

Identificación y compensación del sesgo en sensores inerciales MEMS de muy bajo costo mediante el uso de algoritmos de aprendizaje automático

Rodrigo Gonzalez ^{1,2}, Carlos A. Catania ^{1,3}, Javier Rosenstein ¹ y
Fernando O. Pincioli ¹

¹ Universidad Champagnat, Facultad de Informática y Diseño,
Mendoza, Argentina.
{gonzalezrodrigo, rosensteinjavier, pincirolifernando}@uch.edu.ar

² Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Mendoza, GridTICs,
Mendoza, Argentina.

³ Universidad Nacional de Cuyo, Facultad de Ingeniería, LABSIN
Campus Universitario, Mendoza, Argentina.
harpo@ingenieria.uncuyo.edu.ar

RESUMEN

En los últimos años, el uso de sensores inerciales basados en tecnología MEMS (MicroElectroMechanical Systems) se ha consolidado en diferentes áreas que requieren sensores baratos, livianos y de bajo consumo de energía. Algunas de estas áreas son la robótica móvil aérea y la robótica móvil terrestre. Una desventaja que presentan este tipo de sensores es su bajo desempeño comparado con sensores fabricados con otras tecnologías. Los dos errores más gravitantes en el desempeño de un sensor inercial MEMS son el ruido blanco y el sesgo presentes en la señal de salida del sensor. En particular, el sesgo presenta una variación no lineal muy notoria respecto a la temperatura, debido a que los sensores MEMS están construidos mayoritariamente con silicio. En la literatura existente, si bien se encuentran varios trabajos que han tratado de corregir el sesgo en sensores inerciales MEMS utilizando técnicas basadas en aprendizaje automático (machine learning), debido a la naturaleza no lineal del fenómeno que se trata de predecir, todos estos trabajos han utilizado sensores MEMS cuyo costo varía entre los USD 300 y los USD 1.000. En los últimos años han surgido sensores inerciales MEMS de muy bajo costo, los cuales se encuentran en una cantidad importante de sistemas robóticos. El costo de

estos sensores ronda los USD 10. En este trabajo se propone analizar y compensar las variaciones del sesgo por temperatura en sensores inerciales MEMS de muy bajo costo, usando diferentes técnicas de aprendizaje automático. La hipótesis central de este proyecto se basa en mejorar el rendimiento de sensores inerciales de muy bajo costo aplicando técnicas de aprendizaje automático del estado del arte, las cuales permitirán identificar la relación no lineal que existe entre el sesgo y la temperatura.

Palabras Claves: Sensores inerciales, MEMS, Sesgo, Aprendizaje automático.

CONTEXTO

El presente proyecto se desarrolla en el marco de la Facultad de Informática y Diseño, junto con el grupo de investigación GridTICs de la Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Mendoza. Este trabajo es parte de las líneas de investigación llevadas adelante por el Dr. Rodrigo Gonzalez junto al Dr. Carlos A. Catania desde el año 2016.

1. INTRODUCCIÓN

El uso de sensores inerciales basados en tecnología MEMS (MicroElectroMechanical Systems) se ha consolidado últimamente en ciertas actividades, como por ejemplo en la

fabricación de sistemas de navegación integrados (INS/GNSS) de bajo costo tanto para el control de multicopteros, en la localización en tiempo real de diferentes agentes (bomberos, deportistas, etc.) o para la evaluación de su desempeño físico. Los sensores MEMS poseen tres características fundamentales para ser usados en las aplicaciones mencionadas: bajo peso, bajo consumo de potencia y relativo bajo costo. Como contrapartida, presentan mayores errores cuando se los compara con sensores fabricados con otras tecnologías, como los realizados con fibra óptica. Los errores que tienen mayor influencia en el desempeño de sensores inerciales MEMS son el ruido blanco y el sesgo (*bias*) (Groves, 2008, Sec. 4.4.5).

