

— 修士論文 —

誘導機駆動鉄道車両の超過角運動量補償
に基づく再粘着制御

Re-adhesion control in asynchronous motor drives for an electric train
by monitoring excessive angular momentum

平成24年2月8日 提出

指導教員 古関 隆章 准教授

東京大学大学院 工学系研究科
電気系工学専攻 修士課程
学籍番号 37-106487

原 崇文

内容梗概

近年、地球環境に対する意識から、環境負荷の小さい電気鉄道に注目が集まっている。電気鉄道は加速を行うときに伝えられる力である接線力が小さい。そのため、雨が降っている場合や枯れ葉がレールの上に落ちている場合は線路と車輪との間の摩擦力が減少し、車輪が一周分回転しても、車体が一周分進まない空転と呼ばれる現象が起きる。一旦空転が生じると、エネルギー散逸や乗り心地の悪化、線路の破損が生じてしまう。従って、車輪と線路が粘着していない空転状態から再び車輪と線路が粘着している粘着状態に戻して加速させる空転再粘着制御が必要である。

空転再粘着制御には、これまで様々な手法が考案されている。当初は「すべり速度情報」、「接線力トルク推定情報」の二つを使わずに、基準速度との速度偏差および加速度偏差にファジィ推論を使用した空転再粘着制御が一般的であった。最近では、計算機の発達により外乱オブザーバを使用して瞬時に「接線力トルク推定情報」を使用することができるようになったため、「接線力推定情報」に基づいた空転再粘着制御が開発され、実用化されている。また、すべり速度を測定できるものとして「すべり速度情報」および「接線力トルク推定情報」を共に活用した空転再粘着制御についても提案されている。しかし、これらの物理量は微小なため、電気鉄道車両において測定することは困難とされており、この制御方式の実現は難しいと言える。また、それらの手法は晩秋のレール上への落葉や冬季のレールへの積雪、着氷などによる極めて接線力係数の低い条件下における再粘着の保障についての議論はなされておらず、加えていつ空転が収束するかやどれくらいモータトルクを絞るのかについても統計だった考え方に基づいて行われていない。

そこで、本論文では空転の重度を測る「超過トルク」および「超過角運動量」という2つの新しい概念を使用し、極めて劣悪な路面条件においても再粘着を保証する再粘着制御について述べる。通常の鉄道車両を基にモデル化した4軸2台車モデルを使用した数値解析によってそれらが可能であることを示す。その再粘着制御を粘着力の有効利用とレール、車輪の傷みという2つの評価指標に基づき評価する。また、「すべり速度情報不使用」、「接線力トルク推定情報不使用」の再粘着制御、および「すべり速度情報使用」、「接線力トルク推定情報使用」の再粘着制御と比較を行い、提案空転再粘着制御の優位性を示す。

目次

第 1 章	序論	1
1.1	研究の背景	1
1.1.1	鉄道の駆動における粘着現象とその特徴	1
1.1.2	粘着現象の動特性と粘着制御の必要性	1
1.1.3	粘着性能向上の手法	2
1.1.4	電気鉄道車両の駆動技術と粘着制御の動向	3
1.1.5	電気鉄道車両での粘着制御における制約	3
1.2	研究の目的	4
1.3	本論文の構成	4
1.4	本論文で使われる主な記号一覧	5
第 2 章	電気鉄道車両の数値解析のためのモデル化	6
2.1	鉄道における粘着現象のモデル化	6
2.2	電気鉄道車両の構成とそのモデル化	7
2.2.1	1 軸車両モデル	7
2.2.2	4 軸全車両モデル	9
2.3	誘導電動機のモデル化と瞬時トルク制御のためのベクトル制御	16
2.3.1	誘導電動機のモデル化	16
2.3.2	瞬時トルク制御のための誘導電動機の状態と制御器の設計	19
2.3.3	瞬時トルク制御のための誘導電動機の状態と電流指令	19
2.3.4	複数並列誘導電動機群のモデル化	21
第 3 章	超過角運動量補償に基づく空転再粘着制御の構成	23
3.1	提案再粘着制御補償に基づく再粘着制御の提案	23
3.1.1	超過トルクと超過角運動量 [10]	23
3.1.2	従来空転再粘着制御 [3] の試験測定結果による超過トルクおよび超過角運動量	24
3.2	接線力トルクの推定	25
3.3	空転検知の方法	26
3.4	再粘着のためのトルク指令パターン	28
3.4.1	空転時の超過角運動量の簡略化	29
3.4.2	空転発生, 検知後からトルク引き下げ時の超過角運動量, Case A	30
3.4.3	空転発生, 検知後からトルク引き下げ時の超過角運動量, Case B	30
3.4.4	基本パターン	31
3.4.5	機械系保護のためのトルク指令制限	31

第 4 章	粘着性能の評価	33
4.1	粘着利用率	33
4.2	動輪周損失摩擦力	34
4.3	平均乗り心地係数	34
第 5 章	数値解析による一車輪一車体モデルの提案空転再粘着制御の粘着性能の評価	36
5.1	数値解析条件	36
5.2	モータトルクおよび接線力トルク軌跡	36
5.3	提案再粘着制御におけるパラメータ設計	37
5.4	様々な路面条件下での超過角運動量に着目した空転再粘着制御	38
5.5	提案再粘着制御と従来再粘着制御の比較	41
5.5.1	すべり速度情報不使用, 接線力トルク推定情報不使用の従来再粘着制御の概要	42
5.5.2	すべり速度情報使用, 接線力トルク推定情報使用の従来再粘着制御の概要	42
5.6	粘着利用率と動輪周損失力における比較	43
5.7	本章のまとめ	45
第 6 章	複数並列誘導電動機使用の提案空転再粘着制御の粘着性能の評価	46
6.1	複数並列誘導電動機使用の電気鉄道車両の駆動方法	46
6.1.1	1 インバータ 1 モータ駆動制御 (1C1M, 個別制御)	46
6.1.2	1 インバータ 2 モータ駆動制御 (1C2M)	46
6.1.3	1 インバータ 4 モータ駆動制御 (1C4M, 一括制御)	47
6.2	1 インバータ 1 モータ駆動制御 (1C1M, 個別制御) における提案空転再粘着制御	48
6.2.1	1 インバータ 1 モータ駆動制御における提案手法の拡張	48
6.3	1 インバータ 2 モータ駆動制御 (1C2M) における提案空転再粘着制御の拡張	50
6.3.1	1 インバータ 2 モータ駆動制御 (1C2M) における空転再粘着制御の難しさ	50
6.3.2	1 インバータ 2 モータ駆動制御 (1C2M) における空転再粘着制御の改良法	52
6.3.3	1 インバータ 2 モータ駆動制御 (1C2M) における空転再粘着制御の改良法のモータトルク および接線力トルク軌跡	56
6.3.4	各軸接線力トルクの差異による粘着性能の比較	56
6.3.5	指定走行距離走行後の車輪径変化による粘着性能の比較	58
6.4	本章のまとめ	60
第 7 章	結論	66
7.1	本論文で得られた成果	66
7.2	今後の課題	67
	参考文献	68
	本研究に関する発表論文	70
	謝辞	71
	付録 A 4 軸 2 台車モデルへの拡張の運動方程式	73

第1章 序論

1.1 研究の背景

1.1.1 鉄道の駆動における粘着現象とその特徴

一般的な電気鉄道は鉄のレールと車輪により、支持・案内・推進の機能が果たされている。このうち、特に推進においては車輪の僅かな接触面（以下、踏面）での転がり摩擦現象に起因する接触面に対する接線力によって電動機によるトルクが車体への並進力として車輪からレールへ伝達されることになる。この現象は鉄道の分野においては一般的に粘着現象と呼ばれている。

図 1.1 に示すような方向で転がり摩擦に起因する接線力を伝達しようとする時、車輪 - レール間の接触面において車輪が僅かに圧縮され、レールが僅かに引っ張られる。従って車輪の周速度と並進速度を比較すると周速度がわずかに大きくなる。これをすべり速度という。このすべり速度と接線力には図 1.2（図中では接線力を軸重で規格化した接線力係数¹を表示。）に示すようなあるすべり速度で伝達できる力が最大になるという特性がある。

また、このあるすべり速度よりすべり速度が小さい領域は微視すべり領域、あるすべり速度よりすべり速度が大きい領域を巨視すべり領域とそれぞれ呼ばれる。鉄道においてこの領域を分けるすべり速度はゴムタイヤを用いる自動車などに比べ鉄の弾性変形が小さいため一桁以上のオーダで小さいことが知られている。さらに粘着係数は接触面が付加物や汚れのない良い条件の場合で 0.3 p.u. 程度であり、雨水や氷などのレールへの付加物によって最悪な条件で 0.02 p.u. 程度 [1] まで大きく変動することが知られている。

1.1.2 粘着現象の動特性と粘着制御の必要性

車両が加減速を行う上ではそれぞれの領域における接線力係数 - すべり速度特性を動く動作点の動特性が重要であるため、以下ではその動特性について触れる。

まず、接線力 - すべり速度特性の傾きが正である微視すべり領域における動特性について述べる。ここで、微視すべり領域内での電動機による動輪における加速力と接線力が平衡している動作点を考えると、システム入力として動輪における加速力を微小量だけ増加させると加速力と接線力の差に応じてすべり速度が微小に増大することになる。そのとき、接線力は微視すべり領域であるので微小に増大する。この接線力の増大に応じてすべり速度の増大の度合いが小さくなり、動作点は新たな平衡点に留まることになる。従って、微視すべり領域における動特性は安定である。

次に、接線力 - すべり速度特性の傾きが負である巨視すべり領域における動特性について述べる。ここで、微視すべり領域内での電動機による輪周における加速力と接線力が平衡している動作点を考えると、輪周における加速力を微小量だけ増加させた場合には加速力と接線力の差に応じてすべり速度が微小に増大することまでは微視すべり領域の場合と同じである。このとき、接線力は巨視すべり領域であるので微小に減少する。この接線力の減少に応じてすべり速度の増大の度合いはさらに大きくなり、動作点はすべり速度の大きい方向へ発散してしまう。この現象が空転である。

¹接線力を軸重で除したものである。

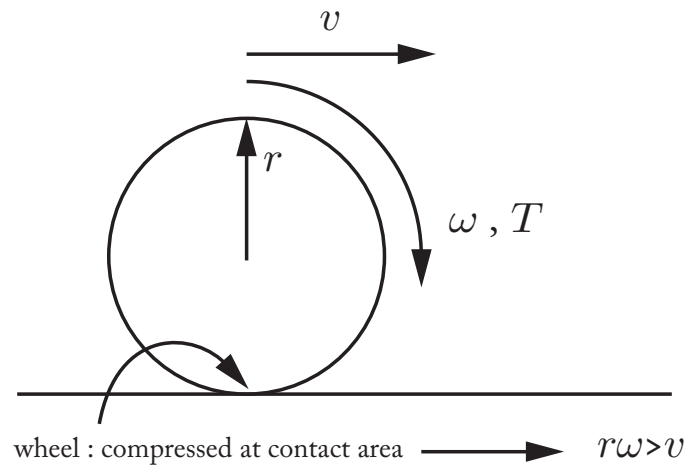


図 1.1: 転がり摩擦モード, Friction of railway

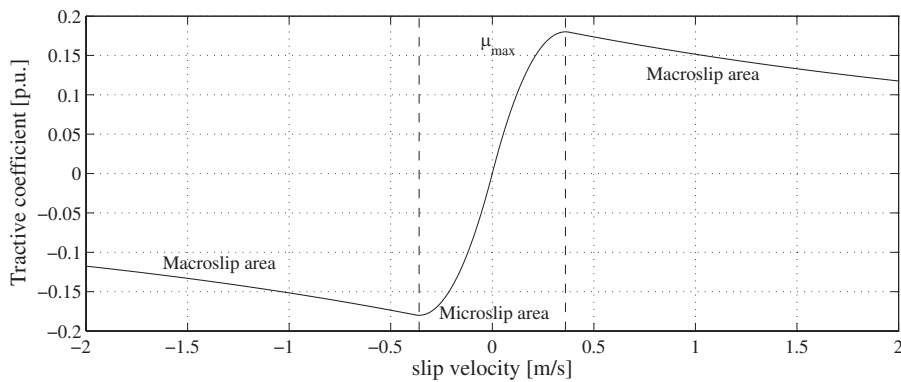


図 1.2: 接線力係数特性例, Example of tractive coefficient characteristic

電動機による動輪へのトルクが粘着係数に相当するトルクを上回り続けた場合には空転が発生し、それによって伝達できる駆動力（接線力）が減少し、空転と呼ばれる、車輪が一周分回転しても、車体が一周分進まない現象が起きる。一旦空転が生じると、エネルギー散逸や乗り心地の悪化、線路の破損が生じてしまう。そのため、動輪へのトルクを積極的に制御し、車輪と線路が粘着していない空転状態から再び車輪と線路が粘着している粘着状態に戻して加速させる空転再粘着制御が必要である。なお、接線力 - すべり速度特性は原点に点対称であるため、減速時にも同様の議論が成り立つ。この場合の加速時の空転に相当する現象は滑走となる。

1.1.3 粘着性能向上の手法

粘着性能の向上については接線力特性に着目すると、大きく以下の3つに分類される [2]。

1. 粘着限界そのものの向上
2. 条件を悪化させない手法
3. 与えられた接線力特性をうまく利用する方針

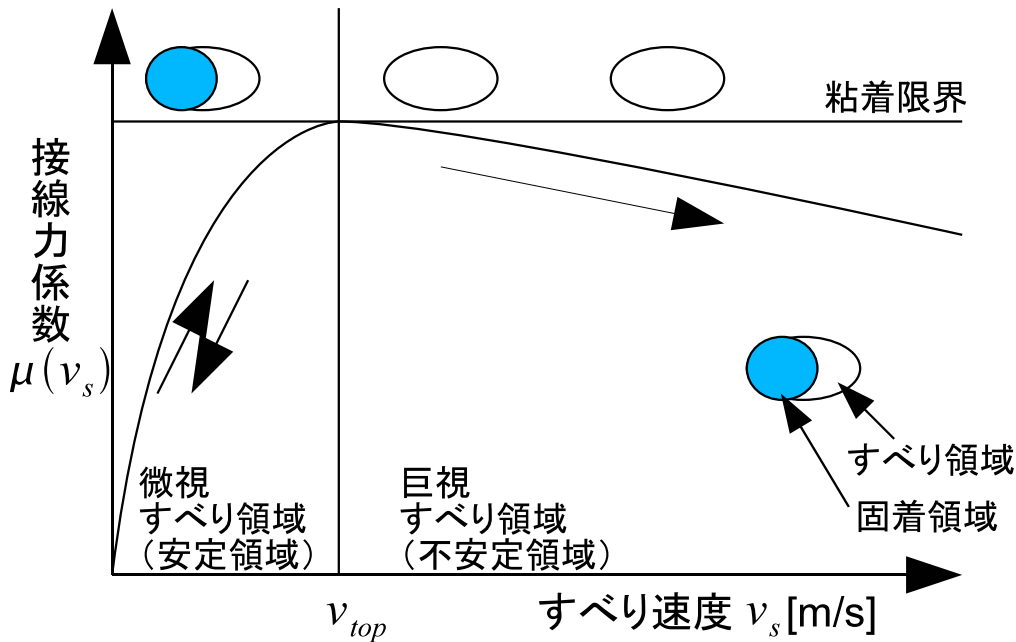


図 1.3: 接線力係数とすべり速度の関係 [2], Relation between tractive coefficient and slip velocity

1. については高速走行を行う新幹線や列車全体における動軸数が少ない機関車などにレール - 車輪間の踏面に粘着係数を増大させるような材料（セラミックスや砂）を噴射する機構が採用されている．しかしながら，運用コストなどの問題から本研究で対象とする通勤電車では主流でないため，2. や 3. の方針に基づいて空転再粘着制御を考える．

1.1.4 電気鉄道車両の駆動技術と粘着制御の動向

現代の電気鉄道車両は駆動装置として交流電動機とその可変速駆動の電源として不可欠な電圧型インバータの組み合わせにより構成される．この駆動装置をマイクロプロセッサによって制御することにより低速域からの広い速度域にわたり電動機によってのみなし得る 10 ms 程度といった粘着制御には十分速いトルク応答が実用化されている．しかし，インバータ駆動は自己消弧型電力用半導体が実用化され始めたおよそ 25 年前以降に普及開始したシステムである．それ以前では粘着状況に応じて電動機のトルクを 0.1 秒かそれ以下のオーダーで制御することはできなかつたため，空転が発生しにくい低い接線力の領域での駆動がなされていた．また，インバータ駆動の普及後についても半導体素子の容量やスイッチング周波数の制約などにより先に述べた高速なトルク応答を持つシステムの普及は最近の 10 年間の出来事であり，それを前提とした粘着駆動にも検討が未だに残されている．

1.1.5 電気鉄道車両での粘着制御における制約

ここまで電気鉄道車両の駆動システムの動向について述べてきたが，粘着現象の制御のための計測という観点からはさらに厳しい制約が存在する．それは粘着現象の特性量である接線力もすべり速度も事実上計測不可能な事である．接線力に関してはひずみゲージによって直接計測することも不可能ではないが鉄道車両の床下という環境から常設するには信頼性が問題となる．

従って、車輪や電動機を含む動軸の運動方程式を元に制御理論の成果である状態観測器を用いて推定した接線力推定値により代用する。さらに、すべり速度に関しては推定値すら求めることは事実上不可能である。すべり速度は動軸の周速度から車両の並進速度を減じて求めることができるが、鉄道車両において並進速度を計測することは道床が多様であることから不可能であり、推定においても車両並進速度などによって大きく変動する正確な走行抵抗値が必要であることから実用的ではない。

これまでの再粘着制御においては空転によって駆動軸の速度の変化量が空転しない場合より増大することを空転の検知とみなし、その度合いに応じてトルクを絞り込み再度粘着に持ち込ませようとする方針によるものが多い [3][4]。最近では、計算機の発達により外乱オブザーバを使用して瞬時に「接線力トルク推定情報」を使用することができるようになった。そこで「接線力推定情報」に基づいた空転再粘着制御が開発され [5][6]、実用化されている [7]。また、すべり速度を測定できるものとして「すべり速度情報」および「接線力トルク推定情報」を共に活用した空転再粘着制御についても提案されている [8][9]。しかし、電気鉄道車両において測定することが微小なため困難とされており、この制御方式の実現は難しいと言える。加えて、それらの手法は晩秋のレール上への落葉や冬季のレールへの積雪、着氷などによる極めて接線力係数の低い条件下 [1] における再粘着の保障についての議論はなされていなく、いつ空転が収束するかやどれくらいモータトルクを絞るかについては系統的解析はなされていない。

1.2 研究の目的

このいつ空転が収束するかやどれくらいモータトルクを絞るかは統計だった考え方に基づいて行われていないという問題点の解決、および高粘着利用率を目指し、先行研究 [10] において超過トルクおよび超過角運動量という新たな概念が明示された。一方で、1.1 で示した以下の問題点が浮き彫りとなった。

1. 超過角運動量を逐次計算する必要があるため、空転していても空転検知できないことがある。また計算量が膨大になる可能性がある。
2. 超過トルクの微分値を空転検知で使用しているため、雑音に弱く、頻繁なトルク引き下げが発生してしまう可能性がある。
3. 一軸換算モデルのみに特化した空転再粘着制御であるため、複数並列誘導電動機使用の場合、超過角運動量の保存が成り立たない可能性がある。

本論文では 1. から 3. までの問題点を解決する超過角運動量に着目した空転再粘着制御を提案する。

1.3 本論文の構成

本論文の構成は第 1 章において研究の背景と目的と構成を述べる。

第 2 章において数値計算のためのモデル化について述べる。車体については 1 軸換算モデル、4 軸 2 台車モデルについて述べる。

第 3 章においては現車試験に基づく本論文で提案する超過角運動量の近似計算に着目した空転再粘着制御について述べる。

第 4 章において本論文で使用する 2 つの評価指標について述べる。

第 5 章においては 1 軸換算モデルを使用し、第 3 章で述べた提案の超過角運動量の近似計算に着目した空転再粘着制御の実装を行い、従来手法と比較し、評価する。

第 6 章では 4 軸 2 台車モデルを使用し，制御が簡単な 1 インバータ 1 モータ駆動制御（1C1M，個別制御）での実装をはかる．そして，1 インバータ 2 モータ駆動制御（1C2M），1 インバータ 4 モータ駆動制御（1C4M，一括制御）へと拡張し，複数並列誘導機駆動電気車における問題点を明らかにし，その解決策を述べる．

第 7 章では本論文の成果と今後の課題について述べる．

1.4 本論文で使われる主な記号一覧

本論文で使われる記号一覧について表 1.1 に示す．但し，本文中で特に断りのある場合を除く．

表 1.1: 本論文で使われる主な記号一覧, Parameters explanation

Parameter	Comment	Units
J_R	Inertia moment around wheel	$\text{kg} \cdot \text{m}^2$
J	Equivalent inertia moment of drive axis	$\text{kg} \cdot \text{m}^2$
ω_w	Driving wheel angular velocity	rad/s
G_r	Gear ratio	-
M_R	Equivalent inertia weight around wheel	kg
M	Mass per axis	kg
W	axle load	kg
v_b	Velocity	rad/s
v_s	Slip velocity	m/s
ω_s	Slip angular velocity	m/s
T_m	Motor torque	N·m
T_L	Adhesive torque	N·m
r	Radius of wheel	m
F_d	Travel resistance	N
g	Gravity acceleration	m/s^2
T_{ex}	Excessive torque	[N·m]
L_{ex}	Excessive angular momentum	$[\text{kg} \cdot \text{m}^2/\text{s}]$

第2章 電気鉄道車両の数値解析のためのモデル化

2.1 鉄道における粘着現象のモデル化

一般的な鉄道車両において、車輪とレールは車重によりわずかに歪んで接触している。その車輪とレールの接触面は、条件によって変化はするものの、楕円形状に近似される。力行もしくは制動のとき、車輪とレールの間には、推進方向に力が働く。

レールに対して車輪が滑ることなく、力が伝わっている場合は、推進方向に働く力は静止摩擦力に近似され、この領域のことを微小すべり領域という。微小滑り領域は滑り速度の絶対値が小さく接線力係数の傾き $\frac{d\mu}{dv_s}$ が正で入力に対する滑り速度の応答が安定な領域である。他方で、レールに対して車輪が滑っていて、力が伝わっていない場合は、推進方向に働く力は動摩擦力に近似され、この領域のことを巨視すべり領域という。巨視滑り領域は滑り速度の絶対値が大きく接線力係数の傾き $\frac{d\mu}{dv_s}$ が負で応答が安定でない領域である。

これらの領域とすべり速度の関係は以下の図 2.1 のように表される。ここで、接線力係数とは線路と車輪との間に接線力がはたらくとき、1つの車輪にかかる接線力を車体の重量で除したものとして定義される。図 2.1 の v_{top} は接線力係数 - すべり速度の関係の頂点におけるすべり速度と定義する。

本論文においては滑り速度が正で接線力係数最大値を粘着係数 μ_{MAX} 、微視滑り領域について傾きを g_1 ($g_1 > 0$) である直線、巨視滑り領域については傾きの最小値 $-g_2$ ($g_2 > 0$) として滑り速度が無限度で粘着係数 μ_{inf} ($\mu_{inf} > 0$) に収束するような指数関数で近似する。この2領域を二次係数 C_{top} ($C_{top} > 0$) の放物線でつなく。その近似式を式 (2.1) に示す。 $v_s < 0$ の領域については原点对称として定式化する。

$$\mu(v_s) = \begin{cases} g_1 v_s & (v_s \leq v_1) \\ \mu_{MAX} - C_{top}(v_s - v_{top})^2 & (v_1 < v_s < v_2) \\ \mu_{inf} + B \exp[(v_2 - v_s) \frac{g_2}{B}] & (v_2 \leq v_s) \end{cases} \quad (2.1)$$

ただし、 C_{top} は原点での連続性より式 (2.2) のように制約される。

$$\begin{aligned} v_1 &= \frac{\mu_{MAX}}{g_1} - \frac{g_1}{4C_{top}} \geq 0 \\ C_{top} &\geq \frac{g_1^2}{4\mu_{MAX}} \end{aligned} \quad (2.2)$$

さらに、式 (2.1) で使用されている補助パラメータ v_1 , v_{top} , v_2 , B を式 (2.3) ~ 式 (2.6) に示す。

$$v_1 = \frac{\mu_{MAX}}{g_1} - \frac{g_1}{4C_{top}} \quad (2.3)$$

$$v_{top} = \frac{\mu_{MAX}}{g_1} + \frac{g_1}{4C_{top}} \quad (2.4)$$

$$v_2 = \frac{\mu_{MAX}}{g_1} + \frac{g_1}{4C_{top}} + \frac{g_2}{2C_{top}} \quad (2.5)$$

$$B = \mu_{MAX} - C_{top} \left(\frac{g_2}{2C_{top}} \right)^2 - \mu_{inf} \quad (2.6)$$

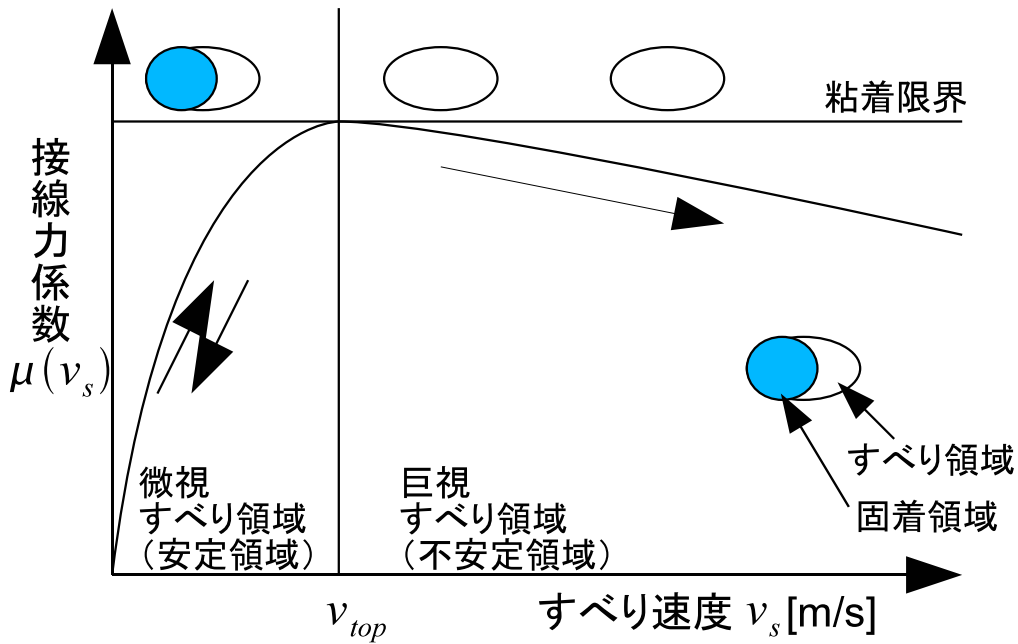


図 2.1: 接線力係数とすべり速度の関係 [2], Relation between tractive coefficient and slip velocity[2]

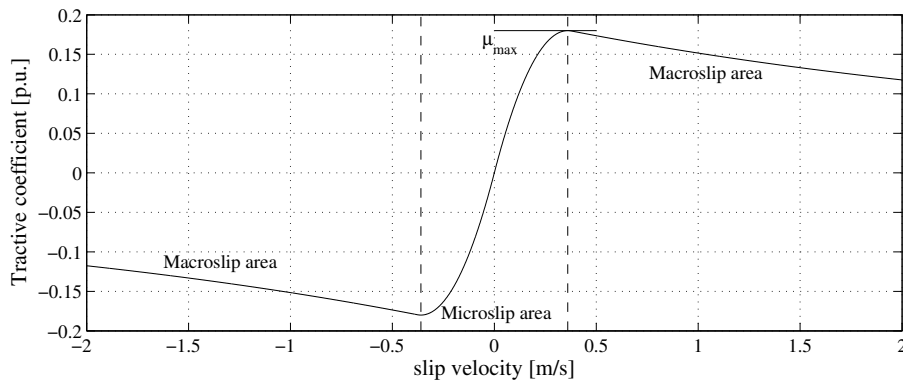


図 2.2: 接線力係数-すべり速度特性概念図, Image of relation between tractive coefficient and slip velocity

以下のケーススタディでは測定事例 [1] に基づき $g_1 = 5$, $C_{top} = 40$, $g_2 = 0.05$ と固定する。 μ_{MAX} については良好な路面条件下においては 0.27 を仮定した。 図 2.2 に $\mu_{MAX} = 0.18$ としたときの接線力係数-すべり速度特性概念図を示す。

2.2 電気鉄道車両の構成とそのモデル化

2.2.1 1 軸車両モデル

本論文では、接線力係数特性と制御系の構成に特化した議論のため、1 車体と 1 動軸の 2 慣性系からなる 1 軸モデルに基づく計算を行う。1 軸換算モデルとは、1 車体と 1 動軸のモデルに単純化したモデルのことである。これ

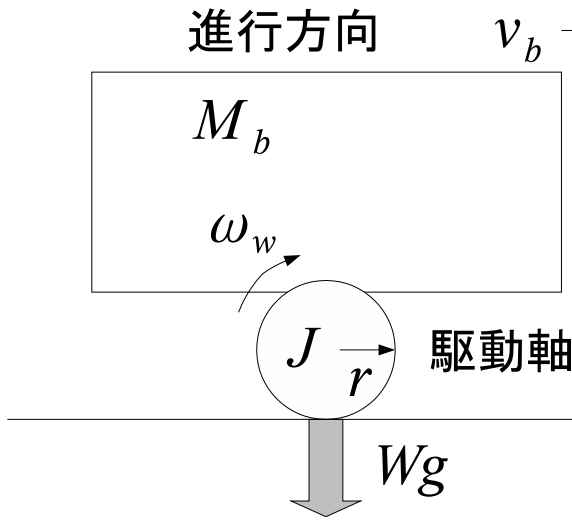


図 2.3: 1 軸車両モデル構成, One axis model

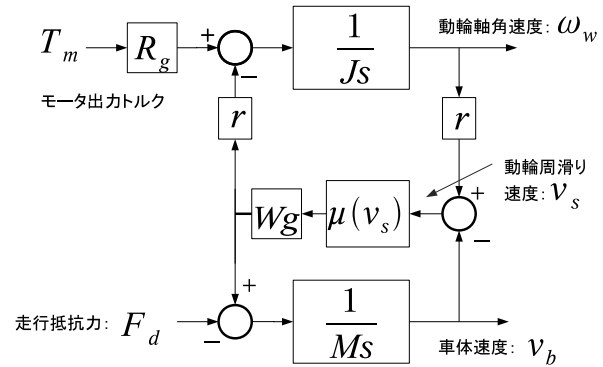


図 2.4: 1 軸車両モデルブロック線図, Block diagram of one axis model

によって、軸重移動や連結器の影響を考慮することはできないものの、制御方式の利点や欠点を求めることが比較的容易に行えるというメリットがある。図 2.3 にその構成を示し、図 2.4 にブロック線図を示す。動軸ダイナミクスを式 (2.7)、車体ダイナミクスを式 (2.8)、滑り速度、動輪周速度、車体速度の関係を式 (2.9) に示す。式 (2.9) は車輪の回転速度と車両進行方向の速度の差であるすべり速度を定義する式である。

$$J\dot{\omega}_w = G_r T_m - Wgr\mu(v_s) \tag{2.7}$$

$$M\dot{v}_b = Wg\mu(v_s) - F_d \tag{2.8}$$

$$v_s = r\omega_w - v_b \tag{2.9}$$

J は動輪軸合成慣性能率、 M は 1 動軸当たり車体重量、 W は動軸上にある車体質量、 T_m は電動機出力トルク、 R_g はギア比、 g は重力加速度、 r は動輪半径、 F_d は走行抵抗、 $\mu(v_s)$ は接線力係数、 v_s は滑り速度、 ω_w は動輪角速度、 v_b は電気車車体速度を示す。1 軸車両モデルにおいてモータの出力トルク特性は現実的なベクトル制御の適用を前提とし、時定数 5 ms の一次遅れ系とした。

電気車は一般的に列車抵抗が小さく無視することもできるが、急な登り勾配などの場合、空転再粘着制御に悪い影響を及ぼす可能性がある。従って、本論文では走行抵抗と勾配抵抗の 2 つについて考慮する。走行抵抗 R および勾配抵抗 G の和を列車抵抗 F_d ($F_d = R + G$) として数値解析を行う。ただし、今回は定常状態の速度のことを考慮しているため、出発抵抗分については考慮しない。

