

機関番号：13102

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2008～2010

課題番号：20360124

研究課題名(和文)

高効率で安全なIPMモータ駆動次世代通勤電車のための空転滑走再粘着制御の開発研究

研究課題名(英文)

High Performance Anti-Slip Re-Adhesion Control for Next Generation IPM motor train

研究代表者

大石 潔(OHISHI KIYOSHI)

長岡技術科学大学・工学部・教授

研究者番号：40185187

研究成果の概要(和文)：

本研究課題は、主電動機に効率の高いIPMモータを用いた、IPMモータ駆動電車のための高効率で安全な空転滑走再粘着制御法の提案である。IPMモータは、誘導電動機に比べて、コギングトルクなどのトルクリップルが大きい。特に、低コストで堅牢な集中巻きのIPMモータでは、トルクリップルは非常に大きくなる。そこで、高効率な集中巻きIPMモータのトルクリップルによる振動と電車の台車振動系の振動の両者の影響をほとんど受けずに接線力を推定する新しい外乱オブザーバを構成する。この空転滑走再粘着制御系に対して、等価実験と通勤電車車両モデルの計算機シミュレーションによる解析で、IPMモータ駆動電車のための高効率で安全な空転滑走再粘着制御を開発する。

研究成果の概要(英文)：

This project proposes the high performance anti-slip re-adhesion control for IPM motor train. IPM motor has large torque ripple caused by cogging torque. Especially, the low-cost, robust concentrated winding IPM motor has very large torque ripple. In order to extend the anti-slip/skid re-adhesion control to the actual bogie system considering the vibration phenomenon, this project proposes a new anti-slip/skid re-adhesion control. The experimental results confirm the validity of the proposed control system.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	7,300,000	2,190,000	9,490,000
2009年度	5,200,000	1,560,000	6,760,000
2010年度	1,700,000	510,000	2,210,000
年度			
年度			
総計	14,200,000	4,260,000	18,460,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・電力工学・電力変換・電気機器

キーワード：電気機器工学、制御工学、電力工学

1. 研究開始当初の背景

安全安心で快適な社会を構築する上で、都市空間の通勤電車を安全に運行することは極めて重要である。また、近年、地球温暖化、エネルギー問題が人類存亡の問題である。電車は一般に一人当たりの輸送エネルギー量

をバスの約1/2に、自家用車の約1/7にできることが知られている。通勤電車の輸送力をより高効率に増強させることができれば、我が国の省エネルギーに大きく貢献する。したがって、高効率で安全な通勤電車の実現は、大都市の多い日本においては、急務かつ重要

な課題である。

電車の空転再粘着制御及び高粘着制御のこれまでの研究は、大石潔のグループ以外には、国内では東京大学、横浜国立大学や鉄道総合技術研究所、海外では韓国やヨーロッパの大学などの研究者等によって進められてきた。しかしながら、接線力の値に基づく理想的な空転再粘着制御系の実現を行ったのは、大石らが最初である。粘着特性の粘着領域のピーク点（高粘着点）近傍を維持する空転滑走再粘着制御は必須の要素技術となっていくべきである。

