論文内容要旨（和文）

2019年度入学　大学院博士後期課程

電子情報工学専攻

氏　　名　清川　宏暁　印

論　文　題　目　光沢感や半透明感の知覚のための視覚情報処理モデルに関する研究

モノの付加価値を決める要素の一つとして見た目の質感（モノの材質や表面の反射特性の視覚的推定から生まれる感覚）が挙げられる．ヒト視覚系が，網膜像から得られる画像特徴から，質感の知覚のためにどのような特徴を用いているのかを解明することは，視覚科学の発展への寄与や，質感を定量的に操作・計測するといった工学的価値が期待される．近年の研究では，質感の一つである光沢感については，鏡面ハイライトと呼ばれる輝度の高い領域の生む画像特徴と光沢感知覚の関係の解明が進められている．その一方で，光沢感は低輝度の鏡面反射領域からも生起されることが近年の研究で明らかになった．しかし，この低輝度領域由来の光沢感知覚が物体の種類や素材に依存しない一般的なものなのか，具体的に低輝度領域のどのような画像特徴を手がかりに光沢感を知覚しているのかも未解明のままであった．

光沢感に次いで研究対象にされている質感に半透明感がある．この質感は物体表面から入射光が物体内部に侵入し散乱する（この現象を表面下散乱と呼ぶ）ことによって生じる，表面の画像特徴の変化が知覚の手がかりであると考えられてきた．具体的には，物体表面の陰影に着目し，その輝度コントラストの低下が表面下散乱の強さに対応した手がかりとして半透明感の知覚に寄与することが報告されていた．一方で，半透明感は物体の陰影のみで説明できる質感なのかは分かっていない．例えば，半透明な物体は光沢成分を持つことも多い．そのため，半透明物体の表面では陰影と光沢成分が生み出す相互作用が半透明感知覚に寄与しているとする仮説があるが，そのような作用を検討した例はあまりない．また，この仮説が正しいとして，相互作用を画像特徴で表現することができれば，そこから生じる半透明感を予測する計算モデルの作成も期待できる．

また，これらの異なる質感の知覚を生み出す視覚情報処理は同一のものなのか，視覚系の情報処理過程についても未解明な点が多い．このような視覚情報処理の独立性の検討には知覚学習と呼ばれる，特定の視覚情報の判別を繰り返すことでその視覚感度が上昇する現象を用いた実験が一般的に行われる．この知覚学習については，異なる2つの視覚情報が脳内で独立に処理されるならば学習効果も独立に現れるということが知られている．しかし，質感知覚において，この知覚学習の効果が起きるのかはよく分かっていない．

本論文では，①光沢感知覚のための低輝度領域の画像特徴の解明，及びその特徴を操作して光沢感を操作できるのか，②陰影と光沢成分の相互作用が半透明感の知覚にどのように寄与するか解明し，画像特徴を使って半透明感知覚を予測する計算モデルの提案，そして，③光沢感と半透明感には知覚学習効果が起きるのか，を検討することを目的とする．

本論文は，１章から７章で構成される．

第１章では，本研究の背景と目的について述べる．

第２章では，低輝度領域由来の光沢感の一般性とその知覚に用いられる画像特徴を検討する．コンピュータグラフィックスによって様々な形状，反射特性，照明条件の物理パラメータを持つ大量の画像群を作成した．その後，各画像の鏡面ハイライトを取り除く処理を行い，鏡面ハイライトの有無が異なる画像の光沢感を評定した．この鏡面ハイライトの有無による光沢感の差を検討することで，低輝度領域由来の光沢感の一般性を検討した結果を述べる．また，鏡面ハイライトの有無による光沢感の差をハイライト依存度として，このハイラ

氏　　名　清川　宏暁

イト依存度が低い時に低輝度領域が光沢感に寄与していると考え，この条件下で光沢感を説明できる画像特徴を，「低輝度領域由来の光沢感を説明できる画像特徴」として検討した結果についても述べる．

第３章では，第２章で明らかになった画像特徴を実際に操作し，それに応じて知覚される光沢感を変化させることが可能なのかを検討した実験の結果について述べる．様々な物体画像で画像特徴を様々な強度で操作し，一対比較法による実験から知覚される光沢感の変化を定量化した．この時に，光沢感の操作がうまくいくかどうかを決定づける反射特性的・画像特徴的条件についても議論する．

第４章では，陰影と光沢成分の形状情報の不一致が半透明感を生起させるかどうか検討した実験について述べる．陰影と光沢成分で独立に凹凸の振幅と周波数を操作し，画像合成した．それらから知覚される半透明感を一対比較法で定量化した．また，定量化された半透明感の変動を画像特徴から説明できる計算モデルを作成した．このモデルからどの程度ヒトの応答を予測できるかについても議論する．

第５章では，光沢感と半透明感には知覚学習による学習効果が現れるのか検討した結果について述べる．光沢感や半透明感と相関する物理パラメータを変化させた刺激画像のそれぞれの質感変化を学習し，その感度が変化するかという実験から質感の知覚学習の成立の可否を議論する．

第６章では，総合的な考察，及び研究全体から考察される脳内の光沢感・半透明感知覚のためのモデルを提案する．

第７章では，本研究の結論と今後の課題を述べる．

論文内容要旨（英文）

2019年度入学　大学院博士後期課程

電子情報工学専攻

氏　　名　清川　宏暁　印

論　文　題　目

A study on the modeling of visual processing for the perception of glossiness and translucency.

Recently, apparent surface qualities catch attentions as a new feature which can produce additional aspects to many products. However, it is difficult to manipulate or evaluate them quantitatively. To have a breakthrough for these problems, we need to elucidate the underlying mechanisms how our visual system perceives surface qualities from retinal images.

