

# スマートフォンの回転角を用いた 室内空間におけるユーザ位置・方向の推定とその活用

佐藤 光起<sup>a)</sup> 松下 光範<sup>b)</sup>

**概要:** スマートフォンに標準的に搭載されたジャイロセンサを用いて、そのスマートフォンを把持するユーザの位置および方向を推定する手法を提案する。室内空間には様々な生活家電が存在し、リモコンで操作できるようになっている。こうした機器のIoT化に伴い、スマートスピーカーを介した操作が可能になってきているが、設定変更などの複雑な操作を行ったり複数人が同時に操作を行ったりすることは難しい。そこで、スマートフォンを操作対象の機器に向けて特定し、その設定機能を手元のスマートフォンに取り込んで操作するというインタラクションを可能にすることで、この問題の解決を試みる。提案手法では、室内の基準点をスマートフォンで指し示した際の角度の差を用いてユーザの空間座標と方向を推定する。本稿では、スマートフォンで指し示した機器の位置推定の精度及びその特性についてユーザ実験を通じて明らかにするとともに、提案手法の活用方法について述べる。

## Estimating User Position and Direction in Indoor Space Using Smartphone Rotation Angle and Its Application

### 1. はじめに

Internet of Things (IoT) 関連技術の発展に伴い、ネットワークを介して操作可能な機器が我々の生活環境に登場している。このような製品が増加するにつれ、利用したい機器の選択や操作に必要な手間が増大する。例えば、スマートスピーカーを通じて音声で操作する場合、どの機器にどのような指示を与えるかを言語化することは必ずしも容易ではなく、同じ生活環境にいる複数のユーザが同時にスマートスピーカーを通じて指示を与えることも難しい。

この解決の一つとして、ユーザが操作したい製品をデバイスで指し示すことで選択し操作を行う手法が提案されている [17]。操作対象を指し示す動作は直感的であり、対象となる機器が増加してもユーザの労力の増加は少ない。操作に用いるデバイスに対象機器の制御画面（コントローラ）を表示することで、音声では伝えにくい複雑な操作を行うことも可能である。

こうした手法の多くは高性能なユーザの位置や姿勢を計

測するセンサと、ユーザが装着ないし把持する操作端末の組み合わせで実現されているが、特殊なセンサや操作端末を用いる手法はユーザにとって環境整備にかかるコストが高い。こうした問題の解決を目指し、本研究ではこれまでに、スマートフォンのみを用いてユーザが指し示している機器を検出し、選択されている機器を推定する手法を提案している [12]。提案手法は、スマートフォンに標準的に搭載されているジャイロセンサの値を用いてユーザの位置推定を行うものであり、特殊な計測装置を用いることなく、携帯端末のみを用いて直感的な機器の選択と、複雑な操作を可能にしている。本稿では、ユーザ実験により、提案手法によるユーザ位置及びポインティング位置の推定精度について検証するとともに、その活用方法について検討する。

### 2. 関連研究

#### 2.1 ポインティングによる対象の認識と操作

同一空間に存在する対象をポインティングして選択する手法は、直感性に優れることから古くから様々な提案がされている) e.g., Put-That-here [2])。その多くは、操作対象となる機器に受光器を取り付け、それとユーザが把持する操作端末との接続を確立することで指

<sup>1</sup> 関西大学  
Kansai University, Takatsuki, Osaka 569-1095, Japan  
a) k081485@kansai-u.ac.jp  
b) mat@res.kutc.kansai-u.ac.jp

示対象を特定したり (e.g., Ubi-Finder [14], Optical Beam Interface [7], Hobs [11]), 環境に設置されたカメラやユーザが把持する端末のセンサを用いてユーザの位置や向き, 姿勢を取得し指示対象を特定したりする (e.g., XWand [10], Minuet [4], 下村らの手法 [16]). これらの手法ではユーザの示している機器を高精度で識別できるが, 専用端末を用いる必要があり導入時のコストが嵩んでしまう.

これに対して, スマートフォンを用いて IoT 製品を操作する手法は, 普及している端末を用いるため機器の導入コストが小さいという利点がある. 大木らは携帯端末に標準的に搭載されている方位センサを用いてユーザの向きを推定し操作対象の機器を選択する手法を提案している [15]. この手法ではユーザの室内における位置を推定しておらず, ユーザと IoT 製品の位置関係や, IoT 製品の配置に制約がある. また, 岩崎らはスマートフォンに方位センサを接続し, 室内の座標と方位が既知である複数の基準点へ端末を向けた際の値をもとにユーザの座標を推測することで位置依存のサービスに利用している [19]. この手法ではユーザが適宜キャリブレーションを行うことで座標推定を可能にするが, 方位センサの値は磁場の分布によって影響を受けるため, 新たな機器の導入や家具の配置転換, 室外の状況変化などによる精度の低下が懸念される.

## 2.2 屋内空間のユーザ位置の推定

ユーザの位置推定は, 屋外であれば衛星からの信号による測位 (Global Navigataion Satellite System; GNSS) が利用可能であるが, 屋内では信号が安定して取得できずに精度が低下するという問題があり, その利用が難しい. そのため, 屋内環境においては (1) WiFi や Bluetooth などの無線周波数信号 (e.g., 伝播遅延の利用 [5], 受信信号強度の利用 [1]), (2) 操作端末に内蔵された慣性センサ (e.g., ジャイロセンサの利用 [13], 慣性センサと超音波センサの併用 [18]), (3) 建物の間取り図 (e.g., 壁面制約による位置の制限 [6]), (4) 帯磁パターンを示した磁気フィンガープリント (e.g., 磁束密度分布図の利用 [9]), などがユーザの位置推定に利用される [3].

