

ARTÍCULO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA

NUEVAS TECNOLOGÍAS DE CONTROL APLICADAS A LA ROBÓTICA



Jaime Alberto Parra Plazas
Magister Ingeniería Mecánica. Docente Investigador Universidad Libre

RESUMEN

El estudio de métodos, algoritmos o rutinas que permitan el control de diferentes automatismos hace necesario la exploración de diferentes alternativas, dentro de éstas se tienen los métodos numéricos, algoritmos fundamentados en variables lingüísticas, algoritmos basados modelos biológicos y otras posibles soluciones que mezclan los anteriores métodos buscando lo mejor de cada uno.

La robótica industrial es uno de los campos en donde se inició el proceso de investigación de algoritmos numéricos que permite el posicionar un brazo robótico, ya que lo más importante es la precisión con la que se puede ubicar un determinado punto en el espacio.

PALABRAS CLAVE

Control, cinemática, dinámica, robótica, interpoladores, regresiones.

ABSTRACT

The study of methods, algorithms or routines that allow the control of different automatisms make

necessary the exploration of different alternative, inside these the numeric methods are had, algorithms based in linguistic variables, algorithms based biological models and other possible solutions that they mix the previous methods looking for the best thing of each one.

The industrial robotics is one of the fields where you beginning the process of investigation of numeric algorithms that you allow positioning an arm robotics, since the most important thing is the precision with which you can position in a certain point in the space.

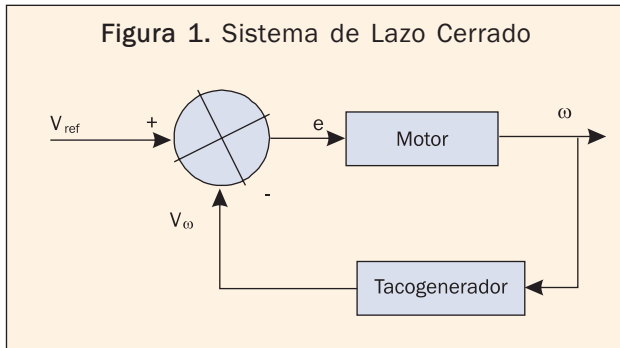
KEY WORDS

Control, kinematics, dynamics, robotics, interpoladores, regressions.

INTRODUCCIÓN

En el control dinámico es importante establecer los métodos que permitan el control del error de la posición en cada articulación, esto se hace por medio de lazo cerrado o de retroalimentación, el esquema básico es:

Fecha de recepción del artículo: 5 de septiembre de 2005.
Fecha de aceptación del artículo: 8 de octubre de 2006.



Dentro de este esquema tenemos diferentes niveles: el control de las trayectorias para alcanzar una posición espacial, control visual y el control de fuerza, en cada uno de estos niveles es importante el determinar un modelo adecuado para el desarrollo del algoritmo de control.

Se tienen diferentes métodos en los cuales se busca aprovechar aspectos mecánicos como aspectos matemáticos logrando el mejor algoritmo de control en cada articulación.

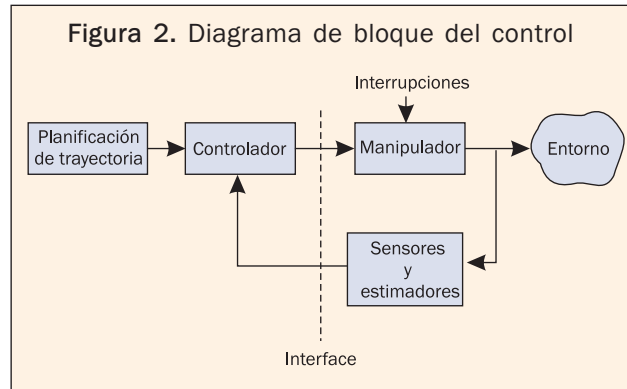
La acción de la gravedad es un factor que se debe tener en cuenta en la creación del algoritmo de control, ya que el factor más importante para lograr una posición es la inercia del sistema, debido a la masa y a la carga que se desea transportar.

