

仮想硬度フィードバックを備えた 張力制御型 DAT スクリーンの開発

玉本孝哉¹ 米澤朋子¹

概要：我々は、これまでに空間投影技術の 1 つであるアミッドスクリーンに押下シングルタッチ深度センシング機能を実装した DAT スクリーンを提案した。本研究では、DAT スクリーンの張力をサーボモータで調整し、仮想的な硬度フィードバックを実現し、押下タッチセンシング機能の動作も確認した。本稿では提案デバイスを腕の筋肉の収縮と弛緩の視触覚表現における実装例を示す。

1. はじめに

空間投影を実現する安価なデバイスにアミッドスクリーン [1] がある。これは、網戸用ネットとプロジェクタを使用したプロジェクションスクリーン [2] の一種である。このデバイスを利用することで、空中に像そのものが浮いているような映像（空間映像）を提示することができる。同様の技術として、農業用ポリエチレンフィルムを用いたポリッドスクリーン [3] や霧を用いたフォグスクリーン [4] がある。これらの空間映像提示技術は音楽ライブ上の演出や Miku Miku Dance^{*1}などの 3DCG ソフトを利用して作られたアニメーションの投影などに活用されている。

我々はこれまでに、強弱を含めたキャラクタとのタッチインタラクションを目的として、押下タッチセンシング機能を実装したデバイス（本稿では Desktop Amid Touch スクリーン、DAT スクリーンと呼ぶ）を提案した [5]。網戸は柔らかく可塑性があり、押し込んだ位置に縦横の張力変化が発生するため、張力センサを作成し縦横双方に複数個配置することで押し込み位置と深度を推定した。

本研究では、DAT スクリーンの張り具合をサーボモータで制御することで押し込む際に必要な力を変化させ、仮想的なスクリーン硬度を調整すること（仮想硬度フィードバック）を試みた。これにより、スクリーン上に表示されたキャラクタの有無や向きなどに応じた仮想硬度フィードバックをユーザに提示することを目的とした。また、デモコンテンツとしてキャラクタの腕の筋肉収縮状態を提示するシステムを制作し、体験者から感想を収集した。

2. 関連研究

2.1 空間投影技術とタッチセンシング

前章で述べた空間投影技術は大きく分けて、気体に映像を投影するフォグスクリーンと、半透明のフィルムや板に投影する透過スクリーンの二種類がある。本節では主に後者について述べる。

アクリルなどの透明な素材にマルチタッチ検出機能を実装する Frustrated Total Internal Reflection という技術 [6][7] がある。これは素材内で赤外線を全反射させ、タッチした箇所のみ全反射が疎外されることにより素材外部に赤外線が漏れる。それをカメラで観測することで複数箇所のタッチを同時に検出することができる。しかし、アミッドスクリーンのような変形性はなく、触覚フィードバックを伴えず、フィルム状の透過スクリーン内で赤外線を全反射させることは困難である。

他にも、深度センサ（Xbox 360 Kinect）を用いて、板状の透過スクリーンに両面タッチ検出機能を実装したシステム [8] がある。スクリーンの側面に深度センサを置くことで、タッチ位置やスクリーンの表裏どちら側かを推定できるが、スクリーンの片側のみに深度センサがあるため反対側の推定精度が低い。また、アミッドスクリーンは変形性があり、押下した際にスクリーンが変形し、両面とも反応する誤検知が起こる可能性がある。

これらのタッチ検出方法や一般的な静電容量方式は、板状の透過スクリーンや液晶ディスプレイにおいて、プロジェクションを邪魔しないことや高精度な検出がメリットとして挙げられる。しかし、投影対象とのタッチインタラクションではスクリーンの柔軟性にも必要がある。そこで、アミッドスクリーンと張力センサを組み合わせ押下タッチ

¹ 関西大学 総合情報学部, Kansai University, Faculty of Informatics

^{*1} <https://sites.google.com/view/vpvp/>

検出方法を実装した。

2.2 スクリーン上の触覚フィードバック

本節では透過スクリーンに限らず、スクリーン上で触覚フィードバックを実装した関連研究を述べる。

振動による触覚フィードバックを実装したタッチスクリーン [9] がある。これは一般的なタッチスクリーンに振動アクチュエータを搭載して、触覚フィードバックを実現している。アミッドスクリーンにおいては、伸縮性の高い素材であり、振動が十分に伝わらない可能性がある。

