

[招待講演] クロスモーダル質感認知に基づく画像提示システム

平井 経太[†] 堀内 隆彦[†]

[†]千葉大学大学院 工学研究院 (融合理工学府 創成工学専攻 イメージング科学コース)

〒263-8522 千葉市稲毛区弥生町 1-33

E-mail: [†]hirai@faculty.chiba-u.jp

あらまし 画像に関する研究分野において、物体表面の質感を計測・編集し、ディスプレイを通して適切に提示することを目的とした研究が近年盛んに行われている。それらの質感画像研究の多くは、視覚的な質感を対象としている。しかし、人間は視覚情報だけでなく、聴覚情報や触覚情報などの複数の感覚情報を組み合わせて、クロスモーダルに質感を認知している。そのため、画像の質感再現において、視覚的な情報だけでなく、他の感覚も考慮したクロスモーダルな質感再現が重要であると考えられる。本稿では、我々が提案してきたクロスモーダル質感認知に基づく画像提示システムとして、視覚と触覚を考慮したプロジェクションマッピング技術と視覚と聴覚を考慮したCG提示システムを紹介する。

キーワード プロジェクションマッピング, テクスチャ質感, 触覚操作, CG再現, 効果音, 視聴覚刺激

Image Reproduction System based on Cross-modal Material Perception

Keita HIRAI[†] and Takahiko HORIUCHI[†]

[†] Department of Imaging Sciences, Chiba University 1-33, Yayoi-cho, Inage-ku, Chiba, 263-8522 Japan

E-mail: [†]hirai@faculty.chiba-u.jp

Abstract In recent years, researches for editing and reproducing Shitsukan (material perception) of object surfaces have been actively developed in the research field of image engineering. Such Shitsukan researches have mainly focused on visual perception. However, human perceives cross-modal Shitsukan by using not only visual information but also other sensory information such as auditory or haptic one. Thus, it is necessary to reproduce Shitsukan in images by considering both visual and other sensory characteristics. In this paper, we introduce two image reproduction systems based on cross-modal Shitsukan perception. One is the projection mapping system by considering visual and haptic sense. Another is the CG reproduction system by considering visual and auditory sense.

Keyword Projection Mapping, Texture Perception, Haptic Control, CG Reproduction, Sound Effect, Audio-visual Stimuli

1. はじめに

画像の計測・処理・解析・再現に関するCV(Computer Vision)・CG(Computer Graphics)研究分野において、視覚的な質感をリアルに再現する研究が近年盛んに行われている。これらの研究では、物体の色や陰影などの光学特性に関する情報を正確に扱うことにより、視覚的な質感を計測・再現してきた。近年では、物体表面の光学特性が人間の質感認知にどのように影響を与えるかに関する認知科学的知見を活かしたCV・CG研究なども取り組まれている[1]。

また、人間は視覚情報だけでなく、他の感覚情報を融合して、クロスモーダルに質感を認知している。視覚心理や認知科学、脳科学の研究分野において、クロスモーダルな質感認知を対象とした研究は取り組まれてきた。しかしながら、質感再現を目的とした画像提示システムにおいて、これらのクロスモーダル質感認知に関する知見は、現状ではほとんど活用されていない。質感をよりリアルに再現するには、視覚的な再現

だけでなく、聴覚や触覚も考慮したクロスモーダルな画像提示技術が求められている。

本稿では、我々が取り組んでいるクロスモーダル質感認知の知見を活かした画像提示システムとして、視覚と触覚を考慮したプロジェクションマッピング技術と視覚と聴覚を考慮したCGの光沢感再現システムを紹介する。視覚と触覚を考慮したシステムとして、テクスチャ質感の触覚操作を目的としたプロジェクションマッピングを紹介する。まず、画像の周波数変調に基づく視覚的質感画像処理アルゴリズムを開発した。続いて、この質感画像処理アルゴリズムをプロジェクションマッピングに応用し、視覚的な質感だけでなく、触覚的な質感も操作可能なことを主観評価実験により確認した。視覚と聴覚を考慮したシステムとして、効果音の影響を考慮したCGの光沢感再現システムを紹介する。まず、効果音とCGに関するクロスモーダルな光沢感の評価実験を行い、CGの光沢感知覚における効果音の影響を解析した。この解析結果に基づいて、

