

距離と地磁気データから 位置の特定による目標物の識別

廣居 舜佑¹ 串田 高幸¹

概要: 既存の IoT デバイスは UUID を基にソフトウェアから識別できるが、見かけが同じハードウェアを視覚的に識別することが出来ない問題がある。そこで、ユーザが立っている位置から特定したい目標物までの距離と角度を使って、一列に等間隔に並んだ同じ見かけの目標物を識別する手法を提案する。IoT デバイスで距離と方位を超音波距離センサと地磁気センサで取得する。センサーの値から余弦定理で目標物までの距離と角度を算出して、目標物の位置を特定する。実測値との誤差を評価とする。超音波距離センサと基準点までの距離を 125 cm とし、3 つ並んでいる目標物の 2 つ目を特定する場合、実測値と提案から計算した距離の誤差を 2 cm にし、IoT デバイスから目標物までの角度の誤差を 1° にすることができた。

1. はじめに

背景

現在、あらゆるものがインターネットとつながる IoT (Internet of Things) は 2018 年までに 370 億台が販売されていて、2025 年には 900 億台が販売されると見込まれている [1]。IoT デバイスの増加に伴い、見かけが同じ IoT デバイスが増えている。また、スマートホームやスマートシティなどの IoT 環境は需要が高まっており、過去数年間で注目を集めている [2]。

現在の主要な IoT デバイスの識別方法として MAC アドレスを基に UUID を付与する方法がある。UUID (Universally Unique Identifier) とは 128 ビットの数値であり、空間と時間にわたってエンティティまたはオブジェクトを一意に識別するために使用される [3]。全世界で 2 つ以上のアイテムが同じ値を持つことがない一意な識別子のことである。しかし、UUID だけでは見た目には違いはないため、どの IoT デバイスか判別できない。そのため、現在の識別手法として IoT デバイスに直接 UUID が書かれたシールを貼る方法がとられている。

課題

IoT デバイスを識別するには UUID を付与して IoT デバイスに仮想的に名前を付ける方法があるが、UUID は通信識別子であるため、端末からのみ ID 情報を読み取ることができる。等間隔に並んでいる同じ見かけの目標物の中か

ら 1 つの目標物を特定するには、目標物に貼られたシールを見て探す必要がある。そのため、目標物を見かけで識別することが出来ない。

各章の概要

第 2 章では関連研究として磁気センサと Bluetooth を使用した IoT のスマートパーキングについて述べる。第 3 章では提案するシステムについて述べる。第 4 章では提案したシステムの実装と分析について述べる。第 5 章では実験の評価と議論について述べる。第 6 章では提案したシステムの議論について述べる。第 7 章で研究のまとめを述べる。

2. 関連研究

Lee らの、IoT のスマートパーキングシステムでは磁気センサと Bluetooth が使用されている [4]。屋外駐車システムでは、モーターが磁気センサモジュールを搭載して駐車場のデータを収集している。Bluetooth 通信により、スマートフォンの USIM (Universal Subscriber Identity Module) ID を受信する。これらのデータは、駐車車両の位置情報サービスに利用される。サーバは受信したデータを基に Web サービスを提供する。Bluetooth 通信による屋外駐車システムでは実測値との誤差が課題である。

J. Kim らは、ワイヤレスセンサネットワークベースの駐車管理システムに、超音波距離センサを導入している [5]。超音波距離センサは車両検出モジュールとして使用されている。自動車の探知に超音波距離センサが使われているが、自転車に適用されていない。

Pius Lee らは、超音波センサを使用して屋外駐車場に太

¹ 東京工科大学コンピュータサイエンス学部
〒192-0982 東京都八王子市片倉町 1404-1

陽光発電のワイヤレスセンサネットワークを実装している [6]. 超音波距離センサは車両の検出率が高いが、乱気流や温度変化などの環境や植物、土壌の遮蔽の影響を受けることが課題である。

3. 提案方式

本研究では、超音波距離センサと地磁気センサを用いて、距離と角度から余弦定理を使い目標物を特定する手法を提案する。一列に等間隔に並んでいる目標物の左端を基準とする。ユーザが立っている位置から超音波距離センサで基準となる目標物までの距離を測定する。地磁気センサを用いて、ユーザが立っている位置から基準となる目標物の方位と、特定したい目標物から基準の目標物の方位を取得する。そして、ユーザが立っている位置から基準となる目標物までのベクトルと特定したい目標物から基準となる目標物までのベクトルのなす角を求める。一列に等間隔に並んでいる目標物間の距離、ベクトルのなす角、ユーザから基準の目標物までの距離を用いて、余弦定理で特定する目標物までの距離と方位を求める。実測値との誤差を評価とする。本研究は、等間隔で並んだ目標物の中から1つだけ位置を特定する。この提案を確立させるために基礎実験を行った。

