



TLATEMOANI
Revista Académica de Investigación
Editada por Eumed.net
No. 20 – Diciembre 2015
España
ISSN: 19899300
revista.tlatemoani@uaslp.mx

Fecha de recepción: 07 de julio de 2015
Fecha de aceptación: 11 de noviembre de 2015

MODELADO Y CONTROL DE MANIPULADORES ROBÓTICOS PARA APLICACIONES BIOMÉDICAS

Zaira Pineda Rico
zaira.pineda@uaslp.mx
Francisco Javier Martínez
fjml@uaslp.mx
Pedro Cruz Alcantar
pedro.cruz@uaslp.mx
Coordinación Académica Región Altiplano
Universidad Autónoma de San Luis Potosí

RESUMEN

Tomando en cuenta las similitudes físicas y de ejecución entre un robot manipulador y la prótesis artificial de la extremidad superior, muchos de los esquemas de control usados en manipuladores se pueden adaptar para ser utilizados en brazos prostéticos robóticos. Es por esto que un manipulador robótico puede ser considerado como una buena representación del brazo humano y puede ser utilizado como plataforma para desarrollar estrategias de control que puedan ser usadas en prototipos de prótesis artificiales. Sin embargo, el diseño de estrategias de control apropiadas involucra la consideración de representaciones matemáticas del sistema, tales como sus modelos cinemático y dinámico. El modelado matemático es fundamental en el proceso de

diseño dependiendo de los objetivos de la implementación, las restricciones de la tarea a ejecutar, y el comportamiento deseado del robot. La dificultad en obtener dichos modelos varía de acuerdo a la complejidad de la cinemática de la estructura mecánica y el número de grados de libertad (GDL) del manipulador.

Palabras clave: Robot manipulador, modelado, control, prótesis de brazo, bioseñales, aplicaciones biomédicas

ABSTRACT

Considering the physical similarities and performance requirements between the robot manipulator and the artificial prosthetic for the superior limb, most of the control schemes used in manipulators may be adapted to be used by prosthetic arms. This is why a robot manipulator can be considered as a good representation of the human arm and might be used as a platform to develop control strategies that can be used in prototypes of future artificial prosthetics. However, the design of suitable control strategies involves the consideration of mathematical representations of the system, such as kinematics and dynamics models. Mathematical modelling is fundamental in the designing process depending of the objectives of the implementation, the constraints of the task to be executed, and the desired robot's performance. The difficulty in obtaining these models varies according to the complexity of the kinematics of the mechanical structure and the number of degrees of freedom (DOF) of the manipulator.

Keywords: Robot manipulator, modelling, control, arm prosthesis, biosignals, biomedical applications.

1. INTRODUCCIÓN

Los avances tecnológicos han llevado al desarrollo de diversos tipos de dispositivos protésicos diseñados para asistir a personas con algún tipo de discapacidad. Estos dispositivos están diseñados para compensar la incapacidad que los órganos o extremidades del usuario pudieran tener ofreciendo una sensación natural y comodidad

al paciente. Para cumplir con esto último, el control de los dispositivos prostéticos está basado generalmente en el uso de bioseñales. Entre las prótesis basadas en bioseñales se pueden mencionar las prótesis neurales, las prótesis mioeléctricas y las prótesis robóticas. Las prótesis mioeléctricas usan la actividad eléctrica de los músculos para controlar dispositivos mecánicos usados para ejecutar una tarea, por ejemplo la rotación de una muñeca, la flexión de un codo o el agarre de una mano. Las prótesis neurales son dispositivos basados en actividad cerebral que son capaces de compensar por daño neural que afecta los procesos motores, sensoriales o cognitivos. Hay varios tipos de prótesis neurales: las prótesis visuales, los implantes auditivos, las prótesis cognitivas y los implantes motores. Las prótesis visuales estimulan las neuronas del sistema visual para crear imágenes en el cerebro. Los implantes auditivos como el implante coclear y el implante auditivo de tronco cerebral estimulan los nervios auditivos ayudando al cerebro a procesar el sonido. Las prótesis cognitivas se usan para replicar funciones cerebrales que son originalmente ejecutadas por el tejido que se ha dañado. Los implantes motores se utilizan para control de movimiento consciente de extremidades mecánicas, o prótesis robóticas. Las prótesis robóticas se construyen como sistemas completos que incluyen sensores, controladores y actuadores para controlar estructuras mecánicas sofisticadas como brazos robóticos.

