

2.1 交通システム Transportation Systems

丸ノ内線CBTC機能に適応したATO制御の開発と成果



ATO Adapted to CBTC System on Marunouchi Line

東京地下鉄(株)丸ノ内線は、2024年12月に無線式列車制御システム(CBTC: Communication Based Train Control)の運用を開始した。従来は、自動列車制御システム(ATC: Automatic Train Control)に対応した自動列車運転装置(ATO: Automatic Train Operation)によって運用されていたが、CBTCへの更新に伴い、CBTC機能に適応したATO制御を開発した。

ATCは、軌道回路によって検知した列車の在線位置を用いて他の列車との間隔制御を行う固定閉塞方式である。ATC信号は閉塞ごとに設定されるため、階段状の信号変化による制御になる。一方CBTCは、列車が演算する列車在線位置を用いて他の列車との間隔制御を行う移動閉塞方式である。先行列車との距離に応じて、CBTC車上装置が常時パターン値を演算し更新するため、滑らかな信号変化による制御になる。速度制限区間に対する制御も同様に、データベースに定義された速度制限情報に基づいてCBTC車上装置がパターンを生成し制御する。CBTC機能に適応したATO制御は、これらのCBTCでの特徴を活用した新たな機能を実現した。

(1) 先行列車への自動追従

先行列車との間隔の変化に伴い時々刻々と変化するパターン値を、CBTC車上装置からATO装置へ通知し、ATOは追従用パターンを生成し自動的に加減速を実施するための制御を行う。追従用パターンに対して急激なノッチ変化を抑制しながら加減速することで、乗り心地を維持し、CBTCの遅延回復能力を最大限に活用した効率的な追従走行を実現した。

(2) 速度制限区間に対する加減速制御の自動判定

ATCでのATOは、目標運転時分や乗り心地を考慮し、通常時はATCのブレーキを出力することがないように現地で手動調整を実施していた。CBTCでは演算した速度制

限区間に対するパターン値をATOが受信することによって、加減速制御を自動判定する。臨時速度制限や到着番線による速度制限の差異もATOが自動的に制御を行うことで、通常と異なる走行でも乗り心地の向上を実現した。

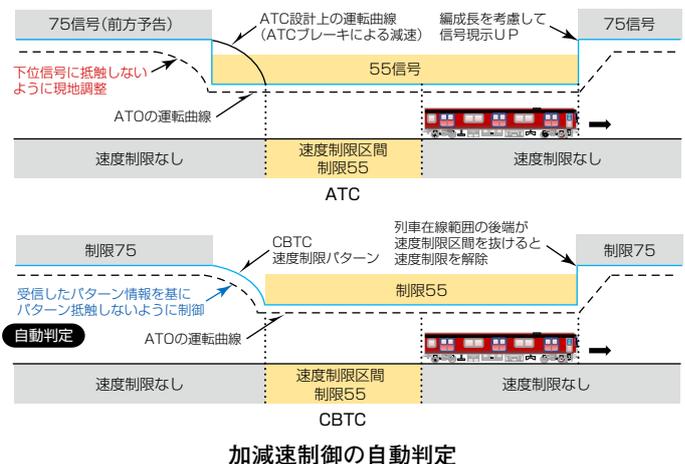
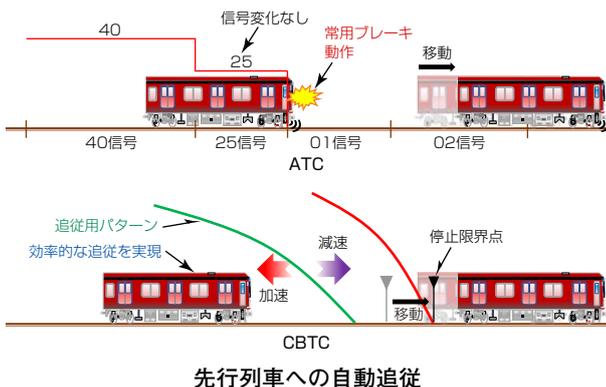
また、速度制限区間を抜けて、信号現示が上がった場合でも、次速度制限区間が近い場合は、不要な加減速を自動的に抑制する機能も付加した。

