

独立成分分析による顔色変化予測に 基づく顔画像の評価 *

植月啓次，津村徳道，小島伸俊*，三宅洋一

千葉大学工学部情報画像工学科

〒263-8522 千葉市稲毛区弥生町1-33

*花王(株)スキンケア研美容センター第3研究室

〒131-8501 墨田区文花2-1-3

P r e d i c t i o n o f f a c i a l c o l o r v a r i a t i o n
b y u s i n g I n d e p e n d e n t C o m p o n e n t
A n a l y s i s a n d e v a l u a t i o n
o n f a c i a l i m a g e s

K e i j i U E T S U K I , N o r i m i c h i T S U M U R A , N * a n d Y o s h i c h i J I M A
M I Y A K E

D e p a r t m e n t o f I n f o r m a t i o n a n d I m a g e S c i e n c e s , C h i b a U
v e r s i t y

1-33, Yayoi-cho, Inage-ku, Chiba 263-8522 Japan

*Kao Corporation

2-1-3, Bunka, Sumida-ku, Tokyo 131-8501, Japan

要旨

近年，マルチメディア，ＣＧ，遠隔医療などの技術の発展に伴って，顔色再現がますます重要視されている．人間の肌は複数の層を形成する複雑な構造であり，各層にはメラニン，ヘモグロビンなどの色素が存在する．肌の構造や色素成分の変化によって，肌の見えは様々に変化する．本研究では，顔画像よりメラニンとヘモグロビンの成分量を分離抽出し，それぞれの成分量を変化させ再び合成することで，様々な肌色の顔画像を予測する．さらに各色素成分量と顔色の見えとの関係を，主観評価実験により解析する．

キーワード

独立成分分析，顔色，メラニン，ヘモグロビン，主観評価，見え

A b s t r a c t

With the recent progress in various imaging systems, facial skin color reproduction becomes increasingly important. Human skin is a very turbid medium with multilayered structure. Various pigments such as melanin and hemoglobin are contained in the skin. Slight changes in structure and pigment construction produce rich skin color appearance. In this research, we reproduce various facial skin color by changing amount of melanin and hemoglobin components. The spatial distributions of melanin and hemoglobin components in the skin are separated by independent component analysis of skin color. The separated components are synthesized to reproduce the various facial color images by changing amount of separated pigments. The synthesized images are evaluated subjectively by comparing with the original facial image. Correlation maps are analyzed between appearance of facial color images and amount of melanin and hemoglobin components in the facial skin. From these analysis, we could find that how changes of melanin or hemoglobin components influence the appearance of facial color image.

Keywords

Independent Component Analysis, Facial color, Melanin, Hemoglobin, Subjective evaluation, appearance

1 はじめに

昔からカラーフィルムの色再現やカラーテレビジョンシステムにおいて、顔色の再現は最も重要である。近年のマルチメディア、CG、遠隔医療などの画像システムの発展に伴って、通信、ハード・ソフトコピー上の画像再現、医療診断や化粧品開発などに対して、顔色再現は一層重要となっている。

人の肌はいくつかの層からなる複雑な構造をしている。肌にはヘモグロビンやメラニンといった様々な色素が含まれている。肌の構造や色素含有量のわずかな変化によって、肌の色は様々に変化する。従って、化粧品開発や医療診断において、その構造と色素成分量に基づいた解析が必要である。すなわち、物理量としての肌の色素成分量と、感性量としての顔色の見えとの関係の解析が重要と考えられる。

独立成分分析を用いてカラー画像を分析する手法が近年注目されている。独立成分分析は、互いに独立な信号が混合した観測信号から、信号の独立性以外の先見的知識なしにもとの信号を抽出する手法である¹⁻³⁾。多重音声分離、脳波データの解析、移動体通信における信号処理、画像の特徴抽出などへの応用が試みられている。井上らは、混合物を撮影したカラー画像からその成分を独立成分分析により抽出する手法を提案している^{4,5)}。津村らは、井上ら手法に基づき、カラー画像として人間の肌を対象とした場合に、ヘモグロビンとメラニンの色素分布を分離することに成功している^{6,7)}。また、分離された成分量を変化させた後、再び合成することにより、様々な顔色を合成できることを示している。

本研究では、色素量を変化させて合成された複数の顔画像に対して、25個の形容詞対を用いた主観評価実験を行う。その結果に基づき、顔画像の見えと、肌に存在するメラニン・ヘモグロビンの色素成分量との関係を解析する。次節で

は独立成分分析の解説とその色素分離への応用について説明する．第3節では，肌色をモデル化し，独立成分分析を適用する方法について説明する．第4節で，第3節までの方法を用いて合成した複数の顔色変化画像の作成結果とその主観評価実験について述べる．また，主観評価実験の結果について考察する．最後に第5節で本論文のまとめと考察を行う．

2 独立成分分析とその色素分離への応用

複数の信号が混在した信号から，単一の信号を分離する問題は，信号源分離問題と呼ばれる．この問題の解法の1つとして，独立成分分析(Independent Component Analysis)がある．独立成分分析は，1)信号源が互いに統計的に独立な信号を発信している，2)信号源の線形和で混合信号が表される，という仮定のもとで，信号源を分離する統計的手法である¹⁻³⁾．

井上らは，ある複数の色素で構成される試料を撮影した画像に独立成分分析を適用する場合を考えた⁴⁻⁵⁾．簡単のため，試料が2つの色素で構成され，2チャンネルの撮影システムで撮影されると仮定する．いま， $s_1^{l,m}, s_2^{l,m}$ を画像の座標 (l, m) での2つの色素量， a_1, a_2 を2色素の単位色ベクトルとする．ここで合成された色ベクトル $v^{l,m}$ を，2つの色素の単位色ベクトルが色素量 $s_1^{l,m}, s_2^{l,m}$ で線形に混合されたものであると仮定すれば， $v^{l,m}$ は次式で表される．

$$v^{l,m} = s_1^{l,m} a_1 + s_2^{l,m} a_2 \quad (1)$$

色ベクトル $v^{l,m}$ の各要素は，各チャンネルでの画素値を表している．列要素に単位色ベクトルをもつ 2×2 の混合行列 $A = [a_1, a_2]$ と，座標 (l, m) における色素量ベクトル

$s^{l,m} \in [s_1^{l,m}, s_2^{l,m}]^T$ で式 (1) を書き直すと , 次式となる .

$$v^{l,m} \in As^{l,m} \quad (2)$$

ここで $s_1^{l,m}, s_2^{l,m}$ は座標 (l , m) において互いに独立であると仮定する . Fig . は混合のプロセスを表したものであ Fig 挿入
る . 我々が既知の信号は観測信号 $v^{l,m}$ のみである .

