

# アグリロボット要素技術の研究

光井 輝彰      小林 孝浩\*      田畑 克彦

## Development of Basic Technologies for Agricultural Robots

Teruaki MITSUI   Takahiro KOBAYASHI\*   Katsuhiko TABATA

あらまし 本研究は農作業の補助や農産物の高品質化など、将来的に農業分野でロボット技術を活用するために必要となる要素技術について調査・研究を行う。県内には中山間地の比較的小規模な圃場が多いことから、圃場への導入が容易な小型のロボットを想定して移動機構の開発を行った。動作実験では水田内での走行性能とRTK-GPSを利用したロボットの位置制御について検討した。

キーワード ロボット、農業、水田、不整地走行、RTK-GPS

### 1. はじめに

日本の農業を巡る情勢は、食料自給率が依然と低い水準にあることや、農業従事者の高齢化が著しいなど深刻な状態にある。さらに、海外からは農産物の貿易自由化を迫られ、国内では食の安全に関する議論の高まりから今まで以上に高品質な農産物が要求されるなど、日本の農業のあり方が全般的に見直されようとしている。このような状況の中、官学を中心に農業生産のロボット化にかかわる研究が進展している<sup>[1]</sup>。しかし、コストと安全性の問題を抱えていることから、近年ではロボットの小型化や農業の情報化への応用が期待されつつある。これらは県土の約7割が中山間地である岐阜県の農業に対しても応用が期待でき、農地の規模を拡大して生産性を高めるのではなく、小規模でも高品質な農産物を生産して差別化やブランド化を図る場合等に有効である。このような観点から、本研究は中山間地の比較的小規模な圃場において、除草等農作業の補助や有機栽培等農産物の高品質化に小型のロボットを活用することを目指し、そのために必要となる要素技術について調査・研究することを目的とする。ロボットの基本的な機能である移動機能には、圃場環境毎に最適な移動技術が求められ、その条件は一様ではない。そこで、ロボットが稼動するには最も厳しい環境の一つといえる、泥と水の不整地である水田を対象とした移動技術について検討を行う。本年度は次の3点について開発を行った。1) 走行性安定化のための機構改善。2) 基本的な制御機能としてジャイロによる姿勢制御。3) RTK-GPS<sup>[2]</sup>を使用した移動制御。1と2に関しては実際に水田で動作実験を行い、3は平坦な屋外のコンクリート上で実験を行った。

\* 情報科学芸術大学院大学

### 2. 移動機構の開発

有機栽培技術の高度化に関する研究<sup>[3]</sup>で開発したクローラユニットをベースとして開発を行った。クローラユニットはベルトの取り回しを工夫して、制御基盤やモータなどの電装部品を高い位置に設置して水から隔離している。これにより、ロボットの防水対策が容易になり、稲を跨いで走行することで稲へ与えるダメージを軽減することができる。しかし、重心が高くなったことで安定性が悪くなり、土壌の凹凸による影響を受けやすい。予備実験では、凹凸へのめり込みや乗り上げ、あるいは柔らかすぎる土壌を自ら掘り込むことにより、転倒やスタックに陥る危険性が確認されていた。

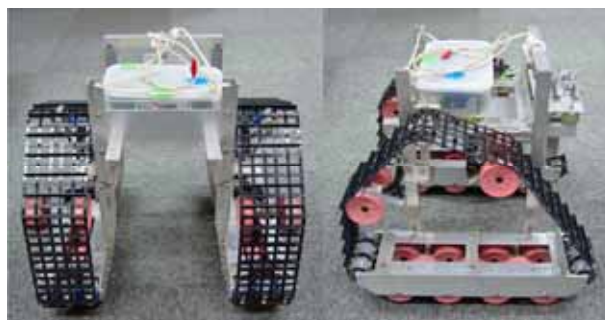


図1 移動機構

表1 ロボット諸元

全長	400mm
全幅	400mm (クローラ間200mm)
全高	370mm (クローラ間280mm)
全備重量	3,800g
モーター、ギヤ比	380モーター 59.77:1
バッテリー	NI-MH 3300mAh
本体フレーム	A6063
クローラベルト プーリー、スプロケット	KYOSHOブリザード プラスチックパーツ



