

平成 30 年 6 月 25 日現在

機関番号：34310

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K05962

研究課題名(和文) 電動車両の安全・省エネルギー駆動のための統合的最適軌道の設計法

研究課題名(英文) Design methodology of integrated optimal trajectories for energy saving and safety drive of EVs

研究代表者

井上 馨 (Inoue, Kaoru)

同志社大学・理工学部・教授

研究者番号：60343662

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、電動車両(電気自動車、鉄道、無人搬送車、などのモータを用いて走行する車両)の自動走行もしくは走行アシストにおいて、各種の駆動条件(時間、速度、移動距離、など)を満足しつつ、省エネルギーかつ運搬物や乗員に過度なジャーク(速度の二階微分)がかからない最適軌道(速度、移動距離、モータトルク、などの時間波形)を求める方法を検討した。その際、車輪にスリップが生じると駆動条件を満たす走行ができない可能性があるため、加速・減速の際のスリップを抑制する制御法の検討も行った。省エネルギー軌道を用いた駆動とスリップ抑制に関する実験とシミュレーションを行い、提案手法の有効性の検証を行った。

研究成果の概要(英文)：In order to drive the electric vehicles using motors (automobiles, trains, automatic guided vehicles, etc.) efficiently, the energy loss should be minimized during its operation. In this study, a design methodology of the optimal trajectories of torque, rotating speed and so on to minimize the energy loss when the operation time, rotating speed, and rotational angle are given as drive conditions. However, the optimal trajectory may cause sudden acceleration and deceleration. Hence, trajectories are designed to be smooth in order to suppress the jerk and slip phenomenon between wheels and road surfaces. The effectiveness of the proposed method are illustrated by means of experiments and simulations.

研究分野：パワーエレクトロニクス・モータ制御

キーワード：省エネルギー 最適軌道 駆動条件 電動機駆動システム 電動車両

1. 研究開始当初の背景

日本国の総発電電力量の 60%程度を電動機で使用しているとの報告があり、電動機を用いた機器の省エネルギー化が重要である。そのため、電源のインバータ化による省エネルギー化や埋め込み磁石型同期電動機(IPM)、リラクタンスマータなどの高効率モータが提案・実用化されてきたが、よりエネルギー使用量を削減するためには、動的なダイナミクスに基づいて省エネルギー化を図る駆動法について検討する必要がある。すなわち、従来において重要視されていた一定速度や一定トルクでの駆動ではなく、可変速でその変化のさせ方に注目し、駆動中の瞬時損失でなく駆動時間のトータルの損失エネルギーに着目した省エネルギー駆動法について検討することが重要である。

モータを用いた機器の一つである自動搬送車などの電動車両においては、先に述べたように速度を変化させながら定められた時刻で定められた距離を移動する必要がある。このような用途では、駆動中の回転速度やトルクの振る舞いが損失に大きく影響する。このため、与えられた規定の時間内に、目標の回転速度や回転角(移動距離)に達するという駆動条件を満足しつつ、駆動時の損失エネルギーを最小とする最適軌道の設計法の検討を行い、これを実現する駆動制御系を構成することは重要である。また、この際、乗客や搬送物などの保守や周囲への安全性のため、運行する目標回転速度への急峻な速度応答性は不要であり、むしろジャークを抑えた乗り心地の考慮が必要となる。また車輪のスリップが存在すると駆動条件を満たすことが困難となるため、これを抑制する必要がある。さらには、機器やアプリケーションによる種々の制約、例えば、駆動系の強度や電動機の定格によるトルクの大きさの上限や、安全性のための回転速度の上限などを考慮した設計を行うことにより、より汎用的な方法の確立が望まれる。

このような省エネルギー駆動法を検討する際、モデルベースでの検討ではパラメータ誤差やモデルに考慮されていない事柄が問題となる。実際の設計現場では実機の詳細な実測データから設計が行われることがあり、速度(N)とトルク(T)の二次元で実際の損失や効率を表した N-T マップを用いることがある。このため、一般的な N-T マップより、駆動条件を満たす最適軌道を効率よく汎用的に設計する方法が求められていた。

2. 研究の目的

本研究では、一般的な N-T マップより、与えられた駆動条件を満足する省エネルギー最適軌道を導出する方法の検討を行うことで、学術だけでなく実用的にも優れた駆動方法の開発を行うことを目的としている。