また、変形しても機能する静電容量式のタッチスクリーンの背面に複数のピストン機構を取り付けることで、スクリーン表面の特定箇所のみを膨らませる触覚フィードバックを実装したシステム [10][11] がある。ユーザに視覚的に表示したボタンなどを実際に膨らませてユーザに提示することで、アフォーダンスを向上させることができるが安価な実装が難しい。

これらのシステムは触覚フィードバックの提示方法や目的が異なること、アミッドスクリーンの背面への機構実装が困難なことから、本研究ではサーボモータを用いた仮想硬度フィードバックを実装した。

3. 提案システム

本研究では、旧 DAT システム [5] と同様に張力センサをスクリーンの縦横に設置し、ユーザがスクリーンを押し込んだ位置を検出する機能を備えつつ、新規にサーボモータを用いたスクリーン張力制御による仮想硬度フィードバック機能を搭載するプロトタイプを制作した。

3.1 張力センサ

張力センサの外観を図 1 に示す。スライドボリュームを引くタコ糸とそれを保持する輪ゴムにより張力センサを構成する。押下該当箇所のタコ糸に強い張力がかかるほど、スライドボリュームのノブ部分が移動し、Arduino で大きい電圧値を検出する仕組みとした。

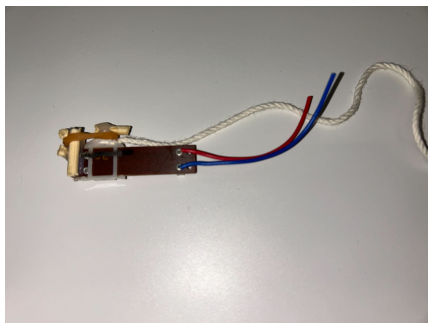


図 1 張力センサ

3.2 ハード構成

本節で述べる提案システムの外観を図 2 に示す。DAT スクリーンの本体部のフレーム、センサ、サーボモータの位置関係のイメージを図 3 に示す。

スクリーンに用いる網戸用ネットを縦 110mm、横 180mm の長方形になるよう切り出し、ほつれないようフェルト生地で切断部分を保護した。この際にフェルト部分の幅は 10mm とし、ネットの露出部分をモニタ等のアスペクト比である 9:16 と同様の縦 90mm、横 160mm とし、投影部分とする。なお、見やすいと報告されているグレーのネット [12] と同様のものを使用した。

張力センサは縦 15mm 間隔で 4 個、横 20mm 間隔で 9 個、合計 13 個をフレームに固定した。硬度フィードバック用サーボモータ (GWS S35 STD) のサーボホーンと糸をつけたボビンを接着し (図 4)、ネジとナットでフレームと固定した。スクリーンのフェルト部分に穴を開け、センサとサーボモータの糸を固定した。スクリーンがフレームの中央に位置し、すべての糸が同じ程度の張力になるように調節した。

本体部と土台となる木板が垂直になるよう固定した。その木板の上にプロジェクタ (EPSON EB-S04) を設置し、スクリーン部に投影した。

3.3 分析方法 [5]

