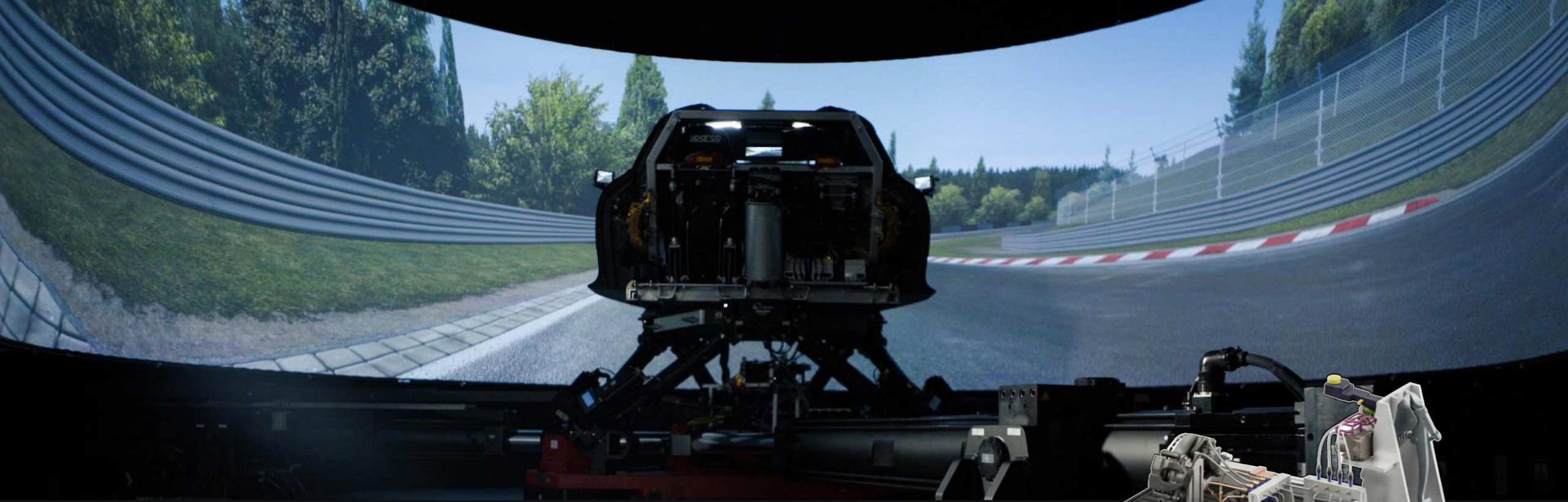




17TH INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ADVANCED VEHICLE CONTROL · TSUKUBA, JAPAN · 7-11 SEPTEMBER 2026

実世界から仮想環境へ:ハードウェア・イン・ザ・ループ統合による ドライビングシミュレータにおけるブレーキフィールの開発

Anton Tworek · Bernhard Riegert · Peter E. Pfeffer

MdynamiX AG, Munich · Munich University of Applied Sciences



はじめに – MdynamiX AG



完璧なドライビング体験

- 研究を産業の革新と実用化につなげる.
- ドライビングの感覚を定量化し、人々がそれを体験できるようにする
- 開発 – 評価 – 体験



議題

- 1 なぜブレーキのフィーリング試験が、依然として実車を使ったテストコースで行われているのか
- 2 「BrakeLink」製品の構成
- 3 制御方式とブレーキ反力の伝達メカニズム
- 4 ブレーキシステムとブレーキ反力装置の連携
- 5 ブレーキ反力装置「BrakeLink」と実際のブレーキシステム作動の比較
- 6 結論と今後の課題

最新の自動車とは何か？

開発予算の大部分は、以下の目的に費やされています。

ソフトウェア
開発

運転支援

航続距離と
充電戦略

接続性と
アップデート

25 to 30 % 2023年時点で主要7社のOEMにおける研究開発予算のうち、ソフトウェアに充てられている割合

出典：ローランド・ベルガー、『Computer on Wheels』（2023年）



AI generated image

やっぱり良いものでなければならない...

