キュウリ果実検出用視覚センサの研究 (第2報)

—果実の位置検出および収穫実験—

近藤 直・中村 博*・芝野保徳

門田充司・有馬誠一*

岡山大学農学部・*井関農機株式会社

Studies on Visual Sensor for Cucumber Fruit Detection (2)

—Experiments of Fruit Position Measurement and Harvest—

Naoshi KONDO, Hiroshi NAKAMURA,* Yasunori SHIBANO,

Mitsuji MONTA and Seiichi ARIMA*

Faculty of Agriculture, Okayama University, Okayama 700, Japan

* Iseki & Co., Ltd., Ehime 791-11, Japan

The visual sensor is an essential component for agricultural robots which work in greenhouses, plant factories and so on. We consider that the visual sensor must have three functions, that is discrimination, recognition and position measurement. In the Part 1 of this study, it was observed that cucumber fruit was discriminated from its leaves and stems and that its shape was recognized even when the fruit was divided into two parts from experimental results. In this paper, an experiment of fruit position measurement was done by the method of binocular stereo vision. Besides, an experimental robot harvested some cucumber fruits with the visual sensor. From the experiments, the following were obtained. 1) It was easy to get the correspondence of fruits in left and right images by the method of binocular stereo vision and the fruit position was detected precisely, since cucumber plants were cultivated in inclined trellis training so that few fruits were hidden by leaves and stems. 2) The developed algorithm for position measurement made the correspondence possible even when fruits were partially hidden by obstacles. 3) It was confirmed that the error of measurement by the visual sensor was reasonable and that it could be compensated with the structure of end-effector. 4) After investigating the roles and the performance of visual sensors in the robotic system, appropriate visual sensors for agricultural use should be developed.

(Received November 21, 1994)

1994年11月21日受付

緒 言

前報(近藤ら, 1993)では, 農作物を検出する視覚センサが有すべき三つの機能のうち, キュウリの果実の識別および認識機能について実験を行い, その結果を報告した. 残る位置検出機能について, 現在までに報告されている方法は, 主としてTVカメラを用いた受動的方法と投影光を用いる能動的方法に分類される. 前者には, 人間と同じように両眼によるステレオ画像法(藤浦ら,

1990; 岡本ら, 1992), マニピュレータの手先に装着された視覚センサを利用した視点の移動による方法(近藤・川村, 1985; 近藤・遠藤, 1989; 近藤ら, 1994)等が, 後者にはLED(発光ダイオード)とPSD(位置検出素子)あるいはレーザを利用した方法(藤浦ら, 1992)等があげられる.

一般に, ステレオ画像法は視覚センサを左右または上下方向に一定距離移動させ, 移動前後の2枚の入力画像から三角測量の原理に基づき, 3次元位置を計測する. この方法は果実が茎葉等に隠れない理想的な条件では,

比較的離れた位置においても精度よく検出可能であるが、対象物の数が多い場合およびどちらか一方の画像中の対象物が障害物等で隠された場合には、画像間の対応付けが困難であるという欠点がある。いっぽう、視覚センサをマニピュレータ先端に装着した視点の移動による方法は、画素数を有効に生かせる、障害物でその一部が隠された対象物を検出する能力が優る、移動前後の画像中の対応が比較的簡単である等の特徴があるが、画像入力と処理を繰り返し行わなければならないため、高速な画像処理が必要となる、対象物が細長く視野に収まらないものに対しては検出精度が低下する等の欠点があげられる。

本研究ではロボットによる作業が行いやすいように、果実と茎葉が分離可能となるよう考案した傾斜棚（有馬ら，1994）を用いて栽培されたキュウリを対象としているため、果実が茎葉等の障害物で隠されることが少なく、節成であるため鉛直方法に着果し、ステレオ画像法による画像間の対応付けも容易と考えられた。そこで本報では、TV カメラを用いることを前提とし、ステレオ画像法を用いて収穫対象である果実の3次元位置を検出する実験を行った。さらに、本視覚センサを収穫用ロボット（有馬ら，1994）に装着し、収穫実験を行い、本視覚センサのロボットの目としての妥当性を確認した。

