

## 科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成 2 4 年 5 月 1 8 日現在

機関番号：1 2 5 0 1

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2011 ~ 2011

課題番号：2 3 6 5 6 1 6 0

研究課題名（和文） 電力貯蔵磁気軸受フライホイール電気自動車の研究

研究課題名（英文） A Study on Electric Vehicle with Flywheel Energy Storage System Supported by Active Magnetic Bearings

研究代表者 野波 健蔵（NONAMI KENZO）

千葉大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：3 0 1 4 3 2 5 9

研究成果の概要（和文）：本研究開発は、電気自動車用の小型高性能な電力貯蔵磁気軸受フライホイールバッテリーを開発し、実際に電気自動車に搭載して電気自動車の性能向上を目指すと同時に、ブレーキ時のエネルギー回生を効率良く行うことで省エネ効果を飛躍的に高める。とくに、本研究では道路から印加される外乱に対して磁気軸受系がタッチダウンしないための制御系を構築する。具体的には適応制御理論である単純適応制御を適用することにより、外乱印加時はバイアス制御系で、かつ、強いばね定数としてタッチダウンを防止し、外乱が印加しない際はゼロバイアス制御系として磁気軸受での電力消費を抑制する新しい制御系を構築した。本研究における研究課題は、小型で高密度・大出力、防振性能に優れた省電力型の電気自動車用電力貯蔵磁気軸受フライホイールの研究開発、加速減速や路面等から印加される外乱に耐えうる非接触軸受の制御方式の2点について集中的に研究を実施し、当初の目標を達成した。

研究成果の概要（英文）：The energy stored in a flywheel is rotational kinetic energy. The flywheel itself is obviously a key component of the FESS. More recently, carbon-fiber composites have been used as the flywheel material. In this case, the flywheel can spin at a much higher speed and the speed of the flywheel provides the greatest contribution to the energy storage capability of the system. The design of the rotor can have a significant effect on the performance of the system, research continues on the design of a modern composite rotor. Thus a higher rotating speed can be safely attained with a consequent higher energy storage capacity. At first, the new FESS was designed, fabricated and assembled. Next, the simple adaptive control was applied to FESS and also variable bias control algorithm was applied to FESS

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	3,200,000	960,000	4,160,000

研究分野：エネルギー分野

科研費の分科・細目：機械工学・機械力学制御

キーワード：電力貯蔵，フライホイール，磁気軸受，電気自動車，回生エネルギー

## 1. 研究開始当初の背景

本研究開発は、有害な重金属などを含む鉛蓄電池に代わる電気自動車用の小型高性能な電力貯蔵磁気軸受フライホイールバッテリーを開発し、実際に電気自動車に搭載して電気自動車の性能向上を目指すと同時に、ブレーキ時のエネルギー回生を効率

良く行うことで省エネ効果を飛躍的に高め、この結果、温室効果ガスの抑制を図る。とくに、2050年までに温室効果ガスを半減するという「Cool Earth - エネルギー革新技術計画」に技術的に貢献することである。研究課題は、小型で高密度・大出力、防振性能に優れた省電力型の電

気自動車用電力貯蔵磁気軸受フライホイールの研究開発， 加速減速や路面等から印加される外乱に耐えうる非接触軸受の制御方式， 超低損失で高効率な充放電ユニットの開発， 総合効率80%以上の電力貯蔵磁気軸受フライホイール用モータ・発電機および電気自動車用モータ・発電機の最適化制御システムの開発， 電気自動車用電力貯蔵磁気軸受フライホイールの有効性の実証， 鉄道や大型バス・長距離トラックなど大型重車両用ハイブリッドシステムの電力貯蔵磁気軸受フライホイール設計論の確立である．

## 2. 研究の目的

本研究グループでは電力貯蔵磁気軸受フライホイール搭載電気自動車を開発し，電力貯蔵磁気軸受フライホイール搭載電気自動車の設計論の確立，および磁気軸受の消費電力などを含む車両全体のエネルギー効率の向上を最終目標としている．本研究では車両搭載用磁気軸受フライホイールの基礎設計を行い，その新たに製作した磁気軸受フライホイールで制御系を構築する．その際，外乱に対するロバスト性を高めるために制御系は可変バイアス式単純適応制御を用いることとする．同時に可変バイアスアルゴリズムに関して実験値よりシミュレーションにて検討する．そして，シミュレーションおよび実験により本手法の有用性を検証する．

