

室内空間における スマートフォンを用いたユーザ位置・方向の推定

佐藤 光起^{1,a)} 竹村 孟^{1,b)} 松下 光範^{1,c)}

受付日 2021年11月16日, 採録日 2022年6月14日

概要: スマートフォンに標準的に搭載されたセンサを用いて, 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. 室内空間の様々な生活家電が IoT 技術により, スマートスピーカなどを介したシームレスな操作が可能になっているが, 設定変更などの複雑な操作や複数人による同時操作は難しい. 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インタラクションを実現することで, 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指示方向を推定する. 本稿では, 提案手法による位置・指示方向の推定精度およびその特性についてユーザ実験を通じて明らかにする.

キーワード: 位置推定, IoT, スマートフォン, ジャイロセンサ

Estimating User Position and Direction in Indoor Space Using Smartphone

KOKI SATO^{1,a)} HAJIME TAKEMURA^{1,b)} MITSUNORI MATSUSHITA^{1,c)}

Received: November 16, 2021, Accepted: June 14, 2022

Abstract: We propose a method for estimating the user position and user's pointing gesture with a smartphone. In recent years, IoT technologies enable the seamless operation of devices, but it is difficult for multiple users to perform complicated operations, such as changing settings or operating at the same time. Therefore, we solve this problem by identifying the device to be operated and realizing the interaction of incorporating the setting function with the smartphone. In the method, the spatial coordinates of the user and the indicated direction are estimated using the difference in angles when reference points in the room are pointed with a smartphone. In this paper, we clarify the accuracy of the proposed method.

Keywords: location estimation, Internet of Things, smartphone, gyro sensor

1. はじめに

Internet of Things (IoT) 関連技術の発展にともない, 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. たとえば, スマートスピーカ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, また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を通じて指示を与えることも難しい.

この解決の1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ある [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.

¹ 関西大学

Kansai University, Takatsuki, Osaka 559-1095, Japan

a) k081485@kansai-u.ac.jp

b) k689493@kansai-u.ac.jp

c) mat@res.kutc.kansai-u.ac.jp

さらにポインティングによる機器への入力はその直感性から容易にユーザの意図を伝達でき、新たなインタラクションを実現する。たとえばロボット掃除機に特定の箇所をポインティングで指示して掃除させることや、会議室の天井に備えられた多数の照明のうち自身の上部に設置された照明のみを自在に選択して切り替えること、多数の照明を囲うようにポインティングにより選択し、ペイントツールの領域選択のように複数の照明を一括で選択することなどは、ポインティング特有の操作方法である。

一方で、ポインティングによる操作手法の多くは高性能なユーザの位置・方向を計測するセンサと、ユーザが装着や把持する操作端末の組合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環境整備にかかるコストが大きい。著者らはこれまでにこれらの問題の解決を目指し、スマートフォンのみを用いてユーザの位置・方向を推定する手法について提案している [12], [13]。本研究が提案する手法は、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などから得られる回転角の情報を用いてユーザの位置・方向の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、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、本研究のこれまでの成果を総括し、提案手法の精度について検証する。

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コネクションを確立することで指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高んでしまう。

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。大木らはスマートフォン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精度が低下する問題があり、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]), などが利用される [3]。

このうち (1) および (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ともなう場合は、誤差が蓄積されるため、精度が低下する。(3) は他の技術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。また、精度の低下につながる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。

3. ユーザ位置および方向の推定方法

3.1 推定の手順

提案手法では、2.2 節で述べた (2) の技術であるスマートフォンに標準搭載されているセンサから得られる回転角と、(3) の技術である室内間の間取り図を用いて、ユーザ位置の推定を行う。具体的には、あらかじめ室内空間に 3 カ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る。ユーザがスマートフォンで各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。

ユーザがと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・方向を推定する。

3.2 システム構成

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、サーバ、および座標算出アプリケーションで構成される。また、推定対象となるユーザの居る空間には座標が既知の基準点を設定する。

スマートフォンアプリケーションは、スマートフォンに搭載されたセンサを用いて回転角を計測する役割と、ユーザに GUI を提供する役割を果たす。スマートフォンアプリケーションは、提案手法の目的が既存のスマートフォンを用いた位置・方向の推定の実現であることに鑑みて、事前のインストールが不要な Web アプリケーションとして実装した。回転角は JavaScript の DeviceOrientation イベントを用いて、スマートフォンの水平方向 (図 2 の α 角)、および鉛直方向 (図 2 の β 角) の回転角を取得する。スマートフォンアプリケーションの画面には、空間に設定された基準点に対応するボタンが表示される。ユーザが各基準点にスマートフォンを向け、対応するボタンを押下することで、システムは基準点と回転角の値を取得し、対応付ける。

