

岡山大学農学報 (71), 23-29 (1988)

分光反射特性を利用した果実と葉の識別のための 最適波長帯域の選定

近藤 直・遠藤俊三

(農業機械学研究室)

Received November 1, 1987

Calculation of the Most Suitable Wavelength Bands for Discrimination between Fruit and Leaves Using their Spectral Reflectance

Naoshi KONDO and Shunzo ENDO

(Laboratory of Agricultural Machinery)

In this report, spectral reflectances of fruits, leaves and other objects were measured and a pair of wavelength bands where difference of the sensor output between each fruit and its leaves was the largest was obtained by calculating the peak wavelengths and the band widths at half height of interference filters in order to develop a visual sensor which could discriminate fruits whose colors were not only different from but also similar to their leaves color. The results were given as follows :

1. Spectral reflectances of all leaves which were used 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. Water absorption bands were observed in only fruits and stems in the region where the wavelength was from 340 nm to 1,200 nm.

2. 670 nm and 970 nm were calculated for tomato, 550 nm or so and 850 nm or so were for eggplant and cucumber, and 520 nm and 670 nm or so were for mandarin orange and persimmon as the peak wavelengths of a pair of the interference filters which have the transmittances in the most suitable wavelength bands. From these results, it was found out that chlorophyll absorption band was suitable for discrimination between fruits whose color were red or yellow and their leaves and that 800-900 nm wavelength band was suitable between fruits whose reflectance was higher than leaves in the near-infrared region and their leaves.

緒 言

果実の収穫、摘果等は未だに大きな労力を要する作業の一つであり、その自動化を計るためには、まず果実と茎葉等の識別をしなくてはならない。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^{3,4)}が、それらは既成の信号、フィルタを使用したもので、必ずしも対象物の反射特性が生かされていない。そのため葉と同系統の色を呈する果実を識別するのに適さなかったり、条件が悪い場合には人間の目でみて葉とかなり異なる色を呈する果実でも識別困難であったりする。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。

現在までに果実の分光反射特性を利用して熟度を判定する研究は数多くなされているが、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以外の部分についての報告は数少なく、各植物体特有の反射特性となる理由等もあまり検討されていない。本報告では、植物体の各部分の分光反射特性を分光光度計で可視領域から近赤外領域まで測定し、若干の考察を加え、その特性を有効に利用して果実と葉を識別するために最適な波長帯域を計算機で求

めた。

材 料

1. トマト

Fig. 1 に 340 nm から 2,500 nm までのトマトの分光反射特性を示す。品種はサタンで成熟した果実は 10 月 17 日、未熟な果実は 11 月 8 日に開花したものを 12 月 13 日にハウス内で収穫した直後に測定した。これより可視領域内では、果実は成熟すると 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り、赤くなるのがわかる。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。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

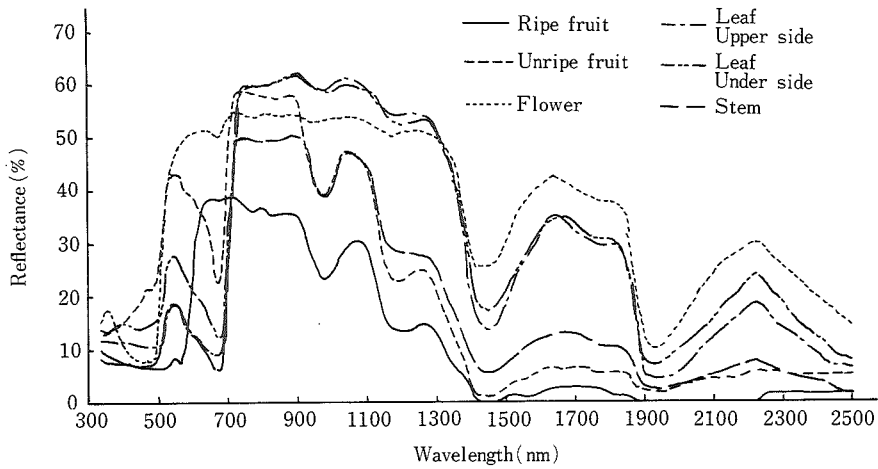


Fig. 1. Spectral reflectance of tomatoes.

