

Jornadas de Automática

Sobre el uso de sensores barométricos comerciales para localización de contactos en pieles blandas

de la Morena, Jesús^a, Kashef Tabrizian, Seyedreza^{b,c}, Terryn, Seppe^b, Ramos, Francisco^a, Vázquez, Andrés S.^{a,*}

^aEscuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial, Av/ Camilo José Cela SN, 13071, Ciudad Real, España.

^bBrubotics, Vrije Universiteit Brussel and Imec, pleinlaan 2, 1050 Elsene, Brussels, Belgium.

^cCentre of Excellence for Advanced Robotics, School of Engineering and Materials Science, Queen Mary University of London, United Kingdom.

To cite this article: de la Morena, Jesús, Kashef Tabrizian, Seyedreza, Ramos, Francisco, Terryn, Seppe, Vázquez, Andrés S. 2026. On the Use of Commercial Barometric Sensors for Contact Localization in Soft Skins. Jornadas de Automática, 47. <https://doi.org/10.17979/ja-cea.2026.47.13852>

Resumen

Las pieles blandas han emergido como una tecnología clave dentro de la robótica blanda, ya que permiten dotar a los sistemas de capacidades avanzadas de percepción manteniendo, simultáneamente, una interacción segura con el entorno. Entre las diferentes estrategias de sensorizado, el uso de sensores barométricos integrados en cámaras neumáticas deformables destaca por su bajo coste, elevada sensibilidad y facilidad de integración. En este trabajo se estudia la viabilidad del uso de sensores comerciales de presión barométrica para la localización espacial de contactos en pieles blandas. Para ello, se ha planteado una estrategia de reconstrucción espacial basada en el análisis de las diferencias temporales entre las señales registradas por los sensores durante los contactos. Esta estrategia ha sido evaluada tanto en señales sintéticas, con distintas condiciones de ruido, como en señales experimentales obtenidas en una piel blanda de hidrogel con cámara de aire interna y múltiples sensores distribuidos radialmente.

Palabras clave: Percepción y sensado, Fusión de información y sensores, Estimación y filtrado, Filtrado y suavizado, Validación de modelos.

On the Use of Commercial Barometric Sensors for Contact Localization in Soft Skins

Abstract

Soft skins have emerged as a key technology within soft robotics, as they enable systems to be equipped with advanced perception capabilities while simultaneously maintaining safe interaction with the environment. Among the different sensing strategies, the use of barometric sensors integrated into deformable pneumatic chambers stands out due to its low cost, high sensitivity, and ease of integration. This work studies the feasibility of using commercial barometric pressure sensors for the spatial localization of contacts on soft skins. To this end, a spatial reconstruction strategy has been proposed based on the analysis of time differences between the signals recorded by the sensors during contacts. This strategy has been evaluated both on synthetic signals, under different noise conditions, and on experimental signals obtained from a soft hydrogel skin with an internal air chamber and multiple radially distributed sensors.

Keywords:

Perception and sensing, Information and sensor fusion, Estimation and filtering, Filtering and smoothing, Model Validation.

1. Introducción

La robótica blanda se ha consolidado como un paradigma innovador en la automática. Se basa en el uso de materiales al-

tamente deformables y estructuras flexibles que permiten desarrollar sistemas, usualmente bioinspirados, capaces de interactuar de manera segura y adaptable con entornos complejos y con los seres humanos. Entre sus principales aplicaciones des-

*Autor para correspondencia: AndresS.Vazquez@uclm.es
Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International (CC BY-NC-SA 4.0)

tacan la manipulación delicada de objetos (por ejemplo en alimentación y en agricultura (Wang and Hirai, 2025)), la rehabilitación (Pan et al., 2021), (Sanguino Nieto-Márquez et al., 2025), la asistencia quirúrgica (Runciman et al., 2019) y la colaboración humano-robot (Jørgensen et al., 2021), así como en dispositivos *wearables* orientados a la biomonitorización (Zhu et al., 2022).

Una de las tecnologías más relevantes dentro de la robótica blanda son las pieles blandas (*soft skins*), que aportan seguridad en la interacción gracias a su conformabilidad, al mismo tiempo que permiten incorporar funcionalidades avanzadas relacionadas con la sensorización del contacto. Por ejemplo, existen trabajos centrados en el desarrollo de pieles blandas que mejoran la seguridad de robots colaborativos (Pang et al., 2021), o que proporcionan capacidades sensoriales en *wearables* (Ling et al., 2019).

