

# Diseño, Construcción y Control de un Robot Cuadrúpedo con Actuadores de Alto Desempeño Conectados en Red

Bautista Quintero Ricardo<sup>1</sup>, Aguirre Cerrillo Fabio Abel<sup>1</sup>, Ramos Andrade José Alfredo<sup>1</sup>,  
Chavira Gutiérrez Diego Enrique<sup>1</sup> y López Cabrera Ramón Jovani<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Instituto Tecnológico de Culiacán,  
Juan de Dios Bátiz 310, Col. Guadalupe, Culiacán, Sinaloa, México, C.P. 80220  
Teléfono: 01(667)7-13-38-04, Fax 01(667)7-16-96-47, [rbautista@itculiacan.edu.mx](mailto:rbautista@itculiacan.edu.mx)

## Resumen

*El avance de los sistemas de control para robots móviles ha sido consecuencia del desarrollo de los sistemas embebidos de control (ECS). Estos incluyen los microprocesadores, microcontroladores, FPGAs y otros diversos dispositivos digitales. El desempeño de estos sistemas permite en la actualidad diseñar y construir robots móviles con relativa simplicidad, debido a que son accesibles en costo y disponibilidad. El software de programación es también una herramienta que en la actualidad simplifica la implementación de algoritmos de control en tiempo real para este tipo de robots.*

*En este contexto, este artículo muestra el diseño, construcción y control de un robot cuadrúpedo de 12 grados de libertad. Específicamente, el tema central del artículo se enfoca en proporcionar comparación del uso de actuadores convencionales de control centralizado y el de actuadores de alto desempeño conectados en red. Se mostraran las ventajas prácticas que tiene el uso de los actuadores conectados en red para desconcentrar las tareas de coordinación de movimiento.*

**Palabras clave:** sistema de control embebido, robot cuadrúpedo de 12 grados de libertad, control centralizado, actuadores de alto desempeño conectados en red.

## 1. Introducción

Los robots móviles han fascinado a los investigadores y desarrolladores en las últimas décadas debido a los retos científicos y tecnológicos que pueden encontrarse al diseñar, construir y/o controlar estas máquinas [1]. En contraste con los robots manipuladores industriales, los robots móviles pueden enfrentarse con entornos desconocidos, lo

cual implica desarrollar un paradigma de control más parecido al de los sistemas que usan los seres vivos [2]. Para esto, la tecnología asociada a robots móviles está en constante desarrollo. Desde la aparición de las computadoras digitales y particularmente las de propósito de control específico en los años 70s, el modo de vivir de la humanidad cambió dramáticamente. Las aplicaciones se han extendido a un nivel exponencial, de hecho el 98% de las computadoras digitales en el mundo son usadas en sistemas embebidos [3] y existen en promedio 3 de estas computadoras por cada ser humano (WSTS, 2005), muchos de estos son empleados en robots móviles [4].

Estos sistemas de control basados en un ECS ofrecen más capacidad de procesamiento a los robots móviles en comparación a sus predecesores. Se puede decir que esta capacidad de procesamiento del ECS ofrece al robot móvil mayor autonomía en el contexto de control. Por ejemplo: en la actualidad el robot “*bigdog*” considerado uno de los robots cuadrúpedos más avanzado del mundo [5] tiene un controlador suficientemente robusto para estabilizar la secuencia de movimiento de las patas en terrenos de difícil acceso. El alto costo de los sensores y las partes mecánicas que usa el *bigdog* lo hace prácticamente inaccesible para muchos centros de investigación.

Paralelamente al desarrollo del *bigdog* diversos centros de investigación dirigen sus esfuerzos a robots más “rentables”. Es decir, en lugar del uso de un robot móvil sofisticado y costoso se prefiere el uso de pequeños robots móviles simples, que –por su bajo costo– permita estudiar tareas de conjunto [6]. Esto es motivado por el interés de imitar el comportamiento algunos sistemas biológicos, como los insectos o pequeños mamíferos [2].

En el contexto nacional, a pesar de no ser México un país altamente industrializado el

desarrollo de la robótica móvil ha tenido contribuciones relevantes, por ejemplo: [7]. Sin embargo, las aplicaciones de robótica móvil en la industria petrolera, la de transformación y hasta la de exploración requiere de mayor desarrollo.

