



**Universidad Carlos III de Madrid
Escuela Politécnica Superior
Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática**

**PROYECTO FIN DE CARRERA
INGENIERÍA INDUSTRIAL**

**ESTUDIO E IMPLEMENTACIÓN DE
SENSORES DE FUERZA 3D CON
APLICACIÓN A MANOS ROBÓTICAS**

AUTOR: ANDRÉS ALÍA MARTÍN

**Tutor: Mohamed Abderrahim Fichouche
Tutor: Javier González-Quijano Álvarez**

Octubre 2010

Índice general

1. Introducción	8
1.1. Motivación y origen del proyecto	8
1.2. Objetivos del proyecto	9
1.3. Robots manipuladores	9
1.3.1. Descripción	9
1.3.2. Clasificación según aplicaciones	9
1.3.3. Descripción de tareas de manipulación diestra	10
1.4. Diseño de pieles artificiales	11
1.4.1. Introducción	11
1.4.2. Definiciones y Clasificación	13
1.4.3. Sentido del tacto como base para la tecnología táctil.	13
1.4.4. Líneas a seguir para diseñar un sistema táctil para robots.	14
2. Estado del arte	16
2.1. Tecnologías para la implementación de sensores táctiles	16
2.1.1. Tipos de sensores táctiles	16
2.1.2. Percepción táctil distribuida.	20
2.1.2.1. Percepción táctil distribuida sin utilizar técnicas de miniaturización	22
2.1.2.2. Percepción táctil distribuida utilizando técnicas de miniaturización	22
2.2. Mejoras necesarias	23
2.3. Estudios teóricos de manipulación con sensores de fuerza	26
3. Obtención de las capacitancias en $f(x, y, z, \theta)$	28
3.1. Condiciones iniciales	28
3.2. Premisas	29
3.3. Fórmulas simplificadas	33
3.3.1. Sensor sin fuerzas aplicadas	35
3.3.2. Sensor con fuerzas aplicadas en el eje Z	36

3.3.3.	Sensor con fuerzas aplicadas en el eje X o en el eje Y	36
3.3.4.	Sensor con fuerzas aplicadas en el eje X, eje Y y eje Z	37
4.	Plataforma experimental de calibración	39
4.1.	Hardware	39
4.1.1.	Sensor de medición capacitivo MPR121	39
4.1.2.	Sensor JR3 67M25A	41
4.1.2.1.	Descripción general del sensor	41
4.1.2.2.	Instalación y montaje del sensor	42
4.1.2.3.	Interfaz electrónico	43
4.1.2.4.	Matriz de calibración	44
4.1.3.	Robot PA-10	45
4.2.	Procedimiento para realizar las medidas	47
4.3.	Método de calibración	47
4.3.1.	Introducción	47
4.3.2.	Regresión mediante redes neuronales	48
4.3.2.1.	Redes neuronales biológicas	49
4.3.2.2.	Redes neuronales artificiales	50
4.3.2.3.	Topología de las redes neuronales artificiales	51
4.3.2.4.	Perceptrón	52
4.3.2.5.	El algoritmo de aprendizaje back-propagation	53
4.3.2.6.	Validación cruzada	55
4.3.2.7.	Número de ejemplos de entrenamiento	56
4.3.2.8.	Reducción del tamaño de la arquitectura de la red	56
4.3.3.	Obtención de los datos de entrenamiento	57
4.3.3.1.	Datos teóricos	57
4.3.3.2.	Datos prácticos	58
4.4.	Procedimiento experimental	59
5.	Pruebas de validación y resultados	63
5.1.	Descripción del método	63
5.2.	Obtención de capacitancias a partir de las fuerzas	64
5.2.1.	Resultados obtenidos mediante el modelo teórico	64
5.2.2.	Resultados obtenidos mediante el modelo real	65
5.2.3.	Comparación entre modelo real y teórico	66
5.3.	Obtención de las fuerzas a partir de las capacitancias	67

<i>ÍNDICE GENERAL</i>	3
5.3.1. Resultados obtenidos mediante el modelo teórico	67
5.3.2. Resultados obtenidos mediante el modelo real	68
5.3.3. Comparación entre modelo real y teórico	68
6.	70
6.1. Conclusiones	70
6.2. Trabajos futuros	71

Índice de cuadros

1.1. Diferentes mecano receptores de los humanos	14
2.1. Arrays de sensores táctiles para partes como los dedos con alta densidad de receptores . .	21
2.2. Arrays de sensores táctiles para partes como las palmas con baja densidad de receptores .	21
4.2. Valor admisible de los torques	43
4.3. Asignación de pins	44

Índice de figuras

2.1. Sensor táctil resistivo	17
2.2. Principio de funcionamiento QTC	17
2.3. Sensor táctil capacitivo	18
2.4. Sensor táctil con tecnología óptica	19
2.5. Sensor Piezoeléctrico	20
2.6. Diagrama de bloques del sistema de percepción táctil	24
2.7. Respuesta del sensor ante diferentes objetos	27
2.8. Hardware del sensor	27
3.1. Ejes de coordenadas y dimensiones del elemento sensor	29
3.2. Ejemplo de un torsor aplicado en el electrodo superior	29
3.3. Influencia en x' de δx	30
3.4. Influencia en x' de δy	30
3.5. Influencia de la fuerza en X y en Y sobre las capacitancias	36
4.1. Esquema de montaje para calibración del sensor capacitivo	39
4.2. Fotografía del KITMPR121EVM	40
4.3. Consumo del MPR121 en función de la frecuencia de muestreo	41
4.4. Puertos MPR121	41
4.5. Orientación de los ejes del sensor	42
4.6. Cable del sensor de 6 Pines	43
4.7. Grados de libertad del PA10-7C	46
4.8. Movimientos en el plano XY del robot PA10	47
4.9. Método de calibración	48
4.10. Morfología de la neurona	49
4.11. Modelo de neurona	50
4.12. Evolución del error de aprendizaje y el error de generalización	55
4.13. Adquisición de datos válidos para la calibración con $d=4$	59

4.14. Adquisición de datos válidos para la calibración con $d=1$	59
4.15. Diagrama de flujo de la información	59
4.16. Ejemplo trayectoria PA10	60
4.17. Presentación de electrodos inferiores en KiCad	61
5.1. Obtención de las fuerzas en función de las capacitancias	64
5.2. Obtención de las capacitancias en función de las fuerzas	64
5.3. Gráfica con los datos teóricos junto a los de la red neuronal para $Z=0$	64
5.4. Gráfica con los datos teóricos junto a los de la red neuronal para $Z=1$ mm	65
5.5. Gráfica con los datos prácticos junto a los de la red neuronal	66
5.6. Comparativa capacitancias teóricas y prácticas	66
5.7. Desplazamiento teórico en 2D en función de las capacitancias	67
5.8. Desplazamiento práctico en 2D en función de las capacitancias para F_y	68
5.9. Desplazamiento práctico en 2D en función de las capacitancias para F_y	68
5.10. Diferencia entre valores teóricos y prácticos para F_x	69
5.11. Diferencia entre valores teóricos y prácticos para F_y	69

Agradecimientos

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a todas las personas que se citan a continuación:

A mi tutores de proyecto Mohamed Abderrahim y Javier Quijano-González, por confiar en mí a la hora de ofrecerme este proyecto de fin de carrera y por haberme ayudado a lo largo de todo este tiempo dándome consejo y apoyo.

A mi padre, mi madre, Pablo e Irene por haber estado junto a mi todos estos años tan duros apoyándome en los malos momentos y alegrándose conmigo los buenos.

A mis tíos, en especial a Fernando y Arantza por su gran apoyo durante todos estos años, sobre todo en los primeros de adaptación a la vida madrileña.

A mis abuelos, pero en especial a Aitite, una de mis inspiraciones a la hora de elegir esta carrera y porque sé que le habría hecho mucha ilusión el verme llegar hasta aquí. También a Abuelo porque sé que se alegra mucho por todos los logros de sus nietos.

A mis compañeros de universidad, sobre todo a Javier Campaña, Sebastián Barragán, Álvaro Bermejo y Javier Moreno por esas conversaciones en los malos momentos académicos y personales, por haber conseguido aguantar conmigo durante casi todas las prácticas de la carrera así como las horas de estudio en la biblioteca, por la cantidad de kilómetros hechos en bicicleta para tomar el aire después de estudiar, por las innumerables horas de sidrería que usábamos como excusa para reunirnos para hablar y como no, las partidas de poker, la excusa 2.0 para reunirnos ahora que por motivos laborales no es posible vernos tan a menudo.

A mis compañeros de colegio mayor, en especial a mis compañeros de habitación Ivan y Alberto; también a David “El Gallego” por esos dos primeros años de estudio, que aunque no fueron demasiado productivos, al menos lo intentamos. A Max, Alberto Amarilla, Ezequiel, Borja, Vicente, Fran, Miguelón, Eneko, Edu, Álvaro, etc..

A Carlos Perez por las horas de ocio y la época impartiendo clases como voluntarios codo con codo.

A Jorge por esas tardes de después de trabajar que invertimos en patearnos Madrid para intentar descubrir nuevos sitios , así como todos los años compartidos de residencia y ocio.

A mis compañeros y compañeras de Ineco que me han alegrado estos 10 últimos meses de carrera mientras realizaba el proyecto.

Capítulo 1

Introducción

1.1. Motivación y origen del proyecto

El presente trabajo se enmarca dentro del contexto del proyecto europeo HANDLE. Dicho proyecto se está llevando a cabo por un consorcio de nueve socios de diferentes países europeos, entre los cuales se encuentra la Universidad Carlos III de Madrid. El objetivo principal es comprender como los humanos llevamos a cabo la manipulación de los objetos, con el objetivo de replicar tanto el agarre como la destreza de los movimientos en una mano artificial antropomórfica y a partir de ahí, mover los dedos de tal manera que se consiga una mano más autónoma y efectiva en los procesos de manipulación de objetos.

Para lograr este objetivo se requiere entre muchos factores la capacidad de percepción táctil. En la actualidad existen algunos dispositivos comerciales que cumplen dicha función. Sin embargo, dichos sistemas solo miden fuerzas normales, lo que limita en gran medida la aplicación de las estrategias de control para conseguir tareas de manipulación diestra de objetos con una sola mano. La necesidad de medir no solo fuerzas normales, sino también fuerzas de fricción han llevado a algunos grupos de investigación del proyecto HANDLE a estudiar y tratar de desarrollar prototipos de piel artificial con electrodos 3D. Entre dichos grupos se encuentra el RoboticsLab de la UC3M.

Con el objetivo de desarrollar piel artificial con capacidad de medición de fuerzas 3D, el presente proyecto se encargará de analizar las diferentes tecnologías actuales que puedan ser utilizadas para dicho fin. Asimismo se seleccionará la más apropiada de acuerdo a diversos criterios relacionados con el costo, escalabilidad, precisión y simplicidad de fabricación. Una vez seleccionada la tecnología base se desarrollará un modelo teórico de un elemento sensor y se validará mediante la implementación de un prototipo con una escala suficientemente grande que facilite dicho proceso. Por ultimo se realizará un análisis crítico del prototipo que permita identificar los puntos débiles y los fuertes para el diseño de sucesivas versiones, estableciéndose unas guías para su futura interacción en una matriz de elementos sensores que pueda integrarse en forma de piel artificial.

1.2. Objetivos del proyecto

El proyecto se divide en varios objetivos que están relacionados entre si:

- Estudio del estado del arte de los tipos de sensores que se pueden llegar a utilizar para el desarrollo de pieles artificiales, haciendo un análisis sobre sus pros y sus contras utilizando diferentes criterios, como son la frecuencia de muestreo de los datos, tamaño de los elementos sensores, facilidad de fabricación, posibilidad de escalabilidad para llegar a cubrir todo un prototipo, costes, etc..
- Desarrollo teórico de un electrodo capaz de medir fuerzas 3D que pueda escalarse, o lo que es lo mismo, aumentar el número de elementos sensores, de manera que sea factible integrarlo en una matriz de elementos sensores de alta resolución.
- Análisis y validación del prototipo desarrollado mediante el estudio de los datos obtenidos tanto de manera teórica como práctica.
- Análisis crítico, propuesta de mejoras para el desarrollo de futuros prototipos y establecimiento de una hoja de ruta a seguir para el diseño de pieles artificiales usando esta tecnología.

Con todos estos objetivos se pretende hacer un estudio amplio, incluidos prototipos, acerca de la mejor manera de desarrollar un sensor de fuerzas 3D.

1.3. Robots manipuladores

1.3.1. Descripción

Un robot manipulador consiste en una serie de cuerpos rígidos llamados eslabones, conectados mediante articulaciones prismáticas o de revolución, siendo cada par articulación - elemento un grado de libertad. Los robots manipuladores poseen un elemento final llamado efector, cuya misión es agarrar o manipular los objetos.

1.3.2. Clasificación según aplicaciones

Los robots pueden clasificarse en dos grandes tipos, los robots manipuladores industriales y los robots de servicio. La frontera entre los dos tipos a veces se vuelve complicada. No obstante, en esto de la robótica existen infinidad de tipos de clasificaciones, por lo tanto, la que se muestra a continuación pretende ser una clasificación por aplicaciones.

Robot Industrial Los robots industriales son robots que se emplean para tareas vinculadas con la producción de bienes de origen manufacturado en fabricas o industrias, siendo los mas habituales por ejemplo los paletizado, pintado, soldadura, inspecciones y ensamblaje.

Robot de servicio Los robots de servicio son los que van a acercarse en un futuro muy próximo la robótica a los hogares, calles, hospitales y espacio entre otros, si es que no lo están haciendo ya. Entre la multitud de tipos de aplicaciones que pueden citarse en este tipo de robots de servicio caben destacar los humanoides, los de exploración espacial, los de logística en órbita y otros que desarrollan varios propósitos como tareas de rescate en lugares peligrosos o los robots que se utilizan para recargar en las centrales nucleares.

1.3.3. Descripción de tareas de manipulación diestra

La manipulación diestra o “Dexterous Manipulation” es una área de la robótica en la que múltiples manipuladores colaboran para manipular un objeto. Al estar centrada la manipulación en el objeto, se requiere de una precisión total sobre las fuerzas y los movimientos, precisando utilizar sistemas de agarre diseñados al efecto.

Aunque los humanos no somos los únicos que manipulamos objetos, si que es una actividad humana por excelencia, ya que gracias a la cantidad y precisión de los mecano receptores que hay en las palmas de las manos y los dedos, podemos realizar una manipulación muy eficiente y precisa. Como ejemplo decir que un robot de hoy en día tiene la misma destreza manipulando un objeto que un niño de un año. En un futuro se espera que este sistema tenga una eficacia tal que pueda sustituir al humano en ciertas tareas de manipulación precisa, como por ejemplo retirar objetos peligrosos, rescate en zonas de difícil acceso para las personas o con condiciones climáticas adversas o la exploración planetaria.

Con la manipulación diestra se persiguen dos objetivos: planear el movimiento del objeto para llegar a la posición deseada y después planear el movimiento de los dedos para realizar el agarre y trasladarlo por la trayectoria deseada.

Para mover un objeto desde su posición inicial hasta la final utilizando los dedos del robot, hay que formular el problema de manipulación diestra (DM de aquí en adelante) [44]. El problema reside en saber determinar la colocación de los eslabones de manera que se aplique la fuerza y los torques precisos para inducir al objeto los movimientos necesarios. Para resolver el problema cinemático de DM hay que tener un conocimiento preciso de las relaciones geométricas que se van a dar entre el objeto y el manipulador, además de suponer que el contacto se va a mantener a lo largo de toda la manipulación del objeto desde la posición inicial hasta la posición final.

Para resolver el problema cinemático y dinámico hay que calcular primeramente la fuerza a ejercer para realizar determinada fuerza o torque sobre el objeto. La base teórica para realizar este cálculo es mediante las relaciones obtenidas por el Jacobiano de agarre o mapa de agarre, que se obtiene resolviendo la fuerza que ejerce cada dedo sobre una coordenada común del objeto.

Una vez resulta la cinemática de los puntos de contacto con el objeto; que no se mueven durante la manipulación; hay que tener en cuenta que los puntos de contacto se mueven en el espacio a la par

que los dedos durante la manipulación, y hay que tener especial cuidado en que se muevan a la misma velocidad tanto el dedo como el objeto, ya que sino se pueden dar situaciones en las que el objeto se deslice o gire sobre los dedos. Esto crea un problema, y por lo tanto hay que añadir una restricción de giro y deslizamiento en el problema cinemático del DM.

En estos estudios hay que tener en cuenta que la cinemática y la dinámica están fuertemente influidas por las condiciones en las que se dan los contactos. En general se pueden definir tres tipos de contactos: Punto de contacto sin fricción, punto de contacto con fricción y punto de contacto elástico. Analizando cada contacto se llega a la conclusión de que en un contacto sin fricción solamente se puede realizar una fuerza perpendicular a la superficie; en el caso de existir fricción habrá que tener en cuenta el cono de fricción que comprende el rango de fuerzas normales y tangenciales que se pueden aplicar al objeto y en caso de ser un punto de contacto elástico habría que hacer un análisis diferente debido a la deformación de los puntos de contacto. Es por esto que se hace necesario el desarrollo de una piel artificial 3D para poder interpretar de manera adecuada los datos del objeto, y de ese modo desarrollar el sistema de manipulación.

1.4. Diseño de pieles artificiales

1.4.1. Introducción

Los dispositivos robotizados que hasta hace unos pocos años estaban limitados a entornos industriales, están empezando a formar poco a poco parte de nuestras vidas. Los robots humanoides trabajarán junto con los humanos en tanto en cuanto sean capaces de entender la inteligencia humana, sus reacciones y sean capaces de actuar como nosotros. El sentido del tacto es uno de los más importantes para lograr esta interacción.

El por qué de la importancia de la capacidad del sentido del tacto [1] se puede razonar con un sencillo ejemplo; si se ponen las manos encima de un bloque de hielo éstas irán perdiendo sensibilidad hasta quedar anestesiadas, y es en ese momento en el que se cae en la cuenta de que sin el sentido del tacto el simple hecho de agarrar o manipular un objeto se complica; los movimientos se vuelven imprecisos con el sentido del tacto alterado, dado que es este sentido el que permite detectar propiedades de los objetos como dureza, rugosidad, temperatura, etc. Todas ellas son propiedades necesarias a la hora de por ejemplo mover un objeto entre los dedos sin tirarlo o simplemente el hecho de diferenciar lo que es mi cuerpo (o el propio robot) de lo que no lo es.

Un ejemplo de sistema para el que se están empezando a utilizar sensores táctiles además de los robots manipuladores industriales, es en el ámbito de los robots de servicio para el cuidado de personas mayores tal y como indica [41], indicando que algún día los animales de compañía podrían ser sustituidos por estos robots. Es por ello que al moverse en entornos no controlados, en los que pueden aparecer elementos

contra los que impactar de manera inesperada, deben de ser muy sensibles. De todos modos, esta piel artificial no es solamente un sistema para evitar contactos peligrosos, sino también una manera de que en este caso la persona mayor pueda comunicarse con el robot ya sea dándole indicaciones, mostrar que todo esta bien o una muestra de afecto. Una de las grandes ventajas del sensor propuesto en este estudio es que es fácilmente escalable, lo que es una propiedad muy deseable en este tipo de aplicaciones, ya que lo que se pretende es poder cubrir todo el cuerpo del robot sin que por ello existan riesgos de interferencias entre los diferentes sensores.

En [42] se hace un estudio completo sobre sensores táctiles capacitivos y su uso para la mejora en el diseño o perfeccionamiento de las prótesis, lo que indica, que esto no solamente se utiliza en el campo de manipuladores, que quizás es la cara mas conocida, sino también en el campo de la medicina. El sensor que desarrollan es un sensor capacitivo con capacidad de medir tanto fuerzas en la componente normal como en la tangencial.

Aunque la percepción táctil es muy importante, a la hora de desarrollar robots se ha prestado poca atención a este campo, limitando en gran medida su capacidad de interacción con el entorno. Probablemente el no prestar la atención que se merece a este campo es debido a la complejidad y la naturaleza de este tipo de sensores, así como el hecho de no haber dado con un sensor eficaz que se pueda incorporar en los robots. En las últimas dos décadas este intento de dotar a los humanoides de sensores táctiles ha dado lugar a numerosos desarrollos, utilizándose prácticamente todos los medios de transducción , como por ejemplo los utilizados en [2, 3, 4].

Pero aunque la producción de nuevos sensores con diseños innovadores siga su camino, la mayoría no cumplen las expectativas, ya sea porque su tamaño pone en compromiso la habilidad del robot o por ser lentos, frágiles o poco robustos. Otro aspecto importante además de sus propiedades físicas es el saber como va a codificar y transmitir el sensor la información obtenida del entorno a su unidad de control.

Es por ello que el estudio del comportamiento de los sensores de los que disponemos los humanos es un buen punto de partida, siguiendo con la más que demostrada utilidad de fijarse en los sistemas biológicos, que han inspirado a generaciones de ingenieros a la hora de crear nuevos útiles, y como no, ahora está empezando también a inspirar en el campo de la robótica.

Por citar un ejemplo, en [38] se hace un estudio completo fijándose en sistemas biológicos para desarrollar un robot capaz de saltar, junto con todo un desarrollo que lo respalda. Por ejemplo, cuando intentan resolver en este estudio el problema de almacenar energía para realizar un salto rápido en un momento dado, se fijan en la capacidad de las pulgas y su sistema de almacenamiento de energía en una proteína con propiedades parecidas a las de un material gomoso, que comprimen. En el caso de la mayoría de los mamíferos esta energía se almacena en los tendones en tensión.

1.4.2. Definiciones y Clasificación

El sentido del tacto en los humanos está compuesto por dos submodalidades [5, 6]; el cutáneo y el cinestésico, ambos encargados de recibir la información desde el exterior; o dicho de otra manera, son los que detectan los inputs. La diferencia entre ellos dos es que el sentido cutáneo recibe la información sensorial desde los receptores embebidos en la piel, y los cinestésicos reciben la información de los receptores situados en los músculos, tendones y articulaciones [5, 6].

Hay que remarcar que la excitación que recibe nuestro sistema sensitivo no es únicamente mecánico, sino que también hay estímulos como el calor, el frío o estímulos que producen dolor. Por lo tanto, valiéndose de los términos asociados con el sentido del tacto humano, se puede describir un valioso paralelismo con el sentido táctil de los robots. Como indican Lee y Nicholls [7] la definición más acertada para definir un sensor táctil es que es un dispositivo o sistema que puede medir una propiedad dada de un objeto a través del contacto con el mundo, pero hay que tener en cuenta que el sensor no es meramente un transductor, dado que las dos modalidades (cutánea y cinestésica), ya sean individualmente o en conjunto procesan los estímulos antes de enviarlos a niveles superiores del sistema.

El paralelismo que existe respecto a los sensores para robots es que la modalidad cutánea se corresponde con los sensores extrínsecos y la cinestésica con los sensores intrínsecos. Los sensores extrínsecos están por lo tanto localizados en la estructura mecánica del robot proporcionando datos sobre las fuerzas ejercidas y los intrínsecos están colocados en la misma superficie de contacto o muy próximos a ella. Independientemente de cómo se definan los sensores hay un aspecto crucial, y es que su tiempo de respuesta debe de ser muy pequeño, del orden de milisegundos, y su densidad debe de ser elevada, no debiendo de existir mas de un milímetro entre cada receptor sensorial (aunque lógicamente esto variará en función de la parte del cuerpo a cubrir). Su principio de funcionamiento puede ser resistivo, capacitivo, óptico, magnético, piezoeléctrico, ultrasonidos, etc.

1.4.3. Sentido del tacto como base para la tecnología táctil.

El sentido del tacto en los humanos cuenta con la percepción espacio temporal de estímulos externos a través de una gran cantidad de receptores; ya sean mecano receptores para la presión y las vibraciones o termo receptores para la temperatura; repartidos por el cuerpo de diferente manera [8]. La respuesta a estímulos como la presión se debe a que los mecano receptores están situados a diferentes distancias desde la superficie de la piel y también en diferentes densidades, variando en diferentes zonas del cuerpo desde 241 receptores por centímetro cuadrado en los dedos a 58 receptores por centímetro cuadrado en las palmas de las manos [9]. No obstante y aunque no se va a entrar en esto en profundidad, en las manos no todos los receptores son iguales, ya que los 17.000 receptores se dividen en 4 grupos, dos de ellos son receptores de adaptación rápida, y otros dos de adaptación lenta. Estos receptores así como sus propiedades se muestran en la tabla 1.1.

Receptor Type	Field Diameter	Frequency Range	Postulated Sensed Parameter
FA I	3–4 mm	10–60 Hz	Skin stretch
SA I	3–4 mm	DC–30 Hz	Compressive stress (curvature)
FA II	>20 mm	50–1000 Hz	Vibration
SA II	>10 mm	DC–15 Hz	Directional skin stretch

Cuadro 1.1: Diferentes mecano receptores de los humanos

En el caso de los estímulos térmicos se cree que es debido a dos receptores diferentes, uno para el calor y otro para el frío. Pero lo realmente interesante y útil es la manera en la que se detecta y transmite la información desde el receptor. En contacto con un objeto, la piel se adapta a la superficie de éste, y es esta deformación la que se transmite a los mecano receptores. Cada mecano receptor; que representa un diferencial del objeto en sí; codifica la información como picos de potencial o estímulos eléctricos mayores a un umbral, que después son transformados en un tren de impulsos, como si de un conversor A/D se tratase. Este tren de impulsos [10] se envía al sistema nervioso central a través de la espina dorsal y es cuando se “analiza”. Esto tiene una gran importancia dado que el sistema nervioso central debe de discriminar cierta información por la gran cantidad de ella que le llega desde los receptores, y así poder formar una imagen coherente del objeto que está implicado en la acción.

La capacidad del sentido táctil esta limitada por la sensibilidad espacial y temporal así como la pérdida de información de los estímulos por el filtrado de datos en las primeras etapas de procesado; estos mismos efectos y limitaciones se dan en los sensores táctiles aplicados a la robótica. Como dato curioso adicional indicar que dentro del sentido táctil de los humanos además de existir diferencias de umbrales de detección en las diferentes zonas del cuerpo, también existen diferencias en las mismas partes del cuerpo entre hombre y mujeres; por ejemplo una mujer puede detectar en sus dedos una variación de 0,032 g y un hombre una variación de 0,158 g [11].

1.4.4. Líneas a seguir para diseñar un sistema táctil para robots.

Basándose en el sistema sensorial humano se pueden trazar unas líneas generales que se deben seguir para diseñar un sistema sensorial adecuado para los robots [4, 12].

1. Se deben diseñar diferentes sensores en miniatura con funciones diferenciadas, idealmente midiendo cada uno de ellos una propiedad diferente. La densidad de sensores que se integrará dependerá de la zona en la que estén localizados.
2. La resolución espacial de los sensores táctiles debe depender también de la zona en la que estén

localizados, siendo en el caso de los dedos una resolución de 1 milímetro y en el caso de las palmas de 5 mm.

3. Los sensores deben de tener una alta sensibilidad y un amplio rango dinámico, dado que una manipulación normal implica fuerzas en el rango de 15 a 90 gramos, debiendo además de ser capaces de detectar la dirección de la fuerza. Esto es importante ya que los robots no tienen a priori un modelo del mundo que les rodea.
4. Los receptores deben de ser capaces de detectar y medir tanto contactos estáticos como dinámicos, por lo tanto quizás sea necesario más de un tipo de transductor.
5. Estos sensores deben de tener un tiempo de respuesta muy pequeño, sobre todo si la información de los sensores se va a utilizar en bucle cerrado para el posicionamiento del robot, siendo el tiempo deseado de respuesta de alrededor de 1 milisegundo.
6. Es conveniente que al igual que en el sistema sensorial humano, los receptores preprocesen la información para no sobre saturar el sistema con operación que pueden realizarse en otra parte del sistema táctil.
7. La información sensorial debería de poder transmitirse por diferentes caminos en función de la urgencia de ésta, dado que es más importante transmitir una información del tipo mecánico que de tipo térmico.
8. Los receptores deben estar embebidos en algún tipo de material como silicona o goma, al igual que los receptores del sistema táctil humano está recubiertos por tejido.

Capítulo 2

Estado del arte

2.1. Tecnologías para la implementación de sensores táctiles

La información táctil es muy útil en diferentes aspectos de la robótica. En las tareas de manipulación, la información táctil se utiliza como un parámetro de control [13, 14] y requiere información como el punto en el que se ha dado el contacto, la medida de la curvatura de la superficie así como la detección del deslizamiento a partir de las fuerzas estáticas. La medida de la fuerza de contacto permite controlar la fuerza de agarre, aspecto fundamental para obtener un agarre estable.

Otra información importante a obtener es la fuerza de cizalladura o tangencial, dado que es útil para determinar el coeficiente de fricción y obtener un perfil de tensiones superficiales cuando el sensor esta recubierto por una capa de piel artificial.

Hasta hace poco, la interacción de los robots con el entorno estaba limitada a la medida de fuerzas estáticas, cuando es lógico pensar que sin obtener las medidas dinámicas no se dispone de una visión completa del mundo que nos rodea. La mayoría de los sensores están diseñados para medir presiones y fuerzas estáticas con lo que es difícil obtener información acerca de la dureza, rugosidad, elasticidad, textura. . . así que de un tiempo a esta parte, al hacerse patente la necesidad de obtener más información, se están desarrollando sensores mas avanzados para detectar cambios de tensiones, formas o contactos dinámicos; o lo que es lo mismo, que varíen en el tiempo.

2.1.1. Tipos de sensores táctiles

1. Sensores resistivos:

Los sensores táctiles basados en tecnologías resistivas (piezoresistivos) tienen unos valores de resistencias que varían en función de la zona del contacto y de la fuerza aplicada. Normalmente estos sensores son sensibles y baratos pero como contrapartida tienen un alto consumo de energía, solamente son capaces de detectar un punto de contacto y no son capaces de medir las fuerzas

de contacto aplicadas sobre ellos. Estos sensores de contacto están fabricados con materiales que cambian su resistencia en función de la presión aplicada y son especialmente populares en sistemas microelectrónicos y mecánicos.

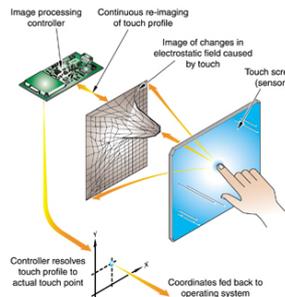


Figura 2.1: Sensor táctil resistivo

2. Sensores de efecto túnel:

Los sensores basados en los Quantum Tunnel Composites (QTC) han pasado a formar parte de los sensores táctiles en la segunda mitad de la década pasada y están disponibles comercialmente de la mano de Peratech [15]. Los QTC tienen la capacidad de pasar de ser un perfecto aislante a ser un conductor cuando se deforma por compresión, estiramiento o giro. En estos sensores las partículas de metal nunca entran en contacto entre ellas. Estos sensores transforman directamente la tensión en una luz electro luminiscente, y están compuestos por una fina capa formada por metal y nanopartículas semiconductoras, y por ejemplo un sensor de $2,5 \text{ cm}^2$ tiene una resolución espacial de $40 \text{ }\mu\text{m}$. No obstante su integración es difícil dado que hay que integrar una cámara que capte los pulsos luminosos que generan las variaciones de forma del QTC.

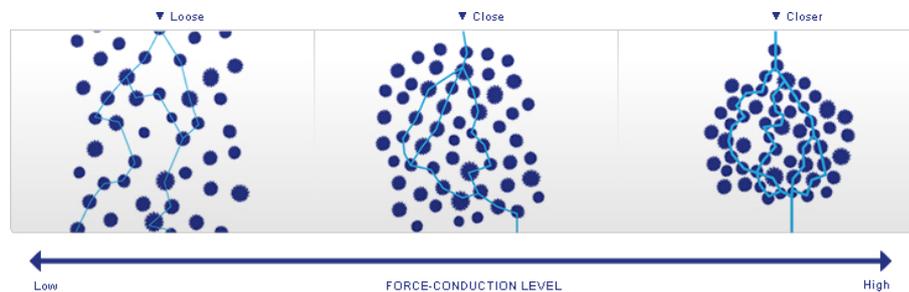


Figura 2.2: Principio de funcionamiento QTC

3. Sensores capacitivos:

Los receptores capacitivos llevan tiempo usándose ampliamente en el campo de la robótica y una de sus grandes ventajas es que se pueden fabricar sensores muy pequeños, lo que permite la construcción de arrays de sensores muy densos, pudiendo obtener sensibilidades de en torno a 5 mN y son lo

suficientemente robustos como para soportar las fuerzas en el tiempo que dura el agarre. Se han llegado a resoluciones espaciales de 1 mm^2 en un array de 8×8 según cuenta [3], lo que es una resolución espacial 10 veces mayor que las del tacto humano. Comercialmente quizás lo más conocido en los que respecta a estos sensores sean las pantallas de los móviles táctiles como el iPhone. La integración de estos sensores a las nuevas tecnologías se ha visto facilitado gracias a los dispositivos convertidores de capacitancia a digital como el AD7147 o el MPR121. El objetivo de estos chips es conseguir una transformación fiable, o lo que es lo mismo, unos datos digitalizados correspondientes a un cambio de capacitancia en el punto de contacto. Como contrapartida a estos sensores basados en la capacitancia cabe remarcar que a pesar de ser muy sensibles tienen una capacitancia parásita y una histéresis muy severa. Un estudio interesante respecto a este tipo de sensores es [40], en el que se presenta un sensor capacitivo flexible y fácilmente escalable pudiendo llegar a un ancho de banda de 10 MHz.

