

水田用小型除草ロボット(アイガモロボット)の開発

— 水田除草用自律走行ロボットのための稲列検出手法の開発 —

平湯 秀和 田中 等幸

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

- Development of Rice Plants Detection for Weeding Robot -

Hidekazu HIRAYU Tomoyuki TANAKA

あらまし 近年、農産物において、消費者の安心・安全・健康への関心が高まってきているため、農業生産者は環境負荷に配慮した生産方式が求められている。岐阜県では、化学合成農薬の節減を基本とする「ぎふクリーン農業」を推進し、その一環として当研究所では、水田除草を目的とした除草ロボットを開発し、除草効果を実証してきた。本研究では、除草ロボット自律走行のための稲列検出手法を開発したので報告する。

キーワード 除草ロボット, 自律走行, 近赤外画像, 稲検出

1. はじめに

近年、農産物において、消費者の安心・安全・健康への関心が高まっている。岐阜県においては、化学合成農薬の節減を基本とする「ぎふクリーン農業」を推進し、生産性と環境が調和できる農業施策を実施している。このような農業を行う上での最大の課題は、雑草対策である。現行、最も有力な方法として機械による除草があげられ、主要な手段としては乗用大型機械によるものである。しかし、高価であることや耕地面積が小さな圃場では取り回しに手間がかかる等の問題があり、中山間地の多い岐阜県では乗用大型機械の小型化が求められている。

当研究所ではこれまで、従来の除草方法の概念を覆し、安価で簡単な機構を持つロボットが稲列の間を繰り返し走行することで、高い除草効果を実現する手法を提案し、圃場実験でその効果を実証した^[1]。この高い除草効果の得られるロボットを実用化するためには、農作業者に手間をかけさせずに、除草作業を自律しながら行う走行機能の開発が必要である。そこで本研究では、ロボットが対象稲列に沿って自律走行を行うために、ロボットに搭載したカメラの画像情報を基に稲列を検出する手法の研究開発を目指す。

稲列の検出に関して、従来研究では可視光カメラを用いて葉の緑色領域を基にした色成分抽出法が提案されている^[2]が、天候や時間によって太陽光が変化するに伴い葉の緑領域の色合いが変化する等の影響で安定した緑色領域が検出できないといった課題がある。このため、本研究では、物質が光を吸収する際の波長が物質の種類や

構造に応じて固有の値となる特性^[3]を利用し、外乱光の影響を受けない近赤外領域による稲の検出手法について検討する。今年度は、下記の2点に関して研究をしたので報告する。

- 1) 稲を検出するための最適な波長帯域の選定
- 2) 稲列の画像特徴を基にした稲列の検出

2. 稲検出のための最適な波長帯域の選定

近赤外領域の波長帯における稲の反射特性を求め、稲検出に最適な反射率が最大となる波長の同定を行う。

2. 1 撮影システム

図1に分光画像の撮影システムを示す。撮影システムの構成は16bit冷却CCDカメラ（Apogee社製 Alta U2000）、液晶チューナブルフィルタ（Cri社製 VariSpec NIR）およ

