視差とコントラスト変化を伴った鏡面反射像の主観的評価

*山本昇志, **澤邉暢志, ***山内泰樹, **津村徳道

- * 東京都立産業技術高等専門学校ものづくり工学科 〒116-0003 東京都荒川区南千住 8-17-1
- ** 千葉大学大学院融合科学研究科 〒263-8522 千葉県千葉市稲毛区弥生町 1-33
- *** 山形大学大学院理工学研究科 〒992-8510 山形県米沢市城南4丁目3-16

要旨

本論文では、再現物体の鏡面反射成分と拡散反射成分の視差角を変化させた立体表示を用いて、鏡面反射成分に対する知覚の変化を主観的に評価した。この実験において、我々は拡散反射と鏡面反射が共に二次元または三次元で再現可能な表示システムを使用した。三次元表示については、人間の眼の融像範囲を考慮して、物体の拡散反射と鏡面反射の視差角を輻輳運動が起こりにくい視差角と輻輳運動が起こる視差角で変化させ、鏡面反射成分の知覚量を比較している。これら表示方法を変化させた評価結果において、輻輳運動が起こりにくい視差角では二次元表示と三次元表示で鏡面反射成分に対する知覚量に顕著な差は見られなかった。一方、輻輳運動が起こる視差角では二次元表示より三次元表示の方が鏡面反射成分に対する知覚量が増すことが明らかになった。更に、拡散反射と鏡面反射のコントラストを様々に変化させた場合でも、輻輳運動が起こる視差角では三次元表示の方が鏡面反射成分に対する知覚量が増すことを明らかにした。

キーワード

立体表示, 両眼視差, 鏡面反射成分, 奥行き差, 主観評価

Subjective Evaluation of 3D Specularity by Changing the Disparity Angle and Image Contrast

- * Shoji Yamamoto, ** Masashi Sawabe, ***Yasuki Yamauchi, **Norimichi Tsumura
 - * Tokyo Metropolitan College of Industrial Technology 8-17-1, Minamisenjyu, Arakawa-ku, Tokyo 116-0003, Japan
 - ** Graduate School of Advanced Integration Science, Chiba Univ. 1-33, Yayoi-cho, Inage-ku, Chiba-shi 263-8522, Japan
 - *** Graduate School of Science and Engineering, Yamagata Univ. 4-3-16, Jonan, Yonezawa-shi Yamagata, 992-8510, Japan

Abstract

In this paper, we evaluated the change of visual perception for specular reflections by using binocular stereoscopic display. In our experiment, the subjective evaluation was performed by using both 2D and 3D images which were consisted of the combination of both diffuse and specular reflection. Furthermore, the disparity angle between diffuse and specular reflection in 3D image was changed in the depth perceptible range. When the depth was hardly observed, the scores of visual perception for specular reflections were almost the same for both 2D and 3D images. On the other hand, when the depth was obviously perceived, the score of 3D images for specular reflections was stronger than the score of 2D images. This difference was observed even if the contrast between diffuse and specular reflection was changed. We confirmed that the visual perception for specular reflection arose at the case of 3D representation when the disparity angle between diffuse and specular reflection exists in the depth perceptible range.

Keywords

Stereoscopic, Binocular, Specularity, Disparity, Subjective evaluation

1. まえがき

近年、コンピュータグラフィックス(以下、CG)技術の進化は目覚ましく、様々な実物体や自然なシーンをリアルに再現することが可能となってきている。計算機の処理能力向上も伴い、物体表面や内部での複雑な光挙動を表現する反射モデル、様々な現実の見え方をそのまま合成するテクスチャマッピング、更には周囲環境光を光源としてシーンを描画するグローバルマッピングなど、現実世界と一致した描写を作成するための手段が開発されてきた 1)~4).

その中で、光輝く光源や物体表面で生じる強い鏡面反射光は、表示装置のダイナミックレンジの制約から正確に再現することが難しい描画対象の一つである。表示媒体の最大輝度を光源や鏡面反射部分に割り当てても、周囲画像との輝度差(コントラスト)によっては単なる白いテクスチャと認識されてしまう場合がある。そのため、強い光を観察したときに眼の光学系で生じるハロ(Halo)やグレア(Glare)などを付加することで、光輝く現象をもっともらしく再現する手法も提案されている5¹⁷. これらハロやグレアは光が非常に強いヘッドライトや太陽光の再現には効果的であると考えるが、物体表面で起こる光沢や鏡面反射に付加すると、誤った物体認識や材質判断を誘引する恐れがある。例えば、我々は表面反射の分布具合から物体の曲率や表面材質を判断しているが、ハロやグレアを付加することより反射光分布の変化を招き、形状が不定で表面の状態が実際と異なる物体として認識してしまう恐れがある。それ故、鏡面反射の再現は反射光分布や強度変化を正確に表現しながら、輝いているような知覚を与えることが必要であり、現在でも CG 分野で非常に重要な研究対象となっている。

