

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 2 日現在

機関番号：56101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25450388

研究課題名(和文) 小規模圃場を対象とした複数のUAVによる協調型薬剤散布システムの開発

研究課題名(英文) Development of Cooperative Chemical Spraying System using Multiple Unmanned Aerial Vehicle for the Small Farm

研究代表者

福見 淳二 (FUKUMI, Junji)

阿南工業高等専門学校・創造技術工学科・准教授

研究者番号：30300627

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、小規模圃場を対象とした複数の小型UAVによる協調型薬剤散布システムを提案している。まず、圃場環境を計測するためのセンサを搭載した環境計測機および薬剤散布装置を搭載した薬剤散布機をそれぞれ開発し、飛行性能および散布性能の検証を行った。また、ピンポイントでの薬剤散布を実現するために、対象作物を検出し効率的な散布経路を生成する経路生成システムおよび環境計測機からの映像に基づく視覚フィードバックを用いた飛行位置制御システムを構築し、実際に飛行実験を行うことで提案するシステムの有効性を確認した。

研究成果の概要(英文)：In this study, the cooperative chemical spraying system using multiple UAV for the small farm is proposed. Environment measurement UAV which was mounted on the sensor for measuring the field environment and chemical spraying UAV which was mounted on the chemical spraying equipment were developed. By the experiment, flight performance and spraying performance were verified. In order to realize the spraying with pinpoint, route generation system which creates the efficient spraying route and flight position control system using the visual feedback based on the image from environment measurement UAV were developed. The effectiveness of the proposed system by the flight experiment was confirmed.

研究分野：農業工学

キーワード：UAV 薬剤散布 視覚フィードバック制御 経路生成

### 1. 研究開始当初の背景

現在日本の農業においては、高齢者でも農業生産が可能な環境作りや作業の軽減、若者にとって魅力ある農業環境の構築などが求められており、そのためには農作業の効率化と自動化が必要となる。その解決策の一つに農業ロボットの利用が挙げられる。

日本における農業ロボットの研究として、無人ヘリコプターやスピードスプレーヤーの自動化に関する研究も進められているが、これらはベース機体が数百万円以上であり、中大規模圃場向けの用途である。また、騒音や運搬も問題となり住宅地に隣接する場合にも適用に限界がある。そこで、本研究では近年様々な分野で活躍が期待されている小型 UAV (無人航空機: Unmanned Aerial Vehicle) に着目した。

現在 UAV は、危険な状況での情報収集等に使用されており、東日本大震災においても災害地調査や環境モニタリングに利用された。その中でも、無人ヘリコプターは空中での低速飛行やホバリングが可能であり、応用範囲の広さから世界中で様々な研究が進められている。農業現場においては、水稲病害虫防除、雑草防除等に活用されているが、騒音や圃場外への飛散防止が課題となっている。また、実際の運用ではオペレータの有視界による遠隔操作が主流であり、自律化に関する様々な研究も進められている。

本研究では、小規模圃場での運用に必要な小型、軽量、低騒音で低価格を実現するため小型マルチコプターを用いた薬剤散布ロボットを提案し、その実用性やコスト等を検討する。UAV の小型化、自律化に伴い制御装置や GPS、カメラ等のセンサを搭載する必要があり、一台の UAV で環境計測と薬剤散布を同時に実現するためには機体の大型化が避けられない。そこで、この解決策として複数の UAV に機能を分散し環境計測機体と薬剤散布機体を協調制御することで小型化、軽量化を図る手法 (図 1 参照) を提案する。

また、将来的には UGV (Unmanned Ground Vehicle) とも協調制御を行うことで、大豆、水稲や果樹園など散布場所に適した組み合わせでより効率的な散布が可能となるシステムが構築できる。

