

# 錯視を用いた不可能モーションの制作について

11N3055 鳴島 啓介 指導教員 佐藤 康三教授

## 1. はじめに

錯視とは、人間の脳が図や物体が安定的な見え方をするように本来とは異なる視覚世界を構築しようとする性質のことであり、古くから舞台美術の手法の一つであるトロンプ・ルイユなどに応用されてきた。また平面の作品だけでなく、「エイムズの部屋」を代表とするような立体空間上での錯視を利用した作品も盛んに創作され、人々に不思議な体験をもたらしてきた。

近年では、立体物による錯視作品に動きを取り入れた「不可能モーション」と呼ばれる作品が生み出されている。これは、実世界ではありえないような動きをしているように見せる新しい錯視現象である。本研究では、人に不思議な感覚をもたらす新たな「不可能モーション」の制作を行う。

## 2. 研究対象

不可能モーションを制作するにあたり、通常のユークリッド空間上では実現不可能な図形の中で最も単純な形であるペンローズの三角形をモチーフとする。本研究では、ある 1 点から見るとペンローズの三角形の形状をした構造物の中を、球体があたかも永久運動しているような動きを実現する(図 1)。

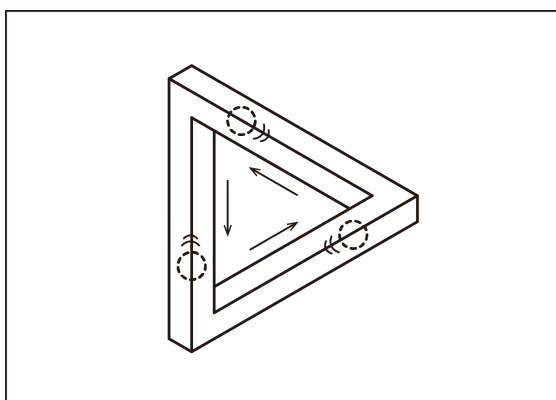


図 1 制作物イメージ図

## 3. 設計指針

本研究における、不可能モーションの実現にあたっての設計指針を以下のように定める。

- 1) 球体は観賞者から見えている所では物理的に自然な運動をしているように見せる。
- 2) 観賞者の視点から機構部(仕掛け)が見えないようにする。
- 3) 三角形の 1 辺は 500mm とする。
- 4) 球体はφ30mm のものを用いる。
- 5) 球体が完全に隠れてしまう場所を可能な限り減らす。

## 4. 制作概要

制作概要を以下に示す。

- 1) 実現方法の決定
- 2) スタディモック制作
- 3) スケッチによる外観意匠の決定
- 4) 3D モデリングによる外観意匠設計
- 5) 試作機の制作
- 6) 動作実験
- 7) 本制作

## 5. 実現方法の決定

### 5.1 ペンローズの三角形の実現

不可能立体の実現方法には、奥行き方向を不連続にさせる「奥行きギャップのトリック」、物体を歪ませる「曲面のトリック」、物体の一部を平面のまま作り非直角に連結させる「非直角のトリック」がある<sup>1)</sup>。今回は球体のループの実現性を考慮し、「奥行きギャップのトリック」を用いて制作を行う(図 2)。

