

第7章 果実の選別に関する実験

第1節 緒 言

農業ロボットで果実を収穫する場合、重要となるのは収穫適期の判定である。収穫作業における情報としては、果実の認識、熟度の判定、果柄の認識、採果位置の決定などがある。一般に、収穫適期の判定は色による熟度判定、外観による大きさ判定、形状の判定などがある¹⁾。これまでの研究事例を見ると、キュウリ²⁾では、緑色の果実を抽出して、大きさ（長さ、幅）から収穫適期を判定する、トマト³⁾では、赤く着色した色から収穫適期果実を判定する、ナス⁴⁾では、紫色の果実を抽出して、大きさ（長さ、幅）から収穫適期果実を判定する、イチゴ⁵⁾では、果実の色情報と外観の特徴（面積、垂直水平のフェレ長）から収穫適期を判定するなどの報告がある。

イチゴは成熟するとアントシアニンによって果実が白緑色から赤色に着色する⁶⁾。そこで本研究における収穫適期の判定は、位置決め用カメラによる境界画素数を用いた採果目標果実の判定、採果用カメラによる赤色部位の着色部と白緑色部位の未着色部を含む果実の画素数を用いた大きさの判定および赤色部位の画素数と果実の画素数の割合の着色率を用いた熟度判定（収穫適期果実の判定も含む）を用いて行った。なお、収穫適期果実は5・6分着色以上の果実とした。

本章では、採果目標果実の真上に移動した採果用カメラで撮影した採果目標果実の画像（以下、原画像と称す）から、大きさの判定と熟度判定が可能な画像処理法⁷⁾を提案し、採果目標果実の判定⁸⁾も加えて、その有用性を検討した。

第2節 果実選別の画像処理法

1. 位置決め用カメラによる採果目標果実の判定

第5章の果実の認識においては、4分着色以上とする採果目標果実収穫の判定を行った。そこで、採果目標果実の判定の方法についてまとめると、収穫エリアにおける果実の赤色部位のみを抽出するための条件は、 $(25 \leq L^* \leq 65)$ and $(10 \leq a^* \leq 60)$ and $(-10 \leq b^* \leq 20)$ とした。この L^* , a^* , b^* の範囲を用いて2値化処理を行い、赤色と認識された画素の8連結成分処理でラベリング処理を行った。ラベル領域の画素数が境界画像数より大きい場合は採果目標果実と判定し、それ以外はノイズまたは収穫適期以外の果実と判定した。

2. 採果用カメラによる大きさ、熟度の判定

図7-1に示す大きさと熟度判定の画像処理手順を、図7-2を例に説明する。なお、背景の除去、果実の抽出、果実を囲む矩形は、第6章で記述した果柄認識の「前処理」と同じである。

(1) 背景の除去

図7-2(a)の原画像から背景を除去する条件：

- ・白色の不織布： $(R-B > 5)$ を満足する時は黒地、それ以外は白地。
- ・黒色の不織布： $(R > 125)$ or $(G > 125)$ or $(B > 125)$ を満足する時は黒地、それ以外は白地。

図7-2(b)は、背景を除去した2値画像を示す。雑音成分の除去は平滑化処理（8近傍）を用いた⁹⁾。

(2) 果実の抽出

図7-2(a)と図7-2(b)から果実を抽出する条件：

- ・白色の不織布： $[(R-B > 5)]$ and $[(L^* \geq 85)$ or $(a^* \geq 5)$ or $(b^* \leq 0)]$ を満足する時は黒地、それ以外は白地。
- ・黒色の不織布： $[(R > 125)$ or $(G > 125)$ or $(B > 125)]$ and $[(L^* \geq 85)$ or $(a^* \geq 5)$ or $(b^* \leq 0)]$ を満足する時は黒地、それ以外は白地。

果実が複数存在する場合、まずラベリング処理を行い、次に各果実の重心が画面中心点に最も近いものを抽出し、それ以外は除去した。図7-2(c)は果実を抽出した2値画像を示

