

## トラクタ・トレーラ系の直線後退運動の制御

### Automatic control of a Tractor – Trailer Combination in back ward rectilinear motion

○栗原健太郎\*、鳥巢諒\*、陳軍\*、朱忠祥\*、武田純一\*

○ Kurihara Kentarou, Torisu Ryou, Tinggunn, Syutyuusyuu, Takeda Jyunichi

\*岩手大学

\*Iwate University

キーワード: 連結車両、PID制御、後退運動

連絡先: 〒020-0114 岩手県盛岡市上田三丁目18番34号 岩手大学農学部生物生産機械研究室

栗原健太郎, Tel.: (090)7665-0751, E-mail: [a1202005@iwate-u.ac.jp](mailto:a1202005@iwate-u.ac.jp)

#### 1. はじめに

自動化、ロボット化の対象の機械の中には、その操縦、運転に人並み以上に訓練する必要があるもの、例えばその中にはレーシングマシンや、飛行機、ヘリコプタやスペースシャトルの様に誰でもおいそれと気軽に操縦、運転が出来る類のものではないものもある。

そしてこの人と機械系の問題を古くから取り扱っている分野の1つとして自動車工学の分野があるが、人-車両系として人の制御動作を制御工学の閉ループ系を構成するコントローラと定め、伝達関数として表した報告が数多くある。<sup>1)</sup>

一方、私が現在席を置いている農業機械の分野では、人-機械系の問題の1つとして、トラクタにトレーラ(作業機)を取り入れた時の連結車両操縦の難しさという問題がある。

本論文の目的はこうした人間でもその操作が極めて困難である、トラクタ・トレーラ連結車両の後退運転を、目標直線に沿ってコンピュータを用いる制御により、実現することである。

実際に実車を走行させる際には、ハンドリング部、またタイヤの接地部などに必ず各種の誤差が入ることになる。また、とても平坦なアスファルトやコンクリートのような、誤差の量、頻度ともに低いと思われる状態より、農業作業車の走行するであろう農地、砂利道という誤差の量、頻度が高いと思われる状態のほうが、その走行が困難であることを想像に難くない。

本論文ではそれらのことを踏まえ、実際の作業現場として最も一般的と考えられる、また、比較的困難である草地状態での後退運転実現に向けて実験を行った。

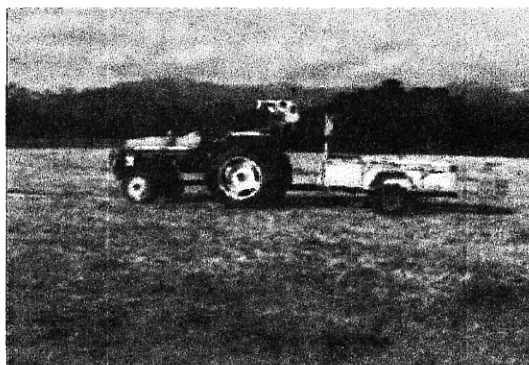


図1 トラクタ・トレーラ

Fig. 1 Tractor – Trailer

#### 2. 理論

##### 2.1 トラクタ・トレーラ系モデリング

###### ① 運動学モデルについて

車両の操舵と運動の間に成り立つ関係式は物理モデルであるが、物理モデルには一般に力学モデルと運動学モデルとがある。運動学モデルとは慣性力を含む全ての外力を考慮せずに物体の運動のみを考えたモデルであり、力学モデルとは、運動学モデルに慣性力等の外力を全て考慮し作るモデルである。

一般に農業用車両と言うものは、作業をしなが

ら極低速での走行、作業する機会が多く、その動きをモデル化するに当たって、タイヤの横滑り、遠心力によるずれ等を無視できるほどである。そこで本論分では、車両やタイヤにかかる外力を一切考慮しなくても良い運動学モデルを用いることにする。

## ② 2輪等価モデルについて

操向機構にはいくらかの遊びが含まれている。つまりハンドルの回転角度と、トラクタ前輪の回転角度は必ずしも一致しない機構になっている。またそのことにより、一般にはハンドルの回転角度のことをハンドル操舵角、または単にハンドル角と言ひ、前輪の回転角度のことを実操舵角、またはたんに実舵角と言ひ分けて用いることが多く、これは左右の角度で若干異なる。そこで本論分では、前輪左右の実操舵角の平均を単に操舵角(等価タイヤ角)と呼ぶことにする。そして前後車輪の中線上に両車両の等価タイヤを考え、このモデルで4輪車両を2輪等価モデルとして、理論解析を行う。また、トレーラも同じように等価タイヤで考える。

