

目の特徴を利用した馬の個体識別

須崎 昌彦[†] 山北 治[†] 久野 裕次[†]
 間 弘子^{††} 佐々木 直樹^{†††} 楠瀬 良^{†††}

馬の個体識別を行うために、目の虹彩および虹彩顆粒を特徴とした場合の個体差を検証した。虹彩は瞳孔の収縮を行うための筋肉であり、表面に筋肉の筋による模様が表示される。虹彩の内側と外側の輪郭に楕円をあてはめることにより座標系を設定し、帯域通過フィルタを用いて虹彩のパターンをコード化する。任意の2つの個体から生成されるコード間のハミング距離によって、それらが本体であるか他体であるかを区別する。一方、虹彩顆粒は瞳孔の上にある突起状の物体である。虹彩顆粒領域を画像から抽出し、領域内の濃淡によって特徴ベクトルを定義し、ベクトル間の距離によって本体と他体を区別する。それぞれの特徴を用いた場合、本体と他体の相違度分布に大きな違いが見られ、個体差があることが検証された。また、それらの特徴を複合して用いることにより、個体識別システムの実現が可能となることを示す。

Horse Identification Method Using Eye Patterns

MASAHIKO SUZAKI,[†] OSAMU YAMAKITA,[†] YUJI KUNO,[†]
 HIROKO AIDA,^{††} NAOKI SASAKI^{†††} and RYO KUSUNOSE^{†††}

We propose a horse identification method using eye pattern as biometric signatures. Two features are used to identify horses. One is iris pattern and the other is granula iridica pattern. Iris pattern is modeled by two ellipses and encoded by squaring 2-D Gabor coefficients. Granula iridica pattern is extracted by incremental edge detection method and vectorized by the collections of the brightness average of subregion. Both features show the apparent differences between imposters and authenticals. Therefore we can identify horses with high accuracy by using two features collaboratively.

1. ま え が き

今日のようなネットワーク社会においては、他人に盗まれる可能性のあるパスワードに代わる手段として、指紋や声紋、顔貌などの身体的特徴(バイオメトリック)を利用した個人識別技術の開発がさかんに行われている^{7),8)}。また個人識別と同様に、動物の世界でも古くから個体識別が必要とされている。身近な例では、犬、猫の首輪につける鑑札がそれである。この動物の個体識別においても、より厳密に本体確認を行うために生体の特徴が用いられはじめてきている。たとえば、

牛の鼻には鼻紋と呼ばれる線状パターンが存在しており、血統管理のためにこれを指紋識別技術の応用により識別する技術が報告されている⁶⁾。

中央競馬をはじめ、国内外で行われる競馬の多くは、競馬場で開催されるレースごとに出走予定馬の馬体検査を行っている。馬体検査はけがや病気の有無を調べ、出走到に適しているかどうかを判断するものであるが、同時に本体確認作業も行っている。これは出走馬とは異なる馬を間違えて出走させることや、すり替えなどによる不正行為を防止することを目的としており、競馬の公正確保や個人の財産の保護などを行ううえで非常に重要な作業となっている。

現在、馬の個体識別は毛色、白斑(頭部や脚の模様)、旋毛(つむじ)の位置などの外観特徴を検査員が目視により確認する方法が用いられている^{1),2)}。この作業には特殊な知識を持った専門家が当たっているが、特徴の少ない馬や外観がよく似た馬を瞬時に見分けるためには熟練した技術が必要である。

海外の競馬では個体識別の手段として、マイクロ

[†] 沖電気工業株式会社システムソリューションカンパニー情報技術開発センター

Information Technology R&D Center, System Solutions Company, Oki Electric Industry Co., Ltd.

^{††} 日本中央競馬会日高育成牧場

Hidaka Yearling Training Farm, Japan Racing Association

^{†††} 日本中央競馬会競走馬総合研究所

Equine Research Institute, Japan Racing Association

チップを馬の体に埋め込んだり、烙印を押すなどの方法を採用している国もあるが、いずれも馬を傷つけるという問題がある。また DNA による個体識別も考えられるが、判定結果が出るまでの時間がかかりすぎるため実用的ではない。そこで、馬に苦痛を与えることなく、高い精度で個体識別を行う方法の開発が期待されている。

一方、目の虹彩(アイリス)の模様を利用した人の個人識別方法は、非接触で非常に高い精度の識別が可能なることから、様々な場面への応用が期待されている^{5),9)}。

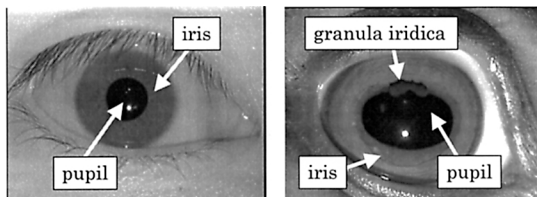
馬においても瞳孔、網膜、虹彩などが存在し、目の基本的な機能は人と同じであるため³⁾、人における虹彩識別手法を応用して個体識別を行うことが可能ではないかと考えられる。虹彩識別を馬に应用する際のメリットとして、その非接触性があげられる。馬は非常に敏感な動物であるため、見知らぬ人物や機器の接触を極端に嫌う。虹彩識別を利用すれば、離れた場所からの特徴の取得が可能であり、馬に意識されることなくかつ馬体を痛めることもない。したがって、高い識別性能が得られるならば、虹彩識別は人と同様に馬の個体識別技術としても非常に有効である。しかしながら、馬の目の模様は個体差があるかどうかについての研究は、獣医学の分野においてもなされていない。そこで筆者らは、虹彩など目の中の模様を特徴とした場合の個体差の有無と、個体識別の手法としての有効性について検証した。

以下、2章では馬の目の構造とデータ取得方法について説明を行い、3章で虹彩特徴を利用した識別方法を、4章では瞳孔の上部に存在する虹彩顆粒を利用した識別方法について述べ、5章で取得したデータに対する個体差の検証結果を報告する。

2. 馬の目の特徴

2.1 馬の目の構造

図 1 (a) は人の目を、(b) は馬の目を示して



(a) 人の目 (b) 馬の目

図 1 人の目と馬の目の比較

Fig. 1 Comparison with human eye and horse eye.

