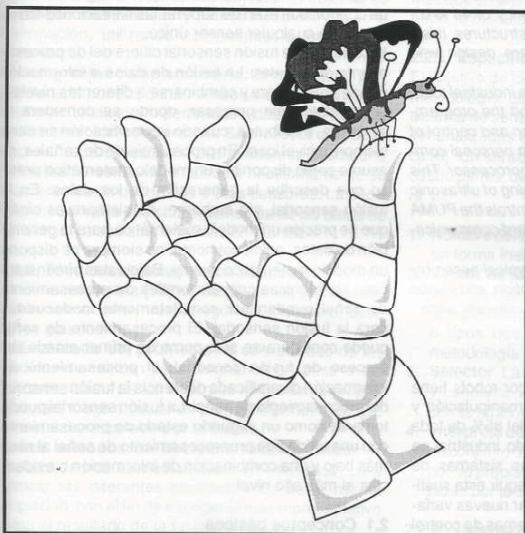


Arquitectura de un sistema sensorial aplicado en robótica



RESUMEN

El objetivo fundamental de este artículo es presentar un trabajo realizado en el Instituto de Automática Industrial de Madrid, España, enmarcado dentro del Proyecto de Investigación de la CICYT No. ROB90-0908, "Elaboración de Estrategias de Manipulación y Ensamblaje en Base a Información de Sensores de Esfuerzos y Ultrasonidos Integrados en una Pinza para Robots".

El trabajo consistió en implementar una infraestructura física (hardware) y lógica (software), para desarrollar tareas de ensamblaje de partes. Se tomó como elemento manipulador una pinza dotada de dos dedos de movimiento solidario y autoalineado orientada al ensamblaje, desarrollada en el Instituto de Automática Industrial, que dispone de dos transductores de ultrasonidos de frecuencia de oscilación de 220 KHz, dos transductores de ultrasonidos de frecuencia de oscilación de 40 KHz y dos estructuras dinamométricas tridimensionales. Esta pinza está englobada en el robot industrial PUMA 700, gestionado por un sistema monitor y un lenguaje de programación VAL II. En el sistema desarrollado la supervisión y control de estos elementos se realiza con un computador personal 80386. El computador realiza la medida y tratamiento digital de las señales de ultrasonido y esfuerzo. A través del protocolo de comunicación RS-422, el ordenador supervisa e interactúa en tiempo real con el robot PUMA 700. Y finalmente, se entrega una base de conocimiento de

- José Martín, Ph.D.
- Leopoldo Calderón, Ph.D.
- Ramón Ceres, Ph.D.
Investigadores
Instituto de Automática Industrial
Madrid - España
- Eduardo Caicedo Bravo, MSc.
Ingeniero Electricista
Profesor Titular, Departamento de
Electricidad Universidad del Valle

diferentes señales de eco parametrizadas, para la identificación de partes y posicionamiento del robot. La infraestructura, tanto física como lógica, desarrollada en este proyecto, es la base para realizar la integración sensorial y definir las estrategias de manipulación y ensamblaje de partes.

ABSTRACT

This paper describes a hardware and software infrastructure for the development of assembly tasks. The manipulator tool is a gripper equipped with two solidary motion and auto-aligned fingers designed for parts assembly. The gripper, implemented by the Industrial Automatic Institute, has two ultrasonic transducers with an oscillation frequency of 220 kHz, one ultrasonic transducer with an oscillation frequency of 40 kHz., and two tridimensional dynamometric structures. It is a multisensorial system whose software design was based on logical sensor concepts.

This sensorial system is included in the industrial robot PUMA 700 with a monitor system and the programming language VAL II. The supervision and control of the proposed system is managed by a personal computer based on the INTEL 80486 microprocessor. This computer executes the digital processing of ultrasonic and force signals. It supervises and controls the PUMA 700 robot through the industrial standard communication protocol RS-422 on real time.

This system was utilized to execute typical assembly tasks like objects location and identification, and stages of grasping, transfer and mounting of different parts.

1. INTRODUCCION

La tendencia de sustituir al hombre por robots tiene una amplia aplicación en tareas de manipulación y ensamblaje, debido a que alrededor del 85% de toda la labor manual realizada en el mundo industrial se ejecuta en trabajos de montaje. Los sistemas de montaje flexible no solo pueden conseguir esta sustitución sino que también pueden utilizar nuevas variables para la realimentación de los sistemas de control y mejorar la calidad.

