

# カルマンフィルタによるスペクトル拡散音波を用いた 農業ロボット用移動体の測位誤差補正 Positioning Error Correction of Moving Object for Agricultural Robot Using Spread Spectrum Sound with Kalman Filter

Key words: Spread spectrum sound, Kalman filter, Agricultural robot

生物センシング工学分野 小野 将範

## 1. 背景

近年日本の農業における労働力不足が深刻な問題となっており、農業ロボットによる農作業の省力化が望まれている。しかし、農業ロボットには高い精度が求められるため、用いられる航法システムは非常に高価となり、農業ロボットの普及の妨げとなっている<sup>1)</sup>。そこで本研究では高精度で安価な航法システムとして、音波による測位システムに注目した。

一般的に、音波を用いた測位は雑音に弱いという問題がある。それを解決する方法の1つとしてスペクトル拡散音波があり、雑音耐性を向上できることが報告されている。スペクトル拡散音波とは、M系列符号などの疑似乱数系列により符号化することで信号の周波数帯域を拡散させた音波である。M系列符号は参照波形とで自己相関処理を行った際に位相差0となった場合にのみ鋭いピークが現れる。そのピークを検出することで信号識別性、雑音耐性を向上しスペクトル拡散音波の受信時刻を精度よく求めることができる。しかし、移動体の測位では、ドップラー効果により受信信号の周波数がシフトしてしまい正確な測位ができないという問題がある。そこで先行研究では、スペクトル拡散音波と同時に別周波数の単一周波数音波を送信し、そのドップラーシフト量を算出し、自己相関処理を行うための参照波形を補正することでドップラーシフト補償を行っている。しかし、反射波やスピーカの振動によりスペクトルピークが複数現れ、スペクトルピークの誤検出があった場合に外れ値が生じるという問題があった<sup>2)</sup>。また、農業フィールドは作物や葉など障害物が多いため、これらの障害物によって信号が遮られ、一時的に観測データが不足しても測位が可能となるような手法が求められる。

そこで、これらの問題を解決するためにカルマンフィルタ(KF)を用いた補償方法を提案する。KFは時系列フィルタの一種であり、ノイズを含む時系列データと対象の運動モデルに基づき位置や速度など対象の状態を推定することができる。本研究では、ドップラー補償ミスにより生じる外れ値を補正するためにKFによって計測距離の補正とドップラー補

償法の改善を行い、外れ値の個数と測位誤差を調べた。また、障害物があった場合に、一時的に観測データが不足しても測位が可能となるようにするために、先行研究を参考にアルゴリズムを作成し、観測データの取得率ごとの測位誤差を調べた。

## 2. スペクトル拡散音波測位システムの原理

4隅にマイクを設置し、マイクに囲まれた領域内でスピーカからスペクトル拡散音波を送信する。マイクで音波が受信されると、相関計算を行い、相関ピークを検出してスピーカと各マイク間の伝搬時間を求め、音速と掛け合わせることでスピーカと各マイク間の距離を算出する。そして、得られた4つの距離からスピーカの位置を算出する。次にドップラーシフト補償方法を説明する。スペクトル拡散音波と同時に周波数 $f_{ds}$ の単一周波数音波を送信し、そのパワースペクトルが最大となる周波数 $f_{max}$ を検出する。そして、ドップラーシフト量 $f_{max} - f_{ds}$ からスペクトル拡散音波のシフト量を算出し、そのシフト量で参照信号の搬送波周波数を補正して相関処理を行うことでドップラーシフトの補償を行う。

## 3. 実験方法

### 3.1 測位実験

図1に測位実験の概要を示す。ただし、赤い円はスピーカの移動する軌道を示す。図1のように4隅に座標既知のマイク(Knowles Electronics, SPM0404UD5)を設置し、搬送波周波数24 kHzのスペクトル拡散音波と36 kHzの単一周波数音波を送信する。マイクに囲まれた領域内でスピーカ(Fostex, FT28D)を台車に乗せ、0.7 m/s, 1.0 m/s, 1.3 m/sの速さで赤い円でしめした円軌道上を移動させ、250 msおきに98回計測し、これを各速度で2回行った。測位誤差はスピーカを移動させる円軌道と測位結果との2次元距離とし、外れ値は相関ピークやドップラーシフト量の誤検出が無かったデータの標準偏差 $\sigma$ を求め、 $\pm 5\sigma$ の範囲の2倍を超えたものと定義した。

### 3.2 外れ値の補正

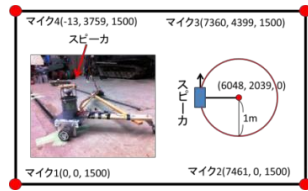


図1 測位実験の概要(座標の単位は mm)

