

# 防滑紙斜面上に柱型の3Dプリント造形物を設置することにより 転がりの軌道を制御する手法

別所蒼汰<sup>†1</sup> 橋田朋子<sup>†1</sup>

**概要**：機能性紙素材の中には特定の用途以外への応用が検討されていないものが多く、本研究で用いる防滑紙もそういった素材の一つである。本研究では強い摩擦抵抗を持つ防滑紙を、従来の滑り止めとしての用途ではなく斜面環境として使用し、3Dプリンタで造形した立体物と組み合わせることで斜面上での物体の動きを制御する手法を提案する。具体的には、造形する立体の形状を工夫することで防滑紙斜面上に物体を置いた際の摩擦力の加わり方を調整し、斜面上において、直線軌道の転がり、曲線軌道の転がり、転がりの途中で停止する運動といった様々な物体の転がりを実現する。また、実装した手法の組み合わせによるアプリケーションを三つ実装し、本手法の応用可能性を示す。

## 1. はじめに

紙は我々にとって最も親しみのある素材の一つであり、紙の特性を応用した研究や作品[1][2]なども多数挙げられる。さらに、紙素材の中には特殊な性質を持つ機能性紙素材も数多く存在しているが、一般的にはこのような特殊な紙は予め意図された用途で使われることが多い。本研究で着目する防滑紙も、強い摩擦抵抗を持つ性質から、専ら物資や食品の輸送の際に荷崩れを防ぐための滑り止めとしての用途で使用されている。一方、筆者らはこの防滑紙を身の回りの物体と組み合わせて性能を検討する中で、物体の形状や防滑紙面の角度を調整することで、物体をその場に留めるだけでなく、紙面上での物体に所望の動きをさせられることに気が付いた。このような特性は、HCIの研究領域において、3Dプリンティングをはじめとしたデジタルファブリケーション技術で自由度の高い造形が容易になったことに伴い、広がりを見せている立体の形状や物性と環境との相互作用によって動きを設計する研究[3][4]と親和性が高い。

これらの背景を踏まえ、本研究では防滑紙を斜面環境として応用し、3Dプリンタで造形した立体と組み合わせることで、物体を水平面に留めておくという防滑紙本来の用途を拡張し、斜面上での物体の動きを制御する。具体的には、物体の設計の工夫により防滑紙斜面上での摩擦力の加わり方を調整することで、斜面上において様々な軌道での物体の転がりを実現する。

## 2. 関連研究

電子的制御によって環境に対する物体の運動を操作し、予想外の挙動を実現する研究や作品は多く存在する。傾斜のない平面で箱型の立体がゆっくりと転がる動きを実現している作品[5]や、3Dプリンタで造形したアタッチメントを

ロボットに装着することで卓上、壁面、天井の行き来を可能にしている研究[6]などがある。これらはいずれも環境に対し重力に逆らうような動きを可能にしているが、本研究は立体の形状および物性と環境との相互作用によって動きを制御する点が異なる。

一方で立体と環境の相互作用により物体の転がりを制御する先駆的な研究や作品も存在し、物体の重心がずれることで生じる不規則な動きを利用し、物体を置いた平面を指でなぞることで指の動きを追いかけるような物体の転がりを実現しているもの[7]や、多面体の表面の起伏を設計することで任意の軌道を転がる立体物を造形する研究[4]などがある。しかし、これらは平面、もしくは非常に小さい傾斜の上でしか転がりを実現できないという点で本研究における斜面上での転がりの制御とは大きく異なる。

## 3. 提案

防滑紙斜面と3Dプリンタで造形した立体の組み合わせにより、斜面上で様々な動きのパターンを実現する手法を提案する。これらのパターンは、造形する立体の形状の工夫によって摩擦抵抗の大きい防滑紙斜面上における物体に対する摩擦力の加わり方を調整し、転がり方を制御することで実現するものであり、具体的には直線軌道の転がり、曲線軌道の転がり、転がりの途中で停止する運動を実現する手法を提案する。

まず、本研究では一般的に転がりやすい立体形状として柱型の立体を採用する。次に、様々な動きを実現するために必要な立体の設計上の指針として、「側面の形状」及び「重心の位置」の二つを工夫する。側面の形状は物体が転がる速度の制御に関わる。側面が曲面である物体は接地面が小さく摩擦がかかりにくいため最も転がりやすく、反対に側面に角を持つ形状では本来加速する転がりの勢いを抑えることができる。さらに、そういった外形の工夫と合わ

<sup>†1</sup> 早稲田大学

せて立体の重心の位置を調整することで、物体の転がりの軌道を制御することができる。上下左右対称な立体において重心が物体の中心にある場合には、転がる力が物体全体に均一にかかるため斜面上に置いた際の角度を維持したまま直線軌道で転がるることができる。一方で重心を偏らせれば物体の上下で加わる力の大きさが変わるため、曲線軌道を描く転がりを実現できる。

