

農用移動ロボットの曲線経路への追従制御

Tracking Control of Farm Mobile Robot for Curved Path

○陳 軍*, 鳥巢 諒**, 井前 譲***, 武田 純一**

Jun CHEN, Ryo TORISU, Joe IMAE, Jun-ichi TAKEDA

*岩手大学大学院連合農学研究科, **岩手大学農学部, ***大阪府立大学

*The United Graduate School of Agricultural Sciences, Iwate University

** Faculty of Agricultural, Iwate University

***Osaka Prefecture University

キーワード: 移動ロボット(mobile robot), 曲線経路(curved path), 追従制御(tracking control), 最適制御(optimal control)

連絡先: 〒020-8550 盛岡市上田 3-18-8 岩手大学大学院連合農学研究科 陳 軍

Tel:(019)621-6267,Fax:(019)621-6267,E-mail:u0202010@iwate-u.ac.jp

1. はじめに

日本農業を取り巻く国内外の状況は厳しく、国内では農業就労者の減少と高齢化が進行し、またグローバル化の進展で農産物が大量に輸入され、国内農業の存続さえも危ぶまれる状況である。これらの問題の解決策の一つとして、多くの農用移動ロボットの研究・開発がなされている。

本研究の目的は、任意の曲線経路が与えられたとき、予測制御の概念を採用して、曲線経路に沿って自律走行する農業移動ロボットを実現することである。このために、はじめに、最適制御理論を用いて、その曲線に沿って走行する最適レギュレータを設計する。次に、その制御器をトラクタに実装し自律移動ロボットが実現可能なことを示す。

2. 車両運動が可能な 4 次元状態空間の再構成

2.1 車両の運動の数学モデル

供試トラクタは、前輪操舵・後輪駆動車両であり、走行速度は低速で使用するため、遠心力などを無視できるものとする。従って、車両を非ホロノミック系と仮定し、図 1 に示すように車両モデルとして等価二輪運動学モデルを採用する。車両後輪軸中心 B を車両代表点と選び、状態変数を次のように定義する。

$$\mathbf{x} = [x, y, \theta, \alpha]^T \quad (1)$$

車両の運動方程式は、以下のように表される。

$$\dot{x} = V \cos \theta \quad (2)$$

$$\dot{y} = V \sin \theta \quad (3)$$

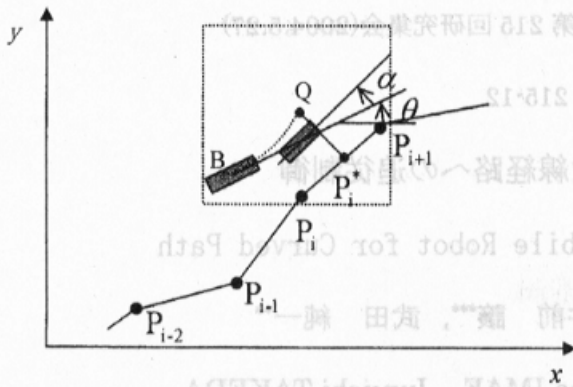


Fig.1 The vehicle kinematical model and headway viewpoint

$$\dot{\theta} = \frac{V}{L} \tan \alpha \quad (4)$$

$$\dot{\alpha} = u \quad (5)$$

ここで、 x, y : 後輪軸中心点 B の座標、
 θ : x 軸を基準とした車両の姿勢角、 α :
 車両の操舵角、 V : 車速、 u : 操舵角角速度(入力)、 L : ホイールベース。なお、 θ, α
 は反時計回りを正とする。

2.2 与えられた曲線の車両運動空間への拡張

目標経路が平面曲線 $f(\bar{x}, \bar{y}) = 0$ の形で与えられたとする。他方、車両の平面運動は、車両が剛体であるため、質点の運動のように座標位置 (x, y) だけでは十分でなく、4 変数の状態空間の部分空間として式(4)と(5)で表される θ と α も必要である。従って、平面曲線 $f(\bar{x}, \bar{y}) = 0$ で与えられる目標経路に沿って車両を走行させる追従制御を構成するためには、平面曲線と車両の現在位置 (x, y) を一致させるだけでなく、残りの状態量 θ と α も同時に一致させる必要がある。従って、追従すべき曲線軌道が平面曲線の形で与えられた場合には、次に示すように車両方程式を用いて、未知の θ と α を直接推定する方法である。

目標経路が平面上の関数 $f(\bar{x}, \bar{y}) = 0$ として与えられるとき、姿勢角 $\bar{\theta}$ と操舵角 $\bar{\alpha}$ は、以下の手順で算出される。