空転再粘着制御を困難にさせる主な原因は、以下である。

① 駆動電動機の位置センサが低分解能(60pulse/rev)である。

② 車両に加速度センサ等を装着しても、カーブや坂で重力や遠心力の影響を受け、接線力を直接検出できない。

そこで、研究代表者の大石の研究グループは、速度センサレスベクトル制御によって①の問題を、外乱オブザーバによる接線力推定によって②の問題を、それぞれ解決して、接線力推定帰還による空転再粘着制御の実現を行った。平成14年には、世界初の接線力推定による空転滑走再粘着制御系を搭載した通勤電車を、JR 武蔵野線に 205 系 5000 番台として導入するに至った。提案する空転滑走再粘着制御方式を用いて、空転（スリップ）検出時間を従来方式と比較すると、0.3 秒から 0.03 秒へ 1/10 に短縮し、ブレーキ性能が向上した。そのため、8 両編成の中でモータ付き車両を 6 車から 4 車に減らすことができたので、約 20%の電力低減ができた。乗り心地としては、再粘着制御のためのモータトルク変化時間が約 0.2 秒と短く、且つそのトルクの増減も接線力の約 3~5%と小さいので、乗客の体にはほとんど感ずることはない。むしろ、従来方式に比べて電車の空転や滑走時の振動がかなり低減されたので、通勤電車の乗り心地は改善された。このように、大石らは安全で快適な通勤電車を実現し、副次的に省エネルギーにも貢献した。

しかしながら、地球温暖化を防ぐためには、大都市の多い日本では、通勤電車のさらなる高効率化及び省エネルギー化を推進して行く必要がある。現在、通勤電車に多く使われている誘導電動機は、インバータエアコンで主流となっている I PMモータ（埋込永久磁石同期モータ）と比較すると、界磁電流を必要とするので効率的ではない。通勤電車を I PMモータで駆動した方が、効率面で有利である。したがって、I PMモータの速度センサレスベクトル制御が確立されてきたので、通勤電車への I PMモータの適用に向けた研究開発成果が期待されている。しかしながら、I PMモータは、誘導電動機に比べて、

コギングトルクなどのトルクリップルが大きい。特に、低コストで堅牢な集中巻きの I PMモータでは、トルクリップルは非常に大きくなる。このトルクリップルは電車の台車振動系に影響を与えるので、振動の影響下で確実に接線力を推定するには、その応答性能を下げる必要がある。その結果、再粘着制御性能も低くなるので、I PMモータ駆動電車の再粘着制御性能は低くなる可能性が高い。そこで、この問題を解決して、I PMモータ駆動電車のための高効率で安全な空転滑走再粘着制御系を開発する必要がある。

2. 研究の目的

地球温暖化を防ぐためには、大都市の多い日本では、通勤電車のさらなる高効率化及び省エネルギー化を推進して行く必要がある。通勤電車を I PMモータで駆動した方が、効率面で有利である。したがって、I PMモータの速度センサレスベクトル制御が確立されてきたので、通勤電車への I PMモータの適用に向けた研究開発成果が期待されている。しかしながら、I PMモータは、誘導電動機に比べて、コギングトルクなどのトルクリップルが大きい。特に、低コストで堅牢な集中巻きの I PMモータでは、トルクリップルは非常に大きくなる。そこで、トルクリップルと台車振動の影響を解決し、I PMモータ駆動電車のための高効率で安全な空転滑走再粘着制御を開発する。本研究課題では、外乱オブザーバにより安全で高速な接線力推定を実現し、世界に例のない高効率で安全な I PMモータ駆動通勤電車のための空転滑走再粘着制御系を実現することを目的としている。

3. 研究の方法

1年目の平成20年度は、先ず、電車車両の台車試験装置による実験装置に、従来の電車用誘導電動機(IM)と比較検討するために、I PMモータ(IPMSM)を搭載させた場合の諸特性を、I PMモータの実験結果と数値シミュレーション結果によって取得する。平行カルダン方式の台車試験装置に I PMモータと誘導電動機をそれぞれ装着させた場合の空転再粘着制御性能の比較は、I PMモータの実験データを基に、数値シミュレーション結果によって検証する。高次外乱オブザーバの接線力推定値フィードバックによる空転滑走再粘着制御系の試験装置の構造を想定して、計算機数値シミュレーションを行う。I PMモータ駆動方式も、誘導電動機と同様に、速度センサレスベクトル制御方式である。ただし、1台のインバータで1台の I PMモータを駆動する個別制御方式となる。「空転滑走再粘着制御」研究グループは以上の研究開発を平成20年度に行う。次に、「力覚フィ

