

筑波大学大学院博士課程

システム情報工学研究科修士論文

RGB画像と深度画像から分析した植物成長状態
を提示する栽培支援システム

ZHANG SHUANG

修士（工学）

（コンピュータサイエンス専攻）

指導教員 高橋伸

2015年3月

概要

植物栽培過程中、一番大事なことは植物の成長状態と健康状態を正しく把握することである。しかしながら、栽培経験の浅い初心者にとって、植物は健康的に成長しているか、もしくは不調な状態にあるかを区別できない可能性がある。特に、植物健康状態の変化があまり大きくないときは、たとえ経験者としても植物の成長状態を把握することは困難である。

本稿では、RGB 画像と深度画像から分析した植物成長状態を提示する栽培支援システムについて述べる。Kinect を利用して取得した植物の 3 次元データから植物の成長状態を推定し、リアルタイムで植物の監視およびその生長状態の提示を実現する。そのための手法を提案し、植物栽培支援システムを実装した。また実験による評価を通じて、提案システムの有効性を考察すると同時に、今後の展望を示した。

目次

第1章	序論	1
1.1	背景	1
1.2	本研究の目的とアプローチ	2
1.3	論文の構成	2
第2章	関連研究	3
2.1	植物の成長状態を推測する研究	3
2.2	植物に関する画像処理の研究	3
2.3	栽培支援の研究	4
2.4	本研究の位置づけ	4
第3章	植物の成長状態を推測する手法	6
3.1	想定環境	6
3.2	植物画像からデータの取得	7
3.3	植物成長状態の推測	8
第4章	実装	10
4.1	ハードウェア構成	10
4.2	ソフトウェア構成	11
4.3	情報の取得	12
4.4	植物成長状態の推測	13
4.5	ユーザへの提示	13
第5章	実験	15
5.1	水をやる前後植物成長状態に関する実験	15
5.1.1	実験内容	15
5.1.2	結果と考察	15
5.2	植物の栽培支援の有効性に関する実験	17
5.2.1	実験1	17
	実験内容	17
	結果と考察	17
5.2.2	実験2	20
	実験内容	20

	結果と考察	20
第 6 章	結論	24
	謝辞	25
	参考文献	26

図目次

1.1	植物の状態	1
3.1	画像の処理	7
4.1	ハードウェア構成	10
4.2	実際に利用したシーン	10
4.3	システムの GUI	11
4.4	植物成長状態の推測	12
5.1	水をやる前後植物の変化	16
5.2	y_{lr} の変化	16
5.3	一週間 y_{lr} の変化	18
5.4	一週間緑色ポイント数の変化	18
5.5	一週間黄色ポイント数の変化	19
5.6	一週間黒色ポイント数の変化	19
5.7	一日色値の変化	20
5.8	6日間 y_l の変化	21
5.9	6日間 y_r の変化	21

表 目 次

3.1	不調の例	7
3.2	各色の RGB 範囲	8
3.3	データの変化から状態の推測	9
4.1	ユーザへの提示	14
5.1	6 日間の提示	23

第1章 序論

1.1 背景

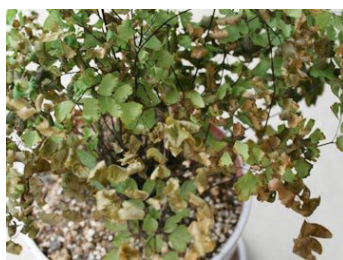
植物栽培の過程において、一番大事なことは植物の成長状態と健康状態を正しく把握することである。一方で栽培の際に植物の健康状態を把握できないと、植物が病気に罹ってしまう。これは水や日光が不足してしまうことが主たる原因である。そして、最悪の場合、植物が死んでしまう例もたくさん出ている。栽培経験の浅い初心者にとっては、植物の成長状態が分からなくなり、植物は健康的に成長しているか、もしくは不調な状態になっているかを区別できないかもしれない。特に、植物健康状態の変化があまり大きくない時、たとえ経験者であっても、植物の成長状態を把握できないこともあると思われる。

一般的に、植物の成長に必要な条件は水、温度、湿度および日光である。これらの条件がお互い制約もしくは促進している。たとえば、温度が高い時水の需要量が高くなったり、日光が強い時温度が高くなったり、水と温度が湿度に影響を与える。それらの条件に満足できない時、植物が不調な状態になる。

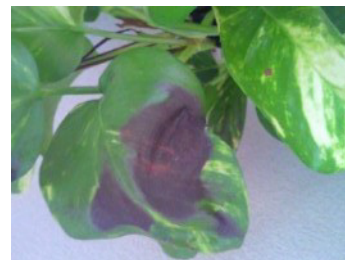
図 1.1 に、よく起こりやすい不調を挙げる。これから分かるように、葉の変化は植物健康状態を表示する一番重要な特徴となっている。その中でも、葉の色の変化が大きな特徴となりやすい。しかしながら、栽培経験の浅い初心者はこれらの変化を見落としやすいと考えられる。特に、あまり大きな変化でない場合では、人の目では把握しづらいと考えられる。



[1] 垂れてくる



[2] 黄色に変色



[3] 黒色に変色

図 1.1: 植物の状態

こういった問題を解消するものとして、植物の成長環境（湿度、温度、日光）を監視した植物の管理システム Garduino[1] が存在する。しかしながら、環境を監視するより、植物本体の状態の把握が重要である。そのため、植物の外観様子から植物の成長状態を把握する方法が必用不可欠である。ここで、植物の外観から植物の成長状態を推測する方法を利用する手

法を提案する。画像処理の手法から問題を解決する方法として、画像処理ソフトウェアを使用して葉の色変化を分析する手法 [2] や、画像処理技術を用いて、葉の向きの変化を計算する手法 [3] の研究が存在する。しかしながら、植物は3次元的な物体なので、2次元画像からの分析はより不完全であると考えられる。そこで、本稿では三次元的な植物の成長状態を把握する方法を求める。また、前述のように、植物の色は成長状態を推測する重要な判断基準の一つである。色情報の所得することも必要不可欠と考えている。したがって、栽培支援システムの開発では、植物の3次元情報および色の RGB 情報を得ることが必要と考えられる。

1.2 本研究の目的とアプローチ

本研究では、植物の成長状態および健康状態を把握するため、植物の3次元情報と色情報を所得し、植物の成長状態を推測し、栽培に関するアドバイスをユーザに提供することを目的とする。

それを実現するため、我々が Kinect for Windows v2 から取得した RGB 画像と深度画像を処理し、植物の3次元点群データ (PointClouds) を取得し、3次元点群のデータから植物の3次元情報と色情報を計算し、植物の成長状態を推測する手法を提案する。統計的な方法から植物各点の情報をまとめて分析することを考えている。また、フィードバックとして、推測した情報および栽培に関するアドバイスをユーザに提示する。その適応例として、栽培支援システムの設計と実装を行った。

1.3 論文の構成

本論文の構成は以下の通りである。本章では、植物栽培における問題点を挙げ、それを踏まえて我々の研究の目的とアプローチを述べた。第2章では、植物の成長状態を推測する研究や植物に関する画像処理の研究など本研究に関連する研究について述べる。第3章では、本研究で提案する栽培支援システムについて述べる。第4章では、栽培支援システムの実装の詳細について述べ、第5章では、実験や試用を通じて行ったシステムの評価について述べる。最後に第6章で結論を述べる。

第2章 関連研究

本研究では RGB 画像と深度画像から分析した植物成長状態を提示する栽培支援システムを開発するため、植物の成長状態を推測する研究、植物に関する画像処理の研究および栽培支援の研究を関連研究とする。本章ではそれらの関連研究について説明し、本研究の特徴を述べる。

