Juggling Cylinder:物理現象のちょっとした驚きに着目した ボール転がり系そこはかとないコンテンツ

渡邊桃吾[†1]　松浦昭洋[†2]　片寄晴弘[†1]

下方に投げたモノはそのまま落ちていくと想像されるが，円筒の内側に沿う形で一定の速度以上で下方に投げ入れたボールは浮き上がってくる．松浦はこの現象に着目したジャグリングを発案，ジャグリング演出における一つの新基軸を提示し，注目を集めた．本稿では，この演出をとりいれた「そこはかとない（ゴールはないのになんとなく遊んでしまうエンタテイメント性を有する)」スマートフォンアプリケーションについて報告する．

1. はじめに

ハンドスピナーや無限プチプチといった玩具には，ゴールはないのになんとなく遊んでしまう独特のエンタテイメント性がある．筆者は，このようなエンタテイメント性を「そこはかとない」エンタテイメント性と名付け，学部在籍時からそこはかとないエンタテイメント性をもつタブレット・スマートフォン向けアプリケーションの開発を進めてきた[1]．また，現在では，特定の条件での球体の転がりを対象としたアプリケーションの開発を行っている．

その中でも，本稿では，離散数学者でありジャグラーでもある松浦(以下敬称略)[2]が提案した，透明円筒ジャグリング[3]に基づいたシミュレーションアプリの開発について報告する．

2. 関連研究

円筒の内側面に沿って球体を転がすと，直感的には重力に従って落下していくように想像されるが，円筒と球体の間で十分に摩擦が働く場合，実際には落下の途中で浮き上がるように動く．松浦は，この物理現象を，透明円筒を使ったジャグリングとして実現した．

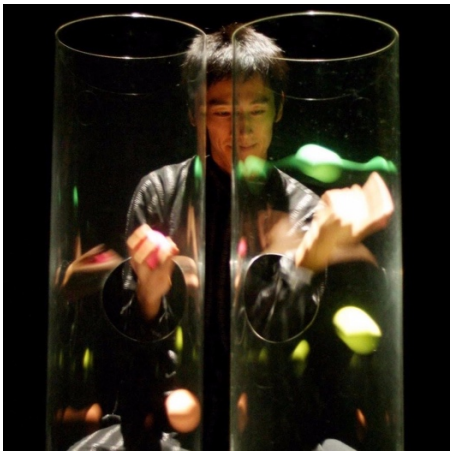

図 1　松浦による透明円筒ジャグリング
Figure 1　Transparent cylinder Juggling by Matuura

円筒内を転がる球の動きに関する初期の解析としては，1892 年に出版された Edward John Routh による剛体力学を扱った著書が挙げられる[4]．著書の中で，球体の運動が水平方向では円筒の垂直軸の周りでの定速公転，垂直方向では調和振動であり，調和振動の周期が球体の重量や重力加速度に依存せず一定である事が明らかにされている．Gualtieri らによって行われた研究[5]では，より発展的な解析と実際の物体での検証が行われている．論文の中で，球体の垂直方向の速度は以下のように表されている．

$$\dot{z} = r_b \omega_\varphi \qquad (1)$$

この時，$\dot{z}$が垂直方向の速度，r_bが球体の半径，ω_φが垂直方向の角速度である(ただし，球体が転がり落ちるとき，ω_φ>0)．

また，加速度は以下のように定式化されている．

$$\ddot{z} = -\frac{\Omega^2}{1+1/K} z - \frac{g}{1+K} \qquad (2)$$

この時，$\ddot{z}$は垂直方向の加速度，zは垂直方向の位置，K, g は定数，Ω は円筒の中心を軸とした球の角速度である．

このような物理解析に基づいた円筒内の球体の浮き上がりシミュレータとして，Rolling Ball inside a Cylinder[6] が挙げられる．このシミュレータでは，円筒内での球体の浮き上がりを初動から 1.5 回転まで観察する事ができる．調節可能なパラメータとしては，円筒と球体の半径比率，初速，入射角，鉛直方向の角速度が用意されている．

†1 関西学院大学
Kwansei Gakuin University
†2 東京電機大学
Tokyo Denki University

ⓒ2020 Information Processing Society of Japan

3. アプローチと実装

3.1 アプローチ

円筒内の球体の浮き上がりをシミュレーションするためには，現実世界での物理現象を物理演算によって再現する必要がある．そのため，開発環境には物理演算の導入が比較的容易なものが望ましい．この要件を満たす開発環境として，unity を使用する．また，調整可能なパラメータとしては，球体の大きさ，初速，入射角を用意する．これに加えて，視点設定機能を用意することで，任意の角度から運動が観察できるよう設計を実施する．各パラメータについては，画面上のアイコンのタッチで開くメニュー画面からスライダーバーを表示し設定を行えるよう実装する．視点設定については，スマートフォンのピンチ，スワイプ操作により，円筒を見回したり角度を変えて見たりすることができるよう実装を行う．

