

触覚的アニメーションの概念に基づく柔軟触覚ディスプレイと視触覚融合の設計

慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科

黒木 帝聡

要旨

我々人類は生物と触れ合いながら社会を形成している。生物との触れ合いは接触者と接触受容者との間の絆を構築し、ポジティブな社会を形成するために重要な要素である。一方で、人類を取り巻く環境は社会的背景や技術的背景から大きく変化し、リモートコミュニケーションや Virtual Agent とのコミュニケーションのようなコンピュータを介した対象とのコミュニケーションも主流なコミュニケーション形態になりつつある。このようなコンピュータを介したコミュニケーションにおいて、どうすれば画面の向こう側にいる対象とポジティブな社会を形成することが出来るだろうか。これまで行われた研究において、コミュニケーション対象に生物らしさであるアニメーションを知覚することは対象への好意度や好感度を高めることが知られている。このことから、コンピュータを介したコミュニケーションにおいても対象にアニメーションを知覚することは対象とポジティブな社会を形成する上で重要であると考えられる。これまでの研究では視覚刺激に基づいてアニメーションを強化する手法が提案されており、コンピュータの中の対象にアニメーションを知覚することが実現しつつある。しかし、視覚ディスプレイと触覚ディスプレイを融合させた視触覚環境において、どのような接触体験がアニメーションを最大化させるかについては十分に議論がされていなかった。その結果、ユーザの身体とバーチャルな対象との間に介在する装置によって、両者の間の奥行き感が一致しないというような視覚的なノイズや、装置の剛性による意図しない硬さが知覚されるというような触覚的なノイズが生じ、バーチャルな対象との装置を介した視触覚インタラクションに止まり対象のアニメーションが弱化する場合があった。

一方、視覚刺激に基づくアニメーション知覚の構成要素は徐々に明らかになりつつあり、また触覚刺激によってアニメーションが知覚されることを示唆する研究もいくつか報告された。そこで本研究では、触覚刺激に基づいて知覚されるアニメーションを触覚的アニメーションと定義し、触覚的アニメーションの概念に基づいた柔軟低周波駆動型触覚ディスプレイである HAPTIC PLASTeR とモジュール化された空中投影型裸眼 3D ディスプレイである Modularized 3D を構築した。そして、HAPTIC PLASTeR と Modularized 3D を組み合わせることで、ユーザとバーチャルな対象との間に介在する装置によって生じる視覚的・触覚的ノイズを軽減し、ユーザがバーチャルな対象に触れた時に知覚する触覚的アニメーションを強化した。

本研究で構築する触覚的アニメーションの知覚モデルはボトムアップな知覚とトップダウン

な認知から構成されるモデルである。この触覚的アニメーションの概念を構築することによって、バーチャルな対象のアニメーションを強化するための触覚的な要素を検討することができ、触覚的アニメーションを強化する触覚ディスプレイと視覚ディスプレイの設計指針を検討することが可能になる。

触覚的アニメーションの概念に基づく触覚ディスプレイでは、アニメーションを強化する触覚刺激である低周波帯域での振動提示と、触覚的ノイズである装置の剛性・重量に由来して知覚される硬さ・重さの軽減に着目し、これらを両立するシステムとして Dielectric Elastomer Actuator を用いた柔軟低周波駆動型の HAPTIC PLASTeR を構築した。

次に触覚的アニメーションの概念に基づく視覚ディスプレイでは、Head Mounted Display の装着により生じる認知バイアスの軽減と、視覚的ノイズであるユーザの身体とバーチャルな対象との間の空間的不整合性の軽減の 2 点に着目し、光線反射型光学素子を用いたモジュール化された空中投影型裸眼 3D ディスプレイである Modularized 3D を構築した。

そして、HAPTIC PLASTeR と Modularized 3D を組み合わせた視触覚融合環境を構築し、バーチャルな対象との視触覚インタラクションにおいて介在する装置により知覚される視覚的・触覚的ノイズを軽減して触覚的アニメーションが強化されることを検証するとともに、本論文を通して得られた触覚的アニメーションの強化に向けた知見をまとめた。

本研究はニューノーマルなコミュニケーションであるコンピュータを介したバーチャルな対象とのコミュニケーションにおいて、バーチャルな対象とポジティブな社会を形成するための基盤となる触覚的アニメーションの概念とその概念に基づいたシステムを構築するものである。本研究の成果は、今後のバーチャルな対象とのコミュニケーションの研究者や設計者がシステムを実装し発展させる際の指針となるものであり、新たなコミュニケーション基盤が人間の豊かな社会を提供することに貢献すると期待する。

