

令和 5 年 6 月 1 6 日現在

機関番号：5 0 1 0 4

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2020 ~ 2022

課題番号：2 0 K 0 4 5 2 3

研究課題名 (和文) IoT向けのリアルタイムで測位可能な超音波測位システムの測位領域の拡大

研究課題名 (英文) Expansion of positioning area of ultrasonic positioning system capable of real-time positioning for IoT

研究代表者

松岡 俊佑 (Matsuoka, Shunsuke)

旭川工業高等専門学校・機械システム工学科・准教授

研究者番号：0 0 4 3 5 3 9 8

交付決定額 (研究期間全体) : (直接経費) 3,300,000 円

研究成果の概要 (和文) : 移動するモノの位置情報をリアルタイムかつ、広範囲で高精度に取得可能な超音波測位システムを実現することが本研究の目的である。事前研究では、すでに30msの時間間隔での測位を達成しており、これは他の関連研究に比べても3倍以上の性能をもつ。本研究課題では測定範囲の拡大に取り組んだ。超音波測位システムの受信回路をPSoC5LPを用いて再構築した。また、超音波送信機の指向性を改善する方法としてフェーズドアレイ送信機を構築したところ、指向方向を制御できることが確認できた。また、数値シミュレーションでは各送信信号の位相角度を変えることによって指向方向を制御できることが確認できた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究課題で提案している複数の超音波周波数を用いた方式は、測位精度とリアルタイム性能が同時に達成可能な、他の研究にはない新たな手法である。技術的に確立されれば、実用化・製品化されれば、工業内における搬送ロボットやドローンの位置推定、地下鉄の駅やデパート、空港におけるナビゲーション、介護施設での老人の見守り、ビル内での避難誘導などと、幅広い分野での活用が見込まれ、社会的な波及効果は大きい。

研究成果の概要 (英文) : The purpose of this research is to realize an ultrasonic positioning system that can acquire the position information of moving objects in real time and in a wide range with high accuracy. In our preliminary research, we have already achieved positioning with a time interval of 30 ms, which is more than three times the performance of other related research. In this research project, we worked on expanding the measurement range. The receiving circuit of the ultrasonic positioning system was reconstructed using PSoC5LP. In addition, we constructed a phased array transmitter as a method of improving the directivity of the ultrasonic transmitter, and confirmed that the directivity can be controlled. Moreover, it was confirmed by the numerical simulation that the pointing direction can be controlled by changing the phase angle of each transmission signal.

研究分野：computer engineering

キーワード：超音波 GPS 測位システム PSoC(プログラマブルシステムオンチップ)

1. 研究開始当初の背景

次世代の技術革新の一つとして IoT(Internet of Things)が各種メディアで盛んに取り上げられている。今後は工場や倉庫内における生産・物流の現場においても IoT 化が進展していくことが予想される。その実現のためには、屋内において移動するモノやヒトの位置情報を高精度かつリアルタイムで取得する技術が必要となる。屋内向けの測位システムには様々な方式が提案されているが、現在のところ、測位精度とリアルタイム性の両方を備えた測位システムは実現されていない。研究代表者は独自に開発した方式を導入し、リアルタイムで測位可能な超音波測位システムを試作した。

提案システムでは3つの周波数の異なる超音波送信機を室内の天井に同じ高さで設置する。測位対象に超音波受信機を設置し、送信機から送られてくる送信信号が到達するまでの伝搬遅延時間により、送信機と受信機間の距離を測定する。3点測量の原理で受信機の座標位置が算出することができる。このとき、各送信信号に異なる周波数を用いることで、3つの信号を同時に受信処理することができ、測位時間を短縮化できる。また受信部にアナログ回路を用いることで受信処理の負荷が軽くなるため、測位時間は30ms と他の方式に比べて大幅に短縮化することができる。予備的な測位実験では、測位対象の位置情報を 2cm 以内の精度で、30ms の時間間隔で取得することができた。リアルタイム性能については目標値を達成できたが、実用化へ向けた次の段階として測位範囲の拡大という課題が残っている。本研究では、研究代表者が提案した超音波測位システムにフェーズドアレイ送信機などを導入し、測位できる領域の拡大に取り組んだ。