いる。

人の目と馬の目の構造上の大きな違いとしては、次の 2 つの点があげられる。

- (1) 人の瞳孔 (pupil) および虹彩 (iris) の輪郭は円形状であるが、馬はともに楕円形状である。
- (2) 馬には瞳孔の上部に虹彩顆粒 (granula iridica) と呼ばれる突起状の物体が存在するが、人には存在しない。

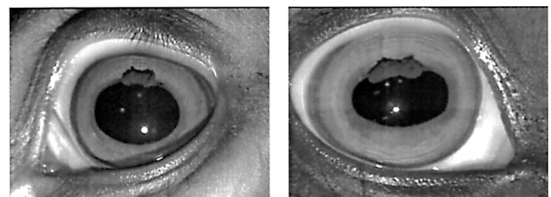
虹彩はカメラの絞りのように光が強いときには瞳孔を閉じ (縮瞳)、逆に暗いときには瞳孔を開いて (散瞳) 光量を調節する機能を持つ。この制御を行う筋肉の筋が、虹彩パターンとして表面に表れる。馬のような草食動物は、天敵が現れてもすぐに見つけられるように、水平方向に広い視野を持っている。そのため瞳孔も横長の形状となっている⁴⁾。表面は人ほど細かな皺はないものの、目視で模様を確認することができる。

虹彩顆粒は、瞳孔の上部と虹彩の境界あたりから帽子のひさしのように前に飛び出している物体で、牛や羊などにも存在する。角膜の内部にあるため瞬きなどによって動くことはない。これはメラニン色素を多く含んでおり、まぶしい太陽の下でも目がくらむことがないように光を吸収する働きがある。表面には皺などの凹凸があり、この模様および全体の形は個体によって、また同じ個体の左右の目によっても異なる。

図 2 (a) は図 1 (b) と同じ馬の左目で、図 2 (b) は異なる馬の右目である。虹彩の模様については違いが分かりにくいですが、虹彩顆粒については目視でも違いがはっきりと分かる。そこで、個体差を評価すべき対象として、虹彩と虹彩顆粒の 2 つの特徴を用いることにした。

2.2 データ取得方法

外光や景色が角膜に反射して虹彩パターンが隠れることを防ぐため、近赤外照明を馬の目に照射し、ビデオカメラにより赤外映像を取得する。ビデオカメラは市販品を改造したものを使用した。カメラの CCD の前にある赤外カットフィルタを除去し、レンズの前に



(a) 図 1 (b) と同一馬の左目 (b) 異なる馬の右目

図 2 馬の目の比較

Fig. 2 Comparison with different horse eyes.

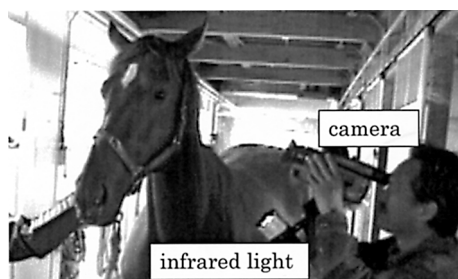


図3 撮影方法
Fig. 3 Getting eye data.

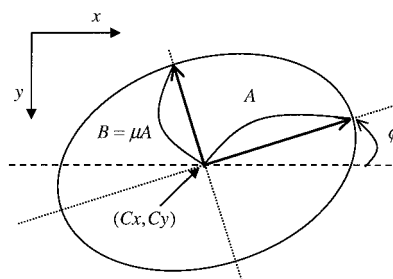


図4 楕円のパラメータ
Fig. 4 Ellipse parameters.

は可視光カットフィルタを装着することにより赤外感知カメラに改造した。また、照明には50Wの八口ゲンランプを使用し、可視光カットフィルタを装着することにより赤外光を照射するようにした。

図3は撮影に使用したカメラと撮影方法を示した図である。照明はカメラの下に固定する。下から照射するのは、上まつ毛の影が虹彩顆粒に掛かるのを防ぐためである。また照明を固定するのは、虹彩顆粒自体の影や表面にある凹凸の影の形状を、できるだけ一定に保つためである。

撮影は太陽の直射を避けるため馬房の中で行った。馬の目とカメラのレンズとの距離は約40cmで、保定者が馬の前方に1名立った状態で、撮影者は馬の側面の目に対してやや下のほうから撮影を行った。焦点距離とズームは、目全体(目頭から目尻まで)が画面の3/4以上の大きさに映るように固定した。映像はいったんビデオテープに記録した後、目が鮮明に映っているシーンを目視で選択し、静止画〔640画素(幅)×480画素(高さ)、モノクロ256階調〕としてハードディスク上に記録した。

3. 虹彩による識別

3.1 識別の概要

虹彩の特徴には瞳孔の中心から放射状に延びる皺のパターンを用いる。処理の流れは以下のとおりである。

- (1) 虹彩の内側、外側の輪郭に対して楕円によるモデルマッチングを行い、楕円の中心を原点とした楕円座標を設定する。
- (2) 内側の楕円と外側の楕円に囲まれたドーナツ状の領域を矩形領域に変換する。
- (3) 矩形領域に対して二次元ガボールフィルタ⁵⁾でフィルタリング処理を施し、得られた振幅によって0または1にコード化する。
- (4) 2つの個体間の相違度を、それぞれから得られるコード間のハミング距離で定義し、相違度の

大小により本体と他体を区別する。

特徴とする皺の方向やコード化の際の分割帯の数など、上記の処理の流れは基本的には人のそれと同じであるが、(1)において楕円モデルを用いるため、後述のように楕円の偏平率、傾きなどのパラメータが発生する点異なる。また、(2)以降の処理においても、皺の粗さなどが人と馬では異なるため、ガボールフィルタのパラメータなど具体的な値も異なる。

