

水田用小型除草ロボット(アイガモロボット)の開発

— 自律走行のためのハードウェア検討 —

田畑 克彦 光井 輝彰 稲葉 昭夫 平湯 秀和 田中 等幸

Development of a Small Weeding Robot "AIGAMO ROBOT" for Paddy Fields

- Development of Robot System for Autonomous Drive Control -

Katsuhiko TABATA Teruaki MITSUI Akio INABA Hidekazu HIRAYU Tomoyuki TANAKA

あらまし 現在、我々は水田内の新たな除草手段として、水田用小型除草ロボット(アイガモロボット)の開発を進めている。本ロボットは、水田内を走行するだけで抑草効果が得られ、慣行農業で多用されている化学農薬の使用量を低減し、環境に優しい農作業を行うことが可能である。平成20年度からは経済産業省「地域イノベーション創出研究開発事業」の補助を受け、ロボットの実用化を目指した開発を進めている。本事業では、農業者の負担を軽減するために、対象とする水田に一定の条件を設定したうえで、ロボットが自律して走行(除草作業)することを目指している。本稿では、自律走行のための走行制御コントローラについて、ハードウェアの検討及び組み込みソフトウェアの開発を行い、走行実験により基本動作を確認したので報告する。

キーワード 小型除草ロボット、自律走行システム、組み込みソフトウェア

1. はじめに

食の安全や環境に関する意識の高まりの中で、水稻栽培においても有機栽培や減農薬栽培などの安全で環境負荷の少ないクリーンな農業が行われつつある。この農業の最大の課題は雑草対策であるが、これまで様々な手法が試みられているにもかかわらず、これを解決する有効な手段は見いだされていない。

この課題に対して、我々は小型除草ロボット(アイガモロボット)を用いた除草手法を提案し、その有効性を確認してきた^[1]。これまでに開発したロボットは、走行による抑草効果の確認を目的としたラジコン操作による実験用であったが、今後ロボットを実用化するためには圃場内での自律走行機能が必要となる。しかし、あらゆる条件の下でロボットを自律走行させる事は現実的でない。そこで、本研究では一定の条件を設定した水田において、ロボットの自律走行の実現を目指す。本年度は、上記自律走行のための制御コントローラの基本ハードウェアの開発、高速な画像処理を行うための画像処理ユニット基本機能の開発および走行制御アルゴリズムの基礎検討を行った。

2. 制御コントローラのシステム構成

水田用小型除草ロボットへの要求や使用用途を考慮し、制御コントローラのシステム構成について検討する。

開発する小型ロボットに要求される制御コントローラの主な仕様を以下に示す。

- ・画像処理により追従すべき稲列を検出し、その他の各種センサの情報と統合して、左右のクローラを制御し、圃場内を自律走行する。
- ・遠隔操作も可能とする。

制御コントローラは、その処理内容から、走行制御ユニット、画像処理ユニット、および各種センサ類から構成される(図1)。画像処理ユニットは、カメラ画像を取り込み画像処理により稲列を検出する。走行制御ユニットは、画像処理ユニットの処理結果と、各種センサ類(ジャイロセンサ、加速度センサ等)の情報から、実際にロボットの走行制御を行う。

なお、画像処理ユニットに関しては、ロボットの方向転換をスイッチバックにより行うことを想定し、ロボットの前方と後方に設置している。

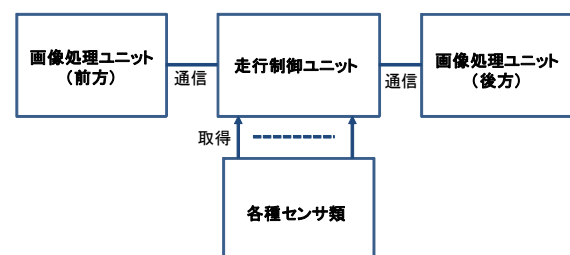


図1 水田用小型除草ロボットの制御コントローラ構成

2. 1 画像処理ユニット

画像処理ユニットは、本ユニットの処理結果に基づいてロボットの走行制御を行うことから、リアルタイムに画像処理を行う必要がある。これを組込システムで実現する方法として、フィルタリング等の画像処理をハードウェアで高速に処理し、かつ、画像の取り込みと画像処理を平行で実行することが考えられる。

