

スクラッチホログラム描画支援ツールの製作

Production of a drawing assistant tool for scratch holograms

舟越久敏¹, 太田穂乃花²

FUNAKOSHI Hisatoshi¹, OTA Honoka²

[キーワード Keyword] 手描きホログラム, 両眼立体視, 理数教育, ものづくり教育, ワークショップ題材
[所属 Institution] ¹岐阜大学教育学部 (Faculty of Education, Gifu University), ²岐阜県立岐阜工業高等学校 (Gifu Prefectural Gifu Technical High School)

[要旨 Abstract] 本研究では, 数学や理科への興味・関心・意欲を高めるとともに, 様々な事象に対して多角的や複合的な視点で事象を捉えるためのきっかけを作るための題材として, 手描きホログラムとして知られているスクラッチホログラムを採り上げる. 早期に数学や理科などの科学分野への興味を喚起できる題材の提供を目指し, 小学生対象のワークショップなどで活用できるスクラッチホログラムの描画支援ツールを製作することを目的とする. コンパスカッターの設定半径ごとに異なるシートを用意し, 各シートに示された円弧の中心位置にコンパスカッターの中心を置き円弧を描くことによって製作作業が容易になるようなツールデザインを検討し, 任意の3次元ワイヤフレームモデルから自動的にシートを作成するソフトウェアを開発した. 本ツールの機能性について検証した結果, 小学校高学年の児童でも大学生と同程度の品質でスクラッチホログラムを描画できるツールであることを確認した.

1. はじめに

平成30年3月に高等学校学習指導要領が改訂され, 各学科に共通する教科として, 理数探求基礎及び理数探求が新設された. 平成28年12月の中央教育審議会答申では, 新教科・科目の設置の背景について, PISA2018 (生徒の学習到達度調査2018年調査) で, 数学的リテラシー, 科学リテラシー共に, 国際的に見ると平均点が高く, 上位グループに位置しているなどの成果が見られるとともに, 令和2年に実施されたTIMSS2019 (国際数学・理科教育動向調査2019年調査) では, 小学校・中学校ともに国際的に見ても引き続き高い水準を維持している一方で, 我が国の生徒は, 諸外国に比べて, 数学や理科を活用する職業に就きたい児童生徒の割合が低く, 数学及び理科の学習に対する興味・関心・意欲が低いことが挙げられると述べている[1, 2].

本研究では, 数学や理科への興味・関心・意欲を高めるとともに, 様々な事象に対して多角的や複合的な視点で事象を捉えるためのきっかけを作るための題材として, ワシントン大学のWilliam J. Beaty氏によって紹介されたスクラッチホログラム[3]を採り上げることにする. スクラッチホログラムとは, アクリル板などの板面上に円弧上の傷を多数刻むことにより立体像を虚像として視認させるものである. 円弧上の傷は, コンパスカッターを用いることにより容易に生成でき

るが, 任意の立体像を生成するためにはどのような円弧状の傷を刻むかを原理に基づいた計算によって求めなければならない. 原理の理解には, 高等学校数学や高等学校物理の知識が必要であるが, どのような傷を刻めばよいか分かっている場合は, その情報に従いコンパスカッターで傷を刻むだけで良いため, ホログラムの製作自体は算数において円の描き方を学習する小学3年生以上で可能であると考えられる. そこで本研究では, 早期に数学や理科などの科学分野への興味を喚起できる題材の提供を目指し, 小学生対象のワークショップなどで活用できるスクラッチホログラムの描画支援ツールを開発することを目的とする.

2. スクラッチホログラムとその原理

2.1. スクラッチホログラムとは

通常, ホログラムと呼称するものは, レーザー光のような干渉性の高い光を使って, 物体から反射した光 (物体光) と参照光と呼ばれる光を重ねることによって生じる干渉縞を感光媒体に記録したものを指す. 干渉縞が記録された感光媒体に, 記録の時に使った参照光のみを照射すると, 感光媒体から干渉縞に応じた回折光が発生し, その回折光を覗き込むと記録した物体の立体像を観察することができる[4].

