

GENERACIÓN DE COMPORTAMIENTO REACTIVO EN ROBOT MÓVIL PARA LA COLABORACIÓN EFECTIVA CON OPERARIO EN TAREAS DE VENDIMIA

María Nuria Conejero¹, Héctor Montes^{1,2}, Dionisio Andújar¹, José María Bengochea-Guevara¹, Ángela Ribeiro^{1,*}

¹Centro de Automática y Robótica (CAR), CSIC-UPM, Arganda del Rey. 28500 Madrid.

²Centro de Investigación e Innovación Eléctrica, Mecánica y de la Industria (CINEMI), Universidad Tecnológica de Panamá

* Correspondencia: angela.ribeiro@csic.es

Resumen

La agricultura es un ámbito de actividad caracterizado por el trabajo físico y por ello son muchos los esfuerzos para introducir la robótica en explotaciones agrícolas. En el caso específico de la recolección manual de frutas y hortalizas, y en particular en la vendimia, la dificultad radica en aproximarse a los tiempos de recolección del vendimiador sin dañar el producto y ofrecer, con ello, una solución rentable. Este artículo presenta una estrategia de seguimiento de un operario para un prototipo de plataforma robótica móvil, colaborativa para abordar la tarea de vendimia con una colaboración persona-robot que combina la destreza manual del vendimiador con la capacidad de carga de un robot. El sistema diseñado y desarrollado es de aplicación en el ámbito de la recogida manual de fruta. Se ha utilizado una plataforma robótica móvil comercial y se ha construido una estructura adaptada al transporte y pesaje del contenido de la caja de recolección de la fruta. Además, se ha integrado una cámara RGB-D y sensores UWB, así como software apropiado, en el robot para realizar el seguimiento de un operario concreto manteniendo una distancia de seguridad. El sistema que genera el comportamiento de seguimiento se ejecuta sobre ROS. Los resultados muestran que el robot realiza correctamente la operación de seguimiento del vendimiador siendo robusto ante cambios importantes de iluminación.

Palabras clave: robótica agrícola, vino con denominación de origen, seguir personas, UWB, RGB-D

1 INTRODUCCIÓN

La vendimia manual, como cualquier otro proceso de recogida de fruta u hortaliza manual, requiere un gran esfuerzo físico durante largas jornadas de trabajo por la localización de los racimos de uva en las cepas, por

las irregularidades en los terrenos, por las condiciones meteorológicas variables, la humedad y el polvo [1]. Además, también son los operarios los encargados de transportar las cajas con los racimos de uva de hilera en hilera, pudiendo llegar a transportar hasta 20 kg cuando las cajas están llenas y tienen que situarlas en los puntos de recogida. Por otra parte, las cajas llenas con los racimos no se recogen hasta el final de la jornada. En este contexto, es evidente las ventajas que tiene integrar robots con el fin de reducir el esfuerzo físico necesario del vendimiador manteniendo la calidad del producto y la velocidad de cosecha.

Se han diseñado y desarrollado robots capaces de cosechar y recolectar de manera autónoma todo tipo de productos como tomates de invernadero [2], pimientos [3], fresas [4], kiwis [5], o lechugas [6]. La vendimia no se queda atrás y diversos proyectos han tenido como objetivo su automatización [7]. Sin embargo, no alcanzan en velocidad de recogida a un operario y el racimo siempre sufre daños. Por esta última razón, algunas denominaciones de origen garantizan la vendimia manual. La puerta a una solución intermedia a corto plazo está abierta y es donde entra la colaboración persona-robot y la combinación efectiva de las capacidades de ambos. En el ámbito de la recogida manual de fruta, donde se incluye la vendimia, existe plataformas de ayuda al transporte autónomo una vez que la caja está completa y tras un aviso del operario [8] [9].

Asimismo, actualmente existe una oferta diversa de dispositivos que pueden combinarse para construir sistemas de detección e identificación robusta de personas. Algunos ejemplos son el *Laser Imaging Detection and Ranging* (LIDAR) [10], las cámaras de profundidad [11] o la tecnología *Radio Frequency Identification* (RFID) [12] y *Ultra-wideband* (UWB) [13].

El objetivo de este trabajo es el diseño y desarrollo de una plataforma móvil robótica colaborativa económicamente rentable para ayudar en la vendimia o en la recogida manual de fruta. Se pretende combinar

la destreza manual del operario y evitar el esfuerzo físico del transporte mediante un robot que lleva la carga. El desarrollo y prueba en explotación agraria (Terras Gauda, Pontevedra) de este robot es uno de los objetivos del proyecto europeo *FlexiGroBots* (<https://flexigrobots-h2020.eu/>). La plataforma robótica debe ser capaz de moverse siguiendo a un operario a una distancia determinada y segura (aproximadamente medio metro), con la velocidad adecuada mientras que este deposita los racimos de uva recogidos en la caja que el robot transporta. La plataforma tendrá además la capacidad de pesar el contenido de la caja de forma continua, por lo que será posible informar en todo momento a un centro de control y, una vez terminada la tarea de vendimia, generar un mapa de cosecha. El objetivo global es aumentar o mantener la tasa de uva cosechada por unidad de tiempo, reduciendo la fatiga y posibles lesiones en el operario y los tiempos empleados en el transporte de la uva a los puntos de procesamiento.

