

Implementación de prototipos y diseño de mallas sensibles a presión de bajo coste

Sergio Domínguez Gimeno
Dpto. de Ingeniería Electrónica
y Comunicaciones
Universidad de Zaragoza
Teruel, España
sdominguezg@unizar.es

Raúl Igual Catalán
Dpto. de Ingeniería Eléctrica
Universidad de Zaragoza
Teruel, España
rigual@unizar.es

Inmaculada Plaza García
Dpto. de Ingeniería Electrónica
y Comunicaciones
Universidad de Zaragoza
Teruel, España
inmap@unizar.es

Resumen—Esta tesis aborda el desarrollo de mallas resistivas sensibles a presión (PSM) de bajo coste, reduciendo el efecto de algunos de los problemas que se encuentran actualmente en la literatura: el *crosstalk*, la complejidad del hardware involucrado, la necesidad de soluciones computacionales eficientes para la obtención de datos a partir de las mismas, etc. Se pretende aplicar al estudio de la variación del centro de presión en pruebas de estabilidad para determinar el riesgo de caída en personas mayores, así como al estudio de la zancada, viabilidad de sistemas modulares que permitan su integración en textiles, asientos, camas, etc., entre otras aplicaciones.

Palabras clave—Mallas sensibles a presión, bienestar y salud, personas mayores, fragilidad, riesgo de caídas.

I. INTRODUCCIÓN

Las mallas sensibles a presión (Pressure Sensitive Mats, PSM) son dispositivos formados por celdas dispuestas, generalmente, en forma de matriz, como se puede observar en la Fig. 1. Cada celda contiene un sensor que varía su resistencia cuando se aplica presión sobre él. La malla es flexible, lo cual permite su portabilidad y adaptación a diversas superficies y entornos. Este sistema presenta muchas aplicaciones en la medida de la distribución de la presión, pudiendo integrarse en camas, sillas de ruedas o en el suelo. Algunas de sus aplicaciones son el análisis de la ergonomía [1], control y medida postural [2], medida de la estabilidad [3] o la presión plantar [4].



Fig. 1. Despiece de la malla de presión matricial. Por orden (de izquierda a derecha): capa de filas, material piezorresistivo *Velostat* y capa de columnas.

S.D.-G. agradece la subvención del Ministerio Español de Universidades (FPU-20/04578). Esta investigación fue financiada por el Departamento de Ciencia, Universidad y Sociedad del Conocimiento del Gobierno de Aragón: *EduQTech* (T49_20R).

Las mallas sensibles a presión comerciales son costosas desde el punto de vista económico, por lo que un abaratamiento del sistema favorecería su uso en sistemas sanitarios, como, por ejemplo, en los centros de atención primaria o en las zonas rurales, donde la atención médica está, algunas veces, limitada. Existen materiales piezorresistivos de bajo coste (*Velostat* [5], *Eontext* o *Exstatic*) que permitirían construir PSM asequibles, pero hay que realizar estudios al respecto para comprobar su utilidad.

La tesis doctoral se centra en aplicaciones de salud y bienestar, aunque existen de otro tipo. Las medidas obtenidas a través de la malla se pueden relacionar con la posición del centro de presión (*Center or Pressure, COP*) y estabilidad a través de pruebas como la *SPPB (Short Physical Performance Battery)*. A través del estudio del centro de presión, se puede evaluar el riesgo de caídas mediante la prueba *Timed Up and Go Test*, la escala de Tinetti o la escala de Equilibrio de Berg.

Uno de los problemas conocidos de las PSM es el *crosstalk*. El *crosstalk* es un efecto que se produce en las matrices de sensores interconectados, por el que, dependiendo de cómo se lea el valor de cada sensor, sea por fila o sea por columna (dependiendo de la configuración), la lectura no se corresponde con el valor real de la resistencia deseada, sino con el de la resistencia equivalente (resistencia de Thévenin) vista entre el punto de medida y la masa. En el grupo de investigación donde se está desarrollando la tesis asociada a este artículo se ha desarrollado un prototipo de malla resistiva de 16x16 sensores (32x32 cm²) y se ha validado su uso para estudiar la estabilidad y la medida del centro de presión en posición bípeda. También se ha propuesto una solución basada en un método de postprocesado [5], y se han estudiado soluciones hardware propuestas por otros investigadores [6].

