

UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID
ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA



Estimación de la posición del Robot Sidemar

Ingeniería Técnica Industrial: Mecánica

Autor: Francisco José Calero de Tena
Tutor: Cristina Castejón Sisamón
Director de proyecto: Juan Carlos García Prada



AGRADECIMIENTOS

Agradecimientos:

En primer lugar me gustaría agradecer a mi madre todo el esfuerzo, por su parte, que ha permitido que pudiera cursar esta carrera.

Al resto de familiares que de una forma u otra también me ayudaron durante esta etapa.

También de forma muy especial y con cariño a Ana María del Álamo por todo su apoyo incondicional en los momentos malos.

Tampoco me olvidare de los compañeros y amigos, que hice durante todo este tiempo en la universidad, los cuales siempre estaban dispuestos a echar una mano proporcionando apuntes, ayudando con las prácticas...

No quisiera olvidarme del Departamento de Oficina Técnica de Electrónica de la Universidad Carlos III de Madrid (especialmente a Jorge Picurelli) que me proporcionaron una beca remunerada y la oportunidad de aprender más en otros campos.

Y por último agradezco mucho a mi tutora de proyecto, Cristina Castejón, por todas las molestias que se ha tomado para conmigo durante la realización de este proyecto.



ÍNDICE

Índice:

1. Introducción	3
1.1 Objetivos del proyecto	
1.2 Introducción a la Robótica	4
1.2.1 Análisis clásicos de los robots industriales	4
1.3 Sistema sensoriales	10
1.3.1 Acelerómetros	11
1.3.2 Encoders	14
2. Sistema experimental	17
2.1 Descripción del sistema Sidemar	18
2.1.1 Reductores	19
2.1.2 Motores paso a paso	21
2.2 Cadena de medida	22
2.2.1 Acelerómetro	22
2.2.2 Tarjeta de adquisición	23
2.2.3 Tarjeta Pmac	24
2.3 Software utilizado	26
2.3.1 Test point tm	26
2.3.2 MATLAB [®]	27
3. Desarrollo del proyecto	29
3.1 calculo de posición teórica	30
3.2 Estimación posición real	33
4. Resultados experimentales	41
4.1 Primer ensayo. Robot sin carga	42
4.2 Segundo ensayo	48
5. Conclusiones y futuros desarrollos	54



ÍNDICE

5.1 Conclusiones	55
5.2 Futuros desarrollos	56
6. Bibliografía	57



INTRODUCCIÓN

1. Introducción





INTRODUCCIÓN

1. Introducción:

1.1 Objetivos del proyecto.

El robot Sidemar, es una maquina creada para el estudio físico de los robots que son profusamente utilizados en la industria a día de hoy.

En el caso de este proyecto, la magnitud con la que se va trabajar va a ser la aceleración, que será medida a través de acelerómetros montados en la propia maquina. No nos limitaremos a la simple extracción de datos experimentales sino que también trataremos de cuantificar la posición mediante estos datos y compararla con la que realmente tiene el robot.

Para llevar a cabo lo anterior, haremos uso de ecuaciones matemáticas basadas en la física para tratar los datos que obtenemos en los muestreos de aceleración y posición real que llevamos a cabo mientras el robot ejecuta determinados movimientos que nos son interesantes para el estudio.

1.2 Introducción a la robótica

En el estudio de la robótica industrial la ubicación de los objetos en el espacio tridimensional es fundamental. Estos objetos son los vínculos del manipulador, las piezas y herramientas con las que trabaja y los demás objetos en el entorno del mismo. A un nivel básico importante, estos objetos se describen mediante sólo dos atributos: posición y orientación. Naturalmente, un tema de interés inmediato es la manera en la que representamos esas cantidades y las manipulamos matemáticamente. Para poder describir la posición y orientación de un cuerpo en el espacio siempre se adjunta un sistema de coordenadas unido al objeto. Después se describe la posición y orientación del sistema de coordenadas del objeto respecto a algún sistema de coordenadas de referencia [1].

Cualquier sistema de coordenadas puede servir como sistema de referencia dentro del cual se puede expresar la posición y orientación de un cuerpo, por lo que a menudo pensamos en *transformar o cambiar la descripción* de estos atributos de un cuerpo de un sistema a otro.

1.2.1 Análisis clásicos de los robots industriales

Dentro del diseño y estudio de los robots, hay varios factores importantes a tener en cuenta tales como la cinemática o los grados de libertad, así como los tipos de robots que existen

Cinemática directa de los manipuladores:

La cinemática es la ciencia que trata el movimiento sin considerar las fuerzas que lo ocasionan. Dentro de la cinemática se estudian la posición, velocidad aceleración y todas las derivadas de orden mayor de las variables de posición (respecto al tiempo o a cualquier otra variable). Por ende, el estudio de la cinemática de los manipuladores se refiere a todas las propiedades de movimiento, las geométricas y las basadas en tiempo. Los manipuladores están formados por eslabones casi rígidos, conectados entre si por articulaciones, que permiten el movimiento relativo entre los eslabones adyacentes. Estas articulaciones generalmente se instrumentan con sensores de posición, los cuales permiten medir la posición relativa de los vínculos adyacentes. En el caso de las



INTRODUCCIÓN

articulaciones de rotación o angulares, estos desplazamientos se conocen como ángulos articulados. Algunos manipuladores contienen articulaciones deslizantes (o prismáticas), en las que el desplazamiento relativo entre los vínculos es una translación. El número de grados de libertad que posee un manipulador es el número de variables de posición independientes que tendrían que especificarse para poder localizar todas las piezas del mecanismo. Éste es un término general que se utiliza para cualquier mecanismo. Por ejemplo un mecanismo de cuatro barras sólo tiene un grado de libertad (aunque tenga tres miembros móviles). En el caso de los robots industriales comunes, como un manipulador es generalmente una cadena cinemática abierta y como la posición de cada articulación se define generalmente con una sola variable (los eslabones se unen entre sí dos a dos por medio de pares elementales de un grado de libertad), el número de articulaciones es igual al número de grados de libertad.

En el extremo libre de la cadena cinemática que conforman el manipulador se encuentra el efector final (*end-effector*). Dependiendo de la aplicación que se va a dar al robot, el efector final podría ser una pinza, un soplete de soldadura, un electroimán o cualquier otro dispositivo. Generalmente presentamos la posición del manipulador proporcionando una descripción de la posición de la herramienta, la cual esta unida al efector final, relativo al sistema de referencia fijo, que generalmente se encuentra en la base del manipulador.

Un problema muy básico en el estudio de la manipulación mecánica se conoce como cinemática directa, que es el problema geométrico estático de calcular la posición y orientación del efector final del manipulador en función de las posiciones de las articulaciones. Específicamente, dado un conjunto de ángulos articulares, el problema de la cinemática directa es calcular la posición y orientación del sistema de referencia de la herramienta relativo al de la base. [1]

Diseño basado en los requerimientos de la tarea

Aunque los robots son nominalmente maquinas “universalmente programables”, capaces de realizar una amplia variedad de tareas, factores prácticos y económicos dictan que se deben diseñar distintos manipuladores para tipos específicos de tareas. Por ejemplo, los grandes robots capaces de manejar cargas útiles de cientos de kilos no tienen generalmente la capacidad de insertar componentes electrónicos en tableros de circuitos. Como veremos, no sólo el tamaño, sino también el numero de articulaciones, el orden de las articulaciones y los tipos de accionamientos, detección y control variaran enormemente con el tipo de tare a realizar.

Numero de grados de libertad

El número de grados de libertad debe concordar con el número requerido por la tarea. No todas las tareas requieren de seis grados de libertad completos (grados de libertad de un robot industrial típico).

La circunstancia mas común de este tipo ocurre cuando el efector final tiene un eje de simetría. La soldadura con arco, la soldadura por puntos, el desbarbado, el encolado y el pulido son otros ejemplos de tareas que a menudo emplean efectores finales con cuando menos un eje de simetría.

Al analizar la situación de la herramienta simétrica, algunas veces es útil imaginar una *articulación ficticia* cuyo eje este sobre el eje de simetría. Al colocar un efector final la ubicación específica, necesitaremos un total de seis grados de libertad. Como una de



INTRODUCCIÓN

estas seis es nuestra herramienta ficticia, el manipulador no necesita tener más de 5 grados de libertad. [1]

Si se utilizara un robot de 5-DOF, regresaríamos al caso común en el que sólo hay un número finito de soluciones distintas disponibles para posicionar la herramienta. Un gran porcentaje de los robots industriales existentes son 5-DOF reconociendo el relativo predominio de las aplicaciones con herramientas simétricas.

Algunas tareas se llevan a cabo en dominios que, fundamentalmente, tienen menos de seis grados de libertad. La colocación de componentes en tableros de circuitos es un ejemplo común de esto. Por lo general, los tableros de circuitos son planares y contienen piezas de varias alturas. Para posicionar piezas en una superficie planar se requieren 3 grados de libertad (x,y,θ) ; para poder levantar e insertar la piezas se agrega un cuarto movimiento normal al plano (z) .

Los robots con menos de seis grados de libertad pueden también realizar tareas en las que cierto tipo de dispositivo de colocación activo presenta las piezas. Por ejemplo, en la soldadura de tuberías, en una plataforma de inclinación / giro es la que comúnmente presenta las piezas a soldar. Al contar los números de grados de libertad entre los tubos y el efector final, la plataforma de inclinación/giro representa dos. Esto, junto con el hecho de que la soldadura de arco, es una tarea de herramienta simétrica, significa que en teoría podría usarse un manipulador de 3-DOF. En la práctica, la necesidad de evitar colisiones con la pieza de trabajo, es lo que hace que se utilice un robot con más grados de libertad.

Las piezas con un eje de simetría también reducen los grados requeridos de libertad para el manipulador.

Configuración cinemática

Una vez se ha decidido el número requerido de grados de libertad, debe seleccionarse una configuración específica de articulaciones para realizar su tarea. En el caso de los robots serie, el número de articulaciones es igual al número requerido de grados de libertad. La mayoría de los manipuladores están diseñados de manera que las últimas $N-3$ articulaciones orienten al efector final, cuyos ejes que intersecan en el punto de la muñeca. En cuanto a las primeras 3 articulaciones, serán las que posicionen el extremo de la muñeca en el espacio. Se puede decir que los manipuladores con ese diseño están compuestos de una estructura de posicionamiento, seguida de una estructura de orientación o muñeca.

Tipos de robot según su configuración:

Robot Cartesiano.

Un manipulador cartesiano es tal vez la configuración más simple. Como se muestra en la figura 1. Las articulaciones, de la 1 a la 3 son prismáticas, mutuamente ortogonales y corresponden a las direcciones cartesianas x,y,z .

La configuración cartesiana produce robots con estructuras muy rígidas. Esto hace que puedan construirse robots de gran tamaño con esta configuración. Estos grandes robots, conocidos comúnmente como robots de puente transversal, se asemejan a grúas corredizas aéreas. Los robots de puente transversal algunas veces manipulan automóviles completos o inspeccionan aeronaves completas.

Las otras ventajas de los manipuladores cartesianos se deben al hecho de que las primeras tres articulaciones estas *desacopladas*. Esto facilita su diseño y evita las singularidades cinemáticas en las articulaciones.



INTRODUCCIÓN

Su principal desventaja es que todos los alimentadores y dispositivos fijos asociados con una aplicación deben encontrarse “dentro” del robot. En consecuencia, las celdas de trabajo de las aplicaciones para los robots cartesianos se vuelven muy dependientes de la máquina. El tamaño de la estructura del soporte del robot limita el tamaño y la colocación de los dispositivos fijos y los sensores. Estas limitaciones hacen extremadamente difícil el proceso de modernizar los robots cartesianos para adaptarlos a las celdas de trabajo existentes.



Figura 1. Robot con configuración cartesiana [catalogoLPKF]

Robot articulado

También llamado manipulador de codo o antropomórfico. Un manipulador de este tipo generalmente consiste en dos articulaciones de tipo “hombro” (una para girar sobre el eje vertical y otra para elevarse en el plano horizontal), una articulación de tipo “codo” (cuyo eje es normalmente paralelo a la articulación de elevación del hombro) y dos o tres articulaciones de muñeca en el extremo del manipulador. En la figura 2 se presenta una configuración de este tipo.

Los robots articulados minimizan la intrusión de la estructura del manipulador en el espacio de trabajo, haciéndolos capaces de llegar a espacios confinados. Requieren de una estructura total mucho menor que los robots cartesianos, lo que los hace menos costosos para aplicaciones que requieren de espacios de trabajo más pequeños.



Figura2. Robot articulado

Scara

La configuración scara está formada por tres articulaciones angulares paralelas (que le permiten moverse y orientarse en un plano), con una cuarta articulación



INTRODUCCIÓN

prismática para mover el efector final de forma normal al plano (ver figura 3). La ventaja principal es que las primeras tres articulaciones no tienen que soportar el peso del manipulador o carga. Además, el eslabón 0 (eslabón que une al robot con la base) puede alojar fácilmente los actuadores para las primeras 2 articulaciones. Los actuadores pueden hacerse bastante grandes, por lo que el robot puede moverse con gran rapidez. Esta configuración se adapta mejor al trabajo en el plano.

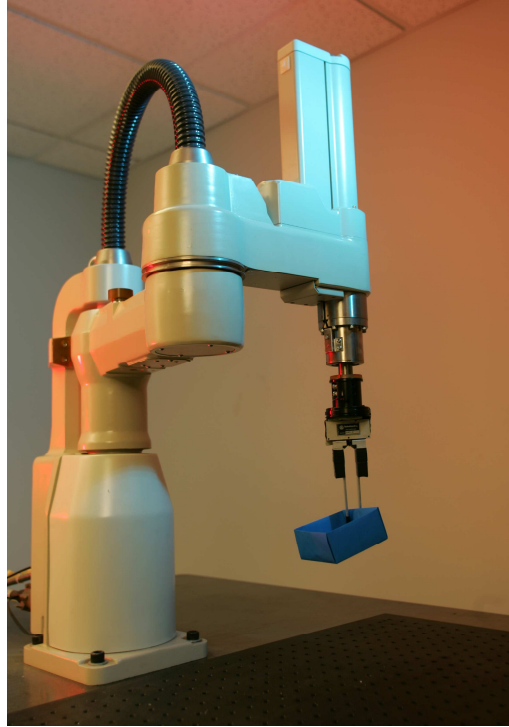


Figura 3. Robot de tipo scara

Robot Esférico

La configuración esférica tiene muchas similitudes con el manipulador articulado, sólo que la articulación tipo codo se reemplaza por una articulación prismática. Este diseño se adapta mejor que el diseño tipo codo en algunas aplicaciones. El vínculo que se mueve prismáticamente podría plegarse como un telescopio (o salir por la parte posterior) al retraerse. (Ver figura 4)

INTRODUCCIÓN



Figura 4. Robot esférico realizando una tarea de paletizado.

