

ANÁLISIS DE LOS SISTEMAS DE PERCEPCIÓN, LOCOMOCIÓN Y APARIENCIA HUMANIZADA EN EL ROBOT HUMANOIDE ICUB



ROBOTS AUTÓNOMOS 2024

MARTA DE CASTRO LEIRA

Índice:

- 1. Introducción**
- 2. Percepción**
 - a. Visual**
 - b. Táctil**
 - c. Auditiva**
 - d. Propioceptiva**
 - e. Fusión de Sensores y Procesamiento Cognitivo**
- 3. Locomoción**
 - a. Evolución de la Locomoción: De Gateo a Bipedestación**
 - b. Control del Movimiento**
 - c. Movimientos del iCub: Piernas, Brazos y Cuello**
- 4. Apariencia Humanizada**
 - a. Dimensiones y Proporciones**
 - b. Estructura Física**
 - c. Expresividad y Movimientos Humanos**
 - d. Materiales y Recubrimiento**
 - e. Relevancia de la Apariencia Humanizada**
- 5. Referencias**

Robot Humanoide iCub

Los robots humanoides representan un avance en el desarrollo tecnológico, ya que combinan habilidades físicas y cognitivas inspiradas en los humanos. Estos robots no solo buscan replicar la apariencia y los movimientos humanos, sino también comprender e interactuar con su entorno de manera autónoma. Su importancia radica en las múltiples aplicaciones que tienen, desde la investigación científica y la educación hasta la asistencia en tareas cotidianas y terapias de rehabilitación.

En este contexto, el iCub se ha consolidado como una de las plataformas de investigación más influyentes en el ámbito de los robots humanoides. Desarrollado por el Instituto Italiano de Tecnología (IIT) como parte del proyecto RobotCub, financiado por la Unión Europea, el iCub tiene como objetivo principal estudiar e imitar los procesos de cognición, percepción y control motor humano. Diseñado con las proporciones de un niño de 3-4 años y dotado de 53 grados de libertad, este robot es capaz de realizar movimientos complejos, como manipular objetos, rastrear visualmente, escuchar sonidos y percibir el entorno. Además, su diseño modular y de código abierto permite que investigadores de todo el mundo personalicen tanto su hardware como su software, fomentando la colaboración internacional.

En términos físicos, el iCub tiene una altura aproximada de 104,6 cm, un ancho de 36,5 cm y un peso total de 33 kg, incluyendo un paquete de baterías de 3 kg. Esta estructura compacta facilita su estabilidad y movilidad, combinando un diseño funcional con una apariencia humanizada. Cada articulación está equipada con actuadores avanzados, como los actuadores elásticos en serie (SEA), que permiten movimientos precisos y naturales en sus piernas, brazos, cabeza y torso.

La conectividad del iCub está diseñada para facilitar su integración en entornos dinámicos. Está equipado con conectividad Wi-Fi (802.11ac 2x2) y Bluetooth 4.0, lo que permite su comunicación y control remoto. En cuanto a su alimentación, utiliza un paquete de baterías de 36V y 9Ah, que aún está en desarrollo, complementado con un sistema de alimentación externa (dummy battery-pack) que garantiza la estabilidad del robot durante las pruebas.

Desde el punto de vista computacional, el iCub está equipado con un procesador Intel i7 7600, 4 GB de RAM y un SSD de 32 GB. Funciona con el sistema operativo Ubuntu LTS de 64 bits y



utiliza el middleware YARP 3(Yet Another Robot Platform), que proporciona integración con ROS y compatibilidad con plataformas como Windows, Linux y macOS.

El sistema de locomoción del iCub es uno de sus aspectos más destacados. Con piernas que tienen 6 grados de libertad (DoF) cada una, el robot puede realizar movimientos fluidos que simulan la marcha bípeda humana. Gracias a los avances en las versiones recientes, como el iCub 3.0, el robot puede caminar en terrenos más complejos, ajustándose dinámicamente a su entorno. Por otro lado, sus brazos y manos, equipados con 7 DoF y 9 DoF respectivamente, le otorgan una gran destreza para manipular objetos con precisión.