この考えに従って、画像処理ユニットの仕様を次のように定めた。

- ・入出力部：カメラなどの撮像部から画像データを取得でき、また、デバッグのための画像表示部としてLCD（液晶ディスプレイ）を接続できること。
- ・外部メモリ：画像処理前および画像処理後のデータに対し独立にアクセスできるよう、フレームデータサイズ以上のデータ容量を持つものが、最低でも2つ以上あること。
- ・画像プリプロセッサ部：高速な信号処理を行い、かつ極力小型化するため、できるだけ多くの機能を1つのチップで実現する。よって、並行かつ高速処理が可能なFPGAが搭載されていること。
- ・稲列検出処理部：画像処理アルゴリズムの開発・実装や走行制御コントローラとの通信については、C言語により比較的容易かつ柔軟に開発可能なマイコンを有すること。

ここで、稲列検出処理部を設けた理由は、FPGAにおいては、ドライバ回路等のハードウェアに近いところからHDL言語で開発する必要があり、さらに、マイコンに比べてデバッグ環境が整っていないことから、すべての機能を画像プリプロセッサ部で実現するためには、多くの時間を必要とするからである。

本研究では上記仕様を満たす基板として、(株)イーエスピー企画のCQ-IMGP基板（表1）を採用した。

2. 2 走行制御ユニット

走行制御ユニットは、画像処理情報やセンサ情報に基づいてロボットの走行を制御する。このために必要なインタフェース機能を次に示す。

- ・画像処理ユニットとの通信
- ・各種センサやスイッチの信号の取り込み
- ・左右のモータの駆動
- ・内部状態（異常箇所等）の表示
（農業者とのインタフェースとして必要）
- ・デバッグインタフェース

本研究では、これらの機能をコンパクトに実装するため、必要なI/Oを1つのLSIの中に組み込んだマイコンモジュールをコアに走行制御ユニットを構成することとし、安価かつ低消費電力で高い処理パフォーマンスが確保できることから、ARM CORTEX-M3（STM32F103ZE, 144pin）を使用することとした。

また、本ユニットの入出力（PIO, A/D）端子については、自律走行戦略検討におけるセンサ構成の変更に柔軟に対応することを考慮し、可能な限りのマイコンの入出力端子を割り付けた。

開発した走行制御コントローラの構成図を図2に示す。点線内がコントローラ基板である。

3. 画像処理ユニット基本機能の開発

本年度は画像処理ユニットに関して、画像処理を行うための基本機能を開発した。開発した基本機能の機能ブロックを図3に示す。各ブロックの処理の概要は次の通りである。

3. 1 画像プリプロセッサ部

画像プリプロセッサ部は、その要求される機能から、画像取得回路群、内部メモリおよびメモリアクセス回路群、画像表示回路からなり、並列処理を行うために、FPGA内部に構築した(図3の(1),(2),(3)のハッチング領域)。それぞれの回路の機能について、以下に示す。

(1) 画像取得回路群

- ・CMOSカメラから毎秒30フレームで送信されるVGA(640×480ピクセル)のYUV422形式の映像データの中から輝度（Y）データのみを8bit階調で取得する(図3①)。

表1 画像処理ユニット基板（CQ-IMGP）の主な仕様

機能項目	仕様等
高速データ処理部	FPGA x1: Xilinx社 XC3S1200E PROMx1: Xilinx社 XCF04s
高機能データ処理部	マイコンx1: STM社 STR912FA(ARM9)
外部メモリ	SRAMx2: シングルポート 2Mbyte x2
画像インタフェース	
画像取得	接続コネクタx5: PFC20pin x2, PFC30pin x1, PFC24pin x2
画像表示	デジタルLCD接続コネクタx2: PFC33pin x1, PFC40pin x1 アナログLCD接続コネクタx1: Dsub15pin DAコンバータ x1: アナログLCD表示用
通信インタフェース	CANx1, USBminix1, RJ45x1, JTAGx2(マイコンx1, FPGAx1)
その他	SDカードスロットx1, 赤外線LED投光コネクタx2 LCDバックライト用コネクタx1 等

