

# 低コストセンサ類を使用した農用車両の自律走行

中西 洋介, 鈴木 慎一, 多田 達実

## Autonomous Traveling Control of Agricultural Vehicle Using Low Cost Sensors

Yohsuke NAKANISHI, Shinichi SUZUKI, Tatsumi TADA

### 抄 録

DGPS (Differential GPS) 等の低コストセンサ類を使用した農作業用履帯トラクタの自律走行制御方法に関して論ずる。一般に低コストセンサは測定誤差が大きいため、適切な信号処理を施した後、走行制御に使用する必要がある。特に DGPS は捕捉衛星数が増減した時に出力値が急激に変化するため、走行制御用位置センサとして使用する場合は、他のセンサ情報を利用して出力値の不連続性を平滑化する必要がある。

本稿では、まずロータリーエンコーダと DGPS で計算した絶対方位角を用いて車両位置を近似計算し、実用上問題無い精度で車両を自律走行制御できることを示す。次に、カルマンフィルタを用いて DGPS 出力値を他のセンサ情報と複合することで、出力値の不連続性を平滑化できることを示す。カルマンフィルタを用いることで、DGPS が走行制御用位置センサとして使用可能となり、長距離走行時において走行誤差が漸増することなく車両を自律走行させることができる。

**キーワード：**自律走行, 履帯トラクタ, 低コストセンサ類, カルマンフィルタ

### Abstract

In this paper, the method of autonomous traveling control of agricultural crawler tractor using low cost sensors including DGPS, is proposed. DGPS output changes widely when the number of satellites captured by DGPS changes. This means its original output cannot be used as a position information for autonomous traveling control. In general, some signal processing must be done against the outputs of low cost sensors to be used for feedback control, because they do not have enough accuracy.

At first, simple signal processing method, using rotational encoder as a position sensor and DGPS as a heading angle sensor, is proposed. Next, the method for using Kalman filter as a signal processing against the outputs of low cost sensors is proposed. By using Kalman filter, DGPS can be used as a position sensor for the autonomous traveling control.

**KEY-WORDS :** Autonomous Traveling, Crawler Tractor, Kalman Filter, low-cost sensors

## 1. はじめに

農林水産省農林業センサスの調査によると、平成12年度の道内農業事業体数は69,841戸となっており、10年前と比較して27%減少している。また、後継者のいない農家の割合も7

割に達し、早急なる農作業の自動化が求められている。

著者らは先に、RTK-GPS (RealTime Kinematic-GPS, Trimble社:MS750)および光ファイバジャイロスコープ (Fiber Optical Gyroscope, 日本航空電子:JD-108FD, 以下 FOG) を用い、作業計画経路に沿って自律走行し、所定の農

作業を行う作業支援型自律走行履帯トラクタを開発した<sup>1)</sup>。同車両は、最大±5cmの走行誤差(目標経路からのズレ量)で作業計画経路に追従走行可能、すなわち走行経路を畝列に設定しても、作物を踏破することなく自律走行可能である。しかし、走行制御用センサとして高価なRTK-GPSおよびFOGを使用したため、実用化に当たりコスト面で課題が残った。

本研究は、DGPS等の低コストセンサ類を使用して車両を自律走行させ、走行誤差を小さくすることを目的とする。走行誤差を小さくすることで、実施可能な作業数を増やすことができる。

一般に低コストセンサ類は出力値にオフセット成分あるいは不連続性を有する等測定誤差が大きい。したがって、制御用として使用する場合、冗長なセンサ群を使用して適宜補間し合う等のセンサフュージョン技術<sup>2)</sup>が必要となる。

次節で、まず試験車両および自律走行させるための制御方法について述べる。第3節では、本稿で使用した4個の低コストセンサ類およびその特性に関して記述し、DGPSがRTK-GPSと同じ計算処理方法では自律走行制御に使用できない理由を述べる。第4節では、4個の低コストセンサ類を組み合わせて車両を走行制御する2つの方法について述べる。まず、簡便な方法として相対距離センサであるロータリーエンコーダとDGPSで車両位置を近似計算し、車両を自律走行制御する方法について述べる。この方法では、DGPSはオフセット誤差の小さい絶対方位角を算出するために使用される。次に、走行中の履帯トラクタを非線形確率システムとして表現した後、同システムに対し拡張カルマンフィルタを適用する。カルマンフィルタを用いることで、出力値に不連続性を有するDGPSが自律走行制御用位置センサとして利用可能となり、その結果、長距離走行時における走行誤差の漸増を抑えることができる。

