

コマ遊び体験を拡張する遊具システム

的場 やすし^{1,a)} 佐藤 俊樹¹ 小池 英樹¹

受付日 2011年6月20日, 採録日 2011年12月16日

概要: 我々は伝統的な玩具であるコマに着目し, 汎用性のある高速回転体計測技術, 拡張現実感技術を開発して新しいエンタテインメントシステムを試作した. プレイヤがコマに働きかけ, コマがプレイヤにフィードバックを返すことによって, プレイヤとコマとの間のより豊かなインタラクションを実現した. 磁力を利用して非接触的にコマの回転速度を加速させ, さらにコマを自由に移動することができる手法と, 偏光板と LED を使用することにより, 高速で回転する複数のコマの回転速度と位置をリアルタイムに計測可能な手法を開発した. これらとコマの回転速度やコマどうしの衝突に同期したビジュアル, オーディオ, フォースフィードバックを複合的に組み合わせ, コマ遊びを拡張したインタラクティブな遊具システムを開発した.

キーワード: タンジブル, 高速度カメラ, テーブルトップ, 独楽, エンタテインメント

An Entertainment System That Enhances the Experience of Playing with Tops

YASUSHI MATOBA^{1,a)} TOSHIKI SATO¹ HIDEKI KOIKE¹

Received: June 20, 2011, Accepted: December 16, 2011

Abstract: We developed an entertainment system that enhances the experience of playing with tops by employing augmented reality technologies. A tabletop system tracks the positions and rotation speeds of multiple tops with a high-speed camera and displays audio and visual effects. A hand-held device, called an accelerator, enables virtual physical contact between the user and top by allowing the user to move and accelerate the top and obtain force feedback from the top. We propose a top battle game in which the player interacts directly with tops.

Keywords: tangible, high-speed camera, tabletop, spinning top, entertainment

1. はじめに

近年の子どもたちの娯楽としては, 電子的なゲームが一般的である. 伝統的な玩具には実際に手にとって遊ぶタイプのものが多いが, 電子的なゲームに比べて単純で刺激が少なく, そのため主流の玩具ではなくなっている. しかし玩具を使ったフィジカルな遊びを通じて, 玩具の持つ様々な物理的特性を感じ取り理解することは, 伝統的な玩具の持つ教育的な意義の1つといえるだろう.

我々はこのような伝統的な玩具の中から, 現代の生活においてその特性に物理的な教育的意義を見出すことができ, なおかつその特性を実感する代替的な方法が見つけないものとして「コマ遊び」に着目し, 最新の技術を活用してその遊戯性を補強し, コマが提示する物理的な現象をより身近に感じられるシステムの構築を試みた.

コマは様々な地域, 時代を超えて子どもたちに遊ばれている遊具である. Charles and Ray Eames の 1969 年の映像作品 “Tops” [1] に示されているように, 世界中に様々な種類のコマが存在するが, いずれも遊び方は単純で世代を超えて誰でも簡単に楽しむことができる. コマは 1 本足の不安定な構造であるが, 回転すると安定して直立するという, 他の玩具と比較して独特な物理的特性を持つ. このよ

¹ 電気通信大学大学院情報システム学研究科
Graduate School of Information Systems, The University of
Electro-Communications, Chofu, Tokyo 182-8585, Japan

a) matoba.uec@gmail.com

うなコマ独特の挙動は、回転する物体に発生するジャイロ効果によって作り出されている。高速に回転するコマは一見すると安定的な印象を与えるが、コマどうしの衝突の際にお互いを激しく弾き飛ばす様子や、回転中のコマを手で触ったときの指の感覚等を通して、内部に蓄えられた回転エネルギーの大きさを実感することができる。身近な遊具を介して得られるこのような体験は、子どもたちにとって物理的な現象を理解するための自然なきっかけとなる。これはコマ遊びの持つ大きな意義の1つである。

我々は、コマに対して電磁気的な力や拡張現実感技術を用いることで、プレイヤーがコマに直接働きかけ、またコマからのフィードバックをプレイヤーに返すことによってコマとの一体感を感じられる、インタラクティブ性の高い、新しい遊具を創造できると考えた。

我々の開発したシステムの特徴は以下の3点である。

- 複数の高速回転物体の位置および回転速度の計測
- 非接触による回転物体の回転速度加速および移動
- 視覚、聴覚、力触覚を組み合わせたフィードバック

本論文では、2章で関連研究について述べ、3章でシステムが提供する機能について述べ、4章ではハードウェア構成と動作原理を述べる。5章で、Virtual Realityの国際会議「Laval Virtual 2011」における動態展示によって得られた知見を中心に考察を述べる。6章で将来にわたる展望を述べ、7章で結論を述べる。

2. 関連研究

現代の子どもたちが、コマのような伝統的な玩具を介して物理現象を直接肌で感じられる遊びから離れがちな傾向にあるという問題を解決するために、従来の遊具やスポーツを先端技術で拡張する様々な試みが行われてきた。

卓球を拡張した PingPongPlus [2] ではマイクロホンアレイによるボールの落下位置の認識を行っている。ボール遊びを拡張した跳ね星 [3] では、赤外線 LED の追跡による位置認識を行っている。この2つは、ともにボールの位置や落下地点をリアルタイムに検出し、映像および音響エフェクトを加えて伝統的なゲームを拡張したエンタテインメントシステムの例である。