材 料

本研究では、グリーンハウスにおいて傾斜棚（有馬ら，1994）で栽培されたキュウリ（*Cucumis sativus*）を画像入力の対象とした。その例を Fig. 1 から Fig. 3

に示す。Fig. 1 は果実が茎葉等でどの部分も隠されることがなく、全体を見ることができる。この画像中には果実が2本あるが、高さが異なるために画像間の対応付けは容易に行えると思われる。Fig. 2 は左から見ると果実の果頂部付近が葉で隠れて、全体を見ることができないが、右から見ると全体が見える場合の対象である。Fig. 3 は果柄部が葉で隠れた場合である。傾斜棚で栽培を行うと、Fig. 2 ならびに Fig. 3 のように果実の一部が葉で隠されることは少ないが、このような場合でも画像間の対応付けが可能か否かを調べるため、人力対象とした。なお、本実験で使用した品種はシャープ1で、いずれ

Fig. 2 Cucumber plant (Sample 2).

Fig. 1 Cucumber plant (Sample 1).

Fig. 3 Cucumber plant (Sample 3).

も果実の長さは約 200 mm, 直径は約 30 mm であった。

位置検出実験

1. 実験装置

画像入力を行うための視覚センサ (画素数 244×244), 光学フィルタ (中心波長 548 nm, 851.6 nm), パソコン, 画像入出力ボード (画素数 256×256 , 256 階調) および周辺装置等は, 第 1 報 (近藤ら, 1993) と同様のものを使用した。さらに, DC モータを用いて視覚センサを左右に移動し, 左右 2 枚の画像を得ることとした。その移動距離は, 15 cm, 移動速度は 1.4 cm/s と一定にした。

2. 実験方法

2.1 画像入力方法

視覚装置は畝間に置いた三脚に固定し, ロボットに装着することを想定し, 対象物からの距離をほぼ 40 cm としてハウス内で画像入力を行った。そのさい, 色温度 5500 K の光源を対象物の左右から当てることにより, 昼間は 3000 から 6000 lx, 夜間は 2000 lx 程度の照度を得た。なお, 本文中で照度とは対象物表面における照度をさす。

2.2 3次元位置の計算方法

Fig. 4 にステレオ画像法による果実位置の計算方法を示す。視覚センサを光軸と直角方向に L だけ平行移動して得られる画像間の果実の位置変化量 $X_2 - X_1$ より, レンズの中心から果実までの距離 Y は式 (1) によって求められる。また, 撮像面中心から果実像中心までの距離を X_i とすると, 光軸から水平方向への距離 X は式 (2) によって求めることができる。同様に, 撮像面中心から果実像中心までの垂直方向の変化量を Z_i と

Fig. 4 Position detecting method.

すると, 光軸から垂直方向への距離 Z は式 (3) から求められる。ここで図中の θ は視覚センサの水平方向の画角, d は像点距離 (レンズから像までの距離) である。

$$Y = \frac{d \cdot L}{X_2 - X_1} \quad (1)$$

$$X = \frac{Y \cdot X_i}{d} \quad (2)$$

$$Z = \frac{Y \cdot Z_i}{d} \quad (3)$$

2.3 検出アルゴリズム

Fig. 5 に果実の位置検出アルゴリズムを示す。まず, 前報で述べた識別処理および認識処理を左右の画像について行い, 果実を線画像で認識する。本実験では右画像を基準に位置検出を行うこととし, 右画像で画素列の長さが 100 画素以上 (果実長が約 18 cm 以上), 左画像で 30 画素以上有する画素列を対象とした。つまり, 右画像で果実全体が検出でき, 左画像で果実の 2/3 程度が隠されている場合にも対処できるアルゴリズムとした。両画像間の対応付けにおいては, それらの画素列の始点の座標を使用した。

一般的なステレオ画像法における画像間の対応付けは, ① 両画像間の対象物の高さがほぼ同じにあること, ② 対象物の大きさがほぼ等しいこと, ③ 左画像の対象物のほうが右画像内の対象物より右に写っていることの全条件を満たす対象物について行う。本研究で対象とした傾斜棚で栽培されたキュウリの果実は, それらの条件において問題が生じることは少ないものの, 柔軟に対応できるように, 以下の三つの場合にも対処可能なアルゴリズムとした。