CG 特徴量と効果音特徴量に基づくクロスモーダル光沢感知覚モデルを構築した。最後に、このモデルの画像提示システムへの応用可能性を検証した。

2. テクスチャの視覚的かつ触覚的質感操作を

目的としたプロジェクションマッピング

プロジェクションマッピング技術は、メディアアートの分野だけでなく、物体表面の見えや質感の操作にも応用されている。天野らは、プロジェクションマッピング技術を用いて、物体表面の光沢感や透明感を操作する手法を提案した[2]。これらの手法では、Motoyoshi らの提案した光沢感操作手法[3]や透明感操作手法[4]を、プロジェクションマッピングを用いて実物体に拡張適用している。また、Kawabe らは、静止物体に対して、動きを付与する投影手法(変幻灯, Deformation Lamps)を提案した[5]。このように、反射特性や色などの低次元な制御ではなく、光沢感や透明感、動きなどの高次元な視覚情報の制御を対象としたプロジェクションマッピング研究も行われてきている。

近年では、プロジェクションマッピング技術を用いた視覚と触覚の相互作用に関する研究も行われている。Ho らは、手に暖色と寒色を重畳投影したときの、触覚的な温度知覚への影響についての研究を行った[6]。Punpongsanon らは、視覚の優位性を利用して、物体表面の触覚的な柔らかさ知覚を操作する手法を提案した[7]。しかしながら、ファブリックやテキスタイルなどの凹凸テクスチャに起因した材質感を、プロジェクションマッピングにより操作する手法は確立されていない。日常生活の多くの物体は表面にこのようなテクスチャを有しており、テクスチャに起因した操作を行う手法は有用であると考えられる。そこで我々は、テクスチャ知覚を視覚的に操作することによって、触覚的なテクスチャ知覚も操作するプロジェクションマッピング技術を開発した[8, 9]。

2.1. 周波数変調プロジェクションマッピングの原理

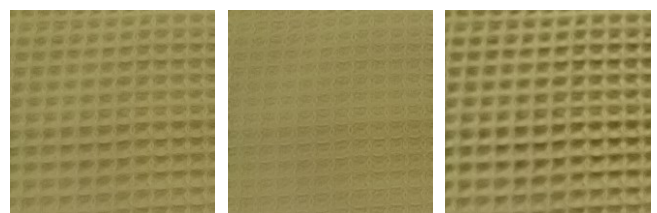
Giesel らは、周波数空間の特性が物体表面の見えと関係していることを明らかにした[10]。彼らは主観評価実験に基づき、特定の周波数帯とテクスチャ画像の質感を関連付けた。さらに、関連付けられた周波数帯を操作することによって、テクスチャ画像の質感を操作する手法を提案した。この手法は、テクスチャ画像の特定の周波数帯を定数倍することによって、質感特徴の強調・抑制を行っている。質感の操作軸は、Undulation, Thickness, Roughness の3つであり、これらの質感を周波数変調により制御した。しかしながら、Giesel らの手法は、モノクロ画像を対象としており、任意のカラーテクスチャを利用できない制限があった。そこで我々は、Giesel らの手法を任意のカラーテク

スチャ画像に拡張適用した[8]。Giesel らは、周波数変調による質感操作は、色による影響を受けないと言及した上で、モノクロ画像における周波数と質感を関連付けた。そこで、著者らの先行研究では、Giesel らの手法をカラー画像の輝度値成分(YIQ 空間の Y 成分)に適用可能な手法を提案し、カラーテクスチャの質感操作を実現した。図1に、カラー画像に対する質感操作(Undulation 操作)の例を示す。

2.2. システム構築と投影アルゴリズム

テクスチャ表面上へのプロジェクションマッピングによって質感操作を行うためには、プロジェクタとカメラの視差を抑制することが望まれる。そこで、ビームスプリッタを用いることにより、プロジェクタとカメラの光軸を一致させた光軸一致系のプロジェクタ・カメラシステムを構築した(図2)。プロジェクタの最短投影距離は 45 cm, 最小投影サイズは 30.4×19.0 cm であり、そのときの解像度は 4.2 pix/mm である。本研究では、上記の実験設定により、以降に記述する視覚と触覚に関する質感評価実験も実施した。

