モデル誤差抑制補償器による福祉用パーソナルビークルの
ロバストな屋内隊列走行システムの走行評価菅野 達也^{*1}, 壇 裕介^{*1}, 岡島 寛^{*1}, 松永 信智^{*2}Evaluation of robust indoor platoon driving system
of welfare personal vehicles by using model error compensatorTatsuya SUGANO^{*1}, Yusuke DAN^{*1}, Hiroshi OKAJIMA^{*1} and Nobutomo MATSUNAGA^{*2}^{*1,*2} Graduate School of Science and Technology, Kumamoto University
2-39-1 Kurokami, Chuo-ku, Kumamoto 860-8555, Japan

Received 28 December 2015

Abstract

In aging society, welfare personal vehicles have been widely used to improve the quality of life of elderly and handicapped persons. However, it is difficult for the users to steer the vehicle in narrow buildings. Accordingly, platoon driving of welfare personal vehicles has attracted attention as one of the effective leading methods. The platoon driving system consists of the longitudinal control and the lateral control. The longitudinal control is based on Adaptive Cruise Control. If the vehicle parameters are adjusted for each user's driving ability, the longitudinal control will be string unstable in the worst case. As for the lateral control, the following vehicle tracks the preceding vehicle according to the target point following algorithm. The following vehicle may collide with a wall due to the large tracking error at a sharp corner in buildings. In this paper, the robust and precise platoon driving system is proposed to realize the safe platoon driving. Firstly, the longitudinal controller stably keeps the inter-vehicle distance regardless of the short time-headway. Secondly, the lateral controller precisely tracks the wheel track of preceding vehicle by using way-points. Thirdly, the robust platoon control for the different vehicle dynamics is designed by Model Error Compensator. Finally, the effectiveness of our proposed system is evaluated by the driving experiments.

Key words : Welfare personal vehicle, Platoon driving, Model error compensator, Adaptive cruise control, String stability, Target point following, Way-point

1. 緒 言

高齢化社会に伴い、手軽な移動手段として電動車いすをはじめとする福祉用パーソナルビークル (Welfare Personal Vehicle, WPV) が広く利用されるようになった。今後さらに高齢化が進むと予測される先進諸国において、一度に多くの高齢者を誘導できる移動支援技術の需要が高まっている。その一つとして、筆者らはクルーズコントロール技術を応用した WPV の隊列走行システムを開発している。先頭を走行する誘導車両は熟練者が運転し、歩行者などの障害物を安全に回避しながら走行する。追従車両には運転の不得意な利用者が乗り、縦一列に連なって前方を走行する先行車両を追従するよう自動走行する。これにより、病院などの歩行者が多く通路が狭い屋内環境においても、要支援者を含む利用者の安全かつ効率的な移動を提供できると期待される。

近年、渋滞緩和や燃費向上を目的として我が国でも自動車の隊列走行に関する研究が盛んに行われている。例

えば、文献(深尾, 杉町, 2015)では貨物トラックの高密度な隊列走行を実現するための制御手法に加え、道路勾配、障害物、悪天候時などを考慮した近い将来の実用化に向けた技術が紹介されている。一方、屋内環境における WPV の隊列走行に関する研究は少なく、特有の課題が多く残されている。追従車両の加減速を制御するロングitudinal制御に関しては、路面状態や利用者の体重の違いが WPV の制御に大きく影響することが知られている(高橋他, 2012)。また、追従車両の操舵を制御するラテラル制御では、先行車両の走行軌道に対する追従精度の低さにより、旋回時に追従車両が壁に衝突する問題がある。

本論文における隊列走行システムは、アダプティブクルーズコントロール (Adaptive Cruise Control, ACC) によるロングitudinal制御器と地点追従法(津川, 村田, 1989)によるラテラル制御器から構成される。ACC は代表的なクルーズコントロール技術であり、先行車両との車間距離と相対速度を維持するように追従車両の速度を制御する(大前, 2015)。地点追従法を用いた隊列走行では、先行車両の相対位置情報から少ない演算量で追従車両の操舵指令値を算出し、滑らかな走行軌道で先行車両を追従する制御が可能となるが、旋回中の先行車両と追従車両の走行軌道は完全には一致しない(加藤, 津川, 1999)。なお、車両特性の変動の問題に対し、自動車の分野では 1990 年代から車両の入出力特性のモデルマッチングによる制御法が精力的に研究されてきた。例えば、ロングitudinal制御においては指令値から車両加速度の応答を規範の一次遅れ特性にマッチングさせ隊列走行に適用する研究や(大前他, 1999)、ラテラル制御においては操舵角とヨーレートを規範の一次遅れ特性に追従する直接ヨーモーメント制御の研究がある(永井他, 1998)。WPV は自動者に比べ車重が軽くドライバが搭乗すると走行特性も大きく変わるため、ロングitudinal制御とラテラル制御に対しパラメータ変動を考慮したロバスト制御器の設計が必要である。