本研究で取り扱うスクラッチホログラムは, 先にも

述べたように、コンパスカッター（あるいは両足に針が付いたコンパス）でアクリル板などの板面上に円弧状の細かい傷を多数刻むことによって製作され、太陽光のような平行光を板面に入射されることにより立体像を再生する。すなわち、スクラッチホログラムは、その作成にレーザー光などの特殊な光や感光媒体などを用いる必要がなく、コンパスカッターがあれば「手」でホログラムを描くことができるため、安価な道具や材料で手軽に製作できるという特長を持つ。

スクラッチホログラムにおいて、コンパスカッターによって刻まれた多数の傷が、通常のホログラムにおける干渉縞に相当することになるが、多数の傷が回折光学素子として働くのではなく、凹面鏡（場合によっては凸面鏡）形状の曲線散乱体として働く[5]ため、立体像の視認は物体光の波面を再現するホログラフィーの原理ではなく、両眼立体視（ステレオグラフィ）の原理[6]に基づくことになる。したがって、スクラッチホログラムは厳密に言えばホログラムではないのであるが、このスクラッチホログラムの原理について調査したBeauty氏によれば、スクラッチホログラムは、その光学的原理がレインボーホログラフィー[7]に似ており、その類似性によって歪みを制御する手法、不透明な物体像を作る手法、アニメーション効果やフィルム面全体に広がる像を作る手法などが明らかにできたことを理由として、ホログラムではないという意見に反論している[8]。

2.2. スクラッチホログラムの原理

以下では、コンパスカッターによって刻まれた円弧状の傷によって、立体像の視認を可能とするスクラッチホログラムの原理について文献[3]を基に説明する。

プレートに刻み込まれた傷が曲線散乱体として働き、これらの傷にはブレイズ角がなく、入射光が全ての半径方向に均等に反射し、中空の円錐状の光線として散乱すると仮定する。図1は、 xy 平面上に半径 r 、曲線の中心 C の曲線散乱体があるとき、遠方の点光源からの光が下向き（ $-y$ 方向）に照射され曲線散乱体で反射する様子を示したものである。

遠方の点光源 PS からの光が散乱体に当たる点を A としたとき、線分 CA と y 軸に平行な半径 CB のなす角を α とする。このとき、 PS からの光は曲線散乱体に垂直な面と角 α をなす円錐状に散乱する。 PS と平行な他の光線も同様に、円錐状に散乱する。