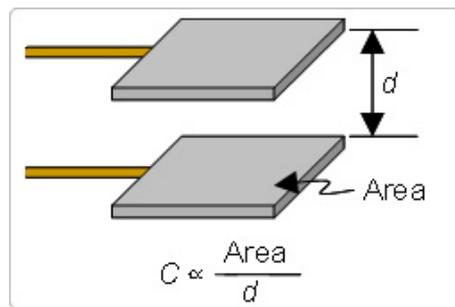


Figura 2.3: Sensor táctil capacitivo

4. Sensores ópticos:

Los sensores táctiles con un método de transducción óptico se basan en el cambio de intensidad de la luz como medida de los cambios en los índices de refracción; lo cual es una manera elegante de medir la presión. Un ejemplo de esto se puede ver en [16]. Estos sensores pueden medir fuerzas del orden de 1 mN con una resolución espacial de 5 mm, pudiendo medir los sensores ópticos tri-axiales tanto fuerzas perpendiculares como tangentes, siendo viables comercialmente tal y como muestra [17]. Una de las grandes ventajas de los sensores de transducción óptica es que son inmunes a las interferencias electromagnéticas, son flexibles, sensibles y rápidos, aunque son más gruesos que los capacitivos.

5. Sensores basados en ultrasonidos:

Otra tecnología que se está usando para el desarrollo de sensores táctiles es la de los ultrasonidos. Los micrófonos, basados en los ultrasonidos, se han utilizado para detectar ruidos superficiales. Un array de 2×2 de Polivinilideno fluoruro (PVDF) como el descrito en [18] detecta contactos por la

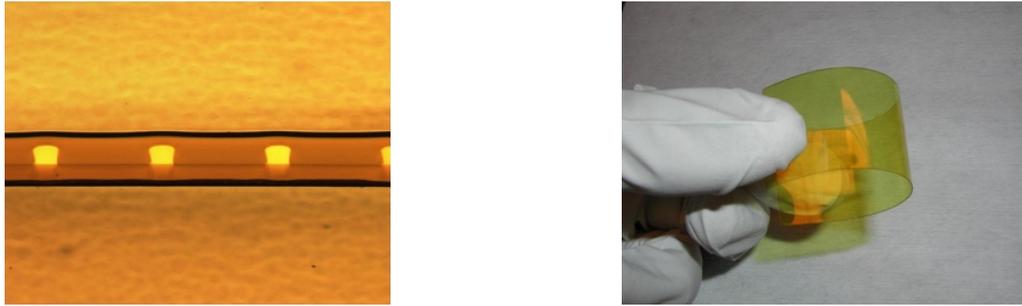


Figura 2.4: Sensor táctil con tecnología óptica

emisión de ultrasonidos desde el punto de contacto. Aquí el PVDF se utiliza como receptor para localizar el punto de contacto. Se ha demostrado que este tipo de sensores son muy útiles a la hora de detectar deslizamientos en la superficie del objeto así como su rugosidad. Una de las ventajas de los sensores basados en ultrasonidos es la rápida respuesta dinámica que ofrecen y una buena resolución frente a las fuerzas aplicadas al sensor. No obstante como contrapunto este tipo de sensores utilizan materiales como el Zirconato Titanato de plomo (PZT) cuyo proceso de miniaturización es bastante difícil, pudiendo simplificar este problema utilizando en lugar del PZT polímeros piezoeléctricos.

6. Sensores basados en el magnetismo:

Estos sensores se basan en la medida del cambio de densidad de flujo como resultado de la aplicación de una fuerza. La medida de este flujo se puede llevar a cabo con un detector de efecto Hall [19] o con un dispositivo magneto resistivo. Las principales ventajas de estos sensores es su alta sensibilidad, un buen rango dinámico, no hay histéresis, respuesta lineal así como ser un sensor muy robusto. Como contrapartida decir que este sistema solamente es aplicable para medios no magnéticos, ya que si se aplica sobre un medio magnético las medidas sería completamente inverosímiles e incoherentes debido al magnetismo propio del material. Un ejemplo de este sensor se plantea en [39] donde describen un sensor basado en este tipo de tecnología y que es capaz de medir tanto fuerzas en 3 ejes como deslizamientos sobre la superficie de la capa elástica exterior. Este sensor dispone de una cualidad muy interesante, y es que se ha diseñado mediante programas de elementos finitos su superficie de contacto, de manera que la distribución de presiones en el sensor es uniforme.

7. Sensores piezoeléctricos:

Los piezoeléctricos generan una carga en proporción a la fuerza aplicada. Materiales piezoeléctricos como el PZT o el PVDF son apropiados para medir fuerzas dinámicas dadas sus propiedades. Aunque el cuarzo y los cerámicos tienen mejores propiedades piezoeléctricas es preferible utilizar polímeros como el PVDF para los sensores táctiles dado que son más flexibles y tienen una mayor estabilidad química. El primer estudio en el que se utilizó el PVDF como sensor táctil viene detallado en [20], surgiendo después de este otros estudios como [21].

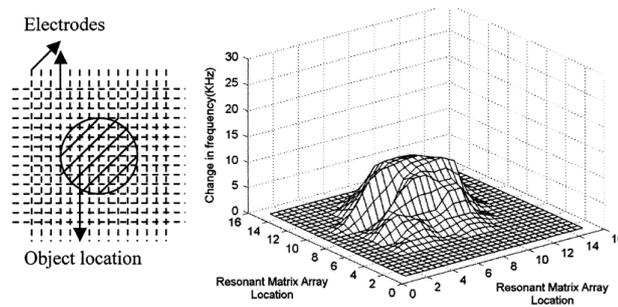


Figura 2.5: Sensor Piezoeléctrico

2.1.2. Percepción táctil distribuida.

El guiado de robots o su control basado en la lectura de fuerzas ha dependido en gran medida de sensores de fuerza tri-axiales o en 6-D. Sin embargo, estos métodos son sensibles a la precisión a la hora de calibrarlos pudiendo dar lugar a una serie de datos erróneos que no están modelados en el sistema.

Además de esto, otro de los factores que pueden alterar las medidas es la inercia del manipulador, por lo tanto, la mejor manera de solucionar esto es colocar el sensor lo mas próximo posible al punto de contacto, o en otras palabras, equipar las manos del robot con un array de sensores o una series de sensores distribuidos de la mejor manera en cada caso; de manera que lo deseable sería disponer de receptores por toda la superficie del cuerpo. Es por ello que cubrir el efector que va a entrar en contacto con los objetos de sensores táctiles es un prerrequisito para el diseño de los algoritmos de movimiento basados en sensores.

Un problema que se soluciona mediante el recubrimiento con receptores es la oclusión, dado que ya no se hace necesario el sistema basado en sistemas de visión. Se han hecho numerosos experimentos para demostrar la seguridad de estos sistemas, en lo que a interacción con humanos se refiere, por ejemplo en [22].

Con el paso de los años se han desarrollado un gran número de sistemas táctiles, destacando los más relevantes en las tablas 2.1 y 2.2. La tabla 2.1 indica aquellos desarrollos de arrays de sensores táctiles con una alta densidad de receptores, y la tabla 2.2 los arrays de sensores con una baja densidad de receptores, ya que como se ha comentado en párrafos anteriores, dependiendo de la parte del cuerpo de la que se quiera obtener información es más adecuada una densidad u otra.

Dependiendo del método de fabricación de los arrays de sensores táctiles se pueden agrupar o clasificar en dos categorías. La primera es la fabricación de aquellos sensores que utilizan sistemas de miniaturización y el otro grupo comprende aquellos que no los utilizan. Los que utilizan las técnicas de miniaturización son los sensores basados en los transistores de efecto de campo (FET) o en sistemas micro electromecánicos

Year	Author	Transduction Method	Miniaturization Technique	No.of Sensing Element	Spatial Res. (mm)	Signal Condition Circuit	Sensor BW ^b (KHz)	Range of Force ⁺ (N)/ Pressure* (Kpa)	Force/ Pressure Sensitivity
1984	Fan et al.	Capacitive	Si-micromachining	1	0.8	No	---	5*	0.13pF/g
1984	Raibert et al.	Resistive	Si-micromachining	6x8	0.64	Yes ^a	---	---	---
1985	Polla et al.	Piezoelectric	Si-micromachining	8x8	2	Yes ^a	---	2+	0.52V/N
1988	Suzuki et al.	Capacitive	Si-micromachining	32x32	0.5	No	200	0.01+	0.45pF/g
1990	Sugiyama et al.	Piezoresistive	Si-micromachining	32x32	0.25	Yes ^a	60	---	0.02mV/Kpa
1993	Lie et al.	Piezoresistive	Si-micromachining	4x4	1	Yes ^a	N/A	200*	0.032mV/Kpa
1994	Audet et al.	Magnetic	Si-micromachining	---	---	Yes	---	---	---
1996	Chu et al.	Capacitive	Si-micromachining	3x3	2.2	No	1.46	0.01+	0.13pF/g(nf) 0.32pF/g(shf)
1996	Kolesar et al.	Piezoelectric	Si-micromachining	8x8	0.7	Yes ^a	0.025	0.008-1.35+	---
1996	Gray et al.	Capacitive	Si-micromachining	8x8	0.1	No	16x10 ⁻³	20x10 ⁻⁶⁺	---
1997	Desouza et al.	Capacitive	Si-micromachining	16x16	500dpi	No	---	---	---
2000	Kane et al.	Piezoresistive	MEMS on Silicon	64x64	0.3	Yes ^a	---	35*	1.59mV/Kpa
2000	Leineweber et al.	Capacitive	Si-micromachining	8x1	0.24	Yes ^a	---	100-300*	1.34V/bar
2002	Castelli	Capacitive	---	8x8	>2	N	---	120*	---
2002	Hellard et al.	Optical	---	4x4	>1	No	---	---	---
2003	Wen et al.	Field Emission	MEMS on Silicon	8x8	1	Yes ^a	---	100*	---
2005	Choi et al.	Resistive & Piezoresistive	---	24	~1	No	---	2+	---
2006	Okha et al.	Optical	---	---	2	No	---	2+	---
2006	Schmidt et al.	FSR & Capacitive	---	1 _{static} 16 _{dyn.}	---	No	~3+ 35,000	0.05-10+ <0.01+	5mN
2006	Takao et al.	Piezoresistive	MEMS on Silicon	6x6	0.42	Yes ^a	---	0.021-0.176+	0.5-1V/N
2007	Dahiya et al.	Piezoelectric	Si-micromachining	32	1	Yes	---	5*	0.4V/N

Cuadro 2.1: Arrays de sensores táctiles para partes como los dedos con alta densidad de receptores

Year	Author	Transduction Method	Miniaturization Technique	No.of Sensing Element	Spatial Res.	Signal Condition Circuit ^a	Sensor BW ^b (KHz)	Range of Force ⁺ (N)/ Pressure* (Kpa)	Force/ Pressure Sensitivity
1989	Cheung et al.	Optical	---	16	---	Yes	0.8	---	---
1992	Domenici et al.	Piezoelectric	On Polyimide	6x7	2.5	No	---	---	---
1992	Lumelsky et al.	Optical	---	500	---	Yes	---	---	---
1998	Um et al.	Optical	---	1000	25	Yes	---	---	---
2004	Someya et al.	FSR	Organic FET	32x32	2.54	No	0.033*	30Kpa	---
2004	Weiss et al.	Resistive	---	3x8	4	No	0.96	---	---
2005	Engel et al.	Resistive	MEMS on Polymer	25	~5	No	---	---	---
2005	Shan et al.	Piezoresistive	MEMS on Silicon	4x4	10	No	---	2N	---
2006	Kim et al.	Strain Gauge	MEMS on Polymer	4x4	2.5	No	---	0.6+	---
2006	Heo et al.	Optical	---	3x3	5	No	---	---	1mN
2006	Kuniyoshi et al.	Optical	---	8x4	~30	No	0.5	---	---
2008	Maggiali et al.	Capacitive	Flexible PCB	12	10	Yes	---	---	---
2008	Toshiharu et al.	Piezoresistive	Flexible PCB	8x8	18	Yes	---	128Kpa	---

Cuadro 2.2: Arrays de sensores táctiles para partes como las palmas con baja densidad de receptores

(MEMS) normalmente realizados sobre un sustrato rígido como puede ser el silicio o sobre una superficie flexible como un plástico. Atendiendo a esta clasificación se van a discutir una serie de trabajos y estudios que se han llevado a cabo según el método de fabricación.

2.1.2.1. Percepción táctil distribuida sin utilizar técnicas de miniaturización

Se ha demostrado en varios estudios como en [23] que cubrir un manipulador con receptores es muy útil a la hora de planificar sus movimientos. En el caso del estudio citado disponía de 5 módulos, estando formado cada módulo por 16 pares de foto transistores y LED infrarrojos (IRLED). El tiempo de escaneo de cada módulo es de 20 ms, siendo el acceso en serie dentro del módulo y en paralelo entre módulos. De este modo, al tener un tiempo de escaneo inferior al de la velocidad de respuesta del robot de ensamblado se podría decir que estamos obteniendo unos datos en tiempo real. En un principio los IRLED eran sensores de proximidad y por lo tanto no se tenía en cuenta el contacto real. Aunque las situaciones reales exigen un contacto con el objeto, este estudio demostró por primera vez que la planificación de los movimientos puede realizarse a priori sin un conocimiento del entorno dinámico que rodea al manipulador. Otro sensor, aunque antiguo ya, que utiliza un método de transducción óptico se discute en [24]. Este sensor esta compuesto por 32 elementos y presenta propiedades interesantes como su escalabilidad y ligereza. Cada receptor esta formado por un foto reflector recubierto de espuma de uretano. Lo que proporciona la medida en este caso es la cantidad de luz que es capaz de medir el foto reflector, dado que al aplicar una fuerza sobre la espuma de uretano se dispersa una cantidad de luz, que es captada por el éste. El tiempo de escaneado para cada sensor es de 0,2 ms. contando con una resolución espacial de 3 cm, pero presenta una gran desventaja, y es la gran cantidad de corriente que precisa cada LED, que es de entorno a 50 mA por cada elemento. Este método de transducción es similar al que usa comercialmente KINOTEX [25].

2.1.2.2. Percepción táctil distribuida utilizando técnicas de miniaturización

Los sensores táctiles que utilizan técnicas de miniaturización se pueden a su vez dividir en aquellos sensores desarrollados mediante MEMS en silicio [26] o MENS en plástico [27]; o también aquellos implementados en FET's orgánicos como [28]. Los sensores táctiles basados en MEMS por lo general usan una tecnología de transducción capacitiva [29] o piezoresistiva [30]. La diferencia principal entre estos dos métodos de transducción es que los piezoresistivos proporcionan una linealidad mayor que los capacitivos, pero en cambio estos últimos proporcionan una sensibilidad un orden de magnitud mayor, lo que cual es bastante interesante.

Los primeros trabajos realizados con sensores piezoresistivos o capacitivos micro mecanizados como [31] y [32] utilizaban como elementos sensibles membranas. Hay que remarcar que los sensores realizados por micro mecanizado en Si son algo mas sensibles y tienen una mayor resolución espacial, no obstante la naturaleza frágil del silicio dificulta su integración en los sistemas robotizados dado que no pueden

soportar las fuerzas y presiones experimentadas durante una manipulación normal. El encapsulado de los electrodos basados en MEMS es un gran reto, aunque este tema se estudia en detalle en [33], y también en [26] donde se explica un método para obtener sensores basados en MEMS flexibles. Tecnologías más recientes han permitidos obtener MEMS en sustratos plásticos como manera alternativa para obtener un sensor flexible. Además esta tecnología permite realizar sensores táctiles multimodo que permiten la medida de durezas, conductividad térmica y temperatura.

De todos modos como en otros casos, este sensor también presenta contratiempos como la complejidad del conexionado, y su escalabilidad esta limitada por la posibilidad de interconexiones. Como se comento anteriormente en este capítulo, una posibilidad muy interesante es la que utiliza el cuerpo humano, sentir y procesar en el mismo lugar, dado que con esto se consigue evitar ruido a la hora de enviar la señal así como disminuir el número de cables (aspecto clave en el desarrollo de los robots). El uso de esta idea se ha demostrado en numerosas aplicaciones como displays flexibles. Se pueden encontrar trabajos que tratan superficialmente este tema, como por ejemplo en [34].

A la hora de elegir una tecnología u otra habrá que tener en cuenta tanto costes como la idoneidad de uso en cada caso dependiendo del manipulador y del uso que se le de, dado que en algunos manipuladores la velocidad de respuesta del sistema será un punto crítico y en otros quizás no lo sea tanto, o prime mas el precio del sistema en conjunto. Cada tecnología tiene sus ventajas e inconvenientes en términos de costes de fabricación, rendimiento o propiedades físicas y mecánicas; por lo tanto no existe una única tecnología adecuada para recubrir todo el cuerpo, siendo necesario intercalar varias de ellas para obtener unos resultados óptimos, lo cual sería un estudio bastante interesante de llevar a cabo.

2.2. Mejoras necesarias

Los sistemas táctiles que hasta hace unos años estaban limitados a los dedos y a las manos, se han ido extendiendo en la última década al resto de las partes del robot, variando por lo tanto las necesidades y volviéndose necesarios nuevos sensores más adecuados para las “nuevas” partes del cuerpo a recubrir.

En esta transición desde el recubrimiento de las yemas de los dedos hasta el recubrimiento de todo el cuerpo ha dejado muchas cuestiones por resolver, ya que aunque se han realizados grandes avances en el diseño de manos para robots, la información táctil obtenida no llega a utilizar todas las posibilidades mecánicas del dispositivo. Otro problema después de esto ha sido que se ha hecho un gran esfuerzo en la creación de sensores pero no así en el diseño de los circuitos que deben proporcionar la información a nuestro sistema de control; a esta misma conclusión podemos llegar viendo la tabla 2.1 y la tabla 2.2, en las que solamente se aprecia el sistema de percepción del sensor, pero no se refleja ninguna innovación en lo que a sistemas de acondicionamiento de la señal o de la información se refiere.

Hay que decir que para la mayoría de los receptores el circuito de acondicionamiento es un simple

de 30 milisegundos.

Con una matriz activa y escaneando una palabra al mismo tiempo en [36], un array de 16x16 puede ser escaneado en 480 milisegundos, lo que es compatible con los tiempos de respuesta de los transductores, de hecho, 16x16 es el límite de elementos en el array. El consumo de potencia es otro factor muy importante a la hora de elegir un transductor, que idealmente, no debería de consumir nada. El consumo de grandes cantidades de energía; como puede ser en los sistema de transducción basados en elementos ópticos; es un factor de preocupación cuando se usan estos arrays de sensores en robots autónomos que cuentan con baterías.

La elección de un circuito de acondicionamiento de la señal apropiado para procesar los datos analógicos es un punto también bastante importante en el desarrollo de nuestro sistema, dado que limita por ejemplo los límites del ancho de banda que se va a poder procesar. Salvo para los sensores táctiles capacitivos, que cuentan con convertidores A/D comercialmente disponibles, no existen convertidores A/D disponibles para los otros métodos de transducción comentados anteriormente. Como se ha comentado anteriormente estos circuitos de acondicionamiento deberán ser capaces idealmente de llevar a cabo operaciones de bajo nivel como eliminar datos que no sirvan, linealizar los datos de entrada, compensar efectos como puede ser el de la temperatura en el caso de que sus propiedades cambien con ésta, comprimir la información, reconocer texturas, etc. Esta arquitectura de procesamiento distribuida reduce la cantidad de datos y optimiza el uso de los recursos del procesador del robot, dejándolo libre para realizar tareas de más alto nivel.

El número de cables necesarios para leer y transmitir los datos de un número elevado de receptores es otro de los retos ya que guarda una relación inversa con la destreza o facilidad de movimiento del robot, y una relación directa con el tiempo que se necesita para escanear un grupo de receptores. Para el acceso serie a los datos se necesitan menos cables que para el acceso paralelo, pero el acceso series es mas lento y esto puede ser un problema ya que si se tiene interés en obtener una imagen en tiempo real. del perfil, el acceso serie puede proporcionar una imagen distorsionada si el tiempo de escaneo es mayor que el de variación de las condiciones de contacto.

Es difícil leer contactos dinámicos si los transductores tienen un tiempo de decaimiento rápido como por ejemplo en los transductores piezoeléctricos. La transmisión de los datos se hace normalmente por buses serie. La velocidad de operación deseada, ruido y el número de cables es una restricción a la hora de seleccionar el tipo de comunicación a emplear a la hora de interactuar con los niveles mas altos. Normalmente se prefiere utilizar los buses CAN dada su mejor capacidad para tiempo real, su alta fiabilidad y su compatibilidad con la mayoría de microcontroladores. No obstante los buses CAN tienen un ancho de banda intermedio (1 Mb/s) lo cual puede dar problemas por lenta velocidad de transmisión si se cuenta con gran cantidad de receptores, por lo tanto en algunos casos se podría recurrir a otros con mayor tasa de transferencia reduciendo el número de receptores de manera que no quede comprometida

la información que se va a necesitar. La solución ideal sería la transmisión inalámbrica para eliminar todas las restricciones que supone el cableado de los receptores. También se facilitarían las cosas con unos receptores que fuesen flexibles y adaptables a las superficies.

Aunque se han hecho progresos utilizando finos conductores de oro estampados en sustratos de materiales elastómeros, aun es insuficiente para aplicaciones que recubran el cuerpo en su totalidad. Se han hecho muy pocos estudios que lleven a cabo una transmisión inalámbrica de los datos, cuyo principal problema son las interferencias entre los distintos receptores y la potencia que requiere la transmisión inalámbrica.

La selección de datos es otra manera de optimizar el uso de los datos obtenidos por los receptores, ya que no todos los datos que proporcionan los receptores tienen por que ser útiles, ya que de hecho, habría que rechazar los datos redundantes. Por ejemplo, en un agarre no todos los dedos son utilizados, y por lo tanto, los datos de los dedos que no están trabajando son descartados.

Lo que falta es construir el modelo del mundo que rodea al robot, para ello hay que integrar los diferentes tipos de sensores como se hace en los humanos [37]. En los robots humanoides estos datos pueden venir de sensores de visión, tacto, sonido o una combinación de las anteriores, siendo importante llevar a cabo esta integración de manera eficaz.

2.3. Estudios teóricos de manipulación con sensores de fuerza

Son muchos los estudios que han surgido a la hora de analizar la manipulación de objetos mediante robots manipuladores dotados de sensores táctiles de fuerza, pero como ejemplo se puede citar el estudio [43].

El estudio [43] es bastante reciente, y plantea el análisis de los datos proporcionados por el agarre para modificar el comportamiento del robot manipulador en función de los datos proporcionados por el transductor óptico. En este proyecto son capaces de detectar tanto fuerzas tangenciales como normales, utilizándose la tangencial en un primer momento para adecuar los movimientos del robot en los primeros momentos del agarre, y las fuerzas normales para detectar la rigidez del objeto y poder ejercer una presión adecuada al ejercer el agarre. En este estudio se demuestra mediante procedimientos experimentales la buena respuesta del sistema a la hora de agarrar y manipular una serie de objetos que se le proporcionó al manipulador, todos ellos con distintas propiedades mecánicas.

En la figura 2.7 se puede ver cuál es la respuesta del sistema ante el agarre de dos elementos diferentes, como es un cubo de aluminio y una caja de cartón. Se aprecia claramente como el manipulador, gracias tanto al análisis de la fuerza tangencial como normal es capaz de determinar la consistencia del objeto, y en consecuencia, aplicar mas o menos fuerza para su manipulación, dado que ambos objetos tienen diferente peso y diferente rigidez.

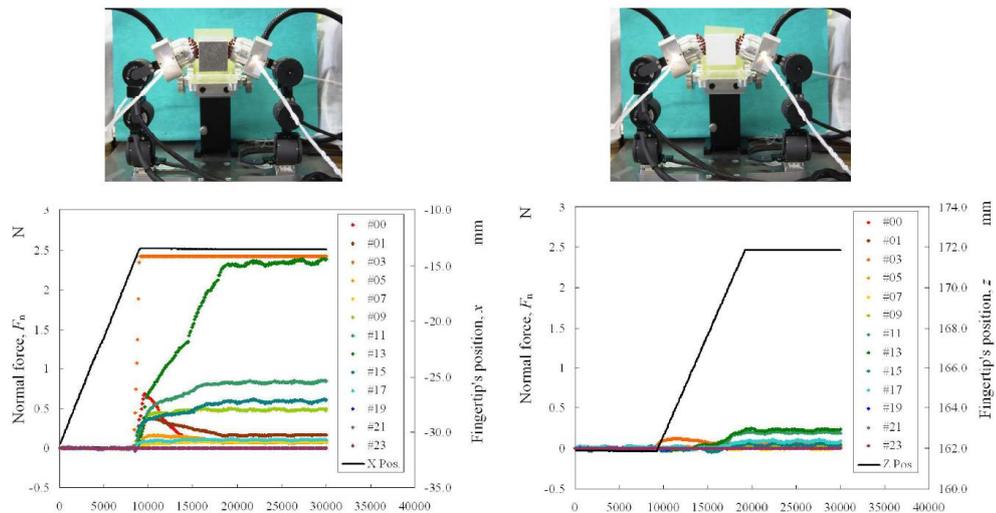


Figura 2.7: Respuesta del sensor ante diferentes objetos

El manipulador del estudio [43] está formado por dos brazos, y cada uno cuenta con dos dedos, obteniendo la información para el análisis de los sensores ópticos tri axiales que están montados en las puntas de los dedos.

En la figura 2.8 se puede apreciar la forma y el principio de funcionamiento del elemento sensor. Lo novedoso de este estudio es el hardware, dado que el sensor está formado por una semiesfera plástica a la que atraviesan un array de 41 piezas de silicona del elemento sensor. También está dotado el sistema de una fuente de luz y una sonda de fibra óptica que comunica el sensor con la cámara CCD, de manera que se puedan tomar imágenes de los elementos sensores localizados fuera de la semiesfera.

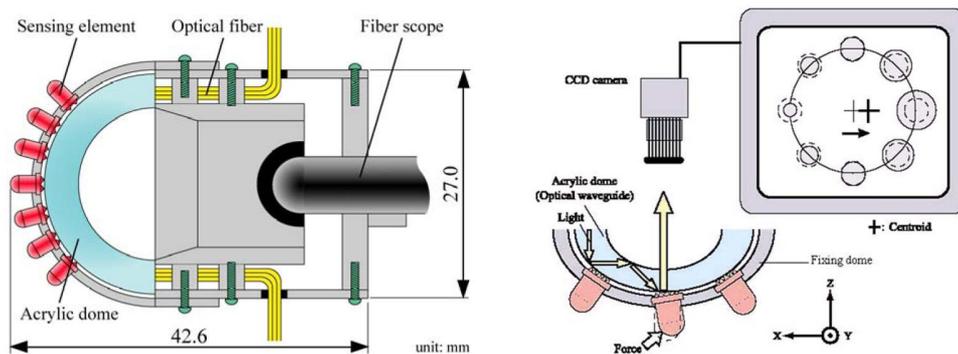


Figura 2.8: Hardware del sensor

Capítulo 3

Obtención de las capacitancias en

$$f(x, y, z, \theta)$$

3.1. Condiciones iniciales

Para los cálculos teóricos y demostrar cual es el principio de funcionamiento que va a seguir el sensor que se ha fabricado se van a desarrollar una serie de cálculos.

Nuestro sensor, es un formado por cuatro condensadores variables que se forman entre un electrodo superior que está conectado a tierra y cuatro electrodos inferiores conectados al conversor capacitancia/digital, que en este caso es el MPR121 de Freescale. La capacitancia de los condensadores se calculan según la formula 3.1.

$$C = \epsilon_r \cdot \epsilon_0 \cdot \frac{A}{d} [F] \quad (3.1)$$

Donde:

ϵ_r permitividad relativa del medio

ϵ_0 permitividad del vacio

A area del condensador

d distancia entre las placas paralelas

Por lo tanto, en el sensor que se está tratando varía tanto el área del condensador como la distancia entre las placas paralelas. El área varía porque el electrodo superior puede deslizarse o girar sobre los inferiores cuando sobre él actúa una fuerza con componente tangencial o cuando se aplique un torsor sobre él. La variación de “d” viene dada por la componente vertical de las fuerzas que se apliquen sobre el elemento sensor.

Las dimensiones con las que se han desarrollado las formulas así como el sentido de los ejes se representan en la figura 3.1.

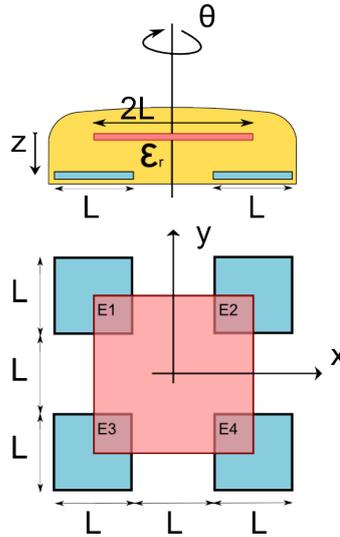


Figura 3.1: Ejes de coordenadas y dimensiones del elemento sensor

El área amarilla indica la distribución del dieléctrico que va a formar parte del sensor y las áreas de intersección entre los electrodos azules y el rojo forman los cuatro condensadores desde los que se va a obtener la información de las capacitancias, y por lo tanto también de x , y , z y θ . Es por tanto esperable que las cuatro capacitancias en el instante inicial sean iguales $C_1 = C_2 = C_3 = C_4$.

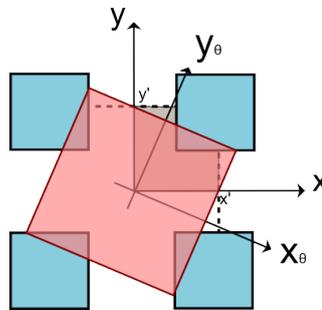


Figura 3.2: Ejemplo de un torsor aplicado en el electrodo superior

3.2. Premisas

Siguiendo con el planteamiento, tal y como se aprecia en la figura 3.2, vemos que ante un determinado giro, por simetría el área del triángulo formado hacia la derecha desde x' (superficie roja) es igual al triángulo que se forma a la derecha del punto marcado por y' (triángulo gris), así que el área gris en forma de L (a partir de ahora área rallada) se podrá calcular como indica la ecuación 3.2.

$$A_{rallada} = \frac{L}{2} \cdot x' + \frac{L}{2} \cdot y' - \frac{L}{2} \cdot \frac{L}{2} = \frac{L}{2} \cdot \left(x' + y' - \frac{L}{2} \right) \quad (3.2)$$

Este área es el área del electrodo superior que se encuentra en un determinado cuadrante a excepción del área coincidente con los electrodos inferiores (azules).

Interesa por lo tanto obtener el valor de x' e y' que a estas alturas son iguales, y con un sencillo cálculo trigonométrico se obtiene la equivalencia 3.3

$$x' = y' = \frac{L}{\cos \theta} \quad (3.3)$$

Ahora queda añadir a esos valores de x' e y' la influencia de un posible desplazamiento vertical y horizontal, pero como son iguales ambos, se plantea únicamente la influencia en x' .

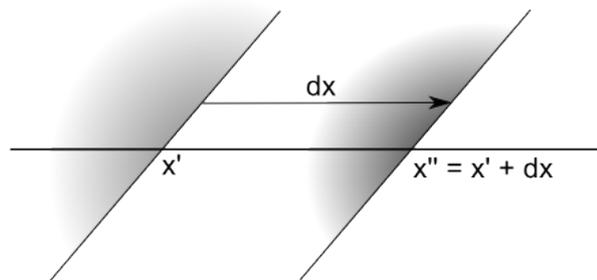


Figura 3.3: Influencia en x' de δx

En el caso del ejemplo de la figura 3.3 x'' es δx mayor que x' , dado que se aprecia que se está desplazando el electrodo hacia la derecha, y según se ha indicado en la figura 3.1 el movimiento hacia la derecha se considera positivo.

En el caso de que lo que afecte a x' sea un desplazamiento vertical tal y como se muestra en la figura 3.4 la formulación se complica algo más, dado que dependiendo del ángulo en el que no encontremos, un mismo desplazamiento vertical puede dar lugar a un desplazamiento de x'' positivo o negativo.