す。

ここで、図中の果実は矩形 $A_1B_1C_1D_1$ (以下、矩形 I と称す) でエリアを決める。

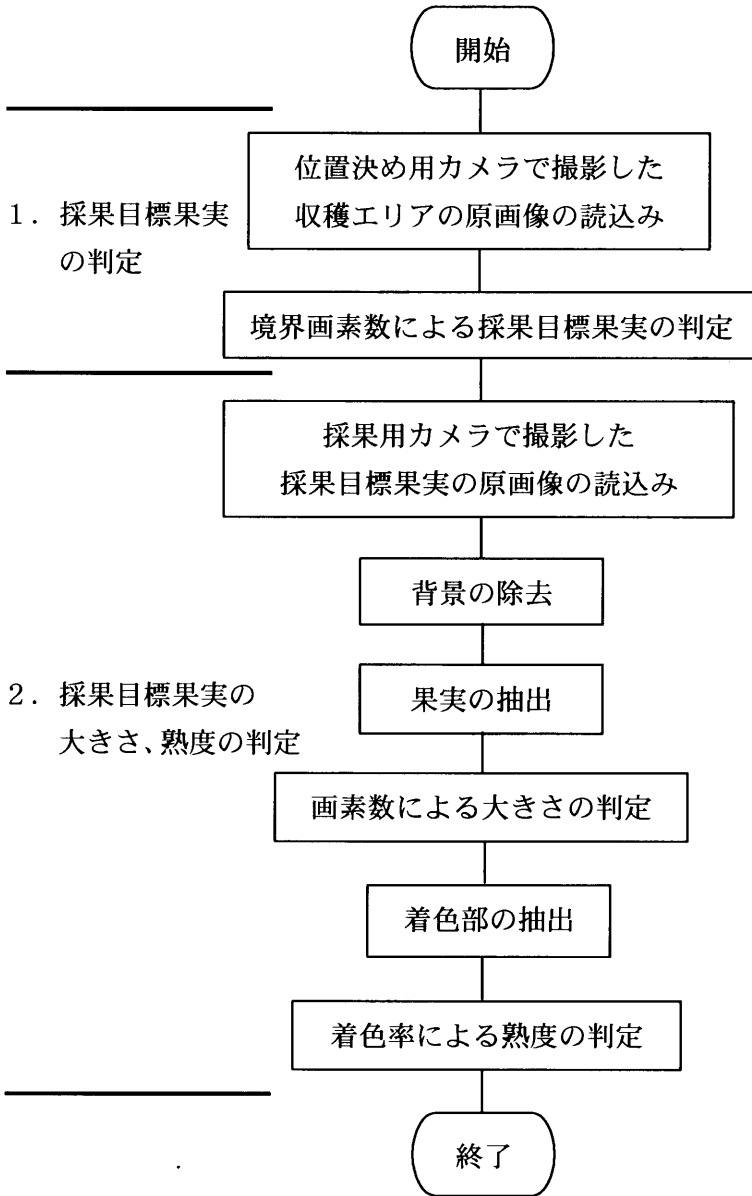


図 7-1 果実の選別における画像処理のフローチャート

Fig. 7-1 Flowchart of image processing method for ripeness judgment of fruits

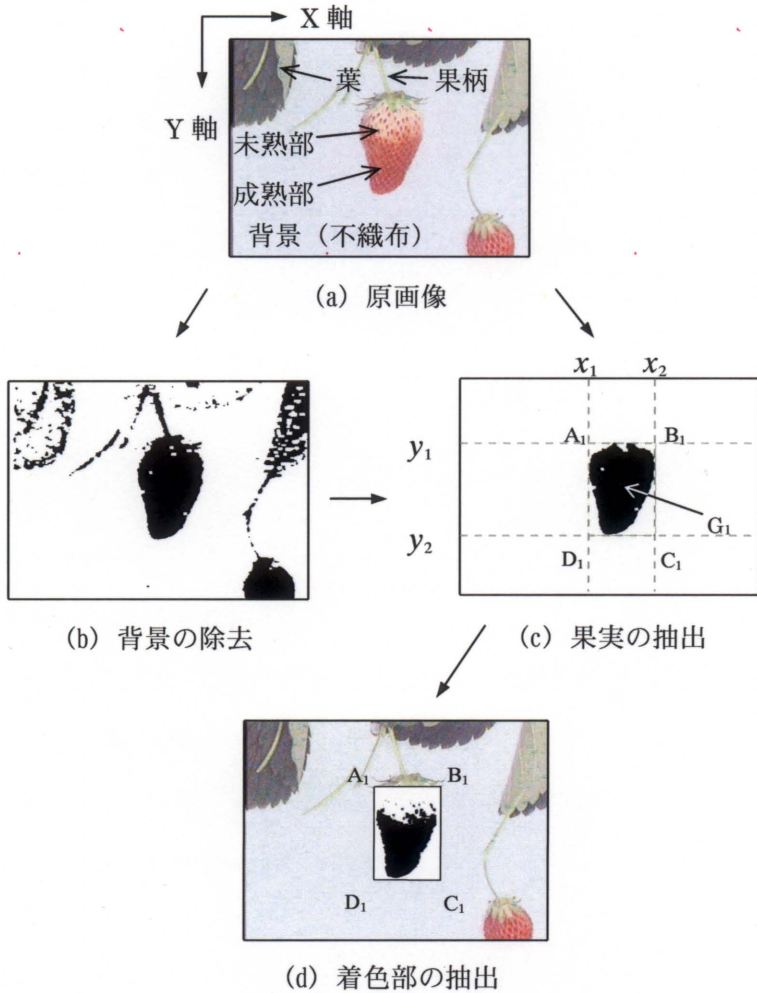


図 7-2 果実の赤色部位の抽出

Fig. 7-2 Extraction of red colored areas of fruits

(3) 画素数による大きさの判定

大きさは、抽出した果実の画素数を大きさの判定基準値 (S, M, L, 2L, 3L ごとの画素数の分布範囲) と比較して判定した。

(4) 着色部の抽出

原画像の赤色部位の着色部、白緑色部位の未着色部、緑色部位の葉、果柄、白色または黒色部位の背景において、それぞれの L^* , a^* , b^* 値の分布範囲を比較して、果実の着色部を抽出する閾値を求めた。白色と黒色の不織布とも、閾値は $L^*=85$, $a^*=20$ を最適値と決定した。

果実の着色部は、図 7-2(a)の原画像に図 7-2(c)の矩形 I を当てはめて、その範囲内のみで 2 値化することにして、 $(L^* < 85)$ and $(a^* > 20)$ を満足する条件を黒地として抽出した。それ以外は白地とした。

図 7-2(e)は、原画像から果実の着色部を抽出した 2 値画像の一例を示す。

(5) 着色率による熟度の判定

熟度を表す着色率は、図 7-2(c)における矩形 I 内の果実の画素数と図 7-2(d)における矩形 I 内の着色部の画素数とから、次式で求めた。

$$R_i = \frac{D_r}{D_a} \times 100 \quad (1)$$

