

# 導電繊維編み込みカーペットおよび靴下を用いた 位置および向き の推定

永山 晃誠<sup>†1,a)</sup> 高田 峻介<sup>†2</sup>

**概要:** 屋内位置推定技術はライフログなどの取得や、独居高齢者の見守りなどへの活用が期待されている。本研究では、導電繊維を格子状に編み込んだカーペットを作製し、つま先/かかとに導電繊維が編み込まれた靴下を用いて、装着者の足の位置および向きを推定する。提案手法にて、つま先/かかところが導電繊維が編み込まれた電極になっている靴下を用いて、カーペット上に設置した際に、カーペットの導電繊維同士が靴下の各電極によって短絡する現象を用いて接地位置を計測する。また、靴下の各電極間はダイオードと抵抗を介して接続されている。そのため、設置した二電極間の抵抗値および電流の制限方向をカーペットに装着した計測回路を用いて計測することで、それぞれの電極がつま先/かかとのどちらであるか識別できる。提案手法は靴下に電源を搭載する必要がないため、ユーザの装着感を妨げない。

## 1. はじめに

屋内位置推定技術は、ライフログなどの取得や、ヒューマンアクティビティ認識 (HAR) と組み合わせた在宅ヘルスケアを支援するシステムなどに応用されている [1]。屋内位置推定手法は主に 4 パターンに分類されるが [2]、光やオクルージョンの影響を受け、ユーザのプライバシーが確保されないもの [3]、外乱に大きく影響されないが、個人識別ができないものなどの問題がある [4]。

また、平面とのインタラクションとユーザの位置推定を組み合わせた研究もいくつか紹介されている [5][6]。屋内位置推定技術より適用できる範囲は狭いものの、床面によるヒューマンアクティビティ認識が可能となり、幅広いインタラクションを実現できる。

そこで、本研究では導電繊維を編み込んだカーペットと靴下を用いて、カーペット上のユーザの足の位置と向きを推定する手法を提案する。提案手法は、導電繊維を格子状に編み込んだカーペットを、導電繊維がつま先およびかかと部分の電極部に編み込まれた靴下で踏んだ際に、カーペットの導電繊維の縦糸と横糸が靴下を介して短絡する現象を用いて各電極位置 (=足の位置) を推定する。また、靴下の各電極はダイオードと抵抗を介して接続されており、つま先からかかるとに一方的に信号が伝搬するため、この性質を利用して各電極の種類 (=足の向き) を推定する。

## 2. 関連研究

### 2.1 屋内位置推定手法

屋内位置推定を行う手法は主に 4 パターンに分類される [2]。まず 1 つ目が、スマートホンなどに搭載された加速度センサや地磁気センサなどを用いてユーザの屋内位置推定を行う PDR (Pedestrian Dead Reckoning) と呼ばれる手法である [7][8][9]。2 つ目が超広帯域 (UWB) 無線電波や、WiFi 電波などを使用する手法である [4][10][11][12]。3 つ目が音波を送信/受信し、それらの到達時間差 (TOA) などを用いる手法である [3][13][14]。最後の 4 つ目はコンピュータビジョンを用いる手法である [15][16]。

提案手法は、床面に設置した物理的なセンサを用いてユーザの位置推定を行う点でこれらの研究と異なる。また、提案手法は屋内位置推定以外にも、床面へのインタラクション手段としての応用も可能である。

### 2.2 平面に対するインタラクション手法

床面に対するインタラクションの方法として、いくつかの手法が提案されている。床面に対するインタラクションを実現する方法で最も直接的な認識手法が圧力センサを利用する方法である。TapisMagique [6] は、カーペット生地の中に、縦向きに並べた導電繊維の層と、ピエゾ抵抗膜の層、横向きに並べた導電繊維の層を構築し、カーペットに圧力がかかった際に、ピエゾ抵抗膜の抵抗値が下がり、その部分で縦向きと横向きに導電繊維が導通する現象を用いてユーザとカーペットの間のインタラクション