2 MATERIALES Y MÉTODOS

Se ha partido de la plataforma móvil comercial RB-Vogui de *Robotnik*. Se ha diseñado y construido una estructura para colocar la dotación sensorial y la caja (Fig. 1). Entre los dispositivos sensoriales se incluyen una cámara RGB-D, en concreto la Intel RealSense D415, dos módulos UWB del kit MDEK1001 de *Decawave* colocados a una altura similar a la de la cámara, una báscula industrial GRAM K3-F sobre la que se coloca la caja de vendimia, y un receptor GNSS MOSAIC-H de *Septentrio*. Sobre la báscula se ha colocado la caja con un sistema de anclaje en 4 puntos robusto pero sencillo de manipular, que asegura que la caja es solidaria a la plataforma en todas las circunstancias.

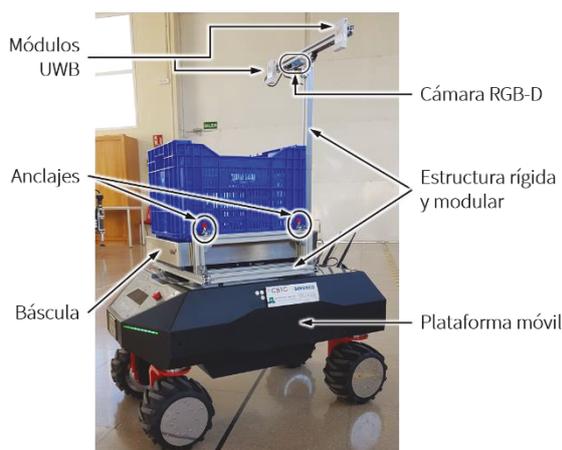


Figura 1: Configuración de la plataforma robótica.

Por otro lado, es preciso que el operario vista el chaleco de trabajo habitual en vendimia por seguridad.

Para este caso, se ha elegido un chaleco reflectante de color naranja, y una “etiqueta” (módulo UWB) colgada del cuello de operario (Fig. 2), que permite identificar a un operario concreto. Conviene señalar que en situación real habrá más de un robot trabajando, cada uno asignado a un vendimiador.



Figura 2: Operario con el chaleco respecto al robot.

2.1 SISTEMA DE IDENTIFICACIÓN DEL OPERARIO

Con el objetivo de conseguir una mayor robustez en el seguimiento del operario, el sistema a bordo del robot fusiona la información proporcionada por el sensor RGB-D, que permite localizar el chaleco que lleva el operario, con la información suministrada por los 3 dispositivos UWB (dos a bordo del robot y uno en el operario). El método desarrollado permite conocer la distancia del robot a un operario concreto, así como la orientación del robot respecto del operario.

2.1.1 Segmentación del chaleco y obtención de distancia con la cámara RGB-D

La identificación del chaleco se realiza mediante un procesamiento de la imagen de color (RGB) cuyo objetivo es aislar por color los píxeles en la imagen pertenecientes al chaleco. Para ello, se trabaja en el espacio de color HSV (*Hue Saturation Value*) y se aplica una máscara a cada plano del espacio que selecciona los valores comprendidos entre unos coeficientes máximos y mínimos otorgándoles un valor de 1, mientras que el resto tendrán un valor de 0. Este espacio resulta idóneo para trabajar con colores fuertes al separar la información de color de la de intensidad. A continuación, se clasifican como parte del chaleco, los píxeles que presentan un valor 1 en los tres planos (Fig. 3).

Los umbrales para la segmentación se han obtenido mediante un algoritmo genético con la configuración que se muestra en la Tabla 1 y utilizando un conjunto de datos (*dataset*) de 150 imágenes RGB con una resolución de 1280x720 píxeles tomadas con la cámara RGB-D, tanto en interiores como en exteriores, y tanto en días soleados como nublados.

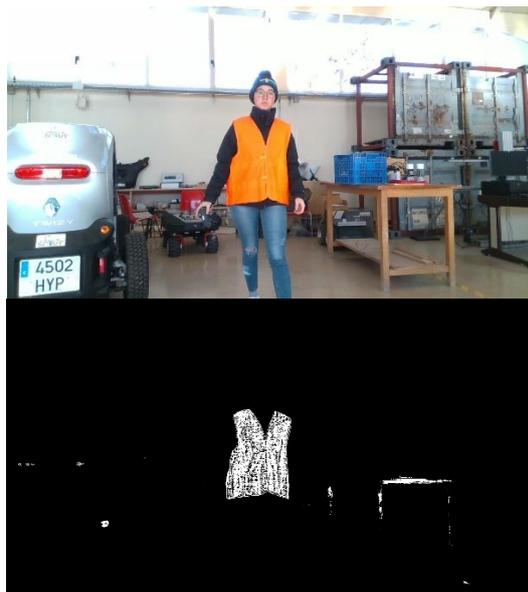


Figura 3: Imagen original y segmentada en interior.

