

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 4 月 25 日現在

機関番号：24403

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2016

課題番号：25820185

研究課題名(和文) 自律的な環境適応能力実現のための行動原理の解明とその実現

研究課題名(英文) Clarification of Mechanism of Autonomous Behavior for Environment Adaptation and its Realization

研究代表者

金田 さやか (Sayaka, KANATA)

大阪府立大学・工学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：60605567

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：2機の自律型マルチロータヘリコプタを自作し、設計した状態推定技術を搭載して実験により適切に飛行制御できることを確認した。屋内における自律飛行技術の確立のため、気圧センサ情報から高度推定を行うアルゴリズムを開発した。具体的には、気圧高度計を複数個用いた気圧高度推定モデルを構築した。センサの高度差に依存して、推定高度の精度向上が見込めることを理論的に明らかにし、実際のヘリコプタに適用した。気温が測定できない環境において、精度よく高度推定が行えることを明らかにした。並行して、電波を利用した位置推定法を改善した。非線形の運動方程式に対して少ない計算量で精度良く推定するアルゴリズムを開発した。

研究成果の概要(英文)：Estimation method for autonomous multi-rotor-helicopters was proposed. The proposed method was applied to quadrotor helicopters of self-built. It was verified that the proposed method can realize autonomous flight. In order to establish indoor autonomous flight, estimation method using barometers was also proposed. Using more than one barometers, it was proved that the proposed method can improve altitude estimation compared by that with single barometer. Experiment with quadrotor helicopters verified that the proposed method works well and it is useful in case that temperature cannot be measured. This research also developed a method of estimation based on radio waves. The proposed method provides accurate estimation with smaller amount of calculation than conventional methods.

研究分野：制御工学

キーワード：自己状態推定の高精度化 気圧高度推定 自律飛行ロボット

## 1. 研究開始当初の背景

DARPA により開かれたロボット車レース Urban Challenge では、4 台のロボット車がコース内の走行可能領域を動的に検出し、動的障害物を回避しながら、コース完走に成功した。コースは人間が予め適切に与えたもので、連続的に走行可能領域を含むよう設定されていた。火星探査ローバは撮像画像を地球へ送り、人間にウェイポイントを与えられて移動を実現した。すなわち目的地への誘導は人間が行い、人間がロボットに任せられると判断した局所的な距離を自律走行した。このように、既存のロボットは埋め込み型の制御で実現されているため、**未知環境での動作が困難**である。これらの問題に対して環境にセンサを配置し、空間自体に情報をもたせる空間知能化によってロボットの作業環境の拡大を図る研究もあるが、いずれにしてもロボットの作業目的達成のためには人間が環境を整える必要があり、問題である。人間が環境を整えること無く、ロボットが自律的に作業目的を達成するには、自身が未知環境に対して適応的な振る舞いを生成する必要がある。適応的振る舞いの生成に関しては、選択した行動の環境への影響を観測する重要性、および変動した環境に合わせて行動を変化させる主体と環境との相互作用の重要性が近年指摘されている。これらの研究は、搭載センサの情報を基にした自律機能の拡充により、環境変化への適応的な振る舞いを実現しようとするものである。したがって、環境変化の影響による行動の受動的な変化は実現できるが、複雑な環境下で本来の作業目的を達成する適切な行動を能動的に選択するような、高次の目的達成と結びつける構造が存在しない。これは高次の目的と環境に含まれる不確かさとが独立に議論されてきたためであると考え、**適応的行動とは環境の不確かさと作業目的の相互関係から決定されねばならない**。すなわち、行動目的達成を阻害する不確かさを推定する行動を能動的に選択する能力こそ、将来のロボットに必要な不可欠な適応能力である。

## 2. 研究の目的

本研究は自己の状態および環境情報に関する不確かさに着目し、これらの不確かさに依存した適応的な行動を実現する行動アルゴリズムを設計した。このことにより、未知環境でも自律的に作業目的を達成する行動原理を解明する。対象として、小型無人ヘリコプタを用い、自律的に屋内の 3 次元情報収集を行うシステムを構築した。

未知環境においてロボットが作業目的を達成するには、目的達成に影響する特定の不確かさを推定するような行動(本書ではこのような行動を探索行動と呼ぶ)の選択が必要である。本研究は**ロボットの環境適応性の実現を目的とし、探索行動と目的達成行動とのトレードオフ関係に着目し、不確かさに依存**

**した行動選択の設計原理の導出を試みた**。探索行動と目的達成行動とのトレードオフ問題は、強化学習における探査:exploration 行動と、知識利用:exploitation 行動とのトレードオフ問題や、多目的最適化問題と同様に、各目的への重み付けをいかに設計するかという重み付け設計問題に帰着できる。そこで、探索行動と目的達成行動とを不確かさをパラメータとする多目的最適化問題として定式化し、不確かさに依存した行動設計原理の解明を検討した。

