

移動ロボットによる車線変更について

Lane Change Control for a Tractor-like Robot

○陳 軍*, 鳥巢 諒**, 井前 譲***, 武田 純一**
Jun CHEN, Ryo TORISU, Jyo 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: 最適制御(optimal control), 移動ロボット(tractor-like robot), 車線変更(lane change)

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

ここでは車線変更を二つの平行な走行レーンがあるとき一つのレーンを直線走行している状態から車線変更を始めて、もう一つのレーンに車線変更終了後再び直線走行するという一連の操作とする。

本研究で利用した車両運動方程式は非ホロノミックな拘束を受ける非線型システムである。非ホロノミックシステムの制御装置設計においては時変形手法および区分解析的なフィードバック制御法がこれまでの代表的な手法として挙げられるが、ここでは、井前らによって、提案された手法を利用する。即ち、フィードバック制御のみに頼ることな

く、フィードフォワード制御と融合させることにより高機能な制御装置を得ようとする考え方である¹⁾。具体的には誘導軌道生成はフィードフォワード制御器で行い、外乱およびモデル誤差などに対してはフィードバック制御器を機能させ対処しようとする手法である。

本研究では、直線路上にある車両を $H(m)$ 離れたもう一つの平行な直線路に移動させることが目的である。ただし①トラクタの速度 v は一定である。②操舵角は最大操舵角 α_m を超えないという拘束条件が与えられている。

2. 車線変更問題の定式化

対象車両は前輪操縦・後輪駆動のトラクタ、また、トラクタは剛体とし、トラクタの走行速度は低速で遠心力やコーナリングフォース等の外力の影響が無視できる。Fig.1 に示す2輪等価モデルで表すものとする。運動学的な関係により状態方程式として次式(1)が得られる。この場合ドリフト項は含まれていない。

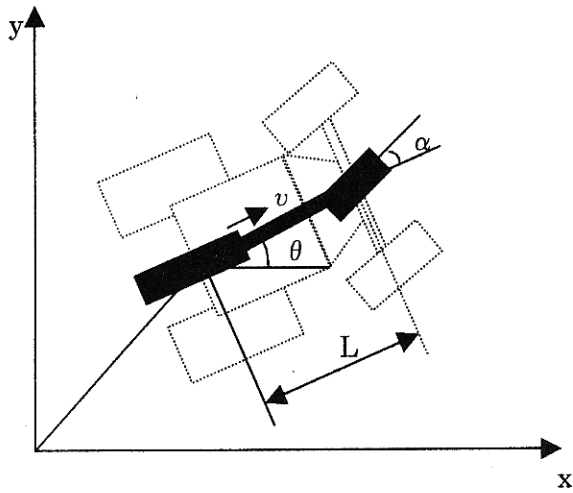


Fig.1 Model of the tractor

$$\begin{cases} \dot{y} = v \sin \theta = f_1 \\ \dot{\theta} = \frac{v}{L} \tan \alpha = f_2 \\ \dot{\alpha} = u = f_3 \end{cases} \quad (1)$$

ここで、

x, y : 後輪後輪軸中心点の座標 [m]

θ : x 軸を基準としたトラクタの姿勢角 [°]

α : トラクタの操舵角 [°]

v : 車速 [m/s]

u : ハンドル操舵角の角速度 [°/s]

L : ホイルベース [m]

であり、 θ と α は反時計回りを正とする。

3. 基準軌道の生成

与えられる初期状態に対し、トラクタ誘導軌道を短時間で生成する必要がある。そのために、初期状態に対して誘導軌道を予め計算しておく。すなわち準備初期状態(0,0,0)から

終端状態 $(H, 0, 0)$ へ至る基準軌道を次のように計算した。

車両運動方程式

$$\begin{bmatrix} \dot{y} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\alpha} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v \sin \theta \\ v \tan \alpha / L \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} u \quad (2)$$

拘束条件 $|\alpha| \leq \alpha_m$

したがって状態方程式(2)、初期状態(0,0,0)のもと、評価関数

$$\begin{aligned} J = & (y(T_f) - H)^2 + \theta^2(T_f) \\ & + \alpha^2(T_f) + \int_0^{T_f} \left(\frac{r_1}{\alpha_m^2 - \alpha^2} \right) dt \end{aligned} \quad (3)$$

