

水田除草ロボットの实用化に向けた応用技術の検討

津山工業高等専門学校 情報工学科 曾利 仁

1 まえがき

水田の除草は、省力化と除草効果が高いことから除草剤を用いた化学的防除法が主流となっている。しかし、近年では消費者の食の安全に対する関心、低農薬志向、環境への負荷低減などの理由から除草剤を用いない水稻栽培が要望されている。農薬を用いない除草法として、歩行型除草機に代表される機械的除草、紙マルチによる物理的除草、アイガモ農法に代表される生物的除草法などがある。しかし、機械的除草においては作業者が水田で作業を行うために重労働であり、アイガモ農法においても飼育に手間やコストがかかるなどの問題がある。そのため、現状としては無農薬農法はあまり普及していない。そこで、化学農薬の使用量を低減し、人による手間と労力を必要とせず、経済的な負担を軽減する新たな除草法が望まれている。我々の研究グループでは、これらの問題を解決する方法として水田除草ロボットを提案し開発を行っている。

これまでに我々は、小型で、かつ簡易な操作で動かすことができる除草ロボットを目標とし、稲苗検知センサや不整地を安定して走行できる車体の開発を行ってきた^{1, 2)}。除草ロボットは水田内を走行しながら除草作業を行うため、安定した除草効果を得るためには水田内をくまなく走行する必要がある。

本研究では、提案する除草ロボットの实用化に向けた必要な応用技術の検討として、水田の畦を検知した後の走行制御アルゴリズムの開発を目的としている。除草ロボットは、バンパータッチセンサにより畦を検知し、方位センサを用いて次の稲苗列を目指し旋回を行う。また、実験環境下の土壌硬度による畦検知後の走行特性についても検討している^{3, 4)}。また、静電タッチセンサにより稲苗列の最後を検知し、方位センサを用いて次の稲苗列を目指し旋回する走行制御アルゴリズムも提案している⁵⁾。

2 除草ロボット

除草剤およびアイガモに変わる雑草対策の有力な手段としては機械を用いた除草がある。しかし、その主流は乗用型の大型機械であるために高価であり、導入できるのは大規模農家に限られる。そのため、著者らは個人農

家でも導入しやすく、かつ水田内すべての条間、株間を安定して走行できる除草ロボットの開発を目指している。

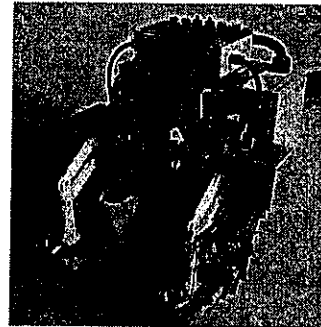


図 1 除草ロボット

表 1 除草ロボットの仕様

Size (Width × Length × Height)	428mm × 558mm × 465mm
Weight	7500g
Maximum Speed	20m/min
Power Source	7.5V(Li-Po) × 2
Continuous Running Time	3h

図 1 に除草ロボットの概要図を示し、諸元を表 1 に示す。除草ロボットの左右駆動部には DC モータを用いており、PWM 制御により基本的な走行制御を行っている。

また、図 2(a) に示すように、除草ロボットは稲苗をまたいで走行することで除草作業を行う。さらに、除草ロボットには、図 2(b) に示すように水田内を走行することにより、土壌を攪拌し雑草を剥離させる効果と、水を濁らせることによって日光を遮断し光合成を阻害することで雑草を枯れさせる効果がある。また、車輪で泥を掻くことによって泥内の余分なガスを排出する効果もある。除草ロボットの基本走行アルゴリズムを図 3 に示す。除草ロボットが、水田内を走行する際に車輪のすべり、走行面の凹凸、棚田のように稲苗がまっすぐ植えられていないといったことから、除草ロボットが稲苗をまたいで走行するのは容易ではない。そこで、本研究では除草ロボットの車輪前方左右に配置された静電タッチセンサで稲苗の検知を行い、マイクロコンピュータで左右の DC モータの Duty 比を制御し、車輪の回転速度を調節することで稲苗を回避して走行する。また、除草ロボットは

