

Plataforma de telerrobótica para laboratorios docentes

Miguel Díaz-Cacho
Esc.Ing.Sup.Informatica
University of Vigo, Spain
Email: mcacho@uvigo.es

Matías G. Rivera
Esc.Ing.Sup.Informatica
University of Vigo, Spain
Email: mgrivera@uvigo.es

Joaquín L. Fernández
Esc.Ing.Sup.Industrial
University of Vigo, Spain
Email: joaquin@uvigo.es

Antonio Barreiro
Esc.Ing.Sup.Industrial
University of Vigo, Spain
Email: abarreiro@uvigo.es

Resumen—La telerrobótica a través de Internet permite abordar muchos campos de la ingeniería que de forma aislada resultan mas complejos de transmitir en escenarios de docencia teórica o práctica. Este trabajo presenta la creación de una plataforma de telerrobótica abierta basada en tres componentes fundamentales, un dispositivo háptico Falcon, un robot móvil SRV1 y un sistema de emulación de Internet. La creación de esta plataforma genera en sí misma suficientes experiencias para servir de base a enseñanzas prácticas de programación, robótica e integración de sistemas, y su uso posterior permite abordar nuevas experiencias operativas para su mejora.

I. INTRODUCCIÓN

La teleoperación es una parte de la ingeniería de control, y en particular de los sistemas de control en red, en el que el controlador es un dispositivo maestro operado por un ser humano, y la planta es un dispositivo esclavo que reproduce en la medida de lo posible los movimientos del operador. De esa forma, es posible controlar el movimiento y la fuerza ejercida por un robot esclavo ubicado en una zona remota o entorno hostil del que haya que proteger al operador, a través del manejo del controlador maestro ubicado en el punto de trabajo del operador. El movimiento del esclavo debe reproducir lo mas fielmente posible los movimientos que el operador provoca en el maestro. De esa forma, el operador debe comprender de manera muy intuitiva cómo mover el dispositivo maestro para conducir al dispositivo esclavo por una determinada trayectoria y además realizar las labores o trabajos requeridos.

Los últimos estudios de teleoperación se concentran fundamentalmente en la adaptación de los parámetros de estabilidad y pasividad de las variables de onda a redes con retardos y con pérdida de paquetes. Las mejoras encontradas en los casos en los que se implementen retardos constantes en las redes animaron a su ampliación a las redes con retardos variables. Uno de los fundamentos de estas líneas de investigación está basado en la posibilidad del uso de Internet como medio de comunicación entre los dispositivos que componen un entorno de teleoperación, lo que abre enormes expectativas en su aplicación dado el carácter abierto y universal de Internet. Un esquema habitual para la teleoperación a través de Internet se representa en la figura 1.

La enseñanza de sistemas de teleoperación tiene además de diferentes atractivos, el reto de englobar disciplinas muy dispares del campo de la ingeniería. Debería por tanto aplicarse

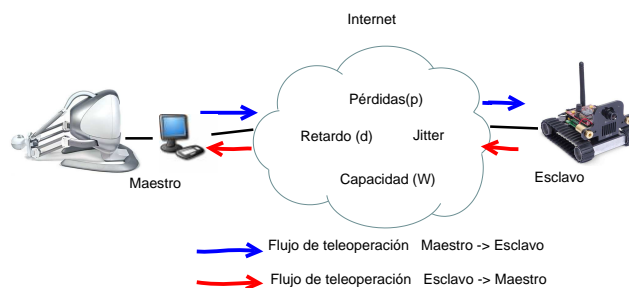


Figura 1. Teleoperación a través de Internet.

de forma relativamente sistemática en los últimos cursos de carreras de ingeniería, en particular en las ramas de automática, robótica, ingeniería de control y comunicaciones, tras los requerimientos de los acuerdos de Bolonia. En el entorno de nuestro laboratorio ya se han realizado experiencias de teleoperación utilizando robots móviles, una grúa o cámaras pan/tilt [1], [2], pero estos han estado hasta ahora mas centrados en la apertura de líneas de investigación que en la creación de plataformas docentes para la misma. Para poder integrar la teleoperación a la docencia, se hace necesaria la localización de dispositivos hápticos y robóticos abiertos y de bajo coste con medias o altas prestaciones; si la teleoperación se realiza a través de Internet, será necesario habilitar algún mecanismo que permita reproducir los retardos y las pérdidas, pero manteniendo ambos extremos de la teleoperación ubicados en el laboratorio para poder ser manipulados por el alumnado.