を最小とする最適制御問題を解くことにより、最適誘導 $(\bar{y}, \bar{\theta}, \bar{\alpha})$ を固定制御区間 $[0, T_f]$

のもとに算出した。そのとき、収束条件を $J \leq 0.0005$ とした。本研究には、井前らの二次アルゴリズム計算法を用いた最適制御解を得て^{2,3)}、 $v = 0.5$ m/s、 $r_1 = 0.0001$ 、 $H = 10$ (m) と $H = 3$ (m) 時の基準軌道を求めた。

4. フィードバックゲインの算出

まず、式(2)の線形化を行う。次式は式(2)の線形化式である。

$$\delta \dot{x} = \begin{bmatrix} 0 & v \cos \bar{\theta} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{0}{L * \cos^2 \bar{\alpha}} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \delta x + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \delta u \quad (4)$$

ここで、 $\delta x = x - \bar{x}, \delta u = u - \bar{u}$,

$$X = (x, y, \theta, \alpha)^T, U = u$$

式(4)は、 $\dot{X} = AX + BU$

という線形の形で表されており、 X は状

態量、 U は操作量である。

ここで：

$$X = \begin{bmatrix} \delta y \\ \delta \theta \\ \delta \alpha \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y - \bar{y} \\ \theta - \bar{\theta} \\ \alpha - \bar{\alpha} \end{bmatrix} \quad U = \phi - \bar{\phi}$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & \bar{v} \cos \bar{\theta} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{\bar{v}} \\ 0 & 0 & L \cdot \cos^2 \bar{\alpha} \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

次式の評価関数を加えれば、

$$J(U) = \int_0^{\infty} X^T(t) Q X(t) + U^T(t) R U(t) \quad (5)$$

車両運動方程式が線形微分方程式と二次形評価関数で表される。この評価関数を最小化することが問題となっており、積分区間は無限時間をとっている。ここで、 Q, R は（対称で）準正定、（対称で）正定である。

$$Q = \begin{bmatrix} 100 & 0 & 0 \\ 0 & 100 & 0 \\ 0 & 0 & 5 \end{bmatrix} \quad R = 1$$

このときリカッチ方程式は以下のようになる。

$$PA + A^T P - PBR^{-1}B^T P + Q = 0 \quad (6)$$

最適制御則

$$U(t) = -R^{-1}B^T P X(t) \quad (7)$$

となる。式(7)による状態フィードバックを最適レギュレータと呼ぶ。よって式(7)から、

$$U = -KX \quad (K = R^{-1}B^T P) \quad (8)$$

ここで、 K はフィードバックゲインである。

5. シミュレーション

求めたゲインを利用して、シミュレーションを行った。実際にトラクタは直進運動するとき、状態量は $y = 0.0(\text{m})$ 、 $\theta = 0.0(^{\circ})$ 、

