

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 5月15日現在

機関番号：10101

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2010～2011

課題番号：22780234

研究課題名（和文）農用ロボットビークルのマシンビジョンによる確率的ナビゲーション

研究課題名（英文）Probabilistic navigation of agricultural robot vehicle using machine vision

研究代表者

海津 裕 (KAIZU YUTAKA)

北海道大学・大学院農学研究院・准教授

研究者番号：70313070

研究成果の概要（和文）：トラクタやコンバイン、田植機など、農業で用いられる車両のナビゲーションを GPS コンパスとマシンビジョンによって行うことを目的とした。GPS コンパスは RTK-GPS と比較して測位精度が劣るためステレオマシンビジョンによって得られる作物との相対距離を用いて確率的フィルタリング処理により誤差を減らすアルゴリズムを開発した。具体的な作業として田植えを想定し、シミュレーションと実際の実験により本手法の有効性を検討した。

研究成果の概要（英文）：The objective of this research was to navigate an agricultural vehicle such as a tractor, a combine harvester or a rice transplanter using a GPS compass and a machine vision system. Since the GPS compass was less accurate than RTK-GPS in positioning, a stereo machine vision was used to decrease the error. The probabilistic filtering algorithm was developed for rice planting operation. The developed method was validated with the simulation and the actual experiment.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,500,000	450,000	1,950,000
2011年度	800,000	240,000	1,040,000
2012年度	0	0	0
2013年度	0	0	0
2014年度	0	0	0
総計	2,300,000	690,000	2,990,000

研究分野：農学

科研費の分科・細目：農業工学・農業情報工学

キーワード：農業ロボティクス, 確率的推定

1. 研究開始当初の背景

現在までに、農地を決められた経路に従って正確に走行することが可能な農用ロボットが国内外で多数開発されている。日本国内では北海道大学で開発されたロボットトラクタや、中央農業研究センターで開発された田植えロボットなどが代表的な事例として挙げられる。これらのロボットでは、その位置を2周波のRTK-GPSで求め、その方位を3

軸の光ファイバージャイロとRTK-GPSの走行履歴によって求めることで誤差数センチメートルでの走行が可能になった。一方海外では、アメリカの会社を中心に、やはり高精度なGPSとジャイロセンサーを用いた自動ステアリングシステムが市販されており、今後ますます普及していくと予想される。農用ロボットビークルシステムは、全自動で、農用車両を用いた全ての圃場作業を行うこと

が可能であり、農家にとっては、魅力的であることは間違いない。

しかしながら、日本においては圃場面積が狭いことから、費用対効果の点で実用化に向けた開発は停滞している。高精度な RTK-GPS の値段は依然高価である。RTK-GPS は、移動局以外に補正信号を得るための固定局が必要となる。日本の電波規制は厳しく、海外で用いられている高出力の無線モデムを用いることができないため、実用的には、携帯電話を用いた VRS (仮想基準点) 方式を用いざるを得ない。しかし、そのサービスも決して安くはない。また、圃場面積が狭いと言うことは、圃場に対して周囲の畦の長さが長いと言うことでもあり、圃場の脇に植えられた樹木が GPS の電波を遮る確率が高まり、全ての場所で GPS が使える保証はない。これまで我が国で研究されている農用ロボットビークルは、高精度な GPS 測量が行えるという前提のもとに開発されており、電波状況が良くなかったり、補正信号が届かなかったりと言った不測の事態には対応できない。事実、立木の近くに行くと、RTK-GPS の精度が落ちることが実験で確かめられている。この GPS の不確定性が我が国における農用ロボットビークルの実用化を阻む大きな要因となっていると考えられる。

一方、農用ロボットビークルの位置及び方位推定に使われてきた技術にマシンビジョンがある。これは、農地に存在する特徴的な形状を画像処理によって抽出し、ロボットビークルと対象物の相対的な位置を推定する手法である。視覚情報にはさまざまな色や位置の情報が含まれているため、理想的な光条件が与えられれば、非常に正確な推定を行うことが可能である。しかしながら、日中の屋外では雲や時間の影響により、光の強さ、スペクトルが秒単位で変化する。そのため目的とする対象物のみを抽出する二値化処理に必要な閾値を決定することは困難である。

