

トラクタ作業機系の自動装着時のフィードバック軌道の生成

A Nonholonomic Trajectories Planning and Nonlinear Feedback Control of a Tractor for an Auto-coupling

○結城 康浩*, 井前 譲**, 鳥巢 諒***

Yasuhiro Yuuki*, Joe Imae**, Ryo Torisu***

*岩手大学大学院農学研究科 **岩手大学工学部 ***岩手大学農学部

Faculty of Agriculture, Iwate University

キーワード: Two-degree-freedom, Feedback control, Feedforward control, Tractor, Coupling

連絡先: 〒020 盛岡市上田 3-18-3 岩手大学農学部 鳥巢 諒

TEL 019(621)6184 FAX 019(621)6204 E-mail:torysryo@msv.cc.iwate-u.ac.jp

1. はじめに

トラクタは各種農作業機を装着して使われる車両であり、着脱の頻度も非常に高い。この着脱作業はトラクタ・オペレータだけでなく他の人間がトラクタと作業機の間で連結作業を行う。そのため、多くの事故が発生している。このような事故を防ぐために、着脱作業を自動化する試み¹⁾が検討されている。他方、農業就業人口の減少や就業者の高齢化によって農作業の自動化が時代の1つの要請であり、自律走行車両の研究²⁾がいろいろ試みられている。

このような背景の中で、本研究はトラクタと作業機の自動装着の問題を取り扱う。この自動装着問題は、大きく2つの領域問題に分類される。①トラクタを作業機のある所定の位置へ、いかに誘導するかということ、②誘導した場所で、トラクタと作業機をどのように着脱するかという問題である。

本論文では、前者の誘導制御の問題に焦点を絞り、次のような経路設計問題について検討する。

本論文の構成は、以下の通りである。2章において、誘導問題とその定式化、3章において、2自由度制御系の設計手法に基づくフィードバック制御則を提案し、4および5章において具体的な数値計算を行う。最後に、提案手法の有効性を検証し、実装化への可能性を検討する。

2. 問題の定式化

2.1 誘導問題の設定

平面上で任意に与えられた初期状態から所定の位置にトラクタを誘導する制御則を導くこと。なお、次のような仮定と制約条件を設定した。

- 1) トラクタは前輪操舵・後輪駆動の4輪車両とする。
- 2) トラクタの最大操舵角を 42° とし、それを越えないような制御系設計を行う。

- 3) 作業機自体を動かすことが困難な大型トラクタを想定し、ホイールベースを2[m]とした。
- 4) 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を無視できるとする。
- 5) 走行路面は、実際の適用を考慮し不整地で、外乱の影響はあるものとする。
- 6) 農用作業機はトラクタ後部装着が多いため、トラクタは後退で走行するものとする。
- 7) カプラー利用の最終状態を想定して、状態量の上限を、 xy の座標系の変位で $\pm 5[\text{cm}]$ 以内、姿勢角で $\pm 3^\circ$ 以内と設定した。
- 8) 半径10[m]の円の右半円内にトラクタは置かれるものとする。ただし本論文では第一象限のみを取り扱う。
- 9) 初期状態の設定範囲を Fig.1 に示す塗りつぶされた領域で考える。
- 10) 初期状態として与えるトラクタの姿勢角範囲を作業機着脱点に向かって $\pm 15^\circ$ 以内に設定する。なお作業機着脱点を原点とする。

上のように設定したトラクタの誘導制御問題は、非ホロミックシステムのフィードバック制御問題と等価である。このシステムのフィードバック制御に関しては一般的に困難とされている。本論文では単にフィードフォワード制御を組み込むだけで良好なフィードバック制御が期待できる2自由度制御系の設計手法³⁾を適用する。

