

四輪操舵システムを有する新交通システムの運動制御に関する研究

日大生産工(院) 海老根 卓 大阪産大 金子 哲也

日大生産工 景山 一郎

1. はじめに

年, 通勤, 買い物などでマイカーを利用する人の増加により都市近郊では道路整備に対して車が溢れる事により交通渋滞が発生している。そのため, 公共交通の利点である定時性・高速性が失われてしまっている。そこで定時性・高速性を確保するため専用軌跡を自動運転により走行するバスを提案する。また, 今後自動車輸送を使用する場合には輸送力確保が重要となり, 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た連結車両では単体車両に比べて最小旋回半径や内輪差が大きく, 運動性能が大きく劣るため過去連結車両は多軸車両の追従性, 操安性向上など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。そのため, 既存の道路に適応させるのは難しい。そこで, 四輪操舵を有するバスによる前輪車軸中心と後輪車軸中心が同じ軌跡を通る同軸制御走行させることで道路占有幅を低減し, 既存の道路に適応出来ると考えられる。

本研究では, 上記の仕様を満たす車両の制御アルゴリズムを構築し, 連節のための前段階として単車量ずつのソフト連結による走行実験を行った。

2. 車両構成

本研究での大型車両はバスを対象とし, 車両としては2両連結とする。フェイルセーフの観点から前方車両, 後方車両のどちらかが故障した場合の牽引を想定してシングルドロバにより連結する。更に, 同軸瀬領を基本とする操舵を実現するために4輪操舵機構を有し, 自立走行可能なシステムとする。操舵方法としては従来の鉄道, 交通システムによく見られる軌道やガイドレールなどの用に完全インフラに依存するシステムではなく, 走行路面に等間隔で埋設

された磁気マーカーを基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や車両状態量をジャイロなどの測定器が必要となる。走行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ーを埋設する必要がある。本研究では, 車両状態量と目標コースとの横変位を検出する事が可能と仮定し, 制御システムの構築を行った。

3. 制御システムの概要

同軸制御実現にあたり, 車両運動方程式を逆解法により舵角を求めるフィードフォワード部と目標コースとの偏差を補償するフィードバック部の二部に分けて構築した。これらは共に線形なシステムであるため線形結合することが可能であることから, 最後に線形結合した。(図1)

3-1 フィードフォワード部

同軸制御を考えた場合, 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。運動方程式を求める2自由度平面2輪モデルを図2とした。車速を一定とし, ヨー方向と横方向の2自由度を規定した。本研究では動的特性把握のため基準コースをシングルレーンチェンジとし, 関数近似した式は(1)式ようになる。ただし, y :横変位[m], D :車線幅[m], L :乗り移り距離[m]とする。

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

(1)式を速度の連続関数にして前輪車軸中心の通過軌跡として考える。同軸制御が実現している場合, 後輪車軸中心の走行軌跡は前輪車軸中心の走行軌跡と同じところを通過するため前輪

車軸中心に対してホイールベース分後ろを走行する。よって前輪と後輪の車軸中心の通過軌跡は(2)式, (3)式のようになる。

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

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

それぞれの位置から重心点の横変位と車両姿勢角が(4)式, (5)式のように求められる。

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

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

近似された重心点の横変位を微分し, 横速を算出する。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しヨーレイトを算出する。更に, 車両のつり合いの式からの2式が求められる。

$$m \frac{d^2 y}{dt^2} = 2K_f \left(\delta_f + \theta - \frac{1}{V} \frac{dy}{dt} - \frac{l_f}{V} \frac{d\theta}{dt} \right) + 2K_r \left(\delta_r + \theta - \frac{1}{V} \frac{dy}{dt} - \frac{l_r}{V} \frac{d\theta}{dt} \right) \quad (6)$$

$$I \frac{d^2 \theta}{dt^2} = 2K_f l_f \left(\delta_f + \theta - \frac{1}{V} \frac{dy}{dt} - \frac{l_f}{V} \frac{d\theta}{dt} \right) - 2K_r l_r \left(\delta_r + \theta - \frac{1}{V} \frac{dy}{dt} - \frac{l_r}{V} \frac{d\theta}{dt} \right) \quad (7)$$