Entre los materiales más utilizados para la fabricación de pieles blandas destacan los elastómeros, debido a su elasticidad, biocompatibilidad y facilidad de fabricación (Gariya and Kumar, 2021). Los hidrogeles también han despertado un gran interés gracias a sus propiedades similares a las de los tejidos biológicos (López-Díaz et al., 2024b). Tanto con elastómeros como con hidrogeles, se buscan materiales que puedan incorporar funcionalidades inteligentes como el autocurado (*self-healing*). Esta es una propiedad fundamental frente a las roturas habituales en sistemas blandos, contribuyendo al desarrollo de sistemas robustos y sostenibles (Kashef Tabrizian et al., 2025).

La capacidad de detectar con precisión dónde y cuándo ocurre un contacto en la piel blanda constituye otra funcionalidad esencial, especialmente en sistemas robóticos, ya que permite mejorar la percepción del entorno y la interacción física con humanos y objetos. Para abordar este problema, se han propuesto diferentes estrategias de detección basadas en visión artificial, sensores capacitivos, piezorresistivos, piezoeléctricos, magnéticos y barométricos (Roberts et al., 2021).

En el caso particular de los sensores barométricos, la interacción mecánica genera variaciones de presión en un sistema neumático deformable, comúnmente una cámara sellada fabricada con algún elastómero, que son medidas mediante sensores comerciales o diseñados *ad hoc* (Tenzer et al., 2014). Una de las principales ventajas de esta estrategia es su elevada sensibilidad y rápida respuesta dinámica. Además, estos sensores pueden combinarse fácilmente con otros tipos de sensores para desarrollar pieles táctiles multimodales, como es el caso de la piel sensora del Robotnaut de la NASA (Markvicka et al., 2020).

En su configuración más sencilla, una piel con un único sensor barométrico proporciona una medida global o puntual de la presión presente en la cámara. Sin embargo, mediante el uso distribuido de múltiples sensores, es posible analizar las diferencias espaciales de presión producidas por la deformación del medio blando y estimar la localización del contacto sobre la superficie. Esta estrategia permite obtener información táctil continua sin necesidad de emplear matrices densas de sensores discretos, reduciendo la complejidad electrónica y manteniendo la conformabilidad mecánica del sistema, lo que además representa una gran ventaja sobre otras técnicas sensoriales en pieles blandas. Un ejemplo relevante de esta estrategia se puede encontrar en (George Thuruthel et al., 2021).

En este trabajo se estudia el uso de sensores barométricos comerciales para la detección y localización de contactos. En particular, se evalúa la viabilidad de emplear técnicas basadas en diferencias de tiempo de vuelo de ondas de presión medidas con sensores comerciales en cámaras neumáticas deformables. La estrategia propuesta se ha evaluado tanto mediante señales sintéticas, generadas bajo diferentes condiciones de ruido, como mediante señales experimentales obtenidas con una plataforma robótica capaz de realizar contactos controlados sobre la superficie deformable.

La Sección 2 presenta los fundamentos matemáticos de la estrategia de reconstrucción y de los algoritmos de estimación utilizados. La Sección 3 describe la plataforma experimental desarrollada. La Sección 4 describe el procedimiento empleado para la generación de señales sintéticas y la Sección 5 analiza el comportamiento de los algoritmos bajo distintas condiciones de ruido. La Sección 6 analiza los resultados experimentales obtenidos y, finalmente, la Sección 7 resume las principales conclusiones del trabajo.

2. Fundamentos matemáticos

2.1. Reconstrucción del punto de contacto

Considérese un conjunto de n sensores barométricos distribuidos alrededor de una cámara neumática deformable. Cuando se produce un contacto localizado sobre su superficie, la perturbación mecánica genera una onda de presión que se propaga a través del medio y es registrada por cada sensor en instantes distintos. Siendo t_i el instante de llegada de la perturbación causada por el contacto al sensor i -ésimo y tomando el primer sensor como referencia temporal, la diferencia de tiempo de vuelo viene dada por $\Delta t_i = t_i - t_1$.

Bajo la hipótesis de velocidad de propagación constante v , las diferencias temporales observadas pueden relacionarse con diferencias espaciales mediante $\Delta d_i = (\Delta t_i + \varepsilon_i) \cdot v$, donde ε_i representa los errores asociados al ruido de medida y a la estimación temporal.

