

として DGPS 出力値から方位角誤差を計算可能である。

なお (4) 式の計算結果は、車速が小さい走行開始時および DGPS 出力値が不安定となる捕捉衛星数変化時は、値に信頼性がない。この場合、適宜地磁気方位センサで補間する必要がある。

#### 4.1.2 計算精度確認走行試験

走行制御に使用する走行誤差（制御量）は、(1) 式で表される PID 制御補償器へ入力され、車両操舵用アクチュエータが駆動される。この場合、走行誤差は十分に滑らかである必要がある。(2) 式に (4) 式を代入して計算した走行誤差が滑らかであるか、また数値的に安定しているか確認するため、車両を RTK-GPS で計算した走行誤差で自律走行させ、その時のロータリーエンコーダおよび DGPS 計測値から (2) (4) 式を用いて走行誤差を計算した。図 4.3 に計算結果を示す。

図 4.3 (a) A は RTK-GPS 出力値を走行座標系に変換して計算した走行誤差で、この値が真の走行誤差と考えてよい。B が (2) (4) 式で計算した走行誤差であり、C は (2) 式に FOG で計算した方位角誤差を代入して計算した走行誤差である。C は走行開始から 12 秒間で真値 A との差が 1.2m に達し、その後 FOG オフセット成分の影響で徐々に漸増しながら推移している。C が 0～12 秒間で急増したのは、FOG リセット時の車両初期方位角  $\phi_0$  と目標方位角  $\phi$  が一致していないためである。一方、(2) (4) 式で計算した B は漸増することなく、RTK-GPS で計算した走行誤差 A とほぼ一定間隔を保ちながら推移している。これは (4) 式、すなわち DGPS で計算した方位角誤差にオフセット成分が含まれていないことを意味する。また B に不連続点はなく、(1) 式に代入し滑

らかにアクチュエータを駆動することが可能である。

図 4.3 (b) A は FOG と目標方位角  $\phi$  との差を取ることで計算した方位角誤差である（走行誤差 C はこの値を (2) 式に代入して計算）。なお A は、C で示される FOG ドリフト補正角で補正済みである<sup>1)</sup>。B が (4) 式で計算した方位角誤差である（走行誤差 B はこの値を (2) 式に代入して計算）。オフセット成分は極めて小さいが、ばらつきが大きいのでフィルタリングした後、(2) に代入して走行誤差を計算している。

図 4.3 (c) は  $\Delta t$  (100mm 秒) 毎の左右輪エンコーダ出力値である。(2) 式には、これらの平均値を代入した。

#### 4.1.3 実証走行試験

図 4.4 に (2) (4) 式で計算した走行誤差、すなわちロータリーエンコーダと DGPS で計算した走行誤差を、フィードバック制御量として (1) 式に代入し、車両を約 80m 直進走行させた結果を示す。車速は毎秒 1m である。

図 4.4 (a) に走行誤差を示す。A が RTK-GPS 座標変換値（真値）、B が (2) (4) 式で計算した走行誤差（制御量）、C が DGPS 座標変換値である。真の走行誤差を示す A をみると、走行開始から 45 秒、距離にして約 45m 走行した時点で最大 300mm（進行方向に対して左方）の走行誤差が発生していることが分かる。これは、40 秒付近で DGPS の捕捉衛星数が変化し、その結果 DGPS 出力値が急激に変化したことが原因である。本法は走行誤差計算に DGPS による方位角を使用しているため、DGPS 出力値の変化量が大きい場合、多少その影響を受ける。しかし、DGPS 座標変換値である C 値を制御量とした場合、走行誤差が 2m 以上になることを考えると、300mm の走行誤差は小さい。

