

RTK-GPS と FOG を使用したほ場作業ロボット (第4報)

— 最適制御を適用したステアリングコントローラ —

木瀬道夫*¹・野口 伸*¹・石井一暢*¹・寺尾日出男*¹

要 旨

本報では新しい操舵制御アルゴリズムについて報告する。既報において開発したステアリングコントローラは主に直線経路を追従させることを目的に開発したものであり、曲線追従の精度を保証するものではない。しかし、本システムのロボットトラクタとしての完成度を高めるためには、農道移動や任意経路の走行を可能にする必要があり、曲線追従精度の向上が不可欠である。本報では最適レギュレータを適用した操舵制御アルゴリズムを開発し、実機実験によって従来法であるPI制御器と曲線経路への追従精度の比較を行った。直角経路、正弦波経路、そして前報で考案した前進旋回の経路に対して精度比較を行った結果、すべての経路において従来法よりも精度よく経路に追従できることがわかった。また3.0 m/sの高速走行の試験も行った結果、従来法と比較してr.m.s. 誤差で38%精度が向上した。

[キーワード] 操舵制御, 最適レギュレータ, 曲線追従, 高速走行

Field Mobile Robot Navigated by RTK-GPS and FOG (Part 4)

— The Steering Controller Applied Optimal Controller —

Michio KISE*¹, Noboru NOGUCHI*¹, Kazunobu ISHII*¹, Hideo TERAO*¹

Abstract

This paper reported about new steering control algorithm. The steering controller developed in previous paper was designed to guide along with a straight path, and it didn't confirm the accuracy of following a curved path. But the robot tractor has to have a function to travel along any curved path precisely to achieve farm management by the robot. The steering control algorithm applied a linear optimal regulator was developed and tested at a field with some curved paths. The developed system showed the outstanding guidance performance comparing to a conventional method which uses a PI controller on all types of the paths including a 90 degree turn, a sinusoidal, and a forward turning paths. In addition, the developed controller could perform high-speed guidance at 3.0 m/s more precisely than the conventional PI controller.

[Keywords] Steering control, Linear optimal regulator, Following curved path, high-speed guidance

I 緒 論

本研究は畑作・水田作・粗飼料生産におけるすべてのトラクタ作業に対応できる汎用性の高いほ場作業ロボットの開発が最終目的である。第1報ではRTK-GPSとFOGのセンサフュージョンによって車両の絶対方位を

推定する手法を開発した¹⁾。第2報では目標経路や変速段数などの情報を持つ「作業計画マップ」を適用して無人作業を行った²⁾。第3報では2種類の枕地旋回手法を開発した³⁾。そして本報では作業走行及び旋回走行の両者に対して追従精度を向上させ得る新しいステアリング制御法を考案したので報告する。

農業機械分野においてこれまでに発表された操舵制御のアルゴリズムは、著者らが既報において開発したものも含めて線形関数で記述されるものが多い⁴⁾。ニューラ

*1 会員, 北海道大学大学院農学研究科 (〒060-8589 札幌市北区北9条西9丁目 TEL011-706-3884)

Graduate School of Agriculture, Hokkaido University, Kita-9, Nishi-9, Kita-ku, Sapporo, Japan 060-8589

ルネットワーク⁵⁾やファジイ理論⁶⁾, または飽和関数⁷⁾などの非線形制御器を適用した例もあるが, 走行経路はいずれも直線を対象としたものばかりである。したがって既往のステアリングコントローラは, 運動特性の非線形性が強くなる直角経路や曲線経路の追従に対する能力は未知数である。

これまでに著者らは開発したロボットトラクタを用いて様々な農作業を行ってきた⁸⁾。その中で, 格納庫からほ場までの農道移動を含む走行経路も実施したが, 農道が直角に曲がる部分で目標経路に対して約 50 cm の横方向偏差が生じた。また第3報で行った実験において, 生成された旋回経路に対して曲率半径の最も小さい部分では 30 cm 以上の偏差を有した。これは経路生成の問題というよりも, ステアリングコントローラに問題があったと考える。また, 現在のコントローラは走行速度を考慮しておらず, 制御ゲインのルックアップテーブルによって広範な走行速度に対応する手法は根本的に限界がある。

本報では最適制御アルゴリズムを適用したステアリングコントローラを導入する。ここで採用した運動モデルは基本的には2輪モデルであるが, タイヤに働くコーナリングフォースと滑り角に関する非線形方程式を導入することによって, 従来の2輪モデルよりも精度の高い運動の記述を図った。この新しく提案した運動方程式を逐次線形化することで本問題を最適レギュレータ問題として定式化した。

実機実験を行うに際して, 定常円旋回に基づいた車両のパラメータ同定を行った。その後ほ場で複数の経路に対し実機実験を行った。直角経路, 正弦波経路, そして前報で考案した前進旋回経路に対して, 既報で開発したPI制御を基礎としたステアリングコントローラとの精度比較を行った。また走行速度 3.0 m/s の高速走行の試験も実施して新たに考案したコントローラの優位性も検証した。

II ステアリング制御アルゴリズム

1. 運動モデルの構築

まず本アルゴリズムの運動モデルを定義する。図1に運動モデルを示した。第2報で報告した作業計画マップの概念を踏襲し, 目標経路がナビゲーションポイントの集合として与えられるものとする。そして車両重心位置(COG)における状態変数を以下のように定義する。

$$x = [d, \beta, \gamma, \phi, \delta]^T \quad (1)$$

d : 横方向偏差, β : 車両重心滑り角, γ : 角速度, ϕ : 方位偏差, δ : 舵角

本アルゴリズムはレギュレータ問題として解を得るため, 次の方法によって目標経路を線形化する。

- 1) ナビゲーションポイント ω_i ($0 \leq i \leq N-1$, N : ナビゲーションポイントの数) を直線で結んだ曲線を, $\Omega(s) = [e(s), n(s)]^T$ で定義する。ただし $\Omega(s)$

