

Desarrollo de un Caso Práctico de Aprendizaje Combinando Visión Artificial y un Brazo Robot

Tomàs Pallejà, Mercè Teixidó, Davinia Font, Marcel Tresanchez, Jordi Palacín, *Miembro IEEE*

Title—Development of a Learning Case Example Combining Artificial Vision and a Robotic Arm.

Abstract—This work describes a learning case developed in the University of Lleida, Spain. This proposal is addressed to third course engineering students that must combine knowledge from artificial vision and robotic control to complete an automation task. The objective is the detection of a small object placed randomly on a surface to recollect and store it with a robotic arm. The educational results of this experience have shown that the development of a learning case based on the combination of artificial vision and robotics increases the motivation of the students and improve the assimilation of theoretical concepts.

Index Terms— Robotic arm, artificial vision, learning experience, practical case.

I. INTRODUCCIÓN

LOS experimentos de laboratorio son una parte fundamental del proceso de aprendizaje ya que permiten aplicar y asimilar conocimientos y conceptos teóricos [1],[2] y aumentar la motivación del alumno [3]. En este trabajo se propone utilizar la robótica para definir un caso práctico de aprendizaje de forma similar a las propuestas realizadas en [4], [5], [6] y a otras propuestas basadas en el uso de simuladores [7], [8], u operando de forma remota mediante interfaz Web [1] y dispositivos móviles [9].

En este trabajo se describe el desarrollo de un caso práctico de aprendizaje planteado a estudiantes de tercer curso de ingeniería de la Escuela Politécnica Superior de la Universidad de Lleida, España, cuya versión preliminar centrada en la descripción de los materiales necesarios para el desarrollo del caso práctico se encuentra en [10]. El caso práctico propuesto plantea la resolución de un problema de automatización en un entorno industrial simulado (Fig. 1) en el que un brazo robot debe recoger un pequeño objeto situado de forma aleatoria dentro de una zona de recogida para depositarlo en una determinada zona de almacenaje.

Para poder desarrollar el caso práctico de aprendizaje propuesto el alumno dispone de una célula de automatización que incluye (Fig. 1): una cámara cenital situada sobre el área de recogida, un sistema de iluminación, un brazo robot educativo, un recipiente de almacenamiento y un ordenador personal.

Los autores T. Pallejà, M. Tresanchez y J. Palacín son investigadores del Grupo de Investigación en Robótica de la Universidad de Lleida, España. Las autoras M. Teixidó y D. Font son investigadoras en formación del mismo grupo.

Emails: {tpalleja, mteixido, dfont, mtresanchez, palacin}@diei.udl.cat.



Fig. 1. Vista general de la célula de automatización creada para desarrollar el caso práctico de aprendizaje.

El desarrollo del caso práctico requiere la aplicación de conocimientos de visión artificial, con el objetivo de detectar el pequeño objeto, y de control de un brazo robot educativo, con el objetivo de recoger el objeto y transportarlo adecuadamente hasta la zona o caja de almacenamiento. En la formulación del caso práctico de aprendizaje se propone realizar la recogida del objeto mediante realimentación visual, detectando la posición del objeto y la posición de la pinza del brazo robot en la imagen adquirida por la cámara cenital para ordenar pequeños desplazamientos que acerquen la pinza al objeto.

La estructura del trabajo es la siguiente. La sección II describe el entorno docente de la propuesta; la sección III los materiales y métodos utilizados; la sección IV los resultados obtenidos y la sección V las conclusiones finales.

II. ENTORNO DOCENTE

El caso práctico de aprendizaje se plantea en una asignatura universitaria de ingeniería cuyo objetivo es aportar conocimientos de visión artificial, automática y robótica al currículum académico del estudiante. La asignatura ha formado parte del tercer curso de la titulación de Ingeniería Técnica en Informática de Sistemas que se ha impartido en la Escuela Politécnica Superior de la Universidad de Lleida hasta el curso 2011-12. Actualmente esta titulación se ha reestructurado en forma de Grado en Ingeniería Informática.

El objetivo básico de la asignatura en el que se plantea el caso práctico de aprendizaje es realizar una introducción práctica a las diversas técnicas y algoritmos aplicables en el campo de visión artificial. El desarrollo de los conceptos teóricos de la asignatura es totalmente convencional y tiene como objetivo proporcionar conocimientos y habilidades. El desarrollo práctico de la asignatura se basa en el desarrollo

de competencias a partir de la realización de casos prácticos como el descrito en este trabajo. De esta forma el desarrollo práctico de la asignatura se estructura en tres grandes bloques: programación avanzada en Matlab, ejemplos de procesamiento de imagen, y desarrollo de casos prácticos de aprendizaje.

A. Programación Avanzada en Matlab

El programa Matlab [11], ampliamente utilizado en entornos universitarios [12], permite analizar datos, desarrollar algoritmos y crear modelos o aplicaciones mediante la utilización de un lenguaje de alto nivel y un entorno interactivo para el cálculo, la visualización y la programación de tareas. En la asignatura se utiliza como herramienta para poder implementar de forma rápida y atractiva las técnicas y algoritmos de procesamiento de imágenes impartidas en el curso. Para ello se parte de la base de que el alumno está familiarizado en el concepto de programación informática y de que dicho programa ha sido utilizado con anterioridad en otras asignaturas de la titulación. De esta forma el objetivo de este bloque es que el alumno adquiera conocimientos específicos que le permitan desarrollar aplicaciones completas en Matlab que dispongan de los menús y de los elementos gráficos necesarios para que el resultado final sea compacto y lo más parecido posible a un programa de control industrial.

