



Osaka Gakuin University Repository

Title	根菜の画像解析のための形状記述についての研究ノート －フーリエ記述子による形状記述－ A Study Note on Shape Descriptions for Image Analysis of Root Vegetables － Fourier Descriptors －
Author(s)	淡 誠一郎 (Seiichiro Dan)
Citation	大阪学院大学 人文自然論叢 (THE BULLETIN OF THE CULTURAL AND NATURAL SCIENCES IN OSAKA GAKUIN UNIVERSITY), 79-80 : 55-67
Issue Date	2020.03.31
Resource Type	Note/ 研究ノート
Resource Version	
URL	
Right	
Additional Information	

根菜の画像解析のための形状記述についての研究ノート － フーリエ記述子による形状記述 －

淡 誠一郎

A Study Note on Shape Descriptions for Image Analysis of Root Vegetables － Fourier Descriptors －

Seiichiro Dan

概 要

果物や野菜の形状は収穫・加工の効率に大きくかわる。形状は生育環境や土壌にも左右されるが、品種独自の形質はやはり遺伝的要因に依るところが大きいと考えられる。例えば、トマトは複数の形質遺伝子の組み合わせでその果実の形が決まることがわかっている。ダイコンなどの根菜も同様に遺伝子が根形にかかわると予想されており、その解明が期待される。この目的のため、筆者を含む研究グループでは、ダイコンの根形を特徴づける複数の形質とその量的な測定方法に取り組んできた^[1,2]。

遺伝子と根形の関係性を明らかにするには、まず現実の個体の形状を的確に、また解析に適した方法で記述する必要がある。形状記述方法の候補は複数あるが、本稿では、動植物の形態学的解析^[3,4]、病理診断^[5,6]、工業製品のデザイン^[7,8]など幅広く応用例の見られるフーリエ記述子を取り上げ、根菜の形状記述を試みた結果について報告する。

1. 対象画像と前処理

図1に本研究で対象とする実画像の一例と記述の対象となるシルエット画像を示す。ダイコンの形状は実際には3次元的存在であるが、おおむねその軸に関して回転対称であることが多い。本研究でいうダイコンの形状とは、図1の左の写真のように、ダイコンを平面に接地させて撮影した写真を入力とした場合の輪郭形状である。実画像には図1の例のように個体識別のためのプレートやサイズ指標が含まれることもあるし、葉の一部が含まれて

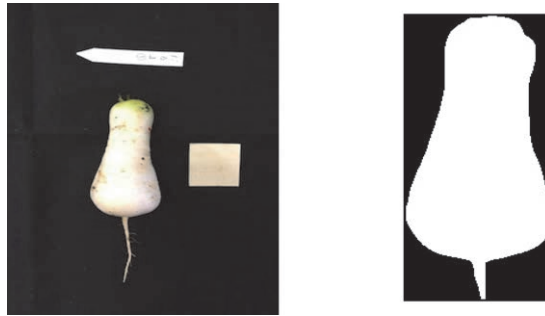


図1 入力画像と記述対象のシルエット画像

いたりもする。

実画像から記述対象となるシルエット輪郭データをえるための前処理について簡単に説明する。前処理の手順はつぎの通りである。

- (1) ダイコン主根部のセグメンテーションと2値画像化
- (2) 膨張収縮・平滑化によるシルエット形状整形
- (3) 輪郭点列データの抽出

以下に手順の概要を説明する。

(1) ダイコン主根部のセグメンテーションと2値画像化

領域抽出アルゴリズム GrabCut を用いて、自動または少しのヒント情報を与えることで先の実画像からシルエット画像が得られるツールを作成した。プログラム開発に用いた言語は python である。GrabCut の抽出結果は濃淡画像であるので、これをしきい値処理により2値化してシルエット画像をえる。一般に濃淡画像から2値画像を得る場合、そのしきい値設定が問題となるが、GrabCut 自体がすでに濃淡差をひとつの基準として前景と背景を分離しているので、あらためてしきい値処理する必要はなく、前景を255、背景を0とすればよい。図2の左→中央は自動セグメンテーションの実例である。

