



Algoritmos bioinspirados en la planeación *off-line* de trayectorias de robots seriales

Bio-inspired algorithms in serial-robot path *off-line* planning

María A. Guzmán*

Cristhian A. Peña**

Fecha de envío: noviembre de 2011
Fecha de recepción: noviembre de 2011
Fecha de aceptación: enero de 2012

Resumen

El objetivo de la planeación *off-line* de trayectorias en robótica serial consiste en dar al efector final del robot las trayectorias necesarias para desplazarse en su espacio de trabajo y ejecutar diferentes tareas mediante un ambiente virtual en el que se simula tanto el robot como el entorno del que hace parte. En este artículo se presenta una revisión de las técnicas tradicionalmente usadas en el desarrollo y optimización de la planeación de trayectorias *off-line* en robots seriales. Se resaltan las bondades y carácter multidisciplinar de los algoritmos bioinspirados gracias a su uso como herramienta de búsqueda y optimización en problemas de diferentes áreas del conocimiento. Por último, son expuestas las principales aplicaciones en planeación de trayectorias *off-line* en las que los algoritmos bioinspirados han contribuido como alternativa para la búsqueda y optimización de soluciones en trayectorias de robots seriales.

Palabras clave

Planeación de trayectorias *off-line*, robot serial, cinemática inversa, algoritmos bioinspirados.

Abstract

The main purpose of *off-line* path planning in serial robotics is to give the robot's end-effector the needed path so it can move along its own workspace and accomplish different assigned tasks through a virtual environment

where the robot and its own context (obstacles, machines, etc) is simulated. In this paper, a review of the techniques traditionally used in the development and optimization of *off-line* path planning optimization for serial robots is presented. The paper highlights the goodness and the multidisciplinary character of the bio-inspired algorithms, which stems from their use as a search and optimization tool for problem solving in different knowledge areas. Finally, the main applications in *off-line* path planning are explained together

* Ingeniera Mecánica, Msc. Automatización industrial Universidad Nacional de Colombia, PhD. Ingeniería Mecánica Universidad de Sao Paulo (Brasil). maguzmanp@unal.edu.co.

** Ingeniero de Diseño y Automatización Electrónica Universidad de La Salle (Colombia), estudiante de Maestría en Ingeniería Mecánica Universidad Nacional de Colombia. crapena-ca@unal.edu.co.

with its bio-inspired algorithms, which have made contributions as an alternative for both the search and optimization of solutions in serial robot path planning.

Key words

Path planning, bioinspired algorithms, serial robot, inverse kinematics.

Introducción

Según su funcionalidad un robot serial o manipulador industrial se define como una máquina automática de manipulación, reprogramable y multifuncional con tres o más ejes que pueden posicionar y orientar materias, piezas, herramientas o dispositivos especiales para la ejecución de trabajos diversos en las diferentes etapas de la producción industrial, ya sea en una posición fija o en movimiento [1]. Por otra parte, un manipulador según su estructura se define como un mecanismo formado generalmente por elementos en serie, articulados entre sí, con un efector final o herramienta de manipulación, destinado al agarre y desplazamiento de objetos [2].

A partir del análisis de movimiento (análisis cinemático directo e inverso) de robots seriales surge el problema de planeación de trayectorias, cuya solución permite que estos dispositivos cumplan los objetivos que tienen por definición. La forma habitual de programar trayectorias en un robot serial se denomina programación *on-line* y consiste en llevar al efector final del robot, mediante un control de posicionamiento (teach-box o teach pendant), a puntos en el espacio con posiciones y orientaciones específicas, de tal forma que una vez sean grabados en el controlador del robot son interpolados todos los puntos permitiendo la ejecución de una trayectoria, con la condición de que entre

más puntos puedan ser grabados mejor será la exactitud de su recorrido.

Debido a que los robots están siendo usados en procesos en los que deben recorrer superficies irregulares y en los que además deben cumplir con varios ciclos de trabajo en cortos periodos, la programación habitual se hace repetitiva y lenta llegando a gastar hasta ocho meses de programación *on-line* para tareas de soldadura en chasis de automóviles [3]. Aún con los entornos *off-line* dados por los fabricantes debe realizarse el proceso de grabar punto a punto las trayectorias, lo cual supone un aumento en la seguridad al no exponer al operario a programar en entornos peligrosos y un ahorro de energía al no usar el robot para grabar los diferentes puntos, sin embargo, el tiempo de programación es prácticamente el mismo que con el *teach pendant*. La planeación de trayectorias ha sido un tema ampliamente estudiado en robots móviles, debido a la naturaleza desconocida o cambiante de los espacios de trabajo que este tipo de robot debe sortear; en Masehian and Sedighzadeh [4] se realiza una revisión cronológica, desde los clásicos hasta los heurísticos, de los diferentes métodos usados para la planeación de trayectorias en robótica móvil. Sin embargo, conforme aumenta la dificultad de las aplicaciones industriales que los robots seriales deben ejecutar (en su mayoría soldadura, ensamble, pintura o prototipado sobre superficies irregulares), ha sido necesario generar mecanismos que permitan la planeación *off-line* de trayectorias enfocadas en este tipo de estructuras. Dicha planeación ocurre cuando se generan trayectorias en los robots antes de su implementación en un entorno real, en ocasiones basándose en perfiles desarrollados en la etapa de diseño asistido por computador (CAD) o bien sobre tareas preprogramadas en la