サーバは、スマートフォンアプリケーションと座標算出

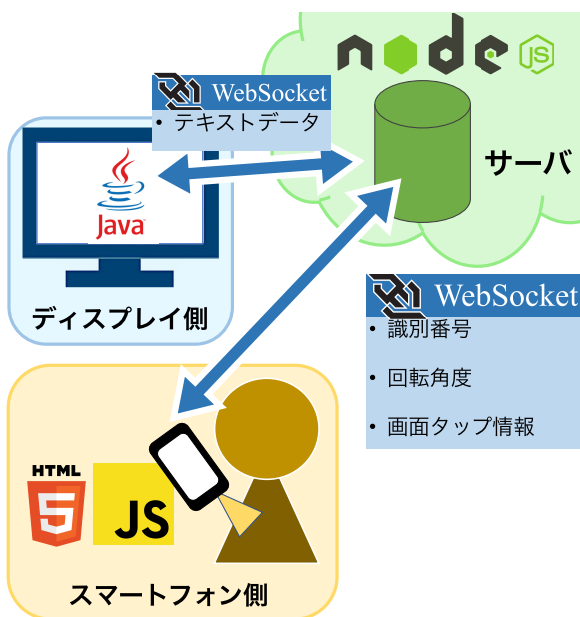


図 1 システム構成図

Fig. 1 The system configuration.

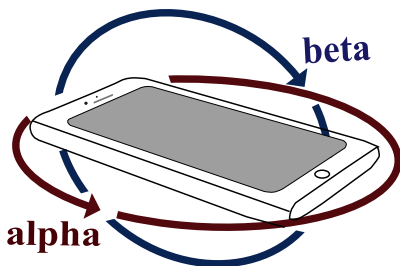


図 2 スマートフォンにおける回転角の座標系

Fig. 2 The coordinate system in a smartphone.

アプリケーションの通信を中継する。サーバを各アプリケーションと分けることで、運用・保守の容易化を図る。

座標算出アプリケーションは、スマートフォンアプリケーションで取得された回転角や、回転角に対応する基準点の座標、および空間の間取り図からユーザの位置・方向を算出し、算出されたユーザ位置を表示する (図 3 参照)。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 (xz 平面) が、右側には部屋を横方向から見た間取り図 (yz 平面) が表示されている。左側の上部から見た図は α の変化に、右側の横から見た図は β の変化に基づいてユーザの位置・方向が表示される。また、空間の間取り図に、操作対象となる機器の位置や操作可能な項目を含めることで、選択され操作可能な機器を認識し表示することや、機器の情報や GUI に関する要素を、双方向通信によりスマートフォンアプリケーションに通知することができる。

基準点は空間内の任意の点に対して、その点と他のすべての基準点を通る球面が形成されないことを制約に、3カ所以上設置する。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・中央・左下を採用し、順に基準点 1・2・3 とする (図 4 参照)*1。また、以降本稿では、図 4 に示す空間において、図中に示す O を原点

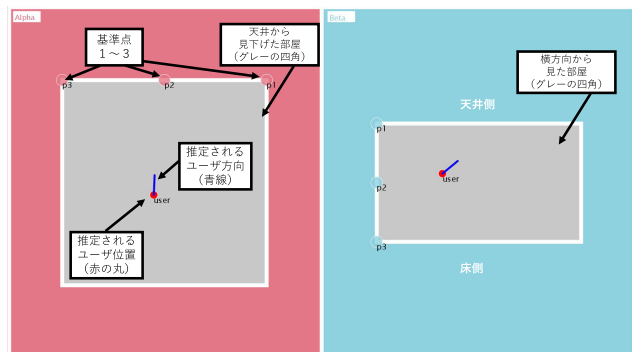


図 3 座標算出アプリケーションの表示

Fig. 3 A display side application.

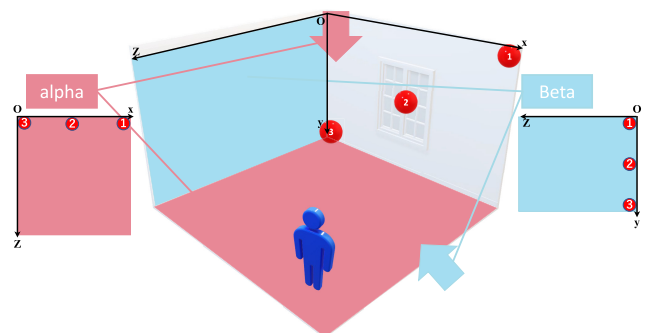


図 4 提案手法における空間の表現

Fig. 4 The display of space in the proposed method.

