

On the Book: 小型ロボットによる外部操作が可能な仕掛け絵本の提案

浅香芽生^{†1} 荒井愛理^{†1} 橋本直^{†1}

概要：仕掛け絵本において、電子機器やコンピュータを組み合わせた表現を探求する研究はこれまでも行われてきたが、その多くは、絵本本体とは別のディスプレイやデバイス上で情報提示や表現を行う方法や、電子部品を絵本内部に組み込む方法に限られていた。本研究では、電子的なギミックを絵本に内蔵せず、ページ上に置かれた小型ロボットによって、ページに組み込まれた仕掛けを外部から操作する設計手法を提案する。本手法により、読者の直接操作とロボットによる自動操作を両立し、物語の内容や読者の行為と連動したインタラクティブな仕掛け動作表現を可能にする。本論文では、提案手法の概要と、開発したプロトタイプを用いた利用例について説明する。

1. はじめに

仕掛け絵本は、紙というシンプルな素材を基盤とし、開閉・スライド・回転といった読者の操作に応じて視覚的・触覚的な変化を生み出すメディアである。読者の操作はストーリーの進行や演出と密接に結びついており、幼児から大人まで幅広い読者に対し、物語世界への没入感や読書体験の楽しさを高める表現形式として発展してきた。既存の仕掛け絵本に見られる仕掛けとしては、ページをめくことで畳まれていた紙構造が展開したり、立体的に立ち上がったものや、ページ内に設けられたフラップを読者が開閉する仕掛けなどが挙げられる。

絵本体験を拡張するために、コンピュータ技術を導入した研究も進められている。北山らは、プロジェクタを用いて絵本に映像を投影する手法として「Immersive Tales」を提案した[1]。この作品では、現実空間において本に触れる、ページをめくるといった従来の読書行為を維持したまま、映像投影による表現や演出が付加されている。これらの演出を実現するために、絵本本体の周囲には、映像投影用のプロジェクタ、絵本上の AR マーカーを認識するための赤外線カメラ、物語内容に呼応するオブジェクトなどが配置されている。類似の方向性として、「PLAYFUL BOOKS」シリーズでは、モーションセンサやディスプレイを絵本周辺に設置し、読み手の操作に応じた音響・映像演出を提示している[2]。これらの手法は、絵本に映像や音響による演出を重ねることで豊かな表現を実現している一方で、外部ディスプレイの設置や、絵本内部への恒久的な電子機構の組み込みを前提としており、紙のみで構成された仕掛け絵本が本来持つ軽量性、加工容易性、既存書籍への適用可能性を必ずしも維持していない。

紙の仕掛けそのものを能動的に駆動するために、電子的な駆動機構を絵本内部に組み込む試みも行われてきた。Qiらによる「Electronic Popables」では、各ページ内部に小型

DC モーターや磁石、マイコンなどの電子部品を直接組み込み、ページを開く動作に応じて紙パーツが自動的に回転・振動するなど、紙構造と電子デバイスを融合したインタラクティブな仕掛け絵本を実現している[3]。このアプローチは、紙の構造的魅力を保ったまま、読者の操作に依存しない自律的な動作を付与できる点で有用である。一方で、仕掛けを駆動する機構を絵本内部に恒久的に配置する必要があるため、電子回路の配置や配線といった制約が避けられず、既存の紙工作技法を用いた多様な仕掛けの設計自由度を損なう場合がある。

そこで本研究では、電子部品を絵本内部に組み込むのではなく、外部から着脱可能な小型ロボットを用いて紙で構成された仕掛けを駆動する外部駆動型のアプローチ「On the Book」を提案する。本システムでは、小型ロボットをページ上に配置し、ロボットのタイヤとページ内部に配置された紙パーツとの摩擦力を利用することで、読者が直接スライド板に触れることなく、自動的に仕掛けを動作させることができる。

同時に、ロボットを取り外した状態では従来の仕掛け絵本と同様に、読者がスライド板を手で操作することも可能



図1 小型ロボットによる仕掛け絵本の駆動

^{†1} 明治大学

である。これにより、紙のみで構成された既存の仕掛け絵本に対して、読者による手動操作とロボットによる自動操作を両立させた仕掛け動作を外部から付与でき、電子機構の内蔵を前提としない軽量性、可搬性、加工容易性を維持した新しい絵本表現を実現する。

本論文では、提案システムの設計コンセプトおよび想定利用シナリオを示したうえで、動作例と動作原理を詳細に説明する。続いて、プロトタイプの実装と評価について述べ、最後に、本アプローチの応用可能性および今後の展開を議論する。

2. 提案手法

仕掛け絵本において、ページ上を走行する小型ロボットを用い、紙で構成された仕掛け要素を外部から駆動することで、読者の直接操作に依らない仕掛けの動作演出を行う手法を提案する。なお、本研究で取り扱う仕掛け絵本のギミックは、ページ内部にあるスライド板をページ面と平行な方向にスライドさせることで表現される仕掛けを基本とし、以下、これをスライド機構と呼ぶ。

