



Universidad
Carlos III de Madrid

Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática

PROYECTO FIN DE CARRERA

REVISIÓN, MODIFICACIÓN Y
VALIDACIÓN EXPERIMENTAL
DEL SISTEMA SENSORIAL DEL
ROBOT HOAP3

Autor: Igor De Miguel Andrés

Tutor: Paolo Pierro

Director: Miguel González-Fierro

Leganés, 18 julio de 2011

Título: REVISIÓN, MODIFICACIÓN Y VALIDACIÓN EXPERIMENTAL DEL SISTEMA SENSORIAL DEL ROBOT HOAP3

Autor: Igor De Miguel Andrés

Tutor: Paolo Pierro

Director: Miguel González-Fierro

EL TRIBUNAL

Presidente: Santiago Martínez De La Casa

Vocal: Ricardo Vergaz

Secretario: Juan Carlos González

Realizado el acto de defensa y lectura del Proyecto Fin de Carrera el día **18 de Julio** de **2011** en Leganés, en la Escuela Politécnica Superior de la Universidad Carlos III de Madrid, acuerda otorgarle la CALIFICACIÓN de

VOCAL

SECRETARIO

PRESIDENTE

Agradecimientos

He de expresar mi profundo agradecimiento a todas aquellas personas que me han dado la oportunidad de desarrollarme, tanto intelectual como personalmente. Su influencia ha sido de una importancia vital para poder llegar al punto en el que me encuentro, finalizando una carrera y el proyecto culmen de la misma.

A mi gran familia en primer lugar:

Mis padres Paco y Encarnita por su apoyo y empuje constante e incondicional durante no solo mi carrera, sino además toda mi etapa de estudiante con variopintos pero no excedentes toques de holgazanería que siempre han sabido comprender.

Hermanas Ainhoa e Itziar, que sin sus correcciones mediante las técnicas “Mano látigo” y “tembleque” características seguro que no hubiese llegado a donde estoy ahora.

Cuñados Borja y Manuel que durante estos años me han proporcionado tantos consejos acertados y alegrías de todo tipo; y las que quedarán!!!!

A mis dos sobrinas, a día de hoy, Irene y Natalia, por su cariño y su poder de contestar siempre con una sonrisa de oreja a oreja que anima y alegra la vida en los momentos difíciles.

A mis abuel@s y Ti@s que siempre han estado preocupados por mi futuro.

A Paolo Pierro y Miguel González-Fierro, tutor y director respectivamente de este proyecto, cuya dedicación demostrada y conocimientos así como su sabiduría en los temas a tratar los reconozco de una importancia capital en el desarrollo de este proyecto aportándome además otro punto de vista dentro del mundo ingenieril como es la robótica, materia muy interesante a partir de su experiencia.

A mis compañeros y amigos de clase, que iban aumentando a medida que pasaban los años y con los cuales he compartido momentos agradables y divertidos y que me han servido de motivación por su trabajo bien hecho y su dedicación a la carrera.

A mis amigos ajenos a la universidad y no tan ajenos a ella, ¿verdad Paula?

Y a Teresa y su familia, porque su apoyo, ánimo y consejo durante toda la carrera ha sido muy importante para mí.

Gracias a todos.

Resumen

Los sensores de un robot son necesarios para que este pueda interactuar con su entorno. Es muy importante poder confiar en las medidas proporcionadas por esos componentes así que este proyecto se propone comprobar el estado de los sensores del robot humanoide HOAP3. Partiendo una hipótesis ideal en la que los sensores tendrían que proporcionar correctamente la información, se procede a realizar las primeras pruebas de obtención de datos de cada sensor en las que desafortunadamente se reflejan errores como son por ejemplo el cálculo del peso y el ZMP (Zero Moment Point) del robot tomado con los sensores FSR (Force Sensing Resistor) de los pies, la calibración de los FSR de las manos, la calibración de la distancia que proporciona el sensor infrarrojo, el error de offset en los sensores giróscopo y acelerómetro, además del ruido de este último sensor influenciado por los motores cercanos cuando se encuentran encendidos y demás errores que se detallan en el documento. Esta hipótesis ideal se consideraría nula puesto que las primeras pruebas realizadas mostraban todo lo contrario. Así se plantean varias preguntas: ¿Cómo se va a llevar a cabo este estudio?, ¿De qué manera solventar estos errores?, y la más importante, ¿Aparecerán problemas nuevos mientras se solventan dichos errores? Estas preguntas y algunas otras que no se plantean de momento, se responderán a lo largo de los capítulos de este proyecto.

Entonces, como el título indica, este proyecto se centra principalmente en la revisión, modificación y validación experimental de los sensores del robot HOAP3. Este trabajo lleva consigo la realización de determinados ensayos previos para comprobar el estado inicial de todos los sensores, seguido de una posterior modificación de determinados parámetros y vuelta a hacer nuevos ensayos, esta vez para comprobar la evolución de los sensores y todo ello bajo el objetivo real que se presenta y que consiste en la calibración de todos los sensores. Como no todos son iguales, se implementarán diferentes técnicas de calibración para obtener soluciones acertadas a los errores en función de la evolución de los datos que muestran los ensayos.

Otro aspecto a tener en cuenta es la validación experimental de la nueva calibración, la cual se realizará mediante el uso de determinadas herramientas como por ejemplo la medida de distancias para la calibración del infrarrojo o el cálculo del ZMP para la correcta verificación de los datos proporcionados por los FSR situados en los pies.

Palabras clave: HOAP3, robot, humanoide, sensor, FSR, giróscopo, acelerómetro, infrarrojo, ZMP, pruebas, problemas, soluciones.

Abstract

Sensors in a robot are needed so that it can interact with its environment. It is very important to rely on the measurements provided by such components and so, this project aims at checking the status of the sensors of the humanoid robot HOAP3. From an ideal hypothesis in which the sensors could provide correct information, we proceed to perform the first tests to obtain data from each sensor in which unfortunately errors are encountered such as, for example, by calculating the weight and the ZMP (Zero Moment Point) through FSR sensors placed in the feet, the calibration of the FSR of the hands, the calibration of the distance provided by the infrared sensor, the offset error in the gyroscope and accelerometer sensors, besides the noise of this latter sensor influenced by the motors when they are on and other errors detailed in the document. The ideal hypothesis would be considered invalid because the first tests showed quite the opposite. This raises several questions: How are you going to conduct this study? How to solve these errors? And most importantly, will there be new problems while solving this error? These questions and some that do not arise at the moment will be answered throughout the chapters of this project.

Then, as the title indicates, this project focuses primarily on the review, modification and experimental validation of HOAP3 robot's sensors. This work involves the completion of certain preliminary tests to check the initial state of all sensors, followed by a subsequent change in certain parameters and return to do further testing, this time for monitoring the sensors and all under the real objective presented: the calibration of all sensors. Since not all are equal, different techniques of calibration will be implemented to obtain accurate solutions to errors depending on the evolution of test data.

Another aspect to consider is the experimental validation of the new calibration, which is made by using certain tools such as distance measurement for calibration of infrared or calculation of the ZMP (Zero Moment Point) for the correct verification of data provided by the FSR (Force Sensing Resistor) located on the feet.

Keywords: HOAP3, robot, humanoid, sensor, FSR, gyro, accelerometer, infrared, ZMP, tests, problems, solutions.

Índice general

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	1
1.1. Introducción	1
1.2. Principales Objetivos	2
1.3. Fases del desarrollo	3
1.4. Estructura de la memoria	4
2. ROBOTS HUMANOIDES CARACTERÍSTICOS.....	6
2.1. ASIMO	7
2.2. NAO	13
2.3. HRP-2:.....	18
2.4. RH-2:.....	22
3. ROBOT HUMANOIDE HOAP3.....	28
3.1. Elementos mecánicos:.....	29
3.2. Componentes electrónicos:	31
3.3. Arquitectura de control:	34
3.3.1. <i>Control local</i>	34
3.3.2. <i>Método de control del robot</i>	37
3.4. Funcionamiento básico del robot	42
3.4.1. <i>Encendido y arranque del robot</i>	42
3.4.2. <i>Calibración inicial de los motores. (start.sh)</i>	44
3.4.3. <i>Procedimiento para la lectura de los sensores y servos del robot</i>	45
3.4.4. <i>Envío de secuencias de datos al Robot</i>	46
3.4.5. <i>Instrucciones principales</i>	51
3.4.6. <i>Programas de ejemplo</i>	54
3.4.7. <i>Apagado del Robot</i>	55
4. ANÁLISIS DE LA LOCOMOCIÓN BÍPEDA	56
4.1. Introducción:	56
4.2. Criterio de la estabilidad:	57
4.3.1. <i>ZMP (Zero Moment Point)</i>	58
4.3.2. <i>FRI (Foot Rotation Indicator)</i>	60
4.3.3. <i>CWC (Contact Wrench Cone)</i>	64
4.3.4. <i>Comparación y conclusiones entre los criterios de estabilidad</i>	65
5. PUESTA EN MARCHA DE LOS SENSORES.....	68
5.1. Force Sensing Resistors (FSR).....	69

ÍNDICE general

5.1.1.	<i>Principio de funcionamiento</i>	69
5.1.2.	<i>Clasificaciones</i>	70
5.1.3.	<i>FSRs ubicados en los pies de HOAP3:</i>	72
5.1.4.	<i>FSRs ubicados en las manos de HOAP3:</i>	86
5.2.	Giróscopo	90
5.2.1.	<i>Principio de funcionamiento</i>	90
5.2.2.	<i>Clasificaciones</i>	90
5.2.3.	<i>Giróscopo en HOAP3</i>	96
5.3.	Acelerómetro:	100
5.3.1.	<i>Principio de funcionamiento</i>	100
5.3.2.	<i>Clasificaciones</i>	103
5.3.3.	<i>Acelerómetro en HOAP3</i>	110
5.4.	Sensor infrarrojo:	114
5.4.1.	<i>Principio de funcionamiento</i>	114
5.4.2.	<i>Clasificaciones</i>	116
5.4.3.	<i>Infrarrojo en HOAP3</i>	121
6.	RESULTADOS FINALES	125
6.1.	Trayectoria 1:	126
6.2.	Trayectoria 2:	134
7.	CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS	142
7.1.	Conclusiones:	142
7.2.	Trabajos futuros:	143
8.	ANEXOS	146
8.1.	Localización y acceso a los sensores:	146
8.1.1.	<i>FSR de los pies</i>	146
8.1.2.	<i>FSR de las manos</i>	148
8.1.3.	<i>Giróscopo</i>	149
8.1.4.	<i>Acelerómetro</i>	151
8.1.5.	<i>Infrarrojo</i>	152
8.2.	Construcción plantilla de calibración:	155
8.3.	Construcción plataforma de calibración:	157
8.4.	Especificaciones de los FSR:	159
9.	REFERENCIAS	166

Índice de figuras

Figura 1. ASIMO comparado con elementos cotidianos de casa y oficina.....	7
Figura 2. Radio de alcance visual de las cámaras de visión de ASIMO	10
Figura 3. Zona de acción de sensores de superficie de ASIMO	10
Figura 4. Zona de acción de sensores de ultrasonidos de ASIMO.....	11
Figura 5. Composición de una tarjeta IC	11
Figura 6. Localización del centro de gravedad y del ZMP de ASIMO.....	12
Figura 7. Nao modelos T02 y T14	13
Figura 8. Nao modelos H21 y H25	13
Figura 9. Ubicación de Grados de libertad de NAO	14
Figura 10. Situación de sensores de ultrasonidos en NAO	15
Figura 11. Sensores FSR del NAO	15
Figura 12. Cámaras de visión de NAO	15
Figura 13. Acelerómetros y giróscopos en NAO	16
Figura 14. Sensores de efecto hall en NAO	16
Figura 15. Bumpers de NAO	17
Figura 16. Sensores de tacto en las manos de NAO	17
Figura 17. Vista de robots HRP-2, HRP-3 y HRP-4 respectivamente.....	18
Figura 18. Sensor laser URG-04 LX del robot HRP-2	20
Figura 19. Sensores de fuerza de los pies HRP-2	20
Figura 20. Movimientos de la mano de HRP-2.....	21
Figura 21. Robots Humanoides Rh-0 y Rh-1	22
Figura 22. Medidas del prototipo RH-2	24
Figura 23. Sensor Fuerza-par JR3	25
Figura 24. Distribución de sensores RH-2	25
Figura 25. Placa sistema táctil. Sensor QT110	26
Figura 26. Sensor inercial GAM-3D	26
Figura 27. Grados de libertad del Robot humanoide HOAP3	29
Figura 28. Nombre de articulaciones y número de dispositivo equivalente	30
Figura 29. Cadera y fémur de HOAP3.....	30
Figura 30. Micro-controlador de sensores giróscopo y acelerómetro.....	31
Figura 31. Placa de control sensores FSR pie derecho y nivel de batería.....	32
Figura 32. Placa de control sensores FSR pie izquierdo	32
Figura 33. Placa de control de motores y servos.....	33

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 34. Esquema de control de HOAP3	34
Figura 35. Diagrama de bloques de las placas de control de motores	35
Figura 36. Comandos software de movimiento del PC.....	36
Figura 37. Diagrama de flujo del modo de control directo	40
Figura 38. Diagrama de flujo del modo secuencial.....	40
Figura 39. Diagrama de flujo del modo de control en tiempo real	41
Figura 40. Mezcla de modos de operación.....	42
Figura 41. Interruptores de lógica y motores	43
Figura 42. Estado de HOAP3 inicializado	43
Figura 43. HOAP3 colgado motores apagados (izquierda); Tras ejecutar starts.sh estando colgado (centro) y estando apoyado (derecha).....	44
Figura 44. Fotodiodos para la inicialización de los motores.....	45
Figura 45. Ciclo del movimiento.....	57
Figura 46. Estabilidad de la locomoción bípeda	58
Figura 47. Fuerzas que actúan en el pie de un humanoide.....	58
Figura 48. Compensación del ZMP.....	59
Figura 49. Región de estabilidad a) en soporte simple, b) en doble soporte.....	60
Figura 50. Boceto del cuerpo rígido de un robot bípedo (izquierda), y vista de su pie de apoyo artificial desconectado de la caña para ver las fuerzas que intervienen (derecha). El Cop, GCoM, y el punto FRI son denotados por P, C y F respectivamente	61
Figura 51. Condición de la rotación de los pies cuando $\tau_1 = 0$. La figura representa diferentes líneas de acción de la fuerza R1 aplicada sobre los pies del robot y el resto de articulaciones del tobillo O1 del robot. Si la línea de acción de una fuerza en la intersección con el suelo es más allá de la huella, habrá un momento aplicado sobre el pie y éste girará. De lo contrario, las fuerzas de la articulación del tobillo podrán soportar las fuerzas de interacción pie/tierra, y el pie se mantendrá en equilibrio estático en una configuración vertical estacionaria.....	62
Figura 52. Localización de los puntos clave de la ubicación del tobillo (O_1) y del límite del polígono de apoyo (A y B). Su geometría en general no son relevantes para el comportamiento del pie. Los tres ejemplos del robot se muestran en la figura y tienen un comportamiento idéntico, aunque sus geometrías son muy diferentes.	63
Figura 53. La magnitud del momento vivido por un punto en el límite de apoyo es linealmente proporcional a la distancia de este punto al punto del FRI. Las magnitudes de los momentos en diferentes puntos se muestran por la longitud de las flechas. Tomando momento negativo con el sentido horario la punta de la flecha apunta para arriba, y en sentido contrario, es decir, anti horario, signo positivo, las flechas apuntan hacia abajo. En la imagen de la izquierda los momentos son compensados con precisión, mientras que en la imagen de la derecha no lo son. El subíndice n denota la componente normal de una fuerza.....	64
Figura 54. Soporte poligonal y una intersección del poliedro del cono convexo	65
Figura 55. Relación Resistencia vs. Fuerza en un FSR.....	69
Figura 56. Composición de un sensor FSR.....	70
Figura 57. Fuerza medida en una galga.....	71
Figura 58. Esquema puente Wheastone de galgas extensiométricas	71
Figura 59. Esquema de izq a der. Celda capacitiva y galga extensiométrica.....	71
Figura 60. Valor de los FSR del pie izquierdo y derecho respectivamente en la prueba 1	72
Figura 61. Valor de los FSR del pie izquierdo y derecho respectivamente en la prueba 2	72

Figura 62. Valor de los FSR del pie izquierdo y derecho respectivamente en la prueba 3	73
Figura 63. Valor de los FSR del pie izquierdo y derecho respectivamente en la prueba 4a	73
Figura 64. Valor de los FSR del pie izquierdo y derecho respectivamente en la prueba 4b	74
Figura 65. Fuerza y ZMP del pie izquierdo y derecho respectivamente en la prueba 4b	74
Figura 66. Valor de los FSR del pie izquierdo y derecho respectivamente en la prueba 5a	74
Figura 67. Valor de los FSR del pie izquierdo y derecho respectivamente en la prueba 5b	75
Figura 68. Fuerza y ZMP del pie izquierdo y derecho respectivamente en la prueba 5b	75
Figura 69. Vista de sensores y suplementos para calibración del offset del sensor	76
Figura 70. Valores FSR de pie izquierdo y derecho respectivamente sin suplementos	76
Figura 71. Valores FSR de pie izquierdo y derecho respectivamente con suplementos	77
Figura 72. Modo de bloqueo de las articulaciones del tobillo	78
Figura 73. Colocación de pesos en la planta del pie del robot para calibración_V1	78
Figura 74. Valores FSR en la primera calibración del pie derecho	79
Figura 75. Valores FSR en la segunda calibración del pie derecho	80
Figura 76. Valores FSR en la segunda calibración del pie izquierdo	80
Figura 77. Valor de Fuerza y ZMP colgado con motores apagados	81
Figura 78. Valor de Fuerza y ZMP colgado con motores encendidos	81
Figura 79. Valor de Fuerza y ZMP apoyado sobre el suelo con motores encendidos	82
Figura 80. Valor de Fuerza y ZMP caminando sobre el suelo con motores encendidos	83
Figura 81. Valor de Fuerza y ZMP caminando sobre el suelo con motores encendidos y omitiendo datos de fuerza inferiores a 10N	83
Figura 82. Curvas de resistencia (izquierda) y conductancia (derecha)	84
Figura 83. Bloqueo de tobillo con listón de madera y pieza metálica	85
Figura 84. Bloqueo de tobillo con tornillo mecánico de mesa y ejemplo de sujeción de pesas	85
Figura 85. Bloqueo de tobillo con plataforma y ejemplo de sujeción de pesas	86
Figura 86. Anverso y reverso de la mano. Vista del sensor FSR y los actuadores de dedos	87
Figura 87. Secuencia de movimiento de las tres posiciones de las manos derecha e izquierda	87
Figura 88. Diversos objetos agarrados por la mano derecha para calibración	88
Figura 89. Valores FSR de manos con mosquetón en mano derecha y la mano izquierda abierta	88
Figura 90. Valores FSR de manos con mosquetón en mano izquierda y la mano derecha abierta	89
Figura 91. Giróscopo mecánico con un único grado de libertad	91
Figura 92. (A) Aceleración de Coriolis; (B) Estructura micro-mecanizada del anillo de vibración; (C-F) efectos de la aceleración en los modos de vibración del anillo	92
Figura 93. Concepto de giróscopo vibratorio (Ref [24])	92
Figura 94. Efecto Sagnac	94
Figura 95. (A) anillo resonador de fibra óptica; (B) Giróscopo con bobina analógica de fibra óptica	95
Figura 96. Vista de los giróscopos	96
Figura 97. Valores de ejes X, Y, Z del giróscopo con motores apagados y robot colgado	96

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 98. Valores de ejes X, Y, Z del giróscopo con motores encendidos y robot colgado	97
Figura 99. Valores de ejes X, Y, Z del giróscopo con robot caminando sobre el suelo con motores encendidos	98
Figura 100. Graficado con Matlab de los valores del giróscopo.....	99
Figura 101. Principio de operación del sensor de velocidad electromagnético	101
Figura 102. Respuesta de la frecuencia en un acelerómetro. f_n es la frecuencia natural y f_{ref} es la frecuencia de referencia.	102
Figura 103. Acelerómetro capacitivo con diferente condensador. (A) Sección transversal. (B) Vista superior de una masa sísmica sostenida por cuatro resortes de silicio	103
Figura 104. Esquema de un circuito convertidor de capacidad a tensión adecuado para integrarlo en silicio.....	104
Figura 105. Vista de un acelerómetro piezorresistivo.....	105
Figura 106. Esquema básico de un acelerómetro piezoeléctrico. La aceleración de la caja mueve relativamente la masa, que ejerce una fuerza sobre el cristal. La salida es directamente proporcional a la aceleración o el nivel de vibración.	106
Figura 107. Acelerómetro térmico. (A) sección transversal de la parte calentada; (B) diseño de un acelerómetro (que se muestra sin tapar) (adaptado de [33])	107
Figura 108. (A) Corte transversal a lo largo del eje x del sensor HGA. El gas caliente distribuye simétricamente el calor. (B) Aceleración provoca que el gas caliente se desplace a la derecha, dando lugar a un gradiente de temperatura.	108
Figura 109. Sensibilidad del acelerómetro térmico (HGA) a temperatura ambiente.....	109
Figura 110. Vista del acelerómetro	110
Figura 111. Valores de ejes X, Y, Z del acelerómetro con motores apagados y robot colgado	110
Figura 112. Valores de ejes X, Y, Z del acelerómetro con motores apagados y robot colgado, antes de la calibración.....	112
Figura 113. Graficado I con Matlab de los valores del acelerómetro	112
Figura 114. Graficado II con Matlab de los valores del acelerómetro	113
Figura 115. Detector de movimiento óptico simple para un interruptor de la luz y juguetes: (A) la superficie sensible de una fotorresistencia constituye un elemento complejo de detección; (B) un espejo plano y una lente de ojo de aguja forman una imagen sobre una superficie de la fotorresistencia, (C) una lente de ojo de aguja .	115
Figura 116. Emisividades espaciales para no metales (A) y un metal pulido (B).....	116
Figura 117. Modelo simplificado de un efecto piroeléctrico como un efecto secundario de piezoelectricidad. Inicialmente, el elemento tiene una temperatura uniforme (A), con la exposición a la radiación térmica, su parte delantera se expande, causando una carga inducida por estrés.	116
Figura 118. Sensor piroeléctrico dual. (A) Un elemento de detección con un electrodo delantero (superior) y dos electrodos de fondo depositados sobre un sustrato cristalino común. Una imagen térmica en movimiento se desplaza desde la parte izquierda del sensor hacia la derecha, lo que genera una tensión alterna a través de una resistencia de polarización (B).	117
Figura 119. Infrarrojo de detección de movimiento lejano con una lente Fresnel curvo y película piroeléctrica PVDF. Estructura interna de la sonda.	118
Figura 120. Formación de una imagen térmica en el elemento sensor de detección de movimiento de un PIR.....	119
Figura 121. El elemento AFIR irradia flujo térmico Φ_η hacia su encapsulado y absorbe flujo del objeto (A); Diagramas de tiempo para flujo de irradiación, temperatura de la superficie, y potencia suministrada.	120

Figura 122. Vista de infrarrojo.....	121
Figura 123. Robot frente a pared negra y blanca	122
Figura 124. Curvas de datos de distancia a partir del A/D.....	122
Figura 125. Aproximación de los datos del A/D a una recta	123
Figura 126. Gráfica calibración de infrarrojo del fabricante y propia	124
Figura 127. Aproximación mediante una función matemática a la curva del infrarrojo	124
Figura 128. Trayectoria 1. HOAP3 andando hacia delante hasta encontrar la pared	126
Figura 129. Trayectoria 1. HOAP3 girando 180° en secuencias de 30°.....	127
Figura 130. Trayectoria 1. HOAP3 ejecutando un paso hacia delante	127
Figura 131. Trayectoria 1. Fuerza y ZMP pie derecho	128
Figura 132. Trayectoria 1. Fuerza y ZMP pie izquierdo.....	129
Figura 133. Trayectoria 1. Fuerza y ZMP pie derecho e izquierdo	129
Figura 134. Dedo pulgar apretando sensor FSR	130
Figura 135. Trayectoria 1. Valor de FSR de la mano derecha e izquierda	130
Figura 136. Trayectoria 1. Valores en los ejes X, Y, Z del giróscopo	131
Figura 137. Trayectoria 2. Valores en los ejes Z, Y y X del acelerómetro.....	132
Figura 138. Trayectoria 1. Valores de tensión del convertidor A/D del infrarrojo.....	133
Figura 139. Trayectoria 1. Valores de la distancia en [cm] del infrarrojo	133
Figura 140. Trayectoria 2. HOAP3 andando hacia delante hasta encontrar la pared	135
Figura 141. Trayectoria 2. HOAP3 dando un paso atrás	135
Figura 142. Trayectoria 2. HOAP3 alcanzando la espada de su espalda.....	135
Figura 143. Trayectoria 2. HOAP3 ejecutando movimiento con espada.....	136
Figura 144. Trayectoria 2. HOAP3 retrocede, suelta la espada y retrocede una vez más.	136
Figura 145. Trayectoria 2. Fuerza y ZMP pie derecho	137
Figura 146. Trayectoria 2. Fuerza y ZMP pie izquierdo.....	138
Figura 147. Trayectoria 2. Fuerza y ZMP pie derecho e izquierdo	138
Figura 148. Trayectoria 2. Valor de FSR de la mano derecha e izquierda	139
Figura 149. Trayectoria 2. Valores en los ejes X, Y, Z del giróscopo	140
Figura 150. Trayectoria 2. Valores en los ejes Z, Y y X del acelerómetro.....	140
Figura 151. Trayectoria 2. Valores de tensión del convertidor A/D del infrarrojo.....	141
Figura 152. Trayectoria 2. Valores de la distancia en [cm] del infrarrojo	141
Figura 153. Robot tumbado preparado para desmontar sensores FSR de los pies	146
Figura 154. a) Tornillos suela. b) Tornillos plancha metálica. c) FSR pie derecho. d) FSR pie izquierdo.....	147
Figura 155. Vista del pasador roscado, Tornillo antiguo, Tornillo nuevo y Muelle de ajuste	147
Figura 156. Detalle del sensor FSR para su desmontaje.....	148
Figura 157. Extracción carcasa frontal y acceso a hueco que alberga la batería	149
Figura 158. Placa metálica de acceso a los sensores giróscopo y acelerómetro	149
Figura 159. Disposición de los sensores giróscopos.....	150
Figura 160. Tornillos de acceso al acelerómetro	151
Figura 161. Anverso y reverso de la placa del acelerómetro.	151
Figura 162. Ubicación del sensor infrarrojo	152
Figura 163. Desmontaje de la carcasa trasera que cubre la cabeza del robot.	152
Figura 164. Desmontaje de la carcasa delantera que cubre la cabeza del robot.	153
Figura 165. Vista interior del micrófono y el sensor infrarrojo	153
Figura 166. Desmontaje final del sensor infrarrojo	153
Figura 167. Circuito impreso interior del sensor infrarrojo	154
Figura 168. Plantillas izquierda y derecha para calibración sensores FSR de pies.....	155

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 169. Plataforma de calibración para ambos pies.....	157
Figura 170. Plataforma de calibración instalada en el pie izquierdo y derecho.....	158
Figura 171. Detalle de la sujeción de la plataforma en pie izquierdo y pie derecho.....	158
Figura 172. Circuito electrónico FlexiForce recomendado.....	160
Figura 173. Resistance and conductance curve.....	163

Índice de tablas

Tabla 1. Distribución Grados de Libertad de ASIMO	8
Tabla 2. Distribución Grados de libertad de las cuatro versiones de Nao	14
Tabla 3. Especificaciones del robot HRP-2	19
Tabla 4. Grados de Libertad del robot RH-2.....	24
Tabla 5. Relación de modos de operación y tipos de comandos.....	37
Tabla 6. Explicación de MemMan.h	38
Tabla 7. Lista de comandos.....	39
Tabla 8. Modos de operación	39
Tabla 9. Comandos de control para motor de la cabeza.	47
Tabla 10. Comandos de control para motor de muñecas y dedos.	47
Tabla 11. Comandos de control para la iluminación del ojo derecho	48
Tabla 12. Comandos de control para la iluminación del ojo izquierdo	48
Tabla 13. Rango máximo de movimiento articulaciones parte derecha del robot.....	49
Tabla 14 Rango máximo de movimiento articulaciones parte izquierda y cintura del robot	50
Tabla 15. Rango máximo de movimiento articulaciones cabeza, muñeca y dedos del robot	50
Tabla 16. Explicación de rt_ctlapp.....	51
Tabla 17. Explicación de sendone.....	52
Tabla 18. Explicación de sendseq	52
Tabla 19. Explicación de readone	53
Tabla 20. Explicación de readseq.....	53
Tabla 21. Explicación de rt_sm.....	54
Tabla 22. Explicación de set_pos.....	54
Tabla 23. ZMP/FRI vs. CWC	66
Tabla 24. Variación y error de los valores de FSR con y sin suplemento respectivamente	77
Tabla 25. Variación y error en la primera calibración de pie derecho	79
Tabla 26. Variación y error en la segunda calibración de pie derecho	79

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 27. Variación y error en la segunda calibración de pie izquierdo.....	80
Tabla 28. Valores FSR máximo y mínimo y variación de mano derecha e izquierda.....	89
Tabla 29. Especificaciones típicas de los sensores de velocidad electromagnéticos.....	101
Tabla 30. Propiedades del Sensor FlexiForce estándar (Modelo A201).....	165

Capítulo 1

Introducción y objetivos

1.1. Introducción

Puesto que mis estudios se han centrado sobre todo en el tema electrónico y dado que tanto la automatización de procesos como la captura y tratamiento de señales además de los lenguajes de programación son materias que me gustan, se me brindó la oportunidad de participar en la revisión, modificación y posterior validación experimental del sistema sensorial que posee el Robot Humanoide HOAP3, de 60 cm de altura y 8kg de peso. Este proyecto era la elección perfecta para finalizar mis estudios de Ingeniería puesto que el robot tenía 28 Grados de Libertad (GDL) movidos por 21 servomotores y 2 motores sin encoder, 4 sensores FSR(Force Sensing Resistor) en la suela de cada pie, 1 sensor FSR en cada mano, un sensor giróscopo y un acelerómetro ambos de 3 ejes situados en el pecho además de un sensor infrarrojos situado en la frente del robot.

Este proyecto, como su título indica, pretende revisar, modificar y validar experimentalmente el sistema sensorial del robot HOAP3, esto es, una revisión que permita inspeccionar el estado inicial en el que se encuentra cada sensor; una modificación donde se desarrollan diferentes calibraciones para cada uno de los sensores y una validación experimental en la que se revisará el valor de cada sensor mientras el robot ejecuta dos trayectorias en las que se comprueba que sea capaz de obtener la correcta lectura de los datos que proporcionan todos los sensores. De esta manera el robot podrá interactuar con su entorno. Por este

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

motivo se abordarán los temas de la adquisición, tratamiento y utilización de señales procedentes de diferentes sensores que incorpora el robot HOAP3, explicando cuales han sido los principales problemas encontrados en el comienzo del proyecto y como se han implementado unas soluciones efectivas para la adquisición de los datos correctos.

Para poder conseguirlo necesita la ayuda de varios sensores ya instalados en el robot. Estos sensores se nombran a continuación, aunque se detallarán en capítulos posteriores.

- **Sensores FSR:** Son sensores de fuerza. Cuatro de ellos están situados en la parte inferior de cada pie del robot y hay uno en cada dedo pulgar de la mano. Con los cuatro sensores FSR de cada pie, se podrá certificar la estabilidad del robot mediante el cálculo de la variable Zero Moment Point (ZMP) que se explicará posteriormente. También servirá para calcular el peso que el pie está soportando en cada momento. Los sensores FSR de las manos proporcionarán información del estado del objeto, es decir, si se ha agarrado correctamente, o por el contrario no se ha podido coger. Estos FSR de las manos no podrán aguantar un peso tan elevado como los situados en los pies debido a la frágil estructura plástica que los aloja.
- **Giróscopo:** Este sensor está situado en el pecho del robot. Proporcionará la velocidad angular en unidades $[\text{°/seg}]$ con la que el robot está rotando en cada uno de los tres ejes X,Y,Z.
- **Acelerómetro:** Situado también sobre el pecho del robot. Informará de la aceleración del robot en los tres ejes, X,Y,Z con unidades de $[\text{m/s}^2]$.
- **Sensor infrarrojo:** Situado en la parte delantera de la cabeza a la altura de la frente, será el encargado de calcular la distancia a la que se encuentra una pared u otro obstáculo y poder así responder con determinadas trayectorias o movimientos.

Este proyecto es importante ya que establece un punto de partida para conseguir una autonomía absoluta del robot. Debido a que por sí solo podrá hacer una buena elección del siguiente movimiento que puede o no realizar.

1.2. Principales Objetivos

Como previamente se ha introducido, el objetivo principal consistirá en la puesta en marcha de los sensores del robot mediante pruebas de reconocimiento del estado inicial de cada sensor para a continuación probarlos, calibrarlos y validar experimentalmente los resultados obtenidos mediante la creación y

posterior ejecución de dos trayectorias en las que el robot HOAP3 realizará determinados movimientos influidos por la información que le proporcionen los sensores. Por ejemplo, detectará paredes mediante el sensor infrarrojo y el agarre de objetos mediante el sensor FSR de las manos. También generará internamente un archivo donde guardará la información proporcionada por todos los sensores para su posterior estudio y graficado offline.

1.3. Fases del desarrollo

La primera fase del proyecto fue la más costosa porque se tardó mucho tiempo en su planificación y desarrollo. Además fue la más importante ya que en ella se estableció una programación de objetivos de trabajo, que posteriormente se irían modificando por los inesperados problemas encontrados. En esta fase de comienzo se recopiló, asimiló y leyó la documentación y manuales del robot HOAP3 y se intentó la búsqueda en internet de los manuales de cada uno de los sensores, de los cuales se desconocía su marca, modelo, etc, teniendo que abandonar provisionalmente esta idea para abordarla posteriormente en otra fase en la que se desmontaría el robot para acceder a los sensores y obtener dicha información.

La segunda fase del proyecto consistió en la puesta en funcionamiento del robot HOAP3, tomando como referencia el manual proporcionado por el fabricante, el cual, cabe destacar que tiene muchas erratas que se mencionarán en cada uno de los capítulos de este proyecto.

La tercera fase fue la de realizar diferentes pruebas del estado inicial de los sensores, es decir, de cómo se encontraron los sensores antes de empezar el desmontaje de éstos, comprobando en reiterados ensayos que los datos obtenidos no eran los correctos.

La cuarta fase fue más práctica que las anteriores y se llegó a ella debido a la imposibilidad de conseguir datos correctos de los sensores. En esta fase se desmontó el robot, pudiendo acceder a cada sensor y se verificó el estado y correcto funcionamiento de éstos y ya de paso se recopiló determinada información como el fabricante, modelo, características...

La quinta fase fue la lectura de la documentación de cada sensor encontrada en la cuarta fase y se llegó a la conclusión de que la calibración inicial de los sensores proporcionada por el fabricante de HOAP3 era diferente a la que actualmente poseía el robot.

En la sexta fase se buscaron los métodos necesarios para poder llevar a cabo la calibración de todos los sensores y como el procedimiento era diferente para cada uno de ellos, se tuvieron que realizar diferentes pruebas que se comentarán también a lo largo del proyecto.

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

En la séptima fase se comprobaría y verificaría la calibración de cada uno de los sensores por separado, realizando pruebas de movimiento con el robot.

La octava fase aborda la programación y comprobación de todos los sensores trabajando en conjunto y el posterior desarrollo de la programación del código encargado de la ejecución de las dos trayectorias finales del proyecto en las que se obtienen las señales de los sensores para realizar determinadas acciones.

1.4. Estructura de la memoria

Para facilitar la lectura de la memoria, se incluye a continuación un breve resumen de cada capítulo

En el **capítulo 1** se hace una breve descripción del contenido del proyecto y también se describe cómo se ha llevado a cabo su organización y desarrollo, indicando los problemas más destacados que han sido encontrados.

En el **capítulo 2** se hace referencia a los robots más característicos mediante una breve introducción a cada uno de ellos, haciendo sobretodo hincapié en la tecnología sensorial que implementan para llevar a cabo la realización de diferentes funciones.

En el **capítulo 3** se presenta la plataforma mecánica, electrónica y de software sobre la que se apoya y sustenta el robot para poder realizar diversas tareas. Además se adjunta una pequeña guía orientada a los usuarios sin experiencia con este robot en la que se explica su funcionamiento y modos de operación, incluida la forma de envío de datos a motores y actuadores, la lectura de señales procedentes de los sensores, instrucciones principales utilizadas y programas de ejemplo para interactuar con el robot.

En el **capítulo 4** se explican de forma teórica determinados conceptos que han sido útiles a la hora de comprobar la veracidad de la información que proporcionaban los sensores tras la nueva la calibración y que han resultado útiles durante el desarrollo del proyecto, como son por ejemplo el cálculo del ZMP y del peso para los sensores FSR.

En el **capítulo 5** se realiza una breve descripción de cada sensor y posteriormente se hace una clasificación y explicación de los modelos de sensores actuales. Además, se detalla el estado inicial en el que se encontraban los sensores, tipos de pruebas realizadas, las distintas formas de calibración empleadas para cada uno de los sensores, incluyendo los problemas encontrados en esta operación que impedían la continuidad del proyecto y la explicación de las soluciones que se han desarrollado durante todo este proceso.

En el **capítulo 6** se presentan dos experimentos que consisten en la generación de dos trayectorias distintas en las que se comprueba que los datos proporcionados por todos los sensores tras su calibración son correctos, además se utilizarán algunos de estos datos para decidir qué movimiento será el apropiado para ejecutar a continuación y proseguir su camino.

En el **capítulo 7** se detalla cómo se han alcanzado los objetivos planteados al principio de este proyecto y se presenta una idea sobre futuros proyectos relacionados con los diferentes sensores que posee el robot.

El **capítulo 8** contiene los anexos del proyecto. Entre estos anexos destaca el dedicado a la localización y modo de acceso a los sensores, construcción de la plantilla y plataforma de calibración de los FSR y las especificaciones de estos sensores.

Palabras clave: HOAP3, robot, humanoide, sensor, FSR, giróscopo, acelerómetro, infrarrojo, ZMP, pruebas, problemas, soluciones.

Capítulo 2

Robots humanoides característicos

En este capítulo se hablará de las características más importantes de cuatro robots humanoides y se hará referencia a los sensores que utilizan. Los nombres de estos cuatro robots son: ASIMO, NAO, HRP-2 y RH2. Los tres primeros actualmente están en funcionamiento y el cuarto está aún en proceso de desarrollo y fabricación.

2.1. ASIMO

En primer lugar se presenta el robot humanoide ASIMO cuyo fabricante es *Honda* [1] y del cual existen dos versiones en el mercado. La primera versión se lanzó en el año 2000 y en esta ocasión el robot tenía 26 Grados de libertad, pesaba 43 kg y medía 120 cm de altura. La segunda versión de este robot vio la luz en el año 2005 con 34 Grados de libertad, un peso de 54kg y 130 cm de altura. En 2009 se mejoraron algunas características internas del robot como fue la de aumentar la velocidad al andar, pero el robot seguía manteniendo las mismas medidas físicas que en 2005.

ASIMO supone uno de los robots bípedos más avanzados jamás construidos, habiéndose convertido en uno de los modelos de referencia empleado por muchos de los futuros diseños en desarrollo. Las siglas ASIMO corresponden a **A**dvanced **S**tep in **I**nnovative **M**Obility y fue diseñado para operar en un mundo real donde las personas que lo necesitasen pudiesen alcanzar o recoger objetos, moverse sobre el suelo y a menudo subir aceras y escalones. Sus 130 cm de altura son un tamaño correcto para operar en el mismo hábitat que el ser humano, tanto en un entorno doméstico como en la oficina; esto se puede apreciar en la Figura 1:

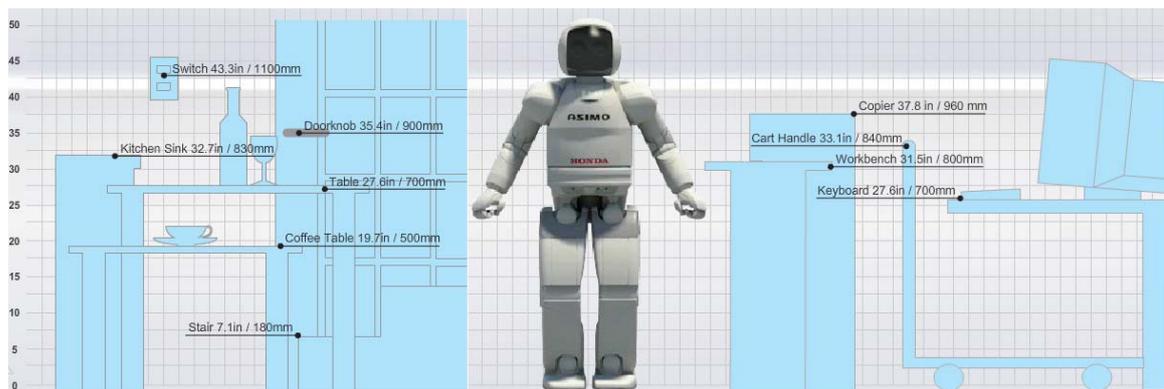


Figura 1. ASIMO comparado con elementos cotidianos de casa y oficina

El cuerpo de ASIMO está fabricado de magnesio y recubierto con una resina plástica que hacen que el robot sea muy duro con un peso ligero. Funciona con batería recargable de LI-ON de 51,8v que se puede cargar en una hora con un método de carga simple. La batería está situada en la mochila trasera y pesa alrededor de 5,9 kg.

ASIMO tiene cadera, rodillas y pies articulados. Los robots tienen articulaciones que los investigadores llaman grados de libertad. Un solo grado de libertad permite el movimiento por la derecha o la izquierda y hacia arriba o hacia abajo. ASIMO tiene 34 Grados de libertad para propagar la libertad en diferentes puntos de su cuerpo con el fin de permitir que se mueva libremente. Hay tres grados de libertad en el cuello de ASIMO, siete en cada brazo y seis en cada pierna. El número de Grados de Libertad necesarios para las piernas de ASIMO se decidió mediante la medición de movimientos de las articulaciones de los humanos al caminar en terreno plano, subir escaleras y correr.

CAPÍTULO 2: Robots humanoides característicos

Presenta un diseño “amigable” para el ser humano y tiene una libertad y flexibilidad de movimientos altísimos dado que los ingenieros de Honda crearon el ASIMO con 34 Grados de Libertad que le permiten hacer cosas como encender el interruptor de la luz, abrir puertas, cargar objetos y empujar carros.

Head	Neck joint (U/D, L/R, RT)	3 DOF
Arm	Shoulder joints (F/B, U/D, RT)	3 DOF
	Elbow joints (F/B)	1 DOF
	Wrist joints (U/D, L/R, RT)	3 DOF
		7 DOF x 2 arms = 14 DOF
Hands	4 fingers (to grasp objects) / Thumb	2 DOF
		2 DOF x 2 hands = 4 DOF
Hip	RT	1 DOF
Legs	Crotch joint (F/B, L/R, RT)	3 DOF
	Knee joints (F/B)	1 DOF
	Ankle joints (F/B, L/R)	2 DOF
		6 DOF x 2 legs = 12 DOF
TOTAL		34 DOF

*1 F/B : Forward/Backward
 U/D : Up/Down
 L/R : Left/Right
 RT : Rotation
 DOF: Degrees of Freedom

Tabla 1. Distribución Grados de Libertad de ASIMO

Las manos del ASIMO tienen pulgares flexibles que permiten coger objetos que tengan una forma extraña. Puede transportar objetos de 300 gr de peso en cada mano o de 1 kg si utiliza ambas manos en conjunto.

Al andar y correr, ASIMO es muy estable gracias a la nueva tecnología i-Walk desarrollada por Honda con la que el robot puede modificar de forma muy suave y continua su forma de caminar, aunque aparezca de repente un movimiento inesperado. Almacena diferentes patrones como son:

- Inicio de caminata o aceleración
- Caminata a velocidad constante de aceleración
- Deceleración o final de caminata
- Paradas y Giros

Todos estos patrones son combinados para lograr una caminata estable y sin problemas. Los patrones de andar son generados independientemente en tiempo real por el mismo ASIMO y la localización de la posición actual del pie y su giro son llevados a cabo también por el robot mientras camina suavemente en cualquier dirección.

Los investigadores de Honda comenzaron a estudiar las patas de los insectos, mamíferos, y el movimiento de un escalador en las montañas con prótesis de las piernas para entender mejor la fisiología y todas las cosas que ocurren cuando se camina, sobre todo en las articulaciones. Por ejemplo, el hecho de que cambie nuestro peso con nuestro cuerpo y se utilicen los brazos para mantener el equilibrio era muy importante para conseguir que ASIMO caminase con un correcto sincronismo. El hecho de tener dedos en los pies ayudan al equilibrio humano y también se tuvo en cuenta. ASIMO actualmente posee un material proyectado en sus pies que desempeña un papel similar al que juegan los dedos de los pies cuando se camina. Este material blando también absorbe el impacto de las articulaciones, al igual que los tejidos blandos hacen cuando se camina.

Este robot posee diversos sensores como son [1][4]:

- Sensores de fuerza kinestéticos en ambas muñecas con los que es capaz de captar la dirección y el valor de la fuerza que está ejerciendo en la mano. Al poder detectar la intensidad y dirección de la fuerza aplicada en la mano, puede por ejemplo ajustar el movimiento para acomodarse a la persona que está atendiendo y al integrar la información recogida por sus cámaras y sensores de fuerza puede incluso agitar la mano en sincronización con el movimiento de una persona y es capaz de dar un paso al frente cuando su mano es apretada y volver a su posición inicial cuando esa mano es soltada.
- Sensores de agarre situados en cada uno de los cinco dedos de la mano y con los que puede agarrar hasta 0,5 kg / mano. Esto le proporciona un sentido del tacto que le permiten juzgar la cantidad de fuerza que ejerce al recoger una bandeja, entregar una carpeta, o agitar la mano. Al empujar un carrito, los sensores de fuerza de ASIMO le ayudan a ajustar la cantidad de fuerza necesaria para empujarlo (Por ejemplo, ASIMO puede empujar un carrito con más fuerza si los sensores detectan una pendiente).
- El sistema de visión de ASIMO consiste básicamente en dos cámaras de video como ojos, localizadas en la cabeza. ASIMO usa visión estereoscópica y un algoritmo propio de visión que le permite ver, reconocer y evitar chocar contra objetos, incluso si su orientación e iluminación no son la misma que las que posee en su base de datos. Estas cámaras pueden detectar múltiples objetos, determinar su distancia, percibir movimientos, reconocer caras programadas e incluso interpretar los movimientos de la mano. Por ejemplo, cuando usted sostiene su mano sobre ASIMO en una posición estática, ASIMO se detiene. La función de reconocimiento facial permite a ASIMO saludar al reconocer a gente familiar. ASIMO puede reconocer objetos en movimiento mediante la interpretación de las imágenes captadas por las cámaras en su cabeza. Se puede evaluar la distancia de un objeto en movimiento y la dirección que permite a ASIMO seguir a una persona, poner fin a su propio progreso para permitir que un objeto en movimiento pueda cruzar por su camino, o saludarlo cuando se aproxima. Las cámaras también transmiten lo que ASIMO está viendo a su controlador. De esta manera, si se está controlando a ASIMO desde otro ordenador, se puede ver lo que las cámaras de ASIMO están captando en ese momento.

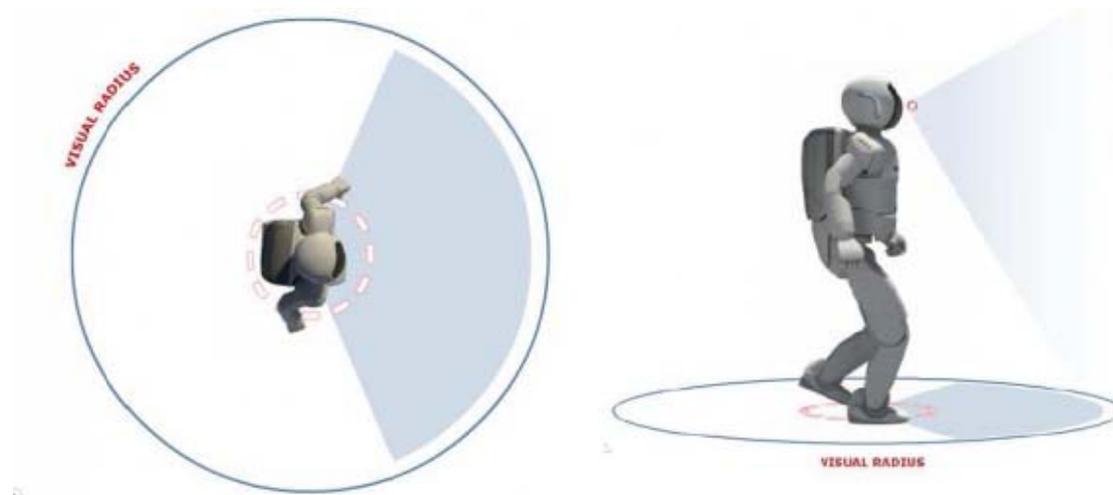


Figura 2. Radio de alcance visual de las cámaras de visión de ASIMO

- Los sensores de superficie del suelo se encuentran a la altura del estómago y son un sistema de detección compuesto por dos sensores. El sensor laser detecta la superficie del suelo, cambios en el suelo y algún obstáculo en dos metros frente a sus pies, y el sensor infrarrojo detecta marcas en el suelo gracias al ajuste de la velocidad de obturación acorde al brillo existente en ese momento. Los sensores terrestres junto con los visuales le sirven para identificar un obstáculo y autónomamente seleccionar una ruta distinta para prevenir la colisión.

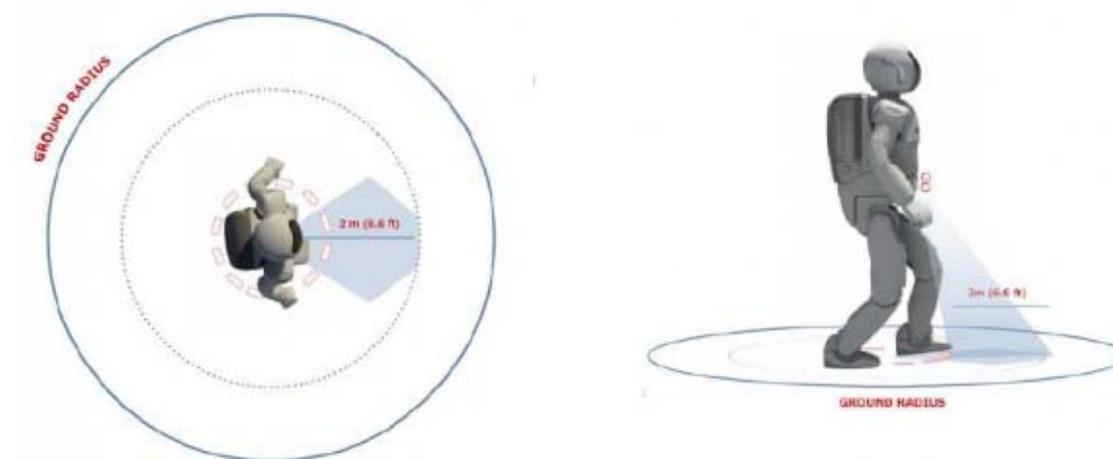


Figura 3. Zona de acción de sensores de superficie de ASIMO

- Los sensores de ultrasonidos están ubicados a media altura y a través de la onda sonora que emite el sensor puede detectar objetos que estén situados hasta a 3 metros de frente, incluidos cristales y otros materiales que el sensor visual no es capaz de detectar. ASIMO corrige automáticamente su posición sin pararse basándose en la información obtenida por los sensores que lleva incorporados.

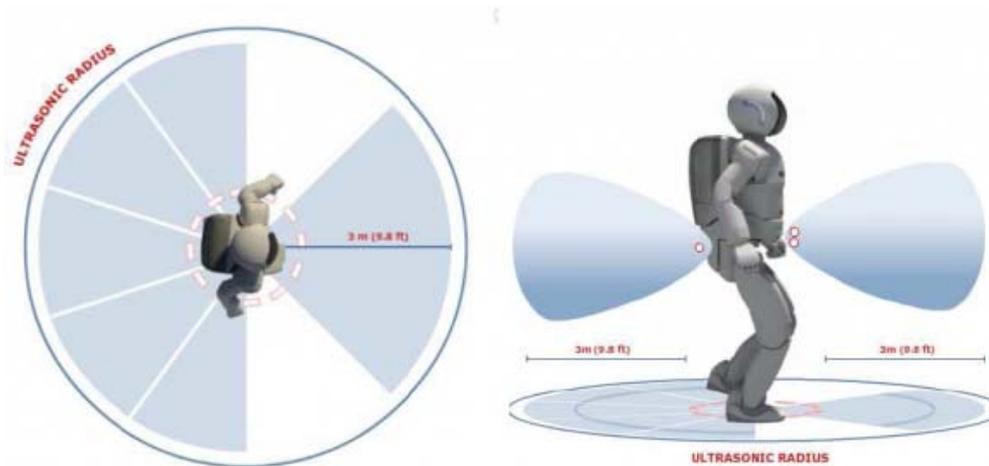


Figura 4. Zona de acción de sensores de ultrasonidos de ASIMO

- Sensor de aceleración y un sensor giróscopo montado en su cuerpo que llevan a cabo las tareas de:
 - o Detección de la posición del cuerpo de ASIMO y la velocidad a la que se está moviendo.
 - o Transmisión de ajustes al ordenador central para mantener el equilibrio.

Estos sensores funcionan de manera similar a nuestro oído interno en la forma de mantener el equilibrio y la orientación.

- Sensores de posición de seis ejes en cada uno de sus pies que le ayudan a posicionar y saber la postura exacta de la planta del pie.
- Otra forma de ASIMO para sentir el ambiente es a través del uso de tarjetas de comunicaciones IC. Las tarjetas IC utilizan señales de infrarrojos para recibir y transmitir información. Si se tiene una tarjeta de IC con la información codificada, ASIMO puede detectar esa presencia, incluso si no está dentro de la línea de visión de sus cámaras. Estas tarjetas permiten mejorar la capacidad de ASIMO para interactuar con los demás. Por ejemplo, si se fuese a visitar la oficina de Honda y recibiese una tarjeta de IC como un pase de visitante, ASIMO puede darle la bienvenida y le dirigirá a la sala inmediatamente después de la lectura electrónica de la información codificada en su tarjeta.

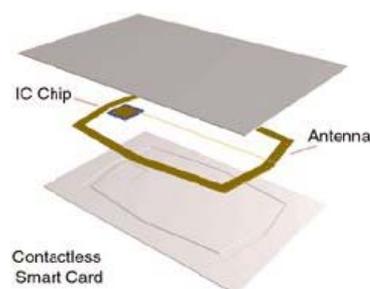


Figura 5. Composición de una tarjeta IC

CAPÍTULO 2: Robots humanoides característicos

Para conseguir el increíble hito de que ASIMO pueda caminar con los seres humanos, la parte más importante del pie de ASIMO es la capacidad de giro mientras camina. En lugar de tener que parar y pensar, parar y corregir, parar y proseguir en su nueva dirección, ASIMO se inclina y gira sin problemas al igual que un ser humano. ASIMO también puede auto-ajustar sus medidas en caso de tropezarse, recibir un empujón, o cualquier otra fuerza que altere la marcha normal. Para lograr esto, los ingenieros de ASIMO tenían que encontrar una manera de trabajar con las fuerzas de inercia creadas al caminar. Por ejemplo, la gravedad de la tierra crea una fuerza, al igual que la velocidad a la que usted camina. Estas dos fuerzas se denominan “fuerzas de inercia total”. También está la fuerza creada cuando el pie toca el suelo, llamada “Fuerza de reacción del suelo”. Estas fuerzas se tienen que compensar, y la postura del robot tiene que trabajar para que esto ocurra. Esto se conoce como “punto de momento cero” (ZMP).

Para el control de la postura de ASIMO, los ingenieros trabajaron en tres áreas de control:

- Control de la reacción del piso significa que las plantas de los pies absorben las irregularidades del piso, manteniendo una posición firme.
- Objetivo de control de ZMP significa que cuando ASIMO no se puede sostener con firmeza y su cuerpo comienza a caer hacia delante, éste mantiene la posición moviendo la parte superior del cuerpo en la dirección opuesta de la caída inminente. Al mismo tiempo, se acelera su andadura de forma rápida para contrarrestar su caída.
- Control de ubicación de la planta del pie que se inicia cuando el control mediante el ZMP ha sido activado. Se ajusta la longitud del paso para recuperar la relación correcta entre la posición y la velocidad del cuerpo y la longitud del paso.



Figura 6. Localización del centro de gravedad y del ZMP de ASIMO

2.2. NAO

El segundo robot que se introduce se llama NAO y es un robot humanoide cuyo fabricante es *Aldebaran robotics* [2] y del cual existen cuatro versiones, una llamada T2 y otra T14 con dos y catorce grados de libertad respectivamente y que como se pueden observar en la Figura 7, no se podrían catalogar de humanoides ya que carecen de piernas.



Figura 7. Nao modelos T02 y T14

Los otros dos modelos son el H21 y H25 con veintiuno y veinticinco grados de libertad respectivamente si son humanoides como se puede observar en la Figura 8.



Figura 8. Nao modelos H21 y H25

La única diferencia entre estos dos modelos es que los cuatro grados de libertad de más se encuentran repartidos dos por cada brazo. Ambos modelos cuentan con una altura

CAPÍTULO 2: Robots humanoides característicos

de 58 cm y un peso de 4,3 kg. El modelo H21 tiene la particularidad de ser el modelo oficial de la liga de fútbol Robocup desde el año 2007 hasta la actualidad.

Los grados de libertad y como están repartidos en el robot, se detallan a continuación en la Tabla 2 para los cuatro modelos vistos de Nao:

DEGREES OF FREEDOM Nao T2		DEGREES OF FREEDOM Nao T14	
HEAD	2 DOF	HEAD	2 DOF
ARM	None	ARM	4 DOF in each arm
PELVIS	None	PELVIS	None
LEG	None	LEG	None
HAND	None	HAND	2 DOF in each hand

DEGREES OF FREEDOM Nao H21		DEGREES OF FREEDOM Nao H25	
HEAD	2 DOF	HEAD	2 DOF
ARM	4 DOF in each arm	ARM	5 DOF in each arm
PELVIS	1 DOF	PELVIS	1 DOF
LEG	5 DOF in each leg	LEG	5 DOF in each leg
HAND	Non prehensile	HAND	1 DOF in each hand

Tabla 2. Distribución Grados de libertad de las cuatro versiones de Nao

La disposición de los Grados de Libertad dentro de NAO y los nombres que recibe cada articulación se muestra a continuación (Figura 9).

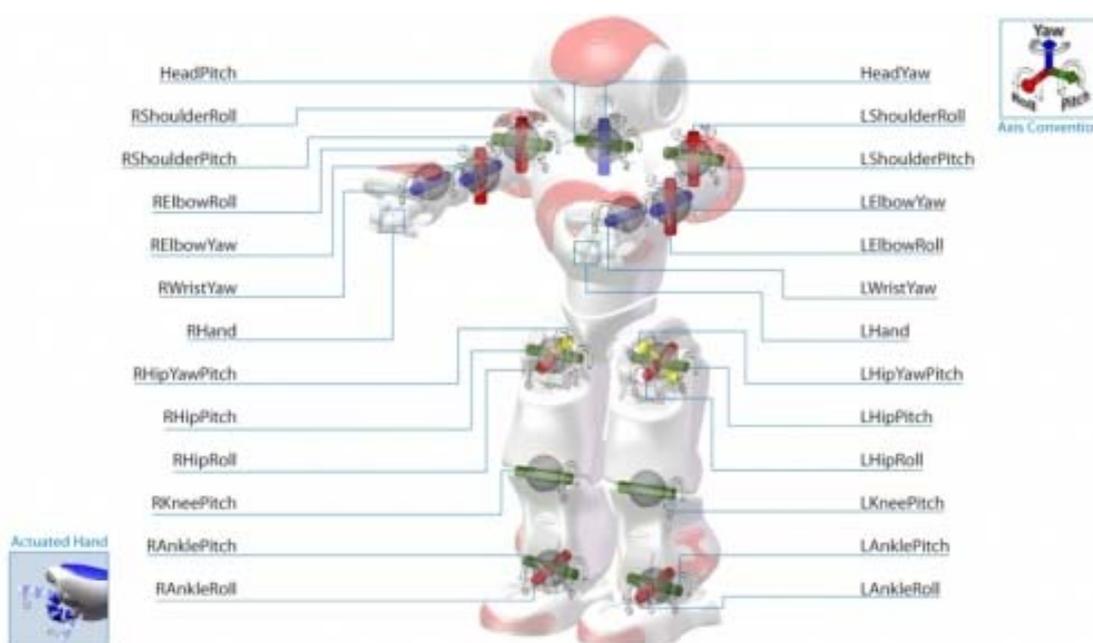


Figura 9. Ubicación de Grados de libertad de NAO

Este robot posee diversos sensores como son [2][5]:

- Dos sensores de ultrasonidos situados sobre en el pecho, repartidos a cada lado y con los que es capaz de detectar colisiones con determinados objetos

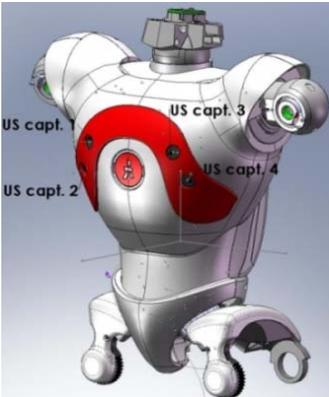


Figura 10. Situación de sensores de ultrasonidos en NAO

- Cuatro sensores de presión en cada pie situados en la parte inferior de la suela.

