

高速鉄道のパンタグラフ用テストベンチの
高度に動的な制御

Keeping Contact

at 300 km/h

電動の鉄道車両は、たとえ最高速度でなくても、電力供給を失うことがあってはなりません。しかし、車両と高架線の相互作用は非常に複雑になるため、パンタグラフの適合が大きな課題となっています。そのため、ウィーン工科大学 (TU Wien: Technische Universität Wien) と Siemens 社は、実際のテスト走行の一部をラボ内で仮想的に行えるようにするための新たなテストベンチの開発に取り組んでいます。ここでは、dSPACE のツールが活用されています。



今

日の鉄道交通の速度は、着実に上昇しています。たとえば、最新の鉄道車両にとって時速 300 km に到達することは、電源に関する課題こそあれ、もはや難しいことではありません。この場合に特に重要なのは、パンタグラフと架線の間の動的な相互作用です。このような伸縮性を持つ接触システムは、特に高速では振動が起きる傾向が

あるためです。接触力が極端に弱い場合、パンタグラフは架線から離れてアーク放電が発生し、炭素製の接触部が電氣的に摩擦する原因となります。接触力が極端に強い場合は機械的な摩擦が増大し、架線や接触部に強力な動的負荷がかかる原因となります。さらには、鉄道の電力供給システムや架線構造、および法規制は国により異なるため、特に国際的な鉄道交通に

おいては多くの課題が生じています。このため、アクティブな制御により高速時にも接触力を最適化できる最新式の高性能パンタグラフが徐々に増えています。これまで、これらの開発や機械設計に際しては複雑な動的シミュレーションによるテストが可能でしたが、コストのかかる実際のテスト走行までをカバーすることはできませんでした。このため、パンタグラフを製造するメーカーである Siemens 社は、実際のパンタグラフの動作を可能な限り早期の開発段階で動的な HIL (Hardware-in-the-Loop) テストによって検証し、適切なコントローラの開発に活用することにしました。この動的な HIL テストでは、テスト対象として実際のパンタグラフを仮想的な架線に接続するため、ラボベース開発の利点である優れた再現性と実物を使用したテスト結果を組み合わせる検証することができます。実機ではこのような場合は通常、特に架線の動的な要因により、テスト対象ユニットを正確に接触させたり、その動作を記述したりすることが非常に困難です。ただし、それらを高い品質で行うことが可能になれば、テストベンチ上で仮想的なテスト走行を実施し、さまざまな有意義なテストを迅速に行えるようになります。これを活用すれば、開発者は線路上のパンタグラフと架線の動的な相互作用の両方を明確に理解できるようになります。このように、テストベンチを使用してシミュレーションを行えば、鉄道車両を新規に開発する際のテスト段階や評価段階において、手間やコストのかかるフィールドテストの数を削減することができます。

テストベンチでの高度なダイナミクス

ウィーン工科大学 (TU Wien) の Institute of Mechanics and Mechatronics では、Siemens 社と協力し、動的な要素を多く持つ既存のパンタグラフのテストベンチを

