

新 制
題
519
京大附図

マニピュレータ装着用 果実認識視覚センサの研究

1988

近 藤 直

マニピュレータ装着用
果実認識視覚センサの研究

1988

近藤 直

序 文

果菜類や果樹類等における作業は、他の多くの農作業の機械化及び自動化が進む一方で、依然として人力に頼っており、その労力は大きく、労働生産性は低くなっている。また、果実類に限らず、農作物の輸入の自由化の政策が進む中、日本の農作物に国際的競争力をつけるためにも、各種の作業が行えるコストパフォーマンスの優れた農業用ロボットの開発は急務であると考えられる。その農業用ロボットの研究ならびにロボットの感覚のなかで最も大きな割合を占める視覚センサの研究は、近年国内外で始められているが、現在の工業技術をそのまま応用しただけでは解決されない問題が多いのが現状である。その理由として、工業用センサは既成の形、色をした対象物をほぼ決められた場所で扱うのに対して、農業用センサでは種々の複雑な形、色をした植物体、土壌等を扱い、その物理量は時間、場所と共に変化すること、農業用センサは過酷な環境下にさらされることがあるため、その構造はできるだけ簡単でなくてはならないということ、また安価でなくてはならないということ等があげられる。

本研究は、それらの農業用センサが有すべき特徴ならびに植物体の特性をふまえた上で、果実認識用視覚センサの開発を目的として行った。このなかでは、まず果実と他の対象物との識別について3つの方法で行い、それらの特徴を実験によって明らかにすると共に、野外における有効性を実証した。次に果実の位置検出については、2つの方法を提唱し、それらの特徴を実験ならびにシミュレーションで明らかにし、さらに両方法を組み合わせた位置検出の有効性を実験によって実証した。

なお、本研究を進めるにあたり、論文の取りまとめに関するご指導ならびに論文のご校閲を頂いた並河清京都大学教授、研究の方法論に関してご指導を頂いた川村登京都大学名誉教授、実験を遂行するにあたり有益なご助言とご協力を頂いた藤浦建史島根大学助教授（元京都大学助手）ならびに浦元信京都大学助手、実験及び論文の取りまとめにご配慮を頂いた遠藤俊三岡山大学教授、暖かいご助言を頂いた芝野保徳岡山大学教授に深く感謝致します。

目 次

第1章 緒論	1
第1節 農業用視覚センサの有すべき特徴	1
1. 果実と茎葉等の識別	3
2. 果実の位置検出	4
第2節 本研究及び本論文の構成	5
第2章 3色分解を利用した果実と茎葉等の識別	7
第1節 実験装置及び方法	7
1. 3板式視覚センサ	7
2. ダイクロイックミラーの透過率及びイメージセンサの相対感度	8
3. インターフェイス回路	10
4. 制御方法	11
5. 実験方法	13
第2節 実験結果及び考察	14
第3節 摘要	17
第3章 2色成分を利用した果実と茎葉等の識別	18
第1節 実験装置及び方法	18
1. 視覚センサ	18
2. 光学フィルタ及びレンズの透過率	20
3. 制御方法	20
4. 実験方法	22
第2節 実験結果及び考察	26
1. トマト	26
2. ナス	27
3. キュウリ	28
4. ビーマン	29
5. ミカン	30

6. カキ	31
第3節 摘要	32
第4章 最適波長帯域を利用した果実と茎葉等の識別	34
第1節 最適波長帯域の計算方法	34
1. 評価関数	34
2. 光源の放射スペクトル	36
3. レンズ, フィルタの透過率及びイメージセンサの相対感度	36
4. 果実と葉の分光反射特性	36
(1) トマト	37
(2) ナス	38
(3) キュウリ	38
(4) ビーマン	39
(5) ミカン	40
(6) カキ	40
5. 計算方法	42
第2節 計算結果及び考察	42
1. トマト	42
2. ナス	44
3. キュウリ	45
4. ビーマン	46
5. ミカン	46
6. カキ	48
第3節 室内実験	48
1. 実験装置及び方法	48
2. 実験結果及び考察	49
(1) トマト	49
(2) ナス	50
(3) キュウリ	51
(4) ビーマン	51

(5)ミカン	52
(6)カキ	54
第4節 摘要	55
第5章 野外における最適波長帯域の有効性	56
第1節 実験装置及び方法	56
1. 2板式視覚センサ	56
2. 光学フィルタ, レンズ及びハーフミラーの透過率, 反射率	57
3. 対象物の分光反射特性	58
4. 実験方法	61
第2節 実験結果及び考察	62
1. トマト	62
2. ナス	64
3. キュウリ	64
第3節 シミュレーション	65
1. 計算方法	65
2. 計算結果及び考察	66
(1)トマト	66
(2)ナス	67
(3)キュウリ	68
第4節 摘要	69
第6章 ビジュアルフィードバック法による果実の位置検出	71
第1節 室内実験	71
1. 制御方法	71
(1)果実認識画素数と果実までの距離	72
(2)マニピュレータの目標角度	72
(3)実験のフローチャート	73
2. 実験装置及び方法	75
(1)関節型マニピュレータ	75

(2)実験方法	75
3. 実験結果及び考察	77
第2節 シミュレーション	78
1. 計算方法	78
(1)果実認識画素数と対象物までの距離	78
(2)計算方法	79
2. 計算結果及び考察	79
第3節 摘要	81
第7章 視覚センサの果実方向移動による果実の位置検出	83
第1節 シミュレーション	83
1. 計算方法	83
2. 計算結果及び考察	86
第2節 室内実験	90
1. 実験装置及び方法	90
2. 制御方法	92
3. 実験結果及び考察	93
第3節 摘要	94
第8章 ビジュアルフィードバック法と視覚センサの果実方向移動による方法を組み合わせた位置検出	96
第1節 組み合わせ方法	96
第2節 室内実験	97
1. 実験装置及び方法	97
2. 実験結果及び考察	98
第3節 摘要	100
第9章 結論	102
引用文献	105

第1章 緒論

第1節 農業用視覚センサの有すべき特徴

現在わが国においては柑橘類，仁果類のほか多くの果菜類が栽培されており，昭和61年度の栽培面積は表1-1の通りで，その収穫量は表1-2の通りである。

米作におけるほとんどの農作業が機械化され，マイクロコンピュータ等を使った農作業の自動化が進む中，果実類における収穫，摘果及び防除等の種々の作業はいまだに手で行われており，人体に及ぼす疲労や薬害はかなりなものになっている。特にミカン等は傾斜地に栽培されている場合も多く，大

表1-1 果実類の栽培面積¹⁾ (単位: ha)

作物名	作付時期	栽培面積
トマト	冬春	3,810
	夏秋	11,400
ナス	冬春	1,840
	夏秋	17,000
キュウリ	冬春	5,230
	夏秋	17,600
ピーマン	冬春	876
	夏秋	3,840
ミカン		108,400
リンゴ		54,700
ナシ		20,500
モモ		15,000

表 1 - 2 果実類の収穫量¹⁾ (単位: t)

作物名	作付時期	収穫量
トマト	冬春	309,300
	夏秋	507,000
ナス	冬春	150,800
	夏秋	442,700
キュウリ	冬春	448,700
	夏秋	591,300
ピーマン	冬春	79,900
	夏秋	97,800
ミカン		2,168,000
リンゴ		986,100
ナシ		480,700
モモ		219,200

表 1 - 3 果実類の10 a当りの労働時間²⁾ (単位: h)

作物名	労働時間	作物名	労働時間
トマト	680.4*	ミカン	153.8
ナス	1224.4*	リンゴ	247.0
キュウリ	876.2*	ナシ	363.2
ピーマン	995.8*	モモ	354.2

*ハウス栽培と露地栽培の平均値

型機械の導入を困難にしている。表1-3には昭和59年度の10 a当りの果実類の労働時間を示すが、米(56.5 h)及び麦(12.8 h)²⁾に比べて、非常に大きいことがわかる。

振動式果実収穫機の研究³⁾及び開発は古くからなされ、米国等ではオレンジやリンゴ等に使用されているものの、その対象果実は加工用に限られ、生食用には向かない。そこで1個ずつ自動的に果実の収穫や摘果を行ったり、防除等の作業を行う農業用ロボットの研究⁴⁾⁻¹¹⁾が国内外で始められている。その実現のためには、ロボットの感覚の中で最も大きな割合を占める視覚部の開発及び研究が急務となっており、本研究は主として、果実と茎葉等の識別ならびに果実の位置検出が可能な視覚センサの開発を目的とする。

この視覚センサのもつべき特徴としては、他産業とは異なり、農業用であるため次のようなことがあげられる。

(1)簡単で安価であること。

(2)小型で軽量であること。

(3)炎天下、風雨、あるいは砂塵等の自然環境にも耐えられ得る構造であること。

(4)果実は風の影響や収穫等の作業を行ったときの枝の動きで、位置を変えることがあるため、適当な範囲内の位置検出誤差を有することが許されること。

(5)特定の果実のみでなく、多種類の果実の認識が可能であること。

(6)植物体の特徴を利用した視覚センサであること。

(7)高速な認識が可能であること等。

これらの特徴をふまえて、果実と茎葉等の識別ならびに果実の位置検出について、実験ならびに計算機によるシミュレーションを行った。

1. 果実と茎葉等の識別

果実と茎葉等を識別するには、色あるいは分光反射特性の違いと形状の違い等を利用するのが有効と考えられ、既にその視覚センサについては種々報告⁵⁾⁷⁾⁸⁾¹¹⁾¹²⁾¹³⁾されている。1つの波長帯域の信号を利用する方法は、視

覚センサが簡単な構造となるものの、光源の影響を受けやすく、2値画像を作成する際、スレッシュホールドレベルの設定が難しい欠点をもつ。2つ以上の波長帯域の信号を利用すると、それらの欠点が解消でき、2値画像信号をDMA (Direct Memory Access) でコンピュータに入力すれば、画像入力、処理時間が短く、メモリ容量も小さくできる。また3つ以上の波長帯域の信号を利用し、各信号相互の構成比によって色を決定すれば、多段階の色を判別でき、色及び成熟度の異なる果実に対しても、ある程度の識別が可能であるという特徴をもつ。

そこで本研究では、まず色信号を市販のテレビカメラ、あるいは既成のフィルタ等を用いて、比較的簡単に3色に分解して取り出せる3色分解による方法によって、果実と茎葉等の識別実験を行った。しかしこの方法は比率の計算に時間を要したり、メモリ容量も大きい等の欠点があるため、次に3色分解用フィルタのうちの2つを用いて行う2色成分の比率による方法を検討した。この方法は、茎葉と色の異なる果実に対してはほぼ識別可能であり、有効な方法と思われるが、各種の果実と葉に対する出力信号の比率、各果実を茎葉等と識別するのに最も適した信号の組み合わせ等はまだ報告されていない。

上述された既成の信号を用いる方法は、近赤外領域に特徴のある植物体の分光反射特性を効果的に利用しているとは言えず、茎葉と同系統の色を呈する果実を識別するには適さない。そのため果実及び茎葉等について、可視領域から近赤外領域までの分光反射特性を測定し、果実と葉を識別するのに最適な1組の波長帯域を数種の果菜と果樹について求め、その波長帯域のみを透過するフィルタを使用して識別実験を行った。さらに選定された波長帯域の対が野外においても適当か否かを確認するために、2板式視覚センサを試作し、立毛中の果菜類に対して画像入力実験ならびに計算機によるシミュレーションを行い、検討を加えた。

2. 果実の位置検出

果実の3次元位置を求めるために、視覚センサを走行装置に取り付け、一定距離、走行装置の進行方向、あるいは鉛直方向に視覚センサを平行移動させて、ステレオ写真の方法により果実の3次元位置を得る報告⁵⁾⁷⁾が、既になされている。この方法はトマト等のようにほぼ平面内に生育する果実には有効であるものの、柑橘類のように大きな樹冠を形成する果実に対しては、視覚センサから果実までの距離が大きいと、果実を認識する画素数が小さくなり、正確な位置測定が困難となったり、風の影響、収穫後の枝の動き等による位置の変化に対処できない等の欠点がある。

そのため本研究では、視覚センサの画素数を有効に生かせる位置、すなわち果実を収穫する際に移動するマニピュレータの手先近くに視覚センサを装着し、マニピュレータの果実に接近する動きを利用したビジュアルフィードバック法と視覚センサの果樹方向移動による方法を考案した。

ビジュアルフィードバック法は果実までの概略の距離とマニピュレータの目標角度を果実ごとに求め、1個ずつ順にその目標角度にマニピュレータを制御して、果実認識画素数が設定値を超えるまで繰り返し画像入力を行ないながら目的の果実に接近する方法であり、果実までの距離は果実の平均径をもとにして算出する。視覚センサの果樹方向移動による方法は視覚センサを一定距離だけ果樹方向に移動させ、移動前後2回の入力画像の違いにより、幾何学的に果実の3次元位置を知る方法である。これらの方法は単独で用いるのではなく、組み合わせれば有効に位置検出ができると考えられたため、両方法の特徴を実験ならびに計算機によるシミュレーションで検討した上で、それぞれの特徴を生かせる組み合わせ方を検討し、実験によって考察を加えた。

第2節 本研究及び本論文の構成

本研究は大きく分けると次の2つの部分から構成されている。

- (1)果実と茎葉等の識別（第2章，第3章，第4章，第5章）
- (2)果実の位置検出法（第6章，第7章，第8章）

まず第2章では3板式視覚センサを試作し、3色分解を利用した識別実験を行い、3色成分相互の比率によって果実と葉の識別の可能性を検討した。

第3章では試作した視覚センサと3色分解用フィルタのうちの2枚を用いて、赤(R)、緑(G)、青(B)の信号の中から2色の各成分比($R / (R + G)$), $G / (G + B)$), $B / (B + R)$)を求め、各果実に対して適当な組み合わせを明らかにした。

第4章では各果実と葉を対象として分光反射特性を測定し、果実と葉を識別するための最適波長帯域を計算機で計算した。さらにその波長帯域の干渉フィルタと視覚センサを用いて果実と葉の識別実験を行い、3色分解用フィルタを使用したときの実験結果と比較することによって、選定された波長帯域の有効性を確認した。

第5章では選定された最適波長帯域が野外においても適当か否かを調べるために、2板式視覚センサを試作し、立毛中の果菜類に対して画像入力実験を行った。さらに種々の条件が変化したときの識別の容易さを求めるため、計算機によるシミュレーションを行い、場合に依じて他の帯域フィルタと使い分けるのが適当であることを示した。

第6章では関節型マニピュレータを用いて、ビジュアルフィードバック法による位置検出実験ならびにシミュレーションを行い、その特徴を明らかにした。

第7章では視覚センサの果樹方向移動による方法によって、シミュレーションならびに直動型アームを用いた位置検出実験を行い、その特徴を明らかにした。

第8章では両方法の特徴を生かせる組み合わせ方を、シミュレーションで検討し、直動型アームを用いた位置検出実験によって考察を加えた。

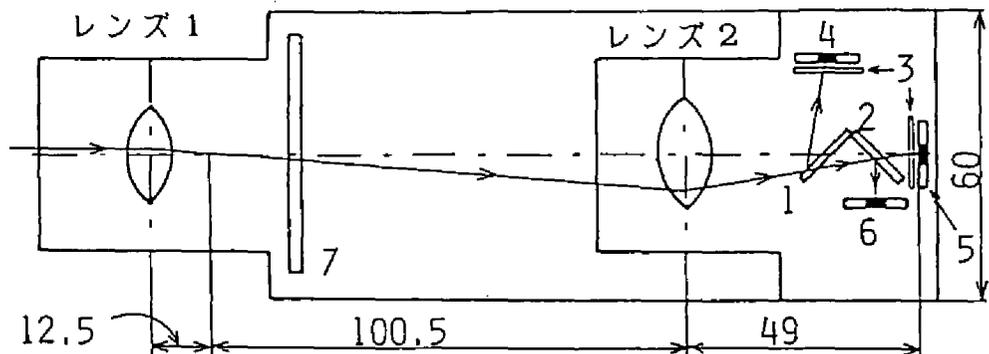
第2章 3色分解を利用した果実と茎葉等の識別¹⁴⁾

果実と茎葉等を識別するには、色または分光反射特性の違いと形状の違い等を利用するのが有効と考えられる。そこで本章では、市販のカラーテレビカメラから、あるいは既成のフィルタ等を用いて、R、G、B信号を比較的に簡単に取り出せる3色分解による方法¹⁵⁾によって、果実と葉の画像入力実験を行い、マイクロコンピュータで3色成分相互の比率を計算することにより、各果実と葉の色を決定した。

第1節 実験装置及び方法

1. 3板式視覚センサ

図2-1に試作した視覚センサの光学系を示す。視覚センサから対象物までの距離は、視覚センサを取り付けたマニピュレータの動作によって変化するため、市販の焦点距離10 mm程度のレンズでは焦点を合わす必要がある。ま



レンズ1	$f_1 = 12.5$ mm	1: 赤反射ダイクロイックミラー
	$F1 = 1.4$	2: 青反射ダイクロイックミラー
		3: NDフィルタ (20%)
レンズ2	$f_2 = 25$ mm	4~6: イメージセンサ
	$F2 = 1.4$	7: フィルタ

図2-1 3板式視覚センサの光学系

た、レンズからイメージセンサまでの間に、ミラー類を入れるスペースが取れないという理由から、今回の装置には焦点距離12.5 mm、F値1.4と焦点距離25mm、F値 1.4のレンズを組み合わせて使用した。まずレンズ1から入ってきた光は、その焦点の近くで第1の像を結ぶ。この像は視覚センサから対象物までの距離が、10~100 cm変化しても1.6 mmの移動にとどまり、レンズ2を通過してイメージセンサ上にできる第2の像は、ほぼ焦点を合わせる必要がなくなる。レンズ2を通過した光は、1のダイクロイックミラーで赤成分をイメージセンサ4に反射し、2のダイクロイックミラーで青成分をイメージセンサ6に反射し、2つのミラーを透過した緑成分はイメージセンサ5に結像する。イメージセンサ4と5の前には、各イメージセンサの出力のバランスをとるため、20 %のND (Neutral Density) フィルタを入れ、レンズ1と2の間にも絞りを補助するためのNDフィルタと赤外線成分をカットするフィルタを入れた。

試作した視覚センサはマニピュレータに装着することを考え、なるべく軽量かつ小型化を計り、カメラの骨組には厚さ2 mmのアルミ板を用い、イメージセンサの駆動回路（クロック発生回路、ドライバおよび増幅部）を視覚センサと切り離した。視覚センサの全長は225 mm、全幅は106 mm、全高は76 mm、質量は880 gであった。

2. ダイクロイックミラーの透過率及びイメージセンサの相対感度

本実験で使用したイメージセンサの相対感度¹⁶⁾を図2-2に示す。イメージセンサにはMOS型で、64×64の画素数及び4.1×4.1 mm²のセンサ受光面をもち、波長800 nmにピークのある感度を有している。このMOS型のイメージセンサはCCD型に比べ、青色の感度がよく、ブルーミングがなく、駆動条件が容易であるという特徴をもっている¹⁷⁾。

図2-3には本実験で使用したダイクロイックミラーの透過率を示す。さらにすべてのミラー及びフィルタを通した時の各イメージセンサの相対感度を図2-4に示す。イメージセンサ6は450~530 nm、イメージセンサ5は

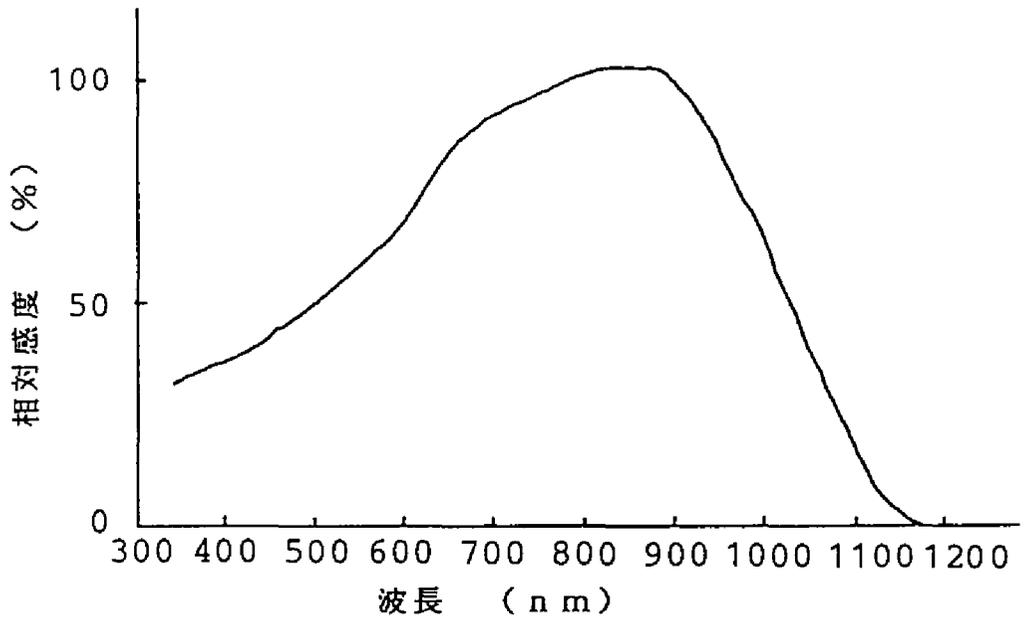


図2-2 イメージセンサの相対感度

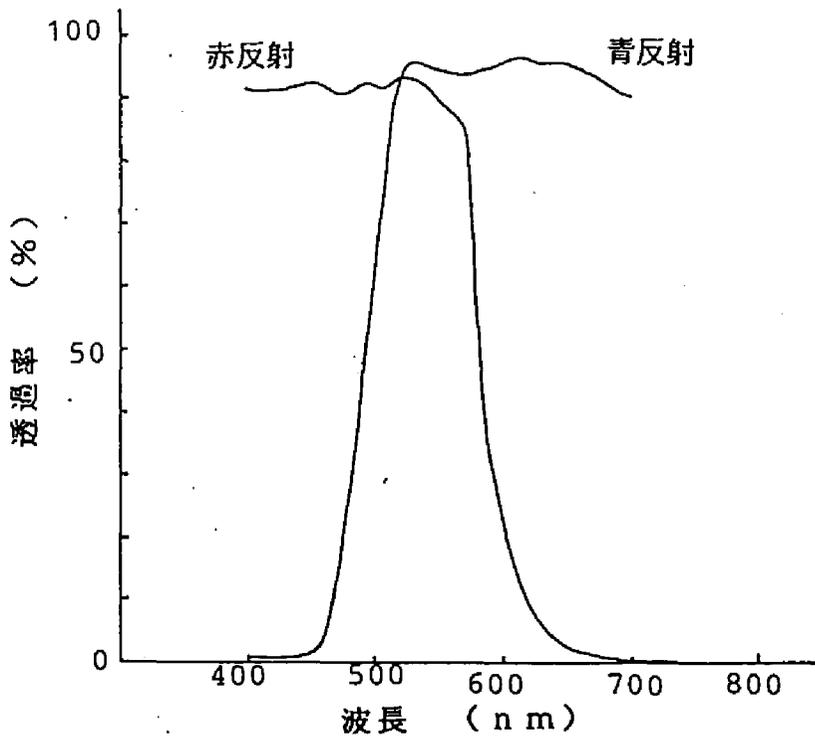


図2-3 ダイクロイックミラーの透過率

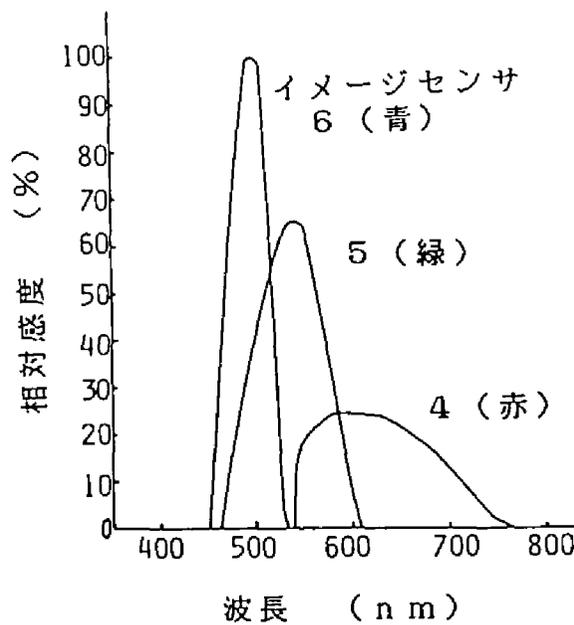


図2-4 各イメージセンサの相対感度

470~610 nm, イメージセンサ4は540~750 nmといずれもほぼ可視領域に感度をもっている。

3. インターフェイス回路

図2-5にマイクロコンピュータとのインターフェイス回路のブロック図を示す。クロック発生回路から送られるクロックを, MOSドライバでTTLレベルからMOSレベルに変換した後, イメージセンサに入力して駆動させる。イメージセンサの光入力の強さに応じた出力のうち, ノイズ成分を差動増幅回路で除いた結果, 図2-5中に示すビデオ出力を得る。この出力をピークホールド回路を通して方形波にした後, 8ビットにAD変換して, 赤, 緑, 青成分共マイクロコンピュータに入力した。また, 結果を出力するためプリンタを接続した。

本実験ではマイクロコンピュータの演算速度, メモリ容量などを考慮し,

64×64画素のうち、1つおきに32×32画素分の信号を入力し、その周期を130 μsとした。

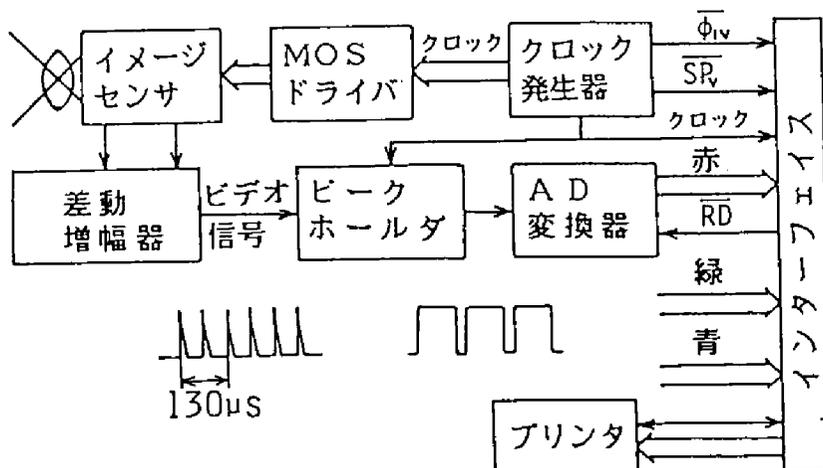


図2-5 インターフェイス回路のブロック図

4. 制御方法

図2-6には本実験で使用したメインプログラムのフローチャートを示す。インターフェイスアダプタを初期化した後、1画素ずつ赤、緑、青の順にA/D変換し、32×32画素分メモリにその値をストアする。次に、緑成分はミラーで反射されず、赤及び青成分とは左右逆に結像しているため緑成分のメモリの調整を行う。その後、赤(R)、緑(G)、青(B)それぞれに対応する画素のA/D変換値の和($S = R + G + B$)とそれらの比率($R' = R/S$, $G' = G/S$, $B' = B/S$)を計算し、再びストアする。これら R' , G' , B' 相互の比率によって1画素ずつ色を決定することにより、果実のように球状で多少照度の異なる部分があっても、ほぼ同じ色と判断される。本実験では青から赤までを11段階に分け、図2-7のフローチャートに示す様に5~Fで表示した。まずSが設定値\$30 (\$は16進数を表す)より小さければイ

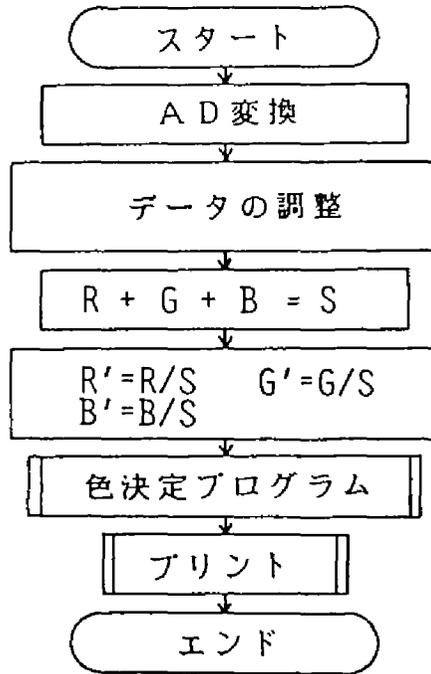


図2-6 メインプログラムのフローチャート

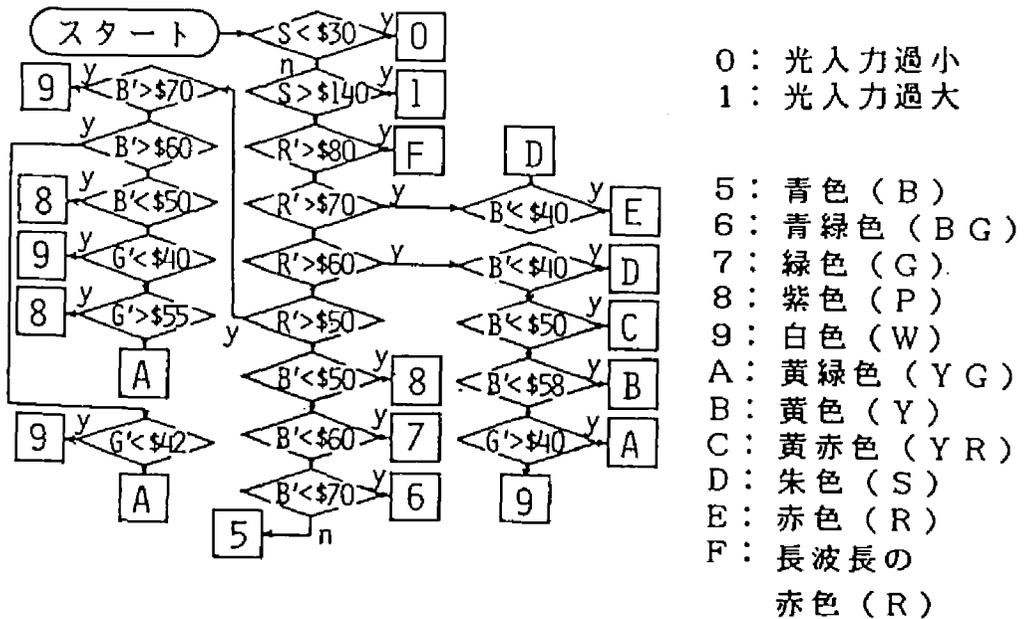


図2-7 色決定プログラムのフローチャート

メージセンサへの光入力が過小で、\$140より大きければ光入力が過大で適当な比率が得られないため、それぞれ0, 1 を与えた。適当な光入力の時、 R' が\$80より大きければF, R' が\$70より大きく B' が\$40より小さければE, B' が\$40以上ならD, 以下同様にして色に対応する数字(16進数)を与えた。この数字は色紙による予備実験で、 R' , G' , B' 相互の比率から決めたもので、B~Fのうち長波長の色程、大きな数字が対応するよう与えている。そして32×32画素色が決定し終われば、結果をプリントした。

