リニアモータ式側引戸用戸閉装置

梅澤 幸太郎（うめざわ　こうたろう）　辻村　勲（つじむら　いさお）　高橋　弘（たかはし　ひろし）

1　まえがき

車両の側引戸用戸閉装置（がわひきどようとじめそうち）は，日本国内では，主として圧縮空気で空気シリンダを駆動する方式が使用されている。しかしながら，空気式戸閉装置は高度な制御ができないために乗客が扉に挟まれたときなど，安全性への対応が難しく，また，空気配管の設置やそのメンテナンス作業が発生する。このことから，近年では乗客への安全性の高いシステム，また，メンテナンス費用が低減できる方式が求められるようになってきた。

富士電機は東日本旅客鉄道株式会社（JR 東日本）との共同開発を経て，リニアモータ駆動による側引戸用戸閉装置（リニア式戸閉装置）を製品化し，JR 東日本の首都圏で運用される E231 系電車および E531 系電車に採用された（**図 1**）。また JR 東日本での採用に続き，ニューヨーク市交通局（NYCT）の最新鋭の R160 電車にも採用された（**図 2**）。本稿では，その開発の経緯と仕組みなどについて紹介する。

2　開発と経緯

JR 東日本は，国内の他の鉄道事業者同様，車両用側引戸用戸閉装置には圧縮空気で空気シリンダを駆動する方式を採用していた。しかしながら高機能，省メンテナンスを志向し，まず 209 系電車で電気式戸閉装置を採用し，さらに安全性，信頼性の高い電気式戸閉装置の導入を検討していた。そこで，JR 東日本とリニアモータ技術の製品化を模索していた富士電機は，リニア式戸閉装置の共同開発を 1989 年にスタートさせた。駆動方式の評価，各種施錠方式の試作と評価，戸挟み安全機能の評価，軽量化，消費電力の低減，信頼性・耐久性向上，コストダウンなどの多岐にわたる項目について開発を推進し，1998 年に 209 系 950 番代（その後，E231 系 900 番代に改称）に正式採用され，その後，E231 系の東北・高崎線，東海道線，湘南新宿ライン，常磐快速線，E531 系常磐線に順次採用されている。

一方，NYCT は 6,000 両以上もの車両を保有する世界有数の鉄道事業者である。元々 NYCT の車両は側引戸に電気式戸閉装置を採用していたが，さらに高品質，高信頼化のニーズがあった。そんな折，JR 東日本で採用された富士電機製品を知り，採用を検討することとなった。NYCT

図 1　JR 東日本の E531 系電車

図 2　NYCT-R160 電車

梅澤 幸太郎

鉄道車両用電機品のエンジニアリング業務に従事。現在，富士電機システムズ株式会社産業・交通システム本部交通・特機統括部車両技術部主任。

辻村　勲

リニアモータの開発設計に従事。現在，富士電機モータ株式会社リニアプロジェクト室マネージャー。電気学会会員。

高橋　弘

パワーエレクトロニクス関連の研究・開発に従事。現在，富士電機アドバンストテクノロジー株式会社エレクトロニクス技術研究所。電気学会会員，電子情報通信学会会員，情報処理学会会員。

表1　開発と製品化の経緯

年　次	車　両	経　緯
1989年		JR東日本との共同開発スタート
1991年	103系	試作装置評価（JR東日本 大船工場内）
1993年	183系	客室仕切引戸（JR東日本 房総地区試験運用）
1995年	701系	側引戸（JR東日本 仙台地区試験運用，2開口，2年間）
1997年	E217系	側引戸（JR東日本 横須賀・総武快速線試験運用，3両，1年間）
1998年	E231系900番代	営業運転（JR東日本 総武緩行線）
1999年	E231系	営業運転（JR東日本 東北･高崎線，以降常磐快速線，東海道線ほかで採用）
2002年	NYCT-R143	営業運転での評価試験（約2年間）
2004年	NYCT-R160	正式採用決定（2006年から営業運転予定）
2005年	E531系	営業運転（JR東日本 常磐線）

