

平成 30 年 6 月 18 日現在

機関番号：32678

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K18094

研究課題名(和文) UAVボクセルによる3次元配置ディスプレイに向けた基礎研究

研究課題名(英文) Study for 3 dimensional display using unmanned aerial vehicle voxels

研究代表者

関口 和真 (Sekiguchi, Kazuma)

東京都市大学・工学部・講師

研究者番号：80593558

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究ではUAVを画素の様に用いて空間的に画像を描画するUAVの分散制御システムを提案し、そのための基礎研究をおこなった。分散制御システムとはタスクに応じて個々のUAVが自律的に状況を判断し行動するシステムである。これにより柔軟な運用とシステムとしてのロバスト性が得られる一方で、UAV同士の衝突や近接したUAVから風の影響を受けるといった問題が生じる。この問題に対し本研究ではUAV単体の制御性能向上と共に風外乱へのロバスト性向上手法を提案した。さらにモデルに基づく予測を用いた制御に風外乱への対策や衝突回避機能を追加することで上記の問題を解決できることを数値計算、実機実験を通して示した。

研究成果の概要(英文)：In this research, we propose a distributed control system for UAVs which draws spatial images by using a UAV as a voxel, and we conducted fundamental research to realize it. In the distributed control system, an individual UAV autonomously decides its action with respect to its surrounding according to the task to be performed. While this approach realizes flexible operation and provides robustness to a system, problems arise such as collision among UAVs and wind influences from close UAVs. In this research, we proposed a method to append robustness against the wind disturbance from other UAV as well as the improvement of control law of individual UAVs. Moreover wind disturbance suppression method and collision avoidance technique have been implemented to a model predictive control. Through numerical and experimental simulations, the effectiveness of the proposed techniques are verified.

研究分野：制御工学

キーワード：multi agent control unmanned aerial vehicle UAV voxel

1. 研究開始当初の背景

3次元の映像情報の提示手法として、古くからアナグリフや偏光メガネを用いた眼鏡式のものや両目の視差を利用したディスプレイ、光線再生型のディスプレイなどが開発されてきている。これらはいずれもディスプレイという2次元平面の映像提示デバイスを用いて3次元情報を伝達しようというものであり、映画館のような固定された聴衆を仮定するなどの必要があり、大型化やスタジアムのような多人数への情報提供などは技術的に難しい。また、長時間使用による健康被害の懸念などが示唆されている。そのような中、画素ではなくボクセルという3次元要素の概念を用いた体積型と呼ばれるディスプレイが提案されている。この体積型ディスプレイとして、高速回転する発光体の発光部位、発光時間を精密に制御することで3次元的に配置されたボクセルを実現するという手法や、レーザーによる空気のプラズマ化を利用したボクセルの実現手法などが提案されている。しかしこれらの手法も2次元のディスプレイと同様、大型化や多人数への情報提示には適していない。本研究課題では、UAVによるボクセルの実現という、3次元要素をより直接的に実現する手法を提案する。UAVとは空間を3次元的に飛び回る無人の航空機で、近年のバッテリーや演算装置、無線機器の発展によって、小型化、高機能化が進んでいる。本研究課題ではUAVのうち、AR.Droneに代表されるマルチコプターを対象とする。マルチコプターは飛行機タイプと異なり、空中で静止するホバリングを得意とするため、ボクセルとして空間的に配置するのに適していると言える。

2. 研究の目的

3次元の映像情報提示手法の実現に向けた制御工学的な課題は大きく分けてUAV単体の制御と群れとしてのUAV群の制御に分けられる。以下ではそれぞれについて本研究の目的を明らかにする。

UAVの運動制御：実現したいボクセルデータが与えられた時にその位置に適切にUAVを配置する必要があるが、UAVの運動制御は多くの研究がなされており、高い運動性能が実現されている。しかし3次元映像情報提示では狭い領域に複数のUAVが飛行することが想定され、UAV同士の相互干渉によって安定した飛行が困難となる。そこで本研究課題では相互干渉などに対してロバストな安定化制御則を構築することを目的とする。

フォーメーション制御：UAV群を用いて正確な描画をおこなうためには、決められた時刻に正しい位置・姿勢を全てのUAVが同時に達成する必要がある。このような複数のUAVの位置・姿勢制御はマルチエージェントシステムのフォーメーション制御の問題として定式化できる。集中的なアルゴリズム