走行抵抗

電気車の平坦直線を等速で走行する場合に受ける抵抗を走行抵抗という。走行抵抗 R に関しては参考文献 [11] より式 (2.10) に示す。ただし、 v_b は車体速度、 W は軸重である。

$$R = (1.32 + 0.0164v_b)W + 0.028v_b^2 \tag{2.10}$$

表 2.1: 1 軸換算モデルの定数, Parameters of one axis model

Item	Value	Unit
g	9.81	m/s^2
J	2.22×10^3	$\text{kg} \cdot \text{m}^2$
J_R	159	$\text{kg} \cdot \text{m}^2$
r	0.412	m
G_r	5.28	-

表 2.2: 車体モデル, Body model

車両モデル	一軸車両駆動モデル
車両定数 (質量)	新京成 8000 系
車両定数 (バネ系)	近鉄 1400 系
編成	1M0.5T (現車 4M2T に対して 1/4)

勾配抵抗

電気車が勾配を上るとき、重力に逆らい電気車を引き上げるため、走行抵抗以外にもなお余分な引張力を必要とする。この重力による抵抗を勾配抵抗という。勾配抵抗 G についても参考文献 [11] より、式 (2.11) に示す。また、 θ が微小であることより、 $\sin \theta \approx \tan \theta$ の近似を用いる。

$$G = W \sin \theta \approx W \tan \theta \quad (2.11)$$

この $\tan \theta$ はどれくらいきつい勾配かを示す勾配表示 (一般に鉄道では‰ (パーミル)¹) から求められる。

各定数について

今回用いた数値計算の各定数を表 2.1 に示す。車体のモデルについて表 2.2 に示す。

2.2.2 4 軸全車両モデル

2.2.1 においては電気車モデルを動輪 1 軸の慣性能率 (イナーシャ)、1 車体質量からなる 2 慣性系として扱ってきた。しかし、実際に使用されている電気車は、電気的には複数誘導機並列駆動を行い、機械的にはボギー車であり、4 軸 2 台車によって構成されている。この台車 - 車体系の構成のもとでは軸重移動、台車ピッチング振動等の現象が発生し、実車において粘着特性を高める上で課題となっている。従って、実車試験のための事前検討ではこれらの現象を再現するため、実車を模した電気車モデルが必要となる。本節ではこの要件を満たす 4 軸電気車電気機械モデルに関して検討を行う。

¹‰は 1000 m 走行したときに何 m 登ったかを示す量である。

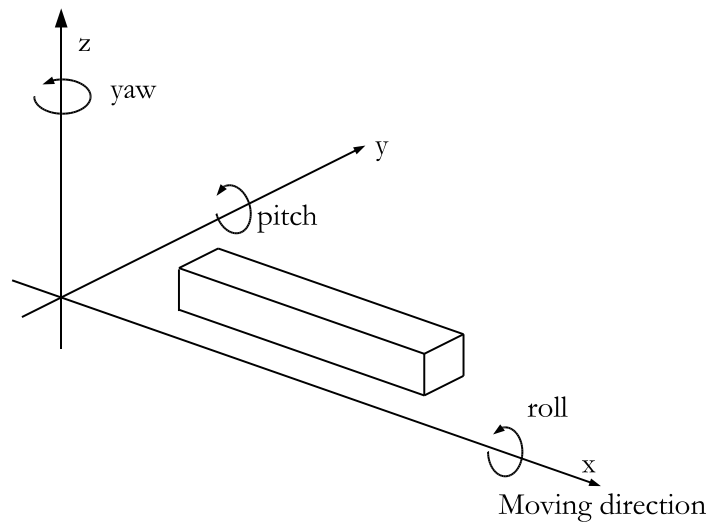


図 2.5: 座標系の定義, Definition of coordinate system

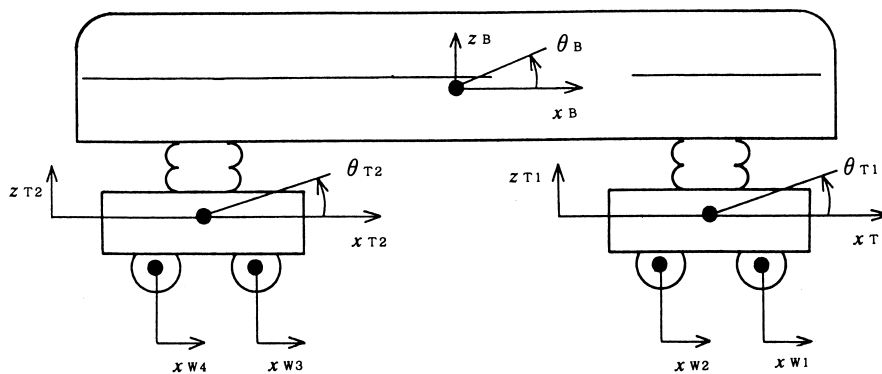


図 2.6: 前後上下系電気車モデルの自由度構成 [12], Freedom degree constitution of 4 axis 2 truck model[12]

実電気車の運動における座標設定

電気車は車体、台車などの曲げ変形を無視すると複数の剛体からなる系とみなすことができる。ここで、剛体の運動の自由度について考えると、 x, y, z の 3 軸方向の並進方向と 3 軸まわりの回転運動の合計 6 つの自由度がある。以下の議論では座標系を図 2.5 に示すように定める。また、特に乗り物においては、前後軸まわりの回転をローリング、左右軸まわりの回転をピッチング、上下軸まわりの回転をヨーイングと呼ぶ。

前後上下系電気車モデルの自由度構成

車両モデルを構成する際、粘着制御など前後系を対象とする場合には車体は左右に対称であると仮定する。その結果として、剛体の 6 自由度のうちローリング、ローリング、左右方向並進運動は励起されず、結果としてモデルの自由度を 3 つ減らすことができる。また、考慮する自由度は前後並進運動とピッチング及び、前者 2 つと結び付けられる上下並進運動の 3 自由度となる。従って、前後上下系の電気車モデルの自由度はレールが上下方向に平滑であるとする、車輪それぞれの自由度は前後のみの 1 自由度で合計 4 自由度となる。さらに、1 車体と

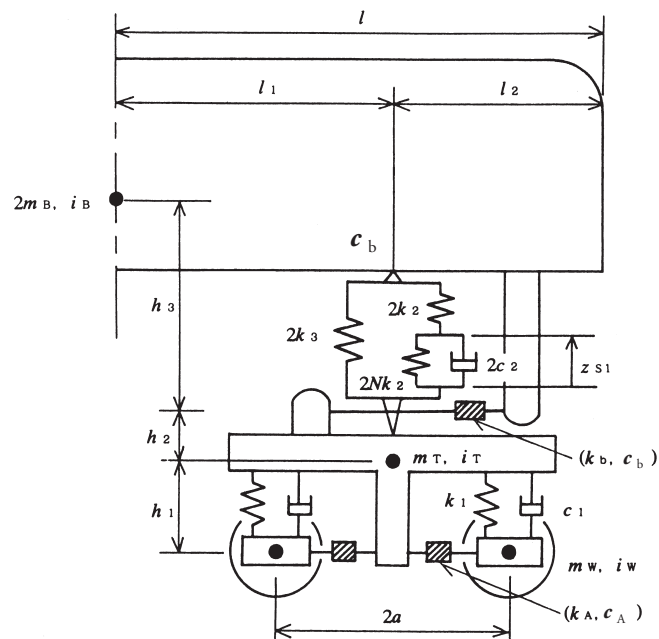


図 2.7: 車両のモデル化 (半車両) [12], 4 axis 2 truck model (Half model)[12]

それに対して支持する 2 台車にそれぞれおいて、前後、上下、ピッチングの 3 自由度であるので合計 9 自由度となり車両全体では 13 自由度となる。

構成するモデルの方針と課題

ここでは構成するモデルの方針を示す。

バネ系

バネ支持については軸 - 台車間、台車 - 車体間において、上下、前後方向ともにバネ系 (合計 4 方向) を考慮するモデルを構成する。また、台車 - 車体間のバネについては本数値解析で使用する新京成 8000 形は金属バネであるが、定数を現時点で入手していないため、今回は文献 [12] による近鉄 1400 系の定数を用い、空気バネによりモデルを構成する。

駆動方式

駆動方式は研究例によって大きく異なる。

今回は、新京成の車両はすべてカルダン駆動であるので構成するモデルはカルダン駆動とする。吊リンク、ギアケースのダイナミクスについては定数が得られないため、考慮しない。

モデル化仮定

ここでは状態空間法を用いて数学モデルについて記述する。モデル化の仮定を以下に示す。

1. 車体は前後，左右に対称である．
2. レールは平行かつ直線に位置する．
3. 左右方向のダイナミクスは無視する．
4. 踏面ブレーキ押し付け力を考慮しない．

状態変数及び定数

文献 [12] より構成した．表 2.3 に 13 個の状態変数を示す．以下の運動方程式に使用する車両緒元数値を表 2.4 に示す．定数は質量，長さ，ばね定数，減衰定数に関しては図 2.8 に示す通りである．また，図中着色した定数に関しては静的垂直抗力移動をモデル化するために文献 [12] から新たに定義した定数である．付録の式 (A.1) から (A.17) に示す．

表 2.3: 状態変数, State variable

識別子	説明	識別子	説明
x_{w1}	第 1 動軸前後位置	\dot{x}_{w1}	第 1 動軸前後速度
x_{w2}	第 2 動軸前後位置	\dot{x}_{w2}	第 2 動軸前後速度
x_{w3}	第 3 動軸前後位置	\dot{x}_{w3}	第 3 動軸前後速度
x_{w4}	第 4 動軸前後位置	\dot{x}_{w4}	第 4 動軸前後速度
x_{T1}	前台車枠前後位置	\dot{x}_{T1}	前台車枠前後速度
x_{T2}	前台車枠前後位置	\dot{x}_{T2}	前台車枠前後速度
x_B	車体前後位置	\dot{x}_B	車体前後速度
z_{T1}	前台車枠上下位置	\dot{z}_{T1}	前台車枠上下速度
z_{T2}	前台車枠上下位置	\dot{z}_{T2}	前台車枠上下速度
z_B	車体上下位置	\dot{z}_B	車体上下速度
θ_{T1}	前台車枠角度	$\dot{\theta}_{T1}$	前台車枠角速度
θ_{T2}	前台車枠角度	$\dot{\theta}_{T2}$	前台車枠角速度
θ_B	車体角度	$\dot{\theta}_B$	車体角速度
z_{S1}	前台車空気ばね変位		
z_{S2}	後台車空気ばね変位		
N_1	第 1 動軸垂直抗力		
N_2	第 2 動軸垂直抗力		
N_3	第 3 動軸垂直抗力		
N_4	第 4 動軸垂直抗力		

表 2.4: 4 軸 2 台車モデルの諸定数 [12], Parameters of 4 axis 2 truck model[12]

識別子	説明	値	単位	識別子	説明	値	単位
$2m_B$	車体質量	37	t	J_{By}	車体ピッチング慣性 能率	$m_B i_{By}^2$	
m_T	台車質量	2.8	t	J_{Ty}	台車ピッチング慣性 能率	$m_T i_{Ty}^2$	
m_W	軸質量	1.5	t				
k_1	軸箱上下剛性	5.3×10^3	kN/m	c_1	軸箱上下減衰定数	39.2	kNs/m
k_2	空気バネ上下剛性	1.72×10^3	kN/m	c_2	前台車枠上下速度	58.8	kNs/m
k_3	空気バネ有効受圧面 積の変化率に関する 上下剛性	-20.0	kN/m				
N	空気バネ本体と補助 空気室の容積比	0.373	-				
k_a	軸箱前後剛性	5.3×10^3	kN/m	c_a	軸箱前後減衰定数	0.1	-
k_b	牽引装置前後剛性	2.35×10^3	kN/m	c_b	牽引装置前後減衰定 数	0.1	-
h_1	台車枠前後着点か ら重心までの高さ	0.130	m	h_{a1}	台車枠軸バネ上下着 力点から空気バネ着 力点までの高さ	0.15	m
h_2	台車枠重心から牽引 装置までの高さ	-0.11	m	h_{a2}	台車枠軸バネ上下着 力点から台車枠重心 までの高さ	0.10	m
h_3	牽引装置から車体重 心までの高さ	1.4	m	h_{l1}	車体空気バネ上下着 力点から車体重心ま での高さ	0.90	m
$2a$	台車ホイールベース	2.15	m	$2l_1$	台車中心間距離	14.1	m
J_W	軸電動機合成慣性能 率	$m_W i_{Wy}^2$		B	軸電動機粘性抵抗係 数	0	
R_g	ギア比	5.28	-	r	動輪半径	0.430	m

前後上下系

文献 [12] より適宜構成した．数式については付録の式 (A.1) から (A.21) に示す．

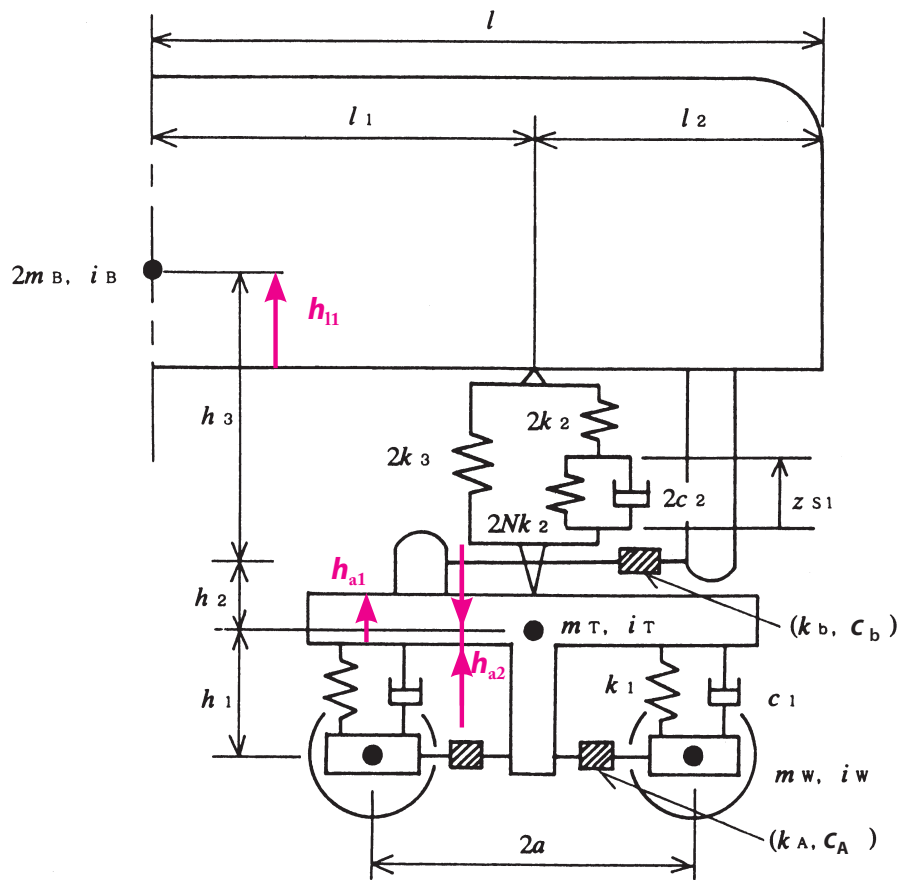


図 2.8: 上下方向の移動を考慮するために必要となった上下方向の位置, Definition of coordinate system

このとき運動方程式は以下のように表すことができる．

$$\begin{bmatrix} M & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{x}^* \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} \\ C_{21} & C_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{x}^* \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} \\ K_{21} & K_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ x^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix} F \quad (2.16)$$

しかし、このシステムでは空気バネに関して質量を持たない自由度を有するため、このままでは数値計算を実行できない．従って、次式に示すように変換 [13] を行い数値計算を実行する．結果として状態空間法に落とし込むことができる．

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \\ x^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & I \\ M^{-1}(-K_{11} + C_{12}C_{22}^{-1}K_{21}) & M^{-1}(-C_{11} + C_{12}C_{22}^{-1}C_{21}) \\ -C_{22}^{-1}K_{21} & -C_{22}^{-1}C_{21} \\ 0 & \\ M^{-1}(-K_{12} + C_{12}C_{22}^{-1}K_{22}) & \\ -C_{22}^{-1}K_{22} & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \\ x^* \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ M^{-1}B \\ 0 \end{bmatrix} F \quad (2.17)$$

2.3 誘導電動機のモデル化と瞬時トルク制御のためのベクトル制御

2.3.1 誘導電動機のモデル化

三相 - 二相変換

三相交流 $i = [i_a \ i_b \ i_c]^T$ において $i_a + i_b + i_c = 0$ であるときは式 (2.18) で表すとおり直交二相交流へと変換できる．右辺の係数 $\sqrt{\frac{2}{3}}$ は変換の際に同一インピーダンスに対してエネルギーを保存する絶対変換のための係数である．

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

これより本論文では誘導機を直交二相交流で議論する．

回転座標変換

後述する誘導機モデルを単純化するために電流・電圧ベクトルの回転座標変換を導入する．回転角速度 ω で回転している $d-q$ 回転座標系の角度が $\alpha - \beta$ 固定座標系 $\theta = \omega t$ とすると、静止座標系から回転座標系への変換は等式 (2.19) で示される．

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

誘導電動機電圧方程式と発生トルク

この条件で、誘導電動機の電圧方程式は電流ベクトルを $i = [i_1 \ i_2]^T$ 、電圧ベクトルを $V = [v_1 \ 0]^T$ 、鎖交磁束ベクトルを $\phi = [\phi_1 \ \phi_2]^T$ とすると（ただし、 i_1 ：一次側電流、 i_2 ：二次側電流、 v_1 ：一次側電圧、 R ：

抵抗行列, L : インダクタンス行列, $P[\]$: 微分演算子である.), 式 (2.20) で示される.

$$\begin{aligned} \mathbf{V} &= \mathbf{R}\mathbf{i} + P[\phi] \\ \phi &= \mathbf{L}\mathbf{i} \end{aligned} \quad (2.20)$$

さらに, トルクは誘導電動機の入力電力 P_{in} より

$$\begin{aligned} P_{in} &= \mathbf{i}^T \mathbf{V} \\ &= \mathbf{i}^T \mathbf{R}\mathbf{i} + \mathbf{i}^T (P[\mathbf{L}]\mathbf{i} + \mathbf{L}P[\mathbf{i}]) \\ &= P_c + \frac{1}{2} \mathbf{i}^T P[\mathbf{L}]\mathbf{i} + \frac{1}{2} \mathbf{i}^T P[\mathbf{L}]\mathbf{i} + \mathbf{i}^T \mathbf{L}P[\mathbf{i}] \end{aligned} \quad (2.21)$$

となる. ただし, P_c は巻き線で消費される電力である. ここでこの誘導機に蓄えられる磁気エネルギー W_m は式 (2.22) であるのでその時間微分は式 (2.23) となる.

$$W_m = \frac{1}{2} \mathbf{i}^T \mathbf{L}\mathbf{i} \quad (2.22)$$

$$\frac{dW_m}{dt} = \frac{1}{2} P[\mathbf{i}^T] \mathbf{L}\mathbf{i} + \frac{1}{2} \mathbf{i}^T P[\mathbf{L}]\mathbf{i} + \frac{1}{2} \mathbf{i}^T \mathbf{L}P[\mathbf{i}] \quad (2.23)$$

ここで, 式 (2.24) の関係が成立することにより式 (2.23) は式 (2.25) と変形できる.

$$\frac{1}{2} P[\mathbf{i}^T] \mathbf{L}\mathbf{i} = \frac{1}{2} \mathbf{i}^T \mathbf{L}P[\mathbf{i}] \quad (2.24)$$

$$\frac{dW_m}{dt} = \frac{1}{2} \mathbf{i}^T P[\mathbf{L}]\mathbf{i} + \mathbf{i}^T \mathbf{L}P[\mathbf{i}] \quad (2.25)$$

以上より, 入力電力式 (2.21) はその右辺第 2 項と第 3 項が式 (2.25) と等しいから式 (2.26) のように変形できる.

$$P_{in} = P_c + \frac{dW_m}{dt} + \frac{1}{2} \mathbf{i}^T P[\mathbf{L}]\mathbf{i} \quad (2.26)$$

エネルギー保存則から, 右辺第 1 項は巻線抵抗による損失の合計であり, 第 2 項が誘導機に蓄積される磁気エネルギーの時間微分である. 残る第 3 項が機械出力 P_m である. 従って, 機械出力トルク T_m は式 (2.27) に示される (ただし, ω_m : 回転子機械角速度である.)

$$\begin{aligned} T_m &= \frac{P_m}{\omega_m} \\ &= \frac{1}{2\omega_m} \mathbf{i}^T P[\mathbf{L}]\mathbf{i} \end{aligned} \quad (2.27)$$

一方で, 一次側固定子及び二次側回転子に固定され, 二次側が一次側に対して機械角 θ_m だけの差のある位置にあ

るときの $\alpha - \beta$ 座標での誘導機電圧方程式を式 (2.28) から (2.28) を用いて式 (2.37) に示す .

$$\mathbf{V} = \begin{bmatrix} v_{1\alpha} \\ v_{1\beta} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.28)$$

$$\mathbf{i} = \begin{bmatrix} i_{1\alpha} \\ i_{1\beta} \\ i_{2\alpha} \\ i_{2\beta} \end{bmatrix} \quad (2.29)$$

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} r_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & r_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & r_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & r_2 \end{bmatrix} \quad (2.30)$$

$$\mathbf{L}_{\alpha-\beta} = \begin{bmatrix} L_1 & 0 & M \cos \theta_m & -M \sin \theta_m \\ 0 & L_1 & M \sin \theta_m & M \cos \theta_m \\ M \cos \theta_m & M \sin \theta_m & L_2 & 0 \\ -M \sin \theta_m & M \cos \theta_m & 0 & L_2 \end{bmatrix} \quad (2.31)$$

$$\mathbf{V}_{d-q} = \begin{bmatrix} v_{1d} \\ v_{1q} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.32)$$

$$\mathbf{i}_{d-q} = \begin{bmatrix} i_{1d} \\ i_{1q} \\ i_{2d} \\ i_{2q} \end{bmatrix} \quad (2.33)$$

(ただし, r_1 : 一次側抵抗, L_1 : 一次側自己インダクタンス, M : 相互インダクタンス, L_2 : 二次側インダクタンス, r_2 : 二次側抵抗である.) ここで, $\alpha - \beta$ 座標から $d - q$ 座標への変換行列を式 (2.34) とすると,

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cos \theta & \sin \theta \\ 0 & 0 & -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (2.34)$$

式 (2.37) より

$$\frac{\partial \mathbf{L}_{d-q}}{\partial t} = \mathbf{C} \frac{\partial \mathbf{L}_{\alpha-\beta}}{\partial t} \mathbf{C}^{-1} = \mathbf{G} = \begin{bmatrix} 0 & -\omega L_1 & 0 & -\omega M \\ \omega L_1 & 0 & \omega M & 0 \\ 0 & -\omega_s M & 0 & -\omega_s L_2 \\ \omega_s M & 0 & \omega_s L_2 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.35)$$

(ただし, ω : 回転子電気角速度, ω_s : 電気角すべり角速度である.) となる. 従って, 式 (2.35) を式 (2.27) に代入すると発生トルクは式 (2.36) で示される (ただし, p : 極対数)

$$T_m = pM(i_{2d}i_{1q} - i_{2q}i_{1d}) = p(\phi_{2d}i_{1q} - \phi_{2q}i_{1d}) \quad (2.36)$$

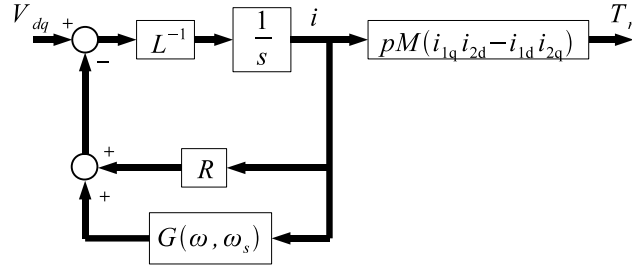


図 2.9: 誘導電動機の数値計算モデルブロック図, Numerical analysis block diagram of Induction motor

一方，誘導機の電圧方程式より電流ベクトルを状態変数とした状態空間法によるシステム表現を考える．式 (2.20) の誘導機の電圧方程式を変形する．式 (eq:IMAL) に $\alpha - \beta$ 軸上の誘導機の電圧方程式を示す．

$$\mathbf{V} = \mathbf{R}\mathbf{i} + \frac{d}{dt}(\mathbf{L}_{\alpha-\beta}\mathbf{i}) \quad (2.37)$$

$$\mathbf{V} = \mathbf{R}\mathbf{i} + \mathbf{L}_{\alpha-\beta}P[\dot{\mathbf{i}}] + P[\mathbf{L}_{\alpha-\beta}]\mathbf{i} \quad (2.38)$$

回転行列 C をかけて， $d - q$ 軸上に変換して

$$\begin{aligned} C\mathbf{V} &= C\mathbf{R}\mathbf{i} + C\mathbf{L}_{\alpha-\beta}P[\dot{\mathbf{i}}] + CP[\mathbf{L}_{\alpha-\beta}]C^{-1}C\mathbf{i} \\ \mathbf{V}_{d-q} &= \mathbf{R}\mathbf{i}_{d-q} + C\mathbf{L}_{d-q}C^{-1}P[\dot{\mathbf{i}}_{d-q}] + \mathbf{G}\mathbf{i}_{d-q} \end{aligned} \quad (2.39)$$

ただし， \mathbf{L}_{d-q} を式 (2.40) に示す．

$$\begin{aligned} \mathbf{L}_{d-q} &= C\mathbf{L}_{\alpha-\beta}C^{-1} \\ &= \mathbf{L}_{\alpha-\beta} \\ &= \begin{bmatrix} L_1 & 0 & M \cos \theta_m & -M \sin \theta_m \\ 0 & L_1 & M \sin \theta_m & M \cos \theta_m \\ M \cos \theta_m & M \sin \theta_m & L_2 & 0 \\ -M \sin \theta_m & M \cos \theta_m & 0 & L_2 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2.40)$$

式 (2.39) を変形した式 (2.41) によって誘導機システムは表現される．

$$\begin{aligned} \mathbf{L}_{d-q}P[\dot{\mathbf{i}}_{d-q}] &= -\mathbf{R}\mathbf{i}_{d-q} - P[\mathbf{L}_{d-q}]\mathbf{i}_{d-q} + \mathbf{V}_{d-q} \\ P[\dot{\mathbf{i}}_{d-q}] &= -\mathbf{L}_{d-q}^{-1}(\mathbf{R} + \mathbf{G})\mathbf{i}_{d-q} + \mathbf{L}_{d-q}^{-1}\mathbf{V}_{d-q} \end{aligned} \quad (2.41)$$

さらに，誘導機システムをブロック線図では図 2.9 に示す通り電圧を入力，電流を出力としたシステムとなる．この節で述べた通り，システムモデルは線形モデルである．従って，磁気系に含まれる鉄心ヒステリシス損，磁束飽和は考慮していない．

2.3.2 瞬時トルク制御のための誘導電動機の状態と制御器の設計

2.3.3 瞬時トルク制御のための誘導電動機の状態と電流指令

ここでは電気車における誘導電動機の瞬時トルク制御として最も用いられる滑り周波数形ベクトル制御について述べる．

座標系を一次側電源角周波数 ω で回転する $d-q$ 回転座標系に変換すると二次側の諸量は直流量となる．電気角滑り角速度を ω_s とした場合，電圧方程式を式 (2.42)，トルク発生式を式 (2.45) に示す．

$$\begin{bmatrix} v_{1d} \\ v_{1q} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_1 + p\sigma L_1 & -\omega\sigma L_1 & p\frac{M}{L_2} & -\omega\frac{M}{L_2} \\ \omega\sigma L_1 & r_1 + p\sigma L_1 & \omega\frac{M}{L_2} & p\frac{M}{L_2} \\ -\frac{r_2 M}{L_2} & 0 & p + \frac{r_2}{L_2} & \omega_s L_2 \\ 0 & -\frac{r_2 M}{L_2} & -\omega_s L_2 & p + \frac{r_2}{L_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{1d} \\ i_{1q} \\ \phi_{2d} \\ \phi_{2q} \end{bmatrix} \quad (2.42)$$

$$\sigma = \frac{L_1 L_2 - M^2}{L_1 L_2} \quad (2.43)$$

$$T_m = N_p M (i_{2d} i_{1q} - i_{2q} i_{1d}) \quad (2.44)$$

$$= N_p (\phi_{2q} i_{2d} - \phi_{2d} i_{2q}) (= k i_q \propto i_q) \quad (2.45)$$

ただし，座標系の位相については回転子鎖交磁束の正の向きが d 軸正の向きとなるよう $\phi_{2q} = 0$ ， $\phi_{2d} = \|\phi_2\|$ の関係を成り立たせるよう $d-q$ 回転座標系を設定し，トルク式を式 (2.46) に簡易化する．

$$\begin{aligned} T &= N_p M i_{2d} i_{1q} \\ &= -N_p \phi_{2d} i_{2q} (= k i_q) \end{aligned} \quad (2.46)$$

従って，電動機のトルクは二次磁束（励磁電流）と q 軸（トルク成分）電流の積に比例する．また，通常は磁束の大きさを一定値としてトルクをトルク分電流に比例するように線形化する．ただし， d 軸を制御器で正確に認識するとは限らないため制御器座標を推定 d 軸を γ 軸，推定 q 軸を δ 軸とする．このように，瞬間トルク制御としてのベクトル制御の 3 要素は二次側鎖交磁束に制御軸を合わせる位相制御と励磁電流制御，トルク成分電流制御の 3 要素 [14] となる

このとき，二次側 q 軸磁束に関する関係 $\phi_{2q} = M i_{1q} + L_2 i_{2q} = 0$ 及び，式 (2.46) を変形して，電動機指令トルクと状態変数の関係は式 (2.47) に示される．

$$T^* = N_p \frac{M \phi_{2\gamma}^*}{L_2} i_{1\delta}^* \quad (2.47)$$

式 (2.42) 第 4 行，及び式 (2.47) より，一次側電流指令 $i_{1\gamma}^*$ ， $i_{1\delta}^*$ は励磁条件 $\phi_{2\gamma}^*$ を用いて式 (2.48)，(2.49) に示される．

$$i_{1\gamma}^* = \frac{\phi_{2\gamma}^*}{M} + \frac{L_2}{M r_2} \frac{d\phi_{2\gamma}^*}{dt} \quad (2.48)$$

$$i_{1\delta}^* = \frac{L_2 T^*}{N_p M \phi_{2d}^*} \quad (2.49)$$

式 (2.48) に示される電流指令値に対して I-P 制御が行われる．また，電圧型インバータを用いるため電圧指令値は電流指令値及び磁束を用い，微分項を無視した式 (2.42) にて算定される．

また，制御上，位相に関しては，軸に取り付けられた回転速度センサによる回転子角速度（電気角）と式 (2.50) で定まる滑り角速度 ω_s （電気角）の和を積分し，フィードフォワード的に求める．

$$\omega_s^* = \frac{M r_2}{L_2 \phi_{2\gamma}^*} i_{1\delta}^* \quad (2.50)$$

以上のようにすべり周波数形ベクトル制御は構成される．これを図 2.10 に示す [15]．磁束電流電圧のベクトル図を図 2.11 に示す．ただし，この方式では定常トルクに対する二次抵抗 r_2 の感度が大きいいため，現実には二次抵抗値を同定する機構をもって実用化している．