Debido a que los sensores MEMS están contruidos mayoritariamente con silicio, el sesgo presente en la salida es muy dependiente de la temperatura (Fontanella et al., 2018). Comúnmente las variaciones del sesgo con la temperatura se corrigen a través de tablas. Dichas tablas se generan en laboratorios para una unidad en particular. Se coloca el sensor MEMS dentro de una cámara térmica y se varía la temperatura. De esta forma se puede mapear la relación que existe entre temperatura y sesgo para un determinado sensor inercial. Posteriormente, se confecciona una tabla que podrá ser usada para compensar la variaciones del sesgo durante la operación del sensor. Debido a la fuerte relación no lineal que existe entre sesgo y temperatura en sensores inerciales MEMS, el uso de tablas es sub óptimo.

En la literatura existente se encuentran diversos trabajos que han propuesto diferentes técnicas para la compensación no lineal del sesgo en sensores inerciales MEMS. Un método conveniente se basa en ajustar mediante el uso de un polinomio (fitting) la relación temperatura/sesgo usando los datos obtenidos en laboratorio (Günhan and Ünsal, 2014). El problema que presenta esta técnica es que no puede mapear con precisión cambios abruptos en el sesgo.

En los últimos años se han propuesto métodos basados en aprendizaje automático (machine

learning) para abordar la compensación del sesgo en sensores inerciales MEMS (Xia et al., 2009) (Zhang et al., 2009) (Shiau, 2011) (Grigorie et al., 2012) (Musavi and Keighobadi, 2015) (Fontanella et al., 2018). Estos trabajos han demostrado ser una mejora respecto a los métodos basados en fitting. Una limitación que presentan estos trabajos es que solo se han centrado en utilizar sensores inerciales MEMS que pueden ser considerados de calidad media, cuyo costo varía entre USD 300 y USD 1.000.

Existen en el mercado sensores inercial MEMS de muy bajo costo, de alrededor de USD 10. Estos dispositivos tienen un tamaño de unos cuantos milímetros cuadrados y son muy livianos. Pesan alrededor de 1 gramo. Ejemplos de estos dispositivos son la unidad de medición inercial (IMU, por sus siglas en inglés) MPU-6000 de Invensense (Invensense, 2013) o la IMU BMI055 de Bosch (Bosh, 2014). No se han encontrado en la literatura existente trabajos que hagan un análisis profundo sobre el uso de diferentes técnicas para compensar los errores presentes en sensores inerciales MEMS de muy bajo costo.

Comúnmente este tipo de IMUs se encuentra en la gran mayoría de sistemas de navegación y orientación en el campo de la robótica, y en productos de electrónica de consumo, como celulares y tablets. Poder lograr una mejora sustancial en el desempeño de estos sensores inerciales puede tener un impacto muy grande en estas industrias. Además, se podría extender su uso a aplicaciones que requieren mayor precisión.

Un área donde los sensores inerciales MEMS de muy bajo costo tienen mucho potencial es en aplicaciones geológicas, por ejemplo en el monitoreo de sismos y la detección temprana de avalanchas. Es sabido que la región conocida como Gran Mendoza está asentada sobre una zona sísmica. Sería muy útil contar con una red de alerta sísmica distribuida por todo el Gran Mendoza usando los acelerómetros MEMS que ya vienen incorporados en teléfonos celulares. Se podría crear una aplicación que sería descargada por

usuarios voluntarios que deseen ser parte de la red de alerta sísmica. Para detectar sismos de baja intensidad, es necesario aumentar la sensibilidad de los acelerómetros. Esto se podría lograr al corregir el sesgo presente en estos sensores. Una vez detectado un sismo, cada celular enviaría un mensaje a través de Internet reportando la ubicación del celular y el nivel de vibración registrado.

Por otra parte, en los últimos años, se han producido en Mendoza varios aludes de barro sobre la ruta nacional 7 camino a Chile, debido a las intensas lluvias que se producen durante el verano (Diario Los Andes, 2016) (El Sol Online, 2018). Un detector de aludes o de avalanchas de nieve podría ser un dispositivo compuesto por una triada de acelerómetros, una radio, una batería y un pequeño panel solar. Este dispositivo estaría instalado en las laderas de las montañas contiguas a la ruta 7. Debido a que el equipo puede ser destruido o perdido ante un alud, es necesario contar con un sensor de muy bajo costo. Usar acelerómetros MEMS de muy bajo costo compensados en sesgo podría aumentar la sensibilidad de estos equipos y permitir emitir una alerta más rápida de avalanchas.

