

## 操舵機構トレーラのトラクタへのオントラッキング制御 On-tracking Control of a Steered Trailer for a Tractor

鳥巢 諒\*, ○出口 雄一\*, 戸室 成人\*, 武田 純一\*, 井前 譲\*\*

\*岩手大学農学部

\*\*岩手大学工学部

Ryo TORISU\*, Yuichi DEGUCHI\*, Shigeto TOMURO\*, Jun-ichi TAKEDA\*, Joe IMAE\*\*

\*Faculty of Agriculture, Iwate University

\*\*Faculty of Engineering, Iwate University

キーワード : オントラッキング制御(on-tracking control) 操舵機構トレーラ(steered trailer)

縮小モデル(scale model) 農用トラクタ(farm tractor)

連絡先: 〒020 岩手県盛岡市上田 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

農業用車両には、ヒッチ点がついており、そこにさまざまな作業機を取り付け作業を行う。しかし、農作業におけるトラッキング問題、特に、トラクタと作業機との内輪差は、移動中の脱輪、圃場における踏みつけ面積の拡大、また、作業者の作物列に作業機を追従させるための熟練度、あるいは、そのため、無理な体勢で後方の作業機の位置を随時確認しなければならないなどの問題を発生させる。

これらの問題を解決するために、トレーラ系作業機車輪に操舵機構を付加したシステム(以後、このシステムのことを操舵機構2輪トレーラ系という)を利用し、内輪差を解消しようという試みが以前より行われてきた。

操舵機構2輪トレーラ系では、以前より、車両と作業機がなす角(以後、折れ曲がり角という)や、折れ曲がり角速度を考慮したもの<sup>1)</sup>が提案されている。また、農業分野では、瀧川ら<sup>2)3)</sup>により車両の操舵角と、折れ曲がり角を考慮したトラッキング制御が提案されている。

本研究では操舵機構2輪トレーラ系に限定し、任意に操舵をしているトラクタの後輪軸中心点Bが通った軌道に、作業機部(以後、トレーラという)軸上任意の点D'(以後、制御点という)が必ず通過するようにするために、(1)系の操舵と運動の間に成り立つ基礎方程式を導出し、(2)トラッキング条件を定式化し、(3)この連立方程式を解くことにより、トレーラ輪をどのように操舵すればよいかを導く。(4)最後に、上記の理論を試作した縮小モデルを用いて、実験的に検証する。

### 2. 車両方程式と操作量

#### 2-1 車両方程式

トラクタ・トレーラ系の数学的モデルは以下の仮定により、運動学モデルを採用する。

- 1) 農用車両は極低速で移動、作業が行われ車輪の横滑りを無視できるものとする。
- 2) 車両は剛体と仮定し、平面運動のみを考える。トラクタ前、後輪及び、トレーラの各左右輪をその軸中心に集めた2輪等価モデルとして扱う。

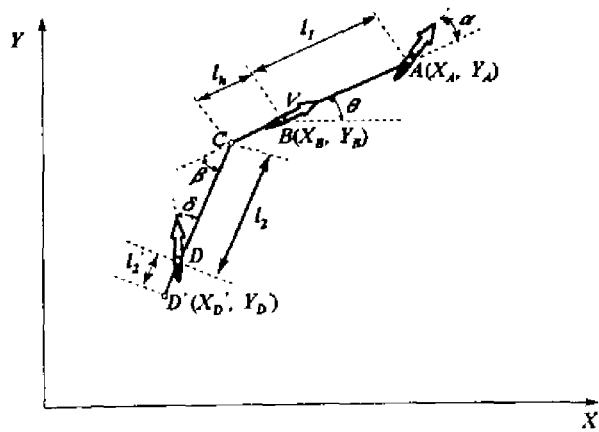


図1 トラクタトレーラ系の2輪等価モデル

表1 等価2輪操舵機構モデルの記号

$A(X_A, Y_A)$	トラクタ前輪軸中心点
$B(X_B, Y_B)$	トラクタ後輪軸中心点
$D(X_D, Y_D)$	トレーラ軸輪中心点
$D'(X_D', Y_D')$	トレーラ軸上の任意の点(制御点)
$l_1$	トラクタ軸距離(2点 AB の距離)
$l_h$	ヒッチ点距離(2点 BC の距離)
$l_2$	トレーラ長さ(2点 CD の距離)
$l_2'$	トレーラ輪軸から制御点までの長さ (2点 DD' の距離)
$\alpha$	トラクタ操舵角
$\delta$	トレーラ操舵角
$\theta$	トラクタ姿勢角
$\beta$	折れ曲がり角
$V$	車速

