一般ハフ変換を応用した不定胚の形状選別

庄野浩資・蔵田憲次*

岩手大学農学部・*東京大学農学部

An Application of Generalized Hough Transform in
Selecting Somatic Embryos

Hiroshi SHONO and Kenji KURATA*

*Department of Agronomy and Forestry, Iwate University, Iwate 020, Japan***Department of Agricultural Engineering, The University of Tokyo, Tokyo 113, Japan*

Developing an efficient method of separating normally shaped somatic embryos from malformed ones is essential for automating the somatic embryo production procedures, and the method based on computer vision algorithm is expected as the strong candidate of the efficient method for this purpose.

Generalized Hough transform is known as the algorithm which is able to carry out very rapidly the procedure of template matching which is one of computer vision algorithm. Because the procedure of template matching seems to have several merits in application to the problem of selecting somatic embryos, e.g. the easiness of improvement of performance by changing templates, we tested the applicability of the procedure of template matching using the algorithm of generalized Hough transform in selecting somatic embryos by using real images of somatic embryos of carrot. As the result, our method could select out malformed somatic embryos fairly well, but it could not distinguish normally shaped somatic embryos and slightly malformed ones sufficiently.

(Received December 28, 1992)

1992年12月28日受付

はじめに

不定胚培養法は従来の組織培養法と比較して、完全自動による大量培養の実現が容易であるという特長を有しており、今後の大量培養法の主流となることが期待されている。しかし現状では、不定胚培養法には未解決の技術的課題がいくつか残されている。そのもっとも大きなものは、培養液中に成熟度および健全度の異なる不定胚が混在することが避けがたく、現状ではさまざまな形状の不定胚群から良好なものを多かれ少なかれ人間の目および手により形状選別する工程が必要とされる点である。したがって、不定胚培養の完全自動化を実現するためには、自動的かつ効率的な形状選別法を実現することが不可欠となる。

不定胚の形状選別の方法としては、画像情報に基づく

方法が有望視されており、さまざまな原理に基づく形状選別法の有効性が検討されている。たとえば、Kurata¹⁾は、人参不定胚の細線化画像に、分岐数などの質的な形状情報に基づく選別ルールを適用して形状選別を行う方法を提案している。かれらは、その選別能力は人間に匹敵するとしている。また、Kurata and Shono²⁾は、画像情報に基づく一般的な形状選別法であり、手書き文字の自動識別などにすでに応用例のあるフーリエ記述子を用いた方法の有効性を検討している。かれらは、Kurata¹⁾が用いたものと同じ人参不定胚の2値化画像群を検証用データ (validation data) として用いたところ、良好な形状と中間的な形状との微妙な形状差の識別能力に改善の余地が認められると報告している。このほかにも多くの報告例があるが、いまだ主流となる方法が確定したとはいえない状況にある。

そこで本研究では、Ballard³⁾による一般ハフ変換

(generalized Hough transform) の原理を応用したテンプレートマッチング (template matching) の方法を、不定胚の画像情報に基づく形状選別法として提案し、その有効性を検討した。

方 法

1. 材 料

本研究では、選別アルゴリズムで用いられるパラメータを決定するために、Kurata and Shono²⁾が用いたものと同じ人參不定胚画像 (56 例) (2 値化画像) を調整用データ (calibration data) として用いている。さらに、Kurata¹⁾が用いた人參不定胚画像 (54 例) (2 値化画像) を検証用データとして用いている。この検証用データは、あらかじめ 3 人の人間により、3 グループ {A (良好形状), B (中間形状), C (不良形状)} に形状選別がなされている。Fig. 1 にそれらの代表例を示す。本研究では、これらの人間による選別結果を、形状選別結果の最終的な適否の判定基準として用いている。