Además de sus capacidades motoras, el iCub puede interactuar socialmente y aprender de manera autónoma en entornos controlados. Estas capacidades están respaldadas por tecnologías como OpenCV, GNU Scientific Library y Point Cloud, así como soporte para lenguajes de programación como Python, Java y C#. Estas características lo convierten en una herramienta indispensable en investigaciones relacionadas con el aprendizaje autónomo, la interacción humano-robot y la manipulación de objetos.

Este trabajo tiene como objetivo analizar tres aspectos clave del iCub: sus sistemas de percepción, que lo dotan de la capacidad de interpretar y reaccionar ante su entorno; sus sistemas de locomoción, que le permiten moverse y realizar tareas dinámicas; y su apariencia humanizada, diseñada para facilitar la interacción social y promover una conexión intuitiva con los humanos. Este análisis permitirá comprender cómo estas características contribuyen al desarrollo de robots humanoides capaces de integrarse en entornos humanos y avanzar en el estudio de la inteligencia artificial y la cognición.

Sistema de Percepción del Robot iCub

El sistema de percepción del iCub permite al robot detectar, procesar e interpretar la información recibida de su entorno con el fin de poder realizar tareas de forma autónoma, como manipular objetos, caminar e interactuar con su entorno.

Dicho sistema se divide en varias partes. Por un lado, está la percepción exteroceptiva, es decir la percepción visual, táctil y auditiva, y por otro lado, están la percepción propioceptiva, y la fusión de sensores y procesamiento cognitivo. A continuación, vamos a analizar una a una su funcionamiento y utilidad.

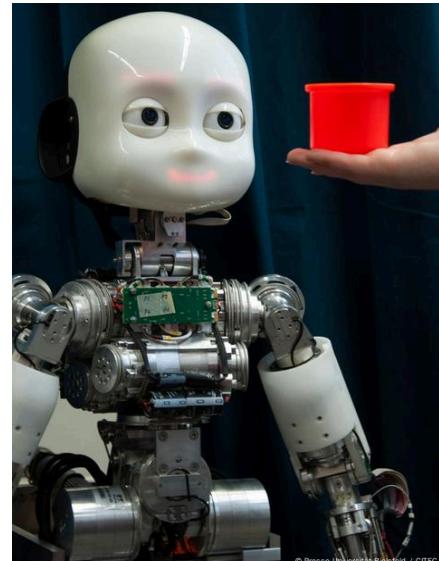
1. Percepción Visual

La percepción visual del robot tiene como fin visualizar su entorno en 3D de manera detallada. Para ello, el robot tiene dos cámaras oculares, llamadas Pointgrey Dragonfly 2 con una resolución de 640x480, las cuales se hallan en su cabeza, imitando los ojos de un ser humano. Estas cámaras pueden moverse de abajo hacia arriba en el espacio log-polar.

Una vez el robot ha recibido las imágenes observadas por las cámaras procesa las imágenes. Con el fin de identificar y localizar objetos en su campo de visión, el sistema de procesamiento de imágenes del iCub se basa en algoritmos avanzados de visión por computadora, como el reconocimiento de objetos y la segmentación de imágenes. Además, se pueden implementar algoritmos para identificar rasgos faciales, gestos y emociones en las expresiones faciales de las personas con las que interactúa.

Un algoritmo muy importante utilizado en este robot fue el algoritmo Lucas-Kanade para el flujo óptico. Este algoritmo permite detectar movimiento independiente en los puntos donde este fallaba debido a occlusiones o altas velocidades relativas. Más adelante, se sustituyó por un modelo basado en datos de codificadores y unidades iniciales, el cual permite predecir el ego-movimiento del robot. Este modelo además de utilizarse para identificar el movimiento inducido por el robot, también se utiliza para segmentar objetos de forma más precisa.