## 2. 試験車両および自律走行制御方法

図2.1に実証走行試験に使用した履帯トラクタを示す。本トラクタは市販の融雪剤散布機を自律走行制御可能となるように改良したものであり、25馬力ディーゼルエンジンを搭載し、最大車速は毎秒約3.9m(時速14km)である。

走行車両を目標経路に追従して走行させるためには、目標経路からの位置および方向のズレ量である走行誤差、方位角誤差が小さくなるように制御する必要がある(図2.2)。

ここでは両誤差に(1)式で示されるPID演算を施すことにより、車両を走行制御した<sup>3)</sup>。(1)式で算出された操作量が、車両駆動用アクチュエータ(左右輪HSTレバー駆動用モータ)への指令電圧となる<sup>1)</sup>。

$$u_i = K_{P1}[x_i + 1/K_{I1} \sum x_i + K_{D1}(x_i - x_{i-1})] + K_{P2}[\theta_i + 1/K_{I2} \sum \theta_i + K_{D2}(\theta_i - \theta_{i-1})] \quad (1)$$



図2.1 試験車両

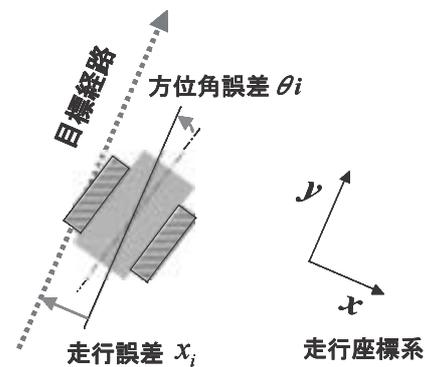


図2.2 走行誤差および方位角誤差

$x_i$ : 走行誤差

$\theta_i$ : 方位角誤差

$u_i$ : 操作量

$K_{P1}$ ,  $K_{I1}$ ,  $K_{D1}$ : 走行誤差用PID各ゲイン

$K_{P2}$ ,  $K_{I2}$ ,  $K_{D2}$ : 方位角誤差用PID各ゲイン

RTK-GPS(測定誤差±2cmMax)で走行誤差を計算する場合、その出力値を走行座標系に変換するだけでよい。走行座標系とは、目標経路方向をy軸正方向とする直交座標系である(図2.2)。また、FOGを使用すれば、適切なドリフト補正を施すことにより極めて信頼性の高い方位角誤差を得ることができる<sup>1)</sup>。このように、測定精度が高く、かつ信頼性の高いセンサを使用すれば、位置および角度センサを各々1個ずつ使用することで車両を走行目標経路に対し精度良く追従走行させることが可能である。

測定精度の低いセンサ類の出力値を適宜組合わせて使用し、自律走行制御、すなわち(1)式に使用する走行誤差および方位角誤差を精度よく計算することが本稿の目的である。

## 3. 使用センサ類

表1に本稿で自律走行制御用に使用したセンサ類およびそ

表1 使用センサ類

センサ名	製造元	主な仕様(カタログ値)
① DGPS	Trimble 社 型番: Ag124	測定精度± 1m ビーコン受信タイプ
②地磁気方位 センサ	トーキン 型番: TMC2000	出力直線性 100 ± 15%
③振動ジャイロ	シリコンセンシング システムズジャパン 型番: CRS03	検出角速度範囲 ± 100deg/sec 応答周波数 10Hz
④ロータリー エンコーダ	オムロン 型番: E6C2-CWZ3EH	2000pulse/rev 堅牢型

これらの主な仕様を示す。

なお、低コストセンサ群による自律走行の精度を計測・評価するため、車両に RTK-GPS (MS750) を搭載した。図 3.1 に車体に設置された DGPS および RTK-GPS を示す。