Tabla 1: Configuración del algoritmo genético.

Parámetro	Valor
Individuo	(H, S, y V mínimo y máximo) (0,0,0,0,0,0) (1,1,1,1,1,1)
Límite inferior	40
Límite superior	Estocástica Uniforme
Individuos de la población	Disperso
Función de selección	0.8
Función de cruce	Uniforme
Fracción de cruce	0.3
Función de mutación	1 individuo
Probabilidad de mutación	Fitness = 0.99 o
Elitismo	200 generaciones sin
Criterio de finalización	mejora o 1000 iteraciones alcanzadas

La *fitness* se define como:

$$\frac{vab}{v vb + v fb} \tag{1}$$

donde, *vab* son los aciertos en los píxeles del chaleco, *v vb* es el número total de píxeles verdaderos positivos (píxeles del chaleco) y *v fb* es el número total de píxeles verdaderos negativos (no son parte del chaleco).

Una vez que se tienen los umbrales de segmentación, el algoritmo desarrollado obtiene la distancia para

cada imagen segmentando los píxeles del chaleco, para posteriormente aplicar operadores morfológicos de erosión, dilatación y erosión, en ese orden, para definir el contorno y el interior del chaleco en la imagen binaria. Con la imagen de profundidad asociada (resolución de 640x480 píxeles) se calcula la media de la distancia a cada píxel blanco que se encuentre dentro del chaleco. Esta media es la estimación de la distancia del robot al operario.

2.1.2 Obtención de posición, orientación y distancia del operario con el equipo UWB

Utilizando dos dispositivos etiquetas UWB (*tags*) colocados en el robot, y el anclaje UWB (*anchor*) que transporta el operario, se obtiene la posición y orientación de este último con respecto al robot y, por ende, se calcula la distancia y orientación del centro geométrico del robot al operario. Los *tags* son elementos activos que emiten una señal tipo Bluetooth que es recibida por el *anchor*. La distancia entre el operario y el robot se estima a partir del tiempo de vuelo (ToF) y utilizando la información proporcionada por las dos etiquetas integradas en el robot.

Ante la presencia de varios operarios utilizando este sistema, la distancia que se recibe será la de los dispositivos que se encuentran en la misma red, lo que permite también identificar al operario. La frecuencia de actualización de estas medidas se ha establecido en *10 Hz* para régimen estacionario y durante el movimiento, por lo que se recibirán nuevas medidas cada *100 ms*. El rango de variación de las medidas, incluso en estático, es de *10 cm*, lo que impide obtener la misma medida de forma continua. En consecuencia, se ha implementado un filtro digital de paso bajo (*low-pass*) (2) junto a uno de media móvil (3), a fin de reducir el ruido existente.

$$y[n] = b_0 x[n] + b_1 x[n - 1] + b_2 x[n - 2] + \dots + b_M x[n - M] - a_1 y[n - 1] - a_2 y[n - 2] - \dots - a_N y[n - N] \tag{2}$$

$$y[n] = \frac{1}{M} \sum_{k=0}^{M-1} x[n - k] \tag{3}$$

Con el filtro de paso bajo, se tiene en cuenta un número determinado de medidas anteriores al momento de obtener un valor de salida de las medidas actuales. El filtro se ha configurado con un *orden 2* y frecuencia de corte de *0.5 Hz*, para que cada 5 medidas recibidas (*M*) se devuelvan estas mismas medidas suavizadas y se obtenga la media con el filtro de media móvil. De esta forma las nuevas medidas se actualizan cada *0.5 s* y son las utilizadas en la estimación de la posición y orientación del operario respecto al centro geométrico (centro de rotación y avance) del robot. Finalmente, la distancia entre el robot y el operario se

calcula desde la parte trasera del robot, donde se encuentra colocada la cámara y los *tags* a una distancia conocida d_x del centro geométrico (en el caso de la plataforma seleccionada es de 0.308 m) y a una distancia d_r entre ellos (en este caso de 0.47 m) con el objetivo de comparar las distancias estimadas con los distintos métodos (RGB-D, UWB). El operario se moverá siempre entre los dos primeros cuadrantes del plano cartesiano (Fig. 4), ya que, de otra manera, quedaría fuera del campo de visión de la cámara del robot y este se detendría. La determinación del tipo de caso viene dada por la ecuación (4).

$$\begin{cases} \text{si } d_{01} \geq d_{02} \rightarrow A_{01} \text{ en } Q1 \\ \text{si } d_{01} < d_{02} \rightarrow A_{01} \text{ en } Q2 \end{cases} \quad (4)$$

La estimación a partir de los *tags* varía en función del cuadrante en el que se encuentre el operario. Por ejemplo, para el primer cuadrante las estimaciones de las distancias d_{01} y d_{02} forman el triángulo que se muestra en la figura 5, donde el ángulo θ_1 se obtiene de la expresión (5), y las distancias Y_A y X_A al *anchor* A_{01} a partir de las expresiones (6) y (7).