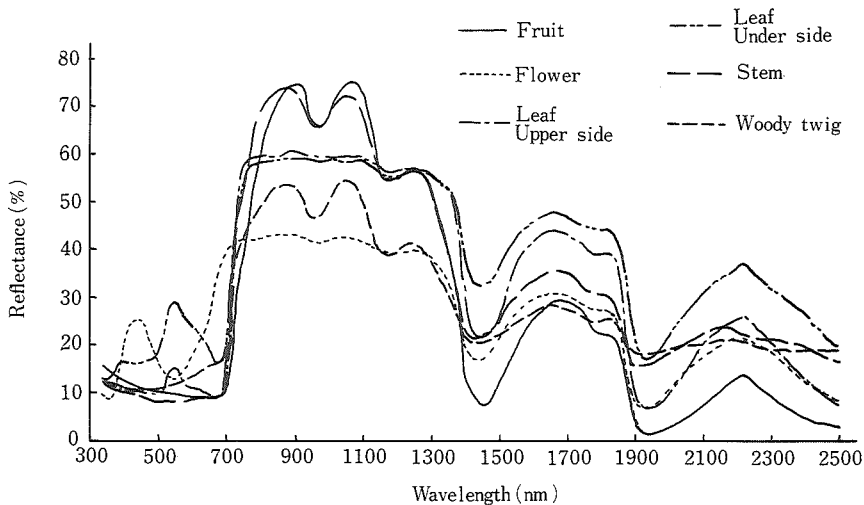


Fig. 2. Spectral reflectance of eggplant.

領域の 500~700 nm にか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 1,200 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, 1,170 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、葉にはたいしてみられない。この波長帯は水分の吸収帯と思われ、果実、茎の表皮組織における水分の状態は葉、花と異なるのではないかと思われた。また各部に共通していることであるが、1,450 nm と 1,930 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。品種は長岡長ナスで 11 月 22 日に収穫、測定した。果実は 10 月 22 日に開花したものをを用いた。葉の反射率は可視領域、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

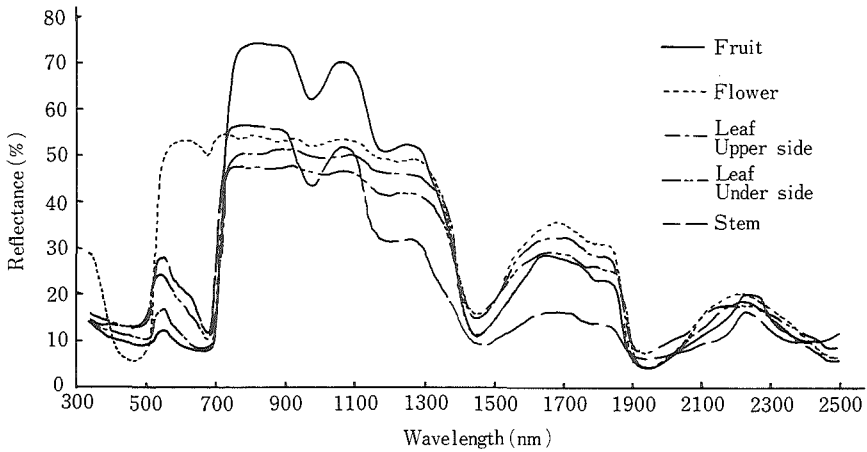


Fig. 3. Spectral reflectance of cucumber.

