

Un sistema de detección de peces para escala de hendidura vertical utilizando tecnología láser y técnicas de visión artificial

A fish detection system in vertical slot fishways using laser technology and computer vision techniques

Rico-Díaz, A.J.^{a1}, Rabuñal, J.R.^b, Puertas, J.^{c1}, Pena, L.^{c2}, Rodríguez, A.^{a2}

^aDept. de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones. Facultad de Informática, Universidade da Coruña. Campus de A Coruña, 15071 A Coruña, España. E-mail: ^{a1}angel.rico@udc.es, ^{a2}arodriguezta@udc.es

^bCentro de Innovación Tecnológica en Edificación e Enxeñería Civil (CITEEC). Universidade da Coruña. Campus de A Coruña, 15071 A Coruña, España. E-mail: juanra@udc.es

^cDept. de Ingeniería Hidráulica. ETSEC, Universidade da Coruña. Campus de A Coruña, 15071 A Coruña, España. E-mail: ^{c1}jpuertas@udc.es, ^{c2}lpena@udc.es

Recibido: 07/01/2015

Aceptado: 08/06/2015

Publicado: 28/10/2015

RESUMEN

Las escalas de hendidura vertical son una de las estructuras más utilizadas para sortear obstáculos como presas, centrales hidroeléctricas y otros. Conocer la frecuencia con la que los peces atraviesan este tipo de estructuras puede ayudar a conocer la eficacia de las mismas, así como a conocer características migratorias de las especies, determinar si el curso fluvial está sano o determinar si se puede pescar con garantías de conservación y mejora de la fauna. La técnica expuesta en este artículo es un método no invasivo para detección de peces en tiempo real, sin necesidad de observación directa. Se utiliza un sensor láser para detectar los peces y los datos recogidos por el sensor son analizados de forma automática con técnicas de visión artificial en una aplicación informática.

Palabras clave | Visión Artificial; Escalas de Peces; Contador de peces; Detección por láser.

ABSTRACT

Vertical slot fishway are hydraulic structures which are widely used to allow the upstream migration of fish through obstructions in rivers. Learning about the frequency of fish's movement through these systems can help determine the efficiency of a vertical slot fishway, as well as migratory patterns of species, determine if waterways are healthy or whether we can continue to fish with guaranteed conservation and improve wildlife. This paper presents a noninvasive method for fish detection. A laser sensor is used to detect fish and data collected by the sensor is analyzed automatically, using computer vision techniques.

Key words | Computer vision; Vertical slot fishway; Fish-counter; Laser detection.

INTRODUCCIÓN

Las escalas de hendidura vertical son estructuras hidráulicas que permiten el movimiento de los peces para sortear obstáculos como presas, centrales hidroeléctricas y otros.

Actualmente, se sabe que el diseño de una escala de peces de hendidura vertical depende de la interacción de parámetros hidráulicos y biológicos, ya que las variables hidrodinámicas de la piscina (como la velocidad del agua) deben ser adecuadas a los requisitos de los peces (determinados por ejemplo por su resistencia o velocidad de natación).

Se ha estudiado el flujo en las escalas de hendidura vertical (Wu *et al.*, 1999; Puertas *et al.*, 2004; Tarrade *et al.*, 2008), la natación de los peces (Dewar y Graham, 1994; Blake, 2004) y el comportamiento de los peces dentro de la escala (Rodríguez *et al.*, 2011). En este trabajo se pretende determinar de una manera sencilla, en tiempo real y con coste reducido el número de ejemplares que atraviesan la escala de hendidura vertical, ya que conocer este valor puede ser una ayuda más en la estimación de la efectividad de la estructura (Puertas *et al.*, 2011).

Conocer el número de peces puede ayudar a estudiar el estado del curso fluvial y su ecosistema o a determinar si se puede pescar con garantías de conservación y mejora de la fauna.

Dos de las técnicas más utilizadas para la detección de peces son el láser y el sónar. Otras técnicas utilizan la grabación de imágenes y tras su tratamiento se detectan los peces en ellas.

El sónar es un aparato que detecta la presencia y situación de objetos sumergidos mediante ondas acústicas. Desde los años sesenta esta técnica se ha usado en aplicaciones como un contador de peces (Craig y Forbes, 1969) o para obtener características de los peces (Ehrenberg, 1972). Más recientemente apareció el *Dual-frequency identification sonar* (DIDSON), sónar de identificación de doble frecuencia que reduce las limitaciones de los sistemas acústicos anteriores y consigue imágenes de más calidad, y con ella nuevos estudios para detección y conteo de peces aprovechando la tecnología acústica (Balk y Lindem, 2000; Belcher *et al.*, 2001; Holmes *et al.*, 2006; Han *et al.*, 2009).

