

AVEC 2026 · 17TH INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ADVANCED VEHICLE CONTROL

磁気流体式スタビライザを用いた セミアクティブ式ボディロール制御

Matthias Becker · Matthias Niegl · Zeynel A. Yavuz · Peter E. Pfeffer · Stefan Battlogg

MdynamiX AG · Munich University of Applied Sciences · INVENTUS Development GmbH

議題

1. 動機付け: パッシブ装置による妥協点の克服
2. システム概念: 磁気流体式(MR)スタビライザ
3. 制御手法: フィードフォワード補償を伴うモデル予測制御(MPC, Model Predictive Control)
4. シミュレーションおよび路上試験の結果
5. 考察と評価
6. 結論および今後の研究課題

研究の動機付け

パッシブスタビライザは, あらゆる走行状況において単一の車体剛性値を設定します.

高いねじり剛性の場合...



コーナリング時の安定した走行性能



よりダイレクトな操舵感



片側の道路からの入力, 車軸を介して車体へと伝達される.

ねじり剛性の低さは...



乗り心地の向上と車輪の遮断



ロール角と操縦精度が低下する

および車軸ごとに 前軸と後軸の剛性のバランスによって, セルフステアリングの挙動が決まります.

最新技術

スタビライザのねじれ経路は, 装置の「隙間」が起因しています.

アクティブ・ロール制御

モデル予測制御方式(MPC)により, 最大61%のロール減衰が報告されている[2]. 実験用アクティブバーによる検証でも, 大幅な効果が確認されている[3].

コスト: 駆動装置の連続稼働・複雑さ・専用のフェイルセーフ機能.

MRダンパ

磁気流体(MR)サスペンションに関する研究のほぼすべては, 単一の車輪の垂直方向の荷重経路を対象としている [4, 5].

ロールへの影響は, 車輪荷重の変化を通じて間接的にのみ生じる.

新開発

MRスタビライザ

ねじれ経路にあるMRユニット — 車軸のアンチロールモーメントを直接調整する.

研究はほとんど行われておらず, 実車での実証はこれまで行われていない.

想定する効果

- 01** MRダンパではなく, MRトーションユニットが, 車軸のアンチロールモーメントを制御するロール制御の概念.
- 02** フィードフォワード補償によって, 非線形なMRトルク特性を処理する**MPC**制御.
- 03** 中型SUVのプロトタイプを用いた路上試験における, パッシブな足回りに対する実験的検証.

システム概要

MRユニットは, 左右のスタビライザを繋ぐねじれ伝達経路上に配置されています.

- 各軸につき左右にハーフトタイプのパッシブスタビライザーバ
- 左右のパッシブスタビライザを接続するMRトーションユニット
- 磁場を発生させる電磁コイル
- 車両センサからの入力进行处理する制御ユニット

反作用トルクは, 相対ねじれ角とねじれ速度の関数であり, 加えられた磁束によって連続的に調整される.



Fig. 1 — MRスタビライザシステムを搭載した前車軸.