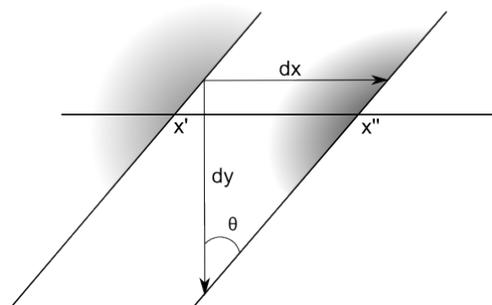


Figura 3.4: Influencia en x' de δy

La formula que se obtiene al juntar estos dos efectos se muestra en 3.5

$$x''_{total} = x' + \delta x + \delta y \quad (3.4)$$

$$x''_{total} = \frac{L}{\cos\theta} + x - y \cdot \tan\theta \quad (3.5)$$

Basando el desarrollo en la conclusión de la formula 3.5 y siguiendo el criterio de numeración de los electrodos mostrado en la figura 3.1 se van a obtener los valores de x y de y de cada cuadrante, que pasaran a llamarse X_{ri} y Y_{ri} queriendo indicar el subíndice “r” que son para calcular las áreas ralladas y el coeficiente “i” el electrodo al que se refiere, ya que como se ha indicado, lo que interesa es obtener ese área rallada en $f(x, y, \theta)$. En estas formulas x e y toman ya el significado de desplazamiento en x y desplazamiento en y respectivamente.

$$\text{Electrodo 1} \begin{cases} X_{r1} = \frac{L}{\cos\theta} - x + y \cdot \tan\theta \\ Y_{r1} = \frac{L}{\cos\theta} + x + y \cdot \tan\theta \end{cases} \quad (3.6)$$

$$\text{Electrodo 2} \begin{cases} X_{r1} = \frac{L}{\cos\theta} + x - y \cdot \tan\theta \\ Y_{r1} = \frac{L}{\cos\theta} + x + y \cdot \tan\theta \end{cases} \quad (3.7)$$

$$\text{Electrodo 3} \begin{cases} X_{r1} = \frac{L}{\cos\theta} - x + y \cdot \tan\theta \\ Y_{r1} = \frac{L}{\cos\theta} - x - y \cdot \tan\theta \end{cases} \quad (3.8)$$

$$\text{Electrodo 4} \begin{cases} X_{r1} = \frac{L}{\cos\theta} + x - y \cdot \tan\theta \\ Y_{r1} = \frac{L}{\cos\theta} - x - y \cdot \tan\theta \end{cases} \quad (3.9)$$

Introduciendo los valores de X_{ri} y Y_{ri} en la formula 3.2 se obtiene:

$$A_{r1} = \frac{L}{2} \cdot \left[\frac{2L}{\cos\theta} - \frac{L}{2} + x \cdot (\tan\theta - 1) + y \cdot (\tan\theta + 1) \right] \quad (3.10)$$

$$A_{r1} = \frac{L}{2} \cdot \left[\frac{2L}{\cos\theta} - \frac{L}{2} + x \cdot (\tan\theta + 1) + y \cdot (-\tan\theta + 1) \right] \quad (3.11)$$

$$A_{r1} = \frac{L}{2} \cdot \left[\frac{2L}{\cos\theta} - \frac{L}{2} + x \cdot (-\tan\theta - 1) + y \cdot (\tan\theta - 1) \right] \quad (3.12)$$

$$A_{r1} = \frac{L}{2} \cdot \left[\frac{2L}{\cos\theta} - \frac{L}{2} + x \cdot (-\tan\theta + 1) + y \cdot (-\tan\theta - 1) \right] \quad (3.13)$$

Pero lo que se necesita en realidad para calcular las capacitancias en $f(x, y, \theta)$ es el área de los

electrodos, y como lo que se ha deducido antes es el área que NO ocupan los electrodos, que es el área rayada, al restar la suma de todas las áreas rayadas al área total del electrodo superior (rojo), se obtiene el área total de los 4 electrodos.

$$A_{4 \text{ electrodos}} = 2L \cdot 2L - (A_{r1} + A_{r2} + A_{r3} + A_{r4}) \quad (3.14)$$

También es de suponer que el área de cada electrodo será proporcional a la del área rayada en cada cuadrante, de manera que el área de los electrodos será:

$$A_{e1} = A_{4 \text{ electrodos}} \cdot \frac{A_{r1}}{\sum_{i=1}^4 A_{ri}} \quad (3.15)$$

$$A_{e2} = A_{4 \text{ electrodos}} \cdot \frac{A_{r2}}{\sum_{i=1}^4 A_{ri}} \quad (3.16)$$

$$A_{e3} = A_{4 \text{ electrodos}} \cdot \frac{A_{r3}}{\sum_{i=1}^4 A_{ri}} \quad (3.17)$$

$$A_{e4} = A_{4 \text{ electrodos}} \cdot \frac{A_{r4}}{\sum_{i=1}^4 A_{ri}} \quad (3.18)$$

Así que resolviendo de manera genérica la ecuación 3.1

$$C_i = \epsilon_r \cdot \epsilon_0 \cdot \frac{A_i}{d} \quad (3.19)$$

$$C_i = \epsilon_r \cdot \epsilon_0 \cdot A_{4 \text{ electrodos}} \cdot \frac{A_{ri}}{\sum_{j=1}^4 A_{rj}} \cdot \frac{1}{h-z} \quad (3.20)$$

$$C_i = \epsilon_r \cdot \epsilon_0 \cdot \left[2L \cdot 2L - \sum_{j=1}^4 A_{rj} \right] \cdot \frac{A_{ri}}{\sum_{j=1}^4 A_{rj}} \cdot \frac{1}{h-z} \quad (3.21)$$

$$C_i = \epsilon_r \cdot \epsilon_0 \cdot \frac{4L^2 - \sum_{j=1}^4 A_{rj}}{\sum_{j=1}^4 A_{rj}} \cdot A_{ri} \cdot \frac{1}{h-z} \quad (3.22)$$

$$C_i = \epsilon_r \cdot \epsilon_0 \cdot \left[\frac{4L^2}{\sum_{j=1}^4 A_{rj}} - 1 \right] \cdot A_{ri} \cdot \frac{1}{h-z} \quad (3.23)$$

Por otra parte si se hace la suma de todas las áreas rayadas, es decir de 3.10, 3.11, 3.12 y 3.13 se obtiene:

$$\sum_{j=1}^4 A_{rj} = \frac{4L^2}{\cos \theta} - L^2 \quad (3.24)$$

Uniendo 3.23 y 3.24 se obtiene:

$$C_i = \epsilon_r \cdot \epsilon_0 \cdot \left[\frac{4L^2}{\frac{4L^2}{\cos \theta} - L^2} - 1 \right] \cdot A_{ri} \cdot \frac{1}{h-z} = \epsilon_r \cdot \epsilon_0 \cdot \left[\frac{5 \cos \theta - 4}{4 - \cos \theta} \right] \cdot A_{ri} \cdot \frac{1}{h-z} \quad (3.25)$$

Así que como resultado final de las capacitancias en $f(x, y, \theta)$

$$C_1 = \frac{\epsilon_r \cdot \epsilon_0}{h-z} \cdot \left[\frac{5 \cos \theta - 4}{4 - \cos \theta} \right] \cdot \frac{L}{2} \cdot \left[\frac{2L}{\cos \theta} - \frac{L}{2} + x \cdot (+\tan \theta - 1) + y \cdot (+\tan \theta + 1) \right] \quad (3.26)$$

$$C_2 = \frac{\epsilon_r \cdot \epsilon_0}{h-z} \cdot \left[\frac{5 \cos \theta - 4}{4 - \cos \theta} \right] \cdot \frac{L}{2} \cdot \left[\frac{2L}{\cos \theta} - \frac{L}{2} + x \cdot (+\tan \theta + 1) + y \cdot (-\tan \theta + 1) \right] \quad (3.27)$$

$$C_3 = \frac{\epsilon_r \cdot \epsilon_0}{h-z} \cdot \left[\frac{5 \cos \theta - 4}{4 - \cos \theta} \right] \cdot \frac{L}{2} \cdot \left[\frac{2L}{\cos \theta} - \frac{L}{2} + x \cdot (-\tan \theta - 1) + y \cdot (+\tan \theta - 1) \right] \quad (3.28)$$

$$C_4 = \frac{\epsilon_r \cdot \epsilon_0}{h-z} \cdot \left[\frac{5 \cos \theta - 4}{4 - \cos \theta} \right] \cdot \frac{L}{2} \cdot \left[\frac{2L}{\cos \theta} - \frac{L}{2} + x \cdot (-\tan \theta + 1) + y \cdot (-\tan \theta - 1) \right] \quad (3.29)$$

3.3. Fórmulas simplificadas

Dado que las fórmulas obtenidas en el apartado 3.2 son complejas para un primer análisis, se plantean unas ecuaciones simplificadas para obtener las capacitancias de los cuatro electrodos y poder sacar una serie de conclusiones a partir de ellas. La simplificación que se introduce en las fórmulas es la de no introducir un factor para que las capacitancias varíen con el ángulo, solamente variarán si existe un desplazamiento en el eje X, en el Y o en el eje Z, o también en una combinación en XY, XZ, YZ, XYZ.

Las ecuaciones obtenidas son:

$$C_1 = \frac{\epsilon_r \cdot \epsilon_0}{h - \delta z} \cdot \left(\frac{L}{2} - \delta x \right) \cdot \left(\frac{L}{2} + \delta y \right) \quad (3.30)$$

$$C_2 = \frac{\epsilon_r \cdot \epsilon_0}{h - \delta z} \cdot \left(\frac{L}{2} + \delta x \right) \cdot \left(\frac{L}{2} + \delta y \right) \quad (3.31)$$

$$C_3 = \frac{\epsilon_r \cdot \epsilon_0}{h - \delta z} \cdot \left(\frac{L}{2} - \delta x \right) \cdot \left(\frac{L}{2} - \delta y \right) \quad (3.32)$$

$$C_4 = \frac{\epsilon_r \cdot \epsilon_0}{h - \delta z} \cdot \left(\frac{L}{2} + \delta x \right) \cdot \left(\frac{L}{2} - \delta y \right) \quad (3.33)$$

La figura 3.1 muestra el layout de los electrodos, y consiste en 4 electrodos impresos en un PCB situados en la parte inferior, un material dieléctrico, que en este caso es una silicona y en la parte superior otro electrodo que solapa las cuatro esquinas de los electrodos inferiores.

En las siguientes subsecciones se van a obtener las capacitancias teóricas que se obtendría frente a una serie de esfuerzos o desplazamientos. Se dice fuerza o desplazamiento ya que es equivalente hablar de uno u otro puesto que se relacionan de forma lineal, pero para ello hay que introducir en el desarrollo el término de coeficiente de rigidez.

En ingeniería, la rigidez es la capacidad de un objeto sólido o elemento estructural para soportar esfuerzos sin adquirir grandes deformaciones o desplazamientos, así que el coeficiente de rigidez será la magnitud física que cuantifica la rigidez de un elemento resistente bajo diversas configuraciones de carga.

Este coeficiente de rigidez se calcula como el cociente entre la fuerza aplicada y el desplazamiento inducido por esa fuerza, tal como se indica en 3.34 , o en su forma general como en 3.35:

$$k_i = \frac{F_i}{\delta_i} \quad (3.34)$$

$$k_i = \alpha_i \cdot \frac{E \cdot S_i}{L^{\beta_i}} \quad (3.35)$$

Donde S_i es una magnitud dependiente del tamaño y forma de la sección transversal, E es el módulo de Young, L es la longitud de la barra y α_i y β_i son coeficientes adimensionales dependientes del tipo de rigidez que se de en el caso a tratar.

El comportamiento elástico de una barra o prisma mecánico sometido a pequeñas deformaciones está determinado por ocho coeficientes elásticos que dependen de:

1. La sección transversal: cuanto más gruesa sea la sección más fuerza será necesaria para deformarla.
2. El material del que esté fabricada la barra, si se fabrican dos barras de idénticas dimensiones geométricas, pero siendo una de acero y la otra de plástico la primera es más rígida porque el material tiene mayor módulo de Young E.
3. La longitud de la barra elástica o en el caso que se presenta el grosor de la capa de dieléctrico L.

En el presente proyecto las rigideces que hay que tener en cuenta y formular son la rigidez axial y la rigidez frente a cortante.

La rigidez axial de un prisma como el que se trata en el proyecto es una medida de su capacidad para resistir intentos de alargamiento o acortamiento por la aplicación de cargas según su eje, en este caso Z.

En este caso la rigidez depende sólo del área de la sección transversal A, el módulo de Young del material E y la longitud de la siguiente manera:

$$\sigma_z = \frac{F_z}{A} \quad (3.36)$$

$$\varepsilon_z = \frac{\delta z}{h} \quad (3.37)$$

$$\sigma_z = \varepsilon \cdot E \quad (3.38)$$

De manera, que despejando estas ecuaciones se obtiene la relación lineal que se indicaba anteriormente:

$$F_z = \frac{E \cdot A}{h} \cdot \delta z \quad (3.39)$$

Por lo tanto:

$$K_z = \frac{F_z}{\delta z} = \frac{EA}{h} \quad (3.40)$$

La rigidez frente a cortante es la relación entre los desplazamientos horizontales en la superficie superior del bloque de dieléctrico tanto en el eje X como en el eje Y, y el esfuerzo cortante aplicado para provocar ese desplazamiento.

Su formulación para aplicarla mas adelante será:

$$K_{cortanteX} = \frac{F_x}{\delta_x} = \frac{12EI_x}{L^3} \quad (3.41)$$

$$K_{cortanteY} = \frac{F_y}{\delta_y} = \frac{12EI_y}{L^3} \quad (3.42)$$

3.3.1. Sensor sin fuerzas aplicadas

En el estado inicial en el que no se aplican fuerzas y por lo tanto el desplazamiento es nulo, las capacitancias de los condensadores vienen dadas por:

$$C_1 = C_2 = C_3 = C_4 = \epsilon_r \cdot \epsilon_0 \cdot \frac{L^2}{4 \cdot h} \quad (3.43)$$

El resultado es lógico dado que el área total que forman los 4 electrodos es $\frac{L^2}{4}$, y sustituyendola en la fórmula 3.1 obtenemos el resultado anterior. En cuanto a que las cuatro sean iguales es debido también a que en la situación inicial, sin fuerzas aplicadas, el diseño lo impone, no obstante en caso de que existiesen pequeñas diferencias entre ellas no sería un gran problema dado que se corregiría con la calibración del sistema.

3.3.2. Sensor con fuerzas aplicadas en el eje Z

En el caso de aplicar una fuerza solamente en el eje Z, las cuatro capacitancias seguirían siendo iguales, dado que al ser un termino que afecta a las 4 formulas de las capacitancias por igual, el efecto será el de aumentarlas todas por igual, a menos que como se ha comentado antes, existan defectos importantes de fabricación.

Por lo tanto, la fórmula resultante de la aplicación de una fuerza en Z es:

$$C_1 = C_2 = C_3 = C_4 = \epsilon_r \cdot \epsilon_0 \cdot \frac{L^2}{4} \cdot \frac{1}{h - \delta z} \quad (3.44)$$

donde δz es el desplazamiento inducido en el eje z por la fuerza aplicada. El signo negativo es debido a que al aplicar una fuerza se esta disminuyendo la distancia entre las placas de los condensadores y con ello aumentando sus capacitancias. Si se despeja la formula anterior en función de las capacitancias se observa que se puede calcular el desplazamiento en Z a partir de las 4 capacitancias, ya que se han obtenido cuatro formulas.

Para disminuir el error lo mas posible, lo adecuado es hacer una media de los cuatro desplazamientos obtenidos a partir de ellas.

$$\delta z_i = h - \frac{\epsilon_r \cdot \epsilon_0 \cdot L^2}{4 \cdot C_i} \quad (3.45)$$

3.3.3. Sensor con fuerzas aplicadas en el eje X o en el eje Y

En este caso, aplicando fuerzas en el eje X o en el eje Y se van a obtener ecuaciones equivalentes, al ser una figura simétrica. En este caso, como aplicamos solamente fuerza en el eje X o en el eje Y se van a obtener capacitancias iguales dos a dos.

En el caso de desplazar el electrodo superior en el eje X, las capacitancias de electrodo serán iguales 2 a 2, de la manera que sigue: $C_1 = C_3$ y $C_2 = C_4$. Si se desplaza en el eje vertical esto cambiará a $C_1 = C_2$ y $C_3 = C_4$.

Esto se aprecia mas claramente en la figura 3.5

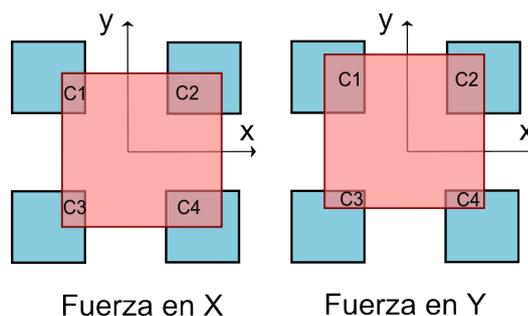


Figura 3.5: Influencia de la fuerza en X y en Y sobre las capacitancias

En el caso de existir una fuerza en el eje X, se obtiene:

$$C_1 = C_3 = \frac{\epsilon_r \cdot \epsilon_0}{h} \cdot \left(\frac{L}{2} - \delta x \right) \cdot \frac{L}{2} \quad (3.46)$$

$$C_2 = C_4 = \frac{\epsilon_r \cdot \epsilon_0}{h} \cdot \left(\frac{L}{2} + \delta x \right) \cdot \frac{L}{2} \quad (3.47)$$

En caso de que la fuerza se aplique en Y, se obtiene:

$$C_1 = C_2 = \frac{\epsilon_r \cdot \epsilon_0}{h} \cdot \frac{L}{2} \cdot \left(\frac{L}{2} + \delta y \right) \quad (3.48)$$

$$C_3 = C_4 = \frac{\epsilon_r \cdot \epsilon_0}{h} \cdot \frac{L}{2} \cdot \left(\frac{L}{2} - \delta y \right) \quad (3.49)$$

Haciendo como en el caso anterior se calcula δx y δy en función de las capacitancias, de manera que se obtienen cuatro soluciones para cada desplazamiento, y al igual que en el caso anterior lo óptimo sería hacer una media de todas ellas para disminuir el error del sistema.

$$\delta_x = \frac{1}{2} \cdot \left[L - \frac{4 \cdot C_1 \cdot h}{\epsilon_r \cdot \epsilon_0 \cdot L} \right] = \frac{1}{2} \cdot \left[L - \frac{4 \cdot C_3 \cdot h}{\epsilon_r \cdot \epsilon_0 \cdot L} \right] = \frac{1}{2} \cdot \left[-L + \frac{4 \cdot C_2 \cdot h}{\epsilon_r \cdot \epsilon_0 \cdot L} \right] = \frac{1}{2} \cdot \left[-L + \frac{4 \cdot C_4 \cdot h}{\epsilon_r \cdot \epsilon_0 \cdot L} \right] \quad (3.50)$$

$$\delta_y = \frac{1}{2} \cdot \left[L - \frac{4 \cdot C_1 \cdot h}{\epsilon_r \cdot \epsilon_0 \cdot L} \right] = \frac{1}{2} \cdot \left[L - \frac{4 \cdot C_2 \cdot h}{\epsilon_r \cdot \epsilon_0 \cdot L} \right] = \frac{1}{2} \cdot \left[-L + \frac{4 \cdot C_3 \cdot h}{\epsilon_r \cdot \epsilon_0 \cdot L} \right] = \frac{1}{2} \cdot \left[-L + \frac{4 \cdot C_4 \cdot h}{\epsilon_r \cdot \epsilon_0 \cdot L} \right] \quad (3.51)$$

3.3.4. Sensor con fuerzas aplicadas en el eje X, eje Y y eje Z

En el caso de aplicar fuerzas en los tres ejes las fórmulas que indicarán los valores de las capacitancias serán las indicadas al comienzo del apartado 3.3, esto es, la fórmula 3.30, 3.31, 3.32 y 3.33.

Como en los casos anteriores, al tener mas ecuaciones que incógnitas, se va a obtener mas de una ecuación por cada desplazamiento, de manera que al igual que en los casos anteriores lo óptimo sería hacer la media de los valores obtenidos para reducir el error de las medidas.

Las ecuaciones obtenidas para cuando se aplican fuerzas o desplazamientos en los tres ejes son:

$$\delta_x = \frac{C_1 - C_2}{C_1 + C_2} \cdot \frac{L}{2} = \frac{C_3 - C_4}{C_3 + C_4} \cdot \frac{L}{2} \quad (3.52)$$

$$\delta_y = \frac{C_1 - C_3}{C_1 + C_3} \cdot \frac{L}{2} = \frac{C_2 - C_4}{C_2 + C_4} \cdot \frac{L}{2} \quad (3.53)$$

$$\delta_z = \begin{cases} h - \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot \frac{C_1 \cdot L^2}{(C_1 + C_3) \cdot (C_1 + C_2)} \\ h - \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot \frac{C_3 \cdot L^2}{(C_1 + C_3) \cdot (C_3 + C_4)} \\ h - \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot \frac{C_2 \cdot L^2}{(C_1 + C_2) \cdot (C_2 + C_4)} \\ h - \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot \frac{C_4 \cdot L^2}{(C_3 + C_4) \cdot (C_2 + C_4)} \end{cases} \quad (3.54)$$

Para expresar las ecuaciones anteriores en función de la fuerza hay que sustituirlas en 3.39, 3.41 y 3.42 de manera que se obtienen las fuerzas aplicadas para haber obtenido esas capacitancias.

Despejando por lo tanto los desplazamientos anteriores, y de esa manera obtener unas fuerzas en función de las capacitancias obtenidas por el MPR121 se llega a la siguiente formulación:

$$F_x = \frac{12 \cdot E \cdot I}{L^3} \cdot \frac{C_1 - C_2}{C_1 + C_2} \cdot \frac{L}{2} = \frac{12 \cdot E \cdot I}{L^3} \cdot \frac{C_3 - C_4}{C_3 + C_4} \cdot \frac{L}{2} \quad (3.55)$$

$$F_y = \frac{12 \cdot E \cdot I}{L^3} \cdot \frac{C_1 - C_3}{C_1 + C_3} \cdot \frac{L}{2} = \frac{12 \cdot E \cdot I}{L^3} \cdot \frac{C_2 - C_4}{C_2 + C_4} \cdot \frac{L}{2} \quad (3.56)$$

$$F_z = \begin{cases} \frac{E \cdot A}{h} \cdot \left[h - \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot \frac{C_1 \cdot L^2}{(C_1 + C_3) \cdot (C_1 + C_2)} \right] \\ \frac{E \cdot A}{h} \cdot \left[h - \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot \frac{C_3 \cdot L^2}{(C_1 + C_3) \cdot (C_3 + C_4)} \right] \\ \frac{E \cdot A}{h} \cdot \left[h - \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot \frac{C_2 \cdot L^2}{(C_1 + C_2) \cdot (C_2 + C_4)} \right] \\ \frac{E \cdot A}{h} \cdot \left[h - \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot \frac{C_4 \cdot L^2}{(C_3 + C_4) \cdot (C_2 + C_4)} \right] \end{cases} \quad (3.57)$$

Capítulo 4

Plataforma experimental de calibración

En el presente estudio se van a tener que llevar a cabo dos calibraciones. La calibración del sensor de 6 ejes (que se realiza automáticamente al ejecutar el software que lo gobierna), y después la calibración del sensor capacitivo que se ha fabricado. La calibración del JR3 es necesaria dado que a partir de los datos que proporcione una vez calibrado, se calibrará el sistema capacitivo, por lo tanto es importante que los datos obtenidos sean fiables, y de ahí el utilizar un sensor de precisión como este.

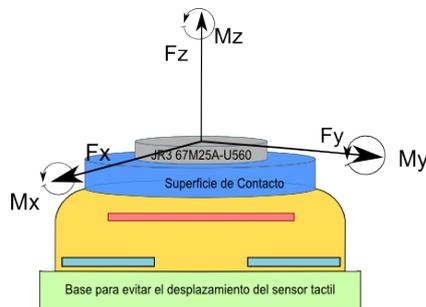


Figura 4.1: Esquema de montaje para calibración del sensor capacitivo

Para realizar las fuerzas sobre el sensor táctil capacitivo se va a utilizar un sistema formado por un PA10, el JR3 67M25A acoplado a su extremo y un sistema para sujetar el sensor al banco de pruebas.

4.1. Hardware

4.1.1. Sensor de medición capacitivo MPR121

El sensor que se ha utilizado en el presente proyecto es el MPR121, junto con el Kit de evaluación KITMPR121EVM (figura 4.2). Con este Kit se puede observar como es el funcionamiento básico de este sensor a través de una serie de demos, así como entrar mas en profundidad en el funcionamiento del sensor, gracias a los modos de evaluación que permiten configurar los registros del MPR121 para ver su comportamiento ante diferentes configuraciones, lo que en este proyecto es suficiente dados los objetivos

que se van persiguiendo.



Figura 4.2: Fotografía del KITMPR121EVM

El convertidor MPR121 pertenece a la segunda generación de controladores de sensores de Freescale, después de la primera serie MPR03x. El MPR121 dispone de mejoras respecto a la serie anterior para una mejor detección de las capacitancias de los electrodos, en este caso, fabricados y diseñados para la aplicación del presente proyecto.

Entre las mejoras que trae consigo esta nueva serie está el aumento del número de electrodos que pueden conectarse, la posibilidad de configurar la dirección I2C del hardware, un mejorado sistema de filtrado para las capacitancias (eliminar contactos no deseables, por ejemplo) y la posibilidad de configurar las opciones de cada electrodo por separado, dado que puede que cada uno de ellos tenga una función diferente. También esta nueva serie presenta una simulación del electrodo número 13, que representa la suma simultánea de las cargas de todos los electrodos que están conectados en ese momento, de manera que sea posible detectar mejor pequeños cambios trabajando todos los electrodos al mismo tiempo.

El MPR121 puede medir capacitancias en el rango desde 10 pF hasta 2000 pF variando la corriente y el tiempo proporcionado a cada electrodo. Los electrodos se controlan independientemente para de esta manera poder diseñar cada electrodo de manera diferente, dependiendo del uso que se le quiera dar; es por esto que la nueva mejora que trae esta serie es de gran utilidad para ciertas aplicaciones, como por ejemplo medir fuerzas de distintos ordenes de magnitud, dado que dependiendo de la fuerza el sensor deberá de tener tanto un tamaño como un dieléctrico diferente, proporcionando esto una gran flexibilidad a la hora de diseñar el sistema.

También es posible configurar los electrodos de manera automática, pero en el caso del proyecto esta opción no ha proporcionado buenos resultados para lo que se andaba buscando.

Otro punto importante a configurar es la frecuencia de muestreo, dado que puede configurarse para que tome muestras en cada electrodo en un intervalo de tiempo de entre 1 ms y 128 ms, lo cual dependiendo de la aplicación puede suponer o un ahorro de energía o un aumento en las prestaciones al aumentar el número de datos proporcionados por el sensor. La relación entre frecuencia y consumo se aprecia en la figura 4.3

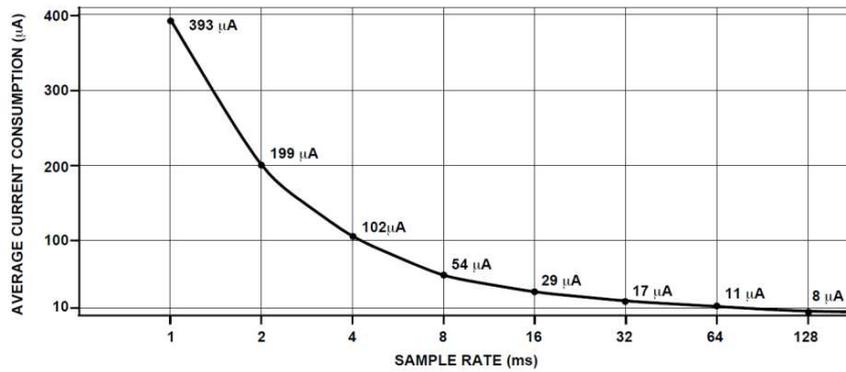


Figura 4.3: Consumo del MPR121 en función de la frecuencia de muestreo

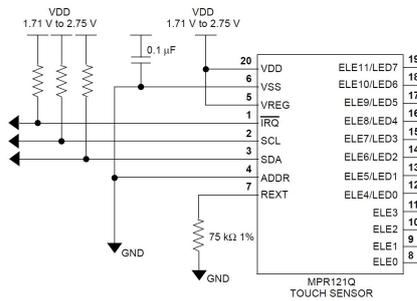


Figura 4.4: Puertos MPR121

El esquema eléctrico completo se incluye en los anejos, pero conviene tener en cuenta a modo ilustrativo el layout de los puertos del MPR121, tal y como se aprecia en la figura 4.4.

4.1.2. Sensor JR3 67M25A

4.1.2.1. Descripción general del sensor

Para la realización de la calibración del sistema se va a utilizar un sensor de fuerza y torque, de manera que a través de los datos obtenidos por el JR3 y los obtenidos por el sensor capacitivo se van a obtener una serie de aproximaciones, o dicho de otra manera, vamos a calibrar nuestro sistema.

Algunas de los campos en los que se suele utilizar este tipo de sensores es en el reconocimiento de sobrecargas en operaciones de manipulación, procesamiento y ensamblado, o también por ejemplo en el control de fuerza a la hora de realizar operaciones de pulido y montaje de piezas.

Para empezar, decir que este tipo de sensores de fuerza y torque (en el presente caso el 67M25A de JR3) tienen una gran capacidad, existiendo una amplia gama de sensores en función tanto de la carga como del momento que se va a aplicar al sistema, variando también por lo tanto el tamaño del sensor. Remarcar que JR3 fabrica este tipo de sensores en los siguientes rangos: un rango de tamaños desde 5 cm a 33 cm, una carga desde 0,91 a 11,4 kg y un torque comprendido en el rango desde 0,028 Nm hasta 2,48 Nm.

El mecanismo de este sensor está formado por una carcasa de aluminio (también puede ser de acero

inoxidable o titanio) y una instrumentación electrónica que puede ser tanto analógica como digital. Los elementos sensores encargados de recibir la información exterior en forma de carga son las galgas extensiométricas, cuyas señales de salida son amplificadas y comparadas para obtener una medida de las fuerzas y de los momentos en los tres ejes. Dependiendo del tipo de sensor que se adopte, JR3 proporciona dos opciones. O bien el dato analógico es convertido a digital en el propio sensor, o bien se da la opción de obtener una salida analógica y procesar después esta señal como mas convenga para cada aplicación.

No obstante, en el 67M25A, que es el utilizado en el presente proyecto, la salida obtenida es digital.

Los ejes de los sensores de JR3 están orientados como indica la figura 4.5, visto desde el lado del robot manipulador. Los ejes X e Y están situados en el plano del bloque del sensor, y el eje Z es perpendicular

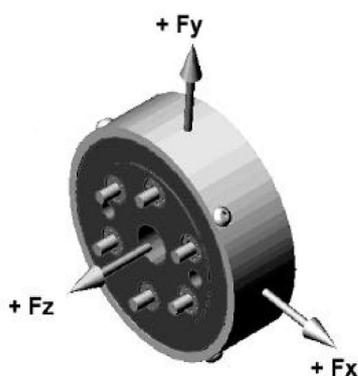


Figura 4.5: Orientación de los ejes del sensor

a estos dos ejes. Cabe remarcar para tenerlo en cuenta a la hora de configurar un manipulador (en caso de ser necesario) que el punto de referencia para todos los datos de las cargas es el centro geométrico del sensor.

Observando las fuerzas desde el lado del robot tanto las fuerzas como los momentos siguen la regla de la mano derecha.

4.1.2.2. Instalación y montaje del sensor

En esta sección se dan los conceptos generales para la instalación del sensor de fuerza y torque de nuestro sistema. Es muy importante tener cuidado a la hora de realizar el montaje dado que el sensor es un aparato de medida de precisión y cualquier manipulación incorrecta puede dar lugar a medidas erróneas, y por lo tanto no ser útiles para la calibración del sistema. Se deben de seguir las instrucciones del fabricante a la hora de montarlo, entre las que destacan las siguientes:

1. No girar un tornillo de una sola vez ya que se puede dañar el sensor.
2. Girar un tornillo un par de vueltas, después ir al siguiente y girar hasta que la superficie del sensor quede paralela con el manipulador
3. Apretar los tornillos siguiendo una secuencia.

4. Apretar los tornillos en dos o mas pasos hasta que se alcance la presión recomendada por el fabricante.

La tabla 4.2 indica los valores de los torques admisibles en función de la métrica de los tornillos, recomendado por el fabricante del sensor con el fin de evitar daños en las cabezas de estos.

Por tanto es recomendable quedarse siempre por debajo de los valores indicados en la tabla adjunta.

Métrica	Torque de apriete recomendado
M3x.5	1.25 Nm
M4x.7	2.9 Nm
M5x.8	5.9 Nm
M6x1.0	10 Nm
M8x1.25	24 Nm
M10x1.5	48 Nm
M12x1.75	84 Nm
M16x2.0	207 Nm

Cuadro 4.2: Valor admisible de los torques

En cuanto a las superficies del sensor están fabricadas de una manera muy precisa para ser extremadamente fina. Estas superficies, que son a las que esta atornillado el sensor deben de ser tan finas como sea posible, siendo preferiblemente el rango en el que se encuentran cercano a las décimas de milímetro. Por lo tanto, al ser tan delgadas son muy sensibles a las condiciones que se dan en las superficies de contacto, así que es importante que las superficies de contacto sean lo suficientemente rígidas en función de las cargas que van a ser aplicadas. Como en el caso del torque el fabricante también impone una serie de grosores óptimos para las láminas de contacto.

