

自律走行車両の GPS 位置計測に関わる傾斜補正

水島 晃*¹・野口 伸*¹・石井一暢*¹・寺尾日出男*¹

要 旨

近年、農用車両の自動走行に必要な位置計測手法として、GPS を使用するのが一般的になっている。しかし、トラクタのキャビン上では、GPS アンテナは地上から約 2~3m の位置に設置され、車両の傾斜によって位置誤差を生じる。本研究では、車両の傾斜による GPS の位置計測誤差の補正法を考案した。傾斜を与えた有人直進走行を行いオフラインで傾斜補正を行った結果、補正を行わなかった場合の横方向誤差は平均 17.1cm であった。これに対し補正を行った場合は平均 2.1cm となり、傾斜による影響をほぼ全て除去することができた。さらに、この傾斜補正法を適用した自動走行実験を行った。4.3m/s の直進走行で傾斜補正を行わなかった走行では、横方向偏差の R.M.S. は 10.4cm であったのに対して、傾斜補正を行った時の自動走行では、R.M.S. は 3.8cm と約 64% の精度向上が確認された。

【キーワード】 自動走行, 傾斜補正, RTK-GPS, ジャイロスコープ

Correction of GPS Positioning by Vehicle Inclinations for Agricultural Vehicle Guidance

Akira MIZUSHIMA*¹, Noboru NOGUCHI*¹, Kazunobu ISHII*¹, Hideo TERAO*¹

Abstract

A GPS is widely used as a positioning system for an automatic vehicle guidance. But, generally a GPS antenna is installed at the top of a vehicle whose height is 2 to 3 meters from the ground, a position error raised from vehicle inclinations (roll and pitch) is included. In this research, to increase travel accuracy of vehicle guidance, we propose the correction method of the position error caused by vehicle inclinations. To evaluate a performance of the developed correction method, the travel test by giving roll and pitch was conducted. The average of lateral error indicated about 17.1 cm, when the vehicle traveled without inclination correction, while the average error was reduced up to about 2.1 cm by introducing the inclination correction. In addition, to investigate the performance under higher velocity, the traveling test in which running speed exceeding 4.0 m/s was also carried out. Without the inclination correction, the R.M.S. error in the lateral direction of the vehicle reached 10.4 cm. On the other hand, when the developed correction method was utilized, the R.M.S. error decreased to about 3.8 cm. It was concluded that the performance of the developed guidance system on high speed travel was

*1 会員, 北海道大学大学院農学研究科 (〒060-8589 札幌市北区北 9 条西 9 丁目 TEL 011-706-2568)
School of Agriculture, Graduate School of Hokkaido University, Sapporo, 060-8589, Japan

satisfied with actual field managements.

[Keywords] automatic vehicle guidance, inclination correction, RTK-GPS, fiber optical gyroscope

I 緒 論

科学技術の進歩に伴い、様々な分野で人間に代わって作業するロボットの開発が行われている^{1)~3)}。農業の分野も例外ではなく、現在日本で生じている労働力不足、農業就業者の高齢化問題等の解決策として、農業機械の自動化、自律化が試みられてきた。さらに、エネルギー問題や環境破壊が深刻化したことに起因して「精密農法 (Precision Farming ; PF)^{4)~8)}」が出現し、自動化、自律化に対する関心はさらに高くなりつつある。しかし、これまで高い走行精度が必要とされる農作業、特にほ場を自由に動きまわる耕うん作業や播種作業等での自律走行の研究は、それを達成させるだけの位置計測技術が確立しておらず、実用化は難しい状態にあった。ところが、ここ 4、5 年に、Global Positioning System (GPS) を始めとする、各種計測センサの高精度化・低コスト化、コンピュータの高速化・低コスト化などによって、かなり完成度の高い自動走行車両の研究報告も発表されるようになってきた⁹⁾¹⁰⁾。

