

三次元映像の知覚と光沢知覚

——脳内機構から映像評価まで——

坂野 雄 一*1),2)

近年、バーチャルリアリティ（VR）に代表されるエクステンデッド・リアリティ（XR）や、メタバースが急速に普及しつつある。その結果、臨場感の高い、広視野三次元映像に接する機会が徐々に増えている。また、そのような仮想空間内での物の実物感や、実世界での物の感性価値に大きな影響を与える要因として、質感、特に光沢知覚がある。学術界では、ここ20年ほど、CG技術の発展に伴い、三次元映像の知覚と光沢知覚の研究が急速に進展してきた。そこで本稿では、著者らの研究を中心に、三次元映像の知覚と光沢知覚の研究を概説する。

キーワード：奥行き知覚、両眼視差、立体ディスプレイ、質感、定量的評価

I はじめに

近年、仮想世界の提供技術であるバーチャルリアリティ（Virtual Reality; VR）、現実世界に仮想世界を重ね合わせて表示する拡張現実（Augmented Reality; AR）、現実世界と仮想世界を相互に影響させる複合現実（Mixed Reality; MR）などのエクステンデッド・リアリティ（Extended Reality; XR）が急速に普及しつつある。また、VR技術を基盤とし、自分自身の分身（アバター）で参加する仮想空間であるメタバースも急速に普及し始めている。これらにおいて高い没入感を生み出しているのは広視野の三次元映像である（安藤他, 2010, 2018）。

一方で、そのような仮想空間内での物の実物感や、実世界での物の感性価値に大きな影響を与えるのは光沢知覚を中心とした質感である。質感は実世界での物の素材知覚に利用されるだけでなく、鮮度や濡れ具合、劣化度などの状態推定にも影響を及ぼす。また、物体認識や、滑りやすそうなので強く持つ等の行動にも影響を与え、さらに、快適性、価値判断にも大きな影響を及ぼすと考えられている（坂野他, 2015; 安藤他, 2018）。

そのような中、ここ20年ほど、コンピュータの性

能とコンピュータグラフィックス（CG）技術が急速に発展したおかげで、三次元映像の知覚と、光沢知覚を中心とした質感の研究も急速に進展した（坂野, 2022a）。そこで本稿では、著者らの研究を中心に、三次元映像の知覚と光沢知覚の研究を概説する。

II 二つの知覚に共通する計算論的問題： 不良設定問題

三次元映像の知覚と光沢知覚には、共通する計算論的問題として、不良設定問題がある。すなわち、どちらの知覚においても、不十分な情報から目的の情報を推定している。三次元映像の知覚では、例えば奥行き知覚の場合は、二次元の網膜像から物体の三次元形状を推定している（Howard & Rogers, 1995, 2002）。光沢知覚の場合は、面の反射率特性、面の三次元形状、照明環境の3つの要因に依存する輝度から、面の反射率特性である光沢を推定している（坂野, 2022a; 坂野他, 2017）。多くの人が日常生活でほぼ支障なく生活できていることから分かる通り、人間の視覚系はこれらの不良設定問題をうまく解いている。そのため、人間の視覚系がどのようにして不良設定問題を解き、奥行きや光沢を知覚しているのかは学術的に非常に興味深

* 1) 愛知学院大学心理学部心理学科

2) 国立研究開発法人情報通信研究機構未来 ICT 研究所脳情報通信融合研究センター脳機能解析研究室
（連絡先）〒470-0195 愛知県日進市岩崎町阿良池12 E-mail: sakano[at]dpc.agu.ac.jp

い。

著者らはこれまで奥行き知覚を含む三次元映像の知覚や光沢知覚に関して一連の研究を実施してきた。関連研究も含めて以下で概説する。

III 三次元映像の知覚

1. 奥行き知覚のための手がかり統合

1) 観察距離の影響, 個人差, 学習効果からの示唆

私たち人間は物体の表面(以下「面」)の三次元的な向きから物体の三次元形状を知覚する(Howard & Rogers, 1995, 2002)。面の向きを知覚する際、二次元の網膜像から得られる情報は、面の向き推定には不十分であるため、人間の視覚系は奥行き手がかりと呼ばれる様々な情報源を統合して用いている(Howard & Rogers, 1995, 2002)。多くの場合、統合様式は重み付け平均で説明できると言われているが(Landy et al., 1995)、各手がかりの重みがどのように決定されるかは不明であった。

著者らは、代表的な奥行き手がかりである両眼視差と遠近法情報の統合過程における手がかりの重みの決定方法を明らかにするため、様々な観察距離で両眼視差と遠近法情報の相対的な重みを計測した。その結果、観察距離が大きくなるほど両眼視差の相対的な重みが減少した(坂野他, 2004b)。これは両眼視差が観察距離の二乗に反比例して減少することにより、両眼視差の信頼性が低下することを反映していると考えられる。すなわち、人間の視覚系は、奥行きを知覚する際に、観察環境に応じて、信頼性が高い奥行き手がかりの重みを大きくしていることが示唆される(坂野他, 2004b)。

同時に、同じ観察環境でも、手がかりの相対的な重みにとても大きな個人差があることが明らかになった(坂野他, 2004b)。著者らは、この個人差の原因がこれまでの経験の個人差にあるのではないかと考えた。すなわち、特定の手がかりを使う習慣という経験により、他の手がかりが存在しても、その手がかりをより多く使い続けるのではないかと考えた。そこで、過去の観察距離の経験を反映する指標として、近視の度合いを反映する調節遠点と読書距離を各被験者で測定した。その結果、両眼視差の重みは、調節遠点や読書距離と負の相関を示した。この結果は、両眼視差の信頼性が高い近距離観察の過去の経験が多い人ほど、現在、両眼視差をより多く使う傾向があることを示唆する(坂野他, 2004b)。

次に、過去の経験が現在の奥行き手がかり統合に与える影響、すなわち、因果関係を明らかにするため、学習実験を実施した。学習時は、両眼視差と遠近法情報のいずれか一方のみが利用可能な条件で面の向きを調整する課題を被験者に与えた。その結果、遠近法情報のみが利用可能な条件で面の向きを調整する学習を7日間続けると、徐々に遠近法情報の重みが増加した。この結果は、特定の手がかりを使い続けることにより、その手がかりをより多く使うようになることを示唆する。ただし同時に、各学習直後は遠近法情報の重みが一時的に減少した。この結果は、遠近法情報のメカニズムの一時的な疲労の影響を避けるために、その重みを一時的に減少させた可能性を示唆する(坂野他, 2004a)。

