

アクティブ操舵による新交通車両の運動制御に関する研究 — 曲線通過性能に関する検討 —

日大生産工(院) ○青木 慎一

日大生産工 坂井 卓爾 日大生産工 綱島 均

1. 緒言

現在、車両の高速化が推進されているが、一般に高速化は車両の走行振動の増大を招き、乗り心地を低下させる。従来、車両の振動を抑えるためには、パッシブサスペンションが用いられてきたが、近年の車両の高速化に伴いパッシブ型サスペンションでは車両の制振に限界が生じてきた。そこで、制振性能向上を目的としたアクティブ型サスペンションの研究が行われ、鉄道車両においては実車への適用例も報告されている¹⁾。

一方、ゴムタイヤで走行する新交通車両では運行の最高速度は60[km/h]と鉄道に比べて低い、小曲線部、分岐部、軌道の接合部など、車両振動の原因となる部分が存在し、他の車両と同様にパッシブ型サスペンションにおける乗り心地の低下が問題となっている²⁾。

本研究では、乗り心地と曲線通過性能の向上を目的とし、案内レールとの接触を除去するため、一次側(台車側)を制御することによって非接触走行させる新交通車両を提案する。

これまで、従来の機械式案内方式と同様の動作を可能にするアクティブ操舵方式のモデルを構築し、走行シミュレーションを行い、非接触による軌道への負担軽減と乗り心地向上の同時達成に対するアクティブ操舵の有効性について検討してきた³⁾。本論文では、実車への適用を考慮し、より現実的なモデルを用いての曲線通過性能に関する検討を行った。

2. 新交通車両の運動モデル

新交通車両は自動運転走行するため、操舵する機構が必要となる。新交通車両では鉄道車両とは異なり軌道に沿って車両を誘導するために、走行輪とは別に案内輪を設ける必要がある。これらの案内方式はステアリング方式と一軸ボギー方式の2種類に分類される⁴⁾⁵⁾⁶⁾。

ここではステアリング方式を対象として、Fig.1に一次側(台車側)の制御を行った、アクティブ操舵方式の運動モデルを構築した。このモデルは車体の左右運動、ヨー運動、ロール運動、前後位台車の左右運動、ロール運動を考慮した運動モデルである。

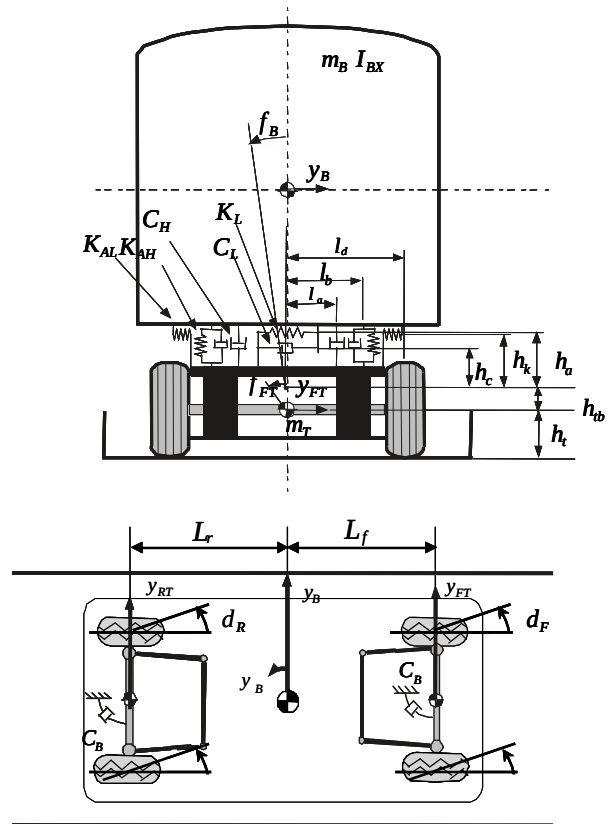


Fig.1: Active Steering Model

アクティブ操舵方式では変位センサにより検出した車両と軌道との相対変位に応じて、アクチュエータにより操舵角を入力しタイヤを操舵し、案内に必要な横力を発生する。

このモデルは制御器及びセンサがフェールした場合においても、簡易的な案内装置を残しておくことで、最低限の走行が可能であるものとした。しかし本論文においてはアクティブ操舵における制御の有効性について検討を行うため案内装置を考慮しないモデルとした。

