This article is a technical report without peer review, and its polished and/or extended version may be published elsewhere.

第 26 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集（2021 年 9 月）

触覚的アニマシーのための 柔軟・薄膜な触覚ディスプレイの基礎検討

A Basic Study of Soft and Thin Haptic Display for Haptic Animacy

黒木帝聡 [1),2)]，米原悠二 [1)]，Peiris Roshan[3)]，藤原武史 [1)]，南澤孝太 [2)]
Tadatosh KUROGI, Yuji YONEHARA, Roshan PEIRIS, Takeshi FUJIWRA, and Kouta MINAMIZAWA

1) 豊田合成株式会社（〒 490-1207 愛知県あま市二ツ寺東高須賀 1 番地 1, tadatoshi.kurogi@toyoda-gosei.co.jp）
2) 慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科（〒 223-8526 神奈川県横浜市港北区日吉 4-1-1,）
3) Rochester Institute of Technology（〒 14623 One Lomb Memorial Drive Rochester, NY, USA）

概要: 本稿では触覚刺激に基づいて知覚される生物らしさを触覚的アニマシーと定義し，その触覚的アニマシーの強化を目指した触覚ディスプレイとして，Dielectric Elastomer Actuator を用いた柔軟・薄膜な触覚ディスプレイを提案する．構築した触覚ディスプレイを用いて触覚刺激に基づくアニマシーの知覚実験を行った結果，本触覚ディスプレイが触覚的アニマシーを強化する可能性が示唆された．

キーワード： 触覚的アニマシー，触覚ディスプレイ，Dielectric Elastomer Actuator

1. はじめに

コミュニケーション対象に触れることは対象への愛着や親密感を得ることに繋がり，ポジティブな社会形成に寄与している．しかし，新型コロナウィルスの影響により対象との接触は避けられ，接触によるポジティブな社会形成は脅かされている．一方で，この状況は遠隔地の人同士がコンピュータを介してコミュニケーションを行うリモートコミュニケーションや，Virtual Agent のようなバーチャルな存在とコンピュータを介してコミュニケーションを行うバーチャルコミュニケーション等の，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．これら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，これまで研究されてきた 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求められる社会の到来を意味する．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．これまでの研究で，人間はコミュニケーション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 [1]，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マシーと呼ばれ，人間は様々な要素からアニマシーを知覚することが知られている．これまで，コンピュータ上のバーチャルな対象のアニマシーを強化する研究が多く行われてきた [2, 3, 4]．これらの多くは Computer Graphics（以下，CG）を用いており，視覚刺激に基づいて知覚されるアニマシーに焦点を当てた研究である．一方で，触覚提示技術の発展に伴い，触覚刺激に対してもアニマシーが知覚される可能性が示唆されている [5, 6, 7]．

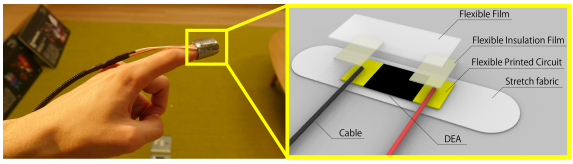

図 1: 柔軟薄膜な触覚ディスプレイ

しかし，アニマシー知覚に寄与する触覚的要素の解明に焦点を当てた研究はほとんどなく，バーチャルな対象との接触インタラクションにおいて，どのような触覚ディスプレイが対象のアニマシー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，バーチャルな対象と接触インタラクションを行うシステムにおいて，触覚ディスプレイの剛性による意図しない硬さが知覚される等の触覚的なノイズや，触覚ディスプレイの嵩張りによってユーザの身体とバーチャルな対象との奥行き感が一致しない等の視覚的ノイズが生じる場合があり，対象の触覚的アニマシーを弱化させる可能性があった．

そこで本研究では，触覚刺激に基づいて知覚されるアニマシーを触覚的アニマシーと定義し，その要素解明に向けた初期検討として，触覚的アニマシーの強化に向けた柔軟・薄膜な触覚ディスプレイの構築を目指す．