で製品が採用されるためにはNYCTのメーカー認定を受ける必要があり，数々の設計評価，試作品の評価などを経て，2002年6月から既存車1編成（8両，64開口に装置を搭載し1年間の走行を行うQualification Test（認定試験）を受検した。この試験でMDBCF（Mean Distance Between Component Failure：平均故障間走行距離）や稼動率で規定されている要求レベルを大きく上回る成績を達成し，Qualified Supplierとして認定された。

表1に開発と製品化の主な経緯を示す。

3　電気式ドアおよびリニアモータの長所

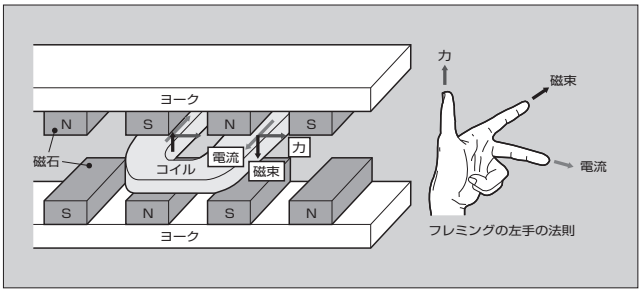
電気式ドアの利点の一つは，電気電子制御により高機能で高速なドア制御が実現できる点にある。乗客が扉に挟まれたときの戸挟み安全機能は，電子制御ならではの，きめ細かな動作により乗客への安全性を確保している。

また，車両の空気配管がなくなることで，車両システムとしてのイニシャルコストやメンテナンスコストの低減が可能である。従来の空気式ドアは経年変化に対して当初の戸閉力や開閉時間という基本性能を維持するために空気配管の定期点検や保守が必要であったが，電気式はデジタル制御の採用で，トルクや開閉時間に関する再現性が確保され，保守点検が容易である。

また，自己診断機能や故障記録機能を行うことでの，省メンテナンス，さらに車両制御伝送システムと連携した車両システムのインテリジェント化にも容易に対応可能である。現在，リニア式戸閉装置を装備した車両は，車上試験や出庫点検時に運転台から全ドアの点検を実施することで省力化を実現している。

さらにリニア式戸閉装置は上記電気式ドアの一般的な長所に加えて，ドアの直線運動をリニアモータ自身の直線運動で実現していることから，動力の機械的な変換機構を必要としないことも特長である。この結果，機械系の摩擦を小さくすることが可能であり，回転式モータにおけるボールねじしゅう動部への頻繁な給油が不要なほか，戸挟み検知の感度を高くし，高い安全性を実現することが可能である。

図3　リニアモータの原理



4　リニア式戸閉装置の原理と仕組み

4.1　リニアモータ

リニアモータには，大きく分けて同期式（リニアシンクロナスモータ）と誘導式（リニアインダクションモータ）の2方式がある。リニア式戸閉装置では，磁界を作る励磁電流が不要で，戸閉装置に要求される推力の発生に適している永久磁石を使用した可動コイル形の永久磁石界磁リニア同期モータを採用した。**図3**にリニアモータの動作原理を示す。

4.2　インバータ

交流モータであるリニアモータの駆動には，高速スイッチングの可能なIGBT（Insulated Gate Bipolar Transistor）を適用したインバータを採用し，サーボ技術によるリニアモータの高性能制御とインバータ動作時の静粛性を実現している。

電車用側引戸は，低電圧の制御電源から給電されるのが一般である。バッテリー給電時は大きな電源変動を受けるため，通常の電気機器よりも許容電源電圧変動範囲を広くとった設計となっている。また，NYCTは給電電圧がDC37.5 Vであるため，ケーブルのインピーダンスによる電圧ドロップの影響を考慮し，インバータの前段に電源電圧の昇圧回路（双方向）を設けて安定化を図るとともに，昇圧することで，リニアモータ可動子巻線の最適化を行っている。

4.3　コントローラ

高性能なマイクロプロセッサを用いて高性能・高機能なサーボ制御を実現している。また，車両内の情報伝送装置との連携により，ドアの状態，装置への入力信号の状態などをモニタする機能や，開閉時間などによる開閉動作の自己診断結果を運転台から確認する機能などを実現し，点検作業の省力化と高機能化を実現している。また，故障記録機能により，万が一の不具合発生に対しても，故障要因の解明を容易にしている。