II. OBJETIVOS

En este apartado se van a presentar dos tipos de objetivos asociados a la tesis doctoral descrita en este paper: objetivos técnicos (A, B, C, D) y objetivos de salud (E).

A. Realizar una revisión sistemática del Estado del Arte.

Análisis sistemático de la bibliografía existente en el campo de las PSMs. El primer objetivo es adentrarse en los avances que se han realizado en materia de PSMs en los últimos años: desde 2016 hasta 2022. Este es el primer paso para poder realizar aportaciones relevantes y solucionar las carencias existentes. Para ello, se va a seguir el Método Prisma [7].

B. Mejorar el prototipo de PSM ya existente.

Primero, se pretende mejorar la frecuencia de adquisición de datos, así como proponer nuevas combinaciones de métodos de lectura de los valores de los sensores y supresión del *crossstalk*, realizando validaciones contra plataformas de fuerza comerciales, para comparar su desempeño. Además, se puede explorar la implementación de la computación en paralelo: aprovechar simultáneamente la CPU y la GPU (*Graphic Processing Unit*) del ordenador.

C. Implementar un sistema computacional de ayuda al diseño de PSMs.

Consiste en un programa que permita seleccionar las diferentes opciones de diseño del sistema: número de filas y columnas, tipo de sensor, material piezorresistivo, circuito de medida, algoritmo de procesado, soluciones para el *crossstalk*, etc. Además, debe proporcionar una estimación de la velocidad de muestreo, coste final del producto, error estimado, consumo medio, picos de consumo, etc. Algunas de las opciones disponibles, aunque no excluyentes entre sí, podrían ser: medida mediante divisor de tensión, amplificador de transimpedancia o medida simultánea en canales paralelos; soluciones al *crossstalk* mediante hardware (*Zero Potential Method*, ZPM [8]), método del diodo/transistor, integrador pasivo, realimentación de voltaje; todos ellos explicados en [9] o algoritmo de postprocesado [5]); protocolos de comunicación con el PC (bluetooth, USB, etc.). Esta herramienta debería proporcionar todos los resultados del diseño:

- **Suma del coste** de todos los componentes, incluyendo circuito de sensores, circuito de medida, sistema de alimentación, sistema de comunicación.
- **Tiempo** que tarda el sistema en obtener un *frame* completo de la malla, desde que se comienza a muestrear hasta que se obtienen los valores reales de las resistencias, pasando por el muestreo de las celdas, la transmisión de los datos, la ejecución del algoritmo de postprocesado y la visualización de datos.
- **Simulación** de los resultados mediante el cálculo de las ecuaciones reales del circuito, incluyendo o no sus no idealidades, obtención de los valores eléctricos reales en todos los puntos del circuito, etc. Para ello se espera utilizar *ngspice* o software propio desarrollado en *Python*.
- **Error máximo** cometido en el cálculo de las resistencias de cada celda de la malla. Este error depende del circuito de medida y del algoritmo de postprocesado, en función de si se usa o no. El algoritmo de postprocesado incrementa el tiempo de procesado total, pero garantiza mejores resultados finales.

D. Sistema de mallas modular.

Este es un paradigma alternativo en el desarrollo de sensores matriciales, que consiste en la interconexión de varias mallas independientes en configuraciones arbitrarias para mejorar las prestaciones o aumentar el área de medida. Esta combinación de mallas permitiría reutilizar otras de menor tamaño para aplicaciones más exigentes en cuanto a área cubierta, pudiendo generar mallas de mayor superficie, por ejemplo, para cubrir el suelo de una pista deportiva. Otros posibles contextos serían camas [10], asientos de respaldo monitorizado [11], etc.

E. Comprobar las aplicaciones de la malla en el ámbito de la salud y el bienestar.

A lo largo de la tesis, se van a estudiar dos posibles contextos: medida de la estabilidad en personas mayores y su relación con la fragilidad (fenotipo o índice de fragilidad [12], [13]); y medida de la estabilidad y la zancada/pisada también en personas mayores, relacionándolo con su riesgo de caídas [14].