El láser de infrarrojos ha sido utilizado en varios estudios para fines similares a los comentados anteriormente, como la detección de peces (Mitra *et al.*, 2004). Uno de los contadores de peces más conocidos es el *Riverwatcher Fish Counter* (Baumgartner *et al.*, 2010) de la empresa islandesa Vaki, que utilizando un escáner de infrarrojos y un túnel con leds permite la toma de fotos y videos y obtener información del pez detectado.

Mediante el uso de cámaras submarinas combinándolo con técnicas de visión artificial (White *et al.*, 2006; Zion *et al.*, 2007) y el uso de redes de neuronas artificiales (Storbeck y Daan, 2001) es posible realizar la detección de peces. El proceso general para aplicar técnicas de visión artificial sobre la imagen capturada suele dividirse en una serie de fases. Durante las etapas iniciales se intenta obtener la mejor calidad de imagen posible para poder, en etapas posteriores, obtener información útil e interpretarla en el contexto adecuado.

En la técnica usada en este trabajo se combinan, por un lado el uso de un sensor láser infrarrojo para realizar la detección de los peces y, por otro, técnicas de visión artificial para confirmar que el objeto detectado por el láser es realmente un pez. Además previamente se estudia el comportamiento del láser en agua bajo ciertas condiciones de turbidez ya que su precisión se verá alterada por ello y por el material en el que es sumergido.

De esta manera, se consigue un sistema de detección de peces en tiempo real, reduciendo el coste computacional que puede tener el uso de las redes de neuronas artificiales, y de bajo coste, al no necesitar dispositivos ni montajes caros. El sistema completo está formado por una parte hardware y otra software. La parte hardware engloba sensores, tales como una cámara y un láser; una unidad de almacenamiento donde se guardarán los datos que se van recolectando, así como el software de visión artificial; y una unidad de control que permite la interacción del usuario con la aplicación.

TÉCNICA PROPUESTA

Se ha diseñado un sistema con diferentes componentes. Se dispone de dos sensores, una cámara que captura imágenes del paso de objetos por la zona escaneada por el otro sensor disponible, un sensor láser (el utilizado en este trabajo dispone de una longitud de onda de 785 nm.) que detecta y devuelve información acerca de los objetos que interfieren su haz. Esta información es volcada y guardada en una unidad de almacenamiento en donde se ejecuta la aplicación software de visión artificial desarrollada específicamente para esta técnica. Tanto la cámara como el sensor se encuentran enfrentados en las paredes laterales del canal. Además se dispone de una unidad de control que permite la interacción del usuario con la aplicación. En la Figura 1 se aprecia la posición de los sensores para capturar datos.

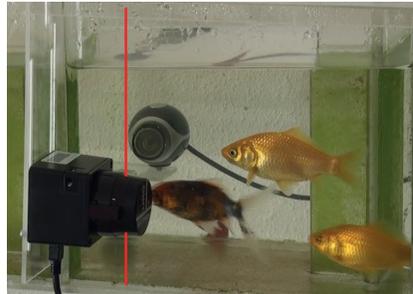


Figura 1 | Esquema de la técnica propuesta

La técnica se puede dividir en dos fases. En la primera fase se recogen las lecturas que devuelve el sensor en cada escaneo y se va generando una imagen en tiempo real de la zona de influencia del láser. Sobre esta imagen se aplican técnicas de visión artificial. En primer lugar se realiza un pre-procesamiento de la imagen, luego una segmentación y por último una fase de representación e interpretación.

Tras la aplicación de las técnicas de visión artificial y en el caso de que se detectara el paso de algún objeto por la zona de influencia del láser comienza la segunda fase de la técnica con el objetivo de verificar si el objeto detectado es un pez. Automáticamente se toma una fotografía con la cámara dirigida a la región sobre la que incide el haz. Sobre esa nueva imagen se aplica técnicas de visión artificial, siguiendo las mismas fases que anteriormente (pre-procesamiento, segmentación y representación e interpretación). Tras este proceso se puede confirmar si el objeto detectado por el láser es o no un pez. En caso positivo el contador que indica el número de peces detectados se incrementa.

A continuación se detallan de forma más completa estas dos fases.

Fase de detección de objetos mediante sensor láser

El sensor envía un pulso de haz láser y mide el tiempo que tarda ese pulso en ser reflejado en el objeto y devuelto al sensor. Con ese valor se puede conocer la distancia a la que se encuentra el objeto aplicando la ecuación (1). Este funcionamiento se ilustra en la Figura 2.

$$Distancia = \frac{velocidad \times tiempo}{2} \quad (1)$$

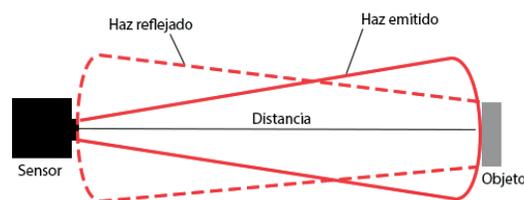


Figura 2 | Principio básico de funcionamiento del sensor láser para calcular distancias.