2. 研究の目的

本研究は、山間地が多く、圃場面積が諸外国に比べ小さい我が国の農地に適した農用ロボットビークルの位置および方位推定技術について開発することを目的とする。具体的には、電波状況により高精度な RTK-GPS による測位が行えない状況、もしくは、低価格であるが、精度の落ちる 1 周波 GPS を用いる状況、GPS の位置更新頻度が低い状況等を想定し、位置方位の推定精度を高めるため周囲の状況をビジョンセンサによって認識し、取得した画像の時間的、空間的変化を求めることで、農用ロボットビークルの 3 次元的な位置および姿勢の変化を“確率的に”推定することを目標とする。

研究期間内に明らかにすることは、①シミュ

レーションによる推定アルゴリズムの妥当性の検証、②実際の圃場における検証、③ロボットビークルの自動制御への応用である。本研究は、確率的マシンビジョンのみを使うのではなく、既存の高精度 GPS、低精度 GPS、ジャイロセンサーを組み合わせてよりロバストなシステムを構築することを目的とする。そのため、まずは、シミュレーションによって様々な条件の組み合わせを検証する。シミュレーションでは 3 次元 CG を使って仮想的に作成した農地を走行し、仮想的なカメラで撮影した画像を用いて検証を行う。実際の圃場では、光条件の変化する中で、正しく確率分布が得られるか否かを検証する。また、本アルゴリズムは、データ量が数十ギガバイトから数百ギガバイトと膨大になることが予想されるため、その計算量についても検証を行う。

農地は、室内環境と異なり、ノイズの要因が多い。このような状況で、農用ロボットビークルの信頼性をより高める技術の開発は、現実の問題との関連が高く、今後の日本の農業ロボットビークルの実用化、普及を考える上で大変重要である。

3. 研究の方法

(1) DGPS コンパスの精度評価試験

本システムでは航法センサの一つとして Hemisphere 社製 DGPS コンパス VS100 を使用した。位置推定アルゴリズム検証用シミュレータの基礎資料としてこの DGPS コンパスの位置と方位の計測精度評価を行った。比較対象は 2 台の Topcon 社製 RTK GPS 受信機 Legacy-E+ であり、方位はこの 2 台の相対位置から計算した。これらを小型運搬車に設置し同時に計測を行った。試験は直進、旋回、1 時間静止測定を行い、位置と方位の計測精度、出力の時間遅れなどを評価した。

(2) マシンビジョンの精度評価試験

マシンビジョンでは車両の制御に必要な隣接苗列との目標経路と直交する方向 (横方向) での距離を計測した。手順は次の通りである。まず、近赤外光線を受光できる工業用 CCD カメラ (IMItech 社製 IMB5040FT) を 2 台使用し近赤外ステレオ画像を撮影した。苗などの植物体は近赤外光線をよく反射するため、湛水した水田では適切な閾値で 2 値化することで周囲の背景から識別できる。さらに各苗との距離を計算するため、左右の 2 値化画像中で同じ苗を表す領域の対応を、領域の重心座標、領域面積、長さ等の指標から決定

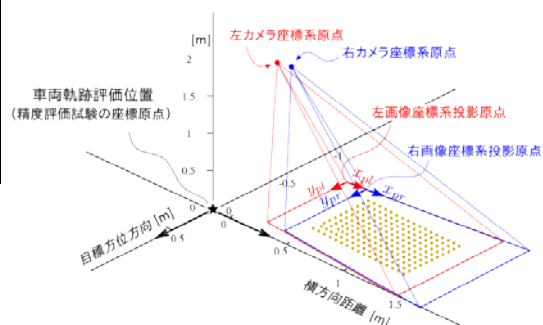


図1 静的計測試験座標設定

した。そして、対応領域間の重心座標の視差から奥行きを求め、カメラ座標系での座標を計算した。計算された各苗の座標値は、DGPSコンパスからの車両方位、傾斜センサ (MicroStrain 社製 3DM-GX1) からの車両ロール角・ピッチ角の出力をもとに横方向距離へと変換される。最後に、認識された苗のうち車両に隣接する苗列に属するものを選別、その中で画像中央に最も近い苗の横方向距離を車両の苗列との横方向距離として採用した。尚、マシンビジョンおよびそれに必要なカメラのキャリブレーションのプログラムは画像処理用ライブラリ OpenCV を利用し C 言語で記述した。