## 3. 研究の方法

### 3.1 車両搭載用フライホイール

新たに製作した車両搭載用磁気軸受フライホイールの概観を図1に，その仕様を表1に示す．図1ではケーシング内部にフライホイールロータがあるなど，高速回転での運用を想定されたシステムとなっている．据置用との大きな違いとしては入出力の信号数，フライホイール材質そしてフライホイールロータの形状が挙げられる．この入出力の信号数の違いの原因は，据置用の電流増幅器にアキシャル方向の制御装置が組み込まれていたことによるものである．そのため，本システムではこれまで行ってきたラジアル方向の制御に加え，アキシャル方向制御も行う必要がある．

### 3.2 全体システム構成

磁気軸受フライホイールの制御を行う実験装置のシステム構成，およびその各構成要素について紹介する．このシステムは磁気軸受フライホイール，フライホイールを回転させるインバータ，非接触支持を行う磁気軸受，ロータの変位を計測する非接触センサ，制御演算を行うコンピュータ，信

号をコンピュータに取り込むためのA/D変換器，磁気軸受内の各電磁石に制御電流を与える電流増幅器，増幅器に電圧指令値を与えるD/A変換器から構成されている．



図1 新しく制作したフライホイール

表1 本制作のフライホイール仕様

Item	Value	Unit
Flywheel diameter	0.4	m
Flywheel thickness	0.04	m
Rotor mass	146	kg
Polar moment of inertia	1.114	kg m <sup>2</sup>
Other moment of inertia	2.610	kg m <sup>2</sup>
Constant of radial AMB	$25.196 \times 10^{-6}$	Nm <sup>2</sup> /A <sup>2</sup>
Constant of axial AMB	$70.568 \times 10^{-6}$	Nm <sup>2</sup> /A <sup>2</sup>
Upper distance from center of gravity	$3.086 \times 10^{-1}$	m
Lower distance from center of gravity	$1.815 \times 10^{-1}$	m
Radial nominal air gap	$0.5 \times 10^{-3}$	m
Axial upper nominal air gap	$0.4 \times 10^{-3}$	m
Axial lower nominal air gap	$0.6 \times 10^{-3}$	m
Radial nominal touch-down gap	$0.2 \times 10^{-3}$	m
Axial nominal touch-down gap	$0.4 \times 10^{-3}$	m
Allowable current	6.0	A

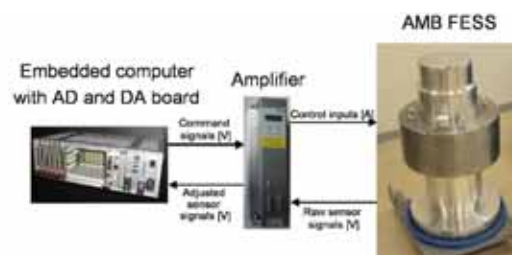


図2 磁気軸受フライホイール制御系の構成

### 3.3 制御対象のモデルと運動方程式

車両系に搭載された磁気軸受フライホイールの運動方程式は，車両系モデルとフライホイール系モデルとなるが，本来は非線形運動方程式である．これを線形化してまとめる

うと次式となる.

線形車両系モデル

$$\begin{cases} I_x \ddot{\theta}_X = -N_x + N_X \\ I_y \ddot{\theta}_Y = -N_y + N_Y \\ M \ddot{X} = -(F_x - mg\theta_Y) + \{F_X + (F_Z - Mg)\theta_Y\} \\ M \ddot{Y} = -(F_y + mg\theta_X) + \{F_Y - (F_Z - Mg)\theta_X\} \\ M \ddot{Z} = -(F_z - mg) + \{F_X \theta_Y + F_Y \theta_X + (F_Z - Mg)\} \end{cases}$$

線形フライホイール系モデル

$$\begin{cases} I_x(\ddot{\theta}_X - \omega \dot{\theta}_Y - \omega \dot{\theta}_z + \ddot{\theta}_x) + I_z \omega(\dot{\theta}_Y + \dot{\theta}_z) = N_x \\ I_y(\ddot{\theta}_Y + \omega \dot{\theta}_X + \omega \dot{\theta}_z + \ddot{\theta}_y) - I_z \omega(\dot{\theta}_X + \dot{\theta}_z) = N_y \\ m(\ddot{x} + z_0 \ddot{\theta}_Y + \ddot{X}) = F_x - mg\theta_Y \\ m(\ddot{y} - z_0 \ddot{\theta}_X + \ddot{Y}) = F_y + mg\theta_X \\ m(-x_0 \ddot{\theta}_Y + \ddot{z} + \ddot{Z}) = F_z - mg \end{cases}$$