ねじりユニット

初代のギアボックスの代わりに、2つのMRチャンバが採用されています。

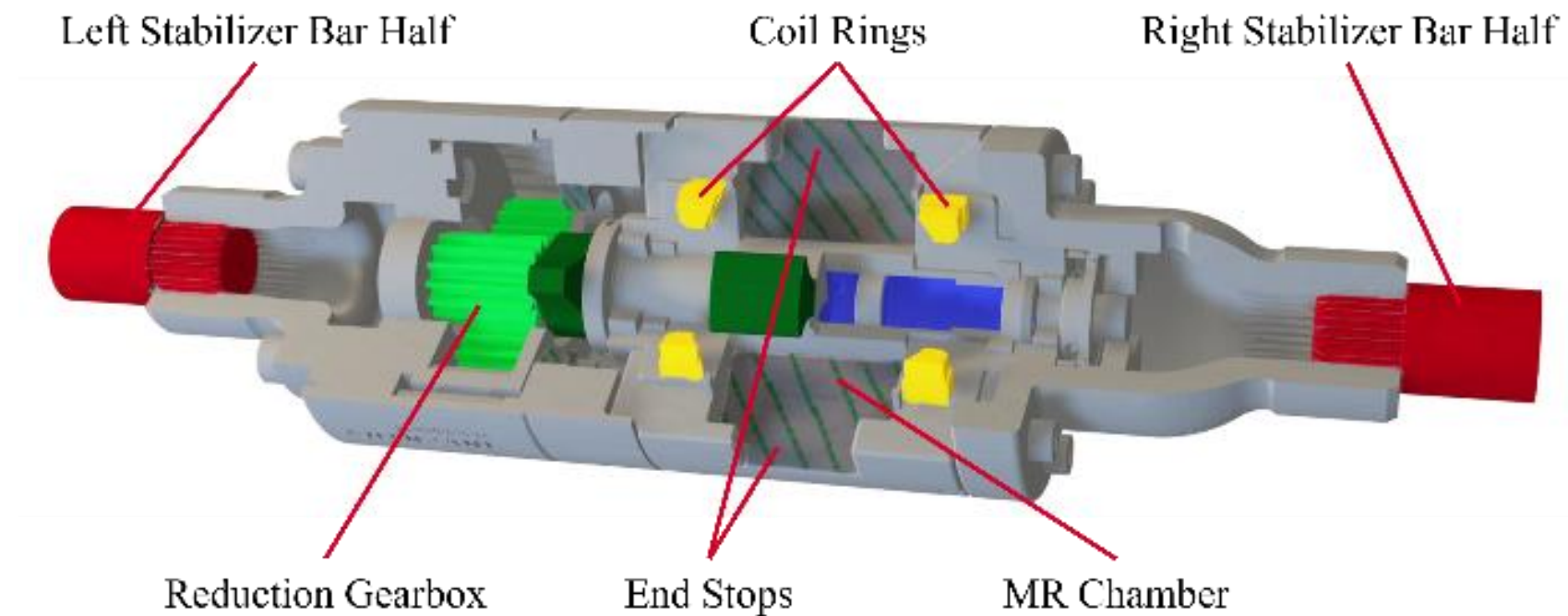


Fig. 2 — MRスタビライザ・トーションユニットの構成部品。

第1世代

ギアボックス付きMRユニット

MRユニットでは、ギアボックスによってスタビライザのねじれが増幅され、ねじれ経路に追加の油圧ダンピングが加えられた。

第2世代

MRチャンバ2基, ギアボックスなし

2つのMRチャンバがギアボックスの代わりとなり、油圧による減衰が低減され、乗り心地が向上しています。

コーナリング

強力な反作用トルクがボディロールを抑制する。

直線・でこぼこ道

低トルクにより、左右の車輪の結合が解放される。

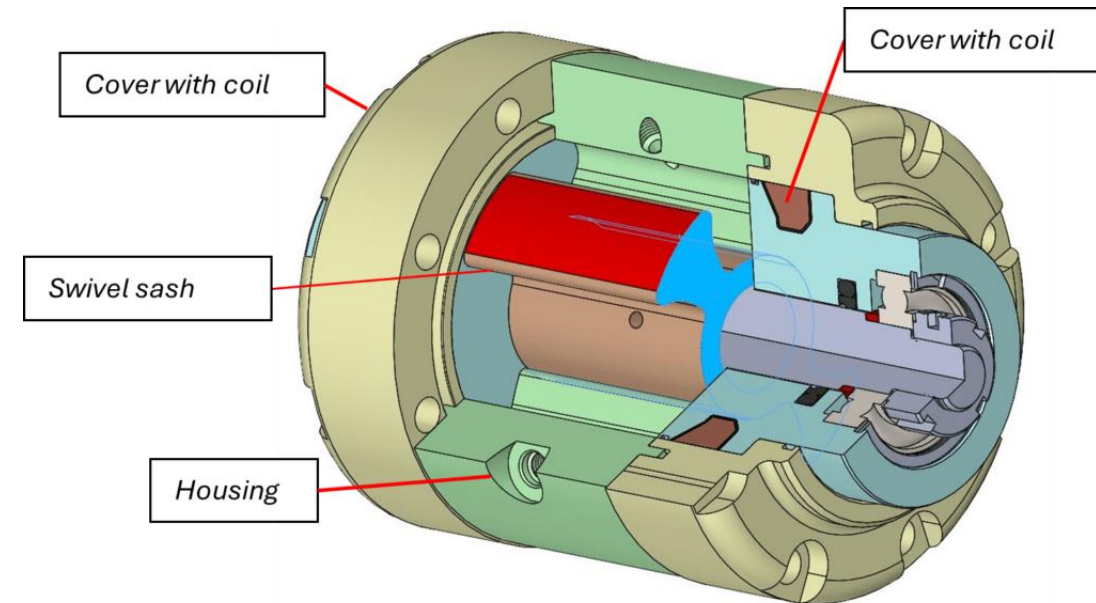
電力損失

明確なパッシブ特性 — 不具合発生リスクが本質的に排除されている。

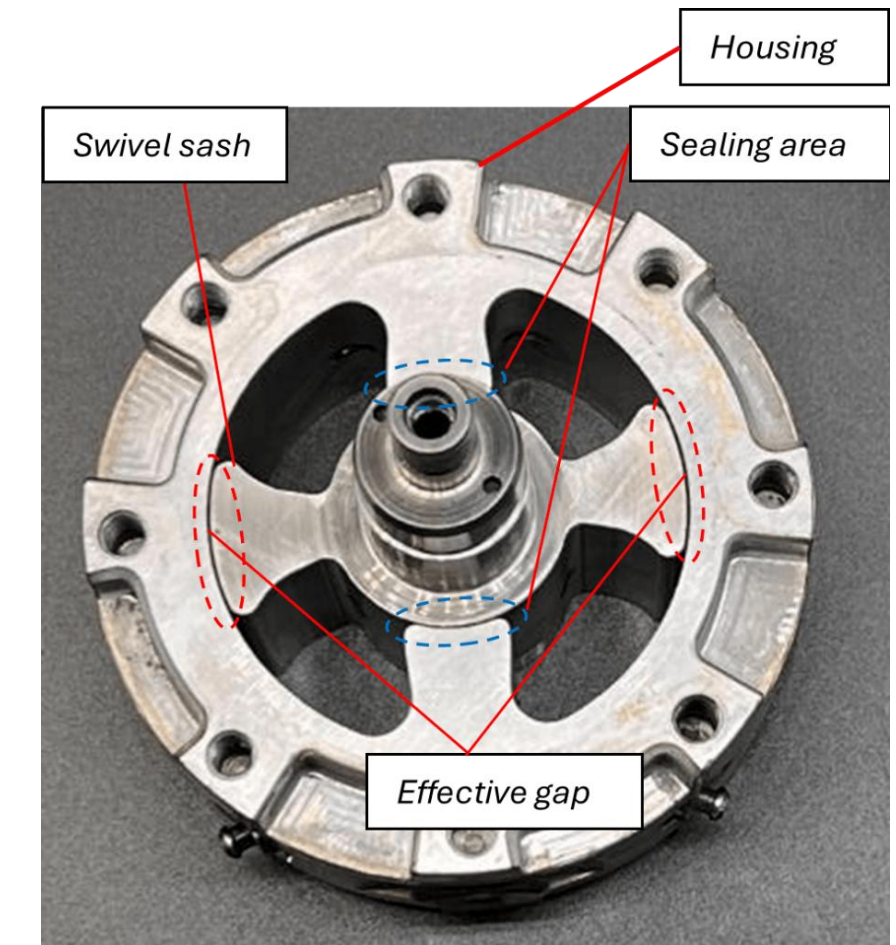
回転流方式の原理

角度制限付き回転流モード — MR流体が実効隙間を圧送される。

- ハウジングの中央に回転ブレードが取り付けられており、回転角度は制限されている — リニア技術におけるスラストに類似している。
- ブレードが回転すると、MR流体は有効隙間を通じて高圧側から低圧側へと送り出される
- 有効隙間は、ブレードに隣接するハウジングの表面によって形成される「磁気流体バルブ」である
