

# パーソナルロボットをシームレスに モード切替するための電磁場変動センサ

小玉 亮<sup>1,2,a)</sup> 梶本 裕之<sup>1,3</sup>

**概要:** 屋外で使用するパーソナルロボットにはユーザに対する自動追従と、ユーザが自らハンドリングする二つのモード間をシームレスに切り替えるシステムが必要である。現在このようなシステムを簡単に実現できるユーザの接近やタッチをロボストに識別できるセンサは存在しない。この研究ではユーザを電磁場で包み込み、その電磁場の変動からユーザの行動を選択的に検知するセンシング技術を提案する。センサを取り付けたロボット模型に対するユーザの接近、タッチ、立っている方位の情報が検出できることを明らかにした。

## An electromagnetic field fluctuation sensor for seamless mode switching of a personal robot

RYO KODAMA<sup>1,2,a)</sup> HIROYUKI KAJIMOTO<sup>1,3</sup>

**Abstract:** While seamless switching between accompanying and handling mode for an outdoor personal robot is required, the lack of sensor that can robustly detect proximity and touch of the user hindered its practical development. In this study, a novel sensing technique using electromagnetic field fluctuation is presented. The experiment using a suitcase type robot with the sensor showed that direction of surrounding user, as well as direct touch of the user can be separately detected.

### 1. 背景

近年の技術発展によりパーソナルロボットの価格は消費者の価値観と釣り合うようになっており、今後ロボット製品への需要が増加することが期待される。パーソナルロボットは技術や制度の制約から、屋内利用に留まっている。屋外でも安全に、簡単に運用できるシステムを開発していくことで活躍の場が広がり、私たちの生活を豊かにしてくれる多彩なロボットが登場していくと考えられる。

屋外での利用を想定すると、パーソナルロボットには

ユーザに対する自動追従と、ユーザが自らハンドリングする二つのモード間をシームレスに切り替えるシステムが必要である。屋外ではロボットは自身のユーザではない人々と出会う機会が多くなり、屋内に比べてユーザをロボストする確率が高くなることが懸念される。また悪路などで自動追従が困難になることも予想される。このような時ユーザがロボットに触れるだけでシームレスに動作モードが切り替わり、電動アシストでロボットをハンドリングできるようなデザインにしておけば、良いユーザ体験が維持できると考えられる。

この研究では電磁場変動を利用した、ユーザとロボットの距離測定からタッチ検出までをケアできる新しい近接センシング技術を提案する。このセンシング技術ではユーザを電磁場で包み込み、ロボットに電磁場の変化を捉えるセンサを搭載する。ユーザに伴って変動する電磁場を追いかけるようにロボットを制御することで、ユーザの認識と自動追従システムが容易に実現できると考えられる (図1)。

<sup>1</sup> 電気通信大学

The University of Electro-communications,  
Chofugaoka, Chofu, Tokyo 182-8585, Japan

<sup>2</sup> 株式会社 豊田中央研究所

TOYOTA CENTRAL R&D LABS., INC,  
Yokomichi, Nagakute, Aichi 480-1192, Japan

<sup>3</sup> 科学技術振興機構さきがけ

Japan Science and Technology Agency

a) kodama-r@mosk.tytlabs.co.jp

またタッチ検出をトリガとすることで、シームレスに動作モードを切り替えるシステムが実現できると期待できる。



図 1 電磁場を利用した自動追従ロボット

## 2. 関連研究

ユーザを自動追従するロボットの研究として、南雲らの発光タグとカメラを組み合わせた追従システムがある [1]. 発光タグは LED アレイの形状や発光パターンを工夫することで特徴量を増加させ、ロバストなユーザ認識を実現できる。一方で屋外の光に負けない光量をタグから出力しなければならないため長時間の運用に課題がある。

大矢らは超音波トランスポンダを用いることで、トランスポンダを持っているユーザを選択的にとらえる手法を提案している [2]. 発光タグに比べて在来ノイズ成分が少ないため扱いやすいが、超音波センサはレスポンスが遅いため十分な制御ループ周期を達成できない恐れがある。また指向性の問題から実用レベルのアルゴリズムを実現するには多くのセンサ設置が必要であると予想される。

小山らは、ロボットの走破性を向上させることで人のハンドリングを必要としない自動追従ロボットを提案している [3]. センサシステムとしては赤外線の発光タグと全方位カメラの組み合わせを用いている。ロボットの足周りの高コスト化と、発光タグの消費電力が課題である。