一連の実験結果から、奥行き知覚のための手がかり統合における手がかりの重みは、現在の観察環境による手がかりの信頼性と、過去の長期的な利用によるその手がかりの信頼性により、その手がかりの重みは高まり、逆に、特定の手がかりを酷使すると一時的にその手がかりの重みが減少することが示唆される(坂野他, 2004a, 2004b)。

2) 触覚情報が視覚的な奥行き知覚に与える影響

一方、日常生活において、面の向きの情報は触覚情報により、直接的に得ることも可能である。そこでErnstらは、両眼視差と遠近法情報のうちの一方のみを触覚情報と一致させ、他方を不一致である状態を継続させる学習により、触覚情報と一致する奥行き手がかりの相対的な重みが増加することを示した(Ernst et al., 2000)。この結果は触覚情報が視覚的な奥行き知覚の手がかり統合過程に影響を及ぼすことを示唆する。

ただし、著者らが行った同様の実験では、一貫した学習効果は見られなかった(Sakano & Kaneko, 2001; Sakano et al., 2001)。触覚的な学習の効果を得るにはErnstらのように、学習時に指の位置を視覚的に呈示することが必要なのかもしれない。

また著者らは、視覚的に知覚される三次元物体の向きが双安定となるネッカーキューブを、視覚だけでなく触覚的にも同時に呈示すると、触覚情報と一致する向きに視覚的に知覚される時間の方が、触覚情報と一致しない向きに視覚的に知覚される時間よりも長かった(Ando et al., 2007)。この結果は、学習しなくても、触覚情報が視覚的な奥行き知覚に影響を与えることを示唆する。

2. 奥行き運動知覚

1) 両眼性手がかり

網膜像は二次元であるため、奥行き運動（物体の前後方向の動き）の特定も不良設定問題である。私たち人間には二つの眼があり、それらを用いる三つの両眼性手がかりが存在する（坂野, 2022b）。一つ目は輻輳眼球運動、すなわち左右の眼を左右逆方向に動かす運動である。この眼球運動情報が奥行き運動知覚に利用されているかは議論があったが、Howardにより奥行き運動知覚に利用されていることが示唆された（Howard, 2008）。二つ目は両眼視差の時間変化、すなわち、両眼間での網膜像の位置の違いの時間変化である（Sakano et al., 2012）。三つ目は両眼間速度差、すなわち、両眼間での網膜像の速度の差である（Sakano et al., 2012; Shioiri et al., 2000）。両眼視差の時間変化と両眼間速度差は似ているが、計算メカニズムが異なる。前者は両眼視差を検出した上でその時間変化を計算する、もしくは、両眼視差の時間変化を直接検出する（Sakano et al., 2012 Fig 1 B-D）。後者はそれぞれの目で速度を検出した後に両眼間でそれらの差を計算する（Sakano et al., 2012 Fig 1 A）。

しかし、人間の視覚系が両眼間速度差を奥行き運動知覚に実際に用いているかは意見が分かれており、用いていることを示す心理物理学的研究がある一方（Shioiri et al., 2000）、その証拠を示さない研究もあった（Cumming & Parker, 1994; Regan, 1993）。また、両眼視差の時間変化からは奥行き運動が知覚されることはよく知られているが（Howard & Rogers, 1995, 2002）、両眼視差からは奥行きを知覚することが可能であるため、単に奥行き知覚の連続である可能性もある。そのため、両眼視差の時間変化から奥行き運動検出に特化したメカニズムの存在の有無は不明であった。

そこで著者らは、奥行き運動検出に特化した両眼視差の時間変化と両眼間速度差のメカニズムを人間の視覚系が持っているのかどうかを明らかにするため、それぞれの手がかりへの順応により、奥行き運動残効が生じるかどうか調べた。その結果、両眼視差の時間変化への順応後は安定した奥行き運動残効が生じなかった一方、両眼間速度差への順応後は安定した奥行き運動残効が生じた（Sakano et al., 2012; Sakano & Allison, 2014）。さらに、片眼への順応後に静止した両眼刺激を提示すると、斜め奥行き方向への運動が知覚された（Sakano et al., 2012）。これらの結果は、人間の視覚系が、奥行き運動検出に特化した両眼間速度差のメカニ

ズムを持っていること、また、その両眼性階層に順応性があることを示唆する。一方で両眼視差の時間変化のメカニズムが奥行き運動検出に特化している、明確な証拠は得られなかった（Sakano et al., 2012; Sakano & Allison, 2014）。さらなる実験により、奥行き運動残効には、両眼視差による奥行き位置選択性がほとんどないことが示された一方、両眼同時に順応刺激を呈示した方が片眼ごとに交互に順応刺激を呈示するよりも強い奥行き運動残効が生じた（Sakano et al., 2006）。これらの結果は、両眼視差による奥行き位置選択性がほとんどない両眼性階層に順応性があることを示唆し、奥行き運動残効が両眼間速度差への順応により生じるという考え（Sakano et al., 2012; Sakano & Allison, 2014）と整合する。

その後、サルを対象とした研究ではあるが、MT野に奥行き運動に反応する神経細胞が見つかり、そのほとんどが両眼間速度差に選択性を持つ一方、両眼視差の時間変化に選択性を持つ細胞は極めて少ない事が明らかとなった（Sanada & DeAngelis, 2014）。これらの結果は著者らの上述の、人間を対象とした研究結果と一致する。

2) 輻輳眼球運動の有無によらない物体奥行き運動知覚の脳内機構

著者らは、両眼性の奥行き運動知覚の脳内機構の特定を試みた。これまでに、前節で紹介した研究のように、輻輳眼球運動の発生しない条件での研究（Rokers et al., 2009）はあるが、実世界ではしばしば対象物を目で追うこともある。輻輳眼球運動により対象物を目で追うと両眼視差の時間変化も両眼間速度差もほぼゼロになる。逆に、対象物が奥行き運動しなくても、輻輳眼球運動が生じれば、両眼視差の時間変化と両眼間速度差が発生する。そこで、輻輳眼球運動の有無によらずに物体の奥行き運動検出に関与する脳部位の特定を試みた。fMRI（機能的磁気共鳴画像法）を用いて脳活動を測定した結果、V3Aと呼ばれる脳部位において、輻輳眼球運動の有無によらず、物体の奥行き運動と関連する脳活動がみられた（和田・坂野・水科・安藤, 2017）。この結果は、V3Aが輻輳眼球運動の有無に関わらず、物体の奥行き運動の処理に関与することを示唆する。

