

ヒューマンインフォメーションの研究動向

佐藤雅之^{†1}, 永井岳大^{†2}, 福田一帆^{†3}, 近藤 悟^{†4}, 竹内広太^{†5}

1. まえがき

2017年1月に日本視覚学会冬季大会がNHK放送技術研究所で開催された際に、筆者は8Kスーパーハイビジョンの試験放送を初めて視聴した。大相撲行司装束の色鮮やかさに目を奪われ、スローモーションで映し出される、張り手に歪む力士の顔に驚愕し、立合いで力士の頭と頭が激突する音に相撲という武道の厳しさを学んだ。映像・音響技術の進歩が社会に及ぼす影響の大きさを再認識させられる貴重な体験となった。2020年の東京オリンピックに向けて技術開発が加速している。

本稿では、ヒューマンインフォメーションに関連する三つの研究分野、①視覚、②画質・映像評価、③映像機器インタフェースについて、最近の動向を解説する。(佐藤)

2. 視 覚

2.1 質 感

近年、さまざまな学会で質感認知に関する特集が組まれることが多くなり、質感知覚・認知研究が視覚研究における一つの分野となりつつある。目に入射する光は、多くの場合、照明光と物体形状、物体の反射・散乱特性が複雑に絡み合って作られる。これらのうち、特に物体の反射・散乱特性が質感に深く関わることになるが、網膜像から反射・散乱特性のみを抽出するのは不良設定問題であるため、例えば、コンピュータビジョンにおいては、これらの要因のうちいずれかを既知とすることにより問題を解くのが一般的なアプローチである。一方、ヒトの場合には、網膜像に含まれる何らかのヒューリスティクスに基づき質感を知覚しているという考えを支持する研究結果が多い。こ

の視覚系の巧妙さが質感研究の面白さの根源であろう。

「質感」といっても多種多様であるが、研究の対象となる質感の種類が多岐にわたるようになってきている。Kawabeら¹⁾は液体のような透明層の知覚に着目し、光の屈折による背景パターンの動きの情報と透明層知覚の関連を調べることで、視覚系が画像の動きの時空間的構造に基づき透明層を知覚できることを明らかにした。また、そのデモンストレーションとして、画像に特定の時空間周波数成分を付与するだけで、透明層知覚が生じることを示している。従来の透明層知覚の研究では、主に輝度や色の配置の影響を調べており、それらの手がかりでは水や空気のような完全に透明な層の知覚はまったく説明できなかった。その意味では、透明層知覚と動的手がかりの関連性を示したという点で、質感知覚の新たな方向性を示した研究であるだろう。Sawayamaら²⁾は、人間の髪の毛のような、視覚系の空間解像度を超える細かさを持つテクスチャの知覚を支える画像要因について検討した。われわれヒトは日常にこの髪の毛のテクスチャを知覚しているように感じているが、その知覚を調べた研究はこれまで存在していなかった。彼らが行った心理物理実験の結果から、ヒトが確かに非常に細かい線テクスチャを弁別できることが明らかとなった。さらに、更なる心理物理実験により、テクスチャのコントラストと輝度ヒストグラムの形状が細かいテクスチャの知覚に重要な役割を果たすことも示している。細かいテクスチャの知覚は他のさまざまな質感知覚の基礎ともなるので、質感知覚のメカニズムを理解するための基盤的な知見となるかもしれない。

また、多様な質感の知覚を俯瞰的に理解しようとする試みも増えてきている。Nagaiら³⁾は、素材カテゴリー認知における応答時間とさまざまな質感知覚量との対応関係を心理物理実験により検討した。その結果、素材カテゴリー判断における応答時間が短いときには、視覚的な質感属性(光沢感、透明感など)との関係性が強く、応答時間が長いときには、非視覚的な質感属性(ざらざら感、重さ感など)との関係性が強かった。この結果は、素材認知に対する視覚的質感属性と非視覚的質感属性の役割の違いを示唆している。類似した心理物理学的ダイナミクスに関する研究と

^{†1} 北九州市立大学

^{†2} 山形大学

^{†3} 工学院大学

^{†4} NHK 放送技術研究所

^{†5} NTTメディアインテリジェンス研究所

"TTE Review 2017 Series (6): Human Information" by Masayuki Sato (The University of Kitakyushu, Fukuoka), Takehiro Nagai (Yamagata University, Yamagata), Kazuho Fukuda (Kogakuin University, Tokyo), Satoru Kondo (NHK Science & Technology Research Laboratories, Tokyo), Kouta Takeuchi (NTT Media Intelligence Laboratories, Kanagawa)

して、山田ら⁴⁾は、短時間だけ呈示される物体画像を用いて、さまざまな質感属性の知覚精度を比較した。刺激の画像統計量により実験結果を解析したところ、色度や空間周波数などの単純な画像特徴と関連性の強い質感属性ほど短い呈示時間でも知覚可能であった。この結果は、短時間呈示される刺激を用いることで、単純な画像特徴に基づいて知覚される質感を見出せる可能性を示している。

