

Utilización como herramienta docente de un robot cartesiano con 5 grados de libertad y una cámara en la pinza

J. Moreno, M. Tresanchez, D. Martinez, E. Clotet, J. Casanovas, J.A. Garriga, F. Clarià, J. Palacín,
Member, IEEE

Abstract— En este artículo se describen los resultados obtenidos al utilizar como herramienta docente un robot cartesiano diseñado para ser utilizado por estudiantes. El diseño y fabricación del robot cartesiano de 5 grados de libertad se desarrolló en el Laboratorio de Robótica de la Escuela Politécnica Superior de la Universitat de Lleida. El diseño e implementación se realizó con piezas fabricadas en plástico mediante una impresora de prototipado rápido y con elementos comerciales de bajo coste para facilitar su aplicación como herramienta docente. El robot cartesiano permite controlar las evoluciones de cinco motores de corriente continua de bajo coste equipados con codificadores magnéticos y acceder a las imágenes de una cámara situada en la pinza de agarre de objetos. El artículo describe los resultados de del proceso de aprendizaje y del proceso de evaluación de los estudiantes obtenidos durante los cursos 2012-2013 y 2013-2014.

Index Terms—Herramienta de aprendizaje, robot cartesiano, sistema automatizado, visión artificial.

I. INTRODUCCIÓN

La mejora de la competitividad y el avance en la producción industrial está directamente correlacionado con la mejora de los sistemas de automatización [1, 2] y con el componente humano encargado de aplicar la tecnología disponible. En las áreas de ingeniería se entiende que el trabajo de laboratorio integrado dentro del periodo formativo es una parte fundamental del proceso de aprendizaje y de asimilación de conocimientos y conceptos teóricos [3, 4].

En este artículo se analizan los resultados docentes obtenidos al utilizar un robot cartesiano [5, 6, 7] (Fig. 1) de 5 grados de libertad [8] que incorpora una cámara en la pinza de recogida. El objetivo del dispositivo era permitir el desarrollo de nuevas prácticas docentes [9] que combinen conocimientos y habilidades de robótica, automatización, y de visión artificial para la resolución de problemas [10]. A nivel industrial, la utilización de robots cartesianos es común por su simplicidad y versatilidad ya que permiten un movimiento libre en el plano vertical y horizontal para desarrollar tareas de manipulación y montaje tales como clasificar, embalar, estampar, marcar, pegar, soldar y paletizar [11]; aplicaciones que pueden ejecutarse de forma muy eficiente si se combinan con técnicas de visión artificial. El objetivo final de la experiencia docente es que un alumno de ingeniería pueda utilizar una herramienta robótica similar a las utilizadas en la industria pero en un entorno mucho más controlado.



Fig. 1. Imagen de uno de los robots cartesianos.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

En el desarrollo de este artículo se han utilizado un total de 10 robots cartesianos y han participado dos promociones de estudiantes de ingeniería del Grado en Ingeniería Electrónica Industrial y Automática (GIEIA), impartido en la Escuela Politécnica Superior de la Universidad de Lleida.

A. Robot Cartesiano

El diseño y fabricación del robot cartesiano se basa en la propuesta [7]. El diseño del robot cartesiano fue realizado mediante el software CREO/Pro-ENGINEER con piezas mecánicas comerciales y con piezas mecánicas construidas mediante técnicas de prototipado rápido en plástico ABS.

El robot dispone de una base plana (tablero de PVC blanco de 450x390x15 mm) que sustenta toda la estructura del robot cartesiano [7] y que realiza las funciones de base neutra para resaltar cualquier objeto y facilitar su localización en la imagen obtenida por la cámara situada en la pinza del robot cartesiano. La estructura que soporta las cargas del robot se basa en un perfil nervado de aluminio de sección 20x20 mm y ranura de 6 mm fabricadas por Rexroth [7]. Estos perfiles permiten el roscado de tornillos M6 y la unión con otros perfiles para formar estructuras y soportar otros elementos estructurales.

De forma similar a los robots de uso industrial, se utilizan cadenas portacables de plástico de 10x7 mm de sección fabricadas por Igus para transportar los cables a todos los elementos móviles del robot [7]. El desplazamiento axial de los ejes principales del robot cartesiano se consigue mediante husillos y motores de corriente continua de bajo coste de 6V que disponen de reductora y codificador magnético de dos

canales y tres impulsos por vuelta (BS 138 F-2S de la compañía Micro Motors).

