

SISTEMA DE CONTROL DE UN MANIPULADOR PARA UN ROV (REMOTELY OPERATED VEHICLE) QUE SIRVA DE APOYO EN ACTIVIDADES DE SALVATAJE

Peter Roberts Olcay; Ingeniero Naval Electricista, Teniente 2º, Armada de Chile, proberts@armada.cl.

RESUMEN

El accesorio que permite a un ROV llevar a cabo distintas tareas de salvataje es un manipulador, el cual será descrito en este trabajo. Definiendo sus componentes con sus principales características y la interacción entre éstos, llegando a un modelo matemático, que describe el comportamiento del manipulador en el medio acuático, a través de los parámetros de Denavit-Hartenberg y las ecuaciones de Newton-Euler.

Se establecerá un sistema de control para el manipulador, dividiéndolo en dos: uno teleoperado y otro automático, los cuales serán analizados en forma independiente.

Para el análisis y simulación de ambos sistemas de control se utilizó el programa Matlab-Simulink 6.5 de Mathworks, el cual fue complementado con dos herramientas diseñadas especialmente para trabajar con robots. Una es la herramienta Robotics Toolbox 7, desarrollada por el Dr. Peter I. Corke de CSIRO (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation), y la otra herramienta empleada es HEMERO (Herramienta Matlab/Simulink para el Estudio de Manipuladores y Robots móviles), desarrollada por Aníbal Ollero Baturone y J. Iván Maza Alcañiz de la Universidad de Sevilla.

Para la modelación del manipulador, se estableció como base, el modelo de ROV llamado “Kambara”, el cual presenta una baja variación en la posición del robot, lo cual permite despreciar esta variación y plantear la base del manipulador como fija.

Para la implementación del modelo obtenido se construyó un prototipo, el que fue llamado Lipang (que quiere decir brazo en mapudungún), para cuya programación se utilizó el programa Basic Stamp Editor v.2.4 o a través de la herramienta para Matlab desarrollada por Yan-Fang Li, Saul Harari, Hong Wong y Vikram Kapila de la Universidad Politécnica de Brooklyn.

Para el sistema teleoperado del manipulador se utilizó como unidad de entrada un joystick, el cual presenta una rápida adaptación por parte del operador y una buena maniobrabilidad, permitiendo mover el brazo a través de los movimientos de la palanca y el uso de pulsadores.

El sistema automático del manipulador, se definió para poder realizar una única tarea automática: regresar desde una posición aleatoria hacia la posición de transporte. Para esto se definió la posición de transporte y la cinemática inversa del desplazamiento producido en el manipulador, con esto se elaboró un modelo matemático de un generador de trayectorias para cada articulación, el cual determina los puntos que debe recorrer cada articulación para que el manipulador pueda realizar el movimiento deseado con un mínimo de error.

Como algoritmo de control se estableció el modelo dinámico, utilizando una técnica conocida como par computado, la cual consiste en calcular el torque necesario producir en cada articulación para que éstas se muevan de la manera deseada. Para esto se utilizaron como referencia los parámetros físicos del Lipang.

Con el objeto de minimizar el error de posición en cada articulación o error de servo, se utilizaron estrategias clásicas de control. Elaborando dos controladores distintos, un proporcional derivativo (PD) y otro proporcional integral derivativo (PID). Ambos controladores fueron modelados y luego simulados a través de Simulink para poder determinar la mejor alternativa a utilizar en el manipulador.

De acuerdo a los resultados de la simulación, se determinó que la mejor alternativa de control corresponde al controlador PD, para lo cual se programó el microcontrolador de forma tal que responda como un controlador de la forma seleccionada.

El sistema de control completo fue implementado en el Lipang, el cual respondió de forma satisfactoria, presentando errores de posición de menos de un 1%, lo cual indica que el modelo planteado para controlar un manipulador para un ROV es adecuado.

INTRODUCCIÓN

Hoy en día el empleo de sistemas automáticos o telecontrolados en la ejecución de tareas submarinas se ha hecho algo común y hasta imprescindible en ciertos casos, llevando a un rápido desarrollo de estas tecnologías, permitiendo la ampliación de las fronteras que para el hombre presentaban las profundidades de los océanos.

Estos sistemas, conocidos como AUV (Autonomous Underwater Vehicle, Vehículo Submarino Autónomo) y ROV (Remotely Operated Vehicle, Vehículo Operado en Remotamente) han permitido al hombre realizar tareas que hasta hace algunos años eran impensadas, como la exploración de las fosas abisales, la inspección y mantenimiento de cañerías y líneas de comunicaciones submarinas o labores de rescate y salvataje como con los submarinos rusos “Kursk” y AS-28, hace algunos años, o más recientemente las labores de búsqueda de los restos del avión Airbus siniestrado frente a las costas de Brasil.

El diseño de estos robots obedece a la tarea específica que se requiere que éstos lleven a cabo, incluyendo elementos como cámaras, sonares y sensores láser, entre otros. Pero sin duda que uno de los accesorios de mayor importancia para un robot submarino es un manipulador, el cual corresponde, según John Craig, a “un brazo mecánico articulado formado de eslabones conectados a través de uniones o articulaciones que permiten un movimiento relativo entre dos eslabones consecutivos”.

Los ROV's, al ser sistemas robóticos teleoperados, corresponden al campo de la telerrobótica, una forma más evolucionada de la teleoperación, ya que el mecanismo telecontrolado cuenta con la capacidad de operar autónomamente por un período de tiempo determinado para desarrollar una tarea específica o bien complementando las instrucciones dadas por el operador, lo cual hace que este mecanismo sea considerado un robot.

