

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24年5月15日現在

機関番号：15201

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2011

課題番号：21560262

研究課題名（和文） パワー・メカトロニクス機器を省エネルギー化する最適な動作法と設計法の研究

研究課題名（英文） OPTIMAL OPERATION AND DESIGN
FOR SAVING ENERGY IN POWER
MECHATRONIC SYSTEM

研究代表者

泉 照之（IZUMI TERUYUKI）

島根大学・総合理工学部・教授

研究者番号：10212953

研究成果の概要（和文）：電気自動車などパワー・メカトロニクス機器を省エネルギー化するために、電氣的・機械的な全散逸エネルギーを最小にする方法を研究して、以下の成果が得られた。電気自動車に無段変速機CVTを導入した場合、散逸エネルギーを最小にする最適変速比関数を求めることができた。これを電気自動車のCVTに指令すれば、自動車の積載量や坂道の傾斜角に適応できるので、省エネルギー運転が可能になることがわかった。また、最適変速比関数が、微分方程式を解くことなく、車速と電流の測定値を係数とする代数方程式を解いて求められ方法を見つけた。

研究成果の概要（英文）：This study has proposed an optimal design method for saving energy dissipated in power mechatronics such as electric vehicles. The optimal reduction ratio function for continuous variable transmission is solved by minimizing the total dissipated energy of the electric vehicles. The optimal function can also be obtained by solving an algebraic equation the coefficients of which are determined from observed values of velocity and current of the vehicles.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2010年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2011年度	700,000	210,000	910,000
総計	2,900,000	870,000	3,770,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・知能機械学・機械システム

キーワード：省エネルギー，電気自動車，最適減速比関数，散逸エネルギー，無段変速機，オンライン変速比制御

1. 研究開始当初の背景

地球温暖化を憂慮すると、省エネルギー技術は全ての機械において極めて重要な研究課題である。したがって、大きな質量負荷を頻繁に始動・停止させるパワー・メカトロニ

クス機器にも、省エネルギー技術の開発・導入が必要である。メカトロニクス機器の省エネルギー技術の基本は、慣性負荷の運動エネルギーと重力負荷の位置エネルギーを効率的に電気エネルギーに回生することである。

減速時の運動エネルギーを電力量に回生して省エネルギー化する技術は、電車では古くから適用されてきた。このエネルギー回生技術は、始動・停止を頻繁に繰り返すメカトロニクス機器に適用されてこそ、大きな意味がある。申請者は、メカトロニクス機器の省エネルギー化を確立するために、散逸エネルギーがモータのジュール熱と機械部の摩擦熱によることに注目して、機械系の慣性力、摩擦力、重力を扱う力学と、電気系のパワーエレクトロニクスを統合することを提案した。そして、全散逸エネルギーを最小にする機構や回路の最適設計法と最適な動作方法すなわち最適速度関数を系統的に考察して、省エネルギー技術を開発することを提唱してきた。

2. 研究の目的

本研究の目的は、提案した方法が実際のパワー・メカトロニクス機器に適用できるように発展させることである。そして、普通の減速機だけでなく、可変変速機などいろいろな動力伝達機構にも適用できるように展開して、将来主流になるとと思われる電気自動車にも応用して、パワー・メカトロニクス機器の消費エネルギーを低減させることを目的とする。そのために、慣性負荷以外に重力負荷や摩擦負荷において、動力伝達部の摩擦や慣性が最適な速度関数や変速比関数に及ぼす影響を理論的に調べる。また、電力変換部の損失特性も正確に把握して、両者で散逸されるエネルギーを最小にする運転方法や変速比の決め方を研究する。

3. 研究の方法

市内の配達業務などに用いられる電気自動車などパワー・メカトロニクス機器は、図1に示すようにインバータ(電力変換部)、モータ、変速機(動力伝達部)、車体(負荷)から構成されている。これらは、大きな慣性負荷を頻繁に始動・停止させるので、省エネルギー技術の導入が不可欠である。この省エネルギー技術は、慣性負荷の運動エネルギーを効率的に電気エネルギーに変換して電池に回生すること以外に、加速・減速時の散逸エネルギーを最小にする最適速度関数 $\dot{x}(t)$ の決定と動力伝達部の変速比 $n(t)$ の最適設計が重要である。パワー・メカトロニクス機器の代表である電気自動車の電氣的・機械的損失をモデル化して、散逸エネルギーの式を研究して、それを最小にする方法に取り組んだ。

