

人間-農作物の相互連携型スマート農業における農作物アピランスに基づく土壌養分推定の検討

代表研究者

村松 聡

東海大学 情報理工学部コンピュータ応用工学科 准教授

1 はじめに

近年、我が国の農業における深刻な高齢化や農業従事者の減少に伴い、食料生産の自給率は今後さらに減少することが懸念されている。各地自体もこのような状況の中、農業の新規参入者を増やすために各種農業機械の導入費用の補助や農地の幹旋などの取り組みを進めているものの、大幅な農業従事者の増加は見受けられない。仮に新規参入者が現れたとしても、これまでのベテランの農業従事者の持てるノウハウやスキルを伝えて新規の参入者が十分に農業のスキルやノウハウを習得して安定して農作物を生産できるようになるまで多くの時間を要することになる。

このことから別のアプローチとして農業の省人化を目指して農機具メーカーやロボットメーカーなどが農業ロボットの研究開発に取り組んでいるが、これも導入コストの問題などにより十分に普及しているとはいえない。また適用できる農作業も水田の除草や農地を耕す、農薬を散布するなどの作業は主であり、種まきから生育、収穫までの一連の流れを自動化するにはまだ至っていない。

一方で IT 企業などをはじめとして農業の IoT システムの研究開発の取り組みも盛んであり、ICT を活用することでより効果的な農作物の栽培を実現することを目標として農作物周辺の温度や水分量の見える化などが実用化されており、一定の効果を得られているとの報告もなされている。

しかしながらこのように各種 ICT システムが研究開発されてはいるものの、我が国の現状における農業従事者の実に 8 割近くが 70 歳以上の高齢者であり、IT サービスへの利用状況の年齢層を鑑みるとこれらの多数を占める農業従事者のこのようなサービスの利用状況は決して高くないことが容易に想像できる。比較して新規参入者の年齢層は 2, 30 代など若い層が占めており ICT 化された農業システムも抵抗なく利用できることが期待されるが、彼/彼女らがシステムから得られる各種センサデータ（水分量や温湿度の時間推移）を提示されとして、それを解釈して最適な農作業へと変換して実行できるほどのノウハウはまだ十分に持ち合わせておらず、効果的に利活用することは困難である。

このことから筆者らはこれまで、各種センサで取得したデータを従来のスマート農業のように数値やグラフで表示、管理するのではなく、これらのデータから次にどのような作業を行うべきを提示することでより直感的にスマート農業のシステムを活用して効果的な農作業を実現するためのシステムの研究開発を進めてきた。これにおいては農作業が直接作業を遂行することでシステムが必要とするリソースを最小化し、コスト面での問題も解決し得るものであり、ベテランの農業者が持ち得るノウハウなどを畑に実装し、各種データに基づいて畑自身が最適な農作業行動を農業者に指示し、農作物の欲求を自ら能動的に満たすことでより効果的な農業の実現を目指すものである。

上記の研究において、これまで本財団の助成によりシステムのプロトタイプ製作と評価も行い、一定の有効性も確認しているが、先のシステムで計測できる情報は水分量および温湿度、照度や周辺の天候情報のみであり、植物の栽培に欠かすことができない土壌養分の測定は実現できていない。これは現状において土壌の養分を構成する窒素化合物の測定をリアルタイムで行うことができるセンサが実現していないことに起因しており、先のシステムが真に農作物の状態を把握して最適な農作業を農業者に立案・提示するためには土壌養分のリアルタイム推定が必要不可欠である。

しかしながら土壌養分は土壌の電離度などを活用して計測することが難しく、これを実現することは困難であるが、普遍的な知識として植物は土壌養分の状態によって生理障害を起こし、その見た目が変化することが分かる。つまり、植物の見た目をカメラセンサによって光学情報として計測することで土壌の養分をリアルタイムに推定することが可能であると考えた。よって本研究では、植物の見た目と土壌養分の相関を調査することで、植物の土壌養分を推定する手法を検討する。

