

### 人によるトラクタ車線変更の最短時間制御

Minimum time control of lane change maneuvers of a farm tractor by a human operator

○鳥巢 諒\*, 中坪敏行\*, 田中健一\*, 井前 讓\*\*

\*岩手大学農学部

\*\*岩手大学工学部

○Ryo Torisu\*, Toshiyuki Nakatubo\*, Kenichi Tanaka\*, Joe Imae\*\*

\*Faculty of Agriculture, Iwate University

\*\*Faculty of Engineering, Iwate University

キーワード: 最短時間制御 (minimum time control), 車線変更 (lane change)

操縦性 (maneuver ability), 農用トラクタ (farm tractor)

非ホロノミック系 (non-holonomic system)

連絡先: 〒020 盛岡市上田3-18-3 岩手大学農学部 鳥巢 諒

TEL 0196(21)6184 FAX 0196(21)6204

E-mail: torisryo:rt@msv.cc.iwate-u.ac.jp

## 1. はじめに

農用トラクタは農作業の場で広く利用され、これを効率的に操縦することは重要な課題である。また近年、農作業の自動化・無人化の必要性から自動走行・自律走行車両の開発<sup>(1)(2)</sup>やその実用化の研究がなされている。他方、ロボット工学の分野では、2輪や4輪タイプのいわゆるcar-like-robotの軌道計画問題<sup>(3)</sup>が研究されている。これらは非ホロノミック車両の制御問題の範疇の属するほとんど同一の問題である。

筆者らは、これまで非ホロノミック車両の制御問題という観点に立って、農用トラクタの車線変更を最短時間で行うことを最適制御問題として定式化し、シミュレーションを行い、実車実験との比較検討を行ってきた<sup>(4)</sup>。システムが非線形にも関わらず、Bang-Bang制御になるという結果が得られた。しかし、①車両の慣性項の

影響、②人の反応時間の遅れ、③実際の車線変更の状況などの要因からシミュレーションと実車実験には若干の相違が見られた。

そこで、今回は、以上の3つの要因を考慮して、実際のトラクタで人が最短時間制御を行う場合の車線変更問題をより詳細に検討する。

(以下、3つの要因を考慮していない理論・状態方程式・実車実験等には、旧理論のように、「旧」をつけて記述し、考慮したものには、新理論のように、「新」をつけて記述することにする。)

## 2. 車線変更問題の定式化

### 2.1 車線変更の最短時間問題の定式化

はじめに、ここでの車線変更とは、図1に示すようなHの幅を持った平行な2直線路の一方から、もう一方に乗り移ることと定義する。

車線変更は平面上の任意の点から任意の点へ車両を移動させる運動計画問題の特殊な例である。また今回は、その開ループ制御を求める問題としている。この問題へのアプローチはいくつかあるが、今回も文献(4)と同様、最適制御問題として帰着させた。最適制御問題の中でも非線形システムの最短時間問題を解析的に解くことは一般に困難とされている。本システムも非線形であるので車線変更時のこの最短時間問題を終端時刻固定問題に変換して、数値解法を利用し、文献(5)で開発された2次アルゴリズムを採用した。

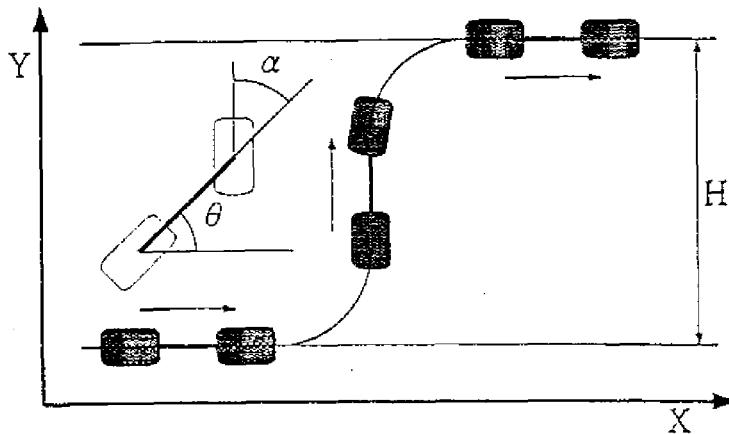


図1 車線変更

## 2.2 旧理論から新理論へ

旧理論によるシミュレーションと旧実車実験の制御特性を比較したところ、前述したように次のような問題点が浮かび上がってきた。

①車両の慣性項の影響：現実の車両ではハンドルから操舵角までには慣性があり、このため瞬時に操舵角を右最大から左最大まで変えることはできない。実車実験では約1秒強の時間がかかっている。