3) 輝度変化による面の傾き変化の知覚

陰影により物体の三次元形状が知覚されること（shape-from-shading）はよく知られている（Howard & Rogers, 1995, 2002）。これは光源が上方にあると仮定することで、面内で高輝度の部分は上向き、低輝度の

部分は下向きに知覚する現象である。これは言い換えると、輝度の空間的な変化から面の傾きの空間的な変化の知覚である。著者らは、この知覚現象が空間でなく時間においても生じるか調べた (Sakano & Ando, 2012a)。すなわち、輝度の時間的な変化から面の傾きの時間的な変化の知覚である。実験の結果、面が高輝度から低輝度に変化すると面がより下向きに知覚され、逆に、面が低輝度から高輝度に変化すると面がより上向きに知覚されることが明らかになった。この結果は、shape-from-shading と同様に、人間の視覚系が光源上方仮定を用いながら、面の傾きの時間的な変化の知覚のために面の輝度の時間的な変化を利用して示唆する (Sakano & Ando, 2012a)。

3. ベクシオン (視覚誘導性自己運動感覚) の脳内機構

広視野の映像全体が一方方向に流れると、そこに見える景色は止まっていて、自分自身がそれとは逆方向に移動しているように感じることもある。この現象はベクシオンと呼ばれる。ベクシオンは錯覚と考えることも可能だが、自分自身の移動を知覚する際に視覚情報を用いていることを示唆する現象でもある。

著者らはベクシオンの脳内機構を明らかにするため、まず、MRI 装置内の観察者に広視野の両眼立体映像を提示する装置を開発した (安藤他, 2011; 和田・坂野・安藤, 2017)。そしてその装置を用いて、ランダムに配置された点群が一方方向 (観察者の後方) に流れる映像や、各点がランダムな方向に動く映像、点が動かない映像などを、様々な大きさに提示し、機械学習の分析手法を用いることで、ベクシオンに最も関連する脳部位として、大脳皮質内側部である帯状溝視覚野 (the cingulate sulcus visual area: CSv) を特定した (Wada et al., 2016)。CSv は、後頭葉周辺に集まる視覚野からは前方に離れている脳部位であり、ベクシオン同様、点群が一方方向に流れる映像が大きくなると活動が高まった。また、CSv の活動の空間的なパターンを、適切な統計手法 (交差検証; Wada et al., 2010) を用いて識別器に support vector machine で学習 (機械学習) させることで、一方方向に流れる映像をランダムな方向に動く映像や点が動かない映像から識別することができた (Wada et al., 2016)。これらの結果は、ベクシオンが生じるような、一方方向に流れる映像が提示されると、CSv の活動が高まるだけでなく、その活動の皮質上の空間的なパターンがそのような映像に特有のものになることを示唆する。

4. 高解像度の立体映像は遠隔操作の作業を改善する

1) 作業精度の向上

日本では頻繁に災害が発生する。災害発生時の危険除去作業では、その危険性のため、人が立ち入ることができないことがある。そのような場合は建設機械を遠隔で操作して作業を進める (伊藤他, 2016)。その際、作業員は、様々な箇所に設置されたカメラから送られた、低解像度の複数の 2D 映像を見ながら建設機械を操作して作業を行う。

著者らは、各視点が Full HD (1,920 × 1,080) の解像度の多視点裸眼立体映像を用いることで、作業の前後方向の空間精度を高めることができるのではないかと考え、多視点裸眼立体ディスプレイを開発した。そして、それを複合商業施設に設置し、前後方向のクレーンゲームのような実験に不特定多数の来場者に参加してもらうことで、多視点裸眼立体映像が作業の前後方向の空間精度に与える影響を調べた (坂野他, 2016)。その結果、2D 映像よりも 3D 映像の方が作業精度が高かった。また、2D 映像の場合は推定年齢が 30代の男性の作業精度が一番高く、年齢とともに作業精度が大きく低下した。一方、3D 映像の場合は推定年齢や性別の影響は比較的小さく、男女問わず、どの推定年齢でも作業精度が高かった (坂野他, 2016)。

2) 作業効率の向上

作業員が建設機械を遠隔操作すると、作業効率が搭乗した場合の 5 割程度になると言われている (古賀, 1999)。すなわち作業時間が倍増する。

著者らは、各眼につき 4K (3,840 × 2,160) の解像度の両眼立体映像を用いることで作業効率を高めることができるのではないかと考えた。そこで、雲仙普賢岳の災害復興現場において、砂防ダム建設作業に近い課題を作業員に実施してもらった。その結果、普段通り、様々な箇所に設置されたカメラから送られる、低解像度の複数の 2D 映像を観察しながら作業する場合と比べ、重機の座席位置に設置した両眼立体カメラからの 4K の 3D 映像を観察しながら作業することで、作業時間が 2 割程度短縮した (伊藤他, 2017)。

5. 多視点立体の半透明可視化映像の奥行き知覚確度向上効果

半透明可視化技術は、観察者から見て一番手前にある物だけでなく、その奥に隠れている物も見せることができるため、多くの分野で用いられている。しかし、半透明可視化された物体の三次元構造が、物理的に提示された通りに知覚されることが多くの状況で重要で

あるにも関わらず、実際に定量的にどう知覚されるのかはほとんど知られていなかった。

この問題に対応するため、著者らは、多視点立体ディスプレイに、確率的ポイントレンダリング技術 (Tanaka et al., 2012) により半透明可視化した医用画像を提示し、物体の知覚される奥行き量を測定した。その結果、知覚された奥行き量は、物理的に提示された量よりも小さかった。しかし、その知覚的過小評価は、(1) 確率的ポイントレンダリング技術固有の輝度勾配の適用、(2) 高い不透明度の適用、(3) 多視点立体ディスプレイによる両眼視差と運動視差により軽減された (Sakano et al., 2018)。

また、ボリュームと呼ばれる物体内部を半透明に埋めるレンダリング画像に、物体表面を追加すること (Miyawaki et al., 2019) や、対象面の内側に補助面を追加すること (Aoi et al., 2021)、アンビエントオクルージョンと呼ばれる、光源遮蔽効果の擬似的な CG 技術を適用すること (Kataoka et al., 2021)、物体のエッジを強調すること (Nishimura et al., 2019; Aoi et al., 2022)、多視点立体ディスプレイによる両眼視差や運動視差の付加 (Morimoto et al., 2019) により、知覚される奥行き量が物理量に近づくことを示した。さらに、背景の歪みが透けて見える状況で、完全に透明な物体においても、多視点立体ディスプレイによる両眼視差の付加により、知覚される奥行き量が物理量に近づくことを示した (黒川他, 2016)。