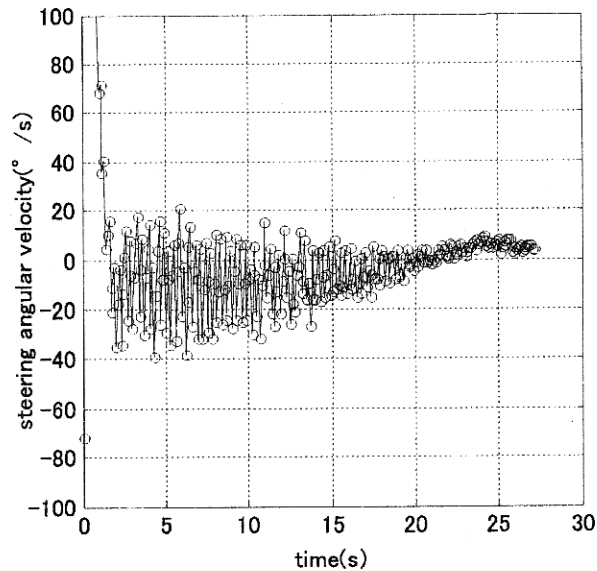


Fig.2 Time histories of steering angular velocity

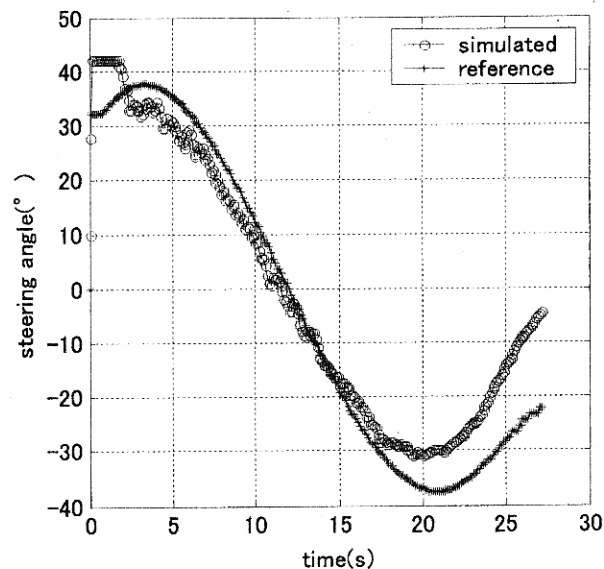


Fig.3 Time histories of simulated and reference steering angle

$\alpha = 0.0(^{\circ})$ を満たすことがほぼ不可能。このため、シミュレーションするときにはトラクタの状態量は $y = 0.2(\text{m})$ 、 $\theta = -5(^{\circ})$ と $\alpha = 10.0(^{\circ})$ を与えて、 $H = 10(\text{m})$ の直線へ車線変更のシミュレーションを行う。シミュレーションの結果は Fig.2、Fig.3、Fig.4と Fig.5 で表す。27.1秒を経ての終端結果は

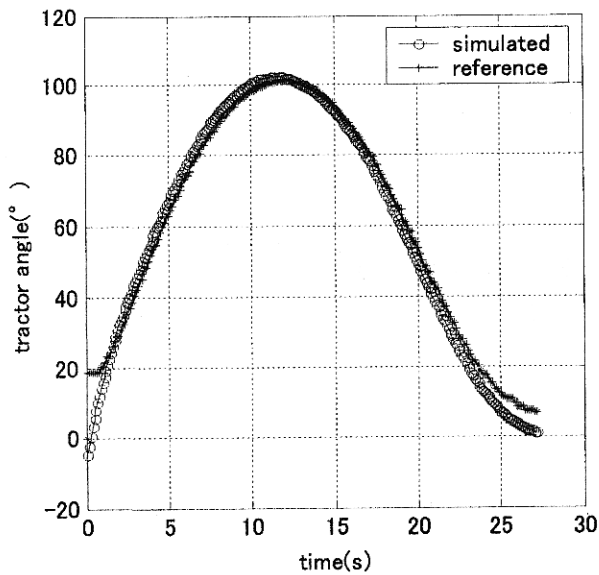


Fig.4 Time histories of simulated and reference tractor angle

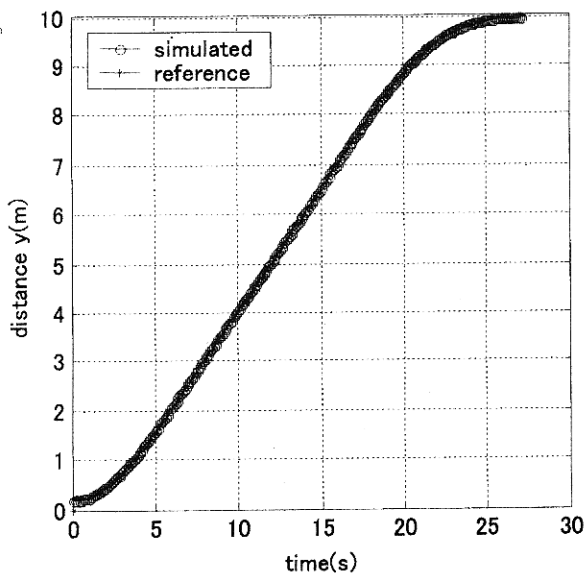


Fig.5 Time histories of simulated and reference trajectory

$y = 9.952 \text{ (m)}$ $\theta = 0.937^\circ$, $\alpha = -4.309^\circ$)である。

Fig.5 は状態量としてトラクタの y 座標の時間変位を表した図であり、 y 座標に関しては完全に基準軌道に追従しているのが分かる。また姿勢角を示した Fig.4 から、姿勢角は滑らかな動きが伺える。ハンドル角を示した Fig.3 から、はじめにハンドルを激しく切