②人の反応時間の遅れ：人には反応時間の遅れがあり、ハンドルの回転速度にも限界がある。

③実際の車線変更の状況：現実の車線変更で

は、車線変更が終了したときに操舵角を零に戻しておくのが普通である。ただし、縦列駐車などでは、ハンドルを切ったままにしておく例のあることも注意されたい。

これらのことから、旧理論での車線変更の最短時間制御問題の定式化は変更する必要がある。

①、②を考慮するためには、これまで操作量としていた操舵角を状態量に変え、人のハンドルの回す速さには上限があるので、操舵角を切る速さにも制約をつける必要がある。また、③を考慮するためには、新たな終端条件を加える必要がある。すなわち、新理論での定式化は、終端時刻固定問題としての扱いは変わらないが、状態方程式、評価関数、拘束条件などが変化することになる。

### 【旧状態方程式と新状態方程式】

状態方程式は新旧それぞれ、表1で示される非線形連立微分方程式になる。状態方程式の新旧の違いは、旧状態方程式では3つの状態量が、新状態方程式では4つの状態量に増加している。これまで、操作量であった操舵角を状態量にし、新しい操作量  $s$  として操舵角の微分すなわち操舵回転速度を導入した。

表1 状態方程式

旧状態方程式	新状態方程式
$\frac{d\theta}{dt} = \frac{V}{L} \tan \alpha$	$\frac{d\theta}{dt} = \frac{V}{L} \tan \alpha$
$\frac{dX_B}{dt} = V \cos \theta$	$\frac{dX_B}{dt} = V \cos \theta$
$\frac{dY_B}{dt} = V \sin \theta$	$\frac{dY_B}{dt} = V \sin \theta$
—————	$\frac{d\alpha}{dt} = k s$

ここで、 $\theta$  : x軸と車両のなす角、 $\alpha$  : 操舵角

$(X_B, Y_B)$  : 後輪軸中心点座標

$L$  : ホイールベース、 $V$  : 車両の速度

【旧評価関数と新評価関数】

それぞれ、表1に示された状態方程式を用い、新旧の評価関数は表2のように定義する。評価関数は前部と後部の積分項に大別され、前者は状態量の終端条件を表し、後者の積分項は状態量や操作量に関する拘束条件を表す。新旧の違いは、新評価関数では操舵角は零に戻して車線変更を終わらなければならず、また、 $\mu_{max}$  より速く操舵角は切ることができないことである。

【旧初期・終端条件と新初期・終端条件】

表3に新旧における初期条件、終端条件を示す。新旧初期条件はともに状態空間の原点から出発することを意味する。特に新初期条件では  $x_4(0)=0$  はハンドルを零から出発したことを、 $x_4(0)=\alpha_0$  は最初から $\alpha_0$  だけ切って出発したことを意味する。終端条件については前進方向すなわちX座標には制約がないので、評価関数にも表われていない。新終端条件にはこれに加えて、新しく状態量になった操舵角も零に戻す必要がある。

表3 初期条件、終端条件

旧初期条件	旧終端条件
$x_1(0)=0$	$x_1(T)=0$
$x_2(0)=0$	$x_2(T)=自由$
$x_3(0)=0$	$x_3(T)=H$
新初期条件	新終端条件
$x_1(0)=0$	$x_1(T)=0$
$x_2(0)=0$	$x_2(T)=自由$
$x_3(0)=0$	$x_3(T)=H$
$x_4(0)=0$	$x_4(T)=0$

【旧拘束条件と新拘束条件】

表4に新旧における拘束条件を示す。拘束条件には操作量と状態量の拘束がある。

新旧の違いは、旧拘束条件には状態量の拘束はなく、操作量である操舵角に拘束がある。新拘束条件では、操作量であった操舵角が状態量となるので、状態量の拘束がつく。そして、新しく、操舵回転速度が操作量となるのでこれにも拘束がつく。