乗り心地

NVHおよび音響

操舵感

ブレーキのフィーリング

ハンドリング

ブランドコンセプト

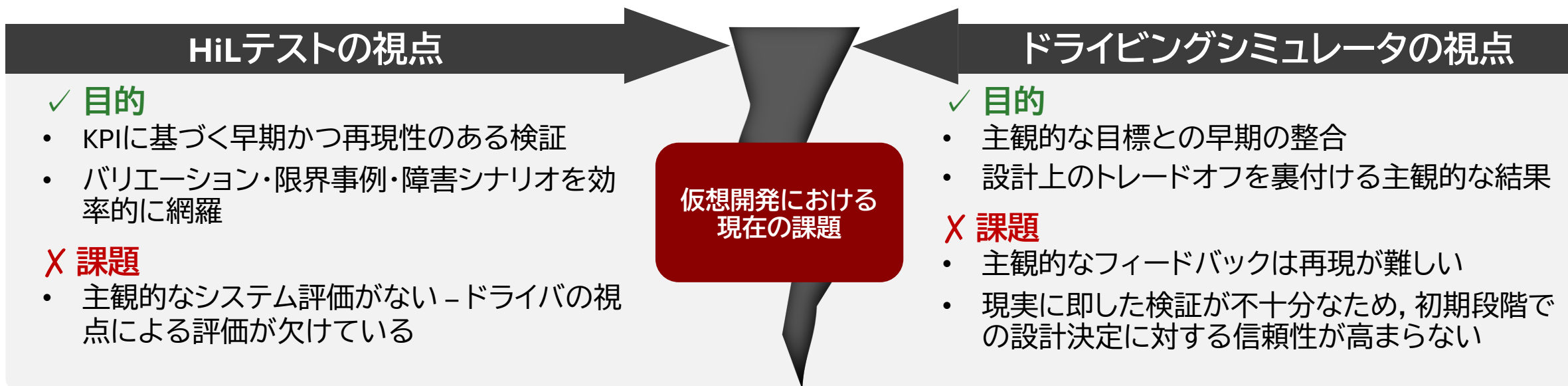
これらのトピックの重要性自体は減っていないが、単に割り当てられる時間が減っただけだ

テストコースでの試験日数が減少

プロトタイプの数や実証試験の時間が限られている場合ほど、テストは開発プロセスにおいてより早い段階(Vサイクルの左バンク)で行われるようになる。



XiL統合を通じて、ドライバをできるだけ開発の早い段階で意思決定プロセスに組み込む必要性大



進化するたびに、新たな機会が生まれる

ケンプテン応用科学大学 (Kempten University of Applied Science) のドライバー支援・コネクテッドモビリティ研究所 (IFM) における運転シミュレータを用いたシミュレーションベースの車両開発に関する研究

モーション制御

高帯域幅モーションプラットフォーム

解決済み

映像と音声

高精細なレンダリング・プロジェクタ・オーディオ

解決済み

コックピットの現実感

製品の形状・座席・操作系

解決済み

操舵感

シミュレータ内の実ステアリングシステム, MXsteerLink

解決済み

ブレーキペダルのフィーリング

ほとんどのシミュレータでの一般的パッシブタイプ反力装置

開発中



出典: 社内画像

ドライビングシミュレータにおいて意味のある主観的評価を行うためには、そのシミュレータがリアルに感じられるものでなければならない。

本論文の成果

構造, 現実的な反力発生装置, および実機を用いた主観的評価.



図1 シミュレータのcockpit, 制御ハードウェア, およびHiLテストベンチ上のiMEB 2ブレーキシテム.

1 BrakeLinkの構造

ブレーキ用HiLテストベンチと, シミュレータcockpit内のフォースフィードバックペダルを接続する信号ライン. ブレーキコントローラハードウェアやソフトウェアに変更を加える必要はない.

2 外力伝達経路の特性評価

ABS動作時の反力帯域におけるカスケード接続された制御ループの帯域幅, 減衰量, および位相遅れ.