これまでに筆者らは、利用者の体重の違いに対してロバストな ACC と先行車両の走行軌道に沿った高精度な地点追従法を提案し、実機実験によりその有効性を示してきた(菅野他, 2014a, Sugano et al., 2014b, 2014c, 2015)。本論文はこれらの成果をまとめたものであり、それに加えて利用者毎の車両特性の違いを配慮した隊列走行システムの設計について考える。高齢者や身体障害者は運転スキルの個人差が大きく、WPV の走行特性は利用者に合わせて車両ごとに調整される。このとき、ある一つのモデルに対して設計された制御器では、車群安定性や追従精度の低下が生じる場合がある。そこで、モデル誤差抑制補償器 (Model Error Compensator, MEC)(Okajima et al., 2013)を用いてモデルと実対象のモデル誤差を補償し、追従車両の加減速特性および操舵特性の違いに対してロバストな隊列走行システムを設計する。そして、ロングitudinal制御とラテラル制御それぞれにおいて提案手法によるロバスト性の向上効果を実機実験により評価する。

2. ロングitudinal制御

隊列走行における代表的なロングitudinal制御手法には、ACC と先行車両との車間通信を利用する協調型 ACC(Cooperative Adaptive Cruise Control, CACC)があり、CACC は ACC と比べてより高密度で車群安定な隊列走行が実現できる(大前, 2015)。しかし、システム構築の容易さと低コスト化が重要視される WPV の隊列走行では車間通信は必ずしも必要ではない(高橋他, 2012)。そこで本研究では、ACC に基づく車間距離制御則を用いて追従車両の速度制御を行う。

2.1 ACC に基づく車間距離制御則

一般に ACC は、目標車間距離と実際の車間距離の偏差(以下、車間距離偏差)と先行車両と追従車両の速度差(以下、相対速度)のフィードバックにより追従車両の加減速指令値を決定する(大前, 2015)。ACC の模式図を図 1 に示す。 v_{i-1} は先行車両の速度、 v_i は追従車両の速度、 d_i は車間距離を表す。ここで、各車両を先頭から順に 0, 1, 2, ...と番号付けし、添え字 i ($i \geq 1$) を追従車両の番号、 $(i-1)$ を先行車両の番号とする。車間距離は追従車両から先行車両までの走行軌道に沿った距離と定義する。図 2 に示すように、測域センサでは追従車両から先行車両までの直線距離しか計測できないが、先行車両の相対位置座標の履歴(以下、ウェイポイント)の各点間の距離の総和をとることで旋回時も近似的に車間距離を算出できる(Sugano et al., 2014b, 2014c)。

車間距離制御は、一定の車間距離を維持する(Constant Inter-vehicle Distance, CID)制御と一定の車間時間を維持する(Constant Time-Headway, CTH)制御に大別される(高橋他, 2012)。ACC による CID 制御では車群安定な車間

距離制御を実現できないことが知られている (Naus et al., 2010) . そのため, CTH 制御を採用して目標車間距離 d_{ri} を式 (1) で定義する. T は目標車間時間, d_0 は停止時車間距離を表す.

$$d_{ri} = Tv_i + d_0 \quad (1)$$

見通しが悪い屋内環境では曲がり角で先行車両が検出不可となりやすいため, 屋外の一般的な隊列走行と比べて非常に短い車間時間 1.0 s での走行を目標とする. しかし, ACC では車間時間が短いほど車群安定性を満たすゲインの範囲は狭くなり (大前, 2015), 所望の車間時間を達成することが困難となる. そこで, 車間距離に対するサーボシステムを組み, 相対速度 $\dot{d}_i = v_{i-1} - v_i$ と車間距離偏差 $\varepsilon_i = d_i - d_{ri}$ に加えて車間距離偏差の積分値 z_i をフィードバック信号として用いる. 加減速指令値 u_{vi} を式 (2) に示す.

$$u_{vi} = K_1 \dot{d}_i + K_2 \varepsilon_i + K_3 z_i \quad (2)$$

$K_j (j=1,2,3)$ はフィードバックゲインであり, 最適サーボにより設計される. これにより, モデルと実対象のモデル誤差のない理想状態において, 目標車間時間 T が短くとも車群安定性を満たすことができる (菅野他, 2014a). 加減速指令値 u_{vi} から追従車両の速度 v_i までの伝達関数を $G_i(s)$ とすると, ロンジチュージナル制御器のブロック線図は図 3 となる.

2.2 車群安定性に基づくフィードバックゲインの設計

車群安定性は隊列における車間距離の伝播特性を表し, 隊列後方に向かって車間距離の振動が増幅伝播する状態を車群不安定という. 車群不安定な隊列走行は無駄な加減速を生じるだけでなく, 車間距離が短いと追従車両が前後車両と衝突する恐れもある. そのため, 単に先行車両との車間距離を維持するだけでなく, 車群安定性を満たすように ACC のフィードバックゲインを設定しなければならない (大前, 2015). 車群安定性の十分条件は式 (3) で定義される (Naus et al., 2010). $SS_i(s)$ は車群伝達関数と呼ばれ, 前方の車間距離 d_{i-1} から後方の車間距離 d_i への伝達関数で表される.