場合 1: 左画像での画素列の始点の x 座標が右画像のそれより大きく, y 座標の差が 10 画素以下であり, 画素列の長さの差が 10 画素以下である場合。

場合 2: 左画像での画素列の始点の x 座標が右画像のそれより大きく, y 座標の差が 10 画素以下であり, 左画像での画素列の長さが 30 画素以上ある場合。

場合 3: 左画像での画素列の始点の x 座標が右画像のそれより大きく, y 座標の差が 30 画素以下であり, 左画像での画素列の長さが 70 画素以上ある場合。

ここで, 場合 1 は一般的な対応付けと同等の条件であり, 両画像ともに果実はほぼ完全に検出されたものが対象となる。この場合, 視覚センサの移動によって生じる y 方向の許容誤差を 10 画素と設定した。場合 2 は左画像において果実頂部付近が隠され, 果実全体の長さの 1/3 程度以上が見えるものが対象となる。場合 3 は左画像に

Fig. 5 Fruit position detecting algorithm.

において果柄部が隠され、長さ、高さともに異なるものが対象となる。場合3の条件に適合した左画像の画素列の始点は正確でないため、果実の曲がり等を考慮に入れ、果実の果柄部の対応点の位置を推定することにより正確な位置検出を行うこととした。本研究では、果実全体の長さの1/3以上が隠された場合には果柄部の位置の推定が困難であると判断し、 y 座標の差を30画素以下と設定した。

本アルゴリズムでは、場合1から順に画像中の画素列を調べ、条件を満たしたところに対応付けを行い、3次元位置の計算を行った。また、果実長は画素列の長さを使用し、果実径は塊状図形の特徴量として使用したFLAG=1（近藤ら, 1993）となる部分の最大幅の画素数を用いて計算を行った。本実験では、以上の計算によって、果実長が160 mm以上240 mm以下、果実径が20 mm以上のものを収穫可能な果実とした。

位置検出プログラムはすべてC言語で作成し、識別および認識プログラムと併せて実行した。

3. 結果および考察

Fig. 6, Fig. 7 および Fig. 8 には、果実を検出し、それぞれ場合1、場合2および場合3で対応付けが行われたときの左右画像の結果の例を示す。両画像中には果実と認識された画素列の始点の座標を付加してある。図中

の番号はラベル番号を示し、それに対応した塊状図形の特徴量および線図形における画素列結合後の特徴量の結果をTable 1に示す。表中の*印は果実と認識された図形である。Table 2にはこれらの画像に対する3次元位置、果実長および果実径の実測値ならびに誤差を示す。これらの画像を入力したときの照度は、Fig. 6では3500 lx, Fig. 7およびFig. 8では2000 lxであった。

Fig. 6では、右画像のラベル3が塊状図形および線図形のすべての条件を満たし、果実と認識された。左画像では、ラベル1, 2および3の画素列が果実と認識された。右画像のラベル3に対して左画像のラベル1から順に対応付けを行った結果、左画像のラベル3が右画像のそれより右に写っており、画素列の始点の高さの差が5画素、長さの差が4画素であったため、場合1で対応付けられ、3次元位置、果実長および果実径の計算が行われた。これらは、いずれもほぼ正確に検出されていることがわかる。

Fig. 7では、右画像のラベル1が塊状図形および線図形のすべての特徴量を満たし、果実と認識された。左画像ではラベル1が塊状図形の特徴量においてFLAGは満たさないが、フェレ長比が条件を満たしたため中心線が抽出され、画素列の長さから果実と認識された。これより、左画像の画素列のほうが右画像のラベル1より右

Fig. 6 Binary images for detecting fruit position (Sample 1).
(a) Left image. (b) Right image.

Fig. 7 Binary images for detecting fruit position (Sample 2).
(a) Left image. (b) Right image.

Fig. 8 Binary images for detecting fruit position (Sample 3).
(a) Left image. (b) Right image.

に写っており、画素列の始点の高さが等しく、長さの差が22画素であるため、場合2で対応付けられ、計算が行われた。距離 Y , X に関してはほぼ正確な距離が検出されているが、 Z , 果実長および果実径に関しては、

実測値より小さい値がでていた。これは、本実験では照度に変化しても2値化処理におけるしきい値に一定の値を用いたためであり、今後、照度に応じたしきい値を設定する必要があると考えられた。

Table 1 Features used for position measurement.

