



Informe Técnico ICC 2006-10-03

Robots Humanoides

Zoe Falomir Llansola

Octubre de 2006

Departamento de Ingeniería y Ciencia de Computadores

Correo electrónico: zfalomir@icc.uji.es

Universitat Jaume I
Campus de Riu Sec
12.071 - CASTELLÓN

Humanoid Robots

Zoe Falomir Llansola

Abstract:

This technical report presents a state of the art in humanoid robots based on well-known European researchers' lectures which took place at *6th International UJI Robotics School (IURS'2006) on Humanoid Robots*. Some of the most important topics are: vision, control and design, locomotion, manipulation, tactile perception and cognitive capacities in humanoid robots.

Keywords:

Humanoid robots, vision, locomotion, manipulation, perception, cognition.

Robots Humanoides

Zoe Falomir Llansola

Resumen:

Este informe técnico presenta un estado del arte en robots humanoides basado en las opiniones dadas por importantes investigadores europeos en las conferencias realizadas en la *6th International UJI Robotics School (IURS'2006) on Humanoid Robots*. Algunos de los temas destacados son: visión, diseño y control, locomoción, manipulación, percepción táctil y capacidades cognitivas en robots humanoides.

Palabras Clave:

Robots humanoides, visión, locomoción, manipulación, percepción, cognición.

1. Introducción

Este informe técnico presenta un estado del arte en robots humanoides basado en las conferencias realizadas en la *6th International UJI Robotics School (IURS'2006) on Humanoid Robots* por los profesores: Rüdiger Dillmann, Carlos Balaguer, Roderic Grupen, Ales Ude, Cecilia Laschi, Tamim Asfour y Luc Berthouze. Algunos de los temas destacados son: visión, diseño y control, locomoción, manipulación, percepción táctil y capacidades cognitivas en robots humanoides.

2. Robots humanoides¹

El objetivo principal de algunos investigadores en robótica es construir robots que se parezcan a las personas, tanto en su cuerpo como en su comportamiento. Sin embargo, hasta ahora, los robots más utilizados en investigaciones robóticas han sido los robots manipuladores, los móviles y los robots con patas.

Por otro lado, en los últimos años, la industria japonesa ha realizado tantos avances en la construcción de robots humanoides que hemos de plantearnos cuál podría ser el papel de dichos robots en el futuro de la sociedad robótica.

La ventaja principal de la utilización de robot humanoides reside en que este tipo de robots **puede trabajar directamente en el mismo entorno que los humanos**, sin que se deban realizar modificaciones sobre dicho entorno, al contrario de lo que ocurre actualmente con los robots manipuladores y móviles. Además, como la mayoría de utensilios, maquinaria y escenarios (oficina, vivienda, metro, cine, calle, etc.) están adaptados para el uso humano, también lo estarán para el uso de robots humanoides.

Otro aspecto importante es que el **medio de locomoción de los robots humanoides se puede adaptar a su entorno**. Si el entorno en el que se quiere incorporar no contiene obstáculos y el suelo es liso, se puede utilizar un robot humanoide que se desplace utilizando ruedas, mientras que si se trata de un entorno real (escaleras, suelo no liso, etc.) puede utilizarse un humanoide bípedo.

En la actualidad, las **investigaciones en robots humanoides se centran más en conseguir una locomoción bípeda que en la cognición**, cuando ambos aspectos sabemos que han estado ligados durante la evolución humana, ya que fue el hecho de caminar bípedo lo que permitió que los homínidos liberaran las manos para poder crear y manipular herramientas y así desarrollar la cognición.

Respecto al **estado actual de las investigaciones en robots humanoides** hemos de destacar que:

- La locomoción bípeda y estable no está resuelta totalmente.
- No existen robots humanoides de tamaño humano en el mercado, ya que la complejidad del problema de una locomoción bípeda y estable crece exponencialmente con la altura y peso del humanoide. Por lo tanto, predominan los humanoides pequeños, ya que pueden llevar a cabo un movimiento de caminar complejo de forma más sencilla y, además, son más baratos y más fáciles de controlar.

3. Estrategia de control de la forma de andar de los robots humanoides²

En la locomoción bípeda de los robots humanoides, el **punto de momento cero** o *Zero Moment Point (ZMP)* es el punto respecto al cual, la fuerza de reacción dinámica al contacto del pie con el suelo no produce ningún momento, si no que la reacción total de fuerzas es igual a cero. Por lo tanto, el *ZMP* es un **indicador de estabilidad** del robot: si se encuentra en la sombra del pie del robot, el movimiento es estable, si no es inestable (Figura 3.1).

Se pueden distinguir dos tipos de locomoción bípeda: activa-estática, siempre estable, ya que consiste en movimientos de caminar lentos en los que el centro del movimiento permanece siempre centrado en las plantas de los pies (Figura 3.2(a)); y pasiva-dinámica, algunas veces inestable, debido a que, en los movimientos de caminar rápido, el centro de movimiento no se encuentra siempre centrado en las plantas de los pies (Figura 3.2(b)).

¹ Prof. Balaguer, Robotics Lab, Universidad Carlos III de Madrid, <http://roboticslab.uc3m.es>

² Prof. Balaguer, Robotics Lab, Universidad Carlos III de Madrid, <http://roboticslab.uc3m.es>

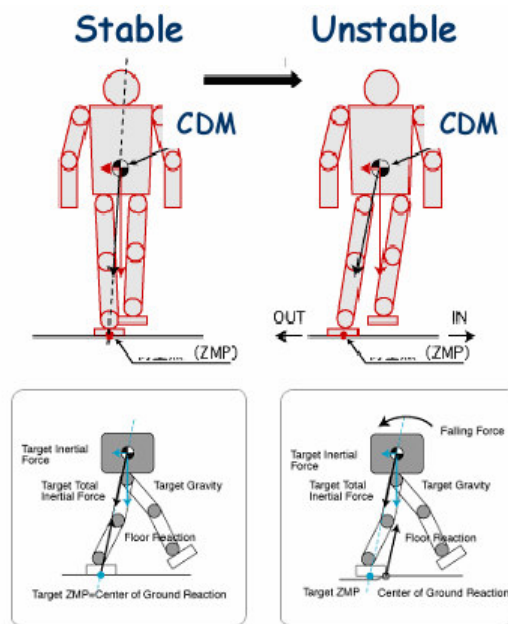


Figura 3.1. Estabilidad en la locomoción bípeda.

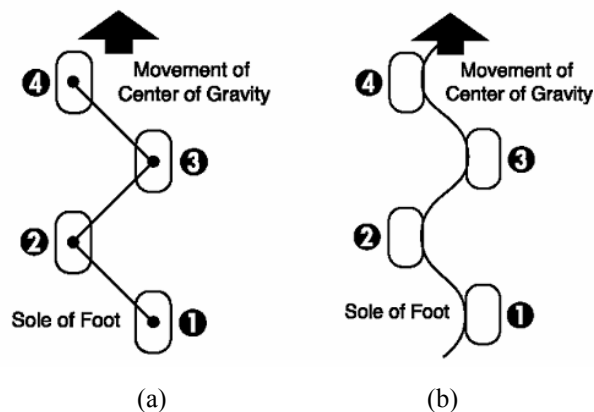


Figura 3.2. (a) Locomoción activa y (b) locomoción pasiva-dinámica.

Además, la **locomoción activa-estática** utiliza todos los grados de libertad del humanoide para llevar a cabo el movimiento de caminar, por lo tanto, requiere un consumo continuo de los motores de todas las articulaciones (incluso de las de los brazos), un control y una sincronización continua y en tiempo real. Para reducir la complejidad de la locomoción activa-estática se puede reducir el número de grados de libertad activos en el humanoide, se puede utilizar la energía del paso previo para generar el siguiente, etc. Por otro lado, la **locomoción pasiva-dinámica** se basa en la estrategia que utilizan los humanos para caminar: dejar que las piernas se balanceen a su manera y luego añadir una pequeña fuerza que compense el balanceo, evitando caer y obteniendo un movimiento de caminar con poca energía. La desventaja de este tipo de locomoción es que sus movimientos se realizan en línea recta, siendo difícil girar, retroceder, sentarse, etc.

Finalmente, para generar un movimiento de caminar bueno y rápido en los robots humanoides se necesita:

- Transformar, en cada instante, la posición de cada pie en una posición de articulación, es decir, **generar trayectorias de articulaciones en espacio y tiempo**. Dichas trayectorias pueden ser definidas por patrones preseleccionados que definen la forma de caminar (como podría ser la forma de caminar de un modelo profesional, etc.).
- Realizar **transformaciones cinemáticas directas e inversas de al menos 12 grados de libertad con diferentes sistemas de referencia** que dependen del apoyo de los pies. Los métodos tradicionales, como el de Denavit-Hartenberg, resultan complicados de aplicar, ya que no existen soluciones exactas y su cálculo conlleva mucho tiempo de computación. En estos casos, se aplican las técnicas *Lie logic* y los subproblemas canónicos de *Paden-Kahan*. Además, para simplificar la implementación y obtener un movimiento de locomoción bípeda natural y dinámico, se ha aplicado

el *Modelo 3D de Péndulo Lineal Invertido (3D-LIMP)* a los algoritmos que implementan el caminar de los humanoides.