2. 関連研究

2.1 アニマシー知覚

人間は環境の中から生物を検出する能力を有しており，この能力はアニマシー知覚と呼ばれる．このアニマシー知覚は

ⓒ 2021 日本バーチャルリアリティ学会

古くから研究されており，1944 年に Heider と Simmel が移動する幾何学図形に生物らしさが知覚されることを報告した [2]．その後，自走運動能力の有無をアニマシー知覚と関連付けた研究 [3] や，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マシーが知覚されることを示した研究などが報告された [4]．これらの研究の多くは視覚刺激に基づいてアニマシーが知覚されることを示したものである．

2.2 触覚的アニマシー

日常生活において生物を検出する機会の多い視覚に比べて，触覚に基づいて生物を検出する機会は少ない．それに相関するかのように，触覚刺激に基づくアニマシー知覚に焦点を当てた研究も少ないが，いくつかの触覚的な要素がアニマシー知覚に寄与していることが示唆されている．アニマシー知覚に寄与する触覚刺激は，主に生物特有の生理的な周期動作に類似する動きであり，具体的には鼓動運動や呼吸運動に由来する低周波帯域の振動である．動物の生理的な周期動作である鼓動運動や呼吸運動に触れることで対象の生物感が高まることがロボット工学やバーチャルリアリティ等の分野で報告されている [5, 6]．このような周期動作によって知覚されるアニマシーは，鼓動運動や呼吸運動を忠実に再現していなくても，単純な正弦波の振動であっても知覚されることが明らかになっている [7]．また，このような触覚刺激から得られるアニマシーは研究室での実験にとどまらず，ワークショップなどを通して新しい体験としても提供されている [8]．

3. システム構成

本稿では，触覚的アニマシーの要素解明に向けた初期検討として，触覚ディスプレイ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や，触覚ディスプレイのサイズが嵩張りユーザの身体とバーチャルな対象との奥行き感が一致しないというような視覚的ノイズの軽減に焦点を当て，触覚的アニマシーを向上させるための柔軟・薄膜な触覚ディスプレイの構築を目指す．構築するシステムは柔軟・薄膜な触覚ディスプレイとそれを制御する制御回路の 2 つの要素で構成される．

3.1 触覚ディスプレイ

本稿では柔軟・薄膜な触覚ディスプレイとして，指先に装着可能な絆創膏型の触覚ディスプレイを構築した（図 1）．ここで，柔軟・薄膜であることを実現するために，アクチュエータには Dielectric Elastomer Actuator(以下，DEA) を用いた．

DEA は柔軟な誘電層の両面を柔軟な電極層で挟み込んだ 3 層構造となっており，両面の電極に電位差が生じると誘電層内部に電気的な分極が生じてクーロン力が発生し，DEA は積層方向へ収縮すると同時に平面方向へと伸長する（図 2）．一方，両面の電極の電位差が低下するとクーロン力も低下し，電位差がなくなると DEA は材料の復元力により初期状態へと戻る．この原理によって，DEA は柔軟な素材

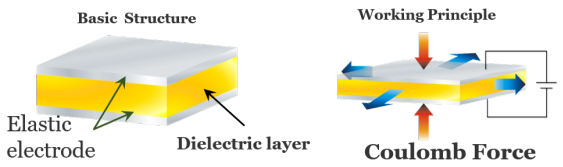

図 2: DEA の構造

で構成されながらも機械的な振動を提供し，小型でありながらも人が知覚可能な触覚刺激を提示することができる．

本論文では豊田合成株式会社が開発した e-Rubber と呼ばれる DEA を用いて触覚ディスプレイを構築した．構築した触覚ディスプレイは，図 1 に示す通り指先に巻くことが可能な柔軟さと，嵩張らない薄さを有している．

