

平成30年6月25日現在

機関番号：13501

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2015～2017

課題番号：15K00267

研究課題名（和文）折り紙技法を活用したフレキシブルディスプレイにおけるインタラクションの実現

研究課題名（英文）Designing interactions for Origami-based deformable surfaces

研究代表者

木下 雄一郎（KINOSHITA, Yuichiro）

山梨大学・大学院総合研究部・准教授

研究者番号：70452133

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,600,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では折り紙テセレーション技法を工学的に応用し、独特な折り構造を有する新たなフレキシブルディスプレイ「Origami Tessellation Display」のコンセプト提案した。まず、折り紙テセレーションに適したインタラクション方法についてジェスチャ導出実験にもとづく調査を行った。その結果、折り紙テセレーションの持つ3次元構造が、形状変化による多様な操作を可能にすることが確認された。次にプロトタイプシステムを構築し、調査により得られたジェスチャを用いた地図アプリケーションを実装した。さらにこれを拡張し、協調作業テーブルトップ環境や形状変化デジタルサイネージなどへの応用の可能性を示した。

研究成果の概要（英文）：This study proposed the idea of Origami Tessellation Display, an origami-based input/output device that has a flexible and unique deformable surface. Possible interactions for Origami tessellation surfaces were primarily investigated using a gesture elicitation study. The results showed that their three-dimensional structure afforded deformable gestures and enabled a variety of interactions. A prototype display system with a map application was also implemented using the observed gestures. In addition, the study demonstrated possible extensions of the tessellated surfaces such as a tabletop environment for cooperative work and a deformable public display.

研究分野：ヒューマンコンピュータインタラクション，感性情報処理

キーワード：フレキシブルディスプレイ インタラクション設計 折り紙テセレーション技法 ユーザインタフェース 情報表現

1. 研究開始当初の背景

近年、新たなディスプレイ素材として、有機 EL や電子ペーパーといった薄く柔軟な紙状の素材が開発され、インタラクションの研究分野においても注目を集めている。ディスプレイの表示部分がフレキシブルに変形することで、従来のタッチパネルにはない、ひねる、曲げるなどのジェスチャによる入力も可能となる。フレキシブルディスプレイにおけるインタラクションの基礎的研究として、Lee ら (2010) は最適なインタラクション手法のユーザ中心設計を行っている。また、ディスプレイの曲げによって MRI 画像の閲覧やアニメーションの操作などが行える Flexpad (Steimle et al., 2013) など、フレキシブルディスプレイの特性を応用したインタラクション研究も行われている。ただし、これまでの研究の多くはシート状のフレキシブルディスプレイの使用を想定した研究である。

一方で、紙を折ることによって幾何学的な基本パターンを平面に充填させる、折り紙テッセレーションと呼ばれる技法が国内外で注目されている。折り紙や折り紙テッセレーションの工学的応用も模索されており、人工衛星に搭載された太陽電池の収納・展開に利用されているミウラ折りや、折り紙テッセレーション技術を応用した軽量かつ強靱なトラスコアパネル (Nojima and Saito, 2006) などが知られている。ただし、工学的応用の広がりには現時点では限定的である。

このような中、本研究代表者、分担者のグループでは折り紙テッセレーションの入出力装置への応用の可能性について議論してきた (Kinoshita et al., 2014)。折り紙テッセレーションは、一般のシート状のフレキシブルディスプレイと異なる独特な折り構造や立体形状を有す。我々が行った予備実験では、ひねる、曲げるなどに加え、盛り上げる、広げるなどといった多様なジェスチャが可能であることが示されている。入力装置として折り紙テッセレーションを活用することでユーザにとってより自然なインタラクションの実現が期待される。また、その立体形状を活用することで、出力装置としてもこれまででない情報表現が実現可能である。

本研究では図1に示す Water Bomb (Gjerde, 2008) と呼ばれる種類の折り紙テッセレーションに注目する。この特徴として、テッセレーションを引っ張ることで、通常時には隠れて見えない新たな折り面が現れることがあげられる。また、このテッセレーションには、曲げることで中心部が盛り上がり半球の形状をとると



(b) 新たな折り面への情報表示
(b) 曲げによる形状変化
図1 折り紙テッセレーションの外観 (Water Bomb)

いう特徴もあり、この形状自体を情報提示に活用することも可能である。

2. 研究の目的

本研究では、以下の3段階のプロセスによって、折り紙テッセレーションの独特な形状を生かしたディスプレイ (以下、Origami Tessellation Display: OTD) のインタラクション手法について調査するとともに、OTD プロトタイプの実装を行い、その情報表現の可能性を示す。

