

平成 27～29 年度 チャレンジふくしま「ロボット産業革命の地」創出事業

福島県ハイテクプラザ研究報告書

Technical Reports of Fukushima Technology Centre

電気防獣柵漏電検出・通報装置と
自走式電気防獣柵除草ロボットの開発

Development of the electric fence leakage detection and notification device
and the autonomous weeding robot

平成 30 年 3 月

福島県 **ハイテクプラザ**
FUKUSHIMA TECHNOLOGY CENTRE

はじめに

福島県ハイテクプラザは、県内ものづくり産業の技術基盤の高度化を図るため、基盤産業・伝統産業の支援、成長産業の創出、地域資源の活用等、様々な事業に取り組んでまいりました。東日本大震災以降は、本県製造業の復興・創生を目指す「成長産業分野への誘導」と「ものづくり活動のサポート」を柱に、「ロボット」、「再生可能エネルギー」、「医療機器」及び「航空・宇宙」に関連する産業の育成・集積に向けて、大学や企業、他の行政機関と緊密に連携し、企業支援や技術開発を推進しております。

このような背景の中、ロボット産業の創出と相双地区の営農再開を目指し、平成27年度から平成29年度までの3年間にわたって、福島県農業総合センターと共同で、チャレンジふくしま「ロボット産業革命の地」創出事業「電気防獣柵漏電検出・通報装置と自走式電気防獣柵除草ロボットの開発」を実施いたしました。

本報告書は関係者一同の3年間の研究成果をとりまとめたものであり、広く県内企業の皆様の技術力向上の一助となれば幸いです。

おわりに、本事業の推進にあたり、関係機関の皆様のご協力とご指導をいただきましたことに心から厚く御礼申し上げます。

平成30年3月

福島県ハイテクプラザ

所長 大和田野 芳郎

研究テーマ：電気防獣柵漏電検出・通報装置と自走式電気防獣柵除草ロボットの開発

目 次

1. 研究の概要	1
2. 電気防獣柵漏電検出・通報装置の開発	3
3. 自走式電気防獣柵除草ロボットの開発	7
4. 自走式電気防獣柵除草ロボットの除草性能評価	11
5. 電気柵下の雑草対策としての抑草資材の利用	14
6. 除草ロボットの自律走行を目的とするディープラーニング画像認識の検討	17

研究の概要

福島県の相双地区では、東京電力福島第一原子力発電所の事故の影響で営農者が遠隔地に避難しているため、定常的な耕作地の管理ができなくなり、イノシシなどによって農作物が荒らされる獣害が多発している。これに対し、獣害対策の主要な手段である電気防獣柵（以下、電気柵）を設置して対策しているものの、伸びた雑草が電気柵に接触して漏電が発生し、電気柵が機能不全に陥ってしまうことが問題になっている。

雑草対策としては、一般的に農薬や抑草シートの使用が考えられるが、農薬を使う場合、薬剤のコストや薬剤を撒く労力がかかること、近くで作物を栽培している場合は登録された農薬以外は使用できないことなどから利用が限られる。また、抑草シートを活用した雑草対策は、電気柵の機能を阻害しない導電型抑草シートが一般的な抑草シートに比べ高額であり、全周数 km にわたって設営される電気柵に利用する場合、非常に大きな投資が必要となるため、あまり普及していない。

このような理由から、電気柵下の草刈は未だに刈払機を用いて人手で行われているのが現状であるが、数 km におよぶ電気柵下の草刈は大人が数人で手分けしても数日かかるなど手間がかかる上に、雑草が生い茂る夏場に屋外で作業を行う必要があり、担い手不足や高齢化が進む営農者にとって大きな負担となっている。また、誤って刈払機で電線を切ってしまうトラブルや、除草中の刈払機による事故も発生していることから、ロボットを活用した除草のニーズが高まっている。

そこで、本研究では電気柵が機能不全に陥ったことを早急に営農者へ通知するための漏電検出・通報装置（以下、漏電通報装置）と、漏電通知を受けて電気柵下を除草する自走式電気防獣柵除草ロボット（以下、除草ロボット）を開発することを目的に研究を行い、メールでの通知機能を有する漏電通報装置と電気柵の電線に沿って自走する除草ロボットを開発した。

また、農業総合センターと共同で、試作した除草ロボットの刈刃と走行速度の最適条件の検証、除草性能の評価や、防草シートの抑草効果、耐久性、通電性等についても検証を行った。

さらに、ディープラーニングによる画像認識技術を使い、電気柵の電線や支柱が認識可能かを検証し、今後除草ロボットの自律走行制御に適用可能かを検討した。

今回研究開発を行うにあたり、漏電通報装置と除草ロボットを使用する環境を以下のとおり想定した。

漏電通報装置は、地上高さ約 25cm に張られた電気柵の電線の電圧値を一定間隔で監視し、3G 通信により電圧値をクラウドサーバにアップするとともに、雑草の接触による漏電と電圧低下を検知した場合、遠隔地の営農者にメールで通報する。通報を受けた営農者は除草ロボットを農地に持ち込んで、比較的平坦な場所の電気柵下約 50cm 幅の除草を行う。支柱周辺や傾斜地、幅の狭い畦畔など、除草ロボットでの除草が困難な場所は防草シートを活用し、除草ロボットの作業中、営農者は法面などの雑草を行う。

想定する漏電通報装置と除草ロボットの使用イメージを図 1 に示す。

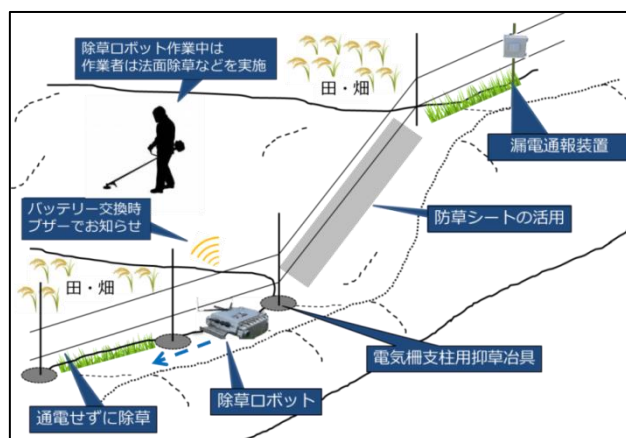


図 1 漏電通報装置と除草ロボットの使用イメージ

○分担課題と内容及び成果

分担課題：電気防獣柵漏電検出・通報装置の開発（ハイテクプラザ、農業総合センター）

内容：電気柵に伸長した雑草が接触して発生する漏電と電圧低下を営農者に通報する漏電通報装置を開発し、実証実験により実用性を検証する。

成果：電気柵の電圧値をクラウドに記録する機能と電圧が設定した電圧値よりも下回った場合にメールで通知する機能を持つ漏電通報装置を開発した。圃場で約1ヶ月間の実証試験を行い、漏電通報装置の各機能が問題なく動作することを確認し、実用性が検証できた。

分担課題：自走式電気防獣柵除草ロボットの開発（ハイテクプラザ）

内容：電気柵の漏電対策のために電気柵下の雑草を刈り取る自走式除草ロボットを開発し、圃場での実証実験を行って実用性を検証する。

成果：電気柵下の雑草を除草するロボットを開発するため、ロボットの形状や機能などの仕様を検討し、試作機を委託製作した。また、走行制御アルゴリズムを検討し支柱を回避しながら屈曲した電気柵の電線に沿って自走する走行プログラムを開発した。試作機を用いて圃場での実証試験を行い、電気柵線に沿った除草走行ができることを確認した。

分担課題：自走式電気防獣柵除草ロボットの除草性能評価（農業総合センター、ハイテクプラザ）

内容：除草ロボットの除草性能を評価するため、刈刃の種類と走行速度を変更した場合の除草性能や消費電力量の比較を行い、除草最適条件を検討する。

成果：除草ロボットの除草性能試験の結果、ナイロンコードを装着し、150mm/sの速度で走行させたときが刈り残しが少なく、バッテリーの消耗も抑えられることが分かった。

分担課題：電気柵下の雑草対策としての抑草資材の利用（農業総合センター）

内容：除草ロボットで除草できない場所の雑草対策として利用する防草シートなど簡易な抑草資材の抑草効果、耐久性、通電性等について検証する。

成果：抑草資材として、黒マルチ、畦ポリシート、防草シートを水田畦畔に敷設し、その抑草効果を評価した結果、黒マルチ、畦ポリシートは1ヶ月程で破損が発生した。電気柵下の雑草対策としてはポリプロピレン製防草シートの耐久性および抑草効果の評価から幅1mの防草シートがより適しており、水分が少ない場所に設置する場合は導電性の防草シートが適していることが分かった。

分担課題：除草ロボットの自律走行を目的とするディープラーニング画像認識の検討（ハイテクプラザ）

内容：ディープラーニングによる画像認識技術を活用して電気柵の電線や支柱が認識可能か検証し、除草ロボットの自律走行制御への適用可能性について検討する。

成果：ディープラーニングにより電気柵の電線や支柱を画像認識で識別するための学習モデルを作成し、実際の圃場で取得した写真を用いて本学習モデルを評価したところ、約75～90%の正解率が得られた。この結果から、ディープラーニングによる画像認識技術の除草ロボットへの適用が可能なことを確認した。

電気防獣柵漏電検出・通報装置の開発

Development of the electric fence leakage detection and notification device

技術開発部 プロジェクト研究科 三浦勝吏 吉田英一 菅野雄大 高樋昌*1
農業総合センター 企画経営部 木幡栄子 河原田友美 宮和佳子 青田聡*2

農作物を獣害から守るために設置された電気防獣柵に伸長した雑草が接触して発生する漏電を通報するための漏電検出・通報装置を開発した。この装置は、電圧をクラウドに記録する機能と電気柵の電圧が設定した電圧よりも下回った場合に持ち主にメールで通知する機能を持つ。この装置を用いて実証試験を行い装置の実用性を確認した。

Key words: 除草、電気柵、漏電通報

1. 緒言

現在、福島県内ではイノシシなどによって農作物が荒らされる獣害が多発しており、県内だけでも被害額が約 6,500 万円にも上っている¹⁾。全国的に見てもイノシシによる農作物の被害は 50 億円を超え、深刻な状況となっている²⁾。これに対し、獣害対策の主要な手段である電気防獣柵（以下、電気柵）を設置して対策をとっているものの、雑草が伸びて電気柵に接触して漏電が発生し、電気柵が機能不全に陥ってしまうことが問題になっている。

一般的に電気柵の電圧は 4.0kV を下回ると効果がなくなるといわれている³⁾ため、現地へ定期的に出かけて電気柵を管理する必要がある。そのため、電気柵の電圧をチェックするテスターが市販されており、県や市町村がこまめな管理を呼びかけるなどの対策を行っているが、あまり効果は得られていない。