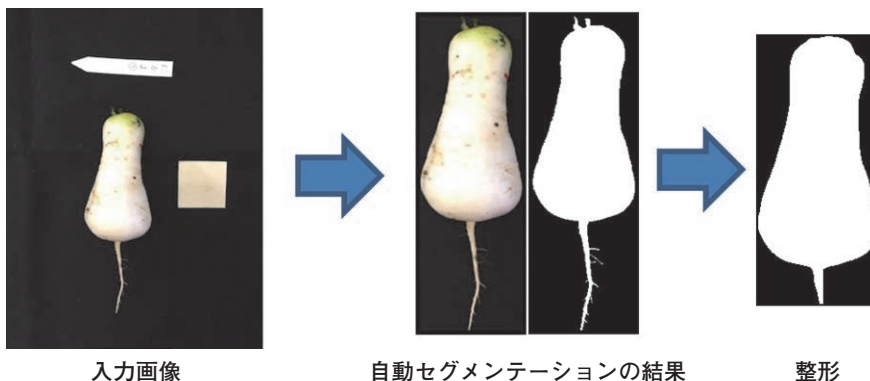


図2 前処理の流れ

(2) 膨張収縮・平滑化によるシルエット形状整形

図2でもわかるように、実画像をしきい値処理して得られるシルエット画像はヒゲ根などにより必要以上に複雑な凹凸や孔が生じるものである。さらに、図2の例には見られないが個体の色や汚れ、傷による凹凸も生じる。これらは主要部の形状記述においては雑音となるので、除去しておきたい。

まず、シルエット画像中の最大白連結成分の最外輪郭を抽出し、その内部を塗りつぶすことで内部の孔を除去する。つぎに、closing（収縮→膨張）と opening（膨張→収縮）により、ヒゲを除去し、最後にガウシアンフィルタによる平滑化で輪郭形状の複雑な凹凸を除去する。図2の右の画像が実際の整形後の画像であり、これを対象個体のシルエット、すなわち形状と考える。

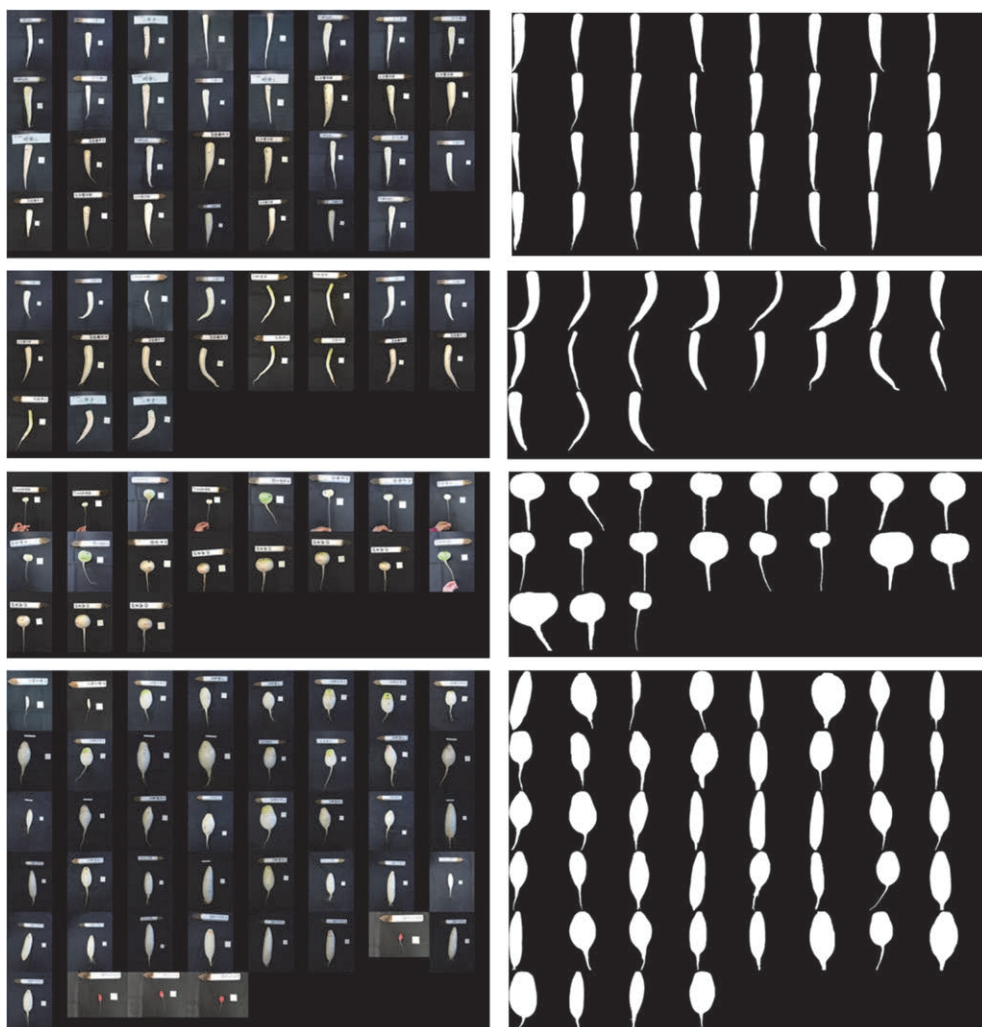


図3 入力画像とえられたシルエット画像の例
(原画像は神戸大学大学院農学研究科附属食資源教育研究センター提供)

