絵画におけるテクスチャの物理的特性およびクラスタリング

Physical Property and Clustering for Textures in Paintings

中井隆洋[†], 正会員 蓼沼 眞[†]
Takahiro Nakai[†] and Makoto Tadenuma[†]

あらまし 画家によって描かれた絵画のテクスチャ（筆遣い）を特徴付ける物理量を定義し、テクスチャの視覚的な違いをそれらの物理量にて説明した。また、それらの物理量に基づくテクスチャのクラスタリング手法を提案した。

キーワード：絵画，テクスチャ，2次元周波数，クラスタリング

1. ま え が き

画家によって描かれた絵画から、その画家特有の画風を感じることはよく経験する。この画風に大きな影響を及ぼすものとしては、その絵画における色、構図、テクスチャ（筆遣い、タッチ）などがあり、これらの要素はその印象、画風のみならず、そのイメージ表現の品質にも大きな影響を与えていると考えられる。そのような考えに基づき、筆者等の研究室においては、これまでに、名画や専門家の作品における配色や構図やテクスチャを参考にして、自分の作品やコンテンツを制作するための、絵画制作支援システムの構築を行ってきている^{1) 2)}。

これらの要素の内、色についてはすでにその測定方法や物理的特性などは明らかにされている。また構図についての研究は、少ないようではあるが、上述の絵画制作支援システムの中で、黄金分割手法を用いて絵画の構図情報の抽出を行った例²⁾はある。これに対し、画家のテクスチャについては、その物理的特性の把握方法やそれらの特性と画家との関係について報告された例はあまり見当たらない。

そこで本報告では、画家の好むタッチの違いをテクスチャから読み取ることを目標として、今回個性的なテクスチャを持つ画家の代表として、GochとRenoirを取り上げ、彼等の絵画に現れるテクスチャに対して、いくつかの物理量を測定することにより、その物理的特性とテクスチャあるいは画家との関係を調べた結果について述べる。またそれらの物理量に基づくテクスチャのクラスタリング手法を提案する。

2. 対象とした絵画とテクスチャ

本研究では、エッチング版画やペン画などの線画は対象

2001年9月5日受付，2001年11月26日再受付，2001年12月20日採録

[†]ATRメディア情報科学研究所

(〒619-0288 京都府相楽郡精華町光台2-2-2, TEL 0774-95-1465)

[†]ATR Media Information Science Laboratories

(2-2-2, Hikaridai, Seika-cho, Soraku-gun, Kyoto, 619-0288, Japan)

表1 採取時のテクスチャの分類とテクスチャ番号
Classification of extracted textures and their texture numbers.

画家	絵画	グループ a	グループ b	グループ c
Goch	Self Portrait (1889)	1, 2	3, 4	5, 6
	Rising Moon (1889)	11, 12	13, 14	15, 16
	Haute Galline (1889)	21, 22	23, 24	25, 26
Renoir	Theatre Box (1874)	1, 2	3, 4	5, 6
	Girl with Parasol (1883)	11, 12	13, 14	15, 16
	Moulin Galette (1876)	21, 22	23, 24	25, 26

*各数字はテクスチャ番号を表す

グループa: 模様が平坦に見えるテクスチャ

グループb: グループaとcの中間的なテクスチャ

グループc: 模様が明確に見えるテクスチャ

外とし、油絵やパステル画を対象としている。表1に、今回用いた絵画（画像）を示す。各画像データは、各絵画の大きさに応じて、概ね1.5画素/mmないし3.9画素/mmの密度で標本化することにより（ただし、1つの絵画に対しては縦横ほぼ同一の標本化密度を採用）、長辺が3072画素、短辺が2048画素以内の画素数に収まるように標本化されたものであり、各画素はR, G, B各8ビットの色データを持つ。採取する1つのテクスチャの大きさは32画素×32画素とし、各画像に対し、a: 模様が平坦に見えるもの、c: 模様が明確に見えるもの（模様の細かさ、粗さにはかわらずに）、b: その中間的なものと思われるテクスチャを2個ずつ選び、画像1枚当たり6個のテクスチャを採取する。表1に用いた画像毎のテクスチャ番号とそのグループを示す。