IV 光沢知覚

1. 動的手がかりと両眼性手がかり

光沢は面の反射率特性である。この世界には、どの方向から観察しても輝度がほとんど変わらない光沢がゼロの、すなわちマットな面から、正反射方向に強い反射を生み出す、高い光沢を持つ面まで存在する。先述の通り、私たち人間の視覚系が得ることのできる輝度は、面の反射率特性、面の三次元形状、照明環境の3つの要因に依存するため、光沢知覚は計算論的には不良設定問題の解決である (坂野他, 2018)。では私たち人間の視覚系はどのようにしてこの不良設定問題を解いて面の光沢を知覚しているのだろうか。

これまでの光沢知覚の多くの研究は、一枚の画像からの光沢知覚についてのものであった。例えば、Motoyoshi らは、人間の視覚系は光沢知覚のために、輝度ヒストグラムの歪度という画像統計量を用いていると主張している (Motoyoshi et al., 2007)。しかし、

歪度は実際の反射率特性を反映しないこともある (Anderson & Kim, 2009)。また、鏡面ハイライトが光沢の重要な手がかりであることが知られているが (Beck & Prazdny, 1981)、マットな面上にハイライトのような模様がある画像でも光沢が知覚される。すなわち、単一画像内にある手がかりでは誤った光沢知覚が生じうる。しかし私たち人間は日常生活でそのような問題に直面することはほとんどない。一体私たち人間の視覚系はどのようにしてこの反射率特性の誤推定の問題を克服して光沢を知覚しているのだろうか。

私たち人間は普段両眼で物を観察し、また、頭部も完全に固定はされていない。そこで著者らは、両眼間の網膜像の差や、頭部運動に伴う網膜像の変化が光沢知覚に利用されているのではないかと考えた (Sakano & Ando, 2010)。具体的には、光沢のある面の場合には両眼間で輝度差が生じるのに対し、マットな面、すなわち光沢のない面では、両眼間で輝度は等しい。同様に、光沢のある面の場合には頭部運動に伴い輝度が変化するが、マットな面では、輝度は変化しない。一連の実験の結果、知覚される光沢強度は、両眼間の網膜像の差 (以下、両眼性手がかり) や、頭部運動に伴う網膜像の変化 (以下、動的手がかり) により著しく増加することが示された (Sakano & Ando, 2010)。この結果は、人間の視覚系が、奥行き知覚のために両眼視差や運動視差を用いているのと同様に、光沢知覚においても両眼性手がかりや動的手がかりといった、複数の網膜像の差に基づく手がかりを利活用していることを示唆する。

2. 多視点立体ディスプレイは知覚される光沢をより正確に再現する

近年はヘッドマウントディスプレイ (HMD) を用いた VR が普及しつつある。しかし HMD 以外にも、両眼視差によって映像を立体的に提示できる二眼式立体ディスプレイや、両眼視差に加えて、離散的ながらも運動視差によって映像を立体的に提示できる多視点立体ディスプレイが存在する。これらの立体ディスプレイのメリットは、映像を立体的に提示できることであるが、実は光沢再現の正確性にも利点がある。

立体でない、通常の 2D ディスプレイの場合は、両眼で同じ映像を観察するため、両眼性手がかりは光沢がゼロであることを示し、同様に、頭部を動かしても同じ映像を観察するため、動的手がかりも光沢がゼロであることを示す。一方、二眼式立体ディスプレイの場合は両眼で異なる映像を観察するため、両眼性手が

かりは光沢があることを示す。さらに、多視点立体ディスプレイの場合は頭部を動かすと異なる映像を観察するため、動的手がかりも光沢があることを示す。そのため、両眼性手がかりと動的手がかりの両方が、光沢があることを示す多視点立体ディスプレイでは実世界に近い光沢が知覚されることが予想され、二眼式立体ディスプレイでは、動的手がかりが光沢がゼロであることを示す分だけ知覚される光沢が下がってしまうことが予想される。さらに2Dディスプレイの場合は、両眼性手がかりも光沢がゼロであることを示すため、知覚される光沢がさらに下がってしまうことが予想される。

著者らは心理物理実験により、多視点立体ディスプレイよりも二眼式立体ディスプレイの方が知覚される光沢が低いこと (Sakano & Ando, 2012b)、また、二眼式立体ディスプレイよりも2Dディスプレイの方が知覚される光沢が低いこと (Sakano & Ando, 2010) を示した。これらの結果は、2Dディスプレイ、二眼式立体ディスプレイ、多視点立体ディスプレイの順に知覚される光沢の再現の正確性が高まることを示唆する (Sakano & Ando, 2012b)。

3. 知覚される光沢を正確に再現するための多視点立体ディスプレイの条件

では、多視点立体ディスプレイであれば、どんな物でも知覚される光沢を正確に再現するのであるか？多視点立体ディスプレイの視点数は有限であるため、視点間隔が広い場合には、頭部運動に伴う輝度変化が低下するなど、不正確になることが予想される。また、視点ごとに提示されるべき映像は、他の視点でもある程度重なって提示されてしまい、これはクロストークと呼ばれる。クロストークが大きいと、両眼間の輝度差や、頭部運動に伴う輝度変化が低下することが予想される。そのため、視点間隔が広い場合やクロストークが大きい場合は、知覚される光沢の再現の正確性が低いことが予想される。

そこで著者らは、視点間隔とクロストークが知覚される光沢の再現の正確性に与える影響を調べた (Sakano & Ando, 2022)。その結果、予想通り、視点間隔が広いほど、また、クロストークが大きいほど、知覚される光沢の正確性が低下した。ただし例外として、クロストークが最も小さい条件では、視点間に刺激が暗黒になる場所が発生し、光沢の正確性が著しく低下した (Sakano & Ando, 2022)。

クロストークが最も小さい条件以外では、予想通り

の結果が得られたが、この結果が本当に両眼間の輝度差や、頭部運動に伴う輝度変化の低下によるものなのかを明らかにするため、頭部運動に伴う輝度変化を各条件で測定し、知覚される光沢と比較したところ、両者の間に強い相関がみられた ($r^2 = 0.961$)。この結果は、多視点立体ディスプレイで、視点間隔が広いほど、また、クロストークが大きいほど、知覚される光沢の正確性が低下する原因は、両眼間の輝度差の低下や頭部運動に伴う輝度変化の低下であることを示唆する (Sakano & Ando, 2022)。

