

令和 6 年 5 月 31 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20H04203

研究課題名（和文）ヒトの視覚特性を考慮した線画生成と効果付与

研究課題名（英文）Line Drawing and Stylization in Consideration of Human Visual System

研究代表者

山口 泰（Yamaguchi, Yasushi）

東京大学・大学院総合文化研究科・教授

研究者番号：80210376

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,700,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では3次元形状の表現法として線画生成技術について研究を進めた。まず曲面近傍の積分量にもとづく特徴線抽出技術をベースにして、線画生成手法を検討した。さらに3次元形状データとヒトが描いた線画との組を機械学習することで線画を生成する方法を試みた。さらに効果付与については、線画における線幅や消失点などから得られる奥行き感を解析するとともに、それらを線画の効果として利用することも検討した。特に消失点など複数の線の関係から誘導される空間認知の傾向について調査を行い、3次元シーン理解におけるヒトの特性について知見を得ることができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

線画表現は多くの場面で必要とされている。たとえば、機械や建造物の設計図、利用マニュアルの説明図などによく用いられる。機械部品などCADデータが存在すれば線画を生成することも可能だが、その場合でも人による修正が必要となっている。一方で自然物や彫像のように複雑な凹凸を持つ曲面形状の場合、適切な線画を自動的に生成することは困難である。また形状理解を促すために設計図や説明図では線幅や描き方に変化をつけるが、その調整法も自明ではない。本研究によって線画認知におけるヒトの特性を解明するとともに、その特性を利用した線画生成ならびに線画への効果付与技術への端緒が得られた。

研究成果の概要（英文）：We investigated a line drawing method based on a feature line extraction technique using integral property of a curved surface. Furthermore, we tried a method to generate line drawings by machine learning based on a set of 3D shape data and line drawings drawn by humans. In addition, we analyzed the sense of depth obtained from angles of lines and vanishing points in line drawings with regard to their scale, and also examined the use of these properties for line drawing effects. In particular, we investigated the tendency of spatial cognition induced by the relationship between multiple lines, such as vanishing points, and obtained knowledge about human characteristics in understanding 3D scenes.

研究分野：形状処理，画像処理

キーワード：線画 視覚特性 3次元形状知覚

### 1. 研究開始当初の背景

3DCGによって3次元形状データから写実的な映像を高速に得られるようになったが、線画表現は依然として重要である。たとえば、機械や建造物の設計図や利用マニュアルにおける説明図には、多くの場合、線画が用いられている。機械部品のような形状であれば、CADデータの曲線から線画を生成することも可能ではあるが、その場合でもCADデータの線をそのまま利用できず、工業イラストレータによる修正が必要となっている。自然物や彫像のように複雑な凹凸を持つ曲面形状、特に3Dスキャナによって取得されたポリゴンデータから、その曲面の凹凸を適切に表現した線画を生成する手法は確立していない。

### 2. 研究の目的

従来、尾根線や谷線は、最大主曲率の極大値や最小主曲率の極小値をとる点の軌跡として定義されてきた。しかし、3階の微分量を用いることから測定ノイズの影響を免れず、滑らかで連続した曲線を抽出することは困難であった。そこで主曲率方向や主曲率に相当するものとして、微分量に代わりに積分量を利用する手法を検討した。図1は曲面と近傍球との交差をとり、曲面の上側にある半近傍球(緑網掛け領域)を示したものである。この半近傍球の長さの最大(赤点線矢印)方向と最小(青実線矢印)方向やそれらの長さを主曲率方向や主曲率に相当するものとして利用する。その結果、積分量を用いることで微分量に基づく手法に比べて、格段に安定した(滑らかで連続した)曲線を抽出できる可能性がある。

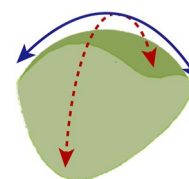


図1 積分量と曲率

一方、ヒトの描く線画と、尾根線や谷線とを比較してみると、必ずしも一致しないことが分かってきた。布のヒダなどは滑らかな波状となり、顕著に尖った部分というわけではないし、周囲より高い尾根線ないし低い谷線と限定できるものでもない。以上の経緯から、ヒトの理解に適した線画表現の解析や生成手法に関する研究の必要性を強く認識するようになった。また、機械や建造物の設計図や説明図などでは、線幅や色の濃さなどに変化をつけるが、それも経験的なものであり、理論的な裏付けがあるわけではない。本研究では、このような線に対する効果付与も含めて、3次元形状の理解を容易にする線画の性質や生成法について研究することを目指した。

