

# 卒業論文要旨

## 赤外線カメラを用いたハウス内ピーマンの果実認識

システム工学群

機械・航空システム制御研究室 1210101 多田 直矢

### 1. 緒言

農業従事者の減少や高齢化は顕著であり<sup>(1)</sup>、農作業による一人当たりの労働の負担は大きくなっている。その問題に対処するために農林水産省はスマート農業<sup>(2)</sup>を推進するなど、農業におけるロボット技術の導入が望まれている。本研究は高知県でハウス園芸において生産が盛んな<sup>(3)</sup>ピーマンの自動収穫を目的とした果実の認識システムについての性能を検討した。

農作物を対象とした自動収穫ロボットの事例として inaho 株式会社のアスパラ収穫ロボット<sup>(4)(5)</sup>やイチゴ収穫ロボット<sup>(6)</sup>が挙げられる。双方ともカメラを用いて対象物の正確な位置情報を認識してから収穫を行うものだが、認識機能としてアスパラの場合認識の邪魔になる物体が少なく、イチゴの場合は葉や茎と果実との間に明確な色の違いがあることから、RGB カメラ等を用いて色のしきい値によって対象物の認識を行うことが可能である。

ピーマンの検出では、葉が生い茂っていると同時に葉と果実の色や形状が近いため RGB カメラを用いた方法は難しい。だが、葉と果実の温度の違いに基づいた赤外線カメラを用いた方法が提案されており、有効性が示されている<sup>(7)</sup>。本研究では赤外線カメラと深度カメラを用いて画像処理を行うことで果実を認識することを提案する。画像処理を行う際に室温や湿度を用いたしきい値処理を行うことで自動検出を行う。具体的には赤外線画像の処理精度を向上させる方法について提案を行う。

### 2. 赤外線カメラによる検出

果実の検出方法として蒸散<sup>(8)</sup>と葉と果実の熱容量の違いによる温度差を利用する。蒸散作用は昼間のハウス内のように照度が大きく湿度が低いときに発生し葉の温度が低くなる。また果実は中が空洞で空気が入っているため熱容量が大きく、葉は薄いいため熱容量が小さいことから、果実より葉の方が温度は変化しやすい。

上記の特性に対して有効な撮影方法として赤外線カメラが挙げられる。赤外線カメラは撮影した画像内の1ピクセルごとの温度情報が取得可能である。本研究では赤外線カメラを用いて葉と果実の温度差を利用した検出を行う。

### 3. ハウス内でのデータ取得実験

#### 3.1. 実験内容

高知県安芸郡芸西村のハウスにおいてデータ取得実験を行った。実験機器はハウス内の環境情報を取得するために温湿度センサと照度・紫外線強度センサを用い、この2つのセンサのデータを保存するためにデータロガーを使用した。また葉と果実の温度を取得するために赤外線カメラを

用いて画像の撮影を行った。温湿度センサと照度・紫外線センサは1分、赤外線カメラは30秒の間隔でデータを取得した。

#### 3.2.1. 夏季の実験

2019年6月25日11:00から6月27日10:59にかけてデータ取得実験を行った。実験日の天候を表1に示す。

Table 1 Experiment day weather in June

Date	weather
2019/6/25	Sunny
2019/6/26	Cloudy then rain
2019/6/27	Rain

#### 3.2.2. 夏季の実験結果と考察

図1に6月25日11:00から26日の10:59までの温度と時間の関係のグラフを示す。左上の画像は赤外線画像内から葉と果実の温度を取得した箇所を示している。右上は期間内の温度のグラフであり、左下と右下はそれぞれグラフの11:00から18:00と23:00から2:00を拡大したものである。グラフの線の色についてそれぞれ青は果実、緑は葉、赤はハウスの温度を示している。図2に6月26日11:00から27日の10:59までの温度と時間の関係のグラフを示す。内容は図1と同様である。図3と4にはそれぞれ1時間ごとの赤外線画像をまとめたものを示す。

図1より25日の11:00から15:00のあいだで果実の温度がハウスの温度に追従し葉と4°C程度の温度差が見られる。図3より日中10:00から17:00と9:00から10:00までは葉と果実の色の違いがはっきり見られる。

図2より26日の11:00から14:00のあいだで果実の温度がハウスの温度に追従し葉と2°C程度の温度差が見られるが、15:00以降は温度差がほぼない。図4より11:00から14:00までは葉と果実の違いが分かりやすいが、27日の8:00から10:00の日中はほとんど同じ色で違いが見られない。

25日の日中や26日の9:00から14:00までのあいだで葉と果実の間に温度差があることから、晴れまたは薄曇りであれば蒸散が行われ葉と果実の温度差が生じ、赤外線カメラを用いた検出が有効であると考えられる。