Sea $\mathbf{S}_i = [x_i, y_i, z_i]^T$ la posición conocida del sensor i -ésimo y $\hat{\mathbf{P}}$ una estimación del punto de contacto, la diferencia espacial predicha respecto al sensor de referencia viene dada por:

$$\Delta \hat{d}_i = \|\hat{\mathbf{P}} - \mathbf{S}_i\| - \|\hat{\mathbf{P}} - \mathbf{S}_1\| \quad (1)$$

Por tanto, la reconstrucción espacial del punto de contacto puede formularse como el problema de optimización:

$$\min_{\hat{\mathbf{P}}} \sum_{i=2}^n (\Delta \hat{d}_i - \Delta d_i)^2 \quad (2)$$

sujeto a $\hat{\mathbf{P}} \in \mathcal{S}$, donde $\mathcal{S}$ representa la superficie de contacto.

2.2. Estimación de la diferencia de tiempo de vuelo

Se ha utilizado un algoritmo para la estimación de la diferencia de tiempo de llegada (TDOA, del inglés *Time Difference of Arrival*) basado en la diferencia entre las integrales acumuladas normalizadas de las señales, similar al de (Laguna et al., 1990).

Sea $s(t)$ una señal adquirida por un sensor de referencia, con un régimen transitorio completamente definido en el intervalo $[-a, a]$, y $v(t) = s(t + \Delta t)$ una versión temporalmente

desplazada de la misma señal. Las integrales normalizadas de ambas señales vienen dadas por:

$$S(t) = \frac{\int_{-a}^t s(\tau) d\tau}{A_s} \quad V(t) = \frac{\int_{-a}^t v(\tau) d\tau}{A_v} \quad (3)$$

donde:

$$A_s = \int_{-a}^a s(t) dt \neq 0 \quad A_v = \int_{-a}^a v(t) dt \neq 0 \quad (4)$$

El desplazamiento temporal entre ambas señales se puede estimar a partir del área entre sus integrales normalizadas:

$$\Delta t = \int_{-a}^a (S(t) - V(t)) dt \quad (5)$$

Este procedimiento proporciona una medida del desplazamiento temporal entre señales transitorias similares, reduciendo la influencia de fluctuaciones locales y el ruido de alta frecuencia.

Con el fin de evaluar el rendimiento y la robustez de este método integral, su comportamiento se ha comparado con otros tres algoritmos de TDOA ampliamente utilizados en la literatura: la correlación cruzada estándar (CC, del inglés *Cross-Correlation*) (Knapp and Carter, 1976), la CC con filtrado previo (George Thuruthel et al., 2021) y el algoritmo GCC-PHAT (*Generalized Cross-Correlation* con transformación PHAT) (Zhang et al., 2008).

3. Plataforma experimental

La plataforma experimental desarrollada consiste en una piel blanda con cámara neumática interna equipada con sensores de presión barométricos. Se han integrado tres sensores de presión absoluta MPXH6115AC6U equiespaciados radialmente en una estructura con geometría de casquete esférico (Figura 1). La cámara neumática interna convierte los contactos realizados sobre la superficie deformable en ondas de presión que se propagan a través del medio y son registradas por los sensores barométricos. La piel blanda ha sido fabricada con el hidrogel CN (López-Díaz et al., 2024a), un material blando con varias propiedades inteligentes, como la capacidad de autocurado y la conductividad eléctrica.

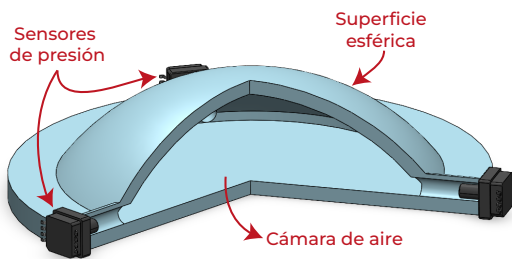


Figura 1: Piel blanda de hidrogel CN con los sensores de presión equiespaciados radialmente.

Las señales de los sensores son adquiridas mediante una placa NUCLEO STM32H753ZI de bajo coste, programada para muestrear hasta 5 canales simultáneamente a una frecuencia de muestreo de 400 kHz, proporcionando una resolución temporal de 2.5 μ s. Los datos adquiridos se transmiten

a un ordenador, encargado de guardarlos para su posterior procesamiento.

Por último, la generación de contactos controlados se realiza mediante un robot industrial ABB IRB 120, que aplica contactos perpendiculares sobre posiciones aleatorias de la superficie blanda. La posición de cada contacto se transmite a un ordenador para la posterior validación de los algoritmos de reconstrucción. La plataforma experimental completa se muestra en la Figura 2.

