

引き抜き式除草機構を備えた小型株間除草ロボットの開発

今岡 広一, 浦池 隆文, 伊藤 壮生, 江丸 貴紀*

Development of the Intra-row Weeding Robot with a Pull-out Mechanism

Koichi IMAOKA, Takafumi URAIKE, Soki ITO, Takanori EMARU*

抄 録

畑作農業において、除草作業は作物の収量や品質に多大な影響を与える重要な作業であるが、同時に負担の大きい作業の一つとなっている。特に、薬草栽培や無農薬・減農薬栽培などでは除草剤の使用が厳しく制限されていることから株間の除草作業を人手で行っており、当該作業の省力化・省人化が求められている。

そこで、本研究では小型の株間除草ロボットを開発した。本ロボットはロボット本体に取り付けたカメラを用いて上方からほ場を撮影し、取得した画像に対して深層学習を適用することで雑草と作物を識別する。また、本ロボットは引き抜き式除草機構を備えており、株間の雑草のみを引き抜いて除草する。深層学習にはMask R-CNNを用いており、二値化しきい値を最適化することにより作物と雑草の識別精度を高めている。また、引き抜き式除草機構は、マニピュレーターの先端に一对のベルト状のエンドエフェクターを取り付けたものとなっており、ベルトを互いに反対方向へ回転させることで雑草を挟み込んで引き抜く。性能検証のため室内で模擬畝を用いて除草実験を実施した結果、本ロボットが作物を認識しながら畝に沿って走行し、雑草のみを識別して除草することを確認した。

キーワード：農業用ロボット、株間除草、深層学習、画像認識、引き抜き除草

Abstract

In field crop farming, weed control is a critical task that significantly impacts the yield and quality of crops. However, it also places a heavy burden on farmers. Particularly in herbal and organic farming, the use of herbicides is strictly limited, necessitating manual weeding between plants (Intra-row). Given the recent significant decline in the agricultural workforce in Japan, the mechanization and automation of intra-row weeding are pressing issues. In this study, we developed a small intra-row weeding robot. The robot captures images of the field using a camera mounted on its body and distinguishes between weeds and crops by applying deep learning to these images. The robot then removes the intra-row weeds using a manipulator. We utilized Mask R-CNN for deep learning and optimized the binarization threshold to enhance the accuracy of crop and weed identification. The end of the weeding manipulator is equipped with a pair of belt-type grippers, which rotate in opposite directions to pinch and pull out the weeds. To verify the robot's performance, we conducted an indoor weeding experiment using simulated ridges. It was confirmed that the robot can move along the ridge while recognizing crops and stopping to weed when weeds are detected.

KEY-WORDS : Agricultural Robot, Intra-row Weeding, Deep Learning, Image Recognition, Pull-out Weeding

* 北海道大学, * Hokkaido University.

事業名：経常研究

課題名：選択式株間除草機構の開発

1. はじめに

畑作農業において、除草作業は作物の収量や品質に多大な影響を与える重要な作業である^{1,2)}。しかし、近年の農業就業人口の減少は著しく、除草作業は作業者にとって大きな負担となっている^{3,4)}。除草作業は除草剤による化学的な除草と、除草機械などで雑草を物理的に除去する機械除草に大別される。一般的には、ブームスプレイヤーなどの乗用の農作業機械を用いて畑全面に除草剤を散布する、あるいは除草機械を取り付けたトラクターなどで畝間（畝と畝の合間のこと、図1参照）の雑草を物理的に除草し、機械での除草が困難な株間（作物と作物の間のこと、図1参照）にのみ除草剤を散布するといった方法がとられることが多い。近年、トラクターやコンバインなどの操縦補助システムや自動操縦システムが実用化されており、これらの農作業機械を用いることで除草作業の負担は軽減されつつある。

