

鉄道車両用ドアの最新動向と安全・信頼性技術

Latest Trend and Safety and Reliability Technology of Rolling Stock Doors

梅澤 幸太郎 UMEZAWA, Kotaro

寺崎 富雄 TERASAKI, Tomio

稲玉 繁樹 INATAMA, Shigeki

富士電機は、鉄道車両用ドアにおいて、モータの運動方向を側引戸の直線動作に適用して機構を簡素化した戸閉装置（リニアモータ方式、FCPM方式）を開発し、製品化している。鉄道車両用ドアは、乗客の乗降や走行中の安全を確保するとともに、鉄道の定時運行にも関わる重要な装置である。このため、安全性、信頼性、機能的が高く、また、省メンテナンスであることが求められている。故障モード影響解析や危険分析などによる設計時の安全性の評価をはじめ、3重フィードバック制御、外力抑制制御、押し返し制御などの制御技術などにより、これらを実現している。

Fuji Electric has developed and commercialized a door operating equipment (linear motor system and FCPM system) with a simplified mechanism by applying the motion direction of a motor to the linear motion of the side sliding door. The door operating equipment for the side sliding door of rolling stock is an important component that ensures the safety of passengers when they are boarding, alighting and traveling, and it may affect trains' punctuality. Consequently, the system is required to be safe, reliable, high functional, and maintenance saving. These characteristics have been achieved in a safety evaluation that was conducted at the design stage and that included failure mode effect analysis and hazard analysis, and they have also been ensured with control technologies such as triple feedback, external force suppression and push-back control.

① まえがき

鉄道車両用ドアは、乗客と直接接する装置であること、一つ一つが独立したシステムであること、また、車両に搭載される数が多いことから、安全性、信頼性、機能的が高く、さらには、省メンテナンスであることが求められている。富士電機は1999年に電気式ドアの供給を開始した。2014年末までに国内外合わせて30,000開口以上が営業運転で稼働されている。

本稿では、鉄道車両用ドアの最新動向と安全・信頼性技術について述べる。

② 電気式ドアの方式と構成機器

2.1 電気式ドアの特徴

日本国内では、空気式の戸閉装置が使用されることが多かったが、最近では電気式の戸閉装置が急速に普及しつつある。海外では電気式の戸閉装置は古くから採用されている⁽¹⁾。

電気式ドアは空気式ドアと比較して、空気配管がなくなることによるメリットに加えて、経年変化による外乱の影響を打ち消し、一定の開閉パターンや開閉時間を再現できる電気制御の特徴により、車両システムとしての初期コストや保守コストを軽減することが可能である。また、制御コントローラの機能の柔軟性を生かし、ドアに乗客や荷物が挟まったときの安全性を高めるとともに、データ伝送技術を応用して、出区・始業点検の簡素化やインテリジェント化、ドア単体の自己診断機能を充実することが可能である。

富士電機の電気式ドアは、パワーエレクトロニクス技術と制御技術を生かし、モータの運動方向をそのまま利用し

て側引戸を駆動する方式を採用している。これにより、ドア駆動機構の簡素化、および戸挟み検知感度の向上による高い安全性と信頼性を実現している^{(2),(3)}。

2.2 リニアモータ方式戸閉装置

富士電機は、モータそのものの動きを側引戸の動きに生かすことのできるリニアモータを使用した戸閉装置を製品化し、納入している。モータの運動の発生方向をそのままドアの動きに生かすことで、余分な運動変換機構をなくすることができる。これにより、乗客や荷物がドアに挟まれたりした場合に早期検知ができるため、安全性が確保できる。リニアモータには、固定子に永久磁石を、可動子にコイルを配した永久磁石リニア同期モータを採用している。図1にリニアモータの構造（断面図）を示す。

両開きの側引戸の場合、二つのモータによってそれぞれのドアを引き分ける方式と、左右のドアを連結し連動させる機構を使って一つのモータで動かす方式とがある。どちらの方式を採用するかは鉄道事業者の安全性、経済性などに関する考え方で決められる。富士電機はいずれの要求に