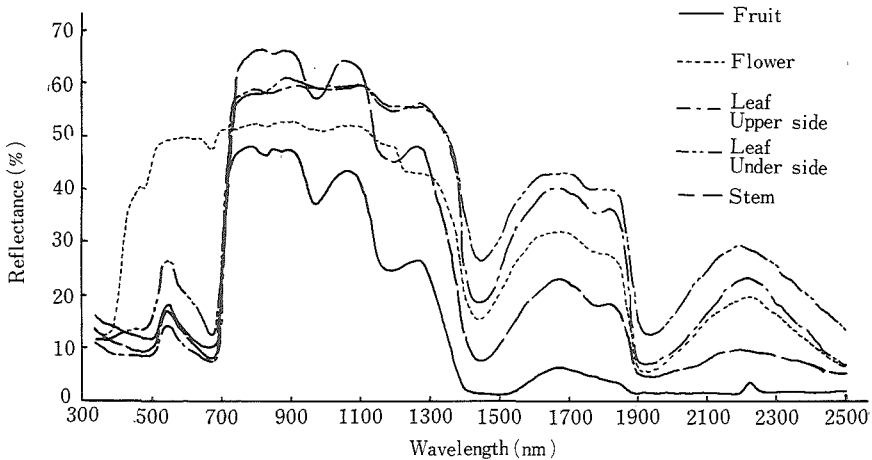


Fig. 4. Spectral reflectance of sweet pepper.

なり高くなり、970 nm と 1,170 nm の吸収帯も見られる。茎は細い紫色をしたものと木性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。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。品種は青力節成 5 号で 12 月 3 日に収穫した。果実は 11 月 12 日に開花したもので、可視領域では緑色を示し、葉、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、花は可視、近赤外領域共トマトと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。品種は京みどりで、11 月 25 日に収穫した。果実は 10 月 24 日に開花したもので、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

この他にも温州ミカン、富有ガキの反射率を測定したが、いずれ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、ナスと同様の特性を示した。文献^{1,2)}によれば、桃、リンゴ、レモン等ほとんどの果実についてもそれが言えた。

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、近赤外領域においては、ナス、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、ピーマンのように葉より反射率の低い果実に

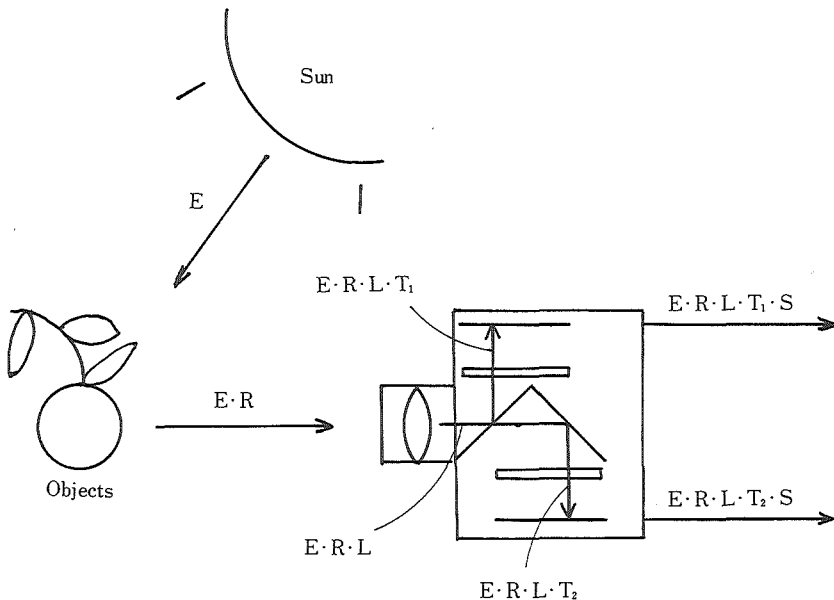


Fig. 5. Flow chart of energy from sun to visual sensor.