このうち (1) 及び (4) については, 環境内に機器設置が必要なことや, 新たな製品の導入によって帯磁パターンが変化することなどが課題となる. また, (2) は精度が課題となっており, 特に屋内空間での移動が伴う場合は, 誤差が蓄積されるため, 精度が大きく低下する. (3) は他の手がかりと組み合わせて利用することで, 利用される環境の特定や精度の向上に貢献する. 事前に間取り図を入力する必要はあるが, 間取りや機器の配置の変更はユーザが目視によってその変化を認識できるため, 比較的容易に修正を行うことができる. 本研究で採用している位置推定手法 [12] は, 簡便に利用できることを目的としているため, 環境側の設備設定や事前の設定を可能な限り排除した手法であ

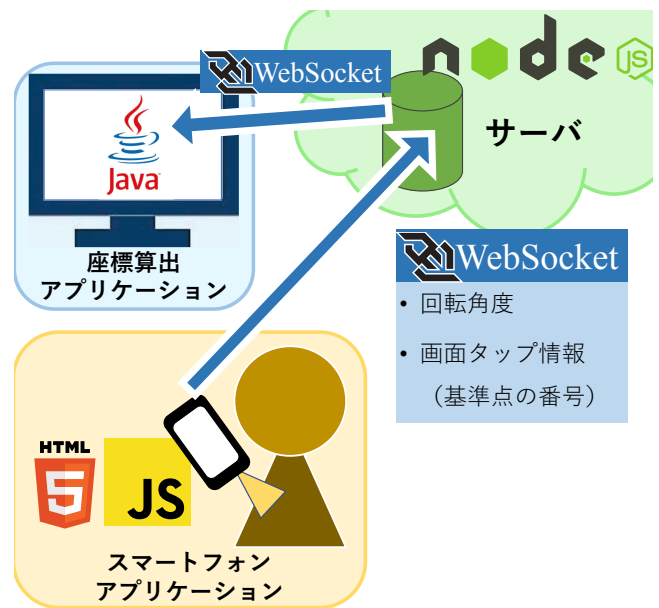


図 1 システム構成図

り, (2) と (3) を組み合わせて利用している.

## 3. ジャイロセンサを用いたユーザ位置および方向の推定

### 3.1 位置推定のアルゴリズム [12]

提案手法では, スマートフォンのジャイロセンサから得られる回転角と室内空間の間取り図を用いることでユーザ位置の推定を行う. 本手法では予めその室内空間に 3 箇所以上の複数の基準点を設定して間取り図の座標と対応付けておく. ユーザがスマートフォンでそれぞれの基準点を示した際の回転角をもとにユーザ位置の候補となる点を求め, 間取り図との整合性が保たれる位置をユーザの位置と推定する.

ユーザが取る行動とシステムが行う処理を以下に示す.

- (1) ユーザは QR コードを読み取り, Web アプリケーションを起動する
- (2) ユーザは室内空間内の各基準点 (3 箇所) にスマートフォンを向け, 対応するボタンをタップする
- (3) システムはボタンがタップされた際のスマートフォンの回転角を取得する
- (4) システムは各基準点における回転角をもとにユーザ位置を推定する

提案手法は図 1 に示すように, スマートフォンアプリケーション, 座標算出アプリケーション, 及びサーバから構成される. 提案手法では, ユーザの居る室内空間に 3 点以上の基準点を設置することが必要である. 室内空間内の基準点は, その空間内の任意の点に対して, その点と全ての基準点の位置を通る球面が形成されないという制約を満たす 3 箇所以上の位置であれば良い. 本稿ではこのような制約を満たす基準点として, 室内空間の同一壁面の右上・