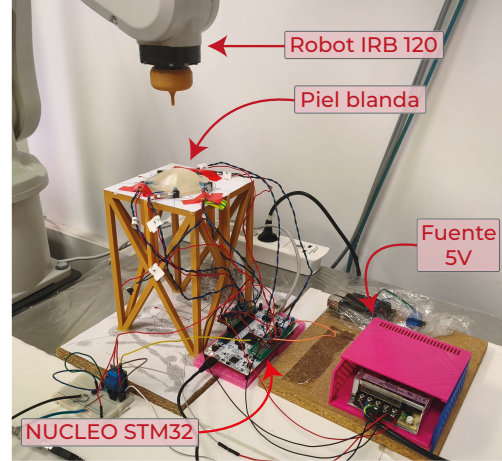


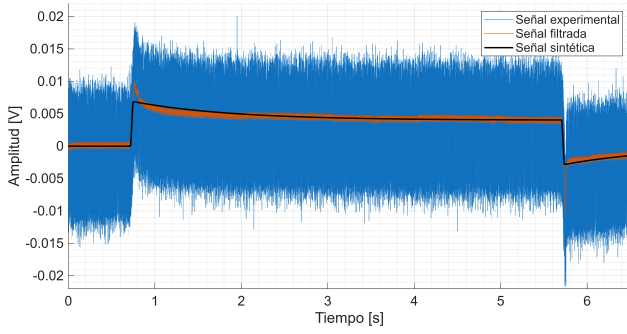
Figura 2: Plataforma experimental completa.

Esta plataforma experimental se ha utilizado para generar señales en dos escenarios distintos: en primer lugar, se ha realizado un contacto puntual sobre la superficie de hidrogel con el objetivo de caracterizar la dinámica temporal del aumento de presión registrado por un sensor barométrico cualquiera dentro de la cámara neumática. A partir de esta señal experimental se han generado señales sintéticas con las que evaluar los distintos algoritmos de estimación de TDOA bajo diferentes condiciones de ruido.

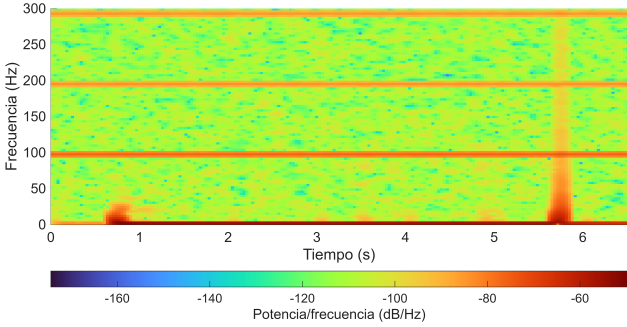
En segundo lugar, se ha realizado una serie de contactos sobre posiciones aleatorias distribuidas a lo largo de la superficie del hidrogel con el objetivo de validar experimentalmente los algoritmos anteriores y analizar el rendimiento real de la reconstrucción espacial.

4. Generación de señales sintéticas

En la Figura 3(a) se muestra el aumento de presión registrado por un sensor durante un contacto sobre la superficie de hidrogel. Como la señal adquirida presenta una cantidad significativa de ruido, se ha realizado un análisis espectral para identificar las componentes frecuenciales asociadas al contacto. Como resultado, se ha obtenido el espectrograma mostrado en la Figura 3(b), donde únicamente se representan las componentes de baja frecuencia. A partir de este análisis se ha determinado que la mayor parte de la información útil se concentra por debajo de los 250 Hz. Por ello, se ha aplicado un filtro paso bajo con dicha frecuencia de corte para obtener una versión filtrada de la señal. Posteriormente, esta señal filtrada se ha ajustado a un modelo de segundo orden con el objetivo de representar principalmente el tiempo de subida y la relajación de la presión tras el contacto (asociada al comportamiento viscoelástico de la cámara neumática).



(a) Señal registrada por un sensor barométrico durante un contacto con la piel blanda (en azul), señal filtrada (en naranja) y modelo de segundo orden utilizado para generar las señales sintéticas (en negro).



(b) Espectrograma de las frecuencias bajas de la señal registrada.

Figura 3: Aumento de presión registrado durante un contacto.