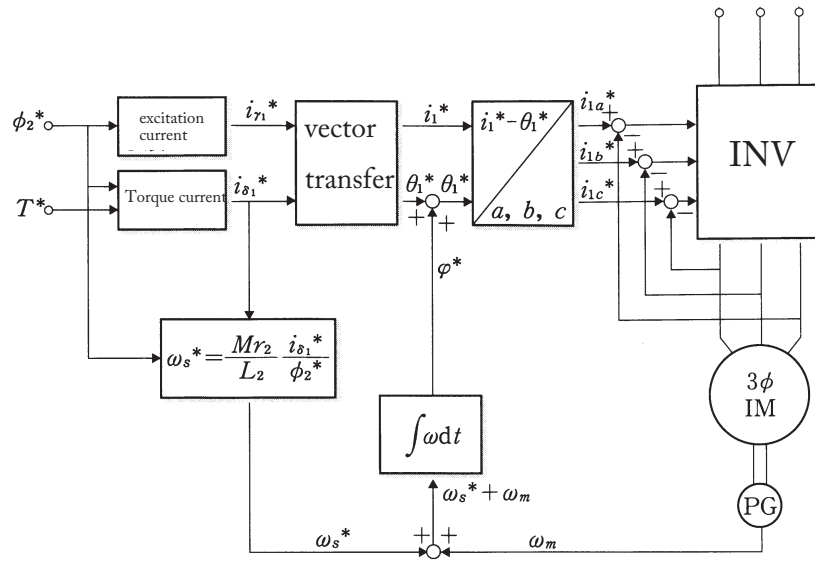


図 2.10: 滑り周波数形ベクトル制御, Slip angular velocity controlled type vector control

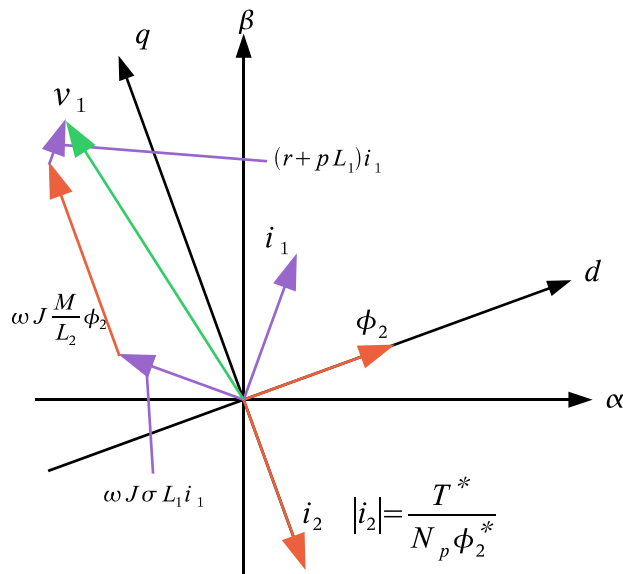


図 2.11: ベクトル制御における電流ベクトル図, Current vector diagram on vector control

本論の電流制御器は I-P 制御器とした．制御器のゲインは分母多項式がケスラー標準形 [16] となるようなゲインを設定した．それぞれの等価時定数は一次 d 軸電流の時定数を 5 ms , 一次 q 軸電流の時定数を 3 ms とした．使用する誘導電動機の定数及び励磁条件を以下の表 2.5 に示す．

2.3.4 複数並列誘導電動機群のモデル化

誘導機は本論文において図 2.9 に示す通り電圧を入力，電流を出力としたシステムとして表現している．

表 2.5: 使用する誘導電動機の定数

項目	数値・単位
一次側抵抗	$r_1 = 0.0579 \Omega$
一次側インダクタンス	$L_1 = 20.897 \text{ mH}$
相互インダクタンス	$M = 19.89 \text{ mH}$
二次側インダクタンス	$L_2 = 20.903 \text{ mH}$
二次側抵抗	$r_2 = 0.0533 \Omega$
極対数	$N_p = 3$
出力	160 kW

従って，入力として単一誘導機の入力に等しい電圧入力を，出力として各誘導機の電流の和を用いて誘導機を複数並列としたシステムは図 2.12 のように構成できる．

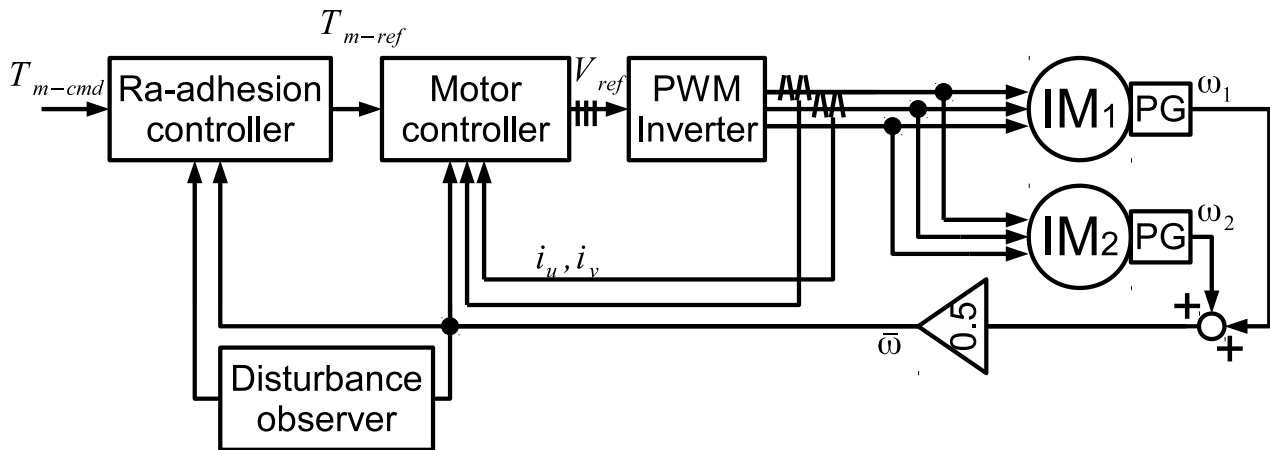


図 2.12: 1 インバータ 2 モータ駆動における複数誘導電気駆動例, Re-adhesion control of 1 inverter 2 motor drive system

第3章 超過角運動量補償に基づく空転再粘着制御の構成

3.1 提案再粘着制御補償に基づく再粘着制御の提案

3.1.1 超過トルクと超過角運動量 [10]

本節では提案空転再粘着制御で必要となる超過トルクおよび超過角運動量の定義を運動方程式より算出する。すべり速度を測定することは困難であるが、モータの出力トルクおよびレール - 車輪間の接線力トルクは測定もしくは推定することが可能である。モータトルクと接線力トルクの差分を見ることで、空転再粘着制御を実現することを考える。1車体1動輪に簡略化した電気車の運動方程式を式(3.1)~(3.4)に示す。

$$J_R \dot{\omega}_w = G_r T_m - T_L \quad (3.1)$$

$$M \dot{v}_b = \frac{T_L}{r} - F_d \quad (3.2)$$

$$v_s = r \omega_w - v_b \quad (3.3)$$

$$\dot{\omega}_s = \dot{\omega}_w - \frac{\dot{v}_b}{r} \quad (3.4)$$

以下では回転系に変換して議論を行う。電気鉄道車両の車体を直方体、車輪を円盤として仮定して質量から慣性モーメント ($J_R = \frac{1}{4} M_R r^2$, $J = M r^2$) を計算する。この関係を用い式(3.1)を J_R で除したのから式(3.2)を rM で除したものを引くと、すべり角速度の微分値 $\dot{\omega}_s$ は式(3.5)となる。

$$\dot{\omega}_s = \frac{1}{J_R} \left\{ G_r T_m - \left(1 + \frac{J_R}{J} \right) T_L + \frac{J_R}{J} r F_d \right\} \quad (3.5)$$

すべり角速度はモータトルクおよび接線力トルク、外乱力トルクに依存する。また、すべり角速度の増大によって空転が拡大すると考えられる。そこで、超過トルクを式(3.6)のように定義する。

$$\begin{aligned} T_{ex} &= J_R \dot{\omega}_s \\ &= G_r T_m - \left(1 + \frac{J_R}{J} \right) T_L + \frac{J_R}{J} r F_d \end{aligned} \quad (3.6)$$

超過トルクはモータトルク $G_r T_m$ と接線力トルク $(1 + \frac{J_R}{J}) T_L$ の差で、車輪の回転に寄与しない空回りさせるトルクである。

さらに、この超過トルクの積分値を超過角運動量として式(3.7)と定義する。

$$L_{ex} = \int \left\{ G_r T_m - \left(1 + \frac{J_R}{J} \right) T_L + \frac{J_R}{J} r F_d \right\} dt \quad (3.7)$$

超過トルク、超過角運動量を使用すると、差すべり角速度およびすべり角速度の微分値は式(3.8)、(3.9)のように書き換えられる。

$$\Delta \omega_s = \frac{1}{J_R} \int L_{ex} dt \quad (3.8)$$

$$\dot{\omega}_s = \frac{1}{J_R} T_{ex} \quad (3.9)$$

式 (3.8)(3.9), 差すべり角速度およびすべり角速度の微分値はそれぞれ超過角運動量, 超過トルクに比例することがわかる。空転をすばやく収束させ再粘着を可能にするためには超過角運動量をできるだけ小さくする必要がある。超過角運動量を見ることで, 再空転の誘発の防止や空転の程度の大きさの推定ができると考えられる。図 3.7 を見ると, 超過角運動量が 0 になり空転が収束していることが確認される。

ところが, 先行研究の超過角運動量に着目した空転再粘着制御 [10] では超過トルクおよび超過角運動量という新たな概念が明示されたものの, 1.1 に示した以下の問題点が浮き彫りとなった。

1. 超過角運動量を逐次計算する必要があるため, 空転していても空転検知できないことがある。また計算量が膨大になる可能性がある。
2. 超過トルクの微分値を空転検知で使用しているため, 雑音に弱く, 頻繁なトルク引き下げが発生してしまう可能性がある。
3. 一軸換算モデルのみに特化した空転再粘着制御であるため, 複数並列誘導電動機使用の場合, 超過角運動量の保存が成り立たない可能性がある。

本論文では 1. から 3. までの問題点を解決する超過角運動量に着目した空転再粘着制御を提案する。1. については 3.4.1, 2. については 3.3 で詳しく述べる。今回提案する手法と従来より提案されている手法の違いを表 3.1 に示す。

3.1.2 従来空転再粘着制御 [3] の試験測定結果による超過トルクおよび超過角運動量

2009 年 4 月に新京成電鉄くぬぎ山車両基地において従来空転再粘着制御 [3] を使用した複数誘導機並列駆動システムにおいてこれまで検討されていなかった 4 電動機のそれぞれの駆動電流を測定した。これを図 3.1 に示す。この実験の目的としては以下の二つが挙げられる。

1. 4 電動機それぞれの駆動電流情報に基づき 4 電動機それぞれに対して状態推定を行い, 滑走・空転時にいかなる現象が発生しているか, 従来空転再粘着制御 [3] の問題点を探る。
2. 複数誘導電動機並列駆動かつ速度センサレスベクトル制御車においては 4 電動機の平均電流のみ測定するため各軸の回転角を推定することができず, 平均の角速度, 位相角とならざるを得ない。ゆえに, 空転検知の感度低下に関する検討を行う。

$\frac{J}{J+J_R} G_r T_m - T_L [= \frac{J}{J+J_R} \{G_r T_m - (1 + \frac{J_R}{J}) T_L\} = \frac{J}{J+J_R} T_{ex}]$ の時間積分について走行ケースでの再粘着に成功する 5.5 秒から 7 秒までの時間軌跡を図 3.5 に, 再粘着に失敗する 17.5 秒から 20.5 秒までの時間軌跡を図 3.6 に示す。等価角運動量は双方とも解析時間の起点において 0 とした。また, 等価角運動量は電動機トルク推定値と負荷トルク推定値から算定した。

解析結果は走行抵抗を 0 と仮定しているため, 両者とも再粘着結果に関わらず負にバイアスされていることが分かる。従って, 超過角運動量に着目した提案空転再粘着制御においては何らかの方法によって走行抵抗を推定する必要がある。走行抵抗は 1 秒や 3 秒程度の短時間では変動しないと仮定して, それぞれ空転開始する前の推定等価角運動量の変動を走行抵抗によるものとした。走行抵抗に起因する等価角運動量の推定値の負値を図 3.5 および図 3.6 のピンクで示す。これと測定した値による推定等価角運動量の差が真の推定等価角運動量となる。

再粘着に成功する場面ではこの場面でのすべり速度時間履歴を示す図 3.2 と比較すると $\frac{J}{J+J_R} G_r T_m - T_L [= \frac{J}{J+J_R} \{G_r T_m - (1 + \frac{J_R}{J}) T_L\} = \frac{J}{J+J_R} T_{ex}]$ の時間積分は再粘着する時点で負となり, 再粘着に失敗する場面でも同様に図 3.2 と比較すると $\frac{J}{J+J_R} G_r T_m - T_L [= \frac{J}{J+J_R} \{G_r T_m - (1 + \frac{J_R}{J}) T_L\} = \frac{J}{J+J_R} T_{ex}]$ の時間積分が再粘着に失敗しすべり速度の拡大とともに値が増大することが分かった。

表 3.1: 各制御手法の比較, Comparison of each re-adhesion control

	超過角運動量に着目した先行研究 [10]	提案空転再粘着制御	従来空転再粘着制御 Method A[4]	従来空転再粘着制御 Method B[8]
空転検知	より速い空転検知を狙い, 超過トルクの微分値 T_{ex}' が閾値を超えたかどうか	超過トルク T_{ex} が閾値を超えたかどうか	すべり速度微分値が閾値を超えたとき	- (接線力係数 - すべり速度の関係特性の頂点を狙うように制御)
超過角運動量の保存	完全に保存	近似計算を利用しているので若干の余裕あり	-	-
超過角運動量のモニター	常に必要	近似計算を利用しているので一部のみ必要	-	-
誤空転検知	あり	ほぼなし(トルクを引き下げるときに超過トルクが大きくなっているか確認)	あり	なし
粘着利用率				
ロバスト性	×			×
すべり速度	×	×	×	
接線力トルク推定情報			×	

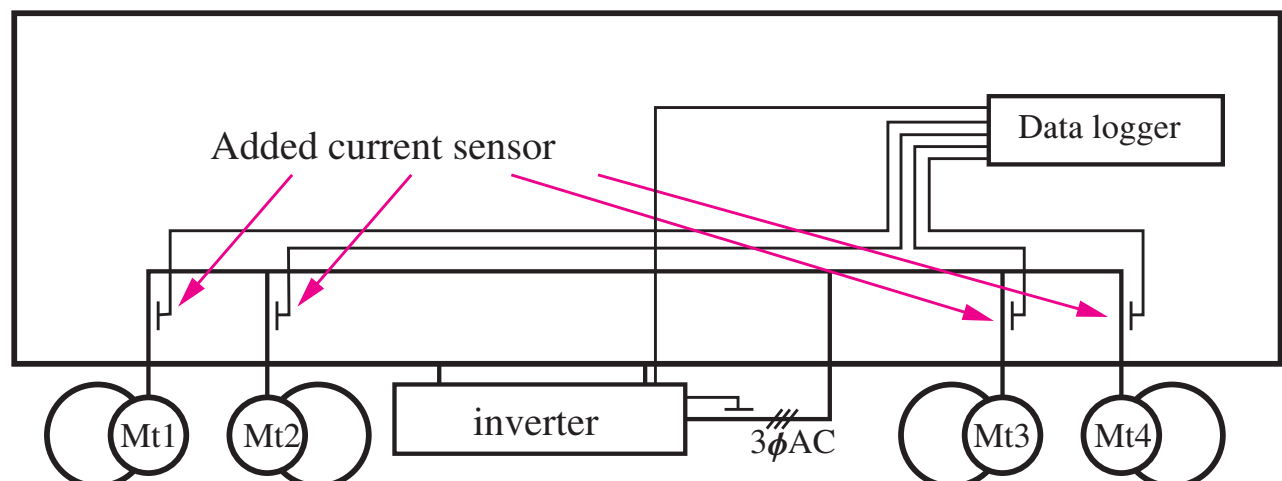


図 3.1: 実験車両の電流測定, Current measurement of experimental train

3.2 接線力トルクの推定

前節で述べた超過角運動量 L_{ex} および超過トルク T_{ex} の算出に際して, 接線力トルクを軸への負荷トルク T_L として推定する必要がある.

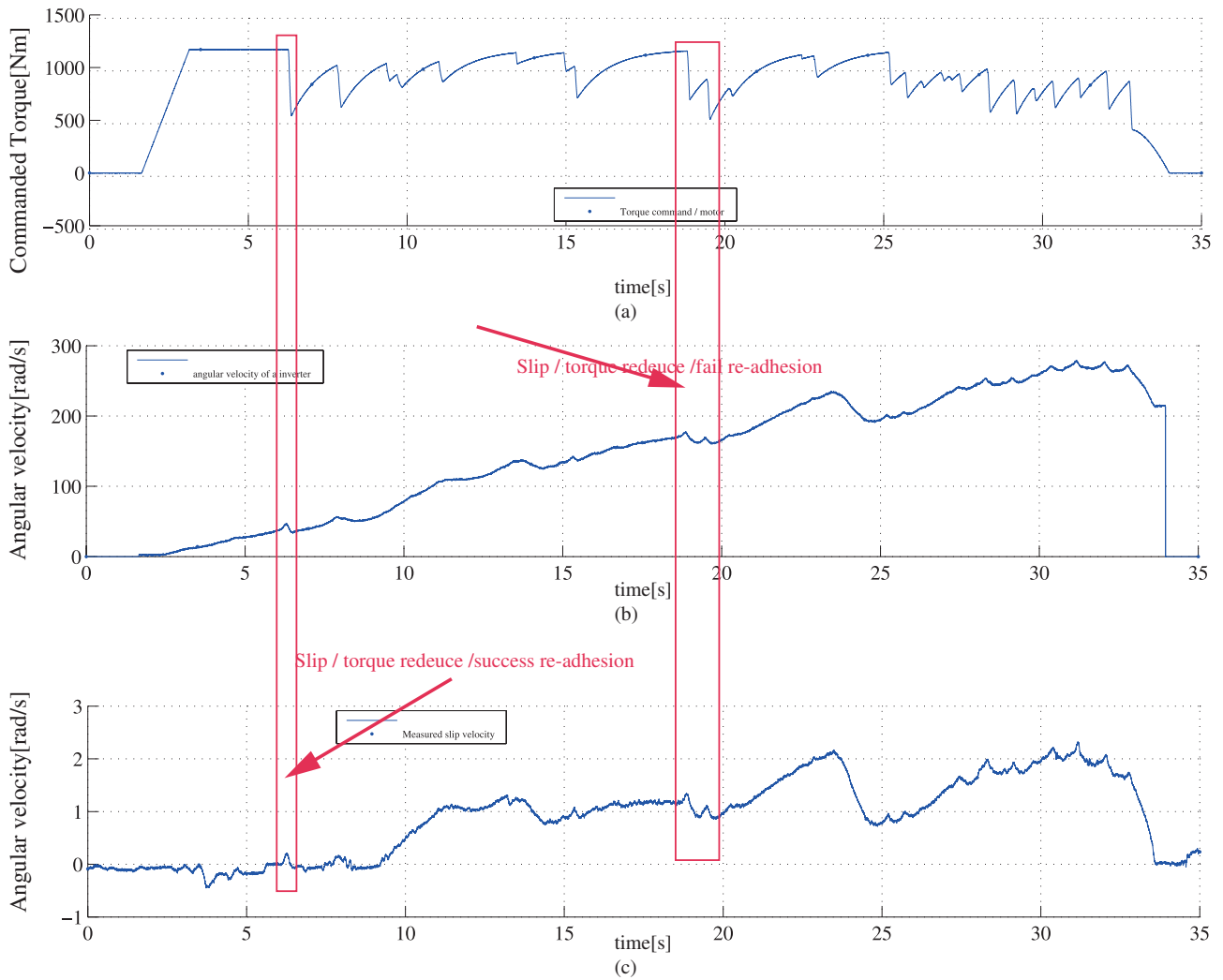


図 3.2: 現車試験における再粘着制御例, Example of re-adhesion control in real train test

よって, 式 (3.10) によって構成される同一次元オブザーバを用いて, 接線カトルク T_L の推定を行う. 接線カトルクおよび接線カトルク微分値の推定は車輪角速度, 入力モータトルクおよび接線カトルク微分値の零次ダイナミクスの仮定 ($\dot{\hat{T}}_L = 0$) を使用している. \mathbf{H} は推定器のゲインである.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \hat{\omega}_w \\ \hat{T}_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{J} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\omega}_w \\ \hat{T}_L \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{G_r}{J_R} \\ 0 \end{bmatrix} T_m + \mathbf{H} (\hat{\omega}_w - \omega_w) \quad (3.10)$$

$$y = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\omega}_w \\ \hat{T}_L \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

3.3 空転検知の方法

本空転再粘着制御法において従来の空転検知方法 [3] と同じように軸角加速度と指令軸角加速度の差である値が閾値を超えたときに空転検知を行う. この値は超過トルクと同じ次元量である. 本論文では軸角加速度と指令軸

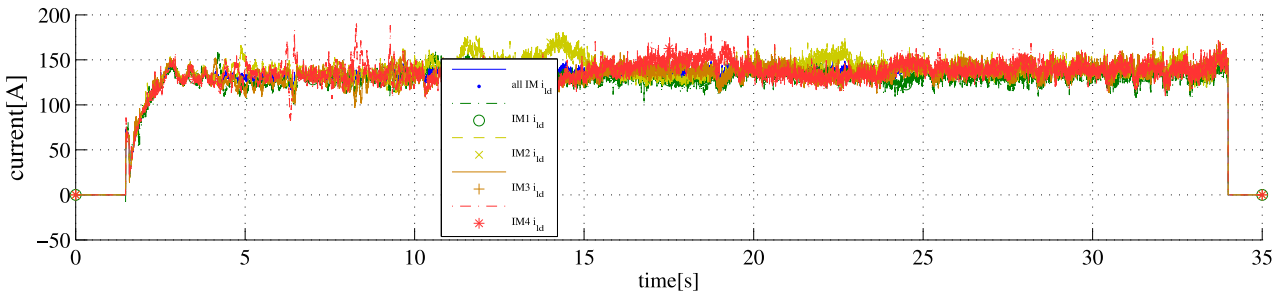


図 3.3: 現車試験における d 軸電流値, d current value in real train test

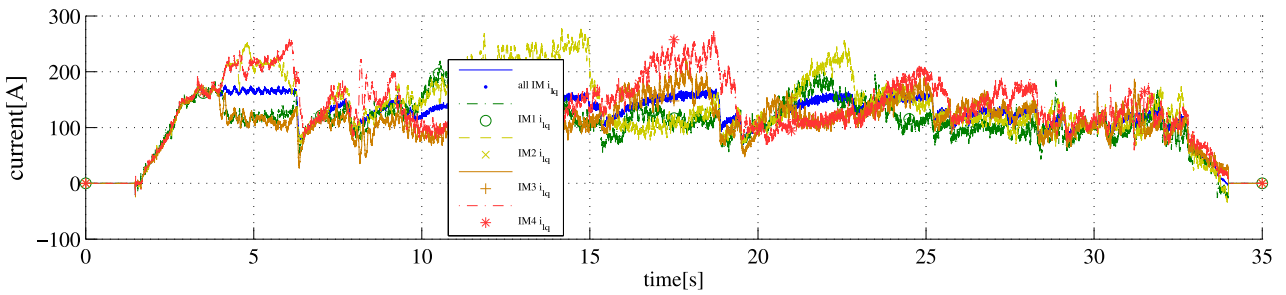


図 3.4: 現車試験における q 軸電流値, q current value in real train test

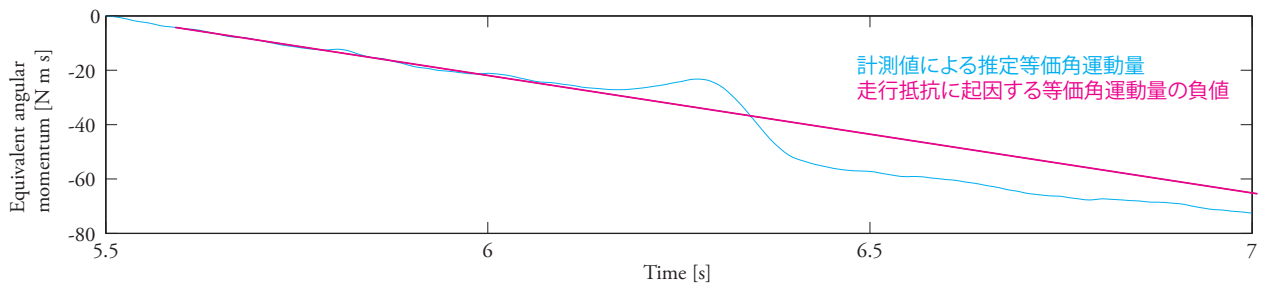


図 3.5: 再粘着した場合の $\int \left(\frac{J}{J+J_R} T_{ex} \right) dt$, $\int \left(\frac{J}{J+J_R} T_{ex} \right) dt$ of re-adhesion success

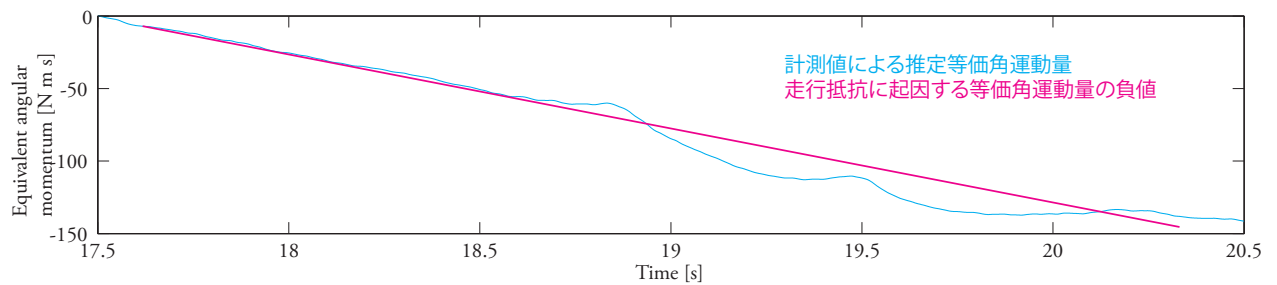


図 3.6: 再粘着に失敗した場合の $\int \left(\frac{J}{J+J_R} T_{ex} \right) dt$, $\int \left(\frac{J}{J+J_R} T_{ex} \right) dt$ of re-adhesion failure

角加速度の差である超過トルク T_{ex} が閾値 $T_{ex-threshold}$ を超えたときに空転検知をする。

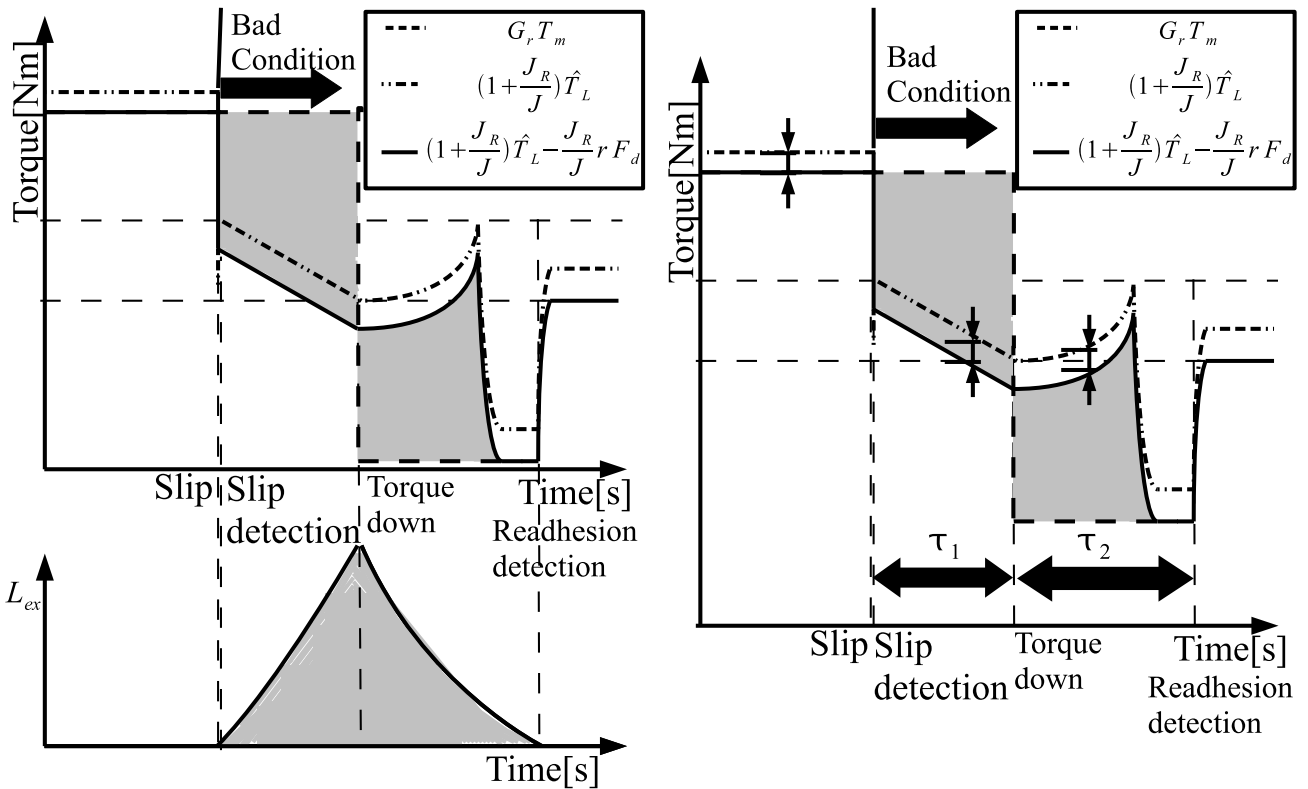


図 3.7: 超過トルク T_{ex} と超過角運動量 L_{ex} , Excessive torque T_{ex} and excessive angular momentum L_{ex} 図 3.8: 外乱トルク分の推定, Estimation of disturbance torque T_{ex}

3.4 再粘着のためのトルク指令パターン

以下では、空転した時刻を t_{slip} 、空転検知した時刻を t_{detect} 、モータトルクを引き下げた時刻を t_{Tdown} 、モータトルクを引き上げた時刻を t_{Tup} 、空転検知してからトルクを引き下げるまでの時間を τ_1 、トルクを引き下げてから再粘着検知するまでの時間を τ_2 とする。

図 3.8 に外乱がある場合のモータトルク $G_r T_m$ および接線力トルク $(1 + \frac{J_R}{J}) \hat{T}_L$ 、接線力トルク $(1 + \frac{J_R}{J}) \hat{T}_L - \frac{J_R}{J} r F_d$ を示す。灰色部分の面積は台形に近似することで求めることが可能である。しかしながら、このままだと外乱トルクの大きさはわからないので、超過角運動量を十分に補償できないまま、トルクを引き上げてしまい、再空転が起きてしまう。まず、空転が始まる前からモータトルク $G_r T_m$ および接線力トルク $(1 + \frac{J_R}{J}) \hat{T}_L$ の差分を外乱トルク $\frac{J_R}{J} r F_d$ としてモニターを行う。そして、空転再粘着時には勾配や走行抵抗による外乱トルクが一定であるという仮定を行う。これを図 3.8 に示す。外乱トルクに τ_1 をかけたものを空転検知からトルク引き下げ時までの超過角運動量に積算を行う。また、外乱トルクに τ_2 をかけたものをトルク引き下げ時から再粘着検知までの超過角運動量に積算して超過角運動量が 0 になるようにする。そのようにすれば、外乱が加わった分を考慮した空転再粘着制御が実現できると考えられる。以下では外乱トルクの保持値を F_{d-hold} とする。

図 3.9 に示すようにトルクが一定値のときとトルクを線形に引き上げているときで超過角運動量の面積の形に変化が生じるため、以下の 2 つの条件で面積近似方法を変える。

1. 突然良い粘着条件から悪い粘着条件になったとき (Case A, 一回目のみ)
2. 悪い粘着条件が継続的に続くとき (Case B, 二回目以降)

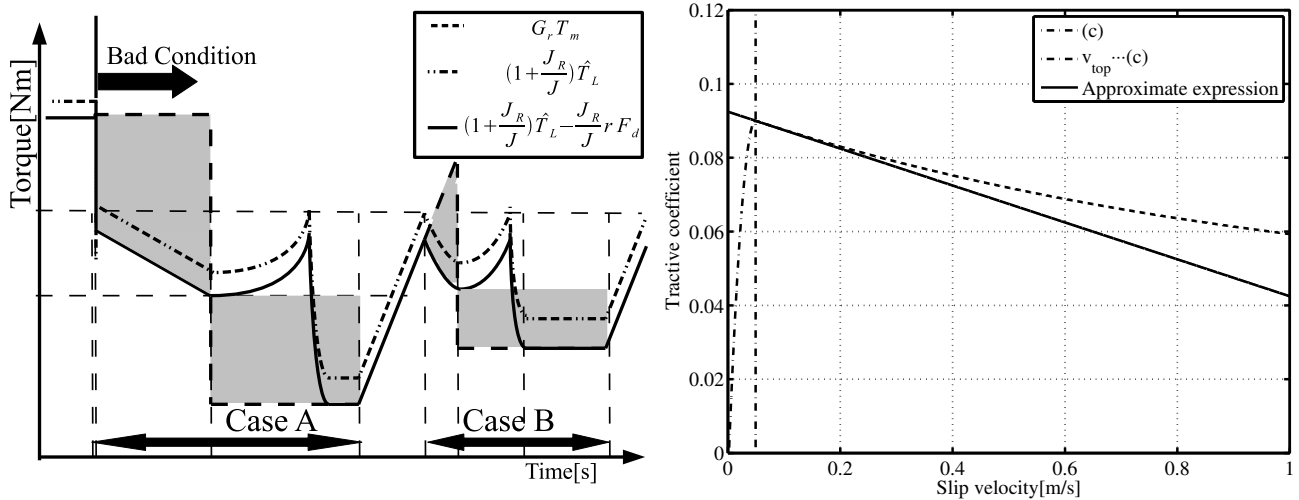


図 3.9: 超過角運動量保存の空転再粘着制御の場合分け, Case analysis of re-adhesion control
 図 3.10: 曲線を直線近似した例, Example of straight-line approximation

突然良い粘着条件から悪い粘着条件になったとき (Case A) は台形, 悪い粘着条件が継続的に続くとき (Case B) は三角形に近似する . 突然良い粘着条件から悪い粘着条件になったとき (Case A) は空転検知してから再粘着するまでの間モータトルクが一定であるため, ほぼ直線状で減少していく接線力トルクと比較して, 溜められる超過角運動量の形状は台形となる . 一方, 悪い粘着条件が継続的に続くとき (Case B) は空転検知してから再粘着するまでの間モータトルクが直線状に増加していくため, ほぼ直線状で減少していく接線力トルクと比較して, 溜められる超過角運動量の形状は三角形となる . 擬似的に超過角運動量を求めることができる . 三角形および台形に近似した超過角運動量については余裕を持たせているため, 実際の超過角運動量が近似により求めた超過角運動量より大きくなることは無い .