El robot cartesiano está formado por dos dispositivos USB: una placa de control de motores y una cámara tipo webcam. Para simplificar el uso del dispositivo como herramienta docente el robot incorpora un HUB interno con el objetivo de reducir el número de cables de conexión USB a un único cable. El HUB se basa en el chip FE1.1S de la empresa Shenzhen Jing Feng Electronic Technology que requiere un único elemento externo (un reloj oscilador) para realizar las funciones de HUB de cuatro puertos.

La placa de control de motores (Fig. 2) del robot cartesiano se basa en el procesador STM32F407VGT6 del fabricante ST Microelectronics; basado en la arquitectura ARMv7-ME. La placa permite controlar el PWM aplicado a los cinco motores del robot y leer su velocidad de giro al interpretar la señal de sus codificadores. La comunicación con la placa se realiza mediante un bus USB configurado como puerto serie virtual (USB CDC). De esta forma el control del robot cartesiano por parte de un programa de ordenador tan solo requiere 1) abrir un puerto serie RS232 y 2) enviar y recibir datos a dicho puerto.



Fig. 2. Placa de control de motores.

La pinza del robot cartesiano incorpora en su estructura una cámara USB de reducidas dimensiones y bajo coste (NGS NetCam-300) con un sensor CMOS de 300Kpx con enfoque manual y un sistema de iluminación LED para que el dispositivo pueda ser controlado mediante un bucle de realimentación visual (Fig. 3).



Fig. 3. Detalle de la pinza del robot cartesiano.

La comunicación con el robot se realiza mediante el puerto serie y con comandos en formato texto. La Tabla I muestra los comandos y las posibles respuestas.

TABLA I. ALGUNOS COMANDOS DE CONTROL DEL ROBOT CARTESIANO

Comando	Descripción
'STATUS'	Consulta si se han ejecutado todos los movimientos
'MX 100'	Sitúa el motor X en la posición absoluta 100
'STOP'	Para todos los motores
'GX 200'	Prepara el motor X para ir a la posición absoluta 200
'INI'	Ejecuta todas las ordenes GX pendientes
'VX 500'	Definir velocidad de avance del motor X a 500 rpm

B. Alumnos del curso 2012-2013

La primera experiencia docente tuvo lugar con estudiantes de la primera promoción de la titulación de Grado de Ingeniería Electrónica Industrial y Automática, en una asignatura obligatoria de tercer curso denominada Diseño de Sistemas de Control i Robótica impartida en el segundo cuatrimestre del curso, periodo de febrero a junio, curso 2012-2013. En total la asignatura contó con 11 alumnos matriculados (Fig. 4). En este caso específico, la evaluación de la asignatura se realiza de forma continua valorando el trabajo práctico realizado por los estudiantes.



Fig. 4. Foto de estudiantes del curso 2012-2013.

C. Alumnos del curso 2013-2014

La segunda experiencia docente tuvo lugar con estudiantes de la segunda promoción de la titulación de Grado en Ingeniería Electrónica Industrial y Automática, repitiendo la experiencia en la misma asignatura, curso 2013-2014. En total fueron 19 los estudiantes matriculados en la asignatura (Fig. 5).

III. USO DEL ROBOT COMO HERRAMIENTA DOCENTE

El diseño del robot cartesiano como herramienta docente permite desarrollar las siguientes tareas experimentales:

- Configuración, acceso y comunicación con un puerto RS-232 (ya que la conexión USB con el robot simula un puerto serie virtual o USB CDC).
- Controlar individualmente cada motor del robot:

posición destino, PWM aplicado al motor, etc.

- Controlar conjuntamente todos los motores del robot cartesiano.
- Controlar el nivel de iluminación de los LEDs de la pinza.
- Configuración y acceso a la imagen capturada por la cámara de la pinza.

El entorno Matlab es el propuesto para utilizar el robot como herramienta docente por su facilidad de desarrollo algorítmico y de presentación de datos.