本研究では、外部標識のないオフロード環境下で使用される自動走行システムのための位置計測手法を考案した。外部標識のない環境下での自動走行を実現するためには、絶対的な車両の位置と方位角が必要となる。また、一般の実作業は±10 cm の走行精度が要求され、車両の位置及び方位の計測精度も高いことが必要である。絶対位置計測には高精度な RTK-GPS (Real-Time Kinematic GPS)、方位計測には光ファイバージャイロスコープ (Fiber Optic Gyroscope ; FOG)^{11)~13)} や地磁気方位センサ¹⁴⁾ 等を使用するのが一般的となっており、これらのセンサーをフュージョンすることによって、車両を制御する方法が現在の主流である。^{15)~19)}

農用車両の運動を検討する場合、ほ場を表現する 2 次元の座標平面上に車両重心を投影した点が車両の位置として取り扱われる。しかし、すべてのセンサを車両重心に設置することは不可能であり、GPS のアンテナはその測位原理から、天空の

見通しのよい車両の最上部に設置する必要がある。その高さは、車両のサイズによるが 2~3m に及ぶ。ほ場表面には、大小ランダムな凹凸が存在し、特に高速走行で行う牧草収穫作業などでは車両のロール、ピッチ方向の揺動運動は極めて大きい。現在、RTK-GPS は 2~3cm 程度の精度で測位が可能であるが、車両に 2~3° の傾斜が生じることによって、そのアンテナ位置は 10cm 以上のずれとして求められる。この位置計測精度に与える影響はナビゲーションセンサの誤差として無視できない。そこで本研究では、3 軸式の光ファイバージャイロを用いて車両の姿勢角となるロール角、ピッチ角を検出し、車両の傾斜によって生ずる計測位置のずれを補正する方法を考案し、実際の自動走行システムに適用することによって、その精度、有用性を検討した。

II 傾斜補正法

1. 理論

傾斜補正には、実際に航空機のナビゲーション技術として考案された傾斜補正法に使用されているオイラー角の定義を踏襲した²⁰⁾²¹⁾。地上座標系として Z 軸の正方向を鉛直上方とした直交右手系 (XYZ) を定義する。また、車両座標系として、車両の前方向を y 軸、右方向を x 軸、垂直上方を z 軸とした直交右手系 (xyz) を定義する。地上座標系と車両座標系の概略を図 1 に示す。任意の姿勢のとき y 軸周りに回転させ x 軸が水平になった時、y 軸回りの回転角をロール角 θ_r とし、極性は水平に対し x 軸が右下がり を正とした。さらに x 軸が水平になった状態から、x 軸回りに回転させ、y 軸が水平になったときの y 軸回りの回転角をピッチ角 θ_p とし、極性は水平に対し前上がり を正とした。また地上座標系 (GPS 座標系) XYZ から、X 軸と x 軸のなす角をヨー角 ϕ とし、X 軸から地上座標系の原点回りの右回転を ϕ の正方向とした。

オイラー角とは、このように 3 つの順序を有する回転 ϕ , θ_p , θ_r によって定義される。図 2 に示すように、まず、 $X_0Y_0Z_0$ 系を Z 軸回りに回転角 ϕ

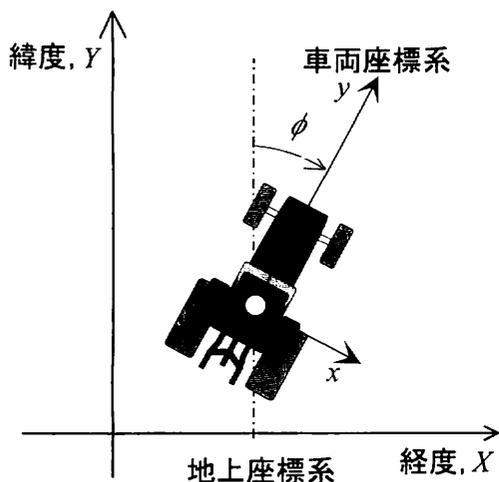


図1 車両座標系と地上座標系

Fig.1 Vehicle coordinate system and world coordinate system

回転し $X_1 Y_1 Z_1$ 系とする。さらに $X_1 Y_1 Z_1$ 系を Y 軸回りに回転角 θ_p 回転し $X_2 Y_2 Z_2$ 系, $X_2 Y_2 Z_2$ 系を X 軸回りに回転角 θ_r 回転し $X_3 Y_3 Z_3$ 系とする。