基礎実験

提案方式確立のために超音波距離センサ (HC-SR04) の精度の基礎実験を行った。また、地磁気センサ (HMC5883L) の精度の基礎実験を行った。

超音波距離センサによる距離測定

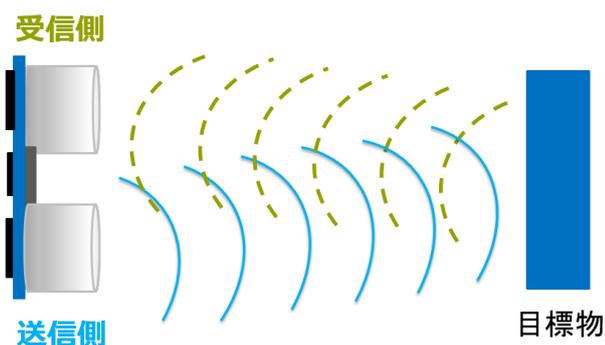


図 1 超音波センサの仕組み

超音波距離センサは最短 2 cm から最長 400 cm を測ることのできるセンサである [7]. 超音波距離センサは図 1 のように受信側、送信側で筒が分かれている。送信側の筒から超音波を送信し、受信側の筒で超音波を受信し、受信するまでの時間で距離を測定する。センサから発生する超音波の有効角度は 15 度である。超音波距離センサは超音波

が反射しない場合、距離を取得できない特性がある。目標物が布で出来ている場合、超音波を吸収するため距離を測ることが出来ない。以上を踏まえたうえで実験を行った。まず、超音波距離センサから 60 cm 先に 500 ml ペットボトルを置いて距離測定を行った。500 ml ペットボトルを使用した理由として、表面が滑らかな物体に対して超音波が反射するのか実験するためである。データの取得は 20 回で行った。図 2 の結果は、58 cm が 1 回、60 cm が 18 回、

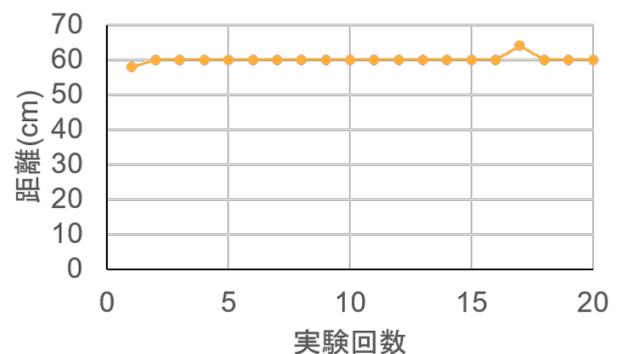


図 2 目標物を 60 cm 先に置いて実験

64 cm が 1 回という結果になり、 $18 \div 20 \times 100 = 90$ から、精度は 90 % であった。精度は超音波距離センサの値が実測値と同じ場合のことを指す。次に図 3 のような小型のビニールハウスを目標物とし、実験を行った。図 4 は目標物までの距離を 250 cm に設定し超音波距離センサで距離測定を行った結果である。図 4 の結果から 250 cm に近い値は 3 回のみで、精度が 0 % であることが分かった。