各色素量が互いに独立であるという条件のもとで , 独立成分分析を画像の混合色ベクトルに適用することで , 色素量と色ベクトルについての先見的知識なしに , 相対的な色素量とその単位色ベクトルを推定することができる . Fig . に示したように , 分離ベクトル h_1, h_2 を列要素にもつ分離行列 $H \in [h_1, h_2]$ と分離されたベクトル $s^{l,m} \in [s_1^{l,m}, s_2^{l,m}]^T$ を定義すれば , その関係は次式となる .

$$s^{l,m} \in Hv^{l,m} \quad (3)$$

適当な分離行列 H を推定することで , 混合された色ベクトルより , 互いに独立な信号 $s_1^{l,m}, s_2^{l,m}$ を求めることができる .

分離された独立信号 $s_1^{l,m}, s_2^{l,m}$ はそれぞれ $s_1^{l,m}, s_2^{l,m}$ に対応するものであるが , 絶対的な色素量ではない . 従って推定される独立ベクトル $s^{l,m}$ は次のように表すことができる .

$$s^{l,m} \in R \cdot s^{l,m} \quad (4)$$

R はベクトルの要素を置き換える置換行列であり , $\cdot$ は絶対量と相対量とを関連付ける対角行列を表している . 式 (2) と式 (3) より , 式 (4) は次のように書き表される .

$$HAs^{l,m} = R? s^{l,m} \quad (5)$$

任意の色素量ベクトルについて式(5)が成り立つには、行列 HA と $R?$ が等しくなければならない。よって A は次式によって計算できる。

$$A = H^{-1}R? \quad (6)$$

すなわち独立成分分析によって得られるのは、相対的な色素量と色ベクトルの方向のみである。分離行列 H の推定法には様々な手法¹⁻³⁾が提案されているが、本研究では固定点アルゴリズム³⁾(Fixed Point Algorithm)を用いる。

3 肌色への独立成分分析の適用⁷⁾

3.1 肌色のモデル化

人間の肌の構造を Fig. 1 に示す。表皮層と真皮層には Fig. 1 挿入 様々な色素が存在する。特に表皮層にはメラニンが、真皮層には血液に含まれるヘモグロビンが多く存在している。

肌色画像は、RGB カラー CCD カメラによって取得される。座標 (l, m) における各チャンネルの画素値を $r^{l,m}, g^{l,m}, b^{l,m}$ で表す。

肌色のモデル化にあたり、以下の4つの仮定を行う。
1) 肌からの反射光に対して、Lambert-B 則⁶⁾または巨視的 Lambert-B 則⁶⁾が成り立つ。2) 肌から反射される分光分布は、カメラのカラーフィルターの感度域内で大きく変化しない。3) 肌色の空間的变化は、メラニンとヘモグロビンの

色素量の変化による．4)各色素量は，互いに空間的に独立である．

これらの仮定により，各チャンネルの画素値の逆数の対数： $\log(r^{l,m}), \log(g^{l,m}), \log(b^{l,m})$ をとった濃度空間において，単一色素の色信号と観測信号との間に線形関係が仮定される⁷⁾．従って，肌色はFig. 6のようにモデル化することがFig. 7挿入できる．濃度空間上では，観測される肌色はベースの色に加えて，ヘモグロビンとメラニンの色ベクトルによって張られる2次元平面上に分布する．

3.2 肌色の独立成分分析

肌色のモデルに従って，独立成分分析を適用する．メラニンとヘモグロビンの色素量を独立成分ベクトル $s^{l,m}$ の要素 $s_1^{l,m}, s_2^{l,m}$ とみなすことができる．また，観測される3チャンネルの色信号の濃度を，観測ベクトル $v^{l,m}$ の要素 $v_1^{l,m}, v_2^{l,m}, v_3^{l,m}$ とすれば，式(2)の線形関係が成り立つ．ここで混合行列Aの要素 a_1, a_2 は，メラニン，ヘモグロビンの単一色ベクトルである．3チャンネルの観測信号は主成分分析によって独立成分と同じ2次元に削減され，固定点アルゴリズムによって単一色ベクトルが推定される．参考文献7に示すように，ニキビがヘモグロビン成分として分離されていることや本論文の後で示す様々な顔色画像の合成結果から，前小節の4つの仮定に基づく肌色のモデル化と独立成分分析による分離，合成結果は，色再現という応用分野では，色素成分に基づいた新しい概念のカラー画像処理法であると考えている．しかし，色素成分に基づく医療診断など応用する際には，光散乱の影響などにより上記の線形性の仮定による誤差が無視できず，光散乱を考慮した肌の分光反射率の非線形独立成分分析を行う必要がある⁸⁾．

4 顔色変化に対する主観評価実験

4.1 顔色変化画像の推定

実験に使用する顔画像は、市販のCCDカメラ(Nikon D1)によって撮影した、 2000×1312 ピクセルのRGBカラー画像である。濃度空間における観測信号の線形性を保つため、撮影時に照明とカメラの前面に偏光フィルタを設置し、観測信号から被写体の表面反射成分を取り除く⁹⁾。また、できるだけ拡散照明を行うことにより、抽出される成分量に照明ムラに起因したバイアスを防ぐのを防いだ。Fig. 4はFig 挿入
顔色変化画像の再現プロセスを示したものである。3チャンネルで撮影された内部反射成分のみの顔画像より、肌色サンプルとして使用する画像を切り出し、その画素値の逆数の対数をとることで、メラニン色素とヘモグロビン色素の分離を行う。さらに各色素の濃度を変化させ、再び合成することで、様々な顔色再現を行う。普段我々が見る顔には表面反射成分が含まれているため、合成後の顔画像に再び表面反射成分を加えて最終的な顔色変化画像となる。

4.2 主観評価実験

実験のために、推定された各色素量をそれぞれ5段階(0.7倍, 1倍, 1.3倍, 1.6倍, 1.9倍)変化させて合成し、計25枚の顔色変化画像を作成した。Fig. 5(a), (b)Fig 挿入
再現された男女各25枚の顔画像を示す。横軸がヘモグロビン色素量の変化、縦軸がメラニン色素量の変化を表わし、右上に行くほど肌の色素濃度が濃くなる。これらの画像を用いて、次のような主観評価実験を行う。Fig. 6Fig 挿入
実験用GUIを示す。評価者には、CRTディスプレイ上に原画像と色素成分変化後の画像を2枚提示し、原画像と