(1) まず、OTD に適したジェスチャインタラクションの方法について、地図アプリケーションを対象に、ユーザ中心設計の手法にもとづく調査を行う。

(2) 次に、OTD のプロトタイプシステムを構築し、(1)で設計したインタラクションを用いた地図アプリケーションを実装する。

(3) 最後に、(2)で構築したプロトタイプシステムを拡張し、協調作業テーブルトップ環境や形状変化デジタルサイネージなどへの応用の可能性を示す。

3. 研究の方法

(1) OTD におけるインタラクション設計

まず、折り紙テッセレーションに適したインタラクションを明らかにするため、18名の実験協力者を対象としたジェスチャ導出実験を実施した。実験では、A4サイズのフレキシブルディスプレイを想定した、30 cm × 21 cm の折り紙テッセレーション8種類、一般的なシート状のフレキシブルディスプレイを想定した「紙」、より柔軟な変形が可能な「布」の計10種類のモックアップを用い、地図ナビゲーションアプリケーションを想定した実験を行った。

地図の移動、拡大・縮小、経路検索など、8種類の機能(コマンド)を実験協力者に提示し、協力者はそれぞれの機能を実行するためにふさわしいと思ったジェスチャを各モックアップに対して行った。また、実験終了後、質問紙によって、各モックアップが地図アプリケーションにどの程度適しているのかを7段階のリッカート尺度で評価した。

(2) OTD のプロトタイプシステムの構築

地図ナビゲーションのアプリケーションを実装するため、まず、OTD のプロトタイプシステムをプロジェクタを用いて構築した。図2にプロトタイプの側面図を示す。床から90 cm の高さのテーブル

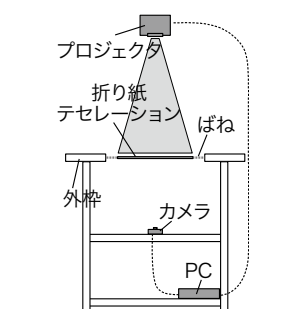


図2 プロトタイプシステム

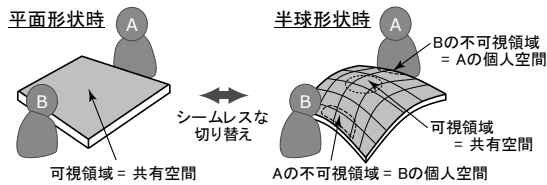


図3 同一テセレーション上での共有空間と個人空間の実現

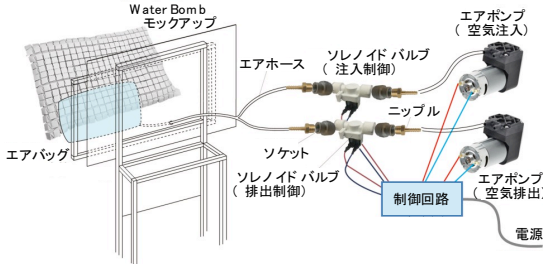


図4 空気式アクチュエータの構成



(a) 1本指でスワイプ (b) ねじる
(c) 一部を盛り上げる (d) 辺を引っ張る

図5 観測されたジェスチャの一例

トップに外枠を設置し、その内側に 30 cm × 21 cm の折り紙テセレーションのモックアップを設置した。テセレーションと外枠はばねを使って繋ぎ、ユーザが自由にテセレーションを操作できるようにした。テセレーションの裏側に複数のマークを配置し、テーブルトップ下部に設置されたカメラでそれを読み取ることでテセレーションの形状を推定した。推定された形状によってユーザが意図した機能（コマンド）を判別し、それに応じてコンテンツを動的に生成した。コンテンツは上部のプロジェクタから投影した。

(3) OTD のプロトタイプシステムの拡張

プロトタイプシステムの構築に用いた折り紙テセレーションを 90 cm × 70 cm のものに拡張し、協調作業テーブルトップ環境を構築した。協調作業環境においては、共有空間内いかにシームレスに個人空間を設けるかという点が問題とされている。本研究で使用する Water Bomb と呼ばれるテセレーションは、曲げることで中心部が盛り上がり半球の形状をとるため、ユーザの手前部分の領域は折り面に隠れ、他のユーザからは見えない。そこで、図3のように、ユーザの手前を個人空間、中央を共有空間とし、テセレーション上における共有空間と個人空間の共存を可能とした。