センサの電圧値は Arduino Uno R4 (以降、Arduino) とアナログマルチプレクサ (CD74HC4067) を利用し張力セ

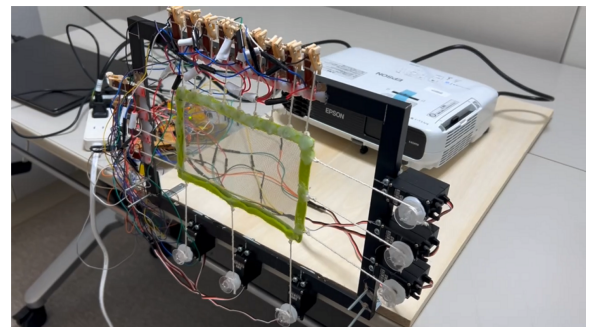


図 2 システム外観

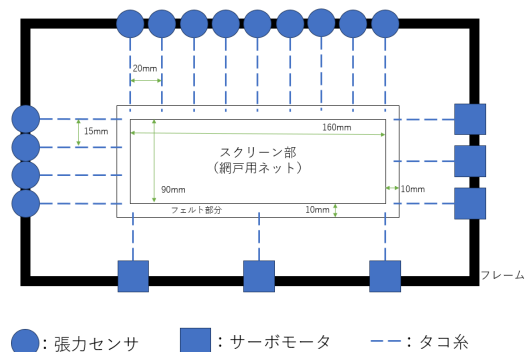


図 3 ハード構成のイメージ

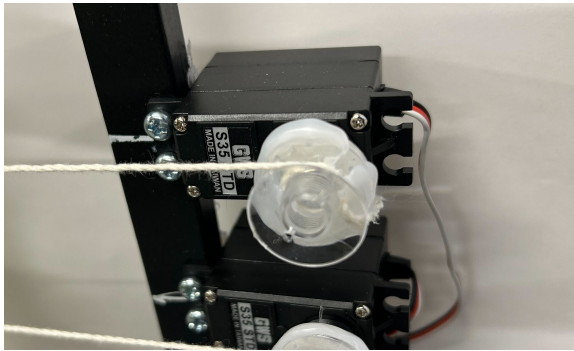


図 4 サーボホーンに接着したボビン

ンサ 13 個の値を取得した。

押下前と後の張力センサ変化量は押下位置に近いセンサであるほど大きくなる。例えば、スクリーンの中央を押下した場合、X 軸を担うセンサ群のセンサ変化量は図 5 のような釣鐘状の分布になる。それに対し、各センサに対して座標値を割り振り、3 次スプライン補間を行った分布の中から最大となる座標値を押下位置の推定座標とした。図 5 に対してこの処理を行ったグラフを図 6 に示す。この処理を Y 軸センサ群にも実施した。この推定方法により、センサ間の位置の推定や、指で押し込みながらスクリーン上を滑らせる動作（スワイプ）の時の座標推定が可能である。

なお、押下の深度の推定はセンサ群の変化量の総和とした。

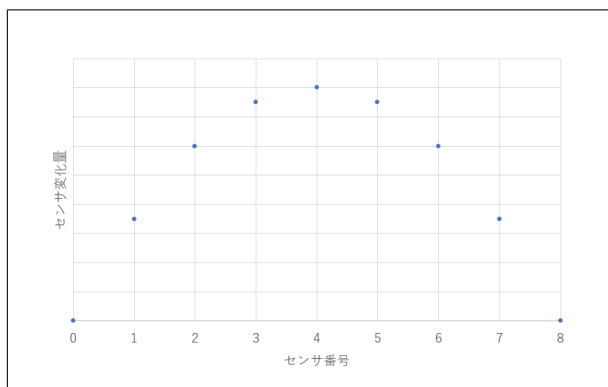


図 5 スクリーン中心部をタッチした際の x 軸のセンサ変化量予想

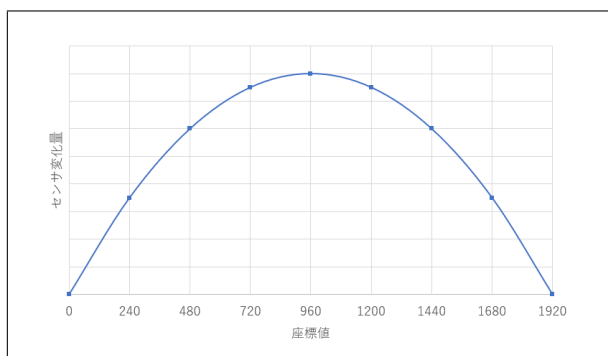


図 6 3 次のスプライン補間版センサ値群

3.4 サーボモータの制御方法

ロータリーサーボ GWS S35 STD は Arduino から回転速度のみ指示可能であるため、張力センサを参照し制御した。構造上、全てのサーボモータを同方向に回転させ糸を巻き取ると、全体的な糸の張力に伴って張力センサ群の電圧値が上がる。そのため、全センサの電圧値の総和に対し範囲を 2 つ設け、その範囲になるまで糸を巻き取り（緩め）続けるよう制御した。それぞれの範囲を初期状態と硬度変化状態としてユーザに提示することにした。