ここで、GPS データの傾斜による誤差の補正をするためにオイラー角の定義を適用し、各座標軸を水平にした。それぞれの車両座標系の各軸を地上座標系の各軸に平行にする変換行列を考えると、

$$\text{ロール角 } \theta_r, F_1(\theta_r) = \begin{pmatrix} \cos\theta_r & 0 & -\sin\theta_r \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\theta_r & 0 & \cos\theta_r \end{pmatrix} \quad (1)$$

ただし

$$E(-\phi, -\theta_p, -\theta_r) = F_3(-\phi) \cdot F_2(-\theta_p) \cdot F_1(-\theta_r) = \begin{pmatrix} \cos\theta_r \cos\phi + \sin\theta_r \sin\theta_p \sin\phi & \cos\theta_p \sin\phi & -\cos\theta_r \sin\theta_p \sin\phi + \sin\theta_r \cos\phi \\ -\cos\theta_r \sin\phi + \sin\theta_r \sin\theta_p \cos\phi & \cos\theta_p \cos\phi & -\cos\theta_r \sin\theta_p \cos\phi - \sin\theta_r \sin\phi \\ -\sin\theta_r \cos\theta_p & \sin\theta_p & \cos\theta_r \cos\theta_p \end{pmatrix} \quad (5)$$

となる。

ここで、車両座標系における GPS 受信機の位置を (a, b, h) 、地上座標系における GPS 受信機の位置を $(X_{GPS}, Y_{GPS}, Z_{GPS})$ 、補正量を $(\Delta x, \Delta y, \Delta z)$ とすると、

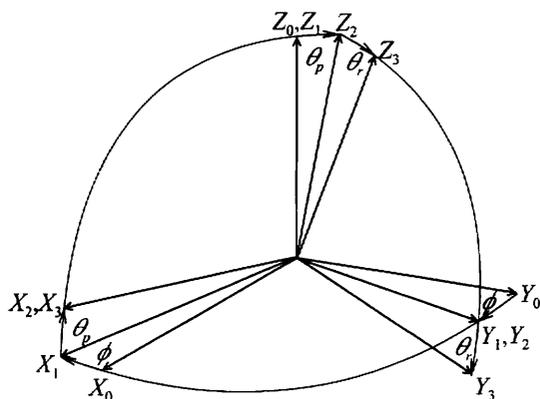


図2 オイラー角の定義

Fig.2 Definition of Eulerian angles

$$\text{ピッチ角 } \theta_p, F_2(\theta_p) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta_p & \sin\theta_p \\ 0 & -\sin\theta_p & \cos\theta_p \end{pmatrix} \quad (2)$$

$$\text{ヨー角 } \phi, F_3(\phi) = \begin{pmatrix} \cos\phi & -\sin\phi & 0 \\ \sin\phi & \cos\phi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (3)$$

となる。したがって車両座標系上のベクトルを地上座標系上のベクトルに変換する行列は

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = E(-\phi, -\theta_p, -\theta_r) \cdot \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \quad (4)$$

$$\begin{pmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{pmatrix} = E(-\omega, -\theta_p, -\theta_r) \cdot \begin{pmatrix} a \\ b \\ h \end{pmatrix} \quad (6)$$

となり、補正後の重心位置 X', Y', Z' は、

$$\begin{pmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_{GPS} \\ Y_{GPS} \\ Z_{GPS} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{pmatrix} \quad (7)$$

