ローラーピン型コンベアを用いたトマト果実の反転性能および 全面画像計測による等級判定

栗田充隆・近藤 直・二宮和則

エスアイ精工(株)技術開発部 791-8036 松山市高岡町 66

Tomato Fruit Turning-over Performance and Fruit Grading through Full Surface Image Inspection by use of Roller Pin Conveyor

Mitsutaka KURITA, Naoshi KONDO and Kazunori NINOMIYA

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

Abstract

Grading machines to inspect agricultural products by imaging technologies have been increasingly introduced recently in Japan. In fruit grading operations, it is one of the most important functions to inspect all sides of an object. In this study, two experiments on grading, based on full surface inspection of tomato fruit, were conducted by using a roller pin conveyor with a turning-over device and six image acquisition systems: 1) an experiment to turn over a fruit and 2) an experiment to synthetically grade a fruit based on each of the 6 images.

In the turning-over experiment, 100 tomatoes, which were placed on a roller pin conveyor with their calyxes down, were spun into upside-down postures through mechanically controlled roller pins. The results showed that this mechanism could be used for full fruit surface inspection, because about 80% success rate was obtained, whereas the success rate of smaller size fruits was lower than that of larger-size fruits due to their shape. After turning over, scattered spin angle of fruit showed variation for defect measurement, therefore some compensation of the result depending on the spin angle and improvement of spinning accuracy were desirable.

The results of the grading experiment confirmed that a set of the roller pins to turn over fruit and six color TV cameras could inspect all sides of the fruit and that the grading results could roughly follow human operators' results, during the turning-over process of tomato fruit. However, grading results of some fruits with cracks around calyxes were different from human grades because of similar crack colors and thin calyx ends. To improve the grading results, it was observed that higher success rate of fruit turning over and higher resolution imaging technologies were required.

Keywords: automation, calyx, direct lighting, grading, image processing, inspection, roller pin, tomato, turn over

2005 年 12 月 15 日受付

2006 年 5 月 11 日受理

Corresponding author: Mitsutaka Kurita

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

緒 言

近年, カンキツ類に関しては, CCD カメラを用いた画像処理装置ならびに近赤外分光法を用いた糖度・酸度センサを

搭載した選別システムが普及し、多くの共同選果施設で利用されている。通常、農産物の選別においては、前処理で腐敗や腐敗につながる進行性の症状をもつ格外品を取り除く。この症状は必ずしも農産物全面に症状が現れず、一部のみに表れる場合も多いことから、自動選別システムを実現する場合には、このような欠陥を見落とさないように、農産物全面の計測を行うことが重要である。このような背景から、選果施設メーカーは、果実の撮像部付近にミラーなどを配置し、なるべく多くの表面を計測するような装置の開発を行ってきた (Maeda, 1995; Kinoshita *et al.*, 1996; Okada *et al.*, 1999)。

しかし、この時点の多くの装置においても、搬送面と果実との接触部はカメラにとって死角であった。最近では、全面計測を実現するために、果実をローラー間で挟み込み回転させる方式 (Fujiwara and Ikeura, 2000) や、搬送コンベアの乗り移りで下面を見る装置 (Ishii, 2000; Andrew, 2002) や、吸着パッドで果実を吸い上げて下面を撮像するタイプの装置 (Yamamoto, 2001; Ishii *et al.*, 2003) が開発されている。

農産物の全面計測を実現するには、対象となる品目の大きさ、形状などと搬送装置との適合性も重要な要素である。CCD カメラを用いた全周計測可能なカンキツ向けの選別システムの搬送ラインは、大きく分けて、PK (ピアノ鍵盤) コンベア式 (図1: Hashimoto, 1992; Sagara, 1998; Suzuki, 2000; Kawano *et al.*, 2003) と、ローラーピン式 (図2: Ishii, 1997) などが挙げられる。PK コンベア式では、上および横方向からのカメラの画像に加え、農産物の底面を計測するためには、PK を一つおきに倒し、その隙間から一下方、次に倒れた PK と倒れていない PK を入れ替え、もう一下方を撮像する (Suzuki, 2000)、あるいは二つの異なるコンベアの間隙を通過する間に下方からミラーの反射画像を用いて撮像する (Kurihara, 1998) などの工夫が必要である。これは、撮影視野の問題、反射画像の精度などを考慮すると、撮像条件が上および横方向と異なる欠点がある。一方、ローラーピンは、農産物自身を反転させることができるため、反転後に設置し

図 1 PK 型搬送装置 (特許公開 2000-317407)
Fig. 1 PK-type transferring device

(a) ローラーピンと反転装置
(a) Roller pins and device for tomato turning over

(b) ローラーピンの形状
(b) Roller pin characteristic

図 2 ローラーピンと反転装置

Fig. 2 Roller pin and device for tomato turning over

た上方のカメラによって、他のカメラと同一条件で底面の計測が可能である (Njoroge *et al.*, 2002)。ただし、計測対象はローラーピンで回転可能な寸法および形状である必要がある。

