

## 修士論文の和文要旨

研究科・専攻	大学院情報システム学研究科情報メディアシステム学専攻 博士前期課程		
氏名	太田 智也	学籍番号	1250007
論文題目	通信・入出力機能を有する空中での軌道変化が可能なボールの開発		
要旨	<p>本論文では、近代スポーツに対してデジタルゲームの特長を融合したスポーツの新たな形態である「デジタルスポーツ」を提案する。デジタルスポーツとは、デジタルゲームの要素を近代スポーツに取り入れるものである。すなわちヒットポイントのような仮想的なパラメータや、様々な特殊効果の概念・システムを近代スポーツに導入することで、身体能力のみならず、多様な要素が競技の展開に多大な影響を与えられるようにするものである。その期待される効果としては、まず運動経験が浅い、あるいは身体能力に自信が無いプレイヤーであっても、楽しんでゲームに参加することが可能となると期待される。同時に、様々な特殊効果により、近代以降その本質において大きな変化のないスポーツに対して、新しい楽しみ方を提供しようと期待される。</p> <p>本研究ではデジタルスポーツ実現に向け、競技の展開に直接影響を与えるような特殊効果実現を目的とした、空中での動的な軌道変化が可能なボール“TAMA (Trajectory chAnging, Motion bAll)”を開発した。圧縮 CO2 ガスを空中で噴射することにより、その反力を利用して軌道変化を実現する。TAMA ではガス噴射機構を変更したことにより従来デバイスからの大幅な軽量化および無線化に成功した。また、無線通信機能および加速度、姿勢計測機能を備えており、情報の入出力が可能である。</p> <p>本稿では、自然落下時のガスの噴射による軌道変化を計測し、TAMA のシステムの評価を行った。計測された軌道変化量は理論値を下回る結果となったが、確かに軌道が変化したことが確認でき、特殊効果としての有効性が示された。しかしながら、現状のシステムでは噴射回数に制限がある、噴射方向の制御が困難である、といった問題を抱えている。今後はより高効率なエネルギー源や噴射機構の検討、噴射口の増設や姿勢制御機構の実装を行うなど、スポーツでの実使用に向けてこれらの問題解決を目指す。</p>		

平成25年度修士論文

通信・入出力機能を有する  
空中での軌道変化が可能なボールの開発

電気通信大学大学院 情報システム学研究科  
情報メディアシステム学専攻

学 籍 番 号： 1250007

氏 名： 太田 智也

主任指導教員： 野嶋 琢也 准教授

指 導 教 員： 小池 英樹 教授

指 導 教 員： 橋山 智訓 准教授

提出年月日： 平成26年2月21日

## 目次

第1章 序論.....	1
第2章 デジタルスポーツ.....	7
2.1 スポーツとデジタル技術.....	7
2.2 デジタルスポーツの提案.....	9
2.3 デジタルスポーツ化したドッジボール.....	11
2.3.1 デジタルスポーツ化の概要.....	11
2.3.2 求められる技術.....	14
第3章 関連研究.....	16
3.1 スポーツのデジタルゲーム化.....	16
3.2 デジタル技術を利用した球技の拡張.....	20
3.3 ボールの機能拡張.....	24
第4章 動的な軌道変化が可能なボール.....	33
4.1 近代スポーツにおけるボール軌道.....	33
4.2 ユーザによるボールへの入力.....	34
4.3 軌道変化手法.....	36
4.3.1 重心動揺を使用する方法.....	37
4.3.2 空気力学的効果を利用する方法.....	37
4.3.3 推進力発生装置を搭載する方法.....	38
4.3.4 軌道変化手法の比較及び決定.....	39
4.4 圧縮ガスの噴射を利用した軌道変化.....	40
第5章 プロトタイプの開発.....	42
5.1 従来デバイスの課題.....	42
5.2 プロトタイプの開発.....	43

5.2.1	システム構成.....	43
5.2.2	入出力と通信機能.....	44
5.3	噴射能力の評価.....	45
5.3.1	実験条件・装置.....	45
5.3.2	実験結果および考察.....	47
5.4	軌道変化能力の検証.....	50
5.4.1	実験方法.....	50
5.4.2	実験結果および考察.....	51
5.5	考察.....	53
第6章	TAMAの開発.....	54
6.1	プロトタイプの問題点.....	54
6.2	システムの無線化.....	54
6.3	軌道変化能力の評価.....	56
6.4	力積の計測.....	57
6.4.1	実験方法.....	57
6.4.2	結果・考察.....	59
6.5	軌道変化の計測.....	63
6.5.1	実験方法.....	64
6.5.2	軌道計測結果.....	66
6.5.3	シミュレーション結果との比較.....	69
6.6	考察.....	74
第7章	入力方法の検討.....	76
7.1	Photoelastic Ballの利用.....	76
7.2	システムの再現.....	76
7.2.1	従来デバイスの構成.....	76

7.2.2	実験用プロトタイプ of 作製 .....	78
7.3	ボール表面へのジェスチャ入力 .....	79
7.4	実験 .....	79
7.4.1	実験方法.....	79
7.4.2	実験結果・考察.....	82
第 8 章	想定使用例 .....	84
8.1	TAMA の能力 .....	84
8.2	特殊能力としての利用 .....	85
8.3	ハンディキャップとしての利用 .....	86
第 9 章	考察 .....	88
9.1	TAMA の性能と課題.....	88
9.2	別の手法による軌道変化.....	90
9.3	未来ビジョン .....	93
第 10 章	.....	94
結論	.....	94
参考文献	.....	95
発表学会リスト	.....	100
謝辞	.....	101

## 図目次

図 1.1	開発したボール型デバイス : TAMA .....	6
図 2.1	デジタルスポーツの分類 .....	10
図 3.1	exergames の例 : Kinect スポーツ [14] .....	17
図 3.2	Table Tennis for Three[17] .....	18
図 3.3	E-SPORTS GROUND[19] .....	19
図 3.4	Imaginary reality games [20] .....	20
図 3.5	PingPong++[8] .....	21
図 3.6	ビリヤード台への情報の可視化[21] .....	22
図 3.7	SHOOTBALL[22] .....	23
図 3.8	跳ね星を用いたゲームの様子[7] .....	24
図 3.9	BallCam! [10] .....	25
図 3.10	Throwable Panoramic Ball [24] .....	26
図 3.11	ぷよこんとその使用の様子[25] .....	26
図 3.12	The Embroidered Musical Ball[26] .....	27
図 3.13	Photoelastic Ball のシステム構成概念図[27] .....	28
図 3.14	カメレオンボール[28] .....	29
図 3.15	跳ね星[7]の内部構成 .....	29
図 3.16	ボール型ロボット (左 : Roball[29], 右 : Sphero[30]) .....	30
図 3.17	ブレダマスター (上段 : マガるボール, 下段 : ブレるボール) [31] .....	31
図 3.18	魔球王[32] .....	32
図 4.1	入力方法の分類図 .....	36

図 4.2	圧縮ガスの噴射を利用した軌道変化 .....	40
図 5.1	従来プロトタイプ[33] .....	42
図 5.2	プロトタイプのシステム構成 .....	44
図 5.3	噴射力測定装置 .....	46
図 5.4	噴射力測定結果 .....	47
図 5.5	複数回の噴射に伴う圧力の低下 .....	49
図 5.6	ボールの軌道 .....	51
図 5.7	センサ情報に基づく噴射タイミングの制御 .....	52
図 6.1	TAMA のシステム構成 .....	55
図 6.2	落下軌道変化の様子（上段：非噴射時，下段：噴射時） .....	56
図 6.3	力積測定実験装置外観 .....	58
図 6.4	測定された圧力の時間変化 .....	59
図 6.5	実験方法による測定圧力の比較 .....	60
図 6.6	実験デバイスによる応答性の比較 .....	60
図 6.7	電源による応答性の比較 .....	63
図 6.8	実験環境の概略図 .....	64
図 6.9	落下装置外観 .....	65
図 6.10	1 回目の噴射による軌道変化 .....	67
図 6.11	2 回目の噴射による軌道変化 .....	67
図 6.12	3 回目の噴射による軌道変化 .....	68
図 6.13	非噴射時における水平方向軌道 .....	68
図 6.14	1 回目の噴射時における水平方向移動量と時間の関係 .....	70
図 6.15	2 回目の噴射時における水平方向移動量と時間の関係 .....	71
図 6.16	3 回目の噴射時における水平方向移動量と時間の関係 .....	71

図 6.17	ボールの回転軸 .....	73
図 7.1	PhotoelasticBall のシステム概要[27] .....	77
図 7.2	プロトタイプ外観 .....	78
図 7.3	押下点の記号設定 .....	80
図 7.4	センサ値の可視化 .....	81
図 7.5	実験で描いた軌道 .....	82
図 7.6	ジェスチャ軌道とセンサ出力 .....	83
図 9.1	変形ボールのプロトタイプ .....	91
図 9.2	変形ボールのシステム構成 .....	92

## 表目次

表 4.1	入力方法の分類 .....	36
表 4.2	軌道変化手法の特長 .....	39
表 5.1	従来デバイスとの噴射力比較.....	48
表 5.2	各噴射における測定結果.....	49
表 6.1	実験法による最大圧力と応答速度の差異.....	61
表 6.2	力積測定結果[Ns].....	62
表 6.3	落下実験結果.....	69
表 6.4	噴射による移動距離の理論値.....	70
表 6.5	ボールの回転角度[°].....	73
表 8.1	噴射により付加できる移動量[m] .....	84



# 第1章

## 序論

本論文では、近代スポーツに対してデジタルゲーム（ビデオゲーム）の特長を融合したスポーツの新たな形態である「デジタルスポーツ」を提案する。本論文ではまずこのデジタルスポーツについて、近代スポーツ並びにエンタテインメントの観点からその価値を論じ、得失を明らかにする。そしてデジタルスポーツで利用する特殊効果の一つとして空中での動的な軌道変化が可能なボールを実際に開発、改良し、それを評価した結果について述べる。

「スポーツ」とは、大辞林（第三版）によれば「余暇活動・競技・体力づくりとして行う身体運動。陸上競技・水泳・各種球技・スキー・スケート・登山などの総称」である[1]。また世界大百科事典（第2版）では、スポーツの中で競争を中心とするものを「近代スポーツ」、楽しさを中心とするものを「ニュー・スポーツ」、また健康志向ものを「体操・ダンス」というように細かく分類している[2]。我々が普段プレイする、あるいは観戦する機会の少ないサッカーや野球のような球技、陸上競技や格闘競技などは近代スポーツに含まれる。これら近代スポーツはそれぞれある程度の練習が必要となり、競争原理がはたらくのに対して、ニュー・スポーツは「誰もが気軽にすぐに楽しむことができること」を目的として考案され、アレンジされたスポーツの総称である。

近代スポーツの基本原理は競争であり、プレイヤは競技ごとに決められたルール、物理的制約の中で個々の技術やチームワーク、戦術を駆使して勝敗を競

い合う。多くの種目で世界的な大会が行われている一方で、近代スポーツは健康維持や身体鍛錬、ストレス発散などを目的として趣味や娯楽としても一般に広くプレイされている。ここで競技では、プレイするために当然競争相手が必要となるが、このとき競争するプレイヤー間に大きな運動能力差や技術差が存在した場合、試合は一方的なものとなりがちとなる。チクセントミハイによれば、人間は自身のスキルと相対する課題の難易度のバランスがとれている状態の時にフロー状態に陥る、すなわち楽しいと感じられる状態となるとされている[3]。つまり、一方的な試合展開となった場合、プレイヤーをフロー状態に導くのは難しく、誰もが同等にスポーツを楽しむことは困難であると言える。

楽しさの実現、という観点から見た時、現代の代表的な娯楽の一つであるデジタルゲーム（ビデオゲーム）の繁栄は、極めて示唆に富んでいると言える。デジタルゲームでは、物理的制約から開放されていることから極めて多くの特殊効果が導入されており、その結果プレイヤーを楽しませる手段の多様化に成功している。またプレイヤーの能力に合わせた難易度調節も可能であり、近代スポーツに比べて比較的容易にプレイヤーをフロー状態へ導くことが可能である。

ここで本研究では、近代スポーツとデジタルゲームを融合したスポーツの新たな形態「デジタルスポーツ」を提案する。デジタルスポーツは、デジタル技術を近代スポーツに適用することで物理的制約を軽減し、プレイヤーに対して新たな楽しみを提供するものである。前述のような試合のバランス調整のほか、様々な特殊効果を利用することで、近代スポーツに対して運動能力や技術に依らない新たな要素を付加することが可能となる。

デジタルゲームとスポーツを結びつける動きはいくつか存在し、"exergames" という分野では、運動全般をより魅力的かつ効率的に行う目的で、身体運動に

デジタルゲームを取り入れる研究が行われている[4] (e.g. Wii Sports[5]). しかしながら exergames は一般的な身体運動に関連したものがほとんどであり, 近代スポーツとの融合を積極的に考慮したものとは言い難い. 一方で, デジタルゲームそのものを競技とみなした”Electronic Sports (e-Sports)[6]”というスポーツ分野も存在する. e-Sports においてはコントローラ操作のための手先の運動はあるものの, 近代スポーツのような全身運動を行うものではない. 近代スポーツに対しては, デジタル技術を用いて視覚効果を付加した研究はいくつか存在する[7][8]. これらは映像による特殊効果を用いることでプレイヤーに対して新たな楽しみを提供したものであるが, 近代スポーツが「競技」であるという観点から楽しみの拡張を行ったものではない. 本研究で提案するデジタルスポーツは, 近代スポーツにデジタルゲームの特長を融合することで, 競技としての新たな楽しみをプレイヤーに提供することを目指すものである.

前述のように, 近代スポーツはプレイヤー毎の細かな難易度調節が難しいという問題点を抱えている. デジタルゲームにおいては, こうした問題をヒットポイントや攻撃力といったパラメータを適切に設定することで, あるいはキャラクタ個別に特殊能力を設けることで解決している. プレイヤーの実力に合わせてこれらの要素を調節することで, 簡単すぎず, 難しすぎないような, 手応えを感じられる適切な難易度を比較的容易に実現することができる. 一方で近代スポーツにおいても, ハンディキャップを設ける事でプレイヤー間の能力差を埋めるという, 同様の試みはなされてきた. 例えばドッジボールのような男女混合でプレイされることも多いスポーツでは, プレイヤーごとに利き腕での投球を禁じる, 一定回数の「アウト」を無効とするといったハンディキャップが適用されることがある. しかしながら, こういったハンディキャップはプレイの平等

性を損なう事となる。全員が同じ条件で力を出し切りながら、実力が伯仲した試合を実現するのは難しいというのが現状である。

デジタルスポーツとは、デジタルゲームの要素を近代スポーツに取り入れるものである。すなわちヒットポイントのような仮想的なパラメータや、様々な特殊効果の概念・システムを近代スポーツに導入することで、身体能力のみならず、多様な要素が競技の趨勢に多大な影響を与えられるようにするものである。その期待される効果としては、まず運動経験が浅い、あるいは身体能力に自信が無いプレイヤーであっても、楽しんでゲームに参加することが可能となると期待される。同時に、様々な特殊効果により、近代以降その本質において大きな変化のないスポーツに対して、新しい楽しみ方を提供しうると期待される。

ここで、実際にデジタルスポーツ化された近代スポーツについて考える。デジタルスポーツでは、前述のように近代スポーツに対し各種デジタルパラメータ、あるいは特殊効果といった新たな要素を付加する。ここで、パラメータ設定は能力を考慮したプレイヤー毎のバランスの調整には利用できるが、プレイそのものに直接介入するものではない。試合展開が運動能力のみに左右されないようなスポーツを実現するためには、適切な特殊効果を利用する必要があると考えられる。スポーツにはプレイヤーと観客の要素[9]があり、プレイヤーは人間、道具、環境(フィールド)の3つに分類することができる。人間に対し特殊効果の適用を考えた場合、プレイヤーへのデジタル機器の取り付けが必要となると考えられ、スポーツにおいてはあまり好ましくない。またフィールドへの特殊効果の適用は大掛かりになりがちであると考えられる。そこで本研究では、特殊効果の対象として道具に注目した。さらに道具の中から、大きさや重さといった規格は異なるものの多くの近代スポーツに共通して用いられているボールに特

に焦点を当てる。

ボールに対する特殊効果に関連した研究としては、例えばボールの運動に応じた映像効果を投影するもの[7]やカメラを内蔵することで観客向けにボール視点からの映像を生成するもの[10]などがある。これらは特殊効果としては有効な手段となり得るものの、プレイの難易度調整といったゲーム進行に直接的に影響をあたえるようなものではない。ボールを利用した特殊効果の発生、そしてゲーム進行への直接介入を同時に実現するものとして、本研究ではボールの運動状態や軌道に着目した。ボールの投げ方はプレイヤーの技術・能力の差が如実に出る領域である。例えばドッジボールでは、狙った相手にボールを当てるため、ボールのスピードや軌道要素を状況に合わせて変化させることがある。つまり、スピードの速いボールを正確な方向に投げる能力や相手の動きを予測する能力が問われることとなる。ここで仮に、ボールの軌道を誰でも自在に変化させられたとする。その結果

- 変化球を簡単に投げられるようになる
- 変化球の軌道変化量を調節できる

という特殊効果が可能となれば、プレイヤーの能力に応じて投球の精度やスピード、飛距離を制限あるいは補助することが可能になると期待される。もちろん、全員に同じことが可能となれば、当初の目的の一つである、プレイの難易度調整には寄与し得ない。ボール技術のみならず、プレイヤーによる特殊効果量の自動調整、あるいは一試合で利用できる特殊効果量の回数・分量制限など、一定の制限事項との組み合わせが必要になると考えられる。これら技術と運用の組み合わせにより、プレイヤーそれぞれに対して個別に難易度調整が可能となる事を意味し、プレイヤー間の能力差を補完し、実力が伯仲した試合の実現に寄与す

るものである。そこで本研究では、両者のうちまず技術的な観点に着目し、ゲームに直接影響を及ぼすことのできる、物理軌道変化効果をもたらすボール、TAMA (Trajectory chAnging, Motion bAll) を開発したので、それについて報告する。

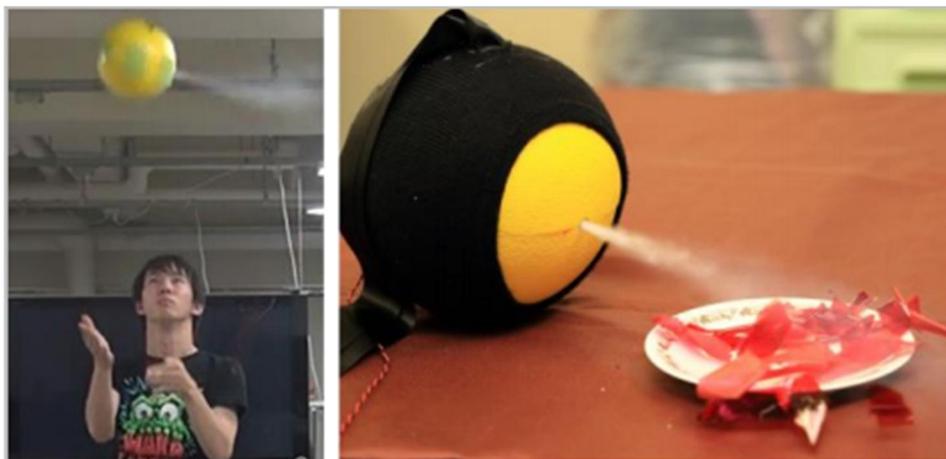


図 1.1 開発したボール型デバイス : TAMA

## 第2章

# デジタルスポーツ

### 2.1 スポーツとデジタル技術

デジタル技術の進歩に伴い、そのスポーツ分野への応用は盛んに行われてきた。特に競技を中心とする近代スポーツにおいては、古くはフェンシングの電気審判器に始まり、野球や相撲などでのビデオ判定、Fraunhofer IIS の GoalRef [11]を用いたサッカーのゴール判定など、幅広い種目で審判支援のためのデジタル技術が利用されている。また、Nike 社による Nike+[12]や、Adidas 社の miCoach EliteTeam System[13]などのように、従来は困難であったスポーツプレイ中の運動データの取得・共有・可視化技術も提案されている。これらのデータは、トレーニングの効率化や、試合のための作戦立案などに役立っている。

また、“exergames”という分野では、スポーツに限らず運動全般をより魅力的かつ効果的に行う目的で、身体運動にデジタルゲームを取り入れる研究が行われている[4]。exergames の身近な事例としては任天堂の Wii Sports[5]や Microsoft の Kinect スポーツ[14]が挙げられ、全身運動をデジタルゲームの入力に用いることで、継続的な運動へのモチベーション維持に貢献するものである。近代スポーツが競争を基本原理としており、プレイするにはある程度の技術修得および対戦相手が必要であったのに対し、exergames は誰もが気軽に運動を楽しむことを可能にしたものであると言える。同様にデジタルゲームに関連するスポーツ分野として、“Electronic Sports (e-Sports)[6]”が挙げられる。

e-Sports は、「デジタルゲームを競技として捉える」あるいは「デジタルゲームを使用して競技する」ものである。デジタルゲームの中には、高度な操作技術や高い反射神経等が必要となるものがある。e-Sports はそういったデジタルゲームの勝敗を他のプレイヤーと競い合うものであり、世界的な規模の大会も行われている。e-Sports も、プレイヤーの特定の身体運動能力を駆使し勝敗を競うという点では、近代スポーツに分類することも不自然ではない。しかしながらその身体運動は基本的に手先に限られたものであり、全身運動には程遠く健康維持や身体鍛錬といった効果は期待できない。

これらは比較的デジタルゲームに近い領域でスポーツとデジタル技術の融合を行っていたのに対し、跳ね星[7]や PingPong++[8]のように近代スポーツの競争性や全身運動といった要素を保ちつつ、デジタル技術をスポーツに応用した例も存在する。これらはボールやフィールドに映像投影を行う、あるいは発光素子を搭載することで、近代スポーツに対して視覚的な特殊効果を付加し、プレイヤーに新たな楽しみを提供するものである。しかしながら、このような特殊効果は、視覚的な楽しみは付加できるものの、プレイに直接影響を及ぼすようなものではない。

以上のように、スポーツに対するデジタル技術の適用はこれまでに数多くなされてきた。審判支援技術、周辺技術としての利用やデジタルゲームとの融合、特殊効果の付加によって、スポーツの発展や楽しみの向上に貢献してきている。しかしながら、近代スポーツの「競技」としての楽しみを拓けるようなデジタル技術の応用はこれまでなされていない。そこで本研究で提案する「デジタルスポーツ」は、より近代スポーツに近い領域でデジタルゲームの特長を融合したスポーツの新たな形態である。近代スポーツにおける物理的制約をデジタル

技術によって軽減することにより，単純な身体能力やプレイの技術によらない新たな要素を付加し，近代スポーツの「競技」としての新たな楽しみを提供するものである。

## 2.2 デジタルスポーツの提案

近代スポーツは，スポーツの中の分類の一つであり，競争原理がはたらくものを言う。決められたルール，物理的制約の中で個々の技術やチームワーク，戦術等を駆使して勝敗を競い合うものであり，様々な種目で世界的な大会も開催されている。両者の実力が伯仲した，勝敗の予測がつかない試合はプレイヤーのみならず観戦者にも興奮を与え，エンタテインメントとしても発展してきた。また身体運動を伴うことから健康維持・身体鍛錬に効果的であり，趣味や娯楽として一般にも広くプレイされている。

ここで，人間は自身のスキルと相対する課題の難易度のバランスがとれているときに，楽しいと感じられる状態となるとされている[3]。近代スポーツにおいては，自身あるいは自チームと対戦相手の実力が拮抗しているとき，プレイヤーは上記のような状態に導かれると考えられる。しかしながら従来のスポーツでは，物理的制約が強いためにプレイヤーの能力に合わせた細かい難易度調節が困難であった。基本的に近代スポーツにおけるプレイの上手・下手は身体能力やテクニックに依存し，これらは長期間の訓練を通じて初めて身につけられるものである。くわえて，訓練をすれば必ず身につけられるという性格のものではない。例えば大人と子供が対戦を行う場合のように，プレイヤー間に大きな運動能力差が存在した場合，試合は一方的なものとなりがちであり，両者が同等にスポーツを楽しむことは難しいと考えられる。

一方、デジタルゲームもまた、現代を代表するエンタテインメントの一つである。デジタルゲームでは、物理的制約から開放されることで、様々な特殊効果を利用してプレイヤを楽しませる手段が豊富に存在することが特長として挙げられる。映像や音声効果による演出のほか、キャラクターのパラメータ設定や特殊能力等を適切に設定することで、プレイヤの能力に合わせた適切な難易度調節も比較的容易に実現出来る。

ここで本研究では、近代スポーツとデジタルゲームを融合したスポーツの新たな形態「デジタルスポーツ」を提案する。デジタルスポーツは、デジタル技術を近代スポーツに適用することで物理的制約を軽減し、運動能力や技術に依らない新たな要素を付加するものである。これにより、前述のような試合のバランス調整のほか、様々な特殊効果を実現し、プレイヤに新たな楽しみを提供することを目的とする。