Este modelo de segundo orden se ha utilizado para generar señales sintéticas (Figura 3(a), en negro), introduciendo desplazamientos temporales artificiales asociados al TDOA de puntos aleatorios del casquete esférico, haciendo que contengan información espacial. Por último, a estas señales sintéticas se les añade tanto ruido blanco gaussiano como ruido tonal:

$$s'(t) = s(t + \Delta t) + n_w(t) + n_t(t) \quad (6)$$

donde $s(t)$ es la señal sintética sin ruido, Δt es el desplazamiento, $n_w(t)$ el ruido blanco gaussiano y $n_t(t)$ el ruido tonal.

El ruido blanco gaussiano se ha modelado mediante una distribución normal de media cero y varianza σ^2 . Por otro lado, el ruido tonal se ha modelado como la suma de múltiples componentes sinusoidales:

$$n_t(t) = \sum_{j=1}^{N_t} A_j \sin(2\pi f_j t + \phi_j) \quad (7)$$

donde N_t es el número de componentes tonales, A_j es la amplitud de la componente tonal j -ésima, f_j su frecuencia y ϕ_j su fase.

Las frecuencias f_j se han seleccionado aleatoriamente dentro de rangos estimados a partir de las componentes espectrales identificadas en la señal del sensor barométrico, reproduciendo así las bandas donde se observa una mayor presencia de ruido: entre 0,4 – 1,3 Hz, entre 85 – 100 Hz y entre 20 – 30 kHz (en la Figura 3(b) se muestran las dos primeras bandas).

Para generar distintas condiciones de ruido, tanto la varianza σ^2 del ruido blanco gaussiano como las amplitudes A_j de las componentes tonales se han escalado conjuntamente, manteniendo aproximadamente constante la relación entre

ambas junto con una pequeña aleatorización adicional de la amplitud del ruido tonal. Además, la fase de cada componente tonal se ha ajustado aleatoriamente (entre $\pm 5^\circ$) para cada señal sintética. Como consecuencia, la relación señal-ruido (SNR) no permanece exactamente constante entre simulaciones, sino que oscila ligeramente alrededor de los valores objetivo establecidos. Esta SNR se ha calculado utilizando la expresión:

$$SNR = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{\sum s_i^2}{\sum n_i^2} \right) \quad (8)$$

donde n_i representa la contribución total de ruido, obtenida como la suma del ruido blanco y el ruido tonal. Bajo esta definición se han considerado tres escenarios distintos, con valores de SNR aproximados de 40 dB, 20 dB y 0 dB.

5. Análisis de la robustez de los algoritmos de TDOA

La Figura 4 y la Tabla 1 muestran los resultados de reconstrucción de la posición del contacto a partir de las señales sintéticas para 100 puntos distintos, utilizando los cuatro algoritmos de TDOA expuestos en la Sección 2.2. Para el algoritmo de la correlación cruzada con filtro, se ha aplicado un filtro paso bajo con una frecuencia de corte de 250 Hz, siguiendo el mismo criterio que al filtrar la señal experimental.

Como se puede ver, para niveles bajos de ruido (SNR de 40 dB), tanto la CC con filtrado previo como el método integral proporcionan reconstrucciones muy precisas del punto de contacto, con errores medianos inferiores a 0.5 mm. Además, el filtrado de las componentes de alta frecuencia mejora significativamente el rendimiento de la correlación cruzada. De manera similar, GCC-PHAT supera a la CC simple, aunque sin alcanzar el rendimiento de los otros dos métodos.

A medida que disminuye la SNR, el rendimiento de todos los algoritmos se degrada. Para una SNR de 20 dB, la CC simple produce estimaciones sin sentido físico, con distancias superiores al tamaño de la piel blanda. En el resto de algoritmos también se aprecia un incremento tanto de la mediana como de la dispersión de los errores. No obstante, el método integral mantiene sistemáticamente los mejores resultados, presentando menores medianas de los errores y una menor dispersión, especialmente en condiciones de ruido elevado.

Al analizar la influencia del número de sensores en la reconstrucción, se observa que al aumentar el número de sensores de tres a cinco se mejora la robustez frente al ruido, reduciendo la dispersión de los errores obtenidos.

6. Resultados experimentales

Tras el estudio de los algoritmos con las señales sintéticas, se procedió a realizar 100 contactos en puntos aleatorios de la piel blanda. Se comprobó que las señales experimentales tenían una SNR de alrededor de 9 dB en todos los casos.