キーワード：

触覚的アニメーション，柔軟触覚ディスプレイ，誘電エラストマアクチュエータ，空中投影型裸眼立体ディスプレイ，視触覚融合

第1章 序論

背景

元来人類は他の人々や様々な生物と触れ合いながら社会を形成している。人類はコミュニケーション対象に触れることで対象の存在を感じて愛着や親密感を得ながら日々の生活を送っている。しかし、2020年現在、新型コロナウイルス(SARS-CoV2)の影響により、このようなポジティブな社会形成に重要な対象への接触行為が避けられる状況になっている。対象に触れられないという現在の状況は、人類のポジティブな社会形成を脅かす状況に陥っているといえる。

一方で、新型コロナウイルスは人類へ悪影響を及ぼすだけでなく、新たなコミュニケーション形態と社会形成の可能性を示した。その代表例の1つが遠隔地の人同士がコンピュータを介して行うリモートコミュニケーションである。このようなコンピュータを介したコミュニケーションの一般化は、これまで多くの研究者が行ってきた3Dディスプレイを活用して現実とバーチャルをシームレスに融合させるコミュニケーションシステムが本当に求められる社会の到来を意味する。また、このような現実とバーチャルがシームレスに融合する社会において、Virtual Agent と呼ばれる存在が人々の生活に徐々に入り込むようになった。Virtual Agent は非生物であるが、人々は日常的に彼らとコミュニケーションを行い、社会を形成するようになりつつある。

それでは、このようにコンピュータを介してコミュニケーションを行う遠隔地の人々やVirtual Agent のようなバーチャルな対象とポジティブな社会を形成するためにはどうすれば良いだろうか。これまで行われた研究において、人間は対象に生物らしさを感じることで、対象への信頼感や好意といった印象を高め、共に社会を形成していくにあたってポジティブな影響を与えることが示唆されている。このような生物らしさはアニメーションと呼ばれ、人間は様々な要素からアニメーションを知覚することが知られている。これまで、Computer Graphics (以下、CG) を用いてコンピュータ上のバーチャルな対象のアニメーションを強化する研究が多く行われてきた。これらの研究はバーチャルな対象の動きや質感に着目しているものが多かった。一方で、CG だけではバーチャルな対象に触れることが出来ないため、ロボットという実体を持たせることで触れ合いを通じたアニメーション強化を実現する研究も行われた。しかし、ロボットを用いる手法では、対象の姿や形を変化させることが容易ではない。そこで、CG と Virtual Reality (以下、VR) で用いられる触覚ディスプレイを組み合わせることで対象のアニメーションを強化する研究も行われた。

目的とアプローチ

CG と触覚ディスプレイを組み合わせた視触覚融合環境によるバーチャルな対象のアニメーション強化は、ニューノーマルなコミュニケーション環境においてコミュニケーション対象とのポジティブな社会形成に向けた重要な研究であるといえる。一方で、これまでの研究では視触覚融合環境においてどのような接触体験がバーチャルな対象のアニメーションを最大

化させるかについて十分に議論がされていなかった。その結果、バーチャルな対象とユーザの身体との間に介在する装置によって、両者の奥行き感が一致しないというような視覚的なノイズや、装置の剛性による意図しない硬さが知覚されるというような触覚的なノイズが生じ、知覚されるアニメシーを弱化させる場合があった。これは視触覚融合環境における接触体験において、触覚刺激に基づいて知覚されるアニメシーを強化するという視点から設計された視触覚融合環境がほとんど存在していないためである。

触覚刺激に基づくアニメシー知覚はまだ十分に議論されていない一方で、視覚刺激に基づくアニメシー知覚の脳内機序は徐々に明らかになりつつある。そのため、視覚刺激に基づくアニメシー知覚の脳内機序モデルを抽象化して触覚刺激に基づくアニメシー知覚に適用することで、触覚刺激に基づくアニメシー知覚の概念を構築でき、それに基づいた視触覚融合環境を構築すれば触覚的なアニメシーを強化できるのではないだろうか。そこで本研究では、触覚刺激に基づいて知覚されるアニメシーを触覚的なアニメシーと定義し、この触覚的なアニメシーの概念構築とそれに基づいた視触覚融合環境を構築し、ユーザがバーチャルな対象に触れた時に知覚される触覚的なアニメシーの強化を目指した。この目的を達成するために、本研究ではボトムアップな知覚とトップダウンな認知から構成される触覚的なアニメシーの概念を構築した。触覚的なアニメシーの概念を構築することで、バーチャルな対象のアニメシーを強化するための触覚的な要素を検討することができ、触覚的なアニメシーを強化する視触覚融合環境の設計指針を検討することが可能になる。次に、触覚的なアニメシーの概念に基づく触覚ディスプレイとして、アニメシーを強化する触覚刺激である低周波帯域での振動提示と、触覚的なノイズである装置の剛性・重量に由来して知覚される硬さ・重さの軽減の2点に着目し、Dielectric Elastomer Actuator（以下、DEA）を用いた柔軟低周波駆動型のHAPTIC PLASTeRを構築した。さらに触覚的なアニメシーの概念に基づく視覚ディスプレイとして、Head Mounted Display（以下、HMD）の装着により生じる認知バイアスの軽減と、視覚的なノイズであるユーザの身体とバーチャルな対象の空間的不整合性の軽減の2点に着目し、光線反射型光学素子を用いたモジュール化された空中投影型裸眼3DディスプレイであるModularized 3Dを構築した。そして、HAPTIC PLASTeRとModularized 3Dを組み合わせた視触覚融合環境を構築し、バーチャルな対象との視触覚インタラクションにおいて触覚的なアニメシーが強化されることを検証すると共に、本論文を通して得られた視触覚融合環境における触覚的なアニメシー強化の知見をまとめた。