3. 計測する物理量

ここでは、画家のテクスチャの特徴量を、その2次元周波数成分の強度分布から求めることを考え、特に画家のタッチの細かさとその揺らぎ、あるいは画家のタッチの方向とその揺らぎに密接に関係すると思われる次の3つの物理量を測定することにした。

3.1 周波数強度分布の重心と原点間の距離D

テクスチャは濃淡画像として扱うので、各テクスチャはR, G, B各8ビットの画像データから8bit輝度信号のみの画像データに変換する。次に平均的な明るさは問題にしないので、テクスチャ毎にその平均値を除く。次にこの32画素×32画素の画像データを2次元FFTする。その結果、水平、垂直周波数ともに-16から+16 (cpwまたはcph) の範囲の周波数格子点上に周波数成分を表す複素数が得られる。次にその複素数の絶対値をとることにより、周波数強度分布を得る。図1に周波数強度分布の測定例を示す。次にこの強度分布を荷重分布とみなし、その重心位置を求め

(最大強度と最小強度の間を 20 等分する等高線で表示)

$D=5.61, V=73.4, P=70.4$

(a) Goch テクスチャ番号1の周波数強度の分布

Frequency intensity distribution of Goch texture number 1.

(最大強度と最小強度の間を 20 等分する等高線で表示)

$D=3.81, V=59.3, P=69.4$

(b) Goch テクスチャ番号5の周波数強度の分布

Frequency intensity distribution of Goch texture number 5.

図1 周波数強度分布の測定例

Example of frequency intensity distribution.

る。ただし、強度分布は原点に関して点対称となるので、重心位置が常に原点となることを避けるために、ここでは右半分の周波数平面 (水平周波数が0から+16, 垂直周波数が-16から+16の範囲) における重心を求めた。重心位置の算出例を図1内に黒丸で示す。ここでは筆の方向は問題にしないので、重心の位置によらず、原点から重心までの距離 D を第1の特徴量として算出する。

3.2 周波数強度分布の重心周りの分散V

次に第2の特徴量として、上記右半平面の周波数範囲で、周波数強度分布の重心周りの分散 V を求める。

3.3 周波数強度分布の第1主成分の寄与率P

上記右半平面における垂直周波数軸上の格子点を第1変量、水平周波数軸上の格子点を第2変量と考え、各格子点上の強度をその第1変量、第2変量を実現したサンプルの頻度と考えると、この2つの変量を統合した第1主成分および第2主成分を定めることができる。この第1主成分の座標軸とは、重心を通るあらゆる軸の中で、その軸に沿った分散が最も大きくなる軸である。今の場合、全変量の個数は2個であるので、全分散すなわち重心周りの分散 V は、第1主成分の分散 V_m と第2主成分の分散 V_s の和に等しくなる。この第1主成分の分散 V_m の全分散 V に占める割合、すなわち第1主成分の寄与率 P を第3の特徴量として求める。図1に、第1主成分軸および第2主成分軸の測定例をそれぞれ実線と破線で示す。

4. D, V, P の分布とテクスチャ、画家との関係

表1に示したGoch, Renoirの絵画計6枚から採取した36個のテクスチャについて、上述の D, V, P を測定した結果を分布図として図2に示す。またそれらの平均値および重回帰式、重回帰係数、回帰直線、相関係数を表2に示す。以下には図2および表2によって得た知見を述べる。

図2 D, V, P の分布

Distribution of D, V, P .

表2 D, P, Vの平均およびD, P, V間の回帰式と相関係数
Means of D, P, V and correlation coefficients, regression expressions between D, P, V.

画家	$\bar{D}$	$\bar{P}$	$\bar{V}$	重回帰式 *	R	回帰直線	ρ	回帰直線	ρ
全体	4.45	68.9	64.0	$V=8.09D+1.80P-95.67$	0.869	$V=10.82D+15.81$	0.783	$V=2.94P-138.67$	0.698
Goch	4.41	68.4	60.3	$V=9.79D+0.969P-49.08$	0.893	$V=11.86D+8.06$	0.868	$V=2.53P-112.63$	0.678
Renoir	4.50	69.4	67.7	$V=7.41D+2.15P-115.01$	0.899	$V=9.35D+25.58$	0.773	$V=3.05P-143.82$	0.688

