

論文

テクスチャーをもつ色に対する色感度特性の計測 —自動車内装樹脂部品の色ずれ判定への応用—

Measurement of color discrimination ellipse for surface color with texture

川澄 未来子

Mikiko Kawasumi

愛知淑徳大学

Aichi Shukutoku University

鈴木 和彦

Kazuhiko Suzuki

(株)豊田中央研究所

Toyota Central R&D Labs., inc.

Abstract

Most experimental studies on color discrimination have been performed with uniform colors. Techniques employed in such studies may not generalize to actual surface colors of industrial products. We propose a new technique to measure color discrimination ellipses for textured surfaces, such as plastic, leather, and fabric. In our experiments, visual stimuli were produced by mixing two appearances: the surface color of an actual object and the non-object color on a computer display, by means of a beam splitter (half-silvered mirror). Using a computer-controlled system, the experimenter changed the color appearance while preserving the texture appearance. Every stimulus was perceived as the surface of a colored object. We prepared reference and test stimuli by this technique and obtained color discrimination ellipses by the method of limits. We examined automotive plastic parts with a grained leather pattern. Results were interpreted according to a colorimetric system we developed for color quality control.

要旨

工業製品の表面色に対する人間の目の色感度特性を計測する手法を考案し、自動車樹脂部品の色品質管理に活用した結果について報告する。色弁別楕円を求める従来の研究は、光を混色して得られる均一刺激を対象にしたものがほとんどで、テクスチャー(光沢、粗さ、きめ等)を伴うような表面色(分布刺激)に対して成果を拡張することが難しかった。ここでは、ハーフミラーを使って製品表面の見えとディスプレイ表示色の見えとを透過的に重ねて仮想的な部品色を生成し、これを実験刺激として色弁別楕円の計測を行う。その結果、製品表面の質感やリアリティは保持したままで、着色のみをコンピュータで細かく制御した実験刺激を生成することができ、試作レスに計測実験が実施できるようになった。実測した色ずれ許容特性は、自動車樹脂部品の色ずれ判定システム内の判定式に係数として実装し、色品質管理のコストが低減される見通しを得た。

1. はじめに

製品のデザインや品質を評価する場合に重視される視覚的な要素として、色・形・テクスチャーなどがある。テクスチャーは、物体の材質や表面構造によって生じる視知覚の属性の一つで、光沢、きめ、模様、陰影などがその一例である。色が物体表面の反射光の分光特性に基づいて知覚されるのに対し、テクスチャーは、二次元平面上の色の微視的な分布パターンに基づいて知覚される。テクスチャーは、表面凹凸による陰影や表面反射の異方特性なども含めて構成されていることが多いため、計測や定量表現がより難しい^{1)~3)}。

製造業の分野では、製品設計の省力化や品質管理の自動化などを目指して、色品質を計測・評価する技術に対するニーズが非常に高い。ところが、従来、色票やディスプレイ表示色のような均一・均質な色を対象とした計測・評価技術は数多く見られるものの、実在の製品表面である「テクスチャーをもつ色」に対する計測技術や定量化手法について汎用性の高い研究成果はほとんどなかった。そのため、製造業の現場では、未だに人間(目視検査員)の経験や勘に頼りながら色品質を検査・評価しているのが実情である。

こうした背景も加わり、最近の色知覚研究は、「光の知覚」から「表面の知覚」へ、「均一刺激(実験室刺激)」から「分布刺激(日常風景刺激)」へと対象が拡張されつつある⁴⁾。これは、実問題を取り扱うことへのニーズの高まりに加えて、コンピュータで高精度・低コストに物体表面の見えを表現できるようになってきた技術的背景によるところが大きい。例えば、木目、布地、真珠、果実、人間の肌などのテクスチャーの解析にCGを用いた研究事例がある^{5)~11)}。また、工業製品の分野では、自動車の内外装の視覚的な品質を計測・定量化する研究などがある^{12)~15)}。

本研究では、工業製品の色品質管理の自動化を目指して、人間の色知覚特性を取り入れた計測・評価システムを開発することを目標としている。本論文では、「テクスチャーをもつ色」を対象に、人間の色感度特性を簡便に計測する手法、および、自動車部品の色品質管理への応用の試みについて報告する。