本研究はニューノーマルなコミュニケーションであるコンピュータを介したバーチャルな対象とのコミュニケーションにおいて、バーチャルな対象とポジティブな社会を形成するための基盤となる触覚的なアニメシーの概念とその概念に基づいた視触覚融合環境を構築するものである。本研究の成果は、今後のバーチャルな対象とのコミュニケーションの研究や設計者がシステムを実装し発展させる際の指針となるものであり、新たなコミュニケーション基盤が人間の豊かな社会を提供することに貢献すると期待する。

第2章 関連研究

アニメシー知覚

人間は環境の中から社会を形成し得る対象を検出することが可能であり、この能力の基盤を担っているのは生物と非生物を区別する能力であるアニメシー知覚である。アニメシー知覚は古くから研究されており、1944年にHeiderとSimmelは移動する幾何学図形に生物らしさが知覚されることを示した。その後、幾何学図形のアニメーションの時空間性を変更することで幾何学図形の相互作用に影響を与えることを示した研究や自走運動能力の有無をアニメシー知覚と関連付けた研究、バイオロジカルモーションと呼ばれる複数の光点の連動した動きにアニメシーが知覚されることを示した研究などが報告されている。これらの多くは視覚刺激に基づいてアニメシーが知覚されることを示した研究である。

一方で、触覚刺激に基づいてアニメシーが知覚されることを示した研究も報告されている。これまでの研究では、鼓動運動や呼吸運動に触れることで対象の生物らしさが高まることや、低周波帯域の正弦波振動に触れることで対象の生物らしさが高まること示されている。また、柔らかさや温かさがアニメシー知覚と関連していることも示唆されている。

このように、視覚刺激や触覚刺激といった感覚刺激に基づいてアニメシーが知覚されることが明らかになっている一方で、アニメシー知覚は感覚刺激とは独立した要素にも影響を受けることが様々な研究により明らかになっている。例えば、社会的な繋がりに対するモチベーションがアニメシー知覚に影響を与えることを示した研究や、人間のミラーシステムにおける処理がアニメシー知覚と関係していることが示唆されている。このような感覚刺激とは独立した要素をトップダウンな認知と呼び、トップダウンな認知と感覚刺激に基づくボトムアップな知覚の両者がアニメシー知覚に影響を与えることが示唆されている。

触覚ディスプレイ

人間は日常生活において身体を操作して外界と様々なインタラクションを行う。その際、触覚は自分自身の身体の制御を適切に行うためのフィードバックを得たり外界の情報を得て意思決定に寄与したりするなどの重要な役割を担っている。このような触覚刺激を工学的に提示するシステムは触覚ディスプレイと呼ばれ、ロボット工学やVRなどで広く活用されている。広義の触覚は機能的には深部感覚と皮膚感覚の2つに区別することが出来るが、本研究ではその中でも皮膚感覚に焦点を当てる。これは皮膚感覚へ触覚刺激を行うことでアニメシーが強化されることが先行研究から明らかになっているためである。

皮膚感覚への触覚刺激提示を行う触覚ディスプレイは様々な物が提案されているが、これらの多くはモータやボイスコイルなどの金属でできたアクチュエータを用いて物理刺激を再現するものである。しかし、このような金属でできたアクチュエータを用いた触覚ディスプレイは装置の剛性に由来する硬さや重量に由来する重さが知覚され、意図しない触覚刺激を提供する可能性がある。一方で、経皮的に電流を流すことで皮膚下の受容器を刺激する電気触覚ディスプレイは小型・軽量であるため装置の重量に由来する重さが知覚されにく

いという特性がある。しかし、電気触覚ディスプレイは発汗や皮膚の厚みなどによって知覚される刺激が変化して安定的な触覚刺激を提示するには課題がある。また、音響放射圧や空気渦を利用した非接触型の触覚ディスプレイも提案されている。これらはユーザに特殊な装置を接触させないため、装置の剛性に由来する硬さや重量に由来する重さが知覚されないシステムである。しかし、知覚される強度を高めるためには振動を変調する必要がある、提示可能な振動に制約が存在する。