B. Introducción al Procesado de Imagen

Una vez adquiridos los conocimientos y habilidades que permiten crear aplicaciones con una apariencia compacta e industrial el objetivo es aplicar técnicas y algoritmos de procesamiento de imagen. Por ejemplo, modificación de brillo, contraste o gamma, cálculo de histogramas, filtrado, segmentación, aplicación de funciones morfológicas y finalmente la realización de mediciones en las imágenes.

C. Casos Prácticos de Aprendizaje

El objetivo de este bloque docente es el desarrollo final de las competencias que permitan que un alumno sea capaz de desarrollar un sistema que resuelva un problema determinado mediante la aplicación de conocimientos y habilidades de visión artificial y de robótica. Para ello se propone la resolución de diversos problemas prácticos con una dificultad incremental, siendo el último de ellos el descrito en este trabajo.

III. MATERIALES Y MÉTODOS

La figura 1 muestra la célula de automatización creada para desarrollar el caso práctico de aprendizaje, cuyos elementos característicos más importantes son: una cámara cenital, una fuente de luz con una cubierta difusa, una zona de recogida delimitada mediante una línea negra gruesa, un objeto cúbico de color azul claro y un recipiente de almacenaje de color azul oscuro. La célula de automatización incorpora también un ordenador personal equipado con Windows XP y Matlab donde se aplicarán los métodos requeridos para el desarrollo experimental del caso práctico propuesto. Como elementos adicionales se incorporan dos funciones para acceder al brazo robot y para acceder a la cámara cenital de la célula de automatización.

A. Brazo Robot

El brazo robot educacional utilizado en este trabajo es el *Service-Arm Type CS-113* (ver Fig. 2) cuyas especificaciones técnicas y más datos especializados se encuentran disponibles en [13]. El diseño del brazo robot simula el comportamiento mecánico de un robot industrial de 6 grados de libertad, disponiendo de motores paso a paso en cada articulación. En la literatura científica existen diversos ejemplos de utilización de este brazo robot [1] [14]. El brazo robot pesa 8 Kg y tiene una capacidad de carga teórica de hasta 500g. La Tabla I muestra de forma resumida la relación entre los diversos motores del brazo robot y el rango de movimientos de las articulaciones: el movimiento del primer motor corresponde con el de la cintura, el segundo se corresponde con el movimiento vertical del hombro, el tercero se corresponde con el giro del codo también en sentido vertical, la combinación del cuarto y quinto motores produce los movimientos de giro e inclinación de la muñeca y el sexto motor efectúa los movimientos de abrir y cerrar la pinza.

El brazo robot incorpora una placa de control equipada con un microcontrolador Z-80A que es el encargado de recibir órdenes de control a través del puerto paralelo del ordenador y de controlar la posición de los diversos motores paso a paso y la velocidad de giro de las articulaciones. Una de las desventajas de este brazo robot es que no dispone de realimentación en las articulaciones por lo que es imposible conocer la posición de las diversas articulaciones al poner en marcha el dispositivo y, además, cualquier choque o freno puede provocar una pérdida de pasos en los motores paso a paso y perderse todas las referencias almacenadas en el robot.

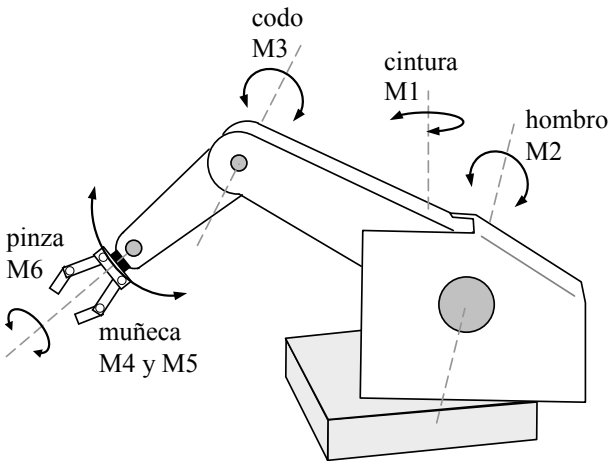


Fig. 2. Representación esquemática del brazo robot CS-113.

TABLA I
RANGO DE MOVIMIENTOS DEL BRAZO ROBOT CS-113

motor	articulación	paso	valor (rango)
M1	cintura	0.12°	240° (±120°)
M2	hombro	0.12°	140° (±70°)
M3	codo	0.08°	100° (±50°)
M4 M5	muñeca	0.05°	(180° inclinación) (360° rotación)
M6	pinza	0.1°	240° (±120°)

Para facilitar la utilización docente del brazo robot las articulaciones disponen de una serie de marcas de alineamiento con el objetivo de poder situarlas manualmente en una misma posición de referencia, proceso que hay que repetir en caso de cualquier incidencia.