III. METODOLOGÍA

La tesis se divide en las siguientes fases e hitos:

A. Búsqueda bibliográfica.

En primer lugar, se ha realizado una búsqueda en la base de datos de la *Web of Science* usando las siguientes combinaciones de palabras clave: *pressure+mat*, *pressure+sensor+mat*, *resistive+sensor+array*. La búsqueda se ha acotado al los años comprendidos entre 2016 y la actualidad (2022). Se han tomado todos los resultados sin limitación de cantidad, que han sido analizados en profundidad. De esta primera fase, se elaborará un artículo de revisión siguiendo la Metodología Prisma [7] para su posterior publicación.

De estos artículos se han extraído varios ítems de análisis:

- **Matriz de sensores *vestible* o *no vestible***: La malla desarrollada por el grupo se coloca sobre el suelo u otra superficie, pero en el análisis bibliográfico no se van a descartar las que sean *vestibles*, es decir, que se coloquen sobre el cuerpo del paciente para obtener distintos parámetros fisiológicos: pulso cardíaco [15], frecuencia respiratoria [16], presión en los vasos sanguíneos [17], etc.
- **Tecnología del sensor**: Con qué tipo de magnitud eléctrica se va a medir la presión o la variable correspondiente: resistiva [4], capacitiva [18], de efecto triboeléctrico [19], etc.
- **Material de separación y del pad**: Algunos posibles materiales de separación son *Velostat*, *Eontex* y *ExStatic*. El material del pad, es decir, de los electrodos del sensor, habitualmente es el cobre, pero hay otras alternativas como el clouro de plata.
- **Tamaño de la malla**: $N * M$, con N igual al número de filas y M igual al número de columnas. En ocasiones, los

autores proporcionan el tamaño de la malla en unidades de área.

- **Solución al *crosstalk*:** Existen varias alternativas a la solución del *crosstalk*, como ya se ha dicho, algunas basadas en hardware y otras basadas en software. En general, los artículos en los que se diseña una PSM no proponen una solución a este problema, sino que hay que recurrir a búsquedas específicas para artículos que se basen únicamente en solucionar este aspecto [5], [6], [20].
- **Sistema que procesa la información:** En general, es un ordenador, pero en algunos artículos se ha realizado el procesado en un sistema empotrado [21], lo cual dota al sistema de una mayor portabilidad.
- **Frecuencia de muestreo de la malla:** Tiempo que tarda el circuito de lectura en escanear la PSM completa. Es un reto si la malla es de grandes dimensiones.
- **Protocolo de comunicación:** Habitualmente se usa el protocolo USB o el Bluetooth, siendo el primero el más usado. En ciertas ocasiones, se ha usado Wi-Fi [22].
- **Aplicación:** Descripción del propósito para el que se ha diseñado la PSM, ya sea para medir el pulso [15], la posición del COP [23], realizar pruebas de estabilidad, evaluar la correlación de la estabilidad con otras patologías [24], ayudar a la rehabilitación [25], etc. En algunos artículos, la aplicación no se da de forma explícita, sino que se baraja una innovación a algún problema técnico, como es el caso del *crosstalk* [8].
- **Experimentos:** Son los métodos a seguir por los autores para evaluar el funcionamiento del sensor matricial. Algunos de los más habituales son la realización de pruebas con seres humanos, el uso de modelos del cuerpo humano, pesas, máquinas de fuerza, etc.
- **Parámetro de evaluación:** Indicador matemático que se ha usado para determinar el desempeño de la matriz y poder compararla con las de otros autores. Algunos parámetros de evaluación utilizados son la precisión, típica en los problemas de clasificación de actividades en las que se emplea Inteligencia Artificial [26]; el error cuadrático medio [18], el coeficiente de Pearson [17], etc.
- **Software de análisis:** Opciones habituales son *MatLab*, *Python*, software específico de la empresa que desarrolla el prototipo [26], etc.
- **Algoritmo de procesado:** Algoritmo empleado para obtener el parámetro a analizar o para procesar la información procedente de la malla. Algunos algoritmos posibles son los basados en *Deep Learning* [27], detección de picos [16], algoritmos de visión por computador [28], transformada de Fourier u otras transformadas [10], etc.
- **Resultados:** Recopilación de los resultados proporcionados en los artículos para los parámetros de evaluación seleccionados, incluyendo su comparación con los resultados de otros artículos si se encuentran disponibles.