4.1.2.3. Interfaz electrónico

El sensor de JR3 que se utiliza en este proyecto proporciona una salida digital en un formato síncrono. Todas las señales analógicas así como el A/D esta incluidos en el interior del cuerpo del sensor, protegido de las interferencias electromagnéticas gracias al componente metálico de su carcasa. Los datos que se generan por la acción de las cargas se transmiten a 8 KHz, pudiendo otros sensores de la gama transmitir a otras frecuencias.

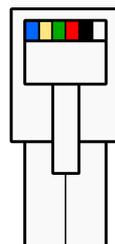


Figura 4.6: Cable del sensor de 6 Pines

No obstante, además de los datos también se envía información de la corriente de alimentación del sensor, así como información de las características del sensor y de la calibración, lo que permite no tener que estar calibrando o ajustando el circuito receptor. En el caso del sensor que se está utilizando, el conector es un RJ-11 de 6 pins como el de la figura 4.6, no obstante el tipo de conector variará en función del sensor que se esté utilizando, debiendo de seguir las instrucciones del fabricante en todo momento.

La asignación de pins es tal y como se indica en la tabla 4.3.

Pin	Señal
1	DClk +
2	DClk -
3	+8 V
4	Pwr Com
5	Data +
6	Data -

Cuadro 4.3: Asignación de pins

Como es habitual en los sistemas electrónicos la tierra del sensor y la del sistema de adquisición de datos debe ser la misma, para evitar que el no compartir tierra pueda ocasionar problemas a la hora de interpretar los datos.

Existe una amplia gama de sistemas de recepción y procesamiento de datos que reciben los datos en serie desde el sensor y proporcionan los valores de la carga en el formato que se desee. Existen diferentes sistemas que permiten una conexión directa con el ordenador ya sea por los puertos serie o paralelo.

4.1.2.4. Matriz de calibración

Todos los sensores multiejes tiene un cierto grado de acoplamiento, lo que quiere decir que un momento o una carga en un determinado eje produce una cierta carga en los otros ejes. Cada sensor de JR3 está calibrado individualmente con cargas aplicadas en cada eje.

Los datos de calibración se utilizan para generar una matriz de calibración y desacoplamiento, que es utilizada para convertir los voltajes de salida en una fuerza o en un momento en las unidades deseadas.

En el caso del sensor que se está utilizando, al ser de salida digital, almacena los datos de salida en una memoria no volátil, y cuando el sensor es conectado al receptor, los datos son transferidos automáticamente descargándose en los primeros segundos de operación. Después de eso el receptor aplica la matriz de calibración a los datos que se van recibiendo sin intervención del usuario.

La matriz de calibración se aplica tal y como se indica en la figura ecuación 4.1

$$\begin{matrix} F_x \\ F_y \\ F_z \\ M_x \\ M_y \\ M_z \end{matrix} \begin{bmatrix} A_{1,1} & A_{1,2} & A_{1,3} & A_{1,4} & A_{1,5} & A_{1,6} \\ A_{2,1} & A_{2,2} & A_{2,3} & A_{2,4} & A_{2,5} & A_{2,6} \\ A_{3,1} & A_{3,2} & A_{3,3} & A_{3,4} & A_{3,5} & A_{3,6} \\ A_{4,1} & A_{4,2} & A_{4,3} & A_{4,4} & A_{4,5} & A_{4,6} \\ A_{5,1} & A_{5,2} & A_{5,3} & A_{5,4} & A_{5,5} & A_{5,6} \\ A_{6,1} & A_{6,2} & A_{6,3} & A_{6,4} & A_{6,5} & A_{6,6} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} V_{Fx} \\ V_{Fy} \\ V_{Fz} \\ V_{Mx} \\ V_{My} \\ V_{Mz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Carga_{FX} \\ Carga_{FY} \\ Carga_{FZ} \\ Carga_{MX} \\ Carga_{MY} \\ Carga_{MZ} \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

Matriz de calibración \times *Voltage de salida* = *Cargas calibradas*

En el caso de resolver la ecuación manualmente sería mas tedioso dado que habría que resolver las ecuaciones una a una, no obstante, el cálculo es bastante sencillo.

Por ejemplo para calcular la Fx desacoplada y calibrada habría que multiplicar la fila $A_{1,n}$ por la columna de voltajes, de manera que se obtendría la Fx. Habría que hacer esto por lo tanto para todas las fuerzas y momentos, tal y como se despeja en la ecuación 4.2. En el presente proyecto esto no es necesario, ya que no se va a calcular manualmente.

$$(A_{1,1} \times V_{Fx}) + (A_{1,2} \times V_{Fy}) + (A_{1,3} \times V_{Fz}) + (A_{1,4} \times V_{Mx}) + (A_{1,5} \times V_{My}) + (A_{1,6} \times V_{Mz}) = Carga_{Fx} \quad (4.2)$$

Información adicional en los anejos.

4.1.3. Robot PA-10

El robot PA10 es un robot de siete grados de libertad con siete articulaciones rotoides y muñeca de ejes concurrentes, fabricado por Mitsubishi y muy popular en la automatización de procesos (en once años, hasta abril de 2003, se habían vendido 310 unidades de este brazo manipulador). Desde 1992 Mitsubishi Heavy Industries forma parte del mercado de robots de propósito general con la introducción de robot llamado originalmente “Portable General-purpose Intelligent Arm PA10”. El PA10 es un brazo robot manipulador ligero que puede tener 6 o 7 ejes de rotación en función de la serie, la PA10-6C tiene 6 y la PA10-7C dispone de 7.

El robot tenía la reputación de ser de los mas ligeros, ya que pesa aproximadamente 40 kilos con una capacidad de carga de 10 kilos. Fue el primero en tener 7 ejes redundantes dentro de los denominados como robots industriales, y de dar la facilidad de poder controlarlo con un ordenador personal, y es por ello que es ampliamente usado tanto en la industria, como en investigación y educación.

Desde un punto de vista mecánico el brazo robótico PA10-7C es una cadena cinemática abierta uniéndose sus eslabones por siete juntas de revolución estando una anclada en la base y otra en el actuador

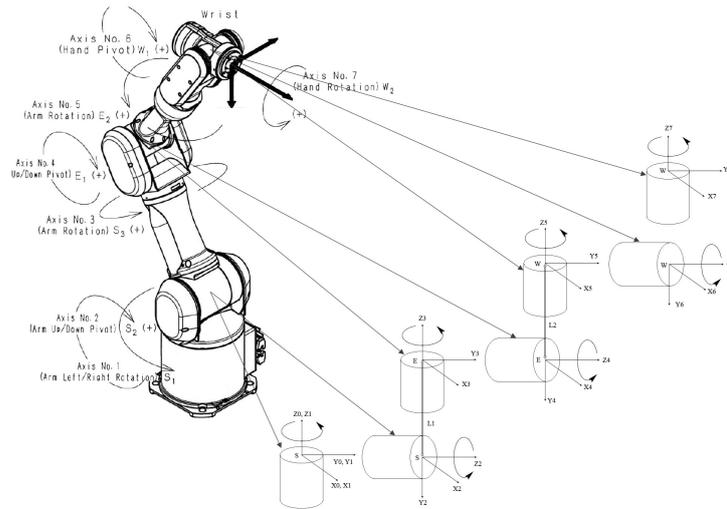


Figura 4.7: Grados de libertad del PA10-7C

del final de la cadena. El brazo del robot esta controlado en sus articulaciones por unos motores,estando en todo momento determinada en el espacio la posición y orientación del actuador que se encuentra en el último eslabón.

Parara estudiar el movimiento del robot respecto de un sistema de referencia dado hay que resolver el problema de cinemática. Existen dos problemas fundamentales de cinemática [1]:

1. Problema cinemático directo: Consiste en determinar cuál es la posición y orientación del extremo final del robot, con respecto a un sistema de coordenadas que se toma como referencia,conocidos los valores de las articulaciones y los parámetros geométricos de los elementos del robot.
2. Problema cinemático inverso: Consiste en resolver la configuración que debe tener el robot para una posición y orientación determinada.

En el caso de querer incluir en los cálculos velocidades o aceleraciones de los elementos del robot hay que acudir a la cinemática diferencial, en la que se emplea la matriz Jacobiana.

Aunque para describir la relación existente entre dos elementos contiguos se puede hacer uso de cualquier sistema de referencia ligado a cada elemento, la forma habitual que se suele utilizar en robótica es la representación de Denavit-Hartenberg o D-H. Escogiendo los sistemas de coordenadas asociados a cada eslabón según la representación D-H es posible pasar de uno al siguiente mediante 4 transformaciones básicas que dependen exclusivamente de las características geométricas de cada eslabón. Estas transformaciones consisten en una sucesión de rotaciones y translaciones que permiten relacionar el sistema de referencia del elemento i-1 con el sistema del elemento i.

Como el brazo robot PA10-7C tiene 7 grados de libertad, una determinada configuración en el espacio puede tener una solución, múltiples, ninguna o infinitas. Basándose en el modelo D-H se aprecia que la cinemática directa del PA10-7C no es lineal, si no que es una combinación de diferentes funciones

trigonométricas.

4.2. Procedimiento para realizar las medidas

Para realizar la calibración del sistema se van a tomar una serie de datos proporcionados tanto por el JR3 como del sensor capacitivo que después se sincronizarán para entrenar la red neuronal.

Para ello se va a acoplar el sensor que se ha fabricado a la bancada, y después se realizarán una serie de movimientos en el plano horizontal en diferentes direcciones, cubriendo el perímetro de una elipse. La idea es tomar las medidas según el robot va recorriendo los radios, de manera que se dispondrán de una cantidad considerable de datos.

Una vez realizado el primer barrido, se realizarían otros con las mismas trayectorias, pero esta vez aplicando una fuerza también en el eje vertical, para obtener datos también con variaciones de fuerza en el eje Z, no obstante, por problemas prácticos al realizar las medidas con diferentes cargas verticales, no se han tenido en cuenta. Las trayectorias que debe recorrer el PA10-7C en el plano XY y en el plano Z se describen en la figura 4.8. En dicha figura se representan dos posibles tipos de movimientos alrededor del eje Z, pero finalmente se optó por el movimiento en espiral, para de esta manera ir obteniendo diferentes valores de desplazamiento en X e Y y de fuerzas aplicadas al sensor, dado que si el PA10 describiese una trayectoria circular, la fuerza realizada sería constante en todo momento.

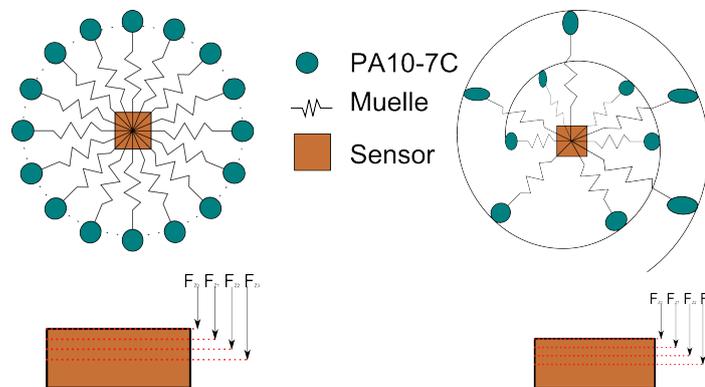


Figura 4.8: Movimientos en el plano XY del robot PA10

4.3. Método de calibración

4.3.1. Introducción

En el futuro, dado que estos sistemas de pieles artificiales dotadas con sensores táctiles, revestirán diferentes partes de los robots, no será posible, en principio que vengan calibrados desde fábrica, ya que sus medidas variarán en función de si el material se encuentra flexionado, comprimido o en un estado sin

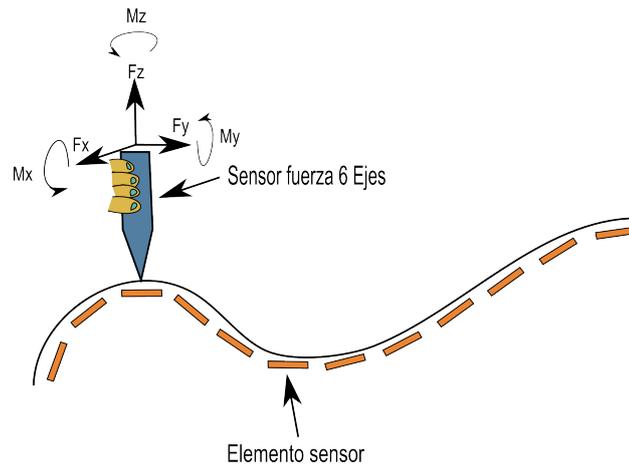


Figura 4.9: Método de calibración

fuerzas. Por lo tanto se hace necesario encontrar un sistema de calibración que permita solucionar estos problemas una vez instalado todo el recubrimiento.

Como se aprecia en la figura 4.9, la idea sería la de ir calibrando cada elemento sensor por separado, aplicando una serie de fuerzas en su centro, de manera que se obtendrían una serie de lecturas por parte tanto del elemento sensor al que se aplican las fuerzas como de los elementos sensores colindantes, debido principalmente a la plasticidad de la piel artificial. Estas fuerzas leídas por los sensores serían comparadas con las obtenidas por el elemento actuador que realiza las fuerzas de calibración (dispone de medición de fuerza/torque en 6 ejes).

Por lo tanto, partiendo de esas dos matrices de datos, se entrenaría una red neuronal, para prever cual sería la respuesta de la piel cuando se aplicasen otras fuerzas en los elementos sensores, o en otra parte de la piel que no disponga de elementos sensores.

4.3.2. Regresión mediante redes neuronales

Las Redes Neuronales surgieron inicialmente como una simulación abstracta de los sistemas nerviosos biológicos, formados por neuronas o nodos conectados unos con otros. Sus inicios datan de 1943 cuando McCulloch y Pitts propusieron un modelo computacional binario de actividad nerviosa, donde cada neurona tenía un escalón o umbral prefijado, y que serviría de base para el desarrollo de futuros modelos neuronales. Una primera clasificación de los modelos de redes neuronales podría ser:

1. Modelos inspirados en la Biología: Comprenden las redes que tratan de simular los sistemas neuronales biológicos, así como ciertas funciones como las auditivas o de visión.
2. Modelos artificiales aplicados: Estos modelos no tienen por qué guardar similitud estricta con los sistemas biológicos, ya que su arquitectura dependerá de las necesidades o aplicaciones para las que son diseñadas.

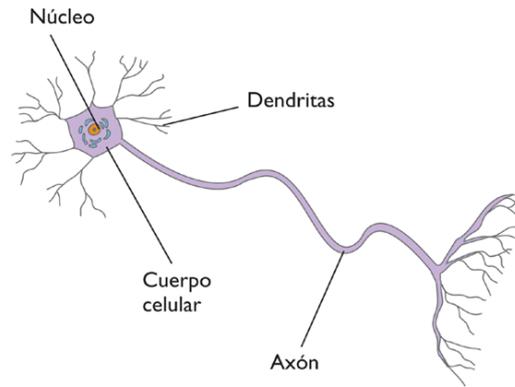


Figura 4.10: Morfología de la neurona

4.3.2.1. Redes neuronales biológicas

Se estima que el cerebro humano contiene más de 10^{11} de neuronas y 10^{14} sinapsis en el sistema nervioso. Los estudios realizados sobre la anatomía del cerebro humano concluyen que hay, en general, más de 1000 sinapsis por término medio a la entrada y a la salida de cada neurona.

Comparandolo con la capacidad de los ordenadores, las neuronas biológicas tienen un tiempo de conmutación de unos pocos milisegundos, lo que es casi un millón de veces menor que la velocidad a la que conmutan los ordenadores, pero las neuronas biológicas tienen una conectividad entre ellas miles de veces superior a las artificiales. El objetivo principal de las redes neuronales de tipo biológico es desarrollar operaciones de síntesis y procesamiento de información, relacionadas con los sistemas biológicos.

La sinapsis y las neuronas son la clave para el procesado de la información. La mayor parte de las neuronas poseen una estructura de árbol, llamada dendritas, que reciben las señales de entrada procedentes de otras neuronas a través de las sinapsis. Una neurona consta de tres partes:

1. El cuerpo de la neurona
2. Las dendritas, que reciben las entradas
3. El axón, que lleva la salida de la neurona a las dendritas de otras neuronas.

La forma completa en la que dos neuronas se relacionan no es totalmente conocida, y depende además del tipo particular de neurona. En general, una neurona envía su salida a otras por su axón, y éste lleva la información por medio de diferencias de potencial eléctrico. Este proceso es a menudo modelizado como una regla de propagación representada por una función $u(\cdot)$. La neurona recoge las señales por su sinapsis sumando todas las excitadoras e inhibitoras. Si las influencias excitadoras positivas dominan, entonces la neurona produce una señal positiva y manda este mensaje a otras neuronas por sus sinapsis de salida. En este sentido, la neurona actúa como una simple función escalón.

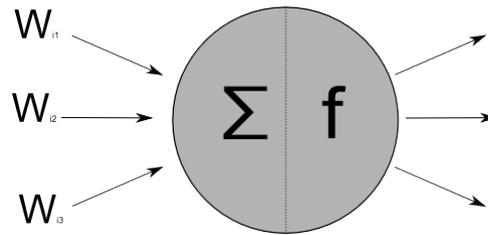


Figura 4.11: Modelo de neurona

4.3.2.2. Redes neuronales artificiales

Las redes neuronales suelen estar por norma general inspiradas en las redes neuronales biológicas, aunque poseen otras funcionalidades y estructuras de conexión distintas.

Las características principales de las redes de neuronas artificiales son las siguientes:

1. Auto-Organización y Adaptabilidad: Utilizan algoritmos de aprendizaje adaptativo y auto-organización, por lo que ofrecen mejores posibilidades de procesamiento robusto y adaptativo.
2. Procesado no Lineal: Aumenta la capacidad de la red para aproximar funciones, clasificar patrones y aumenta su inmunidad frente al ruido.
3. Procesado Paralelo: Normalmente se usa un gran número de nodos de procesamiento, con alto nivel de interconexión.

Al elemento básico de computación se le llama habitualmente nodo o unidad. Éste recibe un input desde otras unidades o de una fuente externa de datos. Cada input tiene un peso asociado w , que se va modificando en el llamado proceso de aprendizaje y cada unidad aplica una función dada f de la suma de los inputs ponderadas.

$$y_i = \sum_j W_{ij} y_j$$

Las características de las redes neuronales juegan un importante papel, por ejemplo, en el procesamiento de señales e imágenes. Se usan arquitecturas que comprenden elementos de procesamiento adaptativo paralelo, combinados con estructuras de interconexiones jerárquicas.

Hay dos fases en la modelización con redes neuronales:

Fase de entrenamiento: Se usa un conjunto de datos o patrones de entrenamiento para determinar los pesos (parámetros) que definen el modelo de red neuronal. Se calculan de manera iterativa, de acuerdo con los valores de entrenamiento, con el objeto de minimizar el error cometido entre la salida obtenida por la red neuronal y la salida deseada. El proceso de aprendizaje se puede dividir en tres grandes grupos:

1. Aprendizaje supervisado. Se presenta a la red un conjunto de patrones de entrada junto con la salida esperada. Los pesos se van modificando de manera proporcional al error que se produce entre la salida real de la red y la salida esperada.
2. Aprendizaje no supervisado. Se presenta a la red un conjunto de patrones de entrada. No hay información disponible sobre la salida esperada. El proceso de entrenamiento en este caso deberá ajustar sus pesos en base a la correlación existente entre los datos de entrada.
3. Aprendizaje por refuerzo. Este tipo de aprendizaje se ubica entre medio de los dos anteriores. Se le presenta a la red un conjunto de patrones de entrada y se le indica a la red si la salida obtenida es o no correcta. Sin embargo, no se le proporciona el valor de la salida esperada. Este tipo de aprendizaje es muy útil en aquellos casos en que se desconoce cual es la salida exacta que debe proporcionar la red.

Fase de prueba: En la fase anterior, el modelo puede que se ajuste demasiado a las particularidades presentes en los patrones de entrenamiento, perdiendo su habilidad de generalizar su aprendizaje a casos nuevos (sobre ajuste). Para evitar el problema del sobre ajuste, es aconsejable utilizar un segundo grupo de datos diferentes a los de entrenamiento, el grupo de validación, que permita controlar el proceso de aprendizaje.

4.3.2.3. Topología de las redes neuronales artificiales

Las redes de neuronas se pueden clasificar en función de tipo de conexiones que se forman. De manera general se pueden definir dos tipos generales:

1. Red de propagación hacia delante o feedforward: En este tipo de redes las señales se propagan hacia adelante a través de las capas de la red. Al ser hacia adelante, no existen conexiones hacia atrás, y normalmente tampoco auto recurrentes, ni laterales, excepto los modelos de red propuestos por Kohonen.

Las redes feedforward más conocidas son: Perceptron, Adaline, Madaline, Linear adaptative memory, Drive reinforcement y Backpropagation siendo todas ellas útiles para aplicaciones de reconocimiento o clasificación de patrones.

2. Red recurrente o de retroalimentación o feedback: En éste tipo de redes la información circula tanto hacia delante como hacia atrás durante el funcionamiento de la red. Para que eso sea posible existen conexiones feedforward y feedback entre las neuronas. En general, suelen ser bicapa, existiendo por lo tanto dos conjuntos de pesos: los correspondientes a las conexiones feedforward de la primera capa (capa de entrada) hacia la segunda (capa de salida) y los de las conexiones feedback de la segunda a la primera, no obstante los valores de los pesos de estas conexiones no tienen porqué

coincidir, de hecho, suelen ser diferentes casi siempre.

Este tipo de estructura bicapa es particularmente adecuada para realizar una asociación de una información o patrón de entrada (en la primera capa) con otra información o patrón de salida en la segunda capa, aunque también pueden ser utilizadas para la clasificación de patrones.

Algunas redes tienen un funcionamiento basado en lo que se denomina resonancia, de tal forma que las informaciones en la primera y segundas capas interactúan entre sí hasta que alcanzan un estado estable. Esto permite un mejor acceso a las informaciones almacenadas en la red.

Los dos modelos de red de dos capas más conocidos son la red ART (Adaptative Resonante Theory) y la red BAM (Bidirectional Associative Memory).

También en este grupo de redes existen algunas conexiones laterales entre neuronas de la misma capa. Estas conexiones se diseñan como conexiones excitadoras (con peso positivo) o inhibidoras (con peso negativo), estableciéndose una competición entre las neuronas correspondientes.

4.3.2.4. Perceptrón

En el caso de ocupar al presente proyecto se va a utilizar la red neuronal denominada como perceptrón, que a su vez puede ser o perceptrón simple o perceptrón multicapa.

En el perceptrón la información fluye desde la capa de entrada hacia la capa de salida, lo que se denomina como red de alimentación directa. Fue desarrollado por F. Rosenblatt a final de la década de los cincuenta basándose en la regla de aprendizaje de Hebb y de los modelos de neuronas biológicas de McCulloch y Pitts.

El Perceptrón es un clasificador, asigna a un vector de N valores un valor binario, usando una transformación no lineal. Así cada vector pertenece a una de las particiones que crea el perceptrón.

El perceptrón es una máquina de computación universal y tiene la expresividad equivalente a la lógica binaria ya que podemos crear un perceptrón que tenga el mismo comportamiento que una función booleana NAND y a partir de esta función se puede crear cualquier otra función booleana.

El perceptrón simple es una red que consta de dos capas de neuronas. Esta red admite valores binarios o bipolares como entrada para los sensores y los valores de su salida están en el mismo rango que los de entrada.

La función de la primera capa es hacer de sensor, por ella entran las señales a la red. La segunda capa realiza todo el procesamiento estando cada neurona de la primera capa unida con todas las de la segunda capa. El funcionamiento para ejecutar un patrón de la red es el siguiente:

1. Se establece el patrón de entrada en los sensores, la capa de entrada.
2. Se actualizan las neuronas de la capa de Salida.

Las sinapsis que une las neuronas i , j aprenderá de la siguiente manera:

$$P_{ijnuevo} = P_{ij} + Tasa \cdot [(E_j - S_j) \cdot E_i] \quad (4.3)$$

E_i = Estado de la neurona de la capa de entrada i

P_{ij} = Peso actual asociado a la sinapsis que une la neurona i (entrada) y la neurona j (salida)

E_j = Estado de la neurona de la capa de salida j

S_j = Valor deseado para esa neurona

$P_{ijnuevo}$ = Peso P_{ij} actualizado

$Tasa$ = Es una constante entre 0 y 1 que indica cuanto aprende la red

Hay que destacar que el perceptrón aprende solo cuando se equivoca al clasificar el patrón. El perceptrón simple tiene una serie de limitaciones muy importantes ya que es incapaz de clasificar conjuntos que no son linealmente independientes.

Esto quedo patente en la obra Perceptrons que en 1969 demostró que un perceptrón es incapaz de aprender una función tan fácil como la XOR.

Surge por lo tanto el perceptrón multicapa, que es una ampliación del perceptrón a la cual añade una serie de capas que, básicamente, hacen una transformación sobre las variables de entrada, que permiten eludir el problema anterior.

Esto acaba con el problema del perceptrón, convirtiendo las funciones linealmente no independientes en linealmente independientes gracias a la transformación de la capa oculta.

Además el perceptrón multicapa admite valores reales, así que se puede afirmar que el perceptrón multicapa es un modelador de funciones universal, y es por eso que es el que se ha seleccionado para ajustar los datos que se obtienen en la calibración del sensor.

4.3.2.5. El algoritmo de aprendizaje back-propagation

Para entrar mas a fondo en el entrenamiento de la red neuronal del tipo Perceptrón conviene explicar bien el algoritmo de aprendizaje de back-propagation.

La típica red de back-propagation tiene una capa de entrada, una capa de salida, y al menos una capa oculta. No hay ningún límite teórico en el número de capas ocultas pero normalmente es una o dos. Algunos trabajos desarrollados apuntan a un máximo de 4 capas (2 capas ocultas y una capa de salida) para resolver problemas de cualquier complejidad. En cada capa, cada neurona de la misma esta conectada a todas las neuronas de la capa siguiente. La capa de entrada y la de salida indican el flujo de información durante la fase de "recall", en esta fase se pone un patrón en la entrada de la red entrenada y se espera a recibir una respuesta. La propagación hacia atrás de los errores no se usa durante esta fase, sino sólo cuando el algoritmo está aprendiendo.

Las funciones de activación de las neuronas ocultas $f(h)$ son de tipo sigmoideo y la minimización del error cuadrático medio se lleva a cabo mediante descenso por gradiente, pero en esta ocasión habrá un

gradiente respecto de los pesos de la capa de salida y otro respecto de los de la oculta.

El número de capas y el número de neuronas por capa son decisiones importantes en una red unidireccional que usa una topología back-propagation aunque estas decisiones se toman usando la experiencia propia. No existe una regla fija que nos indiquen sus valores sino que se establecen por la intuición del diseñador de la red.

Sin embargo, existen un conjunto de reglas que se han seguido a lo largo del tipo y que han sido seguidas por investigadores e ingenieros aplicándolas a las arquitecturas que aplican a sus problemas.

- 1 Cuanto más aumenta la complejidad en las relaciones entre los datos de entrada y los datos de salida, entonces el número de neuronas en las capas de ocultas también deberían aumentarse.
- 2 Si el proceso que se está modelando es separable en dos etapas, entonces nueva(s) capa(s) pueden ser adicionales. Si el proceso no es separable en varias etapas, entonces las capas adicionales simplemente permiten memorizar y no siempre es una solución general.
- 3 El número de patrones de entrenamiento disponibles establecen una cota superior en el número de neuronas en la(s) capa(s) oculta(s). Para calcular esta cota superior primero hay que dividir el número total de neuronas de las capas de entrada y salida. Divide el resultado de nuevo por un factor de escala entre 5 y 10. Factores de escala grandes son usados cuando existen datos con ruido. Cuando los datos de entrada tienen muchísimo ruido será necesario incluso factores más elevados (20 o 50), mientras que datos en los que no exista apenas ruido podríamos disminuir el factor hasta un valor de 2. Es muy importante que la(s) capa(s) oculta(s) tengan pocas neuronas ya que demasiadas neuronas podrían llevar a que los patrones de entrada fueran memorizadas de manera que ningún tipo de generalización fuera posible, haciendo que la red fuera inútil con nuevos datos de entrada.

Para resolver algunos de los inconvenientes del back-propagation se plantean continuamente correcciones o variantes.

Buena parte de estas modificaciones tratan de resolver el problema de su lenta convergencia, mientras que otras se centran en conseguir una mejor generalización. Una variante propuesta supone incluir un término denominado momento, consistente en añadir al cálculo de la variación de los pesos un término adicional proporcional al incremento de la iteración anterior (inercia).

El esquema presentado para el algoritmo back-propagation surge de forma natural del proceso de descenso por el gradiente, se lleva a cabo en una fase de ejecución para todos y cada uno de los patrones del conjunto de entrenamiento, se calcula la variación en los pesos debida a cada patrón, se acumulan, y solamente entonces se procede a la actualización de los pesos.

Este esquema se suele denominar aprendizaje por lotes (batch). Una variación común al algoritmo consiste en actualizar los pesos sinápticos tras la presentación de cada patrón, esquema denominado

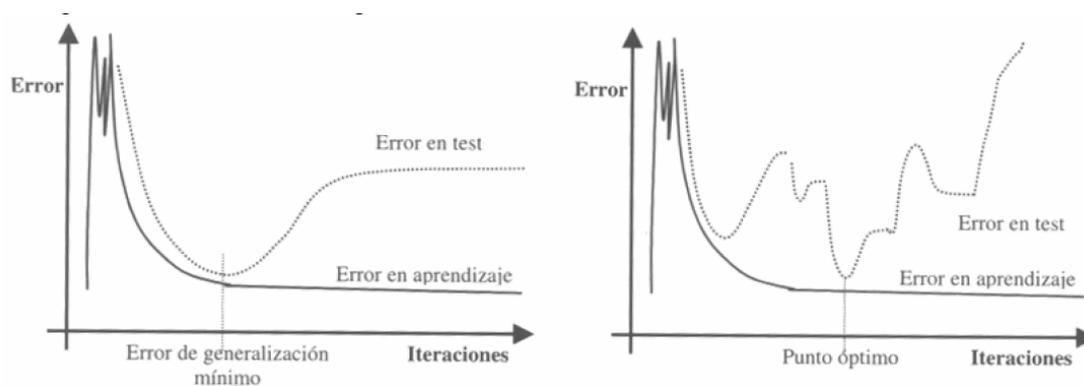


Figura 4.12: Evolución del error de aprendizaje y el error de generalización

aprendizaje en serie (on line).

Aunque el verdadero back-propagation es el que se ejecuta por lotes, el aprendizaje en serie es habitualmente empleado en aquellos problemas en los que se dispone de un numeroso número de patrones de entrenamiento, en el que habrá mucha redundancia de datos. Si se emplease en este caso el modo por lotes, el tener que procesar todos los patrones antes de actualizar los pesos demoraría considerablemente el entrenamiento.

En el aprendizaje en serie se debe tener presente que el orden en la presentación de los patrones debe ser aleatorio, puesto que si siempre se siguiese un mismo orden de entrenamiento estaría viciado a favor del último patrón del conjunto de entrenamiento.

Uno de los aspectos fundamentales de las redes neuronales artificiales es su capacidad de generalizar a partir de ejemplos, lo que constituye el problema de la memorización frente a la generalización. Por generalización se entiende la capacidad de la red de dar una respuesta correcta ante patrones que no han sido empleados en su entrenamiento.

4.3.2.6. Validación cruzada

En el proceso de entrenamiento se debe considerar, por una parte, un error de aprendizaje, que se suele calcular como el error cuadrático medio de los resultados proporcionados por la red para el conjunto de patrones de aprendizaje.

Con una red suficientemente grande, puede reducirse tanto como se quiera sólo con llevar a cabo más iteraciones. Por otra parte, existe un error de generalización, que se puede medir empleando un conjunto de patrones de pruebas. Un hecho experimental, fácilmente observable con cualquier simulador, es que si se entrena una red hasta alcanzar un error muy pequeño en el aprendizaje, la eficacia real del sistema o generalización se degrada. Si se representa a la vez el error de aprendizaje y el error de test durante el transcurso del aprendizaje, se obtiene una gráfica como la de la figura 4.12.

La explicación de este fenómeno es la siguiente. Al principio la red se adapta progresivamente al

conjunto de aprendizaje, acomodándose al problema y mejorando la generalización. Sin embargo, en un momento dado el sistema se ajusta demasiado a las particularidades de los patrones empleados en el entrenamiento, aprendiendo incluso el ruido en ellos presente, por lo que crece el error que comete ante los patrones de prueba.

A este efecto se le denomina técnicamente sobre aprendizaje o sobre ajuste. Idealmente una red neuronal, debería entrenarse hasta el punto óptimo en el que el error de generalización es mínimo. Al procedimiento consiste en entrenar y validar a la vez para detenerse en el punto óptimo se le denomina validación cruzada.

Usualmente de todo el conjunto de entrenamiento se emplea aproximadamente un 80 % de los patrones para entrenar, reservándose un 20 % como conjunto de pruebas.