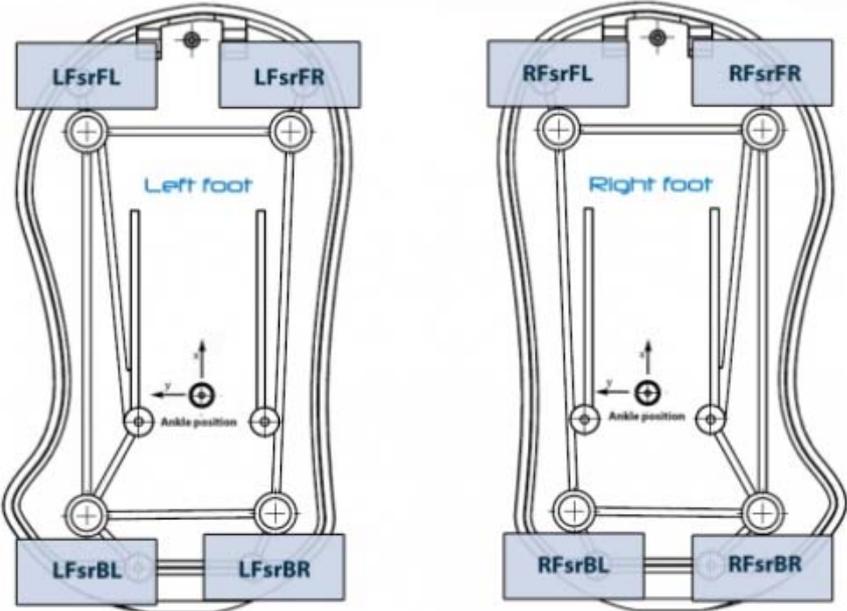


Figura 11. Sensores FSR del NAO

- Dos cámaras de visión en la cabeza situadas en la frente y en la boca que le permiten detectar y reconocer objetos.



Figura 12. Cámaras de visión de NAO

CAPÍTULO 2: Robots humanoides característicos

- Dos giróscopos de un eje situados cada uno en los ejes X e Y, además de un acelerómetro de tres ejes usados ambos para controlar la estabilidad del robot.



Figura 13. Acelerómetros y giróscopos en NAO

- 36 sensores de efecto hall situados en la cabeza con los que una persona puede interactuar con el robot indicándole el movimiento a realizar en función de la forma en que se le acaricia la cabeza.



Figura 14. Sensores de efecto hall en NAO

- Dos bumpers situados cada uno en la puntera del pie. Los bumper son conmutadores mecánicos de dos posiciones con muelle que retorna a la posición de reposo. Se usa para la detección de obstáculos por contacto directo. No son adecuados para robots de alta velocidad, ya que cuando detectan el obstáculo ya están encima y no da tiempo a frenar el robot.

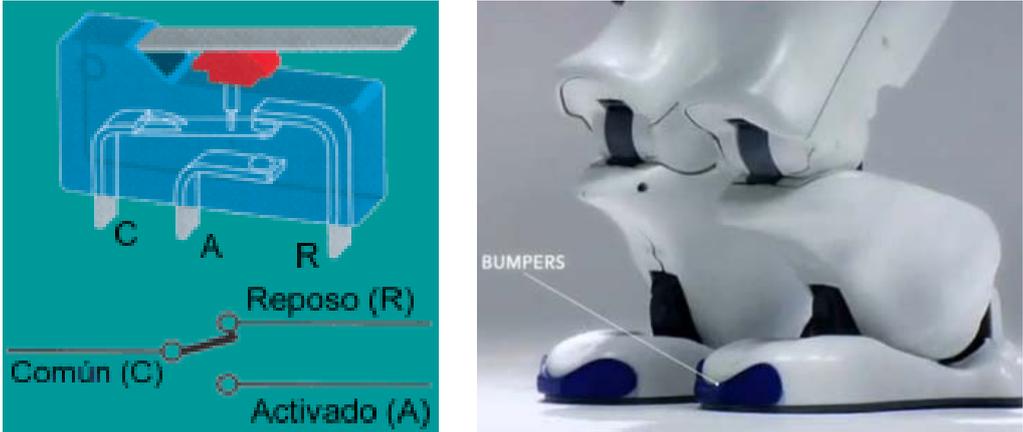


Figura 15. Bumpers de NAO

- Sensores de tacto en cada mano que le permiten agarrar objetos y saber que fuerza aplicar a cada dedo para que el objeto no se caiga.



Figura 16. Sensores de tacto en las manos de NAO

2.3. HRP-2

Este sistema robótico ha sido diseñado e integrado por Industrias Kawada Inc[20], junto con el Grupo de investigación Humanoide del Instituto Nacional de Ciencia Industrial Avanzada y Tecnología (AIST)[21]. La corporación Yaskawa Electric proporcionó el concepto inicial del diseño para los brazos y el grupo de visión de AIST 3D junto con la Corporación Shimizu presentaron el sistema de visión.

HRP-2 tiene una altura de 154 cm y un peso de 58 kg con baterías incluidas. Cuenta con 30 Grados de Libertad (GDL), incluyendo dos en su cadera. La articulación de la entropierna permite caminar en un área limitada. Su sistema eléctrico altamente compacto permite prescindir del uso de la ya común “mochila” que se utiliza en otros robots humanoides.

Actualmente se encuentran ya fabricados dos robots humanoides predecesores al HRP-2 como son el HRP-3 y HRP-4 y en los que se mejora en gran medida la parte de control y buses de comunicaciones con dispositivos electrónicos más compactos además de implementar un bus de datos CAN. Se pone especial interés en el diseño exterior del robot, dotando a estos de un aspecto más humano y atlético como es el caso del HRP-4. (Figura 17). Además existen otros modelos con rostros humanos que poseen estas mismas características.



Figura 17. Vista de robots HRP-2, HRP-3 y HRP-4 respectivamente

La altura, el peso y los GDL de este robot son los mismos que su antecesor el HRP-2P que fue lanzado en marzo de 2002. Las siguientes funciones han sido mejoradas respecto de este modelo.

- Mejora del rendimiento: sistemas de refrigeración incorporados en los actuadores de las piernas permiten una mayor resistencia continua paso a paso. Los pies están diseñados para caminar sobre una superficie irregular. Uniones y rigidez

axial han sido significativamente actualizados para mejorar la movilidad a pie y el rendimiento operacional.

- Mejora de la fiabilidad: el ruido del dispositivo eléctrico se redujo para mejorar la fiabilidad del sistema. Se instalaron en el ordenador y en los sistemas de accionamiento del actuador sistemas de refrigeración para mejorar el control de la temperatura.
- Mejora del tamaño compacto: el cableado eléctrico se convirtió en circuitos integrados y se diseñó específicamente una jaula para la batería para conseguir un torso más compacto.

El aspecto exterior del HRP-2 fue diseñado por el Sr. Yutaka Izubuchi, un diseñador de animación mecánica famoso por sus robots que aparecen en el anime japonés, entre ellos el conocido “PATLABOR”. El Sr. Izubuchi era también llamado HRP-2 “Promet”.

El HRP-2 se utilizaría en experimentos para desarrollar nuevas tecnologías de robótica en las áreas de “caminar sobre superficies irregulares”, “control de inclinación”, operaciones como “levantarse tras caerse al suelo”, y “interacción humana en espacios abiertos”.

Mientras tanto Industrias Kawada comenzará a alquilar el HRP-2, un robot humanoide con plataforma I+D. La Aplicación interna para el HRP-2 se espera que sea abierta al público y así sus usuarios serán capaces de desarrollar su propio software. Se prevé que el HRP-2 mejorará en gran medida la tecnología para que los robots humanoides puedan realizar actividades.

CARACTERÍSTICAS ESPECIALES:

- Sistema con muchos GDL a pesar de su construcción ligera: 154 cm de altura, 58 Kg de peso y 30 GDL.
- La estructura conjunta de la entrepierna permite caminar en un espacio cerrado.
- Un sistema electrónico muy compacto renunciando a la típica “mochila”.
- Experimentos previstos para “caminar sobre superficies irregulares”, “control de inclinación”, levantarse tras caerse al suelo”, y “humano interactivo en espacios abiertos”.
- Los usuarios serán capaces de desarrollar sus propias aplicaciones de software debido a su arquitectura de código abierto.

ESPECIFICACIONES:

Dimensions	Total Height : 1,540mm, Total Width : 620mm	
Mass (including batteries)	58kg	
Degrees of Freedom	30 axes	
Walking Speed	0~2km/h	
Hand Grip	2kgf (per hand)	
Sensors	Torso	3-axes vibration gyro 3-axes velocity sensor
	Arms	6-axes force sensors
	Legs	6-axes force sensors
Motor Drivers	48V 20A (I max) 2 axes / driver x 16	
Power System	NiMH Battery DC 48V 14.8Ah	

Tabla 3. Especificaciones del robot HRP-2

CAPÍTULO 2: Robots humanoides característicos

Este robot posee diversos sensores como son [20][21]:

- Tres cámaras monocromo y sincronizadas situadas en la cabeza.
- Un sensor laser en la cabeza con un ángulo de 240° y que puede detectar objetos situados desde 20 mm a 4 metros.



Figura 18. Sensor laser URG-04 LX del robot HRP-2

- En el torso tiene un giróscopo y un acelerómetro, ambos de tres ejes que son utilizados para estabilizar el movimiento del robot.
- El sensor de fuerza en cada suela del pie es de 6 ejes. Además cuenta con unas arandelas de goma que controlan el cabeceo y balanceo. Se puede apreciar mejor en la Figura 19.



Figura 19. Sensores de fuerza de los pies HRP-2

- Un sensor de fuerza de 6 ejes en cada una de las manos que le facilita la dirección en la que se están agarrando determinados objetos.



Figura 20. Movimientos de la mano de HRP-2

2.4. RH-2

Este robot actualmente es un proyecto que está siendo realizado por el departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática de la Universidad Carlos III de Madrid [3] y es el tercer robot de la serie RH, antecedido por el Rh-0 y Rh-1 que se muestran en la Figura 21.

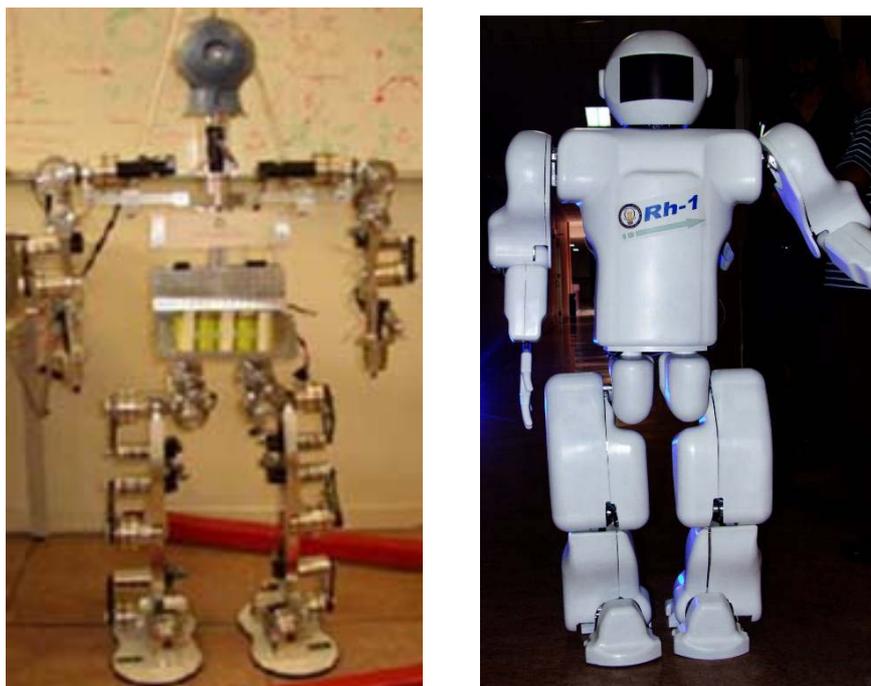


Figura 21. Robots Humanoides Rh-0 y Rh-1

El robot Rh-0 tiene 21 Grados de Libertad y una altura de 130 cm. El Rh-1 posee además una estructura mecánica rediseñada a partir del Rh-0, dispone de nuevos motores para conseguir una reducción de peso del 20% y equipa un potente sistema sensorial.

El Rh-2 ha de ser capaz de realizar diversas tareas tanto en el sector industrial como en el de servicios, así como trabajar por sí solo o interactuar con los seres humanos. El humanoide debe ser lo más parecido al hombre, por ello, sus características fundamentales son:

- Locomoción bípeda
- Posee dos brazos para manipular objetos
- Un cuerpo donde ubicar todos los elementos de control
- Una cabeza provista de sensores de visión y de sonido mediante los cuales el robot pueda orientarse y navegar en su entorno de trabajo, así como recibir comandos por voz.
- Completa autonomía en cuanto a su capacidad energética como a la toma de decisiones.
- Desempeño de sus funciones en entornos estructurados y que abarquen un amplio espectro de posibilidades, desde naves industriales hasta viviendas,

oficinas, locales comerciales, escuelas, hospitales, ambientes exteriores, etc. Por ello el robot deberá ser capaz de andar por distintos tipos de superficies, ya sean planas, inclinadas e incluso deberá poder subir y bajar escaleras.

- Las tareas a realizar por el robot son básicamente de tres tipos:
 - o Manipulación y transporte de objetos, tanto individualmente como en cooperación con otros robots o humanos.
 - o Realización de operaciones de montaje, mecánicas o similares.
 - o Desarrollo de funciones de carácter visual como inspecciones o vigilancia

El Rh-2 cuenta con 24 Grados de libertad (26 si se tienen en cuenta los dos GDL de la cabeza) y se estima un peso de 60 kg. Se calcula que podrá transportar objetos de 2kg de peso e incluso sentarse. Los anteriores modelos disponían de 21 Grados de Libertad y el Rh-2 pretende incluir tres grados más de libertad. Uno en cada codo en el plano transversal, que permite al brazo realizar movimientos más parecidos a los humanos. Otro grado de libertad es necesario en el tronco, en su plano frontal, para poder controlar de manera más rápida el balanceo hacia delante y atrás del cuerpo y lograr mantener su centro de masa centrado. Este nuevo Grado de Libertad dota al robot de la capacidad de plegar más el tronco y poder sentarse. Los Grados de Libertad se distribuyen de la siguiente manera:

- Piernas:

Dispone cada una de 6 GDL distribuidos entre el tobillo, la rodilla y la cadera. La cadera posee 3 GDL, uno en el plano sagital, otro en el frontal y el tercero en el plano transversal, utilizado en el cambio de dirección del movimiento; la rodilla tiene 1 GDL en el plano sagital, pues no es necesario ningún otro; y el tobillo posee 2 DGL en los planos sagital, para adaptar el pie al suelo, y frontal que permite el balanceo junto con el de la cadera para mantener el equilibrio.
- Brazos:

Dispone cada uno de 5 GDL distribuidos entre el hombro, el codo y la muñeca. En el hombro existen 2 GDL en los planos sagital y frontal, en el codo hay 2 GDL en el plano frontal y transversal. En la muñeca existe únicamente 1 GDL en el plano transversal. Esta distribución permite la manipulación de objetos, e intenta que la movilidad sea idéntica a la de un brazo humano.
- Tronco:
 - o Posee 2 GDL en el plano transeversal, que le permite el giro en ese plano sin tener que mover las piernas y otro en el plano frontal, que le permite regular su inclinación.

CAPÍTULO 2: Robots humanoides característicos

GDL	Número	Eje de movimiento
PIERNAS	12 GDL	
Cadera	3 (x2)	Sagital Frontal Transversal
Rodilla	1 (x2)	Sagital
Tobillo	2 (x2)	Sagital Frontal
BRAZOS	10 GDL	
Hombros	2 (x2)	Sagital Frontal
Codo	2 (x2)	Sagital Transversal (nuevos)
Muñeca	1 (x2)	Transversal
TRONCO	2 GDL	
Tronco	2	Transversal Sagital (nuevo)
CABEZA	2 GDL	
Cámara	2	Trasversal (izquierda-derecha) Sagital(arriba-abajo)
TOTAL	26 GDL con cabeza 24 GDL sin cabeza	

Tabla 4. Grados de Libertad del robot RH-2

La altura del Rh-2 es de 165cm, dotando al robot de un tamaño más acorde al de un humano.

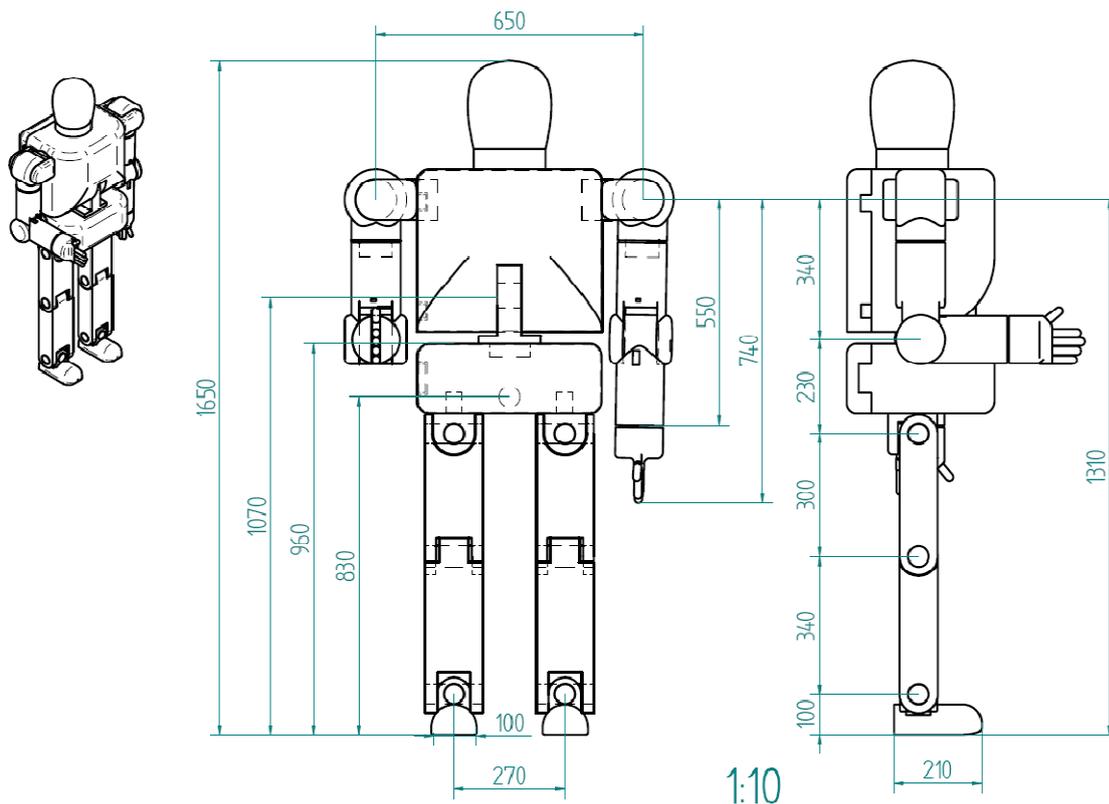


Figura 22. Medidas del prototipo RH-2

En cuanto a los sensores del robot Rh-2 [3][6], se describen los que compondrán principalmente al robot a día de hoy, aunque pueden surgir modificaciones al tratarse de un prototipo.

Para obtener los datos de la fuerza y par que ejercen los puntos de apoyo del robot, manos y en especial pies, se colocaran en tobillos y muñecas sensores JR3 de la marca JR3 Inc. La tecnología que usa son galgas extensiométricas. Este sensor tiene 6 grados de libertad, por lo que mide los pares y las fuerzas en los ejes del espacio cartesiano XYZ. La fuerza máxima que puede medir es de 30 Kgs-fuerza, teniendo una resolución de menos de 10 gramos-fuerza. La salida de los datos es convertido a digital en el mismo circuito interno del sensor. Se usaran dos placas conectadas a las ranuras PCI de cada microprocesador, como interfaz entre los sensores y el microprocesador. Cada placa conectara dos sensores, los cuales reciben la alimentación y los datos por el cable de conexión a la tarjeta PCI. Es un cable de 8 pines de transmisión serie síncrona. Por tanto los datos del sensor de los 6 grados de libertad se envían a una frecuencia de 8KHz por canal.



Figura 23. Sensor Fuerza-par JR3

Estos sensores van situados en ambos tobillos y en ambas muñecas del robot como se muestra en la Figura 24.

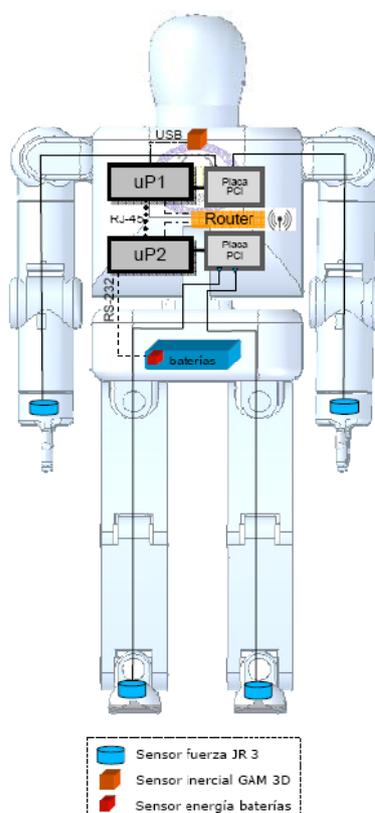


Figura 24. Distribución de sensores RH-2

CAPÍTULO 2: Robots humanoides característicos

Para saber si el robot mantiene contacto con alguna superficie, la mejor opción es ubicar sensores capacitivos en la carcasa externa. Aunque la precisión no es muy buena (2mm distancia para detección), detecta cualquier tipo de material, es estado sólido y líquido.

Otra idea es usar sensores de contacto, ya utilizados en el robot Maggie de la Universidad Carlos II de Madrid. Estos sensores crean un campo magnético al situarlos en contacto con una superficie dieléctrica de plástico o cristal. Cuando un cuerpo se acerca al campo y lo atraviesa, se detecta una caída de tensión en el condensador del circuito. De esta manera pequeñas extremidades como un dedo, pueden ser convertidos en sensores. Los sensores que se pueden usar son los QT110 de la marca Atmel.

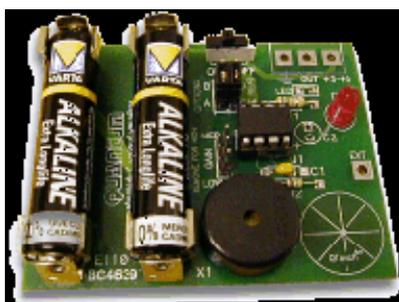


Figura 25. Placa sistema táctil. Sensor QT110

También posee un sensor inercial que lleva integrado un giróscopo y acelerómetro de tres ejes además de un magnetómetro. Es el módulo digital inercial Modelo GAM-3D USB que es capaz de medir la velocidad de giro, aceleración y campo magnético en los tres ejes.



Figura 26. Sensor inercial GAM-3D

Las propiedades del sensor son:

- Giróscopo – velocidad angular: rango de medida $\pm 300^\circ/\text{seg}$, sensibilidad $5\text{mV}/^\circ/\text{seg}$, ancho de banda de 200Hz.
- Acelerómetro – aceleración: rango de medida $\pm 2\text{g}$, sensibilidad $0,66\text{V}/\text{g}$, ancho de banda 200Hz.
- Magnetómetros – campos magnéticos: rango de medida $\pm 6\text{OE}$, sensibilidad: $0,43\text{V}/\text{OE}$, ancho de banda de 200Hz.
- Convertidor A/D: ADC 10 bits, 10 canales

Capítulo 3

Robot Humanoide HOAP3

Este capítulo va destinado principalmente a los usuarios que carecen de un contacto previo con la utilización del robot Humanoide HOAP3. Se quiere con este capítulo transmitir al lector unos conceptos básicos e imprescindibles acerca de la arquitectura hardware y software de éste, para alcanzar una formación básica que permita al lector una interacción con el robot de forma rápida, eficiente y sin riesgos. Este capítulo es importante y de gran interés ya que resuelve todas las confusiones que pueda generar la lectura del manual del HOAP3 debido a su incompleta explicación, erratas y pésima traducción de los textos de idioma japonés al inglés.

El capítulo se distribuye en cuatro apartados en los cuales se explicarán las principales partes que conforman el robot; los elementos mecánicos que abarca el conjunto de motores y actuadores, los componentes electrónicos donde se explican los principales circuitos sobre los que se conectan tanto sensores como actuadores, así como la localización de estos circuitos sobre el esqueleto del robot. El tercer apartado introduce los tres modos de funcionamiento de HOAP3 mediante la explicación de su arquitectura de control. El cuarto apartado tiene por objeto servir de guía explicativa de los pasos a seguir comenzando con el método de encendido para concluir con el apagado, nombrando en este proceso el programa que se ha de ejecutar en cada momento y explicando brevemente este software utilizado.

3.1. Elementos mecánicos:

En este primer apartado se explicará el sistema mecánico que usa el HOAP3, comenzando con una introducción de los grados de libertad para continuar enumerando cada uno de los motores y explicando su situación dentro del robot.

El robot HOAP3 posee 28 grados de libertad distribuidos de la manera que se observaren la Figura 27. Posee 6 grados de libertad en cada pierna, 6 en cada brazo, 3 en la cabeza y 1 en la cadera. Aunque posee 28 grados de libertad, dispone solamente de 23 motores. Los 21 primeros controlan piernas y brazos según se muestra en la Figura 28, de estos motores el fabricante no da las especificaciones técnicas aunque sí proporciona una tabla con los pares nominales y máximos que puede soportar cada motor. Estos motores disponen de encoders relativos y existe la posibilidad de controlarlos en posición y en velocidad.

Los otros dos motores, el 22 y 23, no disponen de encoder como el resto. El motor 22 es el encargado de controlar los 3 grados de libertad de la cabeza (pitch, roll y yaw). El motor 23 controla la rotación de las dos manos y el agarre de las manos.

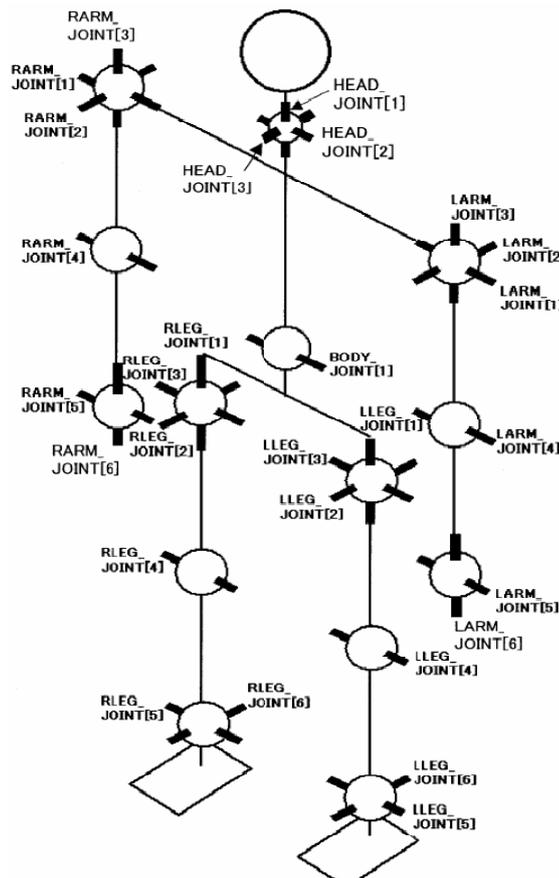


Figura 27. Grados de libertad del Robot humanoide HOAP3

Joint name	Flexibility	Device ID
HEAD_JOINT[1]	Head torsion	22
HEAD_JOINT[2]	Head pitch	22
HEAD_JOINT[3]	Head roll	22
BODY_JOINT[1]	Waist pitch	21
RLEG_JOINT[1]	Right hip joint torsion	1
RLEG_JOINT[2]	Right hip joint roll	2
RLEG_JOINT[3]	Right hip joint pitch	3
RLEG_JOINT[4]	Right knee	4
RLEG_JOINT[5]	Right Ankle pitch	5
RLEG_JOINT[6]	Right Ankle roll	6
RARM_JOINT[1]	Right shoulder Pitch	7
RARM_JOINT[2]	Right shoulder roll	8
RARM_JOINT[3]	Right shoulder torsion	9
RARM_JOINT[4]	Right elbow	10
RARM_JOINT[5]	Right fingers open/close	23
RARM_JOINT[6]	Right hand torsion	23
LLEG_JOINT[1]	Left hip joint torsion	11
LLEG_JOINT[2]	Left hip joint roll	12
LLEG_JOINT[3]	Left hip joint pitch	13
LLEG_JOINT[4]	Left knee	14
LLEG_JOINT[5]	Left Ankle pitch	15
LLEG_JOINT[6]	Left Ankle roll	16
LARM_JOINT[1]	Left shoulder Pitch	17
LARM_JOINT[2]	Left shoulder roll	18
LARM_JOINT[3]	Left shoulder torsion	19
LARM_JOINT[4]	Left elbow	20
LARM_JOINT[5]	Left fingers open/close	23
LARM_JOINT[6]	Left hand torsion	23

Figura 28. Nombre de articulaciones y número de dispositivo equivalente

Como se puede apreciar en la Figura 28, los números de la última columna identifican el número de motor de cada articulación, de tal forma por ejemplo que en el caso de querer mover los motores de la cintura y ambas cabezas de fémur en los tres ejes, se tendrán que enviar órdenes a los motores número: 21(cadera), 1, 2, 3(fémur derecho), 11,12, 13(fémur izquierdo) (Figura 29).



Figura 29. Cadera y fémur de HOAP3

3.2. Componentes electrónicos:

En este subcapítulo se introducirán y explicarán algunas de las partes electrónicas más importantes que se han encontrado en la fase de desmontaje del robot, sin entrar en la forma de acceso a dichas partes ya que éstas se encuentran explicadas en el anexo 8.1.

Para comenzar, todos los sensores, actuadores, motores, servos y demás piezas que se encuentran en el robot y que bien proporcionan valores o bien se puede actuar sobre ellos (mediante el envío de órdenes para por ejemplo mover determinada articulación), van conectados a diversas placas de circuito impreso, las cuales cuentan con un micro-controlador encargado de transformar esa información que les llega a un bus USB (Universal Serial Bus), que en su fase final se conectará a un concentrador situado en la espalda y conectado al ordenador de abordo del robot

La siguiente figura muestra uno de estos micro-controladores, concretamente está situado en la tarjeta de sensores número S03, a la cual van conectados los cables procedentes de los circuitos impresos del sensor giróscopo y acelerómetro. Está situada en la axila derecha del robot bajo una tapa de plástico sujeta por cuatro tornillos.

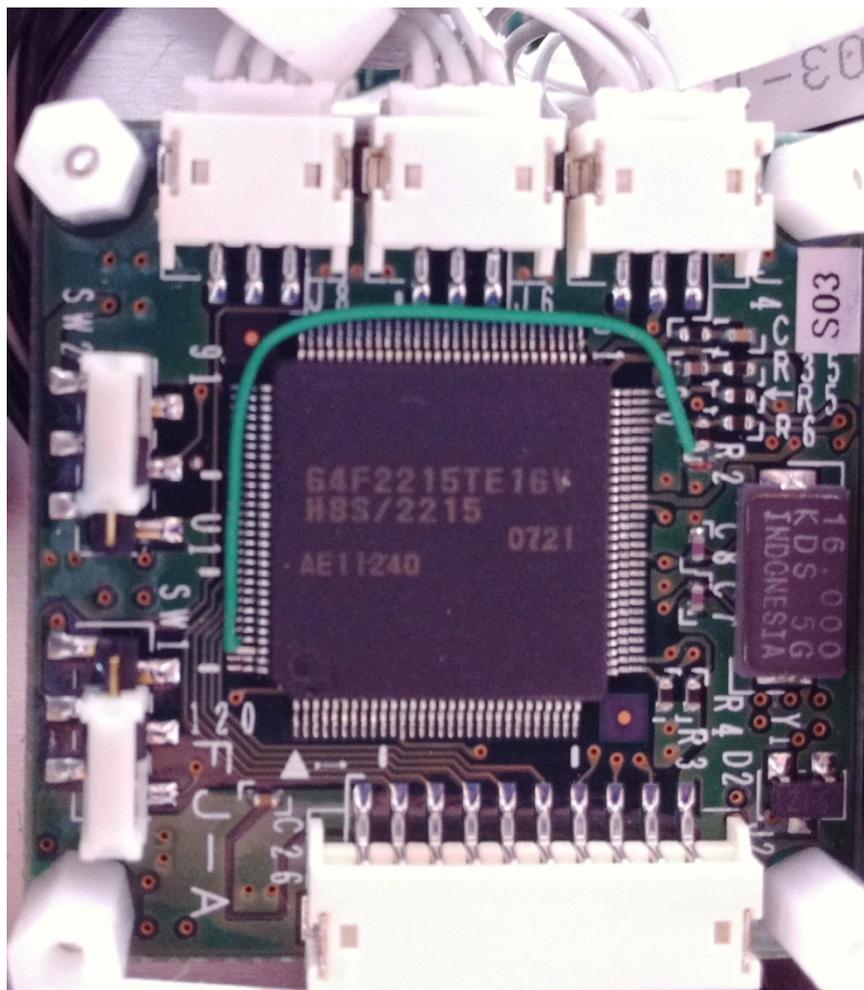


Figura 30. Micro-controlador de sensores giróscopo y acelerómetro

Además, este tipo de placa también se ha encontrado en otro lugar, como son por ejemplo las que controlan la parte de los sensores FSR de los pies, las cuales llevan en la parte delantera de la placa componentes electrónicos como son amplificadores operacionales, reguladores de voltaje o convertidores cc-cc. La parte trasera de la placa es la que contiene el micro-controlador. La placa que se muestra a continuación (Figura 31) tiene conectados los sensores FSR del pie derecho además del control de nivel de batería del robot. De esta forma queda libre un conector al que se le puede conectar cualquier otro tipo de sensor. Esta placa se encuentra situada en el tobillo derecho del robot bajo una cubierta metálica.

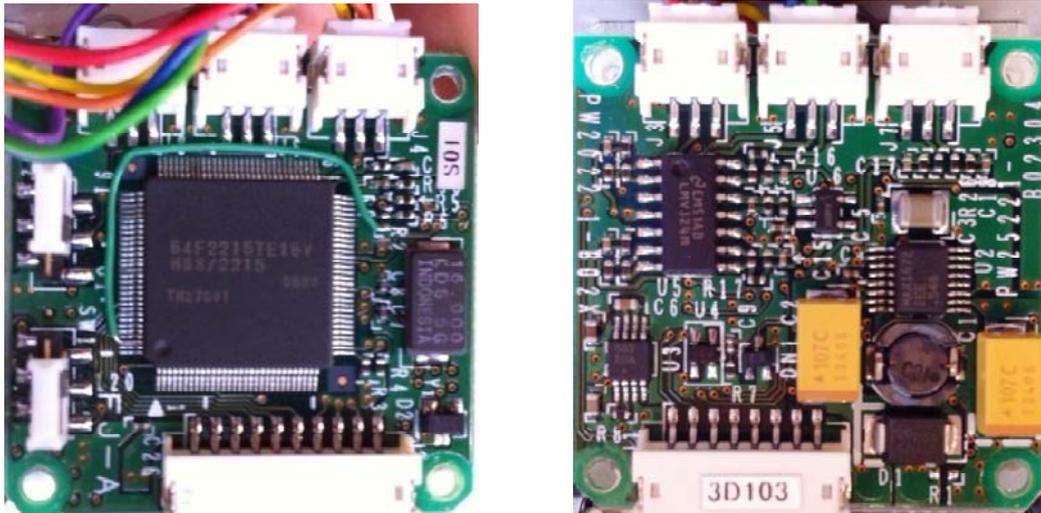


Figura 31. Placa de control sensores FSR pie derecho y nivel de batería

La placa situada en el tobillo izquierdo y que controla los sensores FSR de este pie, es también del mismo modelo que la que controla los sensores FSR del pie derecho, a excepción de que a esta placa no va conectado el nivel de batería, por lo que hay libres dos conectores para poder conectar en un futuro otro tipo de sensores.

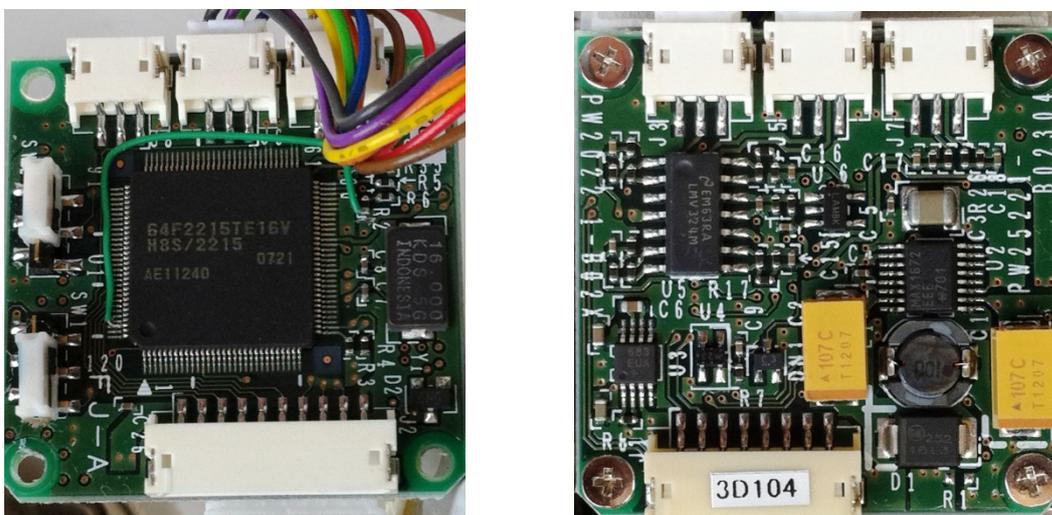


Figura 32. Placa de control sensores FSR pie izquierdo

Como se ha demostrado, todos los sensores del robot van conectados a este modelo de placa que tiene la finalidad de realizar un tratamiento de la señal y transmitirla a través de un bus USB. A continuación esta información proporcionada por los sensores es transmitida a un concentrador situado en la espalda del robot.

Para el control de los motores y servos, el robot utiliza placas de circuito impreso diferentes a las utilizadas por los sensores. Dos de estas placas están situadas en los laterales del robot, a la altura de la cadera y tienen la forma que se muestra a continuación:



Figura 33. Placa de control de motores y servos

En este tipo de placas es donde se redirecciona la información que se envía a cada uno de los motores y también se encargan de enviar la posición de cada uno de los servos.

3.3. Arquitectura de control:

3.3.1. Control local

Para a este robot, se ha dispuesto un controlador para cada articulación. La ganancia local de alimentación está implementada en todas las articulaciones y adopta la forma del valor que tenga el movimiento objetivo que está delicadamente dirigido mediante comandos de movimiento procedentes del ordenador personal. Esto es debido a que cada micro-controlador no realiza un cálculo de la trayectoria como es el caso del método denominado trapezoide. El control está hecho para cumplir rápidamente con el valor del comando que el usuario ha enviado, es decir, el envío de la posición a cada motor se realiza rápidamente a partir de que el ordenador central recibe la orden del usuario. El USB es el interface estándar de propósito general del ordenador personal que se adopta para la comunicación entre el ordenador personal y el micro-controlador. RT-Linux es adoptado como sistema operativo en tiempo real en el ordenador personal para los comandos de movimiento.

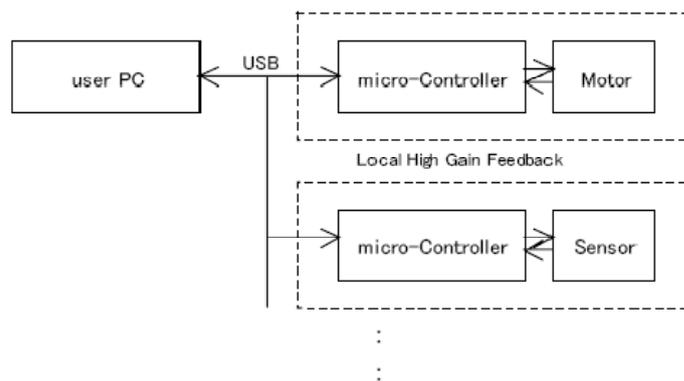


Figura 34. Esquema de control de HOAP3

Existen ventajas y restricciones en el uso de la comunicación mediante el USB. Se entiende como carácter del USB cuando se maneja el sistema del robot.

Ventajas:

- La velocidad de comunicación es relativamente rápida (12 Mbps)
- Pueden conectarse muchos dispositivos (Hasta 127 unidades), el sistema de comunicación es fácilmente ampliable.

Inconvenientes:

- Tiene un host, una idea general de host y función es que fundamentalmente acoge todos los controles de comunicaciones. En otras palabras, no se puede comunicar de forma activa desde el lado de las funciones. En cuanto a este sistema, el PC es equivalente a un host y los micro-controladores son equivalentes a las funciones.

- Es necesario un dispositivo para la división de los aparatos, con un Hub para el incremento de esas funciones.
- El método de comunicación está restringido debido a las franjas de comunicación cada 1 ms, también conocido como SOF.

3.3.1.1 Placa de control de motores y placa de sensores

21 placas de control de motores y 4 placas de procesamiento de sensores son requeridas para el control de cada motor y su posición, además de 2 placas de control de motor RC son las existentes en el robot. Con el envío de diversos comandos se establece una configuración y el estado actual de los datos son transmitidos y recibidos. Con esto, la estructura firmware de la placa de control del motor y la placa de procesamiento de sensores quedan explicadas.

3.3.1.1.a) Placa de control de motores

El diagrama de bloques del firmware que equipa la placa de control del motor está mostrado en la Figura 35. Cuando es elegido el modo de control de velocidad, se supone que se ha decidido a orientarse directamente como se muestra en el siguiente diagrama de bloques. La velocidad se está calculando por el número de cambios en el pulso cada unidad de 1ms a partir de la diferencia en el encoder.

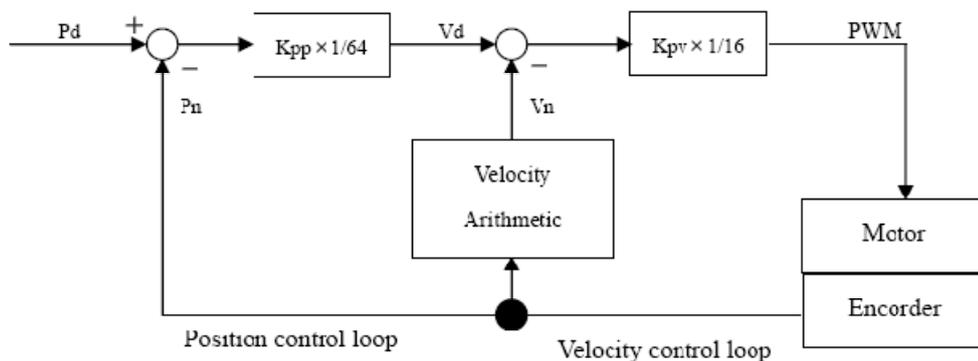


Figura 35. Diagrama de bloques de las placas de control de motores

3.3.1.1.b) Gestión de la placa de sensores

En cuanto a la gestión de la placa de sensores, 6 canales del convertidor AD están apareciendo con un promedio de 8 veces tomados respectivamente cada 1ms. Comienza a leer el estado del puerto Entrada/Salida (E/S) que están preparados para esta opción, y es esta condición justo antes de 1ms cuando se produce la demanda de otros datos.

3.3.1.1.c) Placa de motores RC

La placa de motores RC está conectada a los motores de rotación, giro e inclinación de la cabeza, y a ambas manos. Cuando los motores RC son controlados, éstos dan el código del motor y el ángulo del movimiento.

3.3.1.2 Comandos software de movimiento del PC

Se explicará lo necesario acerca de construcción software de este robot.

3.3.1.2.a) Composición completa

Los comandos software de movimiento del ordenador personal de este robot están en gran medida divididos dentro del módulo de comunicaciones del robot en tiempo real; son llevados fuera del espacio del núcleo en tiempo real y el programa que lo carga. La carga de datos en el robot se realiza en el espacio de usuario. En la carga de datos, el programa se muestra y el módulo de comunicación en tiempo real transmite y recibe comandos mediante el uso de la memoria común. La memoria compartida puede escribirse y leerse desde todos los procesos. El programa de carga de datos escribe datos y comandos en la memoria común para obtenerlos desde el archivo y entradas estándar. El módulo de comunicación de un robot en tiempo real contiene lo escrito en la memoria común. Una pantalla de datos del programa indica el resultado de lo escrito en la memoria común. Es posible que el robot haga esta operación programada por el usuario si el usuario crea un programa que esté leyendo y escribiendo en la memoria común.

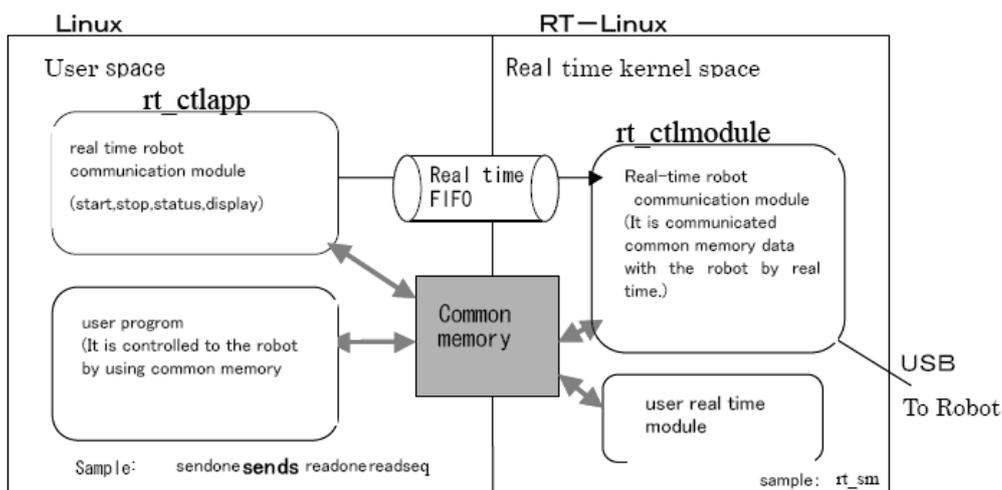


Figura 36. Comandos software de movimiento del PC

3.3.1.2.b) Composición del directorio

El software del robot está instalado en: /usr/local/hoap3

/bin → Archivos ejecutables

/data → Archivos de secuencias de datos del robot

/include → Archivos de cabecera

/modules → Módulo de tiempo real

/src → Archivos de código fuente

/sm_access → Programas de usuario para acceder a memoria común

/examples → Archivos de ejemplo

/rt_sm → Ejemplo de modo de control en tiempo real

3.3.2.Método de control del robot

Para el control del robot son requeridos los comandos dispuestos con el robot, y si se salta esta restricción, se debe hacer que en la comunicación de los datos se disponga para los tres tipos de modos de operación, y si esto es posible, que el comando que se muestra en cada una de las posiciones de la Tabla 5 sea usado para este sistema del robot.

La variable Header es la encargada de controlar el modo de operación del robot. Esto quiere decir que si la variable Header toma el valor de 3, solo se podrá operar el robot mediante el modo de control directo o modo de control secuencial. Por el contrario, si la variable Header toma el valor de 2, el robot opera en modo secuencial o modo en tiempo real. Como se puede apreciar en la Tabla 5, el modo secuencial está activado en todo momento y lo único que variará será la forma de envío de los datos, que será como comando general o comando fijo en función de si la variable Header toma el valor de 3 o 2 respectivamente. Durante este capítulo se hablará con detalle en relación al nombre del modo y el comando de operación.

Direct Control Mode	---	General command(Header = 3)
Sequence mode	}	General command(Header = 3)
		Fixed command(Header = 2)
Real time control mode	---	Fixed command (Header = 2)
※Header =1:Reserved		

Tabla 5. Relación de modos de operación y tipos de comandos

A continuación se explica cómo configurarlo en referencia a la estructura (MemMan.h en la Tabla 6) que muestra y que es necesaria para acceder a la memoria compartida actual.

3.3.2.1 Tipos de comandos

Aquí se explican a que comandos de salida pertenecen los modos de operación que los componen.

3.3.2.1.a) Comandos Generales

Este es el modo que soporta todos los comandos del dispositivo. Cada comando tiene una longitud variable y estos comandos se muestran en la Tabla 7 de acuerdo al dispositivo. Sin embargo, en el caso de que se use este comando, se toma un tiempo de 2ms para una orden, es decir, esto se convierte por lo menos en 54ms usando un comando general para enviar instrucciones a los 27 dispositivos.

```

typedef struct {
    USHORT Step; // Interval until next transmission
    UCHAR Header;
    union {
        struct { // Header = 2 (Fixed command)

            USHORT MtrS[MotorMax]; // ←Motor command value
            UCHAR SnsS[SensorMax]; // ←Sensor command
            USHORT MtrRp[MotorMax]; // ←Position correspondence
            USHORT MtrRv[MotorMax]; // ←Velocity correspondence
            USHORT MtrRi[MotorMax];
            union {
                UCHAR SnsRB[SensorMax][SnsResMax]; // ←Sensor return value
                USHORT SnsRW[SensorMax][SnsResMax/2]; // (read in the size of the return value)
                ULONG SnsRL[SensorMax][SnsResMax/4];
                LONGLONG SnsRLL[SensorMax][SnsResMax/8];
            };
        };
    }Ctl;
    struct { // Header = 3 (General command)
        UCHAR DevID;
        UCHAR CmdAsc;
        union {
            UCHAR ArgB[ArgMax]; // ←The argument of the general command
            USHORT ArgW[ArgMax/2]; // (read in the size of the return value)
            ULONG ArgL[ArgMax/4];
        };
        union {
            UCHAR ResB[SnsResMax]; // ←Correspondence of general command
            USHORT ResW[SnsResMax/2]; // (read in the size of the return value)
            ULONG ResL[SnsResMax/4];
            LONGLONG ResLL[SnsResMax/8];
        };
    }Cmd;
};
USHORT ResTime; // ←Correspondence time
UCHAR MtrMode[MotorMax];
UCHAR StepOver;
}DUNIT;

typedef struct {
    :
    DEVICE DeviceInDevice; // ←The condition of the connection device. It defines separately
    : // in Usbhc.h.
    :
}VARIF;

typedef struct {
    BOOL UsbResetStart; // ←Reset USB(=1)
    :
    BOOL InterruptSend; // ←Start general command(=1)
    :
    BOOL ResRep; // ←Complete real-time control data communication
    BOOL ResInt; // ←Complete general command data communication
    :
    int Mode; // ←Mode settlement(1:real-time control,2:general command,
    : // combine trigger)
    :
    char MtrMode[MotorMax]; // ←Control mode of motor
    :
}VARIF;

```

Tabla 6. Explicación de MemMan.h

La explicación complementaria de “MemMan.h” consiste en que se accede a una memoria con la estructura que se muestra y la transmisión de comandos y la respuesta de datos son adquiridos por el programa de ejemplo.

3.3.2.1.b) Comandos Fijos

Es el modo de comunicación con una longitud fija especificada para su uso. La comunicación de datos se puede hacer para todos los dispositivos (como para este sistema básico, 23 placas de motores y 4 placas de sensores) dentro de 1ms. Esta velocidad está aplicada en términos de comunicación cuando se produce el envío.

	command	parameter	(C)	response		meaning
		byte		byte		
Motor Control board	A	2	K _{pp} (short×1)	0	-	Position proportional gain
	B	2	K _{pv} (short×1)	0	-	Velocity proportional gain
	D	2	K _{pi} (short×1)	0	-	Current proportional gain
	F	2	short×1	0	-	Control mode (0x41:Position, 0x43:Current)
	H	2	short×1	0	-	Velocity limit (0~57)
	I	0	-	0	-	Servo On
	J	0	-	0	-	Servo Off
	L	2	short×1	0	-	Setting the Encoder origin (= 0)
	N	4	short×2	0	-	Encoder Limit (+Limit,-Limit)
	a	0		6	short×3	Response of the present position & the present velocity
	d	0		6	short×3	Received the setup value of the Position proportional gain & Velocity proportional gain & Current proportional gain.
	e	2	short×1	6	short×3	Target Position value , Response of the present Position
	k	2	short×1	6	short×3	Target Velocity value , Response of the present Position & Velocity
	n	0	-	2	ushort×1	Alarm (1: limit over, 2: -limit over)
	o	0	-	0	-	Alarm RESET
	X	0	-	6	ID Version (uchar×6)	Received the Device ID and the firmware version.
Sensor board	R	0	-	13	AD0~AD5 (short×6) +IO(uchar×1)	Received the AD conversion data and the IO port status.
	S	1	IO (uchar×1)	0	-	Set the IO port.
	X	0	-	6	ID Version (uchar×6)	Received the Device ID and the firmware version.

Tabla 7. Lista de comandos

3.3.2.2 Tipos de modo de operación

Se explicará el modo de operación correspondiente a la situación que se le presente al usuario. Cada modo de operación se inicia con un movimiento con el que se establece el valor del modo. La correspondencia del modo de operación y el valor que toman se detalla a continuación:

Operation mode	Mode value	Motion start Trigger
Direct control mode	0(= IDLE)	InterruptSend = 1 set
Sequence mode	1	Mode = 1 set
Real time control mode	2	Mode = 2 set

Tabla 8. Modos de operación

3.3.2.2.a) Modo de control directo

Este es el modo a utilizar cuando una operación general está hecha en la unidad del dispositivo. Un comando especificado es llevado a cabo en este modo para cada línea. Solamente un comando general puede dirigir este comando. Sin duda, los datos siguientes son establecidos después de que se confirme que las comunicaciones de datos del comando general están completas, flag (ResInt). Se deberá poner un flag de interrupción (InterruptSend) más para poder transmitir el mensaje actual. El diagrama de flujo se muestra en la Figura 37.

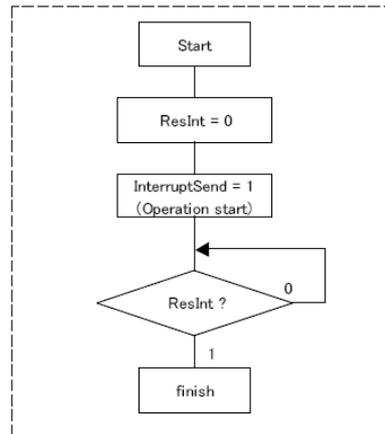


Figura 37. Diagrama de flujo del modo de control directo

3.3.2.2.b) Modo secuencial

Es usado cuando se quiere realizar continuamente una operación sin hacer un proceso manual de comandos como ocurría en el modo de control directo. Un comando es enumerado en el archivo y un comando es llevado a cabo en el intervalo especificado de tiempo, como a la vez es fijado en la memoria. Es posible que un comando de forma fija esté hecho para ser mezclado con un comando general en este modo. Pero el procesado de una línea toma el tiempo de por lo menos 2ms para un comando general y al menos 1ms para un comando fijo. Esto es requerido para entender el comienzo del modo de secuencia con un flag que lleva al modo siguiente.

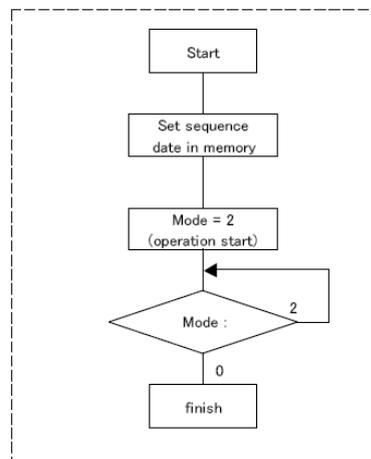


Figura 38. Diagrama de flujo del modo secuencial

3.3.2.2.c) Modo de control en tiempo real

Este es el modo que ha de utilizar el usuario cuando necesita realizar operaciones en tiempo real, como un control en lazo cerrado. El usuario debe controlar con atención que el flag de comunicación de datos completados de un comando con forma fija en efecto si existió y hubo una respuesta efectiva o si el valor de los comandos puede escribirse en él.

Puede ser controlado dentro de 1ms si el valor del siguiente comando es escrito dentro de 100 μ s después de que se escribiera el valor del comando y las comunicaciones de datos de un comando de forma fija coloquen el flag. Y se debe poner el flag al comienzo en el control en tiempo real para hacer este modo efectivo.

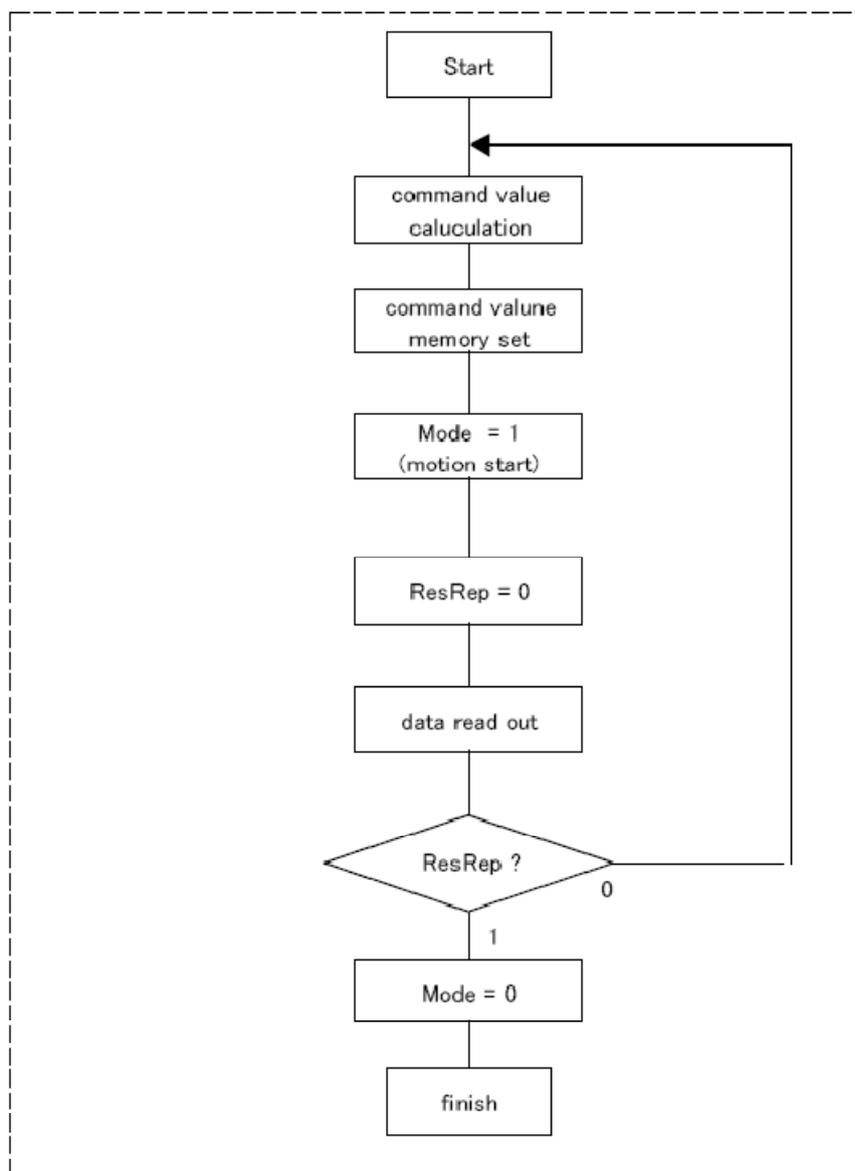


Figura 39. Diagrama de flujo del modo de control en tiempo real

3.3.2.2.d) Mezcla de modos de operación

Mientras se continúa en el modo de control en tiempo real o trabajas en modo secuencial, hay un tiempo en el que se quiere operar para el caso de un dispositivo específico. En este caso las operaciones de interrupción pueden hacerse con el modo de control directo. El modo directo no ha empezado su movimiento actualmente; los datos son transmitidos como se muestra en la siguiente figura que representa al flag InterruptSend, y éste devuelve desde el siguiente marco en adelante el movimiento para el modo de control usual. Se produce asignación de este valor del modo, pero es para iniciar la transmisión por la posición de un flag sobre InterruptSend.

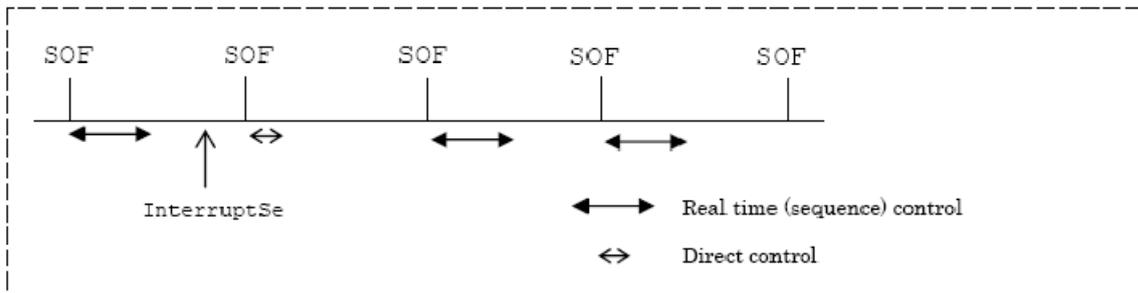


Figura 40. Mezcla de modos de operación

3.4. Funcionamiento básico del robot

3.4.1. Encendido y arranque del robot

Lo primero será insertar el cable de la fuente de alimentación en el conector situado en la mochila del Robot y posteriormente encender la F.A.

Si se quiere hacer un seguimiento gráfico del arranque del Robot, se tendrá además que conectar una pantalla externa al conector VGA del robot y un teclado al conector PS/2.

A continuación, para no dañar el sistema, encender en este orden:

- 1) Interruptor de la placa de control y lógica
- 2) Interruptor de los motores.



Figura 41. Interruptores de lógica y motores

Cuando el sistema se haya terminado de iniciar, el robot tendrá los dos ojos iluminados en blanco como se muestra a continuación (Figura 42).



Figura 42. Estado de HOAP3 inicializado

Si lo que se quiere es interactuar con el robot, se puede hacer también mediante otro medio electrónico que disponga de una tarjeta de comunicación WIFI, y lo único que ha de hacer es crear una conexión *telnet* con el robot mediante una pasarela WIFI llamada actualmente “*Corega*”. La forma de acceder será introduciendo desde la consola del dispositivo la dirección 10.59.145.197 de la siguiente forma:

```
telnet 10.59.145.197
```

Y tanto si se conecta mediante WIFI como con una pantalla externa enchufada al robot, se tendrá que introducir el credencial para acceder al sistema de archivos del robot.

Para acceder se podrá identificar como *guest* (invitado), *root* (raíz) o *su* (Super-Usuario) dependiendo de los privilegios que se quieran obtener.

Los nombres de usuario y contraseñas por defecto son los siguientes:

```
guest → guest  
root → default  
su → default
```

3.4.2. Calibración inicial de los motores. (start.sh)

Es importante saber cómo funciona el programa “start.sh” ya que se nombrará a lo largo de todo el documento y será la primera tarea a realizar cuando se quiera poner el robot a caminar o cuando sea necesario mover algún motor estando el robot colgado, ya que esta posición se tomará como inicial para realizar cualquier trayectoria de movimiento.