2 植物の見た目による土壌養分の推定

2-1 植物の土壌養分と生理障害

(1) 植物の土壌養分とその効果

植物の生命維持には水分、光、空気、温度、そして養分が必須であり、図1に示すように多量必須養分としては窒素、リン、カリウム、カルシウム、硫黄、マグネシウムなどが挙げられ、なかでも窒素、リン、カリウムは3大栄養素と呼ばれ、植物の生育に特に必要とされているものである。

窒素は葉肥とも呼ばれ、葉や茎、枝の育成を促す成分であり、リンは実や花のつきを良くするための成分であり、カリウムは根や茎を丈夫にするための成分である。このように各成分ごとに植物の育成における役割があり、いずれかの成分が不足することで植物の育成が不完全なものとなり、生理機能に悪影響を及ぼし、生理障害として植物の見た目に様々な形で発露して現れる。

多量必須元素(植物組織の乾燥重量の0.2%以上) 窒素(N)，リン(P)，カリウム(K)，カルシウム(Ca)，硫黄(S)，マグネシウム(Mg)， 炭素(C)，水素(H)，酸素(O)
微量必須元素(植物組織の乾燥重量の0.02%以上) 鉄(Fe)，マンガン(Mn)，ホウ素(B)，亜鉛(Zn)，銅(Cu)，モリブデン(Mo)， 塩素(Cl)，ニッケル(Ni)

図1 植物の必須栄養素一覧

(2) 植物の生理障害

土壌の化学性や物理性など様々な環境要因により正常な成長発育が行われなかった場合、生理障害として植物に様々な様相が発露する。植物の生理障害としては葉害、要素障害、環境障害の3種類に分類することが可能であり、農薬などの薬品の散布によって発生する障害作用である葉害としては、葉の白化や褐斑、紫化や茎の捻転、湾曲、奇形などが発露する。環境障害とは日照不足や異常高温、低温、異常乾燥によって発生する障害であり葉の萎れなどの形で発露する。今回本研究で着目する要素障害は植物体内で生育に必要な不可欠な要素の過不足が起こると発生する障害であり、図2に示すように窒素化合物が不足すると葉全体の黄化や生育不良を引き起こすため、この黄化の度合いを測定することで土壌内の養分を間接的に推定することが可能であると考ええる。



図2 窒素化合物不足による生理障害の様相（葉の黄化）

2-2 植物の観測システム

(1) ハードウェア

本システムは植物周辺の環境情報(温湿度、照度、水分量)および植物の画像を取得し、これを管理するためのコンピュータシステムおよびこれらを駆動させるためのバッテリーから構築される。

温湿度を計測するための温湿度センサとしては NTC サーミスタで構築される温度センサと可変抵抗型の湿度センサを備える DHT11 を採用した。本センサは直接制御ボードに接続され、周辺の温湿度の値をコンピュータに渡す。照度を計測するための光センサとしては CdS で構築された光導電セルにて照度測定用の回路を構築した。本センサは光が照射されると内部の抵抗値が変化する一種の可変抵抗のようなものであり、照度によって構成する回路から出力される電圧の値が変化する。水分量を計測するための水分センサとしてはキャパシタンス式の水分センサである LM393 を採用した。本センサは水分量を計測したい土壤に差し込む形で使用され、土壤内部の水分量によってこのセンサを構成するキャパシタの誘電率が変化するため、その比誘電率を測定する。照度センサと同様にこのセンサの値もその水分量による誘電率に応じて出力される電圧の値が変化する。

図3に示すように、以上のセンサ類をプランタの周辺に配置するためのフレームをベースとなる土台とセンサマウンタのためのラティスを組み合わせることで作成し、これに各種センサを固定することで植物を観察するためのセンサシステム系のハードウェアを構築する。

Nvidia 製のシングルボードコンピュータ(Jetson)によって以上のセンサシステム系を制御しており、取得した各種センサの情報はUDP 通信によってデータを分析するための計算機に送信される形となっている。土壤の成分については別途プランタから土壤サンプルを採取し、これを分析器で分析することで窒素化合物などの値を測定する。センサ動作の電源は上記のシングルボードコンピュータから供給され、シングルボードコンピュータへは電源ユニットもしくは家庭用のAC電源から供給する。