ードバック」研究グループは、高次外乱オブザーバを構築して、トルクリップルと台車振動の両者の影響を極力受けしない接線力推定値フィードバックを確立させる。「運動制御と感覚」研究グループは、通勤電車車両1両の計算機シミュレーションに基づく解析結果から、IPMモータのインバータ個別制御方式による電車車両の応答性の評価を、従来の誘導電動機方式（1インバータ複数誘導電動機駆動方式）と比較して行う。

2年目の平成21年度では、まず、台車試験装置における空転滑走再粘着制御時の振動の実測値を加速度センサなどで実測し、トルクシミュレータへのデータベース化を行う。平成20年度に解析したIPMモータ(IPMSM)の諸特性を用いて、トルクシミュレータの実装を行う。本研究課題では、提案する高次外乱オブザーバによる接線力推定値フィードバックの空転滑走再粘着制御の等価実験を行う。具体的には、実装されたトルクシミュレータにより、電車車両の台車をIPMモータのDDM(Direct Drive Motor)駆動方式による空転滑走再粘着制御の等価実験を、「空転滑走再粘着制御」研究グループが行うことになる。「力覚フィードバック」研究グループは、「空転滑走再粘着制御」研究グループに協力して「高次外乱オブザーバによる接線力推定値フィードバック制御」の実験を行い、トルクセンサなどからのデータを解析して、本制御系の有効性を検証する。また、「運動制御と感覚」研究グループは、空転滑走再粘着制御系の等価実験結果と、通勤電車車両モデルの計算機シミュレーション結果を比較解析して、快適性の評価を行う。

3年目の最終年度の平成22年度では、本研究課題で提案する「IPMモータ駆動次世代通勤電車ための空転滑走再粘着制御系」の効率性能と安全性能を、3年間の実験結果と計算機シミュレーション結果に基づいて、3つの研究グループが相互に連携をとり、比較検討及び解析して検証する。

4. 研究成果

前述の研究方法による成果として、以下の様に2つの主たる制御法について考案し、その有効性を台車模擬実験装置で検証した。

- (1) 高次外乱オブザーバの接線力推定値フィードバックによる空転滑走再粘着制御系の構成
- (2) IPMモータによるDDM(Direct Drive Motor)駆動方式の構築
- (3) IPMモータを直結させた台車模擬実験装置によるDDM方式の検証

以下に、これらの制御系についての説明と、検証結果を説明する。

(1) 高次外乱オブザーバの接線力推定値フィードバックによる空転滑走再粘着制御系

一般に、空転が発生した場合、電動機の発生トルクを引き下げて空転を抑制する。この方式では、空転発生時のトルク指令を、外乱オブザーバによって推定された接線力に基づいて決定している。しかしながら、台車振動が接線力の推定に影響を及ぼすため、高い周波数帯域をもつ接線力推定器を実装することができない。これは、この方式が台車振動の影響を考慮しておらず、ポイント通過時など車輪に衝撃が加わり台車振動が発生した場合に、接線力の推定値が振動してしまうことが多いためである。この接線力推定値の振動は、台車振動に起因する軸重変動によるものである。接線力の推定値が振動してしまうと、空転発生時に適切なトルク指令を決めることができず、粘着力の利用率が下がってしまう場合がある。この現象を改善するため、図1のような台車振動系が有するダイナミクスを考慮した高次外乱オブザーバを提案した。提案する高次外乱オブザーバの制御対象モデルを図2に示す。