Augmented Coliseum [4] はテーブル上で動く玩具の車とプロジェクタから投影された CG 映像がリアルタイムで連動する、複合現実感技術を使ったバトルゲームであり、計測にカメラを使用せず、プロジェクタから投影されるグラデーションパターンを、車の上部にアレイ状に設置した光センサで計測することで車の位置と回転角度を認識している。

コマを使った作品「まわる、うつる、ひろがる」[5] は、コマに内蔵した LED の光の位置を上方のカメラで計測し、コマ周辺にプロジェクタによる色鮮やかな美しい映像と音響エフェクトを加える作品である。Laval Virtual 2011 に

おいて展示された「MR SPINTOP」[6] は、台の上で回転しぶつかり合うコマ（バインブレッド [7]）の位置を、上方のカメラによって認識し、液晶ディスプレイ上でコマの映像の上に3次元キャラクターのアニメーション映像を重畳表示し、音響を発生させるエンタテインメントシステムである。これらの研究では、伝統的な遊具、素朴な遊具に対して、複合現実感技術を適用することで、遊具としての新しい遊び方、魅力をそれぞれ実現している。一方、コマの特徴である「高速回転運動」を複合現実感技術の主要な入力情報として扱い、あわせて視覚・力覚等の提示を行う研究例はこれまでに見られなかった。我々はコマのように高速で回転する物体が複数存在する状況で、それぞれの位置だけでなく、回転速度をリアルタイムに計測することにより、新しい複合現実感の形態を実現した。

3. テーブル型システムによるコマ遊び体験の拡張

我々は、コマ遊びに新たな魅力を与えるとともに、コマの物理的な特性について理解を促進するための新たなインタラクションを可能とするシステムを試作した。本章では、試作システムの提供する拡張された体験のコンセプトと、それを実現するための具体的な方法について説明する。

3.1 基本的な遊び方のコンセプト

システムが提供する特殊なコマを、同じくシステムが提供する特殊なステージの上で回して遊ぶ。1~3人のプレイヤーがそれぞれのコマを同時に遊べる仕様となっている。ゲームの開始時に自分のコマを決め、コントローラと呼ぶ装置によってコマを非接触で操作する。コマに発生するジャイロ効果や、コマに蓄えられる回転エネルギーを分かりやすく体感するために、コマどうしをぶつけ合って楽しむ遊び方を基本とした。

3.2 視覚、聴覚によるフィードバックの機能

本システムではステージの上で回転するコマの近傍に、リアプロジェクションによりコマの回転速度に応じた映像やテキストを表示した。コマに蓄えられる回転エネルギーは回転速度の2乗に比例して大きくなる。高速で回転するコマは他のコマを激しく弾き飛ばすほど大きなエネルギーを蓄えているが、コマは回転速度が高速になるほど挙動が安定するという特性を持つため、見ているだけではコマの状態の把握は難しい。このリアプロジェクタによる表示は、分かりにくい回転という物理的特性の可視化と、コマ遊びの魅力を増すための演出の2種類の目的を持っている。

コマ遊びにおける最も重要な物理的な特性である回転速度を、4.4節で述べる手法によってコマの位置とともに計測し、デジタル的な数値情報としてコマの近傍にリアルタイムに表示した(図1)。回転速度の可視化により、コマの挙

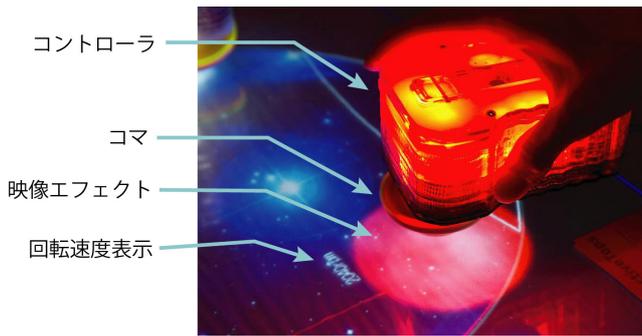


図 1 コントローラ, コマおよびステージ上の映像エフェクト

Fig. 1 The controller, the top and the visual effect appearing on the screen.



図 2 コマ回転中の映像エフェクト

Fig. 2 The visual effect while top are in spinning state.

動の変化と回転速度の変化を結び付けて、回転現象に関する理解がより促進されると考えられる。この数値は、コマの倒れにくさや、相手のコマにあたった際に相手に与えるダメージ（すなわち電子的な対戦ゲームで馴染みのある生命力や攻撃力に相当する）ととらえることもでき、ゲーム性を高めるという側面もある。回転数の表示により、自分や他人のコマの状態を客観的に知り、後述するコントローラを使用して「今すぐ相手にぶつけて戦わせる」「いったん退いて回転を回復させる」等の戦略を立てることが可能となる。

回転速度の数値表示に加えて、コマの回転速度に応じて大きさや激しさの変わる視覚的な手がかりをコマの周辺に表示させた(図 1 および図 2)。この表示は数値表現よりも直観的にコマの回転速度の優劣を比較することができる。表示内容は、「コマから周りに吹き出す煙、コマから飛び散る火花、コマを中心とする光の円盤」の 3 つである。また、コマどうしの衝突という事象は、ぶつかり合うことでコマの回転速度が急激に低下し、蓄えられていた回転エネルギーによってコマがお互いに弾き飛ばされる特徴的な現象である。そこには慣性や作用・反作用等、様々な物理法則を見ることができる。これをより分かりやすく強調するため、コマどうしが衝突した際に接触地点を中心に「爆発する光の輪」と「飛び散る火花」の映像を重ねて表示し、あわせて爆発音の音声を発生させた(図 3)。この映像と



図 3 衝突直後の映像エフェクト

Fig. 3 The visual effect during a collision.