2.1 植物の成長状態を推測する研究

コンピュータや電子機器の発達につれ、植物の成長状態を推測することが可能になりつつある。Li らは、いくつかのセンサーを利用し、センサーから植物各部分までの距離を取得し、植物の 3 次元点群を計算する方法を提案した [9]。システムが植物の 3 次元点群データから葉の状態を認識できる。センサーから植物の 3 次元点群データを取得し、葉の形、大きさおよび向きから各葉の成長状態を認識可能である。また、新生葉、成長期における葉、枯れている葉をそれぞれを区別でき、3 次元点群データにおけるそれぞれの葉に異なる色をつけ、ユーザをリアルタイムで提示できる。

Summy らは、赤外線センサーを利用し、植物の繊維構成を分析し、損傷を受けた葉を検出する手法を提案した [2]。赤外線センサーから撮られた赤外線センサーフィルムを分析し、葉の内部成分構成を推測し、繊維成分の構成を解析し、外部で見えない損傷を検出することが可能である。

また、Laszlo らは、水をやる前後葉の向き方向の変化を計算する手法を提案した [3]。センサーおよび色識別技術を利用し、各葉の向き方向を計算し、植物全体の状態を推測することが可能である。この研究では特に、水をやる前後の葉の向き方向の変化と植物状態の変化を考察した。

2.2 植物に関する画像処理の研究

植物の画像における各種の画像処理は植物栽培支援に関する研究の一つ方向である。Long らは、半自動的に植物をモデリングする手法を提案した [11]。彼らは、画像から植物の形を認識し、葉の 3D 情報を計算し、各葉および枝を識別し、半自動的に 3D モデリングするシステムを開発した。また、写真から明暗照明の情報を分析し、モデリングした植物に照明をレンダリングした。

Takizawa らは、2つのカメラを使用し、3次元撮影空間を構築し、カメラから植物各部分までの距離と色値を取得し、葉と茎を認識する手法を提案した [12]。彼らは、カメラから取得した距離と色データを利用し、植物の3次元再構築を行い、植物の高さ、広さおよび葉の面積と形を計算した。

また、Wang らは、リアルタイムで植物の葉をレンダリングする手法を提案した [13]。葉の形を正確的に認識し、葉の色と植物における環境照明を分析し、BRDF と BTDF 変数を計算してから、葉をレンダリングすることが可能である。Takashi らは花の X 線画像から花をモデリングする手法を提案した [15]。花の各構成を識別でき、3D モデリング画像を生成が可能である。

2.3 栽培支援の研究

面倒な栽培作業を簡単化したいといった要望を満たすため、人間に代わって栽培作業の一部を自動化するという試みがなされている。Luke らは、Arduino のセンサーとモーターを利用し、植物の成長環境を監視し、自動で栽培作業を行うシステム "Garduino" を作成した [1]。温度センサー、湿度センサーおよび可視光センサーが植物の成長環境を測定してから、モーターが水、温度、照明などの条件をコントロールするシステムを実現し、自動的に栽培作業を行うことが可能である。

Noda らは、植物における画像処理の方法を利用し、植物の衰弱を認識する手法を提案した [10]。彼らは、植物の画像から抽出された特徴に基づいて栽培の周辺装置を制御するアプリケーションを開発した。システムが画像の緑色である植物の部分抽出し、中心点から両側までの角度および葉部分の面積を計算し、植物の3次元再構築を行い、密集した葉の植物の衰弱を推測した。

また、センサネットワーク (WSN) を利用し、大面積の植物成長環境を監視する手法もたくさんある。Mare らは、WSN を利用し、温室での温度、湿度、照明などの環境状態を監視し、植物の科学栽培環境を作った [19]。Dong らは、ZigBee 無線センサーに基づいて温度と湿度のモニタリングシステムを開発した [20]。これらの研究は植物の成長環境を監視し、自動的に環境の変化を認識し、調整する手法である。

2.4 本研究の位置づけ

本研究では、RGB 画像と深度画像から植物の成長状態を推測して栽培を支援するものである。2.1 節で挙げた研究は本研究と同様に植物の成長状態を推測する研究を行ったが、赤外線センサーなどのセンサーを利用した。3次元情報を取得できたが、色に関する情報は処理範囲外となっている。本研究は植物の、RGB 画像と深度画像から植物成長状態を推測する研究で、色情報が3次元をともに処理する。2.2 節で挙げた研究は植物画像に関する研究で、植物の色と3次元情報を分析することを実現したが、研究は植物に対するモデリングすることがメインとなり、植物の成長状態に関する推測もしくは評価することはなかった。本研究は植物へ

の栽培支援が目的となっている。2.3 節で挙げた研究は、本研究と同様に栽培支援システムを開発したが、それらの研究は植物の生長環境を監視し、栽培支援を実現できた研究である。

第3章 植物の成長状態を推測する手法

本研究では、植物の RGB 画像と深度画像から植物の 3 次元情報と色情報を取得し、植物の成長状態を推測する。そして、植物の成長状態からユーザに栽培に関するアドバイスを提供する手法を提案する。植物栽培に関する重要な条件は水、湿度、温度、日光となっている。これらの条件が変化することで、植物の成長状態も変わっている。そのため、植物の成長状態と水、湿度、温度、日光など条件の間の関係を考察しないといけないと考えている。画像から植物に関する情報は山ほど多いので、植物の成長状態を推測するための有用な情報を抽出し、整理することが必要となっている。本章では、まず、栽培にとって有用な情報について検討する。そして、有用な情報を抽出および整理する方法を考察する。また、これらの情報から成長状態を推測する手法を説明する。

3.1 想定環境

Kinect for Windows v2 の深度カメラの取得範囲は 0.5～8.0m となっているため、葉ごとに細かくデータを取得するのはかなり困難である。そして、一般的な観葉植物の葉の数が多いため、葉の間遮ることが多い。そのため、本研究は、細かく葉ごとの変化を考察しない。その代わりに、植物全体の三次元情報の変動および色情報の変化から植物の成長状態を推測することを提案する。

本手法の制限として、対象植物は観葉植物だけとなる。多肉植物、花、竹などの植物は外形から見ると、普通の観葉植物との差別が大きくなっている。その差により、三次元および色情報についての分析・推測する方法は差別がある。そのため、同じシステムでの処理することが困難であるため、考察対象から除外して考える。そして、植物は常緑植物に制限する必要がある。正常状態における葉の色が変化すると、植物の色についての判断が複雑である。そのため、本研究では、紅葉する植物など植物の色が時期的に変化する植物は考察対象から除外して考える。

また、環境光が色画像への影響が大きくなっているため、処理が複雑である。そのため、植物が恒常な照明の下に放置する必要がある。そして、植物の位置、もしくは植物と Kinect の距離が変わると、3 次元情報のデータも変化する。そのため、植物および Kinect の位置は事前に固定しなければならない。

3.2 植物画像からデータの取得

植物の RGB 画像と深度画像から得た植物に関する情報が複雑であるため、システムにとって有用な情報を抽出・整理しなければならない。我々は植物各点の情報を統計的にまとめて分析することを考えている。

図 1.1 では、よく起こりやすい植物の不調を挙げた。これらの不調状態から見ると、株全体の状態の変化（図 1.1[1] 垂れてくること）と葉の色の变化（図 1.1[2] 黄色、図 1.1[3] 黒色に変化すること）が見える。表 3.1 の分析からよると、植物の成長状態を推測するため、植物の色情報を取得しなければならない。そのため、植物の葉の平均位置と緑色部分、黄色部分、黒色部分の面積の変化を取得する必要がある。