Cuando se utiliza una computadora para procesar actividad neuronal que será utilizada para controlar un dispositivo, el sistema se conoce como Interface Cerebro Computadora o Brain Computer Interface BCI. Hay varios desarrollos que han ayudado a estimular la investigación en el área de BCI. Braingate, por ejemplo, es un sistema sofisticado que consiste en un arreglo de microelectrodos que se pueden implantar en el cerebro para registrar señales, y utiliza un decodificador para encontrar comandos útiles para el control de dispositivos externos como una computadora, una silla de ruedas, o la prótesis de una extremidad. En la mayoría de los casos el desarrollo de las interfaces diseñadas para controlar extremidades prostéticas robóticas superiores, se lleva a cabo usando brazos robóticos comerciales cuya anatomía es similar al brazo humano. Dos dispositivos populares que cumplen con esta descripción son el DLR Light Weight Robot desarrollado por el Instituto de robótica y mecatrónica en el German

Aerospace Center, y el DEKA que pertenece a un proyecto patrocinado por la Defense Advanced Research Projects Agency y la U.S. Army Research Office.

Un robot manipulador es una estructura mecánica que puede ser comandada para realizar una tarea específica, su movimiento involucra un sistema complejo de sensores y motores. La computadora que trabaja como interface entre el usuario y el manipulador contiene el controlador del sistema. La complejidad del controlador varía de acuerdo a la arquitectura del manipulador, sus grados de libertad y la tarea a ejecutar. La efectividad del controlador dependerá de las consideraciones cinemáticas y dinámicas tomadas por el diseñador. En la mayoría de los casos estas consideraciones se basan en el comportamiento que exhiben modelos matemáticos del sistema a diferentes tipos de estímulos.

El uso de modelado matemático en robótica ha apoyado el diseño de varios tipos de robots, como los robots inspirados por animales, los robots móviles con ruedas, los robots humanoides y manipuladores con dos o más grados de libertad. En el caso particular de los manipuladores robóticos similares a los brazos robóticos prostéticos, se han desarrollado muchos modelos y métodos para la identificación de parámetros de acuerdo a la configuración física del brazo, la cual depende del mercado objetivo. Este es el caso de los brazos robóticos Mitsubishi PA-10 y el PUMA 560, y de sistemas para prototipos como el Hyundai Robot Hardware en el lazo de simulación, cuya estructura les ha permitido alcanzar popularidad no sólo en la industria sino en laboratorios de investigación alrededor del mundo, donde son utilizados para verificación experimental y diseño. Además, algunas configuraciones populares como los manipuladores Stanford y Scara, han sido propiamente estudiadas con el propósito de ilustrar las diferentes metodologías para modelado de manipuladores y el análisis cinemático.

Existen también interfaces de computadora que usan el movimiento de los ojos como señales de control, aunque estas son usadas principalmente para comunicación, búsquedas y navegación en internet, control de aplicaciones y control de dispositivos periféricos.

2. MANIPULADORES ROBÓTICOS

Los manipuladores robóticos han estado en la industria desde 1950. En general, la estructura mecánica de un robot manipulador consiste en una secuencia de cuerpos rígidos llamados eslabones que están interconectados por mecanismos de rotación o translación que funcionan como articulaciones. Generalmente se conecta un efector final en el último eslabón cuya arquitectura le permita agarrar objetos. La configuración específica de los eslabones y articulaciones trazan los requerimientos que deben ser considerados en el diseño del esquema de control usado para mover el manipulador.

Recientemente, los manipuladores de brazo completo o Whole Arm Manipulators WAM han llamado la atención de los investigadores debido a su cinemática similar a la del ser humano. En el caso de los manipuladores de brazo completo, como en otros manipuladores con configuración serial de eslabones, las ecuaciones dinámicas se pueden calcular usando métodos recursivos como el método de Euler-Lagrange, el método de Newton-Euler o una combinación de ambos. Muchos de los modelos matemáticos que han sustentado el diseño de controladores para los manipuladores WAM están basados en la computación de las ecuaciones matemáticas de robots seriales de múltiples eslabones. Las ecuaciones pueden ser obtenidas usando el método recursivo de Newton-Euler para encontrar las fuerzas de Coriolis, las fuerzas centrífugas y las fuerzas inerciales observadas cuando el elemento final está en movimiento. Además, se hace uso del Jacobiano para minimizar las condiciones de singularidad que incrementan la carga computacional del algoritmo de control, esta metodología involucra tanto las fuerzas operacionales como las fuerzas de la articulación. Para evitar tiempos de ejecución significativos, algunos autores han encontrado en MATLAB-SimMechanics una herramienta cómoda y sencilla para diseñar sistemas mecánicos usados en verificación experimental.