これらによって、従来現地調整していた項目を調整不要にして、現地調整工数の削減を図るとともに、路線形状変更等にも柔軟な対応を可能にした。速度制限区間や制限速度の変更などはATO装置のソフトウェア変更をすることなくCBTCのデータベース変更だけで対応が可能になり、メンテナンス性が向上した。

(3) 過走防護に対する自動制御

ATOは次停車駅の所定停止位置に停車するためのTASC(Train Automatic Stopping Controller)パターンを演算し、ブレーキ制御することで次停車駅に停車している。所定停止位置と終端が近い場合、CBTCでは過走防護制御を行っているが、非常・常用ブレーキ出力による乗り心地低下や乗客の転倒事故が発生するリスクが高い条件である。そのためATOはCBTC車上装置から次停車駅での過走防護機能が有効になっていると受信した場合は、CBTCの過走防護制御によるパターンと、所定停止位置に停車するためのTASCパターンの低位処理を行い、目標速度に対してブレーキ制御を実施するように対応した。

2023年3月以降、CBTC夜間試運転での確認検証を実施し、CBTC運用下でのATOの有効性を確認できたため、2024年12月にCBTCとともに運用を開始した。今後はドライバーレス化を見据えて、逆線方向運転や逆方向への停車位置修正機能など、更なる機能向上を実施していく。



1. 背景

鉄道の安全安定輸送を確保するために、路線の保守・点検・修理を計画的に行っている。この際に利用する車両が保守用車である。この保守用車は、鉄道の営業運転外(終電から始発までの間)に使用されることが多く、手動又は地上システム側との連絡で転轍(てんでつ)機の切換えを行う。そのため、進行方向の安全確認は目視による確認になり、確認不足などがあった場合、保守用車が転轍機を割り出す事故が発生する。

この確認不足等の人為的ミスを軽減するために、映像分析AIを活用した保守用車割り出し事故防止支援システムを開発した。実証実験では、CPU(Central Processing Unit)とGPU(Graphics Processing Unit)を内蔵した映像分析装置とカメラを接続した構成で実施し、次に示す成果を確認している(図1)。

2. 転轍機専用映像分析AIの開発

開発した転轍機専用映像分析AIは、線路や転轍機の形状を深層学習(ディープラーニング)し、カメラ映像だけで分析する。このAIの機能は、カメラで撮影した映像から線路(転轍機を含む)と背景に分割(セグメンテーション)し、映像を2値化する。2値化した映像から接触点を検出し、接触点の位置や方向で進行可否を判定する(図2)。

一般的にディープラーニングは、教師データが膨大になるデメリットがあるが、教師データを線路と転轍機のセグメンテーションに限定したことで、AIの軽量化を実現している。この軽量化によって、高速演算可能なシステムでなくても、リアルタイムに進行可否判定が可能である。

その他のAIとしては、全ての転轍機を機械学習し、正確な保守用車の位置情報から転轍機を特定することで、進行可否を判定する方式が考えられる。しかし、この方式では、次の理由でシステムが複雑になる。位置情報を特定するために、GPS(Global Positioning System)受信機や加速度センサーが必要である。さらに、地下鉄などではGPSの電波を長距離受けられないため、地上子などと通信し、位置情報を補正する装置が必要である。

3. 対応可能な転轍機の種類

転轍機専用映像分析AIのセグメンテーションは、様々な線路や転轍機の形状の教師データを学習することで性能が向上する。実証実験では、一般的な転轍機以外に、次の特殊構造の転轍機の学習と検証が完了している。

- (1) ガードレール付きタイプ
- (2) ノーズ稼働タイプ
- (3) シングルスリップタイプ

これら以外の形状に関しても、教師データを作成することで、対応可能な転轍機の種類を増やすことが可能である。

4. 最終的なシステム構成

専用装置のシステムも可能であるが、最終的なシステムは、可搬性を実現することで導入のしやすさを目指す。カメラはスマートフォン、映像分析装置はタブレットパソコンだけの構成になる(図3)。特長は次のとおりである。