これらの指針に基づいて立体形状を設計することで、直線軌道での転がり、曲線軌道での転がり、転がりの途中で停止する運動といった動きを実現する。

## 4. 実装

本章では第3章で述べた指針に基づき、防滑紙斜面上での立体の動きとして、直線軌道での転がり、曲線軌道での転がり、転がりの途中で停止する運動を実現する。

### 4.1 構成要素

本実装では、図1に示すようにスチレンボードに防滑紙（びたっとシート、田村商店）を貼付し、角度可変の台（EL-PCA-LTS8BK, ELECOM）を利用して傾斜を $30^\circ$ に統一したものを基本斜面装置として用いる。斜面上に転がす立体物はすべて3Dプリンタ（K1 max, Creality）によって造形したものであり、フィラメントにはPLAを使用する。また、立体は重さが大きいほど滑落しようとする力も大きくなり、目的の動作が安定して得られない場合があることから、できる限り軽く造形するためにいずれの立体も内部は空洞で、厚さが1mmの筒状の形で造形する。

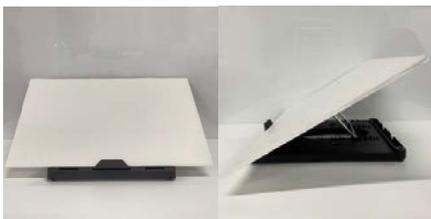


図1 正面から見た装置（左）、横から見た装置（右）

### 4.2 斜め方向への直線軌道の転がり

側面が曲面であり、上下左右対称な立体かつ重心が物体の中心にある最も基本的な形状として円柱型を採用し、斜め方向の直線的転がりを実現する。図2に示すように、今回の実装では円柱型の立体は底面の外周の直径が16mmで厚さが1mm、高さが100mmのものを造形した。

図3に造形した立体を防滑紙斜面上に角度をつけて置いた時の様子を示す。立体は斜面上に置いた際の角度を維持したまま直線的に転がり、目的の動作が実現できている様子が確認できた。



図2 造形した立体

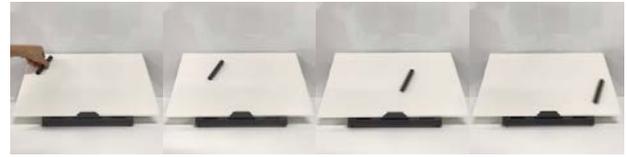


図3 直線軌道の転がりの様子

### 4.3 振り子運動状の転がり

側面が曲面で重心が物体の中心より低い位置にある形状として円錐台型の立体を使用することにより、防滑紙斜面上を物体が振り子運動的に弧を描いて往復する動きを実現する。物体の重心のずらし方については、例えば形状ではなく密度を物体の上下で変える方法などもあるが、見た目から円柱型との違いが明確であり、より容易に目的の動きを実現できることから本研究では円錐台という形状を採用する。図4に示すように、今回の実装では円錐台型の立体は上面・下面の外周の直径がそれぞれ9mm, 16mm、厚さが1mm、高さが100mmのものを造形した。

図5に造形した立体を防滑紙斜面上に置いた時の様子を示す。立体は弧を描きながら複数回往復して転がり、次第に運動の幅を縮めながら最終的には弧の中心に当たる位置で静止しており、目的の動作が実現できている様子が確認できた。



図4 造形した立体

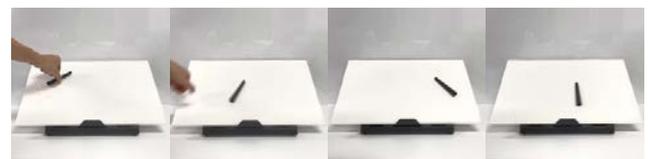


図5 振り子運動軌道の転がりの様子

### 4.4 弧を描く転がりの途中で停止する運動

側面に角を持ち重心が物体の中心より低い位置にある形状として六角錐台型の立体を採用し、防滑紙斜面上に転がすことで、はじめは弧を描いて転がるが、往復運動することなく停止する動きを実現する。図6に示すように、六角

錐台型の立体は上面および下面の外周がそれぞれ 1 辺 4.5mm, 8mm の正六角形, 厚さが 1mm, 高さが 100mm のものを造形し, 使用する。

図 7 に造形した立体を防滑紙斜面上に置いた様子を示す。最初は弧を描いて転がるものの, 次第に転がりの勢いが弱くなり, 立体の向きが斜面に対して滑落する方向に一致した時点で停止するという運動の様子が確認できた。