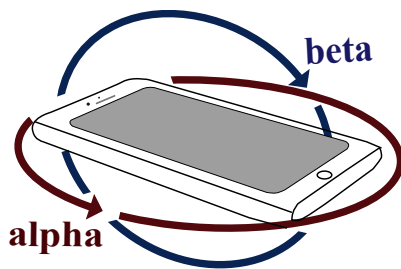


図2 スマートフォンにおける回転角の座標系

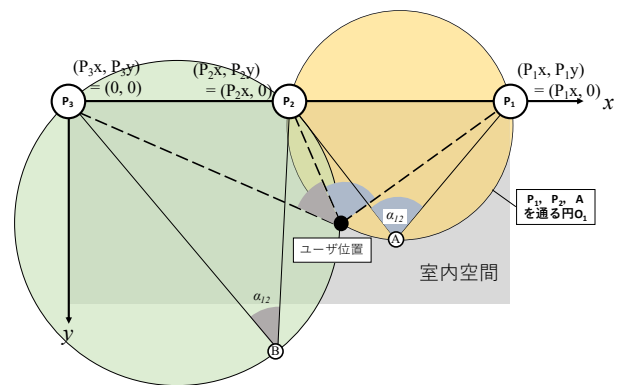


図4 ユーザ位置の候補となる円の重なり

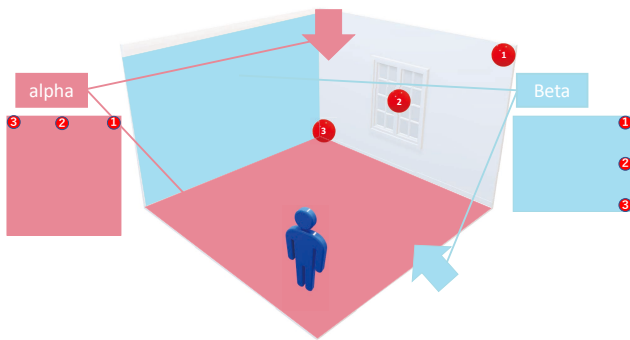


図3 提案手法における空間の表現

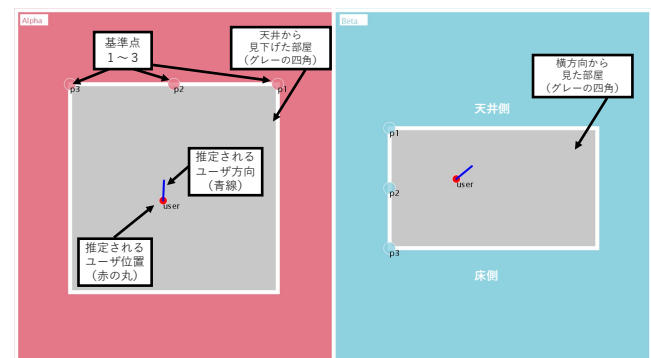


図5 座標算出アプリケーションの表示

中央・左下を採用し、順に基準点1・2・3とする(図3参照)<sup>\*1</sup>。

スマートフォンアプリケーションは、事前のインストールを不要にするために Web アプリケーションとして実装した。回転角は JavaScript の Device Orientation イベントを用いて取得できるスマートフォンの水平方向の回転角(図2の $\alpha$ 角)、及び鉛直方向の回転角(図2の $\beta$ 角)を用いる。このアプリケーションの画面には、基準点に対応したボタンが表示される。ユーザは各基準点にスマートフォンを向けて対応するボタンを押下することで上記の値を取得する。

座標算出アプリケーションではユーザ位置の推定と、推定されるユーザ位置の表示を行う。座標の算出は、基準点1-スマートフォン-基準点2の成す角と、基準点2-スマートフォン-基準点3の成す角から2つの外接円を導出し(図4参照)、その交点から位置を推定する<sup>\*2</sup>。座標算出アプリケーションの左側には部屋を上部から見た間取り図が、右側には部屋を横方向から見た間取り図が各々表示されている(図5参照)。左側の上部から見た図では $\alpha$ の変化に、右側の横から見た図では $\beta$ の変化に基づいてスマートフォンの向きが表示される。

## 4. 検証

### 4.1 提案手法の座標推定の精度

まず、提案手法の座標推定の精度を測定する実験を行った。提案手法では手法に起因する誤差のほかに、ユーザが

基準点との対応付けを行う際に発生する誤差が影響すると考えられるため、この実験ではユーザの振り舞いに起因する誤差を排除してシステムの精度を測定した。本稿における実験は $\alpha$ 角を用いて推定される、左手系の座標軸における $zx$ 平面(i.e., 部屋を上から見下ろした平面)を対象にして行った。

この実験は、端末が指すポイントを正確に把握するために、スマートフォンの中央部にレーザーポインタを結合した端末を用いて行った。この端末を用いて基準点とスマートフォンの回転角との対応付けを行う際に装置の空間上の座標が変化しないよう、三脚に端末を固定することで回転動作のみが可能な状態にして行った。これを用いて基準点と回転角との正確な対応付けによる位置推定を行い、システムが算出した座標と三脚を設置した座標とを比較することで座標推定の精度を確認した。これを室内空間内部の9箇所(図6参照)で行い、精度を算出した。

実験では、壁とパーティションによって区切られた $4.35\text{m} \times 3.85\text{m}$ の空間を部屋に見立てて行った。位置推定のために三脚を設置する座標( $S_1$ から $S_9$ )は、室内空間内で等間隔に定めた。実験に用いた端末はiPhone11(Apple Inc.製)であった。

実験で得られた三脚を設置した各地点の座標とシステムが推定した座標との誤差は最大 $0.088\text{m}$ (地点 $S_7$ )、最小 $0.004\text{m}$ (地点 $S_2$ )、平均 $0.030\text{m}$ であり、各地点の座標と誤差との間に特定のバイアスは見られなかった。この結果

<sup>\*1</sup> 各基準点には実際に目印となるマーカーを貼付する必要は無い。

<sup>\*2</sup> ユーザ位置の算出方法の詳細は文献[12]を参照されたい。

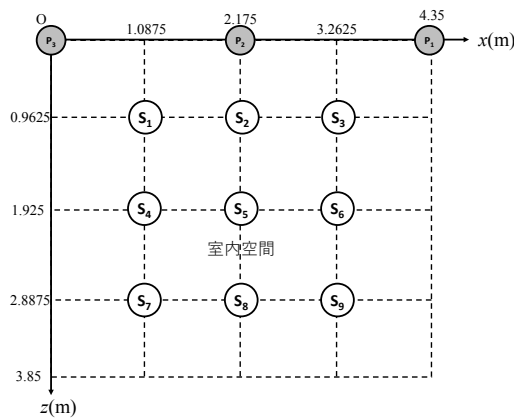


図 6 実験を行った座標 ( $S_1$  から  $S_9$ )

