

研究論文

独楽の回転能力をスコアとして提示する 独楽評価システムの開発

鈴木 浩^{1,a)} 津布久 直樹²

受付日 2020年1月15日, 採録日 2020年5月25日

概要: CD を利用したオリジナル独楽の制作は, ジャイロ効果や慣性モーメントの学習のため, 科学館での工作教室のテーマとして取り上げられている. 著者らはオリジナル独楽づくりとエデュテインメントを繋げるシステムとして「コマスカウター」を開発した. 本システムは, CD のラベル面に色つきナットを配置した独楽を USB カメラで撮影し, 取得した画像を解析することで, 独楽の回転能力をスコアとして提示できる. 本システムは, 独楽の回転能力を簡易的に評価できる特徴があり, これにより, 回転のしくみの理解や独楽の作り直し活動への動機になることが期待できる. 本論文では, CD に配置された色付きナットを認識する手法と配置されたナットからスコアを評価する手法について説明する. 本システムを科学館の体験イベントで利用した結果, 約 40%の体験者を独楽の作り直し活動に導くことができた.

キーワード: 独楽, 科学教育, エデュテインメント, インタラクション, OpenCV

Developing Evaluation System that Presents the Rotation Ability of a Top as a Score

HIROSHI SUZUKI^{1,a)} NAOKI TSUBUKU²

Received: January 15, 2020, Accepted: May 25, 2020

Abstract: Using by the compact disc are able to easily make an original top. This CD top will support in the learning of the gyroscopic and moment of inertia. Therefore, sometimes it become to a theme of experience course of Science Museum. We developed “Koma Scouter” as a system to connect original tops making and edutainment. This system can present the rotational ability of the tops as a score by taking a picture of the tops, which has colored nut on the label surface of a CD, with a USB camera and analyzing the acquired image. The feature of this system is the ability to recognize the rotational capacity of the tops, which will help us to understand the mechanism of rotation and motivate us to rebuild the tops. In this paper, we describe a method for recognizing the color nuts, which are arranged in the CD, and a method of evaluating the rotation score of the CD top. As a result of using this system in scientific events, Children of about 40% has reworked the top.

Keywords: top, science education, edutainment, interaction, OpenCV

1. はじめに

近年, 科学館や大型商業施設において, 多数の子ども達が比較的短い時間で創作活動が体験できるエデュテインメ

ントが数多く見られるようになった [1], [2]. これらのコンテンツでは, 参加する子どもの創作活動や創作物 (作品) をインタラクティブシステムの演出に取り入れる例が少ない. 代表的なものとして, 子どもが描いたお絵かきをコンテンツとして利用するもの [3], [4], [5], [6] や, 子どもが作成したオブジェクトをつかってインタラクティブな体験をさせるもの [7], [8] などがあげられる. これらの事例は, 子ども達の作品をインタラクティブシステムに利用するこ

¹ 神奈川県立大学情報学部
Kanagawa Institute of Technology Faculty Information
Technology, Atsugi, Kanagawa 243-0292, Japan

² 有限会社トリガーデバイス
Trigger Device Ltd., Ogaki, Gifu 503-0807, Japan

a) hsuzuki@ic.kanagawa-it.ac.jp

とで、子ども達のコンテンツへの興味や関心を高めつつ、参加者同士のコミュニケーションを活発にすることや、遊びながら創造性や身体性を引き出すことを目的としている。しかしながら、このようなインタラクティブシステムを通じて作られる子ども達の作品は、その場の一時的な楽しみの素材として扱われることが多く、コンテンツを体験することの他に子ども達がコンテンツから受け取れる学びは乏しいのではないだろうか。上記のようなインタラクティブシステムは、科学館などの教育施設で実施されていることから、エデュテインメントとして広く一般に認知されているものの、創作活動と科学教育とのつながりはみられない。そこで、本研究では、科学教育に関連した創作体験のツールとして独楽に着目し、独楽づくりを通じてエデュテインメントが展開できる「コマスカウター」を提案する。

2. 関連研究

昨今の子どもたちの理科離れや、ものづくり離れの指摘から、子ども達に科学のおもしろさや興味を刺激する教材システム開発がさかんに実施されている。近年では、VRやARの要素を科学教育に取り入れる体験教材 [9], [10] や、学習者の主体的な学びを誘導するWEB教材 [11] の開発が取り組まれている。これらの教材システムは、先端技術を利用した教材の開発を目的としており、ものづくりを通じた科学体験をさせるものではない。

身近なものづくりを通じて子どもに科学への興味を持たせる試みは従来から教育現場で積極的に取り組まれている。紙飛行機を題材とした鈴木らの実践 [12] では、子ども自身が紙飛行機を制作するという行為が紙飛行機の裏に隠れている科学的な現象への興味や理解に影響していることを示唆している。本研究と同じく独楽づくりをテーマにした実践として、花木らは科学イベントでのブース展示を想定した参加型展示に独楽を利用している [13]。この実践例では、参加者が厚紙を用いて左右非対称のイラストを作成し、その重心を数学的に導くことで、独楽に数学が関連していることを伝えている。また、岩部らは大学生を対象に円形のボール紙を利用してオリジナル独楽を制作させ、作った独楽の慣性モーメントを学生自身が計算し、回転時間との関係を観察することから慣性モーメントの理解を深める取り組みを実践している [14]。これらの先事例が示すように、科学への興味を引き出すために、ものづくりを利用することや、テーマに独楽を利用することは、科学を身近に感じさせる手法として有効だと考えられる。

ほかにも、科学を体験できる場として、全国の科学館や公共施設でサイエンスイベント [15], [16], [17] が積極的に実施されている。これらのイベントでは、様々な科学のテーマに沿ったブースが出展され、子ども達は、興味を持ったブースの展示品を体験することで、科学を身近に感じることができる。こうした従来型の展示ブースによる運営は、

展示品によって得られた体験とその科学的な現象について、ブースを運営するサイエンスコミュニケーターと密に對話することで、じっくりと科学の面白さや知識を得られる利点がある。しかし、昨今のエデュテインメントのように大多数の子どもが同時に参加することを想定しておらず、体験者が少人数であることが一般的である。また、展示ブースで子ども達が制作した作品とインタラクティブコンテンツとを関連させる試みは、行われていない。そのため、子どもにブース展示作品を体験させたいと思わせるには、展示作品を魅力的にする工夫や説明技術が必要であり、テーマとしている科学の分野に精通した専門家でないと魅力的なブースとして運営することは難しい。上記の授業実践やサイエンスイベントに共通するねらいは、体験することや、観察することを通じて日常的な風景のなかに科学を感じさせることであり、科学を身近に感じさせることで、子どもの知的的好奇心刺激し、科学への興味を引き出すことにある。著者らは、このような科学の体験を通じて科学の面白さを気付く機会として、創作活動を利用したインタラクティブなエデュテインメントは最適だと考えている。