3.2 楕円の近似

人の虹彩識別法では虹彩の内側、外側輪郭に対し、円をあてはめて極座標を設定する⁵⁾。馬の場合、瞳孔および虹彩の形状が楕円に近いことから、それぞれに楕円をあてはめることによって楕円座標を設定する。楕円近似は、それを境に輝度が急激に変化するような楕円を見つけることによって行う。

すなわち、 (C_x, C_y) を楕円の中心座標、 A を長径の長さ、 μ を長径の長さと短径の長さの比($B = \mu A$, B は短径の長さ)、 ϕ を長軸の傾きとする(図4)。また、式(1)のように $F(\mathbf{E})$ を任意の $\mathbf{E} = \{C_x, C_y, A, \mu, \phi\}$ によって決定された楕円上の平均輝度と、その外側に設定した楕円上の平均輝度の差とする。このとき、 $F(\mathbf{E})$ が最大となるような $\{C_x, C_y, A, \mu, \phi\}$ の組を見つける。

$$F(\mathbf{E}) = \left| \frac{1}{L(\mathbf{E})} \int f(\mathbf{E}, \theta) d\theta - \frac{1}{L(\mathbf{E}')} \int f(\mathbf{E}', \theta) d\theta \right|. \quad (1)$$

$$\mathbf{E} = \{C_x, C_y, A, \mu, \phi\}.$$

$$\mathbf{E}' = \{C_x, C_y, A + \Delta A, \mu, \phi\}.$$

(ΔA は1画素程度)

$L(\mathbf{E})$ は \mathbf{E} によって決定された楕円の円周の長さであり、 θ は極座標系における角度成分である。また $f(\mathbf{E}, \theta)$ を、入力画像の楕円上の位置 (x, y) の輝度値として、 (x, y) と (\mathbf{E}, θ) の関係を以下の式で表す。

$$\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \phi & -\sin \phi \\ \sin \phi & \cos \phi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A \cos \theta \\ \mu A \sin \theta \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} Cx \\ Cy \end{pmatrix}. \quad (2)$$

虹彩の内側の輪郭に対して楕円近似を行う場合は、虹彩顆粒による影響を考慮し、虹彩顆粒部分を近似の計算に含めないように式(1)の積分の範囲を限定する。同様に、虹彩の外側輪郭に対して行う場合は、臉によって上下が隠れる場合があるので、これも近似の対象から省く。輪郭全体に対する近似の範囲は、内側輪郭の方が大きいので、楕円近似は内側輪郭から行う。また、内側輪郭の近似によって得られたパラメータを利用することにより、外側輪郭の探索範囲を絞ることができる。

近似によって得られた内側の楕円 (inner ellipse) の各パラメータを

$$E_i = \{C_{xi}, C_{yi}, A_i, \mu_i, \phi_i\}. \quad (3)$$

とし、外側の楕円 (outer ellipse) の各パラメータを

$$E_o = \{C_{xo}, C_{yo}, A_o, \mu_o, \phi_o\}. \quad (4)$$

とする。ただし、外側の楕円の長軸の傾き ϕ_o は、内側の楕円近似により決定した値 ϕ_i を用いる ($\phi_i = \phi_o$)。

3.3 コード生成と相違度計算

2つの楕円に挟まれたドーナツ状の領域を、矩形領域に変換する。この矩形をコード化矩形と呼ぶ。ここでは、先に求めた楕円の傾き ϕ_i を用いて、楕円の長軸が水平になるように、入力画像全体を回転させたとして処理方法を述べる。実際には画像を回転させることなく、 ϕ_i による回転写像と以下に示す変換から求めた複合変換式により矩形領域を生成する。図5(a)は回転移動した楕円座標であり、この図において画像上の任意の点 $P(X_p, Y_p)$ とコード化矩形上の点 $R(X_r, Y_r)$ の関係は式(5)、(6)で表される。ここで点 P は、同一角度 θ における内側楕円上の点 $P_i(X_i, Y_i)$ と、外側楕円上の点 $P_o(X_o, Y_o)$ を結ぶ直線を内分する点であり、 R_w, R_h はそれぞれ矩形領域の幅と高さを表す。

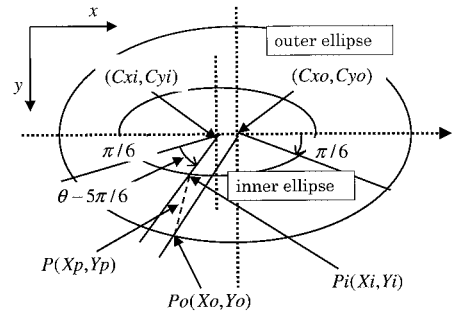
$$X_r = \frac{\theta - 6/5 \cdot \pi}{9/5 \cdot \pi - 6/5 \cdot \pi} \times R_w. \quad (5)$$

$$Y_r = \frac{\overline{P_i P}}{\overline{P_i P_o}} \times R_h, \quad (6)$$

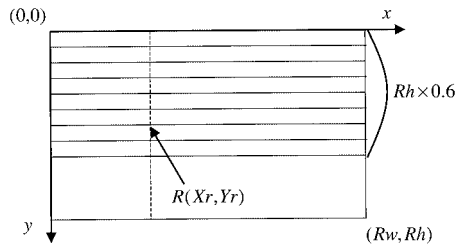
($\overline{P_1 P_2}$: Distance from P_1 to P_2).

$$P_i(X_i, Y_i) = (A_i \cos \theta + C_{xi}, \mu_i A_i \sin \theta + C_{yi}).$$

$$P_o(X_o, Y_o) = (A_o \cos \theta + C_{xo}, \mu_o A_o \sin \theta + C_{yo}).$$



(a) 回転移動した楕円座標



(b) コード化矩形

図5 矩形の生成

Fig. 5 Rectangle region converted from two ellipses.

