

近距離無線通信を用いた識別可能な複数小型ノードの3次元位置推定

沼田 誠二郎* 門本 淳一郎* 入江 英嗣*

概要. 小型ノードの3次元位置推定は、モーションキャプチャや医療用カプセルの体内位置追跡などに応用されるが、従来手法はオクルージョンへの耐性、識別可能なノード数、推定可能な範囲に課題がある。本研究では、近距離無線通信（NFC）を応用し、オクルージョンに強く、複数の小型ノードを識別可能な3次元位置推定システムを提案する。本システムは、直交する3面に配置したリーダアレイとトランスミッタ、および小型NFCタグから構成され、リーダアレイにおける受信信号強度の分布からタグの座標を推定する。Unique Identifier（UID）によるタグ識別とアンチコリジョン機能により、従来手法より多くのノードを識別できる。NFCは一般的に10cm程度以下の通信距離で用いられるが、リーダとトランスミッタを分離し、Q値の大きいアンテナコイルを用いることで通信距離を伸長する。さらに、本システムを活用したアプリケーションを提案する。

1 はじめに

小型ノードの3次元位置推定技術は、モーションキャプチャ[3][4]や医療用カプセルの体内位置追跡[5]などに応用されている。しかし、従来手法にはオクルージョンへの耐性や識別可能なノード数、推定可能な範囲の制限といった課題があり、実現できるアプリケーションに制約をもたらしている。

近距離無線通信（NFC）は、主に10 cm以下の近距離の無線通信に使われる技術であり[1]、Unique Identifier（UID）を用いたタグの識別が可能である。また、複数のタグからの信号の衝突を回避するアンチコリジョン方式が定められており、リーダの読み取り範囲に複数のタグが存在する場合でもそれぞれのUIDを正しく読み取ることができる。

NFCタグの位置推定手法が提案されている[6][7]が、推定可能な範囲や推定精度に課題がある。一方で、従来より遠距離でNFCタグを読み取る手法が提案されている[8]。

本研究では図1のような、NFCを応用した、オクルージョンに強く複数の小型ノードの識別が可能な3次元位置推定システムを提案する。さらに、本システムを活用したアプリケーションを提案する。

2 関連研究

2.1 小型ノードの3次元位置推定

Vicon Motion Systems¹は、カメラを用いた小型マーカの3次元位置推定技術を利用したモーションキャプチャシステムを提供している[4]。しかし、カ

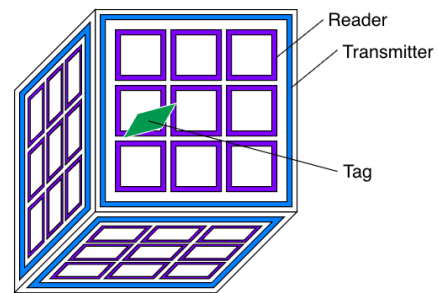


図 1. 提案する 3 次元位置推定システム

メラを用いた手法ではオクルージョンが推定誤差の原因となる[2]。

一方、電磁誘導を用いた手法はオクルージョンに強い。IM6D[3]では、それぞれ異なる共振周波数をもつLCコイルを用いた複数のパッシブ小型マーカの3次元位置推定を行なっている。この手法では、マーカ・リーダアレイ間の電磁誘導によりリーダアレイに生じる誘導電圧を高速フーリエ変換することで、各コイルを識別しながら位置推定を行なうことができる。しかし、マーカを増やすと各周波数成分のSN比が小さくなり推定精度が低下するため、識別可能なマーカ数は15個に限られる。

2.2 NFCを用いた位置推定

NFCはリーダ・タグ間の電磁誘導を用いた近距離の無線通信技術である。タグに割り当てられたUIDにより、複数のNFCタグを識別可能である。

Project Zanzibar[6]では、平面上のリーダアレイにおける受信信号強度（RSSI）からNFCタグを埋め込んだデバイスの位置推定を行なっているが、2次元的な位置推定に止まっている。TextileSense[7]ではビームフォーミングを用いてNFCタグの3次

Copyright is held by the author(s). This paper is non-refereed and non-archival. Hence it may later appear in any journals, conferences, symposia, etc.

* 東京大学

¹ <https://www.vicon.com/>

元位置推定を行なっているが、平均推定誤差が 3.6 cm と大きく小型ノードの位置推定には適さない。

2.3 NFC の通信距離

アンテナコイルの Q 値を大きくすると、NFC の通信距離が増加する一方、帯域幅が減少する。従来の NFC ではリーダ (Rx) がトランスミッタ (Tx) を兼ねているため、NFC の搬送波 (Tx・タグ間の通信に使用) と副搬送波 (タグ・Rx 間の通信に使用) が帯域に収まるよう Q 値を設定する必要がある。そこで、NFC+[8] では Rx と Tx を分離し、Tx の帯域を搬送波に、Rx の帯域を副搬送波に合わせた上で各アンテナコイルの Q 値を大きくすることで、最大 3 m 程度の通信距離を実現している。

3 提案手法

3.1 システム概要

図 1 のような直交する 3 面に配置した Rx アレイおよび Tx, そして小型 NFC タグからなる小型ノードの 3 次元位置推定システムを提案する。各面の Rx アレイにおける RSSI の分布からタグの座標を推定する。Rx に対するタグの角度が 90° に近づくと Rx・タグ間の結合が弱まりタグの読み取りが困難になるが、Rx を 3 面に配置することにより、様々な角度のタグの読み取りが可能になる。UID を用いることで従来の 3 次元位置推定手法よりも多くのタグを識別でき、タグが複数存在する場合でも、アンチコリジョンによりリーダが正しく UID を読み取ることができる。