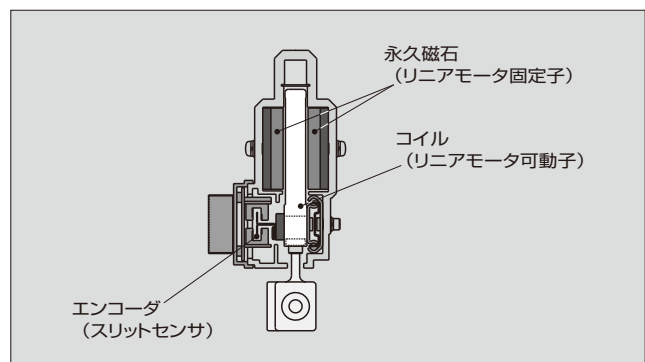


図1 リニアモータの構造（断面図）

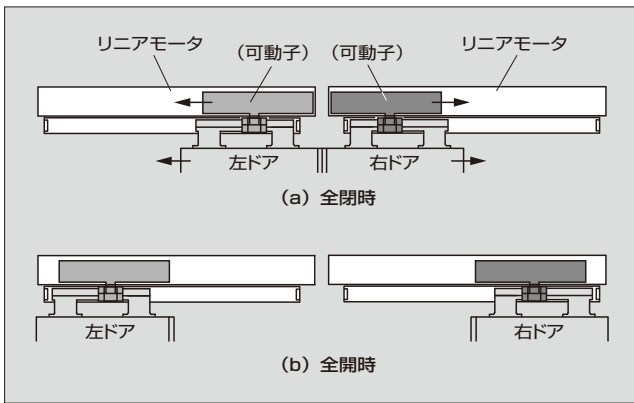


図2 リニアモータ方式（2モータ）戸閉装置の構成

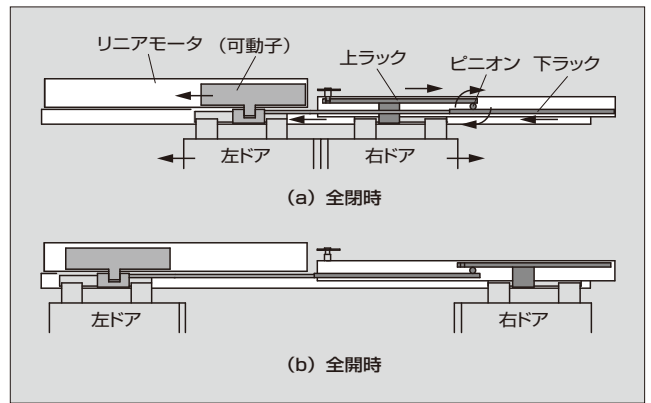


図4 リニアモータ方式（1モータ）戸閉装置の構成



図3 NYCT-R160 電車とリニアモータ方式戸閉装置



図5 JR 東日本 E233 系電車とリニアモータ方式戸閉装置

も応えられるようにしている。

二つのリニアモータで動かす場合には、両リニアモータそのものの動きで直接ドアを開閉するシンプルな構成となる。図2に、二つのリニアモータで左右のドアを開閉する方式の構成を示す。この方式はニューヨーク市地下鉄R160電車（NYCT-R160電車）に採用され、約5,800開口が稼動中である（図3）。

一つのリニアモータで左右のドアを動かす場合には、連動機構にラックとピニオンを用いて開閉する。図4に、一つのリニアモータで左右のドアを開閉する方式の構成を示す。この方式は、東日本旅客鉄道株式会社（JR 東日本）のE233系電車など国内外で採用され、20,000開口以上が稼動中である（図5）。

