S1-2-4.鉄道の独立回転車輪台車の操舵角制御による走行安定性向上の研究

(制御則の検討)

○ 保田 秀彬 (明星大学(院))

[機] 宮本 昌幸(明星大学)

Study on the Stabilization of Railway Vehicles with independently Rotating Wheels by Control of Steering on Wheelset (The examination of control law)

> Hideaki Yasuda (Meisei University) Masayuki Miyamoto (Meisei University)

Some experimental and theoretical investigations were carried out to stabilize the dynamic motions of a vehicle with independent rotating wheels by control of steering on wheels. Scale model (about 1/8) of independently rotating 4 wheels truck with drive motors was made. The wheels steering angle was controlled by actuator using a microcomputer with the information of lateral displacement of the truck. Equations of motion were derived and simulation was performed. In the experiment, the problem which a deviation produces has improved by changing a control law. In the theory, motion equations in expanding the control law of steering angle were derived. And, some simulations results were shown with the considerations of influence of control parameters.

キーワード:鉄道車両、操舵角制御、模型実験、シミュレーション Keywords: Railway Vehicle、Steering Control、Scale Model Experiment、Simulation

1. はじめに

独立回転車輪台車の操舵角制御による走行安定性向上を図る研 究を、模型実験、理論解析の両面から進めてきている。

1 軸台車の模型実験⁽¹⁾、理論解析結果⁽²⁾を受けて、新たに実際 の車両構成に近い2軸駆動台車模型を制作し操舵角制御の走行実 験を行なった結果を報告した⁽³⁾。さらに、実験では使用アクチュ エータ特性の制約(離散的目標点指定方式)のもと、特性を改善 して連続制御に近づける制御法の考案、実験結果について、理論 では台車重心左右変位、ヨーイング角変位それぞれに対する任意 の重み付け和に比例させる定式化に拡張した場合の安定性結果お よびシミュレーション結果を報告した⁽⁴⁾。

この報告では以下の事柄を述べる。実験に関しては、アクチュ エータを離散的目標点指定方式のものから連続制御可能なものに 変更したことでより複雑な制御ができるようになったこと、実験 結果で偏差が残る理由、その偏差を解消できる新しい制御則の提 案、その実験結果について述べる。理論に関しては、新制御則に 対応できるような定式化の拡張、実験に対応するシミュレーショ ン解析、制御則の違いによる結果について述べる。

2. 実験装置

<2.1> 軌道 実験軌道は軌間 128mm、全長 8800mm のアルミレールである。レー ル側部には測定基準面となる垂直な反射板をレールに対して平行 に設置した。

<2.2> 模型車両概要

模型台車は、各車輪が駆動モータにより直接駆動されるため、4 輪独立に駆動力制御を行なうことが可能だが、今回は制御に関し ては4車輪モータともに同一指令電圧を与えている。実験台車を Fig.1に示す。また、前2輪、後2輪はそれぞれのリニアアクチュ エータで独立に操舵角制御が可能である。操舵角制御用のアクチ ュエータは台車端部に取り付けられ、操舵用リンクを介して左右 それぞれの車輪・リンク系の他端を同時に移動さすことにより車 輪を操舵する(Fig.2)。その他の詳細については前報の論文をご 参照いただきたい。

使用している操舵角制御用のアクチュエータは、前報では15の 移動目標点の変位をあらかじめ設定しておき、動作時には移動目 標点を次々に指定していくことにより制御を行なっている。従っ てアクチュエータの移動は連続的ではなく階段状の変化になって いた。しかし、このアクチュエータはこの設定間隔が1.3mm 未満 だと精密位置設定モードとなり応答速度が遅くなってしまう。そ の結果低速でしか制御できないという課題があった。

そこで、今回は外部からの指令パルスにより動作するアクチュ エータに変更したことで、位置・速度・加速度などの制御自由度が 広がったため、前報での課題を解決できた。



Fig.1 Experiment scenery

3. 実験結果

前輪のみの操舵角制御で後輪は制御していない。アクチュエー タを変更したことで、前報での前部変位計位置の左右変位に応じ た制御(以下では制御則1とする)による実験を新しいアクチュエ ータに対応させて行った。

