

# 履带式農用車両の自律走行について

— 矩形軌道の走行シミュレーションについて —

武田純一\*・陳玲玲\*・齋藤雅憲\*\*・佐藤三寛\*\*\*

## Autonomous Traveling of a Crawler Type Vehicle

— Simulation for Rectangular Path Way —

Jun-ichi TAKEDA\*, Ling-Ling CHEN\*, Masanori SAITOH\*\*, Mitsuhiro SATOH\*\*\*

### Abstract

The objective of this research work is to simulate steering strategy for a crawler type vehicle which is moving along rectangular pathway and to find out optimal steering control parameters. The vehicle model was set simply as a bi-cycle model excluding friction forces between ground and crawler. The relationship between steering angle and both left and right crawler speed was developed as linear functions. The optimal values of parameters are analyzed by changing length of fictive point, vehicle velocity and coefficient of steering angle.

[Key words] autonomous traveling, crawler type vehicle, simulation, steering strategy

### 1. はじめに

履带式の農用車両は、接地圧が小さくけん引力が大きいことなどからトラクタをはじめコンバインや運搬車に数多く利用されている。本形式の車両は、左右の駆動輪に速度差を与えて走行する機構であり、制御工学的には2入力システムになることから、操舵輪を有する車輪型の車両と異なり一般に制御は難しくなる。本研究では、仮想的に操舵角と駆動輪速度の間に一次関数の関係を定め、市販機のようにハンドルを有する履带式車両を想定して、矩形軌道を走行するための最適なパラメータを考察した。

### 2. 履带式車両の操行制御理論

#### 1) 車両方程式

図1のように、対象とした車両の運動のモデルを横並び2輪モデルとした。この際、本来は履帯と地面の間の滑りが存在するが、モデルを単純化し滑りを考慮しないものと仮定すると、車両の運動方程式は、次式で示される。

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \frac{r}{2} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos\theta \\ \sin\theta & \sin\theta \\ 1/a & -1/a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\phi}_r \\ \dot{\phi}_l \end{bmatrix} \quad (1)$$

ここで、

- $\phi$  : 駆動輪の回転角
- $r$  : 駆動輪の半径
- $d$  : 輪距
- $a$  : 履帯中心間距離の1/2
- $v$  : 車両重心位置の速度
- $L$  : 前方注視点距離

$x$  : 横方向の変位

$y$  : 縦方向の変位

$\theta$  : を車両の姿勢角

$\dot{\phi}_r, \dot{\phi}_l$  : 右と左の履帯駆動輪の角速度

また、添え字の  $r$  と  $l$  はそれぞれ右、左を、 $C$  は車両の現在位置を、 $\cdot$  は一階微分を表すものとする。

#### 2) 操舵角と履帯速度の関係

履带式車両は左右の駆動輪の入力に応じて運動が規定される2入力システムであり、本来左右の駆動輪速度を独立に入力できるが、ここでは問題を簡略化して1入力システムとするために、仮想操舵角  $\alpha$  を導入し、 $\alpha$  と左右の駆動輪速度との関係を図2に示すように、それぞれ1次関数で定義した。従って、 $\alpha$  が決まれば左右の駆動輪の速度(角

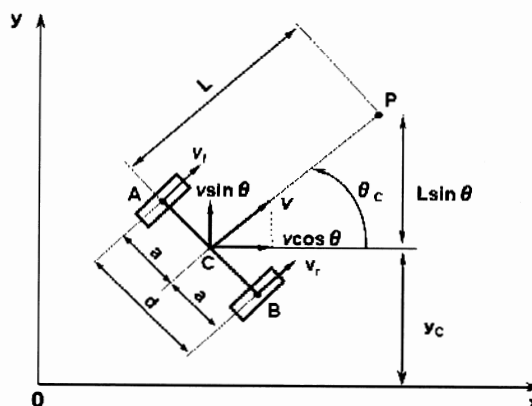


図1 履带式車両の運動モデル

速度)が決まり、式(1)より車両の状態量が決定できる。  
 なお、式(1)は非ホロノミックシステムなので、Runge-Kutta法を用いて数値解を算出した。

3)車両の操行制御方法

図3に直線走行時と1/4円走行時の操舵戦略のモデルを示す。車両の前方 $L$ [m]の地点に前方注視点 $P$ を定める。そして目標軌道が直線の場合は、目標軌道と $P$ 点との横偏差 $PQ$  ( $=\epsilon$ )に比例して式(2)のように操舵輪を操舵するものとする。

$$\alpha = -k\epsilon \quad (k: \text{定数}) \quad (2)$$

ただし、 $k$ は比例定数(以下、操舵角係数と呼ぶ)である。一方、矩形軌道の1/4円部は、1/4円の中心と $P$ 点を結んだ線が円軌道と交わる点 $Q$ とし、距離 $PQ$ に比例して操舵するものとした。この操舵戦略を矩形コース全体で維持するものとした。