Particularmente en robots móviles con patas, investigadores y desarrolladores nacionales –en general– muestran robots que emplean servomotores de radio control para simplificar la sincronización y el control de las extremidades en la planeación de trayectorias (“*gait control*”). Los servomotores de radio control son sistemas integrados que constan de un actuador y un sensor de posición que pueden ser empleados para construir robots móviles con patas a partir de cálculos de tipo cinemático. Para esto se requiere de un mecanismo de programación que calcule las trayectorias y las ejecute de forma síncrona. En este contexto, este artículo revisa las ventajas y desventajas de emplear este tipo de servomotores y propone el uso de actuadores de alto desempeño conectados en red.

La sección 2 muestra una revisión de los mecanismos de programación para la activación de los actuadores convencionales en relación al costo y resolución obtenida en función de ECS empleado. En la sección 3 se muestra como emplear actuadores de alto desempeño conectados en red para descargar de tareas al sistema central de control y dedicarlo a las tareas de adaptación al terreno. El análisis de resultados de este trabajo se muestra en la sección 4. Conclusiones, discusiones y trabajo futuro se muestran en la sección 5.

## 2. Actuadores ampliamente usados en robots móviles con patas

Como se mencionó en la introducción, en el contexto nacional los actuadores más usados en los robots móviles son servomotores de radio control. Este tipo de actuadores se desarrollaron para la industria del entretenimiento [8]. Estos actuadores son basados en motores de corriente directa que tienen conectado un conjunto de engranes que reducen la velocidad del motor. Esta reducción se traduce en un incremento del torque de salida. La incorporación de un sensor de posición (usualmente un potenciómetro) proporciona la señal de retroalimentación. Adicionalmente un circuito de control también insertado en el servomotor con la finalidad de proporcionar el voltaje adecuado al motor en función de la retroalimentación y una señal de control externa. La señal de control es modulada en ancho de pulso (PWM) y el porcentaje de ciclo útil

proporciona la señal de referencia (*set-point*) para que el eje del servomotor gire a una posición deseada.

Debido a que este tipo de servomotores son de arquitectura cerrada su modelo matemático es desconocido para el usuario. Por lo tanto, al ser inaccesible la arquitectura del controlador el desempeño del actuador no puede ser modificado. En [8] se plantea una metodología para estimar un modelo matemático del servomotor con la finalidad de proporcionar la señal de control adecuada para intentar mitigar el problema de desempeño.

El *setpoint* que define la posición deseada a lo largo de un periodo de tiempo o trayectoria, depende de dos factores fundamentales: 1) una resolución finita del sensor y 2) una resolución finita de la señal de control proporcionada comúnmente por un ECS.

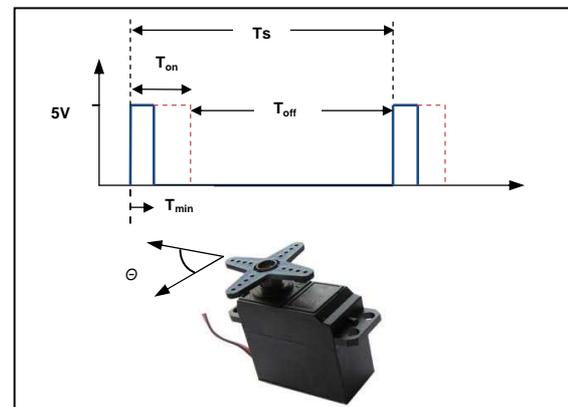


Figura 1. Servomotor de radio control y la señal modulada en ancho de pulso para proporcionar el valor deseado de posición (*setpoint*)

De acuerdo a la Figura 1, la señal de control (pulso cuadrado variable y amplitud 0 a 5Volts) varía su ancho desde  $T_{min}$  hasta  $T_{on}$  y esto determina la posición deseada  $\theta$ . El valor de  $\theta$  es directamente proporcional al ciclo útil. La resolución depende de la variación mínima del ciclo útil y también de la resolución del potenciómetro empotrado en el eje del motor. Para programar el movimiento de varios servomotores simultáneamente empleando un ECS hay diferentes estrategias de programación. En este artículo se mostraran dos tipos de programas que permiten generar las señales (como la mostrada en la Figura 1).