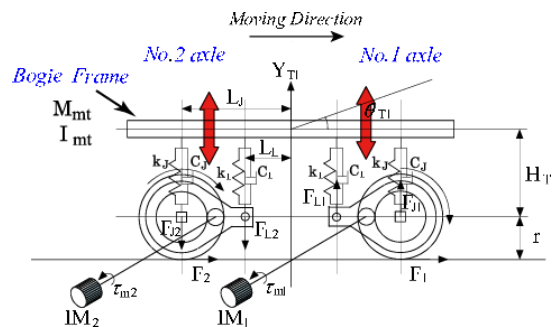


図1. 台車振動のイメージ

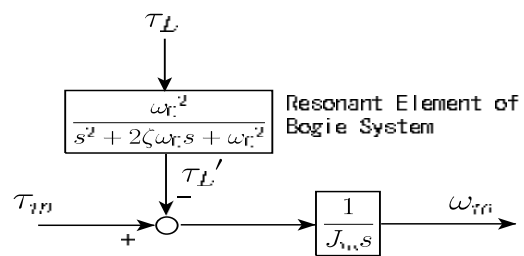


図2. 高次外乱オブザーバの制御対象モデル

図3に台車振動を考慮した高次外乱オブザーバのブロック図を示す。図4は、台車振動が発生した場合の、従来の0次外乱オブザーバと高次(2次)外乱オブザーバをそれぞれ用いた接線力推定器の推定値を比較したものである。

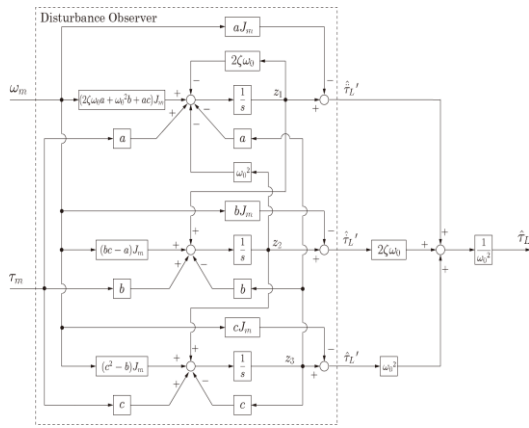


図3. 台車振動を考慮した高次外乱オブザーバのブロック図

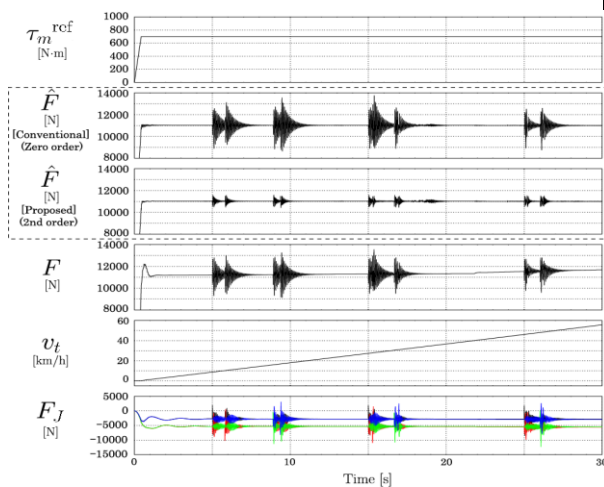


図4. 接線力推定値の振動の比較結果

従来の0次外乱オブザーバでは、接線力の推定値が振動していることがわかる。この振動は、台車振動による軸重変動によるものである。これに対して、提案した高次(2次)外乱オブザーバでは、台車振動が発生しても接線力の推定値は、その影響をほとんど受けていないことがわかる。

図5に、提案する高次外乱オブザーバを用いた場合のシミュレーション結果を示す。これより台車振動が発生しても接線力の推定値の振動は抑制されている。その結果、台車振動の発生時において、再粘着時に適切なトルク指令を決めることができ、粘着力の利用率高く維持できている。

以上より、提案する高次外乱オブザーバにより、接線力推定に対する台車振動の影響を抑制し、台車振動が発生した場合でも、粘着力の利用率高く維持できていることが確認できた。