El objetivo de este trabajo es elaborar un modelo de sistema de control teleoperado de un brazo robótico para ser implementado en un ROV, el cual le permita ejecutar tareas de salvataje. Para esto, en base a tres tareas principales, se describirán las características que deba poseer el brazo, como cantidad y tipo de articulaciones y cantidad de grados de libertad, entre otros, para finalmente describir el método de control a utilizar y elaborar su diseño.

CAPÍTULO I

EL MANIPULADOR ROBÓTICO

Para el desarrollo de este trabajo, el manipulador utilizado obedecerá a uno especializado donde su diseño corresponde al dominio de las tareas a realizar las cuales serán: recuperar un objeto, portar y engrilletar una guía.

El manipulador contará con tres articulaciones, una de tipo esférica de dos grados de libertad para la base y dos angulares, de un grado de libertad cada una, para el “codo” y la “muñeca”. Teniendo finalmente, el manipulador un total de cuatro grados de libertad. Además, el efector final del brazo será de tipo pinza, la cual pueda abrir y cerrar.

El manipulador poseerá dos eslabones, los que unen las articulaciones y el efector final. Su diseño variará de acuerdo a los esfuerzos a los que estarán sometidos y los elementos que deberán soportar (circuitos de lubricación, sistema de transmisión, entre otros).

Los actuadores seleccionados para el prototipo fueron motores eléctricos, dada su facilidad de control. Éstos fueron instalados directamente en los ejes de cada articulación, lo que se conoce como control directo.

Los grados de libertad y la estructura del manipulador, determinan su espacio de trabajo, que corresponde al conjunto de puntos en los cuales puede situarse el efector final.

Finalmente, para permitir la interacción del manipulador con el medio, el robot debe contar con sensores, los que se pueden agrupar en dos sistemas:

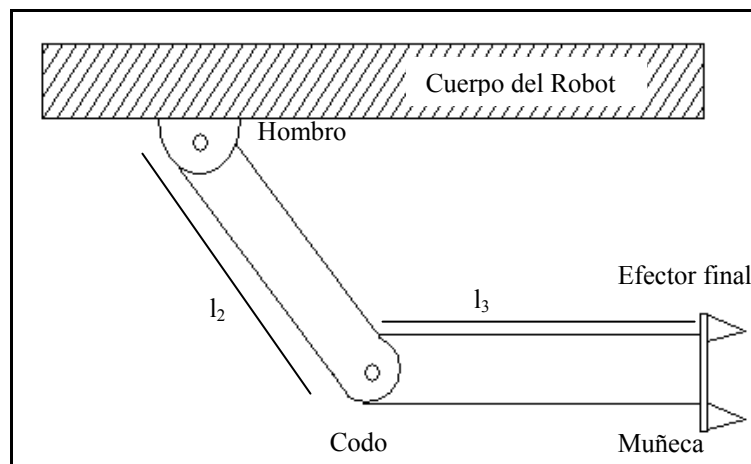


Figura 1-1: Esquema de las principales partes del brazo.

Sistema de detección de posición: Sus sensores envían información de posicionamiento relativo entre los vínculos al sistema de control.

Sistema de detección de fuerza: Utiliza indicadores de tensión los que permiten controlar la interacción entre el manipulador y el entorno midiendo las fuerzas y momentos producidos durante el desarrollo de la tarea especificada.

1.1. CINEMÁTICA DEL MANIPULADOR

Para el estudio de la cinemática se aplicará la notación de Denavit-Hartenberg, para lo cual se descompone la articulación esférica en dos angulares, quedando el manipulador con cuatro articulaciones angulares de un grado de libertad cada una. A cada una se asigna una trama, las que se enumeran, desde el 0, o base del brazo, hasta la 4, que será el efector final.

Para cada trama se deben determinar los parámetros de vínculo: longitud (a_i), torsión (α_i), desplazamiento (d_i) y ángulo de articulación (θ_i). Como todas las articulaciones del modelo son angulares, θ_i es llamada variable de articulación y las otras tres cantidades son los parámetros de vínculo fijos. Con estos parámetros se puede definir la ubicación espacial de cada vínculo relativo a los demás, para lo cual se deben establecer las transformadas que relacionan a los vínculos entre sí.

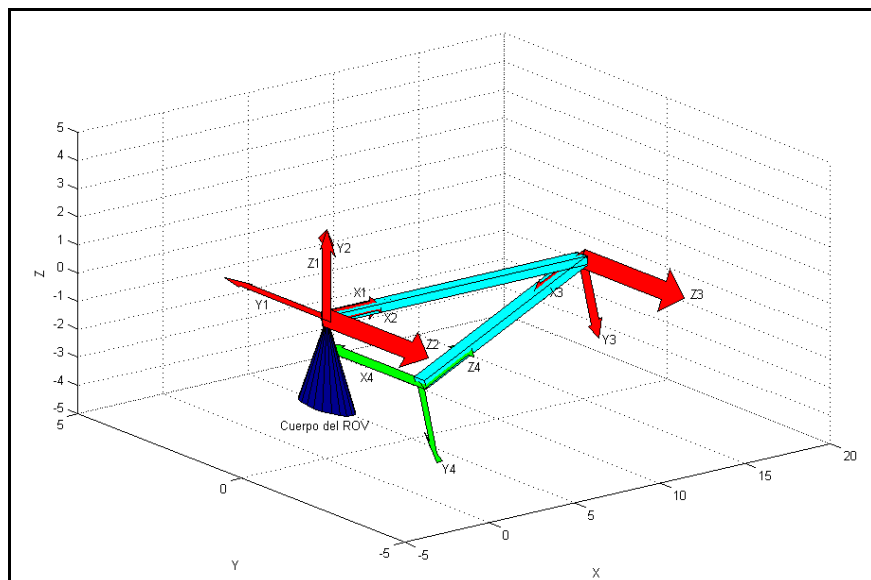


Figura 1-2: Esquema de tramas de referencia del manipulador y su orientación.

