

静電アクチュエータ駆動によるシート立体構造への プロジェクションマッピングの検討

新田航平^{†1} 山本晃生^{†1}

概要：近年、「Origami」構造等のシート立体構造生成に注目が集まっており、映像メディアへの応用も期待されている。本稿では、静電アクチュエータを用いたシート立体構造生成に着目し、変形していくシート形状を Kinect センサによりリアルタイムで計測することで、プロジェクションマッピングを行う簡易的なシステムを試作した。製作したシステムでは、静電アクチュエータによるシート立体構造の高さを指令値に追従するよう制御しつつ、形成された面形状に適した映像を投影することができた。構築したシステムでは、投影する映像の内容に応じて、投影対象面の形状をリアルタイムに変形できることから、より効果的な映像表現につながる事が期待できる。

1. はじめに

近年、「Origami」という言葉が世界的にも注目を集めており[1][2]、その立体構造をロボティクス[3]やインタラクティブメディア[4]の分野で活用しようとする事例が複数報告されている。「Origami」に代表されるような、紙やフィルム等のシート状部材の立体構造の応用においては、紙の立体構造生成が自動で行われることが望ましく、これまでもロボティクス応用を中心に自動生成手法について研究がなされている[5]。

我々は、シート状部材の立体構造自動生成手法の一つとして静電アクチュエータ[6]の活用を提案している[7]。紙などのシート部材を静電気力により直接搬送可能な静電アクチュエータ上に切れ込みを入れたシートを配置し、シートの両側を左右に駆動することで、切り込み部を中心として紙を立体的に立ち上げることが可能である(図1)。このようにして自動作成される立体構造は、広告やインタラクティブアート等への活用が期待できるが、より効果的な視覚体験のためには、立体構造物の表面に映像を投影することが望ましい。立体構造物への映像投影はプロジェクションマッピング(以下 PM)として多くの場で実施されているが、静電アクチュエータを用いた本システムは立体構造を動的に生成、変形させることが可能であるため、映像と同期して PM 投影対象の構造物を変形させることができる。そのため、映像メディアとして非常に大きなポテンシャルを持つ。

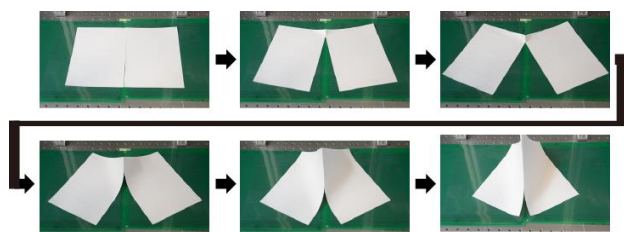


図1 静電アクチュエータによるシート立体構造生成

本研究では、そのような可変立体構造へのプロジェクションマッピングシステムの将来的な実現に向けて、その基盤技術の構築を試みた。具体的には、距離情報カメラ(Kinect V2)を用いてシート立体構造の計測および制御を行い、その立体構造に追従する PM を試みた。

2. 実験装置

本研究で実験用に製作した装置を図2に示す。静電アクチュエータとしては、[7]と同様に 600 μ m 間隔の三相電極がプリントされたプリント基板(表面処理済み PET シートで表面をカバー)を2枚用い、装置下部に並べて配置した。文献[8]に示された Kinect の計測精度を参考に、計測誤差が 2mm 以内となる領域に紙立体構造が収まるよう、Kinect をアクチュエータ面から約 0.85m の高さに下向きに設置した。また、映像投影用プロジェクタを Kinect から約 30cm 奥、アクチュエータ面から約 1.2m の高さに下向きに設置した。駆動対象となるシートとしては、[7]と同じく、A4 サイズの PPC 再生紙の裏面に、表面処理された PET シートを貼り付けたものを用いた。PET シートの表面処理は、駆動時の摩擦低減および表面抵抗率調整のために用いられる。実験では、シート中央に、図1のように一部分(約 20mm)を残して切り込みを入れた。