それぞれの状態で深度が 15mm になるように押下した際の張力センサ変化量を図 7, 8 に示す。初期状態ではセンサ変化量が小さいが、硬度変化状態はセンサ変化量が多い。センサの変化量が多いほどスクリーンに力がかかっているため、初期状態よりも硬度変化状態のほうがスクリーンを 15mm 押し込むのに必要な力が多いといえる。このように、本システムの仮想硬度フィードバックは機能していることが確認できた。

3.5 投影対象の位置に応じた仮想硬度フィードバック

本節では、投影対象の位置に応じた仮想硬度フィードバックを実現するために、サーボモータを個別に制御した際の仮想硬度について述べる。例として、スクリーンの 3 領域（左、中央、右）に対応するサーボモータと張力センサ群で仮想硬度を制御する。スクリーン領域、サーボモータ、張力センサの対応関係を図 9 に示す。

硬度を変化させたい領域に対応する 3 つの張力センサ値の和を参照した。初期状態に対し、サーボモータで糸を巻き取った後のセンサ値の和は増加する。そのため、初期状

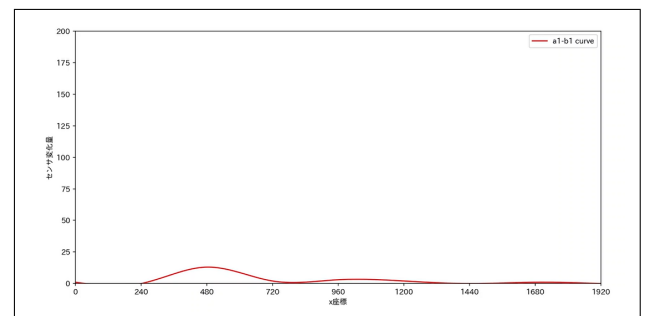


図 7 初期状態を押下した際のセンサ変化量

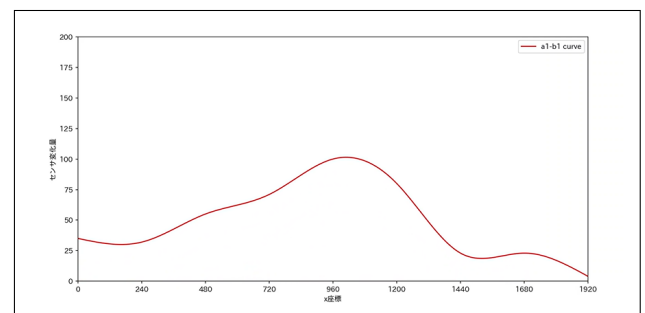


図 8 硬度変化状態を押下した際のセンサ変化量

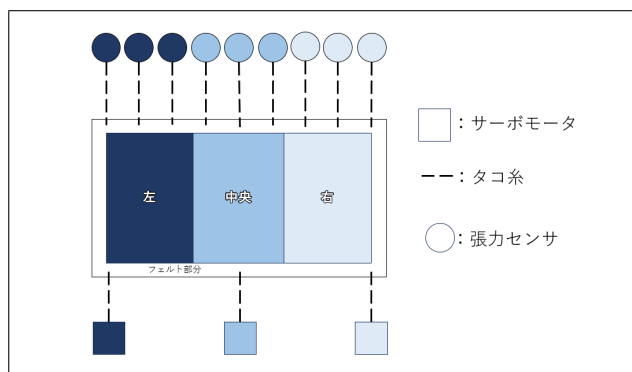


図 9 スクリーン領域、サーボモータ、張力センサの対応関係のイメージ

態のセンサ値の和と巻取り中のセンサ値の和の差が閾値に達せば、糸の巻き取りを終了する制御とした。

例えば、中央の領域と対応するサーボモータのみで糸を巻き取った場合、前節を鑑みると同深度の押下に対して中央の領域のみ張力センサ変化量が大きくなると予想できる。実際に計測したセンサ値（図 10, 11, 12）を見ると、予想通り、中央の領域のみで変化量が大きくセンサ値が高くなり、それ以外の領域では変化に乏しかったことから、中央の領域のみでスクリーンの仮想硬度が増加したことが確認できた。これは中央の領域に限らず、他の領域に対応するサーボモータでも同様だった。

