分光反射特性を利用した植物体各部の識別のための波長帯域の選定

近 藤 直

岡山大学農学部

Selection of Suitable Wavelength Bands for Discrimination between Parts of Plant Body Using Their Spectral Reflectances

Naoshi KONDO

Faculty of Agriculture, Okayama University, Okayama 700, Japan

In this study, spectral reflectances of parts of fruit vegetables were measured and degree of discrimination between them in some pairs of wavelength bands was calculated in order to distinguish each part of fruit vegetables from others. The results were given as follows:

1. Spectral reflectances of all leaves which were measured in this time were almost similar, but those of different color fruits were different in the visible region and those of all fruits could be classified into higher type and lower type than their leaves in the near-infrared region. Reflectances of flowers were different in the visible region, and those were similar in the near-infrared region. Water absorption bands were observed at 970 nm and 1170 nm wavelength only in fruits and stems, and were observed at 1450 nm and 1950 nm in all parts.

2. 670 nm wavelength was effective for discrimination of fruit whose color was red or yellow such as a tomato, 800-900 nm was for fruit whose reflectance was higher than the other parts in the near-infrared region such as an eggplant or a cucumber, 1950 nm was for an eggplant stem, and 1450 nm was for a sweet pepper fruit. It was considered that the discrimination became easier when these wavelengths were combined with another characteristic wavelength.

(Received May 26, 1988)

1988年5月26日受付

結 言

種々の農作業の機械化および自動化が進み、植物工場等における栽培が始められている。現在でも、果実の収穫、摘果、摘芯、剪定および苗の間引き等の農作業はいまだに人力で行われており、大きな労力を要する作業の1つになっている。その自動化を図るためには、まず対象物となる植物体各部の識別を行わなくてはならない。現在までに果実と茎葉等の識別を目的とした視覚センサは研究されているが^{1,2)}、必ずしも対象物の反射特性が生かされていない。そのため、同系統の色を呈する対象物同士を識別するのに適さなかったり、さまざまな照度のもと、および変化する光源の色温度のもとでは、人間の目で見てかなり異なる色を呈する対象物でも識別困難なことがある。そこで植物体の分光反射特性を利用した

識別が必要となる。

従来、果実の分光反射特性を利用して選別を行う研究は数多くなされている³⁻¹⁴⁾が、それらはほとんどが果実のみの特性を利用したもので、果実と果実以外の部分の分光反射特性の違いを利用した報告^{15,16)}は数少ない。最近、筆者らは340~1200 nmの範囲の分光反射特性を利用して植物体の各部分の識別を試みた¹⁶⁾が、この範囲では識別困難な場合が生じた。そこで本報告では、可視領域から2500 nmの波長まで測定できる分光光度計を用いて植物体の各部分の分光反射特性を測定し、このデータをもとに植物体の各部分の識別に有効な波長帯域の選定を行った。

材料および方法

1. 材 料

本研究では岡山市内の圃場で栽培した果菜類、果樹の

果実、葉、茎、花、および土壌を用い、いずれも採取直後に測定した。以下に品種、果実の開花日、採取日等を記す。

トマト：品種はサタンで、熟度によって果実の色が異なるため、成熟した果実は5月30日に、未熟な果実は6月8日に開花したものをいずれも7月6日に採取した。

ナス：品種は黒陽で、果実は6月18日に開花したものを7月1日に採取した。茎は大きくなると紫色が消え、木質化するため、それら2種類を採取した。

キュウリ：品種は青力節成5号で、その果実は6月23日に開花したものを7月1日に採取した。

ピーマン：品種は京みどりで、その果実は6月13日に開花したものを7月3日に採取した。

他の果実：上述のほかに温州ミカン(南柑20号)、カキ(富有)をそれぞれ12月12日、11月8日に採取した。

土壌：乾燥すると白色に近い色を、湿ると茶褐色を示す砂質土を用い、含水率を0%から10%に変えた。

2. 測定方法

分光反射特性の測定には、固定ビームスプリッタによる左右対称ダブルビーム方式を採用した自記分光光度計¹⁷⁾を使用し、可視領域では光電子増倍管を近赤外領域ではPbS光電導セルを検出器として用いた。試料はこの分光光度計の試料室に入るよう、適当な大きさに切断し、ホルダで固定した。その際、果実はいずれも中央部(赤道部)を測定した。