3 主観的評価

10名の専門家評価者が, フォースフィードバックユニットおよびBrakeLinkを介したソフトウェアによるペダルフィードバックモデルと, テストベンチ上でのブレーキシテムの直接作動とを比較評価.

ブレーキシテムは実験室に設置されたまま.
ブレーキペダルのフォースフィードバックアクチュエータだけがcockpit内に設置されています.

BrakeLinkアーキテクチャ

フォースフィードバックブレーキペダル

- ペダルボックス・ペダル位置・踏力・ストローク比は参考車両と同一。



リアルタイムシステムVI-grade製「Autohawk」

- 適用可能車種
- VI-WorldSimによる可視化
- EtherCAT接続
- テストベンチ制御



ブレーキシステムテストベンチ

- ヒュンダイ社IONIQ5 iMEB 2レストバスシミュレーション(ECU機能実現の為)



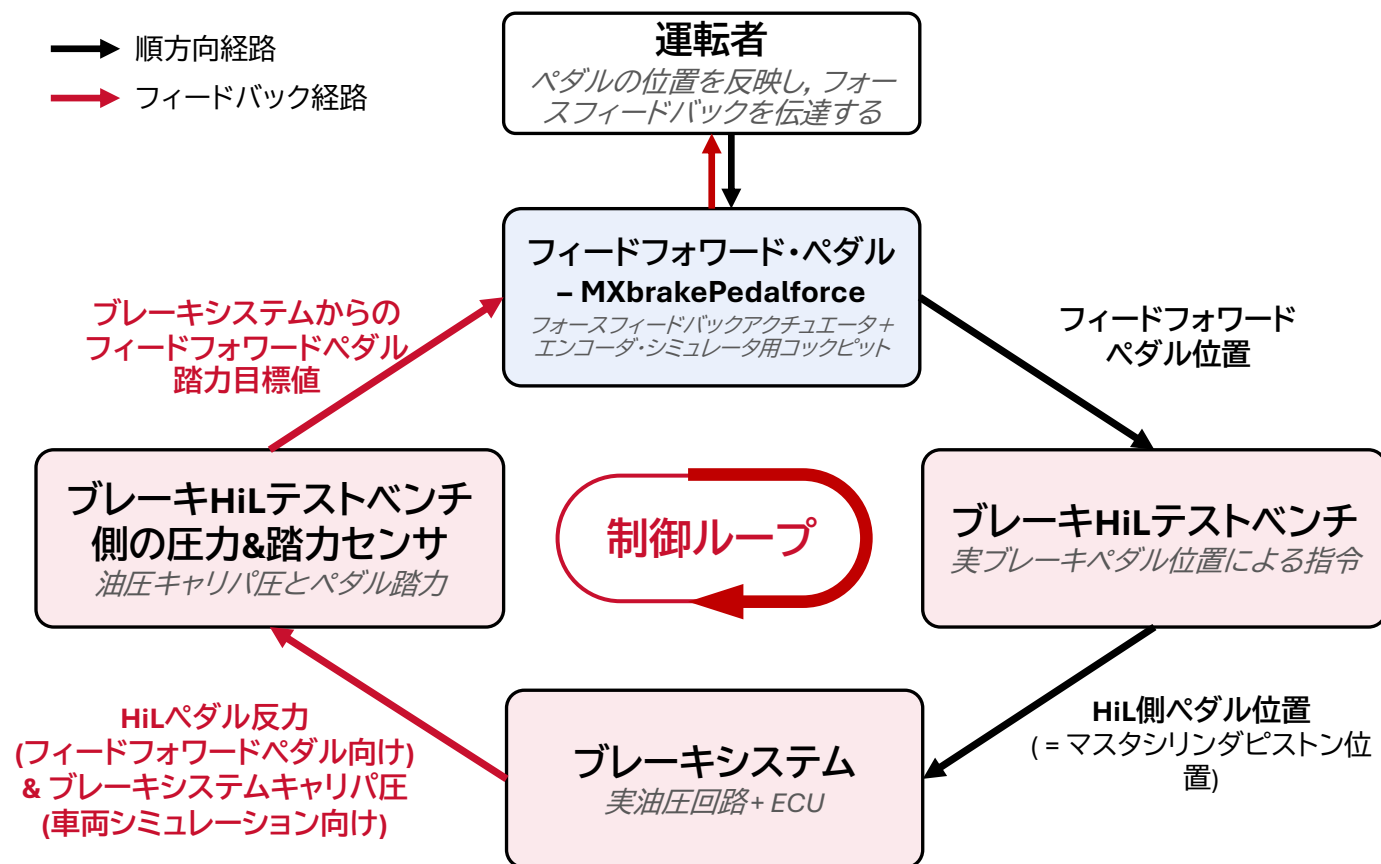
現代モータース製 iMEB 2

テストベンチ用制御装置

- サーボ駆動制御, 計測装置を含む
- 外部リアルタイムシステムとのEtherCAT通信
- ブレーキモデルの演算も可能なプロセス間通信機能

BrakeLinkのカップリングと信号経路

ペダルの位置情報がテストベンチに伝達され、実際の油圧システムによって生み出された力が運転者へフィードバックされる。



- **順方向経路**
運転者からのペダル入力
- **フィードバック経路**
ブレーキシステムで再現された、運転者向けブレーキ踏力
- **仮想連携(電氣的連携)**
フィードフォワードペダルとブレーキHiLテストベンチそれぞれ個別に試験可能な状態。
- **運転台には直接搭載する必要無し**
tブレーキシステムはドライビングシミュレータンモーションベースに搭載せず連携動作が可能なので、余計なペイロードを増加させない設計。
- **あらゆるブレーキシステムを利用可能**
tシステムの構成は今回の例であるiMEB 2などシステムに依存しない。

