

草地におけるトラクタ・作業機系の自動装着のための誘導の実現

Tracking Control of the Tractor to Implement Position on Grassland

○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), 自動装着(auto-coupling), 二段階制御(two-step control), 誘導制御(guide 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

I 緒言

トラクタは各種作業機を装着して使われる車両であり, 作業機の着脱の頻度は非常に高い。特に, 大型トラクタの誘導作業および作業機着脱作業はトラクタ・オペレータと共同作業者との連携プレーにより行われるが, この種の連携プレーは人為的ミスの介入する可能性が高い。これらの事故を回避するため, 結合作業を自動化する試み¹⁾が検討されているが, 十分な成果は得られていない。筆者ら²⁾も理論的に検討している。

この結合問題は, トラクタを作業機位置まで誘導する誘導問題と誘導した位置でトラクタと作業機を結合するカップリング問題の2つに分けて考えられる。本研究は前者の誘導問題に焦点を絞って検討する。この誘導

問題は, 平面上に置かれたトラクタをある位置から別の位置へ誘導させることと定義される。即ち, あらかじめ曲線基準軌道を設定し, その希望曲線基準軌道に沿ってトラクタを誘導する制御則を設計することである。

この曲線基準軌道に沿ったフィードバック制御系設計に関しては, これまでいくつかの研究がなされている。農機分野では瀧川ら³⁾が発点から目的点までの曲線軌道を多項式で表し, その関数近似曲線に沿って車両を誘導する制御方式を採用している。

他方, 制御工学分野では, この非ホロノミック系の制御装置設計において, 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る設計手法⁴⁾がある。こ

れは、①目標軌道コースの生成はフィードフォワード制御器で行い、②生成した曲線コースに沿ってトラクタを自律走行させる場合は、車両系のモデル化誤差や路面からの外乱等に対処するためにフィードバック制御器を設計し制御する複合手法である。筆者ら²⁾もこの2自由度制御系設計手法を非線形系へ拡張し、トラクタ誘導のための実用的な制御装置の設計を行い、幾つかの数値シミュレーションを行い提案した制御装置の有効性を報告した。

本研究は、それを発展・拡張させ、次の3つの項目：①誘導時の軌道（希望基準軌道）生成を曲線路とそれに連続的に接続する直線路での構成（曲線・直線路複合設計）、②次に、その複合希望基準軌道に沿って走行するフィードバック制御器の設計、③最後に、設計した制御器を自律走行するトラクタに実装した実車実験の結果について検討・報告する。

II 誘導問題の設定とその定式化及び制御装置の設計

誘導問題を次のように設定する。Fig. 1に示すように直線 $x = L_x$ を定め、 x 軸上に中間点 $Q(H, 0)$ をとる。トラクタはその直線上のスタート点 $P_i(L_x, y_i)$ に置かれ、作業機は座標原点（ゴール点）に静置されているとする。以上の幾何学的な配置のもとで、トラクタをスタート点 P_i から中間点 Q の近傍を通過し

て原点まで誘導させることを考える。

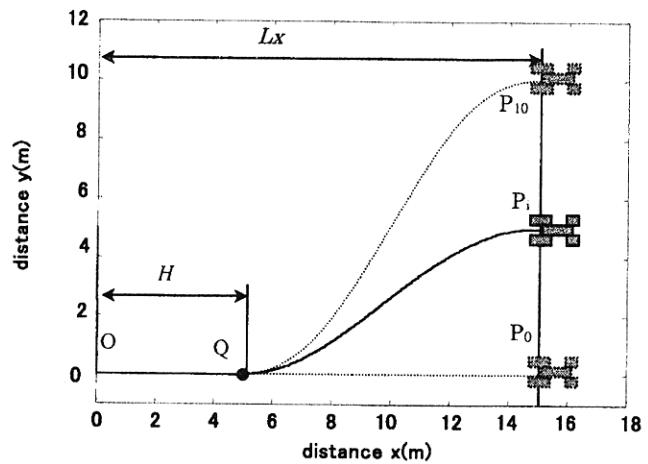


Fig. 1 Setting of the reference trajectories

このとき、トラクタの誘導は、はじめに基準軌道を生成(フィードフォワード制御)し、次に、その基準軌道に沿ったフィードバック制御を行う2自由度系設計手法を適用する。

複合基準軌道の生成：軌道生成は、曲線軌道と直線軌道の2つの組み合わせで構成する。このうち、前者の曲線軌道はスタート点 P_i から中間点 Q までの曲線路 P_iQ を生成する。後者の直線軌道は、曲線路 P_iQ に滑らかに接続する直線路 QO (=線分 QO) とする。最終的に、複合基準軌道 P_iQ+QO が生成された。