例えば、A 地点から B 地点へと無人搬送車により自動走行にて物品を運搬する際、定め

られたタイムスケジュールに従って定められた距離を走行し、位置がずれることなく B 地点へ到着しなければならない。この際、繰り返し走行するため、駆動条件を満たしつつ省エネルギーに走行することが求められる。しかし、省エネルギーに走行できたとしても、運搬物や乗客に過大なジャークが伝わると、乗り心地や安全性に問題がでるだけでなく、車輪がスリップする可能性がある。

そこで、与えられた駆動条件を満足する省エネルギー軌道による駆動に加えて、スリップを抑制しつつ安全・省エネルギーに走行可能となる方法を検討し、その軌道に追従して走行させるための駆動制御方法を提案することで、電動車両の安全・省エネルギーな駆動の実現を目指した。

3. 研究の方法

本研究は平成 27 年度から平成 29 年度の 3 年間にわたり、大きく分けて次の 2 つのテーマに分けて研究を行った。

(1) 駆動条件を満たす省エネルギー最適軌道の設計法の開発

電動機駆動システムを構成し、その損失解析を行い実験による N-T マップを作成した。ここではよく用いられている誘導電動機や磁石埋込型永久磁石電動機を対象として、モータ駆動用インバータ、トルクメーター、負荷となるヒステリシスブレーキとフライホイール、回転速度と位相を検出するロータリーエンコーダを適切に配置した汎用駆動システムを設計・制作した。負荷特性はヒステリシスブレーキで模擬した。

また、N-T マップから駆動時の損失を低減する最適軌道を導出する方法として、解析的な手法と数値的な手法の両方を検討した。

(2) ジャークとスリップ抑制を考慮した最適軌道の設計法の開発

省エネルギー性のみに着目すると、始動・停止時に大きなトルクが必要となり、ジャークやスリップが生じる可能性がある。これらを抑制するために、最適軌道をなめらかに変化させる設計法とスリップ率のフィードバックによるスリップ抑制法を検討した。電動車両では積載物や乗員によって車重などのパラメータ変化が激しい。そこで、車両に関するパラメータを用いない抑制法を検討した。

4. 研究成果

(1) 駆動条件を満たす省エネルギー最適軌道の設計法の開発

図 1 は最適軌道の概念図を示す。定められた駆動時刻(t_1)において、目標回転速度(ω_1)および移動距離(θ_1)へ到達しつつ、駆動中の損失によって失われるエネルギーを最小化するための最適軌道の設計を行った。

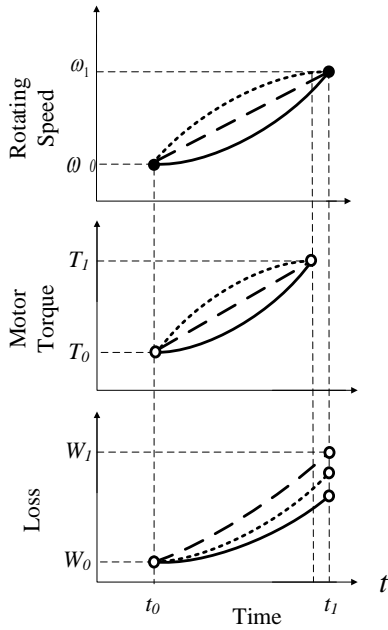


図1 最適軌道の概念図

実験から得られるN-Tマップを用いる前に、従来の変分法を用いた解析的手法の結果と比較して検討するため、図2に示す解析式から計算して求めた理論N-Tマップを作成し、これから最適な回転速度とトルクの軌道を導出する方法についても検討した。N-Tマップのデータは、離散的なデータであるため、適切な補間をかけつつ最適化を行った。最適化の方法としては、評価関数を設定してこれを最小化する数値的手法であるLMI（線形行列不等式）と遺伝的アルゴリズム（GA）を用いた。その結果、駆動条件として、2条件（時間、回転速度）および3条件（時間、回転速度、位相角）を与えたいずれの場合においても、解析解と良好に一致する数値解（最適軌道）を導出することができた。