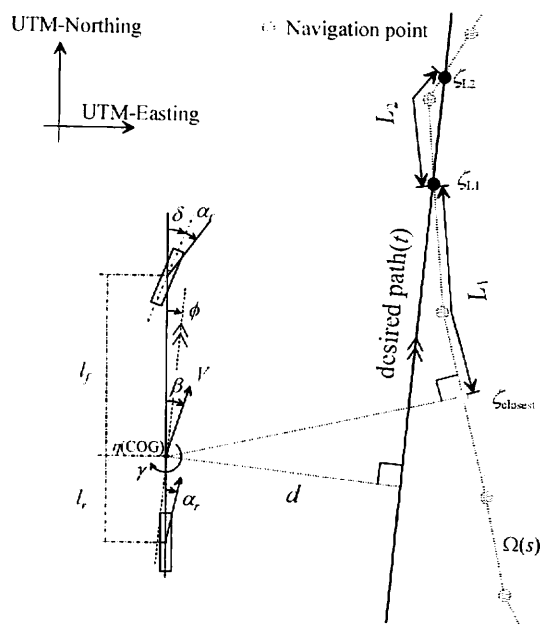


図1 運動モデル
Fig. 1 The Vehicle dynamic model

は UTM 座標系で記述され, $e(s)$, $n(s)$ はそれぞれ UTM-Easting, UTM-Northing を表わす。

- 2) UTM 座標系での COG の位置を η とし, $|\eta - \Omega(s)|$ を最小にする点 $\Omega(s) = \zeta_{closest}$ を求める。
- 3) $\zeta_{closest}$ から $\Omega(s)$ に沿って L_1 進んだ点 $\Omega(s_{L1}) = \zeta_{L1}$ を求める。ここで L_1 は前方注視距離として定義される制御パラメータであり, 目標経路は ζ_{L1} における接線となる。
- 4) ζ_{L1} から $\Omega(s)$ に沿って L_2 進んだ点 $\Omega(s_{L2}) = \zeta_{L2}$ を求める。

ζ_{L1} と ζ_{L2} を結ぶ直線が時刻 t における目標経路であり, その直線からの偏差を横方向偏差 d と定義する。また ϕ もこの直線に対する車両方位偏差であり, ゆえに本運動モデルの座標系はそれぞれの時刻において変化することになる。目標経路を ζ_{L1} における接線とするには $L_2 \rightarrow 0$ とするのが望ましいが, 算出される経路が発散するのを防ぐために L_2 にはある程度の距離を持たせるものとし, 本研究では $L_1 = 2.0$, $L_2 = 0.5$ とした。

本モデルにおいて, 前輪に生じる滑り角 α_f は以下で表わされる⁹⁾。

$$\tan \alpha_f \approx \beta + \frac{l_f \gamma}{V} - \delta \quad (2)$$

一方, 後輪に生じる滑り角 α_r は,

$$\tan \alpha_r \approx \beta - \frac{l_r \gamma}{V} \quad (3)$$

式(2), (3)に基づく運動モデルは, 前後の両輪が前後軸と車軸の交点にそれぞれ集中させた前後2輪の車両とみなせることから2輪モデルと呼ばれる。自動車工学の分野では広く使われるが, 操舵角が大きくなるにつれて

3角関数の近似誤差に起因するモデル誤差が大きくなる。

従来の2輪モデルでは、あるタイヤに働く滑り角 α とそのタイヤに働くコーナリングフォース F との関係を $F=K\alpha$ の形で表してきた。ここで K はコーナリングパワーと呼ばれ、 $K=\left.\frac{dF}{d\alpha}\right|_{\alpha=0}$ を用いるのが通常である。

しかしこの関係は α が小さいことが前提であり、実際は α が大きくなると F の値は飽和することが知られている¹⁰⁾。本研究が想定する大蛇角での走行においては α の値が大きくなり、コーナリングフォースを $F=K\alpha$ の形で表わすことによってモデル誤差が増大することが予想される。

つまり、2輪モデルにおいては以下の2つのモデル誤差要因が存在する。

- 1) 車輪の滑り角を線形化する際の三角関数の近似誤差
- 2) 車輪の滑り角とコーナリングフォースの関係の線形化による誤差

本研究ではこの内の2)を解決するために、Fialaの理論から導かれる以下の式¹¹⁾を運動方程式に導入する。

$$F=f(\alpha) \\ =K \tan \alpha - \frac{1}{3} \frac{K^2}{\mu W} \tan^2 \alpha + \frac{1}{27} \frac{K^3}{\mu^2 W^2} \tan^3 \alpha \quad (4)$$

ここで μ は路面とタイヤのトレッドラバーとの摩擦係数、 W は垂直荷重である。式(4)の目的は、 α が大きいときの α と F の非線形性を補償する事によって、従来の2輪モデルより精度の高い運動モデルを記述することにある。

式(2)、(3)を式(4)に代入することによって得られる前後輪に働くコーナリングフォースを F_f, F_r とおくと、力とモーメントのつり合いから以下の2式を得る。

$$MV(\dot{\beta} + \gamma) = 2F_f + 2F_r \quad (5)$$

$$I\dot{\gamma} = 2l_f F_f - 2l_r F_r \quad (6)$$

M, I は車両の重量とCOG周りのヨー方向慣性モーメントである。以上をまとめると車両の運動方程式は以下のように表わされる。

$$\begin{bmatrix} \dot{d} \\ \dot{\beta} \\ \dot{\gamma} \\ \dot{\phi} \\ \dot{\delta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & V & 0 & V & 0 \\ 0 & \frac{-2(p_f + p_r)}{MV} & \frac{-2(p_f l_f - p_r l_r)}{MV^2} & -1 & 0 \\ 0 & \frac{-2(p_f l_f - p_r l_r)}{I} & \frac{-2(p_f l_f^2 + p_r l_r^2)}{IV} & 0 & \frac{2p_f l_f}{I} \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d \\ \beta \\ \gamma \\ \phi \\ \delta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{2(q_f + q_r)}{MV} \\ -\frac{2(q_f l_f - q_r l_r)}{I} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (10)$$

ただし p と q の添え字 f, r はそれぞれ前・後輪を表わす。

式(10)は以下のようなマトリクス形式で表わすことができる。

$$\dot{d} = V \sin(\phi + \beta) \quad (7)$$

$$\dot{\beta} = \frac{2}{MV}(F_f + F_r) - \gamma \quad (8)$$

$$\dot{\gamma} = \frac{2l_f}{I} F_f - \frac{2l_r}{I} F_r \quad (9)$$

$$\dot{\phi} = \gamma \quad (10)$$

$$\dot{\delta} = u \quad (11)$$

ここで u は操舵速度 $\dot{\delta}$ であり、本システムの入力を表わす。

式(7)~(11)で表わされる微分方程式を一般的な最適制御問題として定式化することを考えたとき、解析解を得ることは困難である。よってダイレクト・シュートなど繰り返しを要する数値計算手法¹²⁾によって解を得ることになるが、これは時間を要するだけでなく、適切な初期値を選ばないと解が収束しないといった問題点を有する。供試車両の操舵周期は10Hz以上であり、数値計算によって解を動的に計算するのは得策ではない。

