画像処理によるキャベツの結球抽出

林 茂彦・坂上 修

野菜・茶業試験場 施設生産部 470-23 知多郡武豊町字南中根 45

Detection of Cabbage Head by Image Processing

Shigehiko HAYASHI and Osamu SAKAUE

Dept. of Protected Cultivation

National Reserch Institute of Vegetables, Ornamental Plants and Tea

Summary

Quality judgment technology for leafy and stem vegetables under growth is required as a basic technique of the selective harvester. Image processing can be a vital tool for measuring parameters in agricultural production. The image processing algorithm was developed to detect cabbage head and to measure head size using an image processing system that could be covered with a blackout curtain. The main process of this method is to detect shadow between the head and outside leaves and to obtain the border line. It is possible to judge matured cabbage during the harvesting period by this method. Using the image processing method, 92.5% of head out of 40 plants were detected. The image processing time was 2.2 seconds, except the loading time of image from a file. The diameter from the projective area gave an appropriate index to judge harvesting time, and the average error was 1.1 mm (standard deviation 13.6 mm) in matured stage. For approximately half of matured cabbage, the image processing system could automatically determine the level of maturity.

緒 言

近年農業従事者の高齢化、後継者不足が深刻化しており野菜の生産における作業の軽労化技術の開発が重要な課題となっている。キャベツの生産では、機械化作業体系の確立のため一斉収穫機の開発が行われているが、生育におけるばらつきや市場価格の変動に対応するため選択収穫への要望も強い。選択収穫の自動化を図るには、生育状態で収穫適期を判定するための技術が必要不可欠となる。一般に収穫適期の判断は、作業者の視覚や触覚に依存しており、品種の特性を踏まえた作業者の知識ベースも大きな判定要因となっている。したがって、自動判定を行うためには、大きさ、硬さなどの判断基準を定量化しなければならない。

キャベツ結球の大きさを非破壊かつ非接触で測定する方法として、近年著しく発達している画像処理技術を採用する。画像処理技術は、農作業ロボットの視覚部として用いられ、トマト収穫ロボット^{1,2)}、キュウリ収穫ロボット³⁻⁵⁾の開発研究が行われている。これらは主に果実部と葉茎部の反射分光特性の違いを利用して果実を認識し三次元位置の測定を行っている。キャベツのよ

うに品種、栽培様式、作型により結球と外葉の色彩が大きく異なる場合にはRGB信号の組み合わせから識別することは容易ではない。キュウリのように果実部と葉茎部が同系色の場合、形状特徴値を基に果実を識別できると報告されている⁶⁾。さらに、品質を評価する技術として、煎茶の形状認識⁷⁾に用いられているほか、対象物の形状を認識する技術として、ニンジンの調製および選別行程⁸⁾、挿し木の各部位の認識⁹⁾に利用されている。しかしながら、これらの評価技術、形状認識技術は、施設内において背景にコンベアなどを使用し個体の認識が容易な環境下で行われており、生育中の個体の品質評価には及んでいない。

そこで、キャベツの結球と外葉の間に生じる影に着目し、この影の内部を結球として識別する方法を考案した。本報告では、キャベツ結球の大きさを非破壊、非接触で判断することを目的に、生育中の個体から結球を抽出する画像処理方法を開発し、得られた形状特徴値を大きさの指標として用いた場合の精度について検討する。

材料および方法

1. 画像処理システム

生育中のキャベツの状態を鉛直上方から取り込み、画像処理を施すため、図1に示す画像処理システムを開発した。走行できる台車とパソコンを中心とする制御部から構成される。太陽光の影響でハレーションを起こさないように、画像入力部は暗幕で覆うことができ、照明には高演色性蛍光灯4灯(色温度5000K 平均演色評価指数Ra99)を設置した。キャベツ画像を撮影するため3板式カラーカメラ(SONY, XC-009, 1/2インチ3CCD, 768(H)×494(V))を用いた。信号方式はNTSC方式で、RGB分離出力が可能である。また、使用したズームレンズの焦点距離は7.5mm~90mmで、露出時間自動調節機能、自動焦点機能付きである。RGBの各々の画像を入力する画像処理ボード(SHARP, GPB-1)は512×512のフレームメモリを12画面持ち、濃度の分解能は256階調である。画像の入力および結球抽出のための画像処理はパソコン(日本DEC, Lpx560, CPU Pentium 60MHz)から行い、プログラムはC言語を用いて作成した。