稲苗列の終わりまで走行すると、バンパータッチセンサや方位センサを用いて旋回し、再び別の稲苗列に入って走行する。

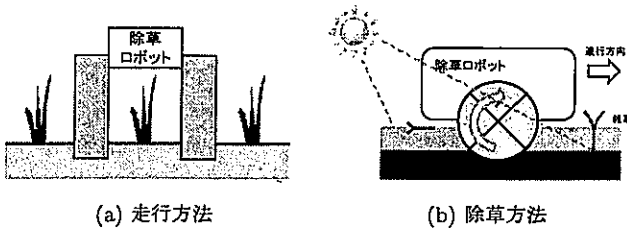


図2 除草ロボットの走行・除草方法

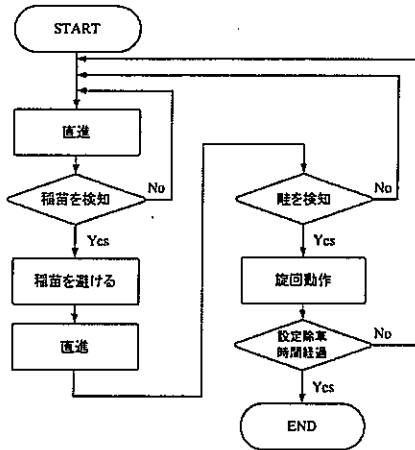


図3 基本走行アルゴリズムのフローチャート

3 旋回走行実験

本研究では、除草ロボットに取り付けられているバンパータッチセンサと方位センサ ($0^\circ \sim 360^\circ$ を測定: 北= 0° , 東= 90° , 南= 180° , 西= 270°) を用いて、水田の畦を検知した後に隣の稲苗列を目指して走行する制御アルゴリズム (以下、制御アルゴリズム A) を提案した。制御アルゴリズム A は、除草ロボットが畦検知後、後退し前進旋回により 180° 方向旋回し、次の稲苗列を目指す制御アルゴリズム A_1 と、畦検知後、後退旋回により 180° 方向旋回し、次の稲苗列を目指す制御アルゴリズム A_2 の 2 パターン提案している。

さらに、除草ロボットの内側左右に取り付けられている静電タッチセンサと方位センサを用いて、稲苗列の終わりに達したと検知した後に隣の稲苗列を目指して走行する制御アルゴリズム (以下、制御アルゴリズム B) を提案した。また、実際の圃場は不整地であることから、実験環境として砂場を選択し走行実験を行った。なお、今回の実験では水田の稲苗列を左端の列から除草作業することを前提に行っている。

