画像処理を用いた農産物の等階級選別手法に関する研究(第2報) —カラーCCDカメラを用いた農産物の質量推定実験—

栗田充隆・近藤 直

エスアイ精工(株)技術開発部 791-8036 松山市高岡町 66

Agricultural Product Grading Method by Image Processing (Part 2) —Agricultural Product Mass Estimation Experiment by Color CCD Cameras—

Mitsutaka KURITA and Naoshi KONDO

Department of Technology Development, SI-Seiko Co., Ltd., Takaoka 66, Matsuyama 791-8036, Japan

Abstract

Image processing techniques of mass estimation for agricultural products, waxed apple, one of major potatoes, “Mayqueen”, and tomato, are described in this paper. In order to find the best method to estimate mass through images using practical grading lines depending on the properties of the products, experiments were conducted with different number of cameras and two methods were used for volume calculation.

The waxed apple mass was calculated based on estimated fruit volume by approximating cone equation, because the fruit looks like a circle from top, while it does a trapezoid or a triangle from side. This result was applicable to a practical use for sorting based on mass with mean square error 9.2 g. Mass of potato was predicted based on its area from three images, one by top and two side cameras and with measured specific gravity of potato. This method was applicable to a practical use for sorting potato with mean square error 7.1 g. Mass of tomato was predicted with different shape models and projected area by using 6 cameras. From the experimental results, it was found that 3 cameras were enough to estimate its mass with mean square error 7.1 g and that 6 cameras reduced the error into 6.3 g. Method of projected area was found to be the most precise result for tomato fruit compared with sphere and flatten sphere models.

Keywords: waxed apple, potato, tomato, image processing, grading, mass estimation, automation

緒 言

1997年頃から画像処理装置ならびに近赤外分光法による糖度・酸度センサを用いた柑橘類の果実選別システム(Njoroge *et al.*, 2002)が導入され始め、2000～2003年の

間に全国で320箇所(農林水産省果樹花卉課調べ)の施設で稼動している。この選別システムは、個々の果実を対象にその外観品質、内部品質を評価することができ、従来の選別のみならず流通を大きく変えるシステムとして、画期的であった。

柑橘分野におけるこの選別システムの普及とともに、新しい対象品目の開発が行われている。たとえば、モモ・ナシ・リンゴ(Ishii *et al.*, 2003a, 2003b)、あるいはナス(Ninomiya *et al.*, 2004)、長ネギなどに対して、対象品目に合った搬送装置、光学機器の選択を行い、自動選別システムを構築している。

2005年 4月 1日受付

2005年 10月 17日受理

Corresponding author: Mitsutaka Kurita

(kurita-m@si-seiko.co.jp)

そのうち、表面に光沢のあるレンブに関して、間接照明より偏光フィルタを用いた直接照明装置 (以下、DL) が有効であることを示した (Kurita and Kondo, 2005)。

本論文では、複数の農産物 (レンブ、パレイショ、トマト) を対象とし、自動選別システムの階級 (質量) に関する画像処理手法を提案する。CCD カメラを用いた選別システムの多くは搬送系の単純化・頑健性、処理の高速化・処理の高能力化などの理由から質量計がついていないものが多い。一方で、農産物の出荷階級基準は従来の選別および精算方法であることから、質量への換算を求めるところも少なくない。実際、柑橘類の選別においては、出荷用の階級は見た目が揃う最大径で振り分けながらも、精算においては、その階級の平均質量を基準に計算しているのが現状である。

これまで農産物の基礎物理特性に関する報告 (Yamashita and Goto, 1979) はあったが、主に体積の計算方法を紹介するものであった。近年、CCD カメラを用いた個々の農産物に対する体積あるいは質量推定の研究も行われ、リンゴ (Davenel *et al.*, 1988; Varghese *et al.*, 1991)、サツマイモ (Wright *et al.*, 1986; Wooten *et al.*, 2000)、ピーマン (Mimura, 2003; Qiao *et al.*, 2004) など数品目に及んでいる。パレイショに関しては、2 カメラの最大径・対角幅・最小径および投影面積を利用する方法 (McClure and Morrow, 1987) や対角幅と投影面積の対数演算から体積を計算する方法 (Hofstee and Molema, 2002; Hofstee and Molema, 2003) が報告されている。トマトに関しては、果頂面の投影面積から指数演算により重量を推定する方法 (Jahns *et al.*, 2001) が報告されている。しかしながら、直接比重の意味をもつ係数の算出方法も合わせて論じられているものは少ない。また、対象品目の形状特性に応じた最適な体積の計算方法、および品目に応じた必要十分なカメラ配置数などに関して、論じられたものは報告されていない。本実験では、一つの対象農産物に対して複数の体積計算方法を検討し、その比較を行うと共に、最大 6 カメラを用いてこれらを検討した。さらに、従来の報告では質量計算のための比重係数は一定の値が採用されていたが、実際には内部の空洞の影響があること、体積に応じて密度も変化すること、および農産物の搬送姿勢による誤差が生じること等の理由より、実際の選果現場では比重係数を変化させる必要がある。そこで本実験では、その比重係数を体積の大小に応じた調整可能な最適化パラメータとして位置づけ、実用化に供する質量推定を行った。