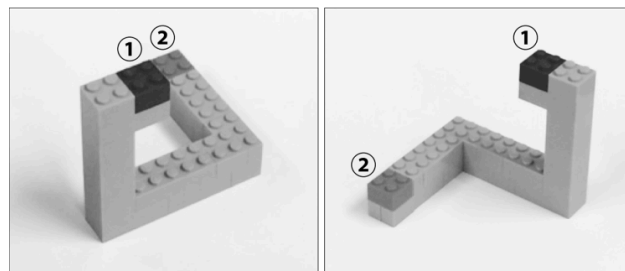


図 2 レゴブロックによる「奥行きギャップのトリック」の例

### 5.2 球体のループの実現

球体を構造物の中でループさせるためには、最も高い地点を起点、低い地点を終点とし、球体が終点に到達した瞬間に起点から再度運動を開始させる必要がある。奥行きギャップのトリックでこれを成立させるために、起点と終点を不可能立体の不連続部分として構造物を作成する。そして同一の球体を 2 つ用意し、球体 A が終点に到達した瞬間に、もう一方の球体 B を起点から落下させ、球体 B が構造物の中を運動している間に球体 A を観賞者の死角を使って起点まで持ち上げる動作を繰り返すことで、あたかも 1 つの球体がループしているような現象を実現する。以下に球体の動き(図 3)と錯視状態での見え方(図 4)を示す。

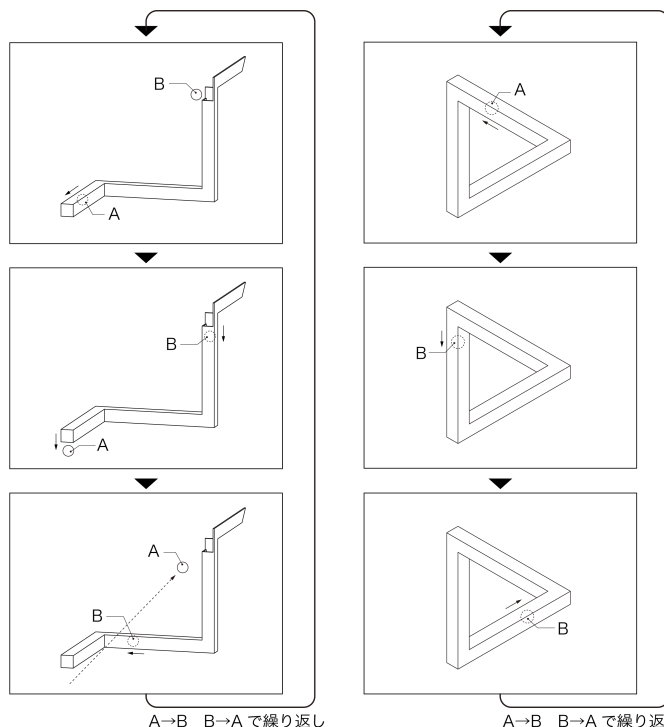


図 3 球体の動き

図 4 錯視状態での見え方

## 6. スタディモック制作

### 6.1 制作目的

外觀形状全体の見え方、錯視成立の可否の確認、球体の動きを確認するために、スチレンボードでスタディモックを制作する。初期モデルでは 3 辺をそれぞれ直交させる(図 5)。

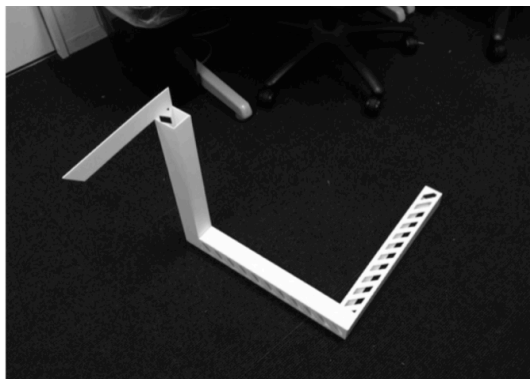


図 5 スタディモック

### 6.2 考察

1 点から見るとペンローズの三角形の形状をした構造物が確認された。しかし、かなり高い地点から俯瞰しないと連続した立体に見えないため、地面に垂直な辺に強いパースがかかる。

また、起点から木球を落下させた所、球体は滑らかに運動したが、起点から垂直に落下するため速度が極端に大きくなる。また、窓から球体がよく見えない。という結果となった。よって、次の制作段階では以下の 3 点を改善する。

- (1)無理のない姿勢で不可能モーションを見ることが出来る視点及び形状の設定
- (2)球体の落下運動の調整
- (3)球体の運動がよく見える外觀の再検討

## 7. スケッチによる外觀意匠の決定

スタディモック制作をもとに、球体が見やすく、且つ作成が可能なデザインをスケッチにより再考する。尚、ペンローズの三角形は等角投影法で描く必要があるためアイソメ図上に描画し、外觀意匠を決定する(図 6)。