撮影した画像データは光磁気ディスクに保存することが可能である。また上下方向の制御モ-

図1 画像処理システムの構成図

Fig. 1 Schematic diagram of the Image Processing System

図2 画像処理のフローチャート

Fig.2 Flow chart of the Image processing procedure

タ(オリエンタルモータ, US-206-401)と2軸制御装置(芝浦製作所, CRA-202B)によりカメラの位置を変えることも可能である。

2. キャベツ画像の撮影条件

ワグネルポットで栽培した40個体のキャベツ‘若峰’ (定植後58~93日)をカメラの下に置き、画像処理システムを用いて画像を撮影する。カメラとキャベツの距離は60cmに固定する。この時、入力画像上でのユークリッド距離は0.823mmとなる。画像入力部は太陽光や外部の照明の影響をなくすため暗幕で覆い、蛍光灯により結球をムラなく照明する。蛍光灯の投光距離は各々33cm, 48cm, 58cm, 74cmであり、入射角は61°, 70°, 74°, 77°となる。また結球の上部での照度は1,150lxである。レンズの焦点距離を7.5mmに設定し、オートアイリス機能、オートフォーカス機能を用いて撮影する。

3. 結球の抽出方法

キャベツは、結球が大きくなり収穫適期に近づくと外葉が広がり始める。つまり結球が露出されるようになり、外葉と結球の識別が容易になる。そこで、外葉と結球の間に生じる影を繋ぎ合わせ結球を抽出する画像処理手法を開発した。

開発した画像処理プログラムのフローチャートを図2に示す。ただし、この処理ではハードディスクに記憶された画像データを処理ボードに読み込み、抽出処理を施すこととした。最初に画像処理ボードに取り込んだキャベツ結球の画像のRGB成分を加算する。これにより結球と外葉の間の影を強調する。この画像を設定した閾値で2値化すると黒色の部分のみが検出される。この閾値は、その後の画像処理に大きく影響するため、5~25まで変化させ、影の部分抽出するのに最適な閾値の検討を行う。この時、外葉の隙間に生じる影も検出する可能性があるため、孤立点を消去しノイズを除去する。次に対象物が一つ、かつ穴の数が一つ(オイラー数=0)になる

まで膨張処理を10回ずつ施すことにより、対象物を繋ぎ合わせ結球と外葉の境界域を得る。ここで、オイラー数とは、2値画像において画素の連結成分の個数から穴の個数を引いた値で定義される¹⁰⁾。さらに対象物を細線化することにより、境界線を検出する。この細線化された円の内部を結球と見なし、穴埋め処理を施すことにより結球を抽出する。最後に対象物の形状特徴値を計算し表示するとともに、ファイルに保存する。

4. 形状特徴値

形状特徴値には多くのものがあるが、対象物は円形に近いことから、投影面積(A)、周囲長(p)、絶対最大長(a)、複雑度(e)、さらに投影面積から算出される処理直径(L)の5個を選択した。この処理システムでは、この五つ以外に幅、高さ、短軸径、方向を計算することができる。幅、高さは X 方向、 Y 方向フェレ径とした。