音声のエフェクトは、衝突するコマの回転速度が速いほど大きく激しくなる。

3.3 非接触によるコマの制御

コマの運動は、回転運動と水平方向の移動運動であるが、従来の一般的なコマ遊びではいったん回転を始めた後はこれらの動きを外部から自由に制御することはできなかった。そこで、コマとのインタラクションを補強するために、プレイヤーがコマの回転速度を速めることができ、さらにコマの移動を可能にするためのコントローラを製作した。回転体への非接触的な制御については、永久ゴマ玩具 [8] が用いている電磁気的な力を応用した手法が知られている。永久ゴマはコマに磁石を内蔵し、コマを回す台の下に電磁石を設置し、モータと同じ原理でコマに回転エネルギーを与えている。本研究ではこの原理を応用し、ステージ上の複数のコマの中から任意のコマに対して選択的に効果をかけられるように、電磁石部分を手に持って自由に動かせる形状とした。これによりコマの衝突等によって自分のコマの回転速度が低下しても回復させることができる。

コントローラがコマの回転速度を加速しているとき、コントローラ側の電磁石とコマ側の磁石の間には磁気的な引力・斥力が発生する。このときコントローラを水平に動かすとコマはコントローラに引っ張られるように一緒に動くため、コマに触れずにコマを前後左右に自由に移動させることが可能となる。この機能はコマを加速させる装置を手持ち可能な形状にしたことにより得られた機能である。なおコントローラの詳細については 4.2 節で述べる。

3.4 力触覚によるフィードバック

本研究では 3.2 節で述べたフィードバックに加え、コマの回転運動やお互いの接触等の状態を、力触覚を通じてより直接的にプレイヤーに感じさせることでコマとプレイヤーとの一体感を作りだし、コマの物理的挙動に対する親しみと理解を促進させることが重要と考えた。そのために、前述したプレイヤーが手に持つコントローラに、3 種類の力覚的なフィードバックの機構を実装した。

1つ目はフライホイールを用いたジャイロ効果の機構である。回転するコマに発生するジャイロ効果は、コマが倒れず自立し続けようとする力を生み出す。回転するフライホイールを内蔵したコントローラは、空中でどこにも支持されていないにもかかわらず傾けようとするとその動きに抵抗する力をプレイヤーに与えることができ、まるで目の前のコマの分身が手の中にあるような感覚が得られる。通常のコマ遊びでは、コマの倒れにくさは視覚的な情報としてしか得られなかったが、そのジャイロ効果を自分の手に感じることで高速回転時のコマの力強さや低速回転時のコマの弱々しさを実感でき、よりコマを身近に感じることができる。2つ目はプレイヤーの手の平に軽い痛覚を与える、コントローラに内蔵した電磁ソレノイドである。コマどうしの接触、衝突については前述した視覚および聴覚のフィードバックにより現実のコマ遊びから拡張がなされているが、視聴覚情報だけでなく、さらに痛みに近い触覚を同時に加えることにより、コマに起こっている衝突の衝撃をより直感的に感じさせることを目的としている。なお複数のコマが存在する場合でも、コンピュータがそれぞれのコマの位置をつねに追跡、把握することで、いったん確立したコマとコントローラとの対応関係はつねに維持することができる。3つ目は、コントローラとコマ間に生じる磁気的な力を利用したコマの加速感の提示である。コントローラとコマ間には磁気的な力が発生する。この力はコントローラがコマの回転に同期して力を与える際に断続的に発生する力であるため、コントローラをコマに近づけるとその回転速度に合わせたバイブレーションを感じることができる。これにより、プレイヤーはコマの加減速を手を感じる事が可能である。

3.5 コマとコントローラの対応付け

本システムは基本的に複数のプレイヤーで相手のコマを倒すためにコマをぶつけ合う、いわゆるバトルゲームの形態で体験できる。本システムは3人のプレイヤーが同時に遊べる仕様となっており、3つのコントローラと3つのコマが用意されている。ステージ上の3つのコマと、3人のプレイヤーが持つコントローラの対応関係の確立は、ステージ上に設けられた3つの回転開始領域のいずれからコマの回転を開始させたかによって、どのコントローラと対応付けられるかを最初に決定する方式を採用した。ステージ上の3つの回転開始領域とコントローラの対応関係を明確にするために、それぞれの領域に投影する図形の色とコントローラ自体の色を同一（赤、白、青）にした（図4）。コマとコントローラの対応付けは、コマが停止したりひっくり返ったりしない限り維持される。

なお本システムは、1人で複数のコマを操作する形態もとることができ、1人の場合でもコマの接触の際の視覚、聴覚、触覚フィードバックの感覚を楽しむことは可能である。



図4 3つの回転開始領域と対応するコントローラ

Fig. 4 Three areas for initial spinning and the corresponding three controllers.



図5 コマの構造

Fig. 5 Top construction.