*1 各基準点はユーザが場所を認識できればよく、冷蔵庫やエアコンなど位置が固定されている機器を目印にその座標を基準点とすれば、実際にマーカを貼付しなくてもよい。

とする。原点 O は xz 平面において基準点 3 と座標が等しく、 yz 平面において基準点 1 と座標が等しい。

3.3 位置・方向推定のアルゴリズム

座標算出アプリケーションで行われるユーザ位置・方向の算出では、まず回転角からユーザの座標を算出し、次にその座標と回転角からユーザの方向を算出する。

座標算出方法の概要を図 5 に示す。図 5 は、図 4 における空間の、 xz 平面（空間を上部から見下ろした平面）を示し、 P_1, P_2, P_3 はそれぞれ基準点を示す。また、「ユーザ位置」とした点は、システムにとって未知の、ユーザが実際に存在する座標を示す。座標の算出ではまず、スマートフォンアプリケーションにより計測された回転角から、ユーザが各基準点に向いた際の α 回転角の差を算出する。ここでは、基準点 1-スマートフォン-基準点 2 のなす α 角が α_{12} であったとする。次に、 P_1-A-P_2 のなす角度が α_{12} となるような点の集合を求める。この集合は、図 5 に示されるように P_1 および P_2 を通る円の円周である。この円の導出方法の例として、基準点 1・2 を結ぶ直線の垂直二等分線上の点（図 5 の点 A, B ）を用いて算出する方法を示す。なお、図 5 から点 B がユーザ位置となり得ない円上にあることは見てとれるが、システムにとってそれは未知であるため、点 A, B ともに算出した後、適当な方を採用する。まず、線分 P_1P_2 の垂直二等分線上にあって、 $\angle P_1AP_2$ が α_{12} となる点を求める。 $\angle \beta = \angle MP_1A$ について、線分 P_1P_2 の中点を M とすると、 $\triangle MP_1A \equiv \triangle MP_2A$ であるため、

$$\angle \beta = \frac{\pi - \alpha_{12}}{2} \tag{1}$$

で求められる。ここで $\triangle P_1P_2A$ において、余弦定理より辺 P_1A の長さは、

$$P_1A = \sqrt{\frac{(P_1P_2)^2}{2 - 2 \cos \alpha_{12}}} \tag{2}$$

となる。よって点 A は、線分 P_2P_1 と線分 AP_1 のなす角

が β で、点 P_1 から P_1A の距離にある点である。また直線 P_2P_1 の傾き m は、

$$m = \arctan 2(P_2z - P_1z, P_2x - P_1x) \tag{3}$$

により求めることができる。ただし $\arctan 2(z, x)$ は、 $\arctan(z/x)$ を $(-\pi, \pi]$ の範囲で求める関数である*2。ここで求めた m を、次式により $[0, 2\pi)$ の範囲に変換する。

$$m = m + \pi \quad (m < 0) \tag{4}$$

以上より、点 A の座標 (Ax, Az) は、

$$Ax = P_1x + P_1A \cos(m + \beta) \tag{5}$$

$$Az = P_1y + P_1A \sin(m + \beta) \tag{6}$$

点 B の座標 (Bx, Bz) は、

$$Bx = P_1x - P_1B \cos(m + \beta) \tag{7}$$

$$Bz = P_1y - P_1B \sin(m + \beta) \tag{8}$$

として求めることができる。これを、すべての基準点の組において行う。基準点が 3 カ所であった場合、6 つの円が求められる。求めた円をもとに、相異なる基準点の組から生成された円のすべてが交わる点を求め、そのうち、室内空間内の座標に存在する点の座標を、ユーザ位置と推定する*3。

またシステムは、ユーザが各基準点に向いた際の回転角を取得している。そのため、座標推定後は、各基準点にユーザが向いた際の回転角と、取得された回転角を比較することで、ユーザの方向を算出することができる。

以上の手順により、システムはユーザの位置および方向を認識し、またそれと空間の間取り図を比較することで、ユーザが選択している機器を識別することが可能である。

ここでは α 角による推定方法について述べたが、 β 角においてもその推定方法は同様である。ただし、 β 方向の回転は仰角・俯角方向の回転であるため、一般に、ユーザの β 方向の回転量には制約がある。たとえばユーザが斜め後ろ方向を示す際などは、 β 方向のみの回転によりその方向を向くことは困難であり、一般にはまず α 方向の回転で後ろを振り返り、その後 β 方向の選択を行うと考えられる。そのため、 α 回転における方向が閾値（たとえば 0° および 180° ）を越える変化をした場合に振り返り動作が行われたと判断して、 β による推定においても方向を z 軸対称に変換することで、ユーザの動作に整合した推定を実現できる。

4. 検証

4.1 検証を行う対象

提案手法では位置推定と、それに基づいた方向推定とを

*2 https://processing.org/reference/atan2_.html (参照 2022-02-26)

*3 アルゴリズムの詳細については文献 [12] を参照されたい。

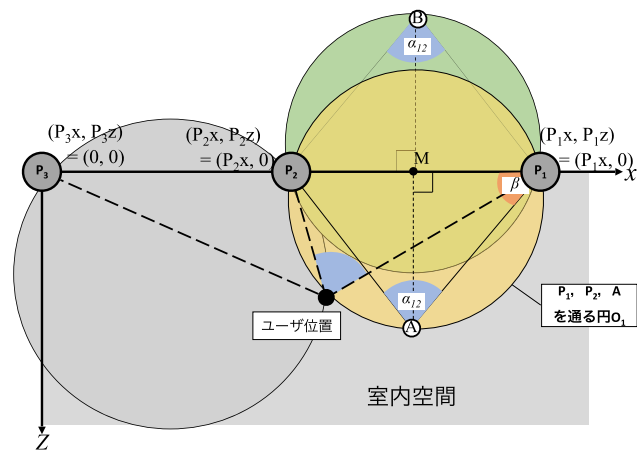


図 5 ユーザ位置の候補となる円

Fig. 5 Candidate circles of the proposed method.

