

作物器官の形の重要性

060310391

0560565

バイオメトリックス 第2回 生物のかたちを計る

2014/4/24 8:40-10:10

@1号館-第4講義室

- 直接商品となる器官

消費者の嗜好

流通・加工特性

- 直接商品にならない器官(葉形, 根形, 草型など)

栽培し易さ

光合成能力

Q. 例えば、コンビニエンスストアのおでんに適したダイコンの形はどうなものでしょうか？ 考えてみましょう。

植物形態情報の評価



- 形
- 色
- 模様
- テクスチャ



もっぱら定性的に
評価されてきた

植物の形態情報

例) 丸い形のダイコン
青い色のパンジー

どのくらい丸いの？どのくらい青いの？

→ 定量的評価

本日のキーワード

- 定量的評価と定性的評価
- フーリエ記述子
- フーリエ級数展開
- 主成分分析
- (アソシエーション解析)
- (ゲノミックセレクション)

生物の形の計測法

- 様々な方法が存在する

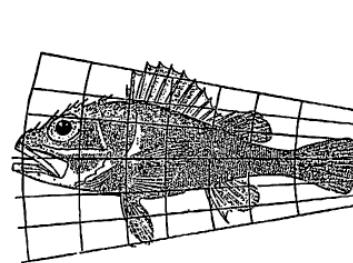


Fig. 523. *Scorpaena* sp.

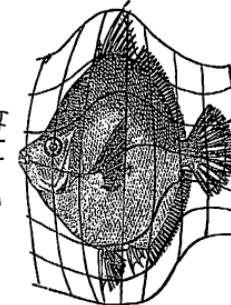


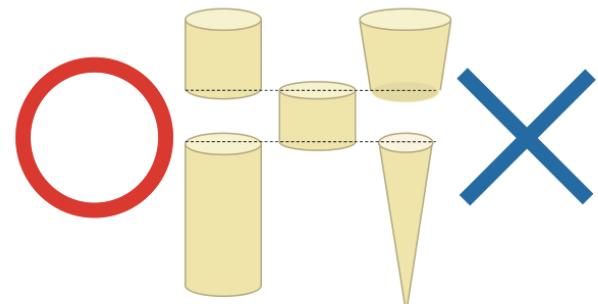
Fig. 524. *Antigonia capros*.

"On Growth and Form" D'Arcy Thompson

例えば、生物学的標識点(ランドマーク)をもとに計測

作物の形の重要性

コンビニのおでんの具に適したダイコンとは?



消費者の嗜好、輸送・加工の容易さに影響
→ 品種改良の重要な対象です

形の計測と、その遺伝解析による遺伝構造の解明が重要

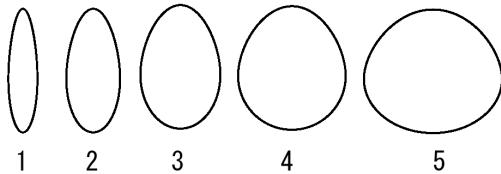
作物の器官は標識点が少ない…



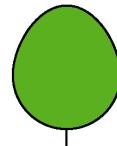
→ 輪郭形状そのものを
直接計測する手法が必要

定量的な形の計り方

スコアリング



幾何的特徴



長さの比 (縦横比など)

面積／(周囲長)²
円の場合: $\pi r^2 / (2\pi r)^2 = 1 / 2\pi$

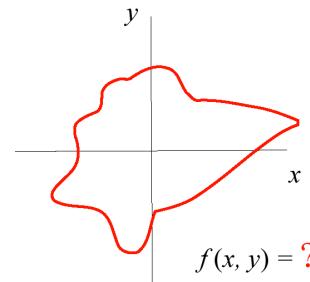
角度 (頂部や基部の角度など)



- 事前の定義が必要
- 部分的な特徴の評価
- 正確性、再現性に問題

11

輪郭の数学的な記述



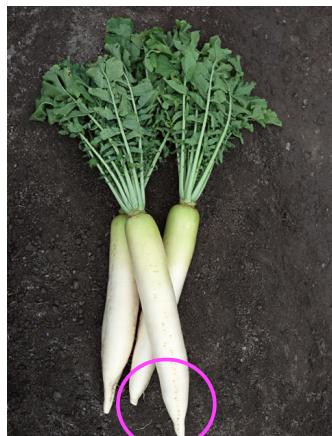
- フーリエ記述子
- モーメント不変量 (Hu 1962)
- eigenshape analysis
(Lohman 1983)

など

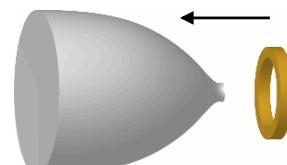
輪郭そのものを数学的に記述

13

例えば、ダイコンの育種では...



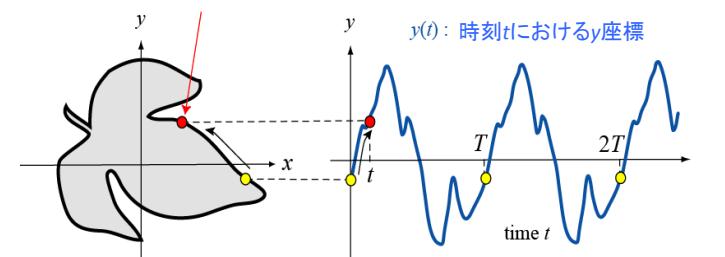
- 先端部の太さ(とまりの度合い)が非常に重要
- どう評価すればよいのでしょうか？



12

フーリエ記述子

輪郭を一定速度でたどる



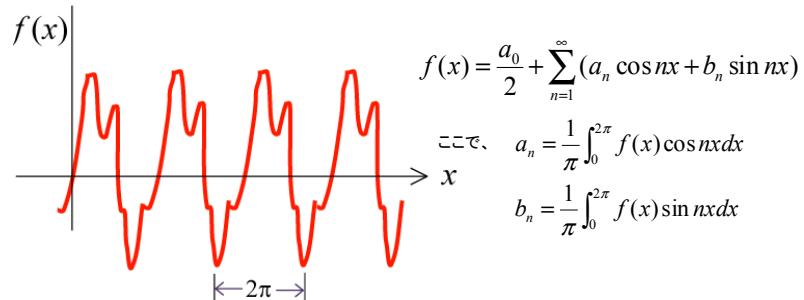
輪郭の形を波の形としてとらえ、波形関数のフーリエ級数展開により、形を数学的に記述する方法

$$y(t) = \sum_{n=0}^N \left(c_n \cos \frac{2n\pi t}{T} + d_n \sin \frac{2n\pi t}{T} \right)$$