学びとは学校教育を代表に、公式で堅苦しいイメージとしてとらえられてしまう場合もあるが、子どもの知的好奇心や科学への興味を引き出すためには自発的な行動を誘引する遊びが含まれた非公式な場での体験が重要との見解もある [18]。さらに両親や友人、兄弟姉妹と体験を共有することから生じるコミュニケーションが学びに対しての面白さや興味を引き出す要因であるといわれている [19], [20]。昨今の創作活動を利用したエデュテインメントでは、リッチな映像コンテンツとインタラクティブ性を組み合わせることで、子ども達を主体的に創作活動に導き、遊びと学びの境界をなくすことを目的としている。また、デジタル化した作品を実空間で共有することで、参加者同士のコミュニケーションを活発にする工夫がなされている。このような創作活動を取り入れたエデュテインメントは、非公式な学びの場を提供することに相応しい特徴を備えていると考えられる。しかしながら、これまで、大多数の子ども達の創作作品を科学教育に関連する体験のツールとして利用したエデュテインメントは見当たらない。

3. 独楽を評価するコマスカウター

3.1 コマスカウターのコンセプト

独楽はシンプルな玩具であるため、子どもでも手軽に作ることができることが魅力の1つである。また、独楽の回転運動は科学的に説明することが可能である。独楽は、このような子ども向けの科学体験講座のテーマとして取り上げやすい身近なサイエンストイの1つであり、これまで独楽遊びをデジタル技術によって拡張したシステムが開発されている。スイッチのまわる、うつる、ひろがる [21] では、プロジェクションされたステージにLEDが内蔵され

たコマを回すことで、ステージ上の位置や LED の色に応じて花や星などの模様を回転している独楽の周辺に重層表示させるとともに効果音を再生することで独楽遊びにインタラクティブ性をもたせている。的場らによる独楽遊びの体験を拡張する遊具システム [22] では、電動モータを備えた独自のコマまわしコントローラを使って独楽を無接触で回転させるとともに、映像による演出と力学的なフィードバックを加えることでコマ遊び体験を拡張している。著者が過去に開発した MR Spintop [23] は、ベーゴマを模した玩具に 3D キャラクターを重層表示することにより、コマどうしがぶつかり合うベーゴマ遊びを拡張している。上記のシステムでは、独楽の回転運動に AR 技術を導入することで独楽遊びを魅力的な遊びに拡張している。しかしながら、これらのシステムでは、あらかじめ準備された独楽を利用することを前提としており、子どもがオリジナルの独楽を創作し、利用することを想定していない。このため、独楽 1 つあたりのコストが高くなる傾向にあり、大多数の子ども達が比較的短い時間で創作活動が体験できるシステムではない。

一方で、分かりやすく独楽の回転運動を説明する科学実験にナットの重りを使った実験がある [24]。この実験では、独楽が回転する要素には、独楽の重心や慣性モーメントが関連していることを教示するために、CD の中心付近にナットを配置した場合と CD の端にナットを配置した場合とで回転の速さや時間を比較し、ナットの位置によって回転運動が変化することを観察させている。これにより重心が独楽の軸に近く、慣性モーメントの大きい独楽ほど回転時間が長くなることを伝えることができる。この CD とナットを使って作成した独楽と回転能力との関係を数値として表すには、独楽の重心の位置や慣性モーメントの値を制作した独楽ごとに算出する必要がある。先行事例の [13], [14] では、人の手で独楽の重心や慣性モーメントを算出している。しかしながら、大多数の子ども達が比較的短い時間で創作活動をするエデュテインメントでは、作られる独楽の数が無数になるため、人の手で各独楽の値を算出することは現実的ではない。そこで、本研究では、各独楽の重心と慣性モーメントの値をコンピュータによって自動で算出できるコマスカウターを提案する。コマスカウターは、子どもが創作した CD 独楽を上部から撮影した後に、その静止画像から CD に配置されているナットの種類や位置を画像処理によって検出し、その位置関係やナットの重さから、独楽の重心や慣性モーメントの値を算出するシステムである。本システムでは、独楽の回転能力に関連する値を数秒で計算することができるため、大多数の子ども達がオリジナル独楽を創作しても、独楽の回転能力を短時間で数値化することが可能である。また、算出した値は、独楽の回転能力を示すスコアとして提示することで、子ども達は、スコアを参考にしながら、独楽を改善することができる。

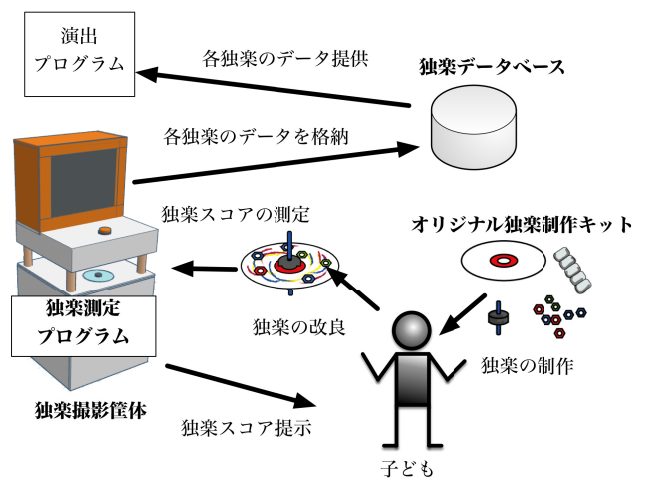


図 1 本システムの概要図
Fig. 1 The system overview.



図 2 オリジナル独楽制作キットの詳細
Fig. 2 Detail of original spinning top construction.

3.2 システムの概要

本研究で提案するコマスカウターは、オリジナル独楽制作キット、独楽撮影筐体、そして独楽測定プログラムから構成されている。本システムの概要図を図 1 に示す。

3.3 オリジナル独楽制作キット

オリジナル独楽制作キットは、12 cm サイズの白地の CD と重りとして利用するカラーナット、そして、回転軸として利用するアタッチメントから構成されている。カラーナットには、赤緑青にクロメート処理をした亜鉛メッキを施した JIS 規格の M4, M5, M6 ナットを利用している。図 2 にオリジナル制作キットを示す。子ども達は、CD のラベル面にマーカーペンを利用して好きなように絵を描いたうえに、カラーナットを粘性接着材によって配置する。これにより子ども達は、カラーナットを何度でも自由に CD に配置することができる。また各 CD の測定データを個別に管理するために CD の裏面には QR コードを貼付した。CD の中心には回転軸が付いたゴム製のアタッチメントを装着することで独楽として回すことが可能となる。