心理物理学の側面からは、単純な画像情報が質感知覚に寄与するという知見は興味深いものの、例えば、質感の中で最もよく研究されてきた光沢感でさえ、光沢ハイライトの単純な画像統計量だけではなく、輝度エッジや光沢成分の二重性など、さまざまな要因が関わるということが明らかになってきている。質感に関わる画像要因の解明は、その応用可能性も相まって非常に重要になってくる。今後、質感の知覚や認知において、単純な画像特徴の影響と、記憶や文化が関わるような高次画像情報の影響という両側面から調べることで、質感知覚を支えるメカニズムの総合的理解が進むことを期待したい。

2.2 色 覚

ヒューマンインフォメーション分野において古くから研究されてきた色覚において、特に色カテゴリーなどの高次な色情報表現について多くの進展が見られた。Yangら⁵⁾は、言語獲得前の乳児を対象に、いくつかの交替呈示される色のペアを見た際の脳活動を近赤外脳機能計測法 (fNIRS) によって計測した。その結果、色のペアが青-緑の色カテゴリーをまたぐ場合と両方共緑カテゴリーに属する場合を比較すると、色カテゴリーをまたぐ場合のみ血液動態学的反応が増加した。この結果は、赤ちゃんが言語を獲得する以前から、青や緑といった色カテゴリーが脳内で構築される可能性を示している。一方で、色カテゴリーについて文化的な側面も検討されている。Kurikiら⁶⁾は、日本人の被験者を対象に、さまざまなマンセル色表に対し、単一色名カラーネーミング実験を行った。そのカラーネーミングの結果を平均法で分類した結果、16種類の色カテゴリーが存在することが明らかとなった。さらに、30年前に計測された日本人の色カテゴリーと比較すると、水色が新たに基本色カテゴリーとしての特徴を備えるという違いが見られたことから、その期間に日本人が用いる色名が変化したことを示している。このような色カテゴリーの生得的側面と文化的側面のつながりは、今後さらに明らかになっていくであろう。

ところで、色覚研究においては、脳内において色情報がどのように表現されているかという疑問が長年残っている。視覚系初期レベルの網膜神経節細胞や外側膝状体では、錐体拮抗型（いわゆる反対色型表現）で色情報が表現されていることはほぼ明らかになっているが、その次の段階である脳内での色情報表現が明らかではないのである。この問題について、Kurikiら⁷⁾は連続的に色相が変化する刺激を

観察している被験者の脳活動を磁気共鳴機能画像法 (fMRI) によって計測した。その結果、第1次視覚野 (V1) や第2次視覚野 (V2) におけるボクセルの色相選択性のヒストグラムには大きな個人差があったものの、各ボクセルが2種類の錐体拮抗軸の中間方向に対して選択性を持つことを明らかにした。すなわち、V1においてすでに色情報表現が錐体拮抗型ではなくなり、より高次の表現形態を持つことが示された。Satoら⁸⁾は、不完全色現象を用いて視覚系の順応状態をあえて不安定な状態にし、心理物理学的に色弁別感度と閾上色差を測定した。その結果、色弁別感度は順応色付近で最大化する一方で、閾上色差は知覚的白色点の周りで最大化することが明らかとなった。これは、色弁別に関わるメカニズムと閾上色差知覚に関わるメカニズムでは色表現が異なることを示唆している。このように、脳内における色情報表現の変遷は少しずつではあるが理解が進んでいる。

上述したとおり、われわれが色に対し色名を当てはめるという色に関する基本的な行動に対してさえ、そのメカニズムの解明はまだ途上である。色覚研究は古くから行われているがゆえに難しい問題が多く残されているが、映像表示デバイスのHDR化に伴う色知覚変化など、応用的側面からも解決すべき新たな問題が出てきている。今後は、実験室の環境における色知覚のみならず、日常環境における色知覚を理解するための研究へと発展することを期待したい。(永井)

2.3 奥行き知覚

本誌69巻6号の《特集A》「脳科学と映像」において、3D・奥行き知覚に関する特集記事が複数掲載されたように、近年の映像技術の進展により、ヒトの奥行き知覚の処理機構を解明することの重要性が再認識されている。

ヒトは2次元の網膜像から奥行きを知覚するため、陰影や線遠近法手がかり、運動視差などの単眼性網膜像手がかり、主に両眼網膜像差による両眼性網膜像手がかり、輻輳や調節などの網膜外手がかりを統合して3次元情報を再構成していると考えられている。初めに運動視差、両眼網膜像差などの個々の奥行き手がかりに関する研究を紹介する。単眼性の手がかりである運動視差に関して、石井⁹⁾は、左右方向と前後方向の頭部運動による運動視差からの奥行き知覚を比較した。この研究の特徴は、運動視差のみの効果を明らかにするため、運動視差以外の大きさ変化や刺激要素の出現/消失の影響を極力排除した実験刺激を用いたことである。被験者に正対する曲面の凹凸弁別課題について左右頭部運動よりは効果が弱いものの、前後方向の頭部運動からも奥行きを知覚することが明らかとなった。前後頭部運動時には網膜像の拡大縮小パターンが生じるが、この動きから分離された網膜像流動パターンが、物体内部の奥行き知覚に寄与することを表わしており、歩行や運転など人の移動の大半を占める前方への運動に対して運動視差の効果を示したことは重要である。一方、両眼性の手がかり