図2に示すように、 xz 平面と平行な視点で観察者が曲線散乱体を覗くと、人間の立体視によって、観察者は2つの虚像のうちどちらかを知覚する。点光源 PS か

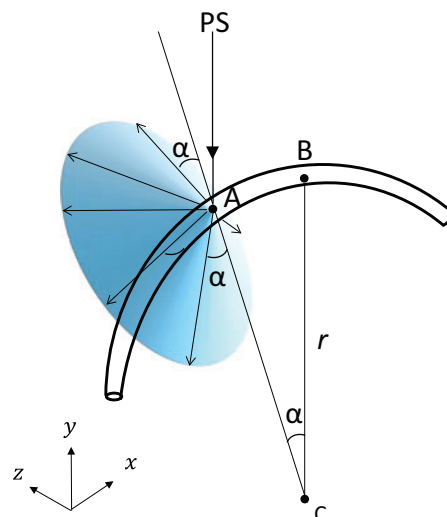


図1 点Aにおいて曲線散乱体で反射する円錐状の光線

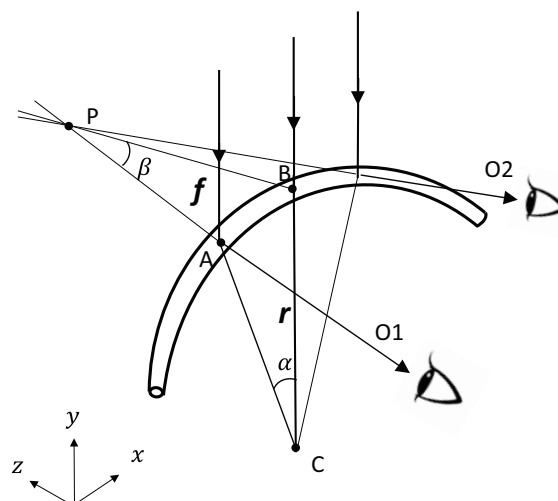


図2 xz 平面と平行な観察者の視点から見た虚像点 P の3次元的位置

ら照射された光は円錐状に散乱するが、観察者は曲線散乱体を通してみると、曲線散乱体があたかもスリットのように働くため、観察者の目には xz 平面と平行に散乱した光線のみが目に入り、それらの光線が交わる点 P のみが光って見える。もう1つの像は視点をプレートの裏側に移した場合にのみ観察することができる。

2.3. コンパスの中心座標と半径の設定方法

虚像点 P の3次元座標を (x, y, z) とおき、曲線散乱体の中心 C の座標 $(x', y', 0)$ と半径 r を点 P の座標を用いて表すことができれば、任意の3次元像を再生するホログラムを描くことが可能である。

まず、半径 r の設定方法を考える。図2の位置関係において、観察者側からの視点で見た図を図3(a)に、光源 PS からの視点で見た図を図3(b)に示す。点Aにお

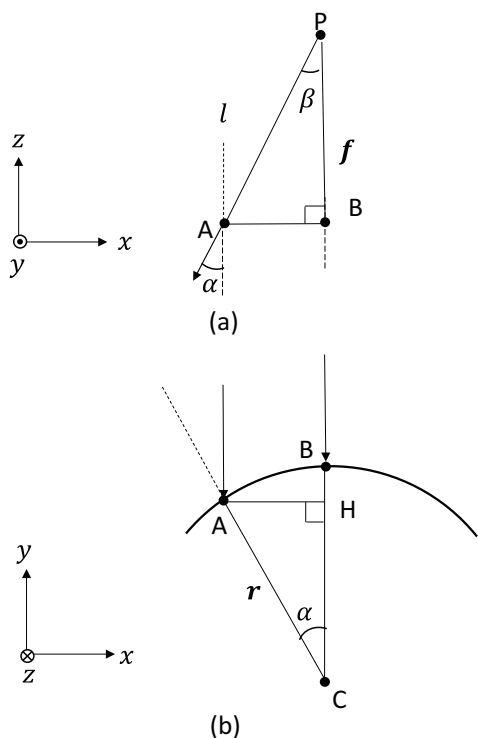


図3 虚像点Pと円弧およびその中心Cの位置関係
(a) 光源PSからの視点で見た図
(b) 観察者側からの視点で見た図

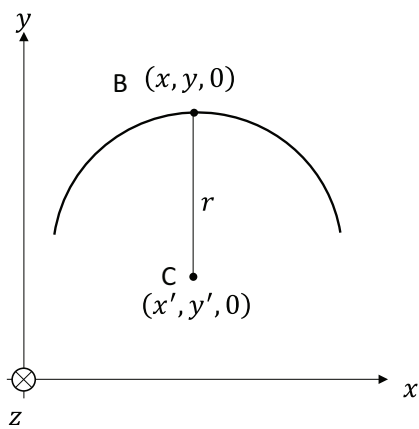


図4 プレートを真正面から見たときの円弧の散乱体の中心Cと反射点Bの位置関係

る xz 平面に平行な法線を l とする。光源 PS からの光は、曲線散乱体に垂直な面と角 α をなす円錐状に散乱するので、法線 l と光線 PA のなす角は α である。また、法線 l と光線 PB は平行なので、同位角は等しい。よって、以下の式 (1) が成り立つ。