から、提案手法の誤差は、ユーザの姿勢によって生じる誤差 [4] に比べ十分に小さく、IoT 製品の操作を目的とした位置推定手法としては十分な精度であるといえる。

#### 4.2 ユーザによる位置推定の精度

ユーザ実験は、前節の実験同様、図 6 に示した環境で行った。実験の手順を以下に示す。

- (1) 実験者が、提案手法の操作方法と「位置を移動するごとにキャリブレーションを行う」という本手法の前提条件を実験参加者に伝える。
- (2) 実験参加者は練習として一度、位置推定の手順を行う。
- (3) 実験者が図 6 に示した  $S_1$  から  $S_9$  地点のうち、計測が行われていない地点をランダムに指示し、実験参加者はその地点に移動する。
- (4) 実験参加者は移動した地点で再度位置推定の手順を実行する。
- (5) 全ての地点での計測が終了していれば実験を終了し、未計測の地点があれば (3) 以降の手順を再度行う。

実験には 20 から 25 歳の男女 13 名が参加した。実験参加者に謝金は与えられなかった。ユーザがスマートフォンを保持する位置や姿勢によって結果が影響を受けることが想定されるため、実験参加者の普段の利き手をアンケートで、実験時のスマートフォンの持ち方など操作方法を実験者が目視で確認した。実験参加者のうち、12 名の利き手は右で、1 名の利き手が左であった。また、スマートフォンの操作手法は、右手でスマートフォンを持って右手でタップしていた参加者が 4 名、左手でスマートフォンを持って右手でタップしていた参加者が 9 名であった。

実験で得られた各計測点における提案手法の位置推定精度を図 7 に示す\*3。実験の結果、 $xz$  平面を対象とした位置推定の誤差は平均 0.26m であった。誤差の平均が最大と

\*3 実験参加者の意図しないタイミングでスマートフォンの画面に指が触れ、適切でないデータが取得された事例があったため、文献 [20] を参考に外れ値を除去している。

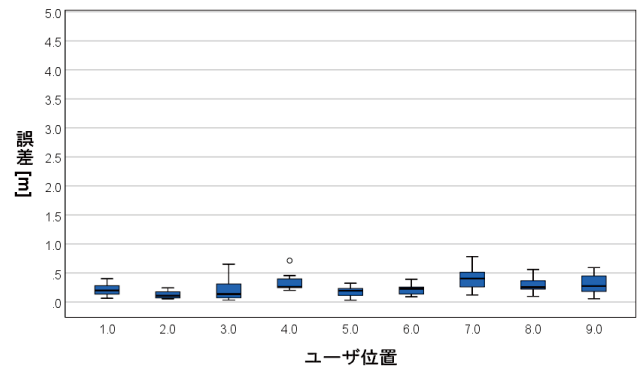


図 7 ユーザによる座標推定の実験結果

なったのは  $S_7$  地点で、0.40m であった。ユーザ実験の平均は、文献 [12] で行ったシミュレーションによる位置推定の平均誤差 (1.29m) に比べて低かった。シミュレーションで推定された誤差に比べて実験で得られた誤差が下回るという傾向は全ての観測地点で確認された。

また、シミュレーションでは、基準点からの距離が遠くなるほど精度が低下するという結果を得たが、本実験の結果ではこうした傾向は確認できなかった。

一方で、基準点を設置した壁からの距離が等しい点の組においては、中央の点の誤差が他の点に比べて低くなる傾向が観察された。例えば、 $S_4$ 、 $S_5$ 、 $S_6$  はいずれも壁からの距離が同一であるが、これらの点では  $S_5$  の誤差が最小であった。この傾向は、文献 [12] で行ったシミュレーションと一致した。このことから、ユーザの位置が空間の中央であるほど精度が向上することが提案手法の特性と考えられる。

#### 4.3 オブジェクト選択の精度に関する評価

次に、提案手法を用いてユーザが意図したオブジェクトを選択できるか検証するため、提案手法のポインティング精度を評価した。提案手法では推定したユーザ位置をもとにポインティングした位置を識別するため、位置推定の誤差や、ユーザの特性や姿勢による誤差、スマートフォンに搭載されたセンサの誤差などが複合的にポインティング精度に影響すると推察される。

実験は、4.2 項の実験と併せて行い、同一の実験参加者を対象とした。実験参加者は 4.2 節の位置推定実験の (4) の手順の後、12 箇所のターゲットをポインティングするというタスクを課した。

ポインティングの誤差は、提案手法により算出されたユーザの位置を起点とするユーザが向いている方向に伸びる半直線と、ポインティングの目標となるターゲットとの距離とした (図 8 参照)。提案手法において三次元空間は、 $xz$  平面および  $yz$  平面として表現され、それぞれが独立した処理により平面上でのユーザの位置・姿勢を計測する。 $xz$  平面および  $yz$  平面は直交するため、それぞれの平面に