Robot Cilíndrico

Los manipuladores cilíndricos consisten en una articulación prismática para trasladar el brazo en forma vertical, una articulación angular con un eje vertical, otra articulación Prismática ortogonal al eje de la articulación angular y, finalmente, una muñeca de cierto tipo. En la figura 5 se presenta un robot con esta configuración dentro de un aparcamiento automatizado.



Figura 5. Robot de tipo cilíndrico [almacén de Volkswagen en Dresde (Alemania)].

Configuración de Muñecas

Las configuraciones de muñecas más comunes consisten en dos o tres articulaciones angulares con ejes ortogonales que se intersecan. Por lo regular la primera articulación de muñeca forma la articulación número 4 del manipulador. Una configuración de tres ejes ortogonales garantiza que pueda lograrse cualquier orientación (suponiendo que no hay límites en los ángulos de las articulaciones).

INTRODUCCIÓN

Una muñeca con tres ejes ortogonales puede ubicarse en el extremo del manipulador en cualquier orientación deseada sin problemas. Véase un típico ejemplo de muñeca en la figura 6



Figura 6. Muñeca de un robot industrial

1.3 Sistemas sensoriales para la adquisición de información

El software de control, necesita saber en todo momento la posición del robot para poder ejecutar con precisión las órdenes programadas. Por este motivo se hace necesaria la instalación de sistemas sensoriales en los robots. Por otro lado también es interesante conocer otras magnitudes como la aceleración para el estudio de la cinemática.

1.3.1 Acelerómetros

Un acelerómetro, como se intuye por su nombre, es un instrumento para medir la aceleración de un objeto al que va unido, lo hace midiendo respecto de una masa inercial interna.

Existen varios tipos de tecnologías (piezo-eléctrico, piezo-resistivo, galgas extensométricas, láser, térmico...) y diseños que aunque todos tienen el mismo fin (medir la aceleración) pueden ser muy distintos unos de otros según la aplicación a la cual van destinados y las condiciones en las que han de trabajar. Hay dos parámetros principales a la hora de escoger el medidor de aceleraciones adecuado, los rangos de funcionamiento de temperatura y frecuencia. Otros parámetros importantes pueden ser el tamaño, si tienen más funciones, la resistencia a golpes y por supuesto el precio. En la figura 6 pueden observarse distintos tipos de acelerómetros. [2]

INTRODUCCIÓN



Figura 6. Diferentes tipos de acelerómetro [catalogo de Honeywell]

Los acelerómetros han pasado de estar dedicados a un uso industrial (medir vibraciones y oscilaciones) y de investigación a estar presentes en muchos aparatos cotidianos, algunos ejemplos de ellos en Wii, Footpod, portátiles, etc.

Tipos de acelerómetro:

Piezo-eléctrico

El funcionamiento de este tipo de acelerómetros se basa en las propiedades de los cristales piezo-eléctricos. Estos cristales, cuando son sometidos a alguna fuerza (compresión, flexión, extensión), producen una corriente eléctrica, la palabra piezo de origen griego significa “apretar”.

De manera que, poniendo un cristal de este tipo entre la carcasa (unida al objeto cuya aceleración se quiere medir) y una masa inercial, se producirá una corriente cuando ocurra una aceleración (la masa ejercerá una fuerza sobre el cristal). Midiendo esta corriente podremos calcular la aceleración, bien directamente si se trata de un acelerómetro de salida de corriente (culombios/g) o bien convirtiéndola a un voltaje de baja impedancia si se trata de un acelerómetro de salida de voltaje (ejemplo IEPE).

La disposición de cada elemento del acelerómetro se detalla claramente en la figura 7

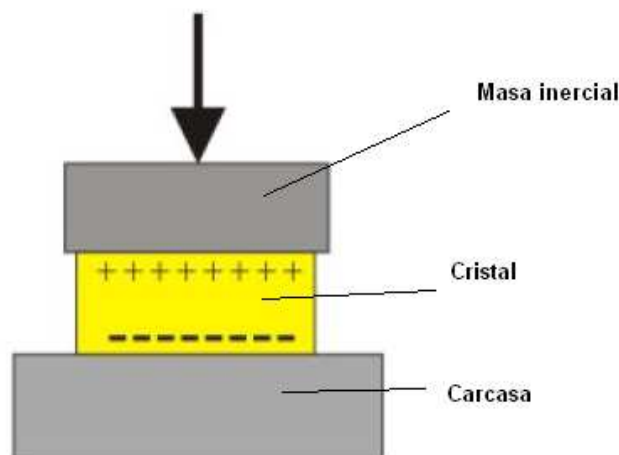


Figura 7: Diagrama de un acelerómetro piezo-eléctrico

INTRODUCCIÓN

Piezo-resistivo

Un acelerómetro piezo-resistivo, a diferencia de uno piezo-eléctrico, utiliza un sustrato en vez de un cristal piezo-eléctrico. En esta tecnología las fuerzas que ejerce la masa sobre el sustrato varían su resistencia, que forma parte de un circuito que mediante un puente de Wheatstone mide la intensidad de la corriente. La ventaja de esta tecnología respecto a la piezo-eléctrica es que pueden medir aceleraciones hasta cero Hz de frecuencia. En la figura 8 se puede ver como está construido este tipo de acelerómetro.

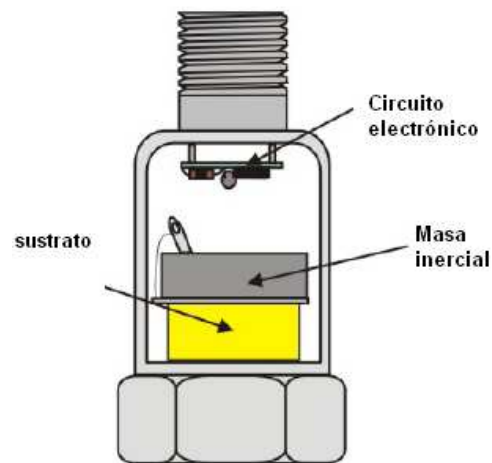


Figura 8: diagrama de un acelerómetro piezo-resistivo

De galgas extensométrica (strain gage based)

En este tipo de acelerómetro una (o más) galgas extensométricas hacen de puente entre la carcasa del instrumento y la masa inercial (ver la disposición de estos elementos en la figura 9), la aceleración produce una deformación de la galga que se traduce en una variación en la corriente detectada por un puente de Wheatstone, la deformación es directamente proporcional a la aceleración aplicada al acelerómetro. Al igual que en el piezo-resistivo la respuesta de frecuencia llega hasta los cero Hz.

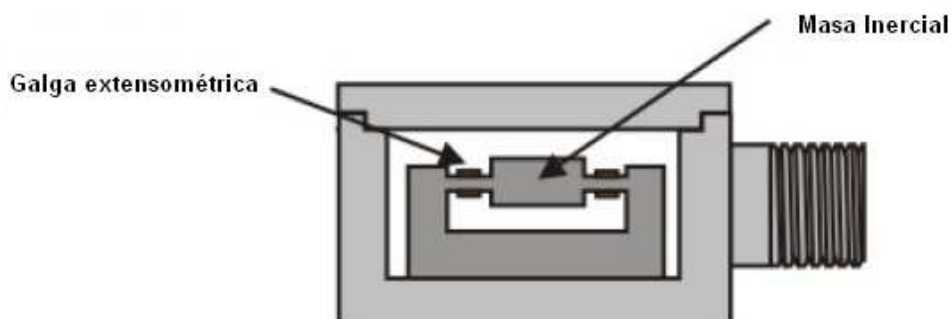


Figura 9. Acelerómetro de galga extensométrica

INTRODUCCIÓN

Térmico

Este tipo de acelerómetro está formado por los siguientes elementos (ver figura 10) un sustrato de silicio en el cual se hace un hueco para meter una pequeña resistencia que hace de calentador, con dos termopares en los extremos, se forma una cavidad de aire (burbuja) encima (la carcasa es estanca).

En reposo con el calentador creando un núcleo de aire caliente en el centro, cuando ocurre una aceleración, por convección, el aire frío desplaza al caliente, el núcleo de aire caliente se desplaza en la misma dirección que la aceleración, esto crea un diferencial de temperatura entre los termopares.

Midiendo este diferencial y ampliando y acondicionando la señal podemos obtener la aceleración del objeto.

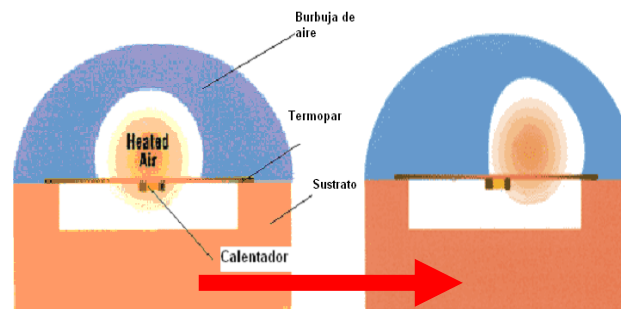


Figura 10. Acelerómetro térmico

Al sufrir una aceleración hacia la derecha el núcleo se desplaza en el mismo sentido.

Condensador (Capacitance accelerometer)

En este tipo de acelerómetros el elemento que conecta la masa inercial con la carcasa es un condensador (ver figura 11). Una de las paredes está fija, pegada a la carcasa y la otra a la masa. Cuando ocurre una aceleración la masa presiona el condensador variando el grosor entre pared y pared. Midiendo la capacitancia del condensador podemos calcular la aceleración. Este tipo de acelerómetros son extremadamente resistentes, pueden soportar aceleraciones de 30 000 G lo cual permite usarlo en mediciones de aceleración de proyectiles de cañón.

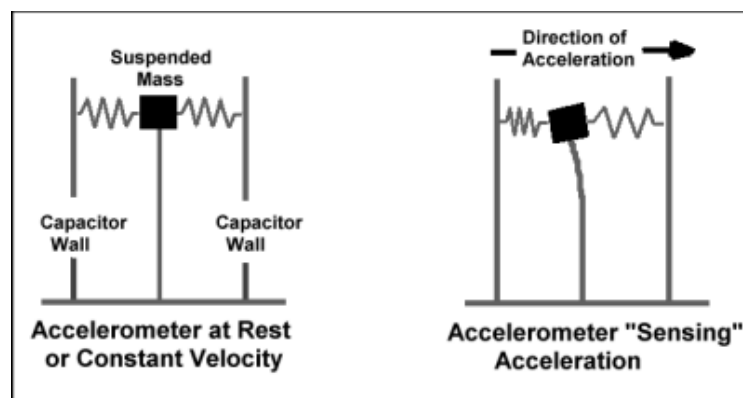


Figura 11. Esquema funcionamiento de un acelerómetro de condensador.

INTRODUCCIÓN

1.3.2 Encoder

Sensores de posición.

Los encoders son Codificadores angulares de posición que son utilizados para determinar la posición (angular) de las articulaciones de los robots. Principalmente se usan dos tipos, el incremental y el absoluto [3].

Encoders incrementales

Los codificadores ópticos o encoders incrementales constan, en su forma mas simple, de un disco transparentes con marcas opacas colocadas radialmente y equidistantes entre si; de un sistema de iluminación en el que la luz es colimada correctamente, y de un elemento fotorreceptor.



Figura 12. Encoder incremental

El eje cuya posición se quiere medir va acoplado al disco transparente (ver figura12). Con esta disposición a medida que el eje gire se irán generando pulsos en el receptor cada vez que la luz atraviese cada marca, y llevándola cuenta de estos pulsos es posible conocer la posición del eje.

Existe, sin embargo, el problema de no saber si en un momento dado se esta realizando un giro en un sentido o en otro con el peligro que supone no estar contando adecuadamente. Una solución a este problema consiste en disponer de otra franja de marcas, desplazada de la anterior de manera que el tren de pulsos que con ella se genere este desplazado 90° eléctricos respecto al generado por la primera franja. De esta manera, con un circuito relativamente sencillo es posible obtener una señal adicional que indique cual es el sentido de giro, y que actúe sobre el contador correspondiente indicando que incremente o decremente la cuenta que se esta realizando.

Es necesario además disponer de una marca de referencia sobre el disco que indique que se ha dado una vuelta completa y que, por tanto, se hade empezar la cuenta de nuevo. Esta marca sirve también para poder comenzar a contar tras recuperarse de una caída de tensión.

La resolución de este tipo de sensores depende directamente del número de marcas que se pueden poner físicamente en el disco. Un método relativamente sencillo para aumentar esa resolución es, no solamente contar los flancos de subida de los trenes de pulsos, sino contabilizar también los de bajada, incrementando así por cuatro la

INTRODUCCIÓN

resolución del captador, pudiéndose llegar, con ayuda de circuitos adicionales , hasta 100.000 pulsos pos vuelta [3].

Encoders absolutos

El funcionamiento básico de los encoders absolutos es muy similar al de los incrementales. Se tiene una fuente de luz con sus lentes de adaptación correspondientes, un disco graduado y unos fotorreceptores. En este caso, el disco transparente se divide en un numero determinado de sectores (potencia de 2), codificándose cada uno de ellos según un código binario cíclico (normalmente código gray) que queda representado por zonas transparentes y opacas dispuestas radialmente tal y como se aprecia en la figura 13.

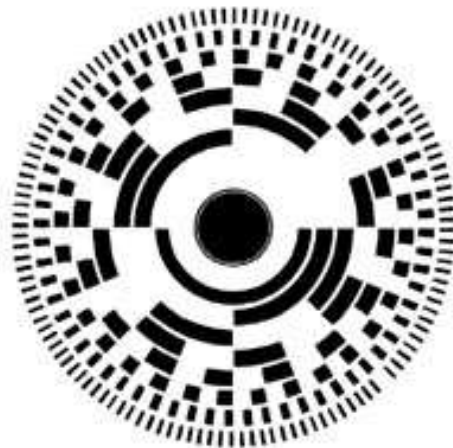


Figura 13. Disco código gray

No es necesario ningún contador o electrónica adicional para detectar el sentido de giro, pues cada posición (sector) es codificado de forma absoluta. Su resolución es fija, y vendrá dada por el número de anillos que posea el disco graduado. Resoluciones habituales van desde 2^8 a 2^{19} bits (desde 256 a 524.288 posiciones distintas).