$$|SS_i(j\omega)| \leq 1, \forall \omega \quad (3)$$

追従車両の加減速特性 $G_i(s)$ は, 時定数 τ_i の一次遅れ系として式 (4) で与えられるものとする.

$$G_i(s) = \frac{v_i}{u_{vi}} = \frac{1}{\tau_i s + 1} \quad (4)$$

ここで, 先行車両と追従車両の時定数が同じである ($\tau = \tau_i = \tau_{i-1}$) と仮定し, 動特性に無関係な d_0 を無視する. 式

Fig. 1 Adaptive Cruise Control

Fig. 2 Approximation of inter-vehicle distance by using way-points

Fig. 3 Block diagram of longitudinal control

(1), (2), (4) を使って u_{vi} と u_{vi-1} の差分から d_i/d_{i-1} を求めると, 車群伝達関数は式 (5) となる.

$$SS_i(s) = \frac{d_i}{d_{i-1}} = \frac{K_1 s^2 + K_2 s + K_3}{\tau s^3 + (1 + K_1 + T K_2) s^2 + (K_2 + T K_3) s + K_3} \quad (5)$$

ここで, 車群伝達関数の極が虚数成分を有する場合, 車間距離の振動に伴い追従車両が加減速をくり返し, 搭乗者に不快感を与える. そこで, 車群安定性を満たすだけでなく, 根軌跡により車群伝達関数の極が実軸に位置するようにフィードバックゲイン K_1, K_2, K_3 を設計する (菅野他, 2014a). これにより, 車間距離の振動のない安定な制御を実現できる.

2.3 前後車両の時定数差の影響

WPV の利用者である高齢者や身体障害者は, 運転スキルの個人差が大きい. そのため, 時定数をはじめとした車両のパラメータが利用者に応じて調整されることが考えられる. 先行車両と追従車両の時定数が異なる場合, 式 (6) に示すように時定数差 ($\tau_i - \tau_{i-1}$) による外乱項が生じる.

$$d_i = \frac{K_1 s^2 + K_2 s + K_3}{\tau_{i-1} s^3 + (1 + K_1 + T K_2) s^2 + (K_2 + T K_3) s + K_3} d_{i-1} + \frac{(\tau_i - \tau_{i-1}) s^2}{\tau_{i-1} s^3 + (1 + K_1 + T K_2) s^2 + (K_2 + T K_3) s + K_3} v_i \quad (6)$$

時定数差による外乱項の影響により, 前節で述べた設計法によるロンジチュージナル制御器では車群安定性が保証されない. 特に, 先行車両の時定数に対して追従車両の時定数が大きい ($\tau_i > \tau_{i-1}$) 場合は, 外乱項が車間距離を増幅する方向に影響し, 車間距離の振動が顕著となる (Sugano et al., 2014c).

3. ラ テ ラ ル 制 御

自動車の隊列走行におけるラテラル制御では, 白線の中央を走行するように追従車両の操舵を制御する車線維持制御が主に用いられる. 一方, 屋内環境で利用される WPV の隊列走行では歩行者などの障害物を避けながら走行するケースが多い. この場合, 誘導車両をターゲットとして追従する制御手法が有効であることから, WPV の隊列走行のラテラル制御として実績のある地点追従法を採用している (高橋他, 2012).

3.1 地点追従法

地点追従法は自動運転車両の操舵アルゴリズムの一つであり, 目標点位置とその点における目標方位が与えられれば, その時点での車両のとるべき操舵角が算出される (津川, 村田, 1989). 地点追従法による隊列走行の模式図を図 4 に示す. 目標点位置を先行車両の位置 (x_p, y_p) とし, 目標方位を先行車両の移動方向 θ_p とすると, 操舵指令値 $u_{\omega i}$ は式 (7) となる.

Fig. 4 Target point following algorithm

Fig. 5 Modified target point following algorithm using way-points

$$u_{\omega i} = \frac{v_i(3y_p - x_p \tan \theta_p)l_d}{x_p^2} \quad (7)$$

ただし、WPV は左右輪の速度差によって旋回する差動操舵型の車両であり、ニュートラルステア特性を有する。

ここで、車間距離が十分に短い場合、先行車両の移動方向の代わりに追従車両から見た先行車両の方位を目標方位としても先行車両に対する追従制御が可能であることが知られている(加藤, 津川, 1999)(高橋他, 2012)。これにより、測域センサで計測できる先行車両までの距離 d_m と先行車両の方位 θ_m 、及びエンコーダで計測可能な自車速度 v_i より、追従車両の操舵指令値 $u_{\omega i}$ は式 (8) で近似できる(菅野他, 2014a)。

$$u_{\omega i} = \frac{2v_i l_d \tan \theta_m}{d_m \cos \theta_m} \quad (8)$$

地点追従法による隊列走行では先行車両と追従車両の走行軌道は必ずしも一致せず、旋回中は追従車両が先行車両の走行軌道に対して内側に切り込んで走行する。先行車両と追従車両の走行軌道の横偏差(以下、追従誤差)は旋回半径が小さいほど大きくなる傾向があり、通路の幅が狭い曲がり角では追従車両が壁に衝突する危険性が高い。

