

外力抑制制御によりラッシュ時の戸閉遅れを解消する電車用ドアシステム

○ [電] 稲玉 繁樹 (富士電機)

[電] 呉 世訓 (東京大学)

[電] 堀 洋一 (東京大学)

Train door system to solve the delays in door closings during rush hours by
disturbance rejection controlShigeki Inatama (Fuji Electric)
Sehoon Oh (The University of Tokyo)
Yoichi Hori (The University of Tokyo)

There are lots of troubles related to commuter train doors during rush hours, particularly in big cities. Delays in door operation cause train delays and disrupt the train schedules. The paper proposes an external force suppression control that detects the force pushed by people and provides a certain force to push the force back. This leads to stable door openings and closing. The structure of the proposed door system and control algorithm with experiment results are reported in this paper.

キーワード：鉄道，電車ドア，外力検出，2 自由度制御

Key Words：Railway, Train door, Disturbance detection, 2DOF

1. はじめに

日本の鉄道は世界一の定時運行性を保有しており，鉄道会社，乗務員，駅員などの日々の努力と運行システムや鉄道機器の高い信頼性により成り立っている．しかし，首都圏における通勤列車の混雑ぶりは混迷を極めており，弊社も納入しているドアシステムはラッシュアワーにおける満員の乗客と直接触れあい，確実な施錠のうえ電車を発車させなければならない，異常や故障が発生すると即延延事故につながるため重要な役割と信頼性が要求されている．⁽¹⁾

この問題に対し乗客を押し込むため単純に力を強くすることも考えられるが，近年頻発している挟み込み事故や引きずり事故などにつながるため，安定動作と安全動作の両立を目指したさまざまな研究が行われている．⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾

本提案では特別なセンサを追加せずに乗客等からドアにかかる外力を検知，逆方向の力を与え押さえ込む制御により，外力の影響を受けず，常に開閉時間が一定となる機能を搭載したドアシステムを紹介する．また，ラッシュを想定した実験により従来機種からの改善効果と安全性について確認する．

2. ドアシステムの概要

2.1 動作概要

ドアシステムの概要を(図 1)に外観を(図 2)に示す．運転台からの開閉指令をドア制御装置(DCU=Door Control Unit)が受けドア用モータを駆動する．モータにラック&ピニオン機構を介することで回転運動を直線運動に変換，回転方向や回転速度を制御することでスムーズなドア駆動を実現している．

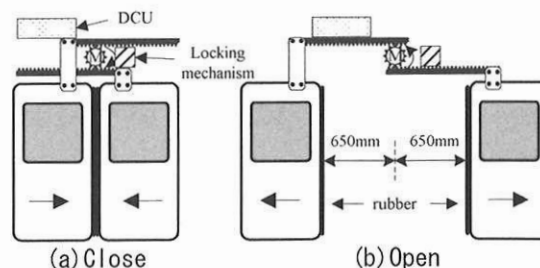


図 1 ドアシステム機器概要



図 2 ドアシステム外観

2.2 ドアシステムの主要構成部品

図 1 の主要構成部品について説明する。電気式ドアは無通電時に全閉保持する施錠装置(Locking mechanism)が重要だが本提案への関連性は低いので説明は割愛する。

(1) 高精度エンコーダ搭載モータ

0.01mm 以上の分解能を持つ位置検出器 (エンコーダ) を内蔵した FCPM(Flat Cup Permanent Motor)と呼ばれる薄型高出力モータにより高精度なトルク制御と、詳細な位置情報を取得する。外力検出はトルクと位置情報から演算しているため高精度なエンコーダが必要となる。

(2) ダイレクトリンク機構

モータから戸先ゴムまでのガタ、隙間を減らしダイレクトに駆動させる必要がある。ガタ、隙間が大きい機構の場合、大きな振動が発生し実用に耐えない。外力抑制制御に追従する機構も重要な要素である。

(3) ドア制御装置(DCU)

モータ制御、外力検出や信号処理、開閉シーケンス、通信制御など全ての処理は DCU に内蔵した CPU のソフトウェアにより実現している。従来と同クラスの CPU 性能にて実現できたため、提案制御を採用しても DCU のコストアップは抑えられそうである。

3. 外力抑制制御

3.1 制御概要

図 3 に外力抑制制御を含むドア駆動部の制御ブロック図を示す。ドア開閉指令(C^*)とドア位置(x)から開閉制御部(Door control sequence)が速度指令(V^*)を生成、速度調節器(Auto speed regulator)が速度指令に追従するための推力指令(F^*)をドア(P)に与える事で開閉動作を実現している。ドア速度(v)はドア位置情報(x)を微分し演算する。

