

葉の輪郭の形状の構造的特徴を用いた葉の形状の分類法

任 哲弘

東京大学 情報科学科

113-0033 東京都文京区本郷 7-3-1

葉の形状の定量的分類法は、葉の形状を索引とする植物のデータベースを利用した新しい種の発見、生態調査、教育用システム等に応用できる。今まで葉の形状の大まかな特徴のみを捉えて比較し分類する方法が提案されて来たが、葉の形状は複雑でばらつきが大きいので、構造的に似通った葉の形状同士ではうまく分類が出来なかった。本論文では葉の形状の複雑性とばらつきを効率良く扱う為の葉の輪郭の形状の構造的特徴を用いた葉の形状の分類法を提案する。葉の形状の階層的構成要素を検出正規化しそれらを独立に記述する事で、各構成要素のばらつきが形状の記述に与える影響を小さくし、より詳細な形状特徴も分類に使用する。

A Method of Classifying Leaf Shapes Using Structural Properties of Leaf Contour Shapes

Cholhong Im

Department of Information Science, The University of Tokyo,

7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-0033

A quantitative classification method of leaf shapes can be applied to a database of plants which is indexed by leaf shapes. Classification methods which compare approximate leaf shape features have been proposed. However, leaf shapes of similar structures cannot be classified well because of their complexities and large variation. In this paper, a method of classifying leaf shapes using their structural properties is proposed in order to deal with complexities and variation of leaf shapes effectively. By describing hierarchical components of leaves which are detected and normalized independently, influence of variation of each components to leaf descriptions is reduced and features of detailed leaf shapes can be utilized.

1 Introduction

葉の形状の分類は植物の種の分類に対応する場合がよくあるので、様々な応用が考えられる。例えば、葉の形状を索引とする植物のデータベースは新しい種の発見に応用出来る。植物

には多くの種が存在し、これをいちいち目で確かめながら採集して来た植物と比較するのは大変な作業であるので、その形状を計算機に入力し、定量的にデータベースに登録している植物の形状と比較する事が出来れば大変便利である。生態調査の場合、葉を採集して認識する事が出

来れば、膨大な数の標本をわざわざ専門家に識別させる必要がない。学生が採集してきた葉を入力し認識出来れば、教育用システムとしても有用である。

今まで葉の形状を分類する方法は幾つか提案されて来たが、それらは葉の形状のばらつきの影響を極力受けず、ある程度分類が可能な解像度を見つけだしその解像度以下での葉の輪郭の形状の比較をする事で分類を行なっている。しかし葉の形状は複雑でばらつきが大きいので、これらの方法ではかなり低い解像度での形状特徴の比較に留まってしまう。CSS (Curvature Scale Space) [1] を使った方法では、輪郭の比較的大きな凹凸の位置関係と大きさを間接的に比較して分類している。CSS 画像は輪郭をガウシアンフィルタを使い徐々に滑らかにしていきながらその曲率を計算し、その 0 交差点の相対的位置を解像度に対し追跡プロットしたものである (図 2)。例えば図 1 の様な葉の輪郭に対しては図 2 の様な CSS 画像が得られる。CSS 画像を使って

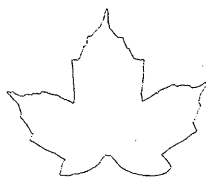


図 1: 葉の輪郭

葉の形状を分類する際は、画像の上の部分まで達している曲線のピークの画像上の位置を使って輪郭を記述し比較する事で、葉の形状のばらつきの影響を抑えている。図 2 の曲線の中でピークに点が付いてあるものが選ばれたピークに相当する。しかしこの方法だと、葉の形状の分類において重要な部分が比較に使われない場合がある。例えば図 2 の場合、葉の上の部分にある二つの谷間に相当するピークは選ばれるもの、下の方の谷間に相当するピークは選ばれない。代わりに葉の付け根の部分にある谷間に相当する