以下に構築したアクティブ操舵方式におけるモデルの運動方程式を示す。

A Study on Control of AGT Vehicle by Active Steering System

— Evaluation of Curving Performance —

Shinichi AOKI, Takuji SAKAI and Hitoshi TSUNASHIMA

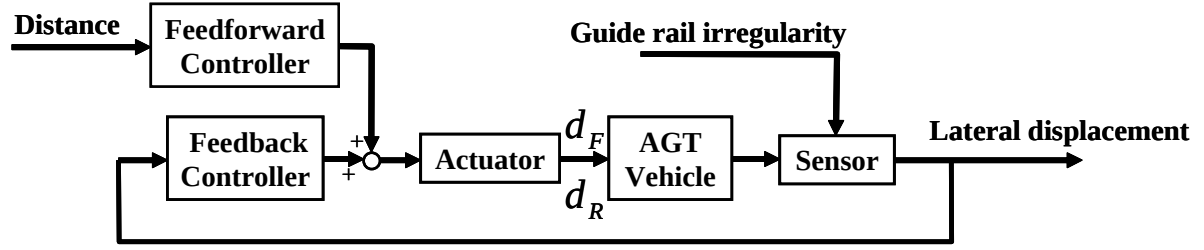


Fig.2: Control block diagram

- ・車体重心点の運動

$$m_B \ddot{y}_B = -F_{FT} - F_{RT} + m_B h_s \ddot{f}_B \quad (1)$$

$$I_{BZ} \ddot{\gamma} = -L_f F_{FT} + L_r F_{RT} + C_B \dot{d}_F + C_B \dot{d}_R \quad (2)$$

$$I_{BX} \ddot{f}_B = M_{FT} + M_{RT} + m_B g h_s f_B + m_B h_s \ddot{y}_B \quad (3)$$

ただし、 $\dot{\gamma}$ は速度を表している．なお車体・台車間の力及びモーメント、 F_{FT} 、 F_{RT} 、 M_{FT} 、 M_{RT} についての詳細は付録に示す．

- ・前位台車重心点の運動

$$m_{FT} \ddot{y}_{FT} = F_{FT} + F_F^* \quad (4)$$

$$I_{FX} \ddot{f}_F = -M_{FT} + h_f F_F^* - K_{th} (t_d^2/2) f_F \quad (5)$$

- ・後位台車重心点の運動

$$m_{RT} \ddot{y}_{RT} = F_{RT} + F_R^* \quad (6)$$

$$I_{RX} \ddot{f}_R = -M_{RT} + h_r F_R^* - K_{th} (t_d^2/2) f_R \quad (7)$$

F_F^* 、 F_R^* は前後のタイヤが発生するコーナリングフォースを示す．タイヤの動特性は転動距離に対する一次遅れ特性として以下の式に示す⁷⁾．

$$\dot{F}_F^* = -(V/L_s) F_F^* + (V/L_s) F_F \quad (8)$$

$$\dot{F}_R^* = -(V/L_s) F_R^* + (V/L_s) F_R \quad (9)$$

ここでは緩和長を $L_s = 0.2[\text{m}]$ とし、 F_F 、 F_R は以下の式を用いた．

$$F_F = C_p (d_F + y - (1/V) \dot{y}_{FT} - (L_f/V) \dot{y}) \quad (10)$$

$$F_R = C_p (d_R + y - (1/V) \dot{y}_{RT} + (L_r/V) \dot{y}) \quad (11)$$

3. 制御系設計

本研究ではアクティブ操舵方式に用いる制御システムの構成としてとして、Fig.2 に示すようなフィードフォワード制御とフィードバック制御を合わせたシステムを構築した．

フィードフォワード制御では新交通車両が専用軌道を走行することを生かし、軌道形状から走行距離に応じた車両の前位台車、後位台車それぞれの相対的な操舵角のパターンを算出し、操舵角入力として制御を行うこととした．

フィードバック制御ではフィードフォワード制御での制御誤差の補償、外乱の抑制を行

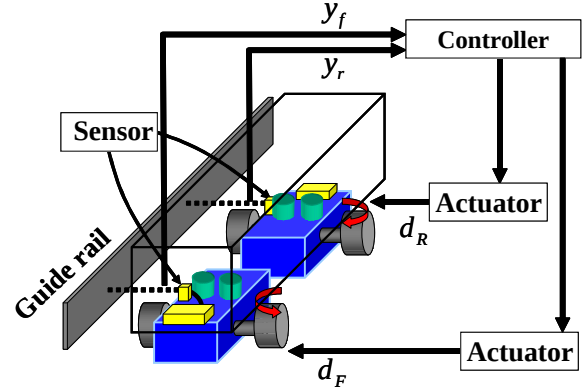


Fig.3: Active Steering System

い、前位台車、後位台車のそれぞれの位置に取り付けた変位センサによって、Fig.3 にある案内レールあるいは目標ラインとの相対変位 y_f 、 y_r を検出し、アクチュエータから出力される操舵角 d_F 、 d_R によりタイヤを操舵することで軌道と車両間の相対変位が一定となるように制御を行った⁸⁾．