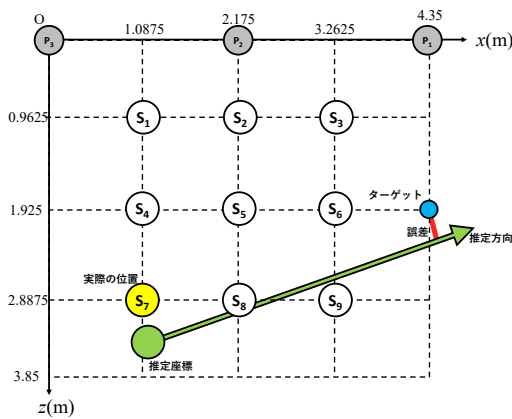


図 8 ポインティングの誤差の測定

における提案手法の誤差を算出し、二乗和の平方根を取ることによって三次元空間における提案手法の誤差とした。

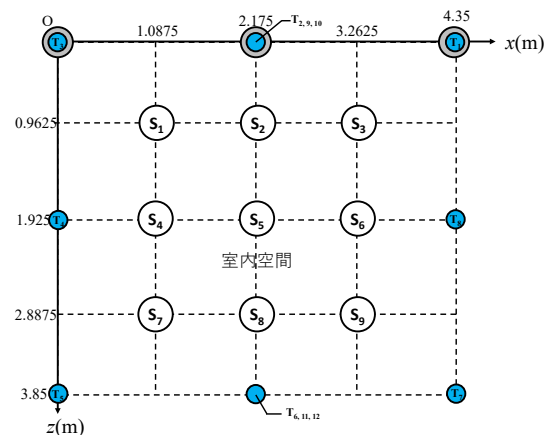
実験は図 9 に示した環境で行った。これは図 6 と同一の空間に、ポインティングを行う目標となる 12 箇所のターゲット ( $T_1$  から  $T_{12}$ ) を設置することで構成されている。前節の実験では  $\alpha$  角を用いて識別される  $xz$  平面を対象としていたが、本実験では  $\beta$  角を併せて用いることで、三次元空間内の実験参加者のポインティングを対象とする。図 9(a) は実験を行う空間とターゲットを  $xz$  平面で表しており、図 9(b) は  $yz$  平面による表現である。

実験は実験参加者 13 名  $\times$  計測値点 9 箇所  $\times$  ターゲット 12 箇所で行ったため、総試行回数は 1404 回であった。一部のデータが欠損データとなっていたためこれらを除き、計 1337 回の試行結果を分析対象とした。実験の結果、提案手法による三次元空間を対象としたポインティングの誤差は平均 0.89m であった。また、 $\alpha$  回転角を用いて  $xz$  平面を対象とした推定の誤差は平均 0.20m、 $\beta$  回転角を用いて  $yz$  平面を対象とした推定の誤差は平均 0.83m であった。

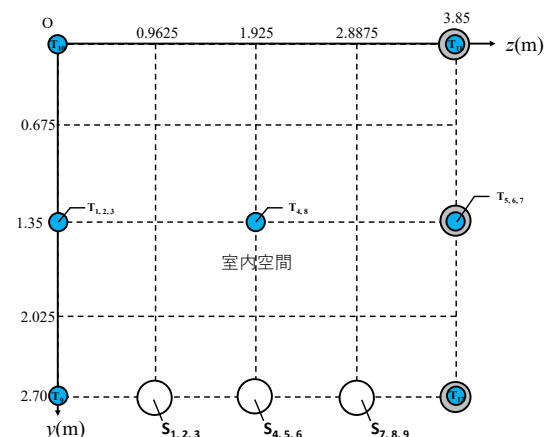
実験結果について、計測位置別に分析を行った。実験結果には外れ値が含まれていることが想定されるため、得られた値について計測地点ごとに、文献 [20] に倣い、式 (1) を用いて外れ値の除去を行った。

$$\begin{aligned} \text{下限値} &= \text{第 1 四分位数} - 1.724 \times \text{四分位範囲} \\ \text{上限値} &= \text{第 3 四分位数} + 1.724 \times \text{四分位範囲} \end{aligned} \quad (1)$$

図 10 は実験により算出されたポインティングの誤差を、計測位置別に示したものである。誤差の平均値が最大となった地点は  $S_1$  地点で、平均 1.00m であった。文献 [12] で行った位置推定のシミュレーションで示唆されたような、ユーザの位置が基準点から遠くなるにつれ位置推定の精度が低下する問題による影響は認められなかった。一方で、 $S_1$ 、 $S_4$ 、 $S_7$  地点でのポインティング精度が低い結果となった。 $xz$  平面を対象とした推定ではこのような空間的偏りは認められず、 $yz$  平面を対象とした推定の結果に影響を受けたものである。 $yz$  空間の推定精度が低い原因につ