質感操作のアルゴリズムの概要を以下に示す。(1)カメラを用いて、処理対象であるテクスチャの陰影パターンをキャプチャする。(2)カメラ特性を考慮して、キャプチャ画像の補正を行う。(3)補正画像を、カメラ座標系からプロジェクタ座標系へ変換する。(4)座標変換した陰影パターンから、周波数変調手法に基づき、目標とする見えを実現するための差分画像を作成する。(5)プロジェクタの出力特性に基づいて、目標とする見えを実現する投影像を算出する。(6)対象テクスチャに対して、目標とする見えを実現する画像を投影する。以上の手順により、周波数変調プロジェクションマッピングを実現する。



(a)原画像 (b)抑制操作 (c)強調操作
図1 テクスチャの Undulation 操作例



図2 構築した光軸一致のシステム

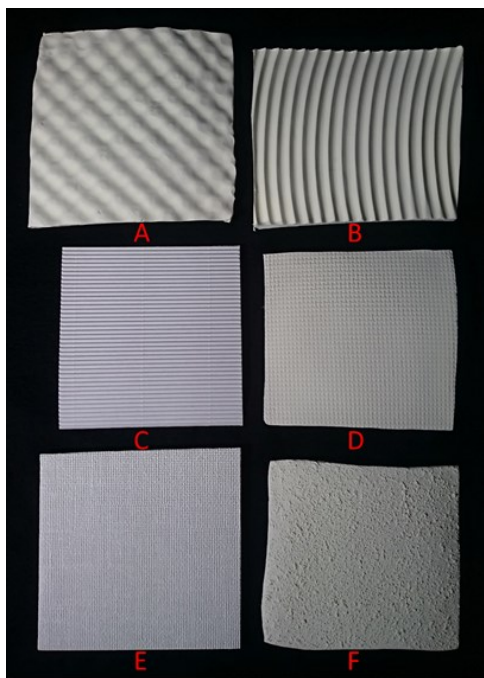


図3 実験に用いたテクスチャ実物体

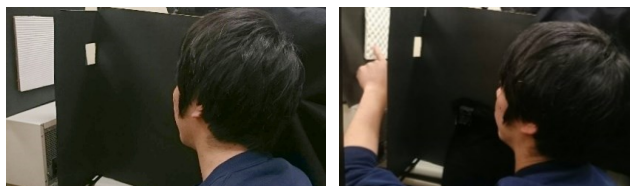


図4 実験の様子(上: 視覚的評価, 下: 触覚的評価. 実際には暗室下であり, 被験者はプロジェクションが認識できないよう, 刺激にマスクをしている.)

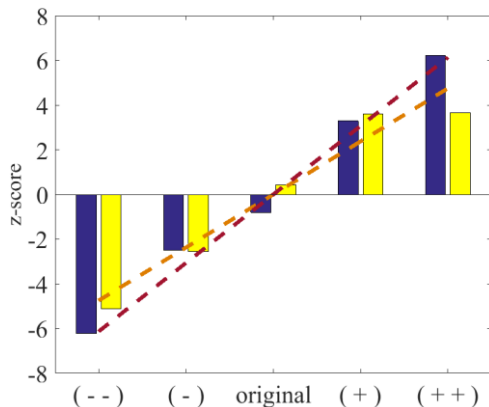


図5 テクスチャ物体 A の Undulation 評価値(青は視覚的評価値を, 黄は触覚的評価値を示す. 赤線は視覚的評価の近似直線を, 橙線は触覚的評価値の近似直線をそれぞれ示す.)

2.3. 主観評価実験による検証

提案手法により, 凹凸のあるテクスチャ実物体の表面を視覚的または触覚的に変化させることが可能であるか否かを検証するため, 主観評価実験を行った. 図3に, 実験で使用した3Dテクスチャを持つ物体を示す. 使用したテクスチャ物体は, Undulation, Thickness,

Roughness に対応する周波数帯に特徴を持つ白色物体であり, 各質感2種ずつの計6種類である.

実験では, テクスチャ実物体6種類に対して, 周波数の振幅を0倍(--), 1/2倍(-), 1倍(original, 変化なし), 2倍(+), 4倍(++)に変調させた計5刺激を用意した. 被験者は, 提案システムによる投影刺激を観察し, テクスチャの視覚的質感(Undulation, Thickness, Roughnessのいずれか)または触覚的質感を一对比較で評価した. なお, 視覚的質感と触覚的質感の評価実験は, 別日に行っている. 刺激の提示順序は各被験者でランダムであり, 被験者数は10名であった. 図4に実験の様子を示す.

