

植物工場における優良苗検出のためのPSEシステム

PSE SYSTEM OF DETECTION OF HEALTHY SEEDLINGS FOR PLANT FACTORY

眞鍋保彦¹⁾, 宇佐見仁英²⁾, 前田太陽³⁾, 西浦拓臣⁴⁾, 吉澤豊⁵⁾, 川田重夫⁶⁾

Yasuhiko Manabe, Hitohide Usami, Taiyo Maeda, Takumi Nishiura, Yutaka Yoshizawa and Shigeo Kawata

- 1) 修(工) 沼津工業高等専門学校 電気電子工学科 (〒 410-8501 静岡県沼津市大岡 3600, manabe@numazu-ct.ac.jp)
 2) 工博 玉川大学 学術研究所 (〒 194-8610 東京都町田市玉川学園 6-1-1, usami@lab.tamagawa.ac.jp)
 3) 博(工) 埼玉工業大学 大学院工学研究科 (〒 369-0203 埼玉県深谷市普濟寺 1690, E-mail: maedat@sit.ac.jp)
 4) 宇都宮大学工学部 電気電子工学科 (〒 321-8585 栃木県宇都宮市陽東 7-1-2, t152363@cc.utsunomiya-u.ac.jp)
 5) 宇都宮大学工学部 電気電子工学科 (〒 321-8585 栃木県宇都宮市陽東 7-1-2, t152395@cc.utsunomiya-u.ac.jp)
 6) 工博 宇都宮大学大学院 工学研究科 (〒 321-8585 栃木県宇都宮市陽東 7-1-2, kwt@cc.utsunomiya-u.ac.jp)

We propose a PSE (Problem Solving Environment) system in a plant factory. The purpose of our study is to reduce the cost in a plant factory. We especially focus on a planting process. At the time of planting process, experienced staffs generally detect whether seedlings have been grown successfully. Due to the needs for the staffs, the costs of the plant factory will be increased. Thus, if this process is automated, the costs will be reduced. Our study automates this process by using image processing. Our PSE system takes pictures of a cultivation board, then the system detects healthy seedlings. The healthy seedlings are moved to another cultivation board by a 3-axis control robot. Finally, only healthy seedlings are collected into another board. The board is transferred to a cultivation room.

Key Words : Problem Solving Environment, Plant Factory, Plant Growth Detection, Robot Planting, Marker Detection

1. はじめに

本研究は植物工場における PSE システムを提案し、植物工場全体のコストを下げることを目的とする。今日、植物工場が全国各地で操業しており、その数は平成 30 年 2 月時点で 373 箇所¹⁾に及ぶ。また、近隣のスーパーマーケットにも植物工場で作られた野菜類が販売されており、植物工場が身近になったと感じられる。しかし、植物工場では製造コストが露地物栽培と比較して高額になる結果、販売価格も高い傾向にある。そこで我々は、植物工場における様々な課題のうち、特に定植に至る直前の“優良苗の選別作業の自動化”に着目し、コスト削減のための研究を行い、途中経過を報告してきた^{2, 3, 4)}。通常、優良苗の選別作業は植物工場のスタッフが行っており、人件費の出費は避けられない。もしこの工程を自動化することができれば、人件費のコストが削減できる結果、植物工場全体のコスト低下に繋がる。本研究で提案する PSE システムはこれを実現するものである。また、優良と判定された苗はロボットにより別の栽培トレイに移動され、栽培室に移動させる準備まで行うことを目指している。

2. システム構成

図 1 が本研究で提案する PSE システムの概念図である。このシステムは大別すると以下の 3 つの部分から構成されている。

- 苗を動かすための“ロボット部分”
- 苗の写真撮影を行うための“撮影部分”