踏力伝達経路

連続的な圧力上昇ランプ入力に追加されたステップ応答による解析

モデルベースのフィードフォワード制御

- 駆動系の摩擦・慣性・トルクリップルに対するフィードフォワード補償.
- 位置制御器と外力制御器のカスケード構成

測定された安定時間

負荷応答: 7 ms

95 %まで, 最大1 kN

1次時定数

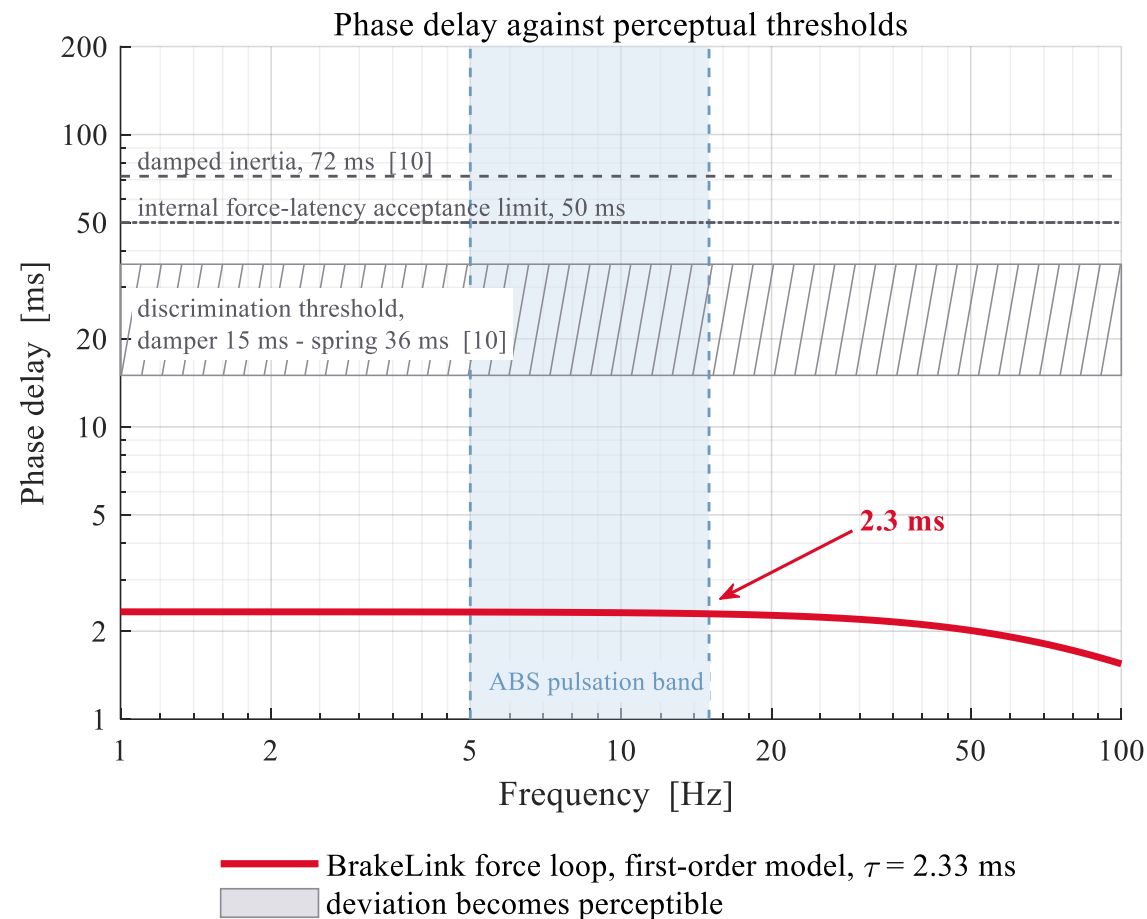
$\tau = 2.3 \text{ ms}$

$$T(s) = \frac{1}{(\tau s + 1)}$$