マイクロコンピュータは8ビット並列処理型で、MC6800相当CPUのものを使用したところ、プログラム容量は機械語で2 kバイト、メモリ容量は6 kバイトであった。

5. 実験方法

被識別対象物としては色、形共に異なるトマト6種類、ハッサク、イヨカン、温州ミカン及びレモンの果実ならびにトマト、イヨカン及び温州ミカンの葉を用いた。対象物の照度をほぼ一定にするため、図2-8に示されるエネルギー分布を有する色温度5500 Kの光源を左右と上方向から当て、レンズの

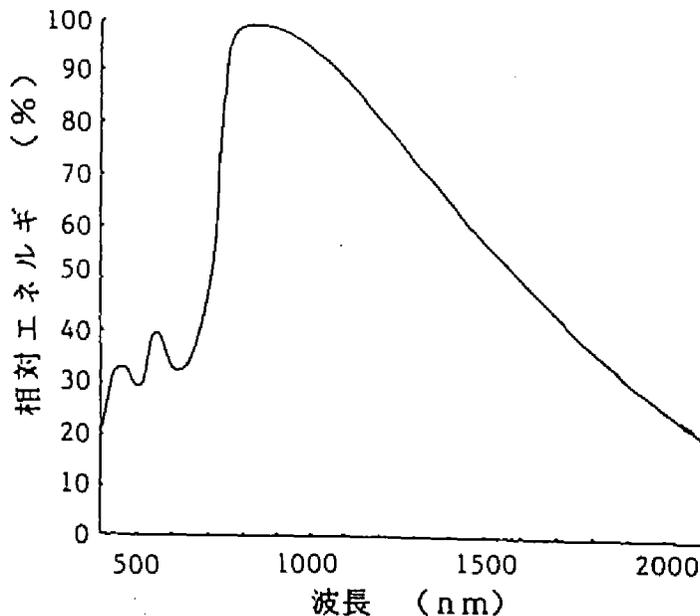


図2-8 光源の分光エネルギー分布

F 値及び視覚センサから対象物までの距離を変えて画像入力実験を行った。

なお、トマトの果実は未熟なものから順にNo.1～No.6まで番号をつけて区別した。

第2節 実験結果及び考察

図2-9にイヨカンの果実とその葉のプリントアウトされた結果を示す。この時のF値は両レンズ共1.4，照度5000 lx，視覚センサから対象物までの距離は30 cm，果実の径は80 mmであった。視覚センサの画角は55°で32×32個の画素で示される範囲が視野であるが，わかりやすくするため四隅以外はBより小さい数字は表していない。イヨカンは主にC～Eの数字で表されており，葉の部分にもC及びDなどの箇所が見られるが，これらは単発的で果実のようには連続して現われないことがわかる。また32×32画素しか使用していないにもかかわらず，画像入力してから，色を決定するまでにかかなりの時間を必要とした。これは各色成分の比率を求めるのに割り算を行ったためで，画素数をさらに増やした場合，この比率の計算を迅速に行う必要があると考えられた。

図2-10はレンズ1のF値1.4，レンズ2のF値2，照度6000 lxのときのトマトの果実の実験結果を示す。横軸には色と対応した数字を，縦軸には画素数の割合を百分率でとっている。この図より熟しているトマトほど右の方に分布しており，No.3より熟したトマトはほぼBより大きな数字の割合が大きいことがわかる。

図2-11は同じ条件でのかんきつ類の実験結果を示す。4種類の果実共，目盛りCを頂点としたあまり差のない分布となっているが，これはイメージセンサの奇数ビットと偶数ビットの出力にばらつきが生じ，偶数ビットの大部分がCを示したためである。この原因としては，イメージセンサと駆動回路を切り離して製作したことが考えられる。これらの結果より，かんきつ類とトマトあるいはトマトの熟度によって分布に差がみられたため，果実と葉の識別だけでなく，多種類の果実の識別の可能性があったことがわかった。ま

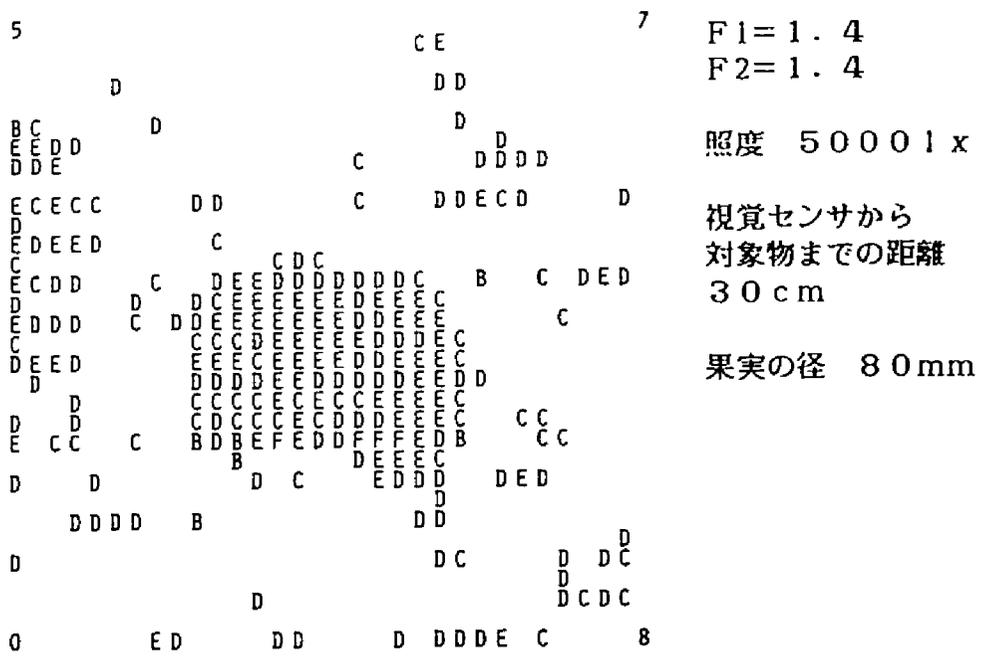


図2-9 プリントアウトされた結果

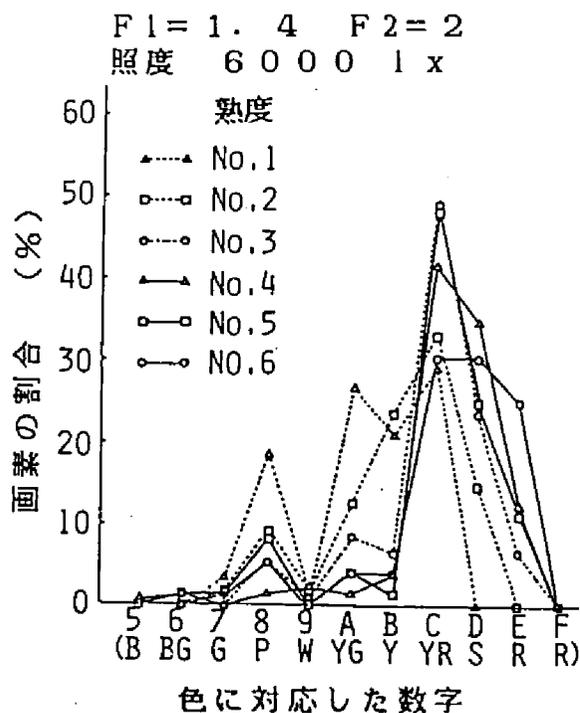


図2-10 トマトの果実の実験結果

F1=1.4 F2=2
照度 6000 lx

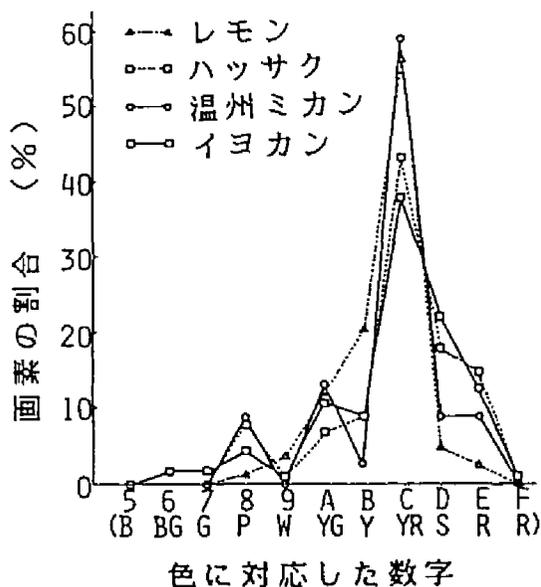


図2-11 かんきつ類の果実の実験結果

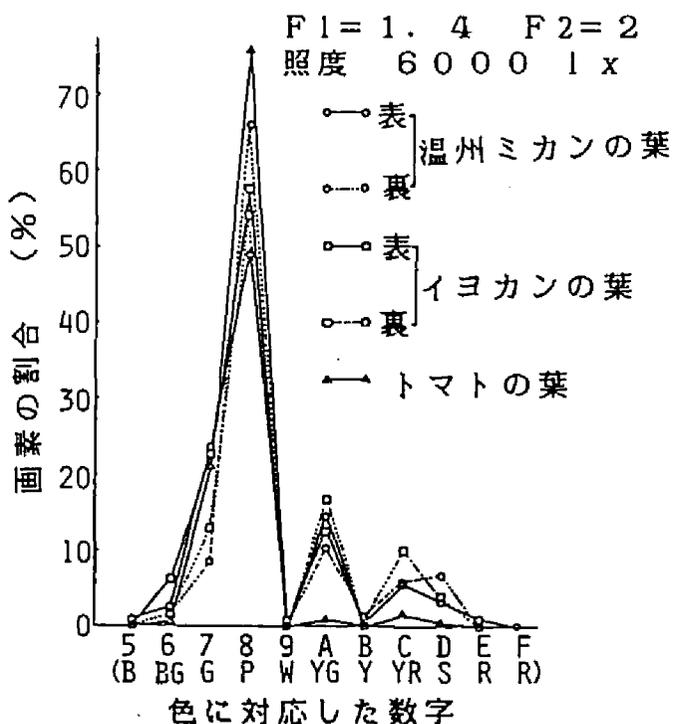


図2-12 葉の実験結果

たこれらの果実の色は、イメージセンサへの光入力が小さくなると右の方へ分布が移動し、逆に光入力が大きくなると目盛り9の白色に近づく傾向があった。この理由としては、本実験で使用したイメージセンサの光入力に対する出力が、完全に直線にならないことがあげられる。

同じ条件での葉の実験結果を図2-12に示す。目盛り8を中心とした分布となっており、表裏、また種類によっても有意な差はみられない。色紙で決定した緑色に対応する数字7の割合が小さいのは、試作した視覚センサが近赤外領域にも感度を若干有していたため、その領域において、予備実験で用いた緑色の色紙と、クロロフィルを有する葉とでは分光反射特性が異なるためと考えられた。

これらの実験結果より、Bをしきい値としてそれより大きい数字が果実の色を示していると見なせば、その色と形とで果実を認識することは可能と思われる。

第3節 摘要

果実と茎葉等の識別を目的として、3板式視覚センサを試作し、入力画像を3色分解し、各果実と葉の色を決定した。その結果、次のことが明らかになった。

- (1) ある色をしきい値として果実と葉の識別を行えば、その色と形で果実を認識できると考えられた。
- (2) かんきつ類とトマトあるいはトマトの熟度によって分布に差がみられたため、果実と葉の識別だけでなく、多種類の果実の識別の可能性があることがわかった。
- (3) 3色分解の方法では色をソフトウェアのアルゴリズムで決定すると、時間がかかり、メモリ容量も大きくなるという欠点があった。
- (4) 近赤外領域において、予備実験で用いた緑色の色紙とクロロフィルを有する葉とでは、分光反射特性が異なると考えられた。

第3章 2色成分を利用した果実と茎葉等の識別^{1,8)}

果実と茎葉等を識別するために、前章ではR, G, B信号の相互の構成比によって色を決定する方法を示したが、その方法は色及び成熟度の異なる果実に対してもある程度の識別が可能であるものの、色を決定するまでの時間を必要とし、メモリ容量もかなり必要であるという欠点があった。文献⁵⁾によれば、それらの欠点をなくすため、葉と色の異なる果実はRとY等の2つの信号をコンパレータで比較し、DMAで2値画像をコンピュータに入力する方法で、茎葉と識別が可能であるという結果が得られており、有効な方法と思われるが、各果実と葉に対する最適な出力信号の組み合わせは報告されていない。

そこで本章は、3色分解用フィルタ、エリア型イメージセンサ及びテレビカメラ用レンズ等を用いて視覚センサを試作し、各種果実と葉を対象物として、3色分解用フィルタのうちの2色の各成分比の分布を明らかにし、種々の色を呈する果実それぞれに、適当な2枚のフィルタの組み合わせを求める目的で、果実と葉の識別実験を行った。

第1節 実験装置及び方法

1. 視覚センサ

図3-1に実験のブロック図を示す。色温度5500 Kの光源からの光は被識別対象物によって反射され、光学フィルタ及びレンズを透過し、駆動回路により駆動されているイメージセンサに入力される。その光入力の強さに応じて発生するイメージセンサからの出力のうち、ノイズ成分を差動増幅回路で除いてビデオ出力を得る。この出力をピークホルダ回路を通して方形波にした後、AD変換回路で8ビットのデジタル値に変換し、パーソナルコンピュータに入力した。このようにしてR, G, B各フィルタを透過させた時のデータをフロッピィディスクでストアし、後にRとG, GとB, BとRの組み合わせでデータをディスクから読みだし、その2色の各成分の比率を1

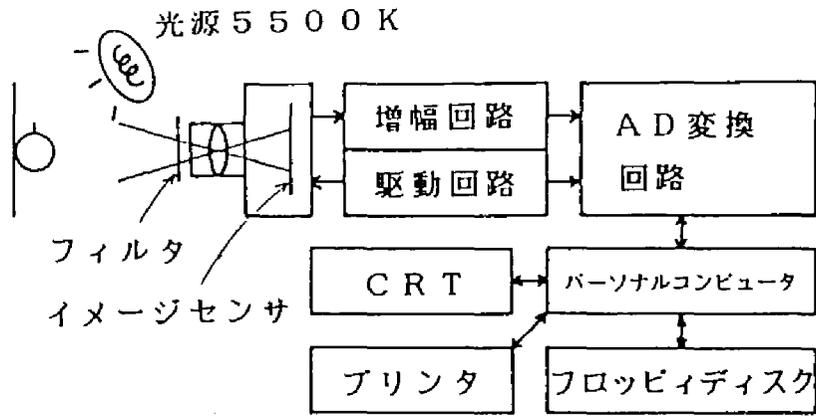


図3-1 実験のブロック図

画素ずつ計算して、比率に対応する文字をプリンタで記録した。

試作した視覚センサはテレビカメラ用レンズ、イメージセンサ及びフレームから構成されている。この装置はイメージセンサの感度のばらつきを除去するため、1個のイメージセンサを用い、駆動回路及び増幅回路は視覚センサを小型化するため、イメージセンサから切り離した。フィルタは数種取り替えられるよう、レンズの前方にレンズと接するように固定した。レンズには焦点距離8.5 mm、F値1.5でCマウントのものを、イメージセンサには前章のものと同じものを用いた。フレームはアルミアングル及びアルミ板を使用して製作したところ、視覚センサの全長は104 mm、全幅は60 mm、全高は104 mmとなり、視野角は約38°であった。なお本実験でもパーソナルコンピュータの演算速度、メモリの容量等を考慮してイメージセンサの画素数64×64のうち32×32を使用し、走査速度は約15 kHz/bitとした。

2. 光学フィルタ及びレンズの透過率

図3-2に本実験で使用した3色分解用フィルタの相対透過率及びレンズの透過率を示す。R及びBフィルタは色ガラスフィルタと、NDフィルタを数枚組み合わせ、Gフィルタは色ガラスフィルタ、NDフィルタ及びダイクロミックフィルタを組み合わせで製作した。Bフィルタは400~540 nm, Gフィルタは480~600 nm, Rフィルタは580~740 nmの波長の光を、それぞれ透過する。レンズは点線で示されているように360 nm付近より長波長の光を透過し、450 nm付近にピークのある透過率を有する。これらの透過率は自記分光光度計を用いて測定した。

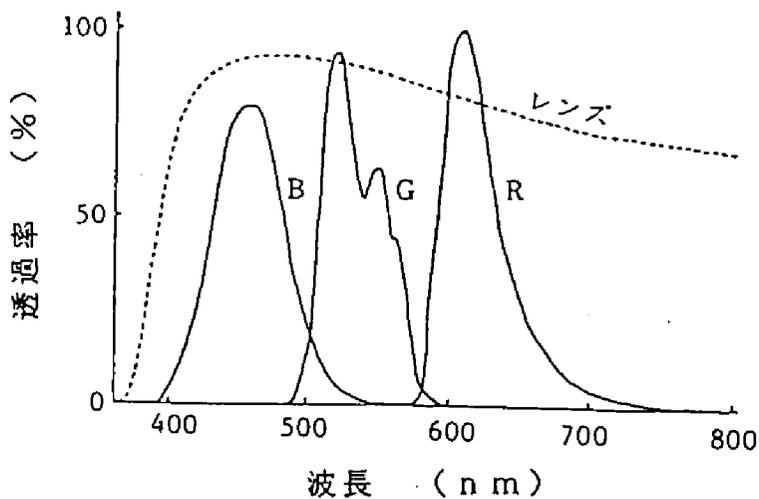


図3-2 R, G, Bフィルタ及びレンズの透過率

3. 制御方法

図3-3に、2色の各成分比に対応する数字を与えるフローチャートを示す。ここでD1とD2は、それぞれフィルタ1と2を通した時の各画素のAD変換値を示す。まずフロッピィディスクにストアされている2色の対応

するデータの値の和が、16進数で\$30以上であれば光入力が過小で、どちらかの値が\$A0以上であれば光入力が過大で、いずれの場合も適当な比率が得難いため、それぞれ一と*の文字を与える。そうでなければ比率Rを(3-1)式で計算し、その百分率が16進数で\$F0以上であればF、\$E0以上であればEというように、10の位の値のみを考える。これを1画素ごとに繰り返して行ない、全画素終われば終了した。

$$R = D1 / (D1 + D2) \quad (3-1)$$

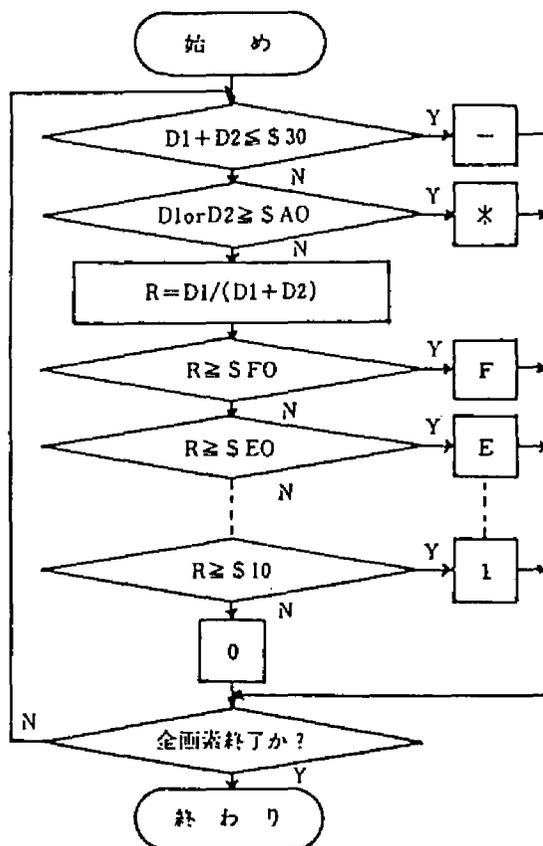


図3-3 比率に対応する数字を与えるフローチャート

4. 実験方法

本実験では被識別対象物として、トマト、ナス、キュウリ、ピーマン、温州ミカン及びカキの果実をそれぞれ数種類とその葉を、圃場で採取した直後に用い、色温度5500 Kの光源を対象物の左右から当て、フィルタを交換する間は照度及び視覚センサから対象物までの距離を一定とし、レンズの絞りを数段階変えて室内で実験を行った。

図3-4に実験に使用したトマトの果実と葉を示す。品種はF1サタンで岡山大学の温室で栽培されたものである。10月17日、10月19日及び11月8日に開花したものを12月13日に採取した。10月17日開花の果実は完熟していたが、11月8日開花の果実は赤みが見られず未熟であった。

図3-5にはナスの果実と葉を示す。品種は長岡長ナスで食用に適する未熟な黒紫色のものから、過熟で黄褐色に近いものまでを選んで用いた。開花日が9月28日及び10月11日のものは露地で、10月22日のものは温室で栽培されたもので、いずれも11月22日に採取した。

図3-6にはキュウリの果実と葉を示す。品種は青力節成5号で温室で栽培され、11月9日、11月12日及び11月17日に開花し、12月3日に採取された。11月9日開花の果実は若干採取時期が遅く、多少大きく成長し過ぎており、11月17日開花の果実は果頂部がかなり黄緑がかった。

図3-7にはピーマンの果実と葉を示す。品種は京緑で食用に適する未熟なものから赤く熟したものを用いた。温室で栽培され、開花日は9月17日、10月7日及び10月24日で、11月25日に採取された。

図3-8(a), (b)には12月12日ならびに11月8日に岡山市内の岡山県経済連の農場で採取した温州ミカン(品種:南柑20号)を、図3-9には11月8日に同農場で採取したカキ(品種:富有)を示す。12月13日に採取した温州ミカン、11月8日に採取したカキは熟していたが、11月8日に採取した温州ミカンは多少緑色に近い箇所が残っていた。

以上6品種、15個の果実と葉を用いた。



図3-4 トマト



図3-5 ナス



図3-6 キュウリ

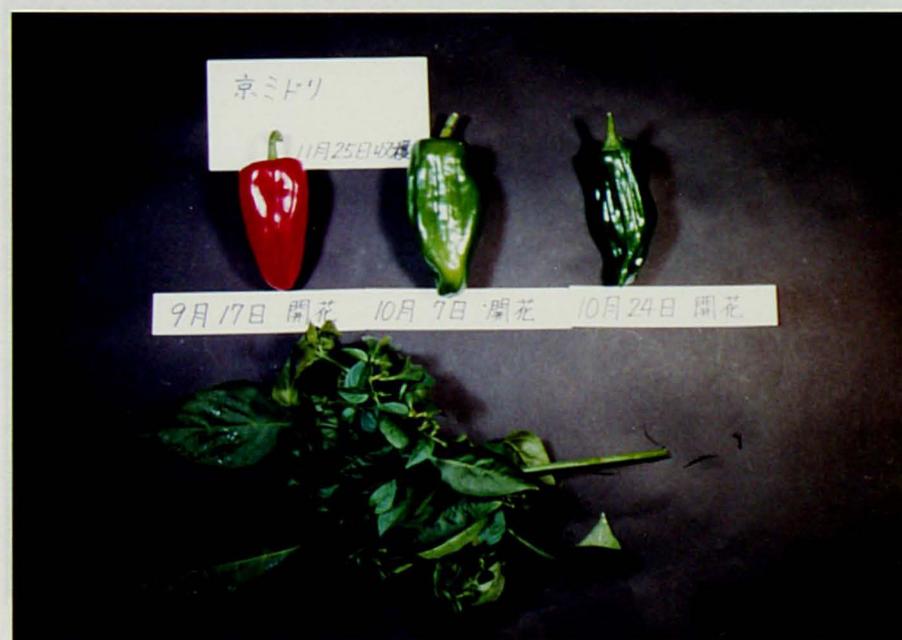


図3-7 ピーマン



(a) 12月13日採取



(b) 11月8日採取

図3-8 温州ミカン



図3-9 カキ

第2節 実験結果及び考察

1. トマト

図3-10に3つのフィルタの組み合わせのうち、最もよく識別できたR及びGフィルタを用いた時のトマトの実験結果を示す。横軸には比率に対応した数字を、縦軸には画素の割合を百分率でとっている。この時の照度は4000 lx, F値は2, 視覚センサから対象物までの距離は30 cmであった。これより果実は赤く熟したもののほど右に分布が位置し、10月17日開花の果実は葉の表、裏とよく識別できるのがわかるが、10月19日開花の果実は多少葉の表と分布が重なり、11月8日開花の果実は葉の裏と分布のピークが一致した。これはR及びGフィルタがほぼ可視領域内の光線のみを透過するため、同系統の色を呈する葉と未熟な果実とは識別が困難になったと考えられる。また葉の表と裏の分布のピークに差が見られるのは、葉の裏の方が緑色を示す波長帯域において反射率が高く、 $R / (R + G)$ の比率が葉の表よりも小さく

なったためと思われる。

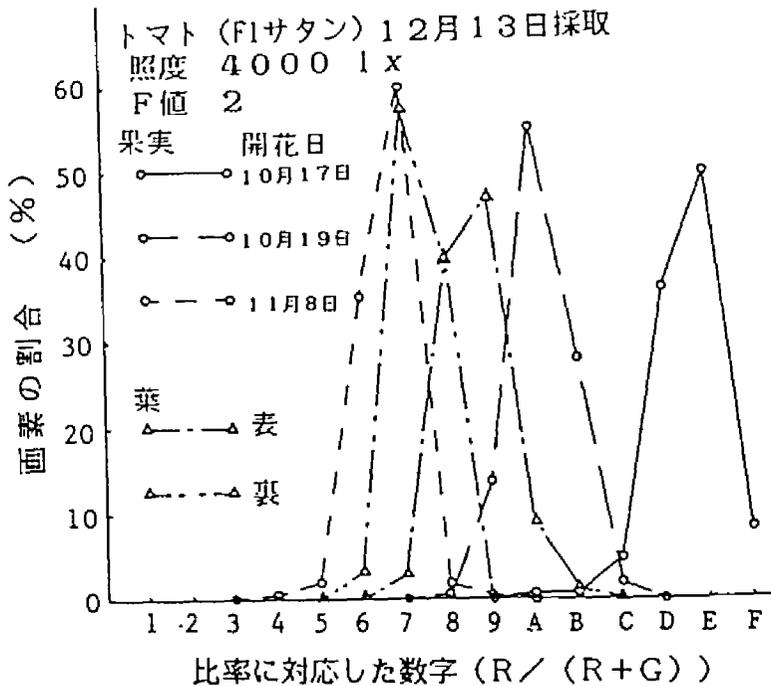


図3-10 トマトの実験結果

R及びBフィルタを用いた時もこの結果とほぼ同様に熟した果実は葉とよく識別できたが、B及びGフィルタを用いて横軸にG / (G + B)の比率に対応した文字をとると、熟した果実は葉の左側に、未熟な果実は葉の右側に分布が接近して位置し、果実と葉を識別するには適さないことが判明した。

2. ナス

図3-11に、R及びGフィルタを用いた時のナスの実験結果を示す。葉はトマトと同様にほぼ目盛り7及び8に分布し、果実は可視領域では反射率が低いため、ほぼ目盛りA～Eに広く分布している。果実に見られる7～9の数字は、光源の光が果実表面で鏡面的な反射をしているところに集中しており、これらを除いた場所ではいずれの果実も葉と識別可能であった。

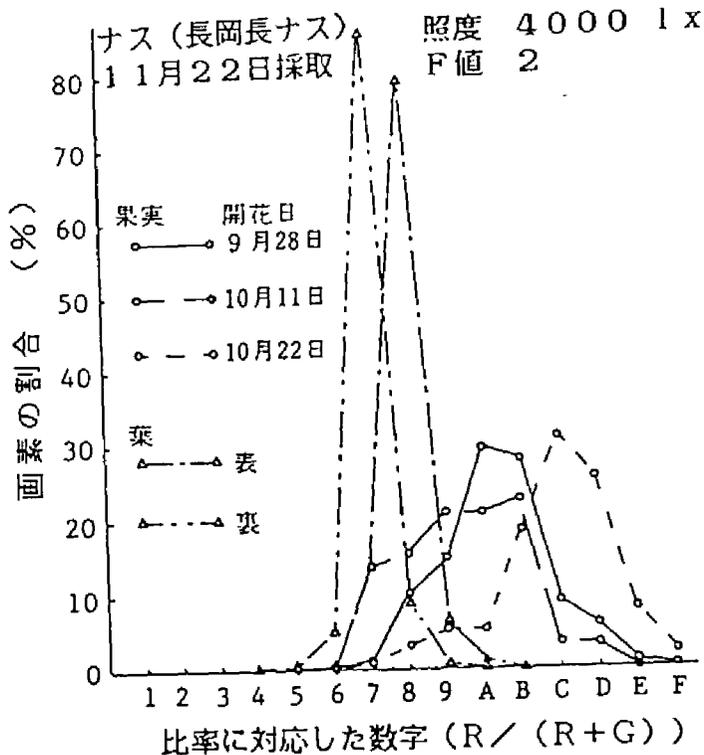


図3-11 ナスの実験結果

B及びGフィルタを用いても識別は可能であったが、R及びBフィルタでは果実と葉の分布が重なり識別は困難であった。これはナスの果実と葉の反射率の差が、緑色を示す波長帯域において大きいからであると考えられた。

