

Laboratorios Virtuales y Remotos para la Práctica a Distancia de la Automática

José Sánchez, Fernando Morilla y Sebastián Dormido

Dpto. de Informática y Automática, UNED (Madrid). <jsanchez@dia.uned.es>

1. INTRODUCCIÓN

En la sociedad actual en que nos encontramos inmersos, la educación a distancia se presenta como la solución idónea para un conjunto de colectivos que exigen el disponer de sistemas de enseñanza mucho más flexibles, accesibles y adaptativos (sin limitaciones espaciales ni temporales). Si bien hasta el momento presente, el modelo educativo de educación a distancia se ha basado, fundamentalmente, en las tutorías telefónicas o en el correo ordinario, las nuevas tecnologías de la información se presentan como las formas alternativas de mejorar la interacción profesor-alumno. Dentro de todo el conjunto de nuevas tecnologías, destacan dos herramientas como las más adecuadas para ofrecer un nuevo enfoque en el modelo educativo de la educación a distancia: los *sistemas hipermedia* como forma de estructurar la información, y las *redes de comunicación de área extendida* como soporte de la información, es decir, la red Internet.

Pese a que estas dos herramientas se consideran suficientes para la creación de sistemas de apoyo al aprendizaje de materias dotadas de una componente práctica no muy fuerte, la enseñanza de la Ingeniería de Control, o de alguna otra disciplina con gran contenido experimental, requiere de algo más, de un elemento que permita al estudiante poner en práctica todos los conocimientos que vaya adquiriendo a lo largo del estudio de la materia. Este papel en las enseñanzas tradicionales lo desempeña el *laboratorio de prácticas* (Kheir, *et al.*, 96; Antsaklis, *et al.*, 99), el cual, inexorablemente, requiere de la presencia física del estudiante para poder manipular los sistemas de control y las plantas existentes en un entorno controlado bajo la supervisión del profesor. Por consiguiente, trasladando este entorno práctico a la enseñanza a distancia, el elemento necesario para abordar la realización de prácticas sobre Sistemas de Control es la existencia de un sistema de apoyo a la enseñanza de la Automática consistente en un *laboratorio virtual y de telepresencia accesible a través de una red basada en protocolos TCP/IP que permita al alumno practicar de una forma lo más similar posible a como si estuviese en las dependencias del laboratorio, dándole la posibilidad de manejar las simulaciones o interactuar con las plantas reales*.

En consonancia con lo anterior, el Departamento de Informática y Automática de la Universidad Nacional de Educación a Distancia está trabajando en el desarrollo de nuevos paradigmas de laboratorios para la realización a través de Internet de experiencias prácticas de Ingeniería de Control sobre plantas y sistemas reales o simulados. De forma resumida, los cuatro pilares en los que se basa este proyecto de investigación son: la simulación remota, la telepresencia, la visualización remota y el seguimiento y evaluación.

2. SIMULACIÓN REMOTA

El paradigma de laboratorio virtual que se está desarrollando para la realización de simulaciones dinámicas e interactivas a través de Internet, también conocido como simulación basada en el Web (*Web-based simulation*), consta de cinco partes:

- *Potentes interfaces gráficas de usuario (GUI) bajo la forma de applets Java (applets de experimentación) para interactuar con los elementos propios de un laboratorio de Control. Por lo tanto, estas interfaces deben estar compuestas por los esquemas de determinados procesos industriales (plantas, controladores, tuberías, válvulas, etc.) más un conjunto de diagramas de señal*

para analizar la evolución de los parámetros y variables a lo largo del tiempo de simulación. En la figura 1 se recogen las interfaces de dos applets de experimentación.

- Un *entorno de cálculo matemático* en el que se ejecutan las simulaciones de las plantas que son de interés por su carácter didáctico: intercambiadores de calor, péndulos invertidos, tanques de líquido, columnas de destilación, etc. Puesto que el entorno está siendo ideado tanto para la enseñanza como para el entrenamiento, éste permite realizar una completa configuración de los modelos matemáticos (perturbaciones programadas, parámetros físicos, actuación de los controladores, etc.) y de las interfaces gráficas (rango de las variables, grado de interactividad de las variables) por medio de ficheros de experimentos y, de esta forma, establecer los objetivos pedagógicos que los estudiantes tengan que alcanzar interactuando con la GUI. Las herramientas seleccionadas para el desarrollo de los modelos están siendo Matlab y Simulink.