フィードバック制御系の設計：生成した複合基準軌道 P_iQ+QO に沿ってトラクタを誘導するフィードバック制御系を設計する。

1. 理論を導くための仮定及び前提

①供試トラクタは、前輪操舵後輪駆動で、諸元を表1に示す。②走行速度は低速で遠心力

等を見捨てるものとする。この仮定を採用することで、理論上はトラクタが非ホロノミック系として定式化できる。③供試トラクタの走行速度は一定とする。また、原点では、制止させるべきだが、今回は通過するという設定にしている。④実際の誘導作業中では、不整地からの予期しない外乱はフィードバック制御で考慮する。⑤後部装着式の作業機を設定し、トラクタは後退走行とする。⑥クイックカプラー利用を想定して、作業機着脱点において、 xy の座標系の変位で ± 0.05 [m]以内、姿勢角で $\pm 4^\circ$ 以内を許容範囲とする。

2. 基準曲線軌道の算出法

曲線軌道は最適制御理論を用いて生成する。筆者ら²⁾は、新しい制御系設計を提案したが、その場合、速度も入力とする2入力系であった。本論文では、走行速度を一定とし、かつ操舵角 α に $\alpha \leq \alpha_m$ という制約を課す。この変更により、誘導問題を再構築する必要があり、その結果、状態方程式は(1)式で表される。

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\alpha} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V \cos \theta \\ V \sin \theta \\ V \tan \alpha / L \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \phi \quad (1)$$

ここで、 x, y : 後輪軸中心点の座標、 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 : 車速で一定、 ϕ : ハンドル操舵角の角速度、 L : 軸距であり、 θ と α は反時計回りを正とする。

「任意に与えられた初期状態

$P_i (x_0^i, y_0^i, \theta_0^i, \alpha_0^i)$ から中間状態 $Q (x_M, y_M, \theta_M, \alpha_M)$ を経て終端状態 $O(0,0,0,0)$ まで曲線路 P_iQ と直線路 QO に沿って有限時間内で移動させ、かつ終端状態 O は等速で通過するコントローラを設計せよ」と表現される。ただし、基準曲線路 P_iQ と直線路 QO の設計では、最初にトラクタを静置する位置 P_i は、Fig. 1 に示すように P_0 から P_{10} まで代表点を10分割して設定し、各点 P_i から Q までの曲線基準軌道 P_iQ を設計する。なお、曲線路 P_iQ は点 Q で直線路 QO (x 軸) と滑らかに接続するようにした。

拘束条件として最大操舵角 α_m を考慮した評価関数

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

を最小にする最適制御問題⁵⁾を解くことにより、最適誘導軌道の曲線部分 $(\bar{x}_j^i, \bar{y}_j^i, \bar{\theta}_j^i, \bar{\alpha}_j^i)$ を固定制御区間 $[0, T_f]$ のもとに算出した。

なお、基準軌道の直線部分 QO はフィードフォワード制御部分 P_0Q と同一である。

3. フィードバック制御器の設計

(1) 基準曲線路 P_iQ の設計

方程式(1)を基準誘導軌道 $(\bar{x}^i, \bar{y}^i, \bar{\theta}^i, \bar{\alpha}^i)$ のもとに線形化する。

$$\dot{Z}^i = A^i Z^i + B^i U^i \quad (3)$$

$$\text{ただし, } Z^i = \begin{pmatrix} \delta x^i \\ \delta y^i \\ \delta \theta^i \\ \delta \alpha^i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x - \bar{x}^i \\ y - \bar{y}^i \\ \theta - \bar{\theta}^i \\ \alpha - \bar{\alpha}^i \end{pmatrix} : \text{状態変}$$

数ベクトル, $U^i = \delta \phi^i = \phi - \bar{\phi}^i$: 操作量,

$$A^i = \begin{pmatrix} 0 & 0 & -V \sin \bar{\theta}^i & 0 \\ 0 & 0 & V \cos \bar{\theta}^i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{V}{L \cdot \cos^2 \bar{\alpha}^i} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix},$$