一般に、農産物の自動選別システムにおいては、まず対象品目自身の形状特徴と搬送装置との適合性を考える必要がある。本研究では、対象をトマトとした。トマトは、等階級を決定する際、果実全面の計測が望まれる品目の一つである。特に、果頂面の情報は等階級の決定には必須であり、ガク側では裂果等の欠陥が生じやすく、側面にはチャック、穴等の欠陥が見られることが多い。また、場所を問わず、軽微な傷害も発生する。従来行われてきた手選別における判定においては、各等級評価項目の中で最も悪い結果が最終等級に採用される。たとえば果頂面の花落ち判定が等級 A、側面の傷害判定が等級 B の場合、最終判定は等級 B であり、果頂面や側面の傷害判定が等級 A、ガク面の傷害判定が等級 B の場合も、等級 B である。また、傷害判定が等級 B、形状判定が等級 B の場合にも、最終等級は B にとどまる。つまり、各果実面の等級評価項目が加算されて評価されることはない。

ただし、そのシーズンの産地における生産物の全体的な状況を考慮して、各評価項目の基準が若干変動することはある。

人間の作業においては、作業による多少の変動はあるものの、産地ブランドの確立のため、それぞれの産地で一定の基準を設け、各作業員がその基準にできるだけ沿うように努力している。これらのことより、自動選別システムにおいても、各等級評価項目に基準を設けて果実全面を計測可能とすることが要求されている。トマト果実は、球形に近いことから、本研究では果実の全面計測を行うため、ローラーピン搬送装置を採用した。本報告では、果実が搬送装置に投入される姿勢がガク下で既知である場合のトマトの全自動全面計測を目標とし、ローラーピン式搬送装置における反転に関する実験および6台のカラーTVカメラを用いた全面傷害計測に関する等級判定実験を行ったので、ここに報告する。

供試材料

施設トマトの産地である広島県向島町においては、果頂面の着色程度、形状、花落ち、トマト特有の傷害であるチャックおよびガク周りの裂果、さらには部位に関わらず存在する傷害などの等級評価項目に対して、ある基準を設けてA・B・Cおよび格外の4段階に選別する。その詳細は、別報に述べた(Kurita *et al.*, 2006a, 2006b)。

本研究では、全面計測のための果実反転計測ならびに等級判定の二つの実験から構成されることより、供試材料もその2種類を以下のように準備した。

1. 反転計測用果実(材料1)

全面計測の成否の検証をするための材料として、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、最大径を基

図3 傷害等級判定用果実
Fig. 3 Sample Fruit

準として、50.0～60.9 mm が 2 個、61.0～66.9 mm が 17 個、67.0～70.9 mm が 17 個、71.0～78.4 mm が 23 個、78.5～81.4 mm が 11 個、81.5～85.9 mm が 11 個、86.0 mm 以上が 19 個である。この階級ごとの個数は、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。

2. 傷害等級判定用果実(材料2)

傷害等級を総合判定するための材料として、2005 年 6 月に広島県向島町、また 2005 年 11 月に熊本県玉名市および愛媛県中山町で生産された果実を 40 個用意した。傷害のみを対象とした目視判定の結果、等級 A が 10 個、等級 B が 10 個、等級 C が 10 個、格外が 10 個で構成され、その階級は 56.6～83.9 mm まで様々である。特に、等級 C と格外には、ガク面の傷害を有するものを中心に選択することによって、42 個の果実のうち 20 個が、ガク面のみの傷害で等級が決定される果実とした。

例として、図 3(a)～(d) に 4 個の果実 (d-1, d-2, d-3, d-4) の 6 方向からの画像を示した。d-1 は傷害がなく、等級は A である。d-2 は、チャックがあるがその長さはトマトの高さの約三分の一に達する程度であり、果頂面に 5 mm 程度の一般キズがあることより、等級は B である。d-3 は、ガク面に 10 mm 以上のガク割れが 2 本あり、等級は C である。d-4 も、ガク面に 20 mm 近くのガク割れが 3 本あり、等級は格外である。

実験装置

1. ローラーピン搬送方式

ローラーピン搬送装置 (Ishii, 1997) のユニットならびに、ローラーピンを個々に回転させ、果実を反転するための V ベルト (反転ベルトと呼ぶ) を図 2(a) に示す。また、図 2(b) にローラーピンの形状を表す。ローラーピンは鼓状になっているため、搬送される果実との接触面が多く、回転しても安定した接触状態を維持できるという特徴をもっている。製造、組立上の都合から 3 本のローラーピンがセットになっているユニットを製作し、使用した。

図 4 には、ローラーピンの回転方向とトマトの反転の様子を示す。反転ベルトはプーリにより回され、波目状に加工されたローラーピンの先端部に接している。その摩擦力でローラーピンを回転させるが、通常、果実の回転量は、ローラーピンの接触距離とそれらの相対的な速度差により、決定される。本実験では、ローラーピン自体は 43.3 m/分 (721.67 mm/s) で搬送しているのに対し、反転ベルトは順方向に 55.4 m/分 (923.33 mm/s) の速度で駆動させた。この結果、相対的にローラーピンは、12.1 m/分 (201.67 mm/s) の速度差を受け

て、図 4 のように反時計回りに回転する。この回転に伴い、トマトと接触している面が時計回りに回転する。この接触面はその回転が行われるたびに、新しい接触面を移動させ果実本体に回転力を与える。