2. 自動車内装樹脂部品の色ずれ判定における課題

2.1 部品の色ずれ検査

図1に、自動車内装に使用されている樹脂部品の表面テクスチャーの例を示す。一般に、樹脂部品の表面には、意匠性や感性品質(高級感など)を高めるために、

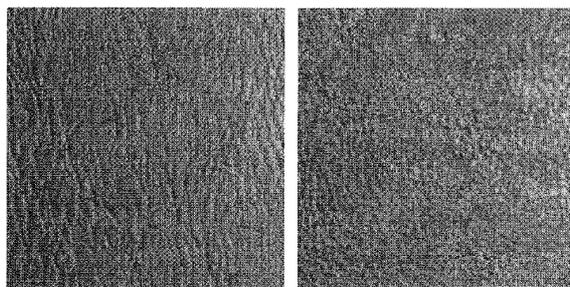


図1 樹脂部品のテクスチャーの例

シボと呼ばれる型押し模様が施されている。シボの模様(革シボ、機械シボなど)、粗さ、深さなどには様々な種類があり、同色部品でもシボの違いによって仕上がりの色やつやが異なって見える。

自動車内装は、塩化ビニル製の表皮材やポリプロピレン製の成形部品など、材質の異なる樹脂部品が共存しているため、組み合わせ後に違和感が生じないように、隣り合う部品間で「色合わせ」と呼ばれる作業を行っている。また、同一部品(同素材・同色・同シボ)でも、製造の単位(ロット)や気候・天候などを含む製造条件の変化により仕上がりの色やつやが異なることがあるため、製造後に「色ずれ」検査が行なわれている。この色合わせや色ずれ検査には、「色基準板」と呼ばれる色見本が使用されている。色基準板は内装色毎に作製され、すべての部品色はこれを基準に調色される。しかし、シボのようなテクスチャーをもつ製品表面の色合わせ作業や色ずれ検査は、測色的に扱いにくいいため、自動化が難しいとされてきた。

2.2 色感度特性

図2は、部品の色ずれイメージを、色差 Δa^* - Δb^* 空間において色基準板の色を原点として表現している。工業製品の色管理には、習慣的に $L^*a^*b^*$ 値が利用されてきた。また、現実の色ずれ検査で問題となる色差は、 ΔE^* で0.1~1.0レベルの微小なものである。

図3は、一つの部品色に対する色感度特性(色ずれの許容特性)のイメージを表している。製品として許容できる色ずれの範囲は、色基準板の色を原点とする楕円形領域で表すことができる。図の例では、 Δb^* 正方向(黄方向)の色ずれに対し最も許容幅が広いという特性を現している。この特性は、人間の目の感度特性を反映しており、楕円の形状や大きさは色基準板の色に応じて異なる。色知覚の研究分野では古くから色弁別楕円が計測されてきたが^{16)~21)}、部品の色ずれに対する許容値が微小レベルの問題であることから、許容範囲

を示す楕円は弁別楕円の相似形であると考えられる。なお、自動車における色ずれ検査の現場では、車格によって楕円の径(許容の閾値)の設定が変わる(例えば、高級車は合格条件がより厳しいなど)。

2.3 色ずれ判定システム

従来は、目視検査員が長年の経験や勘に基づいて色ずれ判定を行ってきた。目視検査員は、上述の色感度特性に基づいた判定を無意識下で行っている。しかし、人間の目による判定は、柔軟で精度が高い一方で、判定の根拠が定量表現されにくく数値的な履歴を残しにくいという難点がある。そこで、これまでに著者らは、人間の色知覚特性や判定基準を組み込んだ色ずれ判定システムの開発を試みてきた。

図4に、開発した色ずれ判定システムの概要を示す¹⁴⁻¹⁵⁾。システムは市販の変角測色機(ミノルタ製CM-512m2)とパーソナルコンピュータとから構成され、コンピュータのソフトウェアには「色ずれ判定式」(表1)が実装されている。変角測色機で部品の色を測定すると、色基準板からの色ずれの大きさと方向が定量的かつ視覚的にコンピュータ画面上に表示される。色ずれ判定式で使用する測色値は ΔL^* と ΔC^* で、また、それらを3つの係数で補正することにより、目視専門家の判断ノウハウを反映させている(ΔH^* は使用せず ΔC^* を係数で補正することで同等の効果をもたせている)。係数は、本システムを使用する前に予め導出する必要があり、目視検査員を被験者、実際の部品色を実験刺激とした心理物理実験により導く。3つの係数の一つが前述の色感度特性である。色感度特性の計測実験では、実験刺激として微小色差のカラーバリエーション(図2)を取り揃える必要がある。従来は、実験試料を試作して使用してきたが、正確に試作するためには、高度な調色技術に加え、多大な時間と費用を要することが問題となっていた。特に、この係数は、製品化される内装色が決定する都度迅速に導出する必要があるため、時間・費用・労力などのコストをかけずに求められるようにしたい。そこで今回、低コストに計測実験を実施する手法を考案した。

