トマトの等級判定のための傷害計測方法

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

Defect Detection for Tomato Grading by use of Six Color CCD Cameras

Mitsutaka KURITA, Naoshi KONDO and Kazunori NINOMIYA

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

Abstract

Grading systems to inspect various agricultural products using imaging technologies have been increasingly introduced and utilized in Japan recently. Among many kinds of fruits, tomato is one of the most difficult fruits to be inspected by image processing because of following reasons: 1) tomato fruits whose peel colors are vary from almost green to completely mature red are shipped depending on seasons. 2) defects whose colors are similar with fruit peel and whose sizes are very thin like "stitching" also should be detected. 3) some defects, which are similar with color of immature fruit peel at shipping time, sometimes become conspicuous by its different color from mature fruit peel color at purchasing. 4) calyxes are sometimes have similar colors with cracks around them and their shadows may be misunderstood as defects. 5) defect type depends on fruit side and each defect level is different.

In this paper, a tomato fruit inspection system with six color TV cameras is described and its experimental results to grade tomato fruits with many types of defects are discussed. From the top view, "blossom end" and general defects were recognized by color and detected edges. Those defects were properly judged through their maximum lengths and area. From the side views, "stitching" and other defects were detected, but it was considered that an algorithm to match side views with their top view should be investigated for a further precise measurement of the defects. From the bottom view, it was observed that calyx recognition and crack detection sometimes were difficult because the calyx size, color, shape and freshness were changed from time to time and from fruit to fruit. To understand defect type and level, the resolution of image sensor and gray level should be increased and the recognition algorithm should be improved.

Keywords: automation, direct lighting, grading, image processing, inspection, tomato,

緒 言

1997 年頃から CCD カメラを用いた画像処理装置ならび

2005 年 8 月 8 日受付

2006 年 1 月 6 日受理

Corresponding author: Mitsukata Kurita

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

に近赤外分光法を用いた糖度・酸度センサを搭載した農産物選別システム (Njoroge *et al.*, 2002) が普及し、利用されている。しかし、それらは画像で農産物の外観全てを計測しているのではなく、コンベアに搬送された農産物の上および横方向からのカメラの画像のみで計測されているものが多い。また、通常の選果においては、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(廃棄農産物)を取り除くことが最重要の作業とされている。この症状は必ずしも農産物全

面に症状が現れず、一部のみの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、農産物の欠陥を見落とさないように、果実全面の計測を行うことが重要な前提であるといえる (Ishii *et al.*, 2003).

農産物の表皮の状態を評価するため、これまで損傷・打ち身といった表皮の状態を、近赤外線などを用いて画像処理で行う方法 (Li *et al.*, 1993, 1994; Nagata *et al.*, 2002) をはじめ、カラー画像を用いてイチゴやリンゴなどの果実の傷害検出に関する手法 (Nakano and Takizawa, 1997; Shrestha *et al.*, 2001) も提案されている。しかし、トマトはほとんど赤みのない一分着色から完熟の十分着色まで出荷される中でその傷害を検出する必要があること、チャック (後述) と呼ばれるトマト固有の細長い傷害や果皮と同様の色を有する傷害をも検出する必要があること、とくに出荷時に目立たない色の傷害であっても販売時に褐変が進み、目立つ傷害となることもあること、ガク周りの裂果と誤認識されるような変色したガクが存在したり、照明によるガクの陰を傷害と誤認識することもあること等の理由より、単純な傷害検出の画像処理アルゴリズムは実際の選果場においては用いることができないことも多いという問題を抱えている。

本報告では、移送される方向がガク下で既知である場合のトマトの全面計測を目標とし、ローラーピン式搬送装置における6つのカラー CCD カメラを用いた傷害計測に関する等級判定実験を行ったので、ここに各カメラの処理手法について報告する。