本研究では小型運搬車上にこのマシンビジョンを設置し、横方向距離の静的計測試験と動的計測試験を行った。静的計測試験は、静止状態での画面内各点における奥行きと横方向距離の計測精度評価を目的としたカメラ部分単独の試験である。苗に見立てた試験片 (10 cm 四方の厚紙の中心に植物の葉を重心が一致するよう貼りつけたもの) を画面内の 187 点に配置し、マシンビジョンで車両からの横方向距離の計測を行った。同時にトータルステーションで車両と試験片重心の相対位置を計測し、精度の比較対象とした。尚、この試験では車両方位は目標方位と一致するものとした。動的計測試験は、各センサの連携、苗の選択アルゴリズム、そして動的条件での横方向距離の計測精度評価を目的とした試験である。長さ 10 m、幅 1 m の黒い防草シート上に近赤外光をよく反射するテープを苗列 (直線、条数 3、条間 30 cm、株間 15 cm) を横して貼り付けた擬似苗列パターンを作成し、平らな路面に設置した。続いて RTK GPS によって設置した擬似苗列パターンの座標を計測した。そして、小型運搬車で移動しながらマシンビジョンにより擬似苗列パターンとの横方向距離の計測を行った。目標方向は擬似苗列パターンの直線方向とした。この際 DGPS コンパスの精度評価試験時と同様に、2 台の RTK GPS での測位も行い、計測値から精度比較の対象となる横方向距離を計算した。

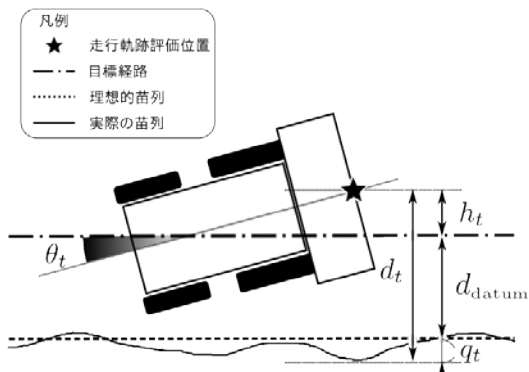


図 2 横方向偏差と隣接苗列の関係

(3) 横方向偏差推定アルゴリズムの妥当性検証シミュレーション

本システムでは操舵角 δ_i を式(1)によって決定した。図 2 に示すように、 θ_i は目標方位と車両方位角の差、 h_i は横方向偏差 (目標経路からの経路と垂直方向のずれ)、 α と β は操舵ゲインである。

$$\delta_i = \alpha\theta_i + \beta h_i \quad (1)$$

方位に関しては十分な精度があるものとして DGPS コンパスの出力を使用するが、横方向偏差はカルマンフィルタを利用したアルゴリズムで推定を行う。本研究では横方向偏差の遷移方程式を式(2)、観測方程式を式(3)としてモデル化した。

$$h_{t+1} = h_t + \Delta t v_t \sin \theta_t + u_t \quad (2)$$

$$g_t = h_t + w_t \quad (3)$$

添字 t のあるものは時刻 t における変数であり、それぞれ、マシンビジョンによる横方向偏差の観測値 g_t 、観測誤差 w_t 、車両速度 v_t 、システムノイズ u_t を表す。時刻 t における横方向偏差の推定量 \hat{h}_t はカルマンフィルタの推定規範から導かれた式(4)によって決定される。

$$\hat{h}_t = \tilde{h}_t + \frac{P_t}{W_t} \{g_t - (\tilde{h}_t + \tilde{w}_t)\} \quad (4)$$