制御器には最適レギュレータを適用し、制御器設計用のモデルは次式及び式 (10)、(11) を用いた線形二輪モデルとした．

$$m_B \ddot{y}_B = 2F_F + 2F_R \quad (12)$$

$$I_{BZ} \ddot{\gamma} = 2L_f F_F - 2L_r F_R \quad (13)$$

このモデルを状態方程式にすると以下のようになる．

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (14)$$

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$B = \begin{bmatrix} b_{11} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & b_{32} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$x = [\dot{y}_f \quad y_f \quad \dot{y}_r \quad y_r]^T \quad (17)$$

$$u = [d_f \quad d_r]^T \quad (18)$$

ただし

$$\begin{aligned} a_{11} &= -\frac{C_p}{m_B V} - \frac{L_f^2 C_p}{I_{BZ} V} & a_{12} &= \frac{2C_p}{m_B (L_f + L_r)} \\ a_{13} &= -\frac{C_p}{m_B V} + \frac{L_f L_r C_p}{I_{BZ} V} & a_{14} &= -\frac{2C_p}{m_B (L_f + L_r)} \\ a_{31} &= -\frac{C_p}{m_B V} + \frac{L_f L_r C_p}{I_{BZ} V} & a_{32} &= \frac{2C_p}{m_B (L_f + L_r)} \\ a_{33} &= -\frac{C_p}{m_B V} - \frac{L_r^2 C_p}{I_{BZ} V} & a_{41} &= -\frac{2C_p}{m_B (L_f + L_r)} \\ b_{11} &= \frac{C_p}{m_B} + \frac{L_f^2 C_p}{I_{BZ}} & b_{32} &= \frac{C_p}{m_B} + \frac{L_r^2 C_p}{I_{BZ}} \end{aligned}$$

この制御対象において $u = Kx$ となるフィードバックゲインを求める．ゲインは評価関数

$$J = \int_0^\infty (x^T Q x + u^T R u) dt \quad (19)$$

が最小になるように決定した．

評価関数の重み Q, R は，車両の乗り心地と軌道への追従性を考慮し，車体の左右加速度とトラッキングエラーにおいて，両者を評価した上で以下のとおり決定した．

$$Q = \begin{bmatrix} 1 \times 10^{-4} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 40 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 5 \times 10^{-3} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 10 \end{bmatrix} \quad (20)$$

$$R = \begin{bmatrix} 46 & 0 \\ 0 & 15 \end{bmatrix} \quad (21)$$

4. シミュレーション

4.1 シミュレーション条件

前章までに構築した車両モデルと制御器を用いて，アクティブ操舵方式に対して曲線通過性能に関する検討を行った．

曲線走行シミュレーションに用いた曲線軌道は，Fig.4のような直線，緩和曲線(30m)，定曲線(20m)，緩和曲線(19m)，直線という軌道である．走行速度は30[km/h]とし，カントは最大で定曲線時の4.30[deg]とした．

また，本検討でアクティブ操舵方式に用いたアクチュエータは電動モータを想定し，一次遅れ特性を用いて表現し，センシングからアクチュエータが作動するまでの時間遅れむだ時間を0.1[s]と仮定した．