<sup>†1</sup> 神戸市立工業高等専門学校専攻科 電気電子工学専攻

<sup>†2</sup> 神戸市立工業高等専門学校 電子工学科

<sup>a)</sup> r117229@g.kobe-kosen.ac.jp

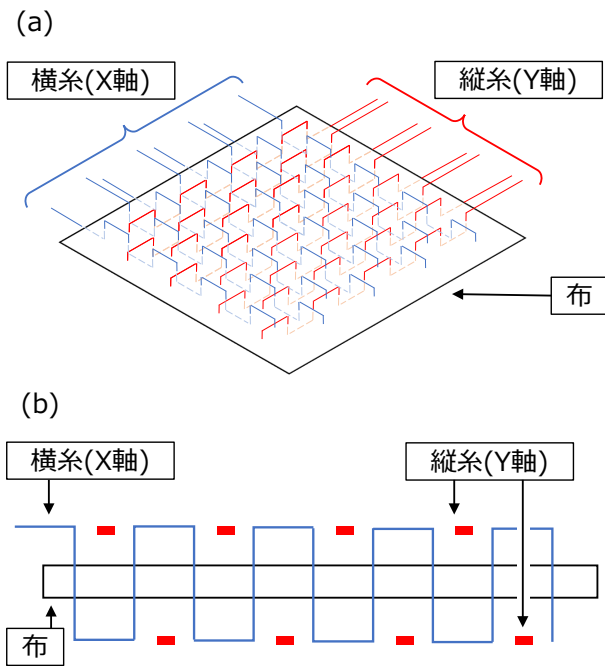


図 1 カーペットの構造 (a: 格子状に編み込まれた導電性の横糸および縦糸の構造, b: 断面図)

を実現している。また、Leong らは、複数の導電布を用いて多層構造にすることにより、靴下型のインタフェースである proCover を開発した [17]。

本研究では、導電繊維を編み込んだ靴下とカーペットを組み合わせセンシングを行う点でこれらの研究と異なる。また、著者らは導電繊維編み込み靴下において、足首及び足趾を曲げた際に靴下表面の導電繊維同士が短絡し、抵抗値が下がる現象を用いて足首/足趾の曲げ角度の推定を行ってきた [18]。提案手法においても、足首/足趾を曲げた際に靴下表面の導電繊維同士が短絡するため、足首と足趾の曲げを推定できる。したがって、足の位置推定だけでなく、足の曲げやひねりなどの動作までセンシングすることが可能となる。

### 3. 提案手法

提案手法である導電繊維を格子状に編み込んだカーペット、ならびにかかと/つま先部分に導電繊維が編み込まれた靴下を用いた、足の位置および向きの推定手法の仕組みを述べる。

提案手法においてカーペットには、図 1(a) に示すように格子状に、導電繊維が図 1(b) のように波縫いで縫い付けられている。このため、通常時にカーペットの縦糸と横糸が導通することはない。導電性の電極を有する靴下を履いたユーザの足が、このカーペットに接地した際に、カーペット表面に露出した縦糸および横糸が、図 3 のように靴下の電極を介して電氣的に短絡する。これにより、横糸に印加した電気信号が縦糸に伝搬するため、これを計測することで足が触れた位置 (=ユーザが立っている位置) を推

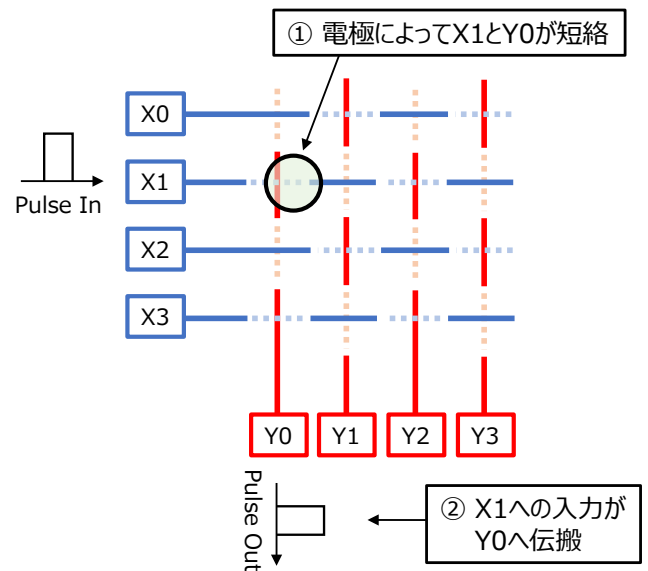


図 2 位置推定の原理 (靴下に編み込まれた電極によって縦糸と横糸が短絡)