式(2)と式(3)から次の式(6)を得る。

$$\frac{d\bar{y}}{d\bar{x}} = \tan \bar{\theta} \quad (6-1)$$

$$\bar{\theta} = \tan^{-1} \left(\frac{d\bar{y}}{d\bar{x}} \right) \quad (6-2)$$

次に、式(6-1)を x で微分して次式を得る。

$$\frac{d^2 \bar{y}}{d\bar{x}^2} = \frac{1}{\cos^2 \bar{\theta}} \frac{V}{L} \tan \bar{\alpha} \frac{1}{V \cos \bar{\theta}}$$

$$\bar{\alpha} = \tan^{-1} \left(\frac{d^2 \bar{y}}{d\bar{x}^2} L \cos^3 \bar{\theta} \right) \quad (7)$$

以上の計算により、状態量 $\bar{\theta}$ と $\bar{\alpha}$ を算出することができる。具体的な計算手順は以下の通りである。

【 $\bar{\theta}, \bar{\alpha}$ の計算アルゴリズム】

Step0: 与えられた曲線経路 $f(\bar{x}, \bar{y}) = 0$ を、図1に示すように N 個の閉区間に分割し、その端点を P_i ($0 < i \leq N-1, N$: 総数) とし、それらを結んだ折れ線を $\Omega = [\bar{x}, \bar{y}]^T$ とする。

Step 1: 中心差分公式を用いて P_{i-1} と P_{i+1} から目標軌道の姿勢角 θ_i を求める。

$$\theta_i = \tan^{-1} \frac{y_{i+1} - y_{i-1}}{x_{i+1} - x_{i-1}} \quad (8)$$

Step 2: 2階の中心差分公式を用いて操舵角 α を求める。

$$\frac{d^2 y_i}{dx_i^2} = \frac{y_{i+1} - y_i}{x_{i+1} - x_i} - \frac{y_i - y_{i-1}}{x_i - x_{i-1}} \quad (9)$$

$$\alpha_i = \tan^{-1} \left(L \cos^3 \theta_i \frac{d^2 y_i}{dx_i^2} \right) \quad (10)$$

なお、曲線経路 $f(\bar{x}, \bar{y}) = 0$ が与えられたとき、他の状態量を求める上での問題は、数学的には式(2)～(5)の微分方程式と関数関係 $f(\bar{x}, \bar{y}) = 0$ を連立させて未知関数を求める問題でもある。

3. 曲線を追従する制御器の設計

3.1 目標点の選択

人が車両を運転するとき、車両の前方注視

点と目標コースの偏差を無くすように運転するということ（目標値の過去・現在値だけでなく未来値も利用している）であると知られている (Hayase et al., 1969, Kumamoto et al., 1999)。

本研究では、図1に示すように、車両の中心線前方で後輪点 B から L_Q ($=BQ$) の距離にある点 Q を前方注視点と定める。この点 Q は現在の操舵角を保ったまま時間 τ 進んだとき到達する車両の近未来の位置 (x, y) を表し、これから、次に示すように未来の状態量が計算できる。ここでは、記号 Q で未来の位置と未来の状態量の2つを表し、共に未来値と呼ぶ。上の定義より、座標 Q の未来値 $(x_Q, y_Q, \theta_Q, \alpha_Q)$ は次のように表される。

$$\begin{cases} x_Q = x + \frac{2LV\tau \cos\theta - V^2\tau \tan\alpha \sin\theta}{2L} \\ y_Q = y + \frac{V^2\tau^2 \tan\alpha \cos\theta + 2LV\tau \sin\theta}{2L} \\ \theta_Q = \theta + \frac{V\tau}{L} \tan\alpha \\ \alpha_Q = \alpha \end{cases} \quad (11)$$

但し、ここで、 x, y, θ, α は現時刻の値を表す。

次に、車両未来値(前方注視点)と目標経路の偏差を無くすためには、目標経路上の点をどのように定めるかが問題となる。ここでは、曲線経路を近似した折れ線集合 Ω 上で車両未来値 Q からの距離が最小のものを計算機で算出し、この点を目標点 P_i^* と定義した。これを用いると、与えられた曲線路に追従する制御系の設計は、目標値 P_i^* と未来値である制御量とのずれを総合的に小さくしようというもので、全制御区間にわたってある評価関数