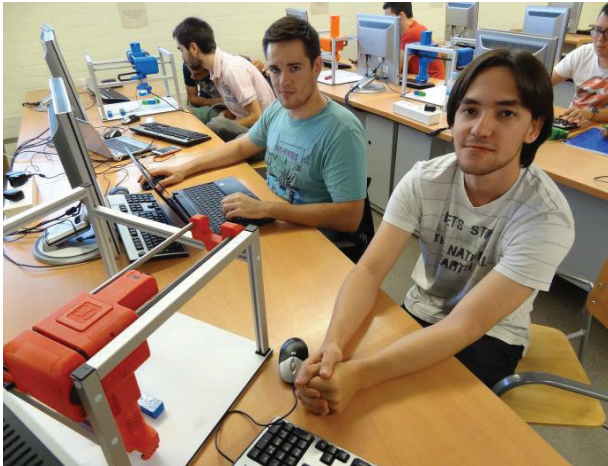


Fig. 5. Foto de estudiantes del curso 2012-2013.

A. Acceso directo al robot cartesiano

El robot cartesiano se conecta a un ordenador mediante un puerto USB convencional que simula una conexión RS-232. Este tipo de conexiones serie puede utilizarse sin problemas en cualquier entorno de programación así como en el entorno Matlab.

Para facilitar el proceso de aprendizaje se optó por desarrollar una función independiente de alto nivel ("robotcart.m") que permitiese crear algo similar a lo que en programación se define como una "clase" tipo robot, cuyo objetivo principal era heredar las funciones de comunicación RS232 necesarias para utilizar el robot, por ejemplo:

```
>> robot = robotcart;
```

permite el acceso a funciones de alto nivel predefinidas para permitir la comunicación con el robot: openport, closeport, senddata, senddatawait, getdata, inmotion. La definición de esta parte del código como si se tratara de una "clase" permite que todas estas funciones de alto nivel estén en una única función Matlab (robotcart.m), lo que debería contribuir a simplificar el trabajo del estudiante al no tener que manejar un gran conjunto de pequeñas funciones.

Por ejemplo, la comprobación de si el robot está realizando un movimiento puede realizarse de esta forma:

```
if robot.inmotion()
    % código en el caso de se esté ejecutando un movimiento
else
    % código si no se está ejecutando ningún un movimiento
end
```

y, por ejemplo, el envío de una orden para modificar la intensidad de iluminación de los leds de la pinza puede realizarse mediante el envío al robot del comando de control en formato texto 'L 90', la siguiente forma:

```
>> robot.senddata('L 90');
```

en caso de que se quiera enviar una orden de movimiento a todos los motores del robot y bloquear la ejecución de Matlab hasta que el movimiento finalice:

```
>> robot.senddatawait('M 10 20 - - 100');
```

en este caso el símbolo '-' indica que la posición de los motores 3 y 4 no se modifica.

B. Acceso directo a la imagen de la pinza

La cámara situada en la pinza del robot se accede como una webcam convencional. El entorno Matlab ofrece varias alternativas que permiten acceder a la imagen de la cámara [6] (Fig. 6). Las alternativas que pueden utilizarse de forma gratuita son las basadas en la función vcap2.dll y como "Support Package: USB Webcam Support with MATLAB" que puede descargarse como elemento adicional a partir de la versión 2014 de Matlab.

Ambas alternativas permiten el acceso directo a la imagen capturada por la cámara aunque el "Support Package" de Matlab no requiere abrir una ventana que muestre una vista previa o "preview" de la imagen de la cámara. En la mayoría de los casos, la inexistencia de una ventana adicional de vista previa va a simplificar la utilización del sistema al reducir el número total de ventanas activas.