さまざまな品種のダイコンについて、シルエット抽出を試み、いずれにおいても主要部の形状特徴が保存され、ひげ根やそれによる孔が除去された結果がえられることが確認できた。

その一部を図3に示す。一部バッチ処理によるシルエット抽出で失敗した個体について再処理をかけているため、入力画像の並び順序とシルエット画像のそれとは一致していない。

なお、この研究で用いているダイコンの画像データは、神戸大学大学院農学研究科附属食資源教育研究センターよりご提供いただいたものである。ここに記して感謝の意を表する。

(3) 輪郭点列データの抽出

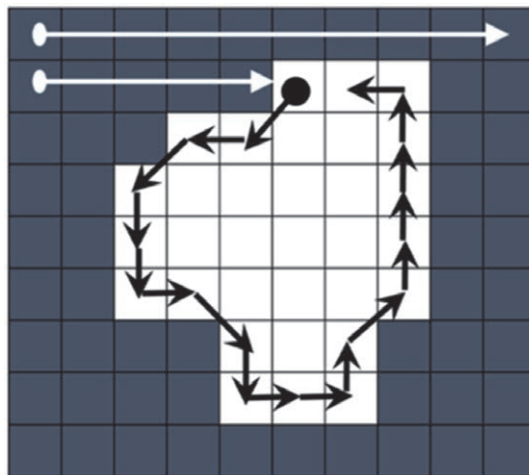


図4 輪郭追跡

ここまでの処理により、画像内には孔のない白連結成分が一つだけ含まれているはずであるので、単連結用の輪郭線追跡アルゴリズムにより輪郭線データを得ることができる。

例えば、図4の図形であれば、輪郭データは次のようなリスト構造の配列で表現される。

$[[5,1], [4,2], [3,2], [2,3], \dots, [7,2], [7,1], [6,1]]$

この記述は他の形状記述を生成するための1次データとなるものであり、対象図形の個々のシルエットを記述するもっとも正確な記述法である。この記述は品種の特徴にノイズや個体変動が加わったものであるので、いかにしてこの記述から品種の共通性を示す特徴と個体の個性である特徴を分離抽出するかが問題となる。

2. シルエット形状の記述

上述のように、本研究では2次元的なシルエットを形状と考えている。シルエットはその輪郭線と同一視できるので、ここでは輪郭線の記述方法に絞って考えることにする。上で述べた前処理により一応輪郭線情報は記述されているわけであるが、単なる座標の羅列に過ぎないのでそのままでは解析や識別には利用できない。

輪郭線の記述方法としては、

- チェインコード (方向差分チェインコード)
- 極座標表現
- フーリエ記述子
- ベジエ曲線に代表されるパラメトリック曲線

などが考えられる。

チェインコードは線図形の一般的な表現方法である。端点もしくは閉曲線上に取った任意の点を開始点とし、隣接する次の点が8方向のうちのどの方向にあるかを記述する。この記述法はたしかにシルエットを正確に記述でき、座標そのものの記述と比べてデータ圧縮できるが、少数のパラメータで近似図形を生成したり、図形の類似性を判定したりする手がかりにはならず、本研究の目的には合わない。

極座標表現は図形内部に原点を取り、原点から見た輪郭点の距離を角度の関数とみなす表現方法である。重心を原点に設定し図形の長さや方向を正規化するなどの方法で図形同士の類似度を比較することができるが、輪郭が入り組んでいると輪郭点の距離が角度の関数とならないケースが発生する。典型的なダイコンやカブの形であれば問題ないと思われるが、湾曲の大きい個体や、ひょうたん型等で支障がでる。

フーリエ記述子は、平面上の連続曲線を、端点から曲線に沿ってはかった道のりの長さ s の関数として記述し、その関数をフーリエ級数展開した際の係数を形状の記述ととらえる。フーリエ級数展開は連続無限の周期関数を前提とした数学的操作であり、フーリエ記述子は、曲線の何をどう周期関数とみなすかによっていくつかのパリエーションが存在する。

ベジエ曲線およびそれを発展させた B スプライン、有理ベジエ曲線、NURBUS 曲線などのパラメトリック曲線は、いずれを用いても任意の精度でシルエット形状を近似できるが、データ解析や識別が目的であれば、表現能力が必要十分な範囲で、次元数は低いほど望ましい。パラメトリック曲線の中では、ベジエ曲線が最も有望であろう。

本研究では、以上の記述方法の中でフーリエ記述子を取り上げ、実際のダイコンの画像を用いて、各種フーリエ記述子のうち、どれが有用であるか、係数の次数を途中で打ち切った場合にどの程度の近似画像が得られるかについて調査する。