(1) まず、電気自動車の運動方程式を確立するために、車体の空気圧抵抗 $F_a \dot{x}(t)^2$ 、タイヤの転がり摩擦力 F_r を定義した。そして、減速機の摩擦力を効率 η と伝達トルクで表

した。これによって、加速時と減速時の運動方程式を導くことができた。

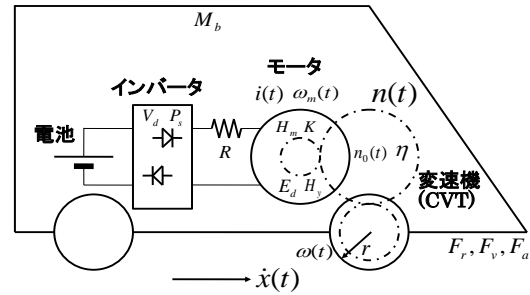


図1 パワーメカトロニクス機器の構成図

(2) 次に、散逸エネルギーを求めるために、上記の摩擦熱による機械的損失と電氣的損失を全て取り上げた。後者の電氣的損失は、モータの巻線によるジュール熱損 $Ri(t)^2$ 、磁気回路の渦電流損 $E_d \dot{x}(t)^2$ とヒステリシス損 $H_y \dot{x}(t)$ 、インバータの導通損 $V_d i(t)$ 、スイッチング損 P_s を含んでいる。全損失をまとめた結果、車速の3乗、2乗、1乗に比例する項、電流の2乗、1乗、0乗(定数)に比例する項、車速と電流の積に比例する項から表されることがわかった。したがって、全損失を完全に網羅できたことになる。

(3) 全散逸エネルギーを最小にする最適な電流関数と変速比関数が最適制御理論を用いて求められた。図2は、7[s]で秒速5.6[m/s]に加速する場合の例で、破線が最適速度関数を、実線が通常の一定加速を示す。この例のように渦電流損が小さい場合、両者は一致する。図3の破線は最適制御理論を用いて求められた最適変速比関数である。得られた最適関数を適用することによって、大きな省エネルギー効果を実現でき、これらは省エネルギー化のベンチマークになる。しかし、最適制御理論の適用は、6元微分方程式を解く必要があり、オンラインで求解できない欠点があった。

(4) そこで、最適変速比をオンラインで求める方法を提案した。これは、全損失を変速比で微分した式を0にする方法である。この方程式は2次式となり、その係数は自動車の速度値とモータの駆動電流値に依存することを見出した。したがって、一定のサンプル時間 T_s ごとに、車速と電流値を計測することによって、最適変速比が2次方程式の解法より簡潔に求められる利点がある。この最適変速比は、 $T_s = 1$ の場合図3の階段状の実線のようになった。これは、破線で示した最適制御理論の結果と比較すると、サンプル時間が小さくなれば、完全に一致することがわかった。

4. 研究成果

(1) 電気自動車の全ての電氣的・機械的損失を含む散逸エネルギーをモデル化して、散逸エネルギーを最小にする最適速度関数を求めた。これは、省エネルギー運転のベンチマークになる。

(2) 電気自動車を省エネルギー運転するために無段変速機CVTを導入した場合、散逸エネルギーを最小にする最適減速比関数を求めることができた。これを電気自動車のCVTに指令することによって、自動車の積載量や坂道の傾斜角に適応できるので、省エネルギー運転が可能になることがわかった。

(3) 最適減速比関数が、微分方程式を解くことなく、車速と電流の測定値から代数方程式を解いて求められ方法を見つけた。そして、いろいろな条件下で調べた結果、その最適性が満たされることがわかった。

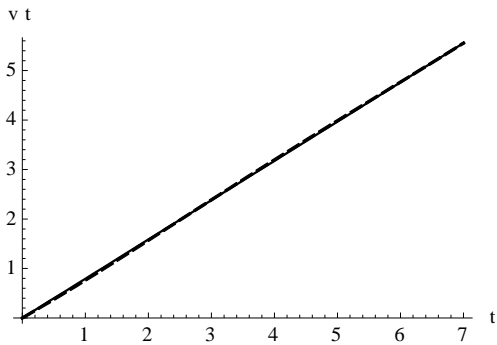


図2 最適速度関数の例

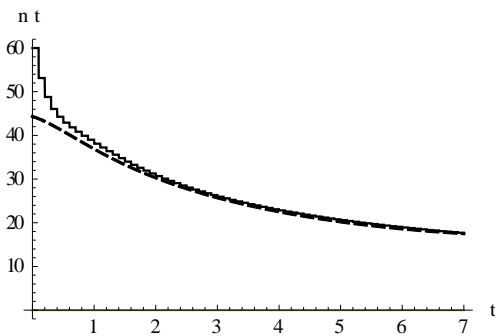


図3 最適変速比関数

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計5件)