2.3 FCPM方式戸閉装置

FCPM（Flat Cup Permanent Magnet Motor）方式は、ラック・アンド・ピニオン機構のピニオンを回転式モータのFCPMによって回転させ、側引戸を駆動する方式である。図6に、一つの回転モータで左右のドアを開閉する方式を示す。モータ軸に直結されたピニオンの回転により上ラックと下ラックを動作させ、左右のドアを開閉する。モータは鴨居（かもい）内の狭いスペースに収納されるため、扁平（へんぺい）な形状をしたFCPMである。この

FCPM方式は、モータの運動をそのまま側引戸の動きに変えるリニアモータ方式と同様の特徴を持ちながら、さらなる軽量化を実現している。この方式は国内外で十数件の車両プロジェクトに採用され、ゆりかもめなどで営業運転を開始している（図7）。

(1) モータ（FCPM）

ドア用のモータには、ラッシュ時には強力な戸閉力、挟み込みには安全で優しい戸閉力、開閉時間と全開停止位置は全数が同一で変化しないこと、鴨居サイズの制約による小型化、長期運用のための省メンテナンス性など、さまざまに相反する要素が求められる。これらを踏まえ、薄型、低速・高トルク、高精度な位置検出といった特徴を持つドア専用モータのFCPMを開発した。3章で述べる制御技術を行えるようにするため、高精度な光学式エンコーダを内蔵し、位置分解能0.01mm、0～100%の推力応答750μs、静止時に500Nのドア押し付けを実現している。

(2) 動力伝達機構

モータ軸端に取り付けたピニオンと上下2本のラックから構成される動力反転機構（方向変換装置）により、1台のモータで両開きのドア2枚を駆動する（図4、図6）。

このFCPM方式戸閉装置は、ラック・アンド・ピニオン機構で一般的なボールねじ式のように減速することなく、直接ドア開閉の運動に伝えるため戸挟み検知感度が向上し

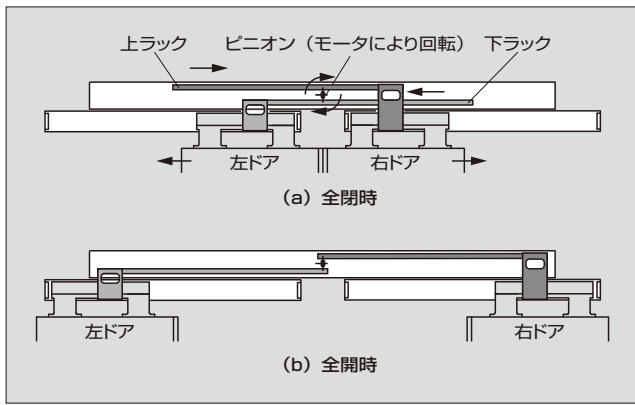


図6 FCPM方式戸閉装置の構成



図7 ゆりかもめ車両とFCPM方式戸閉装置

ている。また、構造が簡素で故障が少なく、メンテナンスもほとんど不要で信頼性が高い。

ある北米向け車両では、車両間にある貫通扉のスペースに制約があり、方向変換装置の長さを短くしなければ設置できなかった。このため、ドア全開閉幅の半分程度の長さのラックを複数使用し、ラックにピニオンを締結させることで長さを短縮した閉装置を開発した(図8)。

ドアの開閉時には、まず、モータ軸の動力供給ピニオンから水平に移動できる中継ラックに力を伝達する。次に、移動する中継ラックの先端に取り付けられている中継ピニオンが、ケースに固定されている固定ラックとかみ合うことにより回転する。進行方向に移動し、かつ進行方向に回転する中継ピニオンによって水平に移動できるドア搬送用ラックを移動させ、ドアを開閉させる。

中継ラック、固定ラック、ドア搬送用ラックをそれぞれドア開口幅の約半分の長さとすることにより、ドア閉装置の全長を通常方式の3/4程度に短縮した。

2.4 施錠・解錠装置

施錠装置は、戸閉状態を確実なものとし、ドアの安全性を確保するために最も重要なものの一つである。富士電機では、施錠装置にロックピンを用いた機構を採用している。戸開動作時に施錠状態を解除するための機構を併せ持っており、モータによって発生するドア開方向の推力によって