4.2 シミュレーション結果

Fig.5にシミュレーション結果を示す．左右加速度，ヨーレート，操舵角共に数値理論上妥当性を確認できる値を示していることがわかった．

左右加速度は直線から緩和曲線，緩和曲線

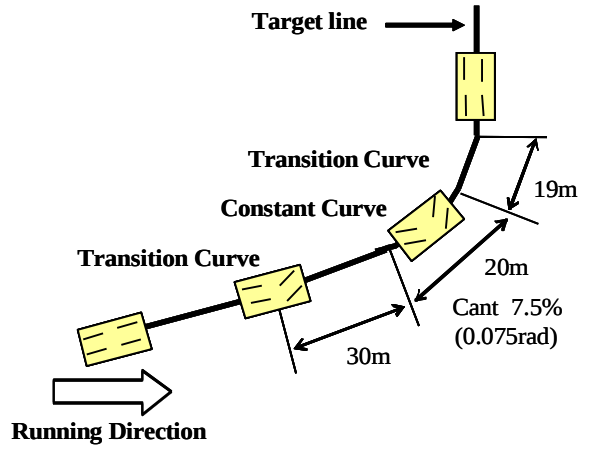


Fig.4: Curved Guideway

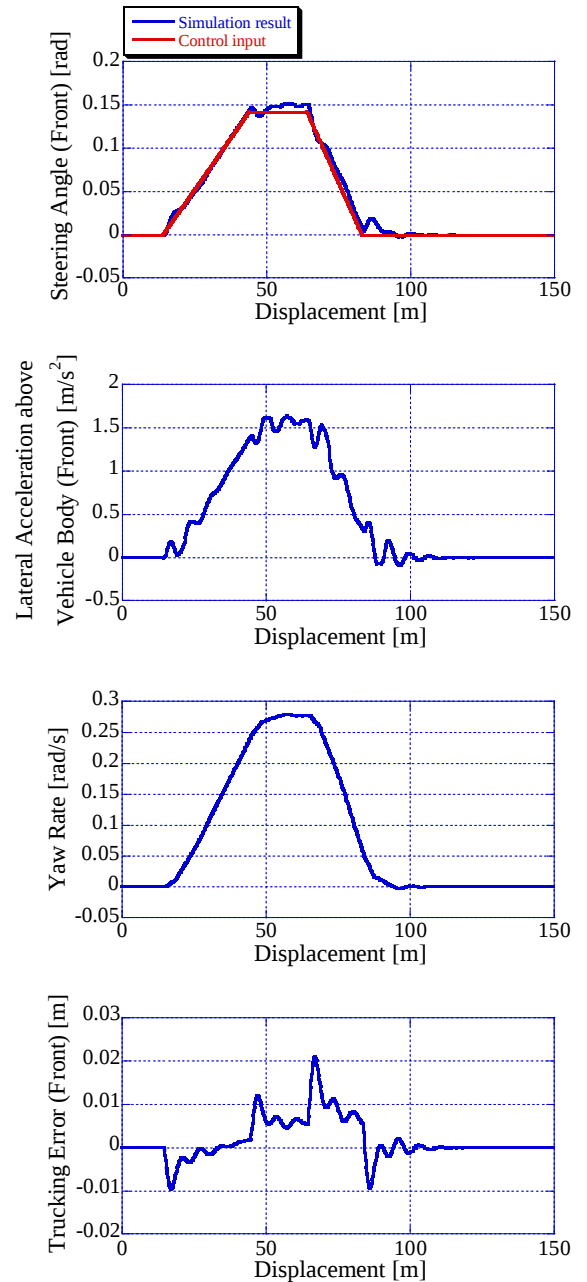


Fig.5: Simulation Results

から定曲線，定曲線から緩和曲線，緩和曲線から直線といったような曲率の変化があるところで振動が発生しているが，乗り心地には問題なしと考えることができる。

トラッキングエラーは本シミュレーションにおいて，アクティブ操舵方式は30Rの定曲線において約20[mm]程度となることがわかった。

左右加速度，トラッキングエラーはフィードフォワード制御でのパターン入力を検討することで改善することできると考えられる。

5. 結言

本論文では，非接触走行型アクティブ操舵方式のモデルを構築し，曲線通過性能に関する検討をおこなった。

制御には，前位台車と後位台車の相対変位に対して最適レギュレータにより制御を行い，アクチュエータから操舵角を入力し軌道への追従走行をさせた。

曲線走行シミュレーションを行った結果，アクティブ操舵方式は乗り心地と追従制度の両面を評価し，制御を行った中で30Rの曲線においても目標とする軌道に追従する走行が可能であり，曲線通過性能の高さが確認できた。

これらの結果より，非接触による軌道への負担軽減と乗り心地向上の同時達成に対するアクティブ操舵がシミュレーション上において有効であることが確認できた。

今後はフィードフォワード制御でのパターン入力，外乱におけるフィードバック制御の検討を行っていく予定である。

「参考文献」

- 1) 大野真弘ほか：電動リニアモータを用いた高速鉄道車両用アクティブサスペンションの開発，鉄道技術連合シンポジウム，(1998)，pp.471-474
- 2) 有森仁勇：乗り心地改善のための各種ダンパにおける制御効果の比較，日本機械学会論文集
- 3) 蛇谷茂樹：新交通車両の自動操舵に関する研究，修士論文，(2003)
- 4) 網島均：新交通車両の運動と制御（機械の研究），養賢堂，第56巻，第10号，(2004)，pp.1027
- 5) Hitoshi TSUNASHIMA: Dynamics of Automated Guideway Transit Vehicle, Vehicle System Dynamics, (2002)
- 6) 永井正夫ほか：車両のダイナミクスと制御（社団法人日本機械学会編），養賢堂
- 7) 景山克三，景山一郎：自動車力学，理工図書
- 8) 足立修一：制御工学，電機大出版局