3. キュウリ

図3-12にR及びGフィルタを用いた時のキュウリの実験結果を示す。図3-6に示されるように、食用に適する果実は葉と、特に葉の表と同様の色を呈しているため、果実と葉の分布に差はあまり見られない。11月9日及び11月12日開花の果実の分布のピークが葉の分布より多少右にずれているのは、果実の反射率がGフィルタの透過する領域内で葉よりも低く、Rフィルタが若干透過する近赤外領域において葉よりも高いからと考えられる。11月

17日開花の果実は果頂部が黄緑がかっており、Gフィルタの透過する領域内で反射率が他の果実より高かったため、他の果実と分布のピークがずれたものと思われる。R及びBフィルタ、B及びGフィルタを用いた時はこの結果よりさらに果実と葉の分布は重なり、いずれのフィルタの組でも識別は困難であった。

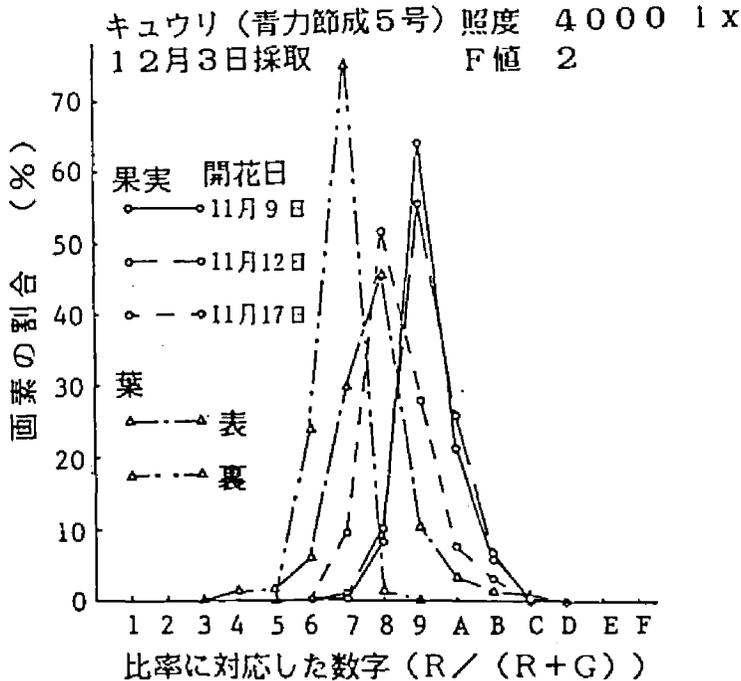


図3-12 キュウリの実験結果

4. ビーマン

図3-13に、R及びBフィルタを用いた時のビーマンの実験結果を示す。赤く熟した9月17日開花の果実においてはR及びGフィルタ、R及びBフィルタで識別が可能であったが、食用に適する緑色の10月17日及び10月24日開花の果実はキュウリと同様に果実と葉の分布は重なり、3色分解用フィルタでは識別困難であった。

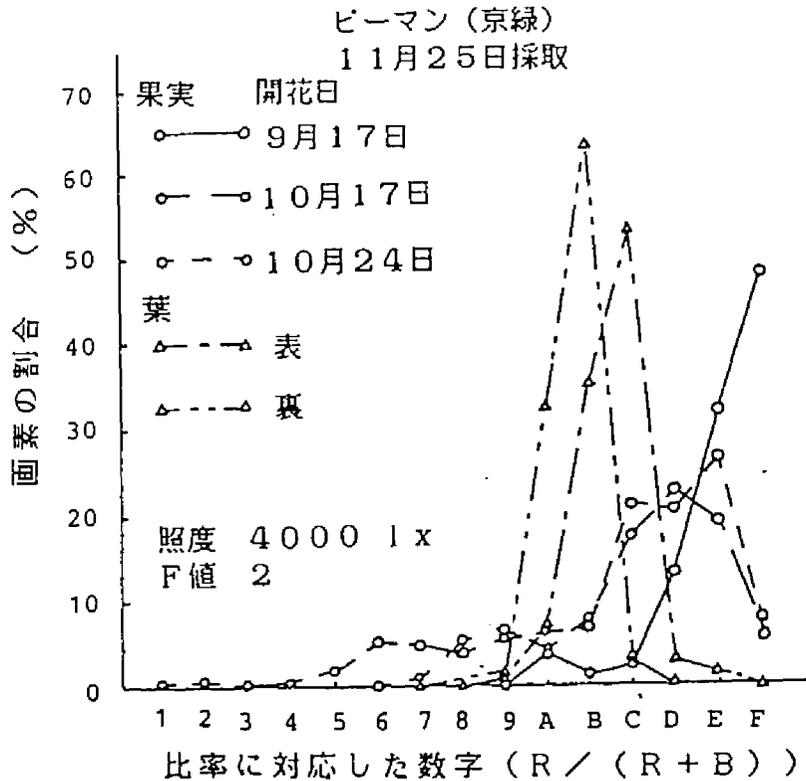


図3-13 ピーマンの実験結果

5. ミカン

図3-14に3つのフィルタの組合わせの中で最もよく識別できたR及びBフィルタを用い、照度3000~4000 lxの時の温州ミカンの実験結果を示す。全体的に右の方に分布が位置しているのはRフィルタが透過する領域の方がBフィルタが透過する領域に比べてイメージセンサの感度が高く、果実と葉の反射率も高いためである。これより12月13日に採取された熟した果実はほぼ目盛りFに分布が集中し、目盛りA~Dに分布している葉とは識別可能であった。また11月8日に採取された多少緑色の部分の残る果実は、若干葉と分布が重なっているのがわかる。R及びGフィルタ、G及びBフィルタを用いても熟した果実はほぼ識別が可能であった。

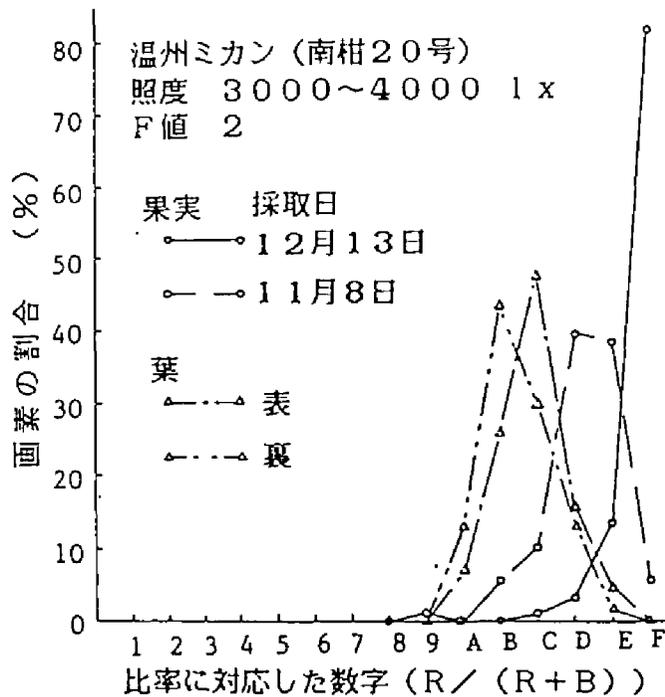


図3-14 温州ミカンの実験結果

6. カキ

図3-15に3つのフィルタの組合わせの中で、最もよく識別できたR及びBフィルタを用いたときのカキの実験結果を示す。これより熟した温州ミカンとほぼ同様な結果が得られ、R及びGフィルタを用いた時にも果実と葉の識別は可能であった。

以上の実験結果はすべてF値が2の時のものであるが、F値を前後1段階ずつずらしてもほぼ同様の結果が得られた。これらの実験結果より果実と葉を識別する場合、トマトのように赤系統の色を呈する果実にはR及びGフィルタを、温州ミカンのように黄系統の色の果実にはR及びBフィルタを、ナスのように黒紫色を示す果実にはR及びGフィルタあるいはG及びBフィルタを使用するのが有効であると考えられた。また赤系統の色の果実に対してはR及びBフィルタを、黄系統の色の果実に対してはR及びGフィルタを使用してもかなり良く葉と識別できた。このように赤系統と黄系統の色の果実

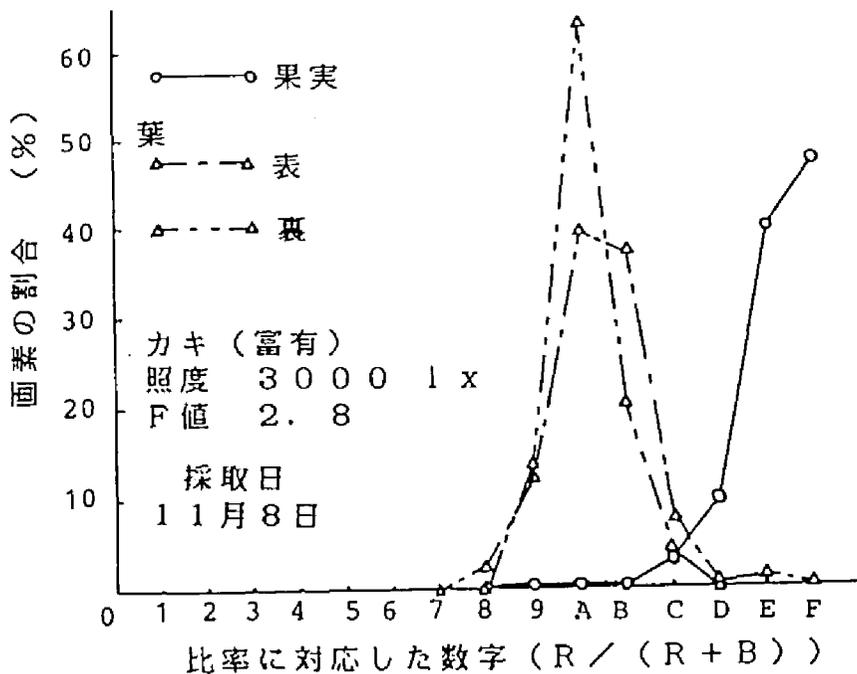


図3-15 カキの実験結果

において、フィルタの組み合わせに若干の差が見られた理由は、赤色がRフィルタの透過する領域のみにおいて光を反射するのに対し、黄色はR及びG両フィルタの透過する領域において光を反射するからであると思われる。以上のような葉と色の異なる果実の識別には3色分解用フィルタは有効であるが、それらが可視領域内の光線しか透過しないため、葉と同系統の色の果実を収穫するキュウリ、ピーマン、さらには未熟なトマト、温州ミカン等に対しては識別が困難であった。

第3節 摘要

3色分解用フィルタ、エリア型イメージセンサ及びテレビカメラ用レンズ等を用いて視覚センサを試作し、6品種の果実とその葉を対象物として室内で識別実験を行った。その結果より、3色分解用フィルタのうちの2色の成分比の分布を明らかにし、種々の色を呈する果実に対して、それぞれ適した

2色のフィルタの組み合わせを求め、次の結論を得た。

(1) 赤系統の果実に対してはR及びGフィルタ，黄系統の果実に対してはR及びBフィルタ，黒紫色の果実に対してはR及びGフィルタ，あるいはG及びBフィルタを使用するのが有効である。

(2) 葉と色の異なる果実に対しては3色分解用フィルタでよく識別できるが，緑色を呈する果実に対しては識別は困難である。

第4章 最適波長帯域を利用した果実と茎葉等の識別¹⁹⁾²⁰⁾

前章までの果実と茎葉等を識別する視覚センサは、市販のビデオカメラから得られる既成の信号や既成の3色分解用フィルタを使用できるという利点をもつが、画像入力してから色の判断を行うのに時間を必要とし、葉と同系統の色を呈する果実を識別するのに適さない欠点をもつ。

そこで本章では、視覚センサが感度を有する可視領域から近赤外領域の間で、果実と葉を識別するのに最適な1組の波長帯域を利用することを考えた。まず各果実と葉の分光反射特性を測定し、その最適波長帯域を計算機で求めた。さらにその波長帯域のみを透過する干渉フィルタを使用した識別実験を行い、前章の実験結果と比較することによって、選定された波長帯域の有効性を確認した。

第1節 最適波長帯域の計算方法

1. 評価関数

本章でも前章と同様に2枚のフィルタで識別することを考え、フィルタ1, 2を通したときの果実と葉に対するセンサの出力を(4-1), (4-2)式で求めた。

$$F_i = \sum E_\lambda \cdot R_{f\lambda} \cdot T_{i\lambda} \cdot L_\lambda \cdot S_\lambda \cdot \Delta \lambda \quad (i=1,2) \quad (4-1)$$

$$L_i = \sum E_\lambda \cdot R_{l\lambda} \cdot T_{i\lambda} \cdot L_\lambda \cdot S_\lambda \cdot \Delta \lambda \quad (i=1,2) \quad (4-2)$$

F_i : フィルタ*i*を通したときの果実に対するセンサの出力

L_i : フィルタ*i*を通したときの葉に対するセンサの出力

E_λ : 波長*λ*における光源の放射スペクトル

$R_{f\lambda}$: 波長*λ*における果実の反射率

$R_{l\lambda}$: 波長*λ*における葉の反射率

$T_{i\lambda}$: 波長*λ*におけるフィルタ*i*の透過率

L_{λ} :波長 λ におけるレンズの透過率

S_{λ} :波長 λ におけるイメージセンサの相対感度

図4-1に各要素の比率を模式的に示す。果実と葉の識別の評価関数としては(4-3)式を用いた。

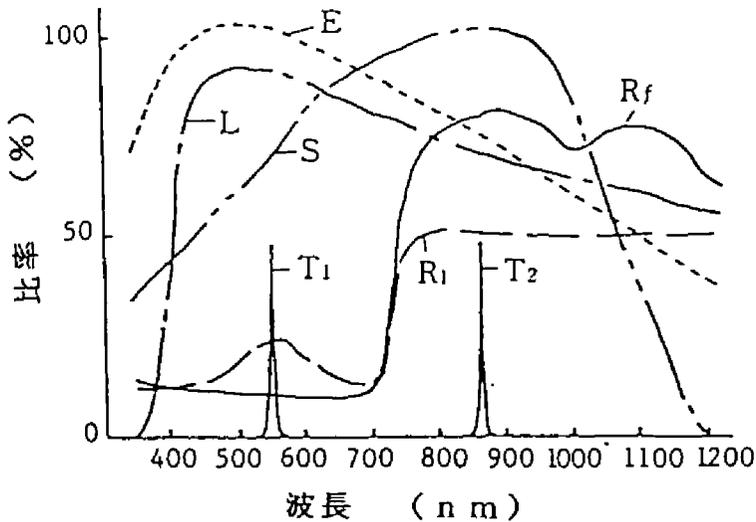


図4-1 各要素の比率

$$D = \frac{F_2 - F_1}{F_1 + F_2} - \frac{L_2 - L_1}{L_1 + L_2} \quad (4-3)$$

これはフィルタ1, 2を通じた場合の果実に対するセンサの出力の比を第1項で求め、葉に対するセンサの出力の比を第2項で求め、その差をとってDとしたものである。このDの値が大きいほど果実と葉は識別し易くなるため、Dが最大となる時の1組のフィルタの透過率を、その果実の最適波長帯域として求めた。

2. 光源の放射スペクトル

この計算に当たり、光源の放射スペクトルは(4-4)式で示されるプランクの公式²¹⁾を用いた。

$$E_{\lambda} = \frac{C_1}{\lambda^5 (e^{C_2/\lambda T} - 1)} \quad (4-4)$$

T : 色温度 (K)

$$C_1 = 3.740 \times 10^{20} \text{ (W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{nm}^4)$$

$$C_2 = 1.438 \times 10^7 \text{ (nm} \cdot \text{deg)}$$

3. フィルタ、レンズの透過率ならびにイメージセンサの相対感度

フィルタの透過率は(4-5)式に示されるようにガウス関数で近似し、最大透過率を1.0とした。

$$T_{i\lambda} = e^{-1002 \left\{ \frac{2(\lambda - \lambda_m)}{H} \right\}^2} \quad (i=1,2) \quad (4-5)$$

λ_m : 中心波長

H : 半値幅

レンズの透過率には、前章で用いたレンズの透過率を使用した。またイメージセンサの相対感度には第2章で述べたデータを用いた。

4. 果実と葉の分光反射特性

従来果実の分光反射特性を利用した熟度の判定及び選別等については国内外で数多く研究が行われている²²⁾⁻³⁵⁾が、圃場においてその特性を利用した

センサの研究³⁶⁾は数少ない。ここでは果実のみでなく葉についても、イメージセンサが感度を有する可視領域から近赤外領域まで、自記分光光度計で測定した。

(1) トマト

図4-2にトマトの果実と葉の分光反射特性を示す。品種はF1サタンで、7月6日に採取した直後に測定し、果実には熟しているものから順に番号を付した。これより可視領域内では果実は成熟するにつれて500~600 nm付近の反射率が低くなり、代わりにクロロフィル吸収帯である670 nm付近の反射率が高くなる傾向がある。葉は表裏共500~600 nm付近の反射率が高く、裏の方が表より全体的に高いのがわかる。近赤外領域では1200 nm付近までは葉の反射率はほぼ50%と一定であるが、果実はいずれも葉より反射率が低く、970 nm, 1170 nm付近には吸収帯がみられる。この吸収帯は図4-3~7にも示されているように本実験で対象とした他の果実においても、さらには文献²⁸⁾によれば、リンゴ、ナシ等の果実にも見られる葉との大きな差異で、果実と葉

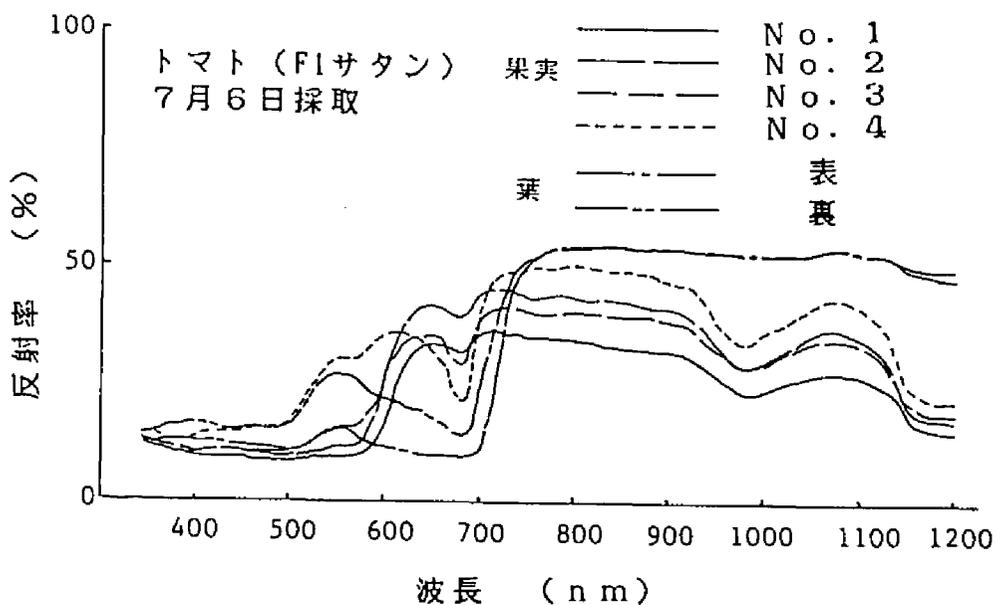


図4-2 分光反射特性(トマト)

を識別するのに有効な波長帯域になり得ると考えられる。これは水分の吸収帯にあたり³⁷⁾、果実のみに見られるのは果実と葉の表皮の水分状態がかなり異なることが原因であると思われる。

(2)ナス

図4-3にナスの果実と葉の分光反射特性を示す。品種は長岡長ナスで7月16日に採取し、測定した。果実には約2週間開花日の異なるもの3種を用いた。葉の反射率はトマトとほとんど変わらないが、果実は可視領域ではいずれも反射率が低く、黒紫色を呈するのが理解できる。近赤外領域では700 nmを超えたあたりから急に反射率が上昇し、葉よりもかなり高くなり、果実特有の吸収帯も見られる。これより葉と果実の反射率の差の大きな500~600 nmと800~900 nm付近が、有効な波長帯域になり得ると考えられる。

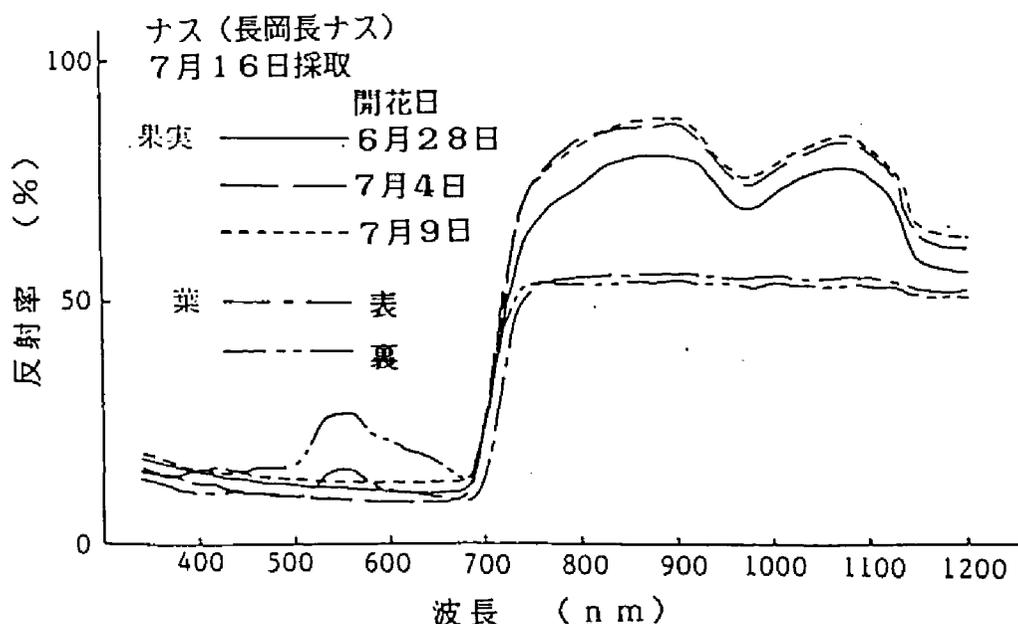


図4-3 分光反射特性 (ナス)

(3)キュウリ

キュウリは緑色の未熟な果実を採取し、測定した。その果実は部分によっ

て若干色が異なるため、果頂部、中央部、果柄部に分けて、図4-4に分光反射特性を示す。品種は夏秋節成2号で、6月21日に採取したものをを用いた。可視領域では黄緑色に近い葉の裏と果頂部の反射率が多少高いほかは、果実と葉にほとんど差がないが、近赤外領域ではナスと同様に果実の反射率が高く、差が見られる。なお実験に用いた品種青力節成4号も図4-4とほとんど変わらない分光反射特性を示した。

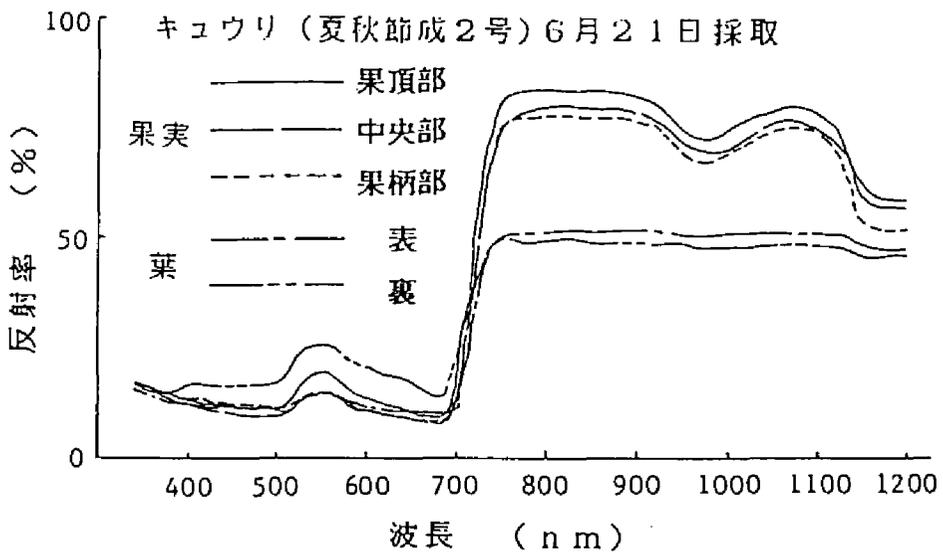


図4-4 分光反射特性 (キュウリ)

(4)ピーマン

ピーマンは340~1200 nmの範囲では果実の葉の反射率の差が小さいため、図4-5にその分光反射特性を340~2500 nmまで示す。品種は京緑で、9月17日開花の果実は赤く熟したもので、10月7日及び10月24日開花の果実は未熟なもので、いずれも11月25日に採取した。これより生食に適する未熟な果実の反射率は、可視領域ではほぼ葉の表と裏の反射率の間にあり、葉との識別は困難と思われる。近赤外領域では果実は葉よりも反射率が低く、1400 nm以

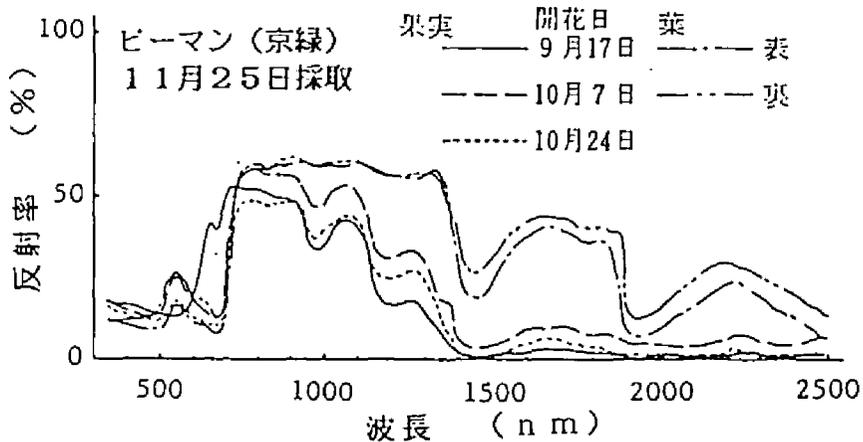


図4-5 分光反射特性（ピーマン）

降は極端に低くなる。それに対して葉は1300 nm付近まではほぼ一定の反射率を有するが、1450 nm及び1930 nm付近に吸収帯が見られ、徐々に反射率も降下する。これらの吸収帯も水分によるもの³⁷⁾と考えられる。2500 nmまでの近赤外領域ではトマトがこれとほぼ同様の反射特性を示し、他の果実は全体的にこれより反射率が高かった。

(5) ミカン

図4-6に温州ミカンの果実と葉の分光反射特性を示す。品種は南柑20号で果実は10月下旬から12月中旬までに採取したものを選んだ。可視領域では果実が生熟するにつれてクロロフィル吸収帯の反射率が高くなるが、トマトと異なるのは、500~600 nm付近の反射率も同時に高くなる点である。近赤外領域ではナス、キュウリ同様に葉との差が見られる。

(6) カキ

図4-7に品種富有のカキの果実と葉の分光反射特性を示す。これより、

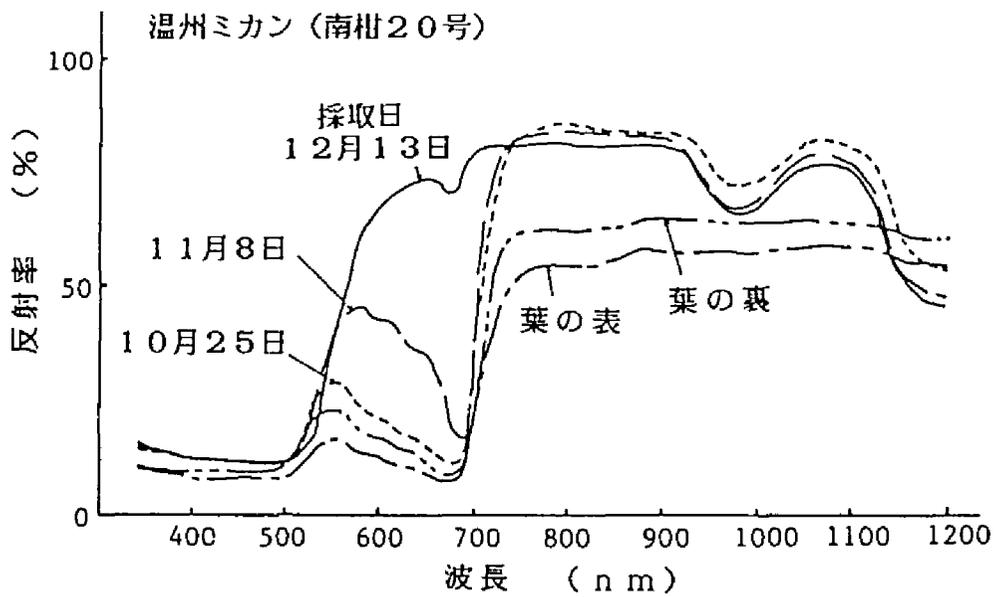


図4-6 分光反射特性(温州ミカン)