本論文では、色ずれ判定システム内の色ずれ判定式に事前に組み込むべき係数の一つ(色感度特性)を、試作レスに簡便に導出する手法について提案する。

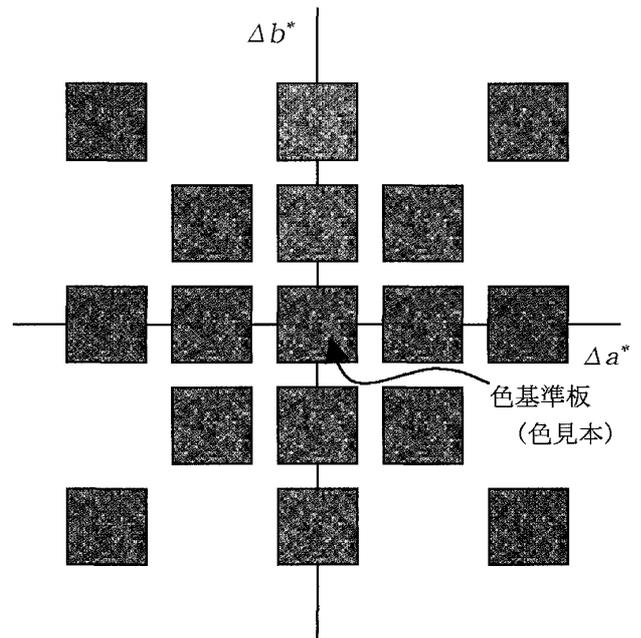


図2 部品の色ずれイメージ

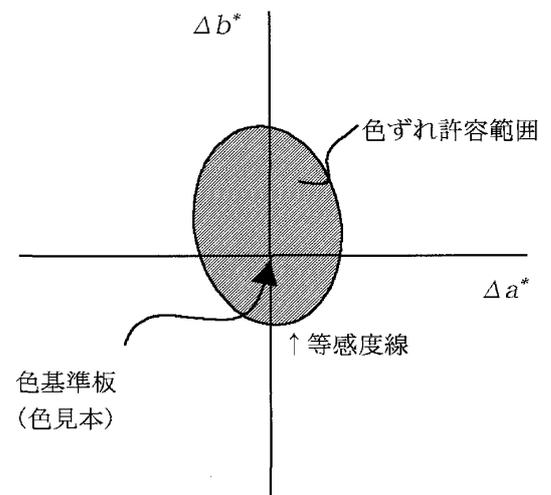


図3 色感度特性の例

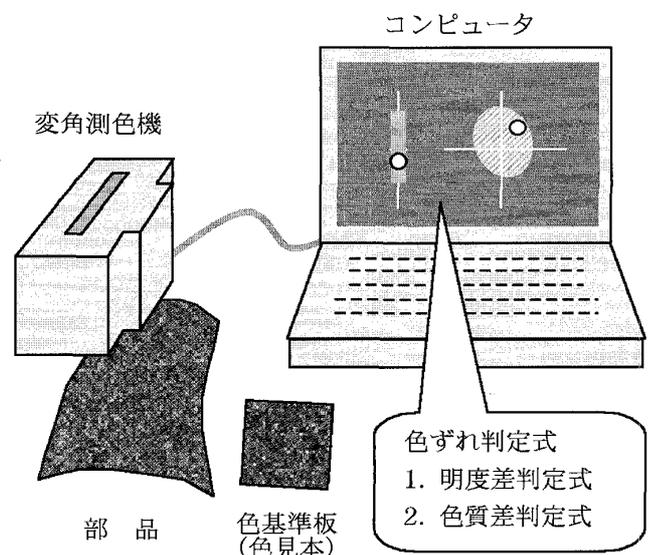


図4 色ずれ判定システムの構成¹⁵⁾

表1 色ずれ判定式¹⁵⁾

明度差	$\Delta E_{\text{brightness}} = T_d \Delta L^*_{\text{diffuse}} + T_s \Delta L^*_{\text{specular}}$ L^*_{diffuse} : 拡散反射成分 (偏角 110°) の L^* 値 L^*_{specular} : 正反射成分 (偏角 15°) の L^* 値
色質差	T_d, T_s : 各成分に対する重み係数 $\Delta E_{\text{chromaticity}} = \Delta C^*_{\text{diffuse}} / S_i$ C^*_{diffuse} : 拡散反射成分 (偏角 110°) の C^* 値 S_i : 人間の色感度特性 (i は色方位)

3. テクスチャーをもつ色に対する色感度特性の計測

3.1 目的

自動車内装樹脂部品のようなテクスチャーをもつ色に対する色感度特性を、試作レスに簡便に求める手法を考案したい。

ここでは、微小色差における色感度特性を対象にしていることから、計測する特性を色弁別特性に置き換えて扱う。従来、均一刺激に対する色弁別楕円を計測した研究事例はいくつかある¹⁶⁻²¹⁾。しかし、工業製品の品質管理では、表面テクスチャーの見えが重要であるため、今回は色弁別楕円の計測対象を分布刺激(テクスチャー付きの色刺激)とする。また、製品企画により新しい内装色が決定する度に、色弁別楕円を迅速かつ低コストに求められることをねらう。