周囲長の計算において、処理の高速化を図るため以下の計算式により算出した。

$$p = ((\text{境界画素数}) + (\text{境界辺の数})) / 2$$

また、複雑度の計算は次式により求めた¹⁰⁾。

$$e = p^2 / A$$

これらの形状特徴値と実測したキャベツの結球径との関係を検討する。ここで、結球径の実測値は、直径の最大値と最小値の平均として測定を行う。さらに、供試するキャベツ(40個体)を作業者の判断に基づき、結球初期(13個体)、結球中期(8個体)、収穫適期(19個体)に分け、それぞれの画像に対し画像処理を施し、処理時間と抽出率および抽出精度について検討することにより、開発した画像処理手法の評価を行う。ただし、処理時間は画像読み込み時間と処理時間に分けて測定した。

結果および考察

1. 閾値の設定

外葉と結球の間の影を2値化するための閾値を変化させた時の抽出率の影響を表1に示す。閾値が5~10では抽出率が高く、閾値を高くするにつれ抽出できる個体数が減少する。閾値を大きくすることにより抽出する画素数が多くなり、外葉と外葉との間に生じる影も認識する。2値画像はノイズを含む画像となり膨張処理を施しても、対象物はリング状にはならず、抽出率は低下した。このことから2値化に最適な閾値は5~10と推察でき、以後の評価には閾値を10とした。

2. 抽出手法の評価

結球初期、結球中期、収穫適期の画像に対し、画像処理を施した時の処理時間と抽出率を表2に示す。ハードディスクからの画像の読み込みに3.3秒を要しているが、抽出処理のみでは2.2

表1 抽出率におよぼす閾値の影響
Table 1 Effect of Threshold value on the Ratio of Head detection

	設定閾値				
	5	10	15	20	25
供試個体数	40	40	40	40	40
抽出個体数	37	37	36	34	34
結球抽出率(%)	92.5	92.5	90	85	85

入力画像

画像間演算

2 値化

膨張

細線化、穴埋め

抽出画像

図3 画像処理結果
Fig. 3 Result of Image Processing Procedure

表 2 結球抽出処理結果
Table 2 Results of Head detection by Image Processing

	結球初期	結球中期	収穫適期	平均	合計
供試個体数	13	8	19	—	40
抽出個体数	11	7	19	—	37
結球抽出率(%)	84.6	87.5	100	92.5	—
画像読み込み時間(s)	3.3	3.3	3.3	3.3	—
画像処理時間(s)	1.8	1.9	2.6	2.2	—
全処理時間(s)	5.1	5.2	5.9	5.5	—

表 3 画像処理による結球抽出精度
Table 3 Precision of Head detection

	結球初期		結球中期		収穫適期	
	平均	標準偏差	平均	標準偏差	平均	標準偏差
実測径平均(mm)	105.0	14.6	123.2	7.8	143.3	11.8
複雑度	22.8	0.8	22.5	1.4	22.2	0.8
処理直径(mm)	118.1	12.7	129.4	6.2	139.5	11.3
絶対最大長(mm)	128.7	13.8	141.8	7.4	152.0	11.4
最大長－実測径(mm)	23.7	5.5	18.6	6.1	8.7	12.3
処理直径－実測径(mm)	17.8	5.7	10.8	7.0	1.1	13.6

秒となり、全体で5.5秒と高速で結球を抽出した。この画像処理結果を図3に示す。

結球初期、中期のキャベツについては、影となる境界域を認識できず、結球を抽出できない個体があった。この原因は、外葉が立っているため外葉と外葉の隙間に生じる影を認識し、ノイズとしては除去できなかったためである。しかしながら、生育が進むにつれ抽出率は向上し、収穫適期のキャベツについては、全ての個体を抽出できた。

3. 抽出精度の評価

抽出した結球の形状特徴値と実測値の関係を表3に示す。抽出した結球は真円から遠いものも含まれることから、結球が進んでも複雑度の変化は少なく、収穫適期を判断することはできなかった。いずれの期間においても、最大直径は、処理直径に比べ実測値との誤差が大きかった。これは、外葉と外葉の隙間に生じる影を認識し長くなり、一方で結球を認識できず、抽出画像が細長くなったためと考えられる。一方、処理直径は、結球が進むにつれて精度が向上し、収穫適期の個体において、実測値との誤差は平均1.1mm、標準偏差13.6mmであった。このことから、結球の大きさを判断するための指標として、投影面積から算出した処理直径を用いることができる。