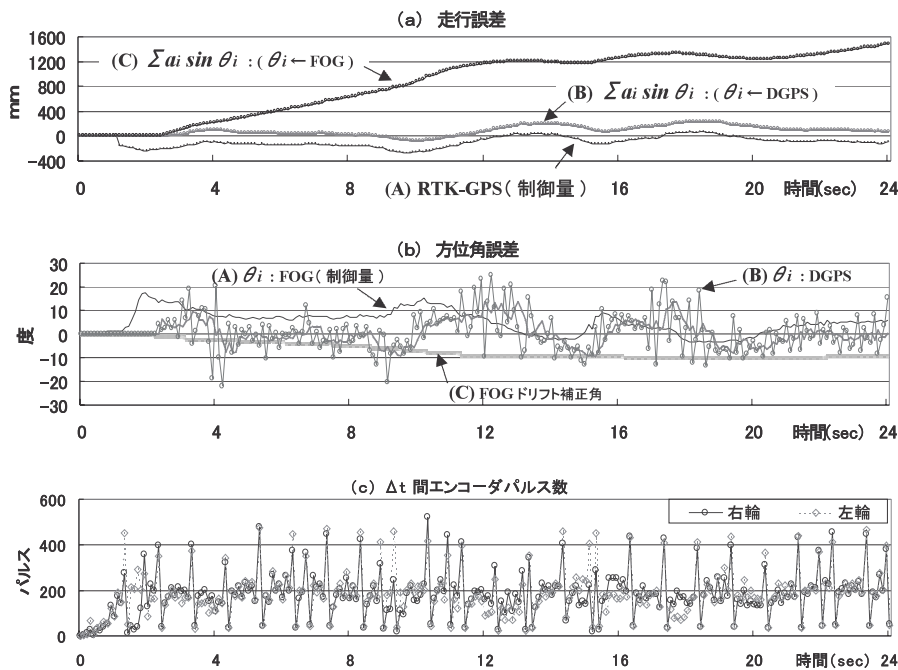


図 4.3 ロータリーエンコーダによる走行誤差計算結果 (RTK-GPS 走行時)

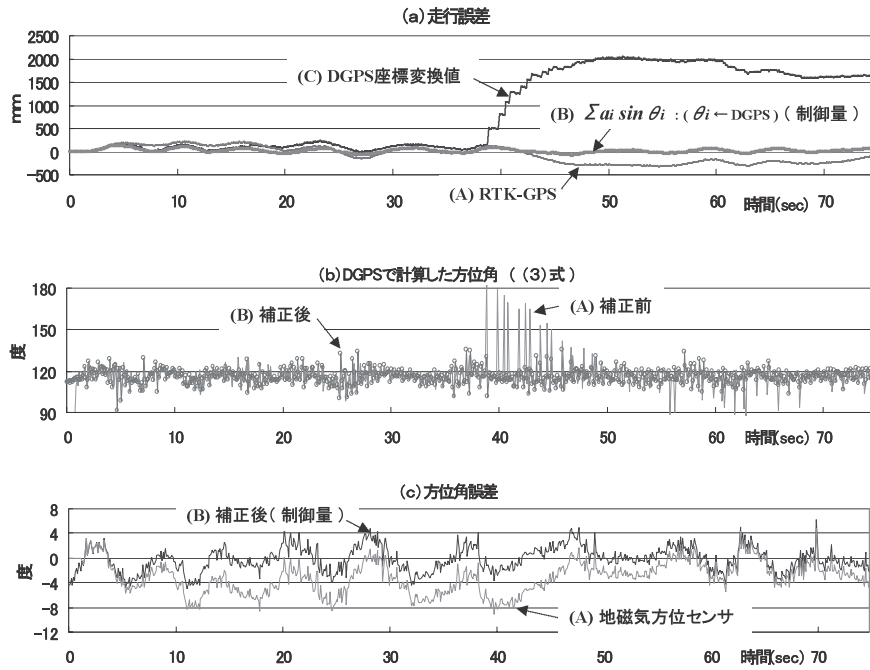


図 4.4 ロータリーエンコーダによる走行試験結果

また、図 4.5 は DGPS 出力値が急激に変動した時の走行軌跡を拡大して表示したものである。RTK-GPS で示される真の走行軌跡が目標経路から（進行方向に対して）左方に 300mm 程度オフセットしているのに対し、DGPS 計測値は右方に 2m 以上オフセットしている。

図 4.4 (b) は、DGPS 出力値を用いて (3) 式で計算した絶対方位角である。A に (3) 式計算結果を示すが、捕捉衛星数変化時に DGPS 出力値が不安定になるため(40 秒付近)、信頼性のない値となっている。したがって、適宜地磁気方位センサで補正している。B に補正後の (3) 式計算結果を示す。走行誤差を計算する (2) 式には、B 値を代入した。

図 4.4 (c) は制御補償器 (1) 式へ代入する制御量としての方位角誤差である。(4) 式で計算する方位角誤差は、S/N 比が小さいため (b) 図参照)、制御量として (1) 式に代入することはできない。したがって、地磁気方位センサ出力値のオフセット量を (4) 式で補正して、制御量としての方位角誤差を計算した。A が地磁気方位センサ出力値(図 3.6 で