定することができる。

また、図 3 に示すように、靴下のつま先/かかとの電極はダイオードと抵抗を介して接続されている。そのため、つま先の電極へ信号を印加した際に、つま先に流れ込んだ信号の一部が図 3(a) のようにダイオードと抵抗を通してかかとの電極に伝搬する。この現象は自己キャパシタンス方式のタッチパネルにて、二点をタッチした際に生じる「ゴースト現象」 [19] に似ているため、本研究においても同様に呼称する。一方で、かかとへ印加した信号はダイオードの極性によってつま先の電極に伝搬することは無い。この二電極間の指向性を利用することで、靴下のつま先部分とかかと部分の判別 (≒向きの推定) が可能となる。

提案手法はカーペット上のユーザの位置を、カメラを使用せずに推定可能であるため、光やオクルージョンの影響を受けず、ユーザのプライバシーも侵害しない。また、つま先からかかとへ伝搬する信号の電圧は、抵抗によって電圧降下する。この抵抗をユーザごとに変えることで、それぞれの抵抗値の違いによって、電圧降下の度合いが変わるため個人の識別も可能となる。加えて、提案手法は靴下側に電源やマイコン等を搭載する必要がないため安価で実現可能である。

### 4. 実装

提案手法を実現可能かどうか調査するために、図 4 に示すプロトタイプを実装した。図 4(a) はプロトタイプ全体の構成である。図 5 に計測用回路の回路図を示す。プロトタイプ計測用回路は Arduino Micro およびアナログマルチプレクサ (CD74HC4067) から構成される。作製したカーペットは柔らかく変形しやすいため、アクリル板にテープを用いて固定した。縫い付けられた導電繊維の様子

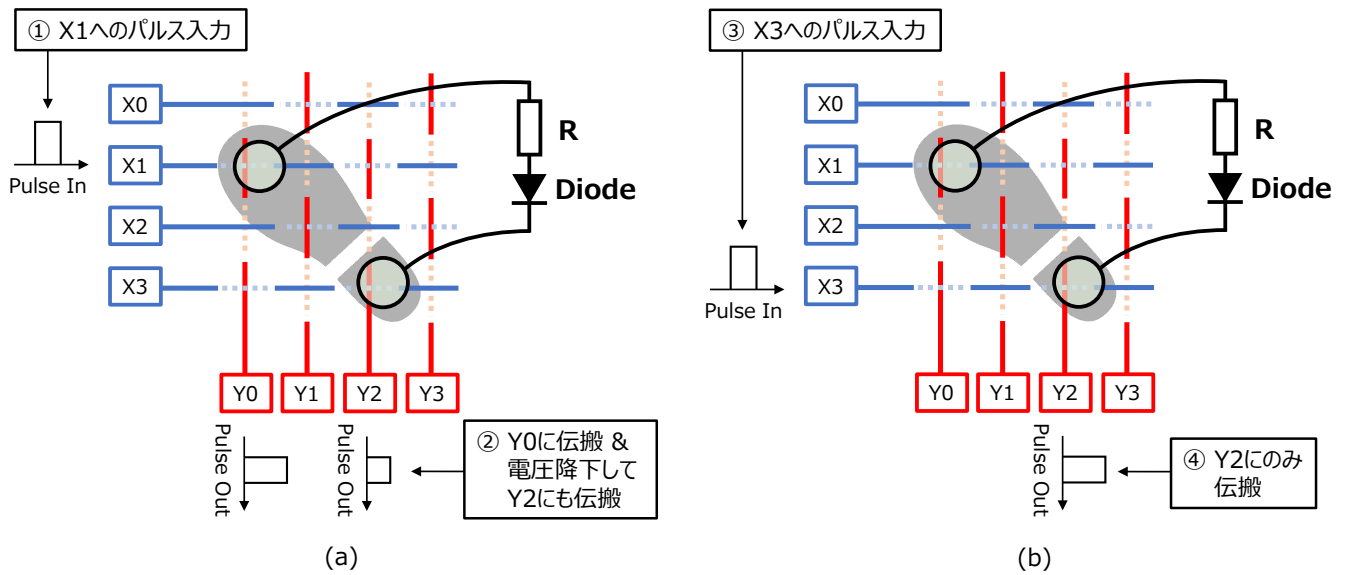


図 3 足の向き推定の原理 (つま先およびかかとの電極間のダイオードを利用した信号伝搬の指向性を利用)