り替えて、最大ハンドル角になった。ハンドル角速度の時間変位を表した図 Fig.2 から、はじめにハンドル角速度は、トラクタでは実現できない角速度になっている。これは本システムに拘束条件のハンドル角速度を加えないため、結果としてこのような現象が生じてしまう。Fig.3 と Fig.4 から、ハンドル角が大きく変化しても姿勢角はあまり大きな変化をしていないのが分かる。

6. 実車実験

ロボット車両は市販トラクタ(三菱2501D)を改造したものである。自動追尾式のトータルステーションを利用して、トラクタの位置情報を得る。車両方位の計測には FOG(JAE, JG-35FD)を採用した。JG-35FD は時間ドリフト $0.5^\circ / \text{h}$, 0.01° の分解能で車両の相対方位を計測することができる。ハンドル角の計測を行うため、変位計 DTP-05MDS(共和)を用いた。ハンドル角の制御を行うため、DC サーボモータ(澤村電気工業)を装着した。

岩手大学の西下台のアスファルト路面で、実車実験を行った。H=3(m)と H=10(m)二つの実験をした。

まず、目標レーン 3(m)について。図 Fig.6、Fig.7、Fig.8、Fig.9、Fig.10 では H=3(m)の実験の結果を表した。実験するとき、トラクタの初期状態は $y = 0.002 \text{ (m)}$, $\theta = 0.182^\circ$, $\alpha = 0.201^\circ$)であり、終端状態は $y = 3.035 \text{ (m)}$, $\theta = 0.546^\circ$, $\alpha = -10.032^\circ$)であり、制御時間は 23.31秒である。姿勢角を示した Fig.8 と y 座標を示した Fig.9 から、時間 8.64 秒、12.46 秒、16.30 秒、19.62 秒等に姿勢角 θ と座標 y は若干不自然な挙動が表れている。このことから、トラクタに対して何かの外乱が加わったことが推測される。しかしその後、軌道修正