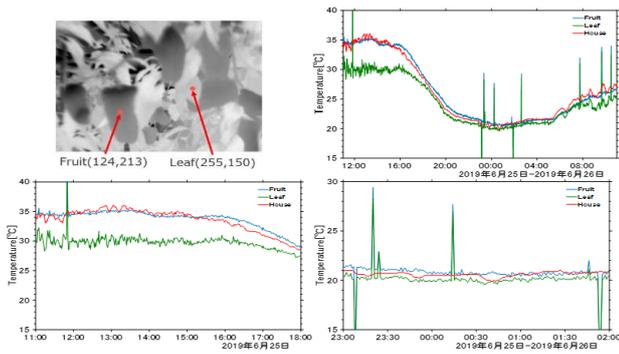


Fig.1 Result on June 25 at 11:00 to June 26 at 10:59

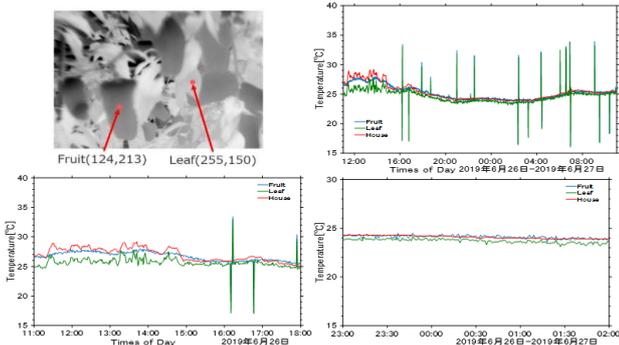


Fig.2 Result on June 26 at 11:00 to June 27 at 10:59

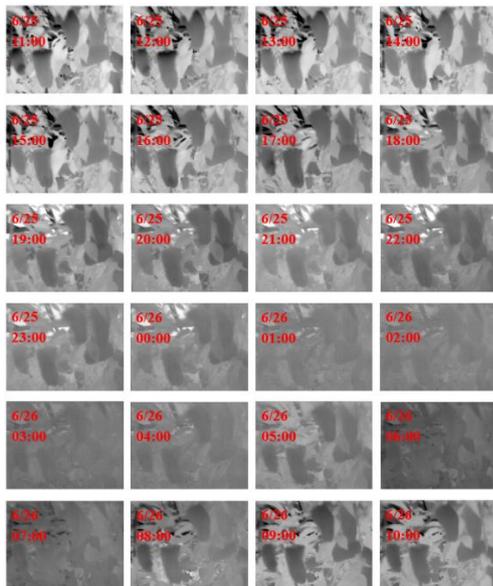


Fig.3 Image taken every hour on June 25 at 11:00 to June 26 at 10:59

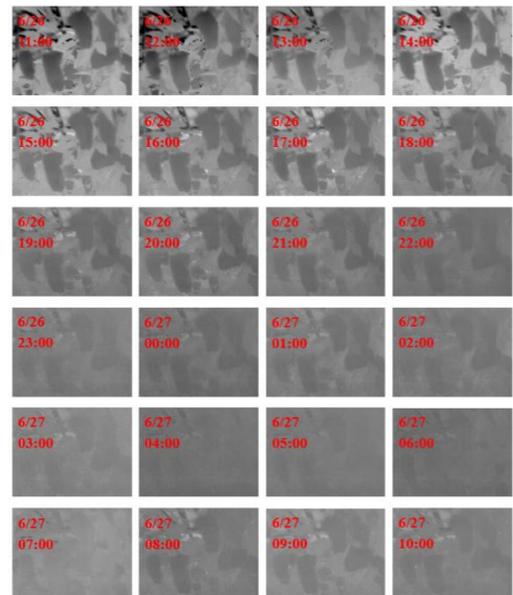


Fig.4 Image taken every hour on June 26 at 11:00 to June 27 at 10:59

### 3. 3. 1. 冬季の実験

2019年12月10日0:00から12月17日23:59にかけてデータ取得実験を行った。実験日の天候を表2に示す。

Table 2 Experiment day weather in December

Date	weather
2019/12/10	Sunny and then cloudy
2019/12/11	Cloudy
2019/12/12~12/16	Sunny
2019/12/17	Cloudy then rain

### 3. 3. 2. 冬季の実験結果と考察

図5に12月11日、図6に14日、図7に17日目の温度と時間の関係のグラフを示す。右上は期間内の温度のグラフであり、左下と右下はそれぞれグラフの0:00から2:00と8:00から17:00を拡大したものである。図8, 9, 10には1時間ごとの赤外線画像をまとめたものを示す。

図5より深夜帯は葉と果実の温度差が小さいもののほぼ一定となっている。日中の10:00から15:00付近までは大体の時間で2℃程度の温度差が見られる。ただし12:00から12:30付近の時間帯において温度差は小さくなっている。図8より9:00と10:00では果実ではなく右上の葉の温度が上がり黒くなっている。11:00から14:00においては果実は黒くなっている。

図6より夜間に一定間隔で小刻みに温度が上下していることがわかる。夜間の温度差はハウス内温度が上がりきる直前と下がりきる直前に大きくなっていることがわかる。日中10:00から15:00においても温度が小刻みに変化しているが、温度差は3℃から6℃程度ある。また、10:00から12:00の間で果実の温度はハウスの温度より2℃から5℃大きくなっている。図9より日中11:00から16:00は果実は黒くなり、夜間に関しても4:00・21:00・23:00はほかに比べて比較的果実は黒くなっている。

図7より17日は一日を通して温度差が小さいことがわかる。夜間の葉の温度が高くなっている時間に2℃程度の

温度差が見られ、温度の下がり方は緩やかである。日中において13:00付近まで温度差はほぼ見られず、13:30以降は2°C程度の温度差が見られる。図10より14:00と15:00のみ葉と果実の色の違いが大きい。

図8と図9において葉が黒くなっていたのは午前中ハウスの温度が上がりきる前に日光が良く当たっていたために局部的に温度が上がったのではないかと考える。図6より昼間に温度差が出ていることから冬季においても日中に晴れであれば赤外線カメラによる検出は可能であると考えられる。図5では曇りの日中で温度差が見られ、図7では曇りのち雨で13:30以降に温度差が見られるため、悪天候下においても外気温もしくは天候の変化があれば葉と果実の温度差が発生し検出は可能であると考えられる。また夜間に温度が変動しているのはハウス内でボイラを作動させているためではないかと考える。ボイラを作動させている間、温度が上昇もしくは下降しきるタイミングであれば果実を検出できる可能性はあると考える。