りである両眼視差に関して、玉田ら¹⁰⁾は、垂直軸周りの傾斜知覚を生じる垂直大きさ視差に対する順応過程を明らかにした。乱視矯正のための円柱レンズ装用以後の知覚変化を調べた結果、装用開始直後に生じた傾斜知覚は3日目以降には消失したが、一方でレンズ装用による違和感の解消には約2週間を要することを示した。この研究成果は、垂直視差から傾斜が知覚されるメカニズムに対して示唆を与えるとともに、眼鏡の処方にも有用な知見である。

両眼視差による奥行き知覚は3D映像に利用されているが、視差の増大による不快感や疲労・映像酔いなどが問題となり、快適に視聴可能な視差範囲は制限される。椿ら¹¹⁾は、両眼視差を適正範囲に収めながら、より高い奥行き感を与える方法を検討した成果を報告した。対象と背景間の視差を圧縮して対象内部の視差を強調する手法により、ランダムドットステレオグラムおよびステレオ写真を用いた対象内部の凹凸弁別課題の結果、対象内部の奥行き構造の知覚を明確にする効果が認められた。対象と背景間の奥行き感には損なわれないという結果も報告されており、快適な3D映像の実現に有用な方法である。また、3D映像観察時の疲労や快適性に関しては、網膜外の奥行き手がかりである両眼輻輳や水晶体調節との関連が言われているが、実物観察時には輻輳や調節はどのような状態であろうか。実際の物体の観察距離が変化した際の輻輳、調節変化を計測した研究が報告されている。Songら¹²⁾は、視距離が異なるディスプレイ観察時の左右眼それぞれの水晶体調節を測定した。視距離0.6, 1, 1.45 mの携帯電話ディスプレイに表示した画像を見たときの水晶体調節変化を比較した結果、被験者3名いずれも左右眼の調節変化に差が表れ、一方の眼が調節に重要な役割を果たしていることを示した。横山ら¹³⁾は、電子端末観察時の視距離変化に対する調節・輻輳運動を計測した。調節変化は表示サイズ・文字フォント・フォントサイズの影響があり、輻輳変化にはこれらの影響は表れず、ほぼ正確に追従していたことを実験により示した。

次に、個々の奥行き手がかりの統合過程に関する研究を紹介する。小澤ら¹⁴⁾は、非常に大きな奥行きの知覚における、両眼網膜像差、運動視差、相対的大きさ手がかりの相互作用を検討した。単独の手がかり、または、両眼網膜像差と運動視差の組合せでは、幾何学的に最大25.6 mの奥行きを与える実験刺激に対して、1 mを超えるような大きな奥行き差は知覚できなかった。しかし、両眼網膜像差または運動視差に加えて相対的大きさ手がかりを与えると1 mを超える比較的大きな奥行き差を知覚できたことから、これらの相互作用が重要であることを示した。また、番ら¹⁵⁾は、特集記事において、両眼視差と各種単眼奥行き手がかり(運動視差、陰影、テクスチャ勾配)の統合処理過程に関する彼らの研究成果から、奥行き手がかりの統合には視覚野V3B/KOの活動が関係しており、V3B/KOの活動から奥行き判別のパフォーマンスを予測することが可能であるこ

とを述べている。對馬¹⁶⁾は特集記事において、超高精細映像が人の特に奥行き知覚に与える効果・影響に関する研究成果を紹介した。解像度感には影響しない高解像度化によっても立体感が上昇すること、また、立体感と解像度感の課題実施時の第5次視覚野(MT+)の活動が異なることを述べている。これらの研究が示唆するように、映像により現実と見紛う奥行き感を表現するためには、さまざまな奥行き手がかりを効果的に組合せ、さらに閾下の解像感など奥行きと直接的な関係のない情報も考慮する必要性があり、映像技術と視覚研究のさらなる進展への期待が高まる。

奥行き知覚研究の歴史は長い、最近の映像技術とも関連の深い研究分野でもある。視覚情報処理における奥行き知覚の基礎メカニズムについても未解明な部分も多く、立体映像技術への応用についても依然として多くの課題がある。今後も当研究会における活発な報告、議論が、奥行き知覚に関する基礎研究、応用技術の研究進展に大きく貢献することを期待したい。

2.4 視線移動と視覚的注意

ヒューマンインフォメーション研究会においては、この数年、視覚的注意や視線移動に関する研究が非常に多く発表されている。特に、視覚的注意の性質に関する基礎研究の成果にもとづき、ヒトの視線移動や注意の状態を推定、予測する研究、視線や注意を誘導するための応用を目指した研究も盛んになってきている。