本研究で提案するデジタルスポーツとは、「近代スポーツにより近い領域で、デジタルゲームの特長を融合した形態の新しいスポーツ」であると言える。図 2.1 は、近代スポーツ、デジタルスポーツ、exergames、e-sports、デジタルゲームを、デジタル技術と近代スポーツの融合度合いの観点から分類したものである。

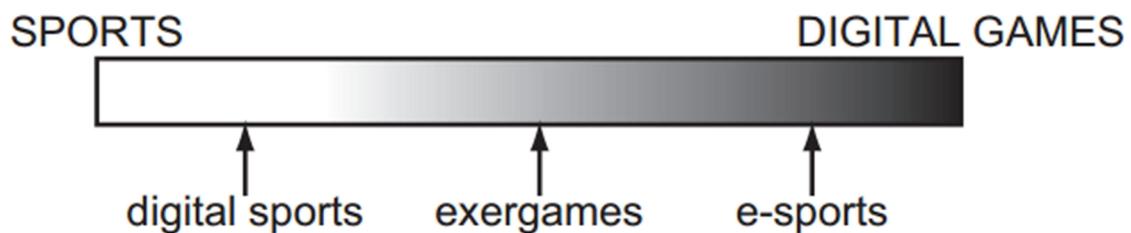


図 2.1 デジタルスポーツの分類

図 2.1 では、まずデジタルゲームと近代スポーツを対極に配置している。前述のとおり、e-Sports もまたデジタルゲームとスポーツを融合したものである。しかしながら e-Sports は近代スポーツと比べて活動領域が非常に狭く、デジタルゲームに極めて近いものであることから、デジタルゲームの近傍に配置している。exergames は身体運動とデジタル技術が適度に融合されたものであり、e-Sports よりも近代スポーツ寄りに配置される。しかしながらその研究の多くは一般的な身体運動に着目されていた (e.g. Wii Sports, Kinect スポーツ)。また近代スポーツ、特にチームスポーツへの適用はほとんど考慮されていない。このことから、近代スポーツからもやや離れた場所に配置するのが妥当である。この exergames と近代スポーツとの間を埋めるものが、本研究で提案するデジタルスポーツである。デジタルスポーツは、チームスポーツを含めた近代スポーツそのものにデジタルゲームの特長を取り入れることで、各種特殊効果を利用した新たな楽しみをプレイヤーに提供することを目的したものである。

## 2.3 デジタルスポーツ化したドッジボール

### 2.3.1 デジタルスポーツ化の概要

ここでは、学校教育などでも広くプレイされているドッジボールを例に、実際に近代スポーツのデジタルスポーツを試みる。ドッジボールは地域やグループによって様々なローカルルールが存在するが、本稿では公式ルール[15]をさらに単純化し、以下の点を基本ルールとしてデジタルスポーツ化を行う。

- 2 チームに分かれ、それぞれ一定の範囲で区切られた陣地（内野）に入る
- 互いに相手陣地内のプレイヤーに対してボールを投げ当てる
- ボールを当てられたプレイヤーは陣地外（外野）に出る

- 陣地外の人が陣地内のプレイヤーにボールを当てた場合、自チーム陣地内に復帰できる
- 陣地内からプレイヤーがいなくなったチーム、あるいは所定の時間経過後に陣地内に残っている人数が少ない方のチームを負けとする

ここで、ヒットポイント、攻撃力／防御力、特殊能力（必殺技）といったデジタルゲームによく用いられているような要素を考える。これらをドッジボールに適用することで、ドッジボールの基本ルールは「2チームに分かれ、ボールを投げ当てる事で相手プレイヤーに攻撃し、全ての相手プレイヤーのヒットポイントを0とする」ことを目的としたゲームに置き換えることが出来る。またボールが当たったときのヒットポイントへのダメージについても、当たったボールのスピードや回転数、あるいは当たった部位に応じて変化させることで、プレイに更なる選択肢が生まれる。さらに「魔球」のような必殺技、味方のヒットポイントを回復する、あるいは攻撃力や防御力といったパラメータに補助的効果を与える能力など、特殊能力を取り入れることで、ドッジボールのプレイに従来以上の戦略性を生み出すことが出来る。

前述のように、ドッジボールに限らず多くの近代スポーツが抱える問題点として、物理的制約のためにその難易度の調整が困難であるというものがある。たとえばチーム間、あるいはチーム内でプレイヤーの力量に大きな差が存在した場合、試合が一方的になる、あるいは活躍するプレイヤーに偏りが生じるなど、誰もが競技を楽しむことは難しいような試合展開となりがちである。こういった問題を、デジタルスポーツでは各パラメータや特殊能力を個別に適切に設定することで解決することが出来る。例えば、各プレイヤーに以下のようなキャラクタを設定する。

- 攻撃特化型キャラクター：適切なコマンドを入れることで、魔球（必殺技）を投げることが出来る
- 防御特化型キャラクター：ヒットポイントが極端に高く、他のキャラクターの数倍のダメージまで耐えることが出来る
- 補助型プレイヤー：攻撃力・防御力は他のキャラクターよりも低いですが、他のプレイヤーのヒットポイントを回復させる、あるいは能力を上昇させる、といった特殊能力を行使することが出来る

このような形でドッジボールをデジタルスポーツ化した場合、誰にどのキャラクターを設定するか、どのキャラクターの相手プレイヤーを狙っていくか、といったチームとしての戦略の幅が大きく拡大し、新たな楽しみ方の提供に繋がるものと期待される。また個人の単位で考えた場合でも、個々人の技量を多様な軸で評価することに繋がるため、プレイヤー間の運動能力に大きな差があっても、各人が楽しめる要素を作り出す事が可能であると考えられる。

例えば、大人主体のチームと子供主体のチームのような、運動能力に極端な差が存在するチーム同士が対戦する場合を考える。この時大人のチームに対してのみ

- ヒットポイントを低く設定する／ボールに当たった時のダメージ量を大きく設定する
- 投げられる魔球の種類や効果、条件を限定する

といった調整をすることで、自然な形で両チームの強さのバランスを取ることが可能となる。これは「互いが全力を出して対戦する」というスポーツの最も基本的な楽しみが、デジタルスポーツ化によって従来より広範囲に実現可能となったことを意味する。

また個人の範囲でも、個々人に多様なキャラクタを設定することにより、味方を回復させる、守るといった個別の目標を与えることが可能となり、それぞれが運動能力に依存しない形でチームへ貢献することが可能となる。例えば、運動能力の高くないプレイヤーに対して補助型キャラクタを割り当てた場合、ボールから逃げる以外の役割が与えられることで、その役割を果たすべく競技に積極的に関与するようになることが期待される。また魔球のような攻撃的な特殊能力の存在も、プレイへのモチベーション向上に貢献する事が期待される。

以上のようにデジタルスポーツは、デジタルゲームの特長を近代スポーツに応用し、物理的制約から開放することでスポーツの新たな楽しみを提供するものである。以下では、ドッジボールのデジタルスポーツ化に際して必要となる技術について考察する。

### 2.3.2 求められる技術

ドッジボールに上記のような要素の付加を実現するためには、

- プレイヤを認識し、各種情報を管理するシステム
- ボールの運動状態を計測するシステム
- 特殊効果を発生させるシステム

の開発が必要となる。特にプレイヤー認識、およびボールの運動状態の計測システムは、プレイヤーそれぞれのヒットポイント、ヒット時のダメージといった各種デジタル情報の管理に用いられる。計測する必要がある情報は以下のようなものが挙げられる。

- ボールの速度・回転数などの運動状態
- 誰がボールを持っているか／誰が投げたかの判定

- ボールが物体に衝突した際の対象：プレイヤーか壁／地面か

これらの実現にあたっては、ボールの運動状態計測システム、ボールとプレイヤーの接触判定システム、およびその接触対象を判別するためのプレイヤー認識システムやプレイヤーの位置計測システムが必要となる。

次に特殊効果を発生させるシステムについて考える。本章で提案したデジタルスポーツ化したドッジボールにおける特殊効果としては、魔球（必殺技）と回復／補助能力を挙げた。本稿で述べる魔球とは、重力や通常のボールに発生する空気力学的効果だけではあり得ないような軌道を描くボール、とする。この実現のためには、ボールに対して軌道変化を促す力を発生させる機構が搭載されている必要がある。また回復／補助能力に関しては、前述のデジタル情報の管理システムの開発によって実現できると考えられる。さらにこれらの特殊効果を使用する際には、その発動のタイミングをコントロールするための計測装置、あるいは入力装置が必要となる。

本研究では、これらのデジタルスポーツ実現のために必要となる技術の中から特殊効果、特に「魔球」に注目し、軌道変化を引き起こすための機構を内蔵したボールの開発を行った。

---

## 第3章

# 関連研究

デジタル技術を用いてスポーツの拡張を試みた研究は多くなされている。本章では、デジタルスポーツに関連する研究として、身体運動をデジタルゲームの操作に取り入れた研究、デジタル技術を適用することでスポーツの楽しみ方を拡張した研究をそれぞれ紹介する。また、スポーツの道具に注目した研究として、ここでは特にボールの機能を拡張した例を紹介する。

### 3.1 スポーツのデジタルゲーム化

本研究で提案したデジタルスポーツは、近代スポーツに対してデジタルゲームの特長を融合したものであった。前述のように、**exergames** は身体運動にデジタルゲームの要素を取り入れたものである。**exergames** の身近な例としては、コナミの **Dance Dance Revolution**[16]や任天堂の **Wii Sports**[5]、Microsoft の **Kinect スポーツ**[14]など、各種運動用デジタルゲームを挙げることが出来る。デジタルゲームを利用することによって、継続的な身体運動へのモチベーションを高めることによって、プレイヤーの健康維持や身体鍛錬に貢献するものである。



図 3.1 exergames の例 : Kinect スポーツ [14]

Mueller らは exergames を、遠隔地のプレイヤーとのスポーツを通じたコミュニケーションに利用している[17]. 互いの等身大の映像をリアルタイムに投影したスクリーンに対して、実際のスポーツ用の道具を使ったインタラクションを行う。Table Tennis for Three は、二人のプレイヤーが投影されたスクリーンに対して実際にボールを当てていき、互いの間に存在するブロックを破壊していくゲームである (図 3.2)。ブロックは 3 回ボールを当てる事で破壊できるが、スコアを獲得できるのは 3 回目をヒットさせたプレイヤーのみであり、そのスコアを競い合うものである。Mueller らは同様のシステムを使って、エアホッケーや卓球、ボクシングを基としたアプリケーションを開発した。また Jeong らは、ワイヤを利用した触覚ディスプレイである“SPIDER-H”を利用することで、画面上のキャラクタとキャッチボールをプレイするシステムを開発した[18]. 手

に装着した触覚ディスプレイにより、バーチャルなキャラクターの投げたボールの速度や軌道を触感によって体感することが出来る。しかしながら、これらの exergames は一般的な身体運動に関するものがほとんどであり、近代スポーツとの融合はあまり考慮されてこなかった。特にチームスポーツとデジタルゲームの融合という観点はほとんど顧みられていない。



図 3.2 Table Tennis for Three[17]

E-SPORTS GROUND は、デジタル空間で行われるスポーツであるところの e-Sports を、実空間に拡張したスポーツのプラットフォームである[19]。広いフィールドの床面に投影されたデジタルゲームを、自分自身が動き回ることによって操作し、遊ぶことが出来る。exergames の多くは画面の前の限られた領域においてプレイされるのに対し、E-SPORTS GROUND では広い領域を動き回ってプレイすることが出来る。さらに、複数人でのプレイも可能であり、運動

のモチベーション維持という観点では非常に効果的なシステムであると言える。本システムを近代スポーツにそのまま適用することは難しく、本研究で提案したところのデジタルスポーツの概念とは合致しないが、デジタル技術を身体運動と組み合わせることで新たなスポーツの分野を提案している。



図 3.3 E-SPORTS GROUND[19]

Baudisch らもまた、スポーツとデジタルゲームを融合することで新たな分野を提案している[20]。Imaginary reality games では、バスケットボールやサッカーなどの球技をバーチャルなボールを用いてプレイする。カメラによってプレイヤーそれぞれの位置を認識し、ジェスチャによってボールのやりとりやシュート等を行う。また、実体のボールを使用しないことを利用して、プレイヤーのパワーアップや物理法則に反するような動き、ゲームバランスの調節などが可能となる。しかしながら、ボールが見えないためにその位置情報は音声などを利用して把握するしかなく、咄嗟の判断が難しい。また、投球方向の細かな調

節なども難しく，従来のスポーツにおける重要な要素の一つであったフェイントや先読みといった駆け引きも起こりにくい。

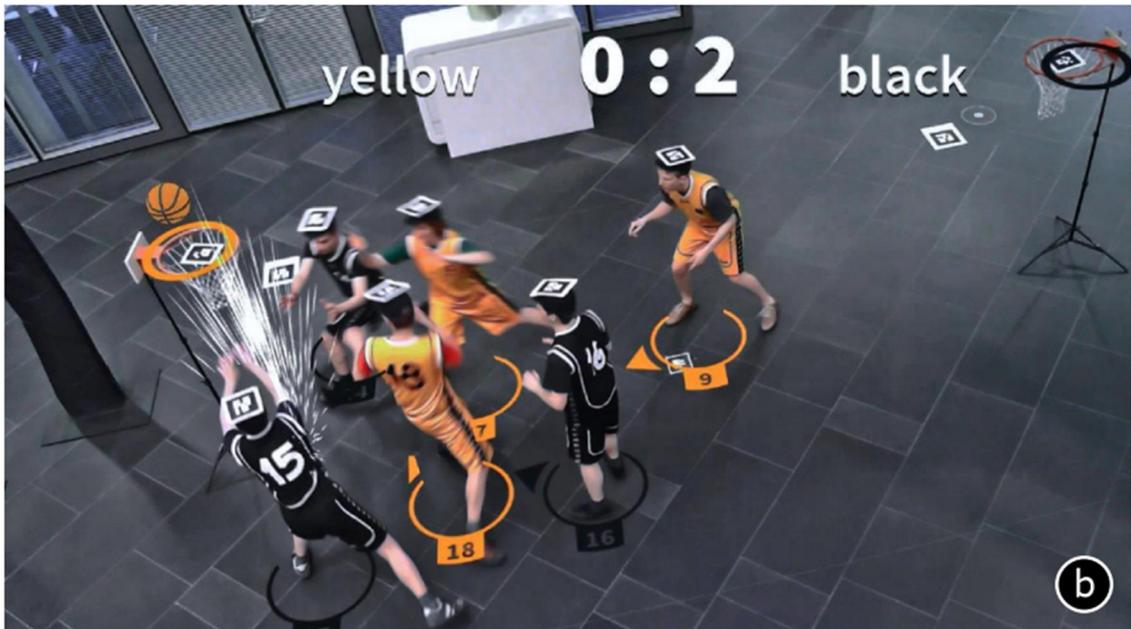


図 3.4 Imaginary reality games [20]

本研究で提案するデジタルスポーツは，近代スポーツにより近い領域で様々な特殊効果を実現しようというものである．スポーツ自体の器具・ルールやプレイの本質を変えることなく，運動能力によらない新たな要素を付加することで，新たな楽しみをプレイヤに提供する．

## 3.2 デジタル技術を利用した球技の拡張

実際のスポーツに対して，映像効果などを用いて特殊効果や新たな要素の付加を実現した研究も存在する．石井らは卓球に注目し，ボールの位置に応じて様々な映像効果を卓球台に投影するシステム“PingPong++”を開発した[8]．卓球台の裏には 8 箇所にはピエゾ素子を取り付けられており，台の振動を各素子に

よって計測することでボールのバウンド位置の推定を行う。その情報を基に、上部に取り付けられたプロジェクタから様々な映像効果を投影することが出来、卓球に新たな楽しみを付加することに成功した。



図 3.5 PingPong++[8]

また、フィールドへの映像投影を利用して、プレイヤーの支援を行う事も可能である。菅沼らは、ビリヤード台に対して情報を投影することにより、プレイヤーに対し適切なボールの撞き方を提案するシステムを開発した[21]。カメラによって手球および的球の位置を検出し、適切なターゲットおよび撞球の方向を可視化することで、初級者への練習支援や試合のバランス調整等が可能となる。

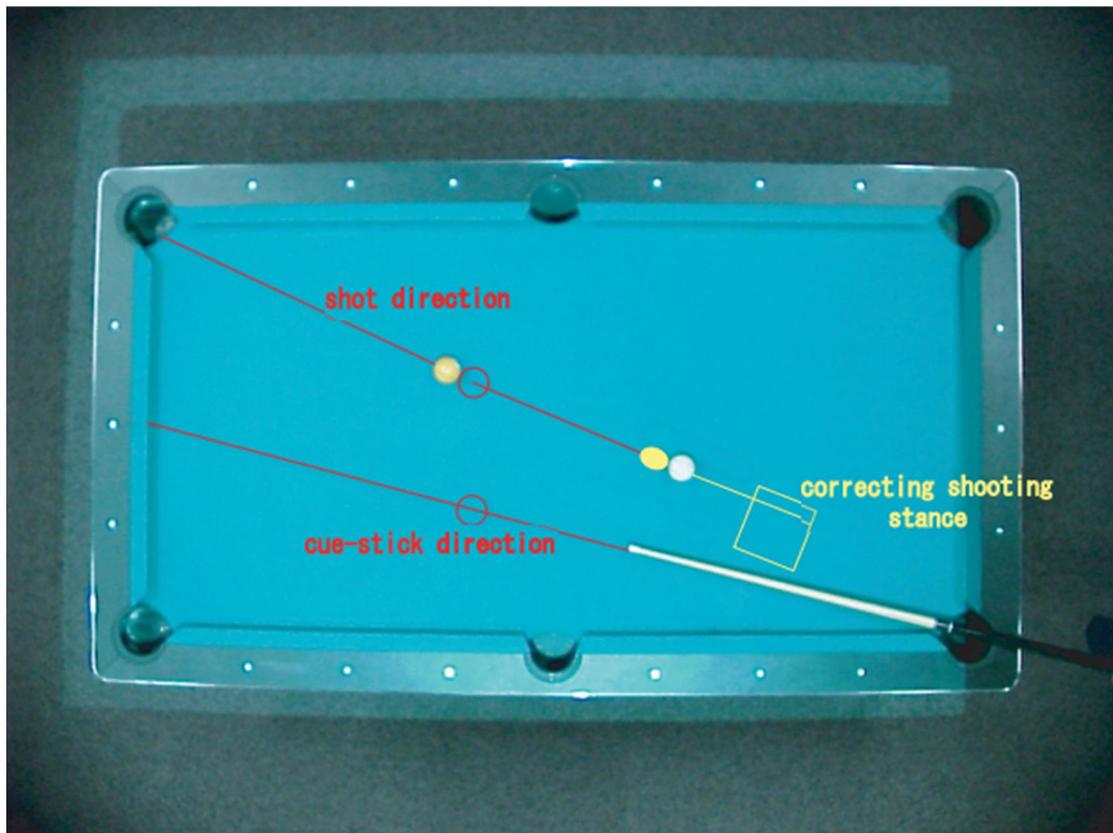


図 3.6 ビリヤード台への情報の可視化[21]

また、菅野らが開発した SHOOTBALL[22]は、カメラとディスプレイに囲まれたフィールドと、センサを内蔵したボールを使用した新たな球技である。フィールド内のカメラとボールに内蔵された衝撃センサによってボールの動きを検出し、プレイヤーは周囲のスクリーンに対してインタラクションを行う。

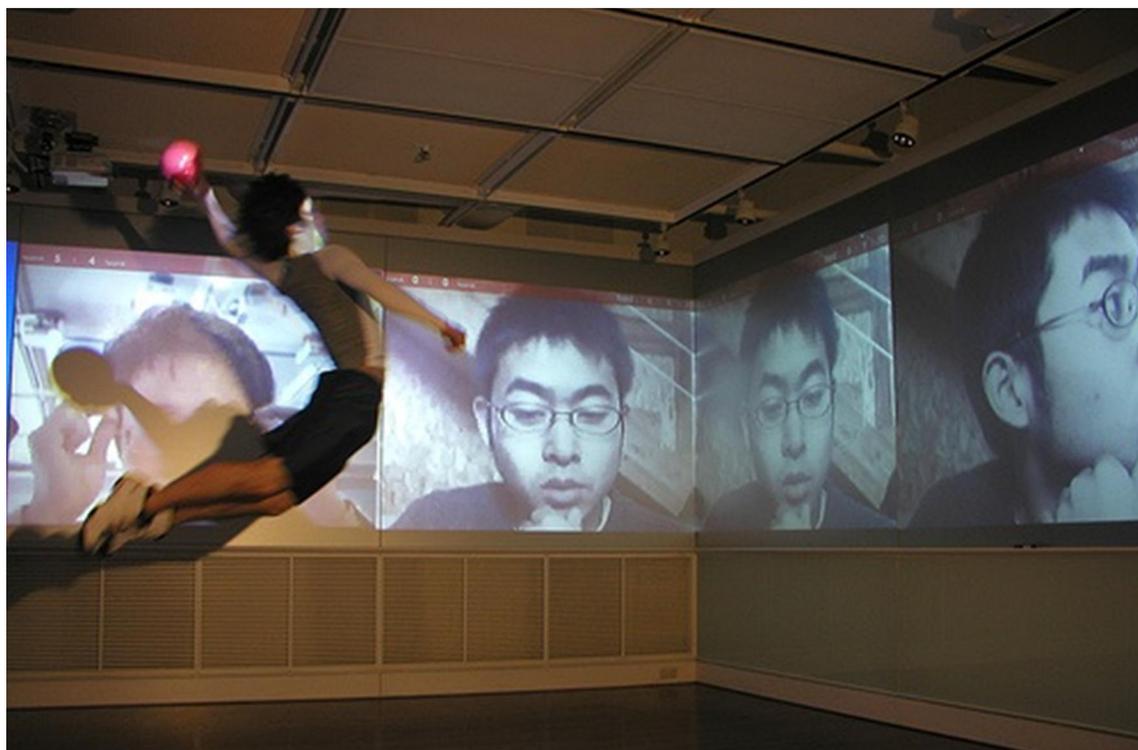


図 3.7 SHOOTBALL[22]

出田らもまた、ボールおよびフィールドにデジタル技術を適用することで新たな球技を創出した[7]. 開発したボール「跳ね星」には各種センサや LED が内蔵されており、運動状態を判別出来るほか、その状態に応じて色を変えることが出来る. さらにボールに内蔵した赤外線 LED と外部に設置した赤外線カメラによってボールの位置検出を行い、光による様々な映像演出をフィールドに投影する.