Sample No.	Binary image				Line image	
	Label No.	Area	Feret's diam. ratio	FLAG	Length	Angle(°)
1	1	567	4.77	1	63	-2.77
	R 2	430	3.31	1	44	10.54
	3*	1588	6.76	1	142	-3.65
	1*	1548	2.79	1	102	-3.11
	L 2*	455	7.75	1	94	-1.85
	3*	1509	7.21	1	138	-2.92
2	R 1*	1279	9.00	1	127	-2.27
	L 1*	564	5.50	0	105	-5.77
3	R 1*	1833	2.44	1	125	-11.40
	L 1*	1132	1.96	1	100	-16.32

* Indicates the image recognized as a fruit.

Table 2 Measurement results of position, length and diameter of fruit.

Sample No.	(X, Y, Z) (mm)	Length (mm)	Diameter (mm)
1	(0, 445, 70)	210	30
	Err.(-6, 1, 8)	-6	-5
2	(20, 430, 160)	200	32
	Err.(2, -5, -15)	-26	-10
3	(40, 400, 80)	200	28
	Err.(3, -17, 1)	-46	-3

Fig. 8 では、両画像とも、ほぼ果実だけの画像となっており、右画像では、塊状図形および線図形の特徴量をすべて満足し、果実と認識された。左画像では右画像中の図形より曲がっているため、フェレ長比は条件を満たしていないが、FLAG=1 となるため果実と認識された。ここで、左右画像の画素列の始点の高さの差が 30 画素、長さの差が 25 画素であり、左画像の長さが 70 画素以上であるため、場合 3 で対応付けが行われることとなる。そのさい、左画像中に示されるように、画素列の始点を推定した後、3 次元位置、果実長および果実径が計算された。この検出結果においては、果実長が実測値より -46 mm とかなり短くなっているが、これは線図形を作成するさいに、果頂部の画素列がノイズ成分として除去されたこと、2 値画像におけるしきい値を変化させていなかったことなどが原因と考えられた。

Fig. 9 Cucumber harvesting robot.

この他の入力画像においても、場合 1, 2 および 3 のいずれかで左右画像中の認識された果実の対応は可能であり、平均すると距離計算の誤差は、ほぼ 10 mm 以内となった。これらの誤差はマニピュレータの制御およびエンドエフェクタの機構等により補正可能であると考えられた。果実長および果実径に関しては、実測値より小さくなるが多かったが、正確な識別および認識画像が得られれば、ほぼ 1 mm の範囲内で検出することが可能であった。

収穫実験

1. 実験装置

Fig. 9 には、位置検出実験で使用した視覚装置を収穫ロボットのショルダ付近に手先の移動する方向と 90° をなすように設置した様子を示す。本ロボットは前述した

Fig. 10 End-effector for cucumber harvesting.

視覚装置のほか、マニピュレータ、エンドエフェクタ、移動機構から構成される。マニピュレータは一つの直動関節と五つの回転関節から構成される6自由度を有し、リストローはDCモータで、残りの関節はDCサーボモータで駆動される。また、このマニピュレータは傾斜棚の角度に沿って直動関節の角度を変えられるため、ほとんどの果実に対して可操作度の高い姿勢で収穫することが可能で、傾斜棚栽培された果実の収穫に適している(有馬ら, 1994)。

本視覚センサの検出アルゴリズムは果実のみに対するものであり、果柄の検出は行っていない。そこで、本実験では、果柄の位置検出はエンドエフェクタのセンサで

行った。Fig. 10 には、マニピュレータの先端に装着されたエンドエフェクタを示す。このエンドエフェクタは果実把持、果柄検出および果柄切断の三つの機能を有し、すべてDCモータで駆動される。まず、フィンガにより把持される果実の径はポテンシオメータ1で検出される。次に、果実を把持したと判断すると検出ガイドを果実に沿って上方向に上昇させ、径が急に小さくなる果柄をポテンシオメータ2で検出した後、カッターで切断する。

2. 実験方法

実験は、移動機構を手動で操作し、果実が視覚センサの視野内に入るようにロボットを移動した後、Fig. 11に示すフローチャートに従って行った。まずウェストを90°回転した初期姿勢で画像入力を行い、識別および認識処理ならびに3次元位置の計算を行う。その結果、マニピュレータの作業範囲内で果実が存在すれば、対象と

Fig. 11 Flow chart of harvesting experiment

Fig. 12 Relationship between A-D conversion value and peduncle detector moving distance during detecting peduncle.