初めに、ヒトの視線や注意領域の移動を予測して表示する顕著性推定モデルに関する研究を紹介する。小玉ら¹⁷⁾は、視覚神経系の受容野特性や視覚的順応特性、高次の運動選択機構を考慮した顕著性推定モデルを構築し、高速自己運動映像を用いて予測精度を評価した結果、他の代表的な既存モデルよりも注意領域の予測精度が高いことを示した。高速移動時ということで運転時の見落とし対策などへの貢献が期待される。次に、注意喚起などのために視野のある領域に視覚的注意を意図的に誘導する研究について紹介する。谷澤ら¹⁸⁾は、周辺視野へのLEDアレイを用いたフロー視覚刺激呈示により、ドライビングシミュレータによる擬似運転状態におけるターゲット刺激への反応が、ターゲット呈示位置とフローの方向との関連の学習により向上することを示した。彼らの研究グループはこの研究に先立ち、ランダムドットステレオグラムなどシンプルな視覚刺激を用いた研究においても、フロー刺激の呈示による注意誘導効果をヒューマンインフォメーション研究会にて報告している。

次に、視覚的注意課題による視機能回復への応用に関する研究を紹介する。加納ら¹⁹⁾は、視覚的注意の集中による弱視症状の改善トレーニング効果を客観的に評価する指標として、高速逐次視覚呈示(Rapid Serial Visual Presentation: RSVP)課題実施時の健常眼・弱視眼の固視微動を比較した。その結果、マイクロサッカードの平均振幅と発生頻度は健

常眼より弱視眼の方が大きいという小児とは逆の傾向が表れ、また、ドリフト運動は健常眼よりも弱視眼で低周波のゆらぎが大きいことを示した。視線移動をとまなわない注意は潜在的注意と言われているが、潜在的注意が微小眼球運動や瞳孔反応に寄与するという報告^{19)～22)}は非常に興味深く、その進展が期待される。

視線移動の記録は、物体認識時の注目箇所を特定する手段としても用いられる。山田ら²³⁾は、顔画像の記憶・同定課題における顔画像の印象操作と観察者の視線移動の傾向について検討した。その結果、記憶時に対して再認時にネガティブな印象を強めた顔画像に対して再認成績が著しく低下した一方で、再認課題時の視線移動（特徴領域ごとの視線停留度）には有意な差が表れなかったことを報告した。視覚的注意や視線移動は、社会応用の観点からも、安全やマーケティングなどさまざまな方面から期待を受けている分野である。ヒューマンインフォメーション研究会においても、毎年新たな研究成果が活発に報告されている。今後、これらの研究についてヒューマンインフォメーション研究会の中でさまざまな報告が活発に行われ、当該分野の基礎研究の進展、応用の拡大につながっていくことを期待したい。

（福田）

3. 画質・映像評価

4K・8Kの超高精細度映像と22.2chの立体音響を特徴とするスーパーハイビジョンの衛星試験放送開始から1年が経過し、2018年には実用放送を控えている。NHKでは更なる画質向上を目指して、最上位フォーマットであるフルスペック8Kスーパーハイビジョンの実現に向けた研究開発を進めている。特に2012年以降、映像として記録および再生表現できる輝度のレンジを拡大するHDR（High Dynamic Range）の規格化に関する動きが国際的にも活発になり、2016年にはHDR-TVの映像方式としてITU-R勧告BT.2100が策定された²⁴⁾。国内では、2015年7月にARIBにおいてHDR-TVに関する主要なパラメータを規定した標準規格STD-B67²⁵⁾が策定された後、2016年5月の「超高精細度テレビジョン放送システム等の高画質化に係る技術的条件」に関する情報通信審議会からの答申を経て、2016年7月に総務省令の改正が行われ、HDRを使った放送が認められた。これにより、これまで映像の美しさを決める要素として注目されスーパーハイビジョンの性能要件として規定されてきた「解像度」および自然の色の忠実な再現を目指して規定される「色域」、動きの滑らかさを実現する「フレームレート」に加えて、明るさに関する情報を規定した「HDR」技術に対応した機材を使うことで、これまで以上の美しい映像が楽しめるようになった。ここでは、2012年以降に高品位映像の要素として急速に注目されたHDR技術を中心に、さらにその先に繋がる画質要素の研究動向について解説する。