etapa Manufactura Asistida por Computador (CAM) del proceso de fabricación [5].

Así como en robótica móvil, el problema básico de planificación de movimiento de robots seriales consiste en encontrar una trayectoria libre de colisiones entre dos puntos de configuración articular inicial y final de un manipulador [6]. De acuerdo con esto, el problema de planeación de trayectorias en robótica serial se ha subdividido en dos temas principales, planeación de trayectorias en entornos estáticos y planeación en entornos dinámicos. En el caso de los entornos estáticos, los puntos inicial, final y las regiones que serán evadidas se conocen antes de la planeación de trayectorias; en el caso de entornos dinámicos, las regiones que serán evadidas son inicialmente desconocidas [7].

Las técnicas clásicas de planeación de trayectorias *off-line* consisten en el desarrollo de modelos matemáticos y geométricos basados en una estructura y configuración definidas de un manipulador serial, tales como la cinemática inversa [8], la aproximación geométrica [9], el modelado de controladores de trayectoria [10], los B-splines y Jerks [11], y los polinomios cúbicos [12], entre otros. No obstante, aunque los métodos matemáticos son una solución eficiente, a medida que los manipuladores se vuelven más complejos, es decir, tienen un mayor número de eslabones o son redundantes, la técnica de modelamiento matemático se vuelve demasiado compleja de resolver y a la vez ineficiente computacionalmente. Para dar solución a este inconveniente se han desarrollado métodos alternativos como la teoría de optimización [13], la programación semiinfinita [14] y la simulación gráfica [15]; este tipo de soluciones, aunque efectivas, suponen recursos computacionales adicionales, lo que restringe su aplicación.

Como alternativa a estos métodos tradicionales de planeación y generación de trayectorias *off-line* en robots seriales, los algoritmos bioinspirados han sido implementados para este fin como será presentado a continuación. Todas las técnicas mencionadas serán abordadas en mayor detalle a lo largo del presente artículo, organizadas de la siguiente manera: en la sección 1 se expondrán las metodologías clásicas usadas en la planeación *off-line* de trayectorias en robótica serial. En la sección 2 serán reportados los principales algoritmos bioinspirados usados en la resolución general de problemas en diferentes áreas del conocimiento; en la sección 3 se mostrarán tanto casos teóricos como de aplicación industrial, en los cuales gracias a la incursión de los algoritmos bioinspirados se han logrado resultados satisfactorios en la planeación de trayectorias *off-line* de robots seriales industriales; y finalmente, se presentarán las conclusiones sobre el impacto que los diferentes métodos de planeación han tenido el campo industrial.

1. Planeación de trayectorias *off-line*

En el problema básico de planeación de trayectorias se estudia su generación y optimización tanto en el espacio cartesiano (espacio de trabajo) como el articular (del robot). Allí se busca evitar regiones de singularidad de movimiento dentro del espacio de trabajo, en aquellos puntos donde el efector final alcanza una posición deseada, pero no todas las orientaciones posibles o viceversa [16]. Como ejemplo de la optimización de trayectorias en Sahar y Hollerbach [17] se propone optimizar el tiempo de posicionamiento-orientación de un manipulador, logrando minimizar el tiempo de recorrido del efector final de un punto a otro en trayectorias predeterminadas mientras se evitan obstáculos. Este y otros tipos de análisis abren las posibilidades de cálculo de trayectorias para manipuladores seriales

además de un sinnúmero de aplicaciones; por ello a continuación se presentan las principales técnicas usadas en planeación de trayectorias *off-line* en robótica serial y sus diferentes aplicaciones en el ámbito industrial.

