

# Fusión e integración de sistemas sensoriales artificiales utilizados en robótica

Eric Vallejo Rodríguez\*

---

## Resumen

*En este trabajo se presentan conceptos relacionados con los sistemas sensoriales artificiales, principalmente con los utilizados en Robótica Móvil. Se hace énfasis en las técnicas de «Integración y Fusión Sensorial» con una revisión de los planteamientos propuestos en la literatura existente al respecto, tanto en problemas particulares como generales, y se esbozan algunas alternativas de solución a problemas concretos. Por último, se relaciona una bibliografía especializada que servirá como fuente básica para ampliación e investigación sobre los temas tratados. El trabajo pretende ser el informe de una revisión bibliográfica que permita vislumbrar el estado del arte en las técnicas planteadas anteriormente sobre sistemas sensoriales artificiales.*

**Palabras claves:** Fusión e integración sensorial, entornos, comportamiento, robots móviles, modelo de sensor.

## Abstract

*In this paper, several concepts about Artificial sensor Systems applied in Mobile Robots are presented. This work deals with «Sensor Systems Fusion and Integration» concepts. It is a survey of technical literature about Mobile robots sensor Systems.*

**Key words:** Sensor Fusion and integration, behavior, environment, mobile robots, sensor model.

---

Fecha de recepción: Septiembre 1 de 1999

## Introducción

El vertiginoso desarrollo tecnológico alcanzado por las diferentes disciplinas

involucradas en la robótica –tales como la mecánica, la electrónica, los sistemas informáticos, la teoría de control y la instrumentación– han hecho posible construir máquinas cada vez más «*inteligentes*» y fáciles de entrenar. En consecuencia, las investigaciones y desarrollos en robótica han llevado a que los robots incursionen en prácticamente cualquier actividad humana.

---

\* Profesor de tiempo completo del Departamento de Ingenierías Eléctrica y Electrónica de la Universidad del Norte en el área de Electrónica y Control; coordinador del Laboratorio de Automatización y Robótica de la misma universidad. Candidato a doctor en Automática e Informática Industrial de la Universidad Politécnica de Valencia. (E-mail: [evallejo@uninorte.edu.co](mailto:evallejo@uninorte.edu.co)).

La robótica aplicada a los medios de producción se ha venido convirtiendo en una interesante alternativa, capaz de responder a las cambiantes exigencias del mercado; su éxito se debe fundamentalmente a la flexibilidad y adaptabilidad. En el campo industrial, los robots han sustituido al hombre en tareas repetitivas, peligrosas o que requieran de altas exigencias de precisión, calidad y/o velocidad. Su implantación aquí está dirigida a las tareas de soldadura, corte, pintura, carga, almacenamiento (paletizado), ensamble, control de calidad, aplicación de pegamentos y sellantes, etc.

Fuera del campo estrictamente de la manufactura y producción, los robots han encontrado aplicaciones importantes (robots de servicio) [2] en labores en las que es conveniente eliminar la presencia humana directa por la peligrosidad del medio, tales como: El trabajo en áreas contaminadas o radioactivas, la manipulación de productos químicos tóxicos o la exploración y toma de muestras en volcanes e investigaciones submarinas, lo mismo que en aquellas en las que el medio tiene altas exigencias en el control de impurezas, como ocurre en los laboratorios donde se producen y manipulan materiales semiconductores.

La medicina y las ciencias de la salud en general han encontrado en la robótica un apoyo formidable en aplicaciones que van desde la ayuda a discapacitados -tanto en equipos como camas y sillas «inteligentes», por ejemplo- hasta

el desarrollo e implantación de prótesis de alta tecnología que responden a los impulsos nerviosos. En el campo médico, la robótica está siendo utilizada inclusive en cirugía.

La utilización creciente de la automatización en los procesos de fabricación requiere de la constante implantación de nuevos y más potentes sistemas y equipos autónomos. Como ya lo dijimos, uno de tales sistemas lo constituyen los *robots*, ya sea como entes independientes o como elementos de *sistemas flexibles de fabricación y ensamble*. En tareas simples de manipulación, un robot puede ejecutar sus movimientos con base en una programación fija que determina sus trayectorias y actuaciones en el proceso. Estas actividades requieren de la realimentación de algunas variables, información que, sin embargo, resulta insuficiente si se quiere mejorar la precisión o la flexibilidad, principalmente en labores de ensamble y en la generación de trayectorias de manera autónoma. Lograr un reconocimiento del entorno y una mayor precisión en la manipulación exigen la realimentación de variables adicionales en los lazos de control.

En este trabajo enfocaremos nuestros esfuerzos hacia el estudio de la *integración* de sistemas sensoriales aplicados a robots móviles, especialmente a los rodantes autónomos (Rover's), incluyendo en esta clasificación a los AGV's (*Automated Guided Vehicles*), aunque sus resultados pueden extenderse a cualquier tipo de robot o máquina automática.