する果実を把持する。その後、検出ガイドが果柄を検出すれば、カッターで切断し収穫トレイまで運ぶ。果柄が検出されなければ収穫動作を終了した。なお、本実験に關するプログラムもすべて C 言語で作成した。

3. 結果および考察

ロボットに装着された視覚センサの検出精度も、前実験と同様に、ほぼ正確に果実を識別、認識および位置検出可能であった。10 mm 程度の誤差もエンドエフェクタ等によって吸収され、ロボットによる収穫実験においても満足した結果が得られた。

Fig. 12 に、エンドエフェクタの検出ガイドが果実を追従した軌跡を示す。横軸は検出ガイドの移動距離を、縦軸はポテンショメータ 2 の AD 変換値を、図の右端が果柄の切断位置を表している。これより、検出ガイドが果柄に近づくにつれて AD 変換値が小さくなり、果柄に達すると同時に AD 変換値が設定値に到達したため、切断されたことが理解できる。このように、果柄の検出は視覚センサを用いず、エンドエフェクタによって十分可能であった。

これらのことより、今後ロボットのための視覚センサを開発するにあたっては、視覚センサの性能のみならず、他のセンサとの併用および他の構成要素との関連を考慮に入れ、ロボットシステムのなかでその位置づけを明らかにする必要があると考えられた。

摘 要

本報では、グリーンハウス、植物工場等において、植物の生育制御、管理・収穫作業等を行うロボットに必要な視覚センサの開発を目的とし、キュウリの果実の位置検出実験ならびに収穫実験を行った。その結果、以下のことが明らかとなった。

1. ステレオ画像法を利用した位置検出実験から、本

研究で対象とした傾斜棚栽培の果実は茎葉等で隠れることが少ないため、対応付けを容易に行うことができ、満足のいく検出結果が得られた。

2. ステレオ画像法における画像間の対応付けにおいては、果実の果頂部および果柄部付近が隠された場合においても対応付けが行えるアルゴリズムを開発した。その結果、従来困難であった対応付けが容易になった。

3. 収穫実験の結果より、本視覚センサの検出誤差はエンドエフェクタの構造により、補正可能であることが確認できた。

4. ロボットのための視覚センサを開発するにあたっては、視覚センサの性能のみならず、他の構成要素との関連を考慮に入れ、ロボットシステムのなかでその位置づけを明らかにする必要があると考えられた。

文 献

- 有馬誠一・近藤 直・芝野保徳・山下 淳・藤浦建史・秋好広明 1994. 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.
- 藤浦建史・浦 元信・川村 登・並河 清 1990. 果樹園用収穫ロボットの研究. 農業機械学会誌 52(2): 35-42.
- 藤浦建史・中尾清治・早川昌光・川相直樹・土肥 誠 1992. 農産物の三次元形状の計測. 農機学会関西支部報 72: 81-82.
- 近藤 直・川村 登 1985. マニピュレータ装着用カメラによる果実の位置検出法 (第 1 報). 農業機械学会誌 47(1): 60-65.
- 近藤 直・遠藤俊三 1989. マニピュレータ装着用カメラによる果実の位置検出法 (第 2 報). 農業機械学会誌 51(4): 41-48.
- 近藤 直・芝野保徳・毛利建太郎・門田充司・中村 博・有馬誠一 1993. 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: 93-100.
- 近藤 直・芝野保徳・毛利建太郎・門田充司 1994. ブドウ管理・収穫用ロボットの基礎的研究 (第 2 報). 農業機械学会誌 56(1): 45-53.
- 岡本嗣男・白井良明・藤浦建史・近藤 直 1992. 「生物にやさしい知能ロボット工学」実教出版, 東京. p 41-43.