次に2輪等価モデルを図2に示す。

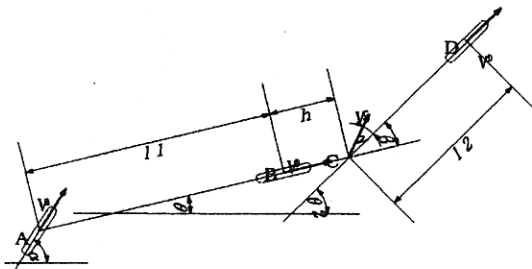


図2 トラクタ・トレーラ 2輪等価モデル

Fig. 2 The equivalent model of a two-wheeler of Tractor-Trailer Combination

### Nomenclature

A点	: トラクタの前輪軸(操舵輪)中心点
B点	: トラクタの後輪軸(駆動輪)中心点
C点	: トラクタ・トレーラの連結点
D点	: トレーラの車輪 中心点
h	: A点とC点の連結点
l <sub>1</sub>	: 線分 AB(トラクタのホイールベース)
l <sub>2</sub>	: 線分 CD(連結点からトレーラ軸中心点までの距離)
V <sub>(A~D)</sub>	: A~D 点の各速度ベクトル
α	: トラクタの前輪軸中心の操舵角
β	: トラクタとトレーラの折れ曲がり角
θ	: トラクタの姿勢角
γ	: C点の速度ベクトルがトレーラとなす角

また、今回実験に用いる車両に諸元表は以下の表1のものとした。

表1 諸元表

Table 1 Dimension of The TTC

h	: 0.33 m
l <sub>1</sub>	: 1.65 m
l <sub>2</sub>	: 1.84 m

## 2.2 モデルの非線形車両方程式

図に示す様に後部装着型2輪等価モデルの車両進行方向をx軸、横方向をy軸とした座標平面上にのせて考え、各主成分を求めた。

そうすると後部装着型2輪等価モデルの各主成分は、計算結果により非線形車両方程式として以下の式(1)~(4)のように求まった。

$$\dot{\theta} = -\frac{V}{l_1} \tan \alpha \quad \dots(1)$$

$$\dot{\beta} = \frac{V}{l_2} \sin \beta + \frac{V}{l_1 l_2} (l_2 + h \cos \beta) \tan \alpha \quad \dots(2)$$

$$\dot{y}_C = h \dot{\theta} \cos \theta + V \sin \theta \quad \dots(3)$$

$$\dot{y}_D = \frac{V}{l_1} (l_1 \cos \beta - h \sin \beta \tan \alpha) \sin(\theta + \beta) \quad \dots(4)$$

## 2.3 線形モデル

これらの式のままでは、数値計算のルンゲクッタ法などを用いることによって解くことも可能である。しかし、本研究では後部装着型トレーラ系後退モデルの運動状態を把握しやすくするため、解析解を用いて以上の式の連立方程式を解いたが、上式の連立微分方程式の解析解を求めるのは容易ではない。そこでこの問題を解決するために、非線形車両方程式の線形化を行った。

今回車両の速度が線形化を行う条件を十分に満たすので、非線形車両方程式を以下の式(5)~(8)のように線形化した。

$$\dot{y}_B = V \theta \quad \dots(5)$$

$$\dot{y}_D = V(\theta + \beta) \quad \dots(6)$$

$$\dot{\beta} = \frac{V}{l_2} \beta + \frac{V(l_2 + h)}{l_1 l_2} \alpha \quad \dots(7)$$

$$\dot{\theta} = -\frac{V}{l_1} \alpha \quad \dots(8)$$

である。

以上の工程によりトラクタ・トレーラ連結車両系の線形化基礎方程式が導けた。

なおこれらの式は、トラクタ・トレーラ系そのものの式であり、この式によって導かれる状態量、すなわち  $y_{A \sim D}$ 、 $\beta$ 、および  $\theta$  については、初期条件が変らない限り、不変のものである。

また同モデルの操作量、すなわちハンドルの切り角をあらわす式として、

$$\alpha = k_1(H - y_d) + k_2\beta + k_3\theta \quad \dots(9)$$

を与えた。Hは基準線からのずれである。

これらの式を元にシミュレーションを経て、実写実験を行った。

### 3. 実車実験

#### 3.1 シミュレーション

一般に人間-機械系システムの評価方法には、人間-機械系システムをなるべく模型や実験によってダイナミックな状態でテストし、総合的な評価を行う方法があり、その評価方法には、大別すると3つの方法がある。すなわち