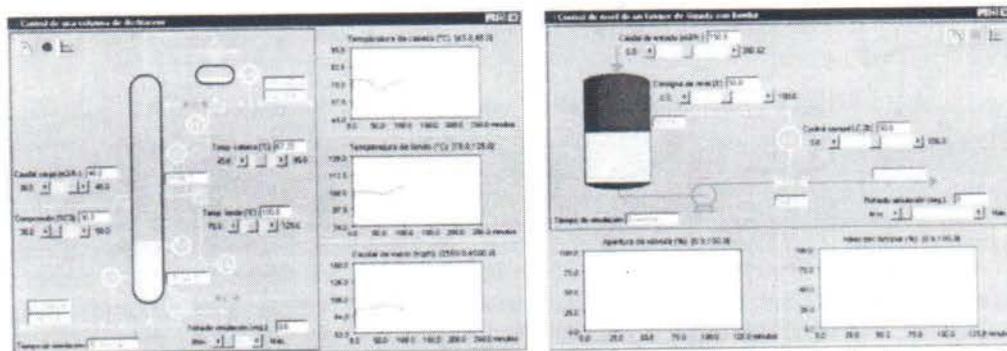


Fig. 1. Interfaz de experimentación para el control avanzado de una columna de destilación y para el control tradicional de nivel de un depósito con líquido

- Un *servidor concurrente* como mecanismo para el intercambio de información a través de Internet entre los applets de experimentación y el núcleo de cálculo/simulación. Con el objeto de que el entorno ofrezca la posibilidad de que varios estudiantes trabajen simultáneamente, la plataforma software para la que se está desarrollando el prototipo es un sistema operativo *nux (cualquier sabor de Unix). Esto viene motivado por la posibilidad de que, gracias a la interfaz de comunicación externa de Matlab para *nux, es posible disponer de tantas sesiones de trabajo Matlab/Simulink como usuarios se conecten al entorno de simulación remoto en un instante dado mediante la creación de procesos Matlab/Simulink asociados en exclusiva a procesos o *threads* denominados PE (*procesos de experimentación*) (figura 2).
- Un *sistema de supervisión y monitorización* con el objeto de que el profesor de forma remota supervise on-line el trabajo que está siendo realizado por los estudiantes mediante los applets de experimentación. Para ello, se ha diseñado un prototipo de *applet de supervisión* que permite monitorizar algunos parámetros de las sesiones de trabajo de los estudiantes: hora y tiempo de conexión, modelos utilizados, comandos emitidos, respuestas del entorno de simulación, etc. Análogamente a la existencia de procesos PE, el servidor cuenta con un proceso o *thread* PS (*proceso de supervisión*) encargado de dialogar con el applet de supervisión y, simultáneamente, de intercambiar datos con los proceso PE por medio de colas de mensajes.
- Un *conjunto de presentaciones conceptuales* embebidas en páginas HTML como forma de proporcionar o completar las bases teóricas necesarias para abordar la realización del trabajo práctico, así como para señalar al estudiante los objetivos que se pretenden alcanzar con la consecución de la práctica.