Por lo expuesto, este proyecto considera relevante compensar las variaciones del sesgo en sensores inerciales de muy bajo costo con técnicas del estado del arte en aprendizaje automático.

2. LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO

Para el desarrollo del presente proyecto pueden diferenciarse 4 etapas principales.

1. Generar datos estáticos que representen la relación que existe entre temperatura y sesgo para diferentes IMUs de muy bajo costo. Será central en el proyecto propuesto la generación de datos provenientes de sensores MEMS de muy bajo costo. Se colocarán diferentes sensores en una cámara térmica nivelados y en estado estático, se variará la temperatura ambiente y se registrarán las señales de salida. Con estos datos se podrá analizar en una etapa posterior qué tipo de relación existe entre el

sesgo y la temperatura en estos dispositivos. Se presupone que la relación entre ambas variables será no lineal. Adicionalmente, se desarrollará un datalogger ad-hoc para esta tarea usando una computadora Arduino Blue Pill. De esta forma, se podrán leer diferentes tipos de IMUs, las cuales generalmente vienen provistas de un puerto de comunicación I2C o SPI.

2. Evaluar los métodos propuestos en la literatura previa para la compensación del sesgo en IMUs MEMS. Se realizará un estudio del estado del arte sobre compensación del sesgo en IMUs MEMS de diferentes costos. Se analizará si los métodos ya propuestos en la literatura, como confección de tablas, redes neuronales o fitting, pueden efectivamente lidiar con las variaciones del sesgo en sensores inerciales de muy bajo costo.

3. Proponer nuevos modelos para la compensación del sesgo basados en técnicas de aprendizaje automático del estado del arte. En una tercera etapa se propondrán nuevas técnicas basadas en aprendizaje automático del estado del arte para la corrección de la variación del sesgo en sensores inerciales MEMS de muy bajo costo. Algunos de los métodos que se analizarán es el Long-Short Term Memory Recurrent Neural Network, la cual es un tipo de red neuronal que ha sido utilizada con buenos resultados en el modelado de series de tiempo en áreas como el reconocimiento del habla y la detección de anomalías. También se analizarán técnicas de aprendizaje automático utilizada en otras áreas del conocimiento que también se basen en la identificación de señales en el dominio del tiempo, como puede ser estudios sobre el estado del arte sobre reconocimiento del habla (speech recognition) o procesamiento de señales médicas.

4. Generar datos dinámicos para evaluar y comparar las técnicas propuestas en el contexto de un sistema de navegación integrado. En una cuarta etapa de cuantificará el impacto que tendrá el uso de las nuevas técnicas propuestas para mejorar el rendimiento de los sensores inerciales bajo

estudio, en el contexto de un sistema de navegación integrado. En otras palabras, se medirá si efectivamente se produce una mejora en la estimación de posición, velocidad y orientación de un vehículo al aplicar una compensación al sesgo de los sensores inerciales de muy bajo costo que componen el sistema de navegación. Para este propósito, se deberán generar datos montando los sensores en un vehículo junto a un receptor GNSS y registrando las mediciones de estos sensores al trazar una trayectoria predeterminada. Se utilizará el datalogger desarrollado con Arduino Blue Pill. Luego, estos datos se integrarán bajo el entorno MATLAB usando una biblioteca o toolbox para simular sistemas de navegación integrado llamado NaveGo (NaveGo, 2019), el cual fue desarrollado y es mantenido por el Dr. Gonzalez.

3. RESULTADOS ESPERADOS

Al término del tiempo de duración del plan de trabajo, se espera obtener los siguientes resultados:

1. Conocimiento de los modelos matemáticos que relacionan temperatura y sesgo en diferentes sensores inerciales MEMS de muy bajo costo.
2. Creación de conjuntos de datos dinámicos compuestos por sensores inerciales MEMS de muy bajo costo y receptores GNSS. Estos podrán ser usados tanto en el marco de este proyecto como en futuras líneas de investigación en el área de sistemas de navegación.
3. Sólida comprensión de los beneficios y limitaciones de las técnicas basadas en aprendizaje automático orientadas a la identificación de series de tiempo en general, y a la corrección del sesgo en sensores MEMS de muy bajo costo en el contexto de un sistema de navegación, en particular.
4. Un mejor entendimiento sobre los alcances y limitaciones del uso de sensores inerciales MEMS de muy bajo costo en sistemas de navegación integrada.