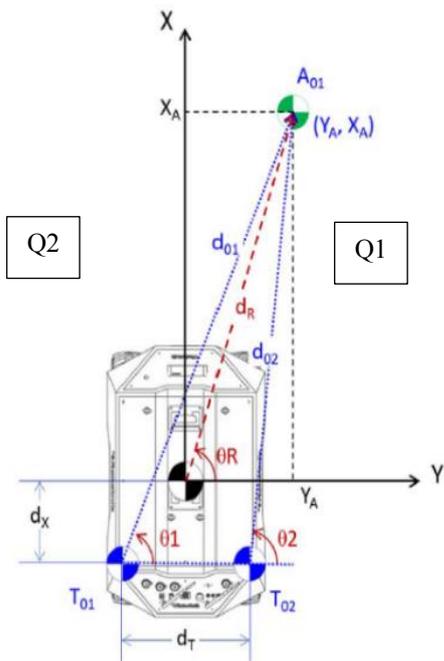


Figura 4: Situación del operario en el primer cuadrante.

$$\theta_1 = \arccos \left[\frac{(d_{01})^2 + (d_r)^2 - (d_{02})^2}{2(d_{01})(d_r)} \right] \quad (5)$$

$$X_A = (d_{01}) \sin(\theta_1) - d_x \quad (6)$$

$$Y_A = (d_{01}) \cos(\theta_1) - \frac{d_r}{2} \quad (7)$$



Figura 5: Obtención del ángulo en el primer cuadrante.

A su vez la orientación θ_R y la distancia d_R (desde la parte trasera del robot) a la que se encuentra el *Anchor* A_{01} puede calcularse con las expresiones (8) y (9).

$$\theta_R = \tan^{-1} \frac{X_A}{Y_A} \quad (8)$$

$$d_R = \sqrt{(X_A + d_x)^2 + (Y_A)^2} \quad (9)$$

Una vez realizada una última transformación para disponer de los valores de orientación y distancia, se aplica un filtro de Kalman para la corrección y estimación de las coordenadas de posición x y y con el objetivo de suavizar las medidas y disminuir todavía más su variación, minimizando los errores de guiñada y de cabeceo que podrían aparecer durante el seguimiento al operario.

Para este caso concreto y tomando como referencia el filtro aplicado para los dispositivos UWB del trabajo [14], se tendrán dos variables de estado que se corresponden con las posiciones x y y del operario respecto al robot y se empleará un modelo de velocidad constante como aproximación del alto comportamiento reactivo del operario, ya que resulta imposible conocer su velocidad de desplazamiento. Por tanto, se establece en la ecuación correspondiente del filtro de Kalman la velocidad de las variables de posición x y y , es decir, la variable dt como la frecuencia de refresco de las medidas, que es de 0.5 s .

2.2 CONTROL DEL DESPLAZAMIENTO DEL ROBOT

Para el control del desplazamiento del robot se ha optado por la actuación sobre la velocidad lineal para el eje x y la velocidad angular en el eje z , de forma que siempre haya asignados valores para ambas. Este método de generación de comportamiento reactivo

logra situar al robot de forma aproximada a una distancia fija del operario en todo momento, corrigiendo los posibles deslizamientos durante el movimiento del robot. Al tratarse de un trabajo sobre explotaciones comerciales con un terreno ya preparado para ello, se prevé un deslizamiento mínimo.

2.2.1 Control de la velocidad angular

Para asignar tanto el módulo como el sentido de la velocidad angular correspondiente al robot, se tienen en cuenta los siguientes parámetros: el ángulo de rotación sobre el eje z del propio robot, el ángulo θ del operario respecto al robot; obtenido a partir del equipo UWB y una tolerancia de error de orientación permitida de 8.6 grados/0.15 radianes y se realiza un control por casos distinguiendo entre 3 posibles situaciones (10).

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{si } |\theta_{operario}| \leq \text{tolerancia} \rightarrow |\omega| = 0 \text{ rad/s} \text{ (10)} \\ \text{si } -30^\circ \leq \theta_{operario} < -\text{tolerancia} \cup \\ \text{tolerancia} < \theta_{operario} \leq 30^\circ \rightarrow |\omega| = 0.6 \text{ rad/s} \\ \text{si } |\theta_{operario}| > 30^\circ \rightarrow |\omega| = 0.7 \text{ rad/s} \end{array} \right.$$

El operario se encuentra siempre enfrente del robot (primer o segundo cuadrante), por lo que se precisan movimientos rápidos y cortos. Por ello, la estrategia consiste en aplicar una velocidad ligeramente mayor cuando se requiera un mayor ángulo de giro, sin ser muy elevada para evitar un ángulo de giro excesivo. Para decidir el sentido de la rotación entre el sentido de las agujas del reloj o, al contrario, es necesario tener en cuenta el sistema de referencia del robot, donde una rotación en el sentido de las agujas del reloj tendrá un signo de ω negativo y positivo en el caso contrario.

Finalmente, mediante una comparación entre el valor θ_{robot} dado por su odometría, y el valor $\theta_{operario}$ respecto del mismo (sumado a θ_{robot}), las distintas situaciones que se dan y el sentido de la velocidad correspondiente en cada una de ellas se muestran en las expresiones (11), (12) y (13).