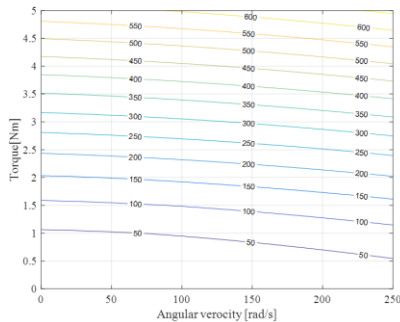


図3 2次元損失マップ

(2) ジャークとスリップ抑制を考慮した最適軌道の設計法の開発

電動機駆動システムの実験装置を用いて測定した損失マップ(図3)を用いて、ジャーク振幅を与えられた制約値以下に抑制し、駆動条件を満たす省エネルギー最適軌道を数値的に設計した。

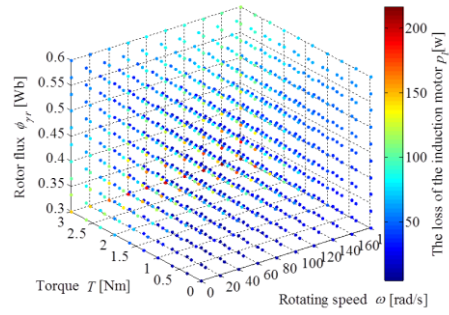


図3 実測した3次元損失マップ

最適軌道を導出する際には、駆動条件、損失エネルギーやトルクのスムージングに関する評価関数を定義し、これらの和が最小となるような軌道を求めた。図5にジャーク制限値以下に抑制した最適軌道に追従させるように図4に示す構成の電動機駆動装置を動作させた場合の実験結果の一例を示す。ジャークを抑制しながらも、与えられた3駆動条件（時間、回転速度、位相角）を満たした駆動ができた。様々な条件の下で実験を行ったところ、ジャークを抑制しすぎると、損失エネルギーが増加することがわかった。

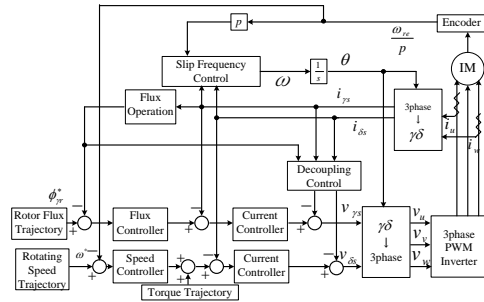


図4 実験システムの構成

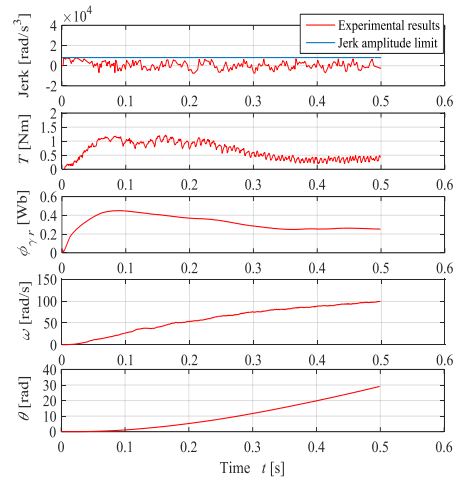


図5 ジャーク制限値以下に抑制した最適軌道を用いた駆動実験結果の一例

電動車両のスリップ抑制法として、与えられたスリップ率の上限値以下に抑制するように、定スリップ率曲線を変化させるトルク制御法が提案されている。この方法を発展させ、トルク制御によって定スリップ率曲線の形状に変更を加えるとともに、モータが本来

もつ特性を積極的に利用することで、なめらかな発進が可能で速やかにスリップ率を抑制する方法 (図 6) などについて検討した。

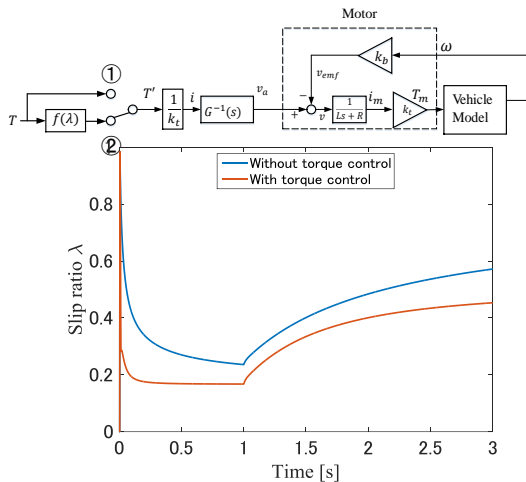


図 6 スリップ抑制制御システム

図 7 スリップ制御のシミュレーション結果

小型模型電動車両を想定して、走行時間を 3 秒、路面が $t=1$ s で乾燥路面から凍結路面に変わるという条件下で、シミュレーションを行った結果を図 7 に示す。提案手法 (With torque Control) の方が、よりスリップが抑制できた。