## SISTEMAS DE PERCEPCIÓN EN ROBÓTICA

El campo del desarrollo sensorial aplicable a los robots se encuentra todavía abierto a la investigación. Un robot con capacidades de detección es mucho más flexible, por cuanto puede ser dotado con niveles mayores de *inteligencia* que le permitan interactuar de mejor forma con su entorno. Resulta evidente que un robot con las habilidades de «ver» y «sentir» es más fácil de entrenar y adaptar que uno que responde a un plan preprogramado. Aquél debe ser dotado entonces con capacidades decisorias que le permitan responder satisfactoriamente en entornos cambiantes o desconocidos (no estructurados).

En los campos de la investigación, desarrollo y aplicaciones de la robótica móvil, tanto en vehículos rodantes autónomos como en robots caminantes, el sistema sensorial es de primordial importancia, y por lo tanto su estudio exige especial atención.

En robótica en general y en robots autónomos en particular, la utilización de varios sub-sistemas sensoriales es vital para el reconocimiento del entorno, base fundamental para la toma de decisiones y la planificación de trayectorias de manera automática. En este punto debemos tener claro que en el entorno industrial, los robots utilizados son fundamentalmente de *primera generación*, entendiendo por ello que se trata de máquinas con ningún o muy poco conocimiento del ambiente que las rodea;

son robots *ciegos y sordos* que realizan tareas repetitivas, inmersos en un entorno controlado. Cuando se requiere de autonomía, debe dotarse al robot con sistemas de *Inteligencia Artificial* (AI) que requieren de sistemas sensoriales inteligentes, o al menos con características muy especiales. Esto nos obliga a considerar más apropiado hablar de *Sistemas Robotizados* que de robots. Un sistema robotizado puede concebirse entonces como la unión de cuatro entidades [15]:

- **Una cadena o sistema mecánico** con sus elementos actuadores, los cuales pueden ser eléctricos, neumáticos o hidráulicos.
- **Las tareas por realizar**, es decir, las acciones (el programa) que se desea que efectúe la primera entidad. Para ello es necesario contar con un lenguaje y un sistema capaz de describirlas e interpretarlas.
- **El «cerebro»**. Para que un sistema robotizado pueda efectuar sus tareas debe contar con un elemento capacitado para interpretarlas y tomar decisiones. Esta es la parte «*inteligente*» del sistema, y puede estar constituida por diversos tipos de dispositivos. Los robots más simples o elementales y que, por ende, se utilizan en aplicaciones poco flexibles, están controlados regularmente por autómatas programables (PLC's), sistemas lógicos básicos, microprocesadores o microcontroladores de bajo nivel o computadores con programas muy



simples. Los robots más avanzados están equipados con un computador especializado, un microprocesador o un microcontrolador de altas prestaciones.

- **El entorno.** Una máquina con un elevado nivel de «*inteligencia*» y la tecnología sensorial involucrada, debe ser capaz de interactuar y reaccionar ante el medio y sus posibles cambios. El desarrollo y aplicación de los sistemas sensoriales artificiales se encargan de suministrar los elementos necesarios para hacerlo posible. Es fácil comprender que entre más avanzado sea el robot, mayor debe ser su conocimiento del entorno y más complejo su sistema sensorial. El entorno pasa entonces a formar parte del sistema.

## Sensores en Robótica

Los sensores asociados a un robot pueden clasificarse en dos grandes categorías: Los *intrínsecos* o de estado interno o propioceptivos, y los *extrínsecos* o de estado externo o exteroceptivos. Los internos operan con base en variables internas o propias del robot, en tanto que los segundos lo hacen con variables dependientes de elementos externos al robot, tales como objetos o características del entorno.

En un brazo industrial, por ejemplo, los sensores intrínsecos le proporcionan al sistema de control información sobre el recorrido o ángulo formado por las diferentes articulaciones, así como las

velocidades y aceleraciones de las mismas.

Los sensores externos pueden, a su vez, subdividirse en dos grupos: Los de *contacto* y los de *no contacto*. Como su nombre lo indica, los de contacto responden al contacto físico (mecánico), tal como tacto, deslizamiento o torsión. Los de no contacto se basan en la respuesta de un detector a las variaciones de radiación electromagnética, óptica, acústica, de temperatura, etc. [7].

Generalmente, los sensores exteroceptivos de no contacto se utilizan para detectar objetos, medir distancias, determinar proximidad y captar características de esos objetos o del entorno; conocimientos necesarios para evadir obstáculos y/o definir trayectorias. Los de contacto se relacionan, por ejemplo, con la operación final de manipulación.

Con base en lo anterior podemos decir que, apoyado en el sub-sistema sensorial intrínseco, el robot trabaja sus estrategias de control en lazo cerrado, pero sin sensores extrínsecos el sistema total está en lazo abierto.

## Sistemas de Percepción Sensorial en Robótica Móvil

La robótica móvil se ha convertido en un campo de continuo crecimiento en los últimos años, tanto en aplicaciones industriales, de servicio o investigación. Como se señaló, los robots móviles se caracterizan por su total o parcial autonomía y, por lo tanto, en ellos se enfocan

gran parte de las técnicas modernas de percepción, planificación de trayectorias e inteligencia artificial aplicada a robótica.