一方、葉草栽培⁵⁾や無農薬・減農薬栽培などでは除草剤の使用が厳しく制限されていることから、畝間だけではなく株間についても物理的な除草を行う必要性がある。前述したように畝間の除草に関してはトラクターによるけん引ユニットや手押しの除草機械など、様々な種類の機械が古くから開発・市販されているが⁶⁾、株間の除草については対応可能な機械はほとんど存在しない。作物によっては株間の除草に使用可能な機械も存在するが、作物を傷つけないための機械の調整に熟練が必要であったり、作物近傍の雑草を除去することができないなどの課題がある。そのため、これらの除草剤が使用できない作物の育成では株間の除草を人力で行っており、その負担軽減が求められている。

そこで、筆者らは一本の畝を跨ぐ大きさの小型の株間除草ロボットを開発している⁷⁾。本ロボットは、本体に取り付けたカメラを用いて上方からは場を撮影し、取得した画像に深層学習を適用することで雑草と作物を判別し、引き抜き式の除草機構を用いて株間の雑草を除草する。深層学習にはMask R-CNN⁸⁾を用いた。二値化しきい値を独自の手法で

最適化することにより、作物を雑草と誤識別する偽陽性の確率を0.7%まで低下させることができた。また、従来の除草機械では土中の雑草の根を除去することは困難であり、雑草の種類によっては残された根から再生するものも多い。そのため、除草する回数を減らすためには雑草を根ごと除去することが望ましい。そこで本ロボットには、マニピュレーターの先端にベルト型のエンドエフェクターを設置し、本エンドエフェクターで雑草を挟み込み、引き抜いて除草する仕組みを採用した。

開発した株間除草ロボットの性能検証のため、模擬畝を使用した室内実験を行った結果、作物を認識して自動走行すること、さらに雑草の識別と除草が可能であることを確認したので報告する。

2. 開発した小型株間除草ロボット

開発したロボットの外観を図2に、また諸元を表1に示す。本ロボットは、一本の畝を跨いで走行することを想定した小型の4輪車両型ロボットである。本体は、アルミフレームを用いて構成されており、跨ぐ畝の幅に応じてトレッド幅（左右の車輪の距離）を変更することが可能である。

車輪は、後輪2輪が駆動輪、前輪2輪が駆動力のない操舵輪となっており、畝を跨ぐために左右の駆動輪は別々のモーターで駆動する。駆動部のモーターと4輪のタイヤは児童用乗用玩具（図3）に使われるものであり、モーターはDL-550C（12V駆動DCモーター）、減速ギア比は102:1である（図4）。操舵輪には左右それぞれ2個ずつのサーボモーター（KRS-9004HV ICS・近藤科学社製）が取り付けられている。

本体には、図5に示すようにロボットの前方中心に畝道従用RGBカメラと、中央部中心に除草用RGBカメラ2台（RealSense D435・Intel社製）を下向きに取り付けており、作物と雑草を上方から撮影する。また、除草用のマニピュレーター、ROS（Robot Operating System）を搭載した制御用PC、マイコン（Arduino Mega）を搭載している。