4.3.2.7. Número de ejemplos de entrenamiento

La capacidad de generalización también se ve afectada por los siguientes aspectos:

1. La arquitectura de la red
2. El número de ejemplos de entrenamiento
3. La complejidad del problema

Los 3 puntos están relacionados; en términos generales, cuanto más complejo sea un problema a modelar, más grande deberá ser la red (con más parámetros a ajustar) y por lo tanto, más ejemplos se necesitarán para entrenarla.

A veces el número de patrones de entrenamiento disponibles es limitado y por el contrario el número de parámetros efectivos de la red elegida (grados de libertad) suele ser grande, hay estudios en los que se demuestra que una red de “n” entradas y “h” neuronas ocultas, con un total de w pesos, requiere un número de patrones de aprendizaje de:

$$p = \frac{w}{\varepsilon} \quad (4.4)$$

4.3.2.8. Reducción del tamaño de la arquitectura de la red

Existe un problema adicional y es que en general el número de patrones de entrenamiento crece exponencialmente con la dimensión del espacio de entrada. Una forma de reducirlo consiste en limitar el número de las entradas de la red de manera que conseguiremos un $p = \frac{w}{\varepsilon}$ más favorable. Para ello hay que aplicar técnicas específicas para el problema en cuestión, por ejemplo realizando un análisis de componentes principales a las variables de entrada, empleando ratios, etc.

4.3.3. Obtención de los datos de entrenamiento

4.3.3.1. Datos teóricos

Como se ha comentado al inicio del apartado, para entrenar una red neuronal, y que por lo tanto sus valores de salida proporcionen datos útiles y veraces hay que entrenarla primero con una serie de valores teóricos que se sabe a ciencia cierta que son correctos, y después proporcionarle los valores experimentales con el fin de corregir errores ya sean de calibración, de fabricación o por algún factor humano.

Para obtener los valores teóricos que servirán para entrenar la red, se ha creado un programa en Matlab que barre todas las capacitancias posibles de salida del sistema, para obtener los desplazamientos que crearían esas capacitancias.

Lógicamente, al estar directamente relacionados los desplazamientos con las fuerzas, se puede utilizar indistintamente cualquiera de los valores.

$$\delta_x \propto Fx \quad (4.5)$$

$$\delta_y \propto Fy \quad (4.6)$$

$$\delta_z \propto Fz \quad (4.7)$$

En Matlab el fichero de valores que se obtiene y que después se proporciona al entrenamiento de la red neuronal es de la forma:

$$C_1 \ C_2 \ C_3 \ C_4 \ \delta x_1 \ \delta x_2 \ \delta y_1 \ \delta y_2 \ \delta z_1 \ \delta z_2 \ \delta z_3 \ \delta z_4 \quad (4.8)$$

El porqué de la existencia de dos columnas de desplazamiento en X, dos de desplazamiento en Y y 4 de desplazamiento en Z se explica con las fórmulas 4.9, 4.10 y 4.11:

$$\delta_x = \frac{C_1 - C_2}{C_1 + C_2} \cdot \frac{L}{2} = \frac{C_3 - C_4}{C_3 + C_4} \cdot \frac{L}{2} \quad (4.9)$$

$$\delta_y = \frac{C_1 - C_3}{C_1 + C_3} \cdot \frac{L}{2} = \frac{C_2 - C_4}{C_2 + C_4} \cdot \frac{L}{2} \quad (4.10)$$

$$\delta_z = \begin{cases} h - \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot \frac{C_1 \cdot L^2}{(C_1 + C_3) \cdot (C_1 + C_2)} \\ h - \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot \frac{C_3 \cdot L^2}{(C_1 + C_3) \cdot (C_3 + C_4)} \\ h - \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot \frac{C_2 \cdot L^2}{(C_1 + C_2) \cdot (C_2 + C_4)} \\ h - \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot \frac{C_4 \cdot L^2}{(C_3 + C_4) \cdot (C_2 + C_4)} \end{cases} \quad (4.11)$$

Estas fórmulas representan la relación entre capacitancias y desplazamientos. Al disponer de 3 incógnitas (los desplazamientos) y 4 ecuaciones, se obtiene más de una ecuación por incógnita, lo que sin duda es una ventaja, ya que proporciona una cierta redundancia, que ayuda a eliminar posibles errores.

De todos modos, el fichero de Matlab lo que hace mediante el barrido de todas las capacitancias, es obtener los desplazamientos que deberían darse para que éstas se cumplieran. No obstante, como no todas las combinaciones son posibles, Matlab eliminará aquellas capacitancias que no cumplan que por ejemplo, tanto en el caso de δ_x como en el de δ_y sus igualdades no coincidan, o en el caso de δ_z no obtenga el mismo resultado en las 4 igualdades.

Además de esto, se ha impuesto para dar por buena la relación de capacitancias que debe cumplirse esta condición en las fórmulas 4.9, 4.10 y 4.11 al mismo tiempo.

Finalmente, después de imponer estas restricciones se llega a que solamente el 0,02 % de los datos que se han barrido resultan válidos para el entrenamiento de la red neuronal.

4.3.3.2. Datos prácticos

La obtención de los datos prácticos se lleva a cabo mediante dos procesos en paralelo.

Al mismo tiempo que se van almacenando los datos proporcionados por el sensor JR3 en un fichero, también se va generando otro fichero con los datos proporcionados por el MPR121. De modo que se va a obtener en un fichero de capacitancias (MPR121) y en otro de fuerzas (JR3).

Posteriormente estos dos ficheros deben fusionarse para obtener uno del mismo formato que el de datos experimentales, pero para ello habrá que sincronizar perfectamente ambos. La manera de hacer esto es creando a partir del fichero proporcionado por el MPR121, otro fichero de datos en el que se van a tomar únicamente aquellos datos que se mantengan dentro de un rango, lo que indicará que el robot no está variando su posición y por lo tanto se podrá comparar fácilmente con ese mismo patrón del fichero obtenido por el JR3.

La figura 4.13 representa la cadena de valores obtenida por el MPR121 para el electrodo número 3 en azul, y en rojo (casi superpuesto en toda su longitud) los valores que se van a tomar para la calibración del sistema. Los valores que se han descartado han sido por que han tenido una subida o bajada escalón mayor de la permitida (fijada en el parámetro “d” del fichero de Matlab), siendo ésta completamente configurable.

Se aprecia en la figura 4.14 que variando el valor de “d” se obtiene un rango diferente de valores para utilizar en el entrenamiento de la red neuronal.

Por cuestiones de claridad a la hora de representar la gráfica, ya que si no por la escala no se apreciarían los detalles, se ha impuesto que el valor que van a tener las capacitancias que no interesan para el entrenamiento va a ser de “660”. No obstante, esto en la realidad no será así, dado que estos valores que

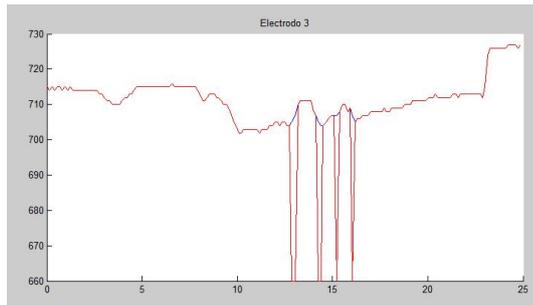


Figura 4.13: Adquisición de datos válidos para la calibración con $d=4$

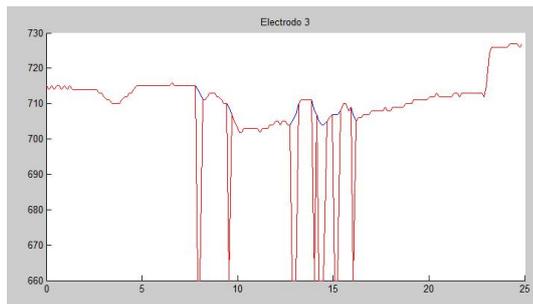


Figura 4.14: Adquisición de datos válidos para la calibración con $d=1$

no pueden ser utilizados tomaran el valor “0”.

4.4. Procedimiento experimental

Como se ha explicado en los capítulos anteriores, en el desarrollo experimental del presente proyecto intervienen una serie de dispositivos que se esquematizan en la figura 4.15:

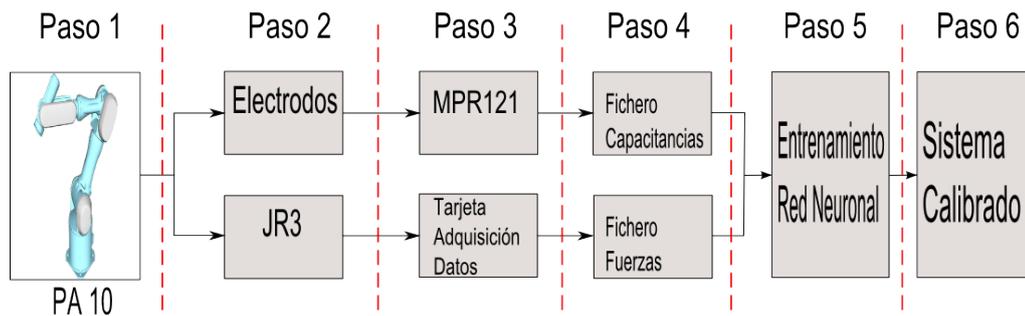


Figura 4.15: Diagrama de flujo de la información

En el paso 1 lo que se hizo fue familiarizarse con el funcionamiento del robot manipulador PA10, de manera que tras decidir que trayectorias debía seguir el último eslabón del robot se procedió a escribir el código necesario. Como la trayectoria que debe seguir es una espiral se tuvo en cuenta la ecuación :

$$r = a + b \cdot \theta \tag{4.12}$$

Los valores de “a” y “b” son números reales, haciendo el valor de “a” girar la espiral y “b” marcando la

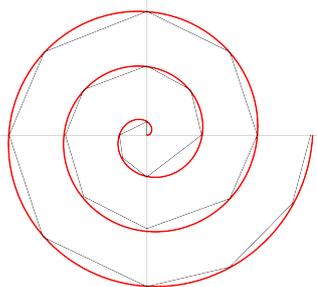


Figura 4.16: Ejemplo trayectoria PA10

distancia que va a existir entre las trayectorias en los giros sucesivos. Por lo tanto, una vez introducida la generación de los puntos por los que debe pasar la cabeza del robot, se puede comenzar a realizar las medidas.

El robot se desplazará por una serie de puntos por vuelta, ya que no define una espiral, sino una aproximación a ésta como se muestra en la figura 4.16 (el número de puntos por los que pasa es configurable), deteniéndose en cada punto un cierto tiempo para, como se comentará, tener un punto de referencia para la sincronización tanto de los datos del MPR121 como del sensor de fuerzas comercial JR3.

Hay que decir, que además de esto, no hay que configurar la altura del plano en el que se van a realizar las elipses, que será el mismo aún cuando se introduzcan los pesos en el sistema, dado que la deformación en el eje Z va a ser despreciable como para tener que corregir la altura de las elipses. Pero en el caso que estamos estudiando, finalmente no se van a introducir pesos en la vertical, por lo que de todas maneras, no habría que modificar el plano de trabajo en caso de ser necesario.

El robot actuará sobre el sistema mediante un muelle conectado entre la cabeza del robot y el JR3 mediante un hilo no deformable. El propósito de utilizar el muelle es el de disminuir la fuerza ejercida por el robot sobre el sistema, dado que al deformarse el muelle (en función de las características de éste) no se transmite todo el desplazamiento del robot, sino solamente una fracción de esta, lo cual se adecuará más a las necesidades de calibración del sistema.

Se ha utilizado el manipulador para realizar las fuerzas en lugar de por ejemplo un método manual, por que así en caso de repetir la calibración o necesitar nuevas medidas, se puede o variar las trayectorias o repetir con la misma, pero con un grado de exactitud mucho mayor que si se realizasen manualmente.

El segundo paso comprende tanto la fabricación de los electrodos que forman el sensor objeto del proyecto como la familiarización con el sensor comercial JR3. El supuesto que se ha hecho es que las fuerzas aplicadas sobre el JR3 van a ser las mismas que las que se van a trasladar al sensor 3D capacitivo, de manera que es por eso por lo que se pueden comparar las medidas obtenidas por estos dos sistemas, y calibrar el sensor en función de los datos que proporcione el JR3.

Para el diseño de los electrodos se han tenido en cuenta las especificaciones de Freescale y se han realizado los esquemas con KiCad, que es un programa de código libre (GPL) para la creación de esquemas

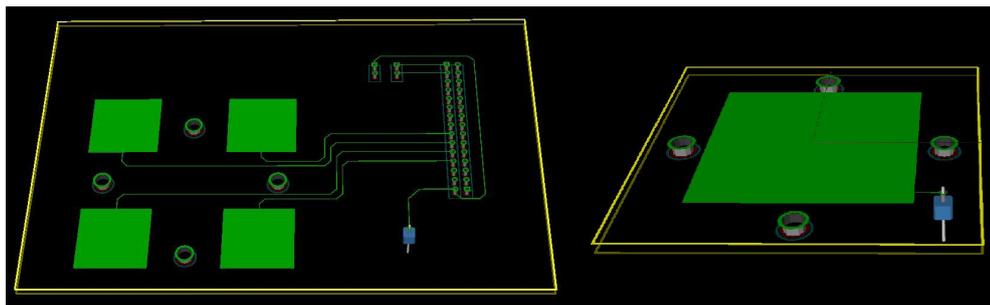


Figura 4.17: Presentación de electrodos inferiores en KiCad

electrónicos y circuitos impresos.

Las dimensiones de los electrodos que se han fabricado son de 15 mm y de 45 mm, dado que se quería hacer pruebas con electrodos de diferentes tamaños pero con el mismo layout. La presentación del diseño de los electrodos en 3D que proporciona KiCad se puede apreciar en la figura 4.17.

Después de generar el modelo que se quiere fabricar se generan con el KiCad los ficheros de contornos del PCB, zonas en las que se tiene que depositar el cobre y el fichero de taladros, importante este último ya que para conectar los electrodos inferiores al convertidor hay que soldar una serie de pines, así como para conectar el electrodo superior para que comparta la misma referencia de tierra que el MPR121.

En cuanto a la utilización del JR3 en este paso no reviste mayores dificultades dado que lo único que hay que hacer para poder utilizarlo es acoplarlo de manera conveniente a los electrodos. Decir que se añadió una material no magnético entre el sensor capacitivo y el JR3 con la intención de que no interviniesen los campos eléctricos en las medidas de este último. En cuanto a su conexión con la tarjeta de adquisición de datos no hay más que conectarlo con un conector de 6 cables.

El paso 3 consiste en la configuración de los registros del MPR121 para obtener los datos de las capacitancias de la mejor manera posible, ya que da cierta libertad para poder aumentar la resolución del sistema a costa de variar los tiempos y las corrientes de carga y descarga de los condensadores, formados por los electrodos. El fichero de salida del MPR121 es de la forma:

```
Approx. Time (s),ELE0 (counts),ELE1 (counts),ELE2 (counts),ELE3 (counts),ELECPROX
(counts),Touch Register 0,Touch Register 1,,Data log created by HWID:9102 SWID:2100 Electrode:No
```

No obstante de los datos anteriores interesarán solamente los 5 primeros, que es el segundo en el que se ha realizado el muestreo y los 4 valores de los 4 electrodos en ese momento. Estos datos servirán para poder ser sincronizados más adelante con el fichero que proporcione el JR3.

En cuanto a la adquisición de los datos del JR3 se hace mediante un software desarrollado por el departamento de automática.

En el paso 4 se van a realizar las transformaciones de los ficheros obtenidos por el MPR121 y el JR3. El fragmento de código en Matlab que transforma el fichero del MPR121 a un formato que sea útil para el siguiente paso es:

```
f = fopen('NombreArchivo.csv');
data = textscan(f, '%f%f%f%f%f%f%f%f%f', 'Delimiter', ',', 'HeaderLines',1);
K=cell2mat(data);
tiempo= K(:,1);
Ele0=K(:,2);
Ele1=K(:,3);
Ele2=K(:,4);
Ele3=K(:,5);
fclose(f);
```

Una vez transformados los dos ficheros se comparan entre ellos para entrenar la red neuronal de manera que queden sincronizados los valores de las capacitancias de uno con los valores de las fuerzas del otro.

Capítulo 5

Pruebas de validación y resultados

Se van a plantear dos análisis de los datos de las capacitancias frente a las fuerzas.

El primero consistirá en la obtención de conclusiones a partir de las gráficas obtenidas a partir de la representación de las capacitancias frente a la fuerza aplicada en los ejes X e Y, manteniendo constante el eje Z. Esto se hará tanto de forma teórica como de forma práctica.

El segundo análisis consistirá justo en el camino contrario, que es al fin y al cabo el que va a ser necesario, ya que consistirá en obtener las fuerzas a partir de las capacitancias obtenidas por el sensor desarrollado. Como en el caso anterior esto se realizará tanto de manera teórica como de manera práctica, sin tener en cuenta la deformación en Z.

5.1. Descripción del método

Para validar el método se van a generar unos datos de manera teórica y partiendo de ellos, una serie de gráficos de salida mediante Matlab; todo esto gracias a la formulación teórica del capítulo 4 que se vuelve a mostrar a continuación.

$$\delta_x = \frac{C_1 - C_2}{C_1 + C_2} \cdot \frac{L}{2} = \frac{C_3 - C_4}{C_3 + C_4} \cdot \frac{L}{2} \quad (5.1)$$

$$\delta_y = \frac{C_1 - C_3}{C_1 + C_3} \cdot \frac{L}{2} = \frac{C_2 - C_4}{C_2 + C_4} \cdot \frac{L}{2} \quad (5.2)$$

$$\delta_z = \begin{cases} h - \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot \frac{C_1 \cdot L^2}{(C_1 + C_3) \cdot (C_1 + C_2)} \\ h - \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot \frac{C_3 \cdot L^2}{(C_1 + C_3) \cdot (C_3 + C_4)} \\ h - \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot \frac{C_2 \cdot L^2}{(C_1 + C_2) \cdot (C_2 + C_4)} \\ h - \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot \frac{C_4 \cdot L^2}{(C_3 + C_4) \cdot (C_2 + C_4)} \end{cases} \quad (5.3)$$

Con los datos de salida tanto de MPR121 como del JR3 se programará una red neuronal de manera

que se obtendrá un conjunto de datos tan amplio como los teóricos, y se podrá obtener una comparación entre ellos.

El objetivo final es, como se ha indicado antes, realizar dos análisis tal y como se indica en las figuras 5.1 y 5.2.

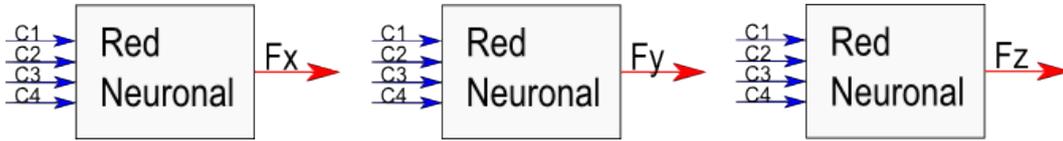


Figura 5.1: Obtención de las fuerzas en función de las capacitancias

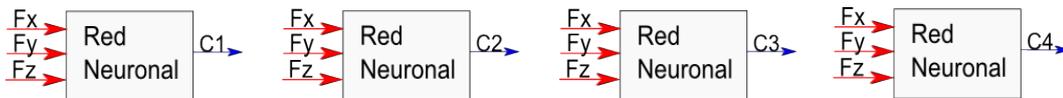


Figura 5.2: Obtención de las capacitancias en función de las fuerzas

5.2. Obtención de capacitancias a partir de las fuerzas

5.2.1. Resultados obtenidos mediante el modelo teórico

Con las fórmulas 5.1, 5.2 y 5.3 se obtienen mediante Matlab una serie de valores, que servirán como partida para las comparaciones con el método práctico.

En la figura 5.3 se aprecia la salida de Matlab una vez generados los datos de partida.

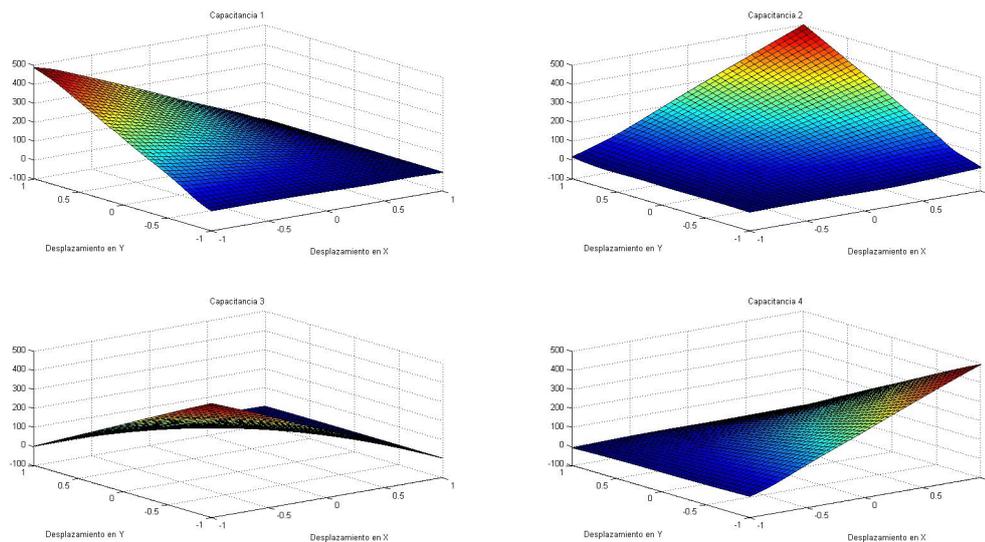


Figura 5.3: Gráfica con los datos teóricos junto a los de la red neuronal para $Z=0$

Al estar los electrodos en la misma distribución que en la figura, se aprecia que se cumple lo esperado, dado que si se desplaza el electrodo superior hacia la dirección superior derecha, se aprecia claramente

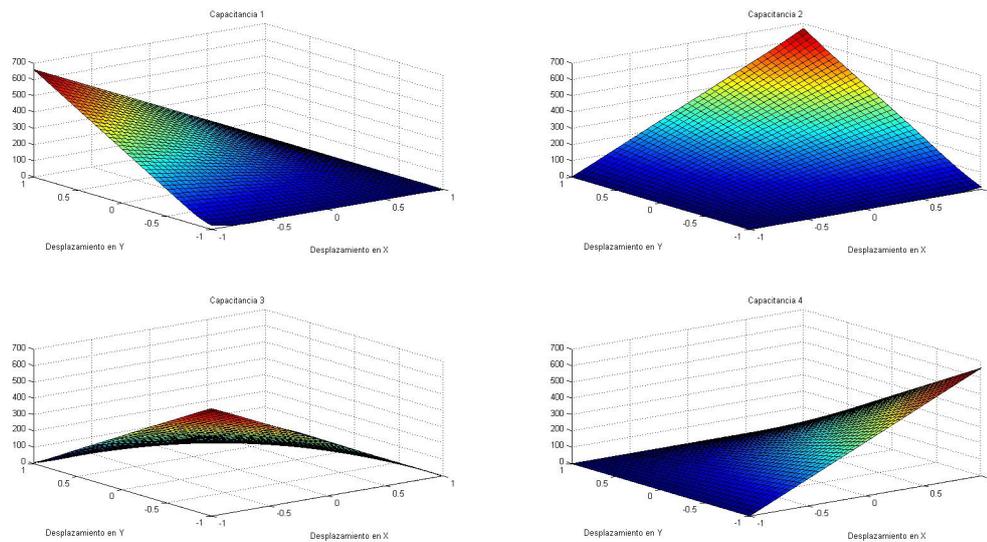


Figura 5.4: Gráfica con los datos teóricos junto a los de la red neuronal para $Z=1$ mm

un aumento de la capacitancia 2, una disminución de la 3, y dependiendo del ángulo de esa fuerza una pequeña variación en la capacitancia 1 y 4; y así con todas las variaciones que se puedan plantear al sistema.

Si se variase la presión en el Eje Z, lo que implicaría una disminución de la distancia entre las placas de los condensadores, se obtendría el mismo gráfico pero variando el valor de la capacitancia de manera proporcional a $\frac{1}{h-\delta_z}$.

Esto se muestra en la gráfica 5.4, en la que se aprecia como la capacitancia máxima es mayor que en el caso de no aplicar ninguna fuerza vertical.

Hay que tener en cuenta que los valores que se representan en la gráfica, en lo que a desplazamiento se refiere, son los máximos desplazamientos que se pueden dar, dado que debido a la elasticidad de la silicona, los movimientos en el plano XY están limitados a algo más de la mitad de la longitud del electrodo en el prototipo fabricado, que tiene unas dimensiones de 1.5x1.5 cm.

5.2.2. Resultados obtenidos mediante el modelo real

Para analizar este punto hay que partir de los datos obtenidos con el prototipo fabricado, y dado que el volumen de datos es mucho menor, habrá que entrenar una red neuronal para obtener un conjunto de datos homogéneo. Por lo tanto, una vez obtenidos los datos de manera práctica se procede a entrenar la red neuronal.

La figura muestra como están distribuidos los datos prácticos una vez entrenada la red neuronal.

Como se aprecia en las gráficas la respuesta no es tan lineal como lo es en el caso teórico, pero es normal, dado que las mediciones experimentales no serían todo lo exactas que deberían ser por las

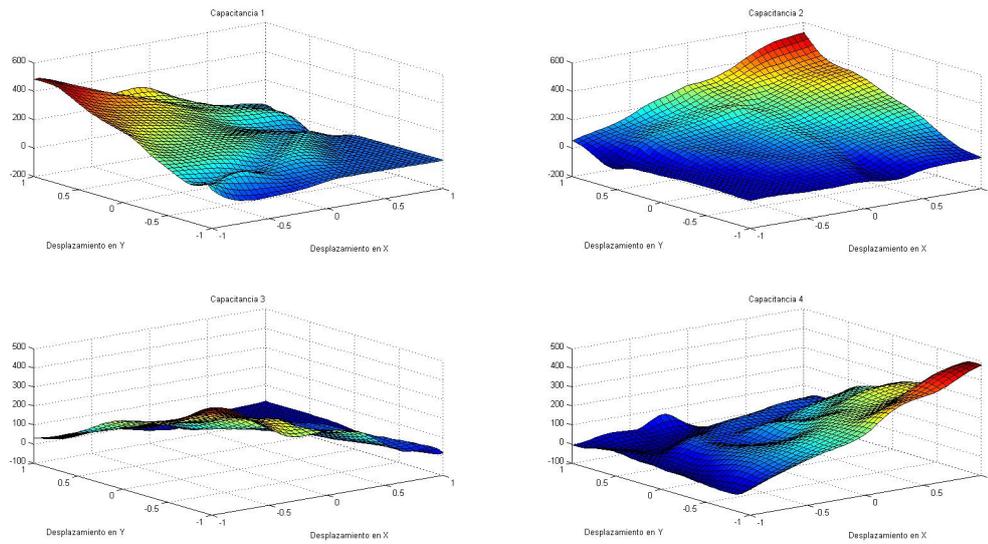


Figura 5.5: Gráfica con los datos prácticos junto a los de la red neuronal

dificultades a la hora de realizar las mediciones.

5.2.3. Comparación entre modelo real y teórico

Para comparar el modelo teórico con el práctico se han realizado una serie de gráficas en las que se resta el valor teórico con el valor práctico, de manera que de forma bastante visual se puede apreciar cuales son las diferencias entre un modelo y otro.

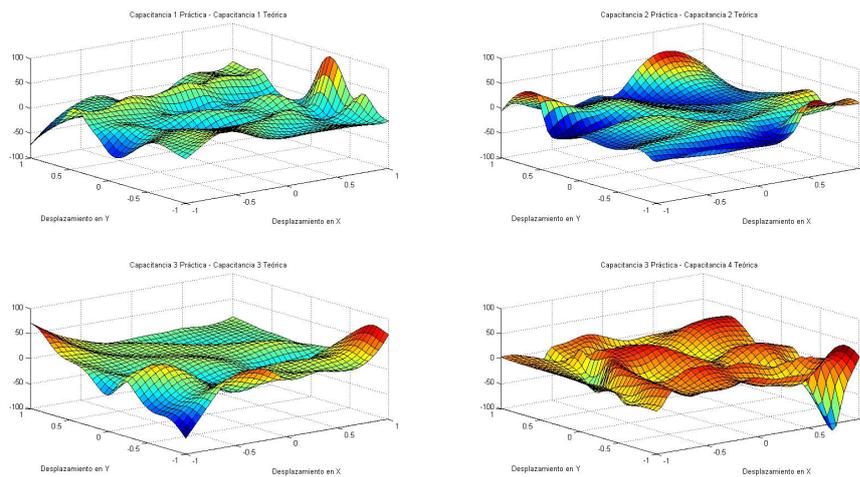


Figura 5.6: Comparativa capacitancias teóricas y prácticas

Una manera de disminuir los errores que se ven en la gráfica, en un futuro, es optar por utilizar las fórmulas deducidas en apartados anteriores para mejorar los datos experimentales, dado que como se ha dicho para el caso de X e Y en las fórmulas 5.1 y 5.2 se disponen de dos formulas por eje, de manera que

se podría reducir el error con un correcto tratamiento de los datos.

5.3. Obtención de las fuerzas a partir de las capacitancias

5.3.1. Resultados obtenidos mediante el modelo teórico

Ahora lo que en realidad interesa es realizar la simulación pero en el sentido inverso, representando cual es la fuerza en el eje X y en el eje Y en función de las capacitancias.

Realizando un cálculo inverso al realizado en los apartados anteriores, obtenemos las siguientes gráficas de las fuerzas en función de las capacitancias, que es en realidad lo que será necesario en el futuro, poder interpretar las capacitancias obtenidas por el sensor como fuerzas.

Con los resultados teóricos calculados a partir de las fórmulas se obtienen las gráficas en función del desplazamiento en X e Y (figura 5.7).

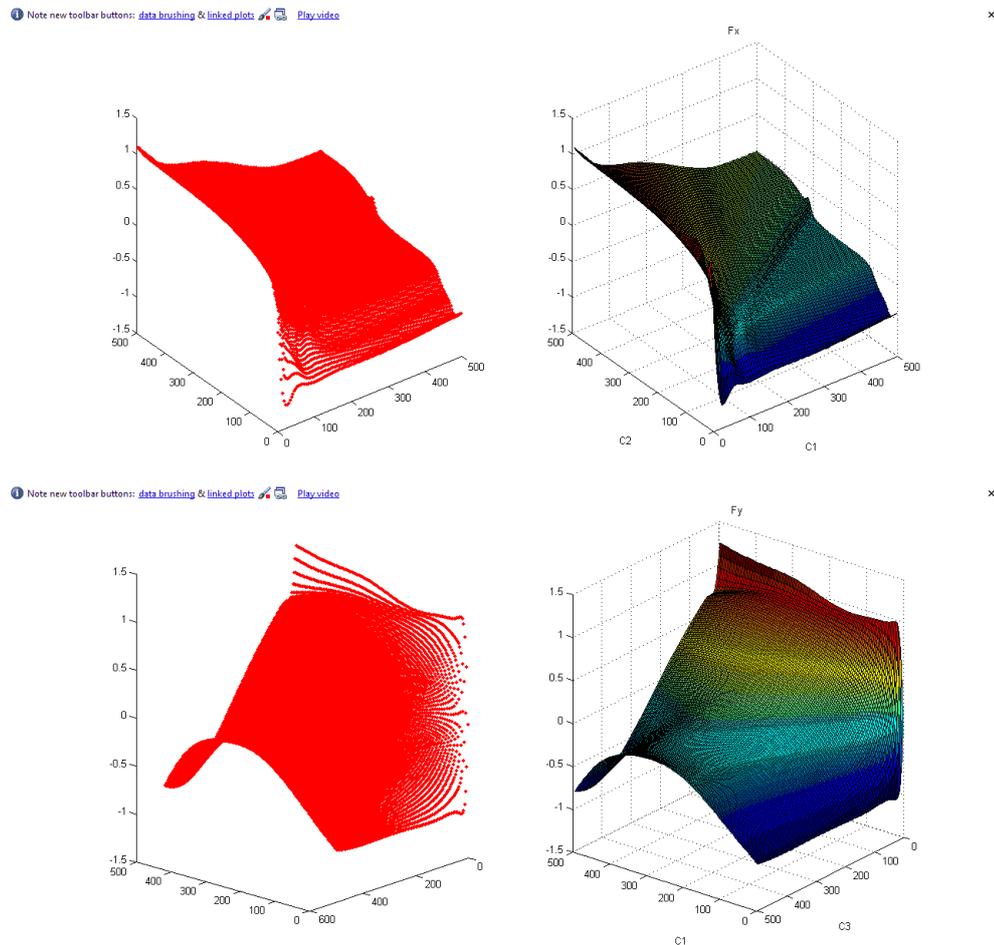


Figura 5.7: Desplazamiento teórico en 2D en función de las capacitancias

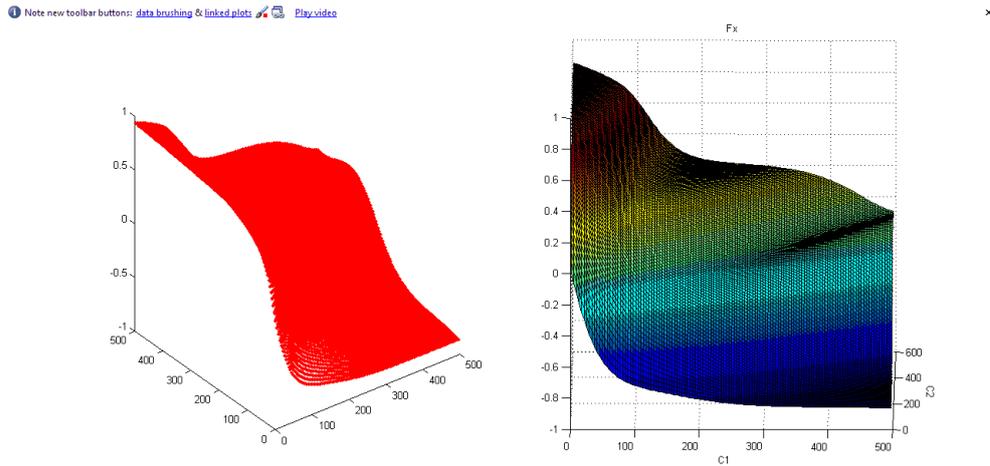


Figura 5.8: Desplazamiento práctico en 2D en función de las capacitancias para F_y

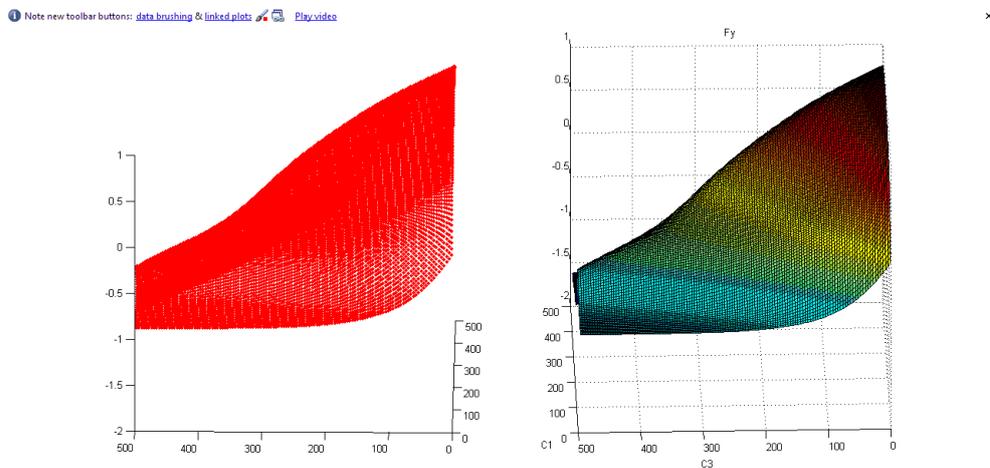


Figura 5.9: Desplazamiento práctico en 2D en función de las capacitancias para F_y

5.3.2. Resultados obtenidos mediante el modelo real

Para el modelo real se obtienen las siguientes gráficas. Como se aprecia en las gráficas, es bastante similar el valor de los desplazamientos teóricos y de los prácticos.