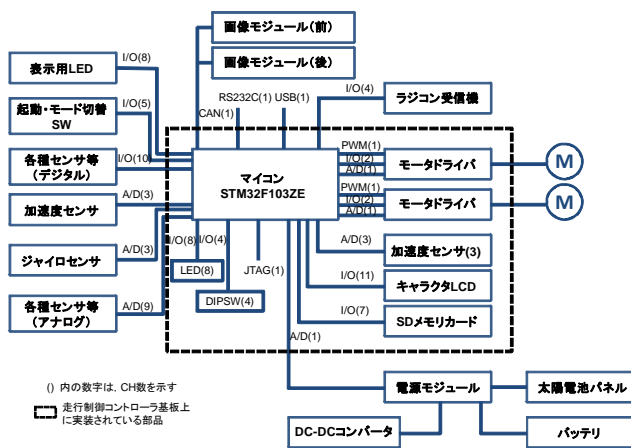


図2 走行制御ユニット

- 取得したVGAサイズの輝度データをQQVGA (160x120) サイズに縮小する。(図3②)
- (2) 内部メモリおよびメモリアクセス回路群
<内部・外部メモリへの書き込み>
- 画像取得回路群で取得したQQVGAサイズの輝度データを、FPGA内に構築した内部メモリ (BRAM1, 図3④) に格納する (図3③)。
- マイコンからデータ (例えば画像処理後のフレームデータ) の書き込み命令に対して、データベース上に出力されているデータを指定されたアドレスの内部メモリ (BRAM2) に書き込む (図3⑤)。
- 画像取得回路群で取得したVGAサイズの輝度データを、外部メモリ (SRAM1, 2) に書き込む。片方の外部メモリに1フレーム格納したら、次の1フレームはもう一方の外部メモリにデータを格納する。(図3⑥)
<内部・外部メモリからの読み出し>
- 画像表示回路からのQQVGAデータ読み出し命令に対しては、内部メモリ (BRAM2) から、マイコン側の書き込みデータ (画像処理後のフレームデータ等) を読み出し、画像表示回路に送信する。内部メモリはデュアルポートメモリのため、読み出しと書き込みが同時に行える。(図3③)
- マイコンからのデータ読み出し命令に対して、命令で指定されたアドレスのデータを内部メモリ (BRAM1) から画像処理前のデータを読み出し、マイコン側のデータベースにそれを出力する。(図3⑤)
- 画像表示回路からのVGAデータ読み出し命令に対しては、書き込み中でない外部メモリからフレームデータを読み出し、画像表示回路に送信する。(図3⑥)

(3) 画像表示回路

画像表示回路は、画像表示部(LCD)へ出力するためのコントロール回路で、主にデバックのために用いる(図3⑦)。表示可能なフレームデータには、画像処理を行っていないVGAサイズのフレームと、画像処理後のQQVGAサイズのフレームがあり、基板上のディップスイッチでどちらのフレームを表示するかを選択する。これにより、両者の画像を比較できるようにした。

また、本回路は、デジタルもしくはアナログのLCDの表示タイミングに同期させて画素データを出力し、毎秒60フレームの速度でVGAサイズの画像を表示させることができる。

現状では、この表示速度に対して、図3⑥にて外部メモリから読み出されるVGAサイズのフレームデータの読み出しスピードが遅く、表示できない。このため、図3⑥は1ピクセルずつ読み飛ばしを行うことで表示速度に同期させ、320x480のフレームサイズを横2倍に引き延ばしてVGAフレームを表示している。また、③のQQVGAデータも見やすいよう、縦横4倍に引き延ばして表示している。