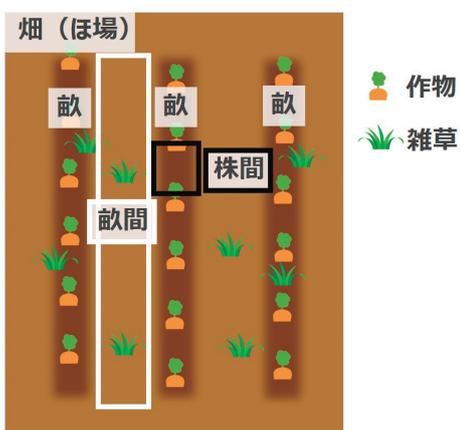


図1 ほ場内の畝間と株間の位置関係

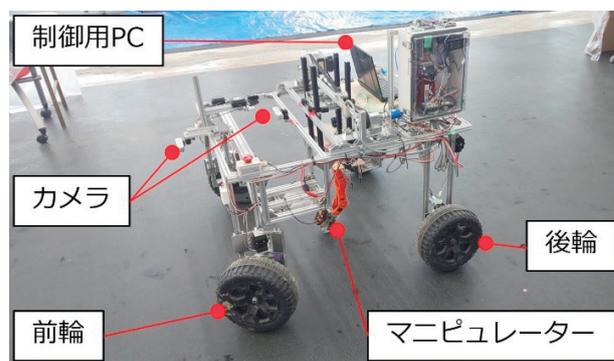


図2 開発した除草ロボットの外観

表1 開発した除草ロボットの諸元

項目	数値	単位
重量(バッテリー含まず)	35.0	kg
全幅×全長×全高	1060×980×1300	mm
トレッド幅	600-1010	mm
ホイールベース	700	mm



図3 児童用乗用玩具

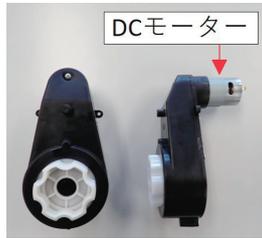


図4 駆動部のDCモーター

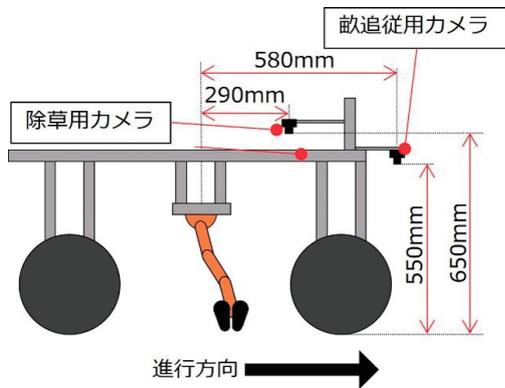


図5 カメラの取り付け位置

本ロボットの制御系を図6に示す。敵追従用カメラは敵に追従して走行するための画像を撮影するためのものであり、除草用カメラは、主として除草時に雑草の座標を特定するために用いられる。これらのカメラ画像を制御用PCに取り込み、次章で説明する深層学習手法を適用することで作物と雑草の識別や、作物と雑草の座標の計算を行う。本ロボットは敵追従用カメラ画像で作物列を認識することで敵に沿って自動的に走行し、雑草を発見するとその場で停止する。敵に沿う経路追従手法については、4章で述べる経路追従アルゴリズムを用いた。次に除草用カメラ画像より雑草の座標を算出

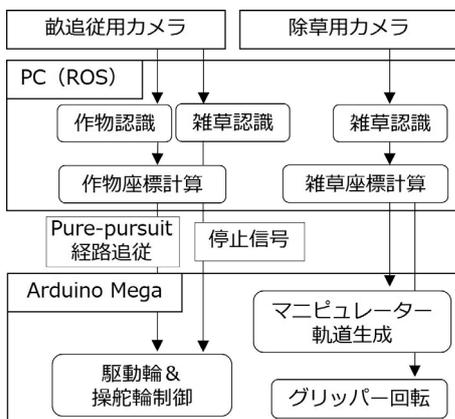


図6 除草ロボットの制御系ダイアグラム

し、車体中央のマニピュレーターおよびエンドエフェクターからなる引き抜き式除草機構を用いて除草を行う。本マニピュレーターの制御および、駆動輪・操舵輪の制御はマイコン (Arduino Mega) を用いて行った。

マニピュレーターの先端には、一対のベルト状のエンドエフェクターを設置し、これらのベルトを互いに逆方向に回転させることで雑草を引き抜いて除草する。本除草機構の詳細については、5章で述べる。

なお、本研究で用いたRealSense D435はステレオ式の深度カメラであるが本研究では深度情報を使用していない。そのため、一般的な単眼式のRGBカメラでも本研究で提案する識別手法は使用が可能である。