### 2.1 Activación en paralelo

El reto fundamental de programar esa señal modulada en ancho de pulso es los cortos (alrededor 0.3ms) y largos periodos (22ms) de tiempo que se deben establecer con variaciones de microsegundos.

Adicionalmente generar varias de estas señales (una por cada servomotor) implica programar uno o varios timers del ECS para que el proceso central dedique su procesamiento central a general las trayectorias de movimiento de los servomotores. Entre más patas tenga el robot mas servomotores requiere y esto implica más recursos de hardware (requiriendo mejor desempeño de CPU).

La programación en paralelo se realiza con el empleo de un *timer* y una estructura de interrupción como se muestra en el pseudocódigo de la Figura 2.

```
#INT_TIMER1 // Rutina de interrupción
void task_timer() {
    Conta_M1++; //Algoritmo para ServoMotor 1
    if(Conta_M1>Time_SP1)
    {
        // Este código se ejecuta 1 tick * Time_SP1
        if(pin_X1==1)
        {
            Time_SP1=Ticks_off1;
            Desactiva_bit(pin_X1); // pin_X1=0
        }
        else
        {
            Time_SP1=Ticks_on1;
            Activa_bit(pin_X1); // pin_X1=1
        }
        Conta_M1=0;
    }
    Conta_M2++; //Algoritmo para ServoMotor 2
    if(Conta_M2>Time_SP2)
    {
        // Este código se ejecuta 1 tick * Time_SP2
        if(pin_X2==1)
        {
            Time_SP2=Ticks_off2;
            Activa_bit(pin_X2); // pin_X2=1
        }
        else
        {
            Time_SP2=Ticks_on2;
            Desactiva_bit(pin_X2); // pin_X2=0
        }
        Conta_M2=0;
    }
    .
    .
    //Se repite el mismo algoritmo para cada
    //servomotor
}
```

**Figura 2 Pseudocódigo de la activación en paralelo de *n* numero de servomotores de RC**

La rutina de interrupción se ejecuta cada base de tiempo llamada “*tick*”, lo cual es el tiempo que define la resolución de la variación de ancho de pulso activo. La ecuación (1) define la relación entre la posición deseada  $\theta$  (en grados) y el número de *ticks* ( $N_{Ticks}$ ) o *Ticks\_on* del pseudocódigo anterior.

$$N_{Ticks} = \frac{Ticks_{max} - Ticks_{min}}{\theta_{max}} \theta + Ticks_{min} \quad (1)$$

Donde, las constantes  $Ticks_{max}$  y  $Ticks_{min}$  son definidas por los tiempos máximos y mínimos de la señal PWM en alto, ver Figura 1. Esto los define el fabricante (servomotor FUTABA S3003 el tiempo máximo es de 2.1 ms y el tiempo mínimo es de 0.3 ms). La conversión de estos tiempos a *Ticks* dependerá fundamentalmente de la velocidad de procesamiento del ECS empleado. De forma similar el ángulo máximo  $\theta_{max}$  es definido por el servomotor, usualmente es de  $180^\circ$  como el servomotor antes mencionado.

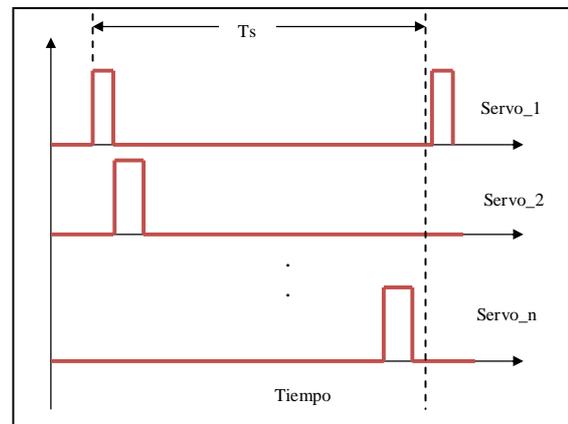
## 2.2 Activación en serie

En la activación en serie, cada servomotor recibe la señal PWM en cascada, y por lo tanto requiere que termine de ejecutarse la secuencia del servomotor 1 para que inicie la del 2, hasta la de *n* servomotores.