図1の操舵機構2輪トレーラ系の2輪等価モデルについて車両方程式を導く。系は後輪駆動とし、B点及びD点を中心としA~D'点及び $\theta$ 、 $\beta$ についての車両方程式とする。

車速がVであるとき、B点のX方向の速度成分は

$$\dot{X}_B = V \cos \theta \quad (2-1)$$

である。また、A点のX方向の成分は

$$\dot{X}_A = V_A \cos(\theta + \alpha)$$

$V = V_A \cos \alpha$  より

$$\dot{X}_A = \frac{V}{\cos \alpha} \cos(\theta + \alpha) \quad (2-2)$$

また、図1よりA、Bの幾何学的関係より

$$X_A - X_B = l_1 \cos \theta$$

この式を時間tで微分し、式(2-1)(2-2)を代入し整理すると

$$\dot{\theta} = \frac{V}{l_1} \tan \alpha \quad (2-3)$$

となる。Y方向について解いても同様のことがいえる。

また、B点のY方向の速度成分は

$$\dot{Y}_B = V \sin \theta \quad (2-4)$$

となる。

同様にD点周りの車両方程式を考える。C点とD点との関係より $\beta$ の状態方程式は以下の通りとなる。

$$\dot{\beta} = \frac{V}{l_2} \left\{ (l_1 - l_2 \tan \alpha \tan \delta) \sin \beta + (l_1 \tan \delta + l_h \tan \alpha) \cos \beta + l_2 \tan \alpha \right\} \quad (2-5)$$

図1よりB点の座標と $\theta$ 及び $\beta$ が分かれば、幾何学的関係より制御点D'の座標が分かるので、系の車両方程式は式(2-1)(2-3)(2-4)(2-5)のみである。また、B点とD'点との関係は、以下の通りとなる。

$$X_D' = X_B - l_h \cos \theta - (l_2 + l_2') \cos(\theta + \beta) \quad (2-6)$$

$$Y_D' = Y_B - l_h \sin \theta - (l_2 + l_2') \sin(\theta + \beta) \quad (2-7)$$

## 2-2 線形化と離散化

それぞれの角度 $\alpha$ 、 $\delta$ 、 $\theta$ 、 $\beta \ll 1$ として線形化し、サンプリングタイム $\Delta t$ で離散時間系にする。ただし、各状態量、入力量は0次ホールドとする。線形化によりX方向の速度成分は $\dot{X}_B = V$ となり一定となるので、 $\theta$ 、 $\beta$ 、 $\dot{Y}_B$ に、関してマトリクス化する。

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{Ax} + \mathbf{Bu} \quad (2-8)$$

$$\mathbf{x} = [\theta \quad \beta \quad Y_B]^T \quad \mathbf{u} = [\alpha \quad \delta]$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & -k_2 & 0 \\ V & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} k_1 & 0 \\ -k_1 - k_3 & -k_2 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

また、 $k_1 = V/l_1$   $k_2 = V/l_2$   $k_3 = Vl_h/l_1l_2$  である。状態方程式(2-7)をサンプリングタイム  $\Delta t$  で離散化すると以下の通りとなる。

$$\mathbf{x}(k+1) = \mathbf{P}\mathbf{x}(k) + \mathbf{Q}u(k) \quad (2-9)$$

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & e^{-k_2\Delta t} & 0 \\ V\Delta t & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} k_1\Delta t & 0 \\ -\frac{k_1+k_3}{k_2}(1-e^{-k_2\Delta t}) & e^{-k_2\Delta t} - 1 \\ \frac{1}{2}Vk_1\Delta t^2 & 0 \end{bmatrix}$$