<3.1> 制御則1

台車前部左右変位、台車後部左右変位、前輪操舵角、目標操舵 角の時間経過を Fig.3 に示す。フィードバックゲインα =2.617rad/m で走行速度 V=0.4m/s の場合である。走行開始から軌 道中心とは逆に寄り、約 20mm 程ずれて走行した。

これは Fig.4 概略図で示したように、前輪は操舵しているが車 輪は前を向いてしまっている状態で落ち着いてしまっていると思 われる。例えば台車前部が右にありヨーイング角が頭右になって いる状態では前輪は前部変位計位置の左右変位に見合う操舵角だ け台車に対して左側に操舵されるが、車輪の向きはレール方向に 向いてしまい台車左右偏差を残してしまうのだと考えた。 <3.2> 制御則 2

制御則1 で台車左右偏差が生じた原因を改善するために作成し た制御則2は、Fig.5 概略図に示すように、前輪は台車ヨーイング 角に関係なく、一定距離1 だけ前の中央点を向くようにする制御 則である。

台車前部左右変位、台車後部左右変位、前輪操舵角、目標操舵 角の時間経過を Fig.6 に示す。フィードバックゲインα =1.308rad/m、1=1.122m で走行速度 V=0.4m/s の場合である。

Fig.6において走行開始から 0mm 付近まで減衰し、途中 4mm 程偏 差が現れたが最終的にまた 0mm 付近まで戻った。Fig.3 と Fig.6 を 比べて、Fig.6は前部変位計位置の左右変位は4秒程で中央に戻っ ていることがわかる。後輪の制御はしていないので後部左右変位 には一定の偏差が認められる場合もある。







Fig.4 The outline figure of the control law 1



Fig.5 The outline figure of the control law 2

となる。

となる。



Fig.6 Experiment result (a=1.308rad/m V=0.4m/s)

4. 理論解析

前輪操舵角制御目標値を制御則1と制御則2の場合の定式化を 示し、固有値解析、シミュレーション解析を行った。ここでは実 験結果 Fig.3と Fig.6に対応したシミュレーション結果を報告する。 <4.1> 運動方程式

用いる記号を以下に示す。

変数

y,ψ:台車中心の左右、ヨーイング変位

 $\Psi_{cf}, \Psi_{cr}:$ 前輪、後輪の操舵角

その他の記号(寸法関係はTable.1に記入)

M:台車質量(kg)

 M_1 : 台車+車輪・リンク系質量=M + m (kg)

m:車輪・リンク系質量(kg)

I:台車慣性モーメント(kgm²)

i:車輪・リンク系のピボットP回りの慣性半径(m) *K*:クリープ係数(N)

γ:車輪踏面勾配(---)

- r_0 :中立位置での車輪半径(m)
- V : 走行速度 (m/s)
- l:一定距離(m)

α:操舵角制御台車左右変位フィードバック係数(rad/m)

β:操舵角制御台車ヨーイング角フィードバック係数(--)

今回の検討では前輪の操舵角のみが制御される場合を考えている。操舵角は制御則2の場合には

$$\psi_{cf} = -\alpha y - \beta \psi$$
 (1) , $\psi_{cr} = 0$

となり、各フィードバック係数は

$$\alpha = \frac{1}{l} \qquad , \qquad \beta = 1 + \frac{L}{l}$$





この場合には式は

$$\{I + 4m(d_{p}^{2} + \ell_{p}^{2}) + 4mi^{2}\}\ddot{\psi} = -\frac{4\kappa(d_{p} - d_{w})\gamma}{r_{0}}y$$

$$-\frac{4\kappa}{V}\{(\ell_{p} + \ell_{w})^{2} + (d_{p} - d_{w})^{2}\}\dot{\psi}$$

$$+ 2\kappa \begin{bmatrix} -\{\alpha A + (2mi^{2}\alpha / M_{t})\}y \\ +\{-(\alpha L + 1)A + (2mi^{2}\alpha / M_{t})(3 - \alpha L)\}\psi \\ +\{-\alpha B + (2mi^{2}\alpha / M_{t}V)(\alpha \ell_{w} - 2)\}\dot{y} \\ +\{(\alpha L + 1)B + (2mi^{2}\alpha^{2}\ell_{w} / M_{t}V)(\alpha L - 1)\}\psi \end{bmatrix}$$

$$M_{t}\ddot{y} = 4\kappa\psi - (4\kappa/V)\dot{y} + 2\kappa \left\{-\alpha y - (\alpha L + 1)\psi + (\alpha \ell_{w}/V)\dot{y} + (\ell_{w}/V)(\alpha L + 1)\dot{\psi}\right\}$$

