

# 平行カルダン駆動台車における再粘着制御時の台車挙動の考察

○ [機] 山口 泰平      [機] 道辻 洋平 (茨城大学)

[電] 牧島 信吾 (東洋電機製造)

## Behavior of Truck with Parallel Cardan Drives under Re-adhesion Control

○Taihei Yamaguchi, Yohei Michitsuji, (Ibaraki University)

Shingo Makishima (Toyo Denki Seizo K.K.)

The vibration of truck caused by motor torque reduction in re-adhesion control affects the control performance greatly. We carry out simulation of the behavior of truck with parallel Cardan drives under re-adhesion control. The model is validated by comparisons with measurements in a test run. The simulation result shows that there can be a continual error of slip detection because of the vibration of truck frame. The condition to avoid the error is shown in connection with a parameter of the truck.

**キーワード** : 電気車, 空転, 再粘着制御, 接線力係数, 台車, 平行カルダン駆動

**Key Words** : Electric motor car, Wheel slip, Re-adhesion control, Tangential force coefficient, Truck, Parallel Cardan drive

### 1. 緒言

電気車の再粘着制御における課題として、空転・滑走の検知精度や加減速度のさらなる向上、乗心地への影響の低減、制御則のパラメータの最適化等が挙げられる。これらの課題を解決するには、台車運動をはじめとする車両ダイナミクスを考慮することが不可欠である。

再粘着制御時に発生する車両ダイナミクスについては、制御の方式ごとにこれまで様々な研究<sup>1)~3)</sup>がなされてきた。本研究で着目する再粘着制御の方式は、空転・滑走検知時のモータ負荷トルクを推定し、その値に応じてトルク引き下げ量を決定する方式<sup>4)</sup>である。この方式ではトルクを急速に引き下げることで短時間に空転・滑走を収束させることができる。この急速なトルク変化の際に発生する台車振動等は、制御性能に大きな影響を与える。先行研究として、台車枠ピッチングの固有振動数と減衰比を考慮した負荷トルク推定を行うことで、制御性能の向上を図った研究<sup>5)</sup>等があるが、トルク引き下げ時の過渡的な台車挙動の特性について詳しく調べた例は少ない。

筆者らはこれまでに、平行カルダン駆動台車の3次元モデルを構築し、再粘着制御のシミュレーションを実施した<sup>6)</sup>。本稿ではシミュレーション結果の妥当性を確認した上で、シミュレーションを用いて台車挙動と再粘着制御性能の関係について考察する。

### 2. モデル化

#### 2.1 車両モデル

平行カルダン駆動台車のモデル<sup>6)</sup>を図1に示す。モータは台車枠に固定されており、モータトルクは軸継手を介して、歯車箱内部の小歯車に入力される。歯車箱は輪軸の回りを回転でき、台車枠との間にある歯車箱吊りゴムにより、台車枠と連成して振動する。モデルの自由度は輪軸、台車枠、歯車箱の各前後、上下、ピッチ、ロール方向を考慮している。また、車体は1台車当たり分割したモデルとし、前後自由度のみを考慮する。

#### 2.2 接線力モデル

車輪・レール間に働く前後方向の力である接線力 $F$ は、輪重 $P$ と接線力係数 $f$ を用いて、

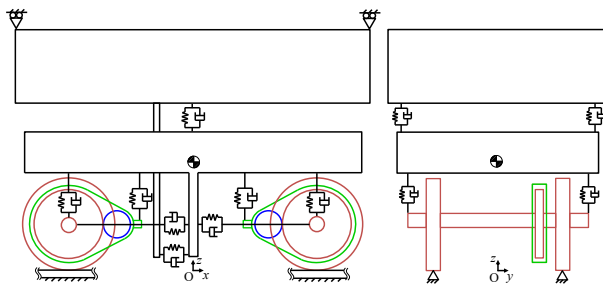


Fig.1 Vehicle model

$$F = f \cdot P \quad (1)$$

と表すことができる。本研究では接線力係数を速度、すべり速度、輪重の関数  $\phi$  としてモデル化する。速度とすべり速度に対する接線力係数特性の例を図 2 に示す。