でUAVのフォーメーション制御を考えるには計算機の性能的限界から扱えるUAVに限りがああり、高解像度の映像を実現するには問題となる。そこで本研究課題では分散的なフォーメーション制御則の構築を目指す。分散的なアルゴリズムとすることで鳥などの障害物やUAVの電池切れなどの時々刻々変化するシチュエーションに柔軟に対応が可能となる。これまでの位置・姿勢のフォーメーション制御としては、UAVのダイナミクスやエージェントの大きさを考慮していないため、複雑なフォーメーションをおこなう際に衝突などの問題が発生する可能性がある。本研究課題ではUAVのダイナミクス、大きさを考慮した3次元空間での位置・姿勢フォーメーション制御手法の開発を目的とする。

3. 研究の方法

研究目的で述べたように本研究課題で提案するUAVボクセルによる3次元配置ディスプレイの実現にはロバストなUAVの運動制御、UAVのダイナミクスや大きさを考慮した3次元空間での位置・姿勢フォーメーション制御が必要であり、以下ではそれぞれについて研究方法を述べていく。

(1) 相互干渉に対してロバストなUAVの運動制御

図1に示すように二機のUAVが異なる高度ですれ違うシチュエーションに対し、下のUAVが受ける影響を下機体に対する外生入力として推定し、その情報をマップとして保存する。保存した情報を元に風の影響をキャンセルするように入力を補償することで風の影響を軽減する。

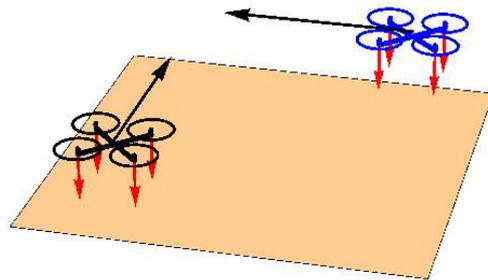


図1：2機のUAVが異なる高度ですれ違うイメージ図。黒いUAVが青いUAVの発生する風の影響を受ける。

モデルに基づく制御の精度は上記の外乱推定においても、3次元画像描画の正確さにも直結する重要な問題である。そこで回転・並進ダイナミクスをまとめたUAVの非線形なダイナミクスを陽に考慮した制御系の構築、そして得られた制御系の実装に必要な非線形モデルの同定手法を確立する。一方でモデルとして再現できない風外乱の擾乱部分などについてはモデル誤差補償器と呼ばれる手法でモデルの不確実性として対処する。

(2) UAV のダイナミクスや大きさを考慮した 3 次元空間での位置・姿勢フォーメーション制御

3次元画像の描画のためにフォーメーション制御を UAV 群に適用する。フォーメーション制御とは UAV の位置や速度を周囲の UAV と共有し、その情報を元に相対位置関係を望みのものにする制御手法で、周囲の UAV の情報だけで制御できるため分散アルゴリズムである。これまで平面的なフォーメーション制御については、実験含め既に報告されており、この手法を空間に拡張することで3次元画像の描画を可能にする。

フォーメーション制御の枠組みにはエージェント同士の衝突は考慮されていないため UAV 同士の衝突について人工ポテンシャル場法という一般によく使われる手法を用いて回避する。しかし UAV は入力から位置まで高次の時間遅れとなるため、そのまま適用しただけでは制御が間に合わず衝突してしまうか、非常に保守的な結果しか得られないことが予想される。そのためモデル予測制御と呼ばれる有限時間未来までの状態を予測した上で最適な制御入力を算出する手法と組み合わせることで UAV のダイナミクスを考慮した衝突回避を実現する。

モデル予測制御では最適化計算に用いる評価関数の設計でフォーメーション制御や衝突回避だけでなく (1) で扱う相互干渉を抑制する制御についても組み込むことが可能となる。

4. 研究成果

本研究では上述の2つの項目に取り組み、それぞれについて以下の結果を得た。

(1) 相互干渉に対してロバストな UAV の運動制御について

上側の UAV を固定し、その下を別の UAV に通過させる実験を繰り返しおこない、得られた入出力データから下機体を受ける影響を外乱マップとして作成した。このマップ情報を元に風外乱をキャンセルする入力を加えることで上機体から受ける影響を軽減できることを明らかにし、マップを用いる有効性を示した(学会発表⑥)。また制御する UAV が上機体に近づきすぎた場合、最大の入力を印加しても風外乱をキャンセルすることはできない。このような場合においても、モデル予測制御の中でマップ情報を利用することによって、事前に受ける風の影響を予測し高度を修正することが可能であり、この手法で風外乱の影響をより軽減できることも明らかにした(学会発表⑤)。さらにマップ化しきれない擾乱成分にも対応するため、モデルの出力と実験機の出力の差をフィードバックし入力を補償するモデル誤差補償器を用いることで経路追従性能を向上させられることを示した(学会発表④)。