また瞳孔より上の虹彩領域は、虹彩顆粒やまつ毛により隠れている場合が多いので、コード化の領域は瞳孔の下側の領域、すなわち図5で $\theta = 7/6\pi \sim 11/6\pi$ の範囲とする。

下臉によって虹彩が隠れる場合を考慮して、コード化矩形の高さの6割をコード化に使用し(図5(b)では $y = 0 \sim R_h \times 0.6$ の範囲)、これを有効コード化矩形と呼ぶ。

次に有効コード化矩形を8つの帯状領域に分割し、それぞれの分割帯に対して2次元ガボールフィルタとの積を計算する。積の実数部が0以上であれば1、それ以外であれば0とすることによりシンボルの系列(コード)を生成する⁵⁾。これによりコード化矩形中で、ガボールフィルタが表す波と類似の波長および位相を持つ皺がある場所には1が、それ以外の場所には0が与えられる。

実験に用いた画像のうち、8頭(16個の目)のデータに対して以降で述べる相違度計算を行い、本体間の分布と他体間の分布の重なりが最も小さくなるようにガボールフィルタのパラメータを調整した。また、積の虚数部をコード化したものを識別に利用した場合と利用しなかった場合で、相違度に顕著な差が見られなかったため、コードのデータサイズを考慮して実数部のみをコード化に使うことにした。図6はアイリスのコードの例である。

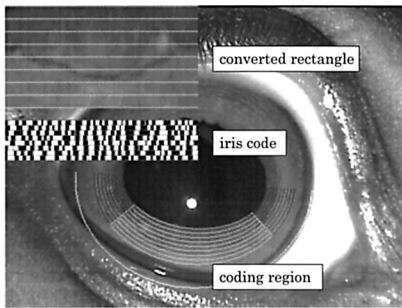


図 6 生成されたコードの例
Fig. 6 Example of iris code.

積の絶対値が 0 に近い部分は、画像中の雑音により正負の変動の可能性が高い部分である。そのような部分は、誤差を含む成分としてマスクコードに記録する。マスクコードはすべてのビットを 1 で初期化し、積の絶対値があらかじめ定めた閾値を下回った場合には 0 を与える。虹彩のコードとマスクコードを Ic , Mc とし、以下の式によって表記する。

$$Ic = \{Ic(1), Ic(2), \dots, Ic(Cm)\}. \quad (7)$$

$$Mc = \{Mc(1), Mc(2), \dots, Mc(Cm)\}. \quad (8)$$

$$Ic(m) = 0 \text{ or } 1, \quad Mc(m) = 0 \text{ or } 1, \\ m = 1, \dots, Cm.$$

先の予備実験による最適化を行った結果、虹彩のコードとマスクコードのそれぞれに対して、1 つの分割帯のビット長を 368 ビット、全体で $368 \times 8 = 2,944$ ビットとした。さらに、楕円座標設定における回転方向の誤差を吸収する目的で、相違度の計算時はビットシフトを行う。各分割帯の最初と最後の 30 ビットをシフトビットとして使用するため、相違度を計算するときの有効ビット数は分割帯中の 308 ビット、全体で $Cm = 2,464$ ビットとなる。

任意の 2 つの個体から生成される虹彩のコードをそれぞれ $Ic1$, $Ic2$ とし、マスクコードをそれぞれそれぞれ $Mc1$, $Mc2$ とする。これらの個体間の相違度 Di を、ハミング距離を用いて式 (9) のように定義する。

$$Di = \frac{1}{Lb} \sum_{m=1}^{Cm} \{Ic1(m) \oplus Ic2(m)\} \\ \otimes \{Mc1(m) \otimes Mc2(m)\}. \quad (9)$$

$$Lb = \sum_{m=1}^{Cm} Mc1(m) \otimes Mc2(m).$$

⊗: 論理積 (AND).

⊕: 排他的論理和 (XOR).

ビットシフトは、有効コード化矩形どうしを水平方向に 1 ビットずつずらすことによって行う。ビットシ

フトを行った結果、最小となる Di を 2 つの個体間の相違度として用いる。

4. 虹彩顆粒による識別

4.1 処理の概要

虹彩顆粒については、表面の濃淡情報を用いて識別を行う。処理の概要は以下のとおりである。

- (1) 画像処理によって虹彩顆粒領域を切り出す。
- (2) 切り出した領域の大きさや平均輝度などを正規化した後、複数のブロックに分割し、各ブロックの値を要素とする特徴ベクトルを生成する。
- (3) 2 つの個体間の相違度を、それぞれの特徴ベクトル間の距離によって定義し、相違度の大小により本体と他体を区別する。

4.2 虹彩顆粒領域抽出

虹彩顆粒の形状は複雑であり、個体によって様々な形をしているため、幾何学的なモデルを近似して抽出することは困難である。そこで、次のような虹彩顆粒の特徴を手がかりに領域抽出を行う。

- (特徴 1) 瞳孔の上部と虹彩の境界に存在する。
- (特徴 2) 瞳孔と虹彩の中間的な明るさである。

最初に瞳孔領域を抽出する。瞳孔は光を吸収するため画像中では最も暗い部分となるが、周囲は比較的明るい虹彩領域に囲まれている。また、画像の中心付近に存在し、画像上で瞳孔のとおりる大きさの範囲も既知である。そこで、入力画像を適当な値 Tr で二値化し、上記の条件を満たすような領域を瞳孔領域として抽出する。閾値 Tr は、瞳孔に対する条件を満たす領域が出現する値の範囲のうち、最も大きな値とする。

瞳孔領域が抽出されると、瞳孔を囲む最小矩形を設定する。この矩形に対して、上部にある一定のマージンをとった矩形を瞳孔矩形 (pupil rectangle) と呼ぶ。これは (特徴 1) に基づくもので、マージンは虹彩顆粒を含む十分な大きさであるとする。この値は多数の画像を調査した結果、実験的に得られた値を用いる。

瞳孔矩形の抽出には先に求めた虹彩の内側輪郭、すなわち瞳孔輪郭の抽出結果を利用することは可能である。しかしながら、マルチプロセッサなどを用いて虹彩特徴と虹彩顆粒特徴の抽出を並行して処理するようなことを考えた場合、ここでは楕円近似よりも比較的处理時間の少ない二値化によって瞳孔矩形を抽出する方法が有効であると考えられる。

以降では、入力された原画像から瞳孔矩形を部分画像として切り取った画像に対して処理を行う。この画像を瞳孔矩形画像と呼ぶ。図 7(a) は瞳孔矩形を、図 7(b) は瞳孔矩形画像の例を示している。

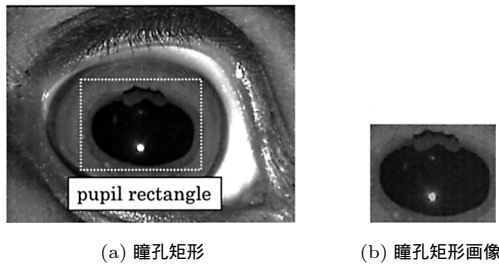


図7 瞳孔矩形の例
Fig. 7 Example of pupil rectangle.