$$\alpha = \beta \quad (1)$$

ここで、 β は線分 PA と線分 PB のなす角である。点 A から線分 BC に下ろした垂線の足を H とすると、 $\triangle AHC$ と $\triangle ABP$ において、図3より以下の関係が成立している。

$$AH = AB \quad (2)$$

$$\angle AHC = \angle ABP = 90^\circ \quad (3)$$

また、 $\angle CAH$ と $\angle PAB$ はそれぞれ

$$\angle CAH = 90^\circ - \alpha \quad (4)$$

$$\angle PAB = 90^\circ - \beta \quad (5)$$

と表せ、式 (1) の関係から

$$\angle CAH = \angle PAB \quad (6)$$

となる。よって、式 (2)、式 (3) および式 (6) より、 $\triangle AHC$ と $\triangle ABP$ において1組の辺とその両端の角がそれぞれ等しいこととなり、 $\triangle AHC \equiv \triangle ABP$ が成り立つ。このとき、円弧の半径 r に等しいのは線分 CA および線分 PA であり、線分 CH は $r \cos \alpha$ となるが、 α の値が小さいとき ($\cos \alpha \approx 1$)、 $CH = r$ とみなすことができ、 $\triangle AHC$ と $\triangle ABP$ の合同関係から $PB = f = r$ が導かれる。ここで、 f は虚像点の奥行きを表すので、 $f = z$ である。すなわち、 α の値が小さいとき $r = z$ なる関係が成立する。このことから、曲線散乱体の半径 r は、点 P の z 座標と一致させれば良いことがわかる。

次に、円弧の散乱体の中心 C の座標 $(x', y', 0)$ について考える。図4にプレートを真正面から見たときの散乱体の中心 C と反射点 B の位置関係を示す。 y 軸に平行である光源 PS から (図4上面から) の光が散乱体に当たる場合、虚像点 P は点 B から反射した光によって見えるため、点 B と点 P は重なって見えることになる。また、点 B で反射する光源 PS からの光の延長線上に円弧の中心 C があるため、線分 BC と y 軸は平行である。したがって、図4から、 $x' = x$ 、 $y' = y - r$ の関係が成立していることがわかる。

以上のことから、虚像点 P の座標を (x, y, z) 、曲線散乱体の中心 C の座標を $(x', y', 0)$ 、半径を r とすると、

$$\begin{cases} x' = x \\ y' = y - r \\ r = z \end{cases} \quad (7)$$

と表すことができる。式 (7) を用いて、立体像の位置座標からコンパスカッターの中心位置と半径を定めることによって、平面図形だけでなく立体像のスクラッチホログラムを描画することができる。

3. スクラッチホログラム描画支援ツールの製作

3.1. 描画支援ツールのデザイン

本研究では、ワイヤフレームモデルで表現された立体像の描画支援ツールを製作することとする。平面図形のスクラッチホログラムを描画したければ、奥行きは一定なのでコンパスカッターの半径を一定にして弧を描けばよい。しかしながら、立体図形のスクラッチホログラムを描画するためには、立体図形の座標情

報から式(7)の関係を考慮してコンパスカッターの中心位置と半径をその都度変える必要があり、その作業は困難を極める。そこで本研究では、立体図形のスクラッチプログラムを描画する際に必要とするコンパスカッターの中心位置と半径の情報が表示された複数枚のシートで構成されるスクラッチプログラム描画支援ツールの製作を試みる。

スクラッチプログラムを描画するプレートについて、文献[3]によれば、黒色のアクリル板を用いると点が最も輝くため、黒色のアクリル板を用いるのが一番望ましいと記されている。しかしながら、本ツールでは、円弧の中心座標位置がプロットされたシートの上にプレートを重ね、プロットの位置にコンパスの針を置くことにより描画することを想定しており、不透明なプレートを使用することはできない。そこで本研究では、100円ショップなどで販売されているクリアカラーの下敷き(材質:PET)をプレートとして採用することとした。

