

ARを用いたセンサ位置設定システムの設計と評価

田上 敦士^{1,a)} 沈 志舒¹

受付日 2020年5月14日, 採録日 2020年11月5日

概要: 様々な場所に多くのセンサを設置する環境センシングは、生活環境、室内環境管理、エネルギー効率の向上に活用されている。センシングデータは、計測された場所に密に結び付いているため、センサの位置を簡単かつ正確に計測・設定する方法が重要な課題である。本稿では、この課題を解決するために、拡張現実 (AR) と Bluetooth を使用してセンサの位置計測と識別を行うセンサ位置設定システムを提案する。本システムでは、スマートフォンなどの一般的なモバイル端末を使用して位置とセンサをマッピングできる。本稿では、本システムの実装設計についてその詳細を説明し、実装を用いた計測精度を評価ならびに、精度向上手法について考察する。

キーワード: センサネットワーク, 位置計測, 拡張現実

Design and Evaluation of Sensor Localization System Using Augmented Reality

ATSUSHI TAGAMI^{1,a)} ZHISHU SHEN¹

Received: May 14, 2020, Accepted: November 5, 2020

Abstract: Environmental sensing, which installs many sensors in various places, is used to improve the living environment, the indoor environment management and the energy efficiency. For this location-aware sensing, how to set the sensor position easily and accurately is an important problem. This paper addresses this problem by proposing a sensor localization system that measures the sensor node's positions and identifications using augmented reality (AR) and bluetooth, respectively. the system enables the mapping the location and the sensor using a common mobile device, such as a smartphone. This paper describes the design of the proposed and evaluates the accuracy of measured values by the implementation.

Keywords: sensor network, localization, augmented reality

1. はじめに

センサと機械学習の広がりにともない、膨大な数のセンサデータを収集・解析し、様々な制御を行う IoT サービスに関する研究開発が活発に行われている [1]。たとえば、BEMS (Building Energy Management System) では、多数のセンサを建物内に設置し、消費電力を削減するために、空調や照明を制御している [2]。また、壁面に設置したセンサアレイにより、転倒などの人の異常行動を検知するシステムも提案されている [3]。これらのサービスでは、センサ

データは収集する場所と密に関係しているため、データ解析の精度向上のためには、センサの位置を正確に設定する必要がある [4]。これは、初期設定だけではなく、センサの故障などにより置き換えられたセンサの位置設定も考慮する必要がある。このため、簡便なセンサの位置設定システムは、IoT サービスに必要であるといえる。

センサの位置計測手法としては、大きく移動体に対するもの [5], [6] と、静止物に対するもの [7], [8] に分類される。本稿では、後者である屋内・屋外など様々な場所に設置された静的なセンサの位置測位を対象とする。この際、GPS (Global Positioning System) のように屋外でしか利用できないものや、WPS (Wi-Fi Positioning System) のように事前に測位地点の電波状態を計測する必要があるものは、適

¹ KDDI 総合研究所
KDDI Research, Fujimino-shi, Saitama 356-8502, Japan
^{a)} tagami@kddi-research.jp

用範囲が限られてしまう。汎用的な環境で利用できる位置測位手法としては、センサ間の電波計測の結果を利用するものがある。久保らは、隣接ノード間で構築したグリッドを拡張することで、分散的に位置測位する手法を提案している [7]。また、北乃馬らは、隣接ノード情報を収集し、それから位置を推定する方法を提案している [8]。これらの手法は、センサ間の距離や隣接情報を、RSSI (Received Signal Strength Indication) や CSI (Channel State Information) などの電波情報を用いて計測する。このため、その位置計測精度が、センサ間の電波伝搬特性に依存し、実際の環境に存在する電波を発する機器や、障害物の影響を大きく受けるという問題がある。また、多くの手法が、平面上の位置測位を指向しており、空間上の位置測位を対象としていない。

コンピュータビジョンの分野において、リアルタイムの単眼での位置測位技術が提案されており [9]、現在のモバイル端末向け OS において、AR (Augmented Reality) アプリケーションのためのフレームワークとして提供されている [10]。本技術は、連続したカメラ映像と慣性計測装置の計測結果を解析することで、カメラとカメラに写った物体の位置を計測するものである。本手法は、電波を用いた手法を比較して以下の利点がある。(1) 障害物や電波雑音の影響を受けない、(2) 三次元座標系上での位置を計測可能である。

我々は、AR を用いたセンサ位置設定システムを提案している [11]。本システムは、モバイル端末のカメラを用いてセンサ間の位置関係を、センサが発する BLE (Bluetooth Low Energy) Beacon 信号からセンサの ID を計測することにより、センサの位置を高精度に設定することを可能とする。試験実装による予備実験においては、高い精度でセンサの位置を計測可能であった。本稿では、実装にあたって、精度を保つためのユーザインタフェースの設計、ならびに、実装を用いて平面上ならびに空間上にセンサを配置したときの計測精度について詳細に述べる。

2. システム概要と関連研究

2.1 システム概要

図 1 に提案システムを用いてセンサの位置計測を行うイメージを示す。センサは、様々な場所に固定されており、

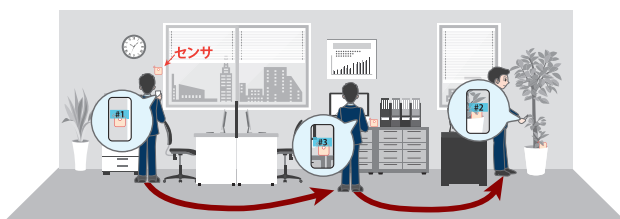


図 1 提案システムを用いたセンサの位置計測イメージ

Fig. 1 Usage scene of the proposed system.