電波を用いた自動追従ロボットの提案として、Rodrigo らの hop! という電動スーツケースのコンセプトがある [4]. 携帯電話に搭載されている Bluetooth の電波のタグとして使い、スーツケースで受信した電波強度からユーザの距離や方位を検出して自動追従を行う。携帯電話やスマートフォンはすでに多くの消費者が所有しているため最も容易に導入できる優れた提案である。しかしながら、Bluetooth の電波は周波数が高くマルチパスの影響が大きいため、スーツケース側で得られる受信電力は安定しない。そのため強力なフィルタリングが必要となり、これがロボットの制御ループ周期を低下させてしまうという課題がある。

我々の知る限り、本研究で提案する人を包み込む電磁場

をタグに使い、パーソナルロボットの動作モード切替をシームレスに行うシステムに関する先行研究はまだない。以降に示す実験を通して、本方式のセンシング技術を搭載したロボットから、ユーザの行動がどのような電磁場変動として捉えられるかを明らかとする。

## 3. 電磁場変動検出

### 3.1 検出原理

人を包み込む電磁場の変化を検出する原理を以下に示す。図 2 に人を電磁場で包み込む送信機と、その変化を捉えるための受信機の回路構成を示す。送信機はユーザが持ち、受信機はロボットに設置する。送信機の電極にユーザが触れるとユーザは電磁場に包まれた状態となる。この状態のユーザがロボットに近づくとき、ユーザと受信機の電極の間には容量性の結合が生じ、この結合を介してユーザをつつむ電磁場が受信機に入力される。結合の強さはユーザと受信電極の距離が近いほど大きくなり、入力される電磁場の強さも大きくなる。入力された電磁場は受信機の回路によって増幅と変換を行い電圧として出力される。出力電圧をマイコンで AD 変換し、信号処理することでユーザとロボットの距離や、ユーザのロボットに対する接触などが検知できるようになる。

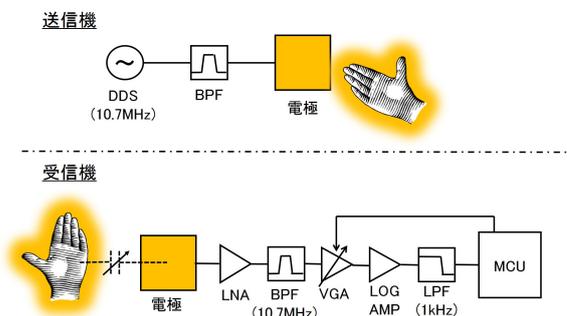


図 2 電磁場センサの回路図

### 3.2 送信機の特性

1-100MHz の電気信号は皮膚表面を低減衰で伝搬することが知られており、本研究の送信機はこの現象を利用してユーザを電磁場で包み込んでいる。この現象を利用した通信技術として人体通信がある [5] 送信機には 10.7MHz の発振器が搭載されており、この 10.7MHz の電気信号がユーザを電磁場に包まれた状態に励振する。10.7MHz の発振器を採用した理由は、10.7MHz が FM 放送の中間周波数であり、高性能な部品が流通しているためプロトタイプに向いていると考えたためである。

この研究のために用意した送信機は総務省から告示されている微弱無線局の規定を守るため、出力が 0dBm に調整されている [6]. 規定より 10.7MHz の無線局において、無

線局から 3m の距離での電界強度が  $500\mu\text{V}/\text{m}$  以下であれば免許不要で 사용할 ことができることになっている。一般ユーザが利用することを考えると必ず守っておくべき点である。この送信機が発生させる電界強度を測定したところ、身長 170cm の標準的な肉付きの男性を無線局のアンテナとしたとき、およそ 1.5m 地点で  $500\mu\text{V}/\text{m}$  まで減衰していた。この結果より、出力 0dBm の送信機は十分な余裕をもって微弱無線局の条件を満たしていることがわかった。

### 3.3 受信機の特 性

図 3 に受信機の入出力特性を示す。横軸は電極から受信機に入力された電力であり、縦軸は受信機から出力される電圧である。縦軸の電圧はマイコンで AD 変換された値となっている。受信電力が増加するにしたがい出力電圧は単調増加していき、-20dB で飽和するという特性となっている。受信電力が増加するということは、3.1 項で説明した容量結合の考え方から、センサの運用時におけるユーザとロボットの距離が近くなることに相当する。すなわちこの特性は人とロボットの距離が近くなるとセンサの出力電圧が増加することを示しており、出力電圧からユーザとロボットの距離が推定できる可能性を示唆している。

測定の上限值となる -20dBm 以降の飽和は受信機の可変ゲインアンプ (VGA) で生じていることがわかっている。しかしながらセンサの運用時において、入力電力は人と電極が直接接している状態でも -30dBm を超えることはないため本研究においてこの特性は問題とならない。測定の下限值は -110dBm 程度である。受信機に電磁場が入力されていない状態でも約 800 のオフセット電圧が出力されているので、-110dBm ~ -120dBm の間にノイズフロアがあると考えられる。受信回路のバンドパスフィルタの帯域から、常温における熱雑音電力は概ね -120dBm であるとわかっており、ノイズフロアは熱雑音由来のものであると推測される。つまり、受信機の増幅ステージには余分な雑音成分が混入しておらず、受信した電力と熱雑音だけで出力電圧が決まっていると考えられる。