順に行い、ユーザの選択する機器を判定する。ところで、2.2 節で述べたように室内空間のユーザ位置の推定は様々な手法が提案されているが、それぞれに課題があり、確立された手法はない。そうしたなか、提案手法の位置推定の方法は、簡便な位置推定的手法として活用することが期待できる。そこで、提案手法における位置推定と、方向の推定とをそれぞれ検証する。これにより、提案手法が機器選択だけでなく、位置推定手法として貢献することを期待する。

本稿における座標推定に関する実験は、 α 角を用いて推定される、左手系の座標軸における xz 平面 (i.e., 部屋を上から見下ろした平面) を対象とした。これは検証において、被験者間の y 軸方向の座標の条件 (i.e., 被験者間の身長) の整合を図ることが困難であることによる。そのため、 β 角による位置推定の検証は実施していないが、その推定方法は α 角によるものと同一であるから、 α 角を対象とした検証によって、一定の知見を得ることができると考えられる。

一方で、方向推定の実験では、実験における計測結果に被験者間の y 軸方向の座標の条件が直接的には影響を与えない*4。そのため、方向推定の実験では、 α 角、 β 角の両者を用いて位置および方向の推定を行い、その検証を行った。

4.2 提案手法のシステム構成における座標推定の精度

提案手法による座標推定では、スマートフォンのセンサなどシステムを構成する要素と、ユーザの基準点を示す動作が不正確であることなどのユーザの振舞いなどに起因して誤差が生じると考えられる。

まず、提案手法そのものの特性を検証するため、ユーザの振舞いによる誤差を排除して座標推定の精度を測定した。この実験では、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精度を検証した。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、端末を三脚に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。この検証は室内空間内部の 9 カ所 (図 6 参照) で行った。実験では、壁とパーティションによって区切られた 4.35 m × 3.85 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 m (地点 S_7)、最小 0.004 m (地点 S_2)、平均 0.030 m (SD = 0.024) であり、

*4 実験における具体的な計測の対象については 4.4 節を参照されたい。

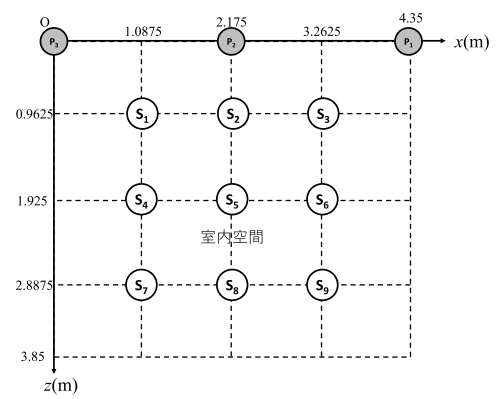


図 6 実験を行った座標 (S_1 から S_9)

Fig. 6 The measured coordinates of the experiment.

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 [21] に比べ十分に小さいことが確認された。よって、IoT 製品の操作を目的とした位置推定手法として提案手法は十分な精度を実現していると考えられる。

4.3 ユーザによる位置推定の精度

提案手法のシステム構成による座標推定は十分な精度であるから、提案手法の精度を検証するうえで、ユーザの振舞いによる誤差がその主題となる。

本研究ではこれまでに、提案手法において、ユーザの振舞いによる誤差をシミュレーションにより再現し、図 6 に示した環境の各点においてその精度を検証した [12]。シミュレーションでは Kang らの報告 [4] をもとに、ユーザのポインティング動作に平均 9.0° (SD = 4.7) の誤差があるとして、同様の分布を示す誤差を疑似的に発生させ、シミュレーションにおいて想定したユーザ位置から各基準点までの角度に当該誤差を加えて位置推定を行った*5。シミュレーションにおいて誤差が最大となった S_7 地点では平均 1.29 m (SD = 0.75) の誤差が示されている。また、シミュレーションでは S_1 から S_3 、 S_4 から S_6 、 S_7 から S_9 と、基準点から遠くなるにつれ誤差が大きくなることが確認されている。また、空間において z 方向の中央である S_2 、 S_5 、 S_8 地点では、それぞれ基準点からの距離が等しい他の 2 点に比べ、誤差が小さいことが確認された。たとえば、 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 の誤差が最小であることが確認されている。

これらを検証するため、実際のユーザによる実験を行った。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被験者に伝える。

(2) 被験者は練習として一度、位置推定の手順を行う。

*5 シミュレーションの詳細については文献 [12] を参照されたい。

- (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、被験者はその地点に移動する。
- (4) 被験者は移動した地点で再度位置推定の手順を実行する。
- (5) すべ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。被験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把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、被験者のふだん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。被験者のうち、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方は、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*6。実験の結果、 xz 平面を対象とした位置推定の誤差は平均 0.26 m (SD = 0.16) であった。誤差の平均が最大となったのは S_7 地点で、0.40 m (SD = 0.18) であった。ユーザ実験による誤差平均は、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 (1.29 m (SD = 0.75)) 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すべての観測地点で確認された。またシミュレーションで確認された、基準点からの距離が遠くなるほど精度が低下する傾向は、本実験では確認されなかった。提案手法ではシミュレーション結果が示すように、ユーザのポインティング動作における誤差が一定の角度であるならば、基準点からの距離が離れるほどにその誤差は拡大する。一方で、ユーザ実験においてその傾向が確認されたかたことは、ユーザのポインティング動作における誤差が一定では