$\theta_{robot} > 0$: el robot está en el segundo cuadrante.

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{si } \theta_{operario} \leq 0 \rightarrow \omega \text{ cw.} \\ \text{si } \theta_{operario} > 0 \text{ y } \theta_{robot} > \theta_{operario} \rightarrow \omega \text{ cw.} \\ \text{si } \theta_{operario} > 0 \text{ y } \theta_{robot} < \theta_{operario} \rightarrow \omega \text{ ccw.} \end{array} \right. \text{ (11)}$$

$\theta_{robot} < 0$: el robot está en el primer cuadrante.

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{si } \theta_{operario} \geq 0 \rightarrow \omega \text{ ccw.} \\ \text{si } \theta_{operario} < 0 \text{ y } \theta_{robot} > \theta_{operario} \rightarrow \omega \text{ ccw.} \\ \text{si } \theta_{operario} < 0 \text{ y } \theta_{robot} < \theta_{operario} \rightarrow \omega \text{ cw.} \end{array} \right. \text{ (12)}$$

$\theta_{robot} = 0$: el robot está en el centro.

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{si } \theta_{operario} > 0 \rightarrow \omega \text{ ccw.} \\ \text{si } \theta_{operario} < 0 \rightarrow \omega \text{ cw.} \end{array} \right. \text{ (13)}$$

2.2.2 Control de la velocidad lineal

El valor de la velocidad lineal vendrá dado por un controlador proporcional (14) donde el valor constante 0.5 se ha fijado experimentalmente.

$$v_{linear} \cdot x = 0.5 * \text{distancia_operario} \text{ (14)}$$

2.3 INTEGRACIÓN DE LOS DISTINTOS SISTEMAS EN LA PLATAFORMA ROBÓTICA

Se puede dividir la lógica o el funcionamiento de la plataforma y su comportamiento seguidor en tres grandes bloques funcionando de manera independiente y paralela: el bloque de pesado, el bloque de la recopilación y sincronización de la información sensorial y el bloque de toma de decisiones y actuación. Estos dos últimos se encuentran, además, comunicados entre sí.

2.3.1 Recopilación de la información de los sensores

En este primer bloque se reciben, de manera sincronizada, la información RGB-D, UWB y la odometría del robot. Con toda la información se obtiene, primeramente, la distancia desde el robot hasta el *anchor* y se repite el proceso con el dato de orientación del *anchor* y el del robot. Este dato sumado a la orientación dada por el *Anchor* permite conocer el ángulo del operario respecto al robot cuando éste se encuentra en movimiento. A continuación, se utilizan las imágenes RGB-D para obtener la distancia al operario proporcionada por la cámara. En este momento se utiliza la información del UWB para desambiguar las distancias y utilizar la correcta. La distancia al operario del UWB, la distancia al operario de la cámara, la orientación del robot y la orientación del operario se gestionan a través del servidor de parámetros de ROS.

2.3.2 Toma de decisiones y actuación

Este bloque se comunica con el bloque anterior y se encarga de generar las órdenes de control sobre las velocidades. Existen tres opciones de funcionamiento:

Situación 1: no hay distancia dada por la cámara

Si el valor de la distancia al operario dada por la cámara es nulo significa que no se ha detectado ningún operario o que, en el caso de haber detectado una pequeña región u objeto naranja, su tamaño se considera irrelevante. Entonces, se detiene el robot con una velocidad lineal y angular de 0. De esta forma,

el robot permanece detenido cuando el operario se encuentra alrededor del robot o depositando la cosecha en la caja fuera del ángulo de visión de la cámara.

Situación 2: las distancias al operario dadas por la cámara y el anchor son similares

Se considera que se está en esta situación cuando la diferencia es inferior a 2.0 m, umbral establecido mediante experimentación teniendo en cuenta situaciones límite como por ejemplo, cuando parte del operario se encuentra fuera del ángulo de visión de la cámara. En este caso, si la diferencia entre ambos sensores (RGB-D y UWB) es mayor que 0.3 metros se toma el valor del anchor como valor de distancia al operario. Para valores menores a 0.3 m se toma como distancia al operario la dada por la cámara RGB-D. Elegido el mejor sistema para la medición de distancia, se comprueba si es menor o igual que 0.5 metros. En caso afirmativo, el robot está suficientemente cercano al operario y se detiene o se mantiene detenido. En caso contrario, se procede al cálculo de velocidades para generar el comportamiento de seguimiento al operario. Para el caso de la velocidad angular, primero se comprueba si la orientación del operario está dentro del margen del ángulo de tolerancia fijado a ± 0.15 radianes con respecto al eje de avance del robot. Cuando esto sucede, se considera que el robot está lo suficientemente centrado como para avanzar de manera lineal y su velocidad angular es 0. En caso negativo, se obtiene el módulo y el sentido de la velocidad angular y se calcula una velocidad lineal.