3. 2 稲列検出処理部

稲列検出処理部は、画像プリプロセッサ部(FPGA)から画像フレームデータを読み出し、画像処理によって稲列を検出する処理を行い、その処理結果を走行制御ユニットへ送信する機能を持つ。なお、ハードウェアとしてARM9マイコンを用いている。

本年度は、上述の機能を実現するための基本機能を開発した。概要は以下のとおり。

(1) 画像プリプロセッサ部とのメモリインタフェース

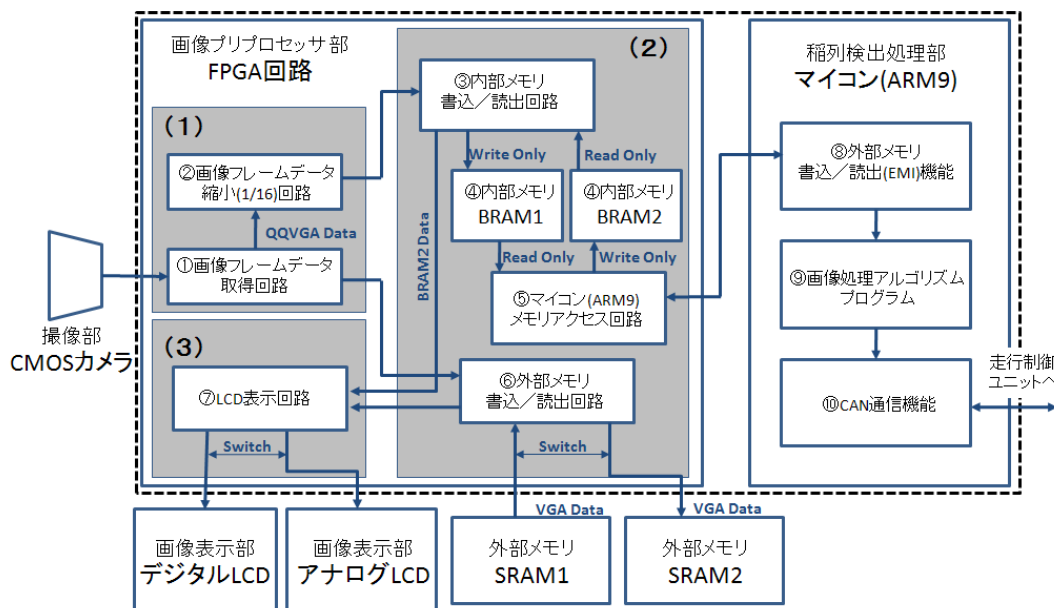


図3 画像処理ユニットの機能ブロック図

画像処理を行うためには、フレームサイズの画素データを取り込み、これを処理するために、比較的大きなメモリを使用する。

マイコンは、一般的にはこの処理ができるほどの内部メモリサイズを持っていないため、外部メモリにアクセスして、フレームデータの読み出しと書き込みを行うこととした。

ARM9マイコンは、外部メモリインタフェース機能を有しているため、この機能を利用している。また、FPGAの処理速度と整合が保たれるよう、メモリアクセス速度等を設定している。(図3⑧)

(2) 走行制御ユニットとの通信

画像処理ユニットの処理結果を走行制御ユニットへ送信する。今後の開発によっては、走行制御ユニットからの命令信号を受信することも考えられる。また、画像処理ユニットは2つ設置されていることから、双方向の多数間通信が可能なものが望ましい。

CAN(車載ネットワーク)通信は、これらの要求を満たし、かつARM9の基本機能として存在することから、これを採用した(図3⑩)。

CAN通信は、1Mbpsの速度で、双方向通信が可能であり、ID割り当てによるデータ優先度の管理が可能である。

3. 3 画像処理ユニットの開発結果

本ユニットで開発した基本機能を確認するため、図3⑨画像処理アルゴリズム部にFPGA内部メモリ(BRAM1)から読み出したデータを未処理でFPGA内部メモリ(BRAM2)に書き込むプログラムを実装し、アナログLCDから表示した。図4は、そのスナップショットである。本図より、画像の乱れがないことから、正常に動作していることを確認できる。

