横すべりを考慮した車両の経路制御手法の提案とその検証

江 上 正*・渡 邊 孝 之*・梅 本 和 希*

Proposal and Verification of a Path Control Method that Considers Vehicle Sideslip

Tadashi EGAMI*, Takayuki WATANABE* and Kazuki UMEMOTO*

We propose a method for vehicle path control that considers sideslip through the combination of a time-state control form and a path control method with nearest point search and we demonstrate the method's effectiveness through experiments with an experimental small four-wheeled vehicle. In the proposed method, combining the time-state control form and path control method with nearest point search for a geometric model that constrains the position of the vehicle in consideration of sideslip allows arbitrary path following through the translational velocity and yaw rate determined from input. The method gives steering angle as input to the yaw rate control system with derived yaw rate taken as a desire value for an equivalent two-wheeled model that considers sideslip. Because cornering power and sideslip angle are difficult to determine in a yaw rate control system, these are estimated using adaptive identification and a state observer, and an adaptive control system is formed. The small four-wheeled vehicle performs path control by use a laser scanner to estimate its position and attitude. The effectiveness of a sideslip angle estimation method that uses motion capture is also demonstrated. We verify that estimates of sideslip angle are nearly identical to measured values, and experiments using a variety of path desired values demonstrate the effectiveness of the proposed path control method.

Key Words: sideslip, vehicle control, path control, time-state control form, yaw rate

1. はじめに

最近、自動車などの車両の自動運転が注目を集めている。前輪操舵型の自動車のような車両は、非ホロノミック拘束をもち、静的連続状態フィードバックで安定化できないことが明らかにされている¹⁾。これに対処するために時変コントローラを用いた制御手法^{2),3)}や不連続フィードバックを用いた制御手法⁴⁾、時間軸状態制御系を用いた制御手法^{5),6)}など多くの制御手法が提案されている。これらの手法はそれぞれ一長一短があるが、三平らによって提案されている時間軸状態制御形を用いた制御手法は構造の簡単さ、拡張の容易さなどの点で優れた方法である。しかし、この手法は基本的に安定化するためには並進速度が一定である必要があり、また追従できる経路も直線や円に限定されていた。

そのため、著者らは目標経路を回転座標変換と伸縮座標変換により直線または円経路として扱うことにより時間軸状態制御形の枠組みで任意曲線経路を扱える経路制御手法を提案してきている⁷⁾。さらに点列で与えられた目標経路に対して、最近目標点探索を用いて基準点を求め、時間軸状態制御形に

回転移動座標変換および総移動距離軸への変換を組み込み、総移動距離軸への変換を行なう経路制御⁸⁾、総移動距離軸に伸縮座標変換を用いた可変速経路制御も提案してきている⁹⁾。

一方で、経路長をパラメータとしたなめらかな曲線経路への追従制御問題に関し、時間軸状態制御形を用いたものとして、石川らは車両の進行経路を時間軸とした時間軸状態制御形により非線形オブザーバを用いた状態推定と出力フィードバック制御を行なっており¹⁰⁾、小山らは走行距離を時間軸とする時間軸状態制御形により経路制御を行なっている¹¹⁾。岡島らはアフラインシステムとして表現可能な車両に対し、最適制御を用いた速度可変経路追従制御法を提案している¹²⁾。また、永井らはレーザースキャナを用いて車両の前方横変位から目標ヨーレートを計算し、車両への入力である実舵角を変化させることでこれを発生させる経路追従制御を提案し、実車実験による検証も行なっている¹³⁾。しかし、これらの手法はいずれも車両の横すべりはしないもの、または既知のものと仮定した手法であった。

横すべり角は車両の向いている方向と車両並進速度方向との差を表わし、すべりやすい路面における旋回時などでは大きな値になり無視できず、またセンサによる計測も難しいことから、推定則に関する研究も行なわれている^{14)~19)}。そして、横すべり角の推定値を利用した経路追従制御制御法に関しても、小田らは4輪操舵駆動車両に対し、モデル予測制御とスライディングモード制御を組み合わせることにより未知

* 神奈川大学工学部 横浜市神奈川区六角橋 3-27-1

* Faculty of Engineering, Kanagawa University, 3-27-1 Rokkakubashi, Kanagawa-ku, Yokohama