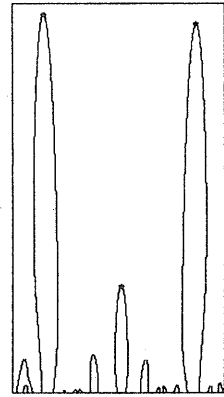


図 2: 対応する CSS 画像

ピークが選ばれてしまう。下の二つの谷間は葉の形状の分類には有用であるが、付け根の部分の谷間は有用ではない。またピークの位置だけでは凹凸の大きさと位置関係を間接的に表してに過ぎず、凹凸の詳細な形状や葉の輪郭上にある鋸歯 (細かいギザギザ) 等の特徴は表す事が出来ない。また曲線が凹を示すものか凸を示すものは分からないので、これから直接輪郭の構造を得るのは不可能である。

曲率の特徴スケールにおける曲率の臨界点に基づいた分類法 [6] では、其々の種に属する葉の輪郭の曲率がお互いに似通ったパターンを示すスケールにおいて、その臨界点を中心とするセグメントで葉の形状を表し、他の種の葉と比較する。種と種の間距離を求める為に考案された方法であるが、そもそも解像度が低くなればなる程お互いに似通ってくるので、実際にこの様なスケールが存在するかは疑問である。また結果的に得られたスケールは解像度がかなり低い状態となっている。特徴スケールは統計的に求めるので、どの種に属するか分からない葉が与えられた時、その特徴スケールを求めるのは困難で一般的な分類には使用する事が出来ない。

この様に結果的にかなり低めの解像度での形状特徴のみを使用しているため、似通った構造をした葉を分類するには適切であるとは言え

ない。そこで本論文では葉の輪郭の形状の構造的特徴を用いた葉の形状の分類法を提案する。つまり、葉の輪郭の形状の階層的構成要素を検出しそれを独立に扱う事で、其々のばらつきが葉の形状の記述に与える影響を抑えようと言う事である。

2 葉の形状

この論文では双子葉植物の内の掌状葉にあたる葉の形状を対象とする。他の形状の葉は構造的にはこれより単純であるため、この論文で述べる方法を適用する事が出来る。

葉は葉柄がつく付け根 (base) の部分から分岐した重なり合う小葉により構成される。小葉はその葉脈に対し対称で、頂点 (apex) を一つ持つ楕円状をしている (図 3)。他の小葉に隠され

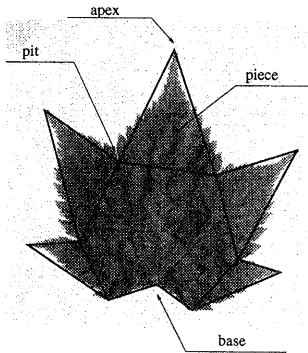


図 3: 葉の形状

てない部分を破片 (piece) と呼び、破片と破片の間に出来る点を谷底の点 (pit) と呼ぶ。葉によって小葉には様々な形状が存在するが、一つの葉に属する小葉の形状は大きさは違うものお互いに似通っている。葉の概形は小葉の大きさやそれらの成す角度により定まる。また小葉は似通っているもののばらつきがあり、成す角度にもある程度ばらつきがある。小葉は葉脈に対して基本的には対称であるが、環境に応じて葉脈が曲がっている場合があるので、輪郭もそ

れに応じ変形している事がある。輪郭上には多くの鋸歯が存在する場合がある。鋸歯の形状の示すパターンは同じ種の葉に対しては似通っている。また種に応じて様々なパターンが存在する。ただその数は同じ種でも一定でなく、大きさも一定ではない。

3 葉の輪郭の形状の構造的特徴を考慮した形状表現

上で述べた様に、それぞれの構成要素がばらつきを持っている為、結果として葉の形状自体は大きなばらつきを持ってしまう。以前の方法ではこのような構造的特徴を無視して輪郭の安定な特徴を捉えて比較しようとした為、結果として大まかな形状特徴しか使用する事が出来なかった。そこで、上で述べた階層的構成要素を別々に検出し記述する事で其々のばらつきを独立に扱い、ばらつきの葉の記述への影響を抑える事でより詳細な葉の形状特徴を分類に使用する事が出来ると考えられる。そこで次の様な階層的特徴を検出する事で、階層的に葉の形状を分類する [3, 2, 4]。

- 葉の構造と大まかな形状
- 葉の局所的詳細な形状
- 鋸歯の形状

葉の構造は破片の数で表す事が出来、大まかな形状は破片の大まかな形状とそれらが成す角度等で表す事が出来る。葉の局所的詳細な形状とは破片の詳細な形状である。

またこの様に構造的特徴を考慮すると同時に葉の対称性も構成要素の検出の際利用する。また構造的特徴に基づき、葉脈の変形に伴う破片の形状の変形を元の変形していない状態に復元する為の葉の形状の正規化も行なう。