上式を連立方程式として前輪舵角と後輪舵角を求める。

$$\delta_f = \frac{2K_r(l_f + l_r) \left(-V\theta + \dot{y} + l_f \dot{\theta} \right) + V \left(ml_f \ddot{y} + I \ddot{\theta} \right)}{2VK_f(l_f + l_r)} \quad (8)$$

$$\delta_r = \frac{V \left(ml_f \ddot{y} + I \ddot{\theta} \right) - 2K_r(l_f + l_r) \left(-V\theta + \dot{y} + l_r \dot{\theta} \right)}{2VK_r(l_f + l_r)} \quad (9)$$

この2式に先ほど求めた式から求められる横方向速度, 横方向加速度, ヨーレイトを代入することで希望舵角を算出する。

3-2 フィードバック部

フィードフォワード制御を行うにあたり初期位置が合うこと, 車両パラメータが既知であることが必須条件であるが, 想定車両がバスのため乗客の乗降による車両パラメータの変動や横風, 路面の変化などフィードフォワードでは加味できない外乱などによって偏差が生じた場合, フィードバックして修正操舵を行う必要がある。そこで, 目標コースと前後輪の車軸中心との差を偏差としてPIDによるフィードバック制御を行う。

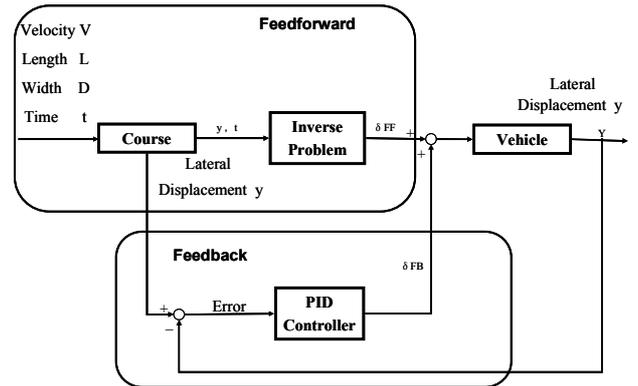


Fig.1 Lateral Control Algorithm

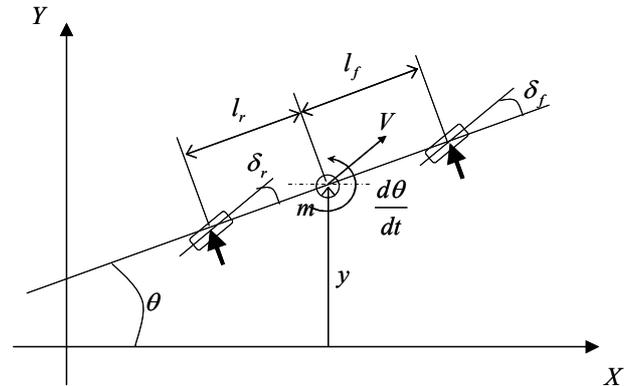


Fig.2 Vehicle Model

4. シミュレーション実験

4-1 シミュレーション条件

実車で実験する前段階の制御アルゴリズムの妥当性の確認として車両運動モデルを用いた数値シミュレーションによる確認実験を行なった。コースは5秒間直線走行をした後, 図3に示すような車線幅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した。通常走行に考えられる外乱として初期偏差, 走行途中の横風などによる偏差, 速度変動を与えた。その時, 外乱を与えてもコースに追従して走行できるかを確認する。車両諸言は表1に示したものを使用し, ニュートラルステアとして検証

を行った。

バスの平均的な車速を 40km/h と考え以下の条件でシミュレーションを行った。

- ① 外乱無し
- ② 初期偏差を 0.2[m]
- ③ ランダムな 0.2[m]の偏差

Table.1 Vehicle Specifications

| | | |
|----------------------------|----------------------|-------|
| Front Axle to Vehicle C.G. | [m] | 2.25 |
| Rear Axle to Vehicle C.G. | [m] | 2.25 |
| Cornering Stiffness | [N/rad] | 76400 |
| Vehicle Mass | [kg] | 8700 |
| Yaw Moment of Inertia | [kg·m ²] | 70600 |