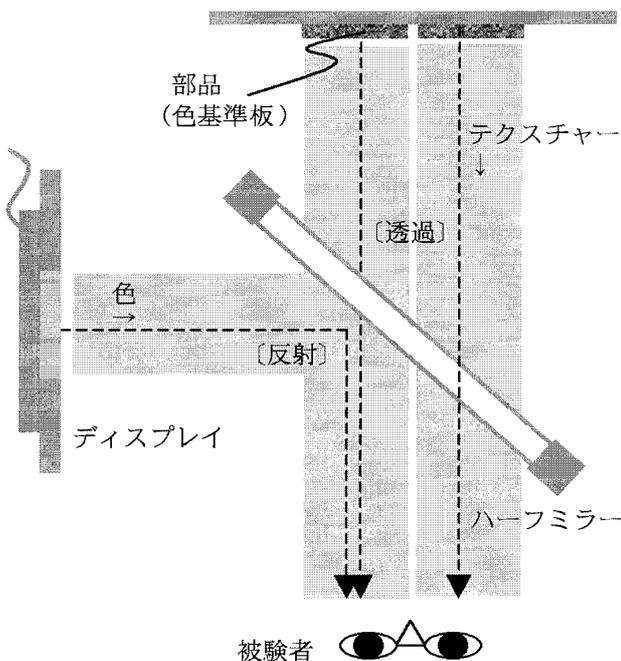
以上をまとめると、今回の実験の目的は、色基準板を中心とするカラーバリエーションを実験試料として

作製することなく、任意の部品色に対する色感度特性を計測できるようにすることである。そのために、実物に相当する見えを仮想的に生成し実験刺激として用いる方法を考案した²²⁻²⁵⁾。

3.2 方法

3.2.1 実験装置と実験方法

図5は、今回の中心的なアイデアである透過的着色手法を実現するための装置を示したものである。色弁別特性を求めたい部品(色基準板)、色を表示したコンピュータディスプレイ、ハーフミラー(入射光を反射光と透過光に分割するミラー)を図5のように配置する。被験者の位置からは、ハーフミラーを介して実物の部品のテクスチャーの見えとディスプレイ表示色の見えとが光学的に重なって見え、元の部品色が少しずつれた色を仮想的に観察することができる。この装置を使うことにより、部品表面のテクスチャーや印象(質感や存在感など)がリアルに見える状況を維持したまま、部品の任意の色ずれを表現することができ、また色ずれの度合いはコンピュータ上で制御することができる。今回は、同じ部品(色基準板)を正面に2枚並べて設置し、片方(図5では左側)のみにディスプレイ表示色が重なるように位置を調整し、仮想的な色ずれ部品を作り出した。なお、被験者には、ハーフミラーの存在やディスプレイ表示色を重ねて見せていると



a) 透過的着色のしくみ



b) 設置風景

図5 実験装置の構成

いう仕掛けに気づかれないよう配慮した。念のため、毎回、本物の着色部品として被験者が捉えているかどうかを確認しながら、実験を進行させた。

図6に、実験装置全体のレイアウトを示す。実験は暗室で行い、色基準板に対して右45度方向から人工太陽照明灯(セリック製キセノンランプ)で照明し、部品面での照度は1000lxとした。また、ハーフミラーへの余分な映り込みを防ぐために、ディスプレイ表示色の周囲をはじめ必要部分には黒のマスクで覆った。

ハーフミラーは、候補7種類の中から選定した。図7は、各ミラーの分光透過特性を計測したものである。分光特性が正確に制御されているハーフミラー(図中C、D)も検討したが、結果的に透明なアクリル樹脂板(図中A)を採用することにした。透過率が90%前後と高いため、透過的に観察する物体表面の見えが損なわれにくく、また、反射が10%前後と低いため、色ずれを微小色差で制御するのに適しているからである。したがって、今回の実験刺激の見えは、ハーフミラーによって透過と反射が9対1の比率で融合される。

3.2.2 実験刺激

図8に、被験者からの実験刺激の見えを示す。これは、図5~6の実験装置によって作り出している見えである。右が参照刺激(色基準板の色)、左がテスト刺激(色ずれ部品を模擬した色)で、実験ではテスト刺激の色を透過的着色手法によって段階的に変化させる。図9は、ディスプレイ表示色(ハーフミラーの反射成分)の制御イメージを示している。変化方向は色差空間