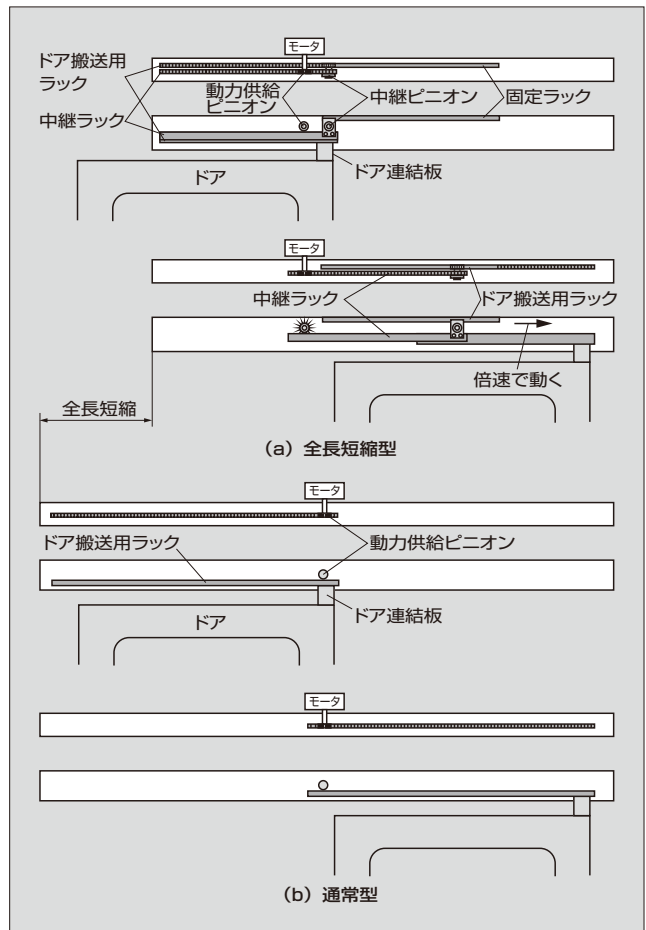


図8 方向変換装置

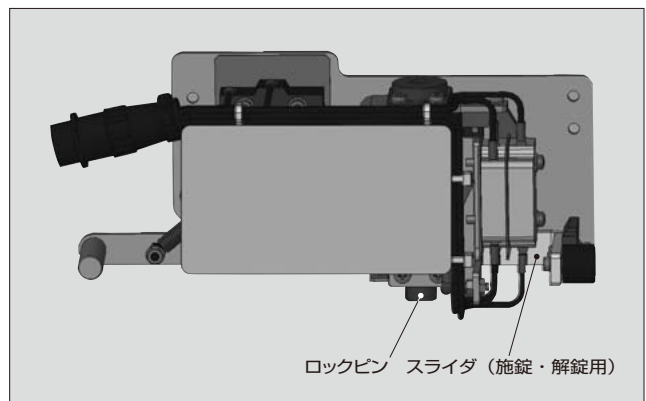


図9 施錠・解錠装置(自己解錠型)

自己解除する方式(図9)と、モータとは別電源のソレノイドによって解除する方式(図10)を用意している。いずれの方式も、非常時に制御電源がない状態でも手動で解錠できる。

また、顧客によっては、ドアの開閉動作と施錠・動作が連動する通常の方式ではなく、ドア開閉と施錠・解錠を独立させたいという要求もある。これに応えるため、ドア開閉と施錠・解錠が独立した機構を開発した(図11)。