Como resultados principales obtenidos por el *Robotics Lab* de la Universidad Carlos III de Madrid, se debe destacar que:

- Se ha implementado con éxito un movimiento de caminar dinámico sobre un robot humanoide Rh-1, utilizando *Lie Logic* y un modelo *LIMP*.
- El método *LIMP* ha permitido obtener un control en tiempo real del movimiento de caminar dinámico del robot humanoide.
- Se ha realizado una comparación entre los movimientos de caminar dinámico y estático implementados, resultando, el dinámico, suave y natural y cerca de 20 veces más rápido que el estático.
- Se ha demostrado que se puede reproducir cualquier patrón de forma de caminar.

4. Percepción Táctil Bioinspirada³

Un análisis del sistema táctil humano puede inspirar el diseño de sensores táctiles y de contacto para robots, ya que mediante una microneurografía se puede analizar la respuesta que emiten todos los corpúsculos de la piel (corpúsculos de Meissner, de Merkel, de Ruffini, Pacinianos, etc.) al entrar en contacto con la superficie de un objeto e imitarlos.

Por otro lado, como se muestra en la Figura 4.1, en la estrategia de agarre humana intervienen dos fuerzas: la fuerza de carga, paralela al objeto, y la fuerza de agarre, perpendicular al objeto. Dicha estrategia se basa en las predicciones del cerebro, es decir, no utiliza sensaciones táctiles para desplazar y agarrar objetos, aunque sí los utiliza para saber la forma y textura de éste. Sin embargo, cuando una persona está agarrando un objeto y detecta movimiento de deslizamiento de éste, entonces sí que interviene el sentido del tacto para ajustar las fuerzas de agarre del objeto con respecto a su peso. Además, el sistema táctil humano también detecta vibraciones y proporciona sensación de contacto de los dedos con el objeto, al principio y al final del agarre de éste.

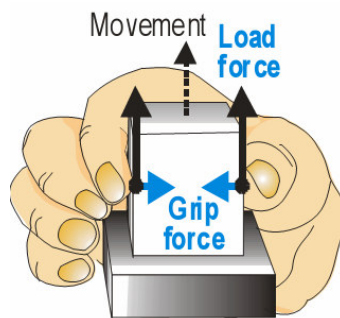


Figura 4.1. Fuerzas que intervienen en la estrategia de agarre humana.

Así pues, basándonos en el sistema táctil humano podemos diferenciar dos tipos de sensores:

- Sensores de contacto, que proporcionan información binaria a cerca si la superficie del sensor está tocando o no la superficie de un objeto.
- Sensores táctiles, que proporcionan información a cerca de la fuerza aplicada sobre la superficie del sensor. Pueden proporcionar solamente la magnitud de dicha fuerza basándose en un vector normal o la magnitud de dicha fuerza y la dirección de ésta.

Ambos tipos de sensores se pueden combinar para proporcionar imágenes táctiles más precisas. Las principales tecnologías que los implementan son:

³ Prof. Laschi, Advanced Robotics Technology and Systems Laboratory, Scuola Superiore Sant'Anna, Italy, <http://www-arts.sssup.it/people/assistantprofessors/claschi/>.

- Interruptores mecánicos, que consisten en sensores de contacto simples que se utilizan como sensores de impacto o *bumpers* en robots móviles y como sensores de parada en las articulaciones de los manipuladores.
- Sensores piezoresistivos, los cuales están hechos de materiales que cambian su resistencia eléctrica con una corriente de contacto.
- Sensores ópticos, basados en guías de luz.
- Sensores magnéticos, basados en corrientes magnéticas inducidas.
- Sensores capacitivos, basados en el almacenamiento de la corriente eléctrica entre dos placas paralelas de material conductor.
- *FSR – Force Sensing Resistors*, dispositivos que contienen una película de polímero que decrece su resistencia cuando las fuerzas que se aplican sobre ella aumentan.
- *QTC – Quantum Tunnelling Composites*, dispositivos que cuando se deforman son capaces de transformar su conductividad de aislante perfecto a un alto conductor como el metal. Esta deformación se produce por compresión, torsión o estiramiento del material.

Finalmente, en la Figura 4.2 se muestra un ejemplo de sistema táctil para la mano de un robot, basado en sensores de fuerza piezoresistivos triaxiales.

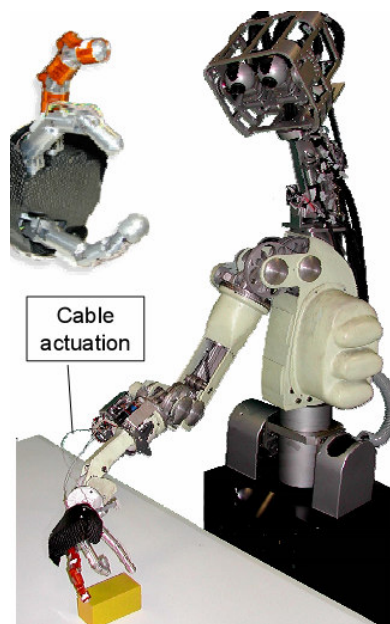


Figura 4.2. Ejemplo de un sistema táctil para la mano de un robot.

5. Visión en robots humanoides⁴

La visión humana es radicalmente diferente a la visión tradicional robótica, ya que la primera depende de los movimientos del ojo (visión activa). Una aproximación antropomórfica a la visión robótica conlleva el diseño y desarrollo conjunto de una cabeza similar a la humana y de un sistema de visión similar al de la retina del ojo humano.

En el *ARTS Lab.*, de la *Scuola Superiore Sant'Anna*, Pisa, Italia, se ha construido una cabeza robótica antropomórfica, que dispone de 7 grados de libertad y puede simular los movimientos oculares y del cuello de una persona (Figura 5.1).

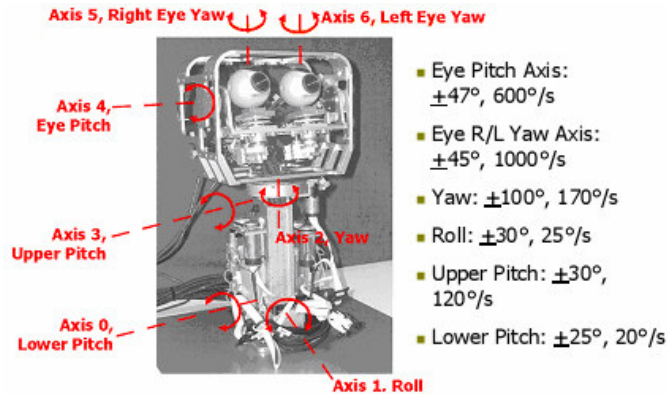


Figura 5.1. Cabeza robótica humanóide construida por la *Scuola Superiore Sant'Anna* con sus ejes y ángulos de rotación.

Los movimientos oculares similares a los de los humanos que imita dicha cabeza son:

- *Saccades*, rápidos saltos utilizados para mover la fovea del ojo de una región/objeto de interés a otro, durante los cuales se suprime la visión para permitir percepciones estables de los alrededores.
- *Vergence*, movimientos suaves que cambian el ángulo entre dos ejes de visión. Se utilizan para cambiar el punto de vista de un objeto cercano a uno lejano o viceversa.
- *Pursuit*, movimientos suaves de los ojos que sólo se producen en escenas dinámicas, al intentar seguir un objeto en movimiento.

Esta cabeza humanóide no utiliza cámaras Giotto, las cuales obtienen directamente imágenes similares a las captadas por la retina del ojo humano (Figura 5.2). En su defecto, se utiliza una técnica de procesamiento de imágenes para transformar las imágenes digitales captadas por las cámaras de la cabeza humanóide en imágenes log-polares y las imágenes resultantes, a su vez, en imágenes similares a las captadas por la retina (Figuras 5.3 y 5.4).

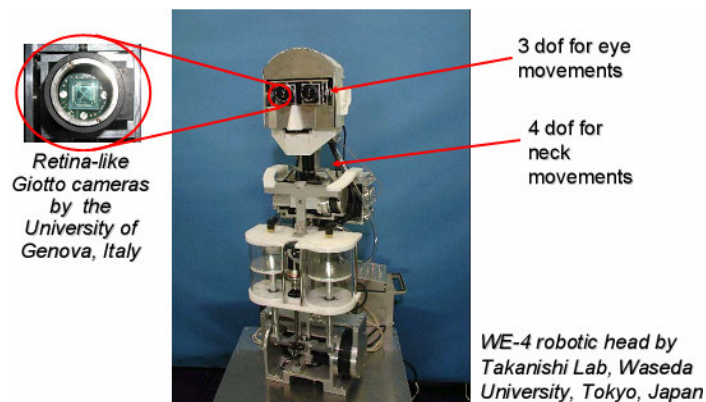


Figura 5.2. Cabeza robótica WE-4 de la Universidad de Tokio incorporando cámaras Giotto creadas por la Universidad de Génova.