* 最も相関の小さいD, Pを独立(説明)変数に選んだ。

R: 重相関係数, ρ : 相関係数

4.1 距離Dとテクスチャとの関係

(1) 模様が平坦なテクスチャほど距離Dが大きく、模様が明確なテクスチャほど距離Dは小さい。

図2から、Dの最大クラスは、表1のグループa内のテクスチャのみで構成されており、またグループa内のほとんどは、Dの平均(=4.45)より大きいことがわかる。またDの最小クラスの多くは、グループc内のテクスチャであり、またグループcのテクスチャのほとんどは、Dの平均より小さいことがわかる。この理由を以下に説明する。上述の密度で標準化された画像データから32画素×32画素の大きさのテクスチャを採取した場合、そのテクスチャの原絵画上的の大きさは、概ね1辺が8mmないし22mmのほぼ正方形となる。一方、画家がキャンバス上に筆によって描くテクスチャは、油絵やパステル画の場合、最も細かいものでも線幅はせいぜい2mm程度、すなわち1周期では4mm程度と考えられる。このようなテクスチャを32画素×32画素の大きさの標本として採取すると、その空間周波数は2~6cpw/cph程度となる。すなわち、今回扱った程度の標準化密度を持つ絵画画像データ上の32画素×32画素のテクスチャの場合(これは一つの代表的なテクスチャ標本の採取例と考えられるが)、相当細かい模様のテクスチャを含めても、その周波数強度の集中は、概ね1~6cpw/cphの範囲にしか分布しないと考えられる(実際、今回の測定結果では、水平、垂直周波数ともに1~4cpw/cphの範囲内であった)。次に、このテクスチャが非常に平坦である場合は、平均輝度を除いた後のテクスチャの周波数成分としては、一様に分布するノイズ成分によるもののみにはなるので、周波数右半平面上における周波数強度分布の重心は点G0(+8.0cpw, 0.0cph)に非常に近いものとなる。また上述のとおり周波数強度の集中は概ね1~6cpw/cphの範囲にしか分布しないので、重心位置Gが点G0より水平周波数が高い側に来ることはなく、点G0と強度が最大となる周波数との間、すなわち点G0より水平周波数が低い側に存在するものと考えられる。次に、模様が同じ細かさである場合は、模様が明確でないほどGは点G0に近づくために大きくなり、逆に模様が明確なほどGは点G0よりも原点寄りにある最大強度周波数に近づくために小さくなると考えられる。一方模様が同じ明確さである場合は、当然模様が細かいほ

どDは大きくなり、細かくないほどDは小さくなると考えられるが、模様が明確か明確でないかがDの大小に与える影響の方が、模様が細かくないか細かいかがDの大小に与える影響よりも相当大きいと考えることができる。なぜならば一般に、周波数強度の集中は1点ないしその周辺の数点のみであり、しかもその存在範囲は1~6cpw/cph程度であるが、ノイズによる周波数成分は全周波数帯域(0~+16cpw, -16~-16cph)に渡って存在するので、よほど強い周波数強度の集中がない限り、多くの場合はノイズによる周波数成分の影響の方が勝るからである。以上から、Dの大小については、模様が細かいか細かくないかよりも、模様が明確かあるいは明確でないかによって大きく影響されるため、模様が明確なテクスチャほど距離Dは小さくなるということが理解できる。

4.2 D, V, P間の関係

複数の特徴量を用いる場合、それらはなるべく独立である方が望ましいが、今回用いた特徴量は特に独立性を考慮して選んだものではないので、また以後の検討のためにもそれらの間の相関を調べておく必要がある。以下には簡単にまずそれらの間の相関性について述べる。

(1) D, V間には強い正の相関がある。

図2、表2からわかるように、D, V間には強い正の相関があり、相関係数は $\rho=0.783$ である。この相関が存在する理由は次のとおりである。4.1で述べたとおり、模様が明確なテクスチャほどDは小さくなるが、Vも小さくなる。なぜならば、模様が明確であればあるほどその重心付近に大きな強度の集中が現れるので、模様が平坦な場合に比べて、まず第1主成分の分散 V_m が大幅に減少する(最大値62.9, 最小値28.7)。一方第2主成分の分散 V_s も減少する傾向があった(最大値24.4, 最小値15.1)。分散Vは V_m と V_s の和であるから、結局模様が明確であればあるほどDもVも小さくなる。逆に模様が平坦であればあるほど、DもVも大きくなり、正の相関が生じる。