Además, las cámaras proporcionan una visión estereoscópica, es decir, el robot puede percibir la profundidad y las dimensiones tridimensionales de los objetos comparando dos imágenes capturadas desde puntos de vista diferentes.



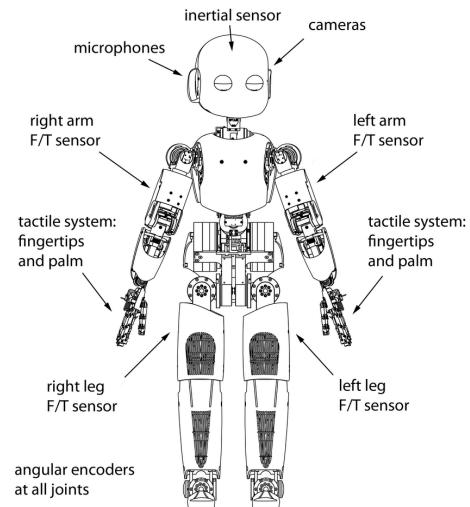
Para la percepción de profundidad, el iCub utiliza algoritmos de código abierto disponibles en OpenCV y LIBELAS. Sin embargo, existe un problema: cada vez que las cámaras se mueven hay que rectificar las imágenes.

Para el reconocimiento de objetos, el iCub utiliza varias técnicas basadas en características SIFT y boosting, bag-of-words y redes neuronales convolucionales profundas. Como con la profundidad existen problemas también, en este caso, el problema consiste en estudiar estrategias que permitan al robot adquirir ejemplos de entrenamiento en tiempo real, ya sea de forma autónoma o con supervisión humana. Se han realizado muchos estudios al respecto, y en uno de ellos, lo que se intentó fue mostrar nuevos objetos al iCub y así obtener los datos de entrenamiento segmentando objetos usando movimiento o disparidad, y a su vez utilizando el conjunto de datos de iCub World para comparar las capacidades de reconocimiento de objetos del iCub.

Además de las cámaras, el iCub tiene sensores, como el Dynamic Vision Sensor (DVS). Estos sensores sólo responden a cambios visuales, lo que los hace muy eficientes energéticamente. Además, el DVS permite al iCub percibir el movimiento con una latencia muy baja, lo que es esencial para la interacción con entornos dinámicos.

2. Percepción Táctil

El iCub está equipado con sensores táctiles distribuidos por casi todo su cuerpo que le permiten sentir y reaccionar ante el contacto físico. En sus últimas versiones, el iCub ha sido cubierto con un total de 4488 sensores. En sus inicios el sistema táctil estaba hecho de espuma de silicona y lycra conductora, pero ha ido evolucionando hasta llegar a lo que es hoy en día, una implementación de grado industrial que utiliza tela personalizable. La espuma de silicona ha sido sustituida recientemente por tela, lo que ha dado lugar a una mayor sensibilidad, y a una menor histéresis y robustez mecánica.



La ‘piel’ del robot se crea pegando varias capas que forman un conjunto de condensadores, los cuales detectan la presión. La base es una placa de circuito impreso (PCB) que actúa como la placa inferior de los condensadores. Encima de ella se coloca una capa de material dieléctrico blando que se deforma al aplicar presión. La capa superior es una cubierta conductora que funciona como la placa superior de los condensadores y también sirve como protección.

En las manos y dedos del iCub hay sensores de presión para poder ajustar la fuerza aplicada durante la manipulación de objetos. Además de en las manos, el cuerpo del robot también tiene sensores de presión distribuidos por su superficie, lo que le permite

detectar si está tocando, o algún ser humano le está tocando alguna parte de su cuerpo. Además, las yemas de los dedos tienen una PCB personalizada con 12 sensores que se envuelve alrededor de un soporte de plástico y la yema del dedo está cubierta con tres capas de tela que completan el sensor.