分類できた。さらに果実、茎において 970 nm, 1,170 nm 付近に吸収帯が見られた。1,200 nm 以降はいずれも同様の傾向を示した。

方 法

ここでは Fig. 5 に示されるように、レンズ、イメージセンサ等で構成される視覚センサに 2 枚のフィルタを使用して果実と葉を識別するシステムを想定し、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 (1), (2) 式で求めた。

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

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

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

L_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

果実と葉の識別の評価関数としては (3) 式を用いた。

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

これはフィルタ 1, 2 を通した時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、その差をとり、 D としたものである。この D の値

Table 1. Pairs of calculated interference filters

	peak wavelength (nm)	band width at half height (nm)	D
Tomato	980	8	0.850
	670	5	
Eggplant	550	16	0.466
	880	5	
Sweet Pepper	1180	7	0.263
	360	5	
Cucumber	550	17	0.357
	800	5	
Mandarin Orange	520	9	0.999
	670	5	
Persimmon	520	14	1.121
	680	5	

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。

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。

$$E_{\lambda} = \frac{C_1}{\lambda^5 (e^{c_2/\lambda T} - 1)} \quad \dots\dots(4)$$

T : 色温度(K)

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

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

$$T_{i\lambda} = e^{-\log 2 \left\{ \frac{2(\lambda - \lambda_m)}{H} \right\}^2} \quad \dots\dots(5)$$

λ_m : 中心波長

H : 半値幅

レンズの透過率、果実、葉の反射率は分光光度計で測定し、葉は表と裏のデータを相乗平均して使用した。またイメージセンサには感度が可視領域から 1,200 nm 付近まで有するもの (MEL 64×64)⁵⁾を想定し、各データは 340 nm から 1,200 nm まで 1 nm ごとに計算機に入力した。光源の色温度は 5,500 K とし、干渉フィルタの制作誤差、イメージセンサの感度等を考慮した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 ごとに調べて計算を行なった。

結 果 と 考 察

Table 1 に最適波長帯域を計算した結果を干渉フィルタの中心波長、半値幅によって示す。この時の2枚のフィルタの中心波長における透過率比は 1 : 1 である。トマトの成熟した果実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。表には示されていないが、未熟な果実に対してはクロロフィル吸収帯より若干短波長側にずれた波長帯と 970 nm 付近の波長帯が選定される傾向があることがわかった。トマトにおいてはこれらの波長帯において果実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。

ナスに対しては、緑色を示す 500 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と認められる。

キュウリは Table 1 に示されるようにナスとほぼ同様の 550 nm と 800 nm が選定され、 D の値は少し小さくなった。

ピーマンに対しては今回入力したデータの両端が示されたが D の値はかなり小さかった。Fig. 4 から 340~1,200 nm 以外の領域により、適当な波長帯域があると考えられるため 340~2,500 nm の範囲で果実と葉のデータのみを入力して最適波長帯域を求めたところ、360 nm と 1,530 nm が選定された。

温州ミカンとカキの成熟した果実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、多少未熟な果実はトマトと同様にクロロフィル吸収帯から若干短波長側にずれた波長帯が値が大きかった。未熟過ぎる果実は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。

これらの結果より、トマト、温州ミカンのように、赤黄系統の色を呈する果実にはクロロ

フィル吸収帯が、ナス、キュウリのように赤外領域で葉よりも果実の反射率が高くなる果実には 850 nm 前後の波長帯域が果実と葉の識別に適することがわかった。

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、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。1,200 nm までの領域では果実、茎にのみ水分の吸収帯が見られた。

2. 最適波長帯域として、トマトは 670 nm と 970 nm 付近、ナス、キュウリは 550 nm と、850 nm 付近、温州ミカン、カキは 550 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。

文 献

- 1) BITTNER, D. R., K. H. NORRIS.: TRANSACTIONS of the ASAE 11 (4), 534-536 (1968)
- 2) GAFFNEY, J. J.: TRANSACTIONS of the ASAE 16 (2), 310-314 (1973)
- 3) 川村登・藤浦建史・浦元信・近藤直: 農業機械学会誌 47 (2), 237-241 (1985)
- 4) 近藤直・遠藤俊三: 農業機械学会誌 49 (5), 476-482 (1987)
- 5) 松下電子工業(株)研究所: MEL 64×64 技術資料 (1976)