El brazo robot se conecta a un ordenador mediante un cable paralelo Centronics [15] y se comporta, a todos los efectos, como una impresora. De hecho, en la mayoría de los casos puede ser necesario tener instalada una impresora IBM-Proprinter (de las primeras impresoras de agujas disponibles para PCs) en el puerto paralelo para que los modernos sistemas operativos permitan la comunicación de un programa con el brazo robot. Para enviar cualquier orden al brazo robot es necesario enviar comandos ASCII a la impresora. La tabla II muestra los comandos aceptados, por ejemplo, el código ASCII “C” cierra la pinza del brazo robot. La comunicación del ordenador con el brazo robot (o impresora) se realiza de forma unidireccional y para introducir una mínima realimentación el brazo robot utiliza la línea ACKNOWLEDGMENT (que indica impresora ocupada) del puerto Centronics para señalar cuando se ha terminado la última acción solicitada. De esta forma se bloquea el envío de instrucciones al brazo robot hasta que se desactive dicha línea.

B. Cámara del Sistema de Visión

La cámara utilizada para obtener las imágenes de la zona de recogida es una Labtec® WEBCAM (ver Fig. 3) [16]. Esta cámara incorpora un sensor CMOS con una resolución de 352x288 píxeles, enfoque manual, frecuencia máxima de adquisición de 30 imágenes por segundo y una conexión estándar USB. La cámara puede ser configurada para generar imágenes en los formatos RGB con 24 bits de profundidad e I420 con 16 bits de profundidad. En ambos casos las resoluciones disponibles son 160x120, 176x144, 320x240, 352x288 y 640x480 (con imagen interpolada).

Para facilitar la implementación de algoritmos de procesamiento de imagen en un programa interpretado como Matlab es conveniente utilizar imágenes con poca resolución para que puedan ejecutarse con una cierta velocidad en un ordenador normal manteniendo una cierta impresión de inmediatez y de funcionamiento en tiempo real. La resolución y formato de imagen por defecto de esta cámara es RGB, 24 bits de profundidad y 352x288 píxeles, representando un compromiso óptimo entre rapidez de procesamiento e información aportada por la imagen.

C. Sistema de Iluminación

La célula de automatización incorpora un sistema de iluminación propio para observar experimentalmente la influencia de la iluminación en el funcionamiento de los algoritmos de control implementados. El sistema de iluminación incorpora dos tubos fluorescentes de 36W y un difusor. La figura 4 muestra la distribución de los niveles de iluminación existentes en la zona de recogida en el caso de utilizar únicamente iluminación artificial evitando la influencia de la luz del sol. Alternativamente, la figura 5 muestra el efecto de la radiación solar indirecta en la distribución de los niveles de intensidad de iluminación existentes en la zona de recogida. Se observa mayor homogeneidad y menor gradiente en el caso de utilizar el sistema de iluminación de la célula de automatización y, por

TABLA II
INSTRUCCIONES DEL BRAZO ROBOT CS-113

comando ASCII	definición
Z	Indica la posición de referencia (HOME)
$Mx_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6$	$\text{sign}(x_i)$: sentido de rotación (motor i) $\text{abs}(x_i)$: número de pasos a girar (motor i)
Hm	Memoriza la posición relativa actual de cada motor: $1 \leq m \leq 100$
$Pm, x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6$	Memoriza una posición relativa con los pasos de cada motor: $1 \leq m \leq 100$
Gm	Ordena alcanzar una determinada posición memorizada: $1 \leq m \leq 100$
N	Ordena ir a la posición HOME (ZERO)
C	Cierra la pinza hasta su límite máximo
O	Abre la pinza hasta su límite máximo
Sv	Determina la velocidad de los motores: $1 \leq v \leq 100$
Dt	Detiene el movimiento durante un tiempo determinado: $1 \leq t \leq 9$ segundos
Lv	Activa la comprobación de los límites de los motores: $v = \{0, 1\}$

tanto, será mucho más sencillo que los algoritmos de procesamiento de imagen puedan aplicarse de forma óptima con dichas condiciones de iluminación. En todo caso se considera importante poder experimentar la influencia de la iluminación en el funcionamiento general del sistema.

D. Objetos Codificados en Colores

Los dos objetos utilizados son un cubo de goma-espuma de 55mm de lado, 25g de peso y color azul claro y un recipiente de plástico de 165x100x75mm y color azul oscuro (Fig. 6). Ambos objetos se encuentran codificados en colores para facilitar su detección mediante un sistema de visión artificial y se dispone también de los mismos objetos en colores adicionales como el rojo y el verde para permitir futuras evoluciones del caso práctico propuesto.

El recipiente de almacenamiento se encuentra dentro del radio de acción del brazo robot aunque situado fuera del campo de visión de la cámara cenital. El recipiente de almacenamiento se encuentra sujeto firmemente a la célula de automatización para que su posición relativa no varíe.

E. Acceso a la Imagen de la Cámara

El acceso a la imagen de la cámara por parte del programa Matlab puede realizarse de dos formas diferentes: mediante una toolbox de Matlab o mediante una función gratuita llamada *vcapg2*.



Fig. 3. Cámara Labtec® WEBCAM.