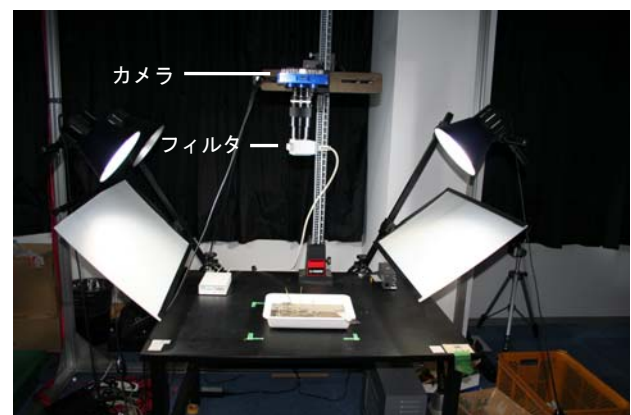


図1 撮影システム

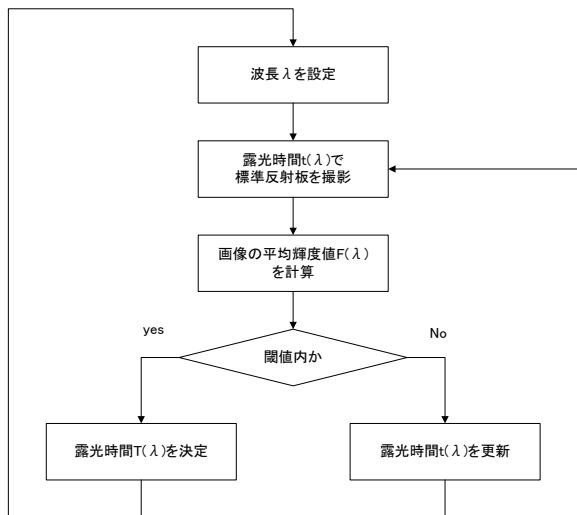


図2 キャリブレーション手順

び光源（岩崎電機社製 JPRF100V600WD）からなる。冷却CCDカメラは解像度が1600×1200であり、各画素において65535階調の高精細かつ高ダイナミックレンジなデータを取得可能である。撮影は650nm～1100nmの範囲で透過帯域を1nm刻みに変化させ実施する。

2. 2 キャリブレーション方法

カメラのCCD感度、分光フィルタの透過率、光源の特性は波長によって異なる。そこで、これらの影響による波長間の違いを解消するために、標準反射板（ミロク社製 BN-R98-SQ12C）を使用し、いずれの波長においても一定の輝度値になるように露光時間を調整する。図2に標準反射板を利用したキャリブレーションの手順を示す。チューナブルフィルタを波長λに設定し、画像取得後の平均画素値F(λ)を求め、平均画素値が閾値範囲内に収まるまで露光時間T(λ)の調整を繰り返す処理を実施する。

2. 3 分光反射特性の作成

前節の手法を基にキャリブレーションを行った後、各々の波長に対して求めた露光時間で、標準反射板および試料の分光画像を撮影する。分光反射率は式(1)によって求める。波長λnmにおいて、 $O_{\lambda}(x, y)$ は試料を撮影した分光画像の画素位置(x, y)の輝度値、 $S_{\lambda}(x, y)$ は標準反射板を撮影した分光画像の画素位置(x, y)の輝度値である。また、 $R_{\lambda}(x, y)$ は画素位置(x, y)の反射率を示している。波長ごとに得られた試料の輝度値を標準反射板の画素値で除算し、画素数で平均することで、反射板に対して試料がどの程度反射したかが分かる。

$$R_{\lambda}(x, y) = \frac{O_{\lambda}(x, y)}{S_{\lambda}(x, y)}$$

$$R(\lambda) = \frac{\sum_{x=1}^W \sum_{y=1}^H R_{\lambda}(x, y)}{W \times H} \quad (1)$$

$\lambda = 650 \sim 1100, W = 1600, H = 1200$

2. 4 稲の反射特性結果

図1に示す環境下で稲を撮影した。撮影は稲を撮影台に固定し、稲以外の領域をマスク処理することで稲の平均反射率を計算する。図3に稲の反射特性を示す。680nm付近で反射率が急激に上がる特性を示していることが分かるが、760nm付近以降の反射率に著しい変化は確認されない。また、比較のため畑地等で自生しているイネ科のメヒシバについても同様の実験を行ったが、稲の反射特性との違いはなかった。従って、図3に示す反射特性は植物の葉緑素（クロロフィル）の反射特性であることが予想される^[4]。

2. 5 土泥の反射特性結果

稲の反射特性と土泥の反射特性が近い場合、近赤外画像において、稲と土泥の区別がつかないことになる。そこで、土泥の反射特性を調べるため、水田の土泥を採取し、乾いた土泥と水分を含んだ土泥の2種類について分光画像を撮影した。