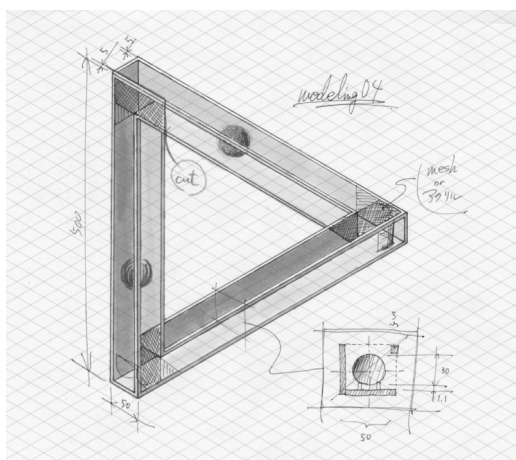


図 6 デザインスケッチ

## 8. 3D モデリングによる外觀設計

### 8.1 形状の検討

形状の詳細な検討を行うため、Rhinoceros を用いて 3D モデリングによる外觀設計を行う。尚、パース角度は 0 に設定する(図 7)。

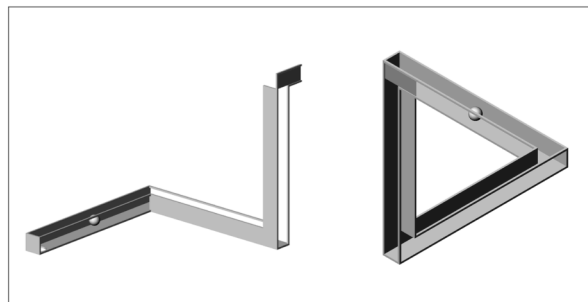


図 7 3D 初期モデル

制作対象物の視点を以下のように設定する。尚、目線の高さは 2013 年の成人の平均身長を参考にする<sup>2)</sup>。

- (1)観察者は基準点から 2000mm 離れた地点に立っていることとする。
- (2)目線の高さを 1500mm とする。

これを基準に、観賞者が無理のない姿勢でペンローズの三角形を認識することができる形状を検討する。このとき、等角投影法で描かれた図形が、俯角約 35.26° の視点から俯瞰した物体であることを考慮する。操作として、地面に垂直な辺のみを視点からの図が変わらない様にシア変形させる。これは、人間が安定的な見え方をするように、歪んだ立体を矩形の形状に錯視してしまう性質を利用している<sup>3)</sup>。

その結果、構造物は地面から 270mm の高さに位置し、地面に垂直な辺を約 35.26° シヤ変形させた形状が導き出された(図 8)。

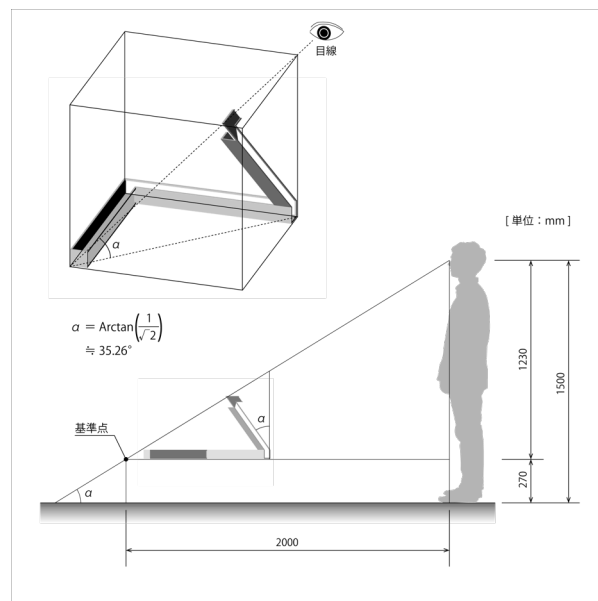


図 8 視点の図解

図 8 で得られた形状を MakerBot Replicator 2(以下、3D プリンター)で出力し視点から眺めてみると、ペンローズの三角形が確認された(図 9)。