4. FORMACIÓN DE RECURSOS HUMANOS

El equipo de trabajo de este proyecto está integrado por:

1. Dr. Rodrigo Gonzalez, propuesto como Investigador Responsable de este proyecto. Tiene basta experiencia en el tratamiento de señales provenientes de sensores inerciales en el contexto de un sistema de navegación integrado (Gonzalez et al., 2014), (Gonzalez et al., 2015), (Gonzalez and Catania, 2016), (Gonzalez et al., 2017), (Gonzalez and Catania, 2019), (Dabove and Gonzalez, 2019).
 2. Dr. Carlos Catania, especialista en el área de Ciencia de los Datos (Data Science). Cuenta con experiencia en la resolución de diferentes problemas aplicando algoritmos específicos del área de aprendizaje automático (Gonzalez and Catania, 2016), (Gonzalez et al., 2017), (Catania et al., 2018), (Gonzalez and Catania, 2019).
 3. Lic. Fernando Pincirolí, docente, investigador y decano de la Universidad Champagnat. Tiene basta experiencia en programación y en ingeniería de software, como así también en gestión de proyectos de desarrollo de software.
 4. Mg. Javier Rosenstein, quien tiene profundos conocimientos en programación usando diferentes lenguajes y experiencia en el desarrollo de firmware para sistemas embebidos. Adicionalmente, cuenta con conocimientos en el procesamiento digital de señales (Rosenstein, 2019).
- En el campo de la formación de recursos humanos, se espera:
1. Iniciar en investigación a profesionales que estén interesados en postularse a diferentes becas doctorales, en el marco del proyecto en referencia.
 2. Iniciar en investigación a alumnos, tanto de la UCH, UTN o UNCuyo, que deseen sumarse al proyecto como becarios.
 3. Iniciar en investigación a alumnos de los últimos años de carrera que deseen desarrollar su proyecto final de carrera en el marco de este proyecto.