5. 主な発表論文等

[学会発表] (計 15 件)

- ① 「空気抵抗と減衰特性の速度依存性を考慮した誘導電動機の省エネルギー最適軌道の検討」, 高橋 諭, 井上 馨, 加藤利次, 電気学会半導体電力変換/家電・民生/自動車合同研究会資料, SPC-17-194, HCA-17-056, VT-17-036 (2017).
- ② 「遺伝的アルゴリズムを用いた IPMSM の省エネルギー軌道の効率的な導出」, 熊谷秀太, 井上馨, 加藤利次, パワーエレクトロニクス学会第 221 回定例研究会, JIPE-43-54 (2017).
- ③ 「電動車両における状態推定を用いたスリップ制御」, 小山陽哉, 井上馨, 加藤利次, パワーエレクトロニクス学会第 221 回定例研究会, JIPE-43-37 (2017).
- ④ 「VHDL-AMS による 4 輪車両ダイナミックモデルの開発とスリップ率抑制制御法の検討」, 岡本和馬, 加藤利次, 井上馨, 平成 29 年電気関係学会関西支部連合大会, G4-2 (2017).
- ⑤ 「トルク制御と逆起電力を用いた電動車両のスリップ抑制」, 萩野一, 井上馨, 加藤利次, 平成 29 年電気関係学会関西支部連合大会, G4-1 (2017).
- ⑥ 「空気抵抗を考慮した誘導電動機の省エネルギー最適軌道の設計」, 高橋 諭, 井上 馨, 加藤利次, 電気学会モータドライブ/家電・民生合同研究会資料, HCA-17-009, MD-17-058 (2017).

- ⑦ 「4 輪車両ダイナミックモデルによるスリップ率抑制制御法の検討」, 岡本和馬, 加藤利次, 井上馨, パワーエレクトロニクス学会第 216 回定例研究会, JIPE-42-50, Vol. 42 (2016).
- ⑧ 「IPMSM の駆動条件を満たす省エネルギー最適軌道の導出」, 井上航太, 井上馨, 加藤利次, パワーエレクトロニクス学会第 216 回定例研究会, JIPE-42-28, Vol. 42 (2016).
- ⑨ 「GA を用いた IPMSM の省エネルギー軌道の設計」, 熊谷秀太, 井上馨, 加藤利次, 平成 28 年電気関係学会関西支部連合大会, G4-32 (2016).
- ⑩ 「空気抵抗を考慮した誘導電動機の省エネルギー最適軌道」, 高橋諭, 井上馨, 加藤利次, 平成 28 年電気学会産業応用部門大会, Y-116 (2016).
- ⑪ 「IPMSM の損失マップを用いた省エネルギー軌道の設計」, 井上航太, 井上馨, 加藤利次, 平成 28 年電気学会全国大会講演論文集, 4-043 (2016).
- ⑫ 「損失マップを用いた誘導電動機の省エネルギー最適軌道の数値的設計 - ジャーク振幅の大きさを考慮した場合 - 」, 有菌拓真, 井上馨, 加藤利次, 電気学会モータドライブ/家電・民生合同研究会資料, MD-16-044, HCA-16-005 (2016).
- ⑬ "Numerically designed optimal trajectories of induction motor for energy-saving and jerk suppression based on 3-dimensional loss map ", Kaoru Inoue, Takuma Arizono, and Toshiji Kato, IEEE IECON, pp. 4477-4481 (2015), 査読有, DOI: 10.1109/IECON.2015.7392797.
- ⑭ 「電動模型車両のスリップ抑制の実験的検討」, 上原悠貴, 萩野一, 井上馨, 加藤利次, パワーエレクトロニクス学会第 211 回定例研究会, JIPE-41-26 (2015).
- ⑮ 「偏心を持つ三慣性共振系の軸ねじれと振れ回りの振動解析」, 本村浩平, 井上馨, 加藤利次, 平成 27 年電気関係学会関西支部連合大会, G4-28 (2015).

6. 研究組織

(1) 研究代表者

井上 馨 (INOUE, Kaoru)
同志社大学・理工学部・教授
研究者番号: 60343662

(2) 研究分担者

加藤 利次 (KATO, Toshiji)
同志社大学・理工学部・教授
研究者番号: 40148375