Tabla 1.1: Parámetros de Denavit-Hartenberg.

I	α_{i-1}	a_{i-1}	d_i	θ_i
1	0°	0	0	θ_1
2	90°	0	0	θ_2
3	0°	l_2	0	θ_3
4	-90°	l_3	0	θ_4

La forma general de la transformada espacial entre vínculos sucesivos es:

$${}^{i-1}T_i = \begin{bmatrix} \cos(\theta_i) & -\sin(\theta_i) & 0 & a_{i-1} \\ \sin(\theta_i) \cdot \cos(\alpha_{i-1}) & \cos(\theta_i) \cdot \cos(\alpha_{i-1}) & -\sin(\alpha_{i-1}) & -\sin(\alpha_{i-1}) \cdot d_i \\ \sin(\theta_i) \cdot \sin(\alpha_{i-1}) & \cos(\theta_i) \cdot \sin(\alpha_{i-1}) & \cos(\alpha_{i-1}) & \cos(\alpha_{i-1}) \cdot d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1-1)$$

Reemplazando las variables para los distintos valores de $i=0,1,2,3,4$; se obtienen las transformadas espaciales para cada vínculo, las que establecen la relación entre dos tramas sucesivas, indicando su rotación y traslación. Con éstas, es posible determinar la posición de cualquier vínculo del manipulador en relación a otro, al concatenar las matrices de transformación, cuyo producto será una matriz cuadrada de orden 4 de la siguiente forma:

$${}^0T_4 = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & p_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & p_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1-2)$$

Esta matriz define la cinemática del manipulador y, por lo tanto, especifica la ubicación de la muñeca del manipulador en relación a su base. Las componentes r , forman una matriz de rotación que indica la orientación de $\{4\}$ con respecto al origen $\{0\}$, mientras que las componentes p , forman un vector que indica la posición del origen de $\{4\}$ con respecto a la Base. Éstas son las ecuaciones básicas para el análisis cinemático del manipulador, donde las variables consisten en los ángulos de articulación $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ y θ_4 .

1.2. CINEMÁTICA INVERSA DEL MANIPULADOR

Corresponde a los cálculos efectuados por el robot para determinar las variables de articulación para alcanzar una determinada posición cuyo resultado es un conjunto de ángulos.

Para determinar las soluciones de la cinemática inversa se utilizará la forma cerrada (analítica) de solución. Ésta está basada en expresiones analíticas o polinomios de cuarto grado o superiores que son determinados igualando la trama objetivo y la del efector final, estableciendo las ecuaciones y resolviendo para cada variable.

1.3. MOVIMIENTO DE LOS VÍNCULOS DEL MANIPULADOR

Cada vínculo en movimiento cuenta con velocidad lineal v_i (velocidad del origen de la trama $\{i\}$) y velocidad angular ω_i (velocidad rotacional de la trama $\{i\}$), las que están definidas por la velocidad, lineal y angular, del vínculo anterior $\{i-1\}$ más los componentes del vínculo en cuestión $\{i\}$. Estos vectores, apilados, forman el vector de velocidad cartesiana.

1.4. DINÁMICA DEL MANIPULADOR

El modelo general de la dinámica de un manipulador de n grados de libertad está determinado por la siguiente expresión:

$$\tau = M(\Theta)\ddot{\Theta} + G(\Theta) + F(\dot{\Theta}) + V(\Theta, \dot{\Theta}), \text{ donde} \quad (1-3)$$

τ : Torque ejercido por los actuadores de cada articulación. Vector de orden $n \times 1$.

Θ : Vector de variables articulares.

$M(\Theta)$: Matriz de masas del manipulador, de orden $n \times n$, simétrica y positiva.

$G(\Theta)$: Torque producido por la acción de la fuerza de gravedad y de boyantez.

$F(\dot{\Theta})$: Torque producido por la fricción entre vínculos y con el agua.

$V(\Theta, \dot{\Theta})$: Torque debido a las fuerzas centrífugas y de Coriolis.

Este análisis dinámico está basado en la segunda ley de Newton y la ecuación de inercia de Euler. Para su desarrollo se plantea una determinada trayectoria a seguir, definida por el vector de variables articulares Θ y sus derivadas en el tiempo, las que indican velocidad y aceleración articular. En base a éste se determina el vector τ , de torque articular, que permite al manipulador seguir la trayectoria deseada; por lo tanto, la fuerza necesaria τ para el actuador dependerá de la posición de la articulación, su velocidad y aceleración.

CAPÍTULO II

SISTEMA DE CONTROL DEL MANIPULADOR

Debido a que el medio acuático presenta una gran cantidad de variables que influyen en las tareas a desarrollar en él, la configuración del sistema de control del manipulador será un sistema intercambiado, donde el manipulador será teleoperado y, en ciertas tareas, operará en forma automática. Así el operador controla el movimiento del manipulador, el cual, a través de un sistema de percepción, envía la información obtenida del entorno para ser visualizada por el operador o la utiliza para su propio control.

Por lo tanto el sistema de control telerrobótico del manipulador estará compuesto por: un ROV con un manipulador (descrito en el capítulo anterior), un computador con interfaces de entrada y salida, el controlador del manipulador y finalmente el operador.

El controlador traduce las órdenes dadas por el operador, en movimiento, o bien, maneja las instrucciones almacenadas para la operación del manipulador en modo automático. Éste realiza la comunicación entre las unidades de entrada, el software de control y los actuadores del brazo. Debido a que un ROV no debe tener un gran peso ni volumen y necesita buena movilidad, el tipo de controlador escogido es un microcontrolador.

El computador contendrá el software que permitirá la programación del controlador y permitirá la visualización de la información obtenida por los sensores del manipulador.