図 3.2 は車両後部に設置された地磁気方位センサである。オルタネータ(発電機)等の大電流系統から発生する強磁性体の影響を回避するため、車体後部隅に木製ブラケットを介して設置している。

また、図 3.3 に駆動軸に設置したロータリーエンコーダを示す。ロータリーエンコーダは前部左右輪に計 2 個設置し、車体移動量および車速を求める際それらの平均値を取った。

図 3.4 に DGPS のアンテナを、90 分間衛星電波環境が良好な屋上に放置して測定した定点側位結果を示す。DGPS 出力



図 3.1 DGPS および RTK-GPS



図 3.2 地磁気方位センサ



図 3.3 ロータリーエンコーダ

値が、± 1m の範囲内でゆっくり推移していることが分かる。

また、図 3.5 は秒速 1m での車両走行時、RTK-GPS と DGPS 出力値を各々走行座標系に変換して計算した走行誤差とその時 DGPS が捕捉していた衛星数を示したものである。走行開始より 14 秒経過した時点で捕捉衛星数が 6 個から 7 個に変化し、それに伴い DGPS 座標変換値が 200mm 程度急激に変化していることが分かる。本研究で行った走行試験では、最大 2m の出力値の急変が観察された。長距離長時間走行する場合、捕捉衛星数が頻繁に変化するため、DGPS 出力値を単純に走行座標系に変換して得られた走行誤差を自律走行制御に使用することはできない。

一方、コイルで地磁気を検出して絶対方位角を計測する地磁気方位センサは、一般に以下の特性を持つ。

- ① オフセット誤差成分がヨー方向で変化する
- ② 傾斜角(ロール, ピッチ角)により出力値が変化する

図 3.6 は本稿で使用した地磁気方位センサ TMC2000 のヨー方向特性を調べるため、傾斜角 0 度を保ちながら、真北から真南(0 ~ 180 度)に 180 度回転させた時の出力値の変化を示したものである。図より、東を向いた時に最大 18 度のヨー方向オフセット誤差が発生していることが分かる。

ここでは、図 3.6 の出力曲線を 5 次の近似曲線で近似し、同近似式でヨー方向オフセット誤差を補正した。

#### 4. 低コストセンサ群による自律走行制御

DGPS は捕捉衛星数変化時に出力値が不連続となるため、

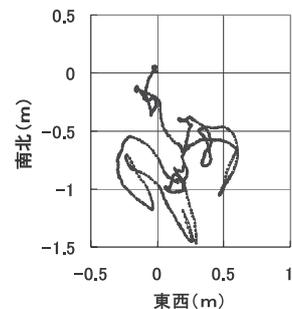


図 3.4 DGPS (Ag124) 90 分間定点測定結果

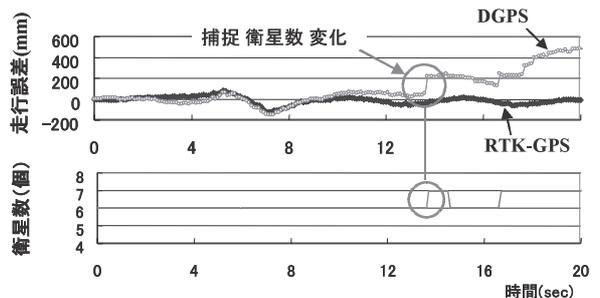


図 3.5 捕捉衛星数変化時における DGPS (Ag124) 出力値変化

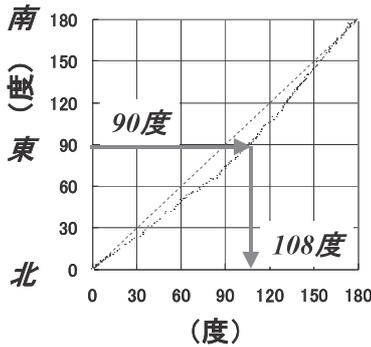


図 3.6 地磁気方位センサ (TMC2000) ヨー方向特性

出力値を走行座標系に変換して計算した走行誤差を、車両操舵用アクチュエータへの指令値を計算する (1) 式へ代入することはできない。

したがって、ここでは以下の 2 つの方法で走行誤差を計算し、車両を自律走行制御した。

- ①ロータリーエンコーダと DGPS による走行誤差計算
- ②カルマンフィルタによる走行誤差の推定

方法①は、DGPS で絶対方位角を計算し、相対距離センサであるロータリーエンコーダ出力値と組み合わせることで走行誤差計算を行う方法であり、計算方法が簡便である反面 DGPS の絶対位置情報が走行誤差に反映されることはない。これは長距離走行時に走行誤差が漸増する可能性があることを意味する。