3. 波長の選定法

本研究では2つの波長帯域の信号を利用して対象物の識別を行う視覚センサを想定し、そのエネルギーの流れを次のように考えた。光源から放射されるエネルギーは対象物によって反射され、レンズを通過した後、2分され、2つの干渉フィルタを通過してそれぞれセンサに入力される。ここで本研究では対象とする領域が340 nmから2500 nmと大きいので、レンズの透過率および視覚センサの感度を1と考えると、視覚センサからの出力は、対象物aに対しては以下の(1)式で表され、対象物bに対しては(2)式で表される。さらに対象物aおよびbの識別のための評価関数を(3)式で求める。

$$O_{ai} = \sum E_{\lambda} \cdot R_{a\lambda} \cdot T_{i\lambda} \cdot d\lambda \quad (i=1,2) \quad (1)$$

$$O_{bi} = \sum E_{\lambda} \cdot R_{b\lambda} \cdot T_{i\lambda} \cdot d\lambda \quad (i=1,2) \quad (2)$$

E : 光源の放射スペクトル

$R_{a,b}$: 対象物a, bの反射率

$T_{1,2}$: 干渉フィルタ1,2の透過率

λ : 波長

$$D = \frac{O_{a2} - O_{a1}}{O_{a2} + O_{a1}} - \frac{O_{b2} - O_{b1}}{O_{b2} + O_{b1}} \quad (3)$$

これは干渉フィルタ1,2を通したときの対象物aに対するセンサの出力の比を第1項で求め、対象物bに対するセンサの出力の比を第2項で求め、その差をとり、 D としたものである。この D の値が大きいかほど対象物aとbは識別容易なことになる。そこで D の値が大きくなるときの干渉フィルタの中心波長の組をあらかじめ設定し、 D の値と半値幅を計算機によって計算することにより、その波長帯の評価を行った。中心波長の組の設定は可視領域から近赤外領域にかけて各種の吸収帯等の特徴ある波長帯で、かつ種々の植物体に汎用性のあるところを数通り選んだ。また近赤外領域においては、イメージセンサ等が高い感度を有する領域¹⁸⁾に近い波長帯を選ぶよう心がけた(450, 480, 550, 670, 850, 970, 1170, 1450, 1650, 1950 nm)。

この計算に当たり、光源の放射スペクトルは(4)式で示されるプランクの公式¹⁹⁾を用い、フィルタの透過率は(5)式に示されるようにガウス関数で近似した。

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

T : 色温度 (K)

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

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

$$T_i = \exp[-\log_2 \{ 2(\lambda - \lambda_m)/H \}^2] \quad (5)$$

λ_m : 中心波長

H : 半値幅

植物体各部の反射率は分光光度計で測定したものを用い、葉は表と裏のデータを相乗平均して使用した。各データは340 nmから2500 nmまで1 nmごとに計算機に入力した。光源の色温度は2000, 4000, 6000 Kの3段階に、干渉フィルタの半値幅は5 nmから1 nmごとに換え、最大透過率の比を1:1として計算を行った。

本研究では果実と葉、果実と茎、花と葉、茎と葉および土壌(含水比: 0%)と葉について波長帯域の選定を行った。

結果および考察

1. 分光反射特性

(1) トマト Fig. 1に340 nmから2500 nmまでのトマトの分光反射特性を示す。これより可視領域内では果実は成熟するにつれ、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、赤くなるのがわかる。葉は表裏とも500~600 nm付近の反射率が高く、裏のほうが表より全体的に高い。茎もほぼ葉と似たような特性を示す。花は紫外領域の350 nm付近と可視領域の500~700 nmにか

Fig. 1 Spectral reflectance of tomato plant.