$X_B(k+1) = X_B(k) + V\Delta t$  となり変化量は一定となる。以上で離散時間系の車両方程式が導かれた。

### 2-3 オントラッキング制御のための制御量

一般にオントラッキングとは、すべての車軸中心が同一の軌跡上を通過するときのことを言う。しかし、普通トラクタ後輪には操舵機構が無いものがほとんどなので、トラクタ前輪と後輪の内輪差は避けられない。よって今回は、トラクタ後輪軸中心とトレーラ制御点が同一の軌跡上を通過するとき、「オントラッキングの状態である」とする。

ここで、先の離散時間系の車両方程式(2-9)を用いる。X軸の関係より後輪軸中心B点と制御点D'点との段数差  $n$  は、 $n = (l_h + l_2 + l_2')/V\Delta t$  となる。B点とD'点がオントラッキングの状態になるための条件式は

$$D'(k+1) = B(k+1-n) \quad (2-10)$$

条件式よりオントラッキングになるための  $\delta$  の操作量を求める。X軸に関しては、一定となっているの

でY軸に関して条件式を書換える。

$$Y_D'(k+1) = Y_B(k+1-n) \quad (2-11)$$

これを満たす  $\delta(k)$  は、

$$\delta(k) = [M_\beta\beta(k) - M_\theta\theta(k) - M_\alpha\alpha(k) - V\Delta t \left\{ \sum_{i=1}^{n-1} \theta(k-i) + \frac{1}{2}k_1\Delta t \sum_{i=1}^{n-1} \alpha(k-i) \right\}] / M_\delta \quad (2-12)$$

ただし

$$\begin{aligned} M_\alpha &= k_1\Delta t \left( \frac{1}{2}V\Delta t - (l_h + l_2 + l_2') \right) \\ &\quad + (k_1 + k_3)(l_2 + l_2')(1 - e^{-k_2\Delta t}) / k_2 \\ M_\beta &= (l_2 + l_2')e^{-k_2\Delta t} \\ M_\delta &= (l_2 + l_2')(1 - e^{-k_2\Delta t}) \\ M_\theta &= V\Delta t - l_h - l_2 - l_2' \end{aligned}$$

以上でオントラッキングになるための操作量  $\delta$  が求められたことになる。

## 3 シミュレーションと縮小モデルによる実験

### 3-1 シミュレーション

縮小モデルでの実験を行う前に、理論式の有効性を見るためコンピュータによるシミュレーションを行った。シミュレーションに用いたパラメータの諸元は表2の通りである。

シミュレーションは、内輪差が確認しやすい2種類の方法で行った。1つは、トラクタ操舵角  $\alpha$  を一定とした定常円旋回、もう1つは、トラクタ操舵角  $\alpha = 0.4 \sin(0.1t + 1.54)$  を入力したスラローム走行を行った。結果は、定常円旋回が図3、4、スラローム走行が図5、6に示す通りで大変良好な追従性が得られた。

