植物工場における野菜の画像処理手法の開発

柴田孝信・岩尾憲三*・高野泰吉**

(株) メイテック 460 愛知県名古屋市中区栄

* 中部電力(株) 電気利用技術研究所 459 愛知県名古屋市長区大高町

** 名城大学農学部 468 愛知県名古屋市中区塩釜口

Development of Image Processing Techniques for Vegetables Grown in a Plant Factory

Takanobu SHIBATA, Kenzo IWAO* and Taikichi TAKANO**

Meitec Co., Inc., Nagoya 460, Japan

* *Electrotechnological Applications R & D Center, Chubu Electric Power Co., Inc.,
Nagoya 459, Japan*

** *Faculty of Agriculture, Meijo University, Nagoya 468, Japan*

Summary

The image processing of plant growth is an effective tool for intact and non-destructive measurement, so as to be able to digitize continuously the images of plant or leaves with the computer system. However, it requires a lot of know-how responded to the features of the object plants. We have, therefore, developed several image processing methods for obtaining the accurate information about the vegetables grown in a plant factory. The image processing procedure of vegetables was composed of basical image processing functions such as sharpening, smoothing, expansion, contraction, deleting of noise and filling hole. In order to recognize individual plant growth continuously, we have developed the labelling algorithm by calculating the distance between center of gravity and set point. Furthermore, the transformation of growth was intelligibly observed by the superposition of outlines and the skeleton by thinning of binary images in the growth stage.

In conclusion, these techniques made it possible to realize automatic measurement and development of the plant growth monitoring system in a plant factory.

緒 言

非接触・非破壊を特長とする画像処理は主として医用、工業分野において発達し、実用的な計測手法としてすでに広く普及している¹⁾。量子化あるいは標本化された画像をコンピュータで処理するデジタル画像処理はソフトウェアにより有用な情報に柔軟に加工できることから、今後、さらに多くの分野に適用されてゆくものと思われる。農業分野においても、すでに植物生体情報の計測や形状認識に画像処理が試みられている²⁻⁵⁾。岩尾ら(1991)は、植物工場で栽培される非結球レタスおよびサラダナの画像計測項目と地上部生体重の間には高い相関関係があることを報告している²⁾。生体重や乾物重といった、従来の成長計測は破壊を伴うもので、主に統計的な平均値の解析となるが、画像処理であれば同一個体の成長解析が可能となる。高度に環境制御され

1992年9月16日受理

たグロースチャンパでの厳密な個体の成長解析のみならず、植物工場が工場である以上、成長制御や生産管理ならびに品質管理の観点から、製品である植物の成長を定量化する技術と装置が必要不可欠であると考えられる。実用装置を開発する際には、たとえば工業製品を生産する製造工場向けの検査装置の開発においても、適用対象ごとに特化したノウハウが必要となる。画像処理においても、カメラからコンピュータに画像を取り込めば、即座に有用な情報が得られることはまれで、適用分野や対象物に応じた処理手法がノウハウとして必要となる。

著者らは、植物工場における野菜の成長を簡易に計測・評価するための、自動成長計測システムの開発を行なっている。その開発に伴い、植物工場で成育する野菜特有の画像処理および計測手法の技術的な知見を得たので、ここに報告する。

材料および方法

供試材料として非結球レタス 3 品種 (*Lactuca sativa* L. 'Green-wave', 'Manoa-lettuce', 'Banchu-red-fire') を使用した。供試材料は、光源に蛍光灯を用いた人工光型植物工場⁶⁾で養液栽培した。栽培は三つの成育ステージ (育苗室-1: 9 日間, 育苗室-2: 9 日間, 成育室: 12 日間) に分けて行なった。

本試験に用いた画像処理システムのハードウェア構成を Fig. 1 に示した。本システムは CCD カメラ、画像処理装置、画像モニタ、プリンタで構成した。画像処理装置は CPU にパソコンを用いたメモリ付加型パソコン画像処理システム⁷⁾とした。

CCD カメラを各栽培室に設置し、播種後 4 日目前後の定植後から定植後 30 日目までのレタス画像を入力し、レタス画像の特徴に応じた撮像処理や画像処理アルゴリズムならびに連続計測するための技術について検討した。各栽培室での CCD カメラによる撮像環境を Table 1 に示す。

Fig. 1. Configuration of image processing system based on a personal computer in combination with a plant factory.