個々の UAV の運動性能を向上させる取り

組みとして、階層型線形化という近似を用いない新しい線形化手法を開発・発展させ UAV を含む様々なシステムが線形化可能であることを明らかにした(雑誌論文①, 学会発表①)。この線形化手法と線形制御器を組み合わせることで、UAV の非線形性を陽に考慮した非線形制御器が実現し、図2に示すようなこれまでの制御器では実現が難しかったダイナミックな動きを可能とした。この制御器を実装するためにはモデルパラメータの同定や直接観測できない状態の推定が必要になるが、これらについてはカルマンフィルタを非線形システムにも適用できるように拡張した無香料カルマンフィルタという手法を用い、基礎的な検証をおこなった(学会発表⑫, ⑭)。

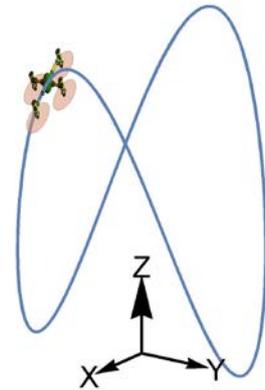


図2：非線形制御を用いることで鞍型の経路上を高速に飛行する際に機体が下を向く動作が自動的に生成される。

(2) UAV のダイナミクスや大きさを考慮した 3 次元空間での位置・姿勢フォーメーション制御について

フォーメーション制御手法を3次元空間上のフォーメーション形成に適用し数値シミュレーションによって実現可能性を示すと共に、図3に示すような UAV の大きさを考慮しないと衝突してしまうようなシチュエーションにおいても、人工ポテンシャル場による衝突回避手法を組み込んだモデル予測制御によって3次元フォーメーションが達成可能であることを数値シミュレーション・実機実験を通して示した(学会発表②, ⑧, ⑯)。また階層型線形化を用いた非線形制御器と

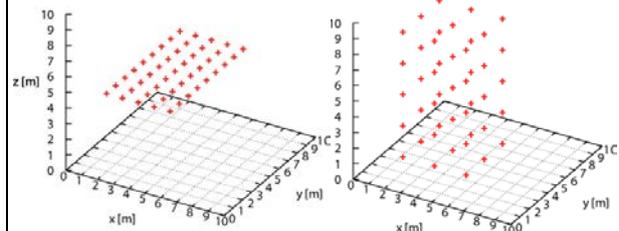


図3：平面的な初期配置(左)から目的の3次元形状(右)への遷移を自律分散的に UAV 同士の衝突を回避しつつ実現。

フォーメーション制御の組み合わせについても検討をおこない数値シミュレーションでフォーメーションの達成を確認した(学会発表⑬).

相互干渉の抑制に利用した外乱マップを用いる手法は, ある程度再現性がある外乱や予測が可能な外乱に対しては有効である. 一方3次元画像の描画のようなフォーメーションを組む場合, UAV 同士は近接した領域を飛行することになり, 周りの UAV が受けた風外乱の情報を共有することで, UAV 自身がこれから受ける風外乱についても上述と同様の手法を応用することで影響を抑制できることを明らかにした(学会発表⑨, ⑩, ⑰). さらに UAV 間の通信遅れを補償することで, よりロバストにフォーメーション形状を維持できることを確認した(学会発表⑦, ⑮).

フォーメーション制御だけでなく被覆制御というフォーメーションとは異なる分散制御手法に関しても研究を進めた. 被覆制御とは重要度という UAV の空間内における位置・姿勢に応じて定まる値を, 最大化するように各 UAV が自律的に行動を決定する分散制御手法である. この手法に被覆効率を上げるための機能やセンサ測距範囲を陽に考慮した被覆制御則へ改良することで, フォーメーション制御に比べてより柔軟な3次元画像の描画を可能とした(学会発表③, ⑪).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 1 件)

- ① Tomohiro Fukaishi, Kazuma Sekiguchi, Kenichiro Nonaka, Attitude Control of Two-Wheel Spacecraft Based on Dynamics Model via Hierarchical Linearization, SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration, 査読有, Vol. 10, No. 4, 2017, pp. 310-316

〔学会発表〕(計 26 件)

