

Wobbly Cylinder: 見た目からの予想を超える転がり挙動をユーザが能動的に操作・体感できる円筒型転がり機構と転がり環境

細倉結衣^{†1} フラハティ陸^{†1} 橋田 朋子^{†1}

概要: 人はモノの形状などの視覚的な手がかりからその物理的挙動を推測しがちである。しかし、見た目に頼りすぎて対象を判断することは弊害となることもある。我々は、人がモノには見た目以上の物理的挙動の可能性があると思うには、ユーザ自身が能動的に対象の構造を操作し、見た目から予測されること以上の振る舞いに気が付く過程が重要と考える。そこで本研究では、物理的挙動として日常的によく目にする転がり、それを引き起こすモノとして円筒容器を取り上げ、円筒形状の転がりは質量と重心位置の変化で変えられることに着目した。そこで内部に円筒形状を分割した形状の充填パーツをおもりとして挿入するパターンや、転がる環境をユーザ自身が操作することで、円筒容器の予想外の転がりを体験できる Wobbly Cylinder を提案する。円筒形状から一般的に予測される転がりとは異なる挙動として今回は水平面での揺動、斜面反対方向への揺動、斜面上での静止という3つの挙動の実現を目指し、適切な充填パターンや転がり環境の指針を示した。さらに実際にユーザに体験してもらい、円筒容器の予想外の転がり挙動に提案システムの操作を通じて気が付けることを確認した。

1. はじめに

私達は、ある形状のモノが特定の環境下でどのような振る舞いをするかを自然と学んでいる。そのため人はから経験的に予測できる物理法則に則ったモノの挙動には比較的無頓着であるが、異なる挙動をするものには驚き注意をひかれやすい。最近では、このような観点から、モノに電子的・機械的制御を組み合わせることでモノに見た目から規定される以上の拡張された振る舞いを可能にする作品[1][2]や、モノの見た目からの予想を裏切る内容を体験させる作品などもある[3][4]。筆者らも、モノには見た目（視覚的な手がかり）以上の物理的挙動の可能性あることをより腑に落ちる形で体験してもらおうことを目指している。そのためにはあくまでその物理的挙動が形状からの制約を受けるモノを題材とし、体験者が能動的にモノの外観以外の構造などを操作する中で予想外の振る舞いと出会えることが重要と考える。またその対象となる物理的挙動としては身近なもので、かつ変化が大きいものがわかりやすい。

そこで本研究では、物理的挙動として地球の重力で引き起こされ日常的によく目にする「転がり」を、転がりを引き起こすモノとして茶筒や製菓容器としてなじみ深い円筒容器を取り上げる。円筒容器の転がりは質量と重心位置の変化で変えられることに着目し、円筒容器の内部に、円筒容器を分割した形で作った充填パーツをおもりとして挿入するパターンや転がる環境をユーザ自身が操作することで、円筒容器の予想外の転がりを体験できる Wobbly Cylinder (図1) を提案する。

円筒形状から一般的に想像される転がりとは水平面での静止、斜面での斜面方向への転がりと考え、これらと異なる3つの挙動を実現することとし、適切な円筒容器の充填パターンや水平面と斜面での円筒容器の設置角度、について明らかにする。これらを設計指針としてまとめ、3Dプリンタを用いて実装し、ユーザによる動作確認や予想外の転がりの応用方法についてまとめる。

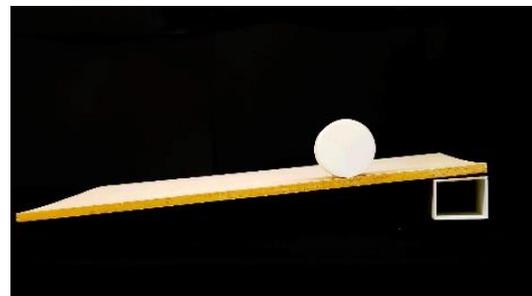


図1 Wobbly Cylinder

2. 関連研究

対象に電子的・機械的制御を施すことでその物理的な挙動を変える事例として、実際には接触しないが適切なタイミングで倒れられるエスパードミノ[1]や空中での静止や任意の方向への移動が可能なボール型のデバイス Hoverball[2]などが挙げられる。これらの事例では対象の形状から本来規定される以上の任意の物理的挙動を生み出せる反面、対象の形状とその新たに加えられた挙動との関係性は低くわかりにくい。本研究では電子的・機械的制御ではなく、内部の構造の工夫により対象の見た目から想像される物理的挙動とは異なる振る舞いを実現する。