視覚的に位置が判別可能であるものとする。本システムは、オフィスや宅内など生活圏内にセンサを配置し、生活環境や行動を測定するアプリケーションを想定している。各人はパーソナル距離 (45 cm から 1.2 m) をとっており、個人々の環境を計測するために、センサ間の距離もその程度離れて配置される。このため、位置測定精度としては、45 cm 以下であることが求められる。具体例としては、オフィスの各デスクにセンサを配置し、気温・湿度など各人のオフィス環境をモニタリングするアプリなどを想定する。また、センサの位置は異動や模様替え、センサの故障・バッテリー交換などのため 1~数カ月ごとに変わるものとする。

各センサは外見上の差異はないが、固有の ID で識別される。ユーザはシステムの一部であるアプリがインストールされたモバイル端末を持ち、センサ間を移動する。モバイル端末の画面には、カメラが撮影した画像がリアルタイムに表示されており、ユーザが画面上のセンサをタッチすることで、モバイル端末は AR 空間上のオブジェクトをセンサであると判断する。このとき、センサが発信する信号も同時に計測し、その電波強度から最も近いセンサの ID を取得する。センサの位置計測と最近傍センサの識別を同時に行うことにより、センサ ID と AR 空間上の相対座標のマップが生成できる。この動作を繰り返し行うことで、AR 空間上にセンサの ID をマッピング可能となる。最後に、あらかじめ位置が分かっているセンサをアンカセンサとし、AR 空間と実空間の変換を行うことで、センサの現実空間上の絶対位置を計測することが可能となる。

提案システムは、AR 技術をセンサ間の距離計測のためだけでなく、計測結果の表示にも利用している。計測された情報をカメラ画像にオーバーラップさせることで、未計測のセンサが分かるだけでなく、タッチミスなどによりセンサ以外の物体をセンサと判断した場合の誤計測検出を可能とする。また、アンカノードの設定なども直感的に可能となる。

2.2 関連研究

2.2.1 モバイル端末上での AR 技術

Project Tango [12] は、スマートフォンやタブレットなどのモバイル端末上で動作する初期の AR プラットフォームである。本プラットフォームは、高精度で周囲の環境を計測可能であるが、魚眼カメラや深度センサ、カラーカメラなど多くのセンサデバイスが必要であった。

近年、一般的な AR フレームワークとして、多くのセンサデバイスを必要としない単眼カメラを用いたものが提案されており、ARKit [10] や ARCore [13] として、広く実装されている。これらのフレームワークは、モバイル端末の位置と方向を、VIO (Visual Inertial Odometry) 技術によって計測している [14]。VIO は、連続したカメラ映像から抽出されたエッジやコーナなど特徴的な要素である

特徴点 (feature point) と、慣性計測装置 (IMU, Inertial Measurement Unit) で計測された値を用いる。最近発売されているモバイル端末は、カメラと IMU を搭載しているため、AR プラットフォームは様々なモバイル端末で利用可能となっている。さらに、AR 技術の普及により、より高精度な AR 体験実現のために深度センサなどを搭載したモバイル端末も発売されており、好循環を生み出している。ただし、特徴点は隣り合う画素の微分値などをもとに抽出されるため [15]、輝度の変化が少ない環境、たとえば白いフラットな机などでは抽出できない。このため、環境によっては正確な位置計測ができないという課題は存在する。

2.2.2 AR 技術のネットワーク運用への適用

AR は、ユーザが認識する現実をコンピュータが生成する情報で拡張する技術である。ナビゲーションや翻訳、学習、ゲームなど、この AR 技術を活用したアプリケーションが多く提供されている [16]。現実空間に情報を表示するという分かりやすさから、ネットワーク運用に対して、AR 技術の適用もいくつか提案されている。Osawa らは、ネットワーク機器へのガイダンス情報を提供するためのサポートシステムを提案した [17]。Nishino らは、VLAN (Virtual Local Area Network) 構成を視覚的に管理するためのモバイル AR アシスタントを提案した [18]。また、VistaFinder MX は、遠隔地の管理者からの操作指示を可能にするリモート操作サポートシステムである [19]。

センサを含む IoT デバイスを制御および視覚化する AR アプリケーションも提案されている [20]。Jeong らは、AR 技術を用いた IoT デバイスのオーサリングならびに視覚化ツールを開発している [21]。しかしながら、多くの既存技術において、ユーザは実際の位置に合わせて 3D マップ上でデバイスの場所を事前に設定する必要がある。Physical web は BLE を用いて IoT デバイスを操作するためのオープンなプロトコルである [22]。本プロトコルは、位置検出機能を持たず、ユーザはデバイスから広報された URL から操作するデバイスを推測する必要がある。Choi らは、災害救出のための要救助者の位置計測システムを提案した [23]。本システムは、AR 技術を用いて擬似アンカとして機能するドローンの位置を検出し、要救助者の持つセンサの X-Y 座標を推定する。センサとドローン間の距離計算には UWB (Ultra Wide Band) 信号を利用しており、特定の用途には適用できる。

AR 技術を用いた視覚化と操作対象の指定に関する研究は、現実世界とコンピュータが生成する情報のオーバーラップが、ユーザに対して分かりやすいため、広範囲で行われてきた。ただし、筆者らの知る限り、IoT ネットワークを対象とした、AR 技術を利用したセンサ位置設定システムについては、まだ提案されていない。

3. 予備検証

3.1 検証の目的

2.1 節で述べたように、提案システムは (1) センサ間の相対的な位置関係の計測、(2) 最近傍のセンサの識別の 2 つの機能が必要となる。本章では、予備検証としてこれら 2 つの機能の精度について実機を用いて実証する。これより、提供システムの適用可能な環境を明確にするとともに、システムの詳細設計に対する要求条件を明確にする。なお、本検証において、モバイル端末と表 1 に示すスペックを持った iPhone Xs を、センサとしてサンワサプライ社の BLE Beacon [24] を利用した。

3.2 位置関係の計測精度

提案システムでは、AR 技術を用いてセンサの位置関係を計測する。ゆえに、その計測精度は利用する AR プラットフォームに依存し、その特性を知ることが重要である。本節では、ARKit [10] を用いて、センサ間の距離を計測し、その精度を調べる。

図 2 に計測環境を示す。2 つのセンサを d cm 離して白い机の上に設置した。白い平面はテクスチャが少なく、特徴点を検出することが困難である。センサは白色で直径 5 cm の円形であるが、上部に多くの穴があるデザインとなっており、特徴点の検出が可能である。このとき、モバイル端末カメラで片方のセンサをとらえている状態から、他方のセンサをとらえるようになるまで、以下の 3 つのパスで移動させた。

Path 1 水平に移動させる。

Path 2 どちらかのセンサを必ずカメラでとらえるように、1 度机から上方にモバイル端末を移動させ、他方のセンサに近づける。

Path 3 センサの間に原色 (赤, 青, 黄色, 緑) のおもちゃのブロックを設置した状態で、水平に移動させる。

表 1 検証で用いた iPhone Xs の仕様
Table 1 Specifications of iPhone Xs.