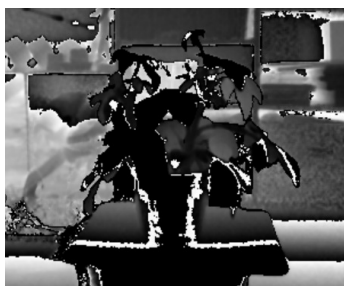
表 3.1: 不調の例

不調	状態	影響条件
乾燥	葉が黄色くカラカラに枯れる	湿度
葉焼け	葉が黒く変色する	日光
水切れ	葉のハリがなくなり、垂れてくる	水
低温	葉が変色したり、落ちる	温度

植物と Kinect 両方を固定すると、植物の RGB データと深度データを獲得できる。PointCloudLibrary の方法を利用し、植物の RGB データと深度データから 3 次元点群データを得る。深度データと RGB データの情報は `pcl::PointXYZRGB` の XYZ3 次元と RGB3 色の各値として保存される。3 次元座標系は Kinect を原点として、Kinect から植物への方向は z 軸、植物に向っての横軸は x 軸、縦軸は y 軸の XYZ 座標系である。PointClouds の xyz3 次元データで閾値を制限し、植物位置および周辺のデータだけを保存する。深度センサーから取得したデータの中、z 値が植物の所在範囲内のデータだけを PointCloud の 3 次元点群に保存する。本研究で提案したシステムは z 値が 50 から 100 までの範囲に設置した。この範囲内には植物以外ほかの影響を与えるものがない場合、保存されたデータは植物のデータであると考えられる。（図 3.1）



[1]RGB 画像



[2] 深度画像



[3]3 次元点群画像

図 3.1: 画像の処理

そして、植物が不調の時は、中心軸から両側に垂れてくるから、植物の中心軸を計算し、左と右で分かれて y 値の平均値を計算する。保存されたすべてのポイントの x 値 ($x_{p1} \sim x_{pn}$) の平均値 (x_0) を計算する (3.1)。 $x < x_0$ のポイントの y 値 ($y_{p1} \sim y_{p(m-1)}$) の平均値は y_l 、 $x > x_0$ のポイントの y 値 ($y_{pm} \sim y_{pn}$) の平均値は y_r を計算する (3.2) (3.3)。植物の成長状態が変化すると、葉の位置と遮ることも変化している。そのため、 y_l と y_r は植物成長状態の推測に影響を与える。また、保存された 3 次元空間におけるすべてポイントの y 値 ($y_{p1} \sim y_{pn}$) の平均値 (y_{lr}) を計算する (3.4)。植物の状態が変わる時、 y_{lr} も変化している。

$$x_0 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_{pi} \quad (3.1)$$

$$y_l = \frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^{m-1} y_{pi} \quad (3.2)$$

$$y_r = \frac{1}{n-m+1} \sum_{i=m}^n y_{pi} \quad (3.3)$$

$$y_{lr} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_{pi} = \frac{y_l + y_r}{2} \quad (3.4)$$

また、保存されたデータから、黒色、緑色、黄色の点をそれぞれ数えると、植物の現時点の色情報が獲得できる。RGB で表 3.2 の閾値を制限し、各色の点数を計算する。植物ごとの色の特徴値も変わっている。正確に色を計算するより、色の変化が推測に決定的な影響を与える。そのため、各色の大体範囲が確定すれば構わない。緑色、黒色、黄色の点数は N_g 、 N_b 、 N_y として表示する。

表 3.2: 各色の RGB 範囲

色	RGB 各値の範囲
緑色	$0 \leq R < 200, 100 < G \leq 255, 0 \leq B < 200$
黄色	$200 < R \leq 255, 200 < G \leq 255, 0 \leq B < 100$
黒色	$240 < R \leq 255, 240 < G \leq 255, 240 < B \leq 255$

3.3 植物成長状態の推測

本研究で提案する植物成長状態推定の手順について説明する。一日中植物の位置情報と色情報が変化を続いている。そのため、現時点の状態と直前の状態を比較することではなくて、毎日の同じ時間の状態を比較する。

まず、一日中 3 次元情報 (y_l と y_r 、もしくは y_{lr}) と色情報 (N_g 、 N_b 、 N_y) を一定時間間隔において記録する。これらのデータを基準値として保存する。一日の基準値が保存される

と、植物の監視を始める。取得した新しい3次元情報と色情報データを基準値と比較する。変化値が閾値範囲から変化すると、成長が不調状態に入ると推測する。また、変化が健康な方向に変化すると、新しい情報と古い基準値を統合して計算する。新しい計算値が古い基準値の代わりに、保存する。

詳しく説明すると、 y_l と y_r が下がると、水切れ状態になるもしくは温度が低いと推測する。 y_l と y_r が上がると、植物の成長が好調と推測する。 N_g が上がると、植物の成長が好調である。 N_y が上がると、湿度が低いもしくは水が足りないと推測する。 N_b が上がると、日照が強いと推測する。(表 3.3)

表 3.3: データの変化から状態の推測

データ	変化	推測された状態
y_l y_r	下がる	水切れ、温度低い
	上がる	成長好調
N_g	下がる	温度低い
	上がる	成長好調
N_y	下がる	成長好転
	上がる	湿度低い、水切れ
N_b	下がる	成長好転
	上がる	日照強い

第4章 実装

4.1 ハードウェア構成

本研究で提案した栽培支援システムのハードウェア構成図を図 4.1 に示す。Kinect と植物を一定距離（5cm～1m）で離し、Kinect のカメラと植物の中心点が大体水平になるように置く。そして、Kinect と植物両方とも固定する。Kinect から取得された 3 次元情報と RGB 色情報は USB 経由でコンピュータに送信される。取得した情報をもとに植物成長状態を推測し、コンピュータのディスプレイによって情報が提示される。そして、実際に利用したシーンは図 4.2 に示す。

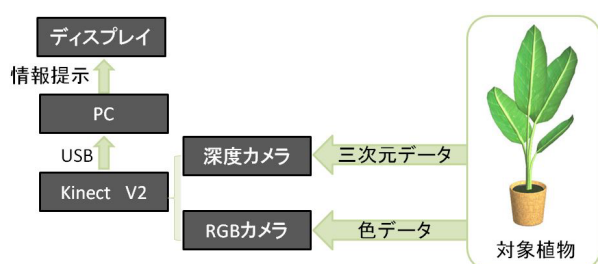


図 4.1: ハードウェア構成



図 4.2: 実際に利用したシーン

なお、本研究では Kinect for Windows v2 センサーを使用した。Kinect のセンサーは RGB カメラと深度センサーを搭載されている。深度センサーは赤外線カメラとパルス変調された赤外線を投光するプロジェクターが搭載されている。深度カメラの精度は Kinect v1 と比較すると、かなり向上している。マイクロソフトは Depth の精度が Kinect v1 比で 3 倍良くなっているとしている [4]。Time of Flight (TOF) の方法を採用されており、投光した赤外線が反射して戻ってくる時間から深度情報を得る。RGB カメラの解像度は 1920×1080 であり、撮影する時のフレームレートは 30fps である。深度カメラの解像度は 512×424 であり、取得範囲は 0.5～8.0m である。また、視野角は水平 70 度、垂直 60 度である。今回の実装で利用した植物はおおよそ 20cm の幅があるため、Kinect を植物中心点から約 75cm の距離位置に設置している。

4.2 ソフトウェア構成

本研究は Microsoft Visual Studio で C++言語を使用して開発した。Point Cloud Library の方法を利用し、3次元点群のデータを取得し、分析する。提案した栽培支援の GUI を図 4.3 に示す。GUI はユーザ設置の部分、フィードバックの部分およびアドバイスの部分から構成される。