a) Aproximaciones basadas en modelos matemáticos

Los métodos clásicos con los que se calcula la trayectoria de un robot serial se basan principalmente en los modelos matemáticos de cada estructura. En Chevallereau [18], se desarrollan las trayectorias viables de un manipulador no redundante dentro de un campo de restricciones a partir de las matrices de velocidad asociadas al mecanismo. Por otra parte, en Leng y Chen [19] se desarrolla la planeación aproximada de trayectorias basada en las ecuaciones dinámicas Lagrange-Euler asociadas a la estructura del robot. Otro caso de aproximación exitosa de planeación de trayectorias está basada en teorías de optimización, por ejemplo en Lin [20] la planeación de trayectorias para un manipulador redundante se logra aplicando una teoría de optimización de minimización de costo en el modelo cinemático inverso, logrando que el manipulador evada singularidades y evite colisiones dentro del espacio de trabajo del robot. Por otro lado, en Yao y Gupta [21] la planeación se logra proyectando un grupo de restricciones al efector final del manipulador y aplicando el método de optimización de gradientes descendentes. Los cálculos y optimización de trayectorias basados en los métodos geométricos y matemáticos suelen volverse mucho más complejos en la medida en que la configuración de los manipuladores cambia o se incluyen variables adicionales, como obstáculos o regiones singulares dentro del espacio de trabajo del manipulador; lo cual no les permite ser escalados a problemas de planeación *off-line* de trayectorias más elaboradas.

b) Planeación de trayectorias asistida

De manera paralela con los métodos basados en la deducción matemática, se han desarrollado métodos alternativos para planeación de trayectorias que dependen tanto de los modelos matemáticos como de mecanismos auxiliares para calcular trayectorias. Por ejemplo, en De Luca y Oriolo [22] se propone una planeación de trayectorias asistida por un control retroalimentado, lo que para su implementación sugiere requerir elementos esenciales tales como sensores, actuadores (del robot) y un controlador independiente. En otro caso, en que la planeación es asistida, son implementadas técnicas de visión artificial para realizar la programación de trayectorias por simulación [23], siendo esta una de las que más recursos demanda para su utilización dado el costo de la iluminación y cámaras de video necesarias. En Kunz [24] se usan sensores como herramienta de percepción añadida al robot, lo cual contribuye a desarrollar un mapeo del espacio de trabajo y a la vez llevar a cabo el seguimiento de la ruta del manipulador al ejecutar tareas en un entorno dinámico.

Por último, otra aproximación más económica pero que también supone recursos adicionales es propuesta en Harada [25], en ella la simulación gráfica es usada para la planeación *off-line* de trayectorias y los sensores actúan como medio de comprobación de las posiciones y orientaciones logradas en el entorno *on-line*, mientras la generación de trayectorias es primero realizada mediante simulación. Este tipo de aproximaciones se basan en elementos de modelamiento matemático y herramientas que permiten un mayor control y percepción del espacio en el que el manipulador debe interactuar; lo cual genera un mayor costo de implementación debido al aumento de los recursos usados, pero aún así prometen ser una solución

bastante robusta para el problema de planeación de trayectorias gracias a los datos dados por la percepción del entorno de trabajo.

c) *Robótica cooperativa*

Otro de los problemas que es abordado mediante la planeación de trayectorias es la robótica cooperativa, en la cual dos o más manipuladores comparten un espacio de trabajo y desarrollan tareas en conjunto como posicionamiento de piezas, soldadura, inspección y ensamble, entre otras. En Shin y Bien [26] se establecen tres temas de vital importancia para manipuladores cooperativos; primero, el análisis de trayectorias libres de colisión con la inclusión de un obstáculo dinámico dentro del espacio de trabajo compartido por dos manipuladores; segundo, el análisis de trayectorias libres de colisiones entre dos manipuladores sin obstáculos dentro del espacio de trabajo; y por último, se trata el problema de optimización de tiempos de trayectorias basado en restricciones dinámicas en las estructuras.

De igual manera, en Zurawski y Phang [27] se establece un esquema maestro-esclavo en el que el espacio de trabajo es subdividido en regiones discretas, lo que indica que se planean trayectorias no simultaneas, lo cual es de gran utilidad posteriormente en tareas asíncronas como se observa en Cheng [28]. Un ejemplo de la coordinación de trayectorias entre tres manipuladores es logrado en Tsuji [29], en el cual, por medio del estudio de dinámica virtual se logra no solo el posicionamiento en común de un elemento dentro del espacio de trabajo compartido, sino también descifrar las posiciones relativas entre dos manipuladores, lo que lo convierte en un análisis paralelo de estructura para los manipuladores involucrados. Este tipo de resultados ha dado paso a un nuevo campo en la planeación e implementación

de trayectorias, ya que con el objetivo de aumentar el volumen de producción en el ámbito industrial la robótica cooperativa se está convirtiendo en una necesidad.