のヨー方向補正済)と目標方位角との差であり、この値を (4) 式で補正し、オフセット量を除去したものが B (制御量) である。B にオフセット量が含まれていないことは、走行誤差がオフセットしていないことから確認することができる<sup>1)</sup>。

図 4.6 に 100m の直進距離を 3 往復、計 600m 走行させた結果を示す。図中の走行軌跡は RTK-GPS 出力値である。12 回の走行試験中、発生した走行誤差は最大 1.1m 程度であった。この走行誤差以内であれば、畝列に沿って走行作業することはできないが、耕耘作業、牧草地での施肥作業、融雪剤散布作業等に展開することが期待できる。

本法は相対距離センサであるロータリーエンコーダで制御量としての走行誤差を計算し、車両を走行制御する方法である。したがって、長距離走行時に走行誤差が大きくなる可能性は否定できない。

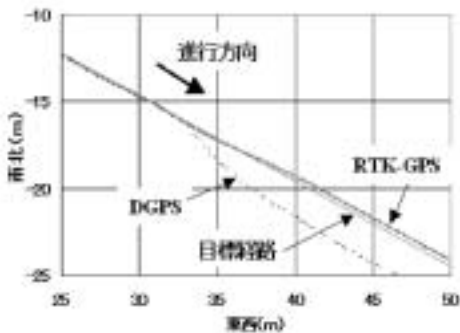


図 4.5 走行軌跡 (DGPS 出力値急変時)

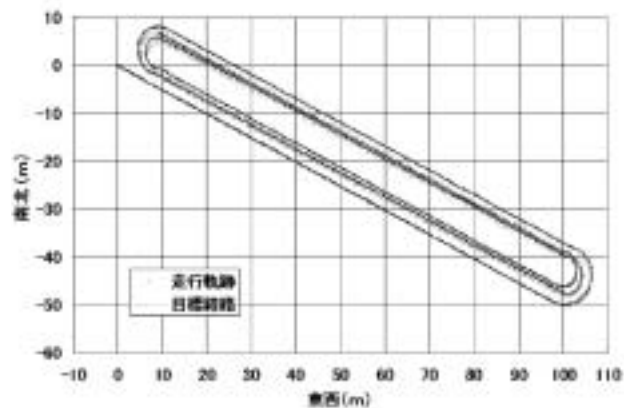


図 4.6 走行軌跡 1 (ロータリーエンコーダ)

### 4.2 カルマンフィルタによる走行誤差の推定

出力値に不連続性を有するもの、絶対位置情報が反映されている DGPS 座標変換値を走行誤差計算に使用して車両を走行制御することができれば、長距離走行時においても走行誤差が漸増することはない。本稿では、カルマンフィルタに DGPS 座標変換値を入力し、同フィルタ出力として走行誤差を計算し、DGPS 絶対位置情報を走行誤差計算に間接的に利用することを試みた。

#### 4.2.1 履帯トラクタに対するカルマンフィルタの適用

カルマンフィルタは、観測対象を表現するモデルが必要となる。フィルタ推定値の精度は、同モデルの良否に大きく左右される。ここでは、状態変数を位置 (xy 座標)、車速、方位角誤差、および重心回り角速度からなる 5 次元ベクトルで表現し (図 4.7)、走行中の履帯トラクタを左右輪速度 (m/s) を外部入力とする離散化漸化式として表現した。(5) 式に車両のシステム方程式、(6) 式に観測方程式を示す。(5) 式から分かるように、車両の走行モデルは非線形確率システムとして表現されるため、付録 1 に示す拡張カルマンフィルタを適用した<sup>4)</sup>。

$$\bar{x}_{k+1} = f_k(\bar{x}_k) + D\bar{u}_k + \bar{w}_k \quad (5)$$

$$\bar{y}_k = H\bar{x}_k + \bar{v}_k \quad (6)$$

$$f_k(\bar{x}_k) = [f_k^{(0)}(\bar{x}_k) \cdots f_k^{(4)}(\bar{x}_k)]^T$$

$$f_k^{(0)}(\bar{x}_k) = x_k + v_k \Delta t \sin \theta_k + v_k \omega_k \Delta t^2 \cos \theta_k$$