外力抑制制御は外力検出部(disturbance observer)によりドアにかかる外力(disturbance)を推定し外力抑制値($dist$)を与えることでドアにかかる外力の影響を受けずに速度指令に追従させる制御である。(5)

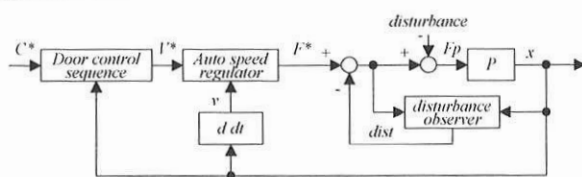


図 3 外力抑制制御ブロック線図

3.2 外力検知の仕組み

図 3 中の外力検出部詳細を図 4 に示す。

外力(disturbance)は推力指令(F^*)と実際ドアに与えられ

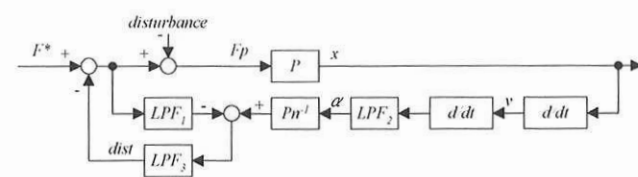


図 4 外力検出部ブロック線図

るプラント推力(F_p)の差分であることに着目し、ドア位置情報(x)より、プラント推力(F_p)を推定する。

$$F = m\alpha \quad \dots\dots\dots(1)$$

$$F^* - \text{disturbance} = m\alpha \quad \dots\dots\dots(2)$$

まず運動方程式(1)より質量(m)と加速度(α)と推力(F)の関係が成り立つ。実際には外力(disturbance)を引いたプラント推力(F_p)が伝わり、式(2)の関係となる。

$$\text{dist} = F^* - Pn^{-1}\alpha \quad \dots\dots\dots(3)$$

外力補償値(dist)を求める式(3)は式(2)を変形しドア質量(m)をプラントのノミナルモデル(Pn^{-1})に置き換えている。

式中の推力指令(F^*)は指令のため既知であり、加速度(α)はドア位置を微分し算出されるためノミナルモデル(Pn^{-1})を定義できれば外力補償値(dist)が求まる。

$$Pn^{-1} = \frac{F^*}{\alpha} \quad \dots\dots\dots(4)$$

ノミナルモデルは外力の無いドアへ一定の推力指令を与え、加速度を観測し式(1)を変形した式(4)により求めた。100[N]の指令を与えた結果(図 5)から $\alpha=0.72[\text{m/s}^2]$ が観測され $Pn^{-1} = 139[\text{kg}]$ をノミナルモデル(Pn^{-1})として採用した。尚、この値はモータから見た質量となり機械ロスや摩擦を含み実際のドア質量とは異なるが、加速度と推力の関係が正しく反映されるため上記の値を制御に採用した。

図 4 中のローパスフィルタ(LPF_1, LPF_2, LPF_3)はノイズ成分を吸収するためプラント特性に合わせ調整を行い 20~50[ms]に設定されている。

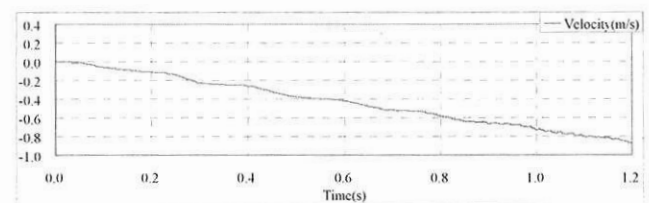


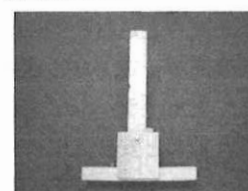
図 5 100[N] 指令時のドア速度

4. 試作機による動作実験

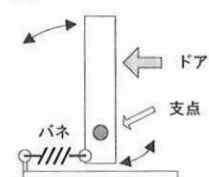
4.1 外力検知実験

図 6 に示す外力発生器はバネとテコの原理を利用し一定の外力が与えられる。図 7(a)に示すドアに外力を与えた測定結果は、外力発生器による外力(disturbance)と外力検出値(dist)がおおむね一致し外力検知性能は良好であった。