分光反射特性の結果を図4に示す。乾いた土泥（実線）も水分を含んだ土泥（波線）も800nmから900nm辺りまで反射率が徐々に上がる傾向がある。また、水分を含んだ土泥の方が乾いた土泥よりも反射率が低い。これは水が強い吸収を持つとともに、土泥の光散乱に影響を及ぼすことが考えられる。

土泥の分光反射特性の結果から、50%以上の反射率を持つ稲の反射特性と比べると、一般的に水田内の土泥は水分を大量に含んでいるため、近赤外画像において稲と土泥の区別はつきやすいことが示唆される。

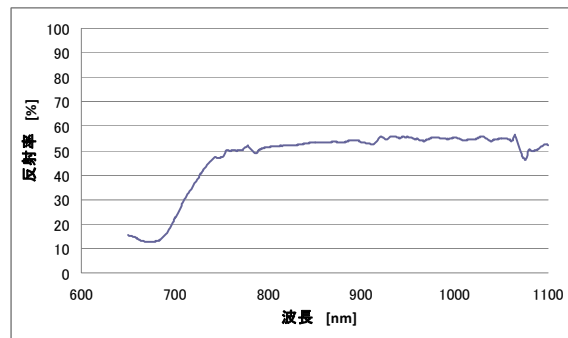


図3 稲の反射特性

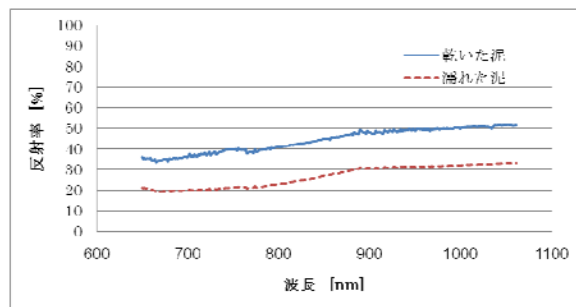


図4 土泥の反射特性

2. 6 屋外環境下での実験

2.4節は屋内環境下における、ハロゲンランプの照明環境で求めた稲の分光反射特性である。そこで、太陽光の照明環境下における稲の分光反射特性を確認するため、快晴の屋外環境下で同様に分光反射特性を求めた。図5に露光時間を1秒として標準反射板を撮影したときの平均輝度値を示す。

図5において、波長が大きくなるにしたがって平均輝度値は徐々に小さくなる傾向にある。これは、近赤外領域において太陽光の分光放射照度は波長が高くなるに従って低くなる傾向を示している。また、688nm付近や760nm付近などで平均輝度値が著しく小さくなるが、この波長は酸素分子の吸収バンド（フラウンホーファ線のA,B線）である。これは太陽光が太陽の外層のガス体を通過するときにガス体を構成する酸素分子に応じた波長が吸収されるため起きた現象であると言われている。

稲の分光反射特性を求めたところ、図3の反射特性とほぼ同じであった。物体の分光反射特性はその物体（本研究ではクロロフィル）特有の特徴を持っているため、照明環境による分光反射特性の違いはないことを確認した。

2. 7 稲列検出のための最適フィルタの検討

稲と泥の反射特性および太陽光の平均輝度を図6に示す。稲の反射率は700nm付近から上がり始め、800nm付近でほぼ50%以上になる。また、土泥は800nm付近から反射率が微少なながら上がるが、稲の反射率ほどの上昇は認められない。一方、太陽光の分光放射照度は波長が高くなるにつれて低くなる傾向にある。従って、より精度良く稲を検出するためには、太陽光の放射照度が高く、稲の反射特性の高い波長帯を選定することが望ましい。従って、780nm-820nmの波長幅が稲列検出に適している。

一方、ある特定の波長帯のみの近赤外画像を取得するには、特定の波長帯のみの光を透過する干渉フィルタが必要である。一般的に、市場にはある特定の波長帯の干渉フィルタしか流通しておらず、それとは異なる波長帯の干渉フィルタが必要な場合は特注となるため非常に高価になる。本研究では、干渉フィルタを付けたカメラを搭載したロボットの実用化を目指すため、市場で流通している波長帯が800nmもしくは810nmの安価な干渉フィルタを使用することとし、カメラレンズ先端に装着することとした。