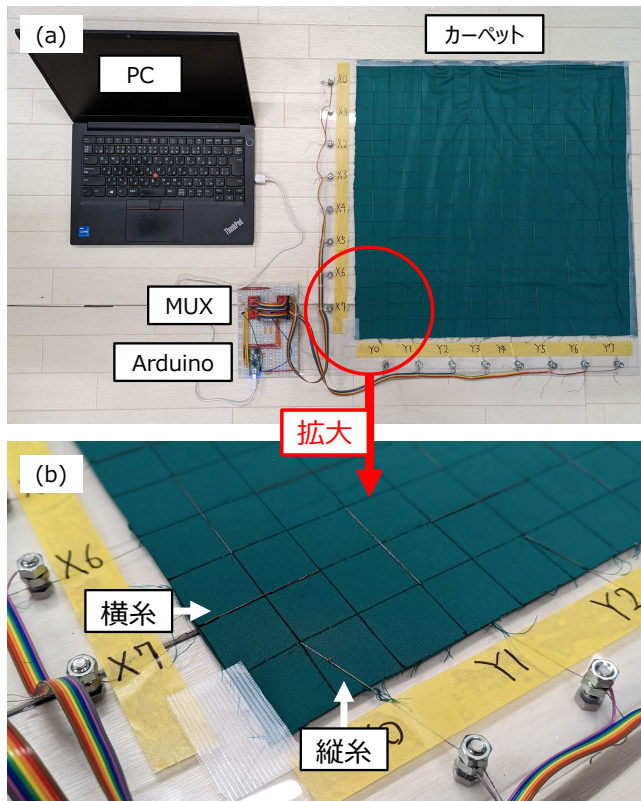


図 4 実装したプロトタイプ (a: 全体の構成, b: カーペット部を拡大した様子)

を図 4(b) に示す。導電繊維は図 1 のように縦 8×横 8 の 6 cm 間隔の格子状に波縫いで縫い付けている。各導電繊維は金属ねじを介して計測用回路に接続されている。なお、マルチプレクサの各電極の浮遊状態を防ぐため、それぞれ 10[kΩ] のプルダウン抵抗を接続した。

実装した導電性靴下を図 6 に示す。靴下はあらかじめつま先およびかかるとに導電繊維が編み込まれている市販品を

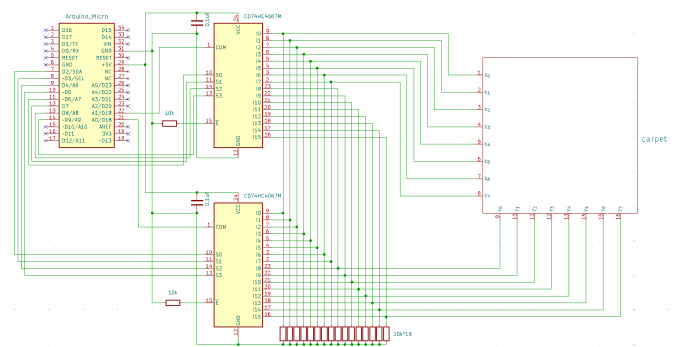


図 5 回路図



図 6 実装した靴下 (つま先およびかかるとが導電繊維が編み込まれた電極になっている。各電極間にダイオードおよび抵抗を導電糸で縫い付けている)