そこで、ハイテクプラザでは電気柵の管理の負担を軽減することを目的に電気柵が機能不全に陥ったことを早急に営農者へ通知するための漏電検出・通報装置（以下、通報装置）を開発することとした。今回開発した通報装置は既存の電気柵に取付可能となっており、一定間隔で電気柵の電圧をクラウドに記録し遠隔地から PC やスマートフォンで電気柵の状況を確認できる機能と、電気柵の電圧が、設定した電圧よりも下回った場合に営農者にメールで通知する機能を持つ。

ここでは通報装置の設計及び製作、実証試験による機能確認について報告する。

2. 漏電検出・通報装置の設計、製作

2. 1. 漏電検出部

開発した通報装置は電圧測定部と通信部で構成されており、電圧測定部では、マイコン (Smart Projects, Arduino PRO mini 3.3V) を用いて電圧の測定及び漏電検出を行った。電気柵には通常、約 5.0kV~10.0kV のパルス電圧が 1 秒間隔で印加されているため、分圧回路とピークホールド回路を用いて電圧を測定した。システムのブロック図及び回路図を図 1、図 2 に示す。



図 1 電圧測定部ブロック図

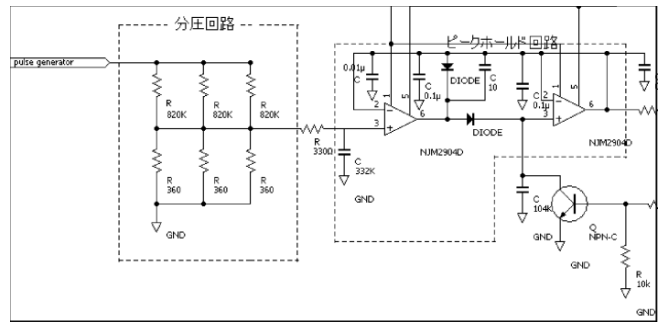


図 2 電圧測定部回路図

分圧回路では入力電圧を 1/3000 に分圧し、ピークホールド回路でパルス電圧のピーク値を保持することによってマイコンでの電圧測定を可能とした。ピークホールド回路とは波形のピーク値を保持する回路である。この通報装置は、通報電圧として設定した電圧よりも下回った場合に漏電と判断し通報することとした。通報電圧は使用者が任意に設定できるように 4.0kV、4.5kV、5.0kV、5.5kV、6.0kV とスイッチを切り替えることによって設定可能である。

2. 2. 漏電通報部

通信部は、3G 通信機能を持つモジュール (タブレット社、3GIM 2.1) を用いた。これにより漏電したことをメールで知らせることが可能となる。具体的には、3G 通信モジュールからサーバーを経由して持ち主にメールを通知するシステムである。このサーバーは、フリーのウェブサーバー (ネットオウル株式会社、ウェブクラウド) を使用している。さらに、通報装置の機能の 1 つとして、電気柵の電圧をクラウドに記録する機能を取り入れた。このことによって、常時電気柵の状態を PC やスマートフォンで確認することができる。システムの概要を図 3 に示す。

*1 現ハイテクプラザいわき技術支援センター

*2 現県南農林事務所

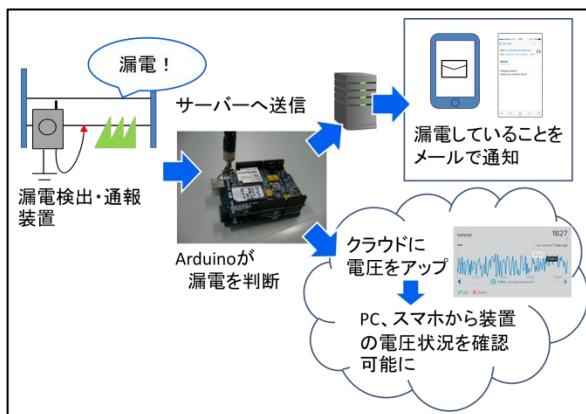


図3 通信システム概要

この通報装置は 30 分ごとに電圧を測定し、クラウドに記録する。その際、電気柵の電圧が、設定電圧よりも低かった場合、登録したメールアドレスにメールを送ることができる。送信されたメールを図4に示す。

また、漏電が発生してから営農地に行くには時間がかかることもあるため、30分ごとに毎回メールが送信されるのではなく、徐々に送信頻度を減らしていく機能を加えた。最初の通知から連続して3回漏電と判断され、メールが送信されると、次回からは1時間ごとにメールが送信される。さらに3回連続で漏電通報のメールが送信された場合は2時間、そしてさらに3回連続で漏電通報のメールが送信された場合は4時間ごとにメールが送信されることとした。

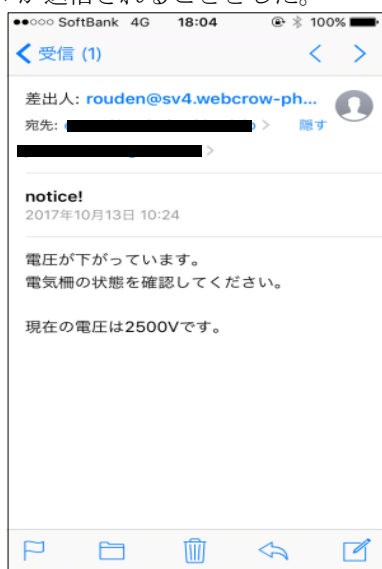


図4 通報メール内容

2. 3. 通報装置全体

電圧測定部及び通信部を組み合わせ、通報装置を製作した。長期間屋外に設置するため、通報装置のケースには防水・防塵性のプラスチックボックス（タカチ精機、BCAP型防水・防塵プラボックス）を使用した。外観を図5に示す。



図5 通報装置外観

また、この通報装置は、常に電気柵の電圧を監視するため、周囲に電源のない圃場で長期間動作する必要がある。開発当初は消費電流の高いマイコン（Smart Projects, Arduino UNO）を使用していたため、4日程度しか持たなかったが、消費電流の低いマイコン（Smart Projects, Arduino PRO mini 3.3V）を使用し、電池の容量を増やすなどの改良をした。

その結果、30分に1回の間隔で30秒間電圧を測定し、3800mAhのバッテリーを使用した場合、計算上では約6か月の連続動作が可能となり、電気柵を設置してから農作物の収穫を行うまでの間連続で監視することができる。マイコンの消費電流を比較したものを表1に示す。

表1 消費電流とバッテリー寿命(3800mAhの場合)

	起動時 (mA)	スリープ時 (mA)	平均電流 (mA)	稼働時間 (日)
変更前	60	40	40.3	4
変更後	16	0.6	0.85	184

3. 実証試験

3. 1. 測定精度

製作した通報装置が正確に電圧を測定できているか確認するため、この装置を農業総合センターの圃場に設置されている電気柵（末松電子株式会社、ゲッターエース3）に接続し、実験を行った。

オシロスコープで測定した電圧を基準とし、通報装置で測定した電圧を比較することで装置の精度を確認した。電気柵には、通常5.0kV～10.0kVのパルス電圧が約1秒間隔で印加されているので、ピーク電圧を電気柵にかかる電圧とした。また、今回基準とした電圧は、オシロスコープ（Tektronix, MDO4104B-6）及び高電圧プローブ（Tektronix, P6015A）を使用して5回測定した平均値とした。オシロスコープで測定した電圧波形を図6に示す。今回測定した電気柵は、多くの雑草が電気柵に触れていたため、電圧のピーク値は通常よりも低い3.8kVを示した。

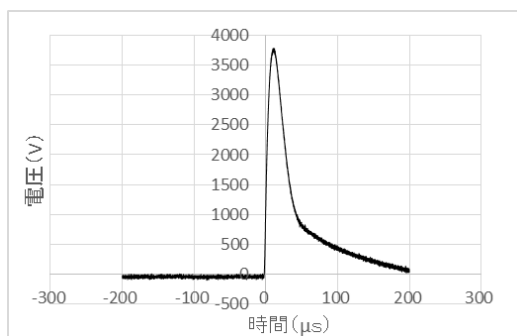


図6 電気柵電圧波形

続いて通報装置を用いて電気柵にかかる電圧を測定した。この実験では、通報装置の電圧は、3秒に1回の間隔で60回電圧を測定し、平均した値とした。値は3.4kVとなり、オシロスコープとの誤差は10.5%であった。通報装置は電気柵の管理を行うためには大まかな電圧低下を把握できれば良いことと、市販のテスターと比較しても同程度の値を示していたことをふまえて、10.5%の誤差は実用に耐えうると判断した。

3. 2. 長期試験

実際の圃場で、実際に使用する形で装置を設置し、一定の期間稼働させた。その間、稼働時間や防水性など問題が起きないか総合的に評価を行った。日時、実験方法等については以下の通り。

- (1) 日時：10月4日（水）～11月17日（金）
（45日間）
- (2) 場所：郡山市石筵地区圃場
- (3) 使用電気柵
末松電子社製ゲッターエース
最大出力：9.8kV
電気柵長：約800m
- (4) 実験方法
30分に1回電気柵の電圧を測定し、xivelyというクラウドに電圧をアップロードし、電圧を記録した。また、4.0kVを下回った場合には、持ち主にメールで通知した。さらに、1日の気温、降水量を記録した。

実験の結果、電気柵が撤去される11月17日までの45日の間、連続で稼働することを確認した。結果を図7、8に示す。試験を行った圃場では、多くの場所で雑草が電気柵にかかっていたため、実験開始時から、4.0kVを下回っていた。しかし、この実験では連続稼働による通信の状態や防水性を把握することを目的としているため漏電している状態から試験を開始しても問題ないとした。試験の間に台風が接近し、大雨に見舞われたが、問題なく稼働していることを確認した。

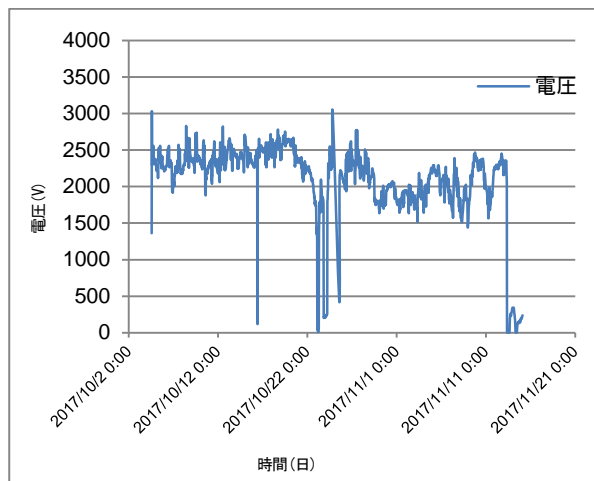


図7 長期試験結果（電圧）

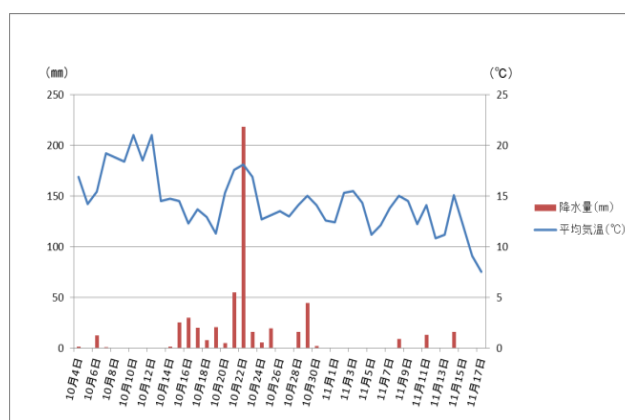


図8 長期試験結果（気温、降水量）

3. 3. 通報電圧の検討

電気柵の電圧と草丈の関係について確認したところ、電気柵の長さが短い場合、4.0kVまで電圧が低下した時の草は、電気柵が埋もれるほど伸びていた。これは、電気柵の長さによって草が柵線に触れる量が変わってくるため、同じ草丈でも電気柵の長さによって漏電の度合いが変わってくると考えられる。