本論文では、まず対象品目の寸法や形状特性、および市場で要求される等級判定項目に応じて、カメラおよび DL の数や配置等のシステム設計を行い、カメラ数の違いや体積計算方法の違いなどによる質量推定の評価実験を、実際の選果設備を用いて行ったので、ここに報告する。

材 料

1. レンブ

フトモ科の常緑性熱帯果樹で、台湾南部を中心に栽培され、赤く円錐状の果実となる。クチクラ層が発達しており、果実表面に光沢を有している。内部には直径 1cm 程度の種があり、種周辺に空洞ができることもある。そのような果実は、持った感じが見た目より軽い。レンブは決められた階級の基準にしたがって出荷される。階級は質量を基準に分けられ、60 g 以上が出荷対象で、3 階級 (60 ~ 109 g, 110 ~ 139 g, 140 g ~) に区分される。

画像から体積推定ならびに質量推定が可能か否かを検討するための材料として、2000 年 11 月および 2001 年 5 月に、台湾屏東県枋寮地区で生産された寸法および形状の異なる 40 個の果実をランダムに用意した。その内訳は、60 ~ 109 g が 27 個、110 ~ 139 g が 11 個、140 g 以上が 2 個である。これらの果実は、通常の選果では問題なく出荷されるものであったが、この中には、いくつかの空洞果実、種子の発達した果実も含まれていた。

2. パレイショ

パレイショは、ナス科の多年草で白または紫の花を咲かせる。多数の品種が栽培されているが、本研究ではメークインを対象とした。メークインは 19 世紀にイギリスで栽培されていたものが世界に広まった。国内では青果用としては男爵に次ぐ作付面積 (2002 年春作・秋作合計 12,760 ha: 農林水産省、平成 14 年産特産農作物生産実績、ばれいしょ品種別都道府県作付面積) と収穫量をもつ品種であり、北海道をはじめ、長崎県、青森県などで生産されている。一般に長楕円体の形状特徴であるが、コブの出っ張ったような変形芋や、大きな芋になれば中心部に空洞をもつものもある。

産地の一つである静岡県三島市においては、メークインは主に次のような階級を基準に選別、出荷が行われている。質量を基準に 7 区分 (20 ~ 39 g, 40 ~ 69 g, 70 ~ 119 g, 120 ~ 189 g, 190 ~ 259 g, 260 ~ 369 g, 370 g ~ : JA 静岡経済連) に分けられる。

一般に、パレイショは収穫後、通常暗所にて扇風機により風を吹きつけ、表面を乾燥させる風乾と呼ばれる保存処理を経た後に選別が行われる。これは搬送時など、パレイショが互いにぶつかることでスリキズが生じるのを防ぎ、箱詰め出荷の際、腐敗等を遅らせる保存が可能となるためである。本実験で用いたパレイショは、いずれも 10 日以上風乾されたものを使用した。

画像から体積推定ならびに質量推定が可能か否かを検討するための材料として、2004 年 6 月に静岡県三島市および

函南町で生産された寸法および形状の異なる 100 個のパレイシヨを用意した。その内訳は、20 ~ 39 g が 1 個、40 ~ 69 g が 10 個、70 ~ 119 g が 39 個、120 ~ 189 g が 36 個、190 ~ 259 g が 10 個、260 ~ 369 g が 4 個である。この階級による個数の差は、通常出荷される割合にほぼ比例している。

3. トマト

トマトは、ナス科の 1 年生の野菜であり、南アメリカが原産とされる。施設向けの品種であった桃太郎を基に様々な品種改良がなされ、今では多様な品種が栽培・出荷されている。トマトの産地の一つである広島県御調郡向島町のトマトの階級出荷基準は、質量で 5 区分 (100 ~ 129 g, 130 ~ 159 g, 160 ~ 199 g, 200 ~ 249 g, 250 g ~) に分けられる。

一般にトマトの質量は、寸法だけでなく内部品質によっても左右される。たとえば、成長の偏りによって生じた空洞果は見た目より軽い。逆に、内部が適度に熟し、実詰りのよいトマトは水に沈むなど見た目より重い傾向がある。

画像から体積推定ならびに質量推定が可能か否かを検討するために、2005 年 2 月に熊本県玉名市で生産された、等級が様々で寸法の異なる 100 個のトマトを用意した。その内訳は、100 ~ 129 g が 8 個、130 ~ 159 g が 22 個、160 ~ 199 g が 21 個、200 ~ 249 g が 19 個、250 g 以上が 30 個である。この階級による個数の差は、大階級を主力としている向島町において通常出荷される割合にほぼ比例している。