以上のように、本研究では形状の積分特徴量を利用する線画生成手法、機械学習ベースの線画生成手法、線画における奥行き感の解析、の3つのサブテーマを研究の目的とした。

### 3. 研究の方法

本節では、3つのサブテーマごとに研究の方法と成果について説明する。

#### 3-1 形状の積分特徴量を利用する線画生成手法

形状の積分特徴量と線画の線について検討するなかで、描画される線にはより大域的な形状特徴との関連性があることが明らかとなってきた。図2の左右いずれの場合でも、赤い点においては局所の特徴である二面角は同じである。しかし、左は近似円筒面の一部、右は溝の底と見なされるため、前者には線を描かないが、後者には線を描くことになる。このことは局所的な形状特徴量だけでは、線を描くべきか否かを判定できないことを示している。

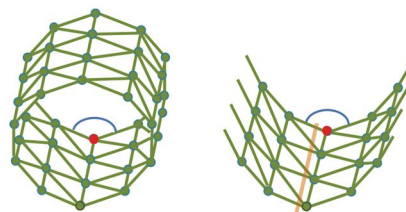


図2 大域的形状と線

そこで積分特徴量の計算にあたって異なるスケールで領域を評価することとした。つまり、積分する領域を狭い範囲から、徐々に広い範囲に変化させていき、その際の積分特徴量の変化を調べる。変化の割合が徐々に大きくなる場所は円筒面的領域、変化の割合があまり変わらない場所は丸まった角、まったく変化しない場所を尖った角として分類する。図3は、左側の形状につい

て、円筒面的領域 (No-line), 丸まった角 (Smooth), 尖った角 (Sharp) へと領域を分類した結果の画像である。形状の上部や下部に複数空いている穴の内側は円筒面的な領域,つまり線を描くべきではない領域として判定されている。尖った角がある領域は青色,丸まった角がある領域には緑色で示されている。

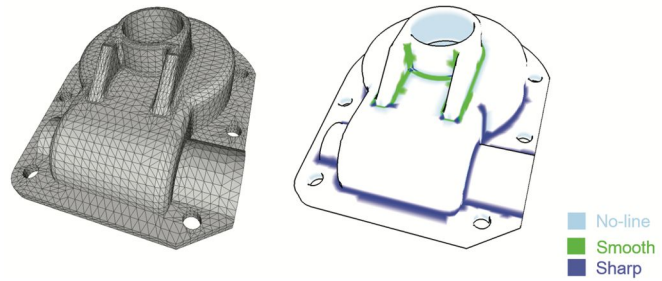


図3 領域の分類

さらに従来の線画生成手法では,描かれる線が途切れたり歪んだりする課題もあったが,その課題の要因を解析して滑らかな線を生成する手法も開発した。図4は最終的に得られた線画の結果画像である。図4上は従来手法で描かれた線画であるが,円筒面上にも短くゴミのような線が描かれている。また赤で囲まれた部分は丸みのある板であるかのように判定されて1本の線しか描かれていないうえ,途切れたり歪んだりしている。図4下は開発した手法を用いて描かれた線画である。円筒面上の短かい線は一掃されている。また板の縁は尖った角と判定されており,板の上と下とに2本の滑らかな線が描かれている。また板に空けられている小さな穴の縁にも線を描くことに成功している。