Este paper presenta la puesta en marcha de un sistema de teleoperación a través de Internet para el ámbito docente, utilizando dispositivos asequibles y de caracter abierto para poder ser utilizados de forma adecuada y ofrecer suficiente integración y adaptabilidad a diversas disciplinas de la ingeniería de control, informática y redes de computadoras.

Técnicamente, la plataforma consiste en la disponibilidad de un esclavo móvil con capacidad abierta de programación de software de comunicaciones sobre plataformas Linux, su ampliación con capturas de sónar y la capacidad de empaquetarlo y enviarlo como retorno a un dispositivo maestro háptico a través de una red local tipo Ethernet. En paralelo, para la reproducción de las características de Internet sobre la red local, se pondrá en marcha un sistema de emulación de

Internet para teleoperación. La plataforma servirá como base para posteriores ampliaciones.

II. PLATAFORMA DE TELEOPERACIÓN A TRAVÉS DE INTERNET

Los diferentes elementos que componen la plataforma son el dispositivo maestro basado en un mando háptico, el dispositivo esclavo basado en un robot móvil y la red Internet, basada en un sistema de emulación sobre la red local.

II-A. Dispositivo maestro

Como maestro se necesita un dispositivo háptico de buenas prestaciones y bajo coste, que tenga posibilidad de comunicación con un sistema controlador y ser conectado a una red de datos.

Existen diversos dispositivos hápticos en el mercado que cumplen dichas especificaciones, incluso algunos de alta gama, como el mando háptico modelo Phantom Omni de SensAble Tech, que consta de seis articulaciones de tipo rotacional, lo que le confiere otros tantos grados de libertad y de dos botones de control. No obstante, sus objetivos y precio se salen del ámbito de la docencia, de forma que se ha optado por un modelo de gama media, el dispositivo háptico Novint Falcon, desarrollado por Novint Technologies Inc., inicialmente para uso doméstico pero con prestaciones mas que suficientes, y que dispone de una librería de desarrollo abierta para el sistema operativo Linux.

El diseño del mando háptico Falcon (figura 2) está basado en el robot delta, diseñado por Reymond Clavel [3], cuya característica principal es el uso de paralelogramos en los brazos del robot para mantener la orientación de un efector final. Posee tres brazos que unen su base con un efector final y que dotan al dispositivo de tres grados de libertad, además de un conjunto de cuatro botones en el manipulador. Los sensores de Falcon pueden manejar posiciones con una resolución milimétrica y las actualizaciones de motor permiten tasas de 1kHz, consiguiendo unas fuerzas máximas de atracción o repulsión aproximadas de 10 Newtons.

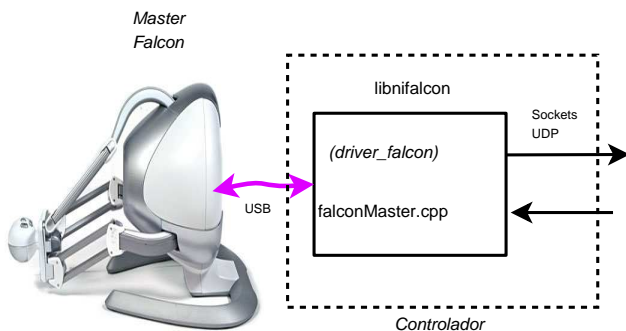


Figura 2. Dispositivo maestro Falcon

La librería utilizada para la integración con los movimientos del esclavo es la librería libnifalcon [4], que permite desarrollar un controlador multiplataforma y de código abierto para manejar el dispositivo háptico Falcon. Para ello, implementa

los algoritmos necesarios para el control del dispositivo, como las comunicaciones, la cinemática o la geometría. El cálculo de la cinemática inversa se realiza con la algoritmia de la tesis redactada por Richard E. Stamper [5], y para el cálculo de la cinemática directa, se sigue un método de resolución iterativo basado en el algoritmo de Newton-Raphson para sistemas lineales.