Normalmente los sensores de posición se acoplan al eje del motor. Considerando que en la mayor parte de los casos entre el eje del motor y el de la articulación se sitúa un reductor de relación N, cada movimiento de la articulación se vera multiplicado por N al ser medido con este sensor. Este aumentara así su resolución multiplicándola por N.

Este problema se soluciona en los encoders absolutos con la utilización de otro encoder absoluto mas pequeño conectado por un engranaje reductor al principal, de manera que cuando éste gire una vuelta completa, el codificado adicional avanzara una posición. Son los denominados encoders absolutos multivuelta.

Esta misma circunstancia originara que en el caso de los codificadores incrementales la señal de referencia o marca de cero, sea insuficiente para detectar el punto origen para la cuenta de pulsos, pues habrá N posibles puntos de referencia para un giro completo de la articulación. Para distinguir cual de ellos es el correcto se suele utilizar un detector de presencia denominado de sincronismo, acoplado directamente al eslabón del robot que se considere. Cuando se conecta el robot desde una posición de apagado, es preciso ejecutar un procedimiento de busque da de referencias para los sensores (sincronizado). Durante su ejecución leen los detectores de sincronismo que detectan la presencia ola ausencia del eslabón del robot. Cuando se detecta la conmutación de presencia a ausencia de la pieza, o viceversa, se atiende al encoder incremental, tomándose como



INTRODUCCIÓN

posición de origen la correspondiente al primer pulso de marca de cero que aquel genere.

Los encoders pueden presentar problemas mecánicos debidos a la gran precisión que se debe tener en su fabricación. La contaminación ambiental puede ser una fuente de interferencias en la transmisión óptica. Son dispositivos particularmente sensibles a golpes y vibraciones, estando su margen de temperatura de trabajo limitado por la presencia de componentes electrónicos [3].



SISTEMA EXPERIMENTAL

2. Sistema experimental



SISTEMA EXPERIMENTAL

2. Sistema experimental

2.1 Descripción del robot Sidemar.

El conjunto mecánico

El robot Sidemar consta de 2 brazos que proporcionan, junto con los motores y los reductores, la capacidad de movimiento rotativo. Es un sistema articulado de dos grados de libertad, siendo ambos de rotación con una capacidad de giro de 360°.

El primer movimiento de rotación (brazo inferior) se debe a la actuación combinada del motor Maxon DC RE36 y el reductor Harmonic Drive HFUC-20-160-2UH.

El segundo movimiento (rotación brazo superior) es proporcionado al conjunto moto-reductor compuesto por el motor Faulhaber 2444-024B acoplado al Harmonic Drive HFUC-14-100-2UH.

Ambos brazos están fabricados en aleación de aluminio muy ligera pero que cumple los requisitos de rigidez exigido para el funcionamiento del sistema. Además, la configuración geométrica de los mismos, formada por cuatro tubos, hace que no sea necesario emplear mucha cantidad de material reduciendo aun más el peso y obteniendo una estructura con mayor rigidez (ver figura 14).

Por último queda decir que la base del robot esta fijada mediante tornillos aun perfil de aluminio con raíles que permiten desplazar longitudinalmente el robot por este. La barra a la cual se atornilla el Sidemar será fijada a la mesa con mordazas tal como se puede ver en la figura 15.

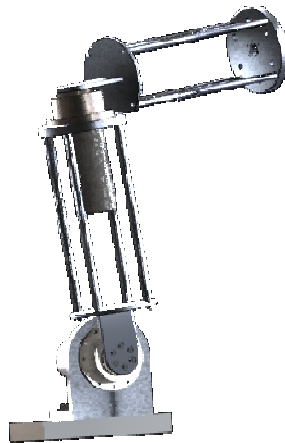


Figura 14. Modelo 3D del robot Sidemar

SISTEMA EXPERIMENTAL

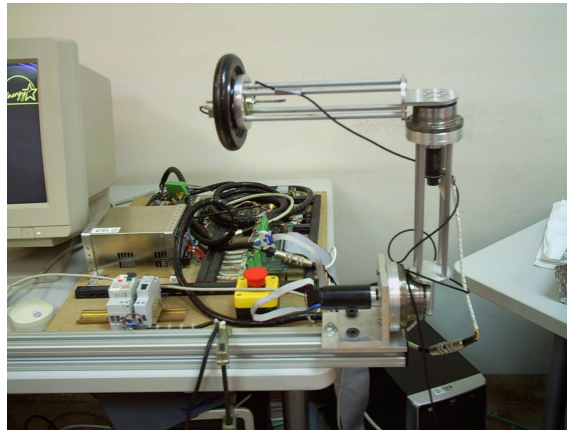


Figura 15 montaje real del robot Sidemar

2.1.1 Reductores

A continuación se exponen las características técnicas de los reductores que transmiten el movimiento desde el eje motriz a la articulación de cada uno de los eslabones.

Estos consisten en una caja circular con dentado interior (*circular spline*) dentro del cual va montado un engranaje flexible con forma anular (*flexpline*) que es impulsado por un disco interior que al girar hace que el *flexpline* engrane con el *circular spline* y lo hace rotar. Para tener una visión más clara del conjunto véase la imagen 16.

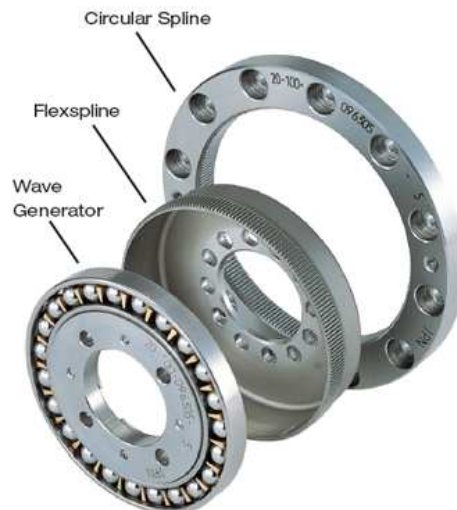


Figura 16. Conjunto *harmonic drive*

El dato clave de los reductores es su relación de transmisión que más adelante necesitaremos para llevar a cabo los cálculos de la posición en función del ángulo girado por los motores [4].

**SISTEMA EXPERIMENTAL****Tabla 1 reductor *harmonic drive* acoplado al motor 1 (primera articulación)**

HFUC-20-160-2UH:		
Relación de transmisión		1:160
Limite para tensión de pico repetitiva (Nm)		92
Limite para par medio (Nm)		49
Relación de par a 2000 rpm (Nm)		40
Limite de par de pico instantáneo (Nm)		147
Velocidad de entrada máxima (rpm)	Lubricación por aceite	10000
	Lubricación por grasa	6500
Momento de inercia (Kg.m²)		0.193 10 ⁻⁴
Eficiencia a 500 rpm y 30° C (%)	Lubricación por aceite	81
	Lubricación por grasa	82
Peso		0.98

Tabla 2 reductor *harmoni drive* acoplado al motor 2 (segunda articulación)

HFUC-14-100.2UH:		
Relación de transmisión		1:100
Limite para tensión de pico repetitiva (Nm)		28
Limite para par medio (Nm)		11
Relación de par a 2000 rpm (Nm)		7.8
Limite de par de pico instantáneo (Nm)		54
Velocidad de entrada máxima (rpm)	Lubricación por aceite	14000
	Lubricación por grasa	8500
Momento de inercia (Kg.m²)		0.033 10 ⁻⁴
Eficiencia a 500 rpm y 30° C (%)	Lubricación por aceite	86
	Lubricación por grasa	78
Peso		0.49

**SISTEMA EXPERIMENTAL****2.1.2 Motores paso a paso eléctricos****Tabla 3. Especificaciones del motor Maxon**

Maxon	
Tensión nominal (V)	24
Potencia de salida (W)	70
Corriente en vacío (mA)	0.5
Corriente nominal (A)	2.25
Corriente de arranque (A)	21.5
Par nominal (mNm)	78.2
Rendimiento (%)	85
Constante de tiempo mecánica (ms)	5.89
Inercia del rotor (gcm²)	69.9
Peso (g)	350

Tabla 4. Especificaciones del motor Faulhaber

Faulhaber	
Tensión nominal (V)	24
Potencia de salida (W)	36
Corriente en continua (A)	1.37
Constante de corriente (A/mNm)	0.102
Velocidad máxima (rpm)	38000
Par máximo a 30000rpm (mNm)	11.4
Rendimiento (%)	77
Constante de tiempo mecánica (ms)	14
Inercia del rotor (gcm²)	6.5
Peso (g)	100

SISTEMA EXPERIMENTAL

En primer lugar, necesitaremos tomar los datos de aceleraciones en el extremo del robot y para ello dispondremos de ciertos equipos y sensores que mas adelante describiremos con más detalle.

Los experimentos consistirán en realizar una serie de movimientos con el robot, que nos resulten interesantes para nuestras comprobaciones.

2.2 Descripción de la cadena de medida.

Como ya hemos dicho, las aceleraciones serán tomadas mediante un acelerómetro piezo-eléctrico que devuelve un potencial eléctrico proporcional a la aceleración a la que está sometido el sensor. Debido a que la señal eléctrica arrojada por el acelerómetro es muy débil, nos veremos en la necesidad de amplificarla mediante un amplificador con una ganancia de 10. Ya acondicionada la señal, será enviada a uno de los puertos de la tarjeta de adquisición de datos que a su vez envía la información vía USB a un PC donde será procesada y almacenada.

A continuación se muestra un esquema del montaje figura 17 de la cadena de medida.



Figura 17. Esquema de la cadena de medida

Ahora definiremos con más detalle los equipos para la toma de datos anteriormente descritos:

2.2.1 Acelerómetro triaxial KS943B.10

Este dispositivo será el encargado de convertir la magnitud física (aceleración) en una señal eléctrica que, previo acondicionamiento, será almacenada en el ordenador.

A continuación detallaremos en la tabla 5 las características principales del acelerómetro que vamos a utilizar (ver figura 18) [7].



Figura 18: acelerómetro KS943B.10



SISTEMA EXPERIMENTAL

TABLA 5. Características del acelerómetro KS943B.10

		KS943B.10
Salida		IEPE
Tipo de diseño piezo-electrico		<i>Shear desing</i>
Sensibilidad del voltaje	B_{ua}	$10 \pm 15\%$
Rango	a_+ / a_-	600
Limite de destrucción	a_{max}	8000
Rango de frecuencia lineal	f_{3dB} $f_{10\%}$ $f_{5\%}$	0,2...22000 0,4...17000 0.6...15000
Frecuencia de resonancia	f_r	>42(25 dB)
Sensibilidad transversal	Γ_{90MAX}	>5
Ruidos residuales (RMS 3Hz-50KHz)	a_n banda ancha	>3000
Densidad de ruido	0,1Hz a_{n1} 1Hz a_{n2} 10Hz a_{n3} 100Hz	300 100 30 10
Corriente constante auxiliar	I_{CONST}	2...20
Voltaje Bias de salida	U_{BIAS}	12...14
Impedancia de salida	r_{out}	>150
Características ambientales		
Rango de temperatura	T_{min} / T_{max}	-20/120
Coefficiente de sensibilidad por temperatura	-20...20°C $TK(B_{-a})$ 20...80°C 80...120°C	0,05 $\pm 0,02$ -0,06
Temperature transiet sensitivity	b_{at}	0,03
Datos mecánicos		
Peso sin cable	m	14/0,5
Material de la carcasa		Aluminio
Conector		Binder 707
Orificios de montaje		M3(Y), M3(Z)

2.2.2 Tarjeta de adquisición KUSB-3100

Como ya se dijo anteriormente, los datos del acelerómetro serán almacenados en un ordenador y para ello necesitaremos la tarjeta de adquisición KUSB-3100 (figura 19) la cual adecuara la señal de salida del acelerómetro a una señal digital que se introducirá en el PC mediante puerto USB. También detallaremos las especificaciones de la tarjeta en la tabla 6 [10].

SISTEMA EXPERIMENTAL



Figura 19: tarjeta adquisición KUSB-3100

TABLA 6. Características de la tarjeta adquisición KUSB-3100

	KUSB-3100
Descripción	Bajo coste-multifunción
Resolución	12 bits
Canales Analógico de Entrada	50k _s / s
Canales Analógicos de Salida	2
Canales Digitales I/O	16
Contadores/Timers	1
Ganancia	1,2,4,8
Conectividad	clema

2.2.3 tarjeta PMAC

La PMAC (Programable MultiAxis Controller) (puede verse en la figura 20), fabricada por Delta Tau Data Systems, es una tarjeta de control de ejes con una serie de funciones entre las que cabe destacar.

- Interpolación y seguimiento de la trayectoria de cada eje.
- Cierre del bucle de control para los ejes del robot.
- Inspección de los ejes controlados y de las variables de importancia para el ensayo como pueden ser las de posición o velocidad.
- Ejecutar las instrucciones dadas a la tarjeta mediante programas.



Copyright © 1999-2008 Artisan Scientific

Figura 20. Tarjeta PMAC lite.

Entre las características de la tarjeta PMAC la más importante es la segunda. La PMAC es capaz de modificar los parámetros de los diferentes ejes de forma individual.



SISTEMA EXPERIMENTAL

La tarjeta es capaz de controlar 8 ejes aunque es recomendable trabajar con 4, cada uno de los cuales puede tener su propio sistema de coordenadas. Otra de las ventajas es la forma de conexión al PC, ya que se puede instalar en la propia placa base del ordenador o a través de los puertos serie RS-232 o RS-422.

La PMAC posee su propia CPU (Motorola DSP56002) que realiza los cálculos pedidos para cada uno de los ejes, lo que hace que la PMAC pueda considerarse como un ordenador, bien independiente bien controlado por un ordenador externo mediante puerto serie o internamente. En la tabla 7 y en la 8 se muestran las especificaciones técnicas más importantes de la PMAC [4].