- 両側のカバーにコイルが組み込まれており、ユニットを支え、密閉する役割も果たしています。部品点数は極めて少ないです。



断面図 — ハウジング, 回転サッシュ, コイル付きカバー。

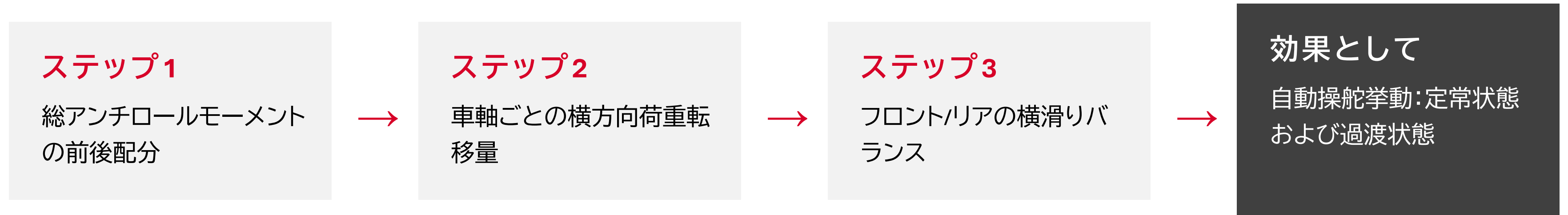


ユニットを分解した状態 — 実効ギャップ(赤)とシール領域(青)。

磁気シール: MR流体は磁場下で自己シール作用を発揮します。これは、気密性, 耐用年数, 製造コストの点で油圧式に比べて優れています。

両車軸

ロールモーメントの配分が、操縦安定性の制御入力となる。



 **前輪荷重偏重**
前輪軸への荷重移行増加 — アンダー
ステア傾向。

 **後輪荷重偏重**
リアアクスルへの荷重移動が増加し—
俊敏なターンインを実現。

 **状況に応じて前後配分**
パッシブスタビライザでは前後配分が
固定されているのに対し、MRスタビラ
イザではリアルタイムで配分制御され
ます。

制御手法

MPC(モデル予測制御): 2つの相反する目的関数に対する単一の最適化関数.

動的なコーナリング

ボディロールの角度を最小限に抑える — 高いアンチロールモーメントを指令.

小さい横加速度

反作用トルクを低減 — 左右のパッシブスタビライザは拘束されない.

- 入力情報: 車速, 操舵角, 重心点ヨーレート, 重心点横加速度.
- 出力: 前軸および後軸の制御コイル電流.
- フィードバック: 測定されたねじれ角.