3.1 制御アルゴリズム A_1

制御アルゴリズム A_1 のフローチャートを図4に示す。制御アルゴリズム A_1 の走行実験結果を図5に示す。

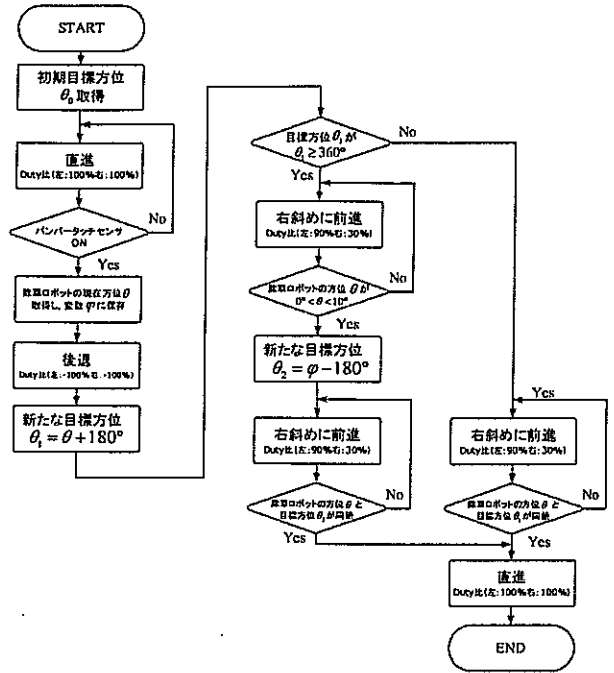


図4 制御アルゴリズム A_1 のフローチャート

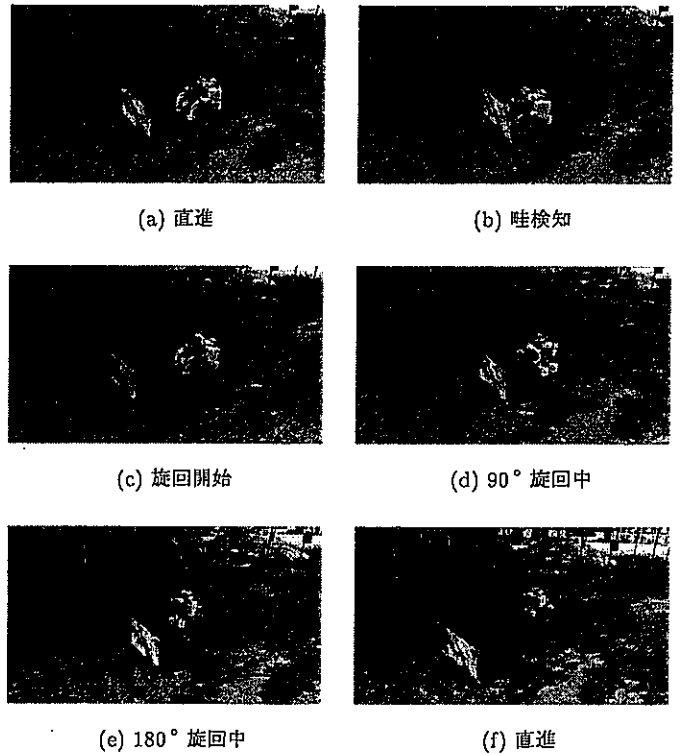


図5 旋回走行実験結果 (制御アルゴリズム A_1)

除草ロボットは、走行開始直後に初期方位 θ_0 を取得する。この初期方位を目標方位として、稲苗検知センサにより現在の稲苗列を直進する (図5-(a))。直進時の左右モータの Duty 比は左:100%, 右:100% に設定している。直進後、バンパータッチセンサにより水田の畦を検知 (図5-(b)) すると、除草ロボットの現在方位 θ を取得する。さらに、現在方位 θ に 180° 加算することで新たな目標方位 θ_1 を設定する。 θ_1 が、 $\theta_1 \geq 360^\circ$ を満たす

場合、畦を検知した時の除草ロボットの方位 θ が、 180° (南) $\leq \theta < 360^\circ$ (北) 内の西側に向いていることを示し、 $\theta_1 \geq 360^\circ$ を満たさない場合は、 0° (北) $\leq \theta < 180^\circ$ (南) 内の東側に向いていることを示している。後退後、畦を検知した時の除草ロボットの方位により、それぞれの旋回行動を開始する (図 5-(c))。除草ロボットの方位 θ が、新たな目標方位 θ_1 または、 θ_2 に達するまで右斜めに前進する (図 5-(d),(e))。旋回時の左右モータの Duty 比は左:90%, 右:30% に設定している。目標方位に達することで直進し (図 5-(f))、隣の稲苗列に走行することが可能となる。

3.2 制御アルゴリズム A₂

制御アルゴリズム A₂ のフローチャートを図 6 に示す。制御アルゴリズム A₂ の走行実験結果を図 7 に示す。

除草ロボットは、走行開始直後に初期方位 θ_0 を取得する。制御アルゴリズム A₁ 同様に、この初期方位を目標方位として現在の稲苗列を直進する (図 7-(a))。直進後、バンパータッチセンサにより水田の畦を検知 (図 7-(b)) すると、除草ロボットの現在方位 θ を取得する。さらに、現在方位 θ に 180° 減算することで新たな目標方位 θ_1 を設定する。 θ_1 が、 $0^\circ < \theta_1 \leq 180^\circ$ を満たす場合、畦を検知した時の除草ロボットの方位 θ が、 180° (南) $\leq \theta < 360^\circ$ (北) 内の西側に向いていることを示し、 $0^\circ < \theta_1 \leq 180^\circ$ を満たさない場合は、 0° (北) $\leq \theta < 180^\circ$ (南) 内の東側に向いていることを示している。後退後、畦を検知した時の除草ロボットの方位により、それぞれの旋回行動を開始する (図 7-(c))。除草ロボットの方位 θ が、新たな目標方位 θ_1 または、 θ_2 に達するまで右斜めに後退する (図 7-(d),(e))。旋回時の左右モータの Duty 比は左:-90%, 右:-30% に設定している。目標方位に達することで直進し (図 7-(f))、隣の稲苗列に走行することが可能となる。