3. Percepción Auditiva

En cuanto a la percepción auditiva, el iCub tiene dos micrófonos SoundMan de alta calidad, estéreo y omnidireccionales. Estos micrófonos tienen una sensibilidad de -46 dB, lo cual les permite captar diferentes sonidos. Estos micrófonos se encuentran en su cabeza, para así poder detectar y localizar mejor de donde provienen los sonidos de su entorno.

Los micrófonos del iCub están configurados para identificar la dirección de los sonidos, lo que le permite detectar y orientarse hacia ellos, lo que facilita su capacidad de respuesta ante señales sonoras, ya sean vocales o ambientales. Además, el iCub es capaz de reconocer voces y responder a comandos hablados, utilizando reconocimiento de voz. Para ello, utiliza tecnologías avanzadas de procesamiento de señales acústicas.

Por ejemplo, el iCub se ha utilizado en investigaciones sobre la percepción del llanto infantil, analizando sus patrones acústicos y probando algoritmos de aprendizaje automático para clasificar los llantos según las necesidades o estados emocionales del bebé.

En resumen, los micrófonos permiten que el robot distinga entre diferentes sonidos, como conversaciones, música o ruido ambiental y responda de manera apropiada a las órdenes vocales.

4. Percepción propioceptiva

La percepción propioceptiva hace referencia a la capacidad de un robot para percibir su propia posición y movimiento en el espacio, lo cual es necesario para el equilibrio y la locomoción.

Respecto de la percepción propioceptiva, el iCub tiene sensores de posición en cada articulación, con el fin de proporcionar información sobre el ángulo de la articulación, para así poder conocer la configuración actual de su cuerpo y planificar los movimientos. Estos sensores incluyen codificadores magnéticos absolutos, codificadores incrementales de alta resolución y sensores de efecto Hall para los motores sin escobillas.

Además, el robot utiliza acelerómetros y giroscopios para medir la velocidad angular y la aceleración lineal del robot, para proporcionar información sobre la orientación y el movimiento del cuerpo en el espacio. Es decir, estos sensores permiten al robot conocer la inclinación de su cuerpo para poder ajustar su postura en tiempo real.

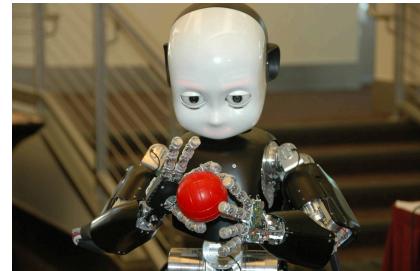
5. Fusión de sensores y procesamiento cognitivo

Por último, vamos a realizar un análisis de todos los sensores y el procesamiento cognitivo. Como ya hemos analizado el iCub tiene muchos sensores con diferentes objetivos (visuales, táctiles, auditivos y proprioceptivos), los cuales se combinan en un proceso de fusión de sensores. Esta función de sensores supone una fusión de información que le proporciona al robot una visión más completa y precisa de su entorno.

La información de los sensores se integra y procesa mediante el middleware de software YARP, el cual proporciona una arquitectura modular y flexible que permite a los investigadores desarrollar e integrar diferentes algoritmos para el control del robot, el procesamiento sensorial y el aprendizaje.

Algunos ejemplos de Fusión Sensorial son:

- Coordinación Ojo-Mano: El iCub combina información visual de sus cámaras con información propioceptiva para agarrar objetos con precisión.
- Aprendizaje de Affordancias: El iCub combina información visual, táctil y motora para aprender las affordancias de los objetos, es decir, las acciones que son posibles con el objeto agarrado.
- Detección de Movimiento Independiente: El iCub combina la información visual de sus cámaras y la información motora e inercial para detectar movimientos en el espacio que no se deban a su propio movimiento.
- Navegación y Reconocimiento de Objetos: El iCub combina la información visual con los datos cinemáticos para construir mapas 3D del entorno y reconocer objetos.