Las unidades de entrada serán aquellas a través de las cuales el operador pueda controlar al manipulador e ingresar los comandos para la elaboración y modificación del software de control, como por ejemplo el teclado del computador, el Mouse y el joystick. También son considerados como unidades de entrada los sensores que posee el manipulador, los que proporcionan datos al controlador.

Para un mejor estudio, el sistema de control del manipulador se dividirá en dos, un sistema telecontrolado y un sistema automático.

2.1. SISTEMA TELECONTROLADO

El sistema telecontrolado del manipulador, corresponde a un sistema de lazo abierto, es decir, sin realimentación, ya que la información proporcionada por los sensores será visualizada y analizada por el operador, quien actuará en tiempo real en base a ésta.

Las órdenes de movimiento son comunicadas por el microcontrolador hacia las articulaciones y la pinza del efector final, es decir, el operador se comunicará con 5 actuadores: dos en el hombro, uno en el codo, uno en la muñeca y uno en la pinza. Mientras que el sistema sensorial estará compuesto por la cámara de video propia del ROV y los sensores de posición y esfuerzo del manipulador, los cuales enviarán la información recopilada al operador, para su visualización en la pantalla del computador.

El elemento escogido como unidad de entrada para la interacción entre el operador y el controlador del manipulador es una palanca de control o joystick, el cual presenta una rápida adaptación por parte del operador, además de ser un elemento ampliamente conocido.

El joystick posee un sistema de realimentación de los esfuerzos realizados por el manipulador, de esta forma el operador podrá “sentir” cuando se aumente o disminuya la carga del manipulador. Este sistema tomará la información recopilada por los sensores de esfuerzo ubicados en los ejes de articulación, los que alimentarán al sistema de control, el cual, a través de actuadores ubicados en la palanca de control permitirá al operador sentir, en forma proporcional, el trabajo realizado por el manipulador.

2.1.1. Simulación del control mediante joystick

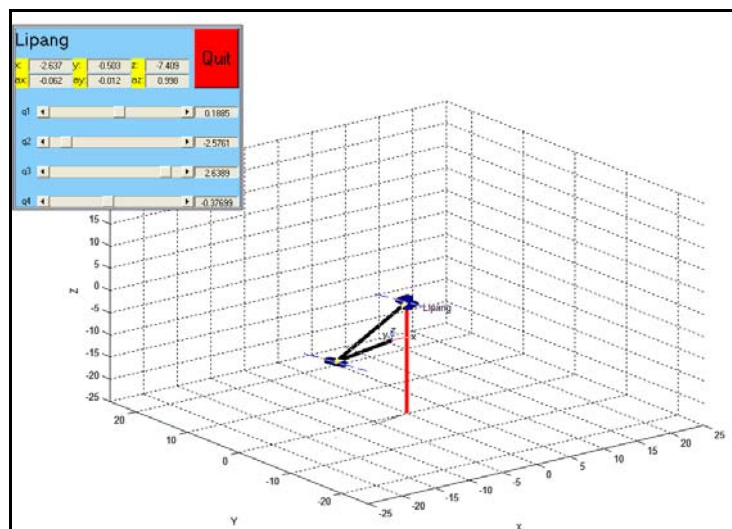


Figura 2-1: Simulación gráfica de control por joystick.

Utilizando la herramienta para Matlab, Robotics Toolbox, se ha simulado una entrada de joystick para controlar el manipulador. Lo que se puede ver en la figura 2-1, donde el recuadro azul simula el control por joystick, controlando las variables

articulares q_1 , q_2 , q_3 y q_4 . En la parte superior del recuadro se pueden obtener los datos de posición y orientación del efector final con respecto a la base del sistema.

A través de este controlador se puede mover al brazo robótico en tiempo real y posicionar al efector final en cualquier lugar del espacio de trabajo del manipulador.

2.2. SISTEMA DE CONTROL AUTOMÁTICO

El sistema automático será un sistema de lazo cerrado donde la realimentación del sistema corresponde a la información proporcionada por los sensores del manipulador.

Debido a que el medio de trabajo del manipulador es afectado por un sinnúmero de variables externas que hacen muy difícil la automatización de tareas, para fines del presente trabajo, se ha definido como única tarea automática el regreso desde cualquier posición a la posición de transporte. La cual corresponde a la adoptada por el manipulador mientras el ROV se desplaza hacia el lugar de trabajo.

Para la ejecución de esta tarea se debe desarrollar un algoritmo de generación de trayectorias entre los dos puntos antes mencionados, siendo necesario conocer la posición inicial en la cual se encuentra el manipulador y la posición final o de transporte. En conclusión, el bucle de control corresponderá al cálculo de la cinemática inversa del manipulador donde la posición final es fija y, a partir de la posición donde se encuentra el efector final al completar la tarea, el controlador debe calcular los ángulos que se debe mover cada articulación para llegar a la posición final ya conocida.

De acuerdo a lo anterior, sólo es necesaria la realimentación de posición relativa de las articulaciones para resolver la cinemática inversa del manipulador, por lo tanto se debe contar con sensores de posición en las articulaciones los cuales entregarán la información del ángulo relativo entre éstas al sistema de control. Este último, determinará la cantidad de grados que deberá moverse cada articulación para llegar a la posición final.

2.2.1. Cálculo de la cinemática inversa del manipulador

Primero se debe determinar la posición de transporte. La que se muestra en la figura 2-2, de cuyo análisis se pueden determinar las variables de articulación.

θ_1 : Como este ángulo es determinado respecto a la base $\{0\}$, la cual se fija en forma arbitraria, se puede establecer que $\theta_1 = 0$.

θ_2 : Como las longitudes de vínculo a_1 y a_2 poseen la misma orientación, $\theta_2 = 0$.

θ_3 : En este caso, el ángulo dependerá de las dimensiones del brazo y de la forma de interacción de los vínculos; por lo tanto, $\theta_3 = \theta_{3'}$, donde $\theta_{3'}$ es constante.