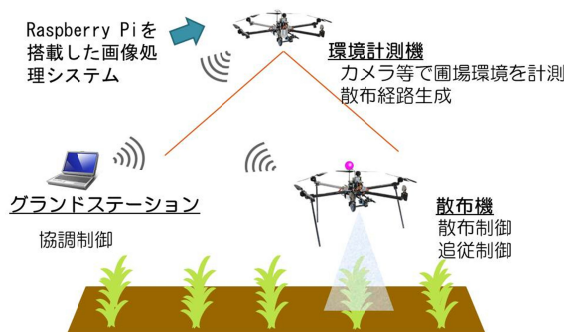


図 1 協調型薬剤散布システムの概要

### 2. 研究の目的

徳島県では、農地の宅地化に伴い農地が分断され住宅地に隣接する小規模圃場が増加している。これらの圃場への薬剤散布ロボットの導入は、騒音やドリフト防止等様々な制約がある。そこで、本研究では、住宅地に隣接する小規模圃場や果樹園を対象とした薬剤散布ロボットの開発を目的とし、研究期間内に以下の目標を掲げた。

#### (1) 小型マルチコプターの製作と散布実験

小型 UAV であるマルチコプターを製作し、搭載能力や散布能力等基本特性を計測し、環境計測用途や散布用途に必要な機体のサイズやモータ出力等を検討する。また、搭載可能な薬剤用タンク、噴霧ノズルを選定し手動操縦による散布実験を行い、最終的な仕様を決定する。

#### (2) 小型マルチコプターの自律制御

製作したマルチコプターに、小型の環境計測用センサ、データ送受信装置、自律航行用マイコン等を搭載し、各種センサの情報に基づき自律制御を行うシステムを構築する。

#### (3) 複数のマルチコプターの協調制御

複数のマルチコプターを用いて、環境計測用機体で収集した情報を他の機体へ無線で送信し、複数台で連動した飛行を実現する協調制御システムの構築を図る。その際には、PC ベースのグランドステーションとの連携も考慮したシステムとする。

#### (4) 実環境での動作確認

連携する農業生産者の協力のもと、実際の圃場において実機を用いた実験を行い、環境計測の精度や協調制御の正確性を検証する。

### 3. 研究の方法

本研究では、以下の流れに従い研究分担者と緊密に連携しながら研究を進めた。

#### (1) 小型マルチコプターの製作と散布実験

環境計測用機体と薬剤散布用機体に機能分散させるため、各機体に求められる積載重量、サイズや強度、センサに関する詳細な検討を行い、機体を製作する必要がある。そのため、試作機を用いて予備実験を行い、基礎特性の測定や制御性能の検証を行う。その結果を基に機体を製作し、実機を用いた飛行実験を通して、機体の改良やセンサの追加を行い、試験機体を完成させる。

また、薬剤散布機体に関しては搭載可能な薬剤用タンクと噴霧ノズルを選定し、実機による散布実験を行いその効果を検証し、機体の仕様選定に反映させる。今回は市販の充電式小型噴霧器を改造し使用する予定であるが、積載重量の関係で液剤の散布が難しいと判明した場合には、粉剤や粉粒剤に限定し手動散布機等を改造し使用することも視野に入れる。

#### (2) 小型マルチコプターの自律制御

製作した小型マルチコプターの自律制御

システムの開発と、PC と機体間における無線データ通信システムの構築を行う。実機を用いた飛行実験を通して、機体の改良やセンサの追加、制御アルゴリズムの検討を繰り返し、目標の制御性能を実現していく。アルゴリズムの検討の際には、制御シミュレーションシステムの構築とシミュレーション結果の可視化システムについての検討も行い、開発の効率化を図る。

また、試験機を製作し、カメラによる画像認識を行うことで圃場の状況（畝や薬剤散布の対象となる農作物の位置など）を自動で認識させる経路生成システムを開発する。搭載マイコンの処理速度等の要因で完全な自律化等が困難であると判断した場合には、PC と連携させ処理を分散させることで自律化を実現する。PC とのデータ送信等のシステムは自律化実現の過程で構築する。

### (3) 複数のマルチコプターの協調制御

環境計測用センサ群を搭載した機体と薬剤散布用タンク、噴霧ノズルを搭載した薬剤散布機体を協調制御するためのアルゴリズムの検討を行う。その際には、環境計測機体からの情報を基に散布経路の生成と軌道追従制御が必要となる。そこで、圃場画像を基に対象作物を抽出し、最適な薬剤散布経路を生成するアルゴリズムの検討、および経路に追従して飛行を行うため視覚フィードバック制御システムを構築し、屋内実験による検証を行う。

