

COMUNICACIONES APLICADAS A LA TELEOPERACIÓN

Pablo García-Robledo
pgrobledo@etsii.upm.es

Patricia García-Borrás
patriciagb@etsii.upm.es

Rafael Aracil
aracil@etsii.upm.es

Manuel Ferre
m.ferre@upm.es

Resumen

Presentación de la plataforma experimental de teleoperación basada en el sistema Grips de Kraft Telerobotics y presentación del hardware desarrollado para su adaptación a una plataforma abierta. Exposición de las diferentes formas de conexión obtenidas a través del hardware desarrollado para cerrar un bucle de control en un sistema bilateral de teleoperación.

Estudio de diferentes protocolos de comunicación muy extendidos como USB y Ethernet, explicando sus fundamentos principales y el funcionamiento básico, y su aplicación en la robótica, en particular en sistemas Bilaterales de Teleoperación con exigencias de tiempo real. Presentación de resultados obtenidos y comparación entre protocolos en diversas situaciones planteadas.

Palabras Clave: Teleoperación, comunicaciones, USB, Ethernet.

1 INTRODUCCIÓN

En la actualidad la robótica ha reemplazado a la mano de obra humana en muchos trabajos tediosos y repetitivos que requieren gran precisión. No obstante, esto hace desaparecer del bucle de control al intelecto humano que hasta ahora hemos sido incapaces de replicar o sustituir.

Es por tanto natural que la robótica evolucione a incorporar la capacidad de decisión ante situaciones imprevistas que tiene el ser humano con la capacidad productiva que puede tener un robot. Para este fin está la telerrobótica, que pretende permitir que la mano humana interactúe con un sistema robótico para que sea su experiencia la que guíe al sistema en

sus tareas, pero que a la vez, el sistema robot pueda enviar información a la persona para ayudarla a tomar la decisión adecuada.

La telerrobótica surge para sustituir al humano en situaciones de riesgo como son trabajos en alta tensión, trabajos submarinos o reactores nucleares en los que hay que realizar labores de mantenimiento. Actualmente la telerrobótica ha evolucionado, encontramos proyectos en los que se pretende relacionar a una persona con un entorno virtual y que este le refleje información como si de un entorno real se tratara.

En este entorno en expansión de los sistemas teleoperados se hace por tanto necesario conocer de que sistemas de comunicaciones se disponen para enviar información entre el dispositivo que maneja la persona y el actuador que realiza la tarea, tanto en situaciones de proximidad, donde es posible realizar una conexión directa, como en situaciones a gran distancia en las que debemos apoyarnos en redes preexistentes para hacer llegar la información de un punto a otro.

2 DISEÑO DE LA PLATAFORMA EXPERIMENTAL

El objetivo planteado es la realización de una estación de teleoperación abierta que ofreciera la posibilidad de realizar distintos desarrollos e investigaciones en distintas áreas de la teleoperación o asociadas a ella. A su vez es necesario hacer uso de los distintos dispositivos existentes en el laboratorio.

Debe ser totalmente abierta, que presente una arquitectura bastante modular de manera que sus distintos componentes puedan ser reconfigurados para ser usados de distintas maneras y a su vez puedan llevarse a cabo distintos tipos de tareas. Debe

tener una alta capacidad de cómputo de tal manera que se puedan implementar distintos tipos de control. Debe hacer uso de los dispositivos disponibles en el laboratorio.

2.1 DISPOSITIVOS

2.1.1 Sistema Maestro-Esclavo

El dispositivo maestro y el manipulador esclavo a utilizar es el sistema GRIPS de Kraft Telerobotics Inc. El mismo es un sistema de teleoperación con reflexión de fuerzas, pero al ser un sistema comercial es totalmente cerrado, la arquitectura del sistema GRIPS puede observarse en la Figura 1.

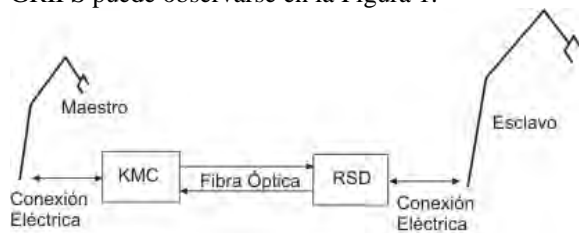


Figura 1: Arquitectura Sistema Grips de Kraft Telerobotics

2.1.2 Esclavo

El manipulador Esclavo (Figura 2), es un robot hidráulico de 6 grados de libertad. El mismo cuenta con 7 potenciómetros, uno en cada grado de libertad más uno en la pinza, que son con los que se obtienen las medidas de posición. Además cuenta con sensores de presión en cada uno de los cilindros de cada grado de libertad, de tal manera que la diferencia de presión en los cilindros es tomada como la medida de fuerza ejercida por cada grado de libertad individual. El dispositivo cuenta adicionalmente con la capacidad de mantener un giro continuo de la muñeca.