5. BIBLIOGRAFÍA

- (Bosh, 2014) Bosh. BMI055. Small, versatile 6DoF sensor module. Rev. 1,2, July 2014.
- (Catania et al., 2018) Carlos A. Catania; Sebastian Garcia; Pablo Torres. An Analysis of Convolutional Neural Networks for detecting DGA. Argentina. La plata. 2018. Libro. Artículo Completo. Congreso. XXIV Congreso Argentino de Ciencias de la Computación 2018. Red de Universidades con Carreras en Informática.
- (Dabove and Gonzalez, 2019) Dabove, P. and Gonzalez, R. Inertial Measurement Units inside Smartphones: Performances and Future Steps, book chapter in Smartphones: Recent Innovations and Applications, Nova Publisher, 2019. ISBN: 978-1-53615-830-4. URL: <https://novapublishers.com/shop/smartphones-recent-innovations-and-applications/>
- (Diario Los Andes, 2016) Diario Los Andes. Un alud tiró un puente de la ruta 7 en Alta Montaña y en Uspallata quedaron 200 vehículos varados. URL: <https://www.losandes.com.ar/article/se-cayo-un-puente-de-la-ruta-7-en-alta-montana>. Febrero de 2016.
- (El Sol Online, 2018) El Sol Online. Un alud en alta montaña obligó a suspender el tránsito en la ruta 7. URL: <https://www.elsol.com.ar/un-alud-en-alta-montana-obligo-a-suspender-el-transito-en-la-ruta-7>. Diciembre de 2018.
- (Fontanella et al., 2018) Rita Fontanella, Domenico Accardo, Rosario Schiano Lo Moriello, Leopoldo Angrisani, Domenico De Simone, MEMS gyros temperature calibration through artificial neural networks, Sensors and Actuators A: Physical, Volume 279, 2018, Pages 553-565, ISSN 0924-4247.
- (Gonzalez et al., 2014) Gonzalez, R., Giribet, J.I., and Patiño, H.D. An approach to benchmarking of loosely-coupled low-cost navigation systems. Journal of Mathematical and Computer Modelling of Dynamical Systems. ISSN 13873954.
- (Gonzalez et al., 2015) Gonzalez, R., Giribet, J.I., and Patiño, H.D. NaveGo: a simulation framework for low-cost integrated navigation systems. Journal of Control Engineering and Applied Informatics. ISSN 14548658.
- (Gonzalez and Catania, 2016). Rodrigo Gonzalez and Carlos A. Catania. Time-delayed Multiple Linear Regression for Increasing MEMS Inertial Sensor Performance by Using Observations From a Navigation-grade IMU. VI IEEE/ION Position Location and Navigation Symposium (PLANS 2016). ISSN 2153-3598. DOI:10.1109/PLANS.2016.7479677. Savannah, Georgia, USA. April 2016.
- (Gonzalez et al., 2017). Gonzalez, R., Catania, C., Dabove, P., Taffernaberry, J.C. and Piras, M. Model validation of an open-source framework for post-processing INS/GNSS systems. In III International Conference on Geographical Information Systems Theory, Applications and Management (GISTAM 2017). Porto, Portugal. April 2017.
- (Gonzalez and Catania, 2019). Rodrigo Gonzalez and Carlos A. Catania. Time-delayed multiple linear regression for de-noising MEMS inertial sensors. Computers & Electrical Engineering, Volume 76, 2019, Pages 1-12, ISSN 0045-7906, <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2019.02.023>.
- (Grigorie et al., 2012) Grigorie, T. L., Botez, R. M., Lungu, M., Edu, R. I., & Obreja, R. Microelectromechanical systems gyro performance improvement through bias correction over temperature using an adaptive neural network-trained fuzzy inference system. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering, 226(9), 1121–1138, 2012.
- (Groves, 2008) Paul D. Groves. Principles of GNSS, inertial, and multisensor integrated navigation systems, first edition. Artech House, 2008.
- (Günhan and Ünsal, 2014) Günhan, Y., and Ünsal, D., “Polynomial Degree Determination for Temperature Dependent Error Compensation of Inertial Sensors”, IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium (PLANS), May 2014,

pp.1209-1212, doi:
10.1109/PLANS.2014.6851494.

(Invensense, 2013) Invensense. MPU-6000 and MPU-6050 Product Specification, Revision 3.4, 2013.

(Musavi and Keighobadi, 2015) Musavi, N., and Keighobadi, J., "Adaptive fuzzy neuro-observer applied S to low cost INS/GPS," *Applied Soft Computing*, Vol. 29, 2015.

(NaveGo, 2019) R. Gonzalez, C. Catania, and P. Dabove. NaveGo: An Open-Source MATLAB/GNU-Octave Toolbox for Processing Integrated Navigation Systems and Performing Inertial Sensors Profiling Analysis. Version 1.2.

URL: <https://github.com/rodrazlez/NaveGo>. DOI: 10.5281/zenodo.2536950. June 2019.

(Rosenstein, 2019) Javier Rosenstein. Uso de VRPN para la implementación de BCI partiendo de señales EEG/EOG. Tesis de Maestría. Maestría en Teleinformática, Universidad de Mendoza. Ciudad de Mendoza, Argentina. 2019.

(Shiau, 2011) Shiau, J. K., "MEMS Gyroscope Null Drift and Compensation Based on Neural Network", *Advanced Materials Research*, Vols. 255-260, 2011, pp. 2077-2081, 2011.

(Xia et al., 2009) Xia, D., Chen, S., Wang, S., and Li, H., "Microgyroscope Temperature Effects and Compensation-Control Methods", *Sensors*, Vol. 9, No. 10, October 2009, pp. 8349-8376, doi: 10.3390/s91008349.

(Zhang et al., 2009) Zhang, Q., Tan, Z., and Guo, L., "Compensation of Temperature Drift of MEMS Gyroscope Using BP Neural Network," 2009 International Conference on Information Engineering and Computer Science, Wuhan, 2009.