となる。

2. 傾斜補正の効果

本研究で考案した傾斜補正法の精度を評価するために、有人運転で直線走行を行った。経路途中に枕木を設置して、左右片側車輪が枕木上を通過するように走行することで車両を傾斜させた。このときの車両方位角、ロール角、ピッチ角及び GPS データを計測してオフラインで傾斜補正を行い、本研究の傾斜補正法の評価を行なった。使用した RTK-GPS は NovAtel 社製 RT-2 で、その公称精度は 2cm、測位周期は 4Hz である。ロール、ピッチ角の計測には日本航空電子工業(株)製慣性姿勢計測ユニット (IMU) JCS-7401A を採用した。JCS-7401A は 3 個の光ファイバージャイロによって各座標軸に対する角速度を測定し、この角速度を積分することによってロール角、ピッチ角を算出する。また、3 個の加速度計により 3 軸方向の加速度が計測でき、地球の重力加速度を計測することによって、ロール角、ピッチ角の累積誤差を補正する機能を有している。ヨー角の計測には日本航空電子工業(株)製の 1 軸式 FOG JG-35FD を使用した。JG-35FD のドリフトは $3^{\circ}/h$ 以下である。これらのセンサを供試トラクタに搭載し、トラクタに搭載されているコンピュータによって AD ボードと RS-232C を介して計測した。また評価基準としてトータルステーション TOPCON 社製光波距離計 AP-L1 を使用した。AP-L1 は測量機として開発され市販されているトータルステーションであり、400m 離れた目標となるコーナーキューブプリズムを約 1cm の位置精度で自動追尾・計測できる。AP-L1 プリズムは傾斜による影響を最小限に抑えるため、図 3 のように GPS アンテナの真下となる PTO 軸付近に設置した。また補正目標については車両の重心ではなく AP-L1 プリズムの位置に補正することとした。したがって、プリズムと GPS アンテナまでの距離は 1.751m となり、(6) 式中の (a, b, h) は $(0m, 0m, 1.751m)$ となった。GPS の計測周期の限界が 4Hz であるため、すべてのセンサの計測周期は 4Hz に設定した。また、GPS のボーレートは 9600bps とした。

図 4 に精度評価実験による走行軌跡を示す。車両進行方向は矢印に示した向きであり、左側車輪



図 3 AP-L1 プリズムの取り付け位置
Fig. 3 AP-L1 prism mounted on the tractor

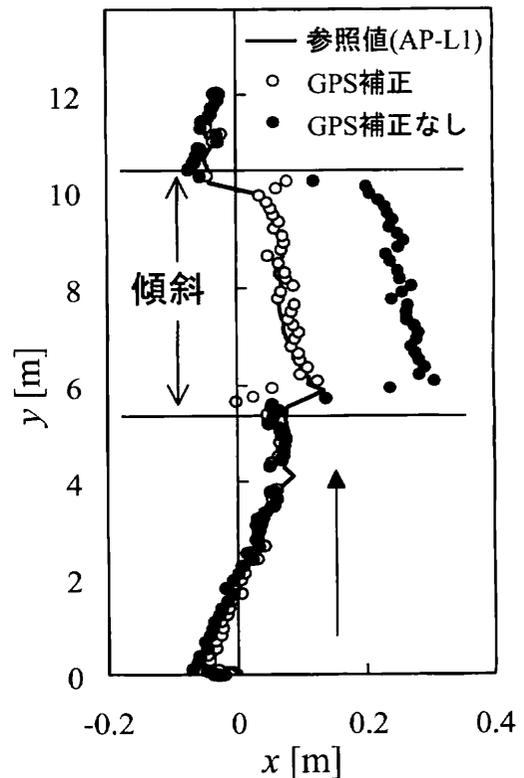


図 4 有人走行試験の走行軌跡
Fig. 4 Trajectory obtained by manual operation

が枕木上を通過するように約 0.5m/s の速度で走行させた。また、図 5 にロール角、ピッチ角、ヨー角、図 6 に補正なしと補正ありの測位誤差を示す。傾斜中のロール角は約 6° で、補正を行わなかった場

