

ダイレクト・ヨー制御の鉄道車両のダイナミクスへの適用

○ [機] 山崎 大生 (東京都市大学)

[機] 道辻 洋平 (茨城大学)

Direct Yaw Control for Railway Vehicle Application

○Hiro-o Yamazaki, (Tokyo City University) Yohei Michitsuji, (Ibaraki University)

This paper describes direct yaw control for railway vehicle dynamics. This paper reports a robust direct control of yaw motion against the parameter variation of creep coefficient, vehicle velocity, and disturbance input. Proposed controller is equal to the regulator of reference yaw and reference yaw rate of wheelset dynamics. Therefore, it is shown that the force feedback loop is not necessary and proposed system is free against noise of load sensor.

キーワード：ダイレクト・ヨー制御，輪軸，ダイナミクス，制御，最適制御，モデル適合制御

Key Words：Direct Yaw Control, Railway, Dynamics, Control, HILS, Wheelset

1. はじめに

鉄道用 Hardware In the Loop Simulator¹⁾が開発され、大規模な試験線を持たない日本のディスアドバンテージを克服する試みが推進されている¹⁾。

鉄道車両のロードセンシングサーボ系については、筆者らの報告などがなされている²⁾。一方、須田、道辻らは独立車輪台車のセミ・アクティブ操舵台車の検討を行っている³⁾。強制操舵制御については佐藤の検討がある⁵⁾。

ロードセンシングサーボ系や、セミ・アクティブ制御などの技術の応用と HIL システムの組み合わせにより、営業線上では実施が困難と考えられる強制操舵等の試験研究が容易に可能となると考えられる。

操舵制御の高精度化については、制御系の安定性の確保が重要で、制御対象が干渉系であるとセンサノイズが他方の出力へ影響を相互に及ぼすことになる。したがってセンサノイズに対するロバスト性と、外乱入力やパラメータ変動、モデル化誤差の影響に対してロバストな制御系設計が重要と考えられる。

そこで本稿では鉄道車両用 HILS システムにおける試験の支障となるパラメータ変動や外乱入力を明らかにすると共に、モデル適応型ダイレクト・ヨー運動制御を検討し、その効果を数値実験により検証したので報告する。

2. モデル化と制御系設計

2.1 モデル化

物理モデルベースによる最適制御で必要となる制御対象のモデル化について検討する。モデルについては、制御系

設計の見通しをよくするため、1 輪軸モデルによって検討する⁶⁾。本研究で用いる各記号の意味は以下である。

y	: 横変位
ψ	: ヨー角
m	: 輪軸の質量
I_{wz}	: 垂直軸まわりの輪軸慣性モーメント
k_x	: 前後軸バネ係数
k_y	: 左右軸バネ係数
b	: 接触点間距離
f_{11}	: 縦クリープ係数
f_{22}	: 横クリープ係数
γ	: 踏面勾配
r	: 車輪半径
V	: 車両走行速度

輪軸のダイナミクスは次式で表される。

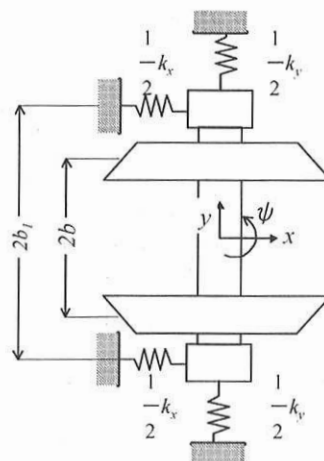


図 1 1 輪軸の運動モデル⁶⁾

ルとの誤差をゼロとする P 制御を用いて性能比較を行う。
比較対象の制御則は次式とする。

$$u_c = K_p \{R(s) - X(s)\} \quad (12)$$

3. シミュレーションによる検討

3.1 数値計算条件

シミュレーションに用いたパラメータを表 1 に示す。シミュレーション条件は、走行速度 130km/h、ヨー角速度初期値 0.2rad/s とした。外乱はセンサノイズとし、白色ノイズが比例制御の力センサへ入力されることを模擬した。

表 1 シミュレーションのパラメータ

Symbol	Mean	Value
m	Mass of wheel-set[kg]	1420
I_w	Inertial of wheel-set[kgm ²]	878
k_x	Longitudinal spring constant of wheel-set [MN/m]	16.5
k_y	Lateral spring constant of wheel-set [MN/m]	9.35×10^6
b	Distance of contact points[m]	0.55
f_1	Longitudinal creep force coefficient[MN]	8.20
f_2	Lateral creep force coefficient [MN]	8.80
γ	Tread gradient[-]	1/12.2
r	Wheel diameter [m]	0.408