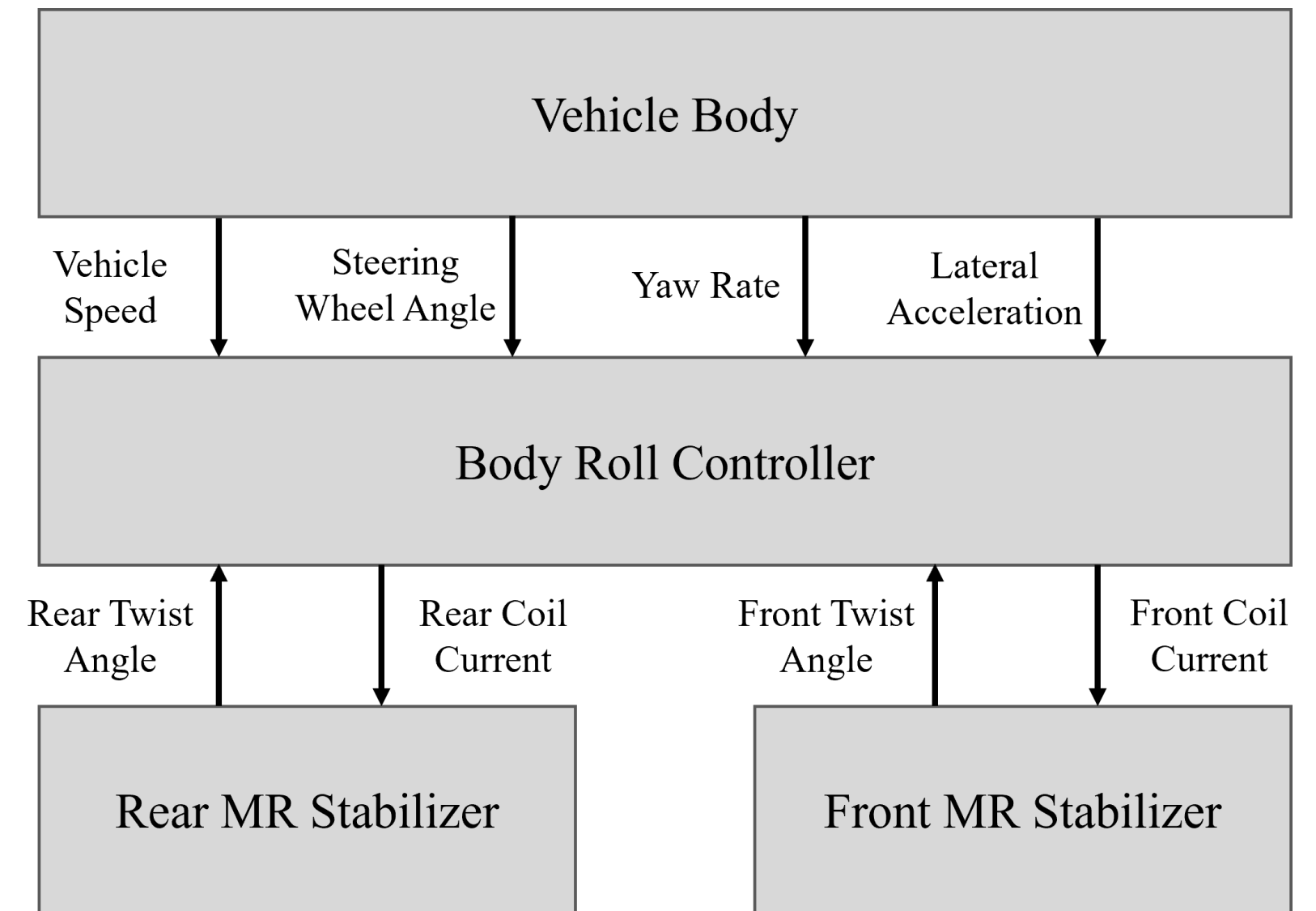
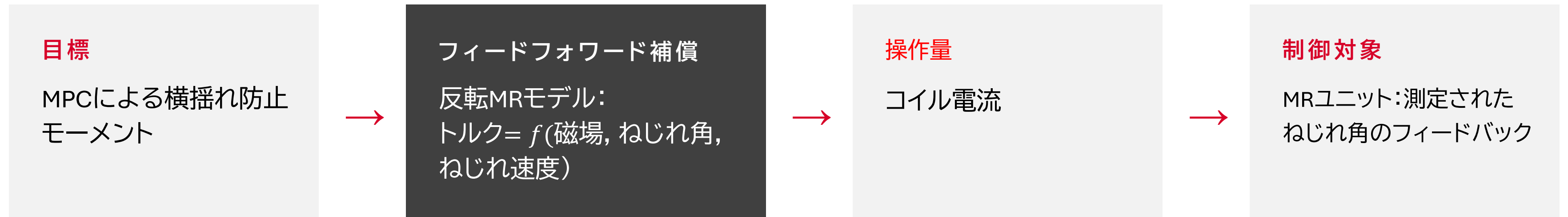


Fig. 3 —ロール制御システムのインターフェース.

フィードフォワード補償

反転したMR特性が非線形性を担っており, MPCがその他の処理を担当する.



構造によるロバスト性: フィードフォワード補償では公称特性が用いられ, 予測フィードバックは残留偏差に作用する. 測定されたねじれ角により, 閉ループが正確なモデル一致に依存する程度が低減される. 温度変動下における定量的評価については, 今後の課題である.