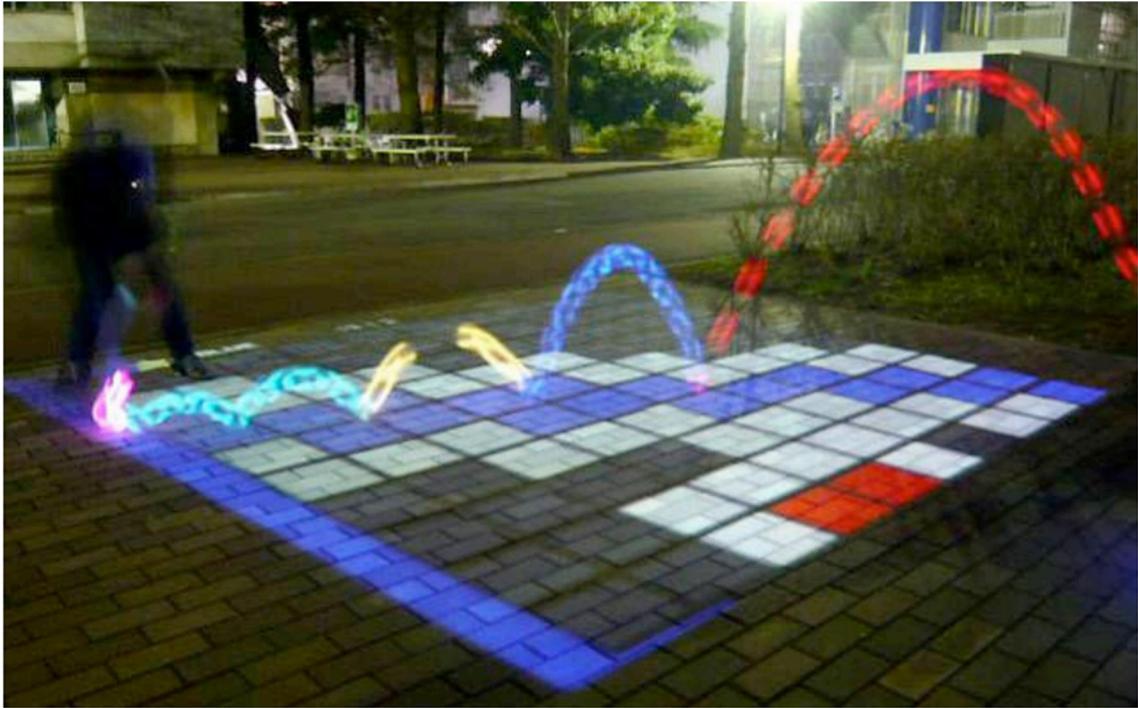


図 3.8 跳ね星を用いたゲームの様子[7]

このように、デジタル技術を利用して球技に様々な特殊効果を付加した研究は多く行われている。しかしながらその特殊効果の多くは視聴覚的演出によるものであり、プレイヤーや道具、フィールド等に対する物理的な効果に関してはほとんど注目されてこなかった。本研究ではスポーツに用いられる道具の中から特にボールに着目し、その軌道を変化させることで、球技における物理的制約を越えたプレイの実現を目指す。以下では、ボールにデジタル技術を適用することで、様々な機能を付加した研究を紹介する。

### 3.3 ボールの機能拡張

スポーツの道具としてボールに着目し、その機能拡張を試みた研究は既に存在する。各種センサを内蔵したバスケットボールである 94FiFty では、バウン

ド数や回転数など、プレイ中の様々なデータを計測することが出来る[23]。プレイ中の様々なデータの可視化などに役立つ事が出来、トレーニングの効率化に貢献すると考えられる。堀田らが開発した **BallCam!**[10]は、カメラを内蔵したボールである。たった一つのカメラによって撮影された映像から特定の一方向を撮影した画像を抽出することで、運動中のボール視点の映像を生成することが出来る。スポーツにおいて、試合の中継映像やリプレイ映像は観客を楽しませる重要な要素の一つであり、**BallCam!**はより臨場感の高い映像の実現に貢献するものである。



図 3.9 **BallCam!** [10]

スポーツでの使用を目的としたものに限らず、各種センサを内蔵することで、ボールをデータ計測や入力インタフェースに応用する研究も数多く行われている。Pfeil らが開発した **Throwable Panoramic Ball Camera** [24]もまた、**BallCam!**と同様カメラを内蔵したボールである。投げ上げられたボールが最高点に達した際に全方位に設置された36個のカメラによって同時に写真を撮影し、上空からの360のパノラマ画像を生成することが出来る。



図 3.10 Throwable Panoramic Ball [24]

平松らの開発した「ぷよこん」は、柔軟な素材で作られたボール型インタフェースである[25]。内部には空気圧センサや加速度センサ，Bluetooth モジュール等が内蔵されており，握り方の判別や投擲による入力を行う事が出来る。従来のコントローラによるボタン操作やジョイスティック操作といった単調な操作への置き換えでは実現できなかった，リアルな動作をバーチャル空間に反映させることで，ユーザに新たな楽しみを提供することを目的としたものである。



図 3.11 ぷよこんとその使用の様子[25]

また、Weinberg らが開発した Embroidered Musical Ball は、ボール内部に導電性の糸で圧力センサを縫いこむことで握る・伸ばすといったジェスチャによる入力を可能としたボール型デバイスである[26]。ジェスチャに対応した音声をスピーカーから出力することで、楽器演奏のスキルを必要とすることなく音楽を楽しむことが出来る。

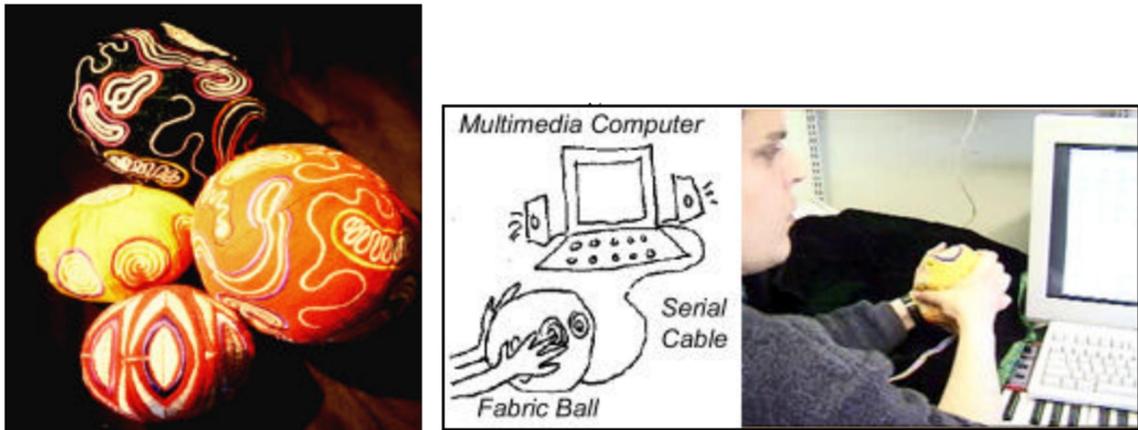


図 3.12 The Embroidered Musical Ball[26]

新田らは、前述のようなインタフェースよりさらに細かなボールへの入力を行うため、偏光と光弾性効果を利用したボール型圧力計測システム“Photoelastic Ball”を開発した[27]。握った圧力のみならず、指の押下方向をも認識することが出来、デジタルスポーツにおけるボールへの入力装置としての貢献が期待できる。

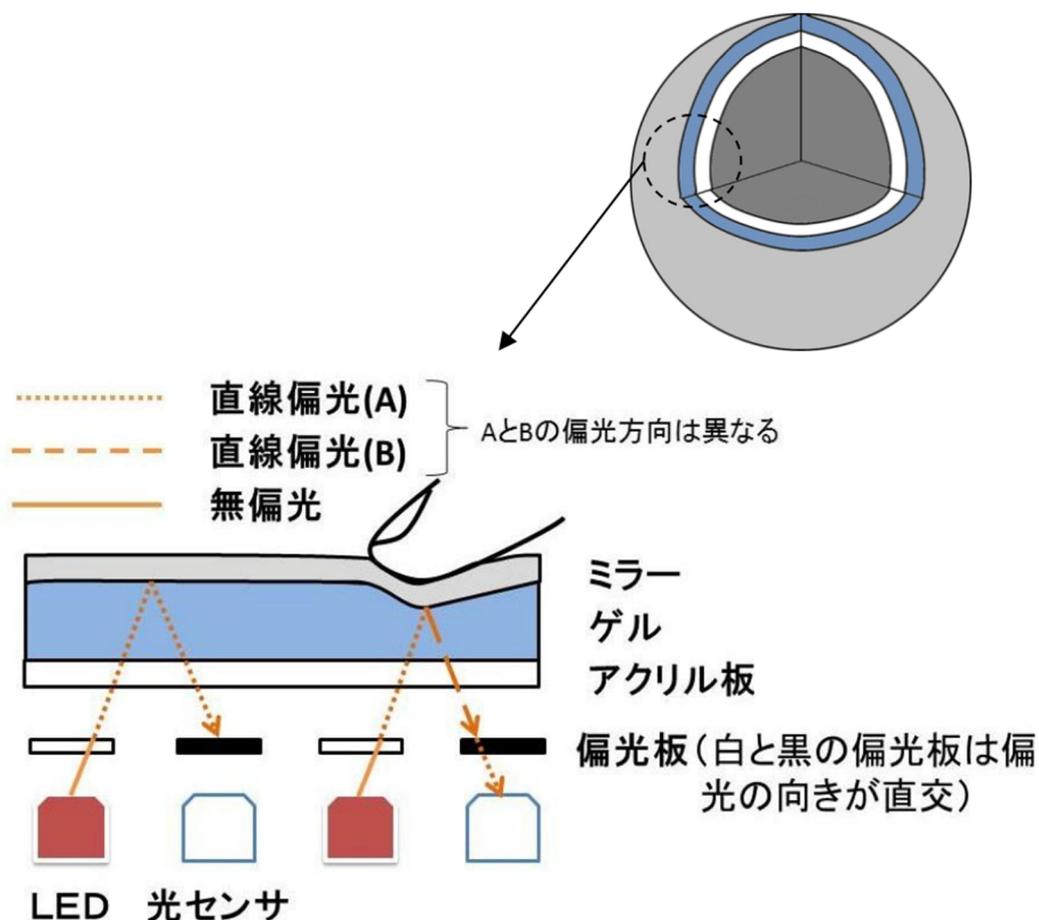


図 3.13 Photoelastic Ball のシステム構成概念図[27]

次に、ボールに出力機能を付加した研究を紹介する。塚田らが開発した「カメレオンボール」は、置かれた場所によってその色を変化させることができるボール型色入出力インタフェースである[28]. 透明なアクリル球に埋め込まれたカラーセンサによって周囲の色を検出し、フルカラーLEDの色を変化させることで、カメレオンのようにボールがその場の色に同調するものである。加速度センサによる入力も可能であり、空間の照明の色選択などへの応用が期待される。



図 3.14 カメレオンボール[28]

前述した跳ね星[7]もまた、フルカラーLEDを内蔵しており、その色を運動状態によって変える事ができる。運動状態は内蔵の加速度センサとマイクによって検出することが出来、入出力両方の機能を備えたボール型デバイスであると言える。

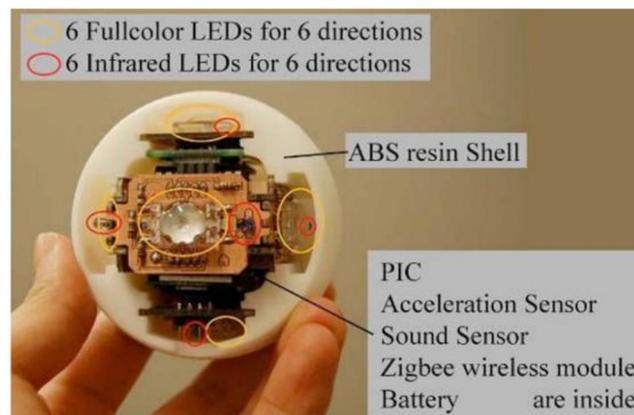


図 3.15 跳ね星[7]の内部構成

これらのボール型デバイスは視覚効果のみによる出力を行うものであったのに対して、実際に動きによってユーザへのフィードバックを行うボールの開発も行われている。Roball[29]はボール型のロボットであり、地上を自由に転がって移動することが出来る。また Sphero[30]は様々なセンサを内蔵した小型のボール型ロボットであり、スマートフォン等を入力装置として地上及び水上での動きを操作することが出来る。



図 3.16 ボール型ロボット (左 : Roball[29], 右 : Sphero[30])

空中での軌道変化に関しても、スポーツを題材として変化球を容易に実現するための製品が存在する。メガハウス社の「ブレダマスター マガるボール/ブレるボール」[31]は重心をずらすことによって容易に変化球を蹴ることを可能としたサッカーを題材とした子供向け玩具である。マガるボールではボール内に異なる質量のおもりを対照的に配置し、それらが水平面で回転するようボールを蹴ることで、ボールの運動中心を移動させていき、カーブボールを実現するものである。ブレるボールには一方に大きな質量のおもりが配置されている。これにランダムな回転を与えることで、軌道がぶれたボールを打ち出すことが出来る。



図 3.17 ブレダマスター（上段：マがるボール，下段：ブレるボール） [31]

またタカラトミー社の「魔球王」シリーズ[32]は、野球を題材とした、変化球を容易に投げることを可能にしたボール型の玩具である。表面に取り付けられたスライダによってボールに空けられた穴の開閉状況を変化させることで、回転するボールの受ける空気力学的効果を増幅することが出来る。



図 3.18 魔球王[32]

これらの製品は空中での軌道変化に注目したものであるが、変化球の効果を増幅させるものであり、動的にその軌道を変化させるものではない。本研究では、デジタルスポーツ実現のための一ケーススタディとして、空中での飛行軌道を動的に変化させる機能を持つボールを開発した。物理法則の縛りを越えた軌道変化を特殊効果としてスポーツに付加することによって、プレイヤーに対して新たな楽しみ方を提供することを目的とする。

## 第4章

# 動的な軌道変化が可能なボール

## 4.1 近代スポーツにおけるボール軌道

ボールの軌道は球技における重要な要素の一つである。野球やテニス、バスケットボールといったほとんどの球技において、ボールの軌道を先読みし、素早く反応する能力が必要とされるほか、正確な軌道を描く投球が要求される場面も多く見られる。また、運動軌道にカーブのような変化を与える「変化球」は野球をはじめとする多くの球技で用いられ、プレイヤー間の駆け引きを生み出している。しかし、従来のスポーツでは、物理法則の縛りを超えたような軌道変化を引き起こすことは困難であった。物理的制約を超えた軌道変化の例としては、上方向へ浮き上がるような変化球や多段変化球、球速が突然変化するボールなどが挙げられる。こういった軌道変化は、相手の意表をつくだけでなく、パスやシュートコースの選択肢の拡大に繋がるなど、プレイの幅を拓き、戦略性の向上に大きく貢献するであろう。デジタルゲームには、一発逆転のための要素として、特定の条件を満たした場合に使える「必殺技」が用意されているものがある。デジタルスポーツにおいては、ボールの軌道変化がこの必殺技として機能すると考えられる。逆転の可能性を秘めた必殺技の存在は、プレイヤーの緊張感を高め、より白熱した試合の実現に貢献すると考えられる。そこで本研究では、飛行軌道を動的に変化させることが可能なボールを開発し、デジタルスポーツへの「魔球」の実装を目指す。

## 4.2 ユーザによるボールへの入力

デジタルスポーツに対して「魔球」を実装するにあたり、効果を使用するプレイヤーは軌道変化のタイミング・方向・効果の大きさをコントロール出来る必要がある。つまり、プレイヤー自身がボールに対して情報の入力を行える必要があると言える。多くのスポーツでは、状況に応じた素早い判断が重要となる。魔球を使用する場合においても同様であると考えられ、プレイヤーはボールに対して直感的で素早い入力を行える必要がある。また、相手の意表をつくことを目的としている魔球においては、相手プレイヤーに悟られる事無く入力を行える事が望ましい。ここでは、ボールに対して各種入力を行う方法について、相手に悟られずに入力できるか（秘密性）、および入力可能な情報量の観点から検討する。

スポーツのプレイ中におけるボールへの入力手段としては、空気圧センサや圧力センサを用いた表面の押下やボールの握り動作による入力、加速度センサやカメラを用いたジェスチャ入力などが考えられる。握りによる入力では、プレイの中で相手に悟られることなく入力が可能である。しかしながら入力できる情報はその握りの強さ（圧力値）のみであり、情報量は少ない。次にジェスチャ入力について考える。ジェスチャ入力では、動きを大きくする、あるいは複数の動作を連続して行うことで、入力する情報量を増やしていくことが可能である。しかしながらプレイ中に長時間のジェスチャを行うことは難しく、スポーツにおいては有効とは言えない。スポーツで使用することを考慮すれば、ボールを叩く・振るといったシンプルなジェスチャが有効であると考えられる。しかしながらこれらのジェスチャも入力できる情報量は少なく、さらに秘密性も握り動作に比べて低い。ここで、ふよこん[25]のような空気圧センサと加速度

センサを組み合わせた入力装置を考える。このシステムでは、それぞれのセンサを個別に使う場合に比べて、一種類多くの情報を入力する事が可能となる。しかしながら、ジェスチャを伴うために、秘密性の低さが課題となる。

次に、ボールとの無線通信による外部入力装置を用いた入力方法を考える。Sphero[30]は、Bluetooth 通信を利用して、スマートフォンを利用した運動の操作を行うことが出来る。このように、スマートフォン、あるいは時計型のウェアラブルデバイスなどを入力装置として使用することで、多くの情報をボールに対して入力することが出来る。しかしながら、この入力動作を相手に隠すことは困難であると考えられ、秘密性は非常に低い。また、スポーツにこれらの外部デバイスを持ち込むことはプレイの妨げになることも懸念される。

最後に、デジタルスポーツで使用するためのボールへの入力装置として開発された、Photoelastic Ball [27]について考える。Photoelastic Ball では、ボール表面の押下力の他、その押下後に力を加えた方向も検出する事が可能となる。そのため、魔球の効果量と方向といったように、2種類の情報を同時に入力することが可能である。また、ボールを把持したまま指の力のみによって入力できるため、秘密性も高い。

ここで、空気圧センサ単体、加速度センサ単体、ぷよこん、Sphero、Photoelastic Ball の各種入力方法における入力可能情報量、秘密性を表 4.1 にまとめる。また、図 4.1 は表 4.1 を可視化したものであり、デジタルスポーツにおいては、図の右上に位置する方法ほど有効な入力方法であると言える。現状の技術では、入力可能情報量、秘密性ともに優れた Photoelastic Ball が比較的有効な方法であると考えられる。

表 4.1 入力方法の分類

	入力可能情報量	秘密性
空気圧センサ	少	高
加速度センサ	少	中
ぷよこん	中	中
Sphero	多	低
Photoelastic Ball	中	高

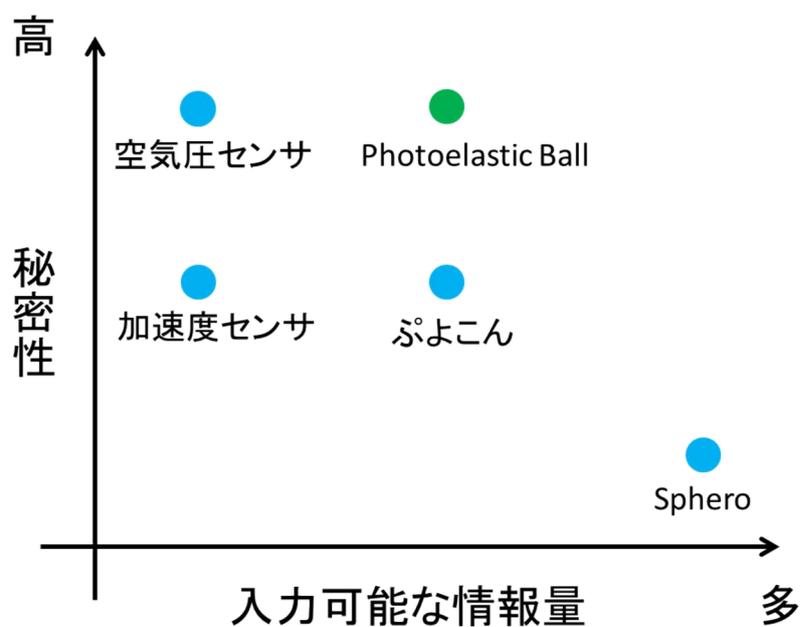


図 4.1 入力方法の分類図

### 4.3 軌道変化手法

ボールの運動を空中で変化させるためには、(1) 運動中にボールの重心位置を変化させる方法、(2) ボールと空気との間に発生する空気力学的効果を利用する方法、(3) 何らかのエネルギーを利用してボールに推進力を発生させる方法の

3種類の方法が考えられる。以下では、それぞれの手法についてデジタルスポーツの観点から議論し、本研究で開発するボールに採用する手法を決定する。

#### 4.3.1 重心動揺を使用する方法

ボールの重心を変化させることにより、ボールの回転軸が変化する。この効果を利用することで、空気力学的効果によらずに一方向へ軌道を逸らす、あるいは軌道をぶれさせることが可能となる。本手法を利用する場合、ボール内におもりとアクチュエータを内蔵し、ボールの回転方向に応じた位置に重心をずらすことによって、変化球を容易に実現することが可能であると考えられる。しかしながら、本手法の問題点として、非常に大きな質量を内蔵しなければ、大きな効果を得られない事が挙げられる。ドッジボールのような比較的軽いボールを用いるスポーツでは、効果的に使用することが難しいと考えられる。また、本手法ではボールに回転を与えた時点でその変化軌道が決まってしまうことも問題として挙げられ、空中で突然その軌道が変化するような、物理法則を超えた変化球を実現する方法としては適切ではないと考えられる。

#### 4.3.2 空気力学的効果を利用する方法

野球におけるカーブボールやフォークボールは、空気力学的効果を利用した軌道変化の代表的な例と言える。ボールに特定方向の回転を与えることによりボールの受ける空気抵抗の大きさ・方向を変化させ、軌道を変化させる技術である。空気力学的効果の大きさは、物体形状の影響を大きく受ける。野球のボールでは、縫い目が空気抵抗を増大させる役割を担っている。そこで、表面形

状を変化させることが可能なボールを開発することで、空気力学的効果を制御でき、動的な軌道変化が可能となると考えられる。

本手法の特長として、ボールの形状を段階的に変化させることで、任意の方向への軌道変化が比較的容易に実現できることが挙げられる。しかしながら、空気力学的効果の大きさはボールの運動速度に依存するため、大きな効果を得るためにはプレイヤーの技術が必要となること、また低速下では大きな効果を生じさせることが出来ないといった欠点も抱えている。比較的高速で、かつ長時間飛行するようなボールの軌道を変化させる場合には本手法が適していると考えられるが、低速下での軌道変化を実現するためには推進力発生装置を搭載する必要がある。

### 4.3.3 推進力発生装置を搭載する方法

推進力発生装置を利用する方法では、ボールのスピードに依存する事無く軌道を変化させることが出来る上、重心動揺や空気力学的効果を利用した方法よりも大きな変化が得られることが期待できる。さらに、加減速、多段変化といった特殊な変化を引き起こすことも可能である。しかしながら、推進力を発生させるためには何らかのエネルギー源が必要となる。また繰り返しの変化を起こすためには推進力源の補充が必要となるという問題が存在する。ただし、デジタルスポーツでは、こういった回数の制約を逆に利用することも出来る。軌道変化を引き起こせる回数が限られるということは、「必殺技」の使用に対して制約が生まれることを意味する。必殺技使用への制限は、ゲームの緊張感や戦略性を高める重要な要素であり、より白熱した試合の実現に寄与すると考えられる。

#### 4.3.4 軌道変化手法の比較及び決定

上記の3手法それぞれの長所および短所を、表4.2にまとめる。

表 4.2 軌道変化手法の特長

	長所	短所
重心動揺	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 電池以外のエネルギー源を必要としない</li> <li>● ボールの形状・外観が変化しない</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● ボールの質量が増加する</li> <li>● 動的な変化を引き起こすのは難しい</li> </ul>
空気力学的効果	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 電池以外のエネルギー源を必要としない</li> <li>● 方向の制御が比較的容易</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 軌道変化量がボールの飛行速度に依存する</li> </ul>
推進力発生装置	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 効果の大きさがボールの速度に依らない</li> <li>● 軌道変化量が大きく、物理的制約を超えた軌道変化が可能</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● エネルギー源を必要とするため、回数に制約が生まれる</li> <li>● 方向の制御が難しい</li> </ul>

本研究では、飛行するボールに対して動的に軌道変化を与えることで、スポーツに対して魔球のような特殊効果を実現することを目的としている。重心動揺を利用した方法は、ボールの回転によって生じる軌道変化を増幅するものであり、特殊な軌道を実現するものではない。そのため回転を与えた時点でその

軌道が決まってしまう重心動揺を利用した方法は、本研究には適してないと言える。推進力発生装置を利用した方法では、エネルギー源を必要とするために使用できる回数に制限がある、という問題点があった。これに対して空気力学的効果を利用した方法では、特殊な軌道変化を引き起こすことは出来ないが、使用回数が制限されることもない。ボールの運動を自在に操る、という観点から見るならば、高速での運動時に限られるが、何度でも軌道を変化させることの出来る空気力学的効果を利用した方法も非常に有効な手法であると言える。最終的には両手法を組み合わせることで、起こしたい軌道変化の種類に応じて機能を使い分けられるようなボールを開発することが理想的である。

本研究では、自在に軌道をコントロール出来るボールの実現への第一歩として、特殊効果としての使用という観点からまずはその軌道変化の大きさを重視し、推進力発生装置を内蔵したボールの開発を行った。

#### 4.4 圧縮ガスの噴射を利用した軌道変化

本研究では、推進力発生のためのエネルギー源として、圧縮ガスを使用したボールを開発した。図 4.2 のように、圧縮ガスを空中でボール内部から噴射することで、その反力を利用して軌道変化を実現するものである。

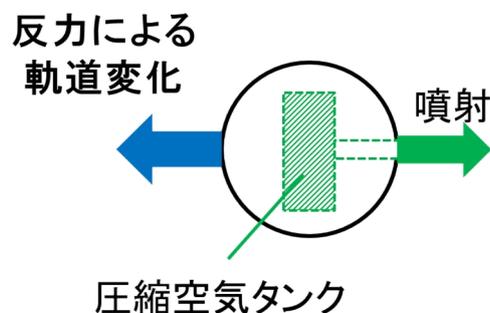


図 4.2 圧縮ガスの噴射を利用した軌道変化

ボールの軌道を変化させるということは、ボールの運動量を変化させることであると言える。物体の運動量変化は、外力によりその物体の受けた力積に等しい。質量  $m$  の物体に外力ベクトル  $\mathbf{F}$  を時間  $\Delta t$  加えたとき、物体の速度ベクトルの変化  $\Delta \mathbf{v}$  は以下の式で表される。

$$\Delta \mathbf{v} = \frac{\mathbf{F} \Delta t}{m} \quad (1)$$

また、時間  $t$  外力を加えた時、その外力を受けている間に物体が移動する距離  $\mathbf{x}(t)$  は、以下の式で表される。

$$\mathbf{x}(t) = \int_0^t \Delta \mathbf{v}(t) dt \quad (2)$$

本研究においてはこの外力として圧縮ガスの噴射によってボールが受ける反力を利用する。ガスの噴射によってボールに付加される速度および移動距離は、(1)式および(2)式を用いて計算することが出来る。