Este programa se encuentra en el directorio “/usr/local/hoap3/data” y de forma general realiza una inicialización de los motores, es decir, le manda una orden determinada a cada motor, de tal forma que posiciona el robot en una postura cómoda para realizar cualquier desplazamiento.

De forma mucho más detallada, este programa realiza los siguientes pasos:

- Apaga todos los servomotores
- Aplica unos valores iniciales (incluidos el origen y el límite de los motores temporalmente)
- Enciende todos los servomotores
- Configura el software original
- Lee la corriente del encoder y el valor de los pulsos de distancia
- Genera una interpolación entre los datos la posición actual y posición deseada.
- Envía los datos de la interpolación a los motores
- Configura los límites de los motores.

Estos pasos anteriores son parte del programa que se ejecuta internamente, pero lo que externamente se observa es que el robot ejecuta un movimiento con todas las articulaciones comandadas por servomotores en la que abre las piernas y los brazos para a continuación cerrar los brazos y las piernas y conseguir la posición mostrada en la Figura 43.

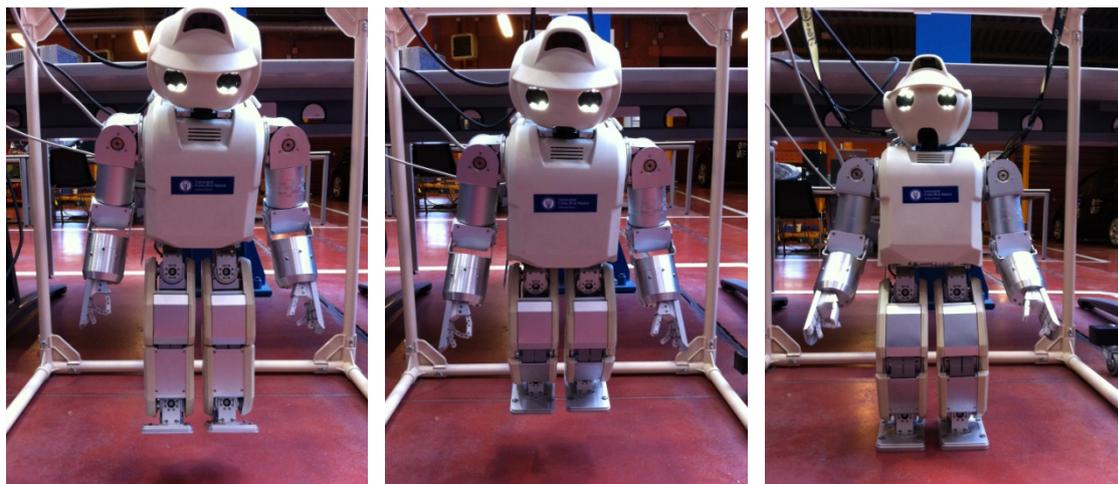


Figura 43. HOAP3 colgado motores apagados (izquierda); Tras ejecutar starts.sh estando colgado (centro) y estando apoyado (derecha)

Para conseguir esa postura inicial, el robot utiliza unos sensores fotoeléctricos que están colocados en cada una de las articulaciones y como se puede ver en la Figura 44 le sirven para regular la posición inicial de cada motor, en este caso para el giro de tobillo.

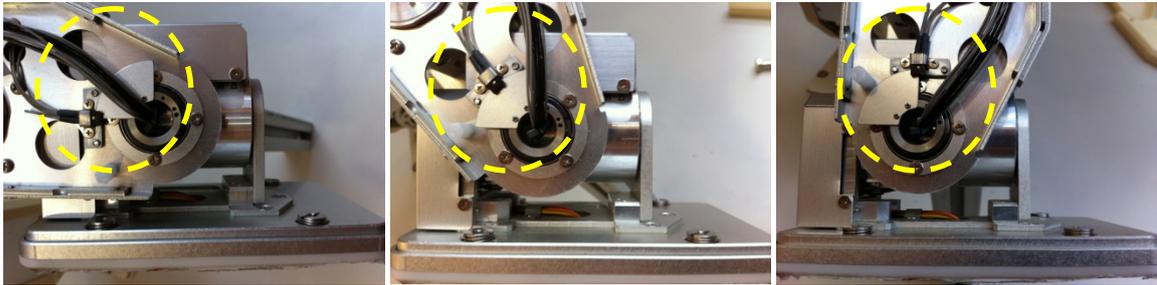


Figura 44. Fotodiodos para la inicialización de los motores

3.4.3. Procedimiento para la lectura de los sensores y servos del robot

Antes de comenzar con este apartado, es importante destacar que para poder leer una secuencia de datos de los sensores y servos, hay previamente que enviar al robot una secuencia de movimiento. El procedimiento será el siguiente:

1. Con el robot encendido e inicializado, colgado en la jaula blanca y con la ventana del terminal situado en el directorio `/usr/local/hoap3/data`, se teclea `“sh start.sh”` para llevar al robot a la posición establecida como inicio.
2. Se envía por ejemplo la secuencia `“same_sequence.csv”` al robot de la siguiente forma:

Desde el directorio `“/usr/local/hoap3/data”` se escribe:

```
../bin/sendseq < same_sequence.csv
```

3. A continuación para leer los datos que proporcionan los sensores y servos, desde el mismo directorio se escribe:

```
../bin/readseq
```

`“readseq”` se encargará de leer de memoria común todos los datos que han escrito previamente los sensores y a continuación los mostrará por pantalla en formato hexadecimal.

Una variante del programa `readseq` es el programa `areadseq` que se explica a continuación:

`“areadseq”` se encargará de leer de memoria común todos los datos que han escrito previamente los sensores y a continuación generará en el directorio `/usr/local/hoap3/data` dos archivos `.csv`:

- `readsensors.csv` → Archivo que contiene información de todos los sensores en formato decimal.
- `readsequence.csv` → Archivo que contiene información de los servomotores, esto es, de la posición de cada uno de los motores del robot.

Notar que si el archivo `areadseq` se ejecuta directamente desde su ubicación, que es: `“/usr/local/hoap3/bin”`, los dos archivos con extensión `“.csv”` que se acaban de

explicar, los generará en la carpeta “/bin” y no en la carpeta “/data” como se ha explicado con anterioridad. En resumen, estos dos archivos “.csv” se generarán en la misma carpeta desde donde se ejecute el programa “areadseq”.

3.4.4. Envío de secuencias de datos al Robot

Antes de comenzar con la explicación del envío de secuencias al robot, debe quedar clara la forma en la que se estructuran las carpetas del robot, es decir, en que directorios se tendrán que copiar determinados programas para que el robot sepa realmente lo que se le está enviando. A continuación se detalla la ruta de los directorios y una breve explicación del contenido de cada uno:

Los ejecutables de los programas que se generan, se guardan en el directorio:
/usr/local/hoap3/bin

Los códigos de programas en “c” o “c++” para acceder a memoria común están en:
/usr/local/hoap3/src/sm_access

Los archivos de cabecera con extensión “.h” se guardan en la dirección:
/usr/local/hoap3/include

Los programas con extensión “.sh” se guardan en:
/usr/local/hoap3/data

Para poder enviar al robot órdenes independientes directamente desde la consola, se tendrá que realizar de la siguiente manera:

1. Con el robot encendido y colgado en la jaula blanca y desde la dirección “/usr/local/hoap3/data”, se tecldea “sh start.sh” para llevar al robot a una posición de inicio. Importante está posición, ya que se tomará como punto de partida de cualquier movimiento que se tenga que programar.
2. Acceder a la carpeta “/usr/local/hoap3/bin” y ejecutar el programa sendone de la siguiente manera: “./sendone”
3. Con ayuda de las tablas que aparecen a continuación (Tabla 9, Tabla 10, Tabla 11, Tabla 12), se podrá mandar órdenes al robot como son por ejemplo mover la cabeza, las manos, los dedos y los ojos del robot. Las tablas indican el rango de valores máximo y mínimo, por lo que cualquier valor intermedio también es válido.

La estructura de los comandos que se deben introducir se explica a continuación. Por ejemplo, para el comando 1,3,22,e,15:

- El “1” corresponde con el intervalo en [mseg] que se desea transmitir.
- El “3” corresponde con el valor que se quiere escribir en la variable “Header”.

- El “22” corresponde al motor que se quiere mover, en este caso será el número 22.
- La letra “e” hace referencia a la lista de comandos de la Tabla 7. Con esta letra se envía la posición objetivo que se quiere alcanzar.
- El “15” es el valor decimal que se corresponde con el movimiento que se quiere realizar.

	Transmitting data (※)													Drive part	Angle								
	Binary											Decimal			angle	direction	note						
M22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	15	(= 0+ 15)	Head tilt	-45°	down	min		
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	60	(= 0+ 60)		0°	front	org		
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	120		(= 0+ 75)	15°	up	max	
	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	256	(= 256+ 0)	Head pan	-60°	right	min	
	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	1	0	0	316	(= 256+ 60)		0°	front	org	
	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	1	1	0	0	0	376		(= 256+ 120)	60°	left	max
	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	1	0	0	1	0	562	(= 512+ 45)	Head roll	-15°	left	min
	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	1	1	1	0	0	572	(= 512+ 60)		0°	center	org
	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1	1	0	582	(= 512+ 75)		15°	right	max

Tabla 9. Comandos de control para motor de la cabeza.

Ejemplos de uso de la Tabla 9:

Cabeza volcada hacia abajo 45°, mirando al suelo: introducir 1,3,22,e,15

Cabeza girada 60° a la derecha: introducir 1,3,22,e,256

Cabeza inclinada hacia la derecha 15°: introducir 1,3,22,e,562

NOTA: Errata en el manual correspondiente a la Tabla 9. El valor decimal de Head tilt max es 75 y no 120 que es lo que pone.

	Transmitting data (※)													Drive part	Angle								
	Binary											Decimal			angle	direction	note						
M23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	(= 0+ 0)	Right hand Rotate (※※)	-60°		min		
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	60	(= 0+ 60)		0°	center	org		
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0		120	(= 0+ 120)	60°		max
	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	256	(= 256+ 0)	Left hand Rotate (※※)	-60°		min
	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	1	1	0	0	316	(= 256+ 60)		0°	center	org
	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	1	1	0	0	0	376	(= 256+ 120)		60°		max
	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	512	(= 512+ 0)	Right hand Open/close	-60°	open	min
	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	1	1	1	0	0	572	(= 512+ 60)		0°	center	org
	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	1	1	0	0	0	632	(= 512+ 120)		60°	close	max
	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	768	(= 768+ 0)	Left hand Open/close	-60°	close	min
	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	1	1	1	0	0	828	(= 768+ 60)		0°	center	org
	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	1	1	1	0	0	0	888	(= 768+ 120)		60°	open	max

Tabla 10. Comandos de control para motor de muñecas y dedos.

CAPÍTULO 3: ROBOT Humanoide HOAP3

Ejemplos de uso de la Tabla 10:

Muñeca derecha rotada 60°: introducir 1,3,23,e,120

Muñeca izquierda rotada 60°: introducir 1,3,23,e,376

Mano derecha cerrada 60°: introducir 1,3,23,e,632

Mano izquierda cerrada 60°: introducir 1,3,23,e,768

NOTA: en el manual hay una errata ya que aparece el número 22 en vez de 23 en el ejemplo 2b de la página S2-2.

	Transfer data															drive part	LED ON/OFF			
	Binary														Decimal					
S22	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4096	Right eye	OFF
	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	4097	upper	ON
	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8192	Right eye	OFF
	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	8193	Low	ON
	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	12288	Right eye	OFF
	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	12289	right	ON
	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	16384	Right eye	OFF
	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	16385	Left	ON
	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	32769	Right eye	OFF
	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	32768	rotate	ON

Tabla 11. Comandos de control para la iluminación del ojo derecho

Ejemplos de uso de la Tabla 11:

Encender parte superior del ojo: introducir 1,3,22,e,4097

Encender parte inferior del ojo: introducir 1,3,22,e,8193

Encender secuencia de rotación del ojo: introducir 1,3,22,e,32769

NOTA: Errata en el manual correspondiente a la Tabla 11. Cambiados valores de ON y OFF en la fila Right eye rotate.

	Transfer data															drive part	LED ON/OFF			
	Binary														Decimal					
S23	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4096	Left eye	OFF
	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	4097	upper	ON
	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8192	Left eye	OFF
	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	8193	Low	ON
	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	12288	Left eye	OFF
	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	12289	Right	ON
	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	16384	Left eye	OFF
	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	16385	Left	ON
	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	32768	Left eye	OFF
	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	32769	Rotate	ON

Tabla 12. Comandos de control para la iluminación del ojo izquierdo

Ejemplos de uso de la Tabla 12:

Encender parte superior del ojo: introducir 1,3,23,e,4097

Encender parte inferior del ojo: introducir 1,3,23,e,8193

Encender secuencia de rotación del ojo: introducir 1,3,23,e,32769

- Para terminar de enviar comandos al robot y salir del programa “sendone”, se pulsan las teclas ctrl+c y se retorna al terminal o bien se pulsa la letra “q” e intro.

También existe otra forma de enviar secuencias de movimiento al robot, y es mediante el envío de las posiciones de destino a los motores. Esta secuencia de movimiento tendrá que haber sido generada previamente con determinados programas informáticos con los que se pueda controlar que la trayectoria que va a seguir el robot será estable en todo momento y cumplir además que carezca de movimientos rápidos y bruscos para evitar que los motores se dañen. Se escribirán las instrucciones en un archivo con extensión “.csv” y se enviará al robot siguiendo los pasos que se han comentado en el punto “Procedimiento para la lectura de los sensores y servos del robot” de la página 45.

A continuación se detalla el formato que debe tener el archivo .csv:

1,2,M1,M2,M3,M4,M5,M6,M7,M8,M9,M10,M11,M12,M13,M14,M15,M16,M17,M18,M19,M20,M21,M22,M23,R,R,R,R

Ejemplo: 1,2,0,40,3695,9537,-5807,-334,18810,-2000,1,8801,0,40,-3730,-9537,5807,425,-18800,2000,0,-8800,418,572,60,R,R,R,R

- La primera columna “1” se completa con el tiempo del intervalo en [mseg]
- La segunda columna “2” es el valor que se le asigna a la variable “Header”
- Las 23 columnas siguientes corresponden al valor decimal que se quiere que tengan cada uno de los 23 motores, teniendo especial cuidado en que sean valores dentro del rango de actuación de cada uno, que aparecen reflejados en la Tabla 13, Tabla 14 y Tabla 15.
- Las cuatro columnas finales son las que se reservan para cuatro comandos de los sensores.

Joint name	Flexibility	DH parameter minimum		DH parameter maximum		Motor type	Device ID
		DH angle	Counter value	DH angle	Counter value		
		(deg)	(Decimal)	(deg)	(Decimal)		
RLEG_JOINT[1]	Right hip torsion	-91	-19019	31	6479	TYPE-2	1
RLEG_JOINT[2]	Right hip roll	-31	-6479	21	4389	TYPE-3	2
RLEG_JOINT[3]	Right hip pitch	-82	17138	71	-14839	TYPE-2	3
RLEG_JOINT[4]	Right knee	-1	-209	130	27170	TYPE-3	4
RLEG_JOINT[5]	Right ankle pitch	-61	-12749	61	12749	TYPE-3	5
RLEG_JOINT[6]	Right ankle roll	-25	5225	25	-5225	TYPE-2	6
RARM_JOINT[1]	Right shoulder pitch	-91	-19019	151	31559	TYPE-2	7
RARM_JOINT[2]	Right shoulder roll	-96	-20064	1	209	TYPE-2	8
RARM_JOINT[3]	Right shoulder	-91	19019	91	-19019	TYPE-2	9
RARM_JOINT[4]	Right elbow	-115	24035	1	-209	TYPE-2	10

Tabla 13. Rango máximo de movimiento articulaciones parte derecha del robot

Joint name	Flexibility	DH parameter minimum		DH parameter maximum		Motor type	Device ID
		DH angle	Counter value	DH angle	Counter value		
		(deg)	(Decimal)	(deg)	(Decimal)		
LLEG_JOINT[1]	Left hip torsion	-31	-6479	91	19019	TYPE-2	11
LLEG_JOINT[2]	Left hip roll	-21	-4389	31	6479	TYPE-3	12
LLEG_JOINT[3]	Left hip pitch	-82	-17138	71	14839	TYPE-2	13
LLEG_JOINT[4]	Left knee	-1	209	130	-27170	TYPE-3	14
LLEG_JOINT[5]	Left ankle pitch	-61	12749	61	-12749	TYPE-3	15
LLEG_JOINT[6]	Left ankle roll	-25	5225	25	-5225	TYPE-2	16
LARM_JOINT[1]	Left shoulder pitch	-91	19019	151	-31559	TYPE-2	17
LARM_JOINT[2]	Left shoulder roll	-1	-209	96	20064	TYPE-2	18
LARM_JOINT[3]	Left shoulder torsion	-91	19019	91	-19019	TYPE-2	19
LARM_JOINT[4]	Left elbow	-115	-24035	1	209	TYPE-2	20
BODY_JOINT[1]	Waist pitch	-1	209	90	-18810	TYPE-3	21

Tabla 14 Rango máximo de movimiento articulaciones parte izquierda y cintura del robot

NOTA: Errata en el manual que corresponde aquí con la Tabla 14 donde BODY_JOINT(1) tiene mal los valores y los correctos serían -209 a 18810.

Joint name	Flexibility	DH parameter minimum		DH parameter maximum		Motor type	Device ID
		DH angle	Counter value	DH angle	Counter value		
		(deg)	(Decimal)	(deg)	(Decimal)		
HEAD_JOINT[1]	Head torsion	-60	-	60	-	RC-サーボ	22
HEAD_JOINT[2]	Head pitch	-45	-	15	-	RC-サーボ	22
HEAD_JOINT[3]	Head roll	-15	-	15	-	RC-サーボ	22
RARM_JOINT[5]	Right fingers	-60	-	60	-	RC-サーボ	23
RARM_JOINT[6]	Right hand torsion	-90	-	90	-	RC-サーボ	23
LARM_JOINT[5]	Left fingers	-60	-	60	-	RC-サーボ	23
LARM_JOINT[6]	Left hand torsion	-90	-	90	-	RC-サーボ	23

Tabla 15. Rango máximo de movimiento articulaciones cabeza, muñeca y dedos del robot

En las tres tablas superiores se detalla el valor mínimo y máximo que puede tomar cada una de las articulaciones del robot, representados por la columna Device ID.

Destacar que se ha presentado esta información en tres tablas separadas debido a que de esta forma queda bien diferenciada la parte derecha e izquierda del robot y se puede dar importancia al hecho de que con solo dos motores, el número 23 y el 24 se pueden hacer tres movimientos sobre la cabeza y cuatro movimientos sobre las extremidades de muñeca y dedos de cada mano respectivamente.

3.4.5. Instrucciones principales

A continuación se detallan las principales instrucciones de interacción y una breve explicación de cada una. Para más información se puede consultar páginas 7-21 a 7-25 del manual de HOAP3.

a. rtctlapp	
Explicación	Se comunica con el módulo de comunicaciones de tiempo real del robot <code>rtctlmodule.o</code> , y este es el programa con el que se coge la práctica de encender / apagar el módulo de las comunicaciones del robot en tiempo real y la información sobre el robot.
Como se usa	El módulo <code>RT_LINUX</code> y el módulo de control en tiempo real <code>rtctlmodule.o</code> , son iniciados mediante la entrada de comandos como <code>rtlinux</code> comienza el <code>rtctlmodule.o</code> y un comando. A continuación, cuando <code>rtctlapp</code> es llevado a cabo, se convierte en un indicador como <code>*.*.*\$</code> (donde <code>*</code> es un número). El primer <code>*</code> es el número de concentrador USB, el segundo <code>*</code> es el número de controlador USB, el tercer <code>*</code> indica el control para el reconocimiento del USB. Los siguientes comandos pueden ser introducidos: <ul style="list-style-type: none"> - r: reseteo del USB - v: indicador del estado de memoria compartida. - h: ayuda - d: i: monitoriza el modo de control directo - d: r: Monitoriza el modo de control en tiempo real - 2: Ajustes para el modo de control de tiempo real - 3: Ajustes para el modo de control direco
Precaución	Esta instrucción no se puede llevar a cabo si el módulo <code>rtlinux</code> no está operativo. El comando <code>r</code> se debe llevar a cabo con permisos de <code>root</code> .
Localización	<code>/usr/local/hoap3/bin/rtctlapp</code>
Archivo	No
Fuente	

Tabla 16. Explicación de `rtctlapp`

b. sendone:	
Explicación	Este es el programa con el que transmite una orden general al robot. La orden es escrita en memoria compartida. Un comando general es llevado a cabo mediante la transmisión de los contenidos que el módulo de comunicaciones del robot escribió en tiempo real en la memoria compartida dentro del mismo robot.
Como se usa	Llevar a cabo desde la línea de comandos Muestra sugerencias como los comandos Un comando general es escrito en memoria compartida cuando una orden ha sido escrita y es devuelta. Cuando la práctica de los comandos es finalizada, el valor devuelto es escrito en la salida estándar. Esto es indicado continuamente como un comando: un comando puede entrar en serie. Si la práctica no se ha completado, así como si el robot no está conectado, devuelve el comando de aviso para pulsar una tecla. Finaliza si introduces <code>quit</code> .

	<p>El comando de entrada es: <sec>,<header>,<devID>,<command>,<param1>. <sec> → Cualquier cosa de entrada, no importa el modo del comando general porque no tiene sentido. <header>→Introducir “3” con la que se muestra el comando general <devID> → Este especifica a que controlador USB va a ser enviado un comando al robot. <command> → entrada que se refiere a la lista de comandos generales <param1> → Este es un parámetro diferente de <command>. La entrada se refiere a la lista de comandos generales. Por ejemplo: comando: 2,3,4,J para enviar el comando general J en el dispositivo 4.</p>
Precaución	<p>Esta instrucción no se puede llevar a cabo si el módulo rtlinux no está operativo. El comando r se debe llevar a cabo con permisos de root.</p>
Localización	/usr/local/hoap3/bin/sendone
Archivo Fuente	/usr/local/hoap3/src/sm_access/sendone.c, sm_access.c

Tabla 17. Explicación de sendone

c. sendseq:	
Explicación	<p>Este es un programa para enviar secuencias de datos al robot. Escribe la secuencia de datos en memoria compartida. Una secuencia de movimientos es llevada a cabo por la transmisión del contenido que el módulo de comunicaciones en tiempo real del robot escribió en memoria compartida para él.</p>
Como se usa	<p>Desde línea de comandos Introducirlo como sendseq < nombre_del_archivo Como, si se introduce archivo con órdenes a todos los motores en cada una de las líneas, el archivo es cargado y escrito como una secuencia de datos y además la ejecución de la secuencia de movimiento es mostrada por pantalla.</p>
Precaución	<p>Esta instrucción no se puede llevar a cabo si el módulo rtlinux no está operativo. El comando r se debe llevar a cabo con permisos de root.</p>
Localización	/usr/local/hoap3/bin/sendseq
Archivo Fuente	/usr/local/hoap3/src/sm_access/sendseq.c, sm_access.c

Tabla 18. Explicación de sendseq

d. readone:	
Explicación	<p>Este es el programa con el que se indican todas las cosas del menú de comienzo de escritura de los contenidos actuales de memoria compartida. Contiene los comandos transmitidos y el resultado puede ser confirmado.</p>
Como se usa	<p>Desde la línea de comandos Introducirlo como readone Indica actualmente el contenido de los datos de memoria compartida</p>
Precaución	<p>Esta instrucción no se puede llevar a cabo si el módulo rtlinux no está</p>

	operativo. El comando r se debe llevar a cabo con permisos de root.
Localización	/usr/local/hoap3/bin/readone
Archivo Fuente	/usr/local/hoap3/src/sm_access/readone.c, sm_access.c

Tabla 19. Explicación de readone

e. readseq	
Explicación	Mientras una secuencia de movimiento es llevada a cabo, este es el programa que muestra los resultados del lugar donde ha terminado un movimiento después de otro en memoria compartida y lo indica. Presenta los contenidos de transmisión de comandos y que resultados pueden ser confirmados. Este es el programa que indica los contenidos de comienzo de escritura en la memoria común
Como se usa	Desde la línea de comandos Introducirlo como readseq Los contenidos de la transmisión para la secuencia de movimiento actualmente es llevada a cabo y el resultado es indicado. Actualmente y después, esto indica todo el tiempo el siguiente movimiento hasta la finalización de la secuencia de movimiento. Finaliza si se introduce cualquier cosa por teclado.
Precaución	Esta instrucción no se puede llevar a cabo si el módulo rtlinux no está operativo. El comando r se debe llevar a cabo con permisos de root.
Localización	/usr/local/hoap3/bin/readseq
Archivo Fuente	/usr/local/hoap3/src/sm_access/readseq.c, sm_access.c

Tabla 20. Explicación de readseq

f. rt_sm	
Explicación	Este es el programa de muestra con el que se escriben los datos de movimiento en memoria común, el cual usa un módulo de comunicación en tiempo real del robot desde el módulo de tiempo real.
Como se usa	Desde la línea de comandos Introducir como rtlinux start rt_ctlmodule.o rt_sm_module.o Inicio del módulo de muestra de tiempo real junto con el módulo de comunicaciones de tiempo real del robot. El arranque de rt_sm_app muestra el comienzo del módulo de tiempo real y finaliza cuando el valor del encoder del motor es recibido desde la muestra de 100 veces del módulo de tiempo real. Los contenidos que empiezan a escribirse en memoria compartida pueden ser confirmados por el programa readone.
Precaución	Esta instrucción no se puede llevar a cabo si el módulo rtlinux no está operativo. El comando r se debe llevar a cabo con permisos de root. El robot no puede trabajar con este código debido a que es un ejemplo de escritura en memoria compartida desde el módulo de tiempo real
Localización	/usr/local/hoap3/examples/rt_sm/rt_sm_app, rt_sm_module.o

Archivo Fuente	/usr/local/hoap3/examples/rt_sm/st_sm_app.c
----------------	---

Tabla 21. Explicación de rt_sm

g. setpos	
Explicación	El valor de corriente se hace corresponder con el valor del comando objetivo del robot
Como se usa	Introducir como "setpos" desde la línea de comandos
Precaución	Esta instrucción no se puede llevar a cabo si el módulo rlinux no está operativo. El comando r se debe llevar a cabo con permisos de root.
Localización	/usr/local/hoap3/bin/setpos
Archivo Fuente	/usr/local/hoap3/src/sm_access/setpos.c

Tabla 22. Explicación de set_pos

h. interpol	
Explicación	Este es el programa con el que se genera un archivo de secuencia de datos que se consigue interpolando el espacio entre una posición que será la actual con una secuencia de datos introducida.
Como se usa	El nombre de la secuencia de datos interpolada es "outputfile.csv", el nombre del archivo de secuencia que se llevará a cabo es "nextfile.csv", entonces introducir "interpol outputfile < nextfile" desde la línea de comandos. Genera un archivo de secuencia de datos el cual interpola con dos segundos de la posición de corriente especificada con cabeza del siguiente archivo desde la posición corriente del motor del robot. Outputfile cambia el nombre del archivo de interpol.csv cuando este es omitido.
Precaución	Esta instrucción no se puede llevar a cabo si el módulo rlinux no está operativo. El comando r se debe llevar a cabo con permisos de root.
Localización	/usr/local/hoap3/bin/interpol
Archivo Fuente	/usr/local/hoap3/src/sm_access/interpol.c, sm_access.c

3.4.6. Programas de ejemplo

Se citará la ubicación de los directorios de una serie de programas ejemplo que venían acompañados con el robot, además de los programas que se han implementado con posterioridad. En cada uno se incluirá una breve descripción del movimiento que lleva a cabo cada ejemplo.

1. Programas ejemplo:

- start.sh → Este programa posiciona todas las articulaciones del robot en un punto inicial que se tomará como posición de comienzo de todas las trayectorias que comenzarán a ejecutar.
- walk.sh → Este programa ejecuta una trayectoria en la que el robot es capaz de caminar estable sobre una superficie plana.
- backward.sh → El robot ejecuta un paso para atrás.
- forward.sh → El robot ejecuta un paso adelante.
- Rot_left → el robot rota 30° hacia la izquierda.
- Rot_right → el robot rota 30° hacia la derecha.

2. Programas implementados posteriormente:

- same_sequence.csv → El robot ejecuta la posición de comienzo de caminata (start.sh) durante aproximadamente 8 segundos
- saludo.sh → Es un saludo que el robot ejecuta con el brazo derecho mientras gira la cabeza hacia la derecha y la izquierda.
- adios.csv → El robot se despide.
- lateral_dere → el robot se desplaza hacia la derecha lateralmente
- lateral_iz → el robot se desplaza hacia la izquierda lateralmente

3.4.7. Apagado del Robot

La manera más directa de apagar el robot es introduciendo el comando “poff” en la ventana del terminal y éste se encargará de apagar el ordenador del robot de forma segura.

A continuación, para no dañar el sistema, apagar en este orden:

- 1) el interruptor de los motores
- 2) el interruptor de la placa de control y lógica.

Capítulo 4

Análisis de la locomoción bípeda

4.1. Introducción:

El desarrollo de robot móviles bípedos [7] ha despertado un gran interés en los últimos años debido al tipo de aplicaciones y ventajas que estos sistemas poseen. En un entorno adaptado a las necesidades humanas, el robot humanoide se posiciona como el candidato ideal para ofrecer asistencia al ser humano en las tareas más tediosas o peligrosas.

Aunque se ha avanzado bastante en cuanto a la robótica móvil bípeda, aún existen muchos problemas abiertos. Los robots más avanzados con los que se cuenta actualmente presentan movimientos torpes o lentos comparados con los seres humanos, así como poco eficientes desde el punto de vista energético.

Una de las características a tener en cuenta en el análisis de la locomoción bípeda, es la periodicidad del movimiento, cuyo periodo es un paso: esto supone que la posición y velocidad al principio y al final de cada paso deben ser las mismas.

Otro detalle fundamental de la caminata bípeda es el cambio de posición continuo del pie de apoyo. Existen dos estados en el proceso de locomoción, la fase de doble soporte, que supone alrededor del 20% del tiempo del ciclo y la fase de simple soporte, que supone el 80% del tiempo del ciclo. En la primera situación el movimiento es estable, sin embargo, en la segunda no lo es. Se produce una situación estáticamente inestable cuando un pie está en el suelo y el otro pasa de una posición retrasada a una adelantada

produciendo aceleraciones que afectan al mecanismo. En la Figura 45 se muestra un esquema del ciclo de locomoción de un movimiento bípedo.

El ciclo está dividido en dos fases, la fase de paso derecho y la fase de paso izquierdo. El paso izquierdo comienza cuando el pie derecho toca el suelo. En ese momento se transmite el peso del cuerpo de un pie a otro, produciéndose aceleraciones laterales que deben ser controladas mediante algoritmos de estabilización. A continuación, se produce el balanceo del pie izquierdo en el estado de soporte simple, es decir, con un sólo pie apoyado en el suelo. El peso se transmite a este pie llegándose al estado de doble soporte, momento en el que los dos pies tocan el suelo simultáneamente. Finalmente se repite el ciclo para el pie contrario [8].

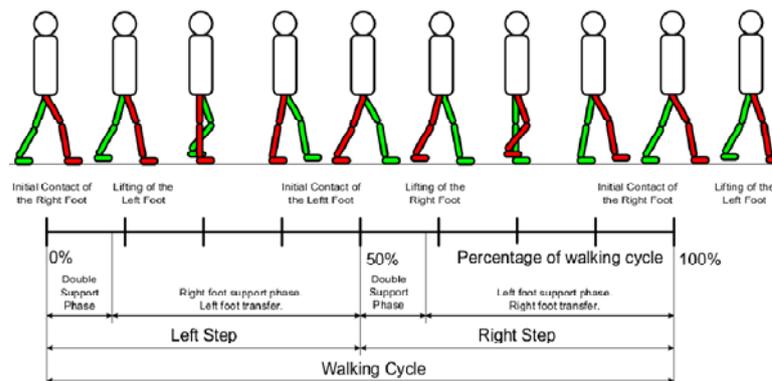


Figura 45. Ciclo del movimiento

4.2. Criterio de la estabilidad:

Desde el comienzo del estudio de la locomoción bípeda [9], los criterios dinámicos de estabilidad para la obtención de una marcha estable han sido la característica principal. El criterio de estabilidad más popular fue el propuesto por Miomir Vukobratovic (1970), el “Punto de Momento Cero” (ZMP, Zero Moment Point), es la base de casi todo el control de estabilidad del robot en la caminata bípeda. Sin embargo otros investigadores han propuesto otros, como el Dr. Ambarish Goswami (1999). Propuso el “Indicador de rotación del pie” (FRI, Foot Rotation Indicator), que realiza una ampliación al ZMP, en el sentido de que no es necesario mantenerlo en el interior del cerco convexo para obtener la estabilidad dinámica al caminar. En la actualidad la investigación tiende a cubrir un criterio de estabilidad más robusto con puntos de multicontacto y en terrenos irregulares, así el “Contact Wrench Cone” (CWC) es propuesto por el Dr. Hirohisa Hirukawa y compañeros de trabajo del AIST.

Este subcapítulo se centrará más en el uso del ZMP, ya que ha sido el que se ha seleccionado para la comprobación de los datos proporcionados por los sensores FSR de los pies. Los otros criterios de estabilidad como son “FRI” y “CWC” únicamente se describirán.

4.3.1. ZMP (Zero Moment Point)

Para lograr una caminata estable [7], es necesario satisfacer algún criterio de estabilidad en la planificación de trayectorias, por lo que el método ZMP (Zero Moment Point) y sus variantes, proporcionan un poderoso enfoque para determinar trayectorias en la locomoción bípeda. El concepto de ZMP (Vukobratovic y Borovac, 2004), es uno de los métodos más utilizados tanto por su simplicidad como por su efectividad.

El ZMP se define como el punto con respecto al cual el momento creado por las fuerzas de inercia y de gravedad no tiene componentes en el eje horizontal (Dasgupta y Nakamura, 1999). Esta teoría asume que la superficie de contacto es plana y que el pie no desliza. Es por lo tanto un indicador de la estabilidad, si el ZMP se encuentra dentro del polígono de soporte el movimiento es estable, en caso contrario, es inestable (Figura 46).

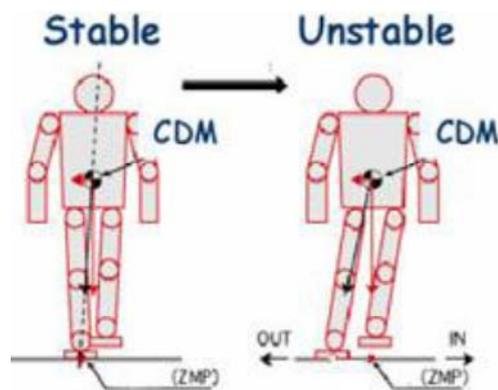


Figura 46. Estabilidad de la locomoción bípeda

Para computar la posición del ZMP es necesario calcular un equilibrio de fuerzas en el pie de soporte (Figura 47). La proyección de estas ecuaciones en el plano horizontal es la base de la computación del punto P, que es el punto de aplicación de la fuerza de reacción con el suelo R [8].

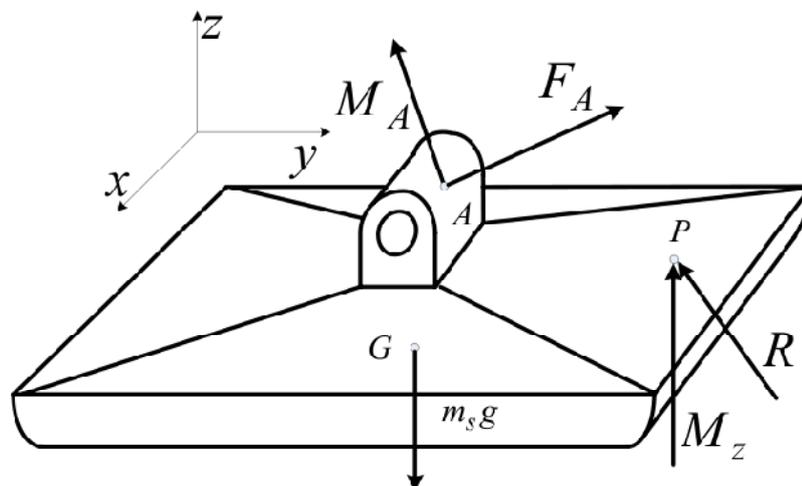


Figura 47. Fuerzas que actúan en el pie de un humanoide

$$R + F_A + m_s g = 0 \quad [4.1]$$

$$\overline{OP} \times R + \overline{OG} \times m_s g + M_A + M_Z + \overline{OA} \times F_A = 0 \quad [4.2]$$

En general, la fuerza y momento resultante de reacción con el suelo tiene tres componentes $R(R_x; R_y; R_z)$ y $M(M_x; M_y; M_z)$. Suponiendo que no hay deslizamiento, las componentes horizontales de la fuerza de reacción, R_x y R_y se equilibrarán con las componentes horizontales de F_A . De la misma forma, el momento de las fuerzas de reacción verticales M_z se equilibrará con la componente vertical del momento que actúa en el cuerpo M_A y el momento creado por las componentes horizontales de F_A . R_z es la fuerza que equilibra las fuerzas verticales del cuerpo.

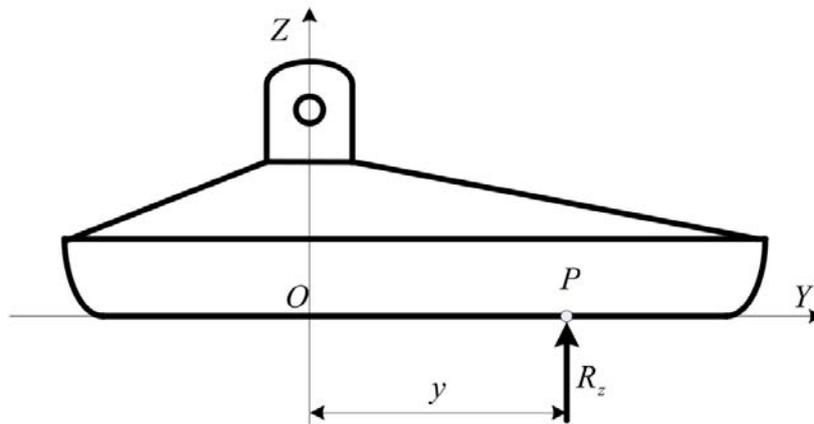


Figura 48. Compensación del ZMP

Para compensar las componentes horizontales de M_A producidas por un movimiento o una carga adicional, es necesario cambiar el punto de aplicación de la fuerza de reacción R_z (Figura 48). Si este punto está dentro del área cubierta por la planta del pie, entonces el sistema está en equilibrio ya que las componentes horizontales del momento de reacción se anulan, $M_x = 0$ y $M_y = 0$. Según el momento M_{Ax} va aumentando, el punto de aplicación de la fuerza R_z se va acercando al borde del pie. Si ese punto sale fuera del borde, aparecerán momentos $M_x \neq 0$ y $M_y \neq 0$, lo que ocasionará que el mecanismo rote alrededor del borde del pie.

Por lo tanto, se define el ZMP como el punto $P_{ZMP} = (x_{ZMP}; y_{ZMP}; 0)$ respecto del cual el momento de la fuerza de reacción no tiene componentes horizontales. Esto se puede entender como un criterio de estabilidad, ya que cuando el ZMP está dentro del polígono de soporte, el movimiento es estable, en caso contrario no lo es. En la Figura 49 se representan los polígonos de soporte, tanto de la fase de apoyo simple como de la fase de apoyo doble. Como se puede observar, en la fase de apoyo simple el polígono de soporte es mucho menor que en el caso de la fase de apoyo doble, es por ello que allí se producirán las mayores inestabilidades.

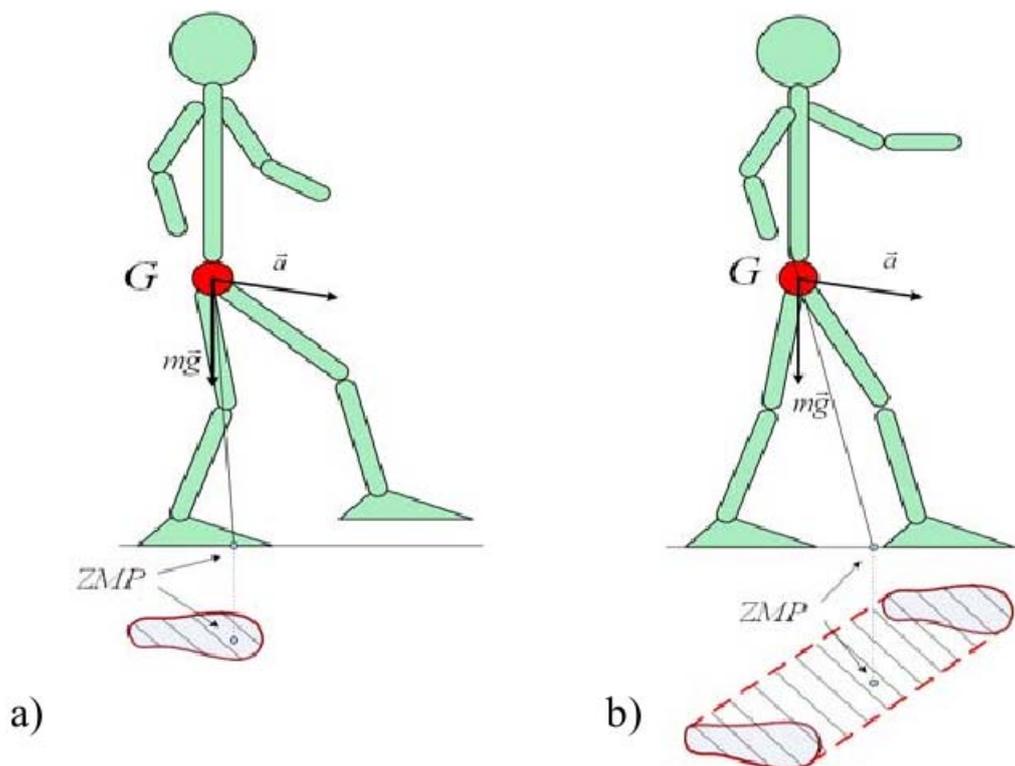


Figura 49. Región de estabilidad a) en soporte simple, b) en doble soporte

Para poder calcular el ZMP es necesario conocer cada una de las fuerzas y momentos que actúan en la estructura en tiempo real, así como las fuerzas y momentos de reacción. La computación de todas estas fuerzas y momentos es lenta, debido al alto número de grados de libertad que poseen las plataformas humanoides, por ello, se han utilizado diversos modelos simplificados que permiten generar trayectorias en tiempo real, un ejemplo es el modelo del péndulo invertido.

4.3.2. FRI (Foot Rotation Indicator)

El Dr. A. Goswami, introdujo el término “Foot Rotation Indicator” (FRI) y describe [9] los detalles de este concepto de la siguiente manera: para formalmente introducir el punto FRI, en primer lugar tratar al robot bípedo al completo, generalmente con n segmentos repartidos en la cadena cinemática de su cuerpo rígido (Figura 50, izquierda), como un sistema y determinar su respuesta ante una Fuerza/par externa. Se pueden emplear los principios de Newton o de d’Alembert para este fin. Las fuerzas externas que actúan sobre el robot son las fuerzas/pares de reacción resultantes del suelo, R y M , actuando en el CdP (denotado por P en la Figura 50, derecha) y la gravedad. La ecuación de equilibrio dinámico de rotación (se ocupará solamente del equilibrio rotacional, y no se hablará del equilibrio de traslación: “deslizante” asumiendo que el contacto de fricción del pie y la tierra es suficientemente grande como para prevenir esto) es obtenida observando que la suma de los momentos externos sobre el robot ya sea referido a su GCoM o a cualquier otro punto de referencia fijo, es igual a la suma de la variación de

cambio del momento angular de los segmentos individuales sobre el mismo punto. Tomando momentos en el origen O, se tiene

$$M + OP \times R + \sum OG_i \times m_i g = \sum \dot{H}_{G_i} + \sum OG_i \times m_i a_i \quad [4.3]$$

Donde m_i es la masa, G_i es la localización del CoM, a_i es la aceleración lineal del CoM, y H_{G_i} es el momento angular respecto del CoM, del i ésimo segmento. Un aspecto importante de este enfoque es tratar la posición de los pies como el foco de atención de nuestro análisis. En efecto, como un solo segmento del robot es el que interacciona con el suelo, la posición del pie es un segmento “especial” sujeto a fuerzas de las articulaciones, fuerza de la gravedad, y las fuerzas de reacción con el suelo. Visto desde la posición del pie, la dinámica del resto del robot puede ser completamente representada por la Fuerza/par del tobillo $-R_1$ y $-\tau_1$ (signos negativos por conveniencia). La Figura 50 (derecha) desconecta artificialmente el pie de apoyo de la caña para mostrar claramente las fuerzas de acción en esa articulación. La ecuación de equilibrio dinámico del pie (segmento 1) es

$$M + OP \times R + OG_1 \times m_1 g - \tau_1 - OO_1 \times R_1 = \dot{H}_{G_1} + OG_1 \times m_1 a_1 \quad [4.4]$$

Las ecuaciones de equilibrio del pie se obtienen mediante el establecimiento de los términos dinámicos (lado derecho de la ecuación [4.4]) como cero.

$$M + OP \times R + OG_1 \times m_1 g - \tau_1 - OO_1 \times R_1 = 0 \quad [4.5]$$

El CoP representa un punto especial con el que se consigue que la ecuación [4.5] se reduzca a una forma más simple:

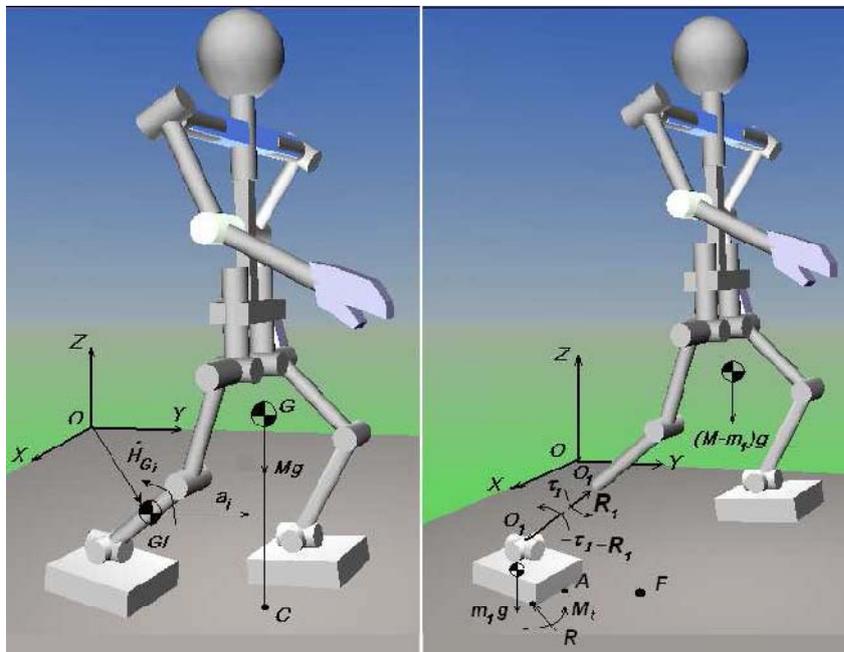


Figura 50. Boceto del cuerpo rígido de un robot bípedo (izquierda), y vista de su pie de apoyo artificial desconectado de la caña para ver las fuerzas que intervienen (derecha). El Cop, GCoM, y el punto FRI son denotados por P, C y F respectivamente

$$M + PG_1 \times m_1 g - \tau_1 - PO_1 \times R_1 = 0 \quad [4.6]$$

Teniendo en cuenta solo la componente tangencial (XY) del vector, la ecuación [4.6] se puede escribir como:

$$(\tau_1 + PO_1 \times R_1 - PG_1 \times m_1g)_t = 0 \quad [4.7]$$

Donde el subíndice t implica que son componentes tangenciales. Puesto que M es tangencial a la superficie del pie/suelo, la dirección de este vector es normal a esa superficie y no contribuye a esta ecuación (Se ignora la rotación de los pies sobre la normal de la tierra, ya que no contribuye a una pérdida de equilibrio). En presencia de un par de desequilibrio en el pie, la ecuación [4.7] no se cumple para cualquier punto dentro del polígono de apoyo. Uno puede sin embargo encontrar un punto F fuera del ámbito del apoyo que satisfaga la ecuación [4.6], es decir,

$$(\tau_1 + FO_1 \times R_1 - FG_1 \times m_1g)_t = 0 \quad [4.8]$$

El punto F es el llamado punto FRI, y es definido como el punto de contacto del pie/tierra con la superficie, dentro o fuera de la envolvente convexa de la zona de los pies de apoyo, en la que el momento resultante de la fuerza/par de impacto en el pie es normal a la superficie. Por “fuerza/par de impacto” se refiere a la fuerza y par en la articulación del tobillo, como otras fuerzas externas, y no a las fuerzas de reacción del suelo. Siguiendo el trabajo de Banach (1951), se pueden identificar las fuerzas de impacto como las fuerzas que actúan, a diferencia de las fuerzas de reacción del suelo, que son las fuerzas que limitan o restringen.

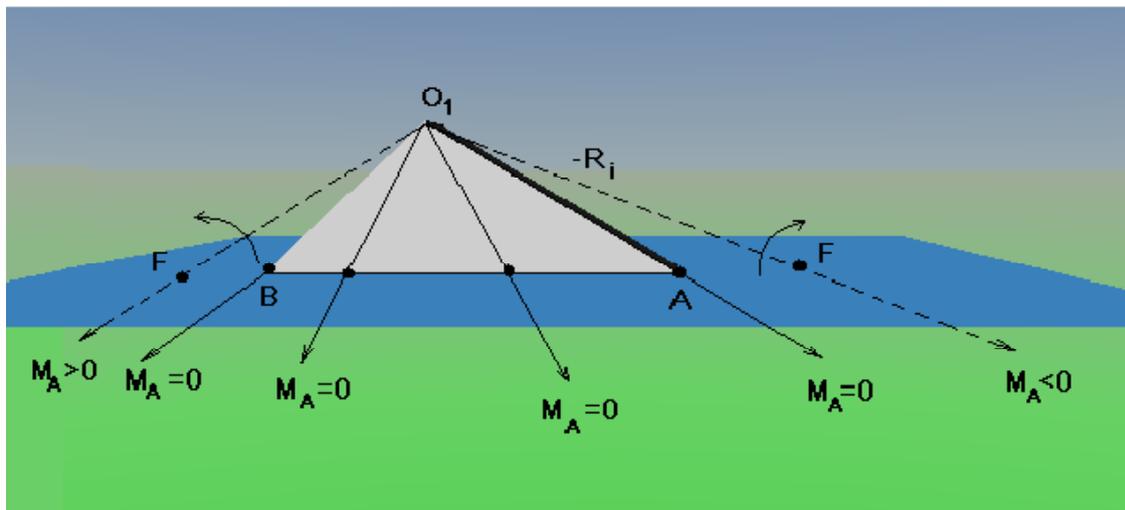


Figura 51. Condición de la rotación de los pies cuando $\tau_1=0$. La figura representa diferentes líneas de acción de la fuerza R_1 aplicada sobre los pies del robot y el resto de articulaciones del tobillo O_1 del robot. Si la línea de acción de una fuerza en la intersección con el suelo es más allá de la huella, habrá un momento aplicado sobre el pie y éste girará. De lo contrario, las fuerzas de la articulación del tobillo podrán soportar las fuerzas de interacción pie/tierra, y el pie se mantendrá en equilibrio estático en una configuración vertical estacionaria.

Una comprensión intuitiva para obtener el punto FRI es mediante el ajuste de $\tau_1 = 0$, $m_1 = 0$ en la ecuación [4.8]. En este caso, F es simplemente el punto sobre la tierra

donde la línea de acción de R_1 penetra, como se muestra en la Figura 51. El caso de la articulación del tobillo que no está actuando fue considerada por Lee y Raibert (1991) para analizar la rotación del pie en un monópodo.

Es importante señalar que la ubicación de la articulación del tobillo y la geometría de la frontera del polígono de apoyo son las únicas características importantes de los pies que son relevantes en nuestra discusión. La forma física de los pies no es importante. Véase la Figura 52 para una ilustración gráfica de este hecho.

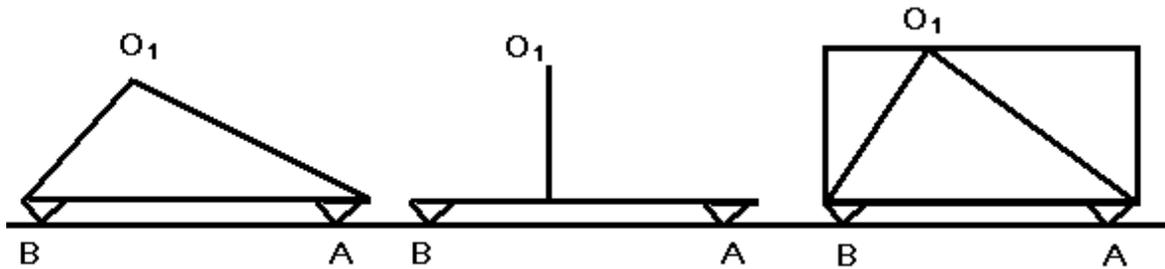


Figura 52. Localización de los puntos clave de la ubicación del tobillo (O_1) y del límite del polígono de apoyo (A y B). Su geometría en general no son relevantes para el comportamiento del pie. Los tres ejemplos del robot se muestran en la figura y tienen un comportamiento idéntico, aunque sus geometrías son muy diferentes.

Propiedades del punto FRI:

Algunas propiedades útiles del punto FRI que pueden ser aprovechadas en la planificación de la marcha son las siguientes:

- 1°. El punto FRI indica la “ocurrencia” de la rotación de los pies, como ya se ha descrito.
- 2°. La localización del punto FRI indica la “magnitud” del momento del desequilibrio del pie. El momento total M_A^I es el momento debido a las fuerzas que impactan en el punto A del límite del polígono de apoyo (Figura 50, derecha):

$$M_A^I = AF \times (m_1g - R_1) \quad [4.9]$$

que es proporcional a la distancia entre A y F. Si F se encuentra en el interior del polígono de apoyo, M_A^I es contrarrestado por el momento debido a R y es justamente compensado (véase la Figura 53, izquierda) para un ejemplo plano. De lo contrario M_A^I tendrá un momento descompensado que puede causar la rotación del pie, (véase la Figura 53, derecha).

- 3°. El punto FRI indica la “dirección” de la rotación de los pies. Esto se deriva de la ecuación [4.9] suponiendo que $m_1g - R_1$ se dirige hacia abajo.

4°. El punto FRI indica el “margen de estabilidad” del robot. El margen de estabilidad de un robot en contra de la rotación de los pies puede ser cuantificado por la distancia mínima del límite del polígono de apoyo desde la ubicación actual al punto FRI dentro de la huella. Por el contrario, cuando el punto FRI está fuera de la huella, la mínima distancia es una medida de inestabilidad del robot. Una rotación inminente del pie será indicado por un movimiento del punto FRI hacia el límite del polígono de apoyo.

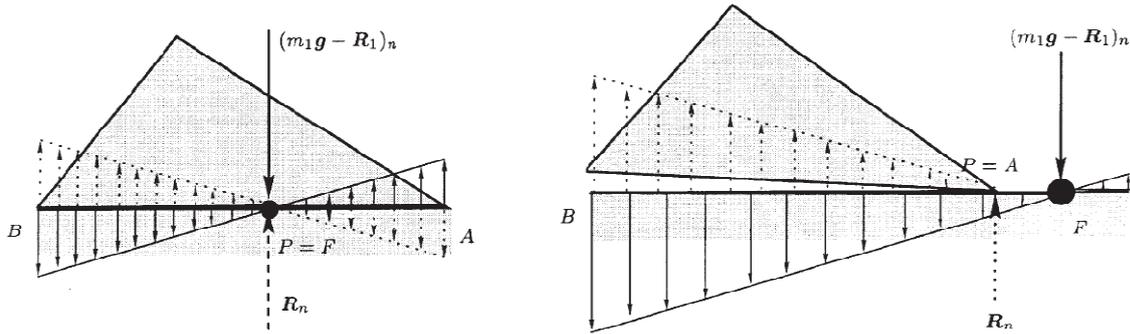


Figura 53. La magnitud del momento vivido por un punto en el límite de apoyo es linealmente proporcional a la distancia de este punto al punto del FRI. Las magnitudes de los momentos en diferentes puntos se muestran por la longitud de las flechas. Tomando momento negativo con el sentido horario la punta de la flecha apunta para arriba, y en sentido contrario, es decir, anti horario, signo positivo, las flechas apuntan hacia abajo. En la imagen de la izquierda los momentos son compensados con precisión, mientras que en la imagen de la derecha no lo son. El subíndice n denota la componente normal de una fuerza.

4.3.3. CWC (Contact Wrench Cone)

En esta sección el Dr. Hirukawa y compañeros de trabajo de la AIST esbozan un criterio de estabilidad universal del contacto del pie con las patas de los robots, de la siguiente manera: el método propuesto comprueba la suma de la gravedad y la inercia aplicada en el COG del robot, con la cual se propone el criterio de estabilidad, que se encuentra dentro del cono convexo poliédrico de la unión de contacto entre las patas del robot y su entorno (ver Figura 54).

El criterio puede ser usado para determinar la fuerte estabilidad del pie de contacto cuando un robot camina sobre un terreno arbitrario y/o cuando las manos del robot están en contacto con él, bajo del supuesto de fricción suficiente.

La determinación es equivalente a comprobar si el ZMP se encuentra dentro del polígono de apoyo de los pies cuando el robot camina sobre un plano horizontal con fricción suficiente. El criterio también se puede utilizar para determinar si el contacto de los pies es lo suficientemente estable o débil cuando la fricción sigue unas leyes físicas. Por lo tanto el criterio propuesto puede ser utilizado para juzgar lo que el ZMP puede hacer, y puede ser utilizado para casos más universales.

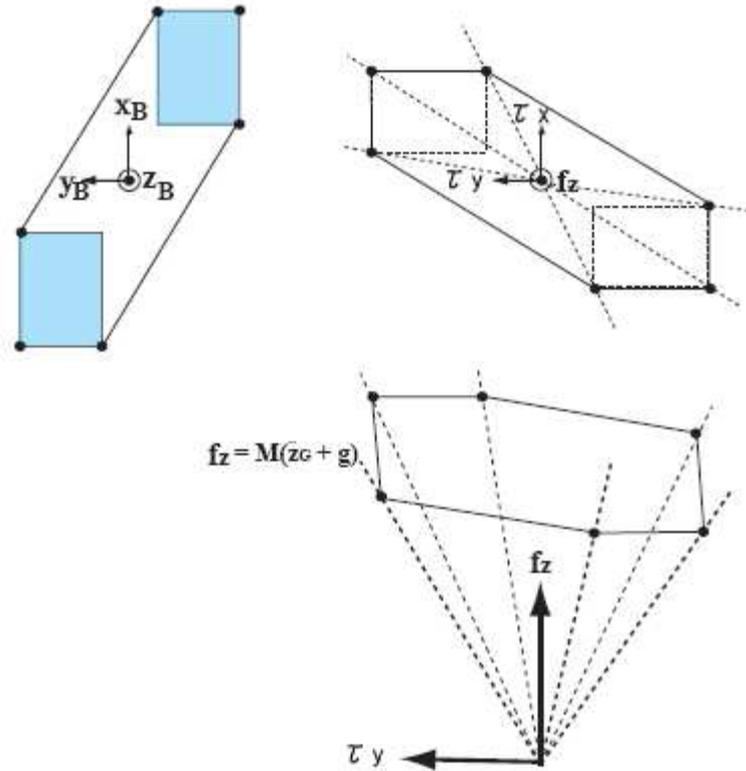


Figura 54. Soporte poligonal y una intersección del poliedro del cono convexo

El criterio propuesto es más universal que el ZMP como se describe a continuación. Una pregunta es si el criterio tiene algún mérito o demérito en comparación con el ZMP en el caso concreto de caminata de un robot bípedo sobre un plano horizontal con fricción suficiente. En el criterio propuesto no es necesaria la división para encontrar el ZMP en la ecuación siguiente, por lo tanto, su cálculo es más estable numéricamente, sobre todo cuando la fuerza de contacto vertical es pequeña

La trayectoria del ZMP se puede trazar más completa ya que es un punto sobre un plano. El criterio propuesto deberá exigir un plano de intersección de f_z para ser pintada sobre el plano (ver Figura 54).

4.3.4. Comparación y conclusiones entre los criterios de estabilidad

Se han explicado tres criterios de estabilidad de la locomoción [9], desde el ya clásico criterio de ZMP al corriente CWC. Con el orden de mejorar la locomoción de los robots humanoides bípedos en un medio ambiente diferente, la investigación se centra en criterios de estabilidad fuertes. En la Tabla 23 aparece un resumen de las capacidades de los criterios de estabilidad.

	ZMP/FRI	CWC
Flat plane Foot contact Sufficient friction	Strong Stability	Strong Stability
Arbitrary terrain Hand/Foot contact Sufficient friction	N/A	Strong Stability

Tabla 23. ZMP/FRI vs. CWC

Se concluye que el CWC es el criterio más fuerte de estabilidad, al menos en teoría y es mejor para los casos críticos en terrenos irregulares, con o sin puntos multicontacto (por ejemplo, dos pies y una mano). En el caso del humanoide caminando sobre una superficie plana se demuestra a partir de los últimos treinta años, que el criterio ZMP es lo suficientemente robusto, teórica y experimentalmente.

Este es nuestro caso donde los resultados se han obtenido con éxito. Esa es la razón de usar el criterio del ZMP en este trabajo, para la comprobación de la calibración de los sensores FSR del robot humanoide.

La marcha bípeda normal se logra con una combinación compleja de componentes posturales automáticas y volitivas. Caminar normal requiere estabilidad para proporcionar un soporte anti gravedad al peso del cuerpo, movilidad de los segmentos corporales y el control de motores de la secuencia de los múltiples segmentos, mientras hay transferencia del peso del cuerpo de un miembro a otro.