実験装置

1. 画像処理システム 1

レンプの質量計測で用いた画像処理のシステム構成を図 1 に示す。レンプの形状は基本的には、円錐形に近似できることから、本システムでは、2 台のカメラ (上カメラおよび横カメラと呼ぶ) を用いることとし、共に同じトリガ信号を与えた。同時にその信号を DIO ボードで検出し、1 枚の画像処理ボード (シャープセミコンダクタ社製 GPB-K) を介して、画像を入力した。PC には、FA 用コンピュータ (RICOH 社製 CPU: Pentium III 700MHz) を用い、DIO ボード (CONTEC 社製 PIO-16/16L (PC)V) ならびに画像処理ボードを ISA バスに挿して利用した。CCD カメラには、シーアイエス社製 VCC-8300BT3 を使用した。これは、有効画素数 694 × 494 の CCD (1/2 インチ) を有し、シャッタースピードが 1/10000 秒から 2 秒まで可変であり、C マウントを有している。レンズヘッドとドライブとが分離されており、ヘッドの寸法は 44 × 40 × 29 mm と小型軽量のものである。上カメラのレンズには、焦点距離 12 mm, F 値 1.4 (PENTAX 社製 H1214-M) を用い、レンズ先端と対象中心の距離は 480 mm とした。横カメラのレンズには焦点距離 6 mm, F 値 1.4 (オプアート社製 OM6NC)

図 1 レンプの画像処理システム

Fig. 1 A machine vision system for waxed apple

を用い、レンズ先端と対象中心の距離を 220 mm とした。

本実験では、対象物表面での照度を均一にできるよう、上方向から 1 台、横方向から 3 台の DL (エスアイ精工株式会社製) で照射した。DL の光源には、ハロゲンランプ (OSRAM 社製 50W12V 48870WFL GU5, 3, 色温度 3100K, ビーム角 38 度) を用いた。これにより、対象物中心付近での照度は約 7000 lx を得た。また、レンズの絞りをドームでは 1.4 に、DL では 2 に、シャッタースピードを 1/1000 秒に、ガンマ補正を 0.45 に設定して行った。これらの設定は実際の選果作業時と同じである。

2. 画像処理システム 2

パレイシヨの質量計測で用いた画像処理のシステム構成を図 2 に示す。メークインは、後述する果実の反転が困難な扁平かつ不定型な形状であることより、3 台のカメラで撮像することとした。基本的なハードウェアおよび動作は画像処理システム 1 と同じであるが、パレイシヨの実験においては、カメラ数、照明配置の関係から、撮像部を 2 箇所 (撮像部 A, 撮像部 B) 設けた。

まず、撮像部 A には、カメラ 2 台 (カメラ 1 および 2) を横方向に配置し、DL を、上に 1 台、横に 2 台配置した。DL は、ハロゲンランプ (PHILIPS 社製 JR12V50WAKW/5-1 (EXN) GU 5.3 色温度 3200K) を光源としている。カメラ 1 および 2 は、レンズの光軸がそれぞれパレイシヨを中心に 90 度で交わるよう配置されており、カメラ 1 のレンズには焦点距離 4.5 mm, F 値 1.4 (オプアート社製 LM5NCR) を、カメラ 2 のレンズには焦点距離 6 mm, F 値 1.4 (オプアート社製 OM6NC) を使用した。ともにレンズ先端と対象中心の距離は 230 mm とした。

撮像部 B には、上方向のカメラ (カメラ 3) を鉛直方向に配置し、その周囲に斜め方向から DL を 3 台配置した。カメ

図2 パレイシヨの画像処理システム

Fig. 2 A machine vision system for potato

ラレンズには、焦点距離 12 mm, F 値 1.4 (PENTAX 社製 H1214-M) を用い、レンズ先端と対象中心の距離は 480 mm とした。

実験は、実際に導入された選果施設を用い、装着された本システムにより行った。本環境により、対象物中心付近での照度は、撮像部 A では約 8,000 lx、撮像部 B では 10,000 lx となった。また、レンズの絞りを 1.4 に、シャッタースピードを 1/1000 秒に、ガンマ補正を 0.45 に設定して行った。これらの設定は実際の選果作業時と同じである。

3. 画像処理システム 3

トマトの質量計測に用いた画像処理のシステム構成を図 3 に示す。トマトの果実はほぼ球状で、反転も可能であることから、本システムでは 6 台のカメラで等級判定のための全面計測を可能とするシステムを用意した。反転前に CCD カメラによる撮影部を 3 箇所 (撮像部 A, B, C)、反転後に 1 箇所 (撮像部 D) 設置した。まず、側面から 2 カメラにて側方の約 180 度を計測する。次に上方より 1 カメラで計測し、続いて撮像部 A とは反対の側面から 2 カメラで約 180 度を計測する。反転後、残った面を上方より 1 カメラで計測する。これらのカメラの配列に合わせ、DL を配置した。DL の光源にはハロゲンランプ (PHILIPS 社製 JR12V50WAKW/5-1 (EXN) GU 5.3 色温度 3200K) を用いた。

