

令和 3 年 10 月 19 日現在

機関番号：12601

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2018～2019

課題番号：18K19801

研究課題名（和文）照明場と知覚の相関解析に基づく新たな照明デザイン

研究課題名（英文）Analysis of lightfield and perception toward a new lighting design

研究代表者

本吉 勇（Motoyoshi, Isamu）

東京大学・大学院総合文化研究科・教授

研究者番号：60447034

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,800,000円

研究成果の概要（和文）：照明の色や強さのみならず空間分布がモノや空間の見え方に影響することは経験的に知られている。本研究では、全方向からの直接間接光を含む「照明場」の統計的性質が物体の質感知覚に及ぼす影響を、様々な照明場の統計量と、各照明場のもとに置かれた物体の見かけの光沢、細かな凹凸、および凹凸のシャープさの心理物理学データとの関係を解析することにより検討した。その結果、3つの質感知覚はいずれも、コントラスト、歪度、尖度、方位エネルギー相関が高い照明場のもとでより強調されることがわかった。以上より、本研究は、これらの統計量が空間照明のもつ「演質感性」に関係する重要な要素であると結論づけた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、全方向からの直接間接光を含む「照明場」の統計的性質が物体に対する感性的判断に及ぼす影響を解析し、照明の空間構造が知覚に及ぼす効果を定式化することをめざした。具体的には、画像統計量解析や精密な心理物理学計測を駆使して、照明統計量・物体画像統計量・質感知覚の関係を解析し、質感知覚を最もリッチにする「演出性の高い」照明場の構造を探索し、少数のセットの照明統計量が質感知覚に強い影響を与えることを示した。この成果は、視覚における照明の力強い影響を再確認するとともに、建築、内装、撮影、商品デザインなど多様な工業分野における照明設計・評価のための新たな科学的分析の枠組みを提供すると考えられる。

研究成果の概要（英文）：It is empirically known that not only the color and intensity of lighting, but also the spatial distribution influences the appearance of objects and spaces. In this study, the effect of statistical properties of "lightfield", including direct and indirect light from all directions, on object texture perception was investigated by analyzing the relationship between the statistics of various lightfields and psychophysical data on the apparent glossiness, roughness, and sharpness of the structural bumps of objects placed under each lightfield. All three materials perceptions were found to be more pronounced under lightfields with high contrast, skewness, kurtosis, and cross-orientation energy correlations. On the basis of these results, we conclude that these statistics are important factors related to the "rendering property" of spatial lighting.

研究分野：心理物理学

キーワード：照明 画像統計量 質感 空間

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

人間は表面のもつ様々な質感を容易に知覚することができる。この質感知覚のメカニズムに関する心理物理学的・神経科学的研究が増加している(Fleming, 2014; Wiebel, Valsecchi, & Gegenfurtner, 2013; Rosenholtz & Adelson, 2014; Wiebel & Gegenfurtner, 2014)。本研究では、質感の知覚における照明の役割を問題とする。

表面の画像は表面の光学的特性と照明の相互作用の産物である。現実世界では、表面特性は複雑な物理組成により決定され、照明も単一光源ではなく複雑な構造をもっている。したがって、自然な表面の画像は極めて複雑な構成をもつ。それと同時に、表面の画像は表面そのものの特性と照明の構造の両方の関数として決定されることになる。これは、ある表面の画像の性質が表面特性のせいなのか照明の構造のせいなのかは一意に決まらないことを意味する。例えば、あるぼやけたハイライトをもつ表面の画像が、鋭い照明のもとにある鈍った鏡面反射特性をもつ表面の画像なのか、ぼやけた照明のもとにある鋭い鏡面反射特性をもつ表面の画像なのか、を区別することは不可能である(Fleming, 2003; Fleming, Dror, & Adelson, 2001)。極端な場合には、ある照明のもとに置かれたある特性をもつ表面の画像が、別の照明のもとに置かれた全く異なる特性をもつ表面と同じ画像になることもありうる。近年流行しているプロジェクション・マッピングはこの曖昧性を利用した技術であるといえる。