3. 作物と雑草の識別手法について

本ロボットは深層学習を用いてRGB画像から作物と雑草を識別する。本研究では深層学習の手法としてMask R-CNNを採用した。Mask R-CNNは、しきい値(二値化しきい値)を設定して背景と物体を区別するが、本研究では独自の手法⁹⁾で二値化しきい値を最適化することで作物と雑草の識別精度を高めている。ハトムギのは場で撮影した画像に本手法を適用した結果を図7に示す。上図が識別結果、下図が元画像である。識別結果では作物と識別された領域は白く囲われ、雑草と識別した領域は黒枠でマスクされる。画像の中央右寄りにあるハトムギが白く囲われて作物として正しく識別されていること、その他の小さい雑草が黒枠で囲われて雑草として正しく識別されていることがわかる。

大豆およびハトムギは場で、作物と雑草を識別した結果を表2、表3にそれぞれ示す。作物を雑草と誤識別する偽陽性の確率は、大豆:0.7%、ハトムギ:5.1%となっており、特に大豆では極めて低い。この確率が低いということは誤って作



図7 作物と雑草の識別例 (上図: 識別結果 下図: 元画像)

表2 大豆ほ場での作物と雑草の識別率

	作物と推定	雑草と推定
実際の作物	77.2%	0.7%
実際の雑草	22.8%	99.3%

表3 ハトムギほ場での作物と雑草の識別率

	作物と推定	雑草と推定
実際の作物	79.0%	5.1%
実際の雑草	21.0%	94.9%

物を除草するという最も避けるべきミスを犯す危険性が少ない手法となっていると言える。

4. 敵追従走行アルゴリズム

ロボットを敵に沿って自動的に走行させることを考えた場合、あらかじめ敵一本一本のGNSS座標を手動で計測しておき、それらの座標をもとにロボットを走行させることは労力の面から実用的ではないと考える。そこで本研究では、ロボット前方に取り付けたカメラ画像と前章で述べた作物と雑草の識別手法を用いて作物を検出し、Pure-pursuitアルゴリズム¹⁰⁾を用いて操舵輪の角度を決定することで敵に沿ってロボットを走行させる手法を採用した。本章では、Pure-pursuitアルゴリズムについて説明する。

Pure-pursuitアルゴリズムは自動車の自動運転などにも採用されるアルゴリズムであり、車体前方に目標点を設定し、その目標点に対して旋回半径一定で到達できるように操舵角を制御する。図8に目標点と旋回中心および操舵角の関係を示す。目標点が車体前方にあり、後輪（駆動輪）の中心と目標点の間の距離を L 、車体の中心線と目標点のなす角度を ψ とすると、旋回半径 R は次式で表される。

$$R = \frac{L}{2 \sin \psi}$$

目標点に向かうためには、旋回中心に対して前輪（操舵輪）が接線方向を向く必要がある。そのため、前輪の角度 ϕ は、前輪の中心と後輪の中心の距離（ホイールベース）を W とした時に、次式で表される。

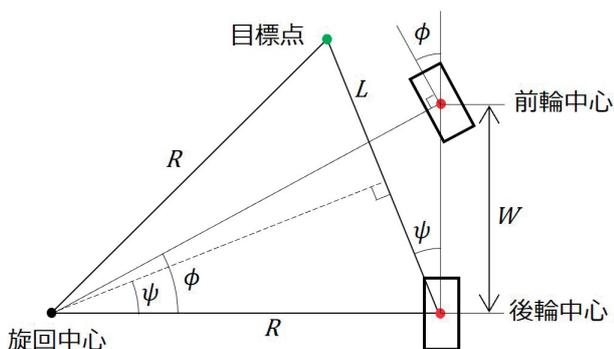


図8 旋回中心と目標点および操舵角の関係

$$\tan \phi = \frac{W}{R}$$

$$\phi = \tan^{-1} \frac{2W \sin \psi}{L}$$

本研究では、目標点を画像中の最も遠方の作物の中心座標とした。

本アルゴリズムを用いて、ほ場においてロボットを走行させたところ、敵に沿ってロボットが自動で走行する様子が確認できた。しかし、本来一定間隔で植えられている作物が生育不良等で欠けているような欠株箇所では、作物を検出できずにふらついて走行する場合があった。本課題については、目標点を見失った場合はそれまでの走行軌跡から進行方向を推定するなどのアルゴリズムの改良や、車両の直進性を担保するためのGNSSの補助的な使用などで解決可能と考える。