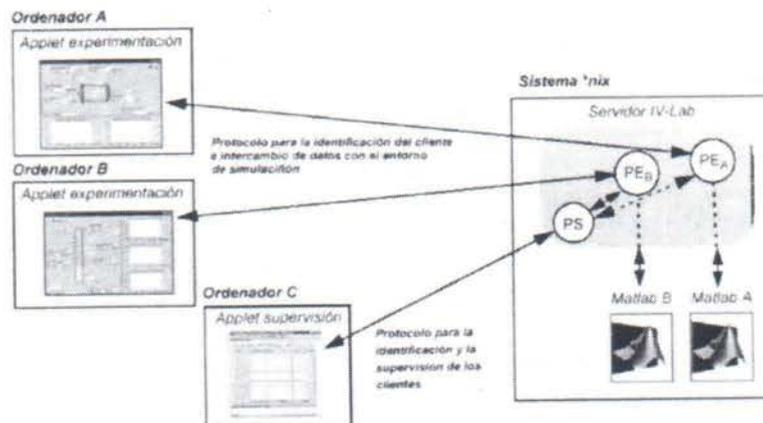


Fig. 2. Esquema conceptual del entorno de experimentación remota

3. TELEPRESENCIA

Utilizando la misma filosofía que en el laboratorio virtual se está desarrollando un entorno de telepresencia para el empleo remoto de tarjetas DSP y de ciertas plantas de entrenamiento (péndulo invertido, tanques de agua, intercambiadores de calor). Con el empleo de plantas reales se intenta, en la medida que la tecnología lo permita, transmitir a los estudiantes las sensaciones y responsabilidades que tendrán cuando trabajen en entornos industriales reales. Pero evidentemente, el término *telepresencia* debe ser tomado con las limitaciones propias de la tecnología actual, ya que de los cinco sentidos que posee el ser humano, sólo dos de ellos, la vista y el sonido, pueden ser transmitidos a través de una red a un coste moderado (Aktan, *et al.*, 96). La transmisión de información digital referente a los otros tres sentidos es viable, pero tanto el coste de los transductores necesarios, como la posible adecuación a un marco de experimentación universitario en la enseñanza de la Ingeniería de Control hace que, por el momento, se desestimen.

El esquema conceptual del sistema de telepresencia será similar al del laboratorio virtual: applets Java para las interfaces gráficas de experimentación, applet de supervisión y un servidor *ad-hoc* que haga de unión con el lazo de control en tiempo real. Pero a diferencia de las simulaciones remotas, en que es necesario que el servidor genere procesos PE en exclusiva para cada cliente, el servidor ante una petición de conexión, generará un único proceso que se comunicará en tiempo real con las plantas a través de las tarjetas de adquisición de datos.

La figura 3 recoge un esquema gráfico resumido del entorno de teleoperación planteado. Debido a la necesidad de dialogar en tiempo real con la planta, nada más activar el servidor, éste inicializa las tarjetas de adquisición de datos e instala el lazo de control en una rutina de interrupción activada por la propia tarjeta de adquisición de datos. Establecido el lazo de control con unos parámetros por defecto, la planta permanecerá en estado estacionario hasta que un applet de experimentación establezca una conexión con el servidor. En ese momento, el servidor creará un proceso PE para atender la conexión y transmitir los parámetros de control desde applet hasta el lazo de control de la planta, traduciendo las acciones del usuario sobre el applet de experimentación en acciones sobre la planta real. Análogamente, la conexión de un applet de supervisión al servidor ocasionará la creación de un proceso de supervisión PS con capacidades de monitorizar al estudiante, al lazo de control y a las tarjetas de adquisición de datos.

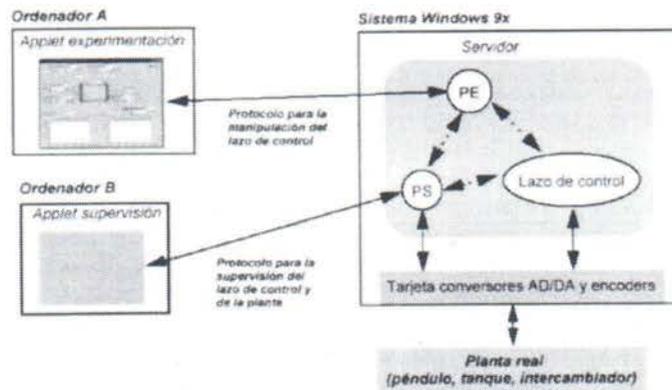


Fig. 3. Esquema conceptual del entorno de teleoperación

Obsérvese que con el fin de solventar los problemas de control que implican el retardo en la transmisión de la información a través de la red, se ha recurrido al paradigma de *control supervisado* (supervisory control) (Sheridan, 93). Brevemente, el control supervisado significa que en lugar de distribuir el lazo de control entre la planta, el servidor y el applet de experimentación, todo el lazo de control se mantiene cerrado en el propio servidor. De esta forma, no hay retrasos en el lazo que realiza las tareas de control y, por lo tanto, no hay inestabilidades.

De acuerdo con este paradigma, las funciones del control supervisado en nuestro entorno desde el punto de vista didáctico se pueden dividir en cinco puntos, los dos primeros propios del profesor y los tres restantes del estudiante. Estos puntos son: (1) planificar las acciones de la planta en función del objetivo didáctico perseguido con el experimento, (2) confeccionar el plan por medio de los ficheros de experimentos, (3) monitorizar y supervisar la evolución del experimento para lograr los objetivos indicados, (4) si hay anomalías, intervenir a través del applet de experimentación para corregir el problema, y (5) aprender de la experiencia.

