

## Determinación de la Orientación en Vehículos No Tripulados

Ignacio Zaradnik<sup>1</sup>, Luciano Salvatore<sup>1</sup>, Oreste Daniel Lupi<sup>1</sup>,  
Diego Turconi<sup>1</sup>, Juan Pablo Calabro<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Ingeniería Universidad Nacional de la Matanza Buenos Aires, Argentina  
izaradnik@unlam.edu.ar, luciano.salvatore431@gmail.com

**Resumen.** El desarrollo de vehículos no tripulados presenta un gran número de áreas de aplicación. Una de estas áreas es el monitoreo de la calidad del agua de ecosistemas acuáticos, y dentro de ella la determinación del contenido de micro y nano plástico. Lo que se logra con la incorporación de un sistema de toma de muestras a un vehículo de superficie no tripulado. En estos dispositivos, la orientación es un factor importante, ya que en base a ella el sistema de control opera sobre los actuadores para lograr la trayectoria deseada. En el siguiente trabajo se presentan las pruebas realizadas con giróscopos y magnetómetros sobre un vehículo terrestre no tripulado, por encontrarse el vehículo de superficie bajo construcción, para la determinación de la orientación. Los resultados obtenidos permiten determinar la orientación con un error aceptable, presentando el uso del magnetómetro la ventaja de la determinación estática de la orientación.

**Palabras claves:** Vehículos no tripulados, Ecosistemas acuáticos, Giróscopo, Magnetómetro.

### 1. Introducción

El contenido de micro/nano plásticos en el agua tienen un efecto sobre los seres vivos, ya sea por ingestión o por toxicidad. En el caso puntual de la concentración de estos en ambientes acuáticos, si bien es posible su detección, tal como se detalla en [1] o en [2-4], dichos métodos tienen la dificultad de no poder ser realizados en tiempo real y de ser muy costosas las campañas de muestreo y análisis. Un dispositivo adecuado para la toma de las muestras antes mencionado puede ser un pequeño vehículo de superficie no tripulado (USV por sus siglas en ingles), manejado a través de control remoto o parcialmente autónomo. En la actualidad existen diversos productos comerciales como los detallados en [5], así como diversos trabajos que presentan este tipo de solución [6-8], inclusive con la toma de muestras [9]. Los primeros poseen un costo elevado, mientras los segundos están pensados para aplicaciones que pueden no adecuarse a las necesidades propias y la documentación disponible no es adecuada para su reproducción.

Por lo tanto, como fruto de conversaciones con investigadores de la Fundación Argentina de Nanotecnología (FAN), quienes estaban interesados en la medición de estos parámetros, se planteó desarrollar un pequeño USV experimental autónomo y/o por control remoto para la medición de parámetros ambientales y la toma de muestras en ecosistemas acuáticos.

En el modo de funcionamiento autónomo, el control de la trayectoria depende de tres parámetros: la posición, el curso y la orientación. Es importante aclarar que el curso

y la orientación no son lo mismo, mientras que el curso nos indica en qué dirección se mueve el vehículo, la orientación nos indica en qué dirección esta apuntando el mismo, una simple explicación se puede encontrar en [10]. En función de la orientación, el sistema de control del vehículo opera sobre los actuadores a fin de mantener el curso que posee o cambiarlo, y de esta forma llegar de la posición actual a la deseada.

La posición y el curso del dispositivo puede ser obtenidas por medio de la incorporación de un módulo GNSS (siglas en inglés de Sistema global de navegación por satélite) a través de la lectura de la trama RMC (Datos de tránsito/GPS específicos mínimos recomendados por sus siglas en inglés) del protocolo NMEA [11]. Mientras que para la orientación es necesario el uso de sensores inerciales: acelerómetro, magnetómetro y giroscopo. A través del magnetómetro se obtiene la orientación por medio de la medición del campo magnético terrestre [12], mientras que el acelerómetro y el giroscopo pueden ser utilizados para compensar el movimiento del sistema y mejorar el cálculo de la trayectoria como se describe en [13].