また、OTD のプロトタイプの表示面を床に

表1 観測された形状変化の種類

モックアップ	変形の種類
紙	曲げる, 折る, 振る
布	曲げる, 折る, 引っ張る, つまむ, 持ち上げる
Water Bomb (中)	曲げる, 引っ張る, 盛り上げる, 押し込む, ひねる, 隙間を広げる, 振る
蛇腹	曲げる, 引っ張る, 盛り上げる, ひねる, 縮める, つまむ

対して垂直に設置することで、OTD をデジタルサイネージとして活用することも検討した。折り紙テセレーションは、40 インチのサイネージを想定した 88 cm × 56 cm のものである。図4のように、テセレーション内部にエアバッグとエアポンプからなる空気式アクチュエータを複数組み込み、ディスプレイへの表示コンテンツに応じてその形状を制御することで、デジタルサイネージへの誘目性・インタラクティブ性の向上を実現した。

4. 研究成果

(1) OTD におけるインタラクション設計

① 観測されたジェスチャ

ここでは、計 10 種類のモックアップのうち、特徴的な結果が見られた紙、布、折り紙テセレーション 2 種類 (Water Bomb (中)、蛇腹) について言及する。観測された代表的なジェスチャを図5に示す。

本研究では、導出するジェスチャを形状変化を伴うものに限定しなかったため、モックアップの形状変化を伴わない、タップ、スワイプ、ピンチといったジェスチャも含めて、提示された各機能を実行する操作として実験協力者が最もふさわしいと考えたジェスチャが収集されている。ここで、それぞれのモックアップについて観察された全ジェスチャに占める形状変化を伴うジェスチャの割合を調べたところ、折り紙テセレーション 2 種類 (Water Bomb (中)、蛇腹) に対する形状変化を伴うジェスチャの割合は、それぞれ 49.3%、66.7%と紙 (12.5%)、布 (36.8%) に比べて高かった。これは、折り紙テセレーションの持つ独特な折り構造がアフォーダンスの役割を果たし、形状変化による操作を誘発したものと考えられる。

② ジェスチャの多様性

前述の 4 種類のモックアップについて観察された形状変化を伴うジェスチャを、ジェスチャの種類・特徴ごとにグループ化したものを表1に示す。紙、布では、それぞれ 3 種類、5 種類であるのに対し、折り紙テセレーションでは、6~7 種類であり、盛り上げる、押し込む、ひねる、縮めるなど、独特のジェスチャが観測されていることが確認できる。ここで、各モックアップで観測されたジェスチャの多様性を定量的に調査するために、Wobbrock ら (2005) の Agreement 値を参考に、各実験協力者が行ったジェスチャの一致度を以下の式で定義した。

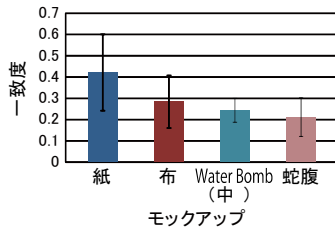


図6 各モックアップにおけるジェスチャの一致度

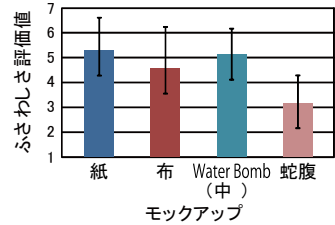


図7 モックアップの平均ふさわしさ評価値

$$I = \sum_{i=1}^r \left(\frac{N_i}{N} \right)^2$$

ここで、 N はある機能に対して観測されたジェスチャの総数であり、本実験の実験協力者数は18名であるため、 $N=18$ である。また、 N_i はその機能に対して導出されたあるジェスチャ i の総数であり、 r はその機能に対して観測されたジェスチャの種類数の総数である。一致度 I は、その値が0に近づくほど同様のジェスチャが少ないことを示すため、この値が低いモックアップは入力ジェスチャの多様性が高いことを意味する。すべての機能における一致度の平均値を前述の4種類のモックアップについて図6に示す。これより、折り紙テセレーション2種類(Water Bomb(中)、蛇腹)は、シート状のフレキシブルディスプレイを想定した「紙」および、より柔軟な変形が可能な「布」よりも入力ジェスチャの多様性が高いことがわかる。これにより、フレキシブルディスプレイ素材としての折り紙テセレーションが、より多彩なジェスチャを実現可能であることが示された。