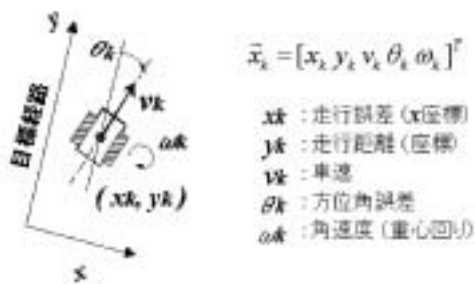


図 4.7 履帯トラクタの走行状態を表す状態変数

$$f_k^{(1)}(\bar{x}_k) = y_k + v_k \Delta t \cos \theta_k - v_k \omega_k \Delta t^2 \sin \theta_k$$

$$f_k^{(2)}(\bar{x}_k) = (Ur_k + Ul_k)/2$$

$$f_k^{(3)}(\bar{x}_k) = \theta_k + \omega_k \Delta t$$

$$f_k^{(4)}(\bar{x}_k) = (-Ur_k + Ul_k)/B$$

- $\bar{x}_k$ : 状態変数
- $\bar{y}_k$ : 観測値
- $\bar{u}_k$ : 左右輪速度  $\bar{u}_k = [Ur_k, Ul_k]^T$
- $H$ : 観測行列
- $D$ : 駆動行列
- $\bar{w}_k$ : システム雑音
- $\bar{v}_k$ : 観測雑音
- $\Delta t$ : サンプル時間 (100mmsec)
- $B$ : 車両トレッド

付録 1 に示すアルゴリズムで計算した走行誤差をシミュレーションして確認したところ、数値的に安定性のない推定結果が得られた。これは、逆行列演算を行うにあたり、要素の有効桁数が少なくなり、カルマンゲイン  $K_k$  が正しく計算できなかったことによるものである。したがって、ここでは観測雑音の共分散行列が対角行列となることを利用し、逆行列演算を行わずに推定値計算を行う Joseph の安定化アルゴリズム<sup>5)</sup>を用いて推定値を計算した。付録 2 に Joseph の安定化アルゴリズムを示す。

図 4.8 にフィルタ構成を、また表 2 にフィルタへの入力値を示す。走行誤差として DGPS 座標変換値とロータリーエ

表 2 フィルタ入力値

フィルタ入力値 $\bar{y}_k$	対応する状態変数
DGPS 座標変換値 (x 座標)	走行誤差: $x_k$
$\sum a_i \sin \theta_i$ : ( $\theta_i \leftarrow$ DGPS)	
DGPS 座標変換値 (y 座標)	走行距離: $y_k$
ロータリーエンコーダ出力値 ( $\Delta t$ 間)	車速: $V_k$
DGPS による計算値 ((4) 式)	方位角誤差: $\theta_k$
地磁気方位センサ(オフセット補正済)	
振動ジャイロ	

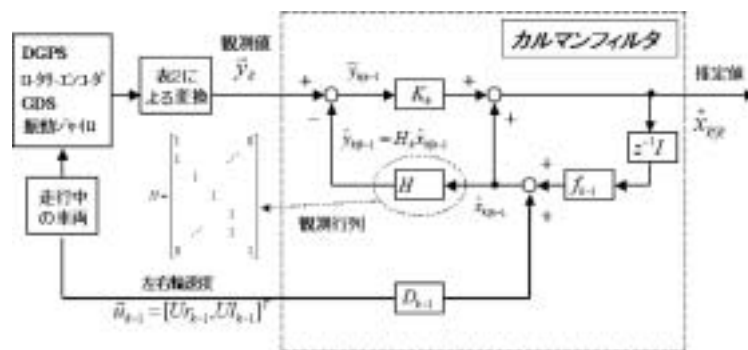


図 4.8 カルマンフィルタ構成

ンコード積算値 ((2) 式) を、また方位角誤差としてオフセット補正した地磁気方位センサ出力値および DGPS 計算値 ((4) 式) をそれぞれ入力した。すなわち 5 個の状態変数に対し、7 個の冗長な観測情報を入力した。

#### 4.2.2 計算精度確認走行試験

図 4.9 にロータリーエンコーダによる走行誤差 (図中 B) を制御量として約 80m の直進距離を自律走行させた時に計算したフィルタ推定値 (図中 D) を示す。なお、捕捉衛星数変化時における出力値の不連続性を平滑化することを目的として、フィルタ入力である DGPS 座標変換値 (図中 C) に対する観測誤差標準偏差を 1m に設定している。