3.3 制御アルゴリズム A₁ と A₂ の比較

提案した 2 つの制御アルゴリズムを比較するために、畦検知後の旋回行動を検証した。図 8 に、制御アルゴリズム A₁, A₂ を用いた畦検知後の除草ロボットの方位変化を示している。図 8 より、制御アルゴリズム A₁ は、畦検知後、時計回り方向に旋回走行を行い、約 16 秒で目標方位に達しその後直進行動に移っていることが確認できる。制御アルゴリズム A₂ は、畦検知後、反時計回り方向に旋回走行を行い、約 11 秒で目標方位に達していることが確認できる。これより、制御アルゴリズム A₂ の方が、速やかに隣の稲苗列に移動し除草作業を行えることが確認できた。

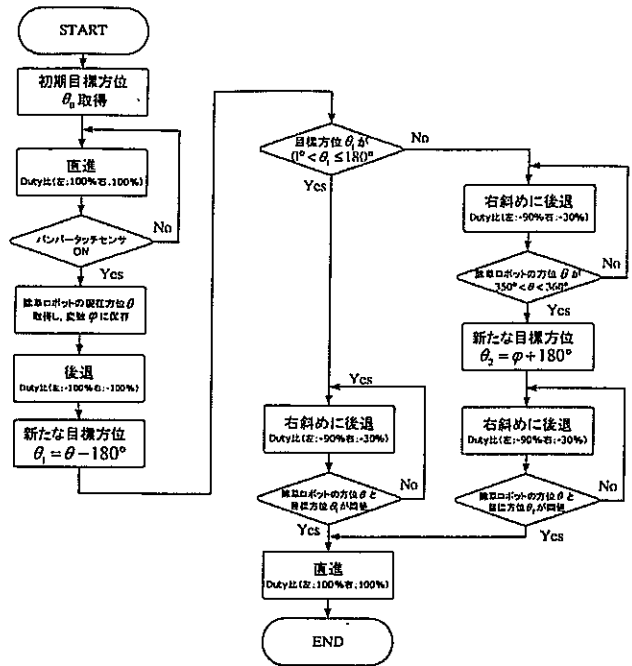


図 6 制御アルゴリズム A₂ のフローチャート

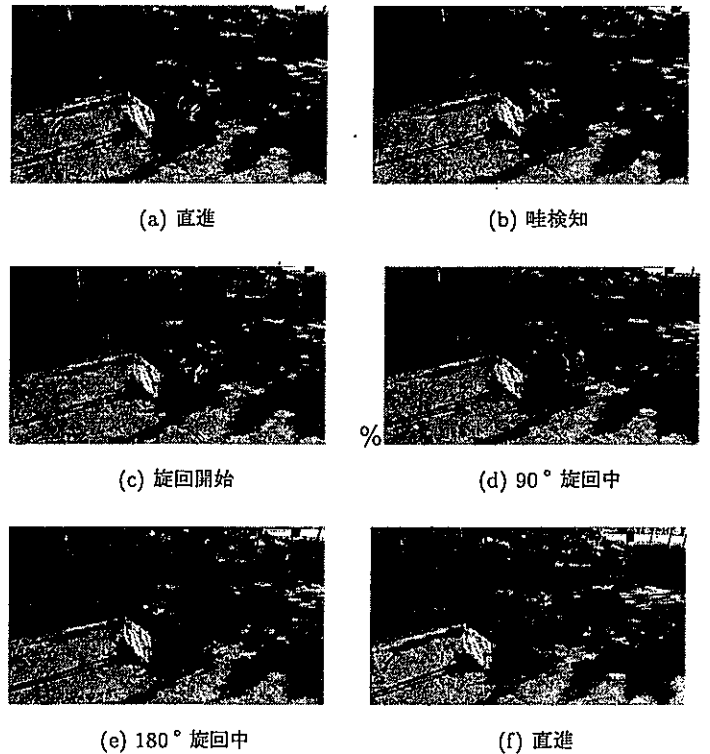


図 7 旋回走行実験結果 (制御アルゴリズム A₂)

3.4 制御アルゴリズム B

制御アルゴリズム B のフローチャートを図 9 に示す。除草ロボットの内側の左右に配置された静電タッチセンサが稲苗を検知すると、除草ロボットは左右の DC モータの Duty 比がともに 100% で走行する。もし、稲苗が一定時間検知されなければ、稲苗列の終わりに達したと判断して旋回動作を開始する。このとき、方位センサに

