

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 14 日現在

機関番号：24403

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2010 年度～2012 年度

課題番号：22560780

研究課題名（和文） 発電機構を有するリアクションホイールシステムを用いた宇宙機の姿勢制御とその最適化

研究課題名（英文） Optimization of reaction wheel system with regenerative function for spacecraft attitude control

研究代表者

長塩 知之（NAGASHIO TOMOYUKI）

大阪府立大学・工学（系）研究科（研究院）・准教授

研究者番号：80334580

研究成果の概要（和文）：本研究では、宇宙機に搭載されたリアクションホイールを駆動するモーターの回生機能を制御系に組み込みことで、姿勢変更マヌーバにおける消費電力を低減化する手法について検討した。そして、離散時間時系列系表現によるシステムの記述手法、時系列系モデルに対する評価関数の最適化アルゴリズムの適用手法、実験装置の製作および実証実験、の各項目について吟味し、一般的な制御手法に比較して、運用における電力収支を向上させることができる制御手法を考案、評価した。

研究成果の概要（英文）：This research work has studied saving electric power of spacecraft attitude maneuver mission by using a regenerative function of reaction wheel system. They consist of a modeling method using a discrete time series system, an optimization method using a cost function for the both of attitude angle error and consumption of electric power, and investigation using experimental device. From the results, it has been confirmed that the proposed method is effective compared with general control schemes.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合 計
2010 年度	2,000,000	600,000	2,600,000
2011 年度	800,000	240,000	1,040,000
2012 年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総 計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：航空宇宙工学

キーワード：誘導・航法・制御

1. 研究開始当初の背景

現在、宇宙機の姿勢維持、及び、変更には、一般的にリアクションホイールが用いられている。その主な理由の一つは、搭載量に制約がある燃料の消費を伴うスラスタに比較

して、ホイールを駆動するモーターの電力が太陽電池から半永久的に供給できる点にある。反面、ホイールには、蓄積できる角運動量に限界があるため、運用にあたっては、適宜、スラスタの噴射を利用したアンローディング動作を実施する必要がある。そのため、

アンローディング実施によるミッションの中断時間短縮、及び、消費燃料の低減、等が将来の課題となっている。

他方、研究代表者は、これまでに、ハイブリッドディーゼルエンジンシステムの開発に関する共同研究を日野自動車株式会社と実施して来た。この共同研究では、車両の運動エネルギーを発電機により電力へ変換する際に、走行状況、ドライバビリティ、蓄電容量、等の様々な制約のもとで回生効率を最適化する手法が重要な研究課題の一つに位置付けられており、これを解決するために、変動パラメータ依存制御系設計手法、モデル予測制御手法、等の適用を検討した。

本研究では、この共同研究から得られた知見を応用発展させ、ホイールに蓄積された角運動量を回生エネルギーとして発電に活用することにより、上述したアンローディング動作に伴う問題の解決手法を検討する。

2. 研究の目的

本研究では、リアクションホイールを用いた剛体宇宙機の姿勢変更制御における消費電力の低減化手法を研究目的として、以下の各項目について研究、開発、及び、評価を実施する。

(1) 「発電機能を備えたリアクションホイール機構を含めた宇宙機のモデル構築」

これまでに、回生機能を有するリアクションホイール機構を厳密にモデル化した研究は実施されていない。そのため、まず、この機構を搭載した宇宙機のモデル化を実施する。

(2) 「回生動作のダイナミクスを含めた宇宙機の姿勢制御手法の確立、及び、ミッション遂行における電力収支の最適化手法の確立」

導出したモデルに対して、回生動作による姿勢への影響を考慮した姿勢制御系設計法を考案する。これと並行して、ミッション遂行時における電力収支を最適化するための評価式を考案する。そして、これら二つの要素を統合した最適化問題を解くことにより、宇宙機のミッション遂行においてエネルギー消費量を最小とすることができる制御系設計手法を実現する。

(3) 「実験装置の製作と実証実験」

研究課題をより現実的な成果とするために、現在の宇宙機に搭載可能な性能水準の各種デバイスを用いて実験装置を製作し、ハードウェア面における問題点を吟味する。そして、その結果を反映することにより、適宜、考案した制御系設計手法を改良する。

3. 研究の方法

研究目的に掲げた各項目を実施する方法を以下に述べる。

(1) モデル構築においては、一般的なハイブリッド車両で採用されているモーター・発電機の関係式を用いて、力学、及び、電磁気学の双方において、リアクションホイールシステムの特性をダイナミクスモデル化する。そして、既存の剛体宇宙機モデルと組み合わせることにより、システム全体のダイナミクスモデル、及び、キネマティクスモデルを導出し、制御対象の運動と消費電力の関係を明らかにする。

(2) 最適化制御手法の確立においては、得られたモデルに対して、消費電力の低減を実現するために、操作可能なシステムのパラメータ値を選定した上で、以下の最適化手法を適用する。

