B 307 公共交通システムとしてのパーソナルモビリティ・ビークル活用

Use of Personal Mobility Vehicle as Transportation System

○李 溶根 (東京大), 正 中野 公彦 (東京大), 大堀 真敬 (東京大)

Yonggeun YI, University of Tokyo, 4-6-1 Komaba, Meguro-ku, Tokyo 153-8505

Kimihiro NAKANO, University of Tokyo, 4-6-1 Komaba, Meguro-ku, Tokyo 153-8505

Masanori OHORI, University of Tokyo, 4-6-1 Komaba, Meguro-ku, Tokyo 153-8505

Abstract: Recently, Personal Mobility Vehicle (PMV) is produced as a new transportation vehicle. In Japan, however, it is not permitted to ride PMV on public road. The authors propose the new transportation system using PMV as automatic driving vehicle, adapting a path following control and a spacing control for platoon. This paper introduces the PMV's kinematic model which is equal to non-holonomic mobile robot and examines the performance through the numerical simulation. By new way to use PMV, the author suggest to make a new transportation system which can be used in short distance

Key Words: Transportation, Vehicle Control, Moving Robot, Platoon Driving, Automatic Driving, Path following control, Tracking control

1. 緒言

近年, 新しい個人用乗り物 (パーソナルモビリティ・ビークル, PMV と略す) に関する研究や製品が発表されている。また, PMV の安全性に関する研究や長時間乗る時の疲労度, 歩行者と一緒に歩道を走行した時の違和感を測定する研究^①など, PMV に人々の注目が集まっている。PMV の特徴は人と環境に優しい動力で, 快適かつ効率的な近・中距離移動の乗り物である。しかし, 国内の一般公道では, 走行することは認められていない。

本論文では, PMV の新たな使い道の一つとして, 動く歩道やエスカレータのような人の輸送システムを構築することを提案する。センサで軌道を読み取り, それに沿って走るように自動運転を行なう PMV を想定する。

提案する PMV 運送システムとして使うと生じる利点はいくつかある。まず, 設置が簡単であるため, 導入に必要なコストや時間を削減でき, 設置後の軌道の変更も容易である。さらに, 郵送する人数分だけの PMV が動くので, 運動時の省エネルギー化も期待できる。

道追従制御や車間距離制御軌が可能な PMV を考え, シミュレーションや数値計算を通じて, 提案する。本論文ではシステムの実現可能性の評価を行い, 今後, 実際プロトタイプを制作する。また, PMV 乗り降り, 乗車中の違和感も評価する予定である。

2. パーソナルモビリティ・ビークルの運動モデル

PMV モデルは 2 つの独立な駆動輪を持つモビールロボットモデルにした⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾。

Fig. 1 PMV model with two actuated wheels

図 1 は典型的な非ホロノミック系モデルである。同じ車軸の上に 2 つの車輪があり, PMV の動きは独立駆動の 2 つのモータで行われる。図 1 において, $2b$ は PMV の全幅とし, r は車輪の半径とする。0- xy 慣性座標系で, P_0-XY は PMV に固定された座標系である。重心は P_c とし, X 軸の上であり, P_0 と d だけ離れている。

この時, PMV の位置と状態は 5 つの要素で表される

$$q = [x \ y \ \phi \ \theta_r \ \theta_l] \quad (1)$$

ここで, (x, y) を P_0 の座標, ϕ を PMV の進行方向となす角, θ_r, θ_l を右左の車輪の回転角度とする。また, m_c と m_w はそれぞれ PMV ボディとモータを含む車輪の質量と定義し, I_c はボディの重心 P_c を垂直に通過する軸周りの慣性モーメント, I_w はモータを含む車輪の車軸周りの慣性モーメント, I_m は直径軸周りの慣性モーメントとする。

タイヤが滑らないと仮定すると, 次の式が満たされる。

$$\dot{q} = S(q)v(t) \quad (2)$$

$$\bar{M}(q)\ddot{v} + \bar{V}(q, \dot{q})\dot{v} = \bar{B}(q) \quad (3)$$

ここで, $S(q)$ は

$$S(q) = \begin{bmatrix} \frac{r}{2} \cos \phi & \frac{r}{2} \cos \phi \\ \frac{r}{2} \sin \phi & \frac{r}{2} \sin \phi \\ \frac{r}{2b} & -\frac{r}{2b} \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