La computación del modelo dinámico del robot manipulador tiene un rol importante en la simulación de movimiento, en el análisis de la estructura del manipulador y en el diseño

de algoritmos de control óptimos. El desempeño de manipuladores robóticos de múltiples elementos se ve frecuentemente comprometido por la influencia de las fuerzas de gravedad que afectan la dinámica del sistema, entre otras no linealidades como las fuerzas de fricción y las fuerzas inerciales. En la mayoría de los casos la minimización del error en la ejecución de tareas demandará la implementación de un controlador adecuado capaz de lidiar con los efectos de la gravedad, o la adición de un módulo de compensación de la gravedad al lazo de control.

3. MODELADO MATEMÁTICO

Desde el punto de vista de la mecánica, un manipulador se representa como una secuencia de cuerpos rígidos llamados eslabones, interconectados por medio de articulaciones. Cada uno de estos eslabones simboliza un elemento importante de la arquitectura del manipulador: un brazo para posición, una muñeca para dar destreza y un efector final que realiza una tarea específica.

Al mismo tiempo, la movilidad de la estructura del manipulador dependerá del tipo de articulación que interconecta los eslabones, que pueden ser tanto prismáticas como rotacionales. Una articulación prismática produce un movimiento traslacional entre dos eslabones, mientras que una articulación rotacional produce una rotación relativa entre dos eslabones. Las características de los eslabones y articulaciones forman el espacio de trabajo del manipulador. La estructura mecánica descrita previamente está conectada a sensores internos y externos que envían información de movimiento a una computadora que contiene el controlador del sistema. Toda esta información sobre desplazamiento, la velocidad y aceleración de los eslabones es usada para determinar el comportamiento del controlador, cuyo objetivo es manipular la estructura mecánica efectivamente de manera que la tarea deseada sea ejecutada exitosamente.

Existen dos tipos de análisis matemáticos usados por el controlador para posicionar el manipulador en una ubicación requerida: el estudio dinámico y el estudio cinemático. El análisis cinemático le dice al controlador a dónde hay que moverse, mientras que el análisis dinámico revela qué hacer para llegar ahí. Por lo tanto, los modelos

matemáticos se han desarrollado para entender y controlar efectivamente el comportamiento del manipulador considerando la posición del efector final, las fuerzas de los actuadores, las velocidades y las aceleraciones de las articulaciones.

Hay dos problemas cinemáticos que se pueden resolver para identificar la posición y orientación del efector final de acuerdo a la información suministrada sobre las articulaciones. Si las variables articulares (ángulos y translaciones) son dadas, se puede calcular la posición del efector final resolviendo el problema cinemático directo, de otra manera si solamente se conoce la posición del efector final, se puede encontrar los valores de las variables articulares a través del problema cinemático inverso.

La computación del modelo dinámico de un robot manipulador tiene un rol importante en la simulación de movimiento, el análisis de la estructura del manipulador y el diseño de algoritmos de control. Simular el movimiento del manipulador permite probar estrategias de control y técnicas de planeación de movimiento sin necesidad de poseer el sistema físico. Por ejemplo, Olsen y Petersen (Olsen and Petersen, 2001) presentaron un método para encontrar los parámetros del modelo de un robot con el fin de apoyar el diseño de controladores para robots basados en el modelo. También propusieron la computación de los parámetros del modelo de fricción usando métodos experimentales para dos eslabones del Mitsubishi PA-10 robot. Kostic y sus colegas (Kostic *et al.*, 2004) mostraron la importancia de agregar un modelo de fricción preciso en control no lineal basado en modelo. Su trabajo muestra un procedimiento para mejorar el desempeño de un brazo robótico RRR y valida sus resultados a través de una tarea de escritura. Otra contribución al modelo del robot Mitsubishi PA-10 lo presenta Bompos (Bompos *et al.*, 2007), donde los autores describen la identificación completa de los parámetros del modelo, la estimación de la rigidez de las articulaciones y un nuevo modelo no lineal de fricción para las articulaciones del manipulador. La verificación del modelo se hace a través de una tarea de seguimiento de trayectoria.