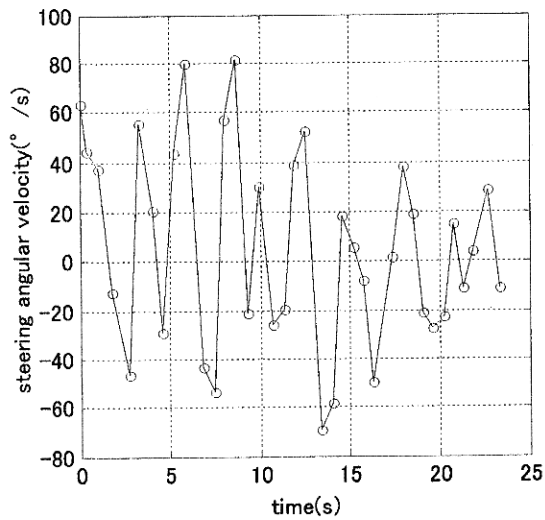


Fig. 6 Time histories of steering angular velocity

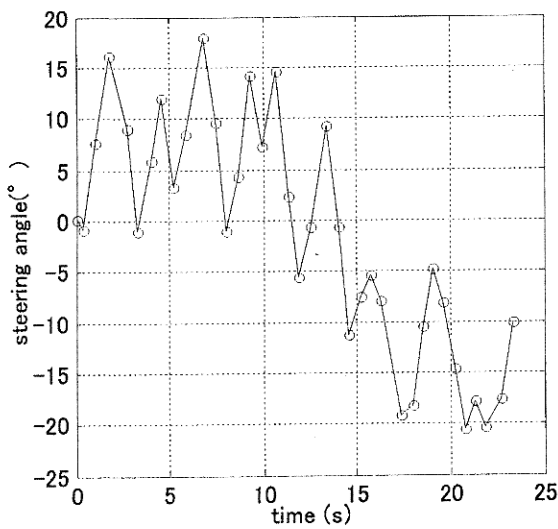


Fig. 7 Time histories of steering angle

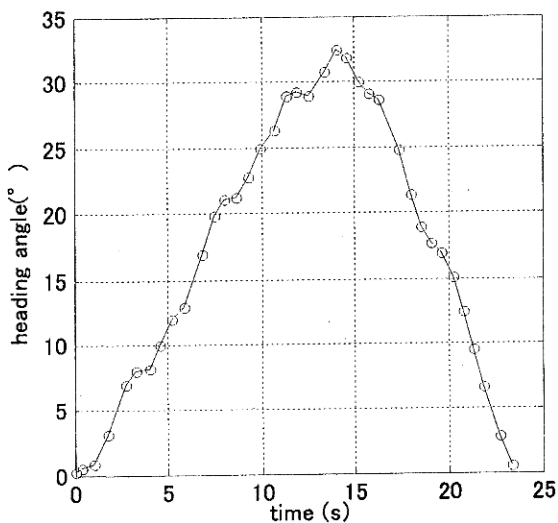


Fig. 8 Time histories of heading angle

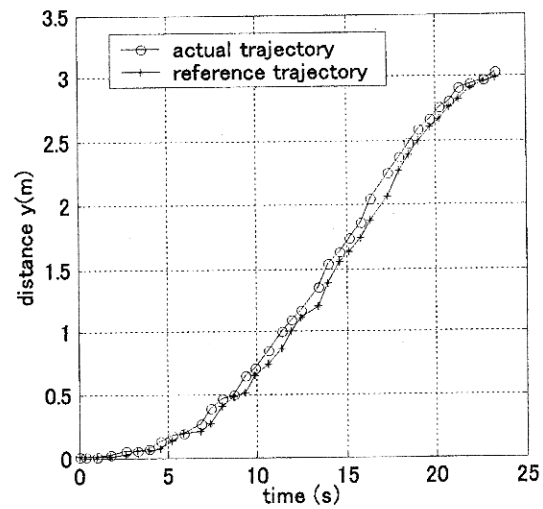


Fig. 9 Time histories of actual and reference trajectory

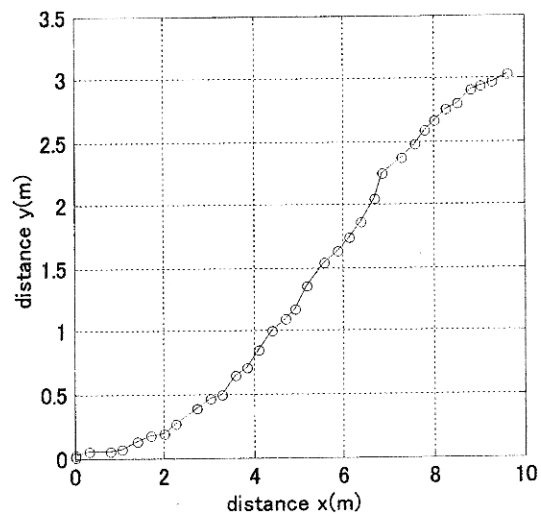


Fig. 10 Actual trajectory

しており、実車においてもフィードバック制御の有効性が伺える。ハンドル角を示した Fig. 7 から見ると、姿勢角を少し変化させる外乱が加わり、直後ハンドル角に大きな変化が表れているので、外乱に対しての即応性が推察される。

次に、目標レーン 10(m) について。図 Fig. 11、Fig. 12、Fig. 13、Fig. 14、Fig. 15 では $H=10(m)$ の実験の結果を表した。実験するとき、トラクタの初期状態は $y = 0.001(m)$ 、 $\theta = 0.182(^{\circ})$ 、 $\alpha = -3.047(^{\circ})$