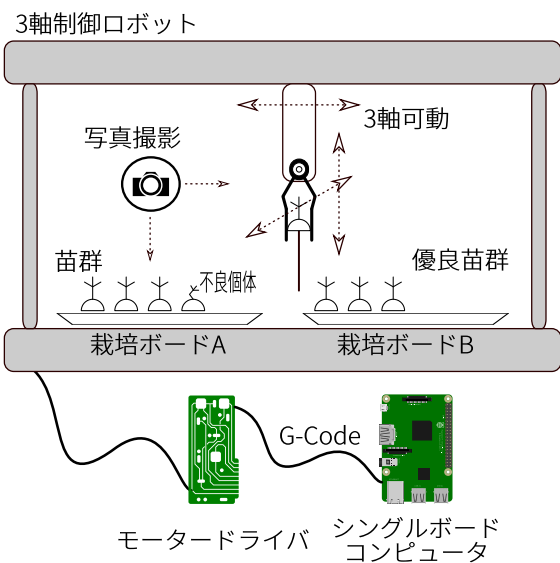


図 1 優良苗検出 PSE システム

- 3軸制御ロボットを統御したり、撮影画像を解析して優劣の判定を行うための“コンピュータ部分”

以下、個々の部分について説明する。

2.1 ロボット部分

机上に置いて使えるコンパクトな 3 軸制御ロボットである。アームの先端部分にはチャックが備え付けられ、物をつかんで持ち上げたり移動させたりできる。3 軸はそれぞれステッピングモータにより制御されるた

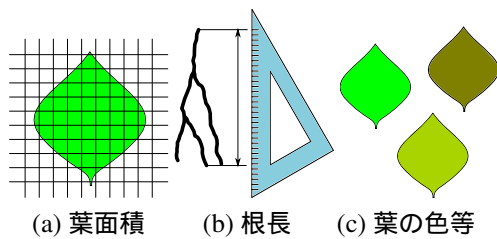


図2 優良苗の判定要素



図3 想定する苗の培地

め、後述する制御信号を送信する必要がある。

2.2 撮影部分

本システムでは苗の優劣判定を画像処理により行うこととしている。苗の写真を撮影し、形状や色等から優劣を判定する。その際、優劣判定の主となるポイントとしては“葉面積”（苗の葉の面積）と“根長”（苗の根の長さ）がある。現時点では定点観測で上面からの撮影のみを行い、撮影画像から葉の部分抽出することで優劣判断を行っている。

2.3 コンピュータ部分

3軸制御ロボットはステップモータを駆動するための制御信号を外部から投入する必要がある。この役目を担うのがコンピュータである。通常のPCでもよいが、システム全体のコストをできるだけ低減するために安価なシングルボードコンピュータで構成する。ただし、シングルボードコンピュータを直接ステップモータの信号線に接続することはできない。そのため、途中にモータードライバ回路を挿入し、ドライバ回路にコンピュータから司令信号を送ると、今度はモータードライバ回路がロボットを駆動するための信号を送信しステップモータを駆動する⁵⁾。このとき、コンピュータが送信する信号は“G-code”とよばれる言語である。G-codeはCNC(Computerized Numerical Control)装置の分野で主流として用いられているものである。

3. 優良苗の検出

優良苗の判定要素としては図2に示すように(a)葉の面積(葉面積)、(b)根の長さ(根長)、(c)他の要素(葉の色等)がある。今回はこのうち葉面積に焦点を当てて述べる。

図3は想定する苗の培地である。(a)は培地にスポンジを入れたものであり、(b)はそのスポンジの拡大図である。スポンジはあらかじめ切り込みが入っており、根

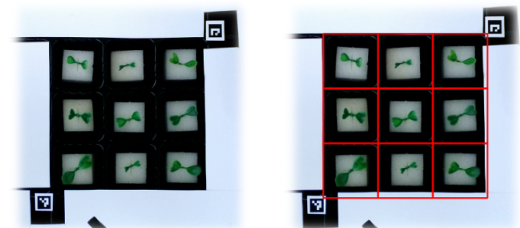


図4 葉面積の算出

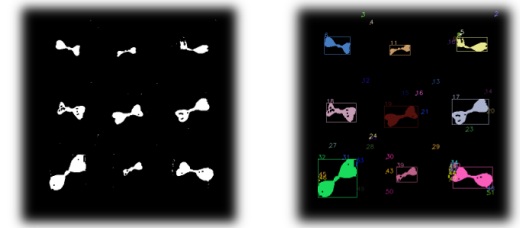


図4 葉面積の算出

の生長の妨げにならないようになっている。

ただし、今回は実際の苗ではなく、造花の一部を切り取って使う模擬苗を用いて検証を行っている。

3.1 葉面積の算出手順

本システムでは培地の写真を上面から撮影し、その画像を処理することで葉面積の算出を行う。その手順は図4に示すように、以下のような流れとなる。

- 苗の様子を上面からカメラで撮影する
- AR マーカーにより苗の存在する部分を矩形領域に分割する
- 二値化を行う(この際、モルフォロジー演算を行い、細かなノイズを取り除く)
- 苗にラベリングを行い、各プロブ(二値画像内のピクセル動詞が隣接した集合のこと)の面積を求める