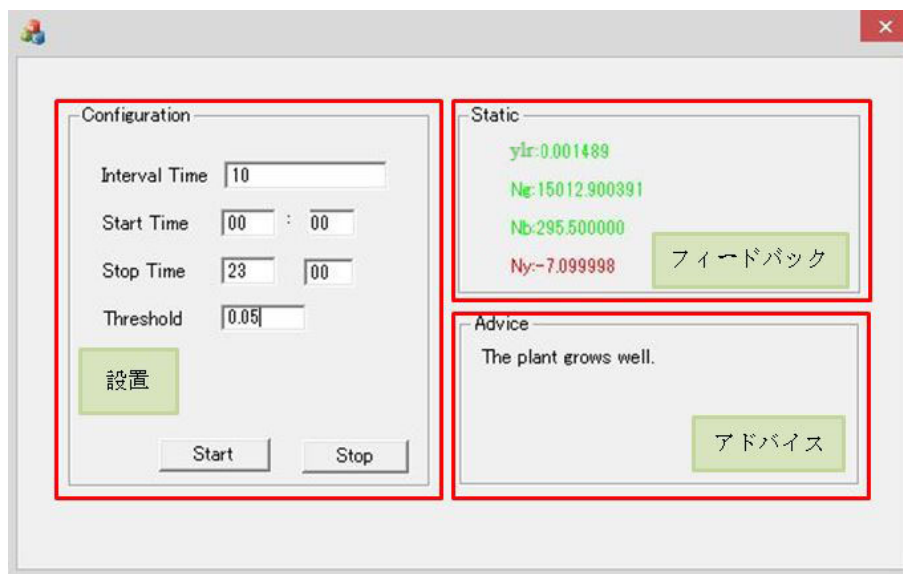


図 4.3: システムの GUI

設定の部分では、ユーザが監視開始時間、終了時間を設定できる。システムは設定された時間帯以外に植物成長状態を推測することが一時停止となる。深夜もしくは使用者が休憩している時をその時間帯外として設定すれば、不必要な時システムを一時停止できる。そして、Kinect は 30fps のフレームレートで植物のデータを取得できるが、植物の生長が遅いから、毎回のデータを比較することは無意味またパソコンへの負担が重い。そのため、システムは分単位で植物の状態を比較する。そして、ユーザが自由的に間隔時間を入力できる。また、植物の生長スピードに応じて、システムの敏感程度が変化しているため、ユーザが Threshold 値を入力して自由的に閾値範囲を設定できる。

フィードバックの部分はシステムからの植物の各値の変化が見える。状態が悪化する時赤字で表示し、好転する時緑字で表示する。今回実装したシステムは y_{lr} 、 N_g 、 N_y 、 N_b の各差分を提示する。

アドバイスの部分はシステムがユーザが植物状態を改善するための対策に関するアドバイスを出す。今回実装したシステムは「The plant desirely need some water.」、「The plant need some water.」、「The temperature may be too low.」、「Sunshine is too strong.」、「The plant grows well.」の五つ提示がある。

また、植物に対する監視を始めたら、ユーザがリアルタイムで植物の 3 次元点群を調べら

れる。ユーザが” Start ” ボタンを押したら、3次元点群を表示するダイアログボックスが表示できる。ユーザがマウスとキーボードを使って、3次元点群を調査できる。” Stop ” ボタンを押したら、システムが停止する。

システム処理の流れは図 4.4 に示す。本システムは、大きく分けて RGB と深度情報を取得する部分、植物成長状態を推測する部分、ユーザに提供する部分の三つによって構成されている。

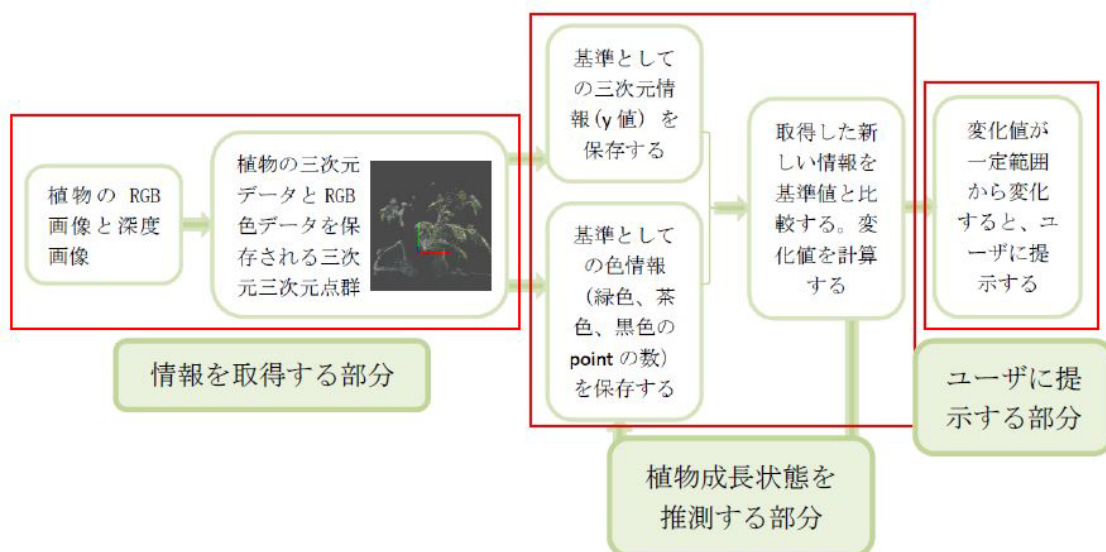


図 4.4: 植物成長状態の推測

4.3 情報の取得

情報を取得する部分では、Kinect を起動し、RGB 画像と深度画像を取得する。Kinect の取得範囲は 50cm からの範囲であり、植物を Kinect から 75cm 前後の位置に放置している。植物は Kinect から 50cm から 100cm までの範囲に存在することが分かっている。そのため、深度画像から 1.0m 以上のデータを消去し、1.0m 以内のデータだけを保留することにする。また、Kinect の視野角は水平 70 度、垂直 60 度であり、結構広い範囲である。植物があまり大きくない場合、画面中心の一部に存在過ぎない。そのため、保存されるデータの x、y 値にも一定範囲を設定する。今回実装したシステムでは Kinect のカメラとセンサの中心点が植物の中心点と同じ水平面である。そして、植物の高さが 30cm ほどである。そのため、y 値が-0.15 から 0.45 までのデータだけを保存する。また、植物の広さは大体 20cm であるため、x 値が-0.2 から 0.2 までのデータだけを保存する。

4.4 植物成長状態の推測

植物成長状態の推測における分析は、初期化データの保存、成長状態の推測および基準値の調整という三つの部分に分けている。

植物に対する監視が初期の時、比較できる基準データが存在しないため、初期化することが必要不可欠である。一日中観葉植物の成長状態を考察すると、植物の様子が変わっている。光合成作用のため、温度があまり高くない時、昼は朝と夜より張っている。水が入れる直後から2時間までの間、植物の様子が徐々に張っていく [3]。つまり、植物が常に変化している。しかしながら、環境条件が変化していない場合、日にちごとの同じ時間には植物の様子はあまり変わらない。そのため、一日の植物の情報を取得し、初期値として保存する手順が必要不可欠である。

システムが起動する前、ユーザから監視の開始時間、終了時間およびデータを記録する間隔時間を入力する。開始時間から終了時間までの間以外、システムのデータ記録は一時停止する。そして、前述のように、システムが毎回取得したデータの3次元情報 (y_l , y_r) と色情報 (N_g , N_b , N_y) を計算する。間隔時間ごとに、この時間内において計算したデータの平均値を計算する。