なお本システムは複数の植物を比較するために複数台作成しており、同時並行的に同条件で植物を育成することが可能となっている。また、本研究では当初の予定とは異なり屋内での植物栽培となったため、日照不足を解消するために室内栽培用のLED光源を別途配置し、植物に一定の照度の光が照射される形で管理される形となっている。

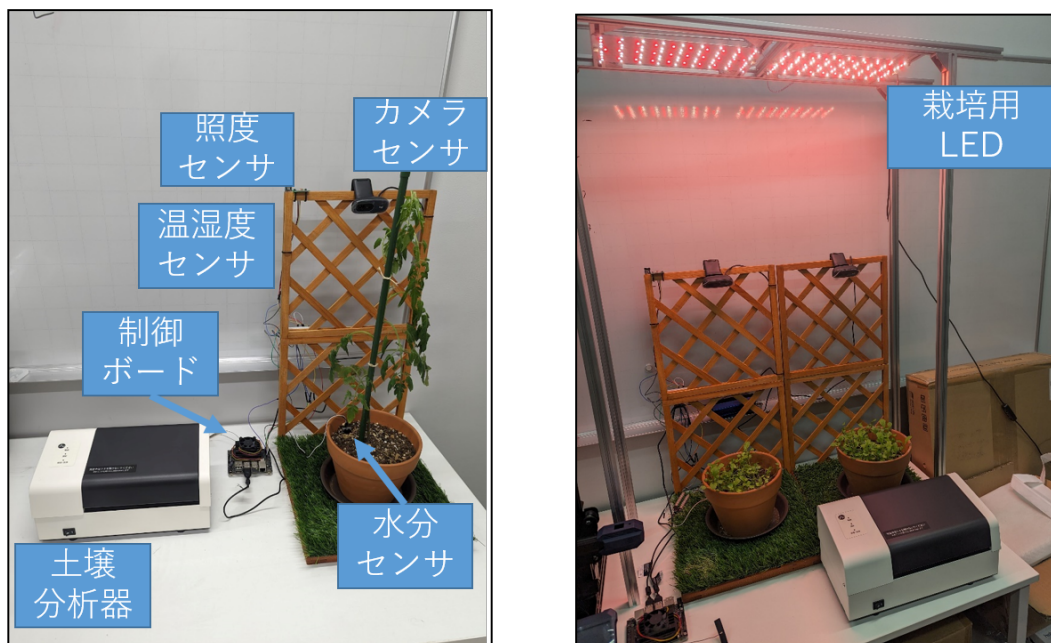


図3 作成した植物観察システム

(2) ソフトウェア

本システムの情報の流れを図 4 に示す。本システムにおいては制御ボードであるシングルコンピュータ (Jetson) に対してカメラセンサから植物の画像情報が、温湿度センサ (DHT11) からデジタル信号として温度 [℃] と湿度 [%] がシリアル通信によって送信される。土壤水分センサ (LM393) と照度センサ (CdS セル) においてはそれぞれ水分量と照度に応じた電圧値がアナログ信号として出力されるため、これを ADC である MCP3002 によって 10bit のデジタル信号に変換することで制御ボードにシリアル通信により送信される。以上、制御ボードにて計測した各種センサの情報を受けとったのちに UDP 通信にて分析用の計算機へと無線送信する。なお、カメラセンサの制御と画像取得をはじめとする情報処理には画像処理ライブラリである OpenCV を用いる。