よって本アルゴリズムは最適レギュレータ問題として解を得るものとする。最適レギュレータは運動方程式が1階の線形微分方程式の形で表わされなくてはならないが、式(4)には3次までの $\tan \alpha$ の項を含むため、式(8)、(9)は非線形微分方程式となる。よって時刻 t における $(\tan \alpha(t), f(\alpha(t)))$ の近傍で式(4)を線形化する。

$\tan \alpha(t) = a(t)$ とおくと

$$F(t) = p(t)a(t) + q(t) \quad (12)$$

ただし

$$p(t) = \frac{d}{da} f(\alpha(t)) \\ = K - \frac{2K^2}{3\mu W} a(t) + \frac{K^3}{9\mu^2 W^2} a^2(t) \quad (13)$$

$$q(t) = f(\alpha(t)) - p(t)a(t) \quad (14)$$

また車両が経路に追従しているならばその方位偏差 ϕ も小さいと仮定でき、滑り角 β も小さいと仮定すると式(7)は次のように線形化できる。

$$\dot{d} = V(\phi + \beta) \quad (15)$$

すると運動方程式は以下のようになる。

$$\dot{x}(t) = A(t)x(t) + Bu(t) - z(t) \quad (17)$$

式(17)の運動方程式で記述される運動モデルを本研究では「拡張2輪モデル」と名づけ、一般的な2輪モデルと区別するものとする。

2. 最適レギュレータの設計

本システムに搭載される航法センサは RTK-GPS と FOG 姿勢計測装置 (IMU) である。ゆえに式(1)の状態変数のうち観測できる要素は、横方向偏差 d (RTK-GPS)、角速度 γ (IMU)、方位偏差 ϕ (IMU)、舵角 δ (供試車両) の4つである。よって、観測方程式は以下のようにならされる。

$$y(t) = Cx(t)$$

$$y = [d, \gamma, \phi, \delta]^T, C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (18)$$

以上を踏まえ、式(17)を終端自由、終端時間固定の最適レギュレータ問題として定式化する。

すると時刻 t における最小にすべき評価関数 $J(t)$ は、

$$J(t) = \int_{t_i}^{t-t_i} (y^T(\tau)R_0y(\tau) + r_2u^2(\tau))d\tau + x_i^T R_3 x_i$$

$$= \int_{t_i}^{t-t_i} (x^T(\tau)R_1x(\tau) + r_2u^2(\tau))d\tau + x_i^T R_3 x_i \quad (19)$$

$$x_i = x(t+t_i)$$

と表わされる。 t_i は評価関数で考慮する時間、 R_0, R_3 は対称非不定値行列、 r_2 は正の値でありこれらは重みを表わす。また $R_1 = C^T R_0 C$ である。本研究ではそれぞれ、

$$R_0 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, r_2 = 4, R_3 = \begin{bmatrix} 4 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (20)$$

とした。したがって $R_1 = 0$ となる。この重みづけの目的は、「操舵角の変化量(制御入力コスト)をできるだけ小さくしながら終端位置での横方向偏差と方位偏差を小さくすることにある。つまり前方注視距離 L_1 以内で横方向偏差、方位偏差をなくすことが目的であり、途中の走行軌跡は考慮しない。また $t_i = |\zeta_{L_1} - \eta| / V$ とした。評価関数における時間変数を $\tau (t \leq \tau \leq t+t_i)$ で表わすと、ハミルトニアン $H(\tau)$ は以下で与えられる。

$$H(\tau) = r_2 u^2(\tau) + \lambda^T(\tau)(A(\tau)x(\tau) + Bu(\tau) + z(\tau)) \quad (21)$$

ここで $\lambda(\tau)$ は随伴変数であり、5次のベクトルとなる。

随伴変数の微分方程式は $\dot{\lambda}(\tau) = -\frac{\partial H}{\partial x}$ で表わされること

$$\dot{\lambda}(\tau) - A^T(\tau)\lambda(\tau) \quad (22)$$

制御入力の最適性の条件 $\frac{\partial H}{\partial u} = 0$ から、

$$2r_2 u^2(\tau) + B^T \lambda(\tau) = 0 \quad (23)$$

$$u^2(\tau) = -\frac{1}{2r_2} B^T \lambda(\tau)$$

u^2 は最適解を表わすものとする。

境界条件は初期時刻 t と終端時刻 $t+t_i$ において以下のように表わされる。

$$x(t) = x_0, \lambda_i^T = R_3 x(t-t_i) = R_3 x_i \quad (24)$$

以上からこの問題は式(24)を境界条件とする2点境界値問題を解くことに帰結する。

$$\begin{bmatrix} \dot{x}^0(\tau) \\ \dot{\lambda}(\tau) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A(\tau) & -\frac{1}{2r_2} BB^T \\ 0 & -A^T(\tau) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x^0(\tau) \\ \lambda(\tau) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} z(\tau) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (25)$$

ただし x^0 は最適入力 u^0 に対応する最適解を表わす。ここで式(25)の遷移行列を次のように分割する¹³⁾。

$$\Phi(\tau, t) = \begin{bmatrix} \Phi_{11}(\tau, t) & \Phi_{12}(\tau, t) \\ 0 & \Phi_{22}(\tau, t) \end{bmatrix} \quad (26)$$