供試材料

1. 傷害の種類と等級判定基準

施設栽培トマトの産地の一つである広島県向島町では、主に果頂面の形状と果面の傷害に基づいて、トマトの等級 (A・B・C ならびに格外) を決定している。本論文では果面の傷害の計測方法について述べる。果面の傷害は様々であるが、主として以下のようなもの (Mori, 1989; Zen-noh, 2002; Asano *et al.*, 2003) があり、果実の部位特有のものも多い。まず、部位固有のものとしては、果頂部の「ネジレアナ」(乱形の多い時期に花落ち付近にねじれた状態で生じる穴)、「あみ入り」(乾燥で果皮が薄くなり内部が透けて維管束の網がとくに果頂部から見える果実)、「花落ち」(花落ちは傷害ではないが、その寸法が大きい場合は等級落ちの要素となる)、雄しべが子房に付着したまま肥大し、雄しべの退化跡がチャック状に側面部に残った「チャック」, 「窓アキ」(花器形成時の障害で器官の発育不全により側面に穴があいた果実)、「スジグサレ」(複合的な環境条件から維管束の一部が褐変し、スジ状に緑色部分が残る異常着色果実)、ガク部の

「裂果」(高温の時期、長い乾燥のあと急激な吸水にさらされた場合、ガクの中心から果実表面が縦に裂けるもの、ならびに同心円上に裂けるものもある) などがあげられる。果実によっては、結実後花びらが落下しないでガクの傍に残ったまま熟れるものがあり、ガク周辺が白く着色不良となる果実もある。

部位に関わらず発生するものは、肥料や栄養分の過不足による一般的な生理障害によるキズをはじめ、「スレキズ」(葉や枝が果実と擦れて生じる茶色や緑色の傷害)、「ナマキズ」(収穫時以降に人為的につけられた傷害)、「オセ」(収穫時以降に、果実の一部に局所的に圧力がかかり、果肉がつぶれた傷害)、「ブク」(過熟により水浸状になった軟弱果)、「日焼け」(肥料条件により、果実の赤色素が少なくなり黄色つぼくボケた着色になる) などである。これらのうち、ナマキズ、オセ、ブクなどは、出荷後輸送中に腐敗の恐れがあるため、出荷の対象とはならず、間違っって出荷されたとしても、即廃果の判定を受ける。

本論文では、数多くの傷害のうち、とくに発生頻度の高いものを対象とし、部位固有の傷害として、①「花落ち」(果頂部)、②「チャック」(側面部)、③「裂果」(ガク部)を、部位によらない傷害のうち、一般の生理傷害によるキズ、スレキズをまとめ、④「一般キズ」として扱った。

(1) 花落ち

果頂部の花落ちに関しては、その長さ・太さにより等級が決められる。標準的な階級に対して、Aとなる基準は花落ちの太さ・長さがおよそ6 mm 未満のもので、Bは、A以上で花落ちの太さ・長さがおよそ12 mm 未満のものである。Cは、花落ちの太さ・長さがB以上でおよそ20 mm 未満のもの、それ以上のものは格外とされる。これらの値は寸法にほぼ比例して変動することが多い。

(2) チャック

主として側面部で計測容易なチャックに関しても等級基準があり、原則としてガクを下にして、チャックが果実の高さの1/4以下程度ならばA、チャックの先端が果頂まで達していればC、その間のものはBとなる。また、果頂までつながっていないチャックが2本あればC、果頂までつながっているチャックが2本あれば格外となる。厳密には太さや色合いなども考慮され、着色後チャックが目立たないと思われる色をもつチャックに関しては、上記の基準より若干甘くすることもある。

(3) 裂果

ガク部の裂果に関しても原則として、割れないものはA、ガクに隠れる程度の長さ約15 mm・太さ約3 mm 未満の軽微なものが1本であればB、ガクを超える長さ約16 mm 以上・太さ約4 mm 以上の大きな割れは1本でもCとなる。また、大きな割れ2本以上で格外となる。実際には、割れの深

Index	0	10	20	30	40
Blossom end face	A	B	C	Substandard	
4 Sides	A	B	C	Substandard	
Calyx face	A		B	C	Substandard

図 1 部位による傷害等級判定の違い

Fig. 1 Defect grading difference with each tomato side

さや色合い（割れた後の経過時間）なども考慮され、割れの深いものに対しては厳しく、割れてからの経過時間が多いものに対しては、甘い判定となる。

(4)一般キズ

部位によらない一般キズについては、標準的な階級に対して、太さ・長さ8 mm 未満のものをA、太さ・長さが18 mm 未満のものをB、太さ・長さが34 mm 未満のものをC、それより大きいものは格別の基準となっている。これらの値も、寸法にはほぼ比例する形で変動して評価される。これらは、いずれも広島県向島町 JA 尾道市のもので、他のJAにおいては若干異なるものの、ほぼ同様の基準があるのが普通である。