3.2. プレートの色と立体像の視認性

プレートとして採用したクリアカラーの下敷きは、様々な色で販売されている。そこで、プレートの色と再生された立体像の視認性について調査を行った。調査に用いたプレートは、赤色、青色、緑色、灰色の4色を用い、同じ立体像のスクラッチプログラムを描画して再生像を観察した。

図5に、それぞれのプレートで観察した再生像を示す。また、図5には各プレートの透過率の実測値を併せて示している。図5より、透過率が低い色のプレートほど視認性が高いことが確認できる。したがって、プログラムの描画材料として、赤色または灰色のプレートを使うことが望ましいが、図6に示すように、プログラム描画後に黒色の画用紙をプレートの背面に貼り付けることで視認性が改善されることが確認できており、赤色または灰色のプレートが用意できなければ、透過率の高い色のプレートでも黒色の画用紙を併用することで十分代用可能である。

3.3. 傷の数と傷の深さに対する立体像の視認性

コンパスカッターでプレートの傷を入れる時の傷の深さと傷の数による視認性の違いについて調査した結果を図7に示す。図7より、傷の数が少ないと辺が線に見えないため、傷の数は多い方が良いということがわかる。また、傷の深さが深いと、光が点ではなく線のように見え、ぼけているように見えるので、傷は非常に薄く入れることが望ましい。しかし、小学生を対象

赤色
(透過率:16%)



青色
(透過率:41%)



緑色
(透過率:41%)



灰色
(透過率:22%)



図5 プレートの色(透過率)による再生像の違い



図6 黒色画用紙を背面に置いた時の再生像(プレートは緑色)

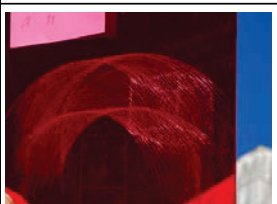
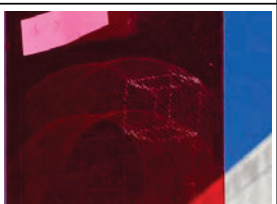
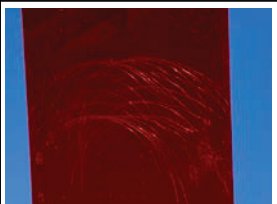
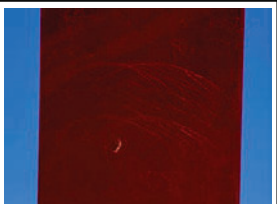
傷の数: 236 傷の深さ: 深い	傷の数: 236 傷の深さ: 浅い
	