図2 旋回時の様子（前後クローラユニット連結機構あり）

- ：稲の条に沿って前進
- ～ ：前方クローラが90°旋回（同時に、リンク長を保ちながら前方クローラを少し右へ進め、後方クローラは少し前進）
- ～ ：前後のクローラがリンク長を保ちながらそれぞれ前進
- ～ ：前方クローラが次の稲条を跨ぐように90°旋回、リンク長を保ちつつ後方クローラも90°旋回
- ～ ：前後のクローラがリンク長を保ちながらそれぞれ前進
- ～ ：前方クローラの後で、後方クローラが稲の条を跨ぐように90°旋回し、稲の条に沿って前進

### 2.1 クローラユニットの改良

図1にクローラユニットの外観を、表1に諸元を示す。水田での予備実験では、土壌の凹凸への引っかかりや泥の巻き込みにより、クローラベルトがよじれて外れることが多かった。そこで、接地面とテンショナープリーの数を増やし、クローラベルトが極力ねじれないようにした。また、プリー内部を発泡ウレタンで充填して水や泥の浸入を防ぐとともに、クローラ自体に浮力を持たせた。接地部分のプリー全体で浮力は約550gとなる。走行実験では、ベルトが外れることは無くなり、土壌への沈み込みも軽減した。改良前はスタックしたり転倒したりしていた土壌条件を走破できるようになり、走破性が向上した。

### 2.2 連結機構の開発

クローラユニットは稲を跨ぐ形で横方向に接地面積を広げているが、重心が高く前後方向のバランスが悪い。接地クローラ長を長くすれば安定するが、旋回時に必要な面積と摩擦が大きくなり弊害が多い。そこで、クローラユニット2台をリンクで前後に接続することにより、前後方向の安定性の向上を図った。リンクと各ユニットの接合部には回転軸を設け、回転角度はアブソリュートエンコーダで計測できる仕様とした。旋回時の様子を図2に示す。前後ユニット間の距離を保ちながら、前方のユニットから順に旋回を行うことで、旋回時に必要となるスペースをユニット単体とほぼ同じ大きさに抑えることができる。リンク長は図2の状態では前後クローラユニットの中心距離が600mm（稲条間隔の2倍）となるので、前方のユニットは後方のユニットを支点として旋回することで、確実に次の条間に進入することが出来る。また、リンク部分は各ユニットと緩衝材を介して接続しているので、様々な土壌表面形状に柔軟に対応することが可能である。



図3 走行実験の様子

クローラの沈み込みによるスタックは無く、走行中は揚力により沈み込みの量はさらに減少する。上2枚は標準的な水量（約10cm）、下2枚が落水後。落水後はクローラベルトへの泥の付着と、接地部の沈み込みが確認できる。

### 2.3 圃場走行実験

図3に代掻き後1週間の水田における走行実験の様子を示す。水田内の水量が少ないと、クローラに泥が付着したままで、重量と摩擦の増加によりロボットの動作効率が極端に悪くなる。ある程度の水量がある方がクローラに付着した泥が動作中に洗い流されて動作が良好であった。水田内の土壌の柔らかさに関しては、柔らかすぎると推力を得られる以前に土壌を掘り込んでスタックしてしまうため、制限が必要である。実験では田植えをする際の標準的硬さ（稲が倒れない着床可能な土壌の硬さ）であれば、問題なく走行可能なことを確認した。

クローラユニット単独の場合と比較すると全般的に走破性と安定性が向上しており、リンクを解してお互いに補助し合うことで、水田内に想定される足跡等の凹凸は問題なくクリアできる。

### 3. ロボットの姿勢制御

これまで、水田での走行実験においてロボットを意図した方向へ直進させることは非常に困難であった。田植え時の足跡など土壌の凹凸にクローラがハマり込んでしまったり、あるいは平坦な土壌であってもクローラベルトがスリップしたりすることが主な原因であり、ロボットは容易に想定外の方角に向いてしまう。これは、連結機構を持たせても回避できない。そこで、ジャイロセンサーを用いた姿勢制御機能を開発し、その有用性を検証した。

#### 3.1 システムの構成

図4にシステム構成を示す。本システムは移動機構であるクローラユニット（アイガモロボット）本体と、これを制御する外部のPCとから構成される。クローラユニットとPCは無線で接続されており、プロポ型ジョイスティックから入力される移動速度（モーターへの出力値）と姿勢（制御目標値としての方向）を、PCを介して与える。クローラユニットにはマイコン（PSoC）が搭載されており、模型用のアンプにPWM波形を与えることで、左右のモーター出力を制御している。搭載されたジャイロからの出力はマイコンにより50Hzで積分され、クローラユニットの垂直軸周りの回転運動を角度として検出する。PCからは5Hzで制御値の更新が可能であり、後述する姿勢制御の有無の切り替えが指示できる。