① リアクションホイールシステムの消費電力と目標値追従誤差の和を2次形式評価関数として定義し、この値を最小化するモデル予測制御手法

② 離散化したダイナミクスモデルの時系列表現に含まれるホイールの回転角度、角速度、電気抵抗値、及び、電流指令値、などの多乗項を変数とした非凸型2次計画問題に対する半正定値計画問題による近似解法

(3) 実験による検討においては、実衛星の開発に実績のある日本電気株式会社の技術者の方々から協力を得て、無線駆動式リアクションホイール実験装置を設計、製作する。そして、これを宇宙航空研究開発機構が所有するエアータブル(宇宙機本体を模擬するエアベアリングで浮上させた1軸回転台座)に搭載して、姿勢変更を想定した実証実験を実施する。

4. 研究成果

得られた成果を以下にまとめる。

(1) モデル構築：

導出したモデルは以下である。

宇宙機全系ダイナミクスモデル

$$(J_{bi} + J_{wi})\ddot{\theta}_{bi} = -J_{wi}\ddot{\theta}_{wi}$$

リアクションホイールダイナミクスモデル

$$J_{wi}\ddot{\theta}_{wi} = -\frac{K_i^2}{R_i}\dot{\theta}_{wi} + K_i I_{ui}$$

回路内電流値

$$I = I_{ui} - \frac{K_i \dot{\theta}_{wi}}{R_i}$$

消費電力

$$W = R_i I_{ui}^2 - \frac{K_i^2}{R_i} \dot{\theta}_{wi}^2$$

回生電力

$$G = K_i \dot{\theta}_{wi} I_{ui} - \frac{K_i^2}{R_i} \dot{\theta}_{wi}^2$$

ここで "i" は、ロール、ピッチ、ヨーの各姿勢軸を意味し、式中の各記号は以下を表す。

J_b : 宇宙機本体部慣性モーメント

J_{wi} : リアクションホイール慣性モーメント

θ_b : 本体部回転角度

θ_{wi} : リアクションホイール回転角度

K_i : トルク定数 = 逆起電力定数

R_i : 回路内電気抵抗値

I_{ui} : 指令電流値 (制御入力)

このモデルの特徴は次の様にまとめられる。

○剛体宇宙機を対象としているため、各姿勢軸間の干渉が存在せず、各軸周りごとに制御系を構築できる。

○回生動作中に制御入力を 0 にすることができれば、電力収支の向上が期待できる。

○回生量の操作は回路内電気抵抗値を可変パラメータとする制御系を構築することにより実現できる。

(2) 最適化制御手法の確立：

先に述べたモデルの特徴を踏まえて実施した制御系構築の成果についてまとめる。

① 一般的なモデル予測制御手法に、回生動作中は制御入力を 0 とするための条件を表 1 に示す組み合わせに従った不等式条件を用いて加え、合わせて、回生動作中は、電気抵抗値を通常値より大きな値へ変更するアルゴリズムを構築することにより、電力収支を向上させる制御手法を考案した。なお、表中の "j" はモデル予測制御アルゴリズムにおける時間ステップを表し、"ref" は目標姿勢角度を意味する。この制御手法を用いた実験結果については後述する。

表 1 制御入力の設定条件

Rotation	e_{ij}	r_{ij}	$e_{ij}r_{ij}$	I_{uij}
Positive	> 0	≥ 0	≥ 0	≥ 0
	< 0	> 0	< 0	$= 0$
Negative	< 0	≤ 0	≥ 0	≤ 0
	> 0	< 0	< 0	$= 0$

$$e_{ij} = \dot{\theta}_{bi,j+1} - \dot{\theta}_{bi,j}, \quad r_{ij} = \theta_{bi,ref} - \theta_{bi,j}$$

② 離散化時系列系表現したモデルに対して、消費電力と目標値追従誤差の和を 2 次形式評価関数として定義し、電気抵抗値を各時間ステップにおいて許容範囲内で操作可能な変動パラメータとして扱う半正定値計画問題を導出し、これに対して、急勾配法にもとづいた解法を適用することで、電力収支を向上させる制御手法を考案した。この制御手法を用いた実験結果については後述する。

(3) 実験による検討：

製作した実験装置を図 1 に、これを設置するエアータブルを図 2 示す。



図 1 無線式リアクションホイール実験装置



図 2 エアータブル実験装置

この実験装置は、無線装置により汎用パーソナルコンピュータに実装した制御則により操作され、エアータブル上で外界からの物理的接触が無い状態での運用が可能である。また、装置内には、汎用マイクロコントローラが搭載されており、電気抵抗値等の操作に用いられる。