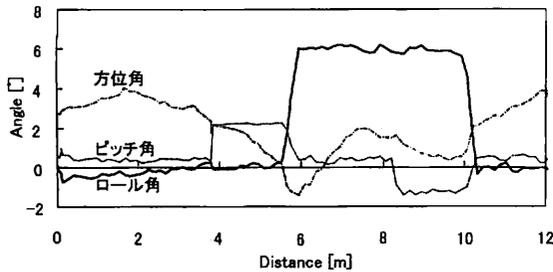


図5 有人運転走行試験時の姿勢角の推移
Fig.5 Transition of roll, pitch and heading angle obtained by manual operation

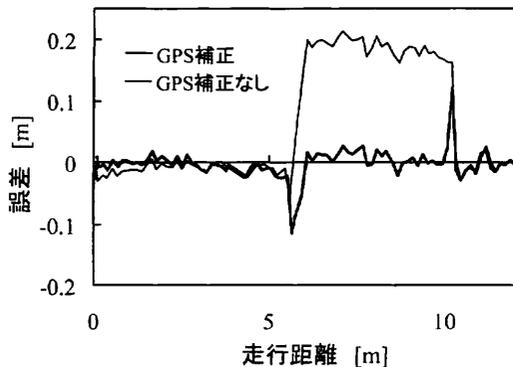


図6 有人走行試験時の誤差の比較
Fig.6 Comparison of errors between corrected and raw GPS data obtained by manual operation

合の測位誤差は平均 17.1cm, 最大 21.3cm であった。これに対し補正を行った場合は平均 2.1cm, 最大 12.1cm であり, ピーク時を除けば最大 2.4cm と傾斜による影響をほぼ除去することができた。しかし, 図から進行方向に対して約 5m と 10m の地点で誤差が大きくなっているのがわかる。これらの地点は傾斜開始点と終了点に一致している。これは, GPS の計測遅れが原因としてあげられ, FOG 出力と IMU 出力との計測タイミングに時間的なずれが生じたためと考えられる。しかし, ロール角が 5° 以上ステップ状に変化する状況は, 実際の農作業の環境ではまれであると考えられる。したがって, GPS と FOG, IMU の計測タイミングを厳密に一致させなくても, 自動走行に要求される精度を満たす十分な補正値が得られる

と判断し, 考案した傾斜補正法を自動走行システムに組み込んだ。

III 自動走行試験

1. 自動走行システムの構成

この傾斜補正を適用した自動走行実験を行った。供試トラクタは, ケース社製 MX240 を自動走行用に改造して使用した。最大出力 179kW と大型で高速走行が可能である。キャビン上部に GPS アンテナと GPS 補正信号受信無線アンテナを取り付けた。(6)式中の (a, b, h) は $(0m, -1.67m, 3.23m)$ となった。またキャビン内部のブレーキペダルの下に FOG を, 座席シート横に GPS 受信機と IMU を取り付けた。FOG は日本航空電子工業(株)製の JG-108FD を使用した。JG-108FD のドリフトは $20^\circ/h$ 以下である。供試 GPS 受信機は Trimble7400Msi を採用し, 前章で使用した NovAtel 社製 RT-2 と同じ RTK-GPS である。L1, L2 の両波の使用が可能であり, 公称精度は 5Hz 計測で 3~5cm である。なお, GPS, FOG, IMU のデータの計測周期は 5Hz, GPS のボーレートは 9600bps とした。

2. 自動走行システムの直進制御法

自動走行に使用したステアリングコントローラは GPS と FOG によって横方向偏差, 方位誤差を推定し, PID フィードバック制御を行う方式を採用した。制御周期は GPS の限界である 5Hz に設定した。直進自動走行時のフローチャートを図 7 に示す。GPS, FOG の精度, 特に GPS の精度が高いため, 本研究で採用した傾斜補正法が基礎実験の精度を満たせば, 横方向偏差と方位偏差によるフィードバック制御で十分直進制御可能と判断した。また, 走行開始地点から約 3m マニュアルで直進走行し, この間の GPS データから算出した絶対方位と FOG の方位をあわせることで, GPS 座標系の方位と車両座標系の初期方位のマッチングをはかった。さらに, 走行中はカルマンフィルタによって GPS, FOG のデータ複合化を行うシステムである。なお, 本研究で使用したカルマンフィルタの構成は別報で報告する。