Figura 2: Manipulador Hidráulico de Kraft Telerobotics Inc con sus grados de libertad.

En la Figura 2, se puede observar cada uno de los grados de libertad con los cuales cuenta el manipulador esclavo, la nomenclatura usada para su identificación es la siguiente: SA- Shoulder Azimut, SE – Shoulder Elevation, EL – Elbow Elevation, WY – Wrist Yaw, WP – Wrist Pitch, WR – Wrist Rotation.

2.1.3 Maestro

El dispositivo maestro (Figura 3) es un dispositivo antropomórfico cuyo diseño mecánico está hecho para acoplarse al brazo humano. Al igual que en el caso del esclavo el dispositivo maestro cuenta con potenciómetros para medir las posiciones, solo que en este caso cuenta con 8 en total, 6 para cada grado de libertad, uno para el cierre de la pinza y uno adicional para una opción de giro continuo de la muñeca. Sumado a esto, cuenta con leds para efectuar indicaciones del estado del sistema y botones para su interacción.



Figura 3: Maestro con reflexión de fuerzas de Kraft Telerobotics Inc.

Como se mencionó anteriormente, el sistema cuenta con reflexión de fuerza, la misma se logra en el maestro mediante 5 motores AC bifásicos en las cinco primeras articulaciones, es decir que el último grado de libertad, la rotación de la muñeca no cuenta con ningún tipo de realimentación de fuerzas. De igual manera, la nomenclatura usada para identificar cada uno de los grados de libertad (Figura 3) del maestro es la siguiente: SA- Shoulder Azimut, SE – Shoulder Elevation, EL – Elbow Elevation, WY – Wrist Yaw, WP – Wrist Pitch, WR – Wrist Rotation. Es importante mencionar que existe una diferencia entre la cinemática del maestro y la del esclavo, y la misma consiste en que dos grados de libertad (WY y WP) se encuentran mecánicamente cambiados en ambos dispositivos, lo cual puede identificarse observando las figuras 2 y 3.

2.1.4 Tarjeta de Control Básica

Uno de los requisitos establecidos para la arquitectura es que fuera totalmente abierta, con lo cual, para poder cumplir con el mismo fue necesario diseñar la electrónica de control que gobernará ambos sistemas. Para ello se establecieron otros requisitos:

- Debe tener suficiente potencia de cálculo.
- Tener varias opciones de comunicación.
- Fácil programación y depuración.

Para cumplir con estos requisitos se decidió realizar una tarjeta de control que fuera común para ambos dispositivos, y que la misma trabajara con una tarjeta con la electrónica de potencia particular de cada uno.

La Tarjeta de Control está basada en un DSP TMS320F2812 de Texas Instruments que cuenta con una capacidad de cálculo de 150 MIPS a 150 MHz y proporciona conexiones a través de puertos SPI, CAN y RS-232.

Así mismo, la tarjeta controladora se ha dotado de 16 entradas de conversión analógica digital y 8 salidas de conversión digital-analógica necesarias para el control de los dispositivos.



Figura 4: Tarjeta de Control Básica

Esta tarjeta de control cuenta con puertos de comunicación RS-232, SPI, BUS Can y, externo al DPS, USB 1.1 mediante un driver ISP1181A de NXP. Esto permite varias combinaciones para realizar el intercambio de datos necesario en un control bilateral transmitiendo posiciones, velocidades, fuerzas, aceleraciones, y cualquier información que sea necesaria.

2.1.4 Tarjeta de Control Extendida

Para incrementar las posibilidades de comunicación de las tarjetas de control y actualizar las mismas a los

sistemas de comunicación actuales se desarrollaron nuevas Tarjetas de Control basadas en los modelos anteriores y que mantienen el mismo núcleo de Texas Instruments y las mismas conexiones analógico-digital y digital-analógico.

El nuevo modelo de tarjeta añade a las conexiones anteriores la posibilidad de usar Ethernet de 10/100 Mbps a través de una placa comercial eZdsk.91C111 de D.SignT conectada a un puerto de expansión añadido a la placa de control que permite el acceso a los puertos de datos y direcciones del DSP.