B. Listado de parámetros que afectan a la configuración de una PSM.

Durante esta fase, se pretende desarrollar el sistema computacional de ayuda al diseño de PSMs. Para ello, primero, será necesario listar todos los parámetros involucrados en dicho diseño para, posteriormente, implementarlos en una aplicación. Este programa se prevé que sea de código abierto y que esté a disposición de los interesados, junto con el artículo de revisión de la fase A.

C. Realización de un prototipo mejorado de las mallas para el análisis de la estabilidad.

Haciendo uso de las tecnologías analizadas en el apartado anterior, se pretende realizar un modelo mejorado del sistema que se emplea actualmente, con el objetivo de incrementar sus prestaciones. Para evaluarlo, se comparará con una plataforma de fuerza comercial, de tal manera que si su desempeño es similar o mejorado, el prototipo será válido.

D. Diseño de un sistema modular.

Investigación acerca de un diseño electrónico que permita ampliar modularmente las mallas. A partir de los modelos ya disponibles en el grupo, se replicarán y se intentarán interconectar y con la unidad de procesado. Se realizarán pruebas que aprovechen la extensión de la malla final y ver si la conexión entre ellas es sencilla, con una publicación al respecto.

E. Aplicación en salud

Definición de los experimentos con sujetos humanos, debiendo ser enviado para su aprobación por el Comité Ético de la Investigación de la Comunidad de Aragón (CEICA), reclutamiento de voluntarios y realización de los experimentos. Se contará con la aportación de profesionales de la salud (enfermeros, médicos, fisioterapeutas, etc.) con los que el grupo de investigación en el que se engloba el proyecto colabora habitualmente.

F. Análisis de resultados

Relación y correlación entre las medidas devueltas por la malla prototipo y la plataforma de fuerza, y extracción de indicadores de salud, valorando la capacidad predictiva de cada uno de los sistemas construidos durante el trabajo.

IV. RESULTADOS ESPERADOS

A. Resultados de la revisión sistemática.

Se han encontrado 89 artículos bajo las palabras clave anteriormente mencionadas. Habiendo analizado todos los ítems mencionados en el apartado anterior, se han elaborado tablas resumen y gráficos que permiten conocer qué tecnologías son las más usadas, cuál es la tendencia en algoritmos de procesado, etc. Este estado de la técnica sirve también para identificar retos investigadores en este ámbito que aún no han sido abordados. De este análisis se pretende plantear una publicación, que tiene el objetivo de esclarecer el estado de la técnica en materia de sensores matriciales, tanto vestibles como ambientales.

B. Evaluación de la PSM mejorada.

En primer lugar, se espera obtener un prototipo físico que mejore, en alguna de las características, a los ya existentes. En el mejor de los casos, el nuevo sistema superará a los anteriores en algún parámetro (velocidad, precisión, precio, etc.) sin provocar pérdidas significativas en los demás. Se espera extraer conclusiones sobre la velocidad de procesado, el precio, el error máximo cometido por el sistema, así como evaluar sus mejoras con respecto a prototipos anteriores. De esta manera, se comprobará si el nuevo prototipo puede sustituir al anterior que disponía el grupo de investigación. Por ejemplo, si se consigue llevar a cabo una computación paralela entre la GPU y la CPU, es probable que se optimice el tiempo de procesado. Para valorar estos balances, la siguiente fase es clave.

C. Evaluación del sistema computacional de ayuda al diseño de PSMs.

Este sistema debería proporcionar un resultado preciso de manera rápida. De este modo, se podrían conocer con antelación las prestaciones de los sistemas basados en PSM. El objetivo es que se puedan analizar las diferentes opciones disponibles con la mayor agilidad posible, sin que sea necesario implementar el circuito real. De este modo, los usuarios de estos sistemas podrán optar por la configuración que mejor se adecúe a sus necesidades.

D. Evaluación del sistema de mallas modular.

De esta idea se pretende obtener un prototipo que permita interconectar varias mallas y que sea flexible, es decir, que permita conectarlas en diversas configuraciones. El objetivo es que sea útil para medidas, por ejemplo, de la marcha, sin que sea necesario añadir mucho más hardware a la malla base. Para ello, será necesario que la malla base tenga su hardware todavía más empotrado y protegido frente a posibles pisadas o roturas por su uso. Además, sería conveniente que la conexión con la unidad central de procesado (el PC, un *smartphone*, etc.) no requiera de una gran cantidad de cableado, pues este aumentaría en complejidad con el tamaño o configuración del sistema total.