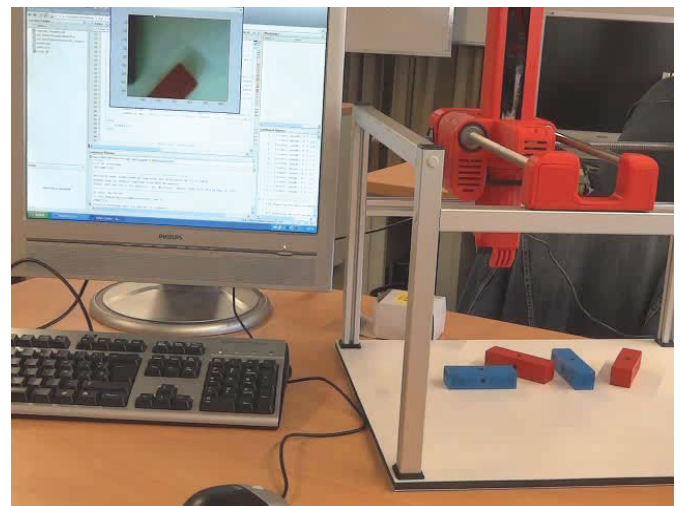


Fig. 6. Ejemplo de imagen capturada por la cámara situada en la pinza del robot cartesiano.

C. Aplicación de control manual

La figura 7 muestra una imagen de la aplicación de control manual (también denominada como control remoto) facilitada a los estudiantes como material docente. Esta aplicación ofrece un interfaz gráfico con elementos deslizables que representan a cada uno de los motores disponibles en los cinco ejes del robot. La aplicación de control remoto se conecta al robot mediante la configuración de un puerto serie. Tras la conexión se obliga al robot a hacer una inicialización para

situar todos los motores en su posición inicial (siempre la misma), obtener los límites de desplazamiento de cada eje (es decir, de cada motor), obtener la posición actual absoluta, obtener el nivel de potencia actual de cada motor, estado de funcionamiento, alarmas de funcionamiento, etc. La aplicación de control remoto también permite ver una previsualización de la cámara situada en la pinza.

La aplicación de control remoto permite definir e implementar un ciclo de funcionamiento industrial en un tiempo muy breve. Es decir, los controles de la aplicación permiten situar la pinza en una posición determinada y luego guardar dicha posición en la memoria del robot, por ejemplo como posición 0 (o 'P0'). La secuencia de posiciones necesarias para definir una acción como, por ejemplo, recoger un pequeño objeto con la pinza para transportarlo o situarlo en una determinada nueva posición define el programa de control del robot cartesiano. El robot cartesiano puede utilizarse para ejecutar cualquier programa de control definido previamente, es decir, ir a la posición 'P0', luego a la 'P1', luego a la 'P2', y así hasta la última posición memorizada.

Gracias a la aplicación de control remoto el estudiante puede analizar el funcionamiento del robot como sistema de automatización y, al mismo tiempo, disponer de un ejemplo muy elaborado de implementación de código de control con interfases gráficas en Matlab. El problema originado por el hecho de facilitar esta aplicación de control remoto al estudiante es que entonces está en condiciones de resolver una propuesta práctica de desarrollo de un programa de control en menos de 30 minutos ya que lo único que tiene que hacer es ir situando los diversos ejes del robot cartesiano en todas las posiciones intermedias necesarias para realizar una tarea determinada. No obstante se considera un buen ejemplo ya que pasa lo mismo en un sistema industrial, en el que tan solo es necesario programar una secuencia con todas las posiciones intermedias que deba alcanzar el robot cartesiano.

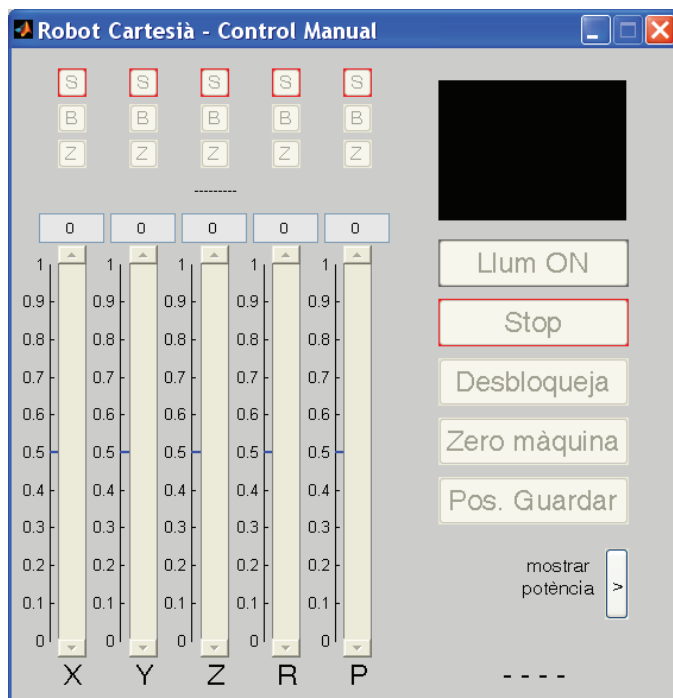


Fig. 7. Aplicación de control remoto del robot cartesiano.