d) *Aplicaciones industriales*

La meta de la planeación *off-line* de trayectorias está enfocada a su uso industrial, por este motivo, muchos de los desarrollos académicos tienen como finalidad resolver situaciones que se presentan directamente en entornos productivos. Por ejemplo, en la industria automotriz se aborda el problema de la planeación de trayectorias *off-line* para permitir que el robot pueda llegar a espacios estrechos [30]. En otros entornos como la soldadura de piezas, donde se requiere gran exactitud, los estudios de Zha y Chen [31] y Mitsi [32] desarrollan la simulación de trayectorias para soldar teniendo en cuenta no solo el posicionamiento del robot, sino también la velocidad y los perfiles de orientación-posición del trayecto de soldadura. Otras aplicaciones destacadas de planeación de trayectorias son: escaneo laser de superficies y piezas de Larsson y Kjellander [33], tareas de ensamble de García y Ávila [34], y remanufactura de piezas de Xiaoshu y Xichen [35].

2. Algoritmos bioinspirados

Como una categoría de la inteligencia artificial, los algoritmos bioinspirados son técnicas de optimización cuyo diseño se basa en la imitación de procesos biológicos [36]. Las principales características de estos algoritmos radican en no ser determinísticos, presentar estructuras paralelas y ser adaptativos [37]. Gracias a estas características, dichos algoritmos poseen la capacidad de generar soluciones a problemas de búsqueda exhaustiva u optimización de manera eficiente sin la necesidad de tener un conocimiento profundo

sobre el problema que se aborde, lo cual permite llegar a resolver problemas multiobjetivo de manera eficaz [38]. A continuación se presenta el concepto básico de los principales algoritmos bioinspirados que han permitido resolver y optimizar tanto problemas en diferentes áreas de conocimiento, como en el ámbito industrial en el que se postulan como una opción para la generación y optimización de trayectorias en robots seriales.

a) Redes neuronales artificiales
(Artificial Neural Networks, ANN)

Inspiradas en las redes neuronales biológicas del cerebro humano y simulando su estructura mediante métodos matemático-computacionales, el uso de las RNA busca imitar las capacidades propias del cerebro humano, tales como aprender, generalizar y abstraer. Gracias a su capacidad de procesamiento paralelo permite resolver aplicaciones en campos como visión artificial, control, robótica, procesamiento de imágenes, optimización y otras aplicaciones que aún son objeto de estudio [39]. Dentro de los estudios más recientes en este campo se encuentran el mejoramiento del desempeño de las redes neuronales artificiales a través de matrices de desigualdades lineales [40], para optimizar el aprendizaje de la red en cuanto a su capacidad de convergencia.

Por otra parte, en Castañeda y Esquivel [41] se desarrolla una red neuronal variable en el tiempo como solución de un filtro de Kalman con entradas variadas estadísticamente para cumplir el objetivo de controlar sistemas no lineales. En otro estudio reciente, son usadas las redes neuronales artificiales para el diagnóstico de diferentes enfermedades, cuyo funcionamiento se comprueba, precisamente, mediante el diagnóstico exitoso de cáncer de seno y problemas de tiroides, lo cual demostró acelerar su tiempo

de decisión [42]. Estos estudios demuestran la versatilidad que puede llegar a tener este tipo de algoritmo denominado “de aprendizaje” para resolver temas en diferentes áreas.

b) Algoritmos genéticos
(Genetic Algorithms GA)

Basados en la teoría de evolución biológica de Darwin, son métodos de búsqueda para la resolución de problemas. El esquema básico de un algoritmo consiste en una población inicial de individuos (cada uno representa una solución del problema) generada aleatoriamente, operadores genéticos (selección, cruce y mutación) que permiten generar la reproducción y la evolución de los individuos a lo largo de las diferentes generaciones, y por último, una función de evaluación que es la que determina cuándo la población alcanza la solución requerida, sea de búsqueda o de optimización [43]. Dentro de las aplicaciones de los algoritmos genéticos se pueden encontrar la predicción de modelos económicos [44], optimización multiobjetivo [45], programación de producción [46] y sintonización de controladores PID [47], entre otros.

Para comprobar la efectividad de los algoritmos genéticos (GA) frente a métodos de optimización convencionales en [48], fue realizada una comparación entre los GA y un método estadístico, demostrando que el desempeño de los AG supera en gran medida a los estadísticos por abordar una mayor cantidad de soluciones del mismo problema gracias a su espacio de búsqueda más amplio.

c) Enjambre de partículas
(Particle Swarm, PS)

Estos algoritmos de optimización se basan en el comportamiento colectivo de los organismos vivos (aves, insectos, peces, etc.), aunque la primera aproximación se realizó

para imitar computacionalmente el comportamiento social humano [49]. Su funcionamiento consiste en establecer un número homogéneo de agentes simples interactuando entre sí, para generar un patrón de conducta basándose en cinco principios fundamentales del comportamiento colectivo: mantener la localización de cada agente, establecer homogeneidad, evadir colisiones, emparejar la velocidad, mantener el enjambre [50].