II-B. Dispositivo esclavo

El dispositivo esclavo debe ser un robot móvil con posibilidad de comunicación a través de redes de datos inalámbricas y capacidad de enviar algún tipo de retorno para utilizarse de forma háptica. El robot seleccionado es un mini-robot móvil SRV-1, que dispone de un sistema de tracción en las cuatro ruedas mediante motores reductores de continua y una cámara a color de 1,3M pixels en su parte frontal. El corazón del sistema de control del robot es un procesador Blackfin BF537 de Analog Devices a 500MHz. El conjunto lleva una placa Matchport 802.11b/g de Lantronix para comunicaciones inalámbricas, que se conecta al procesador a través de dos puertos serie, puenteados con dos puertos TCP/UDP que sirven se puertos de salida y entrada para las comunicaciones inalámbricas. La figura 3 muestra una imagen del robot y un esquema en bloques.

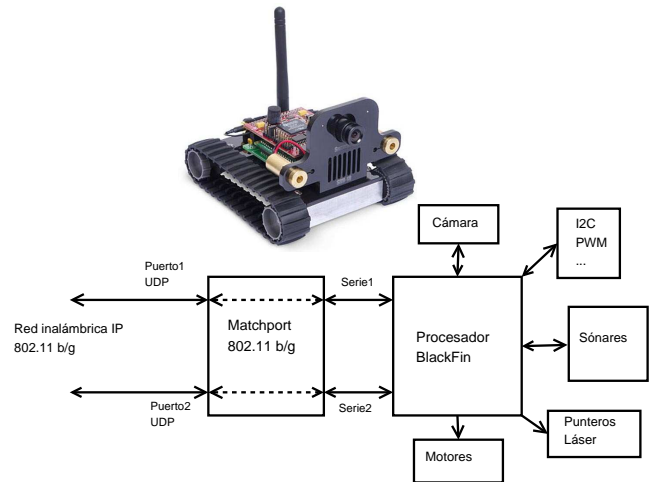


Figura 3. Robot esclavo SRV1

El firmware del robot está escrito en lenguaje C bajo licencia de código abierto GPL, con dos *toolchains* disponibles. Asimismo puede programarse directamente gracias a un intérprete sencillo de C, con funciones específicas para el robot. Este firmware incluye todo el sistema de control de motores, permitiendo cambios de velocidad en cualquiera de los cuatro motores y de sentido de movimiento, e incluye funciones de retorno de datos de sónares, de datos visuales e incluso un cálculo de distancias gracias a una algoritmia de visión artificial utilizando dos punteros láser.

Para implementar datos de retorno, el robot dispone de cuatro entradas adaptadas a medidas de sonar, complementadas con la lógica y los comandos necesarios integrados en

el firmware. Los sonares seleccionados son del tipo MaxSonar-EZ1, de muy bajo consumo. Los EZ1 son capaces de detectar objetos entre 0 y 254 pulgadas (6,45 metros) y proporcionar una información de salida en el rango de 6 a 254 pulgadas con una resolución de 1 pulgada. La distancia medida se ofrece en tres formatos de salida: anchura de pulso, tensión analógica y salida digital en serie. Gracias a estos tres formatos de salida el s3n3nar EZ1 puede conectarse de forma sencilla con cualquier sistema basado en microcontrolador.

Para la conexi3n modular de los s3n3nares, se ha desarrollado una placa de circuito impreso a dos caras, que permite ser insertada mediante un conector macho de 32 pines en la placa base del robot donde se encuentra el procesador.

II-C. La red

Para poder teleoperar un dispositivo a trav3s de Internet es necesario disponer de uno de los elementos maestro/esclavo en una ubicaci3n remota con conexi3n con la otra parte a trav3s de la red Internet. Para ello ser3a necesario disponer de dos equipos de personas, uno en cada ubicaci3n, en permanente comunicaci3n en el proceso de desarrollo de experiencias, y har3a que estas se convirtiesen en complejas y engorrosas. Habitualmente esto se resuelve mediante el uso de modelos de Internet en simuladores.

Al disponer de Internet de forma generalizada en todos los entornos donde se realiza docencia, investigaci3n y experiencias de autom3tica y en particular de telecontrol y teleoperaci3n, se puede plantear utilizar la red como elemento real de las experiencias, en lugar de su simulaci3n mas o menos fiable o mediante algoritmos a tal efecto.