El resultado es un avance en la progresión de la eficiencia energética. El ciclo de marcha de los humanos ha sido analizado con el fin de entender el movimiento bípedo al caminar y sus fases principales, apoyo simple y fases de apoyo doble y sus propiedades: fuerza de reacción, tiempo de ciclo, los pies, rodilla, cadera y las trayectorias de movimiento del cuerpo. Así las trayectorias de robot humanoides podrían ser creadas respecto a los seres humanos. Se demuestra que el movimiento COG de los humanos sigue las leyes del péndulo invertido a una velocidad normal de andar, las cuales son un factor importante para el mantenimiento de la estabilidad mientras está andando. El criterio de estabilidad para obtener una caminata bípeda estable han sido descritas especialmente como el criterio “Zero Moment Point”(ZMP), que es el más popular y el que se aplica a menudo en los robots humanoides de todo el mundo. El concepto de ZMP tiene y tendrá un papel esencial tanto en las consideraciones teóricas como prácticas en el desarrollo de robots humanoides y la locomoción bípeda.

Cuanto más lejos esté el punto “FRI” desde el soporte de apoyo, mayor será el movimiento de desequilibrio en el pie, y mayor es la inestabilidad. La distancia entre el punto “FRI” y el punto más cercano a la frontera de un polígono es un indicador útil del margen de la estabilidad estática del pie. Se concluye que la dinámica estable al “andar bípedo” debe tener en cuenta la dinámica de todo el cuerpo para realizar cualquier movimiento en cualquier superficie. El “CWC”, que comprueba si la suma de la gravedad y la inercia aplicada la COG del robot, se encuentra dentro del cono convexo poliédrico de la unión que está en contacto entre las patas de un robot y su entorno. Este criterio se puede utilizar para determinar la estabilidad de la fuente de contacto con los

CRITERIO de la estabilidad:

pies, incluso cuando un robot camina sobre un terreno arbitrario, que no sea un plano horizontal y/o cuando las manos del robot están en contacto con el terreno, bajo la suposición de que suficientemente debe existir una fricción en el punto de contacto. Eso podría ser detallado en otros trabajos, dado que no se encuentra en el objetivo actual.

Capítulo 5

Puesta en marcha de los sensores

En éste capítulo se introduce cada sensor y se realiza una clasificación de los modelos actuales. Posteriormente se detalla el estado inicial en el que se encontraba cada sensor, las pruebas y las modificaciones realizadas, las distintas formas de calibración empleadas para cada uno de los sensores, además de los problemas encontrados en esta operación que impedían la continuidad del proyecto y la explicación de las soluciones que han sido desarrolladas durante todo el proceso.

5.1. Force Sensing Resistors (FSR)

5.1.1. Principio de funcionamiento

Un FSR (Force sensing resistor) es una resistencia variable formada por un polímero conductor que es sensible a los cambios de manera previsible tras la aplicación de la fuerza a su superficie [18].

La resistencia es inversamente proporcional a la fuerza aplicada, es decir, la resistencia disminuye a medida que la fuerza se aumenta. La Figura 55 muestra esa relación. Cuando se aplica una fuerza al sensor, se incrementa la conexión entre los contactos, lo que produce un incremento de la conductividad. Entre un amplio rango de fuerzas, ocurre que la conductividad es aproximadamente lineal en función de la fuerza. Existe un punto llamado *break force*, antes del cual se produce una variación muy elevada de la resistencia, entre 1000 k Ω y 300 k Ω , utilizando fuerzas en torno a 10 N. A partir de ese punto se encuentra una relación lineal entre fuerza y resistencia.

Los FSRs no son galgas extensiométricos ni células de carga aunque sus propiedades son similares. Su sensibilidad está optimizada para el uso del contacto humano para controlar dispositivos electrónicos [18] [19].

Un FSR está compuesto de dos partes. La primera contiene un sustrato semiconductor que posee el material resistivo. La segunda parte es el área activa, que está formada por un grupo de pequeños contactos o electrodos digitalizados. Esto se puede ver en la Figura 56.

Como se puede observar en las fotos, se trata de un sensor integrado dentro de una membrana de circuito impreso flexible de escaso espesor. El sensor es totalmente plano, lo cual permite colocarlo con facilidad entre dos piezas mecánicas de nuestro sistema y medir la fuerza que se aplica sin perturbar la dinámica de las pruebas.

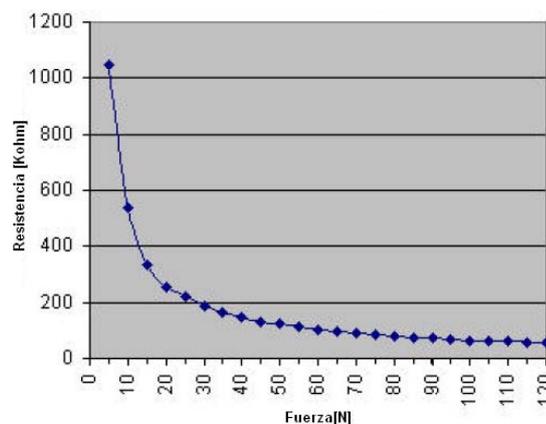


Figura 55. Relación Resistencia vs. Fuerza en un FSR

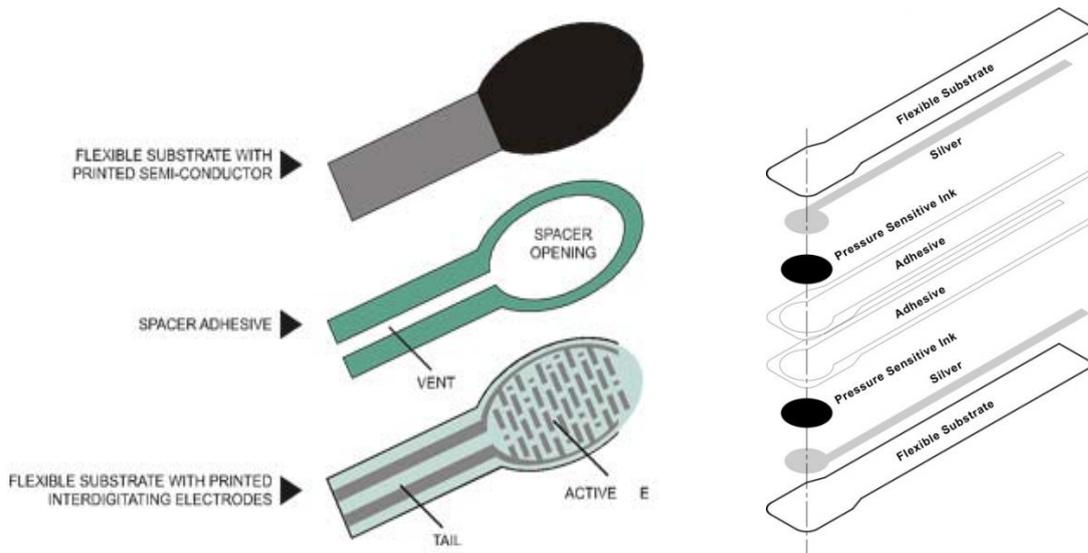


Figura 56. Composición de un sensor FSR

5.1.2. Clasificaciones

Los sensores de fuerza y torsión se utilizan como dispositivos de retroalimentación para controlar la manipulación de un objeto una vez que haya agarrado. Una aplicación muy extendida de este tipo es en robots y en máquinas automatizadas de soldadura, para comprobar si la pinza de soldadura aplica la presión necesaria sobre la zona que suelda.

Desde el punto de vista exoceptivo los sensores de fuerza y de torsión se utilizan principalmente para medir las fuerzas de reacción desarrolladas en la superficie de contacto directo con el medio. También se pueden considerar desde una visión propioceptiva. En el caso de los robots humanoides es importante conocer la fuerza con la que los pies apoyan en el suelo, además de conocer el grado de inclinación y aceleración del centro de masa. Por lo tanto este sensor que informa del estado del entorno externo al robot, y a la vez del estado propio de este, se puede considerar un híbrido entre sensor propioceptivo y exoceptivo. Para medir la fuerza ejercida sobre una superficie, por ejemplo el suelo, se podría recurrir a dos tipos de tecnologías: galgas extensiométricas y celdas capacitivas.

5.1.2.1. Galgas extensiométricas

Una galga de extensión se construye sobre un metal de coeficiente de elasticidad dado, adosándole un alambre, una tira semiconductor o pistas conductoras. Al deformarse el soporte de la galga, se "estira" o se "comprime" el sensor, variando así su resistencia. El cambio de resistencia será, precisamente, el reflejo de la deformación sufrida. En términos de su caracterización, dada la resistencia R sin deformación, la

aplicación de una fuerza F deformante producirá un cambio de resistencia, R , cuya medición permite calcular la fuerza mediante:

$$F = A \cdot E \cdot s = \frac{A \cdot E}{G} \cdot \frac{\Delta R}{R}$$

Figura 57. Fuerza medida en una galga

Donde se ha definido una constante "G", conocido como la constante de la galga y que suele variar entre 2 y 2,2 para galgas de soporte metálico. Su principal ventaja es su linealidad; también presentan una baja impedancia de salida. Su principal desventaja es su dependencia de la temperatura, lo que provoca que, a veces, haya que diseñar circuitos electrónicos para compensar esa dependencia, como por ejemplo el más común es el denominado puente de Wheastone.

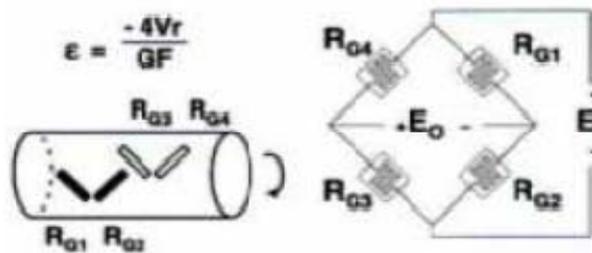


Figura 58. Esquema puente Wheastone de galgas extensiométricas

5.1.2.2. Celdas capacitivas

Basadas en un sensor capacitivo introducido en una estructura deformable. Según se muestra en la figura, la deformación de la estructura, supone un cambio en la medición del sensor capacitivo.

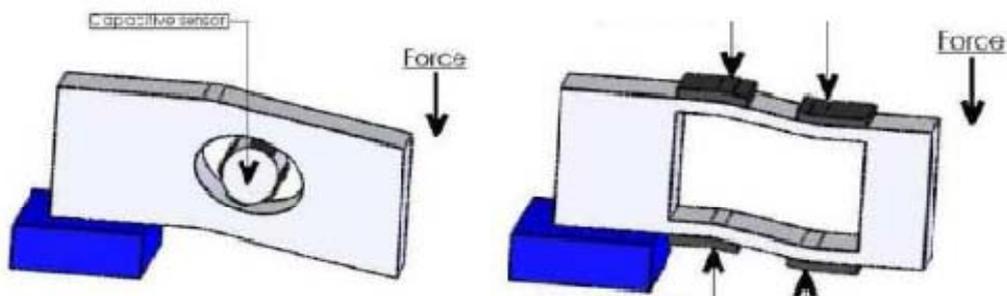


Figura 59. Esquema de izq a der. Celda capacitiva y galga extensiométrica

Una de las ventajas es la sensibilidad de la celda capacitiva, que es de un 10%, comparada con la de las galgas, de 0.1%. Una pequeña desventaja se puede considerar en

la elección del material de la estructura que alberga el sensor capacitivo. La estructura debe ser menos deformable que la de las galgas, y de características concretas, normalmente aluminio tratado. No puede ser usado como las galgas, las cuales pueden situarse directamente sobre la superficie que se deforma.

5.1.3. FSRs ubicados en los pies de HOAP3:

Para comprobar el estado de los sensores FSR de los pies, se realizaron unas pruebas iniciales que consistían en ejecutar diferentes trayectorias con el robot estando éste colgado y más tarde apoyado sobre el suelo. El eje X representa el tiempo en segundos que dura la trayectoria. El eje Y representa el valor decimal de cada sensor.

De la primera prueba estando el robot colgado y con los motores encendidos, de los sensores FSR se obtuvieron los datos que se muestran a continuación (Figura 60). Como se puede apreciar, no existe gran dispersión entre los datos obtenidos, siendo los sensores de la pierna izquierda los que proporcionan unos datos más exactos.

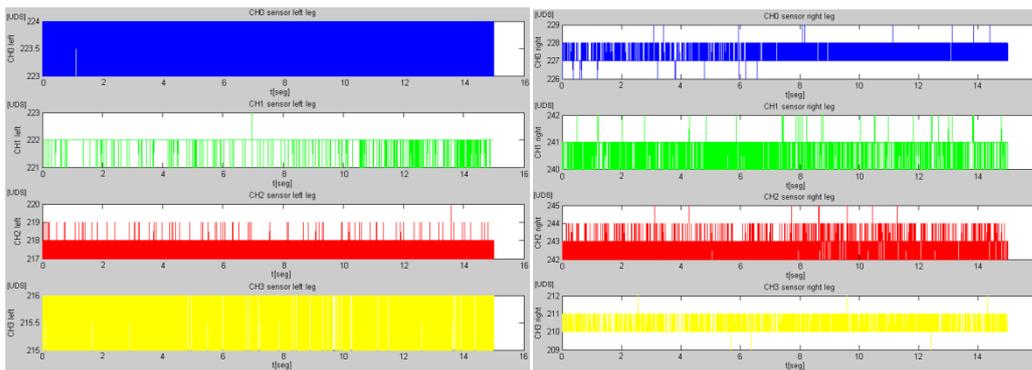


Figura 60. Valor de los FSR del pie izquierdo y derecho respectivamente en la prueba 1

De la segunda prueba con el robot colgado y los motores apagados (Figura 61), se obtuvieron unos datos muy parecidos a los obtenidos en la primera prueba. Es así como el valor proporcionado por cada uno de los sensores FSR se tomarían como un valor de referencia “cero”, en el que se sabía que éstos no estaban presionados debido a que el robot estaba colgado de la jaula.

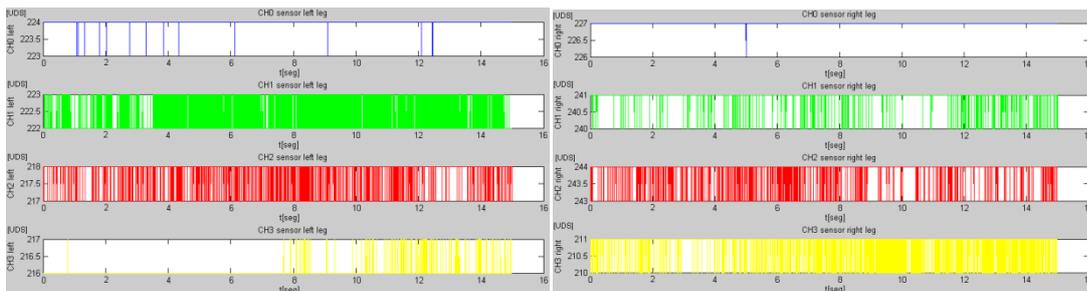


Figura 61. Valor de los FSR del pie izquierdo y derecho respectivamente en la prueba 2

De la tercera prueba con el robot apoyado sobre el suelo, sin baterías y con los motores encendidos, se obtuvieron los datos de los FSR estando éste apoyado sobre ambos pies. La pequeña oscilación de valores que se produce al principio de la trayectoria es debida a que el robot no estaba totalmente estático, es decir, que existía un leve movimiento en el cuerpo del robot que producía una pequeña vibración en los pies, logrando esta forma de onda característica (Figura 62)

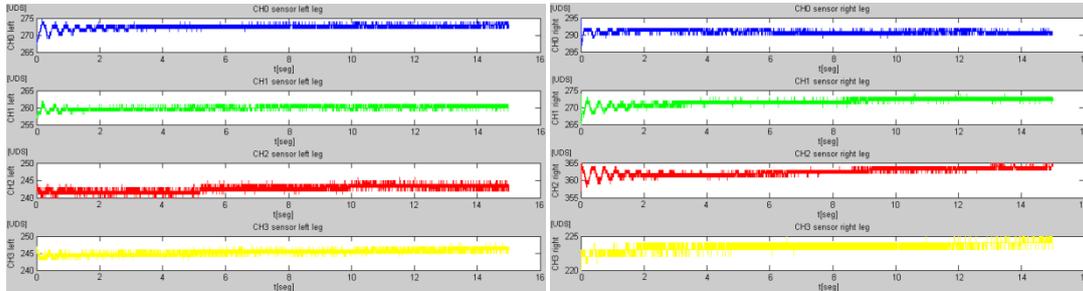


Figura 62. Valor de los FSR del pie izquierdo y derecho respectivamente en la prueba 3

De la cuarta prueba con el robot apoyado sobre el suelo, sin baterías puestas y con los motores encendidos, se obtuvieron los datos de los FSR para dos trayectorias distintas:

En la trayectoria primera llamada “saludo”, el robot se encontraba estático y ejecutando una secuencia de movimiento con la mano derecha que comenzaba en la cadera y subía hasta la cabeza; a continuación saludaba y una vez terminado el movimiento, el brazo descendía a su posición inicial. Con esta trayectoria se aprecia cómo los sensores son capaces de detectar una inercia a consecuencia de levantar el brazo. Sobre todo se nota en la gráfica del pie derecho debido a que este es el pie más próximo al movimiento del brazo (Figura 63).

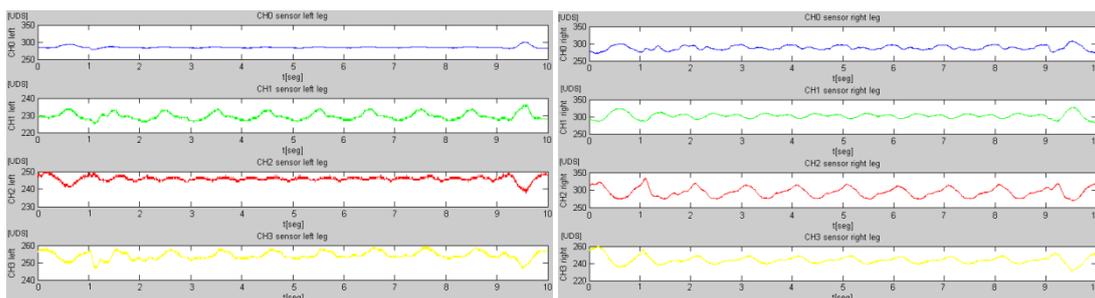


Figura 63. Valor de los FSR del pie izquierdo y derecho respectivamente en la prueba 4a

En la trayectoria segunda llamada “walk”, el robot camina, comenzando el paso con el pie derecho. Con esta trayectoria se aprecia cómo los sensores aumentan y disminuyen el valor de sus datos en función del pie con el que está apoyándose (Figura 64).

CAPÍTULO 5: PUESTA en marcha de los sensores

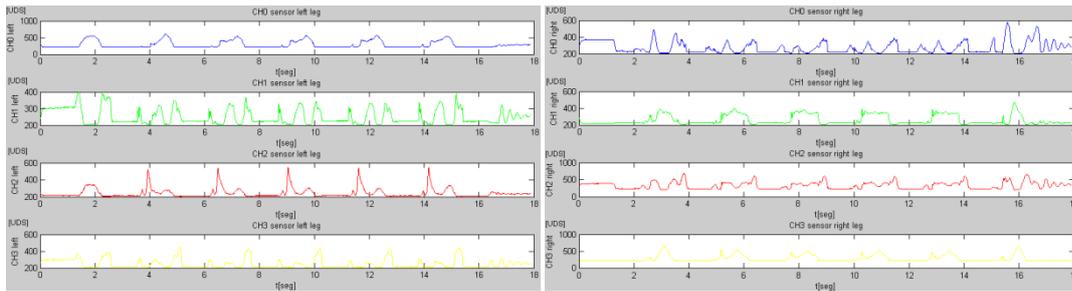


Figura 64. Valor de los FSR del pie izquierdo y derecho respectivamente en la prueba 4b

Además con estos datos de los sensores se calculó y graficó el peso y el ZMP del robot (Figura 65) y se comprobó que los sensores eran capaces de detectar la inercia del aterrizaje del pie al tocar con el suelo. Se pudo ver cómo el peso del robot era bastante inferior al real, lo que indicaba que los sensores estaban mal calibrados. A parte, en el objetivo de calcular el ZMP se obtienen datos erróneos, esto es, datos irreales que se tendrían que despreciar, ya que imposibilitaban la vista del ZMP real. Estos datos son los picos máximos que se ven en el eje X e Y del ZMP, y se producen cuando los valores de la fuerza son inferiores a 10N.

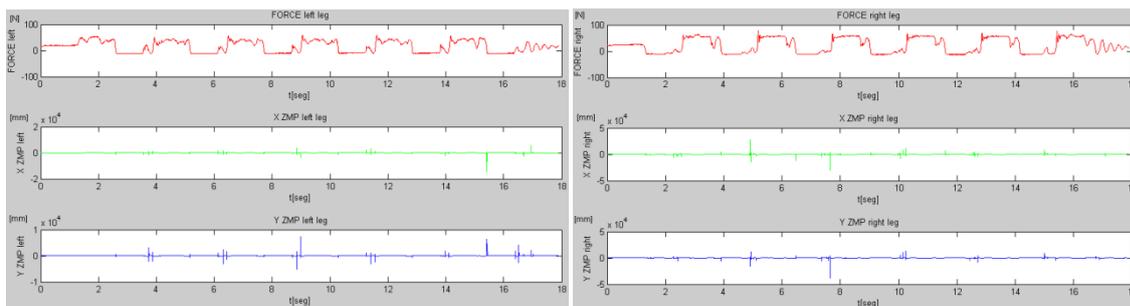


Figura 65. Fuerza y ZMP del pie izquierdo y derecho respectivamente en la prueba 4b

De la quinta prueba con el robot apoyado sobre el suelo, con baterías puestas y con los motores encendidos, se obtuvieron los datos de los FSR para las mismas trayectorias utilizadas en la cuarta prueba:

En la trayectoria primera llamada “saludo”, también se aprecia cómo los sensores son capaces de detectar una inercia a consecuencia de levantar el brazo. Sobre todo se nota en la gráfica del pie derecho debido a que este es el pie más próximo al movimiento del brazo (Figura 66).

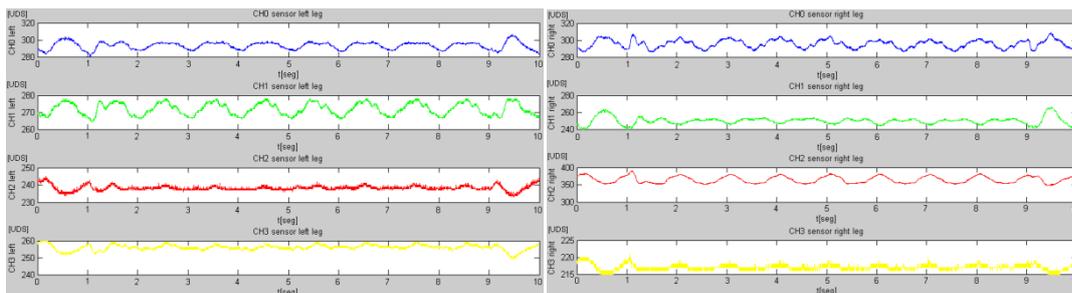


Figura 66. Valor de los FSR del pie izquierdo y derecho respectivamente en la prueba 5a

En la trayectoria segunda llamada “walk”, el robot camina, comenzando el paso con el pie derecho. Con esta trayectoria se aprecia cómo los sensores aumentan y disminuyen el valor de sus datos en función del pie con el que está apoyando (Figura 67).

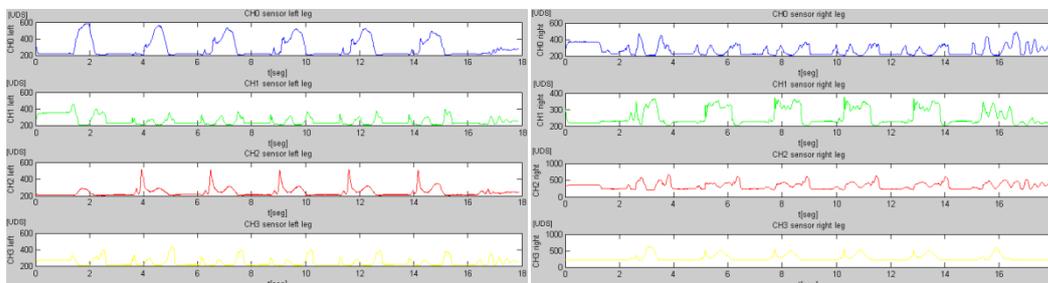


Figura 67. Valor de los FSR del pie izquierdo y derecho respectivamente en la prueba 5b

Además con estos datos de los sensores se calculó y graficó el peso y el ZMP del robot (Figura 68). Los resultados obtenidos no varían en exceso respecto de la cuarta prueba debido a que únicamente se ha añadido la batería que pesa 0,65 kg.

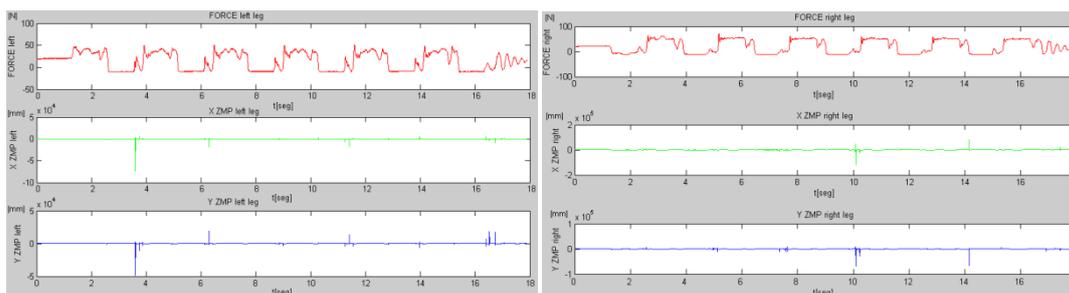


Figura 68. Fuerza y ZMP del pie izquierdo y derecho respectivamente en la prueba 5b

Lo que se podía deducir por el momento era lo siguiente:

- Dentro de las pruebas cuarta y quinta se obtuvieron unos datos más dispersos, debido a que se ejecutaron dos trayectorias, una en la que el robot estaba totalmente quieto, aunque ejecutando un movimiento de saludo con el brazo, lo que repercutía en el valor de los sensores, y otra trayectoria donde el robot caminaba y proporcionaba valores muy distintos entre sí.
- Cabe indicar que en las pruebas realizadas con baterías puestas, los sensores apenas variaban su respuesta respecto a las pruebas sin baterías, a pesar de que las baterías pesan 0,65 kg.
- El peso y el ZMP del robot no eran fiables ya que cada pierna proporcionaba una medida de 20 N aproximadamente, lo que difería en exceso de los 40 N por pierna que debería salir.

Con estas cinco pruebas no se llegó a una conclusión determinante, ya que podía ser que los FSR de los pies estuviesen estropeados o por el contrario solo se encontrasen

CAPÍTULO 5: PUESTA en marcha de los sensores

fuera de calibración. Fuese cual fuese el motivo, mediante estas pruebas se certificó que no se podían obtener datos fiables para el cálculo del Peso y del ZMP.

Como con estas pruebas no se conseguía avanzar, se tomó la decisión de desmontar el robot e investigar el fabricante de los sensores FSR para poder comparar los datos de las pruebas con los que se supondría que aparecerían en ese manual y obtener, de esta manera una conclusión final sobre el estado de los sensores. En el Anexo 8.1 se muestra la ubicación de cada sensor FSR dentro del robot y la manera de acceder a ellos.

Dado que los valores numéricos que proporcionaban los sensores eran menores que los que tendrían que salir, se optó como primera opción por colocar unos suplementos adhesivos sobre los tacos gomosos para que presionasen los sensores, de tal forma que hiciesen la función de calibración del offset del sensor (Figura 69).

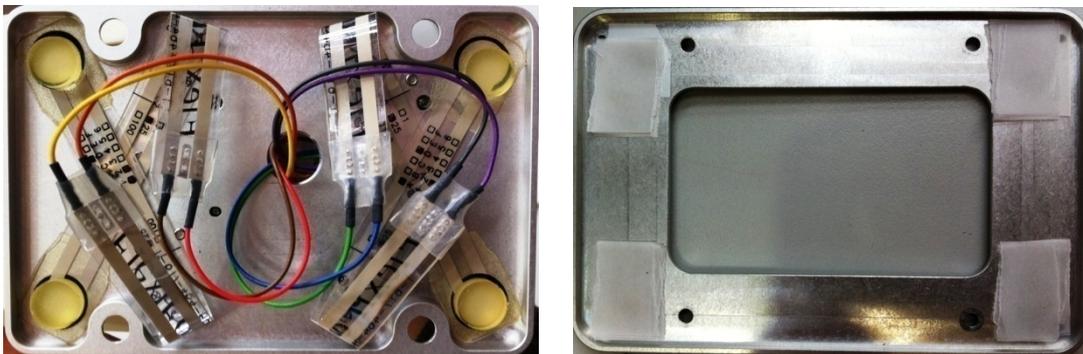


Figura 69. Vista de sensores y suplementos para calibración del offset del sensor

Con este sistema se consiguió una mejora en los datos que entregaban los sensores FSR, pero en contrapartida produjo un aumento del error en la medida, como se puede apreciar en las Figura 70, Figura 71 y en la Tabla 24.

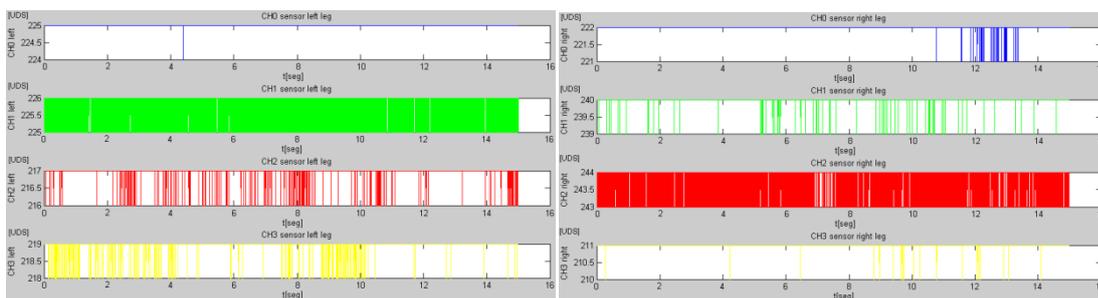


Figura 70. Valores FSR de pie izquierdo y derecho respectivamente sin suplementos

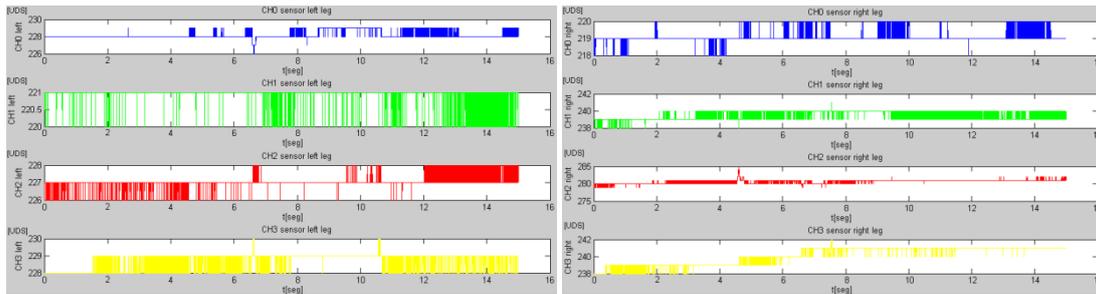


Figura 71. Valores FSR de pie izquierdo y derecho respectivamente con suplementos

name	Min	Max	Ran	name	Min	Max	Ran
CH0_left	226	229	3	CH0_left	224	225	1
CH0_right	218	220	2	CH0_right	221	222	1
CH1_left	220	221	1	CH1_left	225	226	1
CH1_right	238	241	3	CH1_right	239	240	1
CH2_left	226	228	2	CH2_left	216	217	1
CH2_right	279	285	6	CH2_right	243	244	1
CH3_left	228	230	2	CH3_left	218	219	1
CH3_right	238	242	4	CH3_right	210	211	1

Tabla 24. Variación y error de los valores de FSR con y sin suplemento respectivamente

Este error principalmente era provocado por los tornillos encargados de unir las dos superficies metálicas del pie del robot, los cuales tenían cada uno diferente par de apriete para poder conseguir que los sensores proporcionasen una lectura idéntica a la que aparece en la hoja de cálculo llamada “FootBottomSensor” estando el robot colgado de la jaula en posición vertical.

Se descartó esta primera calibración principalmente porque el comportamiento de los sensores difería del especificado en las gráficas de la hoja de cálculo llamada “FootBottomSensor”. Por consiguiente se pensó en el desarrollo de un sistema de calibración con el que se consiguiese una precisión parecida a la que especificaba el fabricante del robot (Tabla 24, derecha).

Tras examinar la hoja de cálculo “FootBottomSensor” y comprobar que al modificar los datos de las columnas, se recalculaban automáticamente los parámetros de offset del peso y otros datos necesarios para calcular posteriormente el ZMP, se comenzó con una nueva calibración que consistiría en colocar varios pesos conocidos sobre determinados puntos de la suela del robot y con los datos obtenidos por los sensores ir completando esa tabla incluida en la hoja de cálculo.

Para esta calibración, se colocó el robot tumbado boca abajo y con las suelas de los pies mirando hacia arriba y se bloqueó todo tipo de giro de articulaciones. Además se retiraron los suplementos de calibración introducidos en la calibración anterior (Figura 69) para que no alteraran la nueva calibración. A continuación se adjunta una imagen del método utilizado para bloquear la articulación del tobillo del robot (Figura 72).



Figura 72. Modo de bloqueo de las articulaciones del tobillo

Una vez bloqueada la articulación del tobillo correspondiente al pie que se quiere calibrar, se ponen diferentes pesos en los distintos puntos de la plantilla de calibración descrita en el anexo 8.2. En este anexo también se detalla la construcción de las plantillas de calibración y el método a seguir para realizar la calibración. No obstante se muestra a continuación una figura donde se aprecia la forma de colocación de los pesos.



Figura 73. Colocación de pesos en la planta del pie del robot para calibración_V1

Terminada la calibración del pie derecho se utilizaron unos ejemplos de movimiento de articulaciones o trayectorias estáticas en las que el robot se sostenía con todo el peso sobre este pie derecho (Figura 74), y se comprobaría que esta calibración era casi correcta de no ser porque se quería conseguir un error menor a pesar de que había disminuido y mejorado bastante respecto de las pruebas anteriores. Este error (Tabla 25) podría ser causado por la falta de estabilidad del tobillo a la hora de realizar la calibración. Se observó que con pesos mayores de 6 kg, el bloqueo del tobillo tenía una holgura, pudiendo provocar un posible fallo en la medida, por lo que antes de continuar con la calibración del pie izquierdo se optó por desarrollar una plataforma de calibración con la que sostener y bloquear el tobillo del robot para realizar una calibración sin errores.

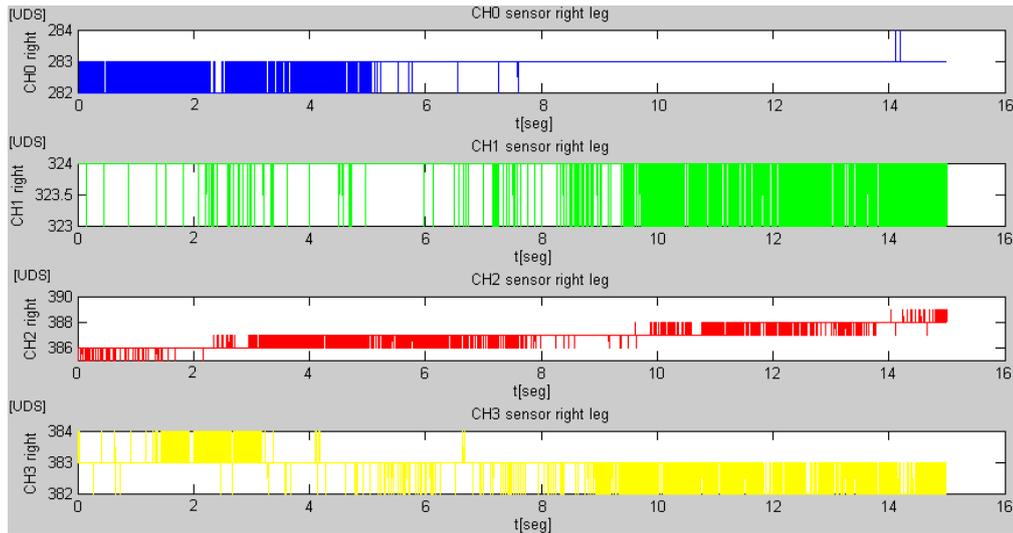


Figura 74. Valores FSR en la primera calibración del pie derecho

Name	Min	Max	Range
CH0_right	282	284	2
CH1_right	323	324	1
CH2_right	385	389	4
CH3_right	382	384	2

Tabla 25. Variación y error en la primera calibración de pie derecho

La metodología para la segunda calibración fue la misma que para la primera, es decir, se comenzó con la calibración del pie derecho y una vez se aprobaron los datos obtenidos, se comenzó con la calibración del pie izquierdo.

Para el pie derecho se obtuvieron unos errores menores a los de la calibración anterior, como se muestra en la Tabla 26 y en la Figura 75.

Name	Min	Max	Range
CH0_right	302	303	1
CH1_right	332	333	1
CH2_right	377	379	2
CH3_right	480	483	3

Tabla 26. Variación y error en la segunda calibración de pie derecho

CAPÍTULO 5: PUESTA en marcha de los sensores

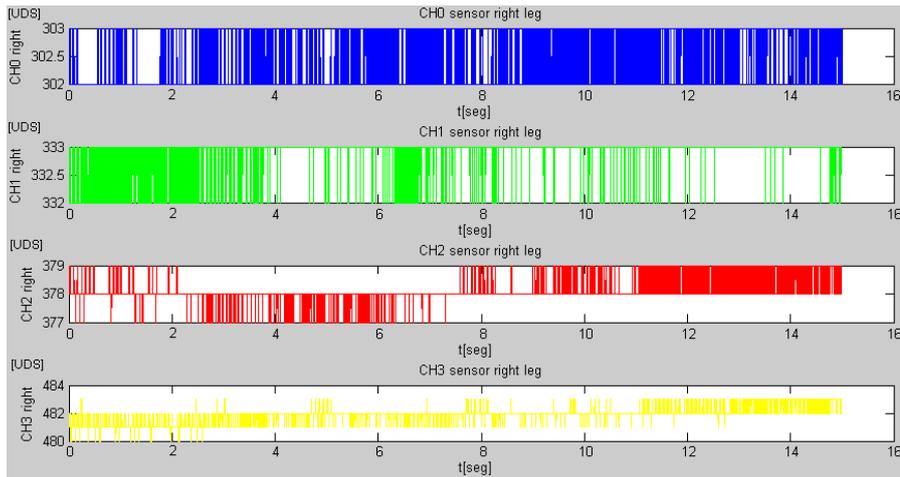


Figura 75. Valores FSR en la segunda calibración del pie derecho

Para el pie izquierdo se obtuvieron también unos errores muy bajos, como se muestra en la Tabla 27 y Figura 76.

Name	Min	Max	Range
CH0_left	356	358	2
CH1_left	238	240	2
CH2_left	344	346	2
CH3_left	300	302	2

Tabla 27. Variación y error en la segunda calibración de pie izquierdo

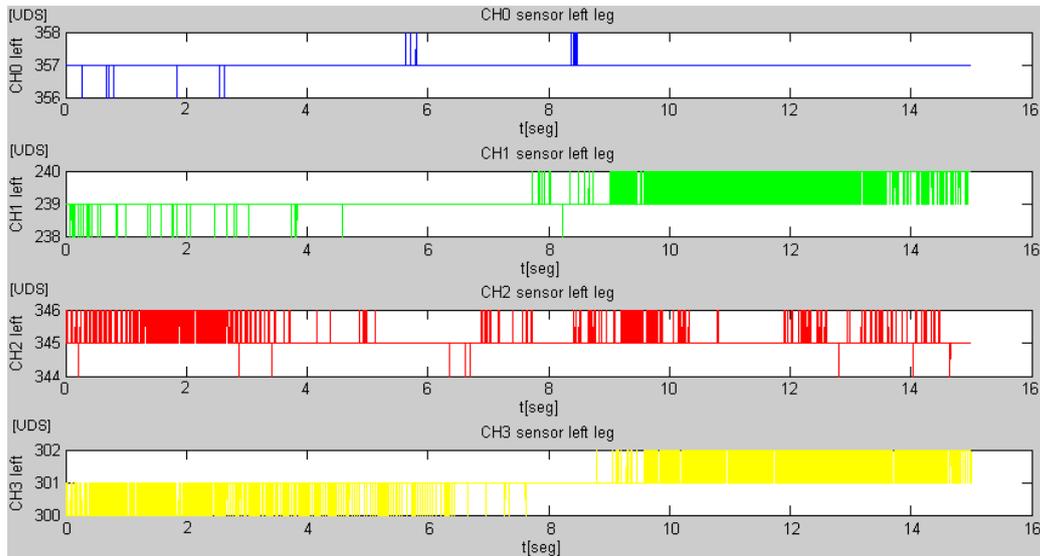


Figura 76. Valores FSR en la segunda calibración del pie izquierdo

En esta segunda calibración se alcanzaron los resultados que se esperaban, donde los sensores proporcionaban unos datos correctos del peso del robot. Esto se pudo corroborar con el posterior cálculo del ZMP.

Se graficó el ZMP y el peso del robot estando éste colgado de la jaula tanto con los motores apagados (Figura 77) como encendidos (Figura 78), para observar si existía una la variación de los datos.

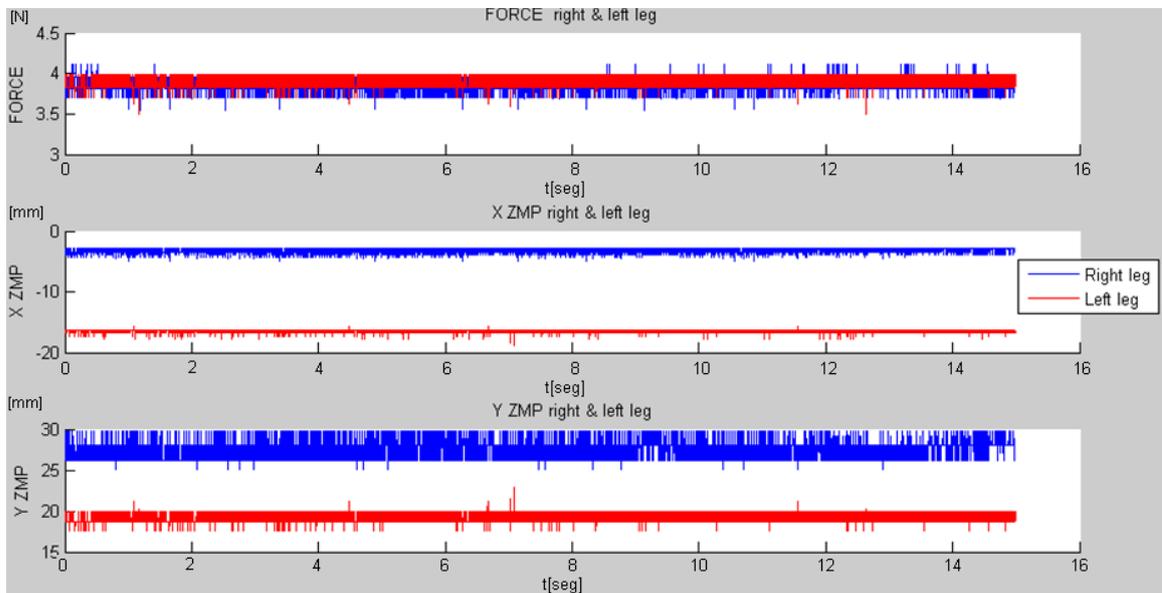


Figura 77. Valor de Fuerza y ZMP colgado con motores apagados

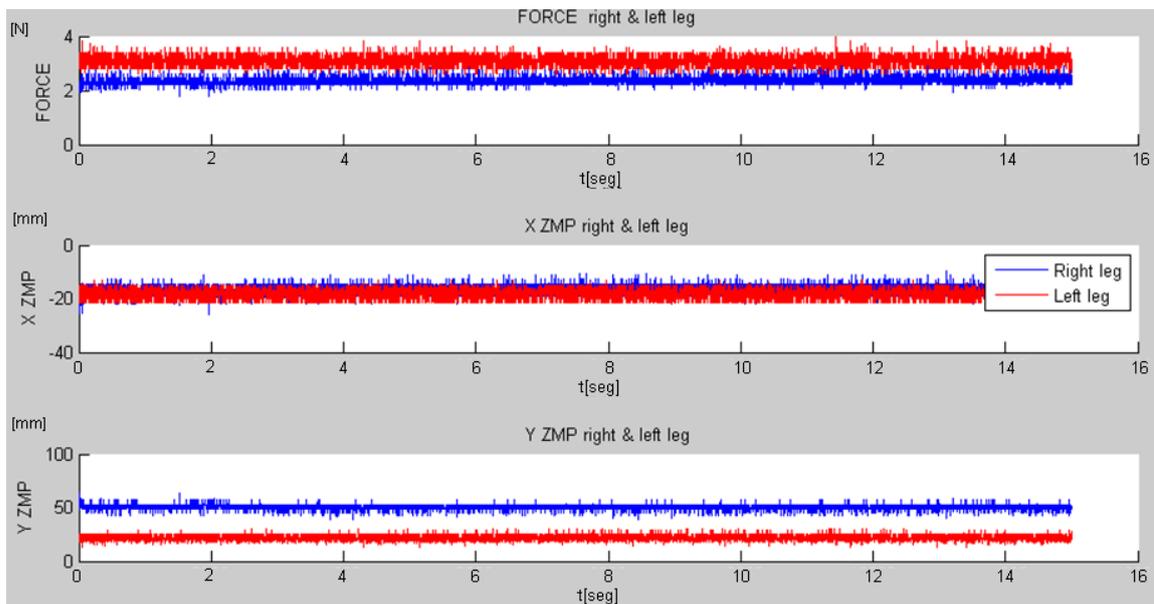


Figura 78. Valor de Fuerza y ZMP colgado con motores encendidos

Como se puede apreciar en las gráficas de fuerza, estando el robot colgado, hay una pequeña variación del valor que toma. Donde sí existe una variación excesiva es en el cálculo del ZMP, pero esto no es un error grave, debido a que al estar aplicando sobre los sensores un valor de 10N de fuerza, el fabricante de los sensores [19] y el propio manual del robot explican que el cálculo del ZMP no se tiene que considerar válido ya que valores tan bajos pueden producir errores. Y esto es lo que está sucediendo en este caso.

Para el caso de encontrarse el robot apoyado con ambos pies sobre el suelo (doble soporte) y con los motores encendidos, se obtuvieron los siguientes valores:

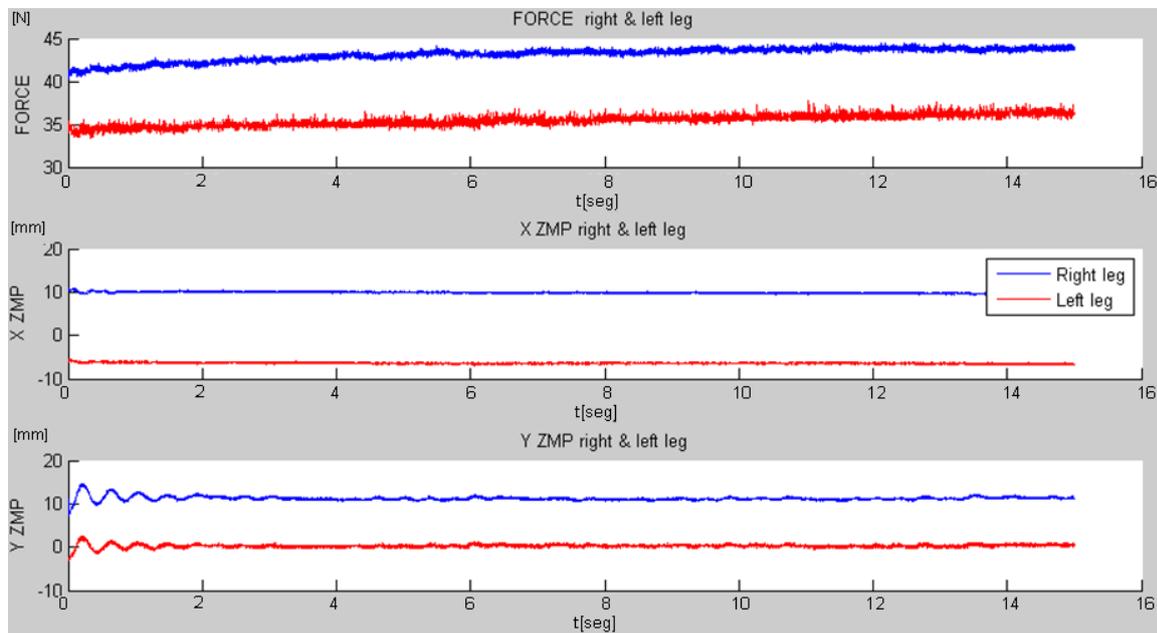


Figura 79. Valor de Fuerza y ZMP apoyado sobre el suelo con motores encendidos

Como se puede apreciar en la Figura 79, el valor de la fuerza del pie derecho es mayor que el valor del pie izquierdo. Esto es debido a que en esta posición el robot se encuentra un poco inclinado hacia ese lado, esto es, apoyando más peso sobre este pie derecho. Por estar el robot apoyado sobre doble soporte, los datos del ZMP no pueden tenerse en cuenta debido a que el cálculo está del ZMP implementado para el caso de encontrarse sobre soporte simple.

Pese a que el peso que soporta cada pierna es distinto, pudiendo ser este provocado por una ligera inclinación del tronco del robot, como se ha comentado en el párrafo anterior. Según la Figura 79 y si aún así cada pierna se toma paralela una de la otra, es decir que los vectores fuerza de ambas sean paralelos, se obtiene para la pierna derecha una fuerza de aproximadamente 43N, mientras que para la pierna izquierda se obtiene una fuerza de 35N. La suma de ambos vectores da un valor de 78N, que dividido entre la fuerza de la gravedad proporciona un resultado del peso del robot de 7,95 kg, lo que aproximadamente es igual a los 8kg reales que pesa el robot. Por lo que se deduce que el peso mientras el robot está estático con los motores encendidos si es correcto.

Entonces para poder verificar la correcta calibración se tendrá que poner al robot a andar para que se dé la situación de encontrarse en soporte simple y poder en ese caso obtener los datos del ZMP válido. A continuación se ha graficado la trayectoria “walk” en la que el robot camina sobre una superficie plana y sobre esta trayectoria se han calculado el ZMP y el peso correspondientes (Figura 80).

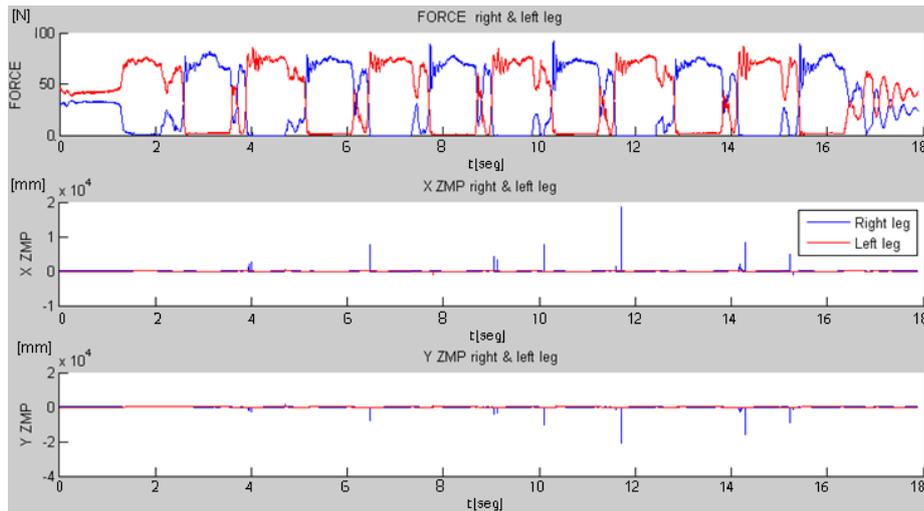


Figura 80. Valor de Fuerza y ZMP caminando sobre el suelo con motores encendidos

De la Figura 80 el resultado más llamativo se encuentra en el cálculo del ZMP, donde claramente se puede comprobar que éste ha sido calculado de forma errónea, como especificaba el fabricante de los sensores, por culpa de haber seleccionado datos menores de 10N para esta medida. Esto es lo que provoca unos números tan elevados e imposibles como son un ZMP en la escala de 10^4 mm. En cuanto al peso del robot, se puede apreciar una línea superior en torno a 80N en cualquiera de los dos pies, estando éstos sobre un apoyo simple. Esta condición de apoyo simple se aprecia en la Figura 80 cuando la distancia entre el peso que soporta la pierna derecha respecto del peso que soporta la pierna izquierda es máxima.

La última prueba que se llevó a cabo fue la de comprobar si efectivamente surtiría efecto el hecho de despreciar los valores de fuerza inferiores a 10N tal y como decía el fabricante y se obtuvo la Figura 81:

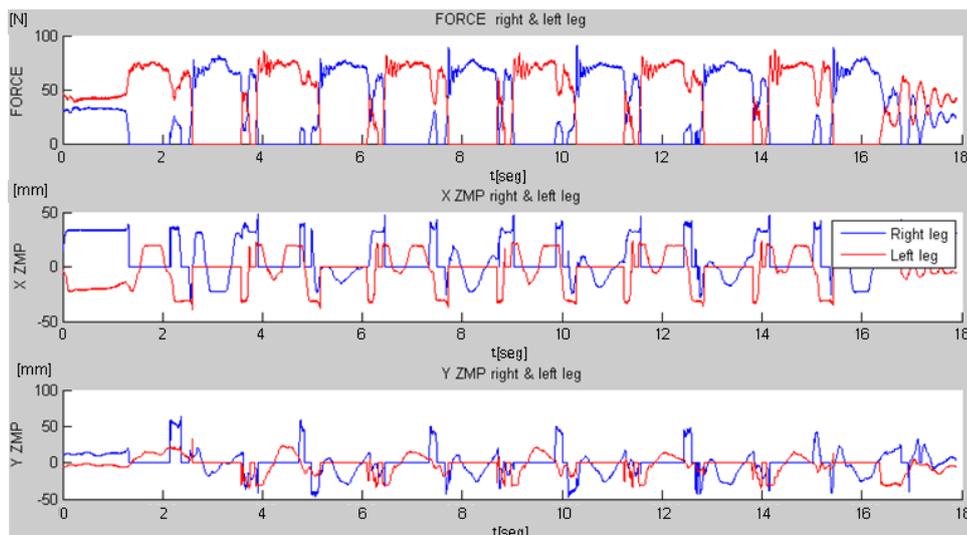


Figura 81. Valor de Fuerza y ZMP caminando sobre el suelo con motores encendidos y omitiendo datos de fuerza inferiores a 10N

Como se puede comprobar en la Figura 81, el valor máximo de fuerza cuando el robot se encuentra sobre un apoyo simple, para cualquiera de las piernas, es de 80N, por lo que está calculando el valor real del peso del robot. En cuanto al ZMP, se considera que el omitir los valores de fuerza inferiores a 10N ha mejorado la escala de la gráfica, pudiendo variar entre -30mm y 30mm en el eje X y entre -50mm y 50mm para el eje Y. Estos datos son correctos debido a que estos valores no sobrepasan el polígono rectangular de la suela del pie que sirve de apoyo simple a la hora de calcular el ZMP como se ha explicado en el punto 4.3.1.

PROBLEMÁTICA ENCONTRADA Y SOLUCIÓN IMPLEMENTADA:

El principal problema encontrado en los FSR ha sido la falta de precisión de los sensores a la hora de transmitir los datos y el posterior error cometido en el cálculo del peso del robot y el ZMP. Después de realizar las pruebas oportunas que se han comentado en el apartado 5.1, se observó que estas medidas no eran en absoluto válidas. Así que se procedió como se cita a continuación.

Como se puede apreciar en la Figura 69, los sensores tienen forma circular y sobre ellos hay pegados unos tacos cilíndricos de material gomoso con los que presiona sobre el sensor FSR. Estos tacos cilíndricos son otro tema a tener en cuenta, debido a que un taco de cada pie resultaba estar situado casi fuera del área de contacto del FSR, produciendo un valor erróneo en la medida en consecuencia a que no se estaba aprovechando el área eficaz del sensor [19], que es el área interna del círculo. Esto se solucionó despegando y volviendo a pegar justo encima del área de contacto. Aun habiendo realizado esta modificación, las pruebas de medida no mejoraban, por lo que se decidió proceder con la búsqueda el fabricante de los sensores.

La marca de los sensores es FlexiForce y en el anexo 8.4 se adjunta el manual del sensor en el que se detallan las características, las aplicaciones, el método de calibración y los problemas que pueden aparecer como pueden ser la histéresis o la saturación. Del manual lo que sobretodo interesa es el comportamiento del sensor a la hora de aplicarle diferentes pesos, mostrado a continuación mediante una curva de resistencia y otra de conductancia respecto a una Fuerza en [N].

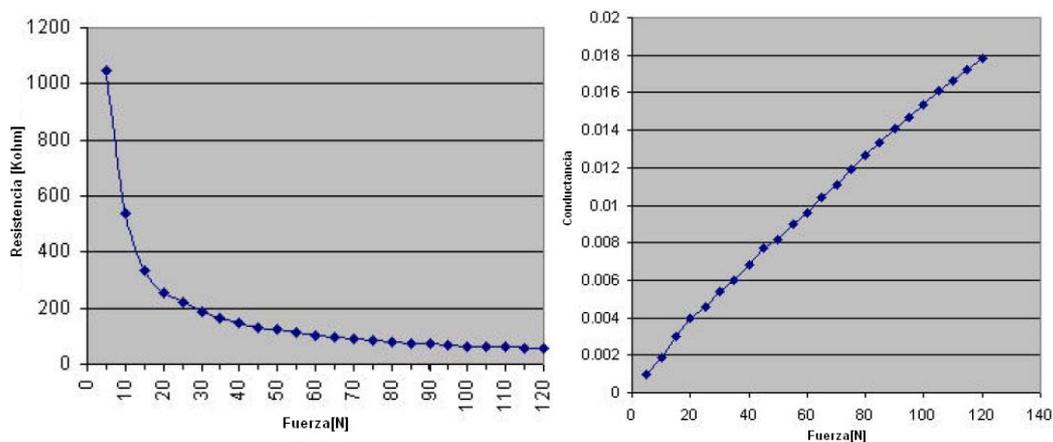


Figura 82. Curvas de resistencia (izquierda) y conductancia (derecha)

Como se puede observar, en la gráfica de la conductancia, el comportamiento es prácticamente lineal con pendiente positiva. Esta será la gráfica de muestra que se tendrá que obtener de la calibración.

Otro problema que se presentó fue la necesidad de crear una plataforma con la que poder bloquear el robot y realizar medidas exactas del peso que soportaban los sensores. Se decidió entonces por inmovilizar en un primer momento el tobillo del robot como se aprecia en la Figura 83:

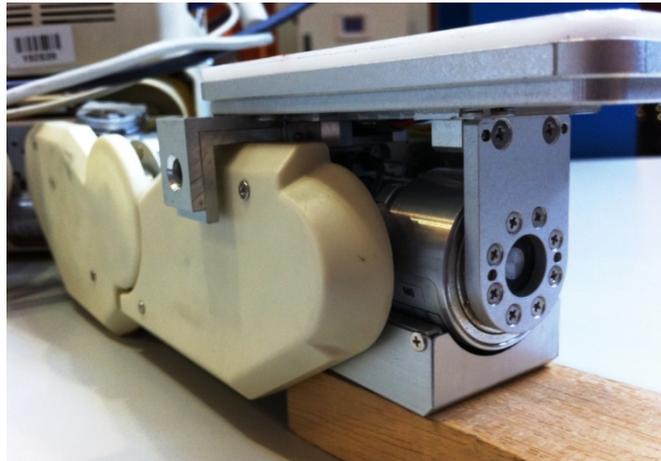


Figura 83. Bloqueo de tobillo con listón de madera y pieza metálica

Esta forma de bloquear el tobillo podría haber sido válida para realizar una o dos medidas de los sensores, pero no era apropiada para esta calibración, debido a que se tenían que realizar muchas medidas, y además no era lo suficientemente estable como para soportar el peso del pie del robot además de los 8 kg de pesas que se necesitaban para completar el método de calibración explicado en el punto 5.1. Así que se buscó una solución a este problema, que fue la de inmovilizar el tobillo sujetando éste a un tornillo de mesa.

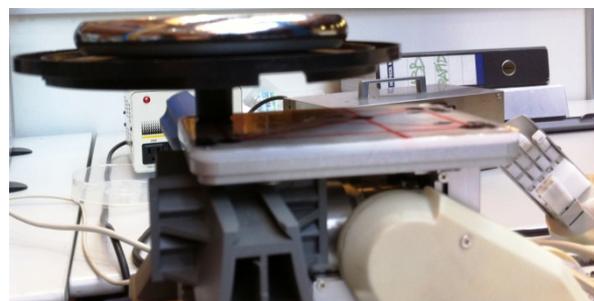


Figura 84. Bloqueo de tobillo con tornillo mecánico de mesa y ejemplo de sujeción de pesas

Esta forma de bloqueo ilustrada en la Figura 84, es más sofisticada que la mostrada en la Figura 83, evitando ese problema de estabilidad. Pero aparte de ser una herramienta válida para calibrar el pie derecho por completo, seguía sin convencer debido a la imposibilidad de realizar lo siguiente:

CAPÍTULO 5: PUESTA en marcha de los sensores

- Conseguir colocar el pie izquierdo con la misma inclinación y punto de apoyo con que se había colocado previamente el pie derecho.
- Repetir la calibración para un punto en concreto, por el hecho de haber percibido alguna anomalía en los datos obtenidos de ese punto.

Volviendo a la calibración, se tendría que repetir la calibración por completo aunque solamente fuese un punto el que descuadrara los datos.

Por esta razón se optó por fabricar una plataforma lo suficientemente estable y que pudiese aguantar el peso del tobillo del robot y los 8kg de peso máximo que tendrían que aplicarse sobre la suela durante la calibración. El diseño y uso de esta plataforma se detalla en el anexo 8.3.



Figura 85. Bloqueo de tobillo con plataforma y ejemplo de sujeción de pesas

Con esta plataforma finalmente se pudieron calibrar de forma correcta los sensores de ambas piernas, consiguiendo una lectura de datos con valores de error bastante bajos.