3.2 実装

アプリケーションを起動すると，下図左側の画面が現れる．画面上の円筒をタッチしスワイプ操作を行うと，入射角と速度を表す黄色いバーが現れる．任意の状態で指を離すと，透明円筒内に球体を転がし入れる事ができる．球体の大きさパラメータは、画面上部に表示されているスライダーバーよって調整を行うことができる．スワイプ・ピンチ操作を行うことで，円筒を中心としたカメラの回転・視野の拡大縮小が行える．

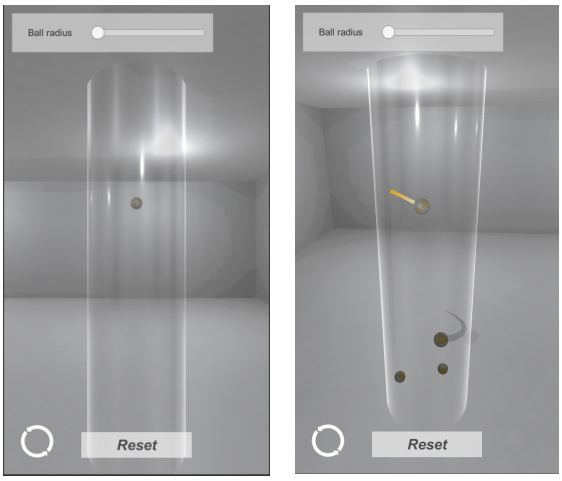

図 2　アプリケーション画面

Figure 2　Application screen

球体の転がりに合わせて，尾状のエフェクトと転がり音が発生する．球体は一度転がり落ちた後に浮き上がるように運動する．画面下部の Reset ボタンを押すことで，投入されたボールを消去できる．

4. 現状と今後の課題

物理演算による円筒内での球体の浮き上がり現象の再現，各種パラメータの変更による球体の動きの変化など，現実世界での動きのシミュレーションは現状である程度行えている．しかし，各種インターフェースやグラフィックはシミュレーションの確認に最低限のものであり，エンタテイメントとしての作り込みは不十分だと感じている．また，unity の物理演算機能にデフォルトで設定されている摩擦力に関するパラメータの調整だけでは，円筒と球体の間のスリップを抑える事が出来ていない．そのため，球体の回転が実際より多くなってしまい，現実世界のスリップが起こらない球体の運動と比較すると若干の違和感がある．

5. 展望

現在発生しているスリップへの対処のために，unity の物理演算機能における滑り・回転の検証を行う．検証が終わり次第，背景，ライティングの調整などを考えている．

これと並行して，現在行なっている透明球殻内での球体の転がりをシミュレートするアプリケーションの開発を進めていく．スマートフォン内蔵の加速度センサ，ジャイロセンサを利用し，スマートフォン本体を動かすことで球殻内の球体を転がす機能，球体の運動に応じた音声の出力機能，球殻の形状や球体のサイズ，摩擦力の設定といったパラメータを調整する機能などを実装する予定である．

謝辞　透明円筒ジャグリングの発案者である松浦教授には，研究やコンテンツ作成の進め方について助言をいただきました．片寄教授には，日頃からご指導いただき，心より感謝申し上げます．

参考文献

1)　渡邊桃吾 (2018), ”Ball in Bowl: ボウルの中でボールを転がすそこはかとないコンテンツ”，情報処理学会論文誌, 60(11): 2030-2033.
2) “松浦昭洋”, ロマンティック数学ナイト http://romanticmathnight.org/teacher/松浦昭洋 (2019.3.23)
3) “大道芸 in 静岡”, youtube.com https://www.youtube.com/watch?v=OTabjshcx1g (2019.3.23)
4) Edward John Routh(1892), A treatise on the dynamics of a system of rigid bodies.
5) M. Gualtieri, T. Tokieda, L. Advis-Gaete, B. Carry, E. Reffet, and C. Guthmann (2006), ”Golfer’s dilemma”, American Journal of Physics, 74(6): 497-501.
6) “Rolling Ball inside a Cylinder”, WOLFRAM Demonstration Project https://demonstrations.wolfram.com/RollingBallInsideACylinder/ (2019.3.23)
7) 水口 充, 片寄晴弘 (2019), “エンタテイメントコンピューティング研究における評価問題の解決に向けての施策の実践” 情報処理学会インタラクション 2019, 141-150.

ⓒ2020 Information Processing Society of Japan