撮像部 A には側面から 2 カメラを、カメラレンズの光軸がそれぞれトマトを中心に 90 度で交わるよう配置した。つまり、搬送装置の進行方向に対して、45 度、135 度の角度から、トマトを計測する (進行上流をカメラ 1、下流をカメラ 2 と呼ぶ)。カメラ 1, 2 のレンズは共に焦点距離 6 mm, F 値 1.4 (オプ

アート社製 OM6NC) を使用した。レンズ先端と対象中心の距離はともに 230 mm である。カメラ 1 およびカメラ 2 共に同じ撮像部 A のフォトインタラプタからのトリガ信号を与えた。同時にその信号を DIO ボード (CONTEC 社製 PIO-16/16L (PCI)) で検出し、2 枚の画像キャプチャボード (マイクロテクニカ社製 MTPCI-TL) を介して、画像を PC に入力した。撮像部 C については、ラインの流れを中心に、撮像部 A と左右対称に同様の配置を施し、上流下流の順にカメラ 4、カメラ 5 と呼ぶことにする。

撮像部 B は、上方から 1 台のカメラ (カメラ 3 と呼ぶ) を置き、そのカメラを中心に、斜め 55 度の傾きから DL を 3 等分配置で 3 台配置した。カメラレンズには、焦点距離 12 mm, F 値 1.4 (PENTAX 社製 H1214-M) を用い、レンズ先端と対象中心の距離は 480 mm とした。カメラ 3 には撮像部 B のフォトインタラプタからトリガ信号が与えられ、同時にその信号を DIO ボードで検出し、前述の画像処理ボードを介して、画像を PC に入力した。撮像部 D も撮像部 B と同様に上方のカメラ (カメラ 6 と呼ぶ) を配置した。撮像部 D に関しては、撮像部 B と同じ装置の構成である。

PC には、FA 用コンピュータ (MTT 社製 TEC-1C (R1); CPU: Pentium III 850MHz) を用いた。画像処理を行う PC には前述の DIO ボードと画像キャプチャボードを PCI バスに挿して使用した。CCD カメラには、シーアイエス社製 VCC-8350CLT を使用した。これは、有効画素数 659 × 494 の CCD (1/2 インチ) を有し、シャッタースピードが 1/10000 秒から 2 秒まで可変なデジタルカメラであり、C マウントを有している。画像キャプチャボードには、カメラリンクを介して接続し

図3 トマトの画像処理システム

Fig. 3 A machine vision system for tomato

た、画像の取り込み速度は倍速 (1/60 秒) で、レンズヘッドとドライバとは一体になっているため、ノイズの影響を受けにくい。また、レンズの絞りは 1.4 に、シャッタースピードは 1/1000 秒に、ガンマ補正の係数は 0.45 に設定して実験を行った。これらの設定は実際の選果作業時と同じである。

実験方法

本実験では、各画像において対象物を背景から抽出するため、まず RGB 画像の各画素の濃度値 (R, G, B) を用いて、以下の簡易色度変換 (R', G') の計算を行った。

$$R' = \frac{R}{R + G + B} \times 255 \quad (1)$$

$$G' = \frac{G}{R + G + B} \times 255 \quad (2)$$

この (R', G') の組み合わせにおいて、材料 1 から着色の異なる 3 個のレンブ、材料 2 から色合いの異なる部位をもつ 5 個のパレイショ、そして材料 3 から着色の異なる 5 個のトマト (ヘタを含む)、それぞれの代表的な点を図 4 に表した。この色度分布を基に、それぞれの農産物をもつ色を簡易色度空間上で定義し、図 4 中の境界線により画素単位で対象と背景を認識した。レンブを一点破線、パレイショを実線、トマトを角点線で示し、対象農産物は境界線の上側に、背景は下側に位置する。また、パレイショに限っては、一部の領域で簡易色度ではなく、 R の濃度値を直接用いただけで判断できるものがあり、その部分は点線で示した (点線の範囲は、色度に関係なく R の濃度値が 90 以上なら、農産物でそれ以下なら背

景)。その結果得られた対象物と背景が分離された画像から、対象を抽出し、実験を行った。

1. レンブ

レンブにおいては、最も推定精度が高いと思われる方法として、まず、2 枚の画像から体積を推定し、それに比重をかけることを試みた。画像処理システム 1 では、上横 2 カメラという条件であることを考慮し、レンブの特徴ある形を円錐体で近似して体積計算することとした。求める推定質量を以下の式で算出した。

$$W = D_w(V_w) \times V_w \quad (3)$$

$$V_w = \frac{1}{3} \times h \times \left(\frac{d}{2}\right)^2 \times \pi \quad (4)$$