Situación 3: las distancias al operario dadas por la cámara y el anchor son dispares

Esta última situación se contempla principalmente para aumentar la seguridad del operario y evitar confusiones con la persona a la que realmente debe seguir. Ocurre cuando la diferencia entre las distancias obtenidas con los sensores es mayor que el umbral establecido de 2.0 m. En este caso se detiene el robot enviando una velocidad lineal y angular de 0.

3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El cálculo de la precisión en la localización del operario se ha realizado mediante experimentación. Para la evaluación del filtro paso bajo para la reducción del ruido de los sensores UWB se seleccionaron para la experimentación filtros de orden 2 y 3 con una frecuencia de corte intermedia o baja. Con una persona llevando el anchor y el chaleco y situada a una distancia de 1,4 m del robot, se tomaron medidas en una posición de 0°/0.7854 rad respecto al robot y en una posición de 45°/0.7854 rad a la izquierda y a -45°/0.7854 rad a la derecha del eje central del robot

y se calculó el error de orientación y posición (Tabla 2). Teniendo en cuenta una colocación aproximada del robot en las posiciones de -45° y 45°, el filtro de orden 2 y frecuencia de corte 0.5 rad/s presenta menor error en orientación, mientras que el filtro de orden 2 y frecuencia de corte 0.3 consigue mayor precisión en distancia. Sin embargo, se escoge el primero ya que la distancia más utilizada por el robot es la de la cámara mientras que la referencia de orientación del operario depende únicamente de los dispositivos UWB.

Tabla 2: Errores de los filtros paso bajo seleccionados.

Posición	Orden	Cut-off (rad/s)	Error ángulo (rad)	Error distancia (m)
Centro	3	0.5	0.0724	0.1239
	2	0.5	<u>0.0002</u>	0.1143
	2	0.3	0.0392	<u>0.0479</u>
Izq.	3	0.5	0.1740	0.0925
	2	0.5	0.0513	0.0703
	2	0.3	<u>0.0405</u>	<u>0.6110</u>
Dcha.	3	0.5	0.4510	0.0341
	2	0.5	<u>0.3671</u>	<u>0.0042</u>
	2	0.3	0.6154	0.0738

Para cuantificar el impacto de la adición del filtro de Kalman a los dos anteriores filtros y a la estabilidad de los datos de posición se realizó un segundo experimento. Se posicionó el robot con su centro en una posición de (0, 0) m y el operario se movía sobre una matriz con marcadores a distancias simétricas de 0.4 m, localizadas sobre el plano del suelo y en frente del robot. El operario permanecía parado en cada uno de los puntos de la matriz durante 10 mediciones, aproximadamente. La Fig. 6 muestra los resultados de este experimento que compara los datos obtenidos con y sin la aplicación del filtro de Kalman. Para el cálculo del error de las posiciones (x, y) y de la distancia entre operario y robot que presentan estas medidas con y sin la aplicación del filtro de Kalman (Tabla 3) se ha utilizado como métrica el Error Cuadrático Medio (RMSE) (15).

La corrección del filtro de Kalman se reduce a valores del orden de milímetros. Los errores estimados son muy reducidos, excepto en el eje y que es aproximadamente de 17 cm. Sin embargo, la observación de un suavizado de la dispersión de las medidas estáticas indica que es posible aplicarlo cuando el robot y la persona portadora del anchor se encuentren en movimiento.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (Predicción_i - Real_i)^2}{N}} \tag{15}$$

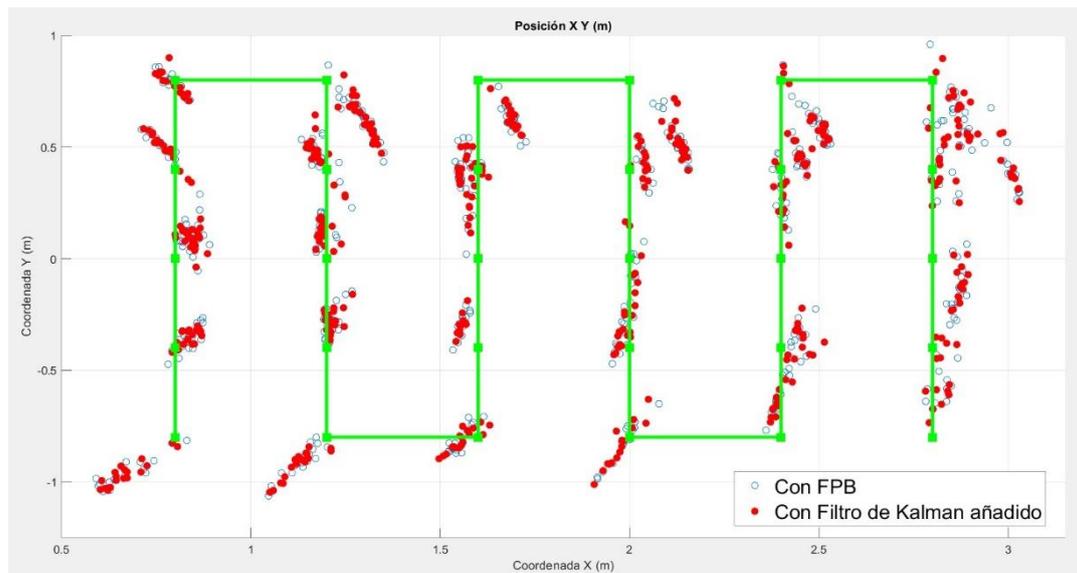


Figura 6: Resultados del experimento del filtro de Kalman para posiciones estáticas. En verde el recorrido del operario y los puntos de toma de mediciones teóricos, en azul los resultados de posición empleando únicamente el filtro *paso bajo* y en rojo los resultados de posición añadiendo también el filtro de Kalman.