このような曖昧性があるため、人間や動物が表面特性の質感をあらゆる照明のもとで安定して知覚することは原理的に不可能である。古典的な色知覚の理論では、人間の視覚系が照明によらず正しい色や明るさを知覚できるという「色/明度の恒常性」が主張されてきた(Land, E. H., & McCann, 1971; Arend & Goldstein, 1987)が、それは間違いである。実際に、多くの心理物理学的根拠により、光沢や明度の知覚は照明により劇的に変化することが示されている(Fleming, 2003; Motoyoshi & Matoba, 2012; Droilisky, & Adelson, 2004; Olkkonen & Brainard, 2010; Pont & Te Pas, 2006)。それらの研究のいくつかは、人間の質感(光沢)の知覚は、照明場の強度の空間的コントラストや歪度といった統計的性質が変わると大きく変化するが(Motoyoshi & Matoba, 2012)、それらがほぼ一定である限りは安定的であることを示している(Fleming, 2003; Motoyoshi & Matoba, 2012)。例えば、あるツルツルに磨いた光沢のある石の見かけの光沢は、晴れた日の公園に置いたときと曇天の公園に置いたときでは大きく異なる。一方、その石を晴れた日の公園のなかで数メートル移動させると、その表面の画像は大きく変化するにも関わらず見かけの光沢はほぼ変わらない。(Fleming, 2003)。また、照明の全体的な強度が変化して画像の平均輝度が変化しても見かけの光沢は安定している(Motoyoshi & Matoba, 2012)。これらの知見は、照明のもつ全ての性質ではなく特定の種類の性質が光沢の知覚に大きな影響を及ぼすことを示唆している。これは光沢のみならず凹凸や透明度など様々な質感の属性について当てはまると考えられる。しかし、どのような特性が重要であるかについては不明な点が多い。

2. 研究の目的

本研究では、照明のどのような性質が表面質感の知覚に影響するかを検討する。そのために、われわれは、様々な自然な照明場の性質と、それぞれの照明場のもとにおける物体の表面画像の性質と、それぞれの表面の知覚される光沢や凹凸の三者の関係を組織的に分析した。照明場や表面画像の「性質」は、原理的には様々な方法で記述できるが、本研究では、画像から客観的かつ容易に計算され、かつヒトの初期視覚系に神経表現がある(つまり生物学的に妥当な)、比較的低次の画像統計量に着目して分析した。

実験1ではまず光沢の知覚について検討した。21の照明場のもとにおかれた凹凸のある球体の見かけの光沢を種々の鏡面反射率について計測するとともに、表面画像と照明場のそれぞれがもつ様々な種類の画像統計量(異なる空間周波数サブバンドにおけるコントラスト、歪度、尖度、および異なる方位エネルギー間の相関)を計算した。そして、知覚された光沢と照明統計量の相関、知覚された光沢と表面画像統計量の相関、および照明統計量と表面画像統計量の相関、を分析した。その結果、従来の研究と一致して照明場のコントラストや歪度が光沢の知覚に大きく影響するのみならず、照明場における方位エネルギー間の相関も大きな影響をもつことがわかった。実験2では、同様の分析を表面の細かな凹凸(ザラザラ感)、および表面の形状の凹凸のシャープさの知覚について、同様の分析をおこなった。

3. 研究の方法

刺激画像はPC (MLABT1700)で制御したグラフィックス・カード(NVIDIA Quadro K2200)により生成されCRT (SONY PVM-A250)に提示された。モニターの空間解像度は本研究で用いた観察距離(100 cm)において0.016 deg/pixel、リフレッシュレートは60 Hzだった。

9名のナイーブなペイドボランティアが実験に参加した。すべての観察者は正常な視力あるいは矯正視力を持っていた。すべての実験は東京大学における研究倫理委員会の承認のもと書面による同意を得て行われた。