3.4 独楽撮影筐体

本システムでは CD 独楽を上部から USB カメラで撮影

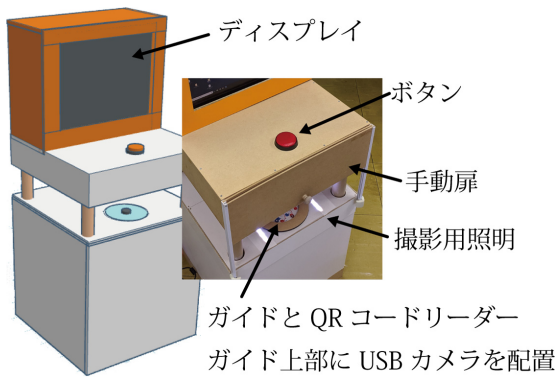
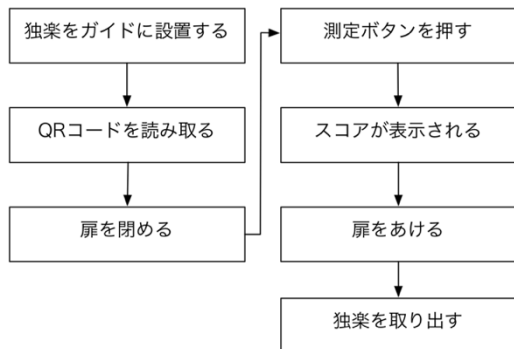


図 3 独楽撮影筐体の詳細

Fig. 3 Detail of spinning top photography case.



コマスカウターのタイトル画面

KomaScore の表示画面

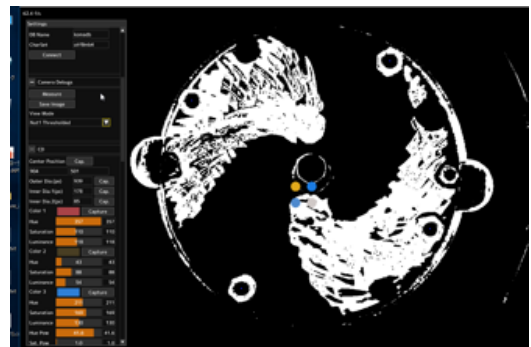
図 4 独楽撮影筐体の使用の流れと KomaScore 表示の GUI

Fig. 4 The flow of spinning top photography case and GUI of KomaScore display.

し、その取得画像からナットの色情報を基にナットを検出することで独楽の回転能力を示すスコア（以後 KomaScore）を測定する手法を採用した。独楽画像の画像解析においては、環境の違いによる明るさによってナットの色が変化しないように独楽を撮影する必要がある。そこで、本研究では同条件で CD 独楽を撮影できる独楽撮影筐体を作した。制作した筐体を図 3 に示す。本筐体には、ボタンと USB カメラ、LED 照明器そして、QR コードリーダーが設置されている。USB カメラは logicool 社の C920m を使用し、撮影する静止画像は 1,080p の解像度で取得した。筐体のガイド部に子ども達のオリジナル独楽をセットすると QR コードリーダーが自動でオリジナル独楽の裏面に貼付された QR コードを読み込む。また、扉の開閉部には光センサが設置されており、扉の開閉を検知することが可能である。これにより、扉が閉まっていて、QR コードの ID が読み込み済の場合に撮影ができるように制御している。図 4 に独楽筐体の使用の流れと KomaScore を提示する GUI を示す。



5-A ナット認識のための設定画面



5-B キャリブレーション設定画面

図 5 設定画面とキャリブレーションの例

Fig. 5 Calibration setting GUI and calibration example.

3.5 独楽測定プログラム

独楽測定プログラムは、C++ と OpenCV を利用して開発された画像認識プログラムである。取得した独楽のデータを格納するデータベース部には MySQL を利用した。各カラーナットの位置取得は、撮影した画像に対してテンプレートマッチングにより検出をしている。独楽筐体により、撮影環境を整えているが、照明の当たり方や撮影角度などの軽微な違いでも、カメラ画像のナットの色が変化する可能性があるため、測定前にキャリブレーションを必要とする。キャリブレーション設定画面を図 5 に示す。

3.5.1 キャリブレーション手順

ナット検出のためのキャリブレーションの手順は、(1) CD とナットサイズの設定と色情報の設定、(2) バイラテラルフィルタの閾値の設定、(3) テンプレートマッチングの閾値の設定、(4) 取得ナットの確認の手順で行う。以下それぞれの手順について説明する。

- (1) CD の中心点と直径やナットの大きさをカメラ画像が表示された GUI 上で設定する。大きさの指定は、マウスで GUI に表示されたカメラ画像をドラッグアンドドロップすることで指定できる。具体的には、画面をドラッグすることで円形のガイドが表示され、ガイドをカメラ画像に映されている CD の直径やナットに合わせて指定する。また、KomaScore 算出時に重心の原点として利用する CD の中心や、閾値として用いる色の取得は、マウスカーソルでカメラ画像の取得した

いポイントをクリックすることにより、マウスポイント上のドット位置にある座標や色を取得することができる。

- (2) カメラ画像を画像ファイルとして取得し、取得した画像ファイルをノイズ除去のためバイラテラルフィルタをかける。その後ノイズ除去画像をHSL変換し、ナット色の閾値からグレースケール画像を生成する。さらに、この画像を元に二値化画像を作成する。これらの処理を行うための閾値は、GUIにより調整できる。
- (3) 前工程により取得した二値化画像からナット形状のテンプレートマッチングを実施し、ナットの位置を認識する。テンプレートマッチングにおける閾値においてもGUIにより調整可能である。
- (4) CDに配置されている色ナットの数とプログラムにより検出されている色ナットの数に相互がないかを目視により確認する。ナットに未検出や誤検出がある場合は、手順(2)、(3)の閾値を再調整する。

以上のキャリブレーション作業をナットの種類ごとに実施し、配置されているすべてのナットを検出していることを確認する。

3.5.2 KomaScoreの測定

独楽測定プログラムでは、画像から取得したナットの種類や位置から各独楽のKomaScoreを算出する。独楽の重心や慣性モーメントの算出方法は一般的な独楽の重心や慣性モーメントを算出する力学[25]を参考にしている。

独楽の回転時間や回転速度は、軸の長さや先端の角度、軸の太さや回すときの力のモーメントで変化するが、コマスカウターによって算出するKomaScoreでは、これらの要素は一定として扱っている。以上のことをふまえ、本研究では、CDに配置されたナットの重心がCDの中心に近く、慣性モーメントが大きい独楽をよく回る独楽として定義した。本システムによって独楽の回転能力を示すKomaScoreは、重心をスコア化したGScoreと慣性モーメントをスコア化したIScoreを利用している。GScoreの算出方法は、測定プログラムによって取得したナットの番号を*i*、ナットの位置ベクトルを*p*、各ナットの質量を*m*として、独楽の重心ベクトル*G*を式(1)で求めている。

$$G = \frac{\sum_i m_i p_i}{\sum_i m_i} \quad (1)$$

$$GScore = -\left(\frac{|G|}{6} - 1\right) * 100 \quad (2)$$

ナットを設置していないCDの独楽の重心は、CDの中心にあり、ナットをCDに設置することで、そのバランスを意図的に崩すことになる。しかし、子どもがバランスよくCDの上にナットを設置することで、独楽の重心が原点であるCDの中心に近づくことになる。つまり、検出したナットから算出される重心がCDの中心に近いほどバランスの取れた独楽であると考えられる。独楽の重心ベクトル

|*G*|は、原点に近づくほど原点との差が小さくなるが、このベクトル|*G*|をスコア化するために式(2)により、独楽の重心と原点との差の値を反転し、スコアが100に近づくように算出している。なお式(2)では、CDの半径を6cmとして扱っている。