4. VISUALIZACIÓN REMOTA

En la actualidad, todo laboratorio remoto de Ingeniería de Control que se considere de auténtica telepresencia demanda la existencia de una comunicación visual y auditiva con la planta sobre la que se estén realizando las experiencias. De acuerdo con las ideas esbozadas, el objetivo perseguido con este apartado es la creación de un entorno de trabajo que permita la supervisión visual remota del proceso. Por ello, se puede afirmar que lo que se pretende es construir un *sensor remoto en red* (McDowell, *et al.*, 98), el cual pueda ser gobernado tanto por el profesor como por el estudiante, siempre este último dentro de las especificaciones que marque el primero, es decir, el profesor.

El campo tradicional del empleo del vídeo en entornos de telepresencia o de teleoperación es el de la telerobótica, caracterizándose por constituir un medio para prolongar el sentido humano de la vista más allá de lo que permite la condición humana *per se*. En unos casos el vídeo permite al ser humano operar en entornos peligrosos (minas, centrales nucleares) (Corke, *et al.*, 98) o remotos (espacio exterior, profundidades abisales) (Sheridan, 93); en otros propicia la supresión de barreras espaciales para la aplicación del conocimiento de un experto (teleasistencia médica, teleoperaciones quirúrgicas) (Kitson, *et al.*, 1997); y, cómo no, permite experimentar de forma remota sobre aspectos de la Ingeniería de Control (Aktan, *et al.*, 96; Kondraske, *et al.*, 93; Gillet, *et al.*, 97; Overstreet y Tzes, 99). Este paradigma en el empleo del vídeo es en el que se enmarca el trabajo aquí expuesto: *la monitorización visual remota de un conjunto de plantas reales con fines pedagógicos*.

Algunos de los posibles supuestos de aplicación en entornos pedagógicos de telepresencia o teleoperación aplicados a la enseñanza de la Teoría de Control son los siguientes:

- *Monitorización on-line del proceso.* Se consigue así la visualización directa y en tiempo real de cómo las acciones de control efectuadas sobre la interfaz de experimentación repercuten en la planta real. De esta forma, la realimentación que el estudiante obtiene no sólo la extrae del análisis de los valores numéricos sino también de la observación directa del proceso.
- *Comprobación on-line del proceso,* es decir, grabación en vídeo de toda o parte de la experiencia con la planta, de forma que, concluida la sesión de teleoperación se puedan estudiar los pasos dados en caso de que se desee profundizar en algún aspecto destacable.
- *Refuerzo de conceptos.* Empleo de secuencias de vídeo obtenidas de alguna experiencia previa y que permiten reforzar algún concepto teórico.
- *Planteamiento de ejercicios.* Presentación visual de ciertas situaciones de forma que el estudiante, a priori, pueda pensar sobre qué acciones debe tomar en el caso de que se le presente esa situación durante una sesión de teleoperación.

Centrándonos en el diseño del sistema de visualización remota (figura 4), éste se apoya en la clásica arquitectura cliente/servidor: un servidor se encargará de dialogar con dos tipos de applets de control remoto de la cámara (profesor y estudiante). Como forma de regular el intercambio de información entre ambas entidades software, se ha diseñado un sencillo protocolo de comunicación denominado PCC (Protocolo de Comandos y Consultas). Este protocolo está compuesto, en su mayor parte, por mensajes que se asocian a paquetes de comandos y consultas soportados por el protocolo de bajo nivel que se emplea para el control de la cámara (protocolo VISCA), más algunos mensajes adicionales para realizar la identificación de usuarios y el control de la comunicación.