本システムではプレイヤーがなるべく自由にコマ遊びを楽しめるように、これまでに述べた内容以外に遊び方を規定するような機能あるいはルールは設けていない。ただしバトルゲームのモードでは複数のコマが回転を始めた後に、回転中のコマが1個だけの状態になった際にゲーム終了の表示を画面上に投影して、ゲームの区切りがついたことを明確に示すようにしている。1人で遊ぶモードに設定されている場合はこの表示は行われず、これらのモードの切替えはシステムの管理者が行う。

4. 実装

本章では、3章で述べた機能を実現するために我々が開発したコマ、コントローラ、ステージの3つの要素について説明を行う。

4.1 コマ

コマ本体は下部をABS樹脂、上部をアクリル樹脂で構成する。直径80mm、高さ35mm、重さ105gである。

図5にコマの構造を示す。コマ上部にネオジウム磁石4個を、コマを上から見たときの磁極が磁石2個で1つのS極とN極になるように時計回りにNNSSの順番で配置している。コマ中央部には1.5V単5電池を内蔵し、下面部中心軸の周りに照射方向下向きに取り付けた赤外線LED4個と結線している。赤外線LEDには前面を半分覆う形で偏光板（Asahi-Kasei WGF）を貼付している。赤外線LED

を半分露出させたのは、4.4節で述べる偏光板の作用によってLED光を偏光板が完全に遮断する時間が発生することを防ぎ、連続的なコマの位置追跡を可能にするためである。

4.2 コントローラ

コントローラは電磁石、電磁ソレノイド、ジャイロ装置の3つの要素からなり、これらに対する電力は外部から有線にて供給する。図6に内部構造を示し、図7にコントローラ上面および下面の外観を示す。コントローラ本体外装部はアクリル樹脂製である。長さ140mm、幅80mm、高さ65mm、重さ750gである。

本体前部にコマの加速装置として2つの電磁石および制御回路を内蔵している。加速装置の回路図を図8に示す。電磁石は2重コイルになっており内側のコイルは0.1mm径ポリウレタン被膜銅線3,000回巻、外側のコイルは0.3mm径ポリエステル被膜銅線1,500回巻である。この電磁石2つの中心軸を垂直に左右平行に並べて配置し、左右の内側どうしおよび外側どうしのコイルを並列につなげて配線している。銅線を巻く向きは左右のコイルで逆向きとしている。コイル中心を通る鉄芯は逆U字型であり、左右2つの電磁石の中心を貫いている。図中のLEDは、外側コイルに流れる電流が遮断されたときに発生する逆起電力からトランジスタを保護するためのものであると同時に、コマ加速時に回転速度と同期して点滅し、回転速度を分かりやすく視覚的に表現しエンタテインメント性を高める効果もあわせ持っている。

回転するコマの上にコントローラをかざし、コマに内蔵された磁石がコントローラ内部の2重コイルの下を通過すると、内側のコイルに誘導電流が発生する。この誘導電流はトランジスタによって増幅され外側のコイルに流され

る。このとき外側のコイルに発生する磁力によってコマ内蔵の磁石が引き付けられ回転速度が加速される。

コマを加速させる力はコントローラとコマの距離が近いほど強くなる。電源に12Vを使用した場合、コマを約3,500rpmまで加速させることが可能である。コントローラがコマから50mm以上離れると、内側のコイルに発生する電圧がトランジスタの動作電圧以下になるため加速されなくなる。

コントローラがコマの回転速度を加速しているとき、電磁石の磁石を引き付ける作用によって、コマはコントローラに引き付けられている。このときコントローラを水平に動かすとコマもコントローラとともに動き、コマに触れずに前後左右自由にコマを移動させることが可能となる。コマの回転数3,000rpm、コントローラとの距離10mmのとき、最大300mm/sでの移動が可能である。

コントローラ中央部に衝撃のフォースフィードバック用として電磁ソレノイド(国際電業AL-02)を搭載している。電磁ソレノイドはAC100Vを通電すると、中心部の鉄心が上方に高速移動し、コントローラ上部のアクリル製レバーを上へ跳ね上げる。図9に動作状態を示す。電磁ソレノイドは、プレイヤのコマと他のコマの衝突が検出されることで駆動され、コントローラ上部のレバー端部が40mm跳ね上げられる。レバーはコントローラを保持する手の平を下から叩いてプレイヤに衝撃を伝える。

コントローラ後部にジャイロ装置として、回転軸を垂直

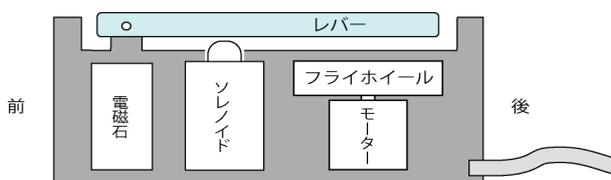


図6 コントローラ内部構造(縦断面)
Fig. 6 The controller construction.

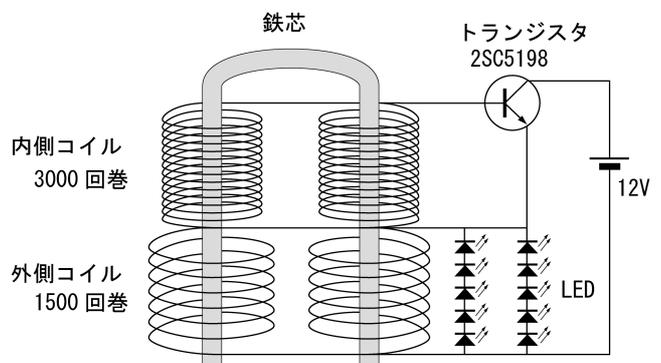


図8 加速装置回路図
Fig. 8 Acceleration unit mechanism.