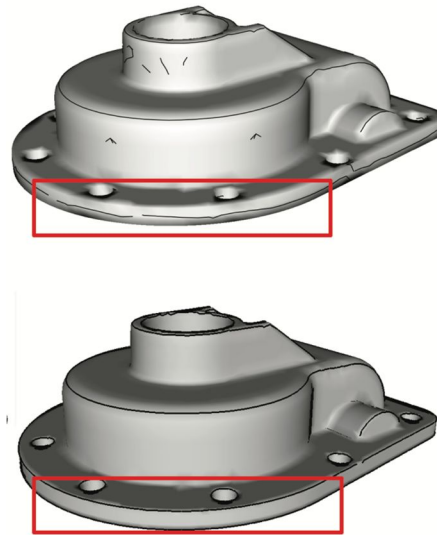


図4 線画生成の結果

### 3-2 機械学習ベースの線画生成手法

ヒトの描く線画を観察すると,必ずしも形状特徴に忠実ではないことがわかる。図5は仏像をスキャンして得られたポリゴンデータから作られた陰影画像とヒトの描いた線画を比較したものである。たとえば,頭髪部分(図中の赤い楕円内部)を比較してみると,ポリゴンデータでは頭髪を表現するためにかなり細かな間隔で多くの溝が掘られているが,線画では1本の線しか描かれていない。また,襟の端部分(図中の青い楕円内部)を見ると,ポリゴンデータからは襟の端に浅い溝が掘られているのがわかるが,線画ではくっきりとした線が3本ないし4本描かれている。このような線はヒトの感性によるもの

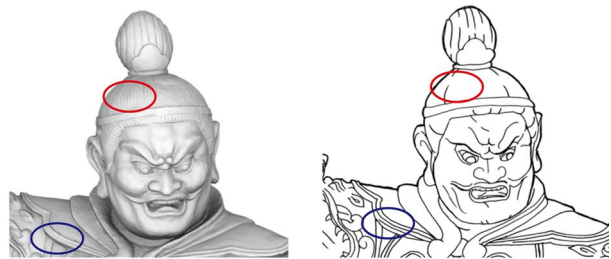


図5 陰影画像と線画の比較

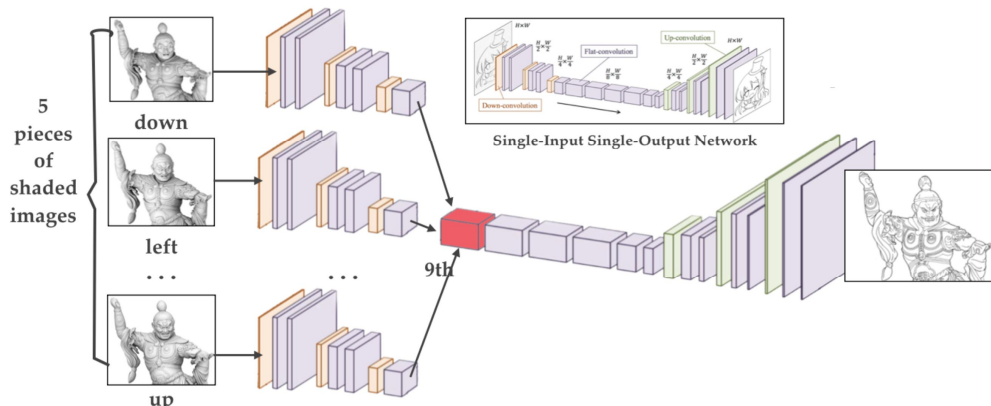


図6 陰影画像から線画への変換ネットワーク

であって、形状だけで描き分けられるものではない。

そこでポリゴンデータから得られる陰影画像をヒトの描いた線画風に変換するニューラルネットワークを学習させることとした。図6にニューラルネットワークの構造を示す。当初は右上にあるように1枚の陰影画像を入力とし、1枚の線画を出力するネットワークを検討したが、線画の特徴を十分に反映できないことがわかった。そこで陰影画像から、より多くのエッジ情報を得られるように照明条件を変えた画像を複数入力することとした。具体的には、光源を正面(カメラ方向)に配置した画像と、上下左右に30度ずつずらした4枚の画像の合計5枚の画像を入力として、線画を出力するようにした。

図7に結果画像を示す。左から陰影画像、1枚のみの入力による出力画像、5枚入力による出力画像、ヒトの描いた正解画像である。5枚の入力を用いることでヒトの描いた線画に近い出力が得られるようになったことがわかる。特に頭髪部分の線がかなり省略されるようになったことは面白いと言えよう。



図7 出力結果

### 3-3 線画における奥行き感の解析

線画で奥行き感を与える典型的な例として消失点の効果がある。図8は消失点の効果を示した例である。左右とも放射状に並んだ直線群であるが、これらの線が1枚の平面上の平行線群であると考えると、左の面の方が急傾斜であり、右は面の傾斜の方が緩やかであるように感じられる。