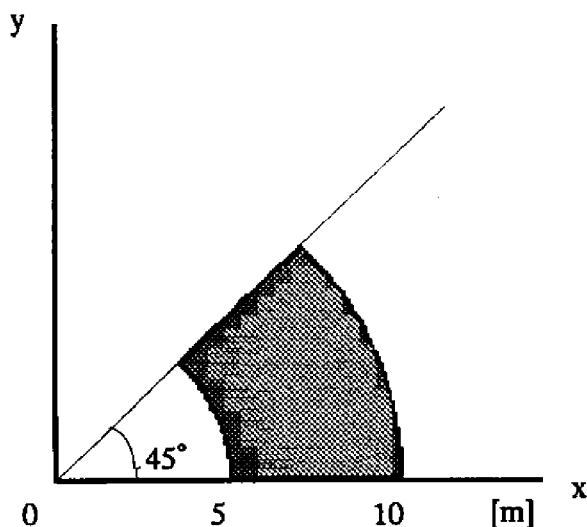


Fig.1 Range of initial tractor position

2.2 誘導問題の定式化

制御対象であるトラクタは前記仮定から、Fig.2 に示す2輪等価モデル⁴⁾で表せる。

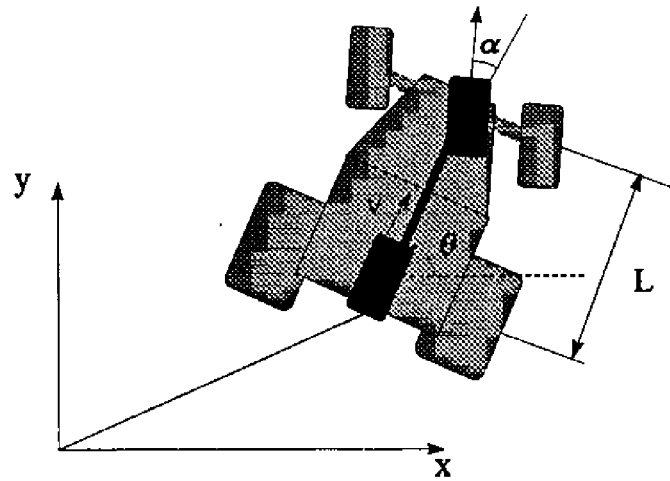


Fig.2 Model of tractor

ここに、

- x, y : 後輪トレッドの中心の座標 [m]
- θ : x 軸を中心としたトラクタの姿勢角 [rad]
- α : 操舵角 [rad]
- v : 車速 [m/s]
- ϕ : 操舵角の角速度 [m/s^2]
- L : ホイルベース [m]

したがって運動学的な関係により状態方程式⁵⁾として次式(2.1)を得る。

$$\begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\alpha} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & 0 \\ \sin \theta & 0 \\ \tan \alpha & 0 \\ \frac{L}{0} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v \\ \phi \end{pmatrix} \quad (2.1)$$

次に、上式を利用して、トラクタの誘導問題を明確に定義する。作業機着脱問題では、走行速度 v と操舵角角速度 ϕ を変えることによって、最初の位置に静止していたトラクタ($v_0 = 0$)を作業機位置原点に移動させ、しかも終端位置では速度 v をゼロとすることが要請される。すなわち、初期状態 $(x_0, y_0, \theta_0, \alpha_0)$ から終端状態 $(0, 0, 0, 0)$ へ移動させ、かつ静止することであり、このためのフィードバック制御則を求める問題となる。

3. フィードバック制御則

文献⁶⁾の手法を踏襲しフィードバック制御系を導出する.詳細は同文献に譲り,ここでは概略のみを示す.非ホロノミックシステムに対するフィードバック制御則生成のアルゴリズムを以下に示す.その前に必要な準備をする.