図 7(b)は人間が閉まるドアを片手で引っ張り、外力を与えた位置と検出値が一致する事を確認した。

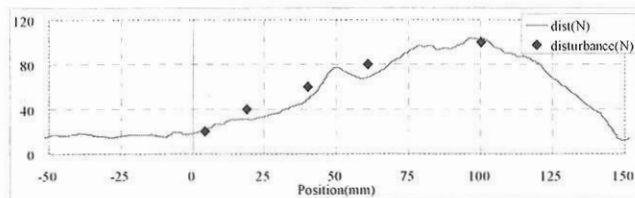


(a) 外観写真

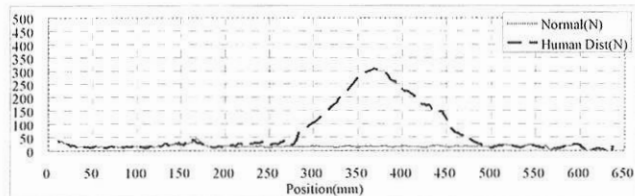


(b) 動作概要

図 6 外力発生器



(a) 外力発生器による外力



(b) 人間による外力

図 7 外力検出値

4.2 ラッシュアワーを想定した動作実験

外力抑制制御の効果を確認するため、戸閉遅れの主要原因となるラッシュ時の混雑を模擬した実験を行った。弊社工場内に設置されている実機サイズの試験機を使用し、図 8(a)(b)に示すよう被験者が戸閉中のドアに対し強く体で押す事でラッシュを模擬した横加重を与えている。また被験者を 1～8 人に変化することで乗車率の上昇を模擬している。被験者は 20～40 代男性のみのため少人数ながら十分に強い外力が与えられた。

被験者の押し付け力や試験機の老朽化による摩擦など、ばらつきが想定されるため従来機種/提案機種とも同程度の外力となるように被験者に注意を喚起し、実験はそれぞれ 5 回実施、平均値を結果として採用した。

図 9 は被験者による外力を確認するため、被験者数と提案機種の外力検出値をグラフに表した。被験者 0 名を示す実線はドアに外力を与えない状態であり外力は 0[N]と思われるがちががグラフは 15～20[N]を示している。これは速度一定状態の走行抵抗がモータから見た外力として検出されておりドアの走行抵抗 15～20[N]とも一致する。また図中 1.8[秒]と 2.8[秒]付近に僅かな外力上昇が見られる。こちらは閉速度の変化ポイントと一致し減速動作中の加速度と前述のノミナルモデル(Pn)誤差から発生している。ノミナルモデルの精度を上げることで検知性能は向上するが動作への影響は小さく、電車ドアという特性上、摩擦や抵抗のばらつきが多く精度向上に意味が無いため現状にて実用上の問題は無い。

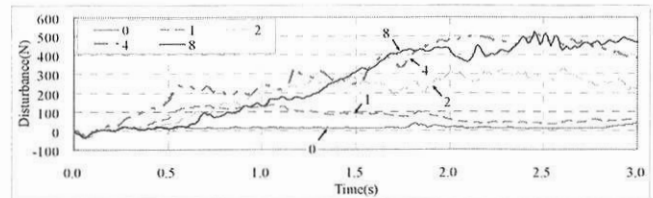


図 9 実機実験時の外力検出値

図 9 中、被験者 1～4 名の外力は 1 名時、100～150[N]、2 名時、200～300[N]、4 名時、400～500[N]と増加傾向を示し乗車率の上昇が模擬できている。8 名時は 400～500[N]と 4 名時と同等となり変化は少ないが、ドア最大推力の 500[N]に近い限界まで外力を与える実験が行えた。

表 1 ラッシュアワーを想定した閉時間

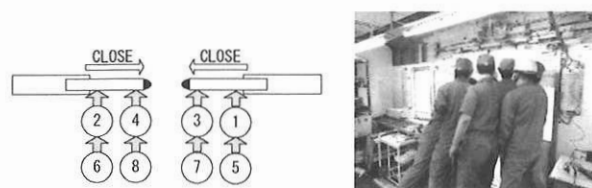
被験者 (人)	従来機種 (s)	遅れ (s)	提案機種 (s)	遅れ (s)
0	3.15	-	3.33	-
1	4.09	+0.94	3.36	+0.04
2	9.38	+6.23	3.41	+0.08
4	14.03	+10.88	3.51	+0.18
8	15.05	+11.90	3.55	+0.22

本論文の主題であるラッシュアワーを想定した閉時間の測定結果と遅れ時間を表 1 に、被験者数と閉時間の推移グラフを図 10 に示す。

従来機種は被験者数の増加に比例する遅れが発生しており最大 12[秒]の遅れが発生したが 14～16[秒]にて閉動作は完了し停止する事は無かった。実験の様子から従来機種は平常動作中の推力が低く、外力によりドアが停止してから推力が上昇、停止→推力上昇→平常動作→また停止のサイクルを 2～3[秒]周期で繰り返し徐々に閉まる動作となったため外力による遅れが大きくなっている。