#### 3.2 姿勢制御

ロボットの姿勢はジャイロ出力を積分して得られる角度をフィードバック信号として、速度系アルゴリズムでPID制御する。ここで得られる操作量は左右で符号を変えて、左右クローラの速度の変化量として反映される。クローラユニットへの入力値は、線形補正した無負荷の状態における入力と速度の関係を用いて正規化を行う。制御周期はクローラユニットの動作特性を考慮して10Hzとした。図5に制御モデルを示す。制御はマイコン内部で行っている。PID制御の各パラメータは限界感度法を用いて設定した。なお、ジャイロのニュートラル検出はマイコンの起動時とリセットコマンド送信時の2秒間で行っている。

#### 3.3 姿勢制御実験

実験は10m程度の水田をテストフィールドとしてクローラユニット単体で行った。姿勢制御が無い場合は平坦な路面でも進行方向のずれが蓄積し、10m進むとその方向は大きくずれ、目標とした到達点からの位置のずれも大きくなった。

図6は姿勢制御の安定性を検証するために、走行条件を厳しく設定したときの実験結果を示す。土壌表面は障害物や足跡により凹凸を強調し、水の分布を偏らせて滑りやすさにも変化を持たせた。この条件でクローラユニットを往復させたときの直進性を観察した。図を上下に貫いている直線は初期姿勢の方向を延長したものであり、

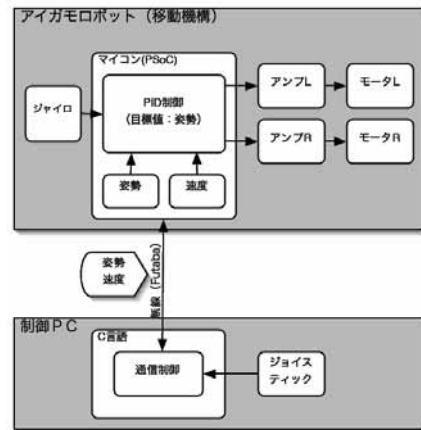


図4 システム構成 1

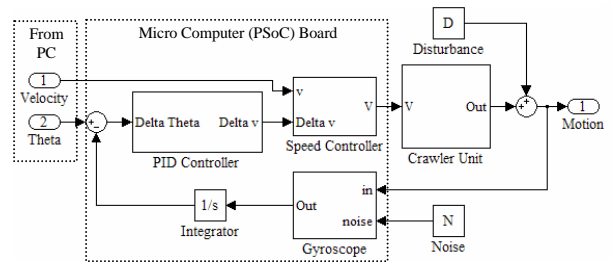


図5 ロボットの制御モデル

Theta: PCからのクローラの姿勢(角度)入力  
 v: PCからのクローラ直進速度入力  
 V: クローラユニットへの速度入力(左右モーターアンプへのPWM)

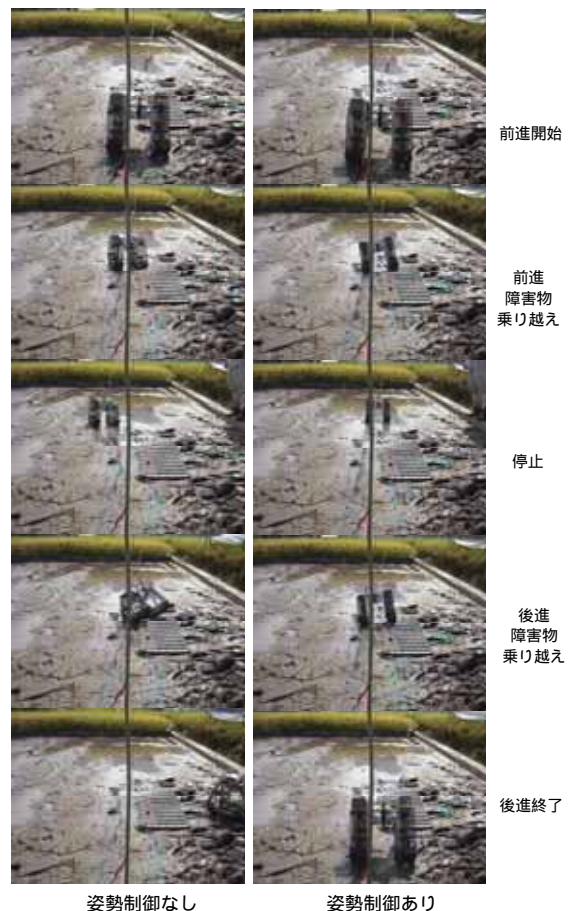


図6 姿勢制御実験(上から順に前進・停止・後進)

