

福祉施設と連携した IoT 水耕栽培連携システムの研究開発

Development of IoT Hydroponics Collaborative System with Welfare Facilities

研究代表者 沖縄高専情報通信システム工学科 助教 亀濱博紀

Hiroki KAMEHAMA

In recent years, attention has been focused on hydroponic cultivation, which is less susceptible to damage from natural disasters such as typhoons and insect pests. Companies and welfare facilities that operate hydroponic plant factories and actively employ people with disabilities and the elderly have a strong desire to not only improve the skills of farmers, but also to create a comfortable and rewarding work environment for farmers. In response to these social and corporate needs, this study aims to realize a hydroponics collaboration system that can achieve stable production of crops while maintaining the job satisfaction of farmers by linking hydroponics systems in welfare facilities and small and medium-sized enterprises through the use of IoT technology. In our research, we constructed an IoT hydroponics system and developed an AI system that can determine the growing status from the data obtained from the hydroponics kit. In addition, we developed a farming support application that can be used with a web browser.

要旨

近年、台風などの自然災害や害虫からの被害を受けにくい水耕栽培に注目が集まっている。水耕栽培を行う植物工場を運営し積極的に障がい者や高齢者の雇用を行っている企業や福祉施設からは、就農者の技術向上のみならず、就農者に対する働きやすさとやりがいの創出に強い要望がある。このような社会ニーズ・企業ニーズに対し、本研究は、福祉施設や中小企業で行う水耕栽培システムを IoT 技術の活用により連携させ、就農者のやりがいを維持しながら農作物の安定生産を達成する水耕栽培連携システムを実現することを目的としている。研究では、IoT 水耕栽培システムを構築し、水耕栽培キットから得られたデータから育成状況を判別できる AI を開発した。また、web ブラウザで使用できる就農支援アプリケーションを開発した。

1. まえがき

近年、沖縄をはじめとする離島地域では、台風などの自然災害や害虫からの被害を受けにくい水耕栽培に注目が集まっている。また、水耕栽培を行う植物工場を運営し積極的に障がい者や高齢者の雇用を行っている企業や福祉施設からは、就農者の技術向上のみならず、就農者に対する働きやすさとやりがいの創出に強い要望がある。就農者へのサポート内容は各個人によって異なるため、企業側は、多様な就農者を安心して雇用することは困難となっている。また、就農者側が抱える不安として「どのような野菜にい

つ需要があるか分からないため、作業の見通しが立て辛い」「次の作業などの確な道しるべを示して欲しい」などがある。このような状況から、就農者に対して効率的な水耕栽培の作業内容や工程をわかり易く提示するシステムの構築が求められている。このような社会ニーズ・企業ニーズに対し、本研究は、福祉施設や中小企業で行う水耕栽培システムを IoT 技術の活用により連携させ、就農者のやりがいを維持しながら農作物の安定生産を達成する水耕栽培連携システムを実現することを目的としている。本研究が目指す水耕栽培連携システムを実現するために必要な要素として以下の3つが挙げられる。

(1) 水耕栽培を小規模スペースで低コストかつ簡易に行うことができるオールインワン型の水耕栽培キット開発

(2) 栽培データや次の作業内容を初心者にわかりやすく表示するユーザインタフェースを備え、障がい者のレベルに合わせて作業内容を提示できる就農支援アプリケーションの開発

(3) 水耕栽培の効率化や就農者のサポートを行うことができる、施設とデータセンタ局を連携した水耕栽培ネットワークの構築

2. 水耕栽培キットの開発と育成条件の最適化^[1]