一般に、直径の異なるローラーピンを組み合わせたり、表面をラバーで巻くなどの措置を施すことで、果実表面とローラーピンとの接触面積を増大させ、摩擦力を増加させることで、反転をよりよく行うことができる。本装置では、ローラーピン表面にラバーを巻き、3 本のセットが大ピン・小ピン・小ピンと組み合わせたものを使用した。この理由は、仮に大ピンや小ピンばかりの同一径のローラーピンで統一されていたとすると、果実の周囲形状が不規則な果実およびドーム形の果実においては、ローラーピンと果実の接触が不安定になり、回転が正しく行われにくいことが多いということが経験的に知られているからである。このローラーピンの最大径は 32 mm (大ピン)、26 mm (小ピン) と異なるものの、ピン中央の最小径はいずれも 12 mm で同じに設計された。

反転ベルトとローラーピン先端の接触距離は 850 mm であり、その区間をローラーピンが通過する時間は、1.178 秒であることから、前述の速度差によって大小ピン共に 237.6 mm の距離だけ回転される。これより、この区間での大ピン、小ピンの回転数は、それぞれ 2.36 周、2.91 周となる。この異なる回転数により、特にローラーピンの中央付近では、42 mm の間隔で配置された大小のピンが果実の異なる部位に回転力を与えることになる。ここで図 4 に示したような配列で、大ピンと小ピンに果実が接している場合を仮定する。速度の差から反転ベルトはローラーピン自身をころがり接触により回転させる。果実は、ローラーピンに直接接していることから摩擦を受け回転する。その回転力および果実と大ピンと小ピンの接触面の高低差により、果実が回りやすくなる。この場合、大ピンをいかに配置するかで、反転の成功率が変わり、その配置は、対象とする果実の大きさを基準に決定する。たとえば、最大径 70 mm 前後を中心とするカンキツ類では、大・小・大・小と 84 mm 毎に大ピンを配置する。本実験におけるトマトは 80 mm を越える大きな果実の反転を考慮し、大・小・小と 126 mm

図 4 反転の説明

Fig. 4 Relation among V belt, roller pins, and fruit for fruit turning over

毎に大ピンを配置した。その結果、大きな寸法の果実にも回転を発生させることが可能となった。

本実験では、最大径を 80 mm とした楕円球（楕円 (1) 式を yz 両軸（長径および短径）で回転した球体：図 2(b)）を基準として、装置の調整を行った。材料 1 の最大径と高さを測定した平均から、楕円球の長径と短径の比は 0.85 ($b = 0.85a$) とし、この楕円球が 180 度反転できるようなローラーピンと反転ベルトの速度設定を行った。

$$\frac{y^2}{a^2} + \frac{z^2}{b^2} = 1 \quad (1)$$

このとき、反転に損失がなく、楕円球とローラーピンが均等に接触しているとすると、その楕円球が反転するためには、ローラーピンと接触している点のうち、最大の接触距離は楕円周 P の近似公式 (2) より、116.6 ($= P/2$) mm と近似できる。

$$P \approx 2\pi \times \sqrt{\frac{a^2 + b^2}{2}} \quad (2)$$

これより、果実を最大径 $2r$ (mm) の楕円球（ここでは $r = 2a$ であり、最大径と長径の軸は一致する）、その周囲にすべりなくローラーピンからの回転がかかると仮定すれば、計算上の反転に必要な回転量 $P_{2r}/2$ は次式で計算できる。

$$\frac{P_{2r}}{2} \approx \pi \times \sqrt{0.86125 \times r^2} \quad (3)$$

たとえば、最大径 65 mm および 95 mm の楕円球は、それぞれおよそ 94.8 mm および 138.5 mm 回転すれば 180 度反転することになり、最大径 80 mm の楕円に比べて、それぞれ -21.8 mm, 21.9 mm の差が生じる計算となる。これは角度に

直すとそれぞれ -39.3 度, 26.6 度となる。

2. 画像処理システム

図 5 に本実験で用いた画像処理システムを示す。果実はローラーピン方式のコンベアで搬送され、フォトインタラプタを遮光すると、発生するパルスにより、CCD カメラにトリガ信号が送られる。この CCD カメラは、ランダムトリガ機能を有しており、任意のタイミングでの撮像が可能である。つまり撮影対象が常に同じ位置および同じ照明条件で画像を撮り込むことができる。

本システムでは、反転前に CCD カメラによる撮影部を 3 箇所設置している。まず、側面から 2 台のカメラで側方の約 180 度を計測する（撮像部 A: カメラ 1, 2）。次に上方より 1 台のカメラで計測（撮像部 B: カメラ 3）、続いて撮像部 A とは反対の側面から 2 台のカメラで約 180 度を計測する（撮像部 C: カメラ 4, 5）。反転後、残った面を上方より 1 台のカメラで計測する（撮像部 D: カメラ 6）。これらのカメラの配列に合わせ、DL（エスアイ精工社製）を配置した。DL はハロゲンランプ（PHILIPS 社製 JR12V50WAKW/5-1 (EXN) GU 5.3 色温度 3200K）を光源としており、その詳細は既報（Kurita and Kondo, 2006）に報告済みである。

本研究では、撮像部 B を利用した。その撮像部 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（PENTAX 社製 H1214-M）には、焦点距離 12 mm, F 値 1.4 を使い、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

図 5 画像処理システム
Fig. 5 Image processing system

(CONTEC 社製 PIO-16/16L (PCI)) で検出し、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、画像をパーソナルコンピュータ (PC) に入力した。

PC には、FA 用コンピュータ (MTT 社製 TEC-1C(R1); CPU: Pentium III 850 MHz) 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 1/10,000 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ブ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