トマトの傷害評価については、その部位の重要度で異なる。図1に、傷害の程度を表す指数を横軸に、各部位の等級判定の目安を示した。たとえば同じ大きさの傷害（仮に最大弦長を指数として10）であったとしても、側面やガク面ではAと判定されるのに対し、果頂面であればBと判定される。出荷の際、正面となる果頂面、表として見ることができる側面の傷害は、ガク面と比べてとくに厳しく評価される。ただ、前述の等級基準および図1の部位による目安は、キズの種類および評価者によって異なり、それを厳密な意味で定量的に表すことは難しい。

2.傷害計測用果実

本実験では、以下のトマト（品種：‘桃太郎’）を供試した。いずれも2003年5月および2005年5月に広島県向島町の施設で生産されたトマトである。産地によっては、出荷時のトマトの熟度を完熟に近いものに限定する場合もあるが、ここでは向島町で取り扱われる様々な着色のトマトを実験の対象とした。

図2に、傷害計測用果実を示す。まず、花落ち計測用のサンプルとして、傷害の寸法からその等級がA、B、C、格別となる4個のトマトを用いた（c-1からc-4）。また、チャック計測用サンプルとして、c-5からc-8の4個の果実を用いた。c-5には側面に高さの1/4まで達していない短いチャックが、c-6には赤道付近まで伸びたチャックがあるため、等級はそれぞれAおよびBとなる。c-7はチャックが果頂部分まで伸びているため、等級はCで、c-8は果頂付近までのチャックが同一面に2本あることより、格別となる。裂果計測用のサンプルとしては、c-9からc-12までの4個のサンプルを用いた。c-9

図2 傷害計測用試験果実

Fig. 2 Sample tomatoes

には目立った傷害がなく、等級はAで、c-10は軽微なガク割れが1本あるため、Bである。c-11は、大きく割れたガク割れが1本あり、等級はCで、c-12は、大きめのガク割れが2本あるので、格別である。一般キズ計測用のサンプルとして、c-13からc-20までの8個の果実を用いた。c-13からc-16は、果頂面に一般キズをもっており、その程度から等級はそれぞれ、A、B、C、格別である。またc-17からc-20は、側面に一般キズをもつ果実であり、その程度から等級は同じくそれぞれA、B、C、格別である。

実験装置および方法

図3に本実験で用いた画像処理システムを示す。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台のカメラにて側方の約180度を計測する。次に上方より1台のカメラで計測し、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。反転後、残った面を上方より1台のカメラで計測する。これらを以下に述べるカメラの配列に合わせ、DL（エスアイ精工社製照明装置）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台のカメラを、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6mm、F値1.4（オプタート社製 OM6NC）を使用した。レンズ先端と対象中心の距離はともに230mmである。カメラ1とカメラ2の外側に二つの DL を、それぞれの中心がトマトの中心を向くように、DLの先端と対象中心の距離が240mmになるように配置した。さらにトマトの真上に一つの DL を、先端と対象中心の距離192mmとなるように配置した。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。撮像部 C については、ラインの流れを中心にして、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12mm、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480mm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

図3 画像処理システム

Fig. 3 Machine vision system

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。

1. 傷害計測実験

(1)色度分布に基づく傷害判定

画像処理システムにおいて、CCDカメラは上面1台、側面4台、果実がローラーピンで反転された後に、上面1台の合計6台を装備した。まず、傷害部位の識別を、次式(1)(2)の簡易色度変換で行うこととした。ただし、RGB画像の各画素の濃度値(R, G, B)を用いて、変換後の値を(R', G')の組とした。

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

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

図2の画像から、傷害特徴である花落ち、チャック、裂果、一般キズについて、無作為に選択した100画素の色度変換結果を図4に示した。これより、いずれの傷害特徴ともトマトの正常部位との重複部分が存在し、傷害特徴同士での重なりもあることから、色度のみによる花落ち、チャック、裂果、一般キズの認識は困難であることがわかる。しかし、それらの傷害特徴を表す画素のいくつかは、正常部位、他の傷害特徴に重複せず、部分的に色度で判定できるものも含まれている。これらの傷害特徴を少しでも色度によって傷害認識をしておくことが有利な結果につながると考えられる。

図4の傷害特徴の色度分布および古い傷害は茶白く明るめの色合いをもつことから、ここでは色度による傷害を、花落ち、チャック、裂果、一般キズを区別せず、 R の濃度値も用いて以下のように定義した。果頂面カメラにおいては、次のように定めた。