## 2. Desarrollo

### 2.1 Arquitectura del Sistema

En la figura N°1 se puede ver la arquitectura planteada para el USV, en donde se tiene un sistema central y subsistemas para las distintas tareas a desarrollar. El subsistema de alimentación brindará la energía necesaria a cada uno de los elementos del dispositivo. El subsistema de radiocontrol recibirá las órdenes de movimiento para el posicionamiento inicial y rescate del dispositivo. Con la posición destino, determinada previamente o informada por el subsistema de telemetría, el sistema central de procesamiento determinará la trayectoria a seguir en función de su posición actual, obtenida por un módulo GNSS incluido en el subsistema de posición. El cual, además, cuenta con sensores inerciales que brindarán información para los ajustes de la trayectoria. Con la trayectoria determinada, se enviarán comandos al subsistema de propulsión para el manejo de los motores. Una vez que se llega a destino, se activará el subsistema de toma de muestra.

### 2.2 Hardware y Software empleado

A continuación, no se detallará todo el hardware asociado al dispositivo, sino sólo el que esté involucrado con las rutinas de posicionamiento y orientación.

Como sistema central de procesamiento se empleó la placa Orange Pi PC2 es una SBC (Single-Board Computer), la cual integra un procesador Quad-core de 64 bits

ARM-Cortex A53, 1GB de memoria RAM (DDR3), 2GB de memoria flash (NOR), interfaz para SD y múltiples interfaces de comunicación [14]. En lo que respecta a los sensores inerciales se empleó el dispositivo MPU 9250, el cual integra un giroscopo, un magnetómetro y un acelerómetro [15].

El sistema operativo embebido en la plataforma seleccionada es un Armbian [16], que no es otra cosa que un Debian (una de las distribuciones de Linux más populares) compilado con los requerimientos necesarios para ejecutarse sobre procesadores con

arquitectura ARM. Las rutinas fueron implementadas en C sobre un entorno Eclipse en PC, y luego se realizó una compilación cruzada (Cross-compilation) con ayuda de Linaro Toolchain ARMv7 [17] para embeberlas en la placa.

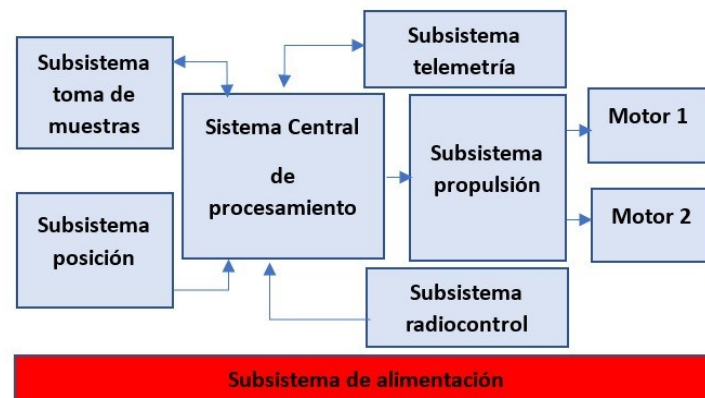


Fig. 1. Aquitectura de embarcación autónoma.

### 2.3 Pruebas iniciales

Partiendo de los ensayos previamente realizados sobre la placa Orange Pi, donde se logró obtener las lecturas de un sensor inercial conectado a la interfaz I2C (no detallados por cuestiones de extensión), la siguiente tarea consistió en lograr el correcto procesamiento de los datos para conseguir información útil de la rotación del dispositivo.

Para la determinación de la orientación en base al magnetómetro se consideraron las mediciones en los ejes “x” e “y” del mismo. Esto en base a que, si el eje “x” está alineado con el campo magnético terrestre la medición en éste será máxima y cero en el eje “y”, mientras que si no lo está se medirá una intensidad en el eje “y”. El ángulo de desplazamiento se obtendrá como el arco tangente de la magnitud del eje “y” sobre el “x”.