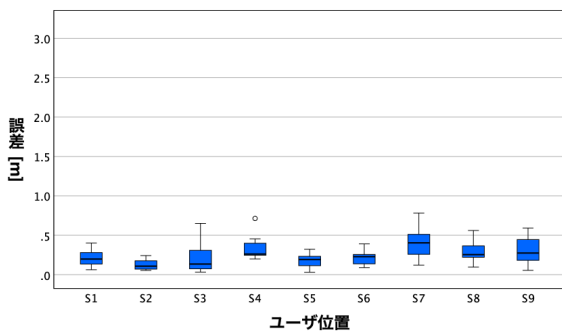


図 7 ユーザによる座標推定の実験結果
Fig. 7 The simulation results of estimating position.

*6 被験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。

ないことを示唆している。すなわち、キャリブレーションにおいて目標となる基準点からの距離が遠くなるほど、被験者は正確にキャリブレーションを行う傾向があると考えられ、この傾向により精度の低下が顕在化しなかったものと考えられる。

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、中央の点で誤差が低くなる傾向が観察され、この傾向はシミュレーションにおける結果と一致した。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は提案手法の特性と考えられる。

4.4 機器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機器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。そこで本稿では、提案手法が最終的に算出するポインティング位置と、実際のターゲットとの差であるポインティングの誤差を測定することで提案手法の評価を行う。

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延びる半直線と、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・方向を計測する。 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 4.3 項の実験とあわせて行い、同一の被験者を対象とした。被験者には 4.3 節の位置推定実験の (4) の手順の後、12 カ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、その誤差を測定した。実験は図 6 と同一の空

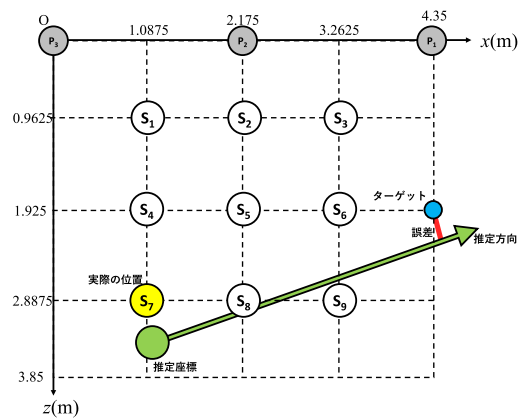
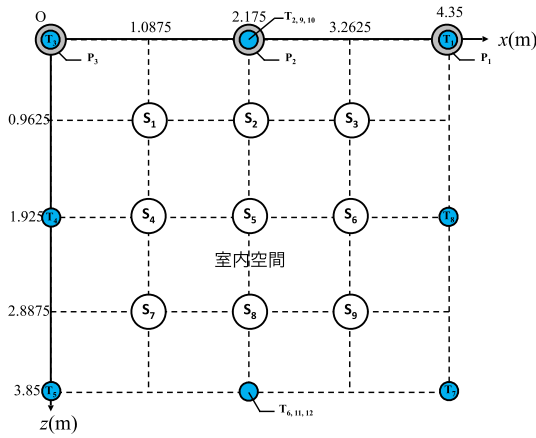
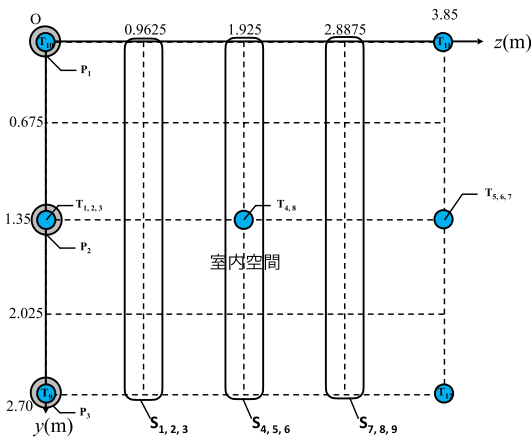


図 8 ポインティングの誤差の測定
Fig. 8 The error of pointing.



(a) xz 平面



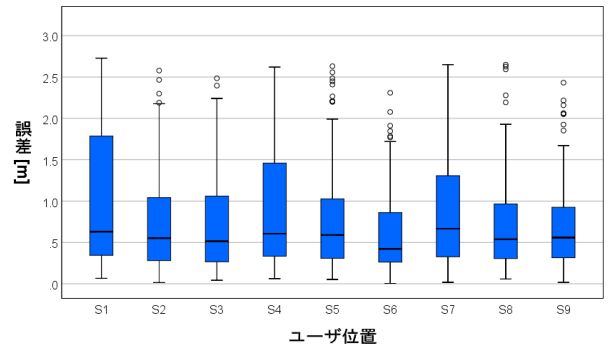
(b) yz 平面

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
Fig. 9 The target coordinates of the experiment.