提案システムは、小型ロボット、ロボット制御用のコンピュータ、および専用のスライド機構を有する仕掛け絵本から構成される。以下では、各構成要素について詳細に説明する。

2.1 小型ロボット

小型ロボットは、仕掛けを駆動するための外部動力源として機能する。読者は、ロボットを絵本のページ上に載せて使用する。小型ロボットはページ上を自律的に走行し、スライド機構が配置された位置まで移動した後、タイヤの摩擦力を利用してスライド機構を動作させる。

読者が指先で把持することを想定し、本システムでは軽量かつ小型(3~4 cm 角)の車輪駆動型ロボットを用いる。また、ページ上を正確に移動するための自己位置推定機能を必要とする。これらの要件を満たす小型ロボットとして、プロトタイプの実装には Sony Interactive Entertainment 社の toio を採用した。toio は、微細なドットパターンが印刷された専用シートを光学的に読み取ることで、紙面上での自己位置と姿勢をリアルタイムに推定できる。



図2 小型ロボットの構造

スライド機構を動作させる際には、スライド板上でロボットのタイヤを駆動し、その動摩擦によってスライド動作を発生させる。このとき、タイヤとスライド板との間に十分な摩擦力が得られない場合、スライド動作が生じない。そのため、ロボットが紙面上で踏ん張るための補助機構が必要となる。

本研究では、この踏ん張りを実現するための一つの実装例として、サーボモータによって駆動されるストッパー機構をロボットに搭載している(図2)。絵本側では、このストッパーが接触するためのガイド板をスライド機構付近に設けている。サーボモータの回転によってストッパーがガイド板に接触することで、ロボットの移動が抑制され、スライド機構に対して十分な摩擦力を発生させることができる。なお、本プロトタイプでは、サーボモータの制御線を toio 本体のスピーカー出力に接続し、音声信号を用いた疑似的な PWM (Pulse Width Modulation) 制御を行っている。

ロボットの移動および動作は、ページ上のスライド機構の配置や絵本の内容に基づいてソフトウェアで制御される。現在の実装では、外部 PC 上で動作する、Processing で記述されたプログラムがロボットの無線制御を担っている。

また、小型ロボットの外装として、物語中の登場人物や乗り物を模したイラストやフィギュアを取り付けることで、ロボット自身を物語世界の演者として扱うことが可能である。このような構成により、ロボットは単なる駆動機構としてではなく、物語表現の一部として位置づけられる。

なお、本手法は必ずしもロボットの自律移動を前提としない。簡易的な運用として、自己位置推定による移動動作を用いず、読者が小型ロボットをスライド機構上に直接配置し、その場で駆動を行う使い方も想定される。

2.2 スライド機構

スライド機構は、ロボットの車輪駆動によってスムーズにスライドできるよう設計する必要がある。現在の実装におけるスライド機構の内部構造を図3に示す。各部位の詳細について以下に述べる。

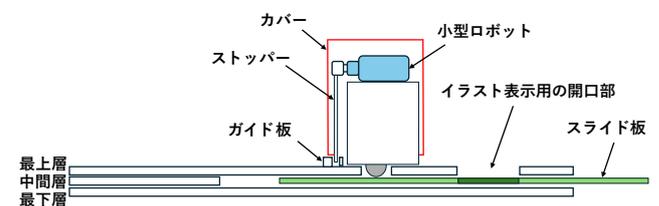


図3 スライド機構の内部構造

最下層：厚さ 1.0mm の厚紙を使用し、ページ全体の剛性を確保した。

中間層：同じく厚さ 1.0mm の厚紙を用い、後述するスライド板が滑らかに動作するためのクリアランス空間を形成した。

最上層：toio 専用開発者用プレイマット (厚さ約 0.18mm)

を配置し、ページ面上でのロボットの自己位置推定を可能とした。

スライド板：厚さ約 0.18mm の紙を使用する。このパーツは中間層内の空間を水平方向に移動し、絵柄や要素の視覚的な変化を生み出す役割を担う。小型ロボットの車輪をスライド板に接触させる位置において、ページ面上に開口部を設ける。また、スライド板の移動に伴って変化する絵柄が視認できるように、を別途設けている。なお、スライド板の末端を直接指でつまむことで、読者による手動操作も可能である。

ガイド板：厚さ約 1.5mm のアクリル板を使用する。小型ロボットに搭載されたストッパーと接触することで、ロボットの移動を抑制し、スライド板を動かすためのグリップを効かせる役割を担う。また、輪郭を緩やかなカーブとすることで、ロボットの位置ずれを吸収する働きもある。

2.3 実際の動作手順

プロトタイプにおける実際の動作手順を図 4 に示す。読者がページ上の任意の場所にロボットを配置すると、ロボットは位置計測に基づいて、あらかじめ配置が既知であるスライド機構の位置に向かって移動する。

ロボットがスライド機構上に到着すると、ロボットは停止し、ストッパーを動作させる。ここでロボットが車輪を駆動すると、ロボットはその場から動かずに、ページ内のスライド板だけが動く。スライド板の移動量は、現在は時間制御としている。ストッパーを解除すると、車輪からスライド板に力が伝達されなくなり、ロボットは再びページ面上を移動することができる。