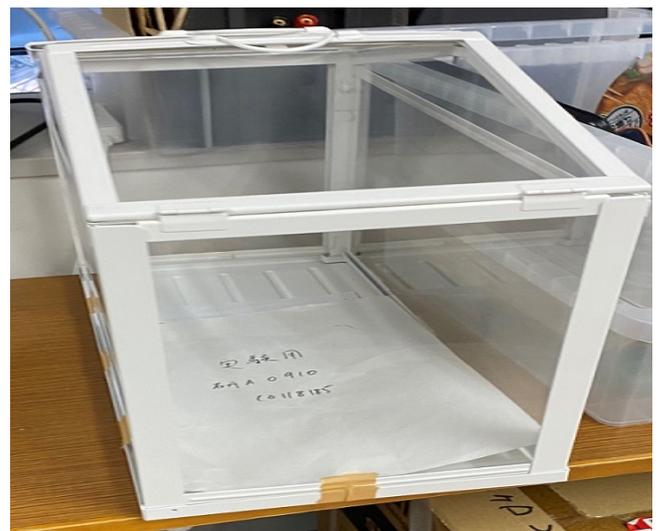


図 3 小型のビニールハウス

2つの実験より以下の結果が得られた。1つ目に、超音波距離センサで何回データを取得する必要があるのか考慮する必要がある。2つ目に、指向性を高くする必要がある。

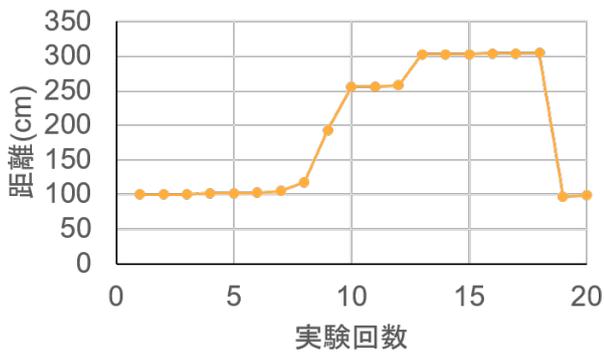


図 4 目標物を 250 cm 先に置いて実験

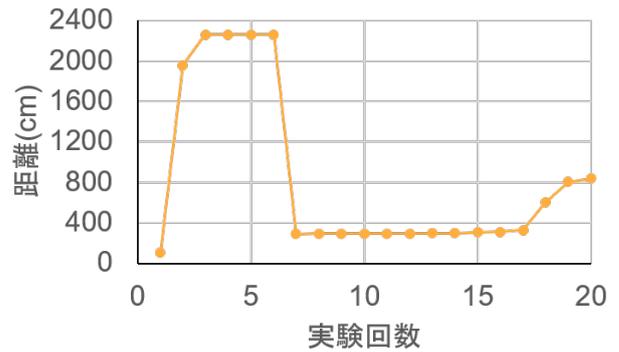


図 6 図 4 の条件下で受信側に筒を付けて実験

超音波距離センサにおける指向性の実験

超音波距離センサの指向性の実験を行う。超音波距離センサは超音波式の距離センサであるため、図 1 のように波状に超音波が進む。目標物までの間に障害物があった場合、手前の障害物に超音波が反射し距離が測定される [7]。そのため、手前の障害物に超音波を当たらないようにしたい。そこで、センサに図 5 のように筒を付けて送信側、受信側それぞれに筒を付けて実験を行った。また、物体まで照準を定めるために赤色ドットレーザーモジュールを使用した。

筒の長さは 10 cm、筒の太さはセンサの穴と同じ大きさにした。図 6 は受信側のみに筒を付け、目標物を 250 cm 先に置いて実験を行った結果である。

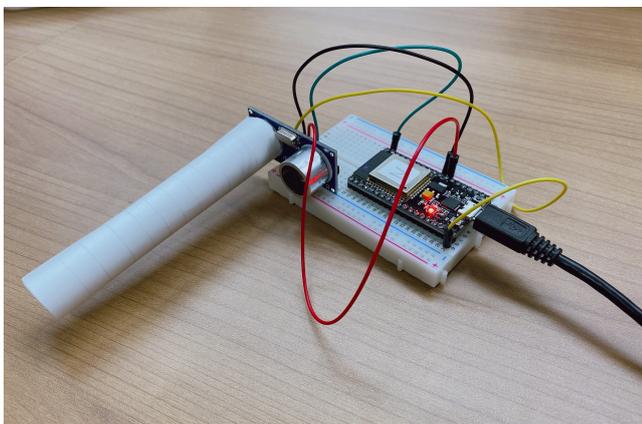


図 5 長さ 10 cm の筒を付けた超音波距離センサ

図 6 の 7, 8, 9 回目において最頻値が 303 cm である。超音波距離センサから目標物までの実測値は 250 cm であるため、精度は 0% であった。次に、図 7 は送信側に筒を付け、250 cm 先に目標物を置いて実験を行った結果である。図 7 の結果において 247 cm の値は 5 個、248 cm の値は 6 個、249 cm の値は 3 個取得でき、誤差 3cm 以内の精度は 70% だった。以上の結果から送信側に筒を付けた場合の方が精度が良いことがわかる。そのため、送信側に筒を付けるようにする。

