

4輪操舵システムを有する大型連結車両の運動制御に関する研究*

日大生産工（院）○飯塚 尚司 日大生産工 景山一郎

1. 緒言

近年、大型車は物資の輸送から都市交通の渋滞緩和のための交通システムとして重要な役割を果たしている。バスは自動車輸送の持つ機動性や建設コストに対し輸送力が高いために現交通システムにおいても広く利用されている(図1)。また、更なる輸送力確保の観点から国内において連節バスが運行されている例もある。今後自動車輸送を使用する場合には輸送力の確保が重要となり、連節バスが必要不可欠であると思われる。しかし、一般に連節バスを含め連結車両では単体車両に比べ最小旋回半径や内輪差が大きく、運動性能が劣るために過去連結車両や多軸車両の追従性、操安性向上から様々な研究が行われてきた^{1), 2)}。前方車と後方車の姿勢角からトレーラ輪操舵を行ったものはあるが内輪差をなくすまでには至っていない。内輪差をなくすために前輪と前輪軸中心と後輪軸中心が同じ回転中心を得られる4輪操舵を有する車両が必要となる。本研究では4輪操舵を有する連節バスを対象とし、前輪車軸中心の通過位置を後輪車軸中心が同軌跡をたどる同軌走行の可能性とその際の制御方法について検討を行った。同軌制御の検討として制御システムを構築しシミュレーションによる検討および、模型車両による確認実験を行った。

2. 車両構成

本研究の大型車両はバスを対象とする。車両としては2両連結バスとし、同軌制御を基本とする操舵を実現するために4輪操舵機構を有する。また、車両は自律行可能なシステムとする。操舵方法としては従来の鉄道、交通システムに見られる軌道、ガイドレールなどのインフラを利用し、操舵を行うものもあるがインフラに完全に依存するため、直接依存して走行を行うシステムではなく、走行路面に等間隔で埋設された磁気マーカを元に車両位置情報を検出し、操舵制御を行う車両を想定する。そのため、車両設備としては磁気センサなどの車両位置情報観測器、車両状態量を検出するジャイロなどの測定器などを必要とする。走行上、地上設備には車両位置情報認識用設備として専用道路に磁気マーカの設置が必要となる。

ここでは車両状態量と目標コースとの横変位を測定可能なシステムを仮定し、制御システムの構築を行った。

3. 制御システムの検討

同軌制御の制御アルゴリズムを図2に示す。規定コースを予め与えられた上でコースの横変位から同軌制御のための希望舵角を運動方程式から逆問題を解くことにより算出するフィードフォワード部と、外乱抑制のために軸中心の横変位と規定コース横変位の偏差をもとにフィードバックを行うフィードバック部と制御部を二つに分けて構築した。連結バスの構築が目的であるが、検討の初期段階として単一車両による検討を行う。

3.1. フィードフォワード部

フィードフォワード部による希望舵角算出は逆問題によって求める。同軌制御を考えた場合、ある走行速度において目標コースを前輪車軸中心と後輪車軸中心が通過する場合には車両位置、姿勢角は一意的に決定される。時間変化から車体姿勢角、車両位置を算出し、運動方程式の逆問題を解くことで前後輪舵角を決定する。今回は動的特性把握のためレーンチェンジによるシミュレーションを行う。レーンチェンジの逆問題としてはまず、走行軌跡を時間に対する横変位の関数として関数近似する。関数近似した式を式(1)に示す。ただし、 y :横変位[m]、 D :車線幅[m]、 L :乗り移り距離[m]、とする。

$$y_{(x)} = \frac{D}{2} \left[1 + \tanh \left\{ p \left(\frac{2}{L} x - 1 \right) \right\} \right] \quad (1)$$

関数近似した式(1)の連続関数がある走行速度の式に変換した式を式(2)、後輪は前輪にホイールベース分、後方を走行するため式(3)で表せる。

$$y_{f(t)} = \frac{D}{2} \left[1 + \tanh \left\{ p \left(\frac{2V}{L} t - 1 \right) \right\} \right] \quad (2)$$

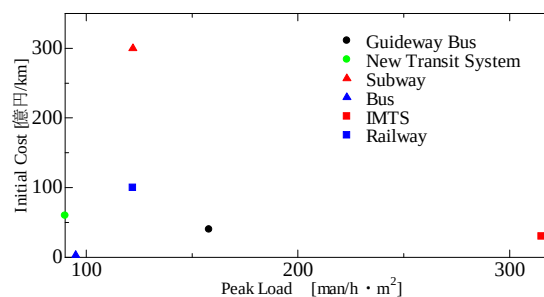


Fig.1 Correlation of Initial Cost and Maximum Transport

Study on Vehicle Control for Articulated Heavy-Duty Vehicles with Four-Wheel Steering System