4. 光沢知覚の脳内機構

光沢知覚のメカニズムに関して、心理物理学的手法を用いた研究は増えてきたが、脳内機構はほとんど明らかになっていなかった。そこで著者らは最初の一步として、光沢知覚に関与する人間の脳部位の特定を試みた (Wada et al., 2014)。一般的に、大脳皮質の背側経路は空間把握や行動に関わる処理を行い、腹側経路は物体認識の処理に関わると言われている (Goodale & Milner, 1992)。光沢は反射率という物体表面の特性であるため、腹側経路で処理が行われている可能性がある一方、表面が滑りやすそうかどうかにも関わる可能性もあるため、背側経路が関与する可能性も考えられる。光沢知覚に関与する人間の脳部位を特定するため、fMRIを用いた。しかし、克服すべき課題として、光沢が高まると、ハイライトの輝度などの他の視覚的特徴も付随して変化してしまうため、光沢に由来する脳活動を、他の視覚的特徴に由来する脳活動から分離する必要がある。そのために著者らは実験1では、照明強度の変化に対する光沢知覚の恒常性 (Motoyoshi & Matoba, 2012) を利用することでこれらを分離した。実験2では、一般的に、注意を向けた視覚特徴の情報処理に関わる脳部位の賦活が高まるという脳の特性 (Corbetta et al., 1990; Cant & Goodale, 2007) を利用した。具体的には、一般的なfMRI実験の手法である刺激間比較の代わりに、光沢に対して注意を向ける時間帯の方が、その他の視覚特徴に対して注意を向ける時間帯よりも高い賦活を示す脳部位を探した。二つの実験に共通して、腹側経路にあるhV4、VO-2と、背側経路のV3A/Bにおいて、光沢知覚に関与が示唆される活動が見られた (Wada et al., 2014)。機能が異なる二つの経路がともに関与しているのは光沢処理特有の特徴である。その後の人間のfMRI研究でも両経路の関与が示唆されている (Sun et al., 2015)。一方で、サルでは全脳を調べた研究も含め、背側経路の関与を示

す結果は示されておらず (Nishio et al., 2012, 2014; Okazawa et al., 2012), 今後の研究が必要ではあるものの, 光沢知覚に両経路ともが関与しているのは, 人間特有の特徴である可能性がある (和田他, 2015).

5. 明度の恒常性の脳内機構

明度 (lightness) は, 光沢と同様, 面の反射率特性の視知覚の一つである. 明度は主に拡散反射に由来し, 黒から灰色, 白に至る. 明度は計算論的には光沢知覚と同様, 不良設定問題の解決である. 一人人間の脳はこの問題をどのように解決して, 黒から暗い灰色, 明るい灰色, 白色を知覚しているのだろうか. その最初のアプローチとして, 著者らは, fMRI を用いて, 明度知覚に関与する脳部位の特定を試みた (Sakano et al., 2017).

明度知覚の大きな特徴は, 照明強度の変化に対する恒常性である. すなわち, 照明がある程度暗くても明るくても, 明るい灰色の面は明るい灰色の面に知覚され, 暗い灰色の面は暗い灰色の面に知覚される.

そこで著者らは, 対象物が他の物体の陰に隠れて光があまり当たらない条件と, 陰を作る他の物体がなく, 光が当たる条件を設けた. そして, 陰の有無に関わらず対象物の明度を区別する課題中の方が, 他の視覚特徴 (物体形状) を区別する課題中よりも活動する脳部位として, 鳥距溝近辺領域を同定した. この結果は, 他の物体の陰に由来する照明強度に関わらず明度を知覚するという複雑な課題の遂行であるにも関わらず, 一次視覚野などの低次視覚野が明度知覚に関与することを示唆する (Sakano et al., 2017).

6. 肌の光沢による顔の魅力

近年, 光沢知覚の研究が盛んに行われているが, 光沢がより高次の認知や情動等に及ぼす影響はあまり知られていない. そのような中, 著者らは, 肌の光沢が顔の魅力度に与える影響を調べた. 肌の光沢には大きく分けて, 「つや」と「テカリ」の二種類ある. つやは内部発光しているように見える光沢であり, 鏡面反射率も拡散反射率も高いことが報告されている (Matsubara et al., 2012; 舛田他, 2017). テカりは強い光沢と皮脂の印象を与え, 鏡面反射率は高く, 拡散反射率は低い (大槻他, 2013; 舛田他, 2017). 実験には 30代~40代の 160名の日本人女性が参加し, つやのある顔, テカリのある顔, 光沢のほとんどないマットな顔の印象評定を行った. その結果, 顔の魅力度をはじめ, 女性らしい, 褒めたくなる, 好感がもてる, 幸せ

そう, 健康的などのポジティブな項目では, マット, テカリ, つやの順に評価が高まった. 推定年齢も, つやのある顔が一番若く評価された (Ikeda et al., 2021).

次に著者らは, 肌の光沢による顔の魅力度を反映する脳活動を特定するため, fMRI 実験と心理実験を行った. fMRI 実験では, 肌の光沢による顔の魅力度を評価する課題遂行時の方が, 肌の光沢を評価する課題遂行時よりも高い活動を示す脳部位として, 眉間の数 cm 後方に位置する眼窩前頭皮質内側部が同定された. この結果は, 眼窩前頭皮質内側部が肌の光沢による顔の魅力度の処理に関与することを示唆する. 心理実験では, 肌の光沢による顔の魅力度が, マット, テカリ, つやの順に高まった. 両実験結果を比較すると, 肌の光沢による顔の魅力度と眼窩前頭皮質内側部の活動量の間には正の相関が見られた. この結果は, 眼窩前頭皮質内側部の活動量が, 肌の光沢による顔の魅力度を反映することを示唆する (Sakano et al., 2021). 眼窩前頭皮質内側部の活動量は報酬量を表現しているとの報告がある (O'Doherty et al., 2001) ため, 肌の光沢は観察者への報酬になっている可能性がある.

V おわりに

本稿では三次元映像の知覚と光沢知覚の研究を, 著者らがこれまで実施してきた, 脳内機構から映像評価までの研究を中心に概説した. 今後は, 三次元映像の知覚については, fMRI 研究用に広視野立体映像提示装置の開発が世界各地で行われることが予想される. また, XR やメタバースが急速に普及しつつある. そのため, HMD を用いた行動研究や広視野立体映像提示装置を用いた脳活動計測研究が世界中でさらに盛んになることが予想される (水科他, 2022). 一方の光沢知覚の研究は, 知覚レベルにとどまらず, 光沢が高次認知や感性, 情動に与える影響についての研究が増えることが予想される. これらの今後の研究が人類の幸福につながることを著者は祈ってやまない.