## 4. 研究成果

### (1) 環境計測機体の開発

環境計測用機体に求められる性能として、カメラやソナー等の各種センサによる圃場環境の計測とその情報をリアルタイムでPC(Grand Station)に送信する機能、各種センサにより自律飛行する機能などが挙げられる。これらを満たすために、本研究ではベース機体として図 2 に示す enRoute 社の Zion QC 630 を用いる。本機体の制御用ボードには 3DRobotics 社の APM2.6 を用いている。これにはジャイロセンサ、気圧計、加速度センサが内蔵されており、プログラムによりセンサ情報を基に任意の位置、高度にてホバリングさせることが可能となる。また、Arduino ベースのオープンソースシステムであるため比較的簡単に自作のプログラムを実装し、機能を拡張することが可能である。



対角軸間：628mm  
機体重量：1.88kg  
プロペラ径：15inch  
飛行時間：15-20分  
ペイロード：2.0kg

図 2 環境計測機体

本機体には XBee を用いた無線テレメトリ

も搭載しており、搭載した GPS 情報から機体の飛行位置、高度等をグランドステーション(GS)に転送することができる。また、環境計測用機体に搭載したカメラ HERO3(GoPro 社)による動画データデータをGSへ送信するため、2.4GHz 無線送受信機 AT-2630AVS を搭載した。図 3 には、GS 上に構築したテレメトリシステムを示す。

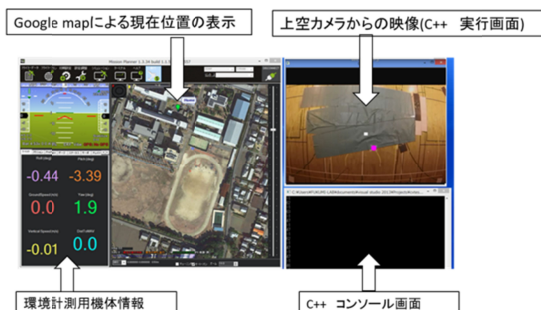


図 3 テレメトリシステム

実機を用いて屋外で飛行性能を検証した結果、ペイロード 2.0[Kg]で約 15 分の連続飛行が可能であり、想定した性能を満足していた。しかし、GPS の位置精度は最大で 2.5[m]程度の誤差が発生しており、精度向上のためには RTK-GPS 等の GPS システム等を用いるなど、今後改善が必要であると考えている。また、動画データの無線送信時におけるタイムラグを計測した結果、約 30[ms]程度の遅延が見られた。研究初期には、GS 用 PC に経路生成および視覚フィードバック制御を全て実装する予定であったが、信号の遅延を考慮して経路生成は環境計測機体に搭載した RaspberryPi を用いて行い、薬剤散布機体の視覚フィードバック制御は GS で行うなど、各システムを分散するシステムに変更した。これにより、将来的には GS を使用せず機体同士が情報を直接やり取りするシステムへの展開が可能になると考えている。

また、今回開発した環境計測機体は本研究の用途以外にも災害時の情報収集や、圃場の植生状況の把握、鳥獣被害の抑止等様々な分野での応用が可能であり、現在これらの用途に関して自治体・官公庁や研究機関との連携を進めている。

### (2) 薬剤散布機体の開発と散布実験

薬剤散布用の機体として、図 4 に示す 8 ローターを有するマルチコプターである DJI S1000 をベース機体として使用した。本機体はペイロードが 10[kg]となっており、電子回路およびバッテリーを考慮しても、薬剤を含め 5[kg]程度の噴霧装置が搭載可能である。薬剤散布装置としては、市販の小型電動散布装置(タンク容量 2L、噴霧能力約 470ml/分)を改良して搭載した。噴霧ノズルは図 5 に示すように散布角度を自由に調節できるように改良した。また、プロポから散布装置の操作が可能なシステムを構築している。



対角軸間：1000mm  
機体重量：4.2kg  
プロペラ径：13inch  
飛行時間：15-20分  
ペイロード：10.0kg

図4 薬剤散布機体

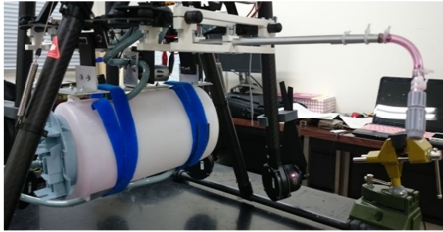


図5 薬剤散布装置外観

次に散布実験を行い、プロペラを回転させることで発生するダウンウォッシュが散布状況にどのような影響を与えるのか検証した。図6に示す実験環境において、散布装置を搭載した UAV のプロペラを回転させた状態と停止させた状態で、2秒間の薬剤散布をそれぞれ行い、中心からの距離に対する薬剤散布の面積比率を求めた。今回の実験では、噴霧ノズルの直下に図6に示す様に感水紙を設置し、画像処理により感水紙の濃淡を解析することで、薬剤の被覆面積率の計測を行った。解析結果の一例を図7に示す。