⁴ Prof. Laschi, Advanced Robotics Technology and Systems Laboratory, Scuola Superiore Sant'Anna, Italy, <http://www-arts.sssup.it/people/assistantprofessors/claschi/>



Figura 5.3. Imágenes obtenidas al realizar la transformación de una imagen digital a una similar a las captadas por la retina.

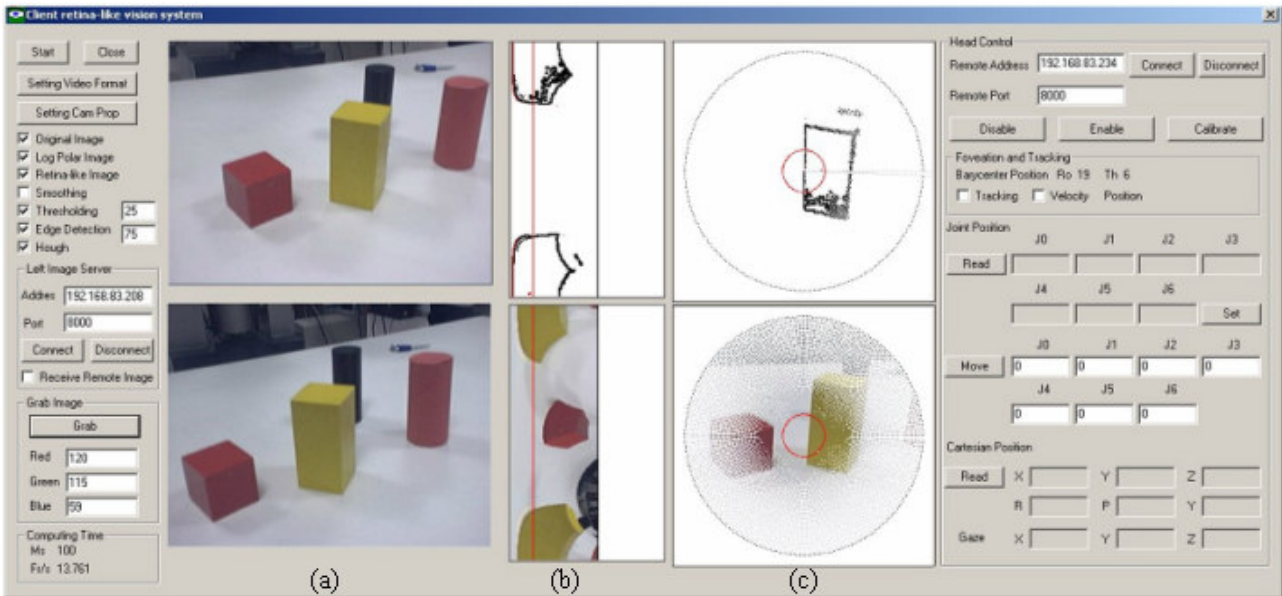


Figura 5.4. Aplicación que realiza la transformación de imágenes digitales a imágenes captadas por la retina en la cabeza humanoide de la *Scuola Superiore Sant'Anna*.

Finalmente, para desarrollar un módulo de control que reciba como entrada la posición a mirar y proporcione como salida la secuencia de comandos a realizar por la cabeza humanoide para alcanzar dicha posición (Figura 5.5), la *Scuola Superiore Sant'Anna* realiza dos propuestas:

- La implementación de un modelo biológico de coordinación de la cabeza y los ojos, detallado en [Maini et al, 2006].
- La implementación de un modelo bioinspirado de coordinación de la cabeza y los ojos basado en el aprendizaje, detallado en [Asuni et al, 2005].

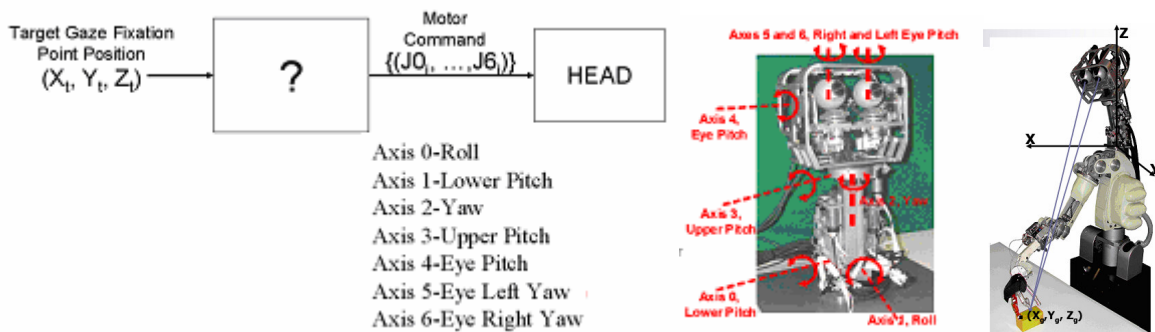


Figura 5.5. Problema de control de la cabeza humanoide.

6. Organización del desarrollo del comportamiento de un robot⁵

Los sistemas software distribuidos y complejos constan de muchos procesos que interactúan entre ellos y que se basan en la aplicación y en su entorno; siendo la mayor parte de dichos entornos abiertos y sin un único dominio para su verificación y análisis. Por lo tanto, encontrar una metodología de programación general y una representación del conocimiento basada en el sentido común, se convierte en un reto.

De la misma forma, los **sistemas sensomotores humanos** no pueden ser programados en un humanoide de forma tradicional, ya que son ensamblajes de procesos que interactúan entre ellos, tomando cada uno sus decisiones para conseguir alcanzar sus objetivos.

El sistema nervioso central se organiza en base a patrones de movimiento, siendo los **reflejos los patrones básicos**. Así pues, el estudio de los movimientos reflejos podría esclarecer qué movimientos simples deberían poder realizar los humanoides. Los principales tipos de reflejos que podemos encontrar en los humanos son:

- Límnicos, persistentes durante toda la vida, como por ejemplo el parpadeo, las ganas de orinar, la tos en respuesta a una laringe irritada, el acto de chupar con la boca, etc.
- Neonatales mediados por el cerebro, es decir, experimentados por los bebés en sus primeras semanas de vida pero que van desapareciendo con el tiempo, como por ejemplo:
 - El reflejo consistente en alargar los brazos e intentar cogerse con las manos a algo ante una sensación de caída.
 - El reflejo consistente en agarrarse a cualquier objeto que se les ponga entre los dedos de las manos o de los pies.
- Posturales, los cuales aparecen a los pocos meses de nacer y persisten durante toda la vida, como por ejemplo, el estímulo de alargar la mano cuando, estando sentados, notamos un balanceo que nos podría hacer caer.

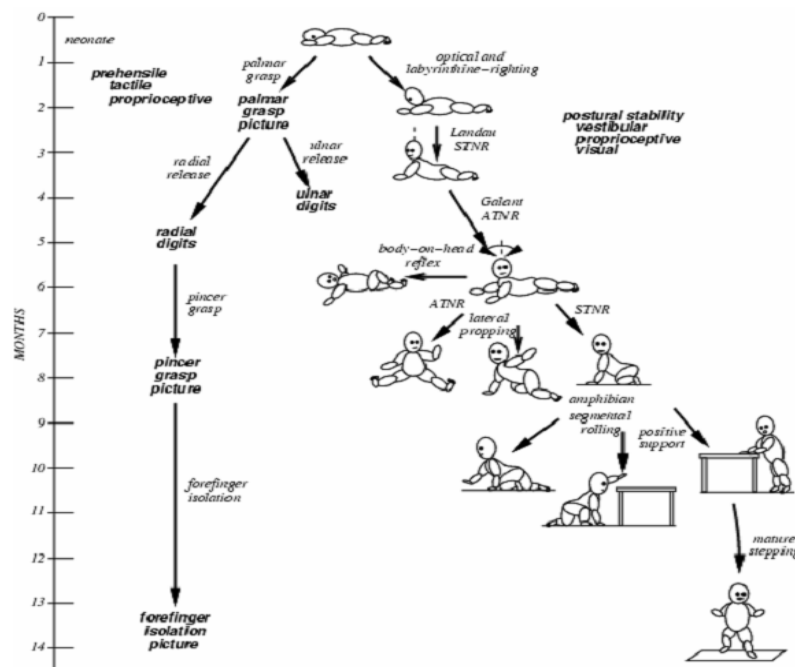


Figura 6.1. Desarrollo sensoriomotor de un bebé.

Concretamente, el desarrollo sensoriomotor de los bebés se lleva a cabo por acumulación de habilidades en etapas explotadas a través del tiempo para acumular conocimiento de control incrementalmente y de forma exhaustiva (Figura 6.1). Posteriormente, a este desarrollo sensoriomotor, le sigue el desarrollo somatosensorial,

⁵ Prof. Grupen, *Laboratory for Perceptual Robotics, Department of Computer Science, University of Massachusetts Amherst*, <http://www-robotics.cs.umass.edu/>

es decir, el desarrollo de los sentidos (tacto, gusto, olfato, vista, oído) y de la percepción intermodal (reconocimiento de formas, etc.), el cual es seguido por el desarrollo cognitivo (intenciones, representaciones espaciales, conceptos de tiempo y espacio, etc.).