考察する時間の基準データが存在しない場合、システムが各情報を初期値として txt ファイルに保存する。もし、基準データが存在する場合、新しいデータとその基準データを比較する。環境によるシステムが取得したデータにはノイズが存在するため、基準値に基づいて閾値範囲を設置する。取得した情報が閾値範囲以内に変化することは正常的な変動である。閾値範囲から変化すると、その変化が有効である。

ユーザが自由的に閾値範囲の設定が可能である。ユーザが入力したデータが α とすれば、閾値は基準値より $(1 - \alpha) \sim (1 + \alpha)$ の範囲である。取得した情報が基準値より閾値範囲から変化すると、植物が表 3.3 に示すように、対応的な状態に入っていると推測する。また、取得した新しいデータと基準値の差分をフィードバックとしてユーザに提示する。ユーザが変化の大きさを調べられる。

なお、植物の成長に進めると、植物の状態が変化している。そのため、判断基準値についての調整が必要である。植物が好調で進んでいる時、古い基準値 (V_o) の代わりとして、現時点情報のデータ (V) と古い基準値の平均値 ($V_n = (V_o + V)/2$) を新しい基準値として txt ファイルに更新する。

4.5 ユーザへの提示

植物成長状態の推測結果に基づいてユーザに提示することについては、フィードバックとユーザへのアドバイスの二つ部分に分けている。フィードバックの提示は、現時点植物の状態と基準値を比較する結果を表示する。今回実装したシステムは y_{lr} , N_g , N_y , N_b の新しいデータと基準値の差分をユーザ提示する。植物の状態が好調している時は緑色で表示し、植物の状態が悪化している時は赤色で表示する。ユーザへのアドバイスは、植物の各参考値が基準値より閾値の範囲から変化すると、ユーザの処理対策についてアドバイスを出す。今回実

装したシステムは「The plant desirely need some water.」、「The plant need some water.」、「The temperature may be too low.」、「Sunshine is too strong.」、「The plant grows well.」の五つの提示がある。基準値よりの変化と対応の提示が表 4.1 に示す。(各基準値は y_{l0} 、 y_{r0} 、 N_{g0} 、 N_{y0} 、 N_{b0} として示す)

表 4.1: ユーザへの提示

データの変化	ユーザへの提示
$y_l < y_{l0}(1 - \alpha)$ $y_r < y_{r0}(1 - \alpha)$ $N_y > N_{y0}(1 + \alpha)$ $N_g < N_{g0}(1 - \alpha)$	The plant desirely need some water.
$y_l < y_{l0}(1 - \alpha)$ $y_r < y_0(1 - \alpha)$	The plant need some water.
$y_l < y_{l0}(1 - \alpha)$ $y_r < y_{r0}(1 - \alpha)$ $N_{y0}(1 - \alpha) < N_y < N_{y0}(1 + \alpha)$ $N_g < N_{g0}(1 - \alpha)$	The temperature may be too low.
$N_g < N_{g0}(1 - \alpha)$ $N_b > N_{b0}(1 + \alpha)$	Sunshine is too strong.
$y_l > y_{l0}(1 + \alpha)$ $y_r > y_{r0}(1 + \alpha)$ $N_g > N_{g0}(1 + \alpha)$	The plant grows well.

第5章 実験

本章では、我々が提案する植物成長状態の推測手法および栽培支援システムの評価のために行った二つの実験について述べる。一つ目は、水やる前後植物状態の変化について調査し、システムが植物の変化を正確に取得できるかについて調査を行う。二つ目は、一定時間にシステムを利用して植物を栽培し、植物の成長状態を考察し、栽培支援の効果について考察する。すべての実験の対象植物は高さが 30cm ほど、広さが 20cm ほどのカボックである。

5.1 水をやる前後植物成長状態に関する実験

短時間に通常的な栽培過程での植物の変化が変動続いているため、実験することは困難である。しかしながら、水をやる前後の植物の変化はより著しいと考えられる。そのため、提案手法を用いたシステムが植物の変化を正確に取得できるかについて調査するため、水をやる前後植物の変化について実験を行った。

5.1.1 実験内容

まず、システムを起動し、植物を水をやる前後植物の y_{lr} 値と様子を記録する¹。システムが起動してから 15 分の時、植物に水をやる。その後、1 時間ほど植物の実際画像と y_{lr} 値を保存する。システムは 5 分ごとに新しいデータを記録することを設置した。そして、保存された植物の画像と y_{lr} の変化を考察し、システムが植物の変化を正確に取得できるかについてを調査する。

5.1.2 結果と考察

実験で植物の変化を図 5.1 に示す。画像を重ねて比較しないと、目を通じて植物の変化を見ずらいであら。 y_{lr} の変化は図 5.2 に示す。横軸は水をやる直前からおよそ 1 時間後の時間軸である。縦軸は y_{lr} である。この数値から、水をやる後植物の成長状態が好調である。およそ 50 分後、極大値についた。この時、葉が一番張っている状態と考えられる。そのあと、葉がだんだんハリがなくなると予想できる。

実験を通じて、システムが植物の変化を取得することが可能である。水をやる前後植物 y_{lr} の変化を記録し、目で見えない情報を取得できる。しかしながら、植物全体の状態変化を把

¹この実験では、 y_l と y_r の代わり、 y_l と y_r の平均値 y_{lr} を推測基準として使用した。



図 5.1: 水をやる前後植物の変化

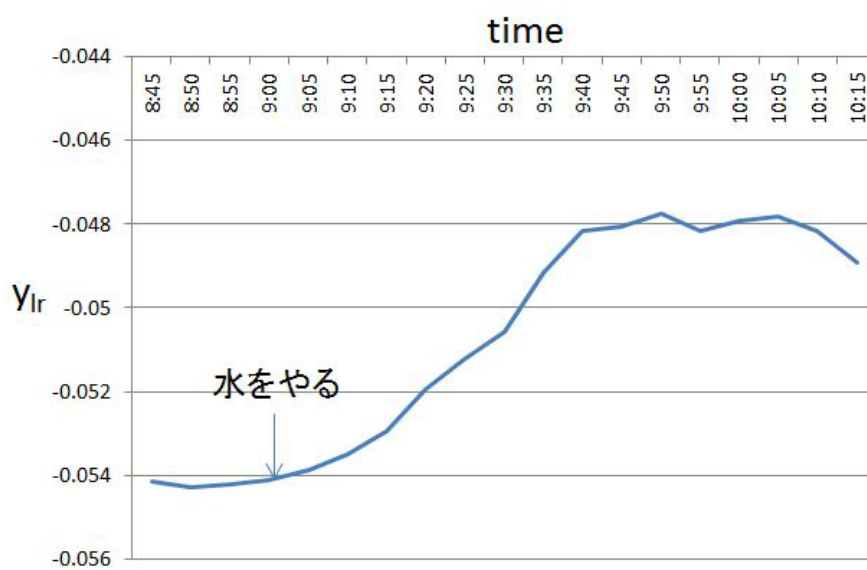


図 5.2: y_{lr} の変化

握できるが、細かく植物葉の向きなどの分析は不可能である。そのため、今後は葉ごとに植物状態について推測手法の改良を検討していきたい。

5.2 植物の栽培支援の有効性に関する実験

提案した栽培支援システムが栽培過程に有効な支援を提供できるかどうかについて評価するため、実験を行った。実験を2回を行った。1回目は一週間植物を栽培したが、ユーザへのアドバイスを記録していなかった。ユーザへのアドバイスを記録するため、2回目の実験を行った。