3.4.1 空転時の超過角運動量の簡略化

巨視すべり領域で空転が徐々に悪化する条件の下で超過トルクの元となる, 車体を並進運動される電動機トルクと接線力トルクを見る . 車両の並進方向の運動方程式を式 (3.12), 回転の運動方程式を式 (3.13) に再掲する .

$$J_R \dot{\omega}_w = G_r T_m - T_L \quad (3.12)$$

$$M \dot{v}_b = \frac{T_L}{r} \quad (3.13)$$

式 (3.12), 式 (3.13) から, すべり速度の微分は式 (3.14) のようになる .

$$\dot{v}_s = \frac{G_r}{J_R} r T_m - r \left(\frac{1}{J} + \frac{1}{J_R} \right) T_L \quad (3.14)$$

$\mu(v_s)$ をすべり速度によって決定される接線力係数と仮定すると, 接線力トルクが $T_L = \mu(v_s) W g r$ となる . この接線力係数 - すべり速度の関係特性は図 3.10 のように考える [4] . これより, 接線力係数が最大となるすべり速度より大きい範囲 (巨視すべり領域と呼ばれる車輪とレールが粘着していない状態) では接線力係数 - すべり速度の関係特性は直線で近似することができることが確認される . このことから, 接線力係数 - すべり速度の関係特性

の頂点より右側の領域を式 (3.15) として近似すると、すべり速度の時間微分値 \dot{v}_s は式 (3.16) のように表される。

$$\mu(v_s) = a - bv_s \quad (3.15)$$

$$\dot{v}_s = \frac{G_r}{J_R} r T_m - r^2 \left(\frac{1}{J} + \frac{1}{J_R} \right) W g a + r^2 \left(\frac{1}{J} + \frac{1}{J_R} \right) W g b v_s \quad (3.16)$$

$r^2 \left(\frac{1}{J} + \frac{1}{J_R} \right) W g b v_s$ が他と比較して十分に小さい時、すべり速度の時間特性は、式 (3.17) のように表される。

$$v_s = C_1 t + C_2 \quad (3.17)$$

$$C_1 = \frac{G_r}{J_R} r T_m - r^2 \left(\frac{1}{J} + \frac{1}{J_R} \right) W g a (< 0) \quad (3.18)$$

これより、式 (3.15)、式 (3.17) より、接線力係数は式 (3.19) のように近似される。

$$\mu(v_s) = (a - bC_2) - bC_1 t \quad (3.19)$$

C_1, C_2 は定数である（空転が拡大するとき、 $C_1 > 0$ ）。よって、電動機トルク $G_r T_m$ および接線力トルク $(1 + \frac{J_R}{J}) T_L$ は一次関数的になる。また、電動機トルクと接線力トルクの差である超過トルク T_{ex} は一次関数と近似できることがわかる。つまり、超過トルクを積分した超過角運動量 L_{ex} は台形状となり、簡易な計算で求めることが可能であることが特長である。

よって、巨視滑り領域での滑りを直線状に近似したことに加え、接線力係数 - すべり速度の特性の頂点における接線力係数と滑っているときの接線力係数の差が無視できるほど小さいという仮定の下では超過角運動量が台形状であることがわかったので、これを用いて以降の議論を進める。

3.4.2 空転発生、検知後からトルク引き下げ時の超過角運動量, Case A

空転検知したときの超過トルクを $T_{ex,slip}$ 、空転検知後 τ_1 s のときの超過トルクを T_{ex,τ_1} とする。これら 2 つを使用して台形の超過角運動量の面積を求める。空転が拡大しているときの超過角運動量 L_{ex,τ_1} は式 (3.20) であらわされる。図 3.11 に近似の概要を示す。

$$L_{ex,\tau_1} = \frac{\tau_1}{2} (T_{ex,slip} + T_{ex,\tau_1}) \quad (3.20)$$

3.4.3 空転発生、検知後からトルク引き下げ時の超過角運動量, Case B

空転検知後 τ_1 秒のときの車体の並進方向に伝達される電動機トルク $G_r T_m$ と接線力トルク $(1 + \frac{J_R}{J}) \hat{T}_L$ の差を T_{ex,τ_1} とする。空転が拡大しているときの超過角運動量 L_{ex,τ_1} は式 (3.21) であらわされる。これを使用して三角形の超過角運動量の面積を求める。図 3.12 に近似の概要を示す。

$$L_{ex,\tau_1} = \frac{\tau_1}{2} T_{ex,\tau_1} \quad (3.21)$$

思想としては空転発生、検知してから τ_1 秒待つて τ_1 秒後に空転しているか確認することで誤空転検知を防ぐという狙いがある。また、トルク引き下げまでの時間を固定することで超過角運動量の保存計算をより容易にできると考えられる。

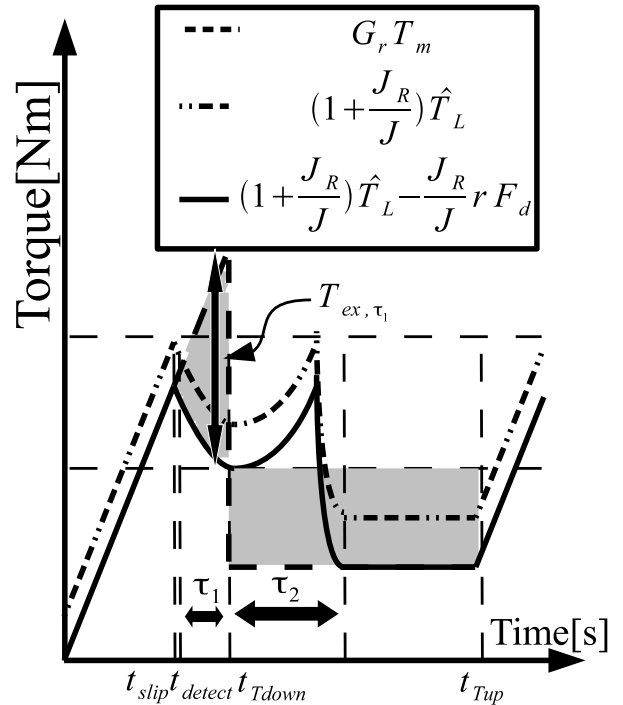
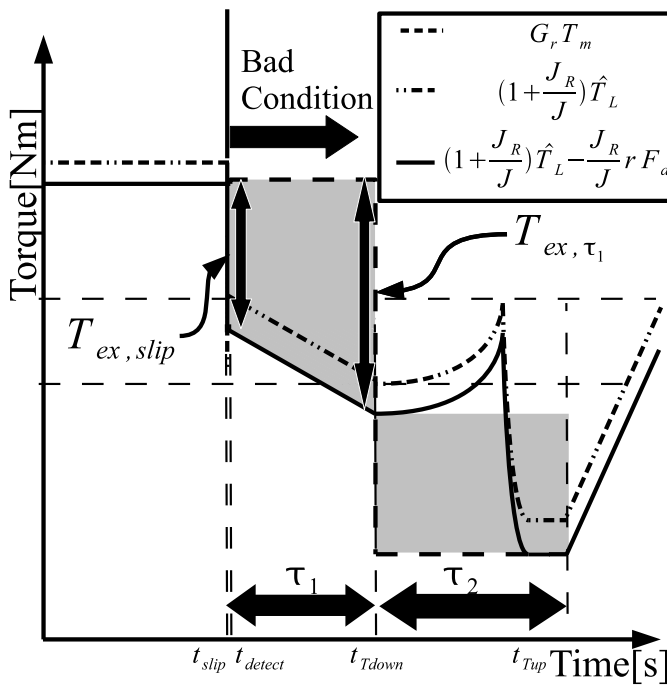


図 3.11: 超過角運動量の簡易計算, Simple calculation of excessive angular momentum, Case A

図 3.12: 超過角運動量の簡易計算, Simple calculation of excessive angular momentum, Case B

3.4.4 基本パターン

確実に再粘着させるためのモータトルク指令値 T_m^* は空転する前の入力トルク T_m , 空転検知した時の接線カトルク $T_{L-detect}$, モータトルクを引き下げた時の接線カトルク $T_{L-detect}$ を使用して, 式 (3.22) のようにあらわされる. トルクを上昇させるときは時定数 G_{up} で引き上げた. これはステップ状に指定トルクまで引き上げると再空転するためである.

$$T_m^* = \begin{cases} T_m & (t_{slip} < t < t_{Tdown}) \\ T_{m-down} & (t_{Tdown} \leq t \leq t_{Tup}) \\ T_{m-down} + G_{up}(T_m - T_{m-down})(t - t_{Tup}) & (t_{Tup} < t) \end{cases} \quad (3.22)$$

$t_{slip} < t < t_{detect}$ において, 引き下げた後のモータトルク T_{m-down} は式 (3.23) に示すように 3.4.2 , 3.4.3 で述べた超過角運動量を補償するように定める.

$$L_{ex,\tau_1} = \tau_2(T_{L-detect} - T_{m-down}) \quad (3.23)$$

空転発生から再粘着し所定のトルクまでどのようにトルクが変化するかを表 3.2 にまとめる.

3.4.5 機械系保護のためのトルク指令制限

電気鉄道車両の駆動系はギアを用いているため, その著しい磨耗を防止するためトルク指令が短い時間スケールにおけるゼロクロスを防止する必要がある. 従って, 最低出力トルク T_{min} を用いて図 3.13 に示すようにモータトルク指令値を T_{min} 以上となるように制限する. ただし, このときは超過角運動量を保存するようにするため, トルク引き上げまでの時間が長くなる.

表 3.2: 基本トルクパターン, Basic torque pattern

Time	Explanation
t_{slip}	Slip generation
↓	Infinitesimal time $T_{m^*} = T_m$
t_{detect}	Slip detection
↓	$\tau_1, T_{m^*} = T_m$
t_{Tdown}	Torque down
↓	$\tau_2, T_{m^*} = T_{m-down}$
t_{Tup}	Torque up
↓	Time constant G_{up}

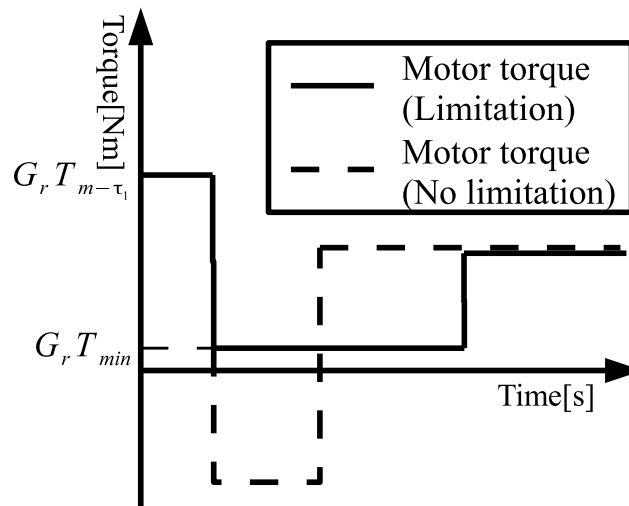


図 3.13: 最低トルク出力, Minimum torque output

第4章 粘着性能の評価

空転再粘着制御の評価指標については現車試験では一般的に加速度が用いられる。しかし、現車試験では接線力係数などの条件が一定ではなく、そのとき最大出しうる加速度は場合により異なる。一方、数値解析においては一般的に現車試験においては測定することができないすべり速度を状態量として把握することができる。そこで、本論文での数値解析では以下の2つの指標を持って評価する。

1. 粘着利用率

数値解析によって最大出しうる接線力係数に対してどれぐらいの割合の接線力係数を利用できたかを示す指標で、現車試験における加速度と同義である。しかし、加速度は異なった路面条件下での比較はできないのに対して、粘着利用率は比較可能である。

2. 動輪集損失摩擦力

単位長あたり車輪が線路に与えた力で、現車試験においては測定することが難しい。そのため、現車試験では粘着利用率と同義の平均加速度を用いる。

電気鉄道車両において、接線力が大きいということは車輪とレール間でのエネルギー伝達がうまくいき、粘着性能が高いということである。しかし、空転をした状態で大きい接線力を持っていても、レールや車輪の磨耗と言う観点から好ましくない。本論文では、粘着力の有効利用とレール、車輪の傷みを評価する2つの評価を使用し、粘着利用率が高く、動輪周損失摩擦力が小さいものが「良い空転再粘着制御」として評価する。空転が収束せず、滑り続けてしまうものについては粘着利用率が高くても、「悪い空転再粘着制御」として評価する。また、これらの評価指標については共に積分区間が重要となるが、積分区間については積分開始時刻を $t_{start} = 6.00 \text{ s}$ 、積分終了時刻 $t_{finish} = 15.00 \text{ s}$ とした。

4軸2台車モデルにおいてはそれぞれの軸の粘着利用率、動輪集損失摩擦力を計算し、平均した値を評価量として使用する。また、4軸2台車モデルにおいては $t_{start} = 6.00 \text{ s}$ のときに車体の先頭部分が路面状況が悪い区間に突入する。そのため、 $t_{start} = 6.00 \text{ s}$ よりある時間の間は後輪は路面条件が良い。

4.1 粘着利用率

参考文献 [17] より最大接線力係数 μ_{max} の利用率を見るために平均値を評価に用いる。粘着利用率の算出においては式 (4.1) で定義する。各々の時間の粘着利用率の瞬時値 $\mu_{ur}(t)$ を用いる。

$$\mu_{ur}(t) = \frac{\mu(t)}{\mu_{max}} \times 100 \quad (4.1)$$

次に、式 (4.2) のように、ある時間内の粘着利用率の瞬時値の平均値 $\bar{\mu}_{ur}$ を求める。

$$\bar{\mu}_{ur} = \frac{1}{t_{finish} - t_{start}} \int_{t_{start}}^{t_{finish}} \mu_{ur}(t) dt \quad (4.2)$$

ただし、式 (4.2) の μ_{max} を 0.09 とした。粘着利用率 $\bar{\mu}_{ur}$ の単位は%である。

表 4.1: 乗り心地評価, Evaluation of ride quality

乗り心地係数	乗り心地評価
1 以下	非常に良い
1 ~ 1.5	良い
1.5 ~ 2	普通
2 ~ 3	悪い
3 以上	非常に悪い

4.2 動輪周損失摩擦力

線路と車輪に働く接線力 T_L が単位時間にする仕事 W_{slip} は式 (4.3) で表される .

$$W_{slip} = \mu(v_s)Wg \cdot v_s \quad (4.3)$$

W_{slip} を時間積分し, 移動距離で除した力は発熱を引き起こし, 線路の磨耗につながっている . そのため, 参考文献 [9] より動輪周損失摩擦力 F_{slip} を評価に用いて, これを動輪周損失摩擦力 F_{slip} とし, 式 (4.4) で定義する .

$$F_{slip} = \frac{\int_{t_{start}}^{t_{finish}} \mu(v_s)Wg \cdot v_s dt}{\int_{t_{start}}^{t_{finish}} v_b dt} \quad (4.4)$$

ただし, $t_{start} = 6.00 \text{ s}$, $t_{finish} = 15.00 \text{ s}$ とした . 動輪周損失摩擦力 F_{slip} の単位は [N] である .

4.3 平均乗り心地係数

車両の振動は, 旅客が「揺れが大きい, 小さい」と感じる際の振動の大きさを意味するものであり, 走行中の揺れの程度は, 車体で測定された前後・左右・上下方向の振動加速度で示される . 本論文では 4 に示したように「粘着利用率」および「動輪周損失摩擦力」を評価指標として主に用いるが, 参考のために「平均乗り心地係数」も評価指標として用いる .

振動と乗り心地の関係には 1963 年に国鉄が発表した乗り心地基準 [19] というものがあり, これを図 4.1 および表 4.1 に示す . 図 4.1 に示すグラフの下の線を, 各振動における乗り心地評価基準として乗り心地係数 1 とする . 振動が 1.5 倍, 2 倍, 3 倍となるに従って乗り心地係数も 1.5, 2, 3 とあわす .

本論文では, 乗り心地基準 [19] を基に車体の前後方向加速度の評価を行う . そのとき, 車体の前後方向加速度が漸次空転状態 (空転 再粘着のサイクルを繰り返している状態) のときの加速度情報を抽出し, FFT (Fast Fourier Transform, 高速フーリエ変換) を用いて周波数領域に変換する . そして, 図 4.1 の評価関数にかけて時間平均をし, それらの値を各空転再粘着制御手法ごとに比較する .

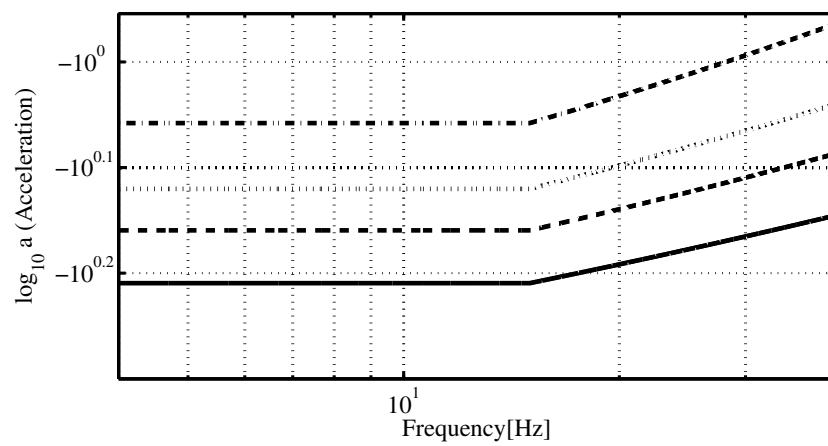


図 4.1: 国鉄の乗り心地基準 (前後方向加速度), Evaluation of ride quality of Japan railway (Front-back direction acceleration)

第5章 数値解析による一車輪一車体モデルの提案空 転再粘着制御の粘着性能の評価

5.1 数値解析条件

今回用いた数値解析条件は以下のとおりである．まず，時刻 $t = 0.00$ s でトルク $T_m = 1.00 \times 10^3$ N·m を入力する．トルクを入力するときの時定数 G を 1.00 s とした．

路面状況については $t = 6.00$ s で図 5.1 の曲線 (a) から曲線 (b) に変化させた． $t = 15.00$ s で図 6.2 の曲線 (b) から曲線 (a) に変化させた．曲線 (a) は晴天時など路面状況が良い状態を，曲線 (b) は雨天時や降雪時など路面状況が悪い状態をあらわす．計算環境は MATLAB/Simulink を利用した．最低出力トルク $T_{min} = 10.0$ N·m とした．数値解析終了時間を $t = 24.00$ s とした．また，勾配は空転が起きやすいよう，登り 30.0% ¹ とした．

5.2 モータトルクおよび接線力トルク軌跡

空転検知からトルク引き下げまでにかかる時間を $\tau_1 = 100$ ms ，トルク引き下げ定数 $k = 0.250$ に固定した．また外乱トルク分を超えたときに空転検知すると仮定したので，空転検知にしようする超過トルク閾値 ($T_{threshold} = 0$) を 0 とした．

接線力トルクおよびモータトルク軌跡を図 5.2，すべり速度を図 5.3， $t=8.00-10.00$ s で拡大した接線力トルクおよびモータトルク軌跡を図 5.4 に示す．図 5.2 において接線力トルクは $(1 + \frac{J_R}{J})\hat{T}_L$ ，モータトルクは $G_r T_m$ を示している．定常状態（粘着状態）において接線力トルク $(1 + \frac{J_R}{J})\hat{T}_L$ およびモータトルク ($G_r T_m$) の差分が外乱トルクとなる．

図 5.4 において，モータトルクと接線力トルクの差分が超過トルクとなっている．また，空転情報は同じ図で表現するために 1000 倍して， 0 と 1000 で表現している．空転情報がちょうどトルクを引き下げたところで 0 から 1000 となっているのは空転を検知して， τ_1 s 間情報を獲得する時間をみているためである．空転検知からトルク引き下げまでの時間 τ_1 は 100 ms ，空転検知からトルク引き下げまでの時間 τ_2 は 250 ms であることが確認できる．空転再粘着制御をしている間には列車抵抗がほとんど変化せず，提案空転再粘着制御の有用性が確認される．提案空転再粘着制御の特長を以下にまとめる．

1. わざと決まった時間，空転をさせることで接線力トルクなどの情報を得ることで，誤ったトルク引き下げ，引き上げをすることなく，正確に再粘着できる．
2. 超過角運動量の補償によりいつ再粘着するかわかる．
3. 超過トルク T_{ex} の計算の簡易化により超過角運動量 L_{ex} を求められ，逐次計算をする必要が無い．

¹1000 m 進んで 30 m 登る勾配のことを示す．

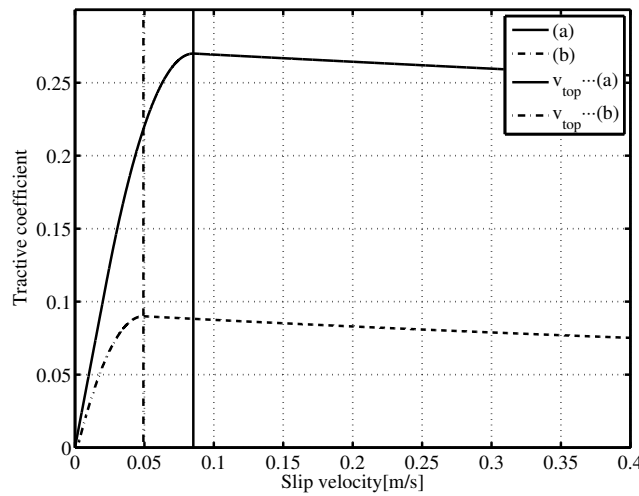


図 5.1: 接線力係数 - すべり速度の関係特性, Characteristic of tractive coefficient and slip velocity

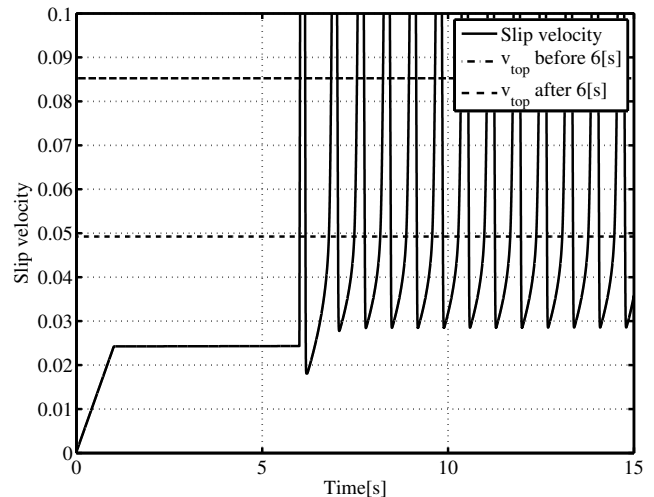
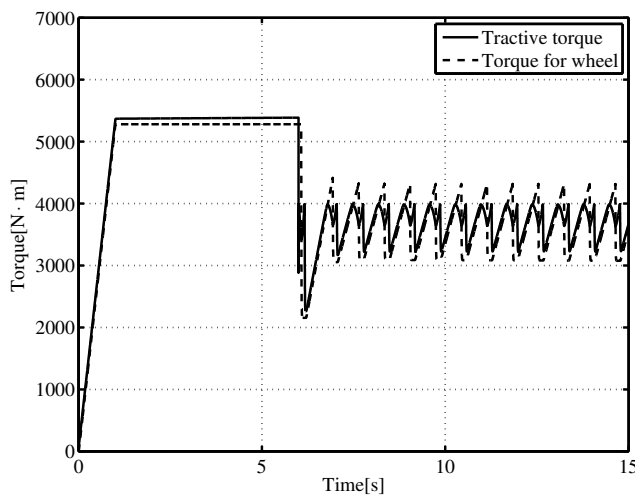


図 5.2: モータトルクおよび接線力トルク (提案空転再粘着制御), Motor torque and adhesive torque (Proposed re-adhesion control)

図 5.3: すべり速度 (提案空転再粘着制御), Slip velocity (Proposed re-adhesion control)

5.3 提案再粘着制御におけるパラメータ設計

本節では提案空転再粘着制御において重要な 3 つのパラメータについて感度解析を行う。この 3 つのパラメータとは「空転検知からトルクを引き下げるまでの時間 τ_1 」、「超過トルクの何倍引き下げるかという定数 k 」、「トルク引き上げ時定数 G_{up} 」である。

まず、「空転検知からトルクを引き下げるまでの時間 τ_1 」について検討を行う。 τ_1 はどれだけの超過角運動量を溜め込むかを定めるものである。大きくすると溜め込む超過角運動量は大きくなるが、その分空転発生から空転検知までのおよそ 40 ms の超過角運動量は無視することができる。一方、小さくすると溜め込む角運動量は小さくなり空転収束までの時間は短くなるものの、空転発生から空転検知までの超過角運動量は無視しづらくなる。表 5.1 に k を 0.200, G_{up} を 1.00 s に固定したとき、 τ_1 を 50.0, 100, 200, 400 ms と変化させたときの粘着利用率

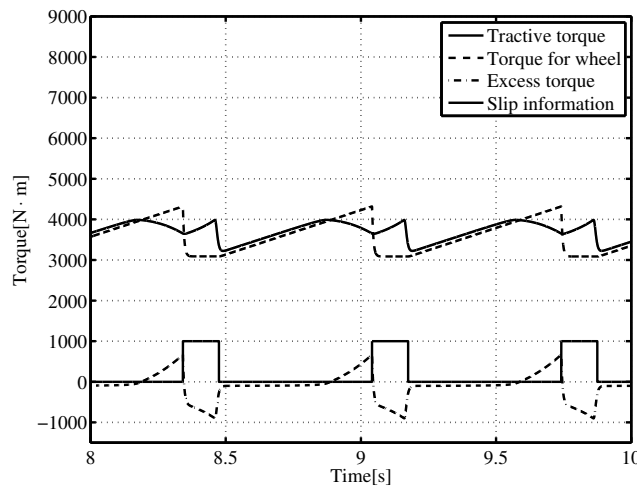


図 5.4: モータトルクおよび接線力トルク (提案空転再粘着制御, $t=8.00-10.00$ s) , Motor torque and adhesive torque (Proposed re-adhesion control, $t=8.00-10.00$ s)

表 5.1: 粘着利用率および動輪周損失摩擦力を見たパラメータ設計, Parameter analysis of Normalized average tractive coefficient ($\bar{\mu}_{ur}$) and Loss friction force around driving wheel (F_{slip})

τ_1 [ms]	Normalized average tractive coefficient ($\bar{\mu}_{ur}$)	Loss friction force around driving wheel (F_{slip})
50.0	94.8 (100 %)	106 (100 %)
100	91.7 (96.7 %)	117 (110 %)
200	80.0 (84.4 %)	172 (358 %)
400	62.4 (65.8 %)	548 (468 %)

および動輪周損失摩擦力を示す。よって、以下では空転発生から空転検知まで時間 50 ms を考慮して、 $\tau_1 = 100$ ms と固定して解析を行う。

次に残る「超過トルクの何倍引き下げるかという定数 k 」, 「トルク引き上げ時定数 G_{up} 」という 2 つのパラメータを変化させ、粘着利用率、動輪周損失摩擦力を見て決定する。図 5.5, 図 5.6 にパラメータを変化させたときの粘着利用率、動輪周損失摩擦力を示す。粘着利用率については時定数 1.00 s から 2.00 s 付近において極大値を持つことがわかる。また、動輪周損失摩擦力についても時定数 1.00 s から 2.00 s 付近においても極小値を持つことがわかる。ただし、これら 2 つの評価指標は積分区間によって大きく変わることから一概に結論付けることはできない。

以上の考察から、今回は「空転検知からトルク引き下げまでの時間 $\tau_1 = 100$ ms」, 「トルク引き上げ時定数 $G_{up} = 1.00$ s」, 「超過トルクの何倍引き下げるかという定数 $k = 0.600$ 」と決定した。

5.4 様々な路面条件下での超過角運動量に着目した空転再粘着制御

一般には、接線力係数 - すべり速度の関係特性は一様ではなく、多様なパターンが存在する [2]。本章では異なった路面状況を使用して数値解析を行い、そのときの挙動の変化を見る。路面状況については図 5.9 に示す 4 つの接

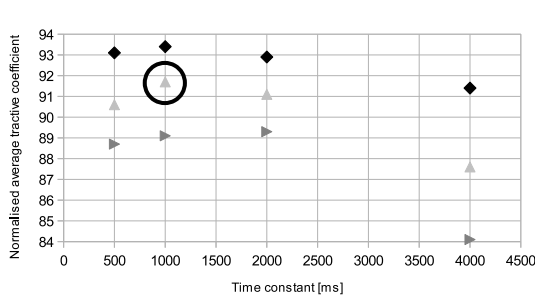


図 5.5: 粘着利用率 $\bar{\mu}_{ur}$, Tractive coefficient $\bar{\mu}_{ur}$

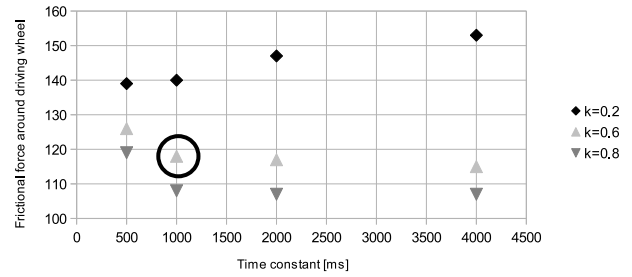


図 5.6: 動輪周損失摩擦力 F_{slip} , Loss friction force around driving wheel F_{slip}

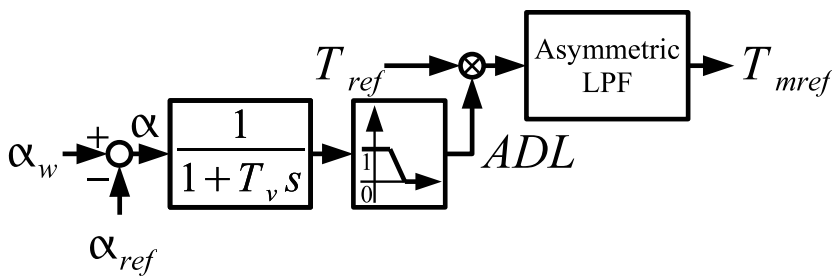


図 5.7: 空転再粘着制御のブロック線図, Block diagram of re-adhesion control, Method A

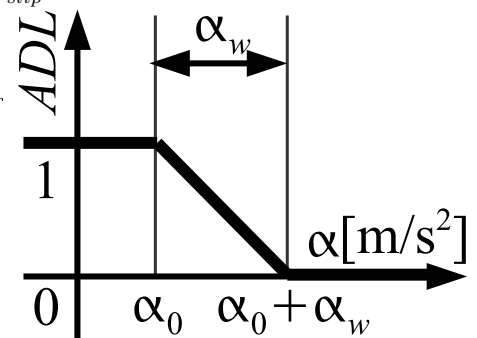


図 5.8: 非線形絞込みテーブル, Non-linear table, Method A

表 5.2: 路面状況の変化, Condition change

Case A	(a) → (b)
Case B	(c) → (d)