Además, se ha actualizado el puerto USB a la versión 2.0 que permite tasas de transferencia de hasta 480MB/s frente a los 12MB/s permitidos por la anterior conexión 1.1, aunque esto dependerá siempre de que el dispositivo hub al que esté conectado también soporte esta velocidad de transmisión.

3 ARQUITECTURA DEL PUESTO DE TELEOPERACIÓN

Dadas las amplias capacidades de comunicación de la tarjeta controladora diseñada, es posible implementar una arquitectura bastante abierta.

3.1 SPI

En lo referente a control, la arquitectura de la plataforma experimental puede ser observada en la Figura 4.

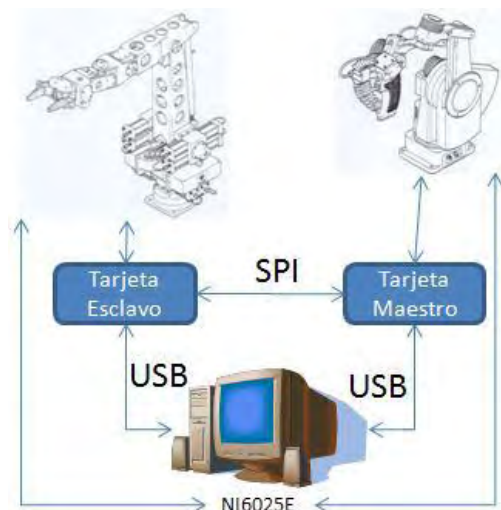


Figura 4: Arquitectura basada en SPI.

La comunicación entre ambas tarjetas se realiza mediante el protocolo SPI. El mismo se encuentra configurado a 800Kbps lo cual permite el intercambio de datos necesario en un control bilateral a una tasa de transferencia suficiente para las

arquitecturas de control más sencillas que podemos implementar.

Existe otra vía de comunicación y es la de las tarjetas controladoras con el Ordenador, el cual se encuentra implementado mediante el bus USB. Este canal es independiente para cada tarjeta, por lo que no están sincronizadas entre sí. El mismo sirve para guardar datos relacionados con el funcionamiento interno de los controladores, o en caso de ser necesario el estado del dispositivo al que controla.

Existe otra posibilidad de adquisición de datos y es una tarjeta National Instruments NI 6025-E instalada en el ordenador, la misma se encuentra configurada para una velocidad de adquisición de 2 kHz por canal. Esto ofrece una capacidad de análisis muy potente, debido a que se cuenta con 16 canales de entrada analógica, con lo que es posible realizar la lectura de las posiciones tanto del maestro como del esclavo de manera simultánea. Gracias a esta opción podemos analizar de forma totalmente ajena al sistema de control la situación del sistema.

3.2 USB

Otra opción para realizar la conexión de ambas tarjetas entre si es mediante la conexión USB conectando ambas placas a un mismo ordenador y sincronizando las placas en este último como podemos ver en la Figura 5.

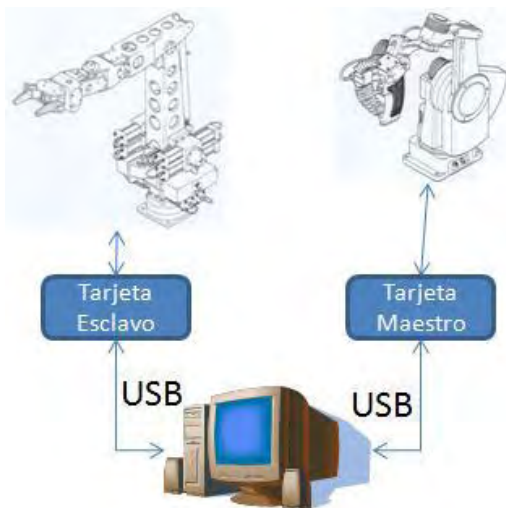


Figura 5: Arquitectura basada en USB.

Idealmente la conexión debería ser entre las dos tarjetas directamente sin necesidad de un intermediario, pero esto no es posible con el protocolo USB 1.1 ni con USB 2.0; solo está disponible en dispositivos USB On-The-Go pero supone una gran carga de cálculo para el DSP, que es el encargado de realizar a bajo nivel todos los pasos de conexión y envío de tramas, y podría comprometer al algoritmo de control.

