

令和 4 年 6 月 8 日現在

機関番号：14301

研究種目：挑戦的研究(開拓)

研究期間：2018～2021

課題番号：18H05364・20K20374

研究課題名(和文)スペクトル拡散音波を用いた小型分散ロボットの協調制御のための測位システム

研究課題名(英文) Positioning system using spread spectrum sound for decentralized control of multi small robots

研究代表者

近藤 直 (Kondo, Naoshi)

京都大学・農学研究科・教授

研究者番号：20183353

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 19,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、非GPS環境における、小型分散ロボットの協調制御を実現するための航法システムに関する研究を行った。スペクトル拡散音波測位システムと慣性航法を組み合わせた複合航法を実現するためのハードウェアを構築し、SS音波同士の干渉低減方法、音速補償方法、ドップラシフト補償方法などの信号処理方法を開発した。さらに、新たな複合処理方法の開発を行った。8m×22mのグリーンハウス内で静止位置と方位の計測精度を評価した結果、位置の精度は55 mm以内、方位の精度は $1.58 \pm 0.86^\circ$ であった。クローラ型およびマルチコプタ型ロボットの移動体の測位精度は、それぞれ約50 mmおよび約74 mmであった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

世界人口の増加により食料需要が増す一方で、生産者の高齢化および減少が進む中、食料生産の省力化および自動化を実現する技術に期待が高まっている。RTK-GPSなどを利用した航法システムによりロボットトラクタなどが実用化されたが、グリーンハウス内や中山間地域などではGPSが使用し難く、小規模農地などではロボット農機が高価であることから導入が進んでいない。本研究では、非GPS環境でも対応し、比較的安価なシステムを構築できるスペクトル拡散音波測位システムを用いた航法システムを開発した。これにより、複数の小型ロボットを協調制御して農作業を行わせることで、比較的安価なロボット農機が実現できると期待できる。

研究成果の概要(英文)：The navigation system to realize decentralized control of multi small robots under GPS denied environment has been developed in this research. The hardware for hybrid navigation system using spread spectrum (SS) sound positioning system and inertial navigation system was constructed. And, The signal processing methods were developed such as SS sound interference reduction, sound velocity compensation, Doppler shift compensation and so on. Moreover, new hybrid processing method was developed. The static positioning and direction accuracy in 8 x 22 m green house were within 55 mm and $1.58 \pm 0.86^\circ$. The dynamic positioning accuracy using crawler type and multi-copter-type robots were within about 50 mm and 74 mm.

研究分野：生物センシング工学

キーワード：スペクトル拡散音波 複合航法 慣性航法システム 測位システム

1. 研究開始当初の背景

これまで開発されたマニピュレータを有する農業ロボットは比較的大型で、高価格かつ作業速度が遅いという欠点のため、選果場以外では普及していない。価格を下げるには小型化が重要であるが、小型車両ロボットは移動速度が遅く、搬送量も少なくなるという問題がある。しかし、近年注目されている小型飛行ロボット(ドローン)は、移動速度が速く経路を選ばないため、搬送作業に優れている。このようなドローンと組み合わせれば、小型ロボットであっても、車両型、飛行型それぞれの特徴を活かした協調動作を行うことで、大型ロボット以上の能力を安価に発揮できる可能性がある。

特に、果実収穫等の選択的作業では、1台の大型ロボットよりも複数台でほぼ同価格となる小型ロボットの方が生産性は高くなる可能性がある。よって本研究では昆虫にたとえられるような小型分散農作業ロボットの可能性を開拓する。そのためには、非GPS環境下で複数台の自律分散ロボットに協調作業を行わせるための航法システムの開発が基盤技術として最重要で、車両ロボットと飛行ロボットの同時自律移動制御という挑戦的な課題を解決する必要がある。

2. 研究の目的

本研究では、室内の非GPS環境下において自律作業を行う小型分散作業ロボットのための航法システムの開発を行う。特に、衛星等を用いたGPSの代わりにスペクトル拡散音波(SS音波)測位システムを用いることを特徴とする。音波は伝搬時間が電磁波と比較して遅いため、低サンプリングで十分な計測精度が得られる。また、レーザなど光学系による計測方法では障害物で遮蔽されると計測不能となるが、音波は回折するため多少遮蔽されても計測ができる優位性がある。さらに、本研究では通常の音波でなくSS音波を使うことで雑音耐性および信号識別性を高めている。ちなみに、搬送波周波数24kHz、チップレート12kcps、M系列符号周期1023、2値位相変調方式で作成したSS音波の雑音耐性は約15dBであった。