^{†1} 早稲田大学

対象の見た目からの予想を裏切る内容を、機械的・電子的制御なしに実現する仕組みとして、メッシュの直方体に大理石のパターンを印刷するテクスチャの操作により、見た目の硬さと異なる硬さを実現する椅子 SOLIDITY[3]や、内部構造の違いにより、同じ見た目異なる重さなどの触覚的な感覚を実現する手で見るとシカク[4]が挙げられる。これらの作品においてユーザは基本的には予め用意された予想外の内容を受動的に鑑賞する。本研究ではユーザ自身が、対象の内側の構造を操作できる仕組みにより、対象のから予想されるのとは異なる振る舞いを自らの手を動かし能動的に体験できる点が異なる。

3. Wobbly Cylinder の提案

Wobbly Cylinder は円筒形状の予想外の転がり挙動をユーザの操作によって実現可能な仕組みであり、円筒型転がり機構および、転がり環境から構成される。予想外の転がり、即ち円筒形状から一般的に想像される転がりとは異なる挙動として今回は水平面での揺動(回転角度が 2π rad 未満)・斜面反対方向への揺動・斜面上での静止という3つの挙動の実現を目指す。本章ではまず、円筒状の剛体の転がりの原理を述べ、円筒状のモノの転がり方は「質量」と「重心位置」で変えられることを確認する。次に円筒形状の容器の中身でこれら进行操作する方法として、内部を同じ形に分割した上で、分割した最小の形の立体をおもりとして充填することとし、この適切な充填パターンについて指針を示す。さらにこの円筒形状を水平面と斜面上にそれぞれ置くことを考えると、その設置角度によって上述した水平面での揺動・斜面反対方向への揺動・斜面上での静止という挙動の実現の可否が異なるため、この適切な設置角度についても指針を示す。

3.1 円筒状の剛体の転がりの原理

円筒状の剛体の転がりの原理として、転がる対象が水平面の場合と斜面の場合との挙動について示す。まず水平面において転がる対象は重心にかかる重力方向の力と垂直抗力がつりあっている状態で静止する。またこのつりあいがずれることで復元力が働き転がる。これは重心位置の位置エネルギー U_g の変化に基づくもので、対象の質量を m 、重力を g 、重心位置が転がりにより変化する高さを Δh とすると式(1)で示すことができ、転がりに伴う重心の移動時の Δh が、回転中心と重心が一致する場合と異なると、挙動に変化が生まれる。また、転がり距離は回転中心から重心を通る延長線上の円周分である。

$$U_g = mg\Delta h \quad (1)$$

次に斜面上では水平面で記載した重心位置の位置エネルギーの変化に加え、斜面上にいて得る位置エネルギーが加わりそれらの合算値が挙動に影響を与える。これは、式(1)より重心が回転中心とずれることで、転がりに伴う重心の移動時の Δh が、回転中心と重心が一致すると

きは異なる、かつ斜面の高さ分の位置エネルギーが加わり、斜面上でも静止や斜面反対方向への揺動といった挙動が生まれる。

3.2 円筒型転がり機構の設計

円筒型転がり機構の転がり方は3.1で示した理論より、対象の質量 m と重心位置が影響すると考えられる。提案する円柱型転がり機構は、質量と重心位置を簡易に変えるため、容器内を同じ形に分割し、分割した最小の形で作った中が充填された立体をおもりとしてこの容器の内部に挿入する構造とする。なお、同じ立体で中が空のものも同時に作り、充填した立体がないところに入れることで動かないようにする(仕切りとする)。円筒容器内の分割数は多様に導き出せるが今回は4分割とする。空の立体と中が充填された立体の組み合わせパターン(充填パターン)は、充填した立体の個数を0から4個まで変化させ、回転したのもも同一と考えると6パターンある。この中で回転中心と重心位置が重ならないものは図2に示す3つのパターンがあることから今回はこの3つを用いる。なお図2は中が空のものを白色、充填したものを黒色で示している。