E. Validación del prototipo para aplicaciones de Salud y Bienestar.

Una vez obtenida la aprobación del CEICA y realizadas las pruebas con sujetos humanos, se pretende estudiar la viabilidad de los nuevos prototipos para analizar parámetros representativos del estado de Salud y Bienestar de las personas, comparativamente con otros sistemas disponibles en el mercado o en el grupo. Del mismo modo, se valorará si el nuevo sistema presenta competitividad comercial. Se espera un producto rápido, barato y eficiente para la obtención de conclusiones clínicas.

V. DISCUSIÓN

A. Experiencia como estudiante.

Actualmente, se está cursando el primer año de tesis. A la fecha de hoy, se están iniciando los trabajos mencionados, habiendo avanzado considerablemente en el estudio del estado del arte y en el prototipo mejorado de malla, tratando de combinar el algoritmo propuesto en [5] con el circuito de medida propuesto en [6]. Se pretende elaborar un artículo científico para cada uno de estos trabajos en curso. Además, durante la tesis, se imparten (y se seguirán impartiendo) un número determinado de horas de docencia en asignaturas del Grado en Ingeniería Electrónica y Automática relacionadas con la Electrónica.

B. Relación con las áreas temáticas del congreso.

Al tratarse de una tesis doctoral en el Programa de Doctorado en Ingeniería Electrónica, cabe destacar su relación con los siguientes campos:

- **Fundamentos de electrónica:** Esta tesis tiene una importante componente de análisis de circuitos electrónicos, pues son los que componen la PSM. El cometido de la PSM es medir el valor de las resistencias que la forman, para lo cual es necesario resolver un circuito electrónico cambiante. En esta asignatura, se puede plantear un pequeño circuito matricial para practicar su resolución mediante nudos. Al tener un número de nudos arbitrario, en función de N y M , se puede generalizar su resolución para cualesquiera valores de esos números, dando así a entender que se puede realizar una programación sencilla de ese problema.
- **Electrónica analógica:** Habitualmente, la obtención de la señal procedente de la PSM requiere de componentes activos intermedios que lo amplifiquen (amplificadores operacionales, amplificadores de transimpedancia), así como soluciones hardware al *crossstalk* basadas en elementos discretos (diodos, transistores BJT y MOSFET, etc.), tal y como se expone en [9]. Partiendo de un análisis por nudos, como en el apartado anterior, el circuito de adquisición propuesto en [8] se basa en una configuración de amplificador inversor, cuya salida se calcula según (1). El esquema del circuito se puede encontrar en la Fig. 2. En dicho circuito, v_i se corresponde con la tensión de las columnas de la malla y v_o es la salida que se lee para su procesado. El análisis de esta y otras propuestas de circuitos de adquisición para las PSMs [9] son ejercicios típicos de Electrónica analógica.

$$v_o = -v_i \frac{R_f}{R_s} \quad (1)$$

- **Sistemas digitales:** Generalmente, las PSMs contienen dos bloques básicos de Electrónica Digital: el multiplexor y el demultiplexor. Estos bloques tienen como misión comunicar las líneas de alimentación y la línea de lectura con el circuito resistivo para variar digitalmente la resistencia que se está midiendo. Por otra parte, se emplean contadores para la medida de tiempos, lógica

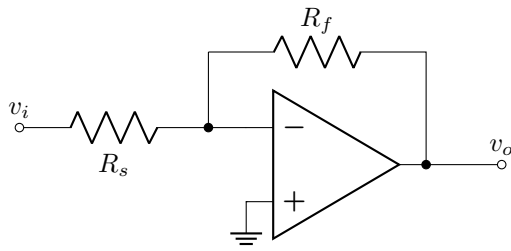


Fig. 2. Configuración en Amplificador Inversor. R_s es la resistencia a través del multiplexor y R_f es la resistencia de realimentación.

booleana programada, etc. En este caso, los multiplexores y demultiplexores conducen señales analógicas, en vez de digitales, como se suele ver en esta asignatura. Se puede realizar el ejercicio de calcular la tabla de la verdad que relaciona la combinación de bits selección de canal de los multiplexores y demultiplexores con la resistencia que se está intentando medir.