(2) V, P間にも正の相関がある。

図2、表2からわかるように、V, P間にも正の相関があり、相関係数は $\rho=0.698$ である。これについても次のように考えることができる。(1)で述べたように、模様が明確であれば、 V_m とともに V_s も減少するが、 V_s の減少の度合いは、 V_m の

減少の度合いよりも緩やかである。したがって模様が明確であるほど、 V_s の V_m に対する比率は相対的に増えることになる。すなわち $V_s = a \cdot V_m$ と表記すると、模様が明確であるほど、 a が大きくなる。したがって $P = V_m / (V_m + V_s) = 1 / (1 + a)$ は小さくなる。結局、模様が明確であれば、 V も P も小さくなり、 V 、 P 間には正の相関が生じる。

(3) D 、 P にも弱い正の相関がある。

上記 (1)、(2) から正の相関が生じることは明らかである。相関係数は $\rho = 0.465$ であった。

(4) D 、 P から V への精度の良い重回帰関係がある。

D 、 V 、 P の内、最も相関が低い D 、 P を説明変数に選び、 V を予測する重回帰式を求めると次式となる。

$$V = 8.09D + 1.80P - 95.67$$

また重相関係数は $R = 0.869$ である。このように精度の悪くない重回帰式が得られた。次に D 、 P が V に与える影響の度合いを評価するため、 D 、 P 、 V を、平均が0、分散が1となるように正規化した変数を ZD 、 ZP 、 ZV とし、その間の重回帰式を求めると次式となる。

$$ZV = 0.585ZD + 0.426ZP$$

したがって、6:4程度の割合で D の影響の方が P の影響よりも大きいことがわかる。

4.3 GochとRenoirにおける D 、 V 、 P の分布の違い

図2の分布図、表2の回帰直線、相関係数、平均値から以下の知見が得られる。

(1) 表2のGochの D 、 V 間の相関は、Renoirのものより極めて高い。これはGochのテクスチャで模様が明確なものは、Renoirよりも、より強く重心付近への周波数強度の集中が起こっているためと考えられる。

(2) また図2の D 、 V 、 P に基づく分布状態を見ると、Gochについては、1本の直線（第1主成分軸）にのる傾向が明確に見られる。このことから、Gochについては重回帰平面を求める分析よりも主成分分析の方がより適しており、さらに第1主成分のみでもかなり精度良く特徴を捉えられる可能性があることがわかる。一方Renoirについては、Gochよりは第1主成分軸からのばらつきが見られ、したがって第2主成分、第3主成分による影響がGochよりは大きいこと、またその分、重回帰分析については、Renoirの方がGochよりは適していることなどがわかる。もちろん複数の特徴量を用いる場合、それらは互いに独立である方が後に検討するクラスタ間の分離が明瞭になって望ましいはずであるが、ここで用いたような互いに相関性のある D 、 V 、 P の3変量のままでも、分布の特徴を捉えることは可能であり、また D 、 V 、 P のままの方が「直感的でわかりやすい」という利点がある。したがって、今回は「直交性は高いものの、直感できる変数とはならない」主成分への変換は行わなかった。

(3) 表2のRenoirの P の平均、 V の平均は、Gochのものより大きい。これは先の考察にあるように、Renoirのテクスチャの方がGochより平坦であることを意味し、見た印象と一致する。