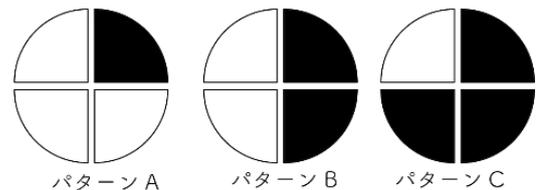


図2 充填パターン

3.3 転がり環境の設計

3.2節で選択した充填パターンを持つ円筒型転がり機構に関して、さらに水平面での揺動・斜面反対方向への揺動・斜面上での静止の3つを実現するには転がり環境として、面に対する設置角度および斜面の傾斜角度が重要となる。そこで回転中心・重心・接地面に垂直な回転中心を通る中心線を結ぶ線の角度を α rad(図3)とし、初期位置の α を設置角度と定め、転がり挙動についてまとめる。

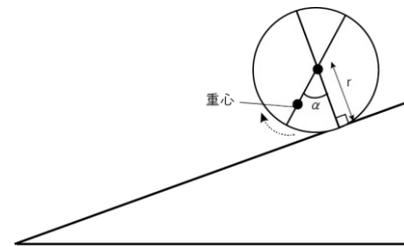


図3 設置角度の模式図

まず水平面においては重心の位置エネルギーのみを考えるため、設置角度と挙動の関係性は重力方向の力と垂直抗力がつりあっている 0 rad, π rad, 2π rad で静止し、重心の位置エネルギーの変化を伴う $0 < \alpha < \pi$, $\pi < \alpha < 2\pi$ の間でそれぞれ左回転、右回転の揺動を示すと考えられる。

次に斜面上においては重力方向の力と垂直抗力がつりあっている設置角度 0 rad, 2π rad で静止すると考えられる。

一方で、その他の目的の挙動を示す設置角度の中で予測が難しい設置角度を β rad で示すと、斜面方向への転がり、静止、斜面反対方向への揺動を示す設置角度はそれぞれ $0 < \alpha < \pi + \beta$, $\pi + \beta$, $\pi + \beta < \alpha < 2\pi$ となる。この β に関しては実装のところで明らかにする。

4. Wobbly Cylinder の実装

提案システムは大別して円筒型転がり機構と転がり環境から構成される。本システムの全体像として円筒型転がり機構を水平面に置いた様子と斜面上に置いた様子の写真を図4に示す。

4.1 円筒型転がり機構

円筒型転がり機構は、円筒容器本体、容器の開閉のための蓋、円筒容器内部に挿入可能な充填パーツから構成される。容器部分は茶筒を模して製作し、容器の形状は日本人の手の大きさを参考[5]にした高さ5.0 cm、直径5.5 cmの円筒型とした。図5に円筒容器を蓋で閉じた時の様子と開いた時の様子をそれぞれ示す。円筒が容器に挿入する充填パーツは図6のように中身が空のサーフェスパーツと中身が詰まったソリッドパーツの2種類を設けた。円筒容器部分、充填パーツ共に3Dプリンタを用いABS材料を使用し製作した。充填パーツが内部でしっかり固定されるよう容器と充填パーツ部分の隙間を0.25 mmとした。円筒容器および充填パーツの質量を表1に示す。また、容器内部に入れる充填パーツの挿入方法である充填パターンは図2に基づき、A,B,Cの3つを設けた。それぞれの質量を表2に示し、3つのパターンで充填した様子を図7で示す。

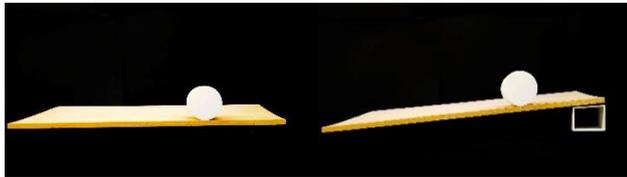


図4 円筒型転がり機構(左: 水平面 右: 斜面)



図5 円筒容器(左: 閉栓状態 右: 円筒容器(開栓状態))



図6 充填パーツ(左: ソリッドパーツ/右: サーフェスパーツ)