Cuando el control se realiza únicamente en posición, el robot no es capaz de ejecutar tareas que conlleven incertidumbre. La ejecución automática de estas tareas necesita la introducción de nuevas variables en el lazo de control del robot, incorporación de sistemas y su integración en el controlador, que permitan soslayar las limitaciones añadidas por la imprecisión en la caracterización geométrica del entorno. La incertidumbre tiene dos fuentes: la ligada al conocimiento impreciso del entorno y la debida a la precisión intrínseca al robot, traducida en un conocimiento limitado de las posiciones reales alcanzadas por el robot. La

primera influye en el proceso de manipulación y la segunda es importante en la realización de tareas de ensamblaje donde los márgenes de tolerancia suelen ser inferiores a la precisión y repetitividad de los robots industriales.

El objetivo fundamental de este artículo es presentar una infraestructura física (hardware) y lógica (software) implementada para desarrollar tareas de ensamblaje de partes con base en la información de un sistema sensorial externo.

2. INTEGRACION SENSORIAL EN ROBOTS

La aplicación de robots en procesos de fabricación flexible, requiere tomar información desde un conjunto integrado de múltiples sensores y estrategias sencillas de control, con el fin de superar las limitaciones específicas de cualquier sensor único.

El concepto de fusión sensorial difiere del de procesamiento de señales. La fusión de datos e información puede presentarse y combinarse a diferentes niveles, desde datos sin procesar, donde se considera la dinámica, a atributos, cuando la clasificación se tiene siempre a nivel local. En procesamiento de señales, se asume como disponible un modelo matemático preciso que describe la generación de los datos. En la fusión sensorial, sin embargo, no siempre es cierto que se precise un modelo matemático para la generación de datos, adicionalmente, no siempre se dispone un modelo matemático simple. Bajo estas circunstancias, las técnicas convencionales de procesamiento de señal pueden ser completamente inadecuadas para la fusión sensorial. El procesamiento de señal puede considerarse sólo como un primer estado del proceso de fusión sensorial; el procesamiento de información diversificada diferencia la fusión sensorial del procesamiento de señal. La fusión sensorial puede tomarse como un segundo estado de procesamiento con una unidad de preprocesamiento de señal al nivel más bajo y una combinación de información o evidencias al más alto nivel.

2.1 Conceptos básicos

Los investigadores Lou and Lin [15], hacen una diferenciación conceptual entre integración sensorial y fusión sensorial. Para ellos, la integración sensorial se refiere al uso sistemático de los datos proporcionados por diferentes dispositivos sensoriales externos, mientras que la fusión sensorial es un caso particular de la integración en donde los datos sensoriales provenientes de diferentes fuentes son combinados en un dato representativo. Sin embargo, otros autores utilizan los términos integración y fusión, aplicados a la información sensorial, como sinónimos.

Para los propósitos de este trabajo se ajusta más el concepto desarrollado por Basañez [16], quien define

la integración sensorial desde un punto de vista más general; como el uso de la información proporcionada por diferentes sensores para construir y actualizar un modelo del entorno, con el fin de cumplir con un objetivo. Esta definición implica que la integración sensorial supone un objetivo el cual condicionará las características del modelo del entorno, y consecuentemente, el proceso de integración.

2.1.1 Metodologías de integración sensorial

La integración sensorial adopta diferentes formas, de acuerdo con la interacción entre los datos suministrados por los sensores:

- **Integración competitiva.** Dos o más sensores entregan información de las mismas características pertenecientes a los mismos objetos. El objetivo es conseguir más precisión y menos incertidumbre en la información, utilizando activamente la información redundante.
- **Integración complementaria.** La información proporcionada por dos o más sensores contiene diferentes características y/o pertenece a diferentes objetos.
- **Información cooperativa.** Se presenta cuando la característica deseada no puede inferirse desde una única fuente sensorial, entonces, necesariamente se requieren datos desde dos o más sensores. La información derivada de esta combinación de los datos de los sensores se llama información híbrida.