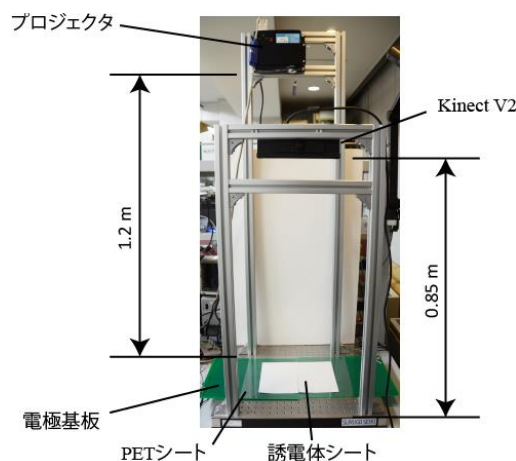


図2 実験装置外観

^{†1} 東京大学大学院 工学系研究科

3. プロジェクションマッピング

変形する立体構造への PM を行うにあたっては、リアルタイムでの投影面のメッシュ生成が必要となる。そのため、PM システムの構築にはメッシュや 3 次元空間を取り扱うことが容易な 3 次元ゲームエンジン及び統合開発環境である Unity を用いた。プロジェクションマッピングは以下の手順で行った (図 3)。

Kinect により、静電アクチュエータにより形成されたシート立体構造を撮像し、その距離情報をもとに Unity 内の仮想空間にシート立体構造 (および、その周囲の平面) のメッシュを生成する。メッシュにはテクスチャを貼り付け、必要に応じてメッシュ上に仮想物体を配置する。また、現実の観測者の位置に該当する仮想空間内の位置に仮想観測者を配置し、その視点からの射影をメッシュ上に投影する。その投影結果をプロジェクタの視点から撮影し、現実空間において投影する。これにより、観測者視点で見た場合において仮想物体の立体感が保たれる。なお、今回の実験では、処理負荷軽減のため、Kinect からの距離情報は距離画像平面において 1/16 にダウンサンプリングしている。

実際に PM を行った様子を図 4 に示す。ここでは静電アクチュエータを用いず、予め折り曲げた紙を用い、高さに応じて雪山が表現されるようメッシュを自動彩色し、その山を鹿 (仮想物体) が最高地点に向かって登るという設定の PM を行った。この手法を用いることで特定の位置から見た場合に限るが仮想物体 (鹿) の立体感を保つことができることを確認した。今回の実験では、観測者視点は固定して、現実空間での観測者位置を計測して、仮想空間内の仮想観測者位置をリアルタイムに更新すれば、視点の位置を限定しない PM も可能である。

4. 静電アクチュエータの制御

本システムでは、PM の対象となる投影面が静電アクチュエータにより変形可能な点の特徴となる。本節では、静電アクチュエータによるシート立体構造の制御手法について述べる。今回、静電アクチュエータには、3 相電極に対して、 $[+V, -V, 0]$ の 3 相パルス電圧を 1.67Hz で印加した。パルス波形の生成には DSP システム (d-space 社 DS1104) を用い、電圧増幅率 1000 倍の高電圧アンプ (NF 回路設計システム, High Voltage Power Amplifier) によって増幅した後、アクチュエータ電極に印加した。2 枚の静電アクチュエータ電極には、アクチュエータ上のシートが互いに逆方向に駆動するように、電圧の組み合わせ順序を反転して印加した。

立体構造の生成には、シートの左右部分に、それぞれ外向きの搬送力を与えてシートの切り込みを広げる (図 1 前半)。切り込む部分が十分に開いた後、搬送方向を内向きに切り替えて、中央部分を隆起させる (図 1 後半) [7]。今回、第 1 段階の外向きの駆動には、 $V=600[V]$ で 10 秒間、搬送