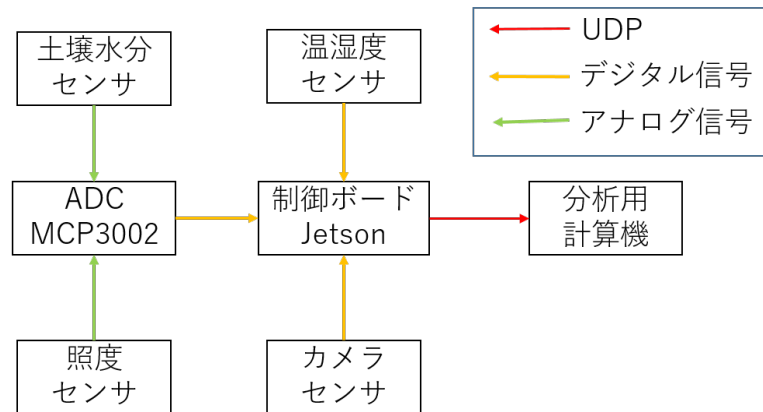


図 4 本システムにおけるデータフロー

植物の葉の様相である黄化の状態を測定するための情報として本研究ではカメラ画像の RGB 情報をそのまま用いるのではなく、これを HSV 表色系に変換することで活用する。HSV 表色系は表 1 に示すように各色味によって異なる角度をもつ色相 (Hue) と色の鮮やかさを表現する彩度 (Saturation)、色の明るさを表現する明度 (Value) の 3 値の組み合わせで表現される色空間である。中でも色相は様々な環境光下においてもロバスト性を持つため葉の重なりなどによって生じる影の影響を軽減することが可能であり、なおかつ色相を表現する Hue の値のみを確認することで葉を構成する色情報が緑色なのか黄色に近い値であるのかを判定することができるため RGB によるカラーモデルに比べて単純な情報で扱うことができるという利点を持つ。

植物は先に述べたように養分が不足すると葉が緑色から黄色に変色する欠乏症状を持っているため、その色相情報は緑色から黄色の範囲へとその分布が変動することが予想される。従って図 5 に示すように取得した植物の画像から植物の葉の領域の色相の値の分布を観察する。

表 1 RGB に対する色相とその値

色相	RGB で色を表現した場合	OpenCV 上の値
0°	R:255 G:0 B:0	0~60
0°~60°	R:255 G:0 B:0~255 へ増加	
60°	R:255 G:255 B:0	
60°~120°	R:255~0 へ減少 G:255 B:0	60~120
120°	R:0 G:255 B:0	
120°~180°	R:0 G:255 B:0~255 へ増加	
180°	R:0 G:255 B:255	120~179
180°~240°	R:0 G:255~0 へ減少 B:255	
240°	R:0 G:0 B:255	
240°~300°	R:0~255 へ増加 G:0 B:255	120~179
300°	R:255 G:0 B:255	
300°~360°	R:255 G:0 B:255~0 へ減少	
360°	R:255 G:0 B:0	

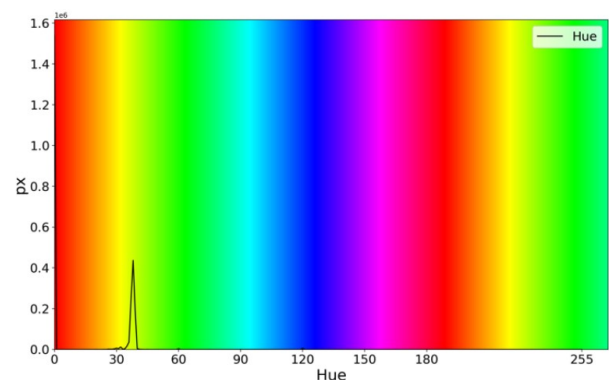


図 5 色相のヒストグラム例

葉の色相を抽出するための過程について述べる. 深層学習によるセグメンテーションに基づいて葉の領域を抽出する方法も検討したが, 本研究ではエッジ抽出をはじめとした画像処理によって領域抽出を行った.

まず図6に示す撮影した植物の画像に対してエッジ抽出を行い画像の輪郭情報のみを取得する. これには植物の葉の周辺の物体によるエッジ情報も多分にノイズとして含まれてしまうため, 抽出したエッジ情報全体に対して収縮処理を施し, 細かいノイズなどの情報消去する.