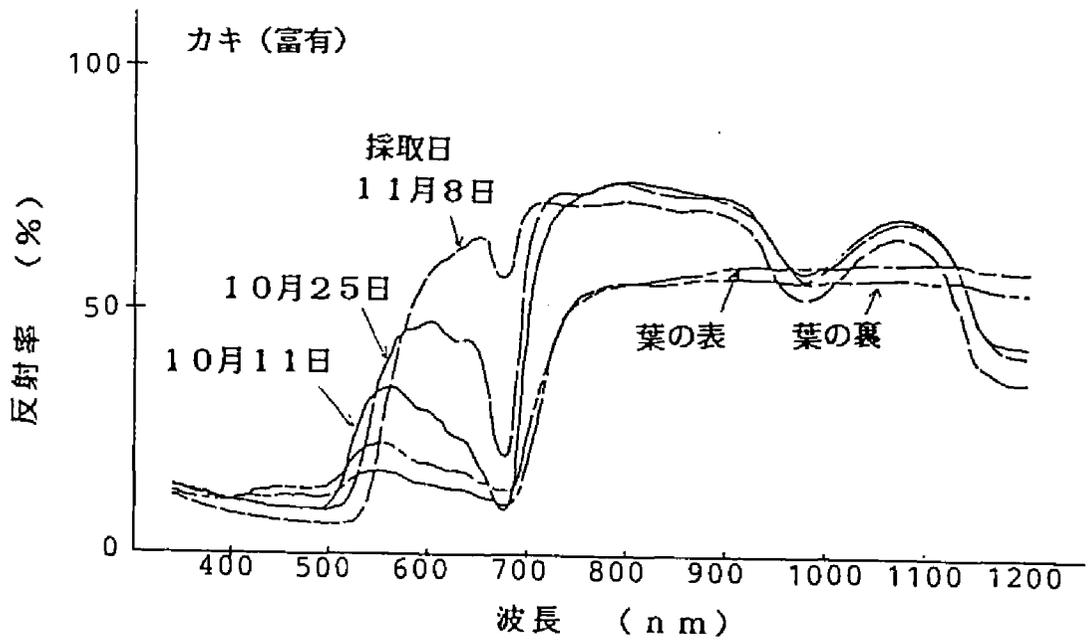


図4-7 分光反射特性(カキ)

温州ミカンとほぼ同様の特性を示したが、果実が成熟するにつれて、500～600 nm付近の反射率の立ち上がりが温州ミカンより多少長波長側にずれる傾向が見られた。この差がトマト、カキ及び温州ミカンの色の違いになると考えられる。

これらの結果より、葉に関してはいずれの品種も大きな差は見られないが、色の異なる果実は可視領域の反射率においてその差違を示し、近赤外領域（1200 nm付近まで）においては、ナス、キュウリ、温州ミカン及びカキのように葉よりも反射率の高い果実と、トマト及びピーマンのように葉より反射率の低い果実に分類できた。さらに果実においてのみ、970 nmと1170 nm付近に吸収帯が見られた。なおこれらのデータはキュウリを除いて、すべて果実の中央部（赤道部）を測定した結果である。

5. 計算方法

以上のデータは使用したイメージセンサが、可視領域から1200 nm付近まで感度を有することから、340～1200 nmまで1 nmごとに、計算機に入力した。

1 nmごとに得られないレンズの透過率、果実と葉の反射率及びイメージセンサの相対感度のデータは、1 nmごとに直線補間した。光源の色温度はほぼ太陽光の取り得る範囲の5000 Kから6000 Kまで3段階に変え、干渉フィルタの制作誤差³⁸⁾、イメージセンサの感度等を考慮して、フィルタの中心波長は10 nmごとに、半値幅は5 nmから1 nmごとに変えて計算を行った。また、参考までに340 nm～740 nmの可視領域内においても、同様に最適波長帯域の計算を行った。

第2節 計算結果及び考察

1. トマト

表4-1に色温度5500 Kの時のトマトの各果実と葉の最適波長帯域ならびに(4-3)式で定義した識別評価関数Dの値を示す。図4-2中のトマトの果実No. 1に対してはクロロフィル吸収帯の670 nmと水分の吸収帯と思われる

970 nmが選定された。また果実No. 2に対しては680 nmと980 nm, 果実No. 3は660 nmと980 nm, 果実No. 4は640 nmと980 nmが選定され, 果実が未熟になるにつれてクロロフィル吸収帯より若干短波長側にずれた波長帯が選定される傾向があることがわかる。トマトではこれらの波長帯において, 果実

表4-1 選定結果(トマト)

試料	フィルタ1		フィルタ2		D
	中心波長(nm)	半値幅(nm)	中心波長(nm)	半値幅(nm)	
No.1	980	8	670	5	0.850
No.2	980	9	680	6	0.850
No.3	980	7	660	5	0.755
No.4	980	7	640	5	0.654

註：試料Noは図4-2のNoと対応する。

表4-2 可視領域の選定結果(トマト)

試料	フィルタ1		フィルタ2		D
	中心波長(nm)	半値幅(nm)	中心波長(nm)	半値幅(nm)	
No.1	560	8	670	5	0.838
No.2	530	8	680	5	0.836
No.3	530	7	660	5	0.620
No.4	400	27	640	5	0.453

註：試料Noは表4-1のNoと対応する。

と葉の反射率がかなり異なるため、Dの値は比較的高くなった。またこれを可視領域内で選定すると、表4-2のようになり、ほぼ緑色の領域内の550nm前後とクロロフィル吸収帯が選定され、成熟した果実ではDの値も大きく、かなりよく識別できるのがわかる。

2. ナス

表4-3 選定結果（ナス）

試料	フィルタ1		フィルタ2		D
	中心波長(nm)	半値幅(nm)	中心波長(nm)	半値幅(nm)	
No.1	550	16	880	5	0.466
No.2	550	18	900	5	0.602
No.3	550	16	880	5	0.449

註：試料No.1,2,3はそれぞれ図4-3の開花日6月28日、7月4日及び7月9日のものと対応する。

表4-4 可視領域の選定結果（ナス）

試料	フィルタ1		フィルタ2		D
	中心波長(nm)	半値幅(nm)	中心波長(nm)	半値幅(nm)	
No.1	560	8	700	5	0.383
No.2	550	9	700	5	0.550
No.3	550	5	690	5	0.341

註：試料Noは表4-1のNoと対応する。

表4-3にナスの選定結果を示す。これより、どの果実も反射率に大きな差がないため、いずれも緑色を示す550 nm付近と果実と葉の反射率の差の大きい880 nm付近が選定された。また550 nmの波長帯の半値幅が比較的大きいのは550 nmにおける反射率が880 nmに比べてかなり低いためと考えられる。また、表4-4に可視領域における選定結果を示すが、可視領域では550 nm付近と可視領域のほぼ端である700 nm付近が選定されており、Dの値も低いことより、可視領域から選定するのは好ましくないことがわかる。

3. キュウリ

表4-3にキュウリの選定結果を表4-4に可視領域における結果を示す。これより、果柄部がナスとほぼ同様の550 nmと800 nm、中央部は650 nmと870 nm、果頂部は490 nmと850 nmが選定されたが、これらは果実の着色状態によって多少可視領域側の波長が変わると思われ、いずれもDの値に大きな差は見られなかった。また可視領域では端の波長が選定され、Dの値も0.3以下になった。

表4-5 選定結果 (キュウリ)

試料	フィルタ 1		フィルタ 2		D
	中心波長(nm)	半値幅(nm)	中心波長(nm)	半値幅(nm)	
果頂部	490	25	850	5	0.348
中央部	650	21	870	5	0.407
果柄部	550	17	800	5	0.357

註：試料は図4-4の試料と対応する。

表4-6 可視領域の選定結果（キュウリ）

試料	フィルタ1		フィルタ2		D
	中心波長(nm)	半値幅(nm)	中心波長(nm)	半値幅(nm)	
果頂部	490	18	720	5	0.263
中央部	650	14	720	5	0.254
果柄部	550	13	720	7	0.171

4. ビーマン

表4-7にビーマンの選定結果を示す。緑色を呈するビーマンに対しては、入力されたデータのほぼ両端が選定され、Dの値も小さい結果となった。そのため、図4-5の10月24日開花の試料についてのみ示している。図4-5から緑色の果実と葉を識別するには、1530 nm付近の波長帯域が果実と葉の反射率の差が大きく、適当であると考えられた。

表4-7 選定結果（ビーマン）

領域	フィルタ1		フィルタ2		D
	中心波長(nm)	半値幅(nm)	中心波長(nm)	半値幅(nm)	
近赤外	1180	7	360	5	0.263
可視	510	7	570	5	0.155

5. ミカン

表4-8に温州ミカンの選定結果を表4-9に可視領域における結果を示

す。成熟した果実（試料No.1）に対してはいずれも可視領域内の520 nm付近と670 nm付近が選定され、多少未熟な果実（試料No.3）はトマトと同様にクロフィル吸収帯から若干短波長側にずれた波長帯がDの値が大きかった。ただ図4-6に示される温州ミカンの10月25日開花の果実のように未熟過ぎ

表4-8 選定結果（ミカン）

試料	フィルタ1		フィルタ2		D
	中心波長(nm)	半値幅(nm)	中心波長(nm)	半値幅(nm)	
No.1	520	9	670	5	0.999
No.2	530	5	660	5	0.609
No.3	1180	5	360	6	0.194

註：試料No.1,2,3はそれぞれ図4-6の採取日12月13日，11月8日及び10月25日のものと対応する。

表4-9 可視領域の選定結果（ミカン）

試料	フィルタ1		フィルタ2		D
	中心波長(nm)	半値幅(nm)	中心波長(nm)	半値幅(nm)	
No.1	520	9	670	5	0.999
No.2	530	5	660	5	0.609
No.3	690	6	700	5	0.134

註：試料Noは表4-8のNoと対応する。

ると、ピーマンと同様に入力データの両端が選定され、Dの値も小さい結果となった。

6. カキ

表4-10にカキの選定結果を示す。これより、温州ミカンとほぼ同様の波長が選定されていることがわかる。可視領域についてもまったく同じ結果であった。

表4-10 選定結果（カキ）

試料	フィルタ1		フィルタ2		D
	中心波長(nm)	半値幅(nm)	中心波長(nm)	半値幅(nm)	
No.1	520	14	680	5	1.120
No.2	510	12	650	5	0.733
No.3	490	18	700	5	0.529

註：試料No.1,2,3はそれぞれ図4-7の採取日11月8日，10月25日及び10月11日のものと対応する。

これらの結果より、トマトや温州ミカンのように、赤黄系統の色を呈する果実はクロロフィル吸収帯が、ナスやキュウリのように近赤外領域で葉よりも果実の反射率が高くなるものは、850 nm前後の波長帯が果実と葉の識別に適した。また半値幅は一般に小さい方がDの値は大きくなるが、両フィルタの中心波長における透過率比を1:1としたため、前述の表に示されるような結果となった。

第3節 室内実験

1. 実験装置及び方法

実験に使用した視覚センサ，パーソナルコンピュータ，光源等の装置ならばに被識別対象物は前章と同じで，実験方法も前章に示したとおりである。

本実験では光学フィルタとして，選定された波長帯域を透過する干渉フィルタを用いた。その透過率を図4-8に示す。図中の数字は上が中心波長で，下が半値幅である。2つのフィルタを透過したときの出力の比率に対応した数字は図3-3の通りに与えた。フィルタ1及び2としてそれぞれ，トマトには670.8 nmと973 nmを，ナス及びキュウリには851.6 nmと548 nmを，温州ミカン及びカキには670.8 nmと498 nmのフィルタを使用した。ピーマンには選定された波長帯域がイメージセンサの感度の非常に低い所であるため，548 nmと973 nmのフィルタを使用した。これらの干渉フィルタは340~1200 nmの領域に生じる副透過帯を除去してある。

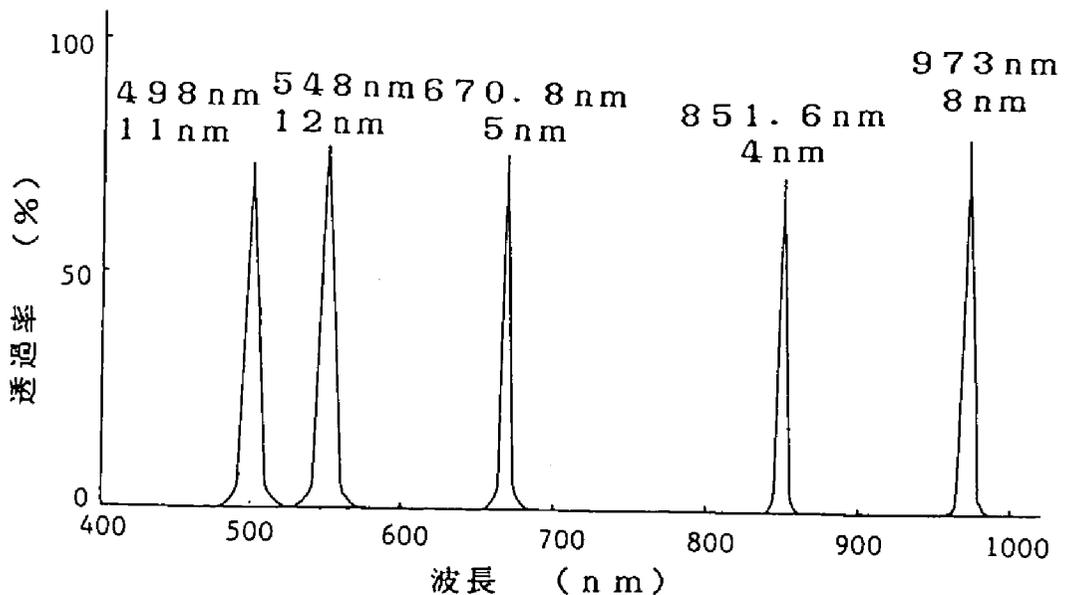


図4-8 干渉フィルタの透過率

2. 実験結果及び考察

(1) トマト

図4-9に、トマトの実験結果を示す。横軸には(3-1)式で求めた比率に対応した数字を、縦軸には画素の割合を百分率でとった。この時の照度は4000 lx, F値は4, カメラから対象物までの距離は30 cmであった。これより葉はほぼ目盛り1~4に, 11月8日開花の果実は目盛り5~9に, 10月19日開花の果実は目盛り8~Cに, 10月17日開花の果実は目盛りB~Dに分布し, 3色分解用フィルタを使用した時に比べ, 熟した果実はもちろんのこと, 未熟な果実までもほとんど葉と重なることなく, 識別が容易になったことを示している。

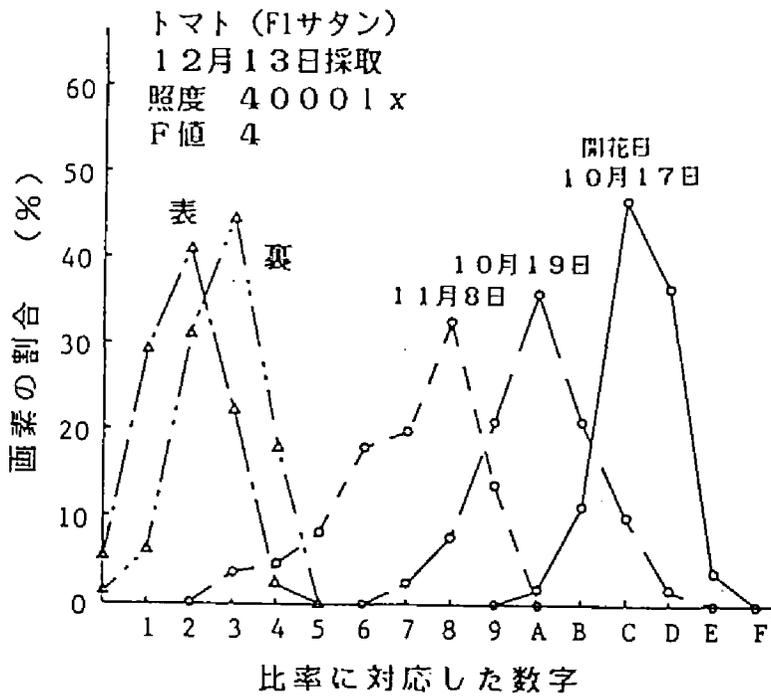


図4-9 実験結果 (トマト)

(2)ナス

図4-10にナスの結果を示す。前章に比べ, 果実の分布は狭い範囲になり, 葉と重なる部分も少なくなっている。これはナスの果実の反射率が可視領域内では低い, 850 nm付近では高く, センサからの出力が適正に得られ

たためと考えられる。

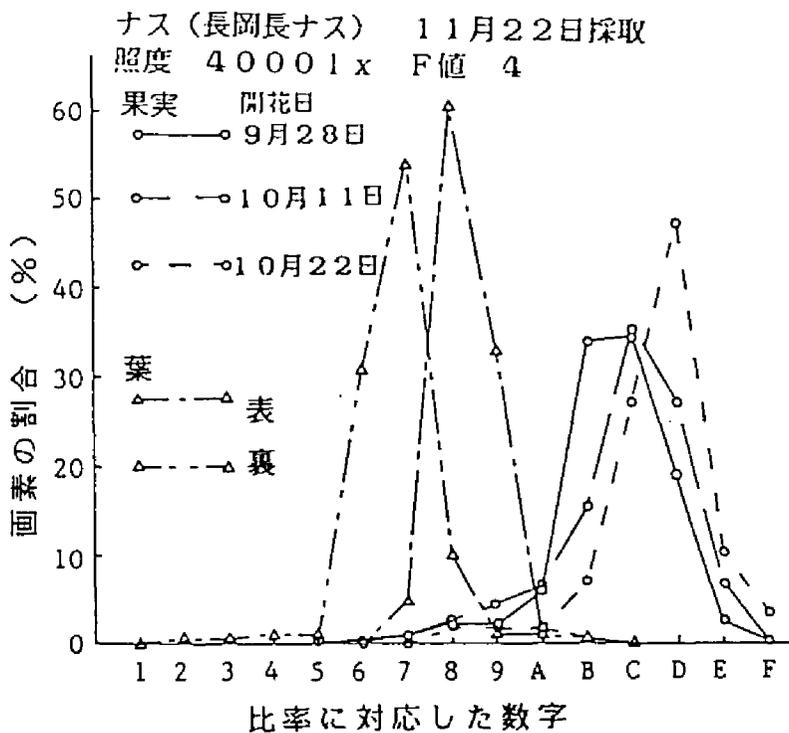


図4-10 実験結果（ナス）

(3) キュウリ

図4-11にはキュウリの結果を示す。これも前章に比べてかなり果実と葉の分布の重なりが少なくなっているのがわかる。若干葉と重なっている数字7は果頂部の黄緑がかった部分に多く見られ、果柄部及び中央部の比率に対応する数字はほとんど8以上であった。これより8以上の数字を果実、7以下を葉と見なして簡単な画像処理を施せば緑色を呈するキュウリも十分識別可能と考えられる。

(4) ビーマン

図4-12にビーマンの実験結果を示す。これより葉と緑を呈する果実の分布は重なり、識別困難であった。これは図4-5にも示されているように、両波長帯において果実と葉の反射率の差が小さ過ぎるためで、ビーマンをこ

の方法で識別するには、図4-5の分光反射特性から、さらに広い領域に感度を有するイメージセンサが必要と考えられる。

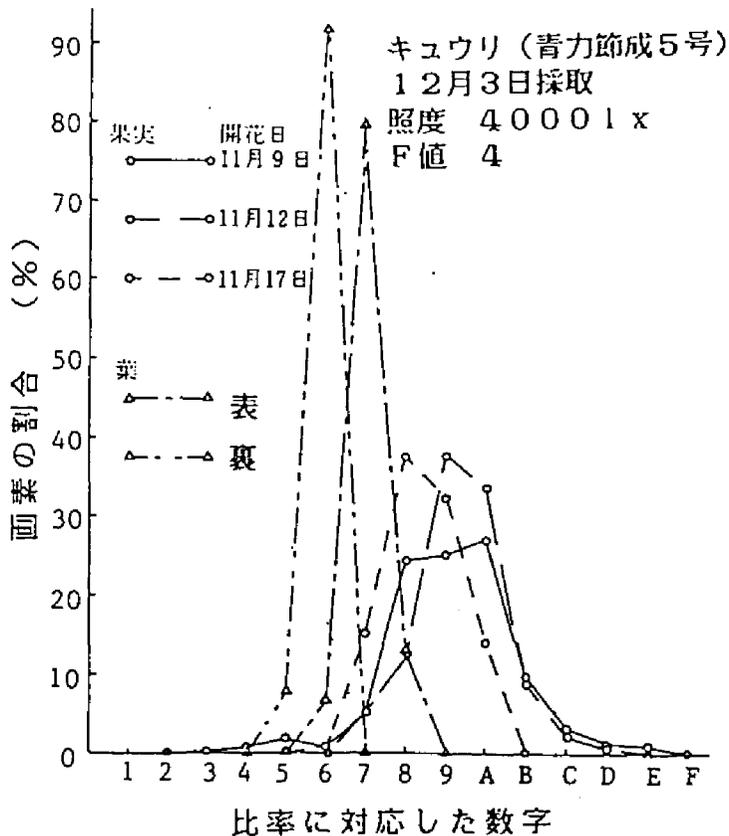


図4-11 実験結果 (キュウリ)

(5) ミカン

図4-13に温州ミカンの結果を示す。前章に比べて、12月13日に採取した熟した果実と葉の分布の差は大きくなっているが、11月8日に採取した緑色の部分の残る果実は依然として少々葉と重なっている。これは本実験で温州ミカンに使用した干渉フィルタが、可視領域内の光線を透過するものであり、また熟した果実を対象として選定したためである。未熟な果実を対象として選定したフィルタを用いれば、より識別は容易になると思われる。

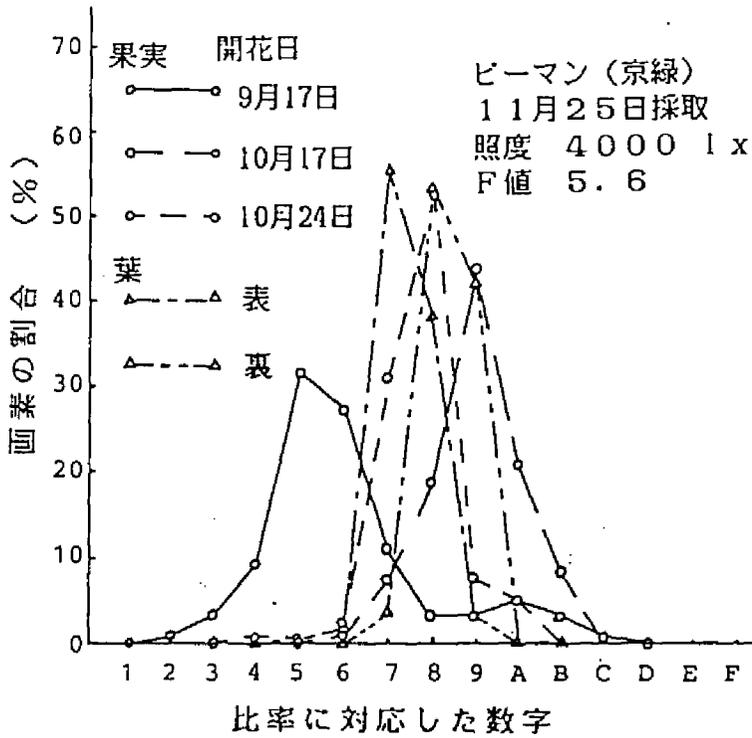


図4-12 実験結果 (ピーマン)

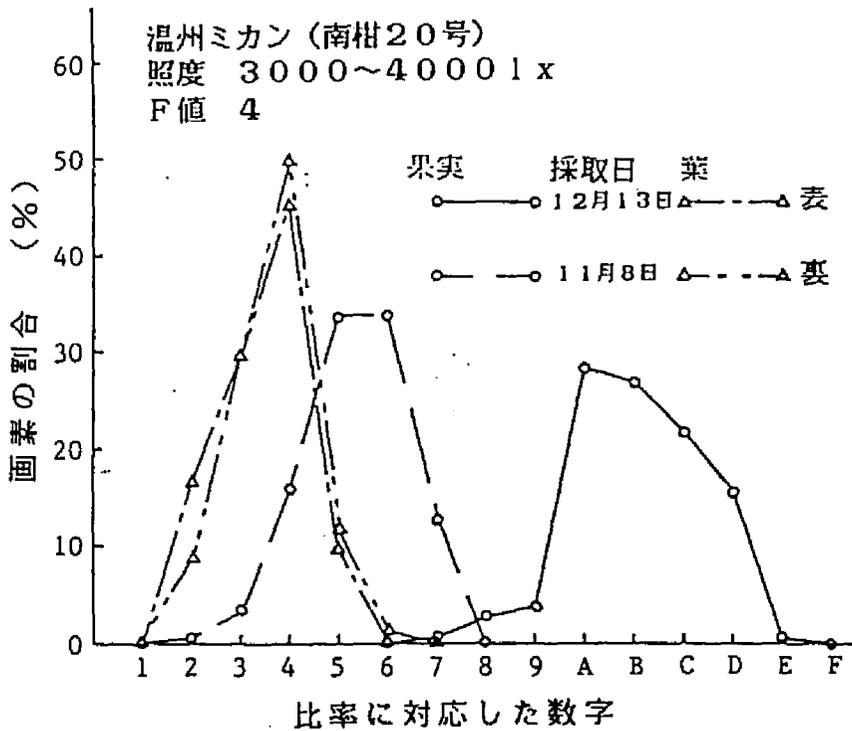


図4-13 実験結果 (温州ミカン)

(6)カキ

図4-14にカキの実験結果を示す。熟したカキについても同様に、前章に比べて果実と葉の分布の差が大きいという結果が得られた。

以上の実験結果はF値が4の時のものであるが、F値を前後1段階ずつ変えても、ほぼ同様の結果が得られた。

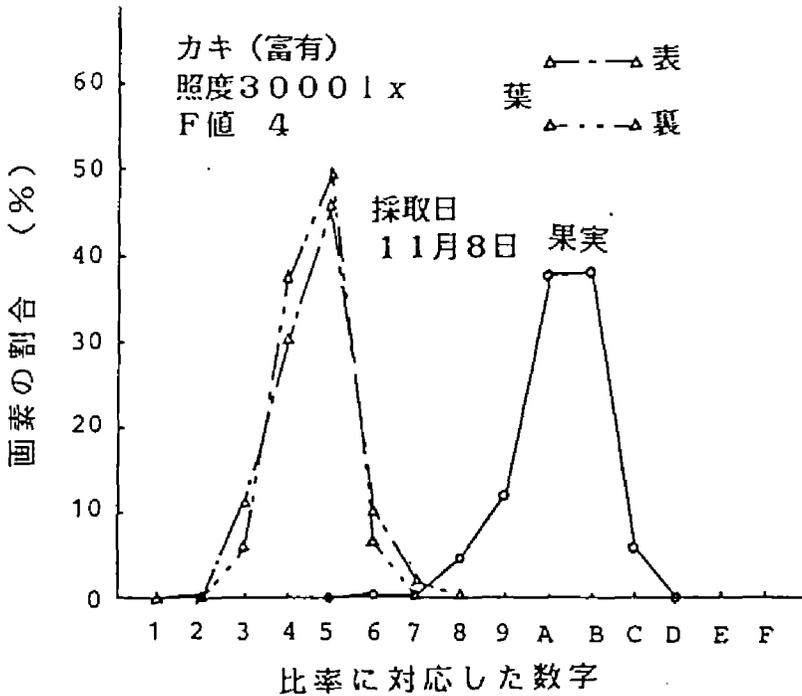


図4-14 実験結果 (カキ)

このように最適波長帯域を利用した方がかなり識別が容易になり、未熟なトマト及びキュウリの果実も識別可能であることが確認された。しかし、干渉フィルタは既成の3色分解用フィルタに比べて高価であり、市販のテレビカメラ等から簡単にはその信号を得られないため、葉と色の異なる果実には3色分解用フィルタを用い、葉と同系統の色の果実には最適波長帯域を透過する干渉フィルタを用いれば、それぞれの特徴が生かせると考えられた。

第4節 摘要

葉と異なる色を呈する果実を識別するだけでなく、葉と同系統の色の果実をも識別可能な視覚センサを開発する目的で、果実と葉の分光反射特性を測定し、各果実と葉に対するセンサの出力の比の差が最も大きくなる1組の波長帯域を計算機で求めた。さらにその波長帯域を透過する干渉フィルタと前章で使用した視覚センサを用いて識別実験を行い、3色分解用フィルタを使用したときの結果と比較し、次のような結果を得た。

(1) 葉の反射率はいずれの品種も大きな差は見られないが、色の異なる果実は可視領域においてその差異を示し、近赤外領域においては葉よりも反射率の高いものと低いものに分類できた。1200 nmまでの領域では果実にのみ水分の吸収帯がみられた。

(2) 最適波長帯域としてトマトは670 nmと970 nm付近、ナス及びキュウリは550 nmと850 nm付近、温州ミカン及びカキは520 nmと670 nm付近の波長帯域が選定された。この結果、赤黄系統の色を呈する果実はクロロフィル吸収帯が、近赤外領域で葉より果実の反射率が高くなる果実は、850 nm前後の波長帯が識別に適することがわかった。

(3) 最適波長帯域を利用して識別実験を行った結果、熟した果実はもちろんのこと、3色分解用フィルタでは識別困難であった未熟なトマト及びキュウリ等の果実と葉の識別が容易になった。ピーマンについては、本章で計算を行った波長の範囲より長い波長帯に、適当な波長帯域が存在すると推定される。

(4) 葉と異なる色を呈する果実には3色分解用フィルタを、葉と同系統の色を呈する果実には最適波長帯域を透過する干渉フィルタを用いるのが有効な使用法であると考えられる。