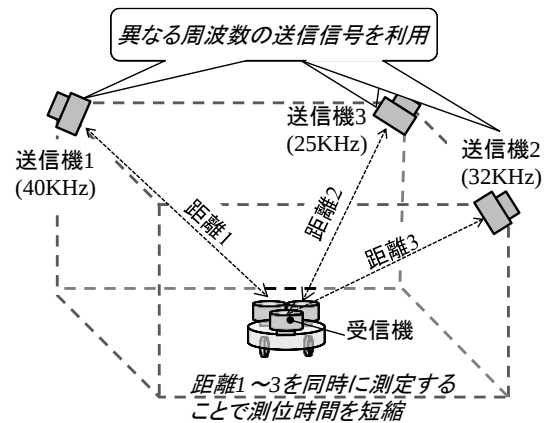


図1 提案システムの概念図

2. 研究の目的

移動するモノの位置情報をリアルタイムかつ、広範囲で高精度に取得可能な超音波測位システムを実現することが本研究の目的である。研究代表者の先行研究では、すでに 30ms の時間間隔での測位を達成しており、これは他の関連研究に比べても3倍以上の性能をもつ。本研究課題では研究代表者が提案した超音波測位システムの測定範囲の拡大に取り組んだ。

3. 研究の方法

研究代表者の令和元年度までの研究では、独自に開発した方式を導入してリアルタイムで測位可能な超音波測位システムを試作した。本研究課題では実用化へ向けた次の段階として、測位システムを改良し、測位範囲を拡大させるために次の①～③の課題に取り組んだ。

①受信回路のコンパクト化

PSoC(プログラマブル SoC)と呼ばれる内部にアナログ回路が内蔵されたマイコンを用いて増幅器やバンドパスフィルタを実装し、回路をコンパクト化させる。

②測定処理の改善

本提案手法では送信信号が受信機に到達するまでの伝搬時間をもとに送信機と受信機間の距離を測定している。事前研究では受信信号が減衰すると、伝搬時間の検出に遅延が生じることが判明した。そこで新たに補正処理を導入する。微弱な受信信号であっても測定精度を保ちつつ、より遠方距離の測定が可能となる。

③フェーズドアレイ送信機の導入による指向範囲の拡大

アレイ状に配置した送信機に位相の異なる信号を入力させることで、指向方向を制御させることができ、全測位領域において測位範囲をカバーすることができる。ここでは、数値シミュレーションにより音場分布を解析しながらフェーズドアレイ送信機の位相変移による音波強度方向について探っていく。