以下では、開発したプロトタイプについて記述する。

## 第5章

# プロトタイプの開発

### 5.1 従来デバイスの課題

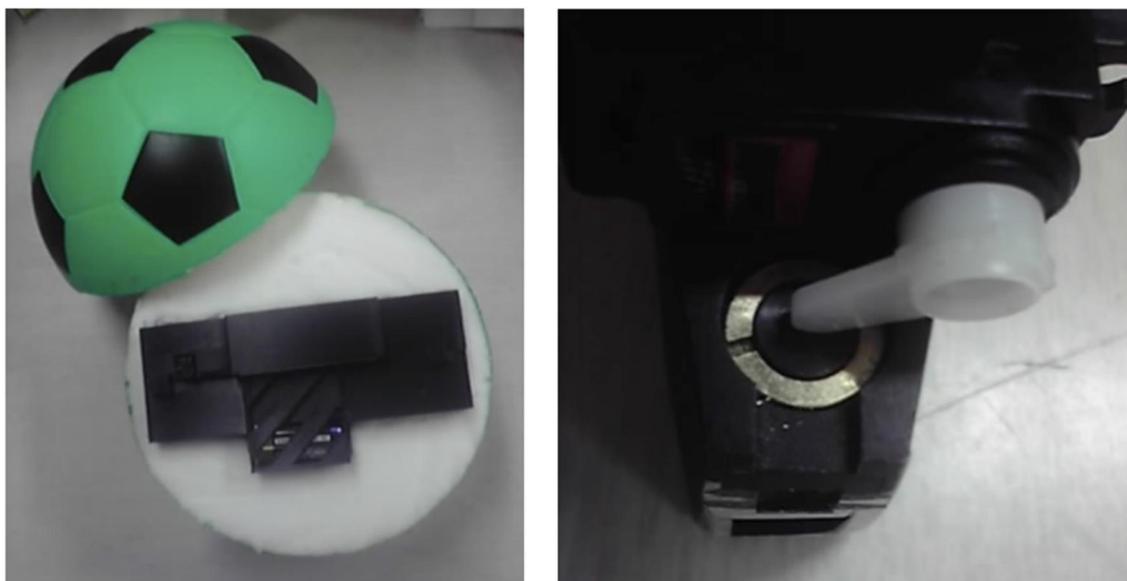


図 5.1 従来プロトタイプ[33]

圧縮ガス噴射による反力を利用して空中でその軌道を変化させるボールは、既に市川らが開発している[33]。市川らが開発したプロトタイプは、モデルガンのスペアマガジンとサーボモータから成る圧縮ガス噴射機構をスポンジボールに搭載したものである（図 5.1）。ガス噴射タイミングの入力方法としては加速度センサおよび近接センサの利用を検討している。しかしながら、実際のボールの運動中における噴射タイミングの制御は実現しておらず、噴射の方向についても検討されていなかった。また、全体の質量も 627g と、バスケットボール

の7号球と同程度でありスポーツ用のボールとしては比較的重い。そこで本研究では、デバイスの軽量化を行うとともに、噴射タイミングをより高精度に制御するためのセンサを搭載した新たなプロトタイプを開発した。

## 5.2 プロトタイプの開発

新たに開発したプロトタイプでは、圧縮ガス噴射装置に自転車用の小型空気入れを利用することにより、小型・軽量化を行った。また、加速度センサおよびジャイロセンサを搭載することにより、運動状態、姿勢情報に基づいた噴射タイミングの制御を可能とした。以下では本プロトタイプのシステム構成、および従来デバイスとの性能比較について記述する。

### 5.2.1 システム構成

本プロトタイプは、圧縮ガスの噴射を行う出力部と、ボールの姿勢等を検出する入力部から構成される。入力部からの情報を元に、マイクロコントローラ (Arduino Nano) による噴射制御を行う。出力部は、自転車用小型空気入れ (マルニ工業製) と圧縮 CO<sub>2</sub> カートリッジ (BARBIERI 社製)、空気弁の開閉用の DC モータ (並木精密宝石 SCL16-30) から構成される。入力部はボールの運動状態や姿勢を検出するための加速度センサとジャイロセンサ (Sparkfun SEN-10121)、モータの回転角を検出し噴射量を調節するためのポテンショメータによって構成される。さらに、PC からの指令を受信するための Bluetooth モジュールを搭載している。モータと空気入れを固定するホルダーやそれぞれに取り付けられた歯車は 3D プリンタを用いて製作した。また電源には 9V の AC アダプタを接続している。ボール全体の質量は CO<sub>2</sub> ガス 16g を含めて 378g で

あり、従来のデバイスから 249g の軽量化に成功した。これはドッジボールの 3 号球の規格重量と同等である。ボール内部の構成を図 5.2 に示す。

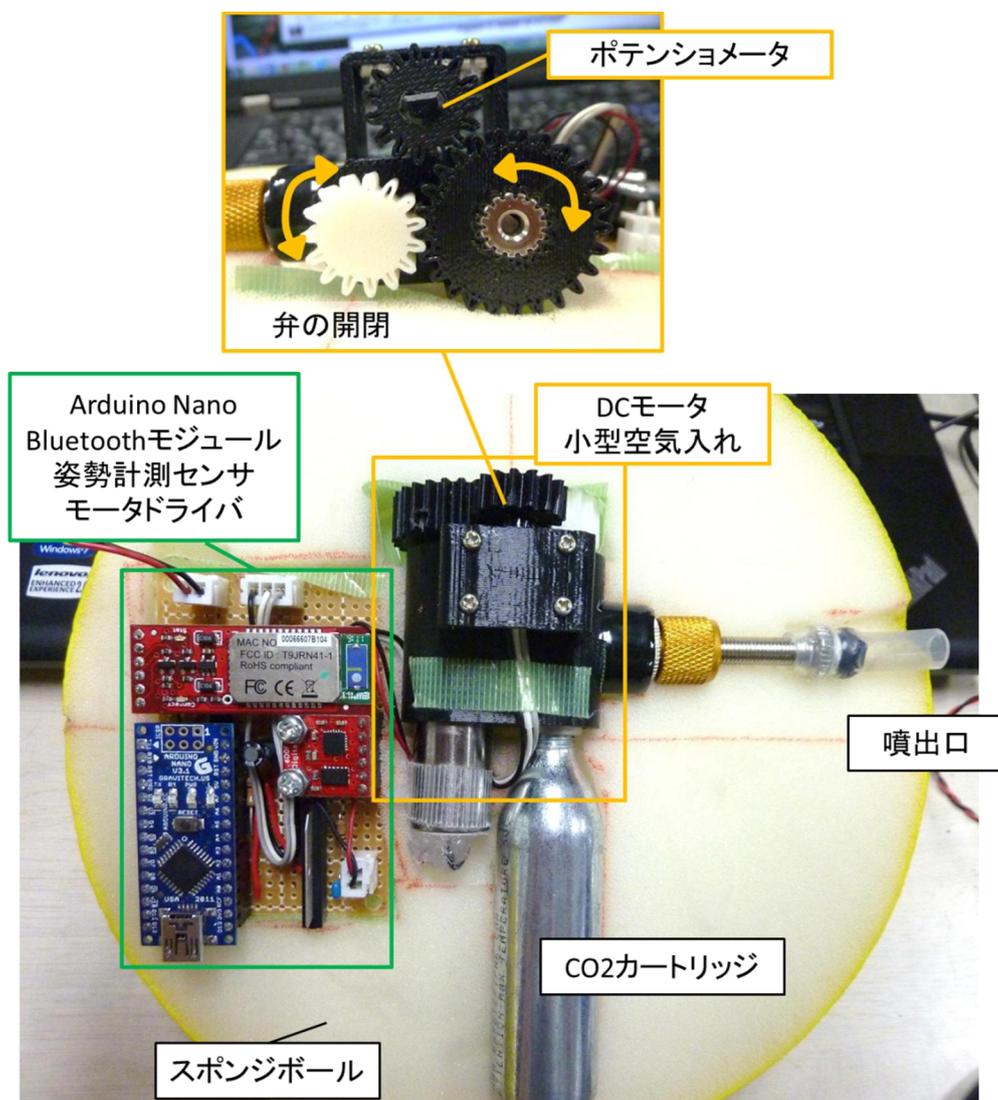


図 5.2 プロトタイプのシステム構成

### 5.2.2 入出力と通信機能

本プロトタイプは加速度センサ、ジャイロセンサを搭載しており、落下や加減速といった運動状態の推定や衝撃、振動の検出、噴射口の向きの推定等が可

能となった。これらの情報を利用することで、ボールを叩く、振るといった簡単な動作による入力が可能となるほか、圧縮ガスの噴射方向にある程度の制限を設けることが出来る。さらに、Bluetooth モジュールの搭載により、外部機器から指令を送ることで任意のタイミングでの噴射を行うことが可能となった。また、センサからの情報を PC に送信することにより、スポーツのプレイ中におけるボールの運動状態の記録・可視化にも応用可能である。

## 5.3 噴射能力の評価

ボールの軌道変化を実現するためには、圧縮ガスの噴射力のみによって十分に大きな反力を発生させることが必要不可欠である。今回新たに製作したプロトタイプでは、推進力源およびガスの噴射機構を変更することで小型軽量化を実現した。本章では、新機構における噴射圧力の測定結果から、質量の削減を踏まえた軌道変化能力の従来デバイスとの比較・評価を行う。また、同一のカートリッジを用いて複数回噴射を行った場合の圧力の変化を測定した。本実験により、一本のカートリッジによる噴射可能回数の評価を行う。

### 5.3.1 実験条件・装置

噴射力の測定に用いた実験装置の外観を図 5.3 に示す。新品の CO<sub>2</sub> カートリッジを取り付けた噴射ユニットを装置に固定し、噴射口の先に設置した圧力センサ (FSR-402) によりその噴射圧力を計測した。本実験では、以下の様な二つの条件において測定を行った。

- (1) カートリッジのガス全てを噴射する
- (2) 噴射を短時間に区切り、同一のカートリッジで複数回測定を行う

(1)の実験により従来デバイスとの効率の比較、(2)の実験によって一本のカートリッジによる噴射可能回数の評価を行う。両実験ともに、噴射の指令をマイクロコントローラへ送信してからの経過時間およびセンサから得た圧力を記録した。また、条件(2)では、弁をポテンシオメータから得られる指定角度まで開放後、500 ミリ秒待機し再び弁を閉じる、という動作を1セットとした。また本システムではガスの噴射後、カートリッジ内の圧力低下に伴い温度が低下してしまう。そのため本実験では噴射毎に約1時間の間隔を空け、カートリッジの温度を常温に戻してから測定を行った。各実験を行った際の室温は23度であった。

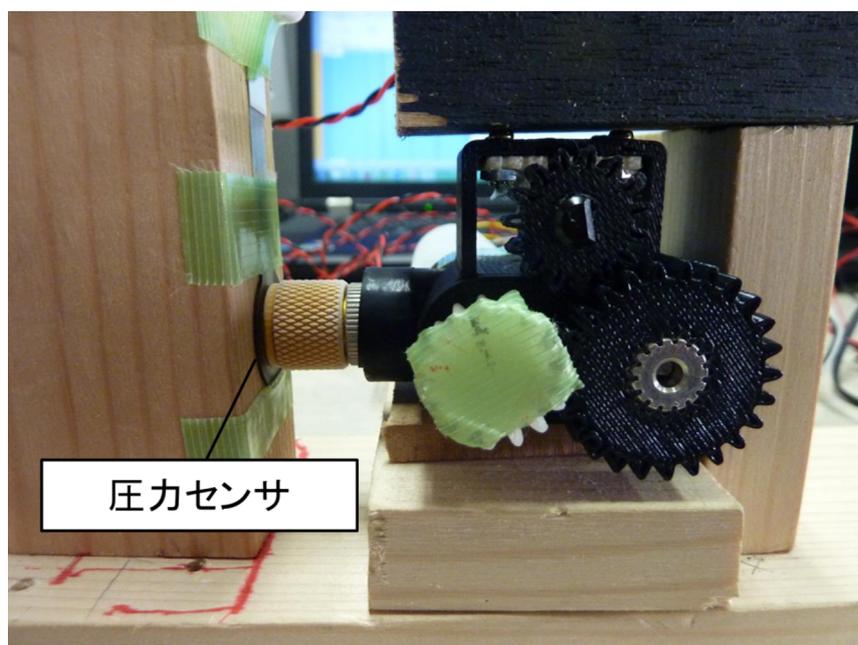


図 5.3 噴射力測定装置

### 5.3.2 実験結果および考察

#### I. 噴射圧力の評価

図 5.4 に条件(1)において測定された圧力値の時間変化を示す。縦軸はセンサによって測定された圧力[N]，横軸は噴射指令を送ってから経過した時間[ミリ秒]である。

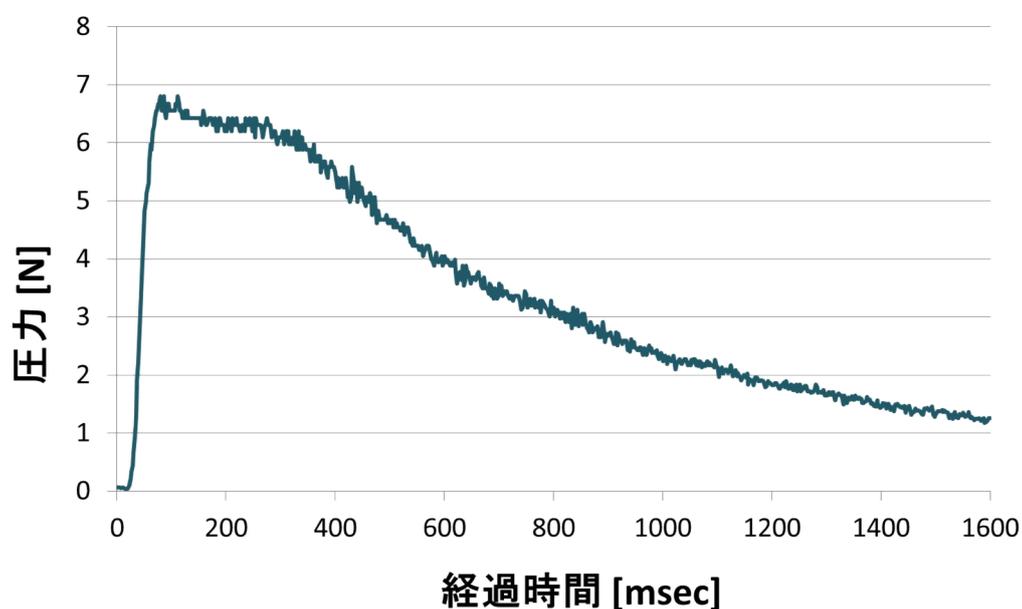


図 5.4 噴射力測定結果

また、本実験によって得られた圧力の最大値および 1.4 秒間の噴射によって生じる力積と、同様の方法によって計測された従来デバイスにおける最大噴射圧力、力積値を表 5.1 にまとめる。

表 5.1 従来デバイスとの噴射力比較

	従来デバイス	本プロトタイプ
総質量 [g]	627	<b>378</b>
最大噴射力 [N]	13.24	6.80
噴射時間 [s]	1.4	1.4
力積 [Ns]	6.93	5.14
力積-質量比 [Ns/kg]	11.1	<b>13.6</b>

運動方程式 $F = ma$ より、質量  $m$  の物体に力  $F$  をある時間  $t$  加えた時に物体に与えられる運動速度は力積-質量比  $Ft/m$  で表される。実験の結果、本システムによる最大噴射力、力積ともに従来デバイスに劣る値が得られた。しかしながら、本プロトタイプでは質量の大幅な削減に成功しており、力積-質量比では従来デバイスを上回っている。このため、運動軌道を変化させるための効率という観点では、本プロトタイプがより優れていると言える。

## II. ガス噴射可能回数の評価

条件(2)では、一本の CO<sub>2</sub> カートリッジを用いて 4 回の噴射力測定を行った。各噴射によって測定された圧力と経過時間の関係を図 5.5 に示す。

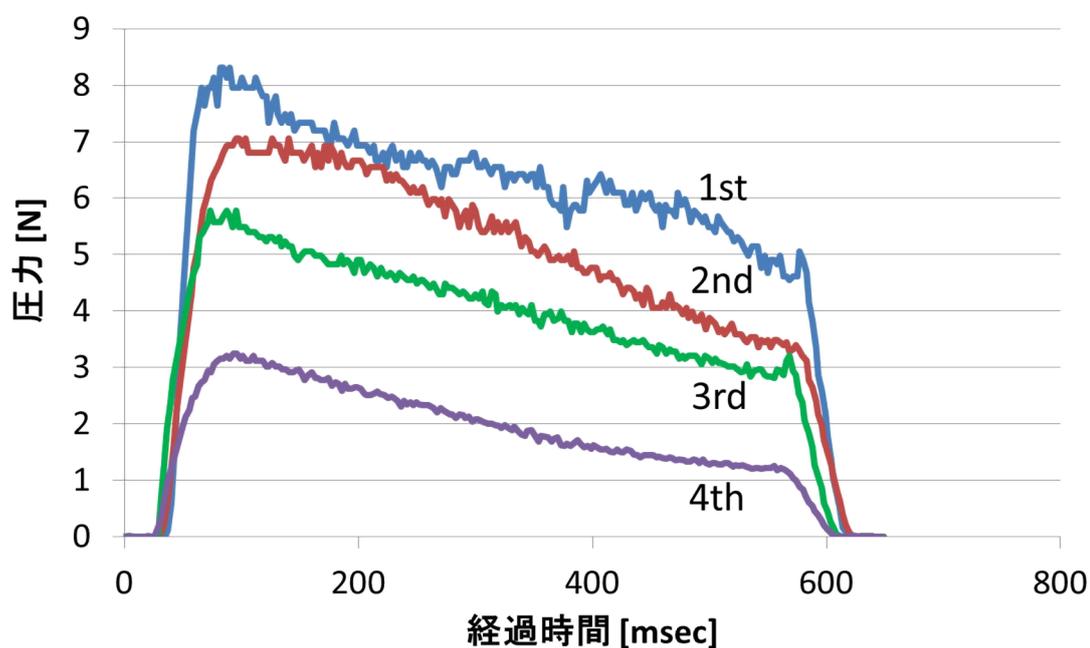


図 5.5 複数回の噴射に伴う圧力の低下

また、各噴射における圧力の最大値、力積値、噴射動作全体の時間を表 5.2 にまとめる。

表 5.2 各噴射における測定結果

	最大圧力値 [N]	力積 [Ns]	全体時間 [msec]
噴射 1 回目	8.31	3.52	623
噴射 2 回目	7.06	2.90	625
噴射 3 回目	5.78	2.27	611
噴射 4 回目	3.24	1.12	612

測定の結果、1 回目の噴射時に最大の圧力および力積が得られ、その後噴射を行うごとに記録される圧力値は減少していくことがわかった。2 回目の噴射では

比較的大きな噴射圧力および力積が得られているが、3回目以降の噴射では測定された圧力は大きく低下する結果となり、5回目以降の噴射ではほとんど圧力を検出することが出来なくなった。スポーツにおいて安定した軌道変化の実現を目指す場合、1本のカートリッジを使用できる回数は1~2回であると言える。

ここで、本実験で測定したのは噴出したガスが噴射口付近に対して与える力であり、ボールの受ける反力とは言えない。そのため本計測結果から軌道変化量などをシミュレーションするのは適切ではないと考えられる。そこで、本実験では1本のカートリッジにおける複数回の噴射による噴射力の低下のみに関して評価することとした。

次に、実際に運動中のボールからのガス噴射実験を行い、その軌道変化能力の検証を行う。

## 5.4 軌道変化能力の検証

前章の実験結果より、未使用のカートリッジを使用することで、少なくとも従来デバイスと同等以上の軌道変化を実現可能であることが示された。そこで、実際に空中に投げ上げたボールからガスの噴射を試みることで、軌道変化能力の検証実験を行った。

### 5.4.1 実験方法

本実験では、ボールを2メートルほどの高さまで鉛直方向に軽く投げ上げ、最高点付近でガスを噴射した場合の軌道変化の様子を観察した。一方向への軌道変化を観察するため、噴射口は可能な限り水平方向を向くようにし、あまり回転を与えないよう投げ上げた。また、噴射のタイミング制御にはセンサ情報

を利用した。以下の二条件を同時に満たした場合に、500 ミリ秒間の噴射を行うよう設定を行った。

(1) ボールの自由落下を検出

(2) 噴射口の水平面に対する角度が 30 度以内

実験中は経過時間、加速度、姿勢情報を PC に送信し記録した。また、加速度値を積分することで、ボールの軌道を計算した。実験は噴射を行わない場合、行う場合のそれぞれについて行った。

#### 5.4.2 実験結果および考察

ボールを投げ上げてから着地するまでの軌道を図 5.6 に示す。

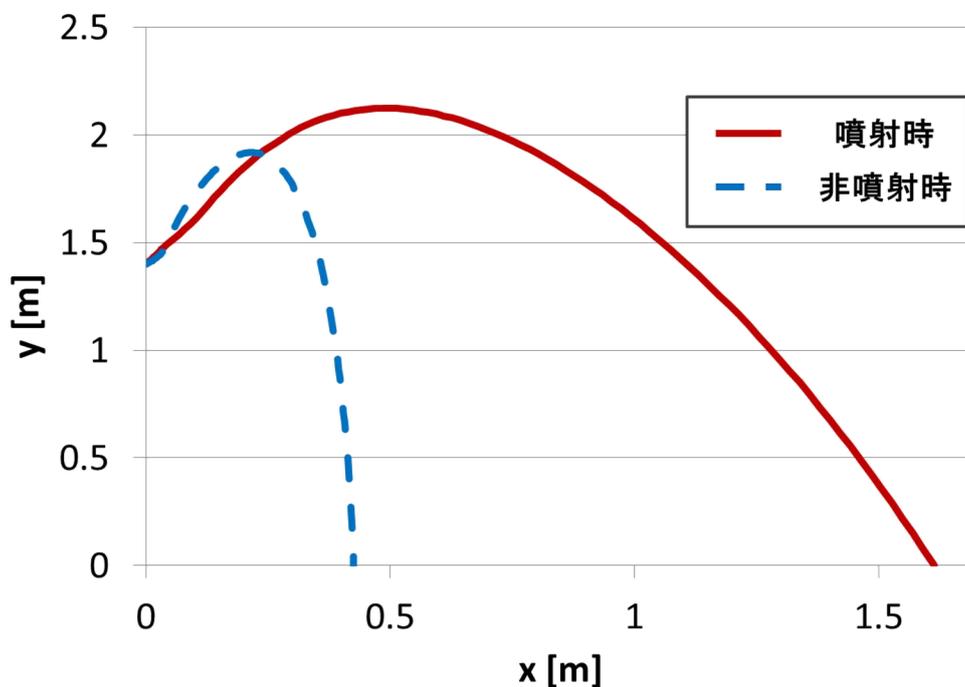


図 5.6 ボールの軌道

圧縮ガス噴射時の軌道を実線、非噴射時の軌道を破線で示している。x 軸は水平方向移動量の絶対値、y 軸は地面からの距離を示しており、ボールが手から離れた点を x 軸原点としている。本実験結果では、圧縮ガスの噴射によって、ボールの落下地点は非噴射時と比較して約 1.2m 変化している。投げ上げた高さや方向が一致していないため単純にこれらと比較することは出来ないが、ガスの噴射反力によって確かにボールの落下軌道が変化したことを確認出来た。

また、図 5.7 のグラフは上から鉛直方向の加速度値、水平面に対する噴射口の相対角度、噴射の有無を示している。噴射口の傾きが 30 度以下であり、かつ加速度の減少を検出した際に噴射を行っていることから、運動状態および姿勢情報を利用した噴射タイミングの制御が行われていることがわかる。