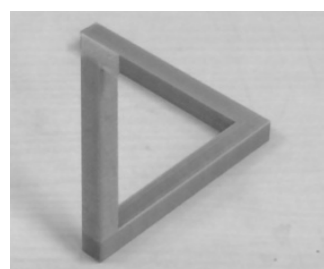


図 9 3D プリンターによるプロトタイプ

## 8.2 機構部の検討

終点に到達した球体を起点に持ち上げる機構の設計を行う。モデリングする際、球体の軌道に注意し、持ち上げている間に球体や部品の一部が見えないようにサイズや位置を配慮する。検討の結果、持ち上げ方はチェーンを回転させ、チェーンに取り付けたフックで球体を引っ掛け、押し上げる方式を採用する(図 10)。

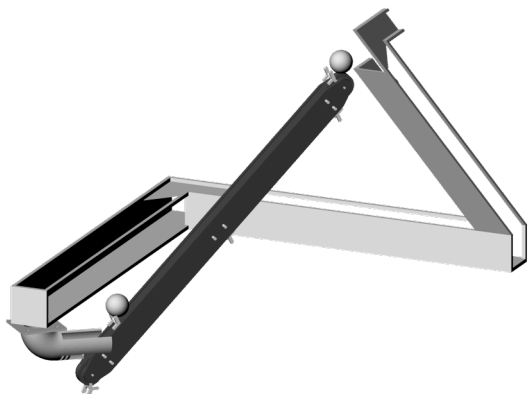


図 10 機構部の想定

## 9. 試作機の制作

### 9.1 制作目的

制作目標とするスケールで構造物を制作し、球体の軌道を確認する。また、機構部が球体の動きに応じて正しく作動するかを確認する。

### 9.2 機構部の制作

3D モデリングをもとに機構部を制作する。押し上げの動力源は DC モーターを使用し、測距センサーで球体の動きを感知することで制御する。以下に部材表を示す(表 1)。尚、球体の押し上げに用いるフックは 3D プリンターで出力する(図 11)。

表 1 機構部部材表

ハイパワーギヤボックスHE(タミヤ製)	アクリル板(5mm厚)
ラダーチェーン&スプロケットセット(タミヤ製)	アクリル板(2mm厚)
Arduino UNO	六角ボルト(M4×40)
5Vコイルコードリレー(SS1A05D)	測距センサー(GP2Y0A21YK0F)
コンデンサー(50V, 0.1μF)	フック



図 11 3D プリンターで出力したフック

制作した機構部を実際に作動させてみた所、球体を押し上げることが確認された。これによりトルクに問題は無いことが示された。また、機構部を 45° まで傾けても問題無く持ち上がることが確認された(図 12)。

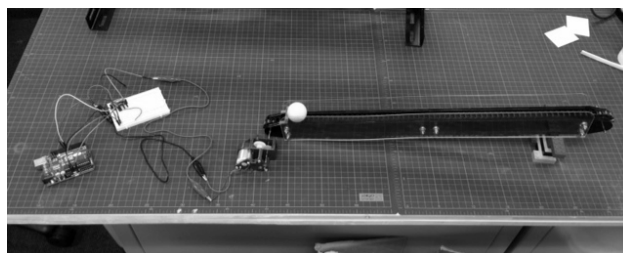


図 12 機構部プロトタイプ

### 9.3 ペンローズの三角形の制作

3D モデリングをもとにペンローズの三角形を制作する。シア変形させた部分は縁を斜めに削りサポーターで固定する(図 13)。レールは観覧者から見た球体の見え方を考慮し、レール幅 10mm、高さ 6mm に設定する。以下に部材表を示す(表 2)。尚、機構部及びシア変形させた部分のサポーターと、終点に到達した球体を押し上げ機構に誘導するパイプは 3D プリンターで出力する(図 14)。