El procesamiento cognitivo en el iCub se basa en modelos de neurociencia y psicología del desarrollo. El iCub utiliza representaciones sensomotoras, parecidas a las del cerebro humano, para integrar la información sensorial y motora. Además, intenta anticipar los resultados de sus acciones para poder ajustar su comportamiento, y observa e imita a los humanos para aprender nuevas habilidades.

Sistemas de Locomoción del iCub

La locomoción en robótica se refiere a la capacidad de un robot para desplazarse e interactuar físicamente con su entorno, ya sea mediante ruedas, patas o articulaciones. En el caso de robots humanoides como el iCub, la locomoción busca imitar los movimientos humanos, garantizando eficiencia, equilibrio y adaptabilidad a diferentes terrenos.

La locomoción del robot humanoide iCub ha evolucionado significativamente desde su primera versión. Diseñado como una plataforma de investigación en cognición artificial, el iCub busca replicar las habilidades motoras humanas, interactuar con el entorno de forma eficiente y equilibrada, y servir como base para el estudio de la movilidad humana en robótica.

1. Evolución de la Locomoción: De Gateo a Bipedestación

El desarrollo de la locomoción en el iCub ha pasado por varias etapas:

1. **iCub 1.0: Gateo.** Diseñado inicialmente para gatear a cuatro patas, el iCub 1.0 priorizó la estabilidad y simplicidad en el control de movimiento. Este enfoque fue clave para estudiar las interacciones básicas con el entorno y asegurar una plataforma segura y eficiente para experimentos iniciales
2. **iCub 2.5: Transición a la Bipedestación.** Con el creciente interés en la locomoción bípeda, el iCub 2.5 introdujo un diseño mecánico mejorado con actuadores elásticos en serie (SEA) en las rodillas y tobillos, así como sensores avanzados para equilibrar y adaptarse a diferentes superficies. Este modelo permitió que el iCub realizará movimientos de bipedestación y caminata funcional.
3. **iCub 3.0: Mayor Potencia y Autonomía.** La versión 3.0 presentó mejoras significativas en potencia, velocidad y autonomía. Equipado con articulaciones que generan el doble de potencia, una batería de mayor capacidad y conectividad inalámbrica, el iCub 3.0 es capaz de caminar más rápido, dar pasos más largos y sortear terrenos desafiantes.

2. Control del Movimiento

Los algoritmos avanzados de control son esenciales para la locomoción del iCub:

1. **PID (Proporcional-Integral-Derivativo):** Para movimientos básicos y mantenimiento de estabilidad.
2. **Modelos Dinámicos Completos:** Permiten calcular los torques articulares necesarios para movimientos como caminar y manipular objetos simultáneamente
3. **Aprendizaje por Refuerzo:** Facilita la adaptación a entornos dinámicos mediante la optimización de movimientos aprendidos

3. Movimientos del iCub: Piernas, Brazos y Cuello

3.1 Piernas

El diseño de las piernas del iCub ha evolucionado significativamente desde sus primeras versiones, adaptándose para soportar tanto el gateo como la locomoción bípeda. Las piernas cuentan con **6 grados de libertad (DoF)** cada una, distribuidos de la siguiente manera:

- **Cadera:** 3 DoF que permiten movimientos de flexión-extensión, abducción-aducción y rotación.
- **Rodilla:** 1 DoF que facilita movimientos de flexión-extensión.
- **Tobillo:** 2 DoF que permiten flexión-extensión y abducción-aducción, cruciales para mantener el equilibrio y adaptarse a superficies irregulares.