ただし、 $D_w(V_w)$: 比重係数 (体積 V_w の関数)

h : 横カメラにおける果実の高さ (単位: mm)

d : 上カメラでの果実の最大径 (単位: mm)

ここで、 d は予備実験で等価円直径、最大径などを比較した結果、質量推定においてより良い結果が得られた最大径を選択した。

本実験では、2 枚の画像しか用いないことから理論的に推定不能な形状の果実も多く存在すること、コンベアに搬送される際の姿勢も一定でないこと、内部の空洞の程度も不規則であること、 $D_w(V_w)$ などの理由より、比重係数は、固定された値をとるものとせず、式 (3) で使用したように様々な誤差を吸収する役割を果たす最適化パラメータとして位置づけた。なお、式 (4) は円錐体で近似したときの推定体積を、式 (5) は、推定体積に応じた比重係数を示す。

図4 対象農産物の色度分布

Fig. 4 Chromaticity distribution of three agricultural products

$$D_w(V_w) = \begin{cases} 1.82 (130 \leq V_w) \\ 2.00 (80 \leq V_w < 130) \\ 2.04 (0 \leq V_w < 80) \end{cases} \quad (5)$$

これらの値は、計測して得られる体積と実質量の関係から、最適な区間において、その平均比重を算出し、決定した。

求めた推定質量値 W_i に対し、実際の質量 M_i との差を比較し、式 (6) によって標準偏差 σ を計算した。

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (W_i - M_i)^2}{N}} \quad (6)$$

ここで、 N は計測個数である。

また、このような円錐形で近似したモデルを利用した質量推定方法の有効性を確認するため、2 画像ではあるが、パレイシヨ等で述べるような投影面積の平均から求まる体積の最小保証値であるから、比重係数を求め、質量推定を行うことも試みた。すなわち、体積を (7) 式で計算した。

$$V_w = \left(\frac{\bar{S}}{1.24} \right)^{1.5} \quad (7)$$

ここで、 $\bar{S}$ は、レンプの上カメラと横カメラの面積平均である。

2. パレイシヨ

メークインは極端に異形を有するものも見受けられる不定形であることから、定められた形で近似することは避け、以下の方法を採用した。互いに直行する3方向からある農産物を計測した場合、それらの投影面積 S_x , S_y , および S_z の平均から、体積の最低保証値を与えることができ、(8) 式の関係が成り立つ (Yamashita and Goto, 1979)。

$$\bar{A} \leq KV^{\frac{2}{3}} \quad (8)$$

ここで、 $\bar{A}$ は (9) 式で与えられる投影面積の平均値 (単位: mm^2)、 V は求める体積、 K は無次元定数であり、個々の農産物においてある一定の範囲をもつ。物理的には、パレイシヨは凸面体の球面率を表しており、平均して $K = 1.38$ と推定される。

$$\bar{A} = \frac{S_x + S_y + S_z}{3} \quad (9)$$

ただし、本システムにおいて、 S_x はカメラ1における面積、 S_y はカメラ2における面積、 S_z はカメラ3における面積とした。これらの関係から、求めるパレイシヨの推定質量 W を (10) 式で定義する。

$$W = D_p(V_p) \times V_p \quad (10)$$

ここで、 V_p は (8) 式より、(11) 式で計算されるものとする。

$$V_p = \left(\frac{\bar{A}}{1.38} \right)^{1.5} \quad (11)$$

ただし、 $D_p(V_p)$ は比重係数 (体積 V_p の関数) である。ここで、比重係数 $D_p(V_p)$ を同様に、以下のように設定した。

$$D_p(V_p) = \begin{cases} 1.13 (190 \leq V_p) \\ 1.25 (75 \leq V_p < 190) \\ 1.39 (45 \leq V_p < 75) \\ 1.56 (0 \leq V_p < 45) \end{cases} \quad (12)$$

さらに、求めた推定質量値に対し、実際の質量との差を比較し、(6) 式で計算される標準偏差によって評価した。

また、カメラの台数による質量推定の違いを検討するために、2カメラ (カメラ1およびカメラ3) において、比重係数を再計算、質量推定を行った。

3. トマト

トマトにおいては、傷害計測のための全面計測を行う必要性から6台のカメラを利用することを考え、まず簡易色度変換によって抽出した正常果実領域に基づき、6カメラの果実の面積平均から、(13) 式を用いてトマトの体積を算出した。

$$\bar{A} = \frac{S1 + S2 + S3 + S4 + S5 + S6}{6} \quad (13)$$

ここで、 $S1 \sim S6$ はそれぞれのカメラ1～6における面積とした。体積を求めるための定数は、トマトの形状が球体に近いので $K=1.24$ とし、(14) 式で体積を求めた。式 (15) の比重係数を乗じることで、質量を式 (16) で推定した。

$$V_t = \left(\frac{\bar{A}}{1.24} \right)^{1.5} \quad (14)$$

$$D_t(V_t) = \begin{cases} 1.46 & (171 \leq V_t) \\ 1.49 & (0 \leq V_t < 170) \end{cases} \quad (15)$$

$$W = D_t(V_t) \times V_t \quad (16)$$

この推定結果に対し、(6)式で計算される、実際のトマトの質量との誤差のばらつきを求めた。

さらに、他の条件における質量推定の違いを検証するために、次の実験を行った。

①カメラ数の違いによるトマトの質量推定

1カメラの場合カメラ3, 2カメラの場合カメラ1および3, 3カメラの場合カメラ1～3, 4カメラの場合カメラ1～4, 5カメラの場合カメラ1～5の計測データをそれぞれ用いて、投影面積の平均をとり体積を計算、さらに逐次比重係数を再計算し、算出した。

