

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 14 日現在

機関番号：22604

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2016

課題番号：26820372

研究課題名(和文) 劣駆動姿勢制御の実システムへの積極的適用に関する研究

研究課題名(英文) Study on Practical Applicability of Underactuated Attitude Control of Satellites

研究代表者

吉村 康広 (Yoshimura, Yasuhiro)

首都大学東京・システムデザイン研究科・助教

研究者番号：00725624

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では劣駆動制御を実システムに積極的に適用するために、1)入力方向制約下における劣駆動制御手法の導出、2)アクチュエータのフォールトトレラント配置解析を目的とした。劣駆動制御は、制御する状態変数の数より少ない入力数で制御を可能とする。そのため、宇宙機のアクチュエータがいくつか故障した際にも、残されたアクチュエータで姿勢制御や位置制御を行うことができる。特に宇宙機軌道上で修理することが難しいため、劣駆動制御を積極的に活用できれば衛星の信頼性の向上に貢献する。本研究では先に述べた2つの点に着目し、劣駆動姿勢制御を実システムに適用しやすくするアクチュエータ配置と制御手法を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：This research has focused on 1) underactuated attitude control of satellites under input directional constraints and 2) optimal fault-tolerant configurations of actuators. Underactuated control is a possible solution to enhance fault-tolerance of satellites, which enables driving a satellite state with less number of inputs than the number of state. This research has proposed magnetic attitude control method for a spinning satellite that uses only a magnetometer data for the feedback control. Furthermore, optimal fault-tolerant configurations of control moment gyros and thrusters have been derived. The optimal configurations of the actuators maximize the controllability of satellites considering underactuated control. The effectiveness of these proposed methods are numerically verified.

研究分野：航空宇宙工学

キーワード：劣駆動制御 磁気トルカ スラスタ コントロールモーメントジャイロ

1. 研究開始当初の背景

人工衛星は、打ち上げ後の修理が難しいため、多くのアクチュエータを搭載することで冗長性を確保している。一方、状態変数より少ない数の入力システムを制御する劣駆動制御の研究は、劣駆動 マニピュレータや劣駆動衛星を対象に 90 年代から盛んに行われている。少数のアクチュエータで衛星の制御が可能になれば、バックアップを含めた搭載アクチュエータ数を大幅に減らすことができる。したがって、アクチュエータの重量低減により、搭載観測機器の数を増加させることが可能になり、ミッションの質が向上し、また同時に衛星の長寿命化とミッション達成の信頼性を高めることができる。

このような利点があるにも関わらず、劣駆動制御の実システムへの積極的な適用は進んでいない。その理由として実システムと理論における次のような差異が考えられる。1)理想的な入力および入力方向が仮定されている、2)外乱やモデル化誤差が考慮されていない。これらの問題を解決することで実システムへ劣駆動制御が適用可能になれば、衛星の信頼性を大幅に高めることができる。これは実用面でも有用であることはもちろん、理論面でも新規性が高く新たな知見が得られるといえる。

2. 研究の目的

本研究は、人工衛星の劣駆動姿勢制御を積極的に実システムへ適用するために、入力方向制約下における劣駆動制御手法の導出とアクチュエータのフォールトトレラント配置の解析を目的とする。

衛星の実際的な劣駆動状態として、制御入力が一方向もしくは連成する状態を考え、その可制御性と制御手法を明らかにする。さらに、劣駆動制御の可制御性まで考慮することで、アクチュエータ故障時においても姿勢制御の可制御性を最大限に保つことができる、フォールトトレラントなアクチュエータ配置の体系的な設計手法を示す。これらの研究により、従来より少ないアクチュエータ数で、従来と同等の冗長性の確保を可能にし、衛星の長寿命化と信頼性の大幅な向上に貢献する。

3. 研究の方法

上記の目的から、

(1) 入力方向が制約を持つ劣駆動システムに対する制御手法の解析と導出

(2) 劣駆動制御の可制御性を考慮したアクチュエータのフォールトトレラント配置
以上の解析の 2 つを実施した。

(1) 制御手法の解析と導出

実システムに適用する際には、そのアクチュエータが持つ特性やそのシチュエーションが重要になる。ここでは、磁気トルカによる制御を扱った。特に小型衛星では信頼性の高い磁気トルカが用いられることが多い。そこで小型衛星への適用時の特有の問題点を整理