ここで、 R_i : 着色率 [%]

D_r : 果実着色部の画素数 [画素]

D_a : 果実の画素数 [画素]

熟度は、果実の着色率をで示す熟度の判定基準値 (4 分着色, 5・6 分着色, 7・8 分着色, 9・10 分着色ごとの R_i の分布範囲) と比較して判定した。

第3節 実験装置および方法

1. 供試イチゴ

品種 (章姫), 区分基準 (「宮崎いちご標準出荷規格表」に従った形状, 大きさ, 熟度), 試料の保管は, 第 6 章と同じである。しかし, 果実の選別における熟度の判定基準と大きさの判定基準を定めるために, 試料は図 7-3 に示すように, 熟度と大きさを組み合わせて判定基準用を追加した。果実選別における熟度 (未熟果, 4 分着色, 5・6 分着色, 7・8 分着色, 9・10 分着色) および大きさ (S, M, L, 2L, 3L) の基準は, 熟練の生産者による判定とした。いずれも, 試料採集時に生産者から熟度と大きさの判定をしてもらい, イチゴごとに記録した。



図 7-3 判定基準用試料

Fig. 7-3 Sample for judging standard

2. 測定装置

内成り栽培用モデル畝は図 7-4 に示すように、白色と黒色の不織布、配置（標準，ランダム）を組み合わせたもので、第 6 章と同じである。



図 7-4 黒色背景のモデル畝

Fig. 7-4 Model ridge with black background

採果用カメラによる採果目標果実の画像取得は、同じく第 4 章の開発機を用いた。果実選別の画像処理は、Visual C++6.0 で自作したプログラムを用い、採果用カメラによる果実選別の処理結果は図 7-5 に示すディスプレイに果実の赤色部位の画素数、果実の画素数（着色部と未着色部を含む）、着色率 R_i のほかに、採果位置 P および採果角 α 出力する。

