

令和 6 年 6 月 3 日現在

機関番号：14501

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K18506

研究課題名（和文）折り紙技術と4次元形状の投象を活用したグラフィクスリテラシー教育コンテンツの開発

研究課題名（英文）Development of graphics literacy educational content using paper folding technique and projection of 4-dimensional shapes

研究代表者

鈴木 広隆（Suzuki, Hirotaka）

神戸大学・工学研究科・教授

研究者番号：60286630

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,100,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、広い意味での投象を理解し先端的な教育コンテンツを開発することを目的としている。このため(A)平面の充填パターンDB構築と折り紙加工の可能性の検討、(B)4次元形状を投象した3次元形状DB構築とその活用方法の検討、(C)カリキュラム作成とフィードバックのサブテーマを設定した。(A)では、平面充填パターンを元にした折り紙加工について、装飾物を付加した場合、透過率を変化させた場合、錯視技術を用いた場合等の提案を行った。(B)では超角柱とテンセグリティ構造を組み合わせた例を提案した。(C)では汎用4次元グラフィクスライブラリの開発を行い、授業評価アンケートにより教育内容についての評価を得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

投影の本質は、次元を1つ減じることである。図学教育の中で多くの割合が割かれている3次元から2次元への投影に加え、2次元から1次元や4次元から3次元への変換も投影であり、その手法は共通している。また、高次元空間への回転（折り紙の場合、2次元図形の3次元空間内への回転と考える）は、形状の次元を1つ上げる処理である。本研究で提案した、投影と高次元空間への回転により得られる様々な形状を教材とすることで、より幅広くさらに深く投影の概念を理解することが可能となる。同時に、ここで得られた手法は、新しい形を生み出すヒントとなるものであり、工業製品のデザイン等の分野に活用することが可能である。

研究成果の概要（英文）：The objective of this research is to understand the concept of projection in a broad sense and develop cutting-edge educational content. For this purpose, sub-themes were established as follows;

(A) construction of a planar tessellation DB and consideration of the possibility of paper folding processing. (B) construction of a 4D DB that contains 3D shapes generated by projection of 4D shape and examination of its utilization method. (C) establishment of educational curriculum and its evaluation.

In (A), paper folding processing based on planar tessellation including adding decorations, changing transmittance, and using optical illusion technology were proposed. In (B), examples that combines a hyperprism structure and a tensegrity structure were proposed. In (C), a general-purpose 4D graphics library was developed and evaluations of the educational content were obtained through the evaluation questionnaire.

研究分野：図学教育

キーワード：図学教育 投影 回転 折り紙 4次元 グラフィクスライブラリ 明暗 テンセグリティ

### 1. 研究開始当初の背景

2020年の時点で、折り紙に関する技術提案は盛んに行われており、とくに曲線折りなどのデザイン性の高いもの、剛体折りなど実用性に重点を置いたものなどの提案が行われていた。本研究では、これを高次元空間への回転という枠でとらえ直している。また、4次元形状の3次元空間への投影方法についても、その時点で確立された技術である。本研究では、投影によって得られる形状の図学教育への活用という観点から様々な提案を行っている。

### 2. 研究の目的

本研究は、2次元平面を3次元形状に変換する折り紙技術と、4次元形状の3次元形状への投影に着目し、より幅広い意味での投影を理解するための教育コンテンツを開発することを目的としている。折り紙技術については、2次元平面を単位ユニットで埋め尽くす平面充填と関連付け、様々な平面充填パターンで折り目を入れた行灯を製作し、その結果生じる明暗により、形状と明暗の関係を理解させることを目的としている。4次元形状の3次元形状への投影は、技術としては確立したものであるが、投影の結果として生じる3次元形状はこれまであまりデザイン・ものづくりに活用されてこなかった。本研究は、様々な種類の投影の結果として出現する3次元形状について、デザイン・ものづくりへの活用という観点から、コンテンツ制作を行う。