Tabla 3: El error cuadrático medio antes y después de la introducción del filtro de Kalman.

Tipo de RMSE	Valor (m)
Posición <i>x</i> sin Kalman	0.0716
Posición <i>y</i> sin Kalman	0.1697
Posición <i>x</i> con Kalman	0.0708
Posición <i>y</i> con Kalman	0.1666
Distancia al robot sin Kalman	0.0447
Distancia al robot con Kalman	0.0442

Finalmente, para comprobar el funcionamiento general de la plataforma se han realizado dos tipos de experimentos: 1) evaluación del seguimiento en interiores para comprobar el comportamiento del sistema ante la presencia de varios operarios y objetos que pudiesen inducir a confusión; y 2) evaluación del seguimiento en exteriores para comprobar la respuesta ante la presencia de sol y los cambios de iluminación asociados.

En interiores se comprueba que, cuando el operario se encuentra con el *anchor* de manera frontal al robot, el seguimiento se realiza correctamente con unos datos de orientación lo suficientemente estables como para que el avance de seguimiento frontal se produzca sin realizar ningún giro innecesario. No obstante, ante giros o movimientos extremadamente bruscos del operario, el robot avanza con un pequeño radio de giro hasta que la estabilidad del operario le permite hacerlo

de manera frontal. Además, se corrobora que, ante la presencia de otros objetos u operarios con chaleco del mismo color, el robot identifica sin problema al operario asignado, debido a la etiqueta UWB.

Tras realizar el mismo experimento en un entorno exterior y sobre un terreno de superficie irregular, se observa una diferencia por las vibraciones que se producen sobre la estructura solidaria al robot que integra la cámara y los *tags*. Mientras que estas vibraciones no afectan a la segmentación por color del chaleco ni a la medida de distancia por parte de la cámara, sí influyen en el cálculo de orientación por parte de los sensores UWB, en especial cuando el operario se orienta lateralmente con respecto al robot. En estos casos y de manera puntual el robot no avanza en sentido totalmente frontal, situación que se debe tener en cuenta en el caso de trabajar en cultivos con calles de ancho muy reducido. Respecto a la incidencia directa del sol, en casos extremos en los que el dato de distancia no se obtiene correctamente, el razonamiento del robot fuerza a utilizar como referencia la distancia del equipo UWB sin mayor inconveniente.

Con carácter general, el razonamiento y la toma de decisiones que realiza el robot son adecuados y cubren todas las posibilidades con un tiempo de respuesta rápido equiparando a las acciones que puede realizar el operario. Además, la seguridad es máxima ya que el robot se detiene a la distancia establecida de 0.5 m del operario y permanece parado mientras la distancia no aumenta.

4 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

Se ha diseñado, desarrollado y probado un prototipo de plataforma robótica móvil colaborativa en un entorno real de vendimia, que asimismo es aplicable a distintos tipos de recogida manual de fruta. La plataforma es robusta en entornos agrícolas, segura para el operario y las primeras pruebas muestran que es una alternativa plausible y utilizable a corto plazo en aplicaciones reales.

Asimismo, la identificación del operario por medio de la segmentación de color de un chaleco reflectante por medio de la cámara RGB-D, una vez ajustados los coeficientes o umbrales mediante algoritmos genéticos, combinada con tecnología UWB, que permite la obtención de la posición y orientación de un operario concreto, con un método rápido y robusto que además genera en el robot un comportamiento estable cuando se integran los filtros de paso bajo, de media móvil y de Kalman. Funciona adecuadamente ante comportamientos bruscos del operario a pesar del inconveniente que supone la incidencia directa del sol sobre la cámara. Esto indica que, la mejor opción para una aplicación de estas características es dotar al robot de sensores robustos para cubrir la máxima cantidad de casos posibles y combinar la información proporcionada por la dotación sensorial. De esta forma, se toman decisiones con la información más fiable para cada situación, lo que permite un uso en entornos agrícolas dinámicos y con tantos condicionantes como los son las condiciones meteorológicas, la morfología del terreno, o la presencia de obstáculos.

Como líneas futuras del proyecto se prevé incorporar en la plataforma robótica un sistema de mantenimiento de nivel para la báscula que permita al robot desplazarse por terrenos con pendientes, mientras que la carga se mantiene de manera estable y sin ser afectada en todo momento. Adicionalmente, se plantea la incorporación de sensores de ultrasonidos en los laterales del robot para medir las distancias con respecto a las hileras de cultivo y evitar posibles colisiones y las consecuencias que estas puedan tener y la adaptación de esta u otras estrategias para las arquitecturas variadas que presentan los viñedos. Por último, se plantea el estudio de una alternativa para el modelo de velocidad continua del filtro de Kalman que tenga en cuenta la velocidad de los movimientos reactivos del operario.