2.1 水耕栽培キット

水耕栽培において、どのような環境条件が野菜の成長度と関連しているかを調べるために、水耕栽培キットを開発し、育成実験を行った。図1に水耕栽培

キットの概要図を示す。

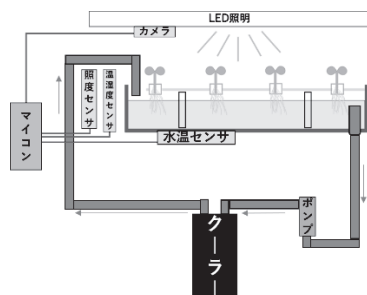


図1 水耕栽培キットの構成

環境構築に関しては、実際の野菜工場にご協力頂き、既存の水耕栽培の仕組みを参考にしてシステムを構築した。照明はコストを抑えるために LED 照明を使用し、栽培プランターからホースを伸ばし、ポンプを用いて水を循環させている。温度制御機能のあるクーラーを通過させることで水を冷やしている。センサ類とカメラはマイコンを用いて制御を行っている。水面と苗床の間は空間を開けることによって、根からの酸素吸収を促進させている。水をプランター内に流す際に、水面よりも上から水を落とすことにより、水面を揺らし、酸素に触れる水面の表面を多くすることで溶存酸素量が増えるように工夫している。センサで得られるデータを2分に一度、カメラで撮影する画像を2時間に一度取得することで、生育状況を監視している。カメラは野菜の真上から画像を撮影し、その画像を成長評価に用いている。

2.2 育成条件の最適化

育成実験では、野菜の真上に取り付けたカメラで撮影した画像から成長度合いを評価している。画像の1ピクセルごとのRGB値を取得し、その値を比較して緑と判断できるピクセルをカウントしている。緑の値が赤、または青より大きいときに、そのピクセルは緑であると判断し、画像全体における緑のピクセルの割合を成長度としている。緑のピクセル数をカウントする際、緑と判断されたピクセル以外のピクセルの値を0としたときの成長評価の例を図2に示す。図2の左の図が野菜の真上から撮影した画像であり、右の図が成長評価後の画像である。

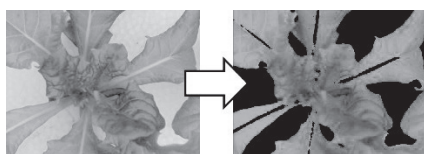


図2 成長評価の手法

苗床の白い部分はカウントされず、葉の緑の部分のみが抽出できていることがわかる。2時間ごとの緑のピクセル数の遷移を図3に示す。計測開始から100時間です葉が成長し、その後、加速度的に緑のピクセル数が多くなっている。

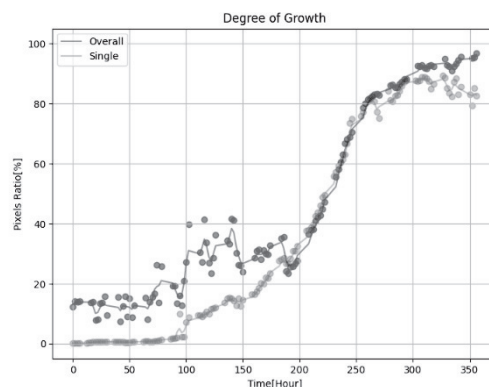


図3 サンチュの成長 (2時間ごと)

育成実験から得られた結果を多変量解析により育成条件の最適化を行った。多変量解析は複数の変数に関するデータをもとに、これらの変数間の相互関連を分析する手法であり、複数の変数をそれぞれの環境条件と置き換えて分析することで、どのパラメータが生育に影響しているのかを比較することができる。育成実験により、サンチュには、①葉が成長するための条件と②成長速度を向上させるための条件が存在し、それぞれ最適な条件があることが事前研究でわかっている⁽¹⁾。①については、複数の説明変数から事象の発生確率を予測する分析方法であるロジスティック回帰分析を用いた。②については、1つの目的変数を複数の説明変数で予測するという分析方法である重回帰分析を用いた。育成条件を最適化するために、室温や湿度、水温、照度、照射時間を変化させて育成実験を行った。