その後, 残ったエッジ情報に対して膨張処理を行い, 図7に示すような情報を取得することで大まかな植物の葉の輪郭情報を取得する. これにより抽出したい葉の領域の輪郭情報を多く残すことができるため, 色相取得のためのマスクの生成が可能となる.

次に図8に示すように得られた各輪郭情報に対してクラスタリングを行い, そのクラスタ毎に矩形で囲むことで各情報のクラスタのサイズを取得する. このとき抽出したい葉の領域に対するクラスタが最も最大のサイズになることが期待されるため, 最も大きなサイズのクラスタの矩形の画像座標を取得し, この元画像に対して矩形内両機の輪郭情報の内部のみを抽出することで最終的に図9に示すように植物の葉の領域のみが取得できる.



図6 植物の元画像の例



図7 ノイズ除去後の画像

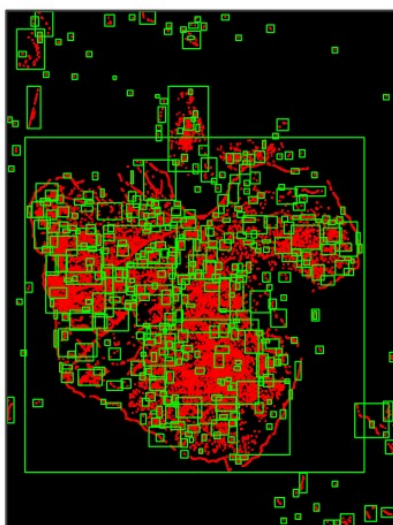


図8 クラスタリングの結果

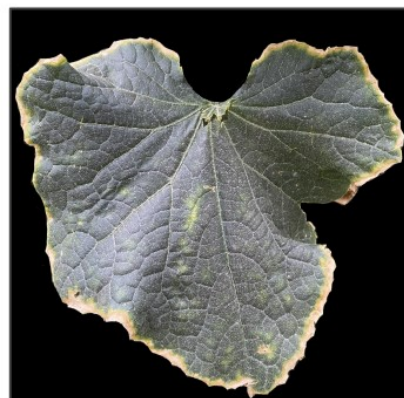


図9 葉の領域の抽出結果

上記の流れで得られた葉の領域の画像に対して各ピクセルの色相情報を取得し、図 10 に示すようにそのヒストグラムを作成する。その後、得られたヒストグラムに対して最頻値の色相の値をその画像における葉の黄化度合とすることで、葉と土壤養分を結びつけるための情報として使用する。

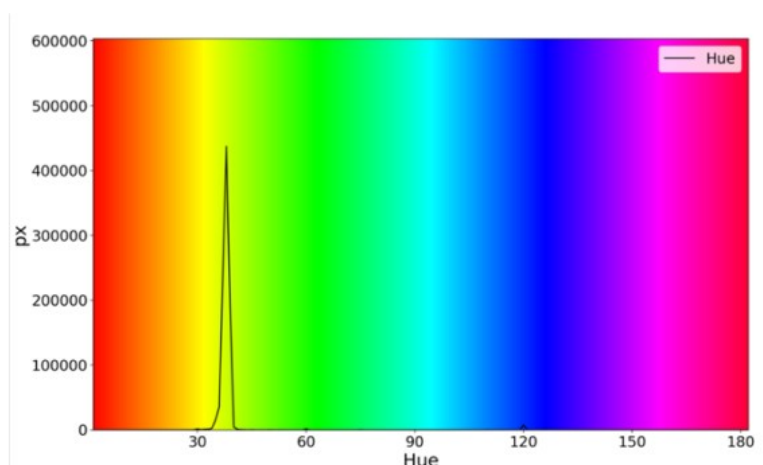


図 10 色相のヒストグラム例

3 評価実験

本研究の目的である色相と土壤養分の相関などを検証するために評価実験を実施する。

3-1 色相と土壤養分の相関の検証

(1) セットアップ

実験用の作物としてほうれん草を栽培し、本葉が 3, 4 枚にまで成長した段階で追肥を開始する。また環境障害の影響を除外するために土壤の pH 度を苦土石灰を用いて 6.3～7.1 の範囲に整えるなどほうれん草の栽培環境に適した栽培方法に従いほうれん草を育成する。