図4 トマト部位特徴別の色度分布

Fig. 4 Chromaticity distribution of tomato parts

$$\begin{cases} R < 110, \text{ かつ, } 110 \geq R' > 100, \text{ かつ, } G' < 82 \\ R < 110, \text{ かつ, } 100 \geq R' > 90, \text{ かつ, } G' < 84' \end{cases} \quad (3)$$

また、それ以外のカメラでは、

$$\begin{cases} R < 70, \text{ かつ, } 110 \geq R' > 100, \text{ かつ, } G' < 82 \\ R < 70, \text{ かつ, } 100 \geq R' > 90, \text{ かつ, } G' < 84 \end{cases} \quad (4)$$

と定めた。これは後述する画像上のガク除去処理を行わない果頂面と、ガク除去処理するそれ以外の面とで、認識の基準を変更したためである。簡易色度による傷害の範囲を図4に点線囲みで示した。

通常のトマト選果においては、花落ちとそれ以外の傷害とは異なる評価指標で等級を決定していることおよび同じ寸法の傷害でも発生する部位によって異なる等級判定を行うことから、本報告でも果面の傷害に関しては、花落ちと2種類の傷害度(傷害度1および2と呼ぶ)の合計3種類のパラメータを設定した。傷害度1は果頂面および側面で、傷害度2はガク面で計測した傷害として評価を別にした。評価方法は、いずれも面積和とそれらの最大弦長とした。このように、トマトは部位別に傷害検出の方法を変える必要があるため、以下にカメラ毎の処理ならびに総合判定の方法について述べる。

(2)主フローチャート

図5に、傷害計測処理の主フローチャートを示す。まず、

図5 傷害計測処理の主フローチャート

Fig. 5 Main flowchart of defect detection

入力画像を基に簡易色度変換処理を行い、果実自身を背景から抽出する。この抽出条件はガクや傷害部位を含むトマト全体の領域であり、二値画像として保持しておく。それとは別に、簡易色度変換にて傷害部位として認識した領域も保持しておく。

一方、果面における色差のある傷害を抽出容易とするため、前処理として画像間演算 2R-B を行う。これは主に果面の色と抽出する傷害の色により変更されるべきであるが、トマトのように正常な部位においても部分的に緑から赤までの色が果実面に混在する中で傷害を検出するために最も適切であった。具体的には、花落ち周辺に現れるキズではない放射状の模様を傷害として誤検出しない演算のなかで、検出結果が良好であったことが選択した主たる理由である。その演算の行われた画像に対して、 3×3 近傍の Prewitt オペレータによる処理（微分処理）を施し、適切なしきい値で二値化（本実験では果頂面カメラ：60、側面カメラ 50、ガク面カメラ 55 とした）を行い、傷害候補を抽出する。これらのしきい値は、代表的なキズサンプルと正常なサンプルを実際に計測し、検出キズと実際の傷害の関係から、誤りが最も小さくなるしきい値を選択し、決定した。

前述の果実の二値画像抽出において、背景と同様の濃度値を有する黒色系統の傷害等は穴となっているため、穴埋め処理をした後、4 回の縮退処理により、微分処理で検出される果実のエッジを除去した画像を作成した。次に、微分処理で求めた傷害候補の二値画像と色度で認識した傷害部位と論理 OR 演算し、傷害候補を足し合わせる。その後、先の穴埋めした果実形状を表す二値画像を論理 AND 演算し、傷害のみを残した。この二値画像に対して、ラベリングを行い、フェレ径 6 画素未満および垂直フェレ径 X と水平フェレ径との積が 36 未満のラベルをノイズとして削除した。本実験装置においては、カメラの画角と対象物までの距離との関係より 1 画素は 0.38 mm に相当する。このことより、粉塵等が約 2 mm 以内の傷害と誤認識されないように、このような処理を行った。さらに、隣り合う距離が 10 以内のもの同士を合成処理した。実際には、二つのラベルに同じラベルを与え、面積は加算、最大弦長は互いを包含する大きさに拡張する処理を行った後に、傷害度を保存した。これにより、チャックのように細く分断されやすいキズも実際の寸法に近い検出を可能とした。

(3)果頂面(カメラ3)