2. テンプレートマッチング

通常のテンプレートマッチングの方法は、画像パターン認識問題においてよく知られる手法であり、その一般原理は以下のようである⁴⁾。

まず初めに、選別あるいは抽出したい目標画像をテンプレートとして用意する。次に、テンプレートと対象画像との 2 次元相互相関を画像全体において求める。相互相関は 2 次元分布となる。この分布における、相互相関

のピークの位置が対象画像中におけるテンプレートの存在位置を示唆し、さらにピークの高さがテンプレートと対象画像とのその位置における類似度と理解できる。これらの類似度を参照すれば、対象画像中に、注目するテンプレートがどこに、また、どの程度含まれているかを分析することができる。

テンプレートマッチングを不定胚の形状選別に適用する場合は、良好な形状を代表する不定胚画像をテンプレートとし、対象画像に上記のアルゴリズムを適用することにより、相互相関、すなわち類似度を求め、その最大値を最終的な選別のための対象画像の得点とすればよい。

テンプレートマッチングには、類似度が単純な数値であるため最終的な選別処理を単純化できる点、また、容易にテンプレートを変更できるため、選別能力の改善や、さらには他の形状選別問題への応用が容易である点などさまざまな特長がある。しかしそのいっぽう、本方法には、低速な計算機では膨大な計算時間が必要となるという大きな欠点がある。不定胚培養システムにおいては、形状選別の作業を連続的にかつ大量に行う必要があるいっぽう、計算機に充てられるコストには限りがあり、必ずしも高速な計算機が使用可能とは限らない。このため、本方法の不定胚の形状選別への応用は、何らかの高速化の方策をたてない限り適当ではない。

本研究では、テンプレートマッチングのアルゴリズムに、効率的処理が可能な一般ハフ変換を応用するとともに、対象画像 (2 値化画像) を細線化アルゴリズムにより簡略化し、画像データ量を軽減することにより、総合的な計算処理の高速化を図ることで、この問題に対処している。

3. 一般ハフ変換

一般ハフ変換の計算方法⁵⁾を簡単に以下に示す。ここでは、Fig. 2 に示す画像から図形 A (テンプレート) を抽出する場合を例にとる。

まず、図形 A をその中心 O (たとえば重心) に関し対称変換した図形 B を求める。図形 B のもつ意味は、以下のようなものである。すなわち、対象画像上のある 1 点が図形 A の一部である可能性は、図形 A の各構成点に対応した件数だけ存在する。この各件における図形 A の中心 O の位置を軌跡として求めると図形 B となる。すなわち、図形 B は、その中心を対象画像上のある 1 点に一致させた場合、その 1 点が示す図形 A の中心 O の存在可能性分布を表現すると理解することができる。

次に、画像と同サイズの 2 次元配列を用意し、各要素を初期値 0 にしておく。この配列の各要素は、画像の各

Fig. 1 Examples of embryos ranked to A, B and C groups.

Fig. 2 The schematic view of generalized Hough transform.

点と1対1に対応している。次に、対象物画像の各構成点に図形Bの中心Oを重ねる。このとき、図形B上の各構成点の位置に対応する2次元配列の各要素に1を加算する。この操作を対象物画像の全構成点において実行する。この結果、2次元配列には、画像における図形Aの中心Oの存在可能性が2次元分布として得られている。この2次元分布は、テンプレートマッチングにおける類似度の2次元分布に相当する。したがって、この後は、テンプレートマッチングの場合と同様に、分布のピーク位置とその高さを求めることにより、最終的な類似度を求めることができる。

一般ハフ変換と、通常のテンプレートマッチングの理論的な原理は等価である^{3,5)}。しかし、以下の技術的な理由で前者の処理は後者よりはるかに効率的となる。

処理の対象となる画像およびテンプレート画像は、対象物とその周りの背景とに分割することができる。テンプレートマッチングを行うためには、この両者を合わせた画像全体間の2次元相互相関の計算が必要であるのに対して、一般ハフ変換は、対象物画像の構成点上における計算だけで済むため、大幅に効率的となる。この効率化の傾向は、複数のテンプレートを用いるさいにはさらに顕著となる。とくに、本研究では、84種類のテンプレート（後述）を用いており、通常のテンプレートマッチングの方法では、事実上実行困難である。

4. 対象物画像の簡略化

一般ハフ変換を用いる場合は、その処理時間は、対象

Fig. 3 Examples of thinning of images.