を使用し、各電極間は、ダイオードと抵抗を介して接続している。

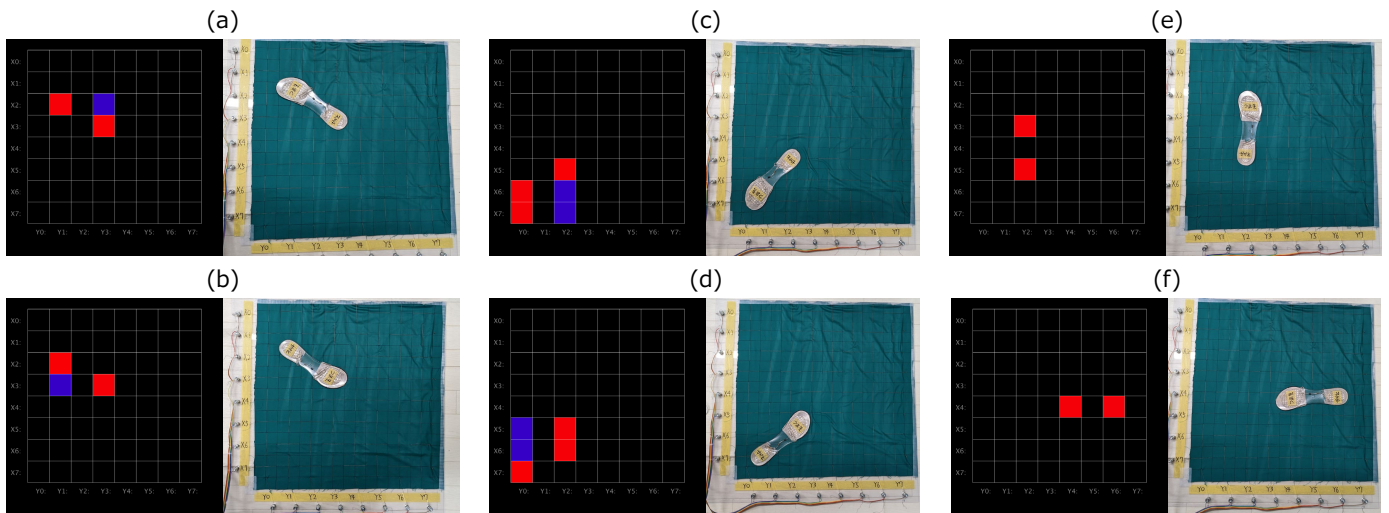


図 7 実験結果, 伝搬する電圧が高い場合は赤色, 低い場合は青色で表現されている (a, b): 足の向きによってゴーストが発生する位置が異なる (c, d) つま先が3つの線にまたがる例でも足の位置および向きを推定できる (e, d) 二電極が同一系上にまたがった場合, ゴーストが発生しないため向きを推定できない

## 5. 実験および結果と考察

プロトタイプのカバーットの横糸 (X0~X7) に入力信号 (5V) を印加した際の, 縦糸 (Y0~Y7) に伝搬した信号の電圧を計測した. 計測された電圧は Arduino を介して PC にシリアル通信にて送信され, 各測定値は Processing 言語を用いて実装した GUI アプリケーションにて可視化した. 実験には, 各糸の短絡の様子がわかりやすいように図 6 にて示した靴下ではなく, 透明のジェルインソール裏面のつま先およびかかとに導電布を貼り付け電極とし, 各電極間にクリップを介してダイオードおよび抵抗 (15kΩ) を接続した.

実験結果を図 7 に示す. 図 7(a)~(f) の各実験結果の左側が可視化用 GUI アプリケーションの出力結果であり, 伝搬してきた信号の電圧が高いと赤色, 低いと青色になるように設計されている. 図 7(a) および (b) の結果より, つま先およびかかとの電極位置 (GUI 上の赤色の部分) が計測できており, さらに足の向きによってゴーストが発生する位置が異なっていることがわかる. また, 図 7(a) および (c) の結果より, 足の位置によって短絡位置が異なっている. これらの結果より, 提案手法にて足の位置および向きを推定できることが確認された.

次に, 図 7(c) および (d) の結果は, 電極面積が大きいつま先が同時に 2 本の横糸にまたがるように接触した際の様子である. これらの結果にて, 短絡 (赤色) およびゴースト現象 (青色) が図 7(a) および (b) 時よりも増えているが, 電極が 1 対 1 以上の縦横糸の短絡を発生させた場合でも足の位置および向きを推定できることが確認された.

