

ReAHK: Sistema auxiliar para la rehabilitación articular del hombro mediante Kinect

Alan J. Crisantos Bazaldúa, Ángel E. Hernández Beltrán,
Eusebio Ricárdez Vázquez

Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica
Unidad Culhuacan,
Departamento de Ingeniería en Computación, México D.F.,
México

alancris@hotmail.com, aherbel0411@gmail.com, eusebior@ieee.org
<http://www.ic.esimecu.ipn.mx/ALUMNOS/>

Resumen. En el siguiente trabajo se presenta el diseño e implementación de un sistema auxiliar para la rehabilitación articular haciendo uso de KinectTM, el cual consiste en un software no lúdico enfocado en la rehabilitación del hombro con ejercicios que trabajan en el plano frontal y sagital. El software se desarrolló para la plataforma Windows utilizando el lenguaje de programación C# en conjunto con el Kit de Desarrollo de Software MicrosoftTM Kinect. Este sistema supervisa que el paciente realice los ejercicios de forma adecuada y envía un reporte por correo electrónico al médico. El sistema se evaluó con 30 personas sin ninguna lesión de hombro, a quienes se les aplicó un cuestionario de usabilidad después de interactuar con el sistema. Los resultados de la evaluación indican que el sistema es aceptado entre un grupo de personas de diferentes edades como un medio auxiliar para rehabilitación.

Palabras clave: Kinect, sistema para rehabilitación, rehabilitación virtual.

ReAHK: Auxiliar System for Articular Shoulder Rehabilitation Using Kinect

Abstract. This paper presents the design and implementation of an articular auxiliary rehabilitation system based on KinectTM. This is non-ludic software which main target is shoulder rehabilitation based on exercises working in frontal and sagittal plane. This work was developed for the Windows platform using C# programming language and MicrosoftTM Kinect Software Development Kit. This system monitors the patient to perform the exercises properly and email a report to specialist physician. Tests were performed with 30 volunteers without any shoulder injury. After interacting with the system a usability questionnaire was applied. The results of the evaluation indicate that the system is accepted among a group of people of different ages as an aid to rehabilitation.

Keywords: Kinect, rehabilitation system, virtual rehabilitation.

1. Introducción

La rehabilitación virtual ha cobrado importancia en los últimos años, ya que al paso de estos se ha buscado la forma de implementar terapias a distancia para evitar el traslado del paciente a los diferentes centros de rehabilitación [10]. Las terapias físicas que se imparten en un reconocido centro de rehabilitación ubicado al sur de la Ciudad de México, se clasifican en terapia física institucional (requieren de un equipo y/o supervisión especial), terapia ocupacional (ejercicios que se realizan en la vida cotidiana) y terapia física en casa (ejercicios dados por un programa de enseñanza). Los pacientes que realizan sus ejercicios con un programa de enseñanza carecen de un médico especialista que los supervise generando incertidumbre sobre la realización correcta de los ejercicios.

En este trabajo se presenta el desarrollo, diseño e implementación de ReAHK, un sistema auxiliar de Rehabilitación Articular para Hombros con la interfaz Kinect, el cual supervisa la correcta realización de los ejercicios para posteriormente, enviar información sobre el arco de movimiento del paciente mediante correo electrónico y así, evitar posibles lesiones por realizar malas prácticas.

Kapandji [4] define al hombro como una articulación proximal que se encuentra posicionada en la parte superior del cuerpo. Es la articulación con mayor movilidad del cuerpo humano ya que posee tres grados de libertad, es decir, trabaja en los diferentes planos de espacio del cuerpo humano (Plano sagital, frontal o coronal y horizontal o transversal).

Algunos de los ejercicios de rehabilitación que corresponden al hombro son:
a) *Flexoextensión* que es un ejercicio que consta de dos movimientos, la *flexión* (Figura 1) y la *extensión* (Figura 2), que realizan su movimiento dentro del plano sagital en torno al eje transversal [4].

b) *Abducción* un movimiento que aleja el miembro superior (brazo) del tronco, partiendo desde la posición anatómica (0°) hasta un ángulo máximo de 180° , este movimiento se realiza en el plano frontal en torno al eje anteroposterior [4], como se muestra en la Figura 3.