4.4　施錠装置

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要として，戸閉装置の構成要素の中でも最重要なものの一つである。開発当初は永久磁石を使用した方式なども検討されたが，最終的には信頼性の高い機械式を採用した。施錠状態はラッチに連動したセンサによって制御装置に通知される。施錠装置の解錠動作は，JR 向けではリニアモータの推力を利用した方式，NYCT 向けではソレノイドにより行っている。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ようにハンドルが設けられている。

4.5　ドア駆動

電車の側引戸はその運用中，扉の開閉方向および横方向に大きな荷重を受ける。特に首都圏で運用される電車のドアは，ラッシュアワーの過酷な条件下での使用に耐えることが不可欠である。

図 4　JR 東日本のリニアモータ式戸閉装置の構成

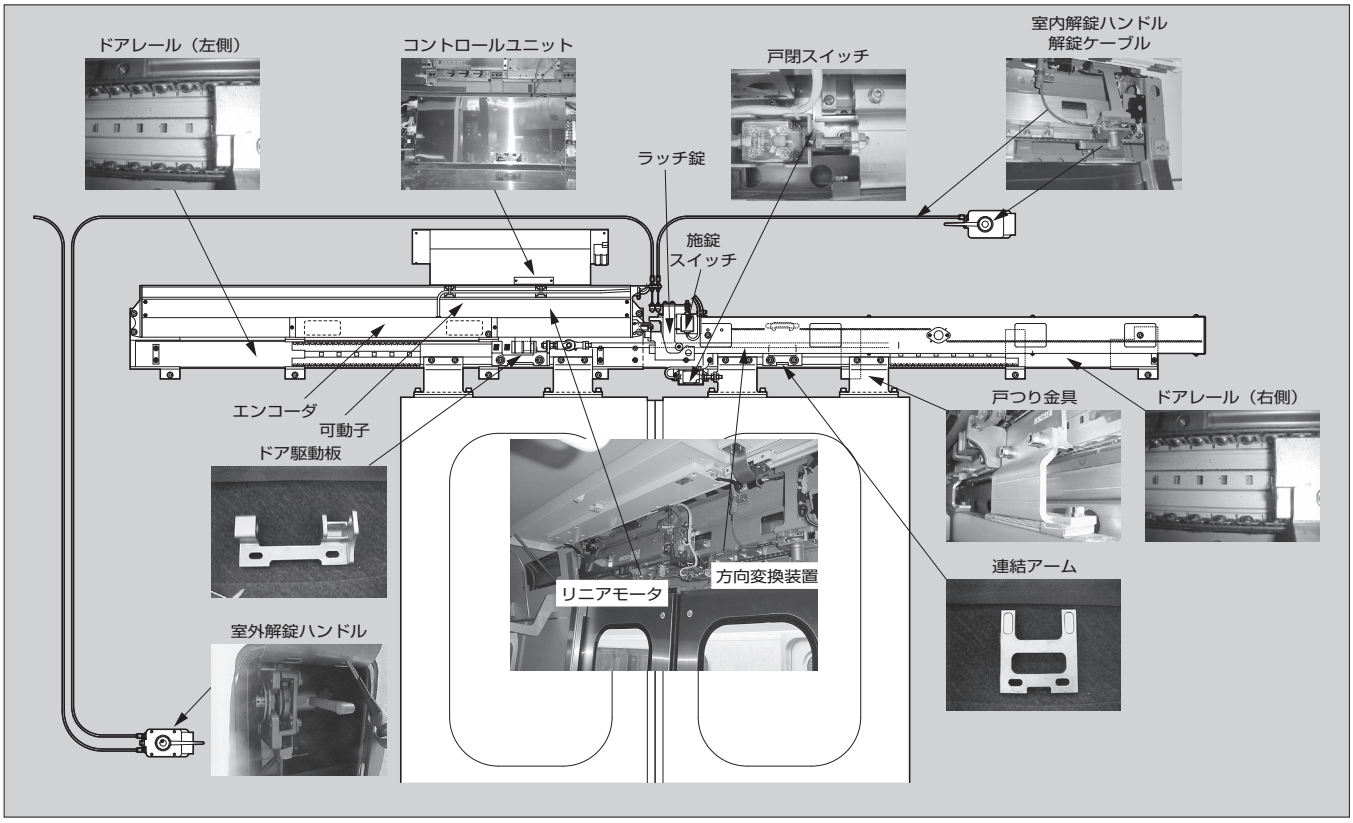
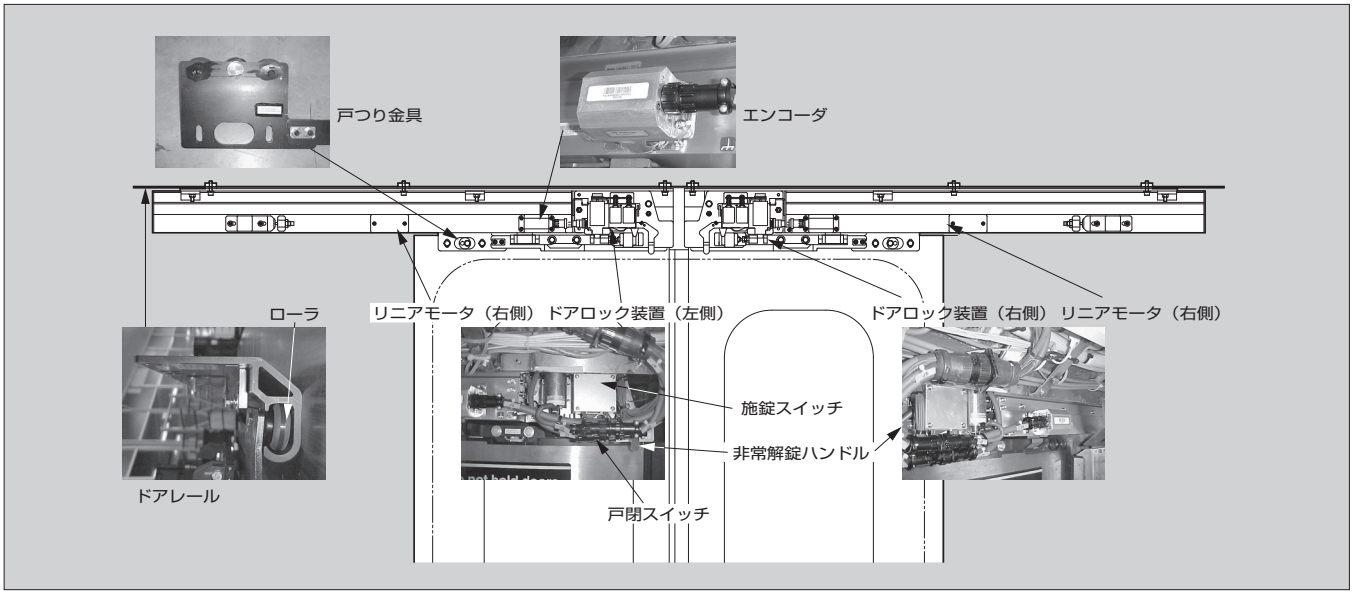