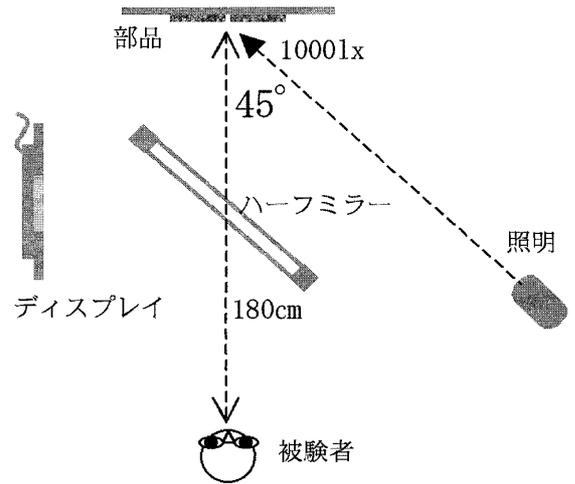


図6 実験装置のレイアウト

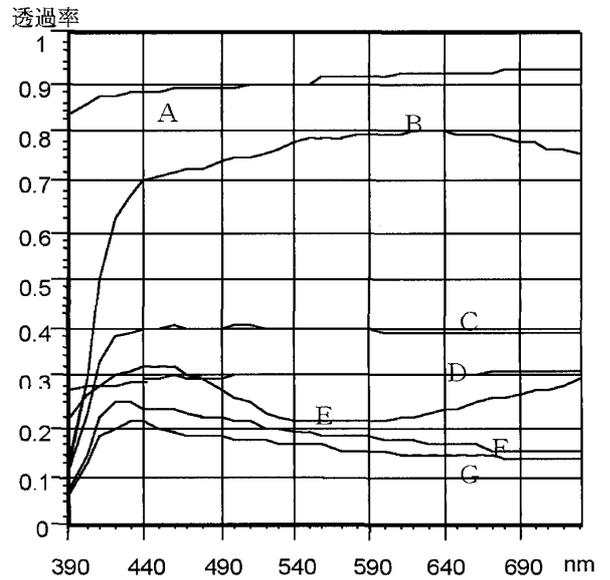
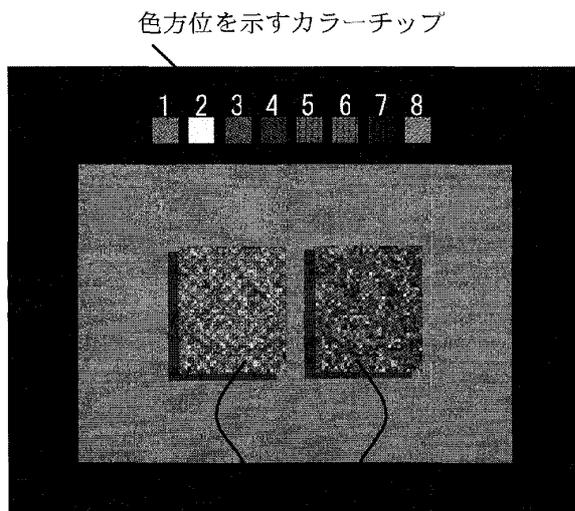
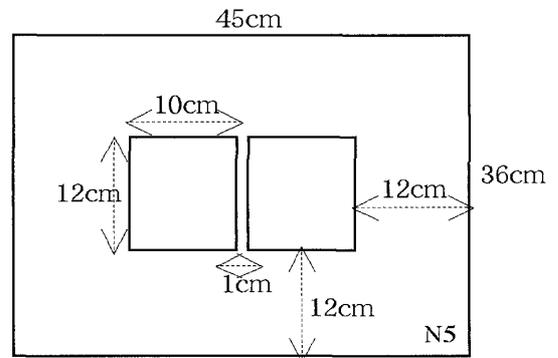


図7 ハーフミラー透過特性の計測結果



テスト刺激 (色ずれ部品を模擬した色) 参照刺激 (色基準板の色)