第5章 野外における最適波長帯域の有効性^{39) 48)}

前章で最適波長帯域に透過率をもつフィルタを使用した時の有効性を報告した。しかしそれは室内実験においてであり、実際の圃場には果実と葉以外の対象物も数多く存在するため、それらと果実とも識別が容易であることが必要である。

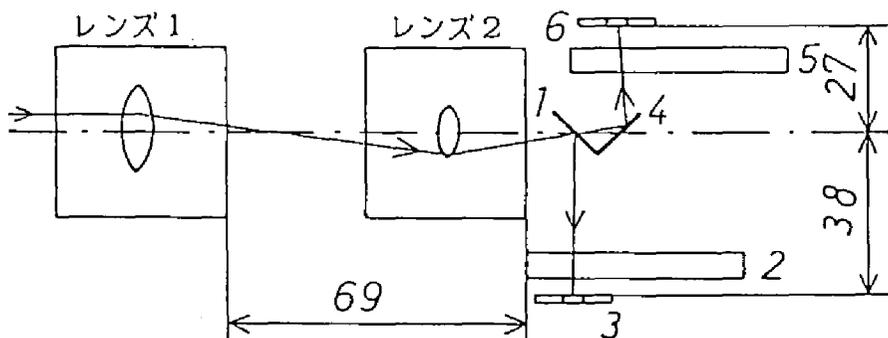
そのため本章では、前章で選定された波長帯域の組が野外においても適当か否かを確認するために、干渉フィルタ、レンズ及びイメージセンサ等を用いて視覚センサを試作し、立毛中の果菜類に対して画像入力実験を行った。また圃場では太陽の色温度、照度あるいは土壌の含水比の条件等が様々に変化し、それら全ての条件下で実験を行うのは難しい。そこでそれらの条件を変化させた時の識別の容易さは計算機によってシミュレーションを行い、検討を加えた。

第1節 実験装置及び方法

1. 2板式視覚センサ

図5-1に試作した視覚センサの光学系を示す。本装置は照度が刻々と変化し、風等によって対象物が多少動く野外で使用するため、2つのイメージセンサに同時に画像入力できる2板式である必要がある。またレンズとイメージセンサの間にハーフミラー及びフィルタ等を挿入するスペースを確保するため、焦点距離8.5 mm, F値1.5のレンズと焦点距離25 mm, F値1.4のレンズを図示したように組み合わせて用いた。対象物で反射した光はレンズ1, 2を通過した後, 1の金属膜ハーフミラーで光量のほぼ半分が反射し, 2のフィルタを透過して3のイメージセンサ上に結像する。また1のハーフミラーを透過した光は4の表面鏡でほぼ全反射し, 5のフィルタを通過して6のイメージセンサ上に結像する構造とした。

イメージセンサには前章と同じMOS型で64×64個の画素をもつものを用い、レンズにはいずれもCマウントのテレビカメラ用のものを用いた。



レンズ1 : $f_1 = 8.5 \text{ mm}$ 1:ハーフミラ 4:表面鏡
 $F_1 = 1.5$ 2:フィルタ1 5:フィルタ2
 レンズ2 : $f_2 = 25 \text{ mm}$ 3:イメージセンサ1 6:イメージセンサ2
 $F_2 = 1.4$

図5-1 2板式視覚センサの光学系

フレームにはアルミ板ならびにアングルを用いて製作したところ、全長176 mm、全幅137 mm、全高126 mm、重量1.96 kgとなり、視野角は約 35° であった。

2. 光学フィルタ、レンズ及びハーフミラーの透過率、反射率

図5-2に2つのレンズの透過率ならびにハーフミラーの透過率と反射率を示す。レンズの透過率はいずれも350 nm付近より立ち上がり、500 nm付近をピークとして徐々に低くなっている。ハーフミラーの透過率は可視領域から近赤外領域にかけて直線的に高くなり、それと逆に反射率は直線的に低くなっている。

本実験では前章で選定された最適波長帯域に透過率を有する干渉フィルタとして、トマトには中心波長670.8 nm、半値幅5 nmと中心波長973 nm、半値幅8 nmのものを、キュウリ、ナスには中心波長548 nm、半値幅12 nmと中心

波長851.6 nm, 半値幅4 nmのものを用いた。

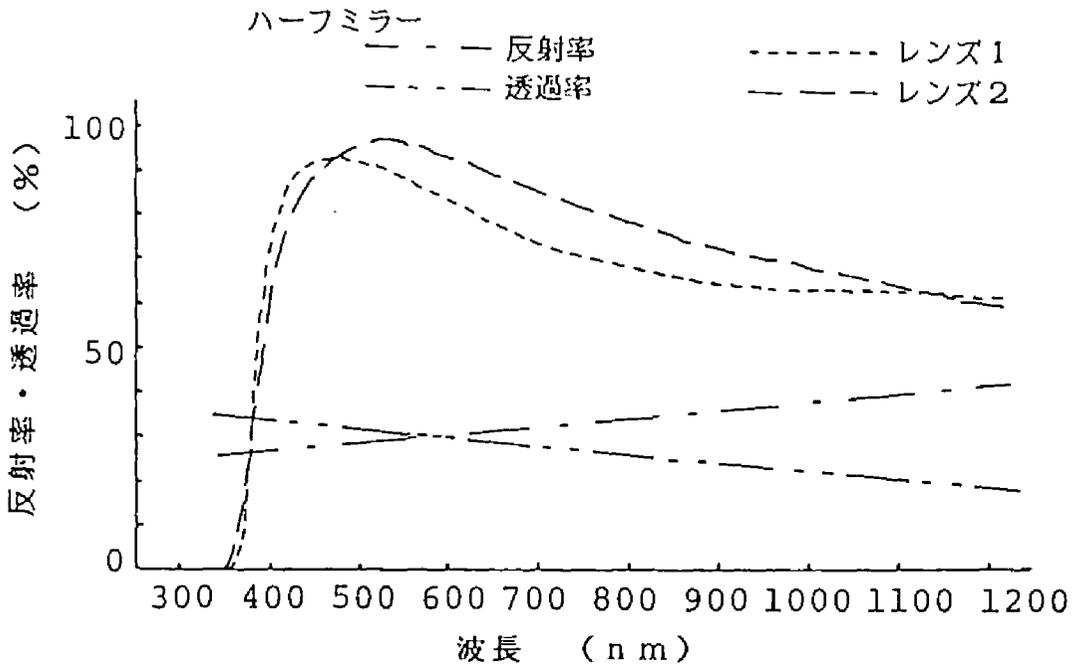


図5-2 レンズの透過率とハーフミラーの透過率, 反射率

3. 対象物の分光反射特性

従来土壌の分光反射特性を測定し, 土壌水分を検出したり, 葉との識別に利用する研究^{41) - 46)}は行われている。本章では果実と植物体の各部分, 土壌及び天空との識別を目的とし, 測定対象物はトマト, ナス及びキュウリの果実, 葉, 茎, 花と土壌とした。図5-3から図5-5に分光光度計で測定した果菜類の各部分の分光反射特性を示す。これよりトマト及びキュウリの茎は可視領域では葉と同様で, 近赤外領域ではいずれも900 nm程度までは葉とほぼ同じ反射率を示すが, 970 nm及び1170 nm付近に果実と同じ吸収帯がみられることがわかる。ナスの紫色をした茎は可視領域ではほぼ果実と同様の特性を示し, 木性化した茎は500 nmから700 nmあたりで若干反射率が高くなっており, 色の違いを示している。近赤外領域ではいずれも果実より20%から30%程度反射率が低く, トマト及びキュウリと同様に970 nmと1170 nmに吸

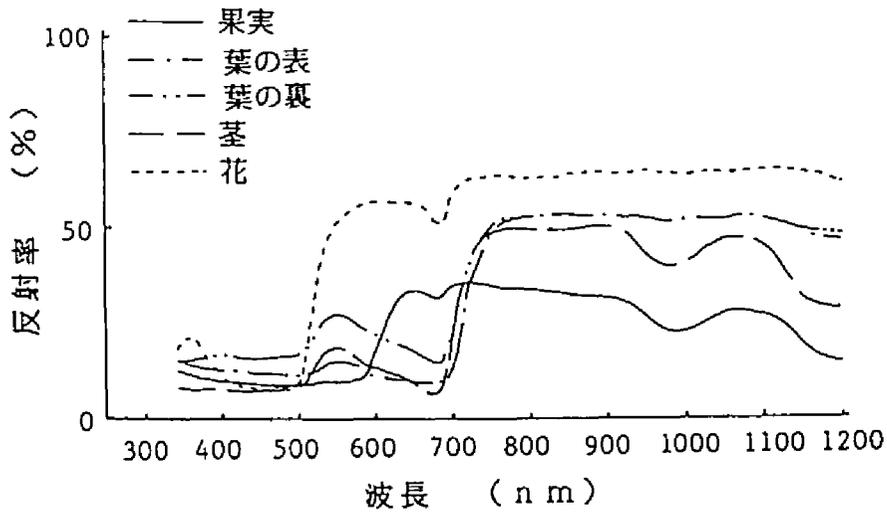


図5-3 分光反射特性(トマト)

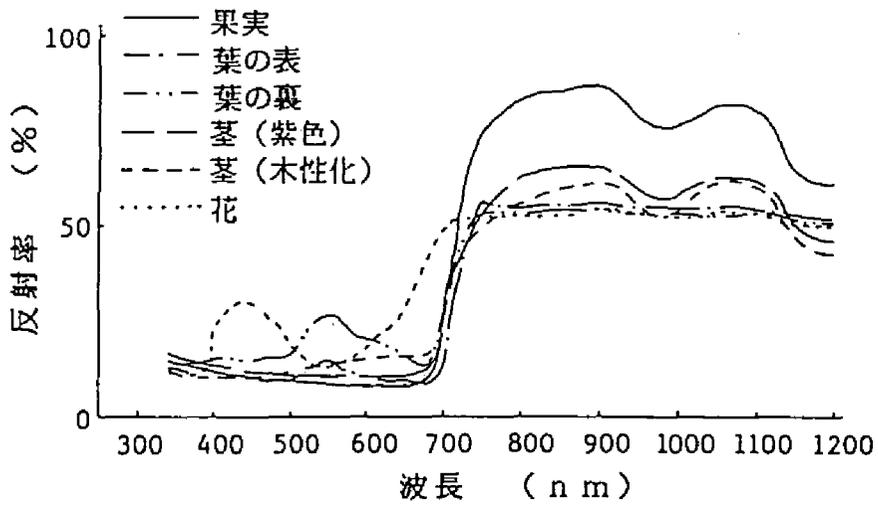


図5-4 分光反射特性(ナシ)

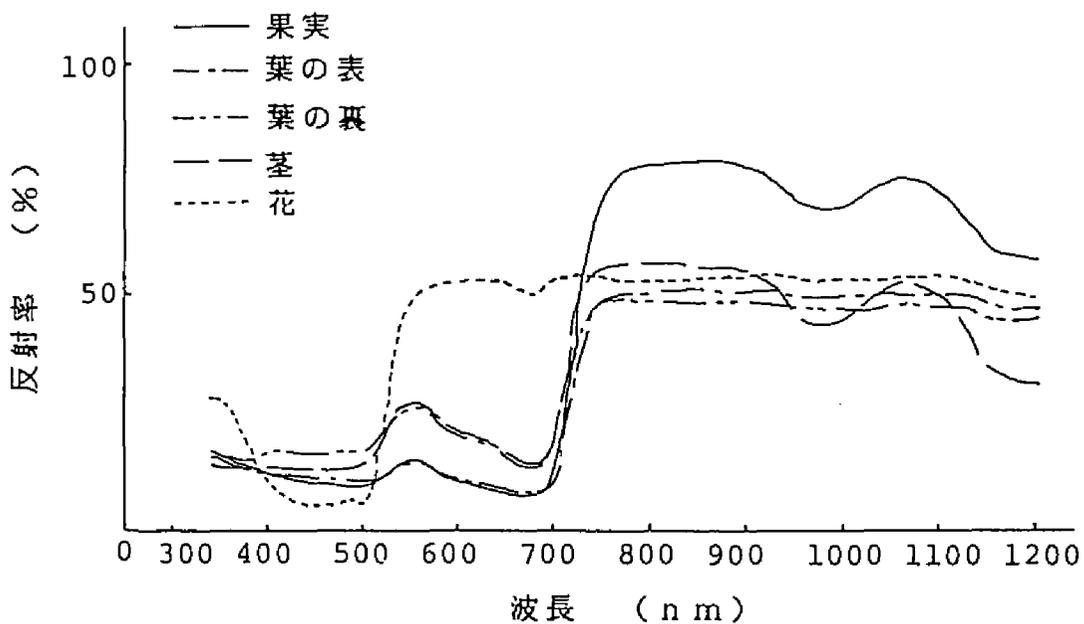


図5-5 分光反射特性(キュウリ)

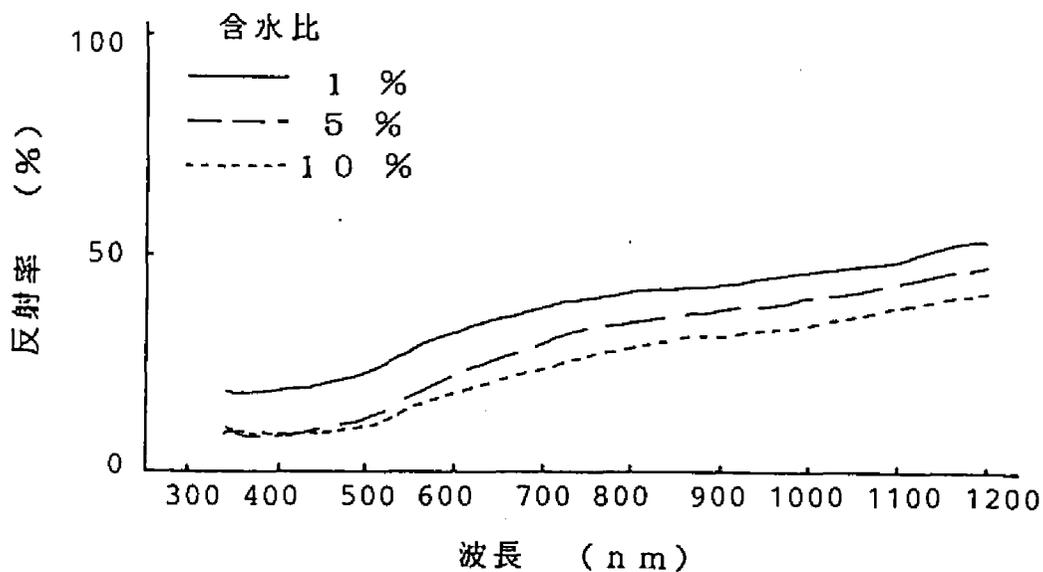


図5-6 分光反射特性(土壌)

収帯がみられる。またトマト，キュウリの花は350 nm付近の紫外領域に若干高い反射率を持ち，500 nm付近から再び反射率は高くなり，黄色を呈するのが理解できる。ナスの花は400 nm～500 nmと600 nm～700 nmの反射率が高く，紫色を示すのがわかる。近赤外領域においてはいずれも葉とほとんど同じ反射特性を示す。

図5-6には含水比（d.b.）を約1%から10%まで変えたときの土壌の反射特性を示す。この土壌は土性三角図による区分では砂質土で，乾いているときは白色に近く，湿ると茶褐色を示した。図からも知れるように，波長が長くなるにつれて反射率が上がり，含水比が高くなると反射率が下がる傾向があった。

4. 実験方法

図5-7に本実験のブロックダイアグラムを示す。視覚センサ中の2つのイメージセンサは駆動回路で発生するクロックによって同時に駆動され，光

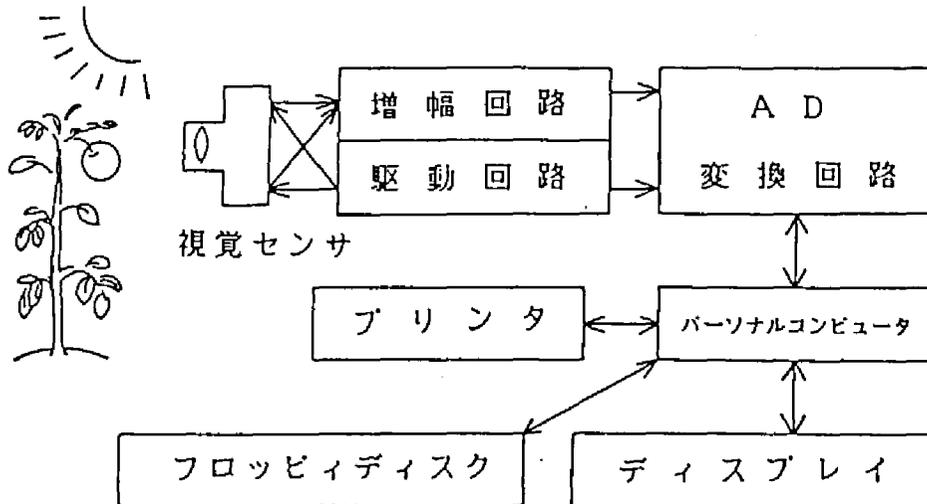


図5-7 実験のブロック図

入力の高さに応じて発生する出力信号を増幅回路に送る。ここでノイズ成分が除去されてビデオ出力が得られ、ピークホルダ回路によって方形波にされる。さらにAD変換回路で8ビットのデジタル値にされた後、両イメージセンサからのデータはパーソナルコンピュータに交互に入力され、フロッピーディスクで記録される。なお本実験でも前章と同様に、パーソナルコンピュータの演算速度及びメモリの容量等を考慮してイメージセンサの画素数64×64のうち32×32を使用し、走査速度は約15 kHz/bitとした。

この方法で前述した干渉フィルタの組を用いて、野外に立毛中の果菜類に対して絞りを数段階変え、イメージセンサへの光入力を適度にし、画像入力実験を行った。結果は後にフロッピーディスクからAD変換値を各画素ごとに読みだし、2つの画像の各画素に対応するAD変換値の比率をパーソナルコンピュータで計算し、ディスプレイならびにプリンタで表示した。

第2節 実験結果及び考察

1. トマト

図5-8にトマト（品種：サタン）の実験結果を示す。横軸には(3-1)式で計算される比率に対応した数字を、縦軸には画素の割合を百分率でとっている。果実、葉及び空は7月下旬のよく晴れた日の午前10時、照度66000 lx、 $F1=2.0$ 、 $F2=1.4$ の時の結果であるが、茎及び土壌は1枚の画像内に適当な大きさで入力するのが困難であったため、別な日時に再度画像入力を行い、センサへの光入力がほぼ同程度の時のものを重ねた。花は認識画素数が小さ過ぎたため、図には記載していない。この果実は6月14日に開花したものでほぼ完熟しており、土壌表面の含水比は約2.5%であった。これより果実は右側に、葉と茎は左側に分布しているため、識別は容易であることがわかるが、空と土壌は果実の分布と重なる部分があり、空、あるいは土壌と同一方向に果実がある場合（特に未熟な果実）、識別困難な場合も出てくると思われた。成熟した果実とこれらの対象物の識別であれば3色分解用フィルタの方が容易であると思われる。また前章の結果と比較すると果実及び葉とも幅の広い

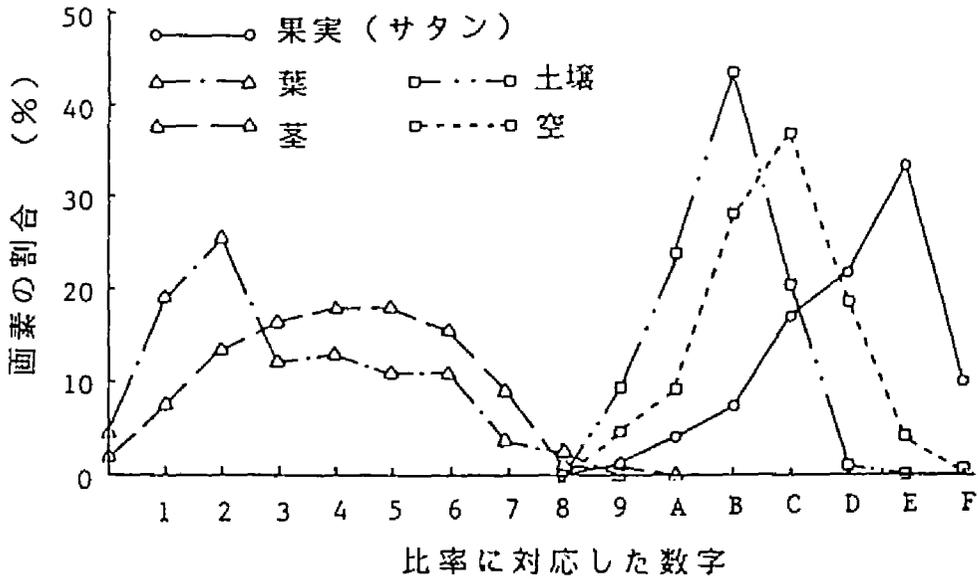


図5-8 実験結果 (トマト)

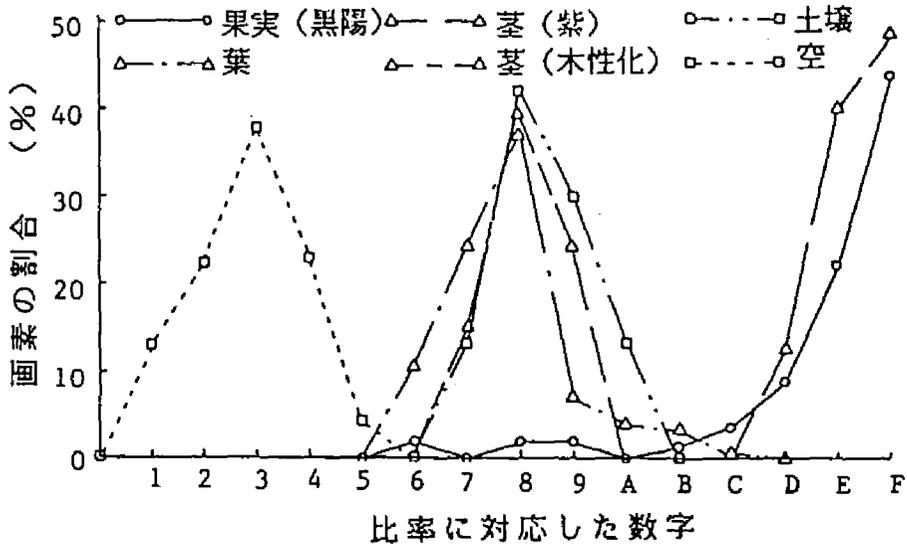


図5-9 実験結果 (ナス)

分布になっているが、これは照度が部分的にかなり異なっていた影響であろうと考えられる。

2. ナス

図5-9にナス（品種：黒陽）の実験結果を示す。果実及び葉は7月下旬のよく晴れた日の午後3時、照度50000 lx, F1=2.0, F2=1.4の時、茎、土壌及び空は別の日時に行った時のものである。果実の開花日は7月10日のものを用いた。トマトの時とはフィルタが異なるため、土壌、葉及び木性化した茎はほぼ目盛り8を中心に、空は目盛り3を中心に分布しており、果実とはほとんど重なりが見られない。ただ紫色をした茎は果実とほぼ同様な分布となったが、形状が果実とはかなり異なるため、識別できると考えられる。

3. キュウリ

図5-10にキュウリの実験結果を示す。キュウリ（品種：青力節成5号）

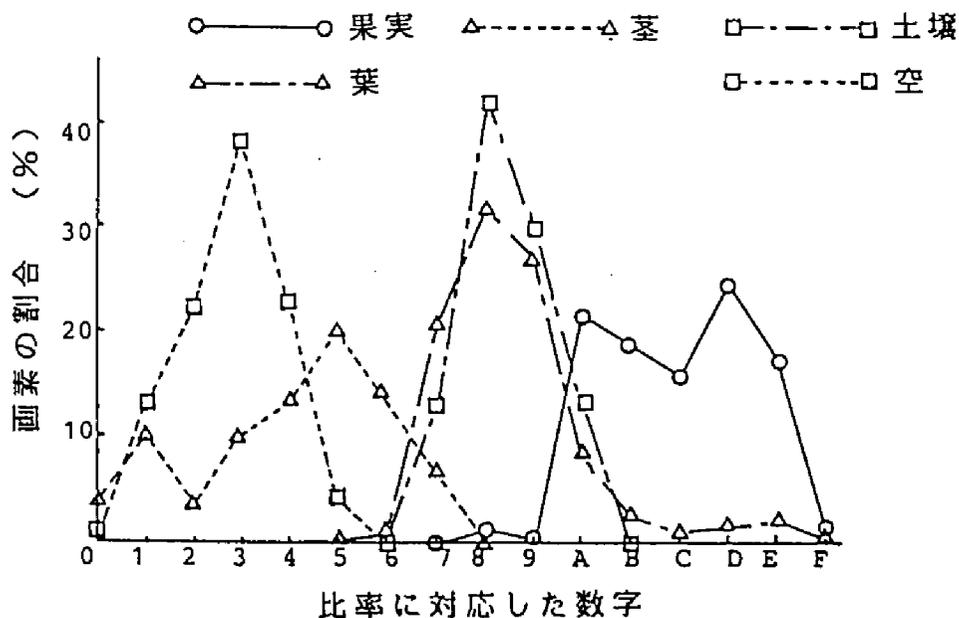


図5-10 実験結果（キュウリ）

はナスと同じフィルタを用いたため、茎が目盛り5を中心に分布した他はほぼナスと同様な分布図が得られ、果実と他の対象物はほぼ識別可能であろうと思われた。ただ前章の結果と比べると各対象物とも幅の広い分布になったため、絞りの調節によっては識別困難な場合もみられた。

これらの結果より、空は550 nmと850 nmのフィルタを用いた場合には果実と離れた位置に分布するものの、670 nmと970 nmのフィルタを使用した場合には果実とかなり似た位置に分布し、果実との識別に適さないのは可視領域における空の分光分布が近赤外領域よりも大きいためと考えられる。選定された最適波長帯域ではトマトの果実と空及び土壌、ナスの果実と紫色の茎のように、識別困難な対象物が存在することが確認された。

第3節 シミュレーション

1. 計算方法

野外では太陽の色温度、土壌の含水比等が様々に変化し、果実とその他の対象物の識別の容易さも変化すると思われるため、前章と同様の計算を行い検討した。本節ではフィルタ1, 2を通したときの果実と葉に対するセンサの出力を前述のセンサを想定して次の(5-1), (5-2)式で求めた。

$$F_i = \sum E_\lambda \cdot R_{f\lambda} \cdot L_{1\lambda} \cdot L_{2\lambda} \cdot H_{j\lambda} \cdot T_{i\lambda} \cdot S_\lambda \cdot \Delta\lambda \quad (i=1,2) \quad (5-1)$$

$$O_i = \sum E_\lambda \cdot R_{o\lambda} \cdot L_{1\lambda} \cdot L_{2\lambda} \cdot H_{j\lambda} \cdot T_{i\lambda} \cdot S_\lambda \cdot \Delta\lambda \quad (i=1,2) \quad (5-2)$$

F_i : フィルタ*i*を通したときの果実に対するセンサの出力

O_i : フィルタ*i*を通したときの他の対象物に対するセンサの出力

E_λ : 波長*λ*における光源の放射スペクトル

$R_{f\lambda}$: 波長*λ*における果実の反射率

$R_{o\lambda}$: 波長*λ*における他の対象物の反射率

$L_{1,2\lambda}$: 波長*λ*におけるレンズ1,2の透過率

$H_{j\lambda}$:波長 λ におけるハーフミラーの反射率($j=1$), 透過率($j=2$)

$T_{i\lambda}$:波長 λ におけるフィルタ i の透過率

S_{λ} :波長 λ におけるイメージセンサの相対感度

果実と他の対象物の識別の容易さを表す評価関数としては、前章と同様に(5-3)式を用いた。

$$D = \frac{F_2 - F_1}{F_1 + F_2} - \frac{O_2 - O_1}{O_1 + O_2} \quad (5-3)$$

この計算においても、前章と同様に、光源の放射スペクトルはプランクの公式を用い、フィルタの帯域と透過率の関係は、ガウス関数で近似した。レンズの透過率及び各対象物の反射率は、分光光度計で測定した前述のデータを使用した。イメージセンサの相対感度は視覚センサに使われているMEL 64×64のものを、ハーフミラーの反射率及び透過率は前述の金属膜によるものを用いた。光源の放射スペクトルと干渉フィルタの透過率のデータは340 nmから1200 nmまで1 nmごとに計算し、1 nmごとに得られないその他のデータは直線補間して1 nmごとに計算機に入力した。光源の色温度は2000 Kから6000 Kまで3段階に変え、干渉フィルタの中心波長と半値幅を各対象物ごとに設定して(5-3)式の計算を行った。

2. 計算結果及び考察

(1) トマト

図5-11にトマト(品種:F1サタン)の計算結果を示す。横軸には色温度を、縦軸には識別の容易さDをとっている。実線が成熟果との識別を、点線が未熟果との識別の容易さを表している。これよりほぼ実験結果と同様の結果が得られており、土壌は含水比が高くなるにつれてDは大きくなるものの、成熟果や未熟果との識別は困難であることを示している。花はこの計

算結果から、この波長帯域における識別は難しいことがわかる。茎については、いずれともよく識別できることを示している。また色温度が低くなるとDの値は小さくなり、色温度2000 Kでは極端に小さくなることがわかった。これは前章で色温度5500 Kの完全放射体の分光分布を用いて最適波長帯域を選定したため、ほぼ5500 Kをピークにしてそれより離れるほどDの値は小さくなると考えられる。