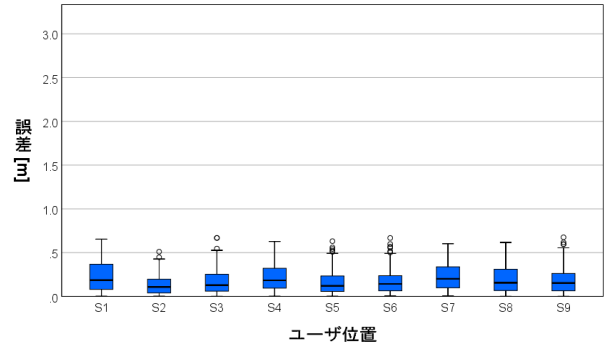
間に、ターゲット (T_1 から T_{12}) を配置した環境で行った。図 9(a) は実験を行う空間とターゲットを xz 平面で表しており、図 9(b) は yz 平面による表現である。なお、図 9(b) 中の S_1 から S_9 が示す角丸の長方形はユーザがスマートフォンを持った場所であり、 x 方向については図 9(a) に示したとおりであるが、 y 方向の座標は被験者の身長などの条件によりそれぞれ異なっていたことを示している。

実験は被験者 13 名 × 計測地点 9 カ所 × ターゲット 12 カ所で行い、総試行回数は 1,404 回であった。一部欠損していたデータを除き、計 1,337 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 0.89 m (SD = 0.82) であった。また、 α 回転角を用いて xz 平面を対象とした推定の誤差は平均 0.20 m (SD = 0.21)、 β 回転角を用いて yz 平面を対象とした推定の誤差は平均 0.83 m (SD = 0.84) であった。

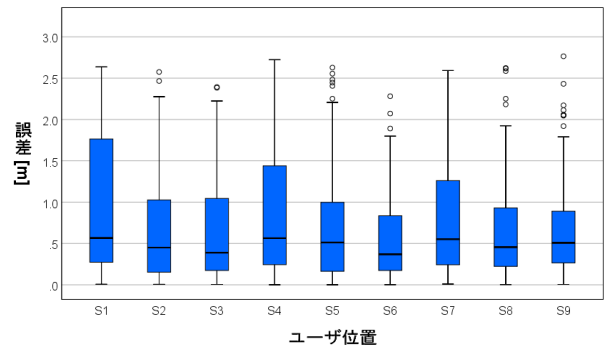
実験結果について、計測位置別に分析を行った。実験結果には外れ値が含まれていることが想定されるため、得られた値について計測地点ごとに、文献 [20] に従い、式 (9) を用いて外れ値の除去を行った。



(a) 三次元空間における結果



(b) xz 平面における結果



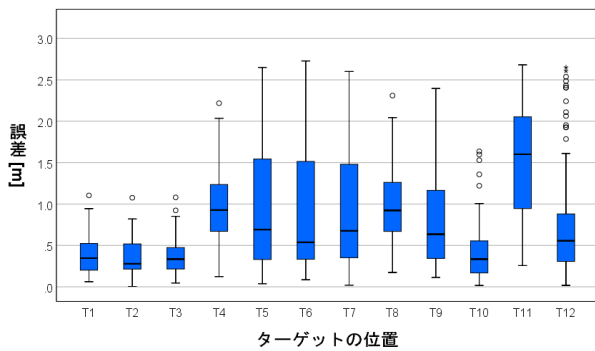
(c) yz 平面における結果

図 10 各計測地点におけるポインティング誤差

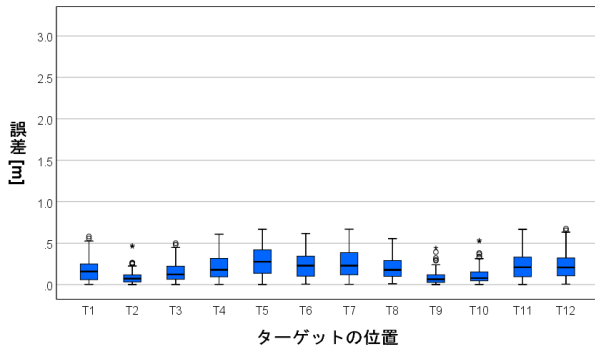
Fig. 10 The results of pointing experiment at each position.

$$\begin{aligned} \text{下限値} &= \text{第 1 四分位数} - 1.724 \times \text{四分位範囲} \\ \text{上限値} &= \text{第 3 四分位数} + 1.724 \times \text{四分位範囲} \end{aligned} \quad (9)$$