Fig. 2 Spectral reflectance of eggplant.

けて反射率が高く、黄色を呈することが理解できる。近赤外領域では 1200 nm 付近までは葉の反射率はほぼ 50～60%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 および 1170 nm 付近には吸収帯がみられる。これは茎にもみられるが、花や葉にはたいしてない。この波長帯は水の吸収帯と思われ、果実と茎の表皮組織における水の状態は葉と花とは異なるのではないかと考えられた。また、各部に共通していえることであるが、1450 nm と 1950 nm 付近にも大きな水分の吸収帯がみられた。

(2) ナス Fig. 2 にナスの分光反射特性を示す。葉の反射率は可視領域および近赤外領域とも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、970 nm と 1170 nm の吸収帯もみられる。茎は細い紫色をしたものと木質化したものを測定したところ、可視領域でその色の差異を示したものの、近赤外領域ではいずれもトマトの茎と同様の特性を示した。ただ、1450 nm と 1950 nm の吸収帯において果

Fig. 3 Spectral reflectance of cucumber plant.

Fig. 4 Spectral reflectance of sweet pepper plant.

実等に比べて反射率が若干高い傾向がみられた。花は可視領域では 400~500 nm と 600~700 nm の反射率が高く、紫色であることがわかる。近赤外領域ではトマトの花と同様の傾向であった。

(3) キュウリ Fig. 3 にキュウリの分光反射特性を示す。これより果実は可視領域では緑色を示し、葉および茎とあまり差がないが、近赤外領域ではナスと同様に果実の反射率が高くなっている。茎および花は可視、近赤外領域ともトマトとほぼ同様の特性を示した。

(4) ピーマン Fig. 4 にピーマンの分光反射特性を示す。これより果実は可視領域ではキュウリと同様に緑

色を示すが、近赤外領域ではトマトと同様に葉より低い反射特性を示す。花は可視領域では 400 nm から 700 nm にかけて反射率が高く、白色を示すのが理解できる。

(5) 他の果実 温州ミカンと富有ガキの分光反射特性においても、可視領域においてはその果実特有の色を示し、近赤外領域においてはキュウリおよびナスと同様に葉よりも高い反射特性を示した。文献^{9,10)}によれば、モモ、リンゴおよびレモン等のほとんどの果実についてもそれがいえた。

(6) 土壌 Fig. 5 に土壌の反射特性を示す。図からも 1300 nm までは波長が長くなるにつれて反射率が上

Fig. 5 Spectral reflectance of soil.

Table 1 Calculated result (Tomato plant).

Objects	$\lambda_{\max}(\text{nm})$	Color temperature (K)					
		2000		4000		6000	
		$\Delta\lambda_{1/2}(\text{nm})$	D	$\Delta\lambda_{1/2}(\text{nm})$	D	$\Delta\lambda_{1/2}(\text{nm})$	D
Fruit (R)*	670	31	1.09	5	1.15	5	1.15
	1170	5		6		11	
Leaf	550	27	1.03	19	1.03	17	1.03
	670	5		10		13	
	670	29	0.94	8	1.00	5	1.00
	970	5		5		5	
Fruit (R)	550	24	1.15	18	1.14	13	1.14
	670	5		11		12	
Stem	670	27	1.04	5	1.11	5	1.11
	1170	5		6		12	
	670	27	0.95	8	1.04	5	1.04
	970	5		5		5	
Fruit (U)**	670	43	0.75	21	0.78	15	0.77
	1170	5		15		21	
Leaf	670	41	0.57	22	0.60	22	0.60
	970	5		9		15	
Fruit (U)	670	35	0.65	12	0.73	9	0.73
	1170	5		9		13	
Stem	670	35	0.55	13	0.64	13	0.64
	970	5		5		8	
Flower	480	54	0.65	17	0.92	9	0.93
	670	5		5		5	
Leaf	670	26	0.79	11	0.83	8	0.83
	850	5		5		5	