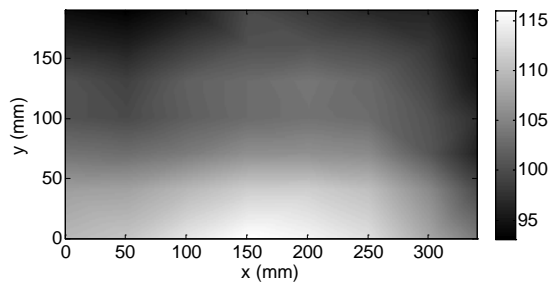


Fig. 4. Distribución de la intensidad de iluminación (lux) utilizando el sistema de iluminación artificial de la célula de automatización.

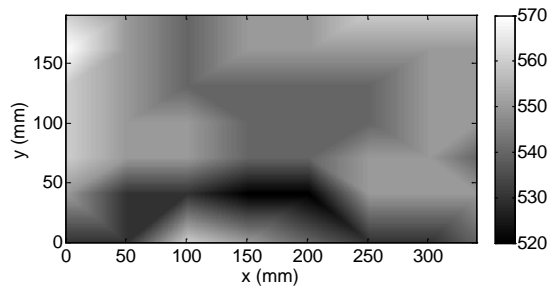


Fig. 5. Distribución de la intensidad de iluminación (lux) utilizando iluminación natural.

1) Mediante la toolbox de “Image Acquisition”

El programa MatLab dispone de una librería de funciones o *toolbox* de “Image Acquisition” que aporta funciones para acceder y controlar de forma sencilla la mayoría de tarjetas de adquisición de imágenes o *Frame Grabbers* y casi todas las cámaras que puedan conectarse mediante los buses USB o FireWire. El único problema de ésta *toolbox* es que es opcional y tiene un coste suplementario, pudiéndose dar el caso de que un centro docente que disponga de Matlab en sus laboratorios informáticos no disponga de dicha *toolbox*.

Principalmente, la *toolbox* “Image Acquisition” está diseñada para grabar una secuencia de imágenes para su análisis posterior y ofrece dos modos de trabajo: volcado de imágenes a disco (*logging to disk*) o volcado de imágenes a memoria (*logging to memory*). Además, en el caso de utilizar un *Frame Grabber* externo permite definir diversos tipos de disparadores o *triggers* para sincronizar la adquisición de imágenes con la aparición de un evento determinado.

El modo de volcado de imágenes en memoria dispone de una función de visualización previa o *preview* de la imagen de la cámara en una ventana especial adicional y de una función complementaria que permite obtener una instantánea de la imagen que se esté visualizando en ese momento (sin haber iniciado técnicamente la adquisición de imágenes). Estas funciones permiten el acceso visual a la zona de trabajo en cualquier momento. La figura 7 muestra un código base ilustrativo del uso de las citadas funciones. En primer lugar se debe crear un objeto de vídeo para el



Fig. 6. Cubo de goma (izquierda) y recipiente (derecha).

adaptador utilizado; la palabra clave “*winvideo*” permite el acceso a cualquier cámara USB conectada a un ordenador con sistema operativo Windows, el número de dispositivo permite indicar el número de la cámara a la que se quiere acceder y finalmente el formato debe coincidir con algún formato soportado por la cámara, en este caso RGB con una profundidad de color de 24 bits y una resolución de 320x240 píxeles.

2) Mediante la función gratuita: *vcapg2*

En el caso de no disponer de la *toolbox* especializada se puede optar por utilizar una función compilada en forma de librería dinámica denominada *vcapg2* [17] que se encuentra disponible de forma gratuita [18]. Esta función realiza una doble tarea. Cuando se ejecuta por primera vez establece un enlace de vídeo entre el sistema operativo y cualquier cámara USB conectada al ordenador, para ello crea una nueva ventana adicional en la que se visualiza la imagen capturada por la cámara. Cuando se vuelve a ejecutar retorna directamente la imagen que se esté visualizando en ese momento. La figura 8 muestra un código base ilustrativo del uso de la función.

```
% creación del objeto de vídeo de entrada
% videoinput(ADAPTADOR,DISPOSITIVO,FORMATO);
objeto = videoinput('winvideo',1,'RGB24_320x240');

% activar preview (crea una ventana auxiliar)
preview(objeto);
% inicio del bucle
while condicion
    % obtener imagen en forma de matriz con 3 capas
    imagen = getsnapshot(objeto);

    % código para procesar la imagen y controlar el robot
    % ...
end
% eliminar el objeto de vídeo al finalizar
delete(objeto);
```

Fig. 7. Código ejemplo de acceso a la imagen de la cámara mediante las funciones de la toolbox de Matlab.

```
% creación del objeto de vídeo de entrada y del preview
vcapg2;

% inicio del bucle
while condicion
    % obtener imagen,
    % el formato es el que la cámara tenga por defecto
    % Labtec: RGB, 8 bits por capa, 352x288 píxeles
    imagen = vcapg2;

    % código para procesar la imagen y controlar el robot
    % ...
end
% eliminar el objeto de vídeo al finalizar
clear vcapg2;
```

Fig. 8. Código ejemplo de acceso a la imagen de la cámara mediante la función *vcapg2*.