本研究グループでは、これまで温度や風などの環境要因による音速変化を補償する基地局法を開発し、屋外30m×30mの範囲で測位可能とした(3m/s程度の風の条件下で誤差20mm程度)。しかし、基地局となる送信機または受信機が必要となり、システムが複雑となる。そこで、本研究では、音波の伝搬時間(TOA)から位置と同時に音速を推定する方法を提案し、その計測精度を明らかにする。また、複数の対象を測位するために、測位範囲に送信機(スピーカ)、測位対象に受信機(マイク)を設置する。このとき、複数の送信機から送信される信号同士の干渉が問題になる。そこで、本研究では、TDMA(時分割多重接続)またはFDMA(周波数分割多重接続)の併用による信号間干渉の影響を緩和する。また、動的計測では、ドップラーシフトの影響が問題になる。ドップラーシフト補償方法を検討し、クローラ型ロボットおよびマルチコプターの測位精度を明らかにする。さらに、個々の車両ロボットの位置計測においては、音速が遅いことによる計測遅延(0.25s)と計測周期の低さ(4Hz程度)は大きな問題にならないが、ドローンの位置を計測し自律飛行を実現するためには問題となる。そこで本研究では、SS音波測位システムと慣性センサを用いた複合航法システムを構築することでこの問題の解決を図る。

以上のように、本研究では農作業用ドローンの自律移動のための複合航法システムの開発ならびに車両ロボットとドローンを含む小型分散型ロボットによる協調作業を実現するための基盤技術を確立することとする。

3. 研究の方法

(1) 音速補償

4つのスピーカから出力される音波の伝搬時間(TOA)から位置と音速を逐次計算により同時に推定する方法(estimated method)を提案した。これにより、温度センサや基地局など音速を推定するための装置が不要となる。提案手法の計測精度を評価するために、3m×9mのグリーンハウス内において、一定の位置にマイクを固定し、温度変化が大きくなる10時~19時までの1時間毎に位置計測を行った。また、温度センサをスピーカ付近に設置し、温度から求めた音速を用いた位置計算結果と比較した。

(2) 静的位置計測の精度評価

信号間干渉の影響を緩和するためにTDMA(時分割多重接続)またはFDMA(周波数多重接続)を併用した方法の静的位置の計測精度を評価した。図1に示すグリーンハウスの6m×12mの位置にスピーカを設置しその1/4の範囲で位置の計測を行った。また、マルチコプターが発生する雑音に対する計測精度の評価も合わせて行った。さらに、2個のマイクロホンを用いて方位の計測精度の評価を試みた。

(3) 動的計測の精度評価

小型ロボットの位置を計測するためのSSSLPS受信機の作成を行った(図2)。マイク、IMU、地磁気方位センサ、気圧センサなどのセンサとドライブ回路、トリガ信号を受信するためのZigbee、各センサ信号を同期しながら取得するためのFPGA、センサ信号の信号処理を行うためのJetson Nanoから構成されている。この装置を小型クローラ型ロボットとマルチコプターに搭

載した (図 3)。これらが移動したときの位置の計測精度をモーションキャプチャーによる計測結果と比較することで評価した。そして、ドップラーシフト補償方法の評価と改良を行った。

(4) 複合航法 (INS+SSSLPS)

IMU から得られる 3 軸加速度, 3 軸角速度から計算される位置と SSSLPS から得られる伝搬時間 (TOA) を利用して位置と姿勢を推定する非線形フィルタリング手法を提案した。シミュレーションと小型クローラ型ロボットから得られる SSSLPS 受信機のデータを用いて評価を行った。