- ① 李 作維, 泉 照之, 電気自動車を省エネルギー化するための最適設計された固定減速機と無段変速機の比較, 日本設計工学会誌, 査読有, 46 巻, 2011, 697-

- ② 李 作維, 泉 照之, 電気自動車の省エネルギー化のための最適変速比基本設計法, 自動車技術会論文集, 査読有, 42 巻, 2011, 921-926
- ③ 泉 照之, 受動要素を用いた垂直3関節マニピュレータの省エネルギー設計, 日本設計工学会誌, 44 巻, 2009, 202-208
- ④ Teruyuki Izumi, Hai Zhou, Zuwei Li, Optimal Design of Gear Ratios and Offset for Energy Conservation of an Articulated Manipulator, IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 査読有, 6 巻, 2009, 551-557
- ⑤ 李 作維, 泉 照之, 周 海, 減速機を含むパワー・メカトロニクス機器を省エネルギー化する減速比の簡易最適設計, 日本機械学会論文集 C, 査読有, 75 巻, 2009, 2757-2764

〔学会発表〕(計23件)

- ① 出口祐貴, 泉 照之, 山本真義, 電気自動車を省エネルギー化するための CVT 制御の最適性の検討, 計測自動制御学会中国支部, 2011 年 11 月 26 日, 岡山大学工学部
- ② 泉 照之, 山本真義, 出口祐貴, 車速と駆動電流情報による電気自動車用 CVT の省エネルギー制御, 自動車技術会, 2011 年 10 月 14 日, 札幌コンベンションセンター
- ③ 泉 照之, 出口祐貴, 電気自動車を省エネルギー化するための CVT への最適制御指令, 電気学会産業応用部門大会, 2011 年 9 月 10 日, 琉球大学工学部
- ④ 泉 照之, 李 作維, CVT をもつ電気自動車を省エネルギー運転するための最適変速比制御, 自動車技術会, 2011 年 5 月 20 日, パシフィコ横浜
- ⑤ 李 作維, 泉 照之, 電気自動車を省エネルギー化するための最適変速比の基本設計法, 自動車技術会, 2011 年 5 月 20 日, パシフィコ横浜
- ⑥ 船本浩司, 李 作維, 泉 照之, CVT を導入した電気自動車に指令する変速比関数の検討, 機械学会中国四国支部講演会, 2011 年 3 月 5 日, 岡山理科大学
- ⑦ 出口 祐貴, 山下直之, 泉 照之, 電気自動車の電気・機械損失のモデル化の研究, 計測自動制御学会中国支部講演会, 2010 年 11 月 28 日, 島根大学
- ⑧ Teruyuki Izumi, Abdul Rahim, Zouwei Li, Minimization of Energy Dissipated in Power Mechatronic System by Considering the Electric Conversion

Loss, Proc. of the XIX International Conference on Electrical Machines, 2010年9月6日, クラウンプラザセントピータホテル(ローマ)

- ⑨ アブドール・ラヒム, 李 作維, 泉 照之, パワー・メカトロニクス系における動力伝達損と電力変換損を最小にする最適関数, 計測自動制御学会システムインテグレーション部門, 2009年12月24日, 芝浦工業大学
- ⑩ Zouwei Li, Teruyuki Izumi, Hai Zhou, Optimal Design of Lead for Minimizing Energy Dissipated in a Mechatronic System with a Ball Screw-nut, Proc. of the 2009 IEEE Int. Conf. on Mechatronics and Automation, 2009年8月9日, シャングリラホテル(中国長春)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計1件)

名称：省エネ走行機能付き自動車

発明者：泉 照之

権利者：島根大学

種類：特許

番号：特願 2011-223548

出願年月日：H23年10月11日

国内外の別：国内

6. 研究組織

(1) 研究代表者

泉 照之 (IZUMI TERUYUKI)

島根大学・総合理工学部・教授

研究者番号：10212953