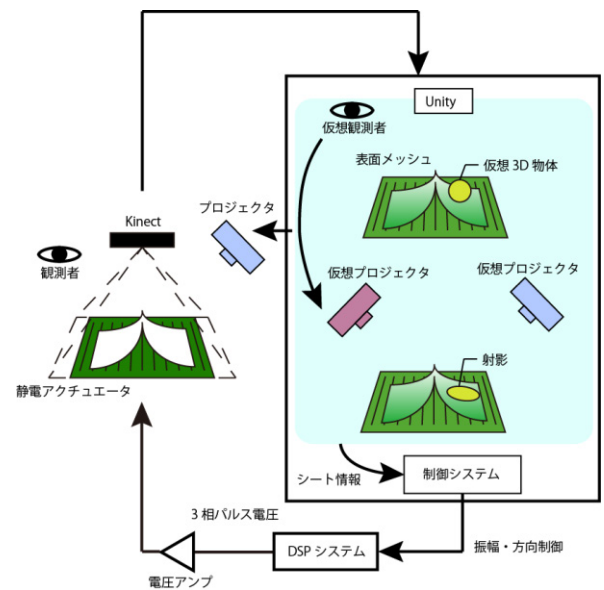


図 3 システム概要

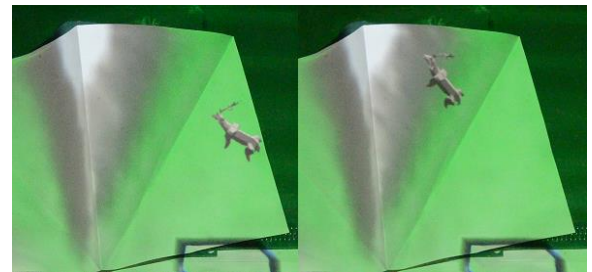


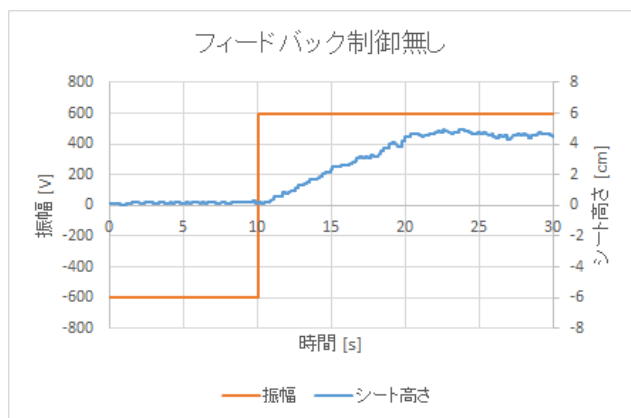
図 4 Kinect により生成したメッシュへの PM の例

力を与えた。搬送方向を内向きに切り替えた後は、Kinect から計測されるシート高さ情報に基づき、静電アクチュエータの駆動電圧 V を PI 制御した。なお、パルスの周波数は常に 1.67Hz のまま固定した。

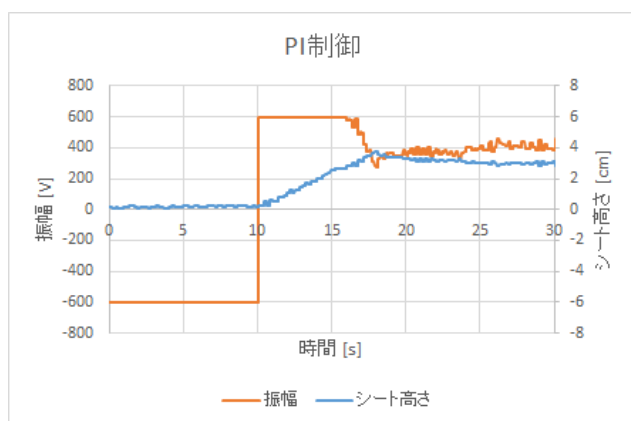
まず、比較のため、PI 制御を行わず内向きに搬送し続けた場合の結果を図 5(a) に示す。図に示されたシート高さは、Unity 内に形成されたメッシュの最高地点の高さである。Kinect の情報をダウンサンプリングしているため、現実のシートには、部分的にこれよりも高い箇所も存在した。この結果から分かる通り、内向きに駆動を続けた場合、紙の復元力とアクチュエータの搬送力が釣り合う高さ (この例では 5cm 程度) でシートの形状が維持される。

一方、図 5(b) はシート高さと目標シート高さの差分をもとに駆動電圧振幅 V を PI 制御した結果である。ここでは、目標高さ $h_{ref} = 3 [cm]$ 、 $K_p = 300 [V/cm]$ 、 $K_i = 50 [V/cm \cdot s]$ とし、駆動電圧の上限値を 600V とした。結果を見ると、0.7cm 程度のオーバーシュートの後に目標である 3cm の高さを維持していることが分かる。この定常状態での電圧振幅は 400V 程度であり、この電圧値におけるアクチュエータ搬送力とシート復元力とが釣り合っていると考えられる。

以上のように、Kinect を用いた形状計測と駆動電圧の PI 制御によって任意の高さの維持が可能であることが確認できた。



(a) フィードバック制御なし



(b) PI 制御

図 5 静電アクチュエータによるシート高さの制御
(振幅の正負は静電アクチュエータの駆動方向を表す。)