Como principales **resultados**, destacar que, en la Universidad de Massachussets, se ha estudiado el desarrollo sensoriomotor de los bebés y ha sido aplicado a varios casos de estudio en robótica, como por ejemplo:

- Que un robot con cuatro patas aprenda a caminar, apoyando para ello tres patas para no perder el equilibrio y rotando cada vez la posición de la pata que se queda libre (Figura 6.2(a)).
- Que un brazo manipulador pueda agarrar y manipular objetos con las dos manos como lo hacen los bebés (Figura 6.2 (b)).
- Que un humanoide pueda entender un proceso de teleoperación para que se le puedan enseñar acciones a realizar por medio de dicho proceso (Figura 6.2 (c)).

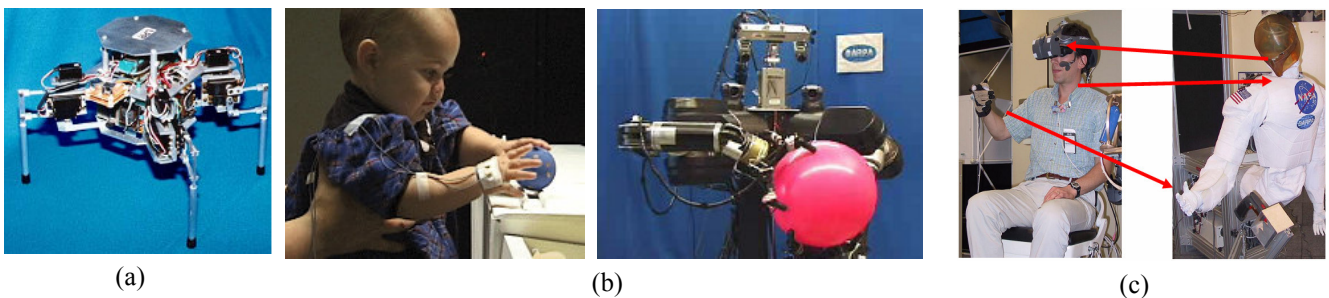


Figura 6.2. Casos de estudio de la Universidad de Massachussets.

7. Desarrollo motor en robots humanoides⁶

Algunos investigadores se basan en el desarrollo psicológico y biológico de los humanos para crear habilidades motoras en los humanoides.

El estudio de cómo las acciones espontáneas de los niños juntan temporalmente grupos de músculos para realizar diferentes tipos de trabajo (como por ejemplo, desplazarse, comer, etc.) es muy interesante, ya que la actividad motora es indispensable para el desarrollo de la cognición.

Una aproximación al desarrollo motor son los sistemas dinámicos, los cuales siguen los principios por los que los sistemas biológicos aprovechan las fuentes de energía física para construir dispositivos funcionales como péndulos, bombas de agua, etc. Estos sistemas se auto-organizan, ya que en cada proceso aparecen patrones de nivel global del sistema obtenidos a partir de interacciones numerosas producidas en componentes de bajo nivel (como por ejemplo, reactivos químicos, granos de arena, células de un órgano del cuerpo, etc.).

Por lo tanto, uno de los principales aspectos que se están investigando hoy en día consiste en determinar **cómo las interacciones entre las partes de un sistema**, incluyendo el sistema nervioso y musculoesquelético y las fuerzas que actúan en el cuerpo, **inducen cambios organizativos en todo el sistema entero**.

El profesor Berthouze propone los casos de estudio del balanceo y del rebote para exponer sus teorías.

Los bebés nacen con limitaciones (no pueden determinar bien el tamaño de los objetos, su memoria, su atención son limitadas, el control de sus partes del cuerpo también lo es, etc.), sin embargo, las limitaciones en los sistemas sensoriales y motores podrían jugar un papel adaptativo en el desarrollo de todo organismo, ya que el procesamiento de las limitaciones por los bebés es beneficioso para su aprendizaje. Así pues, podemos preguntarnos cuál sería el efecto sobre una estructura de control neural con unas dimensiones

⁶Prof. Luc Berthouze, Neuroscience Research Institute (AIST), Tsukuba Central 2, Japan, Luc.Berthouze@aist.go.jp, <http://staff.aist.go.jp/luc.berthouze/>

determinadas, si el cuerpo creciera. La hipótesis que propone el profesor Berthouze sobre este aspecto plantea que un cuerpo con menos grados de libertad permite una exploración más eficiente del espacio sensoriomotor, el cual posteriormente podrá guiar la coordinación de los grados de libertad que se vayan añadiendo. Por ello, en el **caso de estudio del balanceo**, Berthouze propone congelar y liberar grados de libertad del robot como una forma de simplificar su control coordinado.

Tras experimentar con un robot que se balancea (Figura 7.1), congelando y liberando los dos grados de libertad de sus piernas, se ha obtenido como **conclusión** que dicho método no es suficiente cuando aumenta la complejidad de la tarea a realizar o cuando se introducen perturbaciones externas. Por lo tanto, dicho **problema** sigue estando **por resolver** [Berthouze & Lungarella, 2006].

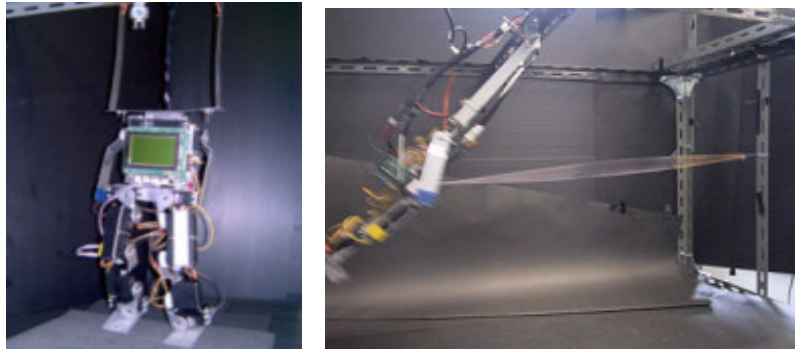


Figura 7.1. Robot que se balancea.

Respecto al **caso de estudio del rebote**, se ha analizado el comportamiento de niños de seis meses al patear, rebotar, etc. colgados de un resorte (Figura 7.2 (a)) y se ha intentado trasladar sus movimientos al robot de la Figura 7.2 (b), el cual dispone de articulaciones elásticas (silicona, goma o látex) y un metal adecuado para los pies. Como conclusión, destacar que, aunque los resultados obtenidos son buenos, el sistema aún debe mejorarse [Meyer et al., 2006].



Figura 7.2. (a) Observación del comportamiento de niños colgados de resortes. (b) Robot que rebota.

Finalmente, como **cuestiones abiertas**, el profesor Berthouze menciona que, en el desarrollo motor de los humanos, falta por determinar qué hacen los bebés para optimizar sus exploraciones del entorno, cómo aprenden qué han de explorar y cuales son las transiciones que experimentan entre la adquisición de una habilidad y la adquisición de la siguiente.

8. Robots humanoides, aspectos de diseño y control⁷

El profesor Asfour presenta el proyecto de investigación que está llevando a cabo en el *Collaborative Research Center on Learning and Cooperating Multimodal Humanoid Robots (SFB 588)*⁸, financiado por la *German Research Foundation (DFG)* por 12 años y cuyo objetivo principal consiste en encontrar métodos para construir robots humanoides adecuados para entornos domésticos.

Además, también describe los aspectos de diseño de la parte superior de los robots humanoides ARMAR I-III (Figura 8.1), concretamente, de sus brazos, manos y cabeza.

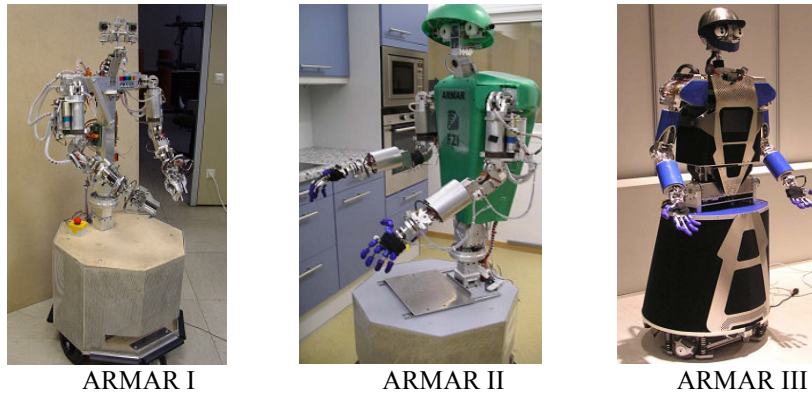


Figura 8.1. ARMAR I-III, robots humanoides de la *Universität Karlsruhe*, Alemania.

Respecto al diseño de los **brazos humanoides**, Asfour comenta que la articulación del hombro en los humanos es tan compleja que es imposible reproducirla técnicamente, ya que se trata de una cadena cinemática de 9 grados de libertad (Figura 8.2). Por ello, el brazo de ARMAR-III se ha diseñado tan sólo con 7 grados de libertad (3 para el hombro, 2 para el codo y 2 para la muñeca) (Figura 8.3), con los cual se consigue un espacio de trabajo comparable al del brazo humano y una reducción de la complejidad del problema cinemático inverso y de la planificación de trayectorias.