以上の開発により、図3⑨に画像処理アルゴリズムを実装すれば、ほとんど周辺のハードウェアを意識することなく、容易にアルゴリズムの開発および検証が可能となった。

4. 走行制御アルゴリズムの基礎検討

本研究では制御コントローラのハードウェア開発と並行して、圃場内を自律走行するためのアルゴリズムについて基礎的な検討を行った。



図4 稲列のスナップショット
(QQVGAをVGAサイズに拡大して出力)

4. 1 水田内走行制御アルゴリズム

実際の圃場には様々な条件が存在するが、これらのあらゆる条件に対応できる自律走行機能を開発することは、現在の技術レベルでは容易ではない。実用化を考える場合、コスト面からも現実的では無い。

そこで本研究では、農業者が受け入れ可能な圃場条件として、次の2つの条件を設定し、この条件下においてロボットの自律走行の実現を目指す。

条件1: 土壌表面は軽微な凹凸(田植機の轍等)のみで足跡などの大きな凹凸が無い。

条件2: 水田の外周部(あぜ際)への稲の植え込みを制限する(米の減反面積として計上可能)。

条件1は、スタックや急激な姿勢変化等の圃場内走行中の不確定要素を軽減する条件であり、条件2は稲列の端での折り返しを容易にする条件である。これらの条件を満たした圃場において、除草ロボットの移動経路を次のように設定する。ロボットは稲列に沿って走行し、稲列の端ではスイッチバックを繰り返す、圃場全体を走行する(図5)。この経路計画を実現するためのロボットの基本走行制御には次の2つがある。

- ・ 稲列に沿った走行制御
- ・ 稲列の端での折り返し走行制御

4. 2 実験機のシステム概要

4. 1で示した2つの基本走行制御について検証するため、今年度の開発機が完成するまでの間、図6に示す実験機を制作し、基礎的な走行実験を行った。ロボットの諸元を表2に示す。この実験機と開発機との共通点は、次のとおりである。

- ・ 同一のクローラの接地長
- ・ 走行制御ユニットのプロセッサは、開発基板と同じARM CORTEX- M3シリーズでピン数の少ないSTM32F103ZB(128pin)を使用
- ・ モータ及びモータドライバは同じ型番のものを使用

カメラは実験機上部に搭載し、約1.2m先が画像中心となるように進行方向斜め下向きに方向を調整した。このカメラは稲の葉が高い反射特性を有する近赤外領域に感度を持つカメラであり、その光学系には可視光カットフィルタを装着している。実験機のシステム構成を図7に示す。画像処理を外部のPCで行い、その結果をシリアル通信でロボットの制御コントローラに送る。

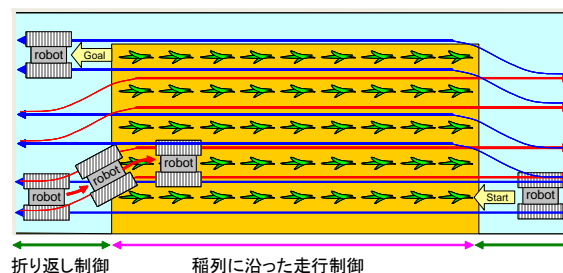


図5 水田内走行アルゴリズム

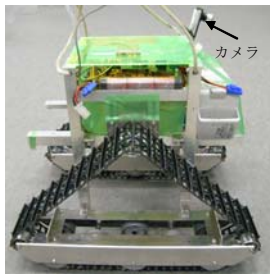


図6 走行実験機

表2 走行実験機の緒元

全長 (クローラ接地長)	500mm (300mm)
全幅 (クローラ中心間)	425mm (300mm)
全高 (クローラ間空間)	370mm (310mm)
クローラ幅	120mm
総重量	8800g
モーター	7.2Kg \cdot cm 18.5W x 2
バッテリー	NiMH 24V-3.8Ah