表 2 ペンローズの三角形部材表

アクリル板(5mm厚)	六角ボルト(M4×12)
アクリル板(3mm厚)	芋ねじ(M4×8)
アクリル板(2mm厚)	シア変形部サポーター
アクリル角棒(50×50×500mm)	機構部サポーター
アルミパイプ(φ15mm, 1mm厚)	誘導パイプ

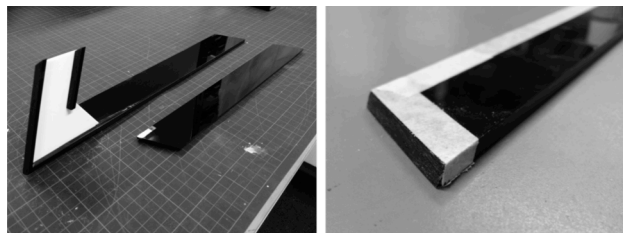


図 13 シア変形部作成の様子

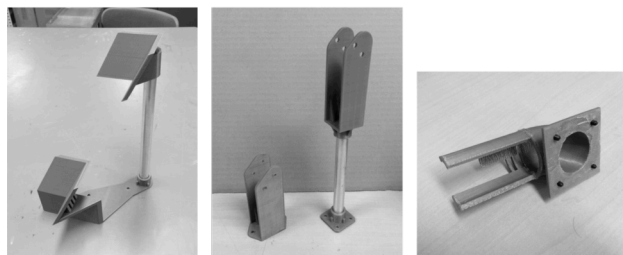


図 14 3D プリンターで出力した部材

土台は MDF を使用し、機構部とペンローズの三角形を組み合わせ、試作機を制作した(図 15)。



図 15 試作機

## 10. 動作実験

### 10.1 実験 I

測距センサーを終点の壁と機構部に取り付け、それぞれセンサーA、センサーBとする。センサーAの値が一定値を超える(球体を検知する)とモーターが回転し、センサーBの値が一定値を超えるとモーターが静止するように制御する(図16)。

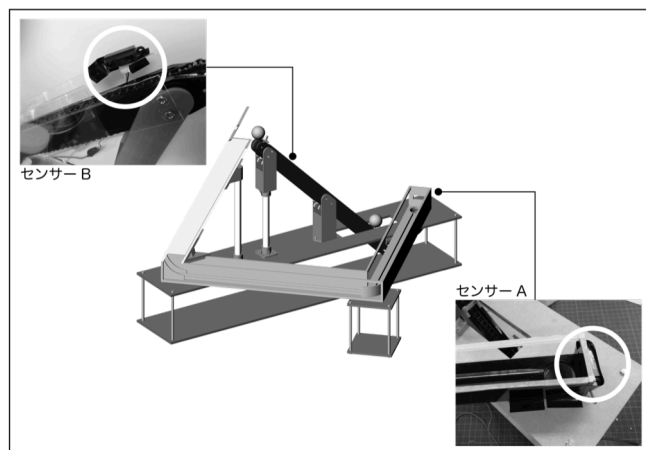


図16 測距センサー取り付け位置

### 10.2 実験結果

球体を転がした所、終点に取り付けたセンサーAが球体を検知し、モーターが正確に作動することが確認された。しかし、センサーBは死角に収まるように設置すると対象物が近付きすぎてしまい、正しく感知することができなかった。

### 10.3 実験 II

測距センサーをセンサーAのみにし、終点に到達した球体を検知するとモーターが回転し、一定時間後に自動的にモーターが静止するように制御する。このとき、球体が終点から起点に戻るまでの時間を一定にする必要があるため、ラダーチェーンに取り付けるフックを4個から20個に増やし、誘導パイプを伝ってからフックに引っ掛けられるまでのタイムラグを限りなく0にする。こうすることで、押し上げられた球体が確実に起点の直前で静止するようにする(図17)。