## 3. 研究の方法

小型無人ヘリコプタによる自律的な情報収集問題を題材に、未知環境における環境適応性の実現原理の解明を試みた。本研究では**ヘリコプタ自身を位置基準として利用し**、3 機により自律的に位置同定・情報収集を行うための行動アルゴリズムの構築を検討した。

本研究は環境に不確かさがある状況において確実に作業目的を達成するシステム原理を解明するために、題材として小型無人ヘリコプタによる自律的な 3 次元地図生成のための情報収集問題に取り組んだ。GPS 電波の届かない閉鎖空間で、自律的に位置を決定するには、位置基準を設ける必要がある。位置基準は環境に固定して探査対象の空間中どこからでも捕捉可能であることが望ましい。未知環境でこのような理想的な基準点を選び、基準マーカを設置するのは困難である。そこで本研究では**ヘリコプタ自身を位置基準として利用することとした**。位置基準となる機体は位置同定精度を向上するため、空中静止するとする。探査のためには移動が求められるため、基準となる機体と探査する機体とを用意し、**複数機により位置同定・情報収集を行う**。高精度な環境情報収集を実現するために、位置基準となる機体と探査する機体とが役割を切り替え、位置同定と情報収集を繰り返しながら探査を行う。**同定精度と環境地図の精度に応じて、適切な切り替えタイミングを設計した**。

## 4. 研究成果

本研究において、まず、小型マルチロータヘリのための自律的な状態推定精度の向上のために、電波の伝播時間を計測値とした推定精度の向上方法を提案した(雑誌論文, 学会発表)。また、非線形な運動方程式で表される対象に対して、計算量が少なく精度のよい位置推定を実現する手法を導いた(雑誌論文, 学会発表)。これらの手法を実験的に実証した結果を発表した(雑誌論文)。並行して、気圧センサの利用を検討し(学会発表), 姿勢表現の違いによる姿勢推定の精度劣化について検討した(学会発表)。さらに、時間連続値と離散量の混在するシステムについて、適切にパラメータ感度を評価する方法について検討した(学会発表)。具体的な内容について、以下に述べる。

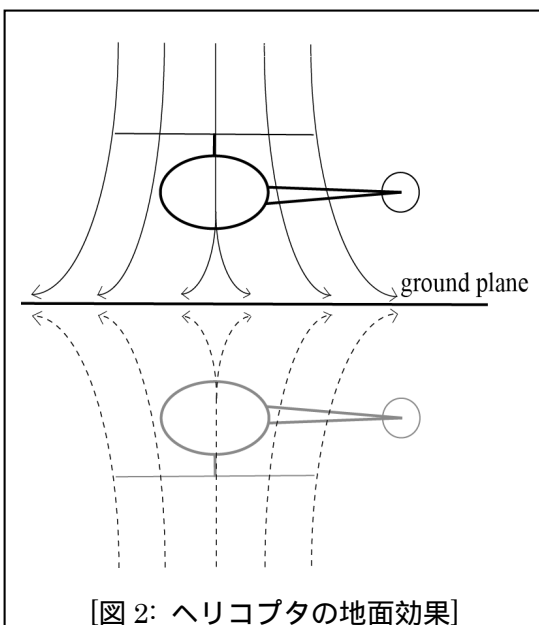
本研究において、2 機の自律型マルチロー



【図 1: 作製した自律飛行ロボット】

タヘリコプタを作製した。その写真を図 1 に示す。ヘリコプタには、GPS 受信機、慣性計測装置およびモータ指令制御装置を搭載した。設計した状態推定器および制御器を PC ボード上で実現させ、自律飛行が可能であることを実験により確認した。次に、実験により設計した状態推定器および自律飛行制御器の機能を確認し、期待通り自律飛行が可能であることを確認した。

また、これまでの研究において、惑星探査ローバを対象とした位置同定法を提案した。これは、母船を電波源とし、天体表面上の探査ロボットまでの往復伝播時間を測定することで探査ロボットの位置を推定する手法である。繰り返し伝播時間を測定することで、**時刻同期の必要なく、単独の電波源で位置同定が可能**である。本研究では、この単独電波源による位置同定法を応用した。対象となるロボットの非線形運動を考慮し、より計算量が少なく高い精度で位置同定を実現できることを確認した。また、安定飛行の実現に貢献するアルゴリズムを開発した。具体的には、また、運動時の推定精度向上のために、粒子フィルタの一部を改良した改良型粒子フィルタを提案した。数値実験により、提案法により非線形運動の推定がより高精度かつ低い計算量で実現できることを示した。さらに、粒子フィルタによる状態推定へ改善した。