比べて変化後の画像がどのような印象をもつか、25組の形容詞対について5段階の評価をしてもらった。評価者は20代前半の研究室内の学生10名である。Fig.に使用 Fig 挿入した形容詞対を示す。

使用した顔画像は、20代前半の男女各1名の顔色変化画像各25枚、計50枚である。5段階評価の最高点を+2、最低点を-2として、実験より得られたデータを顔画像毎に整理した。各顔色再現画像に対して得られた、各形容詞対に対する評価値は、10名の評価者の平均値とした。このデータをもとに、各形容詞対のメラニン・ヘモグロビン色素量の変化と、評価値の相関図を作成した。Fig.に各形容詞対ごとの相関図を示す。縦軸、横軸は Fig.挿入メラニン・ヘモグロビンの色素量変化の度合いを示し、対応する評価値を等高線によって表した。例えば、Fig.8右上は、形容詞対である「不健康そうな-健康そうな」に対する主観評価実験の結果である。図中で黒いほど、すなわち評価値が低いほど、不健康そうに評価された顔色変化画像であったことを示す。オリジナル画像に対して、ヘモグロビン色素量1.3倍、メラニン色素量1.2倍付近で最も白い色、すなわち高い評価値を示しており、最も健康そうな顔色変化画像として評価されている。

得られた相関図を4つのカテゴリに分類した。1つは、メラニンの色素量のみに関連をもつものである。例えばFig.中の「澄んだ-濁った」はこのカテゴリに分類できる。2つ目は、ヘモグロビンの色素量のみに関連をもつものである。例えばFig.中の「赤味が強い-黄味が強い」がこのカテゴリに分類できる。3つ目は、メラニンとヘモグロビンの両色素量に関連をもつものである。例えばFig.中の「上品な-下品な」がこのカテゴリに分類される。最後は、ある色素量のときにピークを

もつような形容詞である．例えばFig.中の「健康そうな - 不健康そうな」がこのカテゴリに分類される．25個すべての形容詞対をカテゴリ分けすると，Table のよ Table 挿入うに分類できる．

ここで，「透き通った - 不透明な」「きめの細かい - きめの粗い」「濁った - 澄んだ」といった，メラニン色素について相関が強い形容詞対群の傾向から，メラニン色素の変化は肌の質感の印象に大きく影響すると考えられる．また，「地味な - 派手な」「活気のない - 活気のある」「暗い - 明るい」といった，ヘモグロビン色素に相関が強い形容詞対群の傾向より，ヘモグロビン色素の変化は顔全体から感じる見えの印象に影響が強いことがいえる．

すなわち，以上の解析よりヘモグロビンとメラニンの成分変化と高い相関をもつ視覚的，心理的な形容詞があることが確認された．また，ヘモグロビンとメラニンの成分変化と顔色画像の見えの関係が分かった．

5 まとめと考察

市販のデジタルカメラを用いて撮影した顔画像に対して，独立成分分析を適用することにより，メラニン・ヘモグロビン色素量を変化させた様々な顔色画像の合成ができた．合成された画像を用いて，顔色の見えと各色素量の変化との関係を，25種類の形容詞対によって評価した．その結果，メラニン色素量と相関をもつ形容詞，ヘモグロビン色素量と相関をもつ形容詞，両色素量と相関のある形容詞，ある色素量のみ評価値がピークをもつ形容詞に分類された．これによりメラニン，ヘモグロビンの色素量が顔色の見えに与える影響を解析できた．今回，色素量は相対的に変化させたため，顔色の見えと絶対的な色素量に関するについては

分からないが、相対的な変化が顔色の見えに与える影響が分かった。この結果は化粧品開発などに有効な方針を与えるものと思う。

独立成分分析によって分離された各色素は、今回顔全体に対して一様に变化させたが、実際には頬の部分だけが赤くなるなど、色素の変化にむらがあることが考えられる。このような生理学的知見を考慮して色素量を変化させることで、よりリアルな顔色変化の再現が可能と考えられる。また、今回は評価に使用する被写体や、評価者の男女差・個人差について考慮していない。今後はこのような点も含めて、人間の感性と2つの色素量との関連をより深く解析し、望みの条件に最適な肌色を実現するための物理的指標を確立することが必要である。

* 本研究の一部はカラーフォーラムJAPAN 2019(平成31年12月17日)に発表した

参考文献

- 1) C. Jutten and J. Hérault, Signal Processing, 24 (1991) 1-10.
- 2) G. Burt, Neural Networks, 3 (1992) 337-343.
- 3) A. Hyvärinen, Neural computation, 9 (1997) 43-52.
- 4) 井上卓, 藤井勇作, 伊東一良, 一岡芳樹: "多次元少数要素独立成分分析法," 光学連合シンポジウム東京'95 講演予稿集 (1995) 105-106.
- 5) 白崎宏一, 井上卓, 伊東一良, 一岡芳樹, 光学 25, 9 (1996) 537-543.
- 6) M. Hiraoka, M. Firbank, M. Essenpreis, M. Cope, S. R. Arridge, P. v. d. Zee, and D. T. Delpy, Phys. Med. Biol. 38, 1859-1876 (1993).
- 7) N. Tsumura, H. Haneishi, Y. Miyake, Journal of Optical Society of America A Vol. 16 No. 9 (1999) 2169-2176.
- 8) 津村徳道, 羽石秀昭, 三宅洋一, 光学 30巻 6号 (2001) 400-406.
- 9) 小島伸俊, 羽石秀昭, 三宅洋一, 日本写真学会誌 56巻 4号 (1993) 263-269.
- 10) 矢野, 橋本, 照明学会誌, Vol. 79 No. 165 (1995).
- 11) 太田, 足立, 松木, 長谷川, 日本色彩学会誌, Vol. 19 No. 14 (1995).