傷の数: 44 傷の深さ: 深い	傷の数: 44 傷の深さ: 浅い
	

図7 傷の数と傷の深さに対する再生像の違い

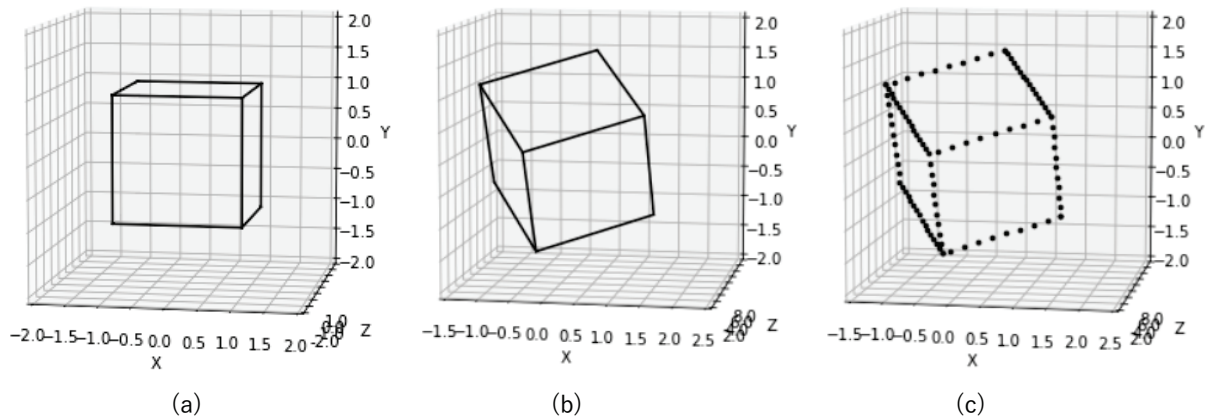


図8 ワイヤフレームモデルから点像分布への変換プロセス
 (a) 辺（線分）のデータからワイヤフレームモデルの生成
 (b) 視点変更（回転座標変換）と奥行方向の調整
 (c) ワイヤフレームモデルから点像分布への変換

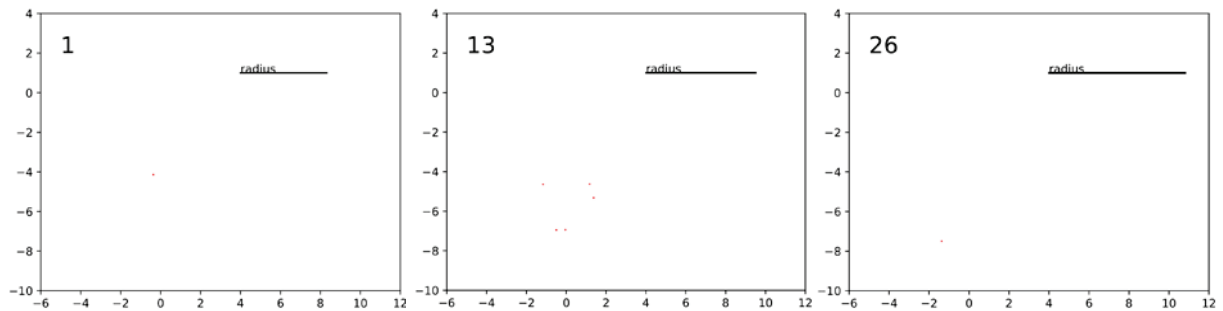


図9 手描き補助シート（一部）のデザイン
 （左から1枚目、13枚目、26枚目のシート）

に行う場合、傷を薄く入れることが困難であることが考えられるため、傷の数を増やし、多少傷が深くても、スクラッチホログラムを描画できるよう配慮する必要がある。

3.4. 手描き補助シートの作成

本研究では、立体図形の辺の情報（線分の始点と終点の座標）を設定すると自動的に必要なシートがPDFファイルで出力されるソフトウェアを開発した。ソフトウェアの開発には、プログラミング言語としてPythonを使用しており、導入したライブラリはMatplotlib, Numpy, Sympyである。

開発したソフトウェアの処理手順は以下の通りである。

- ① 立体を構成する線分の始点と終点の3次元座標を入力し、ワイヤフレームモデルを生成する。
- ② 回転座標変換により立体像の視点を変更する。また、すべての虚像点がプレートの裏側に来よう、奥行方向に平行移動する。
- ③ 線分で描かれた立体を点像分布に変換する。

- ④ 式(7)の座標変換式から円弧の中心座標と半径を求める。

- ⑤ 中心座標を半径ごとのシートにプロットする。

- ⑥ 各シートをPDFファイルとして保存する。

手順①～③のプロセスは、図8に示すように3次元グラフ上で確認することができる。また、図9に手順⑤で出力されたシートの一部を示す。図8に示される立方体の場合、合計26枚のシートが作成され、26枚の手描き補助シートで構成されるスクラッチホログラム描画支援ツールが完成する。