ABS作動帯域(5~15 Hz)における最大位相遅れ

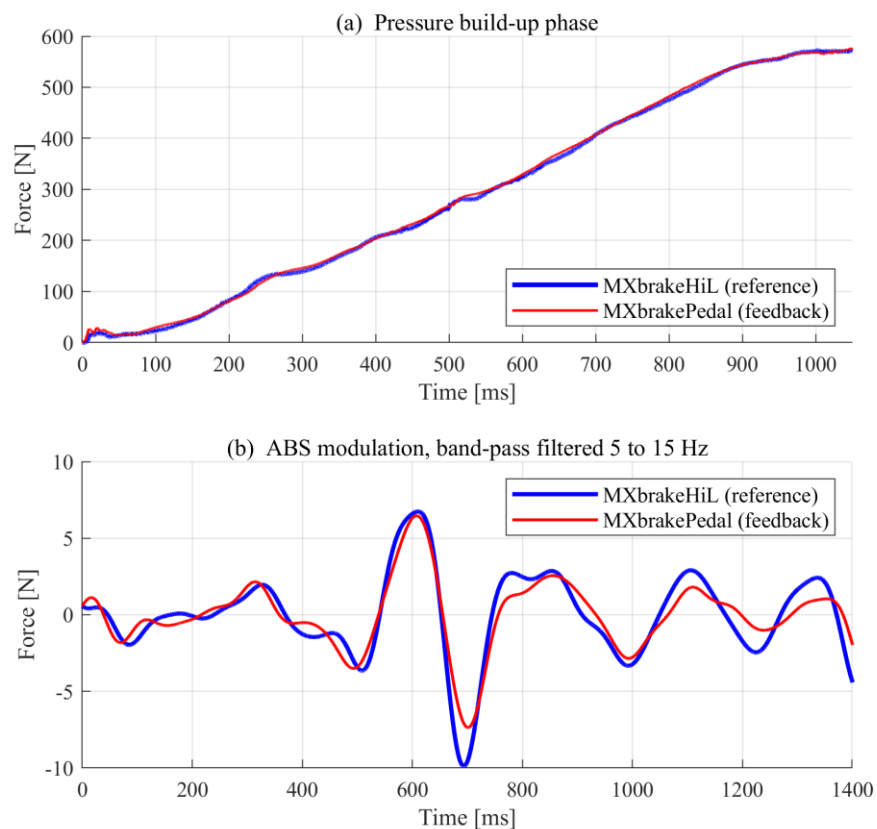
- 一次遅れ系伝達関数から導出された1次時定数
- 位相遅れ $\approx 2.3 \text{ ms}$
- 最適な使用のためには, 位相遅れが閾値以下である必要がある

この7ミリ秒には, 制御ループ全体の演算時間が含まれています. すなわち, 運転者の入力から, テストベンチ上の油圧ブレーキシステムを経て, 運転者の足にかかるペダル踏力に至るまでの全過程であり, 通信や制御ダイナミクスも含まれます.