また, 直進精度を評価するために, 傾斜補正をおこなった走行実験と, 傾斜補正を行わずに GPS の生データで走行を行い, その精度を比較

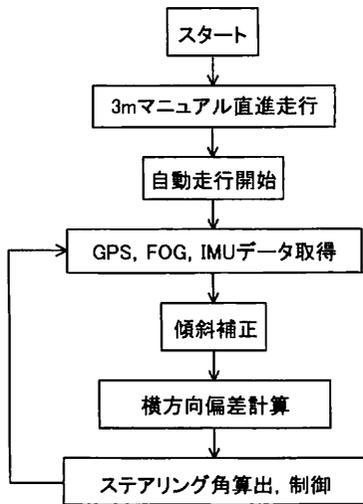


図7 自動走行試験時の走行フローチャート
Fig. 7 Travel flow chart of automatic guidance

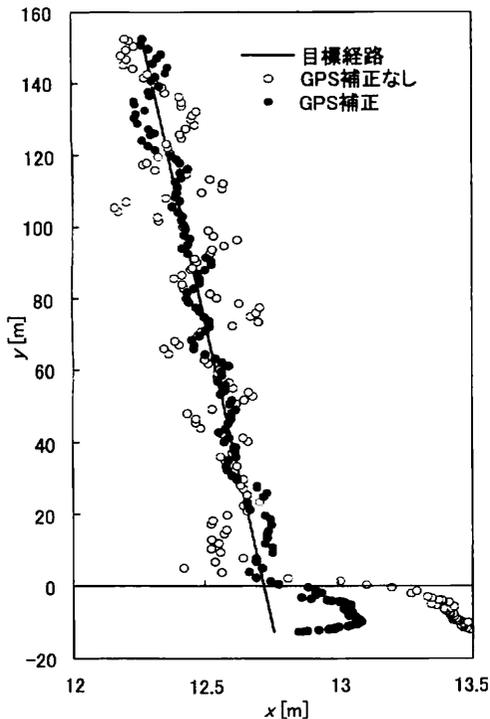


図8 自動走行時の走行軌跡の比較
Fig. 8 Comparison of trajectory obtained by automatic guidance

した。さらに、軌跡評価用にAP-L1を使用し、走行軌跡を把握して、走行精度の評価を行った。なお、AP-L1プリズムはキャビン上部に設置した。試験は、耕うん整地したほ場を使用し、走行距離は約150mである。また、自動走行の設定速度は約4.3m/sと、特に車両が大きく揺動するような、高速で実験を行った。

3. 実験結果および考察

図8に走行軌跡を示す。図8から明らかなように傾斜補正を行った走行の方が、目標経路に対して精度よく走行できていることがわかる。このときの横方向偏差の推移を図9に示す。傾斜補正なしの走行では誤差のR.M.S.が10.4cm、最大誤差25cmであるのに対して、傾斜補正ありではR.M.S.が3.8cm、最大誤差9.6cmと約64%の精度向上が確認された。約4.3m/sと高速な走行にもかかわらず、この精度は、 ± 10 cmの精度が達成された。また、この実験時の方位誤差の推移を図10に示す。方位偏差の誤差も、傾斜補正なしの走行ではR.M.S.が 0.99° 、最大誤差 7.95° であるのに対して、傾斜補正ありではR.M.S.が 0.87° 、最大誤差 -5.1° と、R.M.S.で約 0.12° 精度が向上している。さらに、この図から補正なしでは、走行の振幅が大きくなったために、方位偏差も振動しているが、補正ありでは、小刻みに方位修正されているのがわかる。図11にロール角の推移を示す。傾斜補正なしの走行ではロール角の最大値は 1.42° 、最小値は -2.91° 、傾斜補正ありでは最大値 2.02° 、最小値は -1.92° であった。傾斜補正を行っ

