

# Control de robot manipulador por telemando en cirugía remota \*

Mario Augusto Góngora Florián \*\*

Germán Rengifo \*\*\*

---

**Resumen:** Este artículo trata acerca de las investigaciones en robótica aplicada a la telemedicina que se vienen llevando a cabo por parte del Departamento de Ingeniería Electrónica y el Departamento de Cirugía de la Pontificia Universidad Javeriana. Se muestra el proceso investigativo seguido en la realización de cirugías laparoscópicas utilizando un robot manipulador. Se discuten finalmente los resultados y la posible aplicación del telemando en otros campos.

**Abstract:** The present article deals with research in robotics applied to telemedicine carried out by the Department of Electronic Engineering and the Surgery Department of the Pontificia Universidad Javeriana. The research process applied in laparoscopic surgeries using a manipulator robot is described. Finally, the results and possible implementation of telecommand in other fields are discussed.

---

## 1. Introducción. Robótica, telemando y telemedicina

Por definición, un robot no está diseñado para alguna aplicación específica, un robot se define como un manipulador multifuncional programable, lo cual lo diferencia inequívocamente de una máquina automática. La multifuncionalidad entonces implica una versatilidad basada en el diseño que pretende imitar toscamente la mecánica humana. Esto permite aplicar en cierto grado la robótica en casi cualquier tarea manual (física) que realice el ser humano.

Las principales dificultades en aplicar la robótica en una tarea nueva radican en la utilización de los sensores adecuados, la adaptación de las herramientas del robot y la programación de éste. Es ahí donde se centra el trabajo de investigación, diseño e implementación en un proyecto novedoso en robótica.

---

\* Este proyecto fue galardonado con el premio ALCATEL a la innovación tecnológica en América Latina, 1998.

\*\* Ingeniero electrónico de la Pontificia Universidad Javeriana. Profesor Asociado del Departamento de Ingeniería Electrónica de la misma universidad. Candidato de doctorado en Robótica de Warwick University, Reino Unido.

\*\*\* Médico Cirujano. Miembro del Departamento de Cirugía de la Pontificia Universidad Javeriana.

Una de las áreas principales de aplicación de la robótica es el telemando. En estas aplicaciones el robot realiza tareas bajo las órdenes remotas de un supervisor. Esto es muy útil para realizar tareas en las cuales una persona debe ser responsable de su realización, pero no desea o no puede estar presente en el sitio. El telemando constituye adicionalmente una combinación muy interesante entre la robótica y las telecomunicaciones.

De otra parte, en la medicina moderna se ha encontrado un gran potencial de aplicaciones a la telemedicina. Estas consisten en realizar actividades médicas de forma remota utilizando medios de telecomunicación de alta calidad, como por ejemplo sistemas de videoconferencia. Dentro de estas aplicaciones, y teniendo en cuenta la robótica por telemando, se puede pensar en la realización de cirugías remotas o telecirugías.

En una cirugía por telemando un cirujano especializado pueda realizar, controlar o supervisar una cirugía desde un sitio diferente a donde se encuentra el paciente. Entre las posibles aplicaciones de la telecirugía se encuentran:

- Llevar las habilidades de un cirujano experto a sitios remotos que cuentan con un número limitado de personal médico y no especializado.
- Tener los servicios de personal médico especializado en zonas de guerra sin que los cirujanos tengan que estar arriesgando su vida.
- Dictar cursos por teleconferencia en los que, ya sean los estudiantes o el profesor, puedan tener acceso remoto a una práctica de cirugía.
- Permitir a un cirujano adicional participar en una cirugía remotamente como asesor.
- Procedimientos de cirugía, que se realicen no necesariamente a distancia, pero si remotamente que reduzcan el riesgo para los médicos (necropsias en cadáveres que presenten un alto riesgo para la salud, como muertos por infecciones graves o enfermedades como el ébola o la gangrena o por exposición a radiación, cadáveres en avanzado estado de descomposición, etc.).