慣性モーメントをスコア化するIScoreの算出手法は、ナットの番号*i*、ナットの質量を*m*、独楽の中心からの距離を*r*として慣性モーメント*I*を式(3)により求めている。*r*の値はGScoreと同じく、cm単位で計算している。これにより算出後の*I*の値は、軽微な数値となるので、GScoreとスコアの単位を揃えるために100を乗算する。

$$I = \frac{\sum_i m_i r_i^2}{\sum_i m_i} \quad (3)$$

$$IScore = I * 100 \quad (4)$$

本研究では、上記アルゴリズムにより得られたGScoreとIScoreを加算した値をKomaScore(独楽の回転能力)とした。GScoreとIScoreは、それぞれ違う物理単位であり、双方のスコアを加算することに物理的な意味はないが、GScoreとIScoreはともに正の値に増加するスコアとして算出しているため、これらの値を加算して提示することで、KomaScoreが高いほどよく回る独楽であると分かりやすく知らせられる効果があると考えた。なお、ナットがCDに1つも配置されていない結果となった場合は、例外処理としてGScoreは100、IScoreは0で算出される。

本手法によって算出するKomaScoreは、ナットの誤検出や未検出によって同じ独楽を測定した場合でもKomaScoreが変化すると考えられる。しかしながら、本研究では、子どもが制作した独楽の回転時間や回転能力を正確にシミュレーションするものではなく、独楽の回転に影響する要素である重心や慣性モーメントがナットの配置によってどのように変化するかを簡易的に示す指標として利用することを想定している。

独楽測定プログラムでは、このように算出したKomaScoreの他に各独楽のパラメータとして、QRコードに記録されているIDや、独楽画像に利用されている上位2種類のRGB値をデータベースに格納する。

4. エデュテイメントとしての展開

実装した本システムは、エデュテイメントとして、1. 手軽な創作活動の提供、2. 回転についての理解の補助、3. 取得したパラメータデータの活用、4. 測定履歴データの活用の4つの展開が考えられる。本章では以下にそれぞれの展開について説明する。

4.1 手軽な創作活動の場の提供

オリジナル独楽制作キットを利用した独楽づくりは、独楽の模様や重りの配置をデザインする過程でそれぞれの

子どもの創造性を発揮することができる。また、自作したCD独楽のKomaScoreを測定するために、CD側にデバイスやセンサなどの特殊な機器を設置する必要がなく、誰もが簡単に制作することができる。さらにオリジナル独楽制作キットは比較的安価な素材で構成されているため、創作イベント実施のためのコストを低く抑えることができる。

4.2 回転についての理解の補助

コマスカウターでは、子ども達が自由に配置したナットの位置や重さから重心の位置や慣性モーメントの値を測定できるため、量的なデータとして独楽の回転能力を示すことができる。これにより、独楽のナットの位置によって独楽が回る時間が変化することを分かりやすく伝えることができる。また、作った独楽の回転能力を客観的に示すことができるため、ナットの配置とKomaScoreの因果がつかみやすくなると考えられる。これらのことから、子ども達は、長く回る独楽を作るために、ナットの位置を工夫する試行錯誤をすることで、回転についての理解を深めることができる。

4.3 各独楽の特徴に合わせた演出の提供

従来の独楽遊びを拡張したインタラクティブシステムでは、独楽の位置にアニメーション効果を重層表示し、体験者の独楽遊びを拡張することが一般的である。これらの要素はあらかじめシステムに登録されているパラメータを利用するため、独楽によって体験者に関連するアニメーションが動的に変化して再生されることはない。一方で本システムは、CDの背面にQRコードを添付している。このQRコードに記されたIDを利用することで、KomaScoreを測定する過程で、独楽の色や、重心のバランス、慣性モーメントといった各独楽のパラメータを取得し、データベースに格納できる。これにより、何らかの手法で回転している独楽を個別認識することができれば、体験者が作成したコマの特徴に合わせたアニメーションを再生させることが可能となる。

4.4 履歴データの活用

測定によって格納されたデータを分析することで、各独楽の測定回数や、komaScoreの推移、体験者全体の傾向など、従来の創作活動では把握が難しかった創作の履歴データを得ることができる。この履歴データは、たとえば、本システムを講義形式の独楽づくり体験教室で利用する際に、スタッフによる助言によって体験者のKomaScoreがどのように推移するのかを明らかにできる。つまり、助言の効果やタイミング、教授法の工夫などの指標になると考えられる。

5. 評価実験

5.1 ナット検出実験

実装したコマスカウターの色つきナットの認識率とKomaScoreの誤差を検証するためにナット検出実験を行った。実験に使用したPCはDell Inspiron 15 5000 Intel core i5, 4G DDR4 2,666 MHzである。

ナットの色は、独楽制作キットと同じく、緑をM4ナット重さ0.6g、赤をM5ナット重さ1.0g、青をM6重さ2.0gで利用した。各ナットをCDの上に粘性接着材をつかって配置し、3種類の実験用の独楽を作って利用した。作成した3種類の独楽を図6に示す。それぞれの独楽は、重心のバランスと慣性モーメントの観点から、独楽Aが最も低いKomaScoreとなり、独楽Cが最も高いKomaScoreとなることが予想された。測定にあたっては、作成した実験用独楽を各種5回測定した。また、撮影する角度による測定誤差の有無を考慮し、各独楽とも2回目以降の測定の際に60度ごと独楽を回転させて配置した。

5.2 ナット検出実験の結果

表1に検出実験の測定結果を示す。各ナットの検出に関しては、検出したナットの総重量から、2個程度のナットの誤検出や未検出があることが分かった。また、独楽Aの渦巻状のイラストが描かれている部分において、キャリブレーション時にナットとして検出してしまう場合もあり、描かれているイラストによって誤検出の数が増える可能性がある。独楽Cの2回目と5回目の測定ではナットの検出数が同じであるが、わずかながらKomaScoreが変化している。この誤差は、独楽撮影筐体のガイドに独楽を設置した際の微妙な位置ずれによってカメラから見えるナットの位置や角度が若干変化することが原因と考えられる。しかしながら、それぞれの独楽のKomaScoreは、独楽Aと独楽Bの間で約20%、独楽Bと独楽Cの間で約17%の開きがある。

分散値を見ると、独楽Aと独楽CのGScoreの分散値は同程度であるが、独楽Bに関しては、17.68となっており、他の2つの独楽に比べて分散値が高い。また同じくIScoreにおいても独楽Bが最も高い分散値となっている。この



図6 実験のために作成した3種類の独楽

Fig. 6 Three types of tops created for the experiment.