Tabla 7. Especificaciones de la tarjeta PMAC

Tiempo de ciclo servo	Mínimo 55 μ s por eje controlado (ajustable por puentes)
Servo algoritmo	PID con prealimentación de velocidades y aceleración.
	Todas las ganancias con resolución de 24 bits
Tiempo de actualización	Mínimo de 27 μ s (un motor conmutado)
Tiempo de conmutación	Mínimo 110 μ s (8 ejes, 4 motores conmutados)
Rango de velocidades	0.0001 a 10.000.000 cuentas de encoder.
Precisión en la velocidad	Palabra larga: 0.002% precisión absoluta
	Palabra corta: (dependiente del sistema) típica 0.2% a 1%
Rango de posición	± 2 billones de cuentas mínimo (32 bits)
Precisión en la posición	± 1 cuenta
Precisión en la captura de la posición	± 1 cuenta a cualquier velocidad
Sincronización	Ejes con el mismo sistemas de coordenadas están perfectamente sincronizados. Ejes en diferentes sistemas de coordenadas se pueden sincronizar con ± 2 ms. Sistemas de coordenadas en PMACs distintas compartiendo la misma SYNC se sincronizan con ± 1 servo ciclo de error



SISTEMA EXPERIMENTAL

Tabla 8. Especificaciones técnicas de la tarjeta PMAC

CPU	Dsp	Motorola DSP56002
	Velocidad del reloj	20 MHz. Esta velocidad puede cambiarse por hardware a 40 0 60 MHz cambiando la disposición de puente E48
	Arquitectura hardware	Doble bus de datos internos de 24 bits (x: e y:)
Consumo	Potencia digital	2A @ +5V ($\pm 5\%$) (10W)
	Potencia analógica	0.3A @ +12...+15V (4.5W) 0.24A @ -12...-15V (3.8W)
Memoria		2 KB EEPROM de memoria no volátil para almacenamiento de los parámetros de configuración.
		384 KB RAM
		512 KB EPROM (ROM) firmware para el control maestro de programas

2.3 Software utilizado

A continuación se describen los programas informáticos utilizados para el tratamiento de los datos obtenidos en los ensayos.

Estos fueron utilizados para mover el robot, almacenar datos y hacer los cálculos necesarios para realizar el estudio.

2.3.1 Test Pointtm:

Test Pointtm es un programa creado para la captación, análisis y proceso de datos industriales que permite un manejo sencillo de grandes volúmenes de números.

La tarea de procesamiento de los datos obtenidos en procesos industriales no suele ser sencilla, por eso es necesario un programa capaz de facilitarnos la tarea, tomando esto como premisa, el programa permite un manejo simple basado en una programación modular, es decir *Test Pointtm* dispone de programas más básicos capaces de combinarse y/o modificarse. La programación se hará de una manera gráfica, de modo que bastará con arrastrar con el puntero del ratón el icono de la función que deseemos hasta la ventana principal.

El uso modular además permite una mejor depuración del programa y una rápida generación de procesos de adquisición y análisis.

Test Pointtm posee la capacidad de generar interfaces visuales, pudiendo representar los datos en diversos formatos tales como indicadores de textos, gráficos de barras, etc., que lo hacen muy valioso a la hora de evaluar los rangos de medida del proceso y que nos ayudara a seguir mejor y más rápido el proceso estudiado [5].



SISTEMA EXPERIMENTAL

Las principales capacidades de *Test Pointtm* son:

- Creación de interfaces de usuario
- Análisis y procesado de datos (tanto analógicos como digitales)
- Control de sistemas externos
- Intercambio de datos mediante el sistema Windows
- Entrada y salida de datos

2.3.2 MATLAB[®]

MATLAB[®] (abreviatura de MATrix LABoratory, "laboratorio de matrices") es un software matemático que ofrece un entorno de desarrollo integrado (IDE) con un lenguaje de programación propio (lenguaje M). Está disponible para las plataformas Unix, Windows y Apple Mac OS X [6].

Entre sus prestaciones básicas se hallan: la manipulación de matrices, la representación de datos y funciones, la implementación de algoritmos, la creación de interfaces de usuario (GUI) y la comunicación con programas en otros lenguajes y con otros dispositivos hardware. El paquete MATLAB[®] dispone de dos herramientas adicionales que expanden sus prestaciones, a saber, Simulink (plataforma de simulación multidominio) y GUIDE (editor de interfaces de usuario - GUI). Además, se pueden ampliar las capacidades de MATLAB[®] con las cajas de herramientas (toolboxes); y las de Simulink con los paquetes de bloques (blocksets).

Es un software muy usado en universidades y centros de investigación y desarrollo. En los últimos años ha aumentado el número de prestaciones, como la de programar directamente procesadores digitales de señal o crear código VHDL .



DESARROLLO DEL PROYECTO

3. Desarrollo del proyecto



DESARROLLO DEL PROYECTO

3. Desarrollo del proyecto

3.1 Calculo de la posición teórica

Para calcular la posición real en la que se encuentra el extremo final del robot, se ha desarrollado una rutina en MATLAB[®] que, mediante la introducción de los pasos de encoder obtenidos para cada uno de los motores (y registrados en un archivo de texto), nos arrojará, en coordenadas absolutas, la posición.

A continuación se describe el algoritmo matemático del que nos valemos para el propósito anteriormente mencionado, determinar la posición real del robot:

En principio, definiremos los ejes solidarios a cada eslabón del robot y mediante los cuales estudiaremos la posición del extremo del mismo.

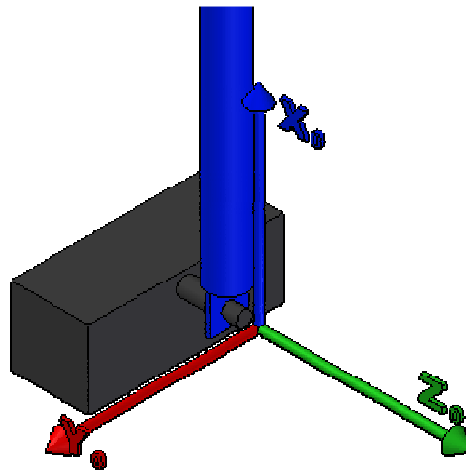


Figura 21 sistema de coordenadas absoluto

Como se observa en la figura 21, el eje absoluto (sobre el cual determinaremos la posición) se encuentra fijado en la base de la maquina. El eje z es colineal con el eje de giro de la primera articulación. El eje x tiene la dirección vertical y sentido hacia arriba. De este modo tenemos el sistema de referencia completamente determinado.

El segundo sistema lo anclaremos al primer eslabón a la altura de la segunda articulación del robot de la manera que se observa en la figura 22.

DESARROLLO DEL PROYECTO

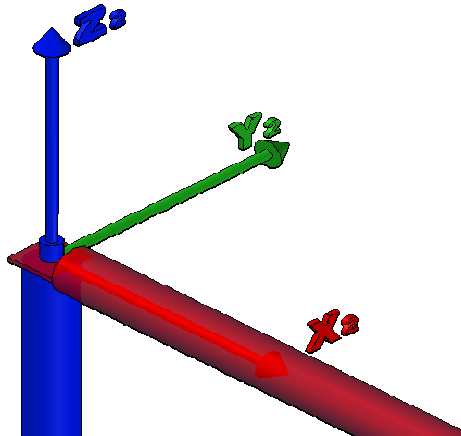


Figura 22. Sistema de coordenadas móvil

De nuevo el eje z comparte la dirección del eje de giro y consentido hacia arriba, mientras el eje x tiene la dirección del eje del eslabón y con dirección desde la articulación al extremo libre (ver figura 22).

Una vez definidos los sistemas de referencia que usaremos, procederemos a la elaboración de las ecuaciones que definan la posición del extremo de la máquina [8].

Eje x :

Observando el robot en una posición cualquiera, en vista frontal (Figura 23).

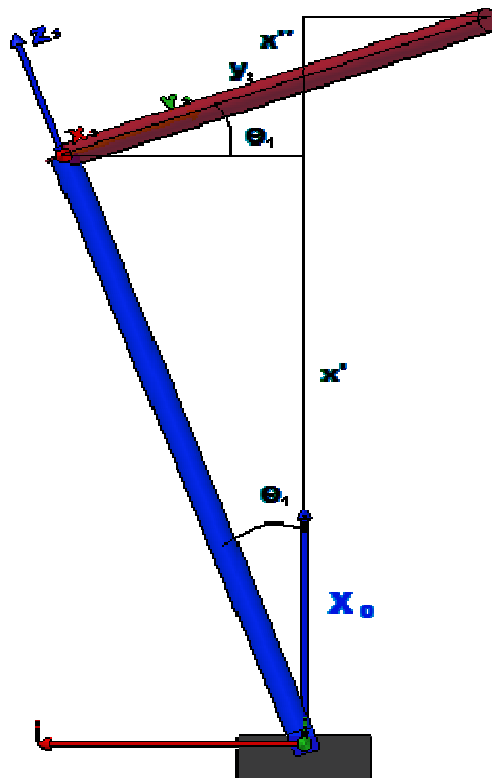


Figura 23. Vista frontal

DESARROLLO DEL PROYECTO

Deducimos que el valor de la coordenada X_0 será la suma de los valores x' y x'' , donde

$$\boxed{x' = l_1 \cdot \cos \theta_1} \quad (1)$$

$$\boxed{x'' = y_2 \cdot \text{sen} \theta_1} \quad (2)$$

$$\boxed{y_2 = l_2 \cdot \text{sen} \theta_2} \quad (3)$$

En las ecuaciones (1) y (3), l_1 y l_2 representan la longitud del eslabón primero y segundo respectivamente tal como puede verse en la figura 24.

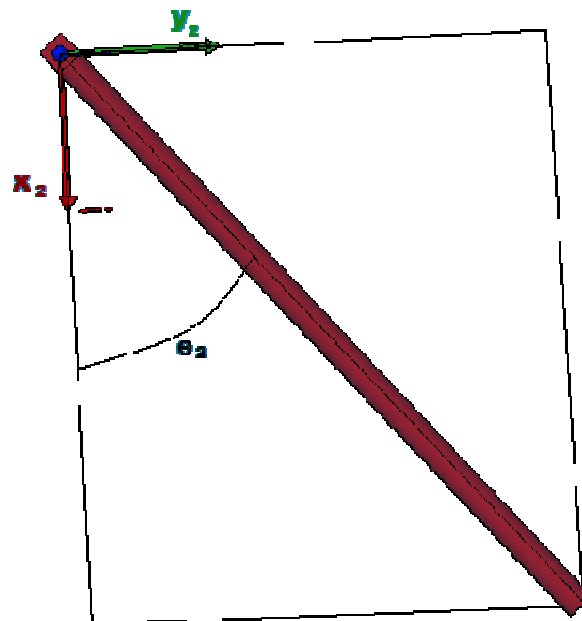


Figura 24. Vista en planta

Finalmente la expresión quedara:

$$\boxed{X_0 = x' + x'' = l_1 \cdot \cos \theta_1 + y_2 \cdot \text{sen} \theta_1 = l_1 \cdot \cos \theta_1 + l_2 \cdot \text{sen} \theta_2 \cdot \text{sen} \theta_1} \quad (4)$$

Eje y:

Ahora abordaremos el caso de la coordenada del extremo del robot en el eje y. Al igual que antes, nos basaremos en un desarrollo geométrico para hallar la ecuación que denote esta coordenada, siendo las variables de las ecuaciones (5) y (6) los ángulos de giro θ_1 y θ_2 de los motores. Si observamos el diagrama de la figura 25, nos damos cuenta que la coordenada Y_0 es igual a la suma de y' e y'' . Con lo cual habremos de calcular estas dos mediante relaciones trigonométricas que serán:

DESARROLLO DEL PROYECTO

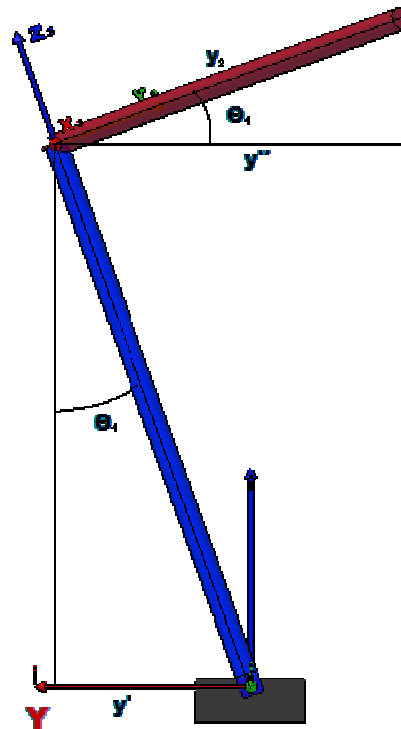


Figura 25. Componentes de Y_0

$$y' = l_1 \cdot \text{sen } \theta_1 \quad (5)$$

$$y'' = y_2 \cdot \text{cos } \theta_1 \quad (6)$$

Eje z:

Por ultimo la aposición de la coordenada z que será igual a la ecuación:

$$Z_0 = l_2 \cdot \text{cos } \theta_2 \quad (7)$$

Para comprobar la validez de nuestras ecuaciones de posición, se ha calculado la posición del robot a partir de un fichero que almacenó los pasos de encoder girados por cada motor en un movimiento en el que solo intervino la articulación 2 y se ha representado en una grafica (figura 26). Se observa que la progresión de cada una de las coordenadas se corresponde a un movimiento circular.

DESARROLLO DEL PROYECTO

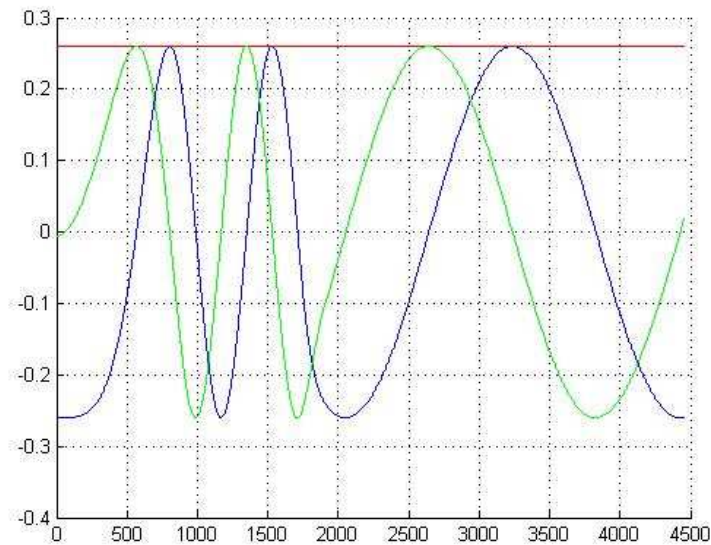


Figura 26. Resultado de la ecuación

3.2 Estimación de la posición real.

Como se expuso en el primer capítulo, el fin del presente proyecto es la determinación de la posición real del extremo del robot mediante un acelerómetro. De manera que, para lograr este objetivo, nos basaremos en el método que desarrolla a continuación.