3.2 苗の位置の検出

培地は同じ大きさの枠に入っているため、基準点がわかれば計算により苗の位置が特定できる。本研究では基準点の抽出にARマーカー^{6,7)}を用いている。図5に位置検出の概念図を示す。対象となる培地の“左下”と“右上”の2箇所にARマーカーを貼付する。これらをそれぞれ便宜上A、Bとする。当初、AとBは同一のマーカーを用いていたが、プログラム上での検出を容易にするため、現在は異なるマーカーを用いている。マーカーの貼付は以下のルールに従う。

- マーカーAは“左上が培地の左下になるように貼付”する
- マーカーBは“左下が培地の右上になるように貼付”する

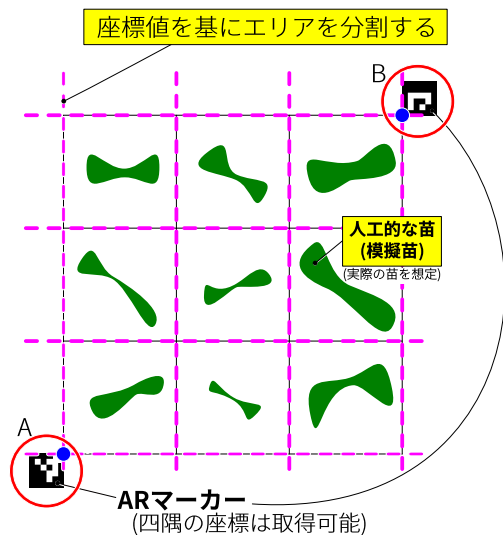


図5 苗の位置の検出

なお、苗床の“横方向の数 n_x ”と“縦方向の数 n_y ”は、あらかじめユーザーが与えておくこととする。ARマーカーの四隅の座標は取得可能である。このことから、マーカー A の右上の座標 (x_1, y_1) とマーカー B の左下の座標 (x_2, y_2) から、苗の存在する矩形領域を分割して特定できる。

3.3 二値化

葉面積を求めるために撮影画像を二値化しなければならない。葉の部分だけを抽出するため、まず RGB 形式の撮影画像を HSV 形式に変換する。HSV 形式は色の表現を色相 H (色合い, hue), 彩度 S (鮮やかさ, saturation), 明度 V (明るさ, value あるいは intensity) で表現するものである⁸⁾。HSV 形式は色合いが数値で表現されるため、範囲を適切に指定することで特定の色を抽出しやすい。

図 4(c) が二値化の結果となるが、このときのピクセル抽出の下限 $(H_{min}, S_{min}, V_{min})$ と上限 $(H_{max}, S_{max}, V_{max})$ とは式 (1) のようになる。

$$\begin{cases} (H_{min}, S_{min}, V_{min}) = (127, 37, 16) \\ (H_{max}, S_{max}, V_{max}) = (168, 99, 99) \end{cases} \quad (1)$$

これらの値は定量的に求めたものではなく、自作のプログラムで視覚的に確認することにより得たものである。そのため、今回の模擬苗ではなく実際の苗ではその結果は異なる。

二値化を行うと、背景の小さなプロブや、黒抜けによるノイズが目立つことがある。図 4(a) の画像の二値化でもこれらのノイズが見られた。そのため、二値化後にさらにモルフォロジー演算を行い、ノイズを軽減する処理を行った。図 4(c) はモルフォロジー演算によるノイズ軽減後の結果である。今回採用したモルフォロジー演算の種類はクロージング処理であり、これは画素の膨張を行ったあとに収縮を行うもので、特に苗のプロブ内の黒抜けの除去に有効である。