Los métodos industriales actuales para diseñar el sistema de control de un robot tratan la articulación del brazo como un servomecanismo simple. Este método del servomecanismo modela la dinámica variable del manipulador de forma inadecuada porque desprecia el movimiento y configuración del brazo en su conjunto, generando problemas de ineficiencia en el sistema de retroalimentación convencional obteniendo como respuesta una velocidad y amortiguamiento del servo reducido, limitando la precisión y la velocidad del efector final teniendo limitaciones debido a las velocidades bajas con vibraciones innecesarias.

Esto justifica que se desarrollen nuevas técnicas que incluyan la dinámica del manipulador en donde se tengan técnicas sofisticadas y computadoras, indica que se debe como un problema de seguimiento de trayectoria (Figura 2).

Dentro de estas estrategias se pueden enumerar algunas:

- Técnicas de par calculado.
- Control Subóptimo de tiempo mínimo.
- Control de estructura variable.



- Control por realimentación desacoplo no lineal.
- Control de Movimiento resuelto.
- Control Adaptivo.
- Control de posición por lógica difusa.
- Control de posición por redes neuronales.
- Control el algoritmos genéticos.

1. TÉCNICAS DE PAR CALCULADO

Este modelamiento de control se fundamenta en las ecuaciones de movimiento de Lagrange – Euler o Newton – Euler, este se fundamenta en encontrar los pares – fuerzas apropiadas para controlar todas las articulaciones del manipulador en tiempo real de forma que se siga una trayectoria deseada fielmente como sea posible.

El par motor requerido para controlar requerido se fundamenta en L-E o N-E, las características del motor en cuanto a la tensión aplicada o corriente se calcula a una velocidad tan alta que los efectos de muestreo generalmente se pueden ignorar en el análisis.

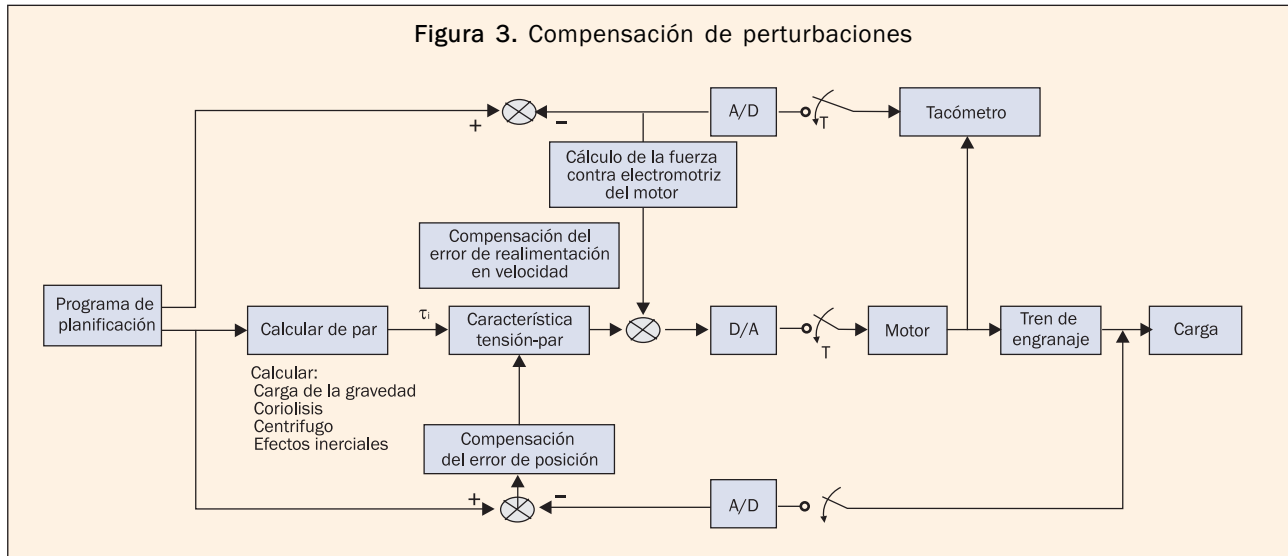
A causa de los errores de la modelación y de las variaciones de los parámetros del modelo, se utilizan señales de posición y velocidad para calcular los pares de corrección, los cuales, cuando se suman a los pares calculados logrando así la señal de excitación correctora para los motores de las articulaciones.