表 1 検出実験の結果

Table 1 Results of nut detection experiment.

独楽A(ナット数:5個)					
回数	ナット重さ	Gscore	Iscore	Koma Score	中央値との差
1回目	6	77	10	86	0.1%
2回目	6	71	10	81	-5.6%
3回目	6	77	9	86	0.0%
4回目	6	78	9	87	0.8%
5回目	6	73	10	83	-3.7%
分散値	0	6	0.06	4.65	
中央値	6.00	77	9.53	86.18	

独楽B(ナット数:10個)					
	ナット重さ	Gscore	Iscore	Koma Score	中央値との差
1回目	10	89	19	108	3%
2回目	10	85	19	105	0%
3回目	11	81	20	101	-4%
4回目	9	92	16	107	2%
5回目	9	82	18	101	-4%
分散値	0.56	17.68	2.70	10.15	
中央値	10.00	85.43	19.13	104.89	

独楽C(ナット数:12個)					
	ナット重さ	Gscore	Iscore	Koma Score	中央値との差
1回目	13	99	28	127	4%
2回目	12	93	26	119	-2%
3回目	15	97	26	122	0%
4回目	11	95	29	124	1%
5回目	12	93	27	120	-2%
分散値	1.84	6.09	1.24	7.84	
中央値	12	94.95	27.07	122.01	

理由として、独楽 A の場合は、ナットの配置数が少ないうえに、最もサイズが大きい M6 ナットを使っている割合が高いためにナットの検出精度が高くなり、分散値が低くなっていると考えられる。また、独楽 C の場合は、CD の外側に等間隔で配置されているため、誤検出や未検出があった場合でも GScore や IScore への影響が独楽 B に比べて少なかったと考えられる。一方で、独楽 B は、各種類のナットがランダムに CD 上に配置されている。誤差の値も 3% から -4% と 3 種類のなかで最も幅が広い結果となった。これらのことから独楽 B のようにランダムにナットを配置することで未検出や誤検出が発生しやすくなり、KomaScore の算出に影響を受けやすいことが推測される。また、それぞれの独楽の KomaScore の中央値からの誤差は最も大きな独楽 B で、-4% から 3% となり、現状の手法では、ナットの配置によって KomaScore の算出値は、約 7% の程度の誤差が生じる可能性がある。

5.3 KomaScore の回転能力評価実験

独楽測定プログラムによって算出された各独楽の KomaScore が独楽の回転能力を示しているかどうかを評価するために、ナット検出実験で作成した実験用の独楽を利用して、実際に独楽を回し、それぞれの回転時間を計測した。実験にあたっては、独楽の回すときの力や回し方の違いを

表 2 独楽回転実験の結果

Table 2 Top rotation time measurement experiment.

単位:sec				
被験者	回数	独楽A	独楽B	独楽C
20代男性A	1	5.54	18.94	47.48
	2	5.21	20.04	51.38
	3	3.8	17.28	59.49
20代男性B	1	3.28	11.6	61.03
	2	3.13	14.93	52.57
	3	1.95	12.05	51.8
20代女性A	1	4.34	16.45	51.23
	2	2.56	17.01	63.33
	3	4.03	15.54	58.78
20代女性B	1	3.22	18.23	55.91
	2	3.76	17.54	49.32
	3	4.03	16.88	54.32
6歳男子	1	3.7	15.21	54.49
	2	4.12	8.43	51.36
	3	6.43	15.15	67
6歳女子	1	3.21	9.32	43.2
	2	3.52	10.55	35
	3	5.13	12.19	48.1
平均値		3.94	14.85	53.10
分散値		1.13	10.89	52.95

考慮し、独楽を回す被験者は、20代の男性2名、20代の女性2名、幼児(6歳児の男女)2名とした。被験者はそれぞれの独楽を3回ずつ回転させ、独楽の回転が止まるまでの時間を計測した。

5.4 KomaScore の回転能力評価実験の結果

実験の結果を表 2 に示す。独楽の回転時間の平均は、いずれの被験者の場合でも独楽 A < 独楽 B < 独楽 C という関係を示しており、KomaScore の高い独楽ほど長く回るという結果となった。分散値の値に関しても同じく、独楽 A < 独楽 B < 独楽 C の順で大きくなっている。これは、各被験者の回し方によって独楽の軸に伝わる力のモーメントが変化したことではらつきが生じていると考えられる。これらの実験結果から、独楽 A は、3つの独楽のなかで最も回転しない独楽であり、独楽 C は回し方に失敗することがなければ、他の独楽と比べて長い時間回る独楽であるということが示された。また、各独楽の KomaScore の差と回転時間との差は KomaScore としては独楽 A と独楽 B との差が約 1.2 倍、独楽 A と独楽 C との差が約 1.4 倍であるのに対し、回転時間は、独楽 A と独楽 B との差が約 3.75 倍、独楽 A と独楽 C との差が約 13.4 倍となった。KomaScore のみで比較すると差は小さく感じるが、実際に回転させてみると独楽 A は、ほとんど回らない独楽であることが分かった。

5.5 評価実験のまとめ

実装した独楽測定プログラムでは、色とナットの形状を利用したテンプレートマッチングにより、ナットの位置を検出しているが、ナットと同じ大きさで似ている形状のイラストが偶然描かれている場合には、イラストとナットの区別をすることが難しい。具体的には、図 7 に示すような、ナットと同じサイズの円が描かれているイラストや、線画で表現された星などである。これらのイラストが多く描かれた独楽では正しい KomaScore を測定することができない可能性がある。この問題を解決するために、本システムを利用する場合には、意図的にこれらの図形をナットと同じサイズで描くことを控えるように指示する必要がある。

以上の実験結果から、現手法では、ナットの未検出や誤検出が原因となり、独楽によって約 7% の KomaScore の誤差が生じる可能性があることが分かった。このことから KomaScore は、独楽の回転能力を正確に示しているとはいえない。しかし、KomaScore に基づいた回転能力評価実験の結果では、算出された KomaScore と独楽の回転時間とを比較すると、KomaScore が高いほど長く回る独楽であることが示されている。つまり、極端に少なくナットを配置した独楽や、ナットをランダムに配置した独楽では、CD の端に規則的に配置した独楽より長く回転することはなく、KomaScore の値も 3 つの独楽のなかで最も高い結果となっている。また、それぞれの KomaScore の間には 15% 以上の開きがあることから独楽を複数回測定した際に 15% を超える KomaScore の向上があった場合には、独楽が改善されていると考えられる。以上の理由から、本システムによって提示する KomaScore は、独楽づくり活動において、独楽の回転能力を簡易的に示す指標として有効活用できると考えた。

また、回転能力評価実験では、85 点前後の KomaScore となった独楽 A は、点数のみに着目すると高得点に感じられるが、実際にはほとんど回らない独楽であり、KomaScore と独楽の回転能力には開きがあることが分かった。そこで、今回の実験の KomaScore の幅を参考にし、子ども達に KomaScore を提示する場合には、独楽測定プログラムから測定された 80 点から 130 点の KomaScore の幅を 30 点から 100 点にスケールして提示することで、KomaScore と独楽の回転能力の感覚的な差を補正することとした。



図 7 誤検出の可能性がある形状の例

Fig. 7 Examples of shapes that may cause false detection.