3. 稲領域の画像特徴を基にした稲列検出

前章により、水田において、近赤外画像は可視光画像と比較すると、屋外の照明環境に影響されにくく稲列を検出しやすい。そこで、近赤外画像を用いて水田に植えられている稲の稲列を検出するため、稲のエッジ方向および存在確率を用いて稲列の検出を行った。本研究では検出する稲列は直線とみなす。なお、カメラはロボット

の前面で、かつ水田を見下ろす位置（本研究では地上45cmの位置）に設置し、水平角 68° 、焦点距離3.7mmのレンズを用いて広角画像を取得する。

3. 1 ロボット制御側に送る稲列検出情報

稲列を検出後、ロボット制御側に送信する稲列検出情報としては、下記の2点である（図7）。

- ・画像の鉛直軸に対する対象稲列の直線との角度 θ
- ・画像の水平方向の中央線からのずれ x

近赤外画像から稲列を求めた際、画像の鉛直方向の軸に対して角度 θ 、画像中央から x ピクセル離れた点を通る直線方向に進むことがわかるので、その2つの値(θ, x)をロボット制御部に送信し、ロボット制御側でロボットの移動方向の制御を行う。

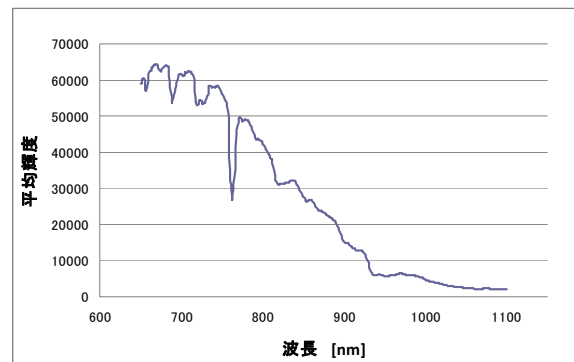


図5 太陽光における標準反射板の平均輝度値

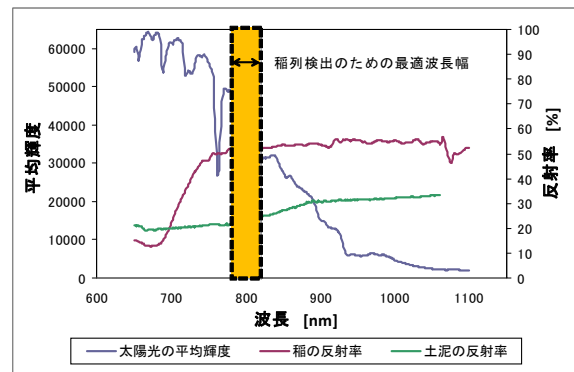
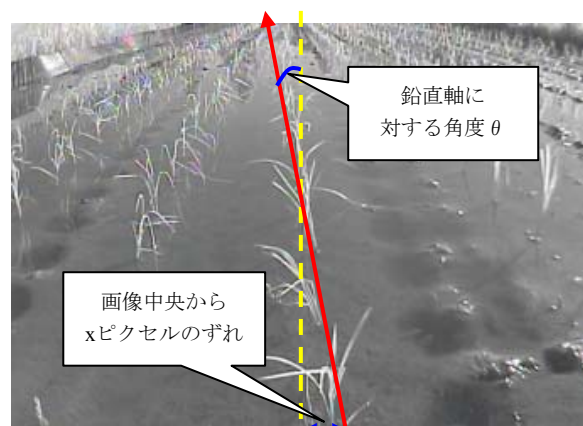


図6 稲と泥との反射特性および太陽光の平均輝度



波線：画像中央線、実線：稲列検出結果

図7 ロボット制御側に送る稲列検出情報

3. 2 稲のエッジ方向と存在確率を基にした稲列検出

図8のとおり，稲列をまたいだ状態でロボットを走行させた場合，対象稲列に関して，前フレームで検出した一番手前の稲 p' の画像位置近傍に，現フレームの一番手前の稲 P があると予想される．また，現フレームにおける対象稲列のベクトル方向は前フレームのベクトル方向（図8の画像中央実線）とほとんど変わらない．そこで，FPGA等への組み込みシステムにアルゴリズムを実装することを想定し，計算コストやメモリ使用量の小さい手法として，稲のエッジ方向および存在確率を基に稲列の検出を行う．