### 3. 再粘着制御

空転再粘着制御時のモータトルク指令値のパターン <sup>4)</sup> を図 3 に示す。インバータ装置の制御部におけるモータ角加速度推定値が、一定の閾値を超えた場合に空転として検知する。検知後、モータトルク指令値をある値  $\tau_a$  まで急速に引き下げて、一定時間  $T_a$  の間に再粘着させる。次にモータトルク指令値を  $\tau_b$  まで引き上げ、一定時間  $T_b$  の間保持する。これにより、再空転しない範囲のできるだけ大きなトルクでの加速を実現する。 $T_a, T_b$  をそれぞれ引下時間、保持時間と称する。 $\tau_a$  と  $\tau_b$  の値は、空転検知時のモータ負荷トルク推定値  $\hat{\tau}_l$  を用いて以下のように決定する。

$$\tau_a = K_a \hat{\tau}_l \quad (2)$$

$$\tau_b = K_b \hat{\tau}_l \quad (3)$$

ここで  $K_a, K_b$  はそれぞれ引下係数、保持係数と称する定数である。ただし  $K_a$  は空転検知時のモータトルク指令値に応じて可変とする。なお今回は 1 台車内の 2 台のモータを 1 台のインバータ装置で並列駆動するため、モータトルク指令値等の制御入出力は 2 台のモータの平均値となる。

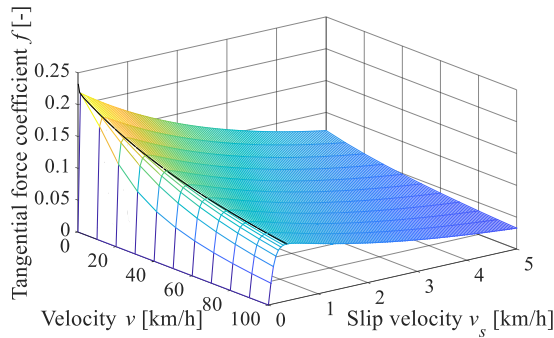


Fig.2 Example of characteristic of tangential force coefficient with wheel load  $P = 40 \text{ kN}$

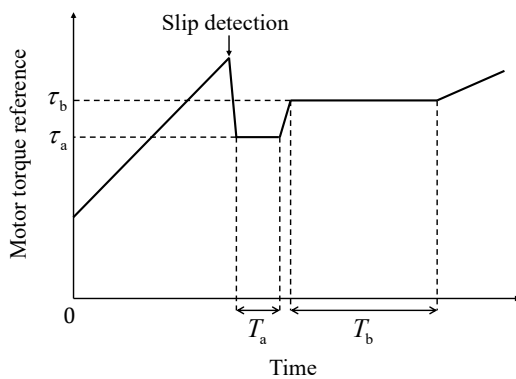


Fig.3 Motor torque reference pattern of anti-slip re-adhesion control

Table.1 Main parameters of simulation

|                                             |                 |                                  |
|---------------------------------------------|-----------------|----------------------------------|
| Pitching moment of inertia                  | Wheel $J_w$     | $70 \text{ kg m}^2$              |
|                                             | Gear case $J_g$ | $16 \text{ kg m}^2$              |
|                                             | Truck $J_t$     | $1.0 \times 10^3 \text{ kg m}^2$ |
| Primary vertical suspension stiffness $k_w$ |                 | $1.0 \times 10^6 \text{ N/m}$    |
| Primary vertical damping coefficient $c_w$  |                 | $3.0 \times 10^3 \text{ N s/m}$  |
| Gear case suspension stiffness $k_g$        |                 | $2.0 \times 10^7 \text{ N/m}$    |
| Gear case damping coefficient $c_g$         |                 | $4.0 \times 10^3 \text{ N s/m}$  |
| Secondary suspension stiffness $k_t$        |                 | $5.0 \times 10^5 \text{ N/m}$    |
| Secondary damping coefficient $c_t$         |                 | $3.5 \times 10^3 \text{ N s/m}$  |

## 4. シミュレーション

### 4.1 現車試験との比較

以上のモデルと再粘着制御アルゴリズムを用いてシミュレーションを実施する。シミュレーション条件は先行研究 <sup>7)</sup> の電車における現車試験と同等とした。主なパラメータを表 1 に示す。モータトルク指令値は 0 から  $1500 \text{ N m}$  まで増加させ、空転を検知すれば再粘着制御を実施する。

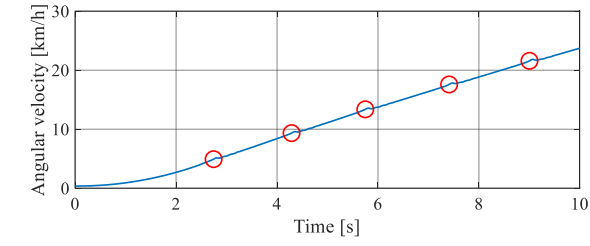
シミュレーション結果を図 4 に示す。(a) はモータ角速度推定値で、丸印の箇所では空転検知が行われた。(b) はモータトルク指令値で、再粘着制御が繰り返し動作する様子が確認できる。(c) はモータ角加速度推定値で、閾値を超えて空転が検知され、モータトルク引き下げにより振動が発生している。(d) は実線がすべり速度、点線が粘着限界のすべり速度である。空転検知時のすべり速度は、粘着限界時より大きい空転領域にある。引下時間中に粘着領域まで減少していることから、再粘着制御が成功していることを確認できる。図 4 を先行研究 <sup>7)</sup> の現車試験時のデータと比較した結果、波形が定性的によく一致していることを確認した。