最終的に各プロブはランダムな色で色付けされ、結

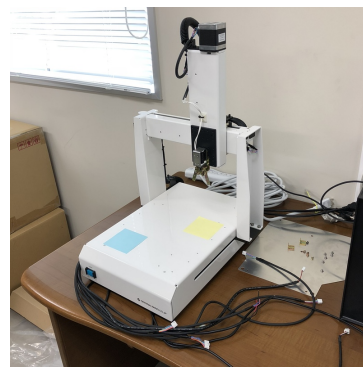


図6 3軸制御ロボット

果に反映される。色付け自体に本質的な意味はないが、結果の識別を容易にするために行っている。

3.4 優良の判定

優良であるか否かの判定には基準を定めなければならない。実際の植物工場では経験あるスタッフが一定の基準に基づいて行っている。例えば、玉川大学植物工場において栽培されているリーフレタスの場合、学生には次のように指示しているという⁹⁾。“播種 18 日後、育苗した苗の中から、平均的な大きさの苗をそれぞれ選抜し、薄膜式水耕栽培へと定植して栽培を継続した。選抜対象は、本葉第 4 葉の形成が確認でき、かつ本葉第 2 葉の葉長および葉幅が各試験区内で平均的な株とした。”

しかし、本研究においては、今回は模擬苗での施行という簡易な環境であるため、単純に葉面積で判定を行うこととした。そのためには判定基準となる代表値を決定しなければならない。代表値として葉面積の平均値も候補としたが、模擬苗はもともと造花であるため、自然に育った苗とは異なり、採取部位によるばらつきが大きい。そのため、平均値は代表値として適切ではない。したがって、中央値であるメジアンを採用することにした。葉面積がメジアン以上であれば“優”、メジアン未満であれば“劣”として取り扱っている。

4. ロボットの制御

本研究の目標として、苗の選別の自動化に加えて、優良と判定された苗のロボットによる移動も計画している。そのため、図 6 に示すような 3 軸制御のロボットを用意した。このロボットは 3 軸制御であり、X, Y, Z 軸それぞれがステッピングモーターで動く仕様となっている。可動範囲はそれほど広くはなく、小規模な苗の移動試験に留まる。ロボット制御の概念図を図 7 に示す。PC が G-code をシングルボードコンピュータに向けて USB ケーブルで送信する。信号を受信したシングルボードコンピュータは、別途構築したモータードライバ回路を駆動する。モータードライバ回路がさらにロボットの各軸の信号線を制御することでロボットが動く仕組みとなっている。本稿執筆時点で、ロボット制御部は構築中である。シングルボードコンピュータとモータードライバ回路は、図 8 に示すように、ブレッドボードレベルの製作段階である。今後はこの部分の基板への実装等を行う予定である。

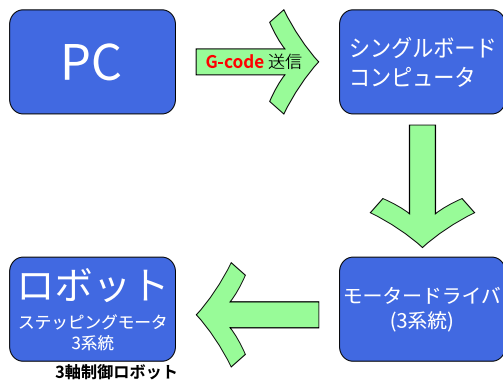


図7 ロボット制御の概念図

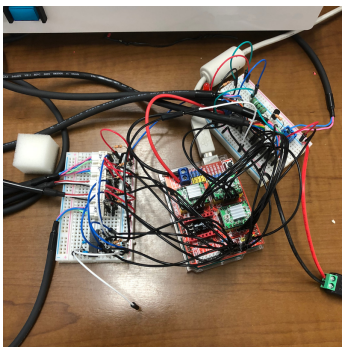
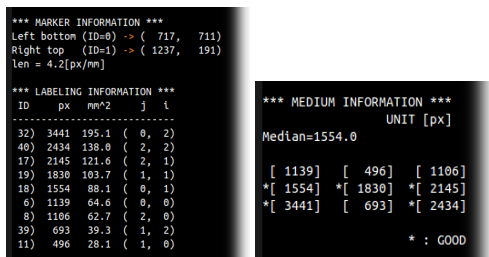