付記

本稿で紹介した, 著者らの研究の全ての共著者に深く謝意を表す. 本稿は科研費21H04903の補助を受けた. また, 本稿の IV-6で紹介した著者らの研究は, 株式会社資生堂の補助を受けた.

引用文献

- Anderson, B. L., & Kim, J. (2009). Image statistics do not explain the perception of gloss and lightness. *Journal of Vision*, 9(11):10, 1–17. <https://doi.org/10.1167/9.11.10>
- 安藤 広志・カラン 明子・Nawa, N. E.・西野 由利恵・Liu, J.・和田 充史・坂野 雄一 (2010). 臨場感の知覚認知メカニズムと評価技術. 情報通信研究機構季報, 56(1/2), 157–165.
- Ando, H., Sakano, Y., & Ashida, H. (2007). Human evaluation of visual and haptic interaction. *HCI (Human-Computer Interaction) International 2007, (Human Interface and the Management of Information: Methods, Techniques and Tools in Information Design, Pt 1, Proceedings, 4557, 12–20)*. https://doi.org/10.1007/978-3-540-73345-4_2
- 安藤 広志・和田 充史・坂野 雄一・カラン 明子・Mokhtari, P.・Liu, J.・西野 由利恵・對馬 淑亮・Nawa, N. E.・Callan, D.・Joachimczak, M. (2018). 多感覚情報処理の脳・認知メカニズムの解明とその応用 情報通信研究機構研究報告, 64(1), 39–49. https://doi.org/10.24812/nictkenkyuhoukoku.64.1_39
- 安藤 広志・和田 充史・坂野 雄一・清原 元輔 (2011). 両眼広視野映像提示及び視線計測装置. 特開2011–188957.
- Aoi, D., Hasegawa, K., Li, L., Sakano, Y., Tanaka, S. (2021). Application of multiple iso-surface rendering to improvement of perceived depth in transparent stereoscopic visualization. *Journal of Advanced Simulation in Science and Engineering*, 8(1), 128–142. <https://doi.org/10.15748/jasse.8.128>
- Aoi, D., Hasegawa, K., Li, L., Sakano, Y., Sakamoto, N., Tanaka, S. (2022). Improving Depth Perception Using Edge Highlighting in Transparent Stereoscopic Visualizations of Laser-Scanned 3D Point Clouds. *Methods and Applications for Modeling and Simulation of Complex Systems. AsiaSim 2022. Communications in Computer and Information Science*, 1712. https://doi.org/10.1007/978-981-19-9198-1_47
- Beck, J., & Prazdny, S. (1981). Highlights and the perception of glossiness. *Perception & Psychophysics*, 30, 407–410. <https://doi.org/10.3758/BF03206160>
- Cant, J. S., Goodale, M. A. (2007). Attention to form or surface properties modulates different regions of human occipitotemporal cortex. *Cerebral Cortex*, 17(3), 713–731. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhk022>
- Corbetta, M., Miezin, F., Dobmeyer, S., Shulman, G., & Petersen, S. (1990). Attentional modulation of neural processing of shape, color, and velocity in humans. *Science*, 248, 1556–1559. <https://doi.org/10.1126/science.2360050>
- Cumming, B. G., & Parker, A. J. (1994). Binocular mechanisms for detecting motion-in-depth. *Vision Research*, 34, 483–495. [https://doi.org/10.1016/0042-6989\(94\)90162-7](https://doi.org/10.1016/0042-6989(94)90162-7)
- Ernst, M. O., Banks, M. S., Bulthoff, H. H. (2000). Touch can change visual slant perception. *Nature Neuroscience*, 3, 69–73. <https://doi.org/10.1038/71140>
- Goodale, M. A., & Milner, A. D. (1992). Separate visual pathways for perception and action. *Trends in Neuroscience*, 15, 20–25. [https://doi.org/10.1016/0166-2236\(92\)90344-8](https://doi.org/10.1016/0166-2236(92)90344-8)
- Howard, I. P. (2008). Vergence modulation as a cue to movement in depth. *Spatial Vision*, 21, 581–592. <https://doi.org/10.1163/156856808786451417>
- Howard, I. P., & Rogers, B. J. (1995). *Binocular vision and stereopsis*. New York: Oxford University Press.
- Howard, I. P., & Rogers, B. J. (2002). *Seeing in depth*. Thornhill, ON: I. Porteous.
- Ikeda, H., Saheki, Y., Sakano, Y., Wada, A., Ando, H., & Tagai, K. (2021). Facial radiance influences facial attractiveness and affective impressions of faces. *International Journal of Cosmetic Science*, 43, 144–157. <https://doi.org/10.1111/ics.12673>
- 伊藤 禎宣・坂野 雄一・藤野 健一・安藤 広志 (2017). 無人化施工において遠隔操作の映像環境が作業効率へ与える影響について 土木学会論文集 F3 (土木情報学), 73(1), 15–24. <https://doi.org/10.2208/jscejci.73.15>
- 伊藤 禎宣・坂野 雄一・茂木 正晴・西山 章彦・藤野 健一・北原 成郎・岡本 仁・安藤 広志 (2016). 高品質映像による建設機械の遠隔操作. 日本ロボット工業会機関誌「ロボット」, 228, 16–23.
- 古賀康正 (1999). 雲仙普賢岳における砂防工事の無人化施工 砂防学会誌, 52(4), 64–68.
- Kataoka, K., Sakano, Y., Sakamoto, N., Hasegawa, K., Li, L., Tanaka, S. (2021). Improving depth perception of transparent objects in stereoscopic vision using ambient occlusion. *The 40th JSST Annual International Conference on Simulation Technology (JSST2021)*, (Proceedings, 194–196).
- 黒川 輝貴・長谷川 恭子・坂野 雄一・Lopez-Gulliver, R.・田中 寛 (2016). 透明物体の裸眼立体視における奥行き知覚の最適化 映像情報メディア学会年次大会 (予稿集 33C-4). https://doi.org/10.11485/iteac.2016.0_33C-4
- Landy, M. S., Maloney, L. T., Johnston, E. B., & Young, M. (1995). Measurement and modeling of depth cue combination: In defense of weak fusion. *Vision Research*, 35, 389–412. [https://doi.org/10.1016/0042-6989\(94\)00176-m](https://doi.org/10.1016/0042-6989(94)00176-m)
- 舩田 勇二・八木 栄一郎・大栗 基樹・桑原 智裕 (2017). 肌のつやの評価法の開発と皮膚表面形態がつやに与える影響の解析 日本化粧品技術者会誌, 51(3), 211–218. <https://doi.org/10.5107/scj.51.211>
- Matsubara, A., Liang, Z., Sato, Y. & Uchikawa, K. (2012). Analysis of human perception of facial skin radiance by means of image histogram parameters of surface and subsurface reflections from the skin. *Skin Reserach & Technology*, 18, 265–271. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0846.2011.00570.x>
- Miyawaki, M., Aoi, D., Sakano, Y., Lopez-Gulliver, R.,