Como consecuencia de que los problemas intrínsecos que poseen los magnetómetros, magnetización remanente a causa de su elevada sensibilidad y diferencia de sensibilidad entre ejes, fue necesario la implementación de una rutina de calibración similar a la empleada en teléfonos móviles. La misma consta en girar el sensor sobre su eje Z, mientras se toman muestras de los ejes X e Y, quienes se encuentran recorriendo todo su rango de valores posibles. Con cada nueva muestra se definen un nuevo valor máximo, mínimo y/o medio según corresponda al caso. Tras 5 segundos de rotación, con la información obtenida se procede a normalizar los valores de las futuras mediciones a realizar. Esto permite aumentar la precisión en la obtención del ángulo a coste de perder información sobre la densidad de flujo magnético, siendo esto último no influyente en el ensayo.

Las pruebas de medición orientación (ángulo respecto al norte magnético) fueron satisfactorias, la mayor precisión se encontró siempre que la brújula estaba en movimiento, llegando a adquirir una dirección final (tras acabar el movimiento) tal que

el error obtenido era menor a  $\pm 1^\circ$ . Al quedarse estático el sensor, se podían apreciar oscilaciones que alcanzaban los  $\pm 7^\circ$ , pero siempre alrededor de un valor medio previamente.

### 2.4 Ensayo

Para validar el uso de magnetómetro en la determinación de la orientación se planteó una prueba de odometría. Para este fin fue necesario contar con un vehículo autónomo o controlado por un usuario, sobre el cual estimar su posición y dirección. Si bien estaba previsto trabajar sobre un USV, las pruebas iniciales se desarrollaron sobre un vehículo terrestre no tripulado (UGV por sus siglas en inglés) constituido por un kit comercial de chasis circular con un juego de ruedas motorizadas de forma diferencial, sensores de proximidad laterales y distancia al frente, figura N°2. En donde, de toda la parte motriz y de detección se encarga de forma autónoma un microcontrolador, mientras que la Orange Pi se ocupa de registrar en intervalos regulares tanto la posición en coordenada “x” e “y”, como la dirección en grados sexagesimales. El uso del kit comercial se debió a que el USV se encontraba en diseño y construcción.

En la figura N°3 se aprecia la rutina asociada al uso del magnetómetro para la determinación de la orientación. En ambas, la posición en “x” e “y” se determina como el producto de una distancia (obtenida por los encoders) y el coseno del ángulo determinado por el magnetómetro.

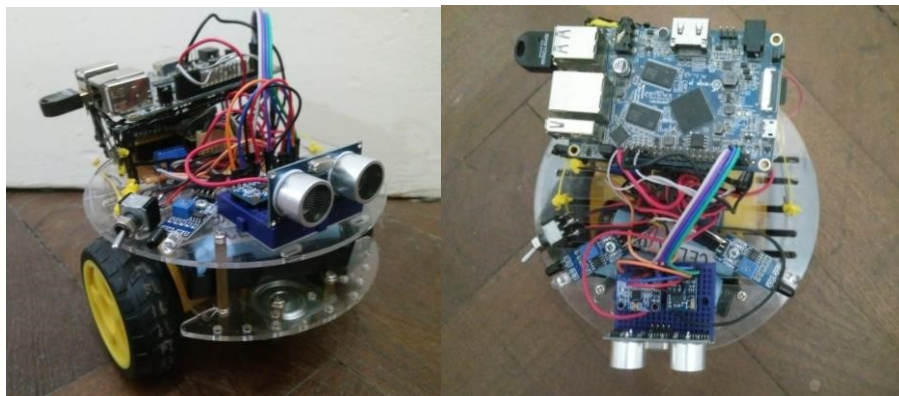


Fig. 2. Prototipo de vehículo terrestre no tripulado implementado para prueba de rutinas.

Aprovechando la libertad de movimiento del autómatas, se lo confinó a un cuadrilátero de aproximadamente 1 metro cuadrado para la realización de la prueba; el diámetro del robot que se ensambló para este fin es de 130mm con una distancia de pisada entre ruedas de 125mm. El procedimiento de ensayo fue el siguiente: tras encenderse el robot, comenzó a girar en su lugar durante 5 segundos para permitir que la rutina de calibración del magnetómetro ajuste el mismo. Transcurrido el tiempo, el robot se detuvo y rotó nuevamente hasta quedar en la dirección de 0 grados, con una tolerancia de  $\pm 7^\circ$ . Completado este proceso, se detuvo durante 3 segundos mientras las coordenadas eran transmitidas de forma inalámbrica para su comprobación.