>>

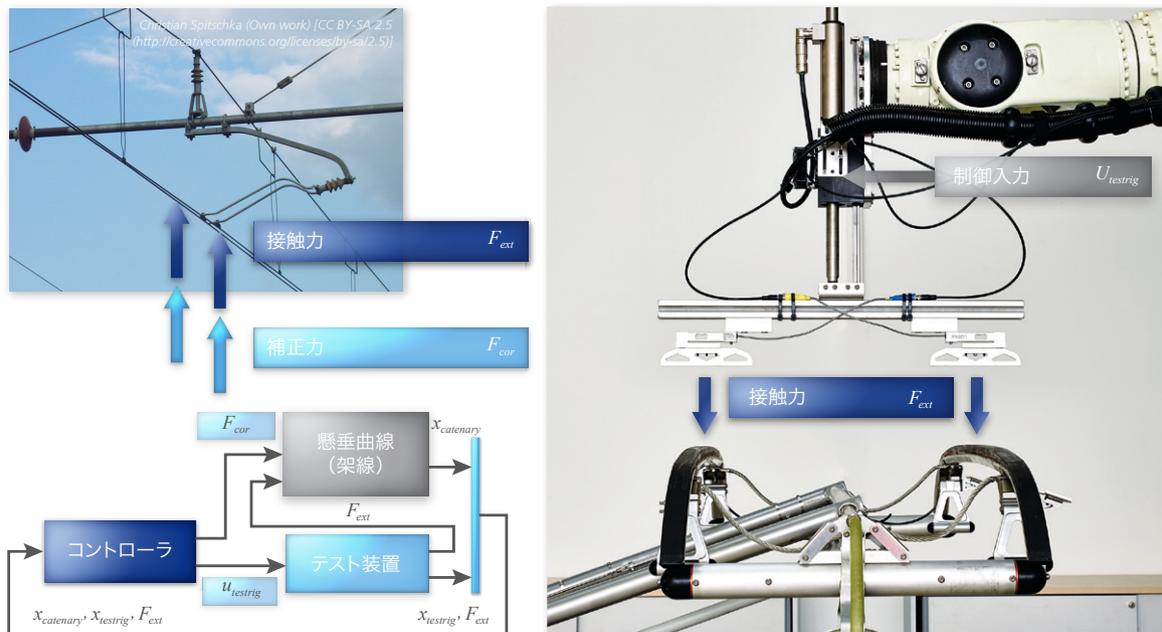


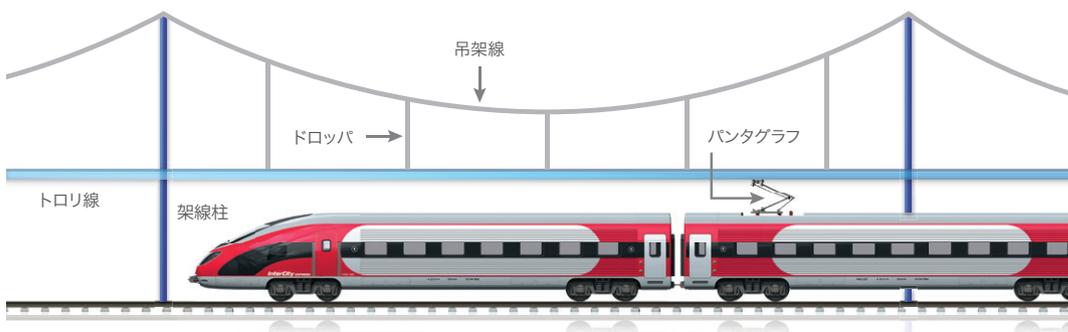
図 1：ウィーン工科大学が開発した手法を使用することで、列車の高速運転を Siemens 社製のパンタグラフテストベンチ上で現実的に再現することができます。

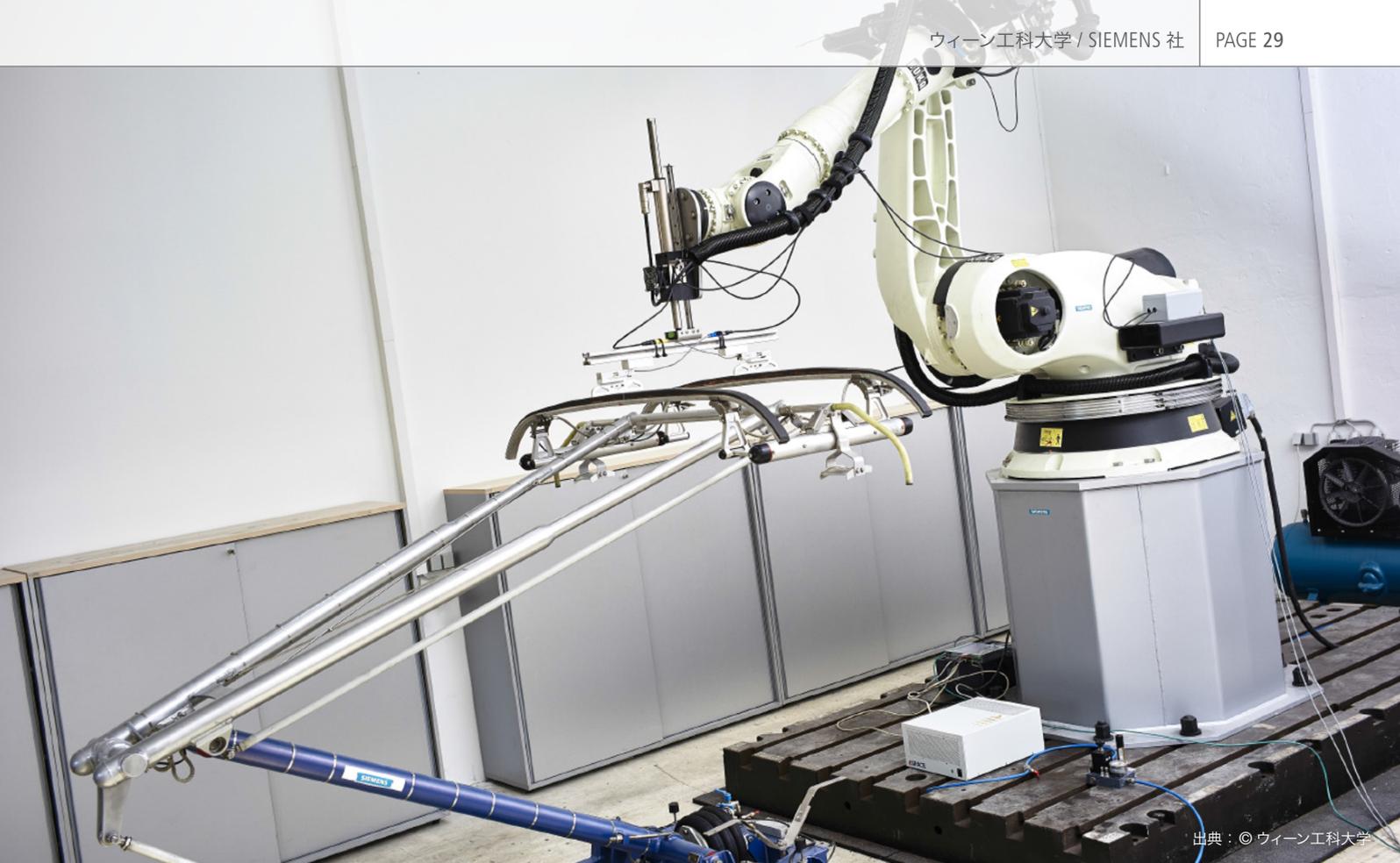
改良し、仮想的な架線を使用して、パンタグラフとの複雑な相互作用をリアルタイムで再現できるようにしており、仮想的なテスト走行を通じて、実際のパンタグラフを現実的かつ再現可能な方法でテストしています。ここでは、リニアモーターを組み込んだ産業ロボットが架線を押し付ける役割を担っています。このテストベンチでは複合型のコントローラが使用されてお