②体積計算方法の違いによるトマトの質量推定

トマトを定形と仮定し、次の三つの場合について体積を近似計算し、比較を行った。まず、上方からのカメラ3を用い、その等価円半径 r を用いてトマトを球と仮定し、(17)式にてその体積を算出した。

$$V_t = \frac{4}{3} \pi r^3 \quad (17)$$

次に、2カメラを用いてトマトを球と仮定するため、(17)式において、 r をカメラ1とカメラ3の等価円半径の平均として、体積を算出した。

さらに、上方のカメラ3から最大径($2 \times a$)(a は長半径)、側面のカメラ1から高さ($2 \times b$)(b は短半径)を取得し、トマトを偏平球と仮定し、体積を(18)式にて計算した。それぞれに比重係数を再計算し、推定質量を評価した。

$$V_t = \frac{4}{3} \pi a b^2 \quad (18)$$

結果および考察

1. レンブ

図5に、実際に質量計で計測したレンブの質量と画像から推定した質量との差を示す。正規の円錐による近似に基づいた場合は、標準偏差は9.2 g、最大誤差は25.4 gであった。レンブの階級区分の最小幅30 gを考慮すると、2階級の計測誤りの発生確率は低い。決定係数 $R^2 = 0.8820$ であり、比較的高いものの、同一果実単体の複数回の計測においては、高い再現性があるとはいえない。これは、コンベアによる移送中の姿勢、形状や空洞による誤差を加味していないためであり、形状が著しく円錐体から外れているような変形果、種のない果実、中身が空洞で見た目より質量が軽い果実の質量

図5 レンブの質量計測結果

Fig. 5 Result of waxed apple mass estimation

に関しては誤差が大きくなった。これらのことより、階級選別においては、形状や空洞の有無を考慮した体積補正を与える必要があると考えられた。

また、2台のカメラの投影面積の平均を用いる方法による結果を図5内に示す。これより、明らかに円錐形状に体積近似した方法が有効であることがわかる。これは、投影面積で必要とされる直交3方向に満たないカメラ数であること、レンブの形状特性がこの計算方法に適していたからであると考えられた。

2. バレイショ

図6に、バレイショを用いたときの結果を示す。これより、カメラ3台を用いた場合の標準偏差は7.1 g、最大誤差は26.8 gであった。決定係数はであり、形状が整っている果実に対しては十分な近似ができていているといえる。階級区分の最小幅20 gと比較すると、2階級の計測誤りも発生する可能性は否定できないが、果実の質量が100 g以下の推定誤差は小さく、その確率も小さいと思われる。大きな誤差を示した果実は、偏平のもの、先が尖っているもの、円形に近いもの、通常格外とされるこぶや曲がりのような不規則な形状をもつ果実であった。これは比重パラメータを決定する際、標準的な形状なもので決定したことが原因であり、より精度を高めるためには $D_p(V_p)$ 比重係数の細分化や形状による補正などが必要と考えられた。さらに、厳密に質量を求める場合には、この形状に加え、内部空洞の有無、収穫後の経過時間、保存状態なども考慮する必要がある。

バレイショの寸法計測に関して、主に収穫マップを作成するための体積推定方法を示した報告(Hofstee and Molema, 2002)は、比重はほとんど変動がないものとして扱われていた。本論文は、比重係数として明確にその意味を与えた。他に、最大径、対角幅、面積から直接質量を計算する報告

図6 バレイショの質量計測結果

Fig. 6 Results of potato mass estimation

(McClure and Morrow, 1987) があるが対象が形のよいものに限定されている。土汚れを有したバレイショに対して、楕円形で形状を近似した方法 (Hofstee and Molema, 2003) は、サツマイモ (Wright *et al.*, 1986) やメークインのような特殊な形状をもつ品種に対しては、同様の結果は必ずしも期待できない。本論文の投影面積による方法は、一般的な適用が期待できる。