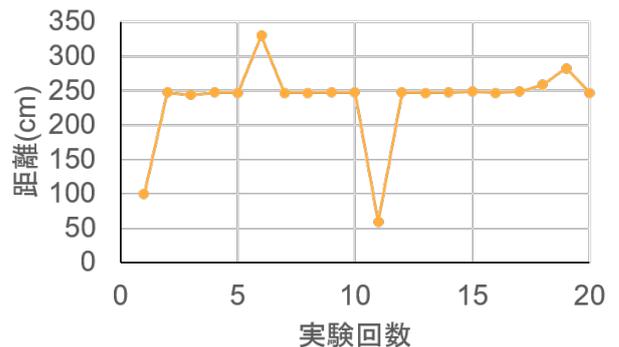


図 7 目標物を 250 cm 先に置いて送信側に筒を付けて実験

地磁気センサによる方位測定

目標物の位置を方位から求めるために地磁気センサから方位データを取得する。方位データは北を 0° として 90° が東、180° が南、270° が西を指す。地球は磁場を巻いており、これを地磁気という。地磁気センサはこの地球の磁力を検出するセンサで、磁力の値から方位を求めることが出来る。最大 1° から 2° の方位精度でデータを取得する。地磁気センサは X 軸、Y 軸、Z 軸のデータを取得する。X 軸、Y 軸は方位、Z 軸は IoT デバイスの傾きを取得し、方位データのキャリブレーションを行う [8]。図 8 は、地磁気センサを同じ向きで固定して 100 回データを取得したものである。実験の結果から、最頻値は 78° で全体の 39% を占めていた。

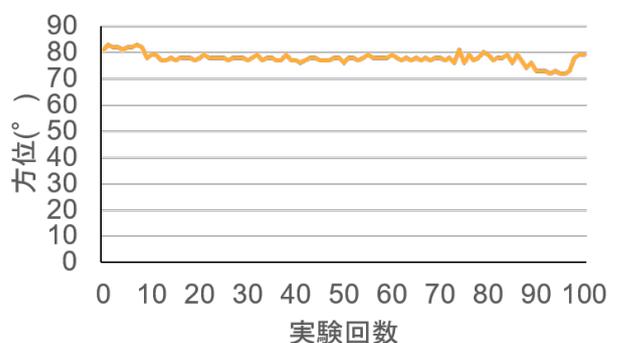


図 8 地磁気センサの値を同じ向きで 100 回取得

提案方式

超音波距離センサと地磁気センサとレーザーモジュールを組み合わせた目標物の特定方法を提案する。測定するIoTデバイスから特定する目標物までの距離をZとする。図9のように物理的に同じ見かけの目標物をd cm 間隔で固定する。一列に並んだ目標物の数をnとし、n台の中で左端の目標物を基準点とする。3番の目標物を特定する。

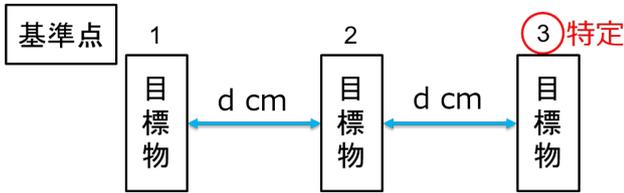


図9 IoT デバイスの配置

次に、図10の通り、IoTデバイスから基準点までの距離と方位を求める。赤色レーザーモジュールで目標物との照準を合わせ、超音波距離センサを用いて基準点までの距離Y cm を取得する。同時に基準点までの方位αを取得する。2番の目標物から1番の目標物までの方位βは固定であるため、α-βで角γを求めることができる。