ここで、

$R$ : 1/4円部の半径

$LL$ : 矩形軌道の長辺

$LS$ : 矩形軌道の短辺

である。

車両はスタート地点 ( $x=R, y=0$ ) より初期姿勢角  $\theta=0$  として発進することとしたため、①の区間では $x$ 軸上を直進することになる。なお、 $P$ 点の存在範囲は図4に示した①~⑧の範囲とし、数字の小さい範囲から順に進行するものとした。

3. シミュレーション

1)シミュレーションの条件

シミュレーションにおいて、重要なパラメータは前方注視点距離 $L$ [m]、操舵角係数 $k$ [-]、直進速度 $V_s$ [m/s]であり、これらのパラメータの値を種々変化させて、車両の運動を評価することとし、前方注視点距離 $L$ を5条件(0.2m, 0.4m, 0.6m, 0.8m, 1m)、操舵角係数 $k$ を16条件(0.1, 0.5, 1, 2, 5, 10, 12, 14, 16, 18, 20, 22, 24, 26, 28, 30)、直進速度 $V_s$ を5条件(0.2m/s, 0.4m/s, 0.6m/s, 0.8m/s, 1.0m/s)組み合わせてシミュレーションを実施した。なお、矩形軌道は、 $R=2m$ ,  $LL=5m$ ,  $LS=3m$ とした。

2)評価関数 $J$

本シミュレーションでは、式(3)に示すとおり、車両への入力としての $\alpha$ と、出力としての $y_e$ ,  $\theta_e$ の2乗の和を評価関数 $J$ とし制御性能を評価した。 $J$ の値は小さければ制御性能が高いことを示す。 $\alpha$ を評価関数に導入したのは、入力と出力の全体をなるべく小さくするためである。