3. 2. 1 稲のエッジ方向の検討

稲列をまたいだ状態で撮影される画像において，稲は水平方向のエッジは少なく，むしろ，垂直方向のエッジや斜め方向のエッジが多い．そこで，当初は図9に示すとおり，垂直エッジ，右上エッジ，右下エッジの3つのエッジを使用したが，右上エッジや右下エッジがかえって稲列を検出する際の誤検出の原因となる事例が多かったため，本研究では垂直エッジのみを使用する．

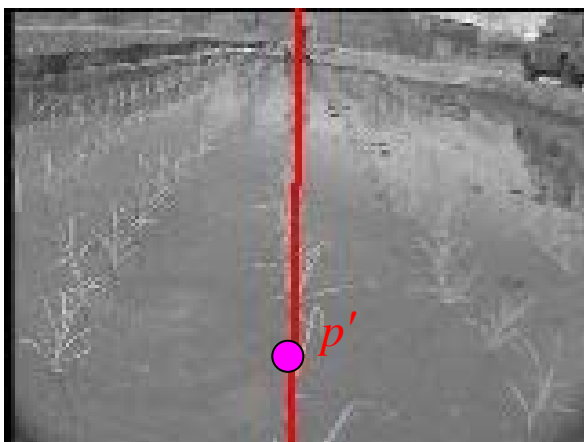
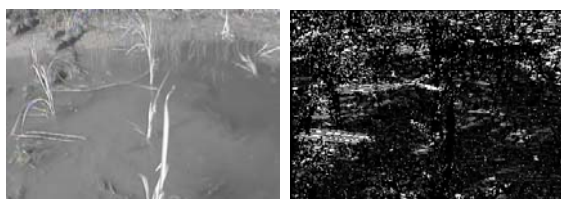
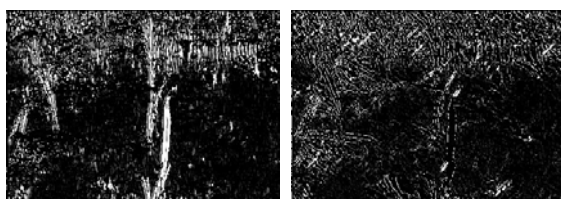


図8 前フレームでの稲列検出例



(a) 入力画像

(b) 水平エッジ画像



(c) 垂直エッジ画像

(d) 右上エッジ画像

図9 稲のエッジ方向検出結果例

3. 2. 2 稲の存在確率を基にした評価関数の適用

除草ロボットは対象とする稲列をまたいで平行に走行する．従って，得られる入力画像の中央下領域に対象稲列手前の稲が存在すると仮定することができる．ここで，図10に示す大きさが0.0~1.0のフィルタを適用する．図10(a)の白い領域は稲の存在確率が最も高く（1.0に近い値となる），遠方になるにつれて黒い領域（0.0に近い値になる）となり，存在確率が放射状に低くなることを示している．本研究では前フレームで検出したロボットの手前の稲の位置情報も利用するため，前フレームで検出したロボットの手前の稲の位置を (x_p, y_p) とし，式(2)の評価関数を用いる．ここで， $vr(m, n)$ は垂直エッジを， $f(m, n)$ はフィルタ，画像