a) 被験者からの見え



b) 大きさ

図8 実験刺激

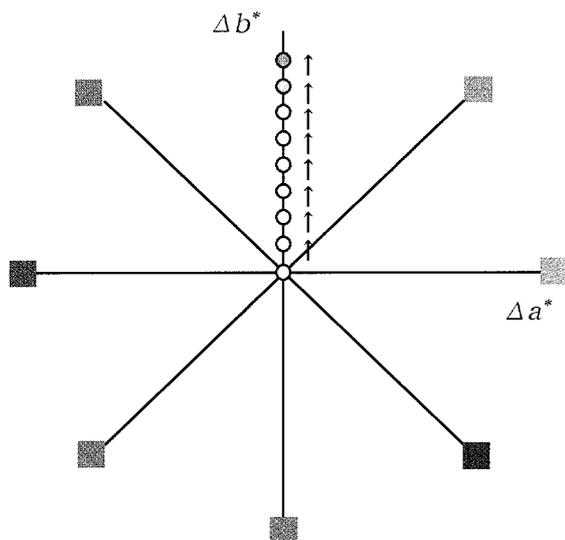


図9 ディスプレイ表示色の制御イメージ

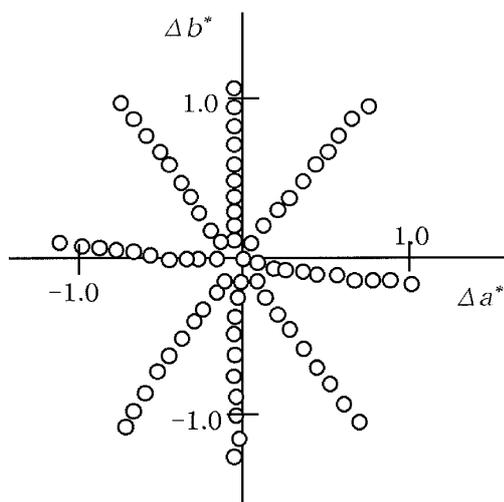


図10 実験刺激の実測結果

Δa^* - Δb^* 上の8方位とし、変化幅は仕上がり色(被験者からの見え)における色差 ΔE^* が0.1レベルで10段階とした。このディスプレイ表示色の作成にはAdobe社製フォトタッチソフトPhotoshopを用い、色の調整には「Labスライダー」、表示切り替えには「レイヤー機能」を使用した。表示サイズは色基準板と同じ10×12cmとし、図5に示す透過色(約90%)と反射色(約10%)がうまく重なって違和感なく「色ずれ部品」が認識できるように調整した。ディスプレイ上で表現された色ずれを何も重ねていない状態が $\Delta E^*=0.0$ で、色基準板の色そのものを意味する。なお、 Δa^* - Δb^* 空間上の色制御に伴い ΔL^* が変化しないように配慮しながら準備した。

刺激の背景は中明度のグレー(N5)とし、それを黒

の内張りをしたボックスに納め(図5b)、間接的な拡散光を遮断した。部品表面の照度は1000lxになるように調整した。刺激の上部には8つの色ずれ方位を示すカラーチップを呈示し、被験者の回答の際に使用した。

図10は、ある部品色を使って生成した実験刺激に対し、被験者からの見え(透過色と反射色が融合された後の仕上がり色)を色彩輝度計(トプコン製BM-7)で計測した結果である。この図から、色ずれ8方位、色差0.1レベルで10段階という意図に沿った実験刺激が準備できたことが確認できる。

3.2.3 実験手続き

被験者は、左右1組の実験刺激を比較する。始めに、左右の色の見えが同じ状態(ディスプレイ表示色を重ねない状態)からスタートする。実験者は、時間経過とともに、テスト刺激の色を色差空間上のある方位(例えば黄)に向けて色差が大きくなる方向へ段階ずつ変化させる(極限法/上昇系列)。被験者は、左右の色の見えが異なると自覚した時点(色弁別閾値)を申告する。また同時に、変化したと感ずる色方位番号(図8上部)も申告させ、実験後に反応の信憑性を確認するための指標として利用した。この弁別閾値の計測を8つの色方位に対して実施し、各方位の弁別閾値を結んで補間することにより色弁別楕円を求める。なお、実験対象となる色方位はランダムに出現させ、また、1方位につき合計2回ずつ試行した。

3.2.4 対象部品色

実験対象とした部品は、表面に中程度の粗さの革シボのある樹脂部品で、自動車内装として実際に使用されているものである。色についても、実際の内装色からブラウン系、グレー系、ブルー系の3色を選定した。色基準板の大きさは10×12cmで、各部品色につき2枚ずつを準備し、図8のように左右に並べて使用した。

3.2.5 被験者

被験者は、自動車内装の研究に携わる3名(男性1名、女性2名)で実施した。全員が、色覚正常者である。

3.3 結果

図11に、ブラウン系の部品色に対して導出された色弁別特性の一例を示す。この部品色では、 Δa^* 軸正方向の色ずれに対して許容幅が狭く、 Δb^* 軸正方向の色ずれに対しては許容幅が広いという特性が読み取れる。従って、色ずれ検査の作業において重点的に管理が必要となる色ずれ方向を予め把握することができる。

図12は、部品色3色(ブラウン系、グレイ系、ブルー系)に対する色弁別特性の計測結果をまとめたものである。楕円の形やサイズは、部品色によって異なることがわかる。3つの部品色は同一シボではあるが明度が異なっているため、楕円サイズはそれに依存しているとも考えられる。

