

水に溶かした紙繊維を用いた切り貼りが可能な形状・剛性可変ディスプレイ

古田 龍平² 川口 陽² 宮坂 和希² 畑中 勘汰² 佐藤 俊樹¹

概要: 今までのディスプレイは剛性を変化させることが難しく、剛性が可変であっても形状変化に制限があった。そこで我々は紙繊維（パルプ）が水中でほどけ、乾燥させることで再結合する性質に注目し、吸引機と温風によって紙繊維の水分含量を調節可能にした装置を用いて紙繊維の可能性を調査した。その結果、装置に改善点が残されるものの紙繊維のディスプレイとしての有用性を実証した。本論文では、動的な剛性の変更と自由に形状変化と切り貼りが可能な水に溶かした紙繊維を用いたディスプレイの実装案とその有用性から考えられるアプリケーション案を述べる。

1. はじめに

従来のコンピュータのディスプレイは文字や画像情報の閲覧に適した形状、つまり平面的で硬いという特徴を有している。しかし、3次元形状を持つ3DCGデータを閲覧したり、表示されたキャラクター等と肌で触れ合ったりしたい場合、立体感のある表示や画面に直接触れた指に対して柔らかい触覚フィードバックを返すこと等は困難である。ディスプレイに粘土 [6], [9]・砂 [10] や弾性体 [11] 等の形状の柔軟性や柔らかさを有する素材を用いる試みもなされてきたが、形状や柔らかさは材質ごとに決まっており、1つのシステム上で複数の異なる触り心地を再現することは困難であった。この問題を解決するために、粒子素材で満たした袋の内部圧力を制御するジャミング転移技術等を用いて、ディスプレイに剛性可変要素を付加する研究等 [7], [8] もあるが、切ったり貼ったりすることが困難であるため、粘土等と比較して形状変化の自由度には大きな制限がある。

そこで本研究では、ディスプレイ表面の剛性を動的に変化させる手法として剛性可変要素を有し、粘土等と同様に切り貼りが可能な水に溶かした紙繊維の可能性に着目した。

2. 関連研究

紙を用いたHCIの研究は過去に数多く提案されている。Pulp-Based Computing[1]は紙自体の持つ形状変化の自由度や強度に注目して紙を複合材料によって、制作し紙のセンサーとアクチュエータを開発する提案をした。Pulp Nonfiction[2]は紙にセンシング機能を組み合わせることが



図 1 水に溶かした紙繊維 (左) と、成形・乾燥後の紙繊維 (右)

容易なことから、紙を低コストな入力デバイスとして用いる提案をした。Tailored Controls[5]は紙をTUIとGUIどちらとも役割をできることに注目し、切ったり貼ったりしてユーザーが独自のユーザーインターフェースを形成することができ、自然な制御を可能にする提案をした。LED Paper[3]は植物から取り出したパルプに電気回路とLEDを組み込むことで、制御可能な手作りの紙を提案した。この紙は回路の基盤としてや、テープ、ステッカーとして応用できる。SkinPaper[4]はシリコン加工した紙の柔軟性がウェアラブルデバイスとして運用できる可能性について検討している。

このようにこれまで紙自体の柔軟性や紙の製紙の段階でセンサー、アクチュエータを組み込むことで紙をディスプレイとして活用する提案は多くされているが、紙の成分であるパルプの水に対する分解性に注目して剛性の動的な変化のために用いた提案はない。

3. 提案

紙は木や草等の繊維から作られた紙繊維（パルプ）が複雑に絡み合っていてできているが、紙に水分を含ませることで結合したこれらの繊維がほどけ、紙は徐々に柔らかくなって

¹ 北陸先端科学技術大学院大学

² 電気通信大学

いく。また完全に水に溶けた紙繊維は液体のようにふるまうが、繊維をこし取り、再び乾燥させることで繊維同士を再結合させ、紙を再生させることが可能である。また、平面的な形状に限らず、紙繊維を立体的な形状に成形することで、立体的な形状に加工することも可能である。