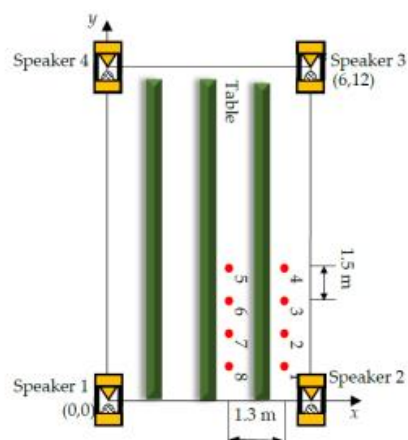


図 1 実験場と計測位置

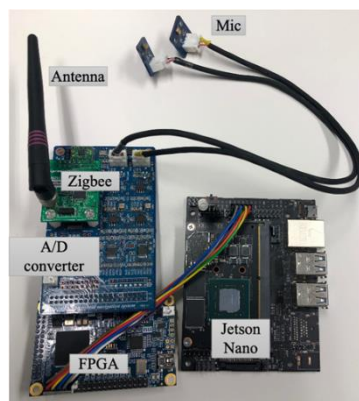
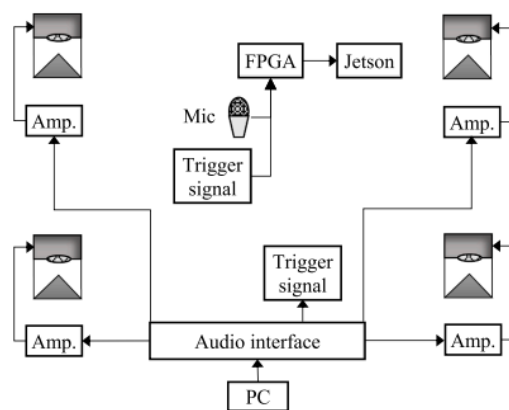


図 2 SSSLPS と受信機

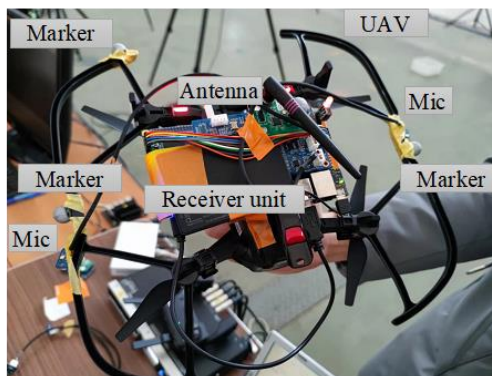
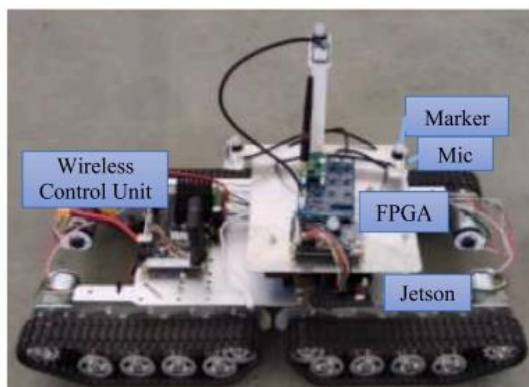


図 3 SSSLPS 受信機を搭載した小型クローラ型ロボットとマルチコプター

4. 研究成果

(1) 音速補償¹⁾

結果を図 4 に示す。各スピーカに温度センサを取り付け、その温度センサから音速を求めて位置を計測(sensor method)した結果は、平均誤差が 39 mm であった。一方、提案手法による誤差は 17 mm であり、計測精度が改善した。温度センサでは、センサのある一点の温度を計測するのに対して、提案手法では、計測場の平均音速を推定している。計測場の温度分布が大きい場合や、温度センサ付近の温度差が比較的大きく異なると、温度センサの温度から求める音速では、実際の音速との違いが大きくなる。そのため、提案手法の精度が改善されたと考えられた。

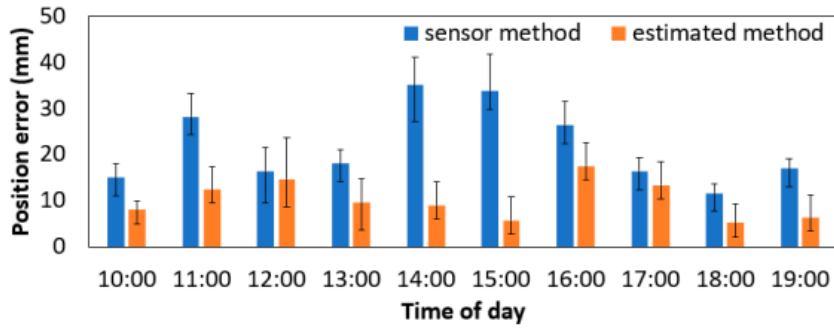


図4 温度補償方法の評価実験の結果

(2) 静的位置計測の精度評価²⁾³⁾

図5に結果を示す。クアッドコプターの雑音が無い場合の、TDMAの平均計測誤差は15.9mm, FDMAは16.0mmであり、両者に大きな違いはなかった。一方、マルチコプターの雑音がある場合は、TDMAの平均計測誤差は23.2mm, FDMAは31.6mmであり、FDMAの計測精度の方が低かった。これは、FDMAの場合、複数の周波数帯域を使用する必要があり、高周波数帯域は距離減衰する程度が大きくなるため、マルチコプターの雑音に対するSS音波信号の受信強度が低下したためだと考えられる。