2.1.2 Técnicas de integración sensorial

En la referencia [17] se clasifican las técnicas de fusión sensorial en tres categorías: Promedio, decisión y guiado.

- **El método del promedio,** la confiabilidad de las medidas se utilizan para asignarles un peso a los diferentes datos de los sensores de la misma propiedad, para luego calcular un promedio ponderado que será el valor estimado por la fusión.
- **Los métodos de decisión,** también utilizan la confiabilidad de la medida, pero en este caso, para calificar las diferentes observaciones de la misma propiedad, con el fin de escoger el más representativo como el resultado de la fusión.
- **En los métodos de fusión guiada,** los valores de un sensor son utilizados para conducir la adquisición o procesamiento de estimadores más precisos o adecuados, provenientes de otro sensor. En este método se persigue una mejora progresiva en los resultados de la fusión.

2.2 Modelos de los sensores

Un modelo de un sensor es una abstracción del proceso de sentido físico cuyo propósito es describir la capacidad de un sensor, para extraer características del ambiente o el objeto en términos de información disponible para el propio sensor.

Una de las formas de racionalizar las características de los sensores, en el contexto de un sistema de robot multisensor, es probablemente la descripción de los modelos de sensores lógicos, que presenta Tom Henderson [6]. Estos modelos de sensor lógico, proporcionan una descripción de las capacidades del sensor en términos de un conjunto de reglas, especificando las características entrada-salida de un dispositivo o un algoritmo. Los modelos son definidos en forma modular, permitiendo la especificación de diferentes funciones en términos de "bloques de construcción característicos" que pueden utilizarse para construir un sistema completo. La principal ventaja de esta estructura es que se concentra en la información proporcionada por diferentes sensores y en algoritmos, más que en el proceso de sentido físico, que conlleva hacia la modularidad y extensibilidad.

2.2.1 Especificación de los sensores lógicos

El objetivo de los sensores lógicos es desarrollar una metodología que permita diseñar y especificar un sistema de sensores tal que sus propiedades puedan ser analizadas en forma automática o semi-automática [6]. Un sensor lógico está definido en términos de cuatro partes, descritas esquemáticamente en la Figura 1.

1. **Nombre del sensor lógico.** Utilizado para identificar en forma inequívoca al sensor lógico.
2. **Vector de salidas.** Es un vector que describe los tipos de salidas producidos por un sensor lógico, que pueden ser estándares como enteros o reales o tipos que definen rangos, aplicados con la metodología Fuzzy.
3. **Selector.** La función del selector es detectar fallas y conmutar a sistemas alternativos para cumplir con la función objetivo.
4. **Intérprete de comandos.** Cada sensor lógico tiene un conjunto de comandos de control, especificados por su propia sintaxis y características físicas definidas por la señal con la que interactúa.

2.2.2 Sistema de integración sensorial propuesto

El sistema instalado en el Instituto de Automática Industrial, usa un procesamiento jerárquico y distribuido para soportar un robot PUMA del tipo industrial, dotado con cuatro sensores de ultrasonidos (dos de 40 KHz y dos de 220 KHz) y sendos arreglos de galgas extensiométricas, configurado para aplicaciones en procesos de ensamblaje industrial. Figura 2.

Con el fin de manejar la complejidad presentada por los múltiples sistemas, la celda de trabajo requiere un nivel de control supervisor. Este supervisor generará los comandos de tarea para el robot y subsistemas sensoriales, adquiriendo y priorizando los datos de los sensores, tomándose como base para la modificación