3.1 ダイナミックレンジの拡張

高品位映像に必要な要素として「解像度」、「フレームレート」、「色域」が主に着目され規格化が進められてきたが、映像の明るさを規定する「輝度のダイナミックレンジ（以下、ダイナミックレンジ）」は最近まで大きく規格を変更する動きはなかった。アナログ放送の時代から輝度のダイナミックレンジは、明るさに対する人間の視覚特性と表示装置の性能限界を照らし合わせて決定されてきた。人間の目には順応性があり、明るさの環境にも依存するが、太陽光から月明かり程度までの明るさを知覚できるとされ、光量の範囲では10の9乗のオーダのレンジを扱っていることになる。対するハイビジョン番組制作用の表示装置が実現していたダイナミックレンジは、CRT（Cathode Ray Tube：ブラウン管）やLCD（Liquid Crystal Display：液晶ディスプレイ）で黒色となる0.1 cd/m²程度から最も明るいピーク輝度となる白色で数百cd/m²までの10の3乗程度であり、単純に人間の視覚特性との対比はできないものの相当に狭いレンジの表現しかできなかった。この狭い範囲でも人間になるべく自然に近い明るさに感じさせるように、人間の視覚の感度が高くなる暗い画像については明るい画像に比べて細かな階調で表現するよう、非線形の特性を持つ伝達関数が用いられてきた。ところが近年、LCDのバックライトにLED（Light Emitting Diode：発光ダイオード）やLD（Laser Diode：レーザダイオード）を用いたローカルディミング方式や、有機EL（Electro Luminescence）などの自発光デバイスの進化により、ピーク輝度が1,000 cd/m²を超える一方で黒輝度を0.01 cd/m²程度に抑え、10の5乗程度のダイナミックレンジを持つ表示装置が開発された。さらに撮像素子の高感度化に伴ってシャッタースピードを大幅に短くすることが可能になったため、超高速撮影による瞬間映像でも十分なS/Nで画像を取得できるようになった。これらの技術の進歩によって、黒輝度からピーク輝度までをより広いダイナミックレンジで表現できるようになり、人間の目で知覚される自然な明暗に近づけられる環境が整ってきた。

3.2 HDRの国際的な標準化

HDR規格の実現のために、HLG方式とPQ方式の二つの具体的な技術方式が開発された。HLG方式はNHKとBBC（British Broadcasting Corporation：英国放送協会）により開発され、撮像側で捉えた光をビデオ信号に変換する伝達関数であるOETF（Opto-Electronic Transfer Function：光電気伝達関数）を用いて映像信号を規定する方式である。ハイビジョンと同じく輝度値を相対的に扱う相対輝度方式であり、ディスプレイの最高輝度によらず「ピーク」に対応する映像信号から「黒」に対応する映像信号までの全範囲を表示する方式である。HLG方式では、映像信号レベルE'がE' = 0.5（相対輝度E = 1/12）まではハイビジョンと同等の関数（ガンマ補正関数）を持ち、映像信号レベル0.5～1.0で

対数関数を持たせることによりハイライトを圧縮する特性を持つ。この特性により、SDR(Standard Dynamic Range)信号やSDR表示装置と互換性を保ちながらHDR制作を行うことができる。また、ディスプレイのピーク輝度によらず知覚的に同様の見え方を再現させるため、ディスプレイのピーク輝度に応じて輝度成分にシステムガンマと呼ばれる冪関数を掛け合わせる事が規定された。本方式ではBBCとNHKでのそれぞれの主観評価実験の結果^{26) 27)}に基づき、ディスプレイのピーク輝度が1,000 cd/m²の場合にシステムガンマを1.2とし、ピーク輝度に応じて値を調整することが規定されている。

PQ方式は、最大10,000 cd/m²までのディスプレイ輝度を絶対値で扱う絶対輝度方式で、人間の視覚特性に基づき効率的にビット割当てを行う独自の伝達関数を導入している。絶対輝度方式であるため、映像信号とディスプレイで再現される輝度値とは一意に対応し、表示装置のピーク輝度に応じて表示可能な映像信号範囲が変わる。ビデオ信号をディスプレイの光に変換する伝達関数であるEOTF(Electro-Optical Transfer Function)は、2014年にSMPTE(Society of Motion Picture and Television Engineers:米国映画テレビ技術者協会)において、HDR制作用基準ディスプレイの規格として規定された²⁸⁾。同方式はHLG方式に比べて非線形性が強く、暗部により多くの映像信号を割当て、明部を大きく圧縮する方式である。なお、HLG方式とPQ方式の映像信号は相互に変換可能であり、ITU-RレポートBT.2390にその枠組みが記載されている²⁹⁾。

3.3 人間への伝わりやすさを中心とした映像の評価

前節では、4K・8Kスーパーハイビジョンの実用放送に備えて、前回の特集から急速な動きがあったHDR技術を実務的な観点から紹介したが、先行して規格化された「高解像度」、「高フレームレート」、「広色域」に「HDR技術」が相乗して映像の印象に与える効果については検証中である。複数のパラメータが織りなす相乗効果は、並行して進められている質感、存在感など、人間にとっての高臨場感に寄与する画質の要素を導き出そうとする研究に大きなヒントが隠されている可能性がある。撮影した映像の特定の対象物のテクスチャ・光沢などの反射や陰影の条件を解析・変更することで物体が何であるかをより判りやすく人間に伝えようとする質感表現の研究^{30) 31)}や、人工的な3D映像をよりリアルに感じさせる計算機ホログラム³²⁾の研究が進めば、高品位映像がもたらす価値の理由が明らかになり、真に人間の望む豊かな映像へと結びついていくと考えられる。映像そのものの評価を人間の主観評価に頼らず、生体反応をセンシングしてコンテンツとしての伝わりやすさや判りやすさを総合的に評価しようとする動きも盛んになって久しい。豊かな映像は単なる映像美を誇るだけでなく、個々の人々の嗜好を充実させ、映像に含まれる何かの価値を共有して他者とのつながりを見いだすことのできるコンテンツ