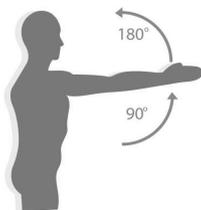


Fig. 1. Ejercicio de flexión.

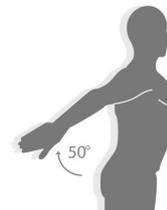


Fig. 2. Ejercicio de extensión.

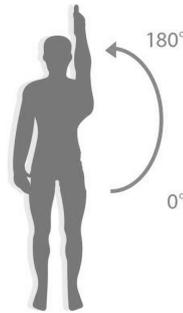


Fig. 3. Ejercicio de abducción.

Para el desarrollo de ReAHK se eligió iniciar con la articulación del hombro a sugerencia de un médico especialista en rehabilitación que consideró a dicha articulación factible de ser rehabilitada usando el Kinect, ya que la abducción y la flexión son ejercicios fáciles de realizar sin supervisión médica.

En este trabajo se describirán los sistemas enfocados en la rehabilitación que utilizan Kinect para la obtención de posicionamiento del usuario mencionando sus principales características, en la siguiente sección se explicarán las técnicas aplicadas para el desarrollo del sistema detallando la manera en que se obtienen los ángulos y cómo éstos son procesados por la máquina de estados, posteriormente, se mencionan los resultados, en donde se describen las características del equipo en el que se realizaron las pruebas. Además, se menciona cómo fue usado y evaluado el sistema y por último, las conclusiones y el trabajo a futuro.

2. Trabajo relacionado

Desde la liberación del kit de desarrollo de software (SDK) de Kinect se han desarrollado diferentes sistemas para la rehabilitación virtual tanto lúdicos (haciendo uso de juegos que sirven para motivar al usuario) como no lúdicos. Sanchis [6] desarrolló un sistema no lúdico basado en Kinect, que permite a los médicos crear guías de los ejercicios que el paciente debe realizar. Mientras que, Tong et al. [8] desarrollaron un sistema lúdico que incluye ejercicios para rehabilitación de pacientes con discapacidades motoras que han sufrido accidente cerebrovascular, con el fin de mejorar su calidad de vida. Por otro lado, González et al. [2] elaboraron un sistema utilizando OpenNI framework y detector de rostros desarrollado en la plataforma *Open Computer Vision Library* para incluirlo en GRADIOR. GRADIOR es una plataforma computacional que ayuda a los médicos en el campo de la evaluación cognitiva y rehabilitación [2]. Este sistema permite llevar un registro de la correcta o incorrecta realización de los ejercicios, los cuales consisten en tocar diferentes características faciales (ojos, nariz y oídos) con las manos. Para obtener las características faciales se procesan las imágenes entregadas por la cámara RGB del Kinect, mientras que

para el seguimiento de la cara y las manos se utilizan los datos de la cámara de profundidad.

En Su et al. [7] se muestra el desarrollo de un sistema de rehabilitación a distancia haciendo uso de Kinect, empleando el algoritmo DTW (Dynamic Time Warping) y lógica difusa. Este sistema utiliza una grabación capturada en el hospital que se usa como referencia, la cual es comparada con el vídeo del paciente usando DTW para medir la similitud entre ambos, dando como resultado la disparidad de trayectoria y la variación de velocidad. Debido a que los médicos se basan en su propia experiencia para evaluar dichas variables hacen uso de la lógica difusa para dar una evaluación subjetiva. De forma similar, Venugopalan et al. [9] proponen un sistema enfocado en la rehabilitación de personas con daño cerebrovascular mediante una sesión de ejercicios empleando Kinect, comparando los datos obtenidos del ejercicio con una grabación de entrenamiento tomada como plantilla. El sistema hace uso de tres técnicas de programación dinámica para evaluar el desempeño del paciente.: *Cross Correlation, Direct Frame by Frame comparison y DTW*.

También existen empresas que han desarrollado sistemas comerciales tales como VirtualWare que desarrolló el software VirtualRehab [3] el cual consta de nueve ejercicios lúdicos que consideran actividades para atender diferentes patologías.