視覚刺激は凹凸のある緑の球体であった。凹凸の形状は5種類であった。全ての視覚刺激画像は商用のCGソフトウェア(NewTek LightWave 2015.2)によって作成された。7段階の異なる鏡面反射率をもつテスト刺激が作成された。つまり、照明場一つにつき5方向×7段階=35種の刺激が作成された。参照刺激は特定の照明場の下で、鏡面反射率を細かく30段階変化させて作成された。鏡面反射のぼかし(roughness)は鏡面反射率に応じて変化させられた。図1は、上段、中

段, 下段はそれぞれ異なる照明場で作成され, 右の画像ほど高い鏡面反射率を持つよう設定されている。

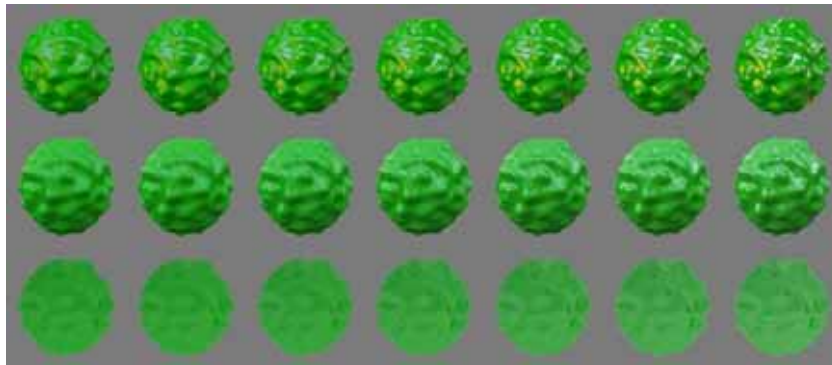


図 1. 刺激画像の例. 上段, 中段, 下段はそれぞれ異なる照明場で作成され, 右の画像ほど高い鏡面反射率を持つよう設定されている。

レンダされた画像はハイダイナミックレンジイメージとして保存され, ガンマ補正されてモニターに表示された. モニターの最大輝度を超える輝度を持つ画素はクリップされた. 全画素の内クリップされた画素が占める割合は最大で 0.12 %, 平均で 0.001 % 未満であった. 21 種類の照明場の下で作成された. 図 2 にその例を示す. 照明の強さは, 最も鏡面反射が小さい刺激画像の平均輝度が等しくなるように変調された.



図 2. 照明場の例.

見かけの光沢の強さを調整法により測定した. 観察者は 1m の観察距離から, 画面中央上部に提示されるテスト刺激画像とその下に提示される参照刺激画像を視点を自由に動かして観察した. 実験は暗室で行われた. 刺激画像の背景は等質なグレイであった.

観察者はキーボードにより参照刺激の光沢を変化させ, 見かけの光沢感がテスト刺激の光沢感と一致するよう調整した. 観察者は画像の明るさと他の次元ではなく, 光沢のみに着目して調整するよう教示された. 十分な調整をするまでの間, 観察者は何度でも調整でき, 任意の時間を与えられた. 最終的なマッチングデータを記録して次の試行に移行した. 各照明場での各刺激レベルにおいて少なくとも 3 回の繰り返し測定が行われた. なお, テスト刺激の表面画像は 5 種類の方向を持つ表面の中からランダムに提示される. すべての観察者は, この課題の経験はなかったが容易に行うことができた.

後述するように, はじめ 21 種の内 7 照明場 (図 2 の上段) において 7 段階の光沢強度を持つ刺激で測定を行った所, 単調に増加することが確認できたので, 残りの 14 照明場 (図 2 の中段と下段) での測定では刺激強度として最小, 中間, 最大の 3 レベルのみ取り扱った.

4. 研究成果

図 3 は, 各照明下における鏡面反射率とマッチング値の関係を示したものである. 図 3 の左のように刺激強度が 7 レベルでの測定を行った所, 単調増加する様子が確認できたため, 照明場の種類を増やして 3 レベルでの測定を行った.