Los resultados obtenidos para los cuatro algoritmos anteriores pueden verse en la Figura 5 y en la Tabla 2. A diferencia de lo observado con las señales sintéticas, los resultados experimentales muestran una degradación muy significativa del rendimiento de todos los métodos de reconstrucción. Independientemente del algoritmo empleado, la mediana de los errores se sitúa en torno a 21 mm, con dispersiones muy similares.

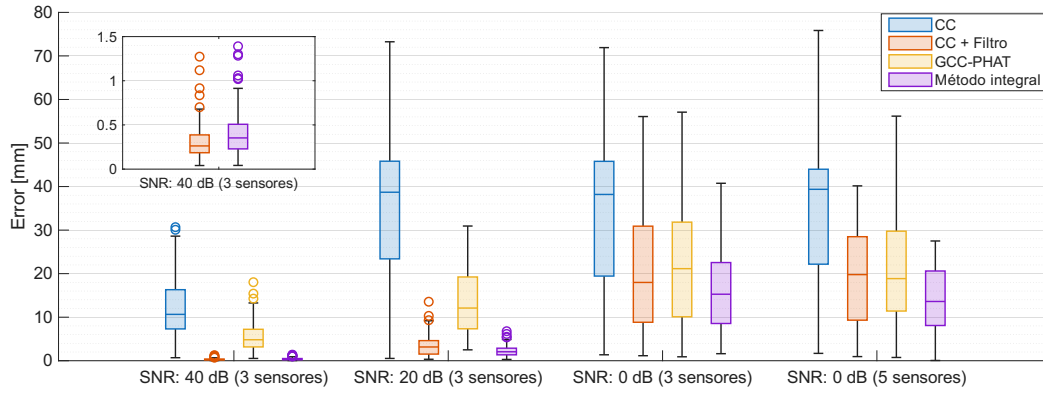


Figura 4: Diagramas de caja con los resultados obtenidos para cada algoritmo en distintas condiciones de ruido con las señales sintéticas. El rango de los bigotes llega hasta el último valor dentro del rango $[Q_1 - 1,5 \cdot IQR, Q_3 + 1,5 \cdot IQR]$. Los valores atípicos se representan con un círculo en el diagrama.

Tabla 1: Resultados obtenidos para cada algoritmo en distintas condiciones de ruido con las señales sintéticas. IQR representa el rango intercuartílico y P95 representa el percentil 95 de los errores.

SNR	Algoritmo	Mediana [mm]	IQR [mm]	P95 [mm]
40 dB (3 sensores)	CC	10.65	9.01	26.57
	CC + filtro	0.26	0.2	0.69
	GCC-PHAT	4.82	4.05	12.12
	Método integral	0.35	0.28	1.03
20 dB (3 sensores)	CC	38.7	22.42	65.64
	CC + filtro	3.16	3.1	8.53
	GCC-PHAT	12.1	11.9	27.82
	Método integral	2.06	1.52	4.86
0 dB (3 sensores)	CC	38.19	26.35	64.24
	CC + filtro	17.98	22.07	42.11
	GCC-PHAT	21.15	21.74	41.66
	Método integral	15.28	14	31.57
0 dB (5 sensores)	CC	39.37	21.81	61.99
	CC + filtro	19.78	19.17	38.27
	GCC-PHAT	18.86	18.34	39.53
	Método integral	13.61	12.52	25.39

Este fenómeno se debe a que los desfases temporales estimados, con independencia del algoritmo utilizado, son muy cercanos a cero para todos los contactos realizados. Como consecuencia, el algoritmo de optimización (Ecuación 2) interpreta que la perturbación alcanza simultáneamente todos los sensores. Dado que los sensores se encuentran distribuidos de forma equiespaciada, el único punto que se encuentra a la misma distancia de todos ellos corresponde al centro geométrico de la piel blanda, produciendo un sesgo en la reconstrucción, como se muestra en la Figura 6.

7. Conclusiones

En este trabajo se ha estudiado la viabilidad del uso de sensores barométricos comerciales para la localización espacial de contactos en pieles blandas de hidrogel. Para ello, se ha desarrollado una piel blanda con geometría de casquete esférico, dotada de una cámara neumática interna y varios sensores distribuidos radialmente. Además, se ha implementado una plataforma experimental capaz de generar contactos controlados sobre la superficie deformable.

Por último, se ha planteado una estrategia de reconstrucción espacial basada en TDOA entre las señales registradas por los sensores. Los resultados obtenidos con señales sintéti-

cas muestran que es posible estimar la localización del contacto incluso en presencia de ruido significativo. Sin embargo, los resultados experimentales evidencian importantes limitaciones físicas del procedimiento. En particular, se observa que las diferencias temporales estimadas entre los sensores son extremadamente pequeñas.