3.2 制御回路

触覚ディスプレイを制御するために，PC などから出力される交流電圧信号を触覚ディスプレイの制御電圧信号へと変換する制御回路を構築した．本触覚ディスプレイの駆動電圧は $0-1.5kV$ であるため，制御回路は PC などからの交流電圧信号を増幅してオフセットする機能を有する．制御回路に入力される交流電圧を V_{in}，増幅率を β，オフセットを V_{offset} とすると，DEA に出力される制御電圧 V_{out} は下記の式となる．

$$V_{out} = \beta V_{in} + V_{offset} \tag{1}$$

4. 出力変位計測

4.1 目的

構築した触覚ディスプレイの基本的な性能を検証するために，印加電圧と周波数に対する出力変位の計測を行った．

4.2 実験環境

構築した触覚ディスプレイを水平なテーブル面に載せ，両端をバイスで挟み 1mm 引張して固定した．1mm 引張する理由は，触覚ディスプレイへ電圧を印加した際に，平面方向へ伸張した際の撓みによって生じる予期しない変位による計測誤差を軽減するためである．積層方向への厚み変位計測には，同軸変位計コントローラ（Keyence 社，CL-3000）と 2 台のレーザ変位計（Keyence 社，CL-P030）を使用した．触覚ディスプレイの上下に 2 台のレーザ変位計を設置し，上下から変位を計測した．触覚ディスプレイの入力には 11 種類の異なる周波数の正弦波を使用した．正弦波の周波数はそれぞれ 0.1, 0.3, 0.5, 1, 3, 5, 10, 30, 50, 100, 300, 500, 1000Hz とした．駆動電圧の振幅範囲は 0-0.75kV, 0-1kV, 0-1.25kV, 0-1.5kV の 4 種類とした．変位計測のサンプリング周波数は 10kHz とした。

4.3 実験結果

各条件について少なくとも 2 サイクル以上の積層方向の変位を計測し，変位の絶対値の最大値を積層方向への変位とした．その結果を図 3 に示す．

ⓒ 2021 日本バーチャルリアリティ学会

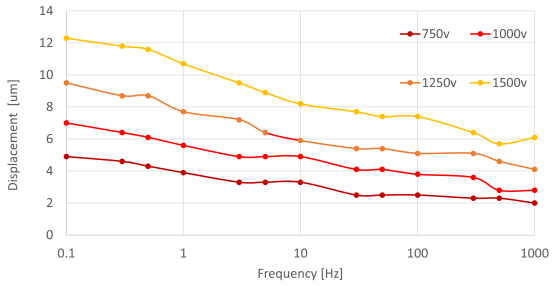

図 3: 変位計測実験の結果

4.4 考察

実験結果より，触覚ディスプレイは印加電圧に応じて変位が大きくなることがわかる．一方，印加電圧の周波数が増加すると積層方向への変位は減少する傾向にあることがわかる．この理由は，用いた DEA の誘電材料のヤング率が低いことによる影響であると考えられる．すなわち，ヤング率が低いということは外力による変形を復元する力が弱いことを意味しており，クーロン力による変形に対して，それを高速で復元することが難しく，印加電圧の周波数が増加すると積層方向への変位が減少したと考えられる．

5. 触覚的アニマシー知覚実験

5.1 目的

構築した触覚ディスプレイが触覚的アニマシーの強化に寄与するか検証するために，異なる触覚ディスプレイを用いた比較実験を行った．

5.2 実験装置

本実験では構築した触覚ディスプレイと Haptuator Mark II を用いた比較実験を行った．Haptuator Mark II は小型でありながらも幅広い帯域の振動を提示可能な触覚アクチュエータであるため，本論文で構築した触覚ディスプレイに類似した特性を有する触覚アクチュエータとして選択した．コンピュータ（Aelienware, OS:MS-Wiondws10, RAM:16GB, CPU:Intel Core i7-4790@3.5GB）上で動作する Unity2019.3f でそれぞれの触覚アクチュエータを制御した．