1. 反転実験

本実験では、球に近いドーム形を有するトマトのガク側を下にし、果実の一部分が大ピンに触れるように供給することとし、そのときのローラーピンによる反転を次のように定義した。「投入後の比較的安定した姿勢を基準として、その接地面重心 (ここではガク中心) が回転後に真上もしくは進行 (回転) 方向前後に 22.5 度以内に入る回転が行われること。」これは各カメラの画像処理の撮像範囲から、全面計測を実現するために、許容できる範囲を考慮した結果に基づいている。ガク側を下にして人為的に供給した理由には、トマトの等階級決定に重要なのは果頂面の画像であり、上カメラのみの選別機においてもこのような供給方法を採用していること、ガク側が下にあるときに、果実の搬送は安定していることより、ローラーピンでの果実の反転率を正確に求められること、および配置した各カメラの役割ならびに処理を明確にできること等があげられる。

果実の反転の成否判定は、撮像部 D の上カメラの画像を検証することで行った。すなわち、果実のローラーピンへの供給時にはガクが下であるので、反転が正常に行われれば、撮像部 D ではガクが真上に向くはずである。このガクを次の方法を用いて認識した。

(1) ガクの認識方法

本実験では、RGB 画像の各画素の濃度値 (R, G, B) を用いて、次式で計算される簡易色度変換 (R', G') の計算を行った。

$$R' = \frac{R}{R + G + B} \times 255 \quad (4)$$

$$G' = \frac{G}{R + G + B} \times 255 \quad (5)$$

前報 (Kurita *et al.*, 2006a) で用いた着色計測用トマト (完熟から未熟までの果実: a-1 から a-5) を対象に、それらの正常果皮よりそれぞれ 100 点を抽出し、さらにガク部位から合計 100 点を選択した画素の色度分布を図 6 に示した。この結果から、出荷基準着色を満たさない a-5 での色度によるガク判別は容易でないことがわかる。出荷対象着色である a-1 から a-4 までの部位とガク部位の分布を考慮し、a-4 の一部でガクとの重複領域が若干残るものの、ガク領域を

$$\begin{cases} R < 70, \text{ かつ, } 100 < R' \leq 110, \text{ かつ, } 85 < G' \\ R \geq 70, \text{ かつ, } 100 < R' \leq 110, \text{ かつ, } 95 < G' \\ R < 70, \text{ かつ, } 90 < R' \leq 100, \text{ かつ, } 85 < G' \\ R \geq 70, \text{ かつ, } 90 < R' \leq 100, \text{ かつ, } 92 < G' \\ 80 < R' \leq 90, \text{ かつ, } 85 < G' \end{cases}$$

(6)

と定義した (図 6 の点線四角囲みの領域)。

図 6 トマト部位特徴別の色度分布

Fig. 6 Chromaticity distribution of tomato fruits and calyxes

図 7 反転ずれ角度

Fig. 7 Error angle for complete turning over

(2) ガク認識による反転判定方法

図6の結果を基に、次の手順で反転の精度を計測する。反転後の撮像部Dの画像(x-y平面上)に対して、まずトマトの重心(G_x, G_y)を求める。次に、前述のガク領域から、その重心(H_x, H_y)を求め、搬送方向のずれ量 $\Delta x (= G_x - H_x)$ を算出する。上面から見た最大径 $2r$ を長径とした楕円球を仮定して、このずれを垂直方向からのずれ角度 $\Delta \theta$ として次式で計算する(図7)。

$$\Delta \theta = \tan^{-1} \frac{\Delta x}{\Delta z} \quad (7)$$

$$\Delta z = \sqrt{0.85^2 \times r^2 - \left(\frac{1}{0.85}\right)^2 \times \Delta x^2} \quad (8)$$

ここで、トマトの最大径を $2r$ とした。このずれ角度が 22.5 度以内であれば反転が成功したと判定する。

なお、最大径 80 mm の楕円球を基準とし、最大径 $2r$ の楕円球を反転させたとき、理論上の反転ずれ角 $\Delta \theta$ は、次の連立方程式を離散的に n について解き、

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^{n-1} \sqrt{(x_{i+1} - x_i)^2 + (z_{i+1} - z_i)^2} \doteq \frac{P_{2r}}{2} - \frac{P_{80}}{2} \\ x_i = r \times \cos((i-1)\theta_{res}) \\ z_i = 0.85r \times \sin((i-1)\theta_{res}) \end{cases} \quad (9)$$

$\Delta \theta \doteq n \times \theta_{res}$ とした。ここで、 θ_{res} は角度の最小分解能(ここでは 0.1 度)である。

2. 傷害等級判定実験

本研究では、トマトの傷害計測に関して、果頂面における花落ち、果頂面で花落ちを除いた傷害および4側面の傷害の総合(傷害度1)、ガク面の傷害(傷害度2)の三つの評価

指標を使用し(Kurita *et al.*, 2006b)、それぞれの指標において算出された面積和と最大弦長の6項目に対し、等級A・B・C・格別の境界値を表1のように設定した。その際、階級による評価の違いを与えるために、果実の大きさ(果頂面の最大径 $Size$ (単位: mm))による補正を(10)式で行った。

$$b(i, j) = b'(i, j) \times \frac{Size}{80} \quad (10)$$

$b(i, j)$ は補正前の境界値、 $b'(i, j)$ は補正後の境界値、 i は計測項目を表し、 j はA・B、B・C、C・格別の等級間の境界値を表すこととする。たとえば、花落ちに関しては、果実の最大径が 80 mm 、花落ちの最大弦長が 13 mm であれば、等級Cであるが、最大径が 100 mm の果実場合、最大弦長が 13 mm でも等級はBとなる。