Tabla 2: Resultados obtenidos con los datos experimentales.

Algoritmo	Mediana [mm]	IQR [mm]	P95 [mm]
CC	21.25	13.18	31.24
CC + filtro	20.95	12.56	30.85
GCC-PHAT	19.87	13.94	31.32
Método integral	21.08	13.33	29.80

La hipótesis actual es que este comportamiento responde a limitaciones físicas del sistema experimental. Por un lado, la cámara de aire y el hidrogel actúan como un filtro paso bajo mecánico que amortigua severamente los frentes de onda de alta frecuencia. Por otro lado, dadas las dimensiones reducidas del prototipo, las diferencias de tiempo de vuelo reales de la onda neumática son del orden de microsegundos. Al emplear sensores cuya dinámica interna de respuesta es significativamente más lenta que el tiempo de tránsito de la onda, la información transitoria del desplazamiento temporal se pierde

antes de ser registrada. Como consecuencia, se interpreta una llegada simultánea de la onda de presión en todos los sensores.

Estos resultados indican que, aunque las pieles blandas neumáticas constituyen una plataforma prometedora para la localización de contacto, la reconstrucción basada en TDOA requiere sensores con una respuesta significativamente más rápida o bien estrategias de sensorización y reconstrucción que no dependan de la medida directa de TDOA. En este sentido, el trabajo proporciona una evaluación experimental de las limitaciones prácticas asociadas al empleo de sensores barométricos comerciales en este tipo de aplicaciones.

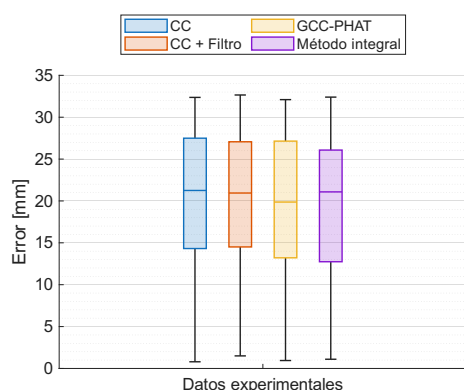


Figura 5: Diagramas de caja con los resultados obtenidos para cada algoritmo con las señales experimentales. El rango de los bigotes llega hasta el último valor dentro del rango $[Q_1 - 1,5 \cdot IQR, Q_3 + 1,5 \cdot IQR]$.

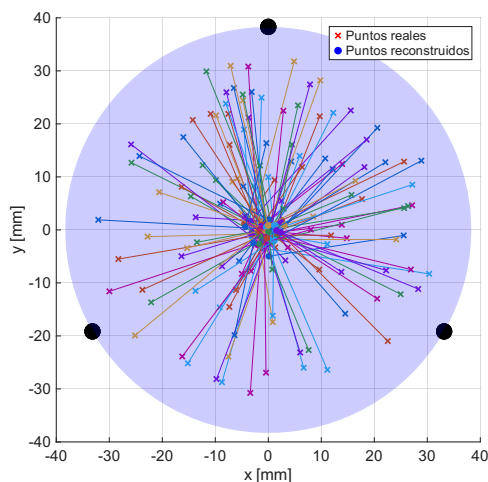


Figura 6: Sesgo de reconstrucción hacia el centro. Las cruces indican los puntos de contacto experimentales y los círculos los puntos reconstruidos.

Agradecimientos

Este artículo forma parte del proyecto de investigación SBPLY/24/180225/000078/2, financiado por la UE a través del FEDER y por la JCCM a través de INNO-CAM y del proyecto PID2023-151681OB-I00, financiado por MICIU/AEI/10.13039/501100011033 y por FEDER, UE. Se agradece la ayuda de referencia "2025-GRIN-38467" financiada por la UCLM y el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER).