- (1) スマートフォンのアクセスポイント機能を利用し、スマートフォンとタブレットパソコンをWi-Fi(注)で接続する。
- (2) 鉄道の営業運転外での作業時間であれば、スマートフォンやタブレットパソコンの内蔵バッテリーで動作が可能である。
- (3) 電源やLANケーブルなどの追加配線が不要である。
- (4) スマートフォンとタブレットパソコンの充電や設置する治具が必要だが、大規模な車体工事は不要である。
- (5) Wi-Fiでカメラの映像を配信するため、多様な保守用車両の形態(多目的作業車などの連結、レール運搬車両など)に対応が可能である。

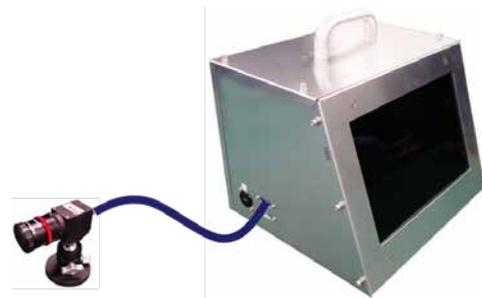


図1-実証実験構成

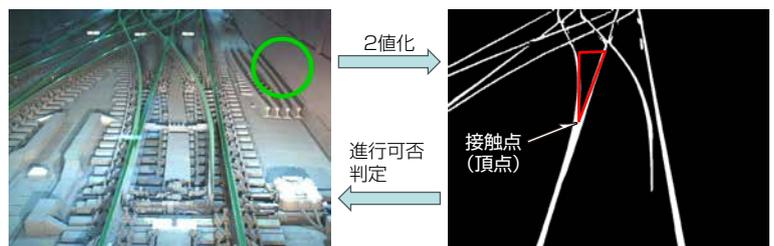


図2-転轍機用映像分析AI

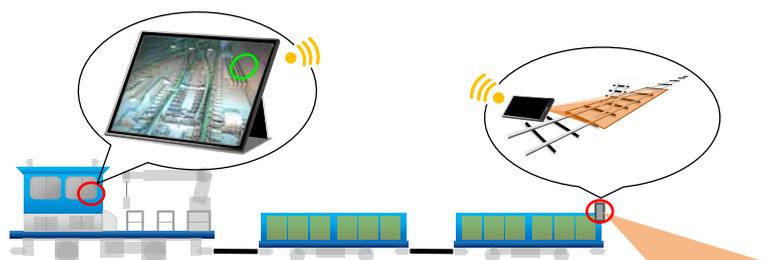


図3-システムイメージ

VVVF Inverter in 4000 Series for Fukuoka City Subway

福岡市交通局4000系向けに、同期リラクタンスモーター (Synchronous Reluctance Motor : SynRM) を適用した鉄道車両推進システム“SynTRACS(Synchronous reluctance motor and inverter TRACtion System : シントラックス)”を世界で初めて(*1)営業列車へ本格導入した。SynRMは同期モーターに分類される高効率なモーターであり、回転子にレアアースを使用しないことから省エネルギー化だけでなく、循環経済へ貢献できる。4000系では走行騒音の低減を目的に片軸操舵(そうだ)台車が適用されているが、この台車の制約上、主電動機は台車に1台、非操舵軸だけに搭載されている。そのため、従来車両と比較し編成での主電動機台数が16台から12台に減り、さらに1車両に2台ずつの分散配置になる。高効率で高出力なSynRMを採用することで、このような台車や編成構成に対応した。分散配置された主電動機に対して、インバーター装置は1台で6台の主電動機を駆動する構成にして、編成2台に集約した。さらに、SynRMは惰行運転時に無負荷誘起電圧が発生しないため、永久磁石式同期モーターで必要な主電動機開放接触器が不要になる。これによって、主回路システムの小型化、保守の省力化に貢献した。4000系向けに初めて量産出荷したSynTRACSは、現車試験で各種試験をクリアし、安定動作を確認した。今後も鉄道車両への適用を