3. フーリエ記述子によるダイコンのシルエット記述

先にも述べたが、フーリエ記述子にはいくつかのバリエーションが存在する。本研究では、実際に

- Z 型フーリエ記述子
- 楕円フーリエ記述子
- G 型フーリエ記述子
- P 型フーリエ記述子

を実装して曲線の記述と近似を試みた。

① Z 型フーリエ記述子

閉曲線上に等間隔に N 個の標本点 P_0, P_1, \dots, P_{N-1} を取って、閉曲線を等辺多角形で近似する。各辺の方向ベクトル $\overrightarrow{P_i P_{i+1}}$ が基準辺の方向ベクトル $\overrightarrow{P_0 P_1}$ となす角 θ_i を偏角、

$$\Phi_i = \theta_i - \frac{2\pi(i \bmod N)}{N} \quad \dots (1)$$

を正規化偏角関数とよぶ。

$i > N$ について、 $P_i = P_{i \bmod N}$ であると考え、 $\Phi_i: i = 0, 1, \dots$ は周期 N ごとに 0 に帰する周期関数となり、

$$\Phi_i = \sum_{k=-\frac{N}{2}+1}^{\frac{N}{2}} c_k \exp\left(j \frac{2\pi k i}{N}\right) \quad \dots (2)$$

と離散フーリエ変換できる。ここで、

$$c_k = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} \Phi_i \exp\left(-j \frac{2\pi k i}{N}\right) \quad \dots (3)$$

である。

始点 (x_0, y_0) とフーリエ記述子 c_k がわかっていれば、次の計算式により、近似多角形の頂点座標 $(x_i, y_i): i = 0, 1, \dots, N-1$ を求めることができる。

$$\left. \begin{aligned} \theta_i &= \Phi_i + \frac{2\pi(i \bmod N)}{N} \\ x_i &= x_0 + \delta \sum_{k=0}^i \cos \theta_k \\ y_i &= y_0 + \delta \sum_{k=0}^i \sin \theta_k \end{aligned} \right\} \quad \dots (4)$$