D. Aplicación del estudiante

La figura 8 muestra una imagen de la aplicación proporcionada al estudiante para implementar una aplicación de automatización controlada por imagen. Esta aplicación contiene una serie de menús ejemplo con ejemplos muy sencillos de lo que debe hacerse para conectarse con el robot, para enviar una orden de desplazamiento a alguno de sus ejes y para acceder a la imagen de la cámara situada en la pinza.

Una de las ventajas de la aplicación del estudiante es que es compatible con el control remoto descrito anteriormente con lo que el estudiante puede utilizar dicho control remoto para "supervisar, deshacer o detener" el resultado de las órdenes de control definidas en su propio código, lo que permite aumentar el nivel de autoconfianza del estudiante y eliminar los riesgos de un proceso natural de aprendizaje que requiere de la prueba y del error.

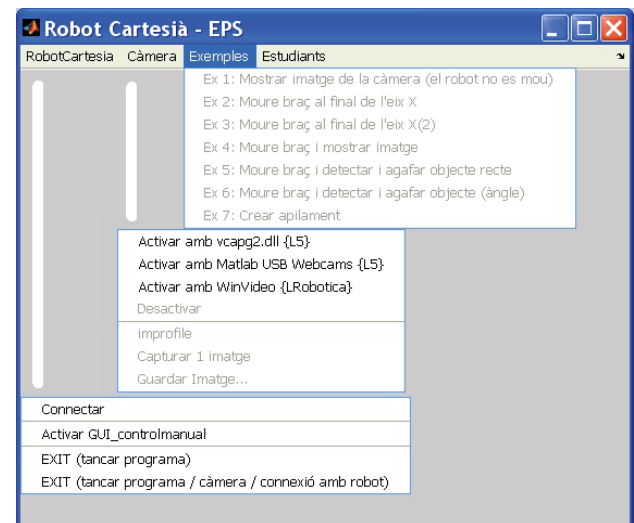


Fig. 8. Aplicación del estudiante para el control del robot cartesiano.

IV. RESULTADOS DOCENTES

Los resultados docentes analizados en este trabajo son el resultado del proceso de aprendizaje y los resultados del proceso de evaluación (notas) de los estudiantes.

A. Resultados del proceso de aprendizaje

Los resultados del proceso de aprendizaje basado en la utilización del robot cartesiano como elemento docente de implementación a escala de un sistema experimental de automatización industrial han sido muy positivos ya que todos los estudiantes que han utilizado el robot cartesiano en los cursos 2012-2013 y 2013-2014 han logrado cumplir todos los objetivos planteados. La Figura 9 muestra algunas imágenes obtenidas durante el proceso de aprendizaje cuyos objetivos generales han sido:

- Adquirir conocimientos y habilidades que permitan manejar un robot cartesiano para realizar una tarea determinada.
- Adquirir conocimientos y habilidades que permitan procesar una imagen para conseguir una información determinada.
- Combinar conocimientos y habilidades para definir una acción robotizada controlada por un sistema de imagen.

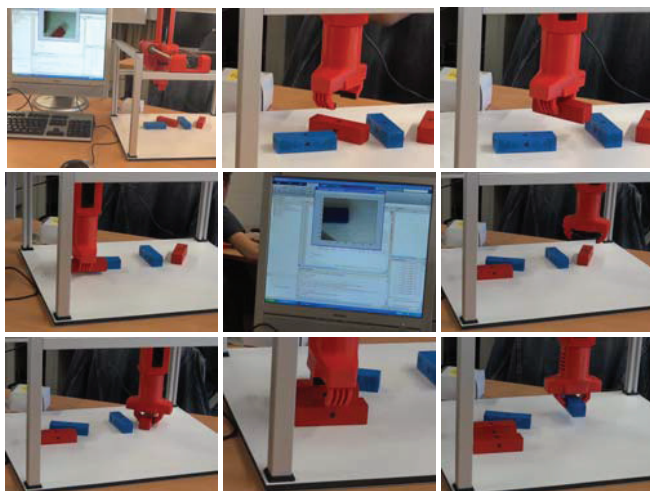


Fig. 9. Imágenes de la utilización del robot cartesiano.