表1 円筒容器・充填パーツ質量

パーツの種類	容器本体	蓋	パーツ1	パーツ2
ABS樹脂(g)	16	7	7	2

表2 充填パターン質量

パターンの種類	A	B	C
ABS樹脂(g)	13	18	23

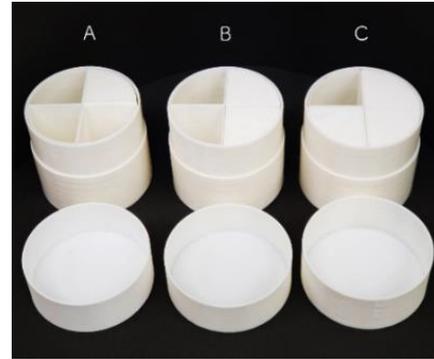


図7 システム構成

4.2 転がり環境

4.2.1 設置面(斜面)の角度

円筒型転がり機構を設置する面として水平面と斜面を設け、両環境共に木の板で製作した。製作物および斜面の摩擦係数が規定値で示されていなかったため、円筒容器の各充填パターンにおいて、斜面反対方向への揺動・斜面上での静止という目的の物理的挙動を引き起こす斜面角度を簡易実験により求めた。結果を表3に示す。いずれのパターンでも目的の挙動が十分にみられた動作環境は傾斜角度 2.5° だったため、これ以降の傾斜角度は 2.5° とする。

表3 転がり環境の適正ありなし

傾斜角度(°)	パターンA	パターンB	パターンC
2.5°	○	○	○
5.0°	△	△	△
7.0°	×	×	×

※○:目に見えて目的挙動の変化がある △:目的挙動の変化が小さい ×:目的の挙動の変化が見られない

4.2.2 円筒型転がり機構の設置角度

円筒型転がり機構の面に対する設置角度は実現したい挙動に応じて異なる。今回実装した円柱型転がり機構を用いて、3.3節で示した設置角度と挙動の関係性の予測と一致しているかの確認を行った。まず水平面で挙動の観察を行い、 0 rad, π rad, 2π rad で静止し、 $0 < \alpha < \pi$ で左回転の揺動、 $\pi < \alpha < 2\pi$ の間で右回転の揺動という予測と一致する結果が得られた。表4に結果をまとめる。

次に正確な予測が難しかった斜面における設置角度と挙動の関係性について実験により確認した。具体的には斜面方向への転がり・斜面上での静止・斜面反対方向への揺動といった目的の挙動を示す設置角度を求めるため、斜面

上で円筒型転がり機構を $\pi/4$ の設置角度ごとに5回ずつ転がし斜面運動方向の変位、即ち1s間で転がり距離の変位(cm/s)を測定した。円筒型転がり機構のパターンA, B, Cのそれぞれに関して設置角度が0 radから 2π radまでの斜面運動方向の変位(cm/s)を図8・図9・図10に示す。

各グラフの斜面運動方向の変位が0即ち静止する地点に着目すると、 β radは $5\pi/4$ に近似する値であると分かった。結果を表5に示す。また、設置角度と物理的挙動の変化の関係性は同じ斜面で転がす場合、いずれの重心位置、質量においても表5で示す値で変化すると考えられる。

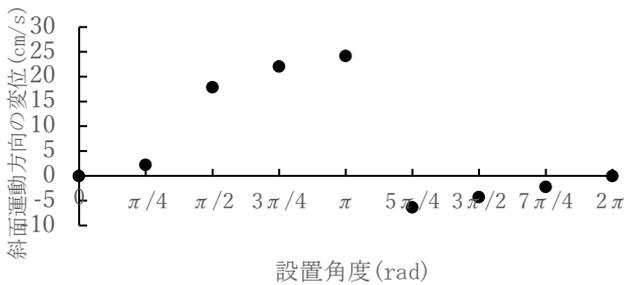


図8 パターンAの斜面運動方向の変位

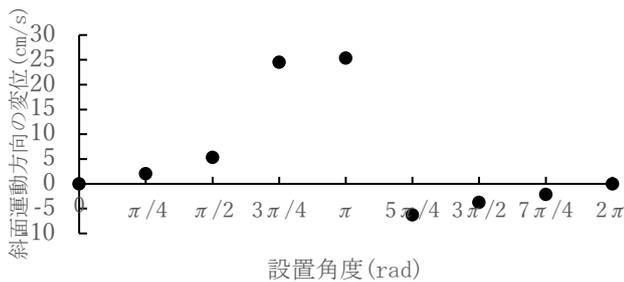


図9 パターンBの斜面運動方向の変位

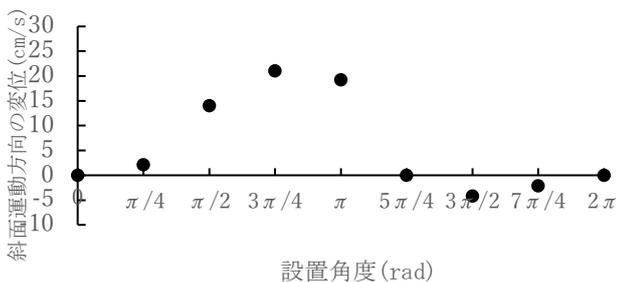


図10 パターンCの斜面運動方向の変位

表4 設置角度の変化に伴う物理的挙動の変化(水平面)