### 3. 研究の方法

本研究は、(A)平面の充填パターンDB(データベース)構築と折り紙加工の可能性の検討、(B)4次元形状を投影した3次元形状DB構築とその活用方法の検討、(C)カリキュラム作成とフィードバックの3つのサブテーマから構成される。以下、それぞれのサブテーマごとに研究内容を詳述する。

(A)では、申請者らが提案している「凹凸テクスチャーを有する折り紙行灯製作手法」が、数理的もしくは文化的紋様を展開図とするものであることに注目し、それらの紋様の歴史・文化の情報を収集し、教材作成の際のバックグラウンドとするものである。基本的に、日本国内のものと、本学以外に授業を行うリトアニアのものを中心として収集する。紋様の歴史と文化の情報収集と並行し、紋様の数理的特性もDBに記録し、行灯の製作可能性と関連付けるとともに、製作された場合の明暗の特徴も記録するものとする。その上で、特に、実際に授業を行ってフィードバックを得るリトアニアの紋様については、重点的に情報を収集することとする。

(B)では、デザイン・ものづくりへの活用という観点から、無数に得られる3次元形状を整理する。4次元形状について、4次元版の正多面体(複数の正多面体が集まって構成される形状)と考えられる正多胞体(6種類)、超角柱や超角錐など様々な形状が知られている。そして、投影の種類や、投影面と4次元形状の位置関係に応じて、投影後の3次元形状は多様となる。本サブテーマでは、様々な4次元形状を3次元に投影したものをCGで確認し、さらに実際に模型として製作することで、そのような形状を教材として利用することを試みる。形状の表現に当たっては、外殻の面表現、稜のみの線表現、稜の一部を引張材として上部を浮遊させるテンセグリティ構造表現など、あらゆる表現方法を視野に入れて可能性を検討するものとする。

(C)では、(A)と(B)のテーマにより構築されるDBを用い、令和3年度後期開講予定の科目であるグラフィクスリテラシー系の科目の教育コンテンツを開発する。本コンテンツは日本語と英語のコンテンツを作成し、グラフィクス部門で本学と学術協定を結んでいるヴィルニュスゲディミナス工科大学(リトアニア、以下VGTU)でも授業を行うことに備える。そして、本学学生によるアンケートで教育コンテンツの評価を受け、内容を再検討することとする。また、VGTUにおいても授業を行い、アンケート調査により学生の評価を受けさらに内容を再検討する。また日本とリトアニアの学生の評価の違いについても明らかにすることとする。

### 4. 研究成果

2020年に発生した新型コロナウイルスによるパンデミックにより、2021年は海外渡航が不可能であり、その後の状況も見通せなかったことから、リトアニアにおける情報収集、授業の実施、教育コンテンツの評価等は中止し、同時に様々なグラフィクスリテラシー教育の事例を集めた書籍を出版し、一般への普及啓発を行うこととした。中止した内容は、(A)の紋様データの収集と、(C)のリトアニアにおける授業の実施と教育コンテンツに関わるものである。

以下、研究成果について報告する。(A)では、これまですでに提案している、ひし形平面充填パターンを用いた凹凸テクスチャーを持つ円柱形について、装飾物を付加したものを提案している(図1参照)。これは、上部に装飾物を取り付けふきのとうの形状



図1 風輝野灯

を模し、下部にスタンドを取り付けたものであり、「楽しいあかり展 2021」(主催/一般社団法人総合デザイナー協会 DAS・協力 平和紙業株式会社、2021年12月)で展示された。また、同じひし形平面充填パターンを用いた凹凸テクスチャーを持つ円柱形について、円柱内側に草木染で折線をなぞるストライプを加えたものも提案している。これは、反射率ではなく透過率を変化させ、反射光で見ている場合と透過光で見ている場合に異なるパターンが見えることを示したものである(図2左右参照)。さらに、錯視の技術を使ったものについても発表している。図3左



