

# 凸回転体の運動を利用して音生成を行う インタラクティブシステム

井川佑馬<sup>†</sup> 松浦昭洋<sup>†</sup>

本発表では、凸回転体が卓上ディスプレイ上でスピンやロールといった特徴的でプレイフルな運動性をもつことに着目し、凸回転体をインタフェースとして用いた、その運動状態を反映した音の生成機能をもつインタラクティブシステムを提案する。これまでに、代表的な凸回転体である楕円体の基本運動である水平スピン、水平・垂直ロール等をタッチセンサで認識する手法、および楕円体とディスプレイとの接触領域の面積や重心の移動速度を反映した音とビジュアルの割り当て手法を考案し、システムの実装を行った。

## An Interactive System That Generates Sound From the Movement of Convex Solids of Revolution

YUMA IKAWA<sup>†</sup> AKIHIRO MATSUURA<sup>†</sup>

In this article, we focus on the playful movement of convex solids of revolution such as spin and roll on tabletop display and present an interactive system that uses them as interface and that generates sound based on their movement. So far, we have developed a method for recognizing the basic movement of ellipsoids such as horizontal spin and horizontal/vertical roll and also developed a method for assigning sound and visual that reflect information such as the touching area of ellipsoids on the display and their moving speed.

### 1. はじめに

入力インタフェースとして、特定用途のものが多く開発されており、特にエンタテインメント・ゲーム分野では、KONAMIのDance Dance Revolution[1]やバンダイナムコの太鼓の達人[2]など、動きや操作法に新規性やエンタテインメント性のあるものが開発されている。[3]では、上向きの曲面ディスプレイ上でパトンを転がし入力を行うインタラクティブシステムが提案された。楽器開発の分野でも様々な独自のインタフェースをもつ楽器が開発され、国際会議NIME等で発表されている。

昨年[4]において、卓上ディスプレイ上で凸状の回転体にスピン、ロールといった運動をさせプレイフルな操作法で入力を行うインタラクティブシステムが発表された。しかし、本システムでは、凸回転体とディスプレイとの接点や軌跡の描画、凸回転体の両端の点の認識・描画等の視覚表現と動きに合った既定のサウンドエフェクトは使用されているものの、接点の大きさや凸回転体の運動状態を反映したインタラクティブな音生成は考慮されていなかった。

本研究では、凸回転体を卓上ディスプレイ上で用いるシステムに関し、特に凸回転体の状態やディスプレイとの関係をリアルタイムで反映した音生成システムを提案する。これまでに、凸回転体の主要な運動である水平スピン、水平ロール/垂直ロールに対して凸回転体とディスプレイの

接触領域の面積や接点の運動速度、凸回転体のスピン時の角速度等の情報を音とビジュアルに反映させる手法の考案と機能の実装を行った。

### 2. 凸回転体の基本運動

凸回転体とは、何らかの平面図形を平面内の軸の周りに360度回転させて得られる凸形状の立体を指す。本稿では凸回転体として特に楕円体を考える。楕円体の主な運動としては、その場で回転するスピンと地面に接し転がるロールの二種類があり、さらに、図1に示す形状の楕円体では、地面に横たわっている状態(水平)と起立する状態(垂直)がある。これらより楕円体は{水平, 垂直}×{スピン, ロール}の四種類の運動をもつ。ここでは、それらを水平スピン/垂直スピン/水平ロール/垂直ロールと呼ぶこととする。

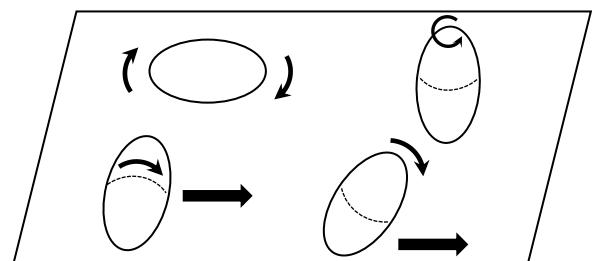


図1 (左上) 水平スピン, (右上) 垂直スピン,  
(左下) 水平ロール, (右下) 垂直ロール

<sup>†</sup>東京電機大学  
Tokyo Denki University

## 2.1 システム概要

### 2.1.1 システム構成

本システムは、平面テーブル、電磁誘導方式タッチセンサ、(複数の)凸回転体、アプリケーションの処理を行うコンピュータ、プロジェクタとその台座等から成る。その概観図、タッチセンサ、凸回転体を図2に示す。タッチセンサとしては、金属に反応する電磁誘導方式タッチセンサである LL センサー (シロク社) を用いる。サイズは  $60 \times 60$  [cm],  $1 \times 1$  [cm] のセル毎に電磁結合係数 ( $0 \sim 2^{16} - 1$ ) の値が 100 [Hz] で得られ、行列データでコンピュータに送信される。コンピュータ上では本データから凸回転体の位置や運動速度、接触部分の面積等の計算やそれを用いたアプリケーションの処理が行われ、イメージはプロジェクタを通して卓上に表示され、同時にサウンドが出力される。