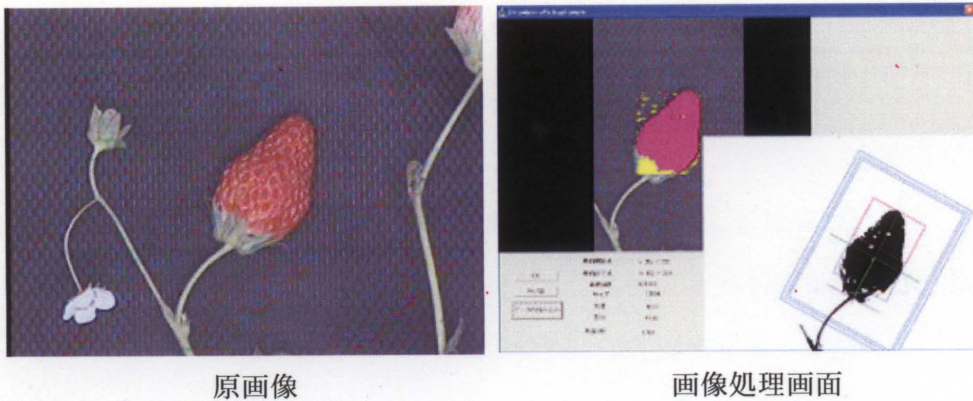


図 7-5 黒色背景の画像処理結果画面の一例

Fig. 7-5 Example of image processing result with black background

3. 測定項目および方法

生産現場において、果実の大きさは外観で M, L などのように、果実の熟度は着色具合で 5・6 分着色, 7・8 分着色などのように生産者が目視で判定していることから、個人差が生じ、特に境界での判定ミスが多々あることが懸念される。そこで、慣行の大きさ、熟度の判定を数値化するために、果実の選別には果実の画素数を用いた大きさの判定基準、着色率を用いた熟度の判定基準を決める必要がある。判定基準用の供試画像は、白色の不織布のモデル畝に標準配置した大きさと組み合わせて熟度ごとに 20 個ずつ（計 80 個）の果実を用い、採果用カメラで撮影した。

果実の選別には、採果目標果実の判定、果実の大きさの判定、収穫適期果実の判定の検証を行った。検証用の供試画像は、収穫適期果実 45 個および 4 分着色以下の果実 10 個を白色と黒色の不織布のモデル畝ごとに標準配置し、位置決め用カメラで果実が配置されている収穫エリアの画像を、採果目標果実の真上に移動させた採果用カメラで原画像を撮影した。なお、位置決め用カメラで採果目標果実と判定されなかった未着色果実などは、採果用カメラで撮影されない。

(1) 位置決め用カメラによる採果目標果実の判定

システムにおける 4 分着色以上とする採果目標果実は、収穫エリアの画像から抽出した果実の赤色部位の画素数と境界画素数を比較して、境界画素数より大きい場合は採果目標果実と判定した。果実の選別における採果目標果実の判定精度は、白色背景と黒色背景ごとに、生産者が判定した 4 分着色以上の果実と画像処理で判定した 4 分着色以上の果実を

比較し、一致率で求めた。

(2) 採果用カメラによる果実の選別

a. 大きさの判定

大きさの判定基準は、原画像から抽出した果実の画素数を用いて、生産者が判定した S, M, L, 2L, 3L 間の画素数の分布範囲、平均値、標準偏差を用いて比較した。

大きさは、原画像と背景除去の 2 値画像を用いて抽出した果実の画素数と大きさの判定基準を比較した。果実の選別における大きさの判定は、白色背景と黒色背景ごとに、生産者が判定した大きさと画像処理で判定した大きさを比較し、両方の一致具合で検討した。

b. 熟度の判定

熟度の判定基準は、式 (1) で求めた R_i を用いて、生産者が判定した未熟果、4 分着色以下、5・6 分着色、7・8 分着色、9・10 分着色の果実におけるそれぞれの R_i の分布範囲、平均値、標準偏差を用いて比較した。また、収穫適期果実の判定基準は、生産者が判定した 4 分着色以下の果実と 5・6 分着色の果実を区別できる境界値 R_i とした。

