

基準軌道に沿ったトラクタ型移動ロボットの誘導 Autonomous tractor-like robot traveling along the desired path for Coupling

○ 緑上一昭*, 鳥巢 諒**, 武田 純一**, 井前 譲***
○ Kazuaki Midorikami*, Ryo Torisu*, Junichi Takeda*, Joe Imae***

*岩手大学大学院農学研究科, **岩手大学農学部, ***大阪府立大学工学研究科

*Graduate school of Agriculture, Iwate University, **Faculty of Agriculture, Iwate University,
*** Faculty of Engineering, Osaka prefectural University

キーワード: トラクタ (farm tractor), 自律走行 (auto-pilot), ランデブー問題 (coupling problem),
基準軌道 (desired path), 最適制御 (optimal control)

連絡先: 〒020-8550 盛岡市上田 18-8, 岩手大学農学部農林環境科学科
リサイクル生物生産工学講座生物機械工学研究室
鳥巢 諒, Tel: 019(621) 6184, Fax: 019(621)6184, E-mail: ryotorys@iwate-u.ac.jp

1. はじめに

日本の農業の危機が叫ばれるようになって久しい。現在、日本の農業が抱える問題の一つに、農業労働者の減少や高齢化による労働力の低下がある。農作業の機械化はこの問題の解決の大きな一因となるが、より効率の良い農業の実践のためには農業機械の次のステップ、すなわち自動化が重要な研究課題となってくる。

本研究では、その中でも車輪型農用移動ロボットの自律走行に着目した。具体的には、農用車両としてトラクタを取り上げ、トラクタ後部への作業機装着の際の誘導問題を対象とした。このような操作は運転の難易度が高く、事故の危険性もあるため、自動化が有効であると。誘導の自動化の手段としては、最適制御理論により誘導のための基準とな

る軌道を生成し、フィードバック制御器によりその軌道に沿うようトラクタを自律走行させる方法を採用した。そしてこの手法による実験結果を検討し、より一般には任意の平面上2点間での車両の自動誘導制御への応用・実現を目指す。

2. ランデブー問題の定式化と制御系の設計

2.1 ランデブー問題の定式化

本研究では平面上で任意に与えられた初期状態から所定の位置、すなわち作業機との装着点にトラクタを誘導させることを問題としたが、これをランデブー問題と呼ぶことにする。なお、現実の作業環境を考慮し、以下のように条件を設定した。

1) トラクタは前輪操舵・後輪駆動とする。

- 2) トラクタは剛体とし、2 輪等価モデル¹⁾で表せるものとする。
- 3) トラクタの最大操舵角を $0.73[\text{rad}](42^\circ)$ とする。
- 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が無視できるものとする。
- 5) トラクタは後退でのみ走行するものとする。
- 6) 作業機装着点を座標原点とし、誘導の目標点とする。
- 7) 原点におけるトラクタの変位の誤差は $\pm 5 \times 10^{-2}[\text{m}]$ 以内、姿勢角の誤差については $\pm 0.07[\text{rad}](42^\circ)$ 以内を許容範囲とする。
- 7) トラクタの初期変位は半径 $10[\text{m}]$ の円の第 1 象限内とする。
- 8) トラクタの初期姿勢角の範囲を原点に向かって $\pm 0.26[\text{rad}](15^\circ)$ 以内に設定する。

上記の 2), 4) よりトラクタをモデル化したものが Fig.1 である。ここに、

A : 前輪軸中心点

B : 後輪軸中心点

x, y : B 点の座標[m]

θ : トラクタの x 軸からの姿勢角[rad]

α : 操舵角[rad]

v : 速度[m/s]

ϕ : 操舵角の角速度[rad/s]

L : ホイルベース[m]

運動学理論により、状態方程式(1)を得る²⁾。

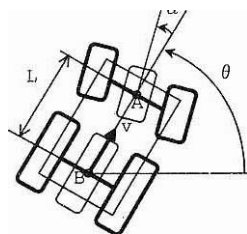


Fig.1 トラクタのモデルと座標系

$$\begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} v \cos \theta \\ v \sin \theta \\ \phi \end{pmatrix} \quad (1)$$

式(1)からトラクタの誘導においては入力(操作量)は走行速度 v と操舵角角速度 ϕ になる。ランデブー問題とは、状態方程式(1)のもとでこの 2 つの操作量を変化させ、任意の初期状態 $(x_0, y_0, \theta_0, \alpha_0)$ に静止しているトラクタを終端状態 $(0, 0, 2n\pi, 0)$ (ただし n 整数) へ有限時間内で移動させ、かつ終端点において速度 v を 0 とする制御システムの設計ということになる³⁾。