このような鏡面反射の再現に対して, Blake らは立体的な表現手法を行うことにより実物 体での見えと同等な再現が可能であることを明らかにしている 8. 彼らは鏡面立体視モデル (Specular stereo model) を提案して、鏡面反射像が物体上の拡散反射面とは異なる位置 に再現されることで、自然な見えが実現できると述べている.また、Wendt らは CG にお ける表示物体の拡散反射光量と鏡面反射光量の差、即ち表示画像における拡散反射部と鏡 面反射部のコントラストを変化させて、平面的な画像表示と立体的な画像表示に対する知 覚的な感度を評価した ⁹. その結果, 評価したほとんどの画像で, 立体的な表示を行ったほ うが鏡面反射に対する知覚量は増加することを報告している. このように, CG で現実感の ある鏡面反射を再現するためには立体的な表現が非常に効果的であることは明らかである. しかしながら、これまでの研究では、物体の拡散反射表面と鏡面反射位置に一定の奥行き 差を発生させた実験のみが行われていて、どの程度の奥行き差を与えた時に鏡面反射の再 現に輝くような知覚を与えるのかについての議論されていない、実際、発生する鏡面反射 は映り込む光源の距離に応じて様々な奥行きを持つため、これらすべての条件で立体的な 表示が鏡面反射のリアルな再現に効果的であるとは考えにくい. それ故, CG を用いて現実 世界で生じる鏡面反射を正確に再現可能とするためには、立体表示における奥行き条件を 明確にする必要がある.

そこで本論文では、この鏡面反射の再現において、拡散反射表面と鏡面反射位置の奥行き差を変化させ、それぞれの奥行き差において鏡面反射の知覚強度を評価した。特に、我々は立体観察時の眼球運動のひとつである輻輳に注目して、輻輳運動が発生する奥行き差と、輻輳運動が起こらない奥行き差で比較を行った。また、鏡面反射の知覚に対しては物体の拡散反射と鏡面反射のコントラストも大きく影響することが明らかになっているため、両者のコントラストを様々に変化させた複数画像において、それぞれの画像で奥行き差の効果を確認した。

以下,次章以降では鏡面反射の再現に対する関連研究を述べるとともに,今回,我々が評価すべき立体的な鏡面反射の生成手法や光源・視点の設定条件などについて3章で述べる.4章では実際に視覚的な知覚感度を評価する実験構成と手法を定義し,5章で主観評価実験の結果を報告している.更に6章では拡散反射と鏡面反射のコントラストや奥行き差が鏡面反射成分の知覚に与える影響量について考察を行い,鏡面反射の再現における立体表示の効果についてまとめる.なお,立体表示では拡散反射表面も鏡面反射も物体形状に依存した左右視差(奥行き)を持っているため,本論文では両者の奥行き差を視差角と定義して区別する.

2. 関連研究

鏡面反射は物体の形状や表面反射特性を忠実に反映するため、CG や視覚研究者によって最も注目されてきた光学現象である 10¹¹). 今までの研究成果から、物体表面で発生する鏡面反射を物理モデルとして形式化して、見えに応じたパラメータを設定することでリアルな再現を可能としている. これら物理的な反射モデルは 1990 年代に多くの提案がなされ、現在の研究の主眼はパラメータの決定手法に移行している ^{12),13)}. そのため、鏡面反射成分の知覚的な解析が進められ、特にコントラストとその分布に対する研究が盛んである ¹⁴⁾⁻¹⁶⁾. コントラストは拡散反射部分と鏡面反射部分の光量比を示しており、輝度に対する応答や順応などの視覚的機能に深く関係している.

コントラストに関する先行研究としては、Pellacini らが鏡面反射成分を表現する物理パラメータと人の知覚量との間の関係を明確にすることを試みている 170. 彼らは Ward らによる反射モデルにおける拡散と鏡面反射のパラメータを変化させた画像を用意し、その画像におけるコントラストとの関係に対する感度を主観的な評価で定量化した。その結果、拡散と鏡面反射のパラメータ (ρ_d, ρ_s) を用いて、艶のある物体のコントラストと知覚量 Cの関係が式(1)で表されることを示した。この結果は二次元画像に対してのみであるが、材質に応じた拡散反射部分と鏡面反射部分のパラメータの決定に非常に有益である。

$$C = \sqrt[3]{\rho_s + \rho_d/2} - \sqrt[3]{\rho_d/2}$$
 ...(1)

一方,立体視での鏡面反射表示については、Blake らが物体表面と光源では視差に違いがあり、鏡面反射は立体的な光学現象だということを述べている 8. 彼らは凹面凸面両者を持