表2 縮小モデルの諸元

$l_1$	0.199m
$l_h$	0.066m
$l_2$	0.27m
$l_2'$	0.065m

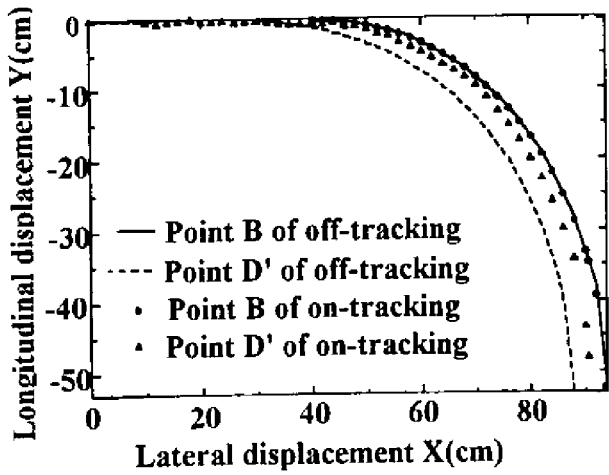


図2 コンピュータシミュレーションによる定常円  
旋回時の軌跡

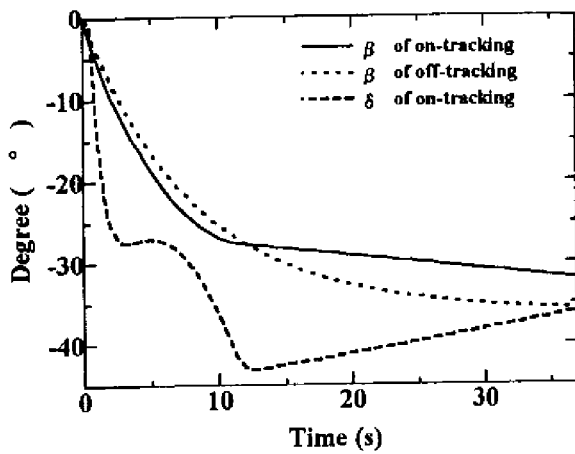


図3 コンピュータシミュレーションによる定常円  
旋回時の角度変化

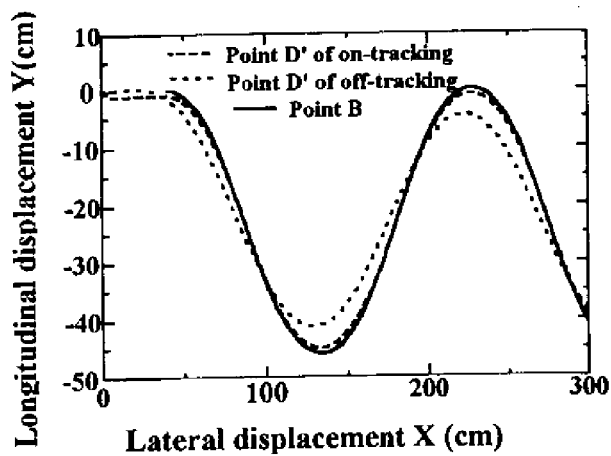


図4 コンピュータシミュレーションによるスラロー  
ム走行時の軌跡

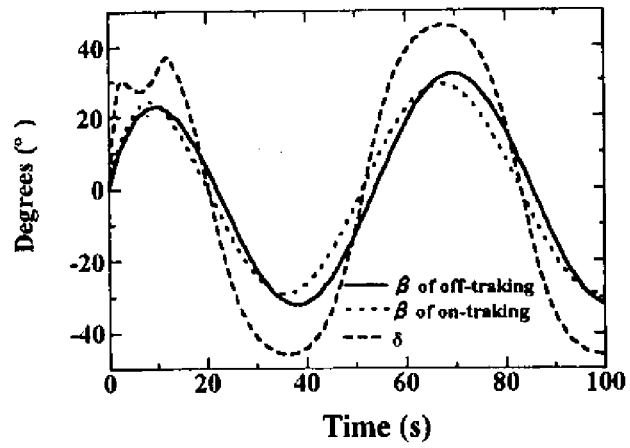


図5 コンピュータシミュレーションによる  
スラローム走行時の角度変化

### 3-2 縮小モデル

表 2 の諸元のトラクタ部が3輪、トレーラ部が1輪の有線式模型を試作した。車輪駆動機構は DC モータを使用し、操舵機構にはステッピングモータを使用した。(図6, 写真1)