次に (特徴2) を利用して虹彩顆粒の輪郭線を抽出する。瞳孔矩形画像の中で、最も明るい領域が虹彩で、最も暗い領域が瞳孔である。また、これらの表面は均一で、虹彩顆粒との境界線上に強いエッジが存在する。そこで、虹彩顆粒と瞳孔および虹彩の境界線を抽出し、それらに挟まれた領域を虹彩顆粒として切り出す。

瞳孔または虹彩と、虹彩顆粒との境界線としての確からしさを示す評価値を次のように定義する。瞳孔矩形画像をある閾値 T で二値化したとき、閾値よりも暗い領域の中で、最も大きい面積を持つ領域 $A(T)$ の上半分の境界線 $y = C(T, x)$, ($X_s \leq x \leq X_e$) を探索する。ただし X_s, X_e は領域 $A(T)$ の両端の座標の x 値であり、 $C(T, x)$ は同じ x 座標では最も上 (y が小さいほう) の値をとるものとする。瞳孔矩形画像で、この境界線 $C(T, x)$ に沿った平均エッジ強度を、閾値 T に対する境界線評価値 $E(T)$ とする。

$$E(T) = \frac{1}{L(T)} \sum_{x=X_s}^{X_e} D(T, x) \quad (10)$$

$L(T)$ は境界線 $C(T, x)$ の水平方向の幅、すなわち $X_e - X_s + 1$ である。また、 $D(T, x)$ はエッジ強度であり、 $I(x, y) = I(x, C(T, x))$ を境界線 $C(T, x)$ 上の輝度値として次のように定義する。

$$D(x) = I(x, y) - I(x, y + 1). \\ \text{if } I(x, y) > I(x, y + 1) \quad (11)$$

$$D(x) = 0. \quad \text{else}$$

虹彩顆粒付近における各領域の配置は、画像の上端 ($y = 0$) から虹彩、虹彩顆粒、瞳孔の順となっており、領域境界線上での輝度値の変化はつねに (明 \rightarrow 暗) となっている。したがって (暗 \rightarrow 明) となる部分は雑音成分と見なして値を 0 としている。

瞳孔を切り出すための閾値を T_p 、瞳孔と虹彩顆粒を含む領域を切り出すための閾値を T_i とすると、 T を変化させたとき、 $E(T)$ は T_p と T_i で極大値を持つ。そこで、 $E(T)$ が最大となるような、 T_m および T_m の前後で $E(T_m) \times R_T$ 以下の値となる極小

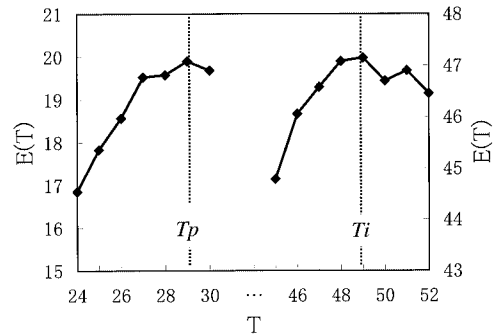


図8 選択された閾値の例
Fig. 8 Example of selected threshold values.

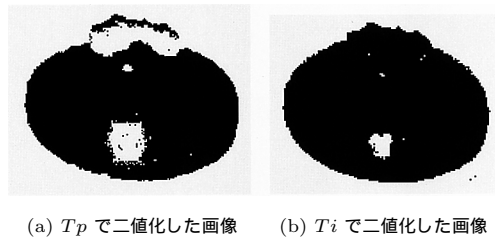


図9 異なる閾値で二値化した瞳孔矩形画像
Fig. 9 Binary images at threshold values T_p and T_i .

値を挟み、再び $E(T)$ が極大値をとるような T_1 と T_2 ($T_1 < T_m < T_2$) を見つけ、次の条件によって、 T_p, T_i を決定する。ただし、 R_T は 0.7 程度の定数である。

- (1) T_1 と T_2 がともに見つからない場合はエラー。
- (2) T_1 が見つからない、または $E(T_2) \geq E(T_1)$ のときは、 $T_p = T_m, T_i = T_2$ 。
- (3) (1), (2) 以外のときは、 $T_p = T_1, T_i = T_m$ 。

$E(T_1) = E(T_2)$ のときに $T_p = T_m$ とするのは、虹彩と虹彩顆粒の境界線には照明による影などの影響でエッジが弱い部分が存在し、瞳孔と虹彩顆粒の境界線の方が $E(T)$ の最大値をとることが多いためである。

図8は、閾値 T と $E(T)$ の変化を示す図である。また、図9(a)は図8の閾値 $T_p + 1$ で瞳孔矩形画像を二値化したもので、図9(b)は図8の閾値 $T_i + 1$ で瞳孔矩形画像を二値化したものである。

閾値 T_p によって切り出された領域に対する輪郭線 $C(T_p, x)$ と、閾値 T_i により切り出された領域に対する輪郭線 $C(T_i, x)$ に囲まれた領域を虹彩顆粒として抽出する。図10は抽出された領域である。

4.3 虹彩顆粒の相違度計算

虹彩顆粒の幅を、輪郭線 $C(T_p, x)$ と $C(T_i, x)$ の垂直方向の幅が一定の大きさを持っている範囲として定め、これによって抽出された虹彩顆粒を囲む最小矩形を、虹彩顆粒矩形 (granula iridica rectangle) と呼



図 10 抽出された虹彩顆粒領域
Fig. 10 Extracted granula iridica region.