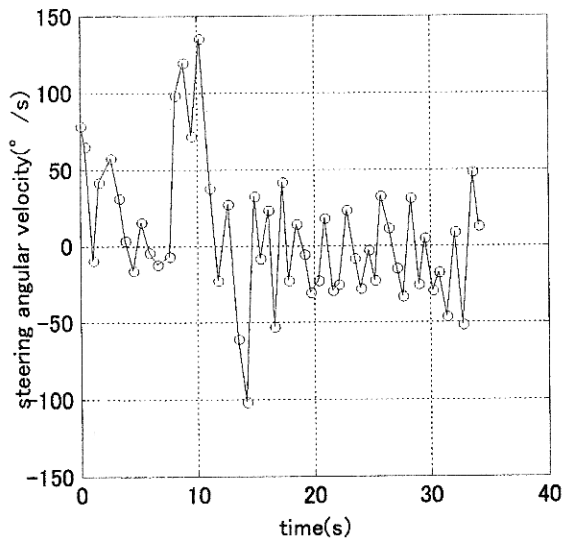


Fig.11 Time histories of steering angular velocity

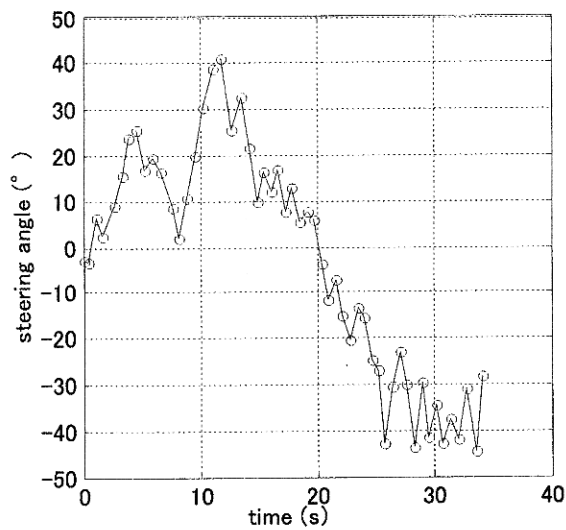


Fig.12 Time histories of steering angle

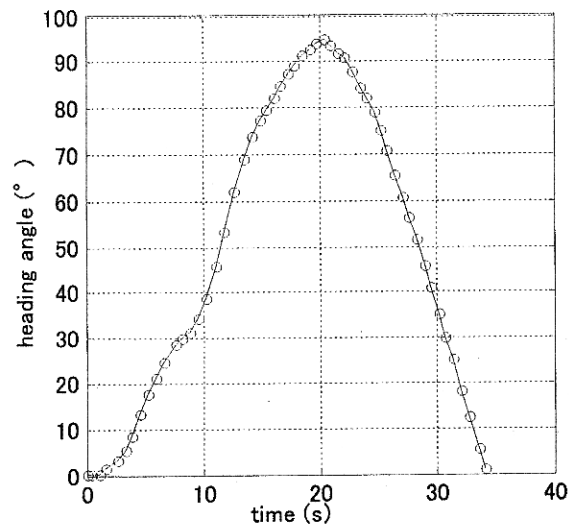


Fig.13 Time histories of heading angle

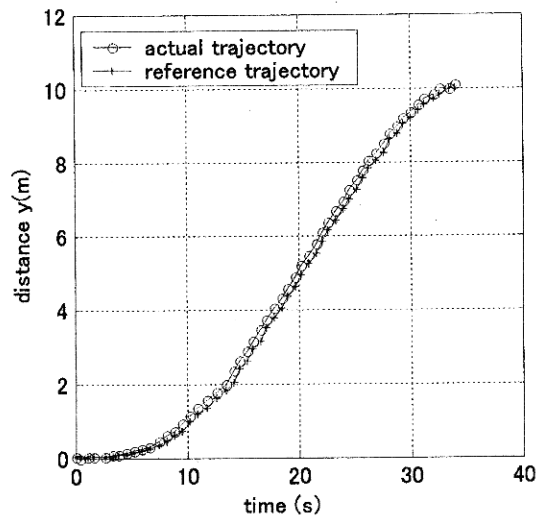


Fig.14 Time histories of actual and reference trajectory

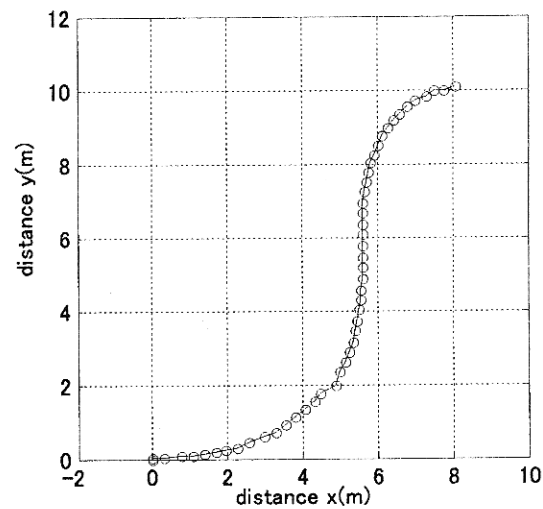


Fig.15 Actual trajectory

であり、終端状態は $y = 10.077$ (m)、 $\theta = 0.91^\circ$ 、 $\alpha = -28.327^\circ$ であり、制御時間は 34.056 秒である。姿勢角を示した Fig.13 と y 座標を示した Fig.14 から、時間 8.231 秒に姿勢角 θ と座標 y は不自然な挙動が表れている。このことから、トラクタに対して何かの外乱が加わったことが推測される。

ハンドル角を示した Fig.7 と Fig.12 から、ハンドルを頻りに切り替えていることが分かる、これは、制御するとき、トータルステーションでトラクタの位置情報を取得す

るときに、サンプリング時間は非固定値、計算した制御量ハンドルの変化量に誤差がある原因の一つである。ハンドルを真っ直ぐにする制御は、比較的難しいことが伺える。トラクタの運動軌跡を示した Fig.10 と Fig.15 から、トータルステーションのサンプリング時間が長く、かつ変数だから、終端状態の誤差がちょっと大きくなっている、この問題を解決するには、サンプリング時間が一定、かつ短い計測装置を採用する必要がある。