視覚ディスプレイ

視覚情報を工学的に提示する視覚ディスプレイは古くから研究されており、視覚ディスプレイの技術や実装方法は多岐に渡る。その中でも、本研究は特に 3 次元ディスプレイに焦点を当てる。これは、本研究では接触行為を対象としており、スムーズな接触行為の実現に向けてバーチャルな対象の奥行きを視覚的に提示するためである。また、本論文はリアルタイムインタラクションを前提としているため、リアルタイムレンダリング可能な 3 次元ディスプレイに焦点を当てる。

3次元ディスプレイの先行研究を述べるにあたり、人間が3次元を視覚的にとらえている要因を整理する。人間が3次元を認識する手掛かりは様々存在することが分かっているが、本研究ではその中でも主な要素と考えられている両眼視差、輻輳、水晶体による焦点調節、運動視差の4つに焦点を当てる。4つの奥行き手掛かりの中でも、両眼視差と輻輳は最も重要な手掛かりとして多くの3次元ディスプレイで実現されている。1960年にMorton Heilingが特許を取得したTelesphere Maskは現在のHMDの原型ともいえるシステムとなっており、個人向けの両眼視差テレビシステムとして特許申請されている。これ以降多くのHMDが提案され、現在では技術が洗練されたことにより小型で軽量の製品も多く販売されている。しかし、多くの人にとってHMDは常時装着しているものではないため、HMDを着脱した際に生じる認知的・心理的・身体的・社会的な影響が議論されている。一方で、ユーザが身体に特殊なシステムを装着しない3Dディスプレイも提案されている。これはレンズアレイを用いたインテグラルフォトグラフィの原理の基礎となる手法や、Parallax barrierを用いた手法など多岐に渡る。しかし、これらの多くは3D映像の焦点面をディスプレイ表面もしくはディスプレイの奥へと生成するように設計されており、実物体とバーチャル物体の間で水晶体の焦点調節に齟齬が生じる場合がある。それに対して、映像の焦点面をディスプレイの手前である空中へと生成する空中投影型裸眼3Dディスプレイが提案された。空中投影型裸眼3Dディスプレイは拡散放射された光線をレンズなどによって屈折させるものが多く、映像を空中に結像させることで実物体とバーチャル物体の間の水晶体の焦点調節の齟齬を軽減した。

本研究の立ち位置

これまで提案されてきた触覚ディスプレイや視覚ディスプレイはそれらを融合した視触

覚融合環境において、どのような接触体験がアニメシーを最大化させるかについて十分に議論がされておらず、バーチャルな対象とユーザとの間に介在する装置により視覚的・触覚的なノイズが生じ、知覚されるアニメシーを弱体化させる傾向にあった。例えば、一般的な 2D ディスプレイと触覚ディスプレイを統合したシステムは、バーチャルな対象が画面の中に存在していたため、ユーザがバーチャルな対象に触れようと手を伸ばすとユーザの身体とバーチャルな対象の奥行きが視覚的に一致しないという視覚的なノイズが存在する。また一般的な 3D ディスプレイと触覚ディスプレイを統合したシステムでは、バーチャルな対象と身体との間で水晶体の焦点調節矛盾が生じ、バーチャルな対象とユーザの身体の奥行きが視覚的に一致しないという視覚的なノイズが存在する。これを解消することを目指した RePro3D などはバーチャルな対象とユーザの身体との間の水晶体の焦点調節矛盾が軽減されるように設計されているが、一方で触覚ディスプレイからは装置の剛性・重量に由来する硬さ・重さなどが知覚されるというような触覚的なノイズが生じる場合があった。

それに対して本研究では、このようなバーチャルな対象とユーザとの間に介在する装置によって知覚される視覚的・触覚的なノイズを軽減し、触覚的アニメシーを強化する視覚覚融合環境を構築する研究として位置付けることが出来る。

また、アニメシー知覚の研究分野からは包括的な触覚的アニメシー知覚モデルの探求として位置づけることもできる。視覚的アニメシー知覚はその刺激要素から脳内機序まで幅広く研究されているが、触覚的アニメシー知覚の研究は主に感覚刺激要素であるボトムアップな知覚に焦点を当てた研究であった。それに対して本研究は、視覚刺激によって生じる触覚的アニメシーのトップダウンな認知の影響を考慮する知覚モデルを構築する研究であると捉えることが出来るため、触覚的アニメシー知覚におけるボトムアップな知覚とトップダウンな認知の 2 つの経路を統合した包括的な触覚的アニメシー知覚モデルについて探求する研究として位置づけることもできる。