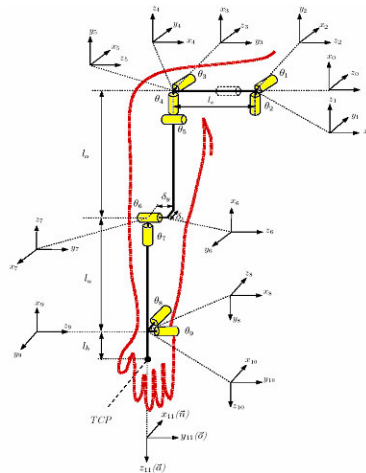


Figura 8.2. Modelo simple del sistema del brazo humano donde se muestran sus 9 grados de libertad.

⁷Prof. Asfour, *Forschungszentrum Informatik Karlsruhe (FZI), Universität Karlsruhe (TH), Deutschland.*
<http://www.iaim.ira.uka.de>

⁸<http://www.sfb588.uni-karlsruhe.de/>

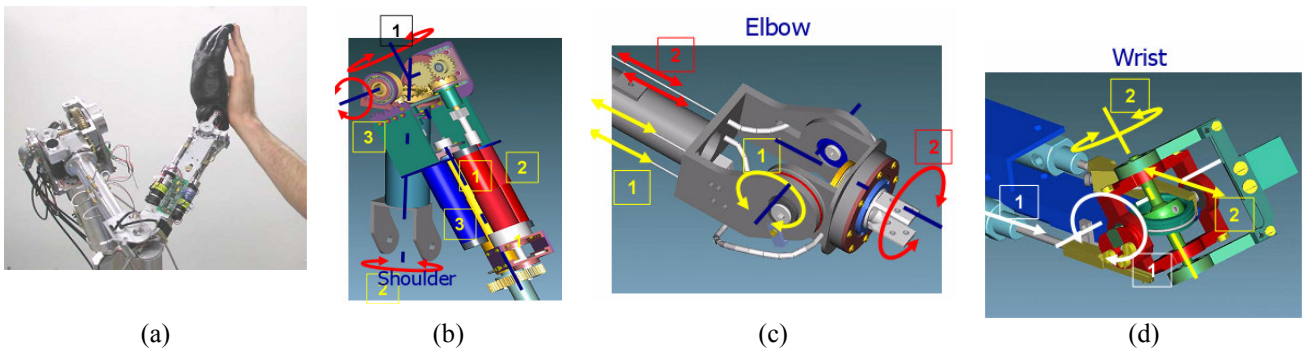


Figura 8.3. (a) Brazo robótico del humanoide ARMAR-III. Esquema de los grados de libertad del hombro (b), del codo (c) y de la muñeca (d).

Por otro lado, la **cabeza** de cualquier **humanoide** debe proporcionar diversas entradas perceptuales necesarias para realizar comportamientos visuo-motrices, como por ejemplo, coordinación mano-ojo, identificación de gestos, percepción de movimiento humano, etc. Por ello, los criterios que se han seguido para diseñar la cabeza de ARMAR-III han sido: que tenga un tamaño y una forma humana realista, a la vez que pueda modelar la mayor cantidad de grados de libertad del cuello y ojo humanos; que presente características de movimiento y respuesta similares a las humanas; que sea fácil de construir, mantener y controlar; que el sistema de visión pueda imitar al ojo humano, el cual tiene una mayor resolución en la fovea que las cámaras normales; y finalmente, que el sistema acústico pueda localizar fuentes de sonido 3D.

El mecanismo que se ha seguido para modelar el movimiento del cuello humano presenta 4 grados de libertad y se puede observar en la Figura 8.4.

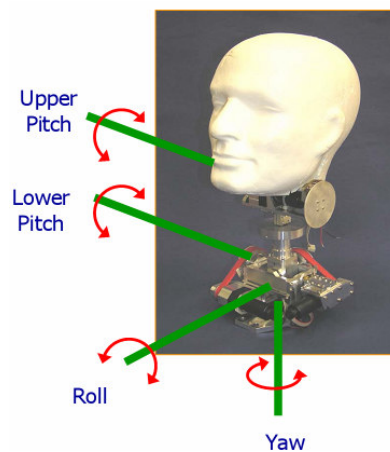


Figura 8.3. Esquema de articulaciones del cuello de la cabeza humanoide.

Las cámaras que proporcionan visión tanto periférica como foveal aún se encuentran en fase experimental y no están disponibles en el mercado. Por lo tanto, el **sistema de visión** de la cabeza humanoide se ha construido tomando dos cámaras del tipo *Point Grey Research Dragonfly IEEE-1394* por ojo: una con lentes de ángulo amplio para captar visión periférica y otra con lentes de ángulo estrecho para captar visión foveal (Figura 8.4 (a)). Además, se han tratado de imitar los movimientos de los ojos humanos proporcionando a cada ojo artificial capacidad para rotar a lo largo de un eje tanto vertical como horizontal (Figura 8.4 (b)).

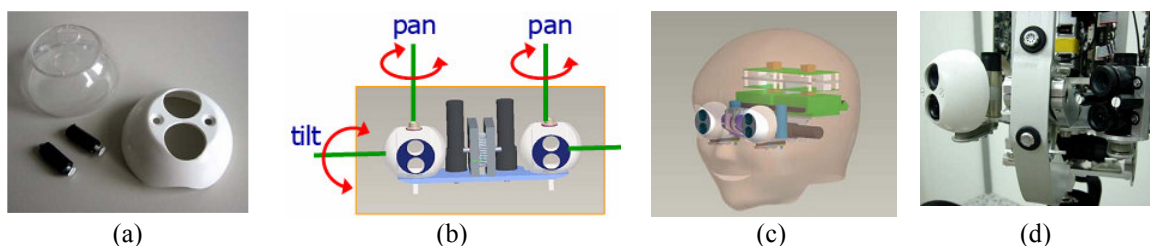


Figura 8.4. (a) Componentes del ojo del humanoide ARMAR-III, (b) Esquema de los grados de libertad de los ojos de dicho humanoide, y localización del sistema de visión en la cabeza de forma gráfica (c) y real (d).

El **sistema de localización acústica 3D** de la cabeza humanoide de ARMAR-III está formado por 6 micrófonos SONY ECMC115.CE7 situados de la siguiente forma: 2 en los oídos, 2 en la frente y 2 en la parte trasera de la cabeza (Figura 8.5).

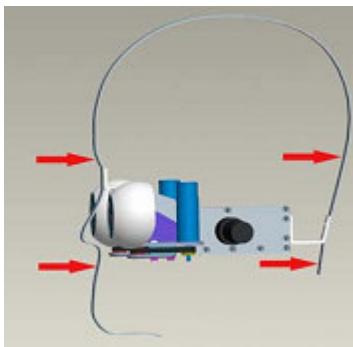


Figura 8.5. Situación del sistema de localización acústica 3D de ARMAR-III.

La **mano humanoide** de ARMAR-III ha sido desarrollada por el Dr. Stefan Schulz⁹ y se trata de una mano ligera (395 gramos), de 5 dedos, compuesta por actuadores neumáticos, con características de movimiento similares a las humanas (8 grados de libertad ampliables hasta 18) y que permite realizar agarres de fuerza y precisión. Además, consta de sensores táctiles en las puntas de los dedos y sensores en las articulaciones, así como una interfaz serie/Bluetooth (Figura 8.6).



Figura 8.6. Mano antropomórfica de ARMAR-III.

La plataforma de ARMAR-III es una **plataforma móvil** que consta de 3 ruedas fijas colocadas alrededor de una circunferencia y que utiliza un láser scanner para localizarse y evitar colisiones (Figura 8.7).

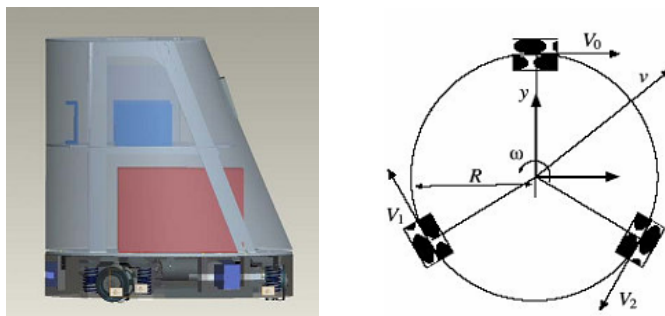


Figura 8.7. Plataforma móvil de ARMAR-III.

El robot humanoide ARMAR tiene 21 grados de libertad mecánicos (sin contar los grados de libertad de la mano) y siete subsistemas (cabeza, brazo izquierdo, brazo derecho, mano izquierda, mano derecha, tronco y plataforma), por lo tanto, la ejecución coordinada de una tarea requiere la planificación en el tiempo de las sub tareas en las que se descompone y la sincronización de éstas con condiciones lógicas y con eventos internos y externos. La herramienta utilizada para coordinar la ejecución de tareas son las redes Petri

⁹ Forschungszentrum Informatik Karlsruhe (FZI), <http://www.fzk.de>

condición/evento, las cuales pueden representar eficientemente tanto el flujo de control como el flujo de datos del sistema, utilizando el mismo formalismo.