El sensor se coloca en el punto deseado para recoger el paso del pez por ese lugar. Se recogen los puntos de medida de salida del láser (en este caso, tomando medidas espaciadas cada 0.35 grados sobre el rango de 240 grados se obtiene un vector de 683 valores de distancias) y se codifican, transformándolos de tal forma que se representen en escala de grises (Figura 3a). El grado de gris dentro de la escala indica el grado de cercanía o lejanía del objeto al láser.

Cada vector de entrada se va almacenando en un buffer con los valores de gris asignados. En cada instante que el sensor manda datos (el sensor utilizado devuelve una lectura cada 100 mseg.), estos son introducidos al final del buffer y, se mueve el resto de vectores una posición, como se ve en la Figura 4. De esta manera se obtiene una imagen en escala de grises de la zona de influencia del láser y que va refrescándose de manera automática en tiempo real, simulando el funcionamiento de un vídeo.

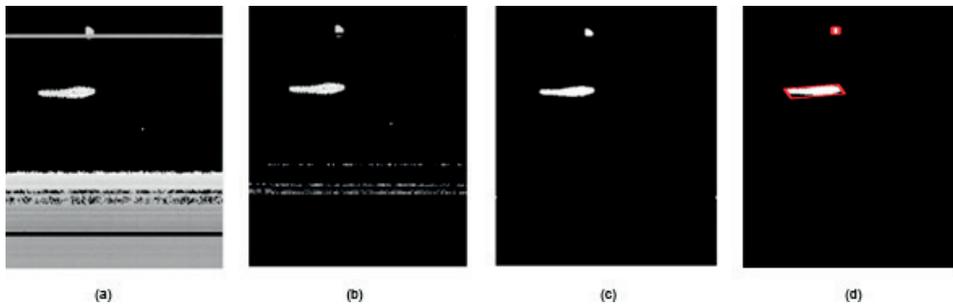


Figura 3 | Proceso de visión artificial que se aplica. (a) imagen generada (b) imagen tras el pre-procesamiento (c) imagen tras proceso de segmentación (d) imagen con los objetos candidatos seleccionados

Tras la obtención de la imagen, se inicia el proceso de visión artificial. El proceso se divide en las siguientes etapas: pre-procesamiento, segmentación y reconocimiento e interpretación.

El pre-procesamiento de la imagen tiene como objetivo mejorar la calidad de la imagen para futuros tratamientos y facilitar los análisis de la imagen en etapas posteriores.

En esta primera etapa se elimina el fondo de la imagen. Para ello se toma una muestra del escaneo del láser en un instante en el que no pase ningún objeto por delante de él y ese vector se va restando a cada vector de datos que manda el sensor. Los píxeles invariantes, que tendrán valor cero tras la sustracción del fondo, se representan en negro (Figura 3b).

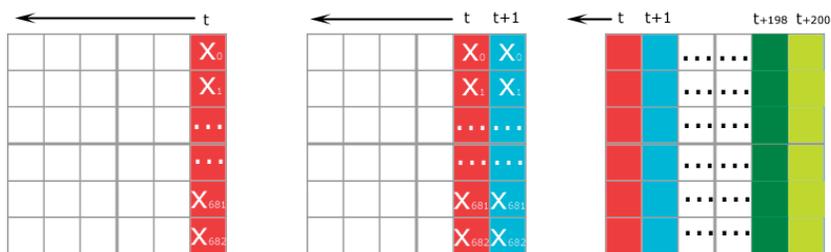


Figura 4 | Funcionamiento de la entrada de valores de lecturas del sensor en el buffer.

A continuación se inicia la etapa de segmentación. La segmentación es el proceso de dividir una imagen en las partes que la constituyen o los objetos que la forman. De esta forma se pueden separar los objetos de interés del resto no relevantes, que se consideran como fondo. Esta etapa es una de las etapas fundamentales en cualquier sistema automatizado de visión artificial, tanto por las dificultades que conlleva como por la importancia de sus resultados.

Las técnicas de segmentación pueden clasificarse dentro de 3 grupos: técnicas basadas en la detección de la frontera, técnicas de umbralización y técnicas basadas en el agrupamiento de píxeles. Para la imagen resultante se va a utilizar la técnica de umbralización binaria que, debido a su rapidez y coste computacional bajo, permite realizar la segmentación en tiempo real. En esta

imagen interesa separar cualquier objeto que detecte el láser, independientemente de su posición, por lo que se selecciona cualquier elemento de la imagen que no sea negro, poniendo un umbral con el valor de 10, y se establece su valor a blanco, quedando una imagen binaria.

Con el objetivo de optimizar los resultados, se aplican operaciones morfológicas (Haralick *et al.*, 1987) sobre la imagen. La morfología matemática es un marco teórico para el procesamiento digital no lineal de imágenes. A través de ella se puede cuantificar muchos aspectos de las estructuras geométricas contenidas en una imagen, de manera que concuerden con la intuición y percepción humana (Rodríguez y Sossa, 2011).