5.1.4. FSRs ubicados en las manos de HOAP3:

Para comprobar el estado de los sensores FSR de las manos se desmontó la palma de la mano para poder acceder a los sensores y verificar su fabricante. Una vez se comprobó que estos sensores eran el mismo modelo que los utilizados en los FSR de los pies, ya se sabía cómo proceder para su calibración.

Se comprobó que la calibración tan exhaustiva que se realizó para los FSR de los pies no era tan importante realizarla en estos FSR de las manos debido a varios motivos que se citan a continuación:



Figura 86. Anverso y reverso de la mano. Vista del sensor FSR y los actuadores de dedos

- Al ser un único sensor, el cálculo de la fuerza de agarre es directo, debido a que la fuerza es aplicada solamente en un punto de la mano, concretamente en el dedo pulgar.
- Como el robot no puede graduar la apertura y cierre de la mano, es decir solo tiene tres posiciones de la mano que son: abierta, intermedia y cerrada, no es tan crítico el valor de la fuerza que pueda tomar el sensor, ya que se puede deducir que ha atrapado un objeto cuando el valor proporcionado por el sensor es muy superior al proporcionado por ese sensor estando en reposo.

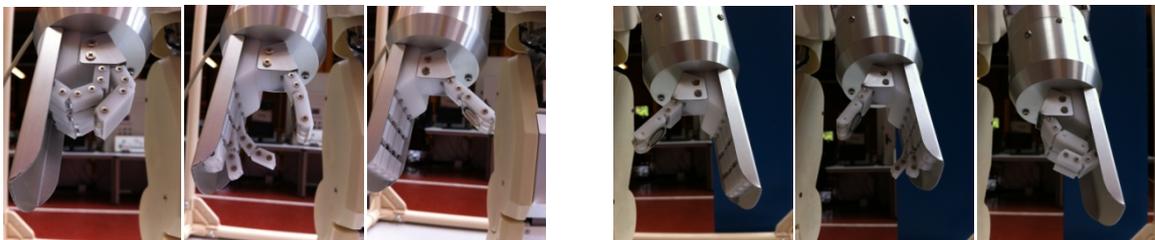


Figura 87. Secuencia de movimiento de las tres posiciones de las manos derecha e izquierda

Por estos motivos se optó por realizar varias medidas en las que se tomaría como valor de reposo, o valor mínimo, el proporcionado por el sensor cuando estuviese con la mano abierta y sin agarrar ningún objeto y el valor máximo se daría cuando agarrase el objeto. Se muestran en la Figura 88 algunos objetos que se utilizaron para realizar estas pruebas y determinar estos valores máximos y mínimos. Entre estos objetos, el mosquetón fue el que mejor mostraba esa variación de presión en el dedo pulgar, debido sobre todo a que se encontraba presionando toda la parte activa del sensor FSR. Esto no ocurría de igual manera para el caso de agarrar el disco o la taza, debido a que el dedo pulgar se introducía en el agujero de ambos objetos y en consecuencia no se apreciaba esa variación de fuerza con tanta claridad como para el mosquetón.

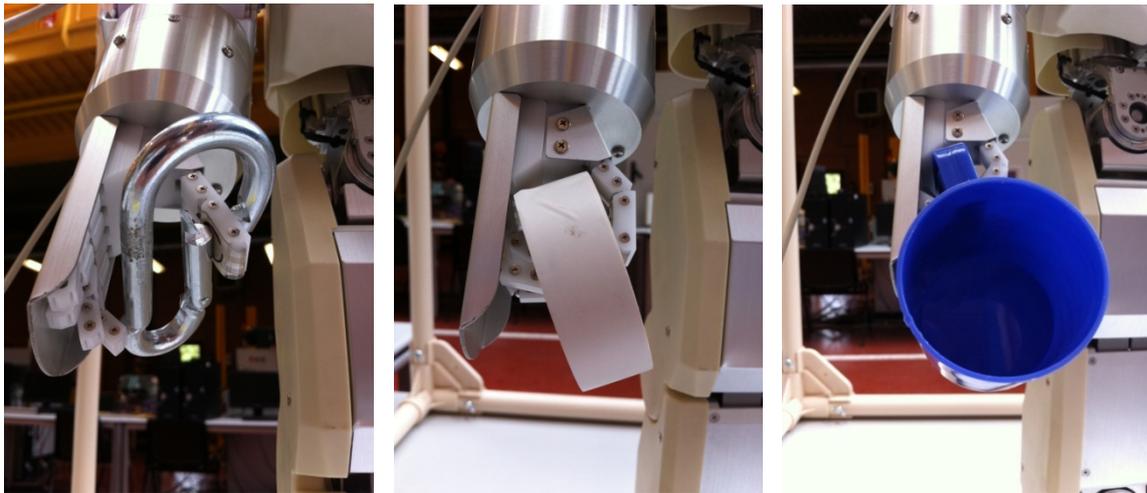


Figura 88. Diversos objetos agarrados por la mano derecha para calibración.

A continuación se adjuntan la gráficas obtenidas mientras el robot sostiene un mosquetón tanto con las mano derecha (Figura 89) como con la izquierda (Figura 90). De estas gráficas se han obtenido los valores mínimo y máximo de cada sensor FSR en el caso de estar el sensor en reposo o apretado por el mosquetón (Tabla 28). Las gráficas obtenidas para los otros objetos no se adjuntan, ya que no se aprecia con tanta exactitud los valores máximos y mínimos del sensor como para el caso de apretar el mosquetón.

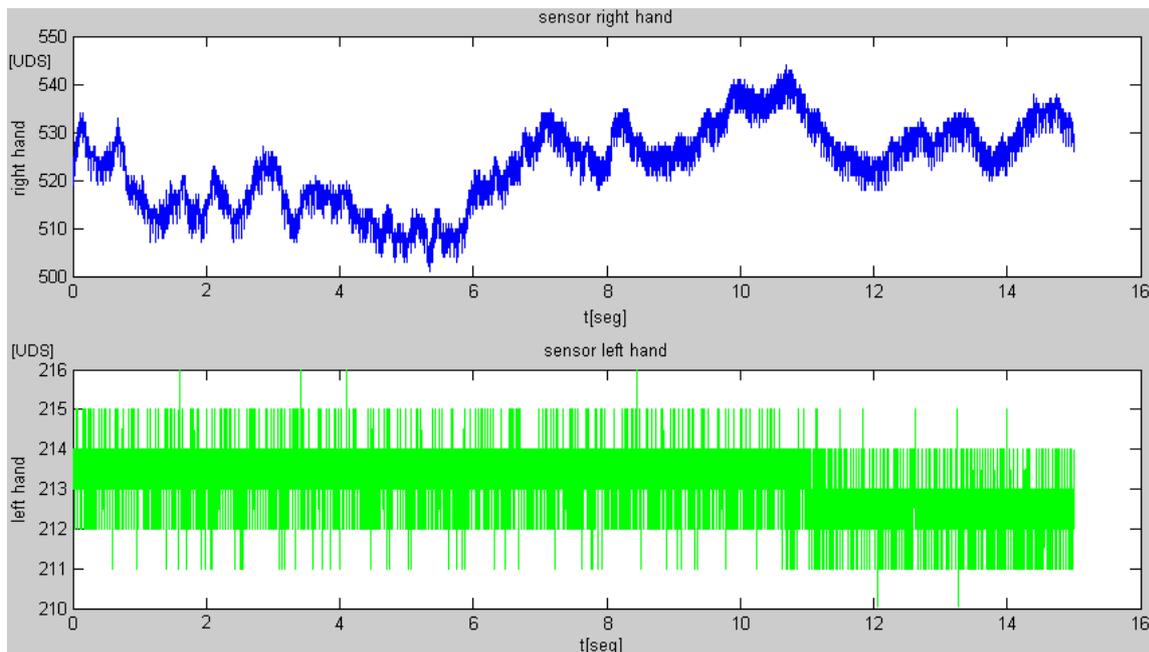


Figura 89. Valores FSR de manos con mosquetón en mano derecha y la mano izquierda abierta

Como se puede observar en ambas gráficas, la mano correspondiente a la que sujeta el mosquetón, presenta una oscilación de los valores producida por el punto de aplicación en el que se encuentra apretando el mosquetón. Al estar éste cerrado, en contacto directo con el sensor y colgando del dedo pulgar, el peso del mosquetón hace que se vaya escurriendo, y eso provoca esta variación de valores en las gráficas, existiendo una oscilación en los valores que proporciona el FSR.

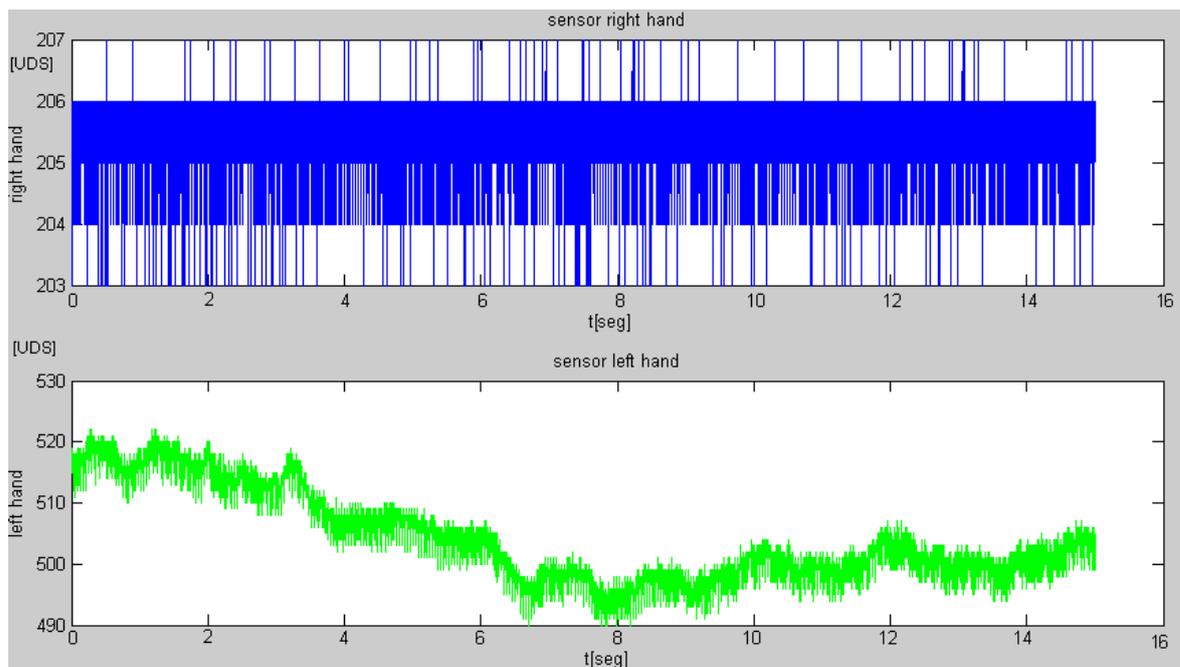


Figura 90. Valores FSR de manos con mosquetón en mano izquierda y la mano derecha abierta

Name	Min	Max	Range	Name	Min	Max	Range
left_hand	210	216	6	left_hand	490	522	32
right_hand	501	544	43	right_hand	203	207	4

Tabla 28. Valores FSR máximo y mínimo y variación de mano derecha e izquierda

PROBLEMÁTICA ENCONTRADA Y SOLUCIÓN IMPLEMENTADA:

Un problema a tener en cuenta para los FSR de las manos fue también el tema de la calibración de estos sensores, por estar situados sobre unas manos de material plástico aparentemente frágiles, no se pudieron calibrar de la misma forma que los FSR de los pies, debido a que no podrían soportar el peso de 8kg sobre ellos sin romperse. Se optó entonces por tomar el valor del dato de salida del sensor estando la mano cerrada y sin sostener objetos y otra medida con la mano cerrada y apretando un objeto. Con estos dos datos se calcularía el rango de valores entre los que oscilaría el sensor.

5.2. Giróscopo

5.2.1. Principio de funcionamiento

Junto a una brújula, un giróscopo es probablemente uno de los sensores de navegación más comunes. En muchos casos, cuando existe ausencia de campo magnético (en el espacio), o se ve alterado por la presencia de algunas interferencias, un giróscopo es indispensable para definir la posición de un vehículo. Un giróscopo, o giro para abreviar, es un “guardián de la dirección”, como el péndulo de un reloj es el “guardián del tiempo”.

El funcionamiento del giróscopo se basa en el principio fundamental del momento angular. En cualquier sistema de partículas, el momento angular total del sistema en relación a cualquier punto fijo en el espacio se mantiene constante, siempre y cuando no actúen fuerzas externas sobre el sistema.

5.2.2. Clasificaciones

5.2.2.1. Giróscopo rotor:

Un giróscopo mecánico se compone de un disco de masa libre que gira alrededor de un eje de giro (Figura 91) que está confinado dentro de un marco donde gira libremente alrededor de uno o dos ejes. Por lo tanto, dependiendo del número de ejes giratorios, los giróscopos pueden ser de uno o dos grados de libertad. La utilidad de estas dos cualidades con las que cuenta el giroscopio son las siguientes: (1°) El eje de giro de un giróscopo libre se mantendrá fijo con respecto al espacio, siempre y cuando no haya fuerzas externas que actúen sobre él, y (2°) un giróscopo puede crear y entregar un par (o señal de salida), que es proporcional a la velocidad angular de un eje perpendicular al eje de rotación.

Cuando la rueda (rotor) gira libremente, tiende a preservar su posición axial. Si la plataforma del giróscopo gira alrededor del eje de entrada, el giróscopo desarrolla un par motor en torno a un eje perpendicular (salida), convirtiendo así su eje de rotación alrededor del eje de salida. Cuando un par T se aplica sobre el eje de entrada, y la velocidad ω de la rueda se mantiene constante, el momento angular del rotor puede ser solo modificado por la proyección del eje de giro con respecto al eje de entrada, esto es, la velocidad de rotación del eje de giro sobre el eje de salida es proporcional al par aplicado,

$$T = I\omega\Omega, \quad (5.1)$$

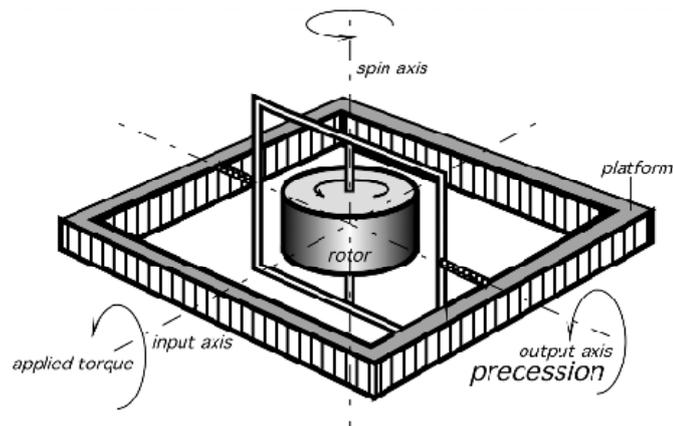


Figura 91. Giróscopo mecánico con un único grado de libertad

donde Ω es la velocidad angular alrededor del eje de salida y I es la inercia de la rueda del giróscopo sobre el eje de giro.

La precisión de los giróscopos mecánicos depende en gran medida de los efectos que pueden causar otros pares no deseados y derivas. Las fuentes de estos son la fricción, el rotor desequilibrado, los efectos magnéticos, etc. Un método que es ampliamente utilizado para minimizar la fricción del rotor es la eliminación del aire en suspensión del rotor y el motor sustituyéndose por un líquido viscoso, de alta densidad, como los fluorocarbonos. Este método requiere un control de temperatura cerca de los líquidos encerrados y también puede sufrir los efectos del envejecimiento. El otro método para reducir la fricción es el uso de los llamados cojinetes de gas, donde se apoya el eje del rotor con alta presión de helio, hidrógeno o aire. Una solución aún mejor es apoyar el rotor mediante un campo eléctrico (giróscopo electroestático). El giróscopo magnético consta de un rotor soportado por un campo magnético. En este caso, el sistema es criogénicamente enfriado a temperaturas donde el rotor se convierte en superconductor. Entonces, un campo magnético externo produce suficiente campo contrario en el interior del rotor que flota en el vacío. Estos giróscopos magnéticos también son llamados criogénicos.

5.2.2.2. Giróscopo de silicio monolítico

A pesar de que el giróscopo rotor fue la única opción práctica en muchos años, su principio de funcionamiento realmente no se presta al diseño de un pequeño sensor monolítico que es requerido por muchas aplicaciones modernas. Los giróscopos de rotor convencionales contienen piezas como cardanes, cojinetes de soporte, motores, y rotores que necesitan un mecanizado y montaje precisos; estos aspectos de construcción convencionales prohibían a los giróscopos mecánicos llegar a ningún dispositivo de bajo coste. El desgaste de los motores y cojinetes durante el tiempo de funcionamiento del giróscopo solamente cumplía con las especificaciones de rendimiento para un número determinado de horas de funcionamiento. Otros métodos para la detección de la dirección y velocidad han sido desarrollados. A menudo, un sistema de posicionamiento global (GPS) sería la opción ideal. Sin embargo, simplemente con cierta frecuencia no pueden ser empleados en el espacio, bajo el agua, o cuando el tamaño y el costo son de vital importancia. El uso de la tecnología micro-máquina MEMS permite el diseño de un giróscopo en miniatura, donde se sustituye el disco que gira con un elemento vibratorio.

El diseño se beneficia de las técnicas desarrolladas en la industria electrónica y es muy adecuado para grandes volúmenes de fabricación. Además, el giróscopo vibratorio es mucho más robusto y puede soportar los ambientes típicos militares y aeroespaciales. Todos los giróscopos de vibración se basan en el fenómeno de la aceleración de Coriolis. El efecto de Coriolis es una fuerza de inercia descrita en el siglo XIX por el ingeniero-matemático francés Gustave-Gaspard-Coriolis en 1835.

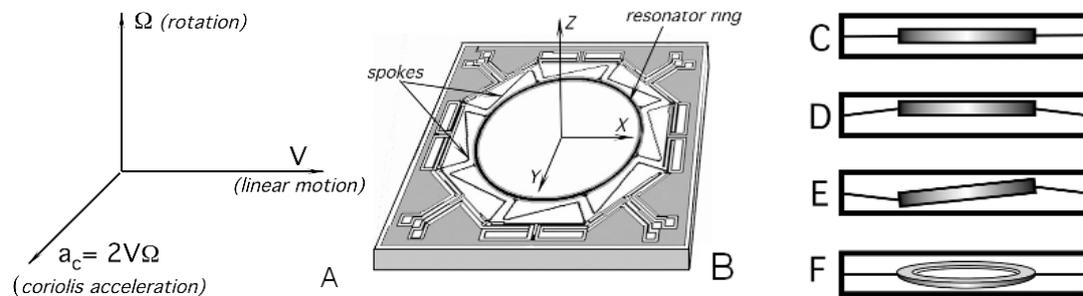


Figura 92. (A) Aceleración de Coriolis; (B) Estructura micro-mecanizada del anillo de vibración; (C-F) efectos de la aceleración en los modos de vibración del anillo

La aceleración de Coriolis de un cuerpo aparece siempre que el cuerpo se mueve de forma lineal en un marco de referencia que gira en torno a un eje perpendicular al del movimiento lineal. La aceleración resultante, que es directamente proporcional a la velocidad de giro, se produce en el tercer eje, que es perpendicular al plano que contiene a los otros dos ejes (Figura 92(A)).

En un giróscopo micro-mecánico, la rotación se sustituye por la vibración y la aceleración resultante puede ser detectada y relacionada con la velocidad del movimiento. En lugar de una masa siguiendo una trayectoria circular como ocurría en el giróscopo rotor, la masa puede ser suspendida y obligada a desplazarse linealmente en un movimiento armónico simple. Hay varias formas prácticas de construir un giróscopo de vibración, sin embargo, todos ellos se pueden dividir en tres grupos principales [23]:

- Oscilaciones simples (masa en una cuerda, vigas)
- Oscilaciones equilibradas (diapasones)
- Resonadores Shell (copa de vino, cilindro, anillo)

Las tres categorías se han implementado en los diseños actuales.

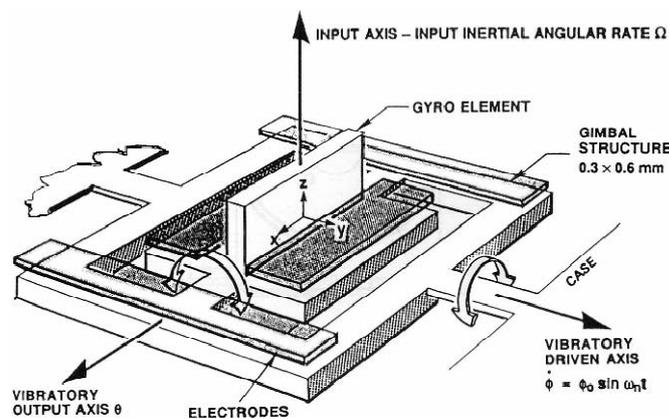


Figura 93. Concepto de giróscopo vibratorio (Ref [24])

Uno de los primeros dispositivos fue una estructura de dos cardanes soportada por pliegues de torsión (Figura 93). Este era débil y libre de movimiento en el área activa. En funcionamiento, el cardán externo, o “motor”, es conducido a una amplitud constante de torsión electrostática usando electrodos colocados en sus proximidades. Este movimiento oscilatorio se transfiere al cardán interior sobre el eje rígido de la flexión interna, creando un vector momento oscilante con el elemento inercial. En presencia de una velocidad angular de rotación perpendicular al plano del dispositivo, la fuerza de Coriolis hará que el interior del cardán oscile alrededor de su eje débil, con una frecuencia igual a la frecuencia de accionamiento y con una amplitud proporcional a la velocidad de la inercia de entrada. La máxima resolución se obtiene cuando el cardán externo es conducido a la misma frecuencia de resonancia del cardán interno. La lectura del movimiento de salida se logra mediante el establecimiento de los cambios diferenciales en la capacidad entre el cardán interno y un par de electrodos. Cuando se opera en un circuito abierto, el desplazamiento angular del cardán interno sobre el eje de salida es proporcional a la velocidad de entrada, es decir, el ángulo de salida Θ es proporcional al ratio de duración de inercia, el ángulo, ϑ_0 , la mecánica Q y la tasa de entrada Ω . Esto es inversamente proporcional a la frecuencia conductora ω_n :

$$\Theta = \left[\frac{I_x + I_y + I_z}{I_x} \right] \frac{\phi_0 \Omega Q}{\omega_n} \quad (5.2)$$

En una aplicación práctica, el dispositivo es usado en bucle cerrado y así el interior del cardán se reequilibra a cero en fase y en amplitud. Un detalle del giróscopo se puede encontrar en otro lugar [24].

Un diseño más reciente [25] está basado en un anillo de resonancia que es micro-mecanizado en el silicio. El silicio tiene notables propiedades mecánicas, en concreto, en su estado cristalino, el silicio tiene un límite de fractura de 7GPa, que es superior a la mayoría de los aceros. Junto con esto está su baja densidad de 2330 kg/m³, resultando un material muy robusto para su bajo peso. El giróscopo resonador está formado a partir de material cristalino. Esto asegura que las propiedades del resonador sean estables a lo largo de su vida. La estructura del anillo vibrador tiene todas las energías vibratorias en un solo plano. Como tal, en virtud de la velocidad angular, no hay acoplamientos de las vibraciones de un cristal sobre el otro, de modo que los parámetros de vibración son muy estables sobre la temperatura.

Para que el resonador funcione correctamente, debe estar soportado sobre un apoyo que le permita vibrar lo más libremente posible. El elemento sensor se muestra en la Figura 92 (B). El resonador consta de un anillo de silicona de 6mm, soportado por ocho radios radiales, que se anclan a un marco de soporte de 10x10mm.

Los conductores portadores de corriente son depositados y estampados sobre una única superficie, y los pads de unión de los cables se encuentran situados en el maco del soporte externo. El chip está anódicamente unido a una estructura de vidrio y a la misma temperatura que el silicio. Hay ocho bucles de conducción idénticos, cada uno de ellos sigue el mismo patrón: conexión al pad \rightarrow a lo largo de la longitud de la pata de apoyo \rightarrow alrededor de 1/8 de segmento del anillo \rightarrow a lo largo de la longitud de la pata de apoyo siguiente \rightarrow conexión al pad. Cada pata por lo tanto, contiene dos conductores, uno de los bucles adyacentes, además de un tercer conductor, que se encuentra entre ellos, para minimizar el acoplo capacitivo. La Figura 92 (C - F) muestra los efectos de la aceleración lineal y angular en el resonador. La Figura 92 (C) muestra una vista lateral del resonador

en condiciones de no aceleración la Figura 92 (D) muestra el efecto de la aceleración lineal en el eje Z, la Figura 92 (E) muestra el efecto de la aceleración angular alrededor del eje X, y la Figura 92 (F) muestra el efecto de la aceleración angular alrededor del eje Y. Debido a los cambios de posición del anillo respecto del marco, lo que se requiere es una combinación de transductores de recogida de desplazamiento para detectar el movimiento particular del resonador.

5.2.2.3. Giróscopos ópticos

El desarrollo moderno de los sensores para aplicaciones de guiado y control se basa en el empleo del llamado efecto Sagnac, que se ilustra en la Figura 94 [26]. Dos haces de luz generada por un laser se propagan en direcciones opuestas dentro de un anillo óptico con índice de refracción n y radio R . Un rayo va en la dirección del sentido horario (CW) y el otro va en la dirección del sentido antihorario (CCW). La cantidad de tiempo que tarda la luz en los viajes dentro del anillo es $\Delta t = \frac{2\pi R}{nc}$ donde c es la velocidad de la luz. Ahora supongase que el anillo gira con velocidad angular Ω en la dirección de las agujas del reloj. En ese caso, la luz recorre caminos diferentes en dos direcciones. El haz CW viajará $l_{CW} = 2\pi R + \Omega R \Delta t$ y el haz de luz CCW viajará $l_{CCW} = 2\pi R - \Omega R \Delta t$. Por lo tanto la diferencia entre ambos caminos es:

$$\Delta l = \frac{4\pi\Omega R^2}{nc} \quad (5.3)$$

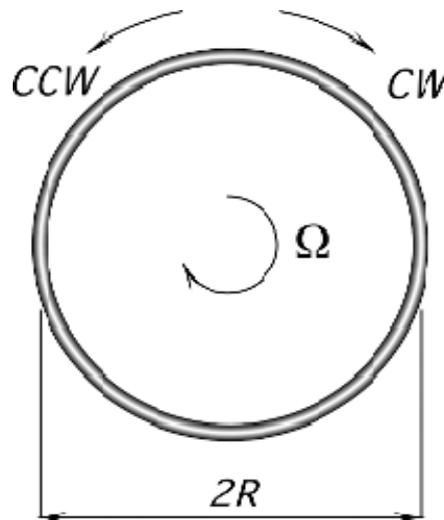


Figura 94. Efecto Sagnac

Por lo tanto, para medir con precisión Ω , una técnica que debe ser desarrollada es la de determinar Δl . Existen tres métodos básicos conocidos para la detección: (1) resonadores ópticos, (2) interferómetros de lazo abierto, e (3) interferómetros de lazo cerrado.

Para el giróscopo láser de anillo, las mediciones de Δl se hacen tomando ventaja de las características laser de una cavidad óptica (es decir, de su capacidad coherente de producir luz). Para que la emisión laser se produzca en una cavidad óptica cerrada, debe haber un número entero de longitudes de onda sobre el anillo completo. Los

rayos de luz que no cumplan esta condición, interferirán entre ellos ya que posteriormente pasarán por la misma vía óptica. Con el fin de compensar un cambio en el perímetro debido a la rotación, la longitud de onda λ y la frecuencia ν de la luz debe ser:

$$-\frac{d\nu}{\nu} = \frac{d\lambda}{\lambda} = \frac{dl}{l} \quad (5.4)$$

La ecuación (5.4) es una ecuación fundamental que relaciona el cambio de frecuencia, longitud de onda, y el perímetro en el anillo láser. Si el anillo láser gira a una velocidad Ω , entonces la ecuación (5.3) indica que se extienden las ondas de luz en una dirección y se comprimen en otra dirección para cumplir los criterios para la emisión láser de un número entero de longitudes de onda sobre el anillo. Esto, a su vez, se traduce en una diferencia de frecuencia de la red entre los haces de luz. Si los dos haces están un poco juntos (mixto), la señal resultante tendrá una frecuencia que es:

$$F = \frac{4A\Omega}{\lambda nl} \quad (5.5)$$

Donde A es el área encerrada por el anillo.

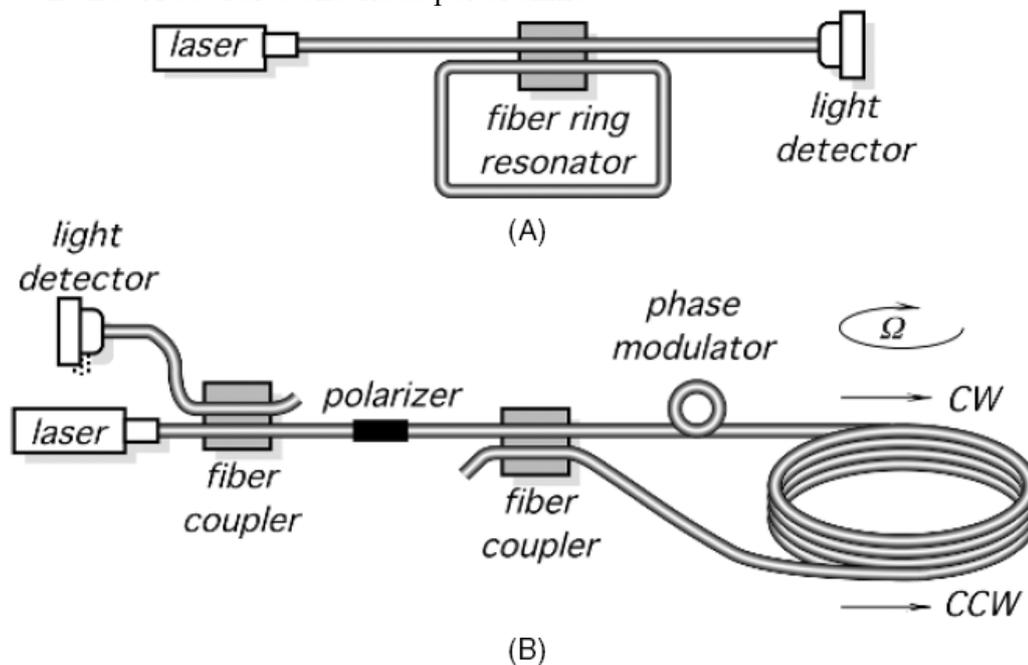


Figura 95. (A) anillo resonador de fibra óptica; (B) Giróscopo con bobina analógica de fibra óptica

En la práctica los giróscopos ópticos están diseñados ya sea con un anillo de fibra resonador, o una bobina de fibra donde el anillo tiene muchas vueltas de fibra óptica [27].

El resonador de fibra es el mostrado en la Figura 95 (A). Cuando el haz incidente está en la frecuencia de resonancia del anillo de fibra, las parejas de luz en la cavidad de fibra y la intensidad de la salida de luz disminuyen.

El giróscopo con bobina de fibra óptica de la Figura 95 (B) contiene una fuente de luz y un detector acoplado a la fibra. El polarizador de luz se coloca entre el detector y el segundo acoplador para asegurarse de que el contador de propagación de los dos haces

recorren el mismo camino en la bobina de fibra óptica [28]. Los dos haces se mezclan e inciden en el detector, que controla los cambios de intensidad sinusoidal causados por cambios de fase inducidos por rotación de los haces. Este tipo de giróscopo óptico proporciona un costo relativamente bajo, de pequeño tamaño, sensibilidad de rotación con un rango dinámico de hasta 10.000. Entre las aplicaciones se incluyen la orientación y las mediciones de campo, la estabilización de la altitud, y la brújula giroscópica. Una ventaja muy importante del giróscopo óptico es su capacidad de operar en ambientes hostiles en los que sería difícil, si no imposible, para los giróscopos mecánicos.

5.2.3. Giróscopo en HOAP3

Los pasos que se han seguido para calibrar los giróscopos han sido parecidos a los efectuados para las calibraciones anteriores.

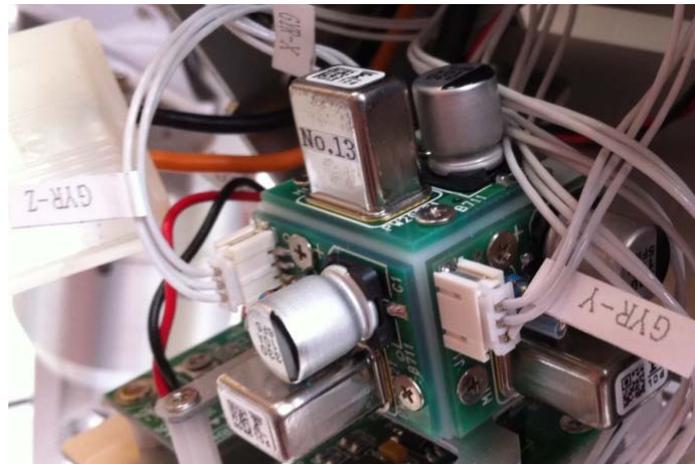


Figura 96. Vista de los giróscopos

Primero se tomaron datos de los sensores mientras el robot estaba en reposo, es decir, colgado y en una posición lo más vertical posible y después fueron comparados con los datos que aparecen en el documento “PostureSensor”, dentro de la hoja llamada “Gyro” que se incluye en el CD del robot.

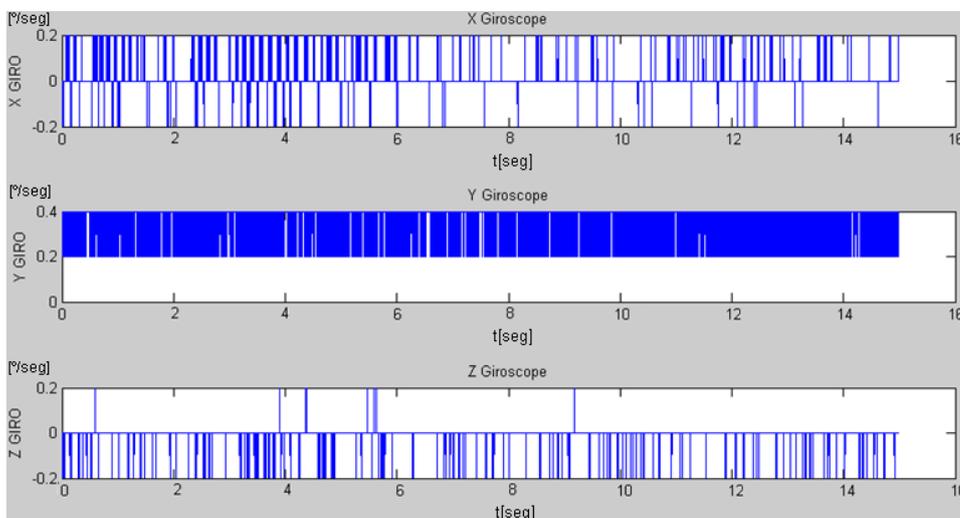


Figura 97. Valores de ejes X, Y, Z del giróscopo con motores apagados y robot colgado

Una vez comparados estos datos (Figura 97) y vistos que eran diferentes a los de la hoja de cálculo, lo que se hizo fue variar el punto de offset, es decir, variar el ajuste del punto cero [V] de la siguiente manera:

- Se tomaron los valores de los tres ejes X, Y, Z del giróscopo estando el robot estático, colgado y en posición vertical.
- Estos valores se sustituyeron en las casillas Q[3], Q[4], Q[5] según fuesen las lecturas de los ejes X, Y y Z respectivamente.
- Teniendo en cuenta que los datos “Sensibilidad en la Velocidad del ángulo [V/deg/s]” y “Ganancia del circuito [LSB/v]” proporcionados por el fabricante fuesen correctos, se tendría que conseguir un resultado de cero en las variables D[x], D[y], D[z], que serán el resultado de la medida expresada en unidades de [°/seg]. Esto se consiguió dando diferentes valores a la variable “Ajuste del punto cero P(V)”, que a su vez modificará el valor de la variable “Ajuste del punto cero P(LSB)” que posteriormente se llamará S[3], S[4], S[5]. Las fórmulas para conseguir obtener las unidades de [°/seg] partiendo del valor que nos proporciona nuestro sensor para cada eje serán:

$$D[x] = (Q[3] - S[3]) \times B[3] \quad (5.6)$$

$$D[y] = (Q[4] - S[4]) \times B[4] \quad (5.7)$$

$$D[z] = (Q[5] - S[5]) \times B[5] \quad (5.8)$$

Una breve explicación de las fórmulas anteriores sería la siguiente: se resta el valor de offset (S[]) al valor que nos proporcione el sensor (Q[]) para posteriormente multiplicarlo por un parámetro de corrección del error (B[]) que viene determinado por el fabricante de los sensores.

A continuación se comprobaría el valor de ruido que provocan los motores estando encendidos. Estos valores de ruido se aprecian en la Figura 98 y como se puede ver, son causa directa de alguna oscilación producida por la vibración de los motores al estar el robot colgado sobre la jaula mediante un arnés. También se aprecia que no es un error muy elevado, además de ir disminuyendo a medida que el balanceo del robot va desapareciendo.

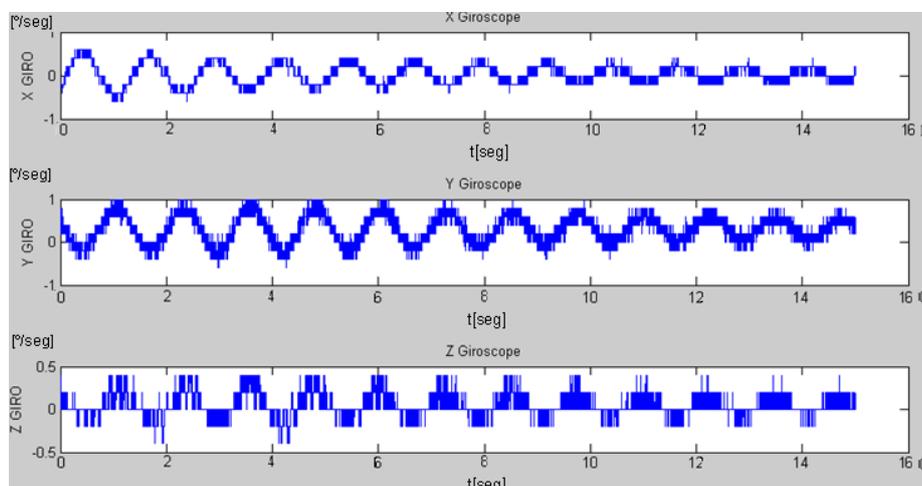


Figura 98. Valores de ejes X, Y, Z del giróscopo con motores encendidos y robot colgado

Todos estos parámetros, fórmulas y errores calculados mediante el documento de excel, habrá que tenerlos en cuenta a la hora de programar las trayectorias del capítulo 6, debido a que estos serán los nuevos parámetros por defecto que se encargarán de facilitarnos una lectura correcta de la velocidad angular por segundo a la que se mueve nuestro robot en cualquiera de los tres ejes.

Teniendo en cuenta estos parámetros y modificándolos en el programa, se comprobaría el funcionamiento de los giróscopos con la trayectoria “walk” en la que el robot camina sobre una superficie lisa.

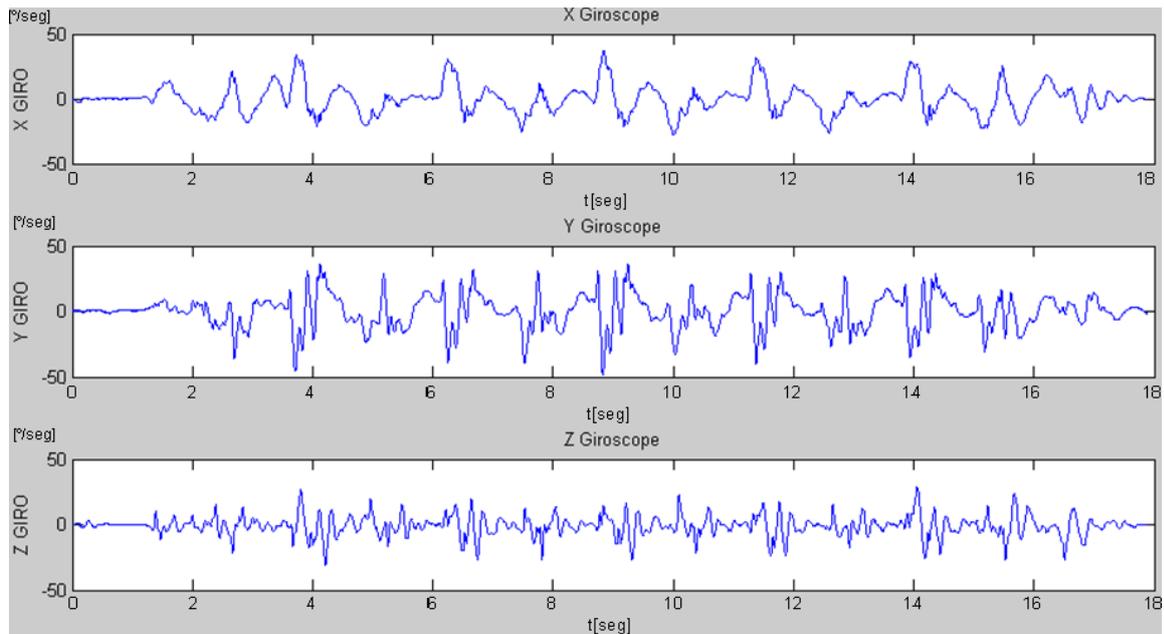


Figura 99. Valores de ejes X, Y, Z del giróscopo con robot caminando sobre el suelo con motores encendidos

Como se detalla en la Figura 99, los valores mínimos y máximos entre los que oscila el giróscopo son -40 y 40 [°/seg] y carecen de ruido exterior. Por otra parte, el valor de offset del giróscopo es cualquier eje es de cero, ya que cuando el robot comienza y termina el movimiento, está estático y el valor que proporciona en ese momento el giróscopo es de cero.

PROBLEMÁTICA ENCONTRADA Y SOLUCIÓN IMPLEMENTADA:

Las pruebas realizadas con estos sensores estando el robot estático y en posición vertical parecían a simple vista que eran malas, debido a los valores dispersos que tomaban los datos estando el robot colgado. Esto incitó a recopilar información del manual del robot, en el que se refería a la hoja Excel llamada “PostureSensor” y donde se encontró que la señal de cada eje se emitía a una frecuencia de 10Hz. Así que se decidió graficar estos datos en matlab para saber lo que sucedía:

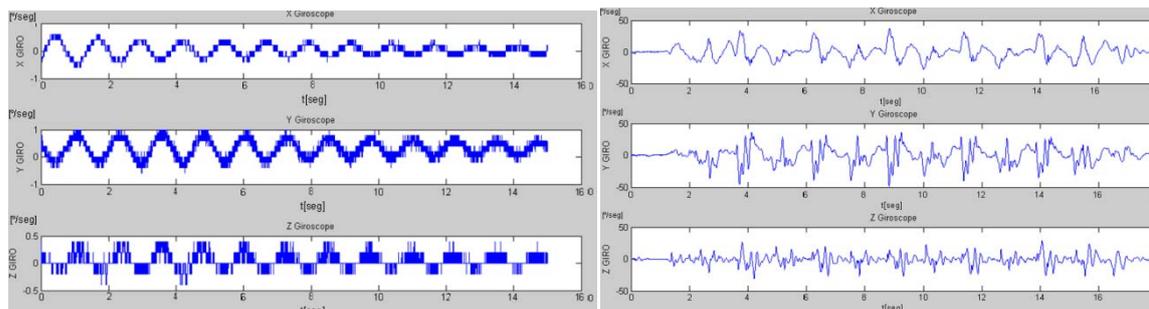


Figura 100. Graficado con Matlab de los valores del giróscopo

En la gráfica de la izquierda se puede apreciar una oscilación de los valores proporcionados por los giróscopos en cualquiera de los tres ejes, con el robot colgado. Al ser un movimiento de giro con unos valores muy pequeños, con máximos puntuales y del orden de $0,5$ [°/seg] se puede decir que son debidos al cabeceo del robot al estar colgado en la jaula.

La gráfica de la derecha corresponde a una trayectoria de movimiento llamada “walk.sh” en la que se aprecia una oscilación mucho mayor que la anterior donde se llegan a obtener datos mínimos y máximos comprendidos entre -40 y 40 [°/seg] respectivamente.

En conclusión, los datos proporcionados por los giróscopos una vez calibrado el punto cero eran correctos y carecían de ruido, por lo que no hubo ningún problema a posteriori con la captura y procesado de estas señales.

5.3. Acelerómetro:

5.3.1. Principio de funcionamiento

La aceleración es una característica dinámica de un objeto, ya que, según la segunda ley de Newton, esencialmente requiere de una fuerza. En efecto, la posición, velocidad y aceleración están relacionadas. La velocidad es una primera derivada de la posición y la aceleración es la segunda derivada. Sin embargo, en un ambiente ruidoso, estas derivadas pueden dar lugar a errores muy altos, incluso aún si son empleados sofisticados y complejos circuitos de acondicionamiento de señal. Por lo tanto la velocidad y la aceleración no se derivan de los detectores de posición, sino más bien son medidos por sensores especiales.

La velocidad (velocidad o velocidad de movimiento) puede ser lineal o angular, es decir, que muestra qué tan rápido se mueve un objeto a lo largo de una línea recta o la rapidez con que gira. La medida de la velocidad depende de la escala de un objeto y se puede expresar, por ejemplo, en milímetros por segundo o en kilómetros por hora. En la actualidad, la velocidad de un objeto grande, sobretodo de un vehículo de tierra o agua, puede ser muy eficiente determinarla por un GPS (Sistema de Geo Posicionamiento Global) que funciona mediante la recepción de señales de radio de una serie de satélites de la Tierra y calcula el tiempo de retardo de las señales recibidas de un satélite, en comparación con los otros. Cuando la posición de un vehículo se determina con una tasa periódica, el cálculo de la velocidad no es un problema. Para otros objetos más pequeños y distancias más cortas, el GPS no es una solución. La detección de la velocidad de estos objetos requiere referencias diferentes. Una idea básica detrás de muchos sensores para la transducción de la velocidad o la aceleración es una medida de desplazamiento de un objeto con respecto a otro objeto de referencia que, en muchos casos, es una parte integral del sensor.

Muchos sensores de velocidad o aceleración contienen componentes que son sensibles a un desplazamiento. Por lo tanto los sensores de posición y desplazamiento descritos son las partes integrantes de los sensores de velocidad y acelerómetros. En algunos casos, sin embargo, los sensores de velocidad y acelerómetros no utilizan un transductor intermedio de desplazamiento, ya que sus movimientos pueden ser directamente convertidos en señales eléctricas. Por ejemplo, moviendo un imán a través de una bobina de alambre que induce un voltaje en la bobina de acuerdo a la ley de Faraday. Este voltaje es proporcional a la velocidad del imán y la intensidad del campo. Transductores de velocidad lineal utilizan este principio de inducción magnética, con un imán permanente y una bobina de geometría fija, por lo que la tensión de salida de la bobina es directamente proporcional a la velocidad relativa del imán en su rango de trabajo.

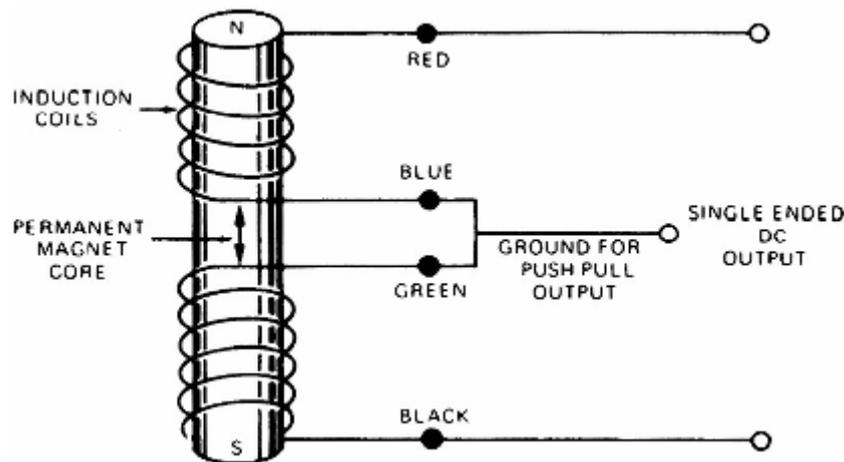


Figura 101. Principio de operación del sensor de velocidad electromagnético

En el sensor de velocidad, los dos extremos del imán se encuentran dentro de la bobina. Con una sola bobina, esto daría una salida de cero debido a la tensión generada por un extremo del imán que cancelaría la tensión generada en el otro extremo. Para superar esta limitación, la bobina se divide en dos secciones. El polo norte del imán induce una corriente en una bobina, y el polo sur induce una corriente en la otra bobina (Figura 101). Las dos bobinas están conectadas en una dirección opuesta en serie para obtener una salida proporcional a la velocidad del imán. La velocidad máxima detectable depende principalmente de las etapas de entrada del circuito electrónico de la interfaz. Las especificaciones típicas de un sensor electromagnético se dan en la Tabla 29.

Characteristic	Value
Magnet core displacement (in.)	0.5–24
Sensitivity (mV/in./s)	35–500
Coil resistance (k Ω)	2–45
Coil inductance (H)	0.06–7.5
Frequency response (Hz) (at load > 100 times the coil resistance)	500–1500
Weight (g)	20–1500

Source: Courtesy of Trans-Tek, Inc., Ellington, CT.

Tabla 29. Especificaciones típicas de los sensores de velocidad electromagnéticos

Este diseño es muy similar a un sensor diferencial variable de posición (LVDT), excepto que el LVDT es un sensor activo, con un núcleo ferromagnético en movimiento, mientras que el sensor de velocidad es un dispositivo pasivo, con un movimiento de imán permanente, es decir, este sensor es un dispositivo de generación de corriente que no necesita una señal de excitación. Naturalmente, los sensores de velocidad lineal detectan la velocidad a lo largo de una distancia que está limitada por el tamaño del sensor, por lo tanto, en la mayoría de los casos, estos sensores miden las vibraciones de la velocidad.

La vibración es un fenómeno dinámico mecánico que consiste en un movimiento periódico oscilatorio alrededor de una posición de referencia. En algunos casos (análisis de impacto, aceleración lineal, etc), el aspecto oscilante puede faltar, pero la medición y el diseño del sensor sigue siendo el mismo. Un acelerómetro se puede especificar como

un dispositivo de un solo grado de libertad que posee algún tipo de masa sísmica (a veces llamada masa de prueba), un resorte como sistema de apoyo, y un marco de estructura con propiedades de amortiguación.

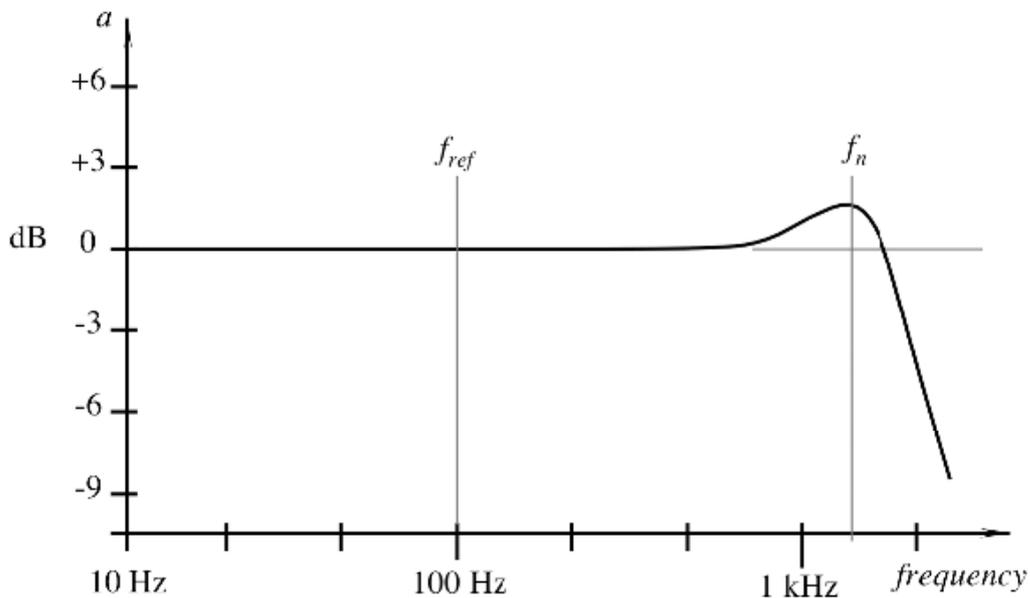


Figura 102. Respuesta de la frecuencia en un acelerómetro. f_n es la frecuencia natural y f_{ref} es la frecuencia de referencia.

Un acelerómetro [29] correctamente diseñado, instalado y calibrado debe tener una frecuencia de resonancia claramente identificable (natural) y una respuesta en frecuencia plana que pueda ser medida de forma precisa (Figura 102). Dentro de esta región plana, como la frecuencia vibratoria cambia, el sensor de salida deberá reflejar correctamente el cambio sin multiplicar la señal por ninguna de las frecuencias características del acelerómetro. El amortiguamiento viscoso se utiliza en muchos acelerómetros para mejorar el rango de frecuencia útil al limitar los efectos de la resonancia. Como medio amortiguador, es utilizado a menudo aceite de silicona.

Cuando se calibra, se deben determinar varias características del acelerómetro:

1°. La sensibilidad es la proporción de una salida eléctrica respecto de una entrada mecánica. Por lo general se expresa en términos de voltios por unidad de aceleración en las condiciones especificadas. Por ejemplo, la sensibilidad puede ser especificada como 1V/g (unidad de aceleración: $g=9,80665 \text{ m/s}^2$ a nivel del mar, latitud 45°). La sensibilidad se mide normalmente a una frecuencia de referencia única de forma de onda sinusoidal. En los Estados Unidos, es de 100Hz, y en la mayoría de los países europeos, es de 160Hz. (Estas frecuencias son elegidas porque eliminan las frecuencias de las líneas eléctricas y sus armónicos).

2°. La respuesta en frecuencia es la señal de salida en un rango de frecuencias donde el sensor debe ser operativo. Se especifica con respecto a una frecuencia de referencia, con la cual se especifica la sensibilidad.

3°. La frecuencia de resonancia en un sensor no amortiguado muestra un pico claramente definido que puede ser de hasta 3-4dB más alto que la respuesta de referencia.

En un dispositivo de amortiguamiento crítico cercano, la resonancia no puede ser claramente visible, por lo tanto el cambio de fase es medible. En la frecuencia de resonancia, es de 180° respecto de la frecuencia de referencia.

4°. Estímulo de salida cero (para sensores capacitivos y piezorresistivos) es especificado para la posición del sensor donde es sensible (activo), el eje es perpendicular a la gravedad de la tierra, es decir, en los sensores que tienen una componente de corriente continua en la señal de salida, los efectos gravitatorios deben ser eliminados antes de la salida, ya que no se determinará la energía mecánica.

5°. La linealidad del acelerómetro se especifica sobre el rango dinámico de las señales de entrada.

5.3.2. Clasificaciones

5.3.2.1. Acelerómetro capacitivo

Un acelerómetro requiere de un componente especial cuyo movimiento va rezagado respecto del encapsulado del acelerómetro, lo que se suma al objeto de estudio. Entonces, un transductor de desplazamiento se puede emplear para generar una señal eléctrica como una función, o una prueba de aceleración. Este componente es usualmente llamado ya sea sísmico o masa inercial. Independientemente del diseño de los sensores o la técnica de conversión, el objetivo último de la medición es la detección de los desplazamientos en masa con respecto al encapsulado del acelerómetro. Por lo tanto, cualquier transductor de desplazamiento apropiado será capaz de medir los movimientos microscópicos bajo fuertes vibraciones o aceleración lineal pudiendo ser usado en un acelerómetro.

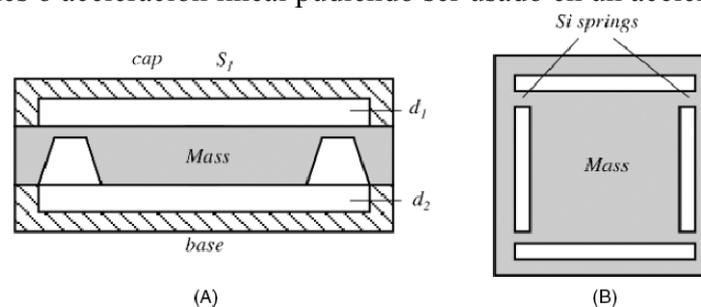


Figura 103. Acelerómetro capacitivo con diferente condensador. (A) Sección transversal. (B) Vista superior de una masa sísmica sostenida por cuatro resortes de silicio

La conversión de desplazamiento capacitivo es uno de los métodos probados y fiables. Un sensor de aceleración capacitivo contiene al menos dos componentes esenciales: La primera es una placa fija (es decir, conectada al encapsulado) y la otra es una placa adherida a la masa inercial, con libertad de movimiento dentro del encapsulado. Estas placas forman un condensador, cuyo valor es una función de distancia entre las placas. Se dice que el valor del condensador es modificado por la aceleración. El desplazamiento máximo que es medido por el acelerómetro capacitivo raramente supera los 20 micrómetros. Por lo tanto, como es un pequeño desplazamiento, requerirá de una compensación fiable de giros y variadas interferencias. Esto se logra generalmente mediante el uso de la técnica diferencial, donde se forma un condensador adicional en la

misma estructura. El valor del segundo condensador debe ser similar al primero y debe ser sometido a cambios de fase de 180°. Entonces, una aceleración puede ser representada por una diferencia de valores entre los dos condensadores. La Figura 103(A) muestra la sección transversal de un acelerómetro capacitivo, donde se intercala una masa interna entre la tapa superior y la base [30]. La masa es sostenida por cuatro soportes de silicio Figura 103 (B). La placa superior y la base están separadas de ella por distancias d_1 y d_2 respectivamente. Las tres partes fueron micro-mecanizadas en una oblea de silicio. La Figura 104 es un esquema simplificado de un convertor de capacidad a voltaje.

Las placas paralelas del condensador C_{mc} entre la masa y los electrodos tiene un área de placa S_1 . La separación entre placas d_1 se puede reducir una cantidad Δ cuando la masa se mueve hacia la placa superior. El segundo condensador C_{mb} tiene un área de placa S_2 diferente que aparece entre la masa y la base. Cuando la masa se mueve hacia la placa superior desde la base, el espacio d_2 incrementa un Δ . El valor de Δ es igual a la fuerza mecánica F_m que actúa sobre la masa dividida por la constante k de los resortes de silicio:

$$\Delta = \frac{F_m}{k} \quad (5.9)$$

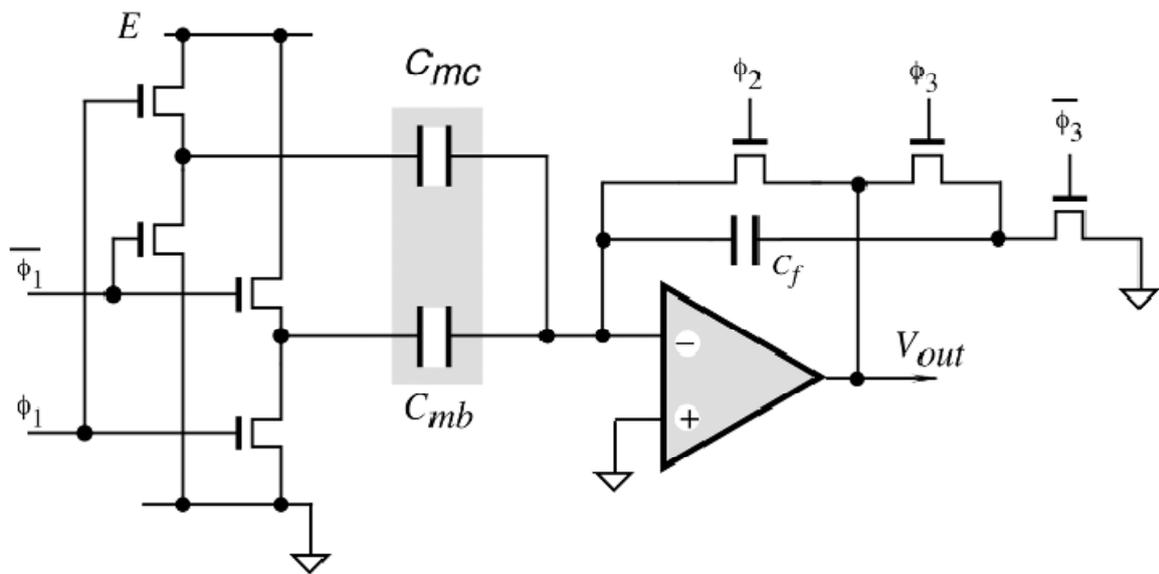


Figura 104. Esquema de un circuito convertidor de capacidad a tensión adecuado para integrarlo en silicio

Estrictamente hablando, el circuito equivalente del acelerómetro es válido sólo cuando las fuerzas electrostáticas no afectan a la posición de la masa (es decir, cuando los condensadores dependen linealmente de F_m) [31].

La salida del acelerómetro también es función de la temperatura y el desequilibrio capacitivo. Es recomendable que sean calibrados en un rango de temperatura y la corrección apropiada es durante el procesamiento de la señal.

5.3.2.2. Acelerómetro piezorresistivo

Como elemento sensor, un acelerómetro piezorresistivo incorpora medidores de tensión, que miden la tensión entre los apoyos y masa. La tensión puede estar directamente relacionada con la magnitud y la velocidad de desplazamiento de la masa y, posteriormente, con una aceleración. Estos dispositivos pueden detectar aceleraciones en un amplio rango de frecuencias: desde DC hasta 13kHz. Con un diseño adecuado, pueden soportar un overshock por encima de 10Kg. Naturalmente, el rango dinámico es algo menor ($\pm 1\text{Kg}$ con un error inferior al 1%). El overshock es una especificación crítica para muchas aplicaciones. Sin embargo, los acelerómetros piezorresistivos con indicadores discretos, unidos con epoxi depositado tienden a tener indeseables coeficientes de temperatura a la salida. Debido a que se fabrican por separado, los indicadores requieren pruebas térmicas individuales y parámetros correspondientes. Esta dificultad se elimina prácticamente en los sensores modernos, que utilizan la tecnología de micro-fabricación de obleas de silicio.