除草ロボットは草が伸びきる前に除草を行うことを想定し作られているため、草が大幅に伸びてしまうと除草することができなくなってしまう。このため、電気柵の長さによって通報する電圧を変更できる機能が必要であることが分かった。

そこで、電気柵の長さを変えて、電圧を測定し、適切な通報のタイミングを検討した。実験の方法については以下の通り。

- (1) 場所：農業総合センター圃場
- (2) 使用電気柵
末松電子社製ゲッターエース 3
最大出力：9.8kV

(3) 実験方法

- (ア) 電気柵下の草の長さ（自然長）を測定し、平均の長さを求める。
- (イ) 測定した平均草丈の長さを基準に、柵線の高さを 4cm ずつ変えていき、その時の電気柵の電圧を測定する。（図 9）
- (ウ) 電気柵の長さを 5m、25m、50m、100m と変更し、方法（イ）を繰り返す。

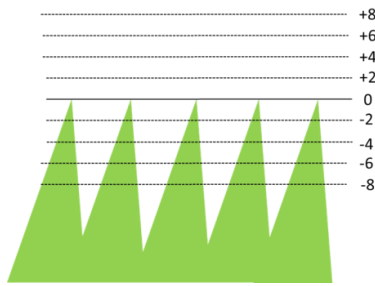


図 9 実験方法

電気柵の長さを変えて、基準点よりも 8cm 低い高さから 4cm ごとに変化させ、電圧を測定したところ、図 10 のような結果が得られた。

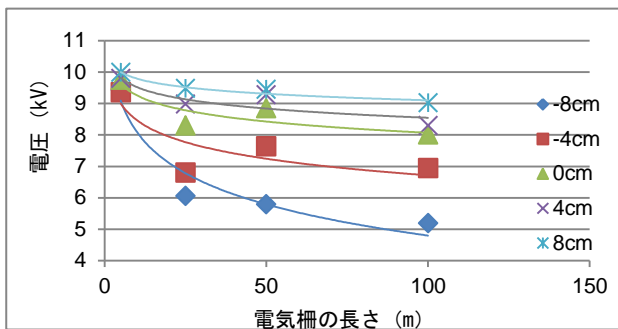


図 10 電気柵の長さと電圧の関係

今回の場合は、除草ロボットが雑草を刈ることを想定して、雑草が柵よりも 4センチ伸びた時のデータをもとに近似式を導出した。このとき、 x を電気柵の長さ、 y を電圧とすると近似式（1）が得られた。

$$y = -0.763 \ln(x) + 10.227 \quad (1)$$

この近似式をもとに電気柵の長さと電気柵の電圧の関係を求めることができる。この結果を参考に電気柵の長さが 200m 以下のときは 6.0kV、200～800m のときは 5.5kV、800～1500m のときは 5.0kV、1500m 以上のときは 4.5kV で通報するよう、スイッチによって設定電圧を切り替えることができるように変更した。

3. 4. 耐熱試験

通報装置が夏場の炎天下の使用に耐えることができるか確認するため恒温恒湿槽（日立アプライアンス、cosmopia EC-10MHPS）を用いて耐熱試験を行った。

夏場、通報装置はかなり高温になると予想されるため、槽内温度を 80℃に設定し、10 日間放置した。その間、30 分ごとにメールを送信するよう設定していたが、途切れることなくメールが送信されていることを確認した。

また、耐熱試験後の電圧測定についても問題が生じていないか確認するため実験を行った。電気柵の電圧を 10 段階に変化させて電圧を測定し 4.0kV を下回った場合にメールが送信されるか確認した。結果を表 2 に示す。

測定精度に関しては耐熱試験前と同等の精度を持つことを確認した。また、電圧が 4.0kV を下回った場合にメールを送信することができた。この結果から、通報装置は 80℃までは正常に動作できることを確認した。

表 2 耐熱試験後の電圧測定値

No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
オシロスコープ (kV)	6.4	5.8	5.2	4.6	3.9	3.2	2.6	2.1	1.4	0.8
通報装置 (kV)	6.4	5.8	5.2	4.2	3.8	3.2	2.4	1.9	1.2	0.8
メール送信	-	-	-	-	○	○	○	○	○	○

4. 結言

電圧測定部及び通信部のシステムを検討し、通報装置を開発した。測定精度は市販のテスターと同程度で、実環境においての長期試験でも問題なく動作することができた。

ただ、この通報装置は 3G 通信が届かないところでは使用できないといった問題がある。また、長期試験に協力してもらった農家の使用者の意見の中に、漏電個所の位置も分かれば良いという意見があった。平成 29 年度で研究は終了するが、今後実用化に向けて対応していく必要がある。

参考文献

- 1) “平成 27 年度野生鳥獣による農作物の被害状況” 福島県
<https://www.pref.fukushima.lg.jp/uploaded/attachment/210619.pdf>
- 2) “全国の野生鳥獣による農作物被害状況（平成 28 年度）” 農林水産省
http://www.maff.go.jp/j/seisan/tyozyu/higai/h_zyokyo2/h28/attach/pdf/180119-5.pdf
- 3) “「電気柵管理のチェックポイント」利用にあたって” 福島県
<https://www.pref.fukushima.lg.jp/uploaded/attachment/48068.pdf>

自走式電気防獣柵除草ロボットの開発

Development of the autonomous weeding robot

技術開発部 プロジェクト研究科 菅野雄大、吉田英一、高樋昌*1

農作物を獣害から守るために設置された電気防獣柵において、伸長した雑草が電気防獣柵に接触して発生する漏電を防ぐため、電気防獣柵下の雑草を刈り取る自走式除草ロボットを開発した。圃場でこのロボットの実証実験を行い、電気防獣柵に沿った除草走行を確認した。

Key words: 電気防獣柵、除草ロボット

1. 緒言

東京電力福島第一原子力発電所の事故後、県内の営農者が、定常的な耕作地の管理ができなくなり、イノシシなどによって農作物が荒らされる獣害が多発している¹⁾。主要な獣害対策として電気柵を設置する農場が増えているが、雑草が電気柵に接触することで漏電が発生し、電気柵の効果が薄れてしまう。そのため、草刈りなどの保安全管理が重要である。

しかし、数 km に及ぶ電気柵周りの除草や夏場の除草は重労働であり、営農者の高齢化とともに大きな課題となっている。

営農者の負担を減らす除草ロボットの研究は盛んに行われているが、電気柵下の除草は、柵線や支柱が障害物となるため、これらを回避する走行制御が必要なことや、柵線や支柱を切らずに除草を行わなければならないといった課題があり、ロボットの導入には至っていない。

本研究では、電気柵下の除草作業における営農者の負担を軽減することを目的に、柵線や支柱を回避しながら電気柵下の除草を行う自走式除草ロボット(以下、除草ロボット)を開発した。ここでは、除草ロボットの仕様や制御方法、実際の圃場で走行性能を評価した結果について報告する。

2. 除草ロボットのシステム構成

2. 1. 除草ロボットの使用環境の想定

本研究で開発する除草ロボットは、畦畔に設置された電気柵下の除草を想定する。支柱周辺や傾斜地、幅の狭い畦畔など、除草ロボットでの除草が困難な場所は防草シートを活用し、除草ロボットの作業中、営農者は法面などの除草を行う。除草ロボットの使用条件を以下に示す。

- ・比較的平らで傾斜角 15° 以内の畦畔
- ・柵線の高さ 20 [cm]~30 [cm]
- ・あぜ道の幅 80 [cm]以上

これらの使用条件から以下のように除草ロボット

の設計方針を決めた。

2. 2. 設計方針

除草ロボットは、畦畔の走行を想定しているため、走行部は走破性を考慮しクローラ型とした。また柵線を走行目標として利用することが可能であるため、接触子(角度センサ)を用いて柵線との角度を計測しながら柵線に沿って走行する構造とした。さらに、除草ロボットが柵下の除草を行う際、支柱を接触式センサであるバンパースイッチで検知する方式とした。そのためバンパースイッチと支柱が接触するように、除草カッター部は機体の下側(裏側)に取り付ける。柵線下を除草走行する際は、柵線下にロボット機体が入り込み、除草する方式とした。

2. 3. ロボットの構成

除草ロボットの持ち運びを考慮し、機体サイズをコンパクトにし、機体の高さは、一番低い柵線の高さより低い 20 [cm]とした。そのため駆動方式はエンジン

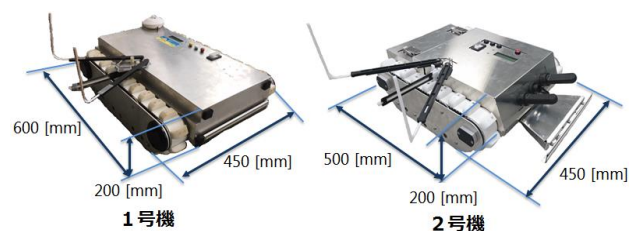


図1 除草ロボットの外観

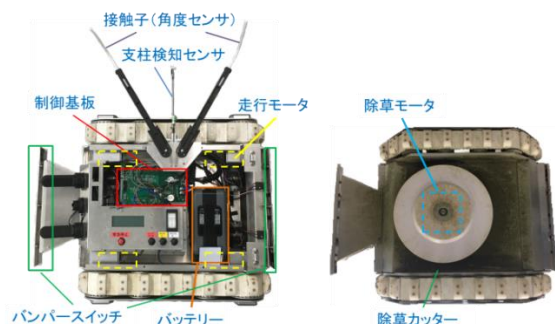


図2 ハードウェア構成 (2号機)