3.2 ウェイポイントを利用した追従アルゴリズム

筆者らは、先行車両の走行軌道に対する追従精度を向上させるため、ウェイポイントを利用した地点追従法を提案している(Sugano et al., 2014b, 2014c, 2015)。その模式図を図5に示す。ウェイポイントは先行車両の相対位置座標の履歴であり、オドメトリに基づく座標変換により先行車両の走行軌道を点列で得ることができる。ウェイポイントの中から適切な一点を新たな目標点として選ぶことにより、先行車両の走行軌道に沿った追従制御が可能となる。

ここで、追従車両から目標点とするウェイポイントまでの距離(以下、目標点距離)による目標点の選定について説明する。本手法では、追従車両から目標点距離 L_{twp} だけ前方に位置するウェイポイント为目标点とする。このとき、目標点距離が短いほど追従精度の向上効果が期待できる一方、同時に操舵指令値が振動的になることが先行研究により明らかとなっている(Sugano et al., 2015)。この理由としては、追従車両から近いウェイポイントほどオドメトリによる蓄積誤差が大きく、センサノイズに対する感度が高くなることなどが挙げられる。例えば L_{twp} を 0.6 m 以下に設定すると、操舵が不安定となり追従車両が蛇行する結果となる。このような操舵安定性とのトレードオフにより、目標点距離を一定値とした場合は追従精度の向上効果に限界がある。

そこで本研究では、旋回半径が小さいほど追従誤差が大きくなることから、走行軌道の曲率情報に基づき目標点距離をリアルタイムに変更する。先行車両の走行軌道を自車位置、先行車両の位置、中間に位置するウェイポイントの三点から円弧近似したときの曲率半径 R を算出し、式 (9) に従って目標点距離を逐次決定する。

$$L_{twp} = \begin{cases} L_{min} & (R \leq R_{min}) \\ \frac{d_i - L_{min}}{R_{max} - R_{min}} R + \frac{R_{max} L_{min} - R_{min} d_i}{R_{max} - R_{min}} & (R_{min} < R < R_{max}) \\ d_i & (R \geq R_{max}) \end{cases} \quad (9)$$

式 (9) より、目標点距離 L_{twp} は最小値 L_{min} から車間距離 d_i まで変化する。直進時に無限大となる曲率半径 R には閾値を設け、最大曲率半径 R_{max} と最小曲率半径 R_{min} は試行錯誤的に決定する。また、 L_{min} は追従車両が蛇行しないように設定する。本手法は追従精度の大幅な向上が期待できるが、適切なパラメータの値が追従車両の操舵特性に依存するという課題がある。

4. モデル誤差補償によるロバストな隊列走行システム

WPV の隊列走行では路面状態や利用者の体重の違いが制御に大きく影響することが知られている (高橋他, 2012)。また、利用者の運転スキルに合わせて車両のパラメータが調整される場合も多く、標準体重や初期パラメータを想定したモデルと実対象の入出力特性に大きなギャップが生じることから所望の応答を得ることが難しい。この問題に対して、モデル誤差補償によるロバストな隊列走行システムを設計する。

4.1 モデル誤差抑制補償器

モデルと実対象とのモデル誤差の抑制に特化した補償器として MEC がある (Okajima et al., 2013)(岡島, 松永, 2015)。MEC は多入出力システムや非線形システムに適用可能であり (梅井他, 2014)、WPV のロバスト制御手法として実績がある (丸野他, 2013)(宮本他, 2016)。

MEC のブロック線図を図 6 に示す。 u_v は加減速入力、 u_ω は操舵入力、 v は車体速度、 ω は車体ヨーレートであり、添え字 m は規範モデルの状態量であることを表す。 $P(s)$ は実対象を表し、入力 $\mathbf{u} = [u_v \ u_\omega]^T$ に対して $\mathbf{y} = [v \ \omega]^T$ が出力される二入力二出力系である。 $P_M(s)$ は規範モデルを表し、入力 $\mathbf{u}$ に対する理想的な応答 $\mathbf{y}_m = [v_m \ \omega_m]^T$ が出力される。 $P(s)$ が線形時不変システムの場合、式 (10) が成り立つ。

$$\frac{\mathbf{y} - \mathbf{y}_m}{\mathbf{u}} = \frac{1}{1 + P(s)C(s)} (P(s) - P_M(s)) \quad (10)$$

式 (10) において、 $P(s) - P_M(s)$ はモデル誤差を表す。補償器 $C(s)$ が十分にハイゲインであれば、 $1/1 + P(s)C(s)$ の

Fig. 6 Block diagram of MEC

項が小さくなり、モデル誤差が出力差 $y - y_m$ に与える影響を抑制できる。すなわち、 u から y までの入出力特性を規範モデルの入出力特性に近付けることができる。

補償器 $C(s)$ は MEC の系をロバスト安定化するよう μ 設計法により設計されることが望ましい (Okajima et al., 2013)。しかし、 μ 設計法では $C(s)$ の次数が大きくなり実機への適用が困難になることから、本研究では PD 制御器を使用する。補償器 $C(s)$ の比例ゲイン C_P と微分ゲイン C_D を試行錯誤的に決定する。