チップ	A12 Bionic
カメラ	12 Mega Pixels × 2 (f/1.8, f/2.4)
搭載センサ	気圧計, 3 軸ジャイロ, 加速度, 近接, 環境光
AR ライブラリ	ARKit 3

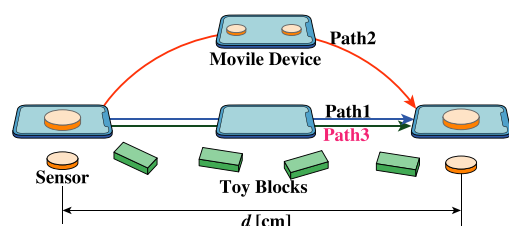


図 2 位置関係の精度計測環境

Fig. 2 Position detection evaluation.

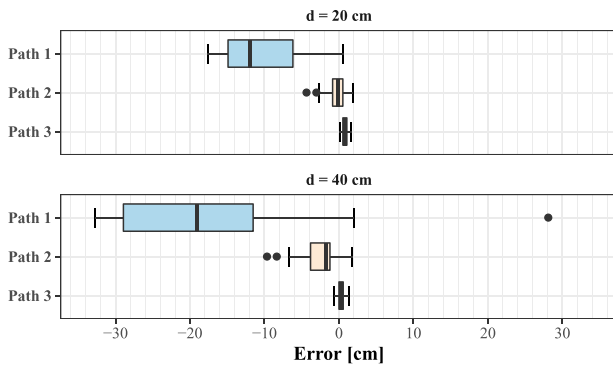


図 3 位置関係の計測誤差
Fig. 3 Error of position detection.

すべてのパスにおいて、開始地点と終了地点はセンサに十分近い位置、具体的には 10–15 cm まで近づいた状態とした。このため、Path 1, 3 においては、移動中どちらのセンサもカメラでとらえられていない時間が存在する。Path 3 において、移動中つねにカメラにはいずれかのブロックが写っている状態となるようにブロックを配置した。このとき、それぞれのセンサ間の距離を AR 空間上で計測された座標から求め、実際の距離との誤差を求めた。

図 3 は、 d を 20 と 40 cm としたときの、計測誤差を箱ひげ図で示したものである。箱の中にある縦線は中央値を表し、箱の両端はそれぞれ 25%, 75% タイルを表す。点は外れ値であり、ひげの両端が外れ値を除いた最大値と最小値である。

Path 1 において、他の Path を比較して高い誤差が生じている。これは、白い平面において特徴点を失い、IMU のみの計測となってしまうことが原因であるといえる。これは、 d が大きくなるに従い、誤差が大きくなることから分かる。また、Path 2 においても、 d が 40 cm のときは誤差が大きくなっている。これは、モバイル端末をセンサに近づけたり遠ざけたりすることにより、カメラのオートフォーカスが追従できず、画像がぼやけてしまったため、特徴点を見失ったことが原因であると考えられる。一方で、Path 3 は、 ± 2 cm 未満の誤差にとどまっている。これはセンサの直径よりも小さい誤差であり、高い精度での計測が可能であるといえる。

3.3 最近傍センサの識別精度

提案手法では、最近傍のセンサをセンサが発信する無線信号を用いて識別する。基本的に電波は、モバイル端末とターゲットであるセンサの間の距離に応じて減衰するため、RSSI 値が最も大きいセンサが最近傍センサである。しかしながら、識別精度を低下させる潜在的な外部要因として、(1) 周辺に存在するセンサからの無線信号、(2) 計測された RSSI 値のゆらぎが存在する。そこで本節では、BLE Beacon を用いて RSSI を用いた最近傍センサの識別精度を計測する。

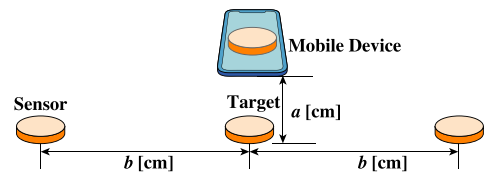


図 4 最近傍センサの識別精度の計測環境
Fig. 4 Sensor identification evaluation.

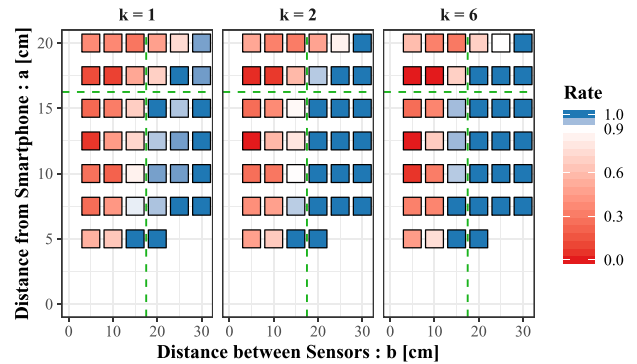


図 5 最近傍センサの識別精度計測結果
Fig. 5 Accuracy of the nearest sensor identification.

図 4 に、最近傍センサの識別精度を計測するための計測環境の模式図を示す。3つのセンサを b cm 離して机の上に設置し、真ん中のセンサを計測したいターゲットセンサとした。モバイル端末を、ターゲットセンサの上方 a cm に机と並行に、かつ、カメラの画像の中心にターゲットセンサが写るような位置で固定した。各センサは 1 秒おきに BLE パケットを送出し、モバイル端末では受信時に RSSI を計測する。本検証では、それぞれ、 k 回分の RSSI 値を平均し、平均値が最大のセンサをターゲットセンサであると識別した。

図 5 に、本計測から求められた最近傍センサの識別精度を示す。モバイル端末とターゲットセンサの距離 a 、センサの間隔 b をそれぞれ、 $\{5.0, 7.5, 10.0, 12.5, 15.0, 17.5, 20.0\}$ cm, $\{5, 10, 15, 20, 25, 30\}$ cm と変化させて計測した。白い四角は 90% の精度で識別可能であることを表し、青は 90% を超える、赤は 90% 未満の精度であることを意味する。おおまかに見ると、 $a \leq 15$ cm かつ $b \geq 20$ cm の範囲において、90% 以上の精度で識別ができています。一方で、 $b \leq 10$ cm では、 k を大きくしても、すなわち、計測時間を長くしても識別精度は向上していないことが分かる。