<準備>

- (1) 軌道を設計するための初期状態を準備初期状態と呼ぶ. $(x^i_0, y^i_0, \theta^i_0, \alpha^i_0), i = 1, \dots, m$ を適当に m 個選び, それぞれの準備初期状態から終端状態へ至る軌道 $(\bar{z}^i, \bar{u}^i), i = 1, \dots, m$ および到達までの時間 $T^i, i = 1, \dots, m$ を算出する. この軌道を以後基準軌道と呼ぶ. なお,

$$\bar{z} = (\bar{x}, \bar{y}, \bar{\theta}, \bar{\alpha})^T, \bar{u} = (\bar{v}, \bar{\phi})^T \text{ とする.}$$

- (2) 状態方程式(2.1)を基準軌道 (\bar{z}^i, \bar{u}^i) をもとに線形化し, m 個の時変形方程式を導出する.

$$\delta \dot{z}^i = A^i(t) \delta z^i + B^i(t) \delta u^i, i = 1, \dots, m \quad (3.1)$$

ここに, $\delta z^i = z - \bar{z}^i, \delta u = u - \bar{u}^i,$

$$A^i(t) = \begin{pmatrix} 0 & 0 & -v \sin \theta & 0 \\ 0 & 0 & v \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & v \\ 0 & 0 & 0 & L \cos^2 \alpha \end{pmatrix} \quad (3.2a)$$

$$B^i(t) = \begin{pmatrix} \cos \theta & 0 \\ \sin \theta & 0 \\ \tan \alpha & 0 \\ L & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (3.2b)$$

- (3) 制御区間 $[0, T^i]$ から適当に l 個の時刻 $\tau_j^i \in (0, T^i), j = 1, \dots, l^i$ を選ぶ. それぞれの τ_j^i に対し, 次式を(3.2)満たすフィードバック定数 K_j^i を決定する.

$$\operatorname{Re} \lambda(A^i(\tau_k^i) + B^i(\tau_k^i)K_j^i) < 0 \quad \text{for all } k = 1, \dots, l^i \quad (3.3)$$

ここに, $\delta u^i = K_j^i \delta z^i$ であり, $\operatorname{Re} \lambda(\cdot)$ は (\cdot) の固有値の実部を示す. 以後 $\bar{z}^i(\tau_j^i)$ を基準状態という. ただし, $v_0^i = 0$ とする.

<制御則アルゴリズム>

I) 与えた任意の初期状態 $(x_0, y_0, \theta_0, \alpha_0)$ に対し, xy 座標の意味で一番近いものを $\bar{z}^i(\tau_j^i), i = 0, 1, \dots, m, j = 1, \dots, l^i$ から捜し, それを $\bar{z}^i(\tau_{j_s}^i)$ とおく. 結果として基準軌道および終端時間も同時に決定される.

II) 適当な $K_{j_s}^i (l^i \geq j_s \geq j_s)$ をいくつか選び, それを適切に切り替えながら, 時変フィードバック制御

$$u = \bar{u}^i + K_{j_s}^i (z - \bar{z}^i) \quad (3.4)$$

を状態方程式(2.1)に適用する.

4. 数値計算

前章で提案した制御アルゴリズムを, 半径 10[m] の円内に任意に置かれた 2 輪モデルに適用し, 本アルゴリズムの有効性を検証する. ただし, 実用性を考えると xy 平面の第 1 象限, 第 4 象限が考えられるが, x 軸に対象なため本論文では第 1 象限のみの検討とする. その適用に際し, いくつかの注意点を以下に述べる.

4.1 基準軌道の設定

準備初期状態として, 原点を中心とした半径 10[m] の円周上に $0^\circ, 5^\circ, \dots, 45^\circ$ の 10 点を選び, 2 輪モデルの傾きは原点から放射状とした. そのとき, 準備初期状態 $(x^i_0, y^i_0, \theta^i_0, \alpha^i_0)$ から終端状態 $(0, 0, 0, 0)$ へ至る基準軌道は次のように計算した. すなわち, 終端速度をゼロにするための工夫として, 新たに状態量として v を加え, 式(2.1)を拡張した式(4.1)を導いた.

$$\begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\alpha} \\ \dot{v} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} v \cos \theta \\ v \sin \theta \\ v \tan \alpha \\ L \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \phi \\ v \end{pmatrix} \quad (4.1)$$