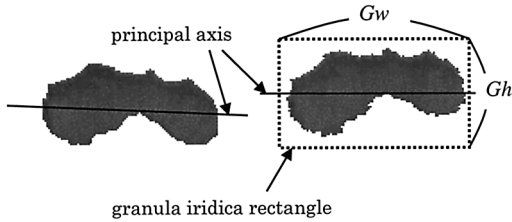


図 11 虹彩顆粒領域の回転
Fig. 11 Rotation of granula iridica region.

ぶ(図 11 (a)).

虹彩顆粒の特徴を明確に表すために、虹彩顆粒矩形内で、虹彩顆粒以外の領域を値 0 の輝度値でマスクする。マスクされていない領域に対して主成分分析を行い、虹彩顆粒の主軸を求め、主軸が水平になるように虹彩顆粒矩形を回転移動し、再度、最小矩形を設定する(図 11 (b))。回転した虹彩顆粒矩形の幅と高さを、それぞれ G_w 、 G_h とする。

さらに、虹彩顆粒領域内の輝度値の分布の平均値と標準偏差が、あらかじめ定めた値 D_m (平均) と D_s (標準偏差) となるように、各画素の値を調整する。すなわち、虹彩顆粒領域の輝度値の分布の平均が d_m 、標準偏差が d_s であったとすると、領域内の各画素の値 $DI(x, y)$ は、元の輝度値 $di(x, y)$ から次のように計算される。

$$DI(x, y) = (di(x, y) - d_m) \times \frac{D_s}{d_s} + D_m. \quad (12)$$

回転移動と輝度値の調整を行った虹彩顆粒矩形を B_w (幅) \times B_h (高さ) 個のブロックに分割する。各ブロックに番号を割り振り、 k 番目のブロックの値をそのブロック内の輝度の平均値 $gv(k)$ で定義し、それらを一次元のベクトルで表したものを虹彩顆粒の特徴ベクトル G_v とする。

$$G_v = \{gv(1), gv(2), \dots, gv(B_m)\}. \quad (13)$$

$$B_m = B_w \times B_h.$$

式 (13) において、あるブロック k 内の画素がすべてマスクされていれば、特徴ベクトル G_v 中の要素 $gv(k)$ は 0 となる。なお、実験では $B_w = 24$ 、 $B_h = 12$ とした。

任意の個体間の虹彩顆粒の相違度 D_g は、それぞれから生成される特徴ベクトル間のシティブロック距離を要

素数で割ったものとする。すなわち、2 つの個体の虹彩顆粒の特徴ベクトルをそれぞれ $G_v1 = \{gv1(k) \mid k = 1, 2, \dots, B_m\}$ 、 $G_v2 = \{gv2(k) \mid k = 1, 2, \dots, B_m\}$ とすると、それらの相違度は A_g を定数として、式 (14) のようになる。

$$D_g = \frac{A_g}{B_m} \sum_{k=1}^{B_m} |gv1(k) - gv2(k)|. \quad (14)$$

また、抽出誤差を考慮して、虹彩顆粒矩形の幅および高さ、虹彩顆粒の主軸をそれぞれ変動させて生成した特徴ベクトルを複数個用意する。それぞれに対して式 (14) の計算を行った結果の最小値を、2 つの個体間の相違度とする。

5. 実 験

左右の目を別々の個体として扱い、3 歳から 23 歳までの馬より 608 種類の映像データを取得した。左右の目を別個の個体として扱ったのは次のような理由による。一般に個体識別システムにおいては、本体と他体の識別が目的であるため、同一個体の左右の目の識別は不用である。しかしながら本論文の主旨は、目の個体差の検証である。人間の虹彩は同一人物でも左右の目において個人差があるといわれている¹⁰⁾。このため、馬の目においても同様な傾向があるか否かを検証する意味で、左右の目を異なる個体とした。

他体間の相違度を計算するため、608 種類の映像データからそれぞれ良好な画像を 1 枚ずつ取得した(任意の異なる個体の 2 枚の画像を選択する組合せの総数は 184,528 通り)。これらの画像をまとめて他体評価用画像セットと呼ぶ。また、本体間の相違度を計算するために、12 種類の映像データからそれぞれ良好な画像を 60 枚ずつ取得した(同じ個体から得られた任意の異なる 2 枚の画像を選択する組合せの総数は 21,240 通り)。これらを本体評価用画像セットと呼ぶ。良好な画像の選択は、(1) 焦点が合っている、(2) 目が正面を向いている、(3) 目頭から目尻までの全体が画面いっぱいに写っている、という判断基準により行った。主観的な判断であるため、どの画像を選択するかによって実験結果も多少変化する可能性があるが、個体差の有無の評価には大きな影響はないものと考えられる。

虹彩の楕円近似および虹彩顆粒抽出は、計算機で自動的に行った後、抽出失敗が著しいものに対しては手動で修正を行った。なお、良好な画像に対する楕円近似の成功率は 99.7% であり、虹彩顆粒抽出成功率は 81.6% であった。

図 12 は、虹彩特徴による本体間、他体間の相違度

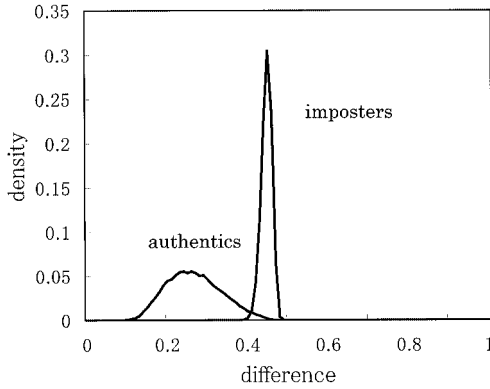


図 12 虹彩特徴の相違度分布
Fig. 12 Distribution of iris differences.