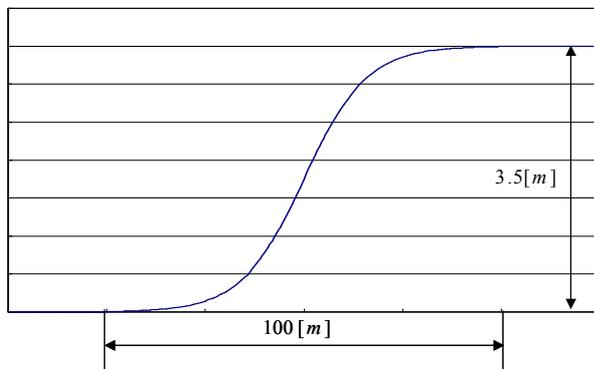


Fig.3 Lane Change Course

4-2 実験結果

シミュレーションより実際のバスが走行するであろう速度 40km/h について検討した。図 4 は外乱無し、図 5 は初期偏差、図 6 はランダム偏差を与えたときの走行軌跡と横偏差のグラフを示す。外乱が入ったとき、PID による修正舵角で多少振幅はするものの横偏差が無くなるまで収束し走行できることが分かった。これにより、実車においてもこの制御システムで走行が可能であることが推察される。

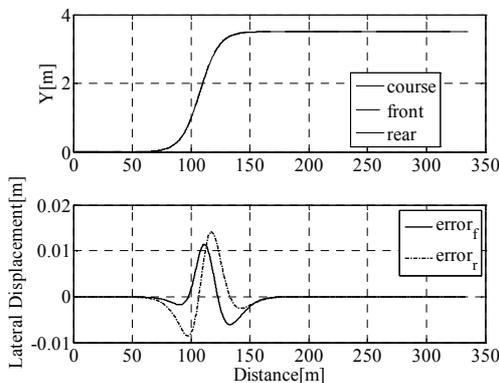


Fig.4 Result of Simulation at V=40

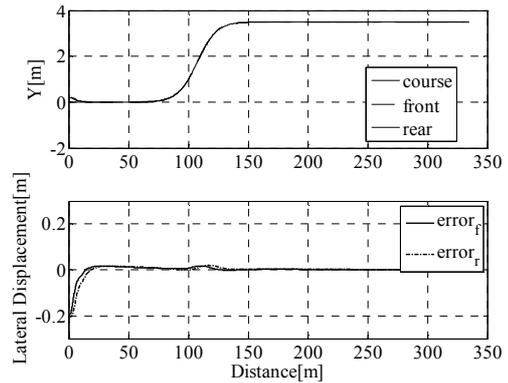


Fig.5 Result of Simulation at V=40

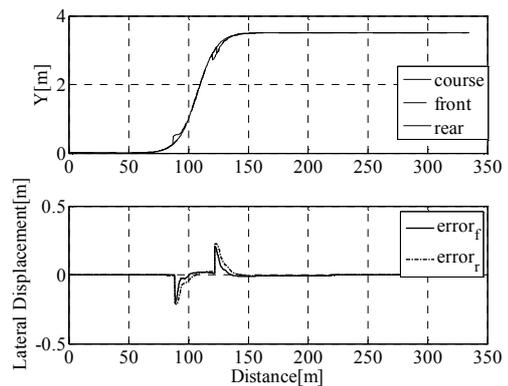


Fig.6 Result of Simulation at V=40

5 模型車両実験

5-1 車両構成

本研究では用地確保, 車両の特性編が容易であることなどから, 車両のホイールベースの寸法比が約 1/8 になるように模型車両を構築し実験を行った。車両のパラメータ等をリアルタイムで制御するため DSP を使用し, 制御用コンピュータからの指令値や模型車両からの測定値の受け渡しを有線ケーブルにより行った。操作入力には前輪・後輪実舵角と駆動力とした。駆動, 操舵はラジオコントロールカーをベースにしており, 4 輪駆動車の前部のみをつなぎ合わせて 4 輪操舵, 4 輪駆動を実現した。車両の横偏差を測定する磁気マーカーの代わりとしてコースを白線で引き, 車体の前後に付けた CCD カメラより取得された画像を輝度値による閾値処理により白線を抽出する。抽出した白線中心とカメラ中心からの距離を求め, その値を車両の偏差とした。表 2 に模型車両の緒言, 図 7 に全体図を示す。

5-2 実験条件

コースはシミュレーションと同様のシングルレーンチェンジとした。乗り移り距離, 車線幅

を 1/8 にすることで模型車両の規格と合わせた。車速を 1m/s とし, 初期の車間をシングルドロバと同じ長さの 0.123m とり実験を行った。車間が詰まって衝突しないよう速度調整を行いながら前車両の後輪と後車両の前輪との偏差を確認した。

Table.3 Model Vehicle Specifications

| | | |
|----------------------------|----------------------|--------|
| Front Axle to Vehicle C.G. | [m] | 0.2997 |
| Rear Axle to Vehicle C.G. | [m] | 0.2563 |
| Cornering Stiffness(Front) | [N/rad] | 29.69 |
| Cornering Stiffness(Rear) | [N/rad] | 31.8 |
| Vehicle Mass | [kg] | 8.98 |
| Yaw Moment of Inertia | [kg·m ²] | 0.2068 |