Un ejemplo de acelerómetro de estado sólido y con amplio rango dinámico se muestra en la Figura 105. Fue desarrollado por Endevco / Allied Signal Aerospace Co. (Sunnyvale, CA). El microsensar se fabrica a partir de tres capas de silicio. La capa interna, o núcleo, formado por una masa inercial y la bisagra elástica. La masa está suspendida dentro de un reborde grabado en la bisagra. El exterior de dos capas, la base y la tapa, protegen las partes móviles de la contaminación externa. Ambas partes tienen huecos para permitir que la masa inercial se mueva libremente [32]. Varias características importantes se han incorporado en el sensor. Una de ellas es que el eje se encuentra en el plano de la oblea de silicio, a diferencia de muchos otros diseños donde el eje es perpendicular a la lámina. Integridad y fiabilidad mecánica están aseguradas por la fabricación de todos los componentes del sensor con un cristal de silicio.

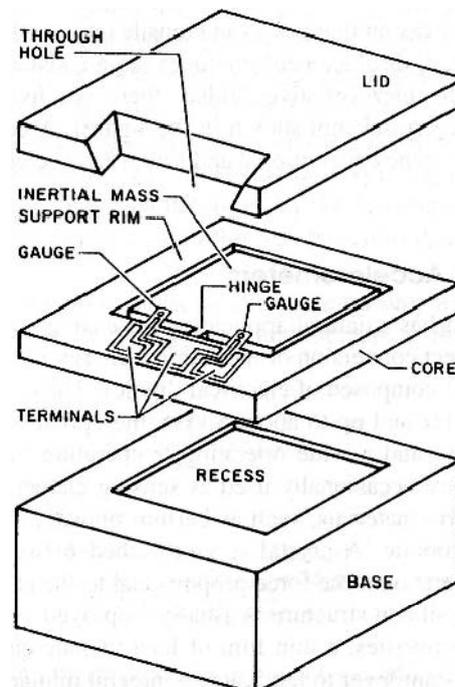


Figura 105. Vista de un acelerómetro piezorresistivo

Cuando la aceleración se aplica a lo largo del eje sensible, la masa inercial gira alrededor de la bisagra. Los medidores a ambos lados de la bisagra permiten la rotación de la masa para generar la tensión de compresión en un lado y de tracción en el otro. Debido a que los medidores son muy cortos, incluso el pequeño desplazamiento produce grandes cambios de resistencia. Para ajustar el balance de cero del puente piezorresistivo, hay cinco resistencias de corte situados en el mismo cristal (no se muestran en la Figura 105).

5.3.2.3. Acelerómetro piezoeléctrico

El efecto piezoeléctrico (no confundir con un efecto piezorresistivo) tiene una aplicación natural en la detección de vibración y aceleración. El efecto es una conversión directa de la energía mecánica en energía eléctrica en un material cristalino compuesto por dipolos eléctricos. Estos sensores operan en frecuencias tan bajas como 2Hz y hasta 5kHz; así poseen un buen rechazo al ruido, alta linealidad y un rango de temperaturas de funcionamiento (hasta 120°). A pesar de que los cristales de cuarzo se utilizan en ocasiones como elementos de detección, los más populares son materiales cerámicos piezoeléctricos, tales como el titanato de bario y titanato de plomo.

Un cristal se encuentra entre la carcasa y la masa sísmica que ejerce una fuerza proporcional a su aceleración (Figura 106). En los sensores en miniatura, la estructura de silicio es empleada generalmente. Porque el silicio no posee propiedades piezoeléctricas, una fina capa de titanato de plomo puede ser depositado en un voladizo micromecanizado de silicio para la fabricación de sensores integrados en miniatura. Para las características de buena frecuencia, una señal piezoeléctrica es amplificada por un convertidor carga-voltaje o corriente-voltaje que normalmente está integrado en la misma carcasa que el material piezoeléctrico.

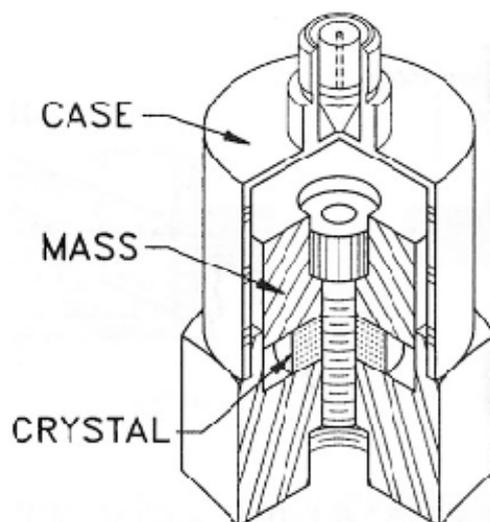


Figura 106. Esquema básico de un acelerómetro piezoeléctrico. La aceleración de la caja mueve relativamente la masa, que ejerce una fuerza sobre el cristal. La salida es directamente proporcional a la aceleración o el nivel de vibración.

5.3.2.4. Acelerómetro térmico

5.3.2.4.a) Acelerómetro de placa caliente

Porque la idea básica detrás de un acelerómetro es una medida de movimiento de la masa sísmica, la fórmula fundamental de transferencia de calor puede ser utilizada para esta medida. Un acelerómetro térmico, como cualquier acelerómetro, contiene una masa sísmica suspendida en un fino voladizo y se coloca en las proximidades de un disipador de calor o entre dos disipadores de calor (Figura 107) [33]. La masa y la estructura del voladizo se fabrican utilizando una tecnología de micromáquinas. El espacio entre estos dos componentes se llena de un gas conductor térmico. La masa se calienta por una superficie o un calentador incrustado a una temperatura T_1 definida. Por debajo de las condiciones de no-aceleración, el equilibrio térmico es estable entre la masa y los disipadores de calor: la cantidad de calor Q_1 y Q_2 conducido por el gas a través de los disipadores de calor desde la masa es función de las distancias M_1 y M_2 .

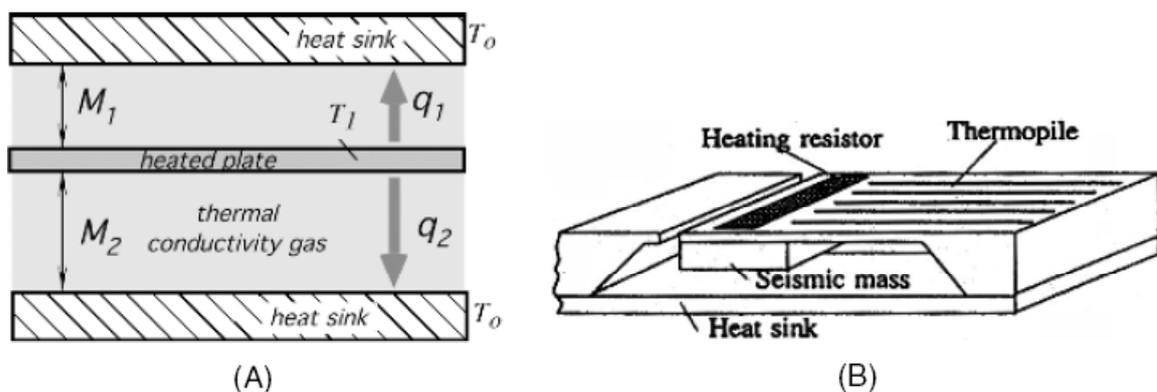


Figura 107. Acelerómetro térmico. (A) sección transversal de la parte calentada; (B) diseño de un acelerómetro (que se muestra sin tapar) (adaptado de [33])

La temperatura en cualquier punto del voladizo que sujeta la masa sísmica depende de su distancia desde el apoyo y los vacíos en los disipadores de calor. Para medir la temperatura, un sensor de temperatura puede ser depositado en el voladizo. Se puede hacer mediante la integración de los diodos de silicón en el rayo, o mediante la formación de termopares conectados en serie (una termopila) en la superficie del voladizo. Con el tiempo, la temperatura del haz se mide en forma de una señal eléctrica que es la medida de la aceleración.

La sensibilidad de un acelerómetro térmico (alrededor del 1% de cambio en la señal de salida por g) es algo menor que la de los tipos capacitivos como la piezoeléctrica, sin embargo, es mucho menos susceptible a las interferencias, tales como la temperatura ambiente o el ruido electromagnético y electrostático.

5.3.2.4.b) Acelerómetro de gas caliente

Otro acelerómetro interesante utiliza el gas como una masa sísmica. El acelerómetro de gas caliente (HGA) fue desarrollado por MEMSIC Corporation. Ha sido fabricado en un chip micromecanizado CMOS y posee un completo sistema de medición de movimiento de dos ejes. El principio de funcionamiento del dispositivo se basa en la transferencia de calor por convección forzada. La convección puede ser natural (causada por la gravedad) o forzada (mediante la aplicación de una fuerza externa artificial, como el producido por un ventilador). En un GHA, tal fuerza se produce por la aceleración. El sensor mide los cambios internos en la transferencia del calor del gas atrapado. El sensor es funcionalmente equivalente a la tradicional masa inercial de los acelerómetros. La masa inercial en el sensor es un gas que es térmicamente homogéneo: La masa inercial de gases ofrece algunas ventajas sobre el uso tradicional de una masa inercial sólida. La ventaja más importante es la supervivencia de un choque de hasta 50Kg, con lo que la tasa de fallo es significativamente menor. El sensor contiene un plato micromecanizado adyacente a una cavidad sellada y llena de gas. La placa tiene una cavidad grabada (trinchera). Una sola fuente de calor, centrada en el chip de silicio, se suspende sobre la trinchera (Figura 108). Equidistantes cuatro sensores de temperatura que son termopilas (TP) de aluminio / silicio policristalino (Es decir, termopares conectados en serie). Los TP están localizados equidistantes de los cuatro lados de la fuente de calor (doble eje). Tenga en cuenta que un TP mide sólo un gradiente de temperatura, de modo que las termopilas de izquierda a derecha son un solo TP, donde la parte izquierda es para la localización de “frío” y la de la derecha es la de las uniones “calientes”. Una termopila en lugar de un termopar se utiliza para un único objetivo: aumentar la señal eléctrica de salida. Otro par de uniones se utilizan para medir un gradiente térmico a lo largo del eje Y.

Por debajo de una aceleración de cero, la distribución de temperatura a través de la cavidad de gas es simétrica con respecto a la fuente de calor, de modo que la temperatura es la misma en los cuatro cruces de TP, haciendo que cada pareja dé a la salida un voltaje de cero. Le calentador se calienta a una temperatura que está muy por encima del ambiente y por lo general es cerca de 200°C.

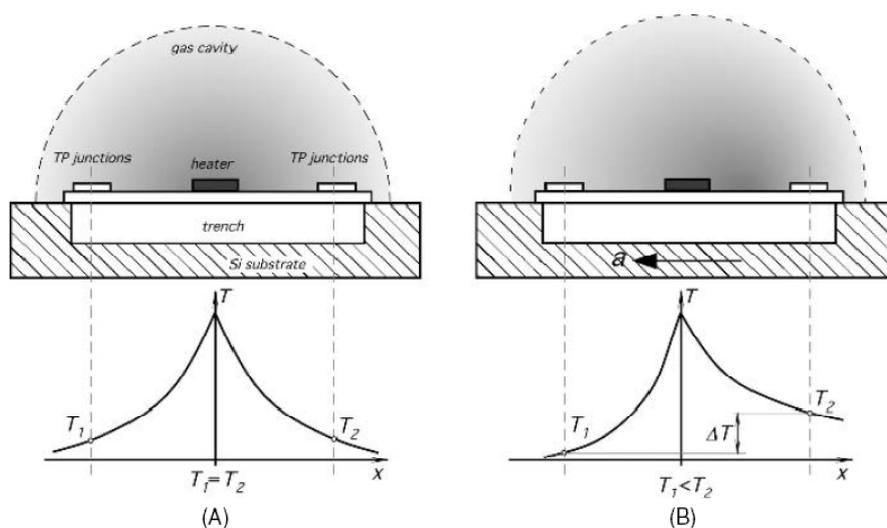


Figura 108. (A) Corte transversal a lo largo del eje x del sensor HGA. El gas caliente distribuye simétricamente el calor. (B) Aceleración provoca que el gas caliente se desplace a la derecha, dando lugar a un gradiente de temperatura.

La Figura 108 (A) muestra dos cruces de termopilas (PT) para la detección de un gradiente de temperatura a lo largo de un solo eje. El gas es calentado por lo que está más caliente cerca de la estufa y se enfriará más rápidamente hacia abajo, hacia los sensores de temperatura izquierdo y derecho (uniones de termopila). Cuando no actúa ninguna fuerza sobre el gas, la temperatura tiene una distribución cónica simétrica como en todo el calentador donde la temperatura T_1 en el TP de la izquierda es igual a la temperatura T_2 del TP de la derecha. La aceleración en cualquier dirección perturba el perfil de temperatura debido a una transferencia de calor por convección haciendo que sea asimétrica. La Figura 108 (B) muestra una aceleración en la dirección de la flecha. Bajo las fuerzas de la aceleración, las moléculas calientes de gas cambian hacia la derecha y TP transfiere una parte de su energía térmica a la misma. La temperatura, y por lo tanto voltaje, salidas de uniones TP opuestas serán diferentes, así que $T_1 < T_2$.

La diferencia de temperatura ΔT , y por lo tanto la tensión, en las salidas de la termopila se convierte en una aceleración que es directamente proporcional. Hay dos caminos idénticos de la señal aceleración en el dispositivo: una para medir la aceleración en el eje X y uno para medir la aceleración a lo largo del eje Y.

El HGA es capaz de medir aceleraciones con un rango de escala completa desde $\pm 1g$ hasta $\pm 100g$. Se puede medir la aceleración dinámica (por ejemplo, la vibración) y la aceleración estática (por ejemplo la gravedad). Cabe señalar que para un sensor de HGA, la salida es sensible al cambio de temperatura. El cambio de sensibilidad se muestra en la Figura 109. Para compensar el cambio, un sensor de temperatura incrustado (un detector de temperatura de resistencia o la unión de silicio) puede ser proporcionado en el chip.

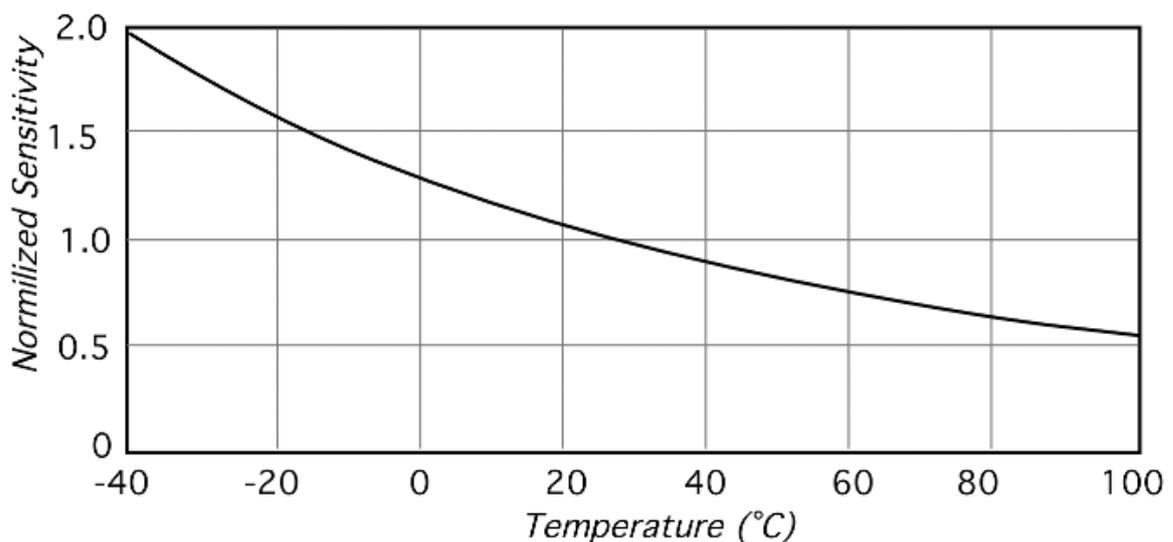


Figura 109. Sensibilidad del acelerómetro térmico (HGA) a temperatura ambiente

5.3.3. Acelerómetro en HOAP3

Los pasos que se han seguido para calibrar el acelerómetro han sido idénticos a los efectuado para la calibración de los giróscopos. Dado que ambos sensores comparten el mismo documento de calibración que lleva por nombre “PostureSensor”.

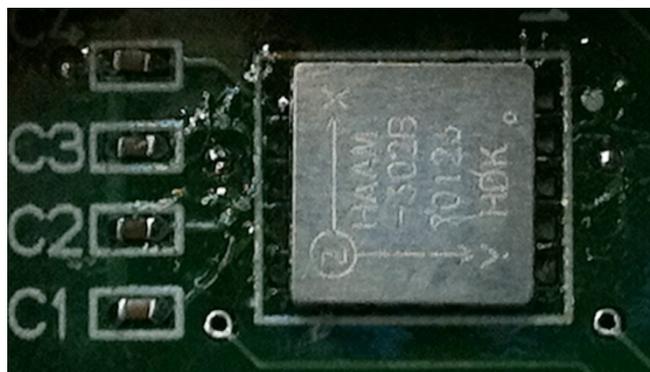


Figura 110. Vista del acelerómetro

Lo primero fue tomar datos de los sensores mientras el robot estaba colgado en la jaula en posición vertical (Figura 111), para luego compararlos con los datos que aparecen en este documento, dentro de la hoja llamada “accel” que se incluye en el CD del robot.

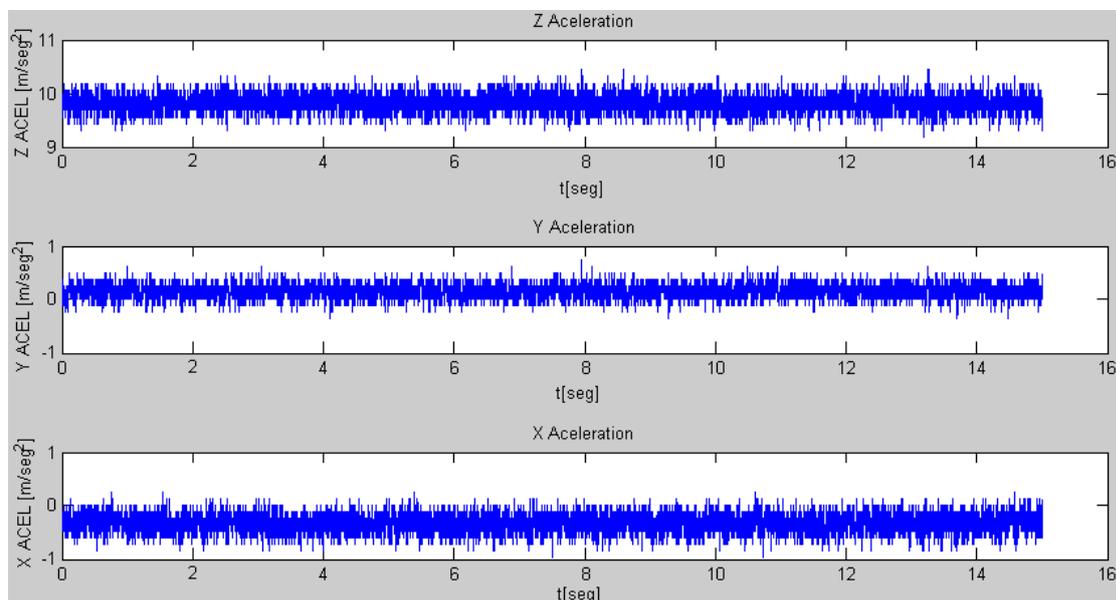


Figura 111. Valores de ejes X, Y, Z del acelerómetro con motores apagados y robot colgado

Una vez comparados estos datos y vistos que eran diferentes, lo se hizo fue variar el punto de offset, es decir, variar el ajuste del punto cero [V] de la siguiente manera:

- Se tomaron los valores de los tres ejes -Z, Y, X del acelerómetro estando el robot estático, colgado y en posición vertical.

- Estos valores se sustituyeron en las casillas Q[0], Q[1], Q[2] según fuesen las lecturas de los ejes -Z, Y y X respectivamente.
- Teniendo en cuenta que los datos “G Sensibilidad [V/(m/s²)]” y “Ganancia del circuito [LSB/v]” proporcionados por el fabricante fuesen correctos, se tendría que conseguir un resultado de cero en las variables D[x], D[y], D[z], que serán el resultado de la medida expresada en unidades de [m/s²]. Esto se consiguió dando diferentes valores a la variable “Ajuste del punto cero P(V)”, que a su vez modificará el valor de la variable “Ajuste del punto cero P(LSB)” que posteriormente pasará a llamarse S[0], S[1], S[2]. Las fórmulas para conseguir obtener las unidades de [m/s²] partiendo del valor que proporciona nuestro sensor para cada eje serán:

$$D[x] = (Q[2] - S[2]) \times B[2] + R[x] \quad (5.10)$$

$$D[y] = (Q[1] - S[1]) \times B[1] + R[y] \quad (5.11)$$

$$D[z] = -1 \times (Q[0] - S[0]) \times B[0] + R[z] \quad (5.12)$$

Una breve explicación de las fórmulas anteriores sería la siguiente: se resta el valor de offset (S[]) al valor que proporcione el sensor (Q[]) para posteriormente multiplicarlo por un parámetro de corrección del error (B[]) que viene determinado por el fabricante de los sensores, y a todo eso se le suma un valor R[] que será una aceleración por defecto que capta el acelerómetro dependiendo del eje, esto es, por ejemplo R[z] tendrá el valor de 9,81 [m/s²], equivalente a la fuerza de la gravedad, mientras que los valores por defecto de R[x] y R[y] serán de cero. Notar que la fórmula para el cálculo de la aceleración en el eje Z difiere en el signo negativo, debido a que en este eje se están tomando los datos en el eje Z negativo y es en la fórmula donde se corrige esto para que el signo del resultado sea el correcto.

Como también pasaba en los sensores FSR y giróscopo, todos estos parámetros, fórmulas y errores calculados mediante el documento de Excel, habrá que tenerlos en cuenta a la hora de programar las trayectorias objetivo, debido a que éstos serán los nuevos parámetros por defecto que se encargarán de facilitar una lectura correcta de la aceleración a la que se mueve nuestro robot en cualquiera de los tres ejes.

PROBLEMÁTICA ENCONTRADA Y SOLUCIÓN IMPLEMENTADA:

Este sensor aparentemente tenía peor calibración que el giróscopo, debido a que los valores que proporcionaba estando el robot colgado eran muy distantes de cero en el eje X e Y, además de que en el eje Z el valor se alejaba de 9,81 correspondiente a la fuerza de la gravedad. Se toma 9,81 como positivo debido a que el sensor está instalado con el eje Z invertido. Estos datos antes de la calibración también se graficaron con matlab, consiguiendo la siguiente gráfica:

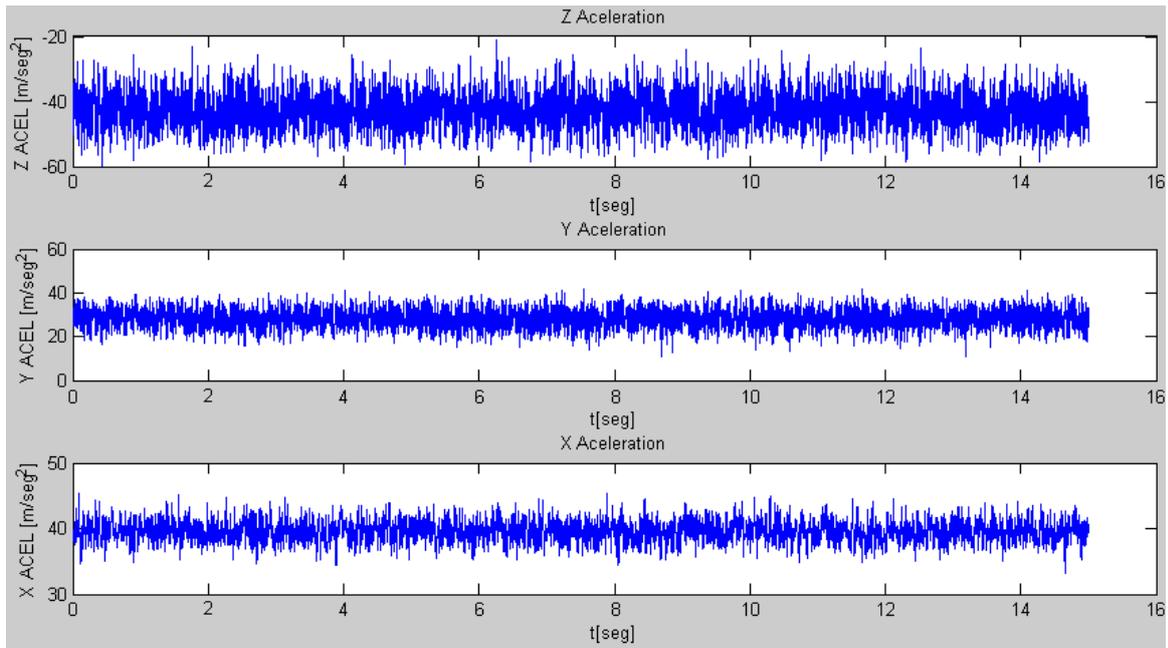


Figura 112. Valores de ejes X, Y, Z del acelerómetro con motores apagados y robot colgado, antes de la calibración

Posteriormente se realizó la calibración como ya se ha comentado y se obtuvieron las siguientes gráficas (Figura 113). En la gráfica de la izquierda se puede apreciar una oscilación de los valores proporcionados por el acelerómetro en cualquiera de los tres ejes, con el robot colgado y los motores apagados. Al ser una aceleración, aparecen valores próximos a cero en el eje X e Y además de un valor próximo a 9,81 en el eje Z. La variación de valores que se observa se podría decir que son debidos a una vibración del robot al estar colgado en la jaula.

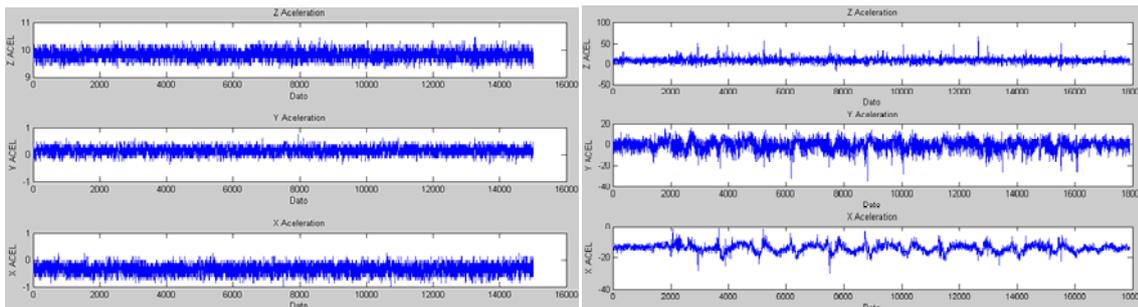


Figura 113. Graficado I con Matlab de los valores del acelerómetro

La gráfica de la derecha corresponde a una trayectoria de movimiento llamada “walk.sh” en la que se aprecia una perturbación en la señal donde se acopla el ruido de los motores. Este ruido se puede apreciar perfectamente en la Figura 114, en la que el robot está en las mismas condiciones que la gráfica de la izquierda de la Figura 113, pero esta vez con los motores encendidos.

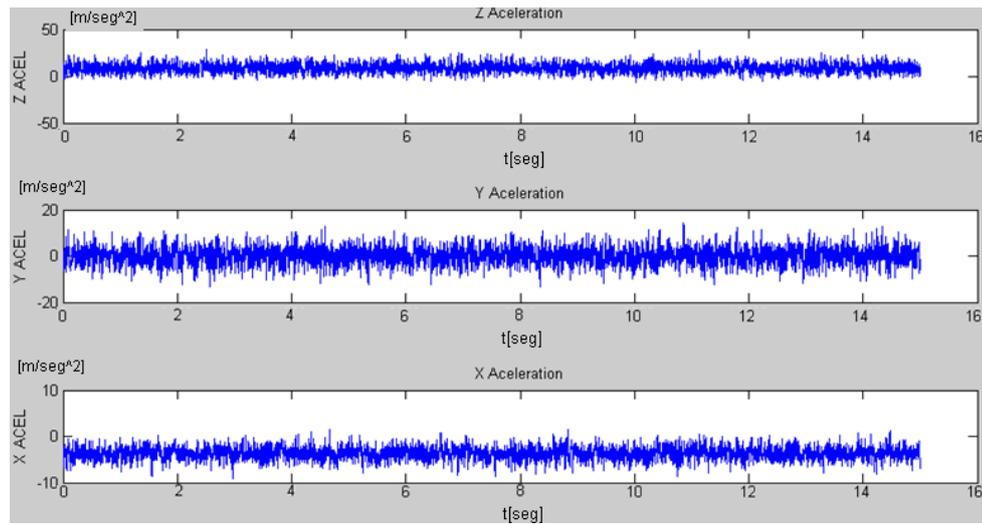


Figura 114. Graficado II con Matlab de los valores del acelerómetro

En conclusión, el principal problema ocasionado por este sensor era el ruido que se obtenía de él en el momento de encender los motores. Pero puesto que el acelerómetro se va a utilizar siempre en combinación con el giróscopo, este ruido no afectará a nuestra medida.

5.4. Sensor infrarrojo:

5.4.1. Principio de funcionamiento

La mayoría de los objetos (aparte de los muy calientes) irradian ondas electromagnéticas solo en un rango espectral al del infrarrojo lejano. Por lo tanto los detectores de movimiento de luz visible e infrarrojo cercano tienen que confiar en una fuente de luz que ilumina el objeto. La luz se refleja en el cuerpo del objeto hacia el dispositivo de enfoque para su posterior detección. Esta luz puede ser la luz solar o la luz infrarroja invisible de una fuente adicional de luz infrarrojo cercano (un proyector). El uso de la luz visible para la detección de objetos en movimiento se remonta a 1932 cuando en la era pre-radar, los inventores buscaban maneras de detectar aviones que volaban. En una invención, un detector de aviones fue construido con la forma de una cámara fotográfica donde el cristal de la lente de enfoque apuntaba al cielo. La imagen de un avión en movimiento fue centrada en un fotodetector de selenio, que reaccionaba a la diferencia de cambio en la imagen del cielo. Naturalmente este detector podía funcionar sólo durante el día para detectar aviones que vuelan bajo las nubes. Obviamente, estos detectores no son muy prácticos. Otra versión de detección del movimiento de luz visible fue el patentado para aplicaciones menos exigentes: el control de luces en una habitación [34] y la fabricación de juguetes interactivos [35].

Para apagar las luces en una habitación desocupada, la detección de movimiento en un rango visible (interruptor de movimiento manufacturado por Intermatic Inc., IL) fue combinado con un temporizador y un relé de potencia de estado sólido. El detector se activa cuando la habitación es iluminada. La luz visible lleva una energía relativamente alta y puede ser detectada por cuánticas células fotovoltaicas o fotoconductoras de detección bastante elevada. Por lo tanto, el sistema óptico puede simplificarse considerablemente. En el interruptor de movimiento, el dispositivo de enfoque fue construido en forma de una lente de ojo de aguja (Figura 115 (C)). Esa lente es un pequeño agujero en una lámina opaca.

Para evitar una difracción de la luz de onda, el diámetro del agujero debe ser sustancialmente más grande que la mayor longitud de onda detectable. En la práctica, el interruptor de movimiento tiene una lente de tres agujeros de ojo de aguja, en los que cada hoyo tiene una abertura de 0,2 mm (Figura 115 (C)). Tal lente tiene una amplia teoría centrada infinitamente en la profundidad de enfoque; por lo que el fotodetector se puede colocar a cualquier distancia de ella. Por razones prácticas, esa distancia se ha calculado para un máximo de desplazamiento del objeto y las dimensiones de la fotorresistencia se usan en el diseño. La fotorresistencia fue seleccionada como un patrón serpenteante para la detección de elementos (Figura 115(A)). Cuando la habitación está iluminada, el sensor actúa como una cámara fotográfica en miniatura: una imagen de su campo de visión se forma sobre la superficie de la fotorresistencia. Las personas que se desplazan en la sala hacen que la imagen cambie, de tal manera que los cambios a través de la óptica serpenteante de contraste patrón de la fotorresistencia. A su vez, cambia su valor de resistencia, lo que resulta en la modulación de la corriente eléctrica que pasa a través del elemento. Esta señal se amplifica y se compara con un umbral predeterminado. Al cruzar el umbral, el comparador genera impulsos eléctricos que reinician un cronómetro de 15 minutos de tiempo. Si no se detecta movimiento en los 15 minutos al

último movimiento, el temporizador apaga las luces en la habitación. Entonces, puede ser activado de nuevo solo manualmente, ya que este detector de movimiento no funciona en la oscuridad.

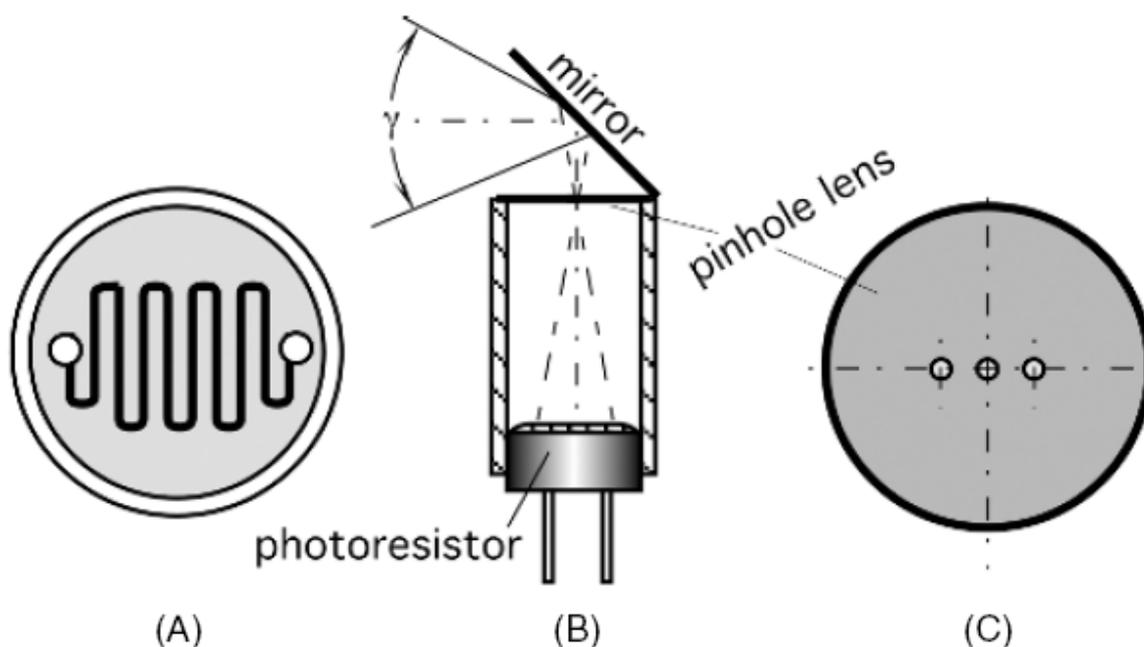


Figura 115. Detector de movimiento óptico simple para un interruptor de la luz y juguetes:
(A) la superficie sensible de una fotorresistencia constituye un elemento complejo de detección; (B) un espejo plano y una lente de ojo de aguja forman una imagen sobre una superficie de la fotorresistencia, (C) una lente de ojo de aguja

Otra versión de un detector de movimiento opera en el rango óptico de la radiación térmica, este recibe el nombre de infrarrojo lejano. Estos detectores son sensibles al intercambio del calor de la radiación entre el elemento sensor y el objeto que se mueve [36-38]. Aquí se va a discutir la detección de personas que se desplazan, sin embargo, la técnica que se describe puede ser modificada por los objetos calientes o fríos.

El principio de detección de movimiento térmico se basa en la teoría física de la emisión de radiación electromagnética de un objeto cuya temperatura está por encima del cero absoluto. Para la detección de movimiento, es esencial que la temperatura de la superficie de un objeto sea diferente a la de los objetos que le rodean, de modo que exista un contraste térmico. Todas las superficies de los objetos emanan radiación térmica y esa intensidad de radiación se rige por la ley de Stefan-Boltzmann:

$$\Phi_{b0} = A\varepsilon\sigma T^4 \quad (5.13)$$

Aquí $\sigma=5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$ (constante de Stefan-Boltzmann), A es el factor de geométrico, y ε es asumido como longitud de onda independiente [39].

Si el objeto está más caliente que su entorno, su radiación térmica se desplaza hacia longitudes de onda menores y su intensidad se vuelve más fuerte. Muchos de los objetos cuyo movimiento ha de ser detectado son no metales, por lo que irradian bastante energía térmica dentro de un hemisferio (Figura 116 (A)). Por otra parte los objetos dieléctricos generalmente tienen una alta emisividad. La piel humana es uno de los mejores emisores,

con una emisividad de más del 90%, mientras que la mayoría de las telas también son altas entre 0,74 y 0,95. En las clasificaciones se describirán dos tipos de detectores de movimiento infrarrojo lejano. El primero utiliza un infrarrojo pasivo (PIR) como sensor y el segundo tiene elementos activos de detección infrarroja lejana (AFIR).

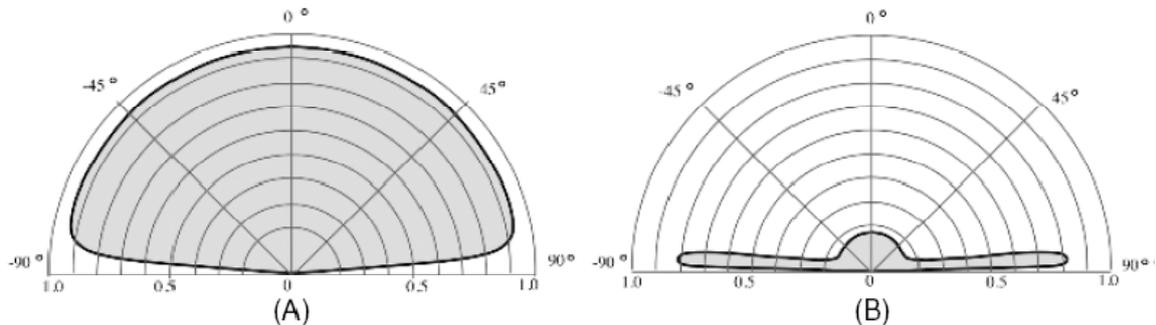


Figura 116. Emisividades espaciales para no metales (A) y un metal pulido (B)

5.4.2. Clasificaciones

Todos los detectores térmicos de radiación pueden dividirse en dos clases: detectores infrarrojos pasivo (PIR) y detectores infrarrojos lejanos activos (AFIR).

5.4.2.1. Detector infrarrojo PIR

Este detector se hizo muy popular por los sistemas de seguridad y gestión de la energía. El elemento sensor PIR debe ser sensible a la radiación infrarroja lejana dentro de un rango espectral de 4 a 20 micrómetros donde se concentra la mayoría de la energía térmica que emanan los seres humanos. Hay tres tipos de elemento sensor, que son potencialmente útiles para el detector: termistores, termopilas y piroeléctricos. Sin embargo los elementos piroeléctricos se utiliza casi exclusivamente para la detección de movimiento gracias a su simplicidad, bajo coste, alta capacidad de respuesta, y un amplio rango efectivo.

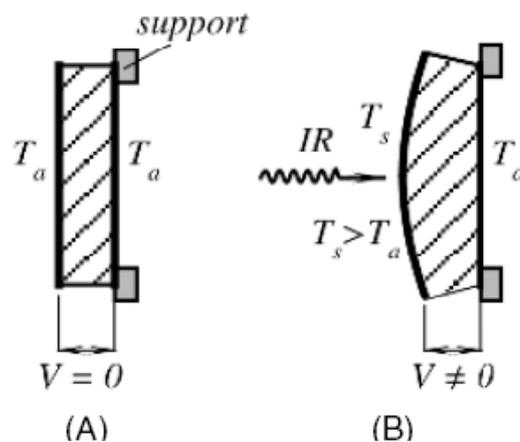


Figura 117. Modelo simplificado de un efecto piroeléctrico como un efecto secundario de piezoelectricidad. Inicialmente, el elemento tiene una temperatura uniforme (A), con la exposición a la radiación térmica, su parte delantera se expande, causando una carga inducida por estrés.

Un material piroeléctrico genera una carga eléctrica en respuesta al flujo de energía térmica a través de su cuerpo. De una manera muy simplificada, puede ser descrito como un efecto secundario de expansión térmica (Figura 117). Debido a que todos los piroeléctricos también son piezoeléctricos, el calor absorbido hace que la parte frontal del elemento de detección se expanda. El estrés resultante inducido térmicamente lleva al desarrollo de una carga piezoeléctrica en los electrodos del elemento. Esta carga se manifiesta como una tensión a lo largo de los electrodos depositada sobre la cara opuesta del material. Desafortunadamente, las propiedades piezoeléctricas del elemento tienen también un efecto negativo. Si el sensor es sometido cada minuto a un estrés mecánico de cualquier fuerza externa, éste también genera una carga, en la mayoría de los casos, no es distinguible de las causadas por las olas de calor del infrarrojo.

Para separar las cargas inducidas térmicamente de las cargas inducidas por el piezoeléctrico, un sensor piroeléctrico es usualmente fabricado con una forma simétrica (Figura 118 (A)). Dos elementos idénticos se colocan dentro de la carcasa del sensor. Los elementos están conectados a los circuitos electrónicos de tal manera como para producir las señales fuera de fase cuando es sometida a la entrada a la misma fase. La idea es que las interferencias producidas, por ejemplo, por el efecto piezoeléctrico o falsas señales de calor se aplican tanto a los electrodos de forma simultánea (en fase) y, por tanto, se cancelará en la entrada del circuito, mientras que la radiación térmica variable que se detecte será absorbida por un solo elemento a la vez, evitando así su cancelación.

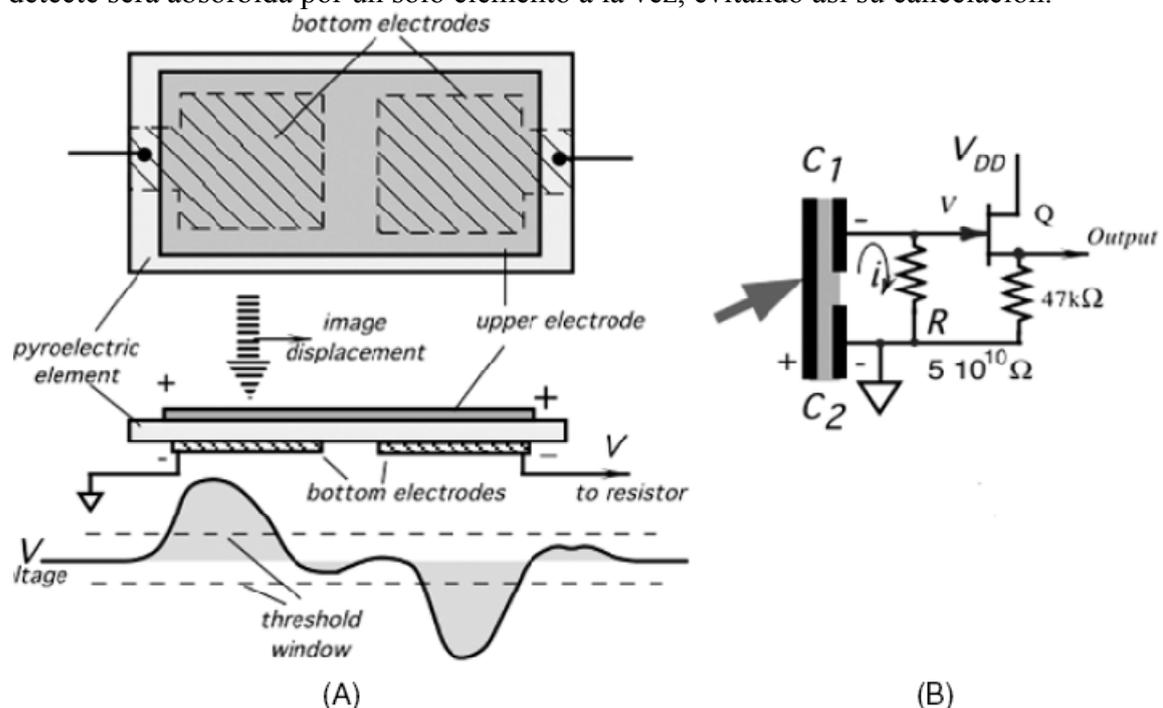


Figura 118. Sensor piroeléctrico dual. (A) Un elemento de detección con un electrodo delantero (superior) y dos electrodos de fondo depositados sobre un sustrato cristalino común. Una imagen térmica en movimiento se desplaza desde la parte izquierda del sensor hacia la derecha, lo que genera una tensión alterna a través de una resistencia de polarización (B).

Una manera de fabricar un sensor simétrico consiste en depositar dos pares de electrodos a ambos lados de un elemento piroeléctrico. Cada par forma un condensador que puede ser cargado, ya sea por calor o por un esfuerzo mecánico. Los electrodos en la parte superior del sensor están conectados entre sí, formando un electrodo continuo, mientras que los dos electrodos inferiores se separan, creando así todo lo contrario, conectados en serie los condensadores. Dependiendo del sitio en que los electrodos se colocan, la señal de salida se presenta de una polaridad positiva o negativa para la afluencia térmica.

Un el elemento sensor simétrico debe ser montado de tal manera que se asegure de que las dos partes del sensor generan la misma señal si se somete a los mismos factores externos. El elemento sensor genera una carga sólo a través del par de electrodos sujetos un flujo de calor. Cuando se mueve la imagen térmica de un electrodo a otro, la corriente i que fluye desde el elemento de detección de la resistencia de polarización R (Figura 118 (B)) cambia desde cero, a positivo, y luego a cero, a negativo, y de nuevo a cero (Figura 118 (A) parte inferior).

Un transistor Q JFET es usado como un convertidor de impedancia. El valor de la resistencia R debe ser muy alto. Tal resistencia no puede ser conectada directamente a un circuito electrónico regular, por lo que el transistor Q sirve como un seguidor de tensión (la ganancia es cercana a la unidad). Su impedancia de salida típica es del orden de varios Kilo-ohmios. Las más utilizadas son los elementos cerámicos, gracias a su bajo costo y facilidad de fabricación.

Además del sensor, un detector de movimiento infrarrojo necesita un dispositivo de enfoque. Algunos detectores emplean espejos parabólicos, pero las lentes de plástico Fresnel se vuelven cada vez más populares porque son de bajo costo, puede representar una curvatura en cualquier forma deseada, y además del enfoque, actúa como ventana, protegiendo el interior del detector de la humedad y contaminantes exteriores.

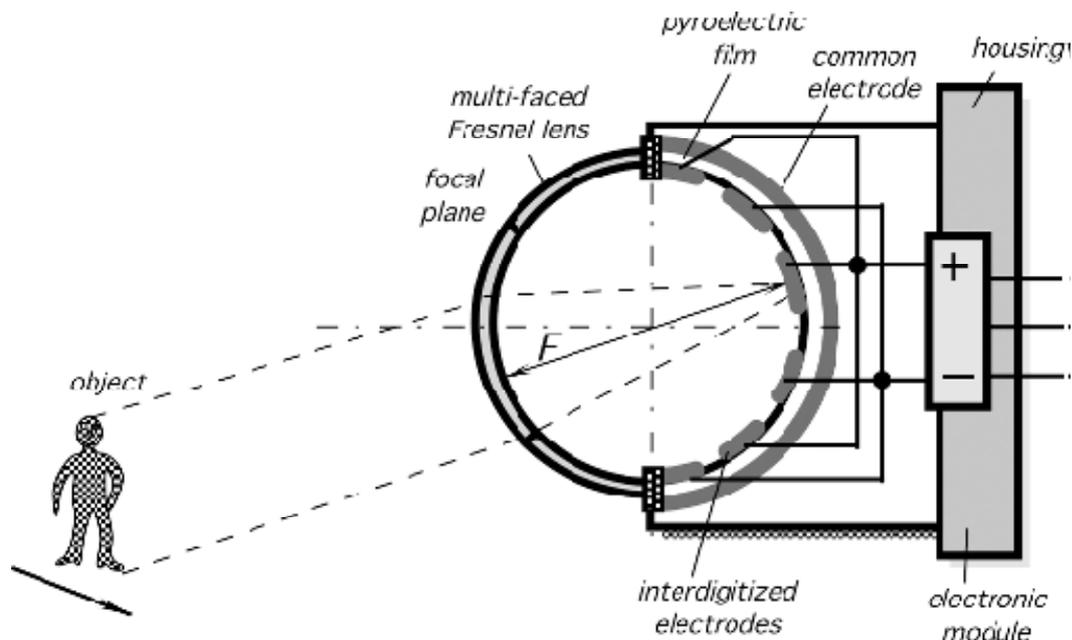


Figura 119. Infrarrojo de detección de movimiento lejano con una lente Fresnel curva y película piroeléctrica PVDF. Estructura interna de la sonda.

Para ilustrar cómo una lente Fresnel de plástico y una película de PVDF pueden trabajar juntos, se verá el detector de movimiento en la Figura 119 (A). Se utiliza una lente de polietileno polifacético como lente y una película curvada de PVDF como sensor [40]. El diseño del sensor combina dos métodos descritos anteriormente: una lente y una forma de electrodo complejo. La lente y la película son curvas con los mismos radios de curvatura iguales a la mitad de la distancia focal f (Figura 120), asegurando así que la película siempre se coloca en un plano focal de la cara correspondiente a la lente. La película tiene un par de electrodos grandes interdigitalizados que están conectados a las entradas positiva y negativa de un amplificador diferencial situado en el módulo electrónico. El amplificador rechaza la interferencia del modo común y la amplificación del voltaje inducido térmicamente. La parte de la película frente a la lente está cubierta con un recubrimiento orgánico para mejorar su capacidad de absorción en el rango espectral del infrarrojo lejano.

Este diseño resulta ser una buena resolución (detección de un pequeño desplazamiento a una distancia más larga) y un volumen muy pequeño del detector.

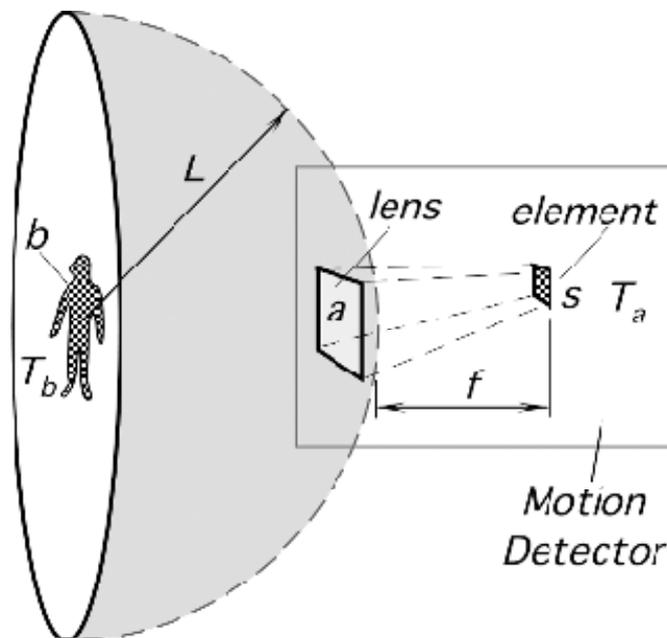


Figura 120. Formación de una imagen térmica en el elemento sensor de detección de movimiento de un PIR

5.4.2.2. Detector infrarrojo (AFIR)

La superficie del sensor AFIR está activamente controlada por un circuito especial para tener la temperatura T_s definida, lo que, en la mayoría de las aplicaciones, se mantiene constante durante un proceso de medición. Para controlar la temperatura de la superficie del sensor, la energía eléctrica P es proporcionada por un circuito de control (o excitación) (Figura 121(A)). Para regular T_s , el circuito mide la temperatura del elemento de la superficie y lo compara con una referencia interna. Obviamente, el ingreso de energía mantiene T_s superior al ambiente. Parte de la pérdida de calor es en forma de conducción térmica, en parte convección térmica, y otra parte es radiación térmica.

Esta tercera parte es la que tiene que ser medida. A diferencia de la transferencia de calor por conducción y convección, que se dirige siempre hacia fuera del elemento de detección (ya que es más caliente que la temperatura ambiente), la transferencia de calor por radiación puede ir en cualquier dirección, dependiendo de la temperatura del objeto. Por supuesto, el flujo de radiación se rige por la ecuación fundamental, que se conoce como la ley de Stefan-Boltzmann.

$$\Phi = \Phi_b + \Phi_s = A\epsilon\epsilon_s\sigma(T^4 - T_s^4) \quad (5.14)$$

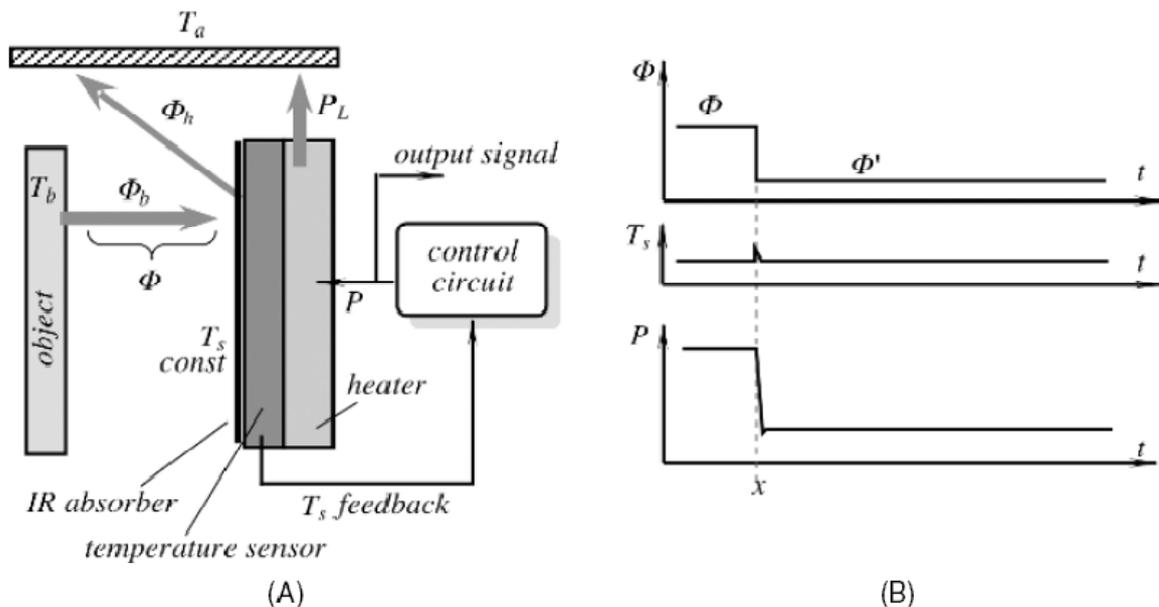


Figura 121. El elemento AFIR irradia flujo térmico Φ_h hacia su encapsulado y absorbe flujo del objeto (A); Diagramas de tiempo para flujo de irradiación, temperatura de la superficie, y potencia suministrada.

Algunas potencias de radiación salen del elemento de la cápsula del sensor, mientras que algunas vienen del objeto (o van hacia el objeto). Lo esencial es que el flujo térmico neto (conducción + convección + radiación) siempre tiene que salir del sensor (por ejemplo, debe tener un signo negativo).

Si el elemento AFIR está provisto de un elemento de refrigeración (por ejemplo, un dispositivo termométrico Peltier effect), T_s puede mantenerse a temperatura ambiente o por debajo. Sin embargo, desde el punto de vista práctico, es más fácil calentar el elemento hasta un lugar a que se enfríe [41-43].

Al contrario que los sensores PIR, el detector AFIR actúa como una fuente “infinita” de calor. Bajo condiciones ideales, su respuesta no depende de la masa térmica y no es una función del tiempo. Un elemento AFIR, en teoría, es un dispositivo mucho más rápido si se compara con el PIR. La eficiencia del detector de AFIR es una función tanto de su diseño como del circuito de control

Para generar calor en el sensor de AFIR, se podrá disponer de un elemento de calentamiento que tiene una resistencia eléctrica R. Durante la operación, la energía eléctrica disipada por la resistencia es una función de tensión V que en la resistencia:

$$P = V^2/R \quad (5.15)$$

Supóngase que el sensor de AFIR se utiliza en un termómetro de radiación. Su señal de salida debe ser representativa del objeto a temperatura T_b que se va a medir.

Al contrario de un detector PIR, un sensor de AFIR es activo y puede generar una señal sólo cuando trabaja en conjunto con un circuito de control. Un circuito de control debe incluir los siguientes componentes esenciales: una temperatura de referencia programada, un amplificador de error, y una etapa conductora. Además, puede incluir una red RC para la corrección de una función de respuesta de lazo y para estabilizar su funcionamiento, de lo contrario todo sistema puede ser propenso a oscilaciones [44].

Cabe señalar que un sensor AFIR, junto con su circuito de control es un convertidor directo de la energía térmica de radiación en la tensión eléctrica y es muy eficiente. Su capacidad de respuesta típica se encuentra en el rango de 3000 V/W, que es mucho mayor en comparación con una termopila cuya capacidad de respuesta típica está en el rango de 100 V/W. Una forma eficiente para la fabricación de un sensor de AFIR sería mediante la tecnología MEMS.

5.4.3. Infrarrojo en HOAP3

Puesto que para este sensor no existe ninguna referencia en el manual en el que indique el tipo de calibración que ha de tener, se optó por comparar la información del manual de instrucciones de HOAP3 con la proporcionada por el fabricante del sensor, apreciando un parecido razonable en todas las gráficas.

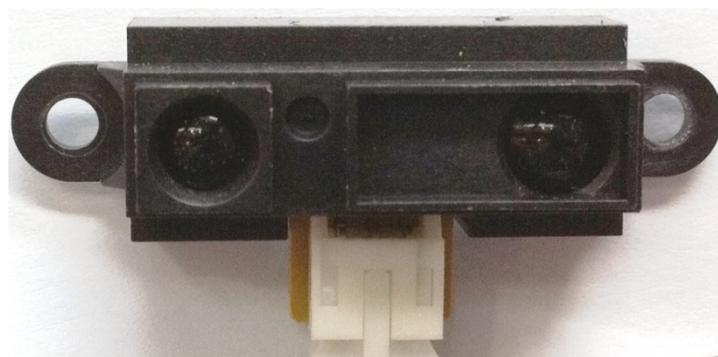


Figura 122. Vista de infrarrojo

No obstante, como esta información era solamente teórica, había que ponerla en práctica y se optó por crear una plantilla en el suelo a la que se le habían realizado marcas cada cinco centímetros, para a continuación colocar al robot en cada una de esas marcas e ir apuntando los valores que recogía el sensor infrarrojo cuando detectaba un fondo negro

para después comparar esas medidas con las tomadas cuando el mismo sensor detectaba un fondo blanco. Estas pruebas se realizaron con una claridad ambiente de luz media.

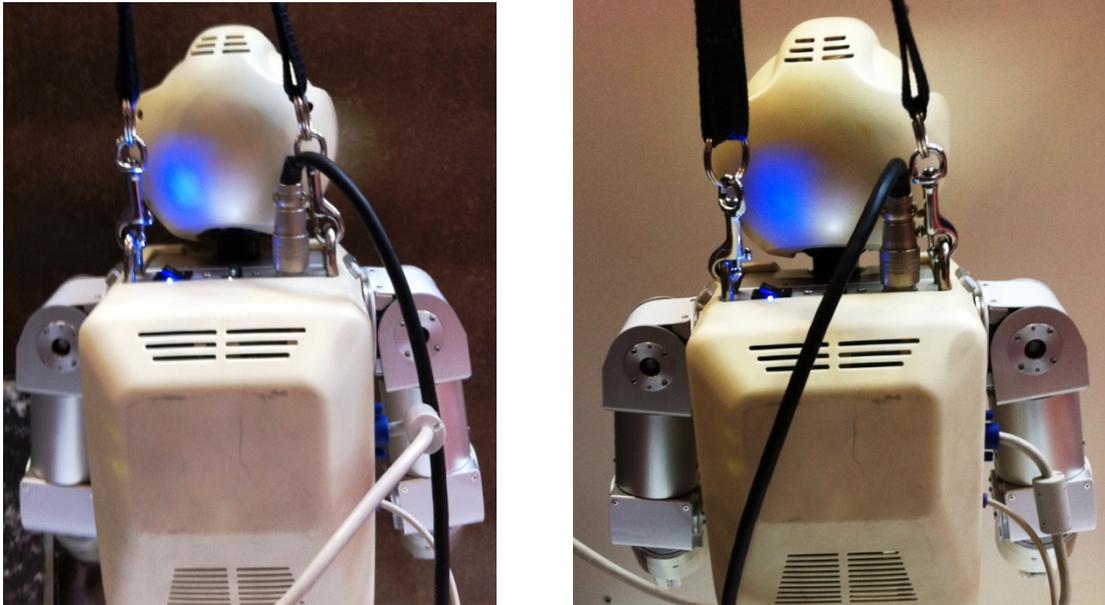


Figura 123. Robot frente a pared negra y blanca

A continuación se graficaron estos datos como se muestra en la Figura 126 para intentar aproximar este comportamiento del sensor a una función. Puesto que ambas curvas se parecen bastante a la función matemática $Y = 1/X$, se ha utilizado esta fórmula para calcular el valor de la distancia en función del valor que proporciona el A/D. Se graficaron con Matlab la curva del sensor y la expresión matemática con los datos del A/D en el eje Y y los datos de la distancia en el eje X y se obtuvo la Figura 124. A la izquierda es la respuesta del sensor ante una pared sabiendo previamente la distancia a la que se encuentra. A la derecha es la gráfica que se obtiene al calcular la distancia en cm mediante la fórmula $Y=1/30X$, sabiendo el valor del convertidor A/D.