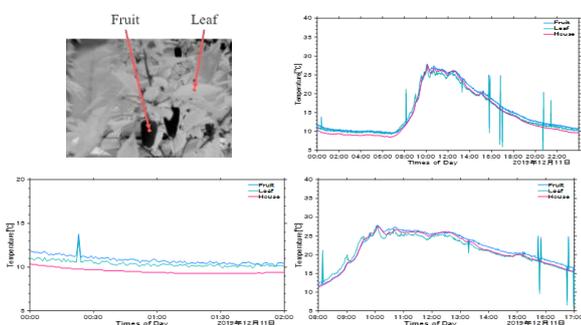


Fig.5 Result on December 11

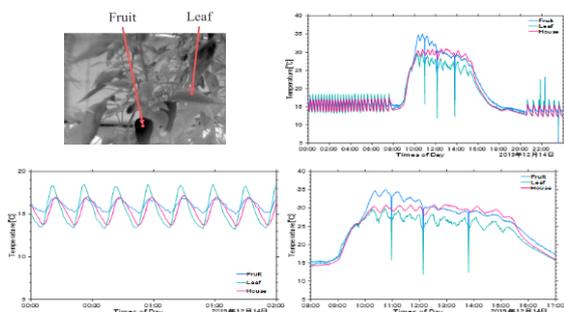


Fig.6 Result on December 14

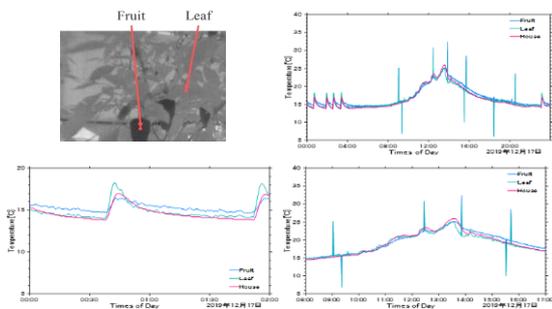


Fig.7 Result on December 17

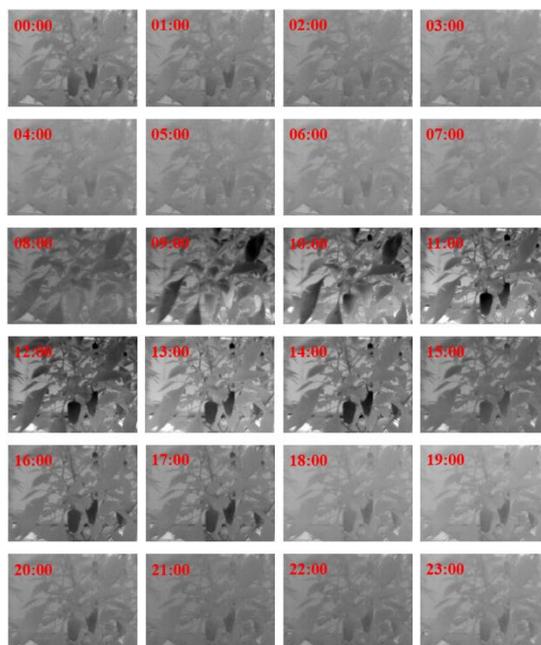


Fig.8 Image taken every hour on December 11

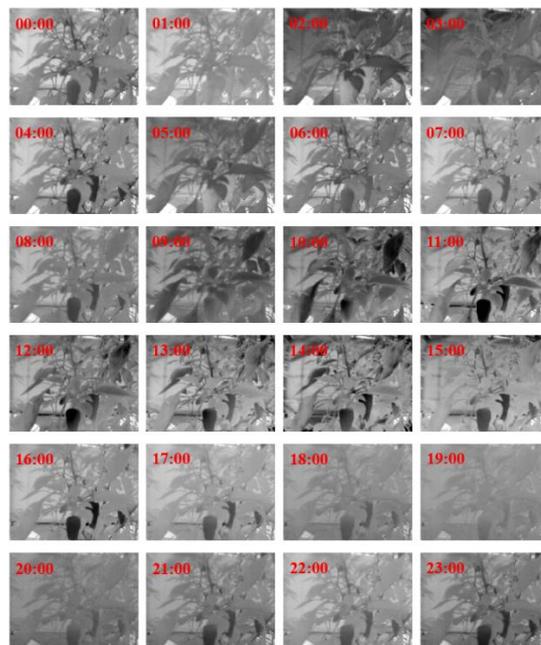


Fig.9 Image taken every hour on December 14

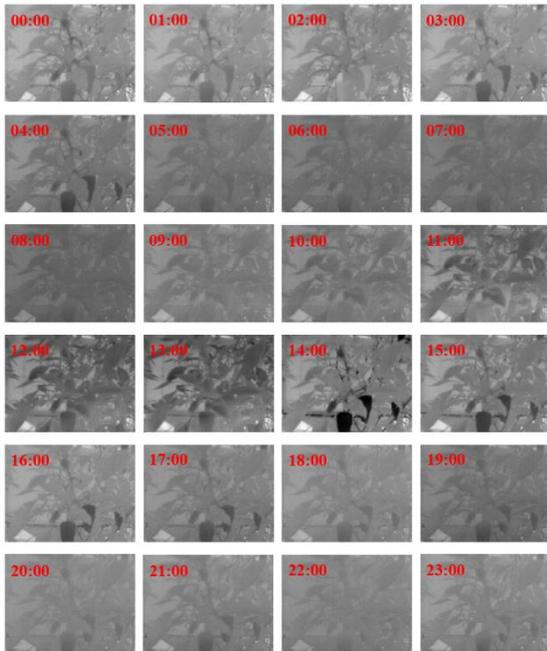


Fig.10 Image taken every hour on December 17

#### 4. 画像処理

赤外線画像内の果実を検出するために画像処理を行った。昼間の検出は温度差の生じやすい11時から15時の間で1時間ずつ行った。また冬季の夜間に温度が大きく変動している時間帯においてはハウスの温度が極小となるタイミングで葉と果実の温度差が大きくなりやすいためにその時間に処理を行った。処理過程でバイナリ変換やモルフォロジー変換等の手法を用いた。また画像内のピクセルの中から指定された温度範囲以外のものを削除するしきい値処理を行った。温度範囲は $-4^{\circ}\text{C}\sim 4^{\circ}\text{C}$ の間で $0.5^{\circ}\text{C}$ ずつパターンを変更し一つの時間あたり136パターンのしきい値で画像処理を行った。検出過程を図11に示す。結果については次章で一部示す。

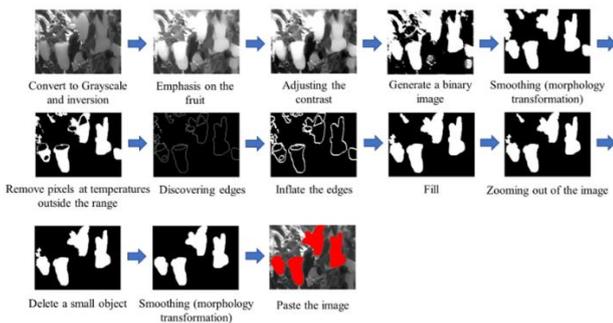


Fig.11 Image processing method

#### 5. 画像処理の評価

##### 5.1. 評価方法

適正な温度のしきい値を推定するための前段階として処理画像の評価を行った。評価方法としては、まず図12のように評価元となる赤外線画像内の対象となる果実を手動で指定する。次に評価指標を求めるために、画像内のピクセルを四つの要素に分ける。対象物を検出した場合を *TP* (True positive), 対象物を検出なかった場合を *FP* (False positive), 対象物以外を検出なかった場合を *TN* (True

negative), 対象物以外を検出した場合を *FN* (False negative) とする<sup>(9)(10)</sup>。これらの要素を用いて式(1)(2)(3)に示すように誤検出の評価をする再現率(*Recall*)と見逃しの評価をする適合率(*Precision*), 再現率と適合率の調和平均をとる *F* 値 (*F-Measure*)<sup>(9)(10)</sup>を求めた。*F* 値を求める理由としては、再現率と適合率はトレードオフの関係であるものの、どちらか一方の数値が高いだけでは必ずしも良い検出結果は得られないためである。

$$Recall = \frac{TP}{TP + FN} \quad (1)$$

$$Precision = \frac{TP}{TP + FP} \quad (2)$$

$$F - Measure = \frac{2}{\frac{1}{Recall} + \frac{1}{Precision}} = \frac{2TP}{2TP + FP + FN} \quad (3)$$



Fig.12 Example of image that is the basis of evaluation.