(to be continued)

Stem	550 1450	238 32	0.34	5 21	0.35	5 54	0.33
Leaf	850 1450	10 24	0.34	5 50	0.33	10 134	0.32
Soil (0%)	670 850	27 5	0.71	12 5	0.76	8 5	0.76
Leaf	550 670	15 5	0.49	5 5	0.49	5 8	0.49

* ripe fruit.

** unripe fruit.

Table 2 Calculated result (Eggplant).

Objects	λ_{max} (nm)	Color temperature (K)					
		2000		4000		6000	
		$\Delta\lambda_{1/2}$ (nm)	D	$\Delta\lambda_{1/2}$ (nm)	D	$\Delta\lambda_{1/2}$ (nm)	D
Fruit	850 1450	5 10	0.67	5 42	0.64	5 57	0.61
Leaf	550 850	156 5	0.36	25 5	0.47	13 5	0.48
Fruit	1650 1950	5 27	1.08	5 35	1.07	5 37	1.06
Stem (W)*	850 1950	5 27	1.17	5 95	0.86	5 129	0.69
Fruit	550 1950	58 5	1.10	5 32	1.08	5 71	0.92
Stem (P)**	850 1950	5 32	1.01	5 101	0.66	5 136	0.50
Flower	550 670	21 5	0.69	7 5	0.71	5 5	0.70
Leaf	450 550	27 5	0.54	5 7	0.55	5 6	0.55
Stem (W)	550 1950	65 5	0.46	5 23	0.53	5 62	0.48
Leaf	550 670	16 5	0.41	5 5	0.42	5 7	0.42
	1170 1950	5 17	0.42	5 44	0.39	5 52	0.38
Stem (P)	550 1950	78 5	0.57	5 21	0.66	5 61	0.62
Leaf	550 850	121 5	0.37	27 5	0.55	14 5	0.56
	550 670	15 5	0.31	42 49	0.32	35 54	0.34
Soil (0%)	670 850	28 5	0.67	5 11	0.70	8 5	0.70
Leaf	550 670	16 5	0.39	5 5	0.39	5 7	0.39

* woody twig.

** purple stem.

がり、含水比が高くなると反射率が下がるのがわかる。1450 nm および 1950 nm 付近には植物体にみられた水分の吸収帯がみられ、含水比が高くなるほど反射率は低くなった。

これらの結果より、葉に関してはいずれの植物でも大きな差はみられないが、色の異なる果実は可視領域の反射率においてその差異を示し、近赤外領域 (1200 nm 付近まで) においては、ナスおよびキュウリ等のように葉よりも反射率の高い果実と、トマトおよ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。さらに果実と茎において、970 nm および 1170 nm 付近に吸収帯がみられた。また 1200 nm 以降は、各部ともほぼ同様の傾向を示すことが知れた。

2. 波長帯域の選定

Table 1 にトマトの各部の識別のために、あらかじめ予想した干渉フィルタの中心波長の組において、色温度別に計算した半値幅と D の値を示す。なお表中で、 $\lambda_{\max}$ は干渉フィルタの中心波長を、 $\Delta\lambda_{1/2}$ は半値幅を表す。これよりトマトの果実と葉の識別にはクロロフィル吸収帯である 670 nm と果実の反射率が低く、葉の反射率が高い 550 nm、または水の吸収帯である 970 nm あるい