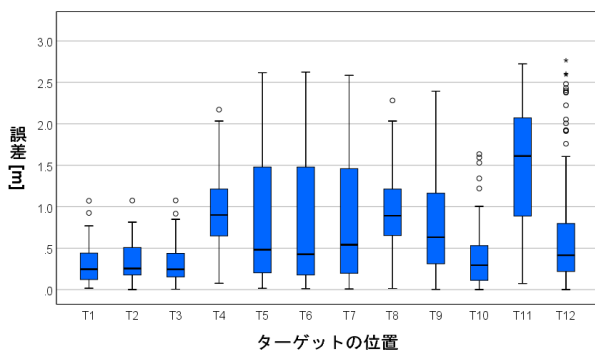
図 10 は実験により算出されたポインティングの誤差を、計測位置別に示したものである。いずれの地点においても、 xz 平面に比べ、 yz 平面における誤差が大きく、その結果三次元空間における誤差は yz 平面における誤差の影響を大きく受けた。三次元空間における誤差の平均値が最大となった地点は S_1 地点で、平均 1.00 m (SD = 0.82) であった。位置推定のシミュレーションで示唆されたような、ユーザの位置が基準点から遠くなるにつれ位置推定の精度が低下する問題による影響は認められなかった。一方で、 S_1 、 S_4 、 S_7 地点でのポインティング精度が低い結果と



(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

Fig. 11 The results of pointing experiment on each target.

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 (9) を用いて外れ値の除去を行った。ターゲット別の分析においても、 xz 平面に比べ、 yz 平面における誤差が大きい結果となっていた。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 1.50 m (SD = 0.70) であった。各々の結果をターゲットの空間位置に基づいて考

察すると、 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じような動作でポインティングが行えたこと、高さは部屋の中に位置するため被験者の視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 はユーザが位置推定の手順のために基準点を向いた際、ユーザから見て横または後ろに位置するターゲットである。そのため、ユーザがそれらのターゲットをポインティングするには手の方向を変えるだけでは難しく、体全体で α 方向に回転しポインティングを行う必要があり、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、 β 方向の回転においても、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。

図 12 は本検証における誤差を、 α および β 方向の回転角の大きさを示したものである。たとえば α 回転角の誤差が正である場合、システムが、被験者はターゲットより右側を示していたと算出したことを示す。本稿で評価に用いてきた誤差は大きさのみを表現したものであったが、誤差を回転角で示すことでユーザのポインティング方向の傾向を明らかにする。図 12(a) は α 方向の誤差であり、その平均は -1.5° (SD = 5.6) であった。また、図が示すようにその誤差の大きさは 0.0° を中心にほぼ左右対称に分布している。これは、誤差が小さく、またその方向に偏った分布はないことを示す。一方で図 12(b) に示した β 方向の誤差の平均は -42.6° (SD = 65.3) であり、その分布は 0.0° より負の方向である左側に広がっている。これは、ユーザがターゲットを示す際に β 方向において負の、俯角方向に偏った箇所を示していると算出されたことを示している。よって、このような傾向をより詳細に検証し、それに基づいた補正を行うことで、誤差がより小さくなると期待できる。

5. 提案手法の特徴と活用

提案手法はユーザが所持したスマートフォンの回転角の値からユーザの位置・方向を計測するものであり、ユーザのスマートフォンから QR コードや Web リンクを介して HTTP 経由でサーバに接続することで、特定のアプリケーションを事前にインストールすることなく位置・方向を推定できる。また、ユーザの位置・方向は各々が持つスマー

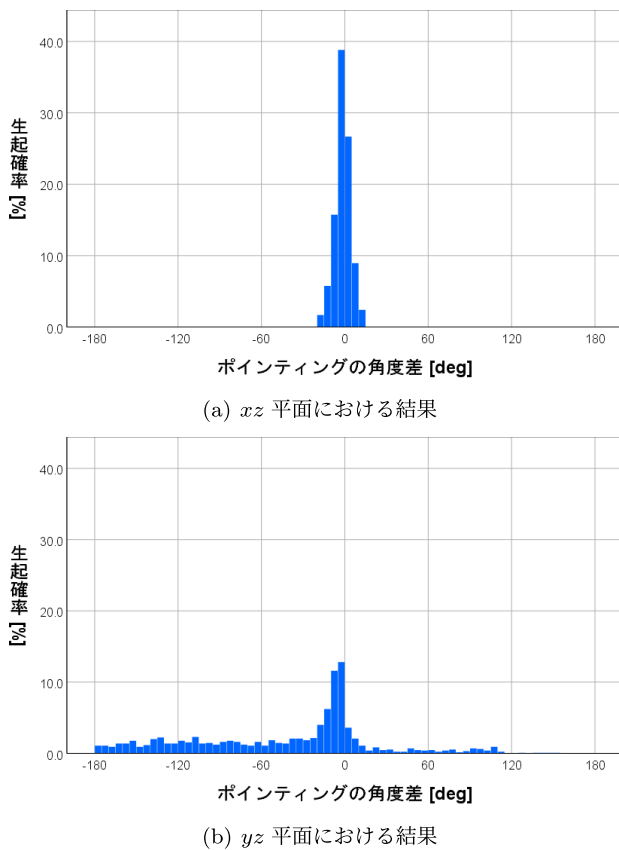


図 12 ポインティング精度評価実験におけるポインティングの角度差

Fig. 12 The results angle of pointing experiment.