図5にテクスチャ物体AのUndulationを操作した際の視覚的および触覚的評価値を示す. 視覚的な質感評価と同様に, 触覚的な質感評価の近似直線が, 周波数変調に従って順方向に推移していることがわかる. 他のテクスチャ物体についても同様の結果が得られており, 周波数変調プロジェクションマッピングにより, 視覚的質感だけでなく, 触覚的質感も操作可能なが示された.

3. CGと効果音のクロスモーダル光沢感モデルの構築と画像提示システムへの応用

人間は視覚情報だけでなく, 聴覚情報も利用して, 材質の質感をクロスモーダルに知覚することが知られている. Fujisakiらは, 視覚と聴覚に関する質感認知の実験[11]や, 視覚と聴覚と触覚の3つの感覚における質感認知の実験[12]を行った. Martínら[13]は, 視覚刺激と聴覚刺激と利用し, クロスモーダルに質感を認知した方が, 1つの感覚で認知するよりも豊かに質感を認知できることを発見した. Andersonら[14]はマテリアル類似性の知覚における視覚と聴覚の詳細レベルとの間の相互作用を解明し, 映像より音の詳細レベルを向上させることにより, コストが低いレンダリング方法が実現できる可能性を示した. しかしながら, これらのクロスモーダル質感研究は, 質感認知の脳メカニズムの解明に焦点をあてた研究が中心である. CGでリアルな質感を再現するには, 視覚的な再現だけではなく, 聴覚も考慮したクロスモーダルなCG質感再現システムが重要と考えられるが, それらを対象とした研究はまだ十分とは言えない. 映画やゲーム, VRなどで盛んにCG技術が使われている現在において, 視覚的な質感再現だけではなく, 聴覚情報も組み合わせたクロスモーダルな質感再現技術を開発していくことは重要である.

本章では, 光沢感に関する効果音とCGの相互作用のモデル化し, CG質感再現システムへ応用することを目的とする. はじめに, 効果音とCGに関するクロ

スモーダルな光沢感の評価実験を行い、CG の光沢感知覚における効果音の影響を解析した。解析結果に基づいて、クロスモーダルな光沢感モデルを構築し、CG 再現システムへの応用可能性を検証した。

3.1. CG と効果音を用いた光沢感評価実験

視覚刺激には、Torrance-Sparrow モデルを利用した CG 画像であり、銀の反射特性に基づき、鏡面反射の粗さを 0, 0.0001, 0.0002, 0.0004, ..., 0.0256, 0.0512 と変化させた CG 画像を 11 種類、反射光における拡散反射成分に対する鏡面反射成分の比率(以後、鏡面反射比率とする)を 0.1 から 1.0 まで変化させて作成した CG 画像を 11 種類用意した。聴覚刺激は、金属効果音を 15 種類用意した。視聴覚刺激は、視覚刺激 22 種と聴覚刺激 15 種を組み合わせた 330 種類を準備した。

評価実験では、まず、被験者はダミー評価プログラムを用いて光沢感評価について事前に訓練した。次に、視覚実験、視聴覚実験、聴覚実験の 3 つのセクションを順に実施した。実験では、モニタおよびヘッドホンで刺激を提示し、マグニチュード推定法によって光沢感を評価した。評価基準の刺激として、粗さ=0.0032 で鏡面反射のみ(鏡面反射比率=1)の CG 画像を用いた。評価基準刺激を図 6 に示す。この画像内に位置している球体を光沢感=50 の基準とした。評価下限(全く各質感を感じないとき)を 0 とし、上限は設定していない。実験では、鏡面反射比率=1 に固定し、粗さのみを変化させた実験と、粗さ=0.0032 に固定して鏡面反射比率を変化させた実験を別々に行った。被験者は、20 代 12 名であり、全ての実験で統一した。