4 本研究の目的

本研究の目的は、上で述べた階層的表現を使った分類法が以前の方法よりよい結果が得られる事を証明する事にある。その為 CSS を使った分類法と階層的表現法を使った分類法の分類結果の比較を行なう。また葉の形状の正規化の有効性を調べる為、正規化を行なった形状に対する分類結果と正規化を行なわなかった形状の分類結果との比較を行なう。

5 葉の形状の入力法

本論文では葉は真中の破片の頂点が画像内で最も高い位置に来るようにし、画像毎に一枚の葉のみ入っているものと仮定する。葉の形状は平坦なのでこの様な入力是比较的簡単である。最初の仮定が満たせない様な場合は後で述べる対称度を使った方法を使用する。

6 葉の形状の階層的表現法

6.1 葉の形状の構造と大まかな形状

葉は多角形から破片が突き出している様な形状を成しているとも考えられる。よって葉の形状の構造は破片の数で定まると言える。また大まかな形状は破片の概形を求めそれらの位置的關係を求めれば表現する事が出来ると言える。破片は一つの頂点と二つの谷底の点で構成される三角形形状をしており、破片の大まかな形状はこの三つの点を求める事で表現する事が出来る。これらの点では輪郭が比較的鋭く曲がっているため、輪郭の曲率の臨界点に対応している。曲率は次の式 1 で表される。

$$\kappa(t) = \frac{\dot{x}(t)\ddot{y}(t) - \ddot{x}(t)\dot{y}(t)}{(\dot{x}(t)^2 + \dot{y}(t)^2)^{3/2}} \quad (1)$$

ただし輪郭には多くの鋸歯が存在する事があるので、まずそれらを取り除く必要がある。輪郭の多重解像度解析を行なう際、輪郭の x 座標列と y 座標列を別々に平滑化せず、輪郭の曲率等

を平滑化していく方法 [6, 5] がよく行なわれるが、鋸歯を取り除くには適していない。曲率の場合鋸歯と鋸歯との間の谷底の点と破片と破片の間の谷底の点での曲率のパターンにはほとんど違いがなく、曲率を直接平滑化すると両方の谷底の点が同じようなパターンで滑らかになり、結果的に鋸歯が取り除かれる時点では葉の概形もかなり崩れてしまう。各座標列を別々に滑らかにすると曲がり方が直接滑らかになるわけではなく、大まかな形状を大きく損なう事なく鋸歯を取り除く事が出来る。輪郭は曲率の 0 交差点間の平均距離が閾値以上になるまで行なう。次に曲率の臨界点を求め、頂点と谷底の点に相当する点を選び出す。頂点は相対的曲率が閾値以上になるものとする。ここで相対曲率とは曲率の最大値で曲率を割ったものである。次に頂点と頂点との間から谷底の点を選び出す。これは曲率が最小となる臨界点とする。

真中の破片の頂点は最も高い位置にある頂点を探せば求める事が出来る。この頂点から弧長が周囲長の半分に位置する点を中心に付け根の点を探し出す。付け根の部分では輪郭が緩やかに曲がっている事が多いので、求める点の前後に二つの点を設けそれらの点を結ぶ線が成す角度が最小となるような点を付け根の点とする。

付け根と隣り合う頂点との間には谷底の点が存在しない為、それに相当する点を求めるが、この間の輪郭はそれほど大きく曲がっていないので、この間の輪郭を二つの線分で線形近似する事で節点を求め、谷底の点の代わりとする。

6.2 対称性を使った破片の検出

葉は対称な形状をしているので真中の破片を除いて左右に同じ数の破片が存在する。しかし付け根付近の破片は比較的小さい場合が多いので、上の検出過程で見逃してしまう恐れがある。そこで真中の頂点と付け根を結ぶ軸を対称軸とし、両方の頂点の数が違う時、付け根付近の頂点と谷底の点を取り除いたり付け加えたりする。破片を取り除く操作は難しくないが、破片を付け加える操作は必ずしもうまく行くとは言えない