【図 2: ヘリコプタの地面効果】

高さ方向に関しては気圧センサが有効であると考えた。気圧センサは安価、軽量でも測定できる。ただし、風の影響を受けることが課題である。ロータの風の影響がない位置に取り付ける、もしくはロータの回転数によりセンサ出力を補正などの対策が考えられる。また、地面付近では図 2 に示したように、吹き下ろし風により、計測される気圧値が大きくなる傾向にある。これは地面効果と呼ばれる。ヘリでは高度がロータの直径程度以下になると現れる。マルチロータにおける地面効果は、単純には直線上に並ぶロータの数とロータ直径の比以下の高度で出現すると考えられる。その大きさを実験により調べ、モデル化した。

一方で、外乱に強いヘリコプタの飛行制御を実現するために、Tacit Learning の適用を検討した。Tacit Learning は環境変動のみを入力として、一定の状態を維持する学習・制御機構である。環境変動に対して、アルゴリズムの変更なく安定した制御の実現が可能である。また、深層学習を制御に適用する方法について検討し、実機実験を行った。具体的には、画像情報から速度推定を行うシステムを構築した。動力学モデルなしに、入力推定を可能とするシステムが構築できることを示した。地図生成と自己位置同定の同時実現 (SLAM) 技術についても、ヘリコプタ適用のための検討を行った。

本研究の結果、ロボットの作業目的および行動が一意に結びつくのではなく、それらは抽象的/具体的に階層構造を成すべきであることに思い至った。これらの階層化は何を基準になされるのか、環境によってその階層化が異なって分化すべきなのかは未だ明らかでないが、ロボットの推定する環境および自己状態に応じて、全体の不確かさが低減するように**選択的に行動する必要性**は本研究にて明らかにした通り重要である。

## 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 3 件)

Sayaka KANATA, Hiroaki NAKANISHI, and Tetsuo SAWARAGI, "Radio-Wave Based Accurate Localization for Space Rover on Small Planetary Body without Motion Information of Mother Spacecraft," SICE, Journal of Control, Measurement, and System Integration, 査読有, vol.10, no. 2, pp. 85-92, 2017. <http://doi.org/10.9746/jcmsi.10.85>

Sayaka KANATA, Yuta UEZONO, and Takashi SHIMOMURA, "Localization of Hopping Rover Using Round-Trip Propagation Delay with Multiple

Motion Models,” Journal of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, 査読有, vol.59, no.3, pp. 170-176, 2016.  
<http://doi.org/10.2322/tjsass.59.170>

金田さやか, 上園雄太, 下村卓: 歳差運動する天体上ローバのための伝播時間計測による位置推定法, 日本航空宇宙学会論文集, 査読有, 63 巻 5 号, pp. 183-187, 2015

〔学会発表〕(計 7 件)

黒江康明, 中西弘明, 金田さやか: あるクラスのサイバーフィジカルシステムの感度解析法, 制御部門マルチシンポジウム, 2017 年 3 月 6~9 日, 岡山大学(岡山県岡山市)

中西弘明, 庵智幸, 黒江康明, 金田さやか: あるクラスのサイバーフィジカルシステムの感度解析とパラメータ最適化への応用, 知能システムシンポジウム, 2017 年 3 月 13~14 日, 東海大学(東京都港区)

金田さやか, 中西弘明: Quadrotor Helicopter における地面効果の実験的評価, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2015, 2015 年 05 月 17 日~19 日, 京都市勧業館「みやこめっせ」(京都府京都市)

窪田智之, 金田さやか, 下村卓: Quaternion を用いた KF による UAV の姿勢推定, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2015, 2015 年 05 月 17 日~19 日, 京都市勧業館「みやこめっせ」(京都府京都市)

石田寛和, 金田さやか, 下村卓: バウンドの不確かさを考慮したホップ移動するローバの電波を用いた位置推定法, 第 52 回 関西・中部支部合同秋期大会, 2015 年 11 月 7 日, I-site なんば(大阪府大阪市)

丸山憂大, 金田さやか, 下村卓: 自律型無人飛行機のための既知の高度差を利用した気圧高度の推定精度向上, 第 52 回 関西・中部支部合同秋期大会, 2015 年 11 月 7 日, I-site なんば(大阪府大阪市)

金田さやか, 上園雄太, 下村卓, 等: 加速度運動中のホップ型ローバのための伝播時間計測による位置同定, 第 16 回 計測自動制御システムインテグレーション部門講演会, 2015 年 12 月 14 日~16 日, 名古屋国際会議場(愛知県名古屋市)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.aero.osakafu-u.ac.jp/as/shimomura/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

金田 さやか (Sayaka KANATA)

大阪府立大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号: 60605567