Agradecimientos

Esta investigación está financiada por el Proyecto europeo FlexiGroBots (Grant agreement ID: 101017111).

GENERATION OF REACTIVE BEHAVIOUR IN MOBILE ROBOT FOR EFFECTIVE COLLABORATION WITH OPERATOR IN GRAPE HARVESTING TASKS

Abstract

Agriculture is a field of activity characterized by physical labor, which is why many efforts are being made to introduce robotics on farms. In the specific case of vineyards, and harvesting in particular, the difficulty lies in approximating the harvesting times of the grape harvester without damaging the product and thus offering a cost-effective solution. This paper presents an operator tracking strategy for a prototype mobile, collaborative robotic platform to address the harvesting task with a human-robot collaboration that combines the manual dexterity of the harvester with the carrying capacity of a robot. The system designed and developed is applicable in the field of manual fruit picking. A commercial mobile robot platform has been used and a structure adapted to the transport and weighing of the contents of the box has been built. In addition, an RGB-D camera and UWB sensors have been integrated. A system for tracking a specific operator while maintaining a safety distance has been integrated into the robot. The system runs on ROS. The results show that the robot correctly performs the operation of tracking the grape harvester and is robust in the event of major changes in lighting.

Keywords: agricultural robotics, designations of origin of wine, person-follower, UWB, RGB-D

Referencias

- [1] Ravankar, A., Ravankar, A. A.; Rawankar, A.; & Hoshino, Y. (2021). Autonomous and Safe Navigation of Mobile Robots in Vineyard with Smooth Collision Avoidance. *Agriculture*, 11(10), 954.
- [2] Feng, Q., Zou, W., Fan, P., Zhang, C., & Wang, X. (2018). Design and test of robotic harvesting system for cherry tomato. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 11(1), 96-100.
- [3] Arad, B., Balendonck, J., Barth, R., Ben-Shahar, O., Edan, Y., Hellström, T., ... & van Tuijl, B.

- (2020). Development of a sweet pepper harvesting robot. *Journal of Field Robotics*, 37(6), 1027-1039.
- [4] Xiong, Y., Ge, Y., Grimstad, L., & From, P. J. (2020). An autonomous strawberry-harvesting robot: Design, development, integration, and field evaluation. *Journal of Field Robotics*, 37(2), 202-224.
- [5] Williams, H., Ting, C., Nejati, M., Jones, M. H., Penhall, N., Lim, J., ... & MacDonald, B. (2020). Improvements to and large-scale evaluation of a robotic kiwifruit harvester. *Journal of Field Robotics*, 37(2), 187-201.
- [6] Birrell, S., Hughes, J., Cai, J. Y., & Iida, F. (2020). A field-tested robotic harvesting system for iceberg lettuce. *Journal of Field Robotics*, 37(2), 225-245.
- [7] Vrochidou, E., Tziridis, K., Nikolaou, A., Kalampokas, T., Papakostas, G. A., Pachidis, T. P., ... & Kaburlasos, V. G. (2021). An Autonomous Grape-Harvester Robot: Integrated System Architecture. *Electronics*, 10(9), 1056.
- [8] Peng, C., Vougioukas, S., Slaughter, D., Fei, Z., & Arikapudi, R. (2021). A strawberry harvest-aiding system with crop-transport co-robots: Design, development, and field evaluation. *arXiv preprint arXiv:2107.13063*.
- [9] Johan From, P., Grimstad, L., Hanheide, M., Pearson, S., & Cielniak, G. (2018). Raspberry-robotic and autonomous systems for berry production. *Mechanical Engineering*, 140(06), S14-S18.
- [10] Zhao, Y., Gao, Y., Sun, Q., Tian, Y., Mao, L., & Gao, F. (2021). A real-time low-computation cost human-following framework in outdoor environment for legged robots. *Robotics and Autonomous Systems*, 146, 103899.
- [11] Priyandoko, G., Wei, C. K., & Achmad, M. S. H. (2018). Human following on ros framework a mobile robot. *Sinergi*, 22(2), 77-82.
- [12] Wu, C., Tao, B., Wu, H., Gong, Z., & Yin, Z. (2021). A UHF RFID-based dynamic object following method for a mobile robot using phase difference information. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 70, 1-11.
- [13] Rykała, Ł., Typiak, A., & Typiak, R. (2020). Research on developing an outdoor location system based on the ultra-wideband technology. *Sensors*, 20(21), 6171.
- [14] Sang, C. L., Adams, M., Korthals, T., Hörmann, T., Hesse, M., & Rückert, U. (2019, September). A bidirectional object tracking and navigation system using a true-range multilateration method. In *2019 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN)* (pp. 1-8). IEEE.



© 2022 by the authors.
Submitted for possible
open access publication
under the terms and conditions of the Creative
Commons Attribution CC-BY-NC-SA 4.0 license
(<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.es>).