他の指標についても同様に等級を判定し、その中で最も悪かった等級を傷害の等級評価 G_{Defect} として決定する。つまり、

$$G_{Defect} = \max_g(g_1(sum_1), g_2(maxlen_1), g_3(sum_2), g_4(maxlen_2), g_5(sum_3), g_6(maxlen_3)) \quad (11)$$

で求める。ここで、 $\max_g$ は最も悪い等級を返す関数、 sum_1 は花落ちの面積、 $maxlen_1$ は花落ちの最大弦長、 sum_2 は傷害度1の面積和、 $maxlen_2$ は傷害度1の最大弦長、 sum_3 は傷害度2の面積和、 $maxlen_3$ は傷害度2の最大弦長とし、 g_1 は花落ちの面積を花落ちの補正後の境界値で判定した等級、 g_2 は花落ちの最大弦長を補正境界値で判定した等級、 g_3 は傷害度1の面積和を補正境界値で判定した等級、 g_4 は傷害度1の最大弦長を補正境界値で判定した等級、 g_5 は傷害度2の面積和を補正境界値で判定した等級、 g_6 は傷害度2の最大弦長を補正境界値で判定した等級である。

3. 反転ずれ角と傷害検出精度の解析

ガク面の傷害検出精度と、反転精度には密接な関係がある。それは単純な球形による投影の変化のみならず、ガク面のキズ、トマト特有のガク割れの色・深さ、ガクの形状や、ガクとキズの位置関係などが複雑に関わっていることに起因する。ここでは、材料2のうちガク割れをもつ10個のサンプルを抽出し、3回反転および傷害計測を試みた。その果実当たり3枚のカメラ6の画像より、反転ずれ角と傷害度2を算出した。なお、傷害度2の最大弦長については、計測処理過程において、近接距離によるキズ合成処理を行うため、角度によって大きく変化することから、面積和のみを対象として解析した。

表1 傷害計測の等級境界値例
Table. 1 Examples of grading criteria for defect detection

Items	A	B	C	SS
Blossom end area	0~20	21~60	61~150	151~
Blossom end max-length	0~6	7~12	13~25	26~
Defect1 area sum.	0~35	36~100	101~200	201~
Defect1 max-length	0~8	9~18	19~34	35~
Defect2 area sum.	0~50	51~100	101~150	151~
Defect2 max-length	0~12	13~25	26~40	41~

SS: Substandard

実験結果および考察

1. 反転計測実験

(1) ガク認識実験

材料 1 から黄緑から赤までの着色をもつ 5 個を選択し、ガク認識した結果を図 8 に示す。図中では、ガクと認識した画素を緑で色付けしてある。実際の処理においては、暗くなるトマトの周辺部にガク領域と定義した同じ色度特徴をもつ画素が現れることもあったが、それらはノイズとして除去した。この結果より、間違いなくガクは確認できるものの、細くなるガクの先端部は認識ができていないことも多い。これはほとんどのガクの先端部が、色を認識できるだけの十分な画素数を有してなく、緑色の正常果皮の色度に重複した特徴をもったためである。また No.5 のように収穫してある程度日時経過しているものに関して、ガクが萎縮し枯れたような色合いを有すると、ガクの内側に穴が開いた認識結果となる。このようになると、ガクの存在は推定できても、ガクの形状が正確に扱えなくなることがある。なお、図中の×印は、次の実験で評価を行うための、トマトの重心（赤）とガクの重心（白）を、参考までに付与している。

(2) ガク認識による反転判定

材料 1 に対し、反転実験を 3 回行った結果を図 9 に示した。横軸に実測した果頂面の最大径を、縦軸にカメラ 6 におけるトマト重心からの進行方向の角度のずれを表した。正の値でまわり過ぎ、負の値で回転が足りないことを示している。果実が楕円球体で、その周囲にすべりなくローラーピンからの回転力がかかるという仮定したときの計算上の回転ずれ角 $\Delta\theta$ ((9) 式) を曲線で示している。ガクがカメラ 6 に写らないような反転失敗は 1 回のみであり、そのグラフ上での点は範囲外となるため示していない。これより、反転の定義に基づく

成功率は、1 回目から 3 回目まで順に 81%, 84%, 87% であった。

また、最大径を基準に、70.9 mm 以下を小階級、71.0 ~ 81.4 mm を中階級、81.5 mm 以上を大階級と分類した場合には、小階級の成功率は順に、66%, 75%, 80%, 中階級は、85%, 85%, 91%, 大階級は 97%, 94%, 90% となった。これは、選別施設におけるトマト出荷の階級比率実績から、ローラーピンの組み合わせを大・小・小とし、反転ベルトの速度決定のための調整を、80 mm の径の果実を中心に中・大階級に合わせて行った結果が反映されていると言える。

同時に、図 9 の結果は果実が完全な楕円球体あるいは球体でないこと、および回転を与えるローラーピンが図 2(b) に示した形状をしていることによる。つまり、多くの果実は部分的に扁平な形状あるいはドーム型をしている。特にガク側の形状は球や楕円球では近似できないものがほとんどである。これより、果実はローラーピンの中心（最も径の小さい位置）で回転を与えられるのではなく、そこから数センチ離れたところで回転力を受ける。このことにより、果実の径が大きいほど、ローラーピンの中心から離れたピンの直径の大きな場所で回転力を受けるため、果実を楕円球と仮定したときの曲線とは若干異なる結果が得られた。

