

平成 30 年 6 月 19 日現在

機関番号：12608

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K18086

研究課題名(和文) モバイルロボティックネットワークの3次元位置・姿勢協調制御

研究課題名(英文) 3-D Pose Synchronization for Mobile Robotic Networks

研究代表者

伊吹 竜也 (Ibuki, Tatsuya)

東京工業大学・工学院・助教

研究者番号：30725023

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究課題では、複数の移動可能なロボットで構成されるモバイルロボティックネットワークに対して、3次元空間上の位置・姿勢協調制御問題を考察した。特に、研究代表者によってこれまで得られていた成果に対して、新たに(i)力・トルク入力モデル、(ii)劣駆動性を有するモデル、(iii)システム外乱、(iv)離散時間システム表現を導入することで、より工学的応用を考慮した発展を試みた。これらの問題に対して、新規の制御則の提案および収束性解析を行い、さらに実験システムを新たに構築し、提案制御則の有効性を実機検証により示した。

研究成果の概要(英文)：This work has investigated 3-D pose synchronization problems for a group of networked mobile robots called mobile robotic network. Specifically, we have extended our previous results by newly introducing (i) force/torque input models, (ii) underactuated vehicle models, (iii) system disturbances, and (iv) discrete-time representation. Here, we have proposed novel synchronization laws and provided convergence analysis for these topics. Moreover, we have developed new experimental environments and conducted experimental verification.

研究分野：工学

キーワード：制御工学 協調制御 ロボティックネットワーク

1. 研究開始当初の背景

現在抱えている深刻な環境問題に対して、広範囲に渡る環境モニタリングは必須である。これに対して、センサを搭載した多数の移動可能なロボットから成るモバイルセンサネットワークと呼ばれるシステムが新技術として期待されている。モバイルセンサネットワークの利点として、各センサがネットワークを構成することにより、システム全体として耐故障性に優れる。また、観測対象が移動する場合や環境の変化が存在する状況に対しても、その計測領域や環境変化に適応してセンサが移動することで計測効率を上げることが可能となる。モバイルセンサネットワークは、環境モニタリングだけではなく、危険区域における監視や探索、未開拓地の地図形成などにも有用であると期待されている。これらの工学的応用では、ネットワーク全体が集合する、同一方向へ移動する、効率的に分散するなど、ネットワーク全体で位置・姿勢に関する所望の秩序を形成するように個々のロボットが制御されることが重要である。

2. 研究の目的

多数のロボットから成る大規模なモバイルロボティックネットワークの運用において、個々のロボットが各々の局所的な情報を互いに交換し、分散的に制御された結果としてシステム全体が制御目的を達成することが望まれる。本研究課題では、このモバイルロボティックネットワークの分散型制御問題が複数の剛体の位置・姿勢協調問題として定式化できることに着目し、特に3次元空間上の位置・姿勢協調制御問題を考察する。研究代表者は、本課題に対して既に先行研究で基礎的な成果を得ており、本研究ではこれまでに得られていた成果に対してより工学的応用を考慮した発展を試みる。

3. 研究の方法

本研究課題では、3次元空間上の位置・姿勢協調の中でも特に位置・姿勢同期を制御目的とする(図1)。位置・姿勢同期の目的は、すべての剛体の位置・姿勢が共通の値に収束、または所望のフォーメーションを形成することである。

研究代表者は、既に位置・姿勢同期問題に対して一定の成果を挙げているが、各剛体が速度・角速度入力を仮定し、かつ3次元空間上の任意の方向に直接並進・回転運動が可能である全駆動な運動学モデルを用いている。また、外乱の影響も一切考慮されておらず、理想的な連続時間モデルのみを考慮している。したがって、既存の提案手法が実用的であるとはいえない。他方、研究開始当初の実験環境では、モバイルロボットとして2次元平面上のビークルを用いていたため、3次元空間上の提案手法の検証としては不十分である。

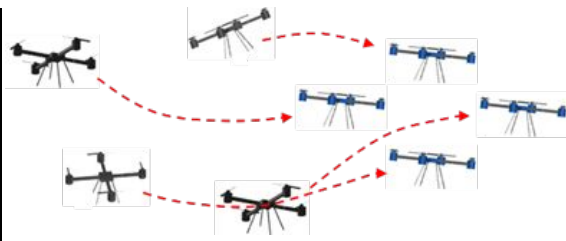


図1: 位置・姿勢同期

そこで、本研究では以下の課題に取り組む。

- (1) 力・トルク入力に基づく位置・姿勢同期問題
- (2) 劣駆動性を有するモデルを考慮した位置・姿勢同期問題
- (3) 剛体モデルに外乱が存在する状況における位置・姿勢同期問題
- (4) 離散時間系における位置・姿勢同期問題
- (5) 実験環境の構築・検証実験