評価

シミュレーションとテストコースでの実車試験では同一の4つの操縦を行う。

環境条件



シミュレーション — IPG Automotive社製CarMaker® :
中型SUVモデル, 非線形サスペンション, MRスタビライザモデル;
MATLAB/Simulinkによる制御. 置換可能ロール安定化モジュール
により, 制御された受動的な基本性能が得られる.



実走試験 : 中型SUVの前軸および後軸に装着されたMRスタ
ビライザのプロトタイプを塔載しテストコースで検証.

運転操作

- 操舵量を徐々に増加 — 車速70 km/h, 最大ロール勾配: 4 m/s^2
- ダブルレーンチェンジ — ISO 3888-1: ロールとヨーの過渡応答試験
- 片側バンプ路面 — 高さ45 mm, 車速30 km/h: ロールコピー
- ウィーブ試験 — 50 km/h, 4 m/s^2 : 動的ロール特性

測定項目: ロール角, 横方向および上下方向の加速度, 電力出力. KPIは, パッシ
ブの基本性能を基準として計算.

実走テストの結果 — ロール角

ロール勾配 -25%, 定常状態のロール -33%, ウィーブロール -23%.

ハンドルをゆっくりと切りながら 時速70 km走行

ウィーブテスト, 50 km/h, 4 m/s²

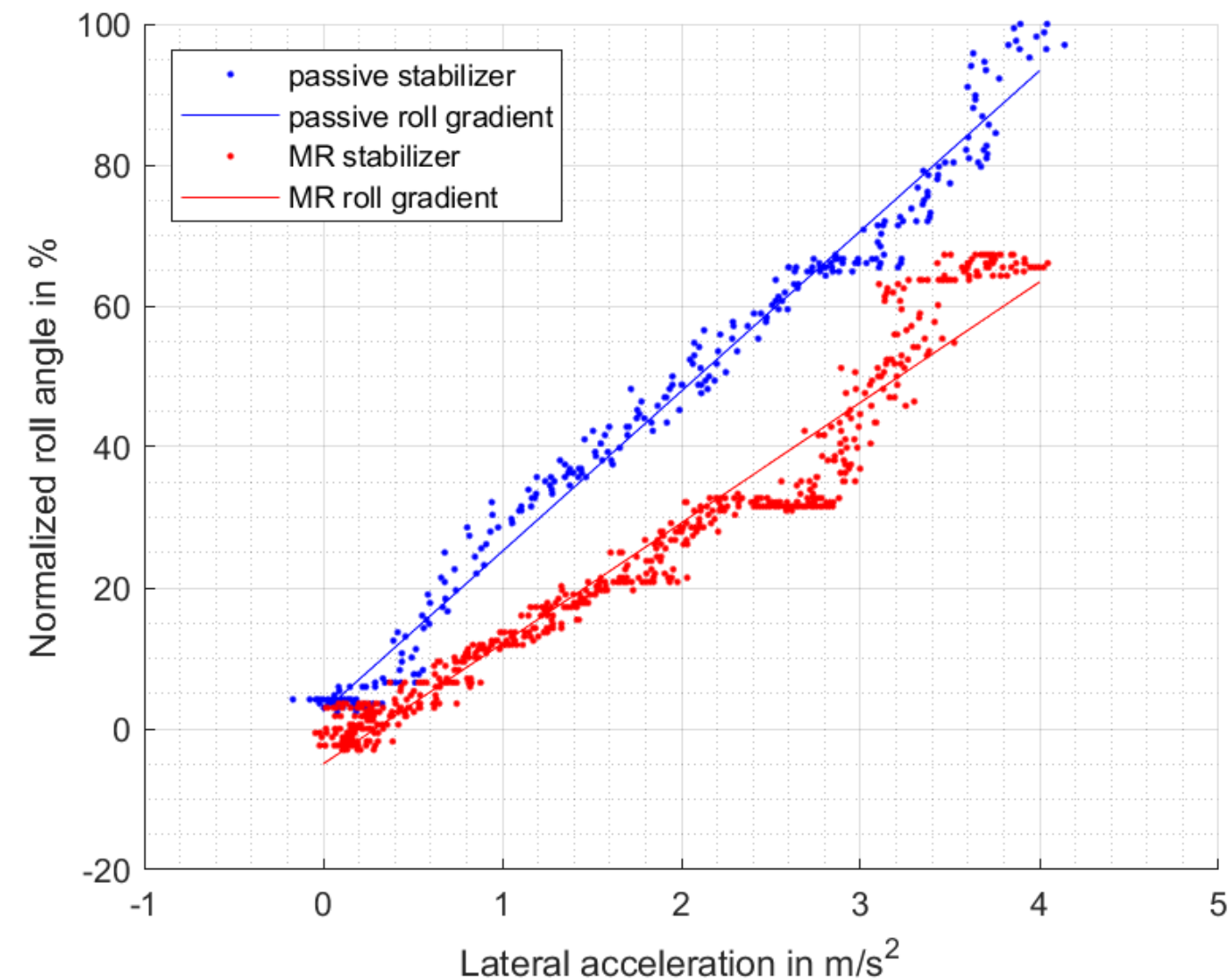


Fig. 4 —ロール勾配が25%減少.