③各モックアップのふさわしさ

実験協力者は、質問紙を通して、各モックアップが地図アプリケーションにどの程度適しているのかを7段階の尺度で評価した。この平均評価値を前述の4種類のモックアップについて図7に示す。ここで、この評価値が高いモックアップほど、地図アプリケーションに適していることを示す。評価値は「紙」「Water Bomb(中)」で高い値を示した。これは変形の制約が少ないため、ユーザが適切だと考えたジェスチャが行いやすかったためであると考えられる。しかし、より変形の自由度が高い「布」の評価はこれらと比較して高くはなかった。これは、片手で形状の維持ができないという布の特徴によるものであると考えられ、片手での形状維持が可能であることがフレキシブルディスプレイのジェスチャインタラクションに重要であることが示唆

表2 観測回数が多い上位3ジェスチャ

機能	ジェスチャ	観測回数
地図の移動(上下)	上下の辺を裏側へ曲げる	4
	移動したい方向へスワイプ	4
	移動したい方向へ傾ける	3
地図の移動(左右)	左右の辺を裏側へ曲げる	5
	移動したい方向へスワイプ	3
	左右の辺のボタンを押す	3
地図の移動(斜め)	角を裏側へ曲げる	4
	移動したい方向へスワイプ	4
	移動したい方向へ傾ける	2
拡大	拡大したい地点を盛り上げる	4
	2つに分けるように大きく曲げる	4
	左右に引っ張りつつ盛り上げる	2
縮小	縮小したい地点を押し込む	11
	ピンチイン	3
	縮小ボタンを押す	3
住所表示	表示したい地点をタップ	12
	表示したい地点を長押し	2
	表示したい地点をタップして盛り上げる	1
衛星写真	切り替えボタンをタップ	5
	一度90度傾けてから戻す	2
	真ん中を盛り上げる	2
経路検索	1点目をタップした後もう1点をタップ	3
	2点を同時にタップ	3
	2点をタップしながら両手で引っ張る	2

された。また、最も評価が低かった「蛇腹」については、1名の実験協力者が実験後に「蛇腹で折られた折り紙ディスプレイは凹凸が邪魔で地図が見づらくなりそう」と述べており、平面の存在についてもフレキシブルディスプレイの要件として考慮すべきであることが明らかになった。

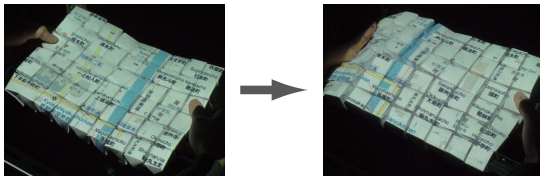
④折り紙テセレーションに適したジェスチャ

観測されたジェスチャの観測回数にもとづき、折り紙テセレーションに適したジェスチャを考察する。ここでは、②において入力ジェスチャの多様性が高く、かつ③のモックアップのふさわしさの検討において、評価が高かった「Water Bomb(中)」を取り上げる。表2に機能ごとに観測回数が多い上位3ジェスチャとその観測回数を示す。この結果より、地図を移動させる機能に対しては、対応する方向の辺を裏側へ曲げるジェスチャ、地図の拡大・縮小に対しては、盛り上げる、押し込むジェスチャが折り紙テセレーションに適したインタラクション方法であるといえる。

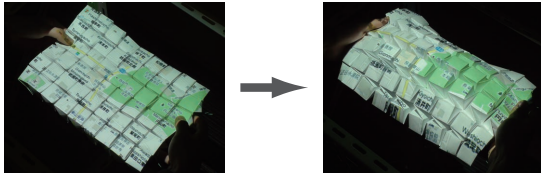
(2) OTDのプロトタイプシステムの構築

①地図ナビゲーション

OTDのプロトタイプシステムでは、(1)のOTDにおけるインタラクション設計において、折り紙テセレーションに適したジェスチャとして抽出されたジェスチャによる地図ナビゲーションを実装した。対応する方向の辺を裏側へ曲げることで地図を移動させる操作、ディスプレイの中央部を盛り上げることで地図を拡大する操作、逆に中央部を押しこむことで縮小する操作を実行可能である。各ジェスチャによる操作の一例を図8に示す。



(b) 地図の移動 (左右)