5.2.1 実験1

実験内容

提案した栽培支援システムを起動し、一週間実際に植物栽培過程に利用する。最初の3日間はシステムからのアドバイスを無視し、植物を放置した。4日目から、システムのアドバイスを従って植物を栽培する。その間、植物の成長状態を記録し、栽培支援の効果があるかを考察する。毎日の記録時間は8:00~20:00である。また、システムは1時間ごとに新しいデータを記録し、成長状態を分析することを設定した。

結果と考察

植物の y_{lr} を記録し、その変化を図5.3に示す¹。最初の植物を放置された3日間に、植物の y_{lr} がだんだん減らしていた。4日目の朝8時にシステムが起動してから、システムが「The plant desirely need some water.」の提示が出ていた。システムの提示に従って、植物に水をやった。植物に水をやる直後、 y_{lr} が増加した。おおよそ1時間後 y_0 が変動しながら、減少していた。しかしながら、その日の色情報を考察すると、水をやる後、各色のポイント数が水に対する反応がなかった。表3.3に示したように、 N_g が変化すると考えられるが、図5.4にはその変化があらわさなかった。

図5.7で1日の色の変化を5分ごとに考察する。水をやらなくて湿度が変わらない時、黄色の点数が10時から13時まで増えている。黄色の点数も一日中何回も変化した。常温の環境に放置していて水をやらない時、緑色の点数が何回も変化していた。これが原因と考えられる環境光による影響がかなり大きいため、色変化による植物状態への分析は信頼度が低いと考えられる。特に、短時間内の葉の色変化は比較的小さいので、本システムではこの環境光による影響から植物の色変化を検出することが難しい。そのため、環境光の影響を回避し、正確に葉の色情報を取得する手法の改良を検討していきたい。