十分に成長した段階で追肥を終了し、終了日を基点として 3 日経過毎に 10 回土壤の養分量を簡易計測する。これに合わせて植物の葉の画像を撮影し、その色相を記録する。なお、植物の撮影は決まった時間、照明下で実施する。なお、色相と土壤養分の結びつきはすぐに植物の様相に土壤養分量が反映されるわけではないので、図 11 に示すように 3 日前の土壤データと色相とを結びつけて相関関係を調査することとした。

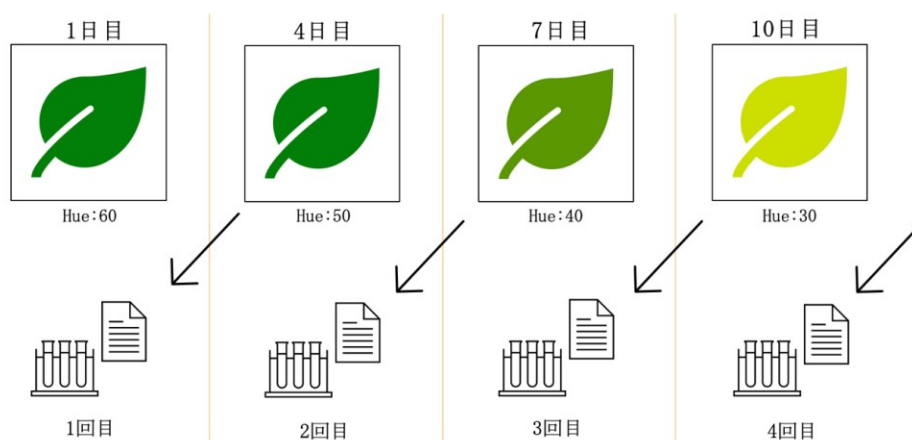


図 11 色相データと土壤データの結び付け

(2) 検証結果

色相値と簡易測定した各土壌データの測定値を表2に示す。土壌データとして測定した化合物は3大栄養素である窒素化合物とリン化合物、およびカリウムの化合物である。また各化合物と色相との共分散を評価した結果を図12～14に示す。これは各成分（横軸）に対する色相（縦軸）の相関を表すものである。

色相に対する窒素の相関係数は0.746程度であり、やや弱い相関があるものの、図12に示す通り共分散は横軸に対してほぼ平行な楕円を示しており、色相の値から土壌の窒素の値を精度良く推定することは困難であると思われる。また同様にリンとカリウムに対する相関係数はそれぞれ0.268と0.568であり、弱い相関を示すもののやはり窒素同様に十分な精度でその量を推定することは困難であると思われる。

表2 色相と各要素の値の測定結果

単位：kg/10a				
	NO ₃ - N	P ₂ O ₅	K ₂ O	Hue
1回目	30	25	25	36
2回目	45	25	25	39
3回目	30	25	25	37
4回目	30	10	25	38
5回目	45	25	25	38
6回目	30	10	25	38
7回目	15	10	10	38
8回目	15	10	10	36
9回目	10	10	10	36
10回目	5	10	10	35