とし, $\bar{M}$, $\bar{V}$, $\bar{B}$ は以下のようになる。

$$\bar{M} = \begin{bmatrix} \frac{r^2}{4b^2}(mb^2 + I) + I_w & \frac{r^2}{4b^2}(mb^2 - I) \\ \frac{r^2}{4b^2}(mb^2 - I) & \frac{r^2}{4b^2}(mb^2 + I) + I_w \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\bar{V} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{r^2}{2b}m_c d\dot{\phi} \\ -\frac{r^2}{2b}m_c d\dot{\phi} & 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\bar{B} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

なお、 $\tau = [\tau_r \ \tau_l]^T$ 、 $v = [v_r \ v_l]^T$ であり、 τ_r 、 τ_l 、 v_r 、 v_l はそれぞれ右と左のモータトルクと車輪回転速度である。また、 $m = m_c + 2m_w$ 、 $I = m_c d^2 + 2m_w b^2 + I_c + 2I_m$ である。

3. 経路追従

上のモデルを用いて、 V を制御入力とする制御システムを考える⁽⁹⁾。その時、力学モデルは次のようになる。

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\phi} \\ \dot{\theta}_r \\ \dot{\theta}_l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{r}{2}\cos\phi & \frac{r}{2}\cos\phi \\ \frac{r}{2}\sin\phi & \frac{r}{2}\sin\phi \\ \frac{r}{2b} & -\frac{r}{2b} \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_r \\ v_l \end{bmatrix} \quad (8)$$

ここで、 θ_r 、 θ_l の因数以外に x, y, ϕ だけを考慮する。 v をPMV進行方向速度、 ω を反時計まわりの回転速度とした時、 V, ω と v_r, v_l の関係は次のようになる。

$$\begin{bmatrix} v_r \\ v_l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{r} & \frac{b}{r} \\ \frac{1}{r} & -\frac{b}{r} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V \\ \omega \end{bmatrix} \quad (9)$$

PMV 重心位置の運動は以下のようになる。

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} x \\ y \\ \phi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\phi & 0 \\ \sin\phi & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V \\ \omega \end{bmatrix} \quad (10)$$

参照車両の場合も同様に

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} x_r \\ y_r \\ \phi_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\phi_r & 0 \\ \sin\phi_r & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_r \\ \omega_r \end{bmatrix} \quad (11)$$

になる。

図2のように経路追従制御は、参照車両が実車両の走行速度に合わせて常に並走していると考え、これによって実車両は独立した制御法を導入することができる。

Fig. 2 Definition of path following error

図2のように参照車両から実車両を見たときの相対誤差を e_1, e_2, e_3 とすると

$$\begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\phi_r & \sin\phi_r & 0 \\ -\sin\phi_r & \cos\phi_r & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x - x_r \\ y - y_r \\ \phi - \phi_r \end{bmatrix} \quad (12)$$

になり、時間微分は以下のようになる。

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \end{bmatrix} = V_r \begin{bmatrix} -1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \omega_r \begin{bmatrix} e_2 \\ -e_1 \\ -1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V \cos e_3 \\ V \sin e_3 \\ \omega \end{bmatrix} \quad (13)$$

この時、参照車両が実車両と並走しているので、 $e_1 = 0$ 、 $\dot{e}_1 = 0$ を満足する必要がある、以下の条件が導かれる。

$$V_r = V \cos e_3 + e_2 \omega_r \quad (14)$$

$$\omega_r = \frac{V_r}{R} = V_r \quad (15)$$

R は参照車両のその時点での旋回半径、 ρ は曲率で、左回りを正とする。以上より、参照車両の速度と角速度は以下のようになる。

$$V_r = \frac{V \cos e_3}{1 - e_2 \rho} \quad (16)$$

$$\omega_r = \rho \frac{V \cos e_3}{1 - e_2 \rho} \quad (17)$$

リアプノフ関数の候補を以下のようにとる。

$$V_1 = \frac{1}{2} e_2^2 + \frac{1 - \cos e_3}{K_2} \quad (18)$$

この時間微分は次のようになる。

$$\dot{V}_1 = e_2 \dot{e}_2 + \dot{e}_3 \frac{\sin e_3}{K_2} \quad (19)$$

$$= e_2 V \sin e_3 + \frac{\sin e_3}{K_2} (\omega - \omega_r)$$

そこで、制御側を以下のように選ぶ。

$$\omega_c = -VK_2 e_2 - K_3 \sin e_3 + \frac{V \cos e_3}{1 - e_2 \rho} \quad (20)$$

