

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 6 月 21 日現在

機関番号：21201

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2022

課題番号：17K12760

研究課題名（和文）SS超音波を用いた人・ロボットの屋内位置情報計測・蓄積システム

研究課題名（英文）Indoor Positioning and Storage System for Human and Robots Using SS Ultrasonic Waves

研究代表者

鈴木 彰真（Suzuki, Akimasa）

岩手県立大学・ソフトウェア情報学部・准教授

研究者番号：10609423

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,300,000円

研究成果の概要（和文）：近年、日常生活や公共の場において自律移動ロボットの利用がされている。人と円滑にコミュニケーションを行うためには適切な位置や姿勢に調整する必要がある。一方、人とドローンのコミュニケーションにおいてはジェスチャーを利用したコミュニケーションやロボットの動作によって状態を伝える研究がされている。これらの研究においては人とロボットの位置関係については言及されていない。これまでSS超音波を利用した屋内測位システムを開発してきた。本研究では、SS超音波測位による位置関係の計測システムを構築した。また、人とドローンの位置関係に対するアンケートを行い、ドローンに対する適切な位置について評価を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

現在、ロボットによる配膳サービス等、人とコミュニケーションを行うロボットが実用化されている。コミュニケーションの際にロボットが人に近づきすぎることによって人が抱く危機感や、ロボットと人の距離が遠くなることによって不便を生じる恐れがある。さらに、ドローンの利活用の際にこの問題が3次元で発生することが考えられる。本研究成果によって、人とロボットの適切な距離や位置の感覚を屋内のあらゆる場面を想定して実験、調査することができ、ロボットが人間にサービスをする状況において、より自然にロボットと人がコミュニケーションすることができるようになる。

研究成果の概要（英文）：With the advent of autonomous mobile robots used in public spaces, robot position and posture must be adjusted to allow smooth communication with humans. Studies have been conducted on appropriate directions and movements for human;robot interactions, and on the use of gestures and robot movements for robots;human communication. However, these studies do not discuss how position impacts the human;robot interaction.

In this study, we develop an indoor positioning system using spread spectrum (SS) ultrasonic waves. We experimentally evaluate the system and show its feasibility in practice. Furthermore, based on questionnaire results, we investigate the relationship of position and human feeling toward a drone.

研究分野：計測工学

キーワード：屋内測位 SS超音波 ロボット ドローン

1 研究開始当初の背景

洗濯、炊事、介護などの人間との共生を目的とした自律移動（自分で考えて行動をする）ロボットの研究が注目されている。人とのコミュニケーションを自然かつ円滑に行うためには、それぞれが近すぎることによって生じる圧迫感や、遠すぎることによる疎外感を感じることなく、適切なタイミングで会話に割り込み、人に合わせてロボットの位置や姿勢、ハンドの高さを調整する必要がある。

この問題に対して、認知科学の面からは、自然にコミュニケーションをとるための間合いについて研究されている例（坊農，平田，石黒，第65回人工知能学会 言語・音声理解と対話処理研究会，2012）や実際にロボットと人の位置関係からコミュニケーションの挙動を変化させる研究（田崎，駒谷，尾形他，情報処理学会全国大会，2006）がある。これらの実施例において、複数の人—ロボット間の建物内での3次元の位置関係を座標として蓄積し、その情報を提供することができれば、人工知能による位置姿勢制御の結果と人やロボットのコミュニケーションとの関連性が容易に解析可能となり、研究発展への貢献が期待できる。

一方、屋内の位置計測による人のナビゲーションシステムは、現在実用化に向けた取り組みが行われている（株式会社ゼンリンデータコム，株式会社NTTドコモ，報道発表，2015）が、ロボットを対象にした高精度な位置計測アプリケーションは実用化されていない。また、これまで赤外線や電波、画像情報センサ等を用いて屋内環境の位置情報をとる研究はされているが、計測精度、リアルタイム性、他の物体の遮り、照明の変化に対する弱さに問題があり、高さ方向を含めた3次元の座標がわかるものは少ない。研究代表者らは、これまでにローカル座標の取得可能な環境設置型センサとしてSS超音波を用いた3次元屋内位置計測システムを検討してきた。SS超音波は雑音に強く、複数の送信・受信機をリアルタイムに識別して位置計測ができる。従って、複数の人・ロボットの3次元位置座標が同時に取得できる。さらに、電波や赤外線などに比べ速度が遅いため容易に広範囲の高精度計測が可能である（M. Hazas. and A. Hopper, IEEE Trans. Mobile Computing, 2006）。