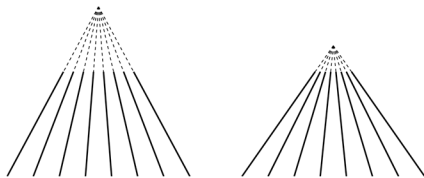


図8 消失点の効果

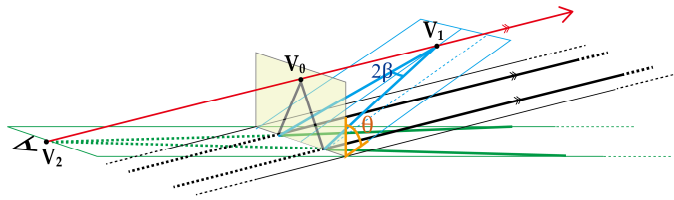


図9 奥行き曖昧さ

もちろん2次元画像である限りは、図9に示すように奥行きに関する曖昧さが残されている。黒い線で描かれた平面上の平行線は黄色い投影面上で  $V_0$  の位置に消失点を作る三角形のように見える。しかし、このような投影像を作る直線は、青い線で描かれた傾いた面上で  $V_1$  を交点とする2直線でも良いし、緑の線で描かれた逆向きに傾いた面上で  $V_2$  を交点とする2直線でも構わない。

この投影像に対する解釈は、投影像の大きさによって変化することがわかってきた。一般に望遠鏡を通して拡大された映像は、奥行き感が減少するため、面の傾きが急に感じられる。お化け坂として知られる橋のスロープが急傾斜に感じられるのは、望遠レンズで撮影した画像であるため、坂道が実際よりも急傾斜な面として解釈されるせいである。しかし、床面上に置かれた長方形を望遠鏡で観察すると、面の傾きが変化する代わりに長方形の向かい合った2辺が平行でなく、先が広がるように感じられることがある。このような現象は「双眼鏡錯視」として報告されている。我々は投影像の大きさが、平行線の載っている平面の傾き角と平行であるはずの2直線間の角の知覚(解釈)に与える影響を調べている。これまでのところ、投影像が拡大されることによって、これらの角度の解釈が変化すること、さらに面の場所(床面、壁面、天井面など)によって、解釈の変化の仕方が異なることなどが分かっている。

## 4. 研究成果

本研究では、3次元形状を適切に表現するための線画生成手法について検討を進めてきた。3つのサブテーマに関して、概ね以下のような成果が得られている。

#### 形状の積分特徴量を利用する線画生成手法

幾何学的な特徴を示すものとして線画を考えると、局所的な特徴だけでなく、ある程度大域的な特徴を加味する必要があることがわかった。異なるスケールで積分特徴量を求めることにより、形状の領域を分類し、線を描くべき場所を判定できることを確認した。

#### 機械学習ベースの線画生成手法

ヒトの描く線画を観察すると、幾何学的な特徴のみで線を描く場所を決めているわけではないことがわかった。このようなヒトのノウハウを反映させる方法として、機械学習ベースの線画生成手法を検討した。線の候補となるエッジを強調することによって、学習精度を向上できることがわかった。

#### 線画における奥行き感の解析

直線の交差する消失点によって奥行き感が得られるが、画像の大きさが奥行き感などの知覚に影響を与えることがわかった。特に平面上に載る2直線を観察する場合に、平面の傾き角と2直線の交差角に曖昧さがあるが、それらの解釈が画像の大きさで変わることを、さらに平面の位置によって解釈の変わり方に相違があることがわかってきた。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計14件（うち査読付論文 14件 / うち国際共著 6件 / うちオープンアクセス 6件）