(2) I P Mモータによる DDM (Direct Drive Motor) 駆動方式の構築

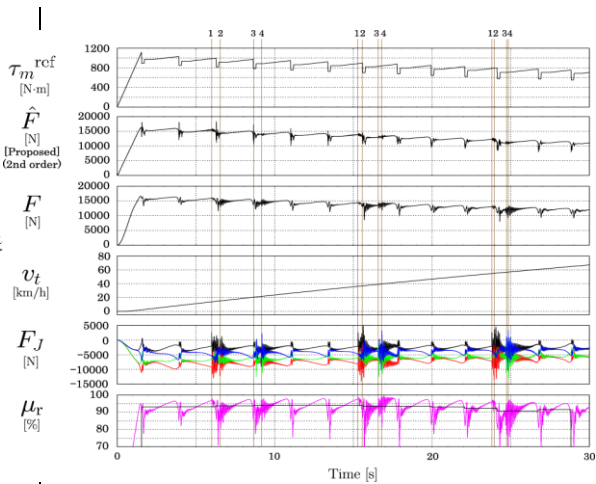


図5. 高次外乱オブザーバを用いた空転再粘着制御のシミュレーション結果

高効率・低コスト化、高制御性を達成する駆動方法のひとつとしてDDM駆動方式がある。DDM駆動方式はモータ動力を直接車輪の駆動力として利用できるため、伝達損失の低減やメンテナンスフリー、省エネルギー化が期待できる。コギングトルクは固定子にスロットがあるため、回転に伴って空隙中の磁気エネルギーが変化することが原因で発生し、低速・高速回転時ともにトルク脈動・騒音を引き起こす原因となる。特に、低速時のトルク脈動がDDMに作用した場合、台車振動や再粘着制御に影響を及ぼすと考えられる。そのため、I P MモータによるDDM駆動方式のための高次外乱オブザーバに基づく接線力推定値フィードバックの新しい空転滑走再粘着制御を提案し、検証した。

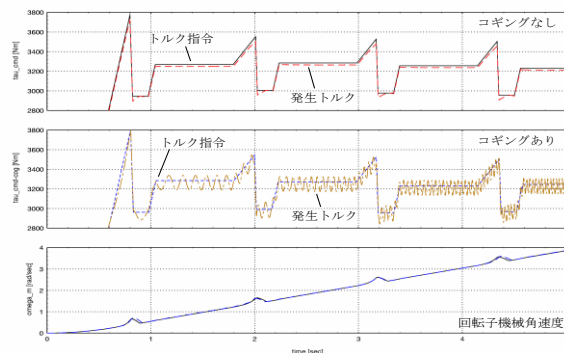


図6. コギングトルクを考慮しない場合と加えた場合のトルク指令とモータ発生トルク

コギングトルクを考慮しない場合と加えた場合でのモータ発生トルクのシミュレーション結果を図6に示す。コギングトルクを加えた場合ではモータ発生トルクが振動的になり、その周波数がモータ角速度の増加とともに高くなっているのが分かる。

この結果からコギングトルクによるトルク脈動が接線力トルク推定値の振動と回転子機械角の振動・共振を引き起こすために発生していると考えられる。

そこで、振動を抑制するために外乱オブザーバの出力である接線力トルク推定値と入力である回転子機械角速度に移動平均処理を組み込むことにする。移動平均の計算は現時点から過去9サンプル分のデータを保持しておき、現在の値とそれら9個の平均を計算してそれを現時点での出力とする。計算が終わったら保持しているデータを更新するという方法を取る。

図6と同じ条件でシミュレーションを行った結果を図7に示す。接線力トルク推定値の振動が大幅に小さくなることによって、良好な制御が行われ、不具合なく再粘着制御が行われていることが確認できた。