設置角度 (rad)	0	$0 < \alpha < \pi$	π	$\pi < \alpha < 2\pi$	2π
物理的挙動	静止	左方向への揺動	静止	右方向への揺動	静止

表5 設置角度の変化に伴う物理的挙動の変化(斜面)

設置角度 (rad)	0	$0 < \alpha < \pi + \pi/4$	$\pi + \pi/4$	$\pi + \pi/4 < \alpha < 2\pi$	2π
物理的挙動	静止	斜面方向への転がり	静止	斜面反対方向への揺動	静止

5. 動作確認と応用例

5.1 ユーザによる動作確認

提案システムを用いて、体験者が自発的に円筒型容器の外観から一般的に想像される転がり以上の転がり挙動を見つめられるかを明らかにするため、簡易な動作確認実験を行った。実験参加者は21~23歳の男女4名である。手順としては、「円筒形状が引き起こす一般的な転がるといった物理的挙動とは異なる振る舞いを二種類の充填パーツを円筒容器に計4つ充填することで実現して下さい」と指示し、水平面・斜面における円筒型転がり機構内の充填パターンや設置角度を自由に試してもらった。実験順序は水平面、斜面の順で行った。また終了後に「体験を通じ感じたことや考えられそうな応用例、ご意見ありましたら記載をお願いします。」といったアンケートを実施した。

4人の体験者の操作の様子を、主に提案システムで意図した3つの目的物理的挙動を見つめられるかに注意して体験者が目視で観察した。その結果、4名全員円筒型転がり機構の目的の挙動のうち、水平面での揺動・斜面上での静止を生み出す組み立て方法に30秒から1分間で気が付いた。一方で、斜面反対方向への揺動に関しては2分から4分程度かけて気がついていった。また「偶然見つけた」というユーザの意見より、意図しない場面で発見している様子が多く見られた。これらの結果から水平面での揺動・斜面上での静止という挙動は、体験者の経験から気がつき操作している一方で、斜面反対方向への揺動は試行錯誤の中で偶然に気が付く可能性が高い挙動であるとわかった。実験中の様子としては、設置角度で関わる挙動の変化に驚く様子や、機構の中身を光に透かし確認をするという行動などが見られた。

アンケートの結果としては「斜面と逆方向に動き始めたときは、分かっているにもかかわらず驚きがあった。また、重り1個中空3個を入れたときのみ、斜面方向に転がりかけてから、元の位置に戻るといった挙動があり、それも驚きがあった。」、「4つの部品の組み合わせの数が有限個なので、パターンを分類できればより部品の種類が多い場合についても議論できそうだと感じました」などの結果が得られた。以上より、ユーザが提案システムによる円筒型転がり機構の振る舞いに驚きつつ試行錯誤した様子が伺え、さらに組み合わせパターンの拡張に関する検討も今後必要なことが示唆される。

5.2 円筒型転がり機構の応用例

提案した Wobbly Cylinder の目的挙動のうち斜面上での静止と斜面反対方向への揺動に関して日常での応用例をそれぞれ示す。

5.2.1 斜面上での静止の陳列への応用

提案システムで可能な振る舞いのうち、斜面上での静止は意外性のある陳列方法などに应用可能と考えられる。図 11 に示すように文房具などの多数の小さな類似商品をまとめてみせるような場合に、商品で円筒容器の内部の充填するパターンを操作することで、傾斜面で商品を静止した陳列が可能となる。