り、2つのアクチュエータによりパンタグラフの電流接点における架線の動作を正確にシミュレートすると共に、発生した接触力を計測しています(図1)。この際、テスト対象ユニットであるパンタグラフは、実際の架線との動的な接触時に発生するのと同じ力による影響を受けます。このテストベンチの開発においては、可能なかぎり現実的なシミュレーションを行うため、ま

ずは架線のダイナミクスに対する極めて効率的な数学モデルを開発する必要がありました。このモデルでは、機械類の正確なアドミッタンスだけでなく、波動伝播現象も考慮する必要があり、さらには、リアルタイムで実行できる必要がありました。実際の架線の主要コンポーネントはトロリー線と吊架線で、両者はドロップで相互に結ばれています(図2)。架線の動的挙動の

図 2：仮想的な架線をモデリングする際は、実際の架線のすべてのコンポーネント(この図では簡略化)を含める必要があります。





出典：© ウィーン工科大学

図3：ウィーン工科大学では、パンタグラフのテストに際し、Siemens社製のテストベンチシステムおよび多数のI/O拡張機能を搭載したDS1006 Processor Boardを組み合わせて使用しています。

数学モデルを作成するため、開発者はまず動作の方程式（この場合には、偏微分方程式）を作成しました。これらは共動座標で公式化されているため、考慮すべきなのはパンタグラフの接点に近い架線の動作のみであり、適切な近似法（有限差分、有限要素）を使用すればこれらの方程式を解くことができます。ここでは、最適化された特別な吸収境界条件を使用することにより、刺激した波動を計算領域外に向かうようにさせることで架線の検討対象を狭い区域に限定しながら、より広域の複雑な架線ダイナミクスを現実的に即してシミュレートできるようにしました。ただし、モデルデータの総合的かつ自動的なプリプロセス処理を必要とする時変系構造の実現には、当然ながらドロップの正確な相対位置が計算に含まれる必要があります。

仮想世界と現実世界の融合

テストベンチの制御では、仮想的な送電線とテスト対象である実ユニットとの間に物理的に正しい接続を確立する必要があります。そのため、開発者は予測コントローラを使用しました。予測コントローラに高精度な架線モデルおよびテストベンチのアクチュエータモデルを統合すると、それぞれの挙動の予測が可能になり、事前に正しい制御判断を下すことができるため、テストベンチ上で可能な限り現実的に架線をシミュレートすることができます。また、この制御システムでは、最大許容モーター電流や位置限界などの物理的な限界をコントローラで常に観測することができます。ただし、これを実現するには、それぞれのサンプリングの合間に最適化に関する複雑な数学的問題を解決することが必要でした。そのため、研究チームは