3.3 ETHERNET

Por último, tenemos la posibilidad de conectar ambas tarjetas de control mediante el puerto Ethernet 10/100 y transmitir la información necesaria para el control basándonos en el protocolo Ethernet 802.3 mediante direccionamiento por MAC Address.

Esta conexión también permite llevarla a protocolos basados en TCP/IP lo cual puede emplearse para separar físicamente el dispositivo maestro del esclavo y poder ejercer la manipulación necesitando exclusivamente una conexión a Internet. Esto requeriría nuevos algoritmos de control por las más que seguras ralentizaciones en la comunicación.

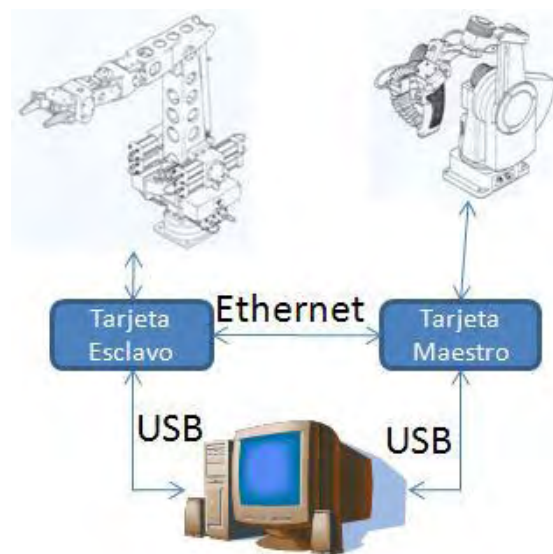


Figura 6: Arquitectura basada en Ethernet.

4 COMUNICACIONES ENTRE TARJETAS CONTROLADORAS

Como hemos visto, las tarjetas se pueden comunicar a través de diferentes protocolos, no obstante, todos tienen algo en común: la información que se debe transmitir entre las placas.

Para enviar los datos se ha confeccionado la trama mostrada en la Figura 7.

1 Byte	17 Bytes	2 Bytes
SOF	Data	Checksum

Figura 7: Trama de datos

La trama está constituida por:

- SOF: "Start of frame" Indica el comienzo de la trama.
- Data: Datos necesarios para el control: posición, fuerza, estado de botones y leds.
- Checksum: Para detección de posibles tramas erróneas en la recepción.

Es fundamental incluir en esta trama los datos de “checksum” para detectar posibles errores ya que en algún caso se pueden emplear protocolos que no comprueben si el paquete recibido es correcto y si utilizáramos en el control datos erróneos podríamos desestabilizar el sistema fácilmente.

4.1 USB

El protocolo USB emplea una tipología de red en estrella basada en un dispositivo root hub que organiza y administra las conexiones de periféricos y un método de acceso al medio en el que solo un dispositivo puede acceder al medio físico.

El protocolo especifica únicamente dos canales de transmisión de información: IN, hacia el hub y OUT, del hub a los dispositivos. Estos canales se comparten entre los dispositivos y será cuando reconozcan que el paquete se dirige hacia ellos cuando procesarán toda la información contenida en la trama.

La comunicación entre Hub y dispositivo se realiza en dos etapas: Enumeration y Application Communications.

4.1.1 Enumeration

La fase de “Enumeration” se realiza al conectar un dispositivo al Hub. El Hub solicita al dispositivo información sobre su configuración y le asigna una dirección para poder dirigirle los paquetes. En este proceso el hub también reconoce los endpoints configurados en el dispositivo que indican la dirección del flujo de información y el tipo de transferencia usada, así como el tamaño máximo de trama a enviar o recibir.

4.1.1 Application Communications

Una vez reconocido el dispositivo conectado al hub en la fase de Enumeration se procede a transmitir la información relevante.

Para la transmisión se pueden utilizar cuatro tipos de transferencia:

- Control: Para la “Enumeration”.
- Bulk: Transferencia sin tiempo crítico.
- Interrupt: Enviar poca información sin retrasos.
- Isochronous: Enviar a tasa constante de datos.

Por las características propias de un sistema teleoperado, se escoge como método de transmisión el Isochronous que es el único que garantiza un tiempo máximo entre paquetes, pero hay que tener en cuenta que este método no incluye detección de errores y además se desconoce si hay pérdida de

tramas. En caso de querer gestionar errores, esto deberá hacerse dentro de la trama enviada por USB.