B. Resultados del proceso de evaluación de los estudiantes

Las figuras 10 y 12 muestran los resultados del proceso de evaluación aplicado a los estudiantes en lo referente a las diversas prácticas realizadas en la asignatura y en lo referente a las prácticas (o casos prácticos) basados en la utilización del robot cartesiano. La figura 11 muestra una estimación de la dificultad de la totalidad de las prácticas realizadas por los alumnos en el curso 2012-2013 en una escala entre 0 (muy simple) y 10 (muy complicada) en la que se observa un planteamiento de dificultad creciente y donde las dos prácticas finales (o casos prácticos) basados en la utilización del robot cartesiano representan la máxima dificultad y con objetivos que requieren aplicar conocimientos interdisciplinarios de otras asignaturas del grado.

Las evaluaciones de los estudiantes correspondientes al curso 2012-2013 (Fig. 10) muestran un elevado grado de compromiso e implicación por parte de los estudiantes en la realización de las prácticas. La nota promedio del curso tras ponderar la dificultad y tiempo empleado en la realización de las prácticas por parte de los estudiantes ha sido muy elevada (9.62 puntos sobre 10). Se puede destacar que la nota media de la práctica final desarrollada con el robot cartesiano ha sido 10 sobre 10, lo que implica que todos los estudiantes han podido completar todos los objetivos de la práctica (o caso) final y que dicha ejecución ha sido excelente. No obstante, hay que realizar una serie de matizaciones a estos resultados:

- Los estudiantes del curso 2012-2013 pertenecen a la primera promoción del grado y han completado cada curso previo en un año por lo que se trata de una selección de los 60 mejores estudiantes que se matricularon en el centro dos años antes.
- El planteamiento de las prácticas es presencial y se han dimensionado para que los estudiantes hayan dispuesto del tiempo necesario para desarrollarlas plenamente.
- Se ha dedicado un énfasis especial a facilitar el proceso de aprendizaje del estudiante destinando los siguientes recursos de profesorado durante el periodo de prácticas con el robot cartesiano: un profesor senior, un estudiante de doctorado y un asistente de docencia (becario de soporte). Este equipo humano participó en el proceso de diseño y desarrollo del robot cartesiano por lo que debe considerarse como experto en la utilización del equipo.

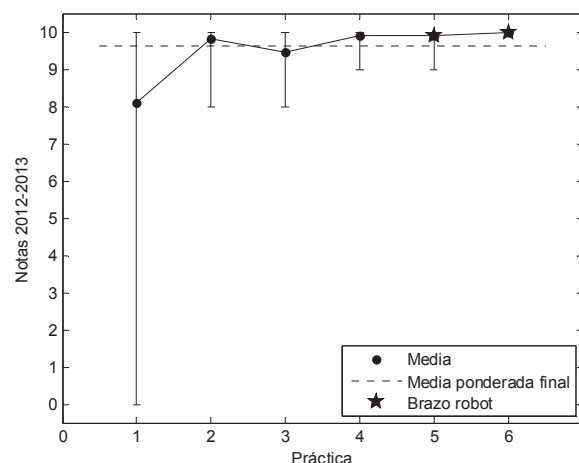


Fig. 10. Resultados obtenidos por los estudiantes del curso 2012-2013.

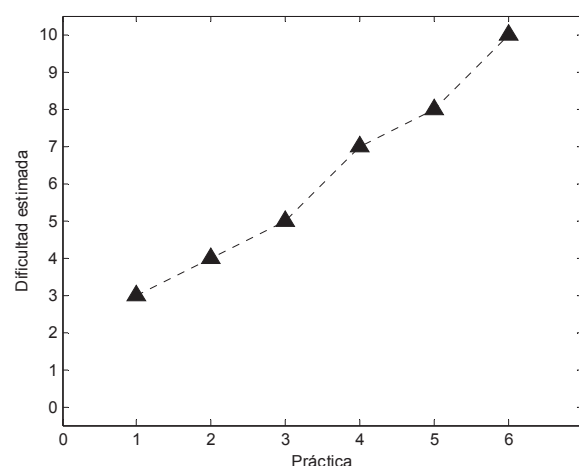


Fig. 11. Dificultad estimada de las prácticas realizadas el curso 2012-2013.