本研究は、この紙（紙繊維）が水に溶ける性質と、乾燥により再び結合する性質に着目し、動的な水分量のコントロールを行うことで、形状・剛性可変要素を持つディスプレイサーフェスとして応用する試みを行う。提案する形状・剛性可変サーフェスは、次のような特徴を持つ。

まず、水を含んだ紙繊維の形状は柔軟性を有し、柔らかな触覚フィードバックを返す。特に、繊維が含む水分量が増えるにつれ、繊維同士の結合力が弱まるため、より高い柔軟性を持つことになる。また、完全に水に溶けた状態では液体に近い性質を示す。

また、形状の固定も可能である。水分を含んだ状態で形状を変え、成形した後に乾燥させることで、乾燥前の形のまま形状を固定することが可能である。

さらに、ジャミング転移を用いた手法とは異なり、サーフェス自体を一部切り取ったり、別の場所に張り付けたりすることも容易である。

以上を踏まえ、本研究では紙の水分含有量を動的に制御することにより、動的な形状および剛性変化を可能にする新しいディスプレイサーフェス技術を提案する。本論文では、以下に提案手法を実現する装置の最初の設計案および試作開発について述べ、提案手法のアプリケーション案および今後の展望を述べる。

4. 実験

本研究では、紙繊維の動的な水分量コントロール機構の動作実験を行った。プロトタイプシステムの構成を図2に示す。

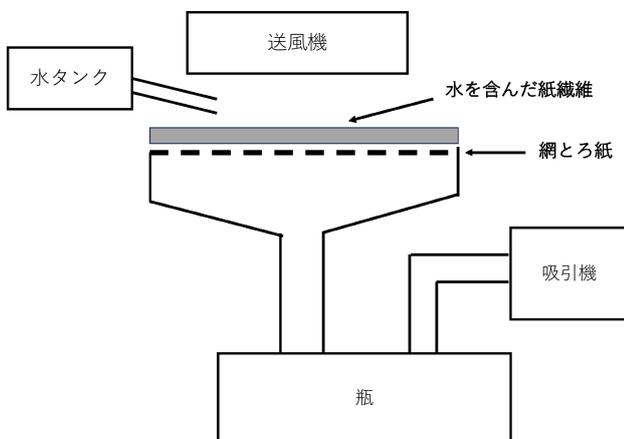


図2 装置の図

今回の実装では、手軽に入手可能な水溶性のティッシュペーパーを細かく刻み、水および洗濯のりを加えたものを

素材（図1）として用いた。実験では、これらを混合したものを紙繊維を通さない細かさの直径11.5cmの円形の網の上部に厚さ0.8cmになるように一様に延ばして配置し、網の下部から家庭用の掃除機を用いて空気を吸いだした。また、同時に網上部、繊維層の前面から家庭用ドライヤーで暖かい空気を繊維層全体にあてた。この時の繊維層の状態変化は図3の通りに観察された。

吸引開始直後、水を含んだ紙繊維から出た水が下の容器へと落ち、紙繊維の水分含有量が減少し乾燥する様子が観察された。吸引から2秒後以降は、紙繊維の見た目の変化は小さく開始直後のような状態変化は見られなかった。しかし紙繊維の表面からつやが減り吸引開始直後よりも薄くなる様子が観察できた。吸引から16秒後にはほとんど紙繊維のみが残り、紙繊維の中心は少しへこみ周りは少し浮いていた。また吸引前は紙繊維から水が下の容器へと落ちていたが吸引後は水の落下が観察されなかった。紙繊維は固まり手に取るできるようになっていた。

また、紙繊維の吸引を行う前に形を変えることでこのような図4が再現できた。



図3 形状変化の遷移



図4 表現可能な形状の例

5. アプリケーション案

提案手法を用いたアプリケーション案として以下のものを提案する。一つ目は、このディスプレイを用いて好きな形に紙繊維を形成、吸引し温風を当てて乾かすことで手に持つことのできる硬いオブジェクトが作成できる。また、このオブジェクトは水にぬらすと元の粘性を取り戻すためほかの同様に作られたオブジェクトと連結させたり切り離すことができる。