図 7~図 9 に、粗さ変化刺激を用いた際の視覚実験、聴覚実験、視聴覚実験における光沢感評価をそれぞれ示す。図中のエラーバーは、被験者間の標準偏差である。また、図 8 の横軸は、音の特微量(本研究ではパワーが最大となる周波数をピーク周波数特微量とした)を示す。図 7 に示されるように、粗さの増加に伴い、光沢感が小さくなるのが分かる。また、図 8 に示されるように、音のピーク周波数が 7800Hz 付近で、音に対する光沢感が最も大きくなる。図 9 に示されるように、視聴覚実験の結果は、視覚実験と聴覚実験の結果を組み合わせたような結果となり、さらに光沢感知覚において、画像と音の間に相乗効果のあることが確認できた。これは、鏡面反射比率を変化させた実験においても同様であった。

3.2. クロスモーダル光沢感モデルの構築と検証

実験結果から、CG 画像と効果音を組み合わせることによって、光沢感の知覚が連続的に変化することが分かった。そこで、粗さ、鏡面反射比率、音のピーク周波数を特微量とし、実験結果に回帰することによって、クロスモーダル光沢感モデル G_{av} を構築した。



図 6 視聴覚実験における基準刺激画像

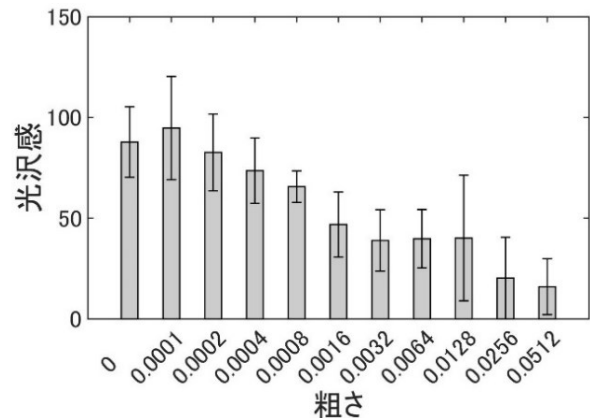


図 7 視覚実験の結果(粗さ変化刺激と光沢感)

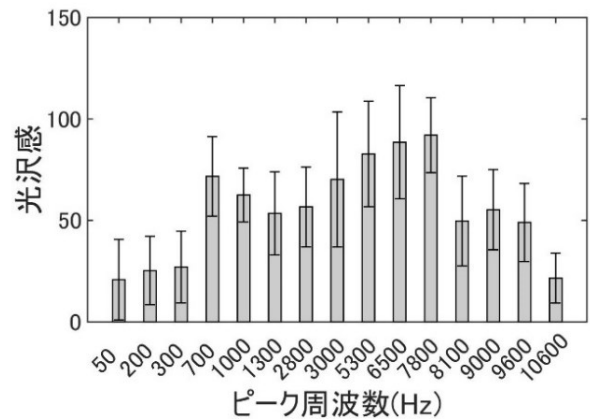


図 8 聴覚実験の結果(音特微量と光沢感)