を最小とするという最適制御理論の枠組みの中で問題の定式化が自然にできる (Egami T., et al., 1987)。

【 P_i^* の算出アルゴリズム】

Step0: 図1に示すように、Q 点の位置座標 (x_Q, y_Q) を図心とした正方形 BOX を作成する。ただし、この BOX は、1辺 2m として計算を行った。

Step1: 設定した BOX の中において、Q 点より 1 番近い折れ線の点 P_i を求める。

Step2: もし P_i が $|P_i B| < L_Q$ になれば、区間 $[P_i, P_{i+1}]$ の中で Q 点より近い点 P_i^* を求め

る。もし $|P_i B| \geq L_Q$ になれば、区間 $[P_{i-1}, P_i]$ の中で Q 点より近い点 P_i^* を求める。

Step3: 次式から P_i^* 点の姿勢角 θ_p と操舵角 α_p を求める。

$$\theta_p = \bar{\theta}_i + \frac{|P_i^* P_i|}{|P_{i+1} P_i|} (\bar{\theta}_{i+1} - \bar{\theta}_i) \quad (12)$$

$$\alpha_p = \bar{\alpha}_i + \frac{|P_i^* P_i|}{|P_{i+1} P_i|} (\bar{\alpha}_{i+1} - \bar{\alpha}_i) \quad (13)$$

なお、時刻 τ は後で示すように自動追尾式測距儀のサンプリング時間の平均値である。

3.2 目標点近傍での線形化車両運動方程式の導出

本研究は、前述したように拡張された最適トラッキング問題として定式化し、数値解法を利用して解を得る。解析解を得るためには、状態方程式が 1 階の線形微分方程式の形で表され、評価関数が 2 次形式であることが必要だが、式(2)~(4)は非線形微分方程式である。

このままでは解析解を得ることが困難である。そこで、時変形手法および区分解法的なフィードバック制御法を利用する (Murray, 1995, Colbaugh et al., 1996)。

車両ロボットの未来値 Q の状態ベクトルを x_Q 、曲線経路の目標点 P_i^* の状態ベクトルを \bar{x}_p とする。目標点を $\bar{x}_p = [\bar{x}_p, \bar{y}_p, \bar{\theta}_p, \bar{\alpha}_p]^T$ で表し、各偏差をそれぞれ $\delta x = x_Q - \bar{x}_p$,

$\delta y = y_Q - \bar{y}_p$, $\delta \theta = \theta_Q - \bar{\theta}_p$, $\delta \alpha = \alpha_Q - \bar{\alpha}_p$ と表す。

このとき、ロボットが曲線経路に沿って走行することは、時々刻々の偏差: $\delta x = x_Q - \bar{x}_p$ を制御区間に渡って極力零にすることと定義される。

式(2)~(5)の1次変分を取って線形化すると、運動を表す新しい状態方程式は以下のようになる。

$$\dot{\delta x} = A(t)\delta x + B(t)\delta u \quad (14)$$

ただし、 $\delta x = [\delta x, \delta y, \delta \theta, \delta \alpha]^T$ は新しい状態量、

$\delta u = [\delta V, \delta u]^T$ は制御量である。

また、 $A(t), B(t)$ は以下のように表される。

$$A(t) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -V \sin \bar{\theta}_p & 0 \\ 0 & 0 & V \cos \bar{\theta}_p & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{V}{L \cos^2 \bar{\alpha}_p} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$B(t) = \begin{bmatrix} \cos \bar{\theta}_p & 0 \\ \sin \bar{\theta}_p & 0 \\ \frac{\tan \bar{\alpha}_p}{L} & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

一方、終端時間が有限な最適制御問題の解はリカッチ微分方程式となるため、その解法が非常に困難である。これを回避するため、ここでは終端時間無限の最適制御問

題として定式化し、リカッチ代数方程式として解を得るようにした。すなわち、式(14)を終端時間無限の最適トラッキング問題として定式化する。なお、評価関数は式(15)で表す。

$$J = \int_0^{\infty} (\delta x^T Q \delta x + \delta u^T R \delta u) dt \quad (15)$$

ここで、 Q の各対角要素は各状態量に対する重み、 R は操作量の重みである。目標軌道に対する追従性に関して x , y , θ を重視し、速度の変化量は制御システムに対する影響を少なくなるため、本研究では重み Q と R をそれぞれ以下のように設定した。

$$Q = \begin{bmatrix} 10 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 10 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 10 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad R = \begin{bmatrix} 10000 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