θ_4 : En este caso, su magnitud no afecta a la posición de transporte, por lo tanto, su valor permanecerá constante durante este proceso.

Por lo tanto, el vector que señala la posición de transporte estará definido por:

$$\Theta_t = [0 \quad 0 \quad \theta_3 \quad \theta_4]^T \quad (2-1)$$

Reemplazando este vector en la matriz (1-2), se obtiene la transformada de la posición de transporte, donde se observa que el cálculo de la cinemática inversa del manipulador dependerá sólo de tres variables: θ_1 , θ_2 y θ_3 .

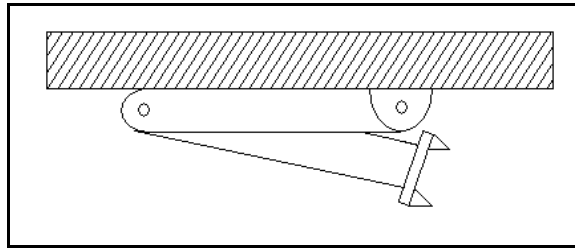


Figura 2-2: Posición de transporte del manipulador.

2.2.2. Generación de trayectorias articulares

El movimiento del manipulador debe ser uniforme, ya que los movimientos bruscos pueden generar vibraciones e incidir en el desgaste del mecanismo. De esta forma se deben generar funciones uniformes $\theta_i(t)$ para cada variable articular donde $\theta_i(0)$ sea la posición inicial y $\theta_i(t_f)$ sea la posición de transporte.

Para que la función sea uniforme debe ser continua, al igual que su primera derivada. Por lo tanto, la velocidad inicial y final de la articulación deben ser iguales a cero; para esto, basta con un polinomio de al menos tercer grado de la forma:

$$\theta(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3, \quad (2-2)$$

del cual se pueden obtener la velocidad y aceleración al aplicar la primera y segunda derivada en el tiempo.

Al combinar las ecuaciones con las restricciones y resolver, se pueden obtener los coeficientes a_i . De esta forma se tiene que el polinomio que determina la trayectoria de cada articulación del manipulador corresponde a:

$$\theta(t) = \theta_0 + \frac{3}{t_f^2}(\theta_f - \theta_0)t^2 - \frac{2}{t_f^3}(\theta_f - \theta_0)t^3 \quad (2-3)$$

Donde el ángulo θ_0 corresponde a la variable de articulación, que indica la posición del manipulador al inicio de la trayectoria y t_f , indica el tiempo que tardará el manipulador en llegar a la posición final, el cual es constante y para el prototipo se escogió una constante de 5 segundos.

2.2.3. Simulación del generador de trayectorias

Utilizando la herramienta Robotics Toolbox, se han simulado distintas trayectorias para el manipulador estudiado, situando al efector final en un punto arbitrario en el espacio y llevándolo hasta la posición de transporte.

De esta forma se cuenta con un generador de trayectorias que proporcionará los valores de posición, velocidad y aceleración angulares para cada articulación para lograr que el manipulador siga la trayectoria deseada, pero éste es controlado en términos de momentos de torsión; por lo tanto, el sistema de control del manipulador debe poder determinar el momento necesario para que cada actuador se mueva según lo requerido.

2.2.4. Control del manipulador mediante el torque

El generador de trayectorias permitirá conocer los vectores: Θ , $\dot{\Theta}$ y $\ddot{\Theta}$; los cuales satisfacen el modelo general de la dinámica del manipulador presentado en el capítulo anterior, el cual corresponde al algoritmo del sistema de control, ya que permite obtener el momento de torsión conocidas las posiciones angulares y sus derivadas.

En la figura 2-3 se puede apreciar la interacción entre el generador de trayectorias, el sistema de control y el manipulador. Este último recibe del sistema de control el vector τ de momentos de torsión, lo que produce el movimiento de las articulaciones y, a través de los sensores de posición, el sistema de control recibe al vector de posiciones articulares Θ como realimentación.

Con la información entregada por Θ , el sistema de control determina la posición y velocidad de las articulaciones y las compara con las entregadas por el generador de trayectorias, con lo cual se obtiene el error de servo:

$$E = \Theta_d - \Theta \quad (2-4)$$

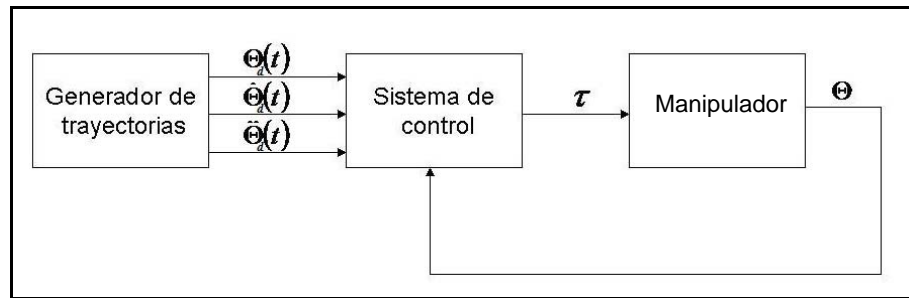


Figura 2-3: Diagrama de bloques del sistema de control del manipulador.

Como se puede apreciar en la figura 2-3 el sistema corresponde a uno MIMO (multientrada, multisalida), este sistema se puede simplificar a uno SISO (una entrada, una salida) y estudiar el control de cada articulación en forma independiente, pudiendo reescribirse el modelo dinámico del manipulador de la siguiente forma:

$$\tau = \hat{M}(\Theta) \cdot (\ddot{\Theta}_d + K_v \cdot \dot{E} + K_p \cdot E) + \hat{G}(\Theta) + \hat{F}(\dot{\Theta}) + \hat{V}(\Theta, \dot{\Theta}) \quad (2-5)$$

Donde las matrices K_p y K_v son matrices diagonales de orden 4 y el signo $\hat{}$ indica la estimación del valor real de las matrices y vectores correspondientes.