2. CONTROL SUBÓPTIMO DE TIEMPO MÍNIMO

Esta estrategia de control se fundamenta en que las tareas de fabricación, es deseable mover el manipulador a su velocidad más alta para minimizar el tiempo de ciclo de tarea, este algoritmo se debe a KAHN Y ROTH quienes investigaron el problema de control de tiempo óptimo para manipuladores.

El objetivo del control en tiempo mínimo es transferir al efector final de un manipulador desde una posición

Figura 3. Compensación de perturbaciones



inicial hasta una posición deseada específica en un tiempo mínimo.

Este modelo de control se fundamenta en el espacio de estados de las ecuaciones de movimiento de un robot de acuerdo con las ecuaciones de L-E en donde se pueden expresar por medio del siguiente vector de estado.

$$X^T(t) = [q^T(t), \dot{q}^T(t)] \quad (1)$$

$$\dot{x}(t) = f[x(t), u(t)] \quad (2)$$

Donde f es una función vectorial de $2n \times 1$ continuamente derivable $D(q)$ es siempre no singular y se puede expresar como:

$$\begin{aligned} \dot{X}_1(t) &= X_2(t) \\ \dot{X}_2(t) &= f_2[x(t)] + b[x_1(t)]u(t) \end{aligned} \quad (3)$$

Del anterior sistema se inicia en $t = t_0$, el sistema se supone que está en estado inicial $X(t_0) = X_0$, el sistema se requiere que esté en el estado final $t = t_f$ el sistema requiere que esté en el estado final deseado $x(t_f) = x_f$.

El problema de control de tiempo mínimo es entonces encontrar un control admisible que transfiera al sistema desde el estado inicial X_0 hasta el estado final X_f , mientras minimiza el índice de funcionamiento de la ecuación:

$$J = \int_{t_0}^{t_f} dt = t_f - t_0 \quad (4)$$

Para resolver la ecuación anterior se hace uso del principio de PONTYAGIN un control óptimo que minimiza el funcional J debe minimizar el hamiltoniano.

El problema de optimización se reduce a un problema de valores de frontera con condiciones sobre el estado $X(t)$ en los instantes de tiempo inicial y final.

Debido a la no linealidad de las ecuaciones de movimiento, una solución numérica es normalmente el único enfoque de control (en lazo abierto) y no considera ninguna perturbación sobre el sistema. Lo anterior es válido para la condición inicial y final, esto acarrea que se deba calcular para movimiento del manipulador.

En la realidad los procedimientos numéricos no proporcionan una solución aceptable para el control de manipuladores mecánicos; por lo tanto como solución numérica se desarrolla una aproximación al control óptimo que resulta en un control Subóptimo en tiempo mínimo.

Este método de control de realimentación se obtiene aproximando el sistema no lineal de la ecuación No 3 mediante un sistema lineal y determinando analíticamente un control óptimo para el sistema lineal. El sistema lineal se obtiene mediante el cambio de variables seguido por una linealización de las ecuaciones de movimiento.

3. CONTROL DE ESTRUCTURA VARIABLE

Este modelo lo propuso YOUNG, en donde los sistemas de estructura variable (VSS) son una clase de sistemas de control por realimentación discontinuo. Se caracteriza en el modo deslizante de una superficie de conmutación¹, dentro de este modo deslizante, el sistema permanece insensible a variaciones en los parámetros y las perturbaciones y sus trayectorias yacen en la superficie de conmutación.

La insensibilidad del VSS es lo que permite eliminar las interacciones entre las articulaciones de un manipulador, por lo tanto se puede utilizar la teoría de VSS para diseñar un controlador de estructura variable VSC que induce el modo deslizante y en el cual permanecen las trayectorias del brazo.

Este modelamiento no requiere un modelo dinámico preciso del manipulador; las acotaciones de los parámetros del modelo son suficientes para construir el controlador, este difiere del control en tiempo óptimo en el sentido de que el controlador de estructura variable induce el modo deslizante en el cual permanecen las trayectorias del sistema. Mas aun, el sistema es insensible a variaciones en sus parámetros cuando esta en el modo deslizante.

4. CONTROL POR REALIMENTACIÓN DESACOPLADO NO LINEAL

La mayoría de los algoritmos de control de robots existentes efectúan compensación no lineal de las interacciones entre los elementos, por ejemplo, la técnica del par calculado. HEMAMI Y CAMANA aplicaron la técnica de control por realimentación no lineal (seno, coseno y polinomial) a un simple sistema de locomoción, en los cuales obtuvo subsistemas desacoplados, estabilidad postural y las trayectorias periódicas deseadas. Este método requiere de un alto tiempo de cálculo.