1. Se considera que el robot se trata de una viga la empotrada en uno de sus extremos y libre en el otro, en el cual se aplica una fuerza tal como se observa en la figura 27.

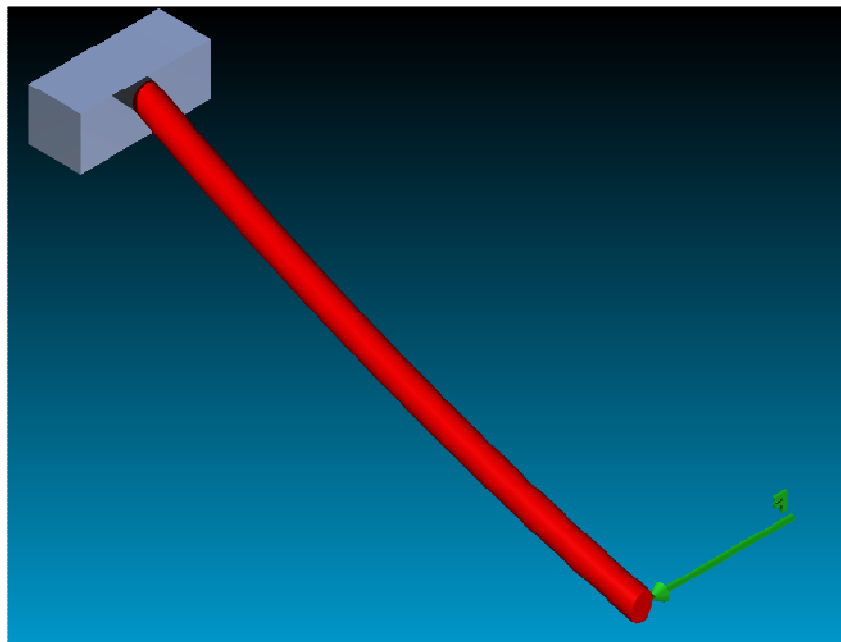


Figura 27. Esquema de barra flectada

DESARROLLO DEL PROYECTO

Lo que en realidad se obtendrá es el ángulo que ha girado el extremo libre respecto al empotrado por efecto de fenómenos de elasticidad [8] y, posteriormente, sumaremos dicha deformación angular al ángulo medido mediante encoder en ese mismo instante. Después tan solo habrá que calcular la posición en los ejes cartesianos usando las ecuaciones (4), (5) y (6).

Deformación angular.

Como puede verse en la figura 28, Se observa que el brazo del Sidemar está constituido por varias secciones.

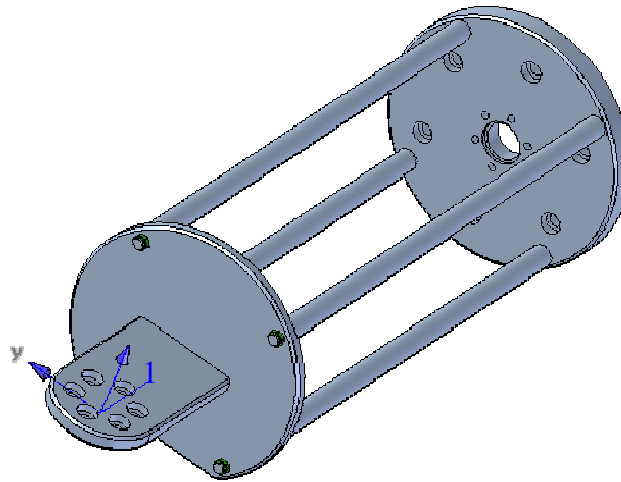


Figura 28. Brazo del robot

La sección 1 será la que se fija al motor, la 2 será la inmediatamente después del anclaje al eje del motor que tienen forma de círculo truncado en la parte inferior. A continuación están las cuatro barras en disposición cuadrada y por último el disco en el cual van a parar las barras y en donde instalamos nuestro acelerómetro.

Debido a que la sección no es continua, la deformación no será constante a lo largo del brazo y variará en función de los distintos momentos de inercia de cada sección. Por lo cual habrá que calcular en cada una de ellas la deformación de manera aislada y posteriormente hacer el sumatorio de todas ellas.

Distribución de momentos flectores.

Empezaremos calculando la ley de momentos flectores [8] a lo largo del conjunto indicando su diagrama correspondiente. Como equiparamos el brazo a una viga en voladizo con una carga aplicada en el extremo libre, la ecuación del momento flector será:

$$M(x) = F \cdot x \quad (7)$$

DESARROLLO DEL PROYECTO

Donde x tendrá origen en el extremo libre y evolucionara hasta el otro extremo. F será la fuerza de inercia que tiene el conjunto, es decir, la masa multiplicada por la aceleración medida en el acelerómetro.

A continuación se muestra el diagrama de momentos flectores en el brazo en la figura 29.

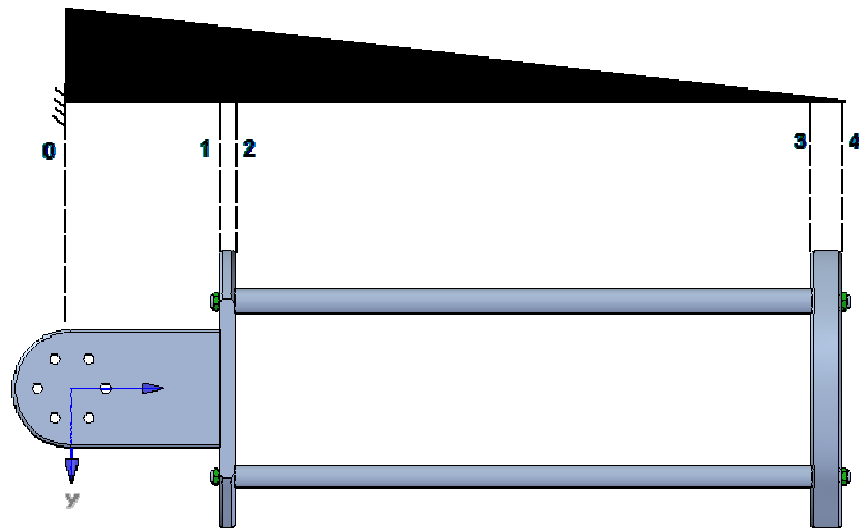


Figura 29. Esquema de barra flectada

Se observa que se han marcado 4 tramos en el conjunto del eslabón de Sidemar correspondientes a cada una de las secciones que nos encontramos. Tendremos que dividir el diagrama de momento de flectores en las 4 secciones y calcular sus valores extremos, lo que viene a decir que habrá que conocer el flector en el punto 0,1,2,3 y 4. Únicamente bastaría con sustituir en la ley de momentos la distancia desde 4 hasta el punto en cuestión para conocer el valor que necesitamos.

DESARROLLO DEL PROYECTO

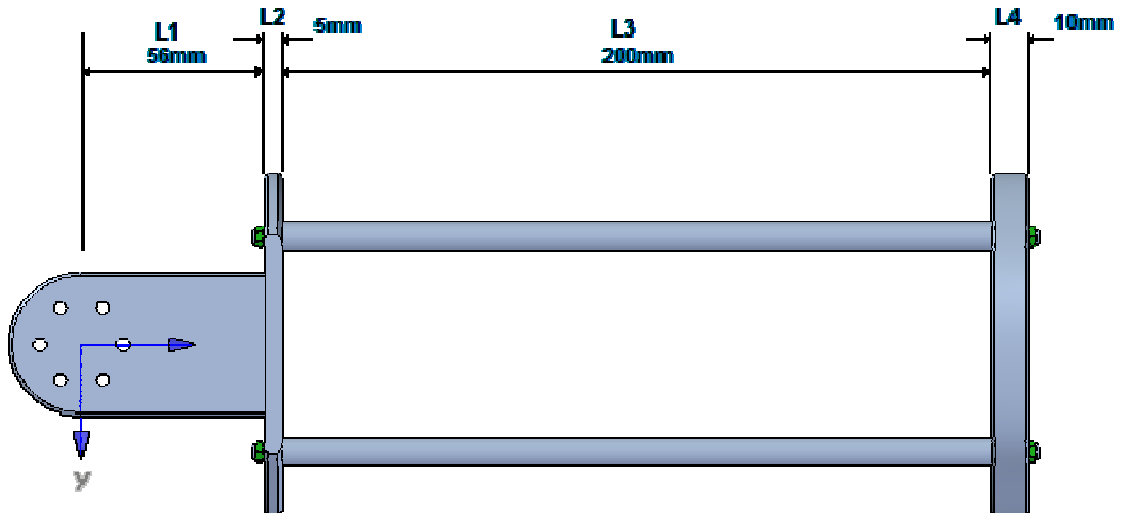


Figura 30. Esquema de barra flectada

En el anterior diagrama de la figura 30 podemos ver las cotas de cada uno de los elementos del brazo. Una vez conocidos estos datos podremos proceder al cálculo de los momentos flectores en cada uno de los 4 puntos que marcamos anteriormente y que son:

$$\begin{aligned}
 M_0 &= F \cdot L_0 = F \cdot 0,271m \\
 M_1 &= F \cdot L_1 = F \cdot 0,215m \\
 M_2 &= F \cdot L_2 = F \cdot 0,21m \\
 M_3 &= F \cdot L_3 = F \cdot 0,01m \\
 M_4 &= F \cdot L_4 = F \cdot 0m = 0
 \end{aligned}
 \tag{8}$$

Ahora mediante el teorema de Mohr [8] que relaciona el giro deformado con el momento flector aplicado, calcularemos el giro en cada sección pero habremos de conocer la distribución de los flectores en cada tramo ya que será necesario calcular la superficie del diagrama.

Observamos que los tramos 0-1, 1-2 y 2-3 tienen una distribución como la que se representa a continuación:

DESARROLLO DEL PROYECTO

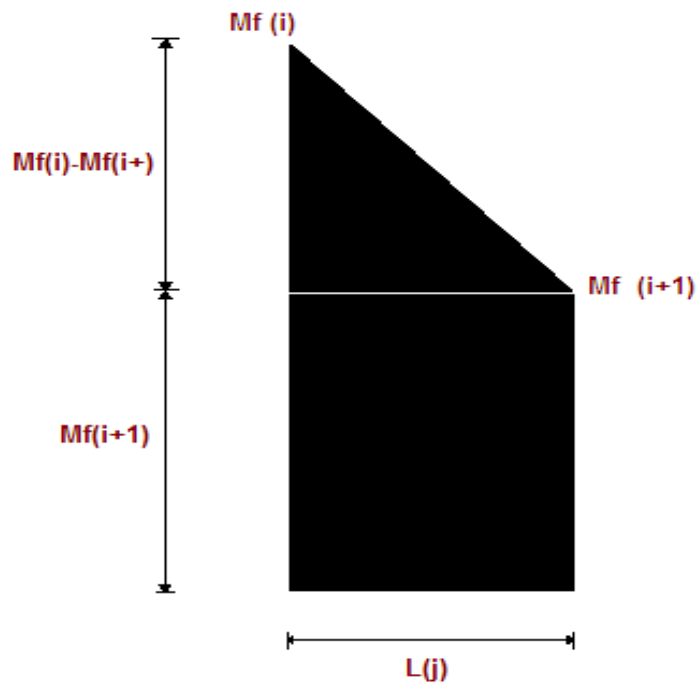


Figura 31. Áreas del diagrama de flectores

Estará formado por un cuadrado y sobre este un triángulo rectángulo (ver figura 31). La altura del rectángulo será el valor del momento flector en la sección más cercana al extremo. La del triángulo será la diferencia entre el flector más alejado del extremo y el más cercano.

El ancho será la longitud de la sección.

En el tramo 3-4 el diagrama simplemente consistirá en un triángulo rectángulo cuya altura corresponderá al momento flector en el punto 3.

Teorema De Mohr

A continuación expondremos las ecuaciones de deformación angular según el teorema de Mohr correspondiente a cada uno de los tramos del brazo:

$$\theta_{0-1} = \frac{M_1 \cdot L_1}{E \cdot I_1} + \frac{(M_0 - M_1) \cdot L_1}{2 \cdot E \cdot I_1} \quad (9)$$

$$\theta_{1-2} = \frac{M_2 \cdot L_2}{E \cdot I_2} + \frac{(M_2 - M_1) \cdot L_2}{2 \cdot E \cdot I_2} \quad (10)$$

$$\theta_{2-3} = \frac{M_3 \cdot L_3}{E \cdot I_3} + \frac{(M_2 - M_3) \cdot L_3}{2 \cdot E \cdot I_3} \quad (11)$$

$$\theta_{3-4} = \frac{M_3 \cdot L_4}{2 \cdot E \cdot I_4} \quad (12)$$

DESARROLLO DEL PROYECTO

El sumatorio de todas estas ecuaciones nos dará como resultado el giro provocado por la fuerza de inercia:

$$\theta_{elastico} = \theta_{0-1} + \theta_{1-2} + \theta_{2-3} + \theta_{3-4} \quad (13)$$

Aun no conocemos los parámetros E e I. Estos son respectivamente el modulo de Young del material (para el aluminio en nuestro caso) y las I se refieren al momento de inercia de la estructura en cada una de la secciones [8].

Cálculo de los Momentos de inercia

En primer lugar tenemos la sección rectangular que se observa en la figura 32.