2.2.1 ロジスティック回帰分析

ロジスティック回帰分析で用いる説明変数には、センサで取得した室温、湿度、水温、照度、さらに暗期とその暗期に対する光の照射時間の違いをダミー変数として表した光周期を用いた。実験で得られたデータは全て正規化してロジスティック回帰分析を行っている。ロジスティック回帰分析の結果を表1に示す。

p値は有意確率であり、この値が小さいほどその

パラメータは育成に大きく影響していることを表している。一般的にはp値は0.05が有意水準であるが、今回は解析したデータが少なかったことから、全ての変数で大きな値をとっていると考えられる。

表1 ロジスティック回帰分析の結果

	偏回帰係数	p 値
切片	-4.13	0.400
室温	-1.32	1.000
湿度	2.69	0.596
水温	-15.6	0.999
照度	3.40	0.474
光周期	19.1	0.998
暗期	0.561	0.841

室温、水温、光周期では、p値が1に近く育成パラメータとしての有意性が低いという結果となった。この理由として、育成実験時の条件の差異が少なかったことが原因だと考えられる。このとき、当てはまり度を表す統計量であるAIC値は20.56であった。有用性の低い説明変数を減らして解析を行うために、水温と光周期はそのまま除外し、室温は湿度と組み合わせると飽差という一つの変数にまとめた。ロジスティック回帰分析の結果を表2に示す。

表2 ロジスティック回帰分析の結果 (変数を減少させた場合)

	偏回帰係数	p 値
切片	-1.38	0.646
飽差	-4.54	0.412
照度	5.22	0.217
暗期	0.895	0.735

変数を減少させた場合、有意性が低い変数はみられなかった。最も有意性が高いパラメータは照度であるとわかった。照度は偏回帰係数の絶対値も大きく、一番重要であることが示されている。このときのAIC値は15.77であった。AIC値は相対的な評価として用いられ、値が小さいほど当てはまりが良いとされているため、変数を減らしたことで精度が向上したといえる。表2の値をロジスティック回帰分析の式に当てはめた場合の式を式(1)に示す。

$$p = \frac{1}{1 + \exp\{-(-1.38 - 4.54X_{sat} + 5.22X_{itu} + 0.895X_{dar})\}} \quad (1)$$

式(1)より、照度(X_{itu})、暗期(X_{dar})は大きく、飽差(X_{sat})は小さくすることでp値を大きくすることができ、葉を成長させることができるということがわかった。偏回帰係数が正の方向に大きい照度は、照度をより高くすることで光合成によるエネルギーを多く作ることができるため、葉の成長について最も重要であることが示された。負の方向に大きい飽差は、室温を低く、湿度を高くすることでp値を大きくすることができるとわかった。空気中の水分量が多いと葉の気孔が開き蒸散が盛んに行われると考えられる。

2.2.1 重回帰分析

重回帰分析において、説明変数は光についてのパラメータである3つ(照度、光周期、暗記)に絞って分析を行った。分析結果を表3に示す。

表3 ロジスティック回帰分析の結果

	偏回帰係数	t 値	p 値
切片	24.5	20.7	0.031
照度	-12.3	-7.15	0.088
光周期	-1.16	-0.357	0.782
暗期	3.93	1.17	0.451
自由度修正済み決定係数	0.9441		

t値はそれぞれの説明変数が目的変数に与える影響の大きさの指標であり、照度が最も影響していることがわかる。自由度修正済み決定係数は回帰モデルの精度を示しており、94%と高い精度を得ることができている。p値は照度が一番小さくなっており、ロジスティック回帰分析と同様に有意性があるということが確認できている。表3の値を重回帰分析の式に当てはめた場合の式を式(2)に示す。

$$y = 24.5 - 12.3X_{itu} - 1.16X_{cyc} + 3.93X_{dar} \quad (2)$$

式(2)より、照度、光周期は大きく、暗期は小さくすることでyの値が小さくなり、成長速度が速くなると読み取ることができる。照度は、光合成によるエネルギーを多く作り出すために大きくする必要があり、光周期は24時間周期で光を当て続けるよりも光合成と呼吸を多く繰り返すことでエネルギーを効率よく野菜の体に取り込めるため、偏回帰係数が負の方向に向いていると考えられる。暗期は短