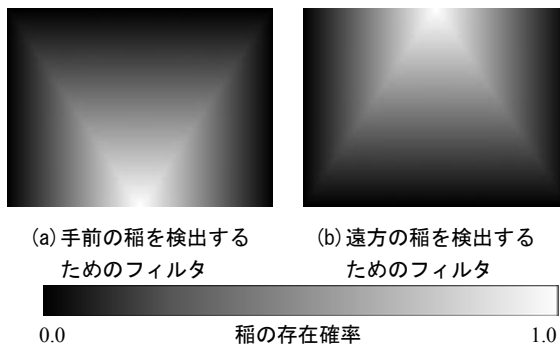


図10 稲を検出するためのフィルタ



図11 近赤外画像

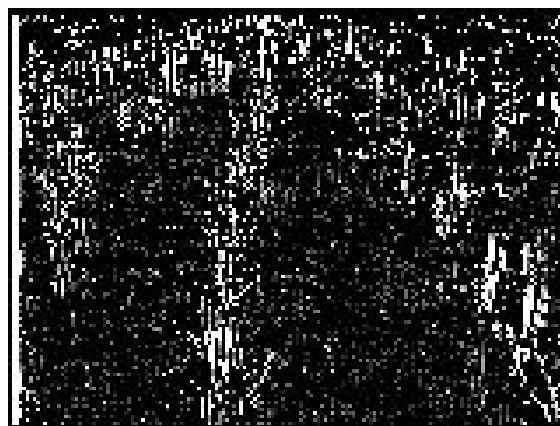


図12 垂直エッジ画像

の大きさをM, Nとする.

$$val(m,n) = \frac{1}{255} \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} (f(m - \left(x_p - \frac{M}{2}\right), n) vr(m,n)) \quad (2)$$

図11の入力画像に対して、垂直エッジを求め(図12)、これに式(2)の評価関数を適用する。評価関数を適用した画像はノイズを含んだ画像であるため平滑化する(図13)。白い領域は評価値が高く、黒色の領域は低い値を示す。この評価値はロボットの手前の稲が存在する確率と同じであるため、図13の画像において評価値が最も高い座標(ピーク値: 丸枠の箇所)を検出することで、一番手前の稲の検出が可能となる。本研究では、ここで求めた手前の稲の画像位置を中心とした直線を引き、その直線上にある遠方の稲の評価値を加算していき、加算値が最大値となる直線が求める対象稲列となる。

そこで、手前の稲の位置を求めた後に、遠方の稲を検出する。ロボットは対象稲列をまたいだ状態で走行するため、対象稲列は画像上の上部中央に向かって直線上に写ると仮定することができる。そこで、遠方の稲を検出するため、画像上部中央に検出感度を高めたフィルタを適用する。本研究ではメモリ使用量を削減するため、前述で述べた図10(a)のフィルタを上下に反転した図10(b)のフィルタを図12の垂直エッジの画像に対して適用する。前フレームの情報を利用して現フレームの稲列を検出するため、式(3)の評価関数を用いる。ここで、前フレームで検出した稲列の直線と画像の上辺部の交点を (x_p, y_p) 、垂直エッジを $vr(m, n)$ 、図10(b)のフィルタを $f(m, n)$ 、画像の大きさをM, Nとする。

$$val(m,n) = \frac{1}{255} \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} (f'(m - \left(x_p - \frac{M}{2}\right), n) vr(m,n)) \quad (3)$$

また、評価関数を適用した画像に対して平滑化を行う(図14)。図13で求めた手前の稲の画像位置情報と遠方の最も高い評価値の結果を基に稲列の検出を行う。図13上で評価値が最も高い座標を通る直線を図14上で引き、その線上で積算された評価値が最も大きな値となる直線を現フレームでの稲列とする。稲列の検出結果を図15に示す。

4 圃場での走行実験

本手法による除草ロボットの自律走行を確認するため、岐阜大学のフィールドセンター内にある圃場にて走行実験を行った。圃場の長さは約12mで株間30cm、7条の稲列がある(図16)。圃場実験の様子を図17に示す。稲の手前に除草ロボットを置き、カメラ取得映像を外部のパソコンに有線ケーブルを介して転送し、走行制御パラメータ (θ, x) を除草ロボットに返す方法で実験を行った。処理速度を上げるため、解像度は 160×120 とした。使用