Aunque las subdivisiones que ordinariamente se hacen de los robots, ya sean de aplicación industrial o de otro tipo, pueden variar mucho de acuerdo con los criterios tomados para las mismas y de los objetivos perseguidos por los autores, podríamos considerar aceptable que los robots móviles son básicamente robots de servicio que pueden subdividirse en dos grupos de acuerdo con su mecánica de locomoción: Los rodantes y los caminantes. Los vehículos rodantes son más rápidos en sus desplazamientos y sus sistemas de control son más sencillos, pero requieren de una superficie más o menos lisa y horizontal para sus recorridos. Actualmente se hacen muchos esfuerzos para desarrollar los robots caminantes, especialmente por su capacidad para desplazarse en superficies nada estructuradas. Los robots caminantes son, en general, lentos y representan un enorme reto para los sistemas de control. Recordemos que el principal obstáculo al que se enfrenta la robótica móvil es poder actuar en ambientes poco o nada estructurados o controlados. Existen algunas combinaciones de técnicas desarrolladas para robots caminantes con aplicaciones en robots rodantes, aprovechando lo mejor de cada una de ellas. Un ejemplo de esto lo vemos en vehículos rodantes de seis ruedas (equivalentes a las patas de un caminante hexápodo) diseñado para operar en superficies no

estructuradas.

El control y manejo de un vehículo autónomo involucra dos conceptos básicos: La *localización* y la *navegación*. El primero se refiere a la ubicación y orientación del vehículo en el espacio o en el entorno, y el segundo, al control y generación de trayectorias. Algunos investigadores (Leonard and Durrant-White [1991]) se han planteado el problema de la navegación con tres preguntas: *Where am I?*, *Where am I going?* y *How should I get there?* En otras palabras: «¿Dónde estoy?», «¿Para dónde voy?» y «¿Cómo puedo lograrlo?». Dar respuesta a cada una de las anteriores preguntas ha representado un enorme trabajo investigativo que aún no entrega soluciones simples, prácticas, definitivas o totales. En realidad, las soluciones vistas hasta ahora son parciales o particulares.

## LOCALIZACIÓN

Las técnicas para la localización o ubicación de robots requieren de medidas *relativas* y *absolutas* [5]. Entre las más comunes se encuentran:

### De medición relativa:

- **Odometría o medida del desplazamiento sobre la superficie**, para lo cual se mide el giro de las ruedas y se calcula el desplazamiento lineal. Generalmente se utilizan *encoders* ópticos (aunque también los hay de *efecto Hall*), que pueden ser *absolutos* o *incrementales*. Con ellos se obtienen

datos de posición y orientación. Su principal ventaja consiste en que son totalmente auto-contenidos y de bajo costo, por lo cual son muy utilizados. Su desventaja está representada en los errores sistémicos (que resultan ser acumulativos) y los no sistémicos, causados por el tipo de suelo y el posible deslizamiento de las ruedas.

- **Sensores de efecto Doppler.** Se obtienen medidas de velocidad con respecto a la superficie analizando la señal reflejada en ella. Se reducen los problemas de derivas, pero son costosos.
- **Sensores inerciales.** Son también auto-contenidos, más caros que los de odometría, tienen mayor precisión y reducen algunos de los problemas de aquéllos. Básicamente son giroscopios y acelerómetros mecánicos, piezoeléctricos u ópticos (láser). Estos y los anteriores son sensores propioceptivos.

#### De medición absoluta:

- **Compases electrónicos.** Brindan orientación con respecto a los polos terrestres. También los hay de diferente tipo, dependiendo de la tecnología y del principio físico en el que se base su funcionamiento.
- **Sistemas de posicionamiento global (Gps).** Utiliza el sistema desarrollado inicialmente con fines militares basado en un grupo de 24 satélites (incluidos cuatro de repuesto) que

giran alrededor de la Tierra cada 12 horas. Conjuntos de cuatro satélites forman seis planos inclinados de  $55^\circ$  con respecto al plano del ecuador terrestre, y entregan dos señales pseudoaleatorias. La posición del receptor se obtiene por métodos simples de trilateralización basada en el tiempo de vuelo (TOF) de la señal de radio[13].

- **Sistemas basados en balizas artificiales.** En este caso, el entorno se encuentra parcial o totalmente estructurado. Tres o más balizas emiten radiación acústica, óptica o de radio, y el sistema sensorial a bordo puede estimar su posición y/u orientación por trilateralización o triangulación.
- **Sistemas basados en el reconocimiento de marcas naturales y artificiales.** Para ello se requiere de un conocimiento previo del escenario en el que se destacan marcas fácilmente reconocibles.
- **Sistemas basados en modelos del entorno.** El sistema sensorial a bordo genera un mapa del entorno cuyo modelo es comparado con otro previamente almacenado en el sistema. Haciendo coincidir los dos mapas, el robot puede establecer su posición en ese escenario.
- **Sistemas basados en visión y sistemas basados en cámaras láser.** Estos dispositivos pueden ser parte de otros sistemas de posicionamiento,



tales como los basados en mapas del entorno, pero por sí mismos pueden dar la información suficiente al sistema para efectuar la navegación. Las cámaras láser pueden entregar información 3D con un único sensor.