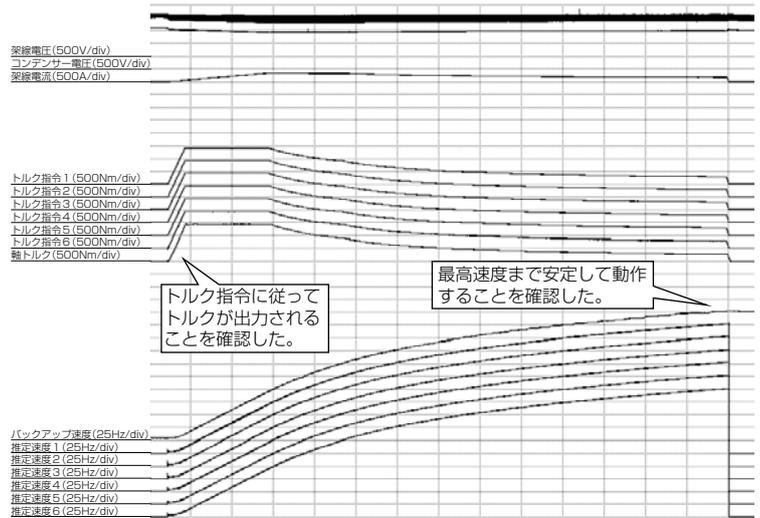
進めていく。

*1 2024年11月29日現在、当社調べ



VVVF : Variable Voltage Variable Frequency

4000系搭載VVVFインバーター装置



応力拡大係数を用いたスポット溶接部疲労強度設計

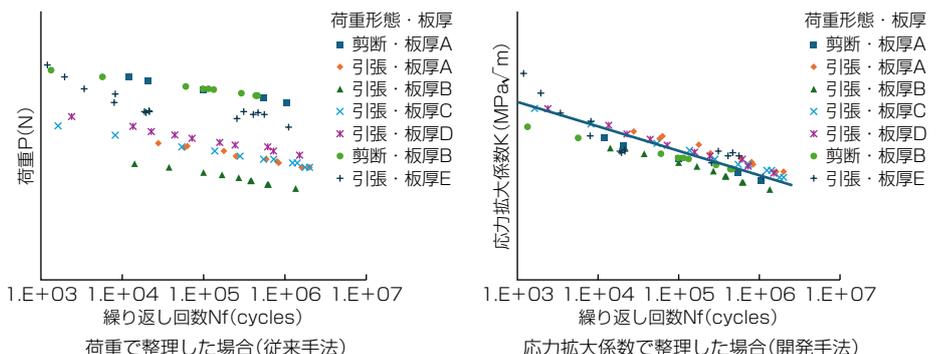
Fatigue Strength Design of Spot-Welded Joints Applying Stress Intensity Factor

近年、鉄道輸送の高速化とエネルギー効率の向上に対する要求が高まってきている。これらのニーズに対応するためには、装置の軽量化と高剛性・強度向上という相反する要素を同時に達成する必要がある。特に、空調装置では、筐体(きょうたい)・カバー等の構造部材の質量は全体質量に対して大きな比率を占めており、その軽量化は設計上の重要な課題になっている。

今回新たに応力拡大係数を用いてスポット溶接部の疲労強度を評価する手法を確立したことで、荷重の形態・板厚に依存せず迅速な評価が可能になり、設計工数を抑えた最適化設計を実現できた。