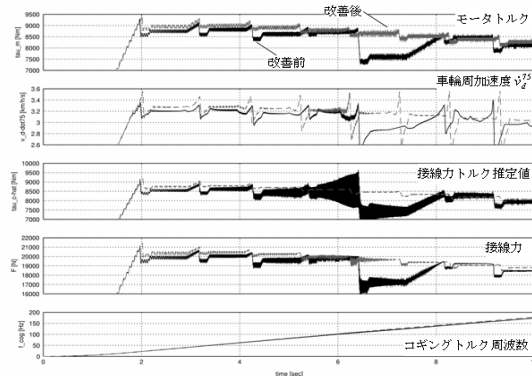


図7. コギングトルクの対策を行ったシミュレーション結果の比較

コギングトルクを加えたときの台車振動に関して、モータトルクが振動的になることで接線力に振動が生じることを確認した。これを改善するために外乱オブザーバの入力・出力部分に移動平均処理を組み込み、そして平滑化することで良好な制御性能が得られることを確認した。以上より、IPMモータによるDDM (Direct Drive Motor) 駆動方式の構築を完遂した。

(3) IPMモータを直結させた台車模擬実験装置によるDDM方式の検証

IPMモータは、小型化のために磁気飽和領域を積極的に利用する傾向があるが、鉄道のように速度範囲の広い用途では、リラクタンストルクを多く用いるため、磁気飽和によるパラメータ変動が大きい。このため、シミュレーションモデルと一致しづらく、IPMモータでの再粘着特性の把握には、実機での検証が必要となる。そこで、サーボモータによるトルクシミュレータにIPMモータを直結させた台車模擬実験装置を新たに構築し、このトルクシミュレータに台車試験装置

の粘着特性と振動特性を模擬させ、空転再粘着制御の検証を行う。

1動輪軸モデルを用いたIPM駆動電車の等価実験シミュレータを構成する。IPM駆動電車の走行負荷を模擬したIPMモータに、線路の路面と風の抵抗の負荷を模擬するためのサーボモータを接続する。接線力係数は接線力係数曲線をテーブルデータとして与え、すべり速度とテーブルデータを比較することで求める。DSPを用いて駆動モータのベクトル制御と、負荷トルクの計算を行う。

図8に1動輪軸換算電車シミュレータに再粘着制御を適用した結果を示す。動輪速度と電車走行速度の差のすべり速度が上昇すると、負荷トルクが減少し、空転現象が生じることを確認した。また、再粘着制御を用いることにより、1動輪軸換算電車シミュレータによる空転現象を抑制できることを確認した。

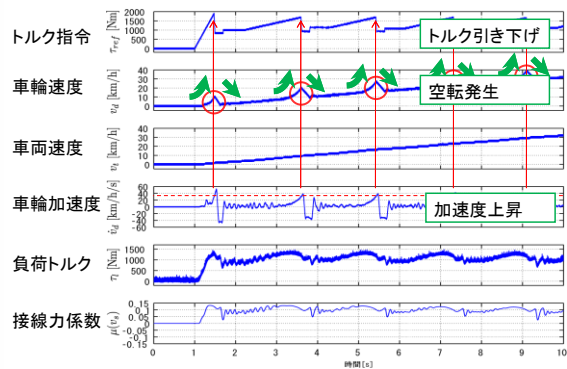
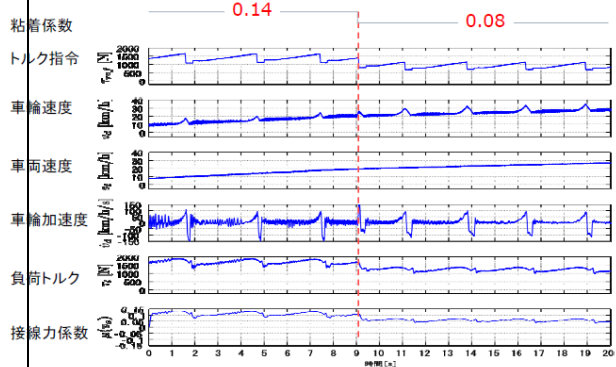


図8. 1動輪軸換算電車シミュレータによる空転再粘着制御の等価実験結果



粘着係数変動に対しても粘着制御可能

図9. 1動輪換算電車シミュレータによる路面状況が変化した場合の空転再粘着制御の等価実験結果

図9に路面状況が変化する場面を想定し、粘着係数を変化させた場合の空転再粘着制御系の等価実験の結果を示す。これより、粘着係数が変動した場合においても、空転再粘着制御が可能であることを確認した。