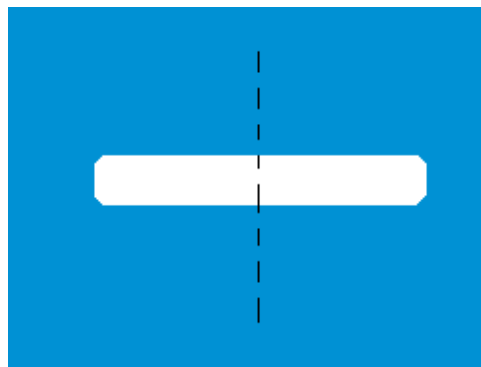


Figura 32. Corte sección 1

$$I_1 = \frac{40mm^3 \cdot 6mm}{12} = 32000mm^4 \quad (14)$$

La sección 2 es una circunferencia truncada por la parte inferior (figura 33):

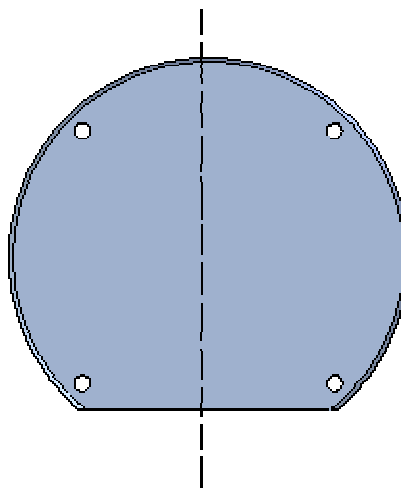


Figura 33. Corte sección 2

DESARROLLO DEL PROYECTO

$$I_2 = \frac{R^4 \cdot \pi}{4} = \frac{47mm^4 \cdot \pi}{4} = 3832492.49mm^4 \quad (15)$$

Para la sección 4 (figura 34) habrá que hallar el momento de inercia de cada varilla y mediante el teorema de Steiner calcularlo respecto al eje central:

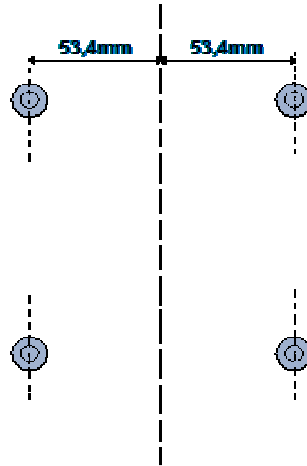


Figura 34. Corte sección 4

El momento de inercia de cada barra por separado es:

$$I_{varilla} = \frac{R^4 \cdot \pi}{4} = \frac{4mm^4 \cdot \pi}{4} = 201.06mm^4 \quad (16)$$

Ahora aplicamos el teorema de Steiner [9]:

$$I_{varilla_ejemedio} = I_{varilla} + A_{varilla} \cdot d^2 = 201.06mm^4 + 50.26mm^2 \cdot (26.7mm)^2 = 36034,82mm^4 \quad (17)$$

Como las cuatro varillas están a la misma distancia del eje medio bastará con multiplicar por cuatro el momento de inercia $I_{varilla_ejemedio}$

$$I_3 = 4 \cdot I_{varilla_ejemedio} = 4 \cdot 36034,82mm^4 = 144139,29mm^4 \quad (18)$$

DESARROLLO DEL PROYECTO

La sección 3 es simplemente una circunferencia como se ve en la figura 35:

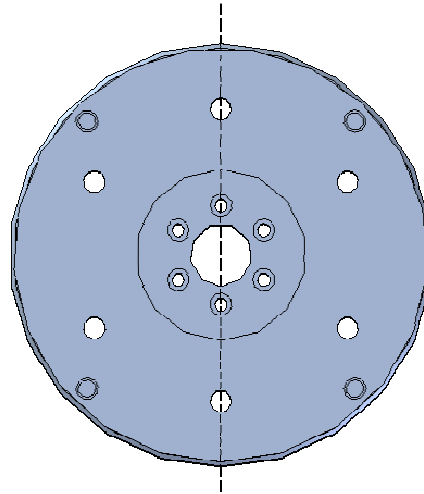


Figura 35. Sección 3

Tendremos que restar el agujero central:

$$I_4 = \frac{R_{disco}^4 \cdot \pi}{4} - \frac{R_{agujero}^4 \cdot \pi}{4} = \frac{(R_{disco}^4 - R_{agujero}^4) \cdot \pi}{4} = \frac{((34mm)^4 - (7mm)^4) \cdot \pi}{4} = 1051441,58mm^4$$

(19)

Ahora conocemos todos los datos para calcular el giro del extremo libre del brazo, sustituiremos en la ecuación de $\theta_{elastico}$.

$$\theta_{0-1} = \frac{M_1 \cdot L_1}{E \cdot I_1} + \frac{(M_0 - M_1) \cdot L_1}{2 \cdot E \cdot I_1} = \frac{m \cdot a \cdot 0.052m}{(6.3 \cdot 10^{10} N/m^2) \cdot (3.2 \cdot 10^{-8} m^4)} \cdot \left(0.215m + \frac{0.271m - 0.215m}{2}\right)$$

(20)

$$\theta_{1-2} = \frac{M_2 \cdot L_2}{E \cdot I_2} + \frac{(M_1 - M_2) \cdot L_1}{2 \cdot E \cdot I_2} = \frac{m \cdot a \cdot 0.005m}{(6.3 \cdot 10^{10} N/m^2) \cdot (3.83 \cdot 10^{-6} m^4)} \cdot \left(0.21m + \frac{0.215m - 0.21m}{2}\right)$$

(21)

$$\theta_{2-3} = \frac{M_3 \cdot L_3}{E \cdot I_3} + \frac{(M_2 - M_3) \cdot L_1}{2 \cdot E \cdot I_3} = \frac{m \cdot a \cdot 0.2m}{(6.3 \cdot 10^{10} N/m^2) \cdot (1.44 \cdot 10^{-7} m^4)} \cdot \left(0.01m + \frac{0.21m - 0.01m}{2}\right)$$

(22)

$$\theta_{3-4} = \frac{M_3 \cdot L_4}{2 \cdot E \cdot I_4} = \frac{m \cdot a \cdot 0.01m}{(6.3 \cdot 10^{10} N/m^2) \cdot (1.04 \cdot 10^{-6} m^4)} \cdot (0.01m) \quad (23)$$



RESULTADOS EXPERIMENTALES

4. Resultados experimentales



RESULTADOS EXPERIMENTALES

4. Resultados experimentales

Para las primeras pruebas, con el fin de comprobar la metodología de ensayo, sólo haremos girar el motor superior (Faulhaber 2444-024B) y tomaremos los datos en el eje colineal con el del eslabón superior (figura 36).

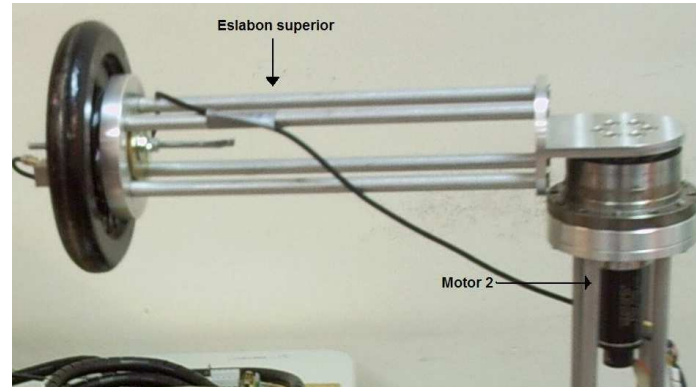


Figura 36. Eslabón superior y motor 2

El procedimiento seguido para la toma de datos es el siguiente:

Primero se selecciona el número de pasos de encoder que girará el motor seleccionado, en el software de control de la tarjeta PMAC, este programa almacenará en un fichero la posición del encoder en cada instante de tiempo así como la señal que es enviada al motor para efectuar el giro.

A continuación se configura la duración del ensayo y la frecuencia de adquisición en el software de adquisición. En este caso será el programa creado en *Test Pointtm* el encargado de recoger la información que proporciona la tarjeta de adquisición.

Una vez configurado todo procederemos a inicializar ambos programas y se arranca con el ensayo.

4.1 Primer ensayo. Robot sin carga:

Se programará un giro de 360°, decir a qué velocidad con una frecuencia de muestreo para el acelerómetro de 1000Hz durante 10 segundos lo que supone que obtendremos 10000 muestras.

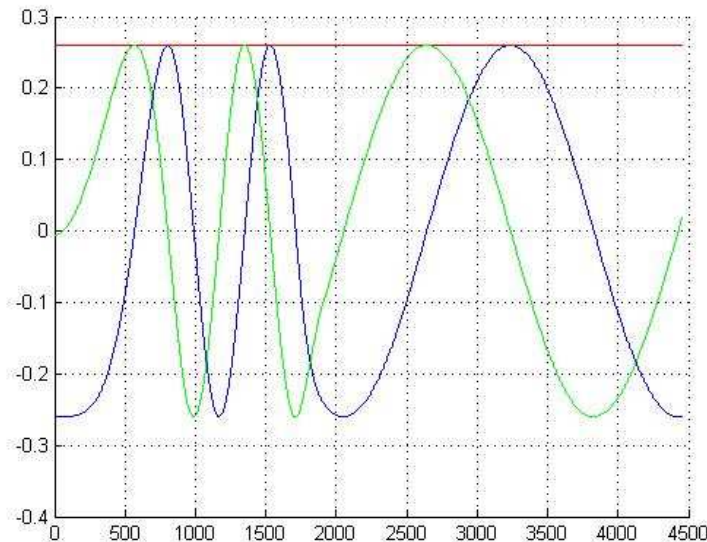
Como resultado para el análisis del movimiento se obtienen dos ficheros, el primero contiene la información arrojada por los encoders de los motores y en el segundo se almacenan las aceleraciones de dos ejes del acelerómetro (uno de ellos colineal con el eslabón del Sidemar) para obtener la aceleración tangencial del extremo del robot.

Con esta información, se comprueba el correcto funcionamiento del código en MATLAB[®]. Analizaremos si los resultados son verosímiles o por el contrario se desvían de lo esperado.

RESULTADOS EXPERIMENTALES

Tenemos Programado en el código la representación de 2 gráficas, la primera (grafica 1) representa la posición teórica calculada directamente con la información de los encoders. La otra (grafica 2) representa la posición angular real junto con la teórica.

Los primeros resultados se han calculado suponiendo que el brazo tiene toda su masa en el extremo:



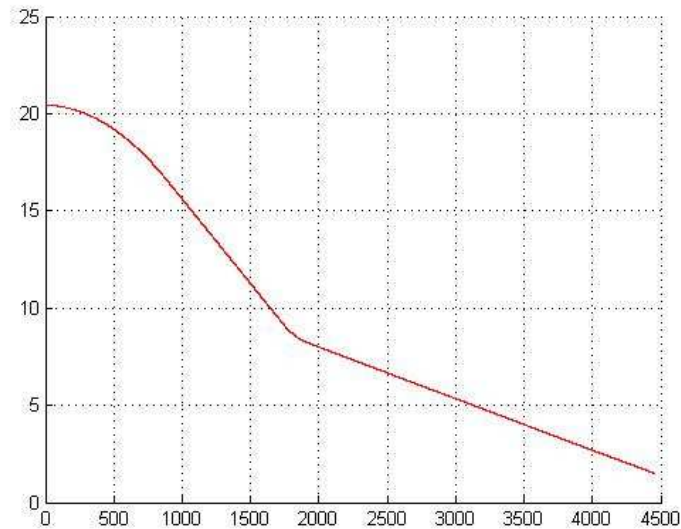
Grafica 1. Posición teórica a partir de la información de los encoders en los tres ejes (rojo: x ,azul: z, verde: y)

En la gráfica 1, la línea roja representa la evolución de la posición en el eje x, la verde en el eje z y la azul en y.

Puede comprobarse que, al moverse únicamente el motor 2, solo varían las coordenadas en el z e y, ya que el brazo rota en este plano. Con respecto a la coordenada x se mantiene constante con el valor de la longitud del brazo 1.



RESULTADOS EXPERIMENTALES



Gráfica 2 Ángulo teórico y real girado por el eslabón 2 (eje y ángulo en radianes, eje x número de muestra)

En la grafica 2 se representa en azul el ángulo teórico girado por el extremo del robot y en rojo el ángulo real.

Se puede observar que las dos curvas quedan solapadas, esto quiere decir que los valores de la deformación a la que es sometido el brazo por efecto de las aceleraciones son muy pequeñas.

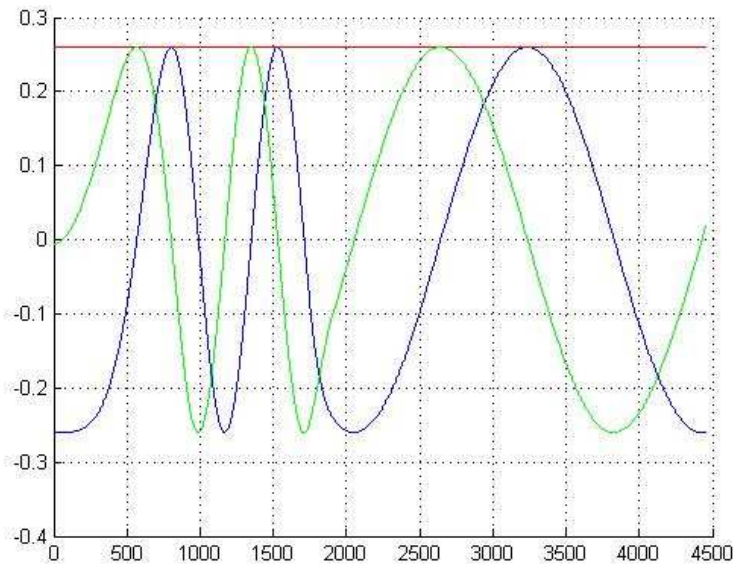
Extraeremos unas muestras de los vectores de ángulo real y ángulo teórico para comparar sus magnitudes.

El elemento numero 1000 del vector de ángulos teóricos P11 vale 15.6091 mientras que en la misma posición del vector de giros reales P22 alcanza un valor de 15.6091.

No ha variado nada aparentemente, ahora extraeremos el valor de la deformación angular para el elemento 1000 del correspondiente vector (PRM). Obtenemos un valor de $-3.6598e-008$. Ese valor es demasiado pequeño para que sea perceptible un cambio entre posiciones angulares reales y teóricas.