つ三次元 CG を用い、被験者に最も現実に近く知覚できる鏡面反射成分を任意の奥行き位置に設置してもらう実験を行った。その結果、凸面において、物体表面より奥に鏡面反射成分が存在するときが最も現実に近いという結果を得た。これは鏡面反射成分が物体表面と異なる視差を持つことの証明であり、両者の視差角が重要であることを裏付けている。更に Wendt らは様々なコントラストを持つ任意形状の物体に対して、鏡面反射に視差をつけた場合と付けなかった場合の知覚量について主観評価を行い、鏡面反射に視差を付けたほうが鏡面反射成分に対する知覚感度を上昇させる効果があると報告しているの。このことから、鏡面反射を引き起こす光源位置と拡散反射が生じる物体表面位置の視差角の違いが光強度知覚に影響を及ぼすと考えられる。

しかしながら、前者の結果には一つの疑問が生じる。CG では物体表面と鏡面反射位置の 視差角は自由に設定することができるため、視差角の大きさによって鏡面反射に対する知 覚が変わるはずである。実際にほんのわずかな視差角の場合、両眼の視差があっても複視 が起こらず感覚融像がなされる Panum の融合域の存在が報告されている $18^{\sim 20}$)。この領域 では奥行き差は感じられず、Blake らや Wendt らが明らかにした鏡面反射に対する立体的 な効果は失われる恐れがある。そこで我々は拡散反射表面と鏡面反射位置の視差角を Panum の融合域内と融合域外に設定した 2 つのケースで、鏡面反射に対する知覚強度の変化を評価した。

3. 視差角の設定と評価用画像

三次元空間で鏡面反射を持つ物体を表現するとき、この反射は光源が映り込んだ像なので、図 1 に示すような距離に応じた視差を持つ。ここで、αは光源を観察したときの輻輳角、βは物体表面を観察したときの輻輳角を示している。物体表面が平面の場合、物体面と対称な位置に光源があり、その距離に応じた輻輳角で表現することができる。しかしながら物体面が曲率を持つ場合、曲率半径によっても光源位置が変化するため、単純に光源と物体の距離だけで輻輳角の違いを検討することはできない。そこで本論文では、物体表面の位置で生じる輻輳角と曲率を介した光源の位置で生じる輻輳角との角度差、すなわち視差角を変化するパラメータとして採用する。

この視差角については2章で述べたように、Panum の融合域で感覚融像がなされることが報告されている 18~20). そのため、視差が実際にあるのに複視や被写体深度による輪郭の手がかりが観察されにくい. つまり、注視点が視差のある物体間を移動しても、輻輳や調節の変化がほとんどないことが想定される. そこで我々は Panum の融合域内と融合域外の評価画像を作成することで、視差角の変化が確実に眼の輻輳や調節運動を誘引する場合での比較を行うこととした. この視差角変化の基準となる Panum の融合域は様々な測定方法で検討されているが、今回は我々が以前の研究で行った融合域の計測結果を採用することとする. 以前の研究では 21)、視差角が固定なマーカーと視差角が変化する周囲画像を用いて、複視が観察され始める視差角、つまり輻輳運動が起こる視差角は平均で 40 arc min

」図 1

であることを明らかにしている. そこで本研究では物体の拡散反射表面と鏡面反射位置を 観察したときに, 輻輳運動が起こりにくい(視差角 40 arc min 以下)場合と, 輻輳運動が 起こる(視差角 40 arc min より大きい)場合に分けて実験を行った.

一方、本実験では視差角変化と同時に、拡散反射成分と鏡面反射成分のコントラストを変化させた画像でも知覚強度を評価する. そのため、評価物体は以下に示す Ward の等方性 BRDF モデルを用いて描画する 4.

$$\rho(\theta_i, \phi_i, \theta_o, \phi_o) = \frac{\rho_d}{\pi} + \rho_s \frac{1}{4\pi\alpha^2 \sqrt{\cos\theta_i \cos\theta_o}} \exp\left(-\frac{\tan^2 \delta}{\alpha^2}\right) \qquad \cdots (2)$$

 θ , φ はそれぞれ仰角と方位角を表し, i, o はそれぞれ入射, 反射光を表す. また, ρ_d , ρ_s は それぞれ拡散, 鏡面反射係数, α は光沢の広がり, δ は法線ベクトルとハーフベクトルの成 す角を表す. 本研究では, α = 0.070 とし, ρ_d = 0.03, 0.12, 0.29, ρ_s = 0.017, 0.050, 0.083 と 変化させ, 図 2 に示す 9 枚の画像を評価に用いた. ρ_d の値はそれぞれマンセル色票 N2, N4, N6 での反射率を採用しており, また, 拡散反射の最大値を画素値の最大値とする. 評価画像は OpenGL グラフィックライブラリを用いて再現しており, 拡散, 鏡面反射の描画はプログラマブルシェーダ (GLSL) に(2)式を組み込んで実現している 22).

図 2

図 3

4. 実験

4.1 実験システム

実験を行ったシステムの概要を図 3 に示す.表示装置としては三次元表示が可能なプロジェクタ(DepthQ, Lightspeed 社)を用いた.プロジェクタの表示解像度は 1280×720 画素であった.左右それぞれの目に与える画像は 120 Hz で切り替えられており,同期が取られた液晶シャッタメガネを装着することで,被験者は立体的な画像を観察することができる.立体を表示するにあたり,コンピュータ上の仮想空間と現実空間の整合性が保たれるように,座標系の中心をスクリーン中心に設定した.評価物体はその重心をスクリーン平面上の中心に配置し,光源の位置は座標中心から手前 3.0 m,高さ 5.7 m の仮想空間上の位置に配置した.