3.2 数値計算実験結果

図 4 は比較対象の制御の検出量である力測定に用いる歪みゲージにノイズが入力された場合のシミュレーション結果である。図 5 はアクチュエータ発生力の時系列応答である。図より比較対象の制御はセンサノイズの影響を受けて、アクチュエータの発生力が安定していない様子が示されている。ヨー角については力センサのノイズの影響は横変位ほどではない。

図 6 に力センサに白色ノイズが入力された場合のパワースペクトル密度を示す。従来の台車はノイズの影響を受けない。一方、アクチュエータによる力制御の場合、 P 制御の場合ノイズの影響を大きく受けることが示されている。提案する制御は、0~18Hz の周波数領域でパワースペクトル密度が低下している。18Hz 以上の周波数領域では、従来台車と比較し若干パワースペクトル密度が増加するが、力センサにノイズが混入された場合と比較して低いパワである。したがって提案する制御は比較対象の制御よりロバスト性が高いことが示されている。

図 7 にセンサノイズが入力されない場合のシミュレーション結果を示す。ノイズを受けた場合である図 4 と差は見受けられないものの、図 8 に示されるアクチュエータ発生力のノイズの影響を見て取れない。一方、図 9 より提案する制御、 P 制御、従来輪軸の順に振動加速度のパワースペクトル密度が小さい。

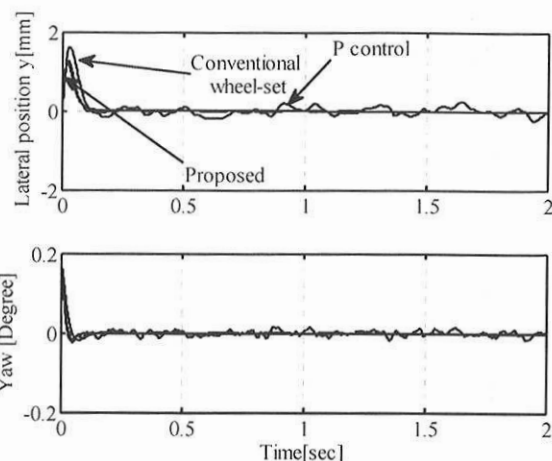


図 4 歪みゲージにノイズが入力された場合における輪軸の時系列応答

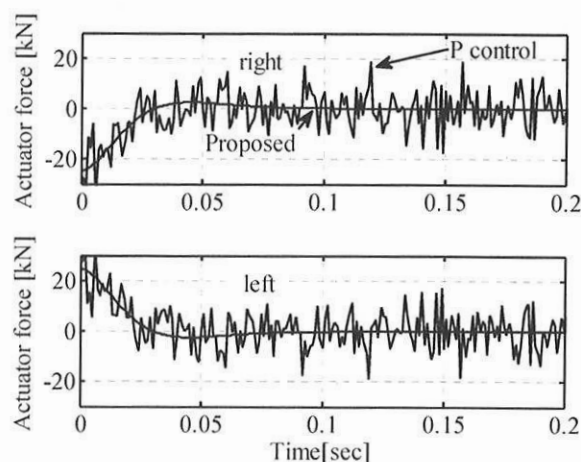


図 5 ノイズが入力された場合におけるアクチュエータ発生力の時系列応答

(実線：提案する制御、点線：比較対象の制御)