ここで、 δ は 1 辺の長さである。

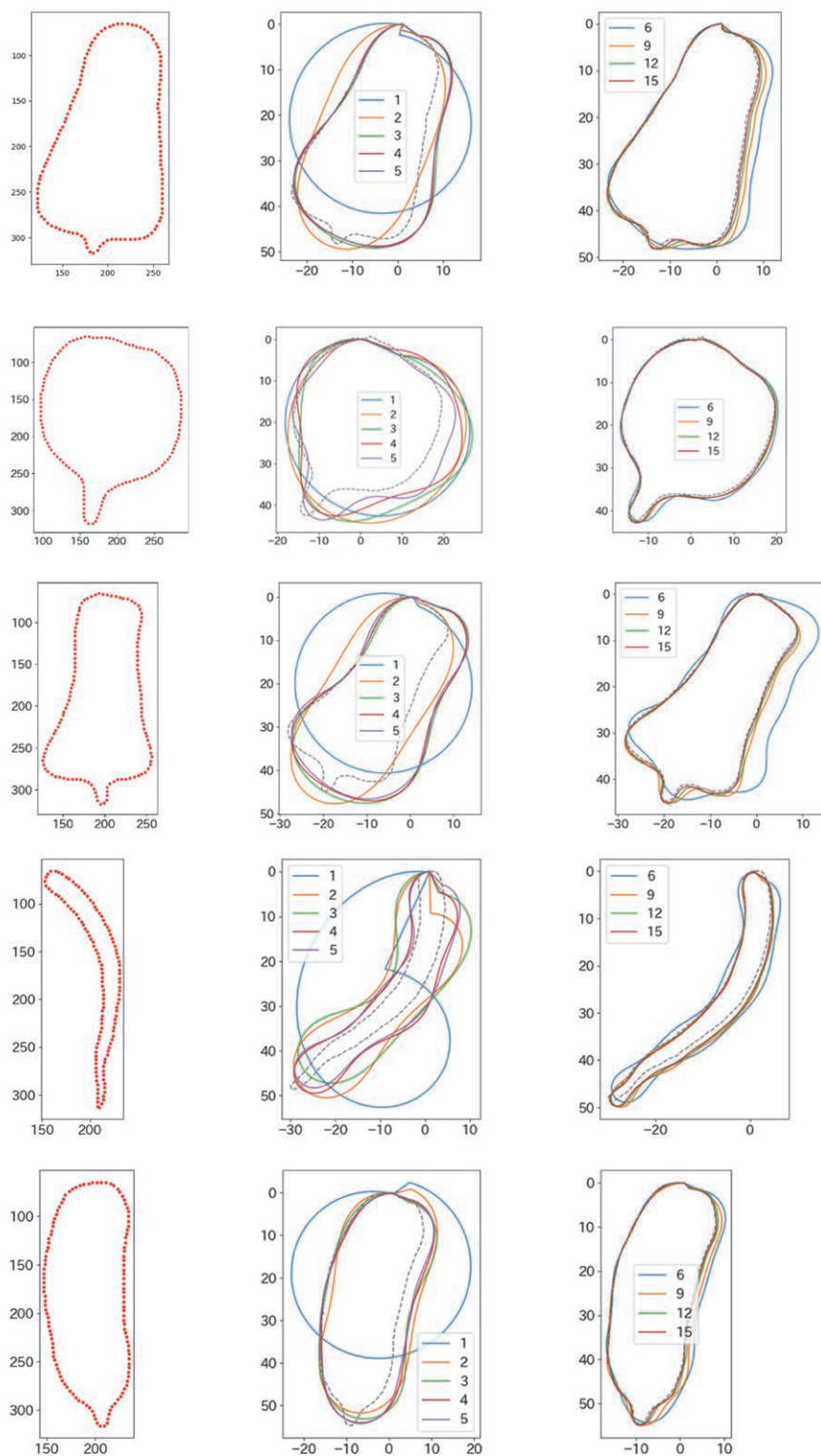


図5 Z型フーリエ記述子による復元形状

図5に実際のダイコンのシルエット画像をZ型フーリエ記述子を得て、 $0 \sim \pm n$ 次 ($n = 1 \sim 5, 6, 9, 12, 15$) の記述子から形状復元した結果を示す。なお、処理対象の入力のシルエット画像は、主要部のみが、若干のマージンを含めて高さが256画素となるよう正規化されるようプログラムされている。輪郭点のサンプル数は128とした。比較のため、これ以降の実験も同じ条件で行う。

復元結果からわかるように、Z型フーリエ記述子から復元される近似図形は最後の頂点と始点との間にギャップが生まれることが多い。このギャップはZ型フーリエ記述子が偏角そのものを変換対象としており、始点から計算で求められた角度と辺の長さから順次形状復元していく際に、失われた高周波成分による角度の誤差と量子化誤差の両方が蓄積していく結果であると考えられる。

② 楕円フーリエ記述子

曲線上に任意の点Sを定め、Sから一定速度で曲線上を移動しながら周回する動点Pを

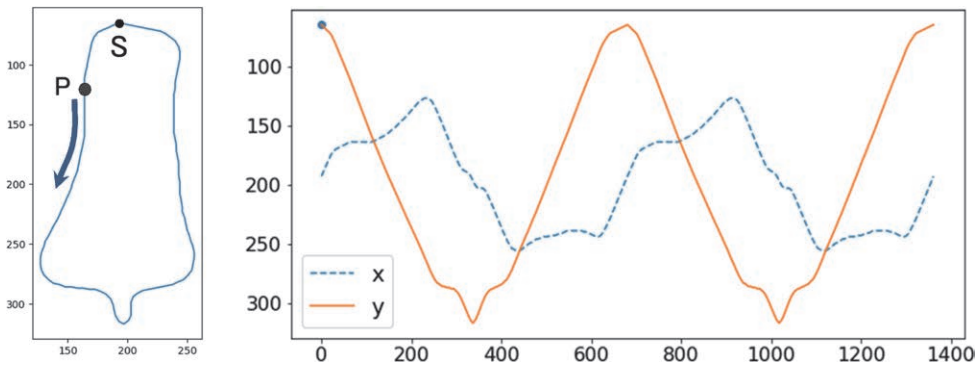


図6 閉曲線上の x 座標と y 座標の変化

考えると、点Pの x 座標、 y 座標はそれぞれ独立した周期関数とみなせる (図6)。

このそれぞれを次式のように離散フーリエ変換することで得られる三角関数の係数が楕円フーリエ記述子である。

$$\begin{aligned} x_i &= \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{N-1} \left(a_k \cos\left(\frac{2\pi ki}{N}\right) + b_k \sin\left(\frac{2\pi ki}{N}\right) \right) \\ y_i &= \frac{c_0}{2} + \sum_{k=1}^{N-1} \left(c_k \cos\left(\frac{2\pi ki}{N}\right) + d_k \sin\left(\frac{2\pi ki}{N}\right) \right) \end{aligned} \quad \dots (5)$$

ここで、

$$\begin{aligned} a_k &= \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} x_i \cos\left(\frac{2\pi ki}{N}\right), & b_k &= \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} x_i \sin\left(\frac{2\pi ki}{N}\right) \\ c_k &= \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} y_i \cos\left(\frac{2\pi ki}{N}\right), & d_k &= \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} y_i \sin\left(\frac{2\pi ki}{N}\right) \end{aligned} \quad \dots(6)$$

であり, $a_k, b_k, c_k, d_k: k=0,1,\dots,N-1$ が楕円フーリエ記述子である.