いとその分速くエネルギーを合成するため偏回帰係数が正の方向に向いていると考えられる。育成実験では、光周期が短くなるほど成長速度が速くなる結果が得られた。

2.3 育成条件最適化のまとめ

本章では、野菜が成長するための環境条件を明らかにすることを目的としており、環境条件の値を変化させながら水耕栽培の育成実験を行った。取得したデータをもとに多変量解析を行った。①葉が成長するための条件を最適化するためにロジスティック回帰分析を行い、分析結果から照度と暗期は大きく、飽差は小さくする必要があるということがわかった。②成長速度を向上させるための条件を最適化するために重回帰分析を行い、照度が大きく影響していることがわかった。それぞれの条件について、数式を用いて定量的に示すことができた。

3. IoT 水耕栽培システムの構築と就農支援アプリケーションの開発^{[2][3]}

水耕栽培を行うにあたって得られる環境パラメータにおいて育成できる環境状態には、上限値と下限値が存在するはずである。ロジスティック回帰分析では非線形分離が不可能であることが分かっていることから、水耕栽培システムに組み込む解析システムとしてロジスティック回帰分析を使用することは、システムのユーザに正しい情報を伝えることができるとは考えにくい。そこで、非線形分離な問題も扱うことができるように、複数のパーセプトロンを多層にした順伝搬型ニューラルネットワーク (FFNN : Feed Forward Neural Network) によって解析することで、正しく環境パラメータを非線形分離することを目指した。

本章では、FFNN が環境パラメータ解析システムとして適しているかどうかを述べる。水耕栽培システムを構築し、FFNN をサーバー内に組み込むことで、水耕栽培キットから送られてくるデータをリアルタイムでユーザに対して定量的にフィードバックすることを目的としている。

3.1 IoT 水耕栽培システムの構成

水耕栽培システムの構成について図4に示す。水耕栽培を行っている栽培キットの状態を Raspberry Pi に接続されたセンサがセンシングし、

その情報を API (Application Programming Interface) サーバーへ HTTP POST で送信する。

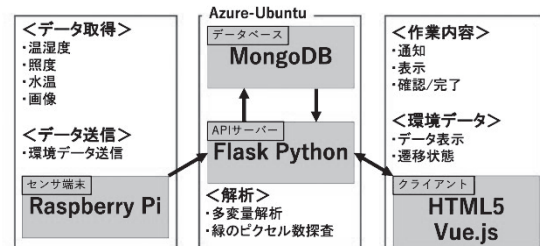


図4 水耕栽培システムの概要

API サーバーから受け取った情報はデータベースに保存され、解析を行う。それらの情報をユーザが受け取るために、フロントエンドのクライアントに環境データや画像データ、それから割り出せる作業内容を表示する。また、ユーザの作業確認・完了のアクションも API サーバーへ送信するようなシステム構成となっている。

温湿度センサで栽培キット周辺の温湿度を計測し、水温センサで栽培キットへ流入する水の水温を計測する。また、照度センサで植物に照射されている LED 照明の照度を計測する。栽培している植物の成長度評価のために画像を栽培キット上部から植物をカメラで撮影する。

これらのデータのうち、温湿度・水温・照度の環境データは2分に1回、画像データは2時間に1回の取得を行うものとした。データ取得後、図5に示すフローで RPi はネットワークに繋がっている環境下におき、HTTP POST を用いてそれぞれのデータをサーバーへ送信している。