4.2 規範モデルの設計

ロンジチュージナル制御およびラテラル制御では、式 (11) に示す線形モデルを規範モデルとする。 $P_{Mv}(s)$ は加減速モデル、 $P_{M\omega}(s)$ は操舵モデルを表す。ロンジチュージナル制御とラテラル制御をそれぞれ独立に設計するため非対角項は 0 とする。 τ_m は規範モデルの速度応答の時定数、 l_d , I_b , c_f はそれぞれ規範モデルのトレッド、慣性モーメント、粘性摩擦係数を表す。

$$P_M(s) = \begin{bmatrix} P_{Mv}(s) & 0 \\ 0 & P_{M\omega}(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{\tau_m s + 1} & 0 \\ 0 & \frac{l_d/2}{I_b s + c_f} \end{bmatrix} \quad (11)$$

ここで、 τ_m はロンジチュージナル制御における重要な設計変数となる。2.3 節で述べたように、先行車両と追従車両の時定数差が存在する場合、隊列走行が車群不安定となる恐れがある。そこで、前後車両の時定数差の影響を抑制するため、追従車両の規範モデルの時定数 τ_m を誘導車両の時定数 τ_0 に設定する。実際の運用においては、誘導車両を含め全車両の規範モデルの時定数を一定とすることで容易にパラメータ変動にロバストな隊列走行を実現できる。そのとき、応答は遅くなるがドライバが搭乗した最大車重時を規範モデルとすることで振動しない安全な隊列が構成できる (菅野他, 2014a)。また、地点追従法において式 (8) を導出するために用いられる車両モデルと同じく、 $P_{M\omega}(s)$ は文献 (Sugano et al., 2015) の操舵モデルにおいて駆動輪軸から車両重心位置までの距離を 0 としたニュートラルステア特性の操舵モデルとする。補償器 $C(s)$ により規範モデル $P_M(s)$ と実対象 $P(s)$ のモデル誤差による出力差を十分に抑制できれば、 $P_M(s)$ に対して設計した制御器のロバスト性の向上が期待される。

5. WPV を用いた隊列走行実験

MEC によるロバストな隊列走行システムの有効性を実機実験により検証する。本実験では、WPV の走行特性が利用者に合わせて調整される状況を想定し、追従車両の加減速特性および操舵特性の違いに対する隊列走行のロバスト性を評価する。なお、比較対象として MEC を使用しない隊列走行システムを用いる。

5.1 実験システム

実験に使用する隊列走行システムを図 7 に示す。図 7(a) の実験車両として使用する室内用パーソナルビークル STAVi (谷他, 2013) は、前輪がフリーキャスト、後輪が駆動輪となっており、左右輪の速度差によって旋回する差動操舵型の WPV である。車体サイズは $(W, L, H) = (685 \text{ mm}, 1140 \text{ mm}, 1090 \text{ mm})$ 、車両重量は 82 kg、トレッドは 0.62 m である。追従車両は車両前方の測域センサで先行車両の後部に取り付けられた高反射強度のポールを検出し、そのポールの位置を先行車両の位置とする。図 7(b) は追従車両の制御システムの構成を示す。先行車両までの距離 d_m と先行車両の方位角 θ_m は LRF (UTM-30LX) により計測される。追従車両の速度 v は左右輪のエンコーダ (E6B2-CWZ1X) から MCU (ATmega2560) を介して算出される。これらのセンサ情報から、MCU (AT91SAM3X8E) により制御指令値 u_v , u_ω が R-net モジュール (PG Drives Technology) へ入力される。STAVi (SUV-03) の動輪は R-net モジュールと専用アンプにより駆動され、同モジュールのパラメータを変更することで走行特性を容易に変更することができる (Fujimoto et al., 2013)。また、本実験に使用する共通のパラメータを表 1 に示す。制御周期は約 50 ms であり、ウェイポイントは毎周期生成される。停止時車間距離 d_0 は実車間距離 1 m に駆動輪軸から測域センサ

Table 1 Experimental parameters

Name	Symbol	Value
Sampling time	Δt	0.05 s
Desired time-headway	T	1.0 s
Standstill distance	d_0	1.7 m
Gain of ACC	$[K_1 \ K_2 \ K_3]$	[79.54 1030.5 1095.4]
Gain of MEC	$[C_P \ C_D]$	[800 50]
Limit of curvature radius	$[R_{min} \ R_{max}]$	[1.0 m 5.0 m]
Minimum target point distance	L_{min}	0.5 m

間の距離 0.7 m を加えて 1.7 m に設定する．なお， C_P ， C_D を大きくするとむだ時間により不安定になるため，試行錯誤的に調整している．

5.2 ロンジチュージナル制御の評価

本節では，前後車両の時定数差に対するロンジチュージナル制御のロバスト性を評価する．図 8 に実験の模式図を示す．車両台数は車群安定性の評価に最低限必要な三台とし，各車両の時定数は $\tau_0=1.0$ s， $\tau_1=2.0$ s， $\tau_2=3.0$ s に設定する．誘導車両は熟練の操縦者が運転し，時刻 $t=0$ s から時速 1 km まで加速して $t=20$ s の時点で時速 2 km まで加速する．その後， $t=40$ s の時点で時速 2 km から時速 1 km に減速する．追従車両には人は乗らず，隊列走行制御により先行車両を追従するように自動走行する．