すると、

$$x^0(\tau) = \Phi_{11}(\tau, t-t_i)x_i^0 + \Phi_{12}(\tau, t-t_i)\lambda_i$$

$$+ \int_{t_i}^{\tau} \Phi_{11}(T, t-t_i)z(T)dT \quad (27)$$

式(24)を代入して、

$$x^0(\tau) = [\Phi_{11}(\tau, t-t_i) + \Phi_{12}(\tau, t-t_i)R_3]x_i^0$$

$$+ \int_{t_i}^{\tau} \Phi_{11}(T, t-t_i)z(T)dT \quad (28)$$

同様に、

$$\lambda(\tau) = \Phi_{22}(\tau, t-t_i)R_3 x_i^0 \quad (29)$$

式(29)に式(28)を代入して

$$\lambda(\tau) = \Phi_{22}(\tau, t-t_i)R_3 [\Phi_{11}(\tau, t-t_i)$$

$$+ \Phi_{12}(\tau, t-t_i)R_3]^{-1} [x^0(\tau) - S_1] \quad (30)$$

ただし

$$S_1 = \int_{t_i}^{\tau} \Phi_{11}(T, t-t_i)z(T)dT \quad (31)$$

とおいた。

式(30)を

$$\lambda(\tau) = P(\tau)x^0(\tau) - P(\tau)S_1 \quad (32)$$

$$P(\tau) = \Phi_{22}(\tau, t-t_i)R_3 [\Phi_{11}(\tau, t-t_i)$$

$$+ \Phi_{12}(\tau, t-t_i)R_3]^{-1} \quad (33)$$

とおくと式(33)はリカッチ方程式

$$\dot{P}(\tau) = -A^T(\tau)P(\tau) - P(\tau)A(\tau)$$

$$+ \frac{1}{2r_2} P(\tau)BB^T P(\tau) \quad (34)$$

の解として与えられる。

式(34)の境界条件は、

$$P(t+t_i) = R_3 \quad (35)$$

と終端で与えられ、逆向きになりに解くことで解を得られる。

3. 計算アルゴリズム

式(34)のリカッチ方程式と式(31)中の遷移行列は時間に依存する行列 $A(\tau)$ を含む。 $A(\tau)$ を決定するには時刻 τ における、 $p(\tau)$ 、 $q(\tau)$ が必要となるが、これらは車輪の滑り角 $\alpha(\tau)$ によって決定される。任意の区間 $t \leq \tau \leq t+t_i$ における時系列データ $\alpha(\tau)$ をあらかじめ得ることは不可能であるから、式(34)、(32)、(31)、(25)を繰り返し計算することで解の収束を試みた。以下にそのアルゴリズムを示す。

Step 0 :

k 番目の繰り返しにおける、 $A(\tau)$ 、 $P(\tau)$ 、 $\lambda(t)$ 、 S_1 を

それぞれ $A^{(k)}(\tau)$, $P^{(k)}(\tau)$, $\lambda^{(k)}(t)$, $S_1^{(k)}$ とおく。ただし $A^{(0)}(\tau)$ は $\alpha(\tau) = \alpha(t)$ を代入して得られる値を用いる。

Step 1:

式(34)のリカッチ方程式

$$\dot{P}^{(k)}(\tau) = -A^{(k)T}(\tau)P^{(k)}(\tau) - P^{(k)}(\tau)A^{(k)}(\tau) + \frac{1}{2r_2}P^{(k)}(\tau)BB^TP^{(k)}(\tau)$$

を式(35)を初期値として $\tau = t + t_f$ から $\tau = t$ まで逆向きに解いて $P^{(k)}(t)$ を算出する。

Step 2:

$S_1^{(k)}$ を式(31)を用いて計算する。

そして Step 1 で得た $P^{(k)}(t)$ と共に式(32)に代入して $\lambda^{(k)}(t) = \lambda_0^{(k)}$ を求める。

$$\lambda_0^{(k)} = P^{(k)}(t) x_0 - P^{(k)}(t) S_1^{(k)}$$

Step 3:

$k=5$ のとき一連の繰り返し計算を終了し、最適解として $u^{(5)}(t) = -\frac{1}{2r_2}B^T\lambda_0^{(5)}$ を採用する。この繰り返し回数5という値は後述のシミュレーション結果を考慮して決定した。 $k < 5$ の場合は Step 4 に進む。

Step 4:

$[x_0, \lambda_0^{(k)}]^T$ を初期値として、式(22)を $\tau = t$ から $\tau = t + t_f$ まで前向きに解く。その際 $A^{(k)}(\tau)$ を更新する。そして $k = k + 1$ とし、step 1 に戻る。

以上のアルゴリズムに従って最適解を得る。本アルゴリズムは時系列データ $A^{(k)}(\tau)$ を繰り返し更新することによって適切な随伴変数の初期値 λ_0 を推定し、式(22)の2点境界値問題を両端の境界条件を強引に引き合わせることによって解く手法である。

時刻 t における入力 $u(t)$ には $u^*(t)$ を採用し、制御周期毎に解を計算するものとする。つまり本手法は本来 t_f 間の時系列データとして得られる最適解の初期値のみを制御入力として適用しており、これは最適制御という意味では数学的正当性が成立しない。しかし本システムは航法センサから得られる観測データを操舵周期と同速度 (10 Hz) で更新することができ、制御周期毎に観測値のフィードバックを行ったほうが有効であると判断したため、このような変則的な手法を採用した。

4. シミュレーション

本アルゴリズムの有効性をシミュレーションによって確認した。図2はある初期位置 x_0 を与えたとき、算出される最適操舵速度 $u^*(\tau)$ の時系列が本アルゴリズムの繰り返し計算によってどのように変化するかを示したものである。このとき走行速度は 1.5 m/s、与えた初期位置は、 $x^2 = [0.91 \text{ m}, 1.3^\circ, 10.5^\circ/\text{s}, -38.1^\circ, 10.1^\circ]^\text{T}$ である。

繰り返し回数 $k=1$ と $k=2$ では初期値で $1.8^\circ/\text{s}$ の差があり、その後の推移も大きく様子が異なる。しかし $k=2$ からは収束する傾向を示し、 $k=3$ 以降の軌跡はほとんど重なった。本シミュレーションにおいて隣り合う繰