ここで、 \tilde{w}_t と W_t はそれぞれマシンビジョンによる観測誤差の期待値と分散である。また、 \tilde{h}_t は時刻 $t-1$ での横方向偏差推定値 \hat{h}_{t-1} から判断された時刻 t での横方向偏差の予測値、 P_t はその分散であり、それぞれモデルに従って漸化式で観測ごとに更新される値である。予め観測誤差やシステムノイズの性質に対する知識があれば、この式を用いて、車両軌跡に対する苗の植付けのずれやマシンビジョンの観測誤差を含んだ情報から、確率的な特性を考慮したより尤もらしい横方向偏差の推定が期待できる。ただし、マシンビジョンによって観察される苗は前回行程での目標経路からずれた位置にあると考えられるため、観測値は前回行程での横方向偏差 q_t を差し引いたものを使用する必要がある。 q_t の値には、前行程での横方向偏差の推定値の列から対応するものを選んで使用する。その対応関係が正確には決定できないことが問題となるが、本システムでは DGPS コンパスから得られる位置情報にもカルマンフィルタを作用させたものを同時刻の横方向偏差の推定値と組にして蓄え、推定時の現在位置と対応する前行程での横方向偏差の決定に利用することで対処した。

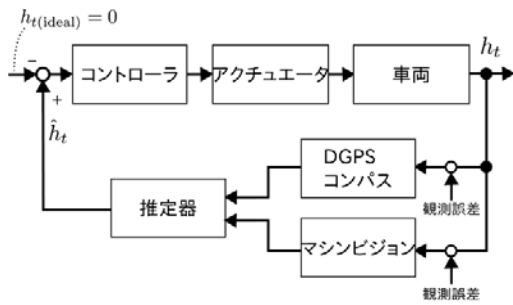


図3 シミュレータの構成

この推定アルゴリズムの妥当性を検討するためコンピュータによるシミュレーションを行った。シミュレータプログラムは数値計算ソフトウェア GNU Octave で記述した。シミュレータの構成を図3に示す。簡単のため車両は2次元平面内を運動するものとして、滑りを考慮しない幾何学的モデルを採用した。アクチュエータは指令値に対する実舵角の遅れをモデル化したもので、一次遅れ系を仮定し、直線近似した式を使用した。また、車両の方位は2輪モデル近似式に基づいて更新した。アクチュエータと車両の状態更新は100 Hz、センサの入力とコントローラの指令値の更新は5 Hzとした。また、観測誤差はDGPS コンパスに関しては精度評価試験で得られた値を使用し、マシンビジョンに関しては精度評価試験で得られた観測誤差の分散をもとに発生させた正規乱数を使用した。シミュレーションでは、1行程を100 mとして、10行程運転を行い、推定アルゴリズムを使用した場合と使用しない場合の走行軌跡を比較し、横方向偏差推定アルゴリズムの妥当性を検証した。

4. 研究成果

(1) DGPS コンパスの精度評価試験

図4は定地点測定試験で得られた軌跡をRTK GPS計測値の平均値を基準とした相対座標に示したものである。試験を実施した1時間の間、比較対象とした2台のRTK GPS受信機は常にfix解が得られ、DGPSコンパスでもディファレンシャル補正が有効な状態で測位でき、方位出力も途切れることがなかった。平均RTK計測値に対するDGPSコンパス計測値のRMS誤差は1.56 m、誤差の標準偏差は0.28 mだった。特徴的なのは、DGPSコンパス計測値が平均RTK計測値の周りに分布しなかったことである。またDGPS計測値の軌跡が線で書いた様に見えるのは計測誤差が時間経過に対して連続的に変化しているためである。東西に1 m、南北に1.5 mほどの幅で変動していることが分かる。これらの結果からやはりDGPSコンパス単独の測位精度では田植機の自動制御には不十分であると言える。