今回,評価物体の表面を表す拡散反射成分と鏡面反射成分の位置で生じる視差角が知覚に与える影響を明らかにするために,鏡面反射成分の発生源である光源の位置を変化させる必要がある.しかしながら,光源の位置を変化させると物体表面で生じている陰影まで変化してしまうため,正確な評価が困難となる.そこで視野角を変化させるという観点から,観察者の位置を前後に移動することで物体と鏡面反射の視差角を変化させる方法を採用した.但し,3章で述べたように,視差角は表示する物体の曲率によって大きく異なる.そのため,表示物体を Stanford Bunny と決定し,その形状データを用いて様々な観察位置での視差角をシミュレーションした.実際に,実験した部屋の大きさから確保できる最大距離は 3.0 m であり,その距離での視差角は平均 29.4 arc min であった.この距離なら

視差角が 40 arc min 以下なので、ほとんどの観察者は輻輳運動をしなくても物体表面と鏡面反射成分の両者を観察することができる.一方、半分の距離である 1.5 m の位置では視差角は平均 69.4 arc min となり、40 arc min 以上を確保することができる.よって、今回はスクリーンと観察者の距離を 3.0 m(輻輳運動が起こりにくい視差角)と 1.5 m (輻輳運動が起こる視差角)として実験を行った.なお、視差角算出における人間の目の間隔は平均的な 65 mm を用いて実施した 23).

4.2 主観評価方法

鏡面反射成分の知覚の強さを定量化する主観評価法として、本研究ではマグニチュード推定法(Magunitude Estimation Method,以下 ME 法と記す)を採用した ²⁴⁾. ME 法とは、物理量と心理量との関係を求めるために用いられる尺度構成法の 1 つで、被験者に 1 つの刺激を提示し、その刺激に対する評価を数値で表現させるものである。今回の実験では「表示物体全体を観察してもらい、鏡面反射成分の知覚の強さを評価する実験である」と教示を行っている。これにより、評価刺激に対する鏡面反射成分の知覚の強さを直接的に求めることができ、物体表面の艶が感じられるほど、高い値が得られる結果となる。

一般に、ME 法による主観評価実験には様々な方法があるが、本論文では標準となる刺激を実験セッション毎に提示する方法を採用した。そして、この標準刺激を 100 として被験者に覚えさせ、各画像に対して評価値を回答させた。なお、標準となる物体刺激としては二次元表示における図 2(2b) の物体を使用した。また、今までの我々が行った主観的な実験では、視覚刺激に対する知覚は初回が高く、徐々に低下していく傾向が伺える。そこで、本実験では主観評価を 5 回行い、全 5 回の平均値を個人の結果とする。これら実験の被験者は立体視能力が正常な男女 12 名であった。各観察距離の実験において、拡散反射と鏡面反射のコントラストを変化させた画像(1a から 3c まで)はランダムな順序で、1 0 秒間呈示された。その後の 20 秒は待ち時間として、この間にスコアを回答してもらう。なお 20 秒の待ち時間の間、画面には一様ランダムノイズ画像を呈示することにより、前回の知覚をキャンセルする処理を行った。

実験を行うパラメータの組み合わせは表 1 に示す 4 通りであり、二次元表示(2D)の場合には拡散反射と鏡面反射のいずれにも視差を発生させていない.一方、三次元表示(3D)では両反射に視差を発生させているが、スクリーンと観察者の距離を変える(1.5m と 3.0m)ことで拡散反射と鏡面反射の視差角を変化させている.なお、被験者にはいずれの実験を行っているかという情報は与えず、実験毎に 30 分以上の休憩を与えながら 1 日で実験が終了するようにした.

表 1

5. 結果

5.1 観察距離 3.0 m (輻輳運動が起こりにくい視差角) での結果 図 4 に観察距離 3.0 m での全被験者のデータを集計した結果を示す. 横軸は図 2 の各画

像の記号を順に並べており、縦軸は光沢の評価値を示している. 各プロット点は被験者 12 名の平均値を示しており、ばらつきは標準偏差を示している. まず、拡散反射と鏡面反射のコントラストを変化させた場合での知覚量の変化に注目した. 各結果を比較してみると、平均値としては同じ拡散反射パラメータの画像間(1, 2, 3) での評価値は鏡面反射パラメータの値の大きさ(a, b, c) に追従して上昇していることがわかる. コントラストは拡散反射と鏡面反射の強度比であるため、コントラストが強いほど鏡面反射に対する知覚が強くなることが伺える. 一方で、三次元表示と二次元表示での評価値(◆,□) を比較すると、明確な差は現れなかった. 更に、三次元表示と二次元表示での評価値の違いを明確にするため、両評価結果の差分と偏差に対する二標本 t 検定を行った結果を図 5 に示す. 差分結果では画像 1a, 1b において差が現れてはいるが、その値は 5 未満と小さく、ほとんど違いはないと考えられる. また、三次元表示と二次元表示のそれぞれの結果に対する t 検定の結果でも、有意差は認められなかった(p>0.05、自由度 12+12−2=22). これらの結果から観察距離が3.0 m の場合、拡散反射と鏡面反射を全て三次元表示した場合と全て二次元表示した場合において、鏡面反射に対する評価はほとんど差がないことがわかる.