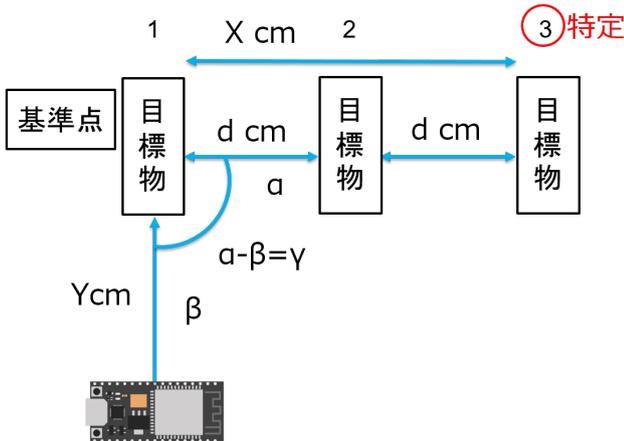


図10 角度γを求め方

特定したいIoTデバイスから基準点までの距離Xを式(1)で求める。

$$X = (n - 1)d \quad (1)$$

ここまでで求めたX, Y, γの値から余弦定理を用いて図11の距離Zを求める。Zを求める式を式(2)に記述する。

$$Z = \sqrt{X^2 + Y^2 - 2XY \cos \gamma} \quad (2)$$

次に、IoTデバイスから特定したい目標物までの方位を求める。X, Y, Zより余弦定理を用いて図12の角度Aを求める。Aを求める式を式(3), 式(4)に記述する。

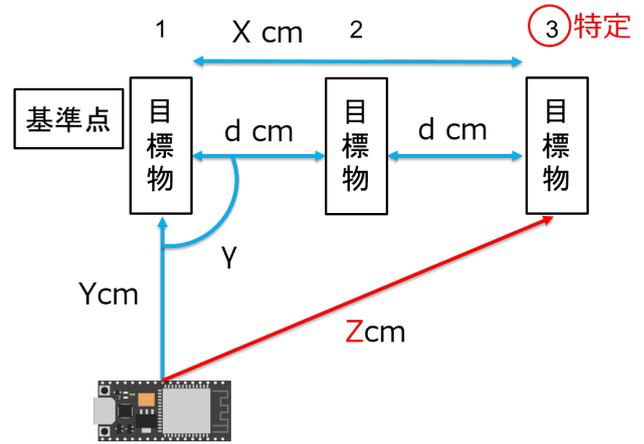


図11 距離Zを求める

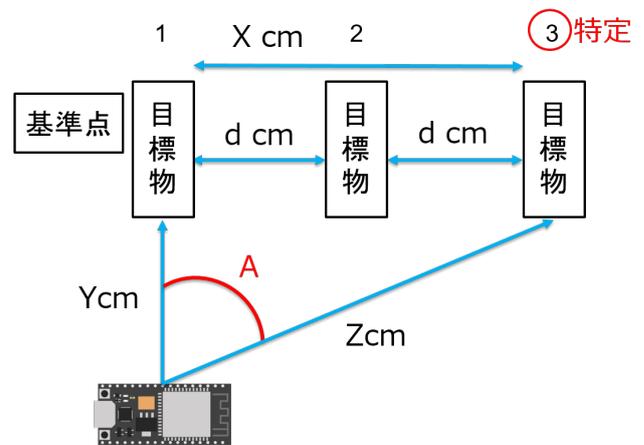


図12 角Aを求める

$$\cos A = \frac{X^2 + Y^2 - Z^2}{2XY} \quad (3)$$

$$A = \arccos\left(\frac{X^2 + Y^2 - Z^2}{2XY}\right) \quad (4)$$

(3)の余弦定理で求めたcosAから(4)の逆関数を用いてAの角度を求める。A < 90°は常に成り立つとする。求めた距離Zと角度Aを表示させる。

ユースケース・シナリオ

本研究では前節で提案した手法を用いたユースケースシナリオについて説明する。ユースケースシナリオとして図13に示すレンタサイクルの駐輪場で自転車を探す場面を想定する。駐輪場でレンタサイクルを予約したユーザが、複数の自転車の中から借りる自転車を探す必要がある。現在は、レンタサイクルに付随している管理コードを見ながら自分の予約した自転車の管理コードと一致するものを探し続けなければならない。本提案のシステムを使用すれば、ユーザは基準となる目標物の方向に超音波距離センサを向けるだけで、ディスプレイに予約した自転車までの距離と角度が表示される仕組みになっている。そのためユーザは自転車を見つけ出すことができる。