また、実物試料を用いた場合と今回のように仮想的な刺激を用いた場合とで、実験刺激の準備にかかるコストを比較したところ、時間、費用、労力のいずれにおいても負担を軽減できた。実物試料の製作は、顔料メーカーの調色専門家に発注する必要があるが、今回の方法では実験担当者による数時間の設定のみで準備できる。つまり、専門家が長時間かけて実物試料を試作することなく、低コストに人間の目の色弁別特性を求めることができる。

なお、今回の被験者は自動車内装の研究者であった。色弁別楕円の計測値は被験者によって、あるいは、実験日によって異なるともされるため、理想的には色ずれ検査の現場にいる目視検査員の目の感度を複数回計測し、平均値を用いたい。それにより、目視検査員の目と同等の判定を安定して行うことができるシステムが期待できる。

均一刺激に対する色弁別楕円の研究においては、実測していない色に対しても予測モデルを構築し、色差空間上で特性を推定しようとする方向などもある。しかし、複雑なテクスチャーのような分布刺激が対象となる実問題を扱う場合には、新しい素材や色が決定する毎に実物の見本を活用しながら実測できる方が、簡便で実用的である。また、CGで微細な見えまでリアルに表現できるようになった昨今では、CGによりカラーバリエーションを生成し実験刺激として用いることも考えられる。今後、部品の実在感や物質感・材質感などが違和感なく表現できるようになれば、CGが色品質管理の技術にも効果的に活用される可能性がある。

4. まとめ

「テクスチャーを伴う色」を対象に人間の目の色感度特性を計測するために、部品色に透過的に着色する手法を考案し、計測実験によりその実用性や有用性を確認することができた。計測した色感度特性は、内装樹脂部品の色ずれ判定システム内の係数として組み込み、色品質管理のコストを低減する見通しが得られた。

透過的着色手法は、こうした実世界の物体に対する

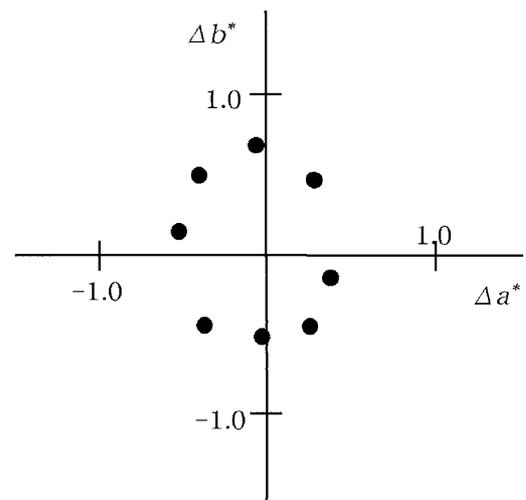


図11 色弁別特性の計測結果

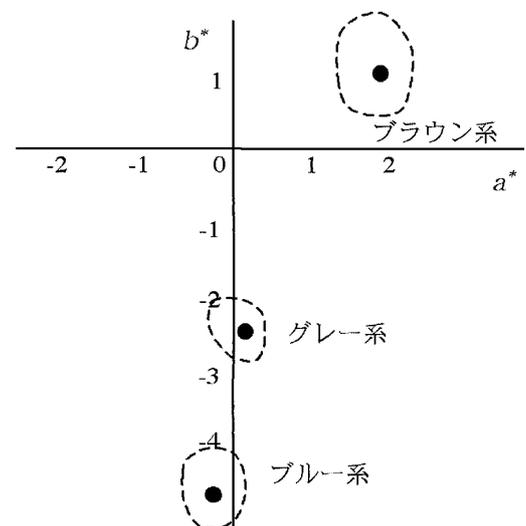


図12 3部品色の色弁別特性

人間特性を計測・評価する手段のみならず、たとえばカラーデザイン工程などにおいても活用が期待できる。CGを使ったカラーシミュレーションは、物体表面の質感や存在感の表現に関して、精度上・コスト上の問題が大きい。本手法では、物質イメージの表現に対して高度な技術や手間を要することなく、また実物の試作に対して時間・費用・労力を費やすことなく、低コストに製品のデザインや見栄えを検討することができる。今後は、こうしたメリットを生かすような他の使い道についても考えていきたい。