5.2 観察距離 1.5 m (輻輳運動が起こる視差角)での結果

次に観察距離 1.5 m での主観評価の結果を示す. 同様に全被験者のデータを集計した結果を図 8 に、そして三次元表示と二次元表示での評価値の違いを明確にするため、両評価結果の差分と偏差に対する二標本 t 検定を行った結果を図 6 に示す.

各結果を比較してみると、5.1 節の実験結果と同様に、平均的には拡散反射と鏡面反射のコントラストの強さに追従して上昇していることがわかる。個人差によるばらつきは一見、大きいように見えるが 5.1 節とほぼ同様であった。一方で、拡散反射と鏡面反射を全て三次元表示した場合と全て二次元表示した場合での評価値を比較すると、三次元表示の評価値が二次元表示の評価値よりも明確に大きくなっていることが分かる。この結果は三次元表示と二次元表示の評価値の差分を計算した図 7 からも明らかである。どの画像の平均評価値も、二次元表示の場合に比べ三次元表示の方が大きくなっており、その値も 10 を超えるものが多い。また、三次元表示と二次元表示の二分布間で t 検定を行った結果、ほとんどの画像で p<0.05 であり、両群の平均値には有意差があるといえる。唯一、画像 1a の場合だけ p>0.05 で有意差が認められなかったが、これは画像全体が暗く、しかも鏡面反射成分が少ないために三次元表示の効果が明確に得られなかったためだと思われる。しかしながら全体的には三次元表示と二次元表示の知覚の差は明確であり、観察距離が 1.5 m の場合、二次元表示に比べ三次元表示の方が、物体の鏡面反射に対して知覚的な強度が増していることがわかる。

6. 考察

コントラストが変化した画像に対する評価結果を整理して、三次元表示と二次元表示で

図 8

図 9

の評価値の違いについて考察を行う. 拡散反射と鏡面反射のコントラストについては、Pellacini らが示した式(1)を用いて整理することができる. そこで、C 値を用いて鏡面反射成分に対する知覚量を並び替えた. 二次元表示と三次元表示のそれぞれの結果に対して、直線回帰式を加えた結果を図 8 に示す. (a)が 3.0m, (b)が 1.5m の結果を表している. 結果から、観察距離が 3.0 m (輻輳運動が起こりにくい視差角)と 1.5m (輻輳運動が起こる視差角)のいずれの場合でも、C 値が増加するにつれて鏡面反射の知覚量も増加していることがわかる. また、観察距離 1.5m の場合は二次元表示に比べ、三次元表示のほうが全画像で鏡面反射の知覚を向上させていることがわかる.

しかし、観察距離 3.0 m での結果と比べて、観察距離 1.5m の結果に対する回帰直線の傾 きは緩やかになっている. 特に, 観察距離 1.5m での二次元表示は傾きが大きく変化してお り、三次元表示の知覚が増したというよりは二次元表示の知覚に対する感度が低下したと みることもできる. 更に、鏡面反射に対する感度としては観察距離が 3.0 m (輻輳運動が起 こりにくい視差角)のほうが高いことが伺える.この結果を考察するために、光沢が繰り返 し発生している部分をラインペアと考え、各観察位置における画像観察状況をコントラス ト感度関数と照らし合わせてみた 25). 実際のスクリーンに投影された Stanford Bunny の 画素値分布と各観察距離から算出した空間周波数をプロットしたものを図 9 に示す. 結果 から,観察距離 3.0 m のほうが拡散反射と鏡面反射のコントラストに対する視感度が高く なることがわかり、今回の結果は観察距離の変化に伴う表示物体の大きさ変化が影響して いたことが推察される. 実際に, 図 8 に示した回帰直線の値を基に知覚量の差を算出する と, 観察距離 3.0 m の場合が 131-84=47 点のスコア差, 観察距離 1.5 m の二次元表示の 場合が 117-86=31 点、観察距離 1.5 m の三次元表示の場合が 135-95=40 点であった. 図 9 のコントラスト感度関数から,観察距離 3.0 m から観察距離 1.5 m になると約 30%低 下するため,観察距離 3.0 m の 47 点差が観察距離 1.5 m の二次元表示の 31 点差まで低下 するのは妥当であると考える. それに比べて観察距離 1.5 m (輻輳運動が起こる視差角)の三 次元表示の場合には 40 点差がついており, コントラストでの変化以外の差異, つまり立体 的な表現が鏡面反射に対する知覚を向上させていると考えられる.