楕円フーリエ記述子は理論に複素数概念が含まれないので直感的に理解しやすいが, 回転によって関数の波形が x_i, y_i ともに変形するので, 素のままの記述子は回転不変性を持たない. このため, 主成分分析などに利用する際には a_1, b_1, c_1, d_1 の値をもとに他の次数の記述子を標準化してやらねばならないという手間がある. a_1, b_1, c_1, d_1 の値は近似楕円を規定する量であり, この標準化操作は, 近似楕円の軸を座標軸とするような座標変換に相当する.

図7に図5と同じ対象画像に対応する, 楕円フーリエ記述子からの形状復元結果を示す.

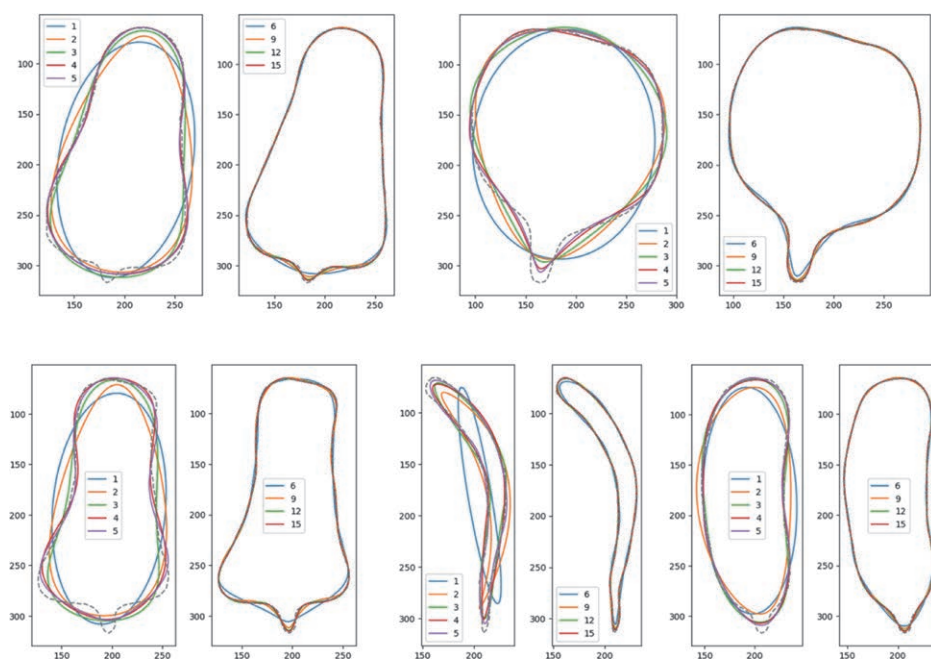


図7 楕円フーリエ記述子による復元形状

③ G型フーリエ記述子

平面座標 (x,y) と複素数 $z = x + jy$ を同一視し, 輪郭線上に等間隔に取った N 個の標本点を N 個の複素数 $z_i: i=0,1,\dots,N-1$ に対応させる. ただし, $z_i: i=0,1,\dots,N-1$ の並びは輪郭線をたどった時の標本点の出現順であり, 先頭の標本点と末尾の標本点も, 他の標本点間と同じ間隔だけ離れて隣接してなければならない.

いま, $z_i; i = 0, 1, \dots$ を周期 N で 1 周する周期関数とみなし, N は閉曲線を近似するのに十分な数であるものとすれば,

$$z_i = \sum_{k=-\frac{N}{2}+1}^{\frac{N}{2}} c_k \exp\left(\frac{j2\pi ki}{N}\right) \quad \cdots (7)$$

と離散フーリエ変換できる。ここで,

$$c_k = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} z_i \exp\left(-j\frac{2\pi ki}{N}\right) \quad \cdots (8)$$

であり, この係数 c_k を **G 型フーリエ記述子** とよぶ。

図 8 に G 型フーリエ記述子からの形状復元結果を示す。先の楕円フーリエ記述子は G 型フーリエ記述子の実部と虚部を別々に扱ったものと考えられ, 両者は数学的に等価である。復元結果もその通りになっており, 図 7 と図 8 の結果はきれいに一致している。