Completada la transmisión, se avanzó en línea recta a unos 0,23 [m/s] hasta detectar una pared. Los sensores laterales corrigieron sólo lo necesario para avanzar paralelo a la pared, y el sensor frontal provocó un giro a la izquierda (si hay pared presente). De esta forma, recorrió toda la periferia del cuadrilátero y volvió a la posición original, transmitiendo nuevamente las coordenadas.

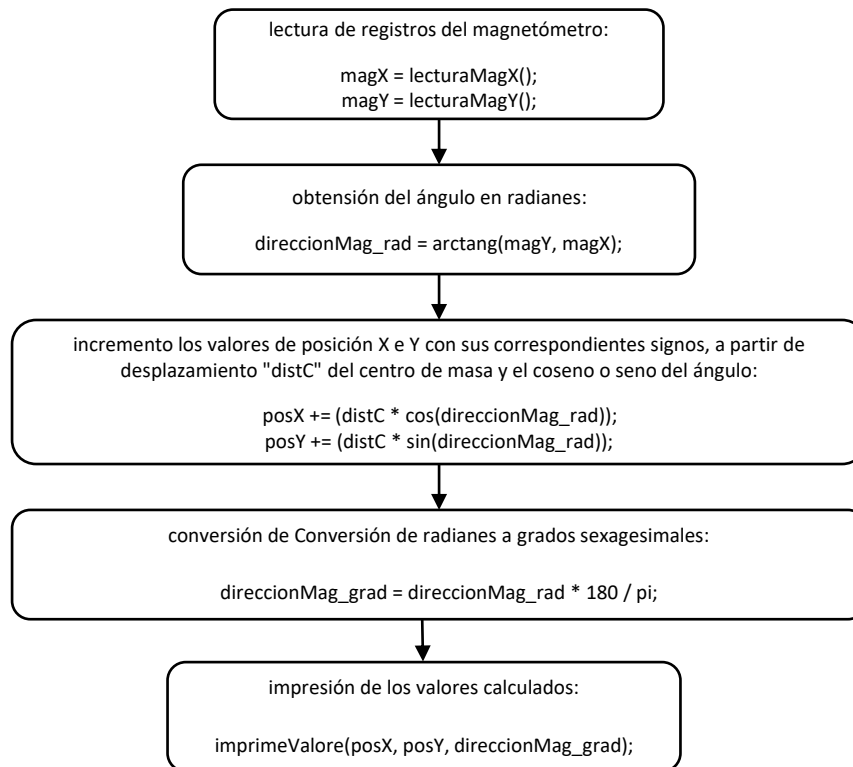


Fig. 3. Rutina del magnetómetro.

### 3. Resultados

El procedimiento se repitió varias veces. En cuanto a la estimación de coordenadas “x-y”, se pudo identificar que al colisionar con una pared (falta del sensor o respuesta lenta de los motores) se producía el efecto de resbalamiento sobre las ruedas, lo que desplazaba mucho la coordenada de su posición real. En las oportunidades donde el robot era capaz de dar una vuelta completa sin incurrir en una colisión o sucesivas correcciones de rumbo, el error obtenido en “x” era de  $\pm 1$  punto, y el de “y” de  $\pm 2$  puntos, independientemente del sensor que se utilizaba, teniéndose en cuenta que un punto equivale a 130 mm (diámetro del robot).

### 4. Conclusiones

Se logró la implementación de rutinas para determinar la posición y la orientación en base a sensores inerciales. Si bien las pruebas realizadas no fueron sobre el dispositivo final (porque el mismo se encuentra en construcción), las mismas aportaron una valiosa experiencia al grupo de trabajo. Entre ellas se pueden nombrar: la familiarización con Linux embebido, los aspectos matemáticos asociados a la determinación de la posición y la orientación y las consideraciones de calibración asociadas al magnetómetro.