*1 現ハイテクプラザいわき技術支援センター

より小型化が図れるモータ駆動とし、搭載するバッテリーは、36V6Ah リチウムイオンバッテリーとした。

センサは、柵線との角度計測用に角度センサ、支柱回避動作にバンパースイッチ、支柱検知センサをロボットに搭載した。

使用刈刃は、直径 250 [mm]のナイロンコード及び金属刃の取り付けが可能である。

2. 4. 除草ロボットの設計

除草ロボットの外観を図 1 に、ハードウェア構成を図 2 に示す。1 号機は平成 28 年度に開発し、2 号機は平成 29 年度に 1 号機をベースに改良して開発した除草ロボットである。

1 号機から 2 号機への変更点として、よりサイズをコンパクトにしている。また、凹凸のある地面では、除草カッターの下皿の部分が接触し、走行不能になることがあるため、2 号機ではカッター部に上下に移動するバネ式機構を設け、これを防ぐ機構とした。またカッターから安全距離を確保するため前方のバンパースイッチを前に出す設計とした。

これらの策定した仕様を基に、ベースとなるロボットの製作を県内企業のひさき設計株式会社に委託し、これに必要な走行制御プログラムをハイテクプラザで作成した。

3. ロボット走行プログラムの開発

3. 1. 走行制御アルゴリズム

柵線を走行目標とし、柵線に沿った走行を実現するために、委託製作したロボットに以下の走行制御アルゴリズムを適用した。

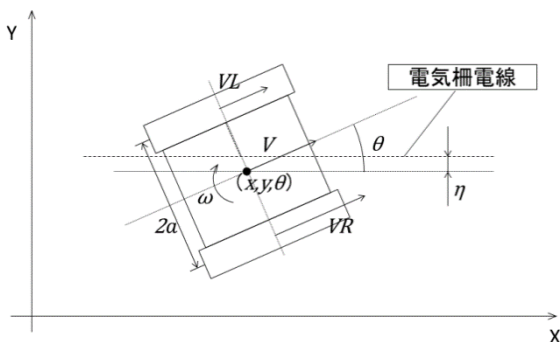


図 3 除草ロボットの数学モデル

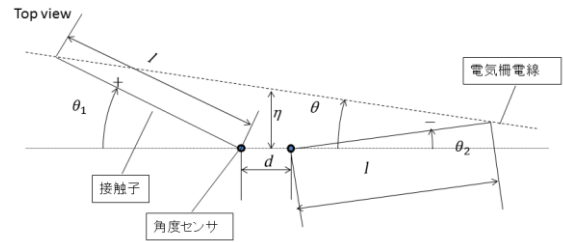


図 4 角度検出機構

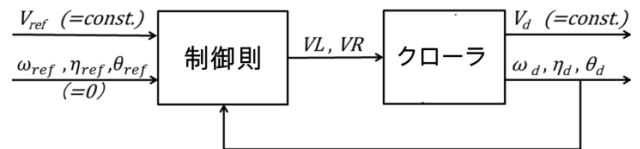


図 5 制御ブロック図

除草ロボットが電気柵に沿った走行をする場合、電気柵の支柱を回避する必要がある。除草ロボットは、図 2 のように角度センサの他、バンパースイッチ、支柱検知センサによって支柱回避動作を行う。なお、ロボットが柵線に沿い、角度計測できている間はフィードバック制御しているが、柵線を見失う支柱回避動作時はオープンループ制御となる。

除草ロボットに対する数学モデルを図 3 に示す。また、角度検出機構を図 4 に示す。図より、除草ロボットの状態は式(1)~(6)のように表すことができる。

$$\dot{x} = V \cos \theta = \{(VR + VL)/2\} \cos \theta \quad \dots (1)$$

$$\dot{y} = V \sin \theta = \{(VR + VL)/2\} \sin \theta \quad \dots (2)$$

$$V = (VR + VL)/2 \quad \dots (3)$$

$$\theta = (\theta_1 + \theta_2)/2 \quad \dots (4)$$

$$\omega = (VR - VL)/2a \quad \dots (5)$$

$$\eta = (l(\sin \theta_1 - \sin \theta_2))/2 \quad \dots (6)$$

ここで、 x 、 y はロボットの中心位置、 θ はロボットと柵線のなす角、 V はロボット中心の速度、 VL 、 VR はロボットクローラの左右の速度、 $2a$ はロボットのトレッド長、 η は柵線とロボットのオフセット、 ω はロボットの角速度、 l は接触子の長さ、 θ_1 、 θ_2 は角度センサが示す角度である。図 4 の d はセンサ間の距離で、十分小さいとみなし 0 とした。なお、式(1)、(2)は自己位置推定に用い走行制御には用いない。

式(3)、(5)から次式を得る。

$$\begin{pmatrix} VL \\ VR \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & -a \\ 1 & a \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V \\ \omega \end{pmatrix} \quad \dots (7)$$

本研究では、除草ロボットは一定速度で走行させることとした。よって V は固定値となる。また a も固定値である。したがって ω を推定できれば除草ロボットの VL 、 VR が求まり制御が可能となる。そこで、直線追従制御の制御則を式(8)のように設定する²⁾。

$$\frac{d\omega}{dt} = -k_{\omega}\omega - k_{\theta}\theta - k_{\eta}\eta \quad \dots (8)$$

ここで、 k_{ω} 、 k_{θ} 、 k_{η} はそれぞれ角速度、角度、オフセットに関する制御係数である。また、 ω は式(5)により、 θ 、 η は式(4)、(6)のとおり角度センサを用いて求めることができる。

これらから、制御モデルのブロック図は図5のようになる。制御ブロックをもとに、制御係数を適切に選択しプログラムを実装した。

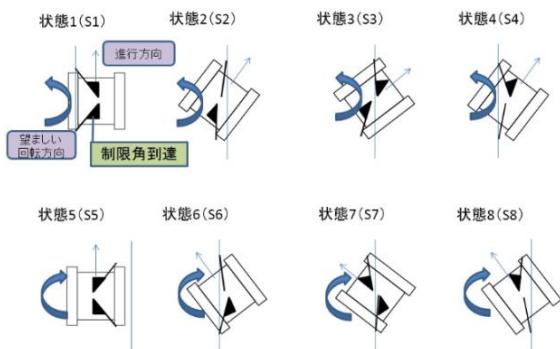


図6 目標に対するロボットの位置

また柵線に沿った走行を行う際、図6のように8つの状態の姿勢が考えられる。図のS1～S4の状態を測定角度から判定し、オープンループによる左旋回を実施する。同様にS5～S8の状態を測定角度から判定し、オープンループによる右旋回を実施する。

3. 2. 走行動作

ここでは、前述した走行制御アルゴリズムを使用した走行方法について述べる。

3. 2. 1. 除草の終了条件

除草終了の条件は、あらかじめ設定した支柱数に到達した時、またはバッテリーの容量が減り除草ができなくなった時とした。そのバッテリー容量の閾値については、バッテリー容量が少なくなり除草ができなくなるまで連続除草走行させた際の除草走行時間とバッテリー電圧値の関係を調べ決定した。

その結果を図7に示す。試験開始から1時間経過後、バッテリー電圧が30[V]を下回ったところから急激に電圧が低下し、除草モータの回転が弱まり、草が刈れなくなった。したがって、除草終了の条件として30[V]を閾値とした。

なお、除草モータの消費電力に比べ走行モータの消費電力は小さいため、30[V]を下回っても途中で止まることなく1時間以上の走行が可能である。

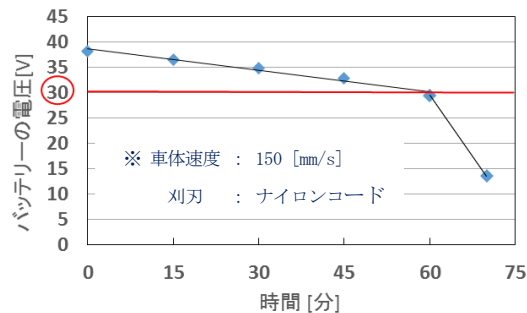


図7 バッテリー電圧値と除草走行時間の関係

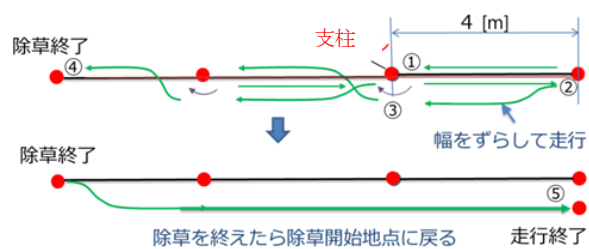


図8 除草ロボットの走行方法

3. 2. 2. 走行方法

除草ロボットの走行方法を図8に示す。図のように除草ロボットは柵線に沿った走行を行い、ロボット前方にあるバンパースイッチが支柱に当たったらバック走行に移る(図8①)。このような走行方法にしたのは、ロボットが走行する際、草をロボットが倒れてしまい刈残しが出る場合があり、そこをバック走行することによって、一度寝てしまった草を起し、刈ることができるからである。バック走行後ロボット後方にあるバンパースイッチが支柱に当たったら、柵線の左側、前方に向かって走行する(図8②)。そうすることで前方にある支柱を回避する。前方の支柱横まで到達した時、ロボットの支柱検知センサに支柱が当たることでロボットが支柱を検知し、再度内側に入り柵線の下で除草を行う(図8③)。これを繰り返す(図8①～③)。

除草が終了したら除草カッターの回転を止め、柵線の左側をバック走行し、除草開始地点に戻る(図8④)。

除草開始地点には終了用の支柱を立て、そこにバンパースイッチが当たったら走行終了となる(図8⑤)。

また、除草走行の終了を営農者に伝えるため、ブザー音を鳴らす。

また、前述した走行動作のように、柵線真下の除草と柵線左側の除草を行うため、ロボットと柵線のオフセット η (角度センサ中心から柵線までの距離)をそれぞれ設定し、後方のバンパースイッチ(図8②)及び支柱検知センサ(図8③)で支柱を検知したタイミングでオフセット η の設定を切り替えるようにした。

3. 2. 3. 緊急停止機能

柵線の高さが想定と異なり、万が一接触子が柵線から外れた際には、ロボットが停止する機能を実装した。しかし、コーナー部を曲がる際は、同様に接触子が柵線から外れる状態となるため、この場合は停止する機能が働かないようにしなければならない。そのため、前述したオフセット η の設定の切り替えるタイミングと同様、この停止する機能を柵線の真下を走行する時のみ働かせ、コーナーを曲がる時のような柵線の左側を走行する場合は働かせないようにした。

3. 2. 4. プログラム実装

前章の走行動作のプログラムをロボットに実装した。

プログラムを実装する上で、制御用マイコンはルネサス社製 RX610 を使用した。またリアルタイム OS は、TOPPERS/ASP を使用し C 言語で記述した。除草ロボットにはプログラムの書き込み用に、拡張 USB ポートが備え付けられている。