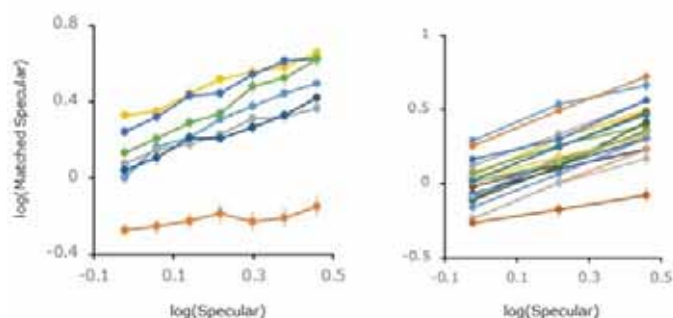


図 3. 鏡面反射率とマッチング値の関係．左は 7 段階の刺激，右は 3 段階の刺激で行ったものである．パラメータの増加によりマッチング値も単調に増加することが確認できる．

以上に述べた知覚された光沢度が，照明場や表面の画像統計量とどのような関係にあるかを理解するため，全ての画像の輝度成分について低次の画像統計量を解析した．各画像は NTSC 式にしたがいグレースケールの輝度値に変換されバンドパスフィルタにより 7 つ空間周波数 (2 - 128 cycle/image) と 8 つの方位に分解された．バンドパスフィルタは 30 deg の方位バンド幅を持ち 1 オクターブの空間周波数バンド幅を持っていた．得られたサブバンド画像それぞれについて標準偏差 (SD) および尖度 (kurtosis) の 2 つのモーメント統計量を計算した．これらの統計量は異なる方位間で平均された．一方で輝度画像を空間周波数バンド幅 2 オクターブの等方性フィルタにより 7 つの空間周波数に分解しそれらの各サブバンド画像について歪度を計算した．歪度の計算を別に行ったのは，歪度を計算するには相対的に広い空間周波数バンド幅の画像データが必要であり，かつ人の視覚系は方位選択的に歪度を符号化していないことが知られているからである (Motoyoshi & Kingdom, 2007) ．

これらのモーメント統計量に加えて，サブバンド間の相関も計算した．まず，各空間周波数バンドにおいて 0-90 deg までの異なる方位差のサブバンド画像間の相関をすべての方位について計算した．すると，多くの画像において方位間相関は方位差が大きくなるほど低下する分布を形成する．この分布の標準偏差を方位間相関の広がり の指標として求めた．同様に，各空間周波数において異なる周波数サブバンド画像 (エネルギー成分) 間の相関をすべての方位について計算し平均した．ここでも，多くの画像において周波数間相関は周波数差が大きくなるほど低下する分布を形成する．この分布の標準偏差を周波数間相関の広がり の指標として求めた．線形成分についても同様に相関を求めたが，画像間における多様性があまりに少ないため，この後の分析では用いなかった．

図 2 に例として示した照明場の画像は全方向から情報を含んでいる．しかし，物体表面が反射する照明光は全方位のうち一部分である．例えば，太陽が観察者の背後にある場面で物体を観察すれば，物体表面は太陽光の情報を反映するが，太陽を物体の背にして観察すれば観察される表面は原理的には太陽光に影響されない．さらにいえば，照明場の中でどの部分が表面に反映されるかは観察者の視点やその方向により決定される．そこで，表面の画像に影響しうる部分だけを分析対象とするために，その部分を表現する照明場の画像として，表面画像の刺激を作成した時に用いた物体と同一の半径を持つ完全鏡面の球体の画像を実効的な照明場のデータとして定義した．そして，これらの画像について上述の画像統計量を分析した．