この回路のフロントエンドには電極の切り替えスイッチがあり、最大 4 個までの電極を取り付けることができる。電極毎に 125Hz のサンプリングレートで受信電力を計測することができる。これらの受信機の特性は、この受信機が 4 項で報告するユーザ歩行時の電磁場変動の測定に十分な性能を有していることを示すものである。

## 4. 電磁場変動の計測

### 4.1 実験の条件

この研究ではパーソナルロボットとして、スーツケースサイズのロボットを想定して実験を行った。スーツケースに受信機と 4 つの電極を取り付け、ユーザがロボットに近づいたり周囲を歩いたりしたときの電圧を測定した。図 4

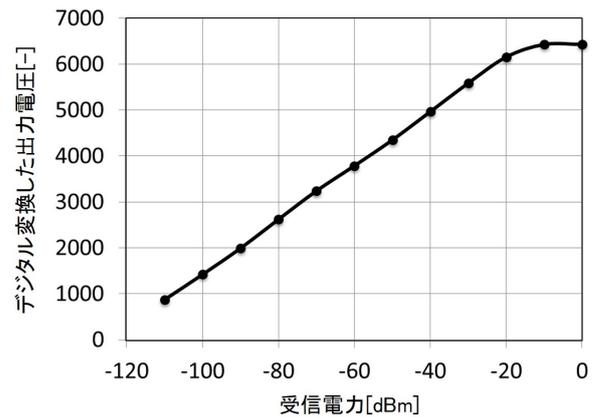


図 3 受信機の入出力特性

(a) に実験に用いたスーツケースの具体的な寸法と、スーツケースへの電極の取り付け位置を示す。スーツケースの寸法は 250mm × 350mm × 500mm であり、電極は前後左右の 4 面の真ん中、高さ 350mm の位置に取り付けた。図 4 (b) に電極の構造を示す。電極のサイズは 4cm × 4cm。平行平板の電極を用いており、片側の電極は信号電極、片側の電極は GND 電極である。誘電体はプリント基板でよく用いられるガラスエポキシ基板を利用した。厚みは 2mm とした。

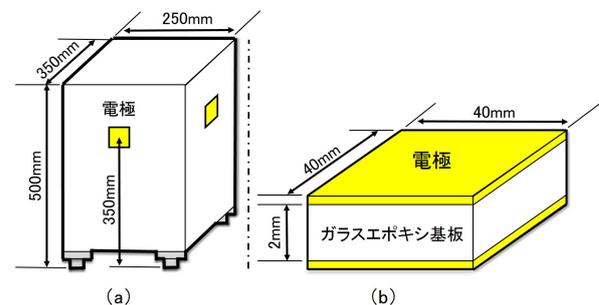


図 4 受信機の電極の設置位置

### 4.2 ユーザの接近〜タッチの測定

この実験環境で 2 つのシーンについて電磁場の変動を測定した。実験方法を図 5 に示す。図 5 (a) は電磁場の変動を検出できるようになったスーツケースが、ユーザとの接近とタッチを検出できるか調査するための実験である。実験は以下の手順で行った。電磁場をまとめたユーザが静止状態のスーツケースの正面 1.5m からスーツケースに歩いて近づき、その後、電極から手を放して元の位置に戻った。図 6 に測定で得られた電磁場の変動を示す。横軸は測定時間で縦軸は受信機の出力電圧である。

まずユーザがスーツケースに接近するにつれて出力電圧が単調増加している。そしてタッチの瞬間に出力電圧が大きく増加し、手を放すと同時に減少する。最後にユーザが

スーツケースから離れるのに伴って電圧は減少していく。この結果から、出力電圧の大きさから人とロボットの距離が推定できることが明らかとなった。例えば出力電圧を一定値に保つようにロボットの位置を制御することで、ユーザへの自動追従のような機能が実現できると考えられる。またタッチ時の電圧変化から、簡単なしきい値の判定でタッチの認識ができることがわかった。正面以外の電極にも近接の影響が表れており、受信機の指向性が広いことがわかる。タッチしている間は正面の電極に受信電力が集中するため、周囲への電磁場の放出が弱まり、他の電極への受信電力が弱まっている様子が見られる。複数の電極の情報を統合することで、より頑強なタッチ検出のアルゴリズムを構築できる。