二つの提案手法および一般的な制御手法として比較対象とする PD 制御器を用いた実験結果を抜粋して図 3、4 および 5 に示す。この実験では、エアータブルに 1[rad]のステップ目標角度を与え、これを追従するようにリアクションホイールの制御系を構築している。図中、実線は PD 制御手法、破線はモデル予測制御手法、一点鎖線は半正定値計画手法、の結果をそれぞれ表しており、図 3 はエアータブルの角度、図 4 は消費電力、図 5 は回生電力である。なお、図中の電力については、モーターが時計方向に回転する状況を正值、逆回転する状況を負値として表示している。表 2 は、各実験における消費電力量 W [W]、回生電力量 G [W]、実消費電力(双方の差分) $W-G$ [W]の総和を掲載している。これらの結果より、提案手法が電力収支の向上に有効であることがわかる。また、電気抵抗値を二値変更パラメータとするモデル予測制御手法より、制御サンプリング周期毎に任意の値を取れるよう設定した半正定値計画手法の方が、より効果的であることがわかる。

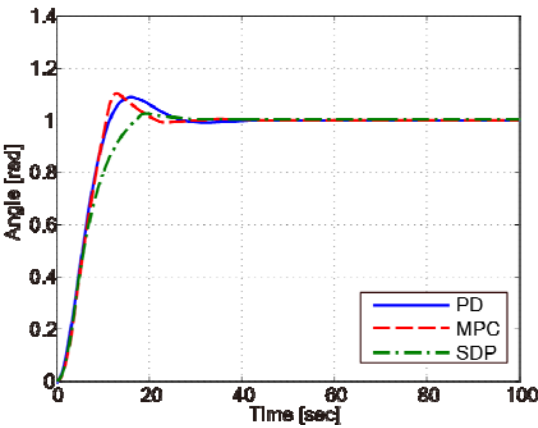


図 3 エアータブル角度

表 2 電力量総計

	W [W]	G [W]	$W - G$ [W]
PD	395	57.9	337
MPC	58.6	1.97	56.6
SDP	42.5	3.49	39.0

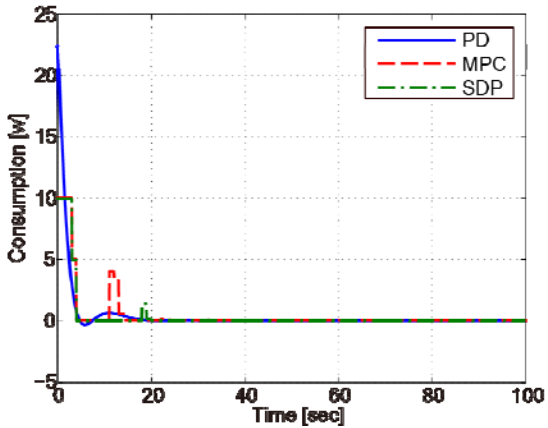


図 4 消費電力

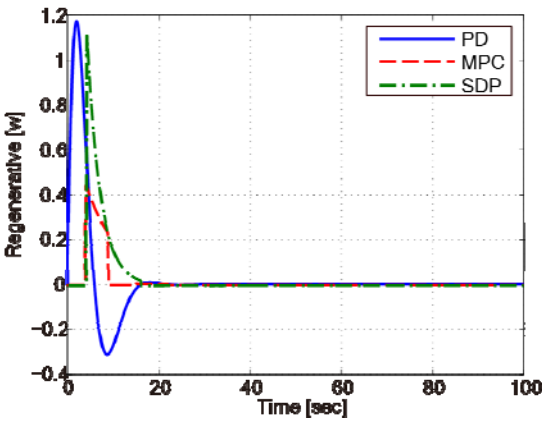


図 5 回生電力

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 0 件)

〔学会発表〕(計 3 件)

(1)Yuki Kurotaki, Tomoyuki Nagashio Takashi Kida, An Optimal Design of H-infinity Static Output Feedback Controller using LMI for Collocated Gyroscopic System, Proc. of 51th IEEE Conference on Decision and Control, ThC17.2, Maui, Hawaii, December 10-13 2012, pp. 7776-7780

(2)Ayaka Senoo, Takeya Asakawa, Tomoyuki Nagashio, Takashi Kida, Model Predictive Control of Spacecraft Attitude with Regenerative Reaction Wheels, International workshop on Modern Science and Technology 2012 PROCEEDINGS, Regular Session 5, Intelligent Systems and Control

1, Tokyo, Japan, August 30-31 2012,
pp. 106-111

(3) 中山啓, 長塩知之, 木田隆、パラメータ
依存リアプノフ関数を用いたディスクリプ
タ方程式によるゲインスケジュール制御系
の設計と柔軟宇宙機への適用、第 29 回誘導
制御シンポジウム資料、宇宙航空研究開発機
構 筑波宇宙センター、2012. 5. 17-18、
pp. 53-57

〔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

該当無し

6. 研究組織

(1) 研究代表者

長塩 知之 (NAGASHIO TOMOYUKI)

大阪府立大学・工学（系）研究科（研究院）・

准教授

研究者番号：80334580

(2) 研究分担者

該当無し

(3) 連携研究者

該当無し