$B^i = [0, 0, 0, 1]^T$ である。

状態量 Z^i は操作量 U^i によって決まるので, 評価関数 J は,

$$J = \int_0^{\infty} \left\{ Z^{iT}(t) Q Z^i(t) + U^{iT}(t) R U^i(t) \right\} dt \quad (4)$$

ただし,

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

である。

Riccati 方程式

$$P^i A^i + A^{iT} P^i - P^i B^i R^{-1} B^{iT} P^i + Q = 0 \quad (5)$$

を $P^i \in R^{4 \times 4}$ ($P^i = P^{iT} > 0$) について解くことより, フィードバックゲイン

$$K^i = -R^{-1} B^{iT} P^i \quad (6)$$

を求める。

(2) 直線路 QO の設計

直線制御のときは基準軌道 P_0Q のゲインを利用する。

4. 制御則アルゴリズム

(1) 追従軌道の選択: トラクタの代表点 (後輪軸中心点) が領域

$D = \{(x, y) | L_x - 0.5 < x < L_x + 0.5; i \leq y < i+1\}$ の中に置かれたとき, トラクタは追従すべき軌道として基準軌道 P_iO を選択し, その軌道に沿って走行する。

(2) 次に, 中間点 Q 点近傍にトラクタが到達したとき, 曲線軌道 P_iQ から直線軌道 QO 制御に切り替わる。

(3) 実車実験では, ゴール点の O 点を通過する。

III 実車実験

1. 移動ロボット (供試トラクタ)

ロボット車両は市販トラクタ(三菱, 2501D)を改造した。トラクタの位置情報 (x, y) は自動追尾式のトータルステーション (TS) を用いて取得した。車両姿勢角は FOG(JAE, JG-35FD) を用いて測定した。この JG-35FD は時間ドリフト $0.5^\circ/h, 0.01^\circ$ の分解能で車両の相対方位を計測することができる。操舵角の計測は, 変位計 (共和, DTP-05MDS) を用いた。操舵角は, トラクタに装着した DC サーボモータ (澤村電気工業, SS60E30-L4-25) で制御した。

自律走行実験は岩手大学附属農場(御明神農場)の牧場地で行った。なお, 本実験に利用したトラクタは自動停止装置を採用していないため, 終端点を通過後, マニュアルで制御を停止させた。

2. 誘導実験の設定

誘導実験は Fig. 1 に示す $x = L_x = 15\text{ m}$ の直線上の $P_0(15,0)$ から $P_{10}(15,10)$ まで 1 m 幅毎に設定した各領域にトラクタを置いて実施した。 P_{10} は x 軸から一番離して置いた場合で大きい操舵が必要であり、 x 軸近くなるほど小さい操舵角操作で良く、 P_0 は x 軸そのものなのでゴールまで直線に沿った制御となる。ここでは、初期状態は $(15.38, 7.95, 6.86^\circ, -14.48^\circ)$ であり、基準軌道 P_7O に沿う誘導制御を行った。なお、トラクタ速度の平均値は 0.48 m/s である。

Fig. 2 に操舵角と姿勢角の時間歴を、Fig. 3 に x と y の時間歴を示す。姿勢角と操舵角はスタートから激しく変化を行った。これは、トラクタは基準軌道より遠いので、速く基準軌道に到着するため、姿勢角と操舵角は激しく変化していった。6.4 秒後、トラクタは基準軌道により近くなった。操舵角と姿勢角は緩やかな変化になった。他方、Fig. 3 の x と y の時間歴にはそう大きな変化はない。このことは、 x と y が姿勢角の積分系になっているためその応答が鈍化するためである。29.7 秒経過後、トラクタは Q 点を通過する。その時点で状態量 (x, y, θ, α) は $(4.73\text{ m}, -0.35\text{ m}, -9.02^\circ, -1.01^\circ)$ になり、曲線制御から直線制御に切換わる。その後、41.1 秒でゴール点 O 点を通過し、制御を終了する。なお、この終端点の状態量は $(-0.27\text{ m}, -0.01\text{ m}, -2.52^\circ, -5.72^\circ)$ であった。