5.3.3. Comparación entre modelo real y teórico

Al hacer la resta entre ambos modelos, el teórico y el práctico, se observan diferencias de entorno al 5% en la precisión de las mediciones. Como se ha comentado en apartados anteriores, esto se puede solucionar en parte mediante la utilización del otro par de capacitancias, con el objetivo de disminuir los errores que se dan al utilizar los datos prácticos.

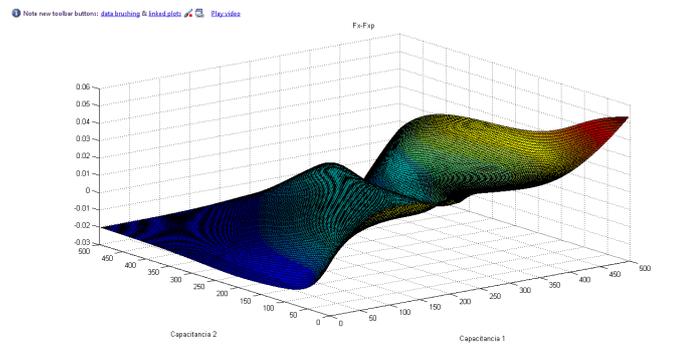


Figura 5.10: Diferencia entre valores teóricos y prácticos para Fx

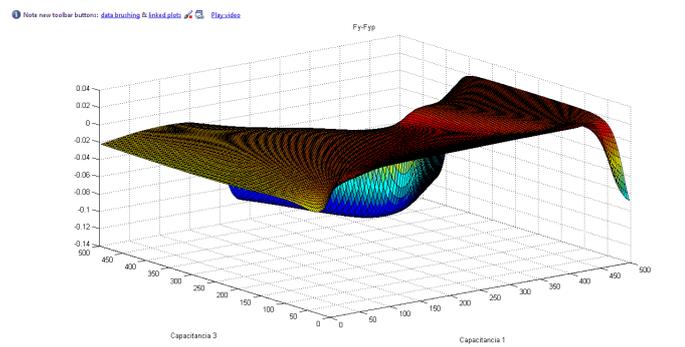


Figura 5.11: Diferencia entre valores teóricos y prácticos para Fy

Capítulo 6

6.1. Conclusiones

Tras la finalización del proyecto se ha realizado un análisis detallado de los puntos fuertes y los débiles de la tecnología utilizada, del modelo teórico desarrollado, del prototipo implementado así como del algoritmo de calibración utilizado. Como conclusión general se deduce que es parcialmente viable la realización de una piel artificial completa utilizando esta tecnología siempre y cuando se realicen estudios mas profundos y se apliquen técnicas de fabricación y medición mas avanzadas.

En cuanto a la tecnología que se ha elegido, la capacitiva, cabe destacar que es probablemente la mas apropiada debido a los siguientes motivos:

- Tienen gran sensibilidad dada la gran variedad de electrodos que se pueden diseñar, aumentando la sensibilidad en función de los requerimientos.
- Se trata de una de las tecnologías mas estudiadas que existen ya que es relativamente sencillo realizar experimentos con ella.
- Se pueden miniaturizar fácilmente con unos procesos de fabricación adecuados.
- Se puede aplicar la tecnología de fabricación de PCBs (printed circuit boards) para la implementación de estos sobre PCBs de tipo flexible, lo que proporciona una gran flexibilidad a la hora de diseñar el tamaño y la forma de los electrodos, así como la integración de las pistas y la electrónica en el mismo circuito que los electrodos.
- Existen multitud de dispositivos electrónicos y microcontroladores que se encargan de la medida y calibración de sensores basados en esta tecnología.
- Al ser una tecnología sencilla, el coste de fabricación es muy bajo.

El modelo teórico desarrollado permite una correcta estimación de la fuerza 3D. El circuito esta diseñado con una simetría que permite no solo aprovechar óptimamente el espacio sino también añadir un electrodo redundante que corrige la estimación de la fuerza frente a pequeños errores de medición o de calibración.

Se han tenido problemas con el chip de medición de capacitancias utilizado debido a la sensibilidad del mismo. Por este motivo ha sido necesario diseñar el prototipo sensor con un tamaño exageradamente grande que no ha permitido estudiar en profundidad la escalabilidad del mismo. Sin embargo, se ha hecho un estudio amplio de chips medidores de capacitancia que resultaran mas apropiados para el diseño de la futura piel artificial.

Se ha empleado un algoritmo de calibración basado en regresión mediante redes neuronales que permite teóricamente obtener las fuerzas 3D de forma eficaz a partir de los valores de capacitancias medidas. El método se basa en someter el elemento sensor a fuerzas con diferente amplitud y diferente orientación que se distribuyan de manera mas o menos homogénea a lo largo de todo el rango de medición. A la vez que sometemos el elemento sensor a dichas fuerzas, es necesario medir tanto las capacitancias como las fuerzas reales utilizando un sensor de fuerza comercial que asegure una correcta medición. Con dichos valores se establece un mapeo de capacitancias a fuerzas mediante el entrenamiento de las citadas redes neuronales. Hemos utilizado una plataforma experimental que incluye el robot PA10 para la generación de dichas fuerzas aunque lo deseable es poder realizar una calibración in-situ después de que la matriz de elementos sensores sea embebida en la piel artificial que cubre el robot. Para alcanzar dicho objetivo se ha desarrollado un método similar al implementado con el PA10, pero en este caso utiliza un punzón con un sensor de fuerza que deberá ser aplicado con diferentes fuerzas y diferentes ángulos sobre cada uno de los sensores de la piel artificial. Aunque este método puede parecer tedioso hay que tener en cuenta que debido a la similitud entre elementos sensores adyacentes, sera posible utilizar un conjunto de datos mucho mas reducido que permite realizar una calibración relativamente rápida.

6.2. Trabajos futuros

Se ha realizado un estudio profundo de las posibles mejoras y líneas a seguir en trabajos futuros que continúen con el tema del proyecto. Lo que se ha demostrado en este proyecto es que es técnicamente viable la implementación de un array de sensores capacitivos para su utilización en aplicaciones en el campo de la robótica. Los puntos a estudiar intentarán avanzar en los puntos mas débiles e incompletos del prototipo diseñado. Entre los principales puntos de mejora se encuentran:

- Utilización de conversores capacitancia/digital que dispongan de una mayor sensibilidad así como la capacidad de medir capacitancias inferiores al pico faradio, $1 \cdot 10^{-12}$ [F] con el objetivo de miniaturizar los elementos sensores. El conversor capacitancia digital utilizado es un cuello de botella a la hora de desarrollar el sensor capacitivo. En el caso del MPR121, siguiendo las indicaciones del

fabricante, hay que fabricar prototipos de electrodos con tamaños de alrededor de 5 centímetros de lado para obtener una buena respuesta del sistema, lo que lógicamente hace inviable su utilización para la creación de un sensor capacitivo escalable en la superficie de un robot, limitando por lo tanto el desarrollo a una mera prueba experimental de los principios de este tipo de sensores capacitivos. Para ello existen otros modelos de conversores capacitancia digital que amplían tanto su resolución como el rango de capacitancias con los que se puede trabajar como son el AD7142, AD7745 y AD7746 de la familia Analog Devices con rangos de capacitancia inferiores a 1pF. Otra ventaja a la hora de optar en el futuro por este conversor es que dispone de 14 canales en lugar de 12 como es el caso del MPR121, y por lo tanto da nuevas posibilidades a la hora de plantearse la escalabilidad del sensor para cubrir grandes áreas del robot.

- Diseño de un circuito electrónico de reducidas dimensiones, que sea capaz de manejar el proceso de adquisición de medidas de una matriz de electrodos que necesite el empleo de varios chips medidores de capacitancia conectados por un bus de campo.
- Estudio e implementación de electrodos sensores con formas óptimas para obtener una sensibilidad mas homogénea en todo el rango de medición.
- Analizar el rango de medición óptimo deseado para cada una de las componentes de fuerza a medir (normal y de fricción), en las diferentes aplicaciones que requieran piel artificial, con el objetivo de seleccionar el material más adecuado como dieléctrico así como su grosor y elasticidad. En el caso concreto de aplicación a manos robóticas el estudio se basará en las necesidades del sistema de agarre, dado que puede que para determinada aplicación (agarrar un huevo) hay que ejercer poca fuerza y ser muy sensible a ésta, y se necesitara un material determinado.
- Implementación de una matriz de electrodos sobre PCB flexible. Lo más complicado será no solo diseñar unos electrodos con determinadas formas geométricas de manera que sean capaces proporcionar medidas fiables de las fuerzas en los tres ejes, así como el giro o torsor aplicado, sino también la deducción y demostración de las formulas que van a relacionar esas capacitancias obtenidas por el conversor con las fuerzas. Este último punto podría solucionarse con un software creado al efecto para esta necesidad.
- Realizar un estudio para determinar si compensa calcular el torque de fricción a partir de las ecuaciones teóricas o si por el contrario esto es inviable debido a limitaciones en la sensibilidad en la medición de dicha variable.
- Otra posible mejora para futuras ampliaciones en el presente proyecto, es la creación de un banco de pruebas específico para poder realizar la calibración de una manera aún mas precisa, de manera que se eliminen posibles fuentes de error a la hora de medir tanto las fuerzas como los giros. Este

banco podría estar formado por una serie de carriles en X e Y o un marco, para poder definir de manera precisa el desplazamiento en esos ejes, y que a su vez mediante una serie de pesos permita también un desplazamiento en Z.

Bibliografía

- [1] E. R. Kandel, J. H. Schwartz, and T. M. Jessell, *Principles of Neural Science*, 4th ed. McGraw-Hill Medical, 2000.
- [2] J. B. F. Van Erp and H. A. H. C. Van Veen, "Touch down: The effect of artificial touch cues on orientation in microgravity," *Neuroscience Lett.*, vol. 404, pp. 78–82, 2006.
- [3] E. S. Kolesar, C. S. Dyson, R. R. Reston, R. C. Fitch, D. G. Ford, and S. D. Nelms, "Tactile integrated circuit sensor realized with a piezoelectric polymer," in *8th IEEE Int. Conf. on Innovative Systems in Silicon*, Austin, TX, USA, 1996, pp. 372–381.
- [4] J.-S. Heo, J.-H. Chung, and J.-J. Lee, "Tactile sensor arrays using fiber bragg grating," *Sensors and Actuators A*, vol. 126, pp. 312–27, 2006.
- [5] B. V. Jayawant, "Tactile sensing in robotics," *J. Phys. E: Sci Instrum*, vol. 22, pp. 684–692, 1989.
- [6] R. M. Crowder, "Automation and robotics," <http://www.soton.ac.uk/~rmc1/robotics/artactile.htm>, 1998.
- [7] B. L. Gray and R. S. Fearing, "A surface micromachined microtactile sensor array," in *Int. Conf. on Robotics And Automat.*, USA, 1996.
- [8] R. S. Johansson, U. Landstrom, and R. Lundstorm, "Responses of mechanoreceptors afferent units in the glabrous skin of the human hand to sinusoidal skin displacements," *Brain Res.*, vol. 244, pp. 17–25, 1982.
- [9] A. B. Valbo and R. S. Johansson, "Properties of cutaneous mechanoreceptors in the human hand related to touch sensation," *Human Neurobiology*, vol. 3, pp. 3–14, 1984.
- [10] J. R. Phillips and K. O. Johnson, "Tactile spatial resolution iii - a continuum mechanics model of skin predicting mechanoreceptors responses to bars, edges, and gratings," *J. of Neurophysiology*, vol. 46, no. 6, pp. 1204–1225, 1981.

- [11] R. H. LaMotte and M. A. Srinivasan, "Tactile discrimination of shape: Responses of slowly adapting mechanoreceptive afferents to a step stroked across the monkey fingerpad," *The J. of Neuroscience*, vol. 7, no. 6, pp. 1655–1671, 1987.
- [12] B. V. Jayawant and J. D. M. Watson, "Array sensor for tactile sensing in robotic applications," in *IEE Colloquium on Solid State and Smart Sensors*, London, UK, 1988, pp. 8/1–8/4.
- [13] R. S. Fearing, "Tactile sensing mechanisms," *The Int. J. of Robotics Res.*, vol. 9, no. 3, pp. 3–23, 1990.
- [14] A. Bicchi, J. K. Salisbury, and P. Dario, "Augmentation of grasp robustness using intrinsic tactile sensing," in *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automat.*, vol. 2, Cincinnati, May, 1990, pp. 968–973.
- [15] Peratech Limited. <http://www.peratech.com/qtscience.php>
- [16] K. Weiss and H. Worn, "Tactile sensor system for an anthropomorphic robotic hand," in *IEEE Int. Conf. on Manipulation and Grasping*, Genoa, Italy, 2004.
- [17] S. Sugiyama, K. Kawahata, M. Yoneda, and I. Igarashi, "Tactile image detection using a 1 K - element silicon pressure array," *Sensors and Actuators A*, vol. A21-A23, pp. 397–400, 1990.
- [18] L. Liu, X. Zheng, and L. Zhijian, "An array tactile sensor with piezoresistive single-crystal silicon diaphragm," *Sensors and Actuators A*, vol. 32, pp. 193–196, 1993.
- [19] "Robotouch," <http://www.pressureprofile.com>, 2007.
- [20] M. H. Lee and H. R. Nicholls, "Tactile sensing for mechatronics - a state of the art survey," *Mechatronics*, vol. 9, pp. 1–31, 1999.
- [21] V. Maheshwari and R. F. Saraf, "High-resolution thin-film device to sense texture by touch," *Science*, vol. 312, pp. 1501–1504, 2006.
- [22] S. Yoshida, T. Mizota, and H. Noma, "Development of an integrated multi-axis tactile sensor: Distributed preprocessing for tactile recognitions," in *IEEE Virtual Reality Conf., VR'07, USA*, 2007, pp. 281–282.
- [23] H.-K. Lee, S.-I. Chang, and E. Yoon, "A flexible polymer tactile sensor: Fabrication and modular expandability for large area deployment," *J. of Microelectromechanical Sys.*, vol. 15, no. 6, pp. 1681–1686, 2006.
- [24] K. Suzuki, K. Najafi, and K. D. Wise, "A 1024-element highperformance silicon tactile imager," in *IEEE Elect. Devices Meeting*, 1988, pp. 674–677.
- [25] http://www.nitta.co.jp/english/product/mechasen/sensor/kinotex_structure.html

- [26] A. M. Dollar and R. D. Howe, "A robust compliant grasper via shape deposition manufacturing," *IEEE/ASME Trans. on Mechatronics*, vol. 11, no. 2, pp. 154–161, 2006.
- [27] M. R. Wolffenbuttel and P. P. L. Regtien, "Design considerations for a silicon capacitive tactile cell," *Sensors and Actuators A*, vol. A24, no. 3, pp. 187–190, 1990.
- [28] R. S. Dahiya, M. Valle, G. Metta, and L. Lorenzelli, "POSFET based tactile sensor arrays," in *IEEE ICECS'07, The 14th Int. Conf. on Electronics, Ckts. and Sys.*, Marrakech, Morocco, 2007, pp. 1075–78.
- [29] "The i-limb hand," <http://www.touchbionics.com/>, 2007.
- [30] R. S. Dahiya, M. Valle, and G. Metta, "System approach-a paradigm for robotic tactile sensing," in *The 10th IEEE Int. Workshop on Advanced Motion Control*, vol. 1, Trento, Italy, 2008, pp. 110–115.
- [31] D. Um, B. Stankovic, K. Giles, T. Hammond, and V. L. Lumelsky, "A modularized sensitive skin for motion planning in uncertain environments," in *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automat.*, Leuven, Belgium, 1998, pp. 7–12.
- [32] S. C. Jacobsen, I. D. McCammon, K. B. Biggers, and R. P. Phillips, "Design of tactile sensing systems for dextrous manipulators," *IEEE Control Sys. Magazine*, vol. 8, no. 1, pp. 3–13, 1988.
- [33] H. Zhang and E. So, "Hybrid resistive tactile sensing," *IEEE Trans. on Sys., Man, & Cybernetics - Part B*, vol. 32, no. 1, pp. 57–65, 2002.
- [34] R. S. Dahiya, M. Valle, G. Metta, and L. Lorenzelli, "POSFET based tactile sensor arrays," in *IEEE ICECS'07, The 14th Int. Conf. on Electronics, Ckts. and Sys.*, Marrakech, Morocco, 2007, pp. 1075–78.
- [35] K. Sawahata, J. P. Gong, and Y. Osada, "Soft and wet touch-sensing system made of hydrogel," *Macromolecular Rapid Comm.*, vol. 16, pp. 713–716, 1995.
- [36] M. Inaba, Y. Hoshino, K. Nagasaka, T. Ninomiya, S. Kagami, and H. Inoue, "A full-body tactile sensor suit using electrically conductive fabric and strings," in *IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Sys.*, Osaka, Japan, Nov 1996, pp. 450–57.
- [37] H. B. Helbig and M. O. Ernst, "Optimal integration of shape information from vision and touch," *Exp. Brain Res.*, 2007.
- [38] Rhodri Armour, Keith Paskins, Adrian Bowyer, Julian Vincent and William Megill, "Jumping robots: a biomimetic solution to locomotion across rough terrain" 2007 *Bioinspir. Biomim.* 2 S65
- [39] Masanori Goka, Hiroyuki Nakamoto and Satoru Takenawa, "A magnetic type tactile sensor by GMR elements and inductors", March 2010

- [40] Hyung-Kew, Sun-Il Chang, and Eusik Yoon, Member, IEEE, "A flexible polymer tactile sensor: Fabrication and modular expandability for large area deployment", *Journal of microelectromechanical systems*, vol 15, No. 6, December 2006
- [41] Takayuki HOSHI, and Hiroyuki SHINODA, "A Tactile Sensing Element for a Whole Body Robot Skin" Department of Information Physics and Computing. The University of Tokyo.
- [42] Kishore Sundara-Rajan, Gabriel I. Rowe, Aaron Bestick, Alexander V. Mamishev, "Capacitive Sensing of Interfacial Forces in Prosthesis". Department of Electrical Engineering University of Washington Seattle, USA. Glenn K. Klute, William R. Ledoux Center of Excellence for Limb Loss Prevention and Prosthetic Engineering VA Puget Sound Health Care System Seattle, USA
- [43] Hanafiah Yussof, Jiro Wada, Masahiro Ohka, "Analysis of tactile slippage control algorithm for robotic hand performing grasp-move-twist motions". *International Journal on Smart Sensing and intelligent systems*, Vol. 3 No 3, September 2010
- [44] A.M. Okamura, N. Smaby, and M.R. Cutkosky, "An Overview of Dexterous Manipulation," *Proceedings of the 2000 IEEE International Conference on Robotics and Automation Symposium on Dexterous Manipulation*, Vol. 1, 2000, pp. 255-262

Anexo

Software utilizado

Para la realización del proyecto se ha utilizado el siguiente software:

- Sensor Toolbox: Herramienta proporcionada por Freescale para la obtención de las capacitancias obtenidas por los electrodos. También permite entre sus opciones la modificación del registro para configurar la adquisición de datos.
- Microsoft Visual Studio: Programa utilizado para mediante un código en C dirigir el robot manipulador PA-10
- Maple 12: Herramienta de cálculo utilizada para realizar cálculos con variables simbólicas
- Matlab R2008b: Utilizado para la obtención de gráficas y realización de todos los cálculos necesarios para el entrenamiento de las redes neuronales.
- KiCad: Programa OpenSource utilizado para el diseño de los electrodos, así como la generación de los ficheros para la fabricación de los electrodos por parte de la oficina técnica.
- L^AT_EX: Editor de Latex para redacción y maquetación del proyecto.
- Inkscape: Editor de imágenes para realizar la representación de la mayoría de las figuras ilustrativas del proyecto.

Código Matlab

```

clear
f = fopen('p9.csv');
data = textscan(f, '%f %f %f %f %f %f %f %f %f %f', 'Delimiter', ',', 'HeaderLines',1);
K=cell2mat(data);
tiempo= K(:,1);
Ele0=K(:,2);
Ele1=K(:,3);
Ele2=K(:,4);
Ele3=K(:,5);
s=size(Ele0);
r=s(1);
%Intervalo es el tiempo que tienen que estar los valores entre un rango d
%para considerarlo constante si son del mismo signo, siendo d el valor que viene del
excel y se
%almacena en Ele0, Ele1, etc...
d=2;
vecesmax=5;
for i=1:r-1
dif0(i)=Ele0(i+1)-Ele0(i);
dif1(i)=Ele0(i+1)-Ele0(i);
dif2(i)=Ele0(i+1)-Ele0(i);
dif3(i)=Ele0(i+1)-Ele0(i);
end
%relleno la ultima posicion del vector de diferencias con la posicion r-1
dif0(r)=dif0(r-1);
dif1(r)=dif1(r-1);
dif2(r)=dif2(r-1);
dif3(r)=dif3(r-1);
%Represento la variación entre un valor y el siguiente.
% plot(tiempo,dif0,'b');
% plot(tiempo,dif1,'b');
% plot(tiempo,dif2,'k');
% plot(tiempo,dif3,'r');
%-----Cálculos Electrodo 0-----
medias0(1)=Ele0(1);
for i=2:r
    if ((abs(dif0(i))<=d)&&(abs(dif0(i)-dif0(i-1))<=d))
        medias0(i)=Ele0(i);
    else
        medias0(i)=0;
    end
end
%-----Cálculos Electrodo 1-----
flag1=0;
veces1=0;
medias1(1)=Ele1(1);
for i=2:r
    if ((abs(dif0(i))<=d)&&(flag1==0)&&(abs(dif1(i)-dif1(i-1))<=d))
        aux1=Ele1(i);
        medias1(i)=aux1;
        flag1=1;
    elseif ((abs(dif1(i))<=d)&&(flag1==1)&&(abs(dif1(i)-dif1(i-1))<=d))
        veces1=veces1+1;
        medias1(i)=aux1;
        if veces1>=vecesmax
            flag1=0;
        end
    end
end

```

```

        veces1=0;
    end
else
    flag1=0;
    medias1(i)=Ele1(i);
end
end
%-----Cálculos Electrodo 2-----
flag2=0;
veces2=0;
medias2(1)=Ele2(1);
for i=2:r
    if ((abs(dif2(i))<=d)&&(flag2==0)&&(abs(dif2(i)-dif2(i-1))<=d))
        aux2=Ele2(i);
        medias2(i)=aux2;
        flag2=1;
    elseif ((abs(dif2(i))<=d)&&(flag2==1)&&(abs(dif2(i)-dif2(i-1))<=d))
        veces2=veces2+1;
        medias2(i)=aux2;
        if veces2>=vecesmax
            flag2=0;
            veces2=0;
        end
    else
        flag2=0;
        medias2(i)=Ele2(i);
    end
end
%-----Cálculos Electrodo 3-----
flag3=0;
veces3=0;
medias3(1)=Ele3(1);
for i=2:r
    if ((abs(dif3(i))<=d)&&(flag3==0)&&(abs(dif3(i)-dif3(i-1))<=d))
        aux3=Ele3(i);
        medias3(i)=aux3;
        flag3=1;
    elseif ((abs(dif3(i))<=d)&&(flag3==1)&&(abs(dif3(i)-dif3(i-1))<=d))
        veces3=veces3+1;
        medias3(i)=aux3;
        if veces3>=vecesmax
            flag3=0;
            veces3=0;
        end
    else
        flag3=0;
        medias3(i)=Ele3(i);
    end
end
%-----
subplot(2,2,1)
hold on
plot(tiempo, Ele0, 'b');
plot(tiempo, medias0, 'r');
title('Electrodo 0');
subplot(2,2,2)

```

```
hold on
plot(tiempo, Ele1, 'b');
plot(tiempo, medias1, 'r');
title('Electrodo 1');
subplot(2,2,3)
hold on
plot(tiempo, Ele2, 'b');
plot(tiempo, medias2, 'r');
title('Electrodo 2');
subplot(2,2,4)
hold on
plot(tiempo, Ele3, 'b');
plot(tiempo, medias3, 'r');
title('Electrodo 3');
fclose(f);
```

```
clc
close all
clear all

load cldata;
numInputs = size(c1,2)-1;
numOutputs = 1;
numDatos=size(c1,1);

%P = zeros(numDatos,numInputs);
P(:,1) = c1(:,1);
P(:,2) = c1(:,2);
P=P';

%T = zeros(numDatos,numOutputs);
T(:,1) = c1(:,3);
T=T';

topology = [10 5];
net = newff(P,T,topology);
net.trainParam.epochs = 1000;
%net.trainParam.goal = 0;
net.trainParam.min_grad = 0;
net.trainParam.time = 180;
net.divideParam.valRatio = 0.2;
net.divideParam.testRatio = 0;
net.divideParam.trainRatio = 0.8;

%training the net
net = train(net,P,T);

%%testing
testInputNew = [];
for i=-1:0.05:1
    for j=-1:0.05:1
        testInputNew(:,size(testInputNew,2)+1) = [i,j];
    end
end
testOutputNew = sim(net,testInputNew);

testInputOld = P;
testOutputOld = sim(net,testInputOld);
subplot (1,2,1)
grid on;
plot3(testInputNew(1,:), testInputNew(2,:),testOutputNew, 'r. ');
hold on;
plot3(testInputOld(1,:), testInputOld(2,:),testOutputOld, 'b. ');
subplot (1,2,2)
[X1,Y1]=meshgrid(-1:0.05:1);
for i=1:1:size(X1,1)
    for j=1:1:size(Y1,1)
        cont=size(X1,1)*(i-1)+j ;
        Z1(j,i)=testOutputNew(cont);
    end
end
end
mesh(X1,Y1,Z1)
```

```
xlabel('Desplazamiento en X')  
ylabel('Desplazamiento en Y')  
title('Capacitancia 1')
```

Approx. Time (s),ELE0 (counts),ELE1 (counts),ELE2 (counts),ELE3 (counts),ELE4 (counts),ELE5 (counts),ELECPRO>

1,717,715,718,720,722,727,,00,00
2,717,715,718,720,722,726,,00,00
3,717,715,718,720,722,726,,00,00
4,717,715,718,720,722,727,,00,00
5,716,714,716,720,722,726,,00,00
6,716,672,709,720,721,726,,02,00
7,714,713,717,648,717,726,,08,00
8,717,711,715,719,654,723,,10,00
9,717,714,715,720,719,681,,20,00
10,656,710,717,720,721,723,,01,00
11,716,654,714,720,721,726,,02,00
12,717,715,718,720,722,727,,00,00
13,716,664,658,719,697,700,,36,00
14,713,713,718,718,721,727,,00,00
15,717,714,718,720,721,726,,00,00
16,716,714,717,720,721,726,,00,00
17,717,715,717,720,722,726,,00,00
18,716,714,683,720,721,727,,00,00
19,716,713,669,720,722,726,,00,00
20,717,714,680,720,722,726,,00,00
21,717,713,667,720,721,726,,00,00
22,711,711,673,720,721,726,,00,00
23,656,710,669,719,721,723,,01,00
24,687,712,693,720,721,723,,01,00
25,714,712,711,706,718,707,,00,00
26,717,715,718,720,722,726,,00,00
27,717,715,718,720,721,727,,00,00

```

%Obtencion de datos de entrenamiento
c1min = 1;
c1max = 500;
c2min = 1;
c2max = 500;
c3min = 1;
c3max = 500;
c4min = 1;
c4max = 500;
resolution = 4;
L=2;
data = [];
i=0;
tic
%%%%%%Generacion tabla de datos
%Las cuatro primeras columnas son la capacitancias
%Dos columnas mas de dx, dos de dy y 4 de dz
actual=0;
for c1=c1min:resolution:c1max
    for c2=c2min:resolution:c2max
        for c3=c3min:resolution:c3max
            for c4=c4min:resolution:c4max
                i=i+1;
%                dX, comparo las ecuaciones en X, debe ser el mismo resultado
                a=((c1-c2)/(c1+c2));
                b=((c3-c4)/(c3+c4));
%                dY, comparo las ecuaciones en Y, debe ser el mismo resultado
                c=((c1-c3)/(c1+c3));
                d=((c2-c4)/(c2+c4));
%                dZ, comparo las ecuaciones en Z, debe ser el mismo resultado
                e=c1/((c1+c3)*(c1+c2));
                f=c3/((c1+c3)*(c3+c4));
                g=c2/((c1+c2)*(c4+c2));
                h=c4/((c3+c4)*(c2+c4));
                comprob=c1+c2+c3+c4;
                if (a==b)&&(c==d)&&(e==h)&&(comprob==500)
                    actual=actual+1;
                    data(actual,1:4)= [c2,c1,c4,c3];
                    data(actual,5)= [a];
                    data(actual,6)= [c];
                    data(actual,7)= [h];
                end
            end
        end
    end
end
i
actual
toc
%
c1 = [data(:,5) data(:,6) data(:,1)];
c2 = [data(:,5) data(:,6) data(:,2)];
c3 = [data(:,5) data(:,6) data(:,3)];
c4 = [data(:,5) data(:,6) data(:,4)];
save c1data.mat c1
save c2data.mat c2

```

```
save c3data.mat c3
save c4data.mat c4
subplot(2,2,1)
plot3(data(:,5), data(:,6), data(:,1), 'r. ');
xlabel('Desplazamiento en X')
ylabel('Desplazamiento en Y')
title('Capacitancia 1')
subplot(2,2,2)
plot3(data(:,5), data(:,6), data(:,2), 'r. ');
xlabel('Desplazamiento en X')
ylabel('Desplazamiento en Y')
title('Capacitancia 2')
subplot(2,2,3)
plot3(data(:,5), data(:,6), data(:,3), 'r. ');
xlabel('Desplazamiento en X')
ylabel('Desplazamiento en Y')
title('Capacitancia 3')
subplot(2,2,4)
plot3(data(:,5), data(:,6), data(:,4), 'r. ');
xlabel('Desplazamiento en X')
ylabel('Desplazamiento en Y')
title('Capacitancia 4')
```

Hojas características

67M25A

SENSOR OVERVIEW

The 67M25 is a member of the **JR3** family of six axis force and torque transducers with internal electronics. It is 67mm in diameter and 25mm thick. The ISO40mm variant uses the mechanical interface specified by the International Standard ISO 9409-1 — A 40, other variants to match the interfaces of industrial robots are available.