Hisashi IIZUKA and Ichiro KAGEYAMA

$$y_{r(t)} = \frac{D}{2} \left[1 + \tanh \left\{ p \left(\frac{2V}{L} (t - \frac{l_f + l_r}{V}) - 1 \right) \right\} \right] \quad (3)$$

また重心点位置の時間変化，ヨー角は式(4)，(5)により表せる．

$$y_{(t)} = y_{r(t)} + \frac{(y_{f(t)} - y_{r(t)})l_r}{l_f + l_r} \quad (4)$$

$$q_{(t)} = \frac{y_{f(t)} - y_{r(t)}}{l_f + l_r} \quad (5)$$

近似された重心点の横変位を微分し，速度を算出する．同様に再度微分を行うことで加速度を求める．ヨー角も同様に微分を行いヨーレイトを算出する．車両モデルを図3に示す．車速一定として横方向とヨー方向の二自由度を規定する．車両のつりあい式から求められる方程式(6)，(7)の重心点回りと横変位の方程式を舵角の方程式(8)，(9)に変形し，先ほどの計算で求められる加速度，速度，ヨー角，ヨーレイトを代入することで希望舵角を得る．

$$m \frac{d^2 y}{dt^2} = 2K_f \left(d_f + q - \frac{1}{V} \frac{dy}{dt} - \frac{l_f}{V} \frac{dq}{dt} \right) + 2K_r \left(d_r + q - \frac{1}{V} \frac{dy}{dt} + \frac{l_r}{V} \frac{dq}{dt} \right) \quad (6)$$

$$I \frac{d^2 q}{dt^2} = 2K_f \left(d_f + q - \frac{1}{V} \frac{dy}{dt} - \frac{l_f}{V} \frac{dq}{dt} \right) l_f - 2K_r \left(d_r + q - \frac{1}{V} \frac{dy}{dt} + \frac{l_r}{V} \frac{dq}{dt} \right) l_r \quad (7)$$

$$d_f = \frac{2K_f (L_f + L_r) (-Vq + \dot{y} + L_f \dot{q}) + V(mL_r \ddot{y} + I \ddot{q})}{2VK_f (l_f + l_r)} \quad (8)$$

$$d_r = \frac{V(mL_f \ddot{y} - I \ddot{q}) - 2K_r (L_f + L_r) (Vq - \dot{y} + L_r \dot{q})}{2VK_r (l_f + l_r)} \quad (9)$$

逆問題によって求められるフィードフォワード部の確認を計算機シミュレーションにて行った．コース図を図4に示す．コースは5秒間直線を走行した後，車線幅3.5[m]，乗り移り距離100[m]のシングルレーンチェンジを行うものとする．車両諸元は表1に示すものを使用し，ニュートラルステアとして検討を行った．走行速度を20,40,60[km/h]とした場合の車両応答の結果を図5に示す．図は上から前後輪舵角，重心点周りの横すべり角，ヨーレイト，横方向加速度，横変位を表す．20,40[km/h]では通常，後輪旋回半径が前輪よりも短くなるために逆操舵を行っているが走行速度が上がり，横すべり角が増大することで車両後輪部が極低速時の回転中心から外側になるために同