7. まとめ

本論文では、鏡面反射成分を持つ物体の立体再現において、光源や視点の奥行き情報が 鏡面反射成分の再現に与える影響について評価を行った。特に物体表面に存在する拡散反 射成分と奥行きを持つ鏡面反射成分との視差角との関係に着目し、輻輳運動が起こりにく い視差角(観察距離 3.0m)と輻輳運動が起こる視差角(観察距離 1.5m)の両者において、 鏡面反射成分の知覚量の強さについて主観評価実験を行った。その結果、輻輳運動が起こ りにくい視差角では、二次元表示と三次元表示で鏡面反射成分の知覚量に差はほとんど現 れないことが明らかになった。一方、輻輳運動が起こる視差角では二次元表示に比べて三 次元表示での鏡面反射成分の知覚量は上昇した。また、物理パラメータと鏡面反射成分の 知覚量との関係を定量的に調べるため、Pellacini らの C 値と実験結果との関連を求めた結果、今回の実験では観察距離の変化で 2 つの実験のコントラストに対する感度が異なるものの、輻輳運動が起こる視差角を持つ立体表示で鏡面反射成分の知覚量がより一層強くなることが明らかになった。

今回の研究では輻輳運動が生じる境界を 40 arc min として実験を行ったが、この値はあくまでも我々独自の方法 ²¹⁾で求めた値であり、複数人の平均値でもある。そのため、次ステップとして各個人の眼球運動を精密に測定できる装置などを使用して輻輳運動を客観的に測るとともに、輻輳運動の量と三次元表示における鏡面反射成分の知覚の変化を詳細に調べる必要がある。また、もっと大きな視差角が発生したとき、二重像による画像ボケが顕著になり、比較自体が非常に困難になると予想される。よって、視差角の上限に対する検討も行う必要がある。今後、このような視差角変化もパラメータとして考慮しながら、鏡面反射成分が織りなす物体の光沢や映り込みを正確に再現できる範囲を明確化していきたい。

謝辞

本研究の一部は科研費新学術領域研究(質感脳情報, 23135530)の支援を受けて実施された.

- 1) Henri Gouraud: "Continuous Shading of Curved Surfaces", IEEE transactions on computers, pp.623-629, 1971.
- 2) Bui Tuong Phong: "Illumination for Computer Generated Pictures", Communications of the ACM, 18(6), pp.311-317, 1975.
- 3) Cook R. L., Torrance K. E.: "A reflectance model for computer graphics", Computer Graphics (SIGGRAPH 81 Conference Proceedings), 15(3), pp.307-316, 1981.
- 4) Ward, G.J.: "Measuring and modeling anisotropic reflection", Computer Graphics (SIGGRAPH 92 Conference Proceedings), 26(2), pp.265-272, 1992.
- 5) GONZATO, Jean-Christophe and MARCHAND. S: "Efficient Simulation of Halos for Computer Graphics", In Proceedings of ECSIA'2001, pp.1-6, 2001.
- 6) Masanori Kakimoto, Kaoru Matsuoka, Tomoyuki Nishita, Takeshi Naemura and Hiroshi Harashima: "Glare Generation Based on Wave Optics", Proceedings of the Computer Graphics and Applications, 12th Pacific Conference pp.133-142, 2004.
- 7) Matthias B. Hullin, Elmar Eisemann, Hans-Peter Seidel, Sungkil Lee : "Physically-Based Real-Time Lens Flare Rendering", Proc. of SIGGRAPH, pp. 108:1-108:9, 2011.
- 8) A. Blake and H. B'ulthoff: "Does the brain know the physics of specular reflection?", Nature, 343(6254), pp.165-168, 1990.
- 9) Gunnar Wendt, Franz Faul and Rainer Mausfeld: "Highlight disparity contributes to the authenticity and strength of perceived glossiness", Journal of Vision, 8, pp.1-10, 2008.
- 10) K. E. Torrance, E. M. sparrow: "Theory for Off-Specular Reflection From Roughened Surfaces", JOSA, Vol. 57, Issue 9, pp.1105-1112, 1967.
- 11) James F. Blinn: "Models of light reflection for computer synthesized pictures", Proc. of SIGGRAPH, pp.192-198, 1977.
- 12) William A. Stokes., James A. Ferwerda, Bruce Walter., nald P. Greenberg. : "Perceptual illumination components: a new approach to efficient, high quality global illumination rendering", Proc. of SIGGRAPH, pp..742-749, 2004.
- 13) Reynald Dumont., Fabio Pellacini., James A. Ferwerda: "Perceptually-driven decision theory for interactive realistic rendering", ACM Transactions on Graphics, Vol. 22, Issue 2, pp.152-181, 2003.
- 14) Motoyoshi, I., Nishida, S., Sharan, L., Adelson, E.H.: "Image statistics and the perception of surface qualities", Nature, 447, pp.206-209, 2007.
- 15) Phillip Marlow, Juno Kim, Barton L. Anderson: "The role of brightness and orientation congruence in the perception of surface gloss", 11(9):16, pp.1-12, 2011.