以上の結果より、I P Mモータ駆動次世代通勤電車のための空転滑走再粘着制御系を、高次外乱オブザーバを用いて構成できることを明らかにした。1動輪換算モデルの実験シミュレータによる等価実験と通勤電車車両モデルの計算機シミュレーションによる解析によって、提案するI P Mモータ駆動電車のための高効率で安全な空転滑走再粘着制御系が、所望の応答性能をあげることを確認した。

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3件)

- [1]今井一富、大石潔、佐野孝、牧島信吾、保川忍、“電気車の空転・滑走再粘着制御時における編成内計画トルク配分制御の一構成法”、電気学会産業応用論文誌、査読有、Vol. 130、No. 7、2010、pp. 890-901.
- [2]大石潔、今井一富、畑正、佐野孝、保川忍、“鉄道の空転制御のための外乱オブザーバの有効性”、日本フルードパワーシステム学会誌、Vol. 40、No. 3、2009、pp. 54-58.
- [3]清水陽介、大石潔、佐野孝、保川忍、“台車振動を考慮した外乱オブザーバを用いた空転滑走再粘着制御”、電気学会産業応用部門誌、査読有、Vol. 128、No. 7、2008、pp. 948-956.

[学会発表] (計7件)

- [1]中間貴生、花田敏洋、大石潔、牧島信吾、上園恵一、保川忍、“交流電動機のベクトル制御と電圧飽和制御の自動切り換えを実現する制御系の提案”、平成22年度電気学会半導体電力変換研究会、2011年1月22日、神戸ユニティー
- [2] 中間貴生、花田敏洋、大石潔、牧島信吾、上園恵一、保川忍、“電圧飽和領域の応答性を改善したたすき掛け制御”、第20回電気学会東京支部新潟支所研究発表会、2010年11月28日
- [3]T. Hanada、 T. Nakama and K. Ohishi、“Hardware Simulator Evaluation of Re-adhesion Control by Using Cross-coupling Current Controller for IPMSM Train”、電子情報通信学会信越支部大会 IEEE 信越支部セッション、2010年10月2日、長岡技術科学大学
- [4] 中間貴生、花田敏洋、大石潔、“通勤電車の1動輪換算モデルのDSP実装化と再粘着制御実験”第12回DSPS教育者会議、2010年9月10日、東京都市大学
- [5] 中間貴生、大石潔、牧島信吾、佐野孝、保川忍、“1動輪換算電車シミュレータ

を用いたI P Mモータ駆動電車の空転再粘着制御”平成22年度電気学会産業応用部門大会、2010年8月24日、芝浦工業大学

- [6] 今井一富、大石潔、佐野孝、牧島信吾、保川忍、“電気機関車へ適用するための外乱オブザーバを用いた空転再粘着制御系の一構成法”、平成21年度電気学会産業計測制御研究会、2010年3月8日、東京農工大学
- [7]K. Imai、K. Ohishi、T. Sano、S. Makishima and S. Yasukawa、“Realtime Distribution Control of Torque Reference of Commuter Train for Fine Re-adhesion Control”、The 11th IEEE International workshop on Advanced Motion Control、2010年3月22日、長岡技術科学大学

[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]

6. 研究組織

(1) 研究代表者

大石 潔 (OHISHI KIYOSHI)
長岡技術科学大学・工学部・教授
研究者番号：40185187

(2) 研究分担者

和田 安弘 (WADA YASUHIRO)
長岡技術科学大学・工学部・教授
研究者番号：70293248

宮崎 敏昌 (MIYAZAKI TOSHIMASA)
長岡技術科学大学・工学部・准教授
研究者番号：90321413

(3) 連携研究者

桂 誠一郎 (KATSURA SEIICHIRO)
慶應義塾大学・理工学部・准教授
研究者番号：00401779