線力係数 - すべり速度の関係曲線を使用する。ケーススタディにおいて図 5.9 に示す接線力係数 - すべり速度の関係曲線でどのように変化させたかを表 5.2 に示す。これらの路面状況の変化は「良い粘着状態」から「悪い粘着状態」になるようにした。ここで、Case A の 2 つの曲線 (a), (b) について先行研究 [18] において使用していた接線力係数 - すべり速度の関係曲線である。先行研究 (Case A) においては接線力係数 - すべり速度の関係曲線の頂点がすべり速度が小さい位置で設定され、すべり速度が大きい領域では接線力係数が低下しないものを仮定していた。一方、今回新しく設定した接線力係数 - すべり速度の関係曲線 (c), (d) は頂点をすべり速度の大きい領域に設定し、頂点の形状を急峻にした。数値解析のシナリオを表 5.3 に示す。

数値解析に基づく粘着性能評価

図 5.10, 5.11 に Case A における数値解析結果を、図 5.12, 5.13 に Case B における数値解析結果を示す。共に高粘着利用率を狙い、空転 再粘着を繰り返していることが確認できる。また、図 5.13 のすべり速度を見ると、接線力係数 - すべり速度の頂点を狙い、モータトルクを制御できている。すべり速度も発散していない。

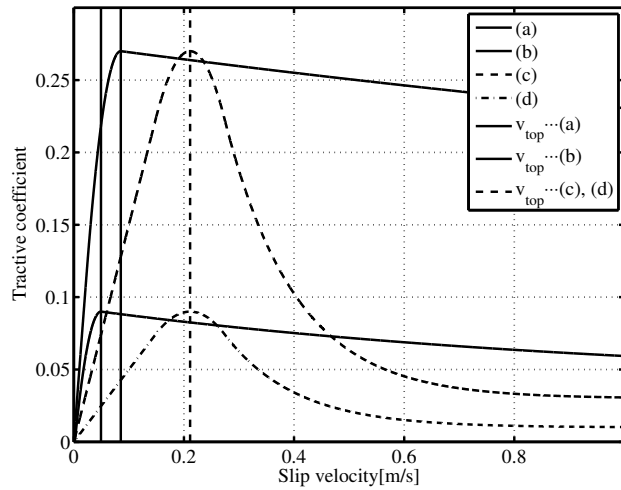


図 5.9: 数値解析における接線力係数 - すべり速度の関係特性, Characteristic of tractive coefficient and slip velocity

表 5.3: ケーススタディのシナリオ, Case study scenario

Time [s]	Simulation
0	Acceleration starts. $T_m = 1000[\text{N} \cdot \text{m}]$ Rail condition (a), (c)
6	Rail condition gets worse. (a) (b), (c) (d)
15	Rail condition gets better. (b) (a), (d) (c)
24	Simulation stops.
	(a)&(c) ...Good condition, (b)&(d) ...Bad condition

表 5.4: 粘着利用率および動輪周損失摩擦力, Normalized average tractive coefficient and loss friction force around driving wheel

Method	Normalized average tractive coefficient $\bar{\mu}_{ur}$	Loss friction force around driving wheel F_{slip}
Case A	92.7	155
Case B	93.4	378

これを表 5.4 に示す．粘着利用率は接線力係数 - すべり速度の関係特性を変化させた Case B は 93.4 % という高い値を示し，路面状況の変化に追従していることが確認できる．動輪周損失摩擦力は Case B の方が約 2.44 倍高くなった．これは図 5.9 を見てわかるように Case B の接線力係数 - すべり速度の関係特性 (c), (d) の方がすべり速度が高い領域に頂点があり安定状態になっているためである．

以上より，超過角運動量に着目した空転再粘着制御は先行研究 [18] とは異なった路面状況でも変化に追従し，高粘着利用率を保つことが確認できており，「良い再粘着制御」ができていることがわかる．

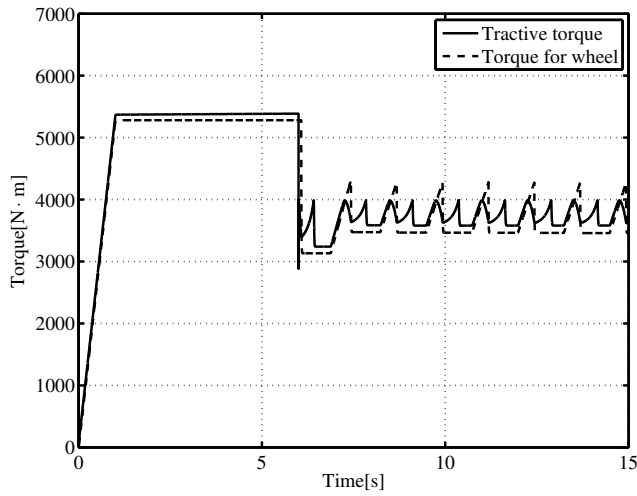


図 5.10: モータトルクおよび接線力トルク (Case A), Motor torque and adhesive torque (Case A)

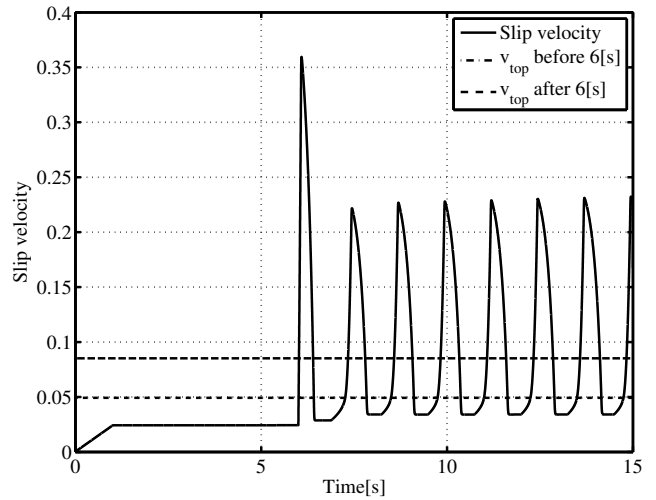


図 5.11: すべり速度 (Case A), Slip velocity (Case A)

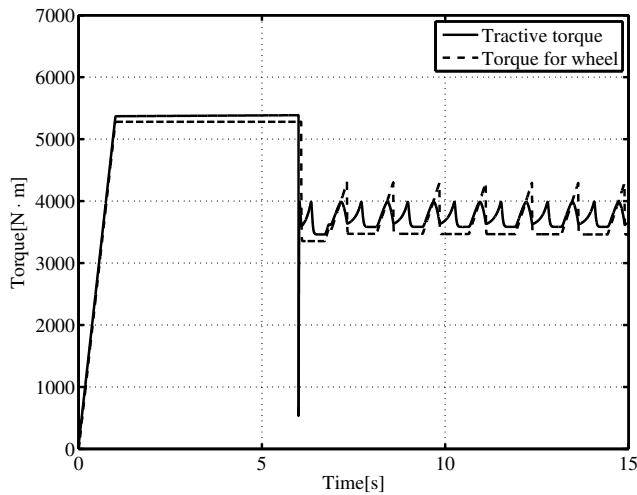


図 5.12: モータトルクおよび接線力トルク (Case B), Motor torque and adhesive torque (Case B)

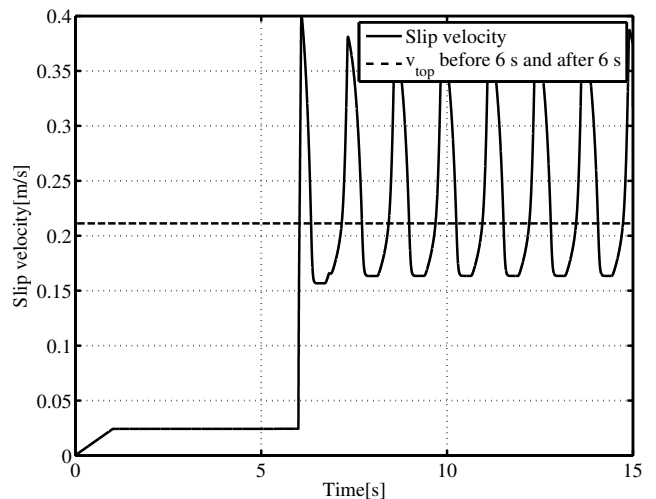


図 5.13: すべり速度 (Case B), Slip velocity (Case B)

5.5 提案再粘着制御と従来再粘着制御の比較

本節では表 5.5 に示す 3 つの空転再粘着制御を比較, 検討し, 提案空転再粘着制御の優位性を示す. 比較対象の従来の空転再粘着制御を示す. 一方はすべり速度情報, 接線力トルク推定情報不使用の再粘着制御 [4], 他方はすべり速度情報, 接線力トルク推定情報を使用する再粘着制御 [9] と提案空転再粘着制御の比較を行う. 以下では区別のためにすべり速度情報, 接線力トルク推定情報不使用の再粘着制御 [4] を Method A , すべり速度情報, 接線力トルク推定情報使用の再粘着制御 [9] を Method B とする.

表 5.5: 比較する 3 つの空転再粘着制御法, Comparison of three re-adhesion control

Estimator	Proposed method	Method A	Method B
Slip velocity v_s	×	×	
Adhesive torque T_L		×	

5.5.1 すべり速度情報不使用, 接線力トルク推定情報不使用の従来再粘着制御の概要

すべり速度情報, 接線力トルク推定情報を共に使用しない再粘着制御の構成ブロック線図を図 5.7 に示す [4]. ただし, α_w は軸角加速度, α_{ref} は指令加速度, T_{ref} はトルク指令値, T_{m-ref} はモータトルク指令, T_v は直列遅れ要素の時定数である. ファジィ近似演算部の構成を図 5.8 および式 (5.1) に示す. 式 (5.1) は入力である動輪周加速度偏差 α についての関数である. α_0 は粘着度低減幅開始加速度偏差, $\alpha_w (> 0)$ は粘着度低減幅である. ADL は粘着度であり, どれくらいのトルクを出すべきかと言う指標になっている.

$$ADL = \begin{cases} 1 & (\alpha \leq \alpha_0) \\ 1 - \frac{\alpha - \alpha_0}{\alpha_w} & (\alpha_0 < \alpha < \alpha_0 + \alpha_w) \\ 0 & (\alpha_0 + \alpha_w \leq \alpha) \end{cases} \quad (5.1)$$

α が α_0 より小さいとき, 車輪とレールが粘着している状態を仮定し, $ADL = 1$, つまりモータトルク T_{mref} はトルク指令値 T_{ref} と同じとする. α が $\alpha_0 + \alpha_w$ より大きいとき, 車輪とレールが粘着していない状態を仮定し, $ADL = 0$, つまりモータトルク T_{mref} は 0 とする. α が α_0 と $\alpha_0 + \alpha_w$ の間にある場合は線形補完により出力 ADL を設定している.

5.5.2 すべり速度情報使用, 接線力トルク推定情報使用の従来再粘着制御の概要

すべり速度情報, 接線力トルク推定情報を共に使用する再粘着制御の構成ブロック線図を図 5.14 に示す [9]. 接線力係数 - すべり速度の特性の右側 (接線力係数 - すべり速度の関係特性の傾き $Q(k) < 0$) から頂点を目指す場合, 左側 ($Q(k) > 0$) と同じ係数 α を用いていた場合, 右側から左側に戻ってくるのが遅れ, 右側に留まった時間が長くなり, 線路の磨耗が引き起こされる. そのため, 接線力係数 - すべり速度の特性の左側から頂点を目指す場合, 式 (5.2) のように接線力係数 - すべり速度の特性曲線の傾き $Q(k)$ の正負によって, α を非対称にしている.

$$v_{s-ref}(k+1) = v_{s-ref}(k) + \alpha Q(k) \quad (5.2)$$

これによって, すべり速度が接線力係数 - すべり速度の関係曲線において頂点におけるすべり速度 v_{top} より右側, つまり $v_s > v_{top}$ の巨視すべり領域にあるとき, すばやく $v_s < v_{top}$ の微視すべり領域に戻すようにした. 逆に頂点におけるすべり速度 v_{top} より左側, つまり $v_s < v_{top}$ の微視すべり領域にあるとき, このとき良い粘着条件にあるので, これを維持しつつ, $v_s > v_{top}$ の巨視すべり領域にあるときと比較してすべり速度 v_s をゆっくりと上昇させるようにした. これを式 (5.3) に示す.

$$\alpha = \begin{cases} \alpha_c & (Q(k) \geq 0) \\ k_c \alpha_c & (Q(k) < 0) \end{cases} \quad (5.3)$$

すべり速度情報, 接線力トルク推定情報使用の再粘着制御のすべり速度指令器の概念を図 5.15 に示す.

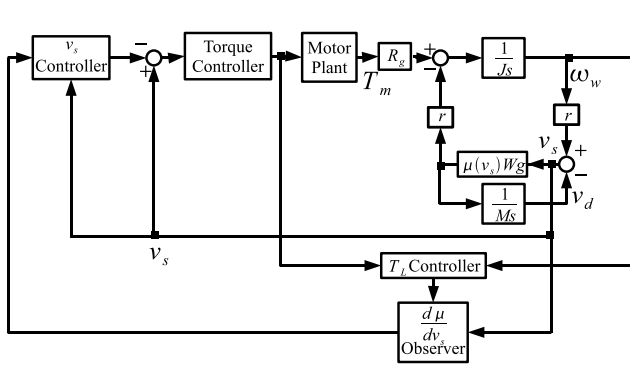


図 5.14: 空転再粘着制御法のブロック線図 (Method B), Block diagram of re-adhesion control (Method B)

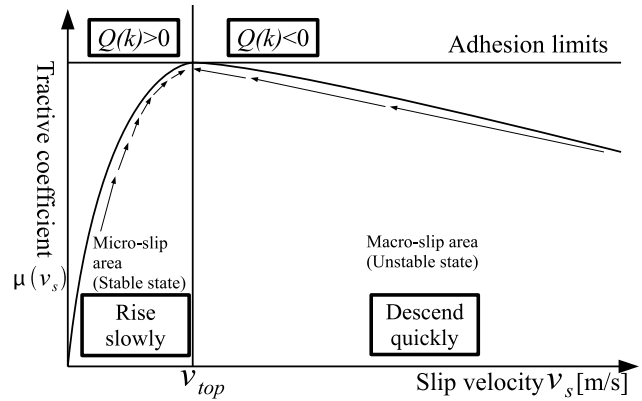


図 5.15: 空転再粘着制御法の概念, Image of re-adhesion control, Method B

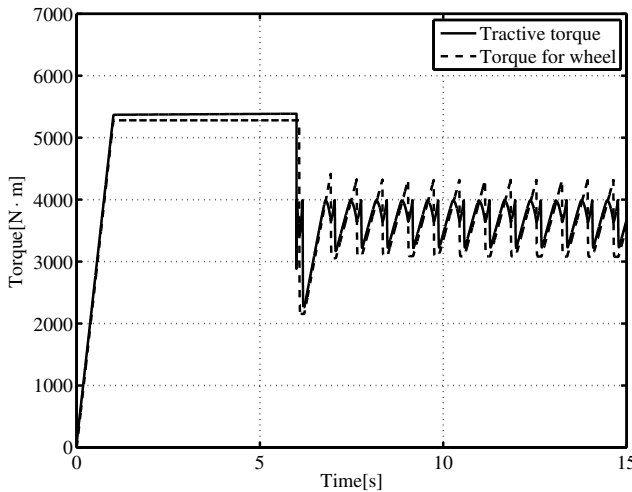


図 5.16: モータトルクおよび接線力トルク (提案空転再粘着制御), Motor torque and adhesive torque (Proposed re-adhesion control)

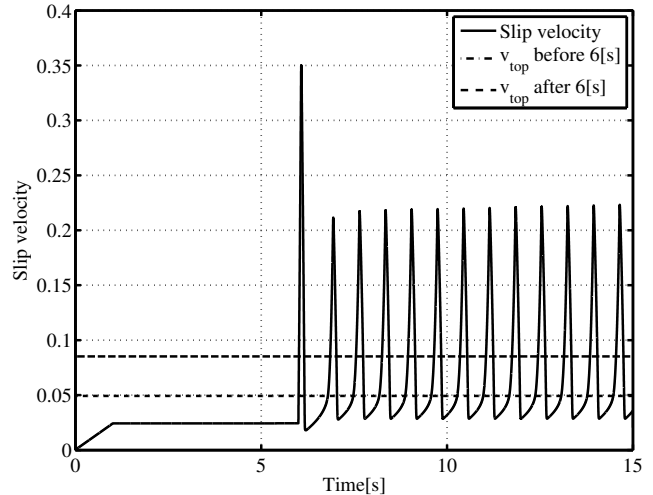


図 5.17: すべり速度 (提案空転再粘着制御), Slip velocity (Proposed re-adhesion control)

5.6 粘着利用率と動輪周損失力における比較

すべり速度情報, 接線力トルク推定情報不使用の再粘着制御 [4] (Method A), すべり速度情報, 接線力トルク推定情報使用の再粘着制御 [9] (Method B) と提案空転再粘着制御の比較を行う. 図 5.16, 5.18, 5.20 はモータトルクおよび接線力トルクである. 図 5.17, 5.19, 5.21 は各方式のすべり速度である.

これらの粘着利用率および動輪周損失摩擦力は表 5.6 に示す.

表 5.6 よりすべり速度情報, 接線力トルク推定情報使用の空転再粘着制御はすべり速度の情報を使用しているため最も粘着利用率が高くなった. しかし, 頂点に到達する時間がかかっているため, 動輪周損失摩擦力が大きくなってしまった.

一方, すべり速度情報, 接線力トルク推定情報不使用の空転再粘着制御はすべり速度, 接線力トルクの情報を使用していないため, 空転検知に遅れ, 提案空転再粘着制御と比較して動輪周損失摩擦力が大きくなった.

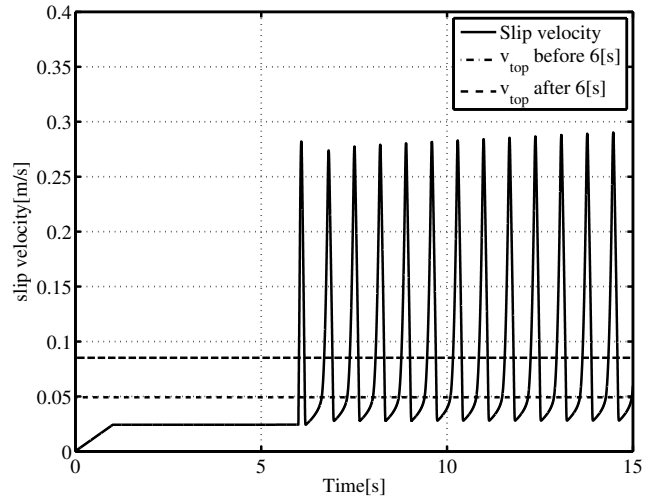
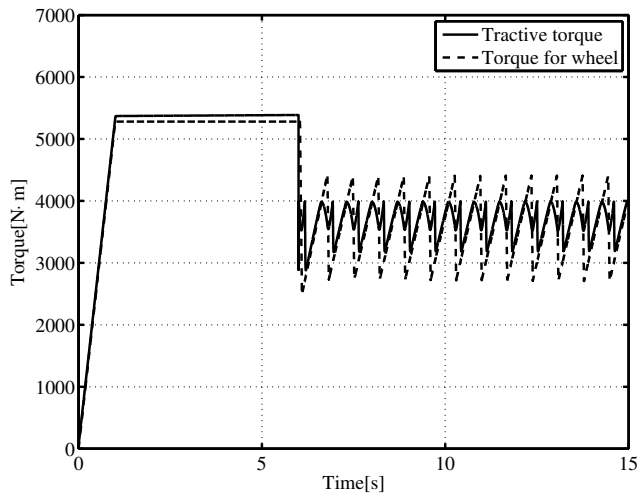


図 5.18: モータトルクおよび接線力トルク (従来空転再粘着制御法 , Method A), Motor torque and adhesive torque (Conventional re-adhesion control, Method A) 図 5.19: すべり速度 (従来空転再粘着制御法 , Method A), Slip velocity (Conventional re-adhesion control, Method A)

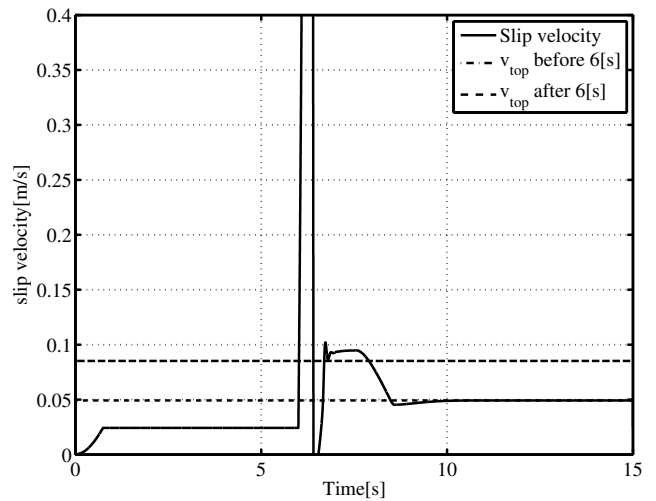
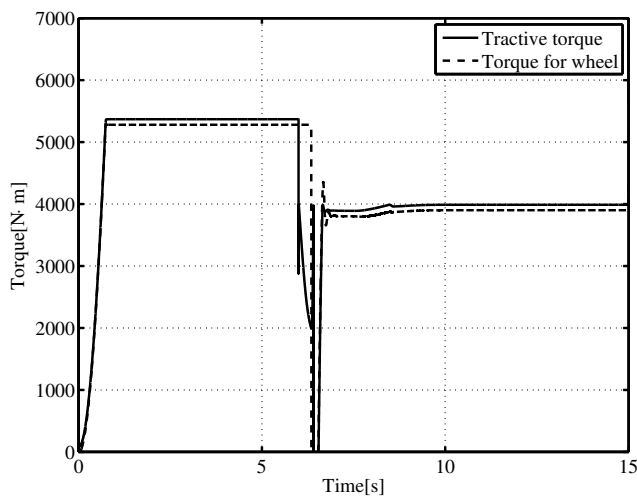


図 5.20: モータトルクおよび接線力トルク (従来空転再粘着制御法 , Method B), Motor torque and adhesive torque (Conventional re-adhesion control, Method B) 図 5.21: すべり速度 (従来空転再粘着制御法 , Method B), Slip velocity (Conventional re-adhesion control, Method B)

提案空転再粘着制御は従来の 2 つの空転再粘着制御方式と比較して, 91.7 % という高い粘着利用率を保ちつつ, 動輪周損失摩擦力を 13.4 ~ 21.3 % 低減した。これは以下の 2 つの点で改良されているためである。

1. 接線力トルクの情報を使用して空転検知までの時間を短くすることで超過角運動量を削減している。
2. トルクの引き下げ量 k を少なくし, トルク引き上げ時定数 G_{up} を大きくすることで, 空転する頻度を減少させ, 空転せずに高粘着利用率を実現する。

また, 本提案法である超過角運動量計算簡易化に基づく空転再粘着制御は以下の利点を持っている。

表 5.6: 3 つの空転再粘着制御法の比較, Comparison of three re-adhesion control

Method	Normalized average tractive coefficient $\bar{\mu}_{ur}$	Loss friction force around driving wheel F_{slip}
Proposed	91.7 (↓↓ 0.218 %)	117 (↓↓ 17.6 %)
Conventional	91.9 (100 %)	142 (100 %)
Conventional (Method B)	99.2 (↑ 7.94 %)	122.6 (↓↓ 13.4 %)

1. 超過角運動量の面積近似を用いることで、計算量が膨大になることを防いだ。
2. 空転検知してからある時間待った後、再度チェックをかけて、空転の誤検知を防ぐことができる。

5.7 本章のまとめ

本章では 1 軸換算モデルを使用し、提案空転再粘着制御の基礎的な動作確認をし、挙動を観察した。また、「すべり速度情報不使用」、「接線力トルク推定情報不使用」の再粘着制御 [4]、および「すべり速度情報使用」、「接線力トルク推定情報使用」の再粘着制御 [?] [9] と比較を行った。提案空転再粘着制御は従来の 2 つの空転再粘着制御方式と比較して、91.7 % という高い粘着利用率を保ちつつ、動輪周損失摩擦力を 13.4 ~ 21.3 % 低減した。これは以下の 2 つの点で改良されているためである。

1. 接線力トルクの情報を使用して空転検知までの時間を短くすることで超過角運動量を削減している。
2. トルクの引き下げ量 k を少なくし、トルク引き上げ時定数 G_{up} を大きくすることで、空転する頻度を減少させ、空転せずに高粘着利用率を実現する。

また、本提案法である超過角運動量計算簡易化に基づく空転再粘着制御は以下の利点を持っていることを確認した。

1. 超過角運動量の面積近似を用いることで、計算量が膨大になることを防いだ。
2. 空転検知してからある時間待った後、再度チェックをかけて、空転の誤検知を防ぐことができる。

第6章 複数並列誘導電動機使用の提案空転再粘着制御の粘着性能の評価

本章では前章で述べた1軸1車体モデルの4軸2台車モデルへの拡張について述べる。これは、通常の鉄道車両は複数電動機並列駆動をしており、多くの鉄道では一つのインバータで複数の電動機を駆動させている。空転再粘着動作を考えるにあたって考慮すべき点や難しい点なども含めここでは多様な数値解析を行い、提案空転再粘着制御法の拡張および評価を行う。

6.1 複数並列誘導電動機使用の電気鉄道車両の駆動方法

電気鉄道において、走行線区、編成の使用条件など、性能の面から電動機を載せている電動車（M車）と電動機を載せていない付随車（T車）の比率を検討する。実務上、制御装置の故障時においても自力走行が可能のように冗長性の面からもMT比を検討する必要がある。通常の電気鉄道車両は複数のユニットから構成されることが多いが、閑散線区など短編成の1M1T¹などの単ユニットで構成される編成では1両の電動車（M車）の中で冗長性を図る必要がある。

一般的な電気鉄道車両においては図6.1に示す3つの駆動方法が使用されている。

6.1.1 1インバータ1モータ駆動制御（1C1M、個別制御）

図6.1の(a)は1台の制御装置が1台の主電動機を制御するシステムで同一車両内で4群構成され、個別制御や1C1Mと呼ばれている。本論文の研究対象外であるが、同期電動機使用の場合はその電動機としての特性上、必然的に個別制御となる。この構成の場合、制御装置に不具合が発生した際に本来の性能の3/4となる。一方、空転再粘着制御と言う観点から見ると、それぞれの動輪の路面状況に適応した空転再粘着制御ができるため、最も粘着利用率が高く、性能としては一番良い。ただし、個別制御（1C1M）の場合、制御装置の台数が増え、コスト高となってしまう。

6.1.2 1インバータ2モータ駆動制御（1C2M）

図6.1の(b)は1台の制御装置が2台の主電動機を制御するシステムで同一車両内で2群構成され、1C2Mと呼ばれている。この構成の場合、制御装置に不具合が発生した際に本来の性能の1/2となる。一方、空転再粘着制御と言う観点から見ると、似かよった近接する2車輪を同一制御装置で制御することができるため、使用されているケースも多い。

¹閑散線区では1M（モータ車）の一両編成で走行しているケースもある。

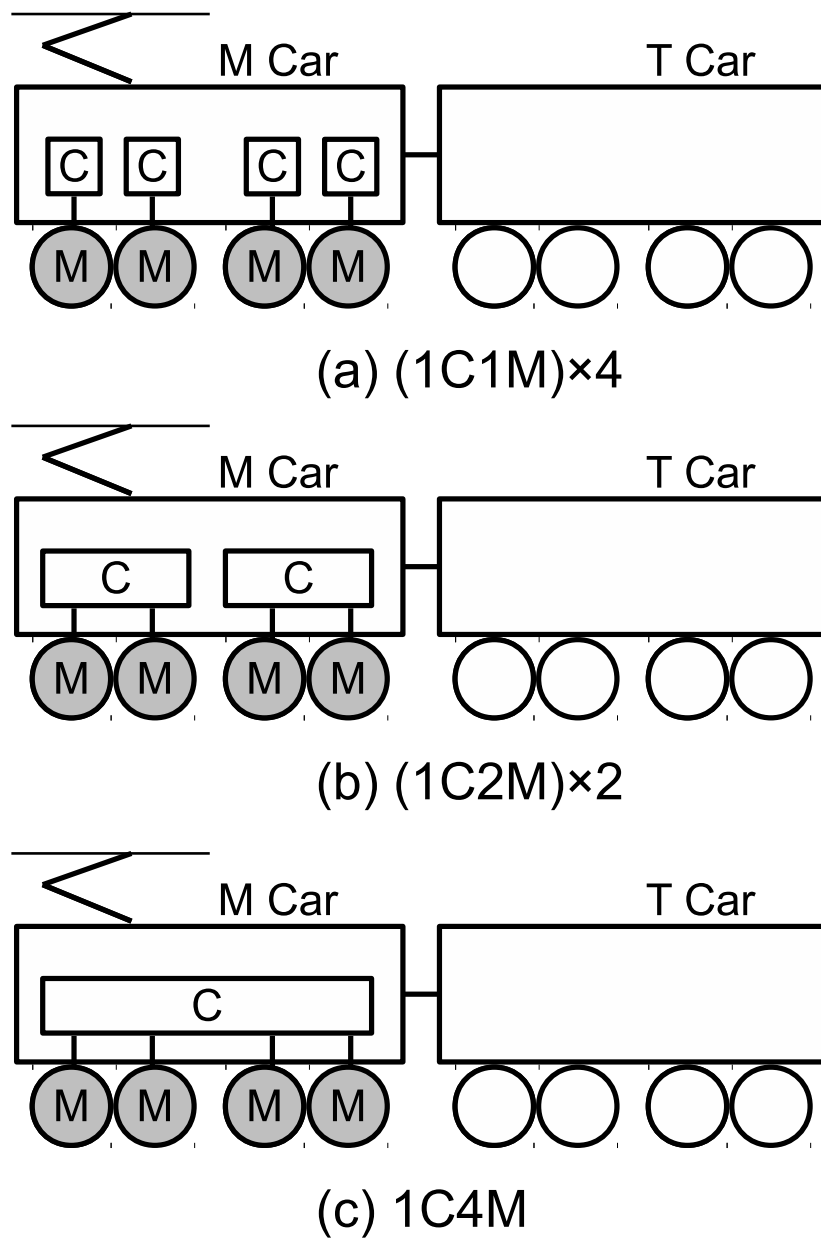


図 6.1: 各駆動方式, Each drive system

6.1.3 1 インバータ 4 モータ駆動制御 (1C4M, 一括制御)

図 6.1 の (c) は 1 台の制御装置が 4 台の主電動機を制御するシステムで一括制御や 1C4M と呼ばれている。この構成の場合、M 車が 1 両しかないとき、制御装置に不具合が発生した際に自力走行が困難となる。一方、空転再粘着制御と言う観点から見ると、1 つの制御装置で 4 輪の空転再粘着制御を行う必要があるため、図 6.1 の (a) や (b) と比較して、粘着利用率が低くなる傾向がある。

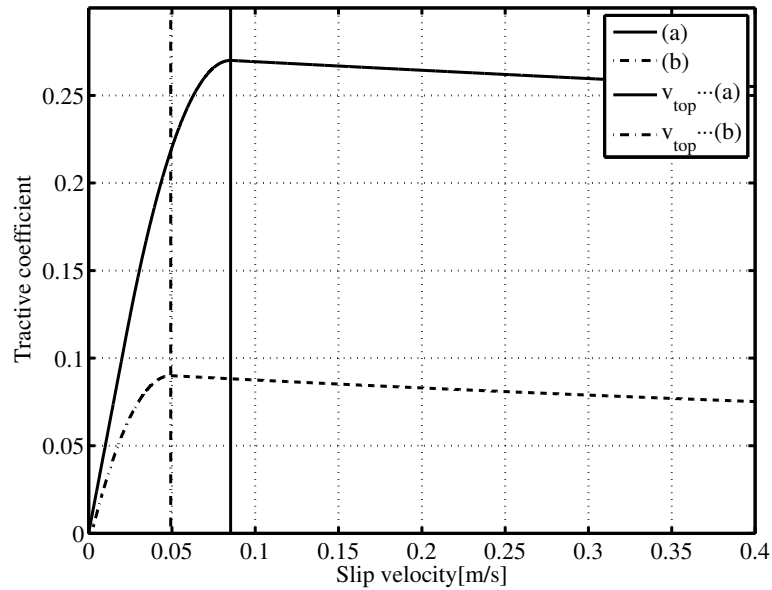


図 6.2: 使用した接線力係数 - すべり速度の関係特性, Relation between tractive coefficient and slip velocity

6.2 1 インバータ 1 モータ駆動制御 (1C1M, 個別制御) における提案空転再粘着制御

数値解析条件

今回用いた数値解析条件は以下のとおりである．まず，時刻 $t = 0.00$ s でトルク $T_m = 1.00 \times 10^3$ N·m を入力する．トルクを入力するときの時定数 G を 1.00 s とした．空転検知後 τ_1 [s] 待ってトルク引き下げを行うが，今回の数値解析では $\tau_1 = 50$ ms と固定して解析を行った．

路面状況については $t = 6.00$ s で図 6.2 の曲線 (a) から曲線 (b) に変化させた． $t = 15.00$ s で図 6.2 の曲線 (b) から曲線 (a) に変化させ，最初の粘着状況が良い状況に戻した．曲線 (a) は晴天時など路面状況が良い状態を，曲線 (b) は雨天時や降雪時など路面状況が悪い状態を表す．計算環境は MATLAB/Simulink を利用した．最低出力トルク $T_{min} = 10.0$ N·m，数値解析終了時間を $t = 24.00$ s とした．また，勾配は空転が起きやすいよう，登り 30.0 % (1000 m 進んで 30 m 登る勾配) とした．図 6.3 に示すように先頭軸から順次劣悪な路面に突入させた．先頭軸より順番に良い路面状況 ($\mu_{MAX} = 0.27$) から悪い状況に突入する．

6.2.1 1 インバータ 1 モータ駆動制御における提案手法の拡張

重要となる仮定を以下に示す．

1. 各軸でモータトルクの指令が可能
2. 車輪の各軸角速度は常時測定可能 (外乱オブザーバによる各軸接線力トルク同時推定可能)
3. 車輪半径は常に一定
4. 先頭軸 (第 1 軸) から順番どおりに 2, 3, 4 軸と粘着条件の悪い部分に突入 (例としてはトンネルから降雨や降雪しているレール区間に突入する場合 2009 年 4 月の現車試験もこの解析条件と一致する.)