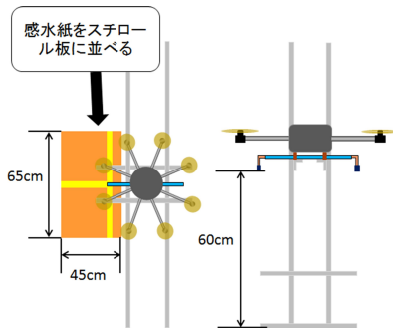


図6 実験環境

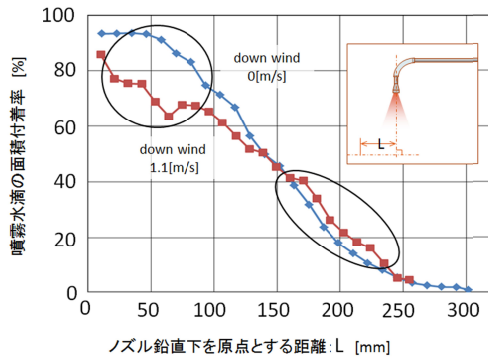


図7 解析結果

ここでは、プロペラとプロペラの間にもノズルを設置しているため、噴霧した薬剤が左のプロペラによるダウンウォッシュに引

き寄せられることで、散布範囲が全体的に拡大している。このように、噴霧ノズルの位置や角度により散布範囲が調整可能であり、ノズルの角度等を制御することでピンポイントでの散布が可能であることが確認できた。

今後は、ノズル角度を最適にする制御装置の開発と実機への搭載を目指して研究を進める予定である。

本機体では環境計測用機体から得た情報を基にGSから随時制御を行う必要がある。また、散布状況を把握しやすいようにこちらの機体にもカメラを取り付け、地上でモニタリングできる機能が必要となる。そこで、本機体には無線通信ユニット(DJI社Lightbridge)を搭載し、操作信号と映像信号をGSと機体間で送受信するシステムを構築した。

実機を用いて屋外での散布実験を行う予定であったが、実験中に機体が損傷し修理が必要になった事と、改正航空法が施行され薬剤散布も物体の投下とみなされる事から規制対象となり、現時点では屋外での散布実験が難しくなった。そこで、屋外での散布実験に替わる検証方法として、簡易的な薬剤散布シミュレーションの開発を検討した。

図8には現在進めているローター周りの気流に関するシミュレーション結果の一例を示している。同図では、ローター回転数を6100[rpm]とした時の空気の流れを示しており、ローター上部の空気が引き込まれ約20[m/s]の速度でローター下方に放出されている。ローター軸直下には流れが形成されておらず、地面で反射された空気の流れが約100[mm]の高さまで立ち上がっていることも確認できた。

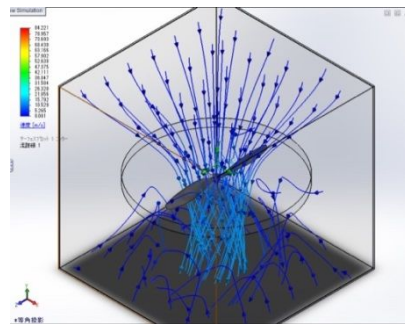


図8 ローター周りの空気の流れ

今後、シミュレーションと今回開発した実機を用いた散布実験結果との比較検証を行い、薬剤散布シミュレーションシステムの開発を進める予定である。本システムが完成すると、薬剤散布最適化の検証を効率的に実施することが可能となり、早期のシステム全体の完成に繋がると期待している。