14

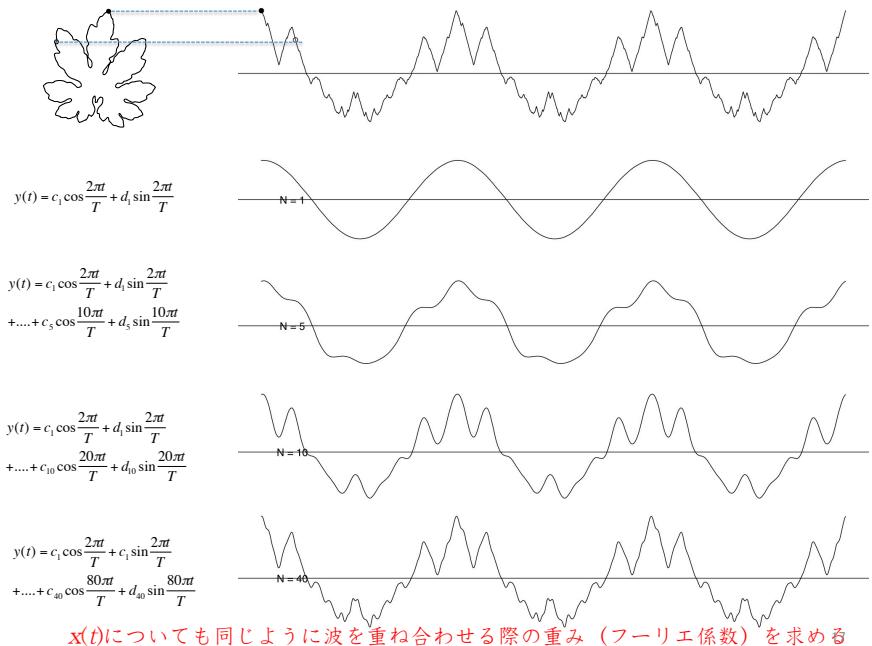
フーリエ級数展開

性質のよくわからない関数を性質のよく知れた三角関数 $\sin nx, \cos nx$ ($n = 0, 1, 2, \dots$) の重ね合わせ（線形結合）として表す方法

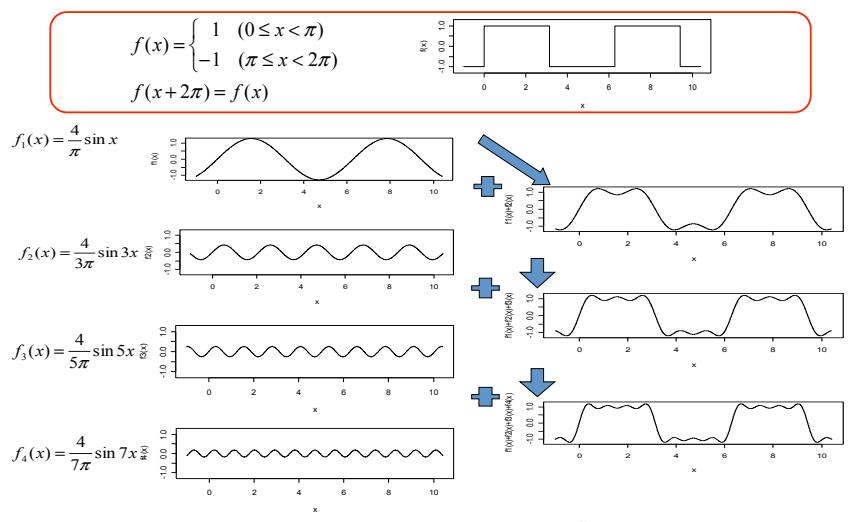


→ 「周期 2π の任意の周期関数はフーリエ級数に展開できる」(J.B.J. Fourier, 1768-1830)

15



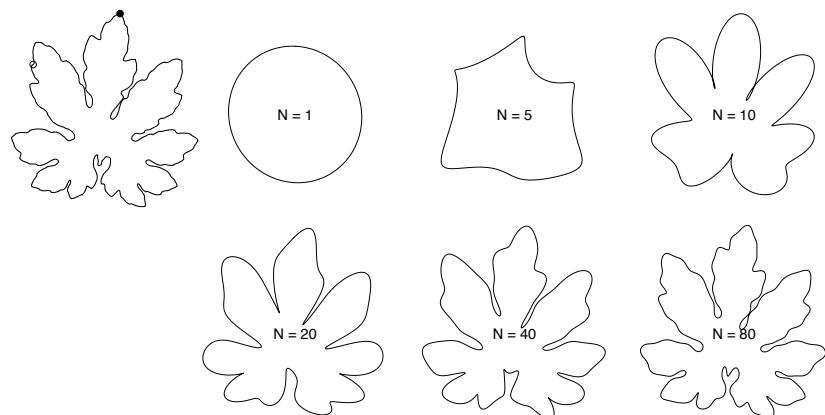
フーリエ級数展開とは、様々な波長の波の重ね合わせ方を求めるこ



$$f(x) = \frac{4}{\pi} \sin x + \frac{4}{3\pi} \sin 3x + \frac{4}{5\pi} \sin 5x + \frac{4}{7\pi} \sin 7x + \dots = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{4}{(2k-1)\pi} \sin((2k-1)x)$$

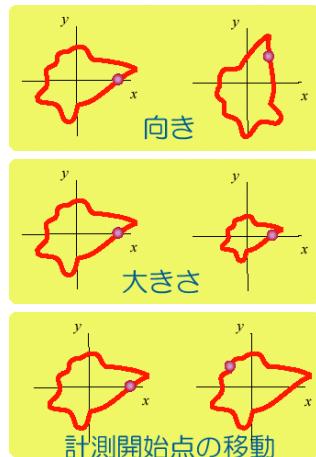
16

橿円フーリエ記述子による近似



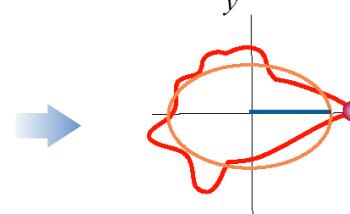
N を大きくすればするほど（より周期の短い波まで足し合わせれば合わせるほど）近似はよくなっていく（ただし、あまり大きくすると不要な変動（ノイズ）を拾う）¹⁸

形の情報だけを抽出する: 向き、大きさ、移動に対する標準化



$$x(t) = \sum_{n=1}^N (a_n \cos 2n\pi t/T + b_n \sin 2n\pi t/T)$$

$$y(t) = \sum_{n=1}^N (c_n \cos 2n\pi t/T + d_n \sin 2n\pi t/T)$$



$N=1$ のとき 楕円 になることを利用して (第1調和橤円)

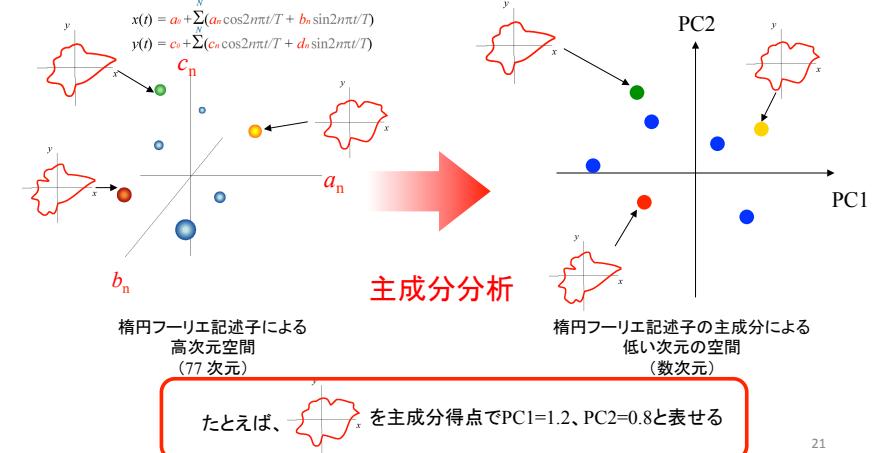
楕円の半長軸を基準に
サイズ、向き、計測開始点
について 標準化

この方法で標準化すると3変数が定数になる ($a_1=1, b_1=0, c_1=0$)