Este modelo se basa en las ecuaciones de estado como el de técnicas de par calculado, en donde el objetivo del control es determinar un controlador desacoplado realimentado.

Este controlador se basa en la dinámica del manipulador y esto se hace eficientemente en las ecuaciones de Newton - Euler.

5. CONTROL DE MOVIMIENTO RESUELTO

El control de movimiento resuelto, permite resolver el movimiento en direcciones cartesianas deseada con un control de posición y velocidad coordinado, movimiento resuelto significa que los movimientos de los diversos motores de las articulaciones se combinan y resuelven en movimiento de la mano controlables separables a lo largo de los ejes de coordenadas de mundo.

Esto implica que algunos motores de articulación deben funcionar simultáneamente a diferentes velocidades con el fin de lograr el deseado movimiento coordinado de la mano a lo largo de cualquier eje de coordenadas de mundo.

Esto permite al usuario especificar la dirección y velocidad a lo largo de cualquier camino orientado arbitrariamente para cualquier manipulador lo siga. Este control de movimiento simplifica enormemente la especificación de las secuencias de movimiento para completar una tarea porque los usuarios están normalmente mas adaptados al sistema de coordenadas cartesianas que las coordenadas de ángulos de la articulación del manipulador.

El movimiento deseado de un manipulador se especifica en términos de una trayectoria temporal de la mano en coordenadas cartesianas, mientras que el sistema de control de los servos requiere que las entradas de referencia se especifiquen en coordenadas de articulación, esta relación matemática entre estos dos sistemas de coordenadas es importante para diseñar un control eficaz en el espacio cartesiano.

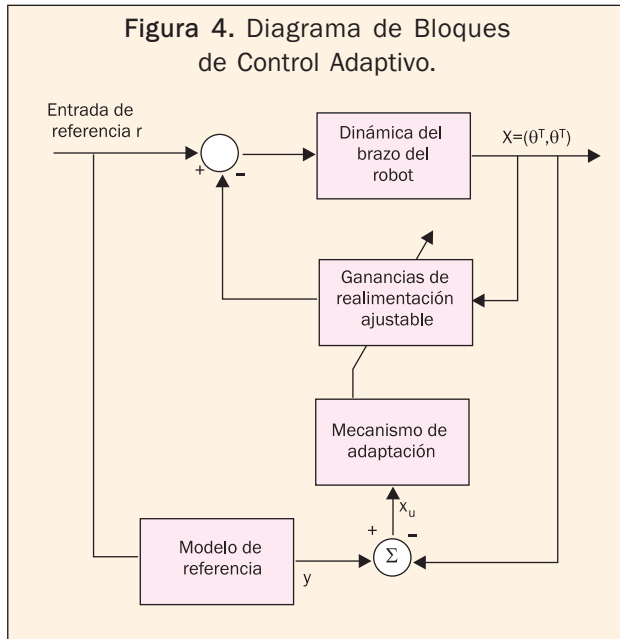
6. CONTROL ADAPTIVO

Los esquemas de control anteriores controlan la mano o la articulación y ponen énfasis en compensaciones no lineales de las fuerzas de interacción entre las diversas articulaciones. Estos algoritmos de control algunas veces son inadecuados porque necesitan una modelización precisa de la dinámica del brazo y expresan los cambios de la carga en un ciclo de tarea.

Estos cambios en la carga del sistema controlado a menudo son bastantes significativos para hacer que las estrategias de control por realimentación anterior sean ineficaces. El resultado es una velocidad de respuesta y amortiguamiento del servo reducido, lo cual limita la precisión y velocidad del efector final.

El control Adaptivo se basa en seleccionar un modelo de referencia apropiado y un algoritmo de adaptación que modifica las ganancias de retroalimentación a los actuadores del sistema real. EL algoritmo de adaptación se excita por los errores entre la salida del modelo de referencia y la salida del sistema real.