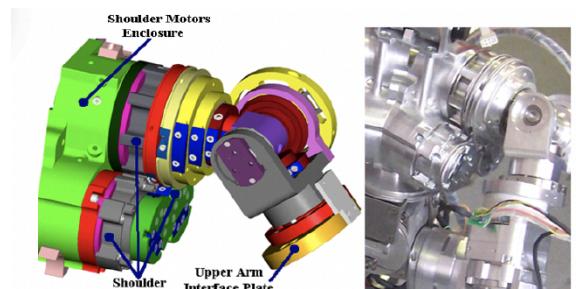
Con la llegada del iCub 2.5, se incorporaron actuadores elásticos en serie (SEA), inspirados en el robot COMAN, y sensores de fuerza/torque de 6 ejes entre el pie y el tobillo, lo que permitió caminar de manera bípeda, ya que ayudan a mantener la estabilidad y permiten que el robot ajuste su marcha en tiempo real. Los sensores táctiles en la planta del pie añadieron la capacidad de detectar el contacto con el suelo y adaptarse dinámicamente.

El iCub 3.0 llevó la locomoción bípeda aún más lejos al aumentar la potencia de las articulaciones, permitiendo pasos más largos y mayor velocidad al caminar. Aunque no se implementó rotación de torsión en los pies, las configuraciones actuales son suficientes para realizar movimientos complejos como ponerse en cuclillas o caminar en terrenos difíciles.

3.2. Brazos

Los brazos del iCub tienen **7 grados de libertad (DoF)** cada uno:

- **Hombro:** 3 DoF que permiten flexión-extensión, abducción-aducción y rotación.
- **Codo:** 1 DoF para flexión-extensión.
- **Muñeca:** 3 DoF para flexión-extensión, abducción-aducción y rotación.

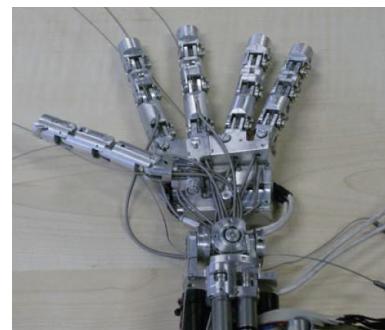


Esta configuración se asemeja a la del brazo humano, proporcionando una gran destreza y flexibilidad para tareas de manipulación. Los brazos utilizan una combinación de motores sin escobillas y motores de corriente continua (DC). Los motores sin escobillas, más potentes, están ubicados en el torso para reducir el peso de los brazos, mientras que los motores DC se encuentran en las articulaciones de menor carga como codo, muñeca y dedos.

3.3. Manos

Las manos del iCub son extremadamente complejas, con **9 grados de libertad y 19 articulaciones**:

- **Pulgar:** 4 articulaciones que permiten rotar sobre la palma y realizar agarres precisos.



- **Índice, Medio, Anular y Meñique:** 3 articulaciones cada uno, con capacidad de abducción-aducción en la base de algunos dedos.

El diseño está basado en un sistema de tendones, que permite una construcción compacta y un rango de movimiento amplio. Este sistema habilita al iCub para realizar tareas complejas como agarrar objetos, interactuar con herramientas y ejecutar movimientos finos. Las manos son fundamentales en tareas de locomoción, ya que permiten mantener el equilibrio y manipular objetos simultáneamente mientras el robot se desplaza.

3.4 Cuello

El cuello del iCub tiene **3 grados de libertad (DoF)**, que habilitan movimientos de:

- **Inclinación:** Movimiento hacia adelante y atrás.
- **Oscilación:** Movimiento de lado a lado.
- **Giro:** Movimiento horizontal.

Además, la cabeza está equipada con un sistema binocular que incluye ojos con 3 DoF cada uno, capaces de movimientos independientes para enfocar objetos a distintas distancias. Esta configuración permite al iCub realizar un rastreo visual preciso y mejorar la interacción con su entorno.