この設定はメカ特性や安定動作、挟み込み時の安全性確保などをふまえて開発当時に決定されている。外力による遅れは発生するが確実な戸閉と安全性が確保されており、実績、評価からも許容される動作と言える。言い換えると戸閉時間を犠牲にして電車ドアに重要な安全性と安定性を実現した設定である。

提案機種は外力抑制制御の効果から外力を物ともせず安定した閉動作と閉時間が実現されており、ばらつきや遅れを感じる事は無かった。最大遅れ+0.22[秒]は従来機種から 10[秒]以上の改善があり、外力抑制制御により戸閉遅れの無いドアシステムが実現されている。



(a) 実験概要



(b) 実験の様子

図 8 実機実験

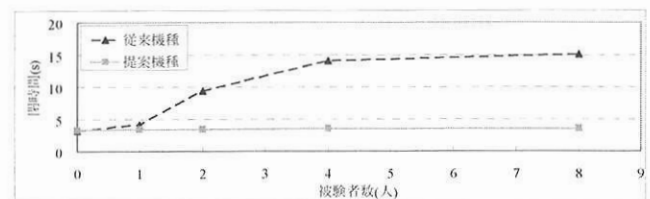


図 10 被験者数と閉時間の推移

4.3 安全性への対応

実験を通じて外力抑制制御により乗客を挟み込んだ場合、早期に最大推力を発生してしまい従来機より強い力で挟み込まれる時間が長く、痛みが強くなる問題が発覚した。この問題に対し、停止により推力を低減する戸挟み安全動作への遷移時間を短く設定することで、完全に挟まれた場合なども強く挟まれる時間が長くないよう安全性への対応を実施している。

図 11 に示す戸挟み安全動作時のグラフから、強く挟まれる時間は従来程度の 0.5 秒であり、強い痛みを感じる事も無く安全性の問題は解消された。推力低減までの時間が短くなることから外力抑制効果の減少が懸念されるが 0.5[秒]の間に外力は十分抑制され外力抑制制御の効果に対する影響は見られなかった。また設定により強く挟む時間を変えられることから、顧客要望や使われ方に合わせた対応も可能である。

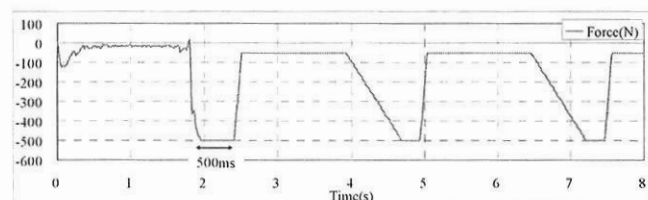


図 11 戸挟み安全動作

参 考 文 献

- 1) K. Umezawa, I. Tsujimura, H. Takahashi: リニアモータ式側引戸用戸閉装置, 富士時報 Vol. 79, No. 2(2006)
- 2) 畑村洋太郎: ドアプロジェクトに学ぶ—検証回転ドア事故, 日刊工業新聞社, 2006.
- 3) 村木克行, 和田智樹, 松本重夫: 引きずり事故防止機能強化型・戸挟み検知装置の開発, JR East Technical Review, No.29, (2009)
- 4) 小林邦生, 呉 世訓, 稲玉 繁樹, 堀 洋一: 環境剛性の推定と 2 自由度制御にもとづく電車ドアの知的制御, 電学研資, IIC 09-116, pp.25-29(2009)
- 5) T. Umeno, Y. Hori, Robust Speed Control of DC Servomotors using Modern Two-Degrees-of-Freedom Controller Design, IEEE Trans. on IE, Vol.38, No.5, pp.363-368, 1991

5. まとめ

本論文では外力抑制制御を搭載したドアシステムにより、ラッシュアワーの混雑状況下でも戸閉遅れが発生しないことを確認した。また強く挟まれすぎる問題も対策を実施し安全性に問題が無いことも確認された。

実験は限られた資源と人員により実施し、定量的な結果を示せなかったが、従来機種との比較により明らかな性能向上と提案制御の効果が見られた。従来機では外力に対して動作が安定せず弱い部分があったが、提案制御は外力や外力変動による速度変化も無く、安定して閉まる様子は「やさしく、強く閉まるドア」という印象を受け、理想とする「安全と安定の両立」に近づけたと思える。

今後の課題は実際の製品としての試験と調整が考えられる。従来より力強いドアが乗客に与える影響を見極め、安全と安定のバランスを調整した上で製品化を目指す。

提案制御およびドアシステムにより戸閉遅れによる遅延事故を解消し、さらなる鉄道の定時運行性に寄与できるよう、今後も研究開発を続けていきたい。