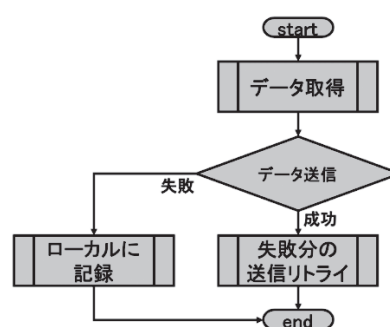


図5 データ送信フロー

表4にクラウドサーバーの開発環境を示す。クラウドサーバー上での運用には、実サーバーに比べて機器調達が必要ないことや、必要に応じて適切な

スケーリングを行えることが利点として挙げられる。Rpi から POST されてきた環境データをデータベースへ insert することや画像を保存する機能を実装した。

フロントエンドのクライアントに JavaScript を基本的な使用するため、データベースに JavaScript Object Notation(以下 JSON)ライクな表現を扱いやすい MongoDB を使用した。クライアントからの HTTP GET リクエストに応じて必要なだけのデータを JSON 形式で返すように構成した。これにより、クライアントでの環境データをグラフとして描画する機能を実装することが可能となる。環境データや画像データを受け取り、記録するために構築した API サーバーの基本的な機能について説明する。それぞれの機能をメソッドとパスごとに分けて REST API を目指した設計になっている。

表4 サーバーのシステム開発環境

クラウドプラットフォーム	Microsoft Azure
CPU	Intel Xeon E5-2673V4
OS	Ubuntu LTS 18.04.3
データベース	MongoDB v2.6.10
言語	Python 3.5.2
ライブラリ	Flask 0.12.2 Flask-HTTPAuth 3.2.4 Flask-RESTful 0.3.7 Flask-restplus 0.13.0 pymongo 3.6.1 pillow 5.1.0 Jinja2 2.9.6 requests 2.19.1

- POST /statuses/ : 環境データの記録
- GET /statuses/ : 環境データの取得
- POST /images/ : 画像データの記録
- GET /images/ : 画像データの取得
- POST /images/survey/ : 画像データの緑のピクセル数の算出とその値の記録
- GET /images/survey/ : 緑のピクセル数の取得
- POST /task/ : 作業確認・完了を記録
- GET /task/ : 作業内容の取得

それぞれのパスへ POST, GET のメソッドでリクエストすることで、データを記録・取得することができる。ユーザによるデータの削除が起こってしまうことを未然に防ぐために、他のメソッドである delete や put などは実装しなかった。

サーバーに蓄積されたデータをフィードバックするためのクライアントを実装した。実際に作成した Web クライアントを図 6 に、取得したデータのグラフを図 7 に示す。



図6 作製した Web クライアント

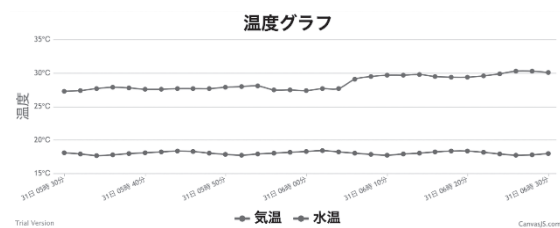


図7 気温ボタンからの遷移先画面

Web クライアントの機能としては、左半分で植物の様子や環境データの確認が行え、右半分で作業内容の確認・完了ができる。環境データの数値をタップすると、過去 1 時間分のデータがグラフとなって表示されるようにしている。