$a \leq 15$, $b \geq 20$ の範囲に注目すると、 $k = 1$ では 100% 未満の精度であるが、 $k = 2, 6$ においては 100% の精度で最近傍センサの識別が実現できている。すなわち、確実に最近傍センサを識別するためには、2 回計測した RSSI 値の平均を用いて識別すればよい。各センサの BLE パケット送信は同期していないため、2 秒間 RSSI 値を計測し、その結果から識別すれば良いといえる。

3.4 結論

前述した予備検証において、提案システムが適用可能な環境として以下のすべての条件を満たす必要があることが分かった。

- システムの動作中、つねに特徴点を抽出可能な何らかの物体・テクスチャが存在する、
- センサに 15 cm まで近づくことが可能、
- センサ間の距離が 20 cm 以上離れている。

特徴点については、おもちゃのブロックなど明らかに色が変わる点のほかにも、布や木目、カーペットなどのテクスチャ上においても抽出可能である。ただし、白い机や壁などは、エッジは抽出できるが、それ以外では抽出できない。すなわち、白い壁に 10 cm 間隔でセンサが設置されているような環境や、天井にセンサアレイが構築されているような環境では提案手法は適用できない。一方で、上記条件を満たせば屋内・屋外を問わず適用可能であり、図 1 に示したようなオフィス内の各所にセンサを設置した場合など、適用範囲は広いといえる。

また、高い精度を保つため、計測時には以下の点に留意する必要がある。

- フォーカスを保つため、センサに近づきすぎない、
 - RSSI 値の計測のため、センサの前で 2 秒間停止する。
- 前者は、物体に近づきすぎるとオートフォーカスがうまく働かず、カメラ画像がぼやけ、特徴点を見失うためである。後者は、最近傍センサを高精度に識別するためである。この 2 点を留意したシステムの詳細設計について、次章で述べる。

4. 実装設計

4.1 概要

提案システムを実装するために、我々はモバイル端末として Apple 社の iOS、センサとサーバとして Linux OS の 1 つである Raspbian OS を使用する。図 6 にシステムのブロック図を示す。本システムは、センサ、モバイル端末、サーバからなり、サーバに対してセンサの ID と絶対位置の関係を設定することを目的とする。センサとモバイル端

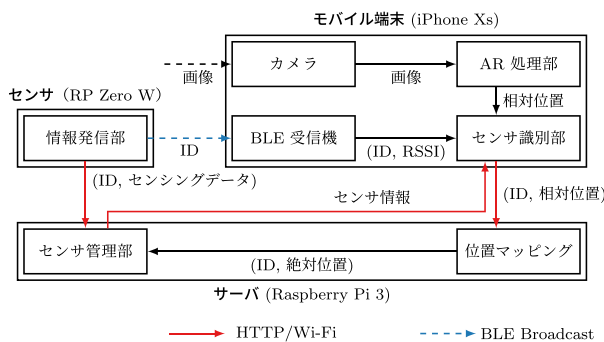


図 6 提案システムのブロック図

Fig. 6 A block diagram of proposed system.

末は、サーバと通信を HTTP を用いて通信を行う。本実装では、すべての機器は同一 Wi-Fi ネットワークに接続されており、サーバのアドレスは mDNS (multicast DNS) [25] を用いて取得できるものとする。

センサは、自らの ID を毎秒 BLE を用いてブロードキャストする。このブロードキャストメッセージのフォーマットは Apple 社が提唱する iBeacon [26] を用いる。iBeacon は、BLE ブロードキャストメッセージの Manufacture Data フィールドを用いて、UUID (Universally Unique Identifier) と major 番号, minor 番号を通知する。一般的に、UUID はサービスを提供する組織の識別子, major 番号と minor 番号の組みをデバイスの識別子とする。提案システムにおいても、UUID としてセンサ位置設定システムのサービス ID, major 番号と minor 番号の組を各センサの ID の広報に利用する。以後, major 番号と minor 番号の組を単にセンサ ID と記述する。

4.2 ユーザインタフェース

3 章での予備検証の結果より、ユーザは (1) センサに近づきすぎず、(2) センサ識別に必要な 2 秒間とどまる必要がある。これを実現するためのユーザインタフェースを設計する。

図 7 に、提案システムのユーザインタフェースのモックアップを示す。モバイル端末の画面には、カメラの画像とともに、現在の RSSI 情報から推定された最近傍センサのセンサ ID が表示される。この値は、1 秒に 1 度変更され、ユーザがこの表示が安定して表示される地点までセンサに近づく (a)。その後、ユーザは画面上でロングタップ (0.5 秒間画面に触れ続ける) することでセンサを選択し (b)、アプリは検証フェーズに移行したことをユーザに提示する (c)。ロングタップの動作に必要な時間 (0.5 秒) と、検証フェーズの待ち時間 (1.5 秒) の間、最近傍センサが変化しなければ、識別結果が正しいと判断し完了する (d)。本インタフェースにより、ユーザはセンサにどの程度近づけば識別可能となるかを知ることが可能となる。また、ロングタップの開始から検証することによって、ユーザの待機時間を減らしつつ、計 2 秒間のセンサ識別に必要な時間を確保している。

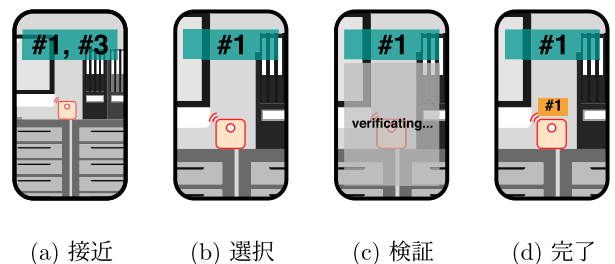


図 7 センサ計測のためのユーザインタフェース

Fig. 7 User interface for sensor identification.

センサの位置計測ならびにセンサ ID 識別完了後, AR 空間上にラベルを表示させる. このラベルはモバイル端末の移動に応じて, あたかもセンサに貼り付けたように表示される. これにより, 正常にセンサの計測が完了したことで, どのセンサの計測が完了していないかを視覚的に把握することが可能となる. また, ラベルをタップすることで, センサの情報が表示され, アンカセンサの指定などが可能である.

4.3 位置マッピング

ARCore で取得できる座標系は, フレームワークの初期化時のモバイル端末の位置を原点とする相対座標系である. 計測環境の World Map を事前に作成することで, 絶対座標系とのマッピングを行う方法もあるが事前準備のハードルが高いため, 提案システムではアンカセンサを用いた, アフィン変換によりマッピングを行う.