2.5 非常時の解錠およびアイソレーション装置

開閉機能そのものに付随して、ドアには非常時に制御電

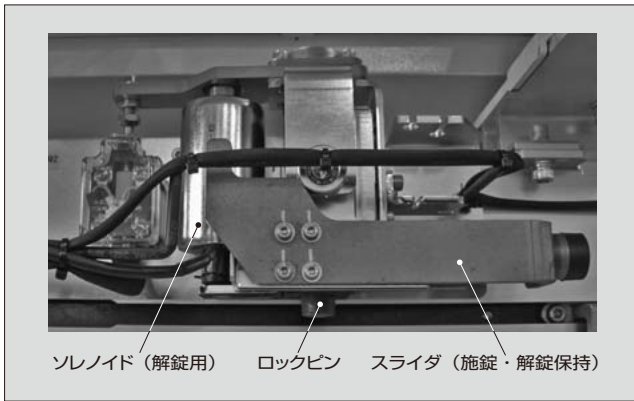


図 10 施錠・解錠装置 (ソレノイド解錠型)

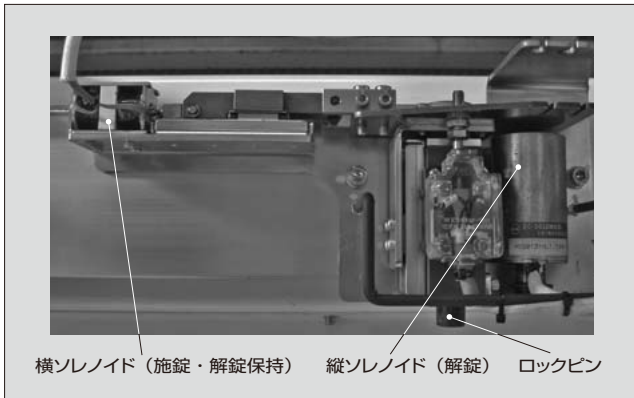


図 11 施錠・解錠装置 (ドア開閉と施錠・解錠独立型)

源がない状態でも手動で強制的に解錠・開放するための機能、ならびに故障した特定のドアを暫定的にアイソレート（隔離）して電車の走行を可能にするための機能が要求される。

非常時ドア解錠装置は、図 12 に示すように通常はハンドルの形態をしており、室内および室外に設置される。戸閉装置本体の施錠・解錠装置と金属製ワイヤで機械的に連結されており、ハンドルを操作することにより解錠を行う。仕様によってはハンドルではなく乗務員が専用のキーによって操作するものもある。また、解錠は乗客でもできるが復帰は乗務員が専用のキーで操作するなど、さまざまな要求に対応する必要がある。さらに、ハンドルの操作力の

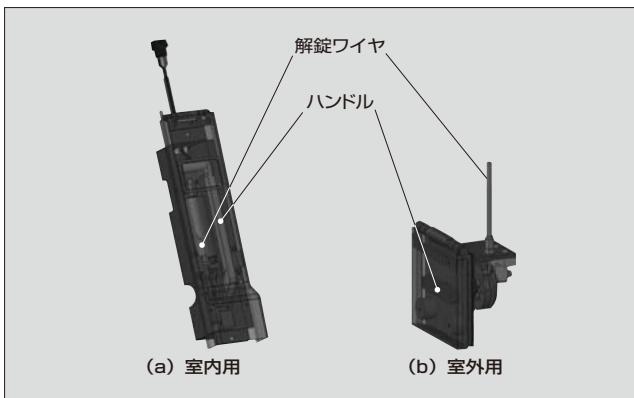


図 12 非常時ドア解錠装置

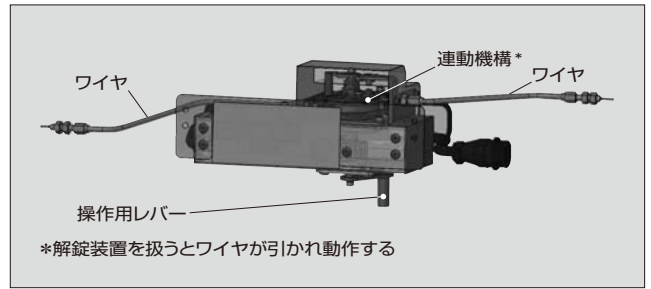


図 13 アイソレーション装置 (連動機構付)

