

# Hopping-Pong: 超音波の非接触力を用いた卓球における変化球の実現

森崎 汰雄<sup>1,a)</sup> 森 涼馬<sup>1,b)</sup> 森 瞭輔<sup>1,c)</sup> 牧野 泰才<sup>1,3,d)</sup> 伊藤 勇太<sup>2,3,4,e)</sup> 山川 雄司<sup>1,3,f)</sup>  
篠田 裕之<sup>1,g)</sup>

概要：Augmented sports と呼ばれる、ゲーム的要素をスポーツに付加することで、能力差の解消やエンターテインメント性を高める試みがある。この中で、ドローン内蔵のボールや超音波による非接触力を用いてボールの軌道を変化させるなど、プレイに物理的干渉を行う手法も提案されている。Morisaki らは超音波を用いて、動いているピンポン玉の軌道を変化させた [1]。本研究では、この超音波を持ちいた軌道変化にインタラクティブ性を加え、任意のタイミングで変化球を打てる卓球システムを開発する。このシステムでは、ピンポン玉の軌道を左右どちらに曲げるかを手元のコントローラで指定できる。実際に、提案システムを用いて軌道を変化させることでプレイヤーが空振りしてしまうことや、ラケット上の思っていた位置にボールを当てられずにミスしてしまうことを確認した。

## 1. 緒言

これまで、augmented sports と呼ばれる、コンピュータゲームの様な要素をスポーツに付加する試みが提案されてきた。この目的の一つとして、能力差の解消やエンターテインメント性の付加により、万人が楽しむことができるスポーツの実現がある。例えば、(球技における) 球の軌道予測による初心者へのプレイ補助 [2][3][4] 及び、映像のプロジェクション [5] やヒットポイントなどゲーム的要素 [6] を用いたエンターテインメント性の付加が提案されている。また、投げたボールの軌道を変化させるなど物理的なプレイ補助も提案されている。Nitta らは、ドローンにボールの外装を装着しその軌道を制御する Hover Ball を提案している [7]。Hover Ball では、相手プレイヤーを追従するなど特殊な変化軌道や、投げたボールを所望の位置まで誘導するプレイ補助を提案している。Morisaki らは集束超音波を用いて、動いているピンポン玉の軌道を非接触に変化させる手法を提案している [1]。これは、例えば力量に関係な

く変化球を打てるゲームデザインを実現できる。

Morisaki らが提案する集束超音波を用いた手法は、軌道変化など物理的干渉を行う augmented sports に適した特徴を持つ。まず、その非接触という特徴から、ピンポン玉など対象物に細工する必要がない。このため、スマッシュやサーブを強く打っても問題がなく、通常の卓球と同様にプレイできる。また、その力は音速で提示され、その力の時間・空間分布はフェーズドアレイ技術によりそれぞれ 1 kHz, 1 cm で制御できる [8][9]。

これまでの研究では集束超音波を用いた手法の基本性能のみが検証されている。本研究では、従来システムにインタラクティブ性を付与し、任意のタイミングで変化球を打てる卓球システムを開発した。提案システムを利用し、変化球を打とうとしたユーザがラケット上の思っていた位置にボールを当てられず、ミスしてしまうことを確認した。これは逆に、初心者が常に特定の場所でボールを打つといった使い方も可能になると考えている。必殺技として変化球を運用し、よりコンピュータゲームに近づけるなど幅広いスポーツのデザインも可能になるシステムである。本稿では、提案システムの構成とその基礎的な性能について述べる。

## 2. システム構成

提案システムの構成を図 1 に示す。本システムにおいて、プレイヤーはコントローラを通じて任意のタイミングで超音波フェーズドアレイを駆動し、ピンポン玉の軌道に

<sup>1</sup> 東京大学

<sup>2</sup> 東京工業大学

<sup>3</sup> JST さきがけ

<sup>4</sup> 理研 AIP

a) morisaki@hapis.k.u-tokyo.ac.jp

b) ryoma\_mori@hapis.k.u-tokyo.ac.jp

c) ryosuke\_mori@hapis.k.u-tokyo.ac.jp

d) yasutoshi\_makino@k.u-tokyo.ac.jp

e) yuta.itoh@c.titech.ac.jp

f) y-yumkw@iis.u-tokyo.ac.jp

g) hiroyuki.shinoda@k.u-tokyo.ac.jp



図 1 システム構成：(上) コントローラを持ったプレイヤー側。プレイヤーは手元もコントローラを操作することで、任意のタイミングで変化球を打つことができる。1 番を押すと左、2 番を押すとピンポン玉により近い側、3 番を押すと右側のフェーズドアレイが駆動する。(下) 相手プレイヤー側。