プログラムは、図 6 のような 8 つの状態（ロボットの姿勢）に応じた状態遷移を実現できるように記述した。

4. 除草走行実験

電気柵を張った実畦畔で除草ロボットの除草走行を確認するため、図 9 のように石筵圃場で除草走行試験を行った。全周 800 [m] の電気柵のうちロボットが除草走行可能で比較的平坦な 20.9 [m] の区間で実施した。

<試験条件>

日 時：平成 29 年 12 月 1 日
 場 所：郡山市石筵地区圃場
 車体速度：150 [mm/s]
 刈 刃：ナイロンコード
 試験範囲：20.9 [m] (支柱 6 本)
 柵線高さ：約 25 [cm]



図 9 石筵圃場での除草走行実験の様子

5. 実験結果及び考察

石筵圃場の試験区間において図 8 の除草走行方法で実験した結果、安定した走行制御ができ、柵線に沿った走行と除草が可能であることを確認した。1 号機ではカッター部がつかえて走行できなかった凹凸のある畦畔も、2 号機ではカッター部にバネ式上下機構を設けたことで走行することが可能となった。

表 1 除草ロボット（2 号機）の仕様

サイズ	W450×D500×H200	
バッテリー	36V6Ah(Li-ion)	
走行モータ	DCモータ4輪駆動 最大消費電力 8.55 [W]×4個	
除草モータ	日立工機フラットDCモータ 最大消費電力200 [W]	
制御マイコン	ルネサス製RX610	
RTOS	TOPPERS/ASP	
除草部	草高20 [cm]の雑草の除草が可能（刈幅50 [cm]）	
	使用可能なカッター：ナイロンコード、金属刃 カッターサイズ：φ250	
	除草カッター部のばね式上下動機構	
走行部	センサ	角度センサ
		バンパースイッチ
		支柱検知センサ
	MAX傾斜15°の坂の登坂可能	
	除草開始地点に戻る走行制御	
共通部	最大1時間除草走行可（バッテリー1個フル充電時）	
	緊急停止機能（接触子が柵線から外れた時）	
	リモコンで制御可	

6. 結言

表 1 の仕様を有する除草ロボットを開発した。接触式の角度検出機構で、除草ロボットと電気柵の角度を測定し走行制御を行うことで、安定走行を実現した。また石筵圃場で除草走行実験を行い、電気柵に沿った走行制御及び電気柵下の除草が可能であることを確認した。

参考文献

- 1) 福島県営農再開支援事業の検証結果（平成 27 年月）.農林水産省生産局農産部農業環境対策課
http://www.maff.go.jp/j/seisan/suisin/tuyoi_nougyou/t_tuti/h26/pdf/kikin_05.pdf
- 2) 米田完ほか.はじめてのロボット創造設計.講談社.2001.37p

自走式電気防獣柵除草ロボットの除草性能評価

The herbicidal performance evaluation of the autonomous weeding robot

農業総合センター 企画経営部 宮和佳子 河原田友美 木幡栄子 青田聡*1
技術開発部 プロジェクト研究科 吉田英一 菅野雄大 三浦勝吏 高橋昌*2

電気防獣柵の維持管理、特に柵線に雑草が接触して発生する漏電を防ぐために、電気防獣柵下の雑草を刈り取る自走式除草ロボットの除草性能の試験を行い、刈刃の種類、走行速度を変更して除草性能や、消費電力量の比較を行った。除草ロボットに複数種類の刈刃をつけ比較したところ、ナイロンコードで最も除草後の草高が低かった。ただし、除草前の草高が25cmを超えると除草の精度が下がった。また、150mm/s の速度で走行させた時は、刈り残しが少なく、バッテリーの消耗も抑えられた。

Key words: 電気防獣柵、除草ロボット、刈刃

1. 緒言

電気柵下の除草を行うことを目的とし開発された自走式除草ロボット（以下、除草ロボット）について、実際に草地で走行・除草を行い、刈刃の種類や走行速度の違いによるモータの消費電力および除草性能への影響について評価した。

2. 除草ロボットの除草性能試験

除草ロボットの性能試験は試作機1号機を用いて行った（図1）（表1）。



図1 除草ロボット1号機

表1 除草ロボット（1号機）の構成

サイズ	L600×W450×H200
重量	20kg
バッテリー	36V6Ah (Li-ion)
走行モータ	DC モータ 4 軸駆動
除草モータ	日立工機フラット DC モータ

2. 1 除草試験

除草ロボットにおいて重要なことは、除草性能とバッテリーの持続時間である。電気柵は数百 m から数 km の長さで設置されているため、草を刈りながら長時間走行する必要がある。

そこで、刈刃の違いによってモータの消費電力や草

の刈り具合が変化するか確認するため除草試験を行った。

2. 1. 1 試験方法

試験は、除草ロボットの平均速度を 50mm/s、カッターの回転速度を 4500rpm とし、電気柵線に沿わせ約 5m 走行しながら除草を行った。刈刃はそれぞれ刈幅 250mm のものを使用した。試験の様子を図 2 に示す。



除草前 除草後

図2 除草試験

試験はナイロンコードと金属刃の刈刃を用いて行った。金属刃については、30 枚刃、8 枚刃、4 枚刃の 3 種類を使用し、計 4 種類について比較した。

除草走行を始める前に、走行個所の任意の場所に 25cm 角の枠を設定し、その中の除草前後の草高を調査した。なお、草高は自然状態での雑草の最も高い位置から地表までの高さである。

2. 1. 2 試験結果

除草モータの無負荷時の電流値は、金属刃の方がナイロンコードよりも低かった（図3）。金属刃はナイロンコードに比べ安定して回転するために消費電流が小さいと考えられる。負荷時でも金属刃がナイロンコードよりも消費電流が小さく、刃の数が少ないほど消費電流が小さい傾向が見られた（図4）。ナイロンコード

*1 現県南農林事務所

*2 現ハイテクプラザいわき技術支援センター

では無負荷状態でも消費電流が大きいことに加えて、刈り取り時の負荷が大きいためであると考えられた。

無負荷時と負荷時における平均消費電流を比較するとどちらもナイロンコードが金属刃よりも消費電流が大きかった (表 2)。

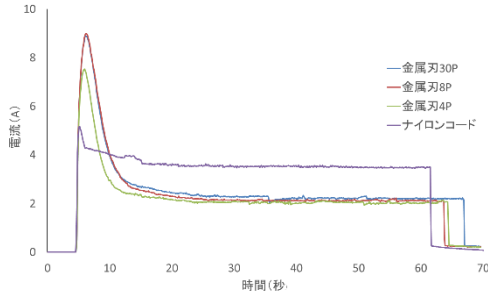


図3 無負荷時除草モータ消費電流

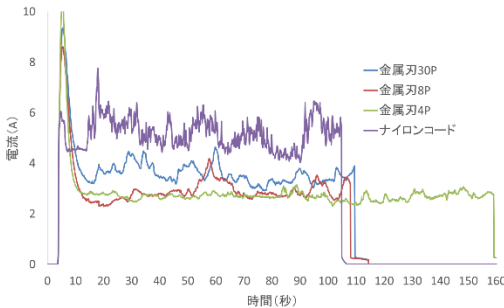


図4 負荷時除草モータ消費電流

表2 無負荷時及び負荷時の除草モータ平均消費電流 (A)

	金属刃 30枚刃	金属刃 8枚刃	金属刃 4枚刃	ナイロン コード
無負荷 電流(A)	2.3	2.1	2.1	3.5
負荷 電流(A)	3.6	2.9	2.7	5.2

除草性能を除草前後の草高によって比較した (図 5)。その結果、ナイロンコードで刈った草高が最も短く、除草性能が優れていた。金属刃に関しては、刃の枚数が多いほど草高が低かった。

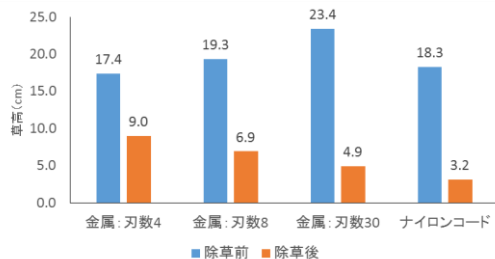


図5 除草結果

2. 2 走行速度、刈刃の比較

除草ロボットで除草を行うにあたり、刈刃の種類で除草性能、消費電力量が変わることが分かった。そこ

で、刈刃と走行速度を変えて、除草性能にどのような影響があるか試験を行った。

2. 2. 1 試験方法

試験は、草地に走行距離 10m の試験区を設定し、除草ロボットを走行させた。調査は試験区内に 25cm 角の枠を 3カ所設置し (図 6)、走行前後にその枠内でランダムに 20本 (イネ科雑草 10本、その他雑草 10本) の草高を測定した。

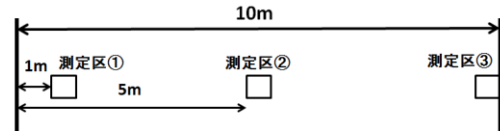


図6 試験区概要

試験はナイロンコードと金属刃 (8、40、60 枚刃) の刈刃を用いて行った。走行速度は 50mm/s、100mm/s、150mm/s とした。

2. 2. 2 試験結果

図 5 の試験結果と同様に、除草ロボットに装着する刈刃ではナイロンコードが除草性能に優れていた (表 3)。ナイロンコードでは走行速度によって除草性能に大きな影響は見られなかった。金属刃では、走行速度を上げることで除草性能が上昇する傾向が見られたが、目視した場合に刈り残された雑草が多く、20cm 以上の雑草が多かった。

表3 走行速度、刈刃の比較による除草性能

刈刃	走行速度 (mm/s)	草高平均値 (cm)	
		除草前	除草後
ナイロンコード	50	16.4	4.4
	100	16.5	5.3
	150	17.8	5.2
金属刃:8枚	50	17.9	6.0
	100	14.8	6.3
	150	16.8	8.9
金属刃:40枚	50	16.2	9.3
	100	16.0	7.4
	150	14.5	6.8
金属刃:60枚	50	18.9	9.4
	100	20.4	7.7
	150	14.1	4.9

2. 3 消費電力の検証

除草ロボットを走行させるにあたり、異なる走行速度における消費電力について検討した。

2. 3. 1 試験方法

試験では、除草モータの回転数が安定するまで 10 秒間待った後、50cm の助走区間をもうけ、刈幅 25cm

で1mの走行を行った。走行前後の草高、走行時間、消費電力、電圧を記録した。草高の測定は10cmごとに10回行った。ナイロンコードで設定走行速度50mm/s、100mm/s、150mm/s、金属刃で150mm/sの走行を行い、各条件で3回ずつ走行した。

2.3.2 試験結果

ナイロンコードでは走行速度を上げることで、処理面積あたりの消費電力量が小さくなった(表4)。走行速度、刈刃の比較試験から、ナイロンコードを装着した場合には、走行速度が除草性能に大きな影響をもたらさないことから、ナイロンコードを装着した除草ロボットで除草を行う場合、制御に影響しない範囲で走行速度を上げた方がより広い面積を除草できると考えられた。