5. 静電アクチュエータ制御と PM

上述の PM 手法と静電アクチュエータ制御を組み合わせることで、可変立体形状への映像投影実験を行った。

結果を図 6 に示す。一連の写真は駆動制御と PM の様子を撮影した動画から切り出したスナップショットである。この例では「海洋上での火山島の誕生」をテーマとし、青い海の中から噴火とともに火山が成長し、最終的に火山活動が終わり緑の島となるまでの様子を PM した。静電アクチュエータによりシートを山状に盛り上げ、その変形動作に合わせて火山活動の様子を投影した。シート高さが事前に設定した 4cm 程度となった後は、緑の山を投影している。噴火の噴煙や炎は Unity 内で立体構造物として表現し、前述の手法によりシート上（および周辺）に投影した。山と海の表現は、各部の高さに応じてメッシュを彩色することで行った。

今回の事例では投影対象となるシート形状に成約があることから、必ずしもリアルな表現とはならないが、平面的なプロジェクションマッピングとは異なり、対象物が実際に隆起することによって、立体感のある表現が可能となった。

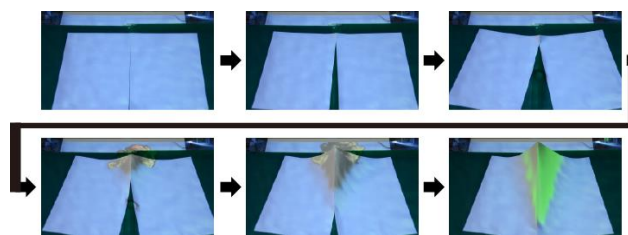


図 6 可変立体構造への PM 例

6. 結論

本研究では静電アクチュエータによって生成されるシート立体構造の変形過程に着目し、その映像メディア応用について検討した。具体的には、変形に合わせて映像投影 (PM) を行うことで、立体感に優れた PM 手法の開発をめざした。

提案システムでは投影対象が変形するため、リアルタイムな投影面メッシュ生成が必要となる。本稿の事例では、Unity と Kinect を用いたシステムにより、対象面の形状をリアルタイムで取り組み、投影面メッシュを生成した。これにより、静電アクチュエータによって変形されるシート形状を追従しながら、プロジェクションマッピングを実現することができた。

今回の手法では制御パラメータを、単純にシートの最大高さとしたが、今後、制御パラメータ数を増やすことで、隆起形状自体の制御や、隆起位置の制御なども実現したい。これにより、より幅広い映像表現が可能になると期待できる。

参考文献

- [1] John M. Hedgepeth. Structures for remotely deployable precision antennas. 1989.
- [2] Kuribayashi Kaori, Tsuchiya Koichi, You Zhong, Tomus Dacian, Umemoto Minoru, Ito Takahiro, Sasaki Masahiro. Self-deployable origami stent grafts as a biomedical application of Ni-rich TiNi shape memory alloy foil. Materials Science and Engineering: A, Vol. 419, No. 1-2, pp. 131-137, 2006.
- [3] Sung-Jin Park, Mattia Gazzola, Kyung Soo Park, Shirley Park, Valentina Di Santo, Erin L Blevins, Johan U Lind, Patrick H Campbell, Stephanie Dauth, Andrew K Capulli, et al. Phototactic guidance of a tissue-engineered soft-robotic ray. Science, Vol. 353, No. 6295, pp. 158-162, 2016.
- [4] Greg Saul, Cheng Xu, and Mark D Gross. Interactive paper devices: end-user design & fabrication. In Proceedings of the fourth international conference on Tangible, embedded, and embodied interaction, pp. 205-212. ACM, 2010.
- [5] Jie Qi and Leah Buechley. Animating paper using shape memory alloys. In Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, pp. 749-752. ACM, 2012.
- [6] 新野, 柄川, 樋口. 静電気力による紙送り機構. 精密工学会誌. Vol. 60. No. 12. pp. 1761-1765. 1994.
- [7] 莫, 山本. 静電アクチュエータによるシート立体構造生成の提案. ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集. 2017 巻. pp. 2A2-B04, 2017.
- [8] Lin Yang, Longyu Zhang, Haiwei Dong, Abdulhameed Alelaiwi, Abdulmotaheb El Saddik. Evaluating and improving the depth accuracy of Kinect for Windows v2. IEEE Sensors Journal, 15(8), 4275-4285. 2015.