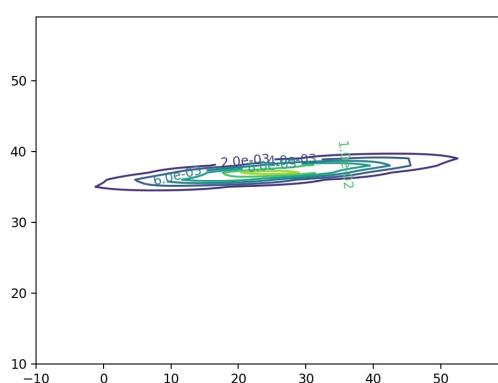


図12 窒素化合物と色相の共分散

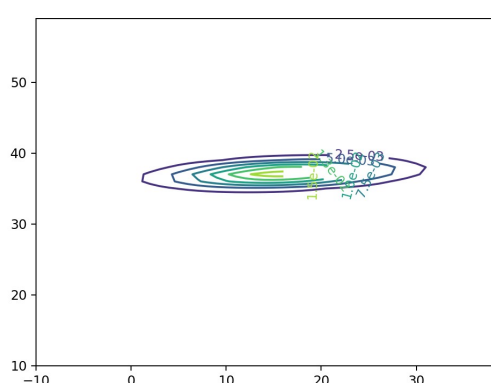


図13 リン化合物と色相の共分散

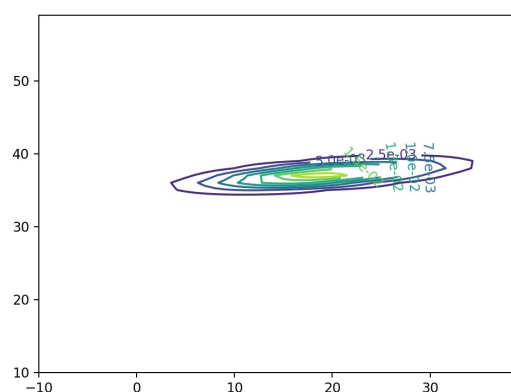


図14 カリウム化合物と色相の共分散

3-2 植物の様相に基づく成長度合い判定の検証

(1) セットアップ

色相の情報に基づいて土壌養分量を推定することは困難であるとの判断に至る結果となったが、植物の色相によって生理障害を判定することは可能であるため、本研究では次善策として先のシステムを改良して植物の見た目から育成度合いを判定するシステムの構築を行った。

図 15 に示すようにセンサシステム等はそのままに制御ボードやカメラセンサの配置などを変更し、本システム単独で稼働するものとしてソフトウェア等の変更も行った。

先に述べた植物の葉の抽出アルゴリズムを用いて植物の葉の領域の抽出を行い、抽出した葉の画像領域内における黄色の色相に該当する領域の割合を求めることでどの程度生理障害が進行しているのかを判定し、システム上部のモニタに表示、通知するものである。

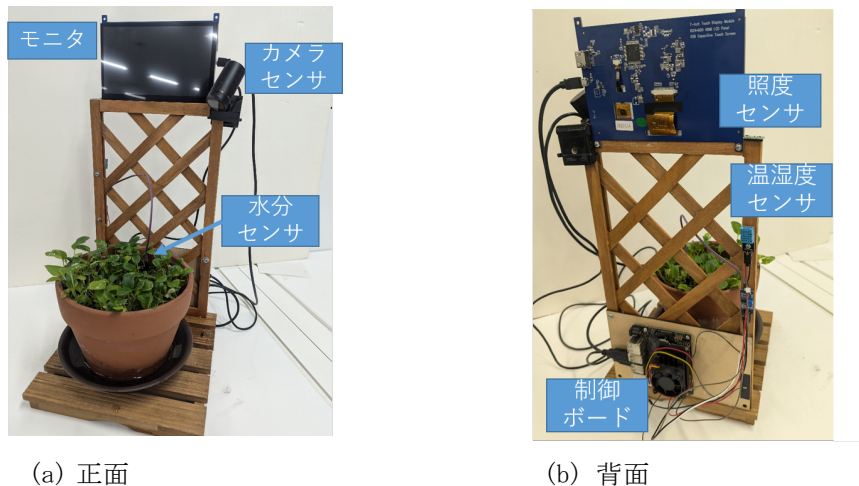


図 15 改変した植物の観察システム

(2) 動作検証

小松菜を栽培し、本システムによって色相の情報からその黄化の割合を算定することでその生育度合いが順調であるかどうかを自動識別可能であるかどうかを検証することで本システムの動作検証を実施した。