2 研究の目的

本研究では、複数の人、ロボットのコミュニケーション向上のため、SS超音波による計測結果をリアルタイムに蓄積する位置情報取得・蓄積システムの開発によって自己座標と方向、相対的な位置関係の動きを蓄積することを目的とする。それぞれの受信機で得られた位置情報を5cm以内の測位(位置計測)精度で70ms毎に蓄積することにより、受信機ロボットの移動経路や人とロボットが自分で考えて行動したときの人との位置関係の計測を可能とする。その様子を他の分野の研究者にわかりやすく提供できるような位置情報取得・蓄積システムを構築して、ロボットの学習や協調作業能力向上につながるようにする。蓄積された位置情報をロボットに与えれば、ロボットと人がコミュニケーションをする際に近すぎ(遠すぎ)ないよう、ロボット自身で修正できる。そこで、ロボットが学習して効率的に協調作業ができるような位置情報の蓄積データを提供できる仕様とする。

3 研究の方法

現在、SS超音波による屋内位置情報取得・蓄積システムの構築に必要な研究として、ロボットの自律移動による自己位置認識精度の検討と符号分割多重通信方式や遮蔽、速度に関する頑健性についてそれぞれ自作の試作機を用いて検討している。これらの検討では自己位置認識を目的としているため、計測環境に送信機、計測対象に受信機を設置する構成になっている。一方、本研究ではデータの取得・蓄積システムを環境側に設置するため、計測環境に受信機、計測対象に送信機を設置した逆GPS方式でシステムを構築する。

研究体制としては、初年度にセンサの性能の検討を中心としたハードウェアの構築に関する検討と、蓄積の手法の検討・実装の2つに分け、学生をそれぞれ研究協力者とし、並行で研究していく。センサ性能としては、初めて無響音室を利用してSS超音波の特性を検討し、計測性能向上を目指す。2年目も同様に2つの研究を平行して行い、成果物として基礎的な位置情報蓄積システムを実現させる。最終年度は、総括として位置情報取得・蓄積システムの定量的評価を行っていく。

(a) システム構築における計測性能の検討

人、ロボットが自然にコミュニケーションをするための位置情報取得・蓄積システムを構築するために、人の動作を制限せず違和感を感じさせないセンサシステムとして、持ち運び容易な小型デバイスを送信機とする計測システムを実現する。新たなシステム構築の際、計測時間間隔や計測可能なエリア、精度が変化する可能性があるため、それらの検討を無響音室と一般的な部屋の双方で行う。計測の精度は真値と計測値間の距離が 5cm 以内となることを目標とする。

(b) データ蓄積手法の検討とデータベース構築

(a)に平行して、70ms 毎に受信機から得られた 3 次元座標情報を位置データの取りこぼしなく取得し、取得時間と受信機の ID とともに登録するデータベースを構築する。このデータベースでは、ロボットの ID を主キーとし、時刻と座標を要素とする。取得した位置情報は、受信機からサーバーに送られる。本研究では、これまでに実験で得られている座標情報を蓄積するデータとして、動作評価を行う。

(c) 測位センサの位置情報蓄積システムへの実装

(b)で検討したデータ蓄積システムをもとに、位置情報を取得しデータを蓄積するためのシステムを構築する。このフェーズにおいては、リアルタイムに取得したデータを蓄積するためのデータに変換可能かどうか検討する。また、取得時にエラーを出した場合の処理が適切に行えるか検討する。最終的にはリアルタイムに有用なデータの取得と蓄積が行えることを目標とする。

(d) 複数の受信機を用いた位置・方向の同時リアルタイム取得

コミュニケーションは複数の人—ロボット間で行われる。そこで、最大 4 点までの計測対象の座標を同時に取得できるように拡張する。複数の計測地点を 1 つの計測対象に設置することにより、位置だけではなく方向の検出ができるようにする。また、無響音室と通常の部屋で取得したデータを比較し、座標の精度とリアルタイム性について検討する。

(e) 位置情報取得・蓄積システムの有用性の検討

平成 31 年度は、研究の総仕上げとして実際に位置情報取得・蓄積システムを稼働させ、位置情報取得・蓄積システムとしての有用性を評価する。1 つのシンプルなシチュエーションとして、人とロボットの会話に着目し、ロボットの接近において位置情報を蓄積し、移動軌跡、速度、方向、距離間が計測できることを確認する。最終的には、位置情報取得・蓄積システムとして、ロボットが自然に会話を成立させたときの移動軌跡、速度、方向、距離の計測結果が 5cm の誤差範囲におさまり、70ms 毎にデータが蓄積できることを定量的な目標とする。