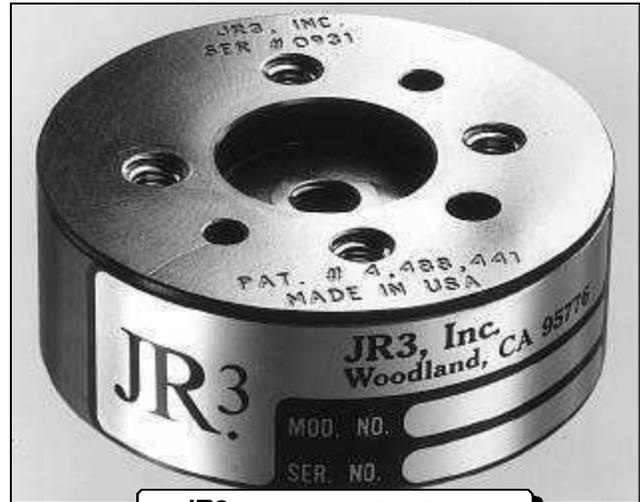
The 67M25 has signal conditioning electronics integrated into the sensor body. Included in the electronics are amplifiers, an analog to digital converter, an EEPROM containing calibration data and RS-485 serial drivers. The 67M25 outputs a 2 megabit per second serial data stream which contains complete 6 axis data at 8 kHz and can be read by any of **JR3**'s serial receivers.

The 67M25 is machined from a solid billet of aluminum. The resulting monolithic structure produces a transducer with unsurpassed hysteresis and precision properties. The 67M25 uses metal foil strain gages bonded to strain rings as the sensing element. This produces linearity, and thermal performance superior to other strain sensing technologies and geometries. The mechanical structure of the 67M25 also produces a transducer with exceptional stiffness.

As can be seen on the interface drawing, the 67M25 has captive bolts which allow direct connection to the user's tool flange. The top of the transducer contains a copy of the tool flange. This feature eliminates the need for adapter plates, which saves weight and lowers the installed height.

The 67M25 can interface to a variety of receiver electronics. **JR3** has DSP-based receiver electronics available for several industry standard computer busses. These receivers are able to process the force and moment data at the full 8 kHz data rate. They provide decoupling, coordinate transformation, low-pass filtering, vector calculation, threshold monitoring, peak capture and rate calculations.

Available interfaces (bolt patterns) for 67M25:
ISO40mm, Puma 560 and Puma 562



JR3 Model NO. 67M25A-I40

Capacities, Resolutions, Stiffnesses and Permissible Single Axis Overloads:

15 lb Model: (Stiffness & overloads = 25 lb model)

Fx, Fy	Fz		Mx, My	Mz	
15	30	lbs	40	40	in-lbs
63	130	N	4	4	N-m
0.006	0.01	lbs	0.02	0.02	in-lbs

25 lb Model:

Fx, Fy	Fz		Mx, My	Mz	
25	50	lbs	65	65	in-lbs
100	200	N	6.3	6.3	N-m
0.01	0.02	lbs	0.03	0.03	in-lbs
29	295	klbs/in	190	48	kin-lbs/rad
110	435	lbs	235	190	in-lbs

50 lb Model:

Fx, Fy	Fz		Mx, My	Mz	
50	100	lbs	130	130	in-lbs
200	400	N	12.5	12.5	N-m
0.02	0.04	lbs	0.06	0.06	in-lbs
73	740	klbs/in	470	130	kin-lbs/rad
210	870	lbs	510	430	in-lbs

Weight: 0.4 lb (180g)

Options: Clean Room Version

JR3, Inc. has been designing and manufacturing six axis loadcells since 1983. We have manufactured six axis loadcells ranging in diameter from 2 to 13 inches, and with load capacities from 2 to 25,000 lbs and 0.25 to 22,000 ft-lbs. Please feel free to call our applications engineers to discuss your particular needs.

PCI-BUS RECEIVER

RECEIVER OVERVIEW

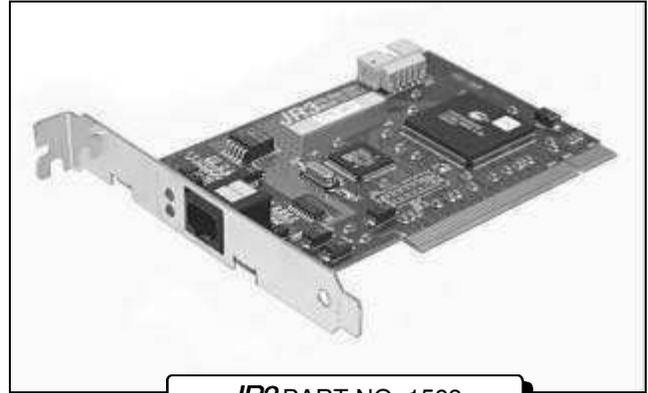
The PCI-bus receiver is a member of the *JR3* family of serial receivers. It interfaces the PCI-bus to any of *JR3*'s high speed, serial, six axis force and torque transducers. It has a form factor which allows it to plug directly into any PCI bus slot.

The PCI-bus receiver directly interfaces to the force sensor through a small 6 or 8 wire cable. The PCI-bus receiver uses the cable to provide power to the sensor, as well as to receive the high speed serial data from the sensor. The PCI-bus receiver contains circuitry to monitor and adjust the power supply voltage to the sensor. The automatic power supply adjustment means that the sensor cable requirements are very forgiving. Long, small gage wires can be used with success. And since the PCI-bus receiver receives power directly from the computer bus, no external power supply is required.

The PCI-bus receiver uses an Analog Devices ADSP-2184, a 40 Mips digital signal processing chip. This chip has the ability to provide decoupled and filtered data at 8 kHz per axis. This data rate is an order of magnitude faster than previously available in the industry. Some of the signal processing functions performed by the PCI-bus receiver include: decoupling, coordinate transformation (translation and rotation), low-pass filtering, vector magnitude calculation, maximum and minimum peak capture, threshold monitoring, and rate calculations.

The PCI-bus receiver communicates to the host computer through shared memory in the PCI bus address space. The interface adheres to PCI Local Bus Revision 2.2 Target Only specifications.

JR3 has serial sensor receivers available with a variety of interfaces. These include PCI-bus, ISA-bus, VMEbus, and Stäubli Unival. *JR3* also has many other interface options available. Please call our Applications Engineers to discuss your particular needs.



JR3 PART NO. 1583

Power Requirements:

The PCI-bus receiver requires no external power. It draws power directly from the PCI bus. The receiver uses the following voltages and currents:

- +5V - 870 mA typical
- +12V - 25 mA typical (w/o sensor)
- 12V - 5 mA typical (w/o sensor)

The sensor will also draw anywhere from 200 to 400 mA from the +12V, and possibly as much as 100 mA from the -12V.

Shared Data Space:

The *JR3* PCI receiver's 16 bit wide DSP memory is mapped into the 32 bit wide PCI bus. The *JR3* PCI receiver is then simply accessed as memory on the PCI bus. Some of the data available and the addresses of that data are listed in the following table:

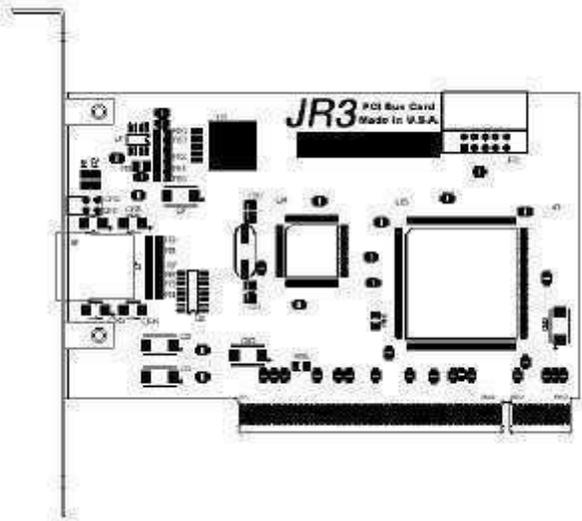
Addr	Data	Addr	Data
0x60	Shunts	0x68	Default Full Scale
0x70	Min Full Scale	0x78	Max Full Scale
0x80	Full Scale	0x88	Offsets
0x90	Filter 0	0x98	Filter 1
0xa0	Filter 2	0xa8	Filter 3
0xb0	Filter 4	0xb8	Filter 5
0xc0	Filter 6	0xc8	Rates
0xd0	Minimums	0xd8	Maximums

JR3, Inc. has been designing and manufacturing six axis loadcells since 1983. We have manufactured six axis loadcells ranging in diameter from 2 to 13 inches, and with load capacities from 2 to 25,000 lbs and 0.25 to 22,000 ft-lbs. Please feel free to call our applications engineers to discuss your particular needs.

Address Selection:

The PCI-bus receiver occupies a 512k-byte block in the PCI address space. The PCI bus is a plug and play bus, there is no user configuration necessary.

Outline of PCI-bus Receiver



Commands:

The PCI-bus receiver implements several commands which realize some of its more advanced features. Some of those commands, and their command numbers are:

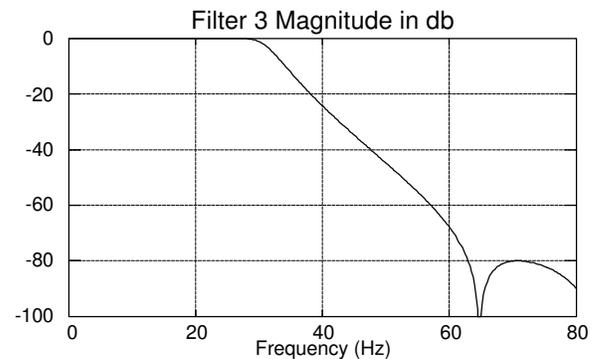
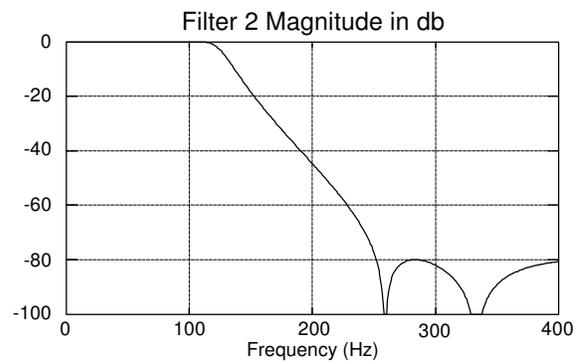
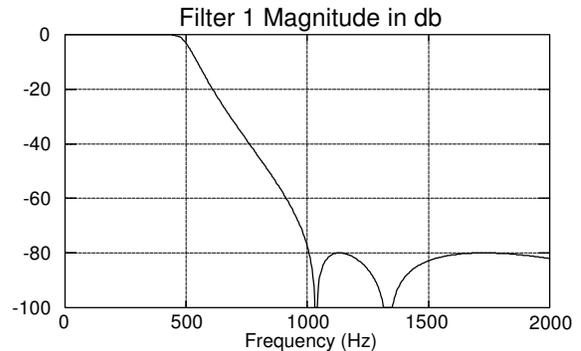
- 3: Bit Set
- 4: Bit Reset
- 5: Use Coordinate Transform
- 6: Use Stored Offset
- 7: Set Offsets
- 8: Reset Offsets
- 9: Set Vector Axes
- 10: Set Full Scales
- 11: Read and Reset Peaks
- 12: Read Peaks

Coordinate Transforms:

The PCI-bus receiver allows the force and moment data coordinate axes to be arbitrarily translated and rotated to any desired location and orientation. This allows the user to align the force and moment data with his coordinate axes, greatly simplifying data usage.

Digital Filters:

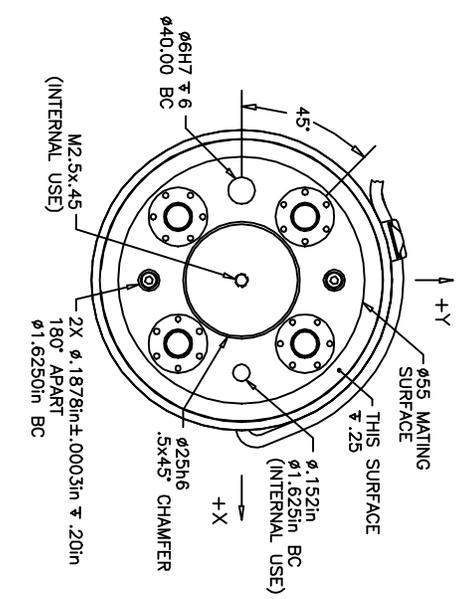
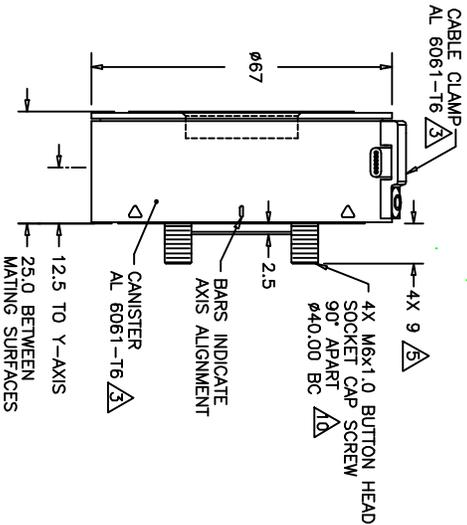
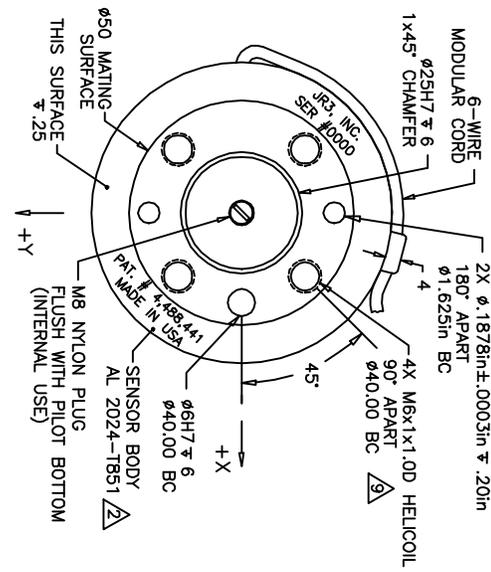
The PCI-bus receiver implements digital low-pass filters. Data for all 6 filters as well as unfiltered data is available at all times. These 6 filters have cut-off frequencies which are 1/4 of the preceding filter. The frequencies are ratioed from the sampling frequency of the sensor. For the typical 8 kHz sensor, the cutoff frequencies are 500, 125, 32, 8, 2 and 0.5 Hz.



Vector Magnitudes:

The PCI-bus receiver implements two vector calculations for each set of data. These vectors can be calculated from any combination of force or moment data. Like the filter data, these numbers are available at all times.

REVISIONS			
REV	DESCRIPTION	DATE	APPROVED
A	SEE ECN E0028	05/10/93	G. SAKONA
B	SEE ECN E0134	01/24/94	G. SAKONA
C	SEE ECN E0135	01/26/94	G. SAKONA
D	SEE ECN E0210	10/19/94	G. SAKONA
E	SEE ECN E0365	12/08/95	G. SAKONA
F	SEE ECN E0441	08/13/97	G. SAKONA
G	SEE ECN E0458	11/20/97	G. SAKONA
H	SEE ECN E0554	09/13/99	G. SAKONA
I	SEE ECN E0559		



TOOL VIEW

ROBOT VIEW

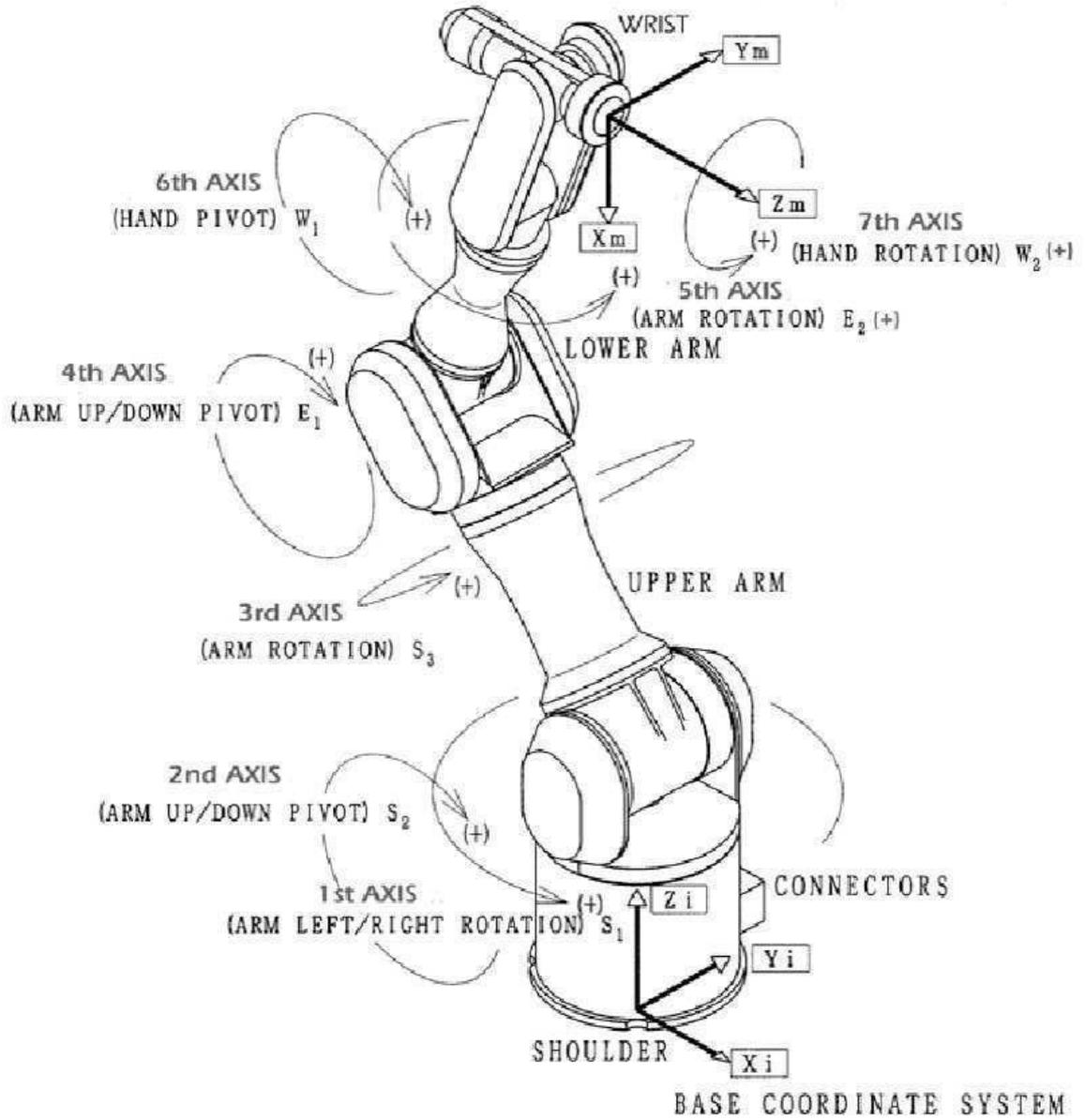
- NOTES:
- DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS UNLESS OTHERWISE NOTED.
 - TYPE 2, CLASS 2, BLACK ANODIZE.
 - TYPE 2, CLASS 2, BLUE ANODIZE.
 - AVAILABLE LOAD RATINGS INCLUDE: 15, 25, 30, 50lb, (63, 100, 125, 200N) WHERE:
 FULL SCALE Fx, Fy = LOAD RATING
 FULL SCALE Fz = LOAD RATING * 2
 FULL SCALE Mx, My, Mz = LOAD RATING * NOMINAL DIAMETER (2.6in, .066m)
 LENGTH OF CAPTIVE BOLT PROJECTION MAY BE ALTERED PER CUSTOMER REQUEST.
 - AXES SHOWN ASSUME OPPOSITE SIDE HELD FIXED.
 - ROBOT VIEW IS RIGHT HAND RULE (JR3 STANDARD). THIS FORCES TOOL VIEW TO BE LEFT HAND RULE.
 - TORQUE MOUNTING SCREWS TO 10nm (89inlb) IN 3 EQUAL STEPS, FOLLOWING A 1-3-2-4 SEQUENCE.
 - MAXIMUM ALLOWED BOLT PENETRATION INTO SENSOR TOOL SIDE IS 8mm (.32in).
 - SCREWS ARE CAPTIVE, FREE TO ROTATE, AND ACCESSIBLE WITH HEX KEY THRU SENSOR TOOL SIDE.

TITLE: INTERFACE, 67M25 SENSOR, 140 BOLT PATTERN	
MAT'L: AS SHOWN	MODEL: 67M25A-140
TOLERANCES: (UNLESS OTHERWISE NOTED)	
X = ±.25mm	
.XX = ±.10mm	
ANGLES = ±0.1°	
DRAWN: GCS	SCALE: 1/1 AND NOTED
DWG NO: 3807	DWG SIZE: B
REV: I	

JR3 INC. WOODLAND, CA 95776

7 -AXIS ARM

Mechanical Interface Coordinate System



Advanced Information

Proximity Capacitive Touch Sensor Controller

MPR121 OVERVIEW

The MPR121 is the second generation sensor controller after the initial release of the MPR03x series devices. The MPR121 will feature increased internal intelligence in addition to Freescale's second generation capacitance detection engine. Some of the major additions include an increased electrode count, a hardware configurable I²C address, an expanded filtering system with debounce, and completely independent electrodes with auto-configuration built in. The device also features a 13th simulated electrode that represents the simultaneous charging of all the electrodes connected together to allow for increased proximity detection in a touch panel or touch screen array.

Features

- 1.71 V to 3.6 V operation
- 29 μ A supply current at 16 ms sample period
- 3 μ A shutdown current
- 12 electrodes
- Continuous independent auto-calibration for each electrode input
- Separate touch and release trip thresholds for each electrode, providing hysteresis and electrode independence
- I²C interface, with $\overline{\text{IRQ}}$ output to advise electrode status changes
- 3 mm x 3 mm x 0.65 mm 20 lead QFN package
- LED driver functionality with 8 shared LEDs
- -40°C to +85°C operating temperature range

Implementations

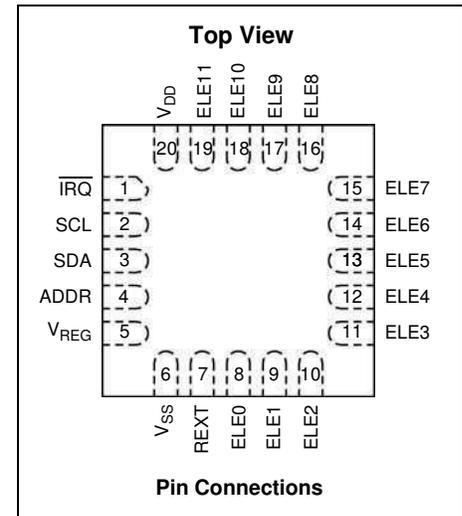
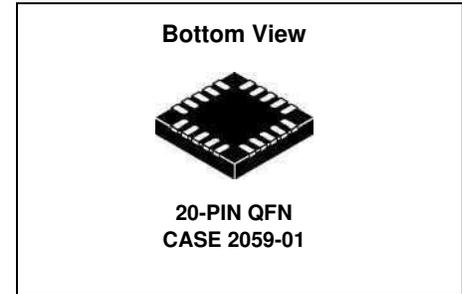
- Switch Replacements
- Touch Pads

Typical Applications

- PC Peripherals
- MP3 Players
- Remote Controls
- Mobile Phones
- Lighting Controls

MPR121

Capacitive Touch Sensor Controller



ORDERING INFORMATION					
Device Name	Temperature Range	Case Number	Touch Pads	IRC Address	Shipping
MPR121QR2	-40°C to +85°C	2059 (20-Pin QFN)	12-pads	0x5A - 0x5D	Tape & Reel

PIN DESCRIPTION

Pin Description		
Pin No.	Pin Name	Description
1	$\overline{\text{IRQ}}$	Open Collector Interrupt pin
2	SCL	I ² C Clock
3	SDA	I ² C Data
4	ADDR	I ² C Address Select
5	VREG	VREG – 0.1 μ F cap connect
6	VSS	Ground
7	REXT	External Resistor – 75 k Ω
8	ELE0	Electrode 0
9	ELE1	Electrode 1
10	ELE2	Electrode 2
11	ELE3	Electrode 3
12	ELE4 (LED0)	Electrode 4
13	ELE5 (LED1)	Electrode 5
14	ELE6 (LED2)	Electrode 6
15	ELE7 (LED3)	Electrode 7
16	ELE8 (LED4)	Electrode 8
17	ELE9 (LED5)	Electrode 9
18	ELE10 (LED6)	Electrode 10
19	ELE11 (LED7)	Electrode 11
20	VDD	VDD

SCHEMATIC DRAWINGS AND IMPLEMENTATION

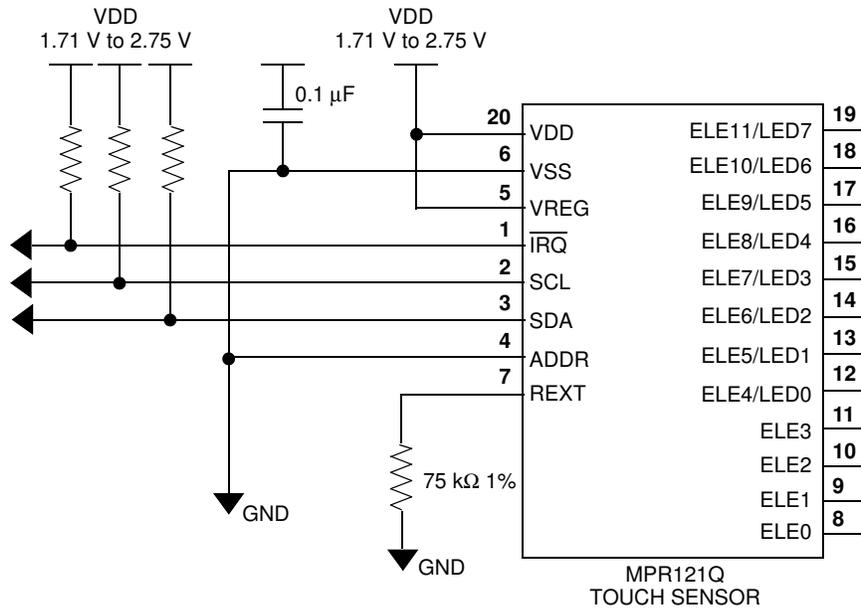


Figure 1. Configuration 1: MPR121 runs from a 1.71 V to 2.75 V supply.

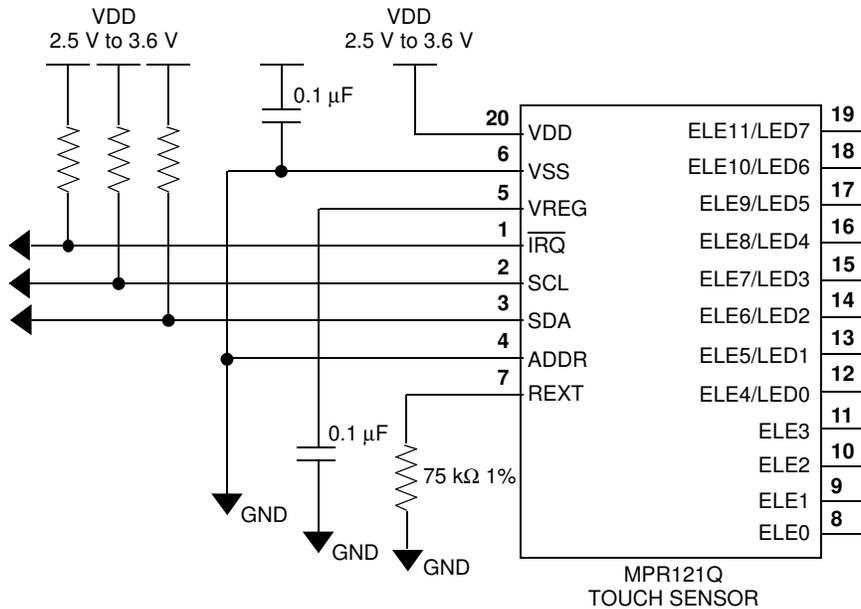


Figure 2. Configuration 2: MPR121 runs from a 2.5 V to 3.6 V supply.

Capacitance Sensing

The MPR121 uses a constant current touch sensor system with two primary types of control. It can measure capacitances ranging from 10 pF to 2000 pF by varying the current and the amount of time supplied to each electrode. The electrodes are controlled independently allowing for a great deal of flexibility in electrode pattern design. To make setup of the device easier, an automatic configuration system can be used to set the ideal capacitance of each electrode. For information on how to set up this system refer to application note AN3889.

Once capacitance is calculated, it runs through a couple of levels of digital filtering allowing for good noise immunity in different environments without sacrificing response time or power consumption. The MPR121 can be configured for sample rates between 1 ms and 128 ms. For information on how to set up this system refer to application note AN3890.

Touch Sensing

Once the capacitance is determined at any given moment, this information must then be translated into intelligent touch recognition. The MPR121 has a couple of systems that have improved over the previous generation in the MPR03x series devices. A baseline tracking system allows the system to track the untouched capacitance in the system. For information on how to set up the baseline capacitance system refer to application note AN3891. The baseline value is then compared with the current value to determine if a touch has occurred. A designer has the ability to set both the rising and falling thresholds in addition to a debounce to eliminate jitter and false touches due to noise. These elements are described in application note AN3892.

Proximity Sensing

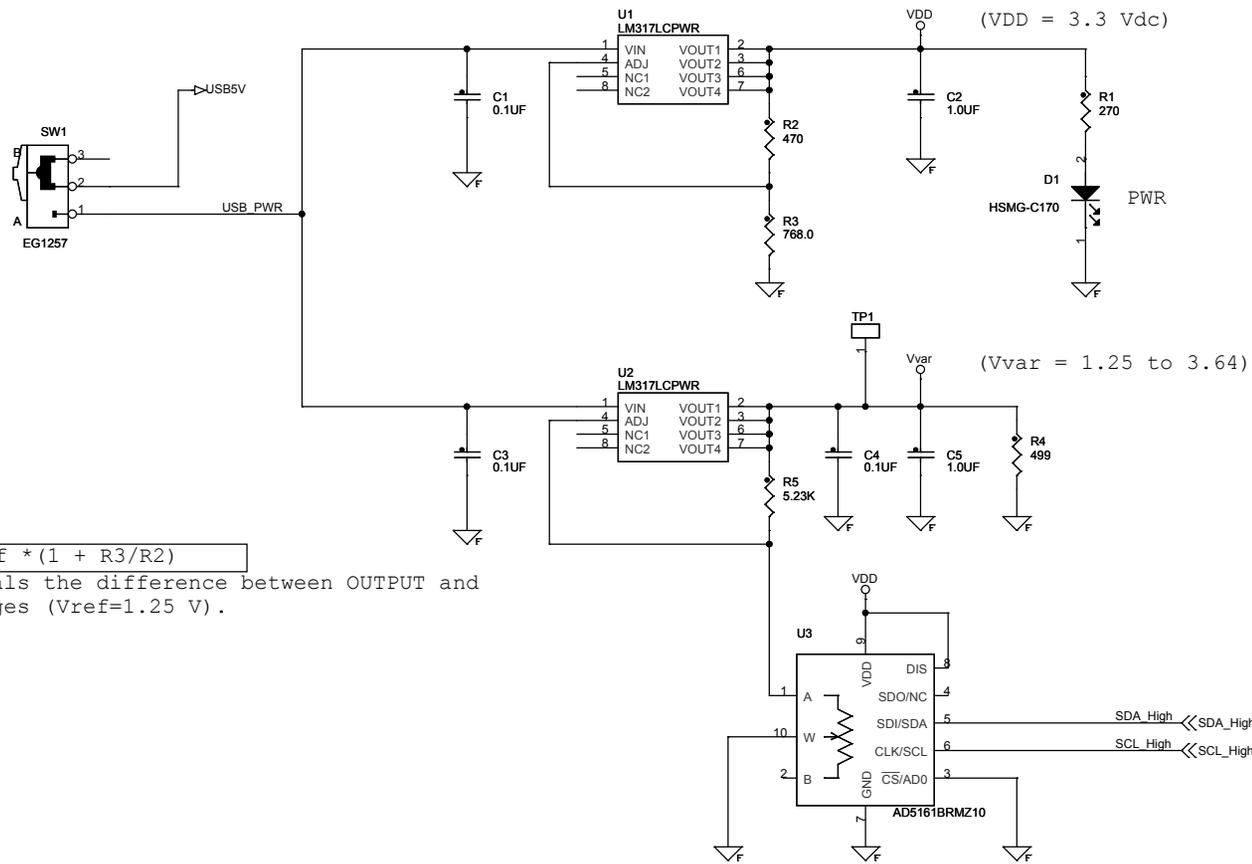
A new feature of the MPR121 is the use of a proximity sensing system whereby all of a system's electrodes can be shorted together internally and create a single large electrode. The capacitance of this electrode is larger and projected capacitance can be measured. When enabled, this "13th" electrode will be included at the end of a normal detection cycle and will have its own independent set of configuration registers. This system is described in application note AN3893.