4. 腕筋肉状態提示デモコンテンツ

第 3 章で作成したシステムの応用として、腕の筋肉の弛緩と収縮を視覚と触覚で提示するコンテンツをいらすとや^{*2}の提供画像（図 13, 14）を利用し投影した。筋肉の弛緩と収縮の表示を第 3.4 節における初期状態と硬度変化状態の触覚提示と対応させて、サーボモータを Python から制御するようにした。また、第 3.3 節で説明した方法で推定した座標と深度を赤い円の位置と大きさで提示した。

3 名の感想を収集したところ、仮想硬度フィードバックと視覚情報の提示により、体験者が投影対象物の状態が明確に異なると認識していることや、強い興味を示していることが確認できた。また、スクリーンを押下すること自体が新奇であるという感想もあった。体験者がコンテンツに触れている様子を図 15 に示す。

5. おわりに

本研究では、サーボモータを取り付けた張力制御型 DAT スクリーンにより、仮想硬度フィードバックを伴う半透明スクリーンの接触体験を実現する手法を提案し、デモコンテンツの試作と、仮想硬度フィードバックと視覚情報によるスクリーン状態の違いの予備的調査を行った。その結果、スクリーンの状態変化を明確に認識できていることが

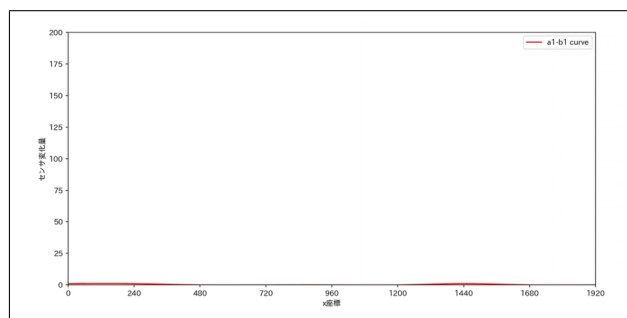


図 10 左の領域を押下した際のセンサ変化量

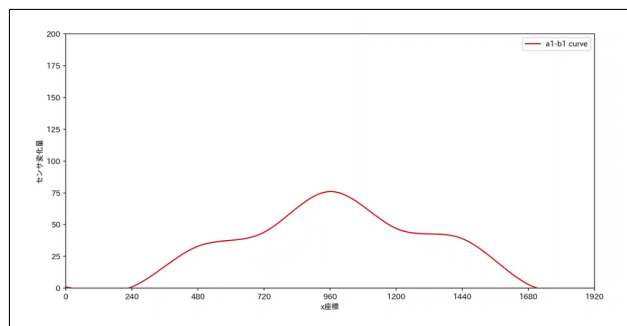


図 11 中央の領域を押下した際のセンサ変化量

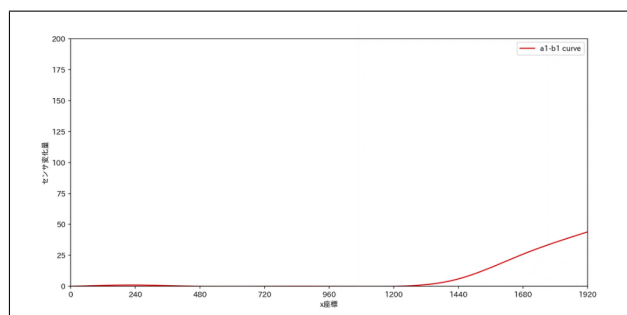


図 12 右の領域を押下した際のセンサ変化量

確認できた。

アミッドスクリーンは柔軟性がある空間投影スクリーンであるため、その張力が制御できることにより様々な応用が考えられる。例えば、医療分野においては腫瘍の有無に応じて仮想硬度を変えることによる触診トレーニングなどへの活用が考えられる。

今後の展望として、第 3.5 節を活用し仮想エージェントの有無や向きに応じてスクリーンの仮想硬度が変化するコンテンツの作成や、第 3.3 節の押下座標推定方法の妥当性を検証する予定である。