図2 内側にストライプを加えて反射光で見ている場合(左)と透過光で見ている場合(右)

は、入隅部分に2次元の図の出隅部分を重ねることで、凹凸の錯視を起こすことを意図したものであり、「楽しいあかり展 2023」(主催/一般社団法人総合デザイナー協会 DAS・協力 平和紙業株式会社、2023年12月)で展示された。図3右は、プリントした正方形パターンを四角錐台形状としたものであり、同じく凹凸の錯視を起こすことを意図したものであり、「12cmの世界」(主催:一般社団法人総合デザイナー協会 DAS/後援:毎日新聞社、2024年1月)で展示された。ここで提案された形状は、神戸大学の教養科目である「カタチの自然学」の授業で教材として用いられた。



図3 錯視技術を組み合わせている例

(B)では、すでに提案されている超立方体の斜投影とテンセグリティ構造を組み合わせた形状について、稜を2本まで減らせることを明らかにした(図4)。この形状は、「12cmの世界」(主催:一般社団法人総合デザイナー協会 DAS/後援:毎日新聞社、2022年1月)で展示された。また、4次元の形状を構成する多面体の一部に面を貼り、ランプシェードデザインへの応用可能性を示した。図5左は、稜との干渉を考慮して超立方体に6つの面を貼った例である。面には、超立方体を3次元に投影した形状をさらに2次元空間に投影したパターンが描画されている。また図5右は、四角錐をベースとした超角柱に4枚の面を貼った例である。どちらも、超角柱とテンセグリティを組み合わせた形状となっている。また、図6のように、正十二面体や反四角柱のような複雑な多面体をベースにした超角柱でも、テンセグリティ構造として面を貼ることが可能であることを示した。(B)で提案された形状も、神戸大学の教養科目である「カタチの自然学」の授業で教材として用いられた。

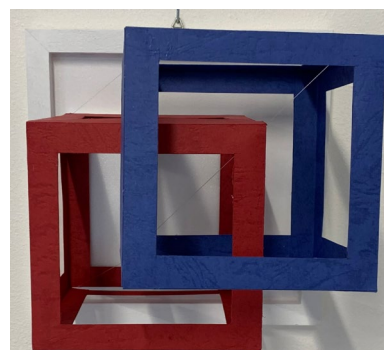


図4 稜を2本とした超立方体とテンセグリティ構造の組み合わせ

図5左は、稜との干渉を考慮して超立方体に6つの面を貼った例である。面には、超立方体を3次元に投影した形状をさらに2次元空間に投影したパターンが描画されている。また図5右は、四角錐をベースとした超角柱に4枚の面を貼った例である。どちらも、超角柱とテンセグリティを組み合わせた形状となっている。また、図6のように、正十二面体や反四角柱のような複雑な多面体をベースにした超角柱でも、テンセグリティ構造として面を貼ることが可能であることを示した。(B)で提案された形状も、神戸大学の教養科目である「カタチの自然学」の授業で教材として用いられた。