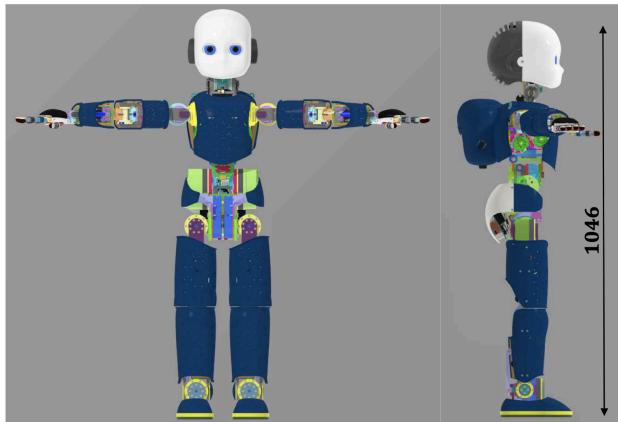
3.5 Torso

El torso del iCub tiene 3 grados de libertad (DoF), lo que le permite realizar movimientos de inclinación, oscilación y giro. Esta flexibilidad adicional facilita la estabilidad durante la locomoción y mejora la manipulación de objetos. Además, el torso contribuye al equilibrio general del robot durante movimientos dinámicos como caminar o gatear. El sistema de movimientos del iCub está diseñado para emular capacidades humanas, desde el control dinámico de las piernas hasta la manipulación precisa con las manos. Las mejoras introducidas en las diferentes versiones han ampliado significativamente sus capacidades, haciéndolo más versátil y eficiente en tareas complejas que combinan locomoción y manipulación.

Apariencia Humanizada

El diseño del iCub se centra en replicar la apariencia, proporciones y movilidad de un niño de 3 a 4 años, lo que facilita la interacción natural con los humanos. Esta característica no solo lo convierte en una herramienta ideal para estudiar la interacción humano-robot, sino que también fomenta la empatía y la aceptación social en aplicaciones educativas, terapéuticas y de investigación.

1. Dimensiones y Proporciones



El iCub tiene una altura de 104,6 cm y un peso de 30-33 kg, proporciones cuidadosamente diseñadas para asemejarse a un niño pequeño. Este tamaño compacto le permite realizar movimientos y tareas de forma comprensible y natural para los humanos. Su estructura está basada en datos antropométricos para replicar la cinemática humana, con un enfoque en las proporciones de las extremidades y el torso.

2. Estructura Física

- **Cabeza:** La cabeza del iCub tiene una forma aproximadamente esférica y cuenta con 3 grados de libertad (DoF) en el cuello, lo que permite movimientos de inclinación, giro y oscilación, imitando el movimiento natural de una cabeza humana. Los ojos son cámaras estéreo articuladas, que proporcionan visión en 3D y un sistema oculomotor similar al humano. Además, los LEDs en la cara permiten simular expresiones básicas, como una sonrisa o fruncir el ceño.
- **Brazos y Manos:** Los brazos del iCub tienen 7 DoF cada uno, lo que les permite realizar movimientos flexibles y precisos. Las manos, con 9 DoF y una compleja estructura de 19 articulaciones, emulan la destreza humana. El pulgar es particularmente funcional, ya que puede rotar sobre la palma, permitiendo manipulaciones complejas como agarrar objetos y herramientas.
- **Piernas y Torso:** El torso tiene 3 DoF, lo que facilita movimientos de flexión, extensión y rotación, contribuyendo al equilibrio y la estabilidad en tareas dinámicas. Cada pierna tiene 6 DoF, permitiendo que el robot camine, se ajuste al equilibrio y adopte posturas similares a las humanas, como ponerse en cucillas.
- **Adaptabilidad estructural:** El diseño modular del iCub permite actualizaciones y personalizaciones en sus componentes, manteniendo su apariencia humanizada y ampliando sus capacidades técnicas.

3. Expresividad y Movimientos Humanos

El iCub incorpora elementos que imitan movimientos y expresiones humanas, lo que facilita una interacción más fluida con las personas.