- Hasegawa, K., Li, L., Ando, H., Tanaka, S. (2019). Fused visualization and feature highlighting to assist depth recognition in transparent stereoscopic visualization. *The KES International Conference on Innovation in Medicine and Healthcare (KES-InMed-19)*, (InMed 2019. Smart Innovation, Systems and Technologies, 145, 197–204). https://doi.org/10.1007/978-981-13-8566-7_19
- 水科 晴樹・坂野 雄一・櫻井 将人・永井 岳大・棚橋 重仁・藤井 芳孝・根岸 一平・前川 亮・松田 勇祐・金成 慧・門野 泰長・森本 拓馬・宮西 雄太 (2022). 視覚光学研究がもたらす未来 光学, 51(4), 169–170.
- Morimoto, I., Sakano, Y., Li, L., Hasegawa, K., Tanaka, S. (2019). Contour lines to assist position recognition of slices in transparent stereoscopic visualization of medical volume data. *The KES International Conference on Innovation in Medicine and Healthcare (KES-InMed-19)*, (InMed 2019. Smart Innovation, Systems and Technologies, 145, 191–196). https://doi.org/10.1007/978-981-13-8566-7_18
- Motoyoshi, I., Nishida, S., Sharan, L., & Adelson, E. H. (2007). Image statistics and the perception of surface qualities. *Nature*, 447, 206–209. <https://doi.org/10.1038/nature05724>
- Motoyoshi, I., & Matoba, H. (2012). Variability in constancy of the perceived surface reflectance across different illumination statistics. *Vision Research*, 53, 30–39. <https://doi.org/10.1016/j.visres.2011.11.010>
- Nishimura, K., Li, L., Hasegawa, K., Okamoto, A., Sakano, Y., Tanaka, S. (2019). Visual guide to improving depth perception in see-through visualization of laser-scanned 3D point clouds. *19th Asia Simulation Conference (Asia Sim 2019)*, (Methods and Applications for Modeling and Simulation of Complex Systems, 1094, 149–160). https://doi.org/10.1007/978-981-15-1078-6_13
- Nishio, A., Goda, N., & Komatsu, H. (2012). Neural selectivity and representation of gloss in the monkey inferior temporal cortex. *Journal of Neuroscience*, 32(31), 10780–10793 <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.1095-12.2012>
- Nishio, A., Shimokawa, T., Goda, N., & Komatsu, H. (2014). Perceptual gloss parameters are encoded by population responses in the monkey inferior temporal cortex. *Journal of Neuroscience*, 34, 11143–11151. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.1451-14.2014>
- O'Doherty, J., Kringelbach, M. L., Rolls, E. T., Hornak, J. & Andrews, C. (2001). Abstract reward and punishment representations in the human orbitofrontal cortex. *Nature Neuroscience*, 4, 95–102. <https://doi.org/10.1038/82959>
- 大槻 理恵・引間 理恵・坂巻 剛・富永 昌治 (2013). ファッション塗布顔画像を用いたテカリ評価法 日本色彩学会誌, 37(2), 113–123.
- Okazawa, G., Goda, N., & Komatsu, H. (2012). Selective responses to specular surfaces in the macaque visual cortex revealed by fMRI. *NeuroImage*, 63, 1321–1333. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2012.07.052>
- Regan, D. (1993). Binocular correlates of the direction of motion in depth. *Vision Research*, 33, 2359–2360. [https://doi.org/10.1016/0042-6989\(93\)90114-c](https://doi.org/10.1016/0042-6989(93)90114-c)
- Rokers, B., Cormack, L. K., & Huk, A. C. (2009). Disparity- and velocity-based signals for three-dimensional motion perception in human MT+. *Nature Neuroscience*, 12, 1050–1055. <https://doi.org/10.1038/nn.2343>
- 坂野 雄一 (2022a). 光沢知覚 ～手がかり, 立体映像による再現法と定量評価, 脳内機構, 顔の魅力への影響とその神経相関～ 電子情報通信学会ヒューマン情報処理研究会 2022年2月研究会, (信学技報 121(381), HIP2021-70, 62–67)
- 坂野 雄一 (2022b). 両眼立体視とその応用. 図説 視覚の事典, (第2章 第13節, 92–95), 朝倉書店.
- Sakano, Y. & Allison, R. S. (2014). Aftereffect of motion-in-depth based on binocular cues: Effects of adaptation duration, interocular correlation, and temporal correlation. *Journal of Vision*, 14(8):21, 1–14. <https://doi.org/10.1167/14.8.21>
- Sakano, Y., Allison, R. S., & Howard, I. P. (2012). Motion aftereffect in depth based on binocular information. *Journal of Vision*, 12(1):11, 1–15. <https://doi.org/10.1167/12.1.11>
- Sakano, Y., Allison, R. S., Howard, I. P., & Sadr, S. (2006). Aftereffect of motion-in-depth based on binocular cues: no effect of relative disparity between adaptation and test surfaces. *6th Vision Science Society (Journal of Vision*, 6(6):626, 626a). <https://doi.org/10.1167/6.6.626>
- Sakano, Y. & Ando, H. (2010). Effects of head motion and stereo viewing on perceived glossiness. *Journal of Vision*, 10(9):15, 1–14. <https://doi.org/10.1167/10.9.15>
- Sakano, Y. & Ando, H. (2012a). Perceiving swinging surface in depth from luminance modulation. *European Conference on Visual Perception 2012, (Perception*, 41, supplement p71). <https://doi.org/10.1177/03010066120410S101>
- Sakano, Y. & Ando, H. (2012b). Psychophysical evaluations of a current multi-view 3-D display: Its advantages in glossiness reproduction. *Journal of the Society for Information Display*, 20(5), 286–292.
- Sakano, Y., & Ando, H. (2022). Conditions of a multi-view 3D display for accurate reproduction of perceived glossiness. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 28(10), 3336–3350. <https://doi.org/10.1109/TVCG.2021.3063182>
- 坂野 雄一・金子寛彦・松宮一道 (2004a). 偏った奥行き手がかり環境下での学習が面の傾き知覚のための両眼視差と遠近法情報の統合過程に与える影響 光学, 33(8), 490–502.
- 坂野 雄一・金子寛彦・松宮一道 (2004b). 両眼視差と遠近法情報の統合過程における視距離と過去の経験の影響 光学, 33(2), 110–121.
- Sakano, Y. & Kaneko, H. (2001). The effect of haptic learning on the process of depth cue integration for perceptual and