したパソコンはCPUがIntel Core2Duo、クロックは1.06GHz、メモリは1024MBである。その際の処理速度は約8フレーム/秒であった。

走行実験の結果、整地された状態では、稲列に沿って走行することができたが、欠株等がある場合や、著しく荒れた走行エリアに遭遇すると、ロボットが大きく傾き、隣の稲列を走行する事例があった。また、遠方の稲を検出する際、水面に反射した遠方の空は近赤外画像上ではかなり明るい(輝度が高い)画像となるため、対象稲列の遠方にある稲を誤検出する事例もあった。

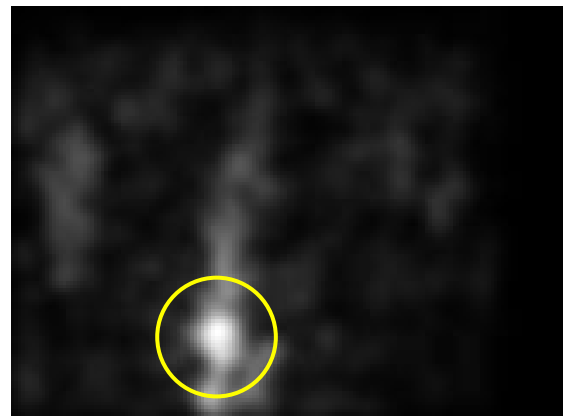


図13 評価関数を適応し平滑化した画像(手前の稲検出)

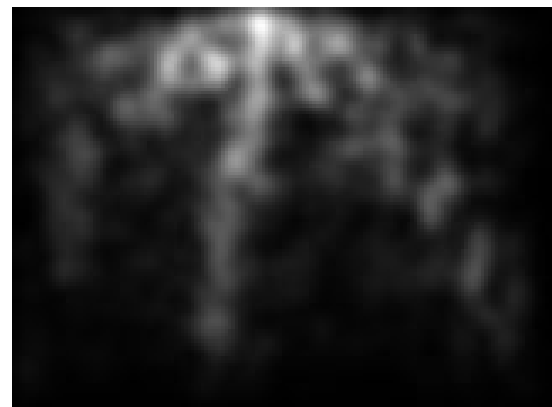


図14 評価関数を適応し平滑化した画像(遠方の稲検出)

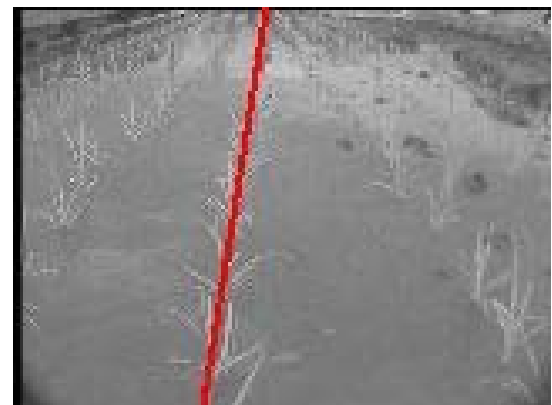


図15 稲列検出結果



図16 実験圃場



図17 実験の様子

- [2] 高原茂幸, 十川和士, 山浦浩二, “画像フィードバック制御による水田除草用自律走行車両”, 農業機械学会誌, 第66巻, 2号, pp.45-54, 2004.
- [3] 岩元睦夫, 河野澄夫, 魚住純, “近赤外分光入門”, 幸書房, 1995.
- [4] 近藤直, “生物生産におけるマシンビジョン —農業分野での画像の利用—”, 動的画像処理実用化ワークショップ DIA2009, pp.177-182, 2009.

5. まとめ

除草ロボットの自律走行を目的として, 屋外環境下で稲列を検出する手法の研究開発を行った. 稲の分光反射特性を調査し, 稲を検出するための最適な波長帯域を800nm近辺とした. 稲列を検出するアルゴリズムを開発し, 圃場において走行実験を行った. 実験の結果, 整地された状況下では正常に自律走行することができることを確認した. 今後は, 様々な状態の圃場において実験を重ね, 適正に走行するためのアルゴリズムの改良を図る予定である.

謝辞

本研究は経済産業省「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.