¹ Los controles de tiempo óptimo son funciones del tiempo constantes a tramos, y de esta forma estamos interesados en regiones del espacio de estado en las cuales el control es constantes. Estas regiones están separadas por curvas en el espacio bidimensional, por superficies en un espacio tridimensional y por hipersuperficies en un espacio n-dimensional. Estas superficies separatrices se llaman curvas de conmutación, superficies de conmutación e hipersuperficies de conmutación respectivamente.



La Figura 4. muestra el sistema de control Adaptivo con referencia en un modelo.

En este modelo se toma la carga en consideración combinándola con el elemento final, y la dimensión del efector final se supone pequeña comparada con la longitud de otros elementos.

El modelo con referencia seleccionado proporciona un medio efectivo y flexible de especificar el funcionamiento en lazo cerrado del sistema controlado. Se selecciona una ecuación diferencial invariante en el tiempo de segundo orden como el modelo de referencia para cada grado de libertad del robot.

El manipulador se controla ajustando las ganancias de realimentación de posición y velocidad para seguir el modelo, de forma que sus características en lazo cerrado coincidan estrechamente con el conjunto de características de control Adaptivo solamente requiere cálculos moderados que se pueden efectuar en un microprocesador. Tal algoritmo de control adaptivo con referencia a un modelo no necesita modelos matemáticos complejos de la dinámica del sistema ni el conocimiento a priori de su entorno (Cargas, etc).

7. CONTROL CON LÓGICA DIFUSA

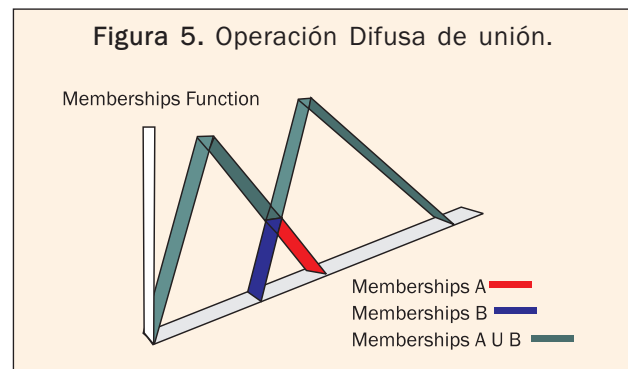
Este modelamiento de control de posición y velocidad se desarrolla bajo variables lingüísticas las cuales actúan de acuerdo con decisiones basadas en unas reglas lingüísticas, esta teoría de control se fundamenta en las operaciones booleanas de and, or y not, adicionalmente a la teoría de conjuntos con el

complemento, estas operaciones permiten el desarrollo de las reglas lingüísticas.

Un conjunto en el universo es, desde el punto de vista intuitivo, una colección de objetos en el discurso tal que es posible decidir cuando un objeto del universo está o no en esa colección. Abstrayendo la noción de conjunto, se puede considerar que un conjunto es exactamente una función del universo en el conjunto de valores $[0,1]$ que asocia precisamente el valor 1 a los objetos que estén en el conjunto y el valor de 0 a los que no. Un conjunto difuso es también una función que asocia a cada objeto del universo un valor en el intervalo $[0,1]$, si X es objeto en el universo y $Y=C(X)$ es el valor asociado a X se dice que Y es el grado de pertenencia del objeto X al conjunto Difuso C .

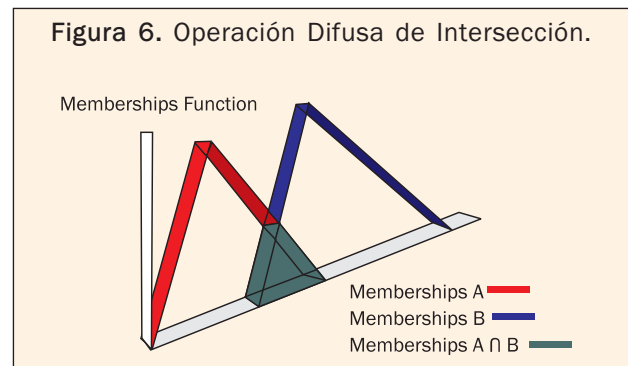
En lógica borrosa, las operaciones entre conjuntos se plantean en forma de operaciones borrosas entre sus funciones de pertenencia. La más utilizadas son la Unión (\cup), intersección (\cap) y complemento (\neg) para los conjuntos, y las correspondientes suma lógica borrosa (\vee), el producto lógico borroso (\wedge) y negación borrosa (\sim) para las funciones de pertenencia.