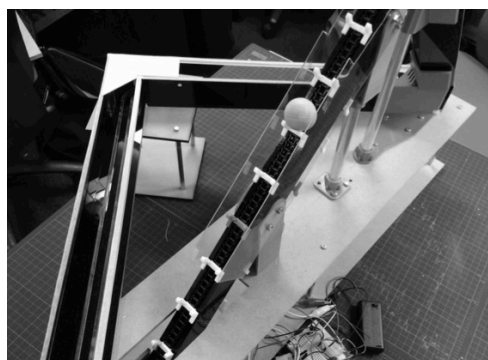


図17 改善後の実験の様子

### 10.4 実験結果

球体が終点に到達するとモーターが回転し、起点の直前に到達すると静止することが確認された。また、球体を2つ用いることでそれぞれの動きを検知し、ループ運動を実現することができた(図18)。尚、球体を木球、アクリル球、アルミ球、真鍮球で試した所、木球が最も確実にループ運動することが確認された。

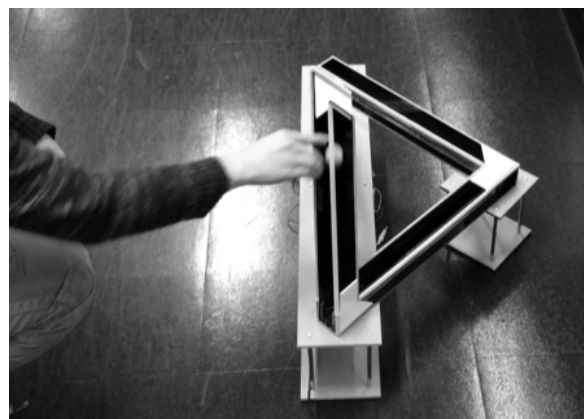


図18 ループ運動実験の様子

## 11. 本制作

試作実験をもとに本制作を行う。本制作では以下の点を考慮する。

- (1)公共の場に設置されることを想定し、ACアダプター(5V,4A)を外部電源として用いる。
- (2)連続部分を強調するため、縁にのみ着色を施す。
- (3)土台はベニヤ板を張り合わせ、840×600×270mmの直方体とする。

以下に不可能モーションの完成イメージを示す(図19)。尚、展示物として設置される際は、視点の位置に片目で覗く覗き穴の付いたつい立てを設置することを想定する。

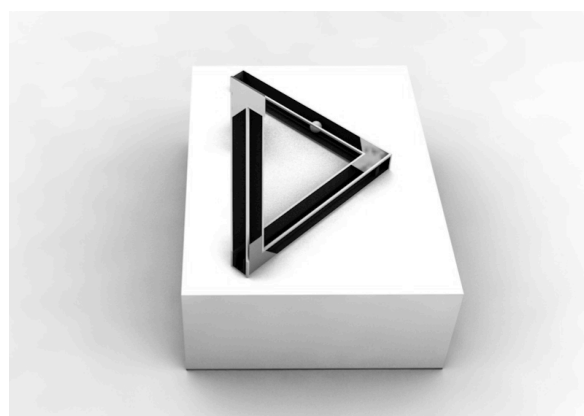


図19 完成イメージ

## 12. おわりに

本研究でモチーフとしたペンローズの三角形は不可能図形の最も純粋な形状であるため、今後さらなる不可能図形を用いた不可能モーションを制作する際の指標となることを期待する。

### 参考文献

- 1) 錯覚美術館, 明治大学先端数理科学インスティテュート 錯視と数理の研究拠点  
<http://compillusion.mims.meiji.ac.jp/museum.html>
- 2) 日本人の平均身長・体重：統計, Paroday  
<http://paro2day.blog122.fc2.com/blog-entry-9.html>(参照 2014-11-26)
- 3) ドナルド・D・ホフマン, 視覚の文法 脳がものを見る法則, 紀伊国屋書店,(2003)
- 4) 小林茂, Prototyping Lab - 「作りながら考える」ための Arduino 実践レシピ, オーライリー・ジャパン,(2010)