Como parte de los futuros trabajos se pretende implementar rutinas de filtrado Kalman para mejorar el error estático del magnetómetro y de compensación por la diferencia entre el norte magnético y el norte terrestre. Así mismo se pretende implementar estas rutinas sobre la embarcación propuesta y en conjunto con un módulo GNSS con el fin de poder desarrollar el control de trayectoria del vehículo de superficie no tripulado.

### Referencias

1. Sergio Calvo Anglada.: Detección y Caracterización por Tamaños de Micro y Nanoplasticos en Muestras de Interés Ambiental. Universidad Zaragoza (2020)
2. M. C. Evans and C. S. Ruf.: Toward the Detection and Imaging of Ocean Microplastics With a Spaceborne Radar. En IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 60, pp. 1-9, (2022)
3. D. G. Kotsifaki, C. Ripken and S. N. Chormaic.: Detection and analysis of microplastics in the subtropical ocean of Okinawa using micro-Raman Optical Tweezers. En 2021 International Workshop on Metrology for the Sea; Learning to Measure Sea Health Parameters (MetroSea), Reggio Calabria, Italy, pp. 158-162, (2021)
4. O. Malyuskin.: Microplastic Detection in Soil and Water Using Resonance Microwave Spectroscopy: A Feasibility Study. En in IEEE Sensors Journal, vol. 20, no. 24, pp. 1481714826, (2020)
5. NauticExpo, <https://www.nauticexpo.es/fabricante-barco/vehiculo-no-tripulado-marino23029.html>
6. Alexander T. Demetillo, Evelyn B. Taboada.: Real-Time Water Quality Monitoring For Small Aquatic Area Using Unmanned Surface Vehicle. En Engineering, Technology & Applied Science Research Vol. 9, No. 2, pp. 3959-3964 (2019)
7. Wonse Jo, Yuta Hoashi, Lizbeth Leonor Paredes Aguilar, Mauricio Postigo-Malaga, José M. Garcia-Bravo, Byung-Cheol Min.: A low-cost and small USV platform for water quality monitoring. En HardwareX, Volume 6, (2019)
8. G. Ferri *et al.*: Design, fabrication and first sea trials of a small-sized autonomous catamaran for heavy metals monitoring in coastal waters: En 2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Shanghai, China, pp. 2406-2411, (2011)
9. G. Ferri, A. Manzi, F. Fornai, F. Ciuchi and C. Laschi.: The HydroNet ASV, a Small-Sized Autonomous Catamaran for Real-Time Monitoring of Water Quality: From Design to Missions at Sea. En IEEE Journal of Oceanic Engineering, vol. 40, no. 3, pp. 710-726, (2015)
10. Difference between Heading (HDG) and Course Over Ground (COG), <https://help.fleetmon.com/en/articles/6589334-difference-between-heading-hdg-and-courseover-ground-cog>

11. NMEA-0183 Sentences for GPS Receivers, <https://w3.cs.jmu.edu/bernstdh/web/common/help/nmea-sentences.php>
12. Honeywell – Compass Heading Using Magnetometers, [https://aerospace.honeywell.com/content/dam/aerobt/en/documents/learn/products/sensors/a pplication-notes/AN203\\_Compass\\_Heading\\_Using\\_Magnetometers.pdf](https://aerospace.honeywell.com/content/dam/aerobt/en/documents/learn/products/sensors/a pplication-notes/AN203_Compass_Heading_Using_Magnetometers.pdf)
13. Leonardo Garberoglio, et al.: Diseño de un autopiloto para pequeños vehículos no tripulados. En Revista elektron, Vol. 3, No. 1, pp. 29-38, (2019)
14. Orange\_Pi, <http://www.orange-pi.org/html/hardWare/computerAndMicrocontrollers/details/Orange-Pi-PC-2.html>
15. Invensense, <https://invensense.tdk.com/wp-content/uploads/2015/02/PS-MPU-9250A-01v1.1.pdf>
16. Arbian, <https://www.armbian.com/>
17. Linaro, <https://www.linaro.org/about/>