多次元情報の縮約: 主成分分析

高次元情報である楕円フーリエ記述子は、そのままでは理解が困難

より低次元で、解釈しやすい情報に縮約する



21

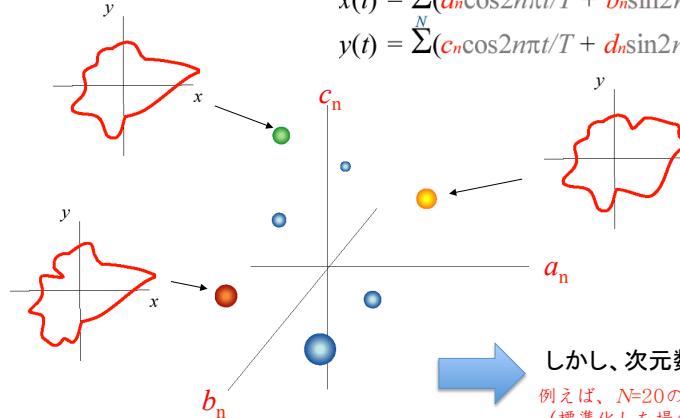
楕円フーリエ記述子による形の記述

標準化された楕円フーリエ記述子

ひとつの輪郭を、多次元空間中のひとつの点として表現

$$x(t) = \sum_{n=1}^N (a_n \cos 2n\pi t/T + b_n \sin 2n\pi t/T)$$

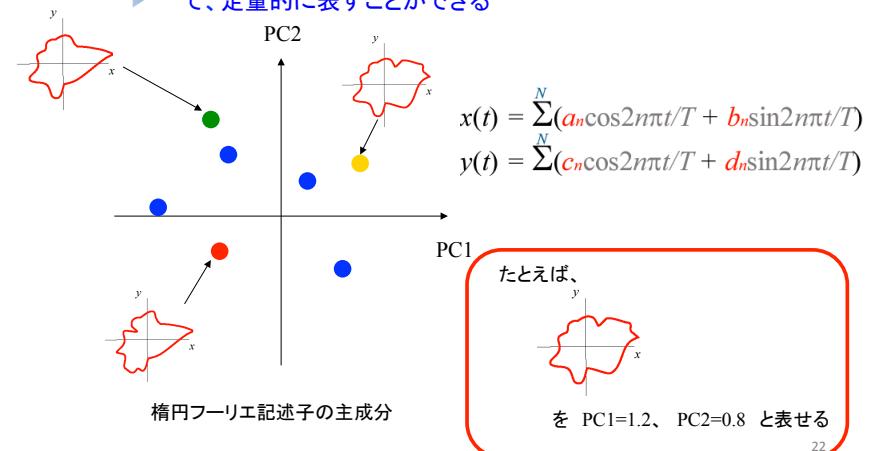
$$y(t) = \sum_{n=1}^N (c_n \cos 2n\pi t/T + d_n \sin 2n\pi t/T)$$



結局どういうこと?