い。しかし破片を付け加える事が出来る時はそれが実際破片である可能性があるので追加を行ない、破片の追加が失敗した時削除を行なう。

6.3 葉の形状の正規化

破片の形状はその葉脈の変形に従って変形している事があるので、このような場合葉の記述に大きな影響を与える。よって曲がった葉脈を真直にしそれに応じ破片の輪郭を修正する事で葉の記述への影響を少なくする。

葉脈は次のように曲がっていると仮定する。

- 曲率が一定
- 破片の付け根の部分ではそれほど曲がっていない
- 一方向に曲がっているものとする

この仮定を元にまず破片の付け根近くで葉脈に対し対称な二つの点の対を求める。葉の付け根からこの二つの点までの距離は小葉の対称性から同一である。よって一方を指定すれば他方を求める事が出来る。破片の二つの谷底の点の内、付け根からの距離が近い方を選ぶと他方が他の小葉に隠されて求められない可能性があるが、遠い方を選ぶと隠されている可能性はないので、遠い方を対称な対の一つとして選ぶ。次に選ばれなかった谷底の点から破片の頂点に向かって付け根からの距離が同じとなる点を捜し出す。

求めた点の対を基準に対称軸を求める。其々の点から頂点に至る二つの曲線を同じ数に其々同じ長さのセグメントに分割する。それらの節点を p_i, q_i とすると中心軸は次の様な線形近似で与えられる

$$c_i = \frac{p_i + q_i}{2} \quad (2)$$

よって新しい輪郭は

$$\left(\frac{|q_i - p_i|}{2}, \sum_{j=2}^i |c_j - c_{j-1}| \right) \quad (3)$$

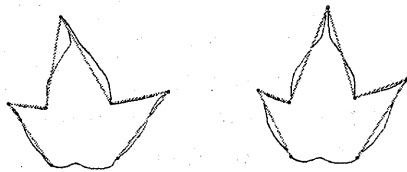


図 4: 正規化の例

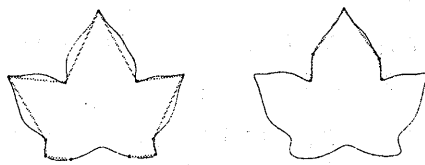


図 5: 大局的形状と破片の詳細な形状

と

$$\left(-\frac{|q_i - p_i|}{2}, \sum_{j=2}^i |c_j - c_{j-1}| \right) \quad (4)$$

で与えられる。図 4 に正規化された葉の例を表示している。

6.4 局所的詳細な形状

次により詳細な形状を分類に利用する為、破片の詳細な形状を捉える。小葉は基本的にはどれも似通った形状をしており、一つの破片の形状のみを捉えれば十分である。真中の小葉が他の小葉に隠されている部分が最も少なく隠され方も対称なので、真中の破片の形状特徴を利用する。ただし、輪郭は大きく曲がっている訳ではないので、二つの線分を使った頂点と谷底の点の間の曲線の線形近似によってこの部分の輪郭を表す。図 5 に検出された大局的形状と破片の詳細な形状の例を示している。

6.5 鋸歯の形状

鋸歯も一般には三角形状をしており、頂点と隣り合う二つの谷底の点により表す事が出来る。

よって曲率の臨界点の中からこれらの点を選び出せば良い。しかし鋸歯はその大きさがあまり大きくないので、輪郭をあまり滑らかにする事が出来ない。臨界点には輪郭の離散化雑音等から生じる臨界点も存在するので鋸歯を表す三角形の頂点に相当する点を選び出さなければならない。しかし臨界値ではほとんど区別がつかないので、鋸歯の形状特徴を利用して相当する点を選び出す。

鋸歯を表す三角形の頂点には次の様な条件を与える。

- 谷底の点に相当する点を結ぶ線分は輪郭の内側を通る
- 鋸歯の頂点に相当する点は二つの谷底の点を結ぶ線分から最も遠い位置にある
- 大きさ（三角形の底辺の長さ、高さ）は閾値以上
- 底辺の長さに対する高さの割合が閾値以上

鋸歯を表す三角形をその大きさが小さいものから大きいものへと輪郭を回りながら探していく。その際、既に見つけた三角形と重なりあってはならないし、他の三角形を含んではならないが、次の様な場合は既に見つけた三角形を後で見つけた三角形に交換する。