は 1170 nm の組が色温度にかかわらず D の値が高くなった。ただ未熟な果実は 550 nm と 670 nm の組のように可視領域の波長帯では識別困難で、670 nm と近赤外領域の 970 nm や 1170 nm の組を利用するのが適当であった。果実と茎の識別についても同様のことがいえた。花と葉の識別においては 670 nm と葉よりも花の反射率が低くなる 850 nm あるいは 480 nm の組が有効であった。茎と葉は似た反射特性を示し、茎の反射率は葉よりも高くなる波長帯がほとんどないため、水の吸収帯である 1450 nm と 850 nm あるいは 550 nm の組を利用しても D の値は低くなった。土壌と葉は 670 nm と 850 nm の組が D の値が高く、他の果菜類においても葉の反射特性はあまり変わらないため、同様の結果となった。

Table 2 にはナスの結果を示す。ナスの果実と葉の識別には、果実の反射率が高くなる 850 nm と 1450 nm あるいは 550 nm の組が、果実と茎あるいは茎と葉の識別には木質化のものも紫色をしたものも特徴ある 1950 nm が、花と葉の識別には反射率の低い 550 nm と 670 nm の組が有効であることがわかる。

Table 3 にはキュウリの結果を示す。果実はナスと同

Table 3 Calculated result (Cucumber plant).

Objects	$\lambda_{\max}(\text{nm})$	Color temperature (K)					
		2000		4000		6000	
		$\Delta\lambda_{1/2}(\text{nm})$	D	$\Delta\lambda_{1/2}(\text{nm})$	D	$\Delta\lambda_{1/2}(\text{nm})$	D
Fruit	550	133	0.38	23	0.44	11	0.45
	850	5		5		5	
Leaf	850	5	0.35	5	0.34	5	0.33
	1450	10		46		68	
Fruit	550	76	0.49	86	0.60	44	0.63
	1450	5		177		253	
Stem	550	133	0.49	34	0.53	10	0.54
	850	5		8		5	
Flower	480	58	0.81	25	1.05	25	1.05
	670	5		6		12	
Leaf	670	28	0.73	11	0.75	8	0.75
	850	5		5		5	
Stem	550	137	0.42	54	0.46	13	0.46
	1450	10		138		130	
Leaf	850	86	0.37	18	0.37	11	0.37
	1450	130		134		133	
Soil (0%)	670	28	0.69	12	0.72	8	0.72
	850	5		5		5	
Leaf	550	15	0.49	5	0.49	5	0.49
	670	5		5		8	

Table 4 Calculated result (Sweet pepper plant).

Objects	Color temperature (K)						
	$\lambda_{\max}$ (nm)	2000		4000		6000	
		$\Delta\lambda_{1/2}$ (nm)	D	$\Delta\lambda_{1/2}$ (nm)	D	$\Delta\lambda_{1/2}$ (nm)	D
Fruit	670	17	1.24	10	1.26	5	1.26
	1450	5		47		52	
Leaf	550	215	1.21	7	1.20	5	1.15
	1450	48		51		79	
Fruit	670	12	0.98	9	1.02	5	1.02
	1450	5		57		65	
Stem	550	129	0.95	6	0.98	5	0.91
	1450	25		58		92	
Flower	670	24	0.88	5	0.90	5	0.90
	1450	5		14		33	
Leaf	670	28	0.75	12	0.79	8	0.79
	850	5		5		5	
Stem	850	5	0.57	5	0.56	5	0.54
	1450	10		48		66	
Leaf	850	59	0.46	6	0.45	5	0.45
	1950	176		169		217	
Soil (0%)	670	28	0.73	12	0.77	9	0.78
	850	5		5		5	
Leaf	550	14	0.48	5	0.49	5	0.49
	670	5		5		8	

様に 850 nm の反射率が高いものの、ナスと同じ波長帯の組でもナスに比べて果実と葉の識別においては D の値が低くなった。果実と茎および茎と葉の識別においては 550 nm と 1450 nm の組が比較的 D の値は高くなった。花と葉の識別は花の反射率が低くなる 480 nm と 670 nm の組が適当と思われた。