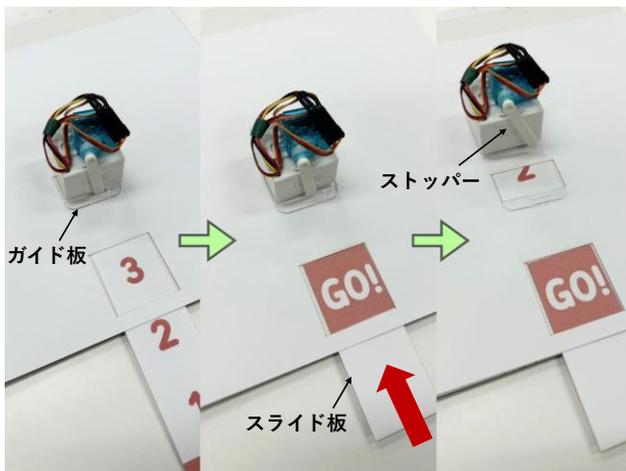


図 4 プロトタイプにおける実際の動作手順

3. 絵本における表現例

絵本における動作表現の例として、直動、回転、立ち上がりの 3 種類を作成した。

3.1 ロケット発射のカウントダウン

ロケットをページ内に描かれた発射台に置くと、カウントダウン演出が行われ、最後にロケットがページ外に向



図 5 ロケット発射。スライド板によるカウントダウンの演出が終わるとロケットが上方向に飛んでいく。

かって飛び出していくというデモを作成した (図 5)。

ロボットにはロケット型のカバーを装着し、ページ内部には 3・2・1 の数字を記載した直線方向に移動するスライド板を配置した。この表現により、読者が触れなくとも時間演出と同期した動的な仕掛けを提示できることを確認した。

3.2 回転機構による情景変化表現

スライド板に回転軸を設け、スライド板が左右にスライドする動作と連動して回転する構造を設計した (図 6)。本プロトタイプでは、霧吹きから水が噴射されることで、空に虹がかかる様子を表現した。



図 6 雨上がりの虹。霧吹きを置くとスライド板が回転し虹がかかる。

3.3 立ち上がり機構を用いた立体構造の生成

スライド動作に連動してスライド板と繋がった仕掛けパーツが垂直方向に起き上がる仕掛けを設計し、閉じているワニの口が開く表現を実装した (図 7)。

このプロトタイプにより、外部からの駆動のみで、従来は読者の手による操作を必要としていた立体的な動作も自動制御可能であることを確認した。



図7 ワニの餌やり．ワニの前にブロック肉を置くとスライド板がスライドしワニの口が開く．

4. おわりに

本論文では、小型ロボットとして **toio** を用いて外部駆動型スライド機構を実現し、インタラクティブな絵本における新たな表現手法を提案した．しかしながら、現行のシステムには **toio** とスライド板の間に生じる摩擦力が弱いという物理的な制約が存在する．これにより実現できる表現の幅、特に複雑な機構を駆動させる能力が大きく制限されている．

我々はこの課題に対し、絵本本体に電子基板の配置や配線などの電子的要素を一切内蔵しないという設計方針を維持したまま、摩擦力を強化するための手法について検討している．具体的には、スライド板の形状設計や接触面積の調整、表面加工や紙質の選択といった物理的特性の工夫により、**toio** とスライド板間に生じる摩擦力を高めるアプローチを想定している．これにより、電子機構に依存せずに、より大きな駆動力を必要とする仕掛け表現の実現が期待される．さらに、摩擦力の強化により、**toio** がスライド板を引く力と読者が加える力を拮抗させることで、「紙が引っ張られている」感覚を提示する触覚的インタラクションも実現可能になると考えられる．

また、本研究では小型ロボットとして **toio** を使用したが、本手法は特定のロボットに依存するものではなく、他の小型移動ロボットへの適用も可能であると考えている．今後は、より高い駆動力や異なる制御方式を備えたロボットを用いた検証も行い、本手法の汎用性について検討していく予定である．加えて、ステージ機構の最上層には **toio** 専用開発者用プレイマットを使用したがる、本手法は特定の基盤に依存するものではない．摩擦特性の異なる紙基盤や下敷き状の支持体を用いることで、絵本本体を改変することなく駆動特性を調整でき、多様な動作表現や触覚的体験を提供できる可能性がある．今後は、摩擦力の強化と、それを活かしたインタラクションについて議論と開発を進めていく．

参考文献

- [1] 北山玲奈, 望月茂徳, 大島登志一. Immersive Tales: 映像投影を用いた絵本とその読書体験の拡張. エンターテインメントコンピューティングシンポジウム 2023 論文集, p.357-362.
- [2] "PLAYFUL BOOKS". <https://playfulbooks.com/>. (参照 2025-12-12).
- [3] Jie, Q. and Leah, B.. Electronic Popables: Exploring Paper-Based Computing through an Interactive Pop-Up Book. TEI, 2010, p. 121-128