- 他の三角形を一つだけ含む
- 大きさの割合が閾値以上

6.6 特徴量の表現

大まかな形状の場合輪郭上に幾つかな特徴点を求めているので、それを結んで一つの多角形として表す。つまり付け根の点から始めて時計周りに谷底の点と頂点を交互に結びつけていく。得られた多角形はその辺の相対的長さ（周囲長に対する長さ）と、辺と辺が成す角度により表される。

破片の場合、正規化により左右対称となっているので、頂点における角度と片方の輪郭を表現している辺と角度により表現する。



図 6: 検出された鋸歯

鋸歯の場合は一つの鋸歯だけでは全体の鋸歯の特徴を表す事が出来ないので、これらの統計量を使い表現する。

- 鋸歯の数
- 鋸歯の大きさの平均及び分散
- 底辺と頂点と底辺の中心を結ぶ線が成す角度の平均と分散
- 高さに対する底辺の割合の平均と分散

図 6 に検出された鋸歯の例が示されている。

6.7 対称度

葉の対称度は真中の破片の頂点と付け根を結ぶ線を対称軸とし、真中の破片の頂点での角度を除く左右の対応する特徴量間の差の自乗を加え合わせたものの平方根をとったものとなる。ただ角度は 2π で割ったものとする。これを使えば真中の破片の頂点が一番高い位置にあるという条件を取り除く事が出来る。

7 階層的分類法

7.1 類似度及び非類似度

形状を分類する為には上で得られた葉の特徴量同士の距離を定めなければならない。本論文では二つの葉の記述間の距離を非類似度と呼び、特徴ベクトル間のユークリッド距離で定義する（非類似度は其々の階層で別々に定義される。た

だし角度は 2π で割る事で正規化し鋸歯の特徴ベクトルの場合は其々の特徴量の差の自乗に重みを掛けた形をとる)。

類似度は一つの葉の記述と一つの葉の形状のクラス間の類似度の事で、次の様にその葉がクラスに属する確率として定義される。

$$sim_i(x_i) = \exp\left(-\alpha_i(x_i - av_i)^2 / var_i\right) \quad (5)$$

式5は特徴ベクトルの第 i 成分に対する類似度で av_i は第 i 成分の平均 var_i は第 i 成分の分散で、トレーニングセットの葉から求める。これを掛け合わせたものが類似度となる。

7.2 階層的分類法

分類は階層的に行なう。つまりまず葉の構造つまり破片数で分類し、次に大まかな形状を分類し、次に破片の詳細な形状を分類し、最後に鋸歯の形状を分類する。各段階において徐々に比較するクラスを類似度及び非類似度を使い絞りこんで行く。分類し切れなかった場合は葉の受け根の付近で実際には破片と見なされないものが検出されたかもしくは破片が検出されなかった可能性があるので、破片の追加及び削除を行ない分類を最初からやり直す。

7.3 幾つかの分類法

得られるベクトルの長さは破片数に定数を掛けたものにある定数を加えたものとなるので、色々な分類法を適用する事が出来る。構造的特徴を無視した以前の方法では特徴ベクトルの長さが一定ではなかったので、分類法は限られてしまう。

まず **voting** による方法が考えられる。これはベクトル長が一定でなくても可能な方法で、トレーニングセットの葉全ての特徴ベクトルをデータベースに貯蔵しておき、与えられた葉に対し特徴ベクトルを求めた後、データベースにある全ての特徴ベクトルと非類似度を使い比較する方法である。階層的に行なう場合はまず破片数で分類し、次に非類似度が小さい特徴ベク

トルをデータベースからいくつか選びだし、その中から多く選出されたクラスを順に幾つか選んで、次の階層における選定候補とする。

類似度を使った方法では候補の絞り込みは各階層における類似度を使って行なう。つまり類似度がある閾値以上を示す葉の形状のクラスを候補として残し、次の段階で該当する特徴ベクトルを使い残された候補との比較を行なう。

特徴ベクトルの長さは破片数に対し線形なので多層パーセプトロン等のニューラルネットも使用する事が出来る。ただ、各階層の特徴ベクトルを使った候補の絞り込みは意味がないので、各階層の特徴ベクトルを一つにつなげた特徴ベクトルを使用する。