Uno de los comportamientos más observados y aplicados en problemas de optimización son las colonias de hormigas, allí se trata de simular computacionalmente el mecanismo de comunicación y transporte usado por las hormigas, en el cual se comunican con feromonas para conseguir alimento y llevarlo a la colonia; en este caso, todos los individuos buscan aprender el camino más corto para conseguir la solución, motivo por el cual lo convierte en un algoritmo de convergencia rápida [51]. Algunas materias en las que se ha usado algoritmos de enjambre de partículas son minería de datos, diseño de elementos finitos, geología, telecomunicaciones, estudio de fallas, entre otros [52].

d) Otros algoritmos bioinspirados

Dado que los algoritmos bioinspirados buscan simular comportamientos de la naturaleza, la cantidad de algoritmos puede llegar a ser tan grande como la cantidad de procesos naturales que se logren hallar. Otros algoritmos en los que se imitan comportamientos naturales son: recocido simulado [53], hiervas invasivas [54] y quimiotaxis de bacterias [55]. Como se puede observar, las aplicaciones de los algoritmos bioinspirados aún son un campo de exploración, lo que indica una tendencia creciente hacia el manejo de este tipo de algoritmos para la solución de problemas multiobjetivo en diversas áreas de conocimiento. Dado su amplio rango de

aplicación, la implementación de algoritmos bioinspirados ha aumentado en robótica, llegando a ser una herramienta muy útil en la generación y optimización de trayectorias. A continuación, en la sección 3 se presentan algunos de los avances en el uso de esta técnica en la generación y optimización de trayectorias *off-line* para robots seriales.

3. Algoritmos bioinspirados en planeación de trayectorias off-line

Dentro de los algoritmos más aplicados en la planeación *off-line* de trayectorias de manipuladores seriales están los algoritmos genéticos. Gracias a que el campo de búsqueda es generalizado dentro del problema, permite encontrar más soluciones óptimas que aquellos algoritmos bioinspirados que buscan la mejor solución tendiendo a encontrar soluciones óptimas locales en ocasiones, hecho que demuestra la robustez de los GA en la planeación y optimización de trayectorias. Por ejemplo, en Yun y Xi [56], la planeación óptima de trayectorias en el espacio cartesiano y articular de robots de dos y tres grados de libertad, se logra mediante la formulación del problema de planeación de trayectoria en el espacio cartesiano y articular como un todo; teniendo en cuenta que cada algoritmo debe adaptarse a las condiciones de cada problema como una solución subjetiva del mismo, fueron realizadas modificaciones en el GA con el objetivo de lograr mejores resultados en las simulaciones.

En otros estudios, se ha separado el problema de la planeación de trayectorias, por ejemplo, en Abo-Hammour [57] y Ramabalan [58] se aborda el problema mediante GA a partir de trayectorias dadas en el espacio cartesiano; en ambos se demuestra que la planeación de trayectorias basada en GA puede ser una herramienta escalable para

casos de manipuladores redundantes y no redundantes con varios grados de libertad.

Además de los GA, otros ejemplos del uso de algoritmos bioinspirados usados en la planeación de trayectorias se presentan a continuación. En Klane [59] se presenta una herramienta basada en control tele-operado para la planeación de trayectorias de un robot serial de siete grados de libertad mediante redes neuronales artificiales, logrando la programación de trayectorias en ambientes dinámicos para evasión de obstáculos. Mediante el uso de la técnica de hiervas invasivas, en Sengupta [60] se logra optimizar el tiempo de trayectorias realizadas por un manipulador serial de dos grados de libertad, teniendo en cuenta la evasión de obstáculos y restricciones de carga. En Xu [61] es usado el método de enjambre de partículas para determinar la programación dinámica de trayectorias de un manipulador de seis grados de libertad atado a una plataforma de navegación espacial. Por último, en Kubota [62] y en Xu [63] por medio de la combinación y modificación de los algoritmos bioinspirados básicos, se logra la optimización de trayectorias.