状態方程式(4.1), 準備初期状態 $(x_0^i, y_0^i, \theta_0^i, \alpha_0^i)$ のものと, 評価関数 $J = x^2(T_f) + y^2(T_f) + \theta^2(T_f) + \alpha^2(T_f) + v^2(T_f)$

を最小とする最適制御問題を解くことにより、最適軌道 $\left((\bar{x}^i, \bar{y}^i, \bar{\theta}^i, \bar{\alpha}^i)^T, (\bar{\phi}^i, \bar{v}^i)^T \right)$ を固定制御区間 $[0, T_f]$ のもとに算出した。なおその際収束条件を $J \leq 0.00005$ とした。また、 \bar{z}^i, \bar{u}^i は $\bar{z}^i = (\bar{x}^i, \bar{y}^i, \bar{\theta}^i, \bar{\alpha}^i)^T, \bar{u}^i = (\bar{\phi}^i, \bar{v}^i)^T$ により与えられる。なお、 T_f を未知として計算するのが適当と考えられるが、終端時刻未知の最適制御問題では一般に解法困難となることが予想されるので、 $T_f = 10$ と固定した。すなわち $T^i = T_f = 10$ 。また非線形最適制御の数値解法には、収束証明がなされており、かつ数値計算例が豊富な文献 η のアルゴリズムを用いた。なお便宜上、 $45^\circ, 35^\circ, \dots, 0^\circ$ の基準軌道を N1, N2, \dots , N10 とする。

計算により得られた基準軌道の全てを Fig.3 に、またその中から基準軌道 N3 を例に取り上げ、トラクタの動きを視覚化したものを Fig.4 に示した。

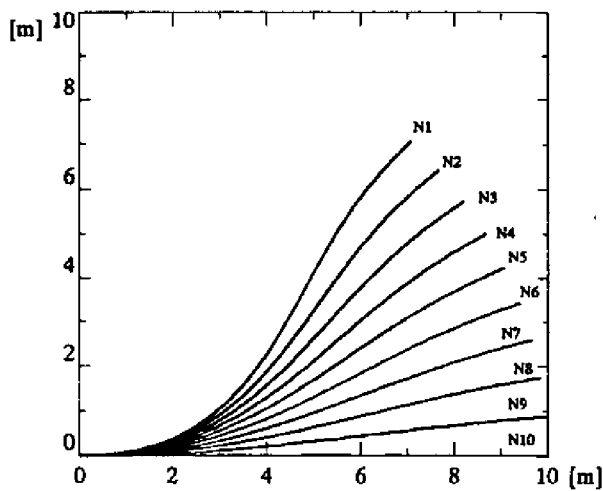


Fig.3 Reference trajectories for feedforward system

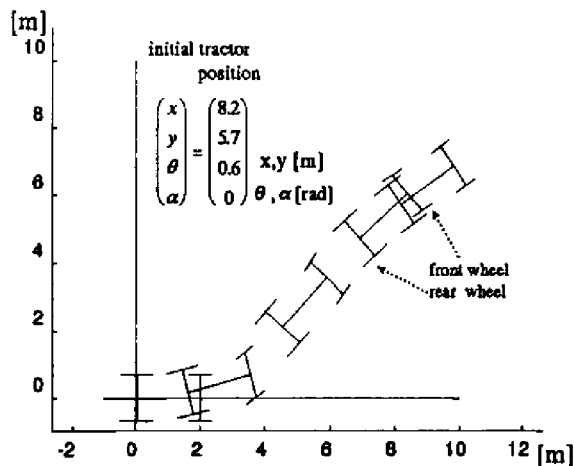


Fig.4 Example of dynamic behavior on a reference trajectory (N3)