図5 多面体の一部に面を貼ってランプシェードデザインへの応用可能性を示した例

続いて、(C)について説明を行う。(A)と(B)で提案し、教材として用いられた形状のうち、「カタチの自然学」で用いられた超立方体を用いた演習を含む4次元の形状の授業内容の学生の評価結果について分析を行った。この科目は文科系理科系を含む多くの学部学科の学生が履修しており、最終レポートの発表講習会と7回の授業から構成されている。内容は、展開図の描画と模型製作、平面図と正面図の描画、軸則図の描画、透視図の描画、副投影の図の描画に加え、4次元の形状となっている。第4週に行われる4次元の形状の授業では、4次元の形状やその投影の説明を行っており、投影の説明に当たっては、通常の図学の授業で説明される3次元から2次元への投影をベースに、それを4次元から3次元に拡張することを図的に直感的に説明した上、行列でも説明している。最終的に2つの立方体を組み合わせ、対応するそれぞれ立方体の対応点を結ぶ稜8本と超立方体の対角線1本に相当する部分を糸で結んでテンセグリティ模型(図7参照)とすることを説明している。なお、2021年は新型コロナウイルスの影響下であったため、これらの講義はすべてリモートで行い、授業時間外の作業の後のレポートの提出も学内の Learning Management System を用いている。7回の講義について、それぞれ「この授業は面白かった」、「この授業は分かりやすかった」、「この授業で学んだことは将来役に立つ」、「この授業を人に勧めたい」の4つの項目について、「全くそう思わない」、「そう思わない」、「どちらでもない」、「そう思う」、「強くそう思う」の5段階で評価させた結果を図8に示す。この図のように、4次元の形状の内容を扱った第4週については「面白かった」で最高評価を、「勧めたい」で高評価を得た。一方で「分かりやすい」、「役に立つ」で低評価となった。あまりなじみのない4次元の形状を3次元の模型で表せることを学んだこと、また宙に浮くようなテンセグリティ構造を自身の手で作り出す体験をしたことが高評価に結び付いていると思われるが、一方で内容についての理解が不十分であり、その結果何の役に立つか分からないという状態になっていることが推察される。このように、分かりやすさが課題として抽出されたため、例となる図や動画を増やし、直感的に分かりやすい指導法とすることを今後の課題としている。

また、(C)では汎用4次元グラフィクスライブラリの開発も行っている。教材の開発や図の製作においては、通常の3次元CGソフトウェアを利用していたが、4次元の形状の3次元への投影や、4次元の回転等については、3次元CGソフトウェアのデータ内で個別に計算を行っていた。しかし、このような方法では、計算方法の修正などを行った場合に、個別のデータをすべて修正する必要がある。このため、汎用4次元グラフィクスライブラリとして独立させ、誰もが利用可能で容易に4次元の形状を取り扱うことができるようにするため、データと別に管理することとした。具体的には、4次元の形状の3次元空間への投影を、「正投影」、「直投影」、「斜投影」の3種として、これを視点の位置ベクトルと投影線の位置ベクトルで選択することとし、データとしては、図9に示すように、4次元の点