新たな固有の拡張機能を開発し、従来のHIL (Hardware-in-the-Loop) 制御コンセプトに実装することにより、仮想的な架線を追跡できるほど十分に高速でないテストベンチを使用している場合であっても、高度に動的なテストケースに対して物理的に正確な結果を得られるようにしました。ここでは、別々の公式を使用して、衝撃とエネルギーという2種類の要素をコントローラ内で直接検証することにより、仮想的な架線と実際のパンタグラフの間でこれらの要素を安定的に交換できるようにしたため、テスト結果がより現実に即したものになりました。しかし、仮想的な架線と実際のパンタグラフの複雑な相互作用のシミュレートには高精度なモデルが必要である一方、モデルをリアルタイムで計算できるようにするにはモデルの複雑さを最小限にする必要があります。また、リ

>>

「dSPACE ツールは、演算処理能力に対する当社の厳しい要件に確実に対応しつつ非常に柔軟に使用することができるため、幅広いタスクに活用できます」

Stefan Jakubek 教授、ウィーン工科大学 (TU Wien)

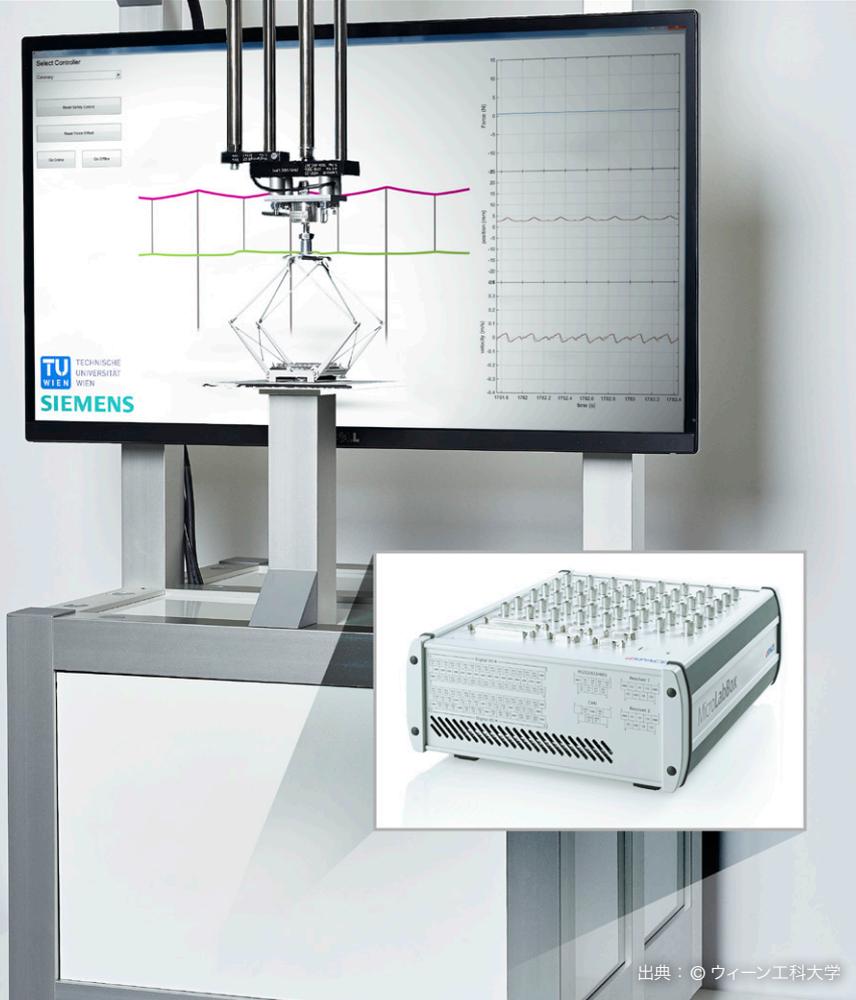


図4：MicroLabBoxを使用して、パンタグラフ用テストベンチの小型試験モデルを構築しました。開発した制御コンセプトは、テストベンチから小型試験モデルへ容易に移行できるため、教育現場での説明にも活用することができます。

図5：テストドライブを使用して、新型パンタグラフのアーカ放電の防止効果を実証しています。



リアルタイムシステムではステートオブザバから受信した計測データに備え、摩擦力などの障害を予測することも必要です。これらすべてのタスクをリアルタイムで完了するため、ウィーン工科大学では新たな数値法だけでなく、極めて強力なリアルタイムプラットフォームが必要となりました。