(Received April 13, 2016)

(Revised January 28, 2017)

の外乱に対しロバストな曲線経路への追従制御法を提案している¹⁸⁾．また Lenain ら¹⁶⁾、Lucet ら¹⁷⁾や吉田ら¹⁹⁾なども実験用車両で横すべり角の推定を用いた曲線経路への追従実験を行なっている．これらを含め、多くの研究で用いられる経路長をパラメータにもつ滑らかな曲線経路は点列で与えた経路と比べて生成が難しい．とくに逐次的に、追従経路と並行して経路を生成する必要がある場合には適さない．

これに対して、本論文では横すべりを考慮しないモデルに対して提案した点列経路に対する経路制御手法^{8),9)}を横すべりを考慮した車両モデルに拡張する．この経路制御手法は横すべりを考慮した車両の位置を表わす幾何モデルに対して、経路を計算機と親和性の高い点列で与え、時間軸状態制御形と最近目標点探索を用いた経路制御手法を組み合わせることで離散時間系において任意経路への追従を可能にした手法である．

提案する手法では横すべりを考慮した車両の位置を表わす幾何モデルに対して、時間軸状態制御形と最近目標点探索を用いた経路制御手法を組み合わせる．離散時間系の経路制御系を構成し、任意経路へ追従するような車両の並進速度とヨーレートをこの経路制御系の入力から求める．そしてこのヨーレートを目値として、横すべりを考慮した等価 2 輪モデルに基づいたヨーレート制御系を構成して、目標ヨーレートに追従させるように導出された入力から車両の操舵角を求める．ヨーレート制御系では、コーナリングパワーと横すべり角の情報が必要であるが、これらは一般に計測が難しい．コーナリングフォースをセンシングして実験を行なっている例なども見られるが²⁰⁾、一般的でなく実験用車両に用いることができないため、本論文では重みつき逐次形最小二乗法と同一次元オブザーバを用いてこれらを推定する^{14),15)}．推定には推定結果に応じてフィードバックゲインを変化させる極指定制御系を用いている．

本論文では実験用 4 輪車両に対して、レーザースキャナを用いた自己位置および姿勢角の測定を行ない、さらにモーションキャプチャを用いて、使用している横すべり角推定手法の有効性を検証する．またさまざまな経路目標値に対する実験により、提案した手法の有効性の検証も行なう．

2. モデリング

Fig. 1 に移動車両の等価 2 輪モデルを示す．横すべり角は微小として横力が横すべり角に比例する線形モデル¹³⁾を扱う．横運動モデルは等価 2 輪モデルを用い、その運動方程式を (1) 式に示す．ただし、 β は横すべり角、 γ はヨーレート、 δ は操舵角である．

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \beta \\ \gamma \end{bmatrix} = \mathbf{A} \begin{bmatrix} \beta \\ \gamma \end{bmatrix} + \mathbf{b} \delta \quad (1)$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -\frac{2(C_f + C_r)}{mV_v} & -\left(1 + \frac{2(C_f l_f - C_r l_r)}{mV_v^2}\right) \\ -\frac{2(C_f l_f - C_r l_r)}{I} & -\frac{2(C_f l_f^2 + C_r l_r^2)}{IV_v} \end{bmatrix}$$

Fig. 1 Vehicle model

$$\mathbf{b} = \begin{bmatrix} \frac{2C_f}{mV_v} \\ \frac{2C_f l_f}{I} \end{bmatrix}$$

ここで、 C_f 、 C_r は前後輪のコーナリングパワー、 l_f 、 l_r は重心から前後輪までの距離、 m は車体質量、 I は車両のヨー慣性モーメント、 V_v は並進速度である．また、車両を x - y 座標系で表わした幾何方程式を (2) 式に示す．

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} P_x \\ P_y \\ \phi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\phi + \beta) \\ \sin(\phi + \beta) \\ 0 \end{bmatrix} V_v + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \gamma \quad (2)$$

横すべりを考慮した車両モデルでは、横すべりを考慮しない場合^{7)~9)}に比べ、ヨーレートや横すべり角の運動方程式 (1) 式を考慮する必要が生じ、幾何方程式 (2) 式も横すべり角を含んだものになっていることがわかる．