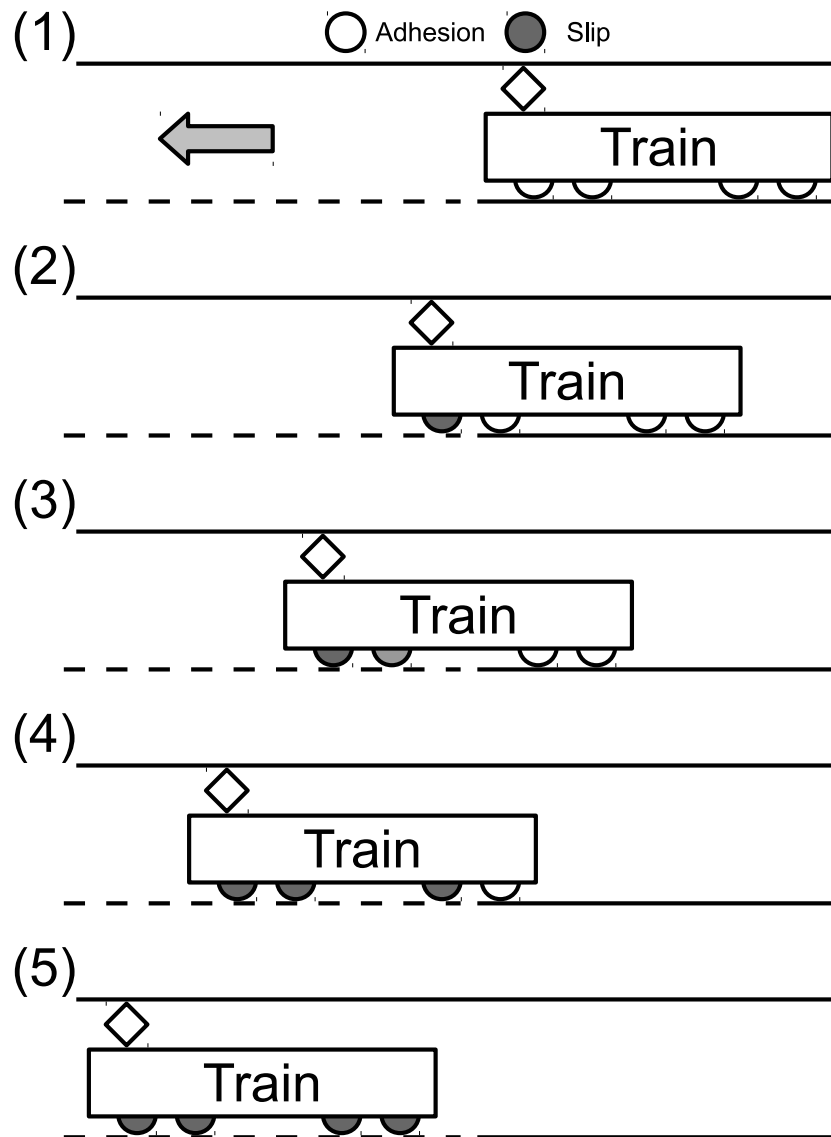


図 6.3: 空転再粘着制御時の空転の順序, Slip number of readhesion control

5. 車体の定数は新京成 8000 系のものを，台車系の定数は近鉄 1400 系 [12] のものを使用

以上の 2 つの仮定を用いて解析を行う。

トルク引き下げ定数 $k = 0.1$ としたときの図 6.2 の曲線 (a) から曲線 (b) に変化させたときのモータトルク，および接線力トルクを図 6.4 から図 6.7 に示す．これらを見てわかるように 1 軸から順番に 4 軸まで空転し再粘着動作をしていることがわかる．また，1 インバータ 1 モータ駆動制御 (1C1M，個別制御) では各軸で独立した制御ができるので，空転検知収束した後は安定した空転 再粘着のサイクルを繰り返すことがわかる．

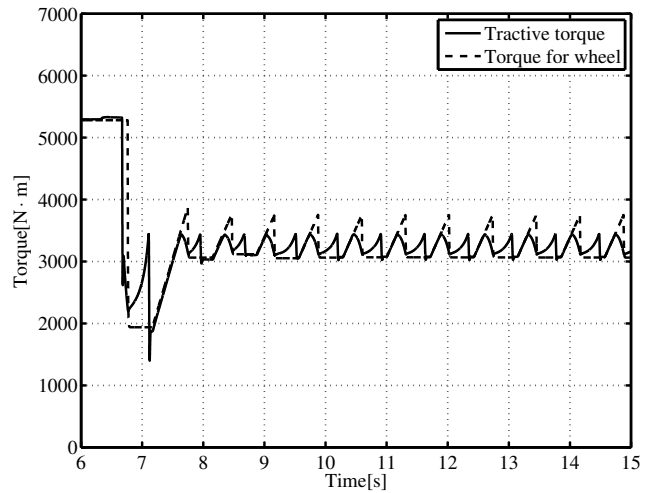
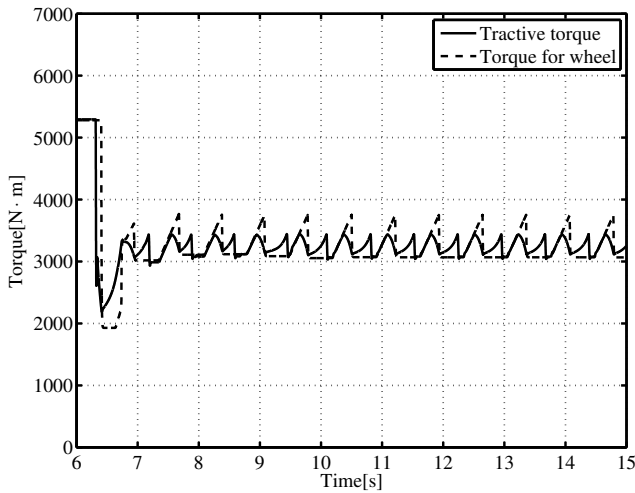


図 6.4: モータトルクおよび接線力トルク (第 1 軸), Motor torque and adhesive torque (1 axle)

図 6.5: モータトルクおよび接線力トルク (第 2 軸), Motor torque and adhesive torque (2 axle)

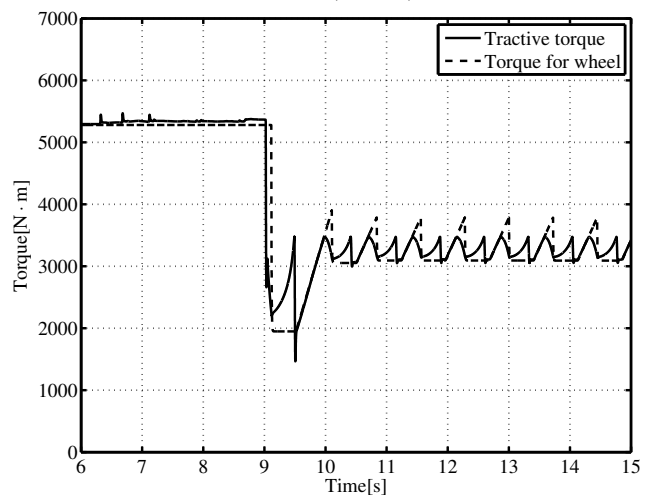
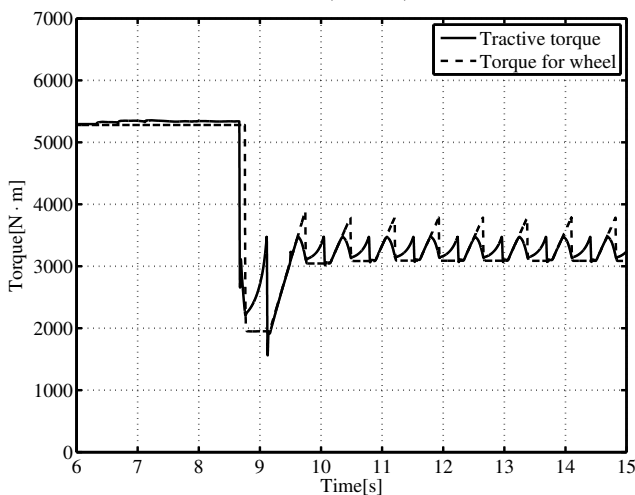


図 6.6: モータトルクおよび接線力トルク (第 3 軸), Motor torque and adhesive torque (3 axle)

図 6.7: モータトルクおよび接線力トルク (第 4 軸), Motor torque and adhesive torque (4 axle)

6.3 1 インバータ 2 モータ駆動制御 (1C2M) における提案空転再粘着制御の拡張

6.3.1 1 インバータ 2 モータ駆動制御 (1C2M) における空転再粘着制御の難しさ

1 インバータ 1 モータ駆動制御 (1C1M, 個別制御) において各軸での超過角運動量の保存を考慮することによって、各軸ごとに空転 再粘着のサイクルをくり返し、準安定状態に入ることが確認された。

しかし、一般的な本論文の対象とする通勤形電車において 1 インバータ 1 モータ駆動制御 (1C1M, 個別制御) は制御装置の多さから使用事例が少なく、1 インバータ 4 モータ駆動 (1C4M, 一括制御) の適用事例が多い。そのような背景から、本論文でも当初 1 インバータ 4 モータ駆動 (1C4M, 一括制御) 方式で実装することを考えていた。しかし、空転再粘着現象の難しさと一括制御による情報の欠落 (電流の合計値しかわからない、角速度も合計値のみしかわからない) から鑑みて、非常に複雑な問題となることが推測される。そのため、本論文では

ケースとして少し単純化し，具体的な事象を把握するために 1 インバータ 2 モータ駆動 (1C2M) 方式で実装を行い，数値解析を実施する．

獲得できる情報を以下に示す．

1. 平均モータトルク (測定された平均電流値から演算)
2. 平均角速度 $\frac{\omega_1 + \omega_2}{2}$ (第 1 軸の角速度 ω_1 と第 2 軸の角速度 ω_2 の平均値，速度センサレスベクトル制御下のとき)
3. 平均角速度と平均モータトルク情報利用の外乱オブザーバで推定した接線力トルク

以上の情報を用いて，本提案方式の 1 インバータ 2 モータ駆動 (1C2M) での拡張を実施した．数値解析条件は 1 インバータ 1 モータ駆動の場合と同じ路面状況およびトルク入力とした．

第 1 軸，第 2 軸が空転し始めている状況を詳しく考察するため，6 秒から 7 秒まで拡大したものを示す．図 6.8 に 6 秒から 7 秒まで拡大した第 1 軸，第 2 軸のみのモータトルクおよび接線力トルクを示す．また，図 6.9 に 6 秒から 15 秒までの第 1 軸，第 2 軸のみのモータトルクおよび接線力トルクを示す．6.6 s 付近で増大しているのは各モータの角速度である (ただし，各モータの角速度は比較のため 100 倍してあることに注意されたい)．

青字が 1 軸，赤字が 2 軸，黒字が平均である．図 6.8 より，第 1 軸が空転していることを検知している (図 6.8 の 6.4 秒付近) が，トルクの引き下げ量が足りないことがわかる．各軸においてモータトルクが接線力トルクより小さくならない限り，超過角運動量が溜まってしまい，結果的に空転収束には結びつかない．第 2 軸は滑っていないにもかかわらず，第 1 軸のモータトルクが第 1 軸の接線力トルクより小さくなっていないため，第 1 軸は滑り続け，図 6.9 にあるように角速度が大幅に増加し空転が発散してしまう．

以上より，各軸においてモータトルクが接線力トルクより小さくならなければ，各軸接線力トルクが異なった状態でモータトルクを引き下げてしまい，第 1 軸の超過角運動量が保存しないままとなる．第 1 軸が空転した時点で 1 インバータ 1 モータ駆動制御 (1C1M，個別制御) の場合と比較して，制御器側で見えている超過角運動量が半分となっているため，モータトルクを大きく引き下げる必要がある．また，これより第 1 軸がトルクを出そうとしてしまうのは空転収束には結びつかない．凡例の補足を以下に示す．

- 赤...第 1 軸
- 青...第 2 軸
- 黒...平均値
- 黒...平均値 (第 1 軸と第 2 軸の平均値，制御器側からわかるのはこの情報である)
- 実線...接線力トルク，点線...モータトルク，破線...各軸角速度

以上をまとめると，

1. モータトルクを各軸の接線力トルクのうち最小のものよりモータ指令トルクを小さくしないと空転収束しない (しかし，第 1 軸，第 2 軸の平均接線力トルクしかわからない)
2. 一番路面状況の悪い軸に焦点を当て，超過角運動量の保存を考える (図 6.8 の例だと第 1 軸)

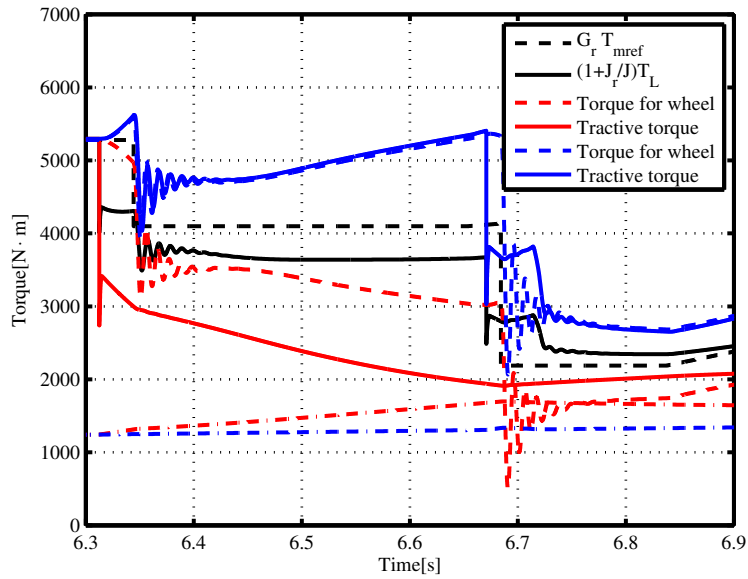


図 6.8: モータ指令トルクとモータトルクおよび接線力トルク (1C2M, 第 1 軸第 2 軸のみ), Motor torque, reference torque and adhesive torque (1C2M, 1 axle and 2 axle)

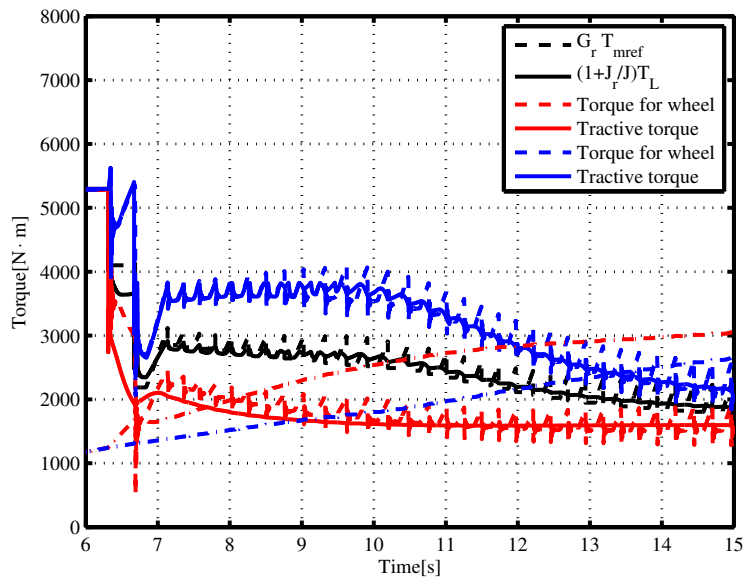


図 6.9: モータ指令トルクとモータトルクおよび接線力トルク (1C2M, 第 1 軸第 2 軸のみ), Motor torque, reference torque and adhesive torque (1C2M, 1 axle and 2 axle)

6.3.2 1 インバータ 2 モータ駆動制御 (1C2M) における空転再粘着制御の改良法

1 インバータ 2 モータ駆動制御 (1C2M) における空転再粘着制御の改良法の概要

今までと同様の考え方に基づいて制御をかけていた場合, 6.3.1 に示したように平均値を取っているせいもあり, うまくいかない. そこで, 条件を絞ってうまく補償できるような考え方を示す. 一般四軸が同時に空転すること少

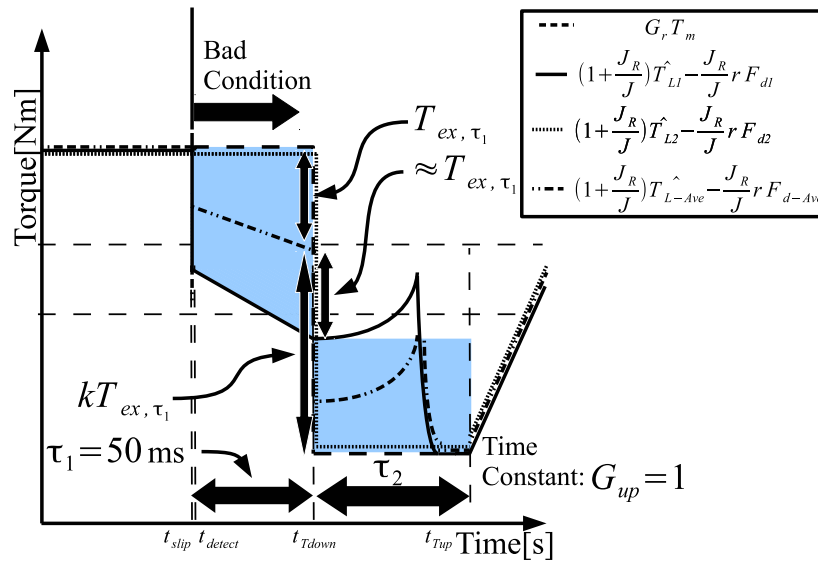


図 6.10: 1 インバータ 2 モータ駆動制御 (1C2M) における空転再粘着制御の拡張法, Expansion of re-adhesion control of 1 inverter 2 motor drive system

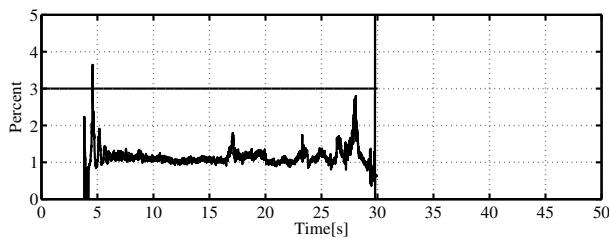


図 6.11: 第 1 軸超過トルクを平均超過トルクで除したものの (Case 1-1-a), Motor torque and Excessive torque of 1 axis divided by average excessive torque (Case 1-1-a)

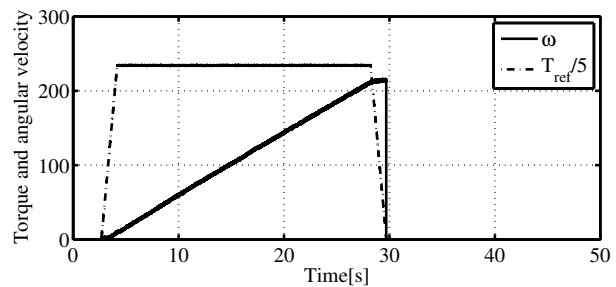


図 6.12: モータトルクおよび角速度 (Case 1-1-a), Motor torque and angular velocity (Case 1-1-a)

なく、ある軸が滑り始めてから、他の軸の接線力トルクが低下し、空転は拡大する。これは、2 軸の平均情報を使用しているので、制御器側で見えている超過トルクは半分に軽減されて見られているからである。この考え方を図 6.10 に示す。

このとき、重要となるトルク引き下げ定数 k であるが、2009 年 4 月に新京成電鉄くぬぎ山車庫において実施された現車試験により決定する。モータトルクは各モータへの電流測定により、接線力トルクは各軸の電流から推定した角速度から外乱オブザーバを用いて求めた。図 6.11, 6.13, 6.15, 6.17, 6.19 に滑りやすい第 1 軸の超過トルク $[T_{ex1} = G_r T_m - (1 + \frac{J_R}{J}) T_L]$ を制御器側でわかる平均の接線力トルク $[T_{ex-ave} = G_r T_{m-ref} - (1 + \frac{J_R}{J}) T_{L-ave}]$ で除したものを示す。分母となる超過トルクがゼロクロスすることによって暴れているものの、以下のことがわかる。まず、粘着状態 (Case 1-1-a) における第 1 軸の超過トルクを平均超過トルクで割ったものはほぼ 1 倍で推移する。一度空転が発生すると、トルクの上げ下げや各軸の路面状況の差異により大きく変動するものの、ゼロクロス点を除けば、3 倍程度となっている。

以上より、数値解析ではトルク引き下げ定数 k を 3.0 と設定し、空転再粘着制御の数値解析を行う。表 6.1 には、図 6.11 から 6.20 において変化させたパラメータを示す。

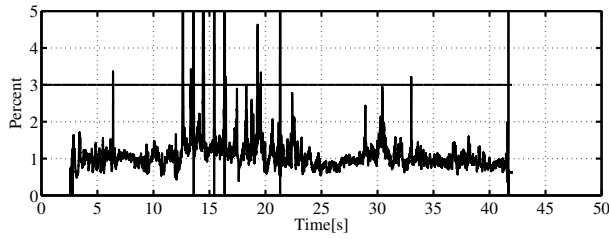


図 6.13: 第 1 軸超過トルクを平均超過トルクで除したものの (Case 1-5-b), Motor torque and Excessive torque of 1 axis divided by average excessive torque (Case 1-5-b)

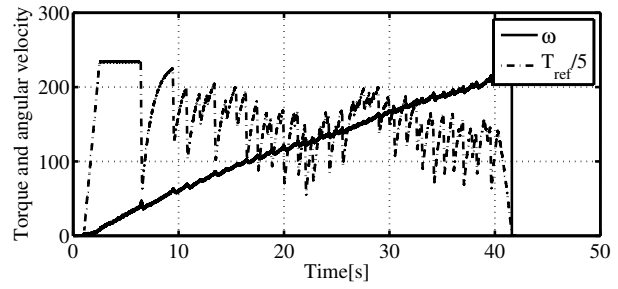


図 6.14: モータトルクおよび角速度 (Case 1-5-b), Motor torque and angular velocity (Case 1-5-b)

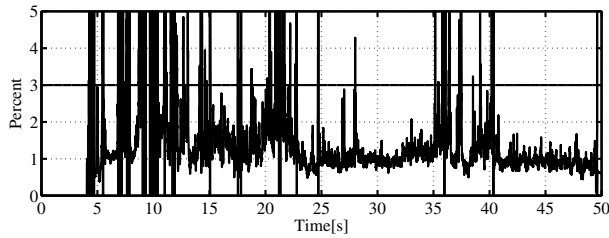


図 6.15: 第 1 軸超過トルクを平均超過トルクで除したものの (Case 3-3-b), Motor torque and Excessive torque of 1 axis divided by average excessive torque (Case 3-3-b)

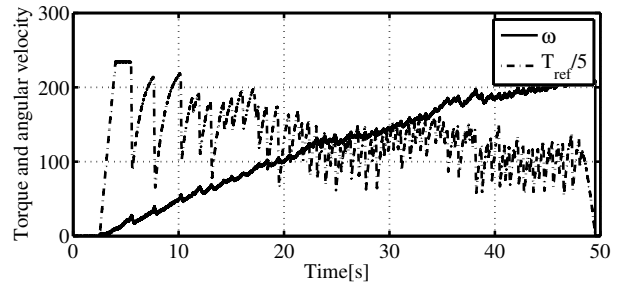


図 6.16: モータトルクおよび角速度 (Case 3-3-b), Motor torque and angular velocity (Case 3-3-b)

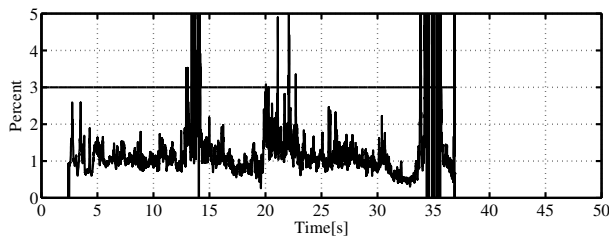


図 6.17: 第 1 軸超過トルクを平均超過トルクで除したものの (Case 4-3-b), Motor torque and Excessive torque of 1 axis divided by average excessive torque (Case 4-3-b)

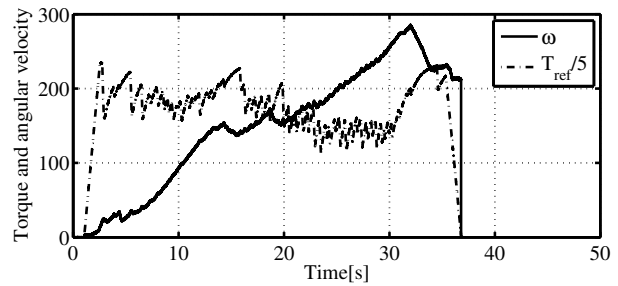


図 6.18: モータトルクおよび角速度 (Case 4-3-b), Motor torque and angular velocity (Case 4-3-b)

空転開始，検知後からトルク引き下げまでの超過角運動量

ここでは，第 1 軸の超過角運動量を計算する．

今までトルク引き下げ前の超過角運動量を台形近似していたが，ある程度余裕を持たせるために長方形で近似する．ここでは重大な二つの仮定を行う．

1. 第 2 軸については粘着状態にあるので，モータトルクと接線力トルクがほぼ一致する．
2. 1. の仮定に基づき制御器から見た超過トルクは第 1 軸の超過トルクの 2 倍に近似できる (図 6.10) ．

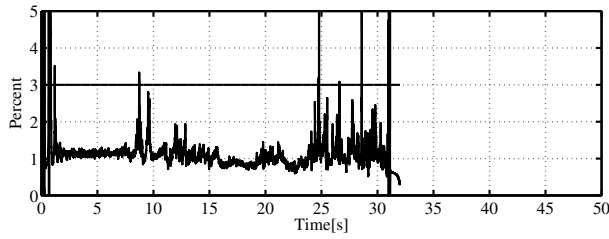


図 6.19: 第 1 軸超過トルクを平均超過トルクで除したもの (Case 5-2-a), Motor torque and Excessive torque of 1 axis divided by average excessive torque (Case 5-2-a)

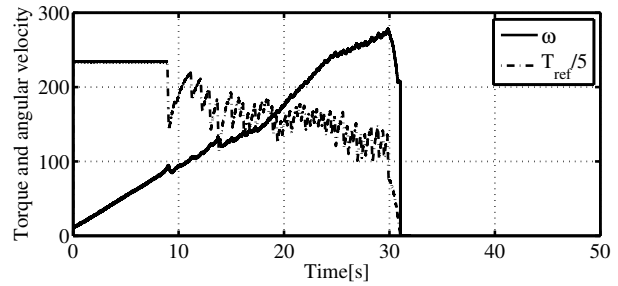


図 6.20: モータトルクおよび角速度 (Case 5-2-a), Motor torque and angular velocity (Case 5-2-a)

表 6.1: 実車試験において変化させたパラメータ, Parameters of real train test

	A_z	A_w	T_d
Case 1	0.125	0.525	0.100
Case 3	0.125	0.375	0.100
Case 4	0.125	0.375	0.400
Case 5	0.125	0.375	0.280

その結果, 空転開始, 検知後からトルク引き下げまでの第 1 軸の超過角運動量 L_{ex,τ_1} は式 (6.1) であらわされる.

$$L_{ex,\tau_1} = 2\tau_1 T_{ex} \tag{6.1}$$

トルク引き下げからトルク引き上げまでの超過角運動量

第 1 軸の超過角運動量補償に着目するので, トルク引き下げからトルク引き上げまでの超過角運動量 L_{ex,τ_2} は式 (6.2) で表される.

$$L_{ex,\tau_2} = \tau_2(k - 1)T_{ex}(k > 1) \tag{6.2}$$

よって, この条件より, 6.3.1 の 1C2M と同じように $k = 0.1$ とした場合は $k > 1$ という条件を満たすことができなかったため, 制御がうまくいかなかったと考えられる.

超過角運動量保存より導き出されるトルク引き下げからトルク引き上げまでの時間 τ_2

式 (6.1), (6.2) より, 超過角運動量の保存より, 超過角運動量保存より導き出されるトルク引き下げからトルク引き上げまでの時間 τ_2 は式 (6.4) で表される.

$$2\tau_1 T_{ex} = \tau_2(k - 1)T_{ex}(k > 1) \tag{6.3}$$

$$\tau_2 = \frac{2}{k - 1}\tau_1 \tag{6.4}$$

以上に示した 1 インバータ 2 モータ駆動 (1C2M) 方式の超過角運動量保存の考え方を図 6.10 に示す.