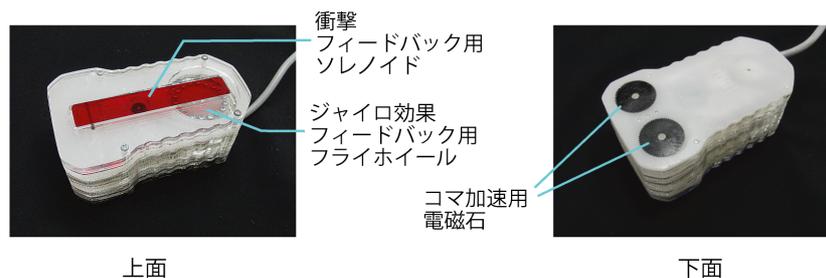


図7 コントローラ
Fig. 7 Controller physical attributes.

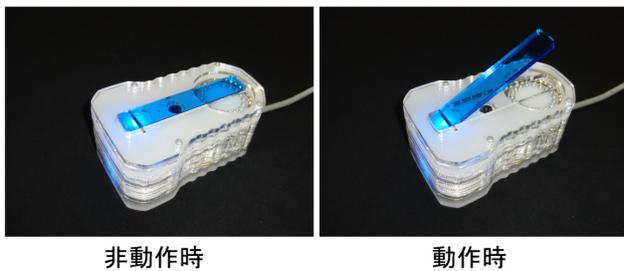


図 9 衝撃フォースフィードバック装置の動作図

Fig. 9 Solenoid-induced force feedback from controller.

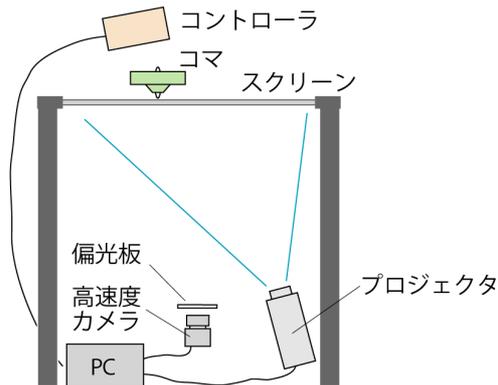


図 10 ステージ構成図

Fig. 10 The stage construction.

に設置したフライホイールおよびモータを内蔵している。フライホイール（直径 44 mm，高さ 22 mm，重さ 42 g）をモータ（マブチ RE-260）により回転させる。モータ用の電力として，そのコントローラと対応付けられたコマの回転速度に基づいて PWM 制御をかけた 3.3 V の電圧を供給することで，フライホイールの回転速度をコマと同じように変化させる。

本研究では，コマに発生しているジャイロ効果を手元で厳密に再現することを目的にせず，コマの回転速度をジャイロ効果の強弱に反映させて，回転の度合いを触覚的に実感できる現実的な仕組みの実現を目指したものである。

コントローラ本体の重量は 750 g であり，コントローラを保持する腕の筋肉に力が必要となり，ジャイロ効果の感覚が弱くなる傾向がある。予備実験によって，本実装のコントローラの場合は，コマの実際の回転速度の 2 倍程度の速度でフライホイールを回転させることで，ジャイロ効果が感じやすくなることが分かった。このため，フライホイールの回転数は，コマの回転数とは一致させず 2 倍程度の速度とした。

4.3 ステージ

ステージ本体の大きさは，高さ 900 mm，幅 900 mm，奥行き 700 mm である。図 10 に内部の構造を示す。ステージ上面は，半透明の塩ビフィルムを 2 枚の透明アクリル板（2 mm 厚）ではさんだ構造である。このフィルムは下方の

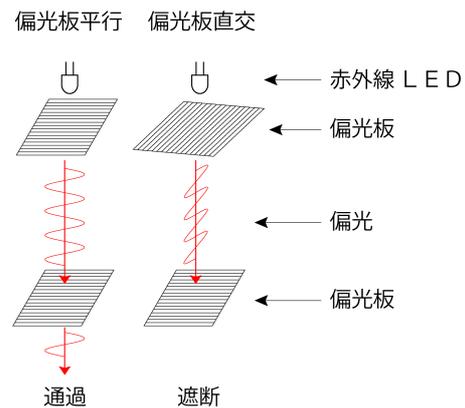


図 11 回転にともなう赤外線のと通過と遮断

Fig. 11 Polarizing of IR light.

プロジェクタ（TAXAN KG-PH1004XS）からの光を適度に拡散する特性を持ち，映像のスクリーンとして機能する。なお複屈折性を持たないフィルムを使用したため，コマが発する直線偏光には光学的な影響を与えず，テーブル下方にそのまま透過させることが可能である。高速度カメラ（Baumer HXC-13）はステージ底面に上向きに設置し，レンズ前に偏光板（Asahi-Kasei WGF）および可視光カットフィルタ（富士フィルム IR86）を装着している。高速度カメラおよびプロジェクタはステージ上方の天井に設置することも可能であるが，オクルージョンの問題が発生するため，ステージ下方に設置した。計算機は一般的なキューブ型 PC（Core i7 980，16 GB RAM，GeForce GT 440）を使用した。

4.4 コマの位置，衝突，回転速度の計測

コマの回転数の計測には，2 枚の偏光板を通過する光が 2 枚の偏光板の相対角度に応じて通過あるいは遮断される現象を利用している。偏光板は特定の方向の振動面を持つ光のみを通過させる性質があることから，通過する光の振動面が直交する角度に 2 枚の偏光板を設置すると光が遮断され，光の振動面が平行の角度に設置すると光は通過する（図 11）。