- ① 実験室的方法
- ② シミュレーション的方法
- ③ 実地テスト

の3通りである。

今回は②の方法を十分吟味したあと、③の方法を取り、トラクタ・トレーラ系後退の自律走行の実現を目指した。

このような方法はシミュレーションの段階では実際にテストを行わないため、そのシミュレーションの構成に十分に気を使う必要がある。しかしそのシミュレーションを繰り返し行うことにより実際の実地テスト、さらに実験にかかる時間や費用を大幅に節約できる点が利点といえる。現在ではこの方法の流れが最もポピュラーといえるので、本実験ではこうした流れを受け、シミュレーション作業も実験という受け止め方とし、実地テストはそのシミュレーションの結果が実際の動きに沿っているか、という確認作業とした。

本論文では先に述べたように外力等を一切排除した運動学モデルを前提に考えている。

しかし現実に発生するであろうタイヤの微妙なすべり、また、突発的な弾みなどが起こる可能性がある。それらの誤差によって発生するシミュ

レーションと現実のトラクタ・トレーラ連結車両のずれ修正は、事前にある程度の含みを持たせた係数を用意することによって対応した。

また、トラクタ・トレーラの位置が、それらの誤差によってずれてしまうことももちろんであるが、今回のトラクタ・トレーラ連結車両の直進後退では連結角  $\beta$  がほんのわずかにずれてしまうと、トレーラ本体があさつての方向を向いてしまう。  $\beta$  の角度自体も爆発的に、指数関数的に増えてしまうので、こうすると制御自体が不可能になってしまう。

こうした不安定な系を制御するために、シミュレーションの段階で実際に発生するであろう誤差に対する余裕を十分に持った係数を用意し、実地テスト時の負担を軽くすることに努めた。

それでは具体的にどうするかというと、まず、Hを目標直線状と比べて、y軸上の誤差とした。そしてトラクタ・トレーラ連結車両の後退直線運動を行う際に、目標直線とのずれ、すなわち誤差を0にすることが必要である。

誤差を0にすることにより、目標直線上を走行させることが出来る。

実車において直接実験を行い、その後退直進運動を実現させることが最終目的であるが、そのためには各パラメータの決定を安全かつ迅速に行うために、本論文ではコンピュータを用いることによるシミュレーションを行った。

シミュレーションはMicrosoft Excelを用い、一度ある程度の軌跡を推測した後、Visual C++により各パラメータを決定していった。そのシミュレーション結果を以下、図3、4に示す。

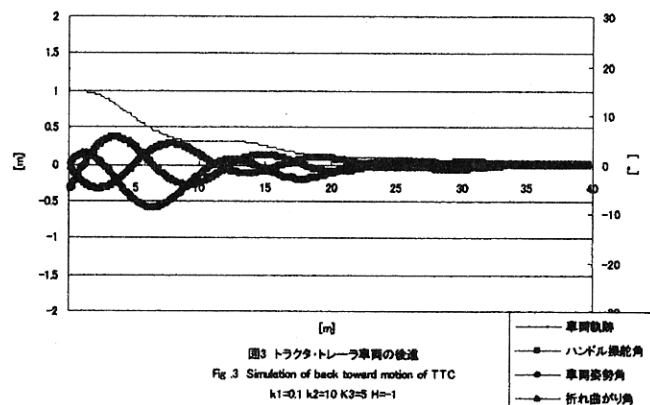
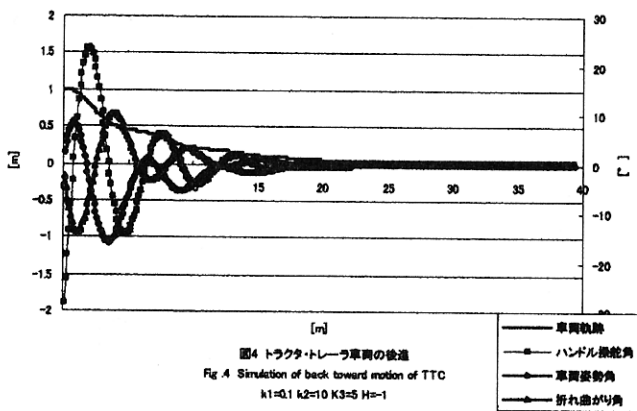