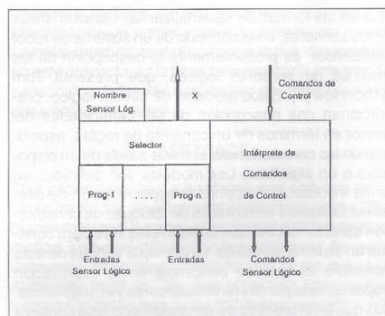


Fig. 1. Esquema de un sistema de sensores lógicos

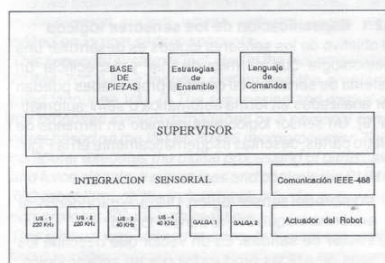


Fig. 2. Sistema de integración sensorial propuesto

de trayectorias en tiempo real. El supervisor es un microcomputador 386 programado directamente en Lenguajes Ensamblador y C. El robot es uno UNIMAT PUMA, con un brazo articulado de 6 grados de libertad con un sistema de operación VALL II. En el caso de los sistemas sensoriales, el supervisor modificará los algoritmos de procesamiento basado en el conocimiento del estado real de la tarea, estos algoritmos pueden alterarse por variables transmitidas que afectan la operación de los procesos de los subsistemas, o por la transferencia completa de nuevos programas para ser procesados por los sensores. En el caso del robot, el supervisor le comunicará una serie de tareas a nivel de comandos de movimiento, basado en el conocimiento del estado actual de la tarea. Esto significa que con base en los datos de los sensores y previo un objetivo de programación, se generará en el supervisor una secuencia de comandos y se le comunicará al robot, al completar esa secuencia, el supervisor genera y comunica otra secuencia. Estas secuencias controlan las actividades del robot, sujetas al subsecuente control adaptativo en tiempo real.

3. SOPORTE FISICO DEL SISTEMA (HARDWARE)

En la figura 3 puede observarse el esquema general del sistema instalado en el Instituto de Automática Industrial, constituido por dos computadores personales 286 y 386, el Robot Industrial PUMA 700, y la pinza para manipulación diseñada en el I.A.I. en cuya estructura están ubicados los sensores de ultrasonidos y de esfuerzos, así como el motor de movimiento de los dedos de la pinza.

El computador personal 386 ejerce la función de supervisor del sistema, pues controla los movimientos del robot PUMA, en los modos ALTER y SUPERVISOR, a través la tarjeta PCL-743 que gestiona dos puertos duales del protocolo estándar RS-422. Además, están instaladas en su bus interno la tarjeta de temporizadores y E/S Digitales PC-TIO-10 de National Instruments, utilizada para conformar los pulsos, de anchura programable, de excitación de los sensores de ultrasonidos y la tarjeta de adquisición de datos ISC-16 de RC ELECTRONICS que dispone de 16 canales de entradas analógicas (tiempo de conversión, 1 microsegundo), de las cuales se utilizan cuatro para los sensores de ultrasonidos de 220 KHz y 40 KHz, dejando libres las restantes para futuras ampliaciones.

El computador personal 286 recibe del sensor de esfuerzos las medidas en formato paralelo a través de una tarjeta desarrollada en el I.A.I., instalada en su bus interno, la información procesada como tres componentes espaciales de esfuerzo para cada uno de los dedos, la envía hacia el PC 386 a través del puerto serie RS-232C, cada que éste se lo solicite. (En la figura 4, puede observarse una descripción detallada del sistema).

3.1 Sistema de adquisición de datos ISC16

La tarjeta ISC-16 de RC ELECTRONICS INC. [11], es un subsistema de adquisición de datos para la familia de computadores IBM PC o compatibles para ser conectada en su bus interno. Las conexiones externas

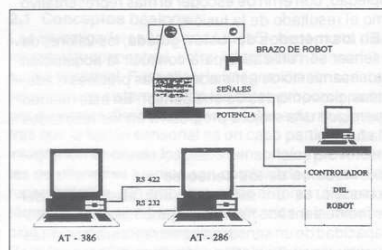


Fig. 3. Diagrama general del sistema

se realizan a través de un conector estándar de 40 pines con un adaptador que permite entradas con conector tipo BNC.

3.2 Generador de pulsos programables

La tarjeta PC-TIO-10 de la National Instruments [9], proporciona pulsos de tiempo de duración programable, utilizados para iniciar la oscilación de los sensores de ultrasonidos.