2.2 基準軌道の設計

制御システムを設計する際には、任意の初期状態に対し、トラクタを誘導する軌道を短時間で生成する必要がある。そこで、数個の初期状態に対する誘導軌道を予め計算しておく。本研究では、原点を中心とした半径 $10[\text{m}]$ の円周上の x 軸から 5° 刻みに 45° まで 10 点を初期変位 (x_0, y_0) とし、そのときの x 軸からの角度を初期姿勢角 (θ_0) とした。なお、初期操舵角 (α_0) は全て $0[\text{rad}]$ とした。

さらに、終端点でのトラクタの走行速度を 0[m/s]とするための工夫として、式(1)を次式(2)のように拡張した。

$$\begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\alpha} \\ \dot{v} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} v \cos \theta \\ v \sin \theta \\ v \tan \alpha \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} \phi \\ v \end{pmatrix} \quad (2)$$

そして状態方程式(2)のもと、評価関数

$$J = x(T_f)^2 + y(T_f)^2 + \theta(T_f)^2 + \alpha(T_f)^2 + v(T_f)^2 \quad (3)$$

を最小とする最適制御問題を解くことにより固定制御区間 $[0, T_f]$ での最適誘導軌道を計算した。 T_f は終端時刻であり、本来は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は解法困難になると予想されるので、本研究では $T_f = 20$ に固定した。さらに、計算回数を 200 回、すなわち各制御間の時間幅を 0.1[s] とした。また、収束条件は $J \leq 0.00005$ とした。このようにして初期状態量を含めて 201 個の状態量からなる軌道を 10 本生成し、それらを基準軌道と称した。便宜上、 45° 、 40° 、 $\dots$ 、 0° の軌道をそれぞれ N1, N2, $\dots$ 、N 10 と呼ぶことにする。各基準軌道の変位の様子を Fig.2 に示す。

2.3 フィードバック制御系の設計

前節で生成した基準軌道を追従するようトラクタを誘導させるに当たっては、以下のようなフィードバック型の制御システムを設計した。

まず任意の初期状態量中の変位 (x, y) に最も

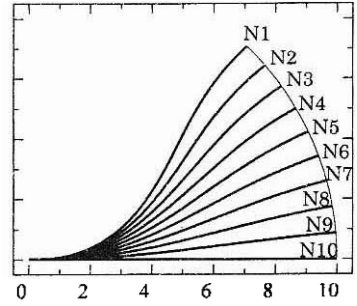


Fig.2 基準軌道

近い基準状態量を探し出し、この基準状態量のある基準軌道をトラクタの追従軌道に決定する。そして、その時刻での状態量 (z) と基準状態量 $(\bar{z})$ 、基準操作量 $(\bar{u})$ 、および基準軌道上の各点で定められたフィードバックゲイン (K) により、

$$u = \bar{u}^i + K(z - \bar{z}^i) \quad (4)$$

を構成し、入力ベクトル $(u = \begin{pmatrix} \phi \\ v \end{pmatrix})$ を計算する。これをトラクタに入力することで誘導制御を行う。なお、フィードバックゲインの計算については制御区間 $[0, T_f]$ を 10 等分し、

$$\tau_1^i = 1, \tau_2^i = 2, \dots, \tau_9^i = 9 \quad (i = 1, 2, \dots, 9)$$

とした後、最適レギュレータ理論により求めた³⁾。すなわち、時不変線形方程式

$$\dot{\bar{x}}^i = A^i(\tau_j^i) \bar{x}^i + B^i(\tau_j^i) \bar{u}^i \quad (5)$$

および、評価関数

$$Q = qI \in R^{4 \times 4} (q > 0), R = I \in R^{2 \times 2} \quad (6)$$

のもと Riccati 方程式

$$\begin{aligned} & A^i(\tau_j^i)^T P_j^i + P_j^i A^i(\tau_j^i) \\ & - P_j^i B^i(\tau_j^i) R^{-1} B^i(\tau_j^i)^T P_j^i + Q = 0 \end{aligned} \quad (7)$$

を $P_j^i \in R^{4 \times 4} (P_j^i = (P_j^i)^T > 0)$ について解くこ

とにより、フィードバックゲイン

$$K'_j = -R^{-1}B'(\tau'_j)^T P'_j \quad (8)$$

$(i=1,2,\dots,10, J=1,2,\dots,9)$

を求めた。この際、重みについては、収束性を厳しくするため 100 とした。

3. 車輪型移動ロボットの設計

3.1 ハードウェアの構成

2章の理論を実装した実車実験を行った。供試車両として小型乗用トラクタ（三菱農機、MT2501D）を準備し、トラクタ上には計測・制御用に自作のパソコンを搭載した。また、各状態量の計測に当たっては、以下のような装置を使用した。