5. 引き抜き式除草機構の開発

ロボットの除草機構部分を図9に示す。除草機構はマニピュレーターとその先端に取り付けたエンドエフェクターから成っている。マニピュレーターはシリアルリンク型のマニピュレーター Tinkerkit Braccio (Arduino.org製)を採用し、車体に下向きに取り付けた。エンドエフェクターには2個のDCモーターが内蔵されており、それぞれのモーターが歯車を介して左右のベルトを駆動する。モーターは互いに逆方向に回転するようになっており、ベルトとベルトの間に雑草を巻き込んで引き抜く仕組みとなっている。エンドエフェクターの諸元を表4に示す。本マニピュレーターおよびエンドエフェクターの詳細については文献¹¹⁾も参照していただきたい。

本除草機構の開発にあたり、雑草を引き抜くために必要な力を測定した。単子葉植物のヒエと双子葉植物のハコベに対して引き抜き力測定実験を行った。測定の様子を図10に示す。雑草にビニール紐を括り付け、ワイヤを介しデジタルフォースゲージ (DSV-50N・IMADA社製)を用いて垂直上方に雑草を引き抜いた際の最大荷重を測定し、引き抜き力とした。測定結果を図11および図12に示す。測定は大きさが20cm以下の雑草を対象として行ったが、その後の農業者へのヒアリングにおいて、実際のは場では雑草が

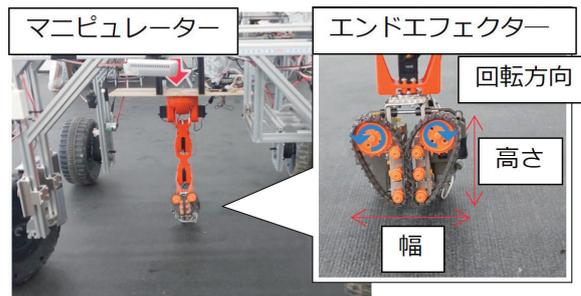


図9 マニピュレーターおよびエンドエフェクターの外観

表4 エンドエフェクターの諸元

項目	数値	単位
幅	100	mm
高さ	90	mm
奥行	90	mm
ベルト幅	17	mm

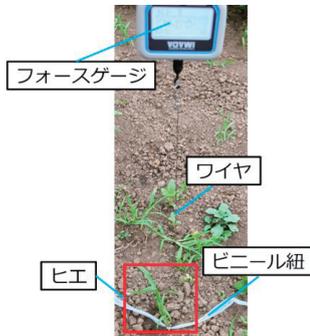


図10 雑草引き抜き力測定の様子

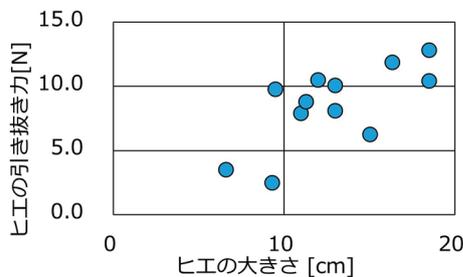


図11 ヒエの大きさと引き抜き力の関係測定の結果

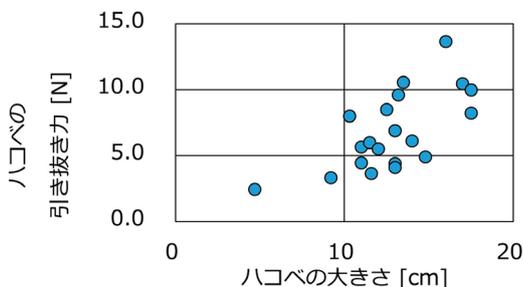


図12 ハコベの大きさと引き抜き力の関係測定の結果

10cmを超える前に除草を行うことがわかった。図11, 12をみると、大きさが10cm以下の場合、ヒエ・ハコベともにおおむね5N以下の力で引き抜くことができていることがわかる。このため、本研究で開発するエンドエフェクターの引き抜き力の目標値は5Nとした。なお、紙面の都合上割愛するがアカザとオオツメクサにも同様の試験を行っており、それらについても10cm以下では、ほぼ5N以下の力で引き抜き可能であった。