La telecirugía es un tema de investigación de punta en muchas universidades de los Estados Unidos y Europa; el DARPA (organismo de investigación del Ministerio de Defensa de los Estados Unidos) también se encuentra investigando sobre el tema. El Ministerio de Defensa de los Estados Unidos ha realizado pruebas de telecirugía en las últimas guerras en que ha participado (el Golfo Pérsico y misiones de paz en el Africa) llevando a cabo procedimientos de emergencia a sus soldados, en los cuales participan médicos desde los hospitales en los Estados Unidos. Los resultados de estas pruebas los han animado a continuar trabajando en el tema.

Pensando en la gran cantidad de posibles aplicaciones de la robótica por telemando, se decidió realizar un proyecto de alta tecnología cuyo objetivo fuera el desarrollo de la gran mayoría de las herramientas necesarias para una aplicación futura de esta técnica en varios campos. Una forma de garantizar que el proyecto arrojara resultados concretos y útiles para la gran mayoría de las aplicaciones que se pudieran pensar en el futuro y que pudieran ser útiles

para Colombia, era llevar a la práctica una aplicación real, innovadora y de las más críticas que se pudieran pensar.

Por lo anterior, se encontró que realizando una cirugía remota se lograría este objetivo primordial. La cirugía es una tarea crítica, no sólo desde el punto de vista tecnológico, sino también a nivel de la precisión y delicadeza de los órganos y por lo crítico del resultado como lo es la vida del paciente. Al lograr realizar con éxito esta tarea, se da la posibilidad de poder aplicar esta tecnología a tareas menos críticas.

## 2. El desarrollo de la telecirugía laparoscópica

Para realizar el proyecto de cirugía remota, se conformó en la Pontificia Universidad Javeriana un grupo de investigadores entre ingenieros del Departamento de Ingeniería Electrónica y cirujanos del Hospital Universitario de San Ignacio (HUSI). El procedimiento de cirugía remota se efectuó utilizando el robot manipulador Scrobot III del Departamento de Ingeniería Electrónica; se trata de un robot manipulador tipo puma de seis grados de libertad. (Foto 1)

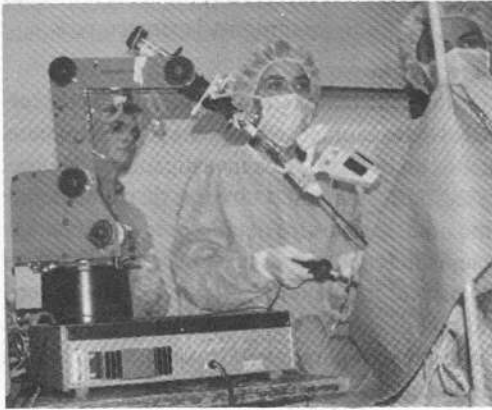


Foto 1: Imagen del robot Scrobot III

En la primera etapa del proyecto los investigadores estudiaron desde el punto de vista biomecánico los procedimientos de cirugía para encontrar el procedimiento más adecuado a utilizar como caso de estudio. La cirugía laparoscópica, la cual se realiza rutinariamente en el HUSI, resultó muy interesante para este proyecto. Esta consiste en realizar una operación sin hacer una herida abierta. Para realizarla, se hacen unas pequeñas incisiones en la piel del paciente por las cuales se introduce una cámara de video y herramientas como las mostradas en la Foto 2. Con estas herramientas (tijeras, pinzas, colocadores de clips, etc.) y mirando el interior del paciente a través de un monitor de televisión (Foto 3), el cirujano realiza la operación de manera mucho menos invasiva que en cirugía abierta y además no queda cicatriz (o queda muy pequeña). Una aplicación específica de esta técnica es la extirpación de la vesícula biliar (por cálculos biliares), una de las cirugías que se realiza en el HUSI.