F. Control del Brazo Robot

La comunicación con el brazo robot requiere el envío de caracteres ASCII al puerto paralelo, cosa que el entorno Matlab no permite de forma directa. La única alternativa que permite establecer dicha comunicación es el acceso directo a los registros de bajo nivel que definen cada uno de los pines del puerto paralelo del ordenador con el objetivo de simular su funcionamiento. El resultado de esta aproximación se encuentra en el desarrollo específico de una función denominada *brazo_robot* que permite establecer la comunicación entre Matlab y el primer puerto paralelo del ordenador (o lpt1). El brazo robot mantiene activo el pin BUSY del puerto paralelo como retorno para indicar que todavía no ha terminado de realizar completamente el movimiento ordenado. La función *brazo_robot* supervisa el estado de este pin y no retorna el control a Matlab hasta que el brazo robot no indica la realización completa del último movimiento ordenado.

La función *brazo_robot* se ofrece de forma gratuita [19] y se creó a partir de la función ejemplo DIOPRINT. Su único inconveniente es que requiere la toolbox de “Data Acquisition” de Matlab ya que las funciones que permiten el acceso a los registros de bajo nivel se encuentran en dicha librería. La figura 9 muestra un código base ilustrativo del uso de esta función y del control del brazo robot mediante instrucciones ASCII.

G. Método Ejemplo de Resolución

En este apartado se describe un método ejemplo que permite cumplir con los objetivos planteados en el caso práctico de aprendizaje propuesto en este trabajo.

La figura 10 muestra una imagen obtenida con la cámara cenital que abarca un área ligeramente superior al rectángulo negro que delimitada la zona de recogida. En la imagen se observa el pequeño objeto de color azul claro que se debe recoger y la pinza del brazo robot en posición abierta que incorpora dos pequeños triángulos rojos en los extremos para facilitar su detección visual.

```
% girar el motor 1 10 pasos en sentido de rotación positivo
% girar el motor 3 50 pasos en sentido de rotación negativo
% no mover ningún otro motor
brazo_robot('M10,0,-50,0,0,0');

% cierre de la pinza (recoger el objeto)
brazo_robot('C');

% ir a la posición de referencia 1, luego a la 2 y luego a la
3
brazo_robot('G1');
brazo_robot('G2');
brazo_robot('G3');

% apertura de la pinza (soltar el objeto)
brazo_robot('C');

% enviar el brazo robot en la posición inicial
brazo_robot('N');
```

Fig. 9. Código ejemplo de control del brazo robot mediante instrucciones ASCII.

Aplicando técnicas de segmentación [20] a las diversas capas de color es posible detectar cada uno de estos elementos que aparecen en la imagen. La figura 11 muestra los niveles RGB de los píxeles que pertenecen al cubo azul y la figura 12 los píxeles que pertenecen a las marcas rojas de la pinza. A partir de esta información se pueden establecer los límites de segmentación para localizar directamente el área del pequeño objeto y de la punta de las pinzas en la figura 10. La Tabla III muestra estos límites y el resultado de la segmentación realizada.

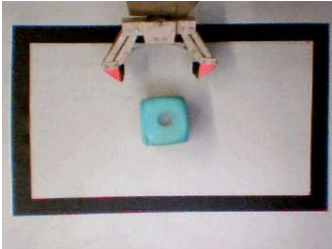


Fig. 10. Imagen de la zona de recogida obtenida con la cámara cenital.

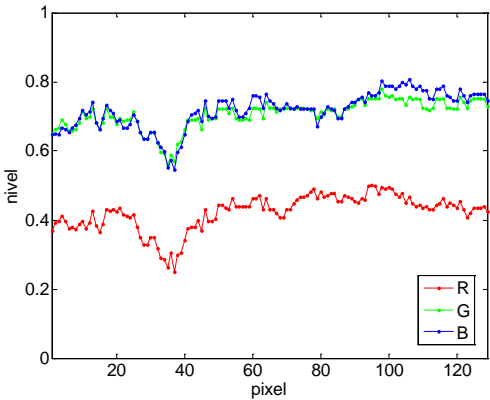


Fig. 11. Niveles de intensidad RGB de una parte de píxeles pertenecientes al cubo azul.

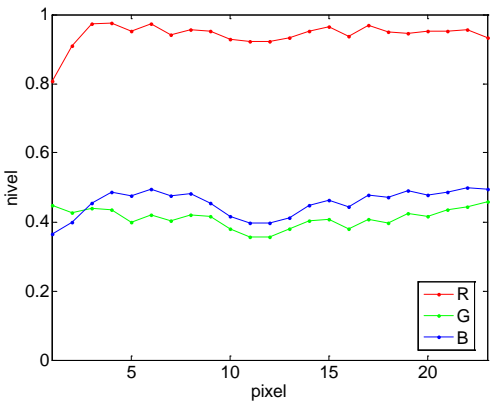


Fig. 12. Niveles de intensidad RGB de una parte de píxeles pertenecientes a las marcas rojas de la pinza.

TABLA III SEGMENTACIÓN POR NIVELES DE COLOR		
contorno	cubo	pinza
$G < 0.3$	$R < 0.6 \ \& \ G > 0.6 \ \& \ B > 0.6$	$R > 0.8 \ \& \ G < 0.6 \ \& \ B < 0.6$

Una vez obtenidas las imágenes segmentadas se puede optar por eliminar el ruido (píxeles aislados) de la segmentación. A continuación se localiza el centro (o centroid) del cubo y el centro de las pinzas (Fig. 13) mediante la realización de la media geométrica de la posición de los píxeles que forman cada objeto. Una vez establecido el centro del cubo y el centro de las pinzas, tan sólo resta mover el brazo robot lentamente para minimizar la distancia entre ambos centros. Cuando esta distancia alcanza un valor inferior a un determinado umbral se puede proceder a cerrar la pinza para atrapar el objeto.