計測している育成中の植物の画像とそこから葉の領域のみを抽出した結果を図 16 に、黄色の領域の割合を求めることで枯葉率を算出し、その育成状況を文章化してモニタに表示した結果を図 17 に示す。結果より色相を計測する場合と同様にほぼ正しく葉の領域のみを抽出してその黄化割合（枯葉率）を算出して表示し、またその割合から育成度合いを判定して正しく表示できていることが分かる。以上により本システムの動作を検証し、生理障害の割合を自動判定することで栽培支援を可能とするシステムを実現することができた。

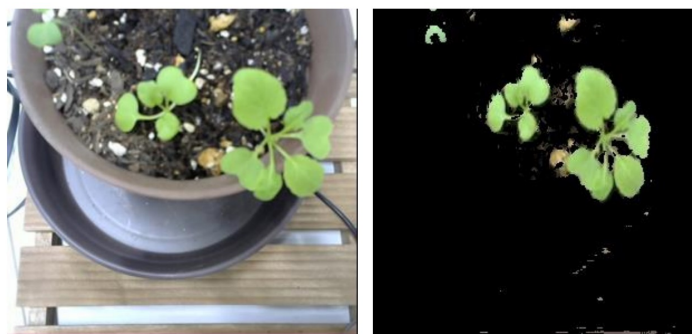


図 16 栽培中の植物の葉領域抽出結果

枯葉の割合は : 0.83 %です！順調に育っていますが、画像も確認してください

図 17 黄化割合の算出による生育度合い判定結果

4 おわりに

本研究では植物がその状態に基づいて適切な農作業を立案し、これを人に提示することで連携して能動的なスマート農業の実現を目指しており、本稿では現在リアルタイムに測定することが不可能である土壌養分を植物の生理障害に着目することでその様相から推定することが可能かどうか両者の相関関係の分析をおこなった。

本稿では植物を観察するためにカメラセンサや温湿度センサなど各種センサを搭載したプランタのハードウェアの開発と植物の様相を数値化するための葉の領域の抽出と色相情報を取得するためのシステムの開発を行った。

実験用の植物の栽培を行い、開発したシステムを用いて土壌養分の測定結果と色相情報の相関を分析した結果、窒素化合物やリン、カリウムの化合物の3台栄養素に対して弱い相関は示すものの、色相の情報から土壌の各養分を制度良く推定するには相関が弱く、本研究の仮説に基づいてリアルタイムに推定することは困難であるという結論に至った。

しかしながら、何らかの要因により育成の疎外要因が生じた場合は植物に黄化といった生理障害が発生することは事実であり、その情報に基づいて生育状況を判断することは可能であると考えられるため、本稿ではその後、開発したシステムの改変を行い、植物の色相情報や水分量、温湿度量などの情報に基づいて育成状況を判定して通知する支援システムの検討と実装も行った。

動作検証の結果、植物の様相から黄化の度合いとして枯葉率を算出し、これを正しく通知することでその育成状況を自動的に通知することができることを確認し、今回作成したシステムの一定の有効性を検証した。

しかしながら、本研究の目的である植物の状態に戻つて植物自身が適切な農作業を検討、立案して人に提示するシステムを実現するためにはやはり土壌の養分量をリアルタイムで測定することは必要不可欠であるため、今後は本助成によって整備された実験機器を駆使することで例えば可視光による様相ではなく、赤外光などのスペクトル情報などを用いることでその相関が認めれないか追実験などを行いたい。

【参考文献】

農林水産省 荒廃農地の現状と対策について

農林水産省 平成30年 食料・農業・農村の動向

農林水産省 平成 28 年度 新規就農者の就農実態に関する調査結果

農林水産省 平成 29 年 上半期農業景況調査関連

農林水産省：農業 DX をめぐる現状と課題

M Hasegawa, S Muramatsu, "Development of the Agricultural Support System Based On Proposal Actions and Farmland Informations", IEEE Int'conf on Industrial Electronics Society

〈発 表 資 料〉

題 名	掲載誌・学会名等	発表年月