$$J = \sum (y_e^2 + \theta_e^2 + \alpha^2) \quad (3)$$

4. シミュレーション結果および考察

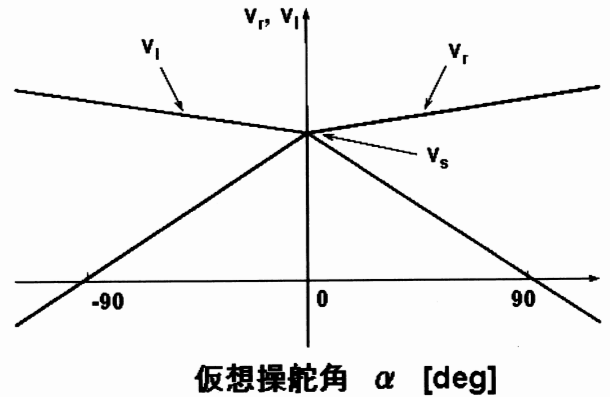


図2 仮想操舵角と左右駆動輪の速度の関係

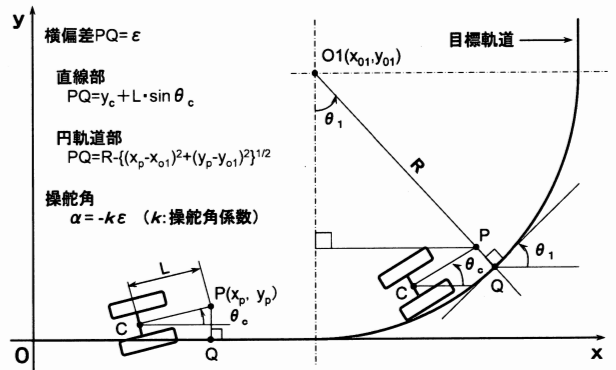


図3 操舵戦略

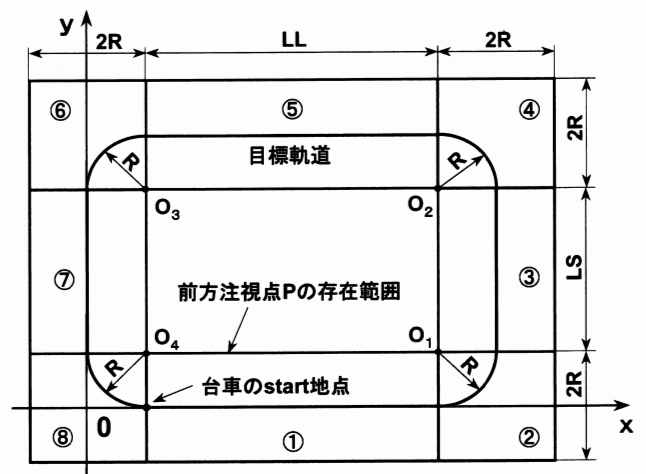


図4 P点の動く範囲

図5は、 $V_s=0.4m/s$ ,  $L=0.2$ ,  $k=20$ とした場合のシミュレーション結果で、目標軌道に非常に良く追従している例である。図6には、このときの姿勢角と操舵角の時間変化を示したが、操舵角は1/4円の開始部と直線部に入った時に、ややオーバーシュートする傾向があった。図7は、

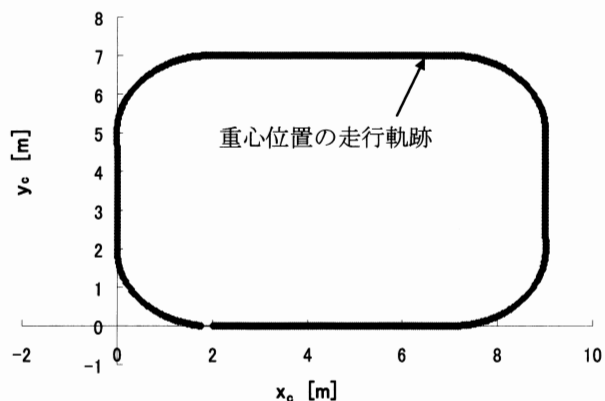


図5  $k=20$  の時の重心位置の走行軌跡  
( $V_s=0.4\text{m/s}$ ,  $L=0.2\text{m}$ )

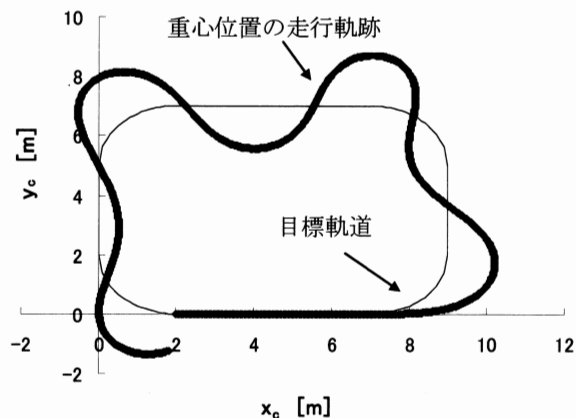


図7  $k=0.5$  の時の重心位置の走行軌跡  
( $V_s=0.4\text{m/s}$ ,  $L=0.2\text{m}$ )

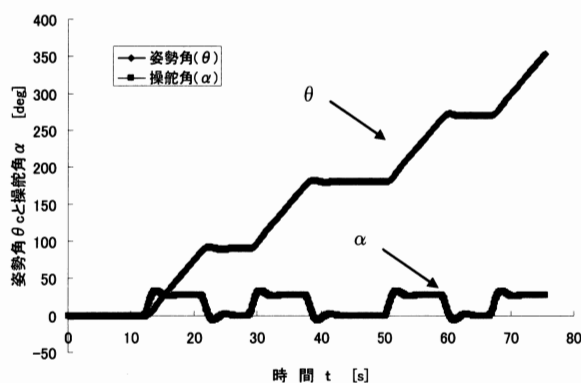


図6  $k=20$  の時の姿勢角と操舵角の時間変化  
( $V_s=0.4\text{m/s}$ ,  $L=0.2\text{m}$ )