また、この手法を用いて設計した空調装置について、実車相当の荷重を付加する耐久試験で評価基準を満足する結果になり、この手法の有効性を確認した。

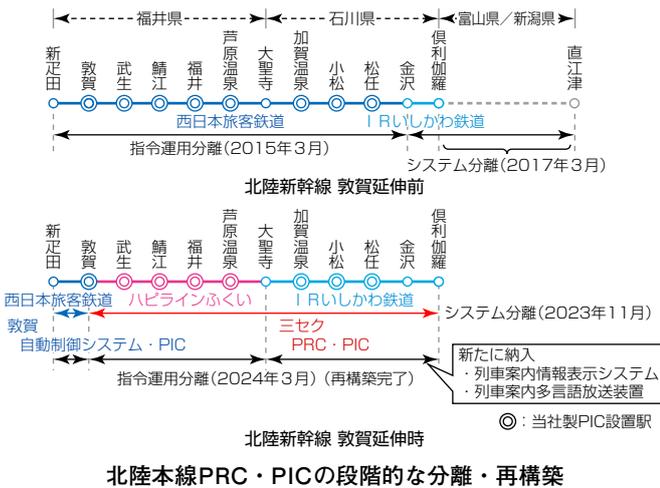
筐体やカバーは生産性向上のためスポット溶接による接合を多用しているが、構造解析を用いて溶接の数や溶接部位を最適化し、構造部材を軽量化しつつ強度を最大化することが重要になる。しかし、従来の構造解析手法では、剪(せん)断や引張などの荷重の形態や部材の板厚によって評価基準が異なり、解析時の評価処理が煩雑であった。



北陸新幹線の延伸開業に合わせて、並行在来線となる北陸本線が第三セクター鉄道(以下“三セク”という。)に委譲された。これまで北陸本線(新正田-直江津)を管理する運行管理システム(以下“PRC”という。)を2015年から段階的に分離してきた。このたび最終段階として敦賀延伸開業に合わせて2024年3月に敦賀自動制御システム(新正田-敦賀)と三セクPRC(敦賀-倶利伽羅)として再構築した。また、旅客案内システム(以下“PIC”という。)についても同様に三セクPICとして再構築した。さらに三セクのI Rいしかわ鉄道にはインバウンド対応と無人駅の案内サービス

拡充を目的として、新たに列車案内情報表示システムと列車案内多言語放送装置を納入した。

- (1) 北陸本線PRCの段階的な分離・再構築
 - ①三セクに委譲される区間に合わせて分離し再構築
 - ②北陸本線PRCの操作性を継承
 - ③一つのハードウェア上で複数の三セクPRCを動作
 - ④指令端末は三セク全線の運行状況を確認可能
- (2) 列車案内情報表示システム・列車案内多言語放送装置
 - ①案内情報表示にLCD(Liquid Crystal Display)を適用し多言語の運行情報を提供
 - ②ホームページに運行情報と列車在線位置を提供
 - ③多言語放送に音声合成を採用
 - ④中央集中音源とIP(Internet Protocol)ネットワークの採用によって駅設備をスリム化



列車案内情報表示システムの運行情報画面

列車統合管理装置(TCMS)の標準画面デザイン

Standard Human Machine Interface Design for TCMS

列車統合管理装置の構成装置の一つである運転台表示器は、列車運用形態の変化とともに機能拡張が進み、画面デザインが多様化している。

運用形態に適した、より魅力的な画面を提供するため、標準画面デザインを開発した。このデザインは、“瞬間認知”のコンセプトに基づいて、操作性や視認性の向上を目指して設計されている。ユーザーが対処すべき状況を一目で把握できるように、主なデザイン方針として次の三つを採用した。

(1) 明瞭なゾーニング

画面に表示する情報をシンプルな四つのエリアに分けて、探す負荷を軽減する。

(2) 重要指標値は読みやすく

運転時や点検時などの利用状況の差異を考慮して、連続的に監視する値を色やサイズで差別化し、重要な要素を際立たせる。

(3) 読まずに伝わる

文字を図記号に置き換えて、用途を絞った強調表現を用いることで、警報等の発生箇所や内容の瞬間認知を支援する。

このデザインは、既に国内の鉄道事業者に採用され、一

部、営業運転が開始している。

今後は、適用範囲を広げるとともに、より鉄道運用に貢献可能な改善を進めていく予定である。

共通表示部
異常通知部
画面固有部
メニュー部

明瞭なゾーニング

重要指標値は読みやすく

読まずに伝わる

利用状況の差異
運転時 点検時

文字を図記号に置き換え
空調 バッテリー

運転中の主な監視対象

平時 警報時

標準画面デザインのデザイン方針

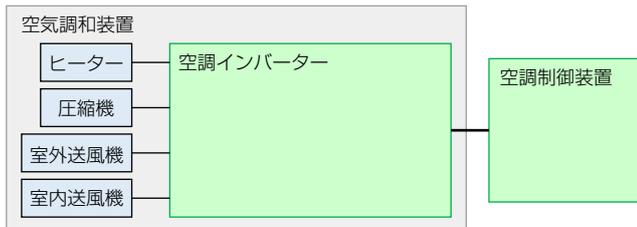
▲ ニューヨーク市地下鉄R211型電車向けController and Inverter Unitの製品化