2カメラを用いたときの結果は、標準偏差 9.7 g, 最大誤差 37.4g, 決定係数 $R^2=0.9764$ であり、3カメラに比べると精度が落ちるものの、選別可能な推定ができていえる。この理由として、不定形ではあるが、今回のサンプルにも言えることであるが、通常選果されるサンプルに極端な異形・奇形がそれほど多くないこと、一般に長楕円球形であるメークインにおいては、上カメラ1台、横カメラ1台の2枚の投影画像によって、比較的特徴ある形状をとらえることが可能で、それらの2カメラのみでも相当の質量推定情報が得られたものと推測されたことがあげられる。しかしながら、時期や産地によって収穫される階級の傾向が変動することを考慮した場合、小階級の二つの区間幅 (20 ~ 39 g, 40 ~ 69 g) を越える最大誤差であり、2カメラでは不十分な精度のことも予測された。

3. トマト

図7に、トマトの質量推定結果を示す。正規の6カメラによる投影面積の平均を用いた場合、誤差の標準偏差は 6.3 g, 最大誤差は 24.3 g で、決定係数は $R^2 = 0.9921$ であった。トマトの形状は偏平球に近いドーム型が一般的であり、体積自体の推定は、レンプ、メークインと比べて、精度よく求まっている。カメラが6台であること、および対象の主たる形状特徴が球体に近いことなどがよい結果を得られた主要因だと考えられる。しかし、トマトの個体特徴として、実詰りがよくおいしいとされる果実は同じ体積でも他より重く、逆に成長に偏りがあり内

図7 トマトの質量推定結果

Fig. 7 Results of tomato mass estimation

表1 カメラ数によるトマトの質量推定結果

Table. 1 Mass estimation results for tomato with number of cameras

Number of cameras	1	2	3	4	5	6
σ	13.4 g	10.2 g	7.1 g	7.3 g	6.3 g	6.3 g
R^2	0.9696	0.9809	0.9897	0.9895	0.9921	0.9921

表2 2カメラでの3品目質量推定結果

Table. 2 Mass estimation results of three products by use of 2 cameras

2 Camras	Waxed apple	Potato	Tomato
σ	12.0 g	9.7 g	10.2 g
R^2	0.8234	0.9764	0.9809

部に空洞がある果実は、他より軽くなる。実際、誤差が 10 g 以上あった果実は、このどちらかの傾向を有していた。画像計測のみでこれらの内部果実特徴を判別することは難しいので、画像による質量推定には、内部品質を評価する手法による補正が必要である。

この結果は、投影面積から指数演算で直接質量を推定した報告 (Jahns *et al.*, 2001) とほぼ同程度の精度である。本論文の方が使用したカメラは多いが、比重係数を使用し、トマトに頻繁に生じる空洞などの扱いを考慮していることから、実用性を伴う。

表1にカメラ数によるトマトの質量推定結果を示す。これより、トマトにおいては、ほぼ5カメラで十分な精度が得られ、それ以上のカメラ台数は質量推定には大きな影響を与えないことが知れた。ただ、等級選別を行わない場合には、トマトの各階級は小さい果実で 30 g, 大きいもので 50 g の差をつけて分けられることより、通常の階級選別を行うためには、偏差 7.1 g

が得られる直交3方向に配置した3カメラがあれば十分であることがわかる。

また、図7中には、体積モデルを変更したトマトの質量推定結果も併記している。これより、球モデルや、偏平球モデルでの推定は、投影面積の平均より精度が悪いことがわかる。この理由として、極端な異形等が少ない形状をしているとはいえ、実際には細部で微妙に異なる形状をした果実が多いことより、単純な球や偏平球モデルでは誤差が生じること、ローラーピンでの側面の高さ計測は、ピンの形状、果実の傾き等による最大径や高さの誤差を生じやすく、径に関わる小さな計測誤差が大きな体積の差を生むこと等が考えられた。球と偏平球のモデルの違いによる精度をみると、カメラ台数に関わらず、球の方がいずれも偏平球よりも精度の良い結果となっている。このことからトマトに関しては、偏平球モデルのように線分長を直接計測する方法ではなく、投影面積あるいは等価円直径などの面積を介した方法が有効であるといえる。

4. 総合考察

表2に、2カメラで投影面積を用いたときの3品目の質量推定結果をまとめた。ほぼ同一の計測環境下であるといえ、決定係数を比較すると、トマト、パレイショ、レンプの順に良い結果となった。これは単に形状の複雑性に起因するのではなく、農産物の密度や搬送姿勢にも影響されていると考えられる。農産物を対象とした質量推定においては、対象の形状や特性、要求される計測精度、計測項目、あるいは搬送系および画像処理システムの特性に合わせ、カメラ数、カメラの配置、アルゴリズムの策定を行うことが重要である。

レンプの選別では、一般に色と質量を中心に計測する市場からの要求が強く、実際に稼働しているシステムにおいても2カメラが採用された。このことより、2カメラのシステムでレンプのような特殊な形状をした果実の質量推定を行う場合は、円錐近似による方法が良いと結論づけられる。