姿勢制御なしでは凹凸で進行方向が変わってしまう。姿勢制御ありでは路面状況によらず姿勢が維持され、ほぼ同じ位置へ戻って来ることが出来る。

理想的に動作すればこの直線に添って移動することになる。ジャイロによる姿勢制御が無い場合(同図左)は、凹凸を乗り越える際に大きく姿勢を崩し、直進性を保つことは不可能であった。一方、姿勢制御を行った場合(同図右)には、常に姿勢が安定しており、軌跡も一直線状になっている。一連の実験において、制御による異常な振動やオーバーシュートが生ずることはなく、10mの区間を往復する限りではジャイロのドリフトによる影響もなかった。

この姿勢制御はジャイロの応答が速いことから、高周波領域における姿勢安定を図ることが期待できる。次章で述べる位置制御と併用すれば、アグリロボットの走行経路を適切に制御するために非常に有効であると考えられる。

#### 4. RTK-GPSによるロボットの位置制御

圃場内でロボットを制御する際にロボット自身の位置情報は非常に有力となる。近年、屋外での移動体制御にRTK-GPSを使用する事例が増えつつあるが、農業分野では大型農耕機での利用がほとんどである。本研究では小型ロボットによる不整地走行において、RTK-GPSの利用を試みる。基地局はTrimble5700とZEPHYRジオテックアンテナ、移動局はTrimbleBD950とZEPHYRアンテナを使用した。

##### 4.1 RTK-GPSによる計測実験

RTK-GPSは基地局と移動局で構成され、それぞれが受信したGPS衛星からの電波を、搬送波の位相レベルで実時間解析する。この結果を元に、既知点に設置された基地局では補正情報を生成して移動局に送信し、移動局ではこの補正情報を利用してcmオーダーの精度の高い位置情報を出力することが可能となる。ただし、補足衛星数やその配置により測位精度が左右されることから、実際の使用環境における計測状況の確認を行った。

図7に計測実験の様子を、図8に移動局を静止させた場合、地表で直線動作させた場合、水平高さの異なる場所に順設置した場合の計測結果を示す。計測結果は緯度経度情報を平面直角座標<sup>[4]</sup>に変換した後、任意位置との相対距離として表した。スペック上の精度は水平精度(1

シグマ：標準偏差)が1cm + 1ppm、垂直精度(1シグマ)が2cm + 1ppmであり、ほぼスペック通りの精度が得られることを確認した。計測時の周辺環境の影響については、アンテナ角度とアンテナ上空の見通しに変化を与えて調べた。その結果、実験時の状況では、前者は前後45度程の傾斜まで、後者はアンテナ付近を人が歩く程度ならば、計測結果に影響が出ないことを確認した。