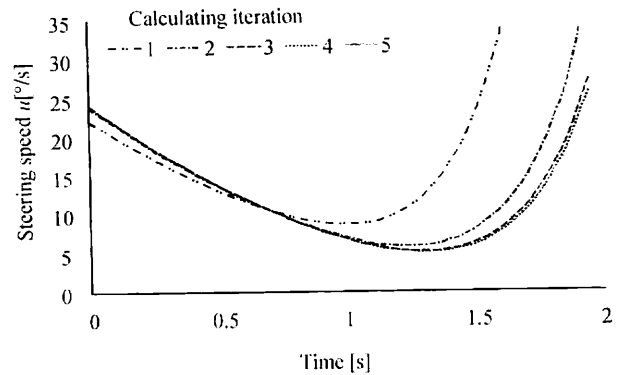


図2 繰り返し計算による最適操舵速度の変化

Fig. 2 The variation of optimal steering speeds in each iteration of calculation

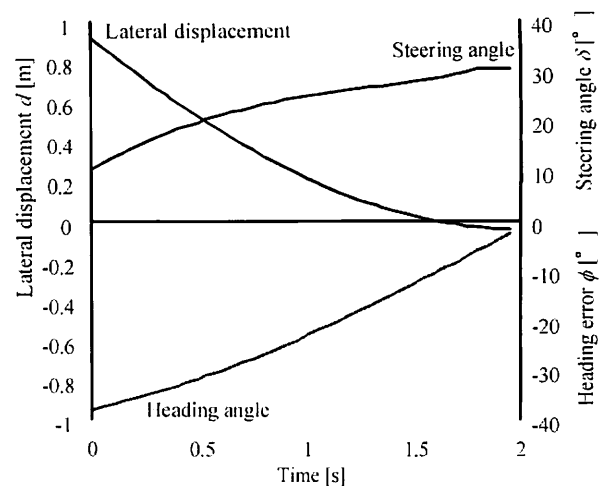


図3 横方向偏差, 車両方位, 舵角の推移

Fig. 3 The trajectories of lateral displacement, heading error, and steering angle

り返し回数の軌跡の偏差の r.m.s. 値は、 $k=1$ と $k=2$ で $26.4^\circ/\text{s}$, $k=2$ と $k=3$ で $2.7^\circ/\text{s}$, $k=3$ と $k=4$ で $0.4^\circ/\text{s}$, $k=4$ と $k=5$ で $0.02^\circ/\text{s}$ となった。この結果はどのような初期値を選んでも似たような傾向を示し、よって5回の繰り返し計算で十分満足な収束を得られると判断した。

図3は $k=5$ における横方向偏差, 車両方位, 舵角の推移である。このように操舵角の大きい走行においても横方向偏差, 車両方位共に終端時刻ではほぼ0になり、本アルゴリズムが正常に機能していることを証明する。

III 実機実験

1. ロボットトラクタのハードウェア

実機実験に用いるロボットトラクタは既報において開発したものである¹⁰⁾。供試車両は市販のトラクタ ((株)クボタ MD77; 55.6 kW) を製造元がロボット走行ができるように改造を施したものであり、操舵, 変速段, 前

表 1 供試車両の旋回半径

Table 1 Turning radius of tested vehicle

Steering angle [°]	Travel speed [m/s]		
	1.0	2.0	3.0
12	12.37	12.41	12.91
16	8.98	9.03	9.25
20	7.00	7.12	7.52
24	5.72	5.85	6.15
28	4.81	4.96	5.23
31	4.27	4.37	4.69
-12	12.06	12.72	13.29
-16	8.82	9.23	9.8
-20	6.92	7.26	7.53
-24	5.67	6.1	6.33
-28	4.79	5.03	5.35
-31	4.26	4.44	4.69

後進、3点ヒッチの昇降、PTOのオン・オフなどトラクタ機能の大部分を外部から制御することが可能である。

航法センサにはRTK-GPSとFOG姿勢計測装置IMUを採用した。供試RTK-GPSは(株)トリプル製MS750であり、20Hzの計測周期、2cmの精度で位置計測可能である。供試IMU((株)日本航空電子JCS-7401A)は光ファイバジャイロと加速度計を3個ずつ内蔵し、3軸周りの角度と角速度を計測することができる。

2. 車両パラメータの同定

実機実験を行う前に車両パラメータを同定する必要がある。ここで同定すべき車両パラメータとは質量 M 、ヨー方向慣性モーメント I 、重心から前後車軸までの距離 l_f, l_r 、前後輪のコナリングパワー K_f, K_r 、前後輪と路面との間に働く摩擦係数 μ_f, μ_r であるが、 M, I, l_f, l_r はメーカーカタログ値を、 μ_f, μ_r は農業機械ハンドブック¹⁵⁾から引用した。

よってここで実際に求めたパラメータとは K_f と K_r の2つである。ある範囲の K_f と K_r のすべての組み合わせに対して、式(7)~(11)の運動方程式を用いて定常円旋回の走行シミュレーションを行い、その旋回半径が実機の旋回半径と最も一致したときの K_f と K_r の組み合わせを採用した。実機実験を行ったのは北海道大学農学部附属農場の牧草刈り跡地であり、以降の供試ほ場も同様である。定常円旋回は走行速度3段階(1.0 m/s, 2.0 m/s, 3.0 m/s)、舵角12段階(±12°, ±16°, ±20°, ±24°, ±28°, ±31° (最大操舵角))、計36水準行い、そのときの結果を表1に示した。そして以下の評価関数を最小にする K_f と K_r の組み合わせを採用した。

$$J_{radius} = \sum_V \sum_\delta \left\{ \frac{r(V, \delta) - \hat{r}(V, \delta)}{r(V, \delta)} \right\}^2 \quad (36)$$

ただし $r(V, \delta)$ は速度 V 、舵角 δ のときの実機による旋回半径、 $\hat{r}(V, \delta)$ はシミュレーションによる旋回半径である。

以上から $K_f=166 \text{ N/}^\circ, K_r=270 \text{ N/}^\circ$ が得られ、そのときのシミュレーション結果を図4に示した。横軸がシ