De acuerdo a los resultados obtenidos en los trabajos mencionados anteriormente, es recomendable incluir un modelo de fricción en el modelo del sistema mecánico para

lograr el diseño de un controlador adecuado. La acción más recomendable es identificar la fricción manifestada en el sistema y usar estos datos para crear el modelo matemático que pueda servir como referencia. Debido a que la no linealidad de la fricción puede afectar el desempeño del controlador, el uso de un modelo de fricción adecuado permite una mejor compensación. Existen muchos modelos de fricción empleados cuando se modelan mecanismos de control de posición. Estos modelos incluyen varios componentes como la fricción cinética, la fricción estática y la fricción viscosa. Armstrong y colegas publicaron una recopilación (Armstrong-Helouvry et al., 1994) donde se explica toda la teoría detrás del fenómeno de fricción y propone e integra un modelo de fricción basado en siete parámetros que incluyen la fricción estática, la fricción cinética, la fricción viscosa y la curva de fricción de Stribeck. A su vez, Canudas de Wit y colegas (Canudas de Wit et al., 1995) propusieron un modelo dinámico que considera las superficies de contacto como el contacto entre cerdas e ilustra el procedimiento de identificación de la fricción para validar el modelo usando datos experimentales (Canudas de Wit and Lischinsky, 1997). Hensen y colegas (Hensen et al., 2000) presentaron dos modelos de caja gris y los validaron usando datos experimentales obtenidos de un brazo en rotación.

En algunos casos la influencia de la fricción no afecta significativamente el desempeño del sistema, por lo que una técnica de compensación podría no ser necesaria. En otros casos la estrategia de control puede ser lo suficientemente efectiva para compensar el error causado por las no linealidades debidas a la fricción en las articulaciones del manipulador. Por ejemplo, un control PID es capaz de lidiar con la fricción cuando todos sus parámetros son seleccionados convenientemente (Lewis et al., 2004). Sin embargo, sintonizar los parámetros de un PID no es una tarea sencilla y frecuentemente se requiere de la implementación de técnicas basadas en métodos iterativos que usan datos experimentales (Hamamoto et al., 2003; Hildebrand et al., 2005).

4. CONTROL DE MANIPULADORES

Las articulaciones de los manipuladores robóticos siguen diversas trayectorias para completar una tarea específica. La precisión en el movimiento de la estructura mecánica depende de las fuerzas aplicadas a las articulaciones del manipulador usando controladores. Existen varias técnicas de control lineal y no lineal usadas para el control articular de los manipuladores robóticos, considerando el manipulador como un sistema una-entrada/una-salida o single-input/single-output SISO, o como un sistema múltiples-entradas/múltiples-salidas o Multi-input/Multi-output MIMO.

Cuando un robot manipulador es considerado como sistema SISO, cada eslabón se controla independientemente y los efectos de acoplamiento se consideran como perturbaciones. Si las perturbaciones son constantes se puede aplicar un compensador. Entre los compensadores más utilizados en robótica son el Proporcional Derivativo PD y Proporcional integral y Derivativo PID. Cuando la trayectoria articular cambia con el tiempo, el compensador puede ser apoyado agregando un lazo anticipativo a la salida del compensador. Si el modelo matemático del sistema es conocido, se puede usar un sistema dinámico basado en el modelo (observador) para compensar por las perturbaciones usando una estimación del estado completo del sistema.

Cuando el manipulador es considerado como un Sistema MIMO el problema de control es no lineal. En la mayoría de los casos, el objetivo de la técnica de control es cancelar las no linealidades basándose en el modelo dinámico del manipulador. Las estrategias de control usadas para compensar las no linealidades en sistema MIMO son control PD con compensación de la gravedad, control dinámico inverso, control robusto y control adaptivo. El control dinámico inverso está basado en la cancelación exacta de las no linealidades usando un estado de realimentación no lineal. La implementación de control robusto depende de una estimación de las incertidumbres y la tolerancia de la estructura mecánica para establecer entradas de control. El control adaptivo usa una

estimación en línea del modelo dinámico haciendo adaptaciones en línea que compensan por perturbaciones externas.