図7 RTK-GPS計測実験の様子

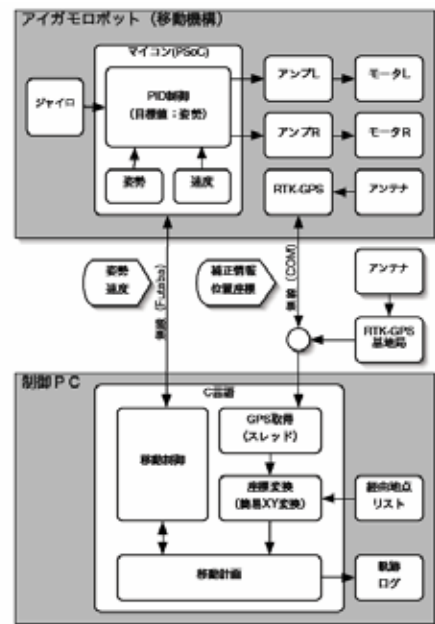


図9 システム構成2

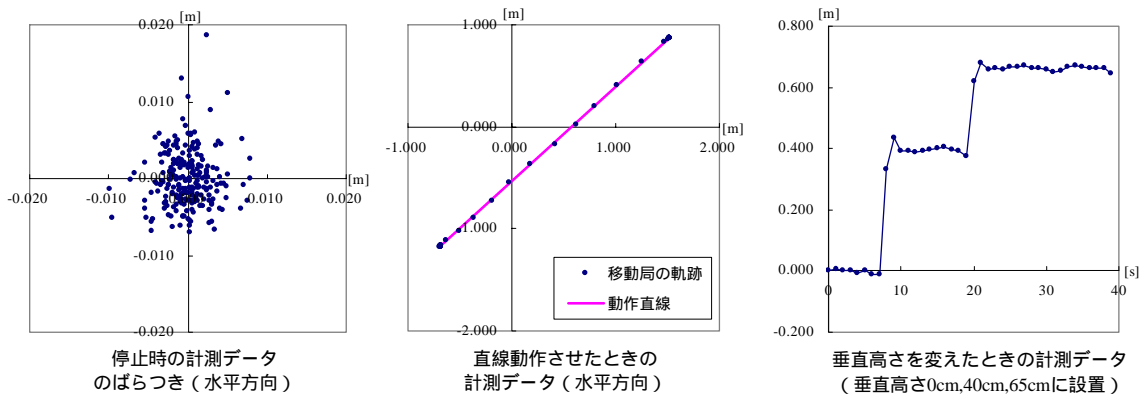


図8 RTK-GPS移動局の計測結果

4.2 RTK-GPS移動局システムの搭載

システムの構成を図9に示す。3.1のシステムをベースとしてRTK-GPS移動局を搭載し、GPSの補正情報と測位データの通信用に無線を追加するなどの改良を行った。制御PCとロボットとの通信は5Hz、移動局への補正情報の送信は1Hz、移動局の測位情報は5Hzで取得する。RTK-GPS移動局システムを搭載したロボットを図10に示す。

4.3 位置制御手法

ここでは、GPSを利用した制御の手始めとして、GPSの座標系で与えられた既知点に向かって走行する、という単純なタスクを実現するためのアルゴリズムを提案する。まず内部状態を表す変数として、自己の推定方向とこれに含まれる誤差、自己の現在座標と目標とする通過地点の座標を持つ。主な制御動作は、進行方向の推定、進行方向の修正(ステアリング)の二つからなる。図11は、任意の直進区間で自己進行方向を推定する様子を示す。3章の姿勢制御で直進するローバーは、GPSから逐一送られてくる現在座標を元に、進行方向を推定する。その際、GPSの計測誤差を踏まえ、推定方向とこれに含まれる方向の誤差を計算する。図の円は、過去のある時点でのローバーの位置と、現在のローバーの位置を示し、その周りの円は計測誤差を示している。二つの円の中心を貫く直線を推定方向とし、接線がなす角を方向誤差とした。直線区間が長くなるほど方向誤差は小さくなるため、内部状態と比較して精度が高い情報が得られた場合に、逐一状態を更新するものとする。図12は、進行方向の修正(ステアリング)制御の様子を示している。状態Aのように、目標到達地点が誤差を含めた推定方向に含まれていればステアリング制御は行わない。さらに前進して状態Bのように方向のずれが認識できた段階で方向の修正を行い、その時点で計測された位置から目標地点へ向かう方向と推定方向との差に相当する角度分の方向修正を行う(状態C)。この方向修正は3章の姿勢制御により行う。

本手法では、進行中にロボットの進行方向を推定することで、ジャイロのドリフトによる影響を軽減することが期待でき、実験はロボットの姿勢方向を意識することなく任意の状態から開始することが出来る。