また、寸法の大きな果実ほど扁平の形状を有する傾向があり、それらは小さな果実に比べて、その姿勢は安定していた。反転不足が予測される大きな果実においても、反転可能な角度まで回転すれば、ほぼ完全に反転する現象が見られた。そのことより、果頂面の最大径が 70 mm から 100 mm の比較的寸法の大きな果実に対しては、ばらつきはあるものの、良好な反転結果が得られている。反対に小玉のトマトは果頂部にとがった形状をもつ果実が多く、ガクを上にした姿勢が安定しないことから、図 9 のように、回転不足のもの、および回転することができないものが多い結果となった。

図 8 ガク認識結果
Fig. 8 Calyx recognition results

図9 反転計測結果
Fig. 9 Results of fruits turning over

2. 傷害等級判定実験

(1) 傷害等級判定実験1 (等級代表サンプル)

図3(a)～(d)の4個のサンプルに対して、それぞれ全6方位画面の傷害計測を既報 (Kurita *et al.*, 2006b) で詳述した方法を用いて行った。それらの処理画像を図10(a)～(d)に示した。また、花落ち、傷害度、傷害度2の計測結果をそれぞれ表2(a)～(d)に表した。なお、処理画像では、傷害

度および花落ち共に0の面は図3と同じであるため表示していない。

サンプル d-1 のカメラ3における最大径は 70.3 mm であったことから、0.879 の係数を乗じて、表1の境界値が補正された。検出された花落ちは等級Aであり、他の計測面において傷害が計測されなかったため、傷害判定はAとなった。

サンプル d-2 のカメラ3における最大径は 68.0 mm であり、境界値の補正係数は 0.850 とされた。花落ちの面積、果頂面の一般キズや側面のチャックを検出した傷害度1の面積および最大弦長、さらにガク面のチャックを検出した傷害度2の最大弦長でBを得た。その結果、傷害判定はBであった。側面やガク面で計測したチャックを表す傷害の最大弦長による基準の設定が有効であったといえる。

サンプル d-3 のカメラ3による最大径は 66.5 mm であり、

図10 傷害計測結果
Fig. 10 Results of defect detection

表2 傷害等級判定結果
Table. 2 Grading result of defect detection by six cameras
 d-1 (Maximum diameter is 70.3 mm on camera3)

Camera	Blossom end		Defect1		Defect2		Defect total grade
	Area (mm ²)	Max-length (mm)	Area sum.(mm ²)	Max-length (mm)	Area sum.(mm ²)	Max-length (mm)	
Camera1	11.1 (A)	3.8 (A)	0.0 (A)	0.0 (A)	0.0 (A)	0.0 (A)	
Camera2			0.0 (A)	0.0 (A)			
Camera3			0.0 (A)	0.0 (A)			
Camera4			0.0 (A)	0.0 (A)			
Camera5			0.0 (A)	0.0 (A)			
Camera6							
Total	11.1	3.8	0.0	0.0	0.0	0.0	
Grade	A	A	A	A	A	A	A

d-2 (Maximum diameter is 68.0 mm on camera3)

Camera	Blossom end		Defect1		Defect2		Defect total grade
	Area (mm ²)	Max-length (mm)	Area sum.(mm ²)	Max-length (mm)	Area sum.(mm ²)	Max-length (mm)	
Camera1	18.5 (B)	4.9 (A)	0.0 (A)	0.0 (A)	29.0 (A)	12.2 (B)	
Camera2			14.4 (A)	4.6 (A)			
Camera3			42.2 (B)	6.8 (B)			
Camera4			17.0 (A)	7.6 (B)			
Camera5			0.0 (A)	0.0 (A)			
Camera6							
Total	18.5	4.9	73.6	7.6	29.0	12.2	
Grade	B	A	B	B	A	B	B

d-3 (Maximum diameter is 66.5 mm on camera3)

Camera	Blossom end		Defect1		Defect2		Defect total grade
	Area (mm ²)	Max-length (mm)	Area sum.(mm ²)	Max-length (mm)	Area sum.(mm ²)	Max-length (mm)	
Camera1	6.3 (A)	3.8 (A)	0.0 (A)	0.0 (A)	49.5 (B)	23.5 (C)	
Camera2			0.0 (A)	0.0 (A)			
Camera3			0.0 (A)	0.0 (A)			
Camera4			0.0 (A)	0.0 (A)			
Camera5			0.0 (A)	0.0 (A)			
Camera6							
Total	6.3	3.8	0.0	0.0	49.5	23.5	
Grade	A	A	A	A	B	C	C

0.831の境界値補正係数が乗じられた。花落ちの面積および最大弦長、あるいは果頂面および側面でも傷害は検出されず、傷害度1の結果は面積和、最大弦長ともにAであった。ガク面において、ガク割れ2本とガク先を検出したため、傷害度2の面積和でB、傷害度2の最大弦長でCであり、総合判定はCとなった。カメラ間で傷害が分断されていたとしても、各カメラにおける傷害度1の面積の和をとることで、実際の等級判定に近い処理を得ることができた。