図8 モータードライバ回路



(a) プロブ情報

(b) 判定結果

図9 苗の判定結果

5. 苗の優劣判定結果

模擬苗の判定結果の様子を図9に示す。

(a)は苗の検出したARマーカーの座標値と、各プロブの情報を示す。まず、上段部にはマーカーに関する情報が表示されている。IDが0のマーカーは培地の左下に貼付したもので、1のマーカーは右上に貼付したものである。lenは1[mm]あたりのピクセル数を表すが、これは貼付したマーカーが1辺10[mm]であることから、座標値を使って算出している。

その下には、各プロブの情報が表示されている。各プロブにはID番号が付加されるため、その数字とともにピクセル数、面積、存在位置が表示されている。

(b)は葉面積の算出結果に基づく優劣の判定結果であり、図4(a)の各苗の位置とそれぞれ対応している。判定基準となる代表値のメジアンは1554.0[px]と表示されている。アスタリスク(*)の付加されたものは優秀と判断された苗を表す。目視による主観的な判断と照ら

しあわせても、極端に小さいと思える苗は排除されており、優良判定が行われていることが確認できる。

今後は、アスタリスクの付加された箇所の苗を移動させるようロボットを制御する予定である。

6. まとめ

植物工場のためのPSEとして、苗の自動選別及びロボットによる移動を行うためのシステムを提案した。このシステムにより人手による苗の選別を自動化することで、人件費の削減による植物工場全体のコスト低下を目指している。またシステム構築に利用する機材も可能な限り安価なものを利用するようにしている。今回はピクセルベースの画像処理で苗の優劣を判定しているが、今後は効率的な処理のため、機械学習の要素を含めることも検討している¹⁰⁾。また、システム全体を俯瞰すると、現段階では模擬苗による試行的な優劣の判定、ロボットの制御は構築中と、システム構築の途中にあるが、今後はシステムの完成を目指していきたい。

参考文献

- 1) 一般社団法人 日本施設園芸協会: 平成29年度次世代施設園芸地域展開促進事業(全国推進事業)大規模施設園芸・植物工場実態調査・事例調査, p.29, 2018.
- 2) Yasuhiko Manabe, Hitohide Usami, Taiyo Maeda, Shigeo Kawata: Detection and Selection System of Healthily Growth Seedlings for a Plant Factory, 13th World Congress on Computational Mechanics (WCCM XIII), July 22-27, 2018, New York, NY, USA.
- 3) 眞鍋保彦, 宇佐見仁英, 前田太陽, 川田重夫: 植物工場における優良苗の検出システム, 計算工学講演会論文集, Vol.23, F-3-5, pp.1-2, 2018.
- 4) 眞鍋保彦, 宇佐見仁英, 前田太陽, 川田重夫: マーカーを用いた苗の生長検出, 計算工学講演会論文集, Vol.22, D-13-2, pp.1-2, 2017.
- 5) 吉澤豊, 西浦拓臣, 眞鍋保彦, 宇佐見仁英, 川田重夫: 3軸制御を用いた優良苗選別システムの検討, 第21回PSE Workshop 2018, 2018.
- 6) S. Garrido-Jurado and R. Muñoz-Salinas and F.J. Madrid-Cuevas and M.J. Marín-Jiménez: Automatic generation and detection of highly reliable fiducial markers under occlusion, Pattern Recognition, Vol. 47, No. 6, pp. 2280 - 2292, 2014.
- 7) ArUco marker detection (aruco module), https://docs.opencv.org/master/d9/d6d/tutorial_table_of_content_aruco.html, 2018.8.20 閲覧.
- 8) 小枝正直, 上田悦子, 中村恭之, OpenCVによる画像処理入門, 講談社, 2014.
- 9) 森直哉, FST栽培プロトコル(スタンダード), 玉川大学植物工場, 2018.
- 10) 西浦拓臣, 吉澤豊, 眞鍋保彦, 宇佐見仁英, 川田重夫: 植物工場における優良苗の判定, 第21回PSE Workshop 2018, 2018.