二つ目は、立体的な地形の再現である。平面方向に紙繊維を広げ、凹凸の形を自分で作り上から映像を投影させることで、多様な地形をレンダリングすることができる。また、紙繊維で作った土台をもとに色紙を素材に用いた同様の液体をのせて吸引することで映像投影を用いなくても様々な色をオブジェクトに反映し、地形の再現度を高めることができる。

三つ目は、ペンベースの入力デバイスを用いて文字や絵をオブジェクト上に描くことである。ペンベースのデバイスから出る紙繊維の量を調節し、まるで紙に描くように描きそれを固めることで、形だけではなく手紙や贈り物としての活用が可能である。

6. 展望

本研究では紙が水分を含むことで紙繊維が切り貼りできる性質を用いた様々な形状変化が可能で、かつ剛性を動的に変化できるディスプレイを提案した。今後は提案した装置の設計過程で生じた課題点の解決と紙繊維による立体表現の改良、ペンベースの入力デバイスの開発を目指す。具体的には、吸引機に水が吸い寄せられて装置のタンクが十分に役割を果たさなかった点や紙繊維が持つ剛性の動的変化の遅さが挙げられる。また、それと並行してアプリケーション案が実現可能か検証していく。

参考文献

- [1] Marcelo Coelho, Lyndl Hall, Joanna Berzowska, Pattie Maes: *Pulp-Based Computing: A Framework for Building Computers Out of Paper*, CHI '02: Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, p3527-3528, (2009).
- [2] Yang Zhang, Chris Harrison: *Pulp Nonfiction: Low-Cost Touch Tracking for Paper*, CHI '18: Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, Paper No.117, p1-11, (2018).
- [3] Erik Brunvand: *LED Paper: Physical Computing with Handmade Paper*, SIGGRAPH '21: ACM SIGGRAPH 2021 Educators Forum, Article No.6, p1-2, (2021).
- [4] Jingwen Zhu, Nadine El Nesr, Nola Rettenmaier, Cindy Hsin-Liu Kao: *SkinPaper: Exploring Opportunities for Woven Paper as a Wearable Material for On-Skin Interactions*, CHI '23: Proceedings of the 2023 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, Article No. 479, p1-16, (2023).
- [5] Vincent Becker, Sandro Kalbermatter, Simon Mayer, Gábor Sörös: *Tailored Controls: Creating Personalized Tangible User Interfaces from Paper*, ISS '19: Proceedings of the 2019 ACM International Conference on Interactive Surfaces and Spaces, p289-301, (2019).
- [6] Ben Piper, Carlo Ratti, Hiroshi Ishii, *Illuminating Clay: A 3-D Tangible Interface for Landscape Analysis*, CHI '02: Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, p355-362, (2002).
- [7] oshiki Sato, Jefferson Pardomuan, Yasushi Matoba, Hideki Koike. *ClaytricSurface: An Interactive Deformable Display with Dynamic Stiffness Control*, IEEE Computer Graphics and Applications, Vol.34, No.3, p59-67, (2014).
- [8] Sean Follmer, Daniel Leithinger, Alex Olwal, Nadia Cheng, and Hiroshi Ishii, *Jamming user interfaces: programmable particle stiffness and sensing for malleable and shape-changing devices*, UIST '12: Proceedings of the 25th annual ACM symposium on User interface software and technology, p519-528, (2012).
- [9] Sean Follmer, Hiroshi Ishii, *kidCAD: Digitally Remixing Toys Through Tangible Tools*, CHI '12: Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, pp.2401-2410, (2012).
- [10] Keishiro Uragaki, Yasushi Matoba, Soichiro Toyohara, Hideki Koike, *Sand to Water: Manipulation of Liquidness Perception with Fluidized Sand and Spatial Augmented Reality*, ISS '18: Proceedings of the 2018 ACM International Conference on Interactive Surfaces and Spaces, p243-252, (2018).
- [11] Giovanni Maria Troiano, Esben Warming Pedersen, Kasper Hornbæk *User-Defined Gestures for Elastic, Deformable Displays*, AVI '14: Proceedings of the 2014 International Working Conference on Advanced Visual Interfaces, p1-8, (2014).