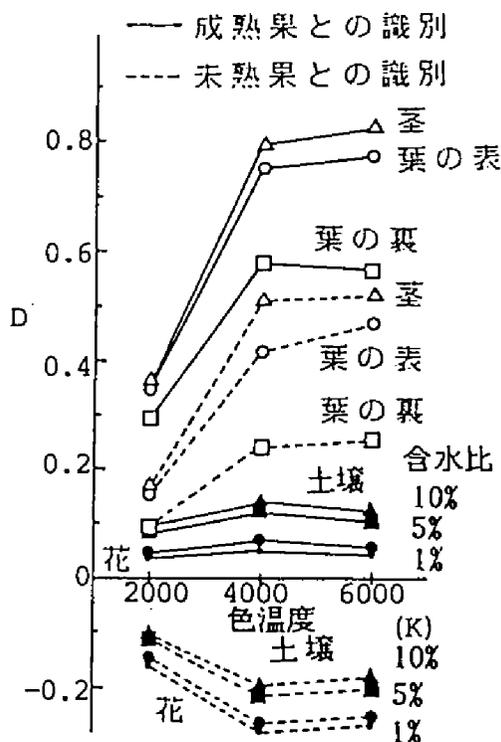


図5-11 計算結果(トマト)

(2)ナス

図5-12にはナス(品種:長岡長ナス)の計算結果を示す。これも実験結果とほぼ同様の結果となっており、紫色の茎以外はほぼ識別可能であることがわかる。ただ土壌が実験結果に比べてDの値が高いが、これは実験の際、他の対象物に比べて土壌の照度が高くなっていた影響が出たと考えられる。

また色温度が低くなると、トマトと同様にDの値も小さくなった。

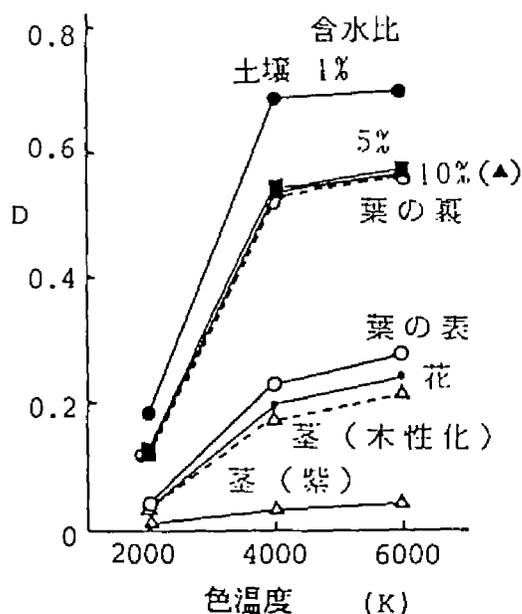


図5-12 計算結果(ナス)

(3) キュウリ

図5-13にキュウリの計算結果を示す。キュウリ(品種:夏秋節成2号)は前章と同様に果実の果頂部,中央部及び果柄部に分けて計算を行ったところ,果頂部と葉の表が識別困難であった他はほぼ実験結果と同じ結果が得られ,全体的にはほぼ識別可能と思われた。ここで果柄部は中央部と値がほとんど同じであったため,記してはいない。

以上のことより,果実と葉の識別に最適な波長帯域も対象物によっては有効でない場合もあるため,識別する対象物に応じて他の波長帯域に透過率を有するフィルタと使い分けるのがよいと思われる。また果実との識別が困難な対象物が画像中に含まれる場合でも,簡単に形状の違いを利用して識別できればそうするのが適当と考えられる。

選定された最適波長帯域は,本実験で使用したイメージセンサの感度であ

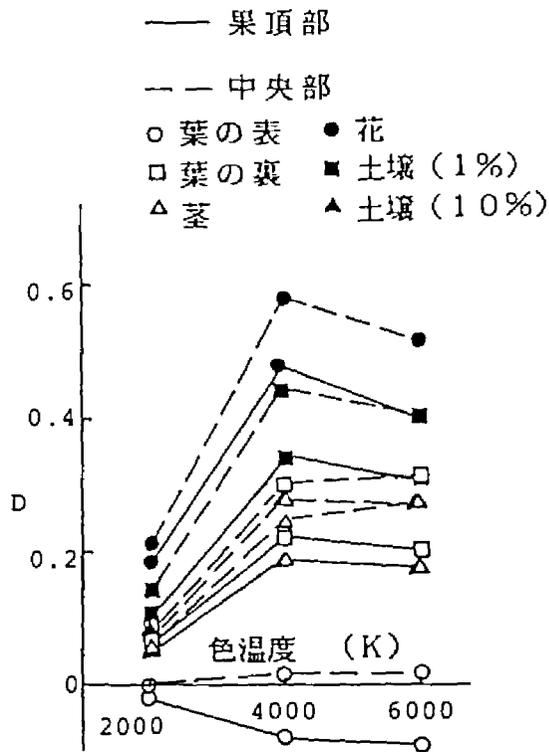


図5-13 計算結果 (キュウリ)

る340 nmから1200 nmまでの範囲から選定されたものであり、図4-5のピーマンの反射特性からもわかるように、さらに広い領域ではより効果的な波長帯域が見つかる可能性があると考えられる。

第4節 摘要

葉と果実の識別のための最適波長帯域が、野外において他の対象物に対しても有効か否かを調べるために、レンズ及びイメージセンサ等を用いて2板式視覚センサを試作し、立毛中の果菜類に対して画像入力実験を行った。さらに各対象物の分光反射特性を調べ、計算機によりシミュレーションを行って検討し、次のような結果を得た。

(1) 果実と葉以外の分光反射特性を測定した結果、可視領域ではトマト及びキュウリの茎は葉と同様で、ナスの茎は果実と同様であった。近赤外領域で

はいずれも900 nm付近までは葉とほぼ同じ反射率を示すが、果実と同じ吸収帯がみられた。トマト及びキュウリの花は緑と赤の成分が高く、紫外領域にも若干高い反射率を示し、ナスは青と赤の成分が高かった。近赤外領域においてはいずれも葉とほとんど同じ特性を示した。また土壌の反射率は長波長になるほど高く、含水比が高くなるほど低くなる傾向があった。

(2) 670.8 nmと973 nmのフィルタを用いたトマトの実験より、完熟した果実と葉と茎は識別容易であるものの、空及び土壌は分布が若干重なり識別困難な場合があった。548 nmと851.9 nmのフィルタを用いたナスの実験からは、紫色の茎以外は識別が容易であった。紫色の茎も果実とかなり形状が異なるため識別は可能と考えられた。キュウリもナスと同様に野外における他の対象物についても、ほぼ識別可能であるという結果が得られた。

(3) 計算機によるシミュレーションより、光源の色温度が低くなるほど果実と他の対象物の識別は難しくなった。土壌は含水比が高くなるほど識別困難になる傾向があったが、550 nmと850 nmのフィルタを使用すれば、果実とは容易に識別できた。他の対象物については実験結果とほぼ同様の結果が得られた。

(4) 最適波長帯域は対象物によっては有効でない場合もあるため、識別する対象物に応じて他のフィルタと使い分けるのがよいと考えられた。

第6章 ビジュアルフィードバック法による果実の位置検出⁴⁷⁾⁴⁸⁾

視覚センサを走行装置に取り付け、ステレオ写真の方法で果実の3次元位置を求める報告⁵⁾⁷⁾が既にされている。しかし、この方法はトマト等のようにほぼ平面内に生育する果実には有効であるものの、柑橘類のように大きな樹冠を形成する果樹に対しては、視覚センサから果実までの距離が大きいと果実を認識する画素数が小さくなり、正確な認識、位置測定が困難となる。また位置検出を行った後の果実の位置の変化に対応できないという欠点がある。

そこで本章では、視覚センサの画素数を有効に生かせる位置、つまり果実を収穫する際に移動するマニピュレータの手先近くに視覚センサを装着し、マニピュレータの果実に接近する動きを利用したビジュアルフィードバック法によって、自由度5を持つ関節型マニピュレータを用いた果実把握のための位置検出実験ならびに距離検出のシミュレーションを行い、その特徴を検討した。

第1節 室内実験

1. 制御方法

マニピュレータに視覚センサを装着した場合、まず走行装置によってマニピュレータを果樹のところまで移動させた後、視野を大きくとるため、マニピュレータを後退させた姿勢で最初の画像入力を行なう。その画像中の果実を1個ずつ順にマニピュレータに装着された視覚センサで位置検出を行いながらマニピュレータを接近させて収穫を行い、最初に入力された画像中の果実が全部収穫されれば、再びマニピュレータを後退させて次の範囲の画像入力を繰り返し行う方法を取るのが適当と考えられる。

ビジュアルフィードバック法におけるマニピュレータの果実への接近の方法は、最初の入力画像より得られる各果実の方向と果実認識画素数を記憶しておき、果実までの概略の距離とマニピュレータの目標角度を果実ごとに求

める。そして1個ずつ順にその目標角度にマニピュレータを制御して果実認識画素数が設定値を超えるまで繰り返し画像入力を行いながら接近する。

(1)果実認識画素数と果実までの距離

視覚センサが果実を認識した画素数を果実認識画素数と呼ぶが、それをライン上か、あるいはエリア上でとらえることによって、計算精度、計算時間が大きく変わる。本節では計算時間を短くするため、果実を認識した1ライン上における最大画素数とした。これより視覚センサから果実までの距離と果実認識画素数との関係は、図6-1のように反比例となっており、果実の径は同一品種のものならばほぼ一定であると仮定すると、果実認識画素数がわかれば果実までの概略の距離が知れる。今回は果実の平均径を65 mmとして果実までの距離を求めた。

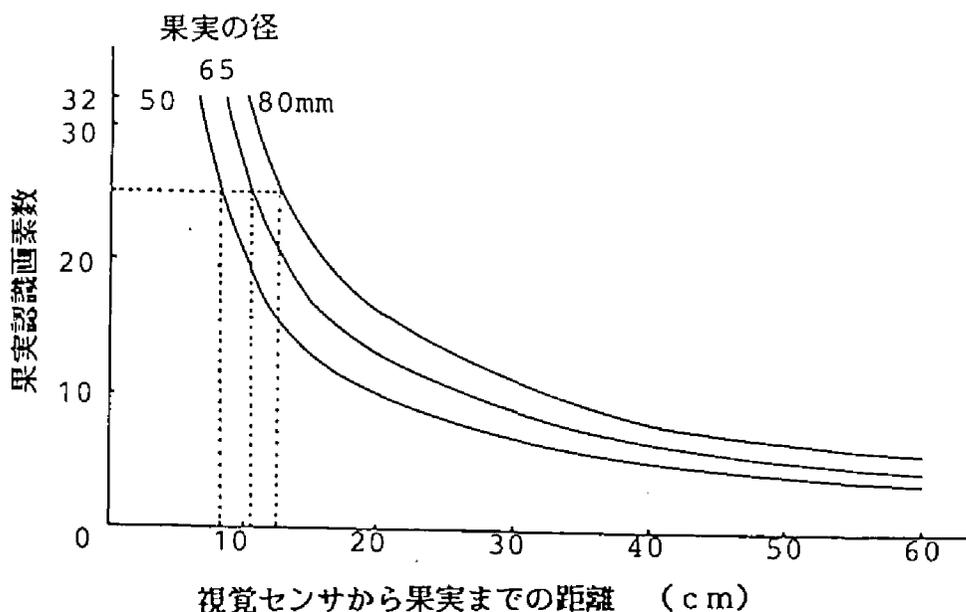


図6-1 果実認識画素数と視覚センサから果実までの距離との関係

(2)マニピュレータの目標角度

図6-2に示すように、マニピュレータの静止した関節（関節型の場合は腰の関節）から視覚センサまでの距離をL、視覚センサから果実までの距離

を X ，入力画像より得られる果実の方向を α' とするとマニピュレータの目標角度 α は

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{X \cdot \sin \alpha'}{L + X \cdot \cos \alpha'} \quad (6-1)$$

のように幾何学的に計算で求められる。

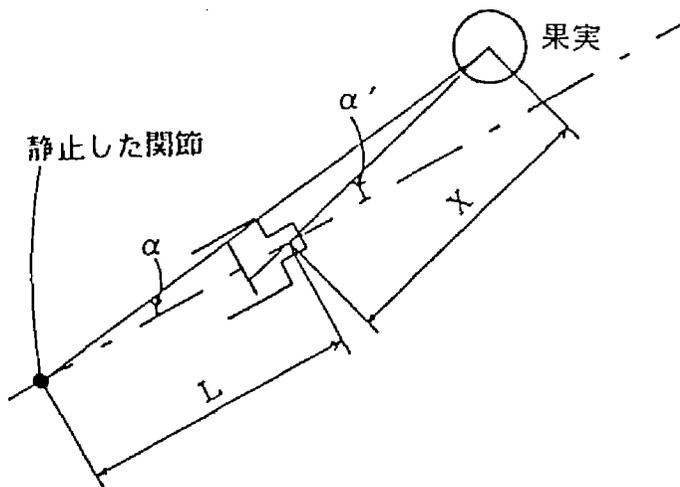


図6-2 果実の方向と目標角度

(3)実験のフローチャート

図6-3に実験のフローチャートを示す。最初，マニピュレータを初期姿勢にした後，画像入力して果実認識画素数が設置値以下ならば果実までの概略の距離とマニピュレータの目標角度を計算する。それと同時に，今回は視覚センサの画像入力，処理速度が約1 sと遅く，速度制御を行なっていない関節型マニピュレータを用いたため，果実認識画素数からマニピュレータの進み得る移動距離を求めた。この移動距離は最も小さい果実の径を30mmとし

て、1度の移動で果実に接近し過ぎないように求められた。その距離だけマニピュレータを移動させた後、再び画像入力を行なうフィードバックループを作成した。それを繰り返すことによって果実約10 cm手前まで接近し、果実認識画素数が設定値を超えればこのループを抜けだす。この時、果実は視覚センサの正面にあるため、ハンドの正面にくるよう位置を補正して把握に移る。把握ができれば、再び初期姿勢をとって制御を終了するが、把握できなければ、2回まで試行を繰り返した後に制御を終了する。なお、本実験では平均径と見なした65 mmの果実のとき、マニピュレータが10 cm手前まで近づいて把握に移るよう、果実認識画素数の設定値を24とした。

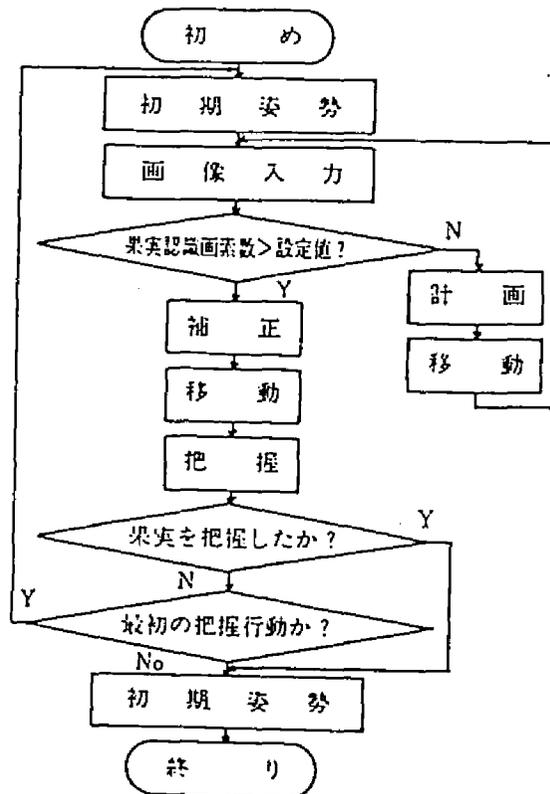


図6-3 実験のフローチャート

2. 実験装置及び方法

(1) 関節型マニピュレータ

マニピュレータには図6-4に示す自由度5をもつ関節型のものを用いた。
この詳細は文献⁴⁾を参照願いたい。

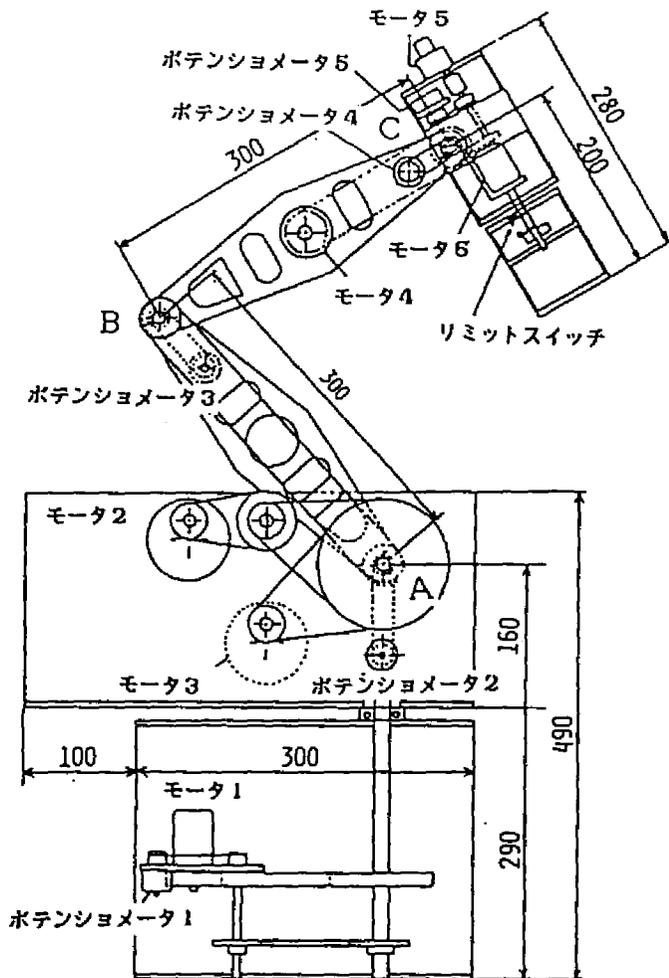


図6-4 関節型マニピュレータ⁴⁾

(2) 実験方法

図6-5に示すように実験は室内で、走行装置（バッテリーカー）の上にマニピュレータ、マイクロコンピュータ及び電源等に乗せ、マニピュレータ

の手先近くに第2章で使用した視覚センサおよびイメージセンサの駆動，増幅回路を装着し，オレンジ色に塗った木球を色温度3200 Kのランプによって適度な出力の得られる照度にして行った。本来は視覚センサのみを装着する予定であったが，イメージセンサと駆動，増幅回路との距離を30 cm以上にすると，イメージセンサから必要とする出力が得られないため，駆動，増幅回路も装着した。装着した視覚センサ，駆動，増幅回路等の全質量はあわせて約3 kgとなった。また木球の径は60，70，80 mmの3種を用いた。

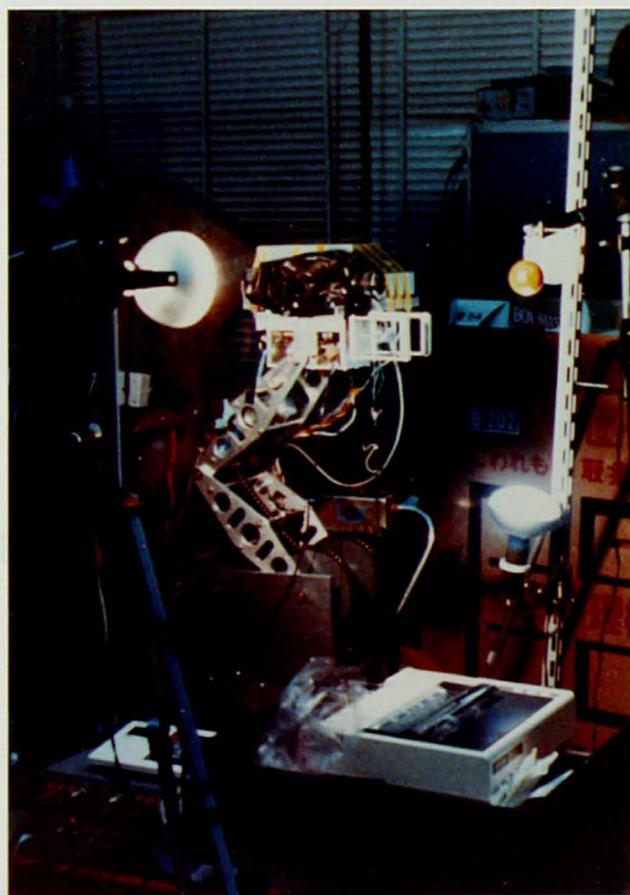


図6-5 実験装置

3. 実験結果及び考察

実験結果の1例を図6-6に示す。果実の方向をX，それに直交する水平方向をY，鉛直方向をZとし，原点を地上から65 cmに位置する腰の関節にとった。マニピュレータが初期姿勢の時，各関節の座標はA (0,0,16)，B₁ (-21,0,37)，C₁ (0,0,58.5)，視覚センサのレンズの座標はD₁ (13,0,71)である。この時の木球は視覚センサの正面に位置しているのに，理想的には初期姿勢からハンドの位置を補正する前までは直進するはずであるが，視覚センサのレンズの位置D₁～D₄が多少上下している。これは視覚センサならびに駆動，増幅回路等の質量が大きかったため，マニピュレータの遊びにより，このような現象が生じたものと考えられる。この時は初期姿勢から3回

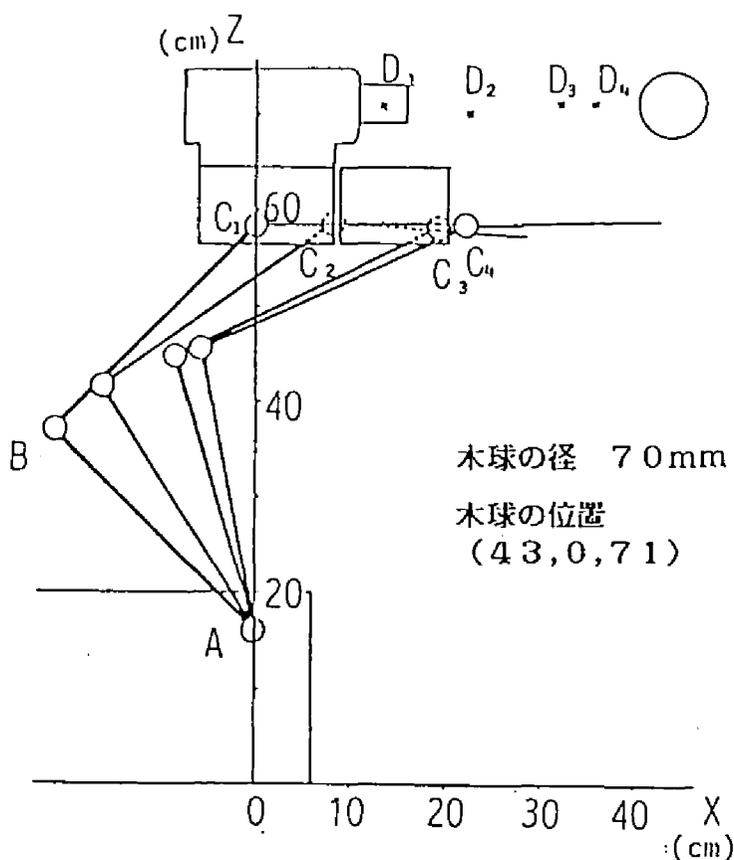


図6-6 実験結果

の移動を行ない、視覚センサが木球中心から8 cmの所まで接近した後、把握に成功した。木球が視覚センサの正面にない場合は、マニピュレータの遊びの影響で木球が視覚センサの視野からはみ出し、マニピュレータが接近できないことが多かったため、本実験では木球が視覚センサの正面にある場合について実験を行った。実験結果を平均すると木球に径が60 mmの時は7.5 cm, 70 mmの時は9.5 cm, 80mmの時は11 cm手前まで接近した後に把握に移った。理想的には径60 mmの時は9.6 cm, 70 mmの時は11.2 cm, 80 mmの時は12.8 cm手前まで接近した後に把握に移るはずであるが、いずれも少し近づき過ぎた結果となった。その原因としてマニピュレータの遊びの影響、視覚センサの画素数が小さ過ぎて木球を正確に認識できなかったこと等が挙げられる。

この実験の結果、視覚センサの正面で距離30 cm程度のところに位置する木球は、多少の径の違いはあっても許容誤差を持つハンドの構造のため、画素数32×32でほぼ把握可能であった。この方法は対象物が視覚センサの視野内にあればマニピュレータの動きを利用して確実に接近できるというという特徴があるが、欠点として球径の大小によって求める対象物までの距離に差ができること、画像入力回数が多いため、画像入力、処理に要する時間が長いと接近するのに時間がかかること等があげられる。また、手先の位置と姿勢を決定して移動する関節型マニピュレータよりも、直動型マニピュレータに有利な方法であると考えられた。

第2節 シミュレーション

1. 計算方法

本節ではビジュアルフィードバック法の距離検出精度に重点をおき、果実はすでに視覚センサの視野の中心にあるとして、対象物までの距離計算のみに関して、計算機によるシミュレーションを行った。

(1)果実認識画素数と対象物までの距離

本節では対象物を完全な球と考え、マニピュレータの移動中に画像入力すると想定し、果実認識画素数はイメージセンサに結ばれた像に対して1画素

ずつ走査し、対象物の像が画素上で半分以上の面積を占めていれば1、そうでなければ0として計算した。

前節では果実認識画素数を視覚センサが果実を認識した1列(ライン)の最大画素数としていたが、本節では計算精度を重視し、果実を認識した画素数全体(エリア)で考えた。これより視覚センサから対象物までの距離と果実認識画素数との関係は対象物を球と考えると(6-2)式であらわされる。

$$X = r \sqrt{\frac{\pi N}{2N_a \tan^2(\theta/2)} + 1} \quad (6-2)$$

X：視覚センサから対象物までの距離

r：果実の半径

N：視覚センサの画素数

N_a：果実認識画素数

θ：視覚センサの画角

ここでXはrが既知でないと求まらないため、前節と同様に対象物の平均径を65 mmとしてrに代入した。

(2)計算方法

本シミュレーションでは画像入力に要する時間は1/60 sとし、画像処理時間を0, 0.5, 1 s, 視覚センサの画素数を32×32から512×512まで、視覚センサの画角を35, 45, 55°, 対象物の径を55, 65, 75 mm, マニピュレータの速度は100, 300, 500 mm/sとし、視覚センサから対象物までの距離は1000 mmから100 mmまで変えて行った。

2. 計算結果及び考察

図6-7に視覚センサの画角55°, マニピュレータの速度100 mm/s, 画像処理時間0.5 sの時, 視覚センサの画素数及び対象物の径による距離計算の誤

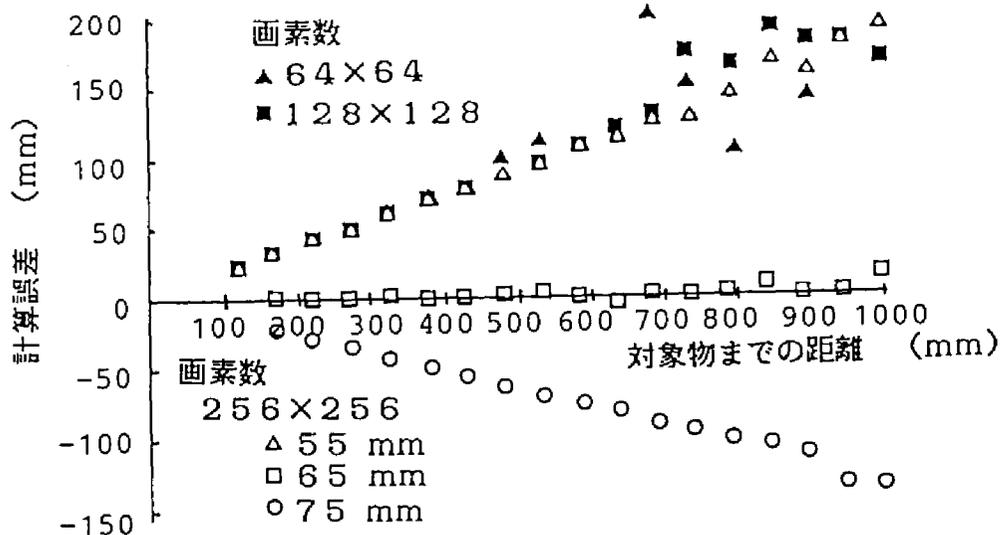


図6-7 距離計算の結果

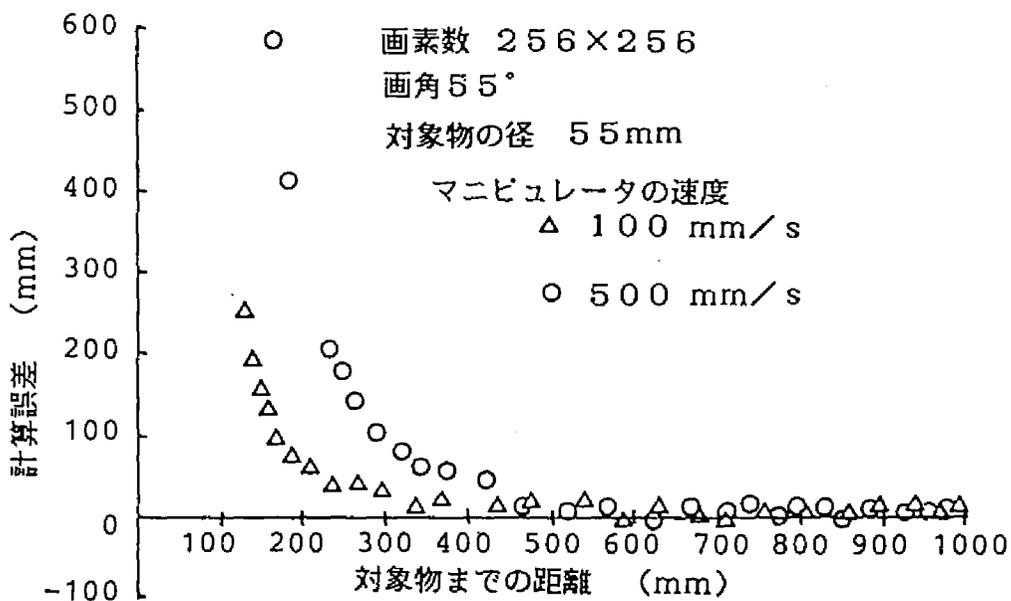


図6-8 果実認識画素数の計算結果

差を示す。画素数は対象物の径55 mmに対して64×64, 128×128, 256×256の時のものを、対象物の径は画素数256×256の時、55, 65, 75 mmのものを記している。これよりビジュアルフィードバック法では、視覚センサから対象物までの距離が小さくなるにつれて直線的に誤差も小さくなるが、対象物の径に左右されることがわかる。また画素数が大きくなる程誤差にばらつきがみられなくなったが、この条件下ではほぼ256×256で十分実用できることが明らかになった。図6-8に視覚センサから対象物までの距離に対して、マニピュレータの速度を変えた時の果実認識画素数と静止した時の果実認識画素数との差の関係を示す。このときの視覚センサの画素数は256×256、画角55°、対象物の径は55 mmである。マニピュレータの速度が早くなるとわずかずつではあるが、このように果実認識画素数が大きくなるため、距離計算の誤差は大きくなった。またマニピュレータの速度、画像処理時間が大きくなると、視覚センサが果実に接近する間に行う画像入力回数も少なくなった。ただ画像処理時間を0 sにすると、画像入力回数が多すぎて計算誤差のばらつきが大きくなった。また画角を小さくすると果実認識画素数が大きくなるため、誤差にばらつきがなくなる傾向がある以外は、大きな変化はみられなかった。