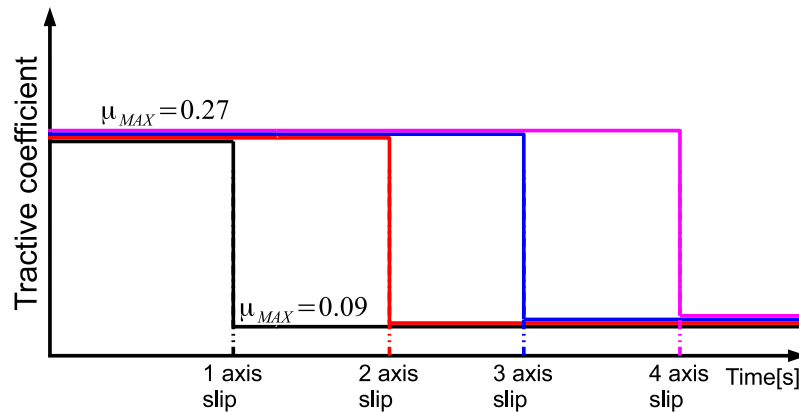


図 6.21: 各軸の路面状況の変化, Change of rail condition of each axle

6.3.3 1 インバータ 2 モータ駆動制御 (1C2M) における空転再粘着制御の改良法のモータトルクおよび接線力トルク軌跡

図 6.21 に各軸の路面状況の変化を示す．数値解析条件は 6.2 と同じ条件を仮定した．図 6.22 から 6.25 に接線力トルクおよびモータトルク軌跡を示す．1 軸換算モデルを使用した 5 章の数値解析や 6.2.1 で行った 1C1M (1 インバータ 1 モータ駆動制御) では $k = 0.2$ と小さくすることで粘着利用率の向上を図った．しかし，4 軸 2 台車モデルを使用すると平均値利用をしていることからうまくいかないことが想定されるため， $k = 3.0$ と大きくした．各軸の出せる粘着係数に大きな差が無い場合，動輪周摩擦力や粘着利用率の低下が見込まれるものの，空転再粘着のサイクルを繰り返し，制御に成功していることが確認される．

6.3.4 各軸接線力トルクの差異による粘着性能の比較

今までの数値解析においては劣悪な路面状況を各軸同じものという仮定に基づいて解析を行っていた (図 6.21)．しかし，各軸の路面状況は逐次変化するものであるため，より実路線に近い各軸接線力トルクが異なったときの粘着性能の比較を行う．図 6.26 に各軸の路面状況の変化を示す．劣悪な路面突入時において最初の車輪は滑りやすいため，最初の路面状況を悪く，後ろの軸に進むにつれ，良好となるような接線力係数の設定とした．

1 インバータの 1 モータ駆動制御 (1C1M) の場合は各軸の接線力トルクの差異は特に問題とならない．一方，接線力トルクの差異は 1 インバータ 2 モータ駆動制御 (1C2M) では大きな問題となる．これは 2 軸の平均接線力トルクしか使用できないため，図 6.8 を見てわかるように 2 軸の路面状況が異なる場合，片方の軸が空転し始める時刻や溜まった超過角運動量は各軸ごとにはわからない．黒色で示す平均モータトルク，接線力トルクだけしか見ることはできない．その結果，平均接線力トルクを軸に空転再粘着制御を行うと，超過角運動量の誤った見積もりによって空転収束の誤りが生じてしまう．そこで，先ほど述べた超過角運動量補償を使用してこの問題点を解決する．図 6.27, 6.28 に 1 インバータ 2 モータ駆動制御 (1C2M) のモータトルク，接線力トルクを示す．

表 6.2 に路面状況を各軸で変化させたときの粘着利用率および動輪周損失摩擦力を示す．粘着利用率および動輪周損失摩擦力は 6 秒から 15 秒までの平均値である．今まで述べてきた超過角運動量に着目した空転再粘着制御は左から 2 番目の本提案方式 (1C2M) と書かれたものである．本手法は 1 インバータ 4 モータ駆動 (1C4M) の従来空転再粘着制御法 [3] よりも 15.7 % 粘着利用率が高くなった．また，これは駆動方式 (一般に制御器が多いほうが粘着性能的に有利) によるものかとも考えられるため，1 インバータ 2 モータ駆動 (1C2M) の従来の空転

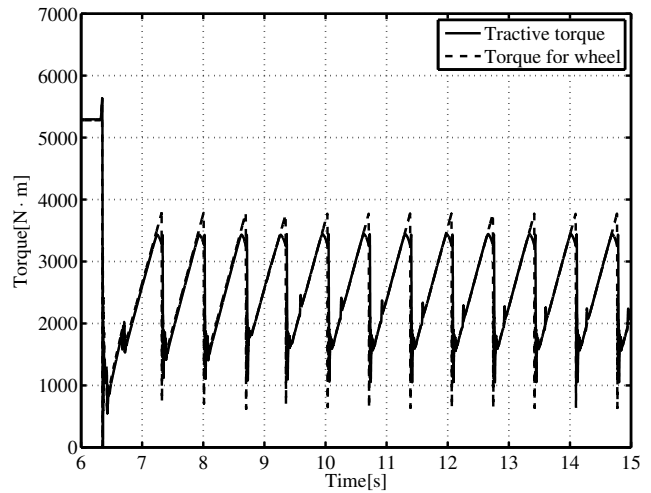
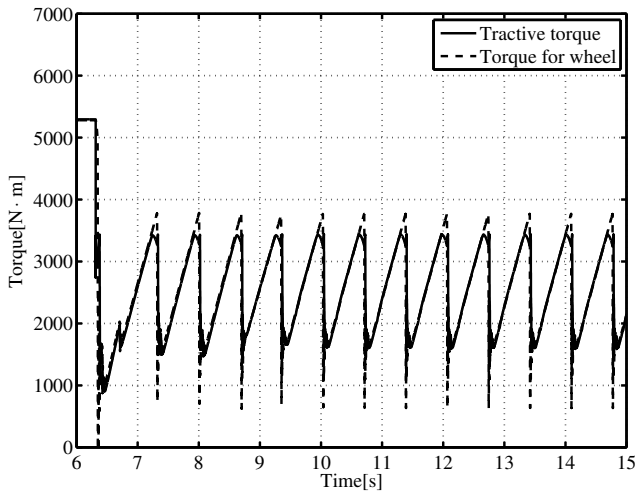


図 6.22: モータトルクおよび接線力トルク (1 軸), Motor torque and adhesive torque (1 axle)

図 6.23: モータトルクおよび接線力トルク (2 軸), Motor torque and adhesive torque (2 axle)

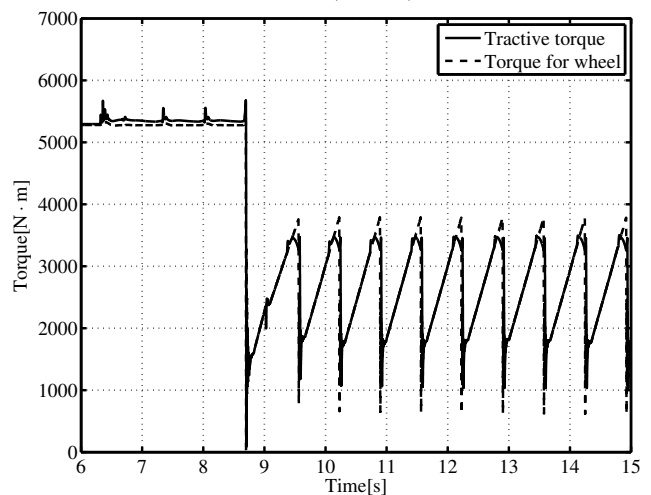
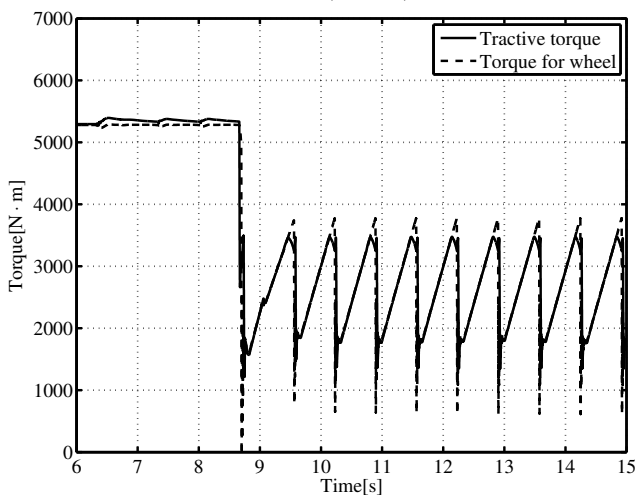


図 6.24: モータトルクおよび接線力トルク (3 軸), Motor torque and adhesive torque (3 axle)

図 6.25: モータトルクおよび接線力トルク (4 軸), Motor torque and adhesive torque (4 axle)

再粘着制御法 [3] についても同様の解析を行った．その結果，動輪周損失摩擦力についてはほとんど変わらなかったのに対して，粘着利用率については 7.0 % 大きくなった．よって，本提案方式の超過角運動量に着目した空転再粘着制御は従来手法 [3] と比較して，「良い」空転再粘着制御ができているといえる．

また，1C2M (1 インバータ 2 モータ駆動) に拡張した本提案手法が車体振動の面で問題ないかという点について，4 で述べた平均乗り心地係数を用いて検討する．漸次空転状態 (空転 再粘着のサイクルを繰り返している状態) として電気鉄道車両が空転してから 4 秒後から 8 秒後 (10 秒から 14 秒) の車体加速度を各空転再粘着制御法ごとに図 6.29 から 6.32 に示す．これらを FFT (Fast Fourier Transform, 高速フーリエ変換) によって周波数領域に変換したものを図 6.33 から 6.36 に示す．従来の空転再粘着制御法 [3] はトルク引き下げ時定数が 100 ms, トルク引き上げ定数が 1 s であることから，おおよそ 1 Hz から 2 Hz 付近に頂点があることが確認できる．一方で提案した空転再粘着制御法はトルク引き下げ定数はモータの時定数，トルク引き上げ定数は 1 s, 1 Hz より小さい付近に頂点があることが確認できる．図 4.1 を評価関数により計算した平均乗り心地係数を表 6.3 に示す．1

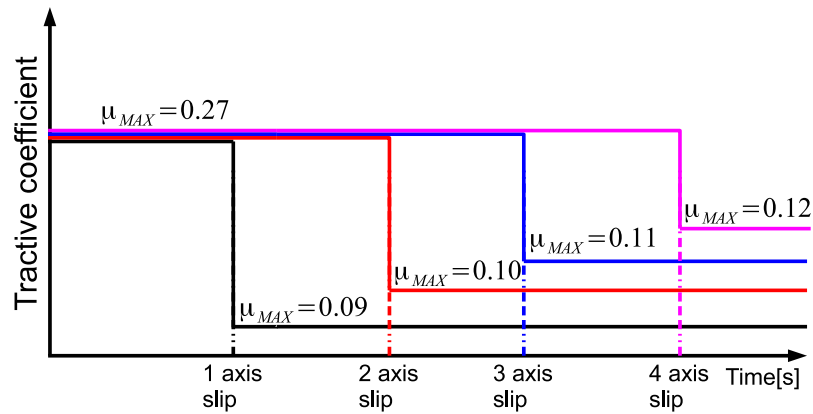


図 6.26: 各軸の路面状況の変化, Change of each axle rail condition

表 6.2: 粘着利用率および動輪周損失摩擦力（各軸出せる接線力トルクに差を出した場合）, Normalized average tractive coefficient and loss friction force around driving wheel

方法	本提案 方式 (1C1M)	本提案 方式 (1C2M)	従来 手法 [3] (1C4M)	従来 手法 [3] (1C2M)
粘着 利用率	89.1 (105 %)	85.2 (100 %)	71.8 (84.3 %)	79.6 (93.0 %)
動輪周 損失摩擦力	89.7 (165 %)	54.5 (100 %)	43.9 (80.6 %)	53.7 (98.5 %)

表 6.3: 平均乗り心地係数（各軸出せる接線力トルクに差を出した場合）, Average ride quality coefficient

方法	本提案 方式 (1C1M)	本提案 方式 (1C2M)	従来 手法 [3] (1C4M)	従来 手法 [3] (1C2M)
平均乗り 心地係数	0.17 (121 %)	0.14 (100 %)	0.13 (92.9 %)	0.14 (100 %)

インバータ 2 モータ駆動の従来の空転再粘着制御法が最も小さい平均乗り心地係数となった。しかし、表 6.4 をわかるように基本的には平均乗り心地係数が 1 を下回っているの、大差はない。よって、本提案方式は乗り心地の面から見ても問題ないことが確認された。

6.3.5 指定走行距離走行後の車輪径変化による粘着性能の比較

電気鉄道車両において鉄輪 - 鉄レール駆動方式を使用している。車両の車輪には、使用状況の各種要因から生じ、かつ検修上で一定の範囲内で許容される各車軸ごとの車輪径の差がある。本来、1 インバータ 1 モータ駆動

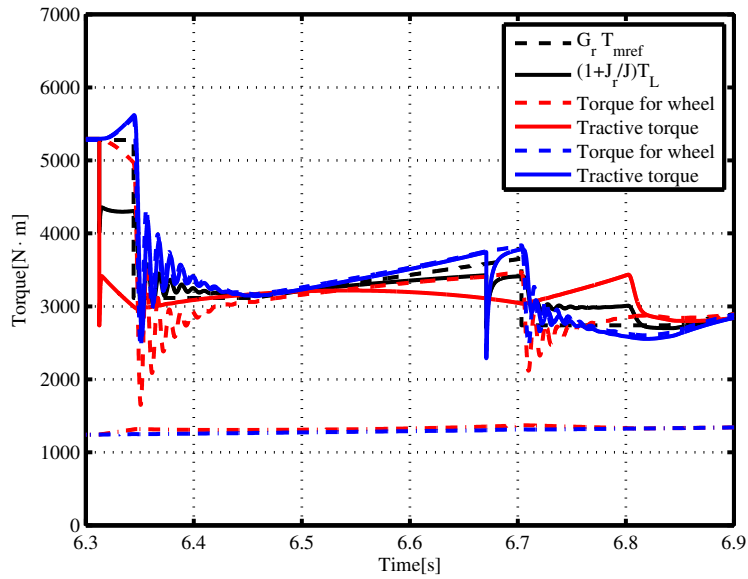


図 6.27: モータ指令トルクとモータトルクおよび接線力トルク (1C2M, 第 1 軸第 2 軸のみ, 各軸路面状況変化), Motor torque, reference torque and adhesive torque (1C2M, 1 axle and 2 axle)

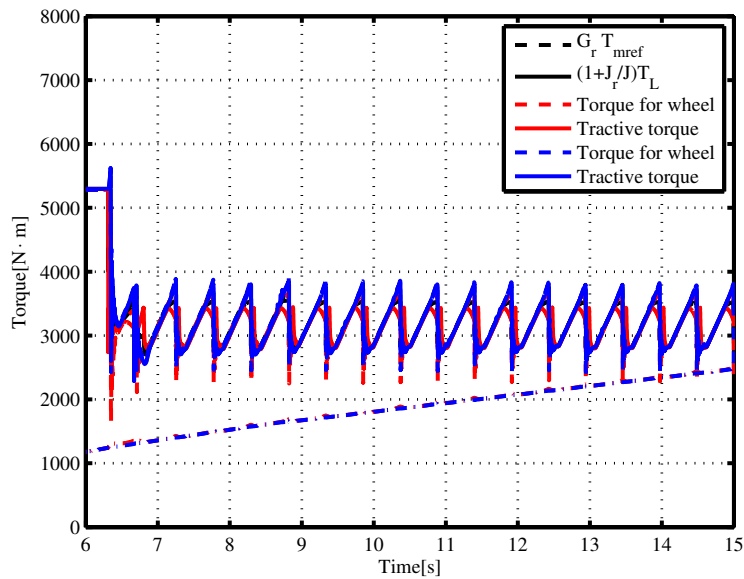


図 6.28: モータ指令トルクとモータトルクおよび接線力トルク (1C2M, 第 1 軸第 2 軸のみ, 各軸路面状況変化), Motor torque, reference torque and adhesive torque (1C2M, 1 axle and 2 axle)

制御 (1C1M) 駆動が理想であるが, 先に示したメリットから 1 インバータ複数電動機駆動が一般的である. 1 台のインバータで一括に制御されている場合, 車輪径の大きい車輪は周長が長いため, 車輪径の小さい車輪と比較して遅く回転する. すなわち, すべりは車輪径の大きい車輪が大きくなり, 定常状態 (空転していない状態) では出力トルクも大きくなる.

表 6.4: 乗り心地評価 (表 4.1 を再掲), Evaluation ride quality

乗り心地係数	乗り心地評価
1 以下	非常に良い
1 ~ 1.5	良い
1.5 ~ 2	普通
2 ~ 3	悪い
3 以上	非常に悪い

そこで、車輪径を変化させたときに 1 インバータ 2 モータ駆動制御 (1C2M) の超過角運動量に着目した空転再粘着制御がうまく制御できていることを示す。図 6.37 に各軸の車輪径の変化を示す。Case A は第 2 軸と第 4 軸が 0.2 % 車輪径が小さくなっている場合を仮定している。一方で、Case B は第 1 軸と第 3 軸が 0.2 % 車輪径が小さくなっている場合を仮定している。

モータ指令トルクとモータトルクおよび接線力トルクを図 6.38, 6.39 に示す。また、すべり速度の軌跡を見ると、空転の程度もわかるので、これを図 6.40, 6.41 に示す。これらに示した 8 秒までの間は後部台車の第 3 軸および第 4 軸は空転していない。図 6.38 に着目すると、一定加速度で進んでいるとき (6.3 秒付近で空転する前)、第 1 軸のモータトルクは 5230[N·m]、第 2 軸の接線力トルクは 5330[N·m] であり、半径を 0.2 % 変化させたときおよそ 1.9 % 程度のトルク配分差があることが確認できる。加えて、第 1 軸のトルク配分が大きく、空転したときに再粘着しづらい Case A についても空転した後、2 回目の粘着制御で空転が収束しており、車輪径が変化しても空転再粘着動作がうまくいくことが確認された。表 6.5 にこのときの粘着利用率および動輪周損失摩擦力を示すが、Case A, Case B 共に大きく変化しなかった。

表 6.5: 粘着利用率および動輪周損失摩擦力 (車輪径に差を出した場合), Normalized average tractive coefficient and loss friction force around driving wheel

方法	本提案手法 (1C2M)	本提案手法 (1C2M 1, 3 軸 車輪径 99.8 %)	本提案手法 (1C2M 2, 4 軸 車輪径 99.8 %)
粘着 利用率	85.2 (100 %)	82.6 (96.9 %)	82.7 (97.1 %)
動輪周 損失 摩擦力	54.4 (100 %)	49.5 (91.0 %)	49.7 (91.4 %)

6.4 本章のまとめ

本章では超過角運動量に着目した空転再粘着制御の複数誘導電動機駆動への拡張を実施した。まず、超過角運動量に着目した空転再粘着制御の拡張が容易な 1 インバータ 1 モータ駆動 (1C1M) の場合について拡張を行った。そして、1 インバータ 2 モータ駆動 (1C2M) について拡張し、そのとき、重要となる各軸接線力トルクの差異や

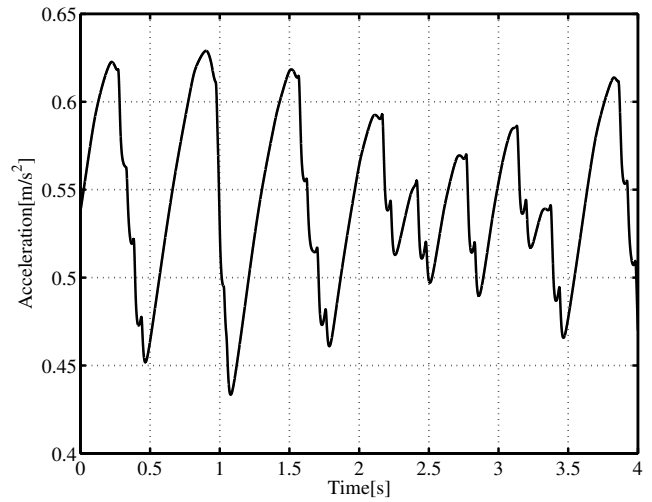
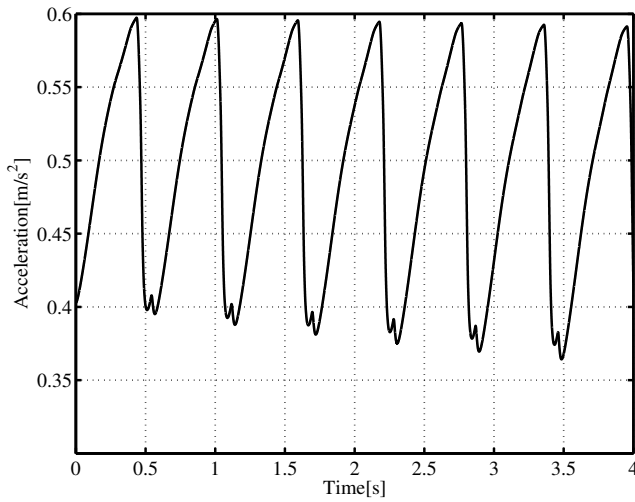


図 6.29: 車体加速度 (従来空転再粘着制御法 [3], 1C4M, $t = 10 - 14$ s), Body acceleration (Conventional re-adhesion control[3], 1C4M, $t = 10 - 14$ s)

図 6.30: 車体加速度 (従来空転再粘着制御法 [3], 1C2M, $t = 10 - 14$ s), Body acceleration (Conventional re-adhesion control[3], 1C2M, $t = 10 - 14$ s)

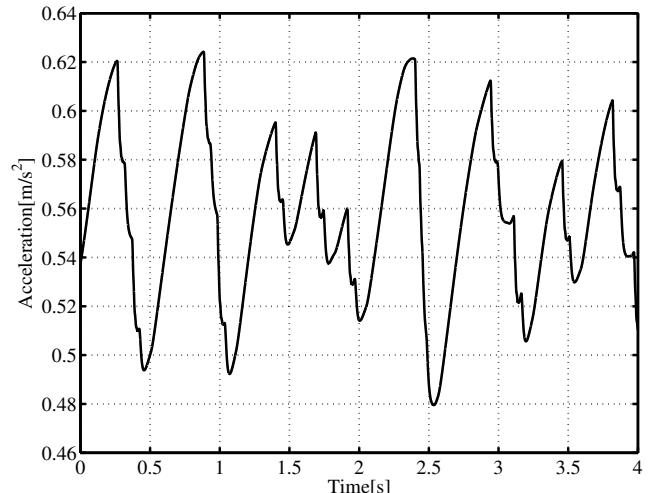
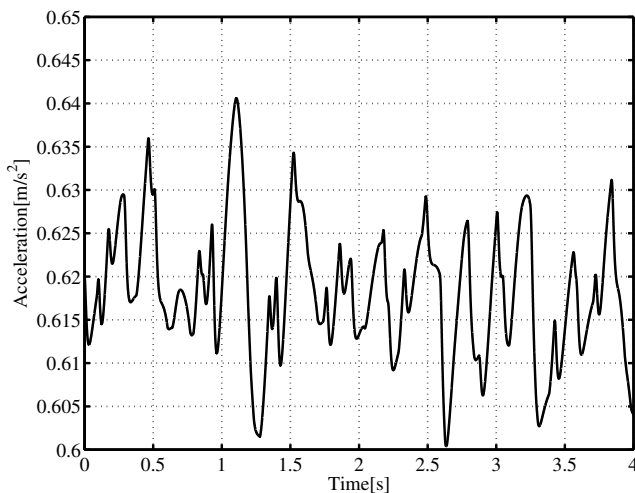


図 6.31: 車体加速度 (提案空転再粘着制御法, 1C1M, $t = 10 - 14$ s), Body acceleration (Proposed re-adhesion control, 1C1M, $t = 10 - 14$ s)

図 6.32: 車体加速度 (提案空転再粘着制御法, 1C2M, $t = 10 - 14$ s), Body acceleration (Proposed re-adhesion control, 1C2M, $t = 10 - 14$ s)

各軸車輪径の相違に着目して数値解析を行い, 1 インバータ 1 モータ駆動 (1C1M) や従来手法と比較しながら評価を行った。

数値解析により以下のことがわかった。

1. 各軸接線力トルクの差異による各再粘着手法の粘着性能の比較を行った結果, 空転再粘着制御時に重要となる超過トルクは制御器側で測定された平均超過トルクに対して, 2009 年 4 月の現車試験の解析より 3.0 倍乗じたものを使用すると, 最低の接線力トルクを出力する軸に対して超過角運動量の保存が成り立つ。
2. 従来手法 [3] (1 インバータ 2 モータ駆動方式) と比較して本空転再粘着制御 (1 インバータ 2 モータ駆動方式) の粘着利用率は 7.04 % 大きくなり, 動輪周損失摩擦力はほとんど変わらなかった。また, 制御器の数が多く, 粘着性能の点で有利な超過角運動量に着目した空転再粘着制御 (1 インバータ 1 モータ駆動方式)

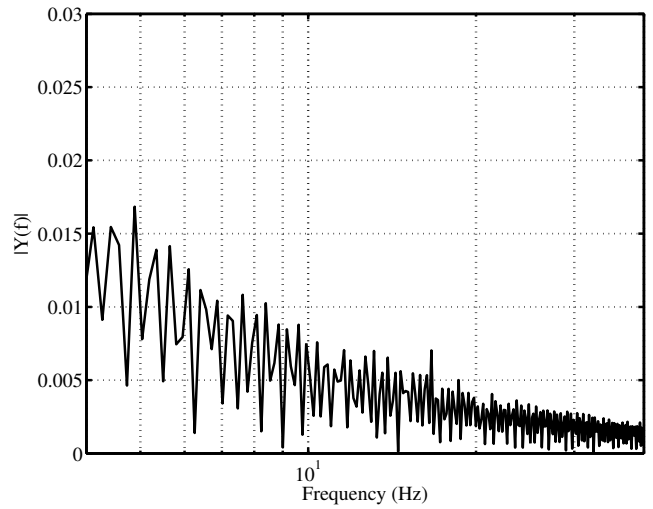
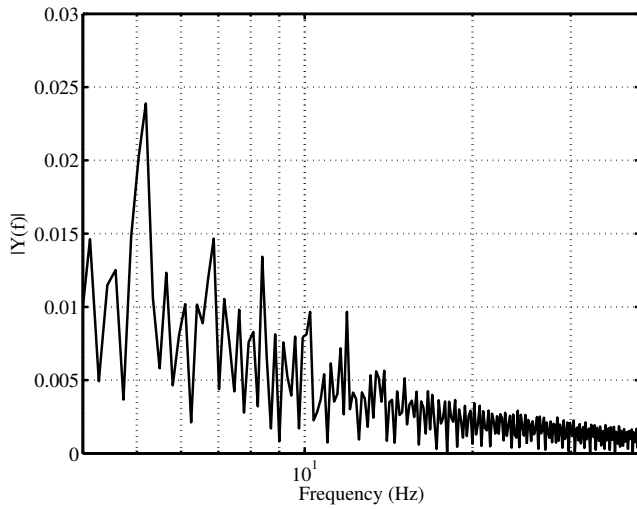


図 6.33: 車体加速度周波数解析 (従来空転再粘着制御法 [3], 1C4M, $t = 10 - 14$ s), Body acceleration frequency analysis (Conventional re-adhesion control[3], 1C4M, $t = 10 - 14$ s)

図 6.34: 車体加速度周波数解析 (従来空転再粘着制御法 [3], 1C2M, $t = 10 - 14$ s), Body acceleration frequency analysis (Conventional re-adhesion control[3], 1C2M, $t = 10 - 14$ s)

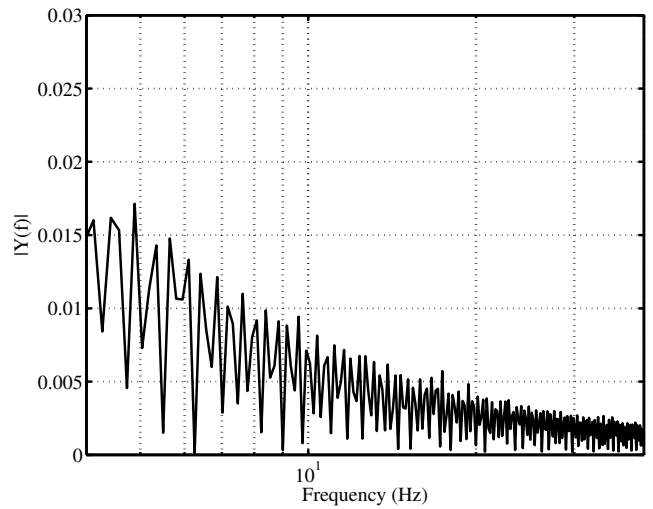
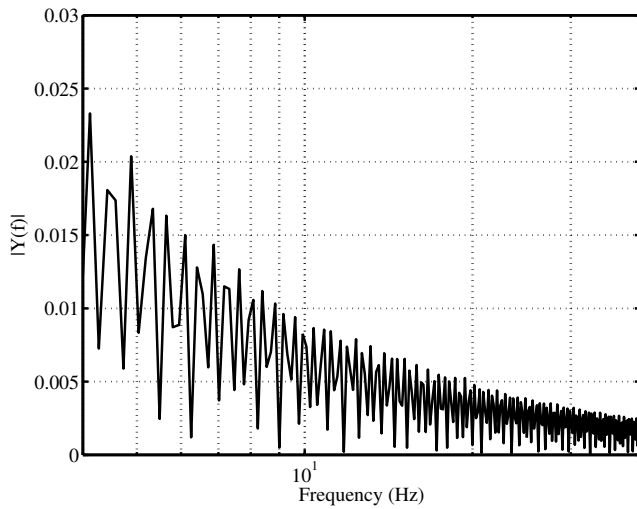


図 6.35: 車体加速度周波数解析 (提案空転再粘着制御法, 1C1M, $t = 10 - 14$ s), Body acceleration frequency analysis (Proposed re-adhesion control, 1C1M, $t = 10 - 14$ s)

図 6.36: 車体加速度周波数解析 (提案空転再粘着制御法, 1C2M, $t = 10 - 14$ s), Body acceleration frequency analysis (Proposed re-adhesion control, 1C2M, $t = 10 - 14$ s)

と比較すると、5%の粘着利用率の減少に抑えることができた(89.1%→85.2%)。さらに平均乗り心地係数を用いて提案空転再粘着制御法は乗り心地でも問題ないことが確認できた。

3. 車輪径を変化させたとき、定常状態(一定加速度で進んでいるとき)でおおよそ1.9%程度のトルク配分差程度のトルク配分差があることを確認した。また、第1軸にトルクが大きく偏るCase B(第1&3軸100%、第2&4軸99.8%)の場合でも再粘着に成功し、粘着利用率、動輪周損失摩擦力も車輪径がすべて100%の場合と比較して大きく変わらなかった。

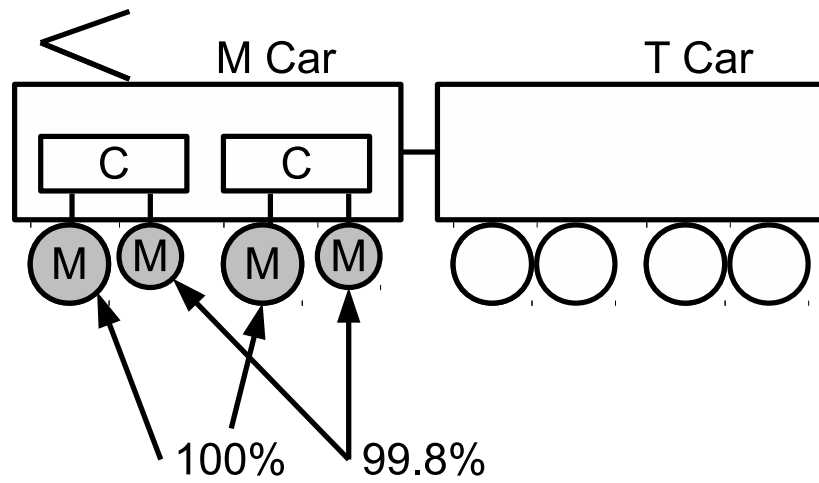


図 6.37: 各軸の車輪径の変化 (Case A), Each axle change (Case A)

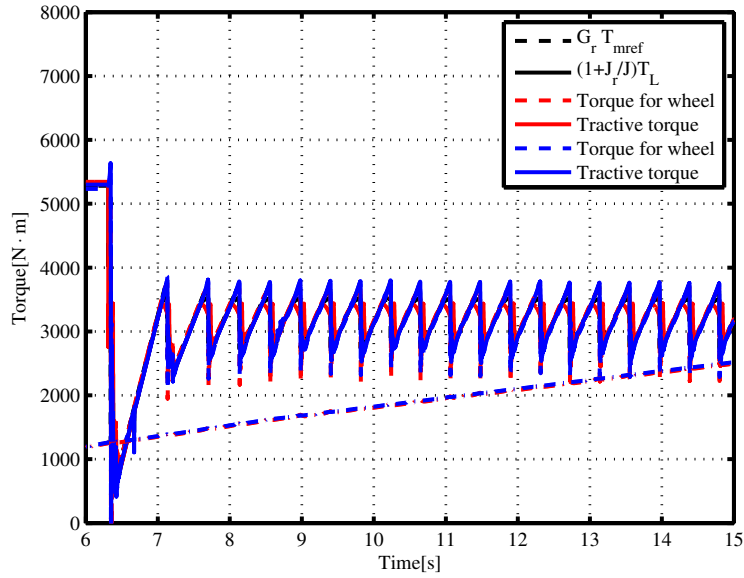


図 6.38: モータ指令トルクとモータトルクおよび接線力トルク (1C2M, 第 1 軸第 2 軸のみ, 第 1&3 軸 100%, 第 2&4 軸 99.8%, Case A), Motor torque, reference torque and adhesive torque (1C2M, 1 axle and 2 axle, 1 and 3 axle 100%, 2 and 4 axle 99.8%, Case A)