Figure Captions

Figure 1 Mixture and separation of independent signals

Figure 2 Schematic model of human skin structure

Figure 3 Skin color model in the optical density domain on three channels

Figure 4 Prediction procedure of facial color variation

Figure 5 (A) Predicted facial images used in the subjective evaluations (Man)

Figure 5 (B) Predicted facial images used in the subjective evaluations (Woman)

Figure 6 Interface used in the subjective evaluations

Figure 7 Pairs of adjectives to describe the appearance
(11)

Figure 8 Correlation maps

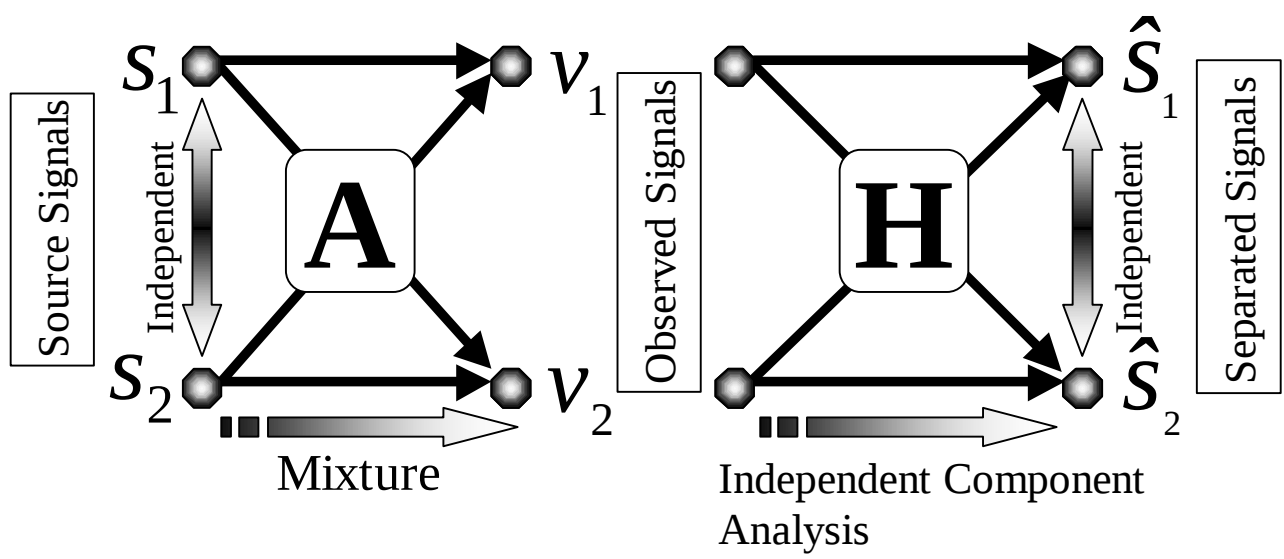


Figure 1 Mixture and separation of independent signals

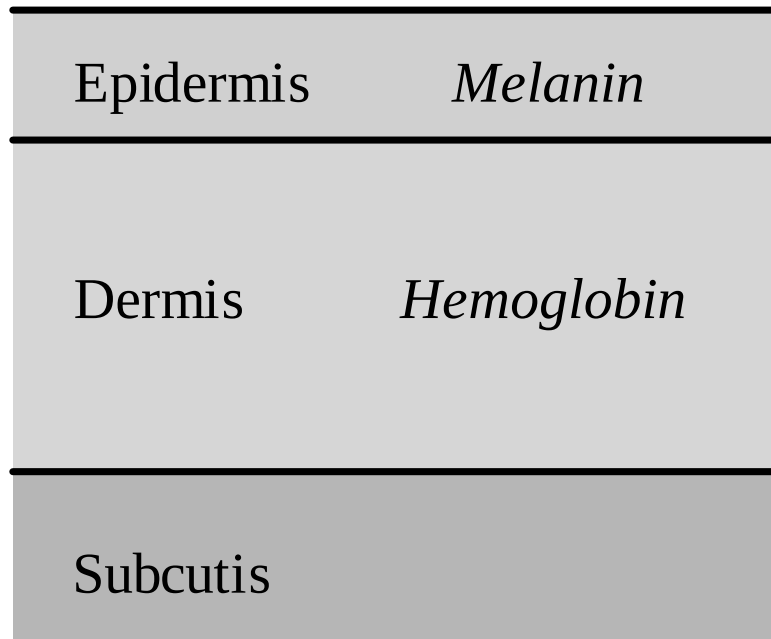


Figure 2 Schematic model of human skin structure

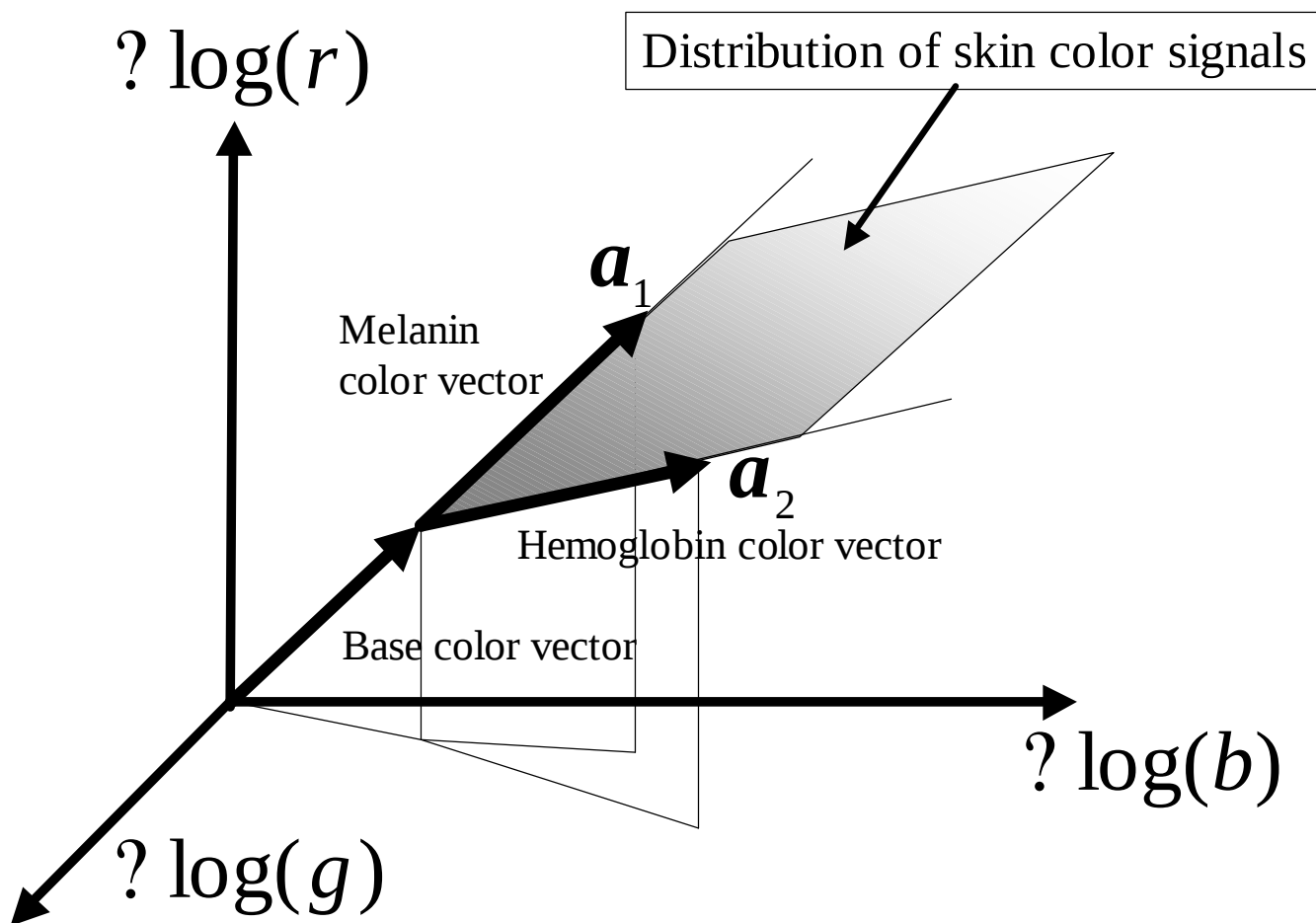


Figure 3 Skin color model in the optical density domain of three channels

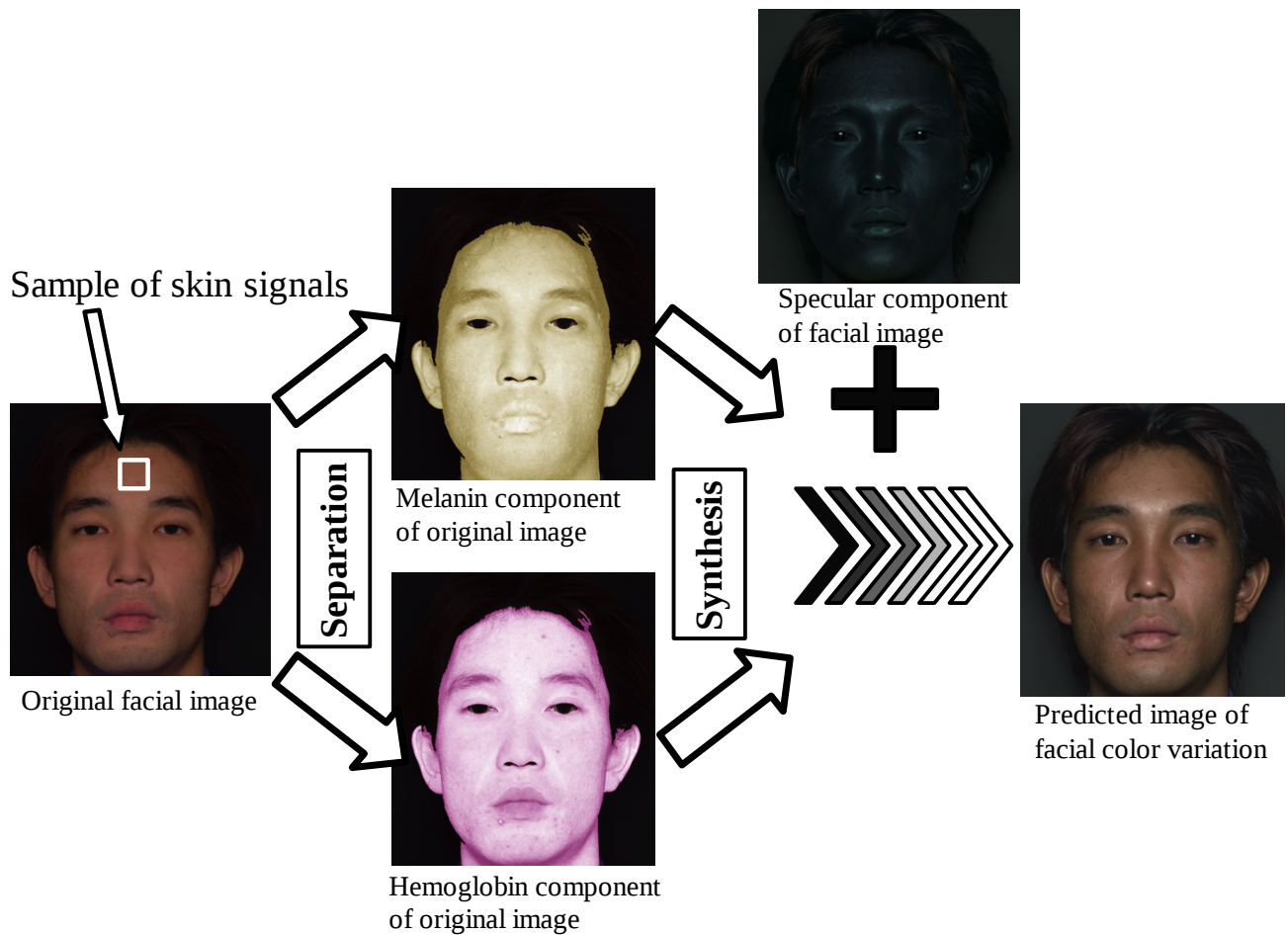


Figure 4 Prediction procedure of facial color variation



Figure 5 (a) Predicted facial images used in the subjective evaluation