図3 トラクタ・トレーラ車両の後退  
Fig. 3 Simulation of back toward motion of TTC  
k1=0.1 k2=10 k3=5 H=1



この際、共通の誤差を入力し、その回復具合を見て実際に実験で用いるパラメータを決定していった。図3はハンドル切り角、姿勢角、折れ曲がり角が比較的穏やかなのに対し、その誤差が収まるまでである程度の距離、時間を要する。一方図4では、ハンドル切り角、姿勢角、折れ曲がり角が比較的急であるのに対し、その誤差が収まるまでの距離、時間は短い。

このシミュレーションの段階ではどちらの傾向の方が良いか一概に言えないため、このパラメータの決定を実験者の手で良いと思われるパラメータを数種類用意し、実車実験において最も具合の良いものを実際に用いることにした。

### 3.2 実験準備

本実験には以下のものを使用した。すなわち

- \* トラクタ・トレーラ連結車両
- \* パソコン
- \* ポテンシオメータ、およびモータ
- \* ジャイロ
- \* ペグ等の走行線をはっきりさせる物
- \* トータルステーション
- \* 送受信機

である。

トラクタとトレーラの接続にはボールジョイントを組み付け、その接続部はがたつかないように改良した。

トラクタにはトータルステーションからデータを受け取る受信機、さらにハンドル角を与えるためと姿勢角を測定するためにポテンシオメータ、モータとジャイロをセットし、それらのデータを管理、記録するため、また制御プログラムを実行し、必要な操舵角を計算するためにパソコンもセットした。

以上が実験機材である。

また、完全な直線を作成するために、トータル

ステーションを用いて90mほどの直線を計測し、目印としてペグ、テープ等で地面に印をつけた。

そして事前にパソコン上のシミュレーションにおいて、実験で使用する各係数の値を、数種類導いておいた。

その際の各パラメータについては、トラクタ・トレーラ連結車両の全長がゆうに4mを超えるため、Hすなわち誤差を0.1m与えたとき、その誤差を収束するまでに約2m、また0.5m与えたとき、その誤差を収束するまでに約10mを要するように設定した。

実際に草地を走行する場合には、突発的にいきなり50cmもずれることは普通考えられないが、少しずつずれ、結果的に目標線上から数10cmは外れることは考えられるためである。

これらは実際の車両を運転してみて、体感したパラメータであり、折れ曲がり角 $\beta$ がなるべく小さいうちに早め早めにハンドル切り角 $\alpha$ を変化させて、補正する方法をとっている。

### 3.3 実験方法

以上の準備が整ったらトラクタ・トレーラ連結車両を、作成した直線上に $\theta=0$ 、 $\alpha=0$ 、 $y_0=0$ としておいた。

各実験条件については、一般的なトラクターの操縦条件とほぼ同じにした。すなわち

$$* v = 0.72 \text{ km/h} = 0.2 \text{ m/s}$$

$$* \alpha < \pm 45^\circ$$

である。速度に関しては人がゆっくり歩くほどの速さで、ハンドル切り角に関してはなるべく小さな操舵角で収まるように設定した。

さらに、目標の距離はおおよそ50mを目安に、出来る限り長く設定した。

こうして初期値をシミュレーションどおり定め、実車をスタートさせた。

スタートの仕方はあらかじめエンジンをかけ、ギアをバックに入れておく。そしてフットブレーキで車両を停止させておき、プログラミングを実行させる。

このプログラムは事前に組んでいたもので、状態量が初期条件から始まり、Hが発生した段階で操作量である $\alpha$ を、制御した角度に操作するものである。また、その際の時々刻々のデータを記録媒体であるパソコンハードディスク内、およびバックアップのためのフロッピーディスク内に保存しておくものでもある。

こうしてプログラムが動き出した後に運転者

がフットブレーキを外し、運転手本人も安全を確認した後に飛び降りる。

その後は走行中に発生した予定走行ラインから外れた分の誤差 $H$ をトータルステーション、ジャイロが検知し、トータルステーションの変位位置データは送信機から受信機を伝わって、およびジャイロの変位角度データはそのまま直接パソコンに、入力される。

こうして状態量として入力されたデータをプログラムが判断することによって必要な操作量である $\alpha$ を算出し、その後取るべきハンドル切角をハンドル基部にセットされたポテンシオメータに伝え、さらにモータを作動させ実際にハンドルを切る。