付録

・運動方程式中の力およびモーメント

$$\begin{aligned} F_{FT} = & C_L \{ \dot{y}_B - \dot{y}_{FT} + L_f \dot{y} - h_c \dot{f}_B + (h_c + h_{tb}) \dot{f}_{FT} \} \\ & + K_L \{ y_B - y_{FT} + L_f y - h_k f_B + (h_k + h_{tb}) f_{FT} \} \\ & + K_{AL} \{ y_B - y_{FT} + L_f y - h_a f_B + (h_a + h_{tb}) f_{FT} \} \quad (22) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} F_{RT} = & C_L \{ \dot{y}_B - \dot{y}_{RT} - L_r \dot{y} - h_c \dot{f}_B + (h_c + h_{tb}) \dot{f}_{RT} \} \\ & + K_L \{ y_B - y_{RT} - L_r y - h_k f_B + (h_k + h_{tb}) f_{RT} \} \\ & + K_{AL} \{ y_B - y_{RT} - L_r y - h_a f_B + (h_a + h_{tb}) f_{RT} \} \quad (23) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} M_{FT} = & h_c C_L \{ \dot{y}_B - \dot{y}_{FT} + L_f \dot{y} - h_c \dot{f}_B + (h_c + h_{tb}) \dot{f}_{FT} \} \\ & + h_k K_L \{ y_B - y_{FT} + L_f y - h_k f_B + (h_k + h_{tb}) f_{FT} \} \\ & + 2h_a K_{AL} \{ y_B - y_{FT} + L_f y - h_a f_B + (h_a + h_{tb}) f_{FT} \} \\ & - 2l_d C_H (l_d \dot{f}_B - l_d \dot{f}_{FT}) \\ & - 2l_a K_{AH} (l_a f_B - l_a f_{FT}) \quad (24) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} M_{RT} = & h_c C_L \{ \dot{y}_B - \dot{y}_{RT} - L_r \dot{y} - h_c \dot{f}_B + (h_c + h_{tb}) \dot{f}_{RT} \} \\ & + h_k K_L \{ y_B - y_{RT} - L_r y - h_k f_B + (h_k + h_{tb}) f_{RT} \} \\ & + 2h_a K_{AL} \{ y_B - y_{RT} - L_r y - h_a f_B + (h_a + h_{tb}) f_{RT} \} \\ & - 2l_d C_H (l_d \dot{f}_B - l_d \dot{f}_{RT}) \\ & - 2l_a K_{AH} (l_a f_B - l_a f_{RT}) \quad (25) \end{aligned}$$

・車両諸元

Table.1: Main Specification of Vehicle Model

Symbol	Description	Value
m_B	Body Mass	10752[kg]
m_{FT}, m_{RT}	Truck Mass	2600[kg]
I_{BX}	Body Roll Moment of Inertia	11739[kgm ²]
I_{FX}, I_{RX}	Truck Roll Moment of Inertia	1197[kgm ²]
I_{BZ}	Body Yaw Moment of Inertia	117790[kgm ²]
C_B	Yaw Damper	1000[Ns/m]
C_L	Damper of Side Stopper Rubber	19.6×10 ³ [Ns/m]
C_H	Vertical Damper	352×10 ³ [Ns/m]
K_{AL}	Stiffness of Lateral Air Spring	612×10 ³ [N/m]
K_{AH}	Stiffness of Vertical Air Spring	278×10 ³ [N/m]
K_L	Stiffness of Side Stopper Rubber	300×10 ³ [N/m]
K_{th}	Vertical Stiffness of Vertical Tire	1382×10 ³ [N/m]
C_p	Cornering Coefficient	561×10 ³ [N/rad]
t_p	Pneumatic Trail	0.03[m]
t_d	Tread	1.85[m]
L_f, L_r	Body C.G - Axle Displacement	3.35[m]
G_f, G_r	Steering Gain	0.68, 1.07[m/rad]