4.2 フィードバックゲインの決定

制御区間 $[0, T_f]$ を 10 等分し、 $\tau_1^i = 1, \tau_2^i = 2, \dots, \tau_9^i = 9 (i = 1, \dots, 10)$ とした。フィードバック定数 $K_j^i (i = 1, \dots, 10, j = 1, \dots, 9)$ は最適レギュレータ理論により求めた。すなわち、時不変線形方程式

$$\dot{\delta z}^i = A^i(\tau_j^i)\delta z^i + B^i(\tau_j^i)\delta u^i \quad (4.2)$$

および、評価関数

$$J = \int_0^{\infty} (\delta z^T Q \delta z + \delta u^T R \delta u) dt \quad (4.3)$$

$$Q = I \in R^{4 \times 4}, R = I \in R^{2 \times 2}$$

のもと Riccati 方程式

$$A^i(\tau_j^i)^T P + P A^i(\tau_j^i) - P B^i(\tau_j^i) R^{-1} B^i(\tau_j^i)^T P + Q = 0 \quad (4.4)$$

を $P \in R^{4 \times 4} (P = P^T > 0)$ について解くことにより、定数フィードバック係数

$$K_j^i = -R^{-1} B^i(\tau_j^i)^T P \quad (4.5)$$

を求めた。なお、 $v = 0$ のとき明らかに、(3.2a) 式より、 $A^i = 0$ となり、フィードバックゲイン K_j^i は決定できないことに注意されたい。

4.3 制御アルゴリズムのステップ I

与えられた初期状態 $(x_0, y_0, \theta_0, \alpha_0)$ に対し、その位置座標 (x_0, y_0) を中心とした 1 辺 1[m] の正方形を作成する。この正方形の中に基準状態が 2 個以上含まれたときは、その中から初期状態との距離が xy 座標の意味で最小となる基準状態を選び、それを $\bar{z}^i(\tau_{j_i}^i)$ とした。例えば Fig.5 のような場合は、与えられた初期状態 A に対し、正方形内に a, b 2 つの基準状態が存在するが、本アルゴリズムでは b を選択する。

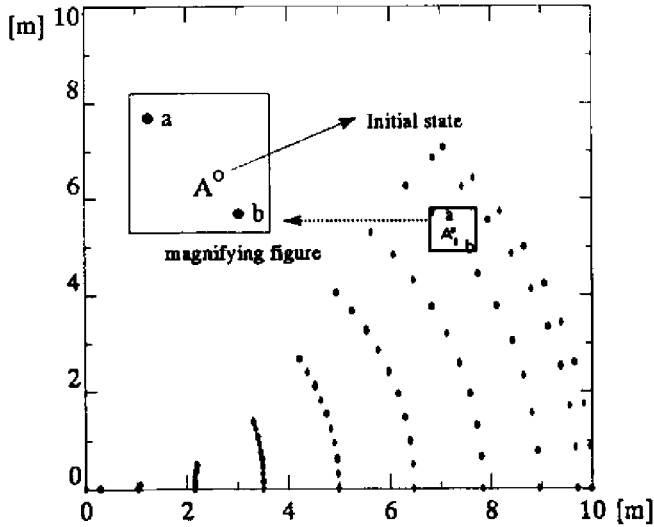


Fig.5 Standard position on a reference trajectory

4.4 制御アルゴリズムのステップII

まずはじめに 10 等分した制御区間の τ_5^i の基準状態におけるフィードバックゲイン K_5^i を用いる。なおその際レギュレータ理論における評価関数の状態量の重みを 0.4 とした。次に終端状態の 5 秒前の位置を通過するときは、ゲイン K_7^i に切り替える。その際の重みは 10 とした。さらに 3.5 秒前の位置を通過するとき、ゲイン K_9^i に切り替えた。その際の重みは 100 とした。なお、ゲインの切り替え時刻の設定とそのときの重み調整は、最終的な許容範囲に全状態量がおちつくよう試行錯誤的に決定した。