M をアフィン行列とすると, 相対座標を表す行列 $\mathbf{r} = (x_r \ y_r \ z_r \ 1)^T$ と絶対座標を表す行列 $\mathbf{a} = (x_a \ y_a \ z_a \ 1)^T$ の関係は次式で表される.

$$\mathbf{a} = M\mathbf{r}$$

よって, 事前に絶対座標が判明しているアンカセンサが, 3 もしくは 4 個あればアフィン行列 M を導出できる*1. 以後, アフィン行列を導出するときに用いるアンカセンサの数を m で表す.

提案システムにおいて, アンカノードが m 個以上与えられたとき, すべての組合せを用いてアフィン行列の集合 $\{M_i\}$ を求める. このとき, 算出される絶対座標 $\bar{\mathbf{a}}$ は, すべてのアフィン行列で導出された絶対座標の重心とする. すなわち,

$$\bar{\mathbf{a}} = \arg \min \sum_i \|\bar{\mathbf{a}} - M_i \mathbf{r}\| \quad (1)$$

で, 導出される座標とする. ただし, $\|\mathbf{a}\|$ は, \mathbf{a} のユークリッドノルムとする.

5. 評価

5.1 評価シナリオと評価指標

本章では, 4 章で示した実装設計に従い実装した提案システムを用いて, 実際のオフィス環境においてセンサ位置を設定したときの精度について評価する. 評価に用いたオフィスは, 白色の金属製の壁に覆われており, 書庫・机などは基本的に白色である. 床にはカーペットが敷き詰められており, 机上はディスプレイや書籍などが置かれており, スマートフォンで撮影した場合, 何らかのオブジェクトが画角に入り, 特徴点が抽出可能である. 図 6 で示し

*1 アフィン行列 M は 4×4 行列であるが, 最終行の値が固定であるため, 3 個で導出可能である.

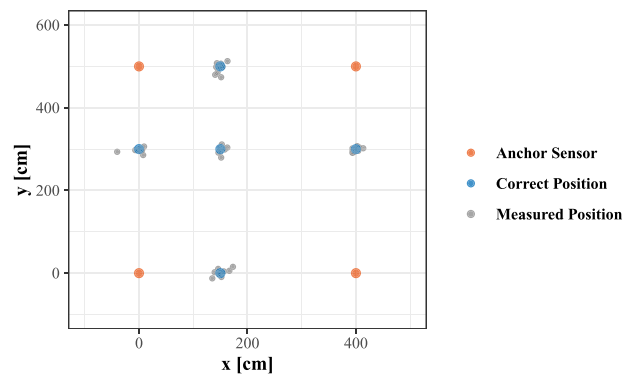


図 8 平面配置時のセンサの位置と計測結果の一例

Fig. 8 Sensor placement and measured sensor positions.

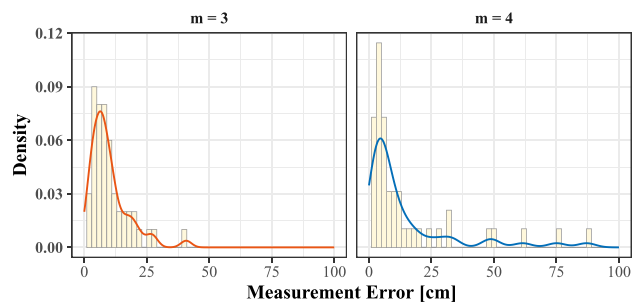


図 9 アンカセンサを四隅のセンサとしたときの計測誤差分布 (平面配置)

Fig. 9 Measurement error when anchor sensors are selected from sensors placed at corners.

たように, モバイル端末, センサ, サーバにはそれぞれ, iPhoneXs, Raspberry Pi Zero W, Raspberry Pi 3 を利用した. 評価環境としては, 以下の 2 つのシナリオを用意した.

- 平面配置 センサを床面に直接配置したシナリオ. すなわち, すべてのセンサの高さ方面成分が等しい場合
- 空間配置 センサを棚の上や床面など様々な場所に設置したシナリオ. すなわち, センサの位置を三次元空間上で表現する必要がある場合

評価指標として, 計測誤差 ϵ を式 (1) より, 以下の式のとおり, 計測された位置 $\bar{\mathbf{a}}$ と, 実際の位置 \mathbf{a} の差と定義する.

$$\epsilon = \|\mathbf{a} - \bar{\mathbf{a}}\|$$

5.2 平面配置時の評価

最初に, 平面上にセンサを 9 個設置し提案システムを用いて各センサの位置を計測した. 図 8 に各センサの実際の位置と, 計測されたセンサの位置を図示する. 本図は, アンカセンサを隅の 4 つのセンサとし, アフィン行列導出に用いるアンカの数を m を 3 としたときの, 10 回計測した結果をプロットしている. 計測値 (グレーの点) は実際のセンサの位置 (青色の点) とほぼ一致しており, 高い精度でセンサの位置が計測できているといえる.

図 9 に, 図 8 における計測誤差 ϵ の分布を示す. $m = 3$

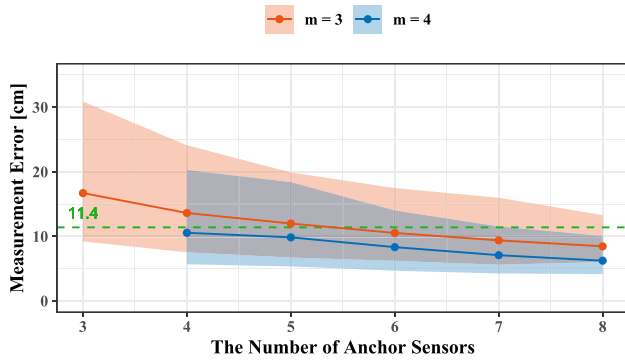


図 10 アンカセンサをランダムに選択したときの計測誤差の中央値と 25, 75 パーセンタイル (平面配置)

Fig. 10 Median and 25th, 75th percentiles of measurement error with randomly selected anchor sensors.