この一連のプロセスをサンプリングタイム0.4秒ごとに行い、 $H$ 、 $\beta$ 、 $\theta$ を限りなく小さく、つまり目標直線上に沿って走行させる。

なお、 $H$ 、 $\theta$ も極力0にする必要もあるが、とくに $\beta$ の連結角度を小さくするように心がけた。

#### 4. 実験結果と考察

まず、各機構の動作確認のため、複数回行った予備実験では、シミュレーションは概ね良好であるが、実際に走らせる段階にあたり、予想以上の走行中に誤差が入ってくることがわかった。

そのため、トラクタとトレーラの接続においては、当初想定していた以上に強固に固めた。

そうしたおかげで結果的にはトラクタ・トレーラ連結車両が走行できる道が存在する限り、どこまでも後退直進を続ける自律走行を実現させることに成功した。

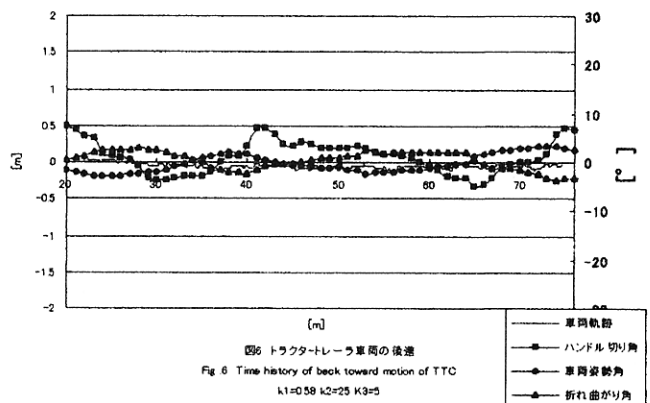
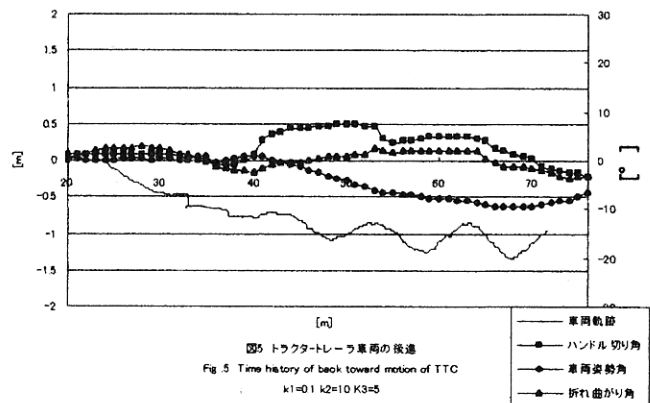
以下に実際にトラクタ・トレーラ連結車両が、走行した走行ラインを代表的な物として図5、6として示す。

なお、下の実験の際に使用した各パラメータの値は、

$$k_2 = 10 \text{ もしくは } 25$$

$$k_3 = 5.0$$

とし、 $k_1$ 数値はシミュレーションで求め、ある程度の誤差に耐えうると判断したものを複数用意し、今回使用した。以下の図に示した時に用いたのは0.1、および0.58である。



この上図に示したように左右それぞれ50cm、最大1mほどのふり幅で50mほど走行しているのがわかる。

実際の走行草地はこれ以上の場所を確保できないため、やむを得ずその実験を打ち切った格好になったが、その状態はまだまだきわめて良好であり、この走行距離数は最低限となる。

また、今回の実験では草地状態の直線後退についてのみ試みたが、予備実験であるアスファルト上でもきわめて良好な結果が得られた。

#### 5. おわりに

今回得られたデータを注意深く見ていくと、目標直線上からわずか数cm外れたときにもう軌道修正のフィードバックがかかっている。これは作成したプログラムとそれに対応した各パラメータの値がきわめて効率よく作用しているといえる。

また、本来であれば草地状態であれば相当の誤差が入ってきているのだが、そのきわめて走行しづらいとも言える実験場でも、その走行は微塵の揺らぎも無く、50mを走行しきっている。これは本論文の最終目標を、きわめて達成したといえる。

## 7. 参考文献

- (1) 例えば、井口雅一：手動制御の研究 機械学会誌 62(481), 215-222, 1959  
安部正人：自動車の運動と制御 第9章 人に制御される車両の運動 211 山海堂 1992

以上