5.3 刺激

本実験では 12 種類の触覚刺激を用いた．Takahashi らの研究 [7] では触覚刺激として正弦波のみを用いたが，現実で生じる触覚刺激はそれよりも複雑な振動であることが多く，その複雑な振動の中には現象のコンテキストを内包している可能性がある．このような触覚刺激が内包しているコンテキストは鼓動運動や呼吸運動などの生物的な要素を連想させ，触覚的アニマシーの知覚に影響を与える可能性がある．そのため本実験では，コンテキストを内包しない正弦波のような振動波形と，コンテキストを内包している可能性のある振動波形を用いて実験を行った．刺激に用いた振動波形は表 1 に示す 12 種類である．

表 1: 触覚刺激一覧

No.	名前	コンテキストの有無	刺激詳細
1	5hz	無	正弦波：5Hz
2	10hz	無	正弦波：10Hz
3	30hz	無	正弦波：30Hz
4	50hz	無	正弦波：50Hz
5	100hz	無	正弦波：100Hz
6	WN	無	ホワイトノイズ
7	HRT	有	疑似鼓動運動
8	HAM	有	疑似ハムスターの咀嚼
9	SM	有	ソフトマテリアルの振動
10	MB	有	ビー玉の衝突振動
11	BDM	有	バドミントン
12	TPD	有	タップダンス

図 4: 実験の様子

5.4 手順

実験環境を図 4 に示す．被験者は触覚ディスプレイの上に右手人差し指の指腹を置き，Start ボタンを押すと 3 秒後に触覚ディスプレイに電圧が印加され，被験者は触覚ディスプレイの振動を感じた．5 秒間の触覚刺激提示後，被験者は知覚した触感の印象を SD 法からなるアンケートに回答してもらうことで触覚刺激から知覚されたアニマシーを評価した．被験者がアンケートに回答後，Next ボタンを押すと 3 秒後に次の試行が開始された．各被験者は触覚ディスプレイ 2 条件と触覚刺激 12 条件を各 2 試行ずつ，合計 48 試行を行った．触覚ディスプレイ 2 条件の順序は被験者間でカウンターバランスをとった．触覚刺激 12 条件はそれぞれランダム化して提示された．アンケートでは触覚刺激を感じた後，触覚刺激の印象について 1 から 7 までの 7 段階のリッカート尺度で 6 つの項目を評価してもらった．各項目は Bartneck ら [9] が提案しているアニマシー知覚の評価項目を用いた．

ⓒ 2021 日本バーチャルリアリティ学会

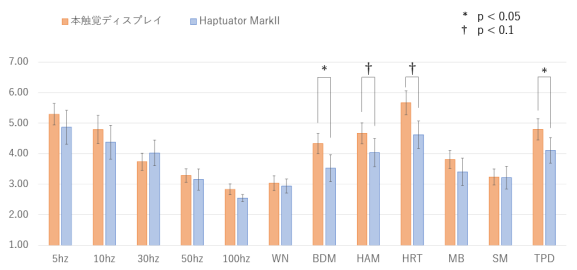

図 5: アニマシー知覚の実験結果

5.5 実験結果

各触覚ディスプレイにおいて，触覚刺激毎に全項目の回答を平均化した値を図 5 に示す．各触覚ディスプレイのスコアを Welch の t 検定で比較した結果，有意水準 $p < 0.05$ において，BDM(t(7)=2.62, p=0.034) と TPD(t(7)=3.52, p=0.010) に有意差が認められた．また，HAM(t(7)=2.17, p=0.067) と HRT(t(7)=2.21, p=0.062) において有意傾向があった．また，図 5 から，有意差の認められた BDM 及び TPD と有意傾向があった HAM 及び HRT の全てにおいて，本稿で構築した触覚ディスプレイは Haptuator Mark II よりも高いスコアを示した．さらに，実験後のインタビューにおいて，本稿で構築した触覚ディスプレイの方が Haptuator MarkII よりも生物的な触覚刺激であったと報告する被験者が複数人いた．