El uso de un sistema de emulaci3n de Internet (IES) permitir3a, aumentar la fiabilidad a la hora de implementar la red Internet en laboratorio para la realizaci3n de pruebas experimentales de teleoperaci3n. Asimismo, el proceso de monitorizaci3n de la red Internet en tiempo real, permitir3a reproducir los datos adquiridos y por tanto reflejarlos sobre el tr3fico local de teleoperaci3n, y permitir3a adem3s utilizar los datos recopilados para la mejora de diferentes procesos intr3nsecos a la teleoperaci3n.

Como par3metros b3sicos de operaci3n a trav3s de Internet para ser reproducidos en simuladores, se utilizan el retardo y las p3rdidas de paquetes. Conocido el retardo en tiempo real se puede calcular a su vez la variaci3n del retardo. El IES consiste b3asicamente en un sistema que env3a paquetes de sondeo tipo ICMP a una ubicaci3n remota, y recoge los retardos y las p3rdidas que se producen sobre cada uno de esos paquetes. Estos retardos o p3rdidas son aplicados a los paquetes de teleoperaci3n que en ese momento le est3n llegando desde el maestro o el esclavo. Para ello, bufferiza cada paquete de teleoperaci3n que le llega, y le asocia el 3ltimo retardo calculado por los paquetes de sondeo, una etiqueta de si el paquete de sondeo se ha perdido y la direcci3n IP de destino. Un hilo de proceso del IES se encarga de comprobar los paquetes del buffer en los que ya ha pasado su tiempo de retardo, en cuyo caso los reenv3a a su destino. Una descripci3n mas detallada del IES se encuentra en [6], y

una visi3n de su funcionalidad comparada con otras soluciones est3 representada en la figura 4.

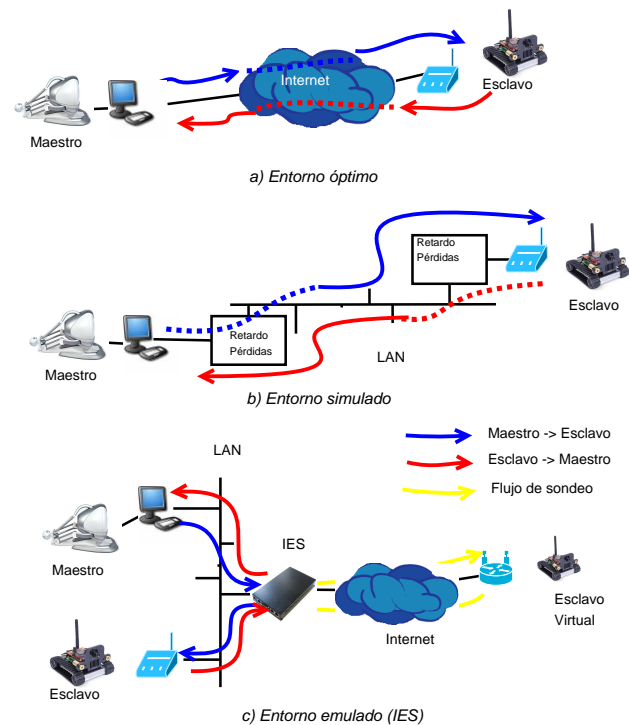


Figura 4. Sistema de emulaci3n de Internet (IES).

III. INTEGRACI3N DEL SISTEMA DE TELEOPERACI3N

La integraci3n de los distintos elementos y conceptos que componen un sistema de teleoperaci3n permiten abordar de forma amena distintos campos de la enseanza de la ingenier3a de sistemas, como la ingenier3a de control y las redes. En entornos docentes, puede ser compleja la implementaci3n de plataformas de teleoperaci3n a trav3s de redes compartidas y a largas distancias. Ello es debido a la necesidad de disponer de un entorno que presente de forma abierta y controlada a los tres elementos fundamentales de la teleoperaci3n: el dispositivo maestro, la red y el dispositivo esclavo.

El controlador del maestro se debe de encargar de procesar los datos de posici3n capturados por el mando h3ptico Falcon, de realizar una conversi3n a par3metros de velocidad y enviar los diferentes comandos operativos al controlador del robot m3vil SRV1 a trav3s de la red de interconexi3n, que incluye el sistema de emulaci3n de Internet (IES). A su vez, el maestro recibe la respuesta del esclavo, con la informaci3n relativa al entorno de actuaci3n del robot, b3asicamente la informaci3n de s3n3nares (distancias a los objetos) y act3a en consecuencia, aplicando fuerzas sobre el mando h3ptico para evitar la colisi3n con los objetos del entorno teleoperado.