表2 評価関数

旧状態方程式
$\frac{dx}{dt} = f(x, u, t) \quad \text{但し, } x = (x_1, x_2, x_3)^t = (\theta, X_B, Y_B)^t, \quad u = \alpha$
旧評価関数
$J = \{x_1(T)\}^2 + \{x_3(T) - H\}^2 + \int_0^T \frac{\gamma}{\alpha_{max}^2 - u^2} dt$
新状態方程式
$\frac{dx}{dt} = f(x, u, t) \quad \text{但し, } x = (x_1, x_2, x_3, x_4)^t = (\theta, X_B, Y_B, \alpha)^t, \quad u = s$
新評価関数
$J = \{x_1(T)\}^2 + \{x_3(T) - H\}^2 + \{x_4(T)\}^2 + \int_0^T \left( \frac{\gamma_1}{\alpha_{max}^2 - x_4^2} + \frac{\gamma_2}{\mu_{max}^2 - u^2} \right) dt$

ここで、 $T$  : 終端時刻、 $H$  : 車線変更幅、 $t$  : 転置記号

表4 拘束条件

旧拘束条件	操作量の拘束	状態量の拘束
	$ u  \leq \alpha_{max}$	——
新拘束条件	操作量の拘束	状態量の拘束
	$ u  \leq \mu_{max}$	$ x_4  \leq \alpha_{max}$

### 3. 実車実験とシミュレーションの結果

#### 3.1 旧実車実験と新実車実験

新旧ともに表5に示す諸元の農用トラクタを供試車両とし、一定速度による車線変更実験を行った。平坦なアスファルト路面に3m幅の平行線を引き、オペレータは実車実験を行う前に、シミュレーションの結果を知っており、最短時間になるように車線変更をした。トラクタには前輪中心点Aと後輪中心点Bにそれぞれ点滴装置を付け、カラーペイントで走行軌跡を描かせた。軌跡は走行後水平方向5cm間隔で読みと取った。なお、操縦時の操舵角 $\alpha$ はポテンショメータを介してデータレコーダに記録した。

旧実車実験の結果を図2(軌跡)、図3(操舵角)に示す。新実車実験の結果を図4(軌跡)、図5(操舵角)に示す。

新旧の違いは、旧実車実験では車線変更の終わり方を、ハンドルが切られていても、車両中心線が直線に乗ったところで終わりとしたが、新実車実験では、終わり方を、ハンドルを直線と平行にして終わりとした。ただし、あくまで速度を一定としているのでシミュレーションでは、通過点となっている。実車実験では急ブレーキをかけて急停止した。

表5 実験に用いた供試車両の諸元

車両形式	KUBOTA L140
重量	6223[N](635[kgf])
ホイールベース	1.315[m]
最大出力	10.3[kw](14[PS])
最大操舵角	42.0[Deg](実測)

#### 3.2 旧シミュレーションと新シミュレーション

新旧のシミュレーションに用いた車両の諸元を表6に示す。ここで、 $\mu_{max}$ は操舵角を切る速度のことで、供試トラクタで右最大から左最大まで切るのに1秒強の時間がかかっていることより算出した。これはある程度熟練したオペレータであり、初心者は2, 3割増加する。旧シミュレーション結果を図6(軌跡)、図7(操舵角)に示す。新シミュレーション結果を図8(軌跡)、図9(操舵角)に示す。

表6 シミュレーションに用いた車両の諸元

旧シミュレーション		
ホイールベース	L	1.32[m]
速度	V	0.5[m/s]
車線変更幅	H	3.0[m]
最大操舵角	$\alpha_{max}$	42[Deg]
新シミュレーション		
ホイールベース	L	1.32[m]
速度	V	0.5[m/s]
車線変更幅	H	3.0[m]
最大操舵角	$\alpha_{max}$	42[Deg]
最大操舵回転速度	$\mu_{max}$	74[Deg/s]

### 4. 実車実験とシミュレーションの比較

車両の車線変更を最短時間で行うという問題は、理論的には典型的なBang-Bang制御問題といえる。このことは、前述の3要因を考慮していないシミュレーションの結果(図6, 図7)に明確に現れている。しかし、実車実験の場合では旧実車実験の結果(図2, 図3)を見てもわかるように3要因のため、オペレータはBang-Bang制御をしようとするが、そうはできない。

そこで、3要因を考慮した新シミュレーションの結果(図8, 図9)を見ると、操舵角の回転速度の限界がかなり現れていて、操舵角も終

端点で零で終わっている。これを、新実車実験の結果(図4, 図5)と比較してみると、かなり一致していることがわかる。このことは、新理論は、人によるトラクタの車両変更の最短時間制御を高い水準で評価できることを示している。また、人はトラクタ車線変更を最短時間制御で行っていることもわかる。