##### 5.2. 夏季の評価結果と考察

表3と表4に6月25日と26日の*F*値が最大の時のハウス内温度とそれを基準とした温度のしきい値の範囲, 評価指標を示す。図13と図14に11:00から15:00の一時間ごとに*F*値が最大の時の処理画像を示す。

表3より25日はどの時間においても3つの評価指標は80%以上であった。温度範囲は $2.5^{\circ}\text{C}\sim 4.5^{\circ}\text{C}$ ある。図13より11:00において右下の対象外の部分を検出しているが再現率は81.7%あった。表4より26日の*F*値は15:00において67.0%となっており70%を下回っている。また最高でも11:00の85.6%である。再現率はどの時間においても80%以上となっているものの、適合率はすべて80%以下となっており見逃しはやや多い。温度範囲に関しては $0.5^{\circ}\text{C}\sim 2.0^{\circ}\text{C}$ となっている。図14より13:00においては左上の対象外の部分を検出しており、14:00以外の時間帯において一番右の対象物が2つに分かれて検出してしまっている。15:00においては一番左の対象物を検出できていない。どの画像においても果実を部分的にしか検出できていない。

2章の図1より25日の葉と果実の温度差が大きいため温度範囲が $2.5^{\circ}\text{C}\sim 4.5^{\circ}\text{C}$ と大きくなったと考えられる。表3において3つの評価指標ともに80%以上あることから、夏季の晴れの日に関してはしきい値を適切に定めた際には画像処理が有効であると考えられる。

26日の結果で14:00以外の時間帯において右の対象物が二つに分かれてしまっているのは、分かれ目の部分が細いため平滑化の際に分かれてしまっているのではないかと考える。図2と表4より温度差の小さい13:00と14:00に関しては温度範囲が $0.5^{\circ}\text{C}$ と最小であり、その他の時間帯においても26日のほうが25日より温度差が小さいため、温度範囲が $2^{\circ}\text{C}$ 以下になったと考えられる。また、果実と

葉の温度両方ともがハウス温度より小さいため温度範囲が 15:00 以外でハウス温度からマイナス寄りになったと考える。

Table 3 Evaluation index and temperature range when the F-measure in the maximum on June 25, 2019.

Time	House Temperature [°C]	Temperature Range [°C]	Recall [%]	Precision [%]	F-measure [%]
11:00	34.5	-1.5~3.0	81.7	90.7	86.0
12:00	34.9	-2.5~1.5	90.1	91.9	91.0
13:00	35.6	-3.0~1.5	89.0	90.0	89.4
14:00	34.8	-3.5~1.0	90.1	91.2	90.6
15:00	34.6	-2.0~0.5	86.2	88.9	87.5

Table 4 Evaluation index and temperature range when the F-measure in the maximum on June 26, 2019.

Time	House Temperature [°C]	Temperature Range [°C]	Recall [%]	Precision [%]	F-measure [%]
11:00	26.8	-0.5~0.5	93.4	79.0	85.6
12:00	28.6	-2.0~0	85.0	61.2	71.2
13:00	27.6	-0.5~0	85.4	60.3	70.7
14:00	27.8	-0.5~0	96.5	70.0	81.1
15:00	26.1	0.5~1.5	94.8	51.8	67.0

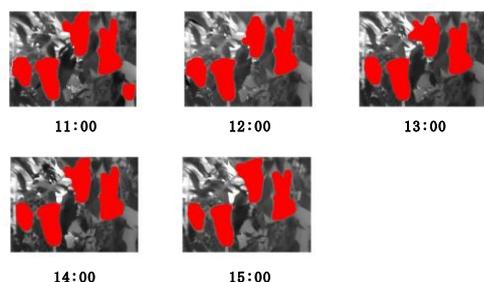


Fig.13 Detected image on June 25, 2019.

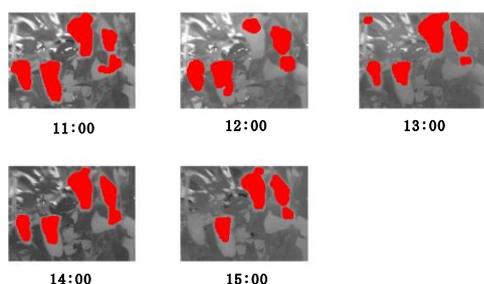


Fig.14 Detected image on June 26, 2019.

### 5.3. 冬季の昼間の評価結果と考察

12月11日と13日及び17日の評価結果の内、F値が最大の時の温度範囲と評価指標の数値を表5~7、画像を図15~17に示す。

表5より11日は温度範囲は0.5°Cから1.5°C程度となっている。また再現率は15時以外で90%以上と誤検出は少なくなっているが適合率は11時と12時で60%を下回っている。表6より13日は温度範囲は1.5°Cから3.5°Cとなっている。再現率は12時以外で90%以上、適合率も11時以外で70%以上となっている。表7より17日は11時だけ温度範囲が4°Cだがそれ以外は1°C以下となっている。14時と15時はF値が60%以上とある程度検出できていたが、

それ以外の時間は20%を下回り検出できていなかった。

温度範囲について天候の違いにより範囲に差があるのは蒸散量に違いが出たためであると考えられる。また17日の14時から果実を検出できたのは曇りから雨へと天候が変化することによってハウス内の温度が大きく変化したためではないかと考える。悪天候時でも気温の変化が一定以上であれば検出は可能であると考えられる。

11日の15時と13日の12時に右上の葉を検出しているのは11日はハウス温度の低下によって温度差が小さくなったため、13日は11時の時点で葉が既に黒いことから日光がよく当たり葉の温度が上昇したためではないかと考える。昼間の検出においては日光がノイズになってしまい葉を検出してしまう可能性があると考えられる。

Table 5 Evaluation index and temperature range when the F-measure in the maximum on December 11, 2019.

Time	House Temperature [°C]	Temperature Range [°C]	Recall [%]	Precision [%]	F-measure [%]
11:00	25.9	-0.5 ~ 0.5	99.4	51.4	67.8
12:00	25.2	0 ~ 0.5	99.9	48.2	65.0
13:00	24.4	-0.5 ~ 1.0	98.0	87.6	92.5
14:00	21.2	0 ~ 1.0	97.3	91.1	94.1
15:00	20.0	0 ~ 0.5	44.7	86.4	59.0

Table 6 Evaluation index and temperature range when the F-measure in the maximum on December 13, 2019.