となる可能性を秘めている。その評価が今後重要となるだろう。(近藤)

4. 映像機器インタフェース

映像機器インタフェース分野では、2016年はVR元年と呼ばれ、VR/AR技術の進歩が著しかった。国際会議SIGGRAPH2017においては、2015年から引き続きVR VillageというVR専門のセッションが、NVIDIA主催のGPU Technology Conference 2017(GTC)においてもVR専門の展示会場が同様に設けられていた。このように、VR/ARのセッション数・発表数は数年前に比べ増加し続けている。本節では、これらVR/ARの観点から映像インタフェースの動向を紹介する。

4.1 拡大するVR市場

2016年はVR/ARデバイスの販売が各社から開始され、それと同時にVRコンテンツ市場も拡大の一途をたどり、研究者だけでなく一般ユーザからも多くの注目を集めた。各社に先駆けて発売されたHead Mounted Display(HMD)であるOculusDK1、DK2に続くように、2016年はHTC社からHTC Vive、SONYからPlaystation VR(PSVR)をはじめとするいくつかのHMDが発売された。PSVRは10月の発売以来、全世界販売台数が90万台を超えているにも関わらず、2017年7月現在に至るまで品薄状態が続いており、需要の高さがうかがえる。これらHMDの好調は、デバイスの性能向上とコンテンツの普及の2点に支えられている。高解像度・広視野なディスプレイ、高精度・高速なトラッキング性能、これら没入感を実現するために必要な基本的な要件は、各社HMDではすでに満たされており、VRコンテンツを楽しむことができる。さらに、Steam³³⁾などコンテンツ配信プラットフォームにおいて、数多くのVRコンテンツがすでに配信されており、VRコンテンツを容易に購入できる環境が整っている。また、これらゲームだけではなくYoutubeを始めとする映像配信サービスにおいても、HMD対応の全地球映像のストリーミング配信が開始されるなど、HMDで視聴できるコンテンツの普及が急激に進んでいる。このようにデバイスの進歩と、コンテンツの拡充が同時に実現されたことにより、VR市場は急激な拡大を遂げている。今後はさらに、ゲームや映像視聴などのエンタメ用途だけではなく、技能継承にVRを活用しようとする取組みも進んでおり、さらなる市場の拡大が期待されている。

一方、ARについても、コンテンツの普及がVRほど進んではないものの、デバイスの進歩は著しい。2016年はMicrosoftからシースルータイプのHMDであるHololens³⁴⁾の開発者キットの販売が開始され、Hololensを利用して開発された各社アプリケーションのデモンストレーション³⁵⁾が数多く行われていた。HololensはWindows10を搭載したスタンドアローンの眼鏡型端末で、超小型プロジェクタと

ハーフミラーを用いて視野映像とレンダリング映像の重畳を行っている。重畳できる領域の視野が30度程度と狭いのが難点ではあるものの、現実世界に頂上される映像はくっきりと視聴することができ、ARの可能性を充分に感じさせてくれる。Hololens以外にも、2017年は同様のシースルータイプのHMDであるMeta2³⁶⁾の登場が期待されている。これはスタンドアローン端末ではないものの、視野角が90度と、Hololensよりもかなり広いため、より自然なAR体験を提供してくれることが期待されている。このように、VR/ARを代表とする映像機器インタフェースは、研究者と一般ユーザから高い注目を集めている。これに関する数多くの研究発表がなされているが、ここではその中のいくつかを紹介していく。

4.2 Light FieldのVR応用

現在普及しているほとんどのVRコンテンツは、アーティストとクリエイターたちが手作業で作ったCGコンテンツであり、実写のVRコンテンツは全地球映像のみである。この理由は、現状は実写のVRコンテンツを作ることが困難を極めるためである。全地球映像はカメラを設置した1視点からの映像を見ているだけなので、首を振ることはできても、立ち上がりたり歩き回ったりすることができない。また、現在のHMDにおいては、人間の目の焦点変化にまでは対応していないため、どこを見てもくっきりとピントが合っており、違和感を与えてしまう。究極的な実写のVRコンテンツを実現するために、これらの課題を一括して解決する方法として、Light FieldをVRに応用することが期待されている。Light Fieldについての詳細説明は割愛するが、シーンの観測・処理・表示をすべてLight Fieldとして行うことができれば、撮影したシーンに自身があたかも入り込んでいるかのような体験を実現することができる。このような取組みの先駆けとして、Lytroは96台のカメラアレイを用いてシーンの観測をLight Fieldとして行い、後段の処理ではLight Fieldから3Dモデルを生成し通常のHMDに表示するというデモンストレーションHALLELUJAH³⁷⁾を発表している。筆者もこれをGTC2017で体験したが、現行のCGによるVRコンテンツとは比べ物にならないほど臨場感の高いVR体験であった。今後は、通常のHMDではなくLight Field Displayの機構を搭載したHMDで表示することが期待されており、これによりディスプレイ越しであっても人間の目の焦点調節が可能となり、より臨場感の高いVR体験が実現される。