本研究では、以上の各課題に対して問題を再定式化し、新規の制御則の提案、収束性解析、およびシミュレーション・実験による有効性検証を行う。

4. 研究成果

【(1): 力・トルク入力】

本課題では、各剛体のモデルとして力・トルク入力を扱う動的モデルを導入し、新たにスライディングモード制御と呼ばれる非線形制御手法を従来の速度入力による同期則と融合させることで、収束性を保証する新規の位置・姿勢同期則を提案した。具体的には、従来の速度による同期則を所望の速度として捉え、これと実際の速度との偏差を有限時間で0とする力・トルク入力によるスライディングモード制御則を提案した。この偏差を0に保つことで、これ以降は従来の運動学モデルに対する位置・姿勢同期問題と同様の収束性解析を行うことが可能となる。

提案制御則の有効性は、シミュレーション検証により示されている。

【(2): 車両モデル】

本課題では、各剛体のモデルとして2次元平面上の2輪車両モデルに対する位置・姿勢同期問題を考察した。2輪車両は、横方向に直接移動不可能な非ホロノミック拘束を有する劣駆動モバイルロボットであり、一般に位置・姿勢を同時に制御することが難しい。これに対して、2輪車両の前方位置に着目することで位置の制御が容易となるLook-ahead Control とう概念を導入することで、新規の位置同期則を提案した。また、すべての車両にあるクラスの共通の並進速度

を課すことで、姿勢も同期させることが可能となることを示した。

提案制御則の有効性は、シミュレーション検証により示されている。なお、ここでは2次元平面上の同期問題のみを考察したが、3次元空間上の非ホロノミック拘束を有する飛行体モデルに対しても同様の制御則の提案、収束性解析が可能である。

【(2)：クアッドロータモデル】

本課題では、クアッドロータがその機械的簡便さと機敏性から現在活躍していることを鑑み、これを各剛体のモデルとして扱った位置・姿勢同期問題を考察した。クアッドロータは、3次元の並進・回転運動に対して4つのロータしかもたないため、劣駆動モバイルロボットである。まず、システムの受動性という入出力間の特性に着目し、クアッドロータモデルをホバリング状態を基準として線形化することで、得られたシステムが位置・姿勢を出力とした受動化が可能であることを示した。つぎに、これと従来の受動性に基づく出力同期則を融合させることで、新規の位置・姿勢同期則を提案した。

提案制御則の有効性は、収束性解析、およびシミュレーション・実験検証により示されている。

【(3)：外乱の存在】

本課題では、2種類の外乱を扱った。1つ目として、従来の位置・姿勢同期問題において各剛体に周期外乱が存在する状況を考察した。ここでは、外乱の内部モデルに基づき、従来の位置・姿勢同期則に積分機構を導入することで、外乱を抑制しつつ同期を達成する新規の同期則を提案した。提案制御則の有効性は、収束性解析とシミュレーション検証により示されている。

2つ目として、確率外乱が存在する状況を考察した。具体的には、リーダ追尾型のロボットネットワークに対して、リーダの運動を未知とし、これを確率信号として捉えた。ここでは、従来の剛体の運動学モデルを確率微分方程式で記述し直し、確率システムに対する安定性の概念を新たに導入することで、従来の同期則の確率の意味での安定性を解析した。提案制御則の有効性は、3次元空間上のシミュレーション検証と2次元平面上の実験検証により示されている。

【(4)：離散時間系】

本課題では、3次元空間上の位置・姿勢がLie群の一種である3次元特殊ユークリッド群($SE(3)$)に分類されるため、位置・姿勢運動モデルの離散時間表現自体が課題であった。これに対して、 $SE(3)$ の構造を保存する指数写像を新たに導入することで、厳密なモデルを導出した。さらに、導出した離散時間モデルがPassivity Shortageと呼ばれる受動性に非常に近い性質をもつことを示し、



図2: 構築した実験場

これに基づく新規の位置・姿勢同期則を提案した。これにより、従来の同期則では任意のゲインで同期が保証されると示されていたことに対して、サンプリング時間によりゲインの上限が存在することを示し、より実用的な結果を得た。

提案制御則の有効性は、収束性解析とシミュレーション・実験検証により示されている。

【(5)：実験環境の構築】

新たに3次元飛行体を用いた実験を行うために、複数台のモーションキャプチャカメラを用いた高速・高精度な観測システムの構築、および実験場の整備を行った。特に、実験場については人、実験機双方の安全性を確保するために、実験場をネットで覆う環境を構築した(図2)。結果として、3次元飛行体を用いたさまざまな検証実験に成功した。