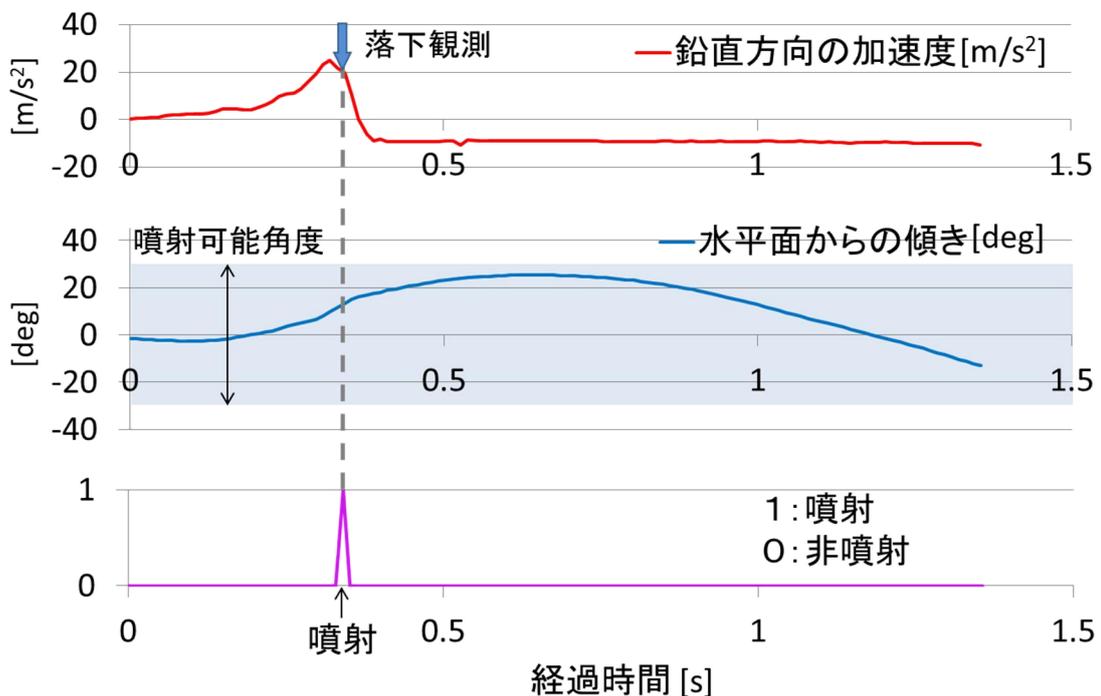


図 5.7 センサ情報に基づく噴射タイミングの制御

## 5.5 考察

新たに開発したプロトタイプでは、圧縮ガスの噴射に自転車用の小型空気入れを使用することで小型・軽量化を行った。本プロトタイプの質量は 378g であり、従来デバイスから 249g の質量低減に成功した。これはドッジボールの 3 号球の規格重量と同等である。噴射力測定実験の結果、出力の大きさそのものは従来法に劣るが、ボール全体の質量が減少したため、効率は向上したことが確認できた。また、本システムによって実際に投げ上げたボールの落下軌道を変化させることが出来た。

しかしながら、本システムで使用している CO<sub>2</sub> カートリッジでは、複数回の使用が困難であるという問題も抱えており、実験の結果安定した軌道変化量が得られるのは 1~2 回である。さらに、現在のシステムでは弁の開閉トルクが不足しており、噴射後にガスが漏れ出てしまうケースも確認された。電源には 9V の AC アダプタを使用しており、有線での供給となっていることも、軌道変化の妨げとなることが予想される。

また、本実験で測定した噴射力は、圧縮ガスが外部に与えた圧力であり、ボールの受けた反力と必ずしも一致するものではない。軌道変化能力をより高い精度でシミュレーションするためには、ボールが受ける反力を実際に測定する必要があると考えられる。

## 第6章

# TAMA の開発

### 6.1 プロトタイプの問題点

本システムでは、空気入れの弁の開放のために大きな電力が必要となる。前章に記述したプロトタイプでは 9V の AC アダプタから電源を供給していたが、空気入れの弁を完全に閉鎖することが出来ず、ガスの噴射後にも空気が漏れ続けてしまう、という問題を抱えていた。また、電源ケーブルによる張力がボールの運動の妨げとなり、軌道変化の効率を低下させる原因となっていた。

そこで開発した最新のシステム「TAMA (Motion chAnging, Motion bAll)」では、これらの問題解決およびデジタルスポーツへの適用に向けて、電源の無線化および弁の開閉強度の改善を行った。

### 6.2 システムの無線化

TAMA では、電源として 3.7V、容量 1000mAh のリチウムポリマーバッテリーを用いる。モータを駆動させるため DC-DC コンバータが組み込まれた昇圧モジュール（秋月電子通商製）を用いて 12V に昇圧し、駆動回路に接続した。本システムの電源を無線化するにあたり、電力の不足による空気入れの弁の開閉のためのトルク不足が問題となる。前述したプロトタイプでは、モータと弁それぞれに取り付けた歯車の歯車比は 25:15（モータ側：弁側）であった。TAMA ではモータトルクの不足を補うため、この歯車比を入れ替えることによってト

ルクを約 2.8 倍に引き上げている。無線化の結果、ボール全体の質量は 404g (圧縮 CO2 ガス 16g を含む) となった。TAMA 内部の構造を図 6.1 に示す。

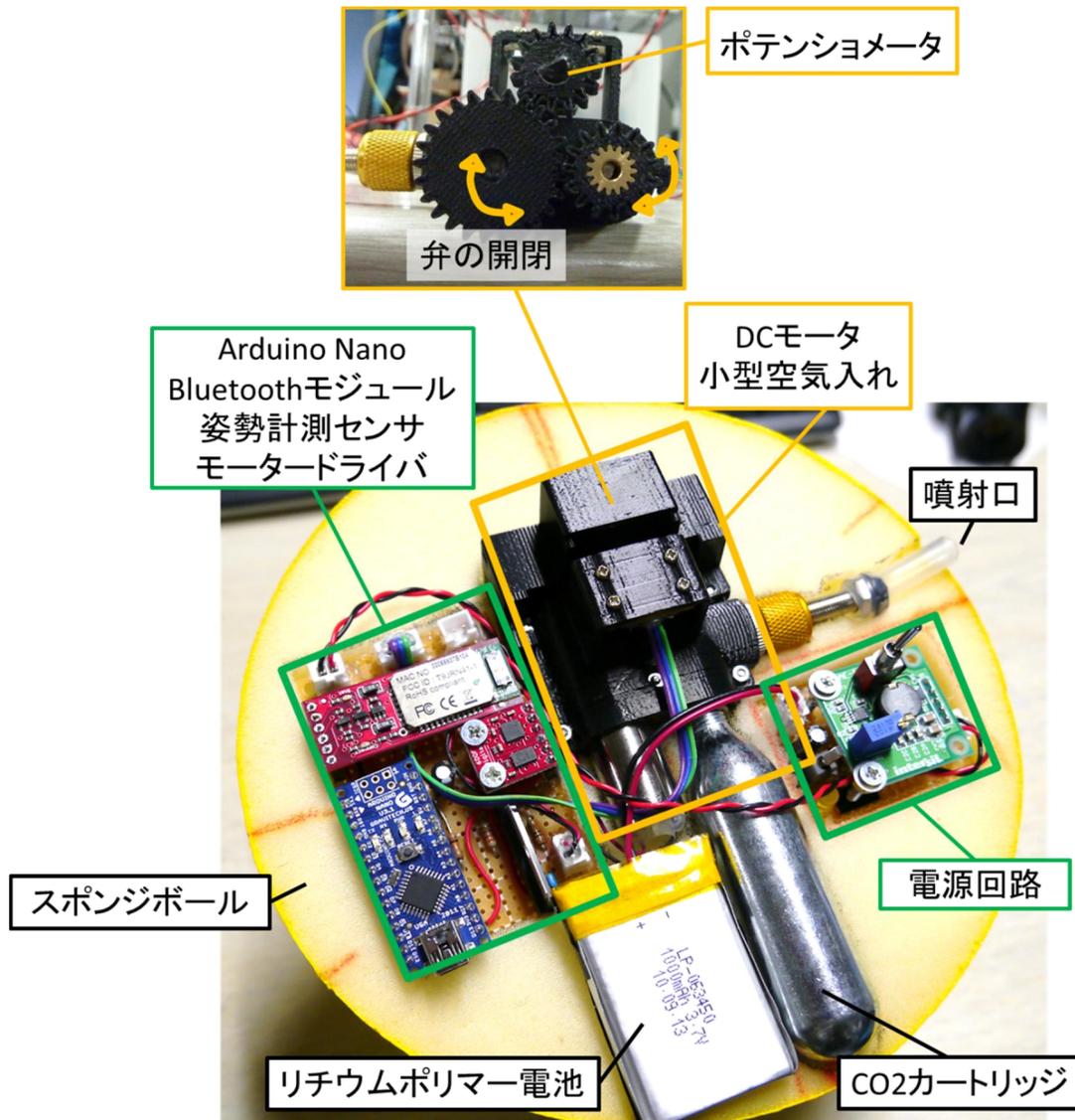


図 6.1 TAMA のシステム構成

また、TAMA を使用して、前章に記述した投げ上げ実験と同様の実験を行った。図 6.2 は軌道変化の様子を撮影したものであり、上側が噴射を行わなかつ

た場合、下側は頂点付近で写真右方向に向けてガスを噴射した場合の様子である。

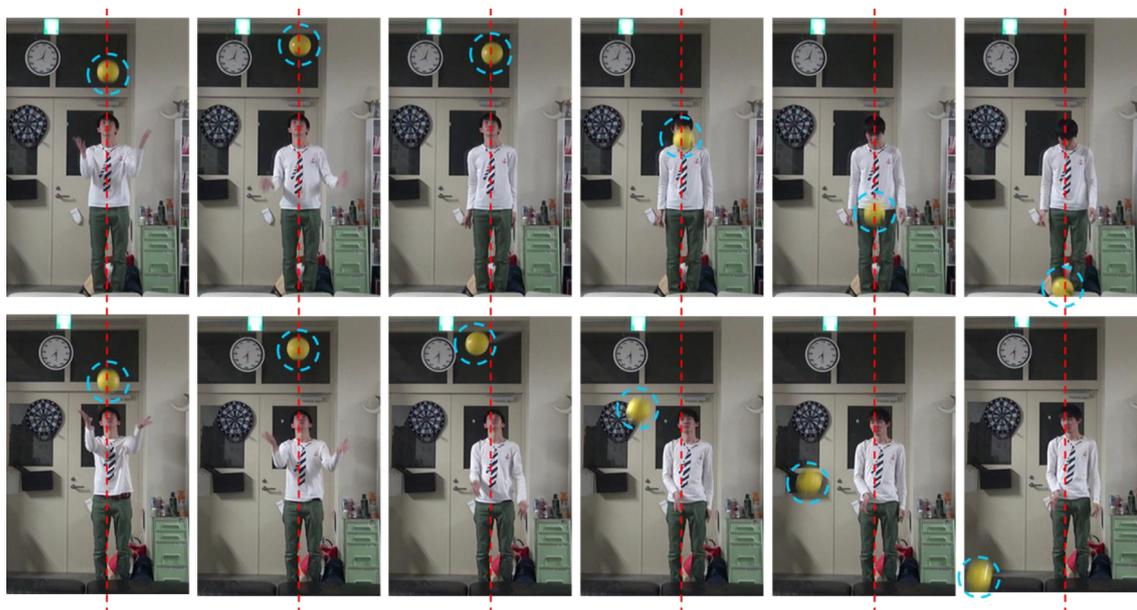


図 6.2 落下軌道変化の様子（上段：非噴射時，下段：噴射時）

### 6.3 軌道変化能力の評価

TAMA は推進力発生装置を利用することによって軌道変化を引き起こす方法を採用している。本手法の利点として、空気力学的効果を利用した方法に比べ、急激な軌道変化を引き起こせる点が挙げられる。デジタルスポーツへの適用にあたって、その軌道変化の大きさは特殊効果としての有用性に関わる重要な要素となる。そこで本研究では、TAMA の持つ軌道変化を引き起こす性能を評価する実験を行った。一度のガス噴射によって力積の計測および落下運動中におけるガス噴射による軌道変化量の計測を行ったため、その結果を報告する。

## 6.4 力積の計測

TAMA では、圧縮ガスの噴射によってボールが受ける反力を利用して軌道変化を実現する。5.3 章で測定した噴射力は、噴射口の先に設置した圧力センサによって記録された数値であり、一定の目安とはなるものの、実際にボールが受ける反力と一致するとは言い難い。そのため、ガスの噴射がボールに与える運動量を単純にシミュレーションすることはできなかった。そこで本章では、本システムによって引き起こすことのできる軌道変化量を評価するため、実際にボールが受ける力積の測定実験を行った。

### 6.4.1 実験方法

実験装置の外観を図 6.3 に示す。TAMA に搭載している圧縮ガス噴射機構をスライドレールに固定し、噴射口と逆側に取り付けた突起を、ゴムシートを挟んで壁に貼り付けた圧力センサ (FSR-402) に密着させた。

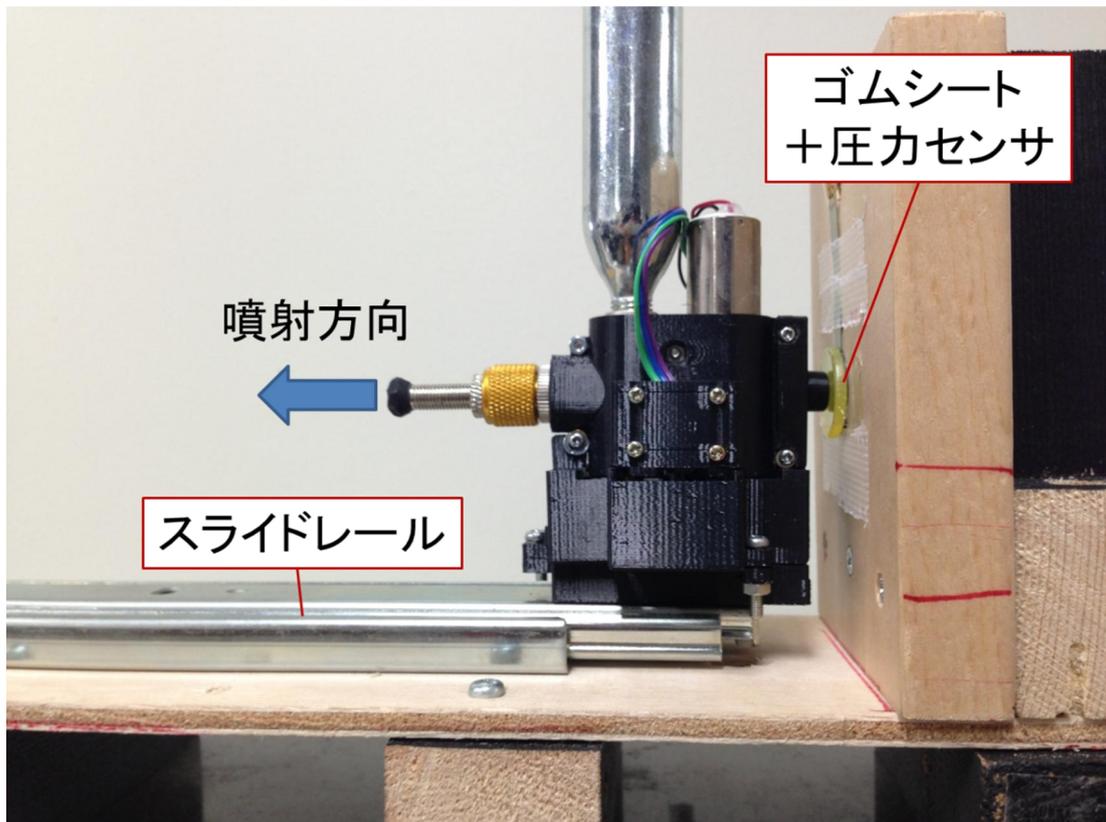


図 6.3 力積測定実験装置外観

計測は4本のカートリッジについて行い、1本のカートリッジにつき3回の噴射を行った。噴射によってカートリッジ温度の低下が生じるため、1回の噴射を終える毎に30分以上の間隔を空け、カートリッジ温度を常温に戻してから測定を行った。一度の噴射で弁を開放した時間は500ミリ秒であり、指令を送ってから噴射を終え、弁を閉め切るまでの圧力値[N]の時間的変化を4ミリ秒毎に記録した。実験時の室温は23度であった。

### 6.4.2 結果・考察

4本のカートリッジにおける圧力の測定結果の平均値を図 6.4 に示す。

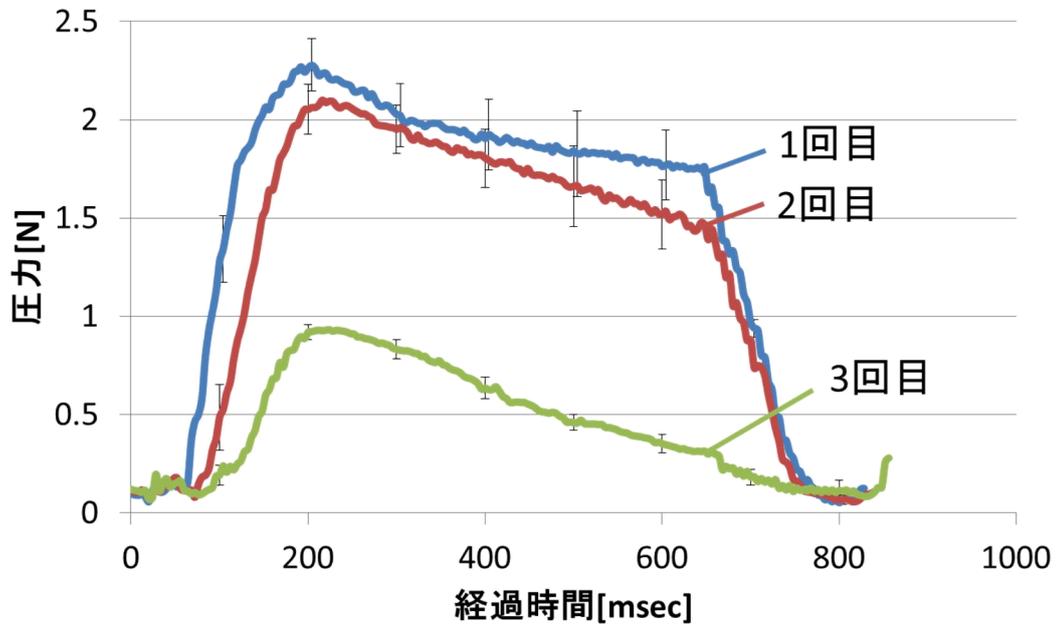


図 6.4 測定された圧力の時間変化

グラフの縦軸は測定された圧力の値[N]であり、横軸は噴射指令を送ってからの経過時間[ミリ秒]である。噴射回数を重ねるにつれて測定された圧力に低下が見られ、3回目の噴射時には、開放中に著しい圧力の低下が起きていることがわかる。

ここで、5.3章で記述した噴射口の先に圧力センサを取り付けて測定した噴射力と、本実験の結果を比較する。図 6.5 はそれぞれの実験方法によって記録した各噴射によって記録された圧力の最大値を比較したものである。また、図 6.6 は噴射の指令を送ってから最大圧力を記録するまでに要した時間（応答性）を比較したものである。

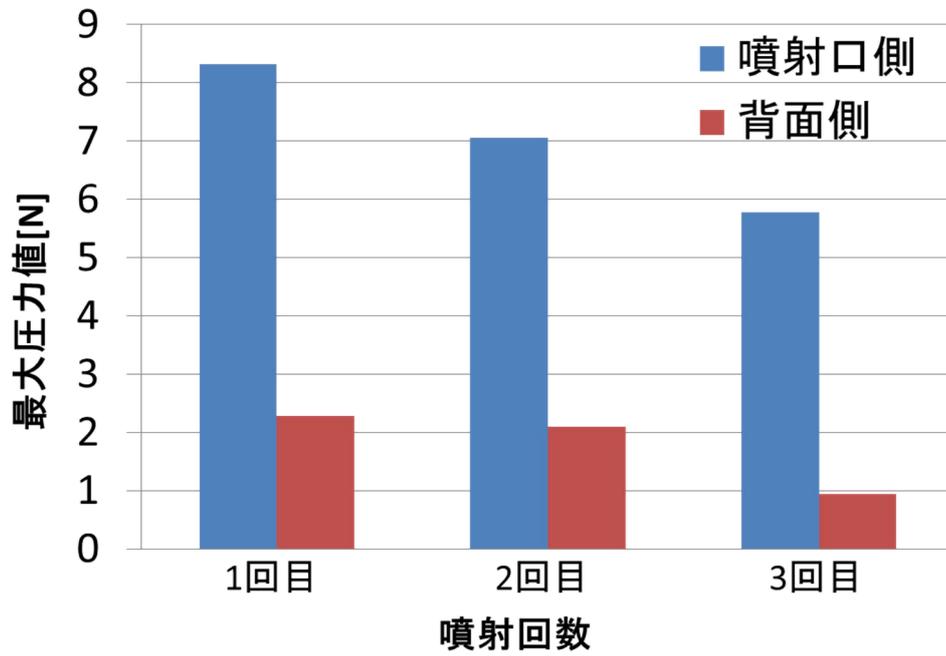


図 6.5 実験方法による測定圧力の比較

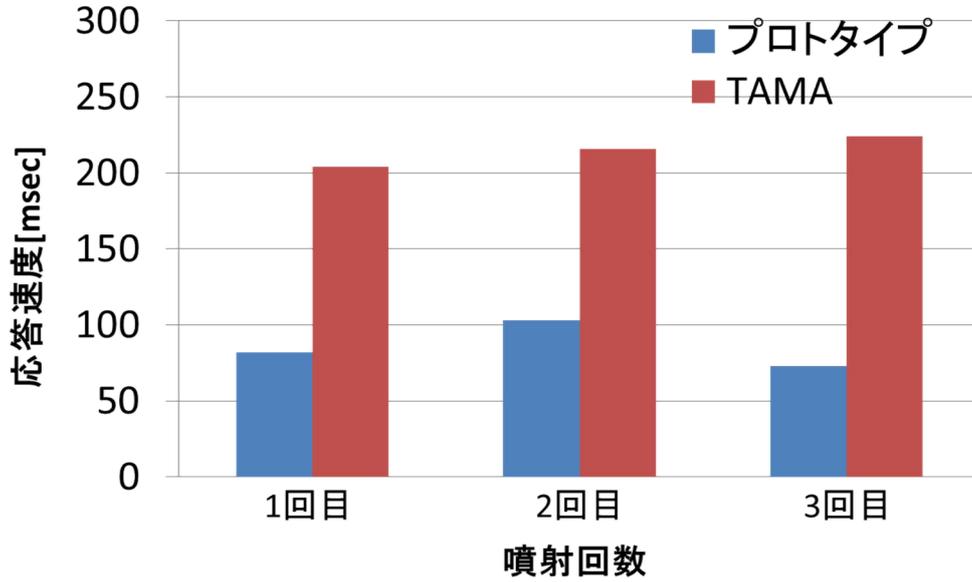


図 6.6 実験デバイスによる応答性の比較

それぞれの図において、青の棒グラフは前章で記述したプロトタイプを用いて、噴射口側に設置したセンサによって測定された圧力の最大値およびその応答速度、赤の棒グラフは TAMA を用いて本実験で測定された圧力の最大値とその応答速度（4 回の測定の平均値）である。それぞれの測定法における圧力の最大値と、噴射の指令を送ってから最大の圧力を観測するまでに要した時間を、エラー! 参照元が見つかりません。にまとめる。

表 6.1 実験法による最大圧力と応答速度の差異

	最大圧力[N]			応答速度[ミリ秒]		
	1 回目	2 回目	3 回目	1 回目	2 回目	3 回目
従来法 (プロトタイプ)	8.31	7.06	5.78	82	103	73
本実験法 (TAMA)	2.28	2.1	0.933	204	216	224
差	6.03	4.96	4.85	122	113	151

噴射口側で測定された最大圧力と本実験で測定された最大圧力の間には各噴射において 5~6N もの差が見られた。これは、測定法の違いによるものであると考えられる。前章で行った実験では、噴射口を覆う形で直接圧力センサを密着させていた。開放されたガスが噴射口付近に蓄積されたことにより、過大な圧力が測定されてしまったものと思われる。本実験によって測定された圧力は噴射ユニットが受ける反力を直接測定したものであり、より信頼できる結果であると言える。また、TAMA では歯車比を変更したことにより、プロトタイプ

に比べて平均約 129 ミリ秒の応答性低下が見られた。噴射の応答性はボールの軌道を変化させる上で非常に重要であり、より高効率のモータの利用および電源の改善を検討していく必要があると考えられる。

次に、この測定結果から、本実験条件における一度の噴射によってボールに与える力積を計算した。各カートリッジにおける各噴射で生じた力積の値を、表 6.2 にまとめる。

表 6.2 力積測定結果[Ns]

	1 回目	2 回目	3 回目
カートリッジ 1	1.24	0.90	0.36
カートリッジ 2	1.18	1.05	0.31
カートリッジ 3	0.98	0.99	0.35
カートリッジ 4	1.21	1.13	0.37
平均	1.15	1.02	0.35

結果を見ると、1 回目の噴射時と 2 回目の噴射時の力積には大きな差は見られないが、3 回目の噴射時に大きく減少していることがわかる。2 回目の噴射では、1 回目に比べて若干の力積の低下は見られたが、同等の軌道変化量を得られることが期待できる。また、4 本のカートリッジ間において、1 回目の噴射では 11.8%、2 回目の噴射では 9.4%の標準偏差が存在する。これは実験装置のずれ等の影響による測定誤差のほか、カートリッジの個体差も影響していると思われる。本システムで使用している CO2 カートリッジは本来自転車用であり、一定の圧力を供給するための製品ではない。より安定した軌道変化量を得るためには、一定の圧力を供給できる噴射力源を使用する必要がある。

また、図 6.7 は電源として 12V の AC アダプタを使用した場合（有線）の 1 回目の噴射による測定結果（カートリッジ 2 本の平均値）である。TAMA では電源の無線化を行ったことにより、取り出せる電流量の低下による応答性の低下が懸念されていた。しかし、図 6.7 に示された通り、バッテリーを使用した場合と AC アダプタを使用した場合の応答性に大きな差は無く、十分なパフォーマンスを無線で発揮できることがわかった。ただし、電池の消耗による出力の低下には注意する必要がある。