### (3) 薬剤散布経路生成システムの開発

環境計測用 UAV に搭載した RaspberryPi に接続したカメラの画像から圃場の作物位置を検出し、順次対象物を通る適切な飛行経

路を生成するシステムを構築し、屋外実験を行った。提案する手法の手順は図9の通りである。散布対象領域を抽出し領域毎にラベリングを行った後、各散布対象物の代表点として領域の中心座標を計算し、求めた中心座標データに対して Hough 変換を用いることで直線の検出を行い、圃場における畝を検出する。検出した直線（畝）に沿って飛行経路を生成する。また、検出した領域が大きく一度に薬剤が散布できない場合には、畝方向に分割し散布対象を増やすことで効率的な散布を行う。

屋外で環境計測機体を飛行させ撮影した画像に対して、提案する手法を適用し経路生成した結果を図10、図11、図12に示す。ここでは、地面に圃場を模擬した緑色の領域と茶色の領域を設定し屋外にて実験を行った。今回は、圃場内で作物が点在しており、スポット的な散布が必要となる場合を想定し、提案手法が有効であるかどうかの検証を行った。図10より、Hough 変換を用いることで直線が検出されて

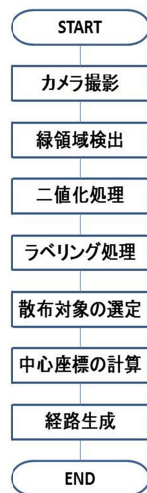


図9 処理手順

おり、黄色の直線が圃場の畝に相当する方向であると認識できる。この情報を基に飛行経路生成を行った結果、環境計測機から撮影した画像から最適な経路が生成できていることが図11より分かる。図12は比較のために、以前提案していた Hough 変換による畝の検出を用いていない手法による結果を示している。これらの結果を比較すると、新たに提案している手法がより効率的な経路を生成できていることが確認できた。

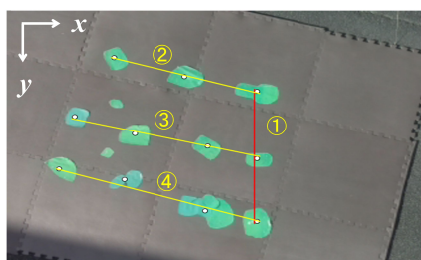


図10 畝の検出

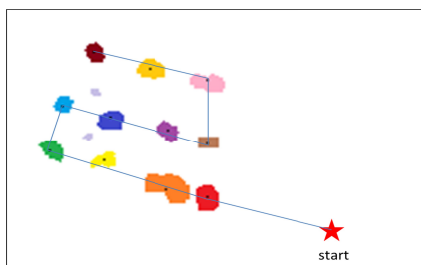


図11 経路生成結果（新手法）

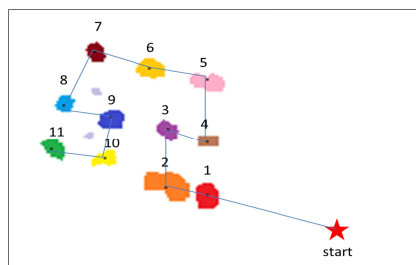


図12 経路生成結果（旧手法）

#### (4) 視覚フィードバックシステムの開発

本研究では、環境計測機にカメラを搭載させ撮影した画像を解析することで農作物の位置を検出して散布経路を生成するとともに、薬剤散布機的位置も検出し生成した経路に沿って散布機を飛行制御させる。これらの協調制御を実現する方法として、視覚フィードバック制御を用いる。薬剤散布機の視覚フィードバック制御を実現するシステムを図13に示している。

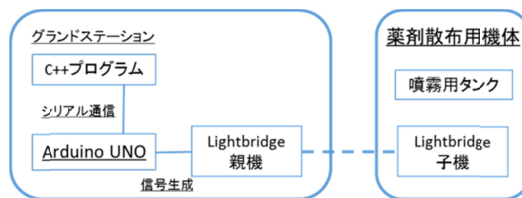


図13 システム構成図

提案するシステムでは、まず環境計測機に搭載したカメラで撮影された映像が無線送信機を介してGSに送られる。その映像からOpenCVとVisual Studio C++を用いて機体上部に設置したマーカに対してカラートラッキングを行い、移動物体の検出を行う。検出方法としては、パーティクルフィルタ、カルマンフィルタ等を用いた手法を比較検討した。次に、検出結果から得られた機体の位置情報をもとに操作信号をGSから機体へ送信し、機体の位置決め制御を行う。操作信号を機体に転送する際には、PCとシリアル接続したArduino UNO上で操作信号を生成し、無線通信ユニットLightbridgeを用いて操作信号を送信することで機体を制御するシステムを構築した。