El diagrama de la figura 15 muestra una propuesta de algoritmo capaz de guiar el brazo robot hasta recoger el cubo. El algoritmo utiliza como parámetros la altura del cubo, ac , que se supone conocida y la altura relativa de la pinza, ap , sobre la superficie de recogida. El algoritmo utiliza una realimentación visual para ordenar pequeños desplazamientos del brazo robot que permitan reducir la distancia entre ambos objetos hasta que la pinza del brazo robot sea capaz de recoger el pequeño objeto.

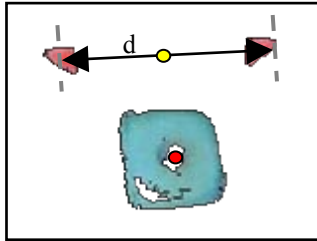


Fig. 13. Centro de las pinzas (marca amarilla) y centro del cubo (marca roja).

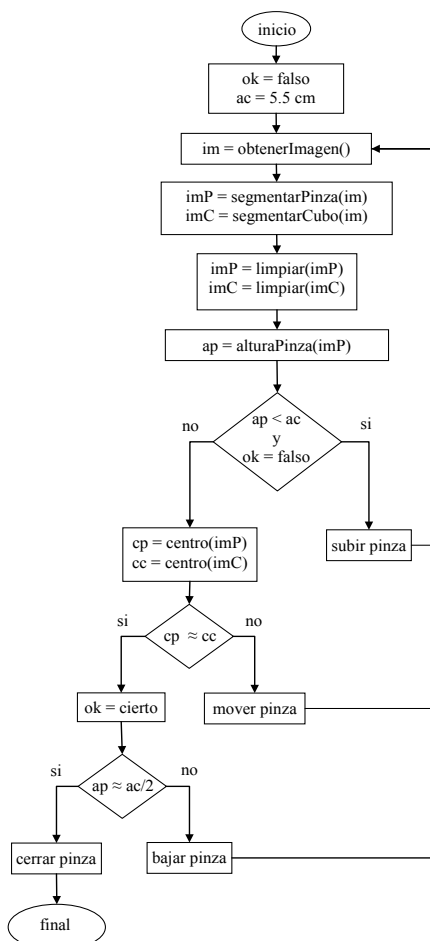


Fig. 15. Diagrama de flujo de un algoritmo que permite localizar y recoger el cubo.

El parámetro de la altura relativa de la pinza, ap , puede estimarse a partir de la distancia, d , que separa los dos extremos de la pinza (ver Fig. 13). La figura 15 muestra la curva de calibración que relaciona ambos parámetros, que puede expresarse mediante la ecuación cuadrática (1):

$$ap = -0.0172 \cdot d^2 + 8.1408 \cdot d - 601.4660 \quad (1)$$

Una vez que el pequeño objeto azul ha sido recogido por la pinza, el brazo robot puede ser dirigido a una serie de posiciones intermedias que le permitan depositar con suavidad al pequeño objeto en el recipiente de almacenaje preseleccionado. Esta parte del control del brazo robot es la que más se parece a la utilización industrial de brazos robots que está muy centrada en la repetición precisa de una secuencia de posiciones y acciones prefijadas.

Las posiciones intermedias normalmente se definen previamente y se almacenan en la memoria interna del brazo robot. Por ejemplo, la instrucción 'HI' hace que el sistema de control del brazo robot memorice la posición absoluta actual del brazo robot como posición '1'. Posición a la que se puede enviar en cualquier momento al brazo robot mediante la instrucción 'GI' (ver Tabla II y Fig. 9).

En el caso práctico propuesto el objetivo es dejar el pequeño objeto recogido con la pinza en un recipiente de almacenamiento en forma de caja (con paredes laterales). Para evitar cualquier roce o colisión durante el transporte es necesario definir varias posiciones intermedias a las que dirigir el brazo robot. De esta forma, una vez la pinza se ha cerrado sobre el objeto se propone la definición de un mínimo de tres posiciones intermedias secuenciales:

- Posición 1: se encuentra definida sobre el área de recogida y a unos centímetros de altura. El objetivo de esta posición es que la pinza y el objeto se eleven verticalmente para evitar el roce del objeto con la superficie del área de recogida.
- Posición 2: se encuentra definida dos centímetros por encima del recipiente de almacenamiento. El objetivo de esta posición es poder situar el pequeño objeto sobre el recipiente evitando chocar con sus paredes durante la trayectoria de transporte.
- Posición 3: se corresponde con la Posición 2 pero con una altura menor sobre el recipiente de almacenaje. El objetivo de esta posición es que el pequeño objeto se deposite con suavidad en su destino definitivo.