凸回転体は、厚み 2 [mm], (胴回りの直径, 高さ) = (6, 12), (6.75, 13.5), (5, 15) [cm] 等様々なサイズのものを使用する。それらは 3D モデルで作成後、ナイロン樹脂, PLA 樹脂等で作成し、センサに反応させるため全体をアルミのテープで覆って使用する。

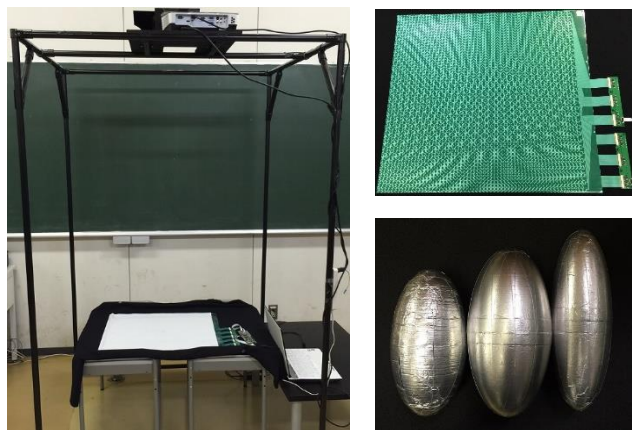


図2 システムの概観, タッチセンサ, 凸回転体

## 3. サウンド生成方法

### 3.1 凸回転体の運動情報の取得

凸回転体の動きに同期した音やビジュアルを生成するには、凸回転体のセンサとの接触領域 (凸回転体とセンサが反応し電磁結合係数値が高い領域) の重心、接触領域の面積、重心の運動速度等の情報が必要となる。それらは以下の方法で求めた。

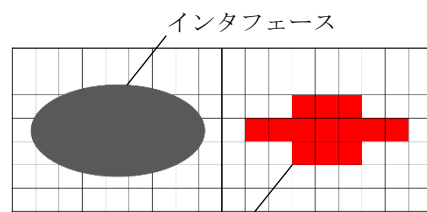
#### 3.1.1 接触領域の重心とその運動速度

電磁結合係数値が 2000 以上のセル全体を接触領域と定める。電磁結合係数値を重みとし,  $x, y$  座標いずれについても、それらのセルの座標の重み付き平均として重心の座標を求めた。なお、座標値は、 $60 \times 60$  [cm] のセンサの中央を原点  $O$  として、センサ全体が  $xy$  平面上で  $10 \times 10$  のサイズとなるようスケールしている。

さらに、フレーム間での重心の移動距離により凸回転体の運動速度を求める。

### 3.1.2 接触領域の面積

電磁結合係数値 2000 以上の正方形セルの面積の総和を接触領域の面積とした (図3)。



電磁結合係数値 2000 以上のセル

図3 接触領域の面積

### 3.1.3 凸回転体の両端を結ぶ単位ベクトルと角速度

凸回転体と接触していると判定された全てのセルの中心の座標を取得し、それらの座標から最小二乗法を用いて近似直線を求める。この近似直線から単位ベクトルの  $x, y$  成分を求める。

凸回転体の回転速度 (角速度) は、一フレーム前の上記凸回転体の単位ベクトルから現フレームの単位ベクトルの成す角  $\theta$  から求まる (図4)。さらに  $\theta$  はこれら二つの単位ベクトルの内積  $= 1 \cdot 1 \cdot \cos \theta$  から求まる。

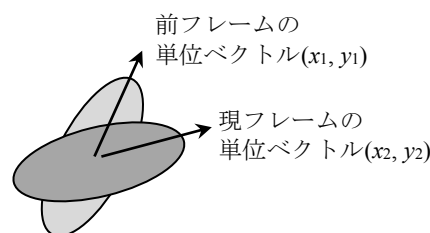


図4 凸回転体の方向ベクトルと回転角

## 3.2 凸回転体の運動情報を利用したサウンド生成

### 3.2.1 水平スピンの認識と音への反映

水平スピンの性質は主に角速度に現れる。音の妥当な割り当て方法については、直感的に角速度が 0 に近ければ音は小さく低く、角速度が大きくなればサウンドも大きく高くなるのが一つの自然な対応と考えられる。そこで、音の高さ (ピッチ) とボリュームの上下限を決めて、それぞれの下限值には角速度 0 を、上限値には 1 フレームで凸回転体が  $\pi$  回転する場合を対応させ、その間を線形補間することとした。音の不安定な変化を避けるため、実装上は、毎フレームにおいて、それまでの 5 フレームそれぞれで得られた内積の平均値を用いて音の高さとボリュームを求めることとした (音の高さやボリュームに関しては、角速度その他の凸回転体の運動情報から別の対応付けを行うことも可能である)。