LED Driver

The MPR121 includes eight shared LED driving pins. When these pins are not configured as electrodes, they may be used to drive LEDs. The system allows for both pull up and pull down LED configurations as well as general GPIO push/pull functionality. The configuration of the LED driver system is described in application note AN3894.

Serial Communication

The MPR121 is an Inter-Integrated Circuit (I²C) compliant device with an additional interrupt that is triggered any time a touch or release of a button is detected. The device has a configurable I²C address by connecting the ADDR pin to the VSS, VDD, SDA or SCL lines. The resulting I²C addresses are 0x5A, 0x5B, 0x5C and 0x5D respectively. The specific details of this system are described in AN3895. For reference the register map of the MPR121 is included in [Table 1](#).

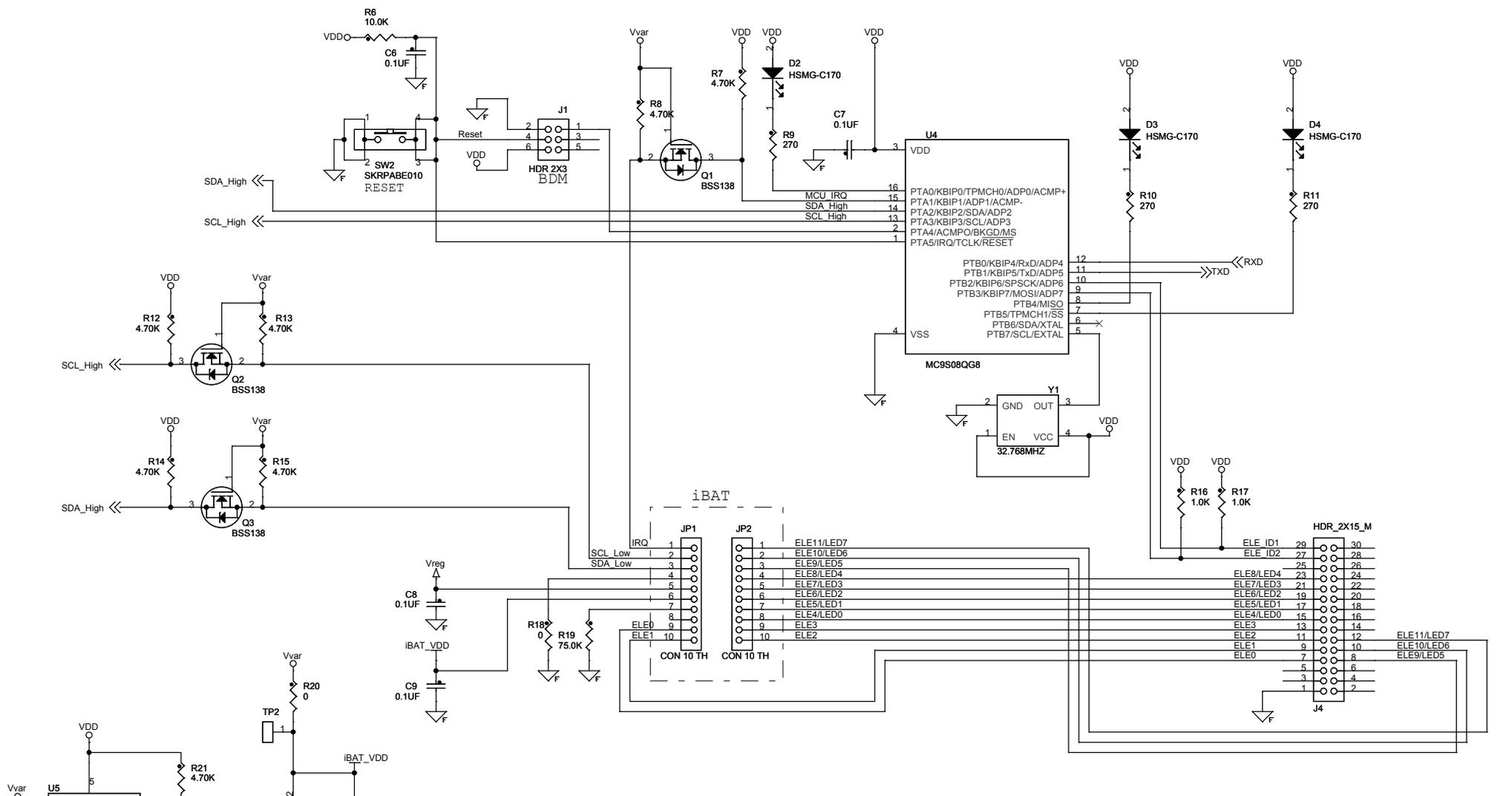


EXAMPLE EQUATION:

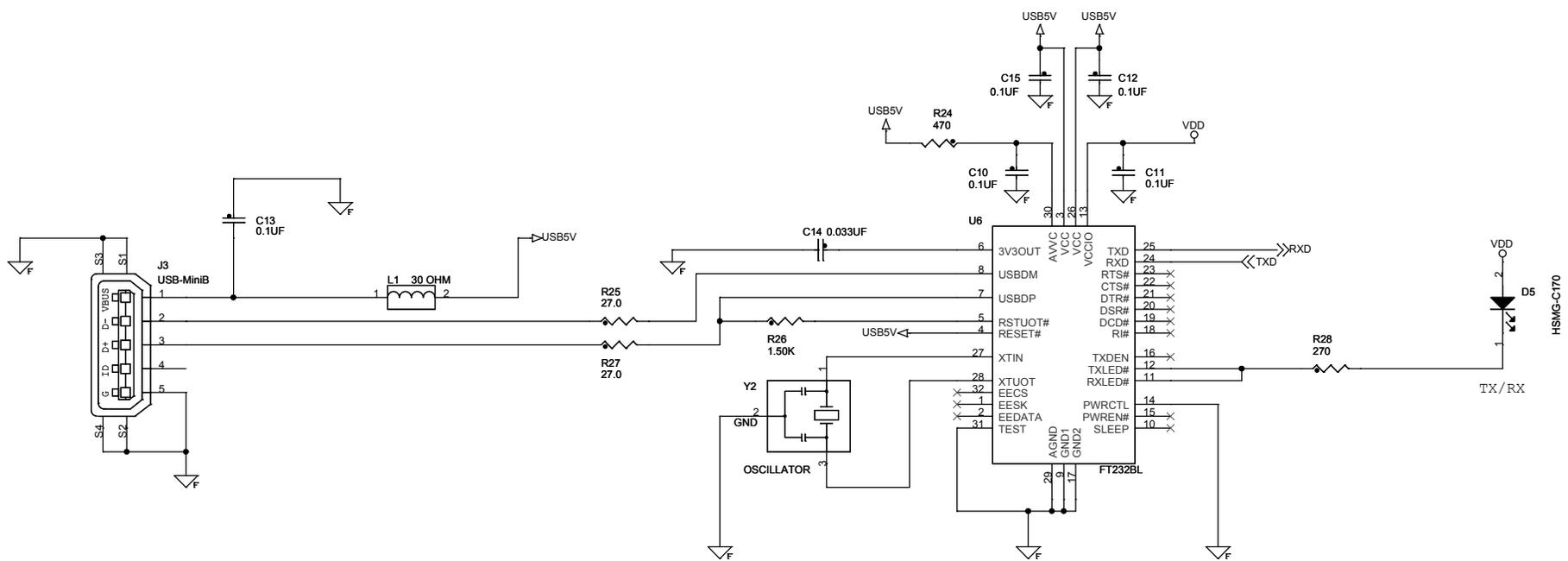
$$VDD = Vref * (1 + R3/R2)$$

Where: Vref equals the difference between OUTPUT and ADJUSTMENT voltages (Vref=1.25 V).

Drawing Title:		
KITMPR121EVM		
Page Title:		
Voltage Settings		
Size B	Document Number	Rev C
	SCH-25890 PDF: SPF-25890	
Date:	Thursday, July 30, 2009	Sheet 3 of 5



Drawing Title: KITMPR121EVM		
Page Title: MCU-Sensor Interface		
Size B	Document Number SCH-25890 PDF: SPF-25890	Rev C
Date: Thursday, July 30, 2009	Sheet 4	of 5





freescale™
 semiconductor

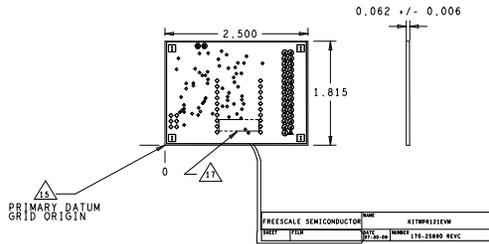
Drawing Title: **KITMPR121EVM**
 Page Title: **USB Interface Circuitry**

Size B	Document Number SCH-25890 PDF: SPF-25890	Rev C
Date: Thursday, July 30, 2009	Sheet 5 of 5	

NOTES (UNLESS OTHERWISE SPECIFIED):

- THIS DRAWING SPECIFIES THE REQUIREMENTS FOR A PRINTED WIRING BOARD IN ACCORDANCE WITH SPECIFICATION IPC-A-600 (LATEST REVISION).
- THIS PWB MUST BE COMPLIANT WITH THE FREESCALE ECO REQUIREMENTS (DOCUMENT # 12MMS000478) THESE REQUIREMENTS PROHIBIT THE USE OF CONTROLLED SUBSTANCES INCLUDING THOSE FOUND IN RoHS STANDARDS. DISCLOSURE OF RESTRICTED AND REPORTABLE SUBSTANCES IS ALSO REQUIRED.
- THE PWB MUST BE LEAD FREE ASSEMBLY PROCESS COMPATIBLE AND MUST BE ABLE TO HANDLE A MINIMUM OF 5 CYCLES AT 260 DEGREES CELSIUS FOR 10 SECONDS.
- BASE MATERIAL - FR4 (OR EQUIVALENT RoHS COMPLIANT) LAMINATE AND PREPREG SHALL MEET IPC-4101A-94
T_g - MUST BE GREATER THAN OR EQUAL TO 150 DEGREES CELSIUS.
T_d - MUST BE GREATER THAN OR EQUAL TO 330 DEGREES CELSIUS.
- COPPER FOIL WEIGHT - OUTSIDE LAYERS AND INNER LAYERS 1.0 OZ. SEE STACKUP DETAIL "A"
- PLATING FINISH - BOTH SIDES ENIG (EMMERSONLESS NICKEL IMMERSION GOLD):
76.2-203.2 MILLIMICRON (3-8 MICROINCH) OF GOLD OVER
2,540-5,080 MILLIMICRON (100-200 MICROINCH) MINIMUM NICKEL.
- ALL THROUGH HOLE VIAS MAY BE PLATED SHUT.
- SOLDERMASK - GREEN COLOR (TATYO OR EQUIVALENT), BOTH SIDES.
- SILKSCREEN - WHITE EPOXY INK, BOTH SIDES. NO SILK ON PADS.
- ELECTRICAL TEST - 100% IPCD356.
- PRINTED WIRING BOARD IS TO BE INDIVIDUALLY BAGGED.
- DRC'S MUST BE RUN ON THE GERBER BEFORE BUILDING BOARDS.
UNLESS PRIOR APPROVAL IS GIVEN IN WRITING BY FREESCALE.
- OVERALL PCB THICKNESS #2 MILS. TOP AND BOTTOM FR4 LAYERS 10 MILS. INNER FR4-LAYER IS 40 MILS.
- SOLDER SAMPLES TO BE PROVIDED.
- BASIC GRID INCREMENT AT 1:1 IS .0001.
- MODIFICATION OF SOLDERMASK IS NOT ALLOWED WITHOUT WRITTEN PERMISSION FROM FREESCALE.
- SUPPLIER MARKINGS - ON SOLDER SIDE ONLY, WHERE SHOWN.
- MUST BE UL RECOGNIZED AND MUST HAVE AN ID THAT CONFORMS TO UL94V-0
- MINIMUM CONDUCTIVE WIDTH/SPACING TO BE .008"/.007"
- THE PWB WILL BE MARKED AS LEAD FREE BY USE OF AN INK STAMP (66)
- THE PWB WILL BE MARKED AS LEAD FREE PROCESS COMPATIBLE BY USE OF AN INK STAMP (260°C)

REVISIONS				
ZONE	REV	DESCRIPTION	DATE	APPROVED
	A	ORIGINAL RELEASE	04-15-09	BO
	B	See SCH-25890, pg1 revision info	06-09-09	BO
	C	J14 replaced	07-30-09	BO

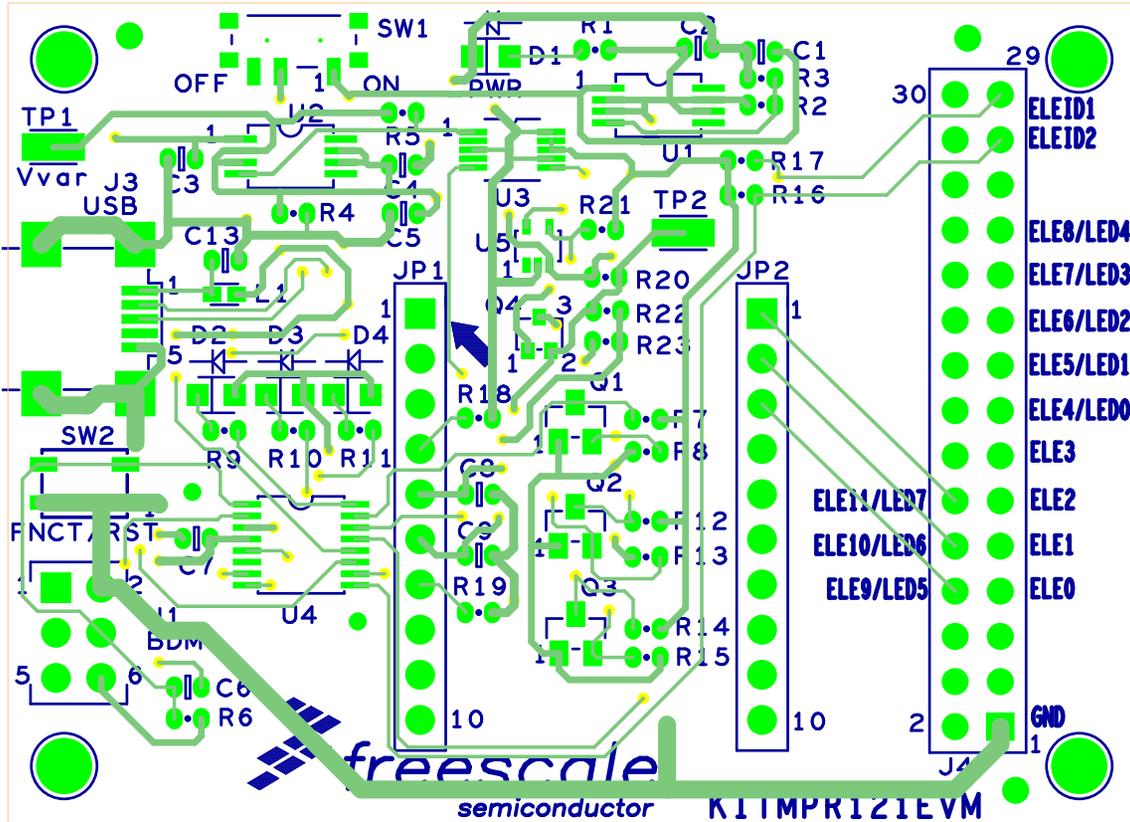


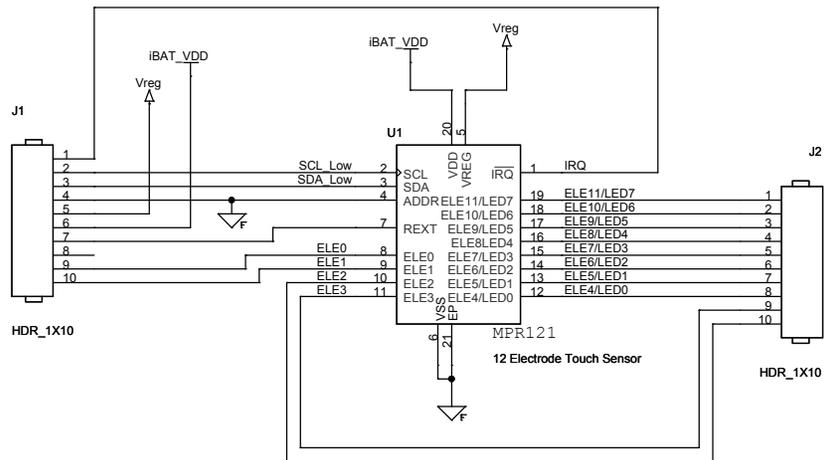
DRILL CHART: TOP to BOTTOM				
ALL UNITS ARE IN MILS				
FIGURE	SIZE	TOLERANCE	PLATED	QTY
•	15.0	+2.0/-2.0	PLATED	61
⊙	40.0	+3.0/-3.0	PLATED	29
◊	40.0	+3.0/-3.0	PLATED	26
▲	40.0	+3.0/-3.0	PLATED	1
●	36.0	+3.0/-3.0	NON-PLATED	2
□	125.0	+3.0/-3.0	NON-PLATED	4

 LAYER 1 COMPONENT SIDE 1 oz.
 LAYER 2 SOLDER SIDE 1 oz.

DETAIL A
 LAYER STACKUP
 SCALE: NONE

UNLESS OTHERWISE SPECIFIED DIMENSIONS ARE IN INCHES TOLERANCES ARE:		PART NO. 170-25890		FREESCALE SEMICONDUCTOR	
DECIMALS	.005	THIS DOCUMENT CONTAINS INFORMATION PROPRIETARY TO FREESCALE AND SHALL NOT BE USED FOR ENGINEERING DESIGN PURPOSES OR MANUFACTURE IN WHOLE OR IN PART WITHOUT THE CONSENT OF FREESCALE.			
ANGLES	.250°	2100 E. Elliot Road, MD, EL 519 TEMPE, ARIZONA 85284 USA			
XXX .XXX	.000	TITLED PRINTED WIRING BOARD KITMPR121EVM			
BREAK ALL SHARP EDGES AND CORNERS. REMOVE BURRS. UNPLATED DIM. NOT TO SCALE. 1:100 SCALE. DIMENSIONAL PROJECTION IS USED.		APPROVALS	DATE		
PITCHES		S. MEJIA	07-30-09		
FINISH		DESIGN CHECKED	DATE	SIZE	ENG. NO.
REWORK TREAT		B. Osinac	07-30-09	D LAY-25890	FAB-25890
		DESIGN	DATE	REV	
		B. Osinac	07-30-09		C
		REVISIONS	DATE		
		C. Teegarden	07-30-09		
		SCALE	DO NOT SCALE DRAWING		SHEET OF



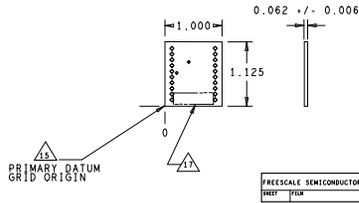


		
Drawing Title: MPR121 DAUGHTER BOARD		
Page Title: MPR121 SENSOR		
Size B	Document Number SCH-76723 PDF: SPF-76723	Rev B
Date: Friday, June 12, 2009	Sheet 3 of 3	

NOTES (UNLESS OTHERWISE SPECIFIED):

- THIS DRAWING SPECIFIES THE REQUIREMENTS FOR A PRINTED WIRING BOARD IN ACCORDANCE WITH SPECIFICATION IPC-A-600 (LATEST REVISION).
 - THIS PWB MUST BE COMPLIANT WITH THE FREESCALE ECD REQUIREMENTS (DOCUMENT # 12MMS000478) THESE REQUIREMENTS PROHIBIT THE USE OF CONTROLLED SUBSTANCES INCLUDING THOSE FOUND IN RoHS AND HALOGEN FREE STANDARDS. DISCLOSURE OF RESTRICTED AND REPORTABLE SUBSTANCES IS ALSO REQUIRED.
 - THE PWB MUST BE LEAD FREE ASSEMBLY PROCESS COMPATIBLE AND MUST BE ABLE TO HANDLE A MINIMUM OF 5 CYCLES AT 260 DEGREES CELSIUS FOR 10 SECONDS.
 - BASE MATERIAL - FR4 (OR EQUIVALENT RoHS COMPLIANT) LAMINATE AND PREPREG SHALL MEET IPC-4101A-94
 MAXIMUM HALOGEN CONTENT - 0.10 ppm
 Tg - MUST BE GREATER THAN OR EQUAL TO 150 DEGREES CELSIUS.
 Td - MUST BE GREATER THAN OR EQUAL TO 330 DEGREES CELSIUS.
 - COPPER FOIL WEIGHT - OUTSIDE LAYERS AND INNER LAYERS 1.0 OZ. SEE STACKUP DETAIL "A"
 - OVERALL PCB THICKNESS 62 MILS. TOP AND BOTTOM FRA LAYERS 10 MILS. INNER FRA-LAYER IS 40 MILS.
 - PLATING FINISH - BOTH SIDES ENIG (EMERSIONLESS NICKEL IMMERSION GOLD):
 76.2-203.2 MILLIMICRON (3-8 MICROINCH) OF GOLD OVER
 2,540-5,080 MILLIMICRON (100-200 MICROINCH) MINIMUM NICKEL.
- △ ALL THROUGH HOLE VIAS MAY BE PLATED SHUT.
- SOLDERMASK - GREEN COLOR (TATYO OR EQUIVALENT), BOTH SIDES, HALOGEN FREE
 - SILKSCREEN - WHITE EPOXY INK, BOTH SIDES. NO SILK ON PADS.
 - ELECTRICAL TEST - 100% IPCD356.
 - PRINTED WIRING BOARD IS TO BE INDIVIDUALLY BAGGED.
 - DRC'S MUST BE RUN ON THE GERBER BEFORE BUILDING BOARDS. UNLESS PRIOR APPROVAL IS GIVEN IN WRITING BY FREESCALE.
 - SOLDER SAMPLES TO BE PROVIDED.
- △ BASIC GRID INCREMENT AT 1:1 IS .0001.
- MODIFICATION OF SOLDERMASK IS NOT ALLOWED WITHOUT WRITTEN PERMISSION FROM FREESCALE.
 - SUPPLIER MARKINGS - ON SOLDER SIDE ONLY, WHERE SHOWN.
 - MUST BE UL RECOGNIZED AND MUST HAVE AN ID THAT CONFORMS TO UL94V-0
 - MINIMUM CONDUCTIVE WIDTH/SPACING TO BE .008"/.007"
 - THE PWB WILL BE MARKED AS HALOGEN FREE BY USE OF AN INK STAMP (HF)
 - THE PWB WILL BE MARKED AS LEAD FREE BY USE OF AN INK STAMP (Pb)
 - THE PWB WILL BE MARKED AS LEAD FREE PROCESS COMPATIBLE BY USE OF AN INK STAMP (Z60°C)
 - SOLDER STENCIL MUST BE 5MILS (0.13MM) MINIMUM THICKNESS. THICKNESS CAN BE ADJUSTED TO OPTIMIZE ASSEMBLY YIELDS.

REVISIONS				
ZONE	REV	DESCRIPTION	DATE	APPROVED
	A	ORIGINAL RELEASE	04-15-09	OB
	B	Updated top and bottom silkscreen	05-28-09	OB

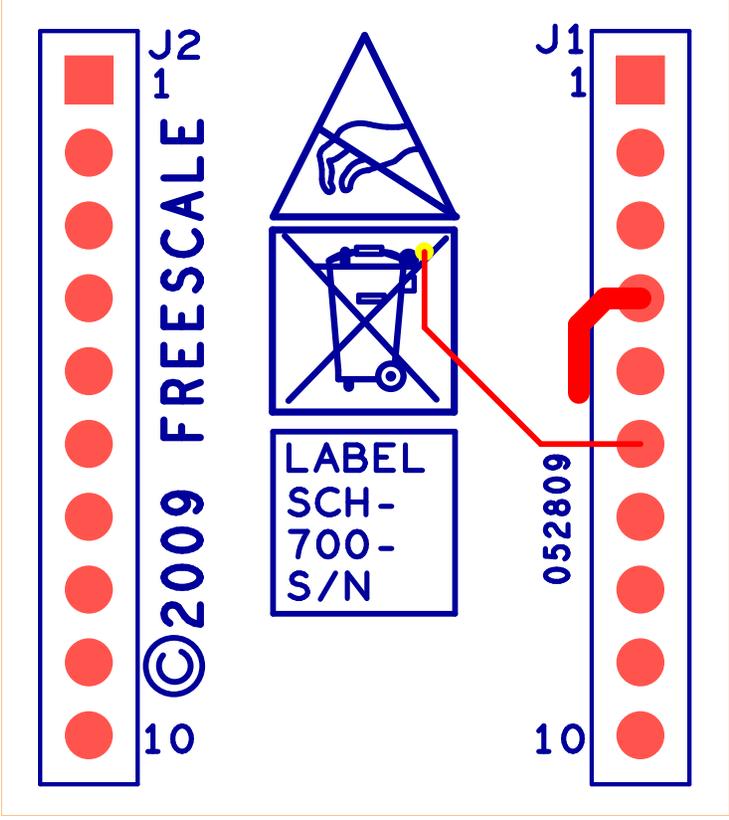


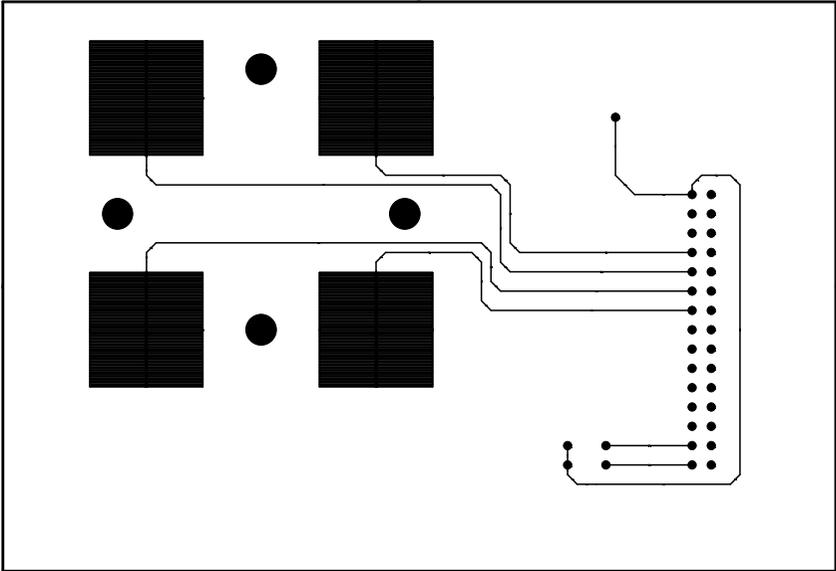
DRILL CHART: TOP to BOTTOM				
ALL UNITS ARE IN MILS				
FIGURE	SIZE	TOLERANCE	PLATED	QTY
•	15.0	+2.0/-2.0	PLATED	2
◦	40.0	+3.0/-3.0	PLATED	20

	LAYER 1 COMPONENT SIDE	1 oz.
	LAYER 2 SOLDER SIDE	1 oz.

DETAIL A
LAYER STACKUP
SCALE: NONE

UNLESS OTHERWISE SPECIFIED DIMENSIONS ARE IN INCHES TOLERANCES ARE: DECIMALS .005 ANGLES .25° XXX .005 ✓ FINISH ALL MACHINED SURFACES BREAK ALL SHARP EDGES AND CORNERS INDICE NONE UNPLATED DIM. NOT TO SCALE 1:100 SCALE, DIMENSIONAL PROJECTION IS USED.		PART NO. 170-76723		FREESCALE SEMICONDUCTOR	
APPROVALS		DATE	TITLE		
DRAWN S. Mejia		05-28-09	FIELD PRINTED WIRING BOARD MPR121 DAUGHTER BOARD		
CHECKED B. Oslnach		05-28-09	SIZE	DWG FILE NAME	ENG. NO.
DESIGN CHECKED B. Oslnach		05-28-09	D	LAY-76723	FAB-76723
REVISION		SCALE	DO NOT SCALE DRAWING		SHEET OF
			2		1





D13

D13

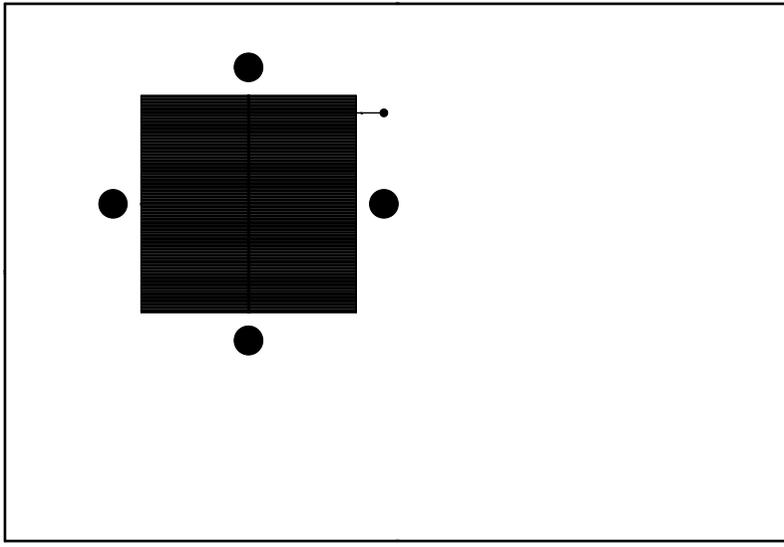
D13

D13

001

001 001
002 002
003 003
004 004
005 005
006 006
007 007
008 008
009 009
010 010
011 011
012 012
013 013
014 014
015 015
016 016
017 017
018 018
019 019
020 020
021 021
022 022
023 023
024 024
025 025
026 026
027 027
028 028
029 029
030 030
031 031
032 032
033 033
034 034
035 035
036 036
037 037
038 038
039 039
040 040
041 041
042 042
043 043
044 044
045 045
046 046
047 047
048 048
049 049
050 050
051 051
052 052
053 053
054 054
055 055
056 056
057 057
058 058
059 059
060 060
061 061
062 062
063 063
064 064
065 065
066 066
067 067
068 068
069 069
070 070
071 071
072 072
073 073
074 074
075 075
076 076
077 077
078 078
079 079
080 080
081 081
082 082
083 083
084 084
085 085
086 086
087 087
088 088
089 089
090 090
091 091
092 092
093 093
094 094
095 095
096 096
097 097
098 098
099 099
100 100

001 001
002 002





Reparación de Cubiertas Sistema de Resina Serie M-20 / M-30 / M-40

Ficha Técnica

Descripción:

El sistema de reparación de cubiertas serie M, está diseñado para recuperar los daños de chaquetas de cables de poder producidos por las condiciones de operación en faenas. El sistema consiste en la aplicación de resina flexible en toda el área dañada y por todo el diámetro del cable, para ello, un molde plástico es dispuesto previamente y separado diametralmente del cable por una cinta espaciadora. Una vez fijado el molde, la resina es vaciada en forma líquida. En algunos minutos, la resina fraguará y el molde puede ser retirado.

El sistema de reparación serie M es la forma más rápida y eficiente de recuperar cubiertas dañadas en forma definitiva, este kit ocupa la resina 2130 de base poliuretánica que garantiza una excelente adhesión a cualquier material y la mejor resistencia a los terrenos abrasivos y tracción de cables.

Cada kit contiene material para 10 reparaciones. la resina 2130 debe ser adquirida por separado, dependiendo de las características de los cables y del tamaño de las reparaciones.

La resina 2130 se encuentra disponible en dos tamaños:

2130B 216 gramos

2130C 616 gramos

Tabla de Selección

Kit	Rango del cable (mm)	Largo máximo de la reparación
M - 20	41 - 63	300
M - 30	47 - 100	508
M - 40	47 - 150	813

Propiedades Físicas:

Color	Negro
Dureza	80 Shore A
ASTM D-2240	
Densidad	1,32 g/cm ³
Tensión de rigidez	59,4 Kg/cm ²
ASTM D-412	
Elongación	175%
ASTM D-412	
T ° de transición al vidrio	-80 °C
Prueba 3M	
Más. T ° exotérmica (100 g)	62 °C
Prueba 3M	
Tiempo de fraguado (23 °C)	15 min
Absorción de humedad 168 hrs a 100 °C	2,60%
Adhesión a materiales de chaquetas de cables	
Neopreno	3,2 Kg/cm ²
Hypalon	3,2 Kg/cm ²
Nitrilo/PVC	2,8 Kg/cm ²
PVC	2,8 Kg/cm ²
EPDM	0,7 Kg/cm ²
Uretano (sí misma)	3,2 Kg/cm ²
Adhesión a metales	
Acero	2,5 Kg/cm ²
Aluminio	2,5 Kg/cm ²
Cobre	2,5 Kg/cm ²

Propiedades Eléctricas:

Rigidez dieléctrica	450 v/mil
ASTM D-149	
Constante dieléctrica (60 Hz)	
ASTM D-150	
23 °C	4,6
60 °C	4,9
90 °C	5,4
Factor de disipación	
ASTM D-150	
23 °C	3,8
60 °C	4,9
90 °C	7,5

Para mayor información:

3M Centro de Atención al Consumidor

600-300-3636



E-mail: atencionconsumidor@3m.com