3.2 FFNN の学習方法

パーセプトロンにおいて誤差逆伝播法を用いた各層の重み訂正により、学習を行っている⁽²⁾⁽³⁾。本研究で使用したハイパーパラメータを以下に示す。

- 活性化関数 : 双曲線正接関数 (tanh)
- 学習率 η : 0.001
- パーセプトロン数: 5
- パッチサイズ: 32
- 誤差関数 : 2 値 交差エントロピー誤差

$$E(w^n) = - \sum_n^N (d_n \log y_n + (1 - d_n) \log(1 - y_n))$$

- オプティマイザ : 確率的局所勾配降下法 (SDG)

$$w^{n+1} = w^n - \eta \frac{\partial E(w^n)}{\partial w^n}$$

これらのハイパーパラメータを用いて実装したネットワークモデルを図8に示す。

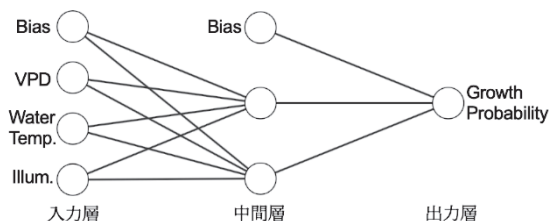


図8 実装したネットワークモデル

3.2 FFNNによる育成判別AI^[4]

学内で行った育成実験のデータを単純パーセプトロンで学習させた。 $w_1^{(1)} \sim w_3^{(1)}$ はそれぞれ飽差、水温、照度のデータ群となっている。得られた結果はそれぞれエッジ重みと正解率となる。得られた超平面を図9に示す。正解率は100%となり、エッジ重みはそれぞれ $w_0^{(1)} = 0.41$, $w_1^{(1)} = -0.06$, $w_2^{(1)} = -1.36$, $w_3^{(1)} = 0.12$ となった。

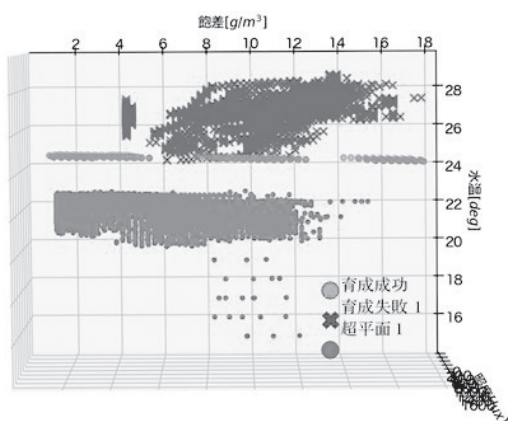


図9 単純パーセプトロンで学習させた場合の超平面

育成に失敗したデータを追加し、ニューラルネットワークを入力層3、隠れ層2、出力層1としてパーセプトロンで学習にかけた。その結果として得られた超平面を図10に示す。正解率は99%となっているが、過学習を起こしていると考えられる。過学習を抑え、超平面を描くために、オプティマイザをSDGからAdamに変更し、県内の野菜工場のデータを学習させた^[4]。その結果を図11に示す。水温が20℃～24℃の範囲で超平面を描くことができ、その範囲内であれば育成可能ということを表している。