Productization of Controller and Inverter Unit for New York City Subway R211 Car

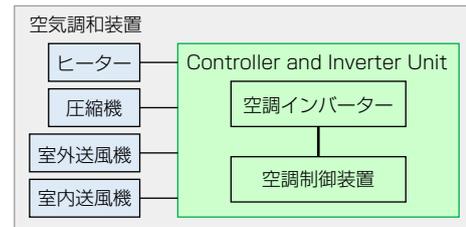
鉄道車両は電力や燃料等のエネルギーを消費し走行する。これらのエネルギーの生成過程で地球温暖化の一因となるCO₂が排出される。そのため、鉄道車両の省エネルギー化は必須である。車両搭載機器の小型・軽量化は車両の軽量化とエネルギーの消費低減につながり、省エネルギーに寄与する。

当社は長年、ニューヨーク市地下鉄向けに鉄道車両用空

気調和装置を納入してきた。従来の装置は車内温度を制御する制御装置と圧縮機や送風機を駆動するインバーターが別々に存在していたが、今回納入するController and Inverter Unitは、高密度設計によって、従来のインバーターと同サイズで、インバーターに制御装置の機能を追加した。その結果、従来比約20%減の小型・軽量化になり、鉄道車両の省エネルギーに貢献している。



従来の空気調和装置の製品形態



Controller and Inverter Unit適用空気調和装置の製品形態

▲ 鉄道車両用空気調和装置の性能試験自動化・品質向上

Digitization of Quality Data Using Automated Heating, Ventilation and Air Conditioning Type Test

鉄道車両用空気調和装置の新製品設計・開発では、その設計が規定の仕様を満足しているかを検証するために、室内外温湿度、電源電圧、風量の変化に対して、冷房能力及び機器の運転状態が仕様範囲内であることを確認している。従来は試験員が手動で試験条件を設定しており、誤った条件で試験を実施するリスクを抱えていた。

そこで性能試験室を新設し、室内外温湿度、電源電圧、風量を常時監視及び自動調整することで、条件設定や判定のミスを低減した。取得した時系列データを分析して機器の特性を把握することも可能である。運転状態(各部温度・圧力・電流)や保護回路を常時監視して、過渡的な異常も自動検知できるようにした。このように試験品質の向上を実現できた。



性能試験室(新設)