3. Metodología

La idea de desarrollar este sistema nace de las entrevistas que se tuvieron con un médico especialista en rehabilitación que labora en un importante instituto de rehabilitación ubicado al sur de la Ciudad de México, quien mencionó los problemas que puede ocasionar realizar erróneamente un ejercicio y la importancia de mantener una postura correcta mientras se realiza el mismo para que la rehabilitación tenga éxito. Con base en las recomendaciones mencionadas se propuso el desarrollo de un sistema capaz de llevar el control sobre un ejercicio de rehabilitación para hombros (ReAHK), en la Figura 4 se muestra el diagrama de funcionamiento de ReAHK.

A sugerencia del médico, quien indicó que el grado de lesión va ligado a la velocidad de movimiento del brazo, ReAHK no incluye una restricción de tiempo para realizar el ejercicio, con el objetivo de que el paciente pueda avanzar paulatinamente a su propio ritmo sin que se vea obligado a forzar el movimiento de su brazo. Usando los datos de profundidad que transmite el Kinect, es posible llevar un seguimiento en el plano horizontal y limitar el movimiento del brazo de acuerdo al ejercicio con un rango de tolerancia de ± 10 cm con respecto al hombro y la muñeca.

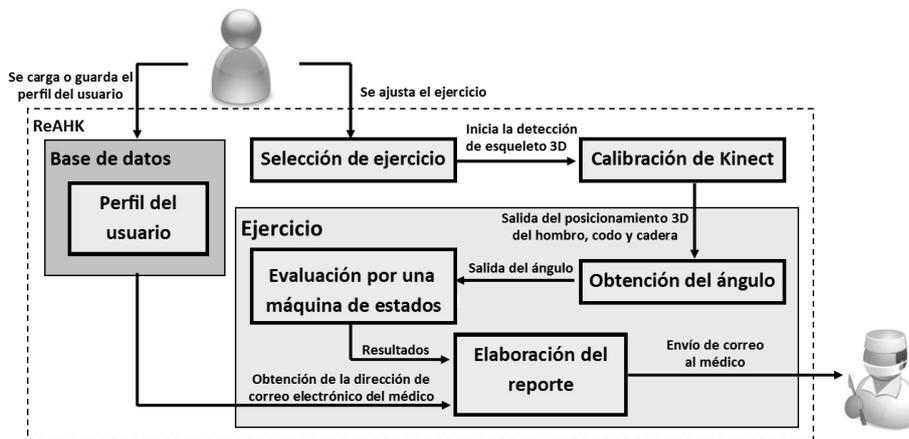


Fig. 4. Diagrama de funcionamiento de ReAHK.

Para poder hacer uso de ReAHK es necesario que el paciente se registre en una base de datos. Una vez iniciado el ejercicio, el sistema captura los movimientos del paciente por medio de las imágenes por segundo que transmite el Kinect (frames), estos contienen la información de posicionamiento de las articulaciones del cuerpo en los tres ejes X , Y y Z , los datos son usados para la obtención del ángulo y validados por una máquina de estados hasta completar la rutina. Al finalizar la actividad, el sistema recupera los datos del perfil del paciente y éstos son usados como plantilla para crear el mensaje de correo que se envía al médico junto con un informe que incluye los ángulos máximos alcanzados en cada repetición y una imagen del paciente mientras realiza el ejercicio.

A continuación, se describirá el método empleado para la obtención de los ángulos que alcanza el paciente durante la realización del ejercicio, la máquina de estados que se utiliza para validar cada repetición y la descripción del sistema completo.

3.1. Obtención del ángulo

Para obtener el ángulo entre las articulaciones (Figura 5) se hizo uso de la expresión analítica del ángulo entre dos vectores (Figura 6), dado que el ángulo entre dos líneas rectas es el más pequeño de los ángulos formados por la intersección de ambas. Únicamente se usaron los ejes X y Y ya que el plano Z es controlado por la cámara de profundidad.

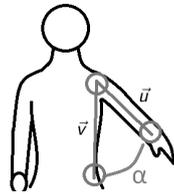


Fig. 5. Obtención del ángulo usando tres articulaciones.

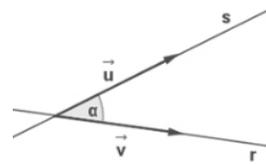


Fig. 6. Representación del ángulo entre dos vectores.