4. Conclusiones

Aunque son efectivas, las metodologías de planeación de trayectorias basadas en modelos matemáticos se vuelven más complejas a medida que el manipulador cambia su configuración. Por otra parte, el uso de métodos asistidos supone más recursos para resolver una tarea, lo cual los convierte en los más costosos de implementar. Debido a que no solo se aumenta la dificultad de las tareas, sino que además se ha abordado la robótica cooperativa dentro de los problemas de planeación de trayectorias para resolver, debe generarse alternativas eficientes para su

desarrollo, lo cual ha sido logrado en gran medida con la implementación de algoritmos bioinspirados en este tema.

La complejidad en la planeación de trayectorias de manipuladores seriales aumenta por tres factores: cambio de configuración, inclusión de obstáculos dinámicos en el espacio de trabajo y ejecución de tareas cooperativas con otros manipuladores. Los algoritmos bioinspirados se han convertido en una salida costo-eficiente en la solución de la planeación de trayectorias en estas tres situaciones, debido a que se abarcan más soluciones posibles para cada punto del espacio de trabajo otorgando no solo una solución óptima de posición-orientación de un manipulador sino también muchas, lo que difiere del caso de optimización tradicional en el que puede abarcarse menos soluciones para un mismo punto. De esta forma, los algoritmos bioinspirados gracias a su capacidad de procesamiento paralelo de un problema se convierten en soluciones eficientes en la planeación de trayectorias de manipuladores.

5. Referencias

- [1] J. Barrientos *et al.*, *Fundamentos de Robótica*. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid, 1996.
- [2] J. González, “Control bilateral con retroalimentación de esfuerzos aplicado a la cirugía cardíaca”, Tesis de Doctorado en Computación Avanzada para Ciencias e Ingenierías. Universidad Politécnica de Madrid, España, 2004.
- [3] Z. Pan, *et al.*, “Recent progress on programming methods for industrial robots”, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 28, n.º 1, pp. 87-94, 2012.

- [4] E. Masehian, D. Sedighzadeh, "Classic and heuristic approaches in robot motion planning, a chronological review", *World Academy of Science, Engineering and Technology*, vol. 29, n.º 1, pp. 101-106, 2007.
- [5] H. Choset, *et al.*, *Principles of robot motion: theory, algorithms and implementation*. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology MIT, 2005.
- [6] J. Bañón, *et al.*, "Sobre algoritmos de planificación del movimiento de robots", *Ingeniería y Competitividad*, vol. 2, n.º 2, pp. 18-25, 2000.
- [7] J. Goldman, "Path planning problems and solutions", in *Aerospace and Electronic Conference. NAECON. Proceedings of the IEEE 1994 National*, Dayton, Ohio, 1994.
- [8] G. Huang, "Inverse kinematics analysis trajectory planning for a robot arm", in *Asian Control Conference ASCC*. Kaohsiung, Taiwán, 2011.
- [9] S. Yahya, *et al.*, "A geometrical motion planning approach for redundant planar manipulators", *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, vol. 3, n.º 4, pp. 3757-3770, 2009.
- [10] C. Atkeson, J. McIntyre, "Robot trajectory learning through practice", in *International Conference on Robotics and Automation. IEEE. Proceedings of the IEEE International*, 1986.
- [11] A. Gasparetto, V. Zanotto, "Optimal Trajectory Planning for Industrial Robots", *Advances in Engineering Software Journal*, vol. 41, n.º 1, pp. 548-556, 2009.
- [12] J. Craig, *Introduction to robotics: mechanics and control*. London: Addison Wesley Longman, 1986.
- [13] G. Bessonnet, J. Lallemand, "Optimal trajectories of robot arms minimizing constrained actuators and traveling time", in *International Conference on Robotics and Automation. IEEE. Proceedings of the IEEE International*. Cincinnati, Ohio, 1990.
- [14] A. Ismael, "Robot trajectory planning with semi-infinite programming", *European Journal of Operational Research*, vol. 153, n.º 1, pp. 607-617, 2009.
- [15] L. Zhenyu, "Motion navigation for arc welding robots based on feature mapping in a simulation environment", *Robotic And Computer-Integrated Manufacturing Journal*, vol. 26, n.º 1, pp. 137-144, 2009.
- [16] R. Mayorga, A. Wong, "A singularities avoidance method for the trajectory planning of redundant and nonredundant robot manipulators", in *International Conference on Robotics and Automation. IEEE. Proceedings of the IEEE International*. Piscataway, New Jersey, 1987.
- [17] G. Sahar, J. Hollerbach, "Planning of minimum-time trajectories for robot arms", in *International Conference on Robotics and Automation. IEEE. Proceedings of the IEEE International*. Edinburgh, Scotland, 1985.