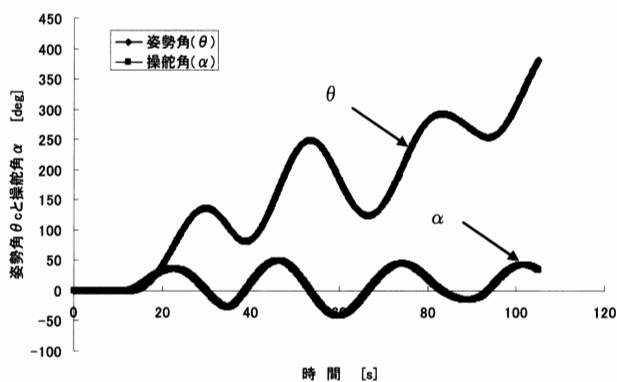


図8  $k=0.5$  の時の姿勢角と操舵角の時間変化  
( $V_s=0.4\text{m/s}$ ,  $L=0.2\text{m}$ )

$V_s$ と $L$ は同一で $k=0.5$ にした場合の結果を示したものである。この場合、相対的に仮想操舵角が小さくなり、目標軌道周辺で大きく振動しながら走行することになった。図8には、このときの姿勢角と操舵角の変化を示した。この例の場合 $k$ の値が小さいことから操舵角が小さくなり、軌道に追従できなくなってしまい、どちらも周期的に変動していることが分かる。このように、パラメータを適切に定めないと、制御結果が思うようにならないことが分かる。

次に、各パラメータの制御結果への影響について考察する。

1) 前方注視点距離  $L$  の影響

走行速度を $V_s=0.2\text{m/s}$ に固定し、操舵角係数 $k=5, 10, 20, 30$ と変化させた場合、図9に示すように前方注視点距離 $L$ が小さいほど、評価関数 $J$ が小さくなる傾向をもっていることが分かる。また、 $L$ が同一の場合、 $k$ が変化しても $J$ の値はあまり大きな変動がないことが分かる。ただし、前方注視点 $L$ が0の場合には、 $k$ の値によっては車両が迷走する傾向があり、図10の示すように $J$ の値が非常に大きくなった。

2) 走行速度  $V_s$  の影響

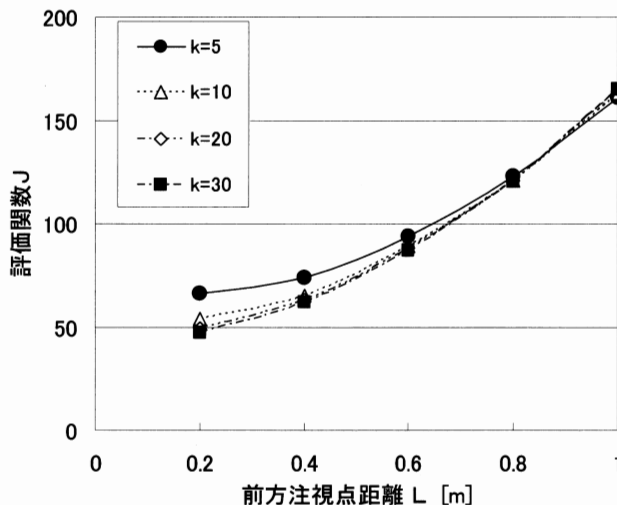


図9  $k$ と $L$ の変化による $J$ の値  
( $V_s=0.2\text{m/s}$ )

操舵角係数を $k=20$ として固定した場合、図11に示すように、 $L$ が同一条件の場合は、走行速度 $V_s$ が大きいほ

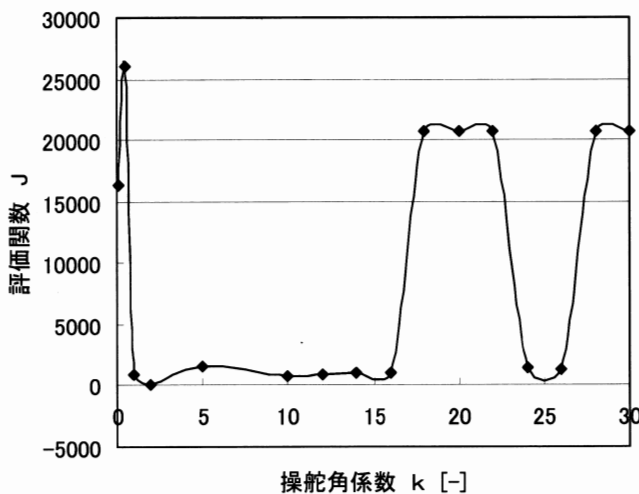


図10 L=0の時のkとJの関係 (Vs=0.2m/s)