とした。

ところで、最適レギュレータ理論によると、状態方程式(14)と評価関数(15)に対する最適制御は、Riccati 代数方程式と呼ばれる(16)式を解くことになり得られることが知られている。すなわち、

$$(PA + A^T P - PBR^{-1}B^T P + Q = 0 \quad (16)$$

式(17)を解くことより、フィードバックゲイン

$$K = R^{-1}B^T P \quad (17)$$

を求める。

求めたゲイン K を $K = [K_v, K_u]^T$ で表す。

ここで、 K_v は操作量として速度の変化量 δV に関するゲインであり、 K_u は操作量として操舵角速度の変化量 δu に関するゲインである。求めた速度制御のゲインは非常に小さいので、本研究のロボット車両では速度を制御しない条件が保証できる。したがって、この最適制御則を実装する場合には、次(18)のようにとる。

$$\delta u = -K_u X \quad (18)$$

4. 実車実験

4.1 供試車両と測定装置

ロボット車両はトラクタ(三菱, 2501D)を改造した。ナビゲーション・システムは図2に示すように外界センサ方式を採用し、車両位置 (x, y) の測定は自動追尾式測距儀(ライカ, TCA1105)を用いた。自動追尾式測距儀からの位置情報は無線モデム(八重洲無線, YRM-311)を介しトラクタに搭載したに記録した。測距儀の出力するサンプリング時間は一定でなく、その平均値は0.65秒あった。姿勢角 θ の計測は光ファイバージャイロ(JAE, JG-35FD)を用いた。このジャイロは時間ドリフト $0.5^\circ/h$, 0.01° の分解能で車両の相対方位を計測できる。操舵角 α の計測は、リニア変位計(共和, DTP-05MDS)を用い回転角に変換した。なお、操舵角 α の制御は、トラクタのハンドル部に装着したDCサーボモータ(澤村電気工業, SS60E30-L4-25)

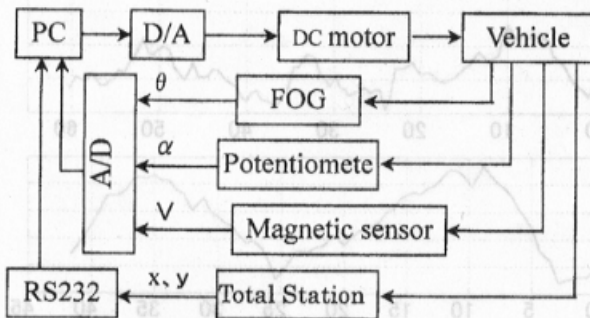


Fig. 2 The vehicle navigation system

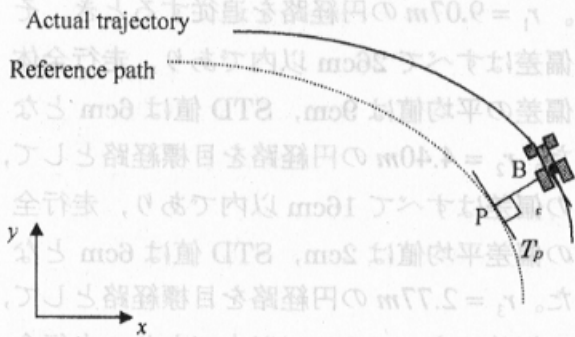


Fig. 3 Evaluation with lateral displacement

を利用した。

4.2 誤差の評価

トラクタ走行軌道の目標経路からの誤差を評価するため、図3に示すように、誤差をトラクタの点Bから目標経路曲線への最短の距離とした。すなわち、横方向偏差 ε (点と曲線の距離)で定義した。曲線上の点Bより最短距離の点Pの法線ベクトル \overline{BP} を作成する。

$$\varepsilon = \pm \sqrt{(x - x_p)^2 + (y - y_p)^2} \quad (19)$$

ここで、ベクトル \overline{BP} は弧中心に向くとき、プラスになると拘束する。なお、 T_p は点Pでの接線である。

4.3 圃場での走行実験

自律走行実験は岩手大学附属寒冷フィールドサイエンス教育研究センタ(御明神農場)内の牧草地で、正弦波経路と円経路を設定し、これらに対する追従制御を行った。

正弦波経路に対する追従特性

図4に目標経路(破線)と実際の走行軌跡(実線)を示す。目標経路は振幅2.0m、波長18.8mの正弦波関数 $y = 2 \sin(x/3)$ で与えた。なお、走行速度は0.5m/sとした。図5はそのときの走行軌跡の目標経路からの横