Las fuerzas de repulsi3n ejercidas en el mando h3ptico, permiten el control de las velocidades m3ximas de movimiento del robot, limit3ndolas proporcionalmente a las distancias del robot con los objetos del entorno. Son varios los par3metros

a considerar para el cálculo de fuerzas sobre los ejes del dispositivo háptico: distancias mínimas y máximas a los objetos, constante de fuerza, radio de acción y punto origen de la fuerza.

Las distancias mínimas y máximas a los objetos determinan la distancia a la que el mando háptico comienza a ejercer fuerzas de repulsión y la distancia a la que la fuerza de repulsión es máxima. La constante de fuerza indica la dureza de la fuerza, regulando el grado de penetración de las posiciones de los ejes del mando en las coordenadas de la fuerza y determina el efecto muelle que se produce en el campo de la fuerza. Este parámetro debe determinarse antes de la ejecución del programa de control del mando. El radio de acción determina el campo de acción de las fuerzas, siendo mayor cuanto más cercanos son los valores de posición de los ejes del mando en relación con el punto origen. Finalmente, el punto origen de la fuerza son los valores de las coordenadas del mando donde tiene origen la fuerza.

La fuerza se calcula en base a la distancia de los objetos en el entorno teleoperado, es decir, en base a los valores que devuelven los sónares del esclavo. El punto origen de la fuerza es el centro del campo de fuerza, por lo que se debe calcular cada vez que se recibe un valor de distancia de los sónares. Por cada sonar se crea un campo de fuerza que variará su posición en función del posicionamiento del sonar en el robot, el ángulo al que apunta dicho sonar, y la distancia al objeto del entorno (dato recibido de la lectura de sonar). Se realiza un escalado entre las distancias mínimas y máximas a los objetos del robot, y los valores máximos y mínimos de los valores del mando, además de aplicar las fórmulas trigonométricas para el cálculo de la posición. En las ecuaciones (1) se muestran las fórmulas para el cálculo del punto origen del campo de fuerza en el espacio de actuación del mando háptico.

$$\begin{aligned} C_{x_i} &= \frac{D_i \cdot \sin(\alpha_i) \cdot \max(J_x)}{M - N} \\ C_{y_i} &= \frac{D_i \cdot \sin(\alpha_i) \cdot \max(J_y)}{M - N} \\ C_{z_i} &= \frac{D_i \cdot \sin(\alpha_i) \cdot \max(J_z)}{M - N} \end{aligned} \quad (1)$$

Donde $(C_{x_i}, C_{y_i}, C_{z_i})$ son los valores calculados para la posición en los ejes del mando háptico del punto origen de la fuerza, D_i es la distancia retornada de cada sonar i , M y N son las distancias máximas y mínimas permitidas con los objetos del entorno del robot, α_i es el ángulo de apuntamiento de cada sonar i respecto a los ejes de coordenadas del robot, y (J_x, J_y, J_z) son valores de originales del mando.

El robot esclavo manejará e interpretará las peticiones recibidas del maestro, controlando su movimiento y reenviando las de tramas de respuesta en forma de distancia a los objetos devuelta por los sónares. El diseño de la placa donde se integran los sónares, situa un sónar a cada uno de los cuatro lados del robot. Ello indica que en un movimiento lineal, con

un posicionamiento adecuado de los ejes de referencia, sólo se tendrá en cuenta un eje del mando, al ser el ángulo de posición α_i para los sónares laterales de valor 0 o π , y en el sónar trasero su velocidad negativa respecto al sentido de movimiento.

Los paquetes de datos tanto del maestro como del esclavo son enviados hacia el sistema de emulación de Internet (IES) que los bufferiza y reenvía a su destino dependiendo del estado de la red Internet hacia una ubicación remota predeterminada.

El sistema completo puede verse en la figura 5.

IV. CONCEPTOS TEÓRICOS

Además de los conceptos prácticos de la conversión de sistemas de referencia, creación de matrices jacobianas, robótica, programación de sockets y redes en general, el trabajo con la plataforma de teleoperación permite la introducción de conceptos teóricos de la ingeniería de control, como lo son la estabilidad, la pasividad y la transparencia.