第3章 触覚的アニメーションの設計

アニメーション知覚の研究は視覚刺激に関するものが多く、人間が触覚刺激からどのようにアニメーションを知覚するのか、その脳内機序モデルはまだ明らかになっていない。一方で、視覚刺激からアニメーションを知覚する際の脳内機序モデルは認知心理学や脳神経科学などの分野の研究により明らかになりつつある。人間が視覚刺激からアニメーションを知覚する際、視覚刺激によって生じるボトムアップな知覚と、知識や予測などのトップダウンな認知の2つの経路がアニメーション知覚に影響を与えることが示唆されている。そこで本研究では、この視覚刺激に基づくアニメーション知覚の脳内機序モデルを基に、触覚的アニメーションの脳内機序モデルを触覚刺激によって生じるボトムアップな知覚と知識や予測などのトップダウンな認知の2つの経路が存在するモデルと仮定した。このとき、知識や予測は接触対象の知識とそれに基づく予測であることから、接触対象の視認がトリガーとなって予測が生じると考えられる。そのため、触覚的アニメーションに影響を与える感覚刺激として、ボトムアップな知覚である触覚刺激と、トップダウンな認知に影響を与える視認に必要な視覚刺激の2つが存在すると考えられる（図1）。

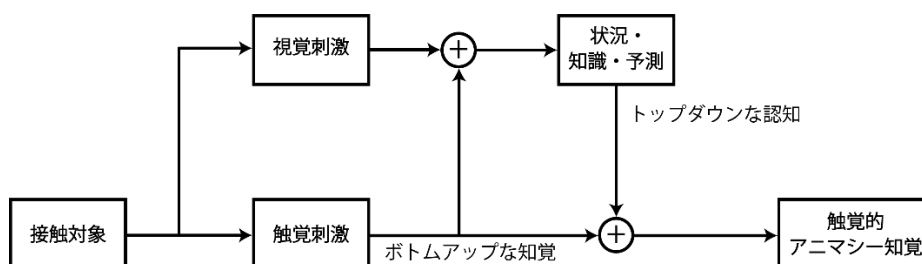


図1. 触覚的アニメーション知覚モデル

この考えに基づいて、触覚刺激と視覚刺激における触覚的アニメーションの強化要因と弱化作因を検討する。触覚刺激による触覚的アニメーションの強化要因として、鼓動運動や呼吸運動、低周波帯域の振動、柔らかさ、温かさが存在することが先行研究より示唆されている。一方で触覚刺激によるアニメーションの弱化作因として、対象からの触覚刺激が得られない状況や手袋やガラス越しに対象へ接触するなどによって接触対象の本来の触覚とは異なる触覚刺激が生じるなどの触覚的ノイズがアニメーションを弱体化させると考えられる。触覚ディスプレイを用いた際に装置の剛性・重量に由来して知覚される意図しない硬さ・重さなどはこれに類する。次に、視覚刺激による触覚的アニメーションの強化要因として、対象の動きやバイオリジカルモーションなどの視覚的アニメーションが存在すると考えられる。一方で視覚刺激による触覚的アニメーションの弱化作因は、接触対象を視認できず接触対象を特定できない状況や、HMDのようなシステムを装着することなどによって対象がCGであると予測する認知バイアスが考えられる。最後に、触覚刺激と視覚刺激の相互作用による触覚的アニメーションの弱化作因として、知覚と認知の不整合が考えられる。これは例えば、視覚刺激によって予測さ

れる触覚刺激と接触によって知覚された触覚刺激が整合しない場合や、対象が視覚的に存在する位置と触覚刺激が生じる位置が整合していない空間的不整合性などである。

これら触覚的アニメシーの強化要因と弱化要因の中から、本研究では触覚的アニメシーの概念に基づく視触覚融合環境として、それぞれ下記に着目したシステムを設計・構築した。

- 触覚刺激による強化要因：低周波帯域の振動提示
- 触覚刺激による弱化要因：装置の剛性・重量に由来して知覚される意図しない硬さ・重さが生じるとい触覚的ノイズの軽減
- 視覚刺激による弱化要因：HMD のようなシステムを装着することによって対象が CG であると予測する認知バイアスの軽減
- 視触覚の相互作用による弱化要因：対象が視覚的に存在する位置と、触覚刺激が知覚される位置が整合していない空間的不整合性の軽減