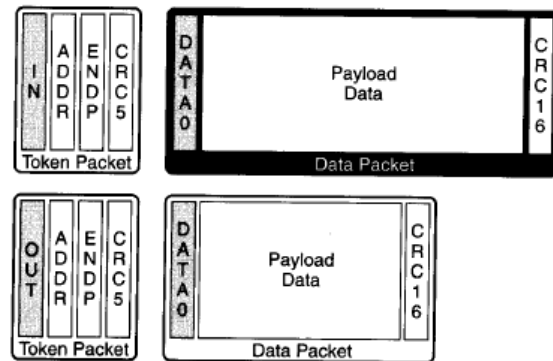


Figura 8: Trama USB Isochronous

Mediante experimentos con la tarjeta de control básica con USB 1.1 se han obtenido resultados que demuestran que escoger este tipo de transmisiones no resulta efectivo en sistemas con grandes exigencias de tiempo y datos.

La tasa de envío, aunque constante, no es suficiente para mantener las exigencias necesarias y además decrece con el tamaño de los paquetes como se muestra en la Figura 9.

Así mismo, se han realizado los experimentos utilizando dos modelos de comunicación USB facilitados por las APIs de Windows denominados: modo normal y modo stream. En la Figura 9 se observa que el modo Stream mantiene constante el envío con indiferencia del tamaño del paquete pero a una velocidad muy inferior a la obtenida con el modo normal de envío.

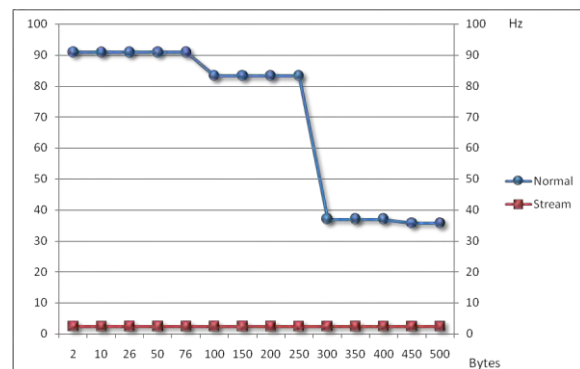


Figura 9: Variación velocidad de transmisión USB Isochrónica con el tamaño de los paquetes.

Los resultados indican que en el mejor de los casos se tardarían 11ms en cerrar un bucle de control completo. Esto consiste en que cada tarjeta de control reciba una trama completa. Como vimos, la trama enviada es de 20 bytes y se estaría trabajando en la zona más favorable con las tasas de transferencia más altas.

Actualmente gracias a la tarjeta de control extendida se dispone de USB 2.0 que esperamos muestre mejores resultados que la versión anterior, aunque la investigación se centra más en obtener resultados con el otro gran protocolo de comunicaciones que es Ethernet.

4.2 ETHERNET

El protocolo Ethernet está pensado para la conexión de ordenadores y periféricos en una red de ámbito local y está recogido en el Estándar IEEE 802.3.

Una de las principales ventajas de Ethernet es que es una conexión full-duplex, esto es, que permite que dos máquinas que intercambian información lo hagan al mismo tiempo ya que cada una tiene dos caminos diferentes para enviar y recibir datos. Esto hace que en el caso de la teleoperación, maestro y esclavo pueden realizar de forma independiente el proceso de enviar datos y recibir datos, lo que hará que los requisitos de tiempo se cumplan de forma más sencilla.

El estándar 802.3 indica cómo se realiza el acceso al medio y proporciona la información de cómo realizar la conexión entre dos máquinas mediante el uso de "Medium Access Control (MAC)" sin más que conocer la dirección MAC de la máquina de destino.

El utilizar Ethernet para transmitir los datos obliga en nuestro caso a que el DSP tenga que formar la trama mostrada en la Figura 10 que como vemos está formada por:

- Preámbulo: Para indicar el comienzo.
- Dirección de Destino: MAC de destino
- Dirección de Origen: MAC de origen.
- Type: Indica tipo o longitud de la trama.
- Información: Datos que queremos enviar.
- Checksum: Para comprobación.

Preamble	Dest Addr	Source Addr	Type	Info	FCS
8 bytes	6 bytes	6 bytes	2 bytes	46<=N<=1500 bytes	4 bytes

Figura 10: Trama Ethernet

Empleando Ethernet simplemente para enviar los mensajes no se tienen garantías de que la información llegue al destino ni de si esta es correcta. Si se quisiera tener conocimiento de si los paquetes llegan al destinatario habría que recurrir a protocolos montados sobre Ethernet como pueden ser TCP/IP que garantice que cada paquete llega al destino o bien añadir información a la trama de datos que permita realizar este control.