コマに内蔵された赤外線 LED は表面の半分の面積を偏光板でカバーされている。このため半分の赤外線は特定の方向の振動面を持つ偏光となって下向きに照射され，半分の赤外線はそのまま下向きに照射される。ステージの上面は光学的に等方性を持つ素材で作られているため，コマから出た赤外線はステージ下の高速度カメラへ到達する。高速度カメラのレンズ前にも偏光板が設置されているため，コマの偏光板と高速度カメラ前の偏光板の相対角度が平行（0 度，180 度）のときはすべての赤外線が通過し，直交（90 度，270 度）のときは偏光である半分の赤外線は遮断される。

ステージ上のコマの位置を計測するために，高速度カメラの映像によって赤外線 LED の光を検出する。コマから

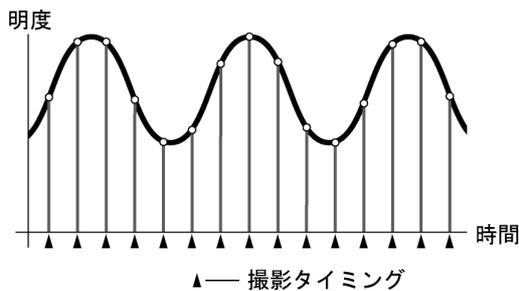


図 12 回転するコマからの赤外線の色変化と撮影タイミング
 Fig. 12 IR light luminance and capture cycle.

の偏光でない赤外線はコマが回転しても途切れることなくつねに観測できる。また、カメラのフレームレートが 2,000 fps と高速であることからコマがステージ上を高速に移動してもフレーム間の移動距離は極わずかであるため、コマがステージ上で激しく衝突しても個々のコマの位置を見失うことなく追跡可能である。コマどうしの衝突の検出も位置計測により行っており、2つのコマが半径の2倍の距離である 80 mm まで接近したとき、衝突したと判定している。

コマの回転速度の計測は、赤外線 LED の位置を検出し、その部分の明度変化を観測することにより行っている。2つの偏光板の相対角度が連続的に変化するため、コマが1回転する間にカメラの画像には2回、明度の変化が観察される。回転するコマからカメラへ到達する赤外線の明るさは図 12 のように変化している。フレームレート 2,000 fps の高速度カメラで明度を計測し周期を特定する場合、測定可能な周波数はサンプリング定理によりフレームレートの半分である 1,000 Hz より小さな値となる。この周波数をコマの回転速度に変換すると 30,000 rpm 以下となるが、本研究で使用するコントローラによって加速されるコマの回転速度は物理的に最大 3,500 rpm 程度であるため、十分に実測可能な範囲であることが分かる。

実際の回転速度を割り出す手順は以下のとおりである。カメラ画像中の赤外線 LED 部分の、現在のフレームと1つ前フレームと2つ前のフレームの連続する3つのフレームの明度を比較する。それぞれを A, B, C としたとき、 $A < B > C$ が成立した場合 A と C の間に明度の最大値があったと判断し、 $A > B < C$ が成立した場合、A と C の間に明度の最低値があったと判断する。実装ではこの明暗のサイクルが 100 回繰り返されるのにかかった時間を計測し、回転速度を計算している。

回転速度の計測に、本研究と同じように回転体から発する偏光を利用した計測手法として、次のような手法が提案されている [9]。並んだ2個のフォトセンサに対しそれぞれ直交する角度に偏光板を装着し回転体近傍に設置する。回転体から発せられる偏光を2つのフォトセンサで同時に計測すると、回転体の偏光板の角度に応じてフォトセンサ

に設置した偏光板で遮断される光の量に変化する。そのため、2つのフォトセンサが受光した光量の比率から回転体の角度を割り出せる。この手法では回転体の角度を正確に計測することが可能であるが、2つのフォトセンサは1つの回転体しか計測できないため、コマのように不規則に移動する複数の回転体を計測することはできない。他にも回転速度を計測する手法として、回転体の内部に地磁気センサを内蔵し地磁気により計測を行うコマ [10] や、フォトセンサを内蔵し2色に塗り分けた接地面の明暗を読み取り回転速度を計測するコマ [11] がある。これらのセンサを内蔵する手法によっても回転速度の計測は可能であるが、多数の電子部品をコマの内部に内蔵する必要がある。さらに本論文のシステムのようにコンピュータへ回転速度の情報を伝えるためには無線送信機器を内蔵する必要がある。またコマの位置情報を得るためにはさらに付加装置が必要であるため、コマ本体が大きく、重くなってしまう。このため、本システムでの適応は困難と判断した。

なお、カメラを使用した画像処理により複数物体の位置・回転を計測する手法はこれまで多く開発されてきている。特に近年のテーブルトップ分野では、2次元コードを用いた手法が一般的である。しかしこのような画像処理ベースの手法の場合、画像処理の計算コストが高いため、コマのように高速回転する対象にマーカを貼り付け、高速度カメラでこれを撮影し計測を行うことは現実的ではない。一方で、本研究で開発した回転体の計測手法は、2枚の偏光板と光源を用いて回転速度を光の明度変化に単純化してとらえるというシンプルな手法であるため、画像処理の計算コストが非常に低く、高速度カメラを用いた 2,000 fps 以上のリアルタイム計測が可能である。また本論文の手法で回転速度計測のためにコマに搭載するのは偏光板を貼付した赤外線 LED と電池だけである。単純な構造であるため、コマを衝撃に強く小型軽量に作ることができる。