### 5. おわりに

今回は、ハンドル操作から操舵角までの慣性の影響や人の反応時間の遅れを考慮すると、より最短時間制御による車線変更時の車両の運動を説明できることを示した。また、車線変更問題は1つの軌道計画問題であるが、これによって、農用車両の自律走行を考える場合、最適制御理論の適用の可能性が大きいことも示し得た。

### 参考文献

- (1) 桶敏・村瀬治比古・中村喜彰・穂波信雄：現代制御理論による農用車両の操向制御(第3報) - 車体屈折式車両の操向制御系におけるオブザーバの設計とその評価 -, 農業機械会誌 Vol. 57, No. 2, 37/42, 1995
- (2) 戸田勝善・木谷収・岡本嗣男・鳥居徹：自律移動ロボットに関する研究(第2報) - ファジモデルによる走行制御手法 -, 農業機械学会誌 Vol. 57, No. 3, 55/63, 1995
- (3) 中村仁彦：非ホロノミックロボットシステム - 第3回・幾何学的な非ホロノミック拘束の下での運動制御 -, 日本ロボット学会誌 Vol. 11, No. 6, 837/844, 1993
- (4) 鳥巢諒・中坪敏行・井前讓：トラクタの最短時間制御問題(第1報) - 車線変更時の最短時間制御の定式化とその実車実験 -, 農業機械学会誌 Vol. 58, No. 5, 1996 (印刷中)
- (5) 井前讓・箱守京太郎：リカッチ解の存在を保証する2次の最適制御アルゴリズム, 計測自動制御学会論文集 Vol. 23, No. 4, 410/412, (1987)

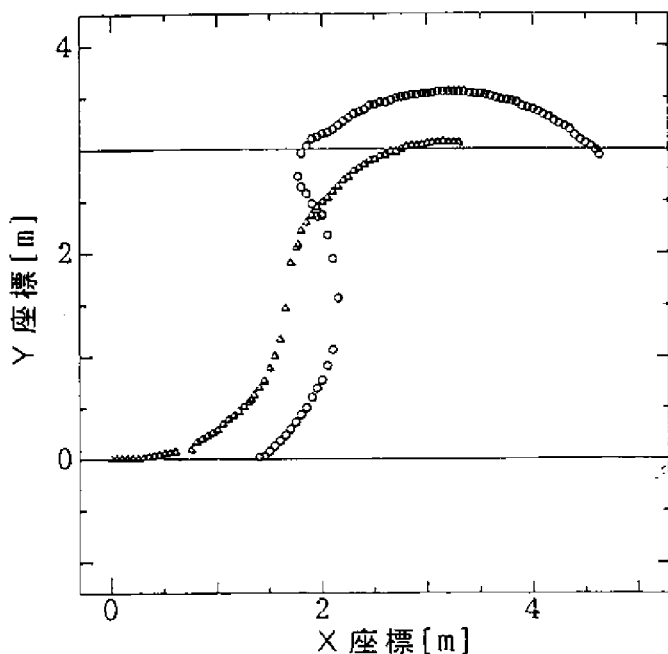


図2 旧実車実験の結果(軌跡)

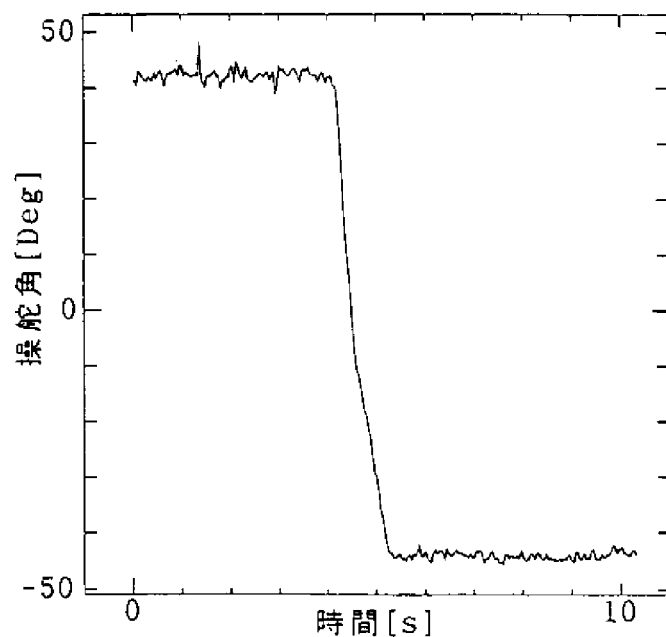


図3 旧実車実験の結果(操舵角)