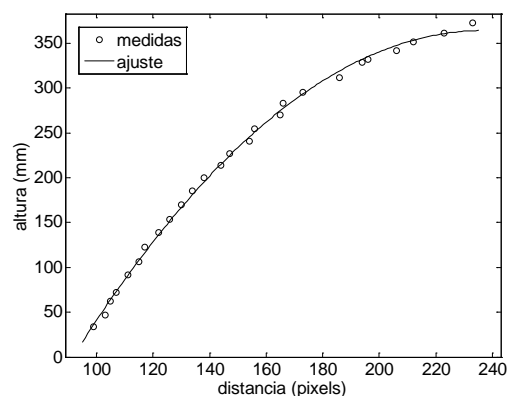


Fig. 14. Relación entre la altura relativa de la pinza y su anchura en la imagen: puntos de medida y ajuste cuadrático.

Una vez se ha depositado el pequeño objeto sobre el área de almacenaje es necesario que el robot ejecute la secuencia de posiciones de forma inversa para evitar que la pinza colisione con las paredes del recipiente de almacenaje.

IV. RESULTADOS

Las figuras 16 a 19 muestran diversas imágenes obtenidas durante el proceso de resolución del caso práctico propuesto que también se encuentra disponible en la plataforma YouTube en forma de vídeo [21]. Uno de los puntos problemáticos de esta propuesta es que sólo se ha podido utilizar una célula de automatización por lo que el proceso de prueba y error necesario para resolver el caso práctico ha originado frecuentemente colas de espera (Fig. 16). Probablemente el interés suscitado en los estudiantes y la voluntad de aprender de los errores de los demás es lo que ha hecho más llevadero todo este proceso.

La figura 17 muestra una imagen obtenida durante el proceso iterativo de detección y guiado del brazo robot hasta la recogida del objeto situado de forma aleatoria en el área de recogida. Esta parte inicial es la que presenta más dificultad al requerir la aplicación de técnicas de visión artificial. La figura 18 muestra el brazo robot en la posición de referencia 1 y finalmente la figura 19 muestra el brazo robot en la posición de referencia 3, justo antes de abrir la pinza para depositar el pequeño objeto en el recipiente de almacenamiento.

A. Valoración del Profesorado

La valoración de la experiencia por parte del profesorado es totalmente positiva. Se ha observado una mejora significativa en los resultados docentes y en la motivación de los estudiantes. Uno de los aspectos más valorados es que cada estudiante se las ingenió para diferenciarse del resto mediante la implementación de lazos de realimentación visual basados en alternativas de resolución diferentes. De todos los estudiantes implicados en la experiencia tan sólo uno no pudo ser capaz de resolver el caso práctico en el tiempo propuesto y el motivo fue la dificultad inherente a su propuesta de lazo de realimentación.

B. Valoración de los Estudiantes

Un total de 10 estudiantes participaron en esta experiencia educativa y su valoración de la experiencia ha sido también totalmente positiva. Los tiempos muertos y colas ocasionadas por disponer únicamente de una célula de experimentación no han sido un factor considerado relevante o importante, por el contrario se ha valorado mucho más la motivación que genera la posibilidad de aplicar experimentalmente muchos de los conocimientos adquiridos en diversas asignaturas de la titulación para conseguir resolver el caso práctico propuesto.

V. CONCLUSIONES

En este trabajo se presenta un caso práctico de aprendizaje desarrollado en la Universidad de Lleida, España. El objetivo del caso práctico es que el estudiante sea capaz de desarrollar una aplicación que permita que un brazo robot recoja un pequeño objeto situado de forma aleatoria en una zona delimitada para depositarlo posteriormente con suavidad en una zona de almacenaje. El



Fig. 16. Cola de espera durante la realización de los últimos ajustes del programa de control de la célula de automatización.

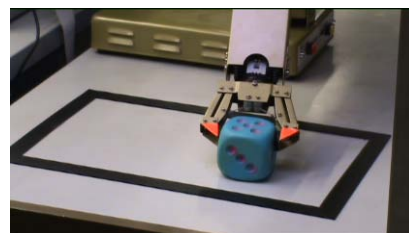


Fig. 17. Imagen del proceso de recogida del pequeño objeto.

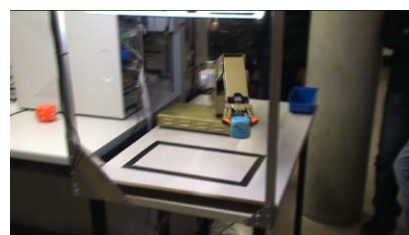


Fig. 18. Imagen del brazo robot en la posición de referencia 1.



Fig. 19. Imagen del brazo robot en la posición de referencia 3.

desarrollo del caso práctico ha permitido aumentar la motivación y el interés de los estudiantes en resolver exitosamente el problema propuesto mediante la combinación de conocimientos de visión artificial y de control de un brazo robot educativo lo que ha permitido alcanzar plenamente los objetivos docentes planteados.