この描画支援ツールの開発において、作業効率を上げ、正確な立体像のホログラムを描画するために、3点の工夫を施した。1点目に、半径の異なる手描き描画補助シートは枚数が多くなるため、どこまで進んだのかわからなくなってしまうことが考えられるため、シート左上に番号を記すことにより順番や進捗を把握できるようにしたことである。2点目は、設定する半径の長さを各シートの右上部分に線分で示すことにより、定規を不要としたことである。3点目は、シートのx軸と



図10 スクラッチホログラム描画支援ツールを用いて作成したスクラッチホログラムの再生像

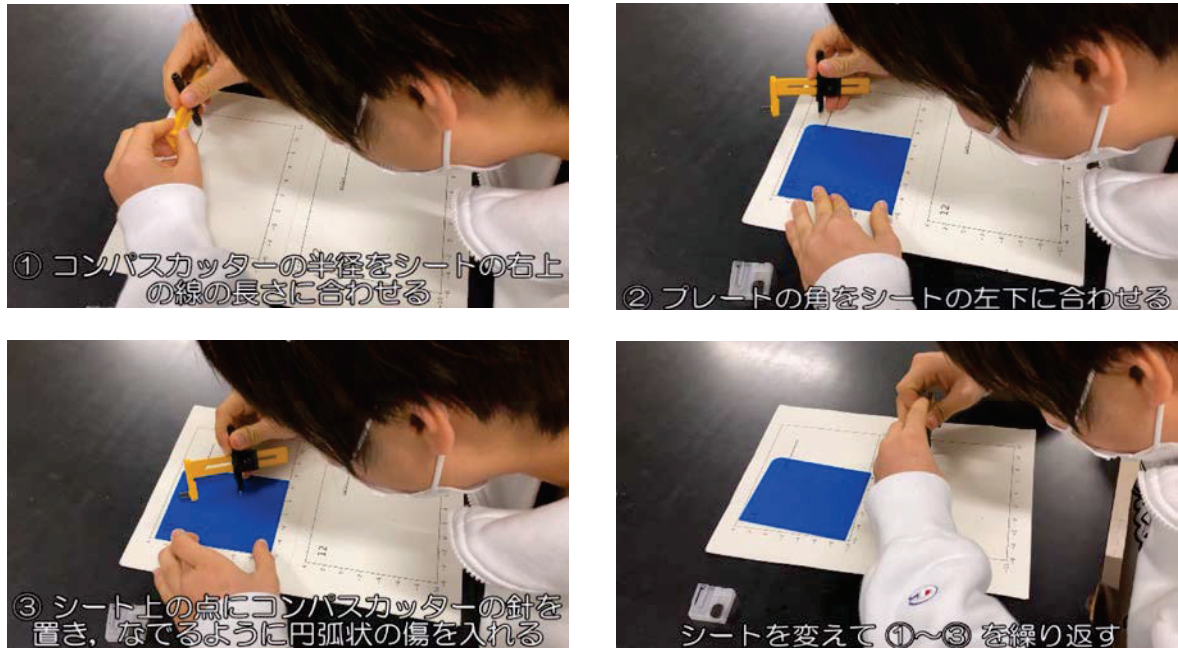


図11 スクラッチホログラム描画支援ツールの使い方

y軸の目盛りの幅の比率を等しくし、すべてのシートのスケールを統一することにより、各シートの左下を基準とすれば正確に立体像のホログラムを描画できるようにしたことである。

開発したソフトウェアによって自動生成された、図8に示される立方体のスクラッチホログラム描画支援ツールを用いて、手描きで作成したスクラッチホログラムの再生像を図10に示す。図10の画像ではプレートの表面に平面的な図形があるように見えるが、実際には多数の傷が凹面鏡形状の曲線散乱体として働くため、両眼立体視の原理に基づき奥行きのある立方体が視認できる。