Concretamente, la **arquitectura de control** del robot humanoide ARMAR-III consta de tres niveles (Figura 8.8):

- Nivel de planificación de tareas, encargado de:
 - generar tareas para llevar a cabo el objetivo perseguido,
 - dividir dichas tareas en subtareas para todos los sistemas del robot,
 - proporcionar a dichas subtareas todos los parámetros necesarios: internos (velocidad de articulaciones, etc.), externos (objetos a evitar/agarrar, etc.), trayectorias etc.,
 - planificar dichas subtareas en el tiempo,
 - gestionar los recursos,
 - sincronizar toda la información, etc.
- Nivel de coordinación de tareas, encargado de:
 - generación de acciones primitivas secuenciales y paralelas,
 - sincronización de subtareas,
 - representar condiciones y eventos de las redes Petri.
- Nivel de ejecución de tareas, encargado de ejecutar los comandos sensomotores especificados.

Además, dicha arquitectura también consta de modelos globales y locales. Los modelos globales incluyen: modelos de los objetos con todas las características necesarias, mapas 3D del entorno, modelos cinemáticos, dinámicos y de los sensores del robot, etc. Mientras que los modelos locales se almacenan en caché y contienen la escena, los objetos y las habilidades activas en el momento actual y son actualizados por el sistema de percepción.

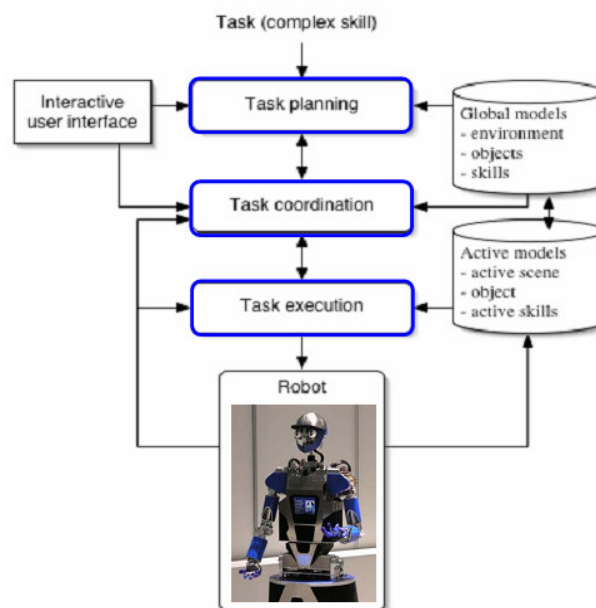


Figura 8.8. Arquitectura de control para ARMAR-III.

9. Aprendizaje por imitación de los movimientos del brazo humano¹⁰

Se puede enseñar a un robot a realizar ciertas tareas mediante un lenguaje de programación de robots, una interfaz gráfica que simule al robot y se pueda programar o mediante un aprendizaje guiado, donde el instructor opera un manipulador mientras su movimiento se graba y luego, los movimientos grabados son añadidos al repertorio de acciones del robot.

Todas estas técnicas son adecuadas para enseñar tareas a robots industriales, pero no lo son tanto para enseñar a robots humanoides, debido a que los futuros usuarios de los robots humanoides no deberían porqué tener conocimientos especializados. El profesor Asfour propone la técnica de **aprendizaje por imitación o programación por demostración** para reproducir movimientos similares a los de los humanos y enseñar nuevas tareas al robot. En general, esta técnica consiste en observar cómo el instructor humano realiza una tarea, en segmentarla, interpretarla y abstraer toda información necesaria de ésta, para luego realizar un mapeo y una simulación de los movimientos que implican dicha tarea antes de ejecutarla en el robot real (Figura 9.1). En ocasiones, si las demostraciones no son buenas, es necesario repetir todo el proceso.

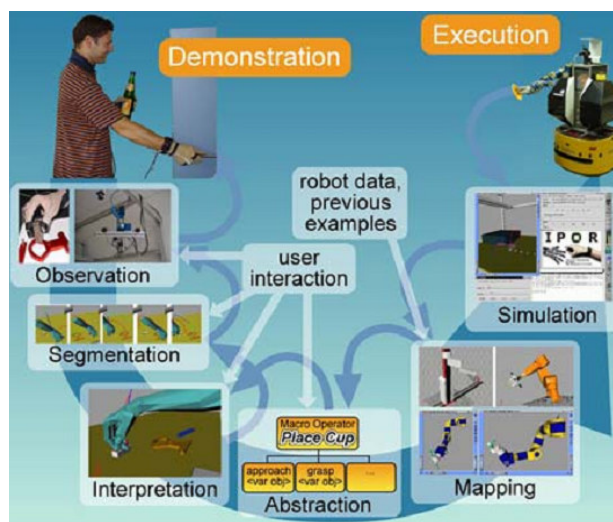


Figura 9.1. Sistema de rastreador magnético.

En la literatura se han propuesto sistemas y arquitecturas de aprendizaje por imitación basados en la percepción y el análisis de las demostraciones humanas. En [Demiris & Hayes, 2002], se distinguen tres estados en la arquitectura de aprendizaje: percepción/análisis, reconocimiento y reproducción. En [Schaal, 1999], se proponen ideas básicas para el aprendizaje por imitación en los robots así como en los humanos y, en [Calinon & Billard, 2005], se presenta un sistema de imitación para robots.

Otros métodos interesantes para capturar los movimientos humanos son: el sistema del rastreador magnético y el de visión estéreo. El **rastreador magnético**, llevado a cabo por Fasttrak, consiste en un sistema como el que se muestra en la Figura 9.2, donde a partir de varias cámaras que observan la escena y un guante con sensores táctiles y rastreadores magnéticos que lleva una persona en su mano, se obtiene la posición y orientación de la muñeca que debe conseguir el robot para poder abrir la nevera. Por otro lado, el **sistema de visión estéreo**, llevado a cabo por Pedram Azad, consiste en capturar movimientos humanos en 3D tomando como entrada solamente una imagen de una de las cámaras de la cabeza del robot. En la Figura 9.3, podemos ver una persona con el brazo extendido. El robot distingue la cabeza y las extremidades de la persona de la imagen por segmentación por color y triangulación estéreo y, obtiene como resultado, los ángulos de giro que debe aplicar a sus articulaciones para obtener el mismo efecto.

¹⁰ Prof. Asfour, *Forschungszentrum Informatik Karlsruhe (FZI), Universität Karlsruhe (TH), Deutschland.*
<http://www.iain.ira.uka.de>

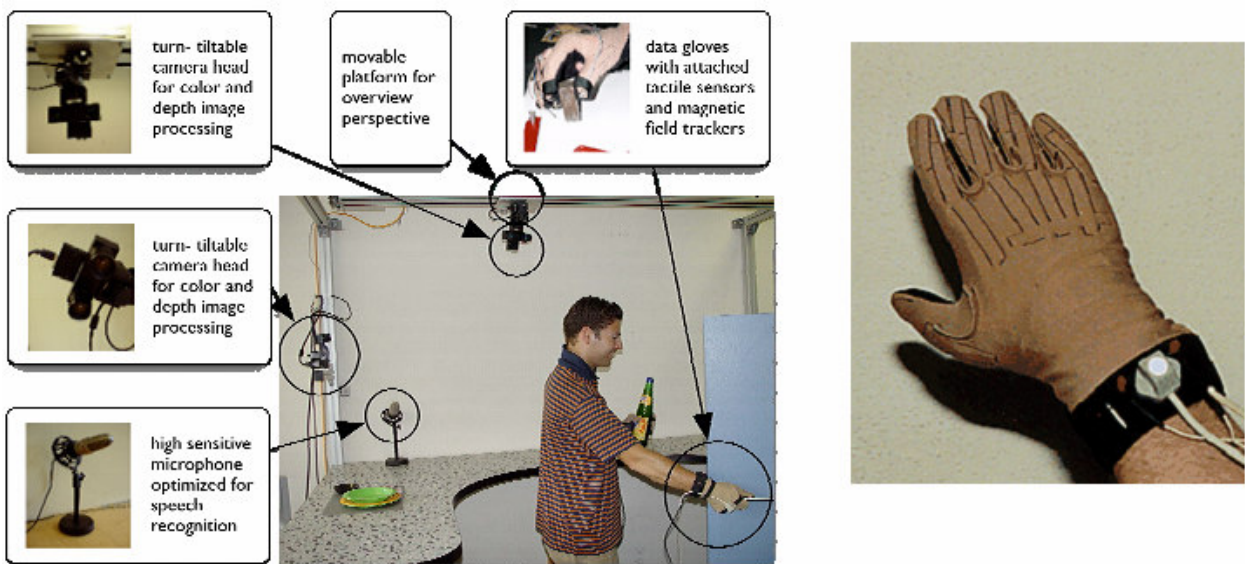


Figura 9.2. Sistema de rastreador magnético.