謝辞

本研究にあたって、課題分析や試料の提供などに多

大なご協力をいただきました関東自動車工業株式会社の関係者の皆様に感謝の意を表します。

また、研究内容について討論し有意義なご意見をいただいた東京工業大学大学院総合理工学研究科の内川恵二教授に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 日本色彩学会編：新編色彩科学ハンドブック（第2版）、東京大学出版会（1998）711-732
- 2) 日本色彩学会編：色彩用語事典、東京大学出版会（2003）183,333
- 3) 本吉勇：21世紀における視覚研究：テクスチャ面の知覚、VISION13-1（2001）23-28
- 4) 内川恵二：二十世紀における視覚研究の足跡と展望：色覚研究の展開、VISION12-3（2000）117-122
- 5) 東海彰吾、宮城真、安田孝美、横井茂樹、鳥脇純一郎：CGによる柑橘果実の質感表現の一手法、電子情報通信学会論文誌J76-D-II（1993）1746-1754
- 6) 江湖俊介、川上幸二：コンピュータグラフィックスによる質感表現の研究、照明学会誌33-5（1995）204-211
- 7) 木元宏次、大野義夫：拡張3次元テクスチャを用いた布地物体の質感表示、電子情報通信学会論文誌J75-D-II（1992）706-713
- 8) 長田典子、宇佐美照夫、眞鍋佳嗣、井口征士：品質評価のためのビジュアルシミュレーションによる真珠の表現、電子情報通信学会論文誌J80-D-II-1（1997）206-214
- 9) 北村薫子、磯田憲生、梁瀬度子：質感の評価尺度の抽出および単純なテクスチャーを用いた質感の定量的検討、日本建築学会計画系論文集511（1998）69-74
- 10) 河合直樹：樹木内部の繊維配向性モデルと木目テクスチャ生成における質感表現、情報処理学会論文誌41-3（2000）586-593
- 11) 中井久史、眞鍋佳嗣、井口征士：物理モデルに基づいた人の肌の色の質感表現、電子情報通信学会論文誌J84-D-II-2（2001）321-327
- 12) 川澄未来子、内山祐司、石原利員、辻紘良：カラーシミュレータによる塗装深み感の評価と設計への応用、映像情報メディア学会誌52-4（1998）528-534
- 13) 久保田毅、和田隆志、松田守弘、永田雅典、安井真由美：シボ面の視覚的なソフト感の解析、計測自動制御学会論文集35-8（1999）989-995
- 14) 田中喜彦、音成信哉、伊東裕之、石原利員、川澄未来子、山川みゆき：内装樹脂部品の色ずれ評価法の開発、自動車技術会学術講演会前刷集（1997）文献番号9732720
- 15) 川澄未来子、石原利員：自動車内装樹脂部品の色ずれ判定法の開発、映像情報メディア学会誌55-9（2001）1291-1297
- 16) W.D.Wright: The Sensitivity of the Eye to Small Color Differences, Proceedings of Physical Society (London) 53 (1941) 93-112
- 17) D.L.MacAdam: Visual sensitivities to color differences in daylight, Journal of the Optical Society of America 32 (1942) 247-274
- 18) W.R.J.Brown: Color Discrimination of Twelve Observers, Journal of the Optical Society of America 47-2 (1957) 137-143
- 19) A.L.Nagy, R.T.Eskew, Jr. and R.M.Boynton: Analysis of Color-matching Ellipses in a Cone-Excitation Space, Journal of the Optical Society of America 4-4 (1987) 756-768
- 20) M.R.Luo and B.Rigg: Uniform Colour Space Based on the CMC (l:c) Colour-difference Formula, JSDC 102-May/June (1986) 164-171
- 21) C.Cui and J.K.Hovis: A General Form of Color Difference Formula Based on Color Discrimination Ellipsoid Parameters, Color research and application 20-3 (1995) 173-178
- 22) M. Kawasumi, T.Ishihara and M.Yamakawa : Color Difference Measurement for Plastic Parts of Automotive Interiors, IEEE Quality Control by Artificial Vision (1998) 77-81
- 23) 川澄未来子、鈴木和彦、山川みゆき：物体表面色に対する人間の色感度特性の測定手法、第5回画像センシングシンポジウム講演論文集（1999）275-276
- 24) 川澄未来子：「質感を伴った色」に対する人間の色許容特性の計測－透過的着色手法による実験刺激生成－、画像ラボ 11-2（2000）5-7

25) 川澄未来子：“物質感を伴う色”を使った人間の
色感度の計測、第16回ファジイシステムシンポジ
ウム講演論文集 (2000) 441-444

(投稿受付日：2007年9月5日)

(掲載決定日：2008年7月20日)

著者紹介



かわすみ みきこ
川澄未来子

1966年1月4日生

1988年、津田塾大学数学科卒業

現在、愛知淑徳大学文化創造学部准
教授

日本色彩学会、日本視覚学会、映像
情報メディア学会、照明学会、自動車技術会、感性工
学会、ヒューマンインタフェース学会、他



すずき かずひこ
鈴木和彦

1951年7月7日生

1972年 豊田工業高等専門学校機
械工学科卒業

現在、豊田中央研究所人間特性研究
室

照明学会、交通工学研究会、他