上記の要因を満たすシステムとして、本研究では柔軟・小型・軽量で低周波帯域の振動を提示可能な装着型の触覚ディスプレイである HAPTIC PLASTeR 及びモジュール化された空中投影型裸眼 3D ディスプレイである Modularized 3D を提案した。HAPTIC PLASTeR は低周波帯域の振動を提示可能であるため触覚刺激によるアニメシー強化要因を満たす。また、HAPTIC PLASTeR は柔軟・小型・軽量であり、人間の指腹の表皮と同じヤング率・厚みであるため、装置の剛性・重量に由来して知覚される意図しない硬さ・重さが軽減され、触覚刺激によるアニメシー弱化要因である触覚的ノイズの軽減に貢献する。一方で、Modularized 3D は裸眼 3D ディスプレイであるため視覚刺激によるアニメシー弱化要因である HMD の装着により生じる認知バイアスの軽減に貢献する。また、Modularized 3D は空中投影型 3D ディスプレイであり、視覚における奥行き知覚手掛かりである両眼視差、輻輳、水晶体による焦点調節、運動視差の 4 つを考慮して設計されているためバーチャルな対象にユーザが手を伸ばした際に両者の奥行き感が整合しやすく、視触覚の相互作用によるアニメシー弱化要因である視触覚間の空間的不整合性の軽減に貢献する。

第4章 柔軟低周波駆動型触覚ディスプレイ

本章で述べる HAPTIC PLASTeR の研究は豊田合成株式会社との共同研究プロジェクトとして行なわれた。HAPTIC PLASTeR は柔軟・薄膜・軽量の絆創膏型の触覚ディスプレイであり、ユーザはこれを指先へ巻くことで触覚フィードバックを受け取ることが出来る (図2)。この設計指針は触覚的アニメーションの概念に基づいて低周波帯域の振動を提示できることと装置の剛性・重量に由来して知覚される硬さ・重さが生じるという触覚的ノイズの軽減の2点とした。この設計指針を満たすために、低周波帯域の振動を提示可能であり、人間の指腹の表皮と同じヤング率・厚みを有する軽量の触覚ディスプレイとして HAPTIC PLASTeR を構築した。

HAPTIC PLASTeR は DEA を用いており、サイズは $70 \times 22 \times 1.5\text{mm}$ (W×H×T) で重量は 2g の絆創膏のような形状をした装着型触覚ディスプレイである。ユーザは HAPTIC PLASTeR を指先へ装着することで触覚刺激を得ることが出来る。HAPTIC PLASTeR で使用する DEA を選定するためにヤング率や比誘電率などが異なる複数の DEA を試作して検討した結果、Slide-Ring Material を用いた e-Rubber と呼ばれる DEA が最適であることを見出した。この DEA は誘電層の比誘電率が 8、ヤング率が 0.86MPa、積層数が 10 層、DEA の全体の厚さが 1mm、面積が $10 \times 16\text{mm}$ の長方形型の DEA であった。この DEA のヤング率及び厚さは人間の指腹の表皮のそれと同じであった。この DEA を用いることで低周波帯域での触覚刺激が強く知覚され、さらに生物に直接接触しているかのような感覚を生じさせることが出来ることを確認した。HAPTIC PLASTeR の構造には柔軟・薄膜・軽量な特性を持つ素子を用いて構成し、さらに DEA を駆動するための制御回路やソフトウェア、触覚センサを実装した。HAPTIC PLASTeR の物理的・知覚的性能評価を行った結果、5Hz といった低周波帯域の振動でも知覚可能であることがわかった。以上のことから、本章の目的である低周波帯域での振動を提示可能であること、装置の剛性・重量に由来して知覚される硬さ・重さを軽減することの2点を満たす触覚ディスプレイを実現できたといえる。

HAPTIC PLASTeR は触覚的アニメーション知覚の実験環境に利用できるだけでなく、柔軟・薄膜・軽量でありながら低周波帯域の振動を提示可能であるため、ウェアラブルな装置や Stylus などの機器への応用、義指などの福祉機器への活用など多様な活用を期待できる。