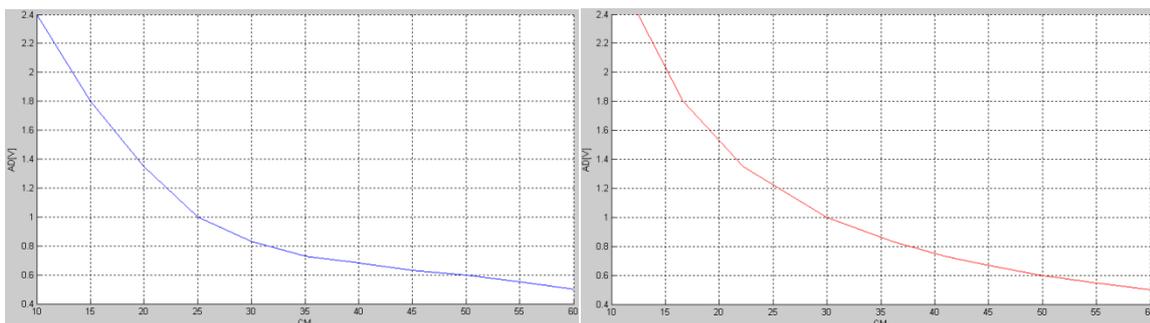


Figura 124. Curvas de datos de distancia a partir del A/D.

Para poder conseguir la Figura 124, previamente se ha tenido que aproximar la curva a una recta, para lo cual se ha graficado en el eje Y el valor del A/D y en el eje X la inversa de la distancia como se muestra en la Figura 125. Los valores de la izquierda se obtienen del comportamiento del infrarrojo a determinada distancia ya calculada y la

recta de la derecha se obtiene aplicando la fórmula $Y=30X$ a los datos del convertido A/D que se muestran en el eje Y.

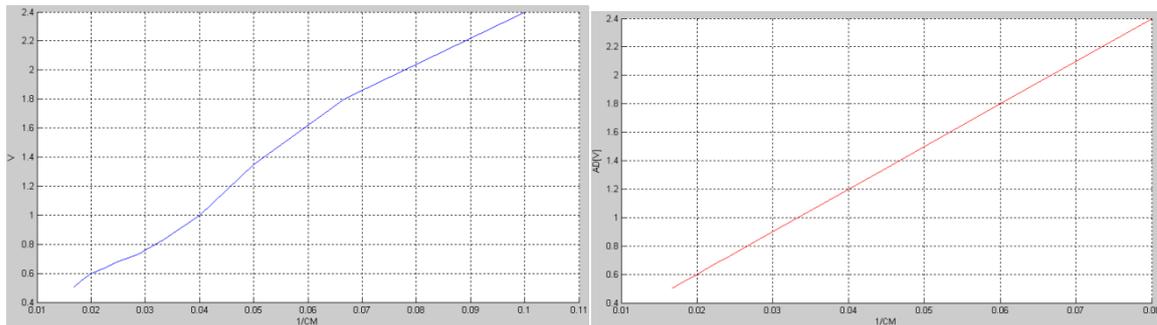


Figura 125. Aproximación de los datos del A/D a una recta

PROBLEMÁTICA ENCONTRADA Y SOLUCIÓN IMPLEMENTADA:

Para este sensor no se han encontrado problemas nuevos que no estén relacionados ya con los inconvenientes típicos encontrados en los infrarrojos que desarrollan trabajos de detección de objetos, como pueden ser los que se citan a continuación:

- Como punto de partida destacar el error que se comete en la medida de la distancia a la que se encuentra determinado objetos en función de la calidad de luz, es decir, diferente medida dependiendo de la claridad en la que trabaje el sensor. Variando esta claridad desde penumbra hasta el punto de llegar a incidir sobre el infrarrojo un haz de luz blanca.
- Otro problema encontrado en la calibración ha sido el resultado distinto que proporcionaba el sensor al reflejar el rayo infrarrojo en una pared blanca o en una pared negra.
- Además de las características técnicas del sensor que solamente puede medir distancias inferiores a 80cm según el fabricante, aunque en la práctica es óptima la medida si la distancia es inferior a 60 cm.

A continuación se adjunta la gráfica original del sensor y se muestran las gráficas obtenidas con el programa matemático Matlab al introducir los datos conseguidos con esta calibración teniendo una pared blanca y otra negra tomando una luz ambiente media.

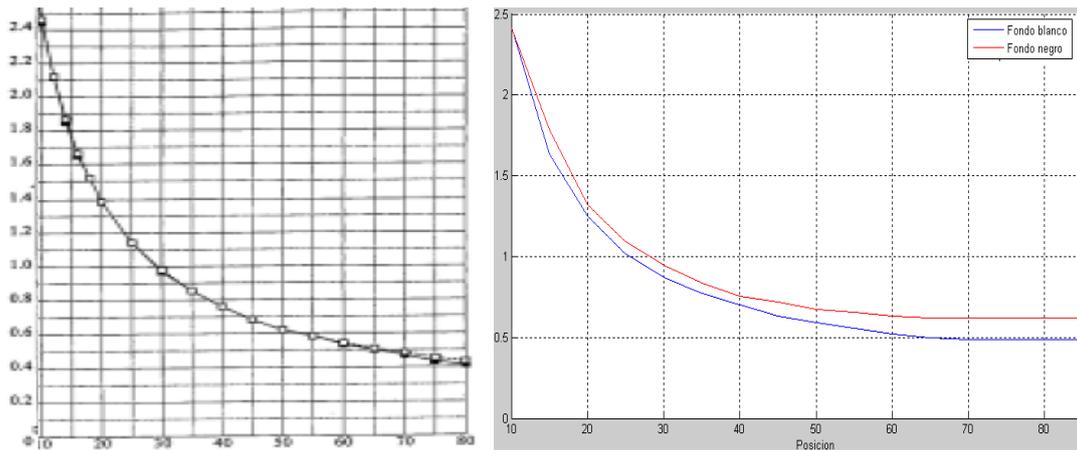


Figura 126. Gráfica calibración de infrarrojo del fabricante y propia

Como se puede observar comparando ambas gráficas, los valores del fabricante son bastante parecidos a los proporcionados por el sensor infrarrojo y estos valores se podrían aproximar a la siguiente función:

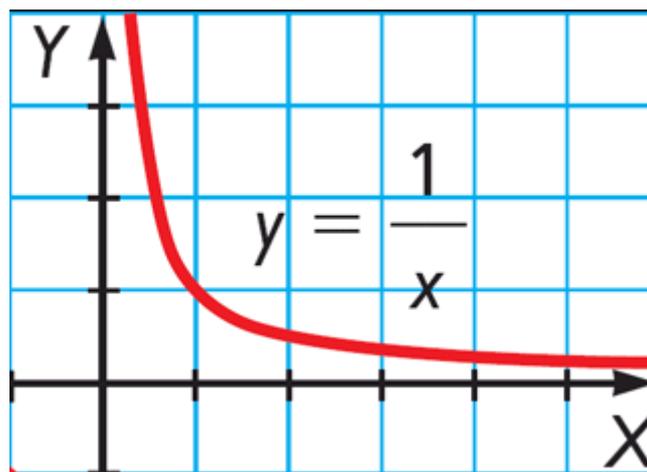


Figura 127. Aproximación mediante una función matemática a la curva del infrarrojo

NOTAR que el sistema sensorial del infrarrojo multiplica el valor de A/D por 200. Además la fórmula $Y=1/X$ no es del todo exacta por lo que habrá una deriva que se tendrá que solucionar.

En conclusión, con estas pruebas realizadas y obteniendo los valores que se aprecian en la Figura 126, se determina que la calibración del sensor infrarrojo está finalizada incidiendo que hay que tener cuidado con la luz ambiente en la que el sensor está trabajando dado que estos datos obtenidos en la pruebas pueden variar.

Capítulo 6

Resultados finales

En este capítulo se explicarán dos trayectorias en las que se han utilizado los datos que proporcionarán los sensores a los que se ha hecho referencia en capítulos anteriores. Estas dos trayectorias sirven además para verificar la correcta calibración de cada uno de los sensores.

6.1. Trayectoria 1:

Esta trayectoria se desarrolla en el interior de una habitación rectangular, dentro de la cual se sitúa el robot mirando a la pared a una distancia de aproximadamente 65 cm. Tendrá que detectar, gracias al sensor infrarrojo, la cercanía de la pared. La lectura de los datos del infrarrojo se realizará de forma continuada y cuando el robot se encuentre a una distancia de 40 cm, el robot girará a la derecha 30° para seguir tomando distancias con el infrarrojos y continuar girando hasta que localice una distancia mayor a esos 40 cm fijados para poder caminar recto. En este ejemplo, el robot al encontrarse en una esquina tendrá que girar 180° , o lo que es lo mismo, realizar esa trayectoria de giro a derechas 6 veces para poder volver por donde había venido. La distancia recorrida durante el desplazamiento cuando el robot anda hacia delante es aproximadamente de 10 cm. La distancia de 40cm de distancia a la pared ha sido definida porque si el robot está a una distancia menor, no podría realizar el giro porque chocaría parte del brazo con la pared y esto desequilibraría al robot provocando una caída inminente.

Para esta trayectoria se ha necesitado programar determinados movimientos como son:

- Forward \rightarrow Paso hacia delante de 10 cm
- Rot_right \rightarrow Giro de 30° a la derecha

El robot elegirá cada uno de los movimientos en función de los estímulos que reciba de los sensores. Puesto que las trayectorias utilizadas han sido programadas para ser estables, lo que más interesa es que el robot no se choque con las paredes, y es por esa razón por la que el robot estará continuamente leyendo el valor del sensor infrarrojo.

En esta trayectoria además el robot será capaz de proporcionar el valor de todos los sensores que tiene instalados y guardar esos datos en un archivo para posteriormente poder calcular el ZMP, el peso del robot, el valor del acelerómetro y del giróscopo al ejecutar dicha trayectoria.

A continuación se expone gráficamente la trayectoria y se explicará paso a paso que es lo que está sucediendo y al finalizar la trayectoria se expondrán gráficamente cuáles son los valores que toman cada uno de los sensores durante todo el recorrido, seguidos de un breve comentario.



Figura 128. Trayectoria 1. HOAP3 andando hacia delante hasta encontrar la pared

En la Figura 128 el robot ejecuta tres veces una trayectoria de desplazamiento frontal, con lo que recorre una distancia en línea recta de 30 centímetros

aproximadamente. A continuación el sensor infrarrojo detecta una distancia a la pared de 40 cm y el robot continúa con la siguiente trayectoria.

En la Figura 129 el robot encuentra una pared situada a unos 40cm por lo que comienza a girar hacia la derecha 30°. Puesto que la captura de datos del infrarrojo se realiza en todo momento, el robot está continuamente divisando la pared y sabe que debe volver a girar para no chocarse. Esta acción la realiza 6 veces y así consigue girar 180°. A continuación el robot detecta que ya no hay un obstáculo cerca y continúa con la siguiente trayectoria.

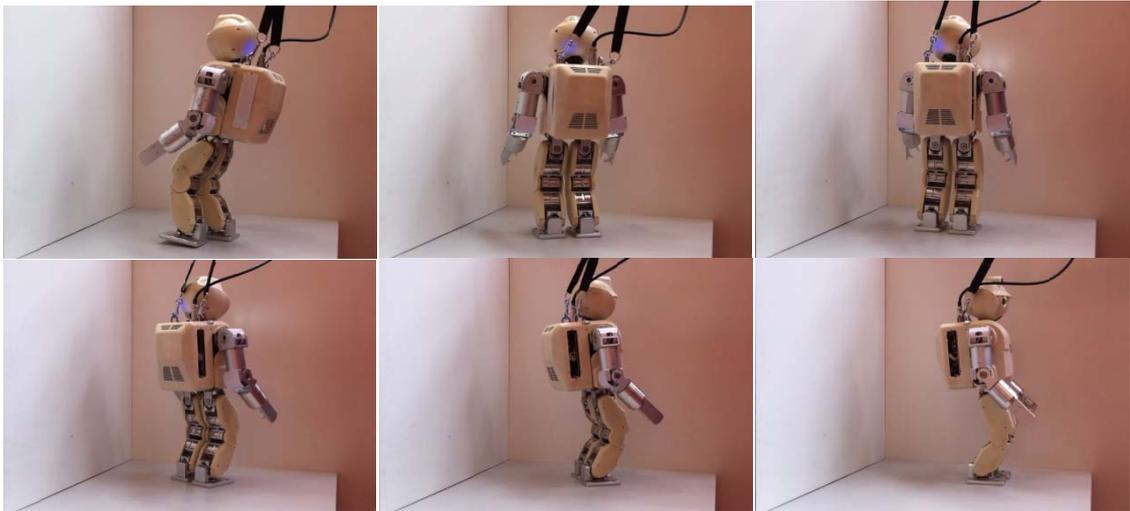


Figura 129. Trayectoria 1. HOAP3 girando 180° en secuencias de 30°.

Tras realizar los seis giros y no detectar la pared, el robot ejecuta un último movimiento (Figura 130) que será caminar hacia delante una sola vez y con el que finaliza la trayectoria 1.

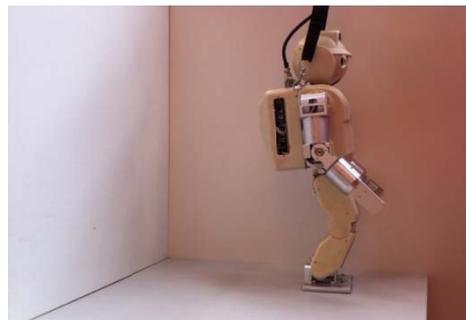


Figura 130. Trayectoria 1. HOAP3 ejecutando un paso hacia delante

Para hacer más comprensibles las simulaciones, en todas las gráficas se han acotado los tiempos de cada movimiento del robot con unos números que se explican a continuación. Esta trayectoria comprende 10 movimientos los cuales son:

- N^{os} de 1 a 3 → Movimiento Forward
- N^{os} de 4 a 9 → Movimiento Rot_right
- N^o 10 → Movimiento Forward

GRÁFICAS FSR UBICADOS EN LOS PIES DE HOAP3

Como se puede apreciar en la Figura 131, la fuerza ejercida por el robot sobre los sensores FSR de los pies cuando está situado sobre un apoyo simple, es decir, cuando el robot solamente está apoyado sobre una pierna, en este caso la derecha, es aproximadamente 80N. Como la trayectoria del robot es estable, ya que el robot no se cae en ningún momento, se puede comprobar cómo los valores del ZMP para el pie derecho están comprendidos entre 50 y -25mm para el eje X y entre 70 y -30mm para el eje Y, por lo que al no sobresalir estas medidas de la suela del pie se cumple el criterio de estabilidad del ZMP. La colocación del origen de estas medidas y las cotas de la suela se pueden comprobar gráficamente con la Figura 168.

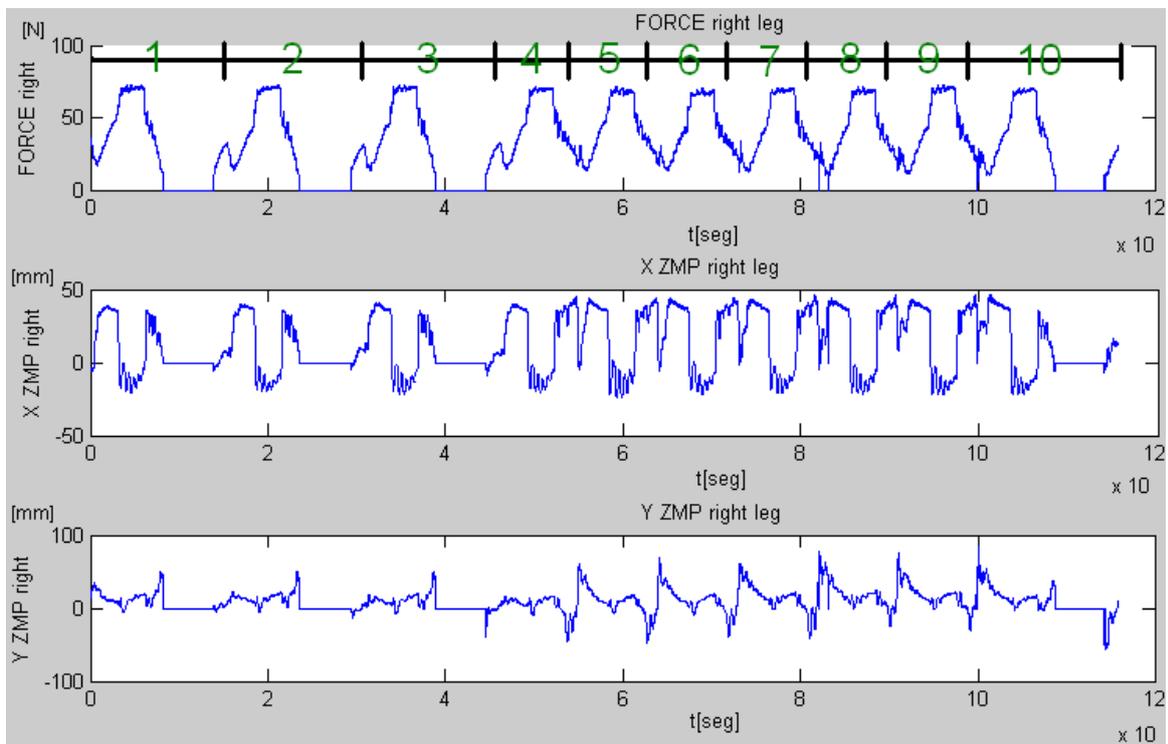


Figura 131. Trayectoria 1. Fuerza y ZMP pie derecho

En la Figura 132, la fuerza ejercida por el robot sobre los sensores FSR de los pies cuando está en apoyo simple, en este caso la pierna izquierda, es aproximadamente 80N. Como ocurría para el pie derecho, en este caso la trayectoria también es estable ya que los valores del ZMP para este pie están comprendidos entre 25 y -10mm para el eje X y entre 5 y -35mm para el eje Y, por lo que al no sobresalir estas medidas de la suela del pie se cumple el criterio de estabilidad del ZMP. La colocación del origen de estas medidas y las cotas de la suela se pueden comprobar gráficamente con la Figura 168.

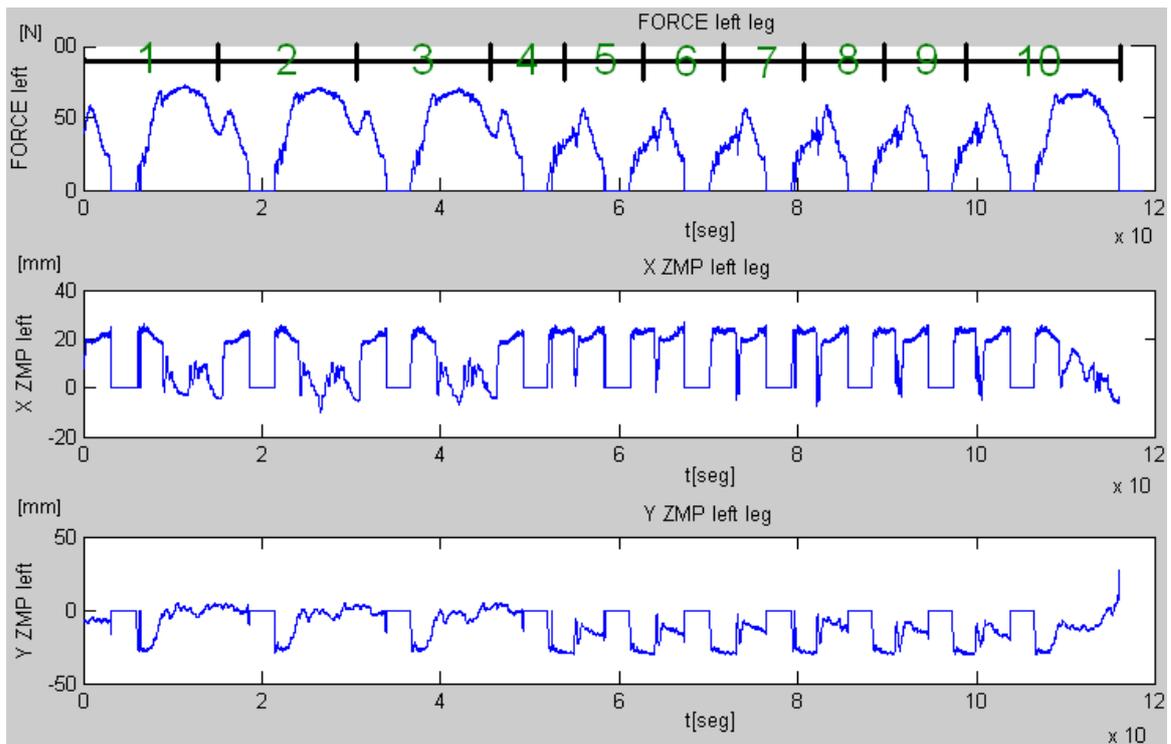


Figura 132. Trayectoria 1. Fuerza y ZMP pie izquierdo

La Figura 133 muestra los resultados simultáneos del cálculo del ZMP y fuerza de ambos pies y se aprecia claramente que cada pie realiza un recorrido distinto, debido a que el movimiento que realiza un pie no es el mismo que el del otro pie. Esto es porque el pie izquierdo es el que primero despega del suelo y aterriza, y a continuación el pie derecho a es el que realiza el movimiento para desplazarse hacia el pie izquierdo.

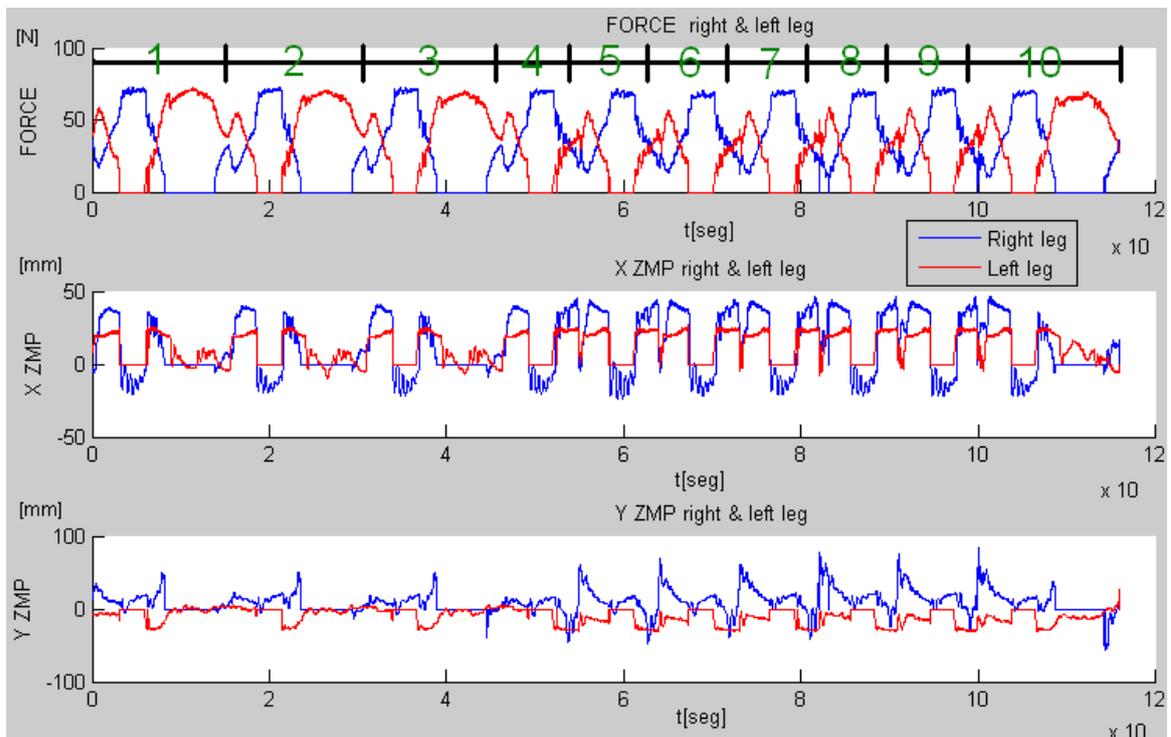


Figura 133. Trayectoria 1. Fuerza y ZMP pie derecho e izquierdo

GRÁFICAS FSR UBICADOS EN LAS MANOS DE HOAP3

Para esta trayectoria no se ha efectuado ninguna maniobra con las manos, por lo que los datos que nos proporcionan estos FSR son insignificantes. Aún así se han graficado para comentar que esta variación perceptible en los valores del FSR se debe a que las manos estaban cerradas durante el movimiento del robot, esto es, el sensor colocado en el dedo pulgar de cada mano estaba apretando ligeramente el resto de dedos de la mano como se puede apreciar en la Figura 134.



Figura 134. Dedo pulgar apretando sensor FSR

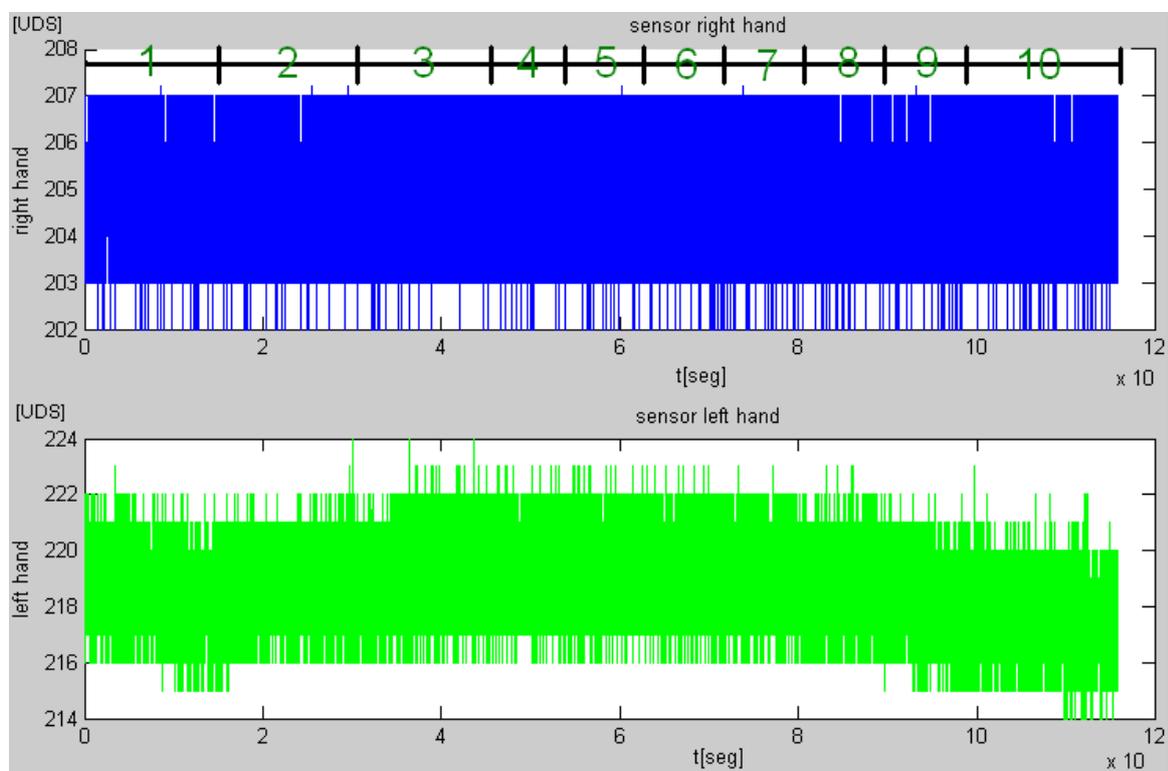


Figura 135. Trayectoria 1. Valor de FSR de la mano derecha e izquierda

GRÁFICAS GIRÓSCOPO DE HOAP3

Como se muestra en la Figura 136, el valor de los ejes del giróscopo varía en consecuencia al movimiento que está desarrollando el robot. Por ejemplo, para el desplazamiento del 1 al 3, en el que el robot anda hacia delante, el eje x refleja una variación de valores comprendidos entre 10 y -10 %/seg y los ejes Y y Z experimentan también una variación aunque con unos valores menores. Notar que el movimiento del giróscopo cuando el robot está parado es de cero, por lo que la calibración está comprobada. También se observa que los valores del giróscopo en cualquier eje se repite donde los movimientos son iguales, como es el caso de los movimientos 1 al 3 y el 10, así como del 4 al 9.

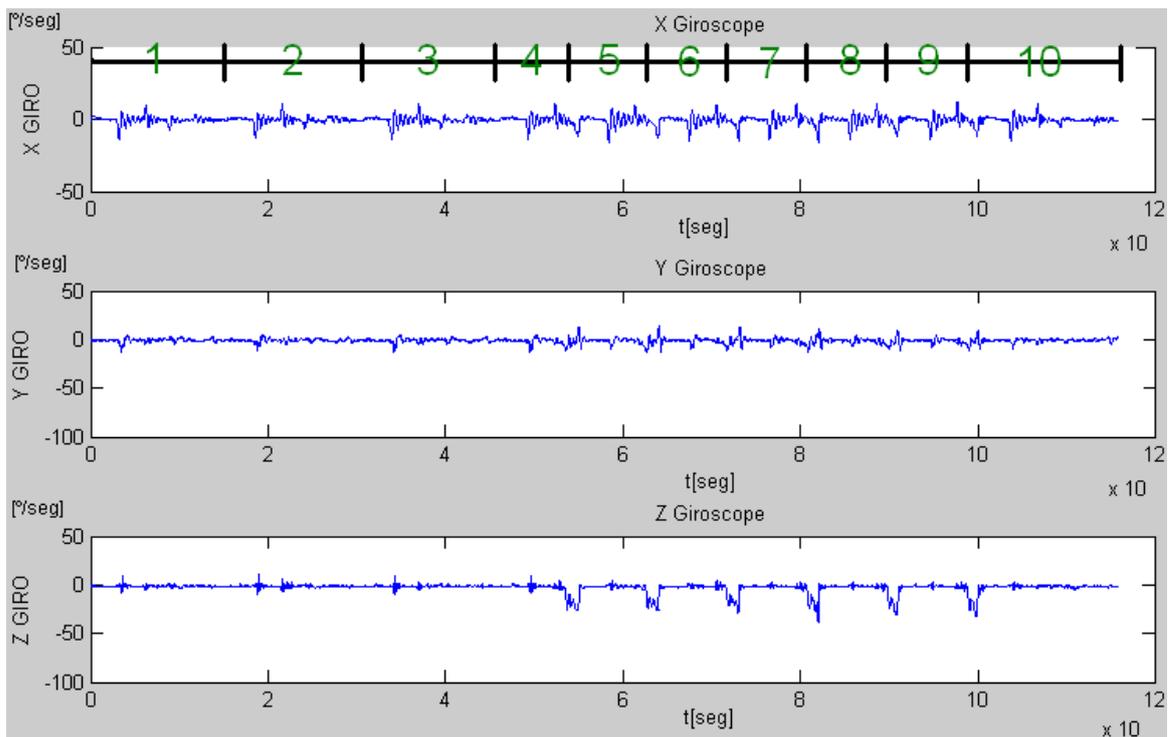


Figura 136. Trayectoria 1. Valores en los ejes X, Y, Z del giróscopo

GRÁFICAS ACELERÓMETRO DE HOAP3

Como ya se adelantó en el capítulo 5 de calibración, el sensor acelerómetro tiene mucho ruido provocado por los motores que tiene a su alrededor. Este ruido es el responsable de que los datos de la Figura 137 no se aprecien de forma correcta. Como ya se demostró en ese capítulo, este acelerómetro fue calibrado mientras el robot estaba suspendido en la jaula blanca y con los motores apagados para que el ruido no interfiriese en su calibración. Aún así se puede apreciar como el eje Z mantiene casi sin oscilaciones aparentes el valor de la gravedad y el eje X mantiene una forma oscilante sobretodo notable en los movimientos del 4 al 9.

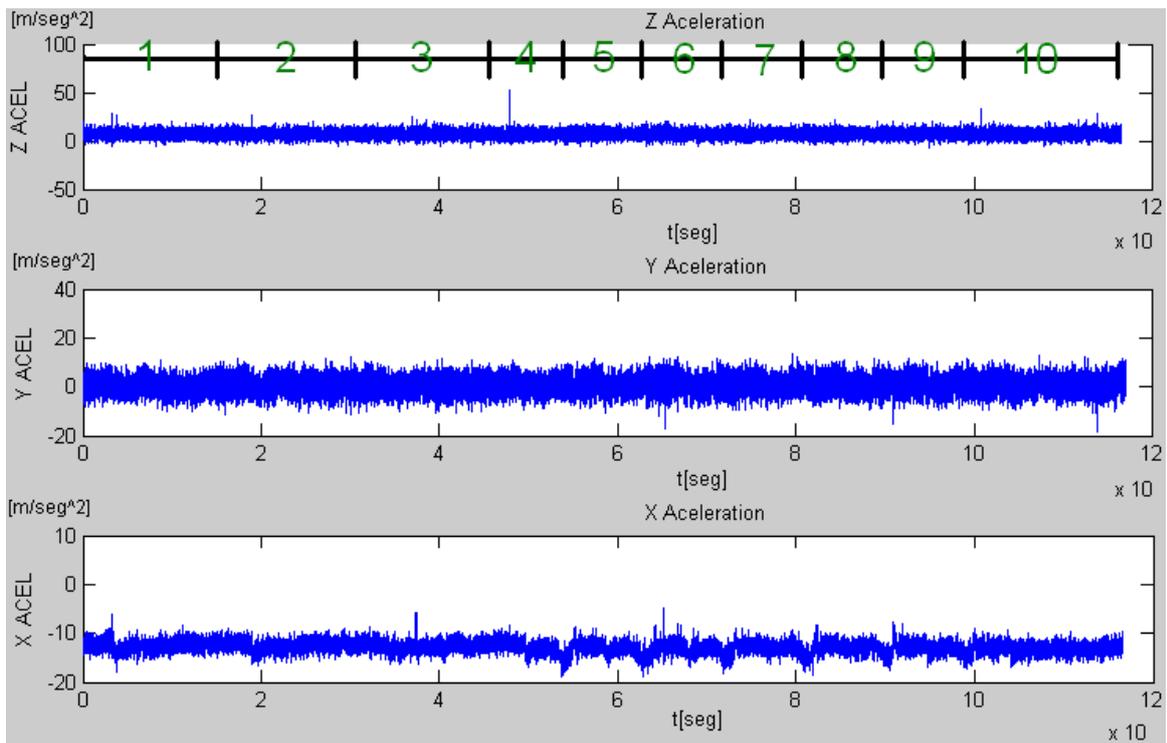


Figura 137. Trayectoria 2. Valores en los ejes Z, Y y X del acelerómetro

GRÁFICAS INFRARROJO DE HOAP3

Del sensor infrarrojo interesa representar además del valor en voltios de la respuesta del convertidor A/D, la distancia en centímetros y su variación en función del movimiento ejecutado.

En la Figura 138, se representa el valor de tensión del A/D respecto del tiempo y lo más llamativo es el pico de tensión que se produce en el comienzo del movimiento 10. Este dato disperso, no produce ningún error durante la ejecución del programa debido a que el robot está continuamente leyendo la información del infrarrojo y depurando esa información que le llega para evitar la aparición de errores durante la ejecución.

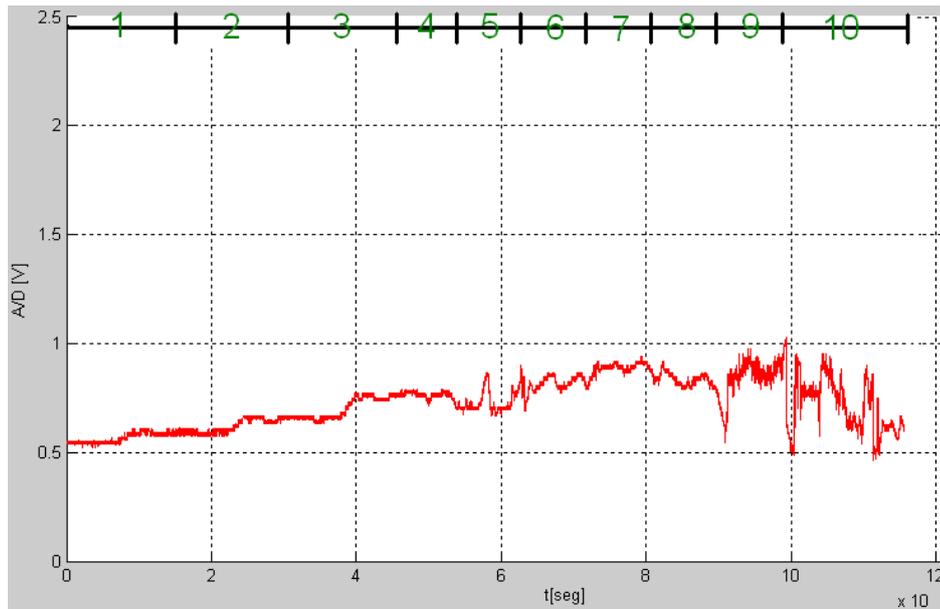


Figura 138. Trayectoria 1. Valores de tensión del convertidor A/D del infrarrojo

Para obtener la distancia del infrarrojo en cm se realizan los pasos explicados en el capítulo 5 de calibración y con los que se consiguen unos datos variables entre 10cm y 60cm que aproximadamente es el rango efectivo del sensor. El robot por cada uno de los movimientos 1,2 y 3 va acercándose a la pared hasta llegar a los 40 cm de distancia donde comienza a girar a derecha en los movimientos 4, 5, 6, 7, 8 y 9. Se aprecia que al comienzo del movimiento 6 hay una distancia a la pared de 45cm que corresponden con la esquina de la pared. Cuando se encuentra con una distancia superior a 40 cm antes de acabar el movimiento, como sucede al finalizar el movimiento 9, es cuando comienza con el movimiento de paso hacia delante (10). Notar que hasta la mitad del movimiento 10, los valores capturados por el sensor corresponden a la distancia a la que se encuentra la persona que sujeta el robot.

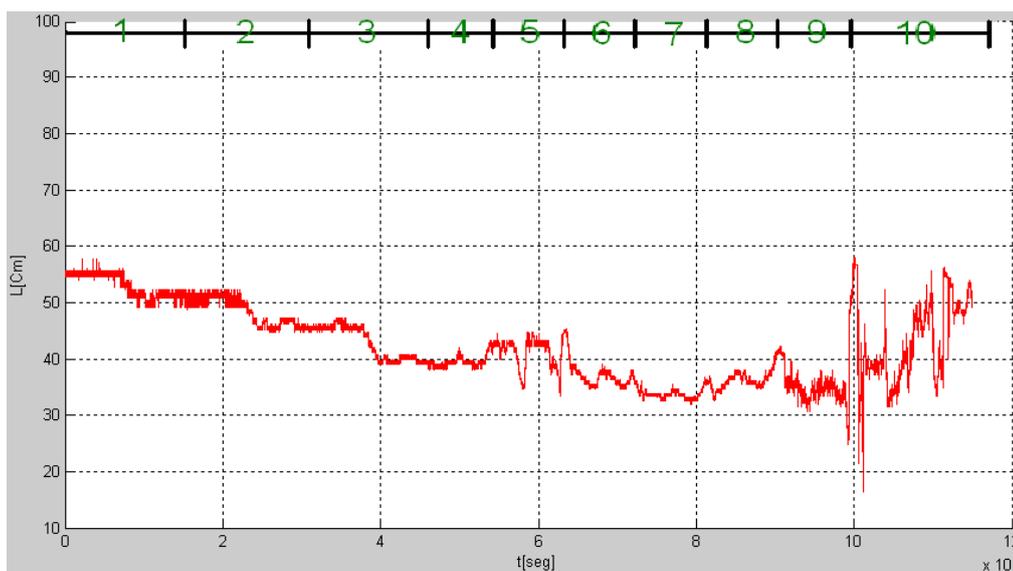


Figura 139. Trayectoria 1. Valores de la distancia en [cm] del infrarrojo

6.2. Trayectoria 2:

En esta trayectoria se situará al robot en una habitación a una distancia de 80 cm de una señal de tráfico. En esta trayectoria, HOAP3 tendrá que andar hacia la señal y cuando esté a 40 centímetros tendrá que dar un paso hacia atrás y comenzará a ejecutar un ejercicio con la espada que consistirá en:

- Abrir la mano izquierda
- Levantar el brazo izquierdo por encima del hombro
- Coger una espada situada en la espalda
- Cerrar la mano izquierda
- Desenvainar la espada
- hacer unos movimientos de exhibición con la espada

Tras esta demostración, HOAP3 retrocederá un paso atrás, abrirá la mano para dejar caer la espada al suelo y volverá a retroceder otro paso para atrás.

Para esta trayectoria se ha necesitado programar determinados movimientos como son:

- Forward → Paso hacia delante de 10 cm
- Backward → Paso hacia atrás de 10 cm
- open → abre la mano izquierda
- close → cierra la mano izquierda
- tray01 → Movimiento inicial para alcanzar la espada situada en la espalda
- ninja → Movimiento de exhibición con la espada

El robot comenzará la trayectoria “ninja” en el momento en que ha agarrado la espada y esto se sabe porque recibe la señal que le proporciona el sensor FSR situado en la mano izquierda y en función de esa información, si no la agarra, por el motivo que fuera, no seguirá ejecutando la trayectoria. En el momento en que la espada es agarrada, se prosigue con la trayectoria.

El principal motivo de la colocación de la señal de tráfico situada delante del robot es para comprobar el correcto funcionamiento del sensor infrarrojo con cualquier material, ya sea una pared blanca como sucedía en la trayectoria anterior como con una superficie metálica y reflectante como en este caso.

En esta trayectoria además el robot será capaz de proporcionar el valor de todos los sensores que tiene instalados y guardar esos datos en un archivo para posteriormente poder calcular el ZMP, el peso del robot y los valores de los FSR de las manos, del acelerómetro y del giróscopo al ejecutar dicha trayectoria.

A continuación se expone gráficamente la trayectoria y se explicará paso a paso que es lo que está sucediendo y al finalizar la trayectoria se expondrán gráficamente cuáles son los valores que toman cada uno de los sensores durante todo el recorrido, seguidos de un breve comentario.

Al comienzo de la trayectoria, el robot se sitúa a 80cm de distancia de la pared aproximadamente. Comienza a andar y cuando detecta que la pared se encuentra a 40cm, se detiene (Figura 140). La distancia que ha recorrido el robot corresponde a haber ejecutado cuatro veces el movimiento llamado forward en el que se desplaza unos 10cm por cada ejecución.

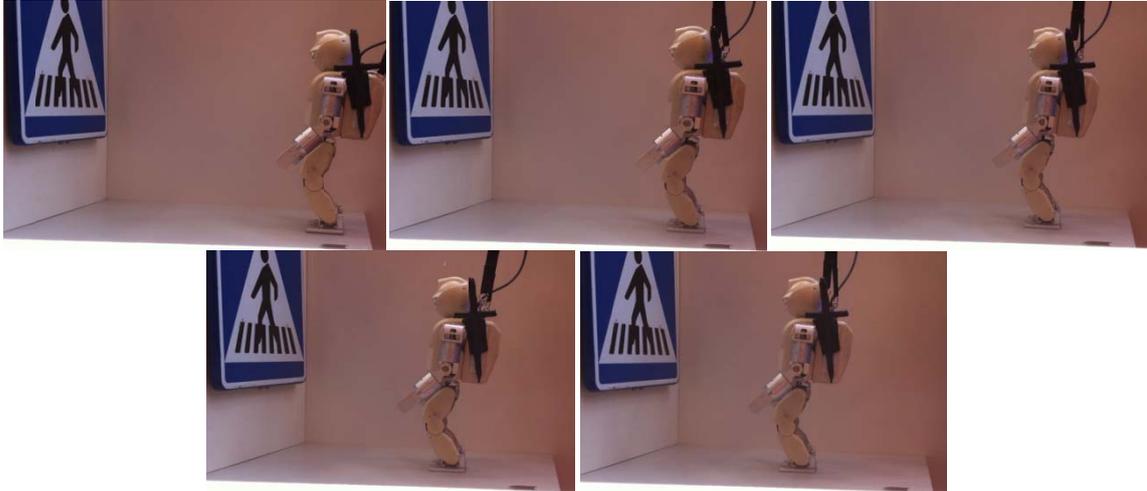


Figura 140. Trayectoria 2. HOAP3 andando hacia delante hasta encontrar la pared

A continuación el robot ejecuta una sola vez la trayectoria backward para poder realizar el movimiento de la espada sin que se golpee con la señal (Figura 141).



Figura 141. Trayectoria 2. HOAP3 dando un paso atrás

Una vez está en posición, abre la mano izquierda y levanta el brazo por encima del hombro para poder alcanzar la espada y a continuación cierra la mano izquierda (Figura 142).



Figura 142. Trayectoria 2. HOAP3 alcanzando la espada de su espalda

Después de cerrar la mano, el robot desenvaina la espada y comienza la ejecución del movimiento de la mano mientras sostiene la espada (Figura 143).

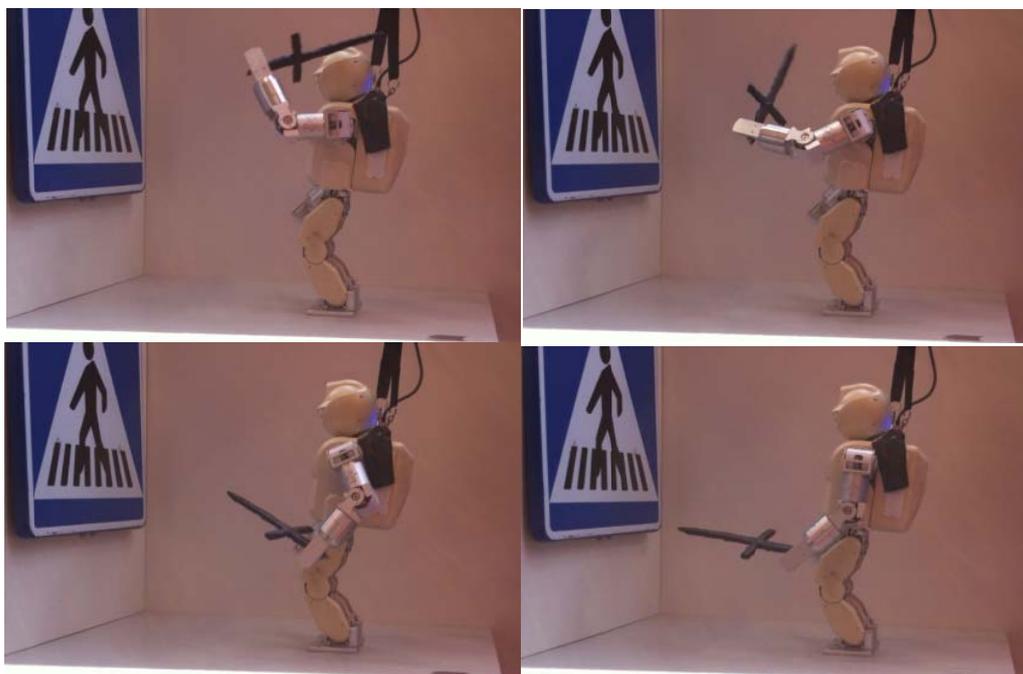


Figura 143. Trayectoria 2. HOAP3 ejecutando movimiento con espada

Al concluir la exhibición con la espada, HOAP3 retrocede un paso mediante la ejecución del movimiento backward para abrir la mano a continuación y dejar caer la espada al suelo y seguidamente ejecutar de nuevo el movimiento hacia atrás (Figura 144).

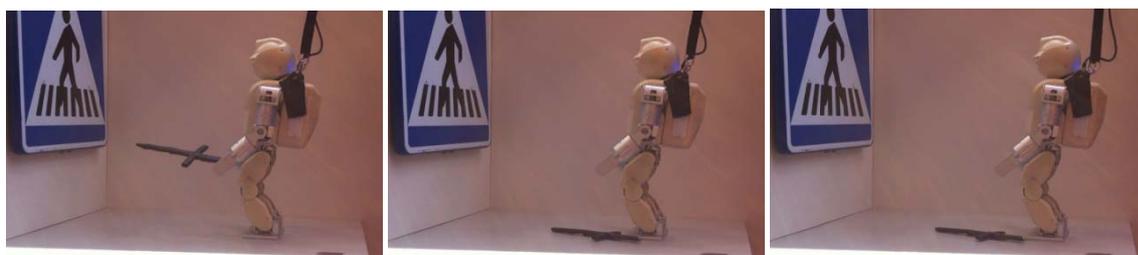


Figura 144. Trayectoria 2. HOAP3 retrocede, suelta la espada y retrocede una vez más.

Para hacer más comprensibles las simulaciones, en todas las gráficas se han acotado los tiempos de cada movimiento del robot con unos números que se explican a continuación. Esta trayectoria comprende 8 movimientos los cuales son:

- Nºs de 1 a 4 → Movimiento Forward
- Nº 5 → Movimiento Backward
- Nº 6 → Movimientos: open, tray01, close y ninja.
- Nº 7 → Movimientos Backward y open
- Nº 8 → Movimiento Backward

GRÁFICAS FSR UBICADOS EN LOS PIES DE HOAP3

Como se puede apreciar en la Figura 145, la fuerza ejercida por el robot sobre los sensores FSR de los pies cuando está situado sobre un apoyo simple, es decir, cuando el robot solamente está apoyado sobre una pierna, en este caso la derecha, es aproximadamente 80N. Como la trayectoria del robot es estable, ya que el robot no se cae en ningún momento, se puede comprobar cómo los valores del ZMP para el pie derecho están comprendidos entre 45 y -25mm para el eje X y entre 45 y -50mm para el eje Y, por lo que al no sobresalir estas medidas de la suela del pie se cumple el criterio de estabilidad del ZMP. La colocación del origen de estas medidas y las cotas de la suela se pueden comprobar gráficamente con la Figura 168.

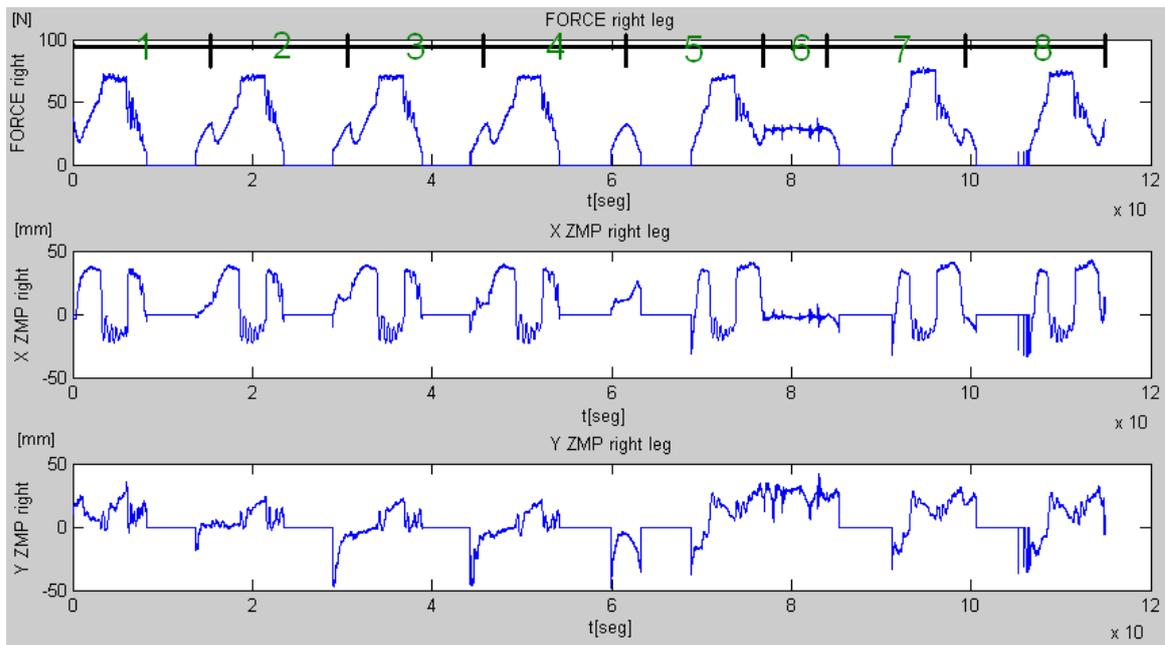


Figura 145. Trayectoria 2. Fuerza y ZMP pie derecho

En la Figura 146, la fuerza ejercida por el robot sobre los sensores FSR de los pies cuando está en apoyo simple, en este caso la pierna izquierda, es aproximadamente 80N. Como ocurría para el pie derecho, en este caso la trayectoria también es estable ya que los valores del ZMP para este pie están comprendidos entre 25 y -10mm para el eje X y entre 20 y -30mm para el eje Y, por lo que al no sobresalir estas medidas de la suela del pie se cumple el criterio de estabilidad del ZMP. La colocación del origen de estas medidas y las cotas de la suela se pueden comprobar gráficamente con la Figura 168.

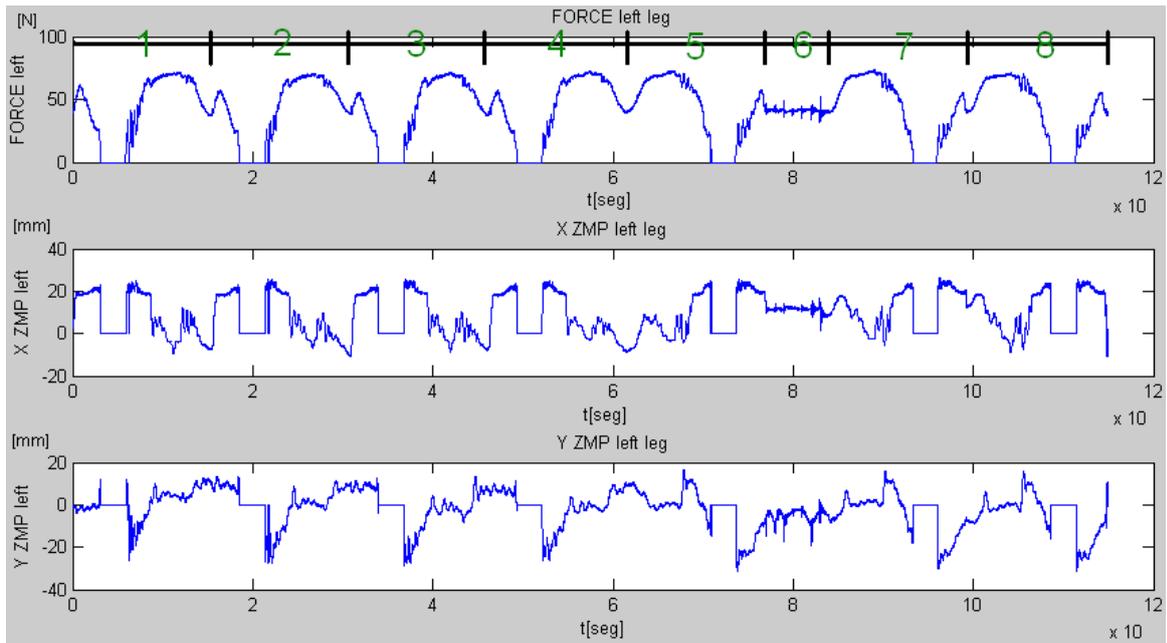


Figura 146. Trayectoria 2. Fuerza y ZMP pie izquierdo

La Figura 147 muestra los resultados simultáneos del cálculo del ZMP y fuerza de ambos pies y se aprecia claramente que cada pie realiza un recorrido distinto, debido a que el movimiento que realiza un pie no es el mismo que el del otro pie. Esto es, como también ocurría en la trayectoria 1, porque el pie izquierdo es el que primero despega del suelo y aterriza, y a continuación el pie derecho a es el que realiza el movimiento para desplazarse hacia el pie izquierdo.

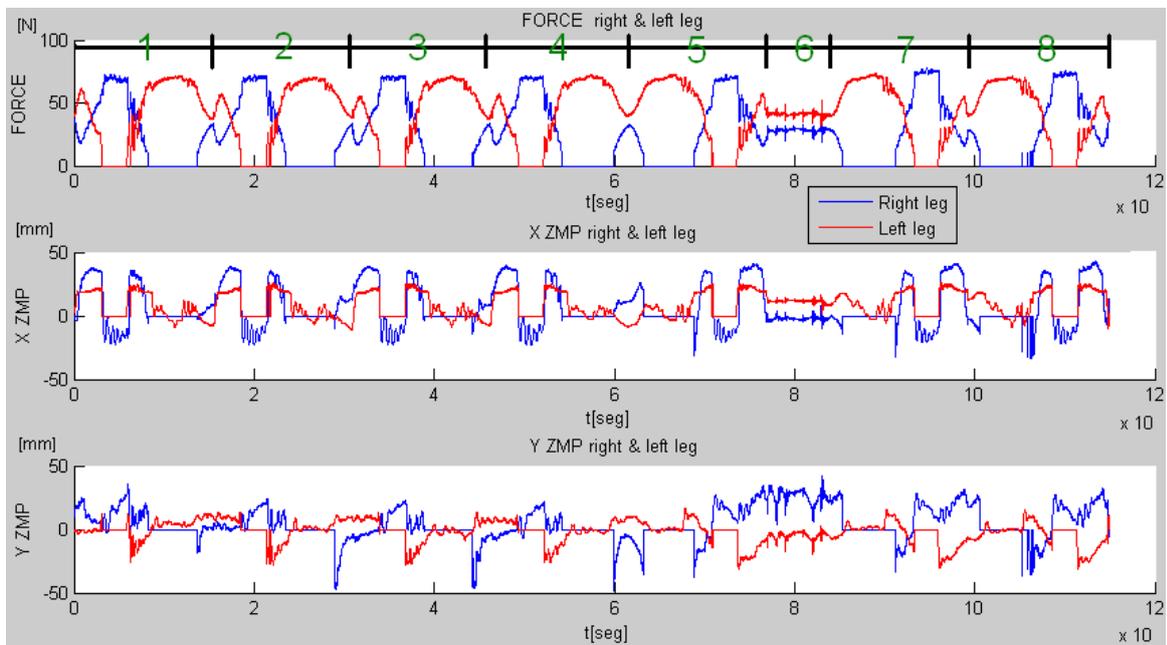


Figura 147. Trayectoria 2. Fuerza y ZMP pie derecho e izquierdo

GRÁFICAS FSR UBICADOS EN LAS MANOS DE HOAP3

Para esta trayectoria se ha recogido información del sensor FSR de la mano izquierda para poder continuar con el movimiento siguiente. La variación de los datos que se producía en la trayectoria 1 cuando el FSR estaba con la mano cerrada es la misma que se presenta para la mano derecha, la cual no se ha usado en esta trayectoria. La escala vertical de la gráfica perteneciente a la mano derecha no se ha modificado para poder comparar el comportamiento de esta gráfica con la de la trayectoria 1 (Figura 135) y observar que ambas tienen un comportamiento idéntico. Sin embargo, la mano izquierda presenta más fuerza cuando comienza el movimiento 6, debido a que ha agarrado la espada. El hecho de que el valor del sensor disminuya durante el movimiento 6 es culpa del material de la espada, que es flexible y provoca una disminución en la fuerza de agarre. Al finalizar el movimiento 7 se observa que el FSR de la mano izquierda deja de apretar el objeto y ello es debido a que se abre la mano para dejar caer la espada.

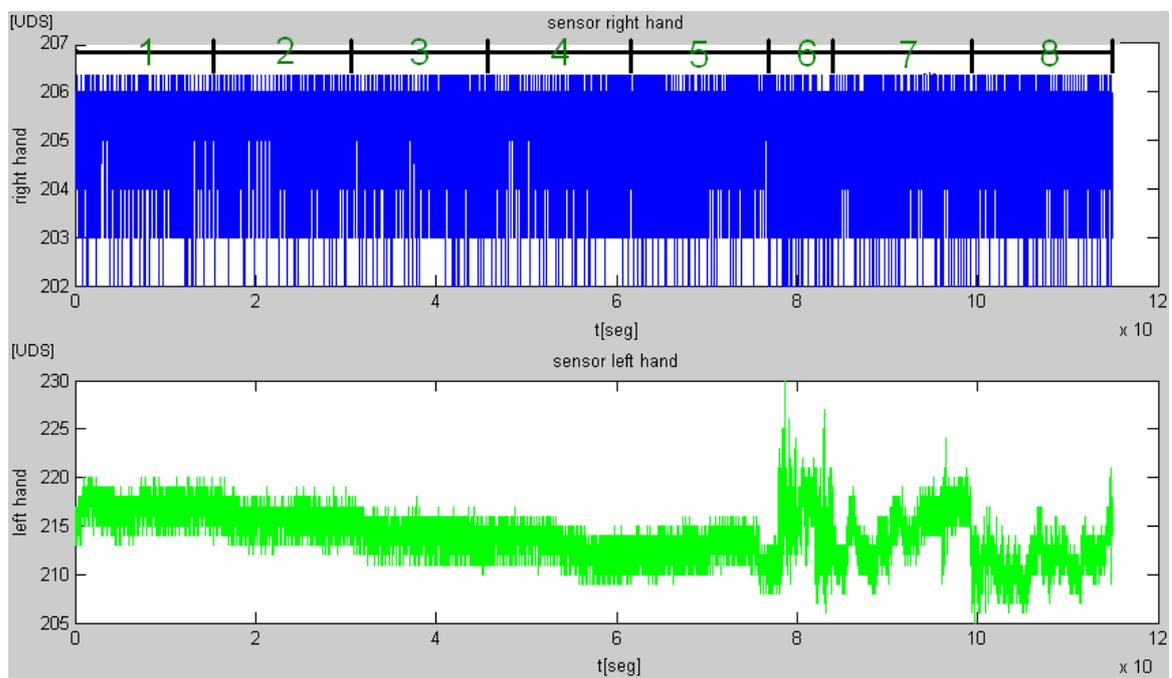


Figura 148. Trayectoria 2. Valor de FSR de la mano derecha e izquierda

GRÁFICAS GIRÓSCOPO DE HOAP3

Como se muestra en la Figura 149, el valor de los ejes del giróscopo varía en consecuencia al movimiento que está desarrollando el robot. Por ejemplo, para el desplazamiento del 1 al 4, en el que el robot anda hacia delante, el eje X refleja una variación de valores comprendidos entre 10 y -20 %/seg y los ejes Y y Z experimentan también una variación, aunque con unos valores menores. Notar que el movimiento del giróscopo cuando el robot está parado es de cero, por lo que la calibración está comprobada también para esta trayectoria. También se observa que los valores del giróscopo en cualquier eje se repite donde los movimientos son iguales, como es el caso de los movimientos 1 al 4, así como para el 5, 7 y 8.