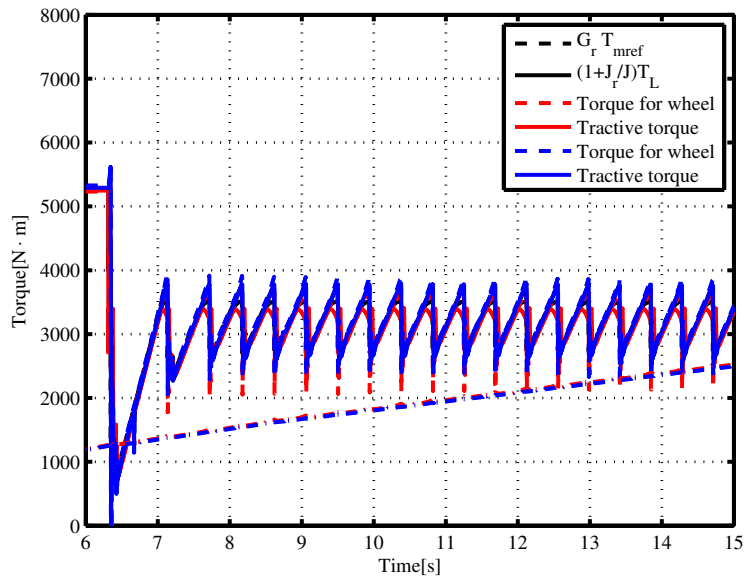


図 6.39: モータ指令トルクとモータトルクおよび接線力トルク (1C2M, 第 1 軸第 2 軸のみ, 第 1&3 軸 99.8%, 第 2&4 軸 100%, Case B), Motor torque, reference torque and adhesive torque (1C2M, 1 axle and 2 axle, 1 and 3 axle 99.8%, 2 and 4 axle 100%, Case B)

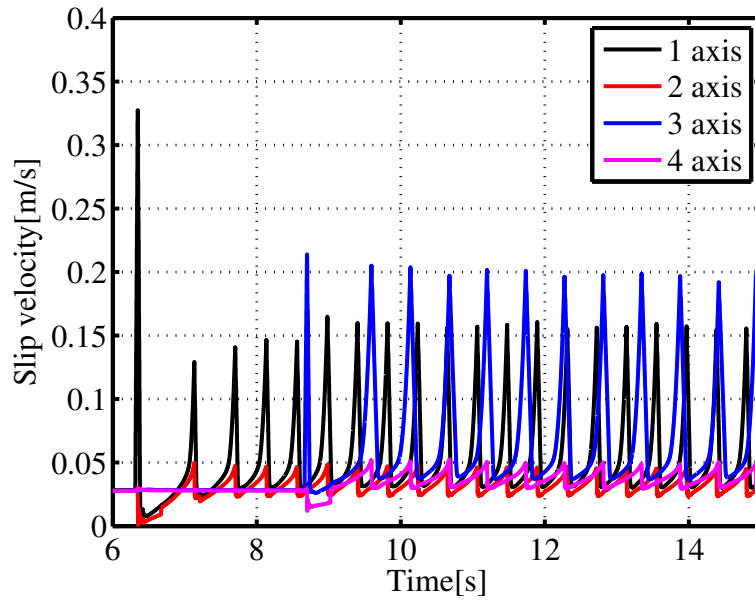


図 6.40: 各軸すべり速度 (1C2M, 第 1 軸第 2 軸のみ, 第 1&3 軸 100%, 第 2&4 軸 99.8%, Case A), Slip velocity (1C2M, 1 axle and 2 axle, 1 and 3 axle 100%, 2 and 4 axle 99.8%, Case A)

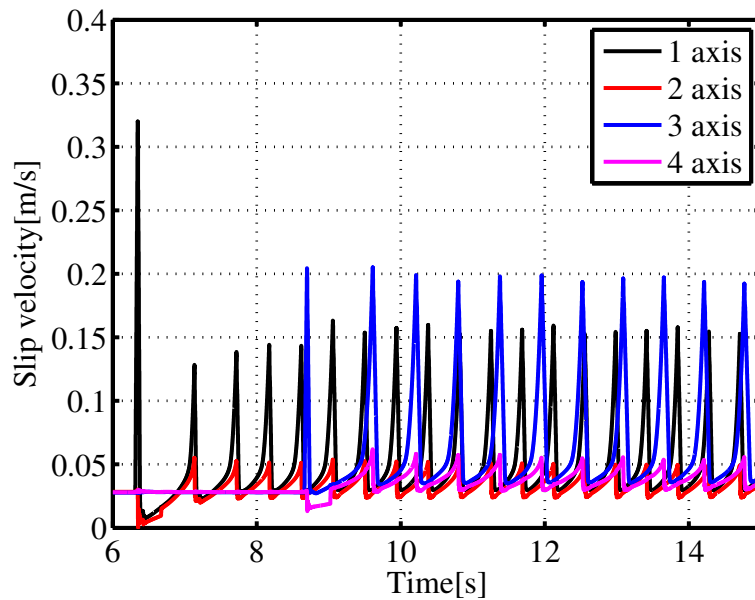


図 6.41: 各軸すべり速度 (1C2M, 第 1 軸第 2 軸のみ, 第 1&3 軸 99.8%, 第 2&4 軸 100%, Case B), Slip velocity (1C2M, 1 axle and 2 axle, 1 and 3 axle 99.8%, 2 and 4 axle 100%, Case B)

第7章 結論

7.1 本論文で得られた成果

本論文では、「超過トルク」および「超過角運動量」に着目し、超過角運動量の計算簡易化を使用した空転再粘着制御を提唱した。まず、「超過トルク」および「超過角運動量」を提案した先行研究の問題点を以下に示す。

1. 超過角運動量を逐次計算する必要があるため、空転していても空転検知できないことがある。また計算量が膨大になる可能性がある。
2. 超過トルクの微分値を空転検知で使用しているため、雑音に弱く、頻繁なトルク引き下げが発生してしまう可能性がある。
3. 一軸換算モデルのみに特化した空転再粘着制御であるため、複数並列誘導電動機使用の場合、超過角運動量の保存が成り立たない可能性がある。

本論文では以上の 1. から 3. までの問題点を解決する超過角運動量に着目した空転再粘着制御を提案し、1 車輪 1 車体の簡易なモデルで基本的な挙動を押さえた。提案法である超過角運動量計算簡易化に基づく空転再粘着制御は以下の利点を持っていることを明らかにした。

1. 超過角運動量の面積近似を用いることで、計算量が膨大になることを防いだ。
2. 空転検知してからある時間待った後、再度チェックをかけて、空転の誤検知を防ぐことができる。

4 軸 2 台車モデルに拡張した場合、超過トルクおよび超過角運動量は鉄道車両の各軸毎に成り立つものなので、1 インバータ 1 モータ駆動制御下では成り立つ。一方で、上の先行研究の問題点 3. に示すように複数並列誘導電動機使用の場合、超過角運動量の保存が成り立たない。そこで、1 インバータ 2 モータ駆動に事象を 1 インバータ 4 モータ駆動の場合と比較して簡易化して、複数並列誘導電動機使用の本提案方式の拡張を行った。各軸の接線力トルクを最小のものよりモータ指令トルクを小さくしないと空転収束しないため、「トルク引き下げ定数 k を現車試験結果の解析より決めうち」として、空転再粘着制御を行った。相反する 2 つの評価指標である粘着性能（加速度）を評価する「粘着利用率」とレール - 車輪間の傷みを評価する「動輪周損失摩擦力」を用い、提案法を評価した。数値解析結果より明らかになったことを以下に示す。

1. 従来手法 [3]（1 インバータ 2 モータ駆動方式）と比較して本空転再粘着制御（1 インバータ 2 モータ駆動方式）の粘着利用率は 7.04 % 大きくなり、動輪周損失摩擦力はほとんど変わらなかった。また、制御器の数が多く、粘着性能の点で有利な超過角運動量に着目した空転再粘着制御（1 インバータ 1 モータ駆動方式）と比較すると、5 % の粘着利用率の減少に抑えることができた（89.1 % → 85.2 %）。加えて、路面状況の変化を各軸で変化させたときも空転再粘着制御に成功しており、超過角運動量に着目する優位性は複数並列誘導電動機駆動でも確認できた。
2. 車輪径を変化させたとき、定常状態（一定加速度で進んでいるとき）でおおよそ 1.9 % 程度のトルク配分差程度のトルク配分差があることを確認した。また、第 1 軸にトルクが大きく偏る Case B（第 1&3 軸 100 %、

第 2&4 軸 99.8 %) の場合でも再粘着に成功し，粘着利用率，動輪周損失摩擦力も車輪径がすべて 100 % の場合と比較して大きく変わらなかった．

以上に示す本論文の成果によって 1 インバータ複数並列誘導電動機駆動の場合の超過角運動量に着目した空転再粘着制御の有用性が示された．前後方向加速度の周波数解析も行うことにより，提案空転再粘着制御は乗り心地の面も問題ないことが確認された．

7.2 今後の課題

本論文では本提案手法の 1 インバータ 2 モータ駆動までの拡張しか述べていない．近年はコストの兼ね合いもあり，主として都市圏の電気鉄道では 1 両に 1 台のインバータで駆動する 1 インバータ 4 モータ駆動の使用も多い．そのため，1 インバータ 4 モータ駆動へ拡張する必要がある．

本提案手法の 1 インバータ 2 モータ駆動までの拡張より「トルク引き下げ定数 k を現車試験結果の解析より決めうち」をすれば，うまくいくことが想定される．

また，本提案手法は数値解析によってのみ評価を行っている．実際の電気鉄道車両への適用を目指し，実車試験を行い，挙動を実際に確認しながら制御器設計法をまとめてゆく作業が必要である．

参考文献

- [1] 永瀬和彦, 田川直人, 前橋栄一, 野元浩, 沖倉柱: “レール, 車輪間の粘着に関する実態調査の研究(第3報)” 第24回鉄道におけるサイバネティクス利用国内シンポジウム論文集(1987年), pp. 282-286
- [2] 鉄道システムにおける粘着制御技術調査専門委員会: “鉄道車両における粘着制御技術”, 電気学会技術報告, No. 673 (1998年)
- [3] 飯田秀樹, 喜多純子, 熊野昌義, 菊池高弘: “ファジィ粘着制御方式の開発”, 平成7年度電気学会産業応用部門全国大会講演論文集(1995年), pp. 269-272
- [4] 槻木澤佑公, 古関隆章, 根来秀人, 村端章浩: “電気車の再粘着制御時における接線力特性軌跡と再粘着可能性 - 一軸モデルに基づく計算 -”, TER-08-37 (2008-9)
- [5] 大石潔, 小川泰明, 中野建, 宮下一郎, 保川忍: “1次外乱オブザーバに基づく電気車の空転再粘着制御方式”, 電学論 D, 120, 3, pp.382.389 (2000/3)
- [6] 門脇悟志, 大石潔, 宮下一郎, 保川忍: “外乱オブザーバと速度センサレスベクトル制御による電気車(2M1C)の空転再粘着制御の一方式”, 電学論 D, 121, 11, pp.1192.1198 (2001/11)
- [7] 門脇悟志, 畑正, 廣瀬寛, 大石潔, 飯田哲志, 高木正志, 佐野孝, 保川忍: “速度センサレスベクトル制御・外乱オブザーバによる空転再粘着制御の実車両への適用とその評価.205系5000番代電車における実例”, 電学論 D, 124, 9, pp.909.916 (2004/9)
- [8] 大下穂高, 河村篤男: “粘着試験装置を用いた加速から減速へ連続した接線力係数の測定と最大接線力制御”, 電気学会 計測・制御研究会 IIC-07-80, 2007, pp. 59-64
- [9] 原崇文, 槻木澤佑公, 古関隆章, 村端章浩, 岡山秀夫: “電気車における推定接線力, すべり速度情報を活用した再粘着制御”, 電気学会交通・電気鉄道/リニアドライブ合同研究会(2010/7)
- [10] 槻木澤佑公: “電気車の軸角速度情報に基づく再粘着制御と車輪部の超過角運動量補償に基づく粘着利用率の向上”, 東京大学修士論文, 2009
- [11] 松本雅行: “電気鉄道”, 森北出版社, 2007年
- [12] 日本機械学会編: “鉄道車両のダイナミクス”, 電気車研究会, 1994年
- [13] 佐々木浩一: “新幹線電車の乗り心地改善”, 日本機械学会論文集(C編), 57巻539号, pp.2211-2216 (1991/7)
- [14] 電動機制御系のアドバンス制御調査専門委員会編: “電動機制御系のアドバンス制御”, 電気学会技術報告, No.737, 1999年
- [15] 松瀬 貢規: “電動機制御工学”, 2007年, 電気学会

- [16] 古関隆章, 劉江桁: “モータドライブ・磁気浮上実験の「とりあえずの制御系設計」: 実験室からの報告”, 電気学会交通・電気鉄道/リニアドライブ合同研究会, TER-01-36, LD-01-70, 2001 年, pp.13-18
- [17] 門脇悟志, 大石潔, 宮下一郎, 保川忍: “外乱オブザーバと速度センサレスベクトル制御による電気車 (2MIC) の空転再粘着制御の一方式”, IEEJ Trans. IA, Vol.127, No.8, 2007
- [18] 原崇文, 槻木澤佑公, 古関隆章: “電気鉄道車両の超過角運動量に基づく再粘着制御の提案とその性能評価”, 平成 23 年電気学会産業応用部門大会, 2011 Annual Conference of IEEJ. Industry Applications Society, Okinawa, Sep 6th -8th.
- [19] 電気鉄道ハンドブック編集委員会編: “電気鉄道ハンドブック” (2001/9), コロナ社
- [20] 清水陽介, 門脇悟志, 大石潔, 畑正, 佐野孝, 保川忍: “電気車の外乱オブザーバを用いた空転滑走再粘着制御の評価と考察”, 電学論 D (産業応用部門誌), vol.127, No.8, pp.918-925 (2007-8)
- [21] 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”, 電気学会論文誌 D (産業応用部門誌), vol.128, No.7, pp.948-956 (2008/7)
- [22] 戸田伸一, 逸見琢磨, 中沢洋介, 安岡育雄: “鉄道車両駆動用空転再粘着制御に関する一考察”, 電学論 D, 121, 9, pp.923-932 (2001/9)
- [23] 石野勲, 嶋田基巳, 渡邊大輔: “ロバスト粘着制御”, 第 41 回鉄道におけるサイバネティクス利用シンポジウム論文集, 論文 No.518 (2004/11)
- [24] 松岡成康, 木村光男, 玉置誠一, 山崎修, 戸田伸一, 中沢洋介, 安岡育雄: “粘着力の有効利用による空転再粘着制御”, 平成 17 年電気学会全国大会講演論文集, Vol.5, p.237 (2005/3)
- [25] 金原義彦, 小山正人: “低速・回生領域を含む誘導電動機の世界速度センサレスベクトル制御法”, 電気学会論文誌 D (産業応用部門誌), vol.120, No.2, pp.223-229 (2000/2)
- [26] 富川英朝, 村上理, 小山泰平: “環境に優しい鉄道車両用全閉自冷式主電動機”, 東芝レビュー, Vol.63, No.12, pp.50-53 (2008/12)
- [27] 山下道寛: “空転誘発を抑制する引張力制御”, 電気学会交通・電気鉄道研究会 (TER-08-8), pp.7-12, 2008 年
- [28] 門脇 悟志: “接線力推定値を用いた電気車の空転滑走再粘着制御に関する研究”, 長岡技術大学博士論文, 2006 年

本研究に関する発表文献

国際学会

1. **T. Hara**, Y. Takada, T. Koseki and Y. Nozaki: “Dual Sampling Rate Digital Signal Processing for Low Speed Vehicle Tests”, 12th International Conference on Computer System Design and Operation in the Railway and other Transit Systems (Comprail 2010), Beijin, Aug 31st-Sep 2nd.
2. **T. Hara**, Y. Takada, T. Koseki and Y. Nozaki: “Dual sampling rate digital signal processing of optical encoder for low speed dynamic tests of electromagnetic traction systems, including iron-wheel suspended linear motors”, The 20th Magnetodynamics Conference in Pacific Asia (MAGDA 2011), Kaohsiung, Taiwan, Nov 14th -16th, 2011.
3. **T. Hara**, T. Koseki: “Study on re-adhesion control by monitoring excessive angular momentum in electric railway tractions”, The 12th International Workshop on Advanced Motion Control (AMC 2012), Sarajevo, Nov 25th -27th, 2012 (発表予定, Paper ID: 17).

国内学会

1. 原 崇文, 槻木澤 佑公, 古関 隆章, 村端 章浩, 岡山 秀夫: 「電気車における推定接線力, すべり速度情報を活用した再粘着制御」, 電気学会交通・電気鉄道研究会 TER-10-38, 2010.
2. 原 崇文, 槻木澤 佑公, 古関 隆章: 「超過角運動量に着目した空転再粘着制御」, NU-Rail, 2011.
3. 原 崇文, 槻木澤 佑公, 古関 隆章: 「電気鉄道車両の超過角運動量に基づく再粘着制御の提案とその性能評価」, 平成 23 年電気学会産業応用部門大会, 2011 Annual Conference of IEEJ. Industry Applications Society, Okinawa, Sep 6th -8th 2011.
4. 原 崇文, 古関 隆章: 「様々な路面条件下での超過角運動量に着目した空転再粘着制御」, 平成 24 年電気学会全国大会, 2012 National Convention Record IEEJ, Hiroshima, Mar 20th -22nd 2012 (発表予定, 701-A4: 電気鉄道車両制御, 5-079).

他分野における発表文献

1. 原 崇文, 渡邊 央朗, 古関隆章, 水間 毅: 「直流電気鉄道の列車間隔調整による回生ブレーキ有効利用」, 電気学会交通・電気鉄道研究会 TER-11-029, 2011.

謝辞

本研究を進めるにあたり、多くの方から多大なるご支援、ご協力をいただきました。ここに深く感謝の意を表したいと思います。人とのつながりを実感した古関研究室での3年間でした。

指導教員の古関隆章准教授には学部4年から修士2年までの三年間、終始懇切なる御指導と御鞭撻を賜り、いつも暖かい御激励を賜りました。また、国際学会やシンポジウムなど頻繁に自分を活躍する場を設けていただき、非常に良い勉強となりました。いつも面白い冗談を言っていただき、古関先生との思い出は楽しいものばかりです。先生もお体にはくれぐれもご自愛ください。

また、本研究では新京成電鉄株式会社および三菱電機株式会社、三菱電機コントロールソフトウェア株式会社、および新京成電鉄の皆様には多大なるご尽力をいただきました。特に新京成電鉄株式会社の久富浩平様、浜崎康弘様、三菱電機株式会社の米畑秀人様、岡山秀夫様、村端章浩様、加我敦様、三菱電機コントロールソフトウェア株式会社の村上様には日頃より多くの御助言と御協力をいただきましたことを深く感謝申し上げます、ここに謝意を申し上げます。

千葉大学の近藤圭一郎先生にはJRTT学生WGで非常にお世話になりました。先生ご自身とてもお忙しいのにも関わらず、熱い議論に付き合ってください、勉強になりました。高校の先輩ということもあり、高校のお話で盛り上げられたのも非常に楽しかったです。千葉大学の斎藤達仁さん、長谷川奨さん、岡野翔太さんはJRTT学生WGでの打合せだけではなく、電気学会産業応用部門大会で一緒にご見学させていただいたり、非常に楽しい見学をさせていただきました。

高田康弘技術職員には日頃から大変お世話になりました。困ったときにいつも相談に乗っていただいたり、お酒を飲んだりとても楽しかったです。また、世界の山ちゃんに行きましょう。時々いただいた北海道のお土産は非常においしかったです。

秘書の松崎由香子様には出張の際の事務手続き等でお世話になっただけでなく、昔は隣席であったのもあり、美味しい物をいただいたり、食べ物について話をするのがとても楽しかったです。

昨年卒業された東海旅客鉄道の福正博之さんには学部4年、修士一年のときに普通のミーティングでのアドバイスはもちろん、学会論文などの校正をしていただきました。論文の基本的な書き方、考え方から指導していただき、感謝しています。卒業されてからお会いする機会が減って非常に残念ですが、また一緒にお酒を飲めればと思います。

住友金属工業株式会社の槻木澤佑公さんには、学部4年生に特にお世話になりました。空転再粘着制御という研究を同時に進めていく中で、たくさんのご指導やアドバイスをいただきました。論文の書き方から図の書き方から基本的なところから教えていただき感謝しています。この研究を進めていく途中で頻りに電話でご相談に乗っていただき、ありがとうございます。

博士課程一年の申重燮さんには英語論文の書き方や学会発表での心構えを教えてくださいました。また、研究室のシステム管理者ということで、パソコンの不具合などを頻りに修繕していただきました。また、いつも買ってきてくださる韓国のお土産は非常に美味しかったです。これからも学生の中で最高学年ということもあり、研究室を引っ張って行ってください。

修士二年の中村太一君には同期ということもあり、研究の苦労や愚痴を共有することはもちろんのこと、研究室での雑談など楽しい研究生活を送ることができました。同じ学年として切磋琢磨し、苦しいときは助け合い、楽しいときははしゃぐ。研究自体が全く苦痛では無かったという面から見ると、こういう人間関係の人が研究室にいたことがとても大きいと実感させられました。これからの社会人としての活躍をお祈りしています。ヨーロッパの卒業旅行楽しみましょう！

修士一年の河邊貴之君には生協と一緒に一緒に行ってお菓子を買ったり、上野でいろいろ遊んだのが印象的でした。自分にとっては縁の無い分野の知識が豊富でよく勉強させてもらいました。修士一年の山元雄太君には鉄道の話で

よく盛り上がったのが、非常に良い思い出です。特に彼は鹿児島出身ということもあり、九州管内のことについてはいろいろ教えていただきました。来年以降もあまり自分で背負いすぎることなく、残された学生生活を楽しんでください。修論のチェックもしていただき、ありがとうございました。修士一年の楊哲君には自分がチューターということもあり、いろいろなお話をさせてもらいました。また、出身の中国についていろいろお話を聞かせていただき、楽しかったです。これからも研究がんばってください。

また、学部 4 年生の角谷太郎君、高橋優斗君、水野陽二郎君、研究生の Cuong Ninh Vang 君、Jorge さん、修士二年のエムレドゥーマンさんにも大変お世話になりました。

最後に、大学生生活を精神面、経済面において支えてくれた家族に心より感謝の意を表し、謝辞といたします。

平成 24 年 2 月 8 日

原 崇文

付録A 4軸2台車モデルへの拡張の運動方程式

第1動軸前後動

$$\begin{aligned} m_W \ddot{x}_{w1} + 2c_A (\dot{x}_{w1} - \dot{x}_{T1} - h_1 \dot{\theta}_{T1}) \\ + 2k_A (x_{w1} - x_{T1} - h_1 \theta_{T1}) = F_{ad1} = \mu_1 N_1 \end{aligned} \quad (\text{A.1})$$

第2動軸前後動

$$\begin{aligned} m_W \ddot{x}_{w2} + 2c_A (\dot{x}_{w2} - \dot{x}_{T1} - h_1 \dot{\theta}_{T1}) \\ + 2k_A (x_{w2} - x_{T1} - h_1 \theta_{T1}) = F_{ad2} = \mu_2 N_2 \end{aligned} \quad (\text{A.2})$$

第3動軸前後動

$$\begin{aligned} m_W \ddot{x}_{w3} + 2c_A (\dot{x}_{w3} - \dot{x}_{T2} - h_1 \dot{\theta}_{T2}) \\ + 2k_A (x_{w3} - x_{T2} - h_1 \theta_{T2}) = F_{ad3} = \mu_3 N_3 \end{aligned} \quad (\text{A.3})$$

第4動軸前後動

$$\begin{aligned} m_W \ddot{x}_{w4} + 2c_A (\dot{x}_{w4} - \dot{x}_{T2} - h_1 \dot{\theta}_{T2}) \\ + 2k_A (x_{w4} - x_{T2} - h_1 \theta_{T2}) = F_{ad4} = \mu_4 N_4 \end{aligned} \quad (\text{A.4})$$

前台車枠前後動

$$\begin{aligned} m_T \ddot{x}_{T1} + (4c_A + 2c_b) \dot{x}_{T1} + (4k_A + 2k_b) x_{T1} \\ - 2c_b (\dot{x}_b + h_3 \dot{\theta}_B) - 2k_b (x_b + h_3 \theta_B) \\ - 2c_A (\dot{x}_{W1} + \dot{x}_{W2}) - 2k_A (x_{W1} + x_{W2}) \\ + (4c_A h_1 - 2c_b h_2) \dot{\theta}_{T1} + (4k_A h_1 - 2k_b h_2) \theta_{T1} = 0 \end{aligned} \quad (\text{A.5})$$

後台車枠前後動

$$\begin{aligned} m_T \ddot{x}_{T2} + (4c_A + 2c_b) \dot{x}_{T2} + (4k_A + 2k_b) x_{T2} \\ - 2c_b (\dot{x}_b + h_3 \dot{\theta}_B) - 2k_b (x_b + h_3 \theta_B) \\ - 2c_A (\dot{x}_{W3} + \dot{x}_{W4}) - 2k_A (x_{W3} + x_{W4}) \\ + (4c_A h_1 - 2c_b h_2) \dot{\theta}_{T2} + (4k_A h_1 - 2k_b h_2) \theta_{T2} = 0 \end{aligned} \quad (\text{A.6})$$

車体前後動

$$\begin{aligned} 2m_B \ddot{x}_b + 4c_b \dot{x}_b + 4k_b x_b \\ - 2c_b \{ \dot{x}_{T1} + \dot{x}_{T2} - 2h_3 \dot{\theta}_b - h_2 (\dot{\theta}_{T1} + \dot{\theta}_{T2}) \} \\ - 2k_b \{ x_{T1} + x_{T2} - 2h_3 \theta_b - h_2 (\theta_{T1} + \theta_{T2}) \} = 0 \end{aligned} \quad (\text{A.7})$$

前台車枠上下動

$$m_T \ddot{z}_{T1} + 2c_{1z} \dot{z}_{T1} + 2k_{123} z_{T1} - 2k_{23}(z_b + l_1 \theta_b) + 2k_2 z_{S1} = 0 \quad (\text{A.8})$$

$$k_{123} = k_1 + k_2 + k_3 \quad (\text{A.9})$$

後台車枠上下動

$$m_T \ddot{z}_{T2} + 2c_{1z} \dot{z}_{T2} + 2k_{123} z_{T2} - 2k_{23}(z_b - l_1 \theta_b) + 2k_2 z_{S2} = 0 \quad (\text{A.10})$$

車体上下動

$$2m_B \ddot{z}_b + 2k_{23}(2z_b - z_{T1} - z_{T2}) - 2k_2(z_{S1} + z_{S2}) = 0 \quad (\text{A.11})$$

$$k_{23} = k_2 + k_3 \quad (\text{A.12})$$

前台車ピッチング

$$\begin{aligned} J_{T1} \ddot{\theta}_{T1} + (4c_A h_1^2 + 2c_b h_2^2 + 2c_{1z} a^2) \dot{\theta}_{T1} + (4k_A h_1^2 + 2k_b h_2^2 + 2k_{1z} a^2) \theta_{T1} \\ + 2c_b h_2 (\dot{x}_b + h_3 \dot{\theta}_B) + 2k_b h_2 (x_b + h_3 \theta_B) \\ + (4c_A h_1 - 2c_b h_2) \dot{x}_{T1} + (4k_A h_1 - 2k_b h_2) x_{T1} - 2c_A h_1 (\dot{x}_{w1} + \dot{x}_{w2}) - 2k_A h_1 (x_{w1} + x_{w2}) = 0 \end{aligned} \quad (\text{A.13})$$

後台車ピッチング

$$\begin{aligned} J_{T2} \ddot{\theta}_{T2} + (4c_A h_1^2 + 2c_b h_2^2 + 2c_{1z} a^2) \dot{\theta}_{T2} + (4k_A h_1^2 + 2k_b h_2^2 + 2k_{1z} a^2) \theta_{T2} \\ + 2c_b h_2 (\dot{x}_b + h_3 \dot{\theta}_B) + 2k_b h_2 (x_b + h_3 \theta_B) \\ + (4c_A h_1 - 2c_b h_2) \dot{x}_{T2} + (4k_A h_1 - 2k_b h_2) x_{T2} - 2c_A h_1 (\dot{x}_{w3} + \dot{x}_{w4}) - 2k_A h_1 (x_{w3} + x_{w4}) = 0 \end{aligned} \quad (\text{A.14})$$

車体ピッチング

$$\begin{aligned} J_{By} \ddot{\theta}_B + c_b h_3^2 \dot{\theta}_B + 4(k_{23} l_1^2 + k_b h_3^2) \theta_B - 2k_{23} l_1 (z_{T1} - z_{T2}) - 2k_2 l_1 (z_{S1} - z_{S2}) \\ + 2c_b h_3 \{2\dot{x}_B - \dot{x}_{T1} - \dot{x}_{T2} + h_2 (\dot{\theta}_{T1} + \dot{\theta}_{T2})\} + 2k_b h_3 \{2x_B - x_{T1} - x_{T2} + h_2 (\theta_{T1} + \theta_{T2})\} = 0 \end{aligned} \quad (\text{A.15})$$

前台車空気ばね変位

$$2c_2 \dot{z}_{S1} + 2(N+1)k_2 z_{S1} - 2k_2 (z_B + l_1 \theta_B - z_{T1}) = 0 \quad (\text{A.16})$$

後台車空気ばね変位

$$2c_2 \dot{z}_{S2} + 2(N+1)k_2 z_{S2} - 2k_2 (z_B - l_1 \theta_B - z_{T2}) = 0 \quad (\text{A.17})$$

軸重移動

第1軸垂直抗力

$$\begin{aligned} N_1 = \frac{m_B}{2} \frac{l_1 - h_{l1} \tan(\theta_B)}{l_1} \frac{a - h_{a1} \tan(\theta_{T1})}{a} + \frac{m_T}{2} \frac{a - h_{a2} \tan(\theta_{T1})}{a} \\ + m_W - 2c_1 (\dot{z}_{T1} + a \dot{\theta}_{T1}) - 2k_1 (z_{T1} + a \theta_{T1}) \end{aligned} \quad (\text{A.18})$$

第2軸垂直抗力

$$N_2 = \frac{m_B}{2} \frac{l_1 - h_{l1} \tan(\theta_B)}{l_1} \frac{a + h_{a1} \tan(\theta_{T1})}{a} + \frac{m_T}{2} \frac{a + h_{a2} \tan(\theta_{T1})}{a} + m_W - 2c_1(\dot{z}_{T1} - a\dot{\theta}_{T1}) - 2k_1(z_{T1} - a\theta_{T1}) \quad (\text{A.19})$$

第3軸垂直抗力

$$N_3 = \frac{m_B}{2} \frac{l_1 + h_{l1} \tan(\theta_B)}{l_1} \frac{a - h_{a1} \tan(\theta_{T2})}{a} + \frac{m_T}{2} \frac{a - h_{a2} \tan(\theta_{T2})}{a} + m_W - 2c_1(\dot{z}_{T2} + a\dot{\theta}_{T2}) - 2k_1(z_{T2} + a\theta_{T2}) \quad (\text{A.20})$$

第4軸垂直抗力

$$N_4 = \frac{m_B}{2} \frac{l_1 + h_{l1} \tan(\theta_B)}{l_1} \frac{a + h_{a1} \tan(\theta_{T2})}{a} + \frac{m_T}{2} \frac{a + h_{a2} \tan(\theta_{T2})}{a} + m_W - 2c_1(\dot{z}_{T2} - a\dot{\theta}_{T2}) - 2k_1(z_{T2} - a\theta_{T2}) \quad (\text{A.21})$$