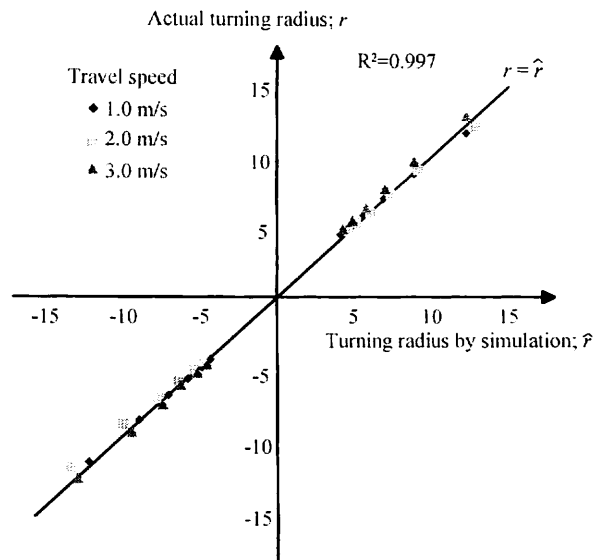


図 4 定常円旋回のシミュレーション結果
Fig. 4 Simulation result of constant circular turning

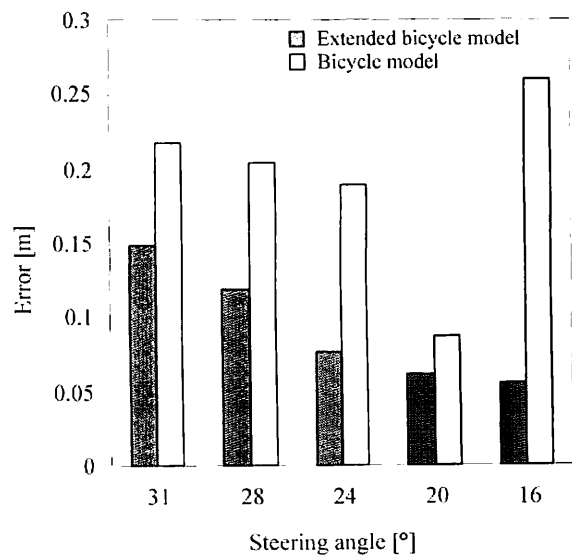


図 5 定常円旋回のシミュレーションにおける拡張2輪モデルと2輪モデルの比較

Fig. 5 Comparison between Extended bicycle model and bicycle model on Simulation of constant circular turning

ミュレーションによる旋回半径、縦軸が実機による定常円旋回の半径である。ただしステアリング角度が負のときの旋回半径を負で表わした。このとき $r = \hat{r}$ に対して直線回帰を行った結果、決定係数 0.997 という結果が得られた。このことから、想定される操舵角と走行速度の範囲において、同定された車両パラメータを適用した拡張2輪モデルは十分な精度でトラクタの運動を記述できるものと判断される。線形モデルにもかかわらずこのように高い相関が得られた理由として、式(4)によってタ

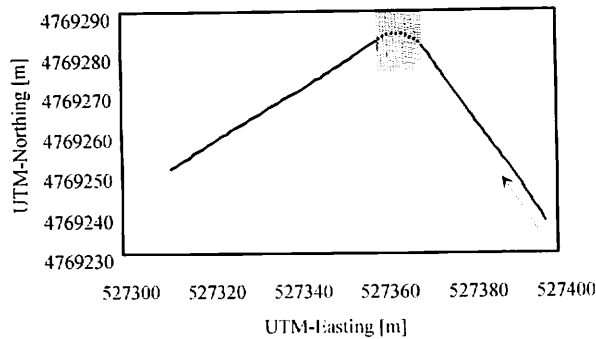


図6 直角経路を含む農道移動走行の目標経路

Fig. 6 Desired path for transfer including 90 degree turning

イヤの滑り角とコーナリングフォースの関係の非線形性が補償されたこと、また式(4)はタイヤの滑り角によってコーナリングパワーが変化することを意味し、これによって線形化過程における三角関数の近似誤差がある程度相殺されたのではないかと推察できる。

2輪モデルについても同様のパラメータ同定を行い、拡張2輪モデルとの比較を行った。図5は走行速度3.0 m/s、舵角15°以上のときの実機による旋回半径に対するシミュレーションによる旋回半径の誤差である。走行速度、舵角共に大きいことから、運動の非線形性も最も強くなる条件設定である。図から明らかなように、本条件においてすべての操舵角で拡張2輪モデルの偏差が2輪モデルより小さくなり、拡張2輪モデルを導入することによって運動モデルの精度が向上することが確認できた。

以上、車両パラメータは以下の様に決定された。

$$M=3200 \text{ kg}, I=1370 \text{ kg m}^2, l_f=1.41 \text{ m}, l_r=0.89 \text{ m}, \mu_f=0.60, \mu_r=0.60, K_f=166 \text{ N/}^\circ, K_r=270 \text{ N/}^\circ$$

3. ほ場での走行実験

(1) 直角経路に対する追従

直角経路を含む農道を目指経路として走行実験を行った。図6にその時の目標経路を示した。本経路は実際に農道を有人で走行したときの走行軌跡をRTK-GPSで記録したものである。この経路に対して本報で開発した手法(レギュレータ)と既報において開発したPI制御器による手法(従来法)の走行精度を比較した。従来法の制御ゲインは既報においてゲインチューニングした値を採用した。なお走行速度は1.8 m/sとした。

図7に両走行の横方向偏差と舵角の推移を示した。グレーに着色した部分は90°旋回区間を表わしており、図6のそれと一致する。直線部分での両者の精度は変わらないものの、経路が直角になる部分では従来法は約50 cm目標経路の内側を走行しているのに対し、レギュレータは走行を通じてほとんど偏差が一定である。従来法で設定した前方注視距離は3.5 mであり、これはレギュレータのそれよりも1.5 m長い。ゆえに従来法の方

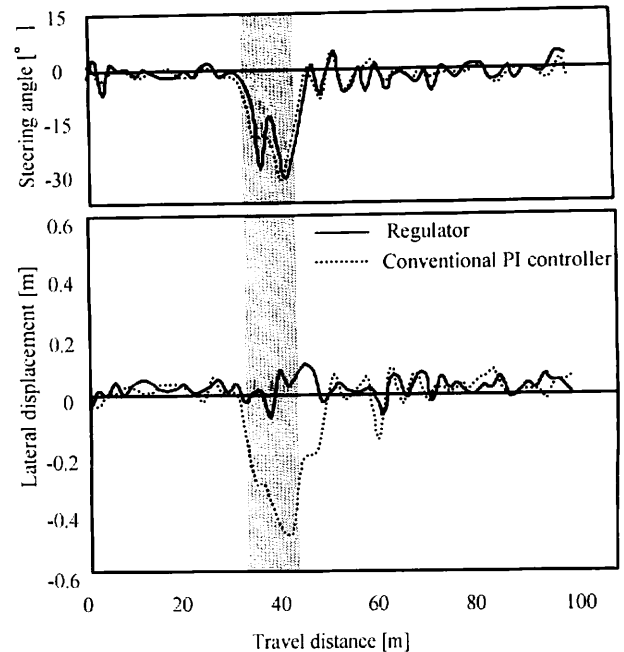


図7 直角経路を含む農道移動走行の横方向偏差と舵角の推移
Fig. 7 Lateral displacements and steering angle on the transfer path