(a)  $xz$  平面

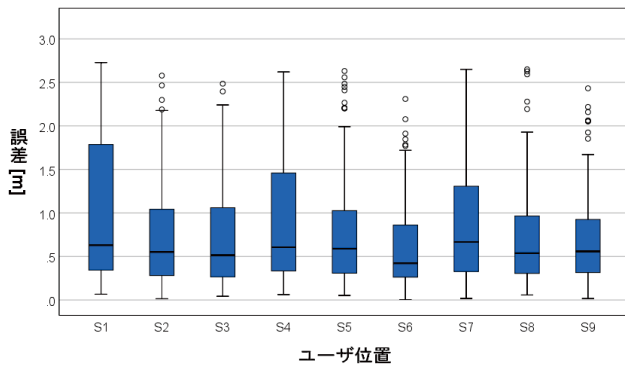


(b)  $yz$  平面

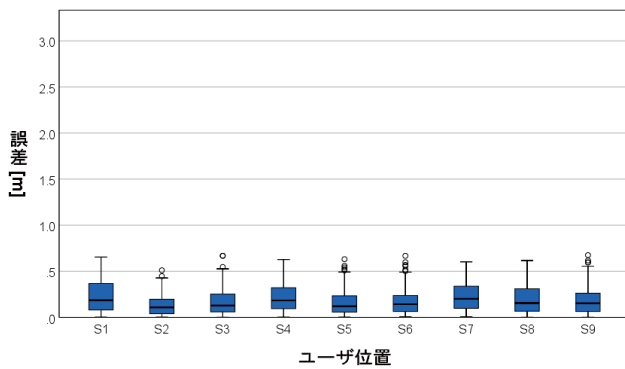
図 9 ポインティングの誤差を測定するためのターゲットの設定

いては今後さらなる調査を要する。

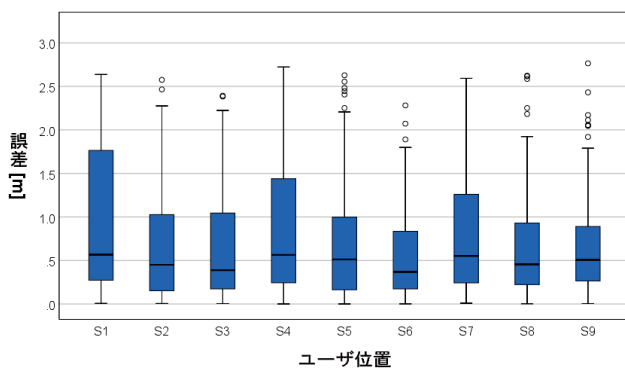
次に、ターゲット別に分析を行う。実験結果に対し、計測位置別の分析同様、ターゲットごとに式 (1) を用いて外れ値の除去を行った。図 11 は実験により算出されたポインティングの誤差を、ターゲット別に示したものである。誤差が最大となったターゲットは  $T_{11}$  地点で、平均 1.50m であった。 $T_1$  から  $T_3$  は、基準点を設置した平面上にあるため位置推定の手順の際と同様の方向を向くことで正確にポインティングが行えたこと、高さは部屋の中間に位置するため実験参加者の目線の高さに近く仰角方向の変化が小さかったことなどから誤差が小さい結果となったと考えられる。また、 $T_4$  から  $T_8$  はユーザが  $\alpha$  方向に回転しポインティングを行う必要があるターゲットのため、基準点に向けて位置推定の手順を行った際の自身のポインティングを行う感覚からずれが生じ、精度が低下したと考えられる。高さ方向では、床の高さに設置されている  $T_9$  と  $T_{12}$  は同様の誤差を示しているのに対し、天井の高さに設置されている  $T_{10}$  と  $T_{11}$  では、 $T_{10}$  の誤差が小さい結果となった。 $T_{10}$  は基準点  $P_1$  地点の隣にあるターゲットである。これらのことから、ユーザは  $\beta$  方向の回転を行う際もポインティン



(a) 三次元空間における結果

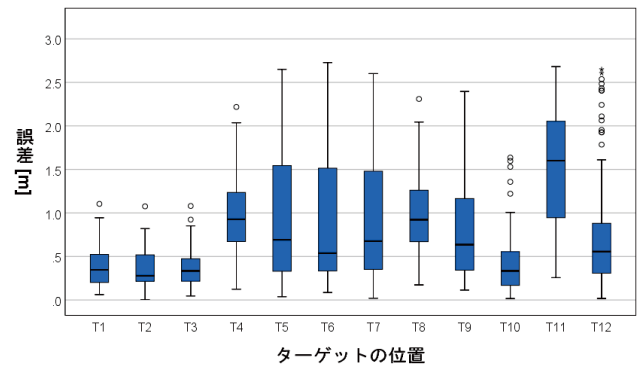


(b)  $xz$  平面における結果

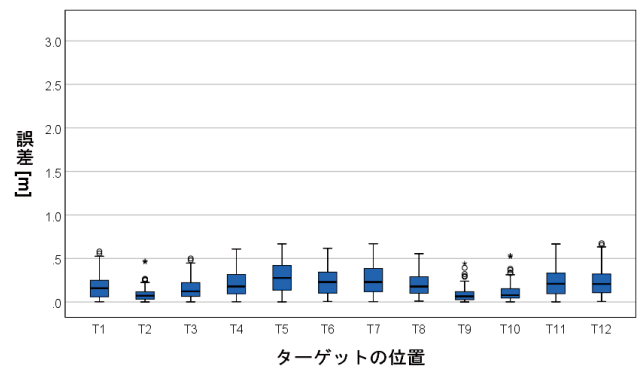


(c)  $yz$  平面における結果

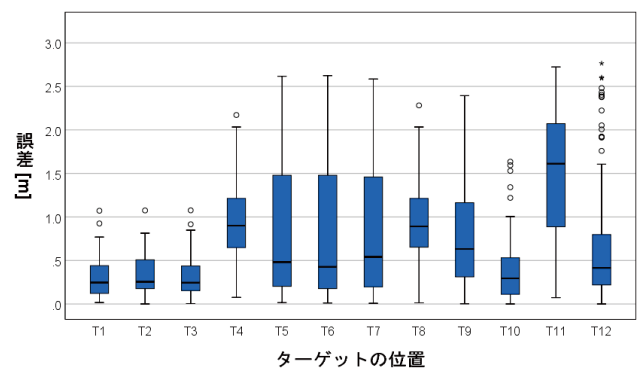
図 10 各計測地点におけるポインティング誤差



(a) 三次元空間における結果



(b)  $xz$  平面における結果



(c)  $yz$  平面における結果

図 11 各ターゲットにおけるポインティング誤差

グの精度が低下するが、基準点付近のポインティング精度の低下が抑えられることが示唆される。

これらの実験結果から、 $xz$  平面と  $yz$  平面を対象としたポインティング位置の推定では精度が異なり、その結果三次元を対象としたポインティング位置の推定は精度の低い  $yz$  平面の推定結果による影響を受けていることが分かる。