Referencias

- Gariya, N., Kumar, P., 2021. A review on soft materials utilized for the manufacturing of soft robots. *Materials Today: Proceedings* 46, 11177–11181. DOI: 10.1016/j.matpr.2021.02.380
- George Thuruthel, T., Bosman, A. W., Hughes, J., Iida, F., Dec. 2021. Soft self-healing fluidic tactile sensors with damage detection and localization abilities. *Sensors* 21 (24), 8284. DOI: 10.3390/s21248284
- Jørgensen, J., Bojesen, K. B., Jochum, E., Mar. 2021. Is a soft robot more "natural"? exploring the perception of soft robotics in human–robot interaction. *International Journal of Social Robotics* 14 (1), 95–113. DOI: 10.1007/s12369-021-00761-1
- Kashef Tabrizian, S., Terryn, S., Vanderborght, B., Feb. 2025. Toward autonomous self-healing in soft robotics: A review and perspective for future research. *Advanced Intelligent Systems* 7 (8). DOI: 10.1002/aisy.202400790
- Knapp, C., Carter, G., Aug. 1976. The generalized correlation method for estimation of time delay. *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing* 24 (4), 320–327. DOI: 10.1109/tassp.1976.1162830
- Laguna, P., Rix, H., Carainal, P., Jane, R., 1990. Performance analysis of a time delay estimate between two noisy transient signals. In: *Proceedings of the Twelfth Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*. IEEE, pp. 877–878. DOI: 10.1109/iembs.1990.691459
- Ling, Y., An, T., Yap, L. W., Zhu, B., Gong, S., Cheng, W., Nov. 2019. Disruptive, soft, wearable sensors. *Advanced Materials* 32 (18). DOI: 10.1002/adma.201904664
- López-Díaz, A., De La Morena, J., Braic, A., Serna, C., Ramos, F., Vázquez, E., Vázquez, A. S., Oct. 2024a. Proprioception and control of a soft pneumatic actuator made of a self-healable hydrogel. *Soft Robotics* 11 (5), 889–901. DOI: 10.1089/soro.2023.0180
- López-Díaz, A., Vázquez, A. S., Vázquez, E., Aug. 2024b. Hydrogels in soft robotics: Past, present, and future. *ACS Nano* 18 (32), 20817–20826. DOI: 10.1021/acsnano.3c12200
- Markvicka, E. J., Rogers, J. M., Majidi, C., Oct. 2020. Wireless electronic skin with integrated pressure and optical proximity sensing. In: *2020 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. IEEE, pp. 8882–8888. DOI: 10.1109/iros45743.2020.9340787
- Pan, M., Yuan, C., Liang, X., Dong, T., Liu, T., Zhang, J., Zou, J., Yang, H., Bowen, C., Nov. 2021. Soft actuators and robotic devices for rehabilitation and assistance. *Advanced Intelligent Systems* 4 (4). DOI: 10.1002/aisy.202100140
- Pang, G., Yang, G., Heng, W., Ye, Z., Huang, X., Yang, H.-Y., Pang, Z., Apr. 2021. Coboskin: Soft robot skin with variable stiffness for safer human–robot collaboration. *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 68 (4), 3303–3314. DOI: 10.1109/tie.2020.2978728
- Roberts, P., Zadan, M., Majidi, C., 2021. Soft tactile sensing skins for robotics. *Current Robotics Reports* 2 (3), 343–354. DOI: 10.1007/s43154-021-00065-2
- Runciman, M., Darzi, A., Mylonas, G. P., Aug. 2019. Soft robotics in minimally invasive surgery. *Soft Robotics* 6 (4), 423–443. DOI: 10.1089/soro.2018.0136
- Sanguino Nieto-Márquez, D., De la Morena Duque, J., Adán Oliver, A., Vázquez Fernández Pacheco, A. S., Ramos de la Flor, F., 2025. Exoesqueleto modular para rehabilitación de manos basado en hidrogeles inteligentes. *Jornadas de Automática* (46). DOI: 10.17979/ja-cea.2025.46.12210
- Tenzer, Y., Jentoft, L. P., Howe, R. D., 2014. The feel of mems barometers: Inexpensive and easily customized tactile array sensors. *IEEE Robotics Automation Magazine* 21 (3), 89–95. DOI: 10.1109/mra.2014.2310152
- Wang, Z., Hirai, S., 2025. *Food Manipulation Technology: A Soft Robotics Approach*. CRC Press.
- Zhang, C., Florencio, D., Zhang, Z., Mar. 2008. Why does phat work well in lownoise, reverberative environments? In: *2008 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing*. IEEE. DOI: 10.1109/icassp.2008.4518172
- Zhu, M., Biswas, S., Dinulescu, S. I., Kastor, N., Hawkes, E. W., Visell, Y., Feb. 2022. Soft, wearable robotics and haptics: Technologies, trends, and emerging applications. *Proceedings of the IEEE* 110 (2), 246–272. DOI: 10.1109/jproc.2021.3140049