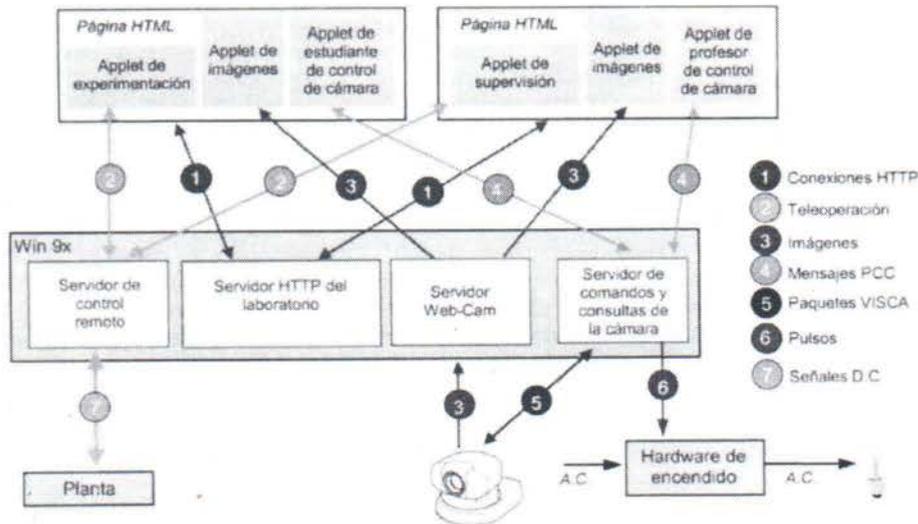


Fig. 4. Esquema del sistema de visualización remota

De acuerdo con lo anterior, una vez que el navegador WWW haya cargado uno de los dos tipos de applets para el control de la cámara, éste establecerá un canal de comunicación con el servidor de comandos y consultas de la cámara (punto 4 de la figura 4) y ambas entidades comenzarán a dialogar por medio del protocolo PCC. Aunque no se refleja fielmente en la figura 4, el servidor es

concurrente y genera un nuevo thread para atender las comunicaciones con cada applet de control, de forma que el servidor puede continuar a la escucha para atender cualquier nueva petición de conexión.

Por su parte, el applet de recuperación de imágenes establece la comunicación con el servidor Web-Cam (punto ④ de la figura 4). Este último componente software está en conexión permanente con la cámara recuperando imágenes a la velocidad a la que haya sido programado (velocidad que estará en función de la dinámica del proceso: no es lo mismo el control de un péndulo invertido que el llenado de un tanque), aunque en última instancia la velocidad de transmisión está determinada por la capacidad de la red. Obsérvese que los canales de comunicación de los applets de control y de recuperación de imágenes son totalmente independientes (sockets UDP para las imágenes y TCP para los comandos).

Evidentemente, el tipo de applet para el control de la cámara que el servidor HTTP transmite depende del usuario: el del profesor (figura 5.a) dispone de un número muy superior de funciones que las del estudiante (figura 5.b), ya que debe poder preajustar las seis configuraciones que la memoria de la cámara soporta (en este caso una cámara motorizada SONY modelo EVI-DE30/31). Además, limitando las funciones de la interfaz del estudiante se consiguen dos objetivos: centrar la atención en los aspectos concretos y relevantes de la planta para lograr las metas del experimento, y evitar los consiguientes problemas que ocasionaría un uso inapropiado de la cámara para los posteriores usuarios.

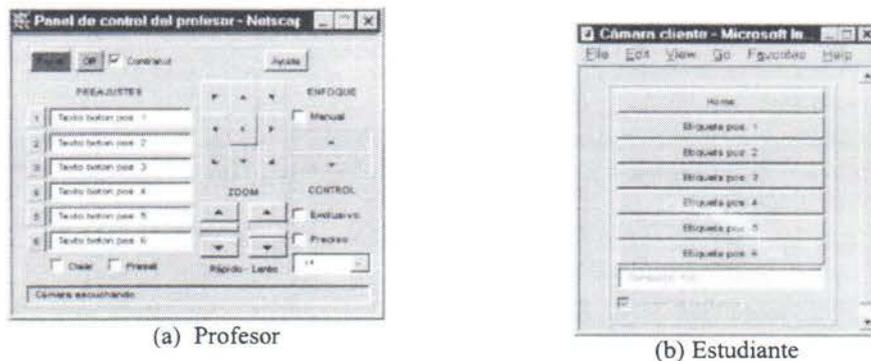


Fig. 5. Interfaces para la configuración y el control remoto de la cámara

Por otra parte, la construcción de un entorno remoto de experimentación implica no sólo una independencia física del estudiante con respecto al lugar de experimentación, es decir, del laboratorio, sino también temporal. De acuerdo con esto, el instante en que se puede recurrir al entorno remoto para realizar prácticas puede ser cualquier momento del día y, principalmente, para aquellos que simultanean la vida laboral con los estudios universitarios, la tarde-noche es el único momento disponible. De ahí la conveniencia de que el entorno de experimentación esté disponible las 24 horas del día, garantizando no sólo la independencia espacial sino también la temporal.