Como veremos más adelante, comúnmente un único elemento sensorial es incapaz de entregar la información suficiente para que el sistema robotizado pueda efectuar sus acciones de navegación.

## NAVEGACIÓN

La navegación se fundamenta en los tipos de técnicas utilizadas para la localización y orientación del robot, y pueden agruparse en:

- **Técnicas generales.** Pueden ser de analogías físicas (campos virtuales de potencial, concentración de fluidos, etc.), histogramas polares, *fuzzy logic*, redes neuronales y otros motores de inferencia, etc.
- **Navegación basada en sensores de proximetría.**
- **Navegación basada en visión.**
- **Navegación por integración sensorial.** Esta es la base fundamental de nuestro trabajo, el cual no está exclusivamente enfocado al posicionamiento y la navegación de robots.

## INTEGRACIÓN Y FUSIÓN SENSORIAL

Para tener un conocimiento más completo y detallado del entorno es necesario contar con diversas fuentes de información a través de diferentes tipos de sensores. En este aspecto toman importancia los conceptos de *fusión e integración sensorial*. Para algunos expertos, los términos son equivalentes, mientras que para otros se refieren a dos estrategias diferentes [10]. Para éstos, la fusión es un caso particular de la integración, y consiste en la combinación de las diferentes informaciones provenientes de los sensores para obtener un dato representativo utilizable en el control del sistema; en tanto que la integración utilizaría tales informaciones de manera sistemática, para tomar las decisiones de control de forma *complementaria, competitiva o cooperativa*. Un caso particular de la fusión sensorial, por ejemplo, podría darse en el caso de utilizar un único sensor del que se obtendrían múltiples medidas en un lapso de tiempo suficientemente largo para obtener de allí ese dato representativo. Sea cual fuere la concepción y estrategia escogida para cumplir con las especificaciones del proceso, el significado de la integración sensorial podría tomarse entonces con la suficiente amplitud como «el procesamiento y la utilización inteligente y sistemática de los datos proporcionados por los diferentes sensores para obtener un mayor conocimiento del entorno y afrontar de mejor forma las tareas programadas».

La investigación en integración y fusión sensorial es relativamente nueva. Se trata de unos conceptos en los que se trabaja desde hace alrededor de diez años, pero de manera intensa (en realidad, la literatura correspondiente apareció a mediados de los ochenta). Los primeros desarrollos en este campo, como ocurre con muchas otras tecnologías, estuvieron enfocados a aplicaciones militares para el seguimiento de objetivos y el guiado de vehículos y robots [14]. Actualmente, las teorías y desarrollos derivados se están llevando al campo industrial, especialmente en labores de ordenamiento de materiales, inspección, ensamble y manufactura automatizados.

La integración y la fusión sensorial son mucho más que utilizar múltiples sensores para obtener información diversa de un proceso, un entorno o un objeto. Se trata, más bien, de procesar la información de manera inteligente, evaluando y combinando aspectos relevantes de las fuentes de información para tomar decisiones. De hecho, muchas máquinas modernas utilizan varios tipos de sensores para controlar sus operaciones, pero en ese caso no puede hablarse de integración o fusión sensorial, ya que cada uno de ellos se encarga de una información particular para una actuación determinada, generalmente de tipo secuencial. En estos casos, cada sensor toma una información simple, la cual es procesada individualmente. En algunos casos se hace algo de integración sensorial *ad-hoc*, no planificada y, por lo mismo, difícil de mantener y actualizar.

La fusión sensorial difiere también del concepto simple del 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 fusión sensorial, sin embargo, no siempre es cierto que se precise un modelo matemático para la generación de datos. Adicionalmente, no siempre se dispone de un modelo matemático simple. Bajo estas circunstancias, las técnicas convencionales de procesamiento de señales pueden ser completamente inadecuadas*» [6].

La idea básica en la integración y la fusión sensorial consiste en que la información obtenida por la utilización de varios sensores actuando sobre un mismo objeto es potencialmente más rica que la ofrecida por un solo sensor. Diferentes tipos de sensores, obteniendo las mismas características de un objeto, pueden proporcionar una redundancia enriquecedora o pueden entregar información complementaria, imposible de obtener por un solo sensor. Lo que se busca es que todo el sistema sensorial artificial trabaje de manera integrada, acercando su funcionamiento al de un sistema sensorial biológico. Aunque la idea parece obvia, su implementación resulta muy compleja, debido, principalmente, a la enorme carga computacional que representa el procesamiento e integración de la información proveniente de todos los sensores, y más



aún si recordamos que en robótica la mayoría de los sistemas deben trabajar en *tiempo real*, en algunos casos de tipo *esencial* [11]. Es obvio pensar entonces que la integración sensorial se ha hecho posible gracias al multiproceso y al procesamiento paralelo.