## 5. 提案手法を用いた操作命令の入力

提案手法では、IoT 製品を操作する際には、製品をポインティングして選択した後、スマートフォン上で操作命令の入力を行うことを想定している。著者らはこれまでに、

平面上に設置された IoT 製品を対象として、ユーザがポインティングにより選択している IoT 製品によって、スマートフォンのディスプレイに表示されるコントローラを操作することで、ポインティングによる選択と GUI による機器操作を両立した手法を提案している [8]。同様に、本研究により実現する三次元空間を対象としたユーザの位置・姿勢計測を用いた IoT 製品の選択操作においても、ユーザが選択している製品に応じてコントローラを表示することで、GUI による操作命令の入力が可能である。

これに加えて、現在利用していないジャイロセンサの  $\gamma$  回転角を用いた操作を検討する。ジャイロセンサにより取

得可能な回転角には  $\alpha$  角,  $\beta$  角,  $\gamma$  角の三種類がある.  $\gamma$  角はスマートフォンを持った際, 手首を回転させる方向の回転である. 提案手法では  $\alpha$  および  $\beta$  角を用いているが, 位置推定には  $\gamma$  角は活用されていないため, 操作命令の入力に活用できる.

以下のような活用が考えられる.

### 5.1 ボタンとしての活用

スイッチの ON/OFF や, コンピュータマウスのクリックなど, 閾値を上回る入力によって状態が遷移する操作は, 特に家電製品の操作などで多く取り入れられている.  $\gamma$  角を用いた操作では,  $\gamma$  回転角の値に閾値を設定することで, ボタンの操作が実現できる (図 12 参照). これにより, 例えば, 提案手法を用いて電灯へのポインティングを検出し, 電灯が選択された状態でユーザがスマートフォンを右に大きくひねることで ON に, 左に大きくひねると OFF に切り替える, といった操作が可能である. また, 右側への大きなひねりを右クリック, 左側への大きなひねりを左クリック, といったように操作との対応付けを行えば, コンピュータマウスと同様の操作が実現できる. 更に, 複数の閾値を設定することで, 複数の選択肢から一つの選ぶラジオボタンのような活用も可能である.

### 5.2 ボリュームとしての活用

$\gamma$  角の変化量を活用することで, ボリュームを操作することが可能である (図 13 参照). これにより, 例えば, ユーザがダイヤルを回すように手首をひねることで, ひねりの量に応じて電灯の明るさを調節する操作や, GUI 操作においてページのスクロール量を調節する操作が実現できる.

また, 複数のオブジェクトをまとめて指示するといったように, 領域を選択する操作を必要とする場合も多い. この領域選択の操作に  $\gamma$  角の変化量を用いることで, 例えば右方向へのひねりが大きくなるほど, 広い領域をまとめて選択する, といった操作が実現する (図 14 参照).

同様に, ポインティングの深度の設定にも活用できる. ユーザがポインティングにより製品を選択する場合, 一般的にはポインティングが行われている方向にあるオブジェクトのうち, ユーザに最も近いオブジェクトを示していると考えられるため, 深度を考慮することなく機器選択が実現する. しかし, ユーザが空間内部のオブジェクト配置を詳細に認識している場合は, 他のオブジェクトの影に隠れている対象を選択する場合は想定され, オクルージョンの問題が発生する. その際,  $\gamma$  角の量に応じて深度を選択することで, 深度方向の選択操作を実現する (図 15 参照).

## 6. おわりに

本研究では, スマートフォンに標準的に搭載されたセンサのみを用いて取得される回転角を用いて, ユーザの位置・

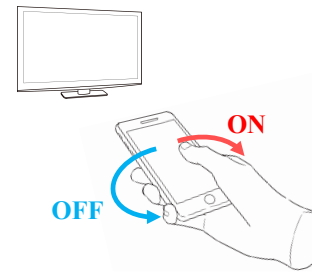


図 12 ボタン操作

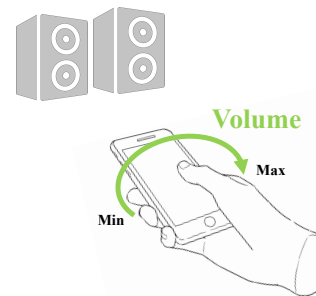


図 13 ボリューム操作

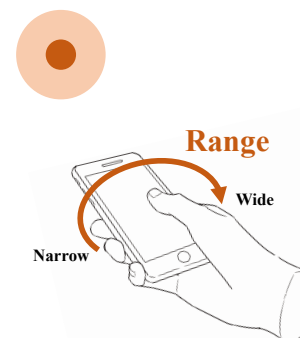


図 14 領域選択

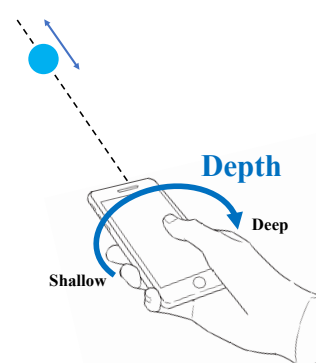


図 15 深度操作

姿勢を推定する手法を提案し, 実験を通して提案手法による位置・姿勢推定の精度を明らかにした.