結球を抽出することのできた37個体について、処理直径と実測径との関係を図4に示す。この関係から、収穫中期と適期の個体が重ならず、処理直径から収穫適期の判別できるのは140mm以上の個体であり、これは、収穫適期の19個体の内10個体であった。120～140mmには結球初期と中期さらに収穫適期の個体が含まれ、収穫適期を判断することはできなかった。この範囲のキャベツについては、直径のみの判断ではなく作業者が行っているような結球の硬さを含めた判断が必要と考えられる。120mm以下については収穫適期の個体が1個体含まれたが、ほぼ結球初期と判断できる。過小に判断した個体は、収穫適期になっても外葉が開かず結球との間に生じた影が小さかったため、影の部分を認識できなかった。

図4 処理直径と実測径の関係

Fig. 4 Relationship between Processed diameter and Real diameter

摘 要

キャベツの収穫適期を判断する一つの指標である大きさを非破壊、非接触で測定することを目的に、画像処理技術を用いた結球抽出手法を開発し、その手法の評価および検討を行った。

外葉と結球の間に生じる影を認識することにより、結球を抽出する画像処理手法を開発した。2値化処理の閾値の最適値は5～10であった。キャベツが収穫適期に近づくにつれ、抽出率は上昇した。全体の抽出率は92.5%であった。画像データの読み込みを除いた結球抽出処理にかかる時間は、2.2秒であった。

抽出画像の投影面積から算出される処理直径は、結球の大きさを判断する指標とすることができた。キャベツが収穫適期に近づくにつれ、その精度は上昇し、収穫適期における誤差は、平均1.1mm、標準偏差13.6mmであった。

開発した画像処理手法のみにより収穫適期の判断を行った結果、収穫適期の個体のほぼ半数について自動的に判断を下すことができた。画像処理による収穫適期の自動判断の可能性を明らかにした。

参考文献

- 1) 川村登, 並河清, 藤浦建史, 浦元信: 農業用ロボットの研究(第1報), 農業機械学会誌, 46(3): 353～358(1984)
- 2) 川村登, 並河清, 藤浦建史, 浦元信: 農業用ロボットの研究(第2報), 農業機械学会誌, 47(2): 177～182(1985)
- 3) 有馬誠一, 近藤直, 芝野保徳, 山下淳, 藤浦建史, 秋好広明: キュウリ収穫ロボットの研究(第1報), 農業機械学会誌, 56(1): 55～64(1994)
- 4) 有馬誠一, 近藤直, 芝野保徳, 藤浦建史, 山下淳, 中村博: キュウリ収穫ロボットの研究(第2報), 農業機械学会誌, 56(6): 69～76(1994)
- 5) 有馬誠一, 藤浦建史, 近藤直, 芝野保徳, 山下淳: キュウリ収穫ロボットの研究(第3報), 農業機械学会誌, 57(1): 51～58(1995)

- 6) 近藤直, 芝野保徳, 毛利健太郎, 門田充司, 中村博, 有馬誠一: キュウリ果実検出用視覚センサの研究(第1報), 生物環境調節, 31(2): 93~100(1993)
- 7) 吉富均: 画像処理による煎茶の品質評価(第1報), 農業機械学会誌, 52(2): 49~56, 1990
- 8) Matthew M. Batchelor, Stephen W. Searcy: Computer Vision Determination of the Stem/Root Joint on Processing Carrots, J. agric. Engng Res., 43: 259~269(1989)
- 9) W. Simonton, J. Pease: Orientation Independent Machine Vision Classification of Plant Parts, J. agric. Engng Res., 54: 231~243(1993)
- 10) 田村秀行: コンピュータ画像処理入門, 総研出版, pp. 71/85~86(1985)