一方で, 図 7(e) および (f) は一本の縦糸あるいは横糸上

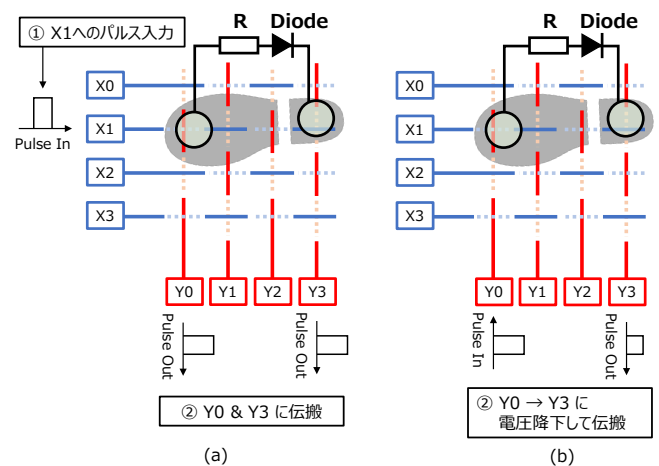


図 8 (a) 同一系上に二電極がまたがった場合に起こる問題 (b) 解決方法

につま先およびかかとの両電極が接触してしまった場合の結果である. 結果より, 短絡 (赤色) により足の位置は推定できるものの, ゴーストが発生せず, 足の向きを推定できないことがわかる. これは図 8(a) に示すように, 一本の横糸に信号を入力した際に, 二本の縦糸に信号が伝搬されるが, 電極間に挿入した抵抗およびダイオードが特に寄与していないことが原因である. この問題の解決方法として図 8(b) に示すように, 縦糸間の信号の伝搬を計測する方法が考えられる. 図 8(b) にて, 縦糸 Y0 に信号を入力した際に, ダイオードを介して Y3 に信号が伝搬するが, 逆向き (Y3 → Y0) に信号を入力してもダイオードの極性により信号が伝搬しない. 図 7(e) のように足の向きが一本の縦糸沿っている場合は横糸を用いて同様に行う. これにより問題を解決できると考えられる.



## 6. まとめ

格子状に導電繊維を編み込んだカーペットと、つま先およびかかとに導電繊維を電極として編み込み、電極間をダイオードおよび抵抗を介して接続した靴下を用いて、足の位置および向きを推定する手法を提案した。

提案手法の実現可能性を検証するために、カーペットおよび計測回路のプロトタイプを実装し、足の電極を介した信号の伝搬の様子を確認した。実験結果より、短絡による信号伝搬を用いて足の位置、ゴースト現象を用いて向きを推定できることが示された。一方で、カーペットの縦糸あるいは横糸に足の各電極が接触した際に、ゴースト現象が発生せず、向きが推定できない問題が発生した。この問題の解決方法として、縦糸間、横糸間の信号の伝搬を計測する解決方法を提案した。今後は、本解決方法の検証を行う。また、靴下の電極間に用いる抵抗の種類によって、靴下の種類(=装着しているユーザ)を識別できるか検証する。また、提案手法は靴下側に電源やマイコン等を必要としないため装着感を妨げにくい。これを評価するためにユーザビリティテストを実施する。

