

学位論文の要約

題目 グリーンハウスにおけるスペクトル拡散音波を用いた測位システムの研究

氏名 椎木 友朗

I 章 緒言

日本の農業の問題として、農業従事者の高齢化と減少、食料自給率の低下が叫ばれて久しい。この問題を技術的な側面から解決するために、自動化技術を駆使した農作業の自動化を目指す技術革新が進められてきた。例えば、屋外であれば、トラクタ、田植機、コンバインの自動化、屋内であれば、農薬散布や収穫作業など多くの研究開発されている。このような農作業に対する自動化技術が普及すれば、省力化および生産性の向上が期待できる。農作業機械の自動化のための共通プラットフォーム技術として、GPS (Global Positioning System) などの測位センサを用いた航法システムがある。しかし、GPS は価格が高いことや山影や屋内など電波が届かないところでは位置計測ができないことが問題であり、代替手段が望まれている。その他の測位技術の中でスペクトル拡散(SS)音波を用いた測位法は、比較的安価で高精度な計測が期待できると言われている。本論文では、グリーンハウスなどの屋内農業フィールドにおいて、農作業の自動化やアシストを行う自律走行車の航法システムとして用いるための SS 音波測位システムを開発することを目的とし、①直接波の相関ピーク検出法と反射波の影響について、②基地局法による温度補償方法について、③計測周期の高速化について検討した。

II 章 スペクトル拡散(SS)音波

SS 音波は M 系列符号に代表される疑似ランダム符号により変調された信号を、スピーカから出力することで作成できる。M 系列符号は、優れた自己相関特性を持ち、相関計算を行い、相関ピークを検出することで、M 系列符号の位相差 0 の位置を検出できる。その M 系列符号を用いて作成された SS 音波も同様の性質を受け継ぎ、マイクロホンで受信された受信信号に対して、スピーカから送信された SS 音波信号で相関処理を行うと、SS 音波の受信時刻に相関ピークが現れる。この相関ピークを検出することで、SS 音波の受信時刻が正確に求めることが可能となる。

III 章 反射板付きスピーカとマイクの指向性

SS 音波を測位範囲全体に出力するために、反射板を付けた場合と付けない場合のスピーカから出力された SS 音波の受信信号の相関ピーク値と相関波形から反射板の有効性を評価した。また、反射板付きスピーカが傾いたときにどのように相関ピーク値と相関波形が変化するか確認した。その結果、スピーカから出力される音波が平面波であると仮定して反射板を作成したが、実際には平面波ではないため複数の相関ピークが出現した。また、スピーカ角度が 0° ~ 40° のときに反射板付きスピーカの相関ピーク値が反射板無しの相関ピーク値より大きくなった。そのため、広範囲の計測を行う場合には適していると言えた。さらに、スピーカ角度が -40° のとき、先頭から 3 つの相関ピークが相対的に小さくなった。これは、スピーカの後方に出力された音波であると考えられた。

また、計測距離を延ばすためにパラボラアンテナと同様の反射板をマイクに取り付けることで集音効果を向上させることを試みた。その効果を確認するために受信信号の相関波形のピーク値と相関波形からパラボラ反射板の有効性を評価した。その結果、マイク角度が 0° のときに反射板付きの相関ピーク値が 6 倍になり有効性を確認できた。しかし、マイク角度が 0° 以外では、反射板の反射波による重ね合わせや透過損失により、相関ピーク

値は同等か小さくなった。このことから、反射板を取り付けることで、受信強度が増加するため広範囲の計測には有利になることが示された。しかし、実際の音波は平面波ではないため複数の相関ピークが出現する。そのため、計測精度を向上するには、相関ピーク検出法が重要になることが予想された。

IV章 グリーンハウス内測位実験

本章では直接波の相関ピーク検出法の検討を行いグリーンハウス内の反射波の影響を調べる、また温度補償法の検討を行った。

直接波の相関ピーク検出法には、正規化相関値と相関値比の2つの特徴量を用いた方法を提案した。まず、数値計算による雑音耐性について評価した。SS音波と雑音の異なる信号強度比の場合、異なる雑音（白色雑音、ピンクノイズ、単一周波数波）の場合、時間的に非定常な雑音の信号強度の場合のいずれにおいても雑音の正規化相関値は1を下まわり、相関値比は2を下まわることを示した。その結果から、①正規化相関値が1.1以上、または②正規化相関値が0.6以上かつ相関値比が2以上（ただし、200サンプル(2ms)以降のデータからとする）という直接波の相関ピーク検出の条件を決めた。次に、グリーンハウス内(4 x 12 x 2 m)で、SS音波による測位システムを用いて9カ所の静止位置の計測を行った。上述の相関ピーク検出法により計測した結果、8カ所で直接波の相関ピークを検出できた。誤検出の主な原因としては、直接波と反射波の重ね合わせにより直接波の相関ピーク値が減衰したこと、反射波成分が多い場合に正規化の計算で相関値全体が想定より小さくなったことであった。また、測距誤差は、グリーンハウス内の温度勾配により定点の温度計測からの温度推定では正確な音速を推定できなかったこと、直接波の3つの相関ピークの識別を行っていなかったこと(14mm程度の誤差)であった。