がより経路の先を目標点とするため、直角部分でステアリングを切り始めるタイミングがレギュレータよりも早くなり、その結果経路の内側を走ってしまう。図7の舵角の推移でも直角部分において従来法のほうが早い段階でステアリングを切り始めている。仮に従来法の前注視距離をレギュレータと同じ2 mに設定したとすると、算出される目標操舵角が発散してしまい、直角経路すら追従できなくなることが既報の実験結果からわかっている。よって本結果はステアリングコントローラに運動モデルを考慮したことによって前方注視距離を短く設定することができ、曲線追従の精度を向上させることができた。

本走行においてレギュレータの最大偏差は16 cm、従来法は50 cmであった。

(2) 正弦波経路に対する追従

図8の曲線部分は振幅2.5 m、波長30 mの正弦波であり、この経路を目標経路として試験を行った。走行速度は1.8 m/sである。図9はそのときの横方向偏差の推移であり、図中①～⑤は目標経路中に同一数字で示した経路の頂点と一致することを表わしている。従来法ではロボットが常に目標経路の内側を走行し、その偏差は経路の頂点付近で30 cmにも達する。しかしレギュレータは、経路の頂点付近で僅かに偏差が大きくなるものの、その偏差はすべて15 cm以内であり、これは直角経路の追従試験結果の傾向と一致する。本試験において、レギュレータの横方向偏差の最大値は13 cm、走行全体のr.m.s.値は6 cmだったのに対し、従来法ではそれぞれ最大値が34 cm、r.m.s.値は17 cmとなり、ここでもレ

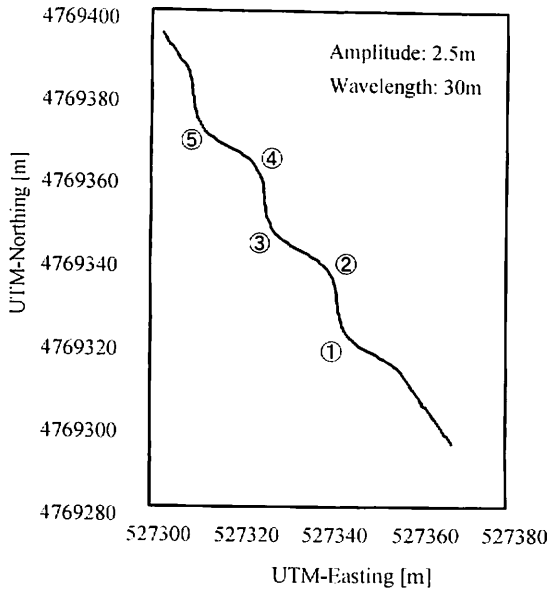


図 8 正弦波走行の目標経路
Fig. 8 Sinusoidal desired path

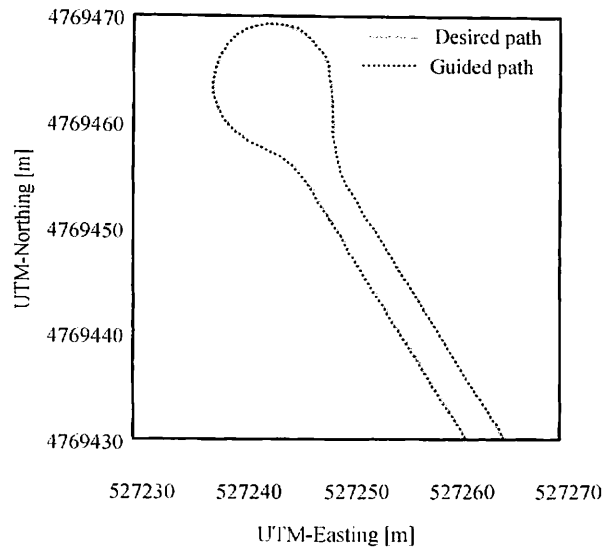


図 10 前進旋回の目標経路と走行軌跡
Fig. 10 Desired path of forward turning and guided path

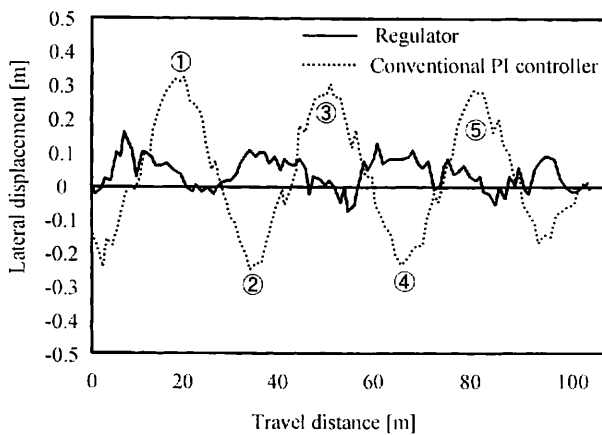


図 9 正弦波走行の横方向偏差の推移
Fig. 9 Lateral displacements on sinusoidal path

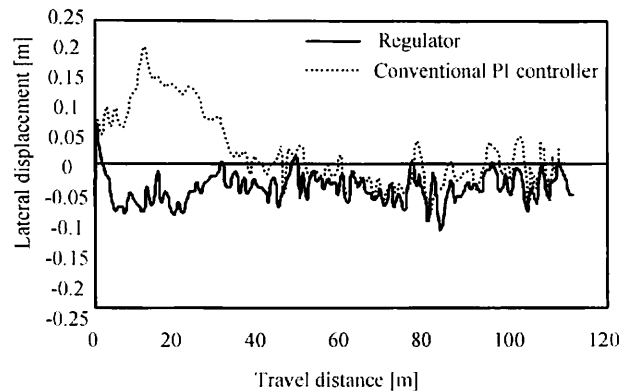


図 11 前進旋回の横方向偏差の推移
Fig. 11 Lateral displacements on forward turning

ギュレータの優位性が確認された。

(3) 前進旋回経路に対する追従

第3報の手法を用いて生成した前進旋回の経路に対して試験を行った。走行速度は1.0 m/sである。図10にそのときの目標経路と、レギュレータによる走行軌跡を示した。走行軌跡と目標経路がほぼ一致している。図11に作業開始地点（旋回経路終了地点）2 m 手前からの横方向偏差の推移を示した。レギュレータは作業開始以降では横方向偏差が15 cm 以下に抑えられたのに対して、従来法では最大偏差が25 cm となり、枕地旋回についても精度の向上が見られた。