4 研究成果

研究を進めるにあたって、コミュニケーションロボットの範囲をドローンに拡張し、ドローンのノイズの影響下においても超音波による位置計測が可能であるか検討を進めてきた。これまで、複数の受信機に対して、電波を用いた SS 通信である従来の GPS で採用されている精度向上手法を応用し、超音波での位置精度の向上を目指した。その結果、最大 15[cm]の誤差でコミュニケーションの位置関係を計測することができることがわかった。ドローン飛行時の平均誤差は 4.1[cm]であり、当初の精度を達成した。さらに、センサの IoT 化とクラウドサービスを利用したデータ蓄積手法を提案し、位置情報のデータベースを構築し、リアルタイムに情報が蓄積されることを確認した。

また、人とドローンの位置関係に対する人の心理的な疎外感、危機感を 3 次元の位置情報から評価した。その結果、本提案手法を用いることで、被験者とドローンが 125cm 以上離れることで、恐怖感を感じないという結果が得られた。また、人とドローンが 150cm 離れていても、コミュニケーションが十分取れるということがわかった。

1.1 システムの実装

SS 超音波測位システムは SS 信号生成に疑似乱数系列である M 系列をかけたあわせた GOLD 符号を用い、直接拡散方式で行う。図 1 に生成される SS 信号を示す。図 1 上図は FPGA 内で生成される搬送波を示しており、疑似乱数系列 1 チップを、搬送波の 4 周期に対して掛け合わせ、図 1 下図に示す SS 信号を生成する。提案システムでは、送信信号の搬送波周波数は 40kHz とする。

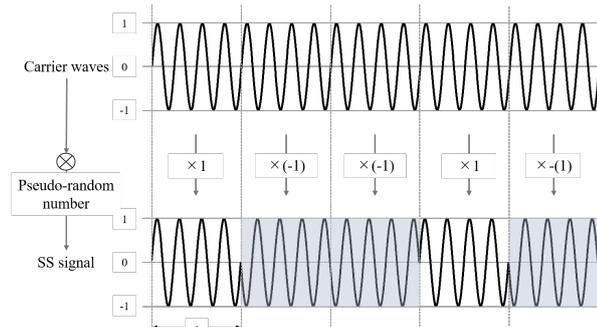


図 1 疑似乱数系列を用いた SS 信号の生成

図 2 にシステムの構成を示す。図 2 の tr_1 から tr_4 、 r_1 、 r_2 はそれぞれ超音波スピーカ、マイクを配置する受信地点を示している。また、Raspberry pi には音速計算のための温度センサを接続している。受信機では、受信した SS 超音波から TOF を計算し、Raspberry Pi に送信される。Raspberry Pi では、TOF と温度データから 3次元座標を計算し、サーバに送信する。受信側では受信から計算、保存までの一連の動作を 1 秒に 1 回行う。

測位センサの位置情報蓄積システムへの実装、ならびに複数の受信機を用いた位置・方向の同時リアルタイム取得を実現させるため、クラウドサービスである Microsoft Azure を利用し、図 2 におけるサーバから、IoT Hub を経由して Cosmos DB においてリアルタイムに座標を保存するシステムを構築した。Cosmos DB に保存された座標を Microsoft Azure にアクセスして表示した内容を図 3 に示す。図 3 に示すように、計測時刻、受信機の番号と 3次元座標がリアルタイムに記録される。