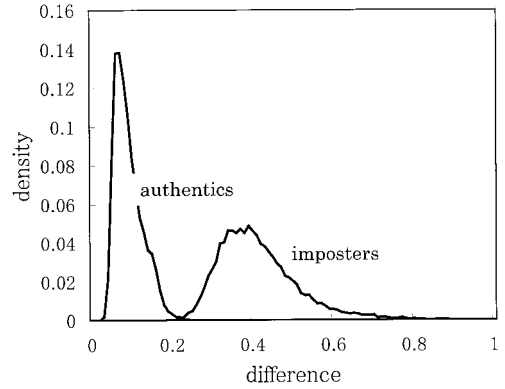


図 13 虹彩顆粒特徴の相違度分布
Fig. 13 Distribution of granula iridica differences.

表 1 虹彩特徴のエラー率
Table 1 Error rate of iris.

閾値	FAR	FRR
0.394	1.1×10^{-4}	4.4×10^{-2}
0.405	1.2×10^{-3}	3.1×10^{-2}

表 2 虹彩顆粒特徴のエラー率
Table 2 Error rate of granula iridica.

閾値	FAR	FRR
0.226	8.0×10^{-5}	4.7×10^{-2}
0.254	8.5×10^{-4}	2.5×10^{-2}

分布の密度関数を示した図である．図 12 において，本体間相違度の平均値は 0.271，他体間相違度の平均値は 0.452 であった．

図 12 に対し，ある閾値 T を定め，2 つのコードの相違度が T より小さければ，それぞれのコードは同じ目（本体どうし）から生成されたものであると判断し，相違度が T より大きければ異なる目（他体どうし）から生成されたものであると判断する．

このときのエラー率を次のように表す．すなわち，他体であるにもかかわらず本体であると判断する割合（他体受諾率）を FAR (False Accept Rate) とし，本体であるにもかかわらず，他体であると判断する割合（本体拒否率）を FRR (False Reject Rate) とする．図 12 の本体間分布の密度関数を $IS(x)$ ，他体間分布の密度関数を $IO(x)$ とし，FAR と FRR をそれぞれ閾値 T に関する関数として式 (15)，(16) のように求める⁶⁾．

$$FAR(T) = \int_0^T IO(x)dx. \quad (15)$$

$$FRR(T) = \int_T^1 IS(x)dx. \quad (16)$$

図 12 における閾値と各エラー率の値を表 1 に示す．FAR を低い値に設定すると FRR は高い値になり，その逆も真である．本体評価用画像セット中の画像の組合せにおいて，すべての組合せが閾値を下回らなかった個体は存在しなかったため，本体拒否は画質のばらつきによる差が要因であると予想できる．

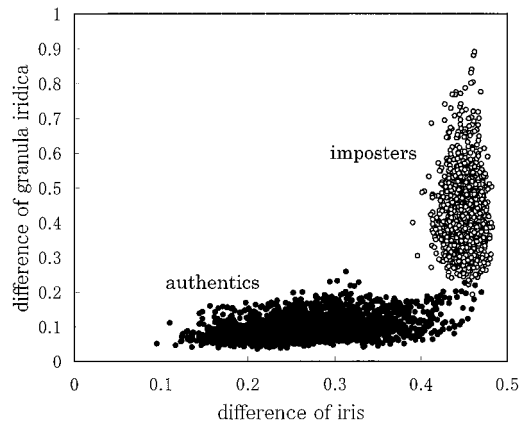


図 14 虹彩特徴と虹彩顆粒特徴の相違度の二次元分布
Fig. 14 2-D distribution of iris differences and granula iridica differences.

図 13 は虹彩顆粒特徴を用いた方法による本体間，他体間の相違度分布の密度関数を示した図である．式 (14) における A_g は $1/350$ とした．図 13 で，本体間相違度の平均値は 0.097，他体間相違度の平均値は 0.418 であった．虹彩顆粒においても，虹彩と同様に本体間相違度の平均値は，他体間のそれよりも小さく，個体差を示す手段として有効であることが分かる．

虹彩特徴に用いたエラー率を，虹彩顆粒特徴に対しても同様に求めた結果を表 2 に示す．虹彩特徴と同等の識別性能があることが分かる．

図 14 は任意の個体間の虹彩特徴の相違度と，それと同じ組合せによる虹彩顆粒特徴の相違度を，二次元

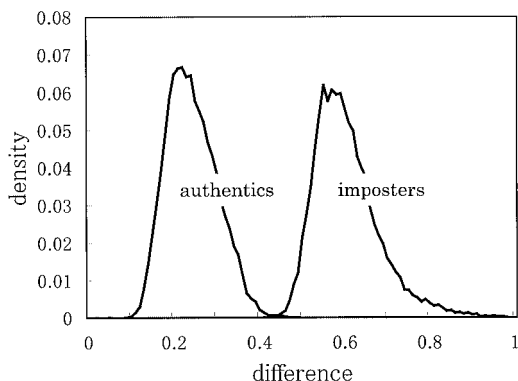


図 15 虹彩特徴と虹彩顆粒特徴の複合相違度分布
Fig. 15 Projection on a line of 2-D distribution.

表 3 虹彩特徴と虹彩顆粒特徴の複合のエラー率
Table 3 Error rate of Fig. 15.

閾値	FAR	FRR
0.429	6.3×10^{-5}	2.5×10^{-3}
0.455	9.4×10^{-4}	8.5×10^{-4}

平面にプロットしたものである。本体間と他体間の分布には大きな違いが見られる。

この二次元平面上に本体と他体を分離するための適当な直線 L_t を設定し、原点を通り L_t に対して垂直な直線 L_f を求める。次に、二次元分布を構成する各点について、 L_f 上に垂直に下した点と原点との一次元距離分布を求めた。図 15 は、一次元距離分布における本体間と他体間の重なりが最も少なくなるように L_t を設定したときの密度関数である。この密度関数の x 軸方向の値は、虹彩と虹彩顆粒の相違度を線形結合した複合相違度となる。この複合相違度を用いた場合のエラー率を表 3 に示す。