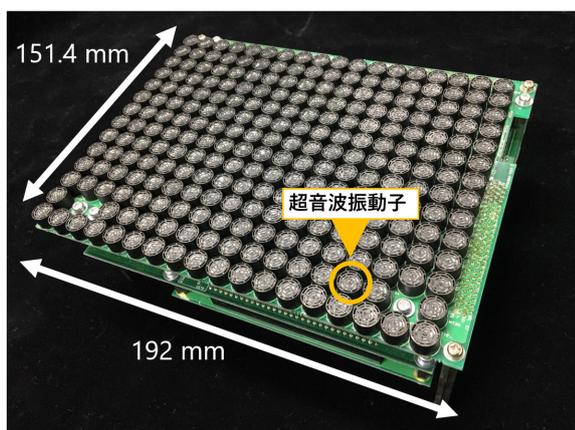


図 2 空中超音波フェーズドアレイ

変化を与えることができる。

本システムは、2 台の高速カメラ (Ximea MQ003CG-CM)、18 台の空中超音波フェーズドアレイ [8][9][10]、リストバンド型の無線コントローラ、これらを制御する Windows PC (Panasonic Let's note CF-SZ6) から構成される。2 台の高速カメラはキャリブレーションを行い、ピンポン玉の位置を 3 次元計測する。測定誤差は、x 軸方向に 0.72 mm, y 軸方向に 0.76 mm, z 軸方向に 1.96 mm である [1]。

空中超音波フェーズドアレイ (図 2) とは超音波振動子がアレイ状に配置されたデバイスであり、各振動子の位相を自由に制御できる。各位相を超音波が一点で集束するように制御することで、空中に 1 cm<sup>3</sup> 程度の大きさで非接触な力を提示できる。本システムでは、この図 2 に示すフェーズドアレイユニット (249 個のトランスデューサ) を 9 台ず

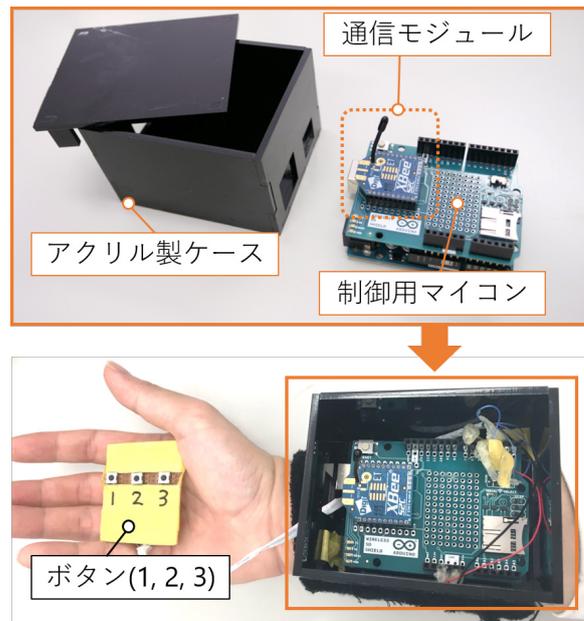


図 3 リストバンド型コントローラ

つまとめ、卓球台の両脇に配置している。また、その駆動もまとめた 9 台ごとに行う。このため、本システムでは z 軸に沿った任意の方向にピンポン玉を変化させることができる。また、ピンポン玉に提示される実際の力は卓球台の中心付近において約 0.5 gf である [1]。

## 2.1 リストバンド型コントローラ

リストバンド型コントローラの構成を図 3 に示す。プレイヤーはこのコントローラを用いることで、任意のタイミングで軌道を変化できる。このコントローラは、プレイヤーの入力となる 3 つのタクトスイッチ、制御用のマイコンボード (Arduino Uno)、制御用 PC と通信するための無線モジュール (XBee S2C)、装着用のリストバンドにより構成される。

プレイヤーが装着した様子を図 1(上) に示す。プレイヤーはこのコントローラを、ラケットを持つ手と逆の腕に装着する。また、スイッチ部は手で握る。

## 2.2 ゲームデザイン

提案システムでは、コントローラ入力を通じて、左カーブ、右カーブ、自動カーブをプレイヤーの任意のタイミングで選択できる。各機能の割り当てを図 4 に示す。まず、タクトスイッチに 1 から 3 の番号を割り振った。1 を押すと、コントローラを持つプレイヤーから向かって左側のフェーズドアレイが駆動される。この時、ピンポン玉の軌道は右側に曲がるカーブとなる。3 番を押した場合は、右側に配置されたフェーズドアレイが駆動される。2 番を押すと、ピンポン玉により近いフェーズドアレイが自動で選択・駆動される。ここではセンターラインを基準に判断しており、例えば、ピンポン玉が卓球台センターラインより

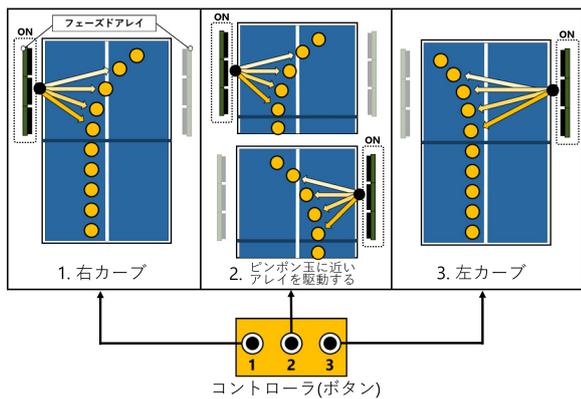


図 4 コントローラへの機能割り当て:1 を押すと左側のフェーズドアレイが駆動される。2 番を押すと、ピンポン玉に近いフェーズドアレイが駆動される。3 番を押すと右側に配置されたフェーズドアレイが駆動される。