仕様が顧客ごとに異なる。装置の設計時においては、解錠ワイヤの車体での敷設ルート（長さ、曲げ回数など）も考慮し、仕様を満足する操作力の算定を行う必要がある。

アイソレーション装置は、故障した特定のドアを機械的に閉状態に保ち、戸閉検知条件や施錠検知条件をバイパスさせて列車全体の発車可能条件を強制的に成立させる装置である。北米では、APTA (American Public Transportation Association) 規格によって非常時ドア解錠装置とアイソレーション装置を連動させること、つまりアイソレーション状態で非常時ドア解錠装置を操作した場合は、自動的にアイソレーション状態を解除してドアを解錠させることという規定がある。連動機構の一例を図 13 に示す。

2.6 コントローラ

電気式ドアのコントローラは、FCPM の特性を生かした高精度で安定したドアの開閉制御を行っている。近年は開閉制御だけでなく、ドアの状況や故障時の解析を行うため、多くの情報を計測し、記録している。日々変化していくドアの健全性を、自己診断により把握する自動試験機能も実装している。車掌や運転手にモニタで情報を伝えるため、RS-485 を用いた HDLC (High-level Data Link Control) や、Ethernet^(注) などの通信プロトコルに対応している。コントローラには 32 bit 高性能 CPU を採用し、1 チップでドア制御・通信機能や自動試験機能を同時に処理することができる。ソフトウェアは自己更新機能を持ち、通信機能や 2.7 節の PTU (Portable Test Unit) によるソフトウェアの一括更新によって、仕様やパラメータの変更、およびバージョンアップに迅速に対応することができる。

2.7 PTU

電車ドアは可動部が多く、乗客と直接干渉するため、故障が発生した場合に車両の運用可否につながる機器である。そのため、故障要因の詳細表示や自己診断により運用継続の判定を早急に行う必要がある。PTU とは、故障時に係員が PC をドア装置に接続し、故障内容の表示、モニタリング、自己診断などを行う専用のソフトウェアである (図 14)。

〈注〉 Ethernet：富士ゼロックス株式会社の商標または登録商標

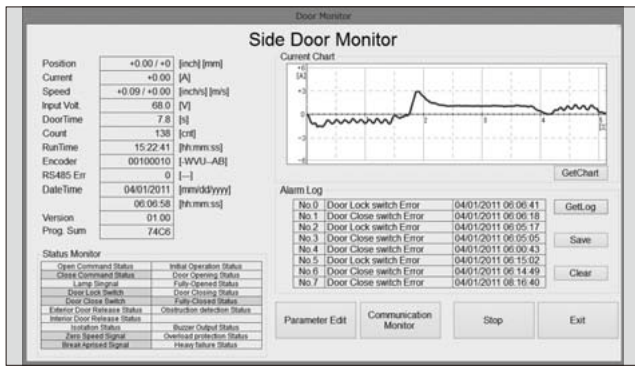


図 14 PTU の画面の例

故障の判定には専門性が求められるため、最終的にはメーカーが対応すべき事項である。しかし、現場では迅速な判定が必要なため、顧客ごとに PTU を用意して保守の現場をサポートすることで、円滑な運用に貢献している。

③ 安全と信頼性の技術

3.1 設計時の安全性評価

車両のドアは乗客の乗降に関わるとともに、車両走行中は乗客の安全を確保する重要な機器であるため、その動作には高度な安全と信頼性が要求される。このため、設計審査の過程で FMECA (Failure Modes Effects and Criticality Analysis: 故障モード影響解析) や Hazard Analysis (危険分析) などによってその安全設計思想が厳しく吟味され、満足していない場合は設計変更も必要となる。また、耐 Vandalism (公共物破壊行為) として、強引な操作やいたずらにより、ドアシステムに影響がないことが求められる。特に海外向け車両ではその傾向が強い。