方位のDGPSコンパス計測値の相対誤差を

図5に示す。方位のRMS誤差は 0.24° 、標準偏差は 0.15° だった。誤差のばらつきが小さい値であること、また長時間測定を行なっても誤差が時間によって大きく変動しないことから、DGPSコンパスは本システムでの方位センサとして十分な精度を持っていると結論できる。

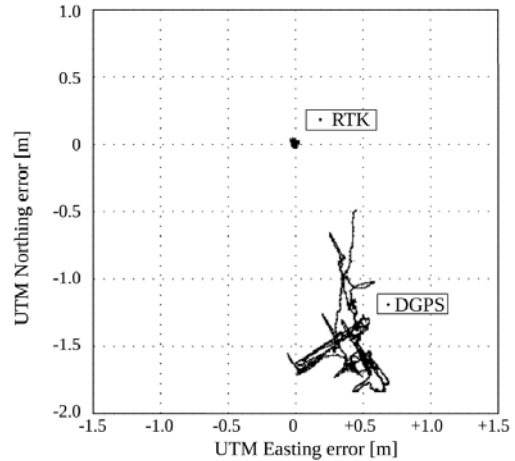


図4 定地点測位軌跡

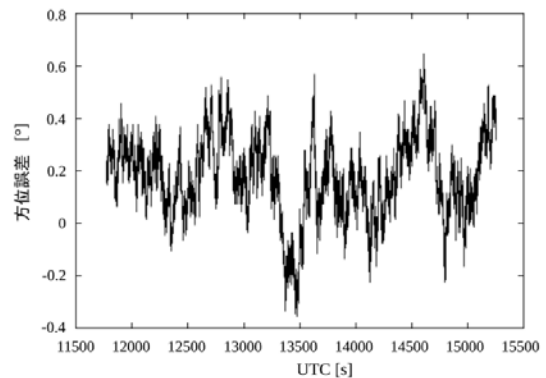


図5 GPSコンパス方位誤差

(2) マシンビジョンの精度評価試験

① 横方向距離の静的計測試験

計測した全187点での横方向距離のRMS誤差は16.1 mm、誤差の絶対値は最大で34.3 mmだった。図6に計測した各点のトータルステーション計測値を真の値として、マシンビジョンによる横方向距離の計測誤差と真の値との関係を示した。計測誤差は画面の端になるほど大きい値を示した。また、画面の列方向に直線的な誤差の変化が見られたが、行方向にはほぼ一様な誤差の分布となった。このような計測誤差が生じたのは、このマシンビジョンでの視差の評価が画面内の各画素についてではなく、苗として識別された領域についてなされていること原因だと考えられる。一般的なステレオ視差によるカメラからの奥行き計算は、画面内の各ピクセル毎に行われるため重い処理となるが、本システムでは計測する対象物が限定されているため、より単純な領域毎の視差計算という方法をと

ることで大幅に計算量を削減し、実時間での処理を実現している。しかし、対象物を面的に評価するため、視点の異なる画像では光の当たり方によって苗領域の見え方が変わり、画像重心が少しずれることで誤差が増加したと考えられる。また、本システムではステレオ視差の計算を容易にするため画像の平行化（左右画像の行を揃え、画像列方向視差のみで奥行きを計算するよう行う変換）を画像2値化前に行なっており、この変換の精度も計測誤差に影響していると考えられる