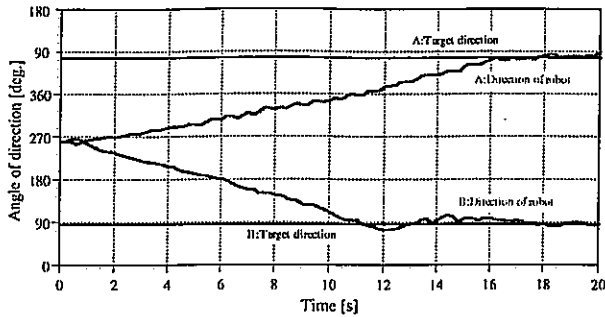


図8 制御アルゴリズム A_1 と A_2 による旋回走行比較結果より旋回開始時の方位 θ を検出し、これを初期方位 θ_0 とする。次に、左右の車輪に速度差をつけることで方位 θ が目標方位 $\theta_0 + 180^\circ$ になるまで旋回する。なお、右旋回時の左右モータの Duty 比は左:90%, 右:30%に設定しており、左旋回時は左右の Duty 比が逆になる。除草ロボットの方角 θ が $\theta_0 + 180^\circ$ に達すると旋回を終了し、稲苗列に沿った走行へ移行する。しかし、旋回を終了した時点では除草ロボットがまだ稲苗列に入っていないために、内側静電タッチセンサで稲苗を検知されない恐れがある。この場合、除草ロボットは再び稲苗列の終わりに達したと謝った判断をし、再び旋回動作を行う。

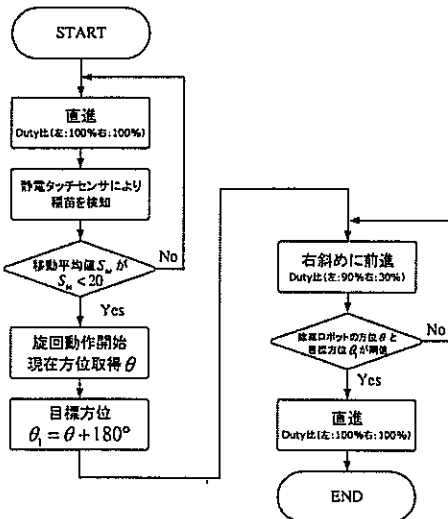


図9 制御アルゴリズム B のフローチャート

そこで、除草ロボットに安定した旋回動作を行わせるために、次に示す3つのモードをセンサ情報と除草ロボットの状況から適切に切り換える手法を提案する。走行経路における各モードを図10に示す。Mode 1は、除草ロボットが稲苗列に入った状態で車輪前方に配置された静電タッチセンサを用いて稲苗を回避しながら走行する。Mode 2は、稲苗列がなくなった状態で旋回動作を行う。Mode 3は旋回後から稲苗列に入るまでの状態であり、除草ロボットの起動時にも相当する。

ここで、除草ロボットのの内側左右の静電タッチセンサの出力 S_t の大きい方の移動平均値 S_{ta} を定義する。静

電タッチセンサの出力 S_t は、稲苗に接触すると $S_t > 50$ となり、接触していなければ $S_t > 20$ を示す。よって、旋回動作を開始する閾値を20とし、 $S_t < 20$ の場合には旋回動作を行う。

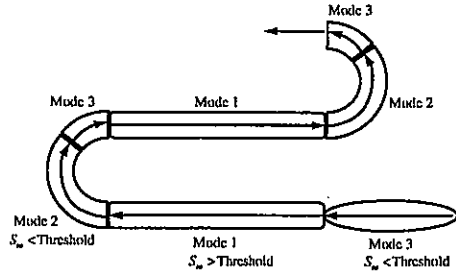


図10 走行経路のモード

提案する制御アルゴリズム B の有用性を確認するために、図11に示すように南北方向に300mmの間隔で植えられた稲苗列の1列目から3列目に入るように右旋回を行った。なお、旋回半径 r は稲苗列1列分の間隔であり、各左右モータの Duty 比は左が100%, 右が30%に設定している。図12(a)に旋回時の除草ロボットの軌跡、(b)に静電タッチセンサ情報と方位変化の関係を示す。図12(a)より、除草ロボットは約600mm前方に進んだ後に旋回を開始している。これは同図(b)より、移動平均を用いて S_{ta} を算出しているため、稲苗列が終了した約3秒後から旋回動作を行っていることが確認できる。旋回動作は約10秒で終了しており、約680mm右側に移動していることが分かる。