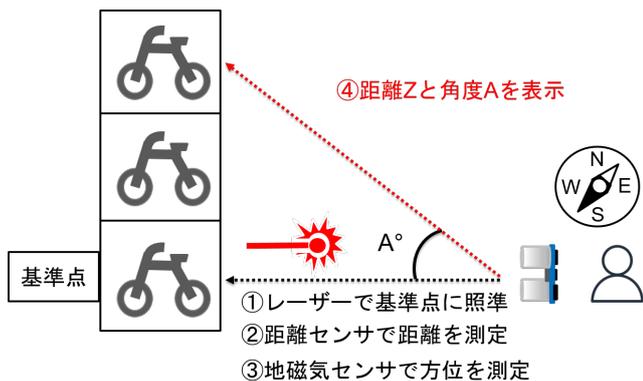


図 13 駐輪場でのイメージ

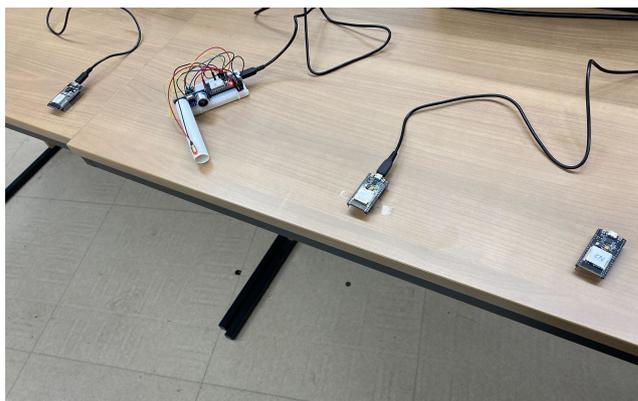


図 15 実験環境

4. 実装と実験方法

実装

ここでは提案を基にした実装について記述する。図 14 はソフトウェア構成図である。IoT デバイス、目標物として ESP32、センサとして、超音波距離センサ HC-SR04、地磁気センサ HMC5883L、赤色ドットレーザーモジュール FU650AD5-C6 を使用した。図 13 のように HC-SR04 で基準点の ESP32 までの距離を測る。同時に HMC5883L で基準点までの方位を測る。得られた距離データと方位データから余弦定理を使い、特定したい目標物までの距離 Z を計算する。特定したい目標物までの距離 Z を求めたら、余弦定理を用いて A の角度を求める。距離 Z と角度 A を WEB 上に表示させる。実測値と求めた値の誤差を評価とする。

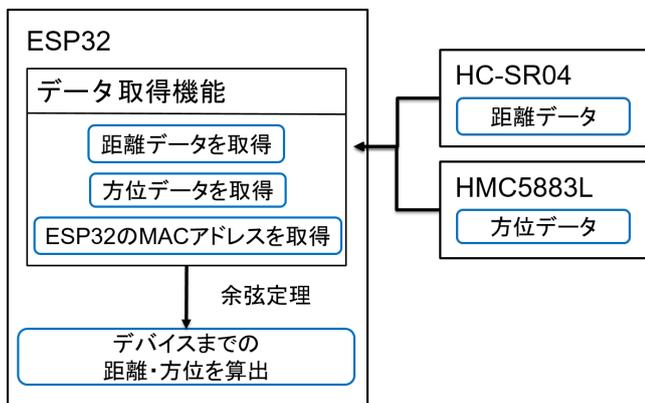


図 14 ソフトウェア構成図

実験環境

ESP32 を 4 台、HC-SR04 を 1 台、HMC5883L を 1 台、FU650AD5-C6 を 1 台使用して実験を行った。一列に並べた 3 台の ESP32 の間隔は 60 cm である。左から 2 台目の ESP32 を特定する目標物とする。超音波距離センサと地磁気センサを付けた ESP32 から基準点までの距離を 125 cm で行った。

5. 評価手法と分析手法

本論文で提案した実験の結果と実測値の相対誤差を評価とする。図 16 のグラフは、基準点までの実測値と超音波距離センサで取得した値の関係を表したものである。実測値 125 cm に対して、超音波距離センサの最頻値は 127 cm で誤差は 2 cm で相対誤差は 1.6 % である。また、最大誤差は 109 cm だった。図 17 は余弦定理から求めた角度 A