Regarding glossiness perception, a previous study reported a new finding, which indicated that we can perceive glossiness from low-luminance regions (hereafter such glossiness will be referred as dark gloss). However, there are two issues left unclear. The first one is that it is not clear whether the perception of dark gloss is general across different objects with various physical parameters, and the second one is that it is still unclear what image features work as cues for the glossiness perception.

Regarding translucency perception, previous studies have focused on the effects of image features that appear on the shading pattern of the translucent object. However, ordinary translucent objects have specular reflections. Thus, there may be some interactive image features between shading patterns and specular reflections used to perceive translucency.

It is also unclear whether the processes for different surface qualities in the human visual system are independent or not. Previous studies demonstrated that the independence of the visual process can be revealed by perceptual learning paradigm. However, it is still unclear whether the effects of perceptual learning occur in material perception.

In this thesis, I aimed for determining which image features work as cues for the perception of the dark gloss and translucency and elucidating their independence of the visual processes in the human visual system. As a result, I found that luminance edge is a cue for the perception of dark gloss, the discrepancy in orientation anisotropy of luminance distribution calculated from between shading and specular patterns is a cue for translucency perception, and the processes for different surface qualities are independent in the human visual system.

This thesis is organized as follows. In Chapter 1, the background and the purpose of this research were described. In Chapter 2, the experiment and analysis to examine the generality of the perception of dark gloss and the image feature for the dark gloss perception were described. In Chapter 3, the experiment to examine whether it is possible to manipulate perceived glossiness by changing the image feature found in Section 2 was described. In Chapter 4, the experiment to determine the image feature for the perceived translucency and its computational modeling were described. In Chapter 5, the experiment to examine whether perceptual learning occurs in the perception of glossiness and translucency was described. In Chapter 6, general

氏　　名　Hiroaki Kiyokawa

discussion was described to wrap up new findings related with the preceding studies and new models for glossiness perception and translucency perception were proposed. In Chapter 7, conclusions and future works were described.

学位論文の審査及び最終試験の結果の要旨

令和　３年　２月　１０日

理 工 学 研 究 科 長　殿

課程博士論文審査委員会

主査　山内 泰樹　印

副査　深見 忠典　印

副査　安田 宗樹　印

副査　永井 岳大　印

副査　　印

学位論文の審査及び最終試験の結果を下記のとおり報告します。

記

論 文 申 請 者	専攻・分野名　電子情報工学専攻　　氏名　清川宏暁		
論 文 題 目	光沢感や半透明感の知覚のための視覚情報処理モデルに関する研究		
学位論文審査結果	合格	論 文 審 査 年 月 日	令和　３年　１月　２０日～ 令和　３年　２月　８日
論 文 公 聴 会	令和　３年　２月　８日	場　所	工学部１１号館 未来ホール
最 終 試 験 結 果	合格	最 終 試 験 年 月 日	令和　３年　２月　８日

学位論文の審査結果の要旨（1,000 字程度）

近年，仮想現実や e-コマースなどの普及により，より表示画像を本物らしく再現する需要が増えており，その中でも「質感」を付加価値としていかに再現するが重要になってきている．そのためには，我々がどのように質感を知覚しているかを解明することができれば，質感を定量的に操作するなどの工学的価値も期待される．本論文では，数多くの質感の中でも，光沢感と半透明感に着目し，その知覚メカニズムを明らかにすることを目的とし，実験結果からこれらの知覚モデルの提案を行っている．

第１章では，本研究の背景と目的について述べている．第２章では，低輝度領域由来の光沢感の一般性とその知覚に用いられる画像特徴を検討し，コンピュータグラフィックスによって様々な物理パラメータを持つ大量の画像群を作成した画像を用いた心理物理実験から低輝度領域由来の光沢感の一般性を検討した．第３章では，第２章で明らかになった画像特徴を実際に操作し，それに応じて知覚される光沢感を変化させることが可能なのかを検討し，光沢感の変化の定量的表現を試みた．第４章では，陰影と光沢成分の形状情報の不一致が半透明感を生起させるかどうか検討した実験について述べ，実験結果に基づき，定量化された半透明感の変動を画像特徴から説明できる計算モデルを作成した．第５章では，光沢感と半透明感には知覚学習による学習効果が現れるのか検討した結果について述べた．第６章では，第２章から第５章で得られた実験結果から総合的な考察を行い，脳内の光沢感・半透明感知覚のためのモデルを提案した．第７章では，本研究の結論と今後の課題を述べながら，研究を総括している．

このように本論文では，研究テーマに新規性・独自性があり，自ら研究を計画・遂行するための専門的知識を基に，研究背景・目的が正しく述べられていた。学位論文の構成は適切で，体裁も整っており，記述が論理的で，設定した研究テーマに沿った明確な結論が述べられていた。また上記の研究成果について，査読付き筆頭著者論文３報が学術論文誌に掲載／採択され，国際学術会議においても５件発表されている。国内学会において，成果発表がベストプレゼンテーション賞を受賞するなど，その成果の質についても業界で認められている．以上より，本論文を博士（工学）の学位論文として合格と判定した。なお本論文に関する研究においては，人を対象とする医学系研究に関する学内規程に基づき山形大学工学部倫理審査委員会に申請し，承認された後に遂行されている。

最終試験の結果の要旨

最終試験は，公聴会実施後に主査・副査の教員により，学位論文を中心とし関連する事項について口頭にて実施された。当該学生の専門的知識，学位論文の妥当性・論理性について議論が行われた。その結果，博士の学位を授与するのに十分な知識と能力を有していると判断されたため，最終試験について合格と判定した。