3.4 FESS 搭載用の電気自動車車両  
電力貯蔵フライホイール搭載電気自動車  
を図3に示す.



図3 FESS 搭載用の電気自動車

表2 FESS 搭載用の電気自動車の仕様

Item	Value	Unit
Total length	3345	mm
Total width	1240	mm
Total height	1840	mm
Mimimum road clearance	94	mm
Mimimum turning radius	3.8	m
Dry weight	495	kg
Rated voltage	72	V

### 3.5 ゼロバイアス式制御系設計

まずゼロバイアス式制御について述べる. これは磁気浮上系の電磁石の制御法の一つである. 本手法では正負の異なる吸引力が必要な場合, 電磁石は性質上吸引力しか発生させることが出来ないため対向した電磁石の制御電流を切り替えることで制御を行う. 従来の組み込みコンピュータを用いて,

ゼロバイアス式PID制御で車両搭載用磁気軸受フライホイールシステムの全軸浮上実験を行った. これにより全軸安定化できた. 図4は安定化の状態を示した実験結果である.

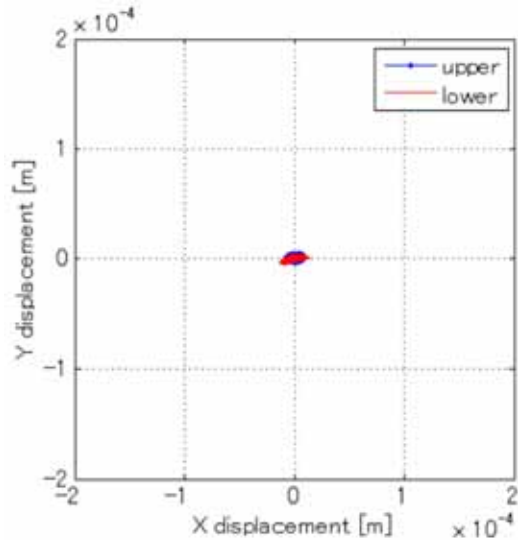


図4 安定化制御実験

### 3.6 可変バイアス式単純適応制御

本研究対象は路上を走行中に外乱の影響を強く受けるシステムである. こうした状態においても, 非接触磁気浮上系が常にタッチダウンしないためには, 外乱の大きさにより磁気浮上系のばね定数を変化させて外乱に強い制御系を構築する必要がある. 一方で, ばね定数をいつも強くすることは電力消費が大きくなり適切ではない. このために, 可変バイアス制御方式を採用することとした. 外乱のない時はバイアス電流はゼロに, 外乱の大きさに依存してバイアス電流が最適されるということである. また, バイアス電流が常に変化するという事は, 制御対象が常に変化するという事であり, 閉ループ系の安定化を保証するためには何らかの理論的根拠が必要となる. そこで, このような時変系システムの漸近安定性を保証する適応制御理論に単純適応制御という方式がある. 本研究ではこの制御方式を採用して, 閉ループ系の漸近安定性を保証している. ただし, オリジナルな制御対象は不安定系であり, 単純適応制御を適用する条件を満たさない. そこで, パラレルフィードフォワードコントローラ(PFC)を挿入して, 概強正実(ASPR)性を満たした後に, 単純適応制御系を構築した. 単純適応制御系の一般的なブロック線図は図5となる. ただ, 本研究ではレギュレータ系であるために, ブロック線図の一番左の入力  $u_m$  はゼロとなるために, フィードフォワード部分はすべてゼロとなり, 簡潔なブロック線図に帰着する. 単純適応制御は一般にサ