|   |                       |
|---|-----------------------|
| 1. 著者名<br>Zhu Yan, Yamaguchi Yasushi  | 4. 巻<br>-             |
| 2. 論文標題<br>JPEG Line-drawing Restoration with Masks   | 5. 発行年<br>2023年       |
| 3. 雑誌名<br>Proc. of Smart Tools and Apps in Graphics   | 6. 最初と最後の頁<br>103-111 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.2312/STAG.20231299   | 査読の有無<br>有            |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスとしている (また、その予定である)  | 国際共著<br>-             |
| 1. 著者名<br>Sripian Peeraya, Ijiri Takashi, Yamaguchi Yasushi                                   | 4. 巻<br>27            |
| 2. 論文標題<br>Magnification Illusion - Change of Interpretation when Viewing Through a Telescope | 5. 発行年<br>2023年       |
| 3. 雑誌名<br>Journal for Geometry and Graphics   | 6. 最初と最後の頁<br>81-101  |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>なし  | 査読の有無<br>有            |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスとしている (また、その予定である)  | 国際共著<br>-             |
| 1. 著者名<br>Shi Rui, Li Tianxing, Yamaguchi Yasushi   | 4. 巻<br>550           |
| 2. 論文標題<br>Understanding contributing neurons via attribution visualization                   | 5. 発行年<br>2023年       |
| 3. 雑誌名<br>Neurocomputing  | 6. 最初と最後の頁<br>126492  |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1016/j.neucom.2023.126492                                      | 査読の有無<br>有            |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難  | 国際共著<br>該当する          |
| 1. 著者名<br>Adachi Akito, Tachi Tomohiro, Yamaguchi Yasushi                                     | 4. 巻<br>26            |
| 2. 論文標題<br>Cylindrical Dual Tiling Origami  | 5. 発行年<br>2022年       |
| 3. 雑誌名<br>Journal for Geometry and Graphics   | 6. 最初と最後の頁<br>185-205 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>なし  | 査読の有無<br>有            |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスとしている (また、その予定である)  | 国際共著<br>-             |

|   |                       |
|---|-----------------------|
| 1. 著者名<br>Zhou Mengyuan, Yamaguchi Yasushi                                    | 4. 巻<br>-             |
| 2. 論文標題<br>An Interactive Tuning Method for Generator Networks Trained by GAN | 5. 発行年<br>2022年       |
| 3. 雑誌名<br>Proc. of Smart Tools and Apps in Graphics                           | 6. 最初と最後の頁<br>151-160 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.2312/STAG.20221269                             | 査読の有無<br>有            |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスとしている (また、その予定である)  | 国際共著<br>-             |

|  |                      |
|--|----------------------|
| 1. 著者名<br>Shi Rui, Li Tianxing, Yamaguchi Yasushi                            | 4. 巻<br>-            |
| 2. 論文標題<br>Region-conscious visualization of output-targeted neuron features | 5. 発行年<br>2022年      |
| 3. 雑誌名<br>Visual Computing 2022 論文集  | 6. 最初と最後の頁<br>40:1-7 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>なし   | 査読の有無<br>有           |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難                                       | 国際共著<br>該当する         |

|  |                      |
|--|----------------------|
| 1. 著者名<br>Shi Rui, Li Tianxing, Yamaguchi Yasushi                      | 4. 巻<br>124          |
| 2. 論文標題<br>Output-targeted baseline for neuron attribution calculation | 5. 発行年<br>2022年      |
| 3. 雑誌名<br>Image and Vision Computing                                   | 6. 最初と最後の頁<br>104516 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1016/j.imavis.2022.104516               | 査読の有無<br>有           |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難                                 | 国際共著<br>該当する         |

|  |                      |
|--|----------------------|
| 1. 著者名<br>周 夢遠, 山口 泰                   | 4. 巻<br>-            |
| 2. 論文標題<br>学習済画像生成ネットワークの対話的な調整法       | 5. 発行年<br>2021年      |
| 3. 雑誌名<br>Visual Computing 2021 論文集    | 6. 最初と最後の頁<br>15:1-7 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>なし         | 査読の有無<br>有           |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著<br>-            |

|   |                     |
|---|---------------------|
| 1. 著者名<br>Sripian Peeraya, Ijiri Takashi, Yamaguchi Yasushi                             | 4. 巻<br>-           |
| 2. 論文標題<br>Binoculars' Illusion - Linear Perspective Perception in Binoculars on Ground | 5. 発行年<br>2021年     |
| 3. 雑誌名<br>Proc. of the 13th Asian Forum on Graphic Science                              | 6. 最初と最後の頁<br>34-42 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>なし  | 査読の有無<br>有          |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難  | 国際共著<br>-           |