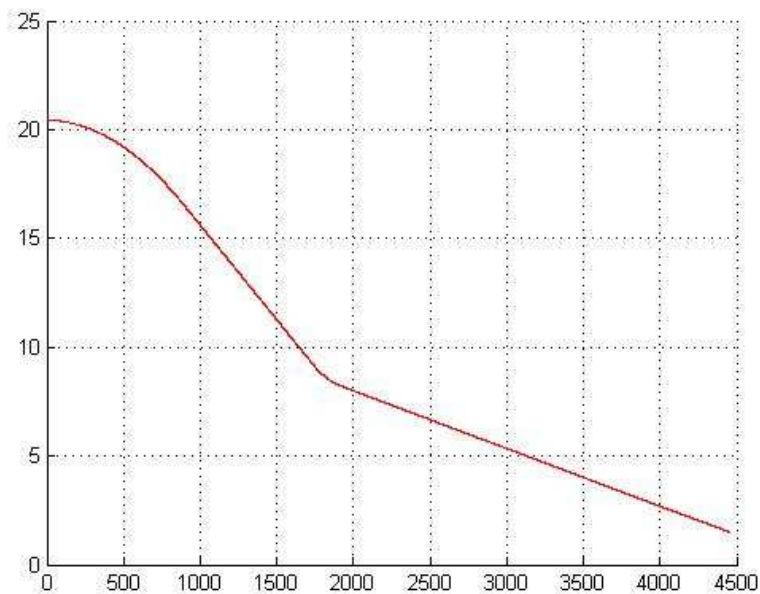
Para obtener un valor de deformación más perceptible programaremos en el algoritmo de calculo una carga de 10 Kg en el extremo del robot para el mismo archivo de datos (360)

RESULTADOS EXPERIMENTALES



Gráfica 3. Posición teórica a partir de la información de los encoders en los tres ejes (rojo: x ,azul: z, verde: y)

Esta grafica no será afectada por e incremento de masa ya que la posición teórica depende exclusivamente de la posición angular de los motores.



Gráfica 4. Ángulo teórico y real girado por el eslabón 2 (eje y ángulo en radianes, eje x numero de muestra)

A pesar de que ahora tenemos más masa (teóricamente) en el extremo del robot, tenemos el mismo problema de antes. Los valores de las deformaciones no son lo suficientemente grandes como para ver una desviación de las curvas de posición angular.



RESULTADOS EXPERIMENTALES

Tomaremos muestras de los vectores de ángulo real, teórico y deformación angular para ver que ha ocurrido en esta ocasión.

Angulo teórico (posición 1000): 15.6091

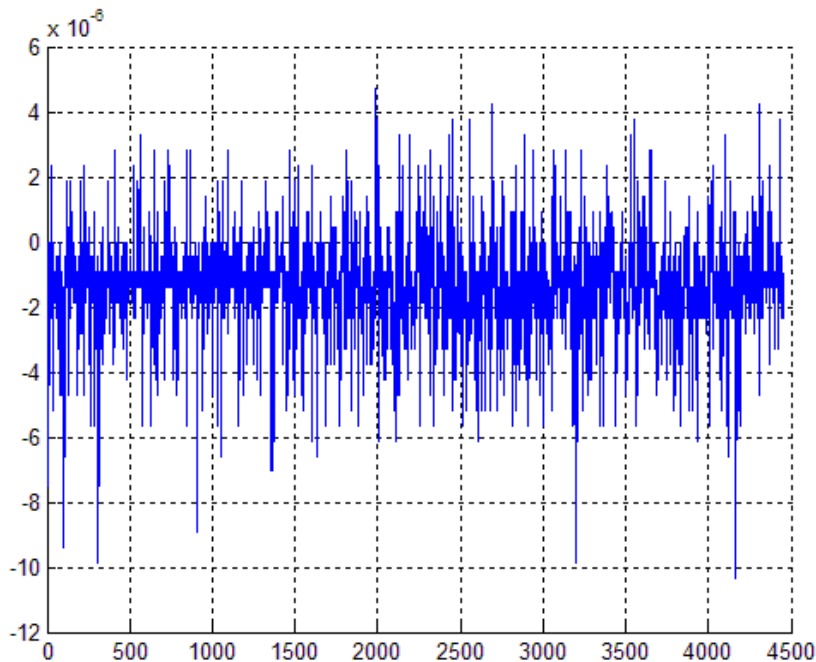
Angulo real(posición 1000): 15.6091

Deformación angular (posición 1000): $-9.4025e-007$

Ocurre lo mismo que antes, la deformación no llega a alcanzar un valor significativo.

Cundo no tenemos carga adicional la deformación fue de $-3.6598e-008$. Ahora es de $-9.4025e-007$. No es excesivo el cambio.

En la gráfica 5 se muestra adicionalmente las deformaciones angulares con el fin de estudiar con más detalle la escasa de diferencia entre la curva de posición teórica y la real.



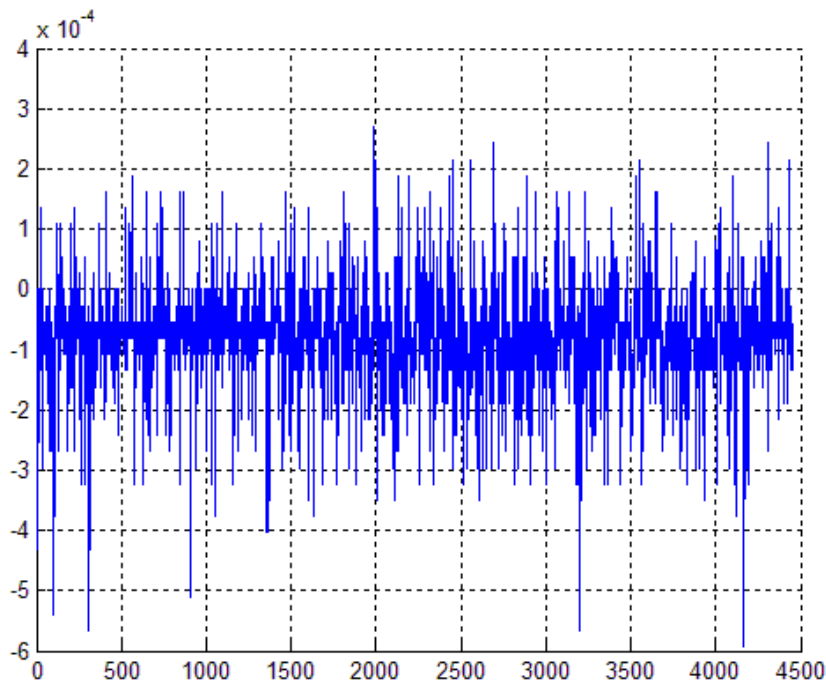
Grafica 5. Deformaciones angulares en radianes, eje y deformaciones sen radianes, eje x numerote muestra.

Fijándonos en la grafica 5 observamos que el valor máximo en valor absoluto que se alcanza esta en torno a 10×10^{-6} radianes.

A continuación dibujaremos dos nuevas graficas en las que se representarán los valores de deformación de la grafica 5 en grados y distancia desviada respecto a la posición teórica del brazo (la posición que tendría el mismo si no sufriera deformación) en metros.

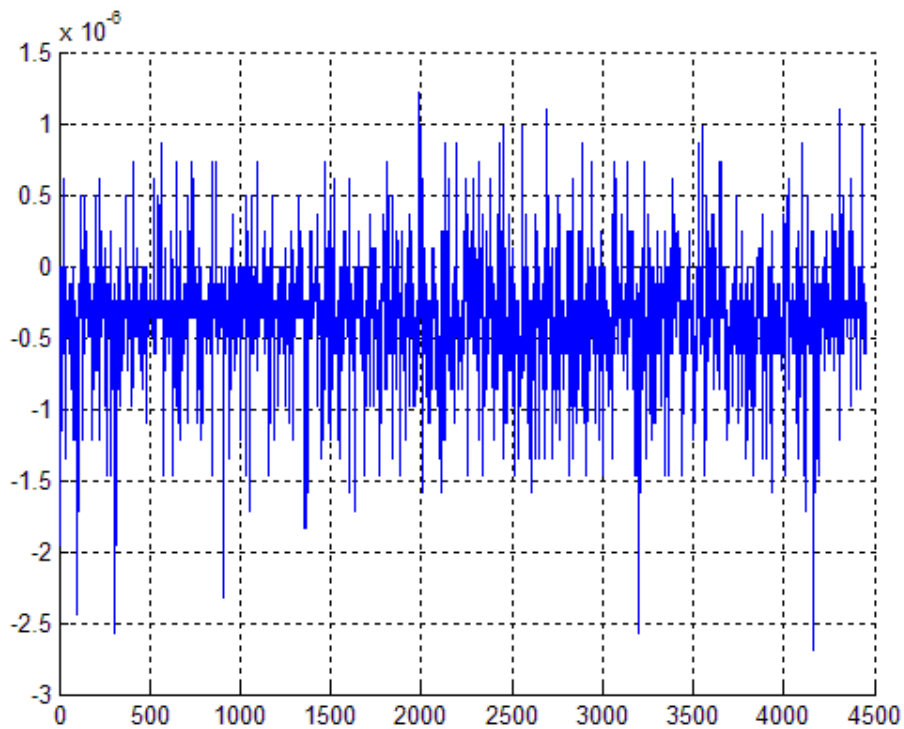


RESULTADOS EXPERIMENTALES



Gráfica 6. Giro en grados por efecto de la deformación, eje y deformación en grados, eje x número de muestra

En la gráfica 6 están representadas las deformaciones en grados. Se puede ver con más claridad la magnitud de las mismas. Apenas alcanza el valor de -6×10^{-4} .



Gráfica 7, desplazamiento del extremo del robot debido a la deformación, eje y deformación en metros, eje x número de muestra

RESULTADOS EXPERIMENTALES

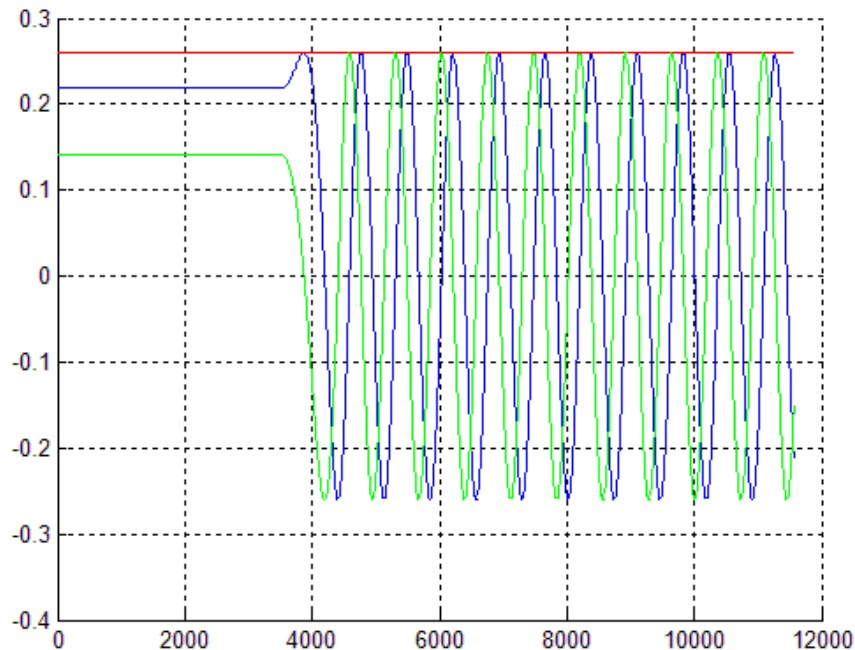
Por ultimo tenemos la grafica 7 donde se representan las deformaciones en metros.

Ahora no cabe duda del motivo de que las curvas de posición real y teórica se solaparan. La deformación a la que se ve sometido el brazo del robot es tan pequeña que apenas difieren entre si. En concreto para este movimiento, el mayor valor de deformación será de algo mas de 2.5×10^{-6} metros o lo que es lo mismo 2.5×10^{-3} milímetros, una cantidad ínfima.

4.2 Segunda toma de datos. Robot cargado.

En esta ocasión en el extremo del robot ira fijada una pesa de 1,25 kilos para comprobar si al añadir una masa adicional (y por tanto mayor inercia) la deformación experimenta un incremento significativo.

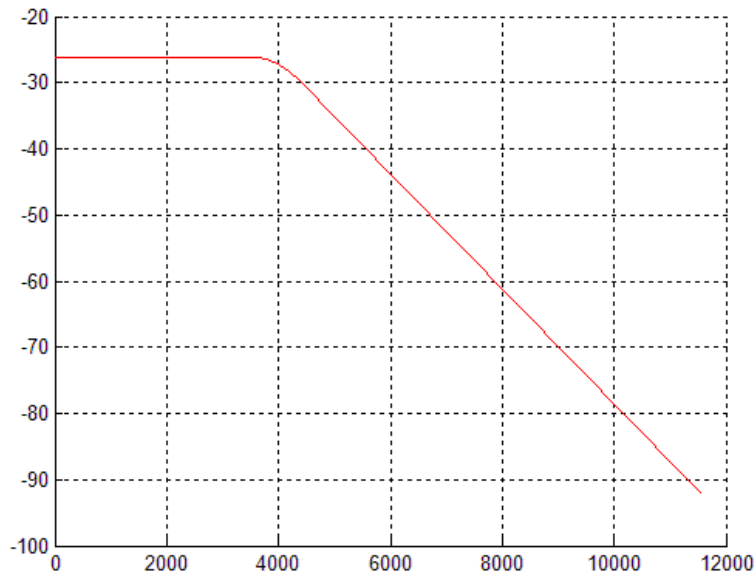
El primer ensayo consistirá en un giro de 360 grados a velocidad normal (decir que se corresponde con velocidad normal), a continuación aparecen las graficas de posición teórica, la de giro real frente al teórico y la de deformaciones (graficas 8 ,9 y 11 respectivamente).