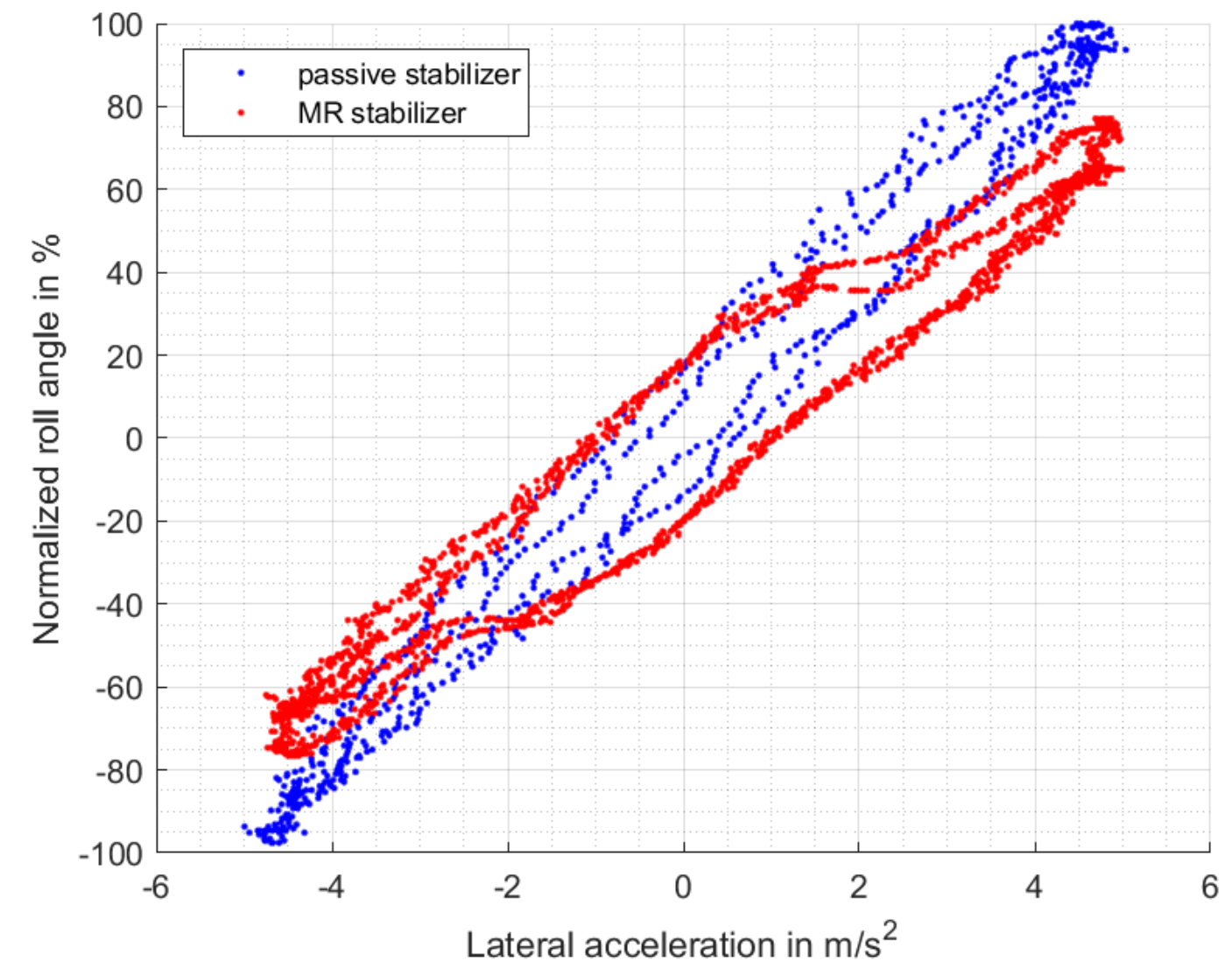


Fig. 7 —最大絶対ロール角が23%減少.

実走テストの結果 — ハンドリングと乗り心地

運転操作 車速 70 → 75 km/h; ロールコピー -9 %.