El ángulo entre dos rectas se puede obtener usando sus vectores directores (\vec{u} y \vec{v}) con la fórmula 1 [1,5].

$$\cos \alpha = \frac{|u_1 \cdot v_1 + u_2 \cdot v_2|}{\sqrt{u_1^2 + u_2^2} \cdot \sqrt{v_1^2 + v_2^2}}, \quad (1)$$

donde α es el ángulo formado por la intersección de los vectores \vec{u} y \vec{v} , u_1, u_2, v_1, v_2 corresponden a las coordenadas cartesianas de los vectores.

3.2. Máquina de estados

El ángulo obtenido se valida en la máquina de estados que se muestra en la Figura 7, la cual permite corroborar las repeticiones que realiza el paciente. El ejercicio comienza en la posición inicial (ángulo menor o igual a 15°) y puede tener dos estados de finalización:

Correcto: Se ha llegado al ángulo objetivo (propuesto por el médico) y se ha regresado a la posición inicial.

Incorrecto: No se ha llegado al ángulo objetivo y se ha regresado a la posición inicial.

El estado intermedio, *Ángulo incremental/decremental*, es un estado auxiliar en el que se permanecerá siempre y cuando no se cumplan los estados de finalización mencionados anteriormente.

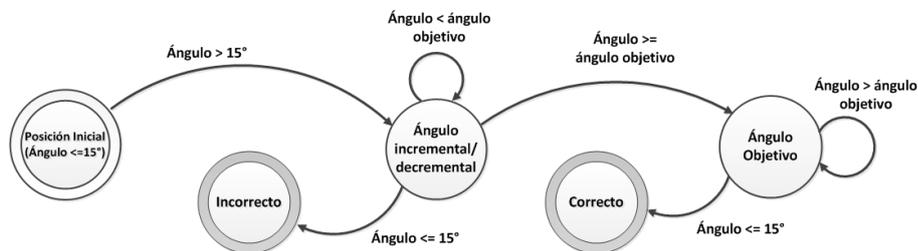


Fig. 7. Máquina de estados para validar una repetición correcta o incorrecta.

3.3. Descripción del sistema

ReAHK está desarrollado en C# utilizando el entorno de desarrollo Visual Studio 2012 en conjunto con el SDK de Kinect versión 1.8. Consta de cinco interfaces: *registro*, *ingreso*, *selección de ejercicio*, *calibración automática* y *ejercicio*. ReAHK al iniciar, despliega una ventana en la que es posible autenticarse con una clave de usuario válida o darse de alta como nuevo usuario. En la ventana de *registro* se solicitan los datos de: nombre del paciente, nombre del médico, usuario, contraseña, correo electrónico del paciente y del médico. En la *selección de ejercicio* (Figura 8) se elige la rutina y se configuran los parámetros del ejercicio como son: la articulación (derecha o izquierda), el número de repeticiones y el ángulo objetivo. La *calibración automática* permite ajustar el sensor para tener una visión completa del paciente con la finalidad de que la captura sea lo más acertada posible. En esta interfaz se implementó el comando de voz “comenzar”, el cual debe pronunciarse de forma fuerte y clara. Al reconocer el comando el sistema inicia la rutina de ejercicio con los parámetros seleccionados. El comando de voz se usa con la finalidad de que el paciente no tenga que moverse de donde esta y no se pierda la calibración obtenida, en esta misma ventana es posible ajustar el ángulo del sensor de forma manual en caso de que la calibración automática falle. También aquí puede apreciarse un vídeo que muestra la realización correcta del ejercicio. Cuando el comando es aceptado se da paso al *ejercicio*, una vista de esta interfaz se presenta en la Figura 9, ésta es el área en la que los pacientes realizan la rutina de rehabilitación, el usuario puede observar en todo momento el ángulo alcanzado en cada repetición y el número de repeticiones realizadas, tanto correctas como incorrectas.

Al completar el número de repeticiones de forma correcta, se despliega la opción para confirmar el envío de información al correo del médico. El reporte que se envía incluye el número de repeticiones y el ángulo obtenido en cada una de ellas, además se adjunta una foto capturada mientras el paciente realizaba el ejercicio, con la finalidad de que el médico observe la postura del paciente.



Fig. 8. Selección del ejercicio.

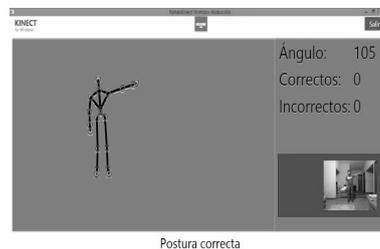


Fig. 9. Realización del ejercicio.