図 5　NYCT-R160 のリニアモータ式戸閉装置の構成



従来の回転式モータを使用した電気式ドアでは，回転力をドアの直線運動に変換するボールねじを介してモータと扉が機械的に直結しているため，扉に加わる衝撃や応力がモータに伝わり，モータや軸受の寿命に影響することがあった。リニア式戸閉装置では，モータが扉と同じ直線運動をする特長を生かし，モータと扉を機械的に直結させることなく，駆動アームによる自由継手を介して駆動する方式を採用することで，モータに横荷重が直接負荷されないようにした。

JR 東日本の通勤・近郊形電車のドアはほとんどが両開きである。このためリニア式戸閉装置も当初は各扉ごとに1台のリニアモータ，すなわち1開口を2台のリニアモータで駆動する方式を採用していたが，軽量化およびコストダウンの観点からラックアンドピニオンによる動力反転機構（方向変換装置）を利用し，1台のリニアモータで両開きの扉2枚を駆動する方式を開発した。**図4**に全体システム構成を示す。ここで，ドアを開閉する推力は，リニアモータからドアレールの可動部に伝達される。ドアレールの可動部には方向変換装置のラックにつながる連結棒が取り付けられており，推力は連結棒に結合されたラックからピニオンを介して他方のラックに伝えられ，リニアモータを装備しない側のドアに逆向きの運動方向を与える。