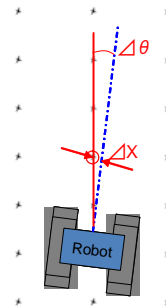


図8 画像処理情報



図9 走行実験の様子 (試作機)

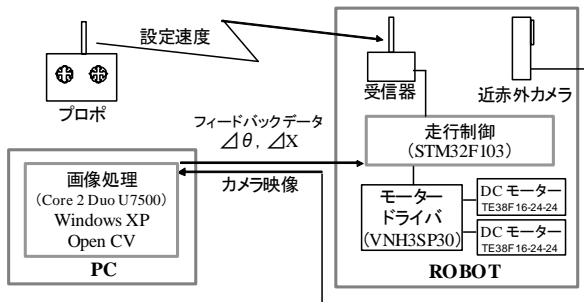


図7 システム構成

4. 3 走行実験

実験環境としては、温室で栽培した葉令約4.0の苗を定植し、対象とする稲列（水位を約5cmとし、苗が水面から10cm程度出ている苗の列）とした。また、ロボットの直進時の設定速度を約50cm/s、解析画像の解像度を160×120ピクセル）に設定して実験を行った。

稲列に沿った走行制御は、搭載カメラ映像を画像処理することにより得られる追従すべき稲列とロボット位置とのズレ（相対位置 Δx 、相対角度 $\Delta \theta$ ）（図8）を最小にするようなPID制御により、ロボットの進行方向を制御した。走行実験の様子を図9に示す。実験の結果、稲列に沿った走行は可能であるものの、条間の中心をクローラがトレースすることは難しく、クローラが稲列へ接近したり接触したりする場合も見受けられた。さらに、欠株が続くと、隣の条間へ進入してしまうケースもあった。

稲列の端での折り返し走行制御については、終端部でのカメラ映像の撮影を行いながら、

- ・折り返し位置（稲の植えてある端）の検出手法
- ・折り返し位置での前後カメラ映像の利用方法

について検討を行った。現状では折り返し動作中に目標とする稲列終端を定めることができれば、稲列に沿った走行制御と同じ制御で折り返し後の稲列への進入が可能であった（図10）。

5. まとめ

本年度は、自律走行のための走行制御コントローラについて、ハードウェアの検討および組み込みソフトウェア開発を行い、その基本動作を確認した。特に画像処理ユニットについては、FPGAおよびマイコンのハードウエ



図10 (左) 稲列への進入実験の様子

(稲列端から約1m, 斜め向き)

(右上) ロボット搭載カメラの画像

(右下) 画像処理中の画像 (ガウシアン処理後)

的な混成システムを構築することで、両者の長所を活かした画像処理システムのハードウェアを開発することができた。これにより、図3⑨に画像処理アルゴリズムを実装すれば、画像処理のソフトウェア開発者は周辺のハードウェアをほとんど意識することなく、容易にアルゴリズムの開発および検証することが可能となった。

今後は、稲列検出アルゴリズムの処理内容に応じて、FPGAによるデータ処理回路の実装方法や、外部および内部メモリの役割の見直しを行い、専用の画像処理ユニットの開発を行う予定である。走行制御実験に関しては、今年度の開発機をベースに実験を行い、上記画像処理ユニットの処理内容に応じて稲列に沿った走行制御と稲列の端での折り返し走行制御の精度を高め、目標とする自律走行機能の実現を目指す予定である。

謝辞

本研究は、岐阜県中山間農業研究所、岐阜大学、みのる産業株式会社、株式会社常盤電機の協力の下、経済産業省「地域イノベーション創出研究開発事業」の支援を受けて実施しました。ここに感謝の意を表します。

文献

[1] 光井輝彰 他, “水稻のクリーン農業を支援するロボット (アイガモロボット) の実証研究”, 岐阜県情報技術研究所研究報告第9号, pp.29-32, 2008.