3.2 3 次元位置推定手法

図 2a のように、 xy 平面の Rx アレイにおける RSSI についてフィッティングを行い、平面上で RSSI がピークとなる x, y 座標を推定する。この座標がタグの x, y 座標の推定値となる (図 2b)。同様に yz 平面の RSSI からタグの y, z 座標、 zx 平面の RSSI から z, x 座標を推定することで、タグの 3 次元位置を推定することができる。

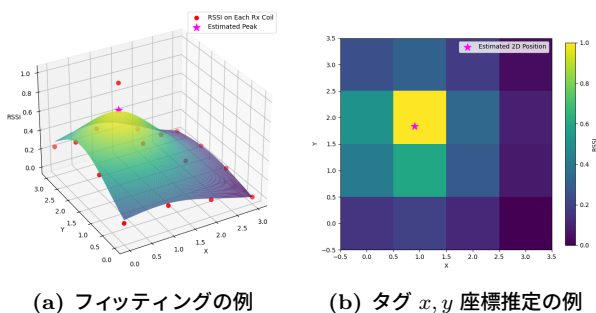


図 2. 3 次元位置推定手法

4 実装

4.1 タグ

図 3a に示すような、10 mm×10 mm の NFC タグを作成した。タグ IC (ST25V02KC), キャパシタおよびアンテナコイルを並列に接続し、共振周波数が NFC で利用する 13.56MHz となるように調整する。

4.2 リーダ・トランスミッタ

タグの読み取り実験を行い (図 3), Rx 面に水平なタグを高さ 5 cm 程度以下の範囲で読み取ることができた。今後、Rx と Tx を別々のコイルを用いて作成し、それぞれ Q 値を大きくすることで読み取り範囲の拡大を目指す。さらに、Rx アレイおよび Tx を図 1 のように 3 面に配置することでタグの 3 次元位置推定を実現する。

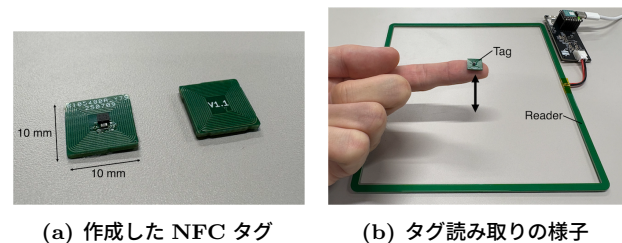


図 3. タグ読み取り実験

5 アプリケーション

本システムを利用した小型ノードの 3 次元位置推定アプリケーションを提案する。例えば、タグを手指に取り付けて位置推定することで、ハンドトラッキングを行うことができる。

また、小型ロボットにタグを取り付けることで、群ロボットの位置推定を行うことができる。ユーザの手などの障害物がある場合でも位置推定が可能であり、機能や役割の異なる複数のロボットを識別することもできる。

さらに、粘土などの変形可能なデバイスにタグを埋め込むことで、自己形状認識可能なデバイスを作成することができる。変形を入力とする入力デバイスや、自身の形状を 3D モデルに変換する直感的なモデリングツールへの応用が可能である。

6 おわりに

本研究では、NFC を用いることで複数の小型ノードの識別が可能な 3 次元位置推定システムを提案した。今後は、Rx アレイおよび Tx を 3 面に配置し、RSSI からタグの 3 次元位置推定を行うプログラムを作成する。さらに、推定したタグ位置の可視化と推定精度の評価を行う予定である。

謝辞

本研究の一部は株式会社 Premo および JSPS 科研費 JP23H00465, JP23K16857, JST CRONOS JPMJCS25K2 の支援を受けたものです。

参考文献

- [1] B. Baker, J. Woods, M. J. Reed, and M. Afrod. A Survey of Short-Range Wireless Communication for Ultra-Low-Power Embedded Systems. *Journal of Low Power Electronics and Applications*, 14(2), 2024.
- [2] M. Conconi, A. Pompili, N. Sancisi, and V. Parenti-Castelli. Quantification of the errors associated with marker occlusion in stereophotogrammetric systems and implications on gait analysis. *Journal of Biomechanics*, 114:110162, 2021.
- [3] J. Huang, T. Mori, K. Takashima, S. Hashi, and Y. Kitamura. IM6D: Magnetic Tracking System with 6-DOF Passive Markers for Dexterous 3D Interaction and Motion. *ACM Transactions on Graphics*, 34, 2015.
- [4] P. Merriaux, Y. Dupuis, R. Boutteau, P. Vasseur, and X. Savatier. A Study of Vicon System Positioning Performance. *Sensors*, 17(7), 2017.
- [5] B. Tao, E. Sie, J. Shenoy, and D. Vasisht. Magnetic Backscatter for In-body Communication and Localization. In *Proceedings of the Annual International Conference on Mobile Computing and Networking, MOBICOM*, 2023.
- [6] N. Villar, D. Cletheroe, G. Saul, C. Holz, T. Regan, O. Salandin, M. Sra, H. S. Yeo, W. Field, and H. Zhang. Project Zanzibar: A Portable and Flexible Tangible Interaction Platform. In *Conference on Human Factors in Computing Systems - Proceedings*, Vol. 2018-April, 2018.
- [7] J. Wang, J. Zhang, K. Li, C. Pan, C. Majidi, and S. Kumar. Locating Everyday Objects Using NFC Textiles. *Communications of the ACM*, 66, 2023.
- [8] R. Zhao, P. Wang, Y. Ma, P. Zhang, H. H. Liu, X. Lin, X. Zhang, C. Xu, and M. Zhang. NFC+: Breaking NFC Networking Limits through Resonance Engineering. In *SIGCOMM 2020 - Proceedings of the 2020 Annual Conference of the ACM Special Interest Group on Data Communication on the Applications, Technologies, Architectures, and Protocols for Computer Communication*, 2020.