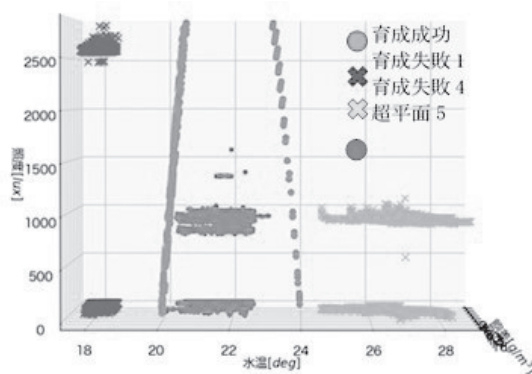


図10 失敗データを学習させた場合の超平面

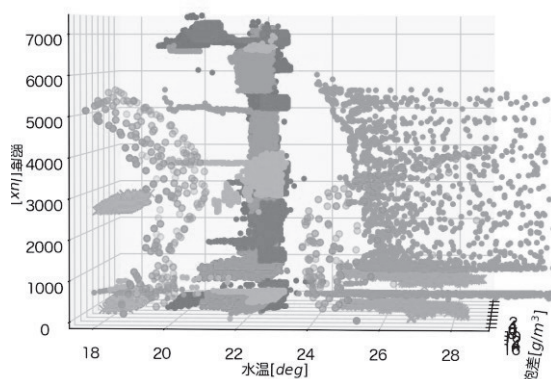


図11 単純パーセプトロンで学習させた場合の超平面

今回提案したFFNNでは、誤差を最小化して任意関数を近似することから、中心極限定理に従わないデータは学習できない。水耕栽培を行う設備では、室内環境での育成のため、パラメータのばらつきが少ないことから、良質な教師データを得ることができる。このことから、FFNNは水耕栽培における育成判別AIに適していると考えられる。

3.3 WBSによる作業分割と就農サポート^[5]

作業の分割は作業をマニュアル化し、就農支援アプリケーションにて指示を出す際に用いる。今回は、水耕栽培における種植えの作業に着目し、作業者の視界を記録した動画をWBS (Work Breakdown Structure) を適用して作業を分割し整理した^[5]。水耕栽培の種植え作業には種入れ・スポンジを濡らす・スポンジを入れるという3つの作業工程がある。この作業工程にWBSを適用したものを図12に示す。WBSを適用すると、種入れの作業がスポンジを濡らす作業と従属関係になっていることがわかる。これは種を濡らしてはいけないという作業のコツを基にしているもので、WBSを適用することでこのような構造図を作成することができる。

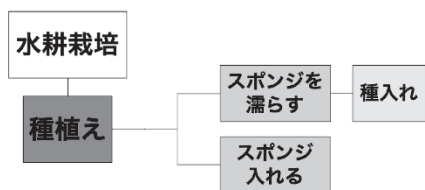


図12 WBSを適用した種植えの作業手順

種植え作業において熟練作業者の特徴を明確化するために、視線計測による実験を行い未経験者と比較した。視線計測実験では、種植え作業時の視線を計測し、計測した視線データに5点移動平均を加え、不規則な視線の動きを除去し、対象物を注視する回数をカウントした。

種植え作業時の動画を見てみると、熟練作業者と未経験者の作業フローには大きな違いがあることがわかった(図13)。

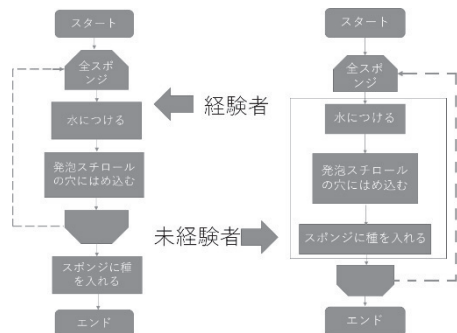


図13 熟練者と未経験者の作業フローの違い

未経験者は決められたフローを順番に繰り返していることに対し、熟練者は効率的に作業を行うために作業を並行して行っているということがわかった。視線計測実験の結果を表5に示す。

表5 視線計測実験による熟練者と未経験者の比較

	熟練者	未経験者
対象物注視時間の割合	88.2 %	73.2 %
視線移動時間の割合	11.8 %	26.8 %
視線移動距離	1.67	2.34

熟練者は作業時に対象物を注視している時間の割合が未経験者に比べ、多いことがわかった。また、視線の移動距離について、未経験者は熟練者に比べ1.5倍大きい結果となった。未経験者がスポンジを濡らし、発砲スチロールにはめ込むといった作業を一つずつ繰り返していることにより、視線移動の距離が増加したと考えられる。一方、熟練者はスポンジを濡らし、

発砲スチロールにはめ込むといった作業をまとめて行っていることから、注視時間の割合が大きくなり、移動距離が小さくなっている。このことから、熟練者は作業を効率化するために、従属関係になっている作業以外をまとめて行っているということがわかった。熟練者はWBSを適用した種植え作業と同じ作業手順で作業を行っていることから、水耕栽培においてもWBSを適用することで効率的な作業が望めることを示している。間引きや収穫などにおいても、熟練者の視線情報を用いることで作業を構造化できると考えられる。この構造化により、障がいのレベルに合わせた作業を提示することができ、熟練者の視界動画をアプリケーションにより提供することで就農者の作業支援が行える。