NYCT では，ドアシステムの運用効率を高めるため，両開きの左右の扉をそれぞれ独立に駆動することが仕様で求められていることから，1開口を2台のリニアモータで駆動する方式を採用している。**図5**に NYCT–R160 の全体システム構成を示す。

5　高信頼度化

車両の側引戸用戸閉装置は乗客の乗降にかかわるとともに，車両走行中はその安全を確保する重要な機器である。このため，その動作には高度の信頼性が要求される。

5.1　制御の高信頼度化

側引戸で最も避けるべき事故は車両の走行中に扉が開くことである。JR 東日本の E231 系，E531 系では，引通し線による開許可信号と，車両情報制御装置経由の制御伝送線で伝達される開指令との論理積に基づいて開動作を行うことで制御信号の二重化を図り，信頼性を確保している。

NYCT では，歴史的に有接点のリレーシーケンスの信頼性を尊重する設計思想があるため，制御伝送を用いたドア制御は行われていない。その代わり，Single Point Failure（単一故障）では，安全にかかわる機能上の支障をきたさないことが求められており，側引戸を閉状態で保持する施錠装置の解錠機構を，ドア駆動用のリニアモータとは別に設け，解錠とドアが別々の指令によって駆動される。

また，戸閉状態の安全確保のため，施錠状態にある場合はモータの電源をオフして，万が一の誤動作による開動作を防止する。さらに，何らかの原因で解錠されたことを検知すると，制御伝送経由で運転台に通知するとともに，モータが閉方向の推力を発生して，戸閉状態を維持するようにしている。

5.2　安全性の確保

(1)　設計時の安全性評価

車両の側引戸用戸閉装置は，乗客と直接接する機会の多い電車搭載機器の一つである。このため設計審査の過程で FMECA（Failure Mode and Effects Critical 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る。また，耐 Vandalism（バンダリズム）として，強引な操作やいたずらに対しても，ドアシステムやその機能に影響がないことが求められる。安全性解析のフォーマット例を**図6**に示す。

(2)　乗客への安全性考慮（戸挟み安全機能）

閉扉時に乗客の身体や荷物が挟まった状態を“戸挟み”と称している。扉で荷物やベビーカーを挟んだまま発車する事故や，乗客のけがを防ぐためにも戸閉装置は感度よく戸挟みを検知し，素早く反応することが必要である。

リニア式戸閉装置は，動力の機械的な変換機構が少ないため機械的摩擦が少なく，他の方式よりも戸挟み検知の感度を高めることが可能であるという特長がある。さらに，最新のパワーエレクトロニクス技術を応用したサーボモータの制御技術を駆使し，高性能の戸挟み安全機能を実現した。それによりベビーカーなどの戸挟みに対しても安全性を十分に確保できることを確認している。

戸挟み検知時の具体的な動作は，長年にわたる運用実績を踏まえ，鉄道事業者ごとに決められている。JR 東日本の E231 系などでは，従来方式のドアとの整合を考慮し，戸挟み状態を検知すると，ドアの推力の強弱を繰り返す方式としている。

NYCT では，戸挟み検知後，規定量だけ扉を開方向に

図6　安全性解析のフォーマット例

Hazard Rate	Hazard Category: Category I : Catastrophic	Category II : Critical	Category III : Marginal	Category IV : Negligible
A Frequent	Unacceptable	Unacceptable	Unacceptable	Acceptable with Review
B Probable	Unacceptable	Unacceptable	Undesirable	Acceptable with Review
C Occasional	Unacceptable	Undesirable	Undesirable	Acceptable without Review
D Remote	Undesirable	Undesirable	Acceptable with Review	Acceptable without Review
E Improbable	Acceptable with Review	Acceptable with Review	Acceptable with Review	Acceptable without Review

各故障モードについて，故障の頻度と発生したときの障害の重大性でマトリックス化して評価

移動し，改めて閉動作する再開閉動作を規定回数だけ行い，その後も戸挟み状態が解消されない場合は閉動作状態を継続することになっている。**図7**に通常の開閉動作パターン，**図8**にJR東日本の戸挟み安全動作，**図9**にNYCT-R160の戸挟み安全動作を示す。