Como el modelo no es exacto producto de fricciones, desgaste y variaciones en la dinámica del manipulador debido a las cargas soportadas, se considera un torque τ_d que agrupa estas variaciones, así la ecuación (2-5) queda de la siguiente forma:

$$\ddot{E} + K_v \cdot \dot{E} + K_p \cdot E = \hat{M}^{-1} \cdot \tau_d \quad (2-6)$$

Haciendo τ_d suficientemente pequeño, el término de la derecha se hace cero, aproximando el comportamiento dinámico del error de servo al de los sistemas lineales de segundo orden, pudiendo apreciar que la ley de control empleada obedece a un controlador de tipo PD (Proporcional Derivativo).

2.2.5. Simulación del sistema de control PD

La figura 2-4 grafica el error de servo obtenido con el uso de un controlador PD, pudiendo apreciarse una magnitud del error bastante reducida, que no influye mayormente en el correcto funcionamiento del manipulador.

Al graficar el torque ejercido por los actuadores (figura 2-5), se puede observar un alto torque inicial para superar la inercia de los vínculos, el cual rápidamente disminuye, llegando finalmente a cero al llegar a la posición deseada.

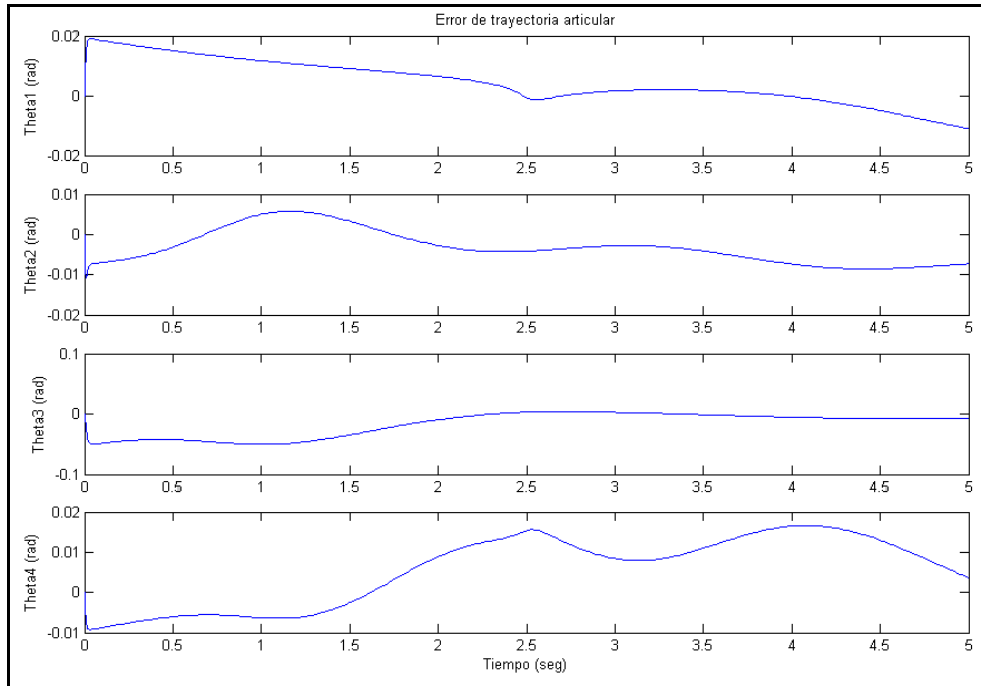


Figura 2-4: Error de trayectoria articular con controlador PD.

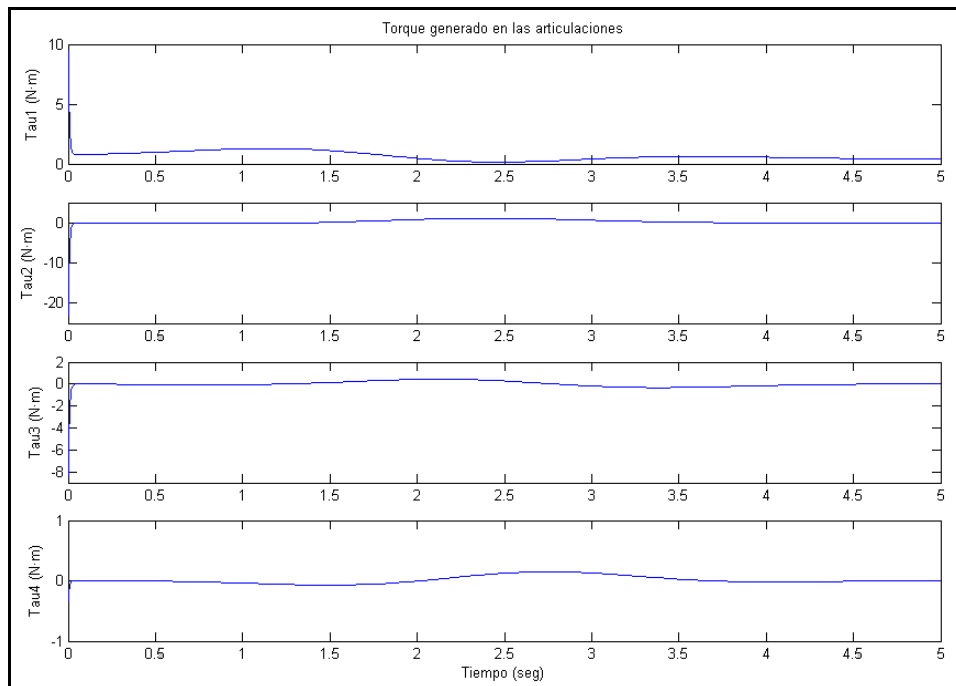


Figura 2-5: Torque ejercido en cada articulación.