ダブルレーンチェンジ, ISO 3888-1

片側バンプ路, 高さ45 mmバンプ, 車速30 km/h

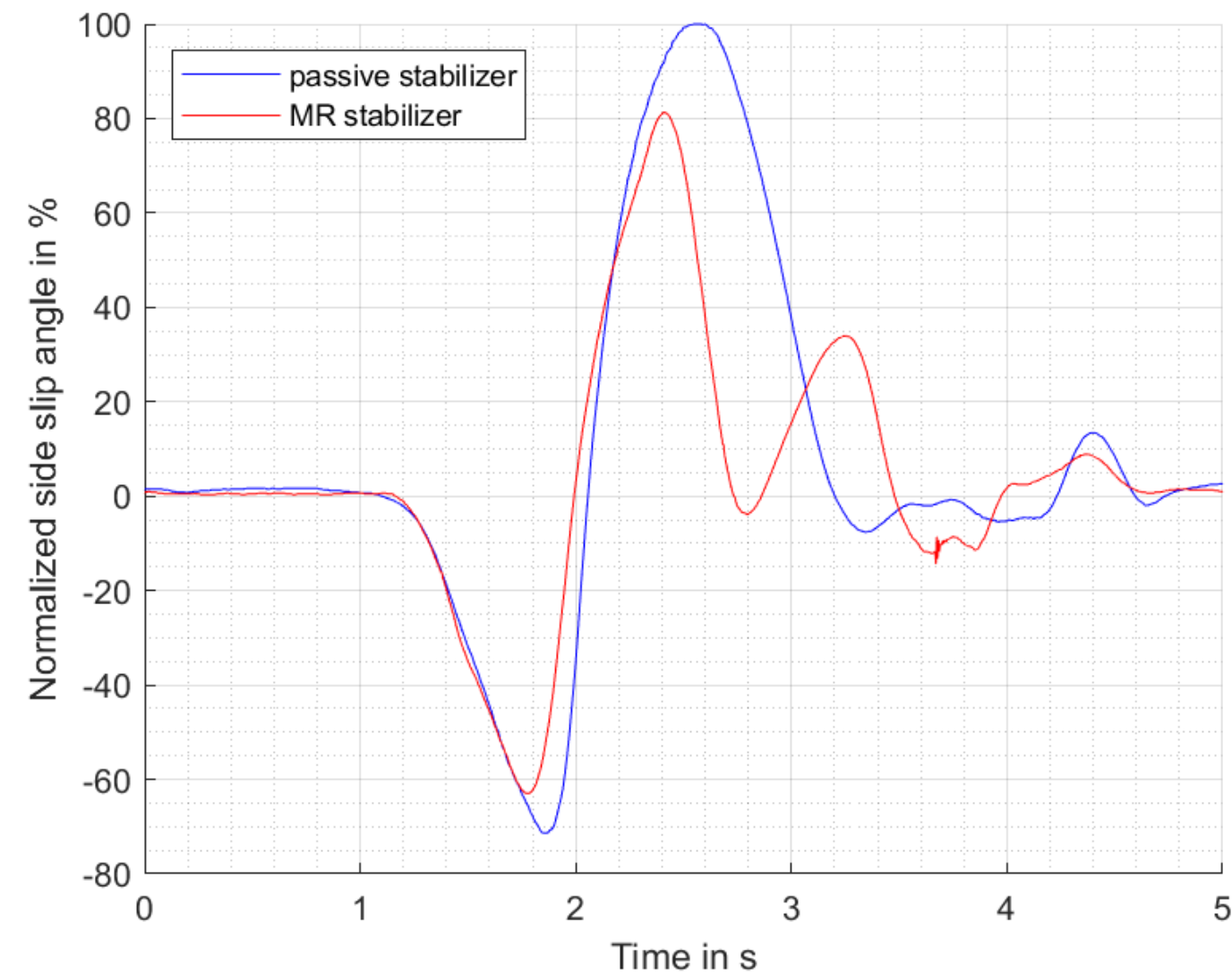


Fig. 5 —時速70 kmにおける横滑り特性;ロール角のピーク間差 -7%

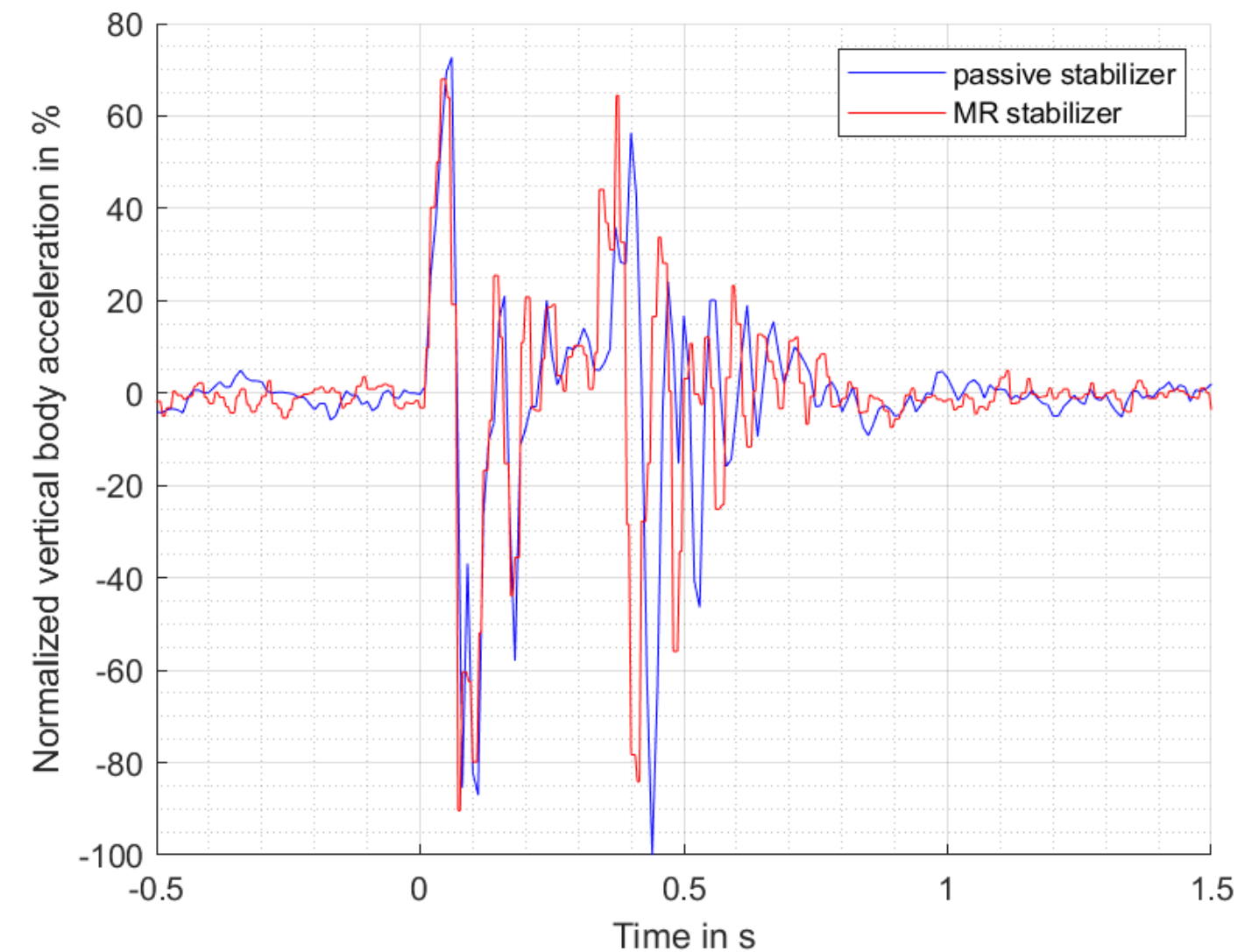


Fig. 6 —ピーク間上下加速度 -9 %.

KPIの概要

パッシブスタビライザで正規化された実走試験結果評価.

運転操作	KPI	パッシブ(従来品)	MRユニット
操舵を徐々に増す	ロール勾配	100 %	75 %
	定常状態のロール角	100 %	67 %
ダブルレーンチェンジ	ピーク間ロール角	100 %	93 %
	車両の最高速度	70 km/h	75 km/h
片側バンプ路	ピーク間上下加速度	100 %	91 %
ウィーブ試験	最大絶対ロール角	100 %	77 %

出典:表1, 中型SUVプロトタイプの路上試験による測定結果.

<100 W

最大電気出力 — コイルのみに電流が流れる

フルアクティブ・ロール制御の電力消費量は、一般的に数百ワットから1キロワット程度と報告されている.

代替案における位置付け

中間的な解決策——メリットの多くを活かしつつコストはごくわずかに抑えられる。

パッシブスタビライザ

固定剛性・動力なし・性質上フェイルセーフ

快適性とハンドリングの絶妙なバランス

セミアクティブ型MRスタビライザ

制御されたトルク反応・ $<100\text{ W}$ ・本質的フェイルセーフ・ロールモーメントの分布

ロール： $-23\sim-33\%$ ・ロールコピー： -9%

完全アクティブ・ロール制御