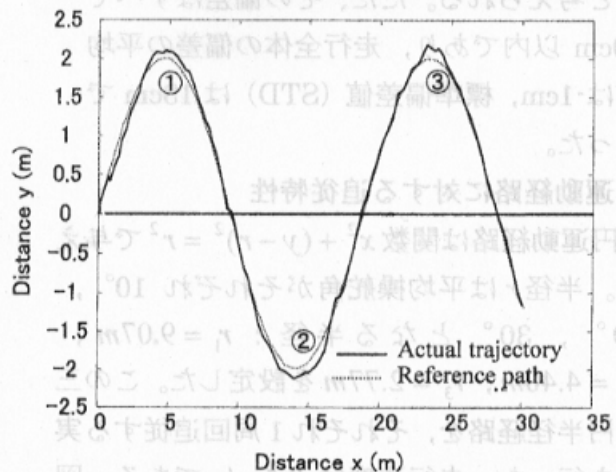


Fig. 4 Sinusoidal desired path and guided path

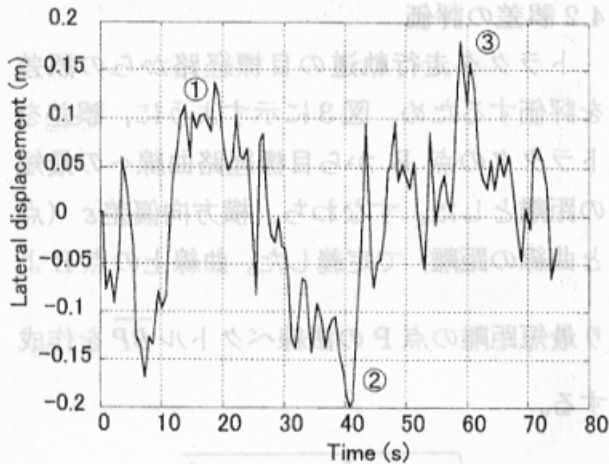


Fig. 5 Lateral displacements on sinusoidal path

方向偏差の時間的推移を表す。図4と5の①～③は正弦波の3つの頂点を表している。これらの頂点付近では偏差が大きくなっているが、これは頂点付近では経路の曲率の変化が大きいため、制御系の時間遅れが発生し、制御精度が劣化したためと考えられる。また、もう一つ原因として車両モデルに関することがある。トラクタの運動経路の曲率が大ききときには、当然トラクタの横滑りも大きくなる。しかし、本システムではトラクタの横滑りを考慮していないからである。これらの原因により、総合的に頂点付近では偏差が大きくなったものと考えられる。ただ、その偏差はすべて20cm以内であり、走行全体の偏差の平均値は-1cm、標準偏差値(STD)は13cmであった。

円運動経路に対する追従特性

円運動経路は関数 $x^2 + (y-r)^2 = r^2$ で与えた。半径 r は平均操舵角がそれぞれ 10° , 20° , 30° となる半径: $r_1 = 9.07m$, $r_2 = 4.40m$, $r_3 = 2.77m$ を設定した。この三つ円半径経路を、それぞれ1周回追従する実験を行った。走行速度は $0.5m/s$ である。図6にそれぞれの目標経路と走行軌跡を示した。図7はこのときの横方向偏差の推移であ