Table 1. Camera environment according to the culture units in a plant factory with fluorescent lamps

Culture units	Temperature		Humidity %	Light intensity klux	Days of cultivation day	Distance cm
	Light °C	Dark °C				
Seedling unit-1	25	20	70	17	9	18
Seedling unit-2	25	20	70	20	9	20
Growth unit	25	20	70	22	12	30

結果および考察

1. 撮像処理

前述の人工光型植物工場にて、発芽装置で発芽させた苗を白色のウレタンフォームに植え付け、育苗室-1で9日間栽培した。野菜画像の背景となるウレタンフォームは、育苗室-1投入後3日目あたりから藻が発生し、Fig. 2 上段に示すように、撮像対象の野菜と背景とのコントラスト比が低下した。入力画像に不要な情報を含まない方がその後の画像処理負担が軽減され、なおかつ高精度の計測が可能であるため、背景処理を行なうことにした。野菜とのコントラスト比の高い背景色は白色と紺色であった。筆者らは、ウレタンフォームの上に白色の防水紙を置き、そのうえで、植物を植え付けた。Fig. 2 下段に背景処理をした場合としない場合の輝度ヒストグラムを

Fig. 2. Effect of background treatment on vegetable image taken by CCD camera. The background was used white background.

示した。白色の背景処理を施した場合の画像ヒストグラムは双峰性を示し、野菜と背景との間に十分なコントラスト比が得られた。

一般に、植物の画像処理では植物葉の赤外線反射能が高いことから赤外線カメラを用いて植物画像を処理することが多いが^{5,8)}、蛍光灯照明下では対象物の赤外線画像を得ることは困難であった。また、背景となる発泡スチロール製の栽培プレートの赤外線反射率が高いため、可視領域の画像の方が赤外領域の画像よりも背景とのコントラスト比が良好であった。

なお、太陽光併用型植物工場等では照明条件が一定ではないため、カメラに自動絞り機能が必要になると思われる。

2. 野菜画像を抽出する画像処理手法の開発

実験的に背景処理を十分に行なった場合には、正確な野菜画像が容易に得られることがわかったが、実際の栽培状態では必ずしも背景処理を十分に行なうことができず、かなりノイズを含んだ画像しか得られないことがわかった。そこで、次のステップとしてノイズを含んだ画像から正確に野菜画像の抽出を行なうための処理方法について検討した。すなわち、野菜画像の画像処理として、まず入力画像の画質を改善するための濃淡画像処理を、次に野菜画像を背景から抽出するための2値化処理、さらに野菜画像とノイズを分離するための2値画像処理を試みた。

画像を鮮明化するために、入力された濃淡画像に対して鮮鋭化と平滑化の空間フィルタリングを行なった。鮮鋭化は画質の低下の一つの原因であるぼけを除去し、画像をくっきりと鮮明なものに変換する処理である。鮮鋭化のためのフィルタとしてラプラシアンフィルタを用いた。鮮鋭化は高い空間周波数成分を強調するものであるが、ノイズも同時に強調される。ノイズが強調されすぎないようにするためには、処理回数は1回とするのが適切であった。平滑化は鮮鋭化により対象物と同時に強調されたノイズ成分を抑えるための処理である。そこで、荷重マトリクスによる空間フィルタリングにより平滑化を行なった。本研究では以下に示す4通りのフィルタを用意して比較を行なった。

- ・局所平均フィルタ
- ・局所加重平均フィルタ
- ・メディアンフィルタ
- ・可変加重平均法

局所平均フィルタでは5×5のマトリクスより3×3のマトリクスの方がぼけが少なかったが、局所加重平均フィルタでは処理後の画像に両者の差異は認められなかった。局所平均フィルタではぼけが強調されたが、局所加重平均フィルタとメディアンフィルタは鮮鋭化された画像をぼかさずにノイズ成分が抑えられ、画質の向上がみられた。可変加重平均法では、原画像に対して必ずしも忠実な処理画像が得られなかった。平滑化についても鮮鋭化と同様に複数回処理すると画質が低下するため1回の処理が適切であった。

濃淡画像から背景（0または1）と対象物（1または0）を分離するための2値化処理は、両者を区別する輝度レベルをしきい値として行なう。固定的なしきい値では、照明条件が一定である人工光型植物工場でも、背景や対象の輝度レベルの変化に対応できないため、安定した処理結果が得られなかった。しきい値を自動的に演算する方法としてはpタイル法、ラプラシアンヒストグラム法、判別分析法⁹⁾などがある。濃淡画像処理後の画像に対して、自動しきい値による2値化を適用したところ、対象物より低輝度レベルの非対象物が2値化誤差となってしまい、安定

Fig. 3. Flow chart of image processing for obtaining the clear vegetables image.