外部で発生するトルク・数百W $\sim$ 1kW超

アクチュエータの複雑さ, 専用フェイルセーフ

現況 この結果はまだ初期段階のプロトタイプ設計によるものです。設計自体はまだ最適化されていませんが、すでに高い可能性を示しています。チャンバとスタビライザの配置, MR特性, およびコントローラの調整にまだ改善の余地があるため, ロールの低減や乗り心地はさらに向上させることが可能です。

結論

- ねじり経路にあるMRトーションユニットが, 車軸のアンチロールモーメントを直接制御する
- 逆モデルフィードフォワード制御を備えたMPCは, MR特性の非線形性を補正する
- 両軸への採用によりロールモーメント配分がハンドリングの要因として加わる
- CarMaker®によるシミュレーションが中型SUVのプロトタイプを用いた路上試験で実証された

まだ最適ではない...

測定された改善効果はいずれも, 最適化されていない試作設計で達成されたものであり, ロール低減と乗り心地の両方において, まだ改善の余地がある.

次のステップ

チャンバとスタビライザの配置, MR特性とコントローラの調整を最適化し, 次にロバスト性, 耐久性, 量産コストを最適化する. 続いて, ADASデータを用いたプレビューベースの予知型ロール制御を行う [6].

ありがとうございました — ご質問があればお気軽にどうぞ！

Matthias Becker · MdynamiX AG · Hessesstr.89, 80797 Munich, Germany

matthias.becker@mdynamix.de · www.modynamix.de

DRIVING EXPERIENCE PERFECTION.