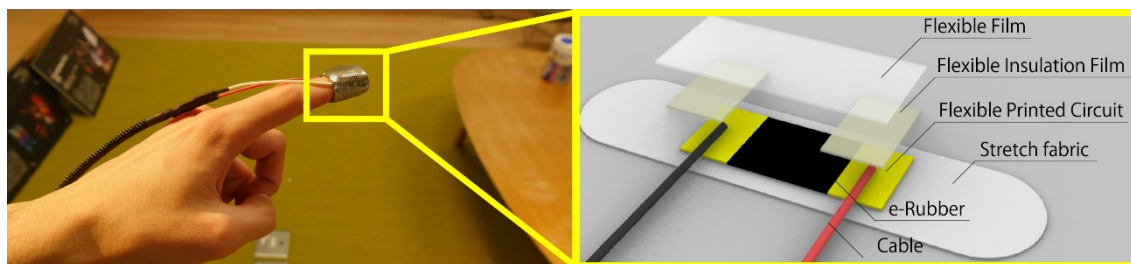


図 2. HAPTIC PLASTeR

第5章 モジュール化された空中投影型裸眼 3D ディスプレイ

Modularized 3D は光線反射型の光学素子を用いたモジュール化された空中投影型裸眼 3D ディスプレイであり、ユーザは特殊なメガネを装着しなくても空中に表示される 3D 映像を見ることが出来る。この設計指針は触覚的アニメシーの概念に基づき、HMD の装着により生じる認知バイアスの軽減と、対象が視覚的に存在する位置と触覚刺激が知覚される位置の空間的不整合性の軽減の 2 点である。この設計指針を満たすために、裸眼でありながらもバーチャルな対象にユーザが手を伸ばしたときに両者の奥行き感が両眼立体視、輻輳、水晶体による焦点調節、運動視差の 4 要素において整合するような光線反射型の光学素子を用いた 3D ディスプレイとして Modularized 3D を構築した (図 3)。

Modularized 3D は視点位置計測器と Micro Mirror Array、透明液晶ディスプレイ、液晶ディスプレイを用いたシンプルな構造の 3D ディスプレイである。ユーザの視点位置に応じて液晶ディスプレイの適切なピクセルを発光させることで、その光線が透明液晶ディスプレイでカラーフィルタリングされた後に Micro Mirror Array によって反射して空中に結像する。また、同時に光線の拡散・放射角度は Micro Mirror Array によってユーザの単眼にのみ入射するように調整される。この処理を右目用と左目用で時間的に分割して行うことで、裸眼でありながらもバーチャルな対象にユーザが手を伸ばしたときに両者の奥行き感が両眼立体視、輻輳、水晶体による焦点調節、運動視差の 4 要素において整合する 3D ディスプレイを実現した。また、光線制御に光線反射型の光学素子を用いることで映像に収差が生じることを防いだ。本論文では 2 台のディスプレイモジュールを実装して立体視の検証実験及び実演展示を行った。その結果、裸眼で視ることのできる 3D 映像を空中に提示できることを確認した。また、2 台のディスプレイモジュールを隣接して配置することで 1 台のディスプレイとして活用できる可能性が示唆された。

この Modularized 3D は触覚的アニメシー知覚の実験環境に利用できるだけでなく、タイリングすることによってディスプレイサイズを変更することが可能であることから、様々な空間への空中投影型裸眼 3D ディスプレイの導入障壁を軽減できると考えられる。

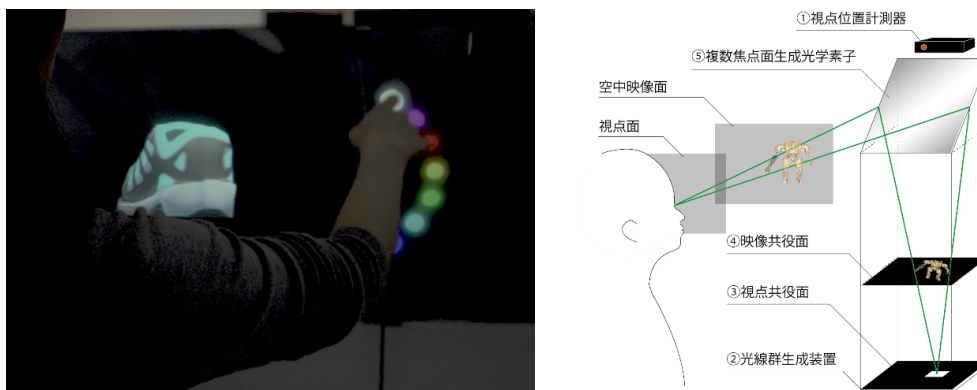


図 3. Modularized 3D

第6章 触覚的アニメーション知覚の検証

本章では触覚刺激と視覚刺激を組み合わせることにより、知覚される触覚的アニメーションが強化されるかどうかを検証するために、3つの方向性から検証を行った。

1つ目の検証では HAPTIC PLASTeR を用いて 13 種類の異なる触覚刺激を提示し、その際のアニメーション知覚を評価した。その結果、HAPTIC PLASTeR で提示した触覚刺激のみで触覚的アニメーションが知覚されることを確認した。また、この検証を通して触覚的アニメーションの知覚に影響を与える要素として、振動の周波数、コンテキスト、不規則性、強度といったパラメータが存在する可能性が示唆された。