Así, estas operaciones aplicadas sobre conjuntos borrosos A y B con sendas funciones de pertenencia μ_A y μ_B serían:



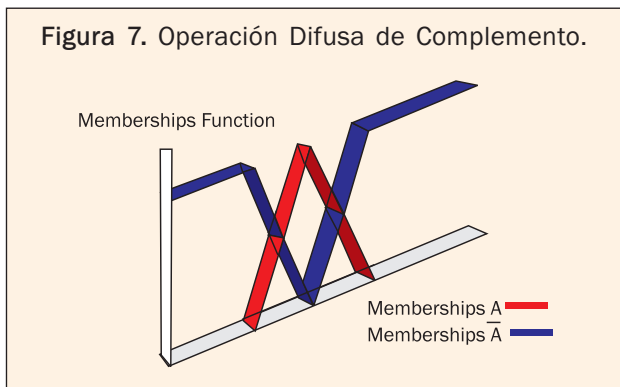
$$\mu_{A \cup B} = \mu_A(x) \vee \mu_B(x) = \max(\mu_A(x), \mu_B(x)) \quad (5)$$

para la unión



$$\mu_{A \cap B} = \mu_A(x) \wedge \mu_B(x) = \min(\mu_A(x), \mu_B(x)) \quad (6)$$

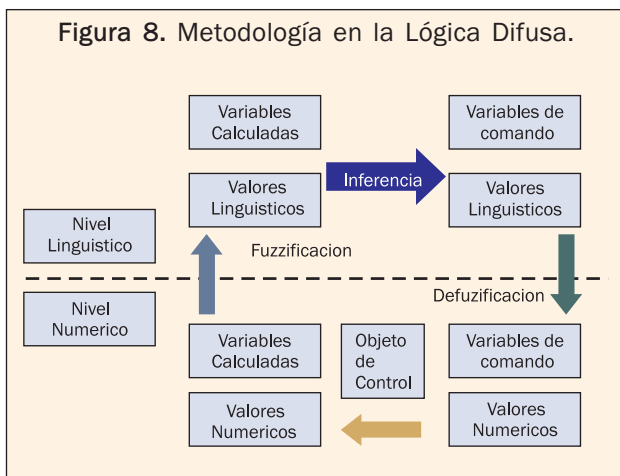
para la intersección



$$\mu_{\bar{A}}(x) = 1 - \mu_A(x) \quad (7)$$

Para el complemento.

El modelo de control no se basa en el modelo dinámico sino en las variables lingüísticas haciendo que sea más sencillo el desarrollo y la implementación, para cada articulación es necesario el desarrollo de un sistema de control y tiene el siguiente diagrama.



La salida del sistema se hace sobre los motores y del par a desarrollar para lograr que alcance la posición deseada, esto se hace bajo el sistema de retroalimentación con la ayuda de la sensorica que permite detectar la posición angular de cada articulación.

Este modelamiento se puede realizar para casos MIMO, en los cuales un solo sistema de reglas permite el control de los diferentes motores de las articulaciones.

El modelamiento se hace en menos tiempo y permite que el sistema tenga autonomía de decisión para corregir el error de acuerdo con los anteriores eventos, esto muestra la capacidad de aprendizaje o principios de IA que son los modelos que actualmente se están investigando.

8. CONTROL CON REDES NEURONALES

Para la interpretación de este modelo se puede mirar en una definición que permita describir lo que significa una red neuronal.

Una nueva forma de computación, inspirada en modelos biológicos.

Este hecho se basa en las redes neuronales biológicas, células neuronales (neuronas) corresponden a los elementos de proceso anteriores. Las interconexiones se realizan por medio de las ramas de salida o axones que producen un número variable de conexiones o sinapsis con otras neuronas que están conectas a músculos, glándulas u otras partes, son sistemas de simples elementos de proceso muy interconectados.

La compleja operación de las redes neuronales es el resultado de abundantes lazos de realimentación junto con no linealidades de los elementos de procesos y cambios adaptativos de sus parámetros, que pueden definir incluso fenómenos dinámicos muy complicados.