- 16) Juno Kim, Phillip Marlow, Barton L. Anderson: "The perception of gloss depends on highlight congruence with surface shading", 11(9):4 pp.1-19, 2011.
- 17) Fabio Pellacini, Fames A. Ferwerda and Donald P. Greenberg: "Toward a Psychophysically-Based Light Reflection Model for Image Synthesis", Proc. of SIGGRAPH, pp.55-64, 2005.
- 18) Panum, P.L.: "Physiologische Untersuchungen uber das Sehen mit zwei Augen", (inOgle, K.N.): "Spatial Localization through Binocular Vision", H. Davison(ed), Academic Press, The Eye, 4, pp.271-320, 1962.
- 19) Ian P. Howard and Brian J. Rogers: "Binocular Vision and Stereopsis", Oxford University Press, 1995.
- 20) S. Pastoor: "Human Factors of 3D Imaging: Results of Recent Research at Heinrich-Hertz-Institut Berlin", Proc. 2nd Int. Display Workshop, 1995.
- 21) Shoji Yamamoto, Mitomo Maeda, Norimichi Tsumura, Toshiya Nakaguchi, Ryutaro Okamoto, Yoichi Miyake, and Ichiro Shimoyama: "Subjective evaluation of visual fatigue due to misalignment of motion and still images in a stereoscopic display", Journal of the Society for Information Display, Vol.20(2), pp.94-102, 2012.
- 22) John Kessenich: "The OpenGL Shading Language", 2008.
- 23) Neil A. Dodgson: "Variation and extrema of human interpupillary distance", Proc. of SPIE, pp.36-46, 2004.
- 24) Torgerson, W.S: "Theory and Methods of Scaling", Wiley: New York, 1960.
- 25) Doug DeCarlo and Anthony Santella. "Stylization and abstraction of photographs", Proc. of SIGGRAPH, pp. 769–776, 2002.

Table Caption

表 1 実験条件

Table1 Experimental conditions

Table

表 1 実験条件 Table 1 Experimental conditions

Experiment No.	1	2	3	4
Distance from screen	1.5 m	1.5 m	3.0 m	3.0 m
Dimension of display	2D	3D	2D	3D

Figure captions

- 図1 物体表面と光源位置での視差角
- Fig.1 Disparity between object surface and light position
- 図2評価用画像
- Fig.2 Evaluation Images
- 図3 実験環境(暗室)
- Fig.3 Experimental environment (dark room)
- 図 4 観察距離 3.0 m での主観評価結果 (観察者平均とばらつき)
- Fig.4 Total results of subjective evaluation at the case of 3.0 m
- 図 5 観察距離 3.0 m における二次元表示と三次元表示の差分(a)と検定結果(b)
- Fig.5 Results of subtracting (a) and t-testing (b) between 2D and 3D at 3.0 m
- 図 6 観察距離 1.5 m での主観評価結果 (観察者平均とばらつき)
- Fig.6 Total results of subjective evaluation at the case of $1.5\ m$
- 図 7 観察距離 1.5 m における二次元表示と三次元表示の差分(a)と検定結果(b)
- Fig.7 Results of subtracting (a) and t-testing (b) between 2D and 3D at 1.5 m
- 図8 コントラストを示す C 値と評価値との相関
- Fig.8 Correlation between C contrast value and evaluation score
- 図9 コントラストに対する視感度と観察距離の関係
- Fig.9 Relationship between contrast sensibility and distances of observation

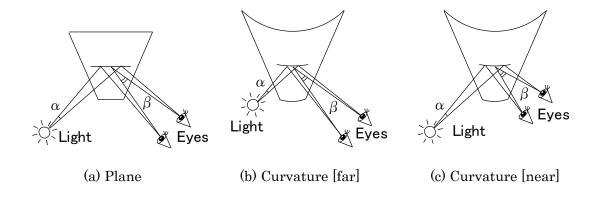


図1 物体表面と光源位置での視差角

Fig.1 Disparity between object surface and light position

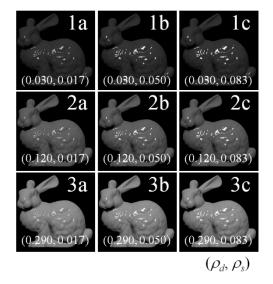


図2評価用画像

Fig.2 Evaluation Images

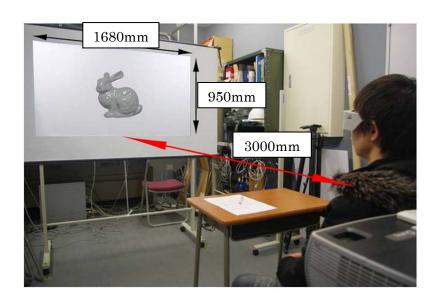


図3 実験環境(暗室)