果頂面には通常花落ちが存在するため、主フローチャートの「特徴抽出」および「傷害度算出」のところで以下の処理を行った。一般に花落ちとは正常な部位との色差があるため、主フローチャートの傷害抽出処理ではば間違いなく検出されている。したがって、合成処理およびノイズ処理で絞り込まれた傷害候補から、花落ちを選択する。

図 6 花落ち選択フローチャート

Fig. 6 Flowchart for blossom end detection

図 6 に花落ち選択のフローチャートを示す。まず、果実中心から果実の垂直フェレ径の 40% 領域内（花落ち領域）に存在するフェレ径 10 以上 100 以下を満たすものを選択する。該当するものがあれば、傷害度の対象からはずし、その大きさ（面積（ mm^2 ）・最大弦長（mm））を算出し、花落ちとして一つのラベルを確定する。花落ち候補が二つ以上ある場合は、中心からの距離の近いほうを選出する。それでも決まらない場合、形状の複雑性を判定し、円形に近い方から選択する。また、花落ちが中央付近にない場合など上記条件を満たさないときは、花落ちはなかったと判定する。

この時点で、花落ちとして選ばれなかった傷害候補の傷害としての判定も確定するため、それぞれの面積と最大弦長を求める。果頂面の傷害評価として、その面積和とその中の最大弦長を計算し出力する。最大弦長を評価したのは、チャックのような細長い傷害は、分断されることが多く、合成処理により、その特徴を最大弦長で評価するためである。場合によっては、果実の搬送姿勢等の関係で、38 mm 以下の一般キズもしくはチャックが花落ちとみなされることもあるが、それらの傷害は花落ちの判定基準でも、ほぼ同等级判定となる。また 38 mm 以下の花落ちが、花落ちとみなされなかった場合についても、傷害度 1 の判定で補うことができる。

(4)側面(カメラ1・2・4・5)

側面の傷害の検出処理も、主アルゴリズムで行うが、側面の下方には下面からはみ出した大きなガクが見えることがあり、次項で詳述するガク除去の処理を行う。まず、色度座標上でガクと認識する部位を次式で定める。

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

(5)

認識したガク部位を4回膨張し、傷害足し合わせ（論理和）処理後に、傷害候補から減算し、除去する。これは、ガクのエッジを傷害として検出してしまう誤りを避けるためである。

側面の処理で考慮しなければならないのは、果面全体を計測するための処理範囲である。図7にチャックをもつ果実のカメラ1, 2, 3の画像を示した。上方からのカメラと側面のカメラ、また側面のカメラ同士では通常撮像範囲に重複する部分が存在する。その重複する部分の2重評価を避けるため、本実験では側面カメラの処理範囲を次のように定めた。側面カメラからとらえた果実のうち、上方25%、下方15%、および左右15%は側面カメラと重複するので処理しない。これらの範囲は標準的なトマトを表した偏平球を対象に、各カメラでの処理を行い、重複する部分がなくなるように、視認しながら決定した。この範囲は、果実対象抽出後、その外接四角形を求め、そのX方向ならびにY方向の対象幅をROI (Region Of Interest) によって設定する。このとき、トマトの形状によっては、画面内で傷害が分断されたり、一部重複することも実際には起こる。しかし、分断された場合は傷害度2で面積和をとることで補うことができる。重複した場合、面積和は実際より若干増える可能性もあるが、計測エリアに死角を生じさせるデメリットよりは効果がある。また重複した場合でも、最大弦長は整合性を維持している。一方、上カメラのROIは図7に示すような果実の外接四角形領域とした。

通常カメラがとらえる画像は平面に投影されたものと見なさ

図7 各カメラにおける傷害度計測処理範囲

Fig. 7 Region of interest for defect detection in each camera

れ、画像中央と周辺に存在する傷害とでは、実際の長さは同じであっても画像上では周辺の傷害の方が小さくなる。果実の形状およびROIの関係より、側面からのカメラでとくに、その傾向が顕著となる（図8）。ここで、 L を傷害の本来の大きさ、 L' を画像投影上得られた傷害の大きさとする、次式で近似できる。

$$L = \frac{L'}{\cos \theta} \quad (6)$$

ここで、 $\theta = \sin^{-1}(\Delta x/r)$ 対象は直径 $2r$ の球と仮定し、 Δx を対象のフェレ径中心と傷害中心の水平方向の距離とした。たとえば、本環境下で直径 80 mm の標準的な対象を考えたとき、このROIの最も外側で横の長さ 3.5 mm の傷害が検出された場合、この補正で推定される実際の大きさは 5 mm となる。後述する微分処理の特性の影響などにより、選果における相対的な評価のなかで、この補正は効果が薄く、本実験では使用していない。ここで、求めた側面カメラの4台分の傷害の面積和 (mm^2) と最大弦長 (mm) は、傷害度1として、果頂面の結果と足し合わされた。