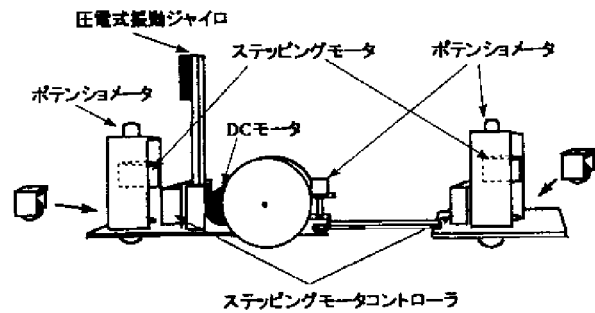


図6 試作機

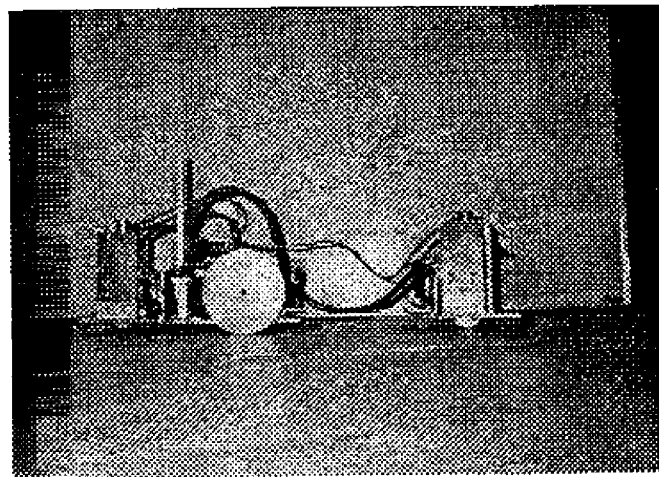


写真1 試作機写真

操舵角  $\alpha$ 、 $\delta$  及び、折れ曲がり角  $\beta$  を測定する

ためにポテンショメータを使用し、姿勢角の角速度  $\dot{\theta}$  を測定するために圧電振動ジャイロを使用した。走行軌跡は、プロッタペンをトラクタ後輪軸中心と制御点に取り付け、地面に貼り付けた紙に描かせた。

制御装置には、パーソナルコンピュータ PC-9821As を使用し、AD コンバータによりポテンショメータ及び、ジャイロの電圧を測定し前式の制御方法に基づき、8255A を介し、ステップモータの制御を行った。また制御間隔は 50ms とした。

### 3-3 縮小モデルによる実験

実験は室内で行い、初期状態は、トラクタ、トレーラ操舵角及び、折れ曲がり角を 0 にし、車速は、0.034m/s とした。また、座標は、発進時の後輪軸中心点を原点とし進行方向を X 軸の正、進行方向に対しての垂線を Y 軸とし、進行方向左側を正とした。また、縮小モデルが走り出すと同時に制御プログラムを動かした。

実験は、シミュレーション同様 2 種類の方法で行った。定常円旋回実験では、トラクタ操舵角  $\alpha = \pm 20^\circ$  にし、トレーラ部が  $90^\circ$  回転するまで行き、制御をした時としない時の軌跡及び各角度を測定した。スラローム走行実験では、操舵角に  $\alpha = 0.4 \sin(0.1t + 1.54)$  を入力し、定常円旋回実験同様に各項目を測定した。

### 3-4 実験結果

定常円旋回実験では、トラクタ操舵角  $\alpha = \pm 20^\circ$  を行ったがどちらも同じ傾向を示したので、 $\alpha = -20^\circ$  の方だけを示した。図 8 は、後輪軸中心 B と、制御点 D' の軌跡。図 9 は、その時の角度変化である。軌跡では、制御なしのとき内輪差が平均 6.2cm であったのに対し、制御ありでは、2.5cm になった。

スラローム実験の結果は図 10 と図 11 に示す通り、位相遅れも見られず、高い追従性を見せた。しかし、最大振幅付近で後輪軸中心点 B の軌跡よりも膨らむ傾向が見られた。