サンプルd-4のカメラ3による最大径は81.7 mmであり、境界値補正係数1.021を乗じた。花落ちの最大弦長でB、果頂面のスレキズは傷害度1の面積和、最大弦長ともにAと判定されるが、ガク面において、ガク割れ3本とガク先を検出したため、傷害度2の面積和で格外、傷害度2の最大弦長でCと判定され、総合判定は格外であった。

d-3、d-4のように、ガク面の傷害のみでその果実の等級が決定される場合、カメラ6の計測は重要な意味をもつ。そ

d-4 (Maximum diameter 81.7 mm is on Camera3)

Camera	Blossom end		Defect1		Defect2		Defect total grade
	Area (mm ²)	Max-length (mm)	Area sum. (mm ²)	Max-length (mm)	Area sum. (mm ²)	Max-length (mm)	
Camera1			5.0(A)	4.1(A)			
Camera2			0.0(A)	0.0(A)			
Camera3	14.0(A)	6.8(B)	0.0(A)	0.0(A)			
Camera4			0.0(A)	0.0(A)			
Camera5			0.0(A)	0.0(A)			
Camera6					167.8(SS)	29.2(SS)	
Total	14.0	6.8	5.0	4.1	167.8	29.2	
Grade	A	B	A	A	SS	C	SS

SS: Substandard

のとき、反転機構をもつローラーピンは有用であり、その反転精度が計測精度を左右するといえる。

(2) 傷害等級判定実験2 (各等級10個)

材料2のうち、等級A・B・C・格外、それぞれ10個ずつ、合計40個をガク下でローラーピンに供給し、傷害の全周総合計測を行った。表3には、全6カメラの計測結果に基づき判定したそれぞれの等級における果実数を示した。たとえば、等級Aの10個は列でその結果が表され、A・B・C・外にそれぞれ、7, 3, 0, 0個と判定されたことを示している。したがって、目視判定とカメラによる計測結果が合致した数はA・B・C・外、それぞれ、表3の対角線上の、7, 7, 3, 5個となる。これより、目視判定と異なる結果は18個であった。このうち、傷害がないのに傷害があるとした過剰検出 (False Positive: FP) は6個、傷害があるのに傷害がないとした見逃し (False Negative: FN) は12個であり、FNの方が多く、等級C、格外の果実の判定が良い方向へシフトした結果となっ

た。また、ガク面に注目すると、21個がカメラ6の判定 (傷害度2) で等級が決定され、そのうち10個は適切な判定であったが、FPが3個 (本来はガク面で等級が決定されない過剰検出の1個を含む)、FNが8個であった。

表4には、材料2の反転ずれ角と等級の分布を示す。22.5度以上の失敗は3個しかなかったことから、表3の目視判定との差は、反転の精度よりも、ガク面の傷害計測処理のソフトウェア (Kurita *et al.*, 2006b) による影響が大きいと考えられた。特に、FPの原因は、ガクの先端を傷害として検出してしまうこと、FNはガク割れが果実の正常部位およびガクと同様の色を示し、検出できない状況が見られた。また、目視評価では、ガク割れの深さも考慮し、深いほど下位等級に落とす傾向があるのに対し、画像処理では深さを考慮しない点も、FNの原因であると考えられた。

3. 反転ずれ角と傷害検出精度の解析

ガク割れを有する果実10個を、それぞれ3回計測し、その結果の傷害度2の面積和と反転ずれ角の関係を図11に示した。横軸に反転ずれ角、縦軸には3回の面積和計測結果の平均を100としたときの面積和の比をサンプル毎にプロットした。理想的には、反転ずれ角が0のとき面積和は最大となり、ずれ角の絶対値が大きくなれば、面積和は小さくなるという大小関係が成り立つ。図中に、ずれ角0の値を100としたときの角度 θ による傷害面積投影の比の近似曲線 ($100 \times \cos \theta$) を基準として示した。

サンプル No.1 に関しては、ずれ角が-36度、-14度、-5度のとき、面積和の比がそれぞれ69, 104, 127であった。ず

表3 判定等級数と正解数

Table. 3 Number of judged grade (number in parenthesis shows fruit number judged as same with human grading)

Result	A	B	C	SS
A (human)	7	3	0	0
B (human)	2	7	1	0
C (human)	0	5	3	2
SS (human)	0	1	4	5

SS: Substandard

表4 反転ずれ角の分布

Table. 4 Distribution of turning-over error angle

Interval (degree)	~-22.5	-22.4~-10.0	-9.9~9.9	10.0~22.4	22.5~
Frequency	0	2	24	11	3