3.1 で得られた結果から, KF によりスピーカとマイク間の距離, スピーカとマイク方向の速度, 加速度を推定し, その結果得られる事後推定値を用いて位置計算することで外れ値を補正する. 運動モデルは等加速度運動モデル, 観測値は計測距離と式(1)により算出されるスピーカとマイク方向の速度 $v_k$ とした. また, 音速 $V$ は式(2)で表される. ただし, 温度 $T$ はスピーカ付近の温度とマイク付近の温度の平均値とした. そして, KF の有無で外れ値の数と測位誤差を比較した.

$$v_k = (f_{max} - f_{ds}/f_{max}) \times V \quad (1)$$

$$V = 331.5 + 0.61T \quad (2)$$

2.において $f_{max}$ を検出する際, 外乱によりパワースペクトルピークが複数現れると, ピークの誤検出により外れ値となる場合がある. そこで, KF を用いて 2. の補償法を改善することでその外れ値を補正する. KF の状態量 $x_k$ はスピーカとマイク方向の速度, 加速度, 運動モデルは前述のものと同様とし, 観測値は式(1)により算出される速度とした. 3.1 で得られた結果から, KF によって速度の推定値が得られると式(1)を変形した式(3)より $f'_{ds\_max}$ を求める. そして, パワースペクトルが最大値の1/2を超えるものの中で $f'_{ds\_max}$ に最も近い極大点の周波数を新しいドップラーシフト後の周波数 $f'_{ds\_max}$ とし, この $f'_{ds\_max}$ を用いてスペクトル拡散音波のドップラーシフト補償を行う. そして, KF の有無で外れ値の数と測位誤差を比較した.

$$f'_{ds\_max} = \{f_{ds}/(V - v_k)\} \times V \quad (3)$$

### 3.3 障害物による計測不能データの補完

3.2 で KF により推定した距離を観測値とし, スピーカの 3 次元座標と  $x, y, z$  軸方向の速度, 加速度を推定する. このとき観測値を状態推定値に変換するための観測行列は非線形となる. そこで, 観測行列を線形化して用いる拡張カルマンフィルタ(EKF)により推定値を求める. この EKF による推定を, 得られた距離データの数だけ繰り返す<sup>3)</sup>. このアルゴリズムを用いることで最低 1 つのデータがあれば測位計算が可能になる. また, 運動モデルは 3.2 と同様とした. そして, データ検出率  $P_d$  を定義し全てのマイクで断続的に計測不能となる場合の測位誤差の大きさを確かめた.

## 4. 結果・考察

図 2 に KF による補正前後の測位誤差を示す. かつこ中の数字は外れ値の個数を示す. 計測距離の補正により測位誤差は低減されるものの, 外れ値の個数は増加した. これは外れ値の影響により KF の正確な推定値を求められなかったためと考えられる. しかし, ドップラーシフト補償方法を改善することにより外れ値の個数は減少した. 補償法の改善によりドップラーシフト量の誤検出が減り, 外れ値が減ったためと考えられる.

図 3 に断続的に計測不能となる場合の測位誤差を示す.  $P_d=1.0, 0.75$  のときは測位誤差 10 mm 程で測位できているが,  $P_d=0.5$  のときは 100 mm 程と, 測位誤差が大きくなった. 今回用いた運動モデルは  $x, y, z$  軸方向に等加速度運動するというものであったが, 実際の運動は加速度の変化する等速円運動であり, モデルと実際の運動には差があった. そのため, モデルによる予測値を観測値で補正するために多くの観測データが必要になり,  $P_d=0.5$  では補正しきれず測位誤差が大きくなったと考えられる.

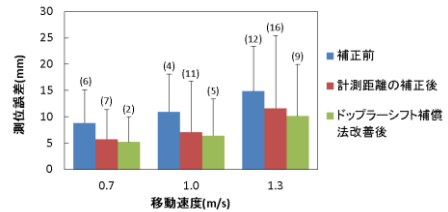


図2 KF による補正前後の測位誤差

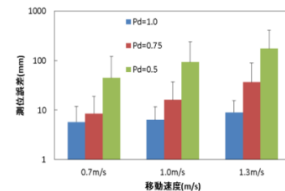


図3 断続的に計測不能となる場合の測位誤差

## 5. 結論

本研究により, KF を用いたドップラーシフト補償で外れ値の個数を低減させることが可能ということがわかった. また, KF を用いるとデータ検出率が  $P_d=0.75$  以上となるようにマイクを設置すれば測位誤差 10 mm 程での測位が可能になると考えられる.

### 参考文献

- 1) 水島晃(2005): 農用車両のための航法センサに関する研究, 北大農研邦文紀要 27(1), 200-206
- 2) Slamet Widodo(2013): Moving Object Localization Using Sound-Based Positioning System with Doppler Shift Compensation, Robotics, 2, 36-53
- 3) 高林佑樹, 松崎貴史, 亀田洋志, 系正義(2008): 複数センサ間の到来時間差/ドップラー周波数差を利用する非同期追尾フィルタ, 電子情報通信学会論文 B Vol. j91-B No.12, 1711-1724