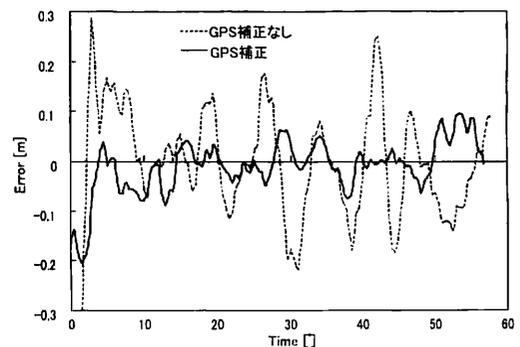


図9 自動走行時の横方向誤差の比較
Fig. 9 Comparison of lateral offset obtained by automatic guidance

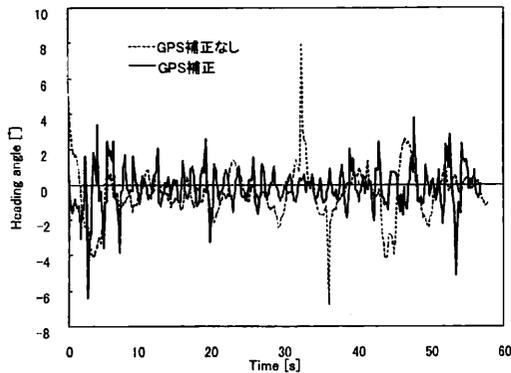


図 10 自動走行時の方位誤差の比較

Fig. 10 Comparison of heading error obtained by automatic guidance

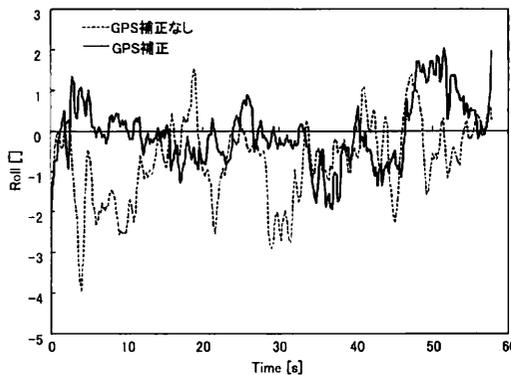


図 11 自動走行時のロール角の比較

Fig. 11 Comparison of roll angle obtained by automatic guidance

た走行時のロール角の変動幅は 3.94° であるのに対して、傾斜補正なしでは 4.33° と変動幅が大きくなっている。傾斜補正を行っていないために位置計測精度、走行精度が低下して、その走行軌跡は最大約 $\pm 20\text{cm}$ の振幅で蛇行している。車両が高速で大きく蛇行したため、地盤の傾斜だけでなく、旋回時の加速度により車両のロール角が増大したことが計測されたロール角の増大原因と考えられる。

IV 摘 要

本研究では、車両の傾斜による誤差の補正法を検討し、その評価を行った。また、開発した傾斜

補正法を適用した自動走行実験を行い、その有用性を検討した。

精度評価実験では、有人運転走行で走行経路に枕木を設置することによって傾斜を与え、走行時のGPS測位データ、ロール角、ピッチ角、ヨー角を計測し、その精度を評価した。補正を行わなかった場合の横方向偏差は平均 17.1cm 、最大 21.3cm であった。これに対し補正を行った場合は平均 2.1cm 、最大 12.1cm であり、ピーク時を除けば最大 2.4cm と傾斜による影響をほぼ除去することができた。このことから、傾斜補正の効果が確認された。しかし、ロール角がステップ状に大きく変化する過渡的な状態では、GPSの時間遅れに起因する誤差の増大が生じた。