② 横方向距離の動的計測試験

動的計測試験中、左右カメラでの撮影は正確に同期されていた。また、DGPS コンパスと傾斜センサからの入力との統合も機能し、設計通り5Hzで横方向距離の計測が行えた。図7に横方向距離の動的計測試験時の走行軌跡を示した。マシンビジョンでは目標方位方向の距離は計測できないので、同時刻のRTK GPS計測値に合わせてある。試験時には車両を徐々に擬似苗パターンから離れるように走行させたが、横方向距離のマシンビジョン計測値もそれに追従している様子が分かる。横方向距離のRMS誤差は68.2mmだった。RTK GPS自体の誤差が一般に2~3cmあり、今回の結果を厳密な計測精度とすることはできないが若干静的計測試験のときより誤差が大きくなった。また、擬似苗パターンの条間は30cmであり、今回マシンビジョンによる横方向距離の計測誤差にこれ以上の値はなかった。従って正しく車両に隣接する列から苗を選んで車両の位置計測に使用できたといえる。一方、試験中苗の認識に失敗した計測の割合は全体の37.8%に達した。この計測成功率の低さはマシンビジョンのある処理が原因だと考えられる。それは、車両から最も近くのいくつかの領域が設定した苗列としての条件を満たさない場合には横方向距離を出力しない、というものである。これは水面の反射など苗以外のものが隣接苗列より近くで認識された場合、実際と大きく異なる横方向距離が算出されることを避けるための処理である。しかし、実際には隣接苗列に属する苗を撮影していても、左右画像間での苗の対応決定条件が厳しいため、隣接苗列中のいくつかの苗が認識されず、列としての条件を満たさなくなり、前述の処理が適用され失敗となること多かったものと考えられる。更に成功率を高めるために、隣接苗列の判断基準の調整またはアルゴリズムの改良が必要である。

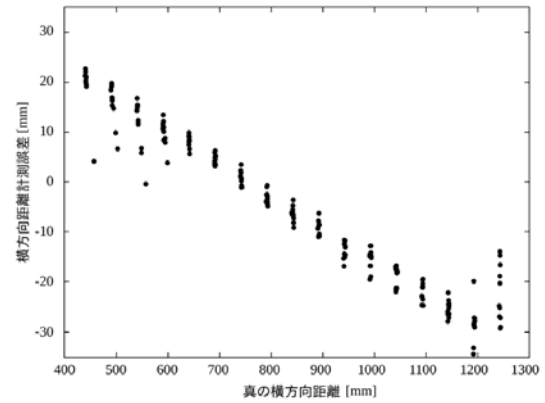


図6 静的計測試験結果

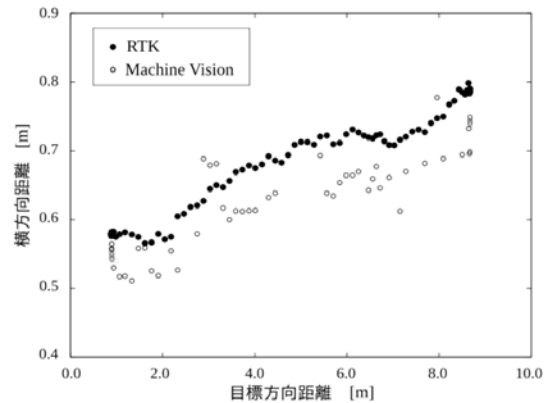


図7 動的計測試験結果

③ 横方向偏差推定アルゴリズムの妥当性検証シミュレーション

図8に横方向偏差の推定を行わなかった場合（位置はマシンビジョンの出力のみ、方位はDGPS コンパスの出力をもとに制御した場合）のシミュレーションによる走行軌跡、図9に推定を行った場合の走行軌跡を示す。図の下方が最初の行程で、図8では行程を重ねる毎に徐々に蛇行していく様子が分かる。アクチュエータの遅れや車両方位によって視野に入る苗が変わってくることから、車両軌跡が一度蛇行すると隣接行程ではそれをずらしてさらに大きくしたものになってしまう。一方推定を行った場合は、隣接する行程で軌跡が目標経路から外れているところでもそれに影響されず走行できていることが分かる。また、推定を行った場合は、第1行程から第10行程まで軌跡の形状に大きな変化が見られず、さらに行程を重ねても安定的な走行が期待できる。