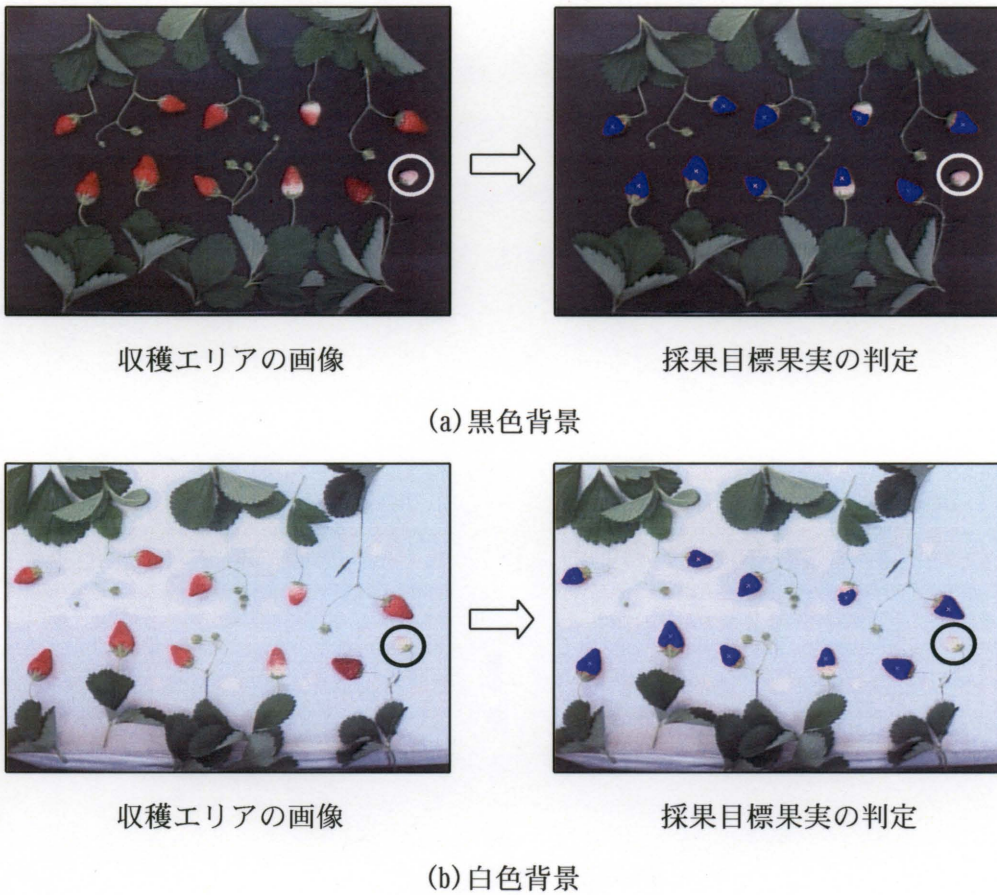
熟度は、式 (1) から求めた R_i と収穫適期果実の判定基準を比較した。果実の選別における熟度の判定は、白色背景と黒色背景において、生産者が目視で判定した収穫適期果実と画像処理で判定した収穫適期果実を比較し、同じ供試果実に対する判定の一致具合で検討した。

第4節 結果および考察

1. 位置決め用カメラによる採果目標果実の判定

黒色背景と白色背景における、採果目標果実の判定の一例を、図 7-6 に示す。4 分着色以上の果実は赤色部位の抽出、画像重心が求められ、未熟果、葉、果柄と区別して認識でき、○印をつけている 4 分着色以下の果実またはノイズは認識されなかった。白色と黒色の両背景におけるイチゴは、45 個を採果目標果実と判定し、10 個を未処理としたことから、果実の選別における採果目標果実の判定は 100% と言える。よって、位置決め用カメラにおける赤色部位の抽出閾値と境界画素数を用いた採果目標果実の判定は、白色と黒色の両背景ともに、4 分着色以上の果実が判定でき、それ以外は処理しないことが確認できた。最初の段階で、着色していない果実を概ね処理対象から外すことによって、作業効率の向上につながる。これは、イチゴ栽培農家の収穫作業において、赤く着色していない果実は

収穫しないことと同じ役割をするものである。



注：○印は認識しなかった4分着色以下の果実

図7-6 採果目標果実の判定

Fig. 7-6 Judgment of target fruits

2. 採果用カメラによる果実の選別

(1) 大きさの判定

生産者が判定した大きさごとの果実の画素数は、図7-7に示すように、S, M, L, 2L, 3Lの順序で、大きさが大きくなると画素数が増える傾向を見せたが、特に隣接している大きさでは生産者の判定とずれる傾向が見えた。大きさごとの画素数のずれは、生産者の目視による大きさの判定範囲が大きくあいまいなことが原因と考えられる。市販の2層箱詰めされたイチゴは、上の層が大きく下の層が割合小さい場合もよくある。

図7-7の生産者が判定した大きさごとの果実の画素数を用いた大きさの判定基準は、表7-1に示すように、Sでは3342~14091画素、Mでは4244~18088画素、Lでは9685~18450画素、2Lでは16476~26634画素、3Lでは20056~32783画素であった。経済的な観点から見た場合、大きいイチゴほど商品価値が高いため、生産者は迷う場合は上のランクに判断する傾向があった。そこで、判定基準は隣接ランク同士の平均値の中間値を大きいランクにおける最小画素数とした。よって、大きさの判定基準は、 $S < 7500$ 画素、 $7500 \text{ 画素} \leq M < 12500$ 画素、 $12500 \text{ 画素} \leq L < 17500$ 画素、 $17500 \text{ 画素} \leq 2L < 22500$ 画素、 $22500 \text{ 画素} \leq 3L$ とした。