測定された力の再現性 BrakeLink

通常減速時のMXbrakeHiLにおける踏力と、MXbrakePedalで再現された踏力を比較。両方の測定値は同じ操作によるもの。



(a) 圧力上昇段階

- 再現された踏力は基準値にほぼ一致しており、明らかなオーバーシュートは見られない。
- 駆動速度は約300 mm/s。

(b) ABS作動領域

- 5～15 Hzの帯域通過フィルタ処理を施し、ABSの脈動の影響を分離。
- パルスの形状とタイミングが忠実に再現。
- これは合成振動ではなく、実際の油圧システムのABSによる脈動と一致。

図4 MXbrakeHiLにおける基準値(青)と、MXbrakePedalで再現された力(赤)

実ブレーキの油圧システムによって生じるペダルへの「脈動」は、運転手にペダル踏力として感じる事が出来る。

試験条件

シミュレータ・車両モデル・ECUの適合値・油圧ハードウェアはすべて同一。ペダル踏力の発生源のみが異なる。

Mode A: FF pedal standalone – software model for pedal feel



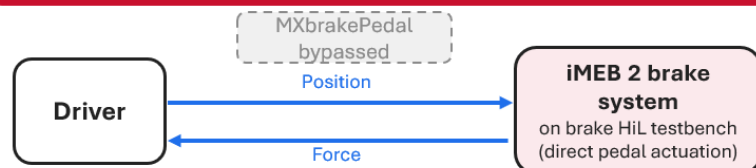
Pure pedal feel without controller interaction

Mode B: BrakeLink – brake HiL coupled with FF pedal



ECU/ brake system interaction reproduced

Mode C: Direct hardware actuation



Real vehicle equivalent system for perceptual ground truth

モードA

ソフトウェア「iMEB 2」のペダルフィールモデルに基づく。このモデルバージョンでは、ABS機能は動作しません。

モードB

HiLテストベンチ上で、実物のiMEB 2ブレーキシステムに接続されたペダルを利用。実際のABSのパルス振動が運転者に伝わる。

モードC

評価担当者は、テストベンチのペダルを直接操作します。その間にアクチュエータも制御ループも存在しません。

モードCは運転者感覚の基準となります。モードAとモードBの切り替えには、機械的な変更は一切必要ありません。

研究計画

評価者

10名の専門家評価者

- 自動車工学・車両ダイナミクス・試乗の経験があること
- ドライビングシミュレータでの運転経験があること

タスク

「再現性」こそが重要であり絶対的な品質ではない

- モードAおよびモードBは、モードCを基準として評価される
- 3つの条件すべてにおいて、車両モデル、ECU、およびハードウェアは同一である

参照

固定された実験室環境

- ブレーキペダルの踏み心地を隔離するためのモーション無し環境
- その違いはブレーキシステムの設定に起因する可能性がある

評価条件:

快適な減速

≈ 0.2 g

徐々にブレーキをかけて完全に停止する

100 km/hから約0.4 G

取り消しと再開

≈ 0.3 G

ABSをフル作動させた緊急ブレーキ

100 km/hから

モードごとの手順:

- 仮想の田舎道, 3~5分程度
- 固定シーケンス C, B, C, A, 常に基準点から
- 9つの主観的属性, MXevalAppで取得



出典: VI-grade Proving Ground - <https://www.youtube.com/watch?v=4Fr1hWJr10s>

評価基準と評価項目

表1：詳細な高品質主観評価尺度 [SAE J1441 [1] を基に改編] – 専門家評価者向け

MX-RS	制御	外乱	説明	専門家の視点
10	「極めて良好」	ほとんど気づかない	傑出／基準レベル。極めて高い品質を誇り、目立った弱点はない	検出不能
9.5	非常に良い*	ほとんど感知できない		
9	非常に良好	ごくわずかな痕跡	明らかに平均を上回っており、ごく軽微でほとんど問題にならない制限がある	経験豊富な者であれば検出可能
8.5	良好*	ごくわずか		
8	良好	少し	堅実なパフォーマンス／目立った問題なく一貫して要件を満たしている	厳密なチェックで検出可能
7.5	満足できる*	ごくわずか		
7	満足	多少	期待通り／軽微な欠点あり、特筆すべき点なし	誰の目にも明らかな
6.5	まずまず*	軽度 中程度		
6	普通	中程度	対応が必要／軽微な不備はあるが、全体としてはまだ使用可能	大多数からの苦情
5	境界線	顕著	限界／重要な点で重大な問題があり、もはや推奨されない	全員からの苦情
4	不十分	煩わしい	明らかに基準を下回っている／顕著な不具合や品質上の問題がある	全員からの苦情
3	「Poor」より下	深刻	さらなる利用が不合理となるほどの深刻な不具合	全員からの苦情
2	極めて不良	深刻	重大な欠陥があり、通常の条件下ではもはや許容できない	全員からの苦情
1	許容できない	許容できない	完全に不備／あらゆる点で許容できない	全員からの苦情

MX Rating Scale
based on SAE J1441

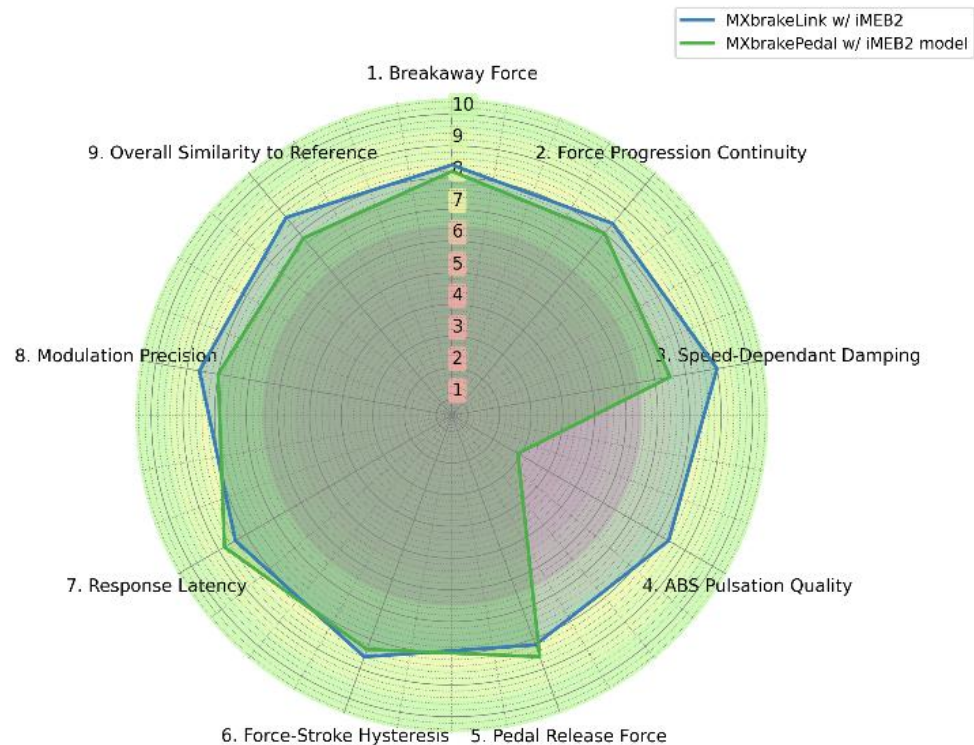
- 主観的な評価は、被験者毎で比較するのが難しい。
- MX-RSはSAE J1441に基づいて策定。
- 10点満点, 0.5点刻み, 専門家による評価。
- 8.0以上は量産モデルを代表する水準であると判断出来る。