4. 描画支援ツールの使い方と機能性検証

4.1. 描画支援ツールの使い方

本研究で製作したスクラッチホログラム描画支援ツールの使い方を図11に示す。1番目のシートから順に

以下のような手順で利用する。

- ① コンパスカッターの半径をシートの右上にある線の長さに合わせる。
- ② プレートの角をシート枠の左下に合わせる。
- ③ シート上の点にコンパスカッターの針を置き、なでるように円弧状の傷を入れる。シートにプロットされた全ての点について同様の作業を行う。
- ④ 次のシートで①～③の作業を繰り返す。

4.2. 描画支援ツールの機能性検証

本研究で製作したツールが、小学生対象のスクラッチホログラム描画支援ツールとして機能するかどうか、大学生3名と小学校6年生の児童1名を対象に調査を行った。図11に示した作業の説明を1分ほどで行い、描画開始から描画終了までの所要時間を測定した。大学生3名の平均作業時間は26分で、小学校6年生の作業時間は41分であった。

図12(a)に大学生が描画したスクラッチホログラム



(a) 大学生が描画したホログラムの再生像



(b) 小学校6年生が描画したホログラムの再生像

図12 スクラッチホログラム描画支援ツールの機能性検証結果

の再生像を、図12(b)に小学校6年生の児童が描画したスクラッチホログラムの再生像をそれぞれ示す。図12に示されるように、小学校6年生の児童が描画したスクラッチホログラムは、大学生が描画したものと同程度の完成度であることが確認でき、本研究で製作したスクラッチホログラム描画支援ツールは、小学校高学年程度の児童に対しても失敗することなくスクラッチホログラムを描画できるツールとして機能することが明らかになった。ただし、検証後の聞き取り調査において、円弧を描くときの力加減が少々難しく、描画時にプレートが少し動いてしまうという課題が挙げられた。プレートが少し動いてしまうことについては、治具やクリップなどで固定できるようにすれば解決できると考える。

5. まとめ

本研究では、小学生対象のワークショップなどで活用できるスクラッチホログラムの描画支援ツールを製作することを目的とした。コンパスカッターの中心位置を、半径ごとにシートを分けたツールデザインを採

用し、描画材料として本ツールで必須となる半透明のプラスチックプレートを用いた場合においても、立体像を十分観察できる視認性を有するべくホログラムを作成することが可能であることを明らかにした。また、3次元空間内の座標からコンパスカッターの中心座標と半径への変換方法を明らかにし、開発したソフトウェアにより、任意の3次元ワイヤフレームモデルから自動的にシートを作成することに成功した。最後に、本ツールの機能性について検証した結果、小学校高学年の児童の描画時間は大学生の2倍ほどかかるものの、小学生でも大学生と同程度の品質でスクラッチホログラムを描画できるツールであることを確認でき、本研究で製作したツールは、小学生対象のワークショップなどで十分活用できるものと考えられる。

参考文献

- [1] 文部科学省, “高等学校学習指導要領解説(平成30年告示)理数編”, 教育図書(2019)。
- [2] 国立教育制作研究所, “IEA国際数学・理科教育動向調査(TIMSS2019)のポイント”, <https://www.nier.go.jp/timss/2019/point.pdf>, (2022年1月13日参照)。
- [3] William J. Beaty, “Drawing holograms by hand,” Proc. of SPIE, Vol.5005, pp.156-167 (2003)。
- [4] 伊藤智義, 下馬場朋禄, “ホログラフィー入門”, 講談社(2017)。
- [5] William T. Plummer and Leo R. Gardner, “A mechanically generated hologram?,” Applied Optics, Vol.31, No.31, pp.6585-6588 (1992)。
- [6] 相田紗織, “知っておきたいキーワード 両眼立体視”, 映像情報メディア学会誌, Vol.75, No.6, pp.779-781 (2021)。
- [7] P. Hariharan 著, 吉川浩, 羽倉弘之 訳, “ホログラフィーの原理”, オプトロニクス社, pp.69-74 (2004)。
- [8] Scratch-Hologram FAQ, <http://amasci.com/amateur/holohint.html#6>, (2022年1月25日参照)。