Grafica 8. Posición teórica a partir de la información de los encoders en los tres ejes (rojo: x, azul: z, verde: y)



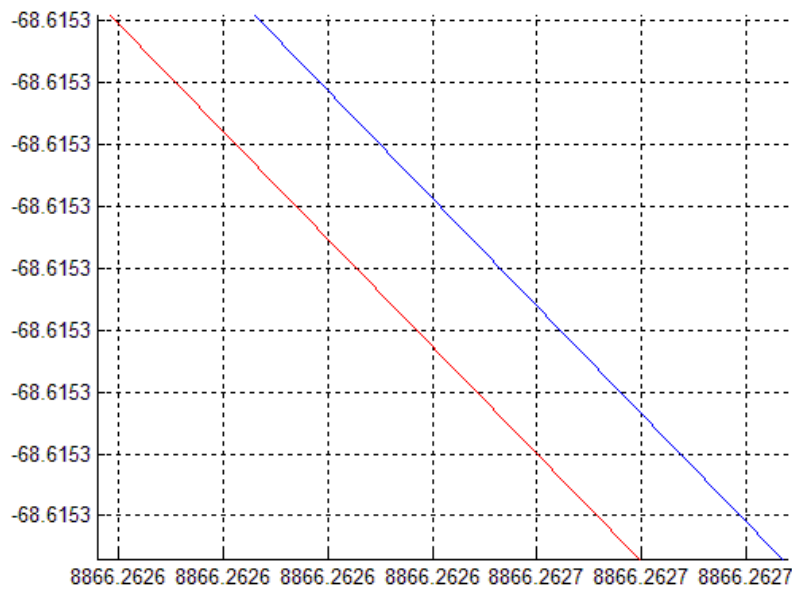
RESULTADOS EXPERIMENTALES



Grafica 9. Ángulo teórico y real girado por el eslabón 2 (eje y ángulo en radianes, eje x numero de muestra)

Al igual que en la primera toma de datos, las curvas de giro real y teórico se solapan.

Veremos una imagen ampliada de la misma grafica en la grafica 10:

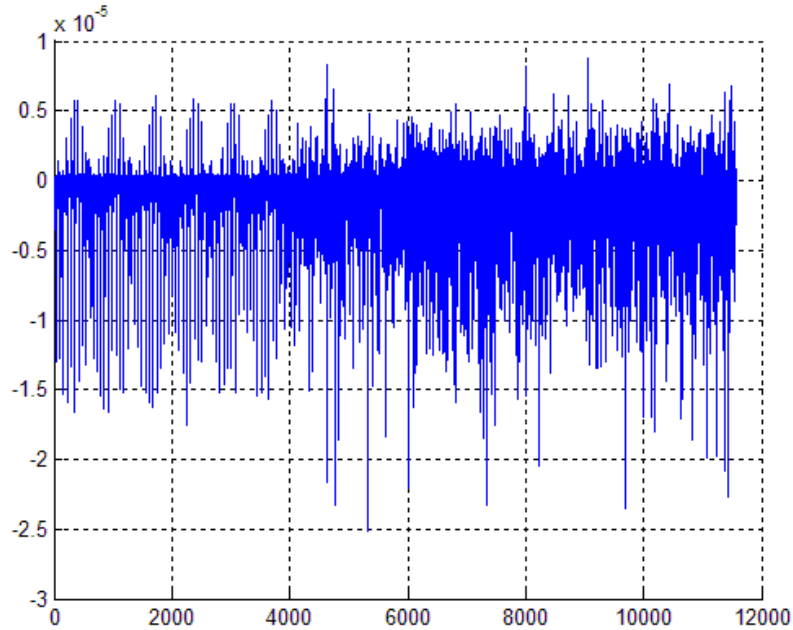


Grafica 10. Ampliación de la grafica de ángulo teórico y real girado por el eslabón 2 (eje y ángulo en radianes, eje x numero de muestra)

RESULTADOS EXPERIMENTALES

Ambas curvas evolucionan en paralelo sin ninguna variación.

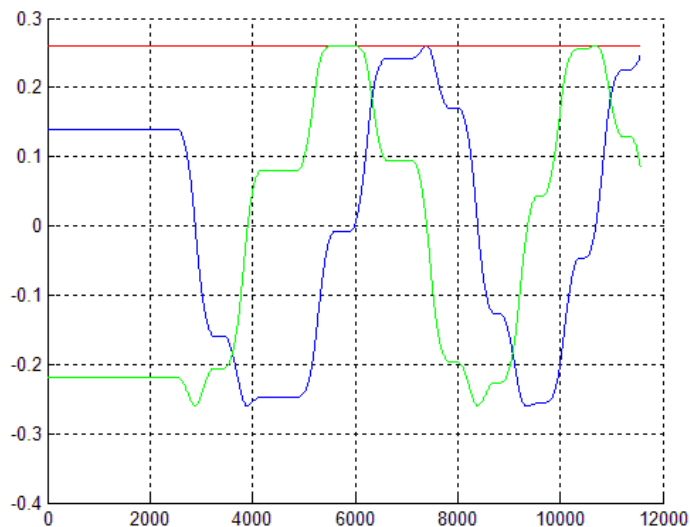
Por último la gráfica de deformación:



Gráfica 11. Deformaciones angulares en radianes, eje y deformaciones sen radianes, eje x numerote muestra.

Los valores están en radianes y a pesar de que son todavía muy pequeños, se observa que la magnitud de los datos (10^{-5}) es algo mayor que antes (10^{-6}).

También se han tomado muestras de datos en un recorrido consistente en arrancadas y paradas sucesivamente con el fin de intentar observar deformaciones y holguras.

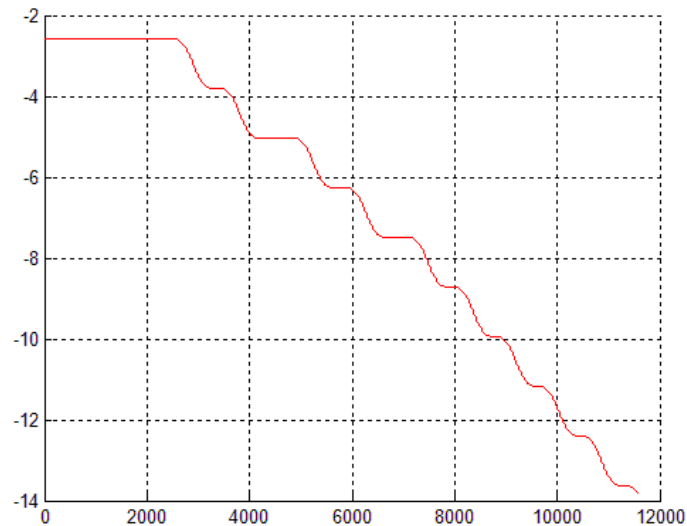


Gráfica 12. Posición teórica a partir de la información de los encoders en los tres ejes (rojo: x, azul: z, verde: y)



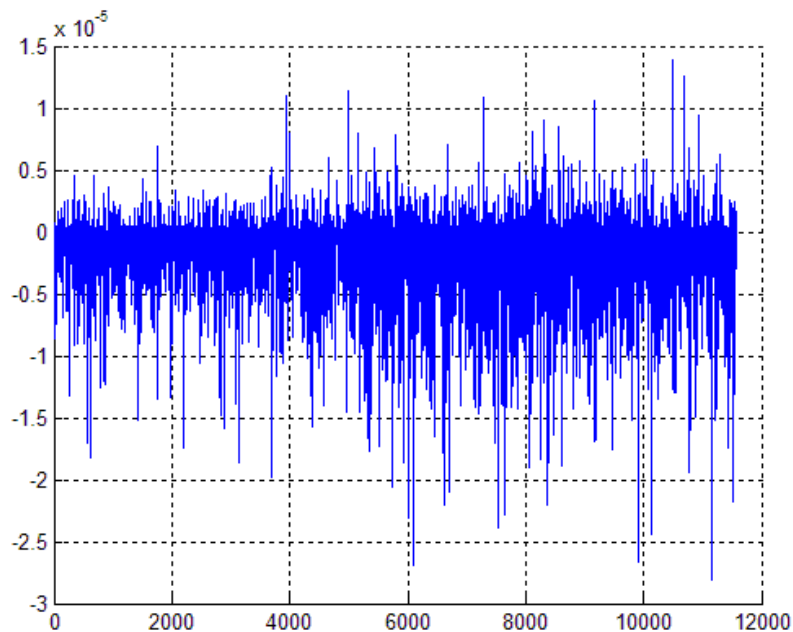
RESULTADOS EXPERIMENTALES

En la grafica 12 se representan los valores de la posición sobre los ejes (en azul el eje y, en verde el eje z y en rojo el eje x). Se observa claramente la evolución teórica que sigue el extremo del brazo en el tiempo arrancando y parando.



Grafica 13. Ángulo teórico y real girado por el eslabón 2 (eje y ángulo en radianes, eje x numero de muestra)

En la grafica 13 se representaron el ángulo real girado en radianes y el teórico pero al igual que ocurría antes ambas curvas se solapan.



Grafica 14. Deformaciones angulares en radianes, eje y deformaciones sen radianes, eje x numerote muestra.



RESULTADOS EXPERIMENTALES

Las deformaciones angulares (representadas en la figura 14) demuestran, una vez más, que son tan pequeñas que apenas varían sensiblemente la posición teórica que calculamos mediante los encoders.

En resumen, se han realizado dos tipos de ensayos con el sistema Sidemar, ambos realizando un movimiento de su último eslabón de rotación en el plano horizontal. Los ensayos se han realizado a diferentes velocidades, mostrando en esta memoria dos de ellas, la primera considerada movimiento normal (100 pasos de encoder por segundo) y la segunda un movimiento con velocidad mayor (150 pasos de encoder por segundo). Las gráficas obtenidas y presentadas en la memoria muestran que, con el estudio realizado, no se producen deformaciones medibles. Sin embargo se observa a partir de las medidas de los acelerómetros que el movimiento no es el teórico.



5. Conclusiones y futuros desarrollos





CONCLUSIONES Y FUTUROS DESARROLLOS

5. Conclusiones y futuros desarrollos

5.1 Conclusiones.

Con la realización de este proyecto se ha conseguido llevar a cabo un conjunto de ensayos a fin de comprobar como la estructura del robot Sidemar sufrirá deformaciones al moverse y la cuantía de las mismas. Para conseguir tal fin, se equipó al robot Sidemar con un acelerómetro en su extremo.

Se realizaron ensayos reales con el movimiento de las articulaciones tanto por separado como conjuntas. Sin embargo, para simplificar el estudio de deformaciones, solo se trabajó a nivel teórico con el motor 2 (motor de la articulación superior) que proporciona un movimiento plano del eslabón 2 en paralelo con el suelo para no tener componentes de aceleración debidas a la gravedad.

En el primer ensayo se realizó un giro de algo más de 360° con el robot sin carga.

Después, se instaló una pesa de 1.25 kilogramos en el extremo del robot y se ejecutó un movimiento de 360° a velocidad normal (100 pasos/segundo) y después a una velocidad mayor (150 pasos/segundo). El segundo tipo de ensayos se realizó arrancando y parando el robot sucesivamente primero a velocidad normal y después otro más rápido.

Los resultados que esperamos obtener serán la posición real del robot en cada instante del movimiento. Esto se ha calculado sumando la deformación que sufre el brazo del Sidemar al moverse por efecto de las fuerzas de inercia. Éstas se calcularon a partir de las aceleraciones.

Se esperan unas deformaciones pequeñas de unos pocos milímetros a lo sumo (sobre todo en el ensayo sin pesa) ya que el brazo del robot tiene una masa escasa (405 gramos) y las velocidades de los movimientos no serán muy grandes, las fuerzas de inercia no alcanzaran grandes valores.

Después de que se han revisado y procesado los datos del acelerómetro, los resultados experimentales apuntan a que las deformaciones que sufre el brazo del robot son muy pequeñas. Tanto es así que se podría decir que son despreciables y no aportan un cambio de posición al que se calcula mediante la posición de los motores (posición teórica).

De todas maneras, a la vista de los resultados, se podría decir que la construcción del robot es lo suficientemente rígida como para que no exista flexión alguna.

Ni siquiera añadiendo una masa adicional se observa que las deformaciones sean significativas aunque, eso si, aumentan de magnitud.

Sin embargo, esto no puede ser cierto, en realidad siempre existirán cierto desplazamiento entre la posición teórica y real. Dicha diferencia procederá de la propia elasticidad del brazo y del juego que tienen los motores y los reductores, en un sistema real.



CONCLUSIONES Y FUTUROS DESARROLLOS

5.2 Futuros desarrollos

Para evitar en la medida de lo posible los errores accidentales en las tomas de datos que son los causantes de imprecisiones, habría que tomar las medidas que se exponen a continuación:

En primer lugar, el robot Sidemar debería estar fijado solidamente a una base pesada la cual no pueda ser movida por las fuerzas de inercia del propio robot.

Sería interesante que los programas informáticos que controlan el movimiento (PMAC) del robot y el que almacena las aceleraciones (Test Pointtm) se ejecutaran simultáneamente. Así, los ficheros de movimientos del encoder y de las aceleraciones tendrán el mismo tiempo de inicio y sería más preciso el cálculo de la deformación.

A parte de las mejoras que ya se han mencionado otros posibles estudios sobre el robot podría ser el cálculo de la frecuencia natural del Sidemar.

En cuanto a la obtención de la posición real, sería interesante realizar una búsqueda bibliográfica sobre algoritmos de estimación diferentes que nos permitan analizar otros sensores que pueden resultar interesantes para este fin.



BIBLIOGRAFÍA

6. Bibliografía





BIBLIOGRAFÍA

6. Bibliografía:

- [1] **J. J. Craig**, *Robótica*, Pearson Educación, 2006
- [2] **Teofilo Molto**, *Acelerómetros, trabajo de instrumentación industrial*, Universidad de Navarra, 2007.
- [3] **A. Barrientos, L.F. Peñín, C. Balaguer, R. Aracil**, *Fundamentos de Robótica*, McGraw-Hill Interamericana , 2007
- [4] **A. Adrados**, *Desarrollo y aplicación del sistema de adquisición y medida del Robot Sidemar*, Proyecto fin de Carrera, Universidad Carlos III de Madrid, 2008.
- [5] **J. A. García Crespo**, *Desarrollo de una plataforma informática para la medida y procesado de las vibraciones de una prensa de moldeo*, Proyecto fin de Carrera, Universidad Carlos III de Madrid, 2006
- [6] **J. García de Jalón, J. I. Rodríguez, J. Vidal**, *Aprenda Matlab 7.0 como si estuviera en primero*, tutorial, Universidad Politécnica de Madrid, 2005
- [7] MMF accelerometers, http://www.mmf.de/triaxial_accelerometers.htm, (ultima visita 20/04/09)
- [8] **A. Arias, C. Navarro, J. L. Pérez** , *Apuntes de teoría de Estructuras y Construcciones Industriales*, Apuntes, Universidad Carlos III de Madrid, 2008
- [9] **F. P. Beer, R. E. Johnston, E. I. Eisenbenberg**, *Mecánica vectorial para ingenieros*, McGraw-Hill , 2007
- [10] Keithley instruments , <http://www.keithley.cl/products/dataacqmodules/mn=KUSB-3100.html> (ultima visita 20/04/09)