Las operaciones morfológicas que se utilizan son las aperturas y cierres (Haralick *et al.*, 1987; Rodríguez y Sossa, 2011). La tendencia de ambas operaciones es a suavizar el contorno de los objetos sobre los que se aplica. La apertura permite suprimir los objetos más pequeños y separar objetos cercanos. La operación de cierre llena los huecos que pueden aparecer en el objeto. Para estos objetivos se realiza un proceso donde primero se aplica una apertura y posteriormente una operación de cierre aplicada 3 veces sobre la imagen. Esta combinación de ambas operaciones permite realizar un filtrado y optimizar la imagen de cara a una fase posterior (Figura 3c). Para realizar las operaciones morfológicas se utiliza como elemento estructural una cruz.

Tras la fase de segmentación se inicia la fase de representación y descripción de los objetos que han sido previamente segmentados. El objetivo en esta fase es elegir la caracterización de los segmentos que faciliten la manipulación de los objetos y buscar los rasgos descriptores del objeto y que se mantengan lo más independiente posible ante transformaciones geométricas.

La caracterización de los segmentos se realiza mediante una descripción externa (en términos de los píxeles que componen el contorno del objeto) englobando el objeto dentro del rectángulo mínimo que circunscribe al objeto. Esto permite conocer rasgos geométricos básicos como el área del objeto o su ancho y alto. Según estas características se continúa el proceso o se descarta el objeto detectado (Figura 3d).

En la Figura 5 se puede ver el proceso completo seguido durante esta primera fase de la técnica propuesta. Para los experimentos que se han llevado a cabo se establecen los valores de filtrado para eliminar objetos tras la segmentación, según el área de su contorno, dentro del intervalo [40, 1000].

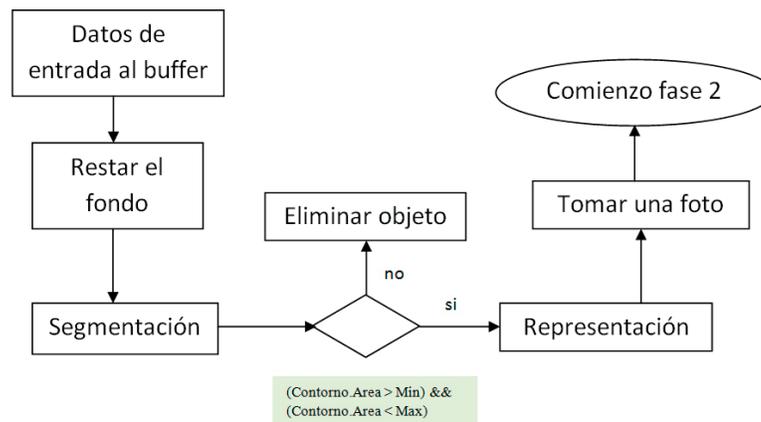


Figura 5 | Proceso aplicado a la primera fase de la técnica.

Fase de verificación o rechazo del objeto detectado

En la fase anterior se ha detectado un objeto en el agua y se ha marcado como candidato a ser un pez. Para verificar su condición de pez, en el momento en el que se detecta se toma una instantánea de la escala en ese instante con la cámara situada a tal efecto. En los ensayos realizados se ha utilizado una webcam con resolución VGA que ofrece una imagen de color RGB.

Con la imagen capturada por la cámara se inicia un nuevo procedimiento de visión artificial en el que se va a realizar una fase de pre-procesamiento, otra de segmentación y una última de representación e interpretación.

La fase de pre-procesamiento consiste en realizar una sustracción del fondo. Antes de empezar a trabajar en la fase anterior, se selecciona una muestra de la zona que captura la cámara para obtener así una imagen del fondo. Con esta imagen se realiza la operación de sustracción para mostrar solo la parte de la imagen que tiene información relevante.

Sobre la imagen resultante se realiza el proceso de segmentación. Para lograr una buena segmentación se procede a convertirla en una imagen de escala de grises y realizar a continuación una umbralización binaria. Para la elección del umbral se utiliza un método automático de cálculo, el método de Otsu (Otsu, 1979), que selecciona el umbral óptimo que permite separar el fondo del contenido.

Por último se realiza una fase de representación e interpretación, cuyo objetivo es determinar si los objetos segmentados anteriormente pueden ser considerados como peces. Para ello se tienen establecidos unos modelos con formas de peces que se comparan con los objetos segmentados de la imagen. Primeramente se eliminan los objetos segmentados que no cumplen ciertas restricciones, como es el área del objeto, que para los experimentos realizados se eliminan los que su área sea menor de 5000. Con el resto de los objetos se inicia la comparación, en la que se van a utilizar los siete momentos de Hu (Ochoa *et al.*, 2013). Los momentos espaciales (Pajares Martinsanz y De la Cruz García, 2007) son medidas estadísticas que permiten describir regiones (objetos) en términos de sus puntos interiores. Los momentos de Hu son momentos centrales normalizados de orden 2 y 3 que son invariantes a traslaciones, rotaciones y escalados.