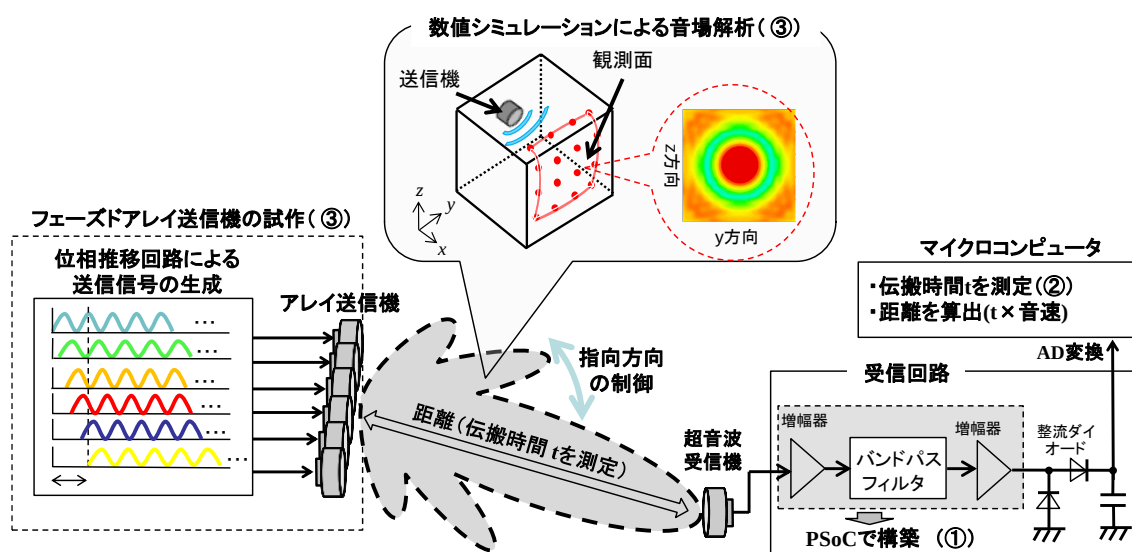


図2 提案方法による測位範囲の拡大

4. 研究成果

4. 1 受信回路のコンパクト化

①の課題については、研究代表者の先行研究において PSoC マイコンと呼ばれる内部にアナログ回路と CPU が内蔵された IC を用いて受信回路を構築した。しかし、使用した PSoC1 シリーズの IC は現在生産中止となっている。そこで、本研究課題では最新の PSoC5 シリーズの IC を用いて受信回路を再構築した。受信回路は PSoC5LP が搭載された CY8CKIT-059 キットへ実装する。受信回路ではオペアンプによる 2 段の増幅回路で受信信号を 16×32 倍する。次に AD 変換器によりデジタル値に変換し、デジタルバンドパスフィルタにより 40kHz の信号成分のみを取り出す。DMA (Direct Memory Access) 回路により PSoC のメモリに書き込んだのち、DA 変換器によりアナログ電圧に変換して PSoC の端子へ出力する。4400pF の平滑コンデンサにより、滑らかな波形に変形し、もう一度 PSoC の入力端子へ取り込む。この信号を比較回路へ通すことにより、方形波信号 TOF (time of flight) が生成される。TOF 信号の立ち上がりを Arduino Uno で検出すること

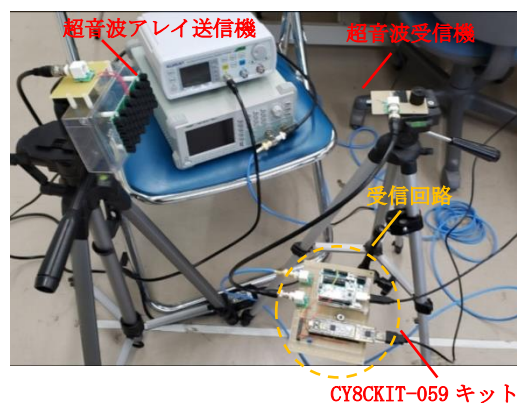


図3 構築した超音波距離

により、超音波信号の伝搬遅延信号を測定する．伝搬遅延時間に音速を掛け合わせることで送信機と受信機間の距離が算出できる．

4. 2 測定処理の改善

受信回路で扱う信号を図4に示す．送信部と受信部とは同期信号で開始時刻を一致させている．送信機からは同期信号の立ち上がりのタイミングで正弦波信号が1 ms 間出力される．送信信号が受信機に到達するまでには伝搬遅延が生じる．受信回路では伝搬遅延時間を測定するための信号を生成する．受信信号は平滑化してから比較回路へ通す．平滑後の信号(Compared signal)の電圧値が比較回路のしきい値電圧 V_{th} を超えた瞬間に TOF 検出信号が立ち上がる．この信号の立ち上がり時間 t を計測し、音速を掛けると送信機と受信機間の距離が算出できる．受信信号の強度によって平滑後の信号波形(Compared signal)の概形は変動する．受信信号が比較的弱い場合は、平滑波後の信号の立ち上がりの傾きが緩やかになり、比較回路のしきい値電圧 V_{th} に達するまでにより時間を要する(図5)．そのため、TOF 検出パルスの立ち上がりの遅延 $t - t_r$ が増加し、距離測定誤差が拡大する．そこで本研究では、平滑後の信号の立ち上がりの2点の電圧 V_1 、 V_2 を測定し、1 次式で近似することで、TOF 検出パルスの立ち上がりの遅延を補正する方法について検討した(図6)．従来の TOF 検出パルスの立ち上がりの判断に用いるしきい値電圧(すなわち V_{th})を V_1 、TOF 検出パルスの立ち上がり時間(すなわち t)を t_1 とする．続けて、平滑後の信号が電圧 $V_2 (> V_1)$ と時間 t_2 を測定する．ここで平滑後の信号の立ち上がり中の時刻 t における電圧 V は、次のような1 次式で近似できる．