次に、開発したエンドエフェクターの引き抜き力を測定した。図13に測定の様子を示す。フォースゲージを定盤に固定し、厚み1.45mmの試験片(雑草に相当)の一端をフォースゲージにとりつけた。もう一端を試作したエンドエフェクターの中心に挟み込み、コンベアを回転させて試験片を

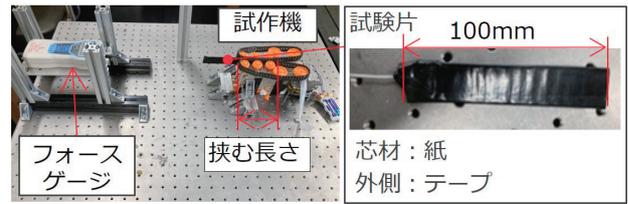


図13 試験機の引き抜き力測定の様子

引っ張った。試験片を挟む長さを、15mm, 31mm, 45mm, 59mmに変えて引き抜き力を計測した結果を図14に示す。必要な引き抜き力5Nに対し、いずれの試験片長さにおいても引き抜き力が大幅に上回っていることを確認した。そこでベルトのテンショナーを廃し、雑草挟み込み部を60mmから35mmに短縮することでエンドエフェクターを小型化した。小型化したエンドエフェクターの引き抜き力を測定した結果、引き抜き力は5.39N(5回の平均値、標準偏差1.19N)となった。

本エンドエフェクターを手に持ち、ヒエの引き抜き試験を行った。雑草が根から引き抜けた場合を成功、根もしくは茎がちぎれてしまった場合を失敗とした。試験の結果、29本の雑草に対して成功数は18本なり、成功率は62.1%であった。ちぎれてしまう要因としては、根が深く、引き抜く力に雑草自体が耐えられないと推測された。そのため、今後は引き抜き以外の方式の機械除草と組み合わせることも検討したい。

図15に引き抜いた雑草の成功例と失敗例を示す。成功例では、雑草が根ごと引き抜けている様子が、失敗例では根本がちぎれている様子が観察できる。

6. 性能確認試験

室内には場を模擬した環境(模擬畝)を構築し、開発した除草ロボットの性能確認試験を行った。

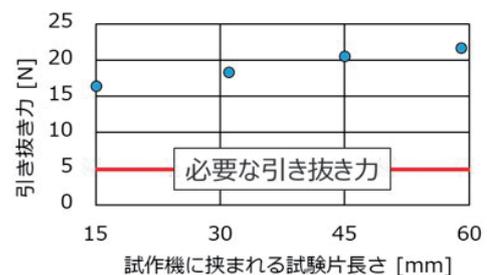


図14 試験機の引き抜き力測定結果

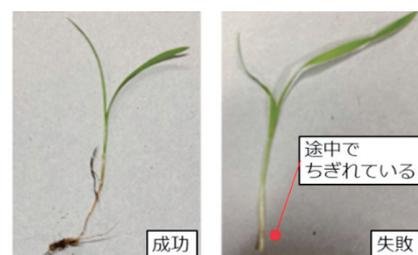


図15 引き抜きの成功例(左)と失敗例(右)

模擬畝を図16に示す。幅0.6m、長さ1.2m程の面積に園芸用の土を敷き、模擬畝を作製した。模擬畝上に30cm間隔でハトムギ（作物）を模した造花とハコベ（雑草）を模した造花を植えた。

実験の様子を図17に示す。畝を跨ぐようロボットを配置し走行を開始させた結果、次の一連の除草動作を確認した。

- (1) ロボットは前方のカメラで作物を認識して畝に追従走行し、雑草を識別するとその場で停止した。
- (2) ロボットは中央のカメラで雑草の座標を検出すると、マニピュレーター先端を雑草の上部へ移動させた。
- (3) ロボットはエンドエフェクターのベルトを回転させ、雑草を巻き込み引き抜いた。
- (4) ロボットはマニピュレーターを格納し、雑草を除去できていることを確認すると、畝に追従した走行を再開した。