1) 光波測距儀

平面上でのトラクタの座標を取得するために、自動追尾式的光波測距儀（ライカ、TPS-System 1000）を使用した。この装置を用いた際はパソコンと有線ケーブルで連結したが、実際の作業環境を考えると現実的ではないので、さらに光波測距儀とパソコンの通信に無線機（八重洲無線、YRM-311）を使用した。なお、無線機を用いた実験では光波測距儀としてライカ製トータルステーションTCA1800を用いた。

2) 光ファイバージャイロ

トラクタの姿勢角の測定については光ファイバージャイロ（多摩川精機、FOG A7345）を用いた。比較的ドリフトの大きい機種であるが、本研究においては実験時間が1, 2分と短いため、結果に及ぼす影響がほとんどないことを予備実験にて確認している。

3) 変位計

変位計（共和、DPM-05MDS）を使って前輪の操舵角を計測した。変位計を前輪車軸部に固定し、ワイヤーを右側のステアリングロッドに取り付け、ワイヤーの変位量による出力電圧をストレインアンプ（共和電業、DPM-305A）で増幅し、AD変換ボードを介してパソコンに取り込んだ。

4) 回転計

トラクタの速度計測は、電磁式回転検出器（小野測器、MP950）によりエンジン回転数を計測し、その値を速度に換算した。

以上の装置により各状態量を計測し、理論に基づいて操作量である操舵角を算出する。制御装置としては澤村電気工業製のDCサーボモータを利用し、ハンドル軸を介して操舵角を入力した。

3.2 ソフトウェアの実装

制御用のソフトウェアを開発するにあたっては、トラクタの速度を制御する装置が現段階で完成しておらず、また実験の際の走行速度を極低速としたため、加速度($\dot{v}$)については計算は行わないものとして速度一定とし、速度を操作量としてトラクタに入力しなかった。さらに、本来ならば状態量中の変位(x, y)によってフィードバックゲインを切り替える必要があるが、等速走行であるためプログラムの簡略化を考慮して制御刻み 190 回目、つまり τ'_j におけるゲインのみを用いた。

初期状態量から基準状態量を選定する際、および制御走行中にある時刻での状態量から基準状態量を選定する際には、その時刻で

の変位(x, y)から x, y の両軸に向かって平行の1辺2mの正方形を仮定し、その正方形内にある基準状態の中で距離的に1番近いものを選ぶようにした。そして、その点を基準状態量として、式(4)により操作量を計算し、入力させるプログラムを作成した。なお、プログラムには言語C++を使用した。

3.3 実験方法

実験では、トラクタに搭載したパソコン上で前節のプログラムを起動させ制御した。その概略をFig.3に示す。なお、トラクタを自動停止させる装置がないため、実験終了の際は手動で停止させた。実験終了は x 方向の変位が負になったときとした。また、本実験はタイヤの滑りの少ないアスファルトで行った。

光波測距儀については、TPS-System 1000は計測された座標情報が全て送信される内部プログラムを所持しているため、制御を行う際にはその時刻直前の変位情報を用いるようにした。一方、TCA1800はサンプリングタイムが約0.5[s]と長いため、次の制御点に達したときに新しい変位情報が来ていないといったことが生じる可能性があった。また、無線機の不具合により変位情報が通信されないといった問題が生じた。そのような場合は、その時点では制御を行わず、変位情報が通信された時点で制御を行うようプログラムを改良した。

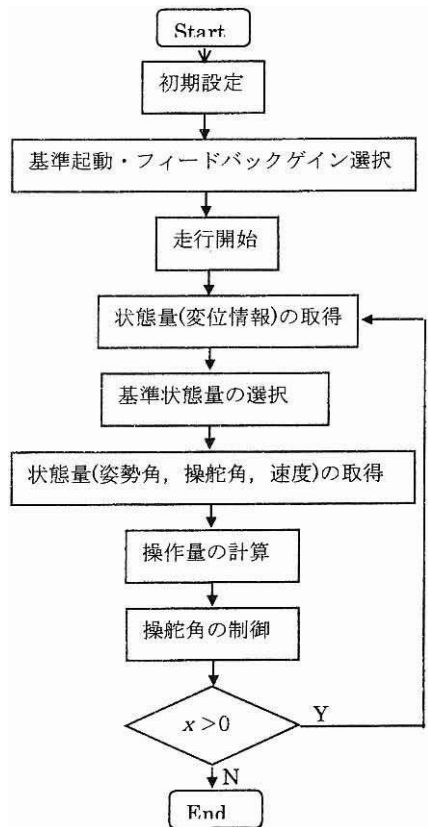


Fig.3 実験の流れ

4. 実験結果と考察

Fig.4, Fig.5は光波測距儀としてTPS-System 1000を用い、コンピュータと有線接続した場合の実験結果である。Fig.4では基準軌道としてN3を、Fig.5ではN9を選択している。ただし実際にはうまく制御できなかった実験もあり、今回は良好な自律走行を行った場合を選んだものである。スタートした直後は選択した基準状態との差が大きく、また光波測距儀からコンピュータへの変位情報の取り込みにスムーズさを欠いたため、