La *estabilidad* es una condición indispensable para cualquier sistema de control, y permite que en entornos teleoperados, el sistema esclavo no pierda el control respecto a los comandos del maestro. Las interferencias y las perturbaciones, además de los retrasos en las comunicaciones son los orígenes mas habituales de la pérdida de estabilidad de un sistema de control. Un diseño correcto de los controladores permite asegurar la estabilidad de un sistema en un entorno acotado, pero el estudio de la estabilidad en entornos variables sigue abierto. Existen estudios de estabilidad en sistemas de control en red utilizando redes con retardos y pérdidas variables [7], y actualmente se trabaja con transformaciones que permiten asegurar la pasividad (y por tanto la estabilidad) de los sistemas teleoperados [8], transmitiendo en lugar de la fuerza y la velocidad, unas variables de onda.

La *pasividad* es un concepto relacionado con la cantidad de energía que se consume en el sistema de teleoperación. Existe una propiedad que relaciona la pasividad con la estabilidad, que se resume en que un sistema pasivo es a su vez un sistema estable. Se dice que un sistema de teleoperación es pasivo cuando la cantidad de energía que recibe un extremo es igual o inferior a la cantidad de energía que envía el origen.

La *transparencia* es una relación entre las percepciones del operador y las acciones del sistema esclavo remoto, y por tanto es un concepto específico del mundo de la teleoperación. Para disponer de suficiente precisión en las acciones del esclavo, el control de la posición del mismo no es suficiente, y se hace necesario un retorno de variables que el controlador del maestro convierta en sensaciones para el operador. Esto es un sistema de teleoperación con reflexión de fuerza. Una transparencia cero indica que el operador no recibe ningún retorno sensorial del robot, y una transparencia infinita indica que el operador recibe las mismas sensaciones que si estuviese realizando las mismas acciones y en el mismo entorno que el esclavo.

V. EXPERIENCIAS

La plataforma permite realizar experiencias en el desarrollo de software, en la integración hardware, en configuración de

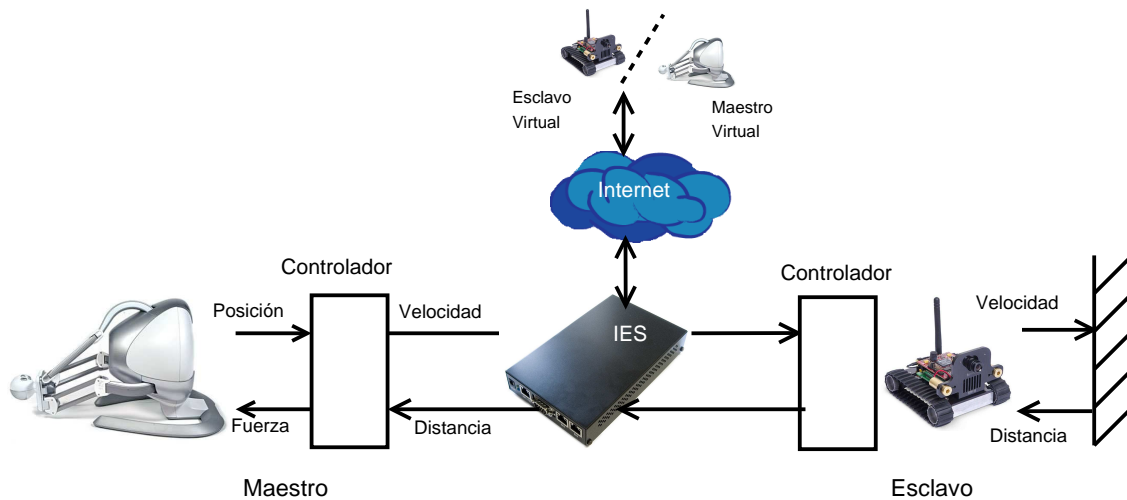


Figura 5. Plataforma de teleoperación de robot móvil.

redes de ordenadores y en la programación de dispositivos hápticos, además de la adquisición de conceptos teóricos, como la estabilidad, pasividad y la transparencia.

V-A. Desarrollo de software

Para poner en funcionamiento del sistema de teleoperación ha sido necesario el desarrollo de software utilizando varios conceptos, como sockets de comunicaciones tipo DATA-GRAM y STREAM, estructuración de datos, hilos e interrupciones con la función SELECT. El desarrollo se ha producido íntegramente en lenguaje C/C++, al ser este mas cercano al hardware y disponer de entornos de compilación para la arquitectura del procesador del mando háptico y del robot.