一つの照明場においてその照明下での見かけの光沢の大きさを定量化するために，全レベルの刺激画像の知覚される光沢の大きさを照明場ごとに平均した．その値をその照明場においてどれだけ物体の光沢度が高いと判別されるかの指標とした．つまり，この光沢指標が大きい照明場ほど同じ物理特性を持つ物体のみかけの光沢が大きくなる．そして，知覚と照明場の関係进行分析するために，照明場の光沢の指標と照明画像の各種統計量との相関を分析した．図 4 は照明場の光沢指標と照明場の各種統計との相関係数を示す．各パネルは左から，SD (log)，歪度，尖度 (log)，方位間エネルギー相関の平均，周波数間エネルギー相関の平均を表し，縦軸は相関係数，横軸は各パネルの統計量の空間周波数 (c/image) を表す．照明画像統計量の SD と光沢指標には相関がみられる．(SD の 4 c/image では $r=0.95, p<0.00001$)

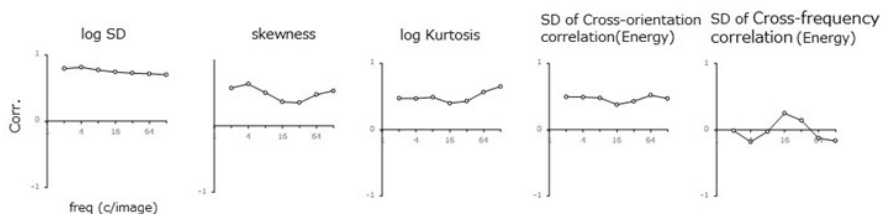


図 4. 知覚される光沢の大きさの平均と照明画像の統計量の相関．各パネルの縦軸は相関係数，横軸は各統計量の空間周波数を表す．

本研究では，光沢以外の様々な質感次元においても照明場と知覚とのあいだに組織的な関係があるかを検討するため，表面の細かな凹凸として現れるザラザラ感 (sandiness) と形状のシャープさ (edge) の知覚データを集め，実験 1 と同様の手続きにより照明・表面・知覚の相関関係を解析した．その結果，光沢と同様の傾向が認められた．

モーメント統計量は光沢の知覚との間に非常に高い相関が見られ，重要な役割を果たすことがわかった．物体表面を一種のぼけた鏡であると考えれば，大きいモーメント統計量の値を持つ照明によって照らされた表面画像のモーメント統計量も大きくなる．さらに，鏡面反射が増すと照明の統計量がより強く反映されるので，表面画像の統計量もおおきくなる．視覚系はそれらを利用するので，高コントラスト，高歪度，高尖度の統計量の照明の下では知覚される光沢も増すと考えると，先行研究 (Motoyoshi & Matoba, 2012) での報告と一致する．

特筆すべきことに，本研究は以上のモーメント統計量に加えて，照明場における方位間相関が光沢の知覚に大きな影響をもつことを明らかにした．方位間相関が高い照明場とは，様々な方位

成分を持つ光源,つまりプロッピーな光源が存在する照明場とみなせる.反対に方位間相関が低い照明場とは光源が特定の方位の成分を強く持つ光源,つまり線状の光源が存在する照明場であるとみなせる.ここで,線状の成分が多いものは知覚される光沢が低くなるという考えは,金属に線のような模様が見られることに矛盾するのではないかという疑念が生じる.しかしながら,日常で目にする多くの金属物体において曲線状の模様は物体表面の幾何学的構造がうみだしたものにすぎない.もし,同じ物体が方位間相関の低い(線状の成分が強い)照明に照らされた場合と方位間相関の高い(ブロップ構造の)照明に照らされた場合を比較するとおそらく後者のほうが高いと容易に想像される.

本研究では極めて低次の画像統計量と知覚される光沢の間に非常に高い相関がみられた.しかしながら,これらの統計量のみで様々な形状の物体における知覚される光沢を一般的に説明できるかは疑問である.知覚される光沢はこれらの統計量とよく相関するより高次の画像特徴にもとづいている可能性がある.それらが画像からどのように抽出され脳内で表現されるかについては経験的な根拠がなく不明な点が多いが,本研究で得られた低次の画像統計量との相関がこれほど高いことを考えると比較的単純な計算で抽出される画像特徴(例えば,on 中心型フィルタの出力の総和など)によって決定されると考えることができるかもしれない.