Fig.3 Experimental environment (dark room)

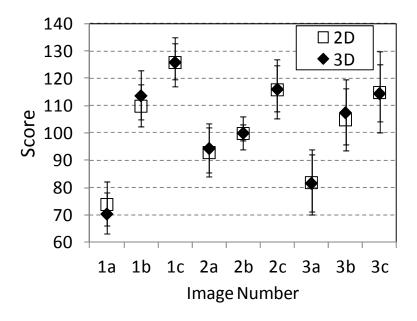
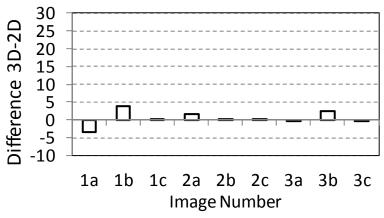
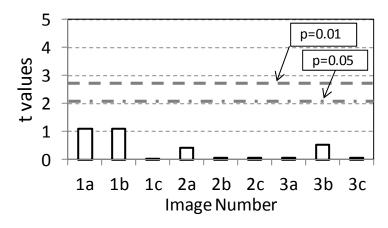


図 4 観察距離 $3.0\,\mathrm{m}$ での主観評価結果(観察者平均とばらつき) Fig.4 Total results of subjective evaluation at the case of $3.0\,\mathrm{m}$



(a) Subtracting between 2D and 3D



(b) Result of t-testing

図 5 観察距離 3.0 m における二次元表示と三次元表示の差分(a)と検定結果(b) Fig.5 Results of subtracting (a) and t-testing (b) between 2D and 3D at 3.0 m

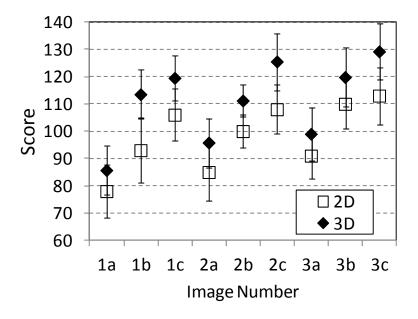
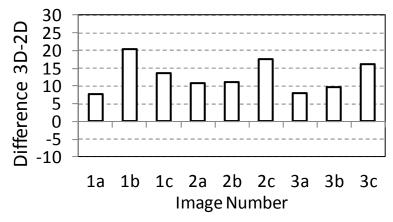


図 6 観察距離 $1.5\,\mathrm{m}$ での主観評価結果(観察者平均とばらつき) Fig.6 Total results of subjective evaluation at the case of $1.5\,\mathrm{m}$



(a) Subtracting between 2D and 3D

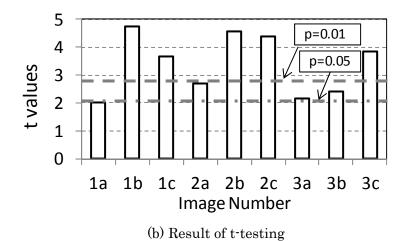
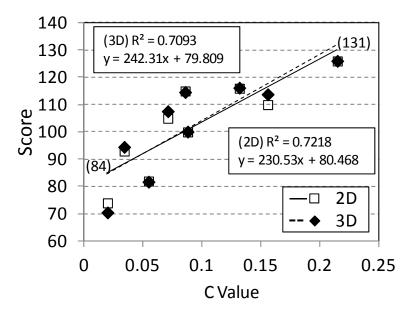
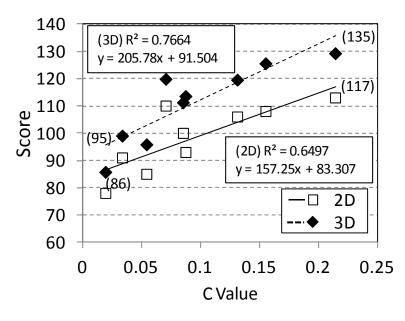


図 7 観察距離 1.5 m における二次元表示と三次元表示の差分(a)と検定結果(b) Fig.7 Results of subtracting (a) and t-testing (b) between 2D and 3D at 1.5 m



(a) Observation at 3.0 m



(b) Observation at 1.5 m

図8 コントラストを示す C 値と評価値との相関

Fig.8 Correlation between C contrast value and evaluation score

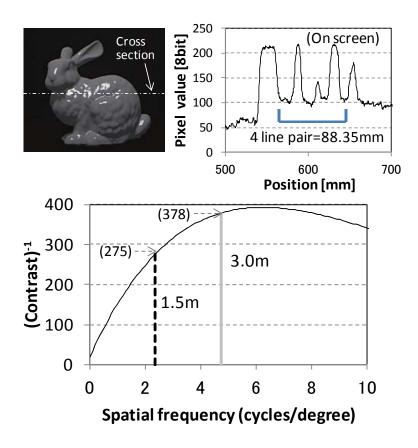


図 9 コントラストに対する視感度と観察距離の関係

Fig.9 Relationship between contrast sensibility and distances of observation