北米向け車両で求められるいわゆる RAMS 関係の検討事項は次に示すとおりである。FMECA の例 (イメージ) を図 15 に示す。

- (1) Reliability Prediction Report (信頼性予測報告)
- (2) Availability Prediction Report (可用性予測報告)
- (3) Maintainability Analysis (保全性分析)
- (4) Preliminary Hazard Analysis (危険予測分析)
- (5) FMECA (故障モード影響解析)

3.2 制御技術

ドアの開閉制御における安全性と安定性のさらなる向上のために、新たな制御技術の研究と開発を行っている。

Item	Function	Failure Mode	Failure Cause	Failure Effects	Severity (S)	Failure Detection	Failure Mitigation	Availability	Design Action Recommendation
Door Release	Door Release	Door Release	Door Release	Door Release	Door Release	Door Release	Door Release	Door Release	Door Release
Door Lock	Door Lock	Door Lock	Door Lock	Door Lock	Door Lock	Door Lock	Door Lock	Door Lock	Door Lock
Door Close	Door Close	Door Close	Door Close	Door Close	Door Close	Door Close	Door Close	Door Close	Door Close

図 15 FMECA の例 (イメージ)

ドアの基本制御として富士電機が保有するサーボ技術を生かし、繊細でなめらかなドア駆動が行えるように、推力(電流)、速度、位置の3重フィードバック制御を採用している(図16)。

ドア特有の問題として、ラッシュ時の戸閉遅れがたびたび取り上げられている。これは平常時と比べて満員のラッシュ時に必要な駆動力が10倍以上にもなるため、制御パターンが追従できない際に発生していた。そこで外力を計測し打ち消すことで安定した動作を行う“外力抑制制御”を採用している。最大8名が強力にドアに寄りかかるラッシュを模擬した実験において、従来制御では10.0s以上の遅れを発生させていた条件でも、0.2sとほとんど遅れない安定した動作を実現させている(図17, 表1)。

強固な戸閉状態を維持するため、ロック装置を用いている電気式ドアでは、ぎ装の調整の難しさや故障などの課題を抱えている。そこでモータにより強固な戸閉状態を実現するために“押し返し制御”の研究に取り組んでいる。これはモータ制御により戸閉状態を維持することで、ぎ装時の細かい調整を行うことなく、簡素なロック装置で安全を確保することを目指している。強引に開こうとする外力によってドアが開かれることを瞬時に判定し、強固に押し返すことでこれを阻止している(図18)。