Las estrategias de control usadas comúnmente en los manipuladores robóticos son el control articular Proporcional Derivativo PD y el control articular Proporcional Integral Derivativo PID. Los controladores PD son fáciles de implementar y es relativamente simple sintonizar sus parámetros, sin embargo éstos no son capaces de compensar por los efectos de la gravedad. Por lo tanto, se debe incluir módulos para compensar la gravedad en el lazo de control para reducir el error de offset en la respuesta del sistema. La compensación de la gravedad es un problema importante en el control de manipuladores, sin embargo es la existencia de otras perturbaciones lo que representa un desafío real cuando se diseñan estrategias de control para manipuladores robóticos. La fuerza de fricción en las articulaciones del manipulador, por ejemplo, nunca garantizará un error cero en la respuesta de salida de los controladores. Comúnmente los efectos de la fricción se deben cancelar por separado a través de una estrategia de compensación.

El control PID es una estrategia de control ampliamente usada en la industria debido al hecho de que el componente integral del controlador puede reducir considerablemente el error del estado estacionario, manteniendo las ganancias pequeñas. Este tipo de controlador tiene comportamiento robusto bajo varias condiciones de operación y su diseño es simple debido a que está basado en un pequeño número de parámetros. Sin embargo pueden aparecer no linealidades cuando el término integral acumula un error significativo que rompe el lazo de realimentación. Esto puede ocurrir debido a las restricciones del actuador y se puede evitar limitando la salida del controlador o utilizando un ajuste de realimentación externa. Sintonizar un controlador PID no es una tarea sencilla, el diseñador debe confiar en métodos específicos para encontrar los valores adecuados de los parámetros. En la mayoría de los casos, la sintonización inicial se lleva a cabo a través de simulaciones computacionales considerando el modelo matemático del sistema. Una vez que el controlador es implementado se utiliza sintonización en línea para ajustar los parámetros a través de la ejecución de varios experimentos.

Las reglas básicas para sintonización de PID son las reglas de Ziegler-Nichols. Estas reglas se aplican bajo distintas condiciones. Si la dinámica de la planta no se conoce con precisión, el método usa la respuesta transiente de la planta a un escalón unitario y los parámetros se escogen de acuerdo a la salida. En una segunda versión del método, la ganancia proporcional se cambia hasta que alcanza un valor crítico K_u , en este tiempo la salida exhibe oscilaciones sostenidas con período P , los parámetros se escogen considerando los valores de K_u y P . Otro método común para sintonizar el controlador usando la respuesta transiente de la planta a un escalón unitario es el método de auto-sintonización basado en realimentación por función relé. En este método se conecta un relé en el lazo de realimentación con la planta. Debido a que la amplitud de la oscilación y la salida del relé son proporcionales, la amplitud del relé se puede autoajustar para reducir las oscilaciones. Es posible sintonizar los parámetros de los controladores PID aún si la dinámica del sistema es completamente desconocida utilizando el método de sintonización iterativa de realimentación o Iterative Feedback Tunning IFT. Este método está basado en el comportamiento del controlador sometido a varios experimentos y permite un análisis más preciso del desempeño real del sistema cuando se ejecuta una tarea específica. El método usa los datos recolectados a partir de los experimentos y los somete a un criterio de minimización basado en el gradiente para encontrar los parámetros del controlador iterativamente. Aunque este método fue diseñado originalmente para sistemas lineales, se ha aplicado exitosamente en sistemas no lineales (Hamamoto et al., 2003, Sjöberg et al., 2003). Este tipo de sintonización limita al manipulador a la ejecución de tareas específicas y requiere de una serie de experimentos que en algunos manipuladores no es posible llevar a cabo, ya sea por su arquitectura o por su estructura cinemática.

5. CONCLUSIONES

Los manipuladores robóticos de brazo completo, por su cinemática similar a la del ser humano, pueden ser utilizados como plataforma para el desarrollo de diversas aplicaciones biomédicas. Entre éstas podemos mencionar el diseño e implementación

de interfaces humano máquina, el diseño de prótesis de brazo y el diseño de controladores para prótesis robóticas de brazo. Para completar una tarea específica, como el alcanzar y tomar un objeto, el manipulador deberá seguir diversas trayectorias cuya precisión de ejecución dependerá del controlador encargado del movimiento de la estructura mecánica. La selección y diseño de algoritmos de control óptimos se debe hacer considerando las características físicas de la estructura mecánica y sus limitaciones, lo cual puede definirse a través del modelo cinemático y dinámico del manipulador. A su vez, el modelo matemático de un robot manipulador tiene un rol importante en la simulación de movimiento, la cual permitirá hacer ajustes fundamentales durante el proceso de diseño y el desarrollo de la aplicación deseada, considerando los objetivos de la implementación, las limitantes de la tarea a ejecutar y el comportamiento deseado del manipulador.