楕円フーリエ記述子 + 標準化 + 主成分分析

対象物の形の変異を、低次元空間に散布される点の散らばりとして、定量的に表すことができる



22

ダイコンの根形変異

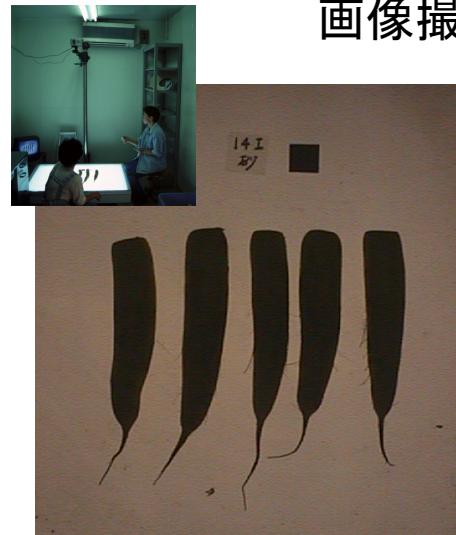


Pictured by Dr. Satoshi Niikura

様々な根形をもったダイコンの品種・系統が、その品種改良の歴史の中で、消費者の嗜好や加工特性に合わせて、作出されてきた

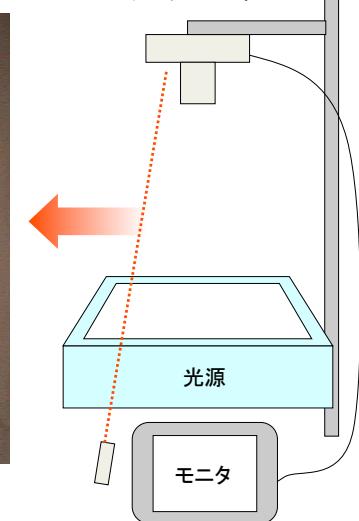
23

画像撮影



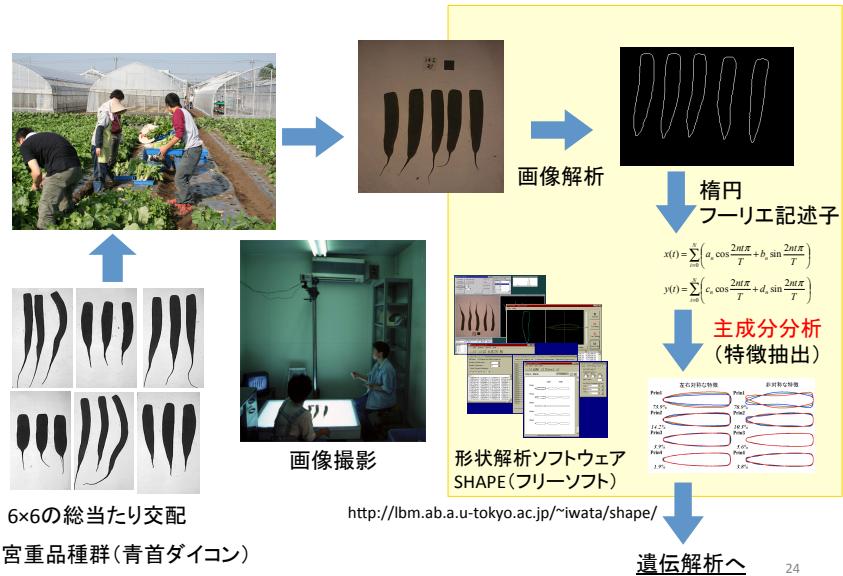
ダイコンの解析では巨大な光源を特注しました

デジタルカメラ



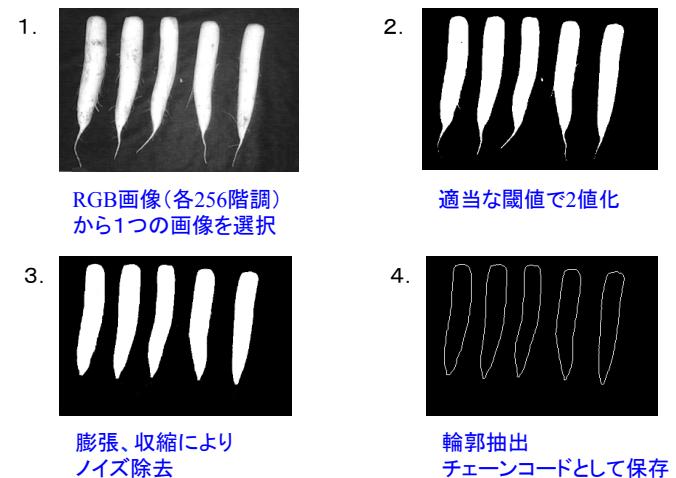
25

ダイコンの根形変異の遺伝解析



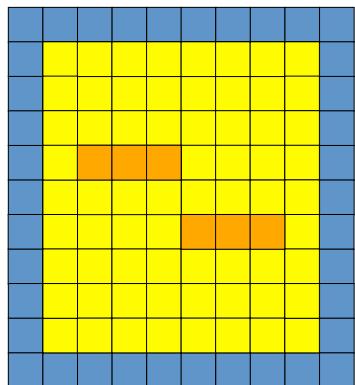
24

画像解析

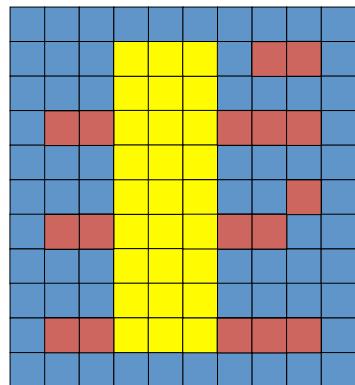


26

膨張・収縮によるノイズ除去



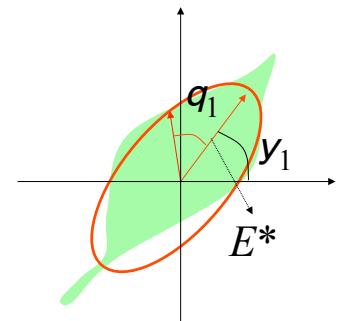
膨張→収縮による虫食い埋め



収縮→膨張によるヒゲとり

27

第1楕円に基づく標準化



$$\theta_1 = \frac{1}{2} \arctan \left[\frac{2(a_1 b_1 + c_1 d_1)}{a_1^2 + c_1^2 - b_1^2 - d_1^2} \right]$$

$$\begin{bmatrix} a_1^* & c_1^* \\ b_1^* & d_1^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & \sin \theta_1 \\ -\sin \theta_1 & \cos \theta_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 & c_1 \\ b_1 & d_1 \end{bmatrix}$$

$$\psi_1 = \arctan \frac{c_1^*}{a_1^*}$$

$$E^* = \sqrt{a_1^{*2} + c_1^{*2}}$$

$$\begin{bmatrix} a_n^{**} & c_n^{**} \\ b_n^{**} & d_n^{**} \end{bmatrix} = \frac{1}{E^*} \begin{bmatrix} \cos \psi_1 & \sin \psi_1 \\ -\sin \psi_1 & \cos \psi_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_n & c_n \\ b_n & d_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos n\theta_1 & \sin n\theta_1 \\ -\sin n\theta_1 & \cos n\theta_1 \end{bmatrix}$$

ヤハリ、ナガメルダケ、ナガメルダケ…

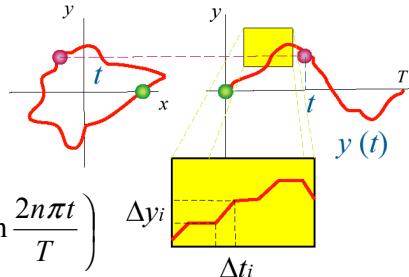
29

座標情報 → 楕円フーリエ記述子

$$t_p = \sum_{i=1}^p \Delta t_i$$

$$T = t_K$$

$$y(t) = \sum_{n=1}^{\infty} \left(c_n \cos \frac{2n\pi t}{T} + d_n \sin \frac{2n\pi t}{T} \right)$$



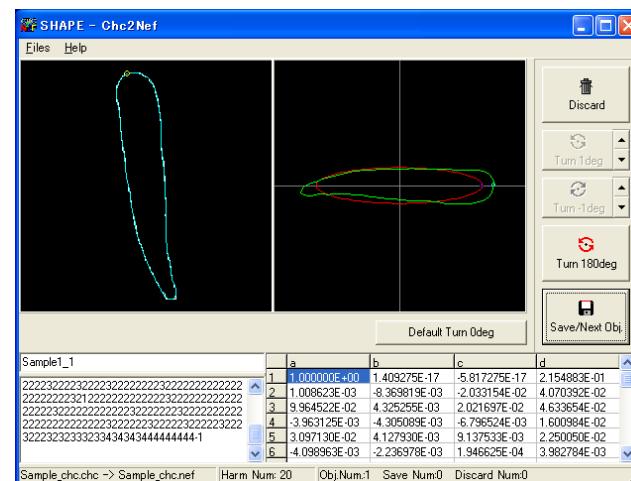
$$c_n = \frac{T}{2n^2\pi^2} \sum_{p=1}^K \frac{\Delta y_p}{\Delta t_p} (\cos \frac{2n\pi t_p}{T} - \cos \frac{2n\pi t_{p-1}}{T})$$

$$d_n = \frac{T}{2n^2\pi^2} \sum_{p=1}^K \frac{\Delta y_p}{\Delta t_p} (\sin \frac{2n\pi t_p}{T} - \sin \frac{2n\pi t_{p-1}}{T})$$