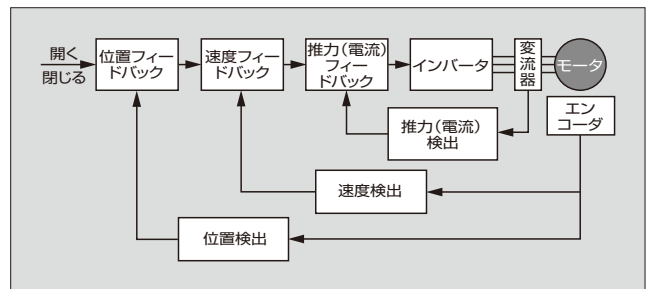


図 16 3重フィードバック制御

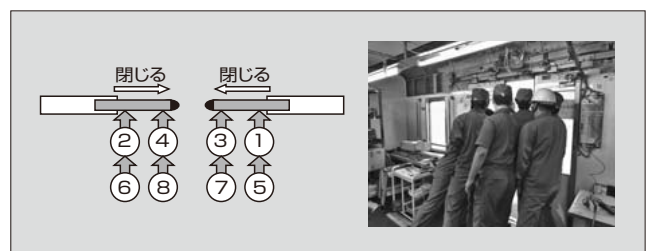


図 17 外力抑制制御実験

表 1 ラッシュアワーを想定した閉時間

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

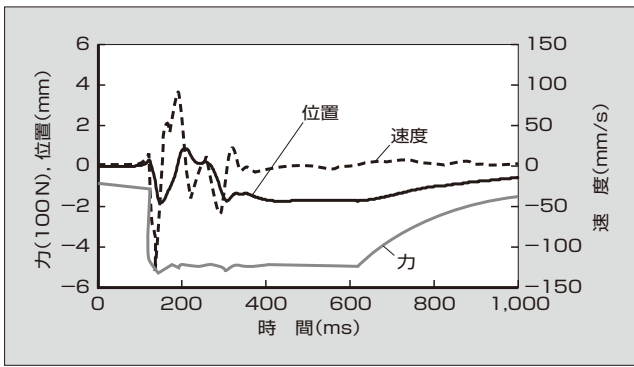


図 18 押し返し制御実験

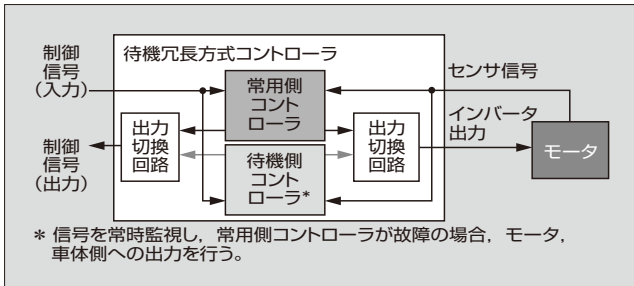


図 19 待機冗長方式コントローラ

営業運転車両に搭載して行った検証では、15万回の開閉動作において、約 300 回の開こうとする事象が発生したが、一回も 1.0mm 以上開くことはなく、安全な制御を実現している。

3.3 待機冗長方式コントローラ

ドアは 1 編成当たりの台数が多く、1 か所の故障が車両だけでなく、路線全体に影響を与える可能性があるため、高い信頼性が求められる機器である。従来機の場合、途中駅で故障が発生した場合は、乗客に代替車両に移動してもらうことなどにより、大きな遅れが発生することがあった。富士電機では、待機冗長構成により内部構造を二重化し、故障時は待機側で運用が可能なコントローラを採用することで信頼性を高めている (図 19)。

4 あとがき

富士電機の鉄道車両用ドアは、リニアモータ方式と FCPM 方式のいずれも国内外のお客さまに採用されている。今後も、鉄道車両用ドアが乗客にとって一番身近な機器であることを、また車両の安定運行にとって最も重要な機器であることを常に意識し、さらに安全性、信頼性に磨きをかけ、お客さまの期待と満足に応えていく所存である。

参考文献

- (1) 梅澤幸太郎. 鉄道車両用パワーエレクトロニクス機器. 富士時報. 2012, vol.85. no.3, p.220-225.
- (2) 梅澤幸太郎ほか. リニアモータ式側引戸用戸閉装置. 富士時報. 2006, vol.79, no.2, p.128-133.
- (3) 梅澤幸太郎. 電気式戸閉装置の構造と機能について. 鉄道車両工業. 2012, no.461.
- (4) 稲玉繁樹ほか. 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でドアシステム. J-RAIL2011 S5-2-4, 2011.
- (5) 稲玉繁樹ほか. 電気式戸閉装置のロック機構簡素化を目指した押し返し制御. J-RAIL2013 S5-1-1, 2013.



梅澤 幸太郎

施設設備関連エンジニアリング業務、鉄道車両用電機品エンジニアリング業務に従事。現在、富士電機株式会社パワエレ機器事業本部鈴鹿工場電機機器設計部担当課長。



寺崎 富雄

中型回転機の設計、各種産業向けシステムの開発、鉄道車両用戸閉装置の設計に従事。現在、富士電機株式会社パワエレ機器事業本部鈴鹿工場電子機器設計部課長補佐。



稲玉 繁樹

電車でドアシステムのシステム設計およびソフトウェア設計に従事。現在、富士電機株式会社パワエレ機器事業本部鈴鹿工場電子機器設計部課長補佐。電気学会 (正員)。



*本誌に記載されている会社名および製品名は、それぞれの会社が所有する
商標または登録商標である場合があります。