し、問題設定を行った。導出した制御則の有効性は数値シミュレーションにより検証した。

(2) アクチュエータのフォールトトレラント配置解析

いくつかのアクチュエータが故障した際、残されたアクチュエータが発生できる並進推力や回転トルクの方法はアクチュエータ配置によって決まる。そのため、劣駆動制御を用いてもそもそも可制御性が成り立っているかを検証する必要がある。これは逆に、いくつかのアクチュエータ故障時においても残されたアクチュエータが発生する並進推力・回転トルクによる可制御性が最大限に保たれていれば、劣駆動制御を活用することができるといえる。そこで、劣駆動制御の可制御性を考慮することで、いくつかのアクチュエータが故障した際に可制御性を最大限に保つアクチュエータ配置を解析した。そしてその有効性を数値シミュレーションと評価関数により検証した。

4. 研究成果

(1) 入力方向が制約を持つ劣駆動システムに対する制御手法の解析と導出

小型衛星はそのコンポーネントや重量の制約から消費電力に制約がある。そのためロケット分離からのデタンプリングなどではセンサやアクチュエータを多く使うことなく電力的に安定な姿勢へ遷移することが求められる。そこで本研究では、磁気センサと磁気トルカのみを用いて軌道面垂直にスピン軸指向制御をする手法を導出した。

これまで提案されてきた手法は GPS による位置情報やジャイロセンサを複合的に用いた手法がほとんどであった。小型衛星が多く用いる太陽同期軌道では、軌道面とダイポールモデル表される地磁場が軌道面外に大きな値を取らないことに着目した。その性質も用いることで、GPS やジャイロセンサを用いずとも、磁気センサと磁気トルカのみで軌道面垂直方向にスピン軸指向制御を可能にする手法を導出した (図 1)。

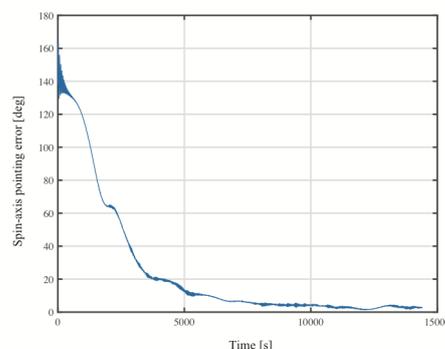


図 1 スピン軸指向誤差時間履歴

(2) 劣駆動制御の可制御性を考慮したアクチュエータのフォールトトレラント配置の解析
 いくつかのアクチュエータが故障した際にも、残されたアクチュエータが発生可能な入力方向が最大限に可制御性を保つようなアクチュエータ配置を解析した。

①コントロールモーメントジャイロの最適配置

角運動量交換型のアクチュエータとして知られているコントロールモーメントジャイロの最適フォールトトレラント配置を導出した。全体の角運動量を交換することから、コントロールモーメントジャイロを用いた姿勢制御では、コントロールモーメントジャイロが作る角運動量曲面の最大化が可制御性の最大化と等価である。したがって、コントロールモーメントジャイロの角運動量の線形結合を最大化する問題へ定式化した。さらにその問題が球面上に点を均等配置する Thomson 問題と呼ばれるものに帰着することを示した。CMG のジンバル軸の端点を電荷とみなすこと(図2)で、Thomson 問題の解法の一つであるエネルギーポテンシャルを用いた最適化手法を提案した(図3と図4)。この手法では初期値推定は必要とせず、また任意の方向に対する重み付け、ゼロモーメントム拘束といった特性を付加することが容易な手法となっている。