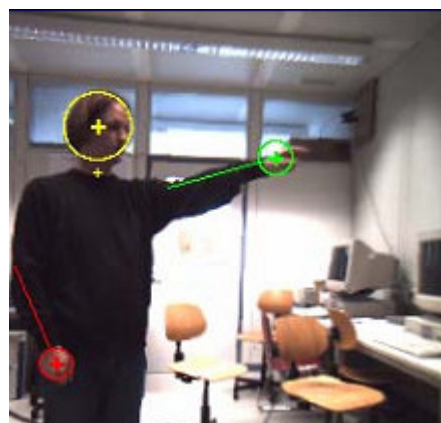


Figura 9.3. Sistema de visión estéreo.

El profesor Asfour propone **imitar el movimiento dual de los brazos humanos** por medio de la captura del movimiento real, la identificación de características en las trayectorias de todas las demostraciones y, considerando solamente aquellas características que reproduzcan un mismo movimiento, indicar cómo utilizarlas para identificar posibles interdependencias entre ambos brazos al realizar tareas con movimientos duales. Para generalizar los movimientos detectados, se utilizan *Hidden Markov Models (HMM)*. Cada modelo es entrenado con los puntos clave comunes (*CKP*) a todas las demostraciones utilizando el algoritmo *Baum-Welch* para múltiples observaciones. Posteriormente, para una secuencia de observación dada, se aplica el algoritmo *Viterbi* para obtener la secuencia óptima de estados del *HMM* que se corresponda con dicha secuencia observada. En la Figura 9.4 se muestra un diagrama del proceso explicado y en la Figura 9.5, se muestra la herramienta de simulación que implementa el movimiento dual de brazos en ARMAR-III.

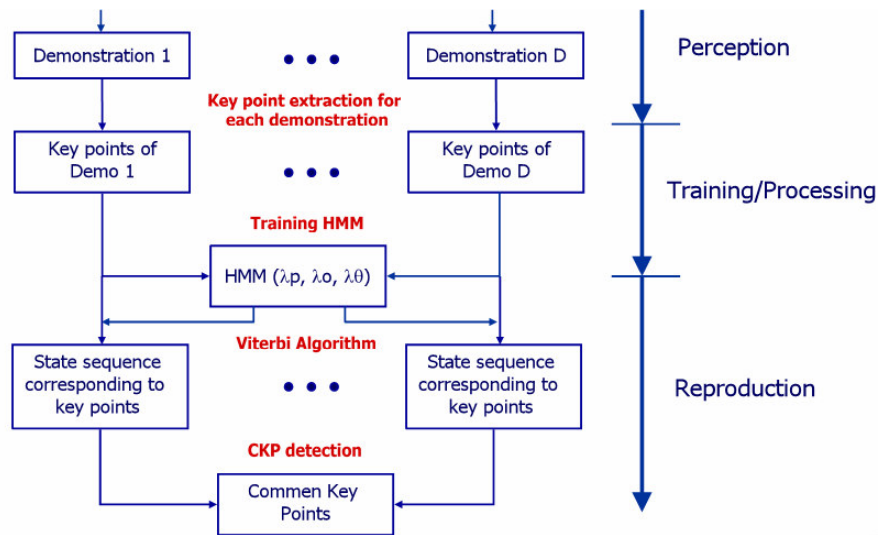


Figura 9.4. Procedimiento a seguir para reproducir el movimiento dual de los brazos humanos.

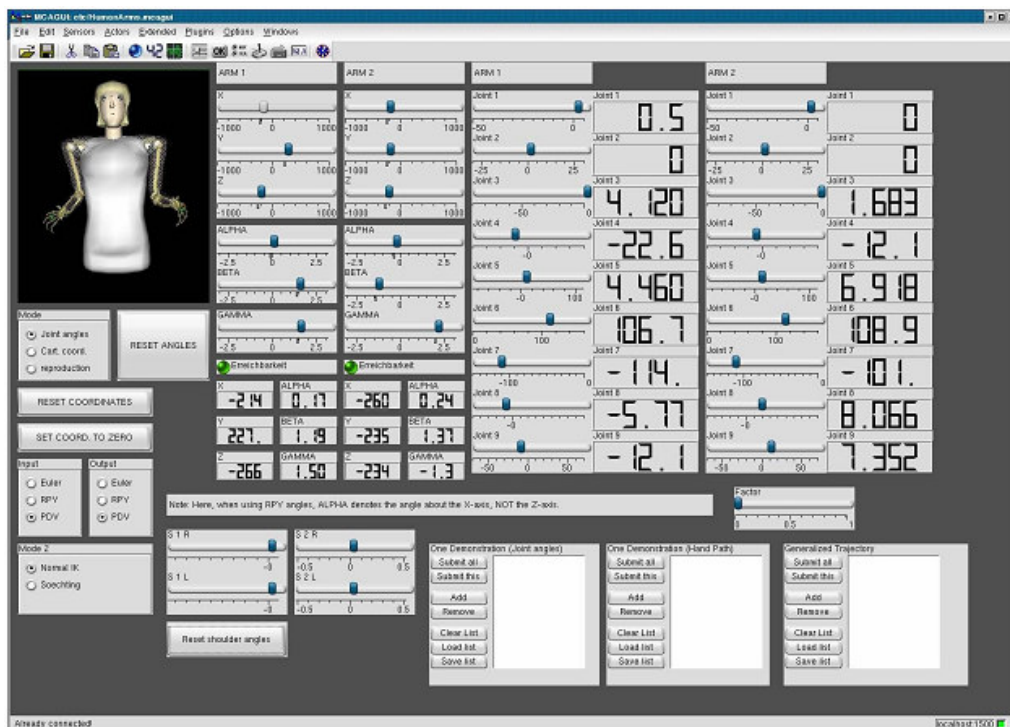


Figura 9.5. Herramienta de simulación que implementa el movimiento dual de brazos en ARMAR-III.

10. Capacidades cognitivas emergentes para robots humanoides¹¹

El profesor Dillman, compañero del profesor Asfour, ambos miembros del *Collaborative Research Center on Learning and Cooperating Multimodal Humanoid Robots (SFB 588)*, complementó la presentación de Asfour sobre del trabajo desarrollado en dicho centro, añadiendo comentarios acerca del modelado de objetos y acerca de las interfaces multimodales utilizadas por los humanoides.

La **interfaz multimodal** que describió el profesor Dillman (Figura 10.1) era capaz de:

- reconocer y seguir fuentes de sonido, estimando la posición de éstas a partir de los retardos de tiempo en el procesamiento de las ondas en un micrófono estéreo.
- seguir caras humanas, a partir de segmentación por color y reconstrucción 3D estéreo en profundidad.

Según Dillman, la **introducción del diálogo** en dicha interfaz es un aspecto que se tiene previsto añadir en el **futuro**.

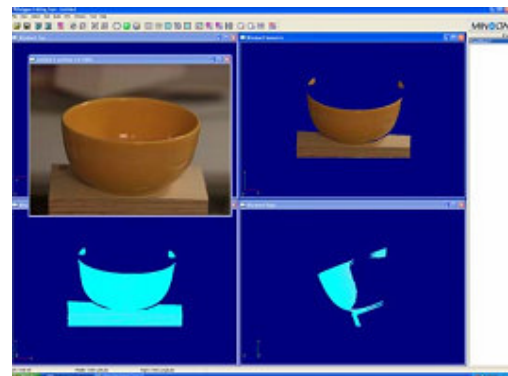
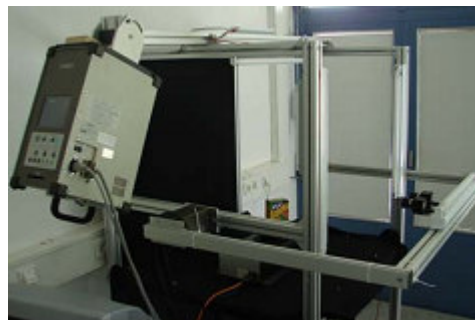


Figura 10.1. Interfaz robótica que gira la cabeza hacia la persona que le está hablando, pudiendo seguir el sonido de su voz y su cara.

Por otro lado, el profesor Dillman comentó el proceso que siguen para **modelar los objetos** que incluyen en sus entornos virtuales. El objeto a modelar se coloca sobre una plataforma rotante en frente de un sensor láser scanner 3D y una cámara de color estéreo de alta precisión movida por un brazo pivote *ASTECC* (Figura 10.2 (a)). Seguidamente, el sistema procesa la imagen del objeto a través de una aplicación que obtiene el modelo virtual 3D de éste (Figura 10.2 (b)). La luz y la dirección de movimiento son controladas por la aplicación. Además, dicho sistema también puede ser controlado por medio de la interfaz de usuario, la cual consta una pantalla sensible al tacto y un joystick. La pantalla presenta toda la información relevante y le ofrece al usuario la posibilidad de construir modelos de objetos de forma interactiva, es decir, especificando sus características, atributos y valores de dichos atributos y modificando el modelo según el resultado obtenido. Mientras que el joystick permite girar el modelo del objeto en la pantalla, tal y como lo hace la plataforma móvil del sistema (Figura 10.2 (c)). Como **líneas de futuro** se prevé introducir más sensores en el sistema (como por ejemplo, sensores de peso, etc.), un mecanismo de reconocimiento del habla en la interfaz de usuario y un guante con sensores táctiles (Figura 10.2 (d)) que proporcione información acerca de posibles puntos de agarre, tipos de agarre, fuerzas a aplicar, máxima aceleración durante el transporte del objeto, etc.