するとリアプノフ関数の時間微分は

$$\dot{V}_1 = -\frac{K_3 \sin^2 e_3}{K_2} \leq 0 \quad (21)$$

になる。これより、Barbalt の補題より、 $e_3 \rightarrow 0$ を示すことができる。また、

$$\dot{e}_3 = -VK_2 e_2 - K_3 \sin e_3 \quad (22)$$

と、 $e_3 \rightarrow 0$ より、 $-VK_2 e_2 \rightarrow 0$ となるため、 $V \neq 0$ であれば、 $e_2 \rightarrow 0$ となる。以上のように、安定性と収束性を示される。

4. 車間距離制御

車間距離制御法について述べる⁽⁶⁾。図3のように x_i , v_i , u_i はそれぞれ、前から i 台目の PMV の位置、速度、入力とする。

Fig. 3 Platoon

$$x_i = v_i \quad (23)$$

$$\dot{x}_i = u_i \quad (24)$$

とおく。車間距離誤差 e_i 、速度誤差 w_i をそれぞれ以下の様に定義する。

$$e_i = x_i - x_{i+1} - L - d \quad (25)$$

$$w_i = v_i - v_{ir} \quad (26)$$

ここで、 d は目標車間距離、 L は PMV の長さ、 v_{ir} は i 台目の PMV の目標速度である。

さて、 u_i は制御入力で、以下のようにあらわされる。

$$u_i = [\dot{v}_r - c_0 w_i + k_1 e_{i-1} + c_1 (v_{i-1} - v_i)] \quad (27)$$

ここで、 c_0 , k_1 , c_1 は正の定数ゲインとする。

これは以下のようにリアプノフの安定論をもとに証明される。まず、2 台の場合を考え、リアプノフ関数候補として、以下のようにとる。

$$V = \frac{k_1(k_a + 2k_b)}{2} e_1^2 + \frac{k_a}{2} w_1^2 + \frac{k_a}{2} w_2^2 + \frac{k_b}{2} (v_1 - v_2)^2 \quad (28)$$

この時間微分は以下ようになる。

$$\begin{aligned} \dot{V} = & -c_0 k_a w_1^2 - c_0 k_a w_2^2 \\ & - (c_0 k_b + c_1 k_a + 2c_1 k_b) (v_1 - v_2)^2 \leq 0 \end{aligned} \quad (29)$$

これより、 $w_1 \rightarrow 0$, $w_2 \rightarrow 0$ 、かつ e_1 が有限になることが分かる。また、

$$\dot{w}_1 = -c_0 w_1 - k_2 e_1 - c_2 (v_1 - v_2) \quad (30)$$

となり、この式と、 $\dot{w}_1 \rightarrow 0$, $w_1 \rightarrow 0$ 、 $(v_1 - v_2) \rightarrow 0$ より、 $e_1 \rightarrow 0$ となり、制御目的を達成される。ここで示したのは 2 台の場合であるが、上記の手法を拡張することで n 台の制御も導出できる。

5. シミュレーション結果

本研究では、試作 PMV を用いた実車実験を行う予定であり、提案手法の可能性を確認するため、Mathworks 社の MATLAB/Simulink™ を使い、PMV のパラメータを代入したシミュレーションを行った。

PMV が走行する軌道は直進区間、旋回区間を入れ、閉じた円軌道を作った。また、目標速度を一定として走るだけではなく、加速および減速区間も入れたシミュレーションを行った。すなわち、高速で軌道上を走り、停留所の前で減速を行い、低速の区間で人の乗り降りの後、再び加速し高速で軌道上を走ること想定している。今回のシミュレーションでは人の乗り降りによる重量の変化までは考慮していなく、一定の重量にした。

正確な軌道は図4と表1に示されており、半時計方向で回るとする。

Fig. 4 Track used in simulation

Table. 1 Track information

Length of straight course	100 m
Radius of curve	10 m
Length of acceleration zone	20 m
Length of low speed zone	10 m
Length of deceleration zone	20 m
Acceleration	0.15 m/s ²
Deceleration	0.15 m/s ²
High speed	9 km/h
Low speed	1.8 km/h