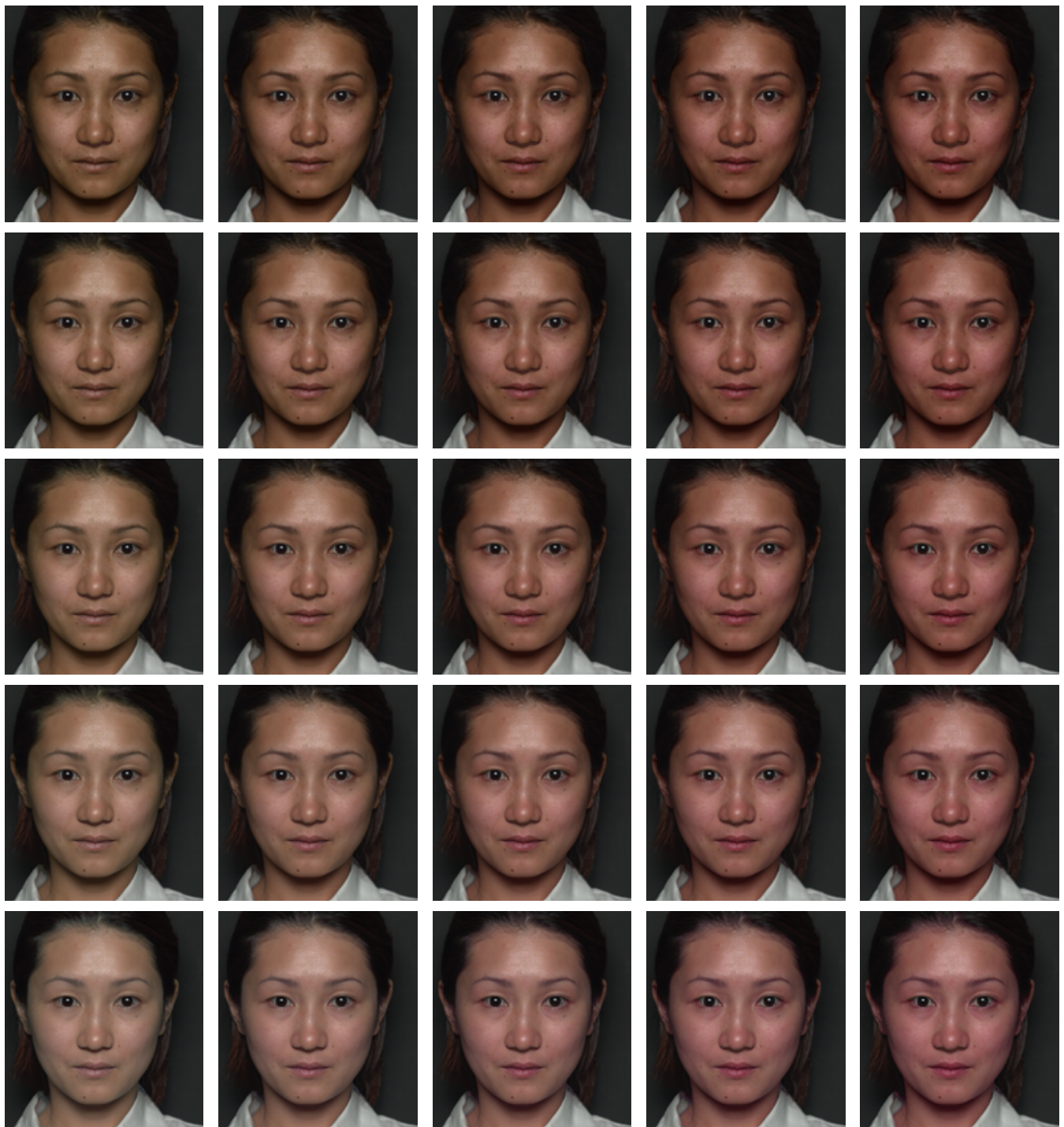


Figure 5 (b) Predicted facial images used in the subjective evaluation

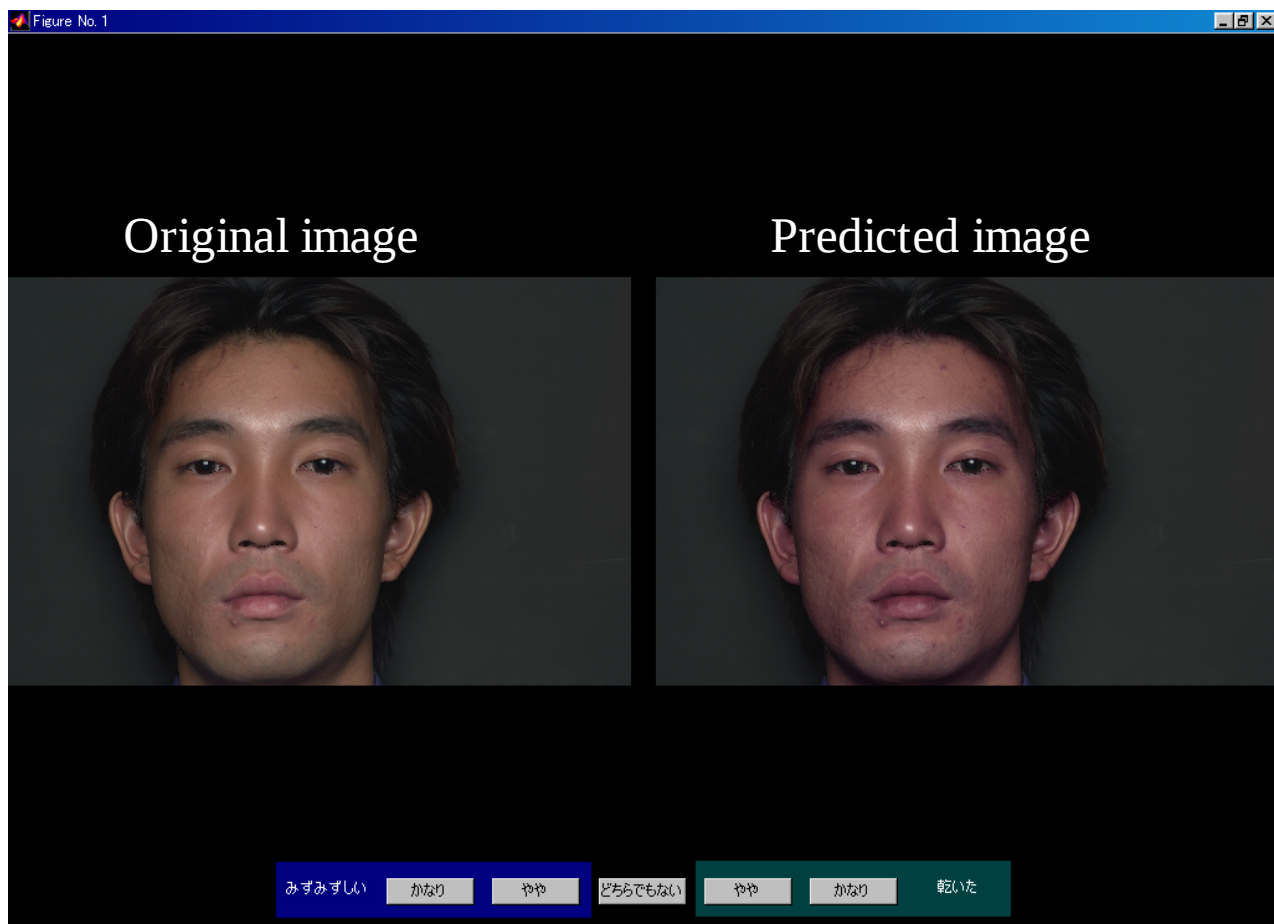


Figure 6 Interface used in the subjective evaluations

清潔な	不潔な
美しい	きたない
健康そう	不健康そう
みずみずしい	乾いた
派手な	地味な
上品な	下品な
明るい	暗い
好ましい	好ましくない
情熱的な	冷静な
やわらかい	かたい
澄んだ	濁った
女性的な	男性的な
活気がある	活気のない
自然な	不自然な
しっとりした	さらっとした
きめの粗い	きめの細かい
年老いた	若々しい
生気のない	生き生きした
艶のない	艶がある
不透明な	透き通った
色白な	色黒な
赤味が強い	黄味が強い
青白い	黄黒い
素肌の感じ	化粧肌の感じ
ハリのある	ハリのない