Fig.6 と Fig.11 は制御量としてハンドル角速度を表した。Fig.6 と Fig.11 から、ハンドル角速度は、ときどきトラクタでは実現できない角速度になっている。これは本システムに拘束条件のハンドル角速度を加えないため、結果としてこのような現象が生じてしまう。

実車実験は総合的に見て、良い結果がえられた。

7. まとめ

本研究では、フィードバック制御とフィードフォワード制御と融合させる制御法を利用して、移動ロボットの車線変更について研究した。

1) フィードフォワード制御器で誘導軌道生成を行った。トラクタの車両特性に関する拘束条件、「最大操舵角拘束」を導入し、約束条件 J を満足して、時間が短い誘導軌道を求める。

2) 生成された基準軌道に関して、フィードバック制御ゲインを求めた。目標レーンより 10m の車線変更制御のシミュレーションを行った。トラクタの y 座標と姿勢角を誘導軌道に追従させた。

3) 実車実験を行った。トラクタの y 座標と姿勢角は良く追従できた。しかし、トータルステーションからのサンプリング時間が一定でないため、ハンドル角速度の誤差が

大きくなる。また、サンプリング時間が大きいため、終端状態量 y の誤差が大きくなる。この問題を解決するには、サンプリング時間を一定で、かつ短くするように計測必要がある。

参考文献

1. 井前 譲, 結城 康浩, 鳥巢 諒: トラクタ作業機系の自動装着のための誘導制御装置設計, シミュレーション 17(2)(1998)、42~133
2. 井前 譲, 箱守 京次郎: 最適制御問題に関する 2 次アルゴリズム, SICE 論文集、23-10(1987)、1100~1102
3. 鳥巢 諒, 田中 健一, 井前 譲: 最適制御理論による枕地最短旋回時間問題(第 2 報)—トラクタに後退も許す場合と一般的な軌道計画問題—, 農業機械学会誌 60(3)(1998)、45~53