Table 4 にはピーマンの結果を示す。文献¹⁶⁾では 1200 nm までの領域で選定していたため、果実と葉の識別は困難であったが、この表より 1450 nm と 670 nm または 550 nm の組において D の値が高くなった。果実と茎の識別も同じ波長が有効であった。花と葉においては 670 nm と 1450 nm の組が、茎と葉においては 850 nm と 1450 nm の組が比較的 D の値が高くなった。なお、1450 nm の波長帯は 1650 nm あるいは 1950 nm の波長帯に代えても大きな差はみられないことが多かった。

今回の計算では干渉フィルタの最大透過率比を 1:1 としたため、その中心波長における被識別対象物の反射率が低いと半値幅は大きく、反射率が高いと半値幅は小さい結果となったが、色温度によって半値幅および D の値は変化することが多かった。そのため目的、対象物

および栽培条件等に応じて波長帯域の組を使い分けるのが適当と考えられた。また実際の圃場では照度等がかなり変わるため、ダイナミックレンジが広く、本研究で選定された範囲にまで感度を有するセンサが望まれる。

文 献

- 1) 川村 登・近藤 直, 1984. 果実類収穫腕装着用カメラの研究, 農機学会関西支部報 **55**: 45-48.
- 2) 川村 登・並河 清・藤浦建史・浦元 信, 1985. 農業用ロボットの研究 (第2報), 農業機械学会誌 **47**: 177-182.
- 3) 中馬 豊・キョウセイ・岩元睦夫, 1973. 果実の光学的性質とその選別工程への利用 (第1報), 農業機械学会誌 **35**: 416-423.
- 4) 中馬 豊・河野澄夫・キョウセイ, 1975. 果実の光学的性質とその選別工程への利用 (第2報), 農業機械学会誌 **37**: 587-592.
- 5) 梅田重夫, 1976. 農産物の自動選別に関する研究, 農業機械学会誌 **38**: 345-351.
- 6) 中馬 豊・志賀 徹・守田和夫, 1978. 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), 農業機械学会誌 **40**: 389-395.
- 7) 安平幸夫, 1979. 光学的手法によるミカン評価シス

- テムの実例, 農業機械学会誌 **41**: 679-686.
- 8) チャウ・ビン・ダック・梅田重夫・毛利建太郎, 1983, 農産物の選別の自動化に関する研究 (I), 農業機械学会誌 **45**: 337-341.
- 9) BITTNER, D. R., and K. H. NORRIS. 1968. Optical properties of selected fruits vs maturity. Trans. ASAE **11**: 534-536.
- 10) GAFFNEY, J. J. 1973. Reflectance properties of citrus fruits. Trans. ASAE **16**: 310-314.
- 11) SARKAR, S. C., and M. O'BRIEN. 1975. Measurement of power spectra for optoelectronic sorting of tomatoes. Trans. ASAE **18**: 177-180.
- 12) GODDARD, W. B., M. O'BRIEN, C. LORENZEN, and D. W. WILLIAMS. 1975. Development of criteria for mechanization of grading processing tomatoes. Trans. ASAE **18**: 190-193.
- 13) MOINI, S., and M. O'BRIEN. 1978. Tomato color measurement vs maturity. Trans. ASAE **21**: 797-800.
- 14) STEPHENSON, K. Q. 1974. Color sorting system for tomatoes. Trans. ASAE **17**: 1185-1186, 1190.
- 15) 鈴木光雄・中川靖夫, 1986, 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 **20**: 49-63.
- 16) 近藤 直・遠藤俊三, 1987, 果実認識用視覚センサの研究 (第2報), 農業機械学会誌 **49**: 563-570.
- 17) 島津製作所科学計測事業部, 島津マルチパーパス自記分光光度計 MPS-5000 取扱説明書.
- 18) 松下電子工業(株)研究所, 1976, MEL 64×64 技術資料.
- 19) 電気学会, 1978, 電気工学ハンドブック, 1361.