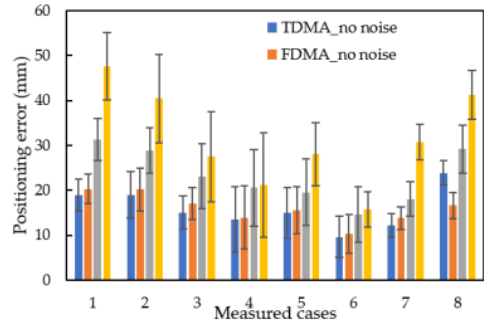


図5 静的位置の計測結果

また、200mmの間をあけて設置した2つのマイクロホンで受信される信号を利用して方位の計測精度を評価した。8m x 16mのグリーンハウス内で、6m x 15mの位置にスピーカを設置し計測を行った結果、 $1.58 \pm 0.86^\circ$ の方位計測誤差であった。

(3) 動的位置計測の精度評価⁴⁾

動的位置を計測する場合はドップラー効果による影響が問題になる。これまでに受信信号の搬送波周波数を検出してドップラーシフト量を推定していた。しかし、図6上に示すように、屋内の場合は反射波の周波数ピーク(赤)が出現し、正しいドップラーシフト量が推定できないことがあった。これを改善するために、搬送波周波数のピーク値を検出するための閾値を設定し、抽出された候補のピークの周波数から、それぞれ相関波形および伝搬時間を求め、最も伝搬時間の短いものを直接波とみなすことにした(図6中)。屋内の約6m x 6mの範囲を速度0.17から0.3m/sの速度で移動させたとき、2次元の動的位置の計測誤差(モーションキャプチャーによる位置計測との比較)は 50.3 ± 22.3 mmであった。また、全計測データ中2.6%のデータにおいて、ドップラーシフト補償が機能せず、相関ピークを検出できなかった。計測した位置の軌跡を図6下に示す。また、マルチコプターの場合は、同じドップラーシフト補正方法で27.9%のデータにおいて相関ピークが検出できなかった。これは、マルチコプターの雑音が、ドップラーシフトを検出するためのスペクトルピークに影響を与えたためであった。この問題を解決するために、1Hz毎にドップラーシフトした参照信号を作成し、その参照信号と受信信号で相関を計算し、その相関波形群の中で最もSN比の高い相関波形を用いて伝搬時間の計測を行った。そのことで、90.2%のデータで相関ピークの検出が行え、位置計測の平均誤差は74.5mmとなった。