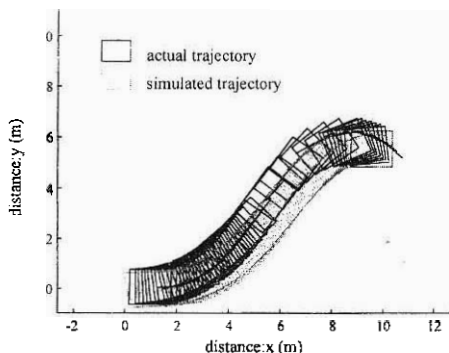


Fig.4 基準軌道 N3 での結果(有線接続)

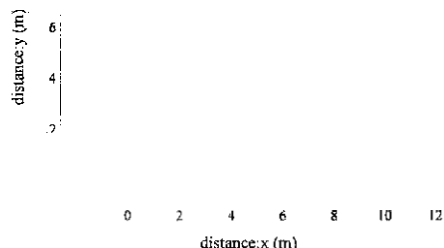


Fig.5 基準軌道 N9 での結果(有線接続)

両結果とも不安定な動きを示した。しかし軌道に乗った後は安定した制御を繰り返し、原点へと近づいていったことがわかった。

一方で、光波測距儀 TCA1800 を使用し、通信に無線機を用いた場合の実験結果から変位のみを示したものが Fig.6(基準軌道 N3)と Fig.7(基準軌道 N4)である。前者の実験結果と同様に原点方向に向かって制御されていくのだが、原点に近づくにつれて基準状態に対する収束性が逆に低下してしまった。原因としては、まず光波測距儀からの変位情報の取り込みでのエラーが多かったということが挙げられる。

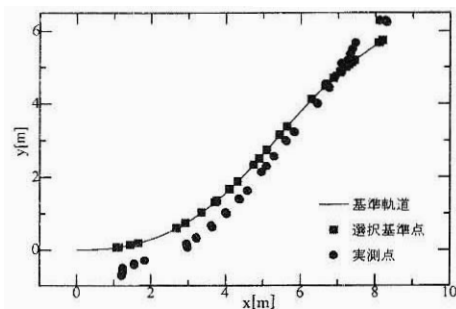


Fig.6 基準軌道 N3 での実験結果(無線接続)

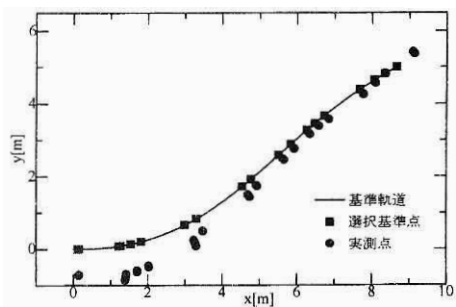


Fig.7 基準軌道 N4 での実験結果(無線接続)

さらに、変位取得の刻みが 0.5[s]以上となったため、制御回数が減少したことも原因の 1 つになったと思われる。さらに、これらを含めた諸原因が重なり、設定したフィードバックゲインと実験とのマッチングが不良となったとも考えられる。このため、フィードバックゲインについて現在再検討中である。また、 y 方向での終端点での誤差が比較的大きくなるのは両者に共通した現象であり、今後原点付近ではフィードバックゲインを切り替えるといった、2段階以上での制御を取り入れた実験を検討している。

5. 終わりに

実験結果からもわかるように、現段階ではハードウェアに関係した問題を解決することが急務である。しかしながら、少なくとも2章にある理論により、ランデブー問題の解決の可能性は確認できた。今後、変位情報の取得に関する諸問題が改善された後には、自動車工学の分野で利用されている前方注視点モデルの概念との融合を図るなどして、ランデブー問題のみならず、圃場内作業での様々な自律走行やトラクター装着時における誘導制御等の問題にも応用していきたい。

参考文献

- 1) 鳥巢, 中坪, 井前: トラクタの最短時間問題 (第一報), 農業機械学会誌, 58-5, 5/12(1996)
- 2) 中村: 非ホロノミックシステム, 日本ロボット学会誌 11-5, 655/662
- 3) 井前, 結城, 鳥巢: 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, 42-49