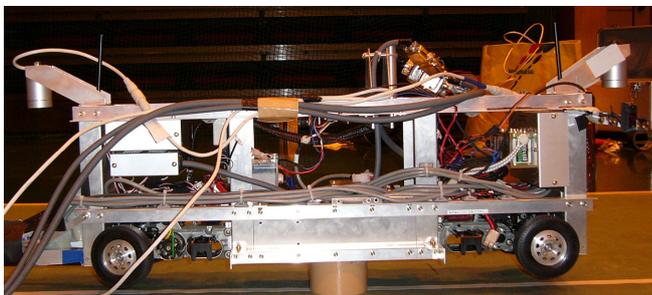


Fig.7 Scale Mode

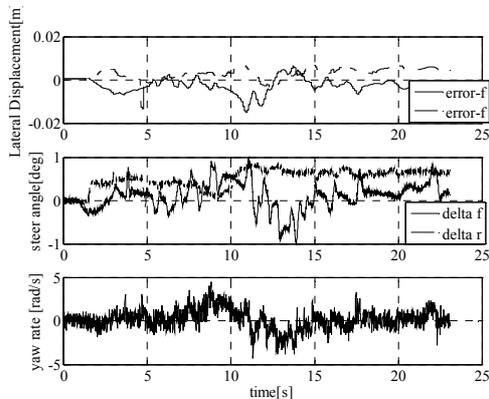


Fig.8 Experimental Result (Front)

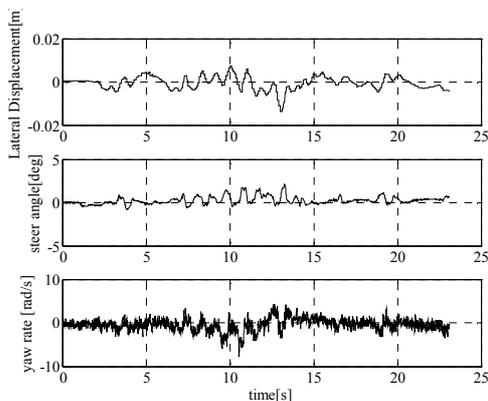


Fig.9 Experimental Result (Rear)

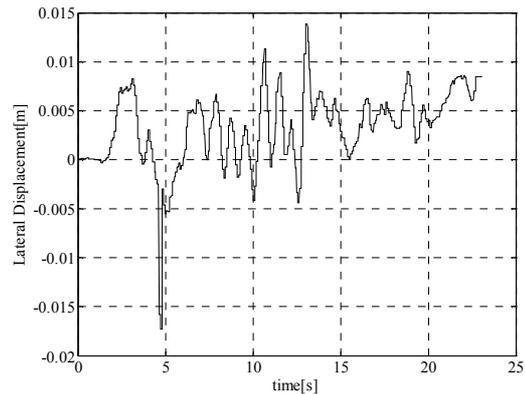


Fig.10 Experimental Result

5-3 実験結果

PID のゲインを調整し, 白線追従走行が出来る状態でソフト連結走行を行った。2 台並べて走行させ速度を合わせることで走行が可能ながことが示された。また, 前輪車軸中心と後輪車軸中心のコースからの偏差を見たところお互いの差は最大でも約 1.5cm 以下となった。このことからシングルドロバによる連結はヨーモーメントを逃がすため 1.5cm の差を許容できるシングルドロバを用いれば連結走行も可能であることが示された。

6. 結言

本研究では, 連結走行を目的としたバスの制御アルゴリズムを構築した。制御アルゴリズムはフィードフォワード部とフィードバック部の二部から構築した。シミュレーションによるアルゴリズムの妥当性の検討後, 模型車両による単車両の走行実験した。単車両走行の実験により求めたPIDゲインを使用し, 車両を2台並べてのシステムだけを繋いだソフト連結走行を行った。その結果, 走行において車間距離に大きな差は出ず, 共に白線上を走行できることが確認できた。今後, シングルドロバによるハード連結の実験を行っていく。

「参考文献」

- 1) 辺見勇ほか：連節バスの操安性, 自動車技術, vol40, No.3, p376-386(1986)
- 2) 辺見勇：連節バスについて, 自動車研究, Vol.7, No.1, p17-20(1985)