今回のシミュレーションでは、PMV の重心は車軸の上にあるとする。つまり、式(6)で $d = 0$ m である。軌道追従に

使われる係数 K_2, K_3 はそれぞれ 0.5, 1.75 としており, 車間距離に使われる係数 c_0, k_1, c_1, L はそれぞれ 0.41/s, 0.33 /s², 0.41/s, 3m とした。

モータの出力が無限大にならないように, 車輪の角加速度を最大 5rad/s² になるように制限を設けた。また, 図 5 のように PMV1 はすでに軌道上を走行しているとし, PMV2 と PMV3 は軌道から 0.5m 離れた所から出発するとした。すなわち, 先頭車は軌道上を走っていて, 2 台目, 3 台目は軌道に入ることを想定している。

Fig. 5 Initial condition

図 6 には PMV1 から 3 の速度を示している。図 7 と図 8 は軌道追従の結果であり, 図 7 には PMV2 と軌道との距離, 図 8 は軌道との角度誤差を示した。図 9 には車間制御の結果である PMV 間の距離を示している。図 10 は PMV2 の左右モータの出力を示している。

Fig. 6 Speed of PMVs

Fig. 7 Distance error from track of PMV2

Fig. 8 Angle error with track of PMV2

Fig. 9 Spaces in the platoon

Fig. 10 Output of motors of PMV2

図 6 と図 9 から, PMV が隊列走行になるため, PMV1 は減速した後に元の速度に戻り, PMV2 と 3 は加速して目標速度になり, 車間距離も一定になることがわかる。その後, 30 秒にカーブに入る。図 7,8,9 では PMV2 の軌道との距離誤差, 角度誤差や, モータの出力が急激に増加することが見える。その理由はカーブでは参照車両が直線と違い, 旋回速度が急に変化するためである。その変化に合わせてモータの出力も大きく増加し, パルスのような形になっている。カーブ

の中では、図 8 に示すように、角度の誤差は 0 になるが、距離の誤差は 0 にはならず、0.2m を保つまま回転する。現在使っている制御方式では、カーブの中で生じた誤差をある値以下にすることができない。図 10 からは見えにくいですが、右のモータより左のモータの出力が高くなっている。45 秒でカーブから抜け、図 7,8,9 ではカーブに入る時と反対の現象がおきる。55 秒から減速区間、低速区間、加速区間になる。図 9 のように減速・加速とともに車間距離が伸縮するため、PMV の速度が変化し、速度の変化に合わせてモータの出力も変化している。距離の変化は $\pm 0.5\text{m}$ 程度で、PMV 同士の衝突は起こらないことを確認できる。110 秒から再びカーブに入り、先と同様なことが起きる。

6. 結論

数値計算の結果から、軌道追従制御および、車間制御が動作されることを確認した。モータの角加速度に制限を設けているが、軌道追従や車間制御に問題はないことが確認され、PMV を用いる新たな交通システムのが実現可能であることを示した。

参考文献

- (1) 中川智皓, ‘人と協調するパーソナルモビリティ・ビークルの運動と制御’, 東京大学院博士論文(2009)
- (2) R.Ferro, F.L.Lewis, Control of a Nonholonomic Mobile Robot: Backstepping Kinematics into Dynamics, Proceedings of the 34th IEEE Conference on Decision and Control 1995, Vol 34
- (3) Takanori Fukao, Hitoshi Nakagawa, Norihiko Adachi, Adaptive Tracking Control of a Nonholonomic Mobile Robot, IEEE Transactions on robotics and automation, VOL.16, No.5
- (4) N. Sarkar, X.Yun, and Vkumar, “Control of mechanical systems with rolling constraints : Application to dynamic control of mobile robots,” Int. J. Robot. Res., vol. 13, no. 1, pp. 55-69, 1994
- (5) 深尾 隆則, 鶴田 義明, ‘自動車の自律走行制御系設計法’, 17th ITS World Congress (2010/10)
- (6) 平田 裕也, 吉田 順, 杉町 敏之, 深尾 隆則, 後方車両と車間距離利用の有無による隊列走行への影響’, SICE 関西支部若手研究発表会 (2010/1)