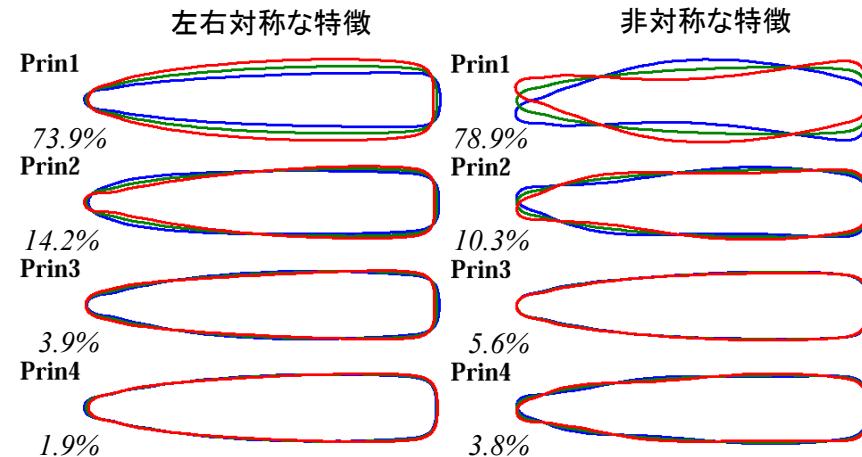
ナガメルダケ、ナガメルダケ…

Kuhl and Giardina (1982)²⁸

楕円フーリエ記述子への変換



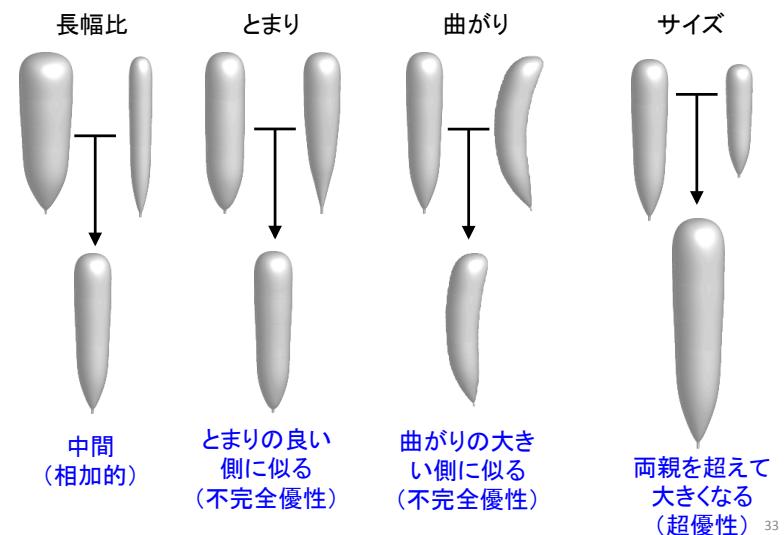
形の特徴抽出 (橿円フーリエ記述子の主成分を視覚化した結果)



<http://lrbm.ab.a.u-tokyo.ac.jp/~iwata/shape/>

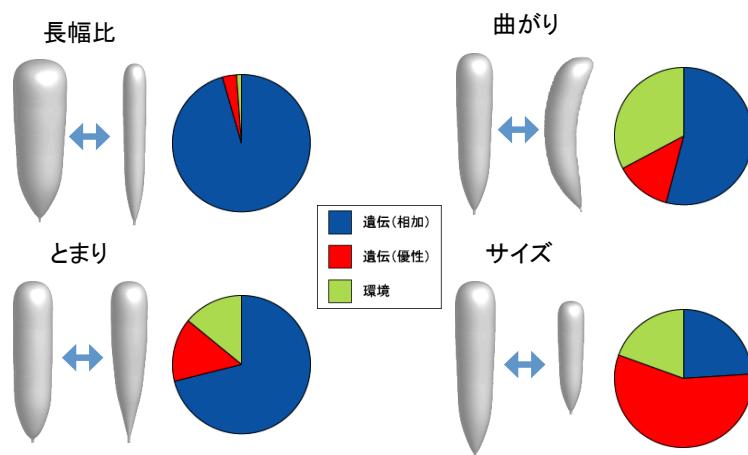
31

遺伝様式



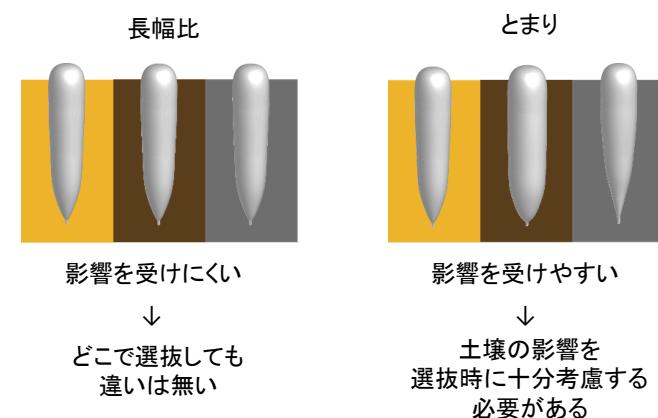
33

遺伝率



32

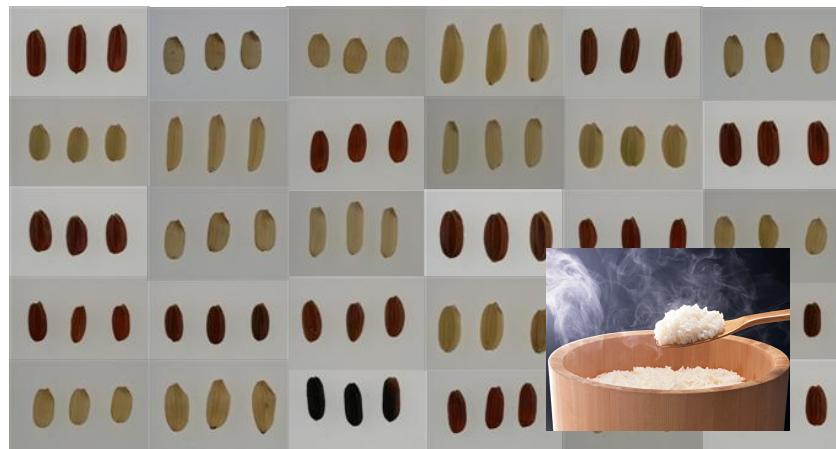
土壤の影響 (遺伝子型と土壤の交互作用)



データ解析によって得られたこうした知見は、育種家が直感的に感じていたものに良く一致していた。しかし、それを客観的に明文化できたことの意義は大きい。（直感というものを自分自身で再確認できる。また、客観的な知見となることで、ある育種家から次代の育種家へと伝えることが容易になる）

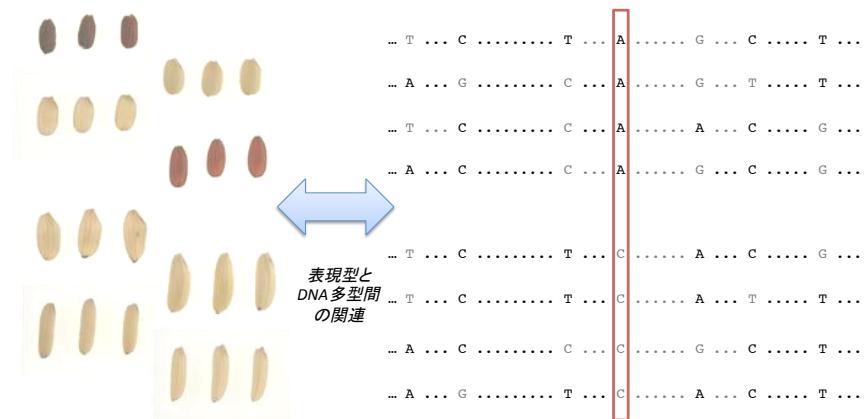
34

おこめの形(イネ玄米形)の変異



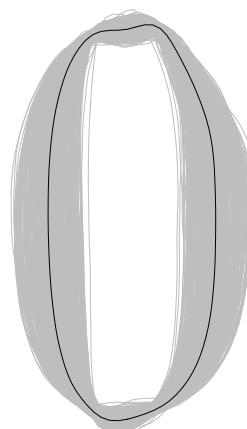
35

アソシエーション解析



- 多数の品種・系統などを材料として用いて、**表現型**変異とDNA多型間にみられる関連(アソシエーション)から、原因遺伝子の位置や効果を推定する方法(第8回に解説します)
- 上の図では、例えば、赤枠で囲んだ部分が玄米の長さに関連していると考える