(5)ガク面 (カメラ6)

通常ガクは濃い緑色を呈し、果面と色合いが明らかに違うため、前述したような微分処理では必ず検出され、傷害として扱われる危険性がある。とくに、ガク周りの裂果は画像上ではガクと接触して見えることもあるので、ガク面の傷害検出に関しては側面と同様のガクの抽出・除去処理を行った。

図9に、c-12を対象にして、ガク面の傷害計測処理の流れを示す。まず、簡易色度変換により定義された傷害部位を画素単位で認識する（図9(a)）。ここでは、正常部位、傷害部位およびガクを赤、青、および緑色で示した。一方、2R-Bの画像間演算後、Prewittにより微分して二値化した傷害候補を示す二値画像を作成する（図9(b)）。これらを論理OR演算して、傷害候補の総合評価を行う（図9(d)）。本実験では、両者に同じ重みを与え、論理OR演算した。

図8 側面の計測誤差

Fig. 8 Measurement error on side view

図9 ヘタ面の傷害計測処理

Fig. 9 Defect detection process for calyx face

図10 傷害の計測結果

Fig. 10 Results of defect detection

一方、予め簡易色度により定義されたガク部位を画素単位で抽出する。ガクと認識した領域に対し、8回（側面は4回）膨張処理を行う（図9(c)）。これは実際のガク部位を100%認識していないため、認識のあいまいさや周辺ノイズの影響を除去するためである。続いて、膨張したガクを表す二値画像を反転し、先に求めた傷害候補の二値画像と比較し、傷害候補から、ガク領域を論理AND演算する（図9(e)）。この処理により、ガク周辺に表れる傷害とガクを区別することができ、裂果などを抽出することが可能となる。ガクから離れている傷害はこの処理でも通常通り検出することができる。なお、ガク面では傷害候補として扱うラベルのフェレ径を10以上（側面は6以上）とした。ガク面と側面でパラメータを変更した理由は、側面に写るガク先に対し、ガク面のガク傍には白い果皮など実際のキズではない箇所が多く存在するためである。検出された傷害は先に述べたように、傷害度2として面積和（ mm^2 ）と最大弦長（mm）を評価する。

実験結果

1. 果頂面の計測結果

図2のc-1～c-4およびc-13～c-16のサンプルに対し、果頂面における傷害計測処理を行った。その結果を図10のc-1～c-4ならびにc-13～c-16に示した。処理画像は、抽出した傷害の領域を青色で、花落ちを黄色で表した。また花落ち、傷害度の評価数値を表1に示した。これより、c-1～c-4の等級の順序に応じた、花落ちの面積および最大弦長がそれぞれ得られていることがわかる。トマトの姿勢が大きく傾くか、花落ち条件を満たす同程度の傷害が花落ちのすぐそばにない限りは、ほぼ花落ちの検出を的確に行うことができる。

一般に微分処理では、傷害もしくは花落ちの実際のエッジ周辺が結果として太く検出される。小さな傷害もしくは花落ちはこの特性により実際より大きくなる傾向にあった。逆に大きな傷害もしくは花落ちは、内部が色度による傷害設定基準で埋められない場合には、エッジ部分のみのデータとなり、実際よりも小さい結果となる傾向があった。c-4のように傷害や花落ちの領域すべてを埋めることは難しいが、このような場合でも最大弦長によって格別に判定することができた。

トマトの傷害判定に関しては、これまでいくつかの報告（Sarkar and Wolfe, 1985; Jahns *et al.*, 2001; Laykin *et al.*, 2002）があるが、花落ちのみを対象とした評価基準を採用していなかったため、花落ちのみの検出方法と評価に関する報告は他に例がない。

c-13～c-16に関しても、花落ち以外の傷害を適切に判別、評価していることが確認できる。これらは、傷害度の面積

和と最大弦長を評価することで、実際の評価等級の順序を実現することができた。しかし、果実が傾くなど花落ちが本来の位置にない場合、他の傷害を花落ちに、花落ちが傷害度1に誤認識してしまう可能性もある。その場合、花落ちと傷害度1の判定基準の差異から、本来の等級判定とは異なる結果を導く場合もある。