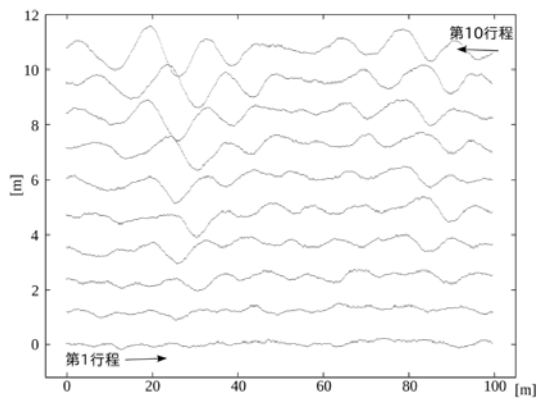


図 8 シミュレーション軌跡(推定無し)

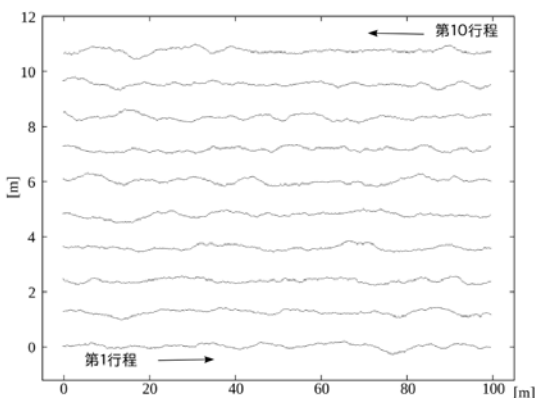


図 9 シミュレーション軌跡(推定有り)

(3) まとめ

低価格で安定的な田植機の自動走行システムの開発を目指して、DGPS コンパスとマシンビジョンの計測値を統合し目標経路との横方向距離を推定するアルゴリズムを考案した。本研究では、想定したシステムで利用する DGPS コンパスの精度評価試験、マシンビジョンの開発と精度評価試験、コンピュータシミュレーションによる横方向距離推定アルゴリズムの妥当性検討を行った。DGPS コンパスの精度評価試験では1時間定地点での測定を行い、測位精度は田植機の自動制御に十分でないが、方位精度は本システムでの利用に十分な範囲であることを確かめた。マシンビジョンは2台のカメラのステレオ視差から奥行きを計測し、車両の方位と傾斜から横方向距離に換算する方式のものを開発した。このマシンビジョンの横方向距離計測精度試験を行ったところ、静止状態での計測では RMS 誤差 16.1mm、動的な計測では RMS 誤差 68.2mm だった。また動的計測では苗の認識率が低く選別法の改善が必要だった。コンピュータシミュレーションによる横方向距離推定アルゴリズムの妥当性検討では、DGPS コンパスとマシンビジョンの精度評価試験で得られた計測誤差のデータを利用して、推定アルゴリズムを使用した場合と使用

しない場合の走行軌跡を比較し、推定アルゴリズムを使用しない場合は行程の進行に伴って蛇行するのに対して、推定アルゴリズムを使用することで軌跡が安定することが確かめられた。

本研究の研究成果は、小規模水田の多い我が国において田植機の自動走行を実現するために有用である。DGPS コンパスとマシンビジョンを使ったナビゲーション手法はこれまでになく、オリジナリティが高いと考えられる。今回の研究では屋外での実験結果を多く行うことができなかったが、今後実際の作業で実験を行うことで実用的な技術として本手法を確立することができると考えられる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表] (計3件)

- ① Sawaki, T., Kaizu, Y., Noguchi, N., Autonomous Rice Transplanter Using DGPS Compass and Machine Vision, The 4th Asian Conference on Precision Agriculture, 5 July 2011, Obihiro, Japan
- ② 海津裕, 崔鍾民, 多目的3次元フィールドマッピングシステムの開発, 日本測量学会北海道支部平成22年度第29回学術講演会, 2011年2月18日, 札幌かでの2.7
- ③ 海津裕, 崔鍾民, 植物群落精密計測プラットフォームの開発—GPSとセンサーの高精度同期手法—, 日本機械学会 ロボティクス・メカトロニクス講演会2010, 2010年6月15日, 旭川とかちプラザ

6. 研究組織

(1) 研究代表者

海津 裕 (KAIZU YUTAKA)

北海道大学・大学院農学研究院・准教授

研究者番号: 70313070