(b) 拡大

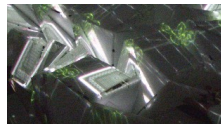
図8 実装した地図ナビゲーションの一例



図9 隙間への街並み雰囲気可視化



(a) プロトタイプ



(b) 個人空間への情報の表示

図10 協調作業テーブルトップ環境

② テセレーションの構造を活用した機能

地図ナビゲーションに加え、テセレーションの構造を活用した機能として、街並みの雰囲気を可視化し表示する機能を実装した。テセレーションの折り面に地図が表示されている状態で、テセレーションを引っ張ることで折り目に溝が現れる。ここに、図9に示すように地図の位置に対応する街並みの雰囲気を（例：伝統的なー現代的な）を色彩とその濃淡で可視化した。街並み雰囲気可視化データは、研究代表者らによる過去の研究成果（木下ら、2016）を利用した。

③ ユーザエクスペリエンスの調査

アプリケーション実装後、ユーザエクスペリエンスの調査を目的とした評価実験を8名の評価協力者を対象に実施した。協力者は、OTDのプロトタイプシステムを十分に操作した後、「地図ナビゲーション操作が容易に行えた」、「多彩な操作が可能だと感じた」、「操作に新鮮さを感じた」という評価項目に対し、7段階のリッカート尺度（1が「全くそう思わない」、7が「非常にそう思う」）で評価した。また、地図ナビゲーションおよびテセレーションの構造を活用した機能に関するインタビューに回答した。

各評価項目に対する全評価協力者の平均評価値は、地図ナビゲーション操作の容易さに関しては4.9、操作の多様さに関しては4.8、操作の新鮮さに関しては6.4であった。いずれの評価も尺度の中央の値である4を上回っ



図11 デジタルサイネージ環境におけるアプリケーションの様子

ており、本 OTD のプロトタイプシステムによるジェスチャ操作が好意的に受け止められていることを確認した。インタビューでは、地図ナビゲーションについて「地図ナビゲーション操作が旅行をしているようだった」、「OTD を変形させることで行う地図ナビゲーション操作は、普通の地図ナビゲーション操作よりも臨場感がある」など、従来の地図アプリケーションにない体験を楽しんだという回答が多くみられた。テセレーションの構造を活用した機能については、「隙間の部分が見やすかった」「色を使うと視覚的にわかりやすい」など、折り目に現れる溝の活用が効果的であったことが示唆される意見が挙げられた。

(3) OTD のプロトタイプシステムの拡張

① 協調作業テーブルトップ環境

OTD をテーブルトップ環境に拡張するに伴い、剛性が必要となる。そこで、折り紙テセレーションの素材としてプラスチックダンボールを使用して図10(a)に示すようなプロトタイプを構築した。プラスチックダンボールは厚みを持つため、これを折り曲げて、紙と同様の折り紙構造を再現することは困難である。そこで、折り線を境に複数のパーツに分割し、各パーツをゴムで接続することで同様の構造を実現した。

さらに、トランプ対戦ゲームのアプリケーションも実装した。本アプリケーションでは、互いの伏せトランプを OTD の中央表面、すなわち共有空間へ投影することで、手札の枚数という情報を公開する。一方、非公開情報である伏せトランプの内容を持ち主にだけ見えるようにユーザの手前部分の折り目に現れる溝、すなわち個人空間に表示する。図10(b)にその様子を示す。ユーザは OTD 表面へのタッチや、OTD の溝を広げることでゲームの操作を行う。

② 形状変化デジタルサイネージ

空気アクチュエータによる形状制御として OTD の「盛り上がり」、「盛り上がりの繰り返し」、「盛り上がり位置の移動」の3種類を実現した。「盛り上がり」の制御は単一のエアバッグにポンプで空気を送入することによって実現される形状変化である。また、空気の送りと排出を交互に行うことで「盛り上がりの繰り返し」の制御を、空気の送りを隣り合うエアバックに対し順番に行うことで「盛り上がり位置の移動」の制御を実現した。

加えて、OTDの「盛り上がり位置の移動」によってデジタルサイネージへの誘目性を向上させるアプリケーションも実装した。本アプリケーションは図11に示すように投影する広告コンテンツ内の商品の形状や位置に合わせて、デジタルサイネージが自動で盛り上がるものである。これによって周囲の歩行者に対してコンテンツの誘目性を向上させる。

(4) まとめ

以上より、本研究では、折り紙テセレーションの独特な形状を生かしたディスプレイに適したインタラクション手法について知見を示すとともに、プロトタイプの実装を行い、その情報表現の可能性および拡張性を示した。本研究によって得られた一連の知見は、折り曲げ可能なディスプレイの素材が一般の市場に普及した際のインタラクションの設計や情報表現の指針として用いることができる。