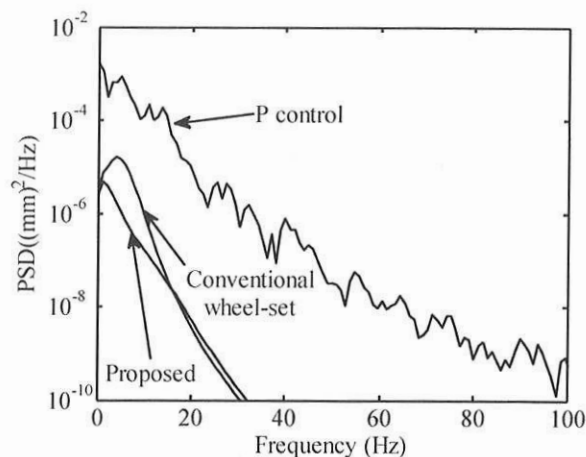


図 6 ノイズが入力された場合のパワースペクトル

4. 結論

クリープ係数と、車両速度のパラメータ変動と、外乱入力に対してロバストな、目標ヨー角をゼロとするダイレクト・ヨー・制御系を提案した。

目標ヨー角と目標ヨー角速度に対するレギュレータに帰

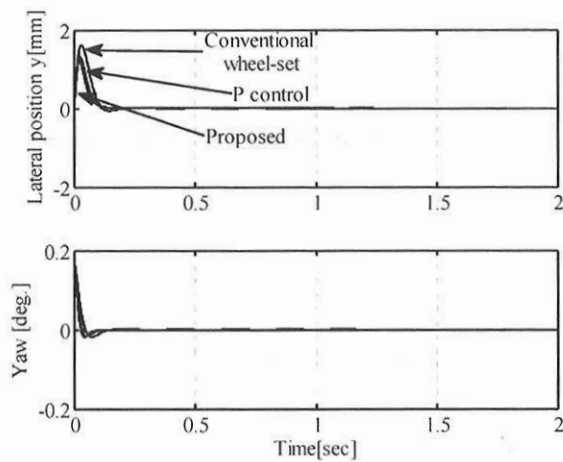


図 7 ノイズ入力がない場合における輪軸の時系列応答

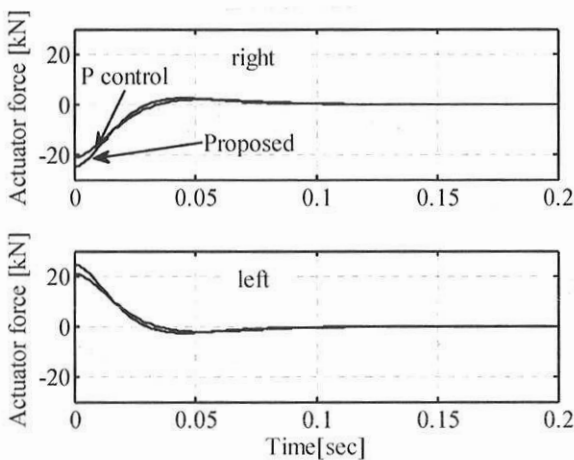


図 8 ノイズ入力がない場合におけるアクチュエータ発生力の時系列応答

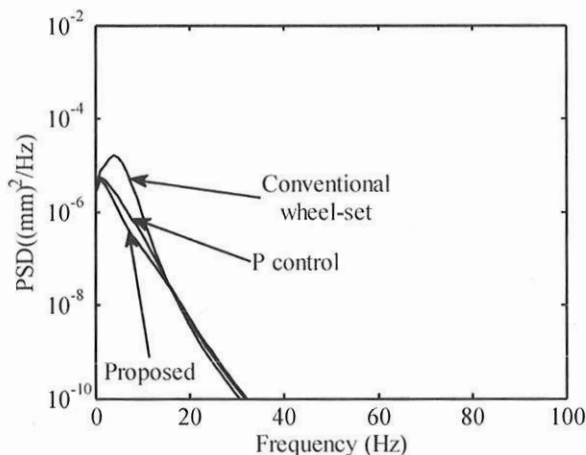


図 9 ノイズ入力がない場合におけるパワースペクトル

着されるため、力フィードバックループが不要となり力センサのノイズの影響を受けなくなることが示された。

曲線通過時の追従特性の検討と、実験による有効性検証が今後の課題である。

謝辞

本研究にご指導いただいた鉄道総研の佐々木君章氏、渡辺信行氏、小金井玲子博士に心より御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 森下隼人, 佐々木君章, 下村隆行, 渡辺信行: 可変特性試験台車の開発, 第 17 回鉄道連合シンポジウム講演論文集, pp.165-168, 2010.
- 2) 長谷川泉, 山崎大生, 保田秀行, 大泉健一, 摩擦ブレーキ力の直接制御方法の開発, 電気学会主催, 鉄道技術連合シンポジウム, pp.367-370, 1998.
- 3) 道辻洋平, 須田義大, スケールモデル実験装置を用いた独立回転車輪パワーステアリング台車の走行性能, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.71 巻, No.703 号, pp.103-110, 2005.
- 4) 秋山裕喜, 道辻洋平, 須田義大, マルチボディ・ダイナミックスを用いた LRV 用セミアクティブ操舵台車の検討, 日本機械学会第 16 回鉄道技術連合シンポジウム講演論文集, pp. 761-764, 2009
- 5) 佐藤栄作, 鉄道車両用操舵機構付き独立車輪台車の運動力学に関する研究, 東京大学博士学位論文, (2000)
- 6) 山崎大生, 佐藤栄作, 下村隆行, 鎌田崇義, 永井正夫, 鉄道車両における車輪滑走時の輪軸の運動, 日本機械学会 2004 年度年次大会講演論文集, pp.367-368, 2004.
- 7) 山崎大生: モデル適合制御を用いた鉄道車両の速度サーボブレーキ, 平成 19 年度春季フルードパワーシステム講演会, pp.167-169, 2007.
- 8) 中沢悠作, 比留川将平, 井上明久, 山崎大生, 鉄道試験台車用電動アクチュエータの推力制御に関する研究, 日本機械学会関東学生会第 50 回学生会卒業研究発表講演会, 2011.