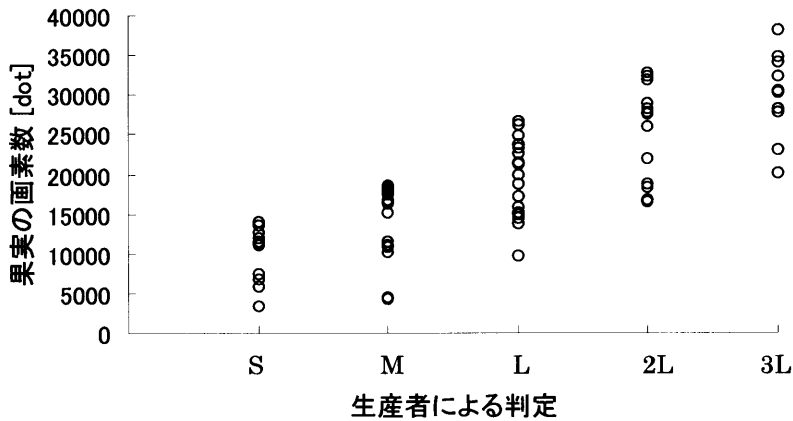


図7-7 大きさごとの画素数

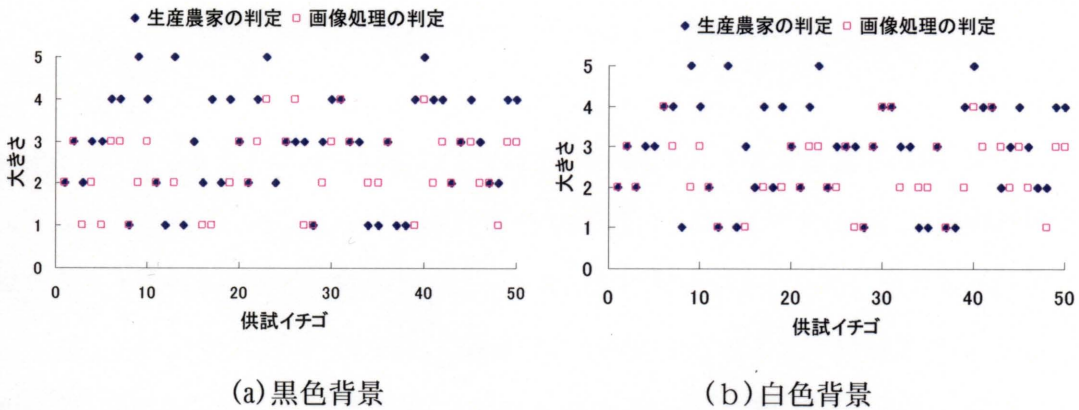
Fig. 7-7 Number of pixels of each sizes

表7-1 大きさと画素数

Table 7-1 Size and number of pixels

大きさ	画素数D [画素]			
	範囲	平均値	標準偏差	判定基準
S	3342~14091	10282	960	$D < 7500$
M	4244~18088	14384	986	$7500 \leq D < 12500$
L	9685~18450	19568	951	$12500 \leq D < 17500$
2L	16476~26634	25423	1406	$17500 \leq D < 22500$
3L	20056~32783	29921	1644	$22500 \leq D$

上記の判定基準を用いた大きさの判定は、図7-8に示すように、白色と黒色の両背景ともばらつきがあり、画像処理の判定が生産者の判定よりやや小さめになる傾向があった。これは、果実の画素数を用いた場合、同じ条件で画像処理を行うため客観的に数値化されるが、生産者が目視で行う場合は、狭い範囲の縦30~70mm、横15~50mmをS, M, L, 2L, 3Lに区分するのに、主観が影響した曖昧な判定となりやすいことが否定できない。よって、大きさの判定は生産者の判定を基準にした場合では難しかったが、主観的な要素の影響が懸念されるため、判定基準の数値化が必要であると考えられる。



注：縦軸の1, 2, 3, 4, 5はそれぞれS, M, L, 2L, 3Lを示す

図7-8 大きさの判定

Fig. 7-8 Judgment of size

(2) 熟度の判定

図7-9に示す着色率 (R_i) の画像処理一例は、原画像における赤色部位が画像処理では抽出され、生産者の判定に近い R_i を示しているが、5・6分着色の果実においては R_i がやや高く示されている。これは、ヘタ部の付近と種などが緑色部位と処理された場合、果実の画素数が減少することで、同じ赤色部位の画素数でも R_i が高く示されることが主な原因だと考えられる。

熟度	4分着色以下	5・6分着色	7・8分着色	9・10分着色
原画像				
白色背景での 処理画像				
着色率 [%]	50.5	81.2	79.8	99.4