5.6 考察

実験結果から，本論文で実装した触覚ディスプレイは高いアニマシーが知覚される傾向を有していることが示唆された．有意差が認められた触覚刺激は正弦波のような単純な触覚刺激よりも BDM や TPD のようなコンテキストを内包している可能性のある複雑な触覚刺激であった．この結果が得られた理由の 1 つとして，被験者は Haptuator Mark II の剛性による硬さを定常的に知覚してしまい，提示された振動のコンテキストを機械的な現象に紐づけた可能性が挙げられる．これ支持する結果として，実験後に被験者へ行ったインタビューにおいて，TPD の振動を Haptuator MarkII では携帯電話のバイブレーションの変則パターンとして解釈し，アニマシーの評価を低く回答したと報告する被験者がいた．また，2 つ目の理由として，本稿で構築した触覚ディスプレイは低周波帯域で駆動していることが挙げられる．Takahashi らは，$2Hz$ といった低周波帯域の振動において最もアニマシーが知覚されることを報告した [7]．一方で，本稿で構築した触覚ディスプレイは図 3 で示すように，$1Hz$ や $3Hz$ のような低周波帯域でも振動することが確認された．ただし，本稿で構築した触覚ディスプレイの変位は非常に小さいため，低周波帯域の振動を提示した際に被験者がその振動を知覚できない可能性はあるが，物理的には低周波帯域の振動も生じているため，それが被験者のアニマシー知覚に影響を与えた可能性も考えられる．しかし，本稿で構築した触覚ディスプレイと Haptuator Mark II はこれらの要素以外にも様々な要素が異なるため，この結果を正確に解明するためには更なる研究が必要である．

6. 結論

本稿では触覚的アニマシーを向上させるための触覚ディスプレイとして，Dielectric Elastomer Actuator を用いた柔軟・薄膜な触覚ディスプレイを構築した．本触覚ディスプレイで 12 種類の触覚刺激を提示した結果，既存の触覚ディスプレイに比べて，コンテキストを有する触覚刺激において知覚されるアニマシーを強化することを確認した．

今後は本触覚ディスプレイを視覚ディスプレイと統合し，バーチャルな対象とシームレスに接触インタラクションを行える視触覚融合環境の構築を目指す．

参考文献

[1] Kristine L Nowak and Frank Biocca: The effect of the agency and anthropomorphism on users ’ sense of telepresence, copresence, and social presence in virtual environments, Presence: Teleoperators & Virtual Environments, Vol. 12, No. 5, pp. 481–494, 2003.

[2] Fritz Heider and Marianne Simmel: An experimental study of apparent behavior, The American journal of psychology, Vol. 57, No. 2, pp. 243–259, 1944.

[3] Lori Markson and Elizabeth S Spelke: Infants’ rapid learning about selfpropelled objects, Infancy, Vol. 9, No. 1, pp. 45–71, 2006.

[4] Gunnar Johansson: Visual perception of biological motion and a model for its analysis, Perception & psychophysics, Vol. 14, No. 2, pp. 201–211, 1973.

[5] Steve Yohanan, Mavis Chan, Jeremy Hopkins, Haibo Sun, and Karon MacLean: Hapticat: exploration of affective touch, In Proceedings of the 7th international conference on Multimodal interfaces, pp. 222–229, 2005.

[6] 橋本悠希: 広帯域性を備えた空気圧駆動型触覚ディスプレイ, 2010.

[7] Kohske Takahashi, Hideo Mitsuhashi, Kazuhito Murata, Shin Norieda, and Katsumi Watanabe: Feelings of animacy and pleasantness from tactile stimulation: Effect of stimulus frequency and stimulated body part, In 2011 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, pp. 3292–3297. IEEE, 2011.

[8] 渡邊淳司, 川口ゆい, 坂倉杏介, 安藤英由樹: 心臓ピクニック: 鼓動に触れる, ワークショップ (特集 ハプティクスと vr), 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 16, No. 3, pp. 303–306, 2011.

[9] Christoph Bartneck, Dana Kulić, Elizabeth Croft, and Susana Zoghbi: Measurement instruments for the anthropomorphism, animacy, likeability, perceived intelligence, and perceived safety of robots, International journal of social robotics, Vol. 1, No. 1, pp. 71–81, 2009.

© 2021 日本バーチャルリアリティ学会