3.3 Pinza para robots manipuladores

En este aparte del trabajo se describe un sistema automático de medida de esfuerzos, configurado en torno a una pinza mecánica diseñada específicamente en el Instituto de Automática Industrial [21]. En sus dos dedos se encuentran implantadas las galgas extensiométricas, mediante las cuales se tendrá la información de interacciones con el medio, todo ello procesado mediante los circuitos de adecuación y conversión de información analógica a digital. La realimentación en prensión se realiza mediante un motor paso a paso desde un microcomputador personal tipo AT con microprocesador INTEL 80286. La información del ambiente de trabajo, como detección de obstáculos, localización y reconocimiento de objetos, se realiza con cuatro sensores de ultrasonidos: dos de 220 kHz y dos de 40 kHz.

La parte principal de la pinza, como se desprende de la figura 5, está constituida por dos dedos con movimientos dependientes de apertura y cierre autoalineados por traslación mediante un husillo. Cada dedo está compuesto por un soporte roscado sobre el husillo y mantenido por una guía superior, un cuerpo central que constituye la estructura sensible donde se insertan las galgas extensiométricas y una parte inferior a modo de garra, con una lámina elástica de contacto para aumentar la superficie de prensión y el coeficiente de rozamiento.

El movimiento del husillo se consigue a partir de un motor D.C. con velocidad regulada. En sentido longitudinal posee dos finales de carrera correspon-

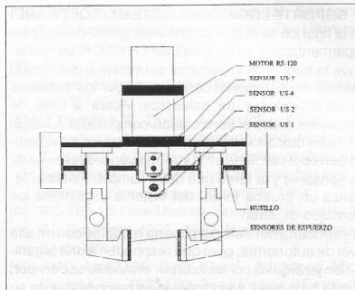


Fig. 5. Esquema general de la pinza para manipulación

dientes a las posiciones de cierre y apertura máxima, realizados con dispositivos de efecto Hall, dadas sus reducidas dimensiones.

3.4 Características del transductor de ultrasonidos de 220 kHz

El transductor de 220 kHz instalado en la garra manipuladora es una cerámica piezoeléctrica comercial (E-188/220 de Massa Product Corporation) cuyas principales características se resumen así:

Frecuencia	: 220.0 KHz
Ancho de banda (Recepción)	: 2.5 kHz
Ancho de banda (Transmisión)	: 25.0 kHz
Sensibilidad (Transmisión)	: 20 dB
Sensibilidad (Recepción)	: -77 dB
Tensión de alimentación (pulsos)	: 50 V
Impedancia en resonancia	: 1 K Ω
Angulo del lóbulo de emisión	: 10° (-3 dB)
Temperatura de operación	: 0-70° C
Peso	: 10 gms

3.5 Característica del transductor de ultrasonidos de 40 kHz

El transductor de 40 kHz instalado en la garra manipuladora es una cerámica piezoeléctrica comercial (MA40S2R/S de Murata MFG CO., LTD) cuyas principales características se resumen así:

Frecuencia	: 40.0 kHz
Ancho de banda (recepción)	: 6.0 kHz
Ancho de banda (Transmisión)	: 7.0 kHz
Sensibilidad máx. (Transmisión)	: 100.0 dB
Sensibilidad máx. (Recepción)	: -74.0 dB
Tensión de alimentación (pulsos)	: 24 V
Impedancia en resonancia	: 3.9 K Ω
Angulo del lóbulo de emisión	: 30° (-3 dB)
Temperatura de operación	: -20/ +60°C
Peso	: 10 gms

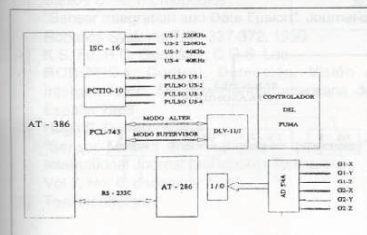


Fig. 4. Descripción detallada del sistema

4. SOPORTE LOGICO DEL SISTEMA (SOFTWARE)

En la figura 6 se presenta una vista global del sistema implementado: El programa SUPERVISOR, que constituye la parte más importante del sistema, gestiona el sistema multisensorial conformado por los sensores de ultrasonidos y de esfuerzos. Actúa a nivel de comandos sobre el controlador, computador AT-286, del motor ubicado en la pinza. Comanda los movimientos del robot con base en la información proveniente de los sensores y la tarea que deba cumplir. Finalmente, realiza una prueba inicial del sistema y gestiona los mensajes de error.