図 7-9 赤色部位の抽出および着色率

Fig. 7-9 Extraction and coloring rate of red part

R_i は表 7-2 に示すように、4分着色以下では 26.1~55.6%、5・6分着色では 54.1~67.7%、7・8分着色では 65.0~80.1%、9・10分着色では 82.1~100%であった。果実の着色は、時期によって着色部と未着色部の境がはっきりしない場合が多いため、生産者が目視で判断した赤色部位と、画像処理で抽出した赤色部位の差が生じることが懸念される。そこで、判定基準は隣接ランク同士の平均値の中間値を熟度が高いランクにおける最小画素数とし

表 7-2 熟度と着色率

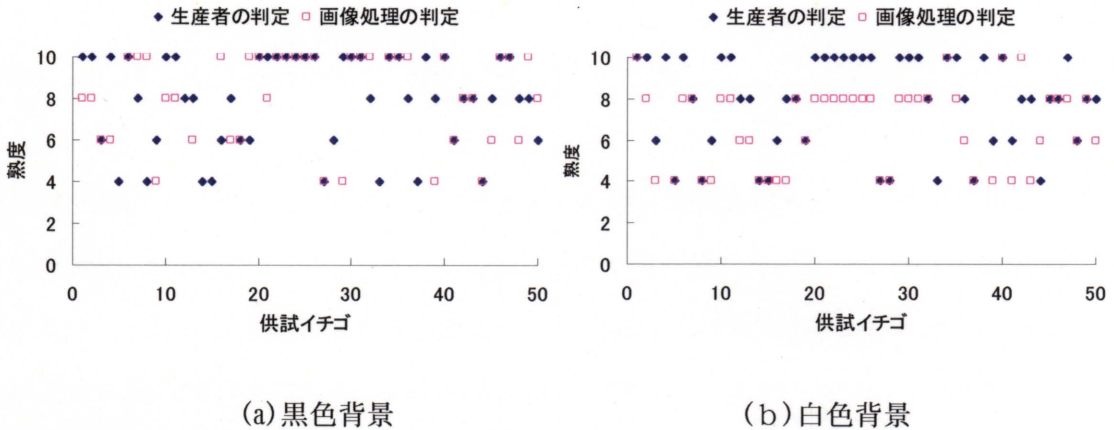
Table 7-2 Level of ripeness and rate of coloring

熟度	着色率 R_i [%]				判定基準
	範囲	平均	標準偏差		
未熟果	4分着色以下	26.1~55.6	47.7	5.4	$R_i < 54.8$
	5・6分着色	54.1~67.7	61.3	3.7	$54.8 \leq R_i < 68.2$
収穫適期果実	7・8分着色	65.0~80.1	75.1	3.5	$68.2 \leq R_i < 82.1$
	9・10分着色	82.1~100.0	89.0	5.5	$82.1 < R_i$

た。よって、熟度の判定基準は、4分着色以下 $< 54.8\%$ 、 $54.8 \leq 5 \cdot 6$ 分着色 $< 68.2\%$ 、 $68.2 \leq 7 \cdot 8$ 分着色 $< 82.1\%$ 、 $82.1\% \leq 9 \cdot 10$ 分着色とした。ここで、4分着色以下の R_i の範囲は 55.6%以下、判定基準は 54.8%、収穫適期果実（5・6分着色以上）の R_i の範囲は 54.1%以上となったことから、両者を区別して収穫適期果実の判定基準 R_i は 55%とした。

上記の判定基準を用いた熟度の判定は、図 7-10 に示すように、白色と黒色の両背景と

もにばらつきがあり、画像処理の判定が生産者の判定よりやや小さめになる傾向があった。色の判定は画像処理と人の目視の間に差があるだけでなく、イチゴにおいても数値化されていないため、基準の決定が非常に難しい。よって、熟度の判定も大きさの判定と同様に生産者の判定を基準にした場合では、主観的な要素の影響が懸念される。よって、判定基準の数値化が必要であると考えられる。



注：縦軸の4, 6, 8, 10はそれぞれ4分着色以下, 5・6分着色, 7・8分着色, 9・10分着色を示す

図7-10 熟度の判定

Fig. 7-10 Judgment of level of ripeness

生産者の判定を基準として、 R_i による収穫適期果実の判定と比較すると、表7-3のような結果が得られた。生産者が判定した収穫適期果実では白色と黒色の両背景とも一致率は100%となったが、未着色果では白色背景では80%、黒色背景では50%であった。未着色果で