Figure P7a Pairs of adjectives to describe the appearance

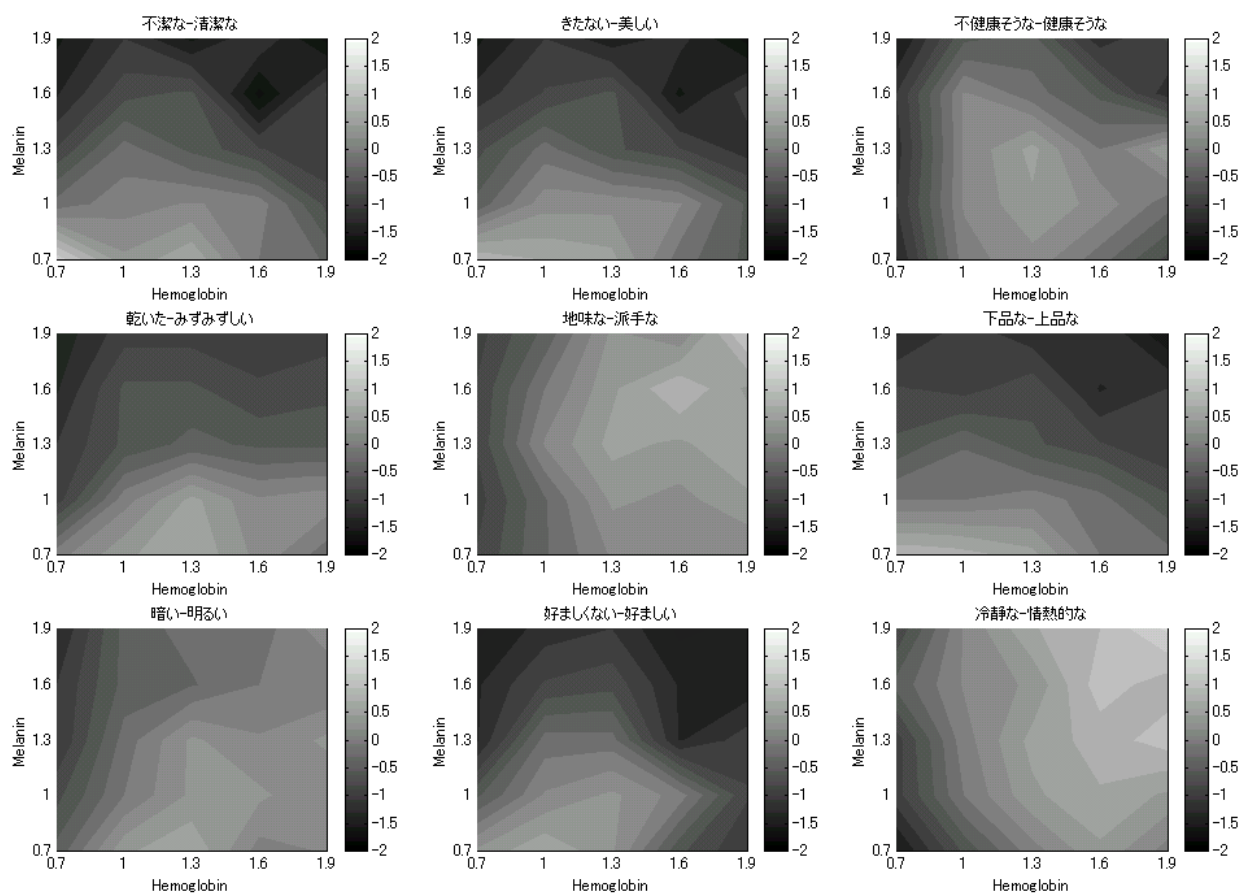


Figure 8 correlation maps

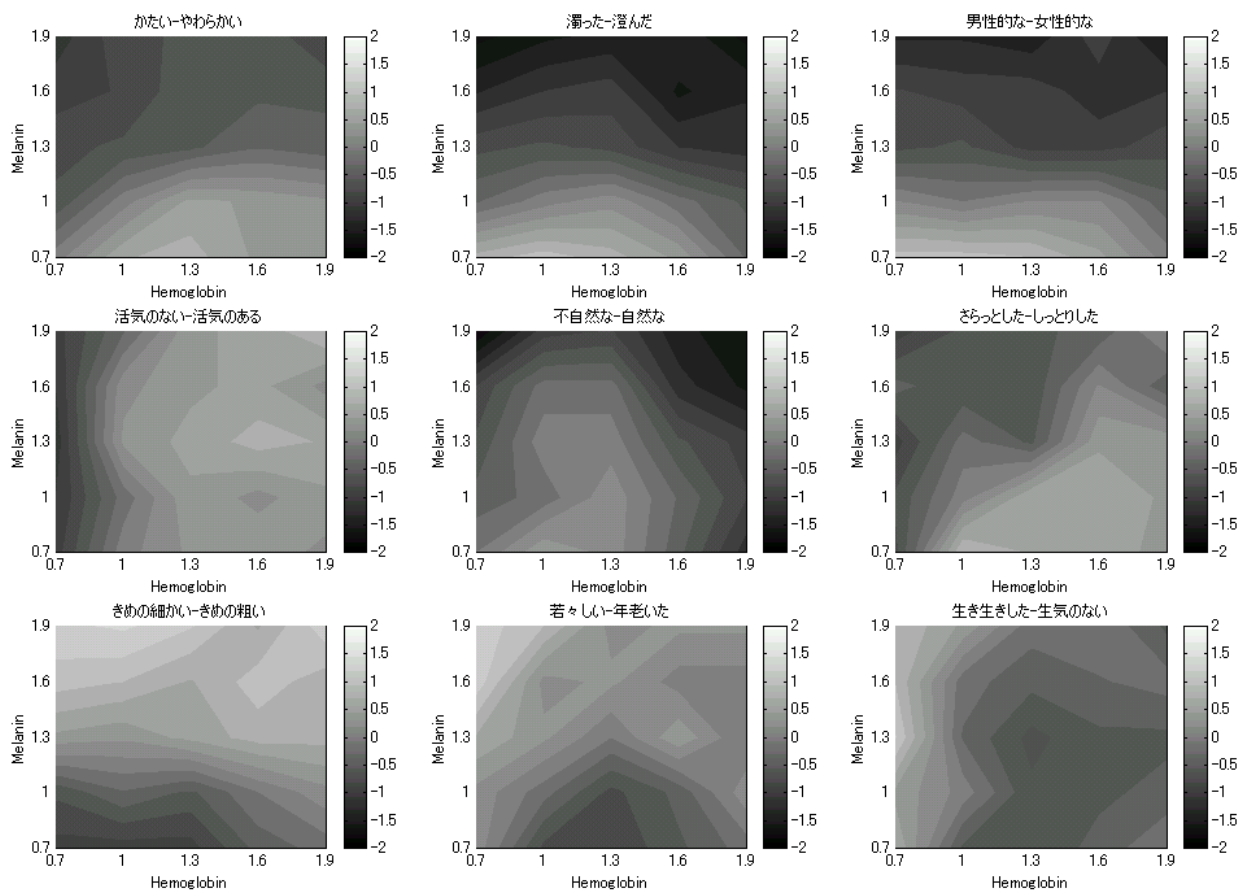


Figure 8 Correlation maps

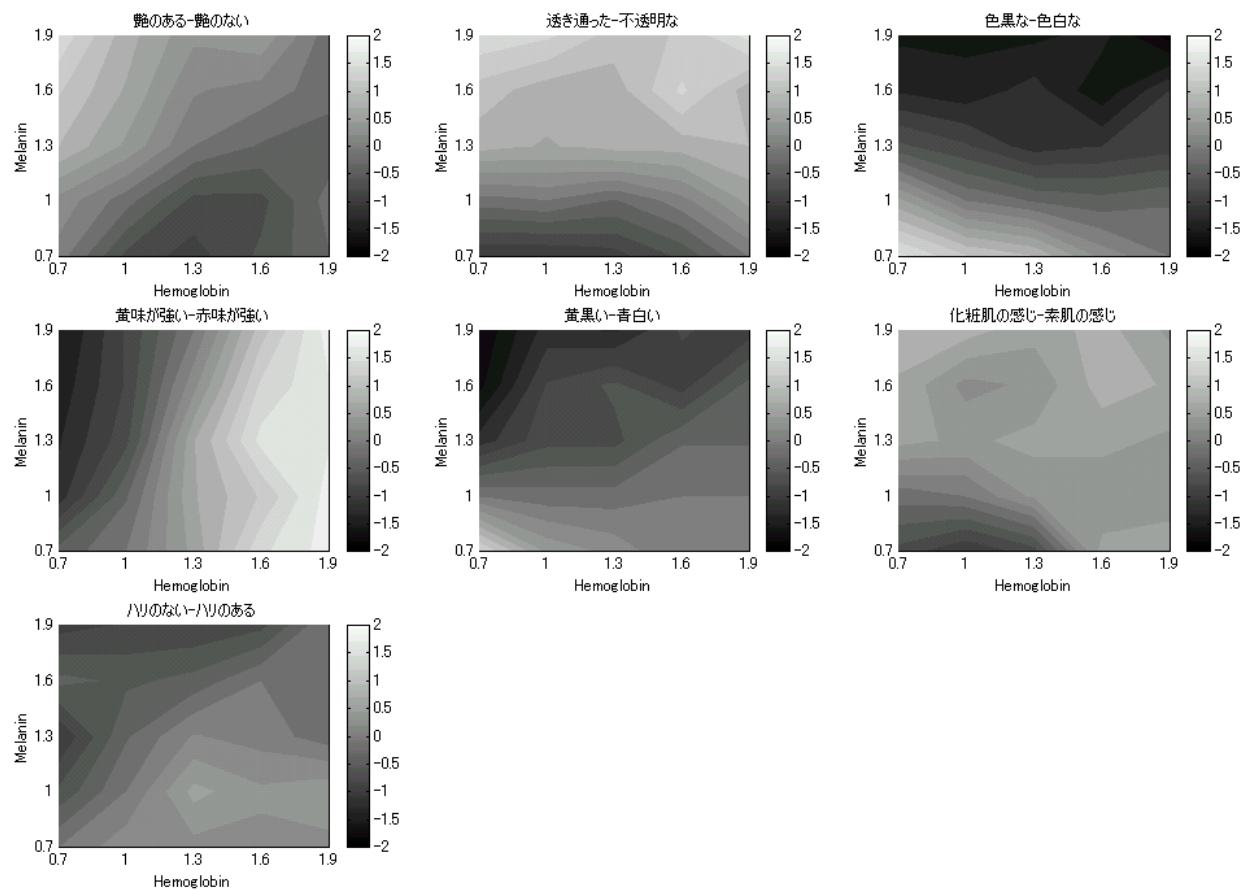


Figure 8 Correlation maps

Table 1 Classification of pairs of adjectives

メラニンとヘモグロビンに相關	ヘモグロビンに相關	メラニンに相關
不潔な-清潔な きたない-美しい 下品な-上品な ハリのない-ハリのある 黄黒い-青白い 艶のある-艶のある 若々しい-年老いた さらっとした-しっとりした 不自然な-自然な かたい-やわらかい 冷静な-情熱的な	地味な-派手な 黄味が強い-赤身が強い 活気のない-活気のある 暗い-明るい 好ましくない-好ましい	乾いた-みずみずしい 色黒な-色白な 透き通った-不透明な きめの細かい-きめの粗い 男性的な-女性的な 濁った-澄んだ
	ある点にピークをもつ	その他
	不健康そうな-健康そうな 生き生きした-生気のない	化粧肌の感じ-素肌の感じ