La programación en serie de la secuencia de movimiento es programada con la ayuda de un *timer* (en el caso de un microcontrolador) y un contador y bascula en el caso de un FPGA. La generación de las señales de control para los servomotores se tiene una resolución basada en el tiempo  $T_{clk}$  que depende de la velocidad del procesador o del reloj del FPGA. Ver la ecuación (2).

$$T_{int} = T_{clk} PR (2^{\#bitsTimer} - \#Ticks) \quad (2)$$

En donde *PR* es el factor pre-escalador para dividir la frecuencia del oscilador (interno o externo al sistema embebido). El  $2^{\#bitsTimer}$  es la capacidad de conteo máximo. Y el *#Ticks* define el porcentaje de ciclo útil para cada motor –como se dijo antes, uno a la vez, en forma serial–. Las señales de salida requieren ser como se muestran en la Figura 3.



**Figura 3 Secuencia serial de activación de RCservos**

En una aplicación de control de un robot móvil empleando los servomotores, el periodo de muestreo en esta configuración serial tiene importantes restricciones. Por ejemplo, el periodo de muestreo requiere ser al menor o igual a  $T_s$  para evitar efectos de superposición periódica, ver [9] para mas detalles. Cuando no se pueda cumplir con la condición anterior se requiere emplear varios ECSs. Esto permite aumentar el número de servomotores trabajando en forma coordinada y simultanea. En [1] se muestra una forma organizada de trabajar con un sistema de robot móvil bípedo en donde se conectan 12 servomotores simultáneamente.

### 3. Actuadores de alto desempeño

Como resultado de la complejidad de operar un número considerable de actuadores por un solo ECS hay una alternativa para simplificar la sincronía del robot. La tecnología de actuadores inteligentes conectados en red permite al usuario dedicar más el procesador a tareas de planeación de trayectoria relacionadas a cinemática directa o inversa [10], ejecución de control del par controlado [11], algoritmos de estabilización y adquisición de datos sobre el terreno, entre otros [1].

La base tecnológica de estos actuadores inteligentes surge en las aplicaciones industriales que requerían desconcentrar el proceso de control en varios procesadores trabajando en paralelo. Este concepto se desarrollo en la industria con diversos protocolos, topologías y tipos de buses. Por ejemplo la tecnología *ASI*, *bitbus*, *profibus*, *fieldbus* y más recientemente el sistema *Ethernet*. Todas estas tecnologías están enfocadas a comunicaciones a distancia y permiten manejar varias computadoras industriales o PLCs en conjunto.

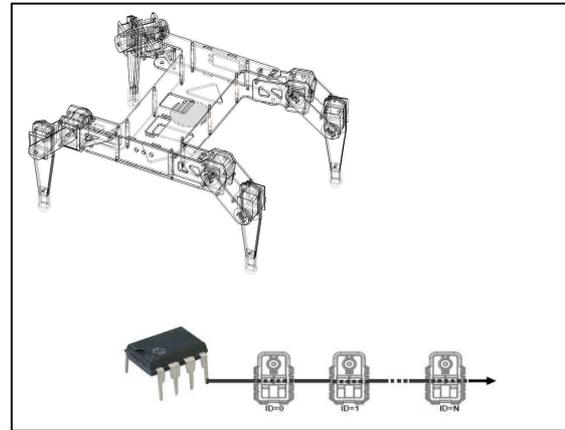
De esta manera las redes industriales evolucionan y permiten en la actualidad en manejo práctico de servomotores con capacidades similares a las de una red industrial conectados en un bus de actuadores. Por ejemplo, la Tabla 1 muestra una comparación entre las características básicas de un servomotor RC estándar y un servomotor de alto desempeño para conexión en red. Adicionalmente a lo descrito en la tabla los servomotores digitales AX-12+ cuentan con sensores de temperatura, posición y permite definir de forma programada el torque y velocidad máximos. Con los actuadores AX-12+ se pueden controlar hasta 255 servomotores por cada pin del microcontrolador utilizando el protocolo RS-232.

**Tabla 1 comparativo de un servomotor de radio control estándar y un servomotor de alto desempeño**

	Dynamixel AX-12+	Hitec HS-311
Voltaje de operacion	7V~10V	4.8V~6V
Torque (Kgf/cm)	12~16.5	3~3.5
Angulo de operacion	300°	180°
Feedback	Si	No
Comunicacion	Serial	PWM
Resolucion	0.35°	*

\*depende de la velocidad del procesador que lo habilite.

El sistema de conexión de red entre los servomotores de alto desempeño y la ECS es ilustrada en la Figura 4.