において、計測誤差の最大値は 40.7 cm であり、75%のセンサが 11.4 cm 以下の計測誤差であった。一方 $m = 4$ において、計測誤差が 50 cm 以上となるセンサがいくつかあることが分かる。これは、アンカセンサの数としては同じ 4 個であったとしても、 $m = 3$ の場合は、 ${}_4C_3 = 4$ 個のアフィン行列が導出でき、式 (1) で示した統計処理が有効に働いていることが原因である。

図 10 にアンカセンサを四隅ではなく、すべてのセンサノードからランダムに選択したときの、計測誤差 ϵ の中央値と、25 および 75 パーセンタイル値をプロットした図を示す。横軸はアンカセンサの数を示し、アンカセンサが増えるに従って精度が向上していることが分かる。一方で、 m に注目すると、図 8 のときとは異なり、 $m = 4$ の方が精度が高いことが分かる。これは、平面を構成できない 3 点、たとえば一直線に並ぶ 3 つのアンカセンサを用いてアフィン行列を導出した場合、正しい行列が生成できないためである。また、四隅のセンサを用いたとき、75%のセンサが 11.4 cm 以下の計測誤差であったことと比較すると、アンカセンサの選択により、計測誤差は大きく影響を受けるといえる。

5.3 空間配置時の評価

次に、実際にオフィスにおいてセンサを配置できる場所にセンサを配置して評価を行った。棚の上や机の上など高さ方向のばらつきがある環境下での計測精度を評価する。図 11 に、各センサの実際の位置と、計測されたセンサの位置を図示する。本図は、アンカセンサを隅の 4 つのセンサとし、アフィン行列導出に用いるアンカの数 m を 4 としたときの、10 回計測した結果をプロット BLE している。X-Y 平面で見ると誤差は小さいが、X-Z 平面で見ると Z 軸方向、すなわち、高さ方向の誤差が大きい。

図 12 に、図 11 における計測誤差 ϵ の分布を示す。平面配置時とは異なり、 $m = 3$ のときの誤差分布は大きく広がっていることが分かる。これは、3 点では三次元空間を

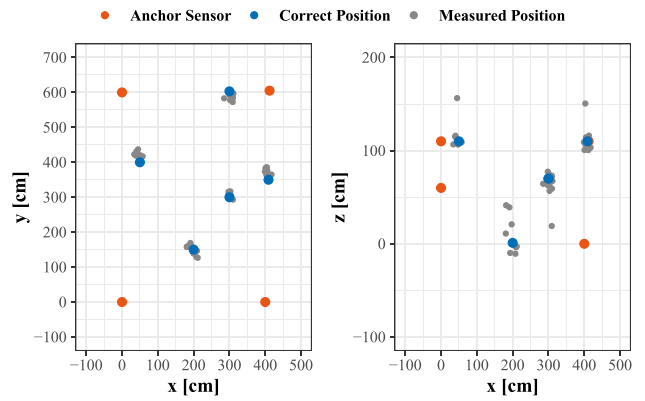


図 11 空間配置時のセンサの位置と計測結果の一例

Fig. 11 Sensor placement and estimated sensor positions.

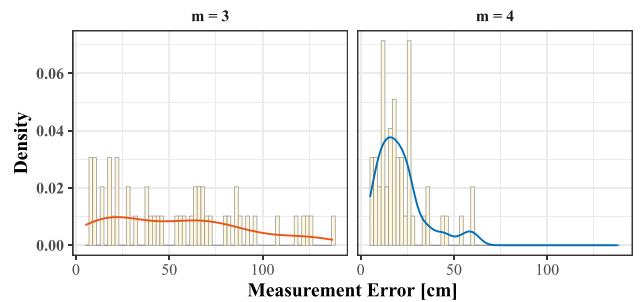


図 12 アンカセンサを四隅のセンサとしたときの計測誤差分布 (空間配置)

Fig. 12 Measurement error when anchor sensors are selected from sensors placed at corners.

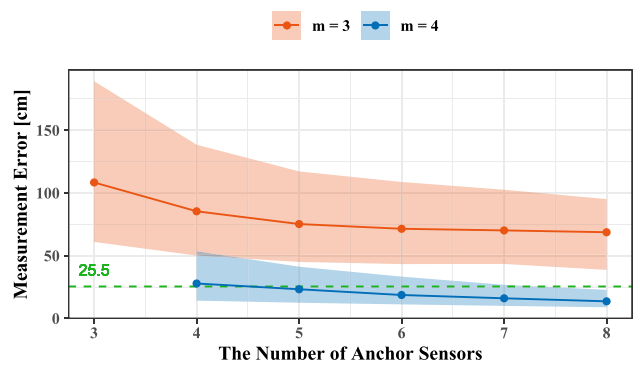


図 13 アンカセンサをランダムに選択したときの計測誤差の中央値と 25, 75 パーセントタイル (空間配置)

Fig. 13 Median and 25th, 75th percentiles of measurement error with randomly selected anchor sensors.

表現することが難しいためであり、空間配置時には $m = 4$ が必要であるといえる。 $m = 4$ のときの計測誤差の最大値は 60.0 cm であり、75%のセンサが 25.5 cm 以下の計測誤差で計測されていた。これは、X-Z 平面で見るとき設置場所の関係で、完全に四隅に設置できていないためであると考えられる。この誤差については 6 章でさらに考察する。

図 13 にアンカセンサを四隅ではなく、すべてのセンサノードからランダムに選択したときの、計測誤差 ϵ の中央値と、25 および 75 パーセンタイル値をプロットした図を

示す。前述のとおり、 $m = 3$ のときの計測誤差は大きく、正しく計測できていないことが分かる。一方で、 $m = 4$ の場合は、図 11 において完全に四隅にアンカセンサを設置できていないことも一因ではあると考えられるが、平面設置の結果と同様の結果が得られている。すなわち、ランダムにアンカセンサを選択した場合においても、ある程度の精度は得られるが、考えて配置した場合、より高い精度が得られるといえる。

6. 考察

6.1 アンカノードによる精度向上

5 章の結果より、三次元空間上のセンサの位置計測には 4 つ以上のアンカセンサが必要であることと、アンカセンサの位置が重要であることが分かった。しかしながら、設置場所の制約により、最適な場所にアンカセンサを設置できないことも想定される。そもそもセンサは、センシング情報を取得すべき場所に設置するものであって、位置計測のために設置するものではない。提案システムにおいて、アンカセンサの目的は AR 空間上の相対座標と、実世界の絶対座標の変換である。すなわち、アンカセンサの AR 空間上での相対座標が計測できればよく、これは特徴点が抽出できる物体、すなわち、視覚できる物体であれば問題はない。このため、アンカセンサは、センサである必要はなく、何らかのアンカノードで代用可能である。