<引用文献>

- ① Lee, S. et al., How users manipulate deformable display as input devices, Proc. CHI 2010, pp. 1647–1656, 2010.
 - ② Steimle, J. et al., Flexpad: Highly flexible bending interactions for projected handheld displays, Proc. CHI 2013, pp. 237–246, 2013.
 - ③ Nojima, T. and Saito, K., Development of newly designed ultra-light core structures, JSME International Journal Series A, Vol. 49, pp. 38–42, 2006.
 - ④ Kinoshita, Y. et al., Origami tessellation display: Interaction techniques using Origami-based deformable surfaces, Ext. Abst. CHI 2014, pp. 1837–1842, 2014.
 - ⑤ Gjerde, E., Origami Tessellations: Awe-Inspiring Geometric Designs, A K Peters/CRC Press, 2008.
 - ⑥ Wobbrock, J.O. et al., Maximizing the guessability of symbolic input, Ext. Abst. CHI 2005, pp. 1869–1872, 2005.
 - ⑦ 木下雄一郎 ほか, 街並みイメージの可視化にもとづく感性街歩きマップの構築, ヒューマンインタフェース学会論文誌, Vol. 18, No. 1, pp. 45–56, 2016.
- #### 5. 主な発表論文等
- [学会発表] (計9件)
- ① 坂本凌, 木下雄一郎, 郷健太郎, 形状が変化するデジタルサイネージにおける誘目性の検討, 情報処理学会研究報告HCI, ヒューマンコンピュータインタラクション研究会報告, Vol. 2018-HCI-177, No. 28 (8 pages), 東京, 2018.3.17.
 - ② 金高遥, 郷健太郎, 木下雄一郎, 誘目性向上を目的とした形状変化デジタルサイネージの実現, 第23回電子情報通信学会東京支部学生会研究発表会講演論文集, No. 17 (1 page), 東京, 2017.3.3.
 - ③ 坂本凌, 木下雄一郎, 郷健太郎, フレキシブルディスプレイを活用したデジタルサイネージにおける形状変化の検討, ヒューマンインタフェースシンポジウム2017講演論文集, pp. 443–448, 大阪, 2017.9.6.
 - ④ 塚田悠斗, 白神翔太, 木下雄一郎, 郷健太郎, 形状変化特性を変更可能なメタ・インタフェース実現にむけたジェスチャ操作の調査, 情報処理学会第79回全国大会講演論文集, No. 4ZA-03 (2 pages), 名古屋, 2017.3.17.
 - ⑤ 坂本凌, 木下雄一郎, 郷健太郎, 折り構造をもつフレキシブルディスプレイにおける入力ジェスチャの検討, ヒューマンインタフェースシンポジウム2016講演論文集, pp. 707–714, 東京・小金井, 2016.9.9.
 - ⑥ 白神翔太, 増田愛美, 木下雄一郎, 郷健太郎, 折り構造をもつ形状変化ディスプレイにおける出力表現の検討, ヒューマンインタフェースシンポジウム2016講演論文集, pp. 217–224, 東京・小金井, 2016.9.7.
 - ⑦ 小宮山憂, 木下雄一郎, 郷健太郎, 折り紙技法を活用したフレキシブルディスプレイにおける形状認識およびジェスチャ推定, 情報処理学会第78回全国大会講演論文集, No. 2Y-09 (2 pages), 横浜, 2016.3.10. (大会学生奨励賞受賞)
 - ⑧ 坂本凌, 木下雄一郎, 郷健太郎, 多様な折り紙技法を活用したフレキシブルディスプレイにおけるジェスチャの導出, 情報処理学会第78回全国大会講演論文集, No. 2Y-08 (2 pages), 横浜, 2016.3.10.
 - ⑨ 増田愛美, 木下雄一郎, 郷健太郎, 折り紙技法を活用したフレキシブルディスプレイにおける形状変化の実現, 情報処理学会第78回全国大会講演論文集, No. 1Z-05 (2 pages), 横浜, 2016.3.10. (大会学生奨励賞受賞)
- [その他]
- ① 研究成果発表文献リスト (山梨大学研究者総覧), <http://nerdb-re.yamanashi.ac.jp/Profiles/337/0033648/profile.html>
- #### 6. 研究組織
- (1) 研究代表者
木下 雄一郎 (KINOSHITA, Yuichiro)
山梨大学大学院・総合研究部・准教授
研究者番号: 70452133
- (2) 研究分担者
郷 健太郎 (GO, Kentaro)
山梨大学大学院・総合研究部・教授
研究者番号: 50282009