物画像の構成点数に比例する。また、対象物画像中の、本質的な形状特徴に関係しない部分は、処理の効率化を疎外するばかりではなく、最終的に類似度にノイズとして影響する。したがって、処理の効率化と選別性能の向上を図るには、本質的な形状特徴を損失せずに対象物画像の簡略化を行うことが必要となる。Ballard は2値化画像のエッジ情報を用いることによりこの問題に対処している³⁾。これは、輪郭化した対象物画像に一般ハフ変換を施すことと等価と考えられる。

本研究では、画像の輪郭化よりもさらに画像データ量を軽減する方法として、Kurata ら⁷⁾が用いた細線化アルゴリズムを適用している。かれらの結果によれば、この細線化アルゴリズムは本質的な形状特徴を損なわずに画像を簡略化できる。Fig. 3 に2値化不定胚画像と、それらをこの細線化アルゴリズムで細線化した画像例を示す。

5. テンプレート

本研究では、不定胚の良好な形状（細線化画像）を代表する基本テンプレートとして、Fig. 4 に示す「Y」字

Fig. 4 The shape of template "Y."

形を用いる。このテンプレートの構成点数は100点である。

実際の不定胚の細線化画像の大きさと画像中における傾斜角度はさまざまである。したがって、テンプレートも、これらのバリエーションに対応して複数個用意しなければならない。

本研究では、基本テンプレートのサイズを1とし、これを0.25刻みに、0.5から2.0までの7通りに伸縮させたテンプレートを用意している。また、傾斜角度に関しては、基本テンプレートの主軸角度を基準とし、これを30°ごとに0°から330°まで12刻みに回転させたテンプレートを用意している。したがって、テンプレートの総数は、84 ($=7 \times 12$) となる。

6. 選別基準しきい値の決定

最終的な形状選別を行うためには、良好形状と判定する基準となる類似度のしきい値を、あらかじめ求めておく必要がある。本研究では、細線化した調整用データに、本方法による形状選別を施し、その結果得られた類似度の分布から「平均値+標準偏差」を求め、これをしきい値としている。これは、調整用データから求めた類似度の分布はほぼ正規分布とみなすことができ、その「平均値+標準偏差」以上の類似度をもつ不定胚は全体の約15%であること、さらに、この部分に良好な形状の不定胚が集中していることによる。

結果および考察

Fig. 5 に、実際に本方法を適用した例を示す。ここで、1例の計算にはワークステーションクラスの計算機(20 MIPS (Million Instruction Per Second, 1 MIPS=1

Fig. 5 An example of template matching using generalized Hough transform.

Table 1 The result of computer judgements.

		Normal	Malformed
A	(14)	7 (50%)	7 (50%)
B	(17)	8 (47%)	9 (53%)
C	(23)	5 (22%)	18 (78%)
A+B	(31)	15 (48%)	16 (52%)
A+B+C	(54)	20 (37%)	34 (63%)

秒間に百万回の命令を実行できる計算速度)程度の処理性能)において約10数秒の処理時間が必要であった。ちなみに、通常のテンプレートマッチングの処理時間は、同程度の計算機においては数10分以上のオーダーとなる。

細線化した全検証用データに対し、本方法による形状選別を施した結果を Table 1 に示す。

Table 1 には、人間があらかじめ形状選別した結果(左端欄中の括弧内の数値)と、本方法が良好な形状(normal)あるいは不良な形状(malformed)と判定した結果がそれぞれ個数と人間の選別結果に対する百分率で示されている。