6. イベントの実施

6.1 イベントの概要

令和元年 7 月 20 日から 8 月 18 日まで期間に東芝未来科学館にて、夏休み特別イベント「怪盗グルグルの挑戦状」が実施された。特別イベントのメインテーマは「コマと回転のふしぎ」であり、本研究で開発したコマスカウターは、同イベントに派生した複数あるイベントの 1 つとして実施した。このイベントにおいて、著者らは、コマスカウター利用したエデュテイメント「つくってあそぼう!くるくるディスク」をデザインした。本エデュテインメントは、独楽を作ること、独楽の回転能力を測定すること、作った独楽で遊ぶことの 3 つの活動に分かれている。子ども達は、まず、受付でオリジナル独楽制作キットを受け取り、作業台でオリジナル独楽を作成する。次に、コマスカウターを利用して KomaScore を測定する。最後に、特製の独楽回しテーブルで自作した独楽を自由に回して遊ぶというものであった。なお、コマスカウターから提示された KomaScore に納得できない場合は、何度でも作り直して再測定することを許可した。図 8 に体験した子ども達の様子を示す。今回のイベントでは、スタッフ 6 名による運営で、コマスカウターを 3 台準備し、各台には測定するためのオペレーションを補助するスタッフを配置した。

6.2 イベントの様子

著者らが実施した本イベントは、夏休み特別イベントの会期中に 7 日間実施され、本イベント自体の参加人数は 5,017 名であった。実施した会場はとても盛況であり、体験者が止めどなく独楽をつくる姿が見られた。

オリジナル独楽の制作に関しては、受付での説明で、ほとんど戸惑うこともなく、幼児から大人までがそれぞれのオリジナル独楽を創作していた。創作した独楽をコマスカウターに設置し、測定ボタンを押すと 10 秒程度で KomaScore が提示されるため、子ども達は手軽に何度でも



図 8 イベントの実施風景

Fig. 8 Event implementation scenery.

独楽の測定を試みていた。提示された KomaScore が想定よりも低いと感じた子どもは、作業台に戻り、どのようにすれば高得点の独楽がつかれるのかをスタッフに聞くことが多かった。また、何故コマスカウターを利用すると独楽の回転能力を評価できるのかを不思議に感じている子どもも少なくなかった。このような場合にスタッフは、独楽が長く回るには、重心と慣性モーメントが重要であることを説明し、KomaScore は、これらの要素をスコア化していることを伝えた。そして、等間隔にバランスよくナットを配置することと、CD の端の位置に重いナットを配置することで KomaScore が高くなることを助言した。

子ども達は、スタッフの助言を参考に独楽を作り直していたが、中には、KomaScore が低くなる独楽と高くなる独楽の 2 種類を作成し、友達と同時にそれぞれの独楽を回すことで KomaScore と独楽の回る時間との関係を確認する姿も見られた。また、両親や兄弟と一緒に参加する体験者も多く、家族のなかで誰が最も点数の高い独楽を作るかを競い合う様子も見られた。

何度も独楽を作り直すことで自分の独楽の点数を高くすることに喜びを感じている子どもが多く、1 人で複数個の独楽をつくる子どもや、これまでに制作された独楽の最高点はどれくらいであるかをスタッフに訪ねる様子も見られた。

6.3 履歴データの分析

イベント終了後に独楽データベースに格納された履歴データを分析した結果、本システムの延べ体験者人数は 2,852 名であり、延べ測定回数が 6,538 回であったことが分かった。このことから 1 日の体験者数は、平均して約 407 人であり、イベントへの来場者の約 57% が本システムを体験していたことになる。履歴データから判明した体験者の測定回数とその割合を表 3 に示す。表 3 によると、2 回以上の測定を行った体験者（リピート測定者）は合計で 1,152 名であり、約 40% の体験者が独楽を作り直していたことが分かる。表 3 の項目にある非改善者とは、リピート測定者のなかで初回測定時のスコアを上回らなかった体験者のことである。また、リピート測定者のなかで

表 3 体験者の測定回数の割合

Table 3 Percentage of the number of measurements taken by the participants.

測定回数	1 回のみ	非改善者	改善者A	改善者B	体験者数
1回	1700				1700
2回		213	72	207	492
3回		57	74	118	249
4回		21	39	59	119
5回		9	34	43	86
6回		7	24	23	54
7回以上		20	78	54	152
合計	1700	327	321	504	2852
割合	59.6%	11.5%	11.3%	17.7%	

最終測定時の KomaScore が初回測定時よりも上回っているリピート測定者を改善者と定義し、さらに最終測定時の KomaScore の増加率が 7% 未満であった改善者のことを改善者 A とし、7% 以上の増加率があった改善者のことを改善者 B としている。表 3 から、KomaScore の誤差率を超える測定値である 7% を上回った改善者 B の人数は、合計で 504 名であり、これは、リピート測定者の 43.7% であった。しかし、改善者 A でも、最終測定時に最も高い KomaScore を記録しているとは限らない。改善者は、独楽を作り直す際に、ナットの配置を変えるため、測定ごとに KomaScore を上下させていると考えられる。そこで、改善者の KomaScore の初回測定時から最大測定値までの推移を分析した。図 9 は、測定回数ごとに KomaScore の推移幅が 10% 未満、10% 以上、20% 以上で推移している改善者の割合を示したグラフである。図 9 から測定回数を重ねるごとに 10% 以上 KomaScore を上下させている人数の割合が増加し、反対に 10% 未満の割合が少なくなっていることが見て取れる。また、改善者が多回数の測定（独楽のつくりなおし）を試みることで、KomaScore が向上しているかどうかを調査するため、改善者の初回測定値と最大測定値の中央値から KomaScore の増加率を分析した。表 4 に分析した結果を示す。表 4 から、改善者は、測定回数を重ねるごとに、最大測定値が向上しており、それにともなって、KomaScore の増加率が高くなる傾向があることが分かった。

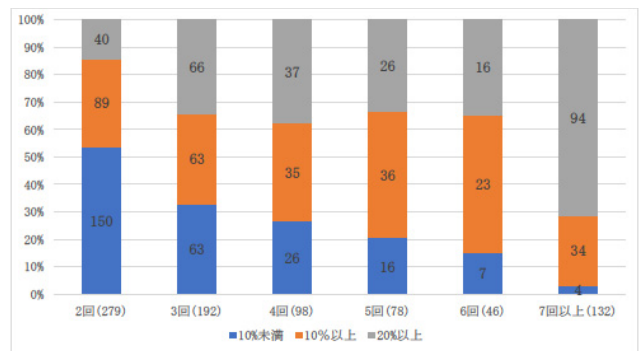


図 9 初回測定時からの KomaScore 増加率

Fig. 9 Percentage increase in KomaScore from the first measurement.