Si la semejanza entre la forma comparada y el objeto segmentado está dentro de unos límites establecidos, para los experimentos realizados se fija a 0.31, se acepta el objeto como pez (incremento de contador de peces) y se marca su contorno, en caso contrario lo desecharmos.

El proceso llevado a cabo en esta fase se resume en la Figura 6.

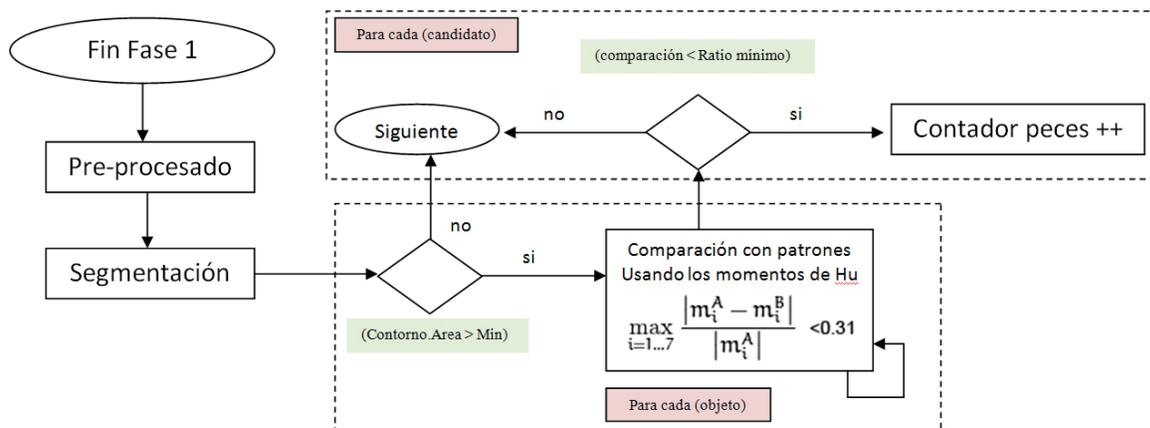


Figura 6 | Diagrama del algoritmo utilizado para la segunda fase de detección de peces.

Como el sensor láser va a realizar mediciones en agua, es necesario realizar un análisis del comportamiento del láser en este medio. La penetración del haz del láser es menor en agua y la turbidez que puede tener el agua hará que el alcance del láser sea más reducido. También se realizan pruebas con diferentes materiales para sumergir el sensor y mantenerlo aislado del agua, las paredes de estos contenedores son otro elemento que influirá sobre el alcance del sensor.

ENSAYOS

Se han realizado dos tipos de ensayos experimentales. Primero uno para conocer el comportamiento del sensor láser en el agua. El segundo tipo de ensayos se realizan con el objetivo de evaluar el rendimiento del software de visión artificial.

Análisis del láser

Para analizar el comportamiento del sensor láser bajo el agua se utilizan dos tipos de piscinas o estructuras hidráulicas. Una piscina con 93 litros y un canal circular con motor que mueve el agua a una cierta velocidad en circuito cerrado.

Las pruebas se han realizado primero con el agua limpia para medir el alcance del láser en agua y posteriormente se ha añadido turbidez (mediante la incorporación de limo de sílice) al agua para comprobar el alcance del láser.

Con estas mediciones se consigue saber cómo se comporta el sensor en diferentes circunstancias, comparando los valores de medición que ofrece el sensor con la medida real a la que se encuentra el pez del sensor, permitiendo establecer de esta forma una relación entre las dos medidas.

Para probar las diferentes situaciones se establecen cuatro niveles de turbidez. El primer nivel es con agua limpia y en cada nivel se incrementa la turbidez hasta llegar al nivel cuatro en donde ya no hay nitidez para ver objetos mediante observación directa.

Se establecen también cuatro modalidades de posicionamiento del láser. La primera con el sensor en el exterior del agua, pegado al cristal. En las restantes, el sensor estará sumergido en el agua dentro de un recipiente. Los recipientes serán un cilindro de cristal, otro de metacrilato y un último de vidrio de cuarzo.

Análisis del software

Para evaluar el rendimiento del software de visión artificial implementado, se han realizado ensayos utilizando un modelo a escala 1:8.3, de una escala de hendidura vertical, construida con metacrilato (Figura 7a) y que une dos peceras en donde se encuentran una decena de peces de diferentes tipos y colores (Figura 7b).



Figura 7 | Escala de metacrilato construida para los ensayos.

Se realizan diversos ensayos durante los cuales se deja el sistema trabajando durante el tiempo suficiente para que se produzcan suficientes pasos de peces por la escala, y para cada detección que hace el láser se almacenan las imágenes para su posterior estudio.

Se realiza también un ensayo para medir los falsos positivos. Para este ensayo se utilizan trozos de madera, metacrilato y acero y con la ayuda de un hilo se pasa por delante del láser y se capturan las imágenes de cómo se comporta el sistema.