- **Instrumentación electrónica:** Los problemas asociados a las PSMs están en el ámbito de la Instrumentación Electrónica, pues se trata de medir el valor de un sensor resistivo sensible a la presión. Además, se abordan las no idealidades de los componentes electrónicos, que introducen desviaciones en las medidas esperadas, introduciendo errores considerables: no idealidades en los amplificadores operacionales, resistencias parásitas, etc. También hay que hacer notar la presencia de los conversores ADC, que son los que obtienen el valor de tensión proporcionado por el circuito para, a partir de él, extraer el valor de las resistencias. El modelado de las no idealidades de los componentes (tensiones de offset de los AOs, resistencias de los switches, etc.) permite la ideación de nuevas formas de solucionarlas, lo cual puede ser propuesto como ejercicio hacia el alumno. Por otro lado, el acondicionamiento de la señal puede hacerse de muchas formas, algunas de las más recientes se encuentran en [29].
- **Microcontroladores y microprocesadores:** El muestreo y adquisición de los datos, así como la coordinación de los multiplexores y demultiplexores son tareas llevadas a cabo por un microcontrolador programable en el lenguaje C o C++. La optimización del número de instrucciones a ejecutar, así como la gestión de la memoria son parámetros clave a controlar en este tema. La programación del microcontrolador en un lenguaje de bajo nivel como ensamblador (ASM) es un problema sencillo que se basa en rutinas de lectura y escritura en registros de los procesadores, por lo que se puede proponer como ejercicio. Es importante destacar que el bajo nivel favorece una optimización del tiempo que requiere el procesador para ejecutar las diferentes rutinas. También se puede englobar en el ámbito de programación de periféricos del procesador (timers, ADCs, etc.).
- **Aplicaciones electrónicas:** En concreto, en ingeniería

biomédica, pues el trabajo global es una aplicación en el ámbito de la salud, orientada a la mejora de la Salud y el Bienestar de la sociedad. Como ya se ha mencionado, se puede calcular el centro de presión de una persona que se coloca sobre ella, o se puede estudiar la frecuencia respiratoria de las mismas. En una asignatura de Procesado de Señales Biomédicas, el estudio de las señales proporcionadas por la malla a lo largo del tiempo podría permitir, entre otras cosas, la frecuencia respiratoria mediante varios algoritmos: detección de picos, transformadas en el dominio de la frecuencia [16], y otras técnicas que se estudian en esta asignatura.

VI. CONCLUSIONES

A lo largo de esta tesis se pretende realizar un estudio completo en el ámbito de las PSMs: Estudio del Estado del Arte, desarrollo de nuevos prototipos, valoración de aplicaciones en Salud, etc. con el objetivo de adquirir destreza en la metodología investigadora en la ingeniería electrónica y, de forma paralela, en la docencia de esta área del conocimiento. Esta última se ve complementada por el carácter multidisciplinario de la tesis doctoral. Además de la función formativa de la tesis, es un objetivo clave el desarrollar prototipos tecnológicos solventes para necesidades en Salud y Bienestar. Durante este primer trimestre de la tesis, se han abarcado varias partes del estudio total que la conforma. Es un campo muy amplio, con una gran cantidad de variables por explorar y analizar, debido a:

- Desde el punto de vista técnico, todas las no idealidades de los componentes electrónicos, de los materiales textiles de separación, limitaciones en la velocidad de comunicación, etc.
- Desde el punto de vista de la salud, las aplicaciones que se pueden ampliar y las que no se han explotado aún, el estudio de diferentes sectores poblacionales (ancianos, jóvenes, niños, personas con discapacidades, etc.), aplicación a otros sistemas más complejos donde la PSM sea solamente un sensor más, etc.
- Desde el punto de vista económico, balance entre prestaciones y precio, tratando de optimizar la ratio *calidad-coste*, etc.

Además, la bibliografía en este campo no es demasiado abundante, por lo que se trata de un buen nicho para comenzar a investigar y realizar aportaciones relevantes a la ingeniería para la salud.