表 4 改善者の KomaScore 増加率

Table 4 Percentage increase in scores of those who increased their scores.

測定回数	初回測定値	最大測定値	増加率
2回	72.6	74.0	102%
3回	70.3	77.2	110%
4回	72.0	79.6	111%
5回	71.4	81.7	114%
6回	73.8	83.2	113%
7回以上	70.9	83.5	118%

以上の分析結果から、コマスカウターで測定回数を重ねることで、KomaScoreの幅が広くなり、最大測定値が向上する傾向があることが推察された。これらのことから今回のイベントでは、多回数の測定に及んだ体験者ほど、独楽をつくりなおす工程で試行錯誤を繰り返し、独楽を改善させていたことが示唆される。

6.4 イベントの考察

実施したイベントを通じて得られた知見と履歴データ分析から独楽スカウターの効果について考察する。本システムを利用したイベントでは、定員を設けることなく、来場者が随時体験する形式であった。このため、1日の平均体験者数は400名を越えていた。家族で訪れることの多い科学館でのイベントにおいて、来場者の約57%が体験していたことから、来場したほとんどの子どもが本システムを体験していたと推察できる。このことから、今回のイベントは、大多数の来場者に対応できていたといえる。

コマスカウターで独楽の回転能力をKomaScoreとして提示することは、当初の計画どおり、子ども達がよく回る独楽を作る上での簡易的な指標として有効に働いているようだった。また、独楽の回転能力を可視化する副次的な効果として、コマスカウターでは、他人が作った独楽の回転能力も可視化できるため、一緒に体験した家族や友人と創作する独楽の良し悪しをKomaScoreで比べて楽しむという姿が見られた。このような客観的に分かりやすい指標があることで、独楽づくりを通じた体験者同士のコミュニケーションを活発にする効果があったと考える。

科学教育の面では、KomaScoreを向上させる方法やコマスカウターで独楽の回転能力を測定できるしくみについてスタッフから説明を聞くことや、それらの助言に基づいて実際に何度も独楽を作り直すことで、重心や慣性モーメントといった独楽の科学的な要素に触れていた。しかしながら、今回は、イベントを通じた体験時間が20分から30分程度と比較的短時間であったため、参加したすべての子どもにも重心と慣性モーメントが独楽の回転のしくみに関わっていることを十分に理解させたとはいえない。一方で、イベント担当の科学館スタッフからは、独楽をテーマとした講義形式の科学体験教室で、本システムを教材ツールとして利用できれば、分かりやすく独楽の回転の仕組みを伝えられる可能性があるとの助言があった。

創作活動の傾向としては、履歴データの分析から、多回数の測定をしている体験者ほどKomaScoreの幅が広く、初回の測定時よりもKomaScoreが増加することが分かった。このことから、測定回数を増やすことで試行錯誤の創作活動に導き、よく回る独楽をつくらせることにつながるができると考えられる。しかし、今回のイベントでは、再測定に及んだ体験者は、全体験者の約4割にとどまっている。さらに、3回以上の多回数の創作活動を実施した体

験者は、660人と全体験者の約2割となっている。今後は、いかに積極的に測定回数を増やすかが重要だと考える。

また、現状のコマスカウターには、次のような課題も見取れた。まず、独楽測定の精度が厳密でないため、わずかに独楽の配置を変えて測定し、KomaScoreが変化した際には、その独楽の配置によって、点数が向上しているのか、それとも測定誤差により点数が向上したのかを正確に判断することが難しい。実際は改善しているにもかかわらず、点数が低下することや反対に改悪していても点数が向上するといったことが起きていることは否定できない。他にも、KomaScoreの提示方法に課題があると考えられる。今回のイベントでは、重心を示すGScoreと慣性モーメントを示すIScoreを加算し、KomaScoreとして提示していたが、この提示手法では、直観的に独楽の回転能力を示すことはできるものの、独楽の重心や慣性モーメントがナットの配置によってどのように変化しているかを詳しく伝えることができない。科学体験として、さらに詳細に独楽の回転のしくみを教示するには、測定するKomaScoreの提示方法について再考する必要がある。

7. まとめと今後の展望

本研究では、オリジナル独楽の回転能力をスコアとして表示できる「コマスカウター」を提案した。実装したシステムを基に独楽をテーマとしたエデュテインメント「つくってあそぼうくるくるディスク」をデザインし、独楽をテーマとしたイベントでエデュテインメントとして実施した。本システムを利用したイベントは、盛況であり、大多数の子ども達がオリジナル独楽を作成することや、作った独楽をまわして遊ぶことを楽しんだ。

また、コマスカウターによって提示されるKomaScoreは、独楽を改善する指標としてだけでなく、スタッフとの交流や、家族や友人らとのコミュニケーションをするきっかけとして有効に働いていた。子ども達はイベントの中でのコミュニケーションを通じて、独楽の回転には重心や慣性モーメントといった科学的な要素が関連しているということに触れていたと考えられる。以上のことから、本システムは以下の2点の特徴がある。

- (1) 大多数の子ども達が比較的短い時間で多回数の改善が試みられる創作体験ができる
- (2) 創作した独楽（ツール）を通じて科学教育に関連したエデュテインメントを体験できる

しかしながら、現状のシステムでは、ナットの認識の精度が十分でなく、科学的な側面から独楽の回転能力を正確に評価するまでには至っていない。ナット検出実験の結果から、1, 2個のナットの未検出や誤検出が生じることやCDに描かれたイラストの形状によって誤検出が高くなるということが分かった。自由な創作活動の場を担保しつつ、科学的な側面からKomaScoreを算出するためには、いかなる

ナットの配置でも正確に位置や種類を検出できる精度が必要である。

今回のナット検出手法では色情報のみを利用した検出手法であったため、撮影環境のわずかな違いでもナット検出に影響を受けてしまう。この改善案として、赤外線カメラや深度センサを利用したナットの位置検出が考えられる。

赤外線投光器と赤外線カメラを利用して、物体を検出する手法は、従来から様々なインタラクティブシステムに利用されている [26], [27], [28]。赤外線カメラで独楽を撮影することで可視光の色情報を大幅にカットすることができるため、誤検出の原因であったイラストの形状による影響を受けることなくナットの撮影が可能となる。現状の測定プログラムでは、ナットの種類や位置は、主に色情報を利用していたが、はじめに赤外線カメラによって取得した画像からナットの位置を検出し、その後、取得したナット位置の周囲にある色情報からナットの種類を選定する手法に変更することで、ナットの検出精度を上げられる見込みが高い。この手法は、深度センサを利用する場合にも同様の手順で利用することができる。

近年では、人の動きやジェスチャーを認識するために RealSense [29] などの深度センサがインタラクティブシステムのインタフェースとして利用されている。このような深度センサは、高い分解能で空間に配置されている物体を認識することが可能である。本研究においても深度センサを撮影時に利用することで、ナットを CD 配置することで生じる凹凸からナットの位置を取得できると考えられる。