イネ遺伝資源に見られる玄米形変異

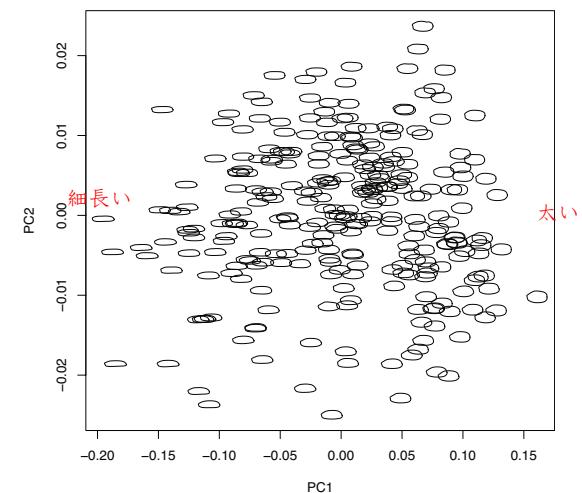


- 374 品種・系統
- 36,901 SNPs



Tung et al. (2010) Rice 3:205-217

主成分得点と玄米形の関係

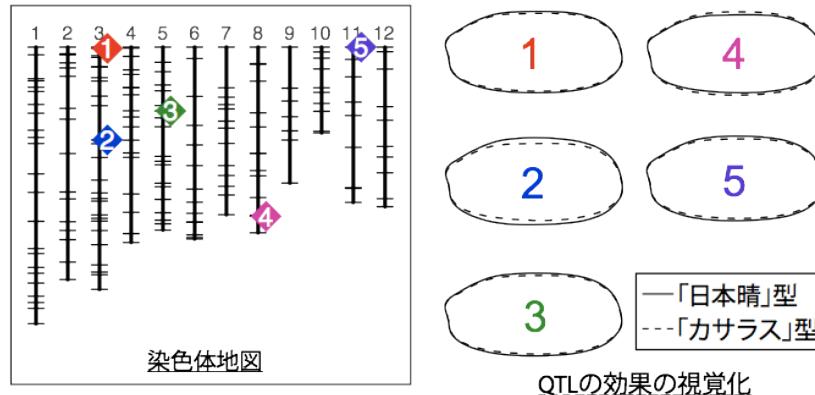


主成分得点は、品種間の玄米形の違いをよく反映している。

楕円フーリエ記述子の主成分分析を行い、主成分得点を玄米形の計測値として用いれば、形の変異の遺伝解析も可能になることが分かる

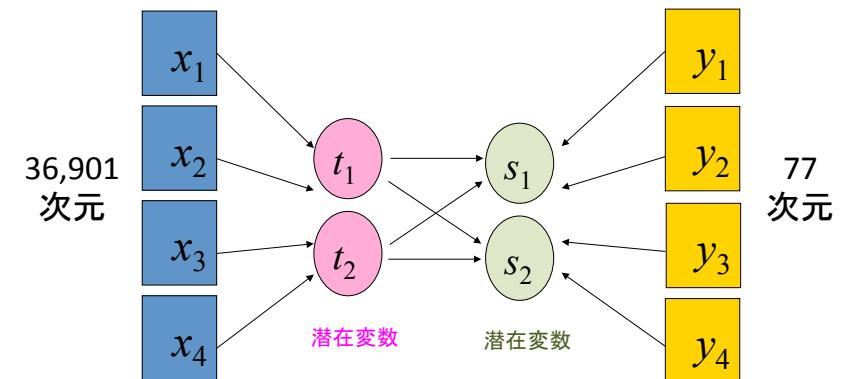
38

検出された遺伝子の位置と効果 (第1主成分)



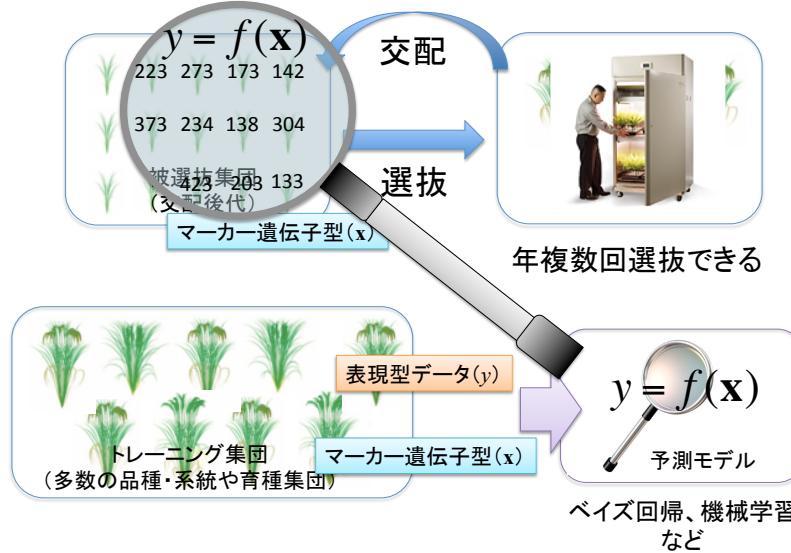
どのDNA多型が染色体上のどの位置に乗っているか予め分かっているので、アソシエーション有意であったDNA多型の位置から、関与遺伝子の染色体上での位置が分かる。また、逆変換により、関与遺伝子の効果も視覚化できる。

多次元の目的変数を 多次元の説明変数で予測する

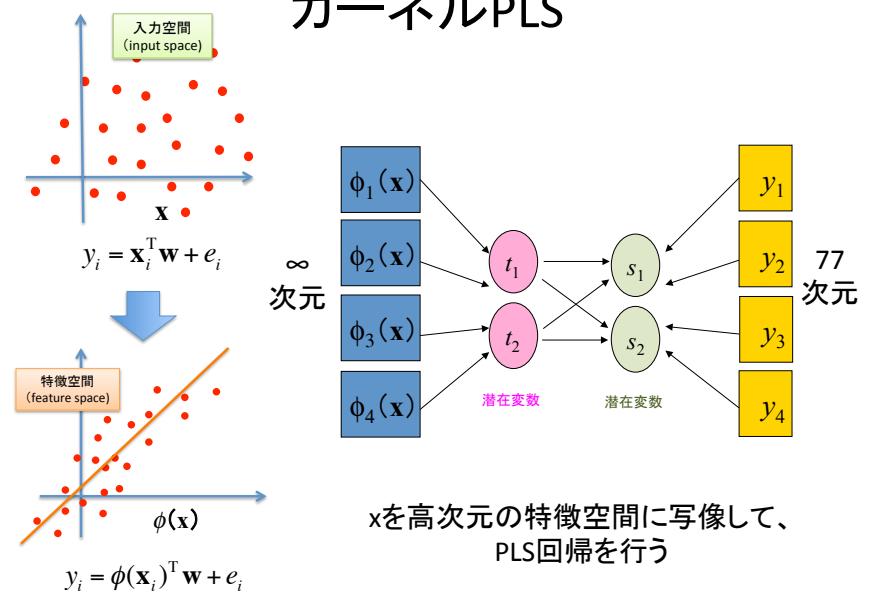


PLS回帰
両者の共分散が最大になるように潜在変数を選ぶ

新育種技術: ゲノミックセレクション(GS)