トフォンのセンサ値に基づいて推定されるため、カメラでユーザの様子を撮影するような手法に比べ、同時にシステムを利用するユーザ数の増減が推定の精度に影響を与えない。さらに、ユーザごとに固有のセンサを用いて、独立して推定するため、あるユーザが利用している空間に、他のユーザが後から参加する ad hoc な利用が可能である。加えて 4 章の実験から、ユーザが基準点から離れた場合でも推定精度の低下が小さいことが確認されており、提案手法はスケーラブルで、広い空間においても利用可能であることが示唆されている。一方で、事前に空間のサイズや間取りを把握し、基準点を決定したうえでそれらをシステムに入力することや、位置推定後のユーザの移動は認識できず、システムを利用するには再度キャリブレーションを行う必要があることが制約としてある。このような特徴と制約をふまえて、提案手法の活用方法について考察する。

提案手法はユーザがポインティングしている位置を推定できるため、1 章で述べたロボット掃除機への指示といった、ポインティング特有の機器操作を実現できる。新たな機器を設置することなく導入が可能な提案手法は、機器導入のコストを低減したい場所での活用が期待できる。たとえば、オフィスの会議室や居室の蛍光灯の交換すべき場所を指示したり、地震などで生じた壁面・天井面の瑕疵の位

置を記録したりするなどの用途が考えられる。

また、提案手法のスケーラビリティや ad hoc な利用ができるという利点を生かしたシーンとして、コンサート会場やアトラクション施設などで行われる参加型イベントでの活用があげられる。こうしたイベントは 1 度限りの体験型消費であることが多く、提案手法の特殊な機器やアプリケーションを必要としない利点がユーザビリティを向上させる。また、提案手法の ad hoc なシステムとできる点はユーザ同士のその場限りの共同利用を実現し、エンタテインメント性を高める効果が期待できる。スケーラブルである点は様々な会場における実現に貢献する。

さらに、提案手法ではスマートフォンの α 角および β 角を用いてユーザの位置・方向を推定するため、スマートフォンアプリケーションが取得可能な回転角のうち、使用していない γ 角を機器の操作などのインタラクションに活用できる。たとえば照明機器などにおいて、その光量を調整するためにダイヤル型の入力が見られている。提案手法において、 γ 角の変化量をダイヤル入力に見立て、照明をスマートフォンで指し示して選択し、 γ 角の回転で光量を変化させる、といったインタラクションが実現する。スマートフォンとその回転角を用いて機器選択を行う提案手法において、具体的な機器操作を行うために、どのようなインタラクションを採用するかは、今後さらなる検討を要する。

6. おわりに

本稿では実験を通して提案手法による位置・方向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 0.40 m の精度で推定が可能であることが確認された。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 0.89 m であり、ユーザの姿勢の変化にともない推定の精度が低下することが示唆された。

ポインティングによる機器の操作手法では大木らが、家電の配置を分散させることで、 α 方向に 10° のユーザによるポインティングの誤差が生じていた場合でも、機器を識別可能であることを示唆している [15]。提案手法における α 方向の誤差は -1.5° と大木らの前提とした誤差に比べ非常に小さく、十分に機器を識別可能な精度であると考えられる。一方で β 方向の誤差は大きく、今後さらなる検証を行い、ユーザに合わせた補正を行うなどで精度を向上することができれば、機器の配置の制約をより低減できる。

提案手法による機器の具体的な操作は、提案手法によりユーザが示していると判断された機器に対応した GUI コントローラをスマートフォンに表示することで実現する [8]。ユーザは操作したい機器にスマートフォンを向けるだけでそのコントローラが動的に表示されるため、シームレスでインタラクティブな操作が可能となる。

さらに、提案手法によりユーザの絶対的な座標を推定し、その後のユーザの移動を端末の加速度やカメラ画像から検出するなど、他の手法と組み合わせることで、ユーザの移動に対応可能な手法が実現すると期待される。

謝辞 本研究の一部は2021年度関西大学研修員費によって行われた。記して謝意を表す。

参考文献

- [1] Arias, J., Zuloaga, A., Lázaro, J., Andreu, J. and Astarloa, A.: Malguki: 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, *IEEE Sensors Journal*, 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 3rd 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, No.3, pp.41–53 (2015).
- [21] 黄 經綸, 大箸純也, 佐藤陽彦: 手の最大作業域について, 人間工学, Vol.25, No.1, pp.27–32 (オンライン), DOI: 10.5100/jje.25.27 (1989).



佐藤 光起

2019年関西大学総合情報学部総合情報学科卒業。2021年同大学大学院総合情報学研究科知識情報学専攻博士前期課程修了。



竹村 孟

2021年関西大学総合情報学部総合情報学科卒業。同年同大学大学院総合情報学研究科知識情報学専攻博士前期課程入学、現在に至る。



松下 光範 (正会員)

1995年大阪大学大学院基礎工学研究科物理系専攻制御工学分野博士前期課程修了。同年日本電信電話株式会社入社。2008年関西大学総合情報学部准教授。2010年同教授。自然言語理解、インタラクシオンデザインに関する研究に従事。博士(工学)。2003年情報処理学会論文賞、2013年 Laval Virtual Award ほか各賞受賞。電子情報通信学会、人工知能学会、芸術科学会、ACM 各会員。