3. 制御系設計

3.1 節、3.2 節の経路制御系の設計では、すでに横すべりを考慮しないモデルに対して提案している文献^{8),9)}などの手法を 2 章で示した横すべりを考慮した車両モデルに拡張する．ヨーレートや横すべり角は測定困難な変数であるため、3.3 節では文献^{14),15)}の推定手法を用いる．推定したヨーレートに対して 3.4 節では推定結果に応じてフィードバックゲインを変化させる極指定制御系を提案し、経路制御系により求めた目標ヨーレートに追従するように制御している．

3.1 時間軸状態制御形

Fig. 2 に示すように目標経路を離散的な点集合 $\{\mathbf{R}(j) | j = 1, 2, 3, \dots\}$ で与えられるとし、車両の位置 $\mathbf{P}$ から最近点となる目標点 $\mathbf{R}(i)$ を求め、その前後の目標点 $\mathbf{R}(i-1)$ と $\mathbf{R}(i+1)$ を結ぶ直線に平行に d 軸、それに垂直に q 軸を取り、 d 軸と x 軸とのなす角を θ とする．そして、 x - y 座標系から θ だけ回転した d - q 座標系へ次式を用いて回転座標変換を行なう．

Fig. 2 Rotational coordinate transformation

$$\begin{bmatrix} f_d \\ f_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_x \\ f_y \end{bmatrix}, \quad (f = R, P) \quad (3)$$

$$\psi = \frac{\pi}{2} - \phi + \theta \quad (4)$$

そして、(3)、(4) 式の変換を (2) 式に用いると以下のようになる。

$$\dot{P}_d - \dot{\theta} P_q = V_v \sin(\psi + \beta) \quad (5)$$

$$\dot{P}_q + \dot{\theta} P_d = V_v \cos(\psi + \beta) \quad (6)$$

$$\dot{\psi} = \dot{\theta} - \gamma \triangleq V_\psi \quad (7)$$

(5)~(7) 式に対して変数変換

$$z_1 = P_d - \int_0^t \dot{\theta} P_q dt \quad (8)$$

$$z_2 = \frac{1}{\tan(\psi + \beta)} \quad (9)$$

$$z_3 = P_q + \int_0^t \dot{\theta} P_d dt \quad (10)$$

および μ_v , μ_ψ を新たな入力とした入力変換

$$V_v = \frac{\mu_v}{\sin(\psi + \beta)} \quad (11)$$

$$\gamma = \mu_v \mu_\psi \sin^2(\psi + \beta) + \dot{\theta} + \dot{\beta} \quad (12)$$

を行なうことにより、

$$\frac{dz_1}{dt} = \mu_v \quad (13)$$

$$\frac{d}{dz_1} \begin{bmatrix} z_3 \\ z_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_3 \\ z_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \mu_\psi \quad (14)$$

となる。ここで (13) 式を時間軸制御部、(14) 式を状態制御部と呼び、これらはまとめて時間軸状態制御形と呼ばれる¹⁰⁾。

状態制御部は時間軸制御部の μ_v が一定の条件の下で安定化フィードバックをかけることで安定性が保証される。実際には、 z_1 を単調増加（あるいは単調減少）させることで z_2 , z_3 を制御することができる。この制御系より μ_v , μ_ψ が求まり、(11), (12) 式により車両の制御入力 V_v と目標位置に行き着くための目標ヨーレート γ を求めることができる。求めた γ を目標値として (1) 式に対してサーボ系を構成するこ

Fig. 3 Rotorotational coordinate transformations

とで実入力である操舵角 δ が求められる。このとき (1) 式により β を測定または推定することで横すべりを考慮しながら目標位置へと到達するための入力を求めることができる。

3.2 経路制御系

(13), (14) 式に基づいて経路制御系を構成する。(13) 式で μ_v は経路上を進行する車両の速度に対応する。本論文では μ_v が一定になるように制御し、これが車両進行速度制御により達成されたと仮定すると (13) および (14) 式で、サンプリング周期を T として離散化した、

$$z_1(k+1) = z_1(k) + \mu_v T \quad (15)$$

$$\begin{bmatrix} z_3(k+1) \\ z_2(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & T \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_3(k) \\ z_2(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{2} T^2 \\ T \end{bmatrix} \mu_\psi(k) \quad (16)$$