5. 計算結果と考察

まずはじめにフィードバックゲインの切り替えを行わなかった場合の計算結果を示す。Fig.6 はフィードバックゲイン K_5^i (重みを 100 として計算) を用いた結果を示したものである。収束は姿勢角 θ が $-0.09[\text{rad}](-5.15^\circ)$ 、最大操舵角が $0.822[\text{rad}](47^\circ)$ となり、設定した許容範囲に満足していない。

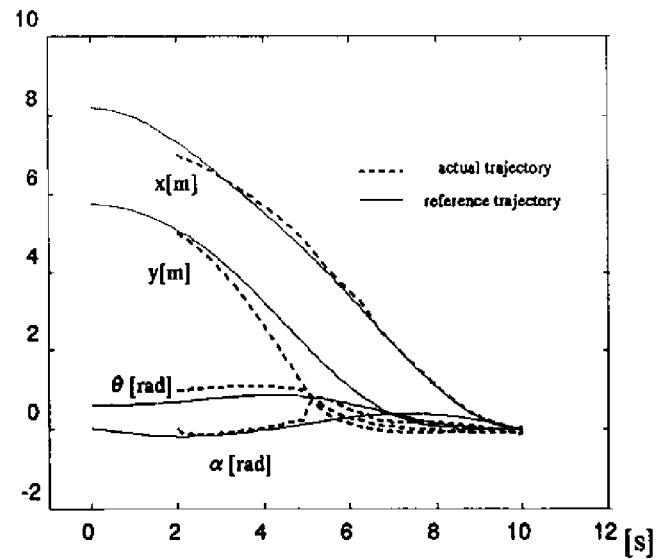


Fig.6 Reference and actual trajectories for a constant feedback gains

このため、最終許容範囲に入るように、フィードバックゲインの値を 3 段階に変える工夫を行った。この例として 2 つの任意な初期状態 $A(7.5, 7.5, 0.3, 0)$, $B(7.5, 1, 0)$ を取り上げ、本アルゴリズムの有効性を調べた。Fig.7, 10 は初期状態 A, B におけるトラクタの追従性を示し、Fig.8, 11 は各状態量、Fig.9, 12 は各操作量の時間的推移を示す。初期状態 A の終端状態は $(2.19 \times 10^{-2}, 2.15 \times 10^{-2}, 2.95 \times 10^{-2}, -4.95 \times 10^{-2})$ 、初期状態 B については $(2.07 \times 10^{-2}, 3.12 \times 10^{-3}, -5.50 \times 10^{-2}, -9.17 \times 10^{-2})$ となり、2 章で問題設定した範囲内に収まる結果が得られた。なおハンドル最大操舵角については A は $0.631[\text{rad}](36.2^\circ)$, B は $0.577[\text{rad}](33.1^\circ)$ であった。

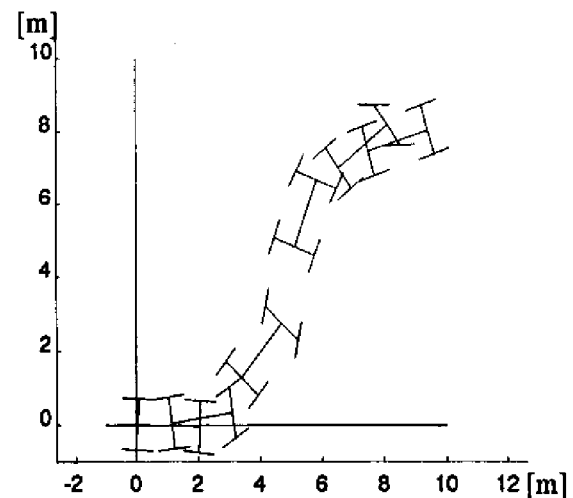


Fig.7 Actual trajectory for time varying feedback gains for $A(7.5, 7.5, 0.3, 0)$