5.3　ハードウェアの高信頼度化

電車の側引戸は乗客の安全確保のために高度な信頼性が要求されるとともに，1台のドアの不具合が列車遅延などの要因となることから，運用上の信頼性も重要である。JR東日本では，次世代の通勤電車としての要素技術を開発・検証するためのプロトタイプ車両であるACトレイン（Advanced Commuter Train，E993系）の開発にあたり，ドアシステムの信頼性向上のため，ドアコントローラの万が一の不具合に対して，隣接するドアのコントローラがバックアップする相互バックアップ方式のドアシステムを採用した（**図10**）。富士電機は，相互バックアップを行うドアとして，対向（車両の海山側）と同側の2方式のドアシステムを納入した。

さらに東海道線から投入されたE231系用リニア式戸閉装置では，相互バックアップのための機器間配線が不要であり，ぎ装やコストを含めトータルで優位性の高い，完全二重化されたコントローラによる待機冗長方式のドアシステムを採用した（**図11**）。ここではドア1開口ごとにインバータ用IGBTを含めて二組のコントローラから構成されている。一方を常用系，他方を待機系として運用し，入力信号は常に両系で監視するが，通常のインバータ出力と信号出力は常用系が担当し，常用系に問題が発生した場合に待機系へ切り替える。これにより，ドアシステムの可用性（Availability）を大幅に改善することができた。

5.4　ソフトウェアの高信頼度化

前述のような電車の側引戸用戸閉装置の特異性から，当然ながらソフトウェアにも高信頼性が要求される。NYCTのコントローラ開発プロジェクトでは，SW-CMM（Software Capability Maturity Model）をベースとしたプロジェクトプロセス技術を適用した。SW-CMMは米カーネギーメロン大学ソフトウェア工学研究所〔Carnegie