Time	House Temperature [°C]	Temperature Range [°C]	Recall [%]	Precision [%]	F-measure [%]
11:00	30.2	1.0 ~ 2.5	100	40.5	57.7
12:00	29.7	-2.0 ~ -0.5	59.7	85.3	70.3
13:00	30.2	-2.5 ~ -0.5	97.0	78.4	86.7
14:00	30.3	-2.5 ~ 0.5	95.6	87.9	91.6
15:00	28.7	-3.5 ~ 0	91.5	90.0	90.7

Table 7 Evaluation index and temperature range when the F-measure in the maximum on December 17, 2019.

Time	House Temperature [°C]	Temperature Range [°C]	Recall [%]	Precision [%]	F-measure [%]
11:00	18.6	-4.0 ~ 0	2.74	25.2	4.94
12:00	21.1	0 ~ 1.0	11.4	56.7	19.0
13:00	23.0	-1.0 ~ -0.5	7.28	67.4	13.1
14:00	21.9	1.0 ~ 1.5	100	44.4	61.5
15:00	20.5	0.5 ~ 1.0	100	50.3	66.9

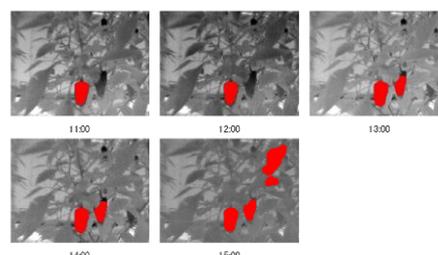


Fig.15 Detected image on December 11, 2019.

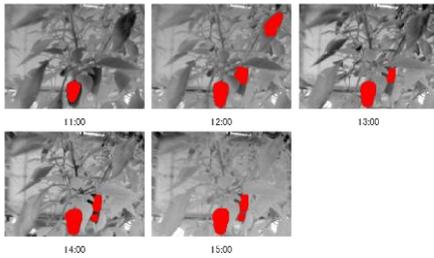


Fig.16 Detected image on December 13, 2019.

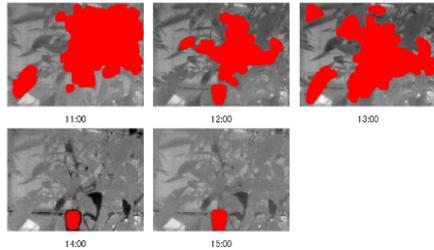


Fig.17 Detected image on December 17, 2019.

#### 5.4. 冬季の夜間の評価結果と考察

12月14日と17日の夜間の評価結果の内、F値が最大の時の温度範囲と評価指標の数値を表8と9、画像を図18と19に示す。

表8より14日は3つの評価指標すべてで70%以上となっている。また適合率が高いことに表わされるようにどの時間においても図18のように果実は2個とも検出できている。表9より17日の1:52は検出ができていなかった。0:37と2:32においてもF値は50%台であった。図19より0:37において対象物以外の部分を多く検出している。

温度範囲はほとんどの時間で0.5°C~1.5°Cであったため、比較的自動検出に向けた温度範囲を検討することは比較的容易ではないかと考える。ただし検出を行う時間についてはグラフの中からハウス温度が極小となる時間を取得しているためリアルタイムで検出するには別の方法を検討しなければならない。

14日の評価数値が70%以上と高かったのは図6よりボイラの作動する間隔が短く葉と果実の温度差が出やすい状態だったためだと考える。対照的に17日は図7よりボイラを停止した後、温度が低下するのが遅いため温度差が小さくなってしまいハウス温度が極小の時間においても検出できない時間があった。このことから外気温が極端に低いなどの要因でハウス内温度が下がりやすくボイラの作動回数が多い場合にはハウスの温度が極小の時間に検出を行うことが可能だと考える。

Table 8 Evaluation index and temperature range when the F-measure in the maximum at night on December 14, 2019.

Time	House Temperature [°C]	Temperature Range [°C]	Recall [%]	Precision [%]	F-measure [%]
0:06	13.8	0.5~1.5	93.5	93.5	93.5
1:24	13.7	1.0~1.5	99.3	77.8	87.3
2:42	13.7	0.5~1.5	99.2	77.2	86.9

Table 9 Evaluation index and temperature range when the F-measure in the maximum at night on December 17, 2019.

Time	House Temperature [°C]	Temperature Range [°C]	Recall [%]	Precision [%]	F-measure [%]
0:37	13.8	0.5~1.0	47.5	55.4	51.2
1:52	13.8				
2:32	13.7	1.0~1.5	100	40.1	57.3

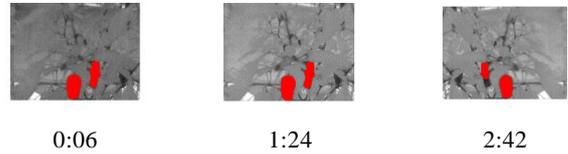


Fig.18 Detected image at night on December 14, 2019.



Fig.19 Detected image at night on December 17, 2019.

#### 6. ハウス内でのデータ取得実験(2021年2月)

##### 6.1. はじめに

第6章では2021年2月18日から2月22日にかけて実施したハウス内でのデータ取得実験について述べる。6.2と6.3節では実験の概要、6.4と6.5節では結果と考察について述べる。

##### 6.2. 実験日と場所

2021年2月18日13:21から2月22日13:20にかけて高知県安芸郡芸西村の農業ハウスにおいて実験を行った。実験日の天候を表10に示す。

Table 10 Experiment day weather on February

Date	weather
2021/2/18~2/22	Sunny

##### 6.3. 実験内容

実験機器については第3章と同様の物に加えて対象との距離を測るための深度カメラを用いた撮影を行った。赤外線カメラの撮影間隔はデータ整理の効率化のため過去の実験では30秒ごとだったのを1分ごとに変更した。

深度カメラの撮影時間についてはプログラムの実装が間に合わなかったため一定間隔での撮影は行わず、1日数回適当な時間に10秒程度の動画を撮影した。定点での撮影であるため頻りに撮影を行わなくても問題はないと判断した。ピクセル内の距離情報を数値として取得できていないため結果には深度の画像のみを示す。深度カメラと赤外線カメラの取り付け位置について図20に示す。右が赤外線カメラ、左が深度カメラとなっている。



Fig.20 Infrared camera and depth camera

#### 6.4. 結果と考察

各実験日の時間とハウス、果実、葉の温度のグラフを図21から図23、1時間ごとの赤外線画像を図24から図26、適当な時間の深度画像を図27に示す。深度画像の距離は色の青い方が近く赤い方が遠い。赤外線画像の方が視野角は狭く深度画像の中央からやや左の部分と同じ場所を撮影している。実験中にトラブルがあり2月20日の11:17~11:39については赤外線画像を取得できなかった。果実と葉の温度は赤外線画像内の1ピクセルから抽出しているため空白の時間については11:16分のデータを用いてグラフを作成した。上記の時間の前後でカメラの位置を変更した。