そこで、図 11 で用いた 9 個のセンサを取り囲むように、8 個のシールを柱などに貼り付け、これをアンカノードとして計測可能なように改修した。図 14 に、アンカノードの配置と計測結果を示す。図 11 と比較すると、X-Z 平面上で計測誤差が小さくなっていることが分かる。

図 15 に、図 14 における計測誤差 ϵ の分布を示す。計測誤差の最大値は 43.3 cm であり、75% のセンサが 16.2 cm 以下の計測誤差であった。これは、5.3 節の結果である 60.0 cm、25.5 cm から大きく向上しており、アンカセンサ/アンカノードの位置が計測精度に大きく影響していることを改めて確認できた。また同時に、アンカノードをシールなど視覚的に識別可能なもので代用可能な、AR 技術を用いた位置計測方式のメリットを、確認できた。

6.2 ユーザインタフェースの評価

本節では、センサの位置測定の容易さという観点から、提案システムと既存技術の比較を行う。本評価において、想定するアプリケーションは 2.1 節で述べたような、オフィスの生活環境計測を想定する。本計測では、市販の温度/湿度/CO₂ センサを、机の上などに設置することを想定する。「置く場所に設置する」必要があるため、異動や机上のレイアウト変更などにより、位置が変更になる可能性もある。また、バッテリー切れや故障などのために新しいセンサに置き換える際にも、新しいセンサに対して位置測定

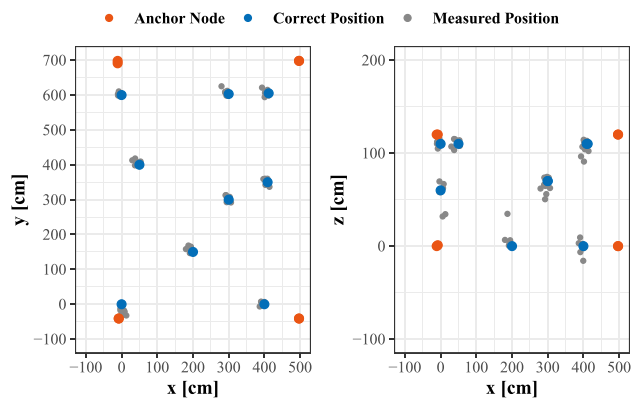


図 14 アンカノード・センサの位置と計測結果

Fig. 14 Sensor placement and estimated sensor positions with substitute anchor nodes.

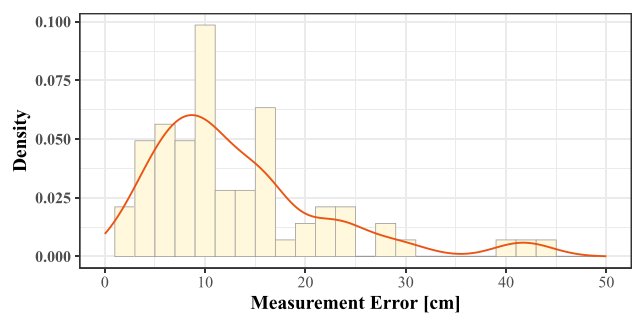


図 15 アンカノードを用いた場合の計測誤差分布

Fig. 15 Management error with substitute anchor nodes.

を行うものとする。このため、1~数カ月ごとに部分的にセンサの位置測定を行う必要がある。

提案システムでは、センサの位置を指定するためにロングタップを必要としている。一方で、QR コードを用いてセンサを同定し、タップなどユーザの操作を必要としない技術も存在する [17], [19]。また、AR 技術と連携はしていないが、画像認識により機器の ID を取得することも提案されている [27]。これらは、ユーザの操作なしにセンサを同定可能である点で、提案手法より優位であるが、センサ上のソフトウェアに設定された ID と、センサに貼り付けられた QR コードなど外観をつねに一致させる必要がある。また、オフィスやホームにおいて、美観の観点からセンサを同定する装飾を付加することが難しいことも考えられる。QR コードなどのタグを使わない方法として、画像認識を用いることも考えられるが、想定するアプリケーションでは同じセンサを大量に設置するため、困難である。

また、センサの位置を事前に 3D マップで設定する方法も提案されている [21]。本手法においては、事前にオフィスやホームの家具や什器を含めた 3D マップを生成する必要があるという課題がある。さらにセンサの ID と位置のマッピングをユーザが正確に把握しておく必要がある。これは、センサの台数が多い場合、ヒューマンエラーの原因になる。

以上より、提案手法はユーザインタフェースに関して、既存技術と比較すると、位置計測に必要な準備作業が少ない、特に、センサ ID とセンサの紐付けを意識する必要がない点で優位であるといえる。これに対して、文献 [23] のように UWB など近接センサを正確に検知できる技術が普及した場合、センサの位置指定手順をさらに簡易にすることが可能である。

7. おわりに

本稿では、モバイル端末を利用してセンサの位置を計測・設定する AR ベースのシステムを提案した。本システムは、センサの発信する信号を用いた最近傍センサ識別機能と、AR 技術を用いたセンサの位置計測機能からなり、モバイル端末だけで高さ方向も含めたセンサの位置計測を可能とする。本稿では、予備検証により、本システムの適用範囲を明確化した。さらに、予備検証で得られたデータをもとに、ユーザインタフェースを設計し、実際にスマートフォン上に実装した。実際の屋内環境での評価により、本システムが正確にセンサの位置を計測できること、ならびに、その精度を向上させる手法についても考察した。

今後、スマートシティやデジタルツインなど IoT の適用先が広がるに従い、大量のセンサが様々な場所に設置されていくことが予想される。これらのセンサから得られる情報は、センサが設置された位置に密に関連しているため、センサの位置を正確に計測することは重要となる。本稿で提案したシステムは、AR 技術を用い様々な環境下に適用できるため、広く採用されると考えている。

謝辞 本研究成果の一部は、独立行政法人情報通信研究機構 (NICT) の委託研究「未来を創る新たなネットワーク基盤技術に関する研究開発」(19103) により得られたものです。

参考文献

[1] Al-Fuqaha, A., Guizani, M., Mohammadi, M., Aledhari, M. and Ayyash, M.: Internet of Things: A Survey on Enabling Technologies, Protocols, and Applications, *IEEE Communications Surveys Tutorials*, Vol.17, No.4, pp.2347-2376 (2015).