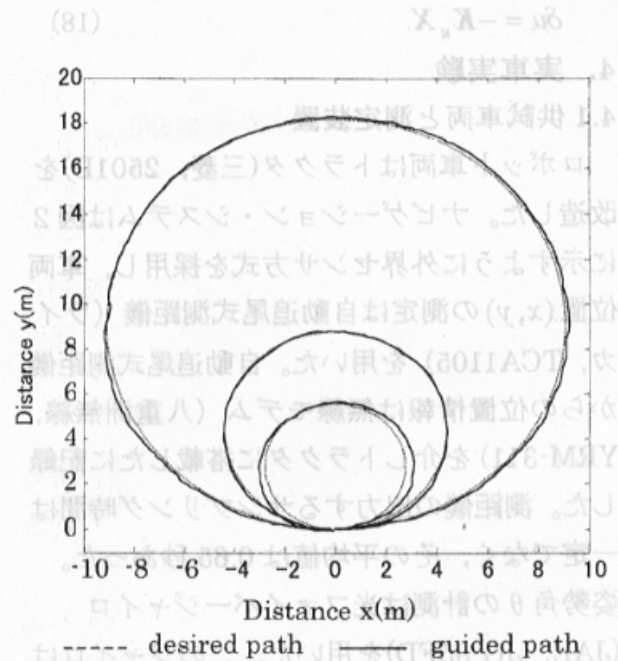


Fig. 6 Circular desired paths and guided paths

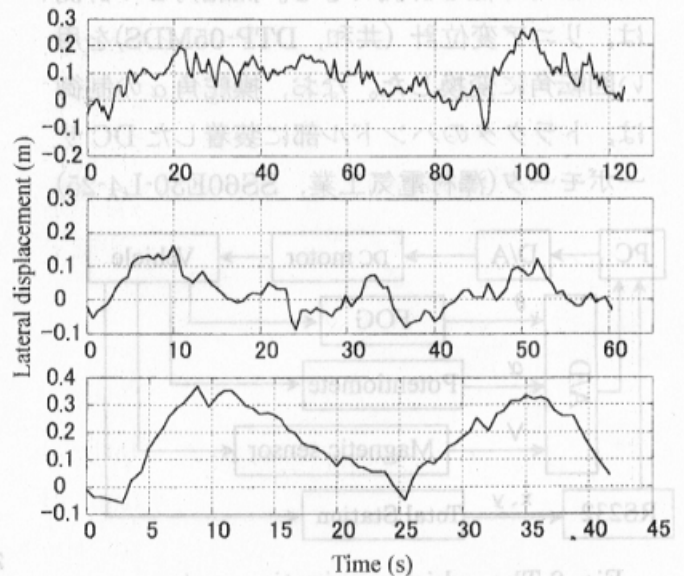


Fig. 7 Lateral displacements on circular paths

る。 $r_1 = 9.07m$ の円経路を追従するとき、その偏差はすべて26cm以内であり、走行全体の偏差の平均値は9cm、STD値は6cmとなった。 $r_2 = 4.40m$ の円経路を目標経路として、その偏差はすべて16cm以内であり、走行全体の偏差平均値は2cm、STD値は6cmとなった。 $r_3 = 2.77m$ の円経路を目標経路として、その偏差はすべて37cm以内であり、走行全体の偏差平均値は17cm、STD値は12cmであった。

5. おわりに

本報では、はじめに、時変形手法および区分解析的なフィードバック制御系の設計手法を利用して、最適制御理論を適用した農用ロボットの追従制御のためのコントローラを開発した。次に、開発した制御器を移動ロボットに実装し、曲線で与えられた目標経路を追従走行する実車実験を行い、提案した制御方法の追従精度を検討した。

1) 運動方程式を1次変分し、目標点近傍での1階の線形微分方程式で記述した最適予見制御問題として定式化した。

2) 簡便法で推定した姿勢角と操舵角を用いて、与えられた曲線経路から状態空間を再構成した。車両未来値情報を利用した予見制御系を構成した。

3) 牧草地で、トラクタとナビゲーションシステムを利用した実車実験を行った。代表経路として1つの正弦波経路と3つの円経路を設定し、それらの曲線路に追従する自律走行実験を行った。その結果、偏差はすべて37cm以下に抑えることができた。

参考文献

1) Hayase M., Ichikawa K., 1969. Optimal Servosystem Utilizing Future Value of Desired Function, The Collection of the Society of Instrument and Control Engineers Papers, 5(1), 86-94

2) Kumamoto H., Nishihara O., Tenmoku K., et al., 1999. Automated Robust Vehicle Steering on Smoothly Connected Arc Course -Non-Linear Reduced-Dimension Sliding Mode Controller-, The Collection of the Society of Instrument and Control Engineers Papers, 35(3), 340-348

3) Yoshimoto K., 1971. Simulation of Man-Automobile System, Automobile Technology, 25(10), 1058-1064

4) Ogata K., 2002. Modern Control Engineering, Fourth Edition, Prentice Hall, Upper Saddle, New Jersey 07458, 779-783.

5) Egami T., Shinada K., Tsuchiya T., 1987. Partial State Feedback Control System Synthesis Method with Preview Feedforward Compensation, The Collection of the Society of Instrument and Control Engineers Papers, 23(12), 1260-1267

6) Athans M., Falb P., 1966. Optimal control, McGraw-Hill Book Company, 793-801

7) Murray, R.M., 1995. Nonlinear Control of Mechanical Systems. A Lagrangian perspective, Nonlinear control systems design 1995(A. J. Krener, et al., Eds), 349-360

8) Colbaugh, R. et al., 1996. Adaptive Control of Nonholonomic Mechanical Systems, Pro. 35th IEEE CDC, Kobe, 1428-1434