$$V - V_1 = \frac{V_2 - V_1}{t_2 - t_1}(t - t_1) \cdots \cdots (1)$$

ここで、 V をあらかじめ測定しておいた平滑後の信号のオフセット電圧 V_{off} とし、(1)式を t について解けば、TOF 検出パルスの立ち上がり時間の補正值 t_r を算出できる．

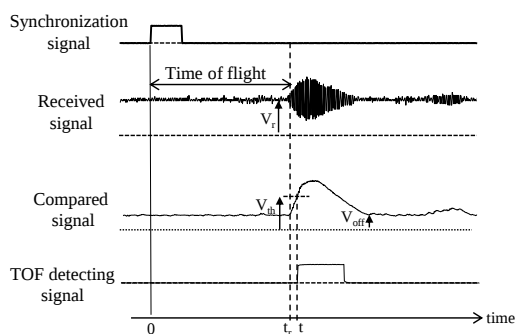


図4 受信信号

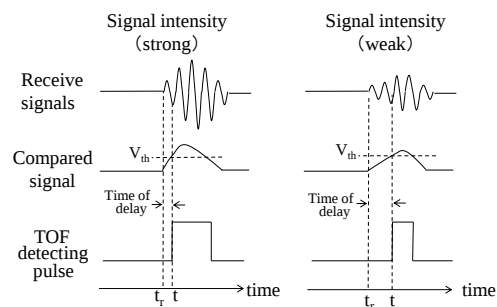


図5 受信信号の強度の違いによる波形の変化

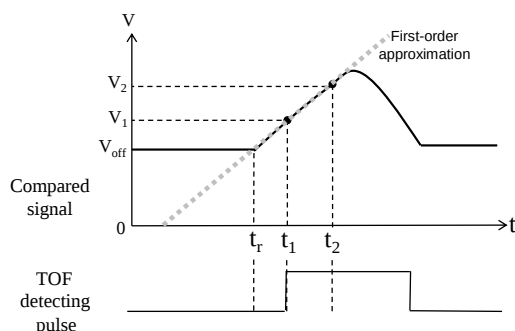


図6 平滑波形の1次近似

4. 3 フェーズドアレイ送信機の導入による指向範囲の拡大

アレイ状に配置した個々の送信機の位相をずらして指向方向を制御させるフェーズドアレイ技術を導入し、指向範囲の拡大を試みた。フェーズドアレイは、複数の送信センサから、超音波をそれぞれ異なるタイミングで発信させることで、波の重ね合わせにより指向方向を任意に操作できるシステムである。位相方向を制御することによって、1 個の送信機では指向範囲外となっていた領域もカバーすることができる。ここでは、フェーズドアレイ送信機を構築し、指向性実験により位相が制御できることを検証した(図7)。各送信信号は複数のファンクションジェネレータを用いて生成する。各ファンクションジェネレータからはクロック信号に同期して、それぞれ位相を等間隔にずらしたバースト正弦波を出力させる。位相間隔を同位相, 位相差 60° , 位相差 120° のパターンについて、測定実験を行ったところ、今回試作したフェーズドアレイ送信機は超音波出力方向の制御が可能であることを確認できた。