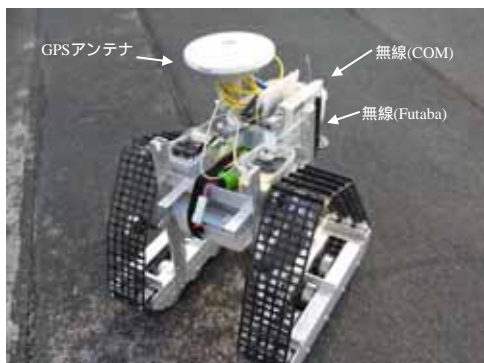


図10 RTK-GPS移動局システムを搭載したロボット

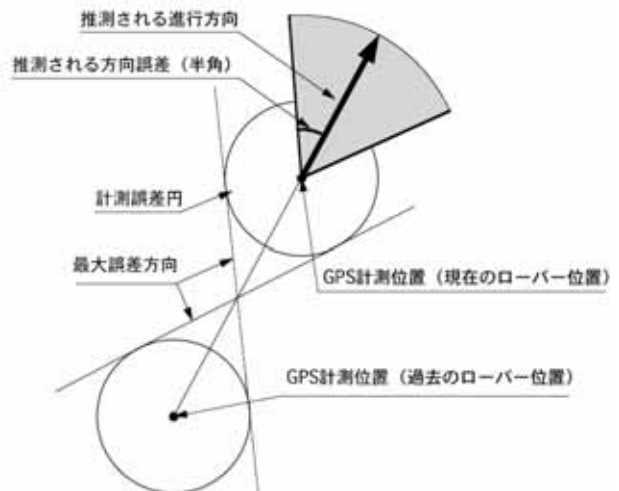


図11 自己位置と進行方向の推定

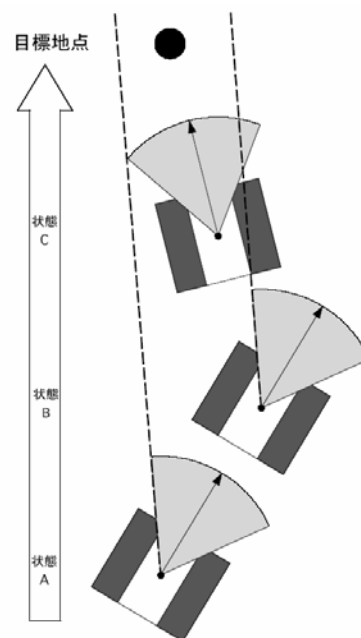


図12 走行中の方向の制御

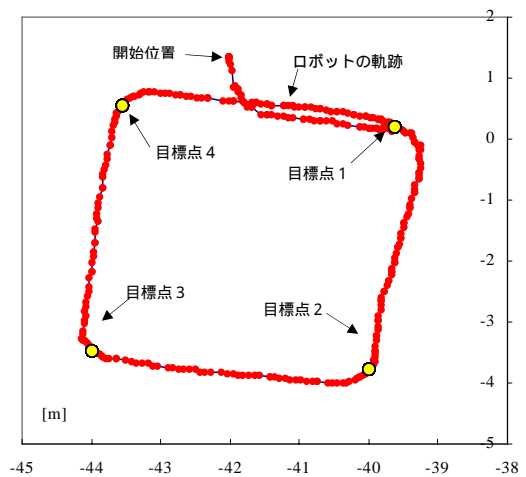


図13 位置制御実験の計測結果

#### 4.4 位置制御実験

4.3のアルゴリズムの妥当性を検証することを目的として、建物の屋上(コンクリート上)で実験を行った。実験は、あらかじめ計測した4つの既知点(図10の目標点1~4)を順に通過させるもので、最初の目標点1から順次このアルゴリズムを用いて到達させ、目標点4に到達した後は目標点1に到達させて終了とした。目標点に到達して次の目標点を目指す際には、加減速の調整も行い、通信遅れやロボットの挙動の遅れなど系全体の遅れに配慮した。図13に計測結果を示す。この結果は上手く動作したときの一例であり、指定した4点を精度良くローバーが通過していることが確認できる。しかし実験中には、推定方向の精度を十分に上げられず、軌跡が蛇行したり、目標地点の近くで円を描くなどの動作も観察された。今後はこれらの対処を行うとともに、既知点を通過するだけでなく、指定した点を通過する際の姿勢とそのためコース取り、点間を結ぶ線分に沿った走行方法などを検討する必要がある。

#### 5. まとめ

水田内を移動するための移動機構の開発と制御方法の検討を行った。今後は、前後クローラユニットの協調動作手法を検討するとともに、GPSによる位置制御手法を発展させ、圃場内の任意の軌道をロボットが自律的に走

行することを目指して開発を進める。水田での動作実験では、実際の現場で想定通りの動作をロボットが行えるかを確認、圃場でロボットを活用する際の課題を調査する予定である。

#### 謝辞

本研究の圃場実験は中山間農業技術研究所で行いました。実験圃場の準備と実験中の多大なる協力に深く感謝いたします。

#### 文献

- [1] 鍵谷俊樹, 瀧孝文, 徳原功, “有機物施用による高冷地の良食味米生産技術-マルチ用再生紙利用による減農薬稲作の確立-”, 平成4年度岐阜県高冷地農業試験場研究年報, pp.21-22, 1993
- [2] 谷口正治, 鍵谷俊樹, 瀧孝文, 徳原功, “有機物施用による高冷地の良食味米生産技術-レンゲ利用による有機質栽培技術-”, 平成3年度岐阜県高冷地農業試験場研究年報, pp.21-22, 1992
- [3] 稲葉光國, “除草剤を使わないイネづくり”, 民間稲作研究所編, 農分協, pp47-51, 1999
- [4] “平面直角座標への換算”, <http://vldb.gsi.go.jp/sokuchi/surveycalc/bl2xyf.html>