自動走行試験では、本研究で考案した傾斜補正法を適用した走行と、傾斜補正を行わない生のGPSデータを使用した走行を行い、その比較を行った。傾斜補正を行わなかった自動走行では、最大 25cm の横方向偏差、R.M.S.は 10.4cm となった。一方、傾斜補正を行った自動走行では最大で 9.6cm の横方向偏差、 3.8cm のR.M.S.と約64%の精度の向上が確認された。また、このときの走行速度は約 4.3m/s と高速であったことから、本方法は水田作、畑作に限らず、牧草収穫作業に対しても有効と判断される。

参 考 文 献

- 1) 宮崎裕道：建設機械の自律化に関する研究，建設機械，34(6) 25-30, 1998
- 2) 大島 寛，伊藤光一郎：無人建設機械の将来性，建設機械，35(8), 66-72, 1999
- 3) 吉瀬 裕：建設機械におけるロボット化技術，シンポジウム「次世代農業へのアプローチ」資料，農業機械学会，15-22, 1997
- 4) Agricultural Primer : The Precision-Farming Guide for Agriculturists, John Deere Publishing Dept., 1997
- 5) 野口 伸：米国穀倉地帯におけるプレジジョンアグリカルチャ，農機誌，61(1), 12-16, 1999
- 6) 野口 伸：マシンビジョンをベースにした精密ほ場管理，シンポジウム「日本型プレジジョンファーマーミグを考える」資料，農業機械学会，1-8, 1998
- 7) 原 令幸：北海道におけるPF農業研究，農機誌，61(4), 19-23, 1999
- 8) Tian, L : New Precision Farming Equipment Research in University of Illinois, セミナー「大規模農業に必要なメカトロニクスとその周辺」資料，日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス部門，13-22, 1998
- 9) O'connor, M.L., G.H. Elkaim, B.W. Parkinson : Carrier-

- Phase DGPS for Closed-Loop Control of Farm and Construction, *Journal of the Institute of Navigation*, 43(2), 167-178, 1996
- 10) 行本 修, 松尾陽介: 耕うんロボットの航法技術, 国際シンポジウム「大規模機械化農業に出現した Bus-System LBS 技術と PA」, 農業機械学会北海道支部, 79-94, 1997
 - 11) 保立和夫: 光ファイバセンサ, *日本機械学会*, 95(2), 26-30, 1992
 - 12) 岩崎浩一: ジャイロスコープとその応用, *農機誌*, 58(5), 89-92, 1996
 - 13) 梶岡 博: 光ファイバジャイロ, *農機誌*, 52(1), 101-105, 1990
 - 14) 行本 修, 松尾陽一: 磁場のセンシングとその応用, *農機誌*, 58(5), 93-96, 1996(15)
 - 15) Reid, J.F.: Precision Guidance of Agricultural Vehicles, セミナー「屋外環境下のロボットにみるナビゲーション技術」資料, *日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス部門*, 1-10, 1998
 - 16) 井上慶一, 大塚寛治, 杉本光穂, 村上則幸, 黎 文: 自律走行のための GPS とジャイロのカルマンフィルタによるセンサーフュージョン技術, *農機誌*, 61(4), 103-113, 1999
 - 17) 井上慶一, 大塚寛治, 杉本光穂, 村上則幸, 内山雅之, 射落周幸: GPS とジャイロを用いたトラクタの自律走行技術, セミナー「屋外環境下のロボットにみるナビゲーション技術」資料, *日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス部門*, 11-22, 1998
 - 18) Noguchi, N., J.F. Reid, J.D. Will, E.R. Benson: Vehicle Automation System based on Multi-Sensor Integration, *ASAE, Paper 983111*, 1998
 - 19) 長坂善雄, 谷脇 憲, 大谷隆二, 重田一人, 佐々木泰弘: 自動走行田植機の開発, *農機誌*, 61(6), 179-186, 1999
 - 20) 加藤寛一郎, 大屋昭男, 柄沢研治: 航空力学入門, 東京大学出版会, 1-22, 1982
 - 21) 太田裕文: 飛行機のダイナミクスと制御, 計測と制御, 36(7), 512-517, 1997
- (原稿受理: 1999 年 10 月 22 日・質問期限: 2000 年 9 月 30 日)