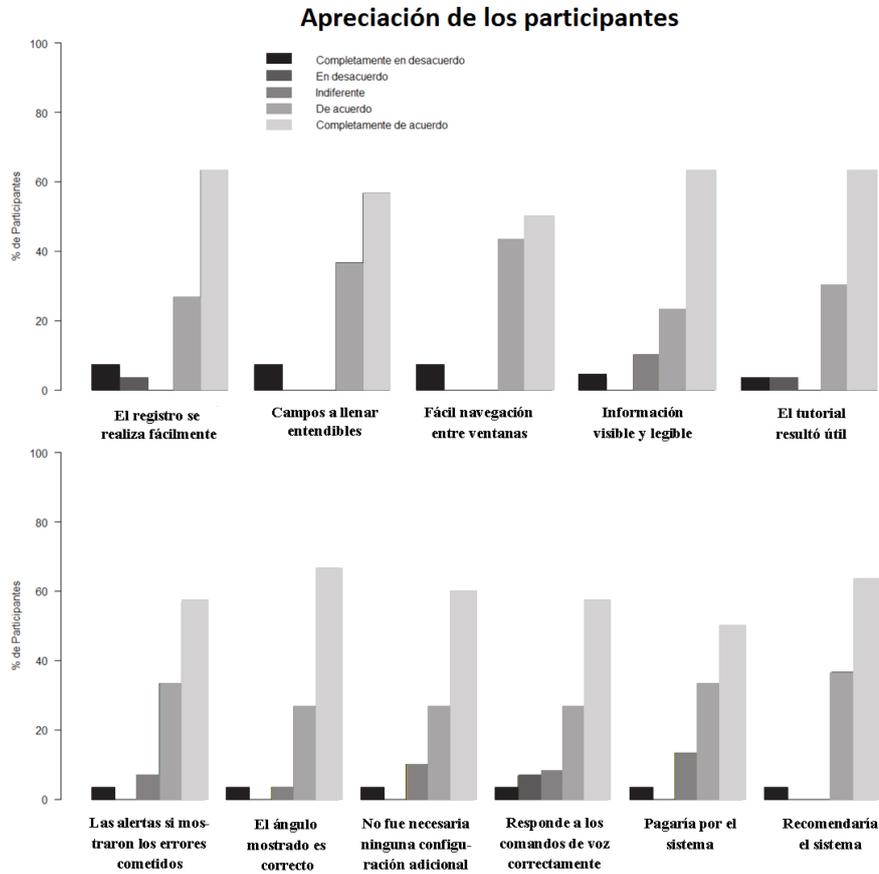


Fig. 10. Resultados del cuestionario de usabilidad.

4. Resultados de usabilidad

Para evaluar la usabilidad del sistema, se realizaron pruebas con 30 personas sanas (sin ninguna lesión en el hombro) con un rango de edad de 18 a 58 años. Las pruebas se realizaron utilizando una computadora portátil marca MSI modelo CX61 con procesador i7-3630QM a 2.4GHz y memoria RAM de 6GB DDR3 además del dispositivo Kinect para Xbox 360.

Se le proporcionó al usuario una breve introducción al sistema en la que se explicó el funcionamiento de cada interfaz y en qué consistían los dos ejercicios implementados. Se procedió a que cada uno de los participantes realizara el proceso de registro y un ejercicio de rehabilitación (abducción o flexión). Una vez completada la rutina, cada participante llenó un cuestionario de usabilidad en el que se calificaron tres aspectos: diseño, funcionalidad y opinión general.

En la Figura 10 se puede apreciar que las calificaciones más altas fueron en las preguntas correspondientes al diseño y funcionalidad. Los usuarios que calificaron de manera negativa manifestaron que se confundían en el registro o la configuración de cada interfaz principalmente en personas mayores de 40 años.

Así mismo, en la Figura 10 se observa que el 65% de los usuarios consideran que los ángulos mostrados en pantalla corresponden al ejercicio real que se está realizando. Además, más del 60% de los mismos, recomendarían el sistema a personas con problemas en el hombro. Sin embargo, las principales valoraciones negativas se presentan en el comando de voz, lo cual se puede atribuir al ruido y a la sensibilidad del micrófono.