Este tipo de cirugía es el más adecuado para llevar a cabo, en una primera instancia una aplicación por telemando debido a dos características principales de esta técnica:

- En este tipo de cirugía el médico maneja herramientas de actuación remota, con las cuales no tiene contacto manual directo, es decir, pierde en gran proporción el sentido del tacto. Para los cirujanos, el tacto ha sido tradicionalmente un componente fundamental en los procedimientos quirúrgicos. En la cirugía laparoscópica el contacto directo de los dedos con los órganos involucrados se pierde y el cirujano queda limitado a la sensación indirecta

de tocar los órganos con la punta de los instrumentos de cirugía. Ya que la sensación del tacto es casi imposible de reproducir remotamente con un sistema artificial, en este proyecto fue muy útil empezar con este tipo de cirugía en la cual el médico ya está preparado para esta limitación.

- En la cirugía laparoscópica el médico observa los órganos que está operando, así como la acción de sus movimientos, en la imagen de una cámara de televisión y no observa directamente al paciente ni a sus propias manos como en una cirugía tradicional. Debido a esto, el cirujano ya está preparado para hacer lo mismo en el procedimiento por telemando, en el cual está observando todas las escenas a través de monitores de televisión o computador. Los cirujanos que realizan este tipo de intervenciones quirúrgicas ya están entrenados para esta nueva manera de coordinar la vista con las manos.

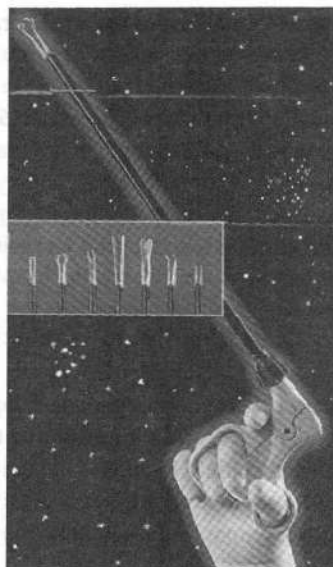


Foto 2: Herramientas utilizadas en cirugías laparoscópicas

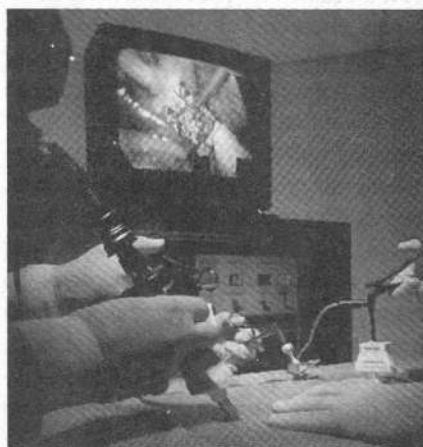


Foto 3: Seguimiento de la cirugía a través del monitor

Una vez escogida esta cirugía

como prueba, se realizó durante dos meses un cuidadoso estudio biomecánico de los procedimientos realizados en el HUSI. Los investigadores de ingeniería asistieron a algunas cirugías de rutina donde se tomó nota de todos los detalles relevantes para la adaptación del robot. Estas observaciones dieron las pautas para el montaje del primer sistema experimental con el robot. Se trabajó principalmente en buscar la manera para que el manipulador tuviera la máxima eficiencia en su rango de movimientos y en su control.

### 3. El montaje experimental

Posteriormente se procedió a hacer el primer montaje experimental en el Departamento de Ingeniería Electrónica utilizando el robot manipulador Scrobot III. En esta fase del proyecto, que tuvo una duración de seis meses, se diseñó y se construyó el control por telemando del robot y se determinaron las necesidades de comunicación básicas para realizar una primera cirugía de prueba.

Se llevaron a cabo varias prácticas con modelos, con las cuales el equipo de investigadores comprobó la viabilidad tecnológica y médica de realizar la cirugía. En el procedimiento quirúrgico, el manipulador maneja la herramienta principal que normalmente utiliza el cirujano responsable de la operación, el que a su vez se encuentra en otro sitio controlando el robot por

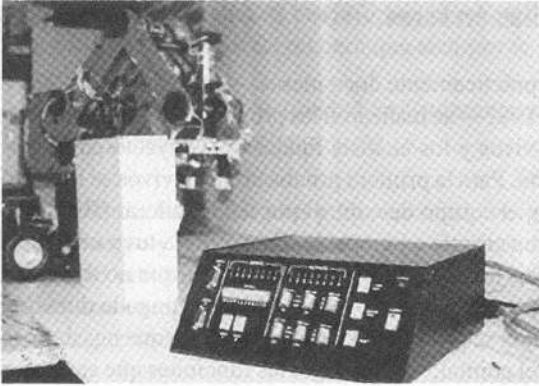


Foto 4: Computador local de control del robot.

telemando. Los ayudantes de cirugía que manejan la cámara y los instrumentos de apoyo deben seguir presentes en la sala así como el anesthesiólogo.