REFERENCIAS

- [1] A. Naddeo, R. Califano, and P. Vink, "The effect of posture, pressure and load distribution on (dis) comfort perceived by students seated on school chairs," *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, vol. 12, no. 4, pp. 1179–1188, 2018.
- [2] H. M. Clever, A. Kapusta, D. Park, Z. Erickson, Y. Chitalia, and C. C. Kemp, "3d human pose estimation on a configurable bed from a pressure image," in *2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 2018, pp. 54–61.

- [3] L. Sheehy, A. Taillon-Hobson, H. Finestone, M. Bilodeau, C. Yang, D. Hafizi, and H. Sveistrup, "Centre of pressure displacements produced in sitting during virtual reality training in younger and older adults and patients who have had a stroke," *Disability and Rehabilitation: Assistive Technology*, vol. 15, no. 8, pp. 924–932, 2020.
- [4] J. F. Saenz-Cogollo, M. Pau, B. Fraboni, and A. Bonfiglio, "Pressure mapping mat for tele-home care applications," *Sensors*, vol. 16, no. 3, p. 365, 2016.
- [5] C. Medrano-Sanchez, R. Igual-Catalan, I. Plaza-Garcia, and V. H. Rodríguez-Ontiveros, "Circuit analysis of matrix-like resistor networks for eliminating crosstalk in pressure sensitive mats," *IEEE SENSORS JOURNAL*, vol. 19, pp. 8027–8036, 9 2019.
- [6] J. A. Hidalgo-Lopez, J. Romero-Sanchez, and R. Fernandez-Ramos, "New approaches for increasing accuracy in readout of resistive sensor arrays," *IEEE SENSORS JOURNAL*, vol. 17, pp. 2154–2164, 4 2017.
- [7] G. Urrutia and X. Bonfill, "Declaración prisma: una propuesta para mejorar la publicación de revisiones sistemáticas y metaanálisis," *Medicina clínica*, vol. 135, no. 11, pp. 507–511, 2010.
- [8] J. A. Hidalgo-Lopez, R. Fernandez-Ramos, J. Romero-Sanchez, J. F. Martin-Canales, and F. J. Rios-Gomez, "Improving accuracy in the readout of resistive sensor arrays," *JOURNAL OF SENSORS*, vol. 2018, 2018.
- [9] J.-F. Wu, "Scanning approaches of 2-d resistive sensor arrays: A review," *IEEE SENSORS JOURNAL*, vol. 17, pp. 914–925, 2 2017.
- [10] H. Liu, E. Sanchez, J. Parkerson, and A. Nelson, "Unobtrusive sleep monitoring with low-cost pressure sensor array," in *2019 IEEE/ACM International Conference on Connected Health: Applications, Systems and Engineering Technologies (CHASE)*. IEEE, 2019, pp. 17–18.
- [11] S. Hongchang, Z. Zhijing, J. Xin, D. Sanpeng, J. Yongxiang, and Z. Zhongpeng, "Monitoring driving psychological fatigue through unconstrained heartbeat signal extraction by using pressure sensor array," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 22 193–22 202, 2019.
- [12] V. de Vassimon-Barroso, A. M. Catai, M. S. D. S. Buto, A. Porta, and A. C. D. M. Takahashi, "Linear and nonlinear analysis of postural control in frailty syndrome," *Brazilian Journal of Physical Therapy*, vol. 21, no. 3, pp. 184–191, 2017.
- [13] L. T. Marques, N. C. Rodrigues, E. O. Angeluni, F. P. A. dos Santos Pessanha, N. M. da Cruz Alves, R. C. F. Júnior, E. Ferriolli, and D. C. C. de Abreu, "Balance evaluation of prefrail and frail community-dwelling older adults," *Journal of geriatric physical therapy*, vol. 42, no. 3, pp. 176–182, 2019.
- [14] A. Rodríguez-Molinero, A. Herrero-Larrea, A. Miñarro, L. Narvaiza, C. Gálvez-Barrón, N. Gonzalo León, E. Valldosera, E. de Mingo, O. Macho, D. Aivar *et al.*, "The spatial parameters of gait and their association with falls, functional decline and death in older adults: a prospective study," *Scientific Reports*, vol. 9, no. 1, pp. 1–9, 2019.