¹この実験では、 y_l と y_r の代わり、 y_l と y_r の平均値 y_{lr} を推測基準として使用した。

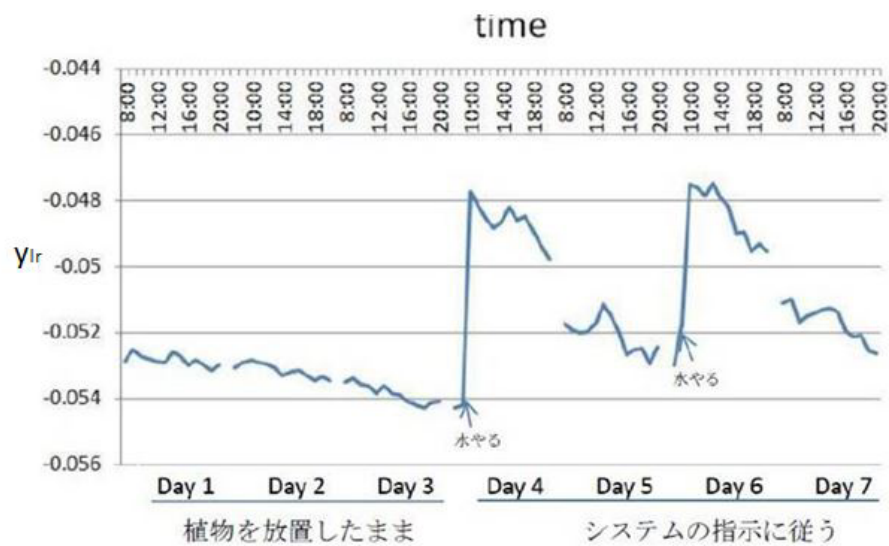


図 5.3: 一週間 y_{lr} の変化

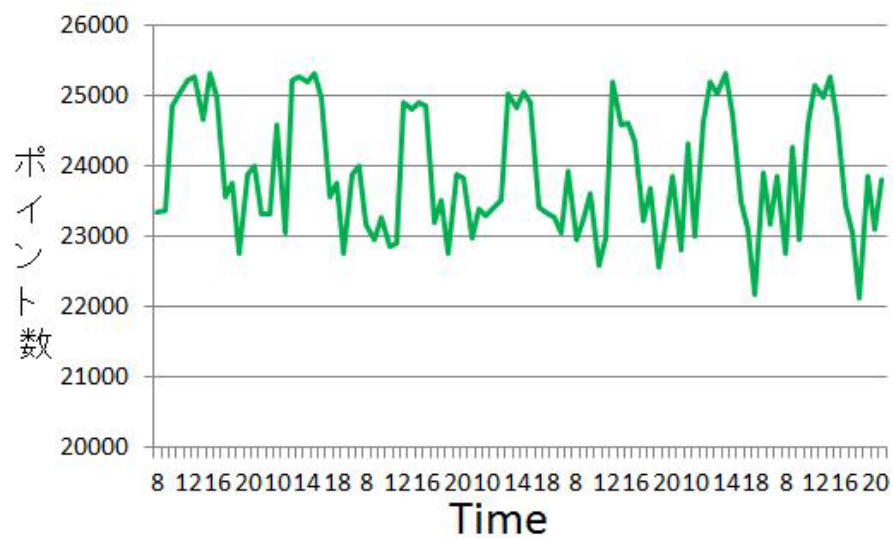


図 5.4: 一週間緑色ポイント数の変化

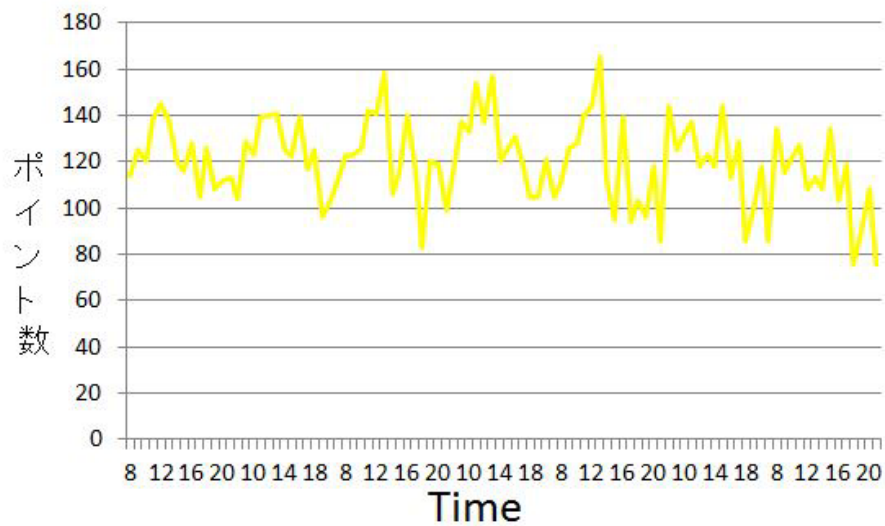


図 5.5: 一週間黄色ポイント数の変化

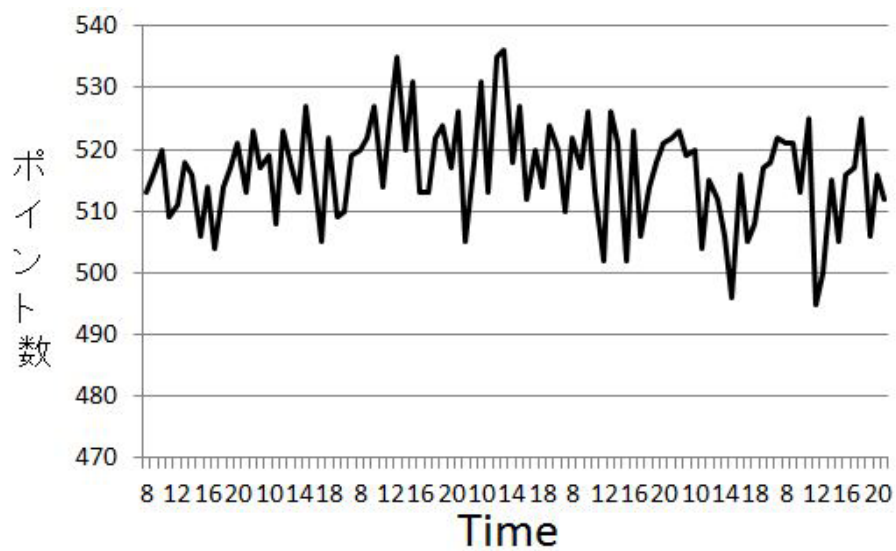


図 5.6: 一週間黒色ポイント数の変化

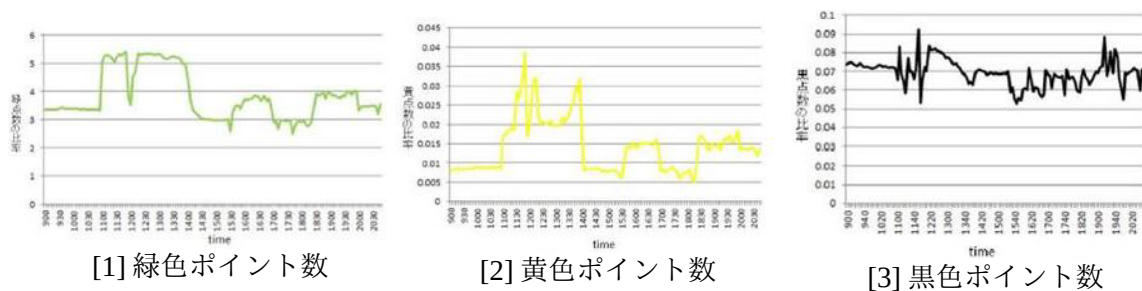


図 5.7: 一日色値の変化

5.2.2 実験 2

実験内容

提案した栽培支援システムを起動し、6日間実際に植物栽培過程に利用する。最初の3日間はシステムからのアドバイスを無視し、植物を放置した。4日目から、システムのアドバイスを従って植物を栽培する。その間、植物の成長状態を記録し、システムが正確的にユーザにアドバイスを提示できるかを考察する。毎日の記録時間は8:00～20:00である。また、システムは5分ごとに新しいデータを記録し、成長状態を分析することを設定した。

結果と考察

実験を通じて、植物の変化とシステムがユーザへのフィードバックを記録した。表 5.1 にまとめてする。1日目に基準値をとるため、システムは植物の状態を推測しなかった。2日目と3日目にシステムが大量な「The plant need some water.」の提示を上げた。4日目から、水をやる作業を行うとともに、「The plant need some water.」の提示数が大幅下降である。また、温度と日光に関する推測は誤推測が多かった。

そして、水切れとかかわる y_l と y_r の変化結果を図 5.8 と図 5.9 に示す。最初の3日間は植物を放置した上で、 y_l と y_r が下がっている状態である。4日目からシステムの指示に従って水をやり、室温を調節したりの作業を行った。水をやる後、 y_l と y_r が上がっていた。植物の状態が一定程度的に好転であると推測できる。しかしながら、実験 1 の図と比較すると、水に対する反応が下降していた。水をやった1時間後 y_l と y_r 値が下降していた。また、4日目から、データのノイズがより大きくなった。これらの原因を調べているが、環境によって結果に影響を与えることを考えている。

また、システムは何回の誤推測がある。特に、日光と温度に関する推測における誤推測が多かった。3日目と4日目に「The temperature is too strong.」のアドバイスが何回出ていたが、室温が 18 度の植物の適温度である。これが誤推測と考えられる。また、5日目と6日目にシステムが「Sunshine is too strong.」のようなアドバイスが出ていた。しかし、植物が室内に栽培しているので、植物に与える日光は強くない。これが誤推測と考えられる。5日目に「The temperature is too strong.」のアドバイスが 9 回出ていたが、5回連続な提示が正しい提示であ

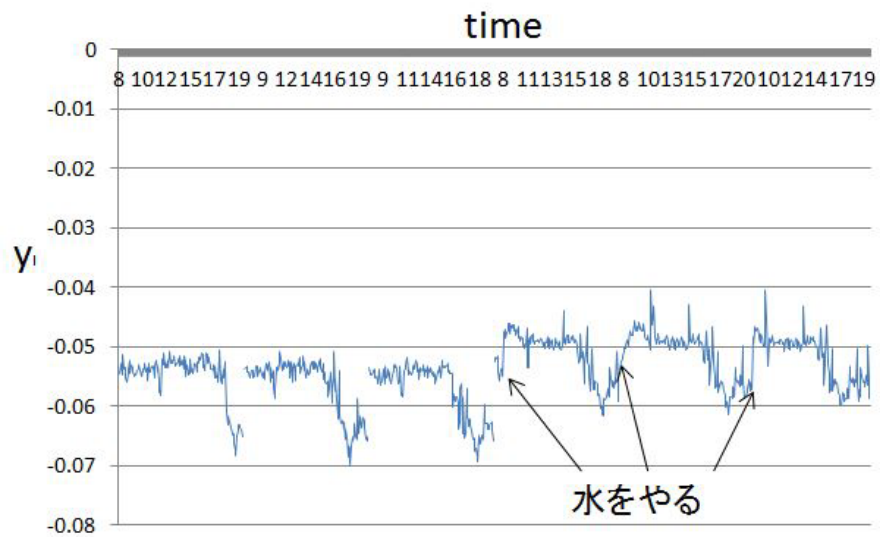


図 5.8: 6 日間 y_l の変化

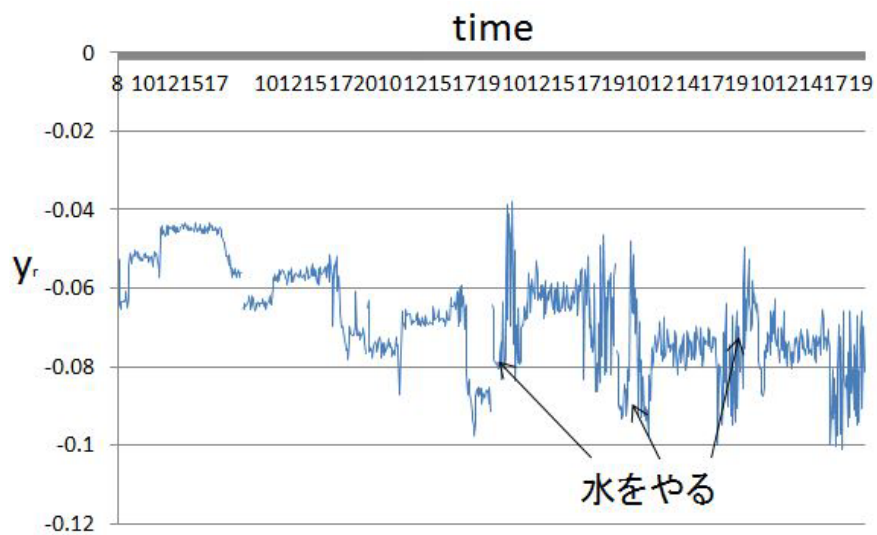


図 5.9: 6 日間 y_r の変化

る。室温を上げたら、提示がなくなった。残った4回はすべて誤推測である。類似な誤推測は何回が発生した。前述のように、環境の影響が大きい原因であるかを考えている。

実験の結果からみると、本システムが一定程度で水をやることを認識できるが、環境の影響があるため、取得した色情報の信頼度が低い。また、栽培支援への有効性が低いと結論付ける。