柔軟性の高いdSPACE ツールチェーン

ウィーン工科大学は、dSPACEのリアルタイムツールを選択しました。研究プロジェクトの過程では、テストベンチのコンセプトの開発に2つの異なるdSPACEプラットフォームが使用されました。実物大のパンタグラフのテストに使用するテストベンチの基盤となるのは、DS1006 Processor Board (図3)です。このボードの2.8 GHz クアッドコアプロセッサを使用すると、計算時の負荷を効率的に分散することができるため、開発者は複雑なシステムをシミュレートしながら高いサンプリングレートで制御を行うこともできます。たとえば、1つ目のプロセッサコアでテストベンチの基本的な接続と制御(5 kHzのサンプリングレート)を行いながら、2つ目のコアでインピーダンスの予測制御(200 Hz)を行います。3つ目のコアでは、高精度の架線モデル(200 Hz)をシミュレートします。それぞれのサンプリング手順では、モデルの状態に応じてテストベンチのコントローラを初期化します。開発者は、DS4302 CAN Interface Board (リニアモーター)、DS3002 Incremental Encoder Interface Board (位置センサ)、DS2201 Multi-I/O Board (制御変数)、およびDS4121 ECU Interface Board (産業ロボット)を使用して、テストベンチのコンポーネントとの通信を最適化しました。開発したアルゴリズムの大半は、MATLAB®/Simulink®で実装し、そこから直接コンパイルしました。また、外部ライブラリを統合することで、複雑な数学的問題も効率的に解決することができました。ユーザインターフェースの開発は試験ソフトウェアであるdSPACE ControlDesk®で行ったため、テストベンチ上では極めて直観的に仮想的なテスト走行を制御することができました。また、開発者は、実物大のテストベンチに加え、開発や教育現場向けとして廉価なラボ用テストベンチも構築しました(図4)。ウィーン工科大学では、パンタグラフと架線の間の相互作用とインピーダンス制御

の基礎を明確に例証し、理解を深めるためのラボ用テストベンチとして新しい小型の MicroLabBox を初めて使用しました。dSPACE ツールチェーンは互換性に優れ、シームレスな特性も確保されているため、テストベンチからこの小型のラボ試験システムへのアルゴリズムの移行は容易に行うことができました。

まとめと展望

ウィーン工科大学では、上述のツールを使用して、極めて動的かつ強力なパンタグラフのテストベンチを構築することができました。とりわけ架線モデルを拡張したことにより、既に複数の牽引力の影響、つまり多数のパンタグラフが同時に上がった状態の鉄道車両の解析もテストベンチ上で行うことができます。そのため、今後は開発サイクルの早期の段階でパンタグラフの性能を確実に定量化することができます。ウィーン工科大学と Siemens 社の連携によって開発されたパンタグラフ用テストベンチは、偏微分方程式における質量のシステムダイナミクスを一貫してシミュレートできる、まさに世界初の HIL (Hardware-in-the-Loop) テストベンチです。既に実現している極めて動的かつ現実的なテストとその優れた再現性は、高性能パンタグラフの機能を大幅に向上させる上で重要であり、今後より効率的な鉄道交通を実現するための貴重な資産でもあります。さらには、実施したテストの結果はより小型の試験システムに容易に移行できるため、開発した制御モデルを教育現場向けに利用することも可能です。これにより、若いエンジニアに対し鉄道技術への関心を持ってもらうことができます。今後の鉄道交通が速度においても効率性においても新しい記録を樹立し続ける可能性は十分にあります。 ■

Stefan Jakubek 教授、Alexander Schirrer 博士
Guilherme Aschauer 氏、ウィーン工科大学
Christian Saliger 氏、Siemens AG Austria

ウィーン工科大学と Siemens 社が共同開発したパンタグラフテストベンチの稼働状況や、極めて動的な新しい制御の詳細を下記の動画でご確認ください。

www.dspace.jp/go/dMag_20161_tuwien_e
(© Strukt GmbH)



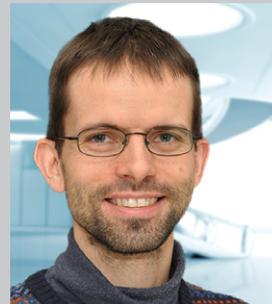
Stefan Jakubek 教授

Control and Process Automation
学部教授、ウィーン工科大学。



Alexander Schirrer 博士

Control and Process Automation
学部の博士課程修了研究者、ウィーン工科大学。



Guilherme Aschauer 氏

Control and Process Automation
学部プロジェクトアシスタント、ウィーン工科大学。



Christian Saliger 氏、理学修士

パンタグラフ開発エンジニア、
Siemens AG Austria。