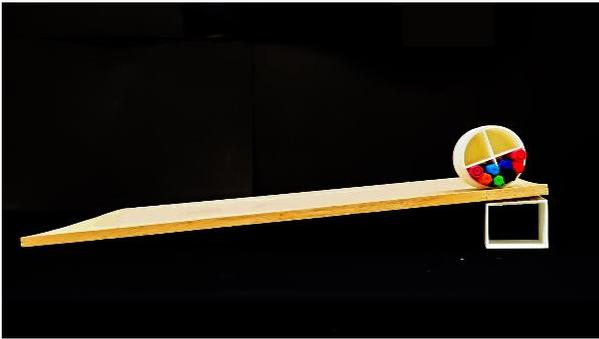


図 11 陳列例

5.2.2 錯覚を用いた予想を超える振る舞いの拡張

提案システムでは対象の内部構造の工夫により、見た目からの予想を超える振る舞いを実現しているが、図 12 に示すように立体錯視を用いることで、円筒型転がり機構の予想外の振る舞いをさらに拡張する応用も考えられる。具体的には既存の円筒型転がり機構で実現できる斜面上の静止・斜面反対方向への揺動に加え、立体錯視のうち反重力三連一連滑り台[6]を用いることで、充填パーツを挿入しない円筒容器を錯覚により視覚的には斜面反対方向に転がる挙動を観察できるようになる。これにより、重力方向の誤認識を促すことが可能になる。

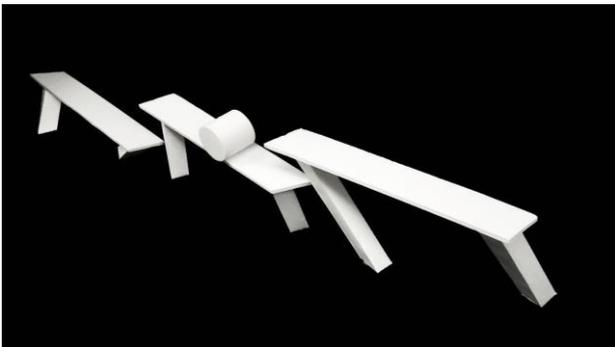


図 12 反重力三連一連滑り台

6. まとめと今後の展望

本研究ではモノには見た目（視覚的な手がかり）以上の物理的挙動の可能性があることを体験してもらうことを目指し、地球の重力で引き起こされ日常的によく目にする「転がり」を用いた体験者が能動的にモノの外観以外の構造などを操作する中で予想外の振る舞いと出会えるシステム「Wobbly Cylinder」を提案した。具体的には質量と重心位置の変化によって転がりが増減する円筒形状に着目し、ユーザにより内部の充填方法を操作する事で、ユーザ体験として物理的挙動を変化させる「円筒型転がり機構」および機構を設置する転がり環境を製作した。これに伴い円筒形状の斜面反対方向への揺動・斜面上での静止という、一般的には想像されない転がり挙動を実現した。さらに、斜面上の静止および斜面反対方向への揺動を用いた利便的なものやエンターテインメントにつなげる応用例について述べた。

今後の課題としては、円筒型転がり機構の素材と大きさ・質量についての言及が挙げられる。より摩擦が大きい素材で円筒容器をプリントすることで幅広い設置位置に対応した転がりの制御ができると考えられる。大きさに関しては円筒半径を大きくすることで、回転中心と重心位置の距離が長くなり、回転のしにくさを表す物理量である慣性モーメントが増え、より勾配のある傾斜においても本研究で目的とした水平面での揺動・斜面反対方向への揺動・斜面上での静止の挙動を引き起こすことができると考えられる。質量に関しては充填パーツを異なる素材のものに変更することで、一定の質量を超えると転がりが滑り挙動に変換されると考える。

参考文献

- [1] “エスパードミノ”。
http://archive.jmediaarts.jp/festival/2010/entertainment/works/14_ej_Esper_Domino/ (参照 2021-12-02).
- [2] Kei Nitta, Keita Higuchi, Jun Rekimoto. HoverBall : Augmented Sports with a Flying Ball. AH '14: Proceedings of the 5th Augmented Human International Conference March 2014, Article No.: 13, p.1-4.
- [3] “SOLIDITY” .
<https://yoy-idea.jp/works/solidity/> (参照 2021-12-18).
- [4] “手で見えるシカク”。
<http://yujimiyano.com/works/te demiru-shikaku/> (参照 2021-12-02).
- [5] “人工知能研究センターHP”。
<https://www.airc.aist.go.jp/dhrt/hand/data/list.html> (参照 2021-12-02).
- [6] 杉原厚吉. 超ふしぎ体験! 立体トリックアート工作キットブック 2. 金の星社, 2013, 11p.