表4 消費電力量(処理面積25[cm]×100[cm])

刈刃	設定走行	消費	刈取り	処理面積あたりの消費電力量 [J]
	速度 [mm/s]	電力 [W]	時間(実測) [s]	
ナイロンコード	50	156.5	30.9	4835.9
	100	182.5	16.8	3066.0
	150	189.9	11.4	2164.9
金属刃 40枚	150	144.8	11.6	1679.7

金属刃はナイロンコードより、処理面積あたりの消費電力量は小さかった。除草ロボットの改良に伴って、除草性能が改善されれば金属刃の取り付けを検討する必要があると考えられた。

走行前の草高の影響については、ナイロンコードでは除草前の草高が高いと除草性能が低下した(表5)。

表5 除草前後の草高

		草高(cm)	
		除草前	除草後
ナイロンコード	50mm/s	20.4	5.4
	100mm/s	25.6	11.9
	150mm/s	24.2	10.7
金属刃	150mm/s	31.8	24.7

試験圃場は、出来るだけ条件が同じになるよう設定したが、管理をしていない畑を用いたために、試験区によって除草前の草高に10cm以上の差が生じた。

図7のように、同じ条件(刈刃の種類、走行速度)であっても、除草前の草高によって除草性能に大きな差が見られた。除草ロボット1号機では、草高25cm以上

で除草性能が大きく低下する傾向が見られた。これは、除草ロボットが機体の下に刈り刃が装着されている構造上、草高が高すぎると機体が雑草をなぎ倒してしまい、除草性能が落ちることが考えられる。そのため、この対策として、効率良く除草できる草高に合わせた除草ロボットの走行時期やロボットの刈刃の位置について検討する必要がある。

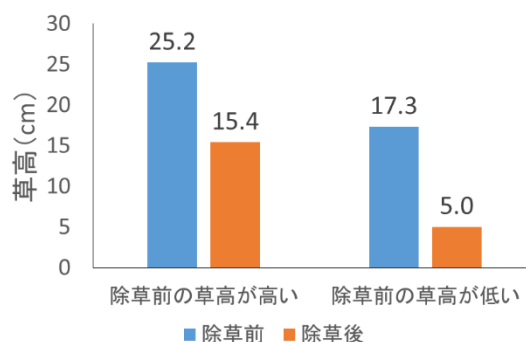


図7 ナイロンコード(100mm/s)での除草前後の草高の一例

3. 結言

刈刃の試験によって、除草ロボットにはナイロンコードを装着することで十分な除草性能が得られることが分かった。ナイロンコードを用いた場合、除草性能は走行速度の影響を受けず、走行速度を上げることで、処理面積あたりの消費電力量が低下した。ただし、草高25cm以上で除草性能が大きく低下する傾向が見られたため、草高条件を考慮し、効率良く除草できる草高に合わせた除草ロボットの走行時期やロボットの刈刃の位置について検討する必要がある。

電気柵下の雑草対策としての抑草資材の利用

Utilization of weed control materials as weed control under electric fencing

農業総合センター 企画経営部 河原田友美 宮和佳子 木幡栄子 青田聡*1

獣害対策として電気柵が広く利用されているが、伸長した草が電気柵に触れると漏電により電圧が低下し、田畑の獣害を防げない。電気柵下の雑草を抑制できれば漏電を防ぐことができ、安定した効果を得ることができる。そこで、防草シートなど簡易な資材の抑草効果、耐久性、通電性等について調査したところ、幅1mの防草シートが適していた。また、防草シート下の土壌の含水比が低いと電気柵の電圧も低下する傾向が確認された。水分の少ないコンクリート等に敷設する場合は、導電性の防草シートが適している。また、電圧の確認は水分の少ない状況でも行う必要があると考えられた。

Key words: 電気柵、抑草資材、防草シート

1. 緒言

イノシシ等の獣害対策としては、電気柵が広く利用されている。しかし、伸長した草が電気柵に触れると漏電により電圧が低下し、田畑の獣害を防げない。電気柵下の雑草を抑制できれば漏電を防ぐことができ、安定した効果を得ることができる。そこで、電気柵の柵線下の雑草対策として、黒マルチや防草シートなど簡易な抑草資材の抑草効果、耐久性、通電性等について、現地水田畦畔及び農業総合センター内圃場において、平成27年度から29年度まで継続して調査を行った。

2. 抑草資材現地試験

2. 1. 試験方法

平成27～29年の6～8月に郡山市熱海町石筵地区の水田畦畔で行った。供試した抑草資材を表1に示す。

表1 供試した抑草資材

抑草資材	素材	厚さ
1 黒マルチ	ポリエチレン	0.02mm
2 畦ポリシート	ポリエチレン	0.04mm
3 防草シートA	ポリプロピレン	0.5mm
4 防草シートB	ポリプロピレン	0.5～0.6mm
5 防草シートC	銅線織込みポリエチレン	0.39mm

注1) 黒マルチ及び畦ポリシートは平成27年のみ敷設。

注2) 防草シートA、Bは、異なる電気柵メーカーのカタログ掲載品。

注3) 防草シートCは、導電性で電気柵用の防草シートである。

注4) 防草シートCは平成28年に敷設した。

平成27年度に、幅0.6m、1mの黒マルチ、畦ポリシート、防草シートA及びBを敷設した。調査は、抑草資材ごとに雑草発生状況を5段階で評価した。また、破損・めくれ等敷設状況について確認した。

平成28～29年度は、平成27年度の結果を受けて、幅1mの防草シートA、B及びCを敷設し、継続して雑草発生状況について調査した。

試験区は各抑草資材及び無被覆区で長さ20mの3反復とした。電気柵の全長は約800mであった。

2. 2. 試験結果

2. 2. 1. 抑草資材の敷設状況

黒マルチ及び畦ポリシートは、敷設から1ヶ月程で穴やちぎれなどの破損や雑草による押さえピンの抜けが多く見られ、電気柵下の雑草対策として使用することは難しいと思われた(図1)。防草シートA、Bは、破損やピンの抜けが少なく、敷設状況は概ね良好であった(図2)。しかし、いずれの抑草資材でも、生長したギシギシにより資材が下から押し上げられて盛り上がっている箇所やピンが抜けている箇所があった(図3)。抑草資材を敷設する前に、除草剤等でギシギシをしっかりと駆除する必要があると考えられた。



図1 畦ポリシート(ちぎれ)

(撮影日: 平成27年7月29日)



図2 防草シートBの敷設状況
(撮影日：平成27年7月29日)



図3 ギンギンによる押さえピンの抜け
(撮影日：平成27年7月29日)

2. 2. 2. 雑草発生状況

調査日ごとの雑草発生状況の評価を表2、3に示す。

幅0.6mの抑草資材の試験区では、資材周辺の繁茂した雑草が柵線に触れている箇所が多くあったが、幅1mの試験区では少なく、幅は1mの方が適していると考えられた(図4)。

表2 雑草発生状況の評価(平成27年)

調査日	幅0.6m				無被覆	幅1m				無被覆
	黒 マルチ	畦ボリ シート	防草シート			黒 マルチ	畦ボリ シート	防草シート		
			A	B				A	B	
6/26	5.0	5.0	5.0	5.0	3.7	5.0	5.0	5.0	5.0	3.7
7/9	5.0	3.7	5.0	5.0	1.0	5.0	3.7	5.0	5.0	1.0
7/17	5.0	5.0	4.3	5.0	1.0	5.0	4.3	5.0	5.0	1.0
除草	-----									
7/29	1.7	1.7	1.7	1.0	1.0	3.0	3.0	4.3	5.0	1.0
除草	-----									
8/10	2.3	2.3	3.0	2.3	1.7	4.3	4.3	5.0	5.0	1.7
8/25	1.7	2.3	3.0	2.3	1.0	2.3	3.0	3.7	3.7	1.0

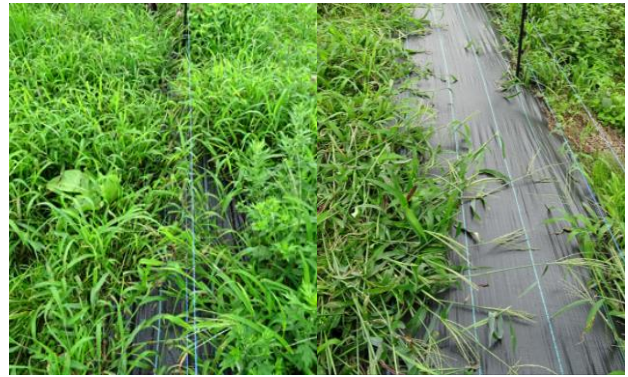
※雑草発生状況：柵線に触れる雑草無しを5、一部雑草が柵線に接触を3、多くの雑草が柵線に接触を1とし、3区画の平均値。

注)抑草資材の敷設日は平成27年6月24日。

表3 雑草発生状況の評価(平成28~29年)

調査日		防草シート			無被覆
		A	B	C	
平成28年	6/17	3.7	4.3	5.0	3.0
	7/12	4.3	5.0	4.3	2.3
	除草	-----			
	8/1	4.7	4.3	4.3	2.3
	8/18	2.3	2.3	3.0	1.0
平成29年	6/13	5.0	5.0	5.0	4.7
	7/27	3.5	4.2	4.5	1.3
	除草	-----			
	8/24	3.0	3.0	3.7	1.3

※雑草発生状況：柵線に触れる雑草無しを5、一部雑草が柵線に接触を3、多くの雑草が柵線に接触を1とし、3区画の平均値。
注)防草シートCは平成28年に敷設。



幅0.6m 幅1m

図4 防草シートの雑草発生状況

(撮影日：平成27年8月25日)

7~8月は、無被覆区では全体的に主にイネ科雑草が繁茂していたが、防草シートA、B及びCの試験区では一部でのみメヒシバ類が伸びて柵線に触れていた(図5、6)。メヒシバなどのように地表を這うように伸びる雑草に対しては、防草シートの効果が低く、防草シートを敷設していても除草は必要であると考えられた。



図5 7月の無被覆区の雑草発生状況

(撮影日：平成29年7月27日)



図6 7月の防草シートの雑草発生状況
(撮影日：平成29年7月27日)

3. 防草シート所内試験

3. 1. 試験方法

平成27～29年の9～12月に農業総合センター内の果樹圃場で行った。平成27年に表1の1～3の防草シートA、B及びCを敷設し、継続して調査を行った。試験区は各防草シート及び無被覆区で長さ約9mの4反復とした。電気柵の全長は約140mであった。

1区画につき3カ所の柵線の電圧及び深さ1～2cmの表土の含水比の測定を行った。電圧は、電気柵用テスター（株式会社松電子製作所製デジタルテスター）のアース金具を防草シート上（無被覆区では地面）に置き、靴の裏で踏みつけて測定した。これは、イノシシ等が柵線に触れるのに近い条件である。電圧と含水比は3カ所の測定値を平均して求めた。