(a)



(b)

¹¹Prof. Dillman, *Fakultät für Informatik, Universität Karlsruhe (TH), Deutschland*. <http://www.iaim.ira.uka.de>



Figura 10.2. (a) Sistema de modelado de objetos, (b) Aplicación que realiza el modelo 3D virtual del objeto, (c) Modelado de objetos interactivo mediante un joystick, que forma parte de la interfaz de usuario, (d) Introducción de un guante con sensores táctiles en el sistema.

11. Visión foveal para robots humanoides¹²

Un sistema de visión robótico podrá considerarse adecuado para humanoides o foveal si posee:

- un sistema ocular-motor similar a los ojos humanos que sea capaz de ejecutar movimientos oculares como *saccades*, *pursuits*, etc.
- una estructura óptica que imite la estructura del ojo humano y pueda simultáneamente adquirir y procesar imágenes de varias resoluciones.

En la Figura 11.1 se puede observar dos sistemas de visión humanoide que cumplen estas condiciones.

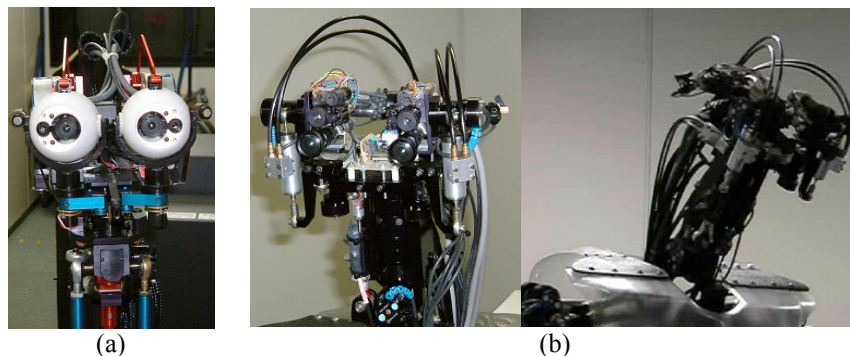


Figura 11.1. Ejemplos de humanoides con visión foveal.

Las **vistas periféricas** son útiles para buscar y para dirigir la vista hacia los objetos detectados, pero una vez el robot centra su visión en un objeto concreto, las **vistas foveales** nos dan imágenes del objeto a alta resolución, lo que resulta muy útil para realizar tareas de reconocimiento de objetos.

En la programación de robots humanoides se necesita una fuerte **integración entre percepción y control motor**, ya que la visión debe ser capaz de tratar con movimientos rápidos del robot y oclusiones, mientras que el control motor deber ser capaz de tratar con fallos de visión.

El caso de estudio que plantea el profesor Ude consiste en que un robot humanoide **localice y reconozca objetos** en una imagen. Así como las personas encuentran objetos mucho más rápido cuando se les proporcionan pistas acerca del color, forma, textura, etc. del objeto que están buscando, en este caso de estudio se le proporciona al robot dicha información para que pueda hacer una segmentación por color, discriminar contenido de la imagen que no le interesa y centrarse en aquéllos objetos que cumplan los requisitos establecidos.

¹² Prof. Ude, Department of Automatics, Biocybernetics and Robotics, Jožef Stefan Institute, Slovenja, <http://www.cns.atr.jp/~aude/>.

Además, para reconocer objetos de forma precisa, el robot deberá realizar una correspondencia de las representaciones visuales que recibe como entrada, con las representaciones visuales en memoria, las cuales deberán contener información a cerca de superficies y contornos del objeto a reconocer. En este caso, una representación visual consiste en un modelo 3D completo del objeto, construido a partir de vistas del objeto desde todos los posibles puntos de vista. Dichos modelos se representan mediante *Gabor Jets* y se utiliza la fórmula de similitud de dichos *Gabor Jets* y máquinas de soporte vectorial o *Support Vector Machines* (SVM) para calcular el nivel de similitud entre la representación visual de entrada y la contenida en memoria y localizar el objeto en la imagen.

Los **resultados** obtenidos muestran que después de entrenar las máquinas de soporte vectorial, se consigue que éstas sean robustas al ruido y a la variación de la luminosidad de la imagen. En la Figura 11.2, se muestra un ejemplo de localización y reconocimiento de un objeto lejano y cercano por el robot humanoide de la Figura 11.1.



Figura 11.2. Reconocimiento y localización de objetos por segmentación en color a partir de información proporcionada a priori.

Una variación de este caso de estudio consiste en no darle conocimiento previo acerca del objeto al robot, sino que él mismo lo extraiga mediante su manipulación. En consecuencia, para llevar a cabo el **reconocimiento por manipulación**, se le coloca al robot el objeto en la mano y él lo dirige a la fóvea de su sistema de visión, donde lo rota en profundidad utilizando los dos grados de libertad de la mano. Utiliza una aproximación bayesiana y un algoritmo de localización de objetos (*EM-Algorithm*) para discernir entre el objeto, su mano y el fondo. Seguidamente se le vuelve a colocar el mismo objeto en la mano pero con una configuración diferente. Cuando todas las configuraciones relevantes han sido analizadas, el clasificador para el reconocimiento de objetos del robot ha “aprendido” las características del objeto, basándose en *Gabor jets* y máquinas de soporte vectorial multi-clase no lineales (Figura 11.3).

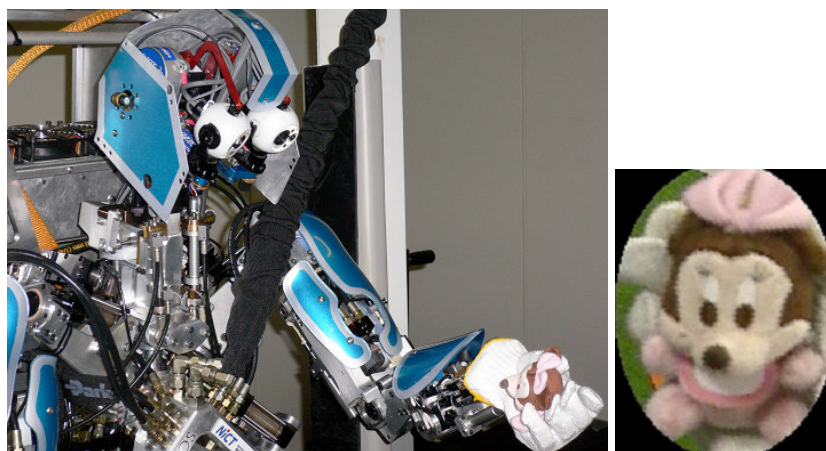


Figura 11.3. Reconocimiento de objetos mediante manipulación.

Como **resultado** de la **comparación de ambos métodos**, el profesor Ude comenta que, aunque ambos tienen una tasa de reconocimiento de objetos superior al 90%, el segundo método resulta un 1% más efectivo que el primero.

12. Bibliografía

- [Asuni et al., 2005] G Asuni, G. Teti, C. Laschi, E. Guglielmelli, P. Dario, “A Robotic Head Neuro-controller Based on Biologically-Inspired Neural Models”, *IEEE International Conference on Robotics and Automation – ICRA 2005*, Barcelona, Spain, April 18-22, 2005, pp. 2373-2378.
- [Berthouze & Lungarella, 2004] Berthouze, L., and Lungarella, M. (2004). “Motor skill acquisition under environmental perturbations: On the necessity of alternate freezing and freeing of degrees of freedom”. *Adaptive Behavior* 12(1):47-63.
- [Calinon and Billard, 2005] S. Calinon and A. Billard, “Stochastic gesture production and recognition model for a humanoid robot”, in *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2005)*, 2005, pp. 2769-2774.
- [Demiris & Hayes, 2002] Y. Demiris and G. Hayes, “Imitation as a dual-route process featuring predictive learning components: a biologically-plausible computational model”, *Imitation in animals and artifacts*, pp. 327-361, 2002.
- [Maini et al., 2006] E. S. Maini, G. Teti, C. Laschi, M. Rubino, P. Dario, “Bio-inspired control of eye-head coordination in a robotic anthropomorphic head”, *IEEE/RAS-EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics*, Pisa, Italy, February 20-22, 2006.
- [Meyer et al., 2006] Meyer, F., Sproewitz, A., and Berthouze, L. (2006). Passive compliance for an RC servo-controlled bouncing robot. *Advanced Robotics* 20(8):953-961.
- [Schaal, 2005] S. Schaal, “Is imitation learning the route to humanoid robots?” *Trends in Cognitive Sciences*, vol. 3, no. 6, pp. 233-242, 1999.