ビジュアル表現に関しては、凸回転体の両端に点を表示するもの、緑のレーザーが照射されたイメージを表示するもの、凸回転体の重心から同心円状に波紋が広がっていくものの三種類を定め、それぞれに合った音源も制作した。

### 3.2.2 水平・垂直ロールの認識と音への反映

水平ロールと垂直ロールへの音の割り当て方法は同様であるため、ここではより変化の大きな運動を行い、音の起伏も激しくなる垂直ロールを例に、運動の認識方法と音への反映方法を述べる。

凸回転体に垂直ロールの運動をさせると、センサ上で重心の位置、重心の運動速度、接触領域の面積が変化していく。これらの値は 3.1 節の記述からリアルタイムで求められる。水平スピンのときと同様、重心の運動速度はそれまでの 5 フレームの平均値を用いる。本稿では運動速度が 0 に近いときは音のボリュームを小さく、速度が大きいときは音のボリュームを大きくすることとし、水平スピンのときと同様ボリュームの上下限値と運動速度の上下限値を定めて対応させておき、その間の運動速度では線形補間によってボリュームを定める。一方で、音の高さは凸回転体のセンサとの接触領域の面積の大きさに比例させることとした。このように設定すると、垂直ロール中の音は、凸回転体が垂直に起立しているときは速度も面積も小さいため、結果音は小さく低いものとなり、水平に近くセンサに対し横向きになっているときは速度も面積も大きく、音は大きく高いものとなる。

ビジュアル表現に関しては、水平ロールに対しては残像の点の描画が数秒間続くものを、垂直ロールに対しては重心を中心に接触領域の面積に比例したサイズの円状のリングを表示し、それぞれに合った音源を制作した。

### 3.3 複数の凸回転体の同時識別手法と応用

2 つの凸回転体にそれぞれ異なるビジュアルと音を割り当てるためには、それらの識別が必要となる。今回使用したタッチセンサで得られる電磁結合係数の値は金属の種類や金属との距離により変化することに着目し、凸回転体の外面を非金属で覆って電磁結合係数値を下げると凸回転体同士を区別できるのではないかと考えた。そこでアルミテープを周囲に巻いた凸回転体の外面に布製ガムテープを 3 重に巻き、電磁結合係数値が元のものとの程度異なるか調べた。すると、アルミテープを巻いた凸回転体をセンサ上に水平・垂直・斜めの三通りの姿勢でそれぞれ 10 回ずつ約 10 秒間置いて、10 秒の間のセンサ全体での電磁結合係数値の最大値を取得したところ、いずれの場合も係数値が 18000 を下回ることにはなかった。同様の調査をガムテープを三重に巻いた凸回転体を用いて行ったところ、電磁結合係数値の全ケース中の最大値は 14300 台であった。このことから、16000 を閾値にとり、センサの全セル間の係数値の最大値がこの値より大きいかな否かでガムテープで覆った凸回転体とそうでない凸回転体が区別できることが分かった。

## 4. システムの実行例

### 4.1 水平スピン

#### 4.1.1 両端に点を描画する表現

システムが本モードの際は、凸回転体の両端に点が出現し、インタフェースの回転に合わせて点も回転する(図 5)。回転の速度により音のピッチとボリュームが変化する。速く回転させるとより高い音を出すことができる。図 5 では二つの凸回転体にそれぞれアルミテープ、ガムテープを巻いて得られる電磁結合係数値を変え、それぞれの両端の点を別の色(黄と赤)で表示し、同時に音源も別のものを使用している。

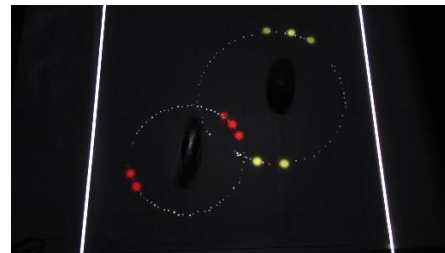


図 5 水平スピン時の凸回転体両端への点の描画

#### 4.1.2 レーザー照射の表現

スピンの最中、凸回転体の両端からレーザーのように直線が表示される表現である(図 6)。音の生成方法は 4.1.1 項と同様だが、レーザーのイメージ合った音を用い、凸回転体が止まっているときもレーザーは照射されているため、その際も最小限の音を発する設定としている。