を得る。ここで、以下のように d - q 座標系を l - n 座標系に変換する。

$$\begin{bmatrix} P_l(k) \\ P_n(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_d(k) + R_l(i+1) - R_d(i+1) \\ P_q(k) - R_q(i) \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$R_l(j) \triangleq \sum_{s=1}^j \|R(s) - R(s-1)\| \quad (18)$$

この変換は Fig. 3 に示すように、 d 軸を d 軸に平行で $R(i)$ を通り、始点からの目標点間距離の総和を成分とする l 軸への変換を表わし、 q 軸は q 軸に平行で経路の q 軸誤差を成分とする n 軸への変換を表わす。

(17) 式の変換に対して進行方向 l 軸の目標値を $R_l(i+1)$, 経路誤差方向 n 軸の目標値を $R_n(i) = 0$ とし、(8) 式よりサンプリング周期を T として

$$\begin{aligned} e_l(k) &= P_l(k) - R_l(i+1) = P_d(k) - R_d(i+1) \\ &= z_1(k) + \sum_{j=1}^k T \dot{\theta}(j) P_q(j) - R_d(i+1) \rightarrow 0 \end{aligned}$$

と進行方向誤差の零化を達成する。また (10) 式より、

$$P_n(k) = z_3(k) - \sum_{j=1}^k T \dot{\theta}(j) P_d(j) - R_q(i) \rightarrow 0$$

と経路誤差の零化を達成する.

3.3 コーナリングパワーおよび横すべり角推定

前節に示したように (12) 式よりヨーレート γ が求まるが, (1) 式の C_f , C_r は未知パラメータであり, 制御中に値が変化することが予想される. また, 横すべり角 β は測定困難な変数として知られ, その測定には高価な対地センサなどを用いる必要があり, 本研究の実験装置に組み込むことは困難である. そこで, ジャイロセンサから求められるヨーレート γ の数値微分 $\dot{\gamma}$ を用いて, 重みつき逐次形最小二乗法と同一次元オブザーバを用いて C_f , C_r と β を推定する. (1) 式の第 2 行目の式から

$$\dot{\gamma} = \hat{\theta}^T \begin{bmatrix} \xi_1 \\ \xi_2 \end{bmatrix} \quad (19)$$

$$\hat{\theta}^T = [\hat{C}_f \quad \hat{C}_r], \quad \begin{bmatrix} \xi_1 \\ \xi_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -2\left(\beta + \frac{l_f}{V_v}\gamma - \delta\right)\frac{l_f}{I} \\ 2\left(\beta - \frac{l_r}{V_v}\gamma\right)\frac{l_r}{I} \end{bmatrix}$$

と変形でき, これより (20), (21) 式の重みつき逐次形最小二乗法を用いて C_f , C_r を求める.

$$\begin{aligned} \hat{\theta}(k) &= \hat{\theta}(k-1) \\ &- \frac{\mathbf{\Gamma}(k-1)\boldsymbol{\xi}(k)}{\lambda + \boldsymbol{\xi}^T(k)\mathbf{\Gamma}(k-1)\boldsymbol{\xi}(k)} [\boldsymbol{\xi}^T(k)\hat{\theta}(k-1) - \dot{\gamma}(k)] \end{aligned} \quad (20)$$

$$\mathbf{\Gamma}(k) = \frac{1}{\lambda} \left[\mathbf{\Gamma}(k-1) - \frac{\mathbf{\Gamma}(k-1)\boldsymbol{\xi}(k)\boldsymbol{\xi}^T(k)\mathbf{\Gamma}(k-1)}{\lambda + \boldsymbol{\xi}^T(k)\mathbf{\Gamma}(k-1)\boldsymbol{\xi}(k)} \right] \quad (21)$$

求めた $\hat{C}_f$, $\hat{C}_r$ を用いて, (1) 式を離散化し, (22) 式の同一次元オブザーバを構成することにより, 推定値 $\hat{\beta}$ を得る. ただし, $\hat{C}_f$, $\hat{C}_r$, V_v は 1 サンプル周期の間一定とする.

$$\begin{bmatrix} \hat{\beta}(k+1) \\ \hat{\gamma}(k+1) \end{bmatrix} = \mathbf{A}_d \begin{bmatrix} \hat{\beta}(k) \\ \hat{\gamma}(k) \end{bmatrix} + \mathbf{b}_d \delta(k) + \mathbf{L} \{ \gamma(k) - \hat{\gamma}(k) \} \quad (22)$$