Para este montaje se utilizó un canal de video que transmite la imagen de la cámara laparoscópica desde el paciente hasta donde está el cirujano. Un canal de voz bidireccional comunica al cirujano con los asistentes en la sala.

El robot manipulador se programó de tal manera que pudiera recibir comandos de un computador por un canal de datos. Para ello se utilizó una mezcla entre el lenguaje de programación nativo del robot (definido por el fabricante) y rutinas en C para hacer la *interfaz* completa con el computador. Parte de este programa se realizó para el computador local de control del robot (computador que incluye el fabricante con el robot). Estos elementos se observan en la Foto 4.

Figura 1. Esquema de manipulación del robot accionado por telemando.



La otra parte del programa se realizó para el computador de *interfaz* (un PC portátil) y junto con éste se diseñó el sistema de *interfaz* para que el cirujano pudiera controlar el robot. El computador traduce los comandos del *joy-stick* que maneja el cirujano al formato de movimientos del robot. La cinemática del robot tiene que ser considerada para hacer la traducción mecánica entre los movimientos del *joy-stick* y las articulaciones del robot. El sistema completo se puede ver en la Figura 1.

Con este sistema se realizaron pruebas en modelos de caucho. Las herramientas de laparoscopia fueron adaptadas de manera que el robot las pudiera tomar con su pinza. Además se les instaló un servomecanismo para activarlas (cerrarlas o abrirlas) en coordinación con el robot. Una de estas herramientas adaptada se puede ver en la Foto 5.

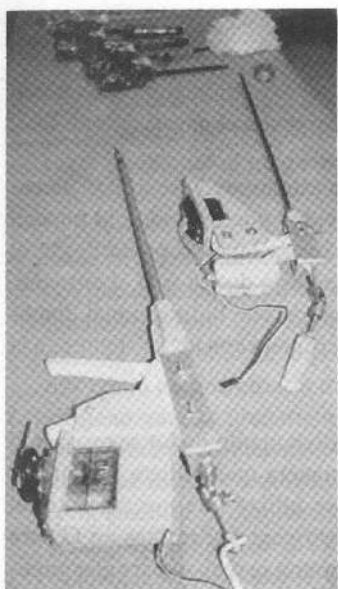


Foto 5: Herramienta adaptada para ser utilizada por el robot.

#### 4. Pruebas en seres vivos

Durante prácticamente doce meses —entre junio de 1996 y mayo de 1997— se realizaron las primeras cirugías de prueba en seres vivos y los análisis finales del proyecto en su primera parte. Para la primera prueba en seres vivos se trasladó el robot y el equipo de control por telemando al HUSI y se realizó una cirugía en un perro. Esta cirugía tuvo una duración de seis horas debido a inconvenientes que no se habían previsto para esta prueba. Debido a la prolongada duración de la cirugía se produjo un paro respiratorio que ocasionó la muerte del animal; sin embargo, las funciones que se debían hacer con el robot fueron realizadas con total éxito.

El control por telemando y las comunicaciones entre la sala de cirugía y el cirujano remoto funcionaron adecuadamente y cumplieron a cabalidad las funciones necesarias. De esta experiencia se tomó una gran cantidad de datos para analizar con respecto a posibles mejoras del sistema de telemando, a la técnica de cirugía para agilizar el tiempo de la operación y a la configuración espacial del manipulador y sus herramientas con respecto al paciente.