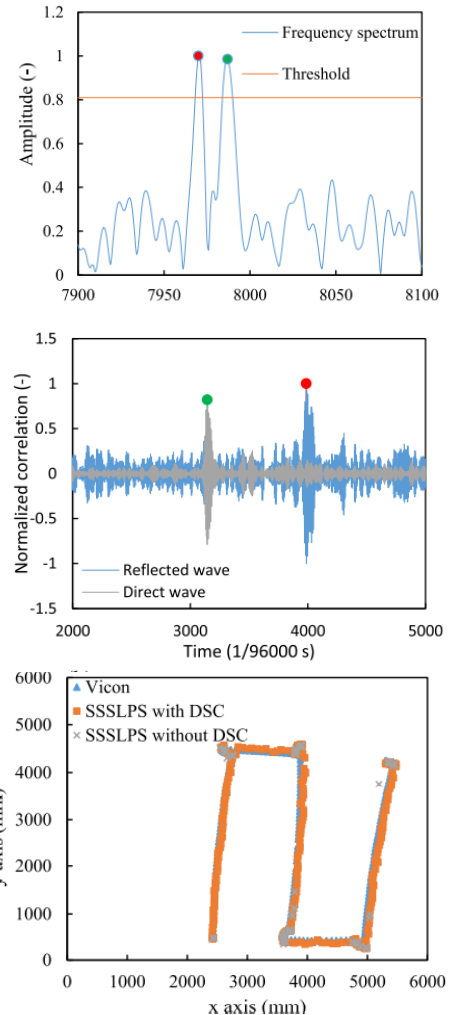


図6 動的位置の計測結果

(4) 複合航法 (INS+SSSLPS) ⁵⁾

シミュレーションにおいて、提案した非線形フィルタリング手法の結果と拡張カルマンフィルタの結果とを比較した。0.1 m/s の移動速度のとき、FDMA では両手法とも約 20 mm の平均計測誤差であった。一方、TDMA では拡張カルマンフィルタは約 60 mm、提案手法は約 40 mm の計測誤差であった。また、2.0 m/s の移動速度のとき、FDMA では拡張カルマンフィルタは約 50 mm、提案手法は約 20 mm、TDMA では拡張カルマンフィルタは約 600 mm、提案手法は約 40 mm の計測誤差であり提案手法の有効性を示した。また、TDMA による計測で小型クローラ型ロボットに搭載した受信機から得られたデータを用いて評価した結果、推定平均誤差は 112 mm とシミュレーションの結果より大きくなった。これは、伝搬時間計測の誤差、モーションキャプチャーと SSSLPS の座標のキャリブレーションの誤差、IMU の設置位置がロボットの重心と一致していないことによる誤差などが考えられる。しかし、TDMA による計測でも、提案した非線形フィルタによる出力は収束し、拡張カルマンフィルタよりも優れた性能を示すことが分かった。

今後の課題をいくつかまとめておく。まず、リアルタイム処理を行うアルゴリズムを構築することである。特に、ドップラーシフト補償方法においては、ドップラーシフトした参照信号を網羅的に作成し相関処理を行っているため計算コストが高く、そのままのアルゴリズムでリアルタイム処理を行うことが難しい。IMU のデータもうまく活用してドップラーシフト量の推定が行えれば、計算コストを削減することも考えられる。次に、複合航法システムの改良である。本研究では、3 軸加速度と 3 軸角速度のデータを用いたが、さらに、地磁気方位センサのデータと複数のマイクロホンによる TOA のデータを用いることで姿勢推定の精度を向上が期待できる。また、気圧センサ、レーザレンジファインダなどのデータも複合航法の処理に利用して高度の推定精度を向上させることができると考えられる。

参考文献

- 1) Lok Wai Jacky Tsay, Tomoo Shiigi, Zichen Huang, Xunyue Zhao, Tetsuhito Suzuki, Yuichi Ogawa and Naoshi Kondo, Temperature-Compensated Spread Spectrum Sound-Based Local Positioning System for Greenhouse Operations, *IoT*, 1, 147-160, 2020.
- 2) Zichen Huang, Lok Wai Jacky Tsay, Tomoo Shiigi, Xunyue Zhao, Hiroaki Nakanishi, Tetsuhito Suzuki, Yuichi Ogawa and Naoshi Kondo, A Noise Tolerant Spread Spectrum Sound-Based Local Positioning System for Operating a Quadcopter in a Greenhouse, *Sensors* 2020, 20, 1981.
- 3) Zichen Huang, Tsay L.W. Jacky, Xunyue Zhao, Hiroki Fukuda, Tomoo Shiigi, Hiroaki Nakanishi, Tetsuhito Suzuki, Yuichi Ogawa, Naoshi Kondo, Position and orientation measurement system using spread spectrum sound for greenhouse robots, *Biosystems Engineering*, Volume 198, 50-62, 2020.
- 4) Zichen Huang, Tomoo Shiigi, Lok Wai Jacky Tsay, Hiroaki Nakanishi, Tetsuhito Suzuki, Yuichi Ogawa, Kondo Naoshi, A sound-based positioning system with centimeter accuracy for mobile robots in a greenhouse using frequency shift compensation, *Computers and Electronics in Agriculture* 187 (2021) 106235
- 5) Romprakhun Tientadakul, Hiroaki Nakanishi, Tomoo Shiigi, Zichen Huang, Lok Wai Jacky Tsay, and Naoshi Kondo, Spread Spectrum Sound with TDMA and INS Hybrid Navigation System for Indoor Environment, *Journal of Robotics and Mechatronics* Vol.33 No.6, 1315-1325, 2021