Table 1 によれば、人間が良好(A)と判定したグループの約半数が不良と判定されている。すなわち、選別の歩止まりあるいは効率は必ずしも満足できる結果ではない。そのいっぽう、人間が不良(C)と判定したグループはその約80%が不良と判定されており、今回行った方法においては、不良形状に対する感度のほうが良好形状あるいは中間形状に対する感度よりも高かったことを示している。これは、今回用いた基本テンプレートが、良好形状の細線化画像をもとにしており、不良形状との差が感知されやすかったためと考えられる。

検証用データ54例のうち、本方法が良好と判定したのは20例であり、不良と判定したのは34例である。ここで、Bグループ(中間形状)を良好形状に含めるべきか否かで最終的な選別成績の評価が異なる。BグループとAグループの形状差は微妙であり、将来の生長過程を追跡しなければ、この点に関する最終的な結論は得られない。今回はその追跡結果は得られていないため、Bグループを良好形状に含めた場合と、含めない場合の2通りの評価を行う。すなわち、前者の場合の正解率は75%であり、後者の場合の正解率は35%である。ここで、正解率とは、良好形状と判定したなかでの実際に良好形状であるものの比率である。

上記結果によれば、Bグループを良好形状に含めた場合の正解率は75%と比較的高い成績といえるが、含めない場合の成績は満足できるものではない。これは、今

回の方法では、AグループとBグループとの微妙な形状差までは感知できなかったことを示している。たとえば、AグループとBグループとの微妙な形状差は、細線化図形において主軸の緩やかな湾曲として現れる場合が多い。しかし、今回用いた「Y」字形のバリエーションによるテンプレートでは、主軸以外の部分でマッチングする可能性があるため、適正な類似度を算出しない場合があると考えられる。

以上から、今回用いたテンプレートの形状に関しては改善の余地が認められる。すなわち、ひとつの良好形状を表す基本テンプレートから大きさと角度のバリエーションだけでテンプレート群を作成するのではなく、微妙な形状差が現れやすい部分に関して、テンプレート形状に細かなバリエーションを与えることにより、選別性能の向上が可能となると期待できる。

また今回の結果は、調整用データと検証用データの形状分布の差の影響が少なくないことを示している。実際 Table 1 において、良好と判定したものの割合は 37% であり、当初、選別基準しきい値を設定したさいに予想した約 15% を超えている。すなわち、選別基準しきい値を設定するさいには、フィードバック操作などによりつねに最新の不定胚画像を参照するようにし、選別結果にバイアスを生じないようにする必要がある。

計算時間に関しては、通常のテンプレートマッチング

と比較すると大幅な高速化が認められるものの、実用的見地からはさらなる高速化が望まれる。この問題に関しては、テンプレートの最適化を図るなどの方策が考えられる。

ま と め

不定胚の形状選別問題に一般ハフ変換を応用し、その有効性を検討した。その結果、現状では、本方法は、不良形状に対する感度は比較的高い性能を示すいっぽう、良好形状と中間形状の微妙な形状差に関する感度には改善の余地が残ることがわかった。

文 献

- 1) KURATA, K., M. TERADA, M. KOMINE, and H. LIYANAGE. 1991. Computer vision for selecting somatic embryos. ASAE Paper No. 913054.
- 2) KURATA, K. and H. SHONO. 1992. An application of Fourier descriptor for selecting somatic embryos. Acta Hort. 319: 591-594.
- 3) BALLARD, D.H. 1981. Generalizing the Hough transform to detect arbitrary shapes. Pattern Recogn. 13: 111-122.
- 4) アズリエル ローゼンフェルド・アビナッシュ C カク (長尾 真監訳). 1978. 「ディジタル画像処理」306-312, 近代科学社, 東京.
- 5) 森 俊二・坂倉 桐子. 1990. 「画像認識の基礎 [II]」11-14, オーム社, 東京.