図21から図23よりどの日においても昼間、果実はハウスの温度に追従し葉との温度差が見られる。16:00から温度が下がりきるまでの間にも温度差が見られる。19日と20日においては昼間にも温度の規則性が違うもののボイラを作動させているような形のグラフになっている。20日にはハウス内で作業を行っていたがボイラを作動させた様子はなかった。

図24から図26より日中の赤外線画像については果実と葉に色の違いが生じている。夕方にかけても多少違いはあった。果実が黒くなっている部分にやや偏りがある。

図27の赤外線画像について同じ場所を移しているときに時間によってあまり差はみられない。中央左付近に撮影した果実が見られる。19日の12:44と20日の10:04においては細かい点が多くみられる。

日中の昼間においても温度の変化が激しいものの夜間の様に温度の上昇幅が一定ではないため、自動検出に用いるときの温度のしきい値の推定が難しいと考える。夜間については2019年12月の実験と同じようにボイラを作動させているため同様の時間で検出可能であると考え。夕方についても葉と果実の温度差が見られるため検出可能であると考え。

赤外線画像について日中果実が黒くなっている部分に偏りがある。実験期間の前半は西向き、後半は東向きにカメラを設置したために南から日光が当たった左側上部、右側上部という風に温度が上昇したのではないかと考える。

深度画像について、距離が近い青色よりの部分であれば肉眼で果実の部分であると判別できるため葉が被っていない状態であれば検出に利用することはできると考える。赤外線画像と角度が違うため赤外線画像では果実が他のものと被っていても深度画像では被ってしまう可能性がある。

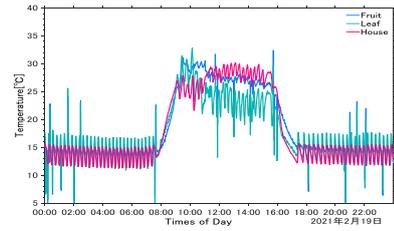


Fig.21 Temperature and time on February 19,2021

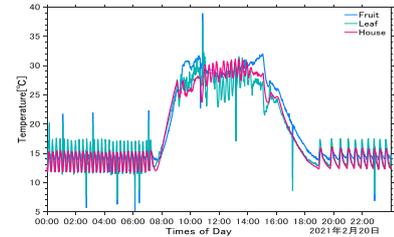


Fig.22 Temperature and time on February 20,2021

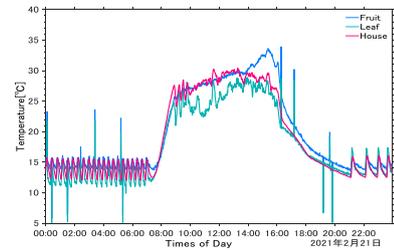


Fig.23 Temperature and time on February 21,2021

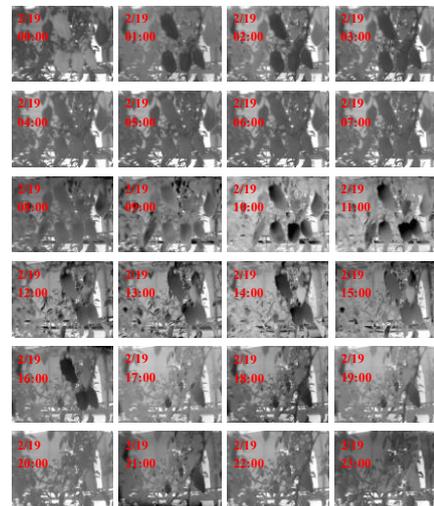


Fig.24 Image taken every hour on February 19,2021

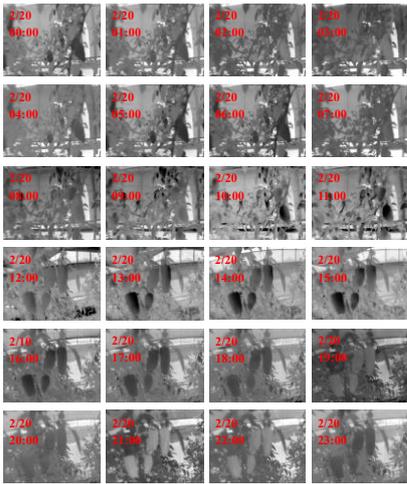


Fig.25 Image taken every hour on February 20,2021

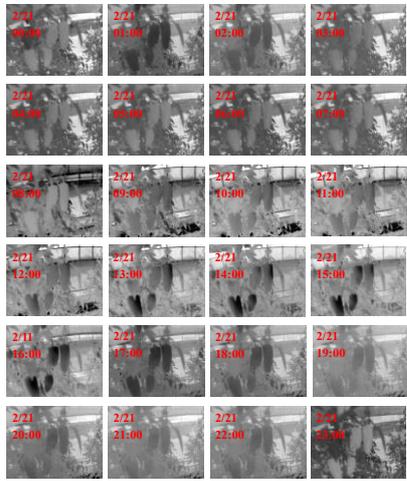
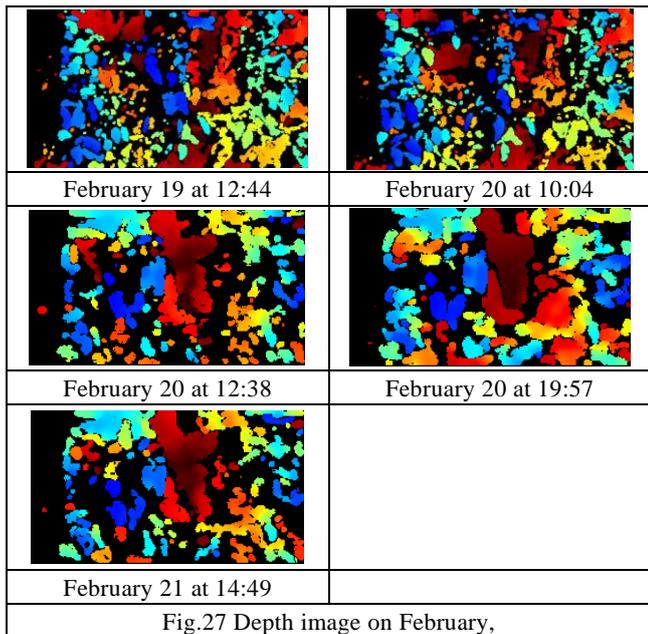