以上の知見から,われわれは光沢の知覚をより鮮明かつ豊かに表現できる照明場の構造について,その一端を理解できる.つまり,全ての周波数におけるコントラストと歪度と尖度が高く,方位間相関の高い統計量をもつ照明場が最もよく光沢の知覚を演出すること考えられる.

引用文献

- Arend, L. E., & Goldstein, R. (1987). Simultaneous constancy, lightness, and brightness, 4(12), 2281-2285.
- Dror, R. O., Willsky, A. S., & Adelson, E. H. (2004). Statistical characterization of real-world illumination. *Journal of Vision*, 4(9), 11.
- Fleming, R. W. (2003). Real-world illumination and the perception of surface reflectance properties, 69(6), 335-337.
- Fleming, R. W. (2014). Visual perception of materials and their properties. *Vision Research*, 94, 62-75.
- Fleming, W., Dror, R. O., & Adelson, E. H. (2001). How do humans determine reflectance properties under unknown illumination. In *Proceedings of CVPR Workshop on Identifying Objects Across Variations in Lighting: Psychophysics and Computation*, (November), 347-368.
- Land, E. H., & McCann, J. J. (1971). Lightness and Retinex Theory. *Journal of the Optical Society of America*, 61, 1-11.
- Motoyoshi, I., & Kingdom, F. A. A. (2007). Differential roles of contrast polarity reveal two streams of second-order visual processing. *Vision Research*, 47(15), 2047-2054.
- Motoyoshi, I., & Matoba, H. (2012). Variability in constancy of the perceived surface reflectance across different illumination statistics. *Vision Research*, 53(1), 30-39.
- Oikkonen, M., & Brainard, D. H. (2010). Perceived glossiness and lightness under real-world illumination. *Journal of Vision*, 10(9), 5-5.
- Pont, S. C., & Te Pas, S. F. (2006). Material - Illumination ambiguities and the perception of solid objects. *Perception*, 35(10), 1331-1350.
- Wiebel, C. B., & Gegenfurtner, K. R. (2014). Early differential processing of material images: Evidence from ERP classification. *Journal of Vision*, 14(2014), 1-13.
- Wiebel, C. B., Valsecchi, M., & Gegenfurtner, K. R. (2013). The speed and accuracy of material recognition in natural images. *Attention, Perception & Psychophysics*, 75(5), 954-966.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Wakana Hata, Isamu Motoyoshi	4. 巻 18(9)
2. 論文標題 Bidirectional aftereffects in perceived contrast	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Vision	6. 最初と最後の頁 1-13
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1167/18.9.12	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 3件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Isamu Motoyoshi
2. 発表標題 Natural illumination and the style of western and eastern paintings
3. 学会等名 The skin of things : A symposium on perceiving and painting material properties（国際学会）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 本吉勇
2. 発表標題 Rembrandt van Rijnおよび工房作品における特異的な画像特徴量
3. 学会等名 日本視覚学会2019年冬季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 畠若菜, 本吉勇
2. 発表標題 双方向のコントラスト残効とコントラスト選択的チャンネル
3. 学会等名 日本視覚学会2018年夏季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 本吉勇
2. 発表標題 意思決定とクオリア：即物的リアリティを支える視覚情報処理機構
3. 学会等名 日本神経回路学会オースタムスクールASCONE2018「リアリティを生むメカニズム」（招待講演）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 本吉勇
2. 発表標題 光の生態学と視覚の仕組み
3. 学会等名 第29回照明学会東京支部照明フォーラム（招待講演）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 本吉勇
2. 発表標題 視覚系におけるテクスチャ情報の処理と利用
3. 学会等名 視覚科学フォーラム2018（招待講演）
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計2件

1. 著者名 日本児童研究所	4. 発行年 2019年
2. 出版社 金子書房	5. 総ページ数 368
3. 書名 児童心理学の進歩 2019年版	

1. 著者名 日本基礎心理学会	4. 発行年 2018年
2. 出版社 朝倉書店	5. 総ページ数 608
3. 書名 基礎心理学実験法ハンドブック	

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------