Entre los resultados más importantes, se encontró que era necesario utilizar dos cámaras de video y dos monitores del lado del cirujano remoto para permitirle al cirujano ver no sólo la imagen interna de los órganos del paciente, sino también la imagen de la sala de cirugía incluyendo al robot. Esto se debe a que cuando el cirujano no puede ver la posición del robot o de sus asistentes, lleva al manipulador a configuraciones que limitan su movimiento, lo cual alarga el tiempo de cirugía. Teniendo una vista global de la sala, el cirujano puede solicitar a sus asistentes que se coordinen mejor con el robot y además mantener al robot en posiciones cómodas todo el tiempo, lo cual agiliza considerablemente la operación. La Foto 6 muestra al cirujano en su oficina con los dos monitores.



Foto 6: Cirujano accionando el robot manipulador remotamente.

Otro resultado interesante de esta fase tuvo que ver con la adaptación de las herramientas laparoscópicas con el manipulador. Teniendo una estructura rígida entre la pinza del robot y la herramienta resultaba muy difícil pivotar el vástago de la herramienta sobre la incisión de entrada en la piel, por lo tanto, en muchos casos la herida era maltratada por la herramienta. Para lograr dicha adaptación se estudiaron varias alternativas:

- Realizar un programa de control para el robot, basado en inteligencia artificial, que adaptara los movimientos de manera que siempre se hiciera un pivote virtual sobre la piel.
- Agregar dos grados de libertad con movimiento libre (no controlado) al robot entre su pinza y la herramienta laparoscópica.

La primera alternativa no pudo ser implementada porque la piel, debido a la elasticidad del cuerpo y a la respiración del paciente, no se queda inmóvil durante mucho tiempo y por lo tanto el pivote virtual se mueve continuamente en el espacio. Esto implica una complejidad de control además de la necesidad de más sensores que indiquen el movimiento de la piel.

La segunda alternativa fue la seleccionada. La adaptación de las herramientas fue modificada agregando una unión universal en el punto donde el robot toma la herramienta, como lo muestra la Foto 7. Por medio de esta unión la herramienta puede girar sobre la piel, donde la herida de entrada, junto con la tensión normal de la piel, genera un pivote. De esta manera se soluciona el problema original pero al agregar dos grados de libertad se complica el control del manipulador y se invierte el sentido del movimiento del elemento final (punta) de la herramienta. Por ello fue necesario otro tiempo de nuevo entrenamiento para los cirujanos.

Con el sistema mejorado se programaron nuevas cirugías. Estas se realizaron en cerdos, animales que presentan características anatómicas y fisiológicas similares a las de los seres humanos, en especial la posibilidad de respirar cómodamente estando boca arriba. Para realizar estos nuevos procedimientos se trasladó el equipo a las instalaciones de cirugía veterinaria de la Universidad de La Salle. Allí se realizaron tres cirugías en cerdos, las cuales resultaron exitosas. La intervención tuvo lugar

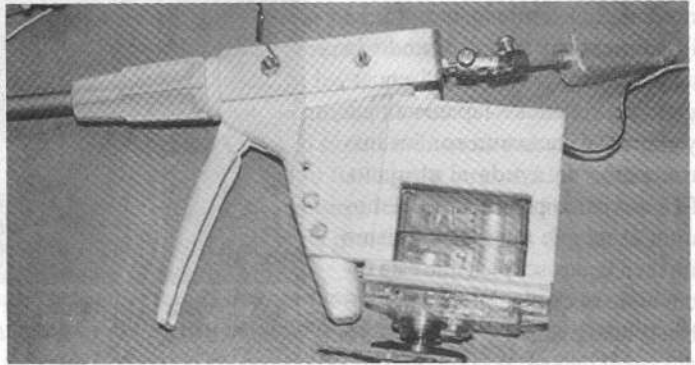


Foto 7: Herramienta modificada para un mejor accionar por parte del robot manipulador.



Foto 8: Vista del robot con la herramienta durante la operación.

en una de las salas de cirugía mientras el cirujano responsable se encontraba en una oficina al otro extremo del edificio. En estas intervenciones se logró reducir el tiempo de cirugía a menos de 50 minutos. Todos los animales sobrevivieron a los procedimientos y no presentaron problemas postoperatorios.