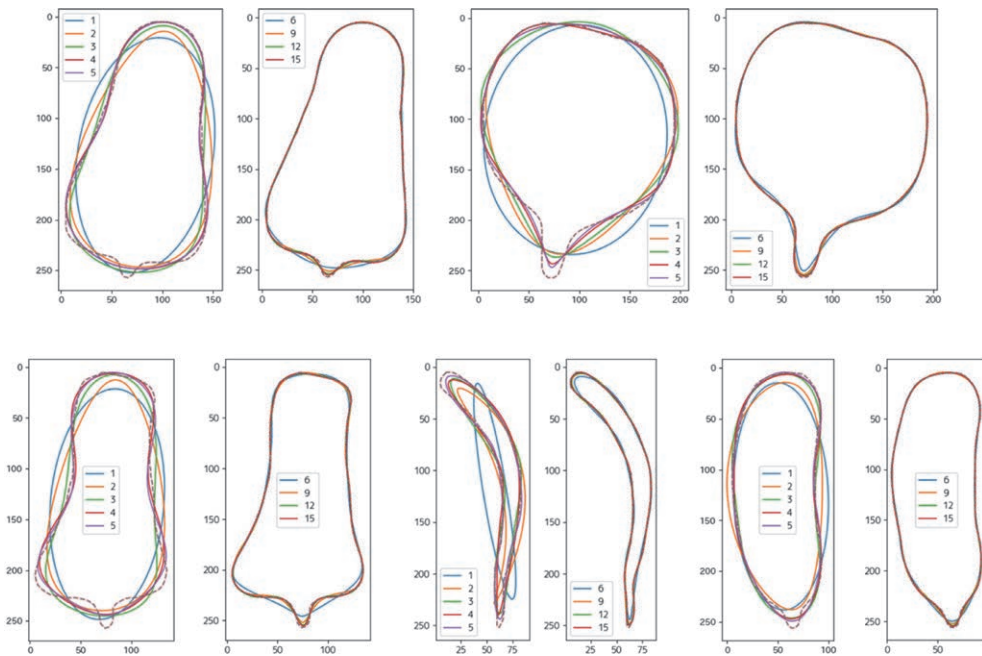


図 8 G 型フーリエ記述子による復元形状

楕円フーリエ記述子が回転に対して不変性を持たないという点は, G 型フーリエ記述子の実部と虚部を別々に見た場合には不変性を持たないということに相当するわけであるが, G 型フーリエ記述子の絶対値は回転不変であり, 回転分だけ記述子の位相が回転することになる。

④ P 型フーリエ記述子

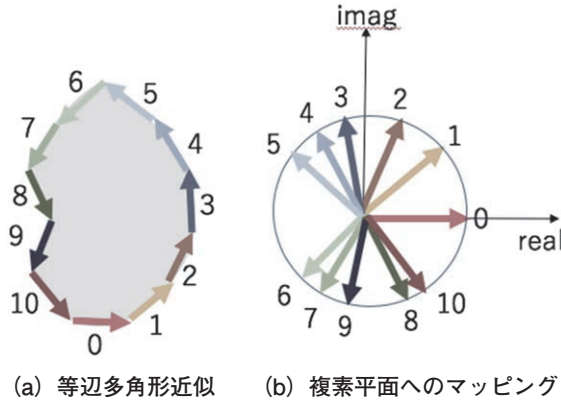


図9 P型フーリエ記述子

G 型で行なったのと同様に，輪郭線上に等間隔に取った N 個の標本点 $P_i = (x_i, y_i): i = 0, 1, \dots, N-1$ に複素平面上の点 $z_i = x_i + jy_i$ を対応づける（図9）．G 型では z_i を周期関数ととらえたが，P 型では，ベクトル $\overrightarrow{P_i P_{i+1}}$ と x 軸（実数軸）のなす角 θ_i の列を考える．この角をベクトル $\overrightarrow{P_i P_{i+1}}$ の偏角とよぶ．いま， $w_i = \cos\theta_i + j\sin\theta_i$ と定義すると，偏角 θ_i は複素平面上の複素数 w_i の偏角に一致する．

$w_i: i = 0, 1, \dots$ は周期 N の複素周期関数とみなすことができるので，

$$w_i = \sum_{k=-\frac{N}{2}+1}^{\frac{N}{2}} W_k \exp\left(j \frac{2\pi k i}{N}\right) \quad \cdots (9)$$

と離散フーリエ変換できる．ここで，

$$W_k = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} w_i \exp\left(-j \frac{2\pi k i}{N}\right) \quad \cdots (10)$$

である．この， W_k を **P 型フーリエ記述子** と呼ぶ．

等辺 N 角形の一つの辺の長さを δ とすれば，

$$w_i = \cos\theta_i + j\sin\theta_i = \frac{x_{i+1} - x_i}{\delta} + j \frac{y_{i+1} - y_i}{\delta} = \frac{z_{i+1} - z_i}{\delta} \quad \cdots (11)$$

であり， $w_i: i = 0, 1, \dots, n$ と始点 z_0 が与えられたならば， $z_n = z_0 + \delta \sum_{i=0}^n w_i$ という計算式で順次図形の頂点を求めていくことができ，形状復元ができる．