時刻 $t=20$ s から $t=40$ s 間の車間距離 d_1 ， d_2 の変化を図 9 に示す．図 9(a) では加減速後に後方の車間距離 d_2 が振動しており，前方の車間距離 d_1 の変化が増幅伝播していることが分かる．これより，MEC を使用しない場合は前後車両の時定数差により車群不安定な隊列走行となる．一方，図 9(b) では d_2 の振動が抑制されており， d_1 とほぼ同じ変化をしている．これは，規範モデルの時定数 τ_m を誘導車両の時定数 τ_0 と同じ 1.0 s とすることにより，前後車両の時定数差の影響を抑制できているためと考えられる．以上の結果から，MEC によるロンジチュージナル

(a) Experimental vehicles STAVi

(b) Electronic controller structure of following vehicle

Fig. 7 Platoon driving system using "STAVi"

Fig. 8 Experiment of longitudinal control

ル制御のロバスト性の向上効果が確認された。

5.3 ラテラル制御の評価

本節では、ラテラル制御の追従精度とロバスト性を評価する。まず、ウェイポイントを利用した追従アルゴリズムによる追従精度の改善効果を検証する。本実験では壁との衝突を避けるため車両台数は二台とし、誘導車両は時速 1 km の一定速度で屋内の直角カーブを旋回半径 1 m で通過する。地点追従法とウェイポイントを利用した地点追従法をそれぞれラテラル制御に使用した隊列走行時の先行車両と追従車両の走行軌道を図 10 に示す。先行車両は図中 $(X, Y) = (1.7, 0.0)$ の地点から矢印の方向に向かって走行する。最大追従誤差を比較すると、図 10(a) は 0.52 m、図 10(b) は 0.07 m である。

また、旋回区間における曲率半径 R と目標点距離 L_{twp} の時間変化を図 11 に示す。先行車両は時刻 $t=26$ s 付近で旋回を開始し、 $t=35$ s 付近で追従車両が旋回し終えている。ここで、先行研究 (Sugano et al., 2015) において目標点距離が一定値の場合、同じ走行経路において追従車両が蛇行しない最小の目標点距離は 0.8 m であり、その時

Fig. 9 Experimental results of inter-vehicle distance during acceleration and deceleration. The preceding vehicle accelerates from 1 km/h to 2 km/h at 20 s, and decelerates from 2 km/h to 1 km/h at 40 s. The inter-vehicle distance oscillation arises after acceleration or deceleration due to the time constant difference between the preceding vehicle and the following one in Fig.9(a), but it is suppressed by MEC in Fig.9(b).

Fig. 10 Improvement of tracking precision by using way-points. The preceding vehicle passes through the corner at the constant velocity 1 km/h. The maximum tracking error of Fig.10(a) is 0.52 m, and that of Fig.10(b) is 0.07 m.

Fig. 11 Adjustment of target point distance according to curvature radius. The preceding vehicle and the following vehicle turn left from 26 s to 35 s. The blue color represents the curvature radius calculated by using way-point. The red color represents the target point distance decided according to eq.(9).

(a) Traditional system without MEC

(b) Proposed system with MEC

Fig. 12 Experimental results of vehicle trajectory during turning at corridor corner. The preceding vehicle passes through the corner at the constant velocity 1 km/h. The trajectories of following vehicle are changed by the difference of each steering characteristic in Fig.12(a), but the variation is suppressed by MEC in Fig.12(b).

の最大追従誤差は 0.18 m であった．それに対して，式 (9) に従い曲率半径に応じて目標点距離をリアルタイムに変更した場合は，図 11 より操舵安定性を維持しつつ旋回区間で $L_{twp}=0.8$ m 一定時より短い目標点距離となっていることが分かる．その結果，ウェイポイント未使用時を基準とした追従誤差の低減率は，目標点距離を一定値とした先行研究では 65 % であったが，目標点距離を曲率半径に応じて変更する本手法では 87 % となり，追従精度を大幅に改善できている．なお，本実験では一定速度での操舵を仮定して目標点距離で評価している．

次に，追従車両の操舵特性の違いに対するラテラル制御のロバスト性を評価する．利用者の運転スキルに応じて追従車両の操舵特性が調整されることを想定し，図 10(b) の実験時を基準として試行ごとに操舵ゲインを $\pm 10\%$ ， $\pm 20\%$ と変更した場合の車両の走行軌道を図 12 に示す．なお，予備実験により $\pm 20\%$ の操舵ゲイン変動でも安定となることを実験的に検証している．

図 12(a) では操舵特性の違いにより追従車両の走行軌道にばらつきが生じ，追従精度が低下する場合があることが分かる．一方，図 12(b) では追従車両が走行軌道のばらつきが抑制されており，操舵特性の違いによらず高い追