La Foto 8 muestra una vista del robot con la herramienta en el momento en que un asistente ayuda a insertar la herramienta dentro del paciente. Esto es necesario debido a que después de agregar la unión universal, la herramienta queda colgando mientras no tenga un pivote (la herida en la piel) y por lo tanto el robot no puede insertarla solo. La Foto 9 muestra una vista panorámica de la cirugía donde se pueden ver el paciente, el robot y los ayudantes, y en el fondo la cámara que muestra la imagen panorámica al cirujano remoto. El instrumentista está revisando la cámara, un ayudante está encargado de la cámara laparoscópica y el otro se encuentra con los instrumentos de ayuda al cirujano. Los dos están pendientes del monitor local que muestra la misma imagen laparoscópica que está recibiendo el cirujano remoto y sobre la cual pueden opinar a través del canal de voz.

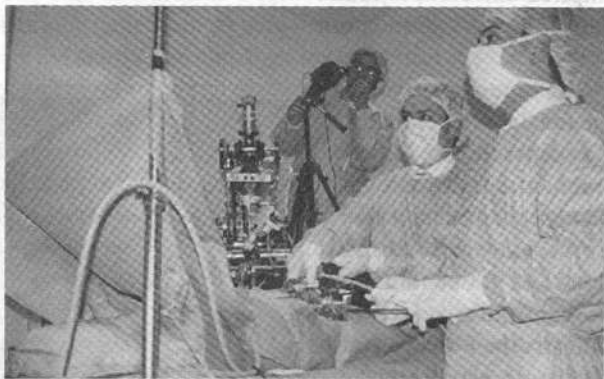


Foto 9. Vista panorámica de la cirugía

La Foto 10 muestra una de las vesículas recién extraídas justo al final de la cirugía. Como el cerdo estaba sano (no tenía cálculos) la vesícula se contrajo al desocuparse de bilis y por ello se ve tan pequeña. En una persona enferma ésta se encuentra muy grande y llena de cálculos y bilis cristalizada. También se observan los trócares aún colocados en la piel del cerdo. Estos se

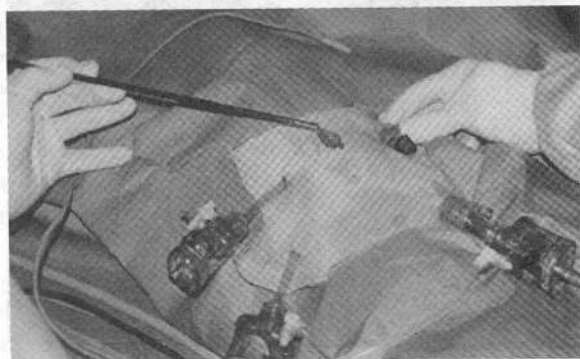


Foto 10. Vesícula extraída durante la operación

colocan para que las herramientas laparoscópicas puedan ser extraídas e insertadas sin resentir demasiado las heridas. La Foto 11 muestra uno de los cerdos operados. Como se puede ver, las heridas son imperceptibles y el animal se encontraba caminando unos minutos después.

Con estos experimentos se comprobó que la curva de aprendizaje de los cirujanos llegó a un punto suficientemente bueno y confiable con dos procedimientos de entrenamiento en seres vivos (luego de varias horas previas de práctica en modelos artificiales) y de ahí en adelante ya se obtenían mejoras en cuanto a tiempo de operación y menor esfuerzo.



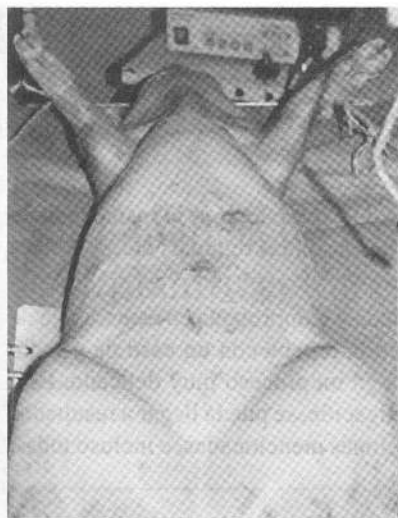


Foto 11: Paciente después de la operación

## 5. Discusión y conclusiones

Con los resultados obtenidos hasta el momento, se puede concluir que existe una gran probabilidad de éxito para realizar cirugías por telemando en Colombia. En la segunda parte del proyecto que se está realizando en estos momentos, se está analizando la experiencia obtenida y se procederá a conseguir los recursos para mejorar el sistema de control e *interfaz* y realizar un procedimiento entre dos ciudades para lograr una distancia considerable en el control remoto del sistema.