(2)側面の計測結果

図2のc-5～c-8およびc-17～c-20のサンプルに対して、側面における傷害計測処理を行った結果を図10に示し、表1に傷害度1として評価値を表した。c-5～c-8の結果から、チャックに対して、その最大弦長を評価することでチャックの等級に近い評価はほぼ可能であると思われる。ただし、処理範囲の関係から、チャックは画面上で果頂面と側面に分断されてしまい、その長さを正確に評価することは本システムではできない。より厳密な計測のためには、上画像と側面画像の結合を計るアルゴリズムの検討が必要と考えられたが、実際の運用では、c-6、c-7の計測結果から、側面だけの傷害判定で実際の評価等級と同じ結果を与えることができるので、大きな問題はないと思われた。

また、c-17～c-20の一般キズの傷害度1に関しても、等級の順序に応じた計測結果が得られており、チャック以外の一般キズに対しても、面積および最大弦長によって、等級

分けを行うことができることがわかる。

(3)ガク面の計測結果

図2のc-9～c-12のサンプルに対してガク面の傷害計測を行った。その結果を図10および表1に示した。ここでの処理画像は、ガクとして認識した領域を緑で表している。

c-9は傷害なしで妥当な結果である。c-10は本来より少し小さめの裂果検出結果となった。これは、対象とされる裂果が、正常な果実の色を有しており、色度での傷害認識および微分処理において、裂果の形状が正確に検出できないことに起因する。c-12は2本の裂果を適切に検出できているのに対し、c-11では、ガク裏の白いコルク状の着色不良果皮を傷害として誤検出した。

ガクの色相と一致する画素からガクを検出する方法は、トマトの方向を認識するために用いられてきた (Laykin *et al.*, 2002)。裂果の検出においては、トマトの寸法に応じた円形のマスクをかけて、微分画像からガクを除去する報告 (Sarkar and Wolfe, 1985) もあった。本手法は、ガクの様々な形状に対応でき、一般性をもった裂果検出方法といえる。

ガクが短く丸まっている場合、本来、ガクで隠されるはずの白いコルク状の果皮はチャック等のキズと同じ色度をもつためにその区別が難しい。また、ガクが細長い場合は、エッジ検出処理によって傷害と認識されるものの、解像度の関係でガ

表1 花落ち・傷害度・傷害度2の計測結果

Table 1 Results of defect detections

	Sample	Blossom end		Defect1/Defect2	
		Area (mm ²)	Max-length (mm)	Area sum. (mm ²)	Max-length (mm)
Blossom end	c-1	14.2 (A)	4.6 (A)		
	c-2	57.9 (B)	9.1 (B)		
	c-3	134.0 (C)	14.1 (C)		
	c-4	188.4 (SS)	31.6 (SS)		
Stitching	c-5			22.1 (A)	8.4 (A)
	c-6			43.3 (B)	24.3 (B)
	c-7			61.9 (C)	31.4 (C)
	c-8			129.4 (SS)	34.6 (SS)
Crack	c-9			0.0 (A)	0.0 (A)
	c-10			13.0 (A)	6.8 (A)
	c-11			166.9 (SS)	33.1 (C)
	c-12			133.4 (C)	29.3 (C)
General defect	c-13	18.5 (A)	4.9 (A)	2.6 (A)	2.7 (A)
	c-14	7.4 (A)	2.7 (A)	39.9 (B)	16.7 (B)
	c-15	24.6 (B)	6.5 (B)	186.7 (C)	19.4 (C)
	c-16	32.5 (B)	7.6 (B)	305.8 (SS)	36.5 (SS)
	c-17			26.3 (A)	6.8 (A)
	c-18			97.6 (B)	20.5 (B)
	c-19			137.8 (C)	32.3 (C)
	c-20			249.8 (SS)	38.3 (SS)