1.2 人とドローンの位置関係に対する人の心理的評価

本研究では 2 地点の SS 超音波測位システムを利用し、人とドローンがコミュニケーションを取るための適切な距離感の定義をするために、アンケート調査を実施した。

実験環境を図 4 に示す。縦横高さそれぞれ 0[mm] の屋内環境を利用する。屋内環境の天井四隅にスピーカ $tr_1 \sim tr_4$ を配置する。空間の端を原点とし、それぞれのスピーカ座標を $(0,0,3000)[mm]$, $(3000, 0, 3000) [mm]$, $(3000, 3000, 3000) [mm]$, $(0, 3000, 3000) [mm]$ とする。マイクは人とドローンの 2 点配置した。人は図に示す $R_h (1500,1000,0)[mm]$ の位置に直立または椅子に座って計測を行う。また、被験者にヘルメットをかぶってもらい、マイクをヘルメットの頂点に装着する。ドローンは、図に示す R_{d1} から R_{d16} の座標に配置した。それぞれの座標は $R_{d1} (1500, 1750, 500) [mm]$ から x 軸に 250mm ずつ 2500mm の位置まで移動し、z 軸に 500mm ずつ 2000[mm] の位置まで移動するとき押される 16 点の座標で実験を行った。また、ドローンは機体重量 905g、大きさ 322×242×84[mm] の DJI 社製 Mavic 2 zoom を利用した。本環境における 2 点の測位座標は、平均測位誤差 41mm 以内で同時計測が可能で、想定する環境下において十分利用可能であることを確認した。

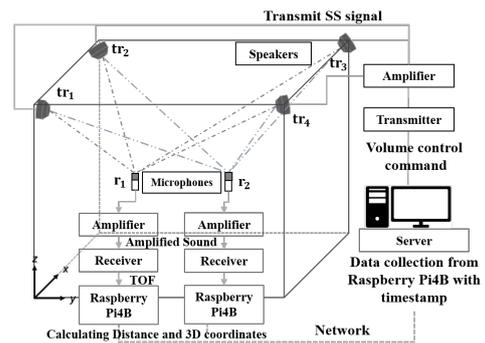


図 3 システムの構成

測位情報(列番号、タイムスタンプ、機器番号、測位座標)が表示される。

列番号	タイムスタンプ	機器番号	x	y	z
1	2021年08月01日 00:00:00.3027599	0	1000.0	2000.0	402.28946159607577
2	2021年08月01日 00:01:02.7469206	0	1000.0	2000.0	402.28946159607577
3	2021年08月01日 00:01:03.2069487	0	1000.0	2000.0	402.28946159607577
4	2021年08月01日 00:01:04.6804900	0	1000.0	2000.0	402.28946159607577
5	2021年08月01日 00:01:05.945195	0	1000.0	2000.0	402.28946159607577
6	2021年08月01日 00:01:07.0090661	0	1000.0	2000.0	402.28946159607577
7	2021年08月01日 00:01:08.074004	0	1000.0	2000.0	402.28946159607577
8	2021年08月01日 00:01:09.1385101	0	1000.0	2000.0	402.28946159607577
9	2021年08月01日 00:01:10.214795	0	1000.0	2000.0	402.28946159607577
10	2021年08月01日 00:01:11.2903827	0	1000.0	2000.0	402.28946159607577
11	2021年08月01日 00:01:12.367854	0	1000.0	2000.0	402.28946159607577
12	2021年08月01日 00:01:13.4449199	0	1000.0	2000.0	402.28946159607577
13	2021年08月01日 17:20:09.840261	0	1000.0	2516.1125	402.748110120969

図 2 データベースに保存された座標

アンケートによる評価実験では 12 人の被験者に協力していただいた。実験結果を図 5 図 6 に示す。各質問に対する回答は、1(思わない)～5 点(強く思う)の 5 段階で評価点をつけた。

図 5、図 6 はそれぞれ、ドローンに対して悪いまたは良い感情を持つ位置をそれぞれ示している。図 5 によれば、x 軸方向ではドローンが人に近い距離にある場合、嫌悪感や不快感、恐怖、緊張を強く感じる傾向がある。z 軸方向では地面から 1500 [mm] の位置において評価点が高い傾向となった。一般的に足元となる地面から 500 [mm]、胴体当たりとなる地面から 1000 [mm]、頭上となる 2000 [mm] の位置で正面距離が 1250 [mm] 以上の場合、悪感情を持たない傾向であった。

また、図 6 によると、 R_{d3} 、 R_{d4} 、 R_{d7} 、 R_{d8} では他の測位点に比べ、評価点が高い傾向となり、悪感情を感じる範囲外であるためコミュニケーションを取ることに適した位置であると考えられる。一方、多くの人が頭上となる地面から 2000 [mm] の高さではドローンに対して悪感情を感じないものの、良い感情を持たない結果となった。

表 1 アンケート調査項目

質問項目	評価点
ドローンに対して嫌悪感を持ちましたか？	1-2-3-4-5
ドローンに対して不快感を感じましたか？	1-2-3-4-5
ドローンに対して怖さを感じましたか？	1-2-3-4-5
ドローンに対して緊張を感じますか？	1-2-3-4-5
ドローンに対して親しみを感じましたか？	1-2-3-4-5
ドローンに触れたいと思いますか？	1-2-3-4-5
ドローンと会話したいと思いますか？	1-2-3-4-5
ドローンと会話することを想定したとき気が散りますか？	1-2-3-4-5