La estructura del sistema soporta módulos con un alto nivel de autonomía, pero que responden a una organización jerárquica controlada por el módulo supervisor. Al más bajo nivel, cada módulo es responsable de su tarea; por ejemplo, medir distancia con los sensores de ultrasonidos, cerrar los dedos de la pinza con un nivel de fuerza determinado o realizar un movimiento con el robot. Esta estructura proporciona un alto grado de modularidad, importante desde el punto de vista de flexibilidad y reconfigurabilidad del sistema.

4.1 Supervisor del sistema

La función del módulo supervisor es coordinar las actividades de todos los dispositivos del sistema, con el fin de cumplir con las secuencias de ensamble especificadas por el usuario. El supervisor debe estar en capacidad de enviar comandos hacia los elementos actuadores con base en la información proporcionada por el sistema sensorial. Las principales funciones definidas en el supervisor son las siguientes:

- Funciones generales
- Funciones de manejo del robot
- Funciones asociadas con los sensores de ultrasonido
- Funciones asociadas con la pinza de robot

4.2 Sensores de ultrasonido

La integración sensorial es el proceso de extracción y combinación de información producida por los dispositivos de sensado en respuesta a un requerimiento del supervisor. La estructura que poseen es la definida en el aparte de "sensores lógicos", del numeral 2.3 de este artículo, incluye por tanto, las cuatro partes fundamentales: Nombre, entradas, salidas y comandos.

4.3 Medida y control de la pinza del robot

Desde el punto de vista del sistema implementado, la pinza del robot es un sistema capaz de entregar la medida de esfuerzo en cada uno de sus dedos, discriminados en los ejes espaciales X, Y y Z. Además, es capaz de actuar sobre un motor que gobierna el cierre y apertura de los dedos de la pinza. Este bloque del sistema, aunque no se ajusta a la definición exacta de sensor lógico 2, se trata como tal para darle una mayor coherencia al sistema. En definitiva este bloque se configura como un sensor de esfuerzos que incluye comandos adicionales de actuación sobre el motor de la pinza.

5. RESULTADOS OBTENIDOS Y CONCLUSIONES

El objetivo fundamental del presente artículo enmarcado dentro del Proyecto de Investigación de la CICYT No. ROB90-0908, "Elaboración de Estrategias de Manipulación y Ensamblaje en Base a Información de Sensores de Esfuerzos y Ultrasonidos Integrados en una Pinza para Robots", era configurar e implementar una infraestructura tanto física (hardware), como lógica (software), para desarrollar tareas de ensamblaje de partes en ambientes flexibles. La información proviene de un sistema multisensorial externo para que el computador central actúe sobre el robot industrial PUMA 700. Con el fin de evaluar la infraestructura

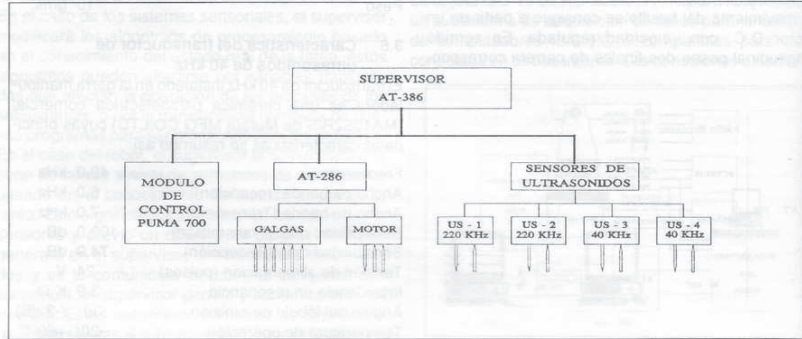


Fig. 6. Diagrama general del software implementado.

realizada se ha montado una aplicación que simula el montaje de una caja de cambios, incluyendo las siguientes fases:

1. Fijar los puntos de ensamble.
2. Identificación de los engranajes.
3. Manipulación de los engranajes.
4. Encajar los engranajes en los ejes.
5. Acoplar los engranajes dejándolos en capacidad de transmitir movimiento.