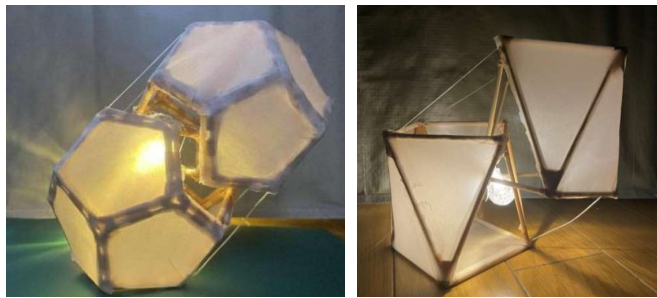


図6 複雑な多面体をベースにした超角柱に面を貼りランプシェードデザインへの応用可能性を示した例

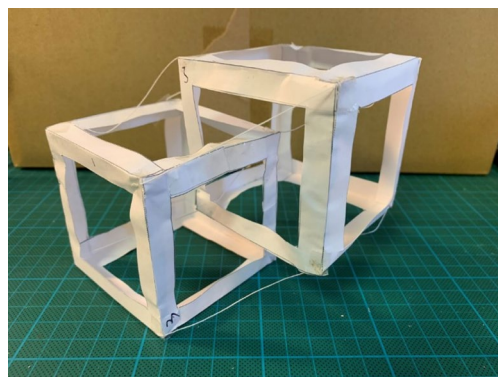


図7 4次元の形状の授業の演習で用いる超立方体テンセグリティ構造

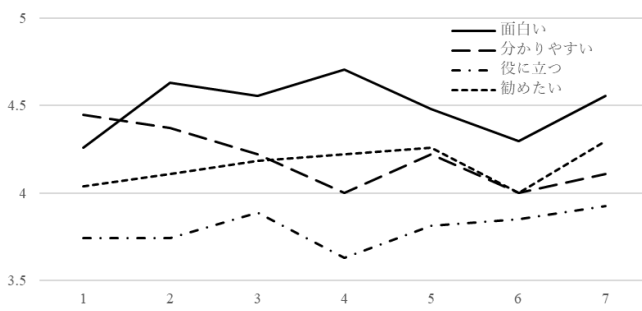


図8 授業評価アンケートの結果(第4週が4次元の形状、全くそう思わない=1点、強くそう思う=5点)

```
#declare p0 = <0. 0. 0. 0>;
#declare p1 = <1. 1. 1. 1>;
object {
  D4_Drawpoint (p0, 0.25)
  pigment {color rgb <1.1.0>}
  finish {ambient 1.0}
}
object {
  D4_Drawline (p0, p1, 0.05)
  pigment {color rgb <0.1.1>}
  finish {ambient 1.0}
}
```

図9 4次元空間内の点の指定と点の描画と線分の描画の例

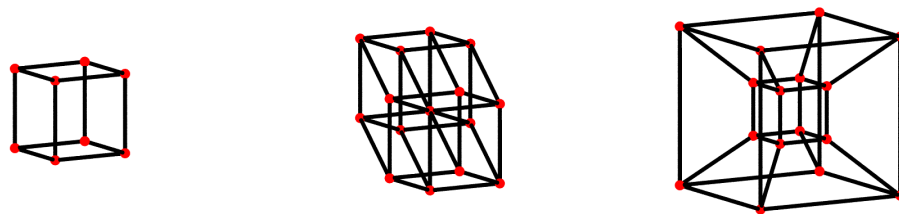


図 10 中心を原点とする稜の長さ 2 の超立方体を正投影(左)、斜投影(中)および透視投影(右)

の位置の指定、点の描画、2 点を結ぶ線分の描画を 3 次元 CG ソフトウェアと同じように記述することができる。同様に、視点位置と投影線ベクトルを変更して投影方法を変更することで、同じ 4 次元形状が 3 次元空間では異なる形状となることなども簡単に確認することができる(図 10 参照)。回転についても、3 次元 CG ソフトウェアと同じように記述できるようにしたため、図 11 のように、超立方体の XY 面、YZ 面、XZ 面、XW 面、YW 面、面 ZW 内での回転の動画を作成することが可能であり、W 軸を伴う面内での回転では、投影された 3 次元空間での形状が変形することなど容易に理解することができる。