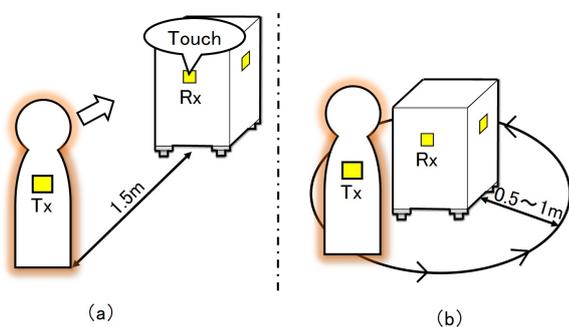


図 5 電磁場変動を計測したシーン

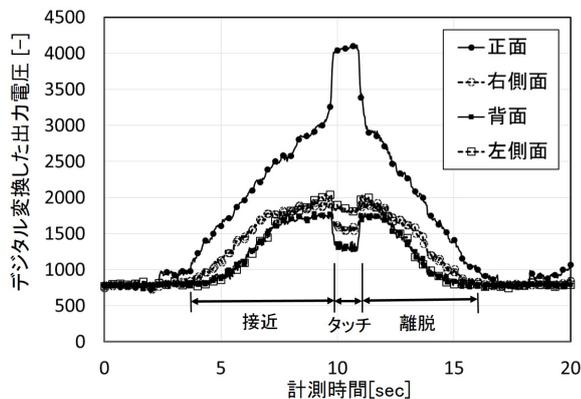


図 6 接近～タッチの電磁場変動

#### 4.3 ユーザの方向検知能の測定

次に電磁場の変動からスーツケースの周りを歩くユーザの方向検知が可能であるか調査した。受信機は指向性が低く、電極に対向した方向以外の電磁場変動を検出できるため、各電極から得られる電磁場変動を統合することで、ユーザが存在する方向を推定できるのではないかと考えた。図 5(b) に示すように静止状態のスーツケースの周囲をユーザが一定速度で歩行した時の電磁場変動を測定した (図 7)。

注目すべき箇所は、ユーザがスーツケースの正面から右側面に移動している時の電圧変化で、正面の電圧下降と右側面の電圧上昇が交差している。この波形から隣り合った電極の検出エリアが重複しており、それぞれの電極から得られた出力電圧の割合から、ユーザがどの方位にいるのかを推定できることがわかった。

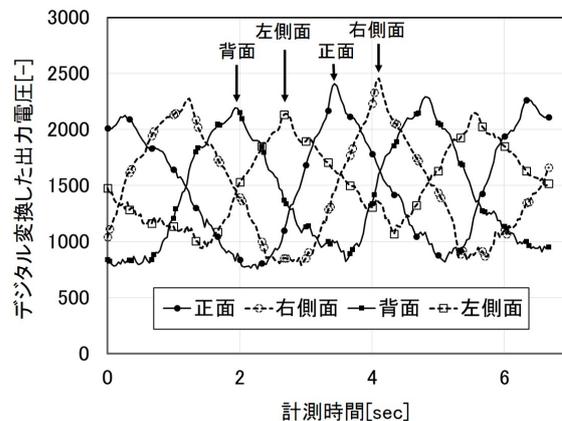


図 7 周回歩行の測定データ

## 5. 結論

この研究では屋外で使用するパーソナルロボットのシームレスなハンドリングを実現するセンシング技術として、電磁場変動センサを用いることを提案した。スーツケースを用いた電磁場変動の測定結果から、屋外でのロボット利用に不可欠と考えられるロボットに対するユーザの接近～タッチやユーザが存在する方位といった情報が得られる可能性を示した。

## 参考文献

- [1] 南雲, 大矢: 発光器をガイドとした自立移動ロボットの人間追従, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'01 講演論文集 2P1-H6 (2001).
- [2] 大矢, 高畑: 人間と共に移動するロボット—超音波トランスポンダによるターゲットイメージング, 日本音響学会 2001 年秋季研究発表会, pp.1259-1260 (2001).
- [3] 小山, 但馬, 田中, 廣瀬, 鋤柄: 人を活動的にする移動支援ロボット—全方位カメラと赤外 LED の発光パターンを用いた利用者の追跡—, 第 14 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会講演論文集 2J3-2 (2013).
- [4] Rodrigo G., Pierre Y., Guillaume C. and Sures K.: Hop! The following suitcase, <http://www.cargocollective.com/ideaactionary/hop> (2012).
- [5] 根日屋英之: 人体通信の最新動向と応用展開, シーエムシー出版 (2011).
- [6] 総務省: 電波利用ホームページ—微弱無線局の規定—, <http://www.tele.soumu.go.jp/j/ref/material/rule/index.html> (2014 年 12 月時点).