した対象物の分離が不可能であった。そこで、輝度変換処理を複合した自動2値化処理を行なった。この手法は、明らかに非対象物となっている輝度値の部分を除く（ノイズサプレス）し、輝度レベルの変動を見込んだ、野菜画像が含まれる部分のヒストグラムを拡大する。拡大されたヒストグラムに対してしきい値演算を行なうことでノイズの少ない2値画像が安定して得られた。このしきい値の決定には、濃度ヒストグラムの統計的意味から最適しきい値を決定する大津の判別分析法¹⁰⁾を用いた。自動しきい値の単一処理より優れた抽出精度が得られた。本手法は背景の占有率が高い幼苗時において特に効果が認められた。

苗の大きさが、苗の支持体であるウレタンフォームを覆うまでに至らない育成ステージでは、ウレタンフォームと栽培プレートの接合部に発生した藻の輝度レベルが野菜画像の輝度レベルとほぼ等しくなり、藻の部分が2値化誤差となった。この野菜と連結した藻によるノイズを除去するためには、収縮、ノイズ削除、膨張の一連の処理を行なうことにより、正確な野菜画像を得ることができた。また、子葉が展開する時期の苗では中心部の輝度レベルが反射光によって高くなり、画像が欠損することがわかった。そのため、膨張、ノイズ削除、収縮の一連の処理により正確な野菜画像を得ることができた。膨張および収縮処理は複数回行なうと原形が再現できなくなるため、2回以内が望ましいことがわかった。以上の処理手順を流れ図として Fig. 3 に示す。

3. 複数個体の個別認識手法の開発

従来の計測対象物の番号付け（ラベリング）では、対象物が走査線（画面左上から右下に移動）と衝突する順番によって計測対象物のラベリングが行なわれてきた¹⁾。この方法では野菜の成長が不斉な場合には、走査線との衝突順位にずれが生じてしまい、数日にわたる計測を行な

Fig. 4. The labelling of each plant by calculating the distance between center of gravity and set point, so as to recognize individual plant during continuous measurement.

う場合、同一個体の認識を続けることが不可能であった。そこで、各個体の識別番号を固定化する手法を開発した。まず、モニタ上の対象物を十字カーソルで番号指定する。そして計測の都度、対象物の重心座標 $G(i, j)$ を求める。次に、式(1)により各番号のカーソル指定座標 $S(h, k)$ と重心座標とのユークリッド距離 de を求め、最も近い重心距離をもつ対象物を、指定した番号の対象物として認識することとした。隣同士の野菜画像の重なりがない限り、個体の認識が正しく行なわれることを確認した。

$$de(G(i, j), S(h, k)) = \sqrt{(i-h)^2 + (j-k)^2} \quad (1)$$

この機能により、計測対象物と非対象物の区別が併せて可能になった。つまり、ノイズ除去処理ですべてのノイズを除去しなくても、ノイズ混在のままに対象物を計測することができた。計測対象物と非計測対象物が混在する中から、四つの野菜苗を認識計測した処理例を Fig. 4 に示す。Fig. 4 から、走査線の衝突順位に関係ない個体の番号付けとノイズ除去処理後に残ったノイズの無視が行なわれていることがわかる。本機能のノイズ除去処理機能は、計測対象物とノイズの画素数に大差がない場合において特に有効であるといえる。

4. 成長のイメージ出力機能の開発

画像処理によって対象画像の定量的な分析を行なうだけでなく、画像を利用した定性的な表現も有用な情報と考えられる。そこで、同一個体の成長推移や形態的特徴を画像出力する方法を検討した。