### 4.2 空転誤検知現象の解析

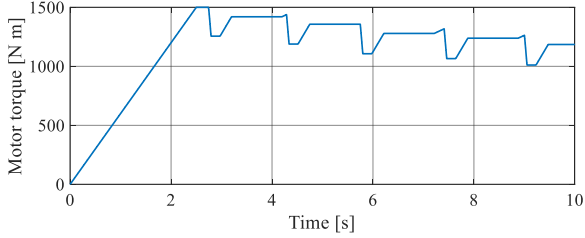
台車の運動特性が制御に与える影響を考察するため、台車の軸箱上下減衰係数  $c_w$  を変更してシミュレーションを実施した。 $c_w$  を  $1500 \text{ N s/m}$  に半減させた場合の結果を図 5 に示す。(a) のモータ角速度推定値は、図 4 に比べて低下している。この原因は、時刻  $3 \text{ s} \sim 5 \text{ s}$  にかけて空転検知が短時間に多数発生し、(b) のモータトルク指令値が連続的に引き下げられたためである。空転検知が多発した原因は、(c) のモータ角加速度推定値に大きな振動が発生したためである。検知のうち 2 回目以降は、(d) のすべり速度が粘着領域にあることからすべて誤検知である。

空転誤検知の原因となったモータ角加速度推定値は、モータ軸と台車枠の相対角加速度  $\dot{\omega}_{mt}$  を推定したものである。 $\dot{\omega}_{mt}$  は、以下のように台車各部の角加速度成分の和で表すことができる。

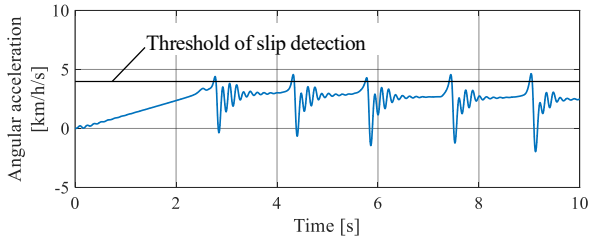
$$\dot{\omega}_{mt} = R_g \dot{\omega}_w - (R_g + 1) \dot{\omega}_g + \dot{\omega}_t \quad (4)$$



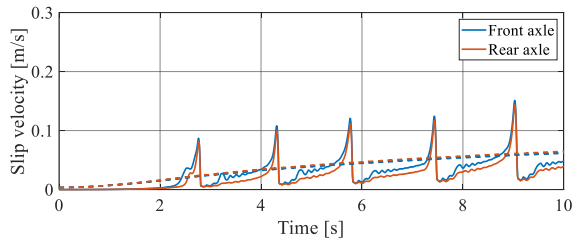
(a) Estimated angular velocity of motor



(b) Motor torque reference



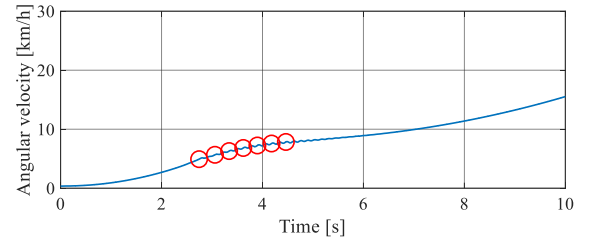
(c) Estimated angular acceleration of motor