3.4 ヨーレート制御系

(12) 式によって求められたヨーレート γ を目標ヨーレート γ^* としてヨーレート γ を制御するには (1) 式で C_f , C_r , V_v などのパラメータ変動を考慮した制御系を構成する必要がある. ここでは, 推定結果に応じてフィードバックゲインを変化させる極指定制御系を提案する. 制御したいのはヨーレートのため, (1) 式の 2 行目の式を

$$\dot{\gamma} = -2 \frac{l_f^2 \hat{C}_f + l_r^2 \hat{C}_r}{IV_v} \gamma + u \quad (23)$$

$$\text{ただし, } u = \frac{2l_f \hat{C}_f}{I} \delta - 2 \frac{l_f \hat{C}_f - l_r \hat{C}_r}{I} \hat{\beta}$$

と置く. (23) 式を $\hat{C}_f$, $\hat{C}_r$, V_v は 1 サンプル周期の間一定として離散化して,

$$\gamma(k+1) = a(k)\gamma(k) + b(k)u(k) \quad (24)$$

Fig. 4 Proposed control system

と表わし, $e(k) = \gamma^*(k) - \gamma(k)$, Δ を 1 階差分オペレータとしてエラーシステムを構成すると

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} e(k+1) \\ \Delta\gamma(k+1) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 1 & -a(k) \\ 0 & a(k) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e(k) \\ \Delta\gamma(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -b(k) \\ b(k) \end{bmatrix} \Delta u(k) \\ &\quad + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \Delta\gamma^*(k+1) \end{aligned} \quad (25)$$

となる²¹⁾. この閉ループ系に対して

$$\Delta u(k) = f_1(k)e(k) + f_2(k)\Delta\gamma(k) \quad (26)$$

とフィードバック制御を行なうと閉ループ系は

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} e(k+1) \\ \Delta\gamma(k+1) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 1 - b(k)f_1(k) & -a(k) - b(k)f_2(k) \\ b(k)f_1(k) & a(k) + b(k)f_2(k) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e(k) \\ \Delta\gamma(k) \end{bmatrix} \\ &\quad + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \Delta\gamma^*(k+1) \end{aligned} \quad (27)$$

となる. この閉ループ系の極を任意極 p_1, p_2 に配置する $f_1(k)$, $f_2(k)$ を求めると以下ようになる.

$$\begin{aligned} f_1(k) &= \frac{1}{b(k)}(p_1 p_2 - p_1 - p_2 + 1) \\ f_2(k) &= \frac{1}{b(k)}(p_1 p_2 - a(k)) \end{aligned} \quad (28)$$

ここで提案した制御系の概略を Fig. 4 に示す. Fig. 4 の制御系は経路制御系とコーナリングパワーおよび横すべり角の推定を含むヨーレート制御系が結合したものになっている. そして経路制御系により制御入力である並進速度 V_v と目標ヨーレート γ^* を求める. γ^* をコーナリングパワーおよび横すべり角の推定を含んだヨーレート制御系の目標値とするとヨーレート制御系の制御入力として操舵角 δ が得られる. この操舵角 δ と並進速度 V_v を車両に入力することにより経路制御を行なう.

経路制御系, ヨーレート制御系の個々の制御系については安定性が保証される. 横すべり角推定および全体システムの安定性は保証されていないが, 5 章において, 安定となる例を実験により示す.

4. 自己位置および姿勢角測定

4.1 自己位置測定

ここではレーザースキャナによる壁の検出データを用いて,

自己位置を測定する手法について示す．まず，**Fig. 5**に示すような逆L字の形をした壁を考える．この壁の角の点をランドマークとして用いる．しかし，レーザースキャナの値には誤差が生じる．そこで，L字形の壁に対して取得した複数のレーザースキャナの値を使用し，最小二乗法を用いてそれらの近似直線を作成する．その直線の交点を角として検出することにより誤差の影響を抑えている．そしてレーザースキャナの初期位置と逆L字の角の部分とを結ぶ直線を x 軸とし，その垂直方向を y 軸とすることで x - y 座標系を構成する．ここでレーザースキャナを原点とした直交座標系を r_x - r_y 座標系，ランドマークを中心とした壁面によって構成される座標を k_x - k_y 座標系とする．このときレーザースキャナと角の点 O を結ぶ直線の距離を R_0 ，その直線と r_x 軸との角度を ϕ_1 とし， r_x 軸と k_y 軸のなす角を ϕ_2 とする．角の点 O は k_x 軸と k_y 軸をレーザースキャナから取得した位置情報を直線近似によって求めてその交点とする．ここで ϕ_1 は角検出に