Fig.26 Image taken every hour on February 21,2021



## 7. 画像処理の評価(2021年2月)

### 7.1. 概要

第5章と同様の方法で画像処理と評価を行った。方法については省略し、7.2節で結果と考察を述べる。評価元となる画像の例を図28に示す。

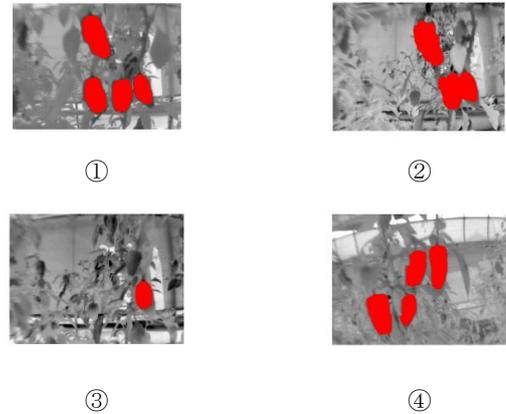


Fig.28 Example of image that is the basis of evaluation

### 7.2. 結果と考察

日中11時から15時、1時間ごとにF値が最大の時の評価結果を表11から13、処理画像を図29から31に示す。

図29より果実が隣り合っていると同一果実であるかのように検出されている。図31よりハウスの骨組み部分を検出してしまっている。20日の11:00については対象物が1個であり画像では検出できているように見えるものの適合率は84.5%だった。F値はどの日においても60%以上であったものの、19日は再現率が低い時間が多く対象物以外を検出していた。しきい値の温度範囲は最低でも1.5℃以上である。

処理結果として果実が隣り合い赤い部分がつながってしまっている場合が多くみられたが、F値は90%を超えるものもあり数値はいいが人間が目で見ると結果が良いとは言えないものがある。評価はピクセルの数を用いているが果実の個数も評価内容に入れる必要があると考える。他の結果の特徴として果実以外の部分を検出している場合が多く再現率が下がっている。この結果はF値が高くてもあまりよいものとは言えない。F値はこのような課題があるため、評価指標の改善を行う必要があると考える。

Table 11 Evaluation index and temperature range when the F-measure in the maximum on February 19, 2021

Time	House Temperature [°C]	Temperature Range [°C]	Recall [%]	Precision [%]	F-measure [%]
11:00	27.0	-2.5 ~ 3.0	67.3	79.3	72.8
12:00	29.0	-1.5 ~ 2.0	83.3	54.3	65.8
13:00	28.7	-2.0 ~ 1.5	63.8	85.5	73.1
14:00	28.4	-3.0 ~ -1.0	92.6	94.5	93.5
15:00	28.9	-3.0 ~ 0	47.3	94.3	63.0

Table 12 Evaluation index and temperature range when the F-measure in the maximum on February 20, 2021

Time	House Temperature [°C]	Temperature Range [°C]	Recall [%]	Precision [%]	F-measure [%]
11:00	29.7	-0.5 ~ 2.5	98.2	84.5	90.8
12:00	27.7	-0.5 ~ 1.5	69.9	91.9	79.4
13:00	27.9	0 ~ 2.5	91.6	93.3	92.4
14:00	29.6	-1.0 ~ 4.0	92.7	93.6	93.1
15:00	28.5	0.5 ~ 3.5	91.9	90.4	91.2

Table 13 Evaluation index and temperature range when the F-measure in the maximum on February 21, 2021

Time	House Temperature [°C]	Temperature Range [°C]	Recall [%]	Precision [%]	F-measure [%]
11:00	28.4	-1.0 ~ 0.5	81.1	53.3	64.3
12:00	28.8	-1.0 ~ 0.5	68.4	84.1	75.4
13:00	29.7	-1.0 ~ 1.0	83.7	92.7	88.0
14:00	29.4	0 ~ 3.0	97.3	89.5	93.2
15:00	29.2	0 ~ 3.5	88.2	91.0	89.6

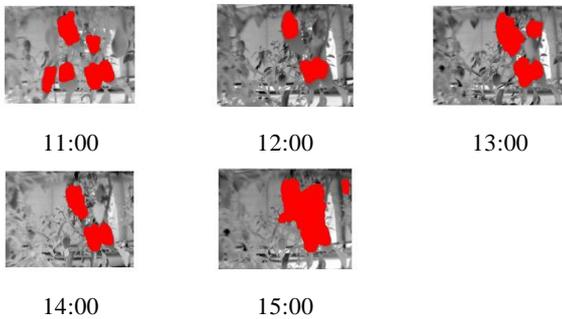


Fig.29 Detected image on February 19, 2021.

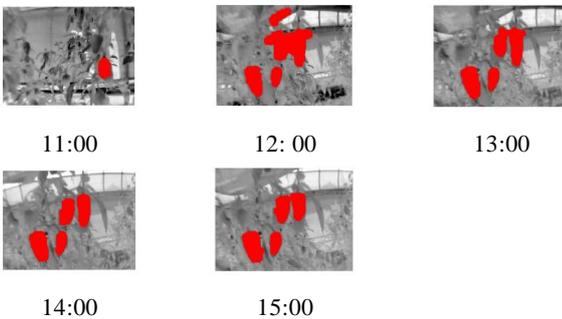


Fig.30 Detected image on February 20, 2021.

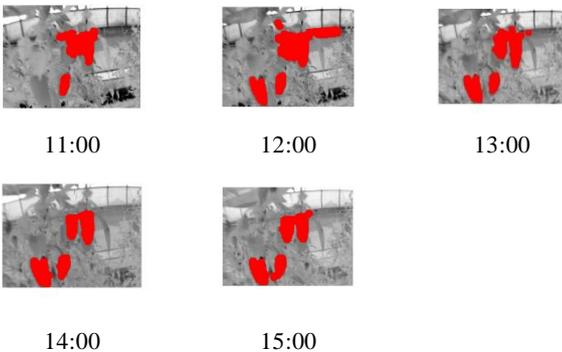


Fig.31 Detected image on February 21, 2021.

## 8. F値についての考察

### 8.1. 内容

第8章ではF値が最大の時の温度のしきい値近傍の別のしきい値で画像処理を行った場合評価指標がどのようになるのか比較を行う。比較には3つの時間のデータを用いた。表14から16にそれぞれの評価指標を示す。天候は11日が曇り、12日が晴れ、17日は曇りのち雨であり葉と果実の温度差に違いがあるためこの3つのデータを用いた。17日のデータについてはしきい値はF値が最大の時の範囲を含まないパターンも用いている。

Table 14 Evaluation index and temperature range on December 11 at 14:00, 2019.