図 6 造形した立体

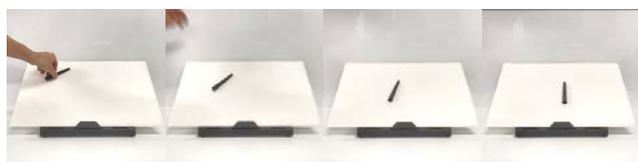


図 7 弧を描いて停止する転がりの様子

#### 4.5 防滑紙を貼付した立体の転がり

これまでは防滑紙を貼付した基本斜面装置上に 3D プリントで造形した立体を転がすという方法を用いているが, 立体の側面に直接防滑紙を貼付し, その立体を防滑紙を貼付していない斜面上で転がす場合においても, これまでの提案手法と同じ動作は実現可能である。

実際に, 防滑紙を貼付していないスチレンボードのみの基本斜面装置に対して 4.2, 4.3, 4.4 で使用した立体に防滑紙を貼付したものを設置して動作を確認したところ, これまでと同様の動作を実現可能であることが確認できた。図 8 は使用した装置および立体の外観を示したものである。

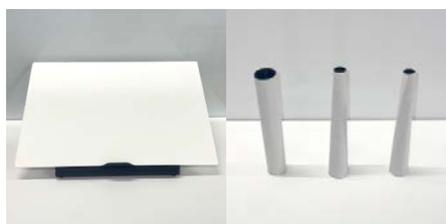


図 8 装置 (左), 使用する立体 (右)

## 5. アプリケーション

本研究において提案・実装した手法を応用し, 三種類のアプリケーションを実装する。

### 5.1 分離による二段階移動

実装した立体を組み合わせ, 二つの物体の分離による二段階移動を実現する。具体的には空洞にした立体の内側に

別の立体を入れ, 二つの物体を重ねた状態で斜面上に置くことで, 一方の物体が運動する途中でもう一方が分離し独立して動き出す, という二段階の挙動を実現するものである。今回は, 物体の動きの差が最も顕著である円柱型と六角錐台型の組み合わせで実装する。なお, 使用する円柱型立体および六角錐台型立体はそれぞれ 4.2 及び 4.4 で使用したものと同一である。

造形した立体の動きの様子を図 9 に示す。はじめは円柱型と六角錐台型の立体が重なったまま斜め方向へ直線的に転がるが, 途中から分離して六角錐台型は弧を描いて止まり, 円柱型は転がり続けるという別々の運動を段階的に展開している様子が確認できた。



図 9 分離による二段階移動の様子

### 5.2 防滑紙斜面スロープトイ

スロープトイとは, 垂直な面上に造形された立体的な道の上に物体を転がし, その様子を楽しむ玩具である。本研究の手法を応用することで, 垂直面ではなく斜面上において, 面上に立体的な道を造形することなくスロープトイと同じ機能を実現することができる。これを防滑紙斜面スロープトイと称し, 立体が転がりの方向を変えながら見えないう道を移動しているかのような動きを実現する。

本アプリケーションで使用する装置および立体の外観を図 10 に示す。装置には基本斜面装置を使用し, 斜面上には転がす物体がぶつかって方向転換するための曲がり角の役割を果たす立体を設置する。なお, この曲がり角にあたる立体は, 衝突時に転がる立体が次の曲がり角に向かう角度で方向転換できるよう少し角度をつけた状態で設置している。また, 転がす物体は底面の直径が 16mm, 厚さが 1mm, 高さが 55mm の円柱型のものを使用する。設置する物体は衝突しても位置が崩れないよう転がす物体よりも重く, 転がりが発生しにくい形状である必要があるため, そのような形状として斜面に側面が広く接地する直方体型を採用し, 9mm×15mm×80mm の大きさで内部を空洞にせず充填率を 100%にしたものを使用する。

図 11 は立体を設置した時点から立体の運動が停止するまでの動きを一枚の画像に収め, 立体の中心点の軌跡を赤線で示したものである。この図に示したように, 装置上に円柱状の立体物を転がすことで, 物体は衝突によって斜め転がりの方向を転換し, あたかも道があるかのような挙動で転がりながら移動していき, 最後は停止するという動きが確認できた。

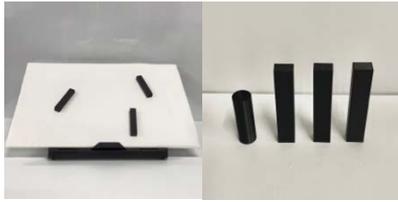


図 10 装置（右），使用する立体（左）

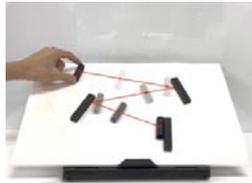


図 11 装置上での転がりの軌跡

### 5.3 錐台転がし

本研究の手法を応用することで、輪投げに似た要領で円錐台・六角錐台を斜面上から転がして狙った的にスタックさせることを目的とする遊びを実現できる。本研究ではこれを錐台転がしと称し、実装する。特に今回は、錐台の形状による軌道の違いや、物体を置く位置・角度といった要素によって到達する位置が変わるような仕組みを実装する。