- motor responses. *1st Asian Conference on Vision* (Proceedings, p51).
- Sakano, Y., Kaneko, H., & Uchikawa, K. (2001). The effect of haptic learning on the integration of disparity and perspective for the dynamic and static slant perception. *1st Vision Science Society* (Program vol. 1, 70–71). <https://doi.org/10.1167/1.3.250>
- Sakano, Y., Kitaura, Y., Hasegawa, K., Lopez-Gulliver, R., Ando, H., & Tanaka, S. (2018). Quantitative evaluation of perceived depth of transparently-visualized medical 3D data presented with a multi-view 3D display. *International Journal of Modeling, Simulation, and Scientific Computing*, 9(3):1840009, 1–16. <https://doi.org/10.1142/S1793962318400093>
- Sakano, Y., Tsushima, Y., Wada, A., & Ando, H. (2017). Which regions in the human brain are involved in lightness perception? *The 13th Asia-Pacific Conference on Vision (APCV 2017), i-Perception*, 8(2_suppl), 70–71. <https://doi.org/10.1177/2041669517728789>
- 坂野 雄一・馬田 一郎・岩澤 昭一郎・奥井 誠人・井ノ上 直己・安藤 広志 (2016). 多視点裸眼立体映像による作業精度の定量的評価 —建設機械の遠隔操作への多視点裸眼立体映像の適用を目指して— 映像情報メディア学会立体映像技術 (3DIT) 研究会, (映情学技報 40(10), 17–20, 3DIT2016–14).
- 坂野 雄一・和田 充史・安藤 広志 (2015). 光沢知覚の脳内処理 ～質感の客観的評価に向けて～ 映像情報メディア学会誌, 69(7), 502–505. <https://doi.org/10.3169/itej.69.502>
- 坂野 雄一・和田 充史・安藤 広志 (2017). 人間の脳内における光沢知覚の処理 —脳活動計測に基づく質感の評価に向けて— 画像ラボ (日本工業出版), 28(2), 22–27.
- 坂野 雄一・和田 充史・安藤 広志 (2018). 光沢知覚のメカニズムと評価. ヒトの感性に訴える製品開発とその評価, (第1章第4節, 31–40), 技術情報協会.
- Sakano, Y., Wada, A., Ikeda, H., Saheki, Y., Tagai, K., & Ando, H. (2021). Human brain activity reflecting facial attractiveness from skin reflection. *Scientific Reports*, 11:3412, 1–13. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-82601-w>
- Sanada, T., & DeAngelis, G. C. (2014). Neural representation of motion-in-depth in area MT. *The Journal of Neuroscience*, 34(47), 15508–15521. <https://doi.org/10.1523/jneurosci.1072-14.2014>
- Shioiri, S., Saisho, H., & Yaguchi, H. (2000). Motion in depth based on inter-ocular velocity differences. *Vision Research*, 40, 2565–2572. [https://doi.org/10.1016/S0042-6989\(00\)00130-9](https://doi.org/10.1016/S0042-6989(00)00130-9)
- Sun, H-C., Ban, H., Di Luca, M., & Welchman, A. E. (2015). fMRI evidence for areas that process surface gloss in the human visual cortex, *Vision Research*, 109, (Part B), 149–157. <https://doi.org/10.1016/j.visres.2014.11.012>
- Tanaka S., Hasegawa K., Shimokubo Y., Kaneko T., Kawamura T., Nakata S., Ojima S., Sakamoto N., Tanaka H. T., Koyamada K. (2012). Particle-based transparent rendering of implicit surfaces and its application to fused visualization. *EuroVis 2012*, 25–29. <https://doi.org/10.2312/PE/EuroVisShort/EuroVisShort2012/025-029>
- Wada, A., Sakano, Y., & Ando, H. (2010). Baseline adjustment and cross validation affect prediction accuracy in multi-voxel fMRI analyses. *7th Forum of European Neuroscience (FENS2010)*, (Abstract vol. 5, 207.15).
- Wada, A., Sakano, Y., & Ando, H. (2014). Human cortical areas involved in perception of surface glossiness. *NeuroImage*, 98, 243–257. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2014.05.001>
- 和田 充史・坂野 雄一・安藤 広志 (2015). 世界で初めて「光沢感」に関わるヒトの脳部位を特定 —質感の客観的な評価に向けて大きく前進— *NICT NEWS*, 450, 1–2.
- Wada, A., Sakano, Y., & Ando, H. (2016). Differential responses to a visual self-motion signal in human medial cortical regions revealed by wide-view stimulation. *Frontiers in Psychology*, 7:309. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2016.00309>
- 和田 充史・坂野 雄一・安藤 広志 (2017). fMRI 用広視野 3D 映像呈示システムの開発と評価 電子情報通信学会ヒューマン情報処理 (HIP) 研究会, (信学技報, 116(513), 27–30).
- 和田 充史・坂野 雄一・水科 晴樹・安藤 広志 (2017). 輻輳眼球運動に依らない物体奥行き運動推定に関わる視覚野の同定 電子情報通信学会ヒューマン情報処理研究会, (信学技報, 117(259), 31–34).

(最終版2023年1月9日受理)

Perception of 3D Images and Perception of Surface Glossiness: From Brain Mechanisms to Image Evaluation

Yuichi SAKANO

The extended reality (XR), which is represented by virtual reality (VR), and metaverse are recently getting pervasive. Consequently, the opportunity to experience wide-view 3D images are increasing. On the other hand, perception of surface glossiness has a profound impact on object realness in such virtual worlds and on affective value of objects in the real world. By virtue of development of CG techniques, many studies on perception of 3D images and those on perception of surface glossiness have been carried out in the last two decades. In the present article, I will give an outline of our series of investigations of perception of 3D images and perception of surface glossiness as well as related studies conducted by other groups.

Keywords: depth perception, binocular disparity, 3D displays, perception of material properties, quantitative evaluation