提案手法によるユーザの位置推定では, 誤差が最大となった地点でも, 平均 0.40m の精度で推定が可能であることがユーザ実験により確認された. また, 基準点からの距離が遠くなった場合でも提案手法の位置推定の精度の大幅

な低下は確認されなかった。一方、ポインティングの認識精度については、平均誤差が0.89mであり、ユーザの姿勢が変化することで、推定の精度が低下することが示唆された。この点については、今後改善を検討する。

提案手法は室内空間においてIoT製品の選択操作を行うことを目的としたが、簡便で、ある程度スケーラブルな手法であることから、例えば巨大な建造物の検診において破損箇所の座標をポインティング動作のみで記録するなど、新たな活用が可能であると考えられる。

## 参考文献

- [1] Arias, J., Zuloaga, A., Lázaro, J., Andreu, J. and Astarloo, A.: Malmuki: An RSSI based ad hoc location algorithm, *Microprocessors and Microsystems*, Vol. 28, pp. 403–409 (2004).
- [2] Bolt, R. A.: “Put-That-There”: Voice and Gesture at the Graphics Interface, *Proc. 7th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*, pp. 262–270 (1980).
- [3] Davidson, P. and Piché, R.: A Survey of Selected Indoor Positioning Methods for Smartphones, *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, Vol. 19, No. 2, pp. 1347–1370 (2017).
- [4] Kang, R., Guo, A., Laput, G., Li, Y. and Chen, X. A.: Minuet: Multimodal Interaction with an Internet of Things, *Proc. 7th Symposium on Spatial User Interaction*, (online), DOI: 10.1145/3357251.3357581 (2019).
- [5] Lanzisera, S., Zats, D. and Pister, K.: Radio Frequency Time-of-Flight Distance Measurement for Low-Cost Wireless Sensor Localization, *Sensors Journal, IEEE*, Vol. 11, No. 3, pp. 837–845 (2011).
- [6] Nurminen, H., Ristimäki, A., Ali-Löytty, S. and Piché, R.: Particle Filter and Smoother for Indoor Localization, *International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation*, (online), DOI: 10.1109/IPIN.2013.6817903 (2013).
- [7] Sakai, T. and Hashimoto, S.: Optical beam interface for mobile robot control, *Proc. 13th International Symposium on Artificial Life and Robotics*, pp. 378–381 (2008).
- [8] Sato, K. and Matsushita, M.: Object Manipulation by Absolute Pointing with a Smartphone Gyro Sensor, *Proc. 7th ACM Symposium on Spatial User Interaction*, (online), DOI: 10.1145/3357251.3360006 (2019).
- [9] Vandermeulen, D., Vercauteren, C., Weyn, M. and Vandermeulen, D.: Indoor localization using a magnetic flux density map of a building, *The Third International Conference on Ambient Computing, Applications, Services and Technologies*, pp. 42–49 (2013).
- [10] Wilson, A. and Shafer, S.: XWand: UI for Intelligent Spaces, *Proc. SIGCHI conference on Human factors in computing systems*, pp. 545–552 (online), DOI: 10.1145/642611.642706 (2003).
- [11] Zhang, B., Chen, Y.-H., Tuna, C., Dave, A., Li, Y., Lee, E. and Hartmann, B.: HOBS: Head Orientation-Based Selection in Physical Spaces, *Proc. 2nd ACM Symposium on Spatial User Interaction*, pp. 17–25 (2014).
- [12] 佐藤光起, 松下光範: スマートフォンの回転角を用いた三点測量によるユーザ位置の簡易測定手法, HCG シンポジウム 2020 論文集, B-1-1 (2020).
- [13] 佐藤光起, 松下光範: Bring Your Own Pointer : 複数の携帯端末による ad hoc なマルチポインティング手法, 情報処理学会論文誌, Vol. 62, No. 2, pp. 680–688 (2021).
- [14] 塚田浩二, 安村通晃: Ubi-Finger : モバイル指向ジェスチャ入力デバイスの研究, 情報処理学会論文誌, Vol. 43, No. 12, pp. 3675–3684 (2002).
- [15] 大木浩武, 峰野博史, 森信一郎, 水野忠則: 携帯端末に搭載された方位センサを用いた周辺機器選択手法の検討, 情報処理学会論文誌コンシューマ・デバイス&システム (CDS), Vol. 1, No. 1, pp. 22–27 (2011).
- [16] 下村駿平, ギエルモエンリケズ, 三輪貴信, 澤田秀之, 橋本周司: レーザポインタによるジェスチャを用いた複数機器の操作, *インタラクシオン 2018*, pp. 289–294 (2018).
- [17] 米田 純, 荒川 豊, 玉井森彦, 安本慶一: 高精度屋内位置情報を利用した直感的な家電操作手法の提案, 情報処理学会論文誌コンシューマ・デバイス&システム (CDS), Vol. 5, No. 1, pp. 30–37 (2015).
- [18] 鈴木惇也, 秋山征己, 田中 博, 五百蔵重典: スマートフォン内蔵センサを用いた歩行位置推定に関する基本実験と評価, 情報処理学会研究報告, Vol. 2012-ITS-51, No. 10, pp. 1–7 (2012).
- [19] 岩崎陽平, 河口信夫, 稲垣康善: Azim : 方向センサを用いたユビキタス位置情報サービス, 情報処理学会研究報告, Vol. 2003, No. 115, pp. 25–30 (2003).
- [20] 野呂竜夫, 和田かず美: 統計実務におけるレンジチェックのための外れ値検出方法, 統計研究彙報, No. 72, pp. 41–53 (2015).