5. 展示を通じたユーザスタディ

フランスの Laval 市で開催された Virtual Reality に関する国際会議「Laval Virtual 2011」(総観客数約 13,000 人、うち一般客数約 9,000 人)において本システムの動態展示を行った。会場では、幼児から高齢者まで幅広い年齢層の来場者が本システムを体験した(図 13)。その体験の様子を観察し、必要に応じてインタビューを行うことで、得られた知見について説明する。

ほとんどの来場者は、コマに触れずにコマを操る体験を新鮮に感じるとの意見を述べた。電磁ソレノイドによるコマ衝突時のフォースフィードバックに関しては、予期せぬ衝撃に驚いてコントローラを落としてしまう来場者も数人見られたが、すぐに慣れてむしろこの刺激を楽しむようになっていた。ほとんどの来場者が、他のコマを弾き飛ばして停止させゲームに勝つことよりも、単純にコマどうし

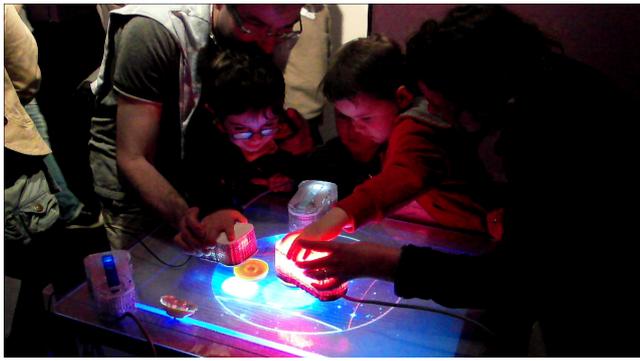


図 13 Laval Virtual 2011 展示の様子

Fig. 13 Demo exhibition at Laval Virtual 2011.

をぶつけ合って衝突時に発生するエフェクトやフォースフィードバックを楽しんでいた。また、多くの来場者からフォースフィードバックがゲームを面白くしているとの評価を得た。

次にインタビューから、来場者はコマに発生しているジャイロ効果や衝撃を自分の手の中に感じたり、自分の意志で他のコマにぶつけにいたり、他のコマから逃げ回ったりする行為を通じてコマとの一体感を感じ、よりゲームに没入できていることが分かった。激しい衝突で回転速度が落ち、フラフラと倒れそうになる自分のコマに対し、「がんばれ、倒れるな、今回復させてやる！」と真剣に声援を送りながらコントローラを操作する姿も多く見られ、来場者にコマの物理的な状態に関するより直接的な親近感のような感覚が発生していることが確認できた。

一方で、コントローラの操作方法を難しいと感じる来場者も見受けられた。基本的な使い方はすぐに理解、習得できることが観察されたが、コマの移動に関しては操作に若干のコツが必要で習得に時間がかかることも観察された。上手に移動するためにはまず、コマの中心とコントローラのコイル部分の中央を正確に合わせる必要がある。またコントローラを動かすスピードが速すぎるとコマが追従できず離れてしまう。最初はうまくいかなくても何度か繰り返して試行錯誤するうちに適当な操作方法を発見し、そこから急に操作が上手になる傾向が見られた。コントローラの操作性の向上は改良すべきポイントといえるが、来場者を観察すると、このように練習を重ねることですぐに扱えるようになっていく、という「練習に応じた上達」の特徴を持たせることも、ゲームの面白さを高めるために効果があると感じられた。

6. 展望

本システムはコマ遊びを通じて子どもたちが、回転する物体に発生するジャイロ効果や高速に回転する物体が蓄える大きなエネルギーを手軽に体感することができ、このことは世の中に存在する様々な物理現象に目を向けるきっかけになると思われる。また、磁石と電磁石を利用して物体

を回転させる仕組み、すなわちモータの仕組みについても学ぶことができる。このように、古くから親しまれてきた遊びを最新技術で拡張することで新しい教育玩具として再構築することができた。今後も様々な「昔からある遊び」の拡張の可能性を探していきたい。

また従来のタンジブルユーザインタフェースの分野では、扱うオブジェクトは利用者が手に持って動かす程度の低速な動作しか想定されなかったため、30 fps 程度のビデオカメラを用いた通常の画像処理の手法でも追跡処理が十分可能であった。しかし、今後たとえばオブジェクトを投げたり、叩いて移動させたりするような遊戯的な要素を持つ動作をタンジブルインタラクションに取り入れようとすると、高速で回転、移動するオブジェクトの追跡を行う必要が生じ、既存のシステムでは実現が困難な場合もあるであろう。特にエンタテインメントやスポーツの分野では、エアホッケーゲームや各種球技のように、高速に回転、移動するオブジェクトの状態をリアルタイムに追跡できることが重要になる場合があると考えられる。そのような高速なタンジブルオブジェクトの位置および回転を厳密にトラッキングする技術として本研究の偏光を利用した技術は有用であると考えられる。また、高速回転する部材を扱う産業分野への応用も可能になると考えられる。

またこのシステムはリアカメラ、リアプロジェクトを用いており、一般的なタッチ検出機能（たとえば FTIR 式や DI 式）を有するテーブルトップシステムと共通の構造を持っている。このため高速度カメラの追加または高速度カメラとの交換だけで本システムの機能を追加することが可能であり、従来の研究システムへの導入が容易である。