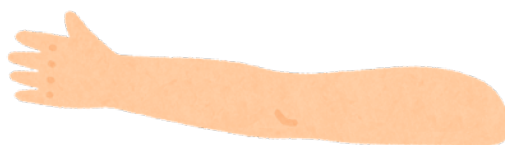


図 13 弛緩状態時に提示した画像

^{*2} <https://www.irasutoya.com/>



図 14 収縮状態時に提示した画像

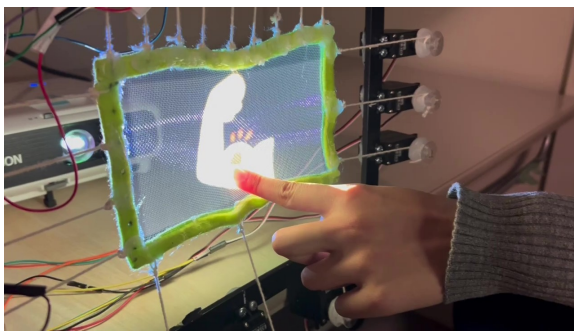
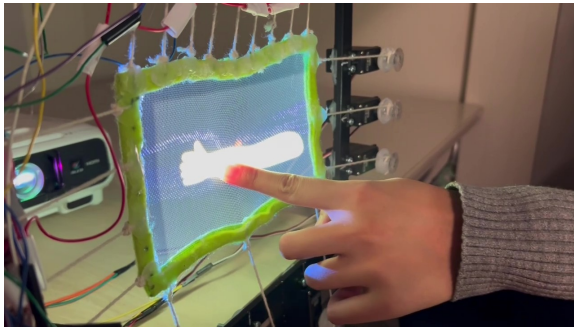


図 15 体験者がコンテンツに触れている様子

謝辞 本研究は科研費 24K02977, 23K11278, 23K11202, 22K19792, 21K03082, 19K12090 の助成の一部を受け実施した。

参考文献

- [1] 青木敬士. 【アミッド p】アミッドスクリーン研究室. <http://textalk.moe-nifty.com/>. (参照日: 2023-12-18).
- [2] 種田悌一. プロジェクション・スクリーン. 光学= Japanese journal of optics: publication of the Optical Society of Japan, Vol. 25, No. 6, pp. 307-312, 1996.
- [3] ポリッドスクリーン. <https://polidscreen.com/>. (参照日: 2023-12-18).
- [4] 久米祐一郎, 鈴木和哉. 混相流を用いた自由空間投影法の検討. 映像情報メディア学会誌, Vol. 56, No. 5, pp. 867-871, 2002.
- [5] 玉本孝哉, 森木臣悟, 米澤朋子. 安価で実装可能なシングルタッチ機能を実装したアミッドスクリーンの提案. インタラクション, 2024.
- [6] Jefferson Y Han. Low-cost multi-touch sensing through frustrated total internal reflection. In *Proceedings of the 18th annual ACM symposium on User interface software and technology*, pp. 115-118, 2005.
- [7] 坂本侑一郎, 吉川拓人, 大江龍人, 堀竜慈, 村田雄一, 志築文太郎, 田中二郎. 赤外線 led 埋め込みシリコンゴムを用いたタッチパネル. インタラクション, Vol. 104, No. 124, pp. 7-12, 2004.
- [8] 小山雄大, 井上亮文, 星徹ほか. 透過スクリーン側面からの深度情報を用いた両面タッチパネル化システム. 研究報告ヒューマンコンピュータインタラクション (HCI), Vol. 2014, No. 41, pp. 1-6, 2014.
- [9] 三嶋渉平, 寺田一貴, 佐々木健, 後藤大作, 竹内修一, 岩崎健二. 振動による触覚呈示を用いたタッチスクリーンの操作性に関する研究. 精密工学会学術講演会講演論文集 2015 年度精密工学会春季大会, pp. 967-968. 公益社団法人 精密工学会, 2015.
- [10] 池田盛陽, 加藤拓海, 佐藤俊樹, 小池英樹ほか. ディスプレイの表面形状と剛性の動的変化が可能なインタラクティブ視触覚デバイスの開発. 研究報告エンタテインメントコンピューティング (EC), Vol. 2016, No. 18, pp. 1-3, 2016.
- [11] 長井弘志. J112024 エアバッグ型触覚提示タッチパネルディスプレイの開発. 年次大会 2012, pp. J112024-1. 一般社団法人 日本機械学会, 2012.
- [12] 清水共. 投影ディスプレイ環境の構築. 香川高等専門学校研究紀要, Vol. 4, pp. 135-139, 2013.