今回のイベント実施から、現状の KomaScore の提示手法には改善の余地があることが分かった。今後は、ナットの配置と独楽の回転要素との関連が分かりやすい提示手法を採用する必要がある。ナットの配置位置とそれぞれの関連に重点を置いた KomaScore の提示手法としては、重心や慣性モーメントだけでなく、ナットの重量や配置数など、独楽の回転に関連する要素を個別に表示する GUI に変更することや、履歴データから体験者ごとの KomaScore の変化を比べられるような機能を追加することが考えられる。また、さらに創作活動を活発化させる工夫としては、本システムの静止画像を分析する特徴を活用し、独楽に描かれた絵の複雑さや色数などを取得して、それを芸術点として提示することも考えられる。今後は、これらの課題を改善した後に、本システムの教育効果についての評価を試みたい。

参考文献

- [1] PLACEHOLDER：リトルプラネット，入手先 (<http://litpla.com>) (参照 2020-04-15)。
- [2] バンダイナムコ：あそびパーク PLUS，入手先 (<https://bandainamco-am.co.jp/kids/asobiparkplus>) (参照 2020-04-15)。
- [3] チームラボ：お絵描き水族館/Sketch Aquarium，入手先 (https://futurepark.teamlab.art/playinstallations/sketch_aquarium/) (参照 2020-04-15)。
- [4] Emma, N. and Eva, H.: Using Children's Drawings to Elicit Feedback on Interactive Museum Prototypes, *Proc. IDC '12*, pp.276–279, ACM (2012).
- [5] 千葉市メディア芸術振興事業実行委員会：THEATER ZOO ほくらのマジカル動物ランド，入手先 (<https://theaterzoo.1001p.jp>) (参照 2020-04-15)。
- [6] RICOH：紙アプリ，入手先 (https://www.rioh.co.jp/rental/paper_app/) (参照 2020-04-15)。
- [7] 1-10Works：ふしぎなかみひこうき，入手先 (<https://works.1-10.com/product/fushiginakamihikouki/>) (参照 2020-04-15)。
- [8] Cowan, K.: Multimodal Technologies in LEGO House: A Social Semiotic Perspective, *Multimodal Technologies Interact, MDPI*, Vol.2, No.4, 70, pp.1–13 (2018).
- [9] 小松祐貴，桐生 徹，中野博幸，久保田善彦：凸レンズ実験と作図を関連させる AR 教材の開発，*日本教育工学会論文誌*，Vol.38, pp.21–24 (2014)。
- [10] 藤井美珠紀，大西建輔，北林照幸，藤代武彦：放物線を体感できる VR アプリの試作とその教材としての評価，*FIT2018*, Vol.4, pp.289–290 (2018)。
- [11] 今井弘二，村山泰啓，松下幸市朗：地球科学における対話形式のデジタル教材の開発とその評価の試み，*日本教育情報学会教育情報研究*，Vol.33, No.1, pp.33–40 (2018)。
- [12] 鈴木久美子，板倉嘉哉：小学校における飛行機を題材とした授業づくりと実践，*千葉大学教育学部紀要*，Vol.59, pp.75–83 (2011)。
- [13] 花木 良，伊藤杏優，杉田岳史，林 訓史：幼児から大人までを対象とした数学と関連付けたコマの参加型展示の実践研究，*日本科学教育学会研究報告*，Vol.33, No.8, pp.7–12 (2019)。
- [14] 岩部洋育，藤田 剛，島山泰亮，下條遼太，菊池恭平：独楽づくりを通じた慣性モーメントの学習，*日本工学教育協会第 62 回年次大会工学教育講演会講演論文集*，Vol.1, pp.704–705 (2014)。
- [15] 日本科学技術振興財団・科学技術館：青少年のための科学の祭典，入手先 (<http://www.kagakunosaiten.jp/>)。
- [16] 科学技術振興機構：サイエンスポータル，入手先 (<https://scienceportal.jst.go.jp>)。
- [17] 白井仁人，マイクロ科学館：新しい科学教育法の開発，一関工業専門学校研究紀要，Vol.52, pp.1–8 (2017)。
- [18] Roussou, M.: Learning by Doing and Learning Through Play: An Exploration of Interactivity in Virtual Environments for Children, *Computers in Entertainment*, Vol.2, No.1, pp.1–10 (2004)。
- [19] Ahn, J., Clegg, T.L., Yip, J., et al.: Science Everywhere: Designing Public, Tangible Displays to Connect Youth Learning Across Settings, *Proc. IDC '18*, pp.1–12, ACM (2019)。
- [20] Clegg, T. and Kolodner, J.: Scientizing and Cooking: Helping Middle-School Learners Develop Scientific Dispositions, *Science Education*, Vol.98, No.1, pp.36–63 (2014)。
- [21] Switch：まわる，うつ，ひろがる，入手先 (<http://switch-project.jp>)。
- [22] 的場やすし，佐藤俊樹，小池秀樹：コマあそび体験を拡張する遊具システム，*情報処理学会論文誌*，Vol.53, No.3, pp.110–1118 (2012)。
- [23] Yagimoto, K., Sato, H., Cho, S., Shimojima, A. and Suzuki, H.: MR SPINTOP, *Laval Virtual ReVolution 2011* (2011)。
- [24] NGK サイエンスサイト：よく回るコマをつくろう！，入手先 (<https://site.ngk.co.jp/lab/no54/>) (参照 2020-04-15)。
- [25] 戸田盛和：力学，岩波書店 (2017)。

- [26] 石川 優, 牟田将史, 田丸順基: 花水: 多視点観察及び移動が可能なフォグスクリーン, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.10, No.2, pp.227–236 (2014).
- [27] Kakehi, Y., Hosomi, T., Iida, M., et al.: Transparent tabletop interface for multiple users on Lumisight table, *Proc. 1st IEEE International Workshop on Horizontal Interactive Human-Computer Systems (TABLETOP '06)*, pp.141–148 (2006).
- [28] Chan, L., Wu, H., Kao, H., et al.: Hui-Shan Kao: Beyond the surface: 3D interactions for tabletop systems, *ACM SIGGRAPH 2010 Emerging Technologies*, Article No.8 (2010).
- [29] Intel Realsense, available from (<https://www.intelrealsense.com/>) (accessed 2020-04-15).



鈴木 浩 (正会員)

神奈川工科大学准教授。2006年情報科学芸術大学院大学メディア表現研究科修了。2015年神奈川工科大学大学院工学研究科修了。博士(工学)。現在、子どもを対象としたインタラクティブデザインやエデュテインメント

システムに関する研究に従事。日本教育工学会、日本VR学会各会員。



津布久 直樹

2009年神奈川工科大学大学院工学研究科情報工学専攻博士前期課程修了。2011年より(有)トリガーデバイスにてインタラクティブシステムの開発に従事。