パレイショにおいては、色、形状、質量などを中心に計測することが要求されたことより、実際の選果システムにおいても3カメラが採用された。

トマトに関しては、色、形状、寸法などはもちろんのこと、傷害計測についても重要な項目の一つにあげられたことより、果実の全面計測をするため、6カメラが果実の反転機構を含むシステムに搭載された。このことより、質量計測に関しては、そのうちの3カメラあるいは5カメラを用いれば、十分な精度が得られた。ただ、トマトの場合は、果実をモールドに箱詰めする際の便宜をはかるために、上カメラで計測した最大径を用いる方が実際の選果作業に即していることも多い。その際には、配置された6カメラからの情報を全て利用することが望ましい。

摘 要

レンプ、パレイショ、トマトの自動選別システムにおいて、画像処理を用いて、カメラ数や体積計算方法を検討し、質量推定実験を行った結果、以下の知見が得られた。

- 1) レンプに関しては、上横2カメラの画像から体積を円錐モデルで近似し、比重パラメータを乗じた方法が最も結果がよく、誤差平均9.2 gの計測精度であった。
- 2) パレイショに関しては、直交する3方向に配置した3カメラの投影面積から体積を近似し、比重パラメータを乗じる方法が最も結果がよく、誤差平均7.1 gの計測精度であった。
- 3) トマトに関しては、直交する3方向に配置した3カメラの投影面積から体積を近似し、比重パラメータを乗じる方法で誤差平均7.1 gと十分な精度が得られた。等級項目の計測に必要とされる6カメラを用いた場合には、誤差平均6.3 gの計測精度を得た。

謝 辞

本研究を行うにあたり、メークインのサンプルを提供くださった三島函南農業協同組合早川義徳氏、伊丹雅治氏に心より謝意を表します。

引用文献

- Davenel, A., Guizard, C. H., Labarre, T., Sevil, F. 1988. Automatic detection of surface defects on fruit by using a vision system. *J. Agric. Engng Res.* 41:1-9.
- Hofstee, J. W., Molema, G. J. 2002. Machine vision based yield mapping of potatoes. 2002 ASAE Meeting Paper No. 021200
- Hofstee, J. W., Molema, G. J. 2003. Volume estimation of potatoes partly covered with dirt tare. 2003 ASAE Annual Meeting. Paper No. 031001
- Ishii, T., Toita, H., Kondo, N., Tahara, N. 2003a. Deciduous fruit grading robot (Part 1) -development of fruit providing and grading robots- (in Japanese). *J. JSAM* 65(6):163-172.
- Ishii, T., Toita, H., Kondo, N., Tahara, N. 2003b. Deciduous fruit grading robot (Part 2) -development of image processing system- (in Japanese). *J. JSAM* 65(6): 173-183.
- Jahns, G., Nielsen, H. M., Paul, W. 2001. Measuring image analysis attributes and modeling fuzzy consumer aspects for tomato quality grading. *Computer and Electronics in Agriculture* 31: 17-29.
- Kurita, M., Kondo, N. 2005. Agricultural product grading method by image processing (Part 1) -Effectiveness of direct lighting method-. *J. SHITA*. 18 (1) : 9-17.

- McClure, J. E., Morrow, C. T. 1987. Computer vision sorting of potatoes. ASAE Meeting Paper No. 87-6501.
- Mimura, Y. 2003. New special product series: Color sweet pepper (in Japanese). Rural Culture Association, Tokyo. 23-153.
- Njoroge, J. B., Ninomiya, K., Kondo, N. and Toita, H. 2002. Automated fruit grading system using image processing. In: Proc. 2002 SICE, Osaka. 1290-1295.
- Ninomiya, K., Kondo, N., V. K. Chong, Monta, M. Machine vision systems of eggplant grading system. In :Proc. 2004 ASAE, Kyoto. 399-404.
- Qiao, J., Sasao, A., Shibusawa, S., Kondo, N., Morimoto, E. 2004. Mobile fruit grading robot (Part 1) -Development of a robotic system for grading sweet peppers-. J. JSAM 66(2): 113-122.
- Varghese, Z., Morrow, C. T., Heinmann, P. H., Sommer, J. H., Tao, Y., Crassweller R. M. 1991. Automated inspection of golden delicious apples using colour computer vision. ASAE meeting Paper No. 91-7002.
- Wooten, J. R., White, J. G., Thomasson, J. A., Thompson, P. G. 2000. Yield and quality monitor for sweet potato with machine vision. ASAE Meeting Paper No. 001123.
- Wright, M. E., Tappan, J. H., Sistler, F. E. 1986. The size and shape of typical sweet potatoes. Trans. of ASAE 29(3): 678-682.
- Yamashita, R., Goto, K.(山下律也,後藤清和) 1979. Studies on properties and measurement methods of agricultural products (in Japanese)(農産物の物性および測定法に関する総合的研究). In: Properties of agricultural products (Vol. 1))(農産物性研究(第1集)). Japanese Society of Agricultural Machinery (農業機械学会), 1-10.