従精度を実現できている．以上の結果から，MEC によるラテラル制御のロバスト性の向上効果が確認された．なお，安全のため時速 1 km での走行例を示したが，この差異は速度が上がるとより顕著になると考えられる．

6. 結 言

本論文では，追従車両の加減速特性および操舵特性の違いに対してロバストな隊列走行システムを提案した．まず，ACC をベースとして短い車間時間で安定に車間距離を維持するロングチュージナル制御について述べた．次に，先行車両の走行軌道に精度良く追従するためのラテラル制御として，ウェイポイントを利用した地点追従法について述べた．また，これらの制御系を走行特性の異なる WPV に幅広く適用するため，MEC の構築と規範モデルの設計を行った．最後に，複数台の WPV を用いた隊列走行実験を行い，ロングチュージナル制御とラテラル制御それぞれにおいて MEC によるロバスト性の向上効果を示した．

走行実験では，一定速度での操舵を仮定して目標点距離で評価した．しかし，適切な目標点距離は目標点までの到達時間や地点追従法のゲインなど車両速度によって変化する要素に応じて決まると考えられる．速度可変時の制御に関しては，今後の課題としたい．

文 献

- Fujimoto, S., Hu, Z., Matsunaga, N., Aynaud, C., Chapuis, R. and Wang, H., Driving intention assistance for front-wheel-drive personal electric vehicle, Proceedings of the 2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems Workshop on Planning, Perception and Navigation for Intelligent Vehicles (2013), pp.216–221.
- 深尾隆則，杉町敏之，自動運転のための制御アルゴリズム，電気学会誌，Vol.135，No.7 (2015)，pp.429–432.
- 加藤晋，津川定之，ビジョンを用いた群走行制御，日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会，1P1-40-049(1999)，pp.1–2
- 丸野裕太郎，Zengin, A., T., 岡島寛，松永信智，中村憲仁，モデル誤差補償による福祉用前輪駆動型パーソナルビークル STAVi の操縦特性の改善，日本機械学会論文集 C 編，Vol.79, No.808 (2013), pp.4721–4733.
- 宮本洋孝，田中友樹，岡島寛，松永信智，PID 制御を用いたモデル誤差抑制補償器と拡張カルマンフィルタによるスキッドステア型車両の操縦支援制御，電気学会論文誌 C(電子・情報・システム部門誌)，Vol.136，No.5 (2016)，pp.1–8.
- 永井正夫，山中幸子，平野豊，後輪操舵と制動力によるヨーモメント制御の統合制御，日本機械学会論文集 C 編，Vol.64，No.622 (1998)，pp. 266–273.
- Naus, G.J.L., Vugts, R.P.A., Ploeg, J., van de Molengraft, M.J.G. and Steinbuch, M., String-stable CACC design and experimental validation: a frequency-domain approach, IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol.59, No.9 (2010), pp.4268–4279.
- Okajima, H., Umei, H., Matsunaga, N. and Asai, T., A design method of compensator to minimize model error, SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration, Vol.6, No.4 (2013), pp.267–275.
- 岡島寛，松永信智，前輪駆動型電動車椅子に対する規範モデルに基づいた操縦性能改善，設計工学，Vol.50，No.4 (2015)，pp.163–168.
- 大前 学，藤岡 健彦，三宅 浩四郎，プラトーンを一力学系として扱った縦方向制御に関する研究，日本機械学会論文集 C 編，Vol.65，No.640(1999)，pp.126–133.
- 大前学，ACC(車間距離制御装置)とCACC(通信利用協調型車間距離制御装置)のアルゴリズム，電気学会誌，Vol.135，No.7 (2015)，pp.433–436.
- 菅野達也，壇裕介，岡島 寛，松永信智，モデル誤差補償型制御による狭い屋内での福祉車両の隊列走行システムの設計，日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会，2A1-A08(2014a)，pp.1–4.
- Sugano, T., Dan, Y., Okajima, H., Matsunaga, N. and Hu, Z., Indoor platoon driving of electric wheelchair with model error compensator along wheel track of preceding vehicle, Proceedings of the 5th International Symposium on Advanced Control of Industrial Processes (2014b), pp.219–224.

- Sugano, T., Dan, Y., Okajima, H., Matsunaga, N. and Hu, Z., Platoon driving experiment of electric wheelchair in narrow space by using model error compensator, Proceedings of the 2014 International Conference on Advanced Mechatronic Systems (2014c), pp.324–329.
- Sugano, T., Okajima, H. and Matsunaga, N., Robust and precise platoon driving control of welfare vehicles along wheel track by using model error compensator, Proceedings of the 41st Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (2015), pp.256–261.
- 高橋佑介, 伊丹誠, 加藤晋, 追従型車いすの追従安定性を旨とした速度制御, 自動車技術会論文集, Vol.43, No.2 (2012), pp.195–201.
- 谷亮輔, 開豊, 山下徹, 下田貞幸, 教育現場におけるパーソナルモビリティSTAViの有効性検証 八代キャンパスでの走行実験と機能改良検討, 熊本高等専門学校研究紀要, Vol.5 (2013), pp.39–46.
- 津川定之, 村田智, 自律車両の操舵アルゴリズム, システム制御情報学会論文誌, Vol.2, No.10 (1989), pp.360–362.
- 梅井啓紀, 岡島寛, 松永信智, 浅井徹, モデル誤差抑制補償器の多入出力システムに対する設計, システム制御情報学会論文誌, Vol.27, No.2 (2014), pp.67–72.