Fig. 5 Estimation model of self-position

Fig. 6 Estimation model of attitude angle

より得られ， ϕ_2 は k_y 側の直線近似した壁の傾きを求めることで得られる．

さらに以下の式により ϕ_3 を求める．

$$\phi_3 = \pi - \phi_1 - \phi_2 \quad (29)$$

このとき x - y 座標上の車両の位置 $\mathbf{P} = (P_x, P_y)$ は k_x - k_y 座標上の位置 (P_{kx}, P_{ky}) を用いて以下のように求められる．

$$P_x = R_0 - P_{kx} \sin(\phi_3) - P_{ky} \cos(\phi_3) \quad (30)$$

$$P_y = P_{kx} \cos(\phi_3) - P_{ky} \sin(\phi_3) \quad (31)$$

4.2 姿勢角測定

姿勢角においては**Fig. 6**に示すように x - y 座標上で初期位置 (P_{x0}, P_{y0}) から (P_x, P_y) へ移動したと仮定し，姿勢角を ϕ として導出する．(29)式を用いて ϕ_3 を求めると ϕ_5 は，

$$\phi_5 = \phi_4 - \phi_3 \quad (32)$$

と表わされる．この ϕ_5 を用いて姿勢角 ϕ を求めると，

$$\phi = \frac{\pi}{2} - \phi_1 - \phi_5 \quad (33)$$

と求めることができる．

5. 実験による検証

実験では，**Fig. 7**に示すZMP社の自動運転の研究・教育プラットフォーム用ロボットRoboCar® 1/10を使用する．このRoboCar® 1/10はLinuxを用いて自律走行実験を行なうことができ，Wi-Fiによる無線通信機能を搭載している．上部にはレーザースキャナを取り付けている．

本実験では，最初に円弧経路目標値に対する経路制御実験を行ない，横すべり角推定の有効性について検証する．ついで，S字カーブと直線を組み合わせた経路目標値に対する経路制御実験を行ない，提案している横すべり角を考慮した経路制御手法の有効性について検証する．本実験では経路制御系は最適サーボ系を用いている²¹⁾．

なお，本実験では $m = 3.58 \text{ kg}$ ， $I_f = 1.33 \times 10^{-2} \text{ m}$ ， $I_r = 1.23 \times 10^{-2} \text{ m}$ ， $I = 3.15 \times 10^{-2} \text{ kgm}^2$ ， $p_1 = 0.85$ ， $p_2 = 0.83$ ， $\lambda = 0.99$ などのパラメータを用いている．

5.1 円弧経路目標値に対する実験

最初に横すべり角の推定が正しく行なわれているか検証するため，実験機を用いて円弧経路目標値に対する経路制御実

Fig. 7 Experimental machine

Fig. 8 Experimental system

験を行なった。本実験では、モーションキャプチャーを用いて横すべり角を測定し、推定手法より求めた横すべり角の推定値と比較検討した。

実験システムを Fig. 8 に示す。ロボットカーはレーザースキャナから取得した位置と姿勢情報 (x, y, ϕ) および逐次形最小二乗法と同一次元オブザーバから推定した横すべり角 $\hat{\beta}$ を PC に送り、PC は経路制御系から算出した目標並進速度と目標ヨーレート (V_v^*, γ^*) をロボットカーに送る。ロボットカーではヨーレート制御系から操舵角 δ を求め、目標並進速度と操舵角 (V_v^*, δ) の指令に従って速度制御および操舵角制御を行なう。

実験機の位置計測にはレーザースキャナ、実験機のヨーレート計測にはジャイロセンサを用いる。モーションキャプチャーはロボットカーに取り付けた 3 つのマーカーを基準に位置と姿勢角 (x, y, ϕ) を取得する。測定誤差は $\pm 1 \text{ mm}$ で高精度な測定ができ、取得した情報から横すべり角を算出する。