図10に P 型フーリエ記述子からの形状復元結果を示す．

P 型フーリエ記述子は基準方向に対する偏角をフーリエ変換するという点では Z 型と同

じであるが、偏角そのものではなく、偏角に対応する複素平面の単位円上の点の座標を変換対象にする。このため、Z型のような正規化の操作が不要であり、Z型とは違って低い次数であっても復元形状はきちんと閉じる。さらに、本稿では取り上げないが、P型フーリエ記述子は閉曲線だけでなく、開曲線にも適用可能である。

以上、各種フーリエ記述子を実装してダイコンのシルエットに適用してみたわけであるが、どのフーリエ記述子でも12~15次程度までの記述子を用いれば十分個体の形状は表現できることがわかった。品種の特定はそれ以下の次数でおそらく十分であり、大まかな品種識別には6~7次、詳細な識別でも高々10次程度で可能ではないかと推測される。

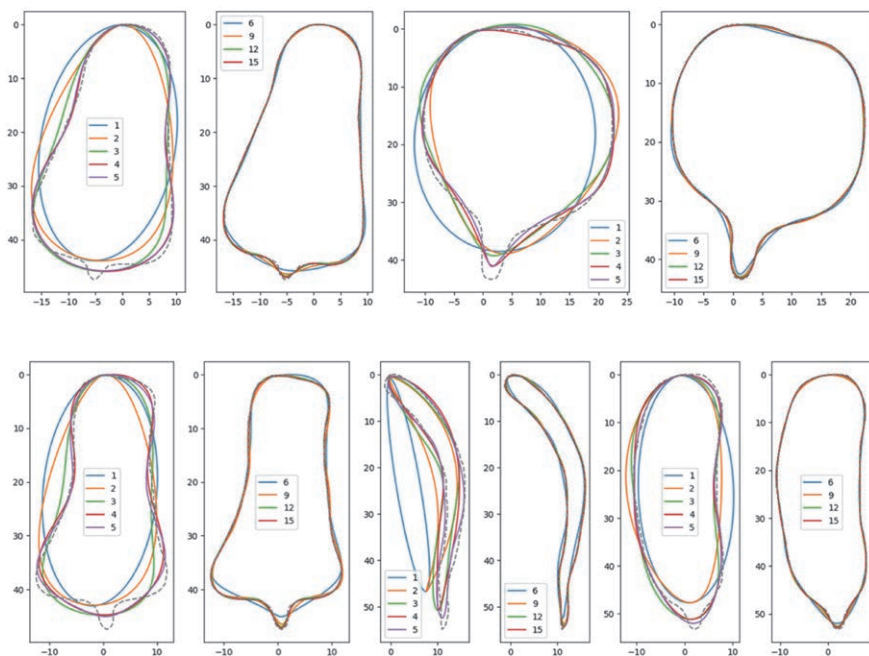


図10 P型フーリエ記述子による復元形状

参考文献

- [1] 淡 裕美子, 淡 誠一郎, 吉田康子: “画像解析を用いたダイコンの根形を特徴づける形質の選定とその評価方法の確立”, 育種学研究 19, 別2, p.70 (2017).
- [2] 淡 裕美子, 淡 誠一郎, 吉田康子: “画像解析を用いたダイコンの根形を特徴付ける形質による多様性評価”, 育種学研究 21, 別1, p.101 (2019).
- [3] 鄭澤宇, 岩田洋佳, 二宮正士, 田村義保: “P形フーリエ記述子に基づくハナハス花弁の部分形状特徴の定量的評価”, 育種学研究 7, 3, pp.133-142 (2005).
- [4] 古田尚也, 二宮正士, 高橋信夫, 大森 宏, 鷗飼保雄: “ダイズ小葉形の楕円フーリエ記述子に基づく主成分スコアによる定量的評価”, Breeding science 45, 3, pp.315-320

(1995).

- [5] 川村陽子：“フーリエ記述子を用いた脳梁形状の性差の解析”，岐阜大学工学部　博士学位論文（2006）.
- [6] 中嶋典子，石井晃太郎，岩田洋佳，大鹿哲郎：“楕円フーリエ記述子に基づく水晶体形状発達の定量的解析”，臨床眼科 65, 7, pp.137-1142 (2011).
- [7] 小林智美，篠田一馬，石川智治，長谷川まどか，加藤茂夫：“楕円フーリエ記述子を用いた衣服の輪郭形状の分類に関する一検討”，映像情報メディア学会技術報告39, 31, pp.5-8 (2015).
- [8] 小森政嗣，川村　智，横山卓未，森下佳昌：“楕円フーリエ記述子を用いたボディソープボトル形状の分析と評価”，日本包装学会誌 21, 6, pp.479-491 (2012).