本アプリケーションで使用する装置および立体の様子を図 12 に示す。装置には基本斜面装置の斜面左側だけに防滑紙を貼付したものを使用し、斜面右側には的となる杭状の立体を三つ配置する。この的となる立体は、底面が 45mm×25mm、高さが 3mm の台座部分の中心に、直径が 4mm、高さが 65mm の円柱型の杭を持つものを使用し、転がす立体については、円錐台は上面、下面の直径がそれぞれ 7mm、13mm の円、厚さが 1mm、高さが 55mm のものを、六角錐台は上面、下面がそれぞれ 1 辺 4mm、6.5mm の正六角形、厚さが 1mm、高さが 55mm のものを使用する。

実際の動きの様子を以下の図 13、14 に示す。六角錐台型の立体を転がした場合には防滑紙とスチレンボードが切り替わる位置に到達した時点で転がりの勢いが止まっているため、そこで斜面を滑落して一番左にある的にスタックし、円錐台型の立体を転がした場合には転がりの慣性が強いいため、より離れた位置の二つの的にスタックさせることができ、目的の動作を実現できていることが確認できた。

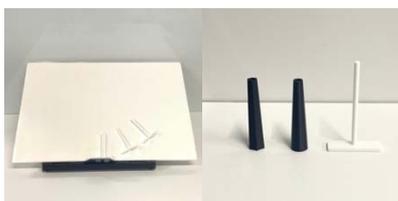


図 12 装置（左），使用する立体（右）

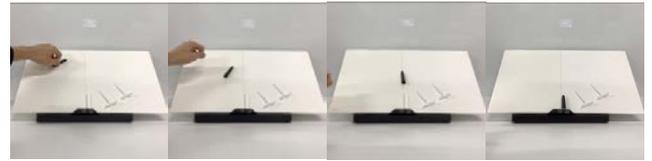


図 13 六角錐台型立体を的にスタックさせる様子

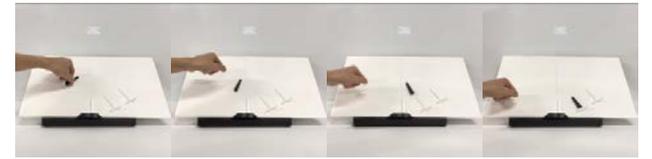


図 14 円錐台型立体を的にスタックさせる様子

## 6. まとめ

本研究では、防滑紙を斜面環境として用い、3D プリンタで造形した立体と組み合わせることで斜面上での物体の動きを制御する手法を提案した。動きの実装として、斜面上での斜め方向の直線的転がり、振り子運動状の転がり、弧を描いて止まる転がりを実現した。また、アプリケーションによって本研究における手法の応用可能性も示した。

一方で本研究の主な課題として、斜面に転がす立体の形状の制限が大きいことが挙げられる。現状では転がりやすい形状として基本的に柱状の立体を使用しているが、一見転がる運動に適していないような形状の立体など、より自由度の高い立体形状の転がりの制御を実現することができれば、身の回りの物体などを応用できる可能性も高まるため、今後も検討を続けていきたい。

## 参考文献

- [1] Mai Ohira. et al.. Demonstrating ex-CHOCHIN: Shape/Texture-changing cylindrical interface with deformable origami tessellation. UIST'22. 2022, No. 57, p. 1-3.
- [2] TAKT PROJECT. "programmed PAPER". <https://www.taktproject.com/ja/projects/programmed-paper/>, (参照 2025-12-14).
- [3] Hong Zhu. et al.. Self-powered locomotion of a hydrogel water strider. Science Robotics. 2021, vol. 6, issue. 53, eabe7925.
- [4] Yaroslav I. Sobolev. et al.. Solid-body trajectoid shaped to roll along designed pathway. Nature. 2023, vol. 620, p. 310-315.
- [5] nomena. "Strolling". <https://nomena.co.jp/project/strolling/>, (参照 2025-12-14).
- [6] 森村太一, 韓燦教, 苗村健. corobos plus: 卓上・壁面・天井の間を移行する群ロボット. インタラクション 2024 論文集. 2024, p. 227-232.
- [7] デザインのトピラ. "Newton 重力のあそび". <https://school.japandesign.ne.jp/sotsuten/geidai-2024/3759>, (参照 2025-12-14).