[2] Manic, M., Wijayasekara, D., Amarasinghe, K. and Rodriguez-Andina, J.J.: Building Energy Management Systems: The Age of Intelligent and Adaptive Buildings, *IEEE Industrial Electronics Magazine*, Vol.10, No.1, pp.25-39 (2016).

[3] Fukushima, Y., Miura, D., Hamatani, T., Yamaguchi, H. and Higashino, T.: MicroDeep: In-network Deep Learning by Micro-Sensor Coordination for Pervasive Computing, *Proc. IEEE International Conference on Smart Computing (SMARTCOMP)*, pp.163-170 (2018).

[4] Shit, R.C., Sharma, S., Puthal, D., James, P., Pradhan, B., et al.: Ubiquitous Localization (UbiLoc): A Survey and Taxonomy on Device Free Localization for Smart World, *IEEE Communications Surveys Tutorials*, Vol.21, No.4, pp.3532-3564 (2019).

[5] Agrawal, M. and Konolige, K.: Real-time Localization in Outdoor Environments using Stereo Vision and Inexpensive GPS, *Proc. International Conference on Pattern Recognition (ICPR)*, Vol.3, pp.1063-1068 (2006).

[6] Zandbergen, P.A.: Accuracy of iPhone Locations: A Comparison of Assisted GPS, WiFi and Cellular Positioning, *Transactions in GIS*, Vol.13, No.s1, pp.5-25 (2009).

[7] 長谷川亨, Walrand, J., 久保 健, 田上敦士, 長谷川輝之: グリッドグラフの幾何学的性質を利用した位置推定手法, 情報処理学会研究報告, Vol.2013-MBL-67, No.4 (2013).

[8] 北之馬貴正, 新居英志, 安達直世, 滝沢泰久: SmartFinder: 大規模屋内施設における集約型自己組織化スマートデバイス位置推定方式とその評価, 情報処理学会論文誌, Vol.59, No.2, pp.462-472 (2018).

[9] Davison, A.: Real-time Simultaneous Localisation and Mapping with a Single Camera, *Proc. International Conference on Computer Vision (ICCV)*, pp.1403-1410 (2003).

[10] Apple Inc.: Understanding ARKit Tracking and Detection, available from (<https://developer.apple.com/videos/play/wwdc2018/610/>).

[11] Tagami, A. and Shen, Z.: LESAR: Localization System for Environmental Sensors using Augmented Reality, *Proc. IEEE COMPSAC WS Smart IoT Sensors and Social Systems for eHealth and Well-Being Applications (SIS-SS)* (2020). (will be appeared).

[12] Marder-Eppstein, E.: Project Tango, *Proc. ACM SIGGRAPH 2016 Real-Time Live!*, p.40 (2016).

[13] Google Inc.: ARCore - Google Developers, available from (<https://developers.google.com/ar/>).

[14] Kelly, J. and Sukhatme, G.S.: Visual-Inertial Simultaneous Localization, Mapping and Sensor-to-Sensor Self-Calibration, *Proc. International Symposium on Computational Intelligence in Robotics and Automation (CIRA)*, pp.360-368 (2009).

[15] Lowe, D.G.: Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints, *International Journal of Computer Vision*, Vol.60, pp.91-110 (2004).

[16] Van Krevelen, D.W.F. and Poelman, R.: A Survey of Augmented Reality Technologies, Applications and Limitations, *International Journal of Virtual Reality*, Vol.9, No.2, pp.1-20 (2010).

[17] Osawa, T., Shimamura, J. and Taniguchi, Y.: Operation Support System Based on Augmented Reality Technology, *Proc. International Computers, Software and Applications Conference (COMPSAC)*, pp.608-609 (2014).

[18] Nishino, H., Nagatomo, Y., Kagawa, T. and Haramaki, T.: A Mobile AR Assistant for Campus Area Network Management, *Proc. International Conference on Complex, Intelligent and Software Intensive Systems (CISIS)*, pp.643-648 (2014).

[19] KDDI 総合研究所: VistaFinder MX, 入手先 (<https://www.kddi-research.jp/products/vistafinder.html>).

[20] Jo, D. and Kim, G.J.: IoT + AR: Pervasive and Augmented Environments for "Digi-log" Shopping Experience, *Human-centric Computing and Information Sciences*, Vol.9, No.1, pp.1-17 (2019).

[21] Jeong, Y., Joo, H., Hong, G., Shin, D. and Lee, S.: AVIoT: Web-based Interactive Authoring and Visualization of Indoor Internet of Things, *IEEE Trans. Consumer Electronics*, Vol.61, No.3, pp.295-301 (2015).

[22] Google Inc.: The Physical Web, available from

- <http://google.github.io/physical-web/>).
- [23] Choi, H.-B., Lim, K.-W. and Ko, Y.-B.: Sensor Localization System for AR-assisted Disaster Relief Applications, *Proc. International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services (MobiSys)*, pp.526-527 (2019).
 - [24] サンワサプライ株式会社：MM-BLEBC1, 入手先 <https://www.sanwa.co.jp/product/syohin.asp?code=MM-BLEBC1>).
 - [25] Cheshire, S. and Krochmal, M.: Multicast DNS, RFC 6762, RFC Editor (2013).
 - [26] Woolley, M.: Bluetooth Technology and the Physical Web-Bluetooth Blog, available from <https://www.bluetooth.com/blog/bluetooth-technology-and-the-physical-web/> (2016).
 - [27] KDDI 株式会社：au スマートフォンで写真を撮るだけで簡単に初期設定できる「Wi-Fi かんたん接続」の機能を拡張, 入手先 <https://www.kddi.com/news/topics/20130228a.html>).



田上 敦士 (正会員)

1974年生。1997年九州大学大学院システム情報科学研究科修士課程修了。同年国際電信電話株式会社(現, KDDI株式会社)入社。インターネットアーキテクチャ, 分散処理の研究開発に従事。博士(工学)。電子情報通信学会,

IEEE, ACM 各会員。



沈 志舒

1986年生。2012年名古屋大学大学院工学研究科修士課程修了。2015年同博士課程修了。同年 KDDI 株式会社入社。次世代通信ネットワークに関する研究開発に従事。博士(工学)。