RESULTADOS

Análisis del láser

Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 8. En el eje vertical de las gráficas se muestran las medidas devueltas por el sensor láser (expresadas en cm), mientras que en el eje horizontal se mide la distancia real (en cm) a la que está el objeto.

Durante los experimentos, y como se puede observar en las gráficas, se comprobó que el comportamiento del láser en agua hace que la medida que devuelve el sensor sea mayor que la distancia real a la que se encuentra el objeto y a partir de cierta distancia se empieza a perder precisión. Este aspecto debe ser tenido en cuenta cuando se quiera calcular distancias a las que se encuentra un objeto detectado por el láser para realizar una estimación acorde con la realidad.

También se puede observar en las gráficas el comportamiento del sensor en los diferentes recipientes agrupados por nivel de turbidez. Los materiales que mejor se comportan son el cristal y el vidrio de cuarzo, ya que permiten medir distancias correctas más lejanas que las medidas que ofrece el metacrilato.

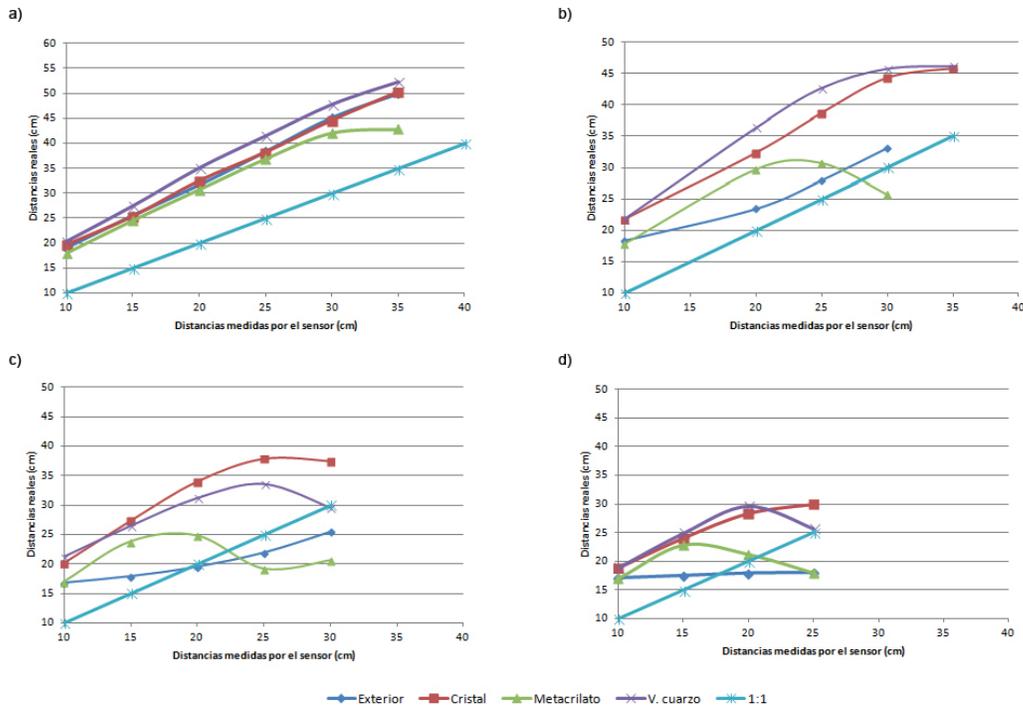


Figura 8 | Resultados del análisis del láser usando diferentes niveles de turbidez, (a) agua limpia, (b) nivel bajo-medio, (c) nivel medio-alto y (d) nivel alto.

Análisis del software

En la Figura 9 se observa el resultado del proceso seguido mediante técnicas de visión artificial para identificar al pez en la imagen que toma la cámara. Así, a partir de la imagen de fondo (Figura 9a) y de la imagen capturada (Figura 9b) y tras realizar la substracción de fondo y segmentación (Figura 9c) se puede concluir si el objeto es un pez o no (Figura 9d).

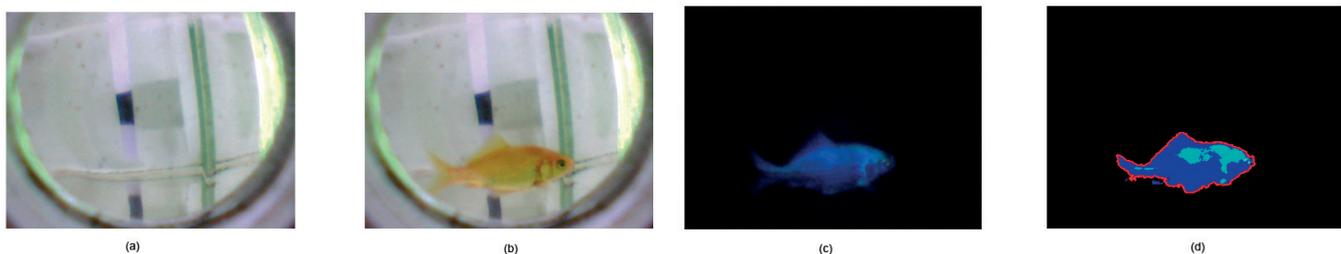


Figura 9 | Resultado del proceso de visión artificial sobre la imagen capturada por la cámara.