Los conceptos de integración sensorial están generalmente enfocados a una *meta*, la que estará asociada al *modelo del mundo* y, por consecuencia, al proceso de integración [8]. El modelo del mundo, o entorno, podrá contener atributos *estructurales*, *paramétricos* y *funcionales*. Los atributos estructurales describen la estructura física de los objetos en el entorno y dan una representación de su geometría. Actualmente existen varias propuestas metodológicas para esas representaciones geométricas. Los atributos paramétricos definen características numéricas de los objetos no relacionadas directamente con su forma, tales como el peso o posibles rangos de intervalos variables. Los atributos funcionales describen cómo un objeto interactúa con otros objetos, inclusive cómo interactúa el sistema robótico con el entorno. La información funcional proporciona una unión entre el sistema sensorial y las acciones del robot y hace más fácil la interacción entre ambos. Los tres tipos de información están estrechamente relacionados, y constituyen un sistema lo suficientemente poderoso para distinguir entre atributos de varios tipos.

### Formas de Integración Sensorial

Ya se mencionó que la integración sen-

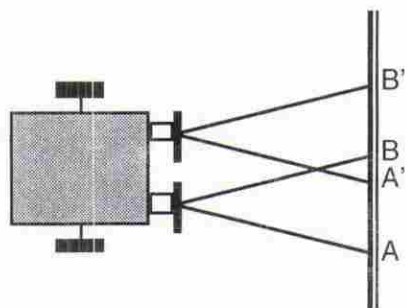
sorial puede utilizar de diversas formas los datos provenientes de los sensores, a continuación las explicaremos con mayor detalle:

- **Integración competitiva:** Se presenta cuando dos o más sensores suministran información de las mismas características provenientes de un mismo objeto. La intención, en este caso, es mejorar la precisión y reducir la incertidumbre utilizando activamente la información redundante.
- **Integración complementaria:** Ocurre cuando la información proveniente de dos o más sensores se refiere a diferentes características u objetos; por lo tanto, la información total está compuesta por partes de información no traslapada proveniente de diversas fuentes. Se puede interpretar como el relleno de la información obtenida por un sensor a partir la captada por otro.
- **Integración cooperativa:** Se produce cuando una característica no puede ser obtenida de la información entregada por un sensor sencillo, y se requiere entonces de los datos de varios sensores. Un caso particular de integración sensorial cooperativa es la utilización de la información proveniente de un sensor para guiar otro sensor en la búsqueda de nueva información.

Como ejemplo de los tres tipos de integración sensorial utilizaremos la figura 1, que representa un robot móvil

con dos sensores iguales colocados en la parte frontal y simétricamente al eje longitudinal del vehículo. Podemos suponer que esos sensores son cámaras de video o detectores ultrasónicos.

Si consideramos que la información proveniente de los sensores es simétrica con respecto a sus ejes longitudinales, es válido suponer que los datos entregados por cada uno de ellos sobre la región A'B es equivalente y el método de integración sensorial aplicable sería el *competitivo*, puesto que los dos están entregando la misma información (redundancia). Las regiones AA' y BB' son exclusivamente tomadas por cada uno de los sensores. Por lo tanto, la combinación de tales informaciones requiere de la integración *complementaria*, ya que la información proveniente de los dos sensores es única y diferente.



**Figura 1** (Tomado y adaptado de [1])

Un caso equivalente se daría en la región A'B si los dos sensores fueran diferentes; es muy importante tener esto en mente. Es claro que los datos que los dos sensores pueden entregar es, en el mejor de los casos, información en 2-D; pero con el adecuado procesamiento

puede extraerse la información necesaria de la región A'B, proveniente del enfoque de los dos sensores, para generar datos del objeto en 3-D, algo imposible con el uso de un solo sensor. Es el caso típico de la integración *cooperativa*.

### Aproximaciones generales a la Integración y la Fusión Sensorial

Dependiendo de cómo se utilicen los sensores y cómo se procese la información, es posible distinguir entre diferentes modos de hacer integración. Una alternativa, por ejemplo, es hacer un procesamiento *estático* de la información, en el cual se utiliza una sola muestra de cada sensor, en contraposición al procesamiento *dinámico*, en el que se manejan series de datos de los diferentes sensores.

Otro modo sería el uso *simultáneo* de los diferentes fuentes sensoriales, en el cual la toma de datos para el procesamiento se hace de una sola vez desde los diversos sensores. A su vez, el *secuencial* tomaría los datos de un sensor después de otro.

Una tercera alternativa está relacionada con el nivel de abstracción en el que se efectúe la integración. En un *nivel bajo*, la integración es realizada, en general, cuantitativamente por algoritmos propios del nivel de sensor. La integración a *alto nivel* o *nivel de conocimiento* emplea procesamiento con métodos más generales e intenta emular el conocimiento.



Obviamente, es posible combinar diferentes formas y niveles de integración dependiendo de las tareas que se vayan a realizar y de los sensores utilizados.