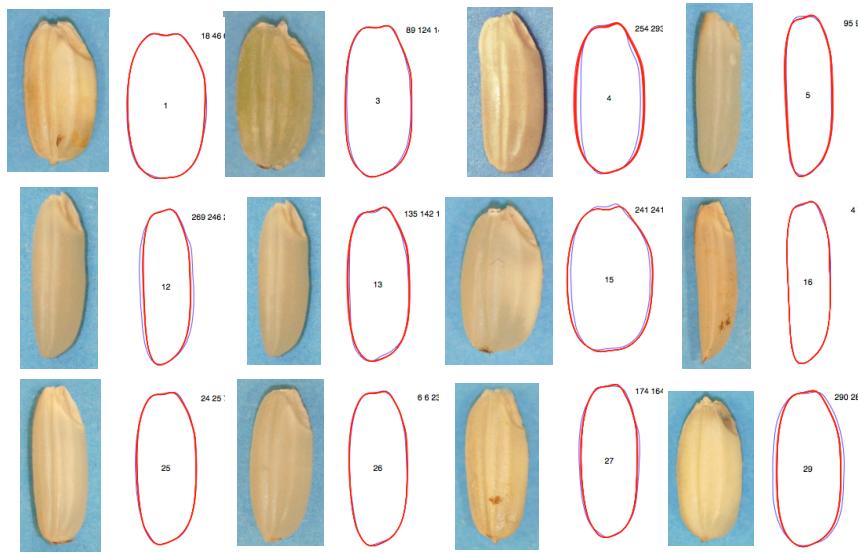


カーネルPLS



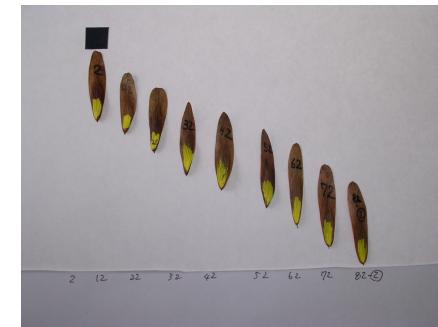
x を高次元の特徴空間に写像して、
PLS回帰を行う

観察された玄米形(青)とその予測(赤)



風散布果実の形と散布能力の関係

(Goto et al. 2005)



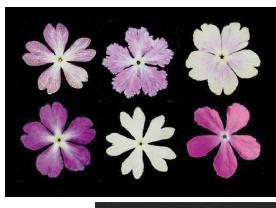
ヤチダモの果実は風で散布されるが、その飛散能力と果実形の間にどんな関係があるか？

→ 飛翔能力は、次世代個体である果実が、発芽し生育していくための新しい環境に移動するために重要

45

いろいろな応用例

- 作物では
ダイコン根形, ヤムイモ根形, カンキツ葉形, チョウジ葉形, ダイズ葉形,
ウメ核果形, ソバ種子形, オオムギ種子形, イネ種子形, イネ穎花形
- 作物以外でも



サクラソウ
花弁形状

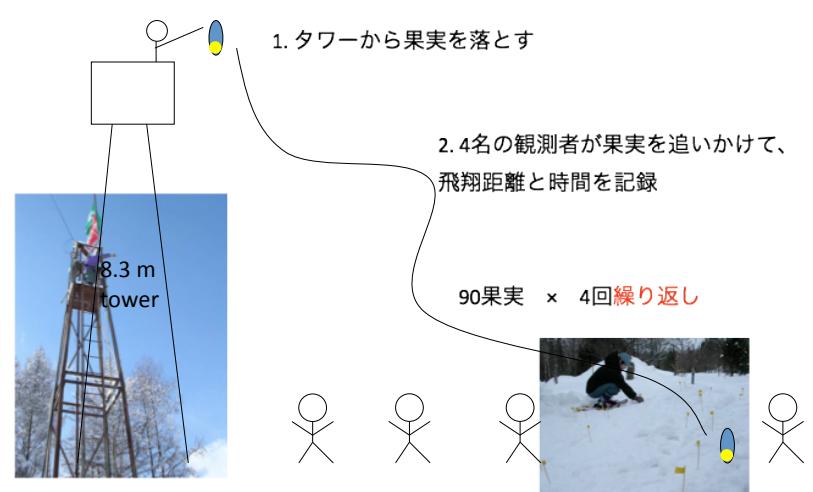


ヤチダモ果実形
(Gotoら 2005)

(Yoshiokaら 2004)

44

散布能力の測定



46

結果

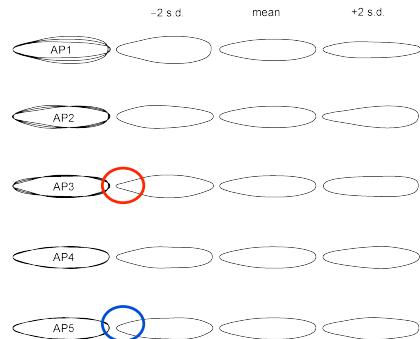


Table 4. Estimation of parameters in regression models.

Variables	Estimate	SE	t	P(Prob> t)
AP3	-21.14	5.549	-3.820	0.0003
AP5	-41.990	14.138	-2.970	0.0040
BP3	-38.009	18.649	-2.040	0.0452
Area	0.013	0.002	5.250	<0.0001
Weight	-16.181	5.998	-2.700	0.0087

- 形の主成分のうち、中心軸に対称な変異の第3、第4主成分(AP3, AP5)、および、中心軸に対して非対称な変異の第3主成分(BP3)が滞空時間と関係していた。
- 面白いことに、形の変異の70%を説明する対称変異の第1、第2主成分(AP1とAP2)が、滞空時間に影響を及ぼしていないかった。一方、AP3, AP5, BP3で説明される変異は9.5%だった。
- 微細な変異も定量化できる手法の有効性が示された実験でもあった

47

カンキツ果実の3D形状評価

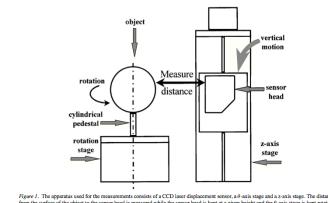


Figure 1. The apparatus used for the measurements consists of a CCD laser displacement sensor at a low step and a z-axis stage. The distance from the surface of the object to the sensor head is measured while the sensor head is held at a given height and the stage rotates at a uniform angular velocity.

CCDレーザーを用いて計測

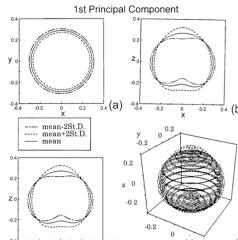


Figure 2. The 3D shape variation that is accounted for by the 1st principal component. To understand their shape variations more clearly, three 2D sectional drawings of 3D objects are shown in (a) were made respectively. (a) the sectional drawing of 3D graph in XY plane; (b) the sectional drawing of 10 species in XY plane; (c) the sectional drawing of 10 species in YZ plane; (d) the sectional drawing of 10 species in XZ plane.



Figure 3. The clustering analysis dendrogram of the 58 Citrus species using the 1st, 2nd, 3rd, 4th and 7th principal component as and the two classes for the ANOVA test of significant differences among species. The distance is defined as the Above sum of squares between the two clusters summed over all the variables.