一方、方法②は DGPS の絶対位置情報を走行誤差に間接的に反映させることができる。すなわち、長距離走行時においても走行誤差が漸増する心配はない。但し、計算方法および各種パラメータの設定が多少複雑となる。

本節では、以上の 2 つの方法に関して、走行試験結果を交えて詳述する。

#### 4.1 ロータリーエンコーダと DGPS による走行誤差の積算

##### 4.1.1 計算方法

図 4.1 で示すように、走行誤差は一定時間毎の走行距離と方位角誤差で計算することができる。すなわち、

$a_i$ :  $\Delta t = t_i - t_{i-1}$  秒間のエンコーダパルス数

$\theta_i$ : 時刻  $t_i$  における方位角誤差

$X_{ini}$ : 初期値

とすると、走行誤差は次式で積算することができる。

$$x_i = X_{ini} + \sum_i a_i \sin \theta_i \quad (2)$$

(2) 式は積算方式であるため、 $\theta_i$  にオフセット成分が含まれていると走行誤差が漸増する。したがって、極力オフセット誤差の小さい方位角誤差を  $\theta_i$  として代入する必要がある。

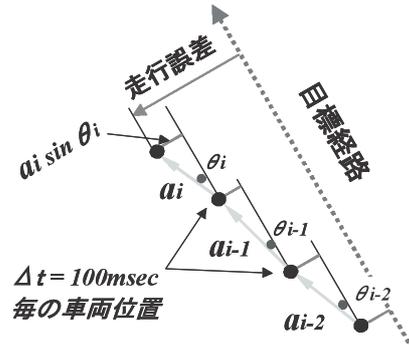


図 4.1 ロータリーエンコーダによる走行誤差計算方法

地磁気方位センサは大きなオフセット誤差を含むため、(2) 式に使用することはできない。振動ジャイロから方位角を得ることも可能だが、角速度出力を積算しなければならないため時間経過とともにオフセット誤差が大きくなる。FOG も高価格なものほどオフセット誤差が小さいが、長時間使用時には (2) 式で走行誤差を計算するに当たり無視することができないオフセット誤差が発生する。

一方、DGPS (Trimble, Ag124) 出力値は長期的には ±1m の範囲内でドリフトするが、捕捉衛星数が変化しない限り短期的なばらつき量は小さい。これは、DGPS と RTK-GPS の出力値が短期的には同傾向を示していることから確認することができる (図 3.5 参照)。この事実、DGPS 出力値でオフセット誤差が小さい絶対方位角が計算できる可能性を示唆する。

ここでは、図 4.2 に示すように DGPS 出力値の更新時間  $\Delta t$  (100ms 秒) の間は車両が直進していると仮定して DGPS 出力値から絶対方位角を算出し、目標方位角との差を取ることによってオフセット誤差の小さい方位角誤差を計算することを試みた。

すなわち、

$(\alpha_i, \beta_i)$ : 時刻  $t_i$  における DGPS 出力値

$\phi$ : 目標方位角

とすると、

$$\phi_i = \tan^{-1} \left( \frac{\beta_i - \beta_{i-1}}{\alpha_i - \alpha_{i-1}} \right) \quad (3)$$

$$\theta_i = \phi_i - \phi \quad (4)$$

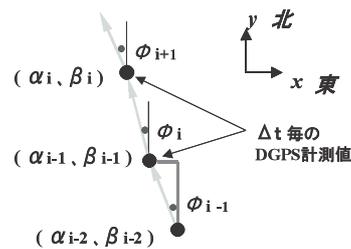


図 4.2 DGPS による方位角計算