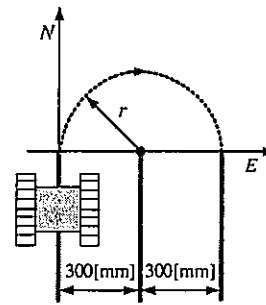
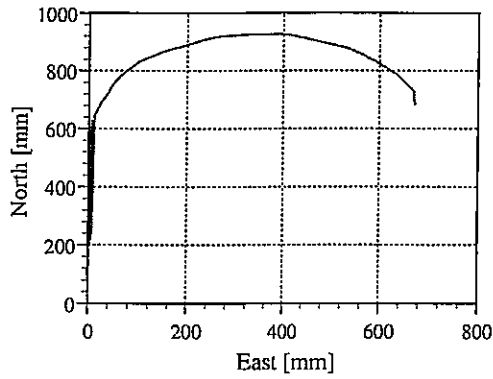


図11 実験環境

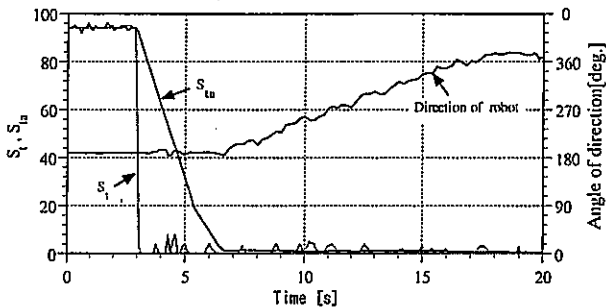
4 まとめ

本研究では、これまで提案している除草ロボットにさらに必要な基本技術の検討として、畦の検知または稲苗列の最後を検知後の旋回アルゴリズムの開発を目的とした。

畦検知にはバンパータッチセンサを用いて、さらに方位センサにより次の稲苗列を目指し旋回走行する制御アルゴリズム A_1 , A_2 を提案した。実際の圃場は、さまざまな土壌でかつ非常に不整地な状態であると想定される。除草ロボットが接地面に足場をとられ、身動きできない状態を極力回避するために、常に移動しながら旋



(a) 移動軌跡



(b) センサ情報とロボット方位の関係

図 12 旋回走行実験結果 (制御アルゴリズム B)

回する制御アルゴリズムを採用した。本研究では、畦を検知後、前進しながら時計回りに旋回行動する制御アルゴリズム A_1 と、後退しながら反時計回りに旋回行動する制御アルゴリズム A_2 を提案した。砂場での走行実験結果から、提案した2つの制御アルゴリズムはともに、接地面に足場を取られることなく旋回行動ができた。また、制御アルゴリズム A_2 の旋回行動の方が速やかに旋回できたことが確認できた。

次に、静電タッチセンサと方位センサを用いた制御アルゴリズム B を提案した。このアルゴリズムでは、除草ロボットの走行モードを3つに分解し、これらのモードをセンサ情報と除草ロボットの状況を考慮して切り換える手法である。砂場での走行実験結果から、静電タッチセンサによる稲苗列の終わりの検知ならびに方位センサを用いた旋回動作が可能であることを確認した。

今後は、できるだけ多くの圃場で走行実験を行い、旋回制御アルゴリズムの改良、走行安定性について検証を行う予定である。

謝辞

この研究は、平成 24 年度公益信託エスベック地球環境研究・技術基金により実施できましたことを御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 石井雄也, 井上浩行, 曾利仁, 安藤泰宏, 八田浩之, 生駒徹志:「除草ロボットのための静電タッチセンサを用いた稲苗検出について」, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'11 講演論文集, 1P1-B01, 2011
- 2) 八田浩之, 安藤泰宏, 飯塚浩二郎, 井上浩行, 曾利仁:「接触式稲株センサーによる水田除草ロボット」, ロボティクス・メカトロニクス講演会'12 講演論文集, 1A1-G01, 2012
- 3) 網島大地, 曾利仁, 井上浩行, 八田浩之, 安藤泰宏:「水田除草ロボットにおける畦検知時の走行制御」, ロボティクス・メカトロニクス講演会'13 講演論文集, 1A1-Q03, 2013
- 4) 曾利仁, 井上浩行, 八田浩之, 安藤泰宏:「水田除草ロボットにおける畦検知時の走行特性」, 平成 25 年電気学会電子・情報・システム部門大会講演論文集, No.GS10-5, pp.1628-1631, 2013
- 5) 藤岡大亮, 井上浩行, 曾利仁, 安藤泰宏, 八田浩之:「水田用自律型除草ロボットの旋回アルゴリズムの開発」, 日本機械学会 2013 年度年次大会, G151036, 2013