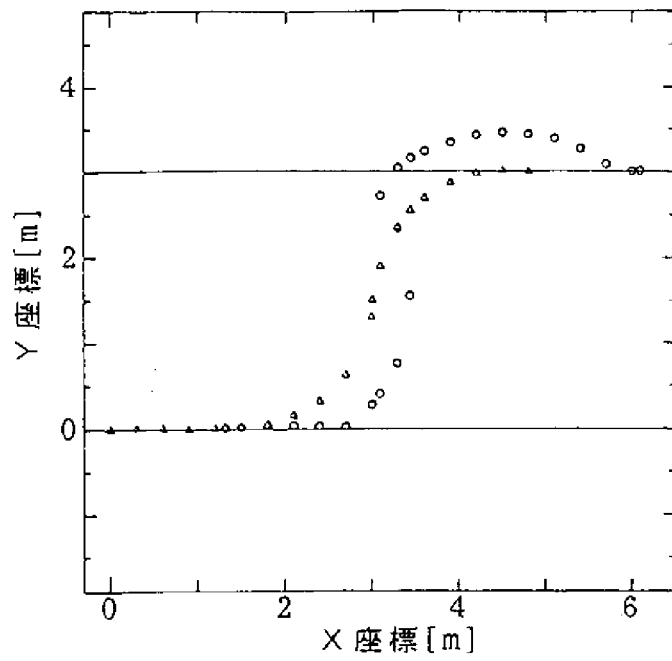


図4 新実車実験の結果 (軌跡)

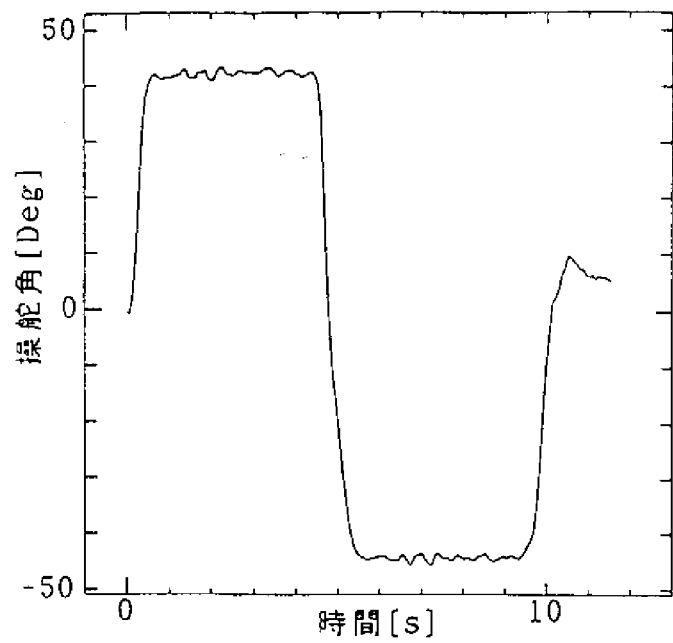


図5 新実車実験の結果 (操舵角)

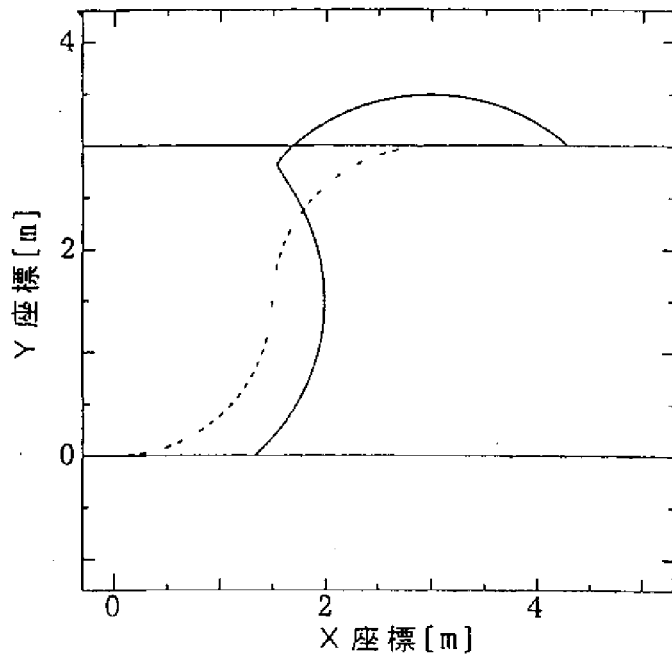


図6 旧シミュレーションの結果 (軌跡)