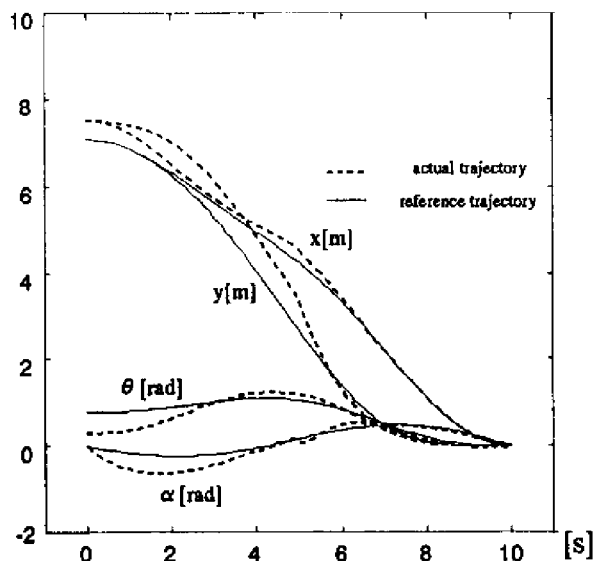


Fig. 8 Reference and actual trajectories for time varying feedback gains for A

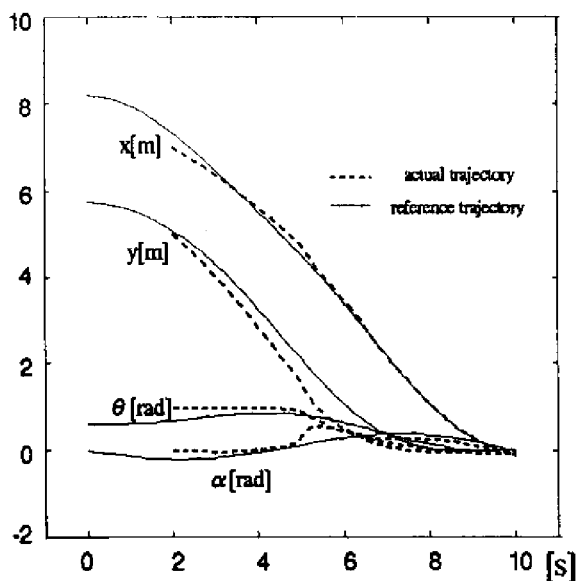


Fig. 11 Reference and actual trajectories for time varying feedback gains for B

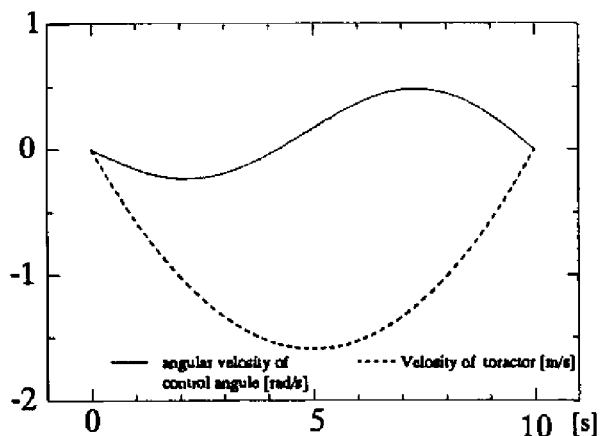


Fig. 9 Time histories of control inputs v and α for A

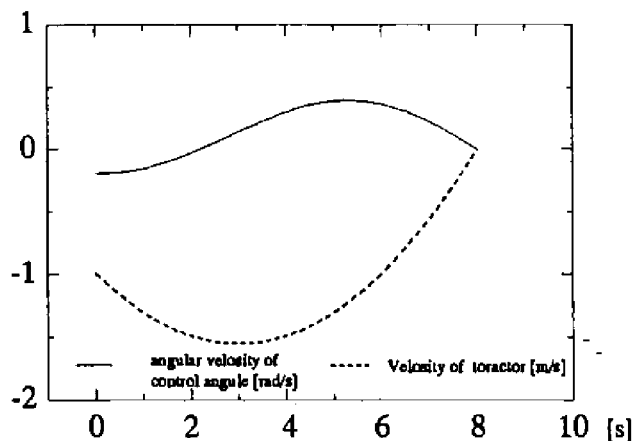


Fig. 12 Time histories of control inputs v and α for B

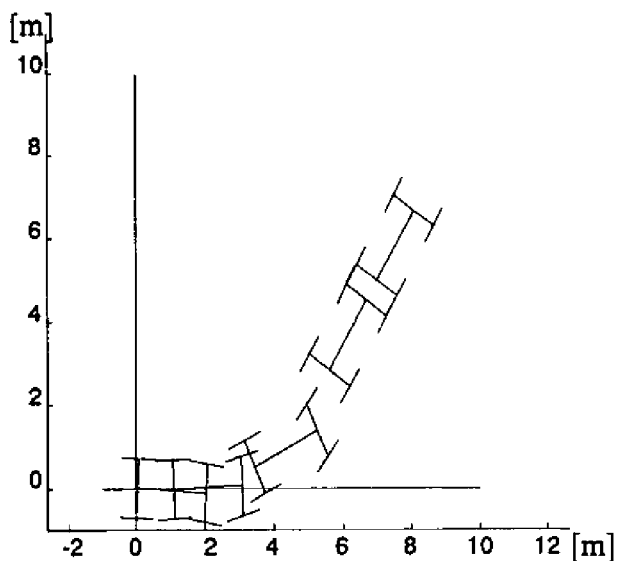


Fig. 10 Actual trajectory for time varying feedback gains for B(7, 5, 1, 0)

6. おわりに

作業機をトラクタに装着するオートカップリング問題において、所定の位置にある作業機の場所へトラクタを自律移動させるフィードバック軌道生成を検討した。トラクタは非ホロノミックシステムであり、かつ路面の状態が非舗装であるため、作業機とトラクタのカップリングにはフィードバック制御が必要である。また、現在使用されている通常のトラクタは前輪操舵の4輪車両であるため、その運動性能は通常のロボットよりも劣る。このような制約条件のもとで、軌道生成を達成するため、次のような2自由度制御系の設計手法を採用した。

- 1) はじめに、フィードフォワード制御系としての10本の基準軌道をトラクタを出発させる移動平面上に作成した。(フィードフォワード制御器の導出。)