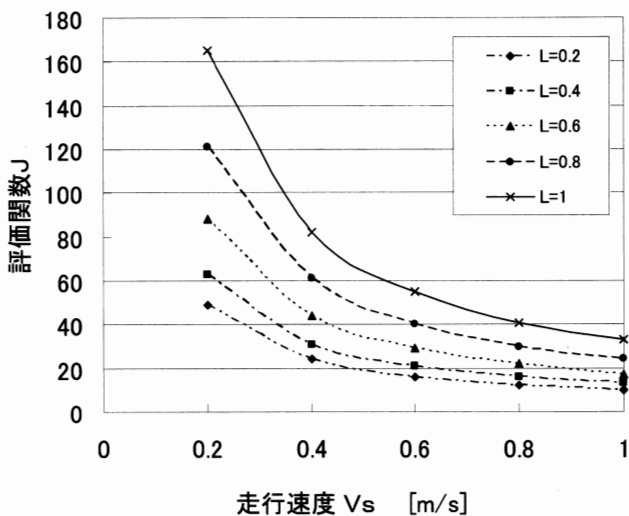


図11 VsとJの関係(k=20の場合)

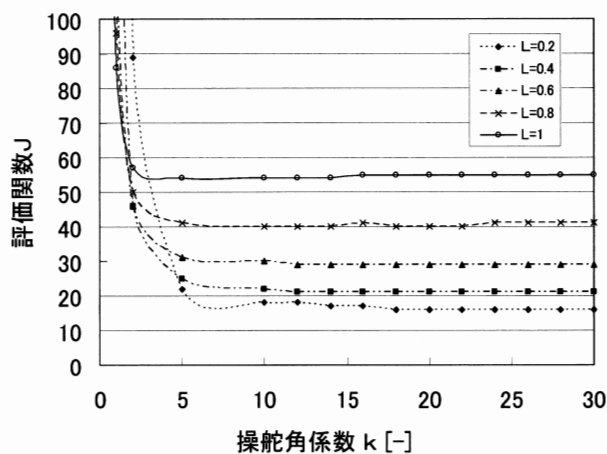


図12 kとJの関係(Vs=0.6m/s, L=0.2m)

ど、評価関数  $J$  が小さくなる傾向があった。また、 $L$  の変化と  $V_s$  の関係は、 $V_s$  が小さいほど  $L$  の変化による  $J$  の値の変化が大きくなる傾向があるが、 $V_s$  が大きいとその差は小さくなった。

3) 操舵角係数  $k$  の影響

図12に示すように、走行速度を  $V_s=0.6m/s$  に固定して、前方注視点を  $L=0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0m$  と変化させた場合の評価関数  $J$  の変化を見ると、 $k$  が小さい場合は  $J$  が急激に大きくなる傾向があったが、 $k$  が3~6程度になると、 $J$  の値はほぼ一致値に収束する傾向があった。また、 $L$  の変化による  $J$  の値については、 $L$  が小さいほど  $J$  の値が小さくなる傾向を持っていた。

5. おわりに

今回のシミュレーションにより、矩形軌道走行時の履帯式車両の制御パラメータ値との最適値について検討した。実際に車両を走行させる場合は、機体内部の信号の遅れやアクチュエータの作動時間も考慮に入れなければならないので、走行条件により再度シミュレーションを行い、各パラメータを適切な値に設定する必要がある。

今後は実車実験を行い、理論との比較を行っていく予定である。

参考文献

- 1) 齋藤雅憲, 武田純一: クローラ型農用車両の自律走行一車線変更問題に対するファジィ操舵制御器の設計一, 農業機械学会東北支部報, 51, 35-38, 2004
- 2) 日高茂實: 強制デフ式操舵システムの開発 (第1報), 農機誌, 64(2), 111-116, 2002
- 3) 多田達美, 鈴木耕裕, 中西洋介: ハーベスタの姿勢制御技術 (第1報), 農機北海道誌, 37, 9-15, 1997
- 4) 多田達美, 鈴木耕裕, 中西洋介: ハーベスタの姿勢制御技術 (第2報), 農機北海道誌, 38, 1-5, 1998
- 5) 中西洋介, 多田達美: 農作業車両自律走行作業支援システムの開発, 北海道工業試験場報告, 300, 43-51, 2001