一ボ系の場合は複雑となるが、レギュレータ系は単純なシステムとなるために有力なア

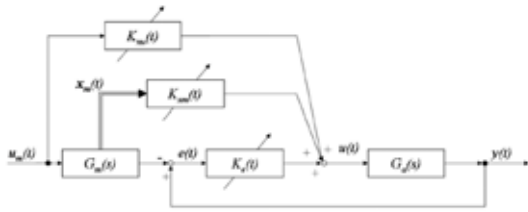


図5 単純適応制御系ブロック線図

ルゴリズムと言える。また、単純適応制御系の漸近安定性を保証するアルゴリズムは以下のものである。

$$\begin{aligned}
 u(t) &= u_p(t) + u_d(t) \\
 u_p(t) &= K_e(t)y(t) \\
 u_d(t) &= K_D(t)\dot{y}(t) \\
 K_e(t) &= K_P(t) + K_I(t) \\
 \dot{K}_I(t) &= -\Gamma_I y(t)^2 - \sigma_1(t)K_I(t) \quad (\Gamma_I = \Gamma_I^T > 0) \\
 K_P(t) &= -\Gamma_P y(t)^2 \quad (\Gamma_P = \Gamma_P^T > 0) \\
 \sigma_1(t) &= \sigma_1 + \frac{\sigma_2 |y(t)|}{\sigma_3 + |y(t)|}
 \end{aligned}$$

#### 4. 研究成果

以上述べた単純適応制御アルゴリズムによる結果を図6と図7に示す。

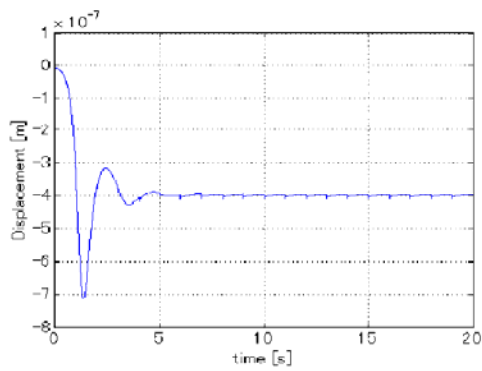


図6 タッチダウンからの浮上テスト

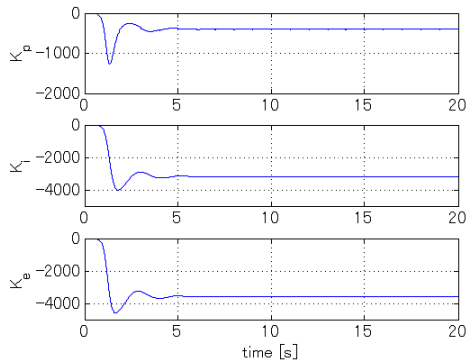


図7 図6における単純適応制御ゲイン

図8と図9は路上における可変バイアス制御のテスト結果を示している。従来型の固定バイアスPID制御と、本研究提案の可変バイアス単純適応制御の比較を示しているが、提案の方法の有効性が明らかとなっている。

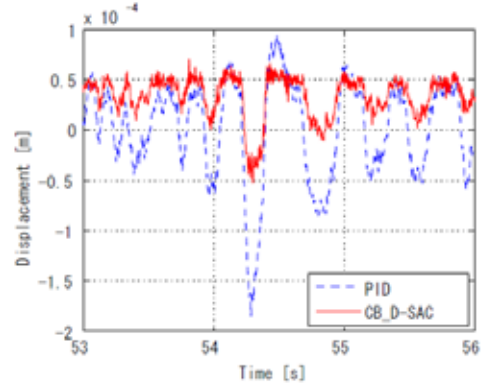


図8 学内路上における変位応答

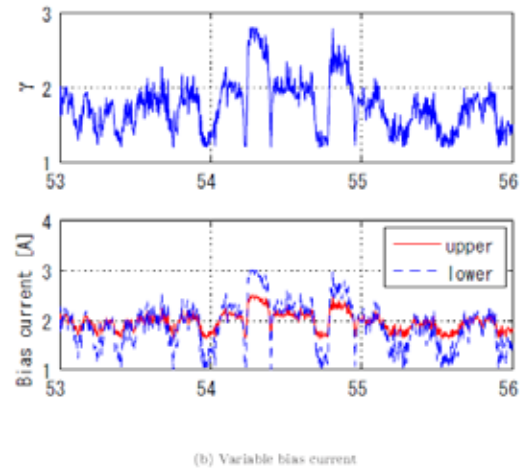


図9 図8に対応した可変バイアス電流

#### 5. 主な発表論文等 発表準備中

〔産業財産権〕  
出願状況  
出願準備中

〔その他〕  
ホームページ等  
URL: <http://mec2.tm.chiba-u.jp/~nonami/>

#### 6. 研究組織

- (1) 研究代表者  
野波 健蔵 (NONAMI KENZO)  
千葉大学・大学院工学研究科・教授  
研究者番号: 30143259
- (2) 研究分担者  
なし