6. REFERENCIAS

Armstrong, B. Khatib, O. Burdick, J. (1986), "The explicit dynamic model and inertial parameters of the PUMA 560 arm", *Proceedings of the 1986 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 510–518.

Armstrong-Helouvry, B. Dupont, P. Canudas de Wit, C. (1994), "A survey of models, analysis tools and compensation methods for the control of machines with friction", *Automatica*, 30:1083–1138.

Asada, H. Slotine, J-J.E. (1986), *Robot Analysis and Control*. John Wiley and Sons.

Bompos, N.A. Artemiadis, P.K. Oikonomopoulos, A.S. Kyriakopoulos, K.J. (2007), "Modeling, full identification and control of the MITSUBISHI PA-10 robot arm", *IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, 1–6.

Hamamoto, K. Fukuda, T. Sugie, T. (2003), "Iterative feedback tuning of controllers for a two-mass spring system with friction", *Control Engineering Practice*, 11:10611068.

Hensen, R. H. A. Angelis, G. Z. van de Molengraft, M. J. G. de Jager, A. G. Kok, J. J. (2000), "Grey-box modeling of friction: an experimental case-study", *European Journal of Control*, 6.

Izadbakhsh, A. (2009), "Closed-form dynamic model of the PUMA 560 robot arm", *Proceedings of the 4th International Conference on Autonomous Robots and Agents*, 675–680.

Kelly, R. Santibanez, V. Loria, A. (2005), *Control of Robot Manipulators in Joint Space*, Springer.

Kennedy, C. W. Desai, J. P. (2004), "Model-based control of the MITSUBISHI PA-10 robot arm: application to robot-assisted surgery", *Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2523–2528.

Khalil, W. Dombre, E. (2002), *Modeling Identification and Control of Robots*, Kogan Page Science.

Kostic, D. de Jager, B. Steinbuch, M. Hensen, R. (2004), "Modeling and identification for high performance robot control: An RRR-robotic arm case study", *IEEE Transactions on Control System Technology*.

Lau, H. Y. K. Wai, L. C. C. (2002), "A Jacobian-based redundant control strategy for the 7-DOF WAM", *Seventh International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision*, 1060–1065.

Lewis, F. L. Dawson, D. M. Abdallah, C. T. (2004), *Robot Manipulator Control: Theory and Practice*, Marcel Dekker.

Lightcap, C. Banks, S. (2007), "Dynamic identification of a MITSUBISHI PA10-6CE robot using motion capture", *Proceedings of the 2007 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 3860–3865.

Neuman, C. P. Murray, J.J. (1987), "The complete dynamic model and customized algorithms of the PUMA robot", *IEEE Transactions on systems, man, and cybernetics*, 17:635–644.

Ogata, K. (2010), *Modern Control Engineering*, Pearson.

Olsen, M. M. Petersen, H. G. (2001), "A new method for estimating parameters of a dynamic robot model", *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 17.

Olsson, H. Astrom, K.J. Canudas de Wit, C. Gafvert, M. Lischinsky, P. (1998), "Friction models and friction compensation", *European Journal of Control*, 176–195.

Orin, D. E. (1980), "Application of robotics to prosthetic control", *Annals of Biomedical Engineering*, 8:305–316.

Pineda, Z. Lecchini-Visintini, A., Quian Quiroga, R. (2012), "Iterative Feedback Tuning for the joint controllers of a 7-DOF Whole Arm Manipulator", *51st IEEE Conference on Decision and Control*, 544-549.

Siciliano, B. Sciavicco, L. Villani, L. Oriolo, G. (2009), *Robotics: Modelling, Planning and Control*, Springer.

Sousa, C. Cortesao, R. Queiros, P. (2006), "Compliant co-manipulation control for medical robotics", *Proceedings of the 2nd conference on Human System Interactions*, 262–268.

Spong, M.W. Hutchinson, S. Vidyasagar, M. (2006), *Robot Modeling Control*, John Wiley and Sons.

Yeon, J. S. Kim, E. J. Lee, S-H. Park, J. H. Hur, J-S. (2005), "Development of inverse dynamic controller for industrial robots with HyRoHILS system", *International Conference on Control, Automation and Systems*, 1060–1065.