3. 2. 試験結果

電気柵電圧と含水比を図7に示す。ポリプロピレン製の防草シートA、B区の電圧は、銅線が織り込まれている導電性の防草シートC区、無被覆区より0.5～1kV程度低かった。いずれの試験区でも深さ1～2cmの表土の含水比が低いと電圧も低くなる傾向が見られた。乾燥しやすい場所やアスファルトなど電気を通しにくい場所では導電性の防草シートを使用するのが望ましい。また、電気柵の電圧の確認は、表土が乾燥状態にあるときにも行ったほうがよいと考えられた。

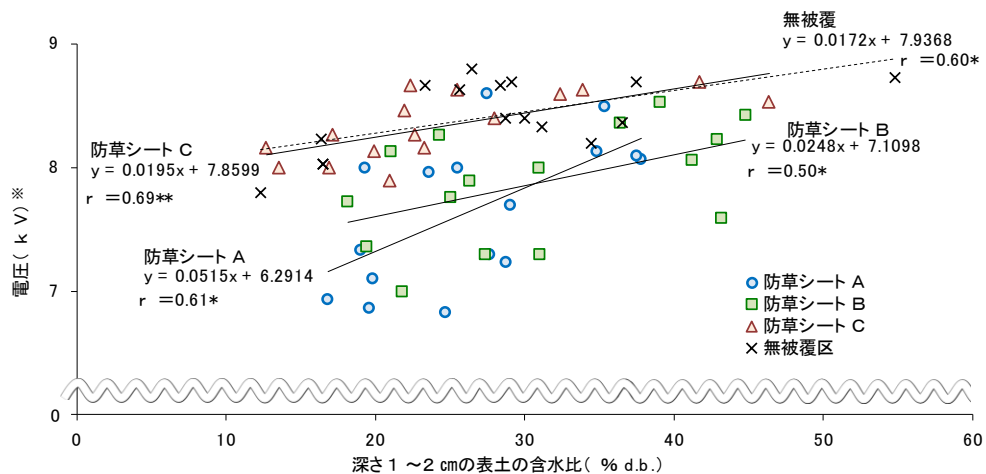
4. 結言

4. 1. 抑草資材現地試験

現地の水田畦畔において、電気柵下に5種類の抑草資材を敷設し、耐久性及び抑草効果について調査を行った。電気柵下の雑草対策としては、幅1mの防草シートがより適していると考えられた。しかし、ギシギシやメヒシバ類に対しては防草シートでも抑草効果が低く、敷設前にしっかり駆除しておくこと、敷設後も7～8月頃は定期的に除草することが必要であると考えられた。

4. 2. 防草シート所内試験

農業総合センター内果樹圃場において、電気柵下に3種類の防草シートを敷設し、通電状況を調査した。一般的なポリプロピレン製の防草シート上では、無被覆や導電性の防草シートと比較して1kV程度電気柵の電圧が低下した。また、いずれの防草シート、無被覆の場合でも、含水比が低いと電圧も低くなる傾向が見られた。



※電圧：電気柵用テスターのアース金具を防草シート上（無被覆では地面）に置き、靴の裏で踏みつけて測定（イノシシ等が柵線に触れるのに近い条件）。

注）無相関の検定により*と**はそれぞれ5%、1%水準で有意差がある。

図7 防草シート別の電気柵の電圧と含水比（平成29年）

除草ロボットの自律走行を目的とするディープラーニング画像認識の検討

A study of deep learning image recognition model for autonomous weeding robot

技術開発部 生産・加工科 稲葉 勉 太田 悟 尾形直秀

電気防獣柵除草ロボットの自律走行に利用する目的で、電気防獣柵を構成する支柱や電気柵線を画像認識で識別する学習モデルをディープラーニングにより作成し評価した。画面上の撮影位置を考慮した支柱や電気柵線、およびその組合せを含め合計 109 に分類した学習用データセットを用い、ディープラーニングの複数のパラメータを調整して学習を行った。実際の圃場で取得した写真を用いて本学習モデルを評価した結果、約 75~90%の正解率を達成した。この結果、ディープラーニングによる画像認識技術の除草ロボットへの適用可能性が示された。

Key words: ディープラーニング、Chainer、AlexNet、画像認識、除草ロボット

1. 緒言

福島県ハイテクプラザでは、“自走式電気防獣柵除草ロボット”（以下、除草ロボット）の研究開発を進めている¹⁾。この除草ロボットは、接触型の角度センサ（以下、センサ）が電気防獣柵（以下、電気柵）の電気柵線に接触しながら自律走行する。

しかし、センサが電気柵線から離れる、障害物に接触するなどにより、電気柵線を正常に検知できなくなると、除草ロボットは制御が不能となる。このため、除草ロボットの自律走行能力向上には、非接触による状況検知機能が必要である。

非接触型の自律走行システムの実現化に向け、画像認識技術に基づく取組みが多数行なわれている²⁾。アイサイト³⁾は、実用化された例の一つである。アイサイトでは、道路や標識、対向車等の路上に出現する限られた物体についてその特徴量を開発者が抽出し、それを基にした分類アルゴリズムを作ることで画像認識を実現している。しかし、除草ロボットが走行する圃場には、地面の凹凸による傾きや石や草等の障害物など、走行上の障害要因が多種多様に存在するため、それらすべてを網羅する特徴量を抽出し、分類アルゴリズムを開発することは難しい。

このような背景から、本研究では、既存の画像認識では人手で行っていた特徴量設定と分類作業を自動化するディープラーニング⁴⁾による画像認識を利用して、除草ロボットに“目”の機能を持たせた。具体的には、ディープラーニングを用いて予め学習した結果を元に、除草ロボットに装着したビデオカメラの映像を推論し、支柱（以下、ポール）や電気柵線を判別して自走するための入力情報とする。

2. ディープラーニングによる画像認識

2. 1. 前提条件

除草ロボットの画像認識における前提条件を以下のように設定した。全体の概要を図 1 に示す。

- ・認識対象は、ポールと電気柵線とする。
- ・除草ロボットは電気柵を右回りに走行し、電気柵線内部に入り込まない。（除草ロボットは本来、電気柵線内部に入り込む仕様であるが、これは省略する。）
- ・ポールや電気柵線は特定のものを利用する。
- ・カメラは、除草ロボット上部に 2 台（前向き、右向き）に設置する。

2. 2. データセットの選定

ディープラーニングの学習に用いたデータセットの一覧を表 1 に示す。109 のカテゴリに分類し、合計 14,870 枚の画像データを利用した。

2. 2. 1. ポールおよび電気柵線

表 1 の 1~7 は、除草ロボットの認識対象であるポールと電気柵線の画像であり、本実験用に独自に撮影した。ポール画像は、画面上の位置を考慮し、中央・左・右の 3 通りに分類した。これは、画面中央に写るポール画像ばかりを無意識に撮影して学習に用いた結果、画面左右端に写るポールをポールと認識出来なかった予備実験の結果を踏まえたものである。

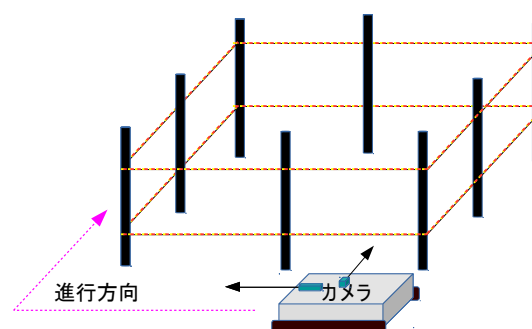


図 1 除草ロボットの前提条件

電気柵線画像は、ポールとの位置関係が重要であることから、4~7のように4タイプに分類した。

除草現場となる圃場等で撮影される画像の背景の多くは空と草地等となり、画面に占める面積割合も大きい。これらの画像をディープラーニングで学習させると、ポールや電気柵線よりも空や草地に強く反応して誤認識の原因となる。この影響を排除するため、1~7の画像は、意図的に背景を変えて撮影した。データセットに用いた画像例を図2に示す。

2. 2. 2. その他の画像

1~7のデータセットのみから作成される学習モデルでは、推論時にもこの7通りにしか分類されない。しかし、データセットの分類数は多い程、画像認識の精度も向上する。こうした理由から、ポールや電気柵線の画像以外に、Caltech101⁵⁾ が提供する102個の分類によるデータセット（101カテゴリにBACKGROUND_Googleを加えた合計102カテゴリで、画像合計9,103枚）を加えることとした。

2. 3. ネットワークモデル

2. 3. 1. ネットワークの選定

ディープラーニングによる画像認識には、畳み込みニューラルネットワーク（CNN）が利用される。代表的なCNNにはGoogLeNet⁶⁾、AlexNet⁷⁾、NiN（Network-In-Network）⁸⁾等がある。予備実験としてこれらの3つのネットワークを構成し、前節で作成したデータセットを学習させて性能評価を行った。ディープラーニングフレームワークには、国産のChainer⁹⁾ 1.23.0を利用した。

表2に示すとおり、正解率が最も高く損失が最も少ないのはAlexNetを用いた時であった。ここで、損失とは、ニューラルネットワークでの学習結果が、正解データとどれくらい離れているかを示す指標のことである。この結果を踏まえ、本データセットを用いた学

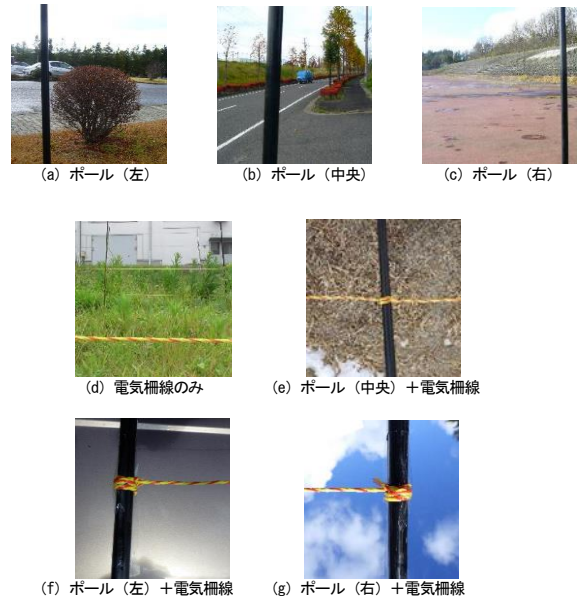


図2 データセットのサンプル

習にはAlexNetを用いるのが最適であると判断し、以後はAlexNetをベースとして実験を行った。

2. 3. 2. ネットワークのチューニング

AlexNetをベースとして、最適化関数、初期化関数、学習時のバッチサイズを変更し、正解率や損失に与える影響を評価した。

損失を最小化することを最適化といい、この処理を行う最適化関数が複数開発されている¹⁰⁾。AlexNetに複数の最適化関数を適用し、本データセットを評価した結果を表3に示す。正解率と損失は60epoch（訓練データの繰返し学習回数）時の値である。