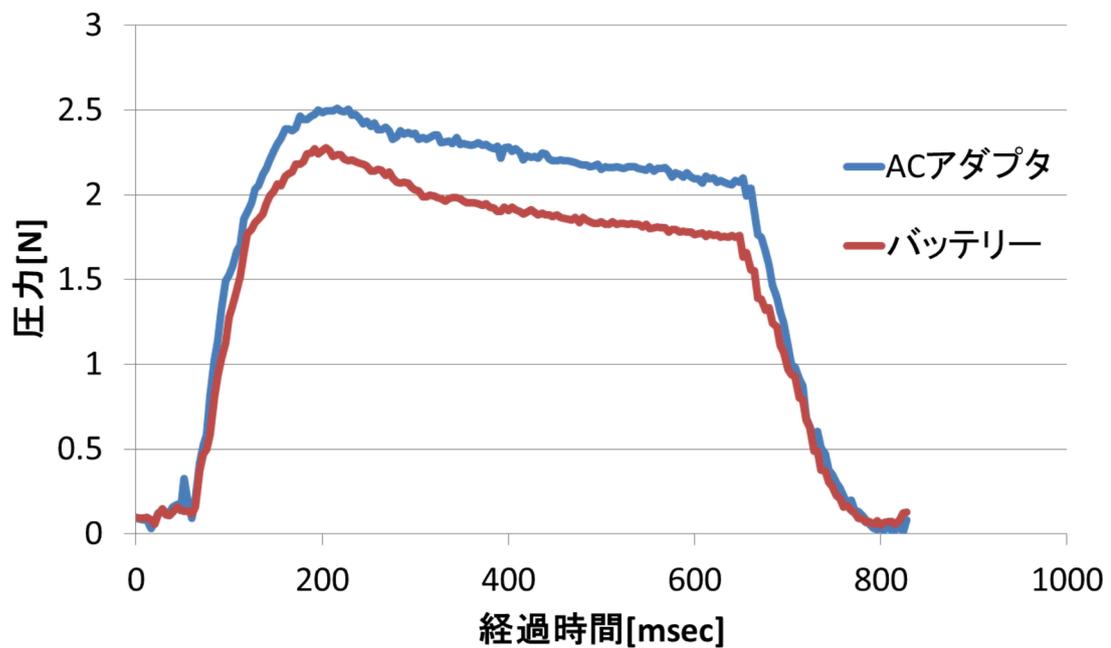


図 6.7 電源による応答性の比較

## 6.5 軌道変化の計測

次に、実際にボールの落下時における圧縮ガスの噴射に寄る軌道変化量を計測することによって、本システムの軌道変化能力を評価する。図 6.2 に示されているように、投げ上げ時において軌道変化が引き起こせることは目視によっ

て既に確認した。しかしながら、図の実験において噴射時にボールが描いている軌道は、投げ上げの角度やボールの回転の影響も受けている。そこで、噴射の反力のみによる軌道変化量を計測するため、ボールに回転を与えずに落下させる実験装置を用いて落下軌道変化実験を行い、モーションキャプチャシステムによりその軌道を計測した。

### 6.5.1 実験方法

実験環境の概略図を図 6.8 に示す。

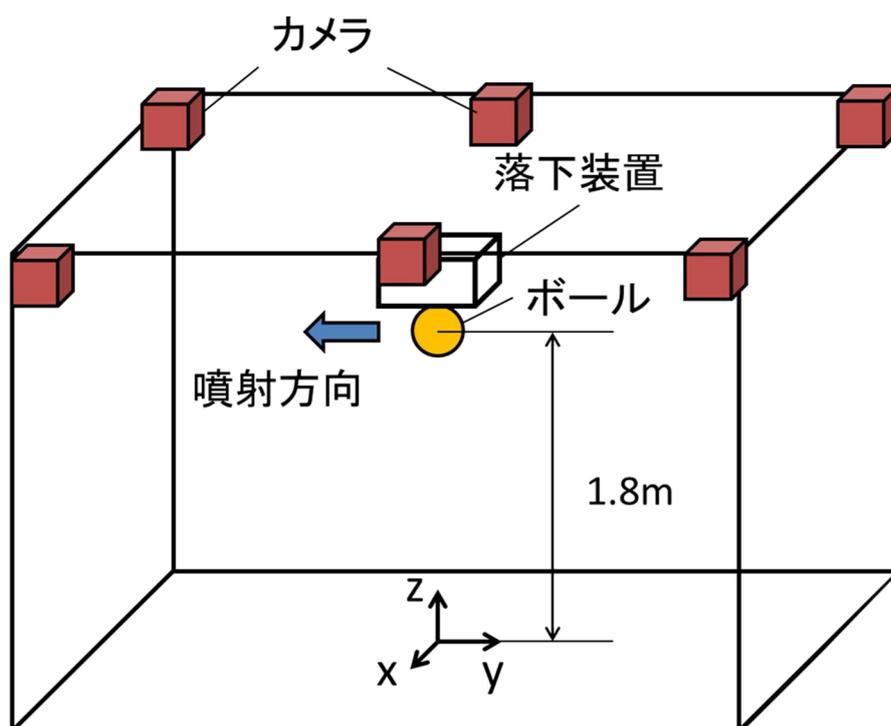


図 6.8 実験環境の概略図

落下装置はソレノイドとネオジウム磁石から構成され、ボール内部に埋め込んだ磁石と装置に装着された磁石とを引き離すことで、回転をかけることなくボ

ールを落下させることが出来る．また，落下装置に取り付けられた 2 本の針をボール表面に空けられた穴に通すことによって，設置時の噴射口の方向を固定している．ボールには表面に 6 個のマーカータリ取り付け，周囲に設置した 6 台のカメラ（OptiTrack S250e）によって中心位置座標を追跡した．このときのボール全体の質量は 440g（CO<sub>2</sub> ガスを含む）であった．ボールをセットした落下装置の外観を図 6.9 に示す．

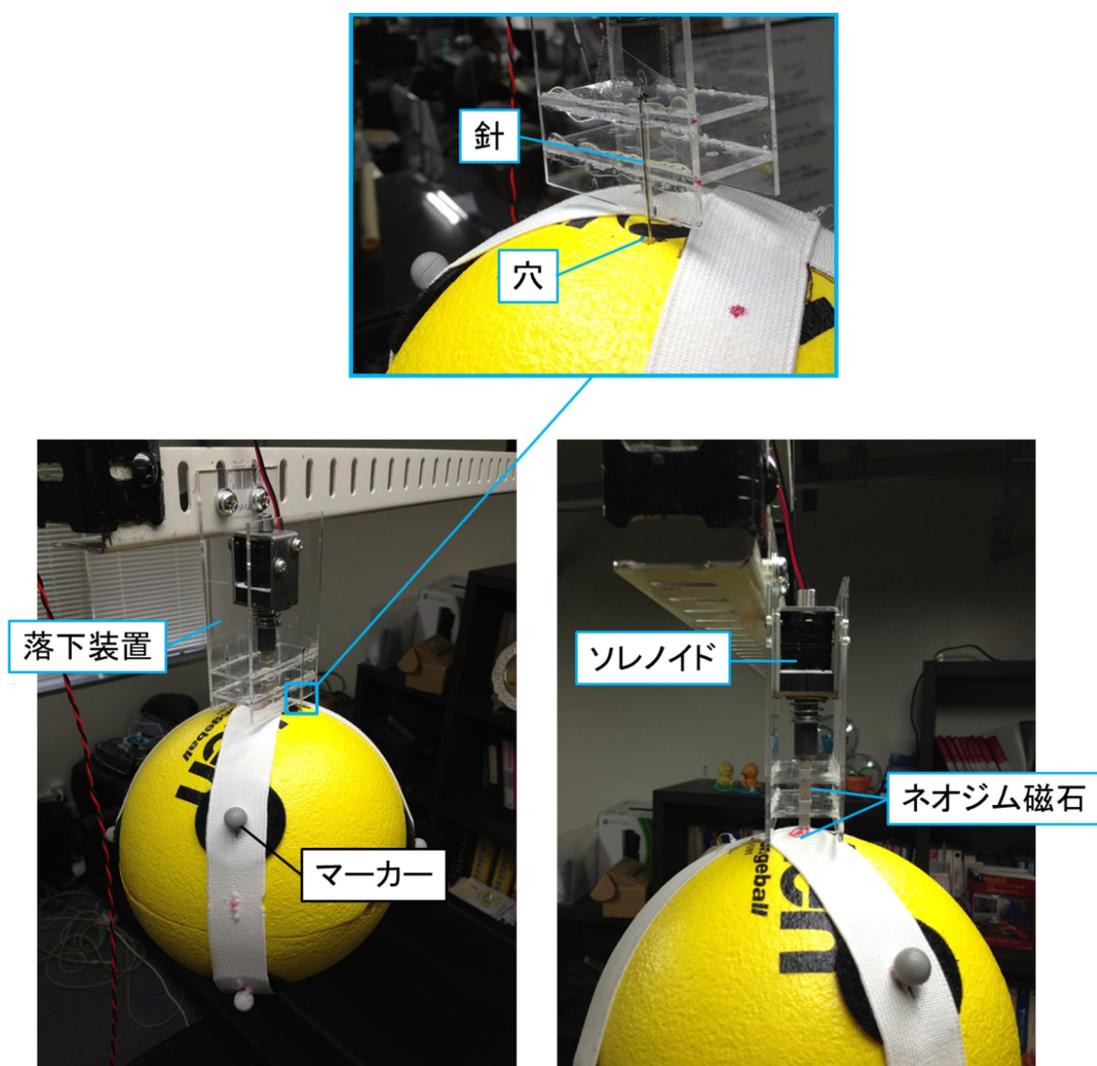


図 6.9 落下装置外観

ボールは床から約 1.8m の高さに設置し、落下の指令と噴射の指令を同時に送った際の軌道を計測した。実験の条件は以下の通りである。

- 噴射方向は図 6.8 に示した座標系における, y 軸に対して負の方向とした
- 一度の噴射における弁の開放時間は 500 ミリ秒とした
- 実験は 9 本のカートリッジに対して行い, 1 本のカートリッジにつき 2~3 回の噴射を行った
- カートリッジの温度を常温に戻すため, 噴射毎に約 30 分の間隔を空け計測を行った
- 実験時の室温は 23 度であった。

### 6.5.2 軌道計測結果

図 6.10~図 6.12 は落下の指令を送ってからボールが着地するまでの, 各カートリッジにおける水平方向の軌道を重ねあわせたグラフである。図 6.13 は噴射を行わず自然落下させた場合の軌道を示している。また, 指令を送ってから着地するまでに要した時間の平均値と水平方向に関する移動した距離の絶対値を表 6.3 にまとめる

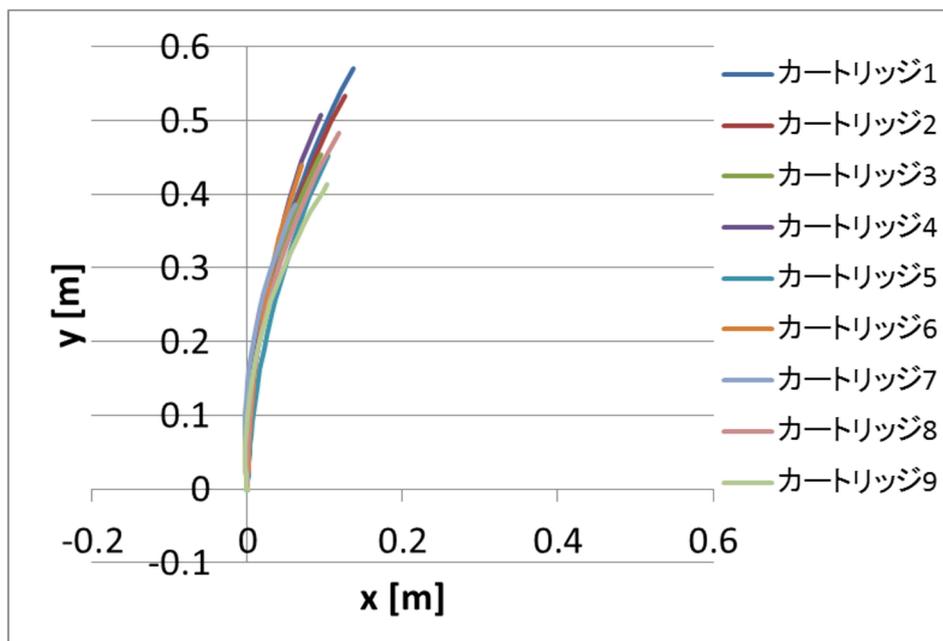


図 6.10 1回目の噴射による軌道変化

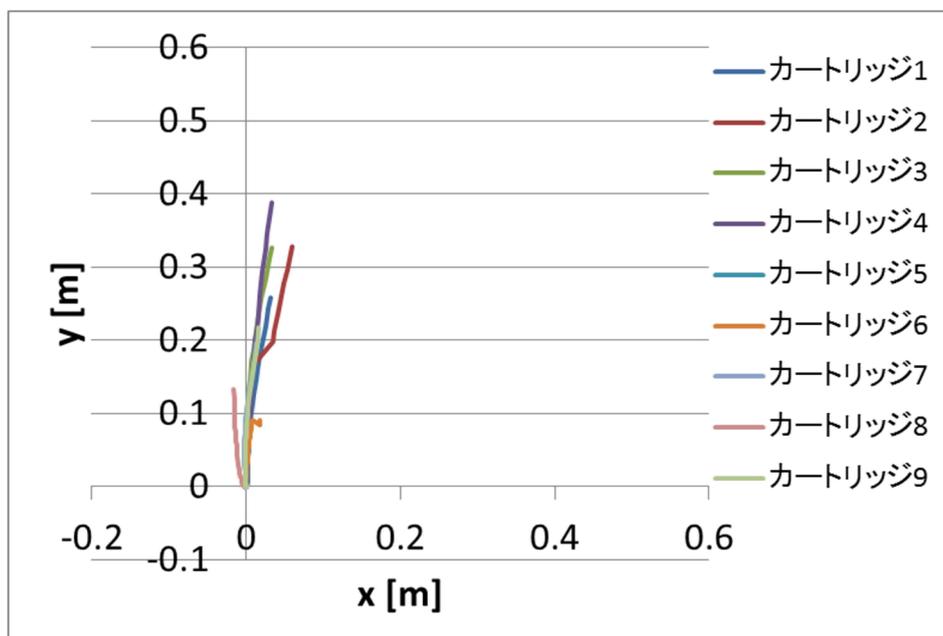


図 6.11 2回目の噴射による軌道変化

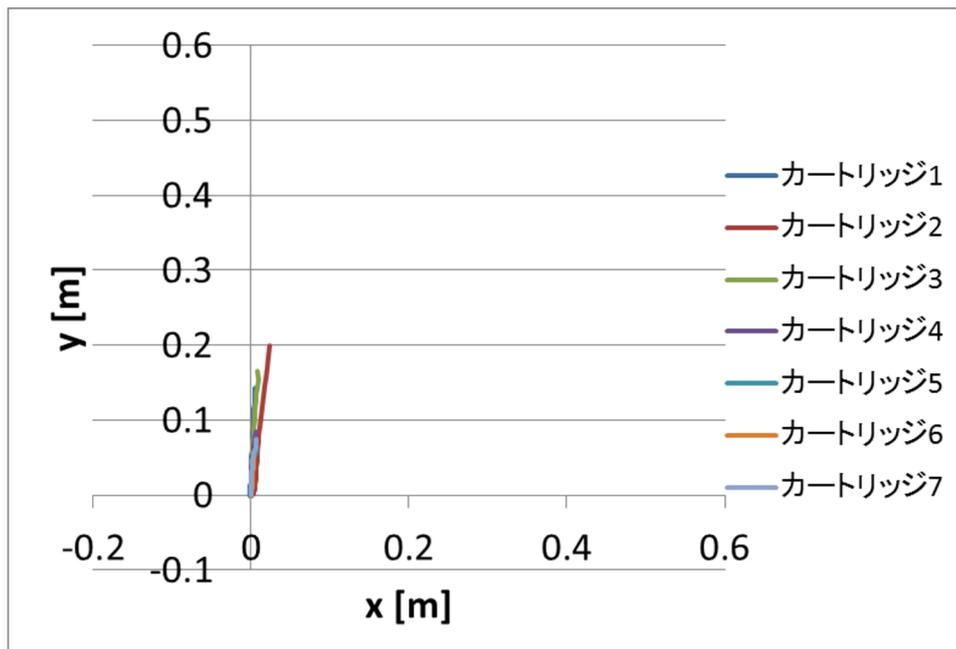


図 6.12 3回目の噴射による軌道変化

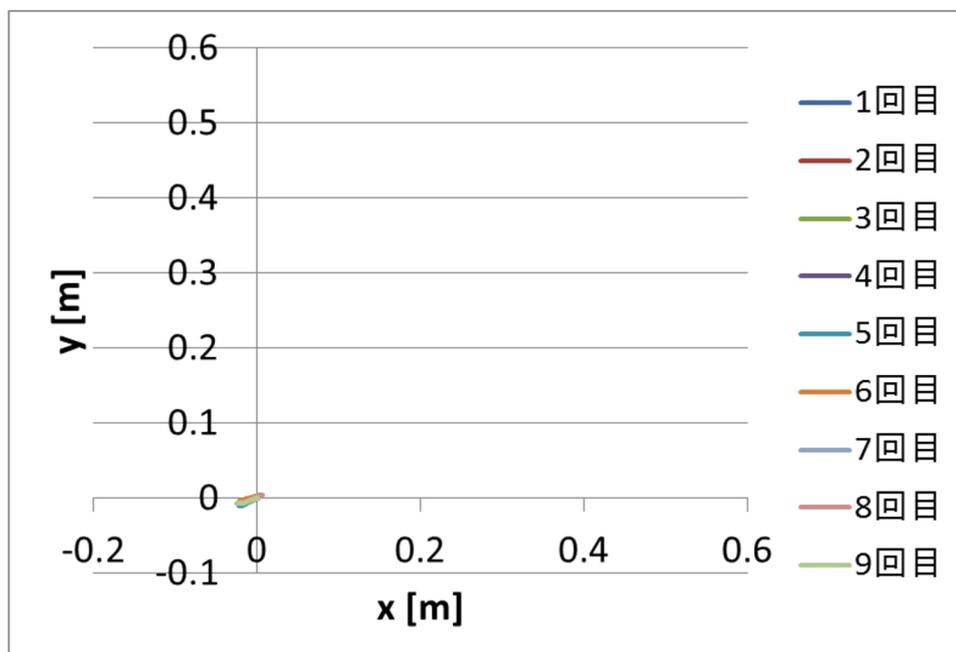


図 6.13 非噴射時における水平方向軌道

表 6.3 落下実験結果

	平均落下時間 [msec]	平均水平方向移動量 [m]
噴射 1 回目	710.9	0.5408
噴射 2 回目	719.9	0.2647
噴射 3 回目	719.4	0.1216
非噴射時	716.2	0.0299

実験の結果、本条件においては各噴射によって水平方向に数 10cm の移動が計測された。しかし、噴射を繰り返すに従って移動量は減少していった。3 回目の噴射による移動量の平均値は約 12cm であったが、これはほとんど目視では確認できず、目に見える派手な軌道変化を引き起こす事が出来たのは、一本のカートリッジにつき 2 度のみであった。しかしながら、3 回目の噴射においてもボール 0.5~1 個分の移動が可能であるといえる。

### 6.5.3 シミュレーション結果との比較

表 6.3 に示した各噴射回数における平均落下時間を用いて、6.4 章で測定した力積の平均値から計算した噴射による水平方向移動距離の理論値を表 6.4 に示す。

表 6.4 噴射による移動距離の理論値

	理論値 [m]	実測値 [m]
噴射 1 回目	0.866	0.5408
噴射 2 回目	0.756	0.2647
噴射 3 回目	0.287	0.1216
非噴射時	0	0.0299

また、図 6.14～図 6.16 は実験によって計測された移動量と時間経過の関係を示したものである。

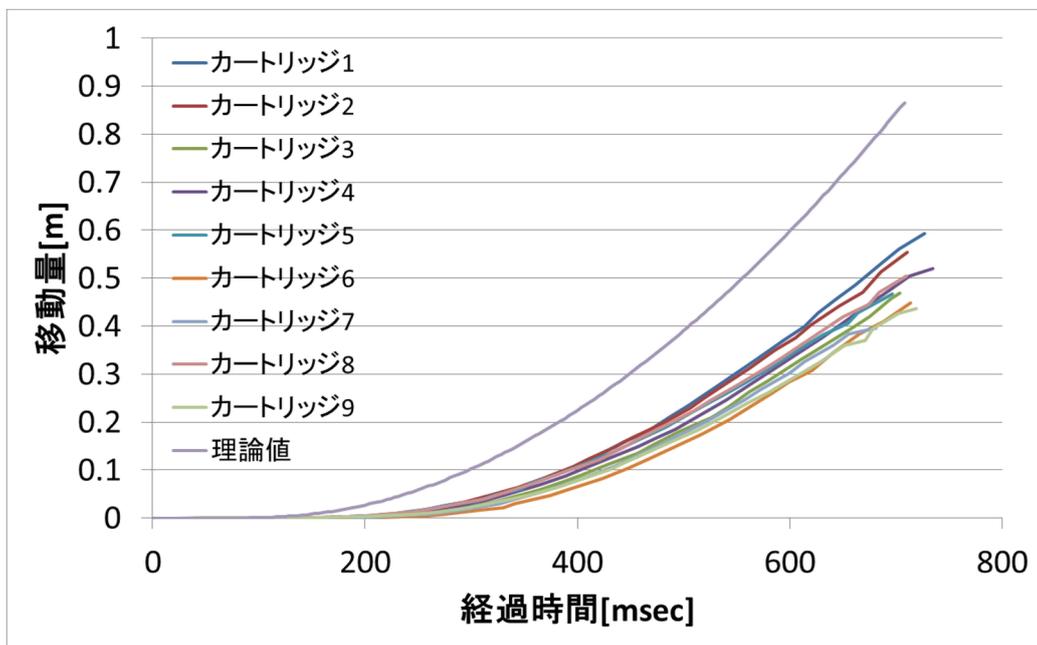


図 6.14 1 回目の噴射時における水平方向移動量と時間の関係

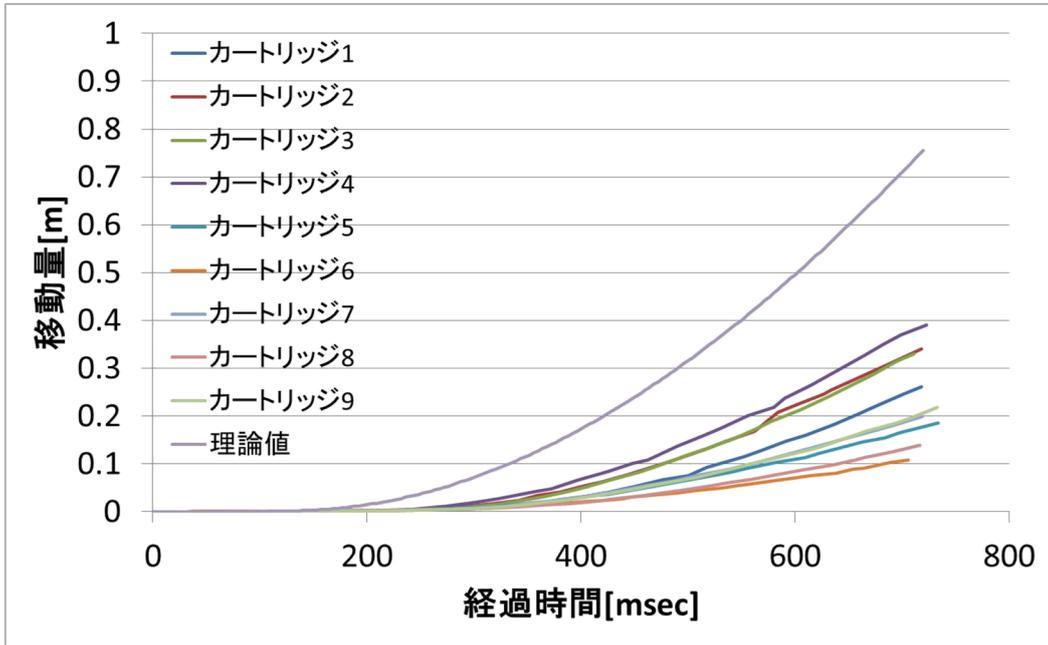


図 6.15 2回目の噴射時における水平方向移動量と時間の関係

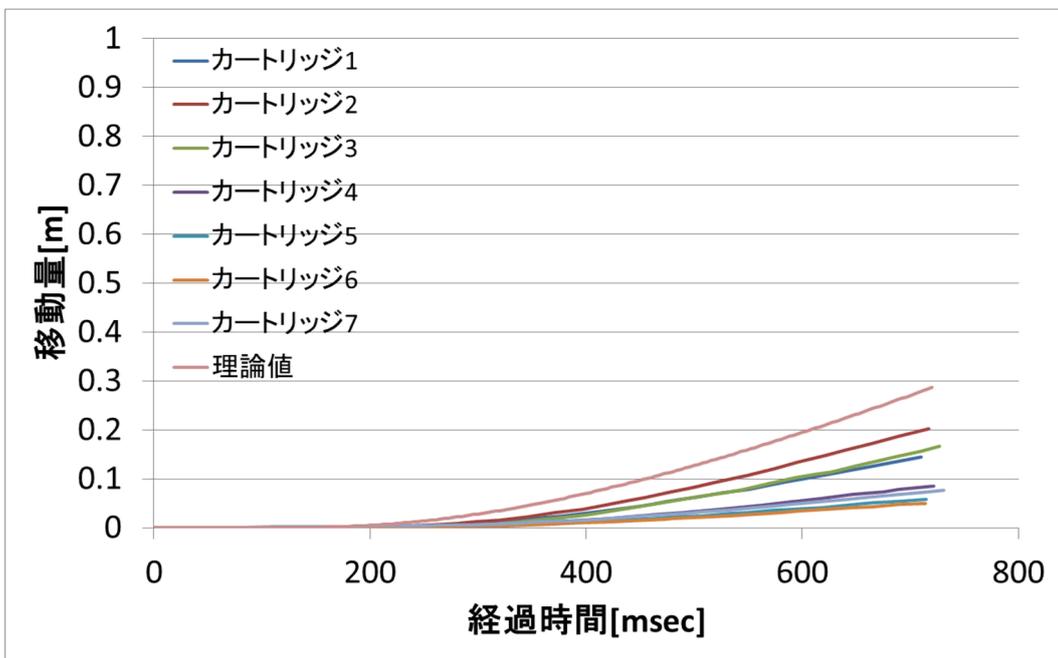


図 6.16 3回目の噴射時における水平方向移動量と時間の関係

これらの結果からわかるように、実際に計測された水平方向移動量は各噴射において理論値を下回る結果となった。考えられる原因として、シミュレーション時において(1)バッテリーの消耗による応答性の低下、(2)カートリッジ温度の低下、(3)回転方向へのエネルギーの消費、(4)ボールの受ける空気抵抗、といった要素が考慮されていなかった事が挙げられる。