De los voluntarios que realizaron la prueba y contestaron el cuestionario, nueve manifestaron haber necesitado rehabilitación en el pasado y consideraron que el sistema puede ser de mucha utilidad ya que evitaría el deterioro del hombro por realizar malas prácticas.

5. Conclusiones y trabajo a futuro

Las ciencias computacionales pueden apoyar a diferentes campos de estudio. En este proyecto se adaptaron algunas herramientas, tanto de software como de hardware, implementándolas en la rama de medicina física y rehabilitación, dando como resultado un sistema que facilita al médico el seguimiento del progreso de personas que realizan su terapia de rehabilitación a distancia al tener un registro de los reportes de los ángulos alcanzado por el paciente durante toda su terapia.

Analizando los resultados del cuestionario de usabilidad y tomando en cuenta a los voluntarios que han necesitado rehabilitación en el pasado, consideramos que el sistema puede ser de gran utilidad para apoyar a las personas que estén realizando ejercicios de rehabilitación sin supervisión.

Previo a la aplicación de las pruebas, el sistema fue validado por el médico especialista, quien consideró que con los resultados obtenidos es posible implementar el sistema con pacientes que sufran de alguna lesión del hombro y necesiten rehabilitación (ejercicios de flexión y abducción).

Con base en las opiniones recabadas durante el periodo de pruebas realizadas, algunas de las mejoras que se pueden realizar al sistema son: ampliar el software agregando más ejercicios que permitan rehabilitar diferentes articulaciones como el codo y la rodilla, además de implementar más ejercicios para el hombro. También, se puede mejorar la interfaz gráfica pasando del diseño 2D a un diseño 3D, para que el usuario le sea más fácil comprender los movimientos que realiza.

Agradecimientos. Agradecemos al Dr. Marco Antonio Guerrero Godínez, médico especialista en rehabilitación por su valiosa asesoría y apoyo.

Referencias

1. Bo, A.P.L., Hayashibe, M., Poignet, P.: Joint angle estimation in rehabilitation with inertial sensors and its integration with Kinect. In: Proceedings of the Annual

- International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBS). pp. 3479–3483 (2011)
2. González-Ortega, D., Díaz-Pernas, F.J., Martínez-Zarzuela, M., Antón-Rodríguez, M.: A Kinect-based system for cognitive rehabilitation exercises monitoring. *Computer Methods and Programs in Biomedicine* 113(2), 620–631 (2014), <http://dx.doi.org/10.1016/j.cmpb.2013.10.014>
 3. Group, V.: VirtualRehab (2015), <http://www.virtualrehab.info/es>
 4. Kapandji, A.I.: *Fisiología Articular: Tomo 1*. Editorial Medica Panamericana, España, sexta edn. (2006)
 5. Ochoa, C.O., Valencia, J.V., Cordova, J.L., López, A.O., Ortíz, M.M.: Análisis de marcha mediante plataforma Kinect. pp. 17–21 (2011)
 6. Sanchis Cano, A.: *MediKnect: Un sistema de rehabilitación virtual*. Ph.D. thesis, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicación (2013)
 7. Su, C.J., Chiang, C.Y., Huang, J.Y.: Kinect-enabled home-based rehabilitation system using Dynamic Time Warping and fuzzy logic. *Applied Soft Computing* 22(November 2010), 652–666 (2014), <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1568494614001859>
 8. Tong, R.K., Hang, C.H., Chong, L.K.W., Lam, N.K.F.: KineLabs 3D motion software platform using Kinect. In: *International Conference on Computerized Healthcare (ICCH)*. pp. 164–165 (2012)
 9. Venugopalan, J., Cheng, C., Stokes, T.H., Wang, M.D.: Kinect-based rehabilitation system for patients with traumatic brain injury. *Conference proceedings : ... Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. Conference 2013*, 4625–8 (2013), <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/24110765>
 10. Yunda, L., Gómez Ortega, L.F., Rodríguez, S., Millán, R.: Plataforma Web para un nuevo modelo de tele-rehabilitación, de base comunal, en áreas rurales. *Sistemas y Telemática* 9(19), 55–67 (2011), http://aplicaciones.icesi.edu.co/revistas/index.php/sistemas/_telematica/article/view/1094