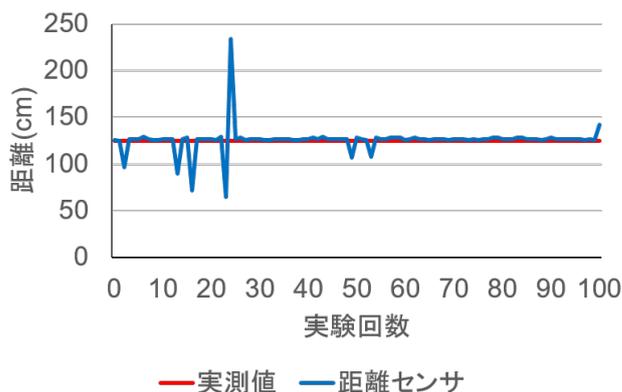


図 16 実験環境における実測値と超音波距離センサの値の違い

についてグラフ化したものである。実測値の距離、方位を余弦定理で計算した結果の角度は 26° だった。一方、センサのデータを用いて余弦定理で計算した角度 A の最頻値は 25° で誤差は 1° で相対誤差は 3.8 % である。また、最大誤差は 22° だった。

次に図 18 は超音波距離センサで基準点まで測定した値と余弦定理で求めた距離 Z の関係を表したものである。距離 Z の実測値は 135 cm だったが、余弦定理によって求めた距離 Z の最頻値は 137 cm であり、2 cm の誤差で相対誤差は 1.5 % である。距離 Z の最大値は 239 cm で最大誤差は 104 cm だった。基準点までの距離と距離 Z には比例関係がなく、基準点までの距離が同じ値の場合でも地磁気センサの値が変化するため、距離 Z が変化した。そのため、距離、方位データどちらも最頻値を用いて計算すると誤差

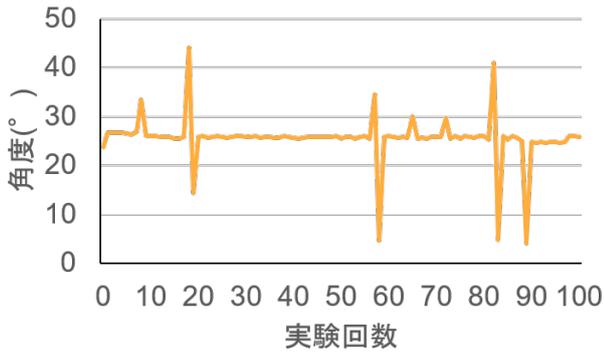


図 17 余弦定理により求めた角度 A

が少なくすることができた。距離の誤差について、国土交通省が定めた駐輪場の自転車の間隔は 60 cm であることから、距離誤差が 2 cm 以内なので、実用可能である。角度の誤差について、図 19 のように角度が 1 度の誤差範囲内で求めることができる V の最大距離を求める式を式 (5) に記述する。式 (5) で計算した結果より、ユーザから基準となる目標物までの距離が 125 cm だった場合、596 cm 以下、つまり 60 cm 間隔に設置された自転車に置き換えると 9 台までは距離と方位のデータから目標物を特定することができる。

$$\frac{\tan \angle DBA + \tan 1^\circ}{1 - \tan \angle DBA \cdot \tan 1^\circ} = V + 60 \quad (5)$$

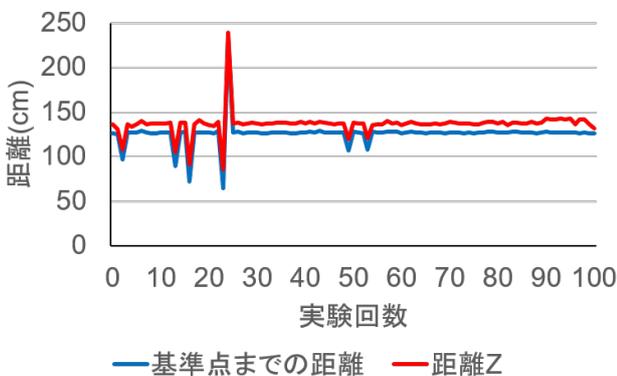


図 18 実験環境における基準点までの超音波距離センサの値と距離 Z との関係

6. 議論

本研究では超音波距離センサの値と地磁気センサの値を用いて余弦定理から IoT デバイスから目標物までの距離と角度を求める提案を行った。距離 Z、角度 A とともに、実行結果の誤差が最も小さくなったのは最頻値を用いた場合だった。しかし、超音波距離センサの値は、目標物までの距離が遠くなるほど、はずれ値が増える傾向にある。これは、超音波センサが先に発した超音波と後から出てきた超音波同士が干渉するためである。解決方法として、複数の