要素(1)に関して、本実験では、全ての試行において同一のバッテリーを使用している。試行間のインターバルに何度か充電を行ったが、回数を重ねるにつれて確実に消耗しており、実験後半では弁の開閉の応答性が低下していたことが考えられる。図 6.14～図 6.16 においても、後半に使用したカートリッジほど移動量が小さい傾向が見られるが、これは応答性の低下による影響であると考えられる。また、実験中には噴射後に弁を完全に閉鎖出来ない場合が数度あり、バッテリーの消耗によってモータ出力の低下も見られた。その都度直接手で弁を閉め直したが、ガスの消耗は避けられず、2回目以降の噴射反力に影響を与えていると思われる。

また要素(2)に関して、本システムでは、一度噴射を行うと熱力学法則によりカートリッジ内の気体温度は低下し、圧力も大きく低下する。そのため本実験では、噴射時のカートリッジ内部の気体温度を常温に近づけるため、試行毎に約 30 分のインターバルを設けた。しかしながら、繰り返しの実験により噴射ユニット全体の温度が低下し、気体温度の上昇効率は低下していた。さらに、弁閉鎖のためのトルク不足によるわずかなガスの漏出も気体温度上昇の妨げとなっていたと考えられる。本実験では正確なカートリッジ温度の測定は行っておらず、インターバル後に気体温度が常温となったことは確認できていない、そのため、低温・低圧力の状態で実験を行っていた可能性は十分に考えられる。

本実験結果では、1 回目の噴射では理論値の 65%の水平方向移動量が得られたが、2 回目、3 回目の噴射ではそれぞれ 35%、42%と理論値を下回った割合が増大している。これは要素(1)(2)による影響が大きいものと考えられる。

また、ボールの回転も移動量の低下に影響していると考えられる。本実験では、モーションキャプチャによって軌道とともにボールの回転角度も計測した。各試行における、着地までに回転した角度の平均値を表 6.5 に示す。また、ロール角、ピッチ角、ヨー角それぞれの回転軸方向は図 6.17 に示した通りである。

表 6.5 ボールの回転角度[° ]

	ロール角	ピッチ角	ヨー角
噴射 1 回目	14.21	26.15	74.01
噴射 2 回目	9.15	12.81	34.17
噴射 3 回目	3.65	7.22	6.28
非噴射時	1.13	14.21	2.45

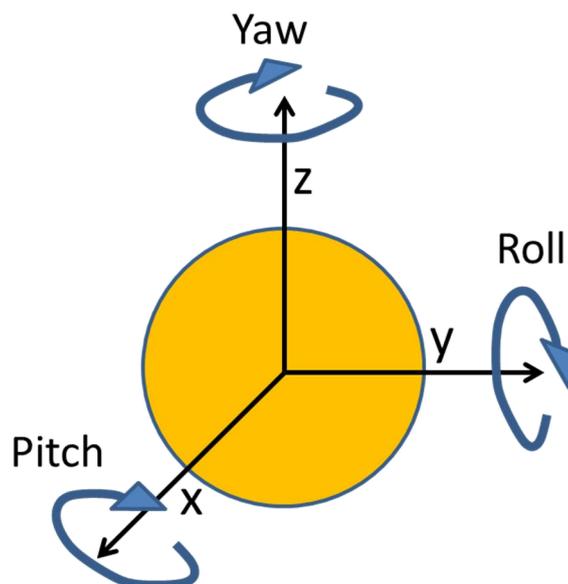


図 6.17 ボールの回転軸

非噴射時の回転角度を見ると、ロールおよびヨー方向に関しては大きな回転をすることなく落下していることがわかる。一方1回目、2回目の噴射の結果を見ると、ヨー方向に比較的大きな回転が生じていることがわかる。この結果より、噴射のエネルギーの一部が進行方向への推進力だけでなくヨー方向への回転に使われていたことが言える。図 6.10 において軌道にカーブが見られるのは、この回転によるものであると考えられる。回転の原因としては、噴射口の傾き、重心のずれによる影響が考えられる。この回転を抑え、より効率的に一方向への軌道変化を引き起こすためには、噴射口をボールの表面に対して垂直に取り付けること、および重心位置の調整が必要不可欠であると言える。

## 6.6 考察

実験により、TAMA が完全にワイヤレスで動作し、また圧縮ガスの噴射によって確かに軌道変化を引き起こすことが可能であることが示された。落下実験によって計測された軌道変化量は理論値を大きく下回っていたものの、従来のスポーツでは起こりえなかったような軌道変化を引き起こすことが出来た。今後無線化に伴う応答性の不足や、噴射口位置および重心位置の調整の甘さといった問題を解決していくことで、より大きな変化を引き起こすことが出来、デジタルスポーツへの特殊効果としての貢献が期待できる。

しかしながら、TAMA は現状 2 つの大きな問題を抱えている。一つは噴射口が一つしか存在しないことによる、回転への弱さである。スポーツでは、ボールの飛行には当然回転が伴う。しかし、現状のシステムでは高速回転するボールの軌道を特定の一方方向に変化させることは困難であり、軌道をコントロールする、というステップに進むためには、姿勢に応じて複数の噴射口を協調制御

する、あるいは姿勢そのものを制御するための機能を追加する、といった改良が必要となる。もう一つの問題は、推進力源として CO<sub>2</sub> カートリッジを使用していることによる制約である。現状のシステムでは、1 度噴射を行うと、熱力学法則に則ってカートリッジ内部の気体温度が著しく低下する。温度の低下は噴射力の低下につながるため、最大限のパフォーマンスを発揮するためには、気体温度が常温に戻るまで待機するか、カートリッジを温める機能をボールに追加する必要がある。また、カートリッジ 1 本によって引き起こす事の出来る軌道変化量およびその使用回数にも制限がある。力積の測定の結果、500 ミリ秒ずつ弁を開放した場合、理論上 2 回目の噴射まで同等の軌道変化を引き起こすことが出来る。しかしながら、実際に落下実験を行った結果、軌道変化量は 2 回目以降著しく低下し、安定した軌道変化量を得られるのは 1 回目の噴射時のみであることが明らかとなった。これらの問題はカートリッジを噴射毎に交換することで解決できるが、デジタルスポーツにおいては、こうした問題は特殊能力を使用するための制約として利用することも出来ると考えられる。軌道変化機能の使用間隔や回数に制限を設けることで特殊能力としての価値が高まり、デジタルスポーツのゲーム性、戦略性の向上に貢献することが期待される。

## 第7章

# 入力方法の検討

### 7.1 Photoelastic Ball の利用

空中での軌道変化を目的として開発した TAMA では、その変化方向、効果量、あるいはそのタイミングを事前に入力できる必要がある。本章ではその入力装置として Photoelastic Ball[27] の利用を検討する。Photoelastic Ball はデジタルスポーツのために開発されたボール型圧力計測システム。4 章でも考察したように、握り動作の中で押下力とその方向を同時に入力することが出来、入力可能情報量と秘密性に優れている。また、ボールにかかった圧力分布も計測することが出来るため、人が持っているか地面に置かれているか、人が持っている場合はその持ち方（片手か両手か、握り方等）の判別も可能となると考えられる。本章では、Photoelastic Ball のシステムの改良およびこれを用いたボールへの入力方法の検討を行う。

### 7.2 システムの再現

本章では、実際に PhotoelasticBall のシステムを再現し、実験によりボールへの入力、その他のデジタルスポーツへの利用方法に関して考察する。

#### 7.2.1 従来デバイスの構成

新田らが開発した PhotoelasticBall は、偏光の性質と光弾性効果を利用した圧力計測システムである。ボール表面を透明弾性体で形成し、内部に設置した

LED と光センサにより，光弾性効果による干渉縞の観察を行うことでボール表面への圧力計測を行う．図 7.1 にシステムの概要図を示す．

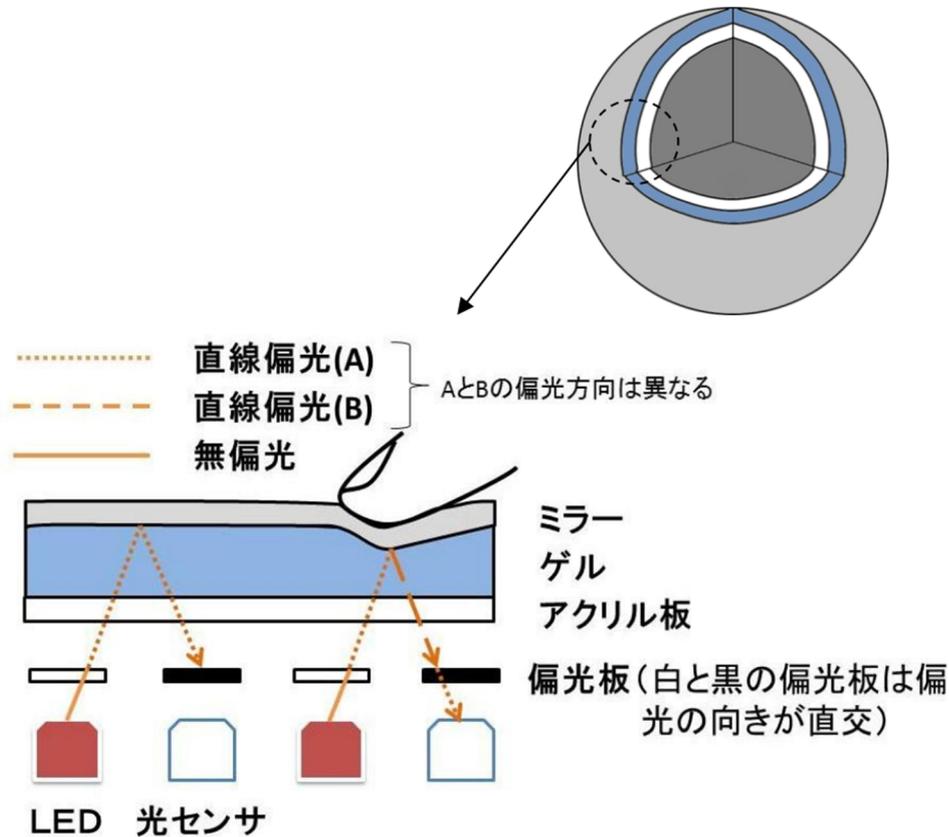


図 7.1 PhotoelasticBall のシステム概要[27]

本システムは，光センサと LED を含むセンサ基板，偏光板，アクリル板，ゲル，ミラーの 5 層からなっており，ゲルの変形が無い時は光センサに光源の光が差し込まないように LED と光センサの上部の偏光板は互いに偏光の向きが直行するように配置されている．また，プロトタイプでは光センサおよび LED として，可視光フォトリフレクタ (KR1210-AA01, 新光電子社製)，ゲル層として RTV ゴム，ミラー層としてアルミホイルを使用している．新田らは実験により，圧力値の計測，方向の認識が可能であることを確認した．

## 7.2.2 実験用プロトタイプの作製

ここで、PhotoelasticBall のシステムを利用したボールへの入力方法を検討するにあたり、実験用のプロトタイプの製作を行う。初期段階ではシステムの一部のみに注目するものとし、センサを 9 個配置したのみの単純な平面型実験装置を製作する。ここで、新田らのシステムでは可視光フォトリフレクタを使用しているため、ミラー層の隙間からの自然光による影響がノイズとして現れることがあった。本研究で再現するシステムでは、ノイズを低減するため、光源を赤外光に変更した。

実際に制作した実験用プロトタイプの外観を図 7.2 に示す。層構成は図 7.1 に示したものと同様であり、フォトリフレクタの上に偏光板を貼り付けたアクリル板（厚さ 3mm）を乗せ、ゲル（厚さ 10mm）、ミラー層を積層している。センサおよび LED には赤外光式反射型フォトリフレクタ（RPR-220）、ミラー層にはアルミホイルを使用した。また偏光板には Asahi Kasei WGF を使用しており、赤外光、可視光両方の偏光方向を限定することが出来る。センサの出力は Arduino の A/D 変換ポートにより取得した。

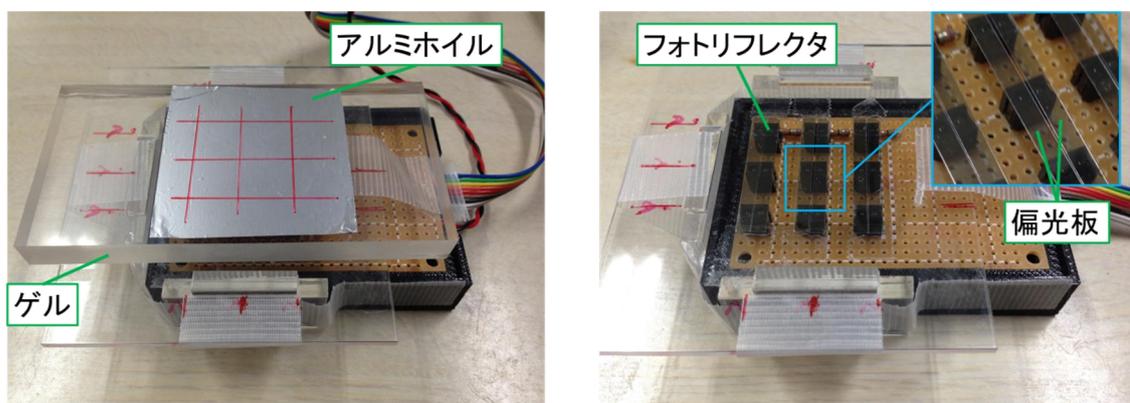


図 7.2 プロトタイプ外観

## 7.3 ボール表面へのジェスチャ入力

PhotoelasticBall のデジタルスポーツへの応用法としては、以下の様なものが考えられる。

- ボールを把持した指による押下を利用した入力
- ボール表面へのタッチによるジェスチャ入力
- ボールの状態の認識（プレイヤーが把持しているか、地面にあるか）

ここで、把持による入力および状態認識の検証実験を行うためには、球体状のシステム、および高解像度なセンサ配置が必要不可欠となる。今回は、実験用プロトタイプハードウェア上の制約から、特にボール表面をなぞることによるジェスチャ入力について検証・考察を行う。

TAMA を特殊効果として使用する場合、大きなジェスチャを伴う入力は相手プレイヤーにその入力内容が悟られてしまうため望ましくない。そこで、本システムの特長の一つである圧力の分布が計測可能であることを利用し、表面に指で軌道を描くことによるジェスチャ入力を行うことを考える。表面へのタッチによるジェスチャ入力は、使用可能な状況は限られるものの、その軌道パターンを利用して様々な情報をボールに入力することが出来ると考えられる。以下では、実験によりその実現可能性を検証する。

## 7.4 実験

### 7.4.1 実験方法

本プロトタイプでは、図 7.2 のようにアルミ層の表面に、センサ位置を示すグリッド線を引いている。各線の交点がセンサの直上を示している。ここで、

便宜上図 7.3 のようにデバイス上の位置に記号を設定する。各センサの真上を数字(1)~(9)、センサ 4 つの中央の点を記号(A)~(D)で示した。

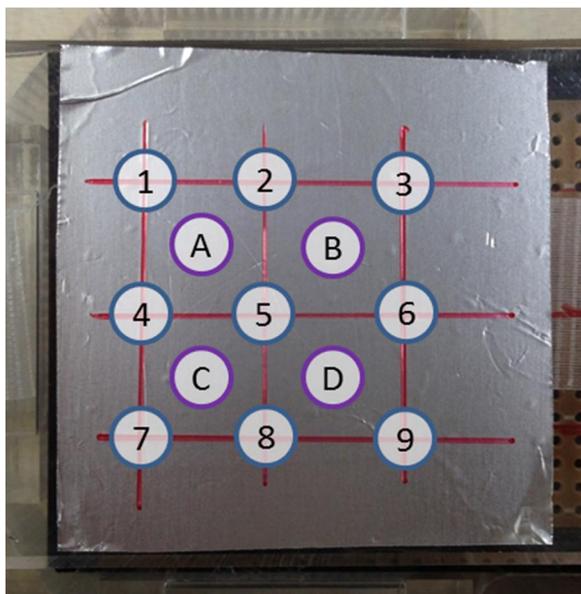
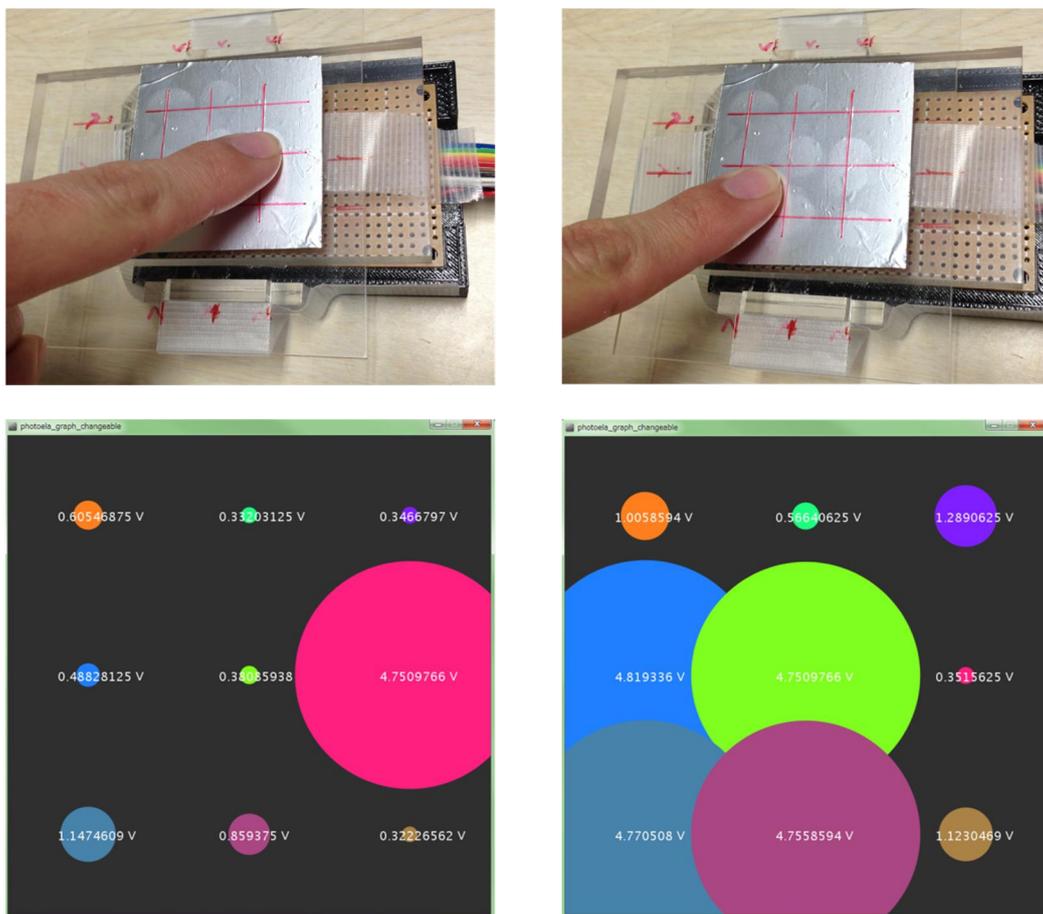


図 7.3 押下点の記号設定

また実験のため、各センサから出力されたアナログ値を電圧値 (0~5V) に変換し、それを可視化するプログラムを作成した。図 7.4 のように、センサの位置に対応した円の大きさが、出力された電圧値に応じて変化する。



(a) 点(6)を押下した場合

(b) 点(C)を押下した場合

図 7.4 センサ値の可視化

本実験では、このプログラムを使用して、指先によって表面に軌道を描いた際の出力の変化を観察した。ここでは記号(A)を始点とし、(A)→(B)→(5)→(C)→(D)という軌道を描いた (図 7.5)。

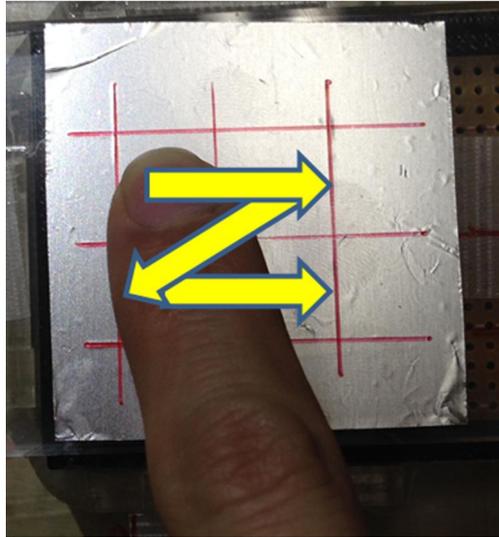
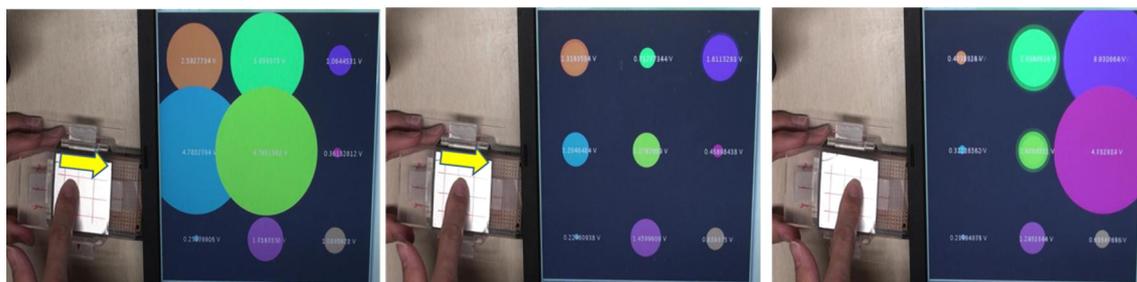


図 7.5 実験で描いた軌道

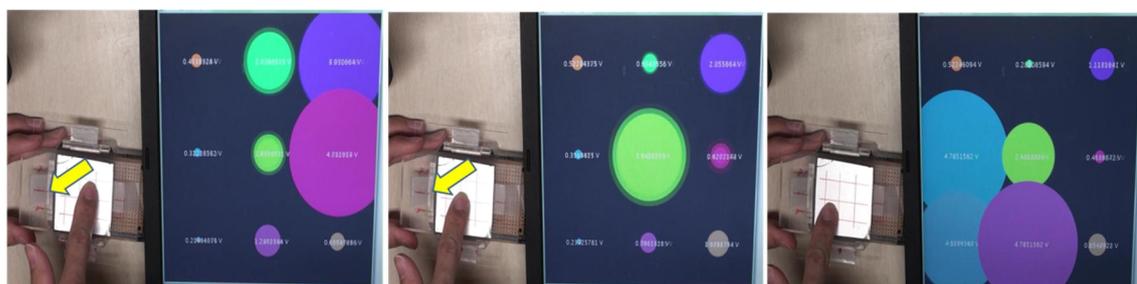
#### 7.4.2 実験結果・考察

実験の結果を図 7.6 に示す。実験の結果、指の動きに応じて反応するセンサが変化していることが確認できた。また、図 7.6(a)中央と図 7.6 (c)中央のように、2つのセンサの間を押下した場合は反応が現れにくいこともわかる。これは、使用している光源の指向性が強いことによるものであると考えられる。タッチ位置検出の分解能を向上させるためには、センサをより高密度で配置するか、偏光を保ったまま光をゲル内に拡散させるための措置を行う必要がある。また本システムでは赤外線光源を使用したことにより、外光による強い影響は現れなかった。しかしながら、現状のプロトタイプではアルミホイルについての細かい傷などによって大きなノイズが生じることがあり、ボールへの実装にあたっては特にミラー層の形成方法の検討が必要となると考えられる。