### **Paradigmas y estructuras para la Integración Sensorial**

La integración sensorial ha tenido un camino de desarrollo en el que muchas de las propuestas existentes han nacido de necesidades de aplicación particulares. Ya habíamos dicho que muchas propuestas de solución en percepción artificial son de carácter particular. Por esta razón, son muchas las alternativas propuestas y existe una extensa documentación al respecto, de la cual tomaremos sólo algunas que consideramos relevantes para nuestro trabajo y que generalmente son las más utilizadas.

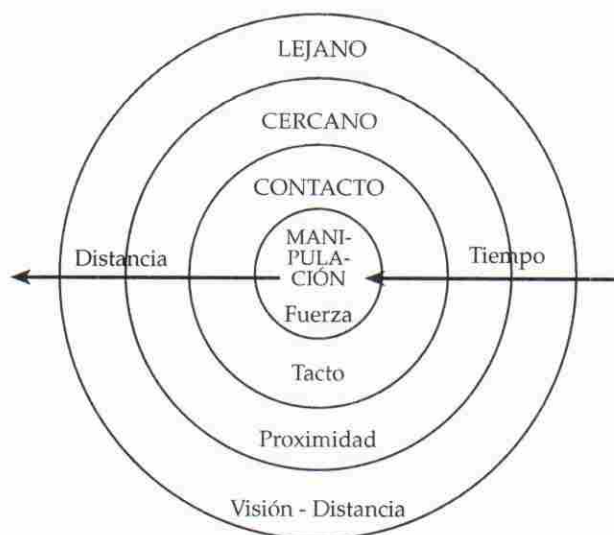
#### ***Plantilla de fases jerarquizada***

Esta propuesta, planteada directamente para integración sensorial en robots, se basa en cuatro diferentes fases temporales en el proceso de adquisición de la información: *Lejana (far away)*, *cercana (near)*, *contacto (touching)* y *manipulación (manipulation)*. Su distinción se hace con referencia al rango en el que se hace el sensado, el conjunto de sensores requerido y el tipo de información deseada. En la primera fase se obtiene una información global del entorno, generalmente con la intención de detectar, localizar o identificar objetos en la escena. Los sensores utilizados para esto son de no contacto, tales como cámaras de video o exploradores de distancia

como los *ultrasonic ranging*. Si la escena llega a ser de interés en esa primera fase, el robot puede efectuar un acercamiento, con el fin de obtener información más detallada, pasando entonces a la segunda fase, la cercana. Es posible que en esta fase no se pueda «ver» completamente al objeto, por lo que es muy común la utilización de sensores de no contacto de proximidad o de video tipo *visión en la mano (eye-in-hand)*, típicos en labores de ensamble y manipulación muy precisas. Es conveniente integrar la información de las dos fases antes de pasar a la tercera. En esta fase se puede recurrir a sensores de contacto. En la manipulación suelen ser necesarios los sensores de contacto para medir fuerzas, deslizamiento, torsiones, etc. La gráfica 2 esquematiza lo expuesto.

#### ***Redes neuronales***

Los trabajos de investigación y desarrollo en redes neuronales ofrecen un paradigma común para las discusiones entre neurociencia y robótica. Varios investigadores conciben el sistema de control de un robot como algo semejante a un cerebro. Inclusive, utilizan términos como «*neurobotics*». Las redes neuronales artificiales ofrecen un muy buen formalismo establecido, claramente adaptable a la integración sensorial. Existen trabajos sobre sistemas sensoriales biológicos, como el de las serpientes, por ejemplo, modelados a partir de redes neuronales. En éstas, la integración de sus sentidos de visión, infrarrojo y gusto se adaptan a la representación



**Figura 2** (Tomado de [10])

con redes neuronales con estructuras «and» y «or». Se puede entrenar una red neuronal para que represente la información de un sensor y con la combinación de varias de ellas disponer de un sistema que responda adecuadamente a diversos estímulos.

### *Sensores lógicos*

En este planteamiento, la integración eficiente de datos provenientes de diversas fuentes requiere del apropiado modelamiento de los sensores, la forma de extraer la información y la interacción entre ellos. El modelamiento de los sensores es entonces un elemento fundamental para la integración sensorial. Existen también varias propuestas al respecto, pero en general debemos tener en cuenta ciertas características básicas y limitaciones cuando se modela la capacidad de los sensores para hacer

sus observaciones:

- *Complejidad del sensor:* Un sensor simple puede estar compuesto de varios elementos físicos que contribuyen en mayor o menor grado a la obtención de datos, pero que aportan también en el grado de incertidumbre de la observación.
- *Error de la observación:* Adicionalmente al ruido del sensor, otras fuentes pueden aumentar la incertidumbre en las medidas, como por ejemplo las imprecisiones en la colocación del sensor, errores de calibración o fallas de los dispositivos. La incertidumbre aumenta también cuando se obtienen únicamente informaciones parciales.
- *Disparidad en la observación:* La diversidad de la información prove-



niente de diferentes sensores puede obligar a transformar un tipo de información en otra; para hacer comparaciones, por ejemplo.