Posteriormente las imágenes han sido revisadas por expertos para realizar un análisis de los resultados. Se han revisado cerca de 200 imágenes de paso de objetos por la escala en donde el láser lo detecta y se toma una fotografía del instante de paso (Tabla 1). Con la intención de probar la fiabilidad del software se han desechado las imágenes en las que no se aprecia el objeto completo o el objeto queda fuera de la toma y que en versiones posteriores será realizado de manera automática.

Las métricas utilizadas para medir el sistema son las mostradas en las siguientes Ecuaciones (2-5):

$$\text{Precisión} = ((\text{Positivos correctos}) / (\text{Positivos correctos} + \text{Falsos positivos})) \quad (2)$$

$$\text{Cobertura} = ((\text{Positivos correctos}) / (\text{Positivos correctos} + \text{Falsos negativos})) \quad (3)$$

$$\text{Ratio de Falsos Positivos} = 1 - \text{Precisión} \quad (4)$$

$$\text{Ratio de Falsos Negativos} = 1 - \text{Cobertura} \quad (5)$$

Tabla 1 | Resultados del ensayo.

Métrica	Datos	%
Precisión	0.97	97.18
Cobertura	0.73	72.63
Tasa de Falsos Positivos	0.03	2.18
Tasa de Falsos negativos	0.27	27.36

CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

Analizando los resultados obtenidos en el análisis de los diferentes materiales en los que se sumergió el láser (Figura 8), se puede concluir que, para realizar operaciones con el láser sumergido, debería utilizarse el de vidrio de cuarzo o el de cristal, ya que son los que más alcance permiten al haz del sensor. Además se debe tener en cuenta el efecto del láser al estar sumergido en agua ya que se amplifican las distancias por la reflexión del haz en el agua.

Se aprecia (Tabla 1) una alta precisión del sistema, lo que indica que el sistema es capaz de detectar objetos correctos en el 97% de los casos, así como una cobertura del 73% que detecta los peces. En versiones futuras se debería automatizar la eliminación de imágenes en donde el pez no se vea completamente, prescindiendo así de la revisión del experto.

Se ha desarrollado un sistema de detección y conteo de peces utilizando tecnología láser y técnicas de visión artificial. Se implementa en dos fases, una primera donde el sensor detecta el paso del objeto y una segunda en donde se trata de confirmar que el objeto que ha sido interceptado es un pez.

Este sistema ofrece un método no invasivo para las especies y sin el inconveniente de las limitaciones visuales que podría suponer bajo ciertas condiciones de turbidez de agua, entre otras. Así como ser un método que va mostrando resultados en tiempo real.

Las principales ventajas de esta técnica son las siguientes. El tamaño del montaje necesario para llevarla a cabo es reducido. Se necesita solamente un sensor láser una cámara y un ordenador portátil con el software que realiza el proceso de visión artificial. Ello implica que sea una técnica que se puede llevar a cabo con un coste bajo. Además permite el muestreo en tiempo real de la zona estudiada.

El método ha sido testado en laboratorio, simulando posibles situaciones adversas, pero debe ser analizado ahora en un contexto real, para permitir afinar más la detección de peces en su medio natural. Se debe evaluar el posible paso de varios peces por la escala de hendidura vertical de forma simultánea y estudiar el comportamiento del sistema en estos casos.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido cofinanciado con fondos FEDER y por el Ministerio Español de Economía y Competitividad. Subprograma estatal de formación del Programa Estatal de Promoción de Talento y su Empleabilidad en I+D, en el marco del Plan Estatal de Investigación Científica y técnica y de Innovación 2013-2016 (FPI Convocatoria 2013) (Ref. del proyecto CGL2012-34688 Ref. de la ayuda BES-2013-063444).