- 2) 次に、トラクタの初期位置に対して目標走行軌道を選定する方策を作成した。
- 3) 最後に、その決定された軌道とトラクタの現在状態の偏差を修正する走行を行うよう、線形化車両方程式に最適レギュレータ理論を適用し、フィードバック係数を求めた。(フィードバック制御器の導出。)ただし、終端条件を最終的に満足するよう、走行区間を3段階に分割してフィードバックゲインの選定を工夫する必要があった。これは、4輪車両の運動機能性の制約から来ている。

以上の手順を用いてシミュレーションによる理論的な検討の結果、オートカップリングの実用化の可能性が確かめられた。今後、この理論の実車への適用を行いたい。

参考文献

- 1) M.Graef, H.Speckman, G.Vellguth: Computer aided steering and driving for tractor and implement coupling, AgEng-Paper No.9204 08
- 2) 岡本: 農業ロボット研究の現状と課題, 農業機械学会誌 Vol.58, No1 128/132(1996)
- 3) 荒木: 2自由度制御系-I, システムと制御 Vol.29, No.10, 649/656(1985).
- 4) 鳥巢, 中坪, 井前: トラクタの最短時間問題(第1報), 農業機械学会誌 Vol.58 No.5 5/12 (1996)
- 5) 中村: 非ホロノミックシステム, 日本ロボット学会誌 Vol.11, No5, 655/662 (1993)
- 6) 井前, 森, 鳥巢: 非ホロノミックシステムのフィードバック制御則の導出, 計測自動制御学会東北支部第160回研究集会, 資料番号160-12
- 7) 井前, 箱守: リッカチ解の存在を保証する2次の最適制御アルゴリズム, SIC 論文集, 23-4 410/412 (1987).