今後はコマとプレイヤーとの一体感をより高めるため、プレイヤーの触覚機能をさらに活用したフィードバックを加えたシステムの開発を検討している。たとえばコマどうしの接触、衝撃を伝えるために、電磁ソレノイドのような衝撃力の発生機構だけでなく、GyroCube [12] で用いられた X, Y, Z 軸方向のトルクを発生できる機構のようにフライホイールの回転エネルギーを活用して衝撃の方向性を再現することや、Biri-Biri [13] で用いられたプレイヤーに電気ショックを与える機構のような、小型で軽量の装置を多数配置することによりコマからのフィードバックを全身で感じられるようなシステムの方向性も模索したい。また、本システムをより小型化、低コスト化するために、現在コマに内蔵している赤外線光源をコマの外部に設置し、コマには偏光板または波長板を再帰性反射材の上に重ねたシール状のものを貼り付け、コマに外部から赤外線を照射し、その反射光をカメラで観測する手法でも同じように回転数を計測できると考えられる。現状では反射する赤外線の光量が計測には不十分であるが、今後光量の改善を進め実現させることができれば実用化がより容易になると考えている。

7. おわりに

今回の研究では伝統的な玩具であるコマに着目し、汎用性のある高速回転体計測技術、拡張現実感技術を開発して新しいエンタテインメントシステムを試作した。このシステムがテレビゲーム世代にも受け入れられる遊具となるように設計を行い、5章で述べた国際的な展示の機会等において、子どもから大人まで広い世代に受け入れられることを動態展示を通じて確認することができた。今後は、前章で述べたように拡張現実感技術の研究をさらに進めるとともに、ここで得られた研究成果を他のデスクトップシステムや、他の環境において活用するための展開も検討していきたい。

参考文献

- [1] Eames, C. and Eames, R.: Tops (1969).
- [2] Ishii, H., Wisneski, C., Orbanes, J., Chun, B. and Paradiso, J.: PingPongPlus: Design of an athletic-tangible interface for computer-supported cooperative play, *Proc. SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems: The CHI is the limit (CHI '99)*, pp.394-401 (1999).
- [3] Izuta, O., Sato, T., Kodama, S. and Koike, H.: Bouncing Star project: Design and development of augmented sports application using a ball including electronic and wireless modules, *Proc. 1st Augmented Human International Conference (AH '10)*, Article 22, 7 pages (2010).
- [4] Kojima, M., Sugimoto, M., Nakamura, A., Tomita, M., Inami, M. and Nii, H.: Augmented Coliseum: An Augmented Game Environment with Small Vehicles, *Proc. 1st IEEE International Workshop on Horizontal Interactive Human-Computer Systems (TABLETOP '06)*, pp.3-8 (2006).
- [5] switch:まわる, うつる, ひろがる, 入手先 (<http://dmd-prologue.com/switch-1.html>).
- [6] Yagimoto, K., Sato, H., Cho, S., Shimojima, A. and Suzuki, H.: MR SPINTOP, *Laval Virtual ReVolution 2011*, in press.
- [7] TakaraTomy: Bayblade, 入手先 (<http://beyblade.takaratomy.co.jp/>).
- [8] 本田寿一, 山下紀幸: いつまでも回り続けるコマの試作・実験とその応用, *トランジスタ技術* 2, pp.354-356 (1995).
- [9] 野口宏基: 回転角度検出装置および検出方法, 特開 2001-221660 (2001).
- [10] Bandai: LuminoDisc, available from (<http://www.bandai.co.jp/releases/J2009030501.html>).
- [11] フォトセンサで回転数がわかる電飾コマ, *電子工作マガジン*, No.2, pp.40-41, 電波新聞社 (2008).
- [12] Nakata, K., Nakamura, N., Yamashita, J., Nishihara, S. and Fukui, Y.: Torque-feedback Device using Angular Momentum Transition, *The Journal of Virtual Reality Society of Japan*, Vol.6, No.2, pp.115-120 (2001).
- [13] Matoba, Y., Eto, H., Sato, T., Fukuchi, K. and Koike, H.: Biri-Biri, *Laval Virtual ReVolution 2011*, in press.



的場 やすし

1987年信州大学理学部生物学科卒業。同年(株)本田技術研究所。1994年高齢者介護施設の運営に参画。2010年ものつくり大学大学院ものつくり学研究科修士課程修了, 同年より電気通信大学大学院情報メディアシステム学専攻博士後期課程在籍。メディアアート作品の制作を行い, Ars Electronica99, SIGGRAPH2000, 2007 Art Gallery等で作品展示を行う。デジタルコンテンツグランプリ 2001インタラクティブ賞。2001年照明学会照明デザイン奨励賞受賞。



佐藤 俊樹 (正会員)

2006年電気通信大学電気通信学部情報工学科卒業。2007年同大学大学院情報システム学研究科情報システム運用学専攻博士前期課程短縮修了。2010年同大学院情報メディアシステム学専攻博士後期課程修了。博士(工学)。日本学術振興会特別研究員(PD)を経て, 2012年現在, 電気通信大学大学院情報メディアシステム学専攻助教。



小池 英樹 (正会員)

1991年東京大学大学院工学系研究科情報工学専攻博士課程修了。工学博士。現在電気通信大学大学院情報システム学研究科教授。この間, 1994~1997年 UC Berkeley 客員研究員。2003年 Sydney 大学客員研究員。HCIの研究に従事。特に情報視覚化, コンピュータビジョンを利用した対話型システム, 情報セキュリティのユーザビリティに興味を持つ。1991年日本ソフトウェア科学会高橋奨励賞, 2001年 IEEE VR Honorable mention for the outstanding paper, 2009年日本バーチャルリアリティ学会論文賞受賞。ACM, IEEE/CS, 日本バーチャルリアリティ学会各会員。