Fig. 4 に基準軌道と実際の走行軌跡を示

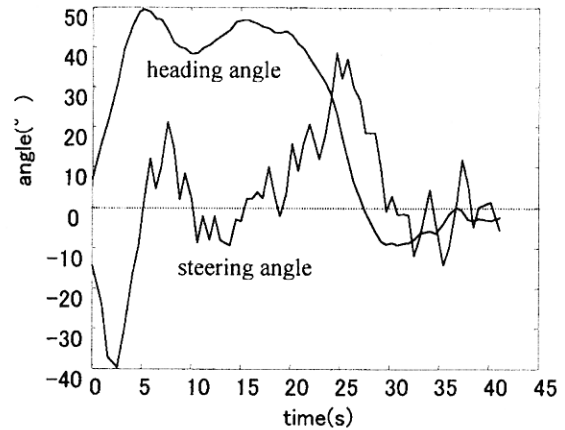


Fig. 2 Time histories of heading and steering angle

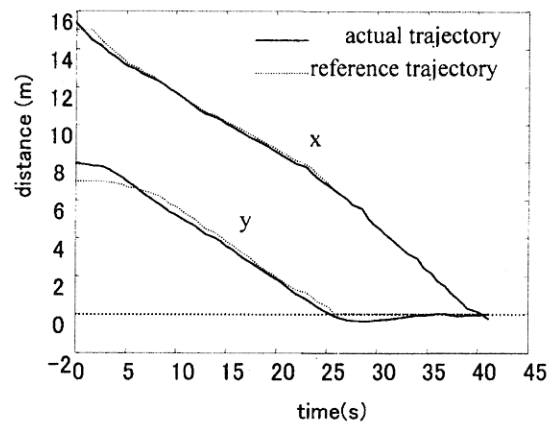


Fig. 3 Time histories of actual and reference trajectory

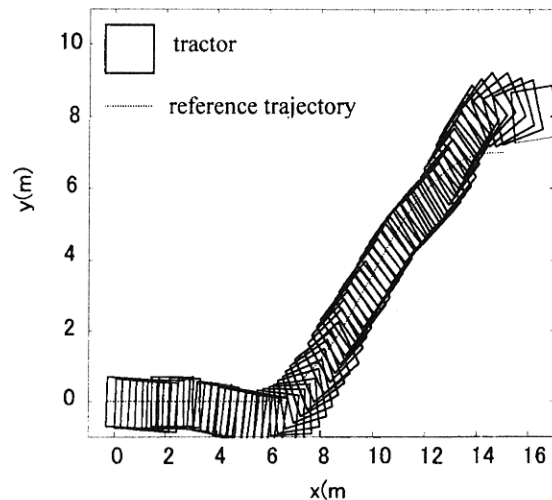


Fig. 4 Actual and reference trajectories

す。全体として、スタート時点から基準軌道に徐々に近づき、かなり曲線軌道に沿った追従制御になっている。点 Q で曲線制御から直線制御へ切り替えるとき、若干のオーバーシュートが認められる。最終的には、最初に設定した、「ある初期状態に置いたトラクタを指定した直線上に水平にかつ原点まで誘導するという誘導問題」は、 y 方向の誤差が ± 0.05 m 以内、姿勢角の誤差が $\pm 4^\circ$ 以内となった。

IV 摘要

本研究では、トラクタを作業機的位置へ誘導するため、フィードバック制御とフィードフォワード制御を融合させる制御法を適用し、軌道生成に 2 段階軌道を構成した。草地で自律走行実験を行い提案した理論が現実系に適用可能なことを検討した。その結果、次のような結論が得られた。

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、拘束条件 J を満足する誘導軌道を求めた。

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、牧草地で実車実験を行った。0.48m/s 速度でゴール点を通過するとき、トラクタの y 方向の変位と姿勢角はそれぞれ ± 0.05 m と $\pm 4.0^\circ$ 以内の許容範囲を満足した。

Reference

1. Graef M., Jahes G., 1996. Intelligent

components for tractor/implement coupling, Ag Eng Paper 1996 No.96A-091

2. Imae, J., Yuuki, Y., Torisu, R., 1998. A design of nonlinear feedback controllers for the auto-coupling of tractor-trailer systems, Trans. of the Institute of Systems, Control and Information Engineers, 11(9), 499-507.

3. Takigawa, T., Sutiarso, L., Koike, M., Kurosaki, H., Hasegawa, H., 2002. Trajectory control and its application to approach a target: Part I. Development of trajectory control algorithms for an autonomous vehicle, Transactions of ASAE 45(4), 1191-1197

4. 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

5. Imae, J., Hakomori, K., 1987. A second-order algorithm for optimal control assuring the existence of Riccati solutions, Trans. SICE, 23(4), 92-94.