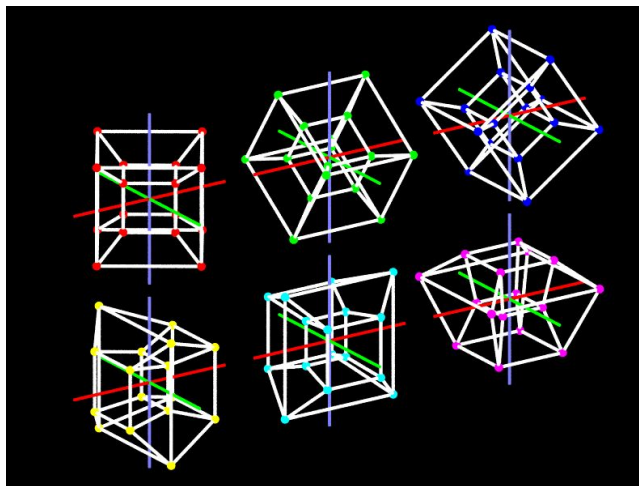


図 11 超立方体の XY 面、YZ 面、XZ 面、XW 面、YW 面、面 ZW 内での回転

さらに(C)では、グラフィクスリテラシー教育の事例を集めた書籍である「グラフィカルな表現法による複雑現象の理解」を出版し、一般への普及啓発活動を行った。

これらのように、(A)平面の充填パターン DB(データベース)構築と折り紙加工の可能性の検討、(B)4 次元形状を投影した 3 次元形状 DB 構築とその活用方法の検討、(C)カリキュラム作成とフィードバックの 3 つのサブテーマにおいて、一定の活動を行った。一部、新型コロナウイルスによるパンデミックによる制限で、遂行できなかった内容があるが、その分については、教材の開発と一般への普及啓発活動で代替することができたと考える。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Hirotaka Suzuki	4. 巻 26/1
2. 論文標題 An Interpretation of the Truncated Triangular Trapezohedron and the Sphere Depicted in "Melencolia I" by Albrecht Durer	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal for Geometry and Graphics	6. 最初と最後の頁 139 146
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス 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 -
1. 著者名 Hirotaka Suzuki	4. 巻 9
2. 論文標題 THE LAMPSHADE DESIGN MAKING USE OF GEOMETRIC FORMS: THE LAMPSHADE FORM BASED ON FOUR-DIMNSIONAL POLYTOPE WITH TENSEGRITY STRUCTURE	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Revista Brasileira de Expressao Grafica	6. 最初と最後の頁 104 126
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス 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 -
1. 著者名 Hirotaka Suzuki	4. 巻 -
2. 論文標題 An Interpretation of the Truncated Triangular Trapezohedron and the Sphere Depicted in "Melencolia I" by Albrecht Durer	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proceeding of The 20th International Conference of Geometry and Graphics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス 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 -
1. 著者名 Hirotaka Suzuki	4. 巻 -
2. 論文標題 Graphics Library '4DGL' for Projection of 4D Shapes into a 3D Space	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Proceeding of The 21st International Conference of Geometry and Graphics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス 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 -

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 1件／うち国際学会 4件）

1. 発表者名 鈴木広隆
2. 発表標題 汎用4次元グラフィクスライブラリの開発
3. 学会等名 日本図学会 2022年度全国大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Hirotaka Suzuki
2. 発表標題 LAMP SHADE DESIGN THAT TAKES ADVANTAGE OF THE SHAPE DERIVED FROM HIGH-DIMENSIONAL POLYTOPES. - MAKING GOOD USE OF SUPER PRISM AND ROTATION OF POLYTOPES
3. 学会等名 The 13th Asia Lighting Conference (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Anqi Duan and Hirotaka Suzuki
2. 発表標題 MANUFACTURING AND EVALUATION OF POLYTOPE TENSEDRITY LAMP SHADE -PRACTICAL APPLICATION AND FABRICATION OF LAMP SHADE METHOD BASED ON SUPER PRISM PRISM-
3. 学会等名 The 14th Asia Lighting Conference (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Hirotaka SUZUKI
2. 発表標題 DEVELOPMENT OF GENERIC FOUR DIMENSIONAL GRAPHICS LIBRARY 4DGL
3. 学会等名 The 14th Asia Forum on Graphic and Science (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 鈴木広隆
2. 発表標題 Albrecht Durer作「Melencolia I」に描かれた反重三角錐台と球に関する一解釈
3. 学会等名 2021年度 日本図学会大会(オンライン)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Hirotaka SUZUKI
2. 発表標題 Establishment of the Graphics Literacy Education and Research Center in the School of Engineering, Kobe University
3. 学会等名 The 13th Asian Forum on Graphic Science (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 神戸大学大学院工学研究科グラフィクスリテラシー教育研究センター編	4. 発行年 2024年
2. 出版社 神戸大学出版会	5. 総ページ数 208
3. 書名 グラフィカルな表現法による複雑現象の理解 連続セミナー講演録	

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担者	秋月 有紀  (Akizuki Yuki)  (00378928)	富山大学・学術研究部教育学系・教授   (13201)	

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
---------	---------