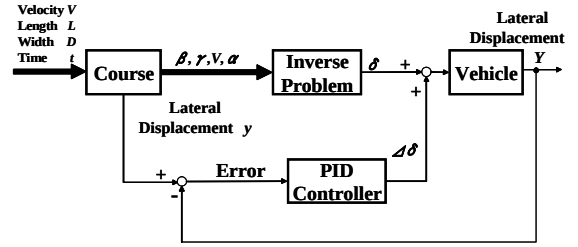


Fig.2 Lateral Control Algorithm

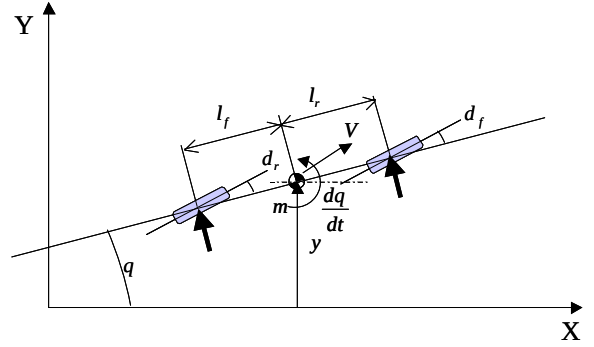


Fig.3 Vehicle Model

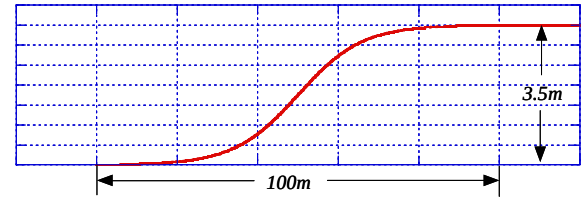


Fig.4 Simulation Course

Table1 Vehicle Specifications

Wheel Base	[m]	4.5
Cornering Force	[N/rad]	76400
Weight	[kg]	9000
Moment of Inertia	[kg·m ²]	70600

轍に近づく．そのため20,40[km/h]となるにつれ後輪の逆操舵角が減少していく．60[km/h]になると横すべり角がさらに増大し，同轍になる範囲を過ぎて車体姿勢角が反転するために後輪舵角は同操舵を行う．速度によって後輪操舵を変化させていることが見て取れる．横変位の図では前後輪と重心点と同じ軌跡を描いていることから，逆問題を解くフィードフォワード部は速度に応じて適切な操舵を行い，同轍制御が行われていることが分かる．

3.2. フィードバック部

フィードフォワード部の検討により同轍制御が確認されたが，初期位置が合うことが前提の制御となる．規定コースの横変位に対し外乱などにより偏差が生じた場合，偏差をフィードバックして修正操舵を行う必要がある．逆問題によって得られた舵角は前輪，後輪それぞれの通過する横

変位から算出される独立なものであるため、フィードバック部も前後輪別々に横偏差をとり、独立にPIDによるフィードバック制御を行うことを考える。変位検出を前後独立で検出して制御を行う場合、前方のみPIDによるフィードバックを前輪のみとした場合と前後輪で行った場合の制御性能の検討を行った。フィードフォワード開始5秒前に初期偏差を0.2[m]を与えた場合について検討を行った。目標コースは前節と同様とした。結果を図6に示す。速度は60[km/h]とした。図は上から前輪舵角、後輪舵角、横すべり角、ヨーレイト、目標値に対する横方向の偏差を表す。フィードフォワードのみの場合をCase1、前輪のみフィードバックを適用した場合をCase2、前後輪独立フィードバックを適用した場合をCase3とする。Case1の場合は初期偏差を持ったままフィードフォワードをおこなっているために目標コースに対して0.2[m]オフセットした結果となっている。Case2、Case3ともに前後輪舵角は初期偏差がない場合に比べ、修正操舵があるために前輪舵角は少なく切られているが、フィードフォワードのみの場合と同様の操舵を行っている。一部多少偏差が残るため完全に規定コース上は走行はできず最大0.442[m]の偏差が生じるが前後輪は同軌跡を描き、同軌制御が行われていることが確認できる。後輪にPIDを適用した場合は横すべり角が減少したがヨーレイトはCase2と変わらず、横偏差についても前輪のみフィード