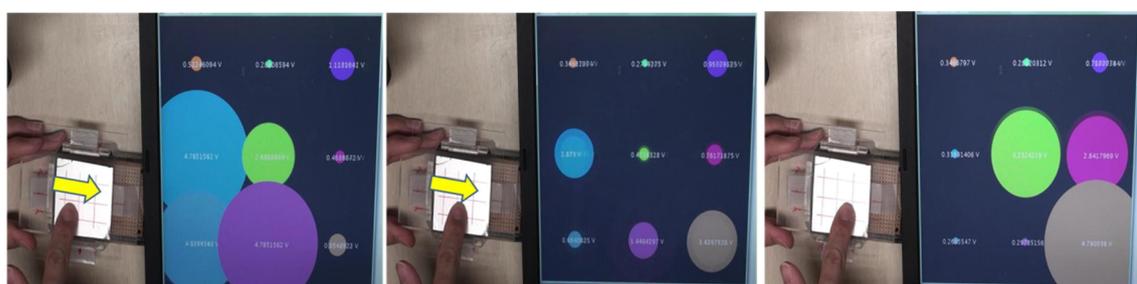
本実験の結果、PhotoelasticBall の原理を利用したボール表面への指先によるジェスチャ入力の実現可能性が示された。また、赤外線 LED の利用により、ノイズの低減やさらなる小型化、分解能の向上も期待される。



(a) (A) → (B)



(b) (B) → (5) → (C)



(c) (C) → (D)

図 7.6 ジェスチャ軌道とセンサ出力

## 第8章

### 想定使用例

#### 8.1 TAMA の能力

6 章で実験により測定した力積値から、500 ミリ秒の噴射によってボールに与えることの出来る移動量を計算することが出来る。しかしながら、実際に落下実験により計測された移動量は 1 回目の噴射では理論値の 62.4%、2 回目の噴射では理論値の 35.0%、3 回目の噴射では 42.4%の結果となった。表 8.1 は、測定した力積値から計算した 500 ミリ秒の噴射完了時におけるボールの移動量の理論値、および上記の割合を用いて計算したその予測値をまとめたものである。なお、500 ミリ秒弁を開放した際の噴射動作の総時間は平均 822 ミリ秒である。

表 8.1 噴射により付加できる移動量[m]

	理論値	予測値
噴射 1 回目	1.19	0.743
噴射 2 回目	1.04	0.363
噴射 3 回目	0.396	0.168

本条件においては、見た目にも派手な軌道変化を引き起こすことが可能なのは各カートリッジにおける 1~2 回目の噴射時のみであると考えられる。しかしながら 3 回目の噴射では派手な変化は引き起こせないものの、ドッジボール約 1

個分程度の移動が可能である。つまり、見た目にも派手な効果を実現できるのは 1~2 回が限度であるが、小さな効果に絞ることで、より多くの回数の軌道変化が可能となると考えられる。

ただし、ここで重視すべきは使用可能回数の多少ではなく、軌道変化という特殊効果のスポーツにおける適切な位置づけである。たとえば、

- 大きな変化を 2 回まで引き起こせるような噴射条件を設定し、「各チーム一度だけ使える必殺技」として使用する
- 小さな効果を繰り返し使うことで運動が苦手なプレイヤーの投げたボールの軌道を調整する、というようなハンディキャップとして利用する

このように、TAMA は適切なゲームデザインと組み合わせることによって、十分な効果を発揮できると考えられる。以下では、TAMA の持つ軌道変化能力に基づいて、引き起こせる特殊効果、およびそのデジタルスポーツにおける想定使用例を検討する。

## 8.2 特殊能力としての利用

TAMA では、推進力発生装置を内蔵することで、空気力学的効果などによらない、物理法則を超えた軌道を描くボールを実現する。ボールがプレイヤーの身体を離れた後に動的に大きな軌道変化を起こすことが可能となるため、相手の手元で突然軌道が変化する、といったいわゆる「魔球」としての利用が期待できる。さらに、重力に反して浮き上がるボールのような、新たな変化球の実現にも貢献する。

例として、ドッジボールにおいて特殊効果として使用する場合を考える。直線的なボールの軌道は読みやすく、ドッジボールにおいては多くが避けられる

かキャッチされてしまう．ここでガスの噴射による軌道変化を利用することで、以下のような利用法が考えられる．

- 誰にも当たらないような軌道で投げられたボールが、突然プレイヤーの方へ向く
- 手元で突然軌道を曲げ、キャッチしづらくする
- 手元で突然速度を変え、キャッチのタイミングをずらす

ここで、TAMA において 500 ミリ秒の噴射によって生じる水平方向の移動量は 0.74m である．このことから、上記のように、相手プレイヤーの真横を通り抜けるように投げられたボールが突然ヒットする、手元でボールが足や肩といったキャッチしづらい方向へ軌道変化する、といった使用法が実現可能であると考えられる．また、より短時間の噴射でもボール 1 つ分程度の距離の移動であれば実現可能であり、派手さは無くとも変化球としては十分貢献可能であると考えられる．ドッジボール以外のスポーツにおいても、野球における変化球としての利用や、バスケットボールにおける新たなパスコースの創出など、特殊効果として様々な利用が可能である．

また、TAMA ではエネルギー源の容量の制約から、大きな軌道変化を引き起こせる回数に制限がある．デジタルスポーツにおいては、特殊効果の使用回数制限と言い換えることが出来、ルールや条件を適切に設定することで、ゲーム性・戦略性の向上に貢献することが期待される．

### 8.3 ハンディキャップとしての利用

本システムは、プレイヤーの運動能力や技術の補助や、個々のプレイヤーに対するスポーツの難易度調節にも利用可能であると考えられる．ここで、大人と子

.....

供のような、身体能力に大きな差がある者同士がスポーツで対戦する場合を考える。軌道変化が自由に起こせると仮定すると、弱い立場である子供のプレイヤーに対して有利に働くように、あるいは大人のプレイヤーに対して不利に働くように使用することで、その試合のバランス調整が可能となる。例えばドッジボールにおいて、大人プレイヤーが投げたボールの軌道を子供プレイヤーの前で逸らす、あるいはスピードを減速するなどして回避／キャッチしやすくする、といった利用法が挙げられる。また、バスケットボールにおいて子供プレイヤーによるシュートの飛距離や方向を修正し軌道をゴールへ導くなど、技術の補助を行うような利用も考えられる。

TAMA においては噴射によって付加できる速度が 1 回目の噴射においても平均 1.69m/s とスポーツにおいては微小であり、加減速への利用は難しい。しかしながら小さな軌道の修正や変化球を目的とするのであれば十分可能な量の変化を引き起こすことができる。つまり、弱い立場のプレイヤーのみが使える効果として、バスケットボールのシュート軌道補正や、ドッジボールにおける変化球は十分実現可能であると考えられ、ハンディキャップとしての貢献が期待できる。本システムをハンディキャップとして利用することで実力の拮抗状態を作り出すことが出来、誰もが全力でスポーツを楽しむことが可能となることが期待される。

## 第9章

### 考察

#### 9.1 TAMA の性能と課題

以下に、本研究で開発した TAMA の特長をまとめる

- 圧縮 CO<sub>2</sub> ガスを噴射することで従来のボールでは実現し得なかった軌道変化が可能
- 全体質量はドッジボールと同等であり、比較的軽量である
- 完全に無線で動作する
- センサや無線モジュールを搭載したことにより、簡単な情報の入出力が可能

本研究では実験により、実際に動的な軌道変化が実現可能であることを確かめた。TAMA による軌道変化は、デジタルスポーツにおいて特殊効果、特に魔球（必殺技）としての貢献が期待できる。特殊効果の存在は、スポーツに対して身体能力や技術によらない新たな要素を付加することが出来る。これにより、プレイの選択肢が拡がり戦略性に幅が生まれるだけでなく、プレイヤー間の技術差を埋めるために利用することで、ゲームのバランス調整にも応用可能であると考えられる。ここで、実際にデジタルスポーツへの適用を行うためには、軌道変化を自在にコントロール出来る必要がある。しかしながら、現状のシステムでは軌道変化の方向やタイミングを制御できる段階には至っていない。

TAMA が抱える問題の一つとして、圧縮ガスの噴射口が一つしかなく、その位置がボールに固定されているために、ボールの回転に非常に弱く、噴射の方向をコントロール出来ない事が挙げられる。実際のスポーツにおいては、多くの場合ボールは高速な回転を伴って運動する。TAMA は姿勢計測センサを搭載しているため、姿勢に応じた簡単な噴射制御は可能であるが、高速回転時に正確な姿勢を計測することは難しく、また噴射による軌道変化方向も回転に依存したものになってしまう。本問題を解決するためには、噴射口を増設し、回転や運動に応じた噴射方向の協調制御を行う、あるいは姿勢を特定の角度に安定させるための機構を搭載することで、噴射口の向きを制御可能にする必要があると考えられる。

さらに、TAMA では推進力を発生させるためのエネルギー源として圧縮ガスカートリッジを使用していることにより、軌道変化の発生回数に制限が存在する。本手法は、物理法則を超えた軌道を実現するために、軌道変化の大きさを重視して選択したものであった。実験の結果、一本のカートリッジにつき初回の噴射のみ、比較的大きな効果を安定して得られることがわかった。2回以上の噴射を行う場合はカートリッジ温度の低下の影響も受けるため、使用間隔にも制約が生まれる。しかしながら、デジタルスポーツにおける必殺技としての使用を想定した場合、使用回数・使用間隔の制約はゲーム要素の一つとなり得る。さらに、小さな変化であればより多くの回数の使用も可能であることが期待できる。3回目以降の噴射による軌道変化では、派手さは少ないもののボール0.5～1個分の軌道変化は実現しており、必殺技として競技に影響を与えることは十分に可能であると考えられる。今後はエネルギー源を必要としないような軌道変化手法や、より高効率なエネルギー源を検討するとともに、こうした制約を

踏まえた、より戦略性やゲーム性の高いデジタルスポーツのゲームデザインを  
考えていく必要がある。

また、実際にスポーツで使用する場合、プレイヤーはその軌道変化方向やタイ  
ミングを自在に入力できることが望ましい。現在のシステムでは加速度センサ  
やジャイロセンサを搭載しており姿勢や簡単な運動状態を計測可能である。こ  
れを利用したジェスチャ入力やタイミングの制御は可能であるが、運動計測の  
精度はあまり高く無いほか、入力できる情報量も少ない。今後は、ボール表面  
へのタッチ入力を可能にするため、PhotoelasticBall のシステムの応用を検討し  
ている。本研究では簡単なシステムの再現を行い、PhotoelasticBall のシステム  
の実装による表面へのジェスチャ入力の実現可能性が示された。

## 9.2 別の手法による軌道変化

TAMA では、圧縮ガスの噴射を利用して推進力を発生させることによって軌  
道変化を発生させる手法を採用している。従来では不可能であった急激な変化  
や多段変化が実現可能となることが特長であるが、使用回数に制限があること、  
また回転に弱い事が欠点として挙げられる。ここで、他の軌道変化手法として  
空気力学的効果を利用した方法がある。軌道変化が比較的ゆるやかであり、さ  
らにその効果量がボールの飛行速度に依存するという欠点を抱えているものの、  
電力以外のエネルギーを必要とせず、さらに方向の制御が比較的容易である  
という特長を持つ手法である。これら二つの方法を組み合わせることが出来れば、  
両手法の欠点を補いあうことが出来、TAMA の性能向上に大きく貢献するこ  
とが期待できる。

そこで本研究では、空気力学的効果を利用して軌道変化を実現するシステムのプロトタイプとして、空中での変形が可能なボールを開発した。図 9.1 に開発したプロトタイプの外観を示す。本プロトタイプでは、アクリル製のフィンが表面に出現させることによって、ボールの受ける空気抵抗を変化させるものである。



(a) フィンを収納した状態



(b) フィンを出した状態

図 9.1 変形ボールのプロトタイプ

また、本プロトタイプの内部構造を図 9.2 に示す。

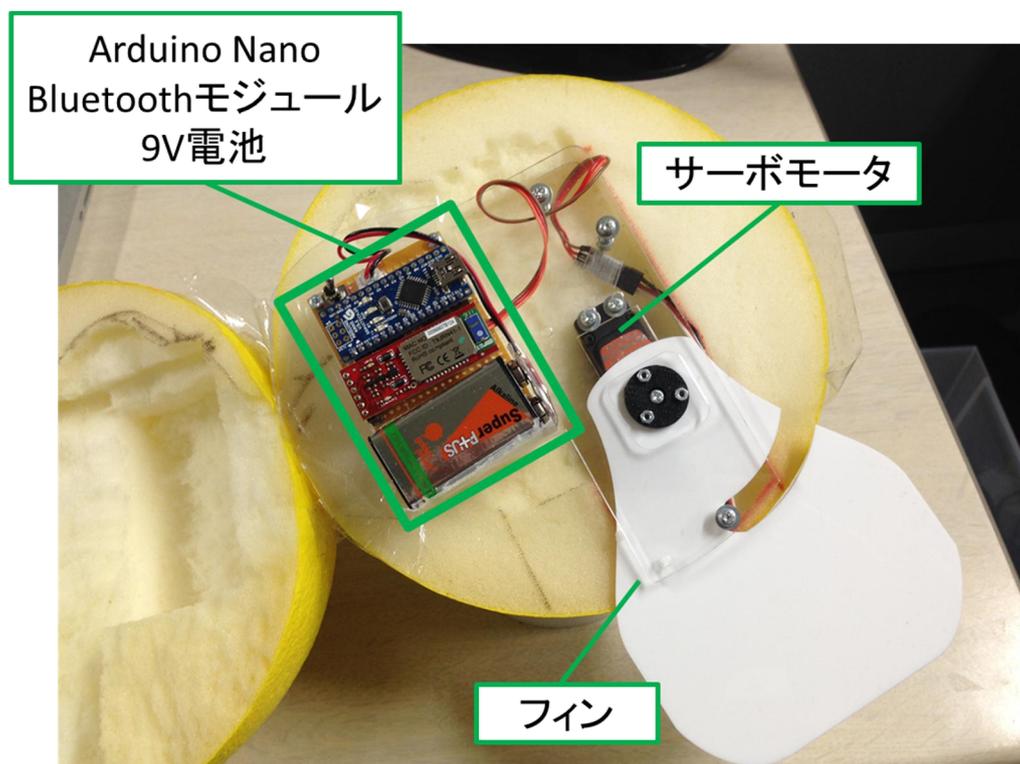


図 9.2 変形ボールのシステム構成

アクリル板はサーボモータ (DS1015, Thunder Tiger 社) に固定されており、制御用の Arduino Nano、無線通信用の Bluetooth モジュールを搭載している。また、電源は 9V 電池を使用しており、完全に無線での動作が可能である。運動中のボールにおいて、空気抵抗として機能するフィンを収納・出現させることによって回転や運動に伴う空気力学的効果の大きさを変化させ、軌道変化を実現するものである。ボールの運動に応じてフィンの出現量や出現数・位置を制御することが可能となれば、ボールの軌道や姿勢のコントロールが実現することが期待される。

### 9.3 未来ビジョン

デジタルスポーツは、本研究で提案しているボールの動きによる特殊効果だけでなく、視聴覚効果やプレイヤー毎のパラメータ設定など様々な要素を組み合わせることによって完成するものである。すなわち、プレイヤー認識技術、運動計測技術など、様々なデジタル技術を結集させる必要がある。当然ボールに付加する機能も一つだけでは無く、運動の状態や把持しているプレイヤーの認識、フィールド内における位置の計測など、様々な機能を同時に持つものとなる。軌道変化はそれらの機能の中の一つであり、他の機能と組み合わせて使われていくことになる。デジタルスポーツ用の軌道変化が可能なボールとして、TAMAの最終形に実装されているべき機能を以下に示す。

- 軌道変化の方向やタイミング，変化量を自在にコントロール可能
- ボール表面へのジェスチャ入力が可能であり，特殊効果に関する各種情報をすばやく入力可能
- ボールが地面にあるかプレイヤーの手にあるかの判別，プレイヤーが把持している場合はそのプレイヤーの判別が可能

## 第10章

### 結論

本研究では、デジタルスポーツへの特殊効果の実装を目的として、動的な軌道変化が可能なボール“TAMA (Trajectory chAnging, Motion bAll)”を開発した。圧縮 CO<sub>2</sub> ガスを空中で噴射することにより、その反力を利用して軌道変化を実現する。TAMA ではガス噴射機構を変更したことにより従来デバイスからの大幅な軽量化および無線化に成功した。また、無線通信機能および加速度、姿勢計測機能を備えており、情報の入出力が可能である。

本稿では、自然落下時のガスの噴射による軌道変化を計測し、システムの評価を行った。計測された軌道変化量は理論値を下回る結果となったが、確かに軌道が変化したことが確認でき、特殊効果としての有効性が示された。しかしながら、現状のシステムでは噴射回数に制限がある、噴射方向の制御が困難であるといった問題を抱えている。今後はより高効率なエネルギー源や噴射機構の検討、噴射口の増設や姿勢制御機構の実装を行うなど、スポーツでの実使用に向けてこれらの問題解決を目指す。

---

## 参考文献

- [1] 松村明（編）．大辞林．三省堂，第三版，2006.
- [2] 加藤周一（編）．世界大百科事典．平凡社．第2版．2006.
- [3] M・チクセントミハイ．楽しみの社会学．新思索社，2000．今村浩明 [訳].
- [4] Jeff Sinclair, Philip Hingston, and Martin Masek. Considerations for the design of exergames. In *Proceedings of the 5th international conference on Computer graphics and interactive techniques in Australia and Southeast Asia* (GRAPHITE '07). pp. 289-296, 2007.
- [5] 任天堂株式会社. Wii Sports - Wii. <http://www.nintendo.co.jp/wii/rspj/>. (アクセス日：2014年1月26日)
- [6] デジタルゲームの教科書制作委員会．デジタルゲームの教科書．ソフトバンククリエイティブ株式会社，2010.
- [7] Osamu Izuta, Toshiki Sato, Sachiko Kodama, and Hideki Koike, Bouncing Star project: design and development of augmented sports application using a ball including electronic and wireless modules. In *Proceedings of the 1st Augmented Human International Conference* (AH '10). Article No. 22, 2010.
- [8] Xiao Xiao, Michael S. Bernstein, Lining Yao, David Lakatos, Lauren Gust, Kojo Acquah, and Hiroshi Ishii. PingPong++: community customization in games and entertainment. In *Proceedings of the 8th International Conference on Advances in Computer Entertainment Technology* (ACE '11). Article No.24, 2011.

- 
- [9] Jay Coakey. *Sports in Society: Issues and Controversies*. McGraw-Hill Humanities/Social Sciences/Languages, 2008
- [10] Kodai Horita, Hideki Sasaki, Hideki Koike, and Kris M. Kitani. Experiencing the ball's POV for ballistic sports. In *Proceedings of the 4th Augmented Human International Conference (AH '13)*. pp. 128-133, 2013
- [11] Fraunhofer IIS. GoalRef. <http://www.iis.fraunhofer.de/en/bf/ln/referenzprojekte/goalref.html> (アクセス日 : 2014 年 1 月 26 日) .
- [12] Nike. Nike+. <http://nikeplus.nike.com/plus/> (アクセス日 : 2014 年 1 月 26 日).
- [13] Adidas. miCoach Elite Team System. <http://news.adidas.com/GLOBAL/micoach-elite-system/s/4fd08cfb-1e14-4575-9533-918016ab0893>, (アクセス日 : 2014 年 1 月 26 日) .
- [14] Microsoft. Kinect スポーツ - Xbox.com. <http://www.xbox.com/ja-JP/Marketplace/SplashPages/kinectsports>. (アクセス日 : 2014 年 1 月 26 日)
- [15] 日本ドッジボール協会 競技委員会 (編) . 公式ルール 審判テキストブック. 日本ドッジボール協会, 2013-2014 年度版, 2013.
- [16] 株式会社コナミデジタルエンタテインメント. DDR GLOBAL GATEWAY, <http://www.konami.jp/bemani/ddr/jp/> (アクセス日 : 2014 年 1 月 26 日)
- [17] Florian 'Floyd' Mueller, Darren Edge, Frank Vetere, Martin R. Gibbs, Stefan Agamanolis, Bert Bongers, and Jennifer G. Sheridan. *Designing*

- 
- sports: a framework for exertion games. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '11)*. pp. 2651-2660, 2011.
- [18] Seungzoo Jeong, Naoki Hashimoto, and Sato Makoto. A novel interaction system with force feedback between real - and virtual human: an entertainment system: "virtual catch ball". In *Proceedings of the 2004 ACM SIGCHI International Conference on Advances in computer entertainment technology (ACE '04)*. Pp. 61-66, 2004.
- [19] エウレカコンピューター株式会社. ESG E-SPORTS GROUND. <http://esportsground.com/> (アクセス日 : 2014 年 1 月 26 日).
- [20] Patrick Baudisch, Henning Pohl, Stefanie Reinicke, Emilia Wittmers, Patrick Lühne, Marius Knaust, Sven Köhler, Patrick Schmidt, and Christian Holz. Imaginary reality gaming: ball games without a ball. In *Proceedings of the 26th annual ACM symposium on User interface software and technology (UIST '13)*. pp. 405-410, 2013.
- [21] Akira Suganuma, Yusuke Ogata, Atsushi Shimada, Daisaku Arita, and Rin-ichiro Taniguchi. Billiard instruction system for beginners with a projector-camera system. In *Proceedings of the 2008 International Conference on Advances in Computer Entertainment Technology (ACE '08)*. pp. 3-8, 2008.
- [22] Yoshiro Sugano, Yuya Mochizuki, Toshiya Usui, and Naohito Okude. Shootball: the ball sport using dynamic goals. In *Proceedings of the*

- international conference on Advances in computer entertainment technology* (ACE '07). pp. 262-263, 2007.
- [23] Basketball Training Aids 94FiFty. <http://www.94fifty.com/>, (アクセス日 : 2014 年 1 月 26 日).
- [24] Jonas Pfeil, Kristian Hildebrand, Carsten Gremzow, Bernd Bickel, and Marc Alexa. Throwable panoramic ball camera. In *SIGGRAPH Asia 2011 Emerging Technologies* (SA '11). Article No.4, 2011.
- [25] Ryousuke Hiramatsu. PUYO-CON. In *ACM SIGGRAPH ASIA 2009 Art Gallery & Emerging Technologies: Adaptation* (SIGGRAPH ASIA '09). Pp. 81-81, 2009.
- [26] Gili Weinberg, Maggie Orth, and Peter Russo. The embroidered musical ball: a squeezable instrument for expressive performance. In *CHI '00 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems* (CHI EA '00). pp. 283-284, 2000.
- [27] 新田慧, 佐藤俊樹, 野嶋琢也, 小池英樹. PhotoelasticBall: 光弾性効果による表面圧力分布計測機能を有するボール型デバイスの提案. 第 17 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集. pp.17-18, 2012.
- [28] Koji Tsukada and Maho Oki. ChameleonBall. In *Proceedings of the fourth international conference on Tangible, embedded, and embodied interaction* (TEI '10). Pp. 387-388, 2010.
- [29] Tamie Salter, François Michaud, H el ene Larouche. How wild is wild? A taxonomy to categorize the wildness of child-robot interaction. In *International Journal of Social Robotics*, pp. 405-415, 2010

- 
- [30] Sphero - What ARE This?!.  
<http://www.prettypmassive.com/sphero-what-are-this/>, (アクセス日 : 2014年1月26日).
- [31] 株式会社メガハウス. ブレダマスター ブレるボール.  
<http://www.megahouse.co.jp/megatoy/products/item/1083/>. (アクセス日 : 2014年1月26日)
- [32] タカラトミーアーツ. 読売巨人軍の魔球王.  
<http://www.takaratomy-arts.co.jp/items/item.html?n=Y511530>. (アクセス日 : 2014年1月26日)
- [33] 市川卓, 小池英樹, 野嶋琢也. 空中での動的な軌道変化が可能なボールの開発. エンタテインメントコンピューティング. pp. 13-14, 2009.

---

## 発表学会リスト

- [1] 太田智也, 野嶋琢也. 動的な軌道変化が可能なボール型デバイスの開発.  
WISS 予稿集 (デモ/ポスター), 2012.

## 謝辞

本研究を遂行するに当たり、日頃より熱心なご指導、ご鞭撻を賜りました野嶋琢也准教授に心より感謝の意を表します。また、様々な面で貴重なご指導、ご意見、ご助言をいただきました小池英樹教授、佐藤俊樹助教に心より感謝致します。

共に研究生活を送ってきた野嶋研究室、小池研究室の皆様にも多大なるご協力をいただきました。心より感謝の意を表します。

最後になりましたが、不自由の無い学生生活を支援、応援して下さいました両親に心より感謝致します。