最適化関数にMomentumSGD、NesterovAG、RMSpropを用いた場合には、epochの進捗に伴う正解率の上昇は見られず、学習に失敗した。しかし、その他の最適

表1 学習に用いたデータセット

番号	分類	枚数	
1	ポール(中央)	927	
2	ポール(左)	778	
3	ポール(右)	678	
4	電気柵線のみ	1,134	
5	ポール(中央)+電気柵線	492	
6	ポール(左)+電気柵線	882	
7	ポール(右)+電気柵線	876	
8	accordion	CSLAIERのデータセットより	
9	airplanes		
10	anchor		
11	ant		
:	:		
108	Faces		
109	Motorbikes		
合計			14,870

表2 CNN ネットワーク毎の性能

CNNネットワーク	最大正解率(評価時)%	最大損失(評価時)
NiN	69.2	3.442
GoogLeNet	70.6	5.587
AlexNet	73.8	2.031

表3 最適化関数による影響

最適化関数	正解率%	最大正解率%(epoch)	損失	損失傾向
Adam	66.7	67.2 (36)	3.33	やや↑
AdaGrad	73.4	74.1 (69)	1.66	→
Adadelta	63.1	64.6 (57)	3.80	→
MomentumSGD	0.2	0.2 (-)	NaN	NaN
NesterovAG	0.2	0.2 (-)	NaN	NaN
RMSpropGraves	72.8	74.5 (84)	2.34	やや↑
RMSprop	8.5	8.5 (-)	3.92	→
SGD	33.3	60.2 (98)	2.97	→

化関数の場合には、epoch の進捗と共にそれぞれ学習し正解率も上昇した。最大正解率を達したのは RMSpropGraves を用いた時の 74.5%であった。このことから、以後の実験では、最適化関数として RMSpropGraves を採用することにした。

次に、初期化関数が学習に与える影響を評価した。結果を表 4 に示す。初期化関数は、ニューラルネットワークで学習される重み値 W やバイアス値 B を初期化する。HeNormal は、標準偏差 $\sqrt{2/N}$ (N は入力値) の正規分布に従う乱数で W と B を初期化する。I. Normal は、与えた標準偏差の正規分布に従う乱数で W や B を初期化する。与えたパラメータ (標準偏差) は、表 4 の括弧内に示す通りである。

評価では、HeNormal の時に最大正解率を得た。本実験では、 227×227 (pixel) $\times 3$ (RGB3ch) (つまり N =154, 587) の入力画像を用いており、HeNormal での標準偏差は 0.0035 程度となる。これらと比較すると、標準偏差の初期値は小さい方が高い正解率を示す傾向があった。以上より、以後の実験の初期化関数には HeNormal を採用した。

最後に学習時のバッチサイズが学習結果に与える影響を評価した。バッチサイズとは、1 回の学習 (W や B の更新) を何個の訓練画像で実施するかを決める値である。

表 5 の結果より、バッチサイズの違いによる正解率への影響は少ないが、一方でバッチサイズが大きい方が損失は少なくなることが分かった。しかし、バッチサイズを大きくすると、学習時にメモリを大量に消費し、学習時間も多く要した。

以上の結果から、本データセットを用いた CNN の学習では、最適化関数: RMSpropGraves、初期化関数:

表 4 初期化関数による影響

初期化関数	正解率%	最大正解率% (epoch)	損失	損失傾向
HeNormal	72.8	74.5(84)	2.34	やや↑
I.Normal(0.03)	70.4	72.2(93)	2.56	やや↑
I.Normal(0.05)	62.6	72.1(25)	3.11	やや↑
I.Normal(0.07)	56.0	58.3(98)	3.01	NaN

表 5 バッチサイズによる影響

バッチサイズ	正解率	最大正解率 (epoch)	最大損失	損失傾向
16	69.6	71.2(77)	6.33(99)	↑
32	71.7	71.8(90)	6.50(96)	↑
64	71.6	73.4(70)	3.86(91)	やや↑
100	72.8	74.5(84)	3.36(81)	やや↑
128	71.5	73.3(86)	2.97(100)	やや↑
192	71.3	74.7(92)	2.75(85)	→
256	72.6	73.1(90)	2.70(98)	→

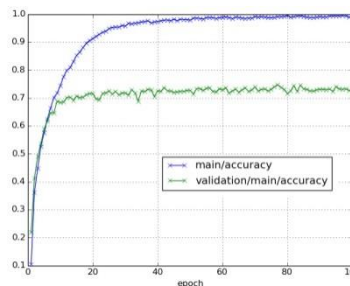


図 3 AlexNet 最適条件における学習過程 (正解率)

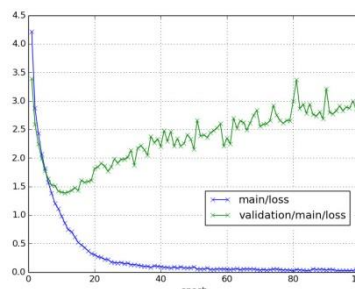


図 4 AlexNet 最適条件における学習過程 (損失)

HeNormal、バッチサイズ:192 の AlexNet が最適であると判断し、この条件で学習モデルを作成した。本条件での学習過程の推移を図 3、4 に示す。20epoch 過ぎた辺りから正解率は収束しはじめ、損失は微増する。20epoch 近辺で生成された学習モデルを用いるのが最適である。

3. 評価実験と考察

除草ロボットに搭載したビデオカメラで撮影した写真を用いて、作成した学習モデルを評価した。撮影は、福島県農業総合センターの圃場にある電気柵線の周囲を除草ロボットに実際に走行させて行った。評価は、大量に撮影した写真から無作為に抽出して実施した。評価写真の一部を図 5 に、評価結果のサマリを表 6 に示す。なお、表 6 中で”風景”とした分類は、電気柵線もポールも写っていない風景のみの写真を指し、ポールや電気柵線以外のものと判定した結果を正解とした。

電気柵線は、赤黄/青白の色の違いによらず認識でき、また、多少のピントずれにも対応できたことから、その認識率は約 90%に達した。一方、画面上端や下端に写った電気柵線を認識できない(a)、遠方に写るポール

表 6 実圃場写真に基づく学習モデルの検証結果

分類	枚数	正解数	正解率 (%)
電気柵線	48	43	89.5
ポール	55	41	74.5
風景	54	22	40.7



図5 誤認識された評価用写真

に強く反応する(b)などによる誤認識が見られた。学習データに、上下両端に写る電気柵線を加える、遠方のポールと電気柵線の組み合わせを”電気柵線”と分類して加えるなどの対応が必要と考えられる。

ポールの認識率は約 75%と比較的高い結果が得られた。不正解例としては、ポールが明確に写っているにも関わらず、一緒に写る電気柵線だけに強く反応して、”電気柵線のみ”と判断したもの(c)が5件存在した。比較的左右に寄ったポールと電気柵線の組合せの写真に誤認識が多かったことから、ポールと電気柵線の組合せ写真も、画面上複数の場所に存在するようデータセットを作成することで改善の余地があるものと考えられる。また、写真のブレに対応できない(d)ほか、背景との組合せにより euphonium (ユーフォニアム) など別物と判断される(e)という誤認識もみられた。

”風景”として分類した写真は、ポールや電気柵線と誤認識する頻度が高くみられた。特に画面下部が草地で上部が空である(f)のような写真は、電気柵線のみと誤認識される回数が24回に達した。さらに、フェンスを電気柵線と誤認識(g)、丈の高い雑草をポールと誤認識(h)する例も見られた。これらの結果から、一般的な背景やフェンス、雑草なども明示的にデータセットに加える対応が必要である。

4. 結言

除草ロボットの自律走行への応用の可能性を評価するために、ディープラーニングによる画像認識の学習モデルを作成し評価した。

実際の圃場で撮影した写真による評価の結果、ポールおよび電気柵線を約 75~90%の正解率で認識できることが確認された。この結果、CNNによる画像認識が、除草ロボットの自律走行のための入力情報として有用に機能することが明らかになった。しかし、ポールも電気柵線も存在しない風景の画像をポールや電気柵線と誤認識するケースも 60%程度確認され、実用化に向けた課題も明らかになった。この問題に解決には、考察で述べたようなデータセットの細分化による学習モデルの再構築が必要である。

今後、本画像認識技術を実用化するには、データセットの再構築、圃場での写真を用いた評価実験を複数回繰り返して、画像認識の精度を高めていく作業が必要である。

参考文献

- 1) 三浦勝史ほか(2017), 「電気防獣柵漏電検出・通報装置と自走式電気防獣柵除草ロボットの開発」、日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集 2017, 1A1-E01, 2017.
- 2) 二宮芳樹(2010), 「車の知能化のための画像認識技術の現状と今後」, 情報処理, Vol.51, No. 12, pp1569-1574.
- 3) “アイサイト NewSUBARUSAFTY Web サイト” <https://www.subaru.jp/safety/eyesight/> (参照 2017-02-09).
- 4) 岡谷貴之(2014), 「Technical Survey ディープラーニング」, 映像情報メディア学会誌 Vol. 68, No. 6, pp. 466~47.
- 5) ” Caltech 101 Web サイト” , https://www.vision.caltech.edu/Image_Datasets/Caltech101/, (参照 2017-02-09).
- 6) A. Krizhevsky, I. Sutskever, and G.E.Hinton. Imagenet classification with deep convolutional neural networks. In Proc. of NIPS, 2012.
- 7) C. Szegedy, et, al., Going deeper with convolutions. In Proc. of CVPR, 2015.
- 8) M. Lin, Q. Chen, and S. Yan. Network in network. In Proc. of ICLR, 2014.
- 9) ” Chainer 公式サイト” , <https://chainer.org/>, (参照 2017-02-09).
- 10) 斎藤康毅(2016), 「ゼロから作る Deep Learning」, オイラリー・ジャパン.

謝辞

本事業の推進にあたり、岩手大学農学部 教授 武田純一氏、農業・食品産業技術総合研究機構 農業技術革新工学研究センター 総合機械化研究領域畜産工学ユニット長 志藤博克氏、産業技術総合研究所 人工知能研究センター 副研究センター長 麻生英樹氏に有益なご助言、ご指導をいただきました。
多大なるご協力ならびにご助言、ご指導をいただきました皆様に感謝いたします。

福島県ハイテクプラザ研究報告書
Technical Reports of Fukushima Technology Centre

チャレンジふくしま「ロボット産業革命の地」創出事業
電気防獣柵漏電検出・通報装置と自走式電気防獣柵除草ロボットの開発

発行

福島県ハイテクプラザ
〒963-0215 福島県郡山市待池台1丁目12番地
TEL 024-959-1739
FAX 024-959-1761

編集

福島県ハイテクプラザ
技術開発部 プロジェクト研究科