House Temperature [°C]	Temperature Range [°C]	Recall [%]	Precision [%]	F-measure [%]
21.2	0 ~ 1.0	97.3	91.1	94.1
	-0.5 ~ 1.0	15.7	100	27.2
	0 ~ 1.5	97.3	91.0	94.1
	0.5 ~ 1.0	100	48.2	65.0
	0 ~ 0.5	94.9	55.7	70.2

Table 15 Evaluation index and temperature range on December 12 at 13:00, 2019.

House Temperature [°C]	Temperature Range [°C]	Recall [%]	Precision [%]	F-measure [%]
26.6	-3.0 ~ -0.5	91.0	97.4	94.1
	-3.5 ~ -0.5	82.5	98.9	89.9
	-3.0 ~ 0	91.0	97.4	94.0
	-2.5 ~ -0.5	61.9	90.4	73.5
	-3.0 ~ -1.0	91.2	96.4	93.7

Table 16 Evaluation index and temperature range on December 17 at 15:00, 2019.

House Temperature [°C]	Temperature Range [°C]	Recall [%]	Precision [%]	F-measure [%]
20.5	0.5 ~ 1.0	100	50.3	66.9
	0 ~ 0.5	22.1	43.0	29.2
	1.0 ~ 1.5	0	0	0
	0 ~ 1.0	32.5	67.4	43.8
	0.5 ~ 1.5	0	0	0

### 8.2. 考察

11日と12日はそれぞれF値が最大で94.1%あるがそれぞれしきい値の上限を0.5°C大きくしたときに評価指標はほぼ同じ値となっている。ただし17日は0%となっている。11日と12日は葉と果実の温度差が生じている状態で葉の温度がハウスより小さいために、しきい値の上限を上げて果実の温度は範囲内に入ったためではないかと考える。17日はF値が最大の際のしきい値の範囲が0.5°Cであるために温度差が小さいと考えられ、範囲をずらすと果実の温度から外れたり、葉の温度が範囲に多く入るなどの要因で検出できないと考える。そのほかの温度範囲では11日と17日は20%以上低下しているが12日は最大で20%低下でとどまっている。晴れで蒸散作用により温度差が生じる場合は多少しきい値がずれてもある程度検出可能であるが、悪天候下では温度差が小さいためしきい値をより厳格に設定しなければよい検出結果は得られないと考える。

前提として温度差が生じたときに検出が可能であることから、温度差が小さいときには範囲をずらした場合に数値が悪くなるというのは妥当な結果である。画像処理過程で様々な処理を行っているため、温度範囲が近いとしても

必ずしも似たような検出結果が出るとは限らず、F 値における問題点ではなく画像処理方法の問題点であると考えらる。

## 9. 結言

本論文では赤外線カメラを用い、ピーマンの葉と果実の温度差を利用した果実の認識について検証を行った。ハウス内でのデータ取得実験において夏季、冬季ともに昼間は晴れであれば温度差が生じていた。悪天候下においてもわずかに温度差が生じている時間はあった。冬季の夜間に関してボイラを作動させている際に温度差が生じている時間があつた。

昼間の温度差が大きい 11:00 から 15:00 の間と冬季の夜間にボイラを作動させている時間帯においてハウス内の温度が極小となる時間に温度差が大きくなりやすいため、その時間帯において画像処理を行った。画像処理の方法としてモルフロジー変換やバイナリ変換、ハウス温度を基準としたしきい値処理を用いた。

画像処理の有効性の確認とハウス温度によるしきい値の自動推定方法の検討の前段階として、再現率、適合率及び F 値を用いた画像処理の評価を行った。F 値が一番高いときのしきい値や評価指標及び画像を示し、昼間の晴れの日であれば適切なしきい値を用いて果実を検出できた。悪天候下においてもハウス温度が短時間で変化している際には果実を検出できていた。夜間の検出においてはハウス温度が極小の時間に検出できており、しきい値の温度範囲はほとんどの時間帯において 0.5°C~1.5°C だった。

2021 年 2 月に深度センサを追加して新たにデータ取得実験と処理画像の評価を行った。最後に F 値が最大の時のしきい値の近傍のしきい値を用いた際の評価結果について考察を行った。

今後の課題として第 5 章と第 7 章の評価結果をもとに湿度や照度を利用した温度のしきい値の推定を行い、自動で果実を検出することを検討している。新たにデータを取得した深度画像を用いて画像処理方法の改善を行えないか検討している。

## 文献

- (1) 農林水産省ホームページ：農業労働力に関する統計  
<https://www.maff.go.jp/j/tokei/sihyo/data/08.html>  
(参照日 2020 年 10 月 4 日)
- (2) 農林水産省ホームページ：スマート農業  
<https://www.maff.go.jp/j/kanbo/smart/>  
(参照日 2021 年 1 月 7 日)
- (3) 高知県庁ホームページ：高知県農業の動向（令和 2 年度） 主要畜産物の生産  
<https://www.pref.kochi.lg.jp/soshiki/162201/2020040200152.html>  
(参照日 2021 年 1 月 8 日)
- (4) inaho 株式会社  
<https://inaho.co/>  
(参照日 2021 年 1 月 13 日)
- (5) 生物系特定産業技術研究支援センター：アスパラガス生産に働き方改革を！改植技術「枠板式高畝栽培」を基盤とした省力安定栽培システムの開発  
[http://www.naro.affrc.go.jp/laboratory/brain/innovation/20\\_inov\\_saiyou\\_R02\\_kaihatsu02\\_02019C.pdf](http://www.naro.affrc.go.jp/laboratory/brain/innovation/20_inov_saiyou_R02_kaihatsu02_02019C.pdf)  
(参照日 2021 年 1 月 13 日)
- (6) 農研機構：イチゴ収穫ロボット  
<https://www.naro.affrc.go.jp/laboratory/iam/urgent/urgent100/069789.html>  
(参照日 2021 年 1 月 13 日)
- (7) 多田敬佑, 岡宏一, 原田明德, “赤外線カメラを利用したハウス内ピーマンの検出”  
修士学位論文, 高知工科大学(2020)
- (8) 増田芳雄“絵とき 植物生理学入門”, (1988), オーム社
- (9) 中川裕志, “東京大学工学教程 情報工学 機械学習”, (2015), 丸善出版
- (10) 秋庭伸也, 杉山阿聖, 寺田学, “見て試してわかる機械学習アルゴリズムの仕組み 機械学習図鑑”, (2019), 翔泳社

## 謝辞

本研究を行うにあたって、懇切丁寧にご指導いただきました岡宏一教授ならびに原田明德准教授に感謝申し上げます。アドバイスいただいた研究室のみなさまに感謝申し上げます。実験にご協力いただいた北村さんに感謝申し上げます。

本研究は高知県の「IoP が導く Next 次世代型施設園芸農業への進化プロジェクト」の助成を受けています。