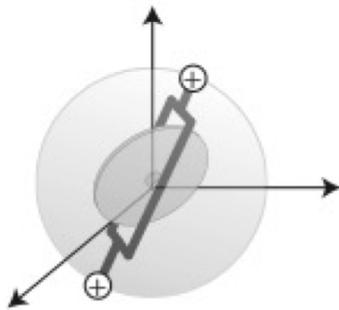


図2 Thomson 問題への対応付け

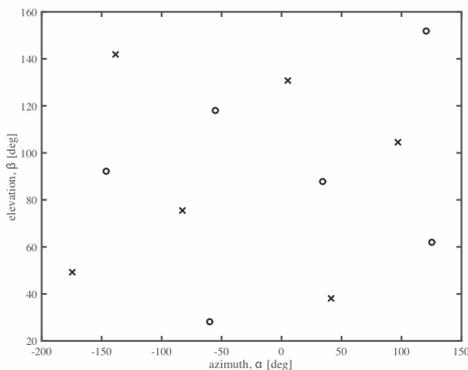


図3 最適コントロールモーメントジャイロ配置

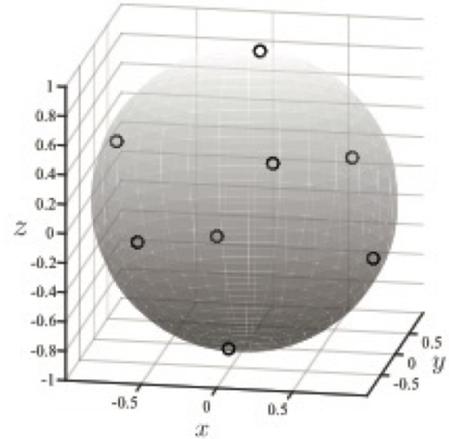


図4 最適球面均等配置

②スラスタの最適配置

コントロールモーメントジャイロと異なり、スラスタは角運動量を保存しないアクチュエータである。さらに並進推力と同時に回転トルクを発生することから、衛星の位置と姿勢の両方の制御が可能である。このことから衛星の位置・姿勢制御の可制御性を最大化するスラスタ最適配置を求めた。

スラスタはその向きだけでなく、位置も影響してくる。そこでスラスタの位置と姿勢を簡易に定式化することができる Dual Quaternions を導入することで、スラスタの発生する並進推力と回転トルクを定式化した(図5)。さらにそれが二つの項から定義されていることに着目し、並進推力と回転トルクをそれぞれ表すようなスラスタ座標系の定義を示した。

これによりスラスタの最適配置もコントロールモーメントジャイロと同様に球面均等配置の応用で解くことができる問題に帰着した。具体的には、エネルギーポテンシャルに基づく球面均等配置を連続的に使用する。はじめにスラスタの姿勢を表すクォータニオンの位置を最適化する。つまり、球面均等配置問題をスラスタ姿勢のみについて解く。そして、それらの位置は固定し、スラスタの位置を表す電荷を追加配置することで、スラスタの最適配置を求められることを示した。

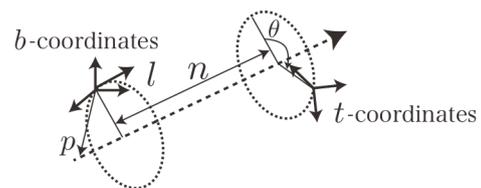


図5 Dual Quaternions を用いたスラスタ配置表現

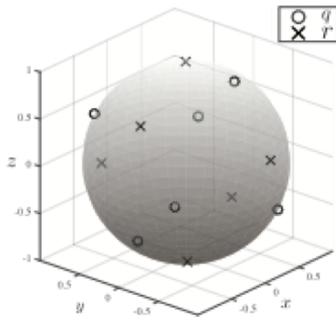


図6 最適スラスト配置

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕（計 3 件）

1. Yasuhiro Yoshimura, Takashi Matsuno, Shinji Hokamoto, Global Trajectory Design for Position and Attitude Control of an Underactuated Satellite, Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, Vol. 59, No. 3, 2016, pp. 107–114. 査読有
2. Yasuhiro Yoshimura, Optimal Fault-Tolerant Configurations of Control Moment Gyros, Journal of Guidance, Control, and Dynamics, Vol. 38, No. 12, 2015, pp. [2460-2467](#), doi: 10.2514/1.G001249. 査読有
3. Yasuhiro Yoshimura, Suboptimal Formation Reconfiguration of Satellites Under Input Directional Constraints, Advances in Space Research, Vol. 56, No. 10, 2015, pp. 2130–2140, doi: 10.1016/j.asr.2015.07.037. 査読有

〔学会発表〕（計 4 件）

1. 吉村康広, 磁気トルカによるスピン軸指向制御, 第 60 回宇宙科学技術連合講演会, 2J04, 函館アリーナ (北海道函館市), 2016 09 6-9.
2. 吉村康広, 最適フォールトトレラントスラスト配置, 第 59 回宇宙科学技術連合講演会, 2J05, かがしま県民交流センター (鹿児島県鹿児島市), 2015 10 7-9.
3. 吉村康広, 劣駆動を考慮したコントロールモーメントジャイロの最適フォールトトレラント配置と適応姿勢制御, 第 58 回宇宙科学技術連合講演会, 2G09, 長崎ブリックホール・長崎新聞文化ホール (長崎県長崎市), 2014 11. 12-14.
4. Yasuhiro Yoshimura, Suboptimal Formation Reconfiguration of

Satellites Under Input Directional Constraints, 2014 Asia-Pacific International Symposium on Aerospace Technology, Shanghai (China), Sep. 24-25 2014.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

吉村 康広 (Yoshimura, Yasuhiro)

首都大学東京 システムデザイン研究科
助教

研究者番号 : 00725624