4.3 Foveated Rendering

人間は、有効視野とよばれる注視している領域はくっきりと見えているが、それ以外の周辺視野は大まかにしか見えていない。これをVRにも応用したものがFoveated Rendering³⁸⁾で、HMD内に視線トラッキングセンサを装着し、視線を観測することで、注視点の近傍のみを高解像度でレンダリングし、それ以外の領域を低解像度にレンダリ

ングすることで、計算負荷を大幅に削減しようとする試みである。レンダリング負荷を低減するために、解像度を減らすだけでなく、シェーディングのさまざまな要素を簡略化して行っている。水平視野が110°のHMDであれば、人間の有効視野が広くて30度程度であることから考えても、その効果が大きいことは明らかである。NVIDIAがSIGGRAPH2016にて発表した方式では、レンダリング解像度を100%、60%、20%と三段階に設定し、250 Hzで動作することが確認されている。Foveated Renderingにより、今までVRのために求められていた高いマシンスペックの要求が大幅に低下することが期待されており、VR分野において今後必須の技術となることが予想されている。(竹内)

5. むすび

ヒューマンインフォメーション研究会で行われた研究発表を中心に、最近2年間におけるこの分野の研究動向をまとめた。

高性能の映像機器、バーチャルリアリティシステムが低コストで導入できるようになったことは、一般ユーザのみならず、大学等における研究者にとっても福音である。感性評価の個人差のようなこれまで踏み込みにくかった分野の進展に期待している。

(佐藤)

(2017年8月1日受付)

〔文 献〕

- 1) T. Kawabe et al: "Perceptual transparency from image deformation", Proc. Natl. Acad. Sci., 112, 33, pp.4620 - 4627 (2015)
- 2) M. Sawayama et al: "Human perception of subresolution fineness of dense textures based on image intensity statistics", J. Vision, 17, 4, 8 (2017)
- 3) T. Nagai et al: "Temporal properties of material categorization and material rating: visual vs non-visual material features", Vis. Res., 115, Part B, pp.259-270 (2015)
- 4) 山田ほか: "質感判断の刺激呈示時間依存性～画像特徴との関連～", 映情学技報, 39, 43, pp.55-58 (2015)
- 5) J. Yang et al: "Cortical response to categorical color perception in infants investigated by near-infrared spectroscopy", Proc. Natl. Acad. Sci., 113, 9, pp.2370-2375 (2016)
- 6) I. Kuriki et al: "The modern Japanese color lexicon", J. Vision, 17, 3:1 (2017)
- 7) I. Kuriki et al: "Hue Selectivity in Human Visual Cortex Revealed by Functional Magnetic Resonance Imaging", Cereb. Cortex, 25, 12, pp.4859-4884 (2015)
- 8) T. Sato et al: "Dissociation of equilibrium points for color-discrimination and color-appearance mechanisms in incomplete chromatic adaptation", J. Opt. Soc. Am. A, 33, 3, pp.A150-A163 (2016)
- 9) 石井: "運動視差による奥行き知覚における頭部運動方向の影響", 映情学技報, 40, 6, pp.295-298 (2016)
- 10) 圧田ほか: "乱視の矯正によって生じる垂直大きさ視差に対する順応", 映情学技報, 39, 43, pp.51-54 (2015)
- 11) 椿ほか: "対象内部の視差を強調する視差調整手法と評価", 映情学誌, 70, 5, pp.J98-J104 (2016)
- 12) Songほか: "Temporal Measurement of Binocular Accommodation Response by Object Distance", 映情技報, 40, 6, pp.285-288 (2016)
- 13) 横山ほか: "奥行き移動する視標に対する輻輳と調節応答の解析", 映情技報, 69, 10, pp.J298-J305 (2015)
- 14) 小澤ほか: "両眼網膜像差, 運動視差, 相対大きさ手がかりによる大