|   |                   |
|---|-------------------|
| 1. 著者名<br>Sripian Peeraya, Yamaguchi Yasushi                  | 4. 巻<br>3         |
| 2. 論文標題<br>Hybrid image of three contents                     | 5. 発行年<br>2020年   |
| 3. 雑誌名<br>Visual Computing for Industry, Biomedicine, and Art | 6. 最初と最後の頁<br>1-8 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1186/s42492-019-0036-3         | 査読の有無<br>有        |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスとしている (また、その予定である)                        | 国際共著<br>-         |

|  |                               |
|--|-------------------------------|
| 1. 著者名<br>Shi Rui, Li Tianxing, Yamaguchi Yasushi  | 4. 巻<br>169                   |
| 2. 論文標題<br>An attribution-based pruning method for real-time mango detection with YOLO network | 5. 発行年<br>2020年               |
| 3. 雑誌名<br>Computers and Electronics in Agriculture   | 6. 最初と最後の頁<br>105214 ~ 105214 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1016/j.compag.2020.105214                                       | 査読の有無<br>有                    |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難   | 国際共著<br>該当する                  |

|  |                         |
|--|-------------------------|
| 1. 著者名<br>Yatagawa Tatsuya, Yamaguchi Yasushi, Morishima Shigeo  | 4. 巻<br>36              |
| 2. 論文標題<br>LinSS: linear decomposition of heterogeneous subsurface scattering for real-time screen-space rendering | 5. 発行年<br>2020年         |
| 3. 雑誌名<br>The Visual Computer  | 6. 最初と最後の頁<br>1979-1992 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1007/s00371-020-01915-4   | 査読の有無<br>有              |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスとしている (また、その予定である)   | 国際共著<br>-               |



|   |                     |
|---|---------------------|
| 1. 著者名<br>Shi Rui, Li Tianxing, Yamaguchi Yasushi               | 4. 巻<br>129         |
| 2. 論文標題<br>Group visualization of class-discriminative features | 5. 発行年<br>2020年     |
| 3. 雑誌名<br>Neural Networks                                       | 6. 最初と最後の頁<br>75-90 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1016/j.neunet.2020.05.026        | 査読の有無<br>有          |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難                          | 国際共著<br>該当する        |

|   |                      |
|---|----------------------|
| 1. 著者名<br>Shi Rui, Li Tianxing, Yamaguchi Yasushi                   | 4. 巻<br>-            |
| 2. 論文標題<br>Class-Discriminative Feature Group and its Visualization | 5. 発行年<br>2020年      |
| 3. 雑誌名<br>Visual Computing 2020 論文集                                 | 6. 最初と最後の頁<br>13:1-6 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>なし                                      | 査読の有無<br>有           |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難                              | 国際共著<br>該当する         |

[学会発表] 計2件(うち招待講演 0件/うち国際学会 1件)

|                             |
|-----------------------------|
| 1. 発表者名<br>安達瑛翔, 舘 知宏, 山口 泰 |
| 2. 発表標題<br>双対タイリング折紙の剛体折り   |
| 3. 学会等名<br>日本応用数理学会2021年度年会 |
| 4. 発表年<br>2021年             |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>Adachi Akito, Tachi Tomohiro, Yamaguchi Yasushi           |
| 2. 発表標題<br>Cylindrical Dual Tiling Origami                           |
| 3. 学会等名<br>SIAM Conference on Geometric and Physical Modeling (国際学会) |
| 4. 発表年<br>2021年  |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

|       | 氏名<br>(ローマ字氏名)<br>(研究者番号)  | 所属研究機関・部局・職<br>(機関番号)             | 備考 |
|-------|--|-----------------------------------|----|
| 研究分担者 | 山田 修<br>(Yamada Osamu)<br><br>(30571723)                           | 奈良県立大学・地域創造学部・特任教授<br><br>(24602) |    |
| 研究分担者 | S R I P I A N P E E R A Y A<br>(Sripian Peeraya)<br><br>(70822542) | 芝浦工業大学・工学部・助教<br><br>(32619)      |    |
| 研究分担者 | 籾内 直樹 (籾内佐斗司)<br>(Yabuuchi Naoki)<br><br>(10376931)                | 東京藝術大学・大学院美術研究科・教授<br><br>(12606) |    |

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

| 共同研究相手国 | 相手方研究機関 |
|---------|---------|
|---------|---------|