5. D 、 V 、 P によるテクスチャのクラスタリング

今回用いたGochのテクスチャ18個、Renoirのテクスチャ18個を、それぞれの D 、 V 、 P 3次元空間上の分布状況に基づき、重心法を用いてクラスタリングを行った。ただし D 、 V 、 P 間で共通の距離の尺度を用いる必要があるため、正規化した変数 ZD 、 ZV 、 ZP を用いる。最適なクラスタの数は以下のようにして決めた。いまクラスタの個数を C 個としてクラスタリングを行ったとする。そのときあるクラスタの重心とそのクラスタに属するすべてのサンプルとの距離の2乗総和（SDと記す）を求め、さらに、SDの C 個のクラスタすべてに渡る総和をとったもの（SSDと記す）を求めると、SSDはその個数のクラスタに分割したときのクラスタリングの精度を表していると考えられる。 $C=18$ 個からクラスタリングを開始し、 $C=1$ 個になるまでクラスタの個数を変えていったときの上記SSDをプロットし、SSDが急激に増大する直前の C （またはそれより大きな C ）で、許せる程度の大きさのSSDを与える C を最適なクラスタ個数とする。図3にクラスタリング精度の算出結果を示す。図3から、Gochについては $C=3$ が良いと言える。Renoirについては、 $C=3$ ではSSDがやや大きい、 $C=5$ を採用しても、2番と23番のテクスチャがそれぞれ新たなクラスタとして独立しただけであったので、ここでは $C=3$ とした。図4に、それぞれを $G1$ 、 $G2$ 、 $G3$ および $R1$ 、 $R2$ 、 $R3$ の3個にクラスタリングした結果を示す。図4を見ると、Goch、Renoirともに D 、 V 、 P が最大のクラス（ $G1$ 、 $R1$ ）、それらが総合的に最小のクラス（ $G3$ 、 $R3$ ）、その中間のクラス（ $G2$ 、 $R2$ ）に分割されたことがわかる。上記4.1、4.2で述べたように、この D 、 V 、 P の大小は、模様が平坦に見えるか、明確に見えるかと大きな相関があったので、結果的にここで得られたクラスタリングは、テクスチャ採取時の目安としたグループa、b、cに近いものになった。実際 $G1$ はグループaの全

図3 クラスタ数とクラスタリング精度
Total number of clustering and clustering precision.

図4 ZD, ZV, ZPによるクラスタリング
Clustering based on ZD, ZV, ZP.

数のみを含み、R1もグループaの半数を含んでいる。またR3はグループcの1/3を含んでいる。G3は、グループcにはあまり対応していないが、全体的に見て、このクラスタリングはグループa, b, cに近いといえる。したがって、テクスチャを無作為に選び、その物理量 D , V , P を測定し、クラスタ数を3個としてクラスタリングを行えば、ある程度は、模様が平坦なテクスチャか、模様が明確なテクスチャか、その中間的なテクスチャかの自動判別ができると思われる。また、サンプル数を多くしたとき、上記の方法で最適なクラスタ数を3個以上にとることができれば、各クラスに属するテクスチャのここで取上げた以外の印象と D , V , P の特徴との対応を知る手懸りとなる可能性がある。

6. む す び

今回、絵画（油絵やパステル画）のテクスチャを特徴付けられると思われる3つの物理量を定義して、これらの物理量の間に成立つ関係を明らかにし、GochとRenoirのテクスチャの違いをそれらの物理量の違いにより説明した。また、最適なクラスタ数を決める方法を示し、これらの物理量に基づきクラスタリングを行った結果、妥当なクラス分割が得られた。今後は、扱うテクスチャの大きさを原絵画の上でも揃える、他の画家についても調べる、また、従来から提案されている一般的なテクスチャを対象とした特徴抽出手法を適用した場合との比較などが課題であり、ここでの検討をより深めて行きたい。

〔文 献〕

- 1) Andre Planet, Shoji Tanaka and Yuich Iwadata: "M-Motion: Conveying Emotions Through Digital", 映像学技報, 23, 33, pp25-30 (May, 1999)
- 2) 田中昭二, 棚沢順, 井口征士, 岩館祐一: "Image Re-Composer: 画家の構図を利用した被写体再構成システム", 信学技報, MVE98-98, (Mar. 1999)

中井 隆洋 1976年、大阪大学基礎工学部機械工学科卒業。同年、(株)三菱電機に入社。映像情報開発センターにてTV, VTRの画質改善回路、画像符号化伝送装置等の開発に従事。2001年、(株)ATRに出向し、イメージ表現支援関連技術の研究中。

蓼沼 真 1982年、東京大学工学部電子工学科卒業。同年、NHKに入局。1986年より、同NHK放送研究所において、主に立体映像システムおよびその符号化方式の研究開発に従事。2000年より、ATRに勤務し、現在同イメージ情報科学研究所第二研究室長として、イメージ表現支援技術の研究を推進。正会員。