図より、推定値は発散することなく、RTK-GPS による走行誤差 A と定性的にほぼ同傾向を示していることが分かる。特に、捕捉衛星数 (図中 E) が 7 個から 6 個となる 30 秒付近で、DGPS 座標変換値 C が急峻に変化しているのに対し、推定値 D は真値 A とほぼ同じ傾向で変化している。また、C が 7 秒かけて約 70cm 変化しているのに対し (真値 A との相対量)、D の変化量は 20cm に抑えられている。

なお、フィルタ推定値に ±5cm 程度の周期的ノイズが含まれるが、これはフィルタへの外部入力である左右輪ロータリーエンコーダ出力値が周期的に激しく変動しているためである (図 4.3 (c) 参照)。

以上より、フィルタ推定値を制御量として車両を自律走行させるにあたり、DGPS 座標変換値に対する観測誤差標準偏差を 1m に設定し、また推定値に含まれる周期的ノイズを平滑化して (1) 式に入力した。

#### 4.2.3 実証走行試験

図 4.10 にカルマンフィルタで推定した走行誤差を制御量として車両を自律走行させた時の走行軌跡を示す。秒速 1m で直進距離約 70m を 3 往復させたものである。5 回の走行試験中、発生した走行誤差は最大 1.2m であった。図 4.11 に走行開始から 3 回目の直進走行時におけるフィルタ入力値 (表 2 参照) および推定された走行誤差 (図中 D) を示す。図より、推定値 D は発散することなく安定した推定結果が得られていることが分かる。

なお、180 度枕地旋回部は車両が急旋回するため、履帯の

滑りの影響でロータリーエンコーダで計算した走行誤差と車速が不安定となった。その結果、これらの 2 つ値を入力情報とするフィルタ推定値が信頼性の低い値となった。したがって枕地旋回部は DGPS 座標変換による走行誤差を制御量として車両を自律走行させ、長距離走行となる直進部のみフィルタ推定値を制御量として車両を自律走行させた。直進走行開始時に、その都度フィルタ推定値およびロータリーエンコーダによる走行誤差を、DGPS 座標変換値で初期化した。

カルマンフィルタは観測誤差分散、システム雑音分散、初期値推定誤差分散等、先見情報として設定するいくつかのパラメータを持つ。本研究では走行試験場所の都合上、十分なパラメータ調整を行うことができなかった。フィルタ推定値による走行制御に関しては、さらに十分なパラメータ調整を行う必要がある。

### 5. まとめ

DGPS 等の低コストセンサ群を使用し、次の 2 通りの方法で履帯トラクタを自律走行させた。

- ① ロータリーエンコーダと DGPS による自律走行
- ② カルマンフィルタによる自律走行

前者は相対距離センサであるロータリーエンコーダ主体で車両を自律走行させる方法である。走行誤差の漸増が懸念されるが、100m の直進距離を 3 往復、計 600m の走行距離を

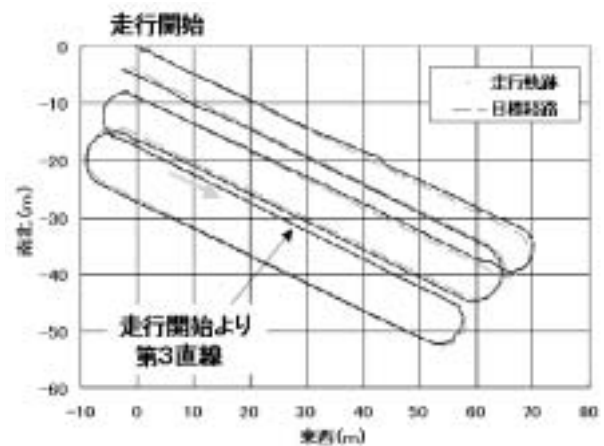


図 4.10 走行軌跡 2 (カルマンフィルタ)

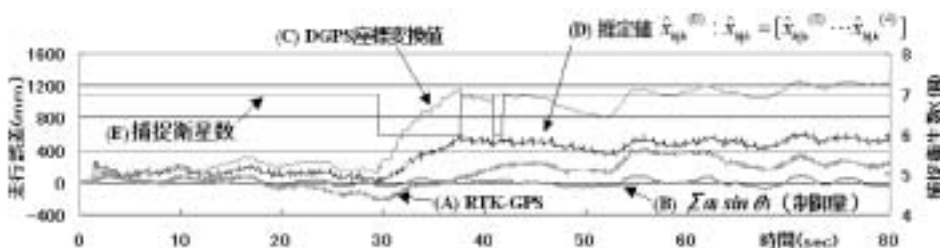


図 4.9 カルマンフィルタによる走行誤差推定結果