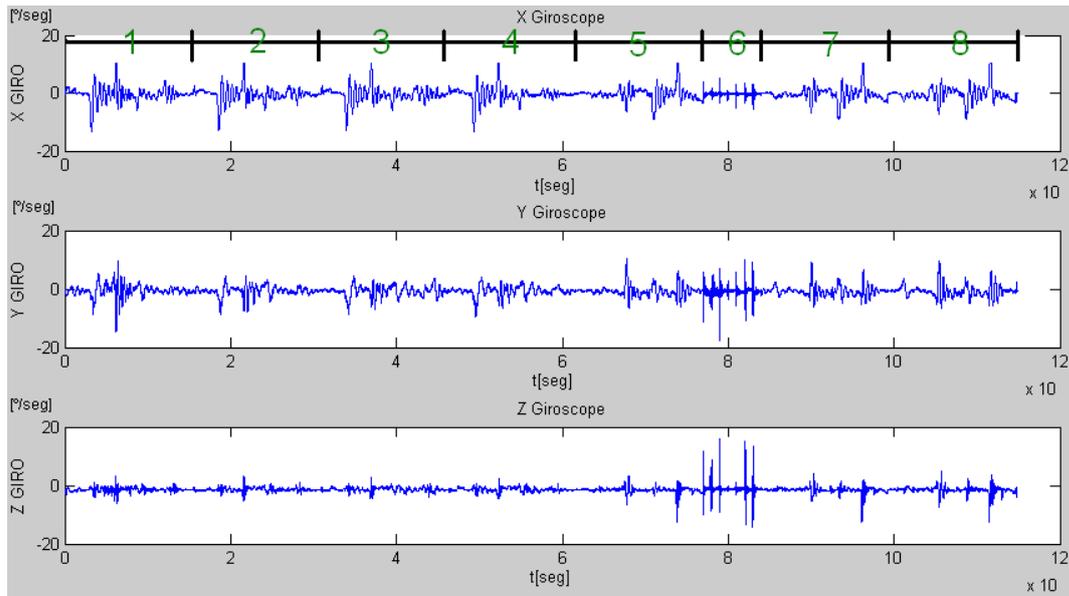


Figura 149. Trayectoria 2. Valores en los ejes X, Y, Z del gir6scopo

GRÁFICAS ACCELER6METRO DE HOAP3

Como ya se adelant6 en el cap6tulo 5 de calibraci6n, el sensor aceler6metro tiene mucho ruido provocado por los motores que tiene a su alrededor. Este ruido es el responsable de que los datos de la Figura 150 no se aprecien de forma correcta. Como ya se demostr6 en ese cap6tulo, este aceler6metro fue calibrado mientras el robot estaba suspendido en la jaula blanca y con los motores apagados para que el ruido no interfiriese en su calibraci6n. Aun as6 se puede apreciar como el eje Z mantiene casi sin oscilaciones aparentes el valor de la gravedad y todos los ejes var6an mientras se ejecuta el movimiento con la espada.

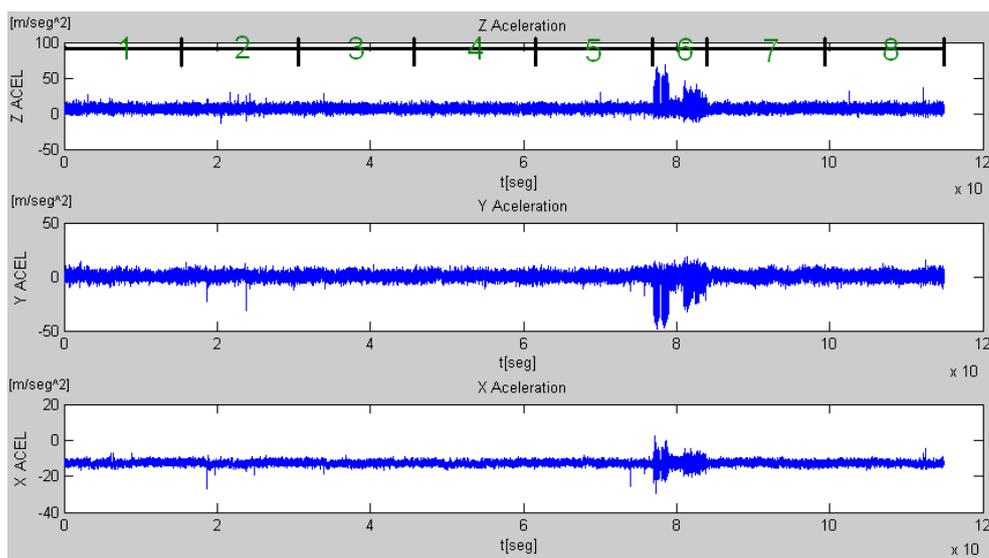


Figura 150. Trayectoria 2. Valores en los ejes Z, Y y X del aceler6metro

GRÁFICAS INFRARROJO DE HOAP3

De un primer vistazo, lo que llama más la atención en la Figura 151 es el valor del A/D tan elevado que se alcanza durante la ejecución de la trayectoria ninja. Este valor viene determinado por la localización por parte de los infrarrojos de la espada durante el movimiento 6. Otra apreciación es la cantidad de picos que se observan. Estos son producidos por la señal colocada delante del infrarrojo. Esta señal reflectante, al tener colores blanco, negro y azul alternados, provoca que el infrarrojo trabaje mal. Pero como se ha comentado en el ensayo 1, estos valores no son perjudiciales para la ejecución del programa.

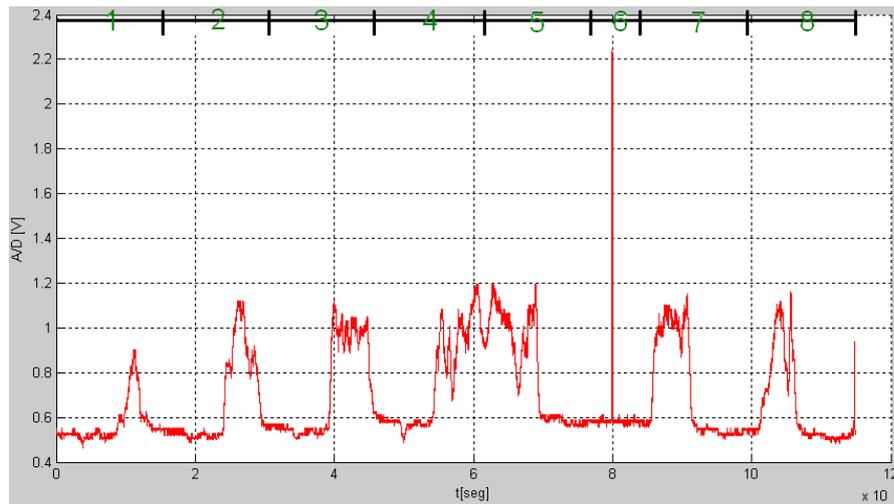


Figura 151. Trayectoria 2. Valores de tensión del convertidor A/D del infrarrojo

Para obtener la distancia del infrarrojo en cm se realizan los pasos explicados en el capítulo 5 de calibración y se consiguen unos datos variables entre 10cm y 60cm que aproximadamente es el rango efectivo del sensor. El robot por cada uno de los movimientos 1,2, 3 y 4 va acercándose a la pared hasta llegar a los 40 cm de distancia donde comienza a retroceder un paso (movimiento 5). A continuación ejecuta el movimiento 6 donde la espada es detectada a una distancia de 15cm del infrarrojo.

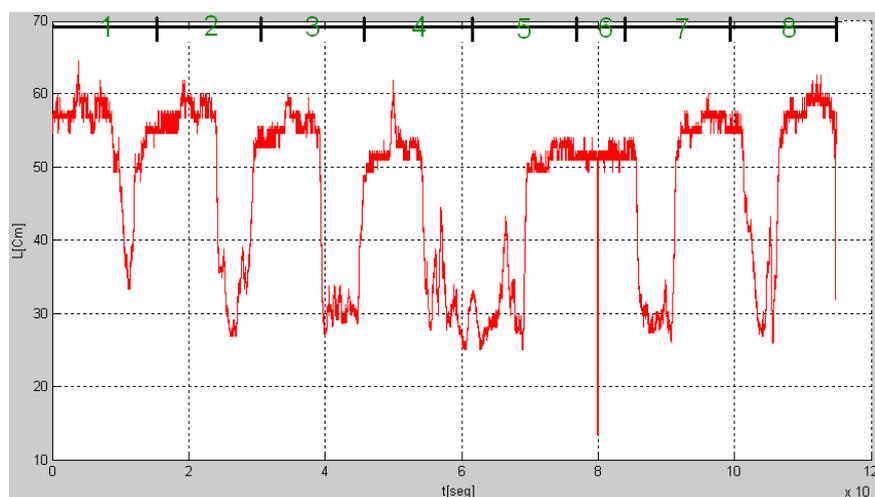


Figura 152. Trayectoria 2. Valores de la distancia en [cm] del infrarrojo

Capítulo 7

Conclusiones y trabajos futuros

7.1. Conclusiones:

La correcta obtención de la información proporcionada por todos los sensores de HOAP3, hace posible que el robot pueda calcular todos los parámetros necesarios para interactuar con el medio que le rodea de una forma eficiente. De esta manera el robot podrá generar trayectorias con las que pueda anticiparse a posibles golpes, tropiezos, caídas, etc.

Esta correcta obtención de los datos es lo que se ha llevado a cabo en este trabajo, mediante la calibración de todos los sensores del robot. Al ser diferentes sensores, se han tenido que implementar diversos métodos de calibración hasta conseguir obtener unos datos precisos tras la realización de diversas pruebas y ensayos. Tras comprobar estas calibraciones mediante el uso de dos trayectorias diferentes se ha determinado que la calibración de los sensores es correcta. Como cualquier otra calibración, y esta no va a ser menos, se ha de mantener, puesto que se ha comprobado que en un período de 3 meses, la calibración de los sensores FSR había perdido efectividad, de tal forma que en caso de observar algún error en la obtención del peso del robot, ha de realizarse dicha calibración. Los sensores giróscopo, acelerómetro, e infrarrojo se ha comprobado que mantienen esta calibración, al menos en ese periodo de tiempo de 3 meses.

Los resultados obtenidos tras el desarrollo de este Proyecto Fin de Carrera se desarrollan a continuación:

Revisión del sistema sensorial del robot HOAP3. Tras la realización de diversas pruebas se llegó a la conclusión de que se necesitaba realizar algún arreglo en el sistema sensorial debido a que a pesar de obtener datos de los sensores, estos presentaban unas variaciones muy grandes tras la repetición de la misma trayectoria. Se tomó la iniciativa de desmontar y analizar cada sensor para verificar por separado su correcto funcionamiento a fin de verificar su correcto estado.

Modificación del sistema sensorial del robot HOAP3. Tras la revisión, se realizaron diversas pruebas en las que se modificarían determinados sensores, como fueron los FSR de los pies que se suplementaron con unos calzos para comprobar la mejora o empeoramiento de los datos. Tras una serie de pruebas se llegó a la determinación de que estos suplementos dotaban al sensor de un ruido innecesario en la medida. Tras la comprobación de todos los sensores se optó por realizar una calibración exclusiva para cada sensor, realizando de nuevo otras pruebas que mejoraban sustancialmente los datos obtenidos.

Validación experimental del sistema sensorial del robot HOAP3. Acabada la modificación se debía validar esa calibración efectuada y para ello se optó por la realización de dos trayectorias en las que el robot ejecutaría diversos movimientos en función de las señales que recibiese de algunos sensores. Además el robot tendría que obtener los datos de todos los sensores para su posterior procesamiento, graficado y estudio de los resultados en los que se aprecia que la calibración obtenida es bastante fiable.

7.2. Trabajos futuros:

En este apartado se expondrán determinados trabajos o proyectos que pueden comenzar a realizarse gracias a la finalización de este PFC. Entre los trabajos más interesantes, destacar:

- **Obtención en tiempo real de los datos sensoriales del robot:** donde, partiendo del código de programación utilizado para calcular el valor de todos los sensores, se tendrán que implementar otros códigos que permitan realizar estos cálculos desde dentro del robot y no offline como se ha estado realizando hasta ahora.
- **Implementación de un filtro de Kalman [14]:** El filtro de Kalman es un conjunto de ecuaciones matemáticas que proporciona un medio computacional eficiente (recursivo) para estimar el estado de un proceso, de manera que minimiza el promedio de error al cuadrado. Mediante la obtención del valor del acelerómetro y el giróscopo del robot, se tendrán que realizar las operaciones necesarias para conseguir un filtro de Kalman que permita la obtención de la postura del robot.

CAPÍTULO 7: Conclusiones y trabajos futuros

- **Cálculo de la posición del robot a partir del ZMP:** A partir de los datos del ZMP, ya calculado, se debe determinar la posición del robot para el caso de encontrarse sobre un apoyo simple y además para el caso de estar en doble soporte.
- **Combinación del filtro de Kalman y el ZMP:** Con el fin de conseguir calcular con mayor exactitud la ubicación del robot, a partir de la combinación de estas dos herramientas se podrá saber con exactitud la postura y la posición del robot.
- **Generación de trayectorias online mediante la información del sensor infrarrojo:** De esta manera se podrá hacer un reconocimiento de los obstáculos que rodean al robot y así conseguir trazar una trayectoria que sirva de escape y con la que poder evitar una colisión.

Capítulo 8

Anexos

8.1. Localización y acceso a los sensores:

8.1.1. FSR de los pies

Para acceder a estos sensores, el robot tiene que estar tumbado boca abajo y las suelas giradas de tal forma que los pies queden mirando hacia arriba.



Figura 153. Robot tumbado preparado para desmontar sensores FSR de los pies

LOCALIZACIÓN y acceso a los sensores:

1º) Se quitan los cuatro tornillos de la parte inferior de la suela del robot (a) y se puede ver una parte de los sensores (b).

2º) Posteriormente se extraen los cuatro tornillos que son los que sujetan ambas partes metálicas de la suela y se accede a ver los Sensores FSR en su totalidad (c) y (d).

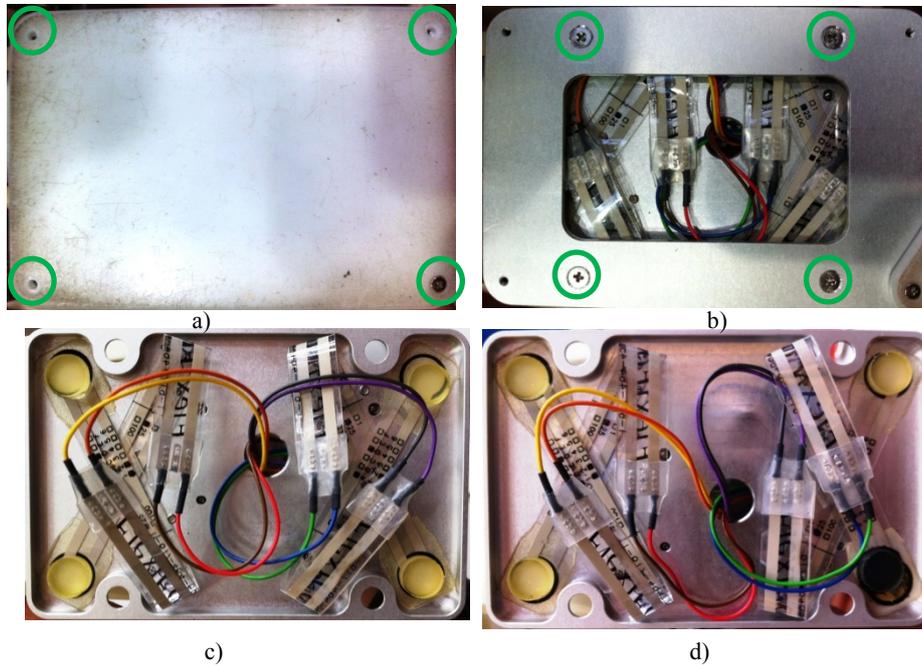


Figura 154. a) Tornillos suela. b) Tornillos plancha metálica. c) FSR pie derecho. d) FSR pie izquierdo

Los tornillos de la figura (b) se aprietan dentro de unos pasadores roscados y que tienen la siguiente forma.



Figura 155. Vista del pasador roscado, Tornillo antiguo, Tornillo nuevo y Muelle de ajuste

Estos pasadores llevan alrededor un muelle, el cual sirve para liberar a los sensores de la presión una vez que el robot no pisa sobre el suelo.

Destacar que se tuvieron que sustituir los tornillos de serie (tornillo de la izquierda), por unos de mayor longitud (tornillo de la derecha) para conseguir que las partes metálicas se sujetaran mejor y de esta manera reducir el cabeceo que estos producían.

8.1.2. FSR de las manos

A estos sensores se accede de la siguiente manera:

1º) Desmontar la chapa situada en el lateral del dedo pulgar; para ello se extraen cuatro tornillos, dos de ellos se visualizan en la Figura 156, mientras que los otros dos están situados en la cara opuesta del dedo pulgar.



Figura 156. Detalle del sensor FSR para su desmontaje

Al extraer la chapa tener especial cuidado en no extraviar un pasador metálico con forma cilíndrica que tiene la misión de facilitar el cierre del dedo pulgar y se encarga de unir éste con la mano.

2º) Desmontar la muñeca del robot desde donde se podrá acceder tanto a la conexión eléctrica del sensor FSR, como a los actuadores encargados de extender y contraer los dedos de la mano. En la Figura 86 de la página 87 se pueden apreciar esos actuadores.

8.1.3. Giróscopo

Los giróscopos se sitúan en el interior de la cintura del robot. A estos sensores se tienen que acceder de la siguiente manera:

1º) Se retira la carcasa delantera del robot, dejando al descubierto el hueco donde se instala la batería.

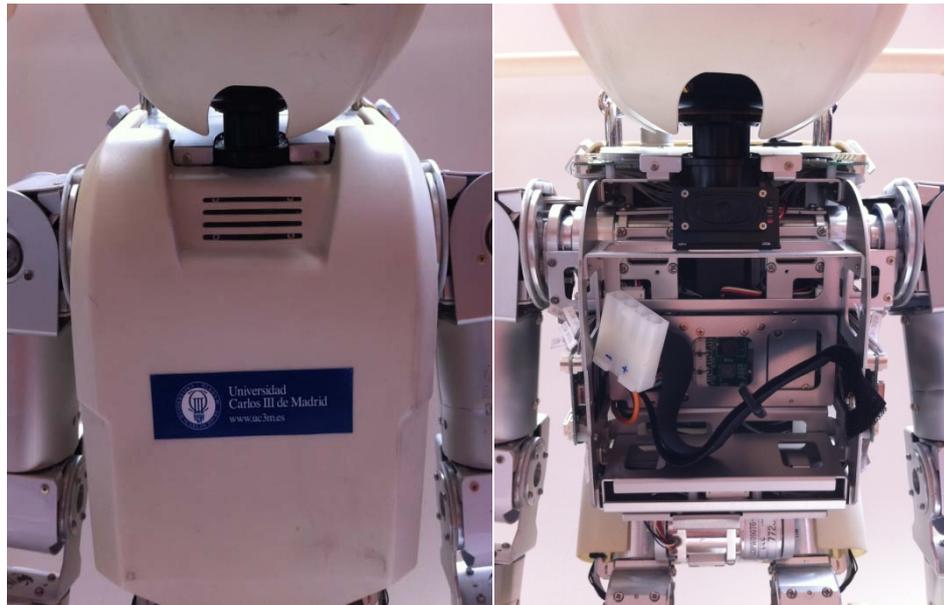


Figura 157. Extracción carcasa frontal y acceso a hueco que alberga la batería

2º) Se extraen los dos tornillos situados en la parte media de la chapa de sujeción de los sensores y se retira para poder acceder a los giróscopos.



Figura 158. Placa metálica de acceso a los sensores giróscopo y acelerómetro

3º) Se voltea la placa metálica y se accede a los sensores giróscopos que están instalados sobre una estructura con forma de cubo como se puede apreciar en la siguiente figura.

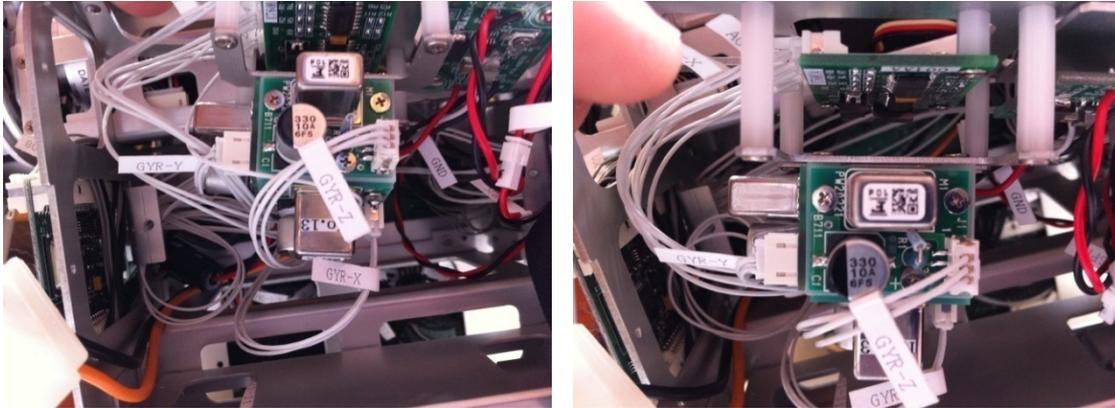


Figura 159. Disposición de los sensores giróscopos

Esta estructura proporciona el grado de orientación necesario para situar los sensores con una configuración dextrógira. Notar que la parte más alta de los sensores está orientada hacia el sentido negativo del eje al que corresponde, es decir, para el eje X por ejemplo, la parte más alta del sensor apunta hacia la zona de las X negativas.

Los sensores están sujetos a la chapa metálica mediante unos esparragos blancos de plástico. La placa de circuito impreso que se aprecia en lo alto de la figura corresponde con la placa que alberga el sensor acelerómetro.

8.1.4. Acelerómetro

El acelerómetro se sitúa también en el interior de la cintura del robot, a la misma altura y justo frente a la instalación de los giróscopos. A este sensor se accede de la misma forma que a los giróscopos, pero además se tienen que retirar los tres tornillos centrales que se ven en la siguiente figura:



Figura 160. Tornillos de acceso al acelerómetro

A diferencia de los giróscopos, el acelerómetro es solamente un componente electrónico que apunta a la parte frontal del robot y que proporciona la aceleración sobre los ejes X, Y y -Z.

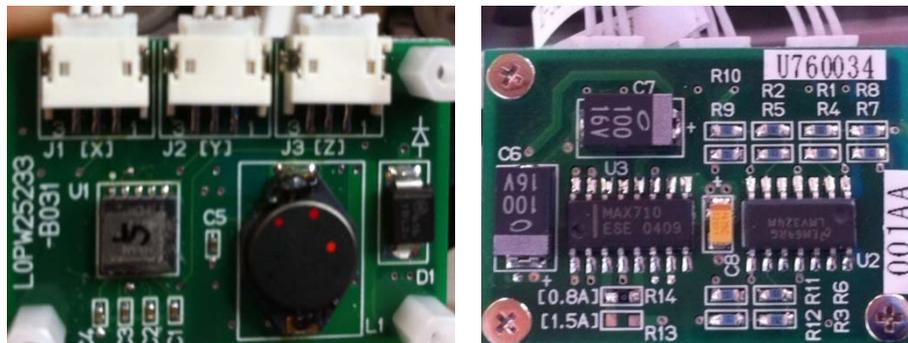


Figura 161. Anverso y reverso de la placa del acelerómetro.

8.1.5. Infrarrojo

Este sensor está situado en la frente del robot y apuntando hacia delante como se muestra en la Figura 162:



Figura 162. Ubicación del sensor infrarrojo

Como se aprecia en la imagen, se diferencian tres agujeros formando un triángulo que corresponden a los siguientes componentes:

- El agujero superior corresponde a un micrófono.
- Los dos agujeros inferiores corresponden al sensor infrarrojo

Para acceder a él hay que seguir los siguientes pasos:

1º) Se desmonta la parte trasera de la cabeza del robot extrayendo los cuatro tornillos que se muestran a continuación:



Figura 163. Desmontaje de la carcasa trasera que cubre la cabeza del robot.

2º) Se desmonta la parte delantera de la cabeza del robot extrayendo los cuatro tornillos que se muestran a continuación

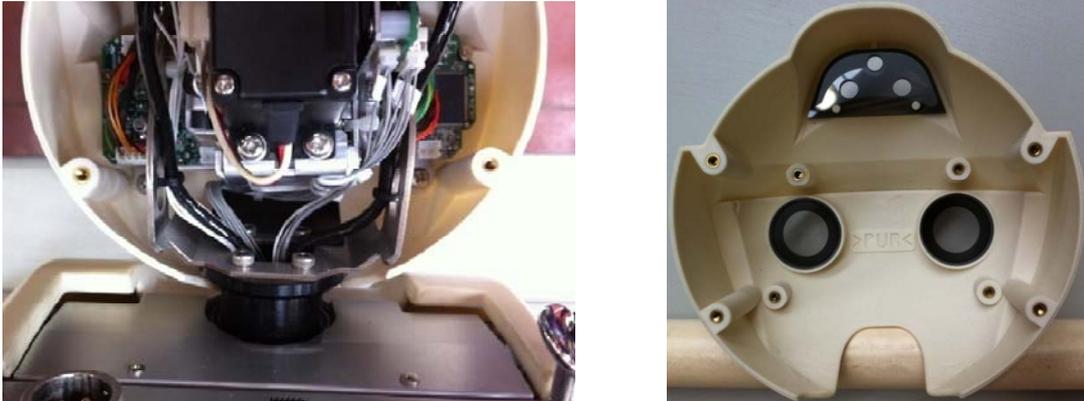


Figura 164. Desmontaje de la carcasa delantera que cubre la cabeza del robot.

Una vez quitados los plásticos queda la siguiente vista (Figura 165) de la frente del robot, en la que se observa claramente la situación del sensor infrarrojo debajo del micrófono.



Figura 165. Vista interior del micrófono y el sensor infrarrojo

3º) Para desmontar el sensor de su chasis metálico de sujeción se tendrán que desenroscar dos tornillos y ya se tendrá acceso total al sensor infrarrojo.

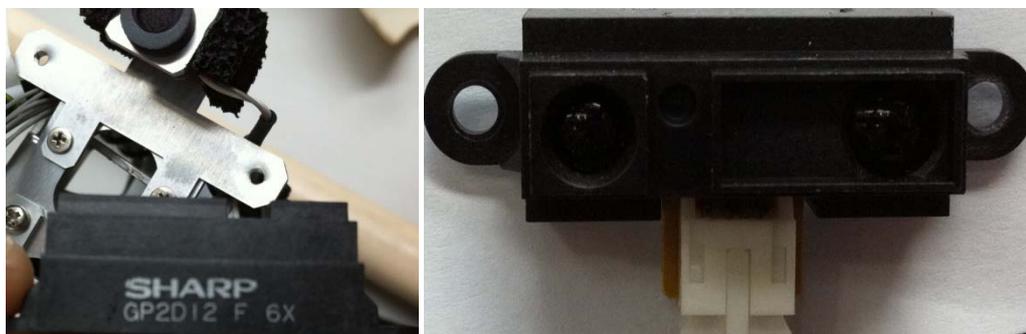


Figura 166. Desmontaje final del sensor infrarrojo

Si lo que se quiere ahora es comprobar la parte interna del sensor infrarrojo, lo único que hay que quitar es el tornillo situado en la placa de circuito impreso del sensor y se podrá ver lo que se muestra a continuación:



Figura 167. Circuito impreso interior del sensor infrarrojo

8.2. Construcción plantilla de calibración:

Debido a que para poder desarrollar la parte de calibración_V1 se necesitaban colocar determinados pesos en distintas posiciones de la suela del robot, se tuvo que implementar una plantilla para cada suela del pie, en las cuales figurasen los puntos sobre los que se tenía que hacer presión, así como el eje de coordenadas utilizado como referencia en el cálculo del ZMP. La situación de los puntos es la siguiente:

- Cuatro puntos, uno por cada sensor y situados encima de éstos quedando a una distancia próxima a las esquinas de la suela del pie.
- Un punto situado justo debajo de la articulación del tobillo.

Los puntos de la plantilla se colocaron a las distancias proporcionadas por el manual del robot, las cuales se marcaron con rotuladores indelebles sobre una superficie plástica con adhesivo que serviría para fijarla a la suela. Además se superpuso una capa del mismo material transparente sobre ella, de manera que lo pintado sobre la suela no se estropease al entrar en contacto y rozar con el suelo.

La figura siguiente refleja la forma de colocación de las plantillas en la suela del robot, siendo la ubicada en la izquierda la referida al pie izquierdo y la derecha la referida al pie derecho. La parte superior corresponde al talón del pie mientras que la parte inferior es la puntera del robot.

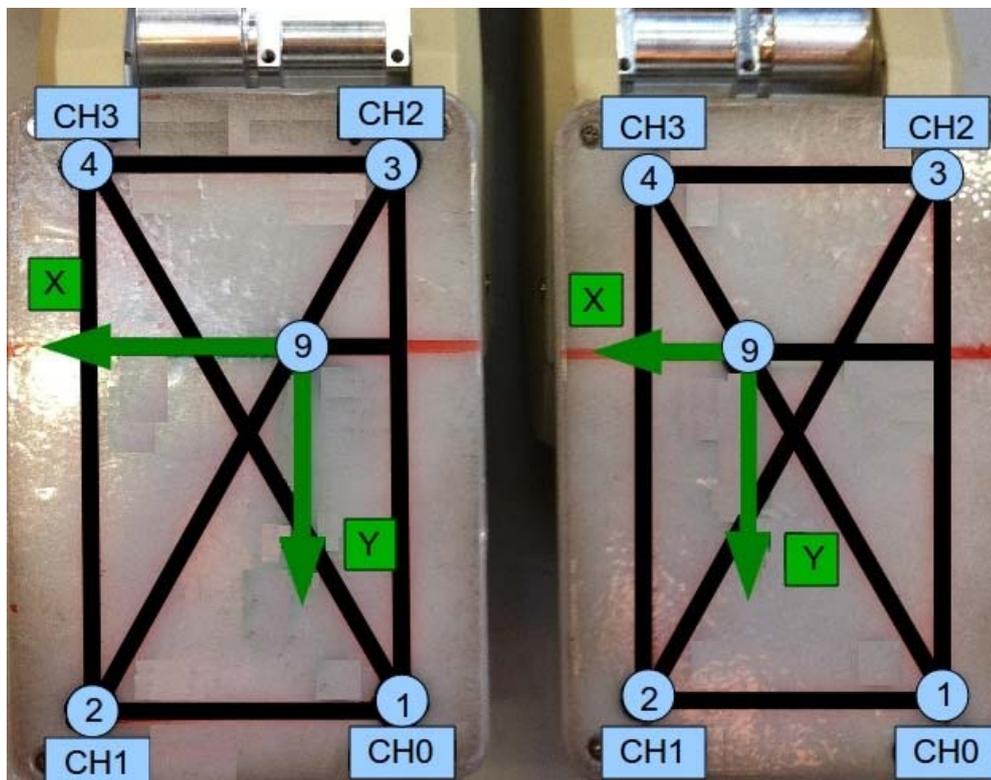


Figura 168. Plantillas izquierda y derecha para calibración sensores FSR de pies

Las medidas de colocación de los puntos referidos a la Figura 168 se describen a continuación:

Distancia del sensor CH0 o CH2 al sensor CH1 o CH3 respectivamente es de 47mm
Distancia del sensor CH0 o CH1 al sensor CH2 o CH3 respectivamente es de 83mm
Distancia vertical del sensor CH2 o CH3 al punto 9 es de 55,5mm
Distancia vertical del sensor CH0 o CH1 al punto 9 es de 27,5mm
Distancia horizontal pie izquierdo del sensor CH0 o CH2 al punto 9 es de 18,5mm
Distancia horizontal pie izquierdo del sensor CH1 o CH3 al punto 9 es de 28,5mm
Distancia horizontal pie derecho del sensor CH0 o CH2 al punto 9 es de 28,5mm
Distancia horizontal pie derecho del sensor CH1 o CH3 al punto 9 es de 18,5mm

Destacar que a la hora de completar el documento excel con los datos obtenidos de los sensores al colocar las pesas sobre los diferentes puntos, el método usado para completar la tabla será el siguiente:

- Completar la tabla Loading Point P1 con los valores obtenidos para todos los sensores al colocar la carga de 1kg a 8kg sobre el sensor CH0 de las plantillas.
- Completar la tabla Loading Point P2 con los valores obtenidos para todos los sensores al colocar la carga de 1kg a 8kg sobre el sensor CH1 de las plantillas.
- Completar la tabla Loading Point P3 con los valores obtenidos para todos los sensores al colocar la carga de 1kg a 8kg sobre el sensor CH2 de las plantillas.
- Completar la tabla Loading Point P4 con los valores obtenidos para todos los sensores al colocar la carga de 1kg a 8kg sobre el sensor CH3 de las plantillas.
- Completar la tabla Loading Point P9 con los valores obtenidos para todos los sensores al colocar la carga de 1kg a 8kg sobre el punto 9 de las plantillas.

8.3. Construcción plataforma de calibración:

Esta plataforma de color azul y con forma rectangular ha sido utilizada para la calibración final de los FSR de los pies, bautizada como calibración_V2.

Ha sido necesaria la construcción de dicha plataforma debido a la imposibilidad de obtener datos correctos al intentar la calibración suplementando el robot con otros medios que se describen el apartado 5.1.

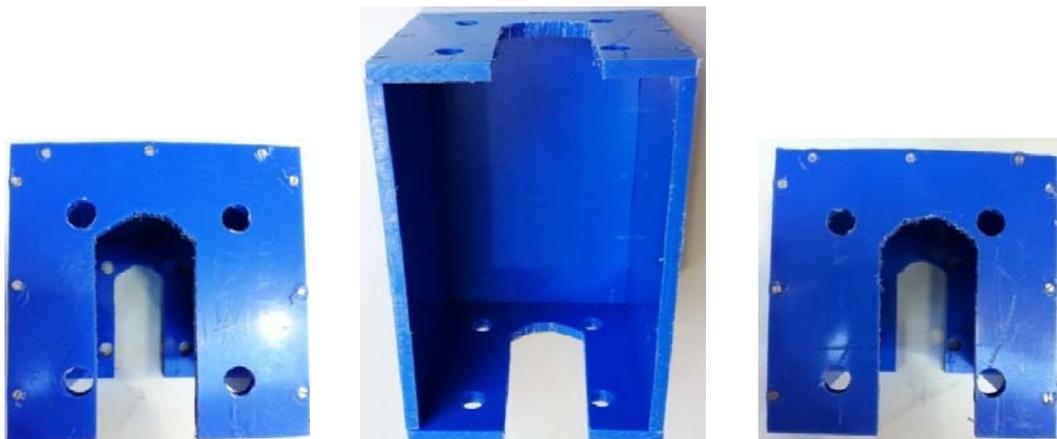


Figura 169. Plataforma de calibración para ambos pies

La plataforma tiene dos posiciones de colocación en función de si se quiere calibrar el pie derecho o el pie izquierdo. Como se aprecia en la Figura 169, la parte fresada no está centrada, con lo que volteando la plataforma 180° se podrá invertir su posición. Destacar que para la calibración del pie izquierdo habrá que situar la parte más ancha en la derecha observando la plataforma desde arriba (imagen de la izquierda), mientras que para la calibración del pie derecho, la parte más ancha quedará a la izquierda como se muestra tanto en la imagen central y derecha.

A partir de una plancha de medidas (400x400x10)mm de material plástico de color azul se han recortado cinco piezas de diferentes medidas. Dos de ellas se han fresado con diferentes dibujos y posteriormente todas las piezas se han ensamblado con tornillos muy finos, dado que la sección del material no permitía un tamaño mayor. Con esto se ha diseñado esta plataforma rectangular de medidas (165x110x110) que encaja perfectamente en cada uno de los pies del robot.

La plataforma crea un apoyo perfecto del empeine del pie, consiguiendo librar los tornillos de ajuste de la suela con esos cuatro taladros que perforan ambas superficies, pudiendo realizar la calibración de forma estable como se puede apreciar en la figura siguiente:

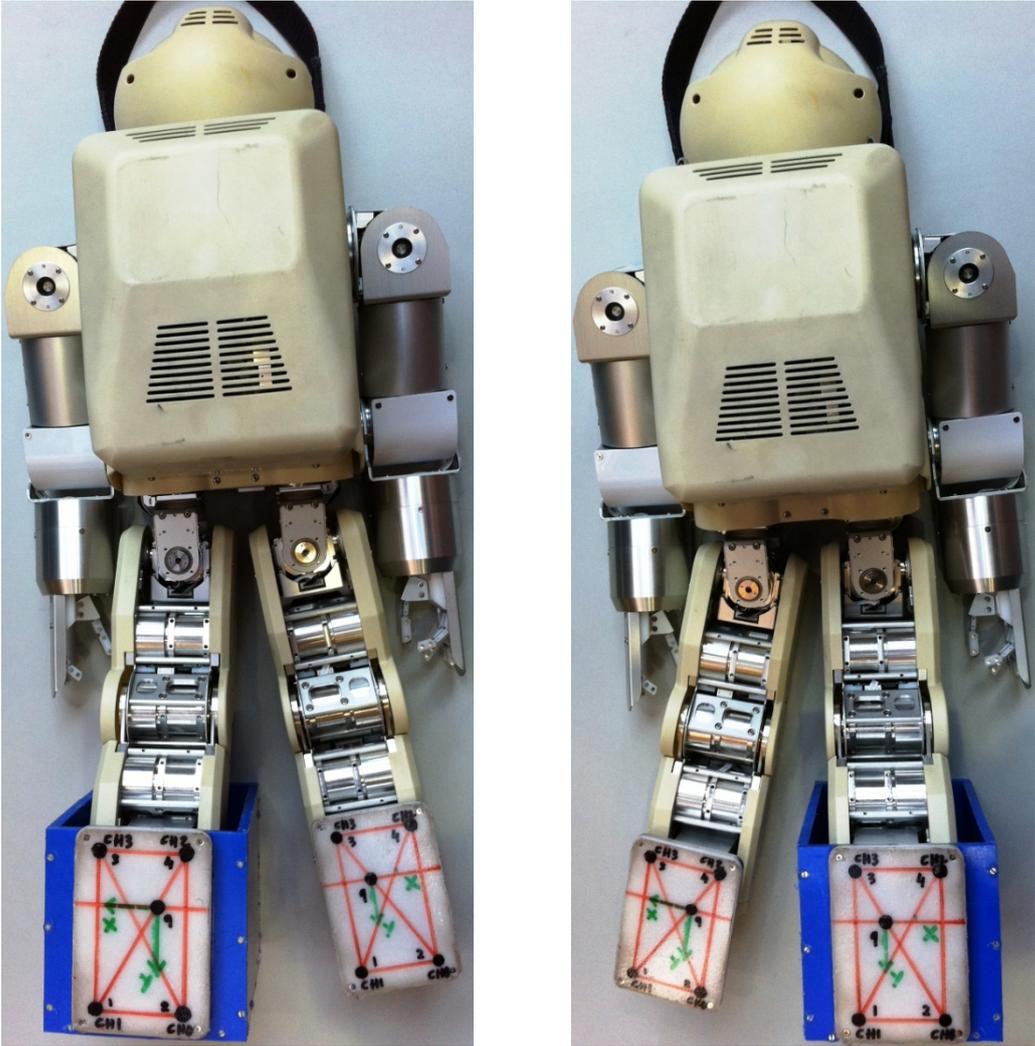


Figura 170. Plataforma de calibración instalada en el pie izquierdo y derecho

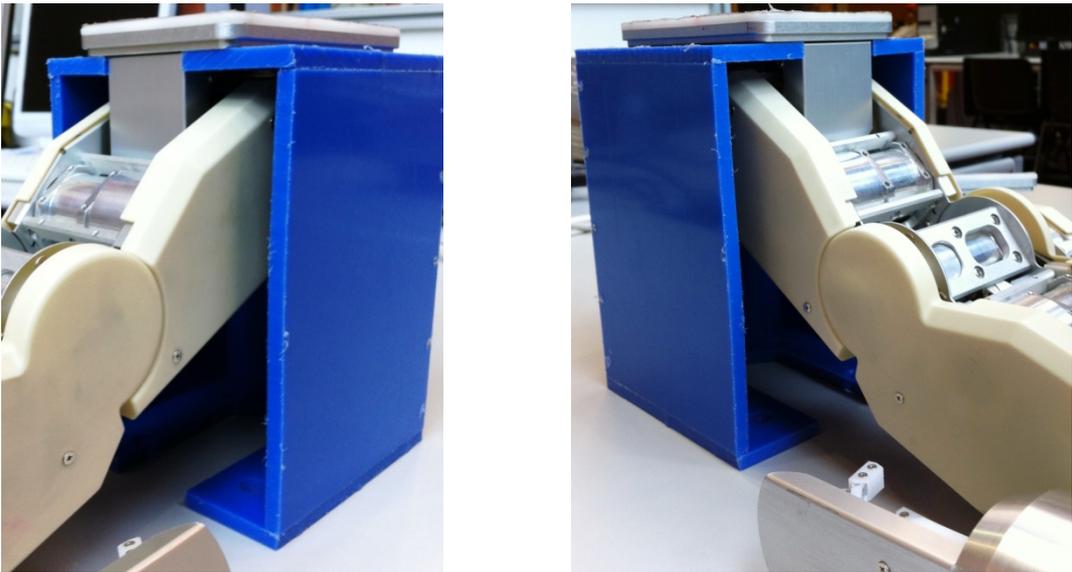


Figura 171. Detalle de la sujeción de la plataforma en pie izquierdo y pie derecho

8.4. Especificaciones de los FSR:

INTRODUCTION

This manual [] describes how to use Tekscan's *FlexiForce Sensors*. These sensors are ideal for designers, researchers, or anyone who needs to measure forces without disturbing the dynamics of their tests. The *FlexiForce* sensors can be used to measure both static and dynamic forces (up to 1000 lbf.), and are thin enough to enable non-intrusive measurement.

The *FlexiForce* sensors use a resistive-based technology. The application of a force to the active sensing area of the sensor results in a change in the resistance of the sensing element in inverse proportion to the force applied

OVERVIEW

This section outlines Sensor Construction and Application.

FLEXIFORCE SENSORS

The *FlexiForce* sensor is an ultra-thin and flexible printed circuit, which can be easily integrated into most applications. With its paper-thin construction, flexibility and force measurement ability, the *FlexiForce* force sensor can measure force between almost any two surfaces and is durable enough to stand up to most environments. *FlexiForce* has better force sensing properties, linearity, hysteresis, drift, and temperature sensitivity than any other thin-film force sensors. The "active sensing area" is a 0.375" diameter circle at the end of the sensor.

The sensors are constructed of two layers of substrate. This substrate is composed of polyester film (or Polyimide in the case of the High-Temperature Sensors). On each layer, a conductive material (silver) is applied, followed by a layer of pressure-sensitive ink. Adhesive is then used to laminate the two layers of substrate together to form the sensor. The silver circle on top of the pressure-sensitive ink defines the "active sensing area." Silver extends from the sensing area to the connectors at the other end of the sensor, forming the conductive leads.

FlexiForce sensors are terminated with a solderable male square pin connector, which allows them to be incorporated into a circuit. The two outer pins of the connector are active and the center pin is inactive. The length of the sensors can be trimmed by *Tekscan* to predefined lengths of 2", 4" and 6" or can be trimmed by the customer. If the customer trims the sensor, a new connector must be attached. This can be accomplished

by purchasing staked pin connectors and a crimping tool. A conductive epoxy can also be used to adhere small wires to each conductor.

The sensor acts as a variable resistor in an electrical circuit. When the sensor is unloaded, its resistance is very high (greater than 5 Meg-ohm); when a force is applied to the sensor, the resistance decreases. Connecting an ohmmeter to the outer two pins of the sensor connector and applying a force to the sensing area can read the change in resistance.

Sensors should be stored at temperatures in the range of 15°F (-9°C) to 165°F (74°C)

Standard FlexiForce Sensors

The Standard A201 sensor is available in the following force ranges:

- Sensor A201-1 (0-1 lb. force range)
- Sensor A201-25 (0-25 lb. force range)
- Sensor A201-100 (0-100 lb. force range)*

** In order to measure forces above 100 lbs. (up to 1000 lbs), apply a lower drive voltage and reduce the resistance of the feedback resistor (1kΩ min.). See the sample drive circuit below in Figura 172.*

High-Temperature FlexiForce Sensors

The High-Temperature HT201 sensor is available in the following force ranges* (as tested with the sample drive circuit).

- Sensor HT201-L Low: 0-30lb (133N) force range
- Sensor HT201-H High: 0-100lb (445N) force range

** In order to measure forces outside specified ranges, use recommended circuit and adjust drive voltage and/or reference resistance*

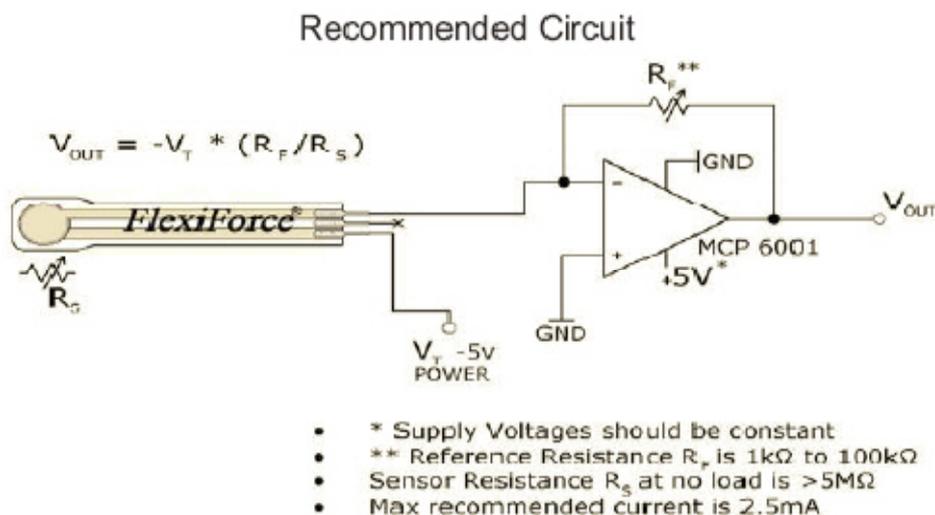


Figura 172. Circuito electrónico FlexiForce recomendado

APPLICATION

There are many ways to integrate the *FlexiForce* sensor into an application. One way is to incorporate it into a force-to-voltage circuit. A means of calibration must then be established to convert the output into the appropriate engineering units. Depending on

the setup, an adjustment could then be done to increase or decrease the sensitivity of the sensor.

An example circuit is shown below. In this case, it is driven by a -5 V DC excitation voltage. This circuit uses an inverting operational amplifier arrangement to produce an analog output based on the sensor resistance and a fixed reference resistance (RF). An analog-to-digital converter can be used to change this voltage to a digital output. In this circuit, the sensitivity of the sensor could be adjusted by changing the reference resistance (RF) and/or drive voltage (VT); a lower reference resistance and/or drive voltage will make the sensor less sensitive, and increase its active force range.

SENSOR LOADING CONSIDERATIONS

The following general sensor loading guidelines can be applied to most applications, and will help you achieve the most accurate results from your tests. It is important that you read the *Sensor Performance Characteristics* section for further information on how to get the most accurate results from your sensor readings.

SENSOR LOADING

The entire sensing area of the *FlexiForce* sensor is treated as a single contact point. For this reason, the applied load should be distributed evenly across the sensing area to ensure accurate and repeatable force readings. Readings may vary slightly if the load distribution changes over the sensing area.

Note that the sensing area is the silver circle on the top of the sensor only.

It is also important that the sensor be loaded consistently, or in the same way each time.

If the footprint of the applied load is smaller than the sensing area, the load should not be placed near the edges of the sensing area, to ensure an even load distribution.

It is also important to ensure that the sensing area is the entire load path, and that the load is not supported by the area outside of the sensing area.

If the footprint of the applied load is larger than the sensing area, it may be necessary to use a "puck." A puck is a piece of rigid material (smaller than the sensing area) that is placed on the sensing area to ensure that the entire load path goes through this area. The puck must not touch any of the edges of the sensing area, or these edges may support some of the load and give an erroneous reading.

The *FlexiForce* sensor reads forces that are perpendicular to the sensor plane. Applications that impart "shear" forces could reduce the life of the sensor. If the application will place a "shear" force on the sensor, it should be protected by covering it with a more resilient material.

If it is necessary to mount the sensor to a surface, it is recommended that you use tape, when possible. Adhesives may also be used, but make sure that the adhesive will

not degrade the substrate (polyester) material of the sensor before using it in an application. Adhesives should not be applied to the sensing area; however, if it is necessary, ensure that the adhesive is spread evenly. Otherwise, any high spots may appear as load on the sensor.

SATURATION

The **Saturation** force is the point at which the device output no longer varies with applied force. The saturation force of each sensor is based on the maximum recommended force specified by Tekscan, which is printed on the system packaging or the actual sensor, along with the "Sensitivity."

The saturation value is based on using the circuit and the values shown in the example circuit in the 'Application' section. In this example, the saturation force (maximum force) of each sensor is related to the RF (reference resistance), and can be altered by changing the sensitivity. The sensitivity of the sensor would be adjusted by changing the reference resistance (RF); a lower reference resistance will make the system less sensitive, and increase its active force range.

It is essential that the sensor(s) do not become saturated during testing.

CONDITIONING SENSORS

Exercising, or **Conditioning** a sensor before calibration and testing is essential in achieving accurate results. It helps to lessen the effects of *drift* and *hysteresis*. Conditioning is required for new sensors, and for sensors that have not been used for a length of time.

To condition a sensor, place 110% of the test weight on the sensor, allow the sensor to stabilize, and then remove the weight. Repeat this process four or five times. The interface between the sensor and the test subject material should be the same during conditioning as during calibration and actual testing.

IMPORTANT! Sensors must be properly conditioned prior to calibration and use.

CALIBRATION

Calibration is the method by which the sensor's electrical output is related to an actual engineering unit, such as pounds or Newtons. To calibrate, apply a known force to the sensor, and equate the sensor resistance output to this force. Repeat this step with a number of known forces that approximate the load range to be used in testing. Plot **Force** versus **Conductance (1/R)**. A linear interpolation can then be done between zero load and the known calibration loads, to determine the actual force range that matches the sensor output range.

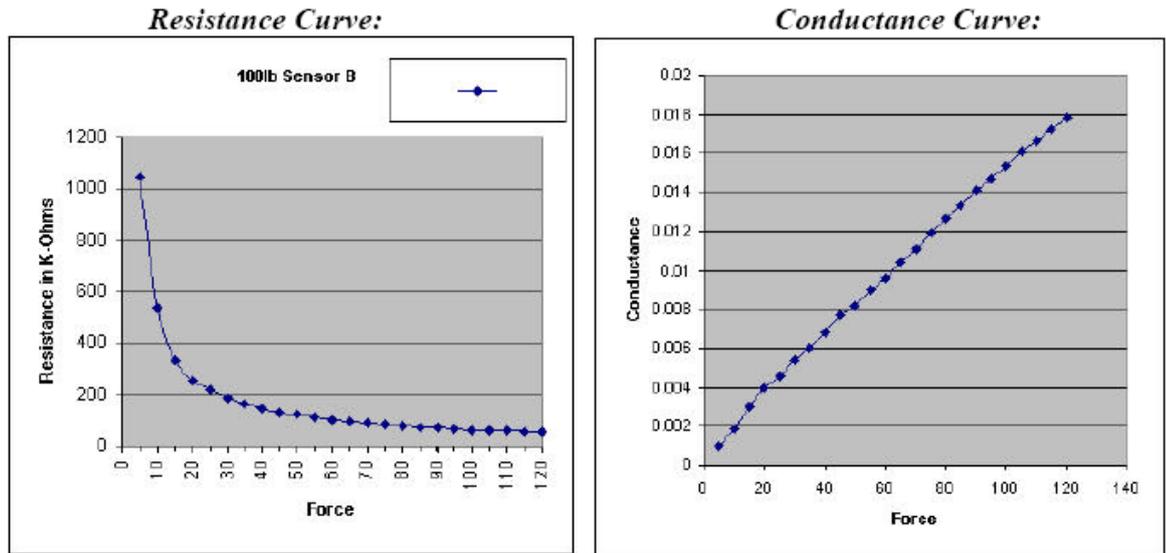


Figura 173. Resistance and conductance curve

CALIBRATION GUIDELINES

The following guidelines should be considered when calibrating a sensor:

- Apply a calibration load that approximates the load to be applied during system use, using dead weights or a testing device (such as an *MTS* or *Instron*). If you intend to use a "puck" during testing, also use it when calibrating the sensor. See Sensor Loading Considerations for more information on using a puck
- Avoid loading the sensor to near saturation when calibrating. If the sensor saturates at a lower load than desired, adjust the "Sensitivity."
- Distribute the applied load evenly across the sensing area to ensure accurate force readings. Readings may vary slightly if the load distribution changes over the sensing area.
- Sensors should be calibrated at the same temperature for which testing will occur. This is especially important for High-Temp Sensors, as these sensors have a wide operating temperature range. If multiple temperatures are used during testing, calibrate the sensors at those same multiple temperatures.

Note: Read the *Sensor Performance Characteristics* section before performing a Calibration.

SENSOR PERFORMANCE CHARACTERISTICS

There are a number of characteristics of sensors, which can affect your results. This section contains a description of each of these conditions, and recommendations on how to lessen their effects.

REPEATABILITY

Repeatability is the ability of the sensor to respond in the same way to a repeatedly applied force. As with most measurement devices, it is customary to exercise, or "condition" a sensor before calibrating it or using it for measurement. This is done to reduce the amount of change in the sensor response due to repeated loading and unloading. A sensor is conditioned by loading it to 110% of the test weight four or five times. Follow the full procedure in the **Conditioning Sensors** section.

LINEARITY

Linearity refers to the sensor's response (digital output) to the applied load, over the range of the sensor. This response should ideally be linear; and any non-linearity of the sensor is the amount that its output deviates from this line. A calibration is performed to "linearize" this output as much as possible. *FlexiForce* standard sensors are linear within +/- 3%. *FlexiForce* High-Temperature sensors have a linearity that is 1.2% of full scale.

HYSTERESIS

Hysteresis is the difference in the sensor output response during loading and unloading, at the same force. For static forces, and applications in which force is only increased, and not decreased, the effects of hysteresis are minimal. If an application includes load decreases, as well as increases, there may be error introduced by hysteresis that is not accounted for by calibration.

DRIFT

Drift is the change in sensor output when a constant force is applied over a period of time. If the sensor is kept under a constant load, the resistance of the sensor will continually decrease, and the output will gradually increase. It is important to take drift into account when calibrating the sensor, so that its effects can be minimized. The simplest way to accomplish this is to perform the sensor calibration in a time frame similar to that which will be used in the application.

TEMPERATURE SENSITIVITY

In general, your results will vary if you combine high loads on the sensor with high temperatures. To ensure accuracy, calibrate the sensor at the temperature at which it will be used in the application. If the sensor is being used at different temperatures, perform a calibration at each of these temperatures, save the calibration files, then load the appropriate calibration file when using the sensor at that temperature.

SENSOR LIFE / DURABILITY

Sensor life depends on the application in which it is used. Sensors are reusable, unless used in applications in which they are subjected to severe conditions, such as against sharp edges, or shear forces. *FlexiForce* sensors have been successfully tested at over one million load cycles using a 50 lb. force.

Rough handling of a sensor will also shorten its useful life. For example, a sensor that is repeatedly installed in a flanged joint will have a shorter life than a sensor installed in the same joint once and used to monitor loads over a prolonged period. After each installation, visually inspect your sensors for physical damage.

It is also important to keep the sensing area of the sensor clean. Any deposits on this area will create uneven loading, and will cause saturation to occur at lower applied forces.

SENSOR PROPERTIES

STANDARD FLEXIFORCE SENSOR (MODEL A201)

Sensor Properties	
Thickness	0.008 (0.208 mm)
Length	8" (203 mm) 6" (152 mm) 4" (102 mm) 2" (51 mm)
Width	0.55" (14 mm)
Sensing Area	0.375" (9.53 mm) diameter
Connector	3-pin male square pin (center pin is inactive)
Typical Performance	
Force Ranges	0-1 lb (4.4 N) 0-25 lbs (110 N) 0-100 lbs (440 N)*
Operating Temperature Range	15°F to 140°F (-9°C to 60°C)
Linearity (Error)	+/- 3%
Repeatability	+/- 2.5% of full scale (conditioned sensor, 80% force applied)
Hysteresis	<4.5% of full scale (conditioned sensor, 80% force applied)
Drift	<5% per logarithmic time scale (constant load of 90% sensor rating)
Response Time	<5 microseconds
Output Change/Degree F	Up to 0.2% (~0.36% / °C). Loads <10 lbs, operating temperature can be increased to 165°F (74°C).

Tabla 30. Propiedades del Sensor FlexiForce estándar (Modelo A201)

- [11] rubberbug, anatomy of a walk Disponible [internet]:
 < <http://www.rubberbug.com/walking.htm> > [15 de julio de 2011]
- [12] Questions about biped robots Disponible [internet]:
 < <http://www.mel.go.jp/soshiki/robot/undo/kajita/faq-e.html> > [15 de julio de 2011]
- [13] Manuales c++ Disponible [internet]:
 < <http://www.mel.go.jp/soshiki/robot/undo/kajita/faq-e.html> > [15 de julio de 2011]
 < <http://www.cplusplus.com/doc/tutorial/> > [15 de julio de 2011]
- [14] Kalman Filter Disponible [internet]:
 < <http://www.cs.unc.edu/~welch/kalman/> > [15 de julio de 2011]
 < <http://autopilot.sourceforge.net/kalman.html> > [15 de julio de 2011]
 < <http://cylonrobot.blogspot.com/2004/10/sample-code-for-kalman-filter.html> >
 [15 de julio de 2011]
- [15] Sensors Disponible [internet]:
 < <http://www.x-robotics.com/sensores.htm> > [15 de julio de 2011]
 < <http://www.sensing.es/> > [15 de julio de 2011]
 < <http://jdlope.tripod.com/gp2d12.html> > [15 de julio de 2011]
 < <http://www.tekscan.com/> > [15 de julio de 2011]
- [16] Matlab Disponible [internet]:
 < <http://www.mathworks.es/> > [15 de julio de 2011]
- [17] Datasheet Disponible [internet]:
 < <http://www.datasheetcatalog.com/> > [15 de julio de 2011]
 < <http://www.datasheetlocator.com/es/> > [15 de julio de 2011]
- [18] J. G. Webster. *The Measurement, Instrumentation and Sensors Handbook*. CRC Press and IEEE Press. 1999.
- [19] Tekscan force sensor Disponible [internet]:
 < <http://www.tekscan.com/flexible-force-sensors> > [15 de julio de 2011]
- [20] Kawada industries Disponible [internet]:
 < <http://www.kawada.co.jp/mechs/index.html> > [15 de julio de 2011]
 < <http://global.kawada.jp/mechatronics/hrp2.html> > [15 de julio de 2011]
- [21] AIST (Advanced Industrial Science and Technology) Disponible [internet]:

< http://www.aist.go.jp/index_en.html > [15 de julio de 2011]

- [22] Jacob Fraden. Handbook of modern sensors physics, designs, and applications. Third Edition. 2007.
- [23] Fox, C.H.J. and Hardie, D.S.W. Vibratory gyroscopic sensors. *Symposium Gyro Technology* (DGON), 1984.
- [24] Boxenhom, B.B., Dew, B., and Greiff, P. The micromechanical inertial guidance system and its applications. In: *14th Biennial Guidance Test Symposium*, 6588th Test Group, Holloman AFB, New Mexico, Oct. 3–5, 1989.
- [25] Varnham, M.P., Hodgins, D., Norris, T.S., and Thomas, H.D. Vibrating planar gyro. U.S. patent 5,226,321, 1993.
- [26] Udd, E. Fiber optic sensors based on the Sagnac interferometer and passive ring resonator. In: *Fiber Optic Sensors*. E. Udd, ed. John Wiley & Sons, New York, 1991, pp. 233–269.
- [27] Ezekiel, S. and Arditty, H. J., eds. *Fiber-Optic Rotation Sensors*. Springer Series in Optical Sciences. Vol. 32, Springer-Verlag, New York, 1982.
- [28] Fredericks, R. J., and Ulrich, R. Phase error bounds of fiber gyro with imperfect polarizer/depolarizer. *Electron. Lett.* 29, 330, 1984.
- [29] Articulo, G. A. Shock impulse response of a force balance servo-accelerometer. In: *Sensors Expo West Proceedings*. Helmers Publishing, 1989.
- [30] Sensor signal conditioning: an IC designer's perspective. *Sensors Magazine*, 23–30, 1991.
- [31] Allen, H., Terry, S., and De Bruin, D. Accelerometer system with self-testable features. *Sensors Actuators* 20, 153–161, 1989.
- [32] Suminto, J.T. A simple, high performance piezoresistive accelerometer. In: *Transducers'91. 1991 International Conference on Solid-State Sensors and Actuators. Digest of Technical Papers.*, IEEE, New York, 1991, pp: 104–107.

- [33] Haritsuka, R., van Duyn, D.S., Otaredian, T., and de Vries, P. A novel accelerometer based on a silicon thermopile. In: *Transducers'91. International Conference on Solid-State Sensors and Actuators. Digest of Technical Papers.* IEEE, New York, 1991, pp: 420–423
- [34] Fraden, J. Motion discontinuance detection system and method. U.S. patent 4,450,351, 1984.
- [35] Fraden, J. Toy including motion-detecting means for activating same. U.S. patent 4,479,329, 1984.
- [36] Fraden, J. Motion detector. U.S. patent 4,769,545, 1988.
- [37] Fraden, J. Active infrared motion detector and method for detecting movement. U.S. patent 4,896,039, 1990.
- [38] Fraden, J. Active far infrared detectors. In: *Temperature. Its Measurement and Control in Science and Industry.* American Institute of Physics, New York, 1992, Vol. 6, Part 2, pp. 831–836.
- [39] Holman J. P. *Heat Transfer*, 3rd ed. McGraw-Hill, New York, 1972.
- [40] Fraden, J. Motion detector. U.S. patent 4,769,545, 1988.
- [41] Fraden, J. Active far infrared detectors. In: *Temperature. Its Measurement and Control in Science and Industry.* J. F. Schooley, ed. American Institute of Physics, Washington, DC, 1992, Vol. 6, Part 2, pp. 831–836.
- [42] Fraden, J. Radiation thermometer and method for measuring temperature. U.S. patent 4,854,730, 1989.
- [43] Fraden, J. Active infrared motion detector and method for detecting movement. U.S. patent 4,896,039, 1990.
- [44] Mastrangelo, C.H. and Muller, R.S. Design and performance of constant temperature circuits for microbridge-sensor applications. In: *Transducers'91. International Conference on Solid-State Sensors and Actuators. Digest of Technical Papers.* IEEE, New York, 1991, pp. 471–474.