9つの評価基準

1. ブレーキ始動力: ペダルが動き始める為に必要な踏力。
2. 踏力変化の連続性: ペダル踏み込み量が増えるにつれて、滑らかに踏力が増加するかどうか。
3. 速度に依存したダンピング特性: 作動速度に伴う引きずり抵抗の変化。
4. ABS作動時の踏力へのフィードバック再現性: ABS作動時に感じられる踏力の変化
5. ペダル解放時の踏力: ペダルを離した時の踏力フィードバック。
6. 踏力のヒステリシス量: 踏み込み時と踏み離し時の踏力のギャップ
7. 応答の遅延: ペダル操作と反応間に感じられる遅延。
8. 制御精度: 目標ペダル位置の設定と継続。
9. 全体的な近似性能: テストベンチの参照結果を全体的に高い類似性を示す。

結果:本研究におけるMX-RSの属性評価

MX-RS属性の平均評価値(専門家評価者10名・評価スケール1~10・モードCを基準).



8.52

モードBパネルの平均値:全9属性が8.0以上

7.57

モードAパネルの平均値, 8.16 (ABS作動時の脈動特性なしの評価)

8.65

モードBの全体的な近似性.
モードAは7.80

10 of 10

両方のモードを「適している」と評価し, 10人全員がモードBを「やや優れている」と選んだ

- ABSの作動時脈動特性:8.4 対 2.9, モードAのブレーキモデルにはABSによる脈動が含まれていない.
- 速度依存性減衰:1.5ポイント, 準静的パラメータ化
- モードAは「解放力」と「遅延」の2項目でリードしており, それぞれ0.4ポイント(参考値のみ)

「ABS作動時の脈動特性」を除けば, どちらの構成も基準値と同等な性能を十分に満たしています. モードB (BrakeLink)の方が, いずれにせよリファレンスに近いと言えます.

まとめ

- 1 構成**

静的運転シミュレータ内の踏力フィードバックペダルと連動した, 実ブレーキを用いたハードウェア・イン・ザ・ループ試験ベンチ.
- 2 制御性能**

フィードフォワード補償付きカスケード型位置・力制御器: 一次遅れ系の計算結果: 力の定常化時間は7 ms, 位相遅延は2.3 ms
- 3 主観的評価**

専門家10名による評価. モードBは8.52, すべての属性が8.0以上, モードAは7.57.
- 4 追加の差分**

モードAの不足点としては, ABSの作動時特性が挙げられます. :これを除くと, その差は0.36ポイントに縮小します.
- 5 結果**

ドライバーの早期統合により、開発プロセスの前倒しを支援します。
客観的結果と主観的結果を組み合わせることで追跡可能な適合が可能です.

考察と制約

対応している機能・非対応の機能・そして今後の展開.

結果

- どちらのモードもブレーキシステムを十分に再現しているが, BrakeLinkの方がより忠実である
- 実験室における再現性, 制御性, 安全性
- 1回のセッションでモデルとハードウェアの評価を行い, 同じペダルを使用

制約

- 10人によるパネル評価では, 数人分の評価には限定的な重みしか与えられていない.
- 完全なブラインド化が行われていないため, モードCへの変更が視認可能であり, iMEB 2のABS制御音が聞こえる
- 研究におけるモードの順序が固定されているため, 順序効果の可能性を排除できない

今後の取り組み

より大規模な研究とモード違いをブラインド化

より多くの評価者, モード違いの分かりにくさ(ブラインド化)

ブレーキモデルの改良

iMEB 2 ソフトウェアの導入とABS制御の検証.

レイテンシに関する評価実験
ループ内のレイテンシを意図的(仮想環境で)に変化させる.

M dynamix



NewtonDynamix

ご質問をお待ちしております

ご清聴ありがとうございました！

Anton Tworek · MdynamiX AG · anton.tworek@mdynamix.de

Anton Tworek · Bernhard Riegert · Peter E. Pfeffer

MdynamiX AG, Munich · Munich University of Applied Sciences