- ① Kazuma Sekiguchi, Novel Control Method for Quadcopter –Hierarchical Linearization Approach–, The 2017 Asian Control Conference, 2017 年
- ② Kenta Yamamoto, Kazuma Sekiguchi, Kenichiro Nonaka, Experimental Verification of Formation Control by Model Predictive Control Considering

Collision Avoidance in Three Dimensional Space with Quadcopters, The 2017 Asian Control Conference, 2017 年

- ③ Masataka Naruse, Kenta Yamamoto, Kazuma Sekiguchi, Verification of Coverage Control for Multi-Copter with Local Optimal Solution Avoidance and Collision Avoidance Using Random-walk and Artificial Potential Method, SICE Annual Conference 2017, 2017 年
- ④ Hiroaki Endo, Ryo Aramaki, Kazuma Sekiguchi, Kenichiro Nonaka, Application of Model Error Compensator based on FRIT to Quadcopter, 1st IEEE Conference on Control Technology and Applications, 2017 年
- ⑤ Takahiro Suyama, Kazuma Sekiguchi, Kenichiro Nonaka, Interference Suppression Control for Interaction of Two Quad Copters by Model Predictive Control Using the Disturbance Map, 1nd IEEE Conference on Control Technology and Applications, 2017 年
- ⑥ Takahiro Suyama, Kentaro Akiyama, Kazuma Sekiguchi, Kenichiro Nonaka, Disturbance Suppression Control for Interaction of Two Quad Copters Using the Disturbance Map, SICE annual conference 2016, 2016 年
- ⑦ Kentaro Akiyama, Kazuma Sekiguchi, Kenichiro Nonaka, Robust Formation Control Applying Model Predictive Control to Multi Agent System by Sharing Disturbance Information with UAVs, SICE annual conference 2016, 2016 年

- ⑧ Kenta Yamamoto, Kentaro Akiyama, Kazuma Sekiguchi, Experimental Verification of Multi-Agent Formation Control by Model Predictive Control Considering Collision Avoidance with UAVs, SICE Annual Conference 2016, 2016 年
- ⑨ Kentaro Akiyama, Zhenwei Wang, Kazuma Sekiguchi, Kenichiro Nonaka, Experimental Validation of Repetitive Disturbance Estimation and Model Predictive Control for Multi UAVs, 3rd RED-UAS 2015 Workshop on Research, Education and Development of Unmanned Aerial Systems, 2015 年
- ⑩ Zhenwei Wang, Kentaro Akiyama, Kenichiro Nonaka and Kazuma Sekiguchi, Experimental verification of the model predictive control with disturbance rejection for quadrotors, Proceedings of SICE Annual Conference 2015, 2015 年
- ⑪ 竹内和, 成勢昌隆, 関口和真, 野中謙一郎, 測域範囲に制限のあるセンサを用いた未観測領域を考慮した被覆制御, 第 5 回計測自動制御学会制御部門マルチシンポジウム, 2018 年
- ⑫ 相馬淳志, 関口和真, 野中謙一郎, オイラーパラメータベースの UKF を用いたクアドコプターの位置・姿勢推定, 第 5 回計測自動制御学会制御部門マルチシンポジウム, 2018 年
- ⑬ 山本健太, 関口和真, 野中謙一郎, 階層型線形化を用いたクアドコプターの合意制御, 第 60 回自動制御連合講演会, 2017 年
- ⑭ 相馬淳志, 関口和真, 野中謙一郎, 無香料カルマンフィルタを用いたクアドコ

プターの非線形モデル同定, 第 60 回自動制御連合講演会, 2017 年

- ⑮ 秋山賢太郎, 関口和真, 野中謙一郎, UAV の通信遅れを考慮した外乱情報共有によるモデル予測隊列制御, 第 59 回自動制御連合講演会, 2016 年
- ⑯ 山本健太, 関口和真, 野中謙一郎, モデル予測制御による衝突回避を考慮したクアドコプターの 3 次元フォーメーション制御, 第 59 回自動制御連合講演会, 2016 年
- ⑰ 秋山賢太郎, 王振イ, 関口和真, 野中謙一郎, UAV の繰り返し推定による外乱情報を用いたモデル予測経路追従制御の実験的検証, 第 58 回自動制御連合講演会, 2015 年

〔その他〕
ホームページ
<https://www.cl.mse.tcu.ac.jp/lab/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

関口 和真 (SEKIGUCHI, Kazuma)
東京都市大学・工学部・講師
研究者番号：80593558