- **Rasgos Faciales y Expresiones:** Aunque el iCub no tiene un rostro completamente humano, cuenta con elementos como párpados móviles, labios mecanizados y una mandíbula articulada. Esto le permite simular expresiones básicas, como sonrisas o la apertura de la boca, lo que mejora la interacción social y fomenta la empatía.
- **Movilidad Natural:** Su capacidad para realizar movimientos dinámicos y adoptar posturas humanas aumenta la naturalidad en su interacción con el entorno y las personas. Por ejemplo, su habilidad para inclinar la cabeza mientras rastrea visualmente un objeto crea una percepción de atención y "humanidad" en sus acciones.



4. Materiales y Recubrimiento

El recubrimiento de "piel" del iCub está hecho de materiales sintéticos suaves, diseñados para imitar la textura de la piel humana y proporcionar una sensación de contacto más amigable. Este recubrimiento está equipado con más de **4488 sensores táctiles capacitivos**, que no solo permiten la percepción del contacto, sino que también contribuyen a una interacción más orgánica y funcional.

5. Relevancia de la Apariencia Humanizada

La apariencia humanizada del iCub tiene varias implicaciones importantes:

1. **Interacción Social:** Las proporciones y expresiones del iCub fomentan una interacción intuitiva, especialmente en entornos educativos y terapéuticos, donde puede actuar como un compañero robótico. Su diseño humanizado lo convierte en un elemento clave para generar confianza y reducir la ansiedad en usuarios sensibles, como niños y personas mayores.
2. **Estudios Cognitivos:** Su diseño permite investigar cómo los humanos perciben y responden a los robots, explorando procesos como la empatía, la confianza y el aprendizaje colaborativo. Además, el iCub puede ser utilizado para estudiar cómo las características humanas influyen en la interacción con máquinas.
3. **Aplicaciones Asistenciales:** En contextos de terapia asistida, un robot con apariencia amigable puede actuar como un puente emocional, ayudando a los terapeutas a generar vínculos con sus pacientes. Su diseño humanizado lo hace más accesible para este tipo de entornos.

4. **Estética Funcional:** Su diseño no solo está enfocado en la apariencia, sino también en la funcionalidad. Cada elemento de su estructura está cuidadosamente optimizado para combinar un aspecto amigable con capacidades técnicas avanzadas.

El diseño del iCub no solo busca replicar las características físicas de un niño pequeño, sino también fomentar interacciones naturales y efectivas con los humanos. Su estructura física, expresividad y materiales cuidadosamente seleccionados lo convierten en una herramienta única para la investigación en robótica humanoide, interacción social y desarrollo cognitivo. Este enfoque lo diferencia como una plataforma robusta y versátil en el ámbito de la robótica humanoide.

Referencias

1. Metta, G., Sandini, G., Vernon, D., Natale, L., & Nori, F. (2008). *The iCub humanoid robot: An open platform for research in embodied cognition*. International Journal of Humanoid Robotics, 5(02), 111-141. <https://doi.org/10.1142/S0219843608001376>
2. iCub Consortium. (2019). *iCub Platform*. Technical documentation. Available at: <https://www.icub.org>
3. Pattacini, U., Natale, L., Nori, F., & Metta, G. (2020). *The iCub platform: Evolution and current trends*. Frontiers in Robotics and AI, 7, 123. <https://doi.org/10.3389/frobt.2020.00123>
4. iCub Consortium. (2019). *Technical Specifications of the iCub Platform (Rev. 2.3)*. Available at: <https://www.icub.org/documentation>
5. Metta, G., Natale, L., & Sandini, G. (2010). *The iCub Cognitive Humanoid Robot: An Open-System Research Platform for Enactive Cognition*. Proceedings of the 19th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication, 259-264. <https://doi.org/10.1109/ROMAN.2010.5598683>
6. <https://icub.iit.it>