表7-3 収穫適期果実の判定

Table 7-3 Judgment of proper harvesting time of fruits

不織布	熟度	生産農家の判定 [個]	R_i による判定		一致率 [%]
			一致 [個]	不一致 [個]	
白	収穫適期果実	45	45	0	100.0
	未熟果	10	8	2	80.0
黒	収穫適期果実	45	45	0	100.0
	未熟果	10	5	5	50.0

の不一致の原因は、収穫適期果実との境界付近の判定ミスに起因するもので、明らかに4分着色以下のものではミスは起きなかった。よって、 R_i を用いて収穫適期果実の判定が可能であることを確認した。

以上の結果、提案した果実選別の画像処理法は、採果目標果実の判定、収穫適期果実の判定については有用性が認められたが、大きさ、熟度の判定には、判定基準の数値化による確実な判定が必要であると考えられる。

第5節 摘 要

果実の選別として、位置決め用カメラによる採果目標果実の判定および採果用カメラによる大きさ、熟度の判定を行った。その画像処理法は、採果目標果実は抽出した収穫エリアにおける赤色部位の画素数から、大きさの判定は採果目標果実の画素数から、熟度の判定は採果目標果実の着色率 R_i から求める方法を提案した。果実の選別は、画像処理法による判定を生産者の目視による判定と比較検討した結果、以下のような知見を得た。

1) 位置決め用カメラによる採果目標果実(4分着色以上の果実)の判定は、背景の色に関係なく100%の判定ができた。

2) 採果用カメラによる大きさの判定における判定基準は、 $S < 7500$ 画素、 $7500 \text{ 画素} \leq M < 12500$ 画素、 $12500 \text{ 画素} \leq L < 17500$ 画素、 $17500 \text{ 画素} \leq 2L < 22500$ 画素、 $22500 \text{ 画素} \leq 3L$ であった。これを用いた大きさの判定は、生産者の判定よりやや小さめになる傾向があった。

3) 採果用カメラによる熟度の判定における判定基準は、4分着色以下 $< 54.8\%$ 、 $54.8 \leq 5 \cdot 6$ 分着色 $< 68.2\%$ 、 $68.2 \leq 7 \cdot 8$ 分着色 $< 82.1\%$ 、 $82.1\% \leq 9 \cdot 10$ 分着色であった。これを用いた熟度の判定は、生産者の判定と一致しにくかった。

4) 収穫適期果実(5・6分着色以上の果実)の判定における判定基準は、 R_i 55%とした。これを用いた収穫適期果実の判定は、生産者が判定した収穫適期果実では白色、黒色背景とも一致率は100%、生産者が判定した未着色果では白色背景で80%、黒色背景で50%であった。未着色果での不一致の原因は、収穫適期果実との境界付近の判定ミスに起因するもので、明らかに4分着色以下のものではミスは起きなかった。よって、 R_i を用いて収穫適期果実の判定が可能であることを確認した。

引用文献

- 1) 藤浦建史：農業ロボット開発の課題と展望 (2) 農業ロボットの視覚部, 農業機械学会誌, 58(1), 144~149, 1996
- 2) 有馬誠一, 近藤直, 芝野保徳, 藤浦建史, 山下淳, 中村博：キュウリ収穫ロボットの研究 (第2報), 農業機械学会誌, 56(6), 69~76, 1994
- 3) Monta, M., Kondo, N., Ting, K.C. : End-effectors for tomato harvesting robot, Artificial Intelligence Review, 12(1-3)11~25, 1998
- 4) 林茂彦, 雁野勝宣, 黒崎秀仁, 有馬誠一, 門田充司：V字型整枝されたナスを対象としたロボット収穫システム (第1報), 植物工場学会誌, 15(4) 205~210, 2003
- 5) 有馬誠一, 近藤直, 八木洋介, 門田充司, 吉田裕一：高設栽培用イチゴ収穫ロボット (第1報), 植物工場学会誌, 13(3) 159~166, 2001
- 6) 植松徳雄：イチゴの栽培の理論と実際, 誠文堂新光社, 東京, 167~169, 1998
- 7) 崔永杰, 永田雅輝, 郭峰, 日吉健二, 木下統, 御手洗正文：マシンビジョンによる内成り栽培用イチゴ収穫ロボットの研究 (第2報), 農業機械学会誌, 69(2), 60~68, 2007
- 8) 崔永杰, 永田雅輝, 梶島芳徳, 曹其新：マシンビジョンによる内成り栽培用イチゴ収穫ロボットの研究 (第1報), 農業機械学会誌, 68(6), 59~67, 2006
- 9) 谷口慶治：画像処理工学 (基礎編), 共立出版株式会社, 東京, 1~14, 99~101, 107~129, 2000