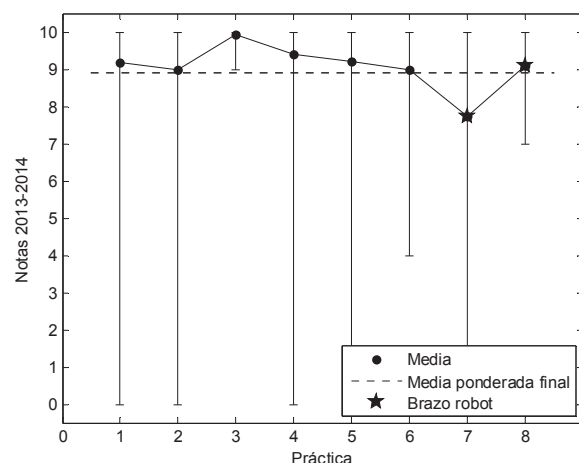


Fig. 12. Resultados obtenidos por los estudiantes del curso 2013-2014.

Las evaluaciones de los estudiantes correspondientes al curso 2013-2014 (Fig. 12) muestran igualmente un elevado grado de compromiso e implicación por parte de los estudiantes en la realización de las prácticas. La nota promedio del curso tras ponderar la dificultad y tiempo empleado en la realización de las prácticas por parte de los estudiantes ha sido muy elevada (8.89 puntos sobre 10). En este caso, el número de prácticas a realizar por los estudiantes

(enunciados) a aumentado ya que algunas prácticas realizadas en el curso anterior se han dividido en dos para simplificar el proceso de ejecución y aprendizaje. De esta forma se considera que el trabajo práctico realizado por el estudiante es aproximadamente el mismo que el realizado en el curso anterior y con niveles de dificultad similares. Una de los elementos más sorprendentes ha sido un elevado número de prácticas no presentadas (valoradas automáticamente con un 0) por parte de los estudiantes dentro del período definido a tal efecto. La valoración de las prácticas requiere que el estudiante complete un sencillo informe que básicamente requiere unas cuantas capturas de imágenes y muy poco o ningún texto explicativo. El informe debe "subirse" al campus virtual de la asignatura en el periodo predefinido, tarea que, una vez sobrepasado la fecha límite, no puede realizarse por lo que automáticamente dicha práctica pasa a tener una valoración de 0 puntos. Una de las efectos que se ha observado es que bastantes estudiantes prefieren no presentar una práctica si no creen que está adecuada o terminada. La valoración continua de la asignatura que se basa en el promedio ponderado de las diversas notas de prácticas no impide que un estudiante pueda aprobar la asignatura incluso con alguna práctica no realizada pero es sorprendente que un estudiante prefiera una valoración de 0 puntos a una posible valoración de, tal vez, 4 o 6 puntos en una práctica. Actualmente se desconoce si este efecto es un suceso puntual originado por las iniciativas especiales implementadas en la asignatura o si puede identificarse como una nueva tendencia de comportamiento en el alumnado.

C. Valoraciones

Las valoraciones generales de la experiencia docente han sido muy positivas. La interpretación de la valoración de los estudiantes acerca de la experiencia docente se basa en las impresiones y percepciones interpretadas directamente por el profesorado que ha desarrollado todo el proceso práctico de aprendizaje. La percepción general de las dos experiencias docentes desarrolladas es que el estudiante muestra una buena actitud y una gran voluntad de aprendizaje cuando se implica en un proceso práctico dirigido a obtener resultados tangibles. No obstante la implicación del estudiante requiere o exige a su vez una gran implicación del profesorado que ha de dirigir de una forma muy activa todos los procesos de aprendizaje que se están desarrollando de forma simultánea en el laboratorio docente.