REFERENCIAS

- Balk, H., Lindem, T. (2000). Improved fish detection in data from split-beam sonar. *Aquatic Living Resources*, 13(5), 297-303. doi:10.1016/S0990-7440(00)01079-2
- Baumgartner, L., Bettanin, M., McPherson, J., Jones, M., Zampatti, B., Beyer, K. (2010). Assessment of an infrared fish counter (Vaki Riverwatcher) to quantify fish migrations in the Murray-Darling Basin. *Industry y Investment NSW, Fisheries Final Report Series 116*, 47.
- Belcher, E., Matsuyama, B., Trimble, G. (2001). *Object identification with acoustic lenses*. Paper presented at the OCEANS, 2001. MTS/IEEE Conference and Exhibition, Honolulu, HI. doi:10.1109/oceans.2001.968656
- Blake, R.W. (2004). Fish functional design and swimming performance. *Journal of Fish Biology*, 65(5), 1193-1222. doi:10.1111/j.0022-1112.2004.00568.x
- Craig, R.E., Forbes, S.T. (1969). Design of a sonar for fish counting. *Fiskeridirektoratets skrifter, Serie Havundersøkelser, Vol 15(3)*, 210-219.
- Dewar, H., Graham, J. (1994). Studies of tropical tuna swimming performance in a large water tunnel - Energetics. *Journal of Experimental Biology*, 192, 13-31.
- Ehrenberg, J.E. (1972). *A method for extracting the fish target strength distribution from acoustic echoes*. Paper presented at the Engineering in the Ocean Environment, Ocean 72, Newport, RI, USA. doi:10.1109/OCEANS.1972.1161176
- Han, J., Honda, N., Asada, A., Shibata, K. (2009). Automated acoustic method for counting and sizing farmed fish during transfer using DIDSON. *Fisheries Science*, 75(6), 1359-1367. doi:10.1007/s12562-009-0162-5
- Haralick, R.M., Sternberg, S.R., Zhuang, X. (1987). Image Analysis Using Mathematical Morphology. *IEEE Transactions on Pattern and Machine Intelligence, PAMI-9(4)*, 532-550. doi:10.1109/TPAMI.1987.4767941
- Holmes, J.A., Cronkite, G.M.W., Enzenhofer, H.J., Mulligan, T.J. (2006). Accuracy and precision of fish-count data from a “dual-frequency identification sonar” (DIDSON) imaging system. *ICES Journal of Marine Science*, 63(3), 543-555. doi:10.1016/j.icesjms.2005.08.015
- Mitra, V., Wang, C.J., Banerjee, S. (2004). Lidar Detection of Underwater Objects Using a Neuro-SVM-Based Architecture. *IEEE Transactions on Neural Networks*.
- Ochoa-Somuanom, J., Pérez-Lara, C., Toscano-Martínez, J.H., Pereyra-Ramos, C.G. (2013). *Clasificación de objetos rígidos a partir de imágenes digitales empleando los momentos invariantes de Hu*. Paper presented at the X Congreso Internacional sobre Innovación y Desarrollo Tecnológico, Cuernavaca Morelos, México.
- Otsu, N. (1979). A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms. *Systems, Man and Cybernetics, IEEE Transactions*, 9(1), 62-66. doi:10.1109/TSMC.1979.4310076
- Pajares Martinsanz, G., De la Cruz García, J. (2007). *Visión por computador imágenes digitales y aplicaciones*, 2ª ed. Ra-Ma Ed.: Madrid, España.

- Puertas, J., Cea, L., Bermúdez, M., Pena, L., Rodríguez, A., Rabuñal, J., Balairón, L., Lara, A., Aramburu, E. (2011). Computer application for the analysis and design of vertical slot fishways in accordance with the requirements of the target species. *Ecological Engineering*, 48, 51-60. doi:10.1016/j.ecoleng.2011.05.009
- Puertas, J., Pena, L., Teijeiro, T. (2004). Experimental Approach to the Hydraulics of Vertical Slot Fishways. *Journal of Hydraulics Engineering*, 130(1), 10-23. doi:10.1061/(ASCE)0733-9429(2004)130:1(10)
- Rodríguez, A., Bermúdez, M., Rabuñal, J., Aff.M.ASCE, Puertas, J., Dorado, J., Pena, L., Balairón, L. (2011). Optical Fish Trajectory Measurement in Fishways through Computer Vision and Artificial Neural Networks. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 25(4), 291-301. doi:10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000092
- Rodríguez, R., Sossa, J.H. (2011). *Procesamiento y análisis digital de imágenes*, Ra-Ma Ed.: Madrid, España.
- Storbeck, F., Daan, B. (2001). Fish species recognition using computer vision and a neural network. *Fisheries Research*, 51(1), 11-15. doi:10.1016/S0165-7836(00)00254-X
- Tarrade, L., Texier, A., David, L., Larinier, M. (2008). Topologies and measurements of turbulent flow in vertical slot fishways. *Hydrobiologia*, 609, 177-188. doi:10.1007/s10750-008-9416-y
- White, D.J., Svellingen, C., Strachan, N.J.C. (2006). Automated measurement of species and length of fish by computer vision. *Fisheries Research*, 80(2-3), 203-210. doi:10.1016/j.fishres.2006.04.009
- Wu, S., Rajaratnam, N., Katopodis, C. (1999). Structure of flow in vertical slot fishways. *Journal of Hydraulic Engineering*, 125(4), 351-360. doi:10.1061/(ASCE)0733-9429(1999)125:4(351)
- Zion, B., Alchanatis, V., Ostrovsky, V., Barki, A., Karplus, I. (2007). Real-time underwater sorting of edible fish species. *Computer and Electronics in Agriculture*, 56(1), 34-45. doi:10.1016/j.compag.2006.12.007