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Huang Zichen, Tsay Lok Wai Jacky, Shiigi Tomoo, Zhao Xunyue, Nakanishi Hiroaki, Suzuki Tetsuhito, Ogawa Yuichi, Kondo Naoshi	4. 巻 20
2. 論文標題 A Noise Tolerant Spread Spectrum Sound-Based Local Positioning System for Operating a Quadcopter in a Greenhouse	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Sensors	6. 最初と最後の頁 1981 ~ 1981
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/s20071981	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Zichen Huang, Tsay L.W. Jacky, Xunyue Zhao, Hiroki Fukuda, Tomoo Shiigi*, Hiroaki Nakanishi, Tetsuhito Suzuki, Yuichi Ogawa, Naoshi Kondo	4. 巻 198
2. 論文標題 Position and orientation measurement system using spread spectrum sound for greenhouse robots	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 BIOSYSTEMS ENGINEERING	6. 最初と最後の頁 pp.50-62
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 オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Tsay Lok Wai Jacky, Shiigi Tomoo, Huang Zichen, Zhao Xunyue, Suzuki Tetsuhito, Ogawa Yuichi, Kondo Naoshi	4. 巻 1
2. 論文標題 Temperature-Compensated Spread Spectrum Sound-Based Local Positioning System for Greenhouse Operations	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IoT	6. 最初と最後の頁 147 ~ 160
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/iot1020010	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Zichen Huang, Hiroki Fukuda, Tsay Lok Wai Jacky, Xunyue Zhao, Harshana Habaragamuwa, Tomoo Shiigi, Tetsuhito Suzuki, Kondo Naoshi	4. 巻 51(17)
2. 論文標題 Greenhouse Based Orientation Measurement System using Spread Spectrum Sound	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 IFAC-PapersOnLine	6. 最初と最後の頁 108-111
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ifacol.2018.08.070	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 該当する

1. 著者名 Tientadakul Romprakhun, Nakanishi Hiroaki, Shiigi Tomoo, Huang Zichen, Tsay Lok Wai Jacky, Kondo Naoshi	4. 巻 33
2. 論文標題 Spread Spectrum Sound with TDMA and INS Hybrid Navigation System for Indoor Environment	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Robotics and Mechatronics	6. 最初と最後の頁 1315 ~ 1325
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.20965/jrm.2021.p1315	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Huang Zichen, Shiigi Tomoo, Tsay Lok Wai Jacky, Nakanishi Hiroaki, Suzuki Tetsuhito, Ogawa Yuichi, Naoshi Kondo	4. 巻 187
2. 論文標題 A sound-based positioning system with centimeter accuracy for mobile robots in a greenhouse using frequency shift compensation	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Computers and Electronics in Agriculture	6. 最初と最後の頁 106235 ~ 106235
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.compag.2021.106235	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計6件 (うち招待講演 5件 / うち国際学会 4件)

1. 発表者名 Romprakhun Tientadakul, Hiroaki Nakanishi, Tomoo Shiigi, Zichen Huang, Lok Wai Jacky Tsay, and Naoshi Kondo
2. 発表標題 Indoor Navigation System by Combining Ultrasonic Wave TOA and Inertial Measurement
3. 学会等名 SICE Annual Conference 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Naoshi Kondo
2. 発表標題 Agri-photonics and Agri-robotics for Food Production toward Global Population 9 Billion time
3. 学会等名 Optics & Photonics International Congress 2018 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 近藤直
2. 発表標題 世界の食料生産を担うセンシング技術」オーガナイズドセッション：食料生産のためのスマート技術
3. 学会等名 システム制御情報学会SCI18（招待講演）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Naoshi Kondo
2. 発表標題 Robotics Technologies Supporting Smart Agriculture
3. 学会等名 6th IFAC Conference on Bio-Robotics（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 近藤直
2. 発表標題 ロボットフォトリクス産業（一次産業分野）の創出を目指して
3. 学会等名 経済産業省近畿経済産業局、公益財団法人レーザー技術総合研究所共催,特別講演会（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Huang Zichen
2. 発表標題 Greenhouse Based Orientation Measurement System using Spread Spectrum Sound
3. 学会等名 6th IFAC Conference on Bio-Robotics (BIOROBOTICS 2018)（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2018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
研究 分担 者	中西 弘明 (Nakanishi Hiroaki) (50283635)	京都大学・工学研究科・講師 (14301)	

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