次に、グリーンハウス内(4 x 12 x 2 m)で、基地局法による音速補償の効果を9点の静止位置の計測を行うことで確認した。基地局法による補償無しの測位誤差は75mm以内、補償有では55mm以内であり20mmの誤差が改善した。本実験では、基地局とマイクロホン間の距離が4mで、基地局とマイクロホン間の伝搬時間計測の誤差が0.042ms(搬送波周波数24kHzのときの1つの相関ピーク間隔分の時間差)であった。この誤差は、温度誤差が2℃程度あった場合の測定誤差に相当する。そのため、グリーンハウス内の温度勾配が小さく、定点の温度計測による誤差が2℃以下の場合、基地局法による補償後の計測誤差の方が大きくなる場合もあった。

基地局法による補償の精度を上げるためにはSS音波の相関波形の3つの相関ピークを識別し、中央の相関ピークを検出する必要がある。中央の相関ピークを検出できれば、測距誤差の平均22mmを6mmに、測位誤差の平均42mmを15mmに改善できた。また、測距誤差はどの測位位置でも同程度であった。そのため、基地局の音波から直接求めた3つの音速の間の音速を角度によって線形補完することで、360度方向すべての音速を精度よく表現できたといえた。また、理論的には、基地局間とマイクロホンとの距離を10m以上にすると、基地局とマイクロホン間のSS音波の伝搬時間計測の誤差が0.042msであった場合でも、温度測定の誤差が1℃未満のときの計測精度となる。そのため、測位範囲が広いほど基地局法の有効性は向上すると考えられた。

V章 計測周期の高速化

SS音波による測位システムの計測周期を高速化するために、出力番号をデータとしてSS音波に付加をして、50mの距離まで計測したときの計測精度について評価を行った。その結果、従来法では計測周期が約0.2sであるが、出力番号を付加することで約1/20sとなり4倍以上の高速化を実現した。また、伝送速度94bits/s、出力音圧レベル90dB(20kHz)のとき、暗騒音60dBで50mまでの距離であればビットエラーレートは0%であり、安定した通信が行えることを示した。今後、温度などの測位に必要なデータを付加することを考えると、より速い伝送速度が求められる。伝送速度と計測距離および信号と雑音の比との関

係を調べる必要があると考えられた。また、音速が正確に求められた場合、静止位置では計測誤差が 15 mm 以内、誤差の標準偏差が 2.5 mm 以内と安定して高精度な計測が行えることを示した。しかし、直接波と反射波の到達時間の差が、チップ長の 1.5 倍(本実験では 0.25 ms)になると反射波の S 曲線のピークが直接波の S 曲線のピークに重なることで計測誤差が大きくなることが分かった。また、SS 音波と雑音の信号強度比が低下することで、拡散符号の遅延時間の推定を小さく見積もられることでも計測誤差が大きくなり、さらに移動体の計測ではより大きな誤差が生じることが懸念された。今後は、上述の問題を解決し移動体の計測に対する本手法の有効性の評価を行う必要がある。

VI章 結言

本研究により、正規化相関値と相関値比による相関ピーク検出法と基地局法による温度補償機能を用いることで、12 m x 4 m のグリーンハウス内を 55 mm 以内の誤差で測位できることを示した。自動走行田植機で用いられていた RTK-GPS の精度(20 mm)²⁾と比較して 35 mm ほど精度が低い。計測精度を向上させるためには、反射波の影響を低減し、3 つの相関ピークを識別するための相関ピーク検出法が必要であると言える。3 つの相関ピークが出現するのは、搬送波周波数 2 周期分を M 系列符号の 1 つ分としたことと、受信信号に対して送信した SS 音波信号を直接用いて相関処理を行ったためである。相関処理を行う前に、搬送波成分を除去する処理を行うと、M 系列符号の自己相関波形と同様な波形となり、相関ピークは 1 つとなる。また、反射波の影響は、相関波形の重ね合わせにより、相関ピークが減少することで生じる。これは、相関波形の極大値と極小値が重なることでおこる。これも搬送波成分を除去することで、M 系列符号の自己相関波形と同様な波形となり、極小値成分が減少されることから、反射波による相関ピークの減衰が低減できると考えられる。

本計測周期の高速化法により、RTK-GPS と同程度の計測周期(1/20 s)と計測精度(15 mm 以内)を実現できたと言えた。本実験では、本計測周期高速化法の基礎的な性能を確認するために廊下において距離計測実験を行った。今後は、グリーンハウスなどの実際の農業フィールドで測位実験を行い、測位精度を評価する必要がある。また、移動体測位のときに問題となるドップラー効果の影響を補償する機能を付加し、評価を行う必要もある。

本測位システムが実用化されると、安価で高精度な航法システムが構築でき、比較的手軽に以下に示すような応用ができるようになると思われる。作業用の台車を自律移動させることで、収穫作業などの農作業のアシスト、農薬散布などの農作業の完全な自動化、さらに、ロボットにカメラを取り付け、インターネットを経由して操作や画像の表示を行い、24 時間いつでも、そしてインターネットが使用できる場所であればどこでも栽培状況のモニタリングを行うことも可能になる。また、本システムは農業の情報化にも役立つ。例えば、収穫作業時は、収穫日時・収穫物の重量・収穫場所が、農薬および肥料の散布時は、その種類・散布日時・散布量・位置などのデータベースに蓄えられることより、どの株の作物からどのような収量と品質の生産物が得られたか、また最適な農薬や肥料の施用計画が立てられる。さらに生産者には蓄えられたデータは経営戦略に、消費者はトレーサビリティとして使用できることが期待できる。