4 まとめ

本研究は、福祉施設や中小企業で行う水耕栽培システムをIoT技術の活用により連携させ、就農者のやりがいを維持しながら農作物の安定生産を達成する水耕栽培連携システムを実現することを目的としている。水耕栽培を小規模スペースで簡易に行うことができるオールインワン型の水耕栽培キットを開発した。クラウドサーバーにデータを蓄積できるIoT水耕栽培システムを構築した。開発した水耕栽培キットを用いて育成実験を行い、多変量解析により育成条件の最適化を行った。また、育成実験で得られたデータから、順伝搬型ニューラルネットワーク(FNN)を用いた育成判別AIを開発した。このAIはサーバー内に組み込むことが可能であり、水耕栽培キットから送られてくるデータをリアルタイムでユーザに対して定量的にフィードバックすることができる。さらには、webブラウザで使用できる就農支援アプリケーションを開発した。現状として、リアルタイムで育成環境を確認できる。視線計測実験では、就農熟練者と未経験者を比較し、作業フローの違いを明確にした。WBSにより作業を細分化し、障がいのレベルに合わせた作業内容を就農支援アプリケーションで提供することで、初心者でも熟練者と同様に作業が行えるようになることが期待できる。

発表論文

- [1] 長嶺健, 金城伊智子, 神里志穂子, 亀濱博紀, 眞喜志治, "水耕栽培における育成条件の最適化", 2019年電気学会電子・情報・システム部門大会・講演論文集, MC2-7

- [2] 池村光夢, 神里志穂子, 亀濱博紀, 眞喜志 治, “特別支援学校における水耕栽培を用いた農福教材の開発”, 2019年電気学会電子・情報・システム部門大会・講演論文集, MC2-5
- [3] Hiromu IKEMURA, Hiroki KAMEHAMA, Shihoko KAMISATO, Katsuya NAKAHIRA, Ichiko KINJO, Ken NAGAMINE, Riri SHIROTA, Shun OKUHAMA, Katsuko NAKAHIRA, Masahito NAGAMORI, Taiga TAKEDA, “Development of Agricultural Welfare Cooperation Hydroponics System for Promoting Work Satisfaction”, STI_Gigaku2019.
- [4] 池村光夢, 冷水晴香, 當間力, 神里志穂子, 亀濱博紀, 眞喜志治, “水耕栽培のためのIoTシステムの開発”, 電子情報通信学会全国大会2019, D-23-3.
- [5] 冷水晴香, 林心, 長嶺健, 池村光夢, 城田璃々, 亀濱博紀, 眞喜志治, 神里志穂子, “就労教育のための水耕栽培システムの開発”, Japan AIフォーラム2019in 富山・講演論文集

参考文献

- (1) 高辻正基, 釜谷慎太郎, 榎本岳夫, LED栽培における光周期の効果, 植物工場学会誌, 1996年
- (2) D. R. Cox, The Regression Analysis of Binary Sequences, Journal of the Royal Statistical Society Series B (Methodological), Vol. 20, No. 2 (1958), pp315-242,
- (3) Rosenblatt, Frank, The Perceptron: A Probabilistic Model for Information Storage and Organization in the Brain, Psychological Review 65(6), p386-408
- (4) Marvin Minsky, Seymour Papert, A Review of Perceptrons: An Introduction to Computational Geometry, Chapter 12, The M. I. T. Press, Cambridge, Mass, 1969
- (5) 岡村美和・菊島靖弘・青山幹雄, 業務プロセスのパターン化による大規模業務システムの効率化とその評価, ソフトウェアエンジニアリングシンポジウム, 2014