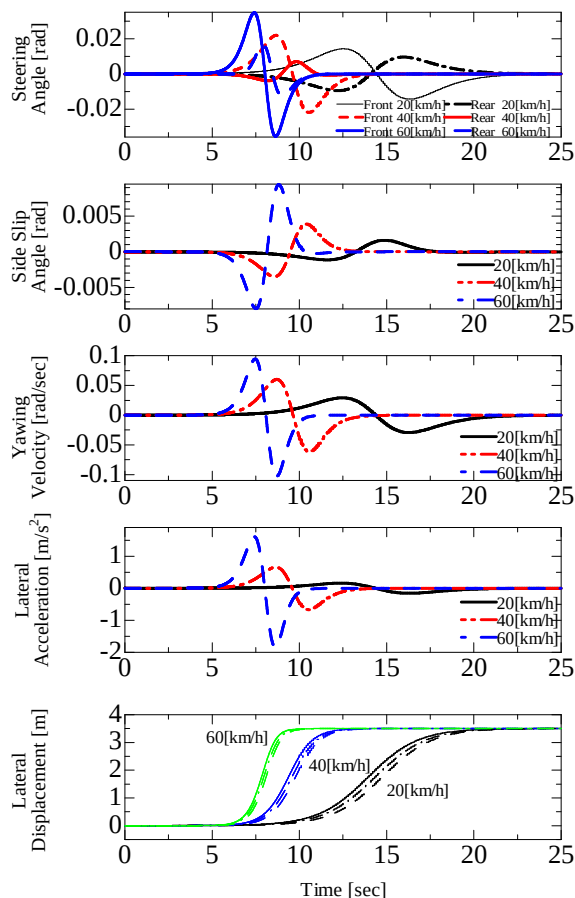


Fig.5 Results of Simulation

バックの場合とは差が見られなかった。車両挙動にあまり差がみられないことからPIDによるフィードバックを前輪のみ適用することで同軌制御が行えると考えられる。

4. 車両実験

4.1. システム概要

模型車両を用いての確認実験を行った。模型車両の概観を図7に示す。模型車両はコンピュータから制御用ケーブルで有線により制御される。操作入力には前後輪舵角と駆動力とした。前輪、後輪舵角はともにサーボモータにより操舵を行い、直流モータによって駆動する。計測出力は前後輪舵角と車速とヨーレイトとした。操舵角はポテンショメータから検出し、後輪左側に取り付けた磁気ピックアップにより検出した車輪速を車速とした。車速一定を実現するために、車輪速をPIDフィードバックにより制御を行う。ヨーレイトは1軸のレートジャイロを車体上部中心に設置した。模型車両では道路情報取得方法としてカメラから道路上の白線認識を採用した。目標コースとの横偏差は前後車体中心に取り付けてあるカメラによって行われる。カメラにより道路上の白線を認識し、輝度値による閾値処理によって白線を判別する。判別された白線を矩形近似することで矩形の中心座標とカメラ中心座標との差からカメラ位置での偏差を検出する。カメラ位置での偏差を車軸

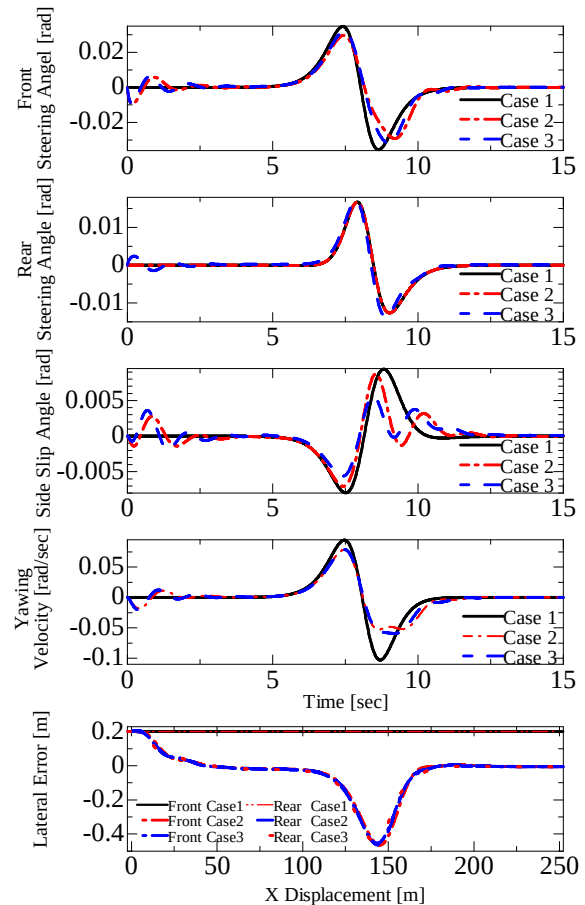
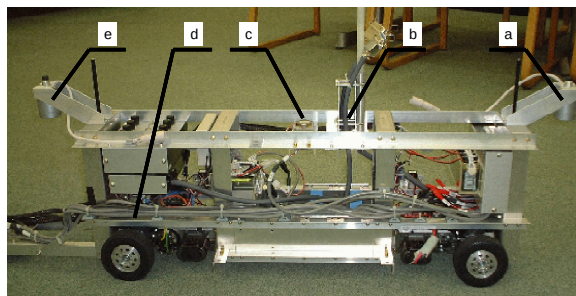


Fig.6 Results of Simulation



a)Front Camera b)Control Cable c)Rate Gyro
d)Magnetic Pickup e)Rear Camera

Fig.7 Scale Model

中心に変換することで車軸中心での偏差を得る。

4.2. 実験概要

シミュレーションにより同軸走行が可能であることや操舵パターンの速度依存性を確認することが出来たため、模型車両により実験を行った。実験コースは車両と縮尺をあわせるために乗り移り距離 12.5[m], 乗り移り幅 4.38 [m] のシングルレーンチェンジとし, 3[m]の直線走行区間を加えた。フィードバックゲインとして予見時間2[sec]の二次予測モデルを使用した。車両の諸元を表 2 に示す。フィードバックはシミュレーションの結果から前輪のみとし, 前輪偏差を計測した。