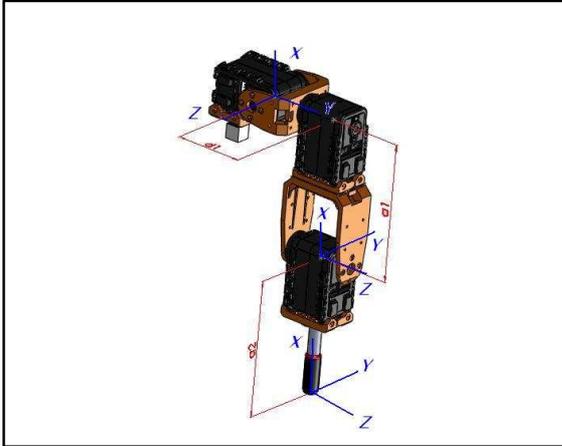


**Figura 4 Sistema de conexión en red serial para los actuadores del robot.**

El propósito de este tipo de topología esta enfocado a distribuir las señales de control y alimentación eléctrica del servomotor. Los comandos de movimiento son transmitidos por un sistema central que calcula las trayectorias de los eslabones. Para estas trayectorias se define el parámetro de Denavit-Hatemberg empleando sólo una pata que consta de tres articulaciones (3GDL). El vector de posicionamiento  $p$  se define así:

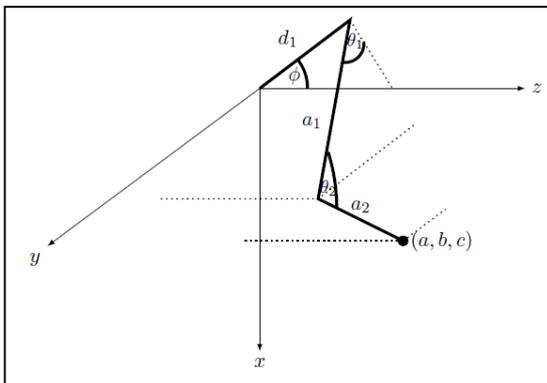
$$\begin{aligned}
 px &= a_3 \cos\theta_1 \cos\theta_2 \cos\theta_3 \\
 &\quad - a_3 \cos\theta_1 \sin\theta_2 \sin\theta_3 \\
 &\quad + a_2 \cos\theta_1 \cos\theta_2 \\
 &\quad - d_2 \sin\theta_1 \\
 py &= a_3 \sin\theta_1 \cos\theta_2 \cos\theta_3 \\
 &\quad - a_3 \sin\theta_1 \sin\theta_2 \sin\theta_3 \\
 &\quad + a_2 \sin\theta_1 \cos\theta_2 \\
 &\quad + d_2 \cos\theta_1 \\
 pz &= -a_3 \sin\theta_2 \cos\theta_3 - a_3 \cos\theta_2 \sin\theta_3 \\
 &\quad - a_2 \sin\theta_2
 \end{aligned} \tag{3}$$

En la Figura 5 se muestra los parámetros de Denavit-Hatemberg para la geometría de cada pata del robot.



**Figura 5** dibujo de una de las patas del robot especificando el offset  $d_1$  y las distancias entre centro del eslabón 2 y 3

Para la activación de las patas sobre un terreno plano se programa un algoritmo basado en la cinemática inversa de cada una de las patas. Para esto se hace un diagrama en cuerpo libre y se deducen las ecuaciones que definen las variables articulares en función de la posición en el espacio 3R debe realizar cada pata. Al conjuntar las trayectorias de cada pata se puede integrar la relación del modo de andar.



**Figura 6** Diagrama geométrico de una de las patas para hacer el cálculo de la cinemática inversa.

En forma compacta la ecuación (4) muestra las expresiones que definen las variables articulares en función de la posición que la pata debe seguir para dar los pasos. El programa de generación de trayectoria se escribe basado en una la ecuación del círculo para simplificación de cálculos. Se escribe en una tabla los ángulos a seguir por cada motor y se

transmiten en red para que el robot ejecute una secuencia de andar.

$$\theta_1 = \varphi \pm \cos^{-1} \left( \frac{a_1^2 + A^2 - a_2^2}{2Aa_1} \right)$$

$$\theta_2 = \tan^{-1} \left( \frac{b - y_0}{a - x_0} \right) \quad (4)$$

$$y \phi = \frac{\pi}{2} - \tan^{-1} \frac{a}{c} - \tan^{-1} \frac{d_1}{B}$$

Para lograr el equilibrio del robot en caminata a relativa baja velocidad se mantienen 3 patas en el piso y una por encima de la plataforma del robot. Las 4 patas se mueven simultáneamente para caminar sobre una superficie plana.