本結果より、作物と雑草の識別部とロボットの走行系、引き抜き式除草部の各々が統合され、一連の除草動作が実現できていることを確認した。

7. おわりに

本研究では、株間の除草を機械化・自動化するために深層学習によって雑草と作物を判別し、雑草のみを選択的に除草するロボットを提案した。ロボット車体に取り付けたカメラによって上方から畝を撮影し、取得した画像に深層学習を適用することにより雑草と作物を識別可能であることを確認した。また、ベルト型のエンドエフェクターとマニピュレーター

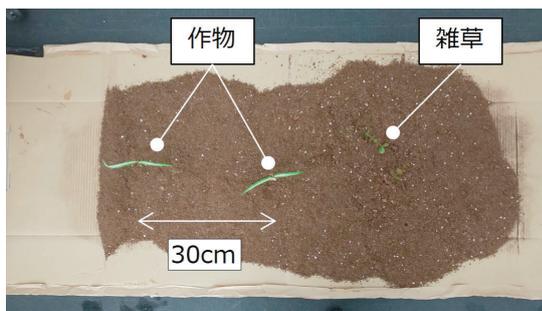


図16 模擬ほ場



図17 実験の様子
(マニピュレーターが雑草上部へ移動した瞬間)

からなる引き抜き式除草機構を用いて、株間の雑草のみを選択的に除草可能であることを確認した。

今後は実際のは場での確認試験を行うとともに、識別精度の向上と、除草機構部分の改良による除草速度の向上を行い、実用化を目指す。

参考文献

- 1) T. J. Monaco, A. S. Grayson et al. : "Influence of Four Weed Species on the Growth, Yield, and Quality of Direct-Seeded Tomatoes (*Lycopersicon esculentum*)", *Weed Science*, vol.29, no.4, pp.394-397, (1981).
- 2) T. Heisel, C. Andreasen, and S. Christensen : "Sugarbeet yield response to competition from *Sinapis arvensis* or *Lolium perenne* growing at three different distances from the beet and removed at various times during early growth", *Weed Research*, vol.42, no.5, pp.406-413, (2002)
- 3) 手島 司・後藤隆志・清水一史・他 : 「畑用株間除草機のアンケート調査」, 農業機械学会誌, vol.64-Supplement, pp.57-58, (2002)
- 4) "Agricultural Labor Force Statistics", *Ministry of Agriculture, Forestry and Fisheries*, <https://www.maff.go.jp/j/tokei/sihyo/data/08.html> (accessed Aug.4, 2023).
- 5) 農業・食品産業技術総合研究機構中央農業研究センター : 「薬用作物の機械除草マニュアル～カンゾウ、トウキ、センキュウ～」, (2020)
- 6) 古池寿夫 : 「機械的手段による雑草防除」 *雑草研究*, vol.23-No.2, pp.49-54, (1978).
- 7) 今岡広一・土井 匠・北村知大・他 : 「画像認識による株間の抜き除草機構を備えた除草ロボットの開発」, *ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集*, pp.1A1-L07-, (2022)
- 8) He, K., Gkioxari, G., Dollar, P. et al. : "Mask R-CNN", *IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV)*, pp.2980-2988, (2017)
- 9) 本庄 匠・土井 匠・井内悠介・他 : 「深層学習における領域検出の精度向上を実現する閾値の準最適化手法の提案」, 第22回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会予稿集, pp.426-431, (2021)
- 10) Coulter, R. : "Implementation of the Pure Pursuit Path Tracking Algorithm", *DTIC document*, (1992).
- 11) 土井 匠・本庄 匠・井内悠介・他 : 「抜き除草を実現するためのグリッパー開発およびマニピュレータ制御」, 第22回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会予稿集, pp.939-944, (2021)