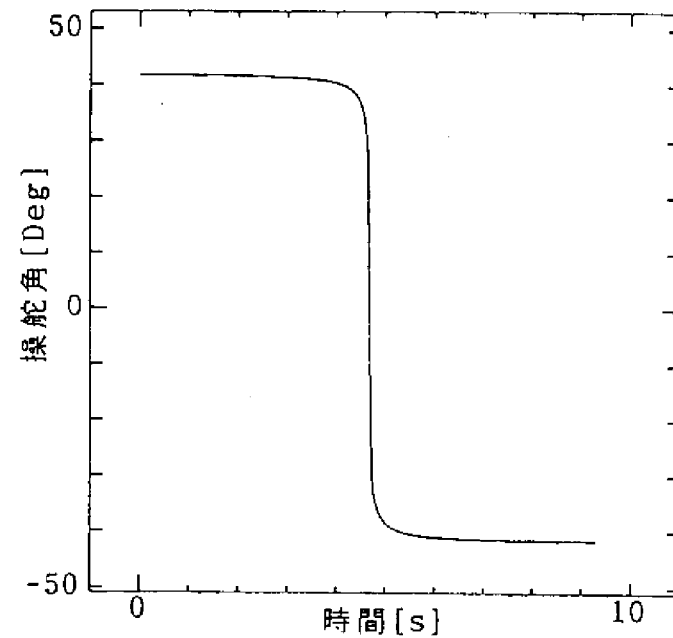


図7 旧シミュレーションの結果 (操舵角)

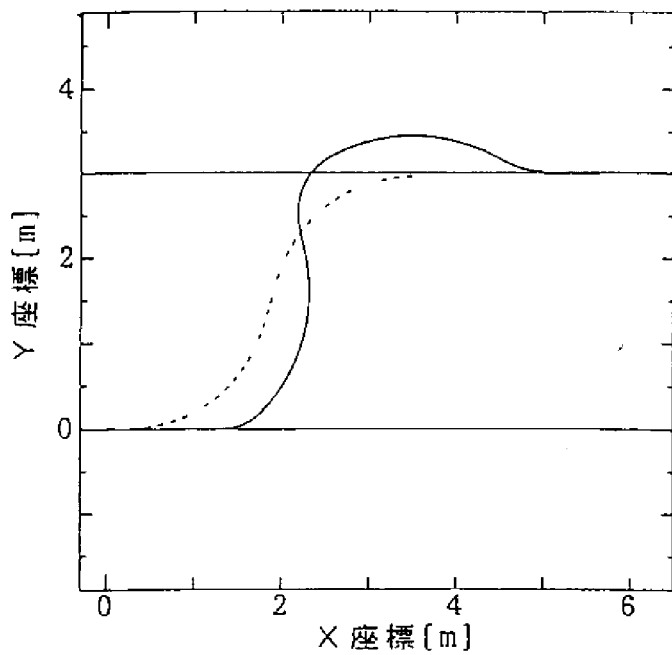


図8 新シミュレーションの結果 (軌跡)

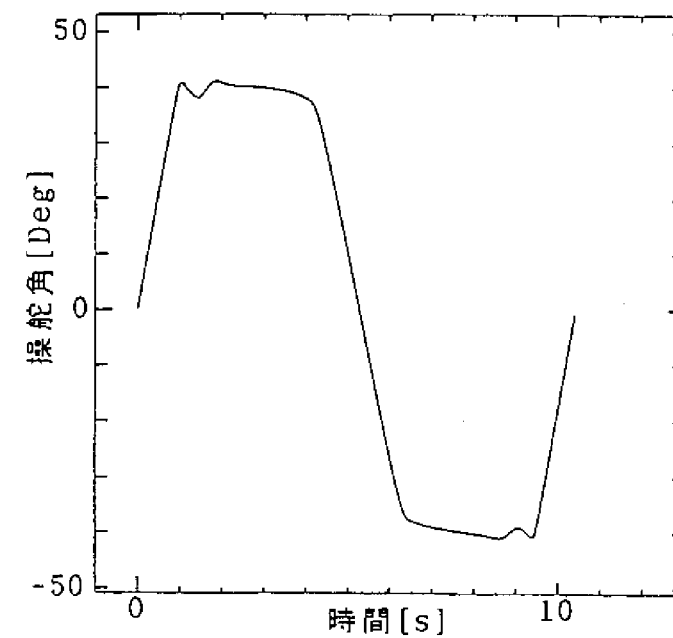


図9 新シミュレーションの結果 (操舵角)