#### 4. Análisis de resultados

Durante el desarrollo de este proyecto se llegó a los siguientes resultados. La primera versión de este robot móvil estaba construida con servomotores de RC y la resolución de los movimientos es restringida en el modo paralelo. La implementación con este tipo de servomotores requiere de una estimación apropiada de la dinámica al ser conectados con la carga. La falta de este conocimiento repercute en el desempeño del sistema de control. El tiempo de muestreo de los sistemas a construir es el factor fundamental que se debe confrontar con los datos mostrados en las Figura 1 y Figura 4. El código de la Figura 2 puede ser una base simple para mandar las señales en forma simultánea, tomando en cuenta las limitaciones para poder generar señales de resolución adecuada para evitar vibración en los servos.



**Figura 7** Fotografía del robot cuadrúpedo completo.

En la Figura 7 se muestra una fotografía del robot en su etapa final incluyendo su sistema de

control basado en un microcontrolador DsPIC33FJ128GP8. Esta versión de robot fue construido con servos Dynamixel AX-12+.

## 5. Conclusiones

El diseño, construcción y control de este sistema robot fue hecho inicialmente con servomotores de radio control y se puede concluir lo siguiente: la cantidad de operaciones del sistema de control al tener dos tareas de la misma prioridad pueden ser menos confiables en comparación de tareas desconcentradas. El segundo prototipo construido con servomotores de alto desempeño permiten mayor capacidad de torque para los movimientos y la resolución del movimiento angular es altamente superado. La red de comunicación es confiable para una cantidad considerable de actuadores y las señales de regreso de los actuadores pueden advertir de una anomalía. Esto es muy útil en robots móviles con patas ya que la energía que consume el sistema es el factor que define su autonomía. La relación costo beneficio de estos actuadores de alto desempeño puede ser bien justificado en diversos proyectos de este tipo.

Este proyecto solo es la base de una futura investigación relacionada a estudiar un mecanismo de programación de tipo evolutivo que le permita al robot aprender a caminar en entornos complejos.

Actualmente el robot tiene los elementos de hardware para conocer su orientación con la finalidad recopilar datos del terreno.

## Referencias

- [1] T. Bräunl, *Embedded Robotics, Mobile Robot Design and Applications with Embedded Systems*, 2006.
- [2] B. Hasslacher, Mark W. Tilden, "Living Machines," presented at the Workshop on Bio-Mechatronics, 1996.
- [3] B. a. R. Gaetano, W., "Embedded Computation Meets The World Wide Web.," *Commun. ACM*, vol. 43, pp. 59-66, 2000.
- [4] WSTS. Embedded Systems Statistics [Online].
- [5] K. Berns. 2006, <http://www.walking-machines.org/>.
- [6] K. skrzypczy, "Control of a team of mobile robots based on non-cooperative equilibria with partial coordination," *international journal math computing science*, vol. 15, pp. 89-97, 2005.
- [7] C. M. Soria, Carelli R, Kelly R, Zannatha J. M., "Coordinated Control Of Mobile Robots Based On Artificial Vision," *International Journal of Computers, Communications & Control*, vol. 1, pp. 85-94, 2006.
- [8] T. I. Wada, M. Kitayoshi, R. Maruta, I. Sugie, T., "Practical modeling and system identification of R/C servo motors," in *Control Applications, (CCA) & Intelligent Control, (ISIC)* St. Petersburg 2009, pp. 1378-1383.
- [9] G. Ellis, *Control System Design Guide*, 2004.
- [10] E. O. Burkus, P., "Autonomous Hexapod Walker Robot "Szabad(ka)"", in *Intelligent Systems and Informatics, 2007. SISY 2007. 5th International Symposium on Subotica*, 2007, pp. 103-106.
- [11] F. L. Lewis, Dawso D. M. and Abdalla C. T., *Robot Manipulator Control Theory and Practice*, 2004.