(4) 高速走行

最後に走行速度3 m/s に設定して試験を行った。目標経路は有人走行によって取得した約80 m の直線経路である。図12に横方向偏差の推移を示した。両走行とも走

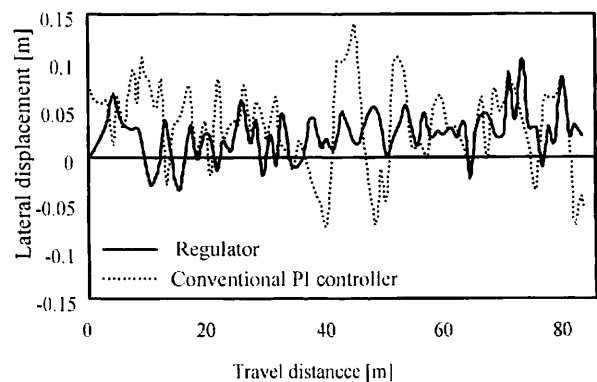


図 12 高速走行 (3.0 m/s) の横方向偏差の推移
Fig. 12 Lateral displacements on high-speed guidance (3.0 m/s)

行を通じてほぼ一定の偏差で走行している。このときレギュレータの横方向偏差の最大値は10.3cm, r.m.s. 値は3.5cmであった。一方従来法はそれぞれ最大値が13.8cm, r.m.s. 値が5.6cmであり, r.m.s. 誤差で38%精度が向上した。

IV 摘要

本報では最適制御アルゴリズムを適用したステアリングコントローラを開発し、主に目標経路が曲線で表わされるときの追従精度の向上を図った。

- 1) 運動方程式を1階の線形微分方程式で記述することによって、最適レギュレータ問題として定式化した。
- 2) 従来の2輪モデルでは、タイヤに働くコーナリングフォース F をそのタイヤに働く滑り角 α を用いて $F=K\alpha$ の形で表わすのが一般的であるが、実際は α が大きくなると F の値は飽和する。よってFialaの理論から導かれる関係式(式(4))を導入して拡張2輪モデルと呼ぶ新しい運動モデルを提案し、 α が大きいときの α と F の非線形性を補償した。
- 3) ほ場において実機実験を行った。直角経路、正弦波、前進旋回経路といった曲線経路に対する走行試験、また3.0m/sの高速走行試験を行い、既報で開発されたコントローラとの精度比較を行った。その結果、すべての試験において本報で開発したコントローラのほうが優れた成績を納めた。

参考文献

- 1) 木瀬道夫, 野口 伸, 石井一暢, 寺尾日出男: RTK-GPSとFOGを使用したほ場作業ロボット(第1報), 農機誌63(5), 74-79, 2001
- 2) 木瀬道夫, 野口 伸, 石井一暢, 寺尾日出男: RTK-GPSとFOGを使用したほ場作業ロボット(第2報), 農機誌63(5), 80-85, 2001
- 3) 木瀬道夫, 野口 伸, 石井一暢, 寺尾日出男: RTK-GPSとFOGを使用したほ場作業ロボット(第3報), 農機誌64(2), 102-110, 2002
- 4) Noguchi, N., Reid, J., Will, J., Benson, E.: Vehicle automation system based on multi-sensor integration, 1998 American Society of Agricultural Engineers Meeting, Paper No. 983111, 1998
- 5) 石井一暢, 寺尾日出男, 野口 伸: 学習機能を有した自律走行車両に関する研究(第2報), 農機誌57(6), 61-67, 1995
- 6) 倉田和彦, 中野和弘, 金子昌彦, 安達 仁: 農用自律走行車両の制御に関する研究(第1報), 農機誌55(2), 23-32, 1993
- 7) 行本 修, 松尾陽介, 野口 伸, 鈴木正壯: 耕うんロボットシステムの開発(第2報), 農機誌(60)4, 29-36, 1998
- 8) 石井一暢, 野口 伸, 寺尾日出男: NEDO地域コンソーシアムで開発したロボットトラクタ(第3報), 第60回農業機械学会年次大会講演要旨, 267-268, 2000
- 9) 阿部正人: 自動車の運動と制御, 山海堂, 49-66, 1992
- 10) 田中 孝, 他: 新版農業動力学, 文永堂出版, 214, 1991
- 11) 社団法人自動車技術学会: 新編自動車工学ハンドブック, 3-40-3-41, 1970
- 12) 加島 正, 石動善久: 動作時間を考慮した消費エネルギー最少規範によるマニピレータの軌道計画, 日本ロボット学会誌(15)7, 52-58, 1997
- 13) 加藤寛一郎: 最適制御入門, 45-46, 東京大学出版会, 1987
- 14) 2) に同じ
- 15) 農業機械学会: 新版農業機械ハンドブック, 334, 1984
(原稿受理: 2001年11月21日・質問期限: 2002年9月30日)

コメント

[読者1からのコメント]

(1) システム行列は時間に依存すると本文にあります。システム行列の固有値は経時的にどのように変化していますか。

(2) 今回提案された操舵制御アルゴリズムは、連続時間系システムとして設計されていますが、時間に依存した時変系の離散型システムを用いなかった理由があればお願いします。

[コメントに対する著者の見解]

(1) システム行列が経時的に変化するの p_r と p_s , そして速度 V といった時間に依存する要素を含むためですが、想定される p_r , p_s , V の範囲において、システム行列の全ての固有値が正となることはありませんでした。したがってこの系は安定です。

(2) 今回は運動モデルを連続時間系で記述しましたが、離散系として記述することも可能です。

[読者2からのコメント]

前方注視距離を短くすると、目標経路への追従性は向上すると思われませんが、一歩間違えると制御結果が収束しなくなる可能性があります。本報の制御方法を用いた場合、作業、速度にもよりますがどの程度の注視距離が最適でしょうか。

[コメントに対する著者の見解]

本研究では前方注視距離を試行錯誤的に決定しましたが、走行速度がほしい3.0m/s以下ならば前方注視距離は約2.0mでほぼ最適なようです。これはシミュレーションでも、実機実験でもほぼ同じ結果が得られました。ただ3.0m/sを越えると、直線、またはそれに準ずる経路ならば問題ないものの、正弦波経路に対する走行では制御結果が発散する場合も見られました。