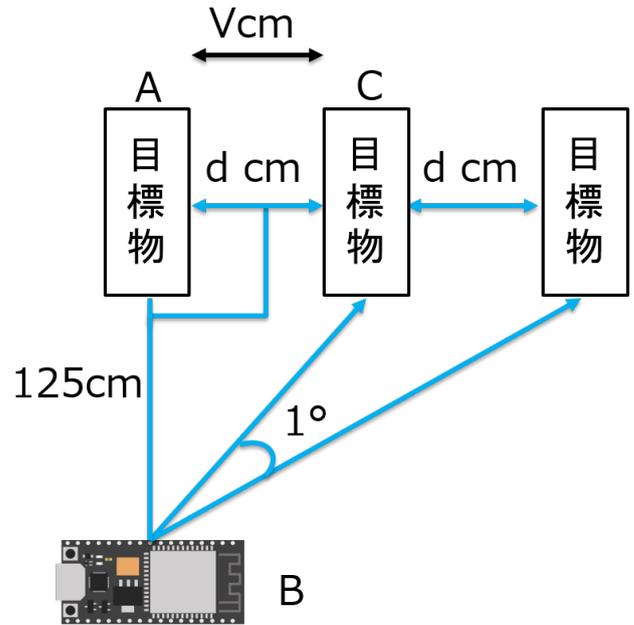


図 19 1 度の誤差による V の最大値

超音波センサで構成されるマルチセンサーフュージョンを採用して、複数のセンサーデータの検証およびクロスチェックが必要である [9]。

IoT デバイスを手に持って超音波距離センサの値を取得する場合、目標物が小さいほど照準が合わず、任意の距離データを取得できなかった。解決方法として目標物の面積を大きくする方法がある。

地磁気センサの値は IoT デバイスを固定した状態でも変化する。この問題を解決するため、地磁気センサのキャリブレーションの修正が必要である。キャリブレーションの修正は、地磁気センサを 1 周回した値を図に落とし込み、キャリブレーション結果の円が歪んでいた場合に Z 軸の値を変更する。図のキャリブレーション結果が円を描くようになったらキャリブレーションの修正は完了である。

7. おわりに

本研究では、物理的に同じ見かけの目標物を超音波距離センサと地磁気センサを用いて特定する方法を提案し、視覚的に目標物を特定することが可能になった。超音波距離センサ、地磁気センサで取得した値の中で最頻値を用いて余弦定理の計算を行った場合、距離誤差が最低 2cm になり、角度誤差を最低 1° にすることができた。

参考文献

- [1] Das, Sujit, and Elizabeth Mao. "The global energy footprint of information and communication technology electronics in connected Internet-of-Things devices." *Sustainable Energy, Grids and Networks* 24 (2020): 100408.
- [2] Choi, Jiwon, et al. "Detecting and identifying faulty IoT devices in smart home with context extraction." 2018 48th Annual IEEE/IFIP International Conference on

- Dependable Systems and Networks (DSN). IEEE, 2018.
- [3] Aftab, Haris, et al. "Analysis of identifiers in IoT platforms." *Digital Communications and Networks* 6.3 (2020): 333-340.
 - [4] Lee, Chungsan, et al. "Smart parking system for Internet of Things." 2016 IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE). IEEE, 2016.
 - [5] J. Kim, H. Kim, J. Jeong, Y. Seo and P. Mah, "Field Deployment of a Large-Scale WSN for Parking Management System," 2010 7th Annual IEEE Communications Society Conference on Sensor, Mesh and Ad Hoc Communications and Networks (SECON), 2010, pp. 1-3, doi: 10.1109/SECON.2010.5508217.
 - [6] Pius Lee, Hwee-Pink Tan, and Mingding Han. 2011. Demo: A solar-powered wireless parking guidance system for outdoor car parks. In *Proceedings of the 9th ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys '11)*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 423–424.
 - [7] Morgan, Elijah J. "HC-SR04 ultrasonic sensor." (2014): 1-5.
 - [8] 田中 風助, 杉本 一彦, 串田 高幸, "自律航法に基づく GPS 通信回数の低減による IoT デバイスの省電力な測位の実測結果", CDSL-TR-069, Nov. 30, 2021.
 - [9] Lim, Bing Shun, Sye Loong Keoh, and Vrizlynn LL Thing. "Autonomous vehicle ultrasonic sensor vulnerability and impact assessment." 2018 IEEE 4th World Forum on Internet of Things (WF-IoT). IEEE, 2018.