表 5.1: 6 日間の提示

DAY	提示	回数	誤推測と栽培作業
DAY1	The plant desirely need some water.	0	
	The plant need some water.	0	
	The temperature may be too low.	0	
	Sunshine is too strong.	0	
	The plant grows well.	0	
DAY2	The plant desirely need some water.	3	
	The plant need some water.	62	
	The temperature may be too low.	6	
	Sunshine is too strong.	0	
	The plant grows well.	0	
DAY3	The plant desirely need some water.	2	
	The plant need some water.	57	
	The temperature may be too low.	1	誤推測
	Sunshine is too strong.	0	
	The plant grows well.	0	
DAY4	The plant desirely need some water.	2	水をやる作業
	The plant need some water.	16	
	The temperature may be too low.	2	誤推測
	Sunshine is too strong.	0	
	The plant grows well.	91	
DAY5	The plant desirely need some water.	1	水をやる作業
	The plant need some water.	11	
	The temperature may be too low.	9	誤推測 4 回、室温を上げる作業 1 回
	Sunshine is too strong.	3	誤推測
	The plant grows well.	44	
DAY6	The plant desirely need some water.	1	水をやる作業
	The plant need some water.	12	
	The temperature may be too low.	5	誤推測
	Sunshine is too strong.	3	誤推測
	The plant grows well.	35	

第6章 結論

本研究では、植物の RGB 画像と深度画像から植物の成長状態を推測する手法を提案した。提案手法では植物の RGB 画像と深度画像から植物の三次元情報および色情報を取得し、植物の成長状態を推測することを実現する。そして、提案手法により、植物栽培支援システムを実装した。本システムでは、リアルタイムで植物の成長状態を監視し、植物の状態およびユーザへのアドバイスを提供する。システムの実験を通じて、システムが一定程度で植物の変化を把握できることを示したが、環境影響による影響が大きいため、栽培への有効性が低い。環境変化による残した問題が多いため、続いて改良を期待している。

今後の展望として、植物状態を推測する手法の改良が考えられる。現状では、植物全体の変化を考察することより植物の状態を推測するため、細かい葉ごとの分析はできない。植物の状態をより正確に推測するため、植物の葉ごとから分析する手法を期待している。そして、環境光による色情報への影響があるため、環境光の影響を回避する手法を改良したい。また、ディスプレイによる表示はユーザにとって不便だと考えられる。そのため、将来的には実世界への情報投影などを利用し、植物本体の上で植物の成長状態を確認できるようシステムを拡張していきたい。

謝辞

本論文を執筆するに当たり、指導教員である高橋伸先生をはじめ、田中二郎先生、三末和男先生、志築文太郎先生には、丁寧なご指導と適切な助言を多数いただきました。深く御礼申し上げます。また、インタラクティブプログラミング研究室の皆様にはゼミや日常生活の中で数々のご意見やサポートをいただきました。特にユビキタスチームの皆様にはグループでのミーティングだけでなく、日常的に多くのご意見やご指摘を頂きました。心より御礼申し上げます。そして最後に、大学生活を送る中、経済面や精神面にわたって支えてくれた家族や、大学生活を共に過ごし様々な面でお世話になった全ての友人に心より感謝いたします。

参考文献

- [1] Luke Iseman. The Garduino Garden Controller. *MAKE*, Vol. 18, pp. 90. September 2009
- [2] K. R. Summy, C. R. Little, R. A. Mazariegos, J. H. Everitt, M. R. Davis, J. V. French, and A. W. Scott, Jr. Detecting Stress in Glasshouse Plants Using Color Infrared Imagery: A Potential New Application for Remote Sensing. *Subtropical Plant Science*, 55: 51-58. 2003.
- [3] Laszlo Font. Plant diagnostic by leaf movement image processing. Thesis of PhD work, Szent Istvan University, 2009.
- [4] MSDN Library, Kinect for Windows SDK 2.0: Features.
- [5] Hui Huang , Dan Li , Hao Zhang , Uri Ascher , Daniel Cohen-Or. Consolidation of unorganized point clouds for surface reconstruction. *ACM Transactions on Graphics*, Vol. 28, Issue 5, December 2009.
- [6] Will Chang , Matthias Zwicker. Global registration of dynamic range scans for articulated model reconstruction. *ACM Transactions on Graphics*, Vol. 30, Issue 3, May 2011.
- [7] Morten Bojsen-Hansen , Hao Li , Chris Wojtan. Tracking surfaces with evolving topology. *ACM Transactions on Graphics*, Vol. 31, Issue 4, July 2012.
- [8] Michael Kazhdan , Matthew Bolitho , Hugues Hoppe. Poisson surface reconstruction, Proceedings of the fourth Eurographics symposium on Geometry processing. June 26-28, 2006, Cagliari, Sardinia, Italy.
- [9] Yangyan Li, Xiaochen Fan, Niloy J. Mitra, Daniel Chamovitz, Daniel Cohen-Or, Baoquan Chen. Analyzing growing plants from 4D point cloud data. *ACM Transactions on Graphics*, Vol. 32, Issue 6, November 2013.
- [10] Keiichi Noda, Nobuo Ezaki, Hotaka Takizawa, Shinji Mizuno, Shinji Yamamoto. Detection of Plant Saplessness with Image Processing. SICE-ICASE International Joint Conference 2006.
- [11] Long Quan, Ping Tan, Gang Zeng, Lu Yuan, Jingdong Wang, Sing Bing Kang. Image-based plant modeling. *ACM Transactions on Graphics*, Vol. 25, Issue 3, July 2006.

- [12] Hotaka Takizawa, Nobuo Ezaki, Shinji Mizuno, Shinji Yamamoto. Plant Recognition by Integrating Color and Range Data Obtained Through Stereo Vision. *Journal of Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics*, Vol. 9, No.6, 2005.
- [13] Lifeng Wang, Wenle Wang, Julie Dorsey, Xu Yang, Baining Guo, Heungyeung Shum. Real-Time Rendering of Plant Leaves. *ACM Transactions on Graphics*, Vol. 24, Issue 3, July 2005.7
- [14] 佐脇風里, 安謙太郎, 稲見昌彦. 喜怒哀楽表現のための植物に特化したアクチュエーション手法. 情報処理学会, インタラクション 2012.
- [15] Takashi Ijiri, Shin Yoshizawa, Hideo Yokota, Takeo Igarashi. Flower Modeling via X-ray Computed Tomography. *ACM Transactions on Graphics*, Vol. 33, Issue 4, July 2014.
- [16] 栗林賢, 脇田玲. PlantDisplay:植物が情報を表示する新しいディスプレイの開発. 情報処理学会, インタラクション 2006.
- [17] 栗林賢, 坂本雄祐, 田中浩也. I/O Plant: 植物とのインタラクティブ設計支援環境の構築. 第15回インタラクティブシステムとソフトウェアに関するワークショップ, 日本長崎, 2007年12月.
- [18] 栗林賢, 田中浩也. I/O Plant: : 植物の性質を利用した入出力インタフェース設計支援ツール. WISS2006 論文集, 2006.
- [19] Mare Srbinovska, Cvetan Gavrovski, Vladimir Dimcev, Aleksandra Krkoleva, Vesna Borozan. Environmental parameters monitoring in precision agriculture using wireless sensor networks. *Cleaner Production*, Vol. 88, pp. 297-307, February 2015.
- [20] Liu Yumei, Zhang Changli, Zhu Ping Temperature and Humidity Monitoring System Based on Wireless Sensor Network. *Electric Information and Control Engineering*, 2011 International Conference, pp. 1850 - 1853, April 2011.