サンプリング周期はモーションキャプチャーが 1 ms 、経路制御系 30 ms 、ヨーレート制御系 20 ms である。目標経路は半径 3 m の円弧経路を用いて、速度が約 0.3 m/s となるように走行させた。実験時間は 13 s で、最初の 3 s 間は待機時間とし、 3 s 後に走行を始める。

実験結果を Fig. 9 に示す。(a) 経路応答、(b) 経路誤差、(c) 横すべり角および推定値である。円弧経路目標値に十分に追従していることがわかる。また横すべり角の比較については、推定値が収束する 8 s 以降の定常状態では測定値とほぼ一致することがわかる。

5.2 S 字カーブと直線経路目標値に対する実験

提案している経路制御手法の有効性を検証するために S 字カーブと直線経路目標値に対する経路制御実験を行なった。円弧経路目標値に対する経路制御では操舵角は理想的には一定になるが、S 字カーブと直線経路目標値では操舵角の切り替えが必要になり、横すべりが無視できない。

(a) Path response

(b) Path error

(c) Sideslip angle

Fig. 9 Experimental results

実験では提案した手法と横すべりを考慮しない経路制御手法で同一目標経路を走行させて経路応答を比較した。横すべり角を考慮しない経路制御手法は (1) 式は考慮せず、(2) 式で $\beta = 0$ 、 $\dot{\phi} = V_v \tan \delta / (l_f + l_r)$ としたモデルに対して経路制御を行なったものである。実験システムや実験条件は Fig. 9 と同様であり、目標経路は S 字カーブと直線を組み合わせた経路を走行させた。実験時間は 14 s とする。推定則は 4 s 後から推定を始め、コーナリングパワーは推定則が安定するまで一定値を与える。

実験結果を Fig. 10 に示す。(a) 経路応答、(b) 経路誤差、

Fig. 10 Experimental results

(c) ヨーレート, (d) コーナリングパワー, (e) 横すべり角, (f) 操舵角である。経路序盤は推定値が安定していないため、経路誤差が発生しているが、提案手法を用いた場合のほうが経路誤差の p-p 値は半分以下と小さいことがわかる。特に直線と S 字カーブの切り替え時には横すべり角を考慮しない経路制御手法の場合には 7.59 s と 12.87 s で外側へ大きくすべって経路誤差が大きくなってしまっており、横すべりを考慮しないモデルでの経路制御の特徴的な軌跡となっている。

6. 結 言

本研究では横すべりを考慮した車両の経路制御手法に関して、経路を計算機と親和性の高い点列で与え、時間軸状態制御形と最近目標点探索を用いた経路制御手法を組み合わせることで離散時間系において任意経路への追従を可能にした手法を提案し、その有効性を実験用 4 輪車両を用いた実験により検証した。

横すべり角の推定値と測定値の一致、提案手法の適用による経路誤差の軽減から有効性を確認することができた。

今後の課題としては汎用性の拡大と現実的な環境への適用である。推定値が安定していない状態、ドリフト状態などを検出し、適した車両モデルに逐次切り替えることができれば、さらにさまざまな車両や環境へ適応したシステムが構築できると考えられる。

謝辞 本研究に際し、神奈川大学大学院工学研究科機械工学専攻の佐藤敬祐君、本多晃司君の協力を得ました。ここに深謝いたします。

参 考 文 献

- 1) R.W. Brockett: Asymptotic Stability and Feedback Stabilization, R.W. Brockett, R.S. Millman and H.J. Sussmann, Eds., *Differential Geometric Control Theory*, 181/191, Birkenhauser (1983)
- 2) C. Samson: Control of Chained Systems Application to Path Following and Time-Varying Point-Stabilization of Mobile Robots, *IEEE Trans. on Automatic Control*, **40**-1, 64/77 (1995)
- 3) O.J. Sordalen and O. Egeland: Exponential Stabilization of Nonholonomic Chained Systems, *IEEE Trans. on Automatic Control*, **40**-1, 35/49 (1999)
- 4) A. Astolfi: Exponential Stabilization of a Car-like Vehicle, *International Conference on IEEE Robotics and Automation*, 1391/1396 (1995)
- 5) 三平満司: 非ホロノミック系のフィードバック制御, *計測と制御*, **36**-6, 396/403 (1997)
- 6) M. Sampei, T. Tamura, T. Kobayashi and N. Shibui: Arbitrary Path Tracking Control of Articulated Vehicles Using Nonlinear Control Theory, *IEEE Trans. on Control System Technology*, **3**-1, 125/131 (1995)
- 7) 江上, 望月, 中崎: 任意曲線経路に対する移動車両の経路制御, *計測自動制御学会論文集*, **41**-1, 85/87 (2005)
- 8) 江上 正: 任意曲線経路に対する移動車両の経路制御, *計測と制御*, **36**-7, 595/601 (2006)