Los programas han sido creados en un computador independiente del robot, y ejecutados en el equipo al que está conectado el mando háptico Falcon. En esta puesta en funcionamiento del sistema, se han aprovechado los comandos de operación que provee el firmware del robot y su protocolo de aplicación, basado en un sencillo modelo de comando/respuesta, y que se resumen en la tabla I para las necesidades concretas de este proyecto. Todos los comandos desde el mando al robot SRV1 se componen de caracteres ASCII seguidos de caracteres binarios de 8-bits o caracteres ASCII decimales. Todos los comandos envían una confirmación del robot al host, que es, o bien un carácter '#' seguido del comando, o '# #' para las respuestas de longitud variable.

El programa de control de las comunicaciones en el maestro tiene su corazón en la función *select*, que permite ejecutar las funciones asociadas a un evento determinado, en particular, a la expiración de un temporizador, a la llegada de un paquete de datos del robot y la variación de la posición de los ejes del mando háptico. El diagrama de bloques queda representado en la figura 6

Para proyectos futuros, el SRV1 integra un compilador de microC, sobre el que pueden desarrollarse nuevas funcionalidades en el "lazo de control local" del mismo.

Cuadro I
PROTOCOLO COMUNICACIÓN SRV1

Comando	Respuesta	Descripción
Mabc	#M	Control directo del motor a: velocidad dcha b: velocidad izq c: tiempo
p	##ping X Y Z K	Consulta de sónares X: valor en pulgadas pin 27 Y: valor en pulgadas pin 28 Z: valor en pulgadas pin 29 K: valor en pulgadas pin 30

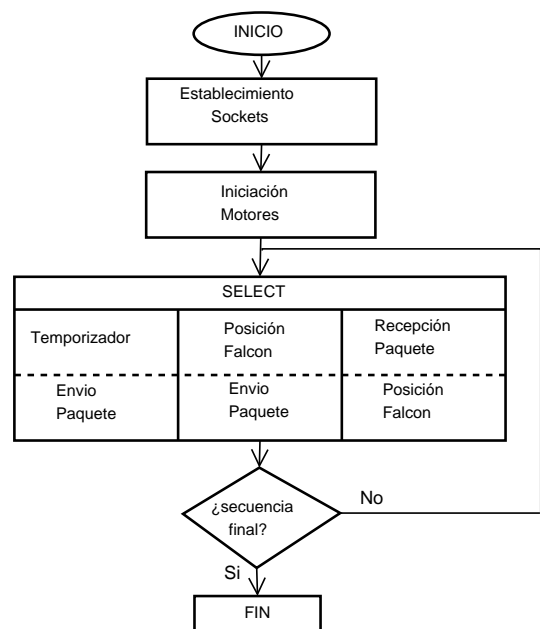


Figura 6. Diagrama de control de las comunicaciones en el maestro.

V-B. Integración de nuevos componentes

El robot móvil SRV1 dispone en su firmware la posibilidad de realizar lecturas de s3nar sobre los pins 27-30 de la placa de control. Ello ha permitido dise3nar una placa de circuito impreso de dimensiones adecuadas al robot donde se integran cuatro s3nares. El dise3no y realizaci3n de esta placa permite acercarse al alumnado a las t3cnicas b3sicas de realizaci3n de circuitos impresos. En el caso de esta plataforma, los s3nares han sido ubicados uno a cada lado del robot, pero las experiencias de medidas indican que pueden realizarse diferentes otros dise3nos mas adecuados a entornos concretos.

El dise3no del robot permite adem3s incluir dispositivos sensores utilizando el bus I2C o dos servos, adem3s de motores continuos para ser controlados por las dos salidas PWM de que dispone.

V-C. Sistemas de control en red

La integraci3n del sistema de emulaci3n de Internet en la plataforma de teleoperaci3n ha permitido estudiar los par3metros fundamentales de Internet en los sistemas de teleoperaci3n, como son los retardos y las p3rdidas de paquetes. Asimismo ha permitido mostrar la idoneidad de la transmisi3n de datos a trav3s de protocolos de transporte no orientados a conexi3n, para evitar retransmisiones y reordenaciones de datos en los extremos, que aumentar3an de forma notable los retardos en las comunicaciones.