References

- Fujimoto, S., Hu, Z., Matsunaga, N., Aynaud, C., Chapuis, R. and Wang, H., Driving intention assistance for front-wheel-drive personal electric vehicle, Proceedings of the 2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems 5th Workshop on Planning, Perception and Navigation for Intelligent Vehicles (2013), pp.216–221.
- Fukao, T. and Sugimachi, T., Control algorithm for automated driving, The Journal of The Institute of Electrical Engineers of Japan, Vol.135, No.7 (2015), pp.429–432 (in Japanese).
- Kato, S. and Tsugawa, S., A vision-based platooning control, Proceedings of the 1999 JSME Conference on Robotics and Mechatronics, 1P1-40-049(1999), pp.1–2 (in Japanese).
- Maruno, Y., Zengin, A., T., Okajima, H., Matsunaga, N. and Nakamura N., Maneuverability improvement of front-drive personal welfare vehicle STAVi using a model error compensator, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C, Vol.79, No.808 (2013), pp.4721–4733 (in Japanese).
- Miyamoto, H., Tanaka, T., Okajima, H. and Matsunaga, N., Driving assistance control of skid steer vehicle using model error compensator with PID control and extended Kalman filter, Vol.136, No.5 (2016), pp.1–8 (in Japanese).
- Nagai, M., Yamanaka, S. and Hirano Y., Integrated control of active rear wheel steering and yaw moment control using breaking forces, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C, Vol.64, No.622 (1998), pp. 266–273 (in Japanese).
- Naus, G.J.L., Vugts, R.P.A., Ploeg, J., van de Molengraft, M.J.G. and Steinbuch, M., String-stable CACC design and experimental validation: a frequency-domain approach, IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol.59, No.9 (2010), pp.4268–4279.
- Okajima, H., Umei, H., Matsunaga, N. and Asai, T., A design method of compensator to minimize model error, SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration, Vol.6, No.4 (2013), pp.267–275.
- Okajima, H. and Matsunaga, N., Design of maneuverability for electric wheel-chair based on desired dynamic model, Design Engineering, Vol.50, No.4 (2015), pp.163–168 (in Japanese).
- Omae M., Fujioka T. and Miyake K., Longitudinal control for platoon treated as one dynamic system, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C, Vol.65, No.640 (1999), pp.126–133 (in Japanese).
- Omae, M., Control algorithm for ACC (Adaptive Cruise Control) and CACC (Cooperative Adaptive Cruise Control), The Journal of The Institute of Electrical Engineers of Japan, Vol.135, No.7 (2015), pp.433–436 (in Japanese).
- Sugano, T., Dan, Y., Okajima and Matsunaga, N., Design of indoor platoon driving system with welfare vehicle by modeling error compensator, Proceedings of the 2014 JSME Conference on Robotics and Mechatronics, 2A1-A08(2014a), pp.1–4 (in Japanese).
- Sugano, T., Dan, Y., Okajima, H., Matsunaga, N. and Hu, Z., Indoor platoon driving of electric wheelchair with model error compensator along wheel track of preceding vehicle, Proceedings of the 5th International Symposium on Advanced Control of Industrial Processes (2014b), pp.219–224.

- Sugano, T., Dan, Y., Okajima, H., Matsunaga, N. and Hu, Z., Platoon driving experiment of electric wheelchair in narrow space by using model error compensator, Proceedings of the 2014 International Conference on Advanced Mechatronic Systems (2014c), pp.324–329.
- Sugano, T., Okajima, H. and Matsunaga, N., Robust and precise platoon driving control of welfare vehicles along wheel track by using model error compensator, Proceedings of the 41st Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (2015), pp.256–261.
- Takahashi, Y., Itami, M. and Kato, S., Speed control for following stability of followed type wheelchair, Journal of Society of Automotive Engineers of Japan, Vol.43, No.2 (2012), pp.195–201 (in Japanese).
- Tani, R., Hiraki, Y., Yamashita, T. and Shimoda, S., Verifying the effectiveness of personal mobility vehicle "STAVi" in schools – running test and examination of functional improvement at Yatsushiro campus –, Research Reports of Kumamoto-NCT., Vol.5 (2013) pp.39–46 (in Japanese).
- Tsugawa, S. and Murata, S., Steering control algorithm for autonomous vehicle, Transaction of the Institute of System, Control and Information Engineers, Vol.2, No.10 (1989), pp.360–362 (in Japanese).
- Umei, H., Okajima, H., Matsunaga, N. and Asai, T., A design method of model error compensator for MIMO systems, Transaction of the Institute of System, Control and Information Engineers, Vol.27, No.2 (2014), pp.67–72 (in Japanese).