## 謝辞

本研究は JSPS 科研費 JP21K21299 および JP22K17941 の助成を受けたものです。

## 参考文献

- [1] Luigi Bibbò, Riccardo Carotenuto, and Francesco Della Corte. An Overview of Indoor Localization Systems for Human Activity Recognition (HAR) in Healthcare. *Sensors*, Vol. 22, No. 21, 2022.
- [2] S.J. Hayward, K. van Lopik, C. Hinde, and A.A. West. A Survey of Indoor Location Technologies, Techniques and Applications in Industry. *Internet of Things*, Vol. 20, p. 100608, 2022.
- [3] 中川健一, 杉原太郎, 小柴, 高塚亮三, 加藤直孝, 國藤進. 実社会指向アプローチによる認知症高齢者のための協調型介護支援システムの研究開発. 情報処理学会論文誌, Vol. 49, No. 1, pp. 2-10, 2008.
- [4] Wenjun Jiang, Hongfei Xue, Chenglin Miao, Shiyang Wang, Sen Lin, Chong Tian, Srinivasan Murali, Haochen Hu, Zhi Sun, and Lu Su. Towards 3D Human Pose Construction Using Wifi. In *Proceedings of the 26th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking*, MobiCom '20, New York, NY, USA, 2020. Association for Computing Machinery.
- [5] Joseph Paradiso, Craig Ablner, Kai-yuh Hsiao, and Matthew Reynolds. The Magic Carpet: Physical Sensing for Immersive Environments. In *CHI '97 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, CHI EA '97, pp. 277-278, New York, NY, USA, 1997. Association for Computing Machinery.
- [6] Irmandy Wicaksono, Don Derek Haddad, and Joseph Paradiso. Tapis Magique: Machine-Knitted Electronic Textile Carpet for Interactive Choreomusical Performance and Immersive Environments. In *Creativity and Cognition*, Camp;C '22, pp. 262-274, New York, NY, USA, 2022. Association for Computing Machinery.
- [7] 遠藤巖, 藤田悟. スマートフォン内の複数センサを用いた歩行者位置推定. 第 76 回全国大会講演論文集, pp. 175-176. 情報処理学会, 2014 年 3 月.
- [8] Yali Yuan, Christian Melching, Yachao Yuan, and Dieter Hogrefe. Multi-Device Fusion for Enhanced Contextual Awareness of Localization in Indoor Environments. *IEEE Access*, Vol. 6, pp. 7422-7431, 2018.
- [9] Robert Jackermeier and Bernd Ludwig. Exploring the limits of PDR-based indoor localisation systems under realistic conditions. *Journal of Location Based Services*, Vol. 12, No. 3-4, pp. 231-272, 2018.
- [10] Paolo Dabove, Vincenzo Di Pietra, Marco Piras, Ansar Abdul Jabbar, and Syed Ali Kazim. Indoor positioning using Ultra-wide band (UWB) technologies: Positioning accuracies and sensors' performances. In *2018 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium (PLANS)*, pp. 175-184, 2018.
- [11] Zhoubing Xiong, Francesco Sottile, Maurizio A. Spirito, and Roberto Garello. Hybrid Indoor Positioning Approaches Based on WSN and RFID. In *2011 4th IFIP International Conference on New Technologies, Mobility and Security*, pp. 1-5, 2011.
- [12] 小柳健吾, 吉田博哉. 位置指紋法における電波強度マップ構築の効率化検討. 第 76 回全国大会講演論文集, pp. 179-180. 情報処理学会, 2014 年 3 月.
- [13] Karalikkadan Ashhar, Md. Noor-A-Rahim, Mohammad Omar Khyam, and Cheong Boon Soh. A Narrow-band Ultrasonic Ranging Method for Multiple Moving Sensor Nodes. *IEEE Sensors Journal*, Vol. 19, No. 15, pp. 6289-6297, 2019.
- [14] Juan Manuel Vera-Diaz, Daniel Pizarro, and Javier Macias-Guarasa. Towards End-to-end Acoustic Localization using Deep Learning: From Audio Signals to Source Position Coordinates. *Sensors*, Vol. 18, No. 10, p. 3418, 2018.
- [15] Huthaifa Obeidat, Wafa Shuaieb, Omar Obeidat, and Raed Abd-Alhameed. A Review of Indoor Localization Techniques and Wireless Technologies. *Wireless Personal Communications*, Vol. 119, pp. 289-327, 2021.
- [16] Fazliddin Jabborov and Jinsoo Cho. Image-Based Camera Localization Algorithm for Smartphone Cameras Based on Reference Objects. *Wireless Personal Communications*, Vol. 114, pp. 2511-2527, 2020.
- [17] Joanne Leong, Patrick Parzer, Florian Perteneder, Teo Babic, Christian Rendl, Anita Vogl, Hubert Egger, Alex Olwal, and Michael Haller. proCover: Sensory Augmentation of Prosthetic Limbs Using Smart Textile Covers. In *Proceedings of the 29th Annual Symposium on User Interface Software and Technology*, pp. 335-346, 2016.
- [18] 永山晃誠, 高田峻介. 導電繊維編み込み靴下を用いた足首及び足趾の曲げ計測手法. 第 85 回全国大会講演論文集, p. 2. 情報処理学会, 2023 年 3 月. (in Press).
- [19] Hyoungsik Nam, Ki-Hyuk Seol, Junhee Lee, Hyeonseong Cho, and Sang Won Jung. Review of Capacitive Touchscreen Technologies: Overview, Research Trends, and Machine Learning Approaches. *Sensors*, Vol. 21, No. 14, p. 4776, 2021.