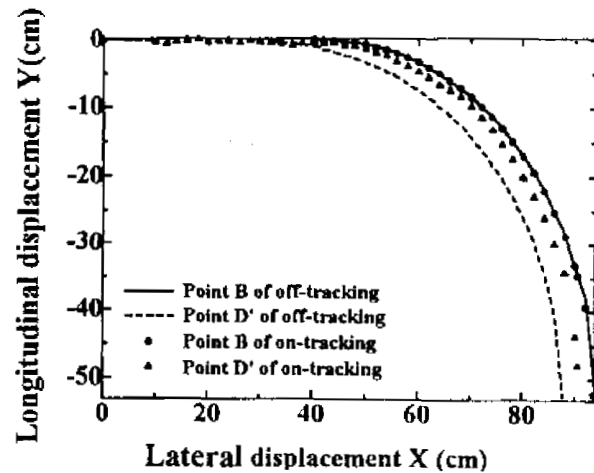


図7 定常円旋回実験の軌跡

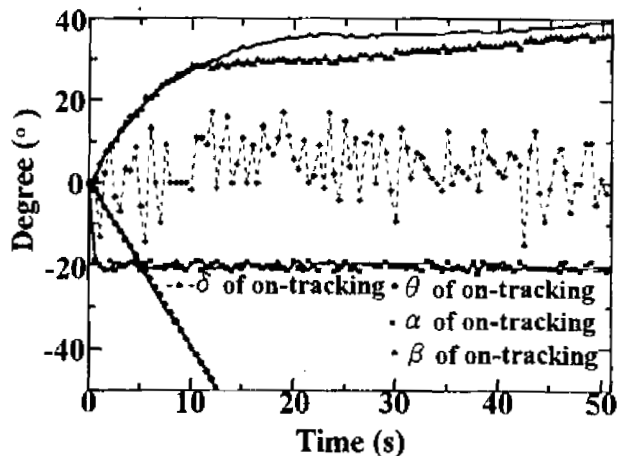


図8 定常円旋回実験の角度変化

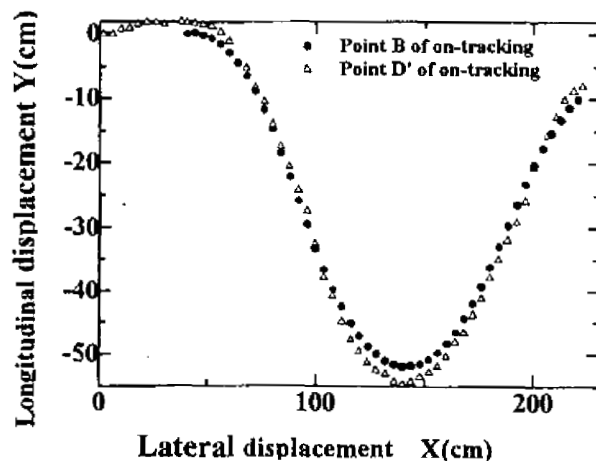


図9 スラローム実験の軌跡

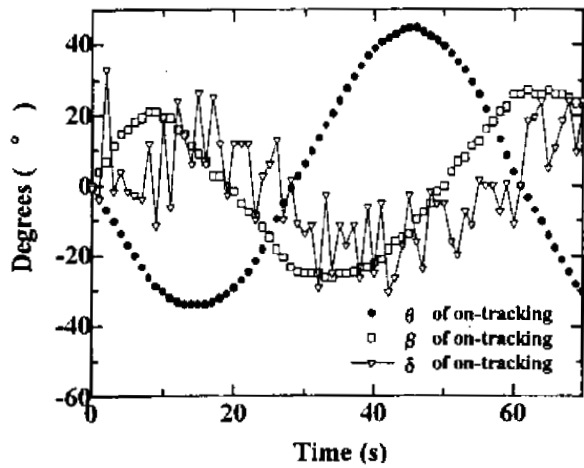


図10 スラローム実験の角度変化

#### 4.おわりに

今回は、操舵機構2輪トレーラ系の基礎方程式を明らかにし、線形化したトラッキング制御理論を導き、実際に試作したモデルでその有効性を検証した。その結果、定常円旋回実験とスラローム実験においては良い追従性を見せた。

#### 参考文献

- 1) 影山一郎: 連結車両(乗用車トレーラ)の安定化に関する研究、自動車技術、Vol.36、No.3  
291-297、1970
- 2) 瀧川ら: 追従型けん引システムの開発(第一報)  
農業機械学会誌、Vol.54、No.5、57-65、1992
- 3) 瀧川ら: 追従型けん引システムの開発(第二報)  
農業機械学会誌、Vol.55、No.4、23-31、1993