4.3. 実験結果

実験結果を図 8 に示す。図は上から前輪舵角, 後輪舵角, ヨーレート, 前輪横偏差となる。車重がホイールベース中心より後輪側にあるために後輪の操舵パターンとして逆操舵となり, 操舵が行われていることが図からも分かる。また, 前輪横偏差も最大で 13[mm]で目標値に追従できていることが分かる。同軸制御が行われているか確認を行うために前輪, 後輪, 重心位置の走行軌跡を求めた。走行軌跡を図 9 に示す。なお, 偏差は前輪のみ計測を行ったために前輪の横偏差を元に車速とヨー角の積算から算出を行った。走行軌跡から同軸走行が行えていることが見て取ることが出来る。

5. 結言

本報告では, 大型車両による同軸制御の可能性を検討した。同軸制御の横方向制御として逆問題を適用したフィードフォワードとロバスト性向上のためのPIDコントローラを用いたフィードバックの併用による制御システムの構築を行った。シミュレーションモデルを構築して検討を行い, 可能性を確認した。初期偏差がある場合は前輪横偏差のみフィードバックを行うことにより, 同軸制御が可能であると考えられる。また, シミュレーション検証のために模型車両を構築し, 縮尺比をあわせて実験を行った。実験により今回構築した制御システムによる同軸制御が確認された。今後は, 連結車両による同軸制御の検討も行う。

Table1 Scale Model Specifications

Wheel Base	[m]	0.556
Cornering Power(Front)	[N/rad]	29.69
Cornering Power(Rear)	[N/rad]	31.8
Weight	[N]	92.8
Moment of Inertia	[N/m ²]	19.6
Velocity	[m/sec]	1.0

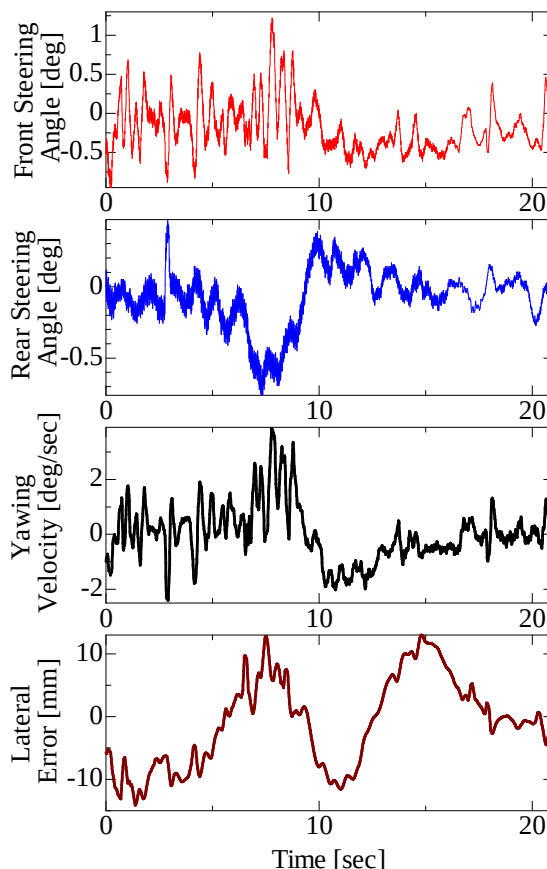


Fig.8 Experimental Results of Scale Model

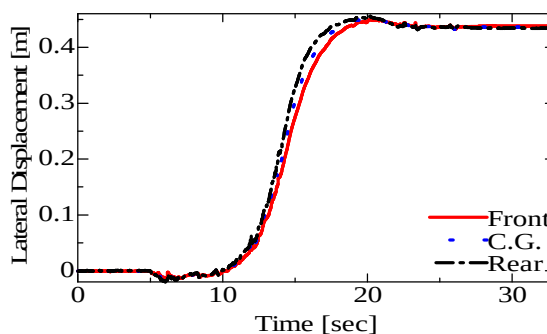


Fig.9 Experimental Results of Scale Model

参考文献

- 1) 辺見勇: 連節バスについて, 自動車研究, Vol.7, No.1, p17-20(1985)
- 2) 辺見勇, 中沢迪, 茂木徳男, 杉浦健一: 連節バスの操安性, 自動車技術, Vol.40, No.3, p.376-385(1986)