2.2.6. Simulación del controlador PID

Para disminuir el error en el estado permanente, se puede implementar un controlador PID (Proporcional Integral Derivativo) en lugar del PD, añadiendo a la ecuación (2-6) el término integral, quedando definida por:

$$\tau_r = \ddot{\Theta}_d + K_v \cdot \dot{E} + K_p \cdot E + K_i \cdot \int_0^t E dt \quad (2-7)$$

Donde K_i es una matriz diagonal de orden 4.

Al realizar la simulación del controlador PID, se obtiene la gráfica del error de servo de la figura 2-6.

La figura 2-7 muestra el torque desarrollado por los actuadores, donde se puede observar que el torque inicial es más alto que en el caso del controlador PD.

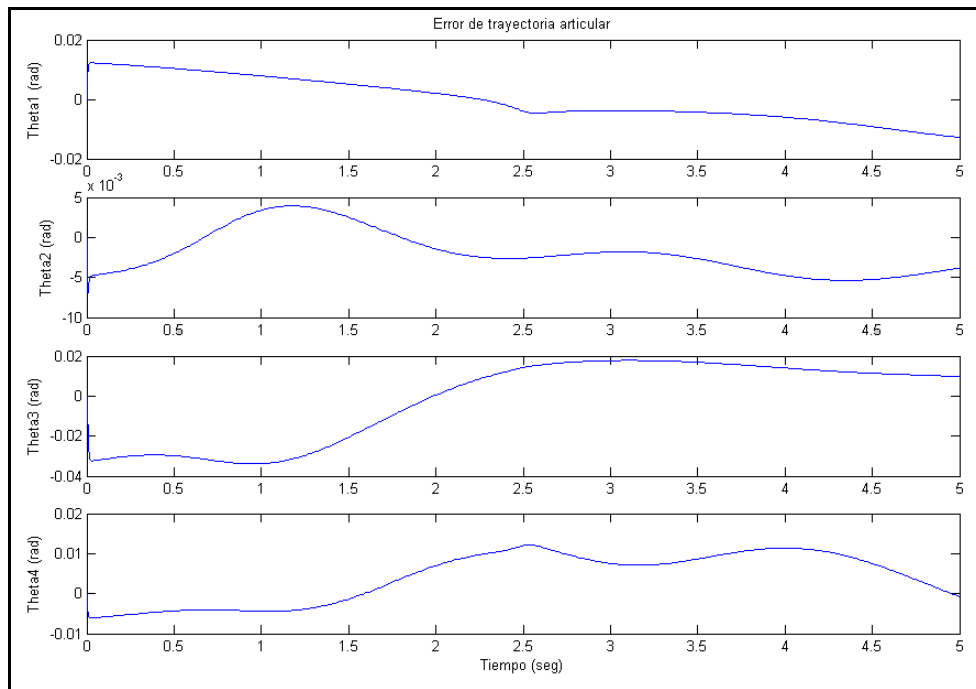


Figura 2-6: Error de trayectoria articular con controlador PID.

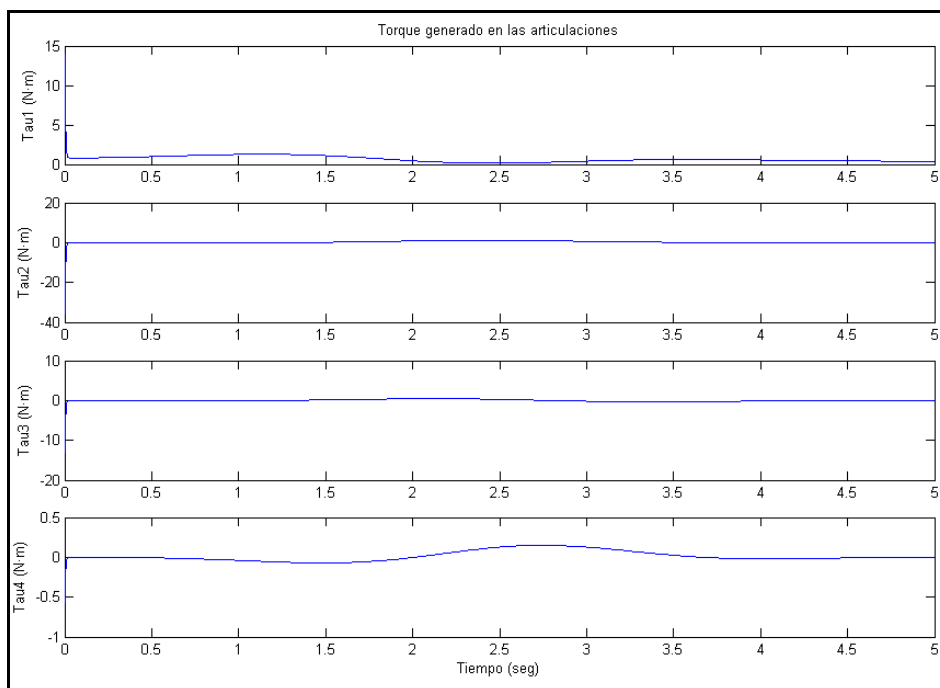


Figura 2-7: Torque ejercido en cada articulación.

2.3. ELECCIÓN DEL CONTROLADOR

Al comparar los resultados obtenidos con ambos controladores, se forma la tabla 2.1, donde se indica el promedio de las diferencias obtenidas de las simulaciones.

Tabla 2.1: Comparación de controladores.