(3)

この連立2階微分方程式を1階の連立微分方程式に変換して、 MATLABを用いて固有値解析を行ないさらに、これらの式を 基にシミュレーションを行なった。計算に使用した値を Table.1 に示す。

Table.1 Parameter of model

ж	クリーブ係数	400	N
I	慣性モーメント	0.1466	kg×m ²
W	(Fig. 7参照)	0.04	m
lp	(Fig. 7 参照)	0.09	m
m	車輪の賃量	0.16	kg
Mt	台車の総質量	7.3	kg
V	走行速度	0.8	m/s
dw	(Fig. 7参照)	0.04	m
dp	(Fig. 7参照)	0.12	m
ro	中立位置での車輪半径	0.037	m
7	車輪踏面勾配	0.025	
L	(Fig. 7参照)	0.019	m

(42) シミュレーション

今回のシミュレーションは走行実験と同じ条件で行った。制御則 1 におけるフィードバックゲインα=2.617rad/m 初期変位 y=10mm、 走行速度 V=0.4m/s(Fig8 (a))、制御則 2 におけるフィードバックゲ インα=1.308rad/m、初期変位 y=10mm、走行速度 V=0.4m/s(Fig8 (b)) という二つのケースについて行った。

Fig.8 (a)と Fig.8 (b)を比べると Fig.8 (a)の台車ヨーイング角は 最大で約0.022rad になった、また全体的に振動的な波形になった。 Fig.8 (b)の台車ヨーイング角は約0.012rad になった、また全体的 に非振動的な波形になった。

Fig.8 (a)と Fig.3 を比べるとシミュレーション結果の方は 0mm 付近に収束しているが Fig.3 では中心に向かうことなく最大で 20mm 程ずれながら走行した、Fig.8 (b)と Fig.6 を比べるとシミュ レーション結果では 0mm 付近まで収束するのに約 6 秒かかったが Fig.6 では約 4 秒かかった。

5. まとめ

実験結果については、制御則1 では偏差が最小で 3mm、最大で 20mm 生じた。制御則2 では偏差が最小で 0mm、最大で 4mm 生じた。 この結果を見る限り、制御側を変えることによって偏差を小さく することができ、大幅な特性改善が認められた。

シミュレーション結果では速度の影響はあまり変化が感じられ ないが、制御則の変化では振動的や非振動的になることがわかっ た。制御則1と制御則2において、制御則2では収束するまでの 時間が遅くはなったが台車ヨーイング角が約半分になったため安 定性が増したと思う。

今回は前輪の操舵角のみが制御されたため後部変位計位置の左 右変位に偏差が生じていた。これを解決するためには後輪の操舵 角制御が必要になると思われる。これにより、前輪操舵角の単独 制御より更なる安定性の向上が期待される。

参考文献

(1) 宮本昌幸・他2名、独立車輪台車の操舵角制御による走行安



(b) Controllaw 2





定化の研究、J-RAIL'99、S4c-2、169

(2) 宮本昌幸・佐藤虎之介、鉄道の独立回転車輪台車の操舵角制 御による安定性向上の研究(1 軸付随台車の場合)、[No. 01-36]日 本機械学会第10回交通・物流部門大会講演論文集[2001-12.5~7. 川崎] 149

(3) 佐藤虎之介・他5名、鉄道の独立回転車輪台車の操舵角制御による走行安定性向上の研究(2 軸駆動台車の前軸操舵の場合)、
 [No. 01-36]日本機械学会第10回交通・物流部門大会講演論文集
 [2001-12.5~7.川崎]153

(4) 佐藤虎之介・他3名、鉄道の独立回転車輪台車の操舵角制御による走行安定性向上の研究(模型実験とシミュレーション)[No. 02-50]日本機械学会第11回交通・物流部門大会講演論文集 [2002-12.11~13.川崎]135