【その他：全駆動飛行体の開発】

本研究では、課題(2)において劣駆動なモバイルロボットの位置・姿勢同期問題を考察したが、その運動能力の制限から達成可能な運動も限定的なものになってしまう。そこで、異なるアプローチとして、3次元空間上の全駆動な飛行体の開発を行った。

具体的には、3次元の独立な並進・回転運動を可能とするために6つのロータから成るヘキサロータを考え、これらのロータを傾けて配置することで全駆動性を保証する新規の機構を開発した。このロータの傾け方は、動的可操作度と呼ばれる運動性能を指標とした最適化により決定されている。さらに、実験機の製作を行い(図3)、飛行実験にも成功した。今後は、開発したヘキサロータを小



図 3: 開発した全駆動ヘキサロータ

型・量産化することで、3次元空間上の全駆動飛行体による位置・姿勢協調制御実験を行う予定である。

以上の成果は、後述の通り多数の雑誌論文、学会論文で採択され、学術的にその意義が認められている。また、本研究の成果がさらに発展することで、今後のマルチエージェントシステムが活躍する社会への貢献が期待される。

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6件)

T. Ibuki, S. Nakano, M. Endou, M. Sampei, Pose Synchronization for Quadrotor Networks under Fixed General Interconnection Topology: A Passivity Approach, SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration, 査読有, Vol. 11, No. 3, pp. 160-168, 2018.

田所祐一, 伊吹竜也, 三平満司, 対称平面傾斜ロータ構造をもつヘキサロータ型全駆動UAVの動的可操作性解析と設計最適化, 計測自動制御学会論文集, 査読有, Vol. 53, No. 8, pp. 480-489, 2017.

S. Nakano, T. Ibuki, M. Sampei, Visual Feedback Position Tracking and Attitude Analysis of Two-wheeled Vehicles Integrating a Target Vehicle Motion Model, SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration, 査読有, Vol. 10, No. 3, pp. 204-213, 2017.

木村駿介, 中村文一, 伊吹竜也, 三平満司, 状態制約を有する非線形システムに対する状態方程式を保持する変換システム蘇生変換, 計測自動制御学会論文集, 査読有, Vol. 53, No. 6, pp. 337-345, 2017.

伊吹竜也, 木曾勝之, 安田真大, 三平満司, 動的可操作度と最大並進加速度を考慮したヘキサロータの構造最適化, 日本機械学会論文集, 査読有, Vol. 83, No. 846, 2017.

DOI: 10.1299/transjsme.16-00206

安田真大, 伊吹竜也, 鈴木洋史, 三平満司, ヘキサロータの動的可操作性に基づく切替位置・姿勢制御, 計測自動制御学会論文集, 査読有, Vol. 52, No. 9, pp. 507-515, 2016.

[学会発表](計29件)

Y. Tadokoro, T. Ibuki, M. Sampei, Classification and Structural Evaluation of Fully-Actuated Hexrotor UAVs, 2018 American Control Conference, to appear, 2018.

N. Murakami, T. Ibuki, M. Sampei, State Regulation of Dynamic Nonholonomic Systems Based on Time-state Control Form, 56th IEEE Conference on Decision and Control, pp. 6119-6124, 2017.

S. Nakano, T. Ibuki, M. Sampei, Dynamic Visual Feedback Position Tracking of Two-wheeled Vehicles with a Target Vehicle Motion Model, 2017 IEEE Conference on Control Technology and Applications, pp. 1791-1796, 2017.

J. Yamauchi, K. Kizaki, T. Ibuki, T. Hatanaka, S. Satoh, M. Fujita, Performance Analysis of Visual Feedback Leader-following Pose Synchronization with Stochastic Uncertain Leader in Three Dimensions, 2017 IEEE Conference on Control Technology and Applications, pp. 349-354, 2017.

S. Kimura, H. Nakamura, T. Ibuki, M. Sampei, Revived Transformation for Nonlinear Systems Subject to State Constraints, 54th IEEE Conference on Decision and Control, pp. 7554-7559, 2015.

Y. Katsuyama, T. Ibuki, M. Sampei, Attitude Controllability Analysis of an Underactuated Satellite with 2 Reaction Wheels and Its Control, 54th IEEE Conference on Decision and Control, pp. 3421-3426, 2015.

〔その他〕
ホームページ等
[http://www.sl.sc.e.titech.ac.jp/~ibuki/
home.html](http://www.sl.sc.e.titech.ac.jp/~ibuki/home.html)

6．研究組織

(1)研究代表者

伊吹 竜也 (IBUKI, Tatsuya)
東京工業大学・工学院・助教
研究者番号：30725023