Por ello, conjuntamente con el sistema de visualización remota se ha diseñado un sistema de encendido remoto de la iluminación de forma que en el mismo instante en que se establezca una conexión para iniciar un experimento sobre una planta real se garantice la visibilidad del objeto a monitorizar.

5. SEGUIMIENTO Y EVALUACIÓN

Parece obvio que la completitud de la verdadera meta perseguida con nuestro proyecto de investigación, que no es otra que la mejora de los conocimientos del alumno sobre la materia en

cuestión, no puede lograrse sin que el estudiante reciba una realimentación sobre la validez del trabajo desarrollado dentro del laboratorio, así como que el profesor conozca el grado de avance experimentado por el alumno. Es por ello que todo el laboratorio virtual no tendría sentido sin la existencia de un módulo de seguimiento y evaluación del alumno que le permitiese a éste autodirigirse en su proceso de aprendizaje, indicándole los puntos sobre los que necesita un mayor refuerzo en su estudio.

Al mismo tiempo, este módulo debe servir al profesor tanto para comprobar que el proceso de aprendizaje que lleva asociado el estudiante es el correcto (seguimiento puntual) como para conocer si se han logrado los objetivos perseguidos tras el estudio completo de la asignatura (seguimiento global). De acuerdo con esto, algunas de las tareas que debe llevar a cabo el módulo de seguimiento y evaluación son: (a) generación y corrección de test sobre la materia, (b) programación de experimentos para el refuerzo y fijación de determinados conceptos, (c) evaluación del resultado de los experimentos y (d) seguimiento continuo de las simulaciones y del estado del laboratorio.

6. REFERENCIAS

- Aktan, B., C.A. Bohus, L.A. Crowl, y M.H. Shor (1996), "Distance Learning Applied to Control Engineering Laboratories", *IEEE Transactions on Education*, Vol. 39, nº 3, pág. 320-326.
- Antsaklis, P., T. Basar, R. DeCarlo, N. Harris, M. Spong, y S. Yurkovich (1999). "Report on the NSF/CSS WorkShop on New Directions in Control Engineering Education", *IEEE Control Systems Magazine*, Vol. 19, nº 5, pág. 53-58.
- Corke, P., J. Roberts, y G. Winstanley (1998), "Vision-Based Control for Mining Automation", *IEEE Robotics & Automation*, Vol. 5, nº 4, pág. 44-49.
- Gillet, D., C. Salzmann, R. Longchamp, y D. Bonvin (1997), "Telepresence: An opportunity to develop practical experimentation in automatic control education", *Proceedings of the European Control Conference*, Bruselas.
- Kheir, N.A., K.J. Åmström, D. Auslander, K.C. Cheok, G.F. Franklin, M. Masten, M. Rabins (1996). "Control System Engineering Education", *Automatica*, Vol. 32, nº 2, pág. 147-166.
- Kitson, F.L., T. Malzbender, y V. Bhaskaran (1997), "Opportunities for Visual Computing in Healthcare", *IEEE Multimedia*, Vol. 4, nº 2, pág. 46-57.
- Kondraske, G.V., R.A. Volz, D.H. Johnson, D. Tesar, J.C. Trinkle, y C.R. Price (1993), "Network-based Infrastructure for Distributed Remote Operations and Robotics Research", *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 9, nº 5, pág. 702-704.
- McDowell, C.E., B.R. Montague, M.R. Allen, E.A. Baldwin, y M.E. Montoreano (1998), "JAVACAM: Trimming Java Down to Size", *IEEE Internet Computing*, Vol. 2, nº 3, pág. 53-59.
- Overstreet, J. W y A. Tzes (1999), "An Internet Based Real-Time Control Engineering Laboratory", *IEEE Control Systems*, Vol. 19, nº 5, pág. 19-34.
- Sheridan, T.B. (1993), "Space Teleoperation Through Time Delay: Review and Prognosis", *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 9, nº 5, pág. 592-606.