次に数値シミュレーションによりフェーズドアレイ送信機の超音波分布を調べた。数値モデルを図8に示す。7 個の送信機を横一列に配置し、それぞれ送信機からは位相を 1 波長ずらした 40kHz の信号を出力させる。このとき x-y 評価平面における超音波の強度分布は図9のようになった。数値計算と位相差を加えることで信号を強く放射したい方向を変えることができる。

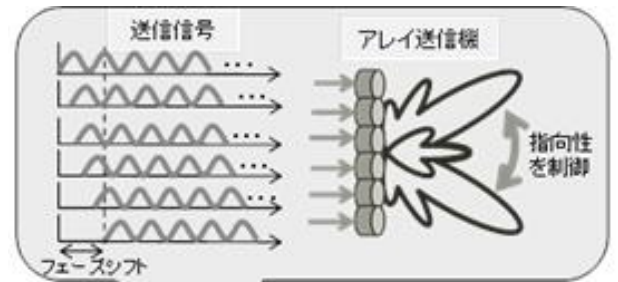


図7 構築したフェーズドアレイ送信機

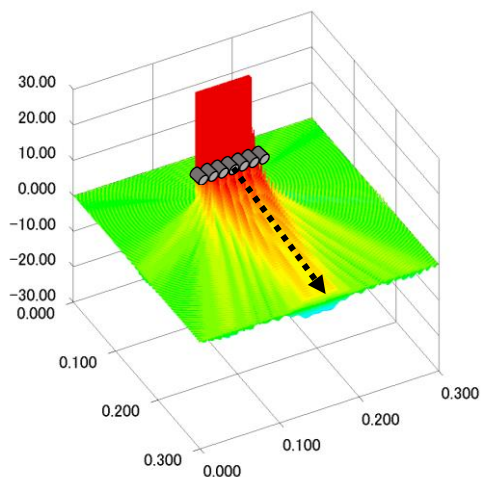


図8 位相差なし

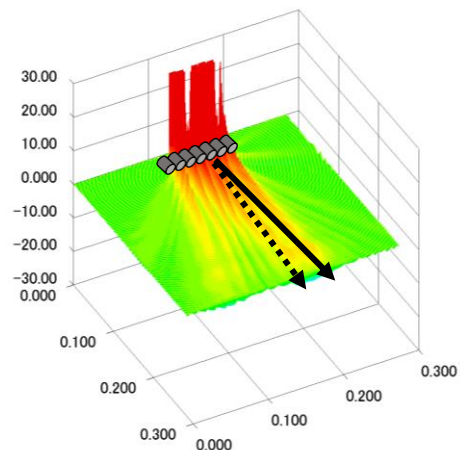


図9 位相差 1.5π

5. おわりに

本研究課題では超音波測位システムの受信回路を PSoC5LP を用いて再構築した。距離測定実験では 50cm および 100cm の距離において 2cm 以内の誤差で測定することができた。また、超音波送信機の指向性を改善する方法としてフェーズドアレイ送信機を構築したところ、指向方向を制御できることが確認できた。また、数値シミュレーションでは各送信信号の位相角度を変えることによって指向方向を制御できることが確認できた。全測位領域にわたって指向方向を向けることによって、指向性による誤差の問題を解決することができる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 齋藤悠登, 松岡俊佑, 川口秀樹, 市川周一
2. 発表標題 超音波測位システムのFFTを用いた受信処理の検討
3. 学会等名 日本機械学会北海道支部第51回学生員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 齋藤悠登, 松岡俊佑, 市川周一
2. 発表標題 IoT向けの再構成可能回路デバイスを用いたシステム構築に関する研究
3. 学会等名 先端的技術シンポジウムATS2021
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 高橋明日香, 川口秀樹, 松岡俊佑
2. 発表標題 超音波測位システムにおける超音波遠方場の放射特性数値解析に関する検討
3. 学会等名 第29回MAGDAコンファレンス
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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
---------	---------