- [18] C. Chevallereau, "Feasible trajectories for non redundant robot at a singularity", in *International Conference on Robotics and Automation. IEEE*. Minnesota, 1996.
- [19] D. Leng, M. Chen, "Robot trajectory planning using simulation", *Robotics & Computer-Integrated Manufacturing Journal*, vol. 13, n.º 2, pp. 121-129, 1997.
- [20] C. Lin, "Motion planning of redundant robots by perturbation method", *Mechatronics Journal*, vol. 14, n.º 3, pp. 237-339, 2004.
- [21] Z. Yao, K. Gupta, "Path planning with general end-effector constrains", *Robotics And Autonomous Systems*, vol. 55, n.º 1, pp. 316-327, 2007.
- [22] A. De Luca, G. Oriolo, "Motion Planning and Trajectory Control of an Underactuated Three-Link Robot Via Dynamic Feedback Linearization", in *International Conference on Robotics and Automation. IEEE*. San Francisco, California, 2000.
- [23] Q. Zhao, Z. Sun. "Image-based Robot Motion Simulation", *Optics Communications Journal*, vol. 205, n.º 1, pp. 257-263, 2002.
- [24] T. Kunz, *et al.*, "Time path planning for a robot arm in changing environments", in *International Conference on Intelligent Robots and Systems. IEEE*. Taipei, 2010.
- [25] K. Harada, "Pick and place planning for dual-arm manipulators", in *International Conference on Robotics and Automation. IEEE*. Minnesota, 2012.
- [26] Y. Shin, Z. Bien, "A novel method of collision-free trajectory planning for two robot arms", in *International Conference on Systems, Man, and Cybernetics. IEEE*. Seoul, 1988.
- [27] R. Zurawski, S. Phang, "Path planning for robot arms operating in a common workspace", in *International Conference on Industrial Electronics, Control, Instrumentation and Automation. IEEE*. San Diego, 1992.
- [28] X. Cheng. "On-line collision-free path planning for service and assembly tasks by a two-arm robot", in *International Conference on Robotics and Automation. IEEE*. Nagoya, 1995.
- [29] T. Tsuji, *et al.*, "Distributed trajectory generation for cooperative multi-arm robots via virtual force interactions", *IEEE transactions on systems, man, and cybernetics Journal*, vol. 27, n.º 5, pp. 862-867, 1997.
- [30] J. Wunderlich, "Simulating a robotic arm in a box: redundant kinematics, path planning, and rapid prototyping for enclosed spaces", *Simulation: Journal of Society for Computer Simulation*, vol. 80, n.º 6, pp. 301-316, 2004.
- [31] X. Zha, X. Chen, "Trajectory coordination planning and control for robot manipulators in automated material handling and processing", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 23, n.º 2, 831-845, 2004.
- [32] S. Mitsi, *et al.*, "Off-line programming of an industrial robot for manufacturing",

International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 26, n.º 5, pp. 262-267, 2005.

- [33] S. Larsson, J. Kjellander, "Path planning for laser scanning with an industrial robot", *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 56, n.º 1, pp. 615-624, 2007.
- [34] T. García, R. Ávila, "Planeación asistida por computadora del proceso tecnológico de ensamble", *Revista de Ingeniería Mecánica Instituto Superior Politécnico*, vol. 11, n.º 1, pp. 1-7, 2008.
- [35] J. Xiaoshu, Y. Xichen, "Off-line programming of a robot for laser re-manufacturing", *Tsinghua Science and Technology Journal*, vol. 14, n.º 1, pp. 186-191, 2009.
- [36] T. Bäck, *et al.*, "A survey of evolution strategies", *Proceedings of the Fourth International Conference on Genetic Algorithms*. Dortmund: Morgan Kaufmann, vol. 1, pp. 2-9, 1991.
- [37] C. Alonso, *et al.*, "Model selection in genetic programming", in *Proceedings of the 12th annual conference on genetic and evolutionary computation*. ACM. New York, Estados Unidos, 2011.
- [38] A. Konak, *et al.*, "Multi-objective optimization using genetic algorithms: a tutorial", *Reliability Engineering and System Safety Journal*, vol. 91, n.º 9, pp. 992-1007, 2006.
- [39] X. Basogain, Redes neuronales artificiales y sus aplicaciones. Dpto. Ingeniería de Sistemas y Automática, Escuela Superior de Ingeniería Bilbao. Open Course Ware. [En línea] disponible en <http://ocw.ehu.es/ensenanzas-tecnicas/redes-neuronales-artificiales-y-sus-aplicaciones> /Course_listing. [Consultada 20-09-2012].
- [40] X. Jing, "Robust adaptative learning of feedforward neural networks via LMI optimizations", *Neural Networks Journal*, vol. 31 n.º 1, pp. 33-45, 2012.
- [41] C. Castañeda, P. Equivel, "Decentralized neural identifier and control for nonlinear systems base don extended kalman filter", *Neural Networks Journal*, vol. 31, n.º 1, pp. 81-87, 2012.
- [42] E. Alkim, *et al.*, "A fast and adaptative automated disease diagnosis method with an innovate neural network", *Model*, vol. 33, n.º 1, pp. 88-96, 2012.
- [43] D. Whitley, "A genetic algorithm tutorial", *Statistics and Computing Journal*, vol. 4, n.º 1, pp. 65-85, 1994.
- [44] J. Álvarez, *Introducción a los algoritmos genéticos: introducción a los algoritmos evolutivos*. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid, 2012.
- [45] E. Zitzler, *Evolutionary algorithms for multiobjective optimization: methods and applications*. Alemania: Institut für Technishe Informatik und Kommunukationsnetze, 1999.
- [46] F. Wang, *et al.*, "Genetic algorithms with a new repair operator for assembly job shop scheduling", *International Journal of Industrial Engineering*, vol. 18, n.º 7, pp. 377-385, 2010.