図7　通常の開閉動作パターン

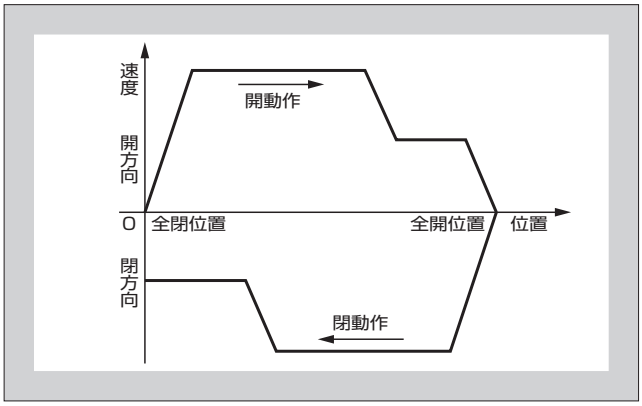


図8　JR東日本の戸挟み安全動作

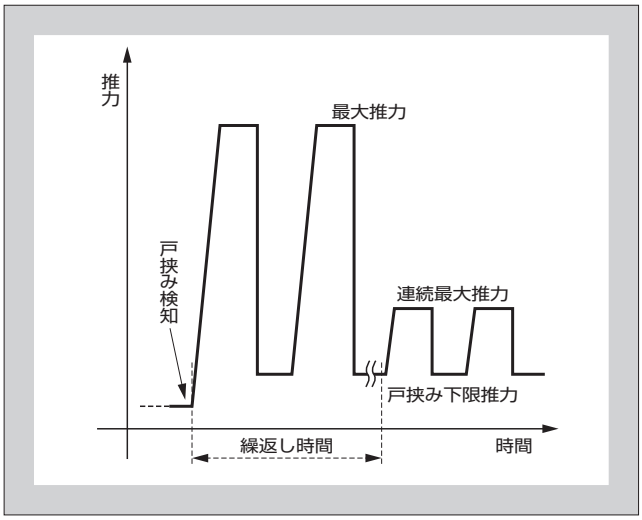


図9　NYCT-R160の戸挟み安全動作

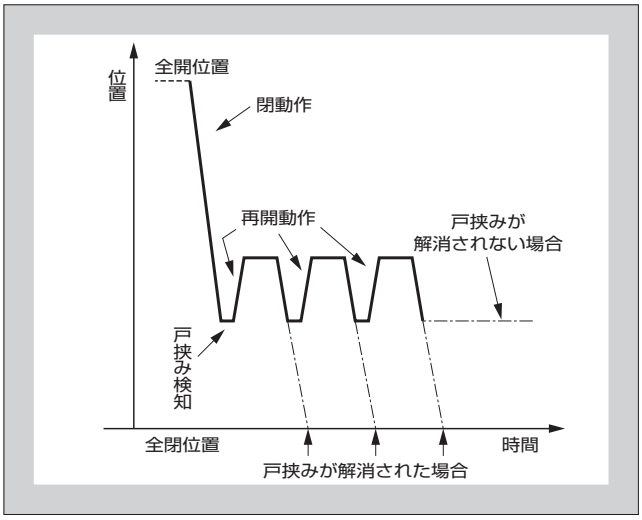


図10　ACトレインで採用された相互バックアップ方式

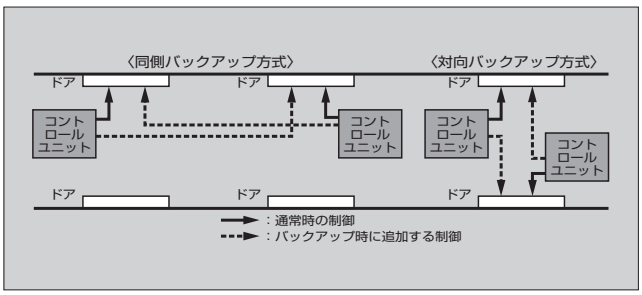
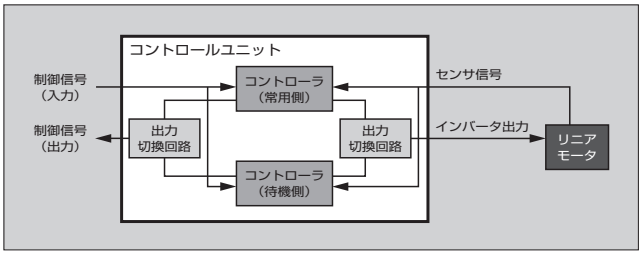


図11　待機冗長バックアップ方式の構成



Mellon University/Software Engineering Institute（SEI）〕が提唱するソフトウェア開発プロセスの成熟度モデルで，ソフトウェア品質管理手法のデファクトスタンダードとして米国を中心に急速に普及しつつある。このプロジェクトでは新規プロセスの適用により，国内では取得例の少ない第三者監査手法（Software Capability Evaluation）による，米国 SEI 公認エバリュエーターによる CMM レベル 2 認定をわずか 1 年という，通常の半分の期間で取得した。

6　あとがき

リニア式戸閉装置は，JR 東日本の E231 系および E531 系で採用され，2005 年度末時点で合計 1 万開口以上が運用中である。また，海外では NYCT の R160 形で採用され，それを足掛かりに，さらに海外市場へリニア式戸閉装置を展開すべく車両メーカーと連携して推進中である。これからも車両用ドアシステムの供給メーカーとして，今後ともより高品質のドアシステムを提供していく所存である。

リニア式戸閉装置の製品化にあたり，ご指導いただいた JR 東日本および川崎重工業株式会社の関係各位に深く感謝の意を表する次第である。

参考文献

(1)　佐藤芳信ほか．通勤電車用リニアモータ駆動ドアシステムの開発．平成 11 年電気学会産業応用部門大会．no.114, 1999, p.359–362.

(2)　佐藤芳信ほか．リニアモータを用いた鉄道車両用ドア駆動システム．平成 15 年電気学会産業応用部門大会．no.3–66, 2003, p.Ⅲ–297 ～Ⅲ–298.

(3)　長倉孝行ほか．電流センサレス方式回生機能付き昇圧コンバータ．平成 14 年電気学会産業応用部門大会．no.80, 2002, p.383–384.

(4)　尾崎覚，針江博史．側引き戸用リニアドアの開発と概要．鉄道車両工業．no.431, 2004.

e-Front runners

＊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。