8 実験結果

実験は21種の植物の葉を使って行なった。実験結果は分類率によって表される。分類率は分類に使った葉の総数に対する正しく分類された葉の数の割合によって表される。

まず本論文で使用した方法の有効性を見る為、CSSによる方法で得られた実験結果との比較を行なう。CSSによる方法で得られる特徴ベクトルは同じ種でも長さが不規則で一定ではないので、**voting** による方法を使っている。よって本論文で提案した階層的分類法を用いた方法でも **voting** を使って比較している。CSSによる方法で得られた分類率0.353に対し階層的表現法によって得られる分類率が0.657と改善が見られる。主な原因はCSS法では葉の構造をうまく捉える事が出来なかった事による。葉の構造をCSS画像の選ばれたピークの数で表すとして、其々の種に対し最も多い構造をその種の主な構造と定義すると、其々の種の分類率は其々の種の主な構造が占める割合に対応する。よって葉の分類において葉の構造を捉える事の重要性が示された。

次に類似度を使った実験結果(実験(b))と**voting**による実験結果(実験(a))の比較は表1の様になる(ただし、表以外にも頂点一つの場合

合がある)。表 1 から分かる様に頂点三つの場

表 1: 様々な分類法を使った実験結果の比較

	頂点三つ	頂点五つ	全体
実験 (a)	0.462	0.755	0.657
実験 (b)	0.690	0.792	0.790
実験 (c)	0.580	0.754	0.720
実験 (d)	0.663	0.830	0.800

合の方が分類率がより大きく改善されている。実験では頂点三つの種を最も多く使っているので、クラスの数多くなる時の類似度を使った分類法の有効性が示されている。実験 (c) は正規化を行なわなかった場合で、実験 (b) に比べ、分類率が低い事がある。特に頂点三つの場合の分類率の差が大きく現れるが、これは頂点五つの場合に比べ三つの葉の方が葉脈の変形出来る範囲が広い為であると考えられる。また実験結果から最初の階層での分類率に比べ、第二、第三階層での分類率の方が高くなっている事から、第二第三階層による分類の有効性が示される。

多層パーセプトロンによる実験 (実験 (d)) では実験 (b) に比べ全体の分類率が若干上がっているものの頂点三つの場合は多少下がっている。これはクラスの数が増えるとニューラルネットの学習がうまく行かない事を示している。第一階層の特徴ベクトルのみを使った実験では分類率が 0.683 であり、これは第二第三階層を使った分類の有効性を示している。

9 結論

実験結果から階層的表現法による分類の有効性が示された。まず CSS による方法との比較において同じ voting による分類法を使っても階層的表現に基づいた方法の方がより良い結果を示す事が分かった。また階層的分類法では特徴ベクトルの長さを破片数に対し線形にとる事が出来るので様々な分類法を使用する事が出来る。

類似度や多層パーセプトロン等により、より良い結果を得る事が出来た。また正規化をした葉に対する分類と正規化しなかった葉に対する分類結果の比較により正規化の有効性を示す事も出来た。

参考文献

- [1] S. Abbasi, F. Mokhtarian, and J. Kittler. Reliable classification of chrysanthemum leaves through curvature scale space. In *Proc. International Conference on Scale-Space Theory in Computer Vision*, pages 284–295, Utrecht, The Netherlands, 1997.
- [2] C. Im, H. Nishida, and T.L. Kunii. A hierarchical method of recognizing plant species by leaf shapes. In *Proc. of MVA'98 IAPR Workshop on Machine Vision Applications*, pages 158–161, Makuhari, Japan, 1998.
- [3] C. Im, H. Nishida, and T.L. Kunii. Recognizing plant species by leaf shapes - a case study of the acer family. In *Proc. of 14th ICPR*, pages 1171–1173, Brisbane, Australia, 1998.
- [4] C. Im, H. Nishida, and T.L. Kunii. Recognizing plant species by normalized leaf shapes. In *Proc. of Vision Interface 99*, pages 397–404, Quebec, Canada, 1999.
- [5] Y. Nakamura and T. Yoshida. Learning two dimensional shapes using wavelet local extrema. In *Proc. of 12th ICPR*, pages 48–52, 1994.
- [6] T. Tsukioka. *Coding boundary shapes of leaves based on multiresolution*. February 1994.