第3節 摘要

ビジュアルフィードバック法による位置検出の特徴を明らかにするため、関節型マニピュレータを用いた実験ならびに計算機によるシミュレーションを行い、次のような結果を得た。

- (1) 果実把握のための位置検出実験では、視覚センサの正面で距離30 cm程度のところに位置する木球は、多少の径の違いはあっても許容誤差を持つハンドの構造のため、画素数32×32でほぼ把握可能であり、対象物が視覚センサの視野内にあればマニピュレータの動きを利用して確実に接近できた。
- (2) マニピュレータの位置決めのための計算時間を短くするには、手先の位置と姿勢を決定して移動する関節型マニピュレータよりも、直動型マニピュ

レータに有利な方法であると考えられた。

(3) 計算機によるシミュレーションでは、視覚センサから対象物までの距離が小さくなるにつれて直線的に誤差も小さくなるが、果実の径に左右されて誤差が生じた。

第7章 視覚センサの果樹方向移動による果実の位置検出⁴⁷⁾⁻⁴⁹⁾

前章でビジュアルフィードバック法の特徴を検討したところ、果実の径によって距離計算の誤差が生じるという欠点があった。本章ではその欠点がなく、マニピュレータの果実に接近する動きを利用した位置検出法として、視覚センサが果樹方向に移動する前後2回の入力画像の違いより、果実までの距離を求める方法を考案した。この方法の特徴を明らかにするため、計算機によるシミュレーションならびに直動型アームを用いた位置検出実験を行った。

第1節 シミュレーション

1. 計算方法

視覚センサの果樹方向移動による方法では、視覚センサを一定距離だけ果樹方向に移動させ、果実が画面中心になれば、図7-1に示される移動前後2回の入力画像の違いにより、移動後の視覚センサから果実までの距離 X と視覚センサ中心線から果実までの距離 Y を、幾何学的に(7-1)、(7-2)式で求め、果実の3次元の位置を知る。

$$X = \frac{M \cdot Y_1}{Y_2 - Y_1} \quad (7-1)$$

$$Y = \frac{Y_2 \cdot X}{X_i} \quad (7-2)$$

M : 視覚センサの移動距離

Y_1 : 移動前のイメージセンサ上での視覚センサ中心線から果実中心線までの距離

Y_2 : 移動後のイメージセンサ上での視覚センサ中心線から果実中心線までの距離

X_i : 像点距離

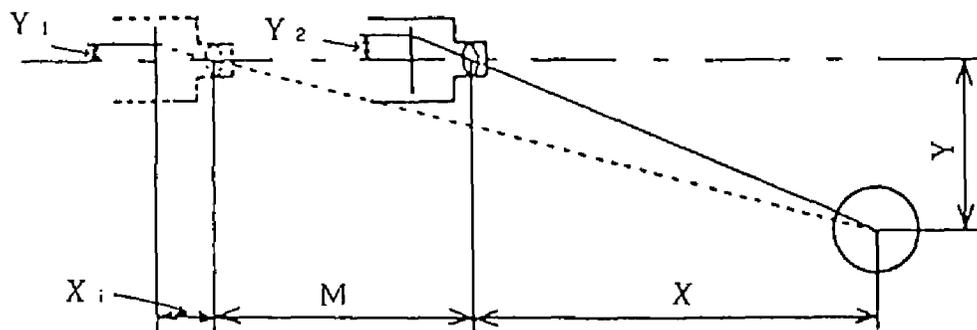
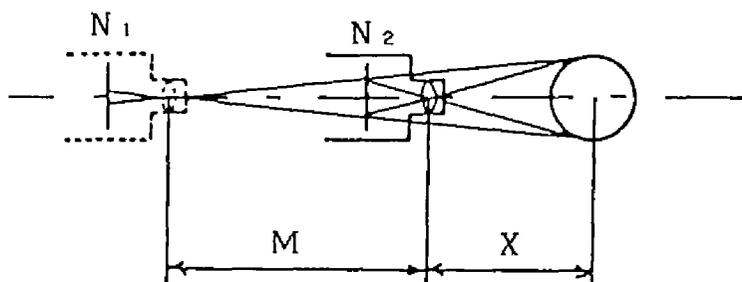


図7-1 視覚センサの果樹方向移動による方法
(果実が画面中心にない場合)



N_i : 視覚センサの移動前後の果実認識画素数 ($i = 1, 2$)

図7-2 視覚センサの果樹方向移動による方法
(果実が画面中心にある場合)

果実が画面中心にあれば、図7-2に示されるように視覚センサ移動前後の入力画像より果実認識画素数を求め、その差より移動後の視覚センサから果実までの距離 X は(7-3)式で表される。

$$X = \frac{M \cdot N l_1}{N l_2 - N l_1} \quad (7-3)$$

$N l_i$: 移動前後のライン上の果実認識画素数 ($i = 1, 2$)

ここで果実認識画素数は前述したようにライン上でとらえており、(7-3)式は視覚センサから果実までの距離と果実認識画素数とが反比例の関係であることより導かれている。

また果実認識画素数をエリア上でとらえた場合、視覚センサから対象物までの距離は果実の半径を考慮しないと(7-4)式で、果実の半径を考慮に入れると(7-5)式であらわされる。

$$X = \frac{M \cdot \sqrt{N a_1}}{\sqrt{N a_2} - \sqrt{N a_1}} \quad (7-4)$$

$$X = \frac{M \cdot N a_1 + \sqrt{r^2 (N a_2 - N a_1)^2 + M^2 \cdot N a_1 \cdot N a_2}}{N a_2 - N a_1} \quad (7-5)$$

$N a_i$: 移動前後のエリア上の果実認識画素数 ($i = 1, 2$)

r : 果実の半径

またこれ以後、果実が視覚センサ中心にある場合の位置検出法を視覚センサの果実方向移動による方法と呼ぶ。画像入力方法及び果実認識画素数の計算方法は前章と同様で、視覚センサの画素数、画角、マニピュレータの速度、

対象物の径，視覚センサの移動距離及び計算式等を変えて計算機によるシミュレーションを行った。

2. 計算結果及び考察

図7-3には(7-1)，(7-2)，(7-3)式を用い，対象物の径65 mm，視覚センサの移動距離20 cm，画素数128×128で，対象物の位置をX，Y方向共に1 cmずつ代えた時のX方向の測定誤差2 cm，4 cm及び10 cmの分布を示している。この計算に際しては小数点以下を四捨五入し，マイクロコンピュータ内で行なうことを想定して行った。横軸にはX方向の座標を，縦軸にはY方向の座標をとっており，外側の鎖線は移動後の視覚センサの視野で，内側の実線は測定可能な範囲を表わしている。X軸上に示されている測定誤差は，対象物が画面中心に有るときで(7-3)式により求められ，その他の測定誤差は(7-1)，(7-2)式から求められた。この図より，画面中心付近では(7-1)式によって求められた誤差は非常に大きく，誤差2 cm以内の範囲は視覚センサから

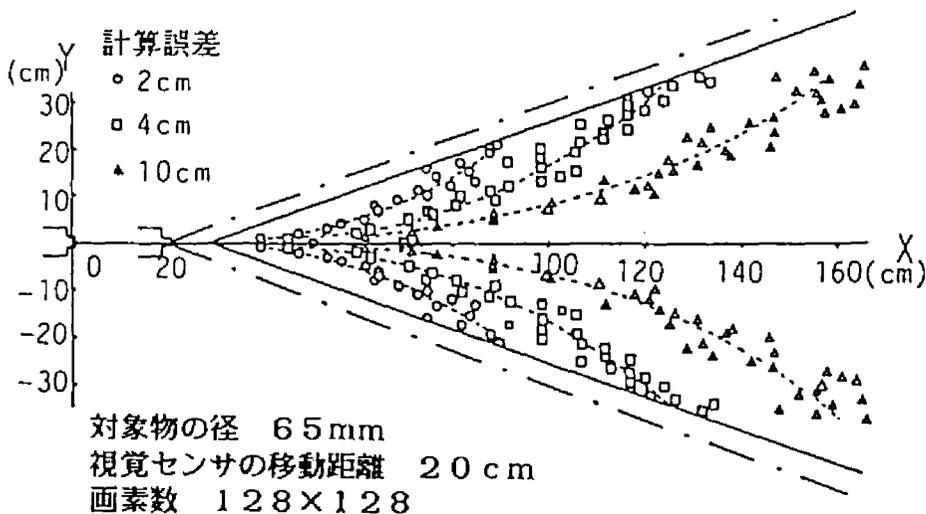


図7-3 計算誤差の分布

の距離の小さい所と画面周辺付近に限られているのがわかる。これは画面中心付近では(7-1)式の分母が極端に小さくなるためである。

図7-4は対象物が画面中心にあり、(7-3)式を用い、対象物の径70 mm、視覚センサの移動距離20 cmで視覚センサの画素数を変えたときの計算結果である。横軸には対象物のX方向の座標を、縦軸にはX方向の測定誤差をとっている。このときも対象物の座標は1 cmずつ変え、小数点以下は四捨五入して計算した。この図より、対象物の位置が視覚センサから遠ざかれば双曲線状に誤差が増える。その誤差は既に報告された方法⁵⁾⁷⁾に比べてかなり大きくなっており、この方法だけで果実の位置検出を行なうには、かなりの画素数が必要と考えられる。対象物が画面中心にない時も同じような傾向の曲線となった。

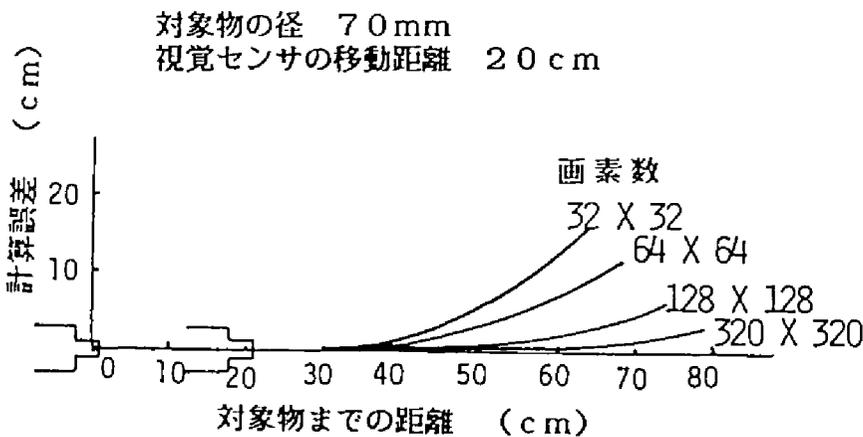


図7-4 画素数による計算誤差

図7-5には(7-4)式と(7-5)式を用いたときの計算誤差を示す。このとき視覚センサの移動距離は150 mm、画素数256×256、画角55°、マニピュレータの速度100 mm/s及び対象物の径55 mmであった。これより図7-4に比べ、果実認識画素数をエリア上でとらえることにより、格段に検出精度が向上していることがわかる。また、(7-4)式と(7-5)式による計算誤差の比較を行う

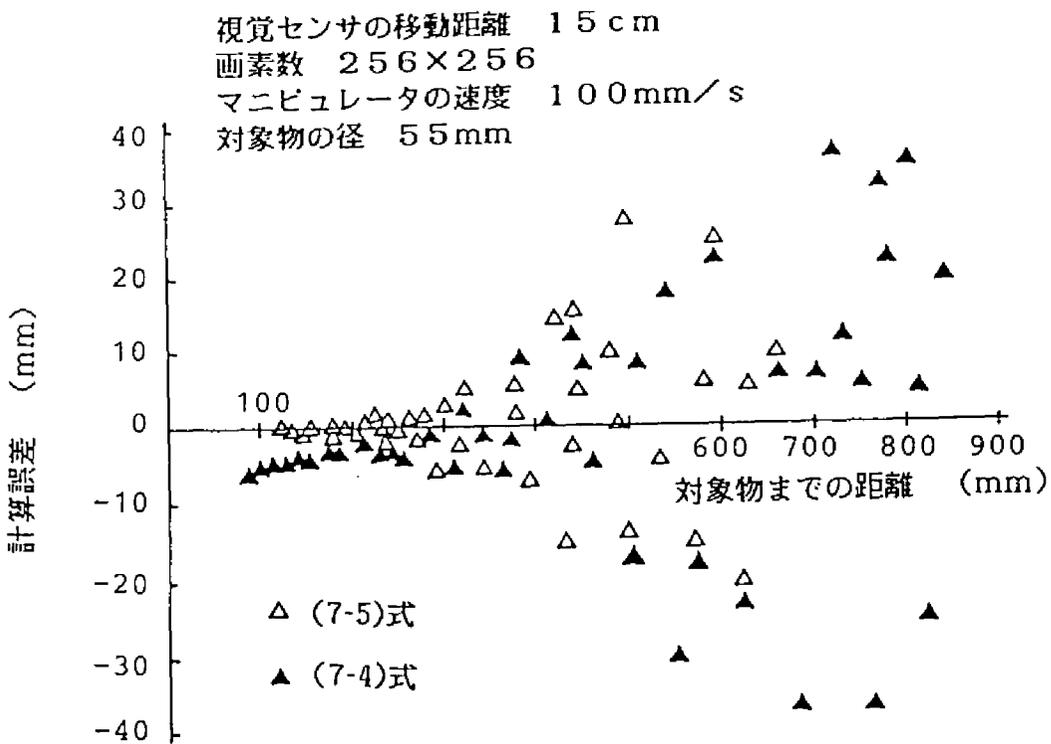


図7-5 計算式による距離計算の誤差

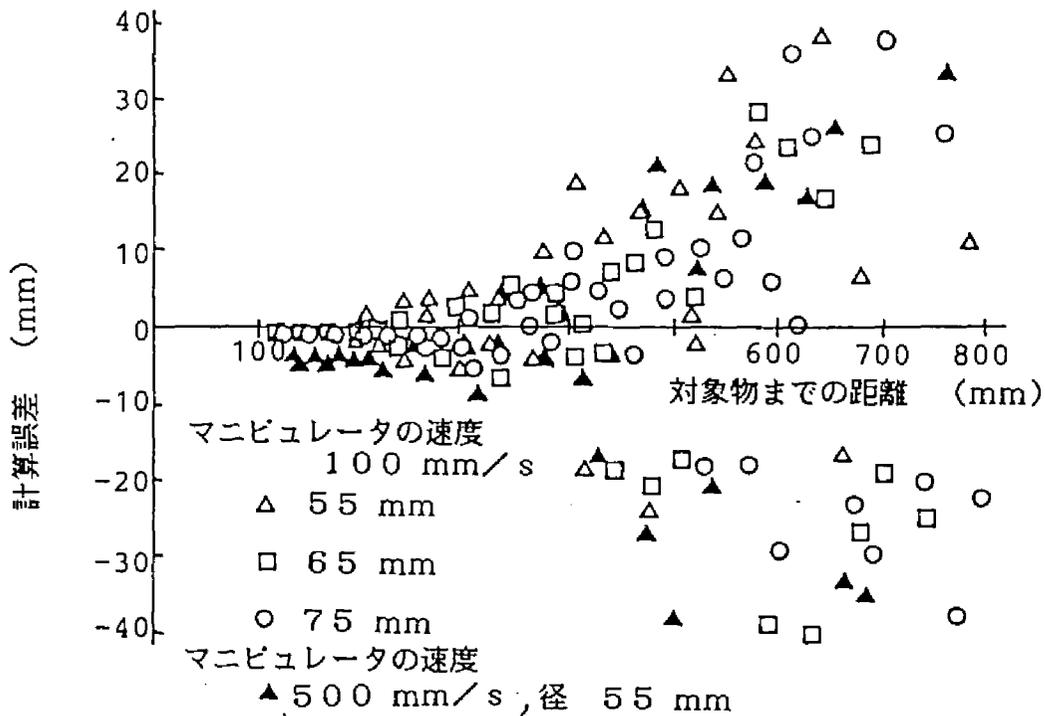


図7-6 対象物の径, マニピュレータの速度による距離計算の誤差

と、視覚センサから対象物までの距離が300 mm程度までは両者に大きな違いがみられないが、それより近づくと(7-4)式では対象物を円として取り扱っているため、マイナスの誤差がでてくる。このことより、これ以降の計算には最初に(7-4)式を用い、それより求まる半径を用いて(7-5)式で計算した。

図7-6に視覚センサの画角 55° 、マニピュレータの速度100 mm/s、視覚センサの移動距離100 mm、視覚センサの画素数 256×256 の時の対象物の径による距離計算の誤差ならびに対象物の径55 mm、マニピュレータの速度500 mmの時の誤差を示す。これより、視覚センサから対象物までの距離が大きい時は果実認識画素数が小さいため、対象物の径が小さいほど誤差は大きくなっているが、対象物までの距離が小さくなると対象物の径に関わらず誤差は小さくなることを示している。マニピュレータの速度を大きくすると画像入力の際にマニピュレータの進む距離が増え、図6-8で示されたように果実認識画素数が大きくなり、マイナスの誤差が増加している。

図7-7に視覚センサの移動距離を変えた時の、視覚センサから対象物ま

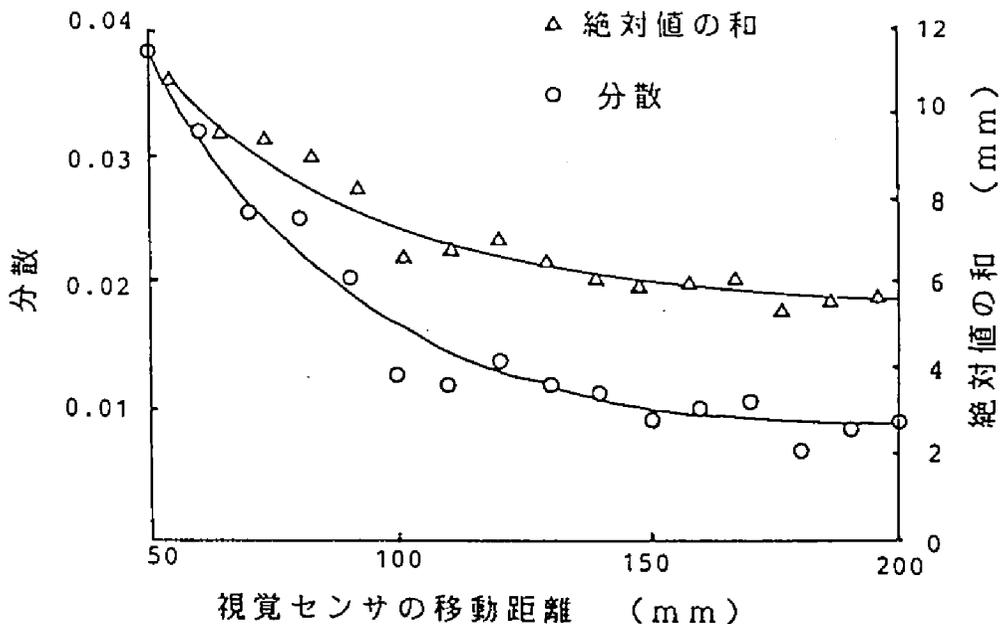


図7-7 視覚センサの移動距離による距離計算の誤差

での距離が100 mmから600 mmの間の100個の計算誤差の分散ならびに誤差の絶対値の和を示す。このときマニピュレータは停止し、視覚センサの画素数は256×256、画角35°、対象物の径65 mmで、誤差のばらつきを少なくするため、果実認識画素数をイメージセンサに結ぶ対象物の像の面積とイメージセンサの受光面の面積の比より求めた。この図は移動距離が大きくなるほど誤差は小さくなるが、移動距離が100～150 mmを越えてもそれほど測定精度は上がらないことを示している。

以上の結果より、この方法は果実の径によってあまり計算精度に差がなく、視覚センサから果実までの距離が小さくなると誤差が非常に小さくなるため、ビジュアルフィードバックによる方法、あるいは他の方法と組み合わせ、果実にある程度接近した後に用いれば、遠くに位置する果実の検出精度の向上がはかれるだけでなく、メモリにストアされた果実の位置変化に対処でき、画素数の縮小も可能であると考えられる。

第2節 室内実験

次にシミュレーション結果の計算誤差が実際に正しいか否か、また対象物が完全な球でない場合の計算誤差を調べるため、実際に果実を用いて位置検出実験を行った。

1. 実験装置及び方法

視覚センサを装着するためのマニピュレータとして、簡単に制御が行えるよう、自由度1の直動型アームを試作した。このアームはDCサーボモータの回転運動を減速機によって10分の1に減速し、ラック及びピニオンを用いて回転運動を直線運動に変える構造をもち、全長は1500 mmでストロークは約1000 mmとした。図7-8に実験装置のブロック図を示す。アームはパーソナルコンピュータにモータの回転速度指数を入力すると、DA変換器、ドライバを介して速度が制御され、エンコーダからのパルスのカウントすることによってその位置を知ることができる。そのアーム先端に、1/60 sで画像メモリに画像入力でき、約0.4 sでパーソナルコンピュータ内のメモリに画像デー

タが転送可能な視覚センサを装着した。メモリには16階調の濃淡画像が取り込まれるため、2値化した後、簡単な画像処理を行って果実認識画素数を計算した。視覚センサは画素数244×244で、全長128 mm、全幅 32 mm、全高34 mm、重量130 gであり、水平方向の画角約56°，垂直方向の画角約37°，焦点距離8 mm，F値1.4のレンズを装着した。

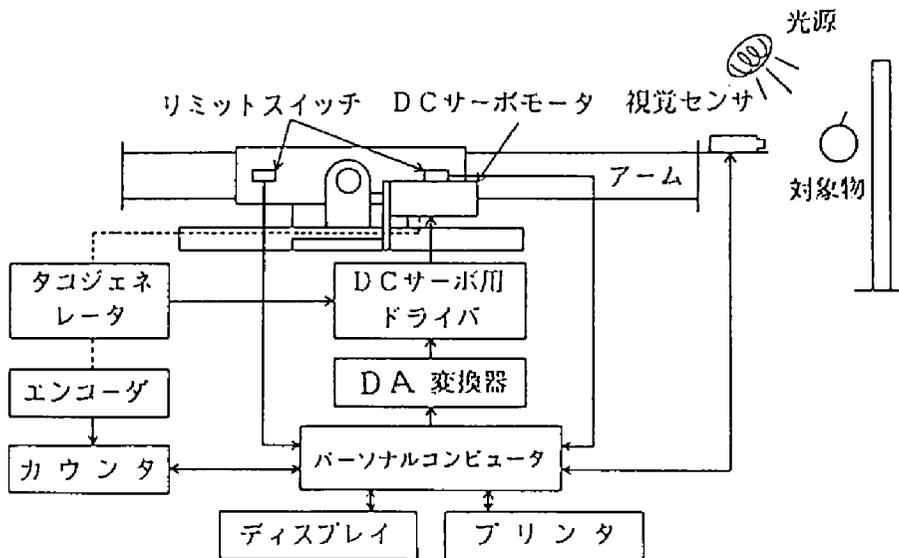


図7-8 実験装置のブロック図

実験は対象物を視覚センサの視野の中心になるように置き、3方向から光源で影ができないよう照度約25000 lxで照らし、視覚センサのレンズにはNDフィルタをつけて入射光を適度に調節して行った。アームは視覚センサから対象物までの距離が1000 mmの位置から接近させ、画像入力するごとに視覚センサのレンズ中心から対象物の中心までの距離をリアルタイムで計算した。アームの速度は約10, 100 mm/sにかえ、対象物には径が55, 65, 75 mmの木球と長径が55, 65, 75 mmの温州ミカンを用いた。その写真を図7-9に示す。

本実験にはCPUに8086相当のものを用いている16ビットパーソナルコン

コンピュータを用い、そのプログラムはアセンブリ言語で作成し、機械語で実行させた。

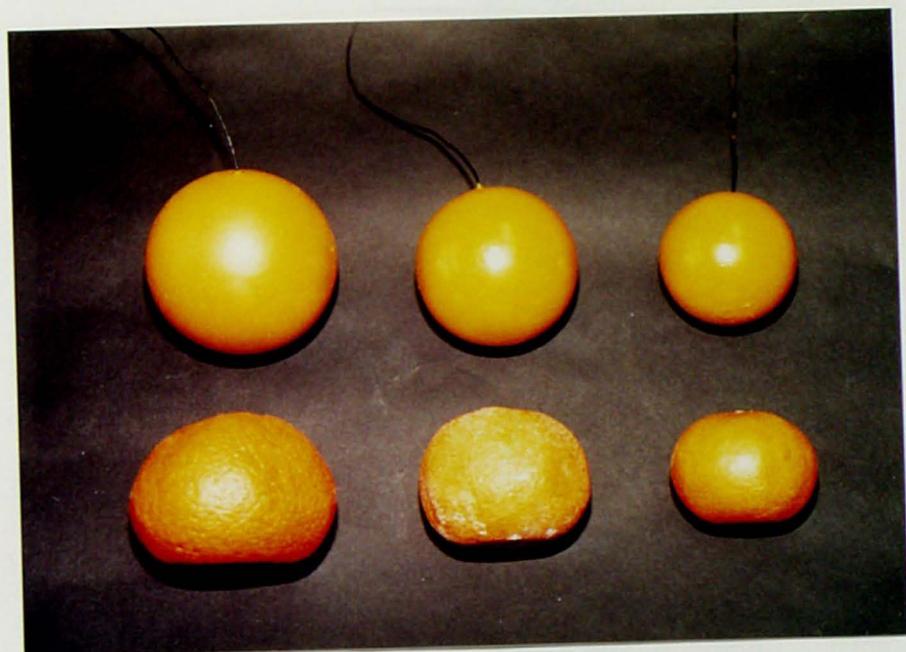


図7-9 対象物

2. 制御方法

図7-10に実験のフローチャートを示す。初期設定でアームの速度及び視覚センサの移動距離等を設定する。アームを起動させた後、画像入力し、果実認識画素数の計算を行う。そしてアームが一定距離移動すれば再び画像入力ならびに果実認識画素数の計算を行い、最初は(7-4)式で対象物までの距離の計算及び対象物の半径の計算を行う。そしてアームをさらに一定距離移動させ、画像入力ならびに果実認識画素数の計算を行い、2度目からは(7-5)式で対象物までの距離の計算及び対象物の半径の計算を行う。それを繰り返していき、視覚センサの視野から対象物がはみでると判断すると終了した。本実験では視覚センサの移動距離は距離計算の精度及び画像入力回数を考慮し、100 mmとした。

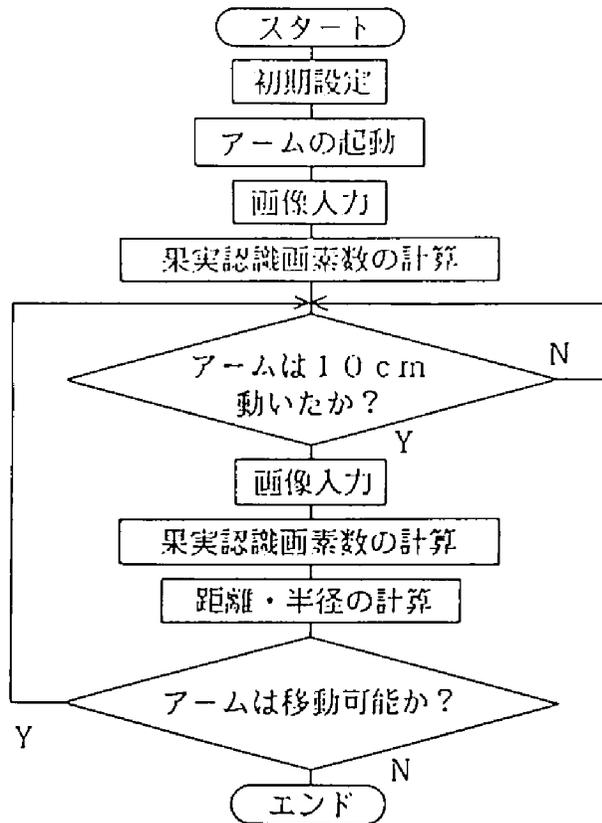


図7-10 実験のフローチャート

3. 実験結果及び考察

図7-11にマニピュレータの速度10 mm/sの時、木球と果実を対象物として実験を行った結果を示す。この図で木球は図7-5と同様の傾向を示し、計算機による計算結果とほぼ一致している。ただ視覚センサから対象物までの距離が200 mm以下になると少しプラス側に誤差が出ている。これは今回使用した視覚センサにはオートフォーカス機構が備わってなく、ほぼ300 mmのところを焦点を合わせた状態で実験を行ったため、対象物までの距離が200 mm以下では像がぼけていたからであると考えられる。また果実は木球よりも全体的にばらつきが多く、視覚センサが果実に接近しても約5 mmの誤差が残った。これは図7-9からもわかるように木球と果実とでは形状の差があるにもかかわらず、果実を球と見なしたためと考えられた。アームの速度を変