Los resultados de este proyecto han sido presentados en varios eventos internacionales (congresos y conferencias) en los cuales ha sido muy bien acogido. En estos eventos se ha observado que a pesar del nivel tecnológico superior de otros países desarrollados, este proyecto ha llegado a resultados similares, y en algunos casos, a resultados más concretos, ya que en otros importantes centros europeos y de los Estados Unidos aún se encuentran en las etapas de prueba en modelos de caucho.

Sobre la telecirugía es importante aclarar que ésta no reemplaza al cirujano ni a los asistentes, no aumenta los conocimientos ni evita errores tácticos del cirujano. La responsabilidad sigue siendo de las personas a cargo. Sin embargo, existen formas de mejorar la seguridad de la cirugía por medio del robot, como lo es aplicar técnicas de inteligencia artificial al control de robot para que éste evite errores como un movimiento brusco accidental del cirujano, el cual el robot puede reconocer como no apto para la cirugía y no lo reproduciría.

Con este proyecto se han desarrollado la gran mayoría de las herramientas tecnológicas para llevar la telecirugía a la práctica en seres humanos; sin embargo, esta posibilidad aún se encuentra muy lejana, pues, si bien, se ha logrado el desarrollo tecnológico necesario para llevarla a cabo, aún falta por sortear los obstáculos éticos y legales asociados.

El problema radica en que “errar es humano” pero se acepta que las máquinas fallen. Aún si la cirugía por telemando fuera tan o más segura que una cirugía tradicional un error puede producir más rechazo social que un error humano. Ciertamente en situaciones críticas nadie está dispuesto a ser parte de las estadísticas, por favorables que éstas sean. Por esto, los obstáculos éticos y legales son probablemente más difíciles de superar que los tecnológicos.

De otra parte, el proyecto de telecirugía desarrollado en este trabajo de investigación abre las puertas a una gran cantidad de aplicaciones de esta técnica, no sólo en la medicina sino en otras áreas de la ciencia. En áreas fuera de la medicina, esta técnica tiene un gran abanico de posibilidades en la manipulación de objetos o control de procesos a distancia. En la manipulación de objetos peligrosos puede ser útil para:

- El manejo de sustancias radioactivas.
- La desactivación de explosivos o minas antipersonales.

- El manejo de sustancias corrosivas o tóxicas.
- La fumigación en cultivos de flores evitando así la exposición de los trabajadores.

En la exploración (espacial, submarina o terrestre) puede ser aplicado en:

- El manejo de experimentos remotos.
- Las reparaciones de emergencia de vehículos o naves de exploración, o la instalación de infraestructura remota (represas, plataformas de petróleos, sondas remotas, etc.).

Aunque el espectro de aplicaciones de la técnica desarrollada y comprobada en este trabajo de investigación es muy amplio, el hecho de haber realizado la prueba con un caso de estudio como la telecirugía hace que la prueba haya sido exitosa en un proceso muy delicado. Esto permite esperar que continuando con este trabajo de investigación, se pueda llegar a resultados importantes y útiles para realizar la mayoría de las aplicaciones mencionadas, e incluso todas, en un futuro cercano.

Para llevar a la práctica algunas de estas aplicaciones se están desarrollando en el Departamento de Ingeniería Electrónica de la Pontificia Universidad Javeriana otros trabajos de investigación en aplicaciones tales como sistemas de navegación por telemando para robots móviles (robots tipo carro) que al conjugarse con un manipulador se pueden utilizar para fumigación de flores o exploración y desactivación de campos minados.