SS: Substandard

クの色変換がガク先端までできず、ガク除去が完全に行えないため、傷害として残ってしまうことがある。さらには、新鮮なトマトでガクが太く立っている場合、果皮に生じるガクの影を傷害と判定してしまうこと、逆に収穫から時間が経ったトマトで、ガクが萎縮している場合、ガクの変色あるいは着色不良でキズと誤検出としてしまうこともある。これらの問題に対しては、ガクの存在領域とそうでない領域に分けて、傷害に関わる設定値を変更することが必要である。同時に、ガク面の傷害計測においては、ガクの認識が最重要の処理であることから、今後画像の解像度、濃度値の分解能を高めるなど、ソフトウェア、ハードウェアの高性能化が必要であると考えられた。また、解像度および分解能がさらに高精度になれば、色情報によって傷害の程度（重大な致命的傷害、軽傷など）の判定の可能性も高まるものと考えられた。

前述したように裂果に関しては厳密な等級の基準がありながら、ガク面の傷害判定は他の面より基準が甘いのが常である。今回の実験では、ガク面の一般キズと裂果を同一の傷害（傷害度2）として扱ったため、傷害度2におけるサンプル間の等級判定の整合がとれなかった。これらの要求を同時に満たすには、ガク面の傷害のうち裂果であるかどうかの認識を行うことが必要であると考えられる。ガク認識精度の向上、裂果部位のキズ認識精度向上が実現できれば、形状特徴（針状比・最大弦長・方位角・中心からの距離など）を用いてある程度の認識は可能だと思われる。

摘 要

様々な傷害をもつトマトを対象に、全面計測を行う画像処理システムを構築し、傷害の計測実験を行った結果、以下の知見が得られた。

- 1) 果頂面に関しては、花落ちおよび一般キズの傷害共にほぼ良好な判定結果が得られた。
- 2) 側面に関しては、チャックおよび一般キズの傷害共に良好な判定結果が得られたものの、チャックのより厳密な計測のためには、上面画像と側面画像の結合を計るアルゴリズムの検討が必要と考えられた。
- 3) ガク面に関しては、ガクの寸法、形状、鮮度等によって正確なガクの認識が困難な場合も見られた。同時に傷害の種類、程度を認識するためにも、解像度、分解能などの高精度化、ソフトウェアの改良などが望まれた。

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

- Asano, J. *et al.* 2003. Green house gardening handbook (in Japanese)(施設園芸ハンドブック). Nihon shisetsu engi kyokai, Tokyo, 447-450.
- 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.
- Hashimoto, Y. 1992. Green house automation (in Japanese). Yokendo, Tokyo, 137-145.
- Laykin, S., Alchanatis, V., Fallik, E., Edan, Y. 2002. Image-processing algorithms for tomato classification. *ASAE. Trans.* 45(3): 851-858.
- Li, X., Iwao, T., Fujiwara, K., Shibusawa, S., Mohri, K. 1993. Damaged fruits inspecting system by machine vision (Part 1) -Spectral reflectance of peach defects-. *J. JSAM* 55(4): 91-98.
- Li, X., Iwao, T., Fujiwara, K., Shibusawa, S., Takeyama, K., Mohri, K. 1994. Damaged fruits inspecting system by machine vision (Part 2) -Defects evaluating algorithm by gray-level difference in near-infrared image-. *J. JSAM* 56(1): 37-44.
- Mori, T. 1989. Tomato encyclopedia (in Japanese)(まるごと楽しむトマト百科). No-son gyo-son bunka kyokai, Tokyo, 73-78.
- Nagata, M., B. P. Shrestha, Gejima, Y. 2002. Study on image processing for quality estimation of strawberries (Part2) -Detection of bruises on fruits by NIR image processing-. *J. Soc. High Tech. Agric.* 14(1): 1-9
- Nakano, K., Takizawa, K. 1997. Study on fruit sorting system -Development of all sides image acquisition system and detection of apple defect- (in Japanese). *J. SASJ* 28(1): 13-20.
- 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.
- Sarkar, N., Wolfe, R. R. 1985. Feature extraction techniques for sorting tomatoes by computer vision. *Trans. of ASAE* 28(3): 970-979.
- B. P. Shrestha, Nagata, M., Q. Cao. 2001. Study on image processing for quality estimation of strawberries (Part 1) -Detection of bruises on fruits by color image processing-. *J. Soc. High Tech. Agric.* 13(2): 115-122.
- Zen-noh. 2002. Cultivation, nutrition and physiology defect for tomato (in Japanese)(営農指導員のためのトマトの栽培と栄養・生理障害). Zenkoku no-son kyokai, Tokyo, 1-112.