今回は、屋内にて視覚フィードバックを用いたUAVの位置決め制御実験を行った。屋内での実験であるため、環境計測機体を飛行させるには高度が不足することから、床面から約6[m]の高さにカメラを設置し、7[m]×6[m]のフィールド内を飛行させ実験を行った。実験環境を図14に示す。

今回は位置制御として、P制御、PI制御、PID制御を用いて制御精度の比較を行った。結果の一例としてPID制御( $K_p=1$ ,  $K_i=0.01$ ,  $K_d=1.5$ )を行った例を図15に示す。

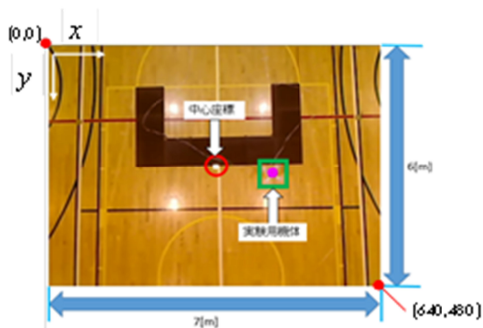


図 14 実験環境

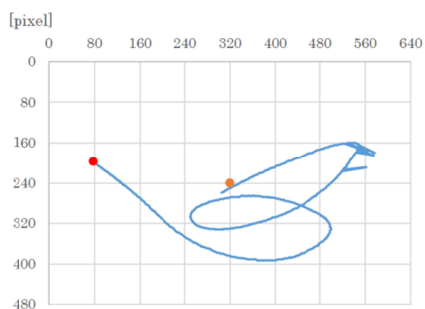


図 15 実験結果例(  $K_p=1$ ,  $K_i=0.01$ ,  $K_d=1.5$  )

この結果より、画面中心の橙色の点が目標点であるが、初期位置（赤点）から緩やかに円を描くように目標点に近づいていることが分かる。画像より算出すると実験終了時の位置誤差は、x 方向約 30[cm]、y 方向約 25[cm] であり、UAV の飛行特性を考慮すると薬剤散布等の用途としては十分な精度であると考えられる。しかしながら、バッテリーの残量や風の影響で制御精度が変動することも確認できており、今後は風などの外乱を考慮した制御手法の開発が必要となる。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 1 件)

濱口直輝, 松浦史法, 福見淳二, 福田耕治,  
Analysis for Limiting the Sprayed Range  
of Agricultural Chemicals with Airflow  
Induced by a Rotor of an UAV,  
Proceedings of SICE annual conference  
2016, 査読有, 計測自動制御学会, 2016,  
掲載予定

[学会発表](計 8 件)

前田大樹, 福見淳二, 福田耕治, 薬剤散布  
用 UAV の飛行経路生成手法、農業食料工  
学会第 75 回年次大会、2016 年 5 月 29 日、  
京都大学(京都府・京都市)  
大黒嵩浩, 福見淳二, VR システムを用い  
た quadrotor シミュレーションの可視化、  
平成 27 年度計測自動制御学会四国支部学  
術講演会、2015 年 11 月 28 日、高知工科  
大学(高知県・高知市)

三島啓寛、福見淳二、福田耕治、複数の  
UAV による協調型薬剤散布システム ～  
上空カメラを用いたビジュアルフィード  
バックシステムの構築～、農業環境工学関  
連 5 学会 2015 年合同大会、2015 年 9 月  
16 日、岩手大学(岩手県・盛岡市)  
三島啓寛、福見淳二、福田耕治、マルチコ  
プターを用いた圃場環境計測ロボット  
の開発、第 73 回農業食料工学会年次大会、  
2014 年 5 月 18 日、琉球大学(沖縄県・中  
頭郡)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

福見 淳二 (FUKUMI Junji)  
阿南工業高等専門学校・創造技術工学科・  
准教授  
研究者番号：30300627

### (2) 研究分担者

福田 耕治 (FUKUDA, Koji)  
阿南工業高等専門学校・創造技術工学科・  
教授  
研究者番号：40208955