- 9) 江上, 天野, 西川: 移動車両の可変速経路制御, 計測自動制御学会論文集, **46-5**, 306/308 (2010)
- 10) 石川, 三平: 時間軸変換に基づく非ホロノミック車両システムの状態推定と出力フィードバック制御, システム制御情報学会論文誌, **13-3**, 124/133 (2000)
- 11) 小山, 関口, 野中: 走行距離を時間軸とする時間軸状態制御形による車両の経路追従制御, 計測自動制御学会論文集, **150-10**, 747/754 (2014)
- 12) 岡島, 浅井, 川路: 経路追従問題における最適速度制御, 計測自動制御学会論文集, **44-7**, 566/574 (2008)
- 13) 永井, ラクシンチャランサク: カー・ロボティクス, 21/155, ZMP パブリッシング (2010)
- 14) 高橋, 藤本, 裾坂, 野口: 電気自動車における車両横すべり角推定法の一提案～前後輪のコナリングステイフネス同定に基づく手法, 電気学会産業計測制御研究会, **05-73**, 89/94 (2005)
- 15) 高橋, 藤本: コナリングステイフネスと車両横すべり角の推定に基づく電気自動車のヨーレート制御法に関する一考察, 電気学会産業計測制御研究会, **06-04**, 17/22 (2006)
- 16) R. Lenain, B. Thuilot, C. Cariou and P. Martinet: Mixed Kinematic and Dynamic Sideslip Angle Observer for Accurate Control of Fast Off-Road Mobile Robots, Journal of Field Robotics, **27-2**, 181/196 (2010)
- 17) E. Lucet, R. Lenain and C. Grand: Dynamic path tracking control of a vehicle on slippery terrain, Control Engineering Practice, **42**, 60/73 (2015)
- 18) 小田, 野中, 関口: モデル予測制御とスライディングモード制御による四輪操舵駆動車両のロバスト経路追従制御, 計測自動制御学会論文集, **51-7**, 484/493 (2015)
- 19) 吉田, 伊藤, 野中, 関口: 小型車両による加速度センサを用いた横滑り角推定および経路追従実験, 第 15 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会予稿集, 3F1-7, 2154-2157 (2014)
- 20) K. Nam, H. Fujimoto and Y. Hori: Lateral Stability Control of In-Wheel-Motor-Driven Electric Vehicles Based on Sideslip Angle Estimation Using Lateral Tire Force Sensors, IEEE Trans. on VT, **61-5**, 1972/1985 (2012)
- 21) 土谷, 江上: 新版現代制御工学, 産業図書 (2015)

梅 本 和 希 (正会員)

2014 年京都大学大学院機械理工学専攻博士後期課程修了。同年神奈川大学工学部機械工学科助教となり、現在に至る。非線形制御、ロバスト制御の研究に従事。システム制御情報学会、IEEE の会員 (工学博士)。

[著 者 紹 介]

江 上 正 (正会員)

1987 年北海道大学大学院電気工学専攻博士課程修了。同年神奈川大学工学部機械工学科専任講師、90 年助教授、97 年教授となり、現在に至る。制御工学、ロボティクス、メカトロニクス分野の研究に従事。最近はとくに経路制御や宇宙エレベーター実験用クライマーの理論と応用の研究を中心に行なっている。電気学会、日本機械学会、システム制御情報学会、日本ロボット学会、IEEE の会員、宇宙エレベーター協会フェロー (工学博士)。

渡 邊 孝 之

2016 年神奈川大学大学院機械工学専攻博士前期課程修了。在学中は車両の経路制御に関する研究に従事。