- *Múltiples puntos de vista:* De igual forma, las observaciones de sensores separados pueden requerir de la transformación de sistemas de coordenadas.

Como se expresó arriba, existen varias propuestas para representar o modelar un sensor. Una bastante extendida es la de considerar un sensor desde un nivel de abstracción alto, por encima del físico; lo que lo hace muy útil para proporcionar una estructura general para la integración sensorial. Con esta abstracción se hace innecesario el conocimiento de los detalles físicos del sensor, separándolos de la funcionalidad del mismo en el sistema. El uso de las *especificaciones de sensores lógicos* (LSS) proporciona dos interesantes cualidades: La portabilidad y la adaptabilidad a cambios tecnológicos de manera trans-

parente al sistema. En la figura 3 vemos la representación de este concepto.

Cada sensor lógico puede considerarse como un elemento de una red de sensores lógicos, la cual, a su vez, podría verse como un sensor lógico. En la figura 3 se muestran los componentes genéricos de esta representación. El *nombre del sensor lógico* lo identifica de manera única en la red. El *vector de características* describe el tipo de datos del conjunto de vectores de salida del sensor. Los *comandos de control* consisten en los comandos necesarios para el control del sensor lógico y de los comandos para sensores de nivel jerárquico más bajo. El *intérprete de los comandos de control* es un elemento que no aparecía en las primeras propuestas, y se encarga de tomar comandos de entrada y generar comandos propios del nivel inferior. El *selector* examina los comandos de control entregados al sensor lógico y los resultados de las diferentes unidades de programa (o sub-redes) y arbitra su interacción; podría decirse que actúa como un pequeño *sistema experto*.

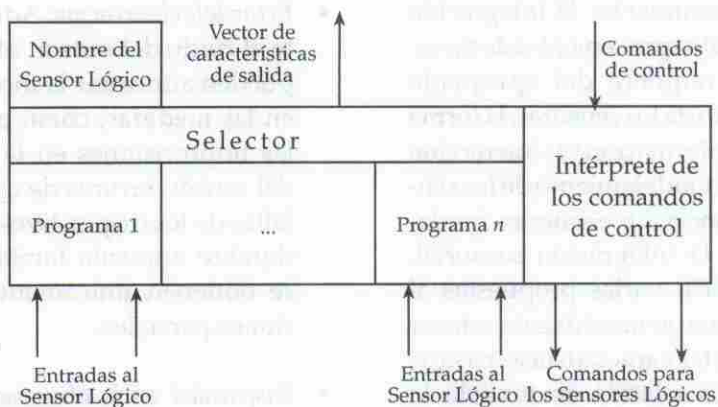


Figura 3 (Tomado y adaptado de [10])

## **Modelo de Equipo de elementos decisores**

Esta es una forma de ver la integración sensorial en el contexto geométrico, de manera más amplia que la anterior.

El modelo del sensor lógico considera a cada uno de estos sensores con la capacidad de tomar decisiones individualmente e implementar sus propias acciones. Esta nueva alternativa considera al sensor de manera similar pero, al mismo tiempo, cada uno de ellos actúa como miembro de un equipo con metas comunes.

Este modelo contempla tres elementos: *El modelo de observación, el modelo de dependencia y el estado del modelo.* Estos tres componentes muestran explícitamente que la medida hecha por un sensor que forma parte de un sistema multisensorial puede ser función de las capacidades del sensor para obtener información, de extraer e intercambiar información con otros sensores, de su localización y de su *estado interno*.

## **Programación Orientada a Objetos**

Como ocurre con el modelo de sensor lógico y las redes neuronales, la programación orientada a objetos es una metodología que puede brindar los elementos apropiados para construir una estructura uniforme para la implementación de tareas de sistemas multisensoriales. De hecho, el modelo de sensor lógico puede ser visto como un objeto dentro del contexto de *HOOD (Hierarchical Objects Oriented Design)*[9].

## **Combinación de Sensores**

Debido a las ventajas y limitaciones de cada tipo de sensor, muchos robots móviles utilizan la combinación de diferentes tipos de sensores para realizar las tareas de percepción. Algunos tipos de sensores no pueden usarse en alguna aplicación particular debido a sus limitaciones intrínsecas; el ultrasonido en el vacío, por ejemplo; mientras que otros están limitados por factores técnicos o económicos. Un detector de obstáculos con sensores de contacto limitará necesariamente la velocidad de desplazamiento de un robot, pues el contacto podría producirse antes de su detección; los sensores láser requieren de fuentes de energía potentes y pesadas y su uso está restringido a áreas donde no exista el peligro de afectar la vista de las personas o animales. Los sistemas de visión tienen una crítica dependencia de las condiciones de iluminación de la escena; además sus exigencias de cómputo y tiempo de procesamiento pueden resultar inaceptables en algunos casos. Como se dijo, surgen entonces propuestas más o menos generales para la solución de casos particulares. Por ejemplo, encontramos aproximaciones interesantes para la integración de fuentes sensoriales de uno o varios tipos; visión y tacto, visión y temperatura, distancia y tacto, radar láser y sensores infrarrojos, etc. Es posible, inclusive, encontrar en la literatura propuestas de fusión e integración sensorial de fuentes tan diversas como radar anti-colisiones, telémetro láser y cámaras de video lineal estéreo[15].