La valoración del profesorado implicado en la experiencia docente presentada en este artículo es muy positiva ya que el esfuerzo aplicado en la formación de los estudiantes se transforma casi en su totalidad en nuevos conocimientos y habilidades que pueden evaluarse fácilmente de forma objetiva.

V. CONCLUSIONES

En este artículo se describe el análisis de los resultados de la experiencia de utilizar un robot cartesiano como herramienta docente. El control del robot cartesiano se realiza mediante el control de 5 motores de corriente continua equipados con codificadores magnéticos y mediante el acceso a las imágenes de la cámara situada en la pinza del robot. El robot cartesiano se ha utilizado como herramienta docente en

una asignatura de grado durante dos cursos académicos.

Los resultados del proceso de aprendizaje evidencian que los estudiantes han sido capaces de adquirir y combinar nuevos conocimientos y habilidades para resolver problemas de ingeniería. Asimismo, los resultados del proceso de evaluación de los estudiantes evidencian unos resultados académicos excelentes en el caso de una asignatura basada en la evaluación continuada de los estudiantes mediante la realización de trabajos prácticos.

La valoración de la experiencia docente por parte de estudiantes y profesorado implicado es muy positiva ya que todos los esfuerzos que se han empleado tanto en la enseñanza como en el aprendizaje se han visto plasmados en los resultados prácticos como en los resultados docentes de los estudiantes.

REFERENCIAS

- [1] S. Kock, T. Vittor, B. Matthias, H. Jerregard, M. Kallman, I. Lundberg, R. Mellander, M. Hedelind, "Robot concept for scalable, flexible assembly automation: A technology study on a harmless dual-armed robot," in *IEEE International Symposium on Assembly and Manufacturing (ISAM)*, Tampere, 2011, pp.1-5.
- [2] A. Nagchaudhuri, "Robotics and machine vision for introduction to flexible automation to engineering undergraduates," *Frontiers in Education*, 2002. vol.1, pp. T2D-23- T2D-28, 2002.
- [3] A. Emin and G. Erdemir, "Development of a web-based control and robotic applications laboratory for control engineer education," *Information Technology and Control*, 2011, no.4, pp. 352-7, 2011.
- [4] T. Bojko, "Educational Cartesian robot based on linear drives," in *Proceedings of the Fourth International Workshop on Robot Motion and Control*, Puzoszykowo, 2004, pp. 203- 208.
- [5] P. Sanchez-Sanchez, F. Reyes-Cortes. "A new Cartesian controller for robot manipulators," in *2005 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2005, pp. 3733- 3739.
- [6] M. Teixido, D. Font, T. Palleja, M. Tresanchez, J. Palacin. " Ejemplo de caso práctico de aprendizaje combinando visión artificial y un brazo robot," in *Seminario Anual de Automatica, Electronica Industrial e Instrumentacion (SAAEI 2012)*, Guimaraes, pp. 835-839.
- [7] J. Moreno, M. Tresanchez, T. Palleja, M. Teixido, D. Font, J. Palacin. "Desarrollo de un robot cartesiano de uso docente con 5 grados de libertad y una camara en la pinza," in *Seminario Anual de Automatica, Electronica Industrial e Instrumentacion (SAAEI 2013)*, Madrid, 2013.
- [8] T.M. Khan, M. Arshad, M.A. Choudhry. "Modeling and Control of Cartesian Robot Manipulator," in *9th IEEE International Multitopic Conference*, Karachi, 2005, pp.1-4.
- [9] T. Palleja, M. Teixido, D. Font, M. Tresanchez, J. Palacin, "Desarrollo de un Caso Practico de Aprendizaje Combinando Vision Artificial y un Brazo Robot," *VAEP-RITA*, 2013, no. 1, pp. 61-68.
- [10] H. Frank, D. Barteit, M. Meyer, A. Mittnacht, G. Novak, S. Mahlke. "Optimized Control Methods for Capturing Flying Objects with a Cartesian Robot," in *IEEE Conference on Robotics, Automation and Mechatronics*, Chengdu, 2008, pp.160-165.
- [11] D.A. Anisi, J. Gunnar, T. Lillehagen, C. Skourup, "Robot automation in oil and gas facilities: Indoor and onsite demonstrations," in *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Taiwan, 2010, pp.4729-4734.