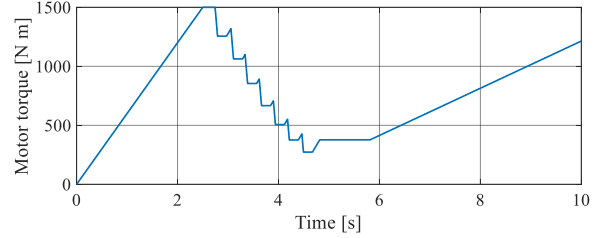
(d) Slip velocity

Fig.4 Simulation result with parameters of Table.1

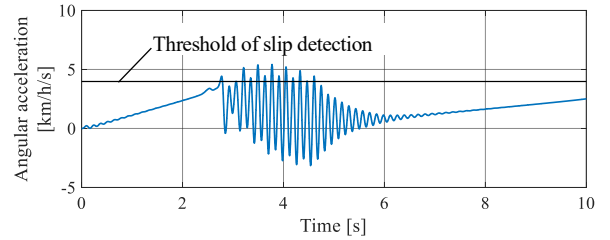
ここで  $\dot{\omega}_w, \dot{\omega}_g, \dot{\omega}_l$  はそれぞれ輪軸，歯車箱，台車枠のピッチ角加速度， $R_g$  は歯車比である．1 回目の空転検知前後における各角速度成分を図 6 に示す．(a) は  $c_w = 3000 \text{ N s/m}$  の場合，(b) は  $c_w = 1500 \text{ N s/m}$  の場合である．モータトルク引き下げによって発生した各成分の振動は，(a) では減衰しているのに対し，(b) では振幅が徐々に増大している．また，(b) では各成分が同位相で重畳している．このときの台車の振動状態の模式図を図 7 に示す．台車枠のピッチングとローリングに歯車箱が付随して振動している．車両モデルのモード解析を実施した結果，この振動は特定のモード形状とそのときの固有振動数 (7.9 Hz) によく一致していることが判明した．以上より，軸箱上下減衰係数が小さい場合に誤検知が連続して発生する原因は，台車枠のピッチングとローリングに歯車箱が付随するモードの振動が，モータトルク引き下げ後に大きくなることで，モータ軸と台車枠の相対角加速度に台車各部の振動成分が同位相



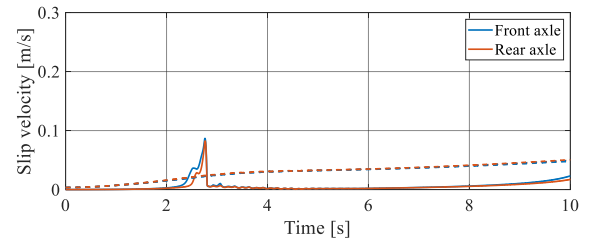
(a) Estimated angular velocity of motor



(b) Motor torque reference



(c) Estimated angular acceleration of motor



(d) Slip velocity

Fig.5 Simulation result with  $c_w = 1500 \text{ N s/m}$ 

で重畳するためと考えられる．

#### 4.3 軸箱上下減衰係数の引下係数への影響

誤検知の原因である台車振動の大きさは，モータトルク引き下げ量によって変化すると考えられる．そこで， $c_w = 1500 \text{ N s/m}$ ,  $3000 \text{ N s/m}$ ,  $4500 \text{ N s/m}$  の各条件において，引下係数  $K_a$  の値を変更しながらシミュレーションを繰り返し実施した．その結果を図 8 に示す．

$c_w = 1500 \text{ N s/m}$  のとき， $K_a$  を現車試験より  $0.03 \sim 0.1$  程度大きくすることで，誤検知が解消した．一方， $K_a$  を  $0.14$  以上大きくした場合，再粘着に失敗する現象が発生した．このときのグラフを図 9 に示す．(a) のモータトルク指令値は，時刻  $3 \text{ s} \sim 4 \text{ s}$  付近で連続的に引き下げられている．このとき (b) のすべり速度は，モータトルク引き下げにも関わらず空転領域に留まり大空転に至っている．この原因は，引下係数を増加させたことで，引き下げ後のモ

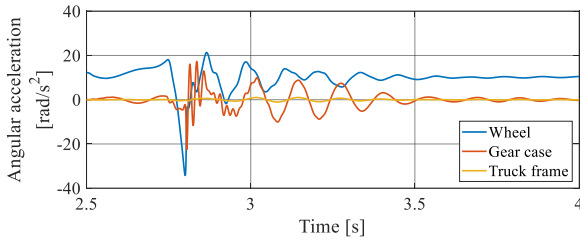
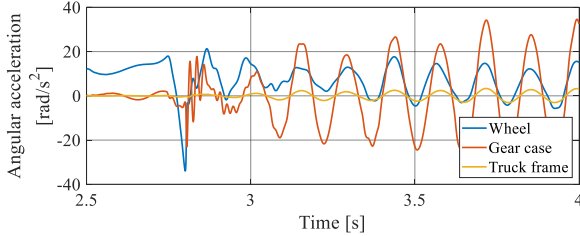
(a)  $c_w = 3000 \text{ N s/m}$ (b)  $c_w = 1500 \text{ N s/m}$ 