主成分得点に基づく
果実形の分類
(クラスタ解析)

Ding et al. (2000) Euphytica 114:103 49

3D形状の主成分分析の結果

球面調和関数を用いた3D形状記述例

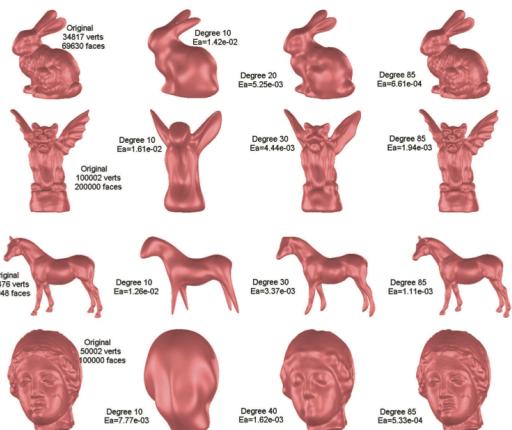


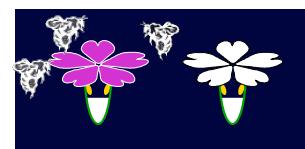
Figure 7: Shown from left to right are original models and their SPHARM reconstructions (with reconstruction error E_a) of degrees 10, 20 and 85. SPHARM can accurately model large scale 3D surfaces as well as be used for interesting applications such as geometric compression, surface filtering, etc.; see text for details.

Shen et al. (2009) Computers and Graphics 33: 299

48

ハチの選好性の研究

・先天的な選好性



ある特定の花冠形質に蜂が先天的な選好性をもち、その花に選択的に訪花する場合

・後天的な選好性



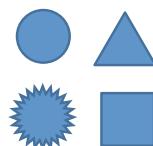
ある特定の花冠形質を持つ花が同時に報酬（蜜や花粉）を多量に保有し、蜂が学習に基づいてその花に選択的に訪花する場合

どちらの場合も花冠形質に対する蜂の識別能力が前提条件

吉岡洋輔博士より提供

これまでの実験の問題点

人工花を用いた実験



- 利点… 対象形質以外の形質を標準化できる
- 欠点… 人工花の形態的変異は丸や四角など質的な変異

結果を実際の植物にあてはめることが困難

実際の植物を用いた実験



- 利点… 結果の解釈が比較的容易にできる
- 欠点… 他の形質の要因を排除できない

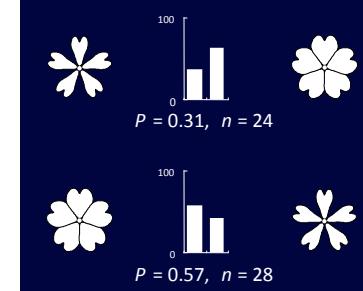
得られた結果には常に他の要因の効果が含まれている可能性がある

吉岡洋輔博士より提供⁵⁴

実在する花冠形態変異に対するマルハナバチの認識能力

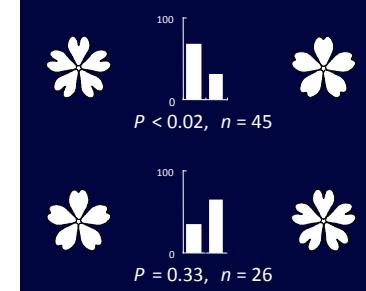
PC1: mean-2s.d. vs. mean+2s.d.

Training



PC2: mean-2s.d. vs. mean+2s.d.

Training



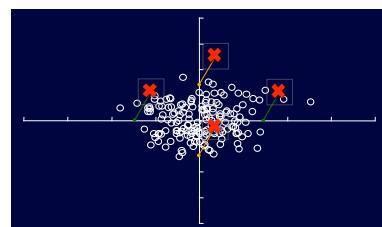
± 2 倍の標準偏差の範囲には供試した遺伝子型の約95%が含まれる

PC1(長幅比)には有意な反応を示さず、PC2(上部の切れ込み)では、切れ込みの深い人工花を学習させた場合にのみ、有意な学習の効果が現れた。

(Results of two-tailed binomial tests)

吉岡洋輔博士より提供⁵³

CGを利用した人工花の作製



-2 s.d.

PC1: 長幅比



+2 s.d.

PC2: 上部の切れ込み



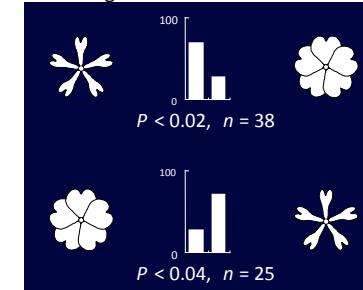
自然のサクラソウから得られたデータをもとに、ある特定の主成分得点を持つ花弁形態を計算でもとめ、計算で求められた形態をもとに花冠をCGで再構成する。

吉岡洋輔博士より提供

仮想的な花冠形態変異に対するマルハナバチの認識能力

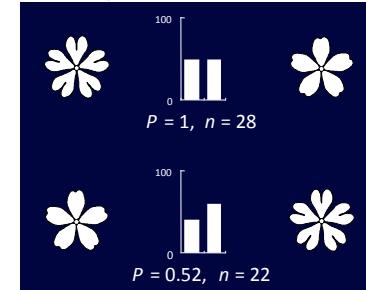
PC1: mean-4s.d. vs. mean+4s.d.

Training



PC2: mean-4s.d. vs. mean+4s.d.

Training



± 4 倍の標準偏差の値をもつ実際の遺伝子型は存在しない

PC1(長幅比)では、どちらの人工花を学習させた場合も有意な反応を示し、PC2(上部の切れ込み)では有意な反応を示さず。

(Results of two-tailed binomial tests)

吉岡洋輔博士より提供

先天的な選好性とサクラソウの花冠形態変異

Contour density と蜂の先天的選好性



これまでの研究で、蜂はContour density(周囲長/面積)の値の大きな形態に対して、先天的な選好性を示すことが知られている。

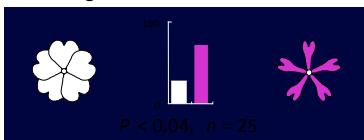
(Dafni and Neal, 1997; Dafni et al., 1997)

PC1: mean-4s.d. vs. mean+4s.d.

Training



Training



Contour density: 細い花弁の人工花 = 7.468, 幅の広い花弁の人工花 = 1.876

今回の実験でもContour Densityが高い、細い花弁の人工花に蜂は先天的な選好性を示したのかもしれない。

吉岡洋輔博士より提供

バイオメトリックス第2回 小レポート課題

Q. 楕円フーリエ記述子による近似は、Nを大きくすればするほど精密になります。しかし、実際はNを無限に大きくできないので、Nをある有限の値に固定して計測を行わなければなりません。では、適切なNの決め方として、どのような方法が考えられるでしょうか。あなたのアイデアを自由に述べてください。

<提出の仕方>

PDFまたはMS-Wordフォーマットのファイルとして作成し、eメールに添付して iwata.report@gmail.com 宛に送って下さい。

<分量>

多くてもA4で1ページ以内で

<期限>

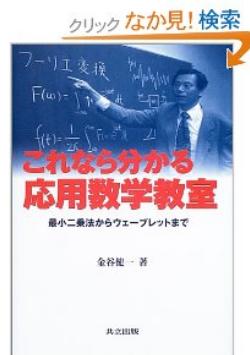
5月1日まで

57

本日の一冊

- これなら分かる応用数学教室—最小二乗法からウェーブレットまで
- 金谷 健一 (著)
- 共立出版 (2003/06)
- ISBN-10: 4320017382
- ISBN-13: 978-4320017382

フーリエ変換や主成分分析などで用いられている数学について、丁寧に分かりやすく解説してくれている良書。
数学が多少苦手でも大丈夫。



www.amazon.co.jp より