2つ目の検証では HAPTIC PLASTeR と実物体と組み合わせることで触覚刺激と視覚刺激を提示した際に触覚的アニメーションが知覚されるかどうかを検証するために、目の前に実在する人の脈拍をセンサで取得して HAPTIC PLASTeR で提示する検証を行った。その結果、体験者がアニメーションを知覚したことを示唆するコメントを得ることが出来た。また、体験者の中には HAPTIC PLASTeR で脈拍が提示された際に、鳥肌が立ったかのように肌を擦る行動をした体験者が観察された。鳥肌は不快な情動が生じた時の防御反応であり、また人間はパーソナルスペース内に他者が存在すると不快な情動が生じる場合があることから、この体験者の肌を擦る行動は HAPTIC PLASTeR によって提示された触覚刺激が体験者に他者に直接接触しているような感覚を与え、それが体験者のパーソナルスペース内に他者が存在するような感覚を想起させて不快な情動が生じ、その不快な情動の防御反応として鳥肌が立つような感覚が生じて肌を擦ったのだと考えた。これらの結果から、HAPTIC PLASTeR と実物体と組み合わせることで視覚刺激と触覚刺激を提示した際に触覚的アニメーションが知覚される可能性が示唆された。

3つ目の検証では CG と組み合わせることで触覚的アニメーションが知覚されるかどうかを調査した。この検証を行うために、第4章で実装した HAPTIC PLASTeR と第5章で実装した Modularized 3D を統合した視触覚融合環境を構築した。そして、受動的な触覚提示環境における検証、能動的な接触環境における検証の2つを実施した。2つの検証では共に赤ちゃんの CG と 13 種類の異なる刺激を提示し、被験者にアニメーションを評価してもらった。その結果、特定の触覚刺激で触覚的アニメーションが強化されたことを確認した。また、CG への愛着を示すようなコメントを行う体験者もいた。これらの結果から、CG に対しても触覚的アニメーションが知覚されると同時に、愛着のような社会形成にポジティブな効果を与える可能性が示唆された。

最後に、これら 3 つの方向性の検証を通して得られた触覚的アニメーションの強化に向けた設計指針とデザインパラメータの知見を整理した。

第7章 結論

まとめ

本論文では、視触覚インタラクションにおいてこれまでほとんど議論されてこなかったバーチャルな対象の触覚刺激に基づくアニメーションに対して、触覚的アニメーションの概念を構築し、その概念に基づく触覚ディスプレイと視覚ディスプレイを提案した。触覚的アニメーションの概念構築では、視覚的アニメーションの脳内機序モデルを参考にして、ボトムアップな知覚とトップダウンな認知から構成される触覚的アニメーション知覚モデルを構築した。これにより触覚的アニメーションを強化する視触覚融合環境の設計指針を検討することが可能になった。次に、触覚的アニメーションの概念に基づく触覚ディスプレイとして、低周波帯域の振動を提示できることと触覚的ノイズである装置の剛性・重量に由来して知覚される硬さ・重さの軽減の2点に着目し、DEAを用いた柔軟低周波駆動型のHAPTIC PLASTeRを構築した。さらに触覚的アニメーションの概念に基づく視覚ディスプレイとして、HMDの装着により生じる認知バイアスの軽減と視覚的ノイズであるユーザの身体とバーチャルな対象の空間的不整合性の軽減の2点に着目し、光線反射型光学素子を用いたモジュール化された空中投影型裸眼3DディスプレイであるModularized 3Dを構築した。そして、HAPTIC PLASTeRとModularized 3Dを組み合わせた視触覚融合環境を構築し、バーチャルな対象との視触覚インタラクションにおいて触覚的アニメーションが強化されることを検証すると共に、本研究を通して得られた視触覚融合環境における触覚的アニメーションの強化に向けた知見をまとめた。

課題と展望

本論文では触覚的アニメーションの概念の提案とその概念に基づく視触覚融合環境を実装した。実装された視触覚融合環境は、触覚刺激の中でも特に振動触覚により生じる特徴に焦点を当てて構築された。しかし、広義の触覚は振動触覚以外にも多様な感覚が存在し、それらがアニメーションを強化する可能性がある。例えば、強い反力の知覚に貢献する深部感覚は対象に触れたときに対象の実在感を強化し、温冷覚は対象に触れた時の体温の知覚に貢献する。本研究ではこれらの感覚は対象としていなかったが、今後の研究ではこれらのような感覚も加えて各感覚刺激がどのように相互作用するかを解明することで、今後のバーチャルな対象との豊かなコミュニケーションの実現に向けて重要だと考えられる。

また、本論文ではアニメーション知覚に影響を与える感覚刺激として触覚刺激と視覚刺激に焦点を当てたが、人間は他にも聴覚、嗅覚、味覚を有している。特に聴覚はコミュニケーションにおいて重要な役割を果たし、嗅覚は人間の認知や記憶へ影響を与えることが示唆されている。そのため、触覚刺激と視覚刺激だけでなく聴覚刺激や嗅覚刺激も統合したマルチモーダルなアニメーション知覚を探求することは、アニメーションを有するバーチャルな対象の創造に向けて重要であると考えられる。このようなマルチモーダルなアニメーションを探求することは、バーチャルなコミュニケーション対象とポジティブな社会を形成する世界の実現に大きく貢献すると期待できる。