えたときも計算機で計算したものと同じような結果が得られた。

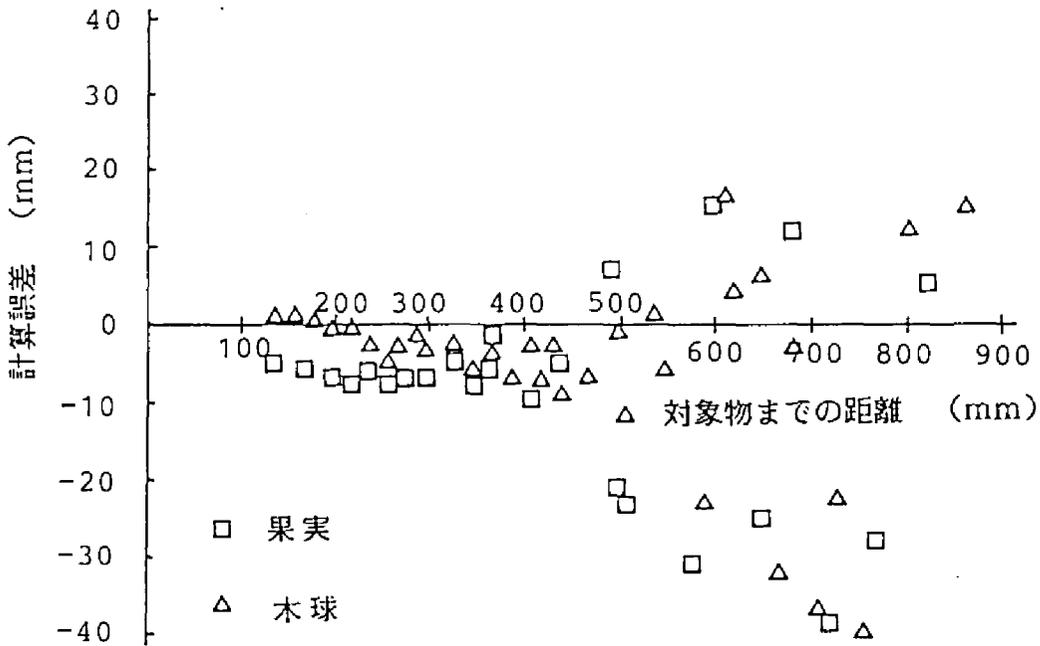


図7-11 木球と果実の距離計算の誤差

本プログラムの実行時間を計測したところ、(7-4)式による計算時間は約2 ms、(7-5)式では約40 ms、であった。また画像処理及び果実認識画素数の計算時間は、視覚センサから対象物までの距離が小さくなり果実認識画素数が増えるにしたがって大きくなるが、その距離が300 mm以上あるときは約0.4 s以下、距離200 mmの時0.9 s、距離150 mmの時1.6 s程度であった。参考までに(6-2)式による計算時間は約5 msであった。これより(7-5)式による計算は(6-2)、(7-4)式に比べて時間がかかるため、そのことも考慮して両方法の組み合わせ方を検討するのが適当と思われた。

第3節 摘要

視覚センサの果樹方向移動による方法による位置検出の特徴を明らかにするため、計算機によるシミュレーションならびに直動型アームを用いた位置

検出実験を行い、次のような結果を得た。

- (1) 対象物までの距離が小さいと誤差は非常に小さくなるが、距離が大きかったり、果実が画面の中心付近にあると誤差は大きくなった。
- (2) 対象物の径による計算誤差の違いはあまり見られなかった。
- (3) 視覚センサの果実方向移動による方法では、果実認識画素数をラインでなくエリアでとらえることによって誤差は非常に小さくなった。
- (4) 対象物が木球の場合はほぼ誤差はなくなったが、温州ミカンでは-5 mm程度の誤差が径によって生じた。
- (5) この方法は単独で用いるのではなく、ビジュアルフィードバック法、あるいは他の方法とそれぞれの特徴を生かすように組み合わせて用いれば、有効な方法になり得ると考えられた。

第8章 ビジュアルフィードバック法と視覚センサの果実方向移動による方法を組み合わせた位置検出⁴⁸⁾⁵⁸⁾

第6章及び第7章でビジュアルフィードバック法と視覚センサの果実方向移動による方法の特徴を明らかにしたが、その結果、それらは単独で用いるのではなく、それぞれの特徴を生かせるよう組み合わせれば非常に有効な方法になり得ると考えられた。そこで本章ではその組み合わせ方を計算機によって検討し、位置検出実験によってその効果を確認した。

第1節 組み合わせ方法

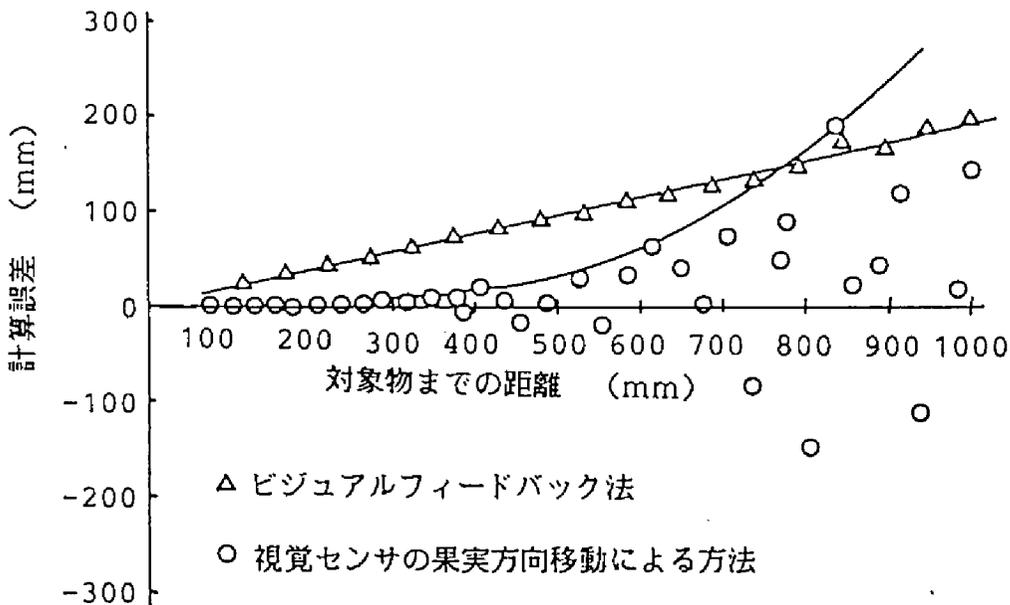


図8-1 ビジュアルフィードバック法と視覚センサの果実方向移動による方法の位置検出誤差

図8-1に視覚センサの移動距離100 mm，画素数256×256，画角55°，対象物の径55 mmで，マニピュレータを停止させて画像入力した時の両方法の計

算誤差の比較を示す。この条件下では、視覚センサの果実方向移動による方法は対象物までの距離が800 mm付近より遠いところではビジュアルフィードバック法よりも誤差が大きく、300 mm付近より近くなると誤差はほぼ0に収束する。そのため距離が800 mm 付近よりも遠いところではビジュアルフィードバック法で、300 mm付近から800 mm付近の間は視覚センサの果実方向移動による方法で、300 mm付近よりも近いところではそれまでに計算された対象物の半径の値を用いて、計算時間の短いビジュアルフィードバック法で位置検出を行うのが適当と考えられた。以下、ビジュアルフィードバック法から視覚センサの果実方向移動による方法へ変える地点を基準点1，視覚センサの果実方向移動による方法からビジュアルフィードバック法に変える地点を基準点2と呼ぶことにする。

第2節 室内実験

1. 実験装置及び方法

実験装置は前章と同じものを用い、実験方法も同様にして行った。図8-2に組み合わせた方法のフローチャートを示す。初期設定でアームの速度及び基準点等を設定する。アームを起動させた後、ビジュアルフィードバック法により画像入力し、果実認識画素数の計算を行い、対象物までの距離を(6-2)式で求めることを繰り返し、基準点1を越えたと判断すれば視覚センサの果実方向移動による方法に移る。ここでは視覚センサの移動距離は距離計算の精度及び画像入力回数を考慮し、100 mmとした。その移動距離だけアームが移動すれば画像入力ならびに果実認識画素数の計算を行い、最初は(7-4)式で、2度目からは(7-5)式で対象物までの距離及び対象物の半径の計算を行うことを繰り返す。そして基準点2を越えたと判断すれば、再びビジュアルフィードバック法で前回求められた半径を用いて距離計算を繰り返し行い、視覚センサの視野から対象物がはみでると判断すると終了した。

本実験では基準点1を600, 700, 800 mmとし、基準点2を200, 300 mmとした。

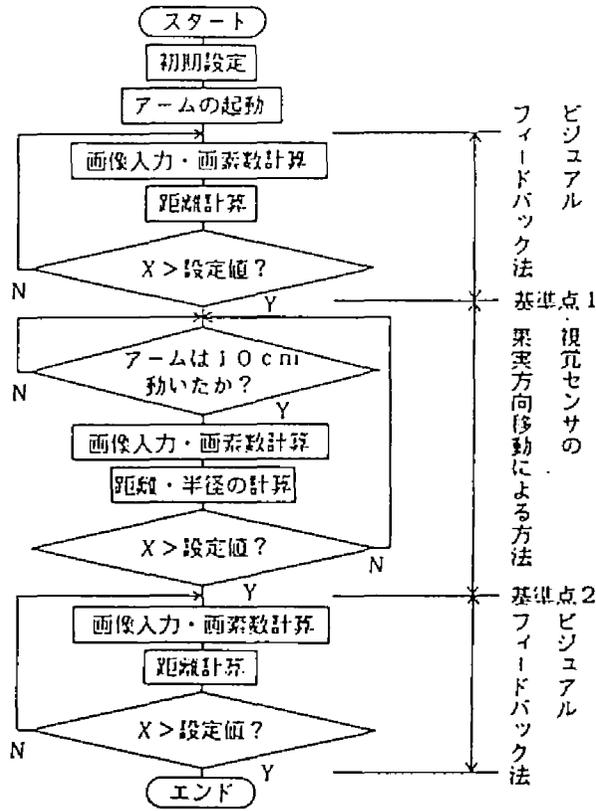


図8-2 組み合わせた方法のフローチャート

2. 実験結果及び考察

図8-3にマニピュレータの速度10 mm/sで径65 mmの木球を対象物とし、基準点1, 2を変えたときの距離計算の誤差を示す。これより基準点1を変えても計算誤差にあまり差が見られないが、800 mmよりも大きいところに基準点1を設定すると誤差が大きくなるものと思われる。また基準点1をあまり小さくすると径の小さい対象物では、実際にビジュアルフィードバック法から視覚センサの果実方向移動による方法へ移行する地点が、基準点1よりもかなり対象物よりになるため、視覚センサの果実方向移動による方法で少ない回数しか計算されないという不都合が生じた。これより基準点1は対象物の径の範囲によって変えるのが適当と思われた。基準点2は300 mmでは視覚センサの果実方向移動による方法でまだ完全に誤差が0に収束していなか

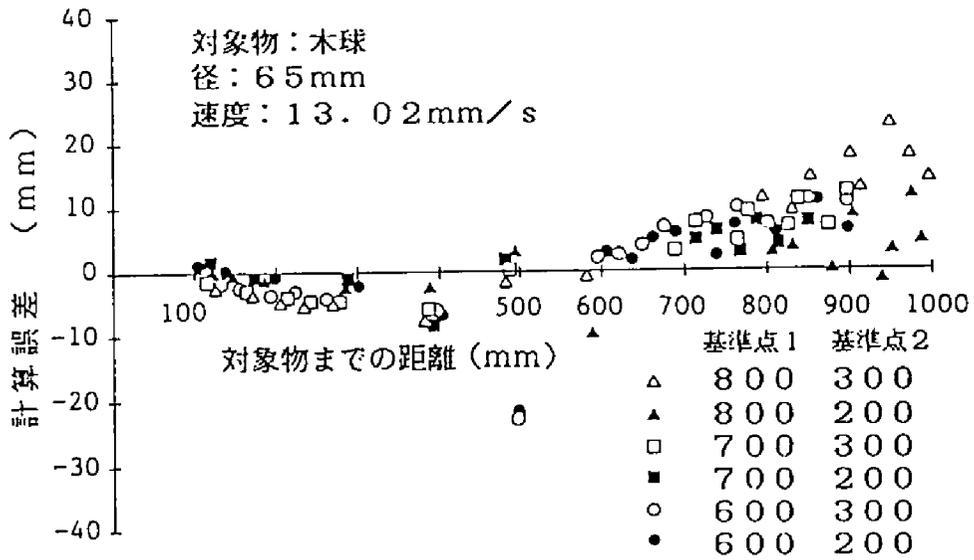


図8-3 組み合わせ方による計算誤差

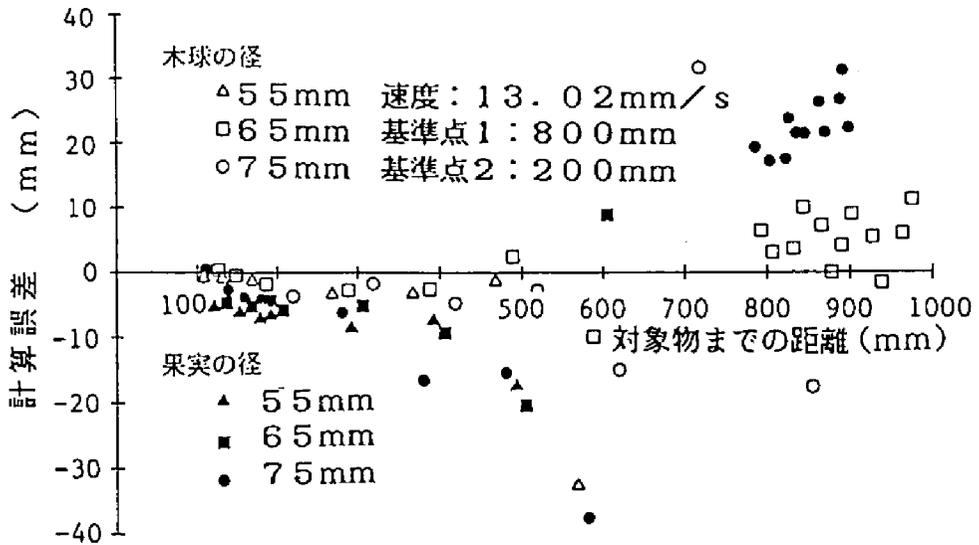


図8-4 対象物の径による計算誤差

ったため、最終的に若干マイナスの誤差が残っているが、200 mmではほとんど誤差はなくなっており、(6-2)式による距離計算で良いことがわかる。

この結果より、基準点1を800 mm、基準点2を200 mmとし、対象物を変えたときの実験結果を図8-4に示す。木球の径55 mmと75 mmならびに果実の径55 mmと65 mmの視覚センサから対象物までの距離が800 mmよりも大きいところのデータは計算誤差が±40 mmをこえたため、この図には示されていない。果実の径65 mmが(6-2)式による距離計算で誤差が大きくなった理由は、果実の径は長径であり、視覚センサのイメージセンサに結像する面積は、実際には木球よりかなり小さいからであると考えられた。この結果より、木球は径が変化しても最終的にはほぼ誤差はなくなっているが、果実は前章の図7-12に見られる-5 mm程度の誤差が径によって生じた。この誤差をさらに小さくするには、次のようなことが考えられる。

- (1)この誤差は果実を球でとらえて計算していることより生じるため、別な形状にあてはめて計算を行う。
- (2)果実の形状によって定式的に出るものと考えられるため、果実によってその補正を行う。
- (3)5 mm程度の誤差であればハンドあるいは作業機側で誤差を吸収するような構造とする。

以上のようにビジュアルフィードバック法と視覚センサの果実方向移動による方法を適切に組み合わせれば、距離計算の誤差が小さく、時間的にも有効に位置検出できることがわかった。

第3節 摘要

ビジュアルフィードバック法ならびに視覚センサの果実方向移動による方法の特徴を生かした両方法の組み合わせ方を検討するため、計算機によるシミュレーションならびに直動型アームを用いた位置検出実験を行い、次のような結果を得た。

- (1) 両方法の組み合わせ方は対象物までの距離が800 mm付近より遠いところ

ではビジュアルフィードバック法で、200 mm付近から800 mm付近の間は視覚センサの果実方向移動による方法で、200 mm付近よりも近いところではビジュアルフィードバック法で位置検出を行うのが適当と考えられた。

(2) 前章と同様に対象物が木球の場合はほぼ誤差はなくなったが、温州ミカンでは-5 mm程度の誤差が径によって生じた。その誤差は対象果実によって補正を行ったり、ハンドあるいは作業機側で誤差を吸収するような構造とするのが適当と考えられた。

第9章 結論

果実と茎葉等の識別ならびに果実の位置検出が可能なマニピュレータ装着用視覚センサを開発する目的で、視覚センサを試作し、識別実験ならびに位置検出実験、さらには計算機によるシミュレーションを行った。大要は次の通りである。

(1) 3色分解を利用した果実と葉の識別実験では、ある色をしきい値として果実と葉の識別を行えば、その色と形で多種類の果実を認識できると考えられた。欠点として色をソフトウェアのアルゴリズムで決定すると、時間がかかるということがあげられた。

(2) 2色の成分比による識別実験より、赤系統の果実に対してはR及びGフィルタを、黄系統の果実に対してはR及びBフィルタを、黒紫色の果実に対してはR及びGフィルタ、あるいはG及びBフィルタを使用するのが有効であることがわかった。この方法は既成の信号またはフィルタを使用できるという利点をもつが、葉と同系統の色を呈する果実を識別するのに適さない欠点があった。

(3) 果実と葉の分光反射特性を可視領域から近赤外領域にかけて測定した結果、葉の反射率はいずれの品種も大きな差は見られなかった。果実においては、色の異なるものは可視領域でその差異を示し、近赤外領域では葉よりも反射率の高いものと低いものに分類できた。1200 nmまでの領域では果実のみ水分の吸収帯がみられた。また果実と葉以外の分光反射特性を測定した結果、可視領域ではトマト及びキュウリの茎は葉と同様で、ナスの茎は果実と同様であった。近赤外領域ではいずれも900 nm付近までは葉とほぼ同じ反射率を示すが、果実と同じ水分の吸収帯がみられた。トマト及びキュウリの花は可視領域において緑と赤の成分が高く、紫外領域にも若干高い反射率を示し、ナスの花は青と赤の成分が高かった。近赤外領域においてはいずれも葉とほとんど同じ特性を示した。また土壌の反射率は長波長になるほど高く、含水比が高くなるほど低くなる傾向があった。

(4) 葉と同系統の色の果実をも識別する目的で求められた最適波長帯域は、トマトは670 nmと970 nm付近、ナスとキュウリは550 nmと850 nm付近、温州ミカンとカキは550 nmと670 nm付近であった。この結果、赤及び黄系統の色を呈する果実はクロロフィル吸収帯が、近赤外領域で葉より果実の反射率が高くなる果実は850 nm前後の波長帯が識別に適することがわかった。

(5) 最適波長帯域を利用して識別実験を行った結果、熟した果実はもちろんのこと、3色分解用フィルタでは識別困難であった未熟なトマト及びキュウリ等の果実との識別が容易になった。これより葉と異なる色を呈する果実には3色分解用フィルタを、葉と同系統の色を呈する果実には最適波長帯域を透過する干渉フィルタを用いるのが有効な使用方法であると考えられた。

(6) 野外において最適波長帯域の識別実験を行った結果、最適波長帯域では識別困難な対象物も存在するため、対象物に応じて他のフィルタと使い分けするのが適当と考えられた。

(7) ビジュアルフィードバック法による位置検出実験ならびにシミュレーションの結果、視覚センサから対象物までの距離が小さくなるにつれて直線的に誤差も小さくなるが、果実の径による誤差が生じることがわかった。またマニピュレータの位置決めのための計算時間を短くするには、手先の位置と姿勢を決定して移動する関節型マニピュレータよりも、直動型マニピュレータに有利な方法であると考えられた。

(8) 視覚センサの果樹方向移動による方法による位置検出の特徴を明らかにするため、計算機によるシミュレーションならびに直動型アームを用いた位置検出実験の結果、対象物の径による計算精度の違いはあまり見られず、対象物までの距離が小さいと誤差は非常に小さくなるが、距離が大きかったり、果実が画面の中心付近にあると誤差は大きくなった。この方法は単独で用いるのではなく、ビジュアルフィードバック法、あるいは他の方法とそれぞれの特徴を生かすように組み合わせれば有効な方法になり得ると考えられた。

(9) ビジュアルフィードバック法ならびに視覚センサの果実方向移動による

方法の特徴を生かした両方法の組み合わせ方を検討するため、位置検出実験を行った結果、対象物までの距離が大きいところではビジュアルフィードバック法で、続いて視覚センサの果実方向移動による方法で、距離が小さいところではビジュアルフィードバック法で位置検出を行うのが適当と考えられた。

残された問題点としては、果実が枝葉等で隠されていたり、数個並んでいるときの認識方法、風の影響、収穫等の作業を行ったときの枝の動きで変化する果実の位置検出誤差、果実の形状による位置検出誤差等があげられる。これらに対しては、視覚センサの側からだけでなく、ハンドあるいは作業機側から、さらには果菜類を育成する側からのアプローチが必要であると考えられる。

引用文献

- 1)農林水産省統計情報部：昭和61年度産作物統計，No.29(1987)
- 2)農林水産省統計情報部：第61次農林水産省統計表，昭和59年～60年，(1986)
- 3)例えば土屋功位：果実の機械収穫に関する研究（第1報），農機誌，第33巻，第2号，p.173～181(1971)
- 4)川村登，並河清，藤浦建史，浦元信：農業用ロボットの研究（第1報），農機誌，第46巻，第3号，p.353～358(1984)
- 5)川村登，並河清，藤浦建史，浦元信：農業用ロボットの研究（第2報），農機誌，第47巻，第2号，p.177～182(1985)
- 6)川村登，藤浦建史，浦元信，近藤直：果実収穫用ロボット，農機誌，第47巻，第2号，p.237～241(1985)
- 7)田中芳夫，小川洋司，榑原実雄，永田重幸：果実収穫を目的とした簡易ロボットシステム，四国工業技術試験場報告，第19巻，第1号，p.1～37(1987)
- 8)E. G. Tuttle: Image Controlled Robotics in Agricultural Environments, Robotics and Intelligent Machines in Agriculture, p.84～95(1984)
- 9)G. E. Coppock: Robotic Principles in the Selective Harvest of Valencia Orange, Robotics and Intelligent Machines in Agriculture p.138～145(1984)
- 10)Gary W. Krutz: Future Use of Robotics in Agriculture, Robotics and Intelligent Machines in Agriculture, p.15～29(1984)
- 11)A. Grand D'Esnon: Robotic Harvesting of Apples, Agri-Mation 1, p.210～214(1985)
- 12)David C. Slaughter, Roy C. Harrell: Color Vision in Robotic Fruit Harvesting, TRANSACTIONS of the ASAE 30-4, p.1144～1148(1987)

- 13)佐藤純一，宮沢福治，谷脇憲，沢村篤，吉田智一：機械作業の自動化に関する研究，第43回農機誌学会講演要旨，P.176(1984)
- 14)川村登，近藤直：果実類収穫腕装着用カメラの研究，農機学会関西支部報第55号，p,45～48(1984)
- 15)松田文夫，榊 吉孝，上田実：カスタムメイドシングルボードコンピュータによるロボットと連動可能な自立型カラーセンサ，システムと制御，Vol. 27, No.11, p.737～741(1983)
- 16)松下電子工業（株）研究所：自己走査形エリアイメージセンサ MEL 64×64,技術資料(1976)
- 17)水野博之：オプトエレクトロニクス，日刊工業新聞社，p125(1978)
- 18)近藤直，遠藤俊三：果実認識用視覚センサの研究（第1報），農機誌，第49巻，第5号，p.476～482(1987)
- 19)遠藤俊三，芝野保徳，近藤 直，高瀬広視，門田充司：最適波長帯域を利用した果実と葉の識別，農業機械学会関西支部報，第60号，p.92～93(1986)
- 20)近藤直，遠藤俊三：果実認識用視覚センサの研究（第2報），農機誌，第49巻，第5号，p.563～570(1987)
- 21)電気学会：電気工学ハンドブック，p.1361(1978)
- 22)中馬豊，キョウセイ，岩元睦夫：果実の光学的性質とその選別工程への利用（第1報），農機誌，第35巻，第4号，p.416～423(1973)
- 23)中馬豊，河野澄夫，キョウセイ：果実の光学的性質とその選別工程への利用（第2報），農機誌，第37巻，第4号，p.587～592(1975)
- 24)梅田重夫：農産物の自動選別に関する研究，農機誌，第38巻，第3号，p.345～351(1976)
- 25)中馬豊，志賀徹，守田和夫：光反射利用による温州ミカンの選別自動化に関する研究（第1報），農機誌，第40巻，第3号，p.389～395(1978)
- 26)安平幸夫：光学的手法によるミカン評価システムの実例，農機誌，第41巻，第4号，p.679～686(1979)
- 27)チャウ・ビン・ダック，梅田重夫，毛利建太郎：農産物の選別の自動化に

- 関する研究 (I) , 農機誌, 第45巻, 第3号, p.337~341(1983)
- 28)D. R. Bittner and K. H. Norris. : Optical Properties of Selected Fruits vs Maturity, TRANSACTIONS of the ASAE 11-4, p.534~536(1968)
- 29)J. J. Gaffney: Reflectance Properties of Citrus Fruits, TRANSACTIONS of the ASAE, 16-2, p.310~314(1973)
- 30)S. C. Sarkar, M. O'Brien: Measurement of Power Spectra for Optoelectronic Sorting of Tomatoes, TRANSACTIONS of the ASAE, 18-1, p.177~180(1975)
- 31)W. B. Goddard, M. O'Brien, C. Lorenzen, D. W. Williams: Development of Criteria for Mechanization of Grading Processing Tomatoes, TRANSACTIONS of the ASAE, 18-1, p.190~193(1975)
- 32)Samad Moini, Michael O'Brien: Tomato Color Measurement vs Maturity, TRANSACTIONS of the ASAE, 21-4, p.797~800(1978)
- 33)K. Q. Stephenson: Color Sorting System for Tomatoes, TRANSACTIONS of the ASAE, 17-6, p.1185~1186,1190(1974)
- 34)S. Gunasekaran, M. R. Paulsen, G. C. Shove: Optical Methods for Nondestructive Quality Evaluation of Agricultural and Biological Materials, J. Agric. Engng Res. 32, p.209~241(1985)
- 35)G. S. Birth, G. G. Dull, W. T. Renfroe, S. J. Kays: Nondestructive Spectrophotometric Determination of Dry Matter in Onions, Jour. Amer. Soc. Hort. Sci. 110-2, p.297~303(1985)
- 36)鈴木光雄, 中川靖夫: 分光反射特性の農業機械用光電識別センサへの応用に関する研究, 農業機械化研究所報告, 第20号, p.49~63(1986)
- 37)羽生光宏, 鈴木守, 長坂武彦: 田無における太陽光の分光放射測定 (I) , 電子技術総合研究所報告, 第812号(1981)
- 38)日本真空光学株式会社: 多層薄膜光学製品カタログ
- 39)遠藤俊三, 芝野保徳, 近藤 直, 角田洋一: 最適波長帯域を利用した果実認識用視覚センサ, 農業機械学会関西支部報, 第62号, p.105~106(1987)

- 40)近藤直, 遠藤俊三: 果実認識用視覚センサの研究 (第3報), 農機誌投稿中
- 41)Nickerson, D., K. L. Kelly, K. F. Stulz: Color of Soils, Journal of the Opt. Soc. Am. 35, p.639~643(1945)
- 42)W. A. Hovis, Jr., William, R. Callahan: Infrared Reflectance Spectra of Igneous Rocks, Tuffs, and Red Sandstone from 0.5 to 22 μ , Journal of the Opt. Soc. Am. 54, p.639~643(1964)
- 43)Albert G. Story: Spectral Reflectance of Light and Infrared Radiation by Potatoes, Stones, and Soil Clods, TRANSACTIONS of the ASAE, 16-2, p.302~303(1973)
- 44)Yoshino Kano, W. F. McClure, R. W. Skaggs: A Near Infrared Reflectance Soil Moisture Meter, TRANSACTIONS of the ASAE, 28-6, p.1852~1855(1985)
- 45)D. E. Guyer, G. E. Miles, M. M. Schreiber, O. R. Mitchell, V. C. Vanderbilt: Machine Vision and Image Processing for Plant Identification, TRANSACTIONS of the ASAE 29-6, p.1500~1507(1986)
- 46)George E. Meyer, Dale A. Davison: An Electronic Image Plant Growth Measurement System, TRANSACTIONS of the ASAE 30-1, p.242~248(1987)
- 47)近藤直, 川村登: マニピュレータ装着用カメラによる果実の位置検出法, 農機誌, 第47巻, 第1号, p60~65(1985)
- 48)近藤直, 遠藤俊三: マニピュレータ装着用カメラによる果実の位置検出法 (第2報), 農機誌投稿中
- 49)遠藤俊三, 芝野保徳, 近藤直, 小野将志: 視覚センサの果実方向移動による位置検出法の改善, 農業機械学会関西支部報, 第62号, p.107~108(1987)
- 50)遠藤俊三, 芝野保徳, 近藤直, 有馬誠一, 長森幸男: ビジュアルフィードバック法と視覚センサの果実方向移動による方法を組み合わせた果実の位置検出, 農業機械学会関西支部報, 第64号, p.99~100(1988)