La configuración implementada, puede resumirse con las siguientes características:

- Manipula cargas de hasta 10 Kg. a través del robot PUMA 700, con seis grados de libertad o ángulos de movimiento.
- Posee dos sensores de ultrasonidos (220 kHz).
- Posee dos sensores de ultrasonidos (40 kHz).
- Posee dos estructuras tridimensionales de medida de esfuerzos.
- Posee una pinza para manipulación con diámetro interno de 112 mm y diámetro externo de 236 mm.

Finalmente, la infraestructura se ha configurado bajo los principios básicos de los sistemas de integración sensorial, en particular se debe destacar que el modelo adoptado para los sensores es el propuesto por Tom Henderson [6], "Modelos de Sensores Lógicos", debido en gran medida a su simplicidad, flexibilidad y modularidad, características que facilitan el crecimiento del sistema en futuras aplicaciones.

6. BIBLIOGRAFIA

- [1] C. Roukangas, M. Black, J. Martin. "Integration of Multiple Sensors to Provide Flexible Control Strategies". Proceedings 1986. IEEE International Conference on Robotics and Automation. Rockwell Science Center, Thousand Oaks, CA 91360
- [2] D. Nitzan, C. Barrouil, P. Cheeseman. "Use of Sensors in Robot Systems". Proceedings ICAR. (International Conference on Advanced Robotics). September 1983. Tokyo, Japan.
- [3] Stelios C. A. Thomopoulos. "Sensor Integration and Data Fusion". Journal of Robotics Systems 7(3), 337-372, 1990
- [4] K.S. Fu, R.C. González, C.G.S. Lee. ROBOTICA. Control, Detección, Visión e Inteligencia. Ed. McGraw-Hill/Interamericana de España 1988
- [5] Hugh F. Durrant-Whyte. "Sensor Models and Multisensor Integration". International Journal on Robotics Research. Vol 7, No. 6, december 1988.
- [6] Tom Henderson. "The Especification of Logical Sensors". Department of Computer Science. The University of Utah. Proc. 1986 IEEE.
- [7] Albus, J.S. Brains, Behavior and Robotics. Peterborough: BYTE 1981.
- [8] L. Basañez, C. Torras, A. Sanfeliu, J. Ilari. "Automatic Cell Programming and Monitoring Through The Cooperative Interplay of Operation Specialists." II International Symposium of Robotics. Albuquerque, november 1988.
- [9] PC-TIO-10. User Manual. Timing I/O Board for the PC. Copyright 1990, 1991 National Instruments Corporation.
- [10] AMD Am9513A Data Sheet. Advanced Micro Devices, Inc. 1990. Data Book Personal Computer Products.
- [11] Computerscope, Enhanced Graphics Acquisition and Analysis. Operation Guide and Reference Manual. August 1990. RC Electronics Inc. 5386-D Hollister Ave., Santa Barbara, CA 93111
- [12] PCL 743 Dual Port RS-422/RS-405. Interface Card. User's Manual. The PC-LabCards. Advantech Co., Ltd. 1989. Part No. 2003743000 Rev. A2.
- [13] Unimate. PUMA Mark III - VAL II Robot. 700 Series (Models 761/762) Equipment Manual 398Z1. Unimation Incorporated, may 1986.
- [14] Unimate. Industrial Robot. Programming Manual. User's Guide to VAL II P/N 398AG1. Unimation Incorporated, February 1986.
- [15] Luo R.C., Lin M.H. "Robot Multi-Sensor Fusion and Integration: Optimum Estimation of Fused Sensor Data. Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation, Philadelphia, pp.1706-1081.
- [16] Luis Basañez. "Multi-Sensor Integration in Robotics". Workshop in Robotics and CIM, september 1989.
- [17] Harmon S.Y., Bianchini G.L. and Pinz B.E. "Sensor Data Fusion Through a Distributed Blackboard". Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation. San Francisco, 1986.
- [18] Alberto Ibáñez Rodríguez. "Sistema de Medida y Análisis de Esfuerzos en Organo Prensor de Robots". Tesis de Doctorado, Facultad de Ciencias Físicas, Universidad Complutense de Madrid. Madrid, 1988.
- [19] Ceres R., Ibáñez A., Alvarez E. "Sensor de Esfuerzos en Pinza para Robots Manipuladores". Instituto de Automática Industrial (CSIC). MEXICON 86 Ciudad de Guadalajara, Jalisco, México, octubre de 1986