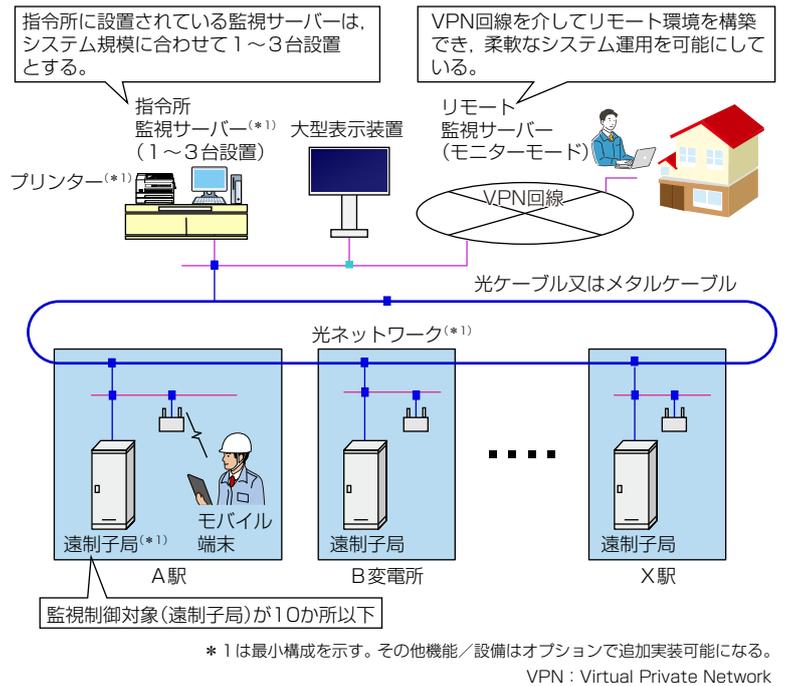
中小規模向け電力管理システムの標準開発

Standardization of Power Management System for Small and Medium Sized Customers

中小規模の鉄道事業者では電力監視制御を現場手動に頼ることも多い。働き手減少や経営効率化に迫られてシステム化する場合でも、大手のような多機能システムは採用されにくい。これは小規模な管理区でも同様である。そのため、監視制御対象と機能を必要最小限に絞った中小規模向け電力管理システムを開発した。

特徴は次のとおりである。

- (1) 指令所に親局機能付き監視サーバー、各変電所にIP遠制御局を設置して光ネットワークで接続し、処理高速化を実現した。
- (2) 現場ではなく指令所でGUI(Graphical User Interface)による集中監視制御ができて対応人員の負担軽減、迅速な異常把握と復旧対応を実現した。
- (3) データベース化してプログラミングを極小化することで価格を抑えつつ、顧客要望に合わせたシステム提供も可能である。



中小規模向け電力管理システム構成

某鉄道事業者向け既設他社製ホームドアの更新

Updating Existing Platform Doors from Another Manufacturer for Certain Railway Operator

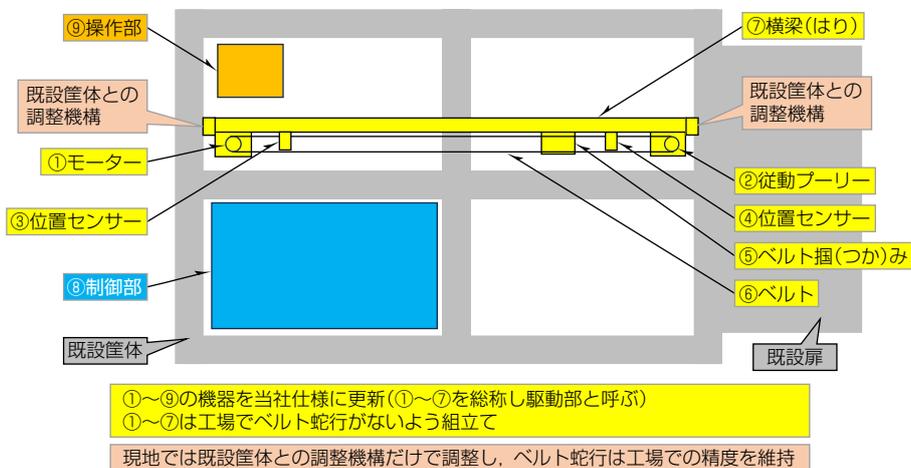
老朽化のため他社製ホームドアの駆動部・制御部・操作部を更新した(図1①～⑨を当社仕様へ更新した)。

課題は“既設図面と既設筐体の整合確認”と“既設筐体と更新駆動部の組付け精度確保及び交換時間短縮”であった。精度不足ではベルトが蛇行しプーリーと接触し破断するリスクがあるため、次のことに取り組んだ。

- (1) 全駅現地調査
- (2) 組立て治具を用いてベルト蛇行のない高精度駆動部を製作

- (3) 精度確保したまま既設筐体に組付け可能な調整機構を設けた駆動部を製作

これらによって高品質かつ交換時間短縮を実現できた。この更新は製品寿命を延ばすとともにコスト削減の有効な戦略であるため、今回の実績を生かして他社製ホームドア更新にも積極的に参入し、市場拡大につなげる。



既設他社製ホームドアの更新