- きな奥行き知覚”, 映情学技報, 40, 37, pp.37-40 (2016)
- 15) 番ほか: “fMRI脳機能イメージングとTMS法で明らかになったヒト脳内における3D視覚情報の処理と統合”, 映情学誌, 69, 6, pp.510-515 (2015)
- 16) 對馬: “「超」高精細映像による奥行き知覚と脳機能”, 映情学誌, 69, 7, pp.506-509 (2015)
- 17) 小玉ほか: “初期視覚系受容野特性と高次運動選択機構を考慮した自己運動映像に対する顕著性推定モデル”, 映情学技報, 41, 9, pp.13-16 (2017)
- 18) 谷澤ほか: “周辺視野への視覚刺激を用いた自動車運転時の注意誘導方法の検討”, 映情学技報, 40, 9, pp.25-28 (2016)
- 19) 加納ほか: “弱視者の固視微動に見られる特徴の解析”, 映情学技報, 40, 9, pp.9-12 (2016)
- 20) 染谷ほか: “反応時間と瞳孔径変動に基づいた注意状態推定の比較”, 映情学技報, 39, 43, pp.19-22 (2015)
- 21) 遠藤ほか: “視覚的注意の集中時に生じるマイクロサッカードの持続的抑制”, 映情学技報, 37, 12, pp.51-54 (2013)
- 22) R. Engbert et al.: “An integrated model of fixational eye movements and microsaccades”, PNAS, 108, 39, pp.E765-E700 (2011)
- 23) 山田ほか: “印象操作による顔観察時の再認成績と視線運動への影響”, 映情学技報, 40, 9, pp.1-4 (2016)
- 24) Rec. ITU-R BT.2100: “Image Parameter Values for High Dynamic Range Television for Use in Production and International Programme Exchange” (2016)
- 25) 電波産業会: “Essential Parameter Values for the Extended Image Dynamic Range Television (EIDRTV) System for Programme Production”, ARIB STD-B67 (2015)
- 26) T. Borer and A. Cotton: “A “Display Independent” High Dynamic Range Television System”, the Best of IET and IBC, 7, pp.6-12 (2015)
- 27) Y. Ikeda, Y. Kusakabe, K. Masaoka and Y. Nishida: “Effect of Variable System Gamma for Hybrid Log-Gamma HDR Video Production”, Proc. IDW'16, pp.1001-1002 (2016)
- 28) SMPTE ST 2084: “High Dynamic Range Electro-optical Transfer Function of Mastering Reference Displays” (2014)
- 29) Report ITU-R BT.2390: “High Dynamic Range Television for Production and International Programme Exchange” (2016)
- 30) 山田, 鈴木, 平井, 堀内: “質感尺度を利用した物体のリテクスチャリング”, 映情学技報, 40, 36, pp.1-4 (2016)
- 31) 山本, 平沢, 津村: “材質感評価における顕著性特徴の比較”, 映情学技報, 40, 36, pp.5-8 (2016)
- 32) 五十嵐, 中村, 松島, 山口: “正射影光線サンプリング面を用いた計算機合成ホログラムによる質感表現”, 映情学技報, 40, 36, pp.13-16 (2016)
- 33) Steam, <http://store.steampowered.com/?l=japanese>

- 34) Hololens, <https://www.microsoft.com/ja-jp/hololens>
- 35) NTT R&D フォーラム, https://labevent.ecl.ntt.co.jp/forum2017/info/exhibit1_feel2020.html
- 36) Meta2, <https://buy.metavision.com/>
- 37) Lytro HALLELUJAH, <https://vr.lytro.com/>
- 38) Patney, Anjul, et al.: “Perceptually-based foveated virtual reality”, ACM SIGGRAPH 2016 Emerging Technologies, ACM (2016)



佐藤 雅之 1996年, 東京工業大学大学院総合理工学研究科博士課程修了。ヨーク大学博士研究員, カリフォルニア大学バークレー校博士研究員を経て, 2001年, 北九州市立大学国際環境工学部助教授。現在, 同大学教授。人間の視知覚(特に奥行き知覚)に関する心理物理学的研究に従事。博士(工学)。正会員。



永井 岳大 2007年, 東京工業大学大学院博士課程修了。カリフォルニア大学サンディエゴ校博士研究員, 豊橋技術科学大学助教を経て, 2013年, 山形大学大学院理工学研究科准教授。質感認知, 高次色覚特性に関する研究に従事。博士(工学)。



福田 一帆 2006年, 東京工業大学大学院総合理工学研究科博士課程修了。同年, カナダ・ヨーク大学博士研究員, その後, 東京工業大学特任助教, 同大学助教を経て, 2014年より, 工学院大学情報学部准教授。人間の視覚情報処理, 特に色覚や3次元空間知覚の研究に従事。博士(工学)。正会員。



近藤 悟 1993年, 東北大学工学部通信工学科卒業。同年, NHKに入局し, 放送技術研究所にて, VTRの機構制御など放送用機器の研究および開発に従事。1995年～1996年, 東北大学ベンチャービジネスラボラトリ研究員。2007年, NHK大阪放送局, 2011年, 長野放送局を経て, 2015年より, 放送技術研究所にて, ヒューマンインタフェースの研究に従事。正会員。



竹内 広太 2009年, 名古屋大学工学部卒業。2011年, 名古屋大学大学院工学研究科修士課程修了。同年, 日本電信電話(株)入社。同社NTTメディアインテリジェンス研究所画像メディアプロジェクトにて, 自由視点映像合成およびコンピュータショナルフォトグラフィに従事した後, 2017年より, (株)NTTぶららにてひかりTV開発に従事。