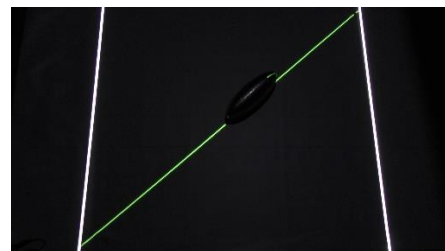


図 6 水平スピン時のレーザー照射の表現

#### 4.1.3 同心円状の波紋の表現

水平スピンするインタフェースの回転量が一定以上になると凸回転体の重心から同心円状に波紋が広がる(図 7)。一つの円が広がる毎に短い音が再生される。スピンの角速度によりピッチとボリュームが変化するため、再生される音は次第に低くなり、ボリュームは小さくなっていく。



図 7 水平スピン時の波紋の表現

## 4.2 水平ロール

凸回転体の重心の軌跡が画面に表示される。水平ロールは、楕円体をうまく操作することで進行方向に対し楕円体を真っ直ぐに、あるいは図のように左右に揺らしながら進ませることができる(図8)。左右に揺れながら進むことでセンサ上の面積が変化するため、面積に対応して音のピッチを変化させることで音が振動する効果が得られる。

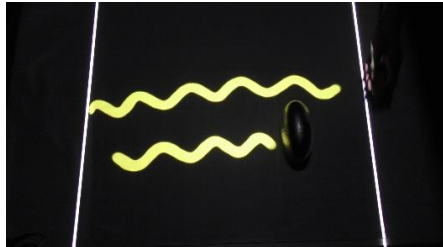


図8 水平ロール時の波線の描画

## 4.3 垂直ロール

垂直ロールでは、接触領域のサイズに比例した青色のリングが一定時間おきに表示される(図9)。同時に、音も各フレームでこのリングの大きさに比例したピッチで生成され、ボリュームは重心の速度を反映する。



図9 垂直ロール時のリングの描画

## 4.4 二つ以上の凸回転体の独立操作

二つ以上の凸回転体をセンサ値により区別できれば、より複雑な音生成を行うことができる。現状では二つまでのセンサ値の区別しか実現できていないが、同じ機能をもつ凸回転体を複数用いれば、三つ以上の凸回転体を同時に扱うことが可能である(図10)。

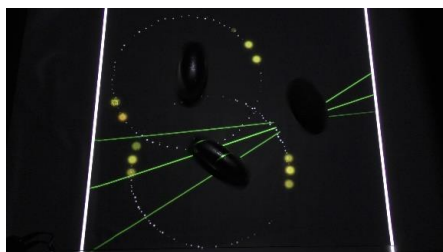


図10 両端の光る二つの凸回転体とレーザーの凸回転体

## 4.5 その他

### 4.5.1 凸三角形形状(おにぎり型)立体の垂直ロール

本立体は凸回転体と同様スムーズに垂直ロールを行うことが知られている。本立体も、凸回転体の垂直ロール向けに開発した機能が利用でき、ロール運動に合わせ、音のピッチやボリュームを変化させることができる(図11)。

水平スピンもうまく操作すれば可能である。三つの頂点を認識して表示・利用する機能は現時点では未実装である。



図11 凸三角形形状(おにぎり型)立体の垂直ロール

### 4.5.2 凸回転体による線画の描画と音生成

本システムの拡張として、凸回転体を使い図形や絵などを描くことができるドローツールを開発しており、描画中に凸回転体の重心の速度により高さやボリュームの異なる音をリアルタイムで生成することができる(図12)。



図12 凸回転体による線画の描画と発音

## 5. おわりに

本研究では、凸回転体のスピンとロールという二種類の運動を認識して、運動情報を反映した音とビジュアルを生成できるインタラクティブシステムを開発した。本システムにより凸回転体をプレイフルに操作する視聴触覚インタラクションを楽しむことができる。一方で、三つ以上のセンサ値の異なる凸回転体を同時に安定的に使えるようにすること、凸回転体の運動として本稿では利用しなかった垂直スピンの認識と利用を可能とすること、4.5.1項に述べた凸三角形形状立体のように回転体でない立体でもスピンやロールを利用できるようにすることは本システムの課題である。また、拡張したシステムを利用して視聴覚表現の作品の制作を行うことも今後の課題として挙げられる。

**謝辞** 本研究は JSPS 科研費 16K00507 の助成を受けて行った。

## 参考文献

- 1) Dance Dance Revolution Gateway GLOBAL, <http://www.konami.jp/bemani/ddr/jp/>
- 2) 太鼓の達人シリーズ公式サイト, <https://taiko-ch.net/>
- 3) Matsuura, A., Matsukawa, T., Ohshima, H., Kurihara, H. and Oriono, H.: Stick'n Roll: A Playful Stick Interface for Curved Display, Proc. of ACM Virtual Reality International Conference (VRIC 2015), Article No. 20 (2015).
- 4) Matsuura, A., Ikawa, Y., Takahashi, Y. and Tone, H.: Spin and Roll: Convex Solids of Revolution as Playful Interface, Proc. of ACM SIGGRAPH Asia 2017, Poster, Article No. 25 (2017).