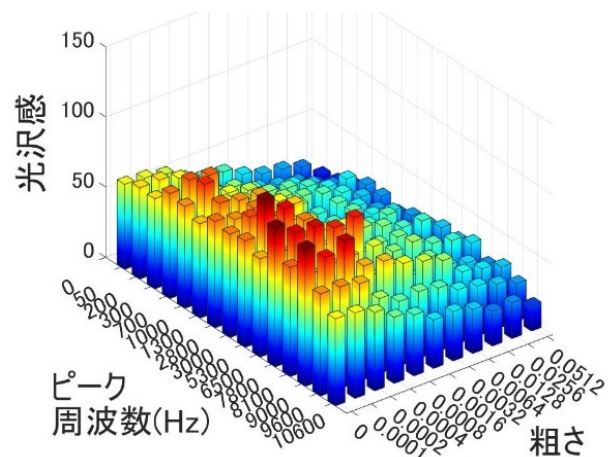


図 9 粗さと周波数に対するクロスモーダル光沢感

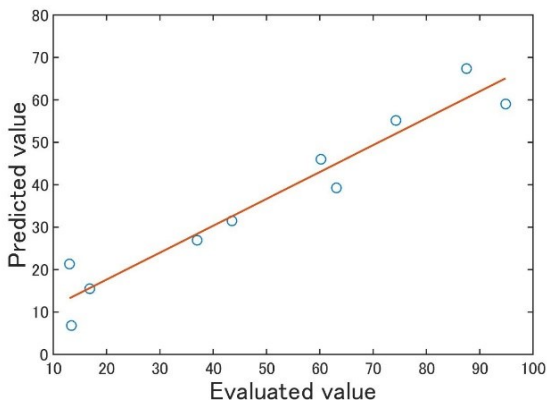


図 10 クロスモーダル光沢感モデルの検証結果

$$G_{av} = a_{av}O(r) + b_{av}P(m) + c_{av}Q(f) + d_{av},$$

$$O(r) = a_r \log r + b_r,$$

$$P(m) = a_m m + b_m,$$

$$Q(f) = a_f f^2 + b_f f + c_f.$$

ここで、 $O(r)$ 、 $P(m)$ 、 $Q(f)$ はそれぞれ粗さ r 、鏡面反射比率 m 、音のピーク周波数 f に関する光沢感モデルであり、これらの光沢感モデルの線形和によりクロスモーダル光沢感モデル G_{av} を構築した。各式の a 、 b 、 c 、 d は係数を表している。

モデルの精度検証のため、粗さ、鏡面反射比率、音のピーク周波数をランダムに組み合わせて作成した10種類のテストサンプルを用いた評価実験を実施した。図10に、モデル検証の結果を示す。横軸が検証実験で得られた評価値であり、縦軸が光沢感モデルから求めた予測値である。評価値とモデルから求めた予測値の相関は0.96だった。この結果は、提案モデルが相対的な光沢感推定に有効であることが示された。このクロスモーダル光沢感知覚モデルを利用することで、CG再現における光沢感の制御や表現が広がる可能性が示唆された。

4. おわりに

本稿では、我々が取り組んでいるクロスモーダル質感認知の知見を活かした画像提示システムとして、テクスチャ質感の触感操作を目的としたプロジェクションマッピング技術と効果音の影響を考慮したCGの光沢感再現システムを紹介した。

クロスモーダル質感認知に関しては未解明であるメカニズムも多く、認知科学や脳科学の研究分野において発展途中的なテーマである。そのため、これらの知見を活かした画像提示システムの検討は充分であるとは言えない現状である。しかしながら、人間のクロスモーダル認知の知見を積極的に映像システムへ応用することで、視覚刺激だけでは達成できない臨場感を再

現する映像システムが実現可能であると考えられる。今後、このような研究開発が発展していくことを期待している。

文 献

- [1] 新学術領域研究「多元質感知」, <http://www.shitsukan.jp/ISST/>
- [2] 天野敏之, “プロジェクタカメラ系を用いた光沢感と透明感の実時間操作,” 映メ誌, 68(12), pp.J528-J533, 2014.
- [3] I. Motoyoshi et al., “Image statistics and the perception of surface qualities,” Nature, 447(7141), pp.206-209, 2007.
- [4] I. Motoyoshi, “Highlight-shading relationship as a cue for the perception of translucent and transparent materials,” J. Vision, 10(9), pp.6:1-6:11, 2010.
- [5] T. Kawabe et al., “Deformation lamps: a projection technique to make static objects perceptually dynamic,” ACM TAP, 13(2), pp.10:1-10:17, 2016.
- [6] H. N. Ho et al., “Combining colour and temperature: A blue object is more likely to be judged as warm than a red object,” Scientific Reports, 4, pp.5527:1-5527:5, 2014.
- [7] P. Punpongson et al., “SoftAR: Visually manipulating haptic softness perception in spatial augmented reality,” IEEE TVCG, 21(11), pp.1279-1288, 2015.
- [8] T. Katsunuma et al., “Fabric appearance control system for example-based interactive texture and color design,” ACM TAP, 14(3), pp.16:1-16:20, 2017.
- [9] K. Hirai et al., “Effect of projection mapping on haptic perception of texture,” Proc. IDW, pp.1068-1071, 2017.
- [10] M. Giesel et al., “Frequency-based heuristics for material perception,” J. Vision, 13(14), pp.7:1-7:19, 2013.
- [11] W. Fujisaki et al., “Audiovisual integration in the human perception of materials,” J. Vision, 14(4), pp.12:1-12:20, 2014.
- [12] W. Fujisaki et al., “Perception of the material properties of wood based on vision, audition, and touch,” Vision Research, 109, pp.185-200, 2015.
- [13] R. Martín et al., “Multimodal perception of material properties,” Proc. ACM SAP, pp.33-40, 2015.
- [14] R. Anderson et al., “Audio-visual perception - The perception of object material in a virtual environment,” Proc. AVR, pp.162-171, 2016.