Fig.6 Components of angular acceleration of motor

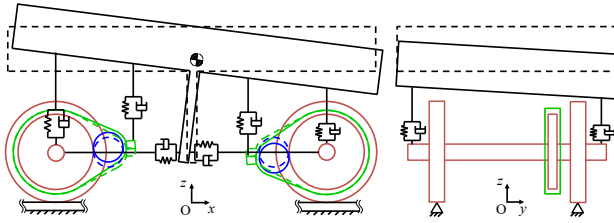


Fig.7 Vibration of truck when detection error occurs

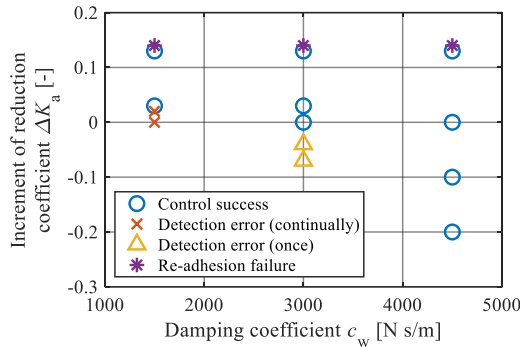
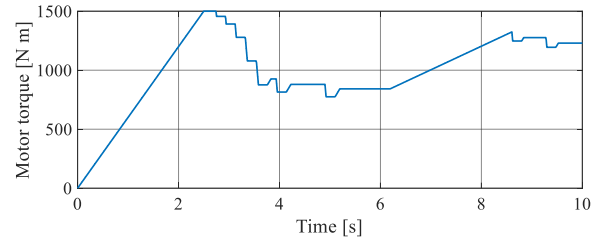


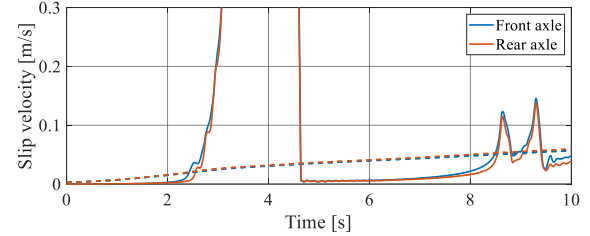
Fig.8 Result of re-adhesion control with each primary vertical damping coefficient and increment of reduction coefficient

ータトルクが依然として負荷トルクを上回っていたためと考えられる。再粘着失敗時の (a) のモータトルク指令値は階段状の波形を示しており、一見すると図 5 (b) の誤検知時の波形と類似しているが、発生している現象はまったく異なることが分かる。

$c_w = 3000 \text{ N s/m}$  のときは、 $K_a$  を小さくした場合に誤検知が発生したが、2 回以上連続して誤検知することはなかった。さらに  $c_w = 4500 \text{ N s/m}$  のときは、誤検知はまったく発生しなかった。これは  $c_w$  の増加により、台車枠のピッチング・ローリング振動が抑制されるためと考えられる。



(a) Motor torque reference



(b) Slip velocity

Fig.9 Simulation result with  $c_w = 1500 \text{ N s/m}$  and  $\Delta K_a = 0.14$ 

## 5. 結言

本研究では再粘着制御時の台車挙動のシミュレーションを実施し、台車の運動特性が制御に与える影響を考察した。モータトルク引き下げによって台車枠のピッチングとローリングに歯車箱が付随するモードの振動が発生することで、空転誤検知が発生しうること示した。制御パラメータの設定に際して、空転誤検知や再粘着失敗を防止するために考慮すべき車両パラメータの影響を明らかにした。

## 参 考 文 献

- 1) 山下道寛, 添田正: 電気機関車の軸重移動を考慮した空転再粘着制御法の開発, 鉄道総研報告, Vol. 24, No. 6, pp. 41-46, 2010.
- 2) 相原将仁, 近藤圭一郎, 桜沢良樹, 山崎修: 空転再粘着制御時のトルク引き下げ時に生じる台車振動の影響, 電気学会研究会資料, TER-20-28, pp. 13-18, 2020.
- 3) 黒丸廣一, 大石潔, 小川泰明, 宮下一郎, 保川忍: 電気車の台車系を考慮した空転再粘着制御系の一方式, 電気学会研究会資料, IIC-00-11, pp. 61-66, 2000.
- 4) 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, 電気学会論文誌 D, Vol. 121, No. 11, pp. 1192-1198, 2001.
- 5) 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, Vol. 128, No. 7, pp. 948-956, 2008.
- 6) 山口泰平, 道辻洋平, 牧島信吾: 平行カルダン駆動台車の粘着・空転現象を考慮したモデル構築, Dynamics and Design Conference 2020 講演論文集, 503, 2020.
- 7) 牧島信吾, 大久保孔靖, 高木正志: 空転安定化制御の提案および現車試験検証, 電気学会論文誌 D, Vol. 138, No. 2, pp. 91-98, 2018.