Las redes neuronales artificiales presentan un gran número de características semejantes a las del cerebro. Por ejemplo, son capaces de aprender de la experiencia, de generalizar de los casos anteriores, de abstraer características esenciales a partir de entradas que representan información irrelevante, etc. Esto hace que ofrezcan numerosas ventajas y que este tipo de tecnología se esté aplicando en múltiples áreas y sus ventajas son:

- Aprendizaje adaptivo, capacidad de aprender a realizar tareas basadas en entrenamiento o experiencia inicial.
- Autoorganización. Una red neuronal puede crear su propia organización o representación de la información que recibe mediante una etapa de aprendizaje.
- Tolerancia a los fallos. La destrucción parcial de una red conduce a una degradación de su estructura; sin embargo, algunas capacidades de la red se pueden retener, incluso sufriendo un gran daño.

- Operación en tiempo real. Los computadores neuronales pueden ser realizados en paralelo, y se diseñan y fabrican maquinas con hardware especial para obtener esta capacidad.
- Fácil inserción dentro de la tecnología existente. Se pueden obtener chips especializados para redes neuronales que mejoran su capacidad en ciertas tareas. Ello facilitará la integración modular en los sistemas existentes.

En la robótica el control adaptivo en tiempo real es primordial en muchas de las aplicaciones de control de procesos, como puede ser guiado el movimiento del robot. Dentro de estos procesos se tienen dos categorías:

- Los de trayectoria programada.
- Robots inteligentes.

En la programación de los primeros, lo que se supone controlar sus movimientos y acciones de la forma deseada, hay que almacenar en memoria una secuencia de coordenadas y comandos, durante su uso, se definen idénticas trayectorias y comandos por medio de la información memorizada.

En los segundos en los robots inteligentes se supone que se pueden planear sus acciones, la inteligencia exhibida por los robots ha sido ampliamente implementada por programas I.A; lo cual significa que las estrategias han de ser inventadas y programadas heurísticamente por el ser humano.

Esta metodología es aplicada a la robótica para movimientos en entornos desconocidos y esta tarea es difícil de ser programada.

BIBLIOGRAFÍA

- AHMAD M. Ibraim. Introduction to Applied Fuzzy Electronics, PRENTICE HALL, 1997.
- COX, E. The Fuzzy Systems Handbook, McGraw Hill. 1996.
- FU, K. S, GONZÁLEZ R. C, Robótica, control, detección, visión e inteligencia. McGraw Hill. 1997.
- GODOB L., Hajek P. Deductive systems of fuzzy logic. Macmillan Press. 2001.
- HILERA José, Redes Neuronales Artificiales, Alfaomega. 2000.
- KARTALOPOULOS, S. V. Understanding Neural Networks and Fuzzy Logic. IEEE PRESS, 1996.
- KELLY Rafael y otros, Control de Movimiento de robots Manipuladores. Prentice Hall, 2003.
- TORRES, Fernando y otros, Robots y Sistemas Sensoriales, PRENTICE HALL, 2002.

INFOGRAFÍA

- www.fuzzytech.com, FuzzyTech
- www.mathworks.com Matlab

CONCLUSIONES

El desarrollo de nuevas estrategias de control ha evolucionado desde el modelamiento matemático basado en modelos en ecuaciones diferenciales y funciones de transferencia los cuales tiene sus limitaciones de tipo computacional.

Los modelos de espacio de estados los cuales permiten conocer el comportamiento del sistema a partir de los estados intermedios. Los cuales se fundamentan en modelos dinámicos del robot, haciendo que sea complejo su solución al no tener en cuenta las perturbaciones del medio u otras alteraciones del modelo.

Los modelos de control de última generación los cuales se fundamentan en la programación de variables lingüísticas buscando en estas soluciones que no tienen mecanismos sencillos de modelamiento y que su solución es compleja de desarrollar basada en modelos matemáticos.

Los modelos de control fundados en la I.A o modelos biológicos que permiten el aprendizaje de tareas específicas, pero que permiten la solución de problemas basados en la historia o recuerdos de eventos anteriores como el de las redes neuronales y sus posibles combinaciones con otros modelos como lógica difusa entre otros.

La última parte de estos desarrollos que se encuentran en investigación son los basados en algoritmos genéticos y todas las posibles formas, éstos desarrollos permiten una amplia gama de estrategias de control para la robótica en general.