中央競馬の競走馬の数は約 6,000 頭である。馬体検査時に外観特徴が明らかに異なる場合などは、検査員が容易に判定できることから、本論文による識別システムの精度は、FAR が 1 万分の 1 程度を妥当な値であると考えている。検証の結果、FAR = 1/10,000 以下および、FRR = 1/400 以下の識別精度が得られた。このことは、馬の目による個体識別システムの実現の可能性を示している。

計算機としてシリコングラフィックス社の O2 (CPU: R10000, 195 MHz) を用いた場合の平均処理時間は、虹彩の楕円近似が 669.6 ミリ秒、虹彩のコード生成が 160.6 ミリ秒、ビットシフトを含むハミング距離計算が 1.1 ミリ秒であった。また、虹彩顆粒抽出は 842.7 ミリ秒、ブロック化は 1453.6 ミリ秒、特徴ベクトルの距離比較は 1.1 ミリ秒であった。虹彩のコードのハミング距離計算および虹彩顆粒の特徴ベク

トル比較は、それぞれ 2 つの個体間の比較に要した時間である。

現在の馬体検査に要する時間は 1 頭につき約 15 秒である。虹彩特徴と虹彩顆粒特徴の両方を用いたときの処理の合計時間は約 3 秒であるため、現行の馬体検査の時間内に認識結果を出力することは可能である。

6. むすび

馬の虹彩および虹彩顆粒について、個体差の検証を行った。虹彩については皺のパターンをコード化し、コード間のハミング距離によって本体と他体を区別した。虹彩顆粒については、画像中から虹彩顆粒領域を切り出し、切り出された領域内の濃淡のパターンを比較することにより本体と他体を区別した。実験の結果、虹彩および虹彩顆粒には個体差が存在し、それらの特徴を用いることによって、本体であるか他体であるかを識別することが可能であることが分かった。さらに、それらの特徴を複合して用いることによって、個体識別システムの実現可能性があることも明らかとなった。

虹彩顆粒は牛など、他の草食動物にも存在するため、この方法を応用することは可能である。また、離れたところからデータを取得することができるため、対象となる動物が急に暴れた場合でも、動物と検査を行う人間の両方にとって安全である。

本論文では、個体差の検証を目的としたため、比較的安定した環境でデータを取得した。実際の競馬場での使用を考えた場合、本体確認を行う場所は屋外環境である。このため、瞳孔サイズの変化など外光の影響を受けやすくなる。これに関し、虹彩に対する座標系のあてはめ方法や、虹彩顆粒の切り出し方法について改良を加える必要がある。

参考文献

- 1) 日本中央競馬会：中央競馬のすべて，pp.171-179，日本中央競馬会広報室，東京（1993）。
- 2) 木全春生：馬の知識，pp.158-164，サイマル出版会，東京（1994）。
- 3) Barnett, K.C., Crispin, S.M., Lavach, J.D. and Matthews, A.G.: *EQUINE OPHTHALMOLOGY*, pp.9-21, Mosby-Wolfe, Italy (1995).
- 4) 日本中央競馬会競走馬総合研究所：馬の科学，pp.165-170，講談社，東京（1995）。
- 5) Daugman, J.G.: High Confidence Visual Recognition of Persons by a Test of Statistical Independence, *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol.15, No.11, pp.1148-1161 (1993).
- 6) Niu, Y. and Sasaki, Y.: Recognition of Muz-

zle Pattern Using Local Features in Cattle, Bioimaging Society, *Bioimags*, Vol.1, No.2, pp.81-88 (1993).

- 7) 坂野 鋭: バイオメトリック個人認証技術の動向と課題, 信学技報, パターン認識・メディア理解, PRMU-99-29, pp.75-82 (1999).
- 8) 佐藤宏介, 土居元紀: 自分がパスワード—バイオメトリック本人確認, 電子情報通信学会誌, Vol.82, No.4, pp.340-345 (1999).
- 9) 松下満次, 谷本英雄, 和田誓一: アイリス個人識別システム, 沖電気研究開発第 175 号, Vol.64, No.3, pp.107-110 (1997).
- 10) Daugman, J.G.: Wavelet demodulation codes, statistical independence, and pattern recognition, Institute of Mathematics and its Applications, *Proc. 2nd IMA-IP*, pp.244-260 (1999).

(平成 11 年 9 月 16 日受付)

(平成 12 年 6 月 1 日採録)



須崎 昌彦

1966 年生. 1990 年神戸大学工学部電気工学科卒業. 1992 年同大学院自然科学研究科電子工学専攻修士課程修了. 同年沖電気工業(株)に入社. 画像処理, 画像認識, コンピュータグラフィックス等の研究に従事. 電子情報通信学会

会員.



山北 治

1966 年生. 1989 年岐阜大学工学部電気工学科卒業. 1991 年同大学院工学研究科電気工学専攻修士課程修了. 同年沖電気工業(株)入社. 以来画像認識の応用研究および開発に

従事. 電子情報通信学会会員.



久野 裕次(正会員)

1961 年生. 1984 年名古屋大学工学部電子工学科卒業. 1986 年同大学院工学研究科電気電子工学専攻修了. 同年沖電気工業(株)入社. 画像認識技術の研究開発に従事. 電子情報通信学会, 人工知能学会各会員. 工学博士.



間 弘子

1959 年生. 1981 年北里大学獣医学部畜産学部獣医学科卒業. 日本中央競馬会嘱託を経て, 1991 年入会. 1995 年獣医学博士取得. 現在, JRA 日高育成牧場生産育成研究室研究員. 馬の麻酔および循環生理の研究に従事.



佐々木直樹

1967 年生. 1992 年岩手大学農学部獣医学科卒業. 同年日本中央競馬会に入会. 現在, JRA 競走馬総合研究所臨床医学研究室研究員. 馬の消化器病学の研究に従事.



楠瀬 良

1951 年生. 1975 年東京大学農学部獣医学科卒業. 大学院等を経て, 1982 年日本中央競馬会に入会. 1985 年獣医学博士取得. 現在, JRA 競走馬総合研究所運動科学研究室室長. 馬の行動学の研究に従事. 「サラブレッドはゴール板を知っているか」(平凡社)執筆.