- [15] M. Kaisti, T. Panula, J. Leppänen, R. Punkkinen, M. Jafari Tadi, T. Vasankari, S. Jaakkola, T. Kiviniemi, J. Airaksinen, P. Kostianen *et al.*, "Clinical assessment of a non-invasive wearable mems pressure sensor array for monitoring of arterial pulse waveform, heart rate and detection of atrial fibrillation," *NPJ digital medicine*, vol. 2, no. 1, pp. 1–10, 2019.
- [16] W. Li, C. Sun, W. Yuan, W. Gu, Z. Cui, and W. Chen, "Smart mat system with pressure sensor array for unobtrusive sleep monitoring," in *2017 39th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC)*. IEEE, 2017, pp. 177–180.
- [17] B. Ibrahim and R. Jafari, "Cuffless blood pressure monitoring from an array of wrist bio-impedance sensors using subject-specific regression models: Proof of concept," *IEEE transactions on biomedical circuits and systems*, vol. 13, no. 6, pp. 1723–1735, 2019.
- [18] S. Nizami, A. Bekele, M. Hozayen, K. Greenwood, J. Harrold, and J. R. Green, "Comparing time and frequency domain estimation of neonatal respiratory rate using pressure-sensitive mats," in *2017 IEEE International Symposium on Medical Measurements and Applications (MeMeA)*. IEEE, 2017, pp. 239–244.
- [19] K. Y. Lee, H.-J. Yoon, T. Jiang, X. Wen, W. Seung, S.-W. Kim, and Z. L. Wang, "Fully packaged self-powered triboelectric pressure sensor using hemispheres-array," *Advanced energy materials*, vol. 6, no. 11, p. 1502566, 2016.
- [20] J. Wu and L. Wang, "Cable crosstalk suppression in resistive sensor array with 2-wire s-nsde-ep method," *Journal of Sensors*, vol. 2016, 2016.
- [21] H. L. Wang, S. Y. Kuang, H. Y. Li, Z. L. Wang, and G. Zhu, "Large-area integrated triboelectric sensor array for wireless static and dynamic pressure detection and mapping," *Small*, vol. 16, no. 2, p. 1906352, 2020.
- [22] D. Chen, Y. Cai, and M.-C. Huang, "Customizable pressure sensor array: Design and evaluation," *IEEE Sensors Journal*, vol. 18, no. 15, pp. 6337–6344, 2018.
- [23] J. Martinez-Cesteros, C. Medrano-Sanchez, I. Plaza-Garcia, R. Igual-Catalan, and S. Albiol-Perez, "A velostat-based pressure-sensitive mat for center-of-pressure measurements: A preliminary study," *INTERNATIONAL JOURNAL OF ENVIRONMENTAL RESEARCH AND PUBLIC HEALTH*, vol. 18, 6 2021.
- [24] C. Bickley, J. Linton, E. Sullivan, K. Mitchell, G. Slota, and D. Barnes, "Comparison of simultaneous static standing balance data on a pressure mat and force plate in typical children and in children with cerebral palsy," *Gait & Posture*, vol. 67, pp. 91–98, 2019.
- [25] A. L. Betker, T. Szturm, Z. K. Moussavi, and C. Nett, "Video game-based exercises for balance rehabilitation: A single-subject design," *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, vol. 87, no. 8, pp. 1141–1149, 2006. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S000399930600356X>
- [26] J. Goetschius, M. A. Feger, J. Hertel, and J. M. Hart, "Validating center-of-pressure balance measurements using the matscan® pressure mat," *Journal of sport rehabilitation*, vol. 27, no. 1, 2018.
- [27] H. Azimi, P. Xi, M. Bouchard, R. Goubbran, and F. Knoefel, "Machine learning-based automatic detection of central sleep apnea events from a pressure sensitive mat," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 173 428–173 439, 2020.
- [28] Q. Sun, E. Gonzalez, and Y. Sun, "On bed posture recognition with pressure sensor array system," in *2016 IEEE SENSORS*. IEEE, 2016, pp. 1–3.
- [29] J. A. H. Lopez, O. Oballe-Peinado, and J. A. Sanchez-Duran, "A proposal to eliminate the impact of crosstalk on resistive sensor array readouts," *IEEE SENSORS JOURNAL*, vol. 20, pp. 13 461–13 470, 11 2020.