	PD	PID
Error de servo [rad]	0,003	0,001
Peak de torque inicial	[9,4 -22,9 -8,3 -0,3]	[14 -35,8 -13 -0,6]
Torque en estado permanente	[0,95 -0,53 -0,26 0,0006]	[0,95 -0,54 -0,27 -0,0008]

Por lo tanto el controlador escogido para realizar la tarea automática del manipulador será un controlador proporcional derivativo, dado el menor promedio de torque inicial ejercido por los actuadores. De esta forma, la programación del microcontrolador deberá ser de tal forma que éste se comporte como este tipo de controlador.

2.4. PROGRAMACIÓN DEL MICROCONTROLADOR

A través de un conjunto de instrucciones escritas en lenguaje PBASIC, se programa en el PIC un generador de trayectorias como el visto en el capítulo 2, el cual determina las variables articulares para cada articulación, las que se transforman en una magnitud de torque, la que es transmitida a los actuadores que finalmente hacen que el manipulador se desplace hasta la posición de transporte. Otro conjunto de instrucciones permite al microprocesador leer la información presentada por los sensores de posición a medida que se desplaza el manipulador, dicha información es comparada por el procesador con las respectivas magnitudes articulares provenientes del generador de trayectorias para efectuar las correcciones necesarias al desplazamiento del manipulador.

Existe una segunda forma de programar este microcontrolador. Ésta es usando una herramienta de control y obtención de datos para Basic Stamp a través de Matlab-Simulink desarrollada en la Universidad Politécnica de Brooklyn.

Esta herramienta permite llevar la simulación presentada al microprocesador, a través de un conjunto de bloques e instrucciones especialmente diseñadas para esto.

Este segundo método es relativamente más simple de utilizar debido a que al trabajar en Simulink se busca, a través de simulaciones, el controlador que proporcione la mejor respuesta para que el manipulador realice la trayectoria deseada. Una vez encontradas las correspondientes magnitudes de las matrices K_p y K_v , este controlador es exportado en forma directa hacia el microprocesador, donde se puede ejecutar la acción deseada.

La desventaja que presenta este método, es que demanda una mayor cantidad de memoria que el primero y la ejecución del programa es más lenta debido a los intervalos que se generan al traducir el lenguaje de Matlab (C) a PBASIC y luego éste a lenguaje de máquina para ser ejecutado por el microprocesador. Por lo tanto se generan retardos inconvenientes para el control del manipulador que no existen al utilizar el programa Basic Stamp Editor.

Por esta razón, se eligió programar el controlador usando el lenguaje PBASIC, ya que al estar diseñado específicamente para el PIC 16F57, requiere una menor cantidad de memoria, optimiza las capacidades del microprocesador y presenta una mayor velocidad de ejecución, sin tener los retardos que se generan a través de Matlab.

CONCLUSIONES

De acuerdo a las características del sistema de control desarrollado, basado en un modelo matemático general, se concluye que éste puede ser aplicado a cualquier manipulador, permitiendo una correcta evaluación y simulación de éste antes de ser construido y ampliando sus capacidades a otras tareas que contribuyan al desarrollo del buceo de salvataje y a la investigación submarina.

El método de control teleoperado mediante un joystick es apropiado para controlar un manipulador y permitir que realice las tareas seleccionadas en este trabajo, debido a que representa un dispositivo de entrada de fácil control para un operador, ya que mediante la simulación en software se pudo demostrar su flexibilidad y afinidad con el modelo del manipulador, el cual respondió en forma estable y sin problemas.

El sistema de control automático del manipulador se basó en el modelo dinámico de éste presentado en el capítulo 1. Con esta información se establece la estrategia de control conocida como par computado, que no es más que el control del manipulador utilizando como entradas del sistema la trayectoria articular y sus derivadas en el tiempo, para obtener el torque necesario en cada articulación para producir el movimiento deseado.

Se demostró mediante herramientas de software, que para la ejecución automática de movimientos del manipulador, la mejor opción es un controlador Proporcional Derivativo, el cual presenta un reducido error en las trayectorias articulares y un bajo torque inicial en las articulaciones, lo que minimiza el desgaste de los actuadores y las uniones entre los vínculos.

La simulación del sistema de control mediante Matlab, satisfizo los requerimientos planteados, proporcionando un modelo que se ajusta a las condiciones reales de un manipulador para ser utilizado en un ROV.

Por último, se concluye que el sistema robótico del manipulador utilizado como prototipo, se comporta de manera satisfactoria, logrando ser bastante ajustado a lo esperado teóricamente.

BIBLIOGRAFÍA

- [01]. Angeles, Jorge; Fundamentals of Robotic Mechanical Systems: Theory, Methods and Algorithms; 2ª edición, Montreal, Canadá, Springer Editions, 2002.
- [02]. Angulo Usategui, José Mª; Romero Yesa, Susana, et al; Introducción a la Robótica; 1ª edición, Madrid, España, Thomson Editores, 2005.
- [03]. Angulo Usategui, José Mª; Angulo Martínez, Ignacio; et al; Microcontroladores PIC, la Clave del Diseño; 1ª edición, Madrid, España, Thomson Editores, 2003.
- [04]. Craig, John J.; Robótica; 3ª edición, Editorial Pearson, Prentice Hall, México, 2006
- [05]. Kelly, Rafael y Santibáñez, Víctor; Control de Movimiento de Robots Manipuladores; 1ª edición, Madrid, España, Pearson Prentice Hall, 2003.
- [06]. Nise, Norman S.; Control Systems Engineering; 4ª edición, Estados Unidos, John Wiley & Sons Inc; 2004.
- [07]. Ollero Baturone, Aníbal; Gómez de Gabriel, Jesús, et al; Teleoperación y Telerrobótica; 1ª edición, Madrid, España, Pearson Prentice Hall, 2003.
- [10]. Ollero Baturone, Aníbal; Robótica. Manipuladores y Robots Móviles; 1ª edición, Barcelona, España, Editorial Alfaomega, 2007.