REFERENCIAS

- [1] A. Emin and G. Erdemir, "Development of a web-based control and robotic applications laboratory for control engineering education," *Information Technology and Control*, vol. 40, no.4, pp. 352 - 357, 2011.
- [2] G. Xabiel, D. Melendi, S. Cabrero, R. Blanco, R. García and A. Rionda, "Tres Técnicas de Prácticas Competitivas Basadas en el Paradigma Project-Oriented Learning para las Ingenierías TIC", *IEEE-RITA*, vol. 7, no. 2, pp. 53-60, 2012.
- [3] E. Hyun, H. Yoon and S. Son, "Relationships between user experiences and children's perceptions of the education robot," *Human-Robot Interaction (HRI), 2010 5th ACM/IEEE International Conference on*, pp.199-200, 2-5 March 2010.
- [4] M. Braae, "A robot arm for a first course in control engineering," *Education, IEEE Transactions on*, vol. 39, no. 1, pp. 40-45, 1996.
- [5] W.I. Clement and K.A. Knowles, "An instructional robotics and machine vision laboratory," *Education, IEEE Transactions on*, vol. 37, no. 1, pp. 87-90, 1994.
- [6] M. Qassem, I. Abuhadrous and H. Elaydi, "Modeling and Simulation of 5 DOF educational robot arm," *Advanced Computer Control*

(ICACC), 2010 2nd International Conference on, vol. 5, pp. 569-574, 27-29 March 2010.

- [7] R. Inigo and J. Morton, "Simulation of the dynamics of an industrial robot," Education, IEEE Transactions on, vol. 34, pp. 89-99, 1991.
- [8] R. White, R. Read, M. Koch, and R. Schilling, "A graphics simulator for a robotic arm," Education, IEEE Transactions on, vol. 32, no. 4, pp.417-429, 1989.
- [9] J. Bento, W. Rochadel and R. Marcelino, "Utilização de NTIC's Aplicadas a Dispositivos Móveis", IEEE-RITA, vol. 7, no. 3, pp. 149-154, 2012.
- [10] M. Teixidó, D. Font, T. Pallejà, M. Tresanchez, J. Palacín, "Ejemplo de caso practico de aprendizaje combinando vision artificial y un brazo robot", Seminario Anual de Automatica, Electronica Industrial e Instrumentacion, pp. 835-839, 11-13 Julio 2012.
- [11] Web del fabricante Mathworks, accedida el 24 de septiembre de 2012. <http://www.mathworks.es>
- [12] L. Soares, V. Alcalde, "An Educational Robotic Workstation based on the Rhino XR4 robot," Frontiers in Education Conference, 36th Annual, pp. 7-12, 27-31 Oct. 2006.
- [13] Web del brazo robot CS-113, accedida el 24 de septiembre de 2012. http://cfievalladolid2.net/tecnocyr_01/robotica/cs113.htm
- [14] J. Marthinus, "TCP/IP facilitated flexible robotics controller", Thesis MScEng, University of Stellenbosch, 2008.
- [15] J. Nicoud, "Peripheral interface standards for microprocessors," Proceedings of the IEEE , vol. 64, no. 6, pp. 896- 904, 1976.
- [16] Web del fabricante Labtec, accedida el 24 de septiembre de 2012. <http://www.labtec.com>
- [17] K. Kobayashi, "MATLAB Utilization Book", Shuwa System Co, Ltd., 2001.
- [18] Web de descarga de *vcap2.dll*, accedida el 24 de septiembre de 2012. <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/2939-vcap2>
- [19] Web de descarga de *brazo_robot.m*, accedida el 24 de septiembre de 2012. http://robotica.udl.cat/brazo_robot/brazo.htm
- [20] L. Lijie and F. Guoliang, "Combined key-frame extraction and object-based video segmentation," Circuits and Systems for Video Technology, IEEE Transactions on, vol. 15, no. 7, pp. 869- 884, 2005.
- [21] Web del vídeo "Controlling an educational robot using a vision loop". accedida el 24 de septiembre de 2012. <http://www.youtube.com/watch?v=1pgprHglYs>



Tomàs Pallejà Cabré, es Doctor (2011) e Ingeniero Informático (2006) por la Universidad de Lleida (UdL). Actualmente es investigador en el Grupo de Investigación en Robótica de la UdL y sus áreas de interés incluyen agricultura de precisión, robótica móvil y nuevos desarrollos en la interacción persona ordenador.



Mercè Teixidó Cairol, es Ingeniera Informática (2008) por la Universidad de Lleida (UdL). Actualmente es investigadora en formación en el Grupo de Investigación en Robótica de la UdL y sus áreas de interés incluyen interacción persona ordenador, procesamiento de imagen y el desarrollo de nuevas aplicaciones robóticas.



Davinia Font Calafell, es Ingeniera Industrial (2010) por la Universidad Politécnica de Cataluña. Actualmente es investigadora en formación en el Grupo de Investigación en Robótica de la UdL y sus áreas de interés incluyen el desarrollo de nuevas aplicaciones robóticas y la agricultura de precisión.



Marcel Tresanchez Ribes, es Doctor (2011) e Ingeniero Informático (2006) por la Universidad de Lleida (UdL). Actualmente es investigador en el Grupo de Investigación en Robótica de la UdL y sus áreas de interés incluyen optimización del diseño de robots móviles, agricultura de precisión y el desarrollo de nuevas aplicaciones robóticas.



Jordi Palacín Roca, es Doctor (2005) e Ingeniero Electrónico (1997) por la Universidad de Barcelona. Actualmente es investigador y director del Grupo de Investigación en Robótica de la Universidad de Lleida y sus áreas de interés incluyen el desarrollo de modelos compactos térmicos, fusión de datos y el desarrollo de nuevas aplicaciones de procesamiento de señal en robótica.