図 11 反転ずれ角によるガク割れの傷害度 2 (面積) 検出比

Fig.11 Relation between Defect2 area ratio and turning-over error angle

れ角の絶対値が小さくなるにつれ、面積和の比も大きくなり、適切な結果であるといえる。サンプル No.2 は、ずれ角が -7 度、-1 度、3 度で、面積和の比はそれぞれ 64, 113, 123 であった。このとき、113 と 123 の大小が逆転しているがその差が比較的小さく、ずれ角度に依存しない安定した計測であったといえる。また、サンプル No.3 は、ずれ角が -13 度、-7.1 度、-6.9 度で、面積和の比はそれぞれ 98, 153, 50 であった。153, 50 の間の大小が大幅に逆転しており、計測が不安定であったと考えられる。このような不安定な計測結果を図中に太枠マークで示した。サンプル No.1 のような大小関係が適切なサンプルは他に No.4 および No.7 で、これらの 3 個は、すべてに共通して、白もしくは茶色のガク割れを有していて、検出が安定するタイプであった。また、サンプル No.3 のような不安定なサンプルは他に No.10 で、これら 2 個のサンプルは、ともにキズの周囲や内部が黒く汚れているものであった。暗い色は、画像処理におけるガク除去処理が正確に行われないことも多く、FP が生じた。残りの、サンプル No.2 のようにほぼ計測が安定していた 5 個のサンプルについては、細いガク先の傷害誤検出が軽微であるが無作為にみられ、反転ずれ角による違いが生じなかったり、反転が安定して行われたため、3 回の試行に対して大きな差が生じていない。カメラ 6 の原画像および処理画像の観察より、ガク面の計測においては、ガク面のキズの状態 (特にガク割れの色)、ガクによるキズの隠蔽、ガクの影の影響等、種々の原因により、傷害結果に変動が生じることが明らかとなった。この改善には画像解像度および濃度値の分解能を高める必要があると考えられた。

以上のことから、6 台のカメラを用いて全周計測によるトマトの傷害総合判定を行うには、反転の機構を有するローラーピ

ン形コンベアが有効であることが示せた。実際の運用のためには、反転精度のさらなる向上およびガク周辺の傷害計測処理の高精度化が望まれる。

摘 要

1. トマトを対象に、ガク側を下にローラーピン搬送装置に供給し、反転実験を行った結果、ガク認識は確実に行うことが可能で、約 80% の成功率を得た。これより、本装置は全面計測を行うための機構として利用できると考えられた。ただし、小階級の果実は大階級に比べて、その形状より成功率は低くなった。
2. 傷害をもつトマトを対象に、6 台のカラー TV カメラならびに果実の反転機構を有する選別システムにおいて、傷害の等級判定実験を行った結果、人間の選別作業で得られる等級にほぼ近い判定が実現できた。実際の運用に向けては、反転角度のばらつきによってガク面の傷害計測結果が変動することより、反転精度およびガク面の傷害計測処理精度の向上が望まれた。

謝 辞

トマトに関する一連の研究にあたり、選果サイドの貴重なご意見およびサンプルをご提供くださった JA 向島町 (現 JA 尾道市向島地域本部) 三阪哲美氏、寄井武道氏に心より謝意を表します。

引用文献

- Andrew, W. 2002. Vision system grades moving food products. Vision System Design. June 2002: 26-29.
- Fujiwara M., Ikeura K. Inspection device for agricultural products (農産物の検査装置), 特許公開 2000-84495
- Hashimoto, Y. 1992. Green house automation (in Japanese). Yokendo. Tokyo, 137-145.
- Ishii T. Moving device for agricultural products (果実搬送装置), 特許公開 09-327667
- Ishii T. Inspection device for products (物品検査装置), 特許公開 2000-237696
- Ishii, T., Toita, H., Kondo, N., Tahara, N. 2003. Deciduous fruit grading robot (Part 2) -Development of image processing system- (in Japanese). J. JSAM 65(6): 173-183.
- Kawano, S., et al. 2003. Handbook for Food Non-destruction Measurement (in Japanese)(食品の非破壊計測ハンドブック). Science Forum Inc. Tokyo, 131-141.
- Kinoshita S., Shiomi T., Ohta H. Multiple imaging device under indirect lighting condition to grade lump-

- shaped agricultural products (塊状青果物のカメラ選別機に用いる間接照明型多面撮影装置), 特許公開平 8-5563
- Koshimizu, H. 1995. Industrial Inspection Automation Techniques (in Japanese)(目視検査の自動化技術). Techno-system Co. Tokyo, 237-248.
- Kurihara M. Imaging device to capture lower part of object (物品の下面撮像装置), 特許第 2812466 号
- Kurita, M., Kondo, N. 2006. Agricultural product grading methods by image processing (Part 1) -Effectiveness of direct lighting method-. J. SHITA. 18(1): 9-17.
- Kurita, M., Kondo, N., Yoshimaru, H., Ninomiya, K. 2006a. Extraction methods of color and shape features for tomato grading (in Japanese). J. SHITA. 18(2): 145-153.
- Kurita, M., Kondo, N., Ninomiya, K. 2006b. Defect detection for tomato grading by use of six CCD cameras (in Japanese). J. SHITA. 18(2): 135-144.
- Njoroge, J. B., Ninomiya, K., Kondo, N., Toita, H. 2002. Automated Fruit Grading System Using Image Processing. In : Proc 2002 SICE, Osaka. 1290-1295.
- Maeda H. Surface inspection device for object (物体の外観検査装置), 実用新案公開平 7-43779
- Okada K., Itou K., Ikeura K., Katayama Y., Iwami K., Kawase M. Imaging device for grading (選別用の撮影装置), 特許公開平 11-132739,
- Suzuki N. Conveyer device for object measurement and its application to grade agricultural products (物品計測用コンベア装置及び該装置を使用した農産物の選別装置), 特許公開 2000-317407
- Sagara, Y. 1998. Recent Development of sorting and grading systems for fresh fruits and vegetables (in Japanese). J. JASM 60(2): 167-174.
- Yamamoto Y., Nakamura S., Kikuchi A., Makino H. Measurement device to grade agricultural products (農産物選別用の計測装置), 特許公開 2001-4342