- [47] B. Tandon, R. Kaur, “Genetic algorithm based parameter tuning of pid controller for composition control system”, *International Journal Of Engineering Science and Technology*, vol. 1, n.º 1, pp. 6705-6711, 2011.
- [48] C. Reeves, C. Wright, “Genetic algorithms and statistical methods: a comparison”, in *International Conference on Genetic Algorithms in Engineering Systems: Innovations and Applications*. Galesia. Sheffield, 1995.
- [49] R. Eberhart, Y. Shi, “Particle swarm optimization: developments, applications and resources”, in *Conference on Evolutionary Computation. IEEE*. Seúl, 2001.
- [50] C. Grosan, *et al.*, *Swarm intelligence in datamining*. 1ed. London: Springer, 2006.
- [51] M. Fleischer, “Foundations of swarm intelligence: from principles to practice”, in *Conference on Swarming: Network Enabled, CAISIR*. Virginia, Estados Unidos, 2005.
- [52] F. Chan, M. Tiwari, *Swarm intelligence: focus on ant and particle swarm optimization*. Croacia: I-Tech Education and Publishing, 2007.
- [53] M. Vásquez, 1994 “Recocido simulado: un nuevo algoritmo para optimización de estructuras”, Tesis de Doctorado en Arquitectura. Universidad Politécnica de Madrid, España, 2007.
- [54] A. Mallahzadeh, *et al.*, “Application of the invasive weed optimization technique for antenna configurations”, *Progress in Electromagnetics Research*, vol. 79, n.º 1, pp. 137-150, 2008.
- [55] M. Guzmán, “A novel multiobjective optimization algorithm based on bacterial chemotaxis”, *Engineering Applications of Artificial Intelligence Journal*, vol. 23, n.º 3, pp. 292-301.
- [56] W. Yun, Y. Xi, “Optimum motion planning in joint space for robots using genetic algorithms”, *Robotics and Autonomous Systems Journal*, vol. 18, n.º 4, pp. 373-393, 1996.
- [57] Z. Abo-Hammour, *et al.*, “Cartesian path generation of robot manipulators using continuous genetic algorithms”, *Robotics and Autonomous Systems Journal*, vol. 41, n.º 4, pp. 179-223, 2002.
- [58] S. Ramabalan, *et al.*, “Multi-objective dynamic optimal trajectory planning of robot manipulators in the presence of obstacles”, *International Journal of Advances in Manufacturing Technology*, vol. 41, n.º 5, pp. 580-594, 2008.
- [59] S. Klane, *et al.*, “Dynamic path planning for a 7-DOF robot arm”, in *International Conference on Intelligence Robots and Systems. IEEE*. Beijín, 2006.
- [60] A. Sengupta, *et al.*, “Energy efficient trajectory planning by a robot arm using invasive weed optimization technique”, in *Third World Congress on Nature and Biologically Inspired Computing. NaBic*. Salamanca, 2011.
- [61] H. Xu, *et al.*, “Global time-energy optimal planning of robot trajectories”, in *International Conference on Mechanics and Automation. IEEE*. Changchun, 2009.

- [62] N. Kubota, *et al.*, “Hierarchical trajectory planning of redundant manipulators with structured intelligence”, *Advanced Robotics Journal*, vol. 12, n.º 3, pp. 209-225, 1998.
- [63] W. Xu, *et al.*, “Study on non-holonomic cartesian path planning of free-floating space robotic system”, *Advanced Robotics Journal*, vol. 23, n.º 1-2, pp. 113-143, 2009.