VI. CONCLUSIONES Y L3NEAS FUTURAS

La ense3anza de la teleoperaci3n o telerrob3tica a trav3s de Internet permite ofrecer al alumnado de posibilidades de aprendizaje integrado de numerosos problemas comunes en la ingenier3a de sistemas y autom3tica, electr3nica, redes e ingenier3a de control. El desarrollo de una plataforma de telerrob3tica utilizando robots m3viles peque3os pero de altas prestaciones y mandos h3pticos inicialmente destinados al uso dom3stico pero reconvertidos para uso docente, es en s3 misma una experiencia suficientemente completa para ser ofrecida como complemento a las ense3anzas te3ricas y pr3cticas de las carreras de ingenier3a.

El mando h3ptico Falcon y el robot m3vil SRV1 son elementos adecuados para implementar de forma flexible y gradual conceptos de telerrob3tica, y el sistema IES de emulaci3n de Internet es un complemento adecuado, que tambi3n puede desarrollarse

El alumnado adquirir3a competencias en programaci3n, en dise3no de circuitos integrados, en redes y en rob3tica, as3 como en integraci3n de sistemas. En paralelo adquirir3a competencias transversales de trabajo en equipo y de presentaci3n de trabajos.

Existen varias l3neas futuras que pueden abordarse tomando como punto de partida la plataforma creada, a destacar:

- La programaci3n de un nuevo controlador para el robot, permitiendo una mejor integraci3n de los comandos entrantes de velocidad con la respuesta de los s3nares hacia el mando Falcon.

- El trabajo sobre el retorno de v3deo, que no ha sido abordado en este paper.
- La integraci3n de nuevos componentes en el SRV1, como un m3dulo de odometr3a y unos servos que permitan convertir la c3mara en PanTilt.
- El trabajo sobre rob3tica colaborativa, al permitir el precio de adquisici3n disponer de varios mandos h3pticos Falcon y varios robots SRV1.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido parcialmente subvencionado por el Ministerio Espa3ol de Ciencia y Tecnolog3a en el proyecto DPI2010-20466-C02-01.

REFERENCIAS

- [1] D. Bustelo, R. Ramos, E. Delgado, M. Diaz-Cacho, and A. Barreiro, "Sistema de teleoperaci3n cooperativa con retorno sensorial de fuerza," in *VI Jornadas CEA EIWISA: Ense3anza a trav3s de Internet-Web de la Ingenier3a de Sistemas y Autom3tica*. CEA, Junio 2010, pp. 32–38.
- [2] M. Diaz-Cacho, A. Fernandez, and A. Barreiro, "Sistema de teleoperaci3n colaborativa grua-camara con retorno de estado," in *XXIX Jornadas de Autom3tica*, 2008, p. 271.pdf, <http://www.cea-ifac.es/actividades/jornadas/XXIX/pdf/271.pdf>.
- [3] R. Clavel and C. W. Burckhardt, "Conception d'un robot parall3le rapide à 4 degr3s de libert3," Ph.D. dissertation, Lausanne, 1991. [Online]. Available: <http://library.epfl.ch/theses/?nr=925>
- [4] K. Machulis, "libnifalcon - open source driver for the novint falcon," Website, 2010, <http://qdot.github.com/libnifalcon/index.html>.
- [5] R. Stamper and M. D. o. M. E. University of Maryland (College Park, A three degree of freedom parallel manipulator with only translational degrees of freedom. University of Maryland, College Park, Md., 1997. [Online]. Available: <http://books.google.es/books?id=k3s1GwAACAAJ>
- [6] M. Diaz-Cacho, A. Fernandez, M. Garcia, and A. Barreiro, "Internet emulation system for udp-based teleoperation," *Control and Automation, 2008 16th Mediterranean Conference on*, pp. 1417–1422, June 2008.
- [7] M. Garcia-Rivera and A. Barreiro, "Analysis of networked control systems with drops and variable delays," *Automatica*, vol. 43, no. 12, pp. 2054–2059, 2007.
- [8] G. Niemeyer and J.-J. Slotline, "Stable adaptive teleoperation," *Oceanic Engineering, IEEE Journal of*, vol. 16, no. 1, pp. 152–162, Jan 1991.