Fig. 5 は晩抽レッドファイヤーの2時間ごとの成長推移を画像の重ね合わせで表現したものである。本手法では、まず各計測ごとの2値画像を画像処理により得た後、ラプラシアンフィルタにより輪郭線を抽出する。画像の存在しない白紙の画像ページ $G(x, y)$ を用意し、2値輪郭画像 $F(x, y)$ と排他的論理和の画面間演算を行なって、合成画像 $G(x, y)$ を得た(式(2))。この操作を順に12回、すなわち24時間分繰り返して Fig. 5 の合成輪郭画像を得た。これにより野菜の成長の推移をイメージでわかりやすく表現できることを確認した。

$$G(x, y) = G(x, y) \vee F(x, y) \quad (2)$$

野菜の形態的特徴を解析するための細線化処理を試みた。細線化処理は、与えられた図形から

Fig. 5. Graphical images represent growth process of lettuce plants (*Lactuca sativa* L. non-heading type). These images were obtained by super imposition of the outlines of the binary images at two-hour intervals.
(.....) : Light, (—) : Dark

線幅を細めて幅1の中心線を抽出するものである。細線化処理の結果、葉の面から線への変換により、葉の結合関係、葉の先端の形状および葉長の特徴を得ることができた (Fig. 6)。葉の先端が曲がっている場合 (A) には細線画像はY字型になり、まっすぐ伸びている場合 (B) には葉の横方向と交差した十字型の線分画像が得られた。この手法により、幼苗の形態的特徴量の定量化の可能性が示唆された。

Fig. 6. Graphical images represent the morphological features of lettuce plants (*Lactuca sativa* L. non-heading type).
A : Y shape expressed the bending of leaf tip.
B : + shape expressed the normal leaf development.

ま と め

植物工場や順化育成装置などで栽培される野菜について、画像処理による非破壊連続計測の適用として、一連の技術開発を行なった。野菜の成長を画像計測する際、野菜の輝度レベルと類似した藻の発生などによるノイズが測定誤差となり、大きな問題となった。そこで、鮮明な画像入力のため、背景である栽培床の下地処理、フィルタリングによる画質の向上、ノイズサプレスの自動2値化、収縮、ノイズ削除および膨張処理によるノイズの除去など、各種の手法の組合せや工夫を行なった。その結果、正確な野菜画像の抽出が可能になった。さらに、連続して自動計測を行なうための複数個体の自動識別や成長情報のイメージ出力などの機能の開発により、植物工場における実用的な育成監視システムを開発できることが確かめられた。

以上の問題点と種々の対策は藻の発生や時間とともに成長する野菜に起因したものであり、野菜を画像計測するうえでの固有の技術もしくはノウハウである。今後さらに、適用植物の拡張や品質の定量化を行なうつもりである。本研究の結果が植物に画像処理を適用する際の参考になれば幸いである。

参 考 文 献

- 1) 田村秀行監修：コンピュータ画像処理入門（日本工業技術センター編），総研出版，p. 9～11（1985）
- 2) 岩尾憲三・蔭山裕之・谷村泰宏・池田 彰・江崎謙治・河相好孝・中山繁樹：蛍光ランプを用いた人工光型植物工場の研究（その2）画像計測による野菜の育成監視技術の開発，生物環境調節，29（2）：89～93（1991）
- 3) Matsui, T., and H. Eguchi: Computer control of plant growth by image processing I, Mathematical representation of relation between growth and pattern area taken in photographs of plants, Environ. Control in Biol., 14: 1～7（1976）
- 4) 小田雅行・野中正義・星野和生：レタスの投影面積と成長の関係，農気東海誌，45: 6～12（1987）
- 5) 大政謙次・相賀一郎：画像処理による植物の生育・生理反応の評価，遺伝，35（1）：25～31（1981）
- 6) 谷村泰宏・池田 彰・江崎謙治・河相好孝・中山繁樹・岩尾憲三・蔭山裕之：蛍光ランプを用いた人工光型植物工場の研究（その1）栽培システムの諸元ならびに性能試験結果，生物環境調節，29（2）：81～88（1991）
- 7) 花本真一・岩下正雄・寺嶋廣克：パソコン画像処理，昭晃堂，p. 52～62（1988）
- 8) Eguchi, H., and Matsui, T: Computer control of plant growth by image processing III, Image processing for evaluation of plant growth in practical cultivation, Environ. Control in Biol., 16: 47～55（1978）
- 9) 高木幹雄・下田陽久監修：画像解析ハンドブック，東京大学出版会，p. 502～504（1991）
- 10) 大津展之：判別および最小2乗規則に基づく自動しきい値選定法，電子通信学会論文誌，J 63-D（4）：349～356（1980）