La combinación de partes inciertas de información obtenida de diferentes fuentes es otro de los problemas básicos en integración sensorial, aunque no le es exclusivo. En los sistemas expertos, por ejemplo, la producción de varias reglas confluye en el valor de una misma variable. Para la revisión de este problema se han propuesto varias estructuras para la representación y la reducción de la incertidumbre, como el modelo *probabilístico*, el *evidencial* o el de *pasibilidad*, basado en *fuzzy logic*.

## CONCLUSIONES

La utilización de sistemas robotizados avanzados en entornos desconocidos, no controlados o no estructurados, exige gran capacidad y eficiencia de los sistemas de control, que, a su vez, dependen de un potente procesamiento de los datos provenientes de diferentes elementos sensoriales. En este sentido, la integración y la fusión sensorial representan un papel importante para la solución del problema.

A pesar de los enormes esfuerzos en investigación, aún no se ha consolidado una teoría que ofrezca la solución óptima, general y definitiva al problema de combinar la información de un sistema multisensorial. Sin embargo, se han visto significativos avances y contribuciones en casos particulares y se vislumbra un amplio campo de discusión e investigación.

En este trabajo se han mostrado diferentes ángulos del problema y mirado

algunos planteamientos de solución. Se ha evadido intencionalmente el rigor matemático, por cuanto lo que se pretendía era, fundamentalmente, entregar los conceptos. Quienes se interesen en el tema encontrarán mucha información y aspectos diferentes del mismo en las referencias bibliográficas citadas.

## Referencias

- [1] BASAÑEZ, L. *Multi-Sensor Integration in Robotics. Workshop on Robotics and CIM*. Lisboa, Sep. 13-15 de 1989.
- [2] BARRIENTOS, A. *Fundamentos de Robótica*. 1ª ed. Madrid, McGraw-Hill, 1997.
- [3] BORENSTEIN, J.; KOREN Y. *The Vector Field Histogram-Fast Obstacle Avoidance for Mobile Robots*. IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol. 7, N° 3, Jun. 1991.
- [4] BORENSTEIN, J.; KOREN Y. *Histogrammic in Motion Mapping for Mobile Robots Obstacle Avoidance*. IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol. 7, N° 4, Ag. 1991.
- [5] BORENSTEIN, J.; EVERETT, H.R.; FENG, L. *Where am I? The University of Michigan*, 1996.
- [6] CAICEDO, E. *Arquitectura de un sistema sensorial para Identificación de partes y Ensamble Robotizado*. Tesis de Master en Tecnologías de Fabricación, Universidad Politécnica de Madrid. Madrid, Dic. 1992.
- [7] FU, K., et al. *Robótica: Control, Detección, Visión e Inteligencia*. 1ª ed. México, McGraw-Hill, 1989.
- [8] GARCIA, M.; BASAÑEZ, L. *Heterogeneous Multisensory Integration in Robotics: a Data Representation Approach*. SPIE conference on Sensor and Networked Robotics. Philadelphia, Oct. 22-26 1995.
- [9] HOOD Working Group, *Hood Reference Manual*. European Space Agency, Ref. WME/89-173/JB, Sep. 1989.
- [10] JOSHI, R.; SANDERSON, A. *Multisensor*

- Fusion and Unknown Statistics*. IEEE International Conference on Robotics and Automation, Jun. 1995.
- [11] LEVY, Sh., AGRAWALA, A. *Real-Time System Design*. 1ª ed. E.U., McGraw-Hill, 1990.
- [12] LUO, R.; KAY, M. *Multisensor Integration and Fusion in Intelligent Systems*. IEEE Transactions systems, Man and Cybernetics, Vol. 19, N° 5, Sept-Oct. 1989.
- [13] MONTANO, L. *Sistema de Percepción en Robótica Móvil*. Primeras Jornadas Iberoamericanas de Robótica. Cartagena de Indias, abril de 1997.
- [14] NAISH, M. *An Open Architecture for Multisensor Integration in Industrial Applications*. Proceedings of the SPIE International Conference on Architectures, Networks and Intelligent Systems for Manufacturing Inspection, Vol. 3203. Pittsburg, PA, Oct. 1997, p 33-41.
- [15] PONTOIS, J., et al. *Fusion Sensors Applied to a Collision Avoidance System*. Preprinters of the IFAC Workshop on Intelligent Components for Vehicles, ICV'98, Vol. 2. Madrid, March 23-24, 1998.
- [16] VALLEJO, E. *Sistemas Flexibles de Manufactura*. Revista «Ingeniería y Desarrollo», Universidad del Norte, N°s 3 y 4, Ene.-Nov., 1998, p. 43-49.