En Teleoperación, no es tan importante el que lleguen todos los paquetes como comprobar que los paquetes que llegan sean correctos. Si la

comunicación es buena y la tasa de transferencia es alta, se están enviando paquetes más que suficientes para cerrar el bucle de control en un tiempo suficiente para cumplir las exigencias de tiempo real. En esta situación, si se pierde un paquete, no influiría en la estabilidad del sistema, siempre que se prevea la situación y se tomen ciertas medidas de seguridad en el controlador.

El peor de los casos posibles es que se pierdan varios paquetes consecutivos haciendo que cualquiera de los dos dispositivos esté tomando como posición actual la última posición conocida del otro dispositivo. Esta posición contendrá un error muy grande respecto a la verdadera posición actual por lo que al llegar un nuevo paquete con información real de la posición actual impondría un error de posición muy grande en el sistema que podría sacarlo de la estabilidad.

4.2.1 UDP

Junto con las pruebas realizadas con USB se realizaron pruebas para ver como influiría el cerrar el bucle de control cuando las tarjetas de control están conectadas a diferentes PCs y queremos que la información viaje de uno a otro a través de la red Internet.

Para esto, se basó el envío de información en el protocolo UDP/IP sobre Ethernet. El uso de estos protocolos permite que la información pueda ser enviada a través de Internet entre puntos separados aprovechando el Internet Protocol (IP) necesario para el rutado de un punto a otro.

User Datagram Protocol es un protocolo sobre IP que permite el multiplexado de varias conexiones entre dos máquinas mediante el uso de puertos de origen y destino junto con las direcciones IP, pero no asegura la conexión entre ambas ni que la transmisión sea correcta.

Los resultados obtenidos fueron que el usar Internet para conectar ambas tarjetas de control no suponía ninguna merma en la velocidad de transferencia obtenida con ambas placas conectadas a un mismo PC. Sin duda, esto se debe al gran cuello de botella que supone el USB para la conexión. Durante las experiencias se observó como a través de Ethernet se conseguía enviar hasta 5 veces el último dato conocido antes de que el USB consiguiera hacerlo llegar a la tarjeta de destino.

Estos datos hacen que actualmente se esté desarrollando la conexión directa entre las dos tarjetas de control basándose en Ethernet sin necesidad de recurrir a protocolos de capas superiores, a la espera de obtener resultados.

5 CONCLUSIONES

Las comunicaciones más comunes hoy día no están pensadas para usarlas en una red de control, caracterizada generalmente por la necesidad de transmitir en intervalos de tiempo pequeños pocas cantidades de información.

Los protocolos comentados en este artículo se han desarrollado buscando siempre el transmitir grandes volúmenes de información de forma que en caso de retraso todavía haya información para procesar y se enmascare el problema.

No obstante, estos protocolos pueden resultar muy útiles en la robótica por muchas razones. Pese a que vemos que USB 1.1 no es recomendable su uso bajo ninguna circunstancia para control, es más que suficiente para obtener información para emplear en otras aplicaciones como representaciones virtuales.

Si fuera necesario cerrar el bucle usando una conexión USB con un ordenador habría que realizar pruebas con sistemas operativos de tiempo real y en cualquier caso, utilizar la versión 2.0 que permite comunicaciones con menores intervalos de tiempo.

En el caso de Ethernet, este problema se ve parcialmente subsanado pero es necesario desarrollar algoritmos de control que permitan reducir los efectos potencialmente peligrosos de que haya pérdida de datos y ralentizaciones, algo que es casi seguro en el caso de basar la comunicación en la red Internet.

Agradecimientos

Los autores de este artículo quieren agradecer a la Universidad Politécnica de Madrid y en concreto al Departamento de Automática de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales la oportunidad brindada para realizar estos estudios y proyectos así como la confianza depositada en nuestra labor de investigación.

Referencias

- [1] Axelson, Jan, (2005) USB Complete Third Edition, Lakeview Research LLC Madison.
- [2] Ferre, M., Buss, M., Aracil, R. (2007) Advances in Telerobotics. STAR series Spinger.
- [3] Goldberg, K., Siegwart, R., (2002) Beyond Webcams. An introduction to online robots, The MIT Press, Cambridge.
- [4] The Institute of Electrical and Electronic Engineers, Inc. (2005) IEEE Standard 802.3

- [5] Universal Serial Bus Specification, Revision 2.0 (2000)