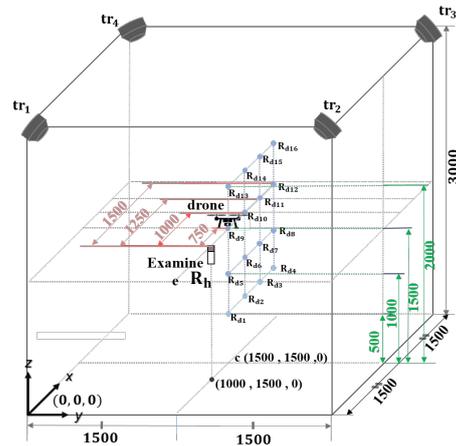


図 4 コミュニケーション距離計測環境

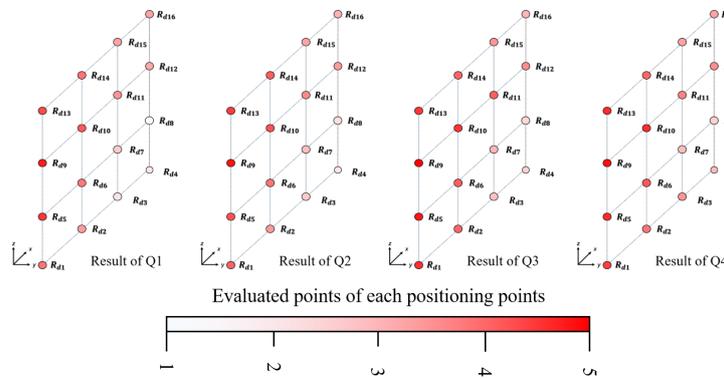


図 5 コミュニケーションにおいて否定的な意見が得られた場所

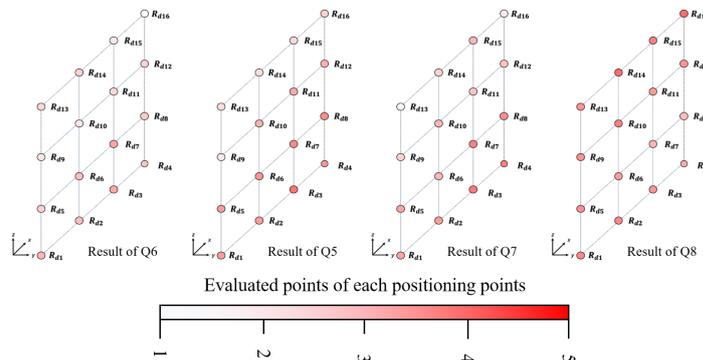


図 6 コミュニケーションにおいて肯定的な意見が得られた場所

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Tatsuki Okada, Akimasa Suzuki, and Souichirou Masuda	4. 巻 14
2. 論文標題 Performance Evaluation on Indoor Positioning System Using SS Ultrasonic Waves for Drone Applications	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 International Journal on Advances in Systems and Measurements	6. 最初と最後の頁 59-68
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 増田蒼一郎 鈴木彰真
2. 発表標題 GOLD符号を用いたSS超音波によるドローンの屋内自己位置推定の精度評価
3. 学会等名 情報処理学会84回全国大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Tatsuki Okada, and Akimasa Suzuki
2. 発表標題 Measurement Accuracy on Indoor Positioning System Using SS Ultrasonic Waves for Drone Applications
3. 学会等名 The Ninth International Conference on Advances in Vehicular Systems, Technologies and Applications VEHICULAR 2020（国際学会）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 岡田樹, 鈴木彰真, 村田嘉利, 佐藤永欣
2. 発表標題 超音波測位装置を用いた非GNSS環境下における暗所壁面スキャニングシステムの提案
3. 学会等名 情報処理学会第82回全国大会
4. 発表年 2019年～2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

岩手県立大学 鈴木彰真研究室
http://p-www.iwate-pu.ac.jp/~suzuki_a/
鈴木研究室 研究について
http://p-www.iwate-pu.ac.jp/~suzuki_a/project.html
岩手県立大学 鈴木彰真研究室 ホームページ 研究成果
http://p-www.iwate-pu.ac.jp/~suzuki_a/research

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------