図 5 超音波による変化球を受けたプレイヤーの実際のミス (空振り) の様子。オレンジ色のラインは実際に撮影したプレイ動画の各フレームからピンポン玉を抽出し、重ねることで生成した。ただし、変化が無い場合の軌道 (黒い点線) 及び軌道変化のタイミングは、動画より目で見て判断し記入している。

も右にあれば右側のフェーズドアレイが駆動される。また、ピンポン玉位置がカメラの認識範囲外の場合はどのスイッチを押してもフェーズドアレイは駆動されない。1 番と 3 番を使えば、プレイヤーは任意の方向に変化球を打つことができる。2 番を押したままにしておけば駆動されるフェーズドアレイは自動で決定されるため、ボールを常にコートの中に戻す自動補助のような形で運用できる。

### 3. システムの動作

実際の卓球において、提案システムによる変化球が相手プレイヤーのミスを誘発できることを確認した。変化球を受けたプレイヤーのミス (空振り) の様子を図 5 に示す。この図は、実際に撮影したプレイ動画から生成したものである。オレンジ色のラインは実際のピンポン玉の軌道であり、動画の各フレームからピンポン玉を抽出し重ねることで生成した。ただし、図 5 内の変化がない場合の軌道 (黒い点線) 及び軌道変化のタイミングは、動画より目で見て判断し記入したものである。

軌道がこの画像程度に変化するときプレイヤーは空振り

していた。この画像より小さい軌道変化については、空振りはしないものの、意図していないラケットの位置に当たるためミスは誘発できていた。今後は、具体的なミスの発生率や満足度を定量的に検証する。

### 4. 結言

本論文では、これまで試されてきた超音波の非接触力によるピンポン玉の軌道変化 [1] にインタラクティブ性を付与し、任意のタイミングで変化球を打てる卓球システムを開発した。このシステムでは、18 台の空中超音波フェーズドアレイを卓球台の両側に 9 台ずつ配置しており、そのどちらを駆動するか、すなわちピンポン玉の軌道を左右どちらに曲げるかをリストバンド型コントローラで指定できる。また、本システムによる変化球で相手プレイヤーのミスを誘発出来ることを確認し、実際の卓球に应用できることを確認した。

今後は、ミスを誘発できる確率やその時行われたラリーの速度を定量的に測定し評価する。また、ミスの誘発という物理的干渉が、スポーツそのものの楽しさや、自己効力感といったプレイヤーの心理に与える影響を検証する。これらの結果をもとに、なるべく多くの人が楽しめる augmented sports のデザインを卓球を例に行い、その評価も試みる。

謝辞 本研究は、JST さきがけ 17939983 及び JP-MJPR17J2 の支援を受けて行われた。

### 参考文献

- [1] Morisaki, T., Mori, R., Mori, R., Makino, Y., Itoh, Y., Yamakawa, Y. and Shinoda, H.: Hopping-Pong: Changing Trajectory of Moving Object Using Computational Ultrasound Force, *Proceedings of the 2019 ACM International Conference on Interactive Surfaces and Spaces*, ACM, pp. 123-133 (2019).
- [2] Itoh, Y., Orlosky, J., Kiyokawa, K. and Klinker, G.: Laplacian vision: Augmenting motion prediction via optical see-through head-mounted displays, *Proceedings of the 7th Augmented Human International Conference 2016*, ACM, p. 16 (2016).
- [3] Suda, S., Makino, Y. and Shinoda, H.: Prediction of Volleyball Trajectory Using Skeletal Motions of Setter Player, *Proceedings of the 10th Augmented Human International Conference 2019*, ACM, p. 16 (2019).
- [4] 剣 宇陳, 森崎汰雄, 王 安晟, 藤原正浩, 牧野泰才, 篠田裕之: Prediction of Ping-Pong Ball Trajectory Based on Neural Network Using Player's Body Motions, 第 24 回バーチャルリアリティ学会大会, pp. 6D-0 (2019).
- [5] Ishii, H., Wisneski, C., Orbanes, J., Chun, B. and Paradiso, J.: PingPongPlus: design of an athletic-tangible interface for computer-supported cooperative play, *Proceedings of the SIGCHI conference on Human Factors in Computing Systems*, ACM, pp. 394-401 (1999).
- [6] Nojima, T., Phuong, N., Kai, T., Sato, T. and Koike, H.: Augmented dodgeball: an approach to designing augmented sports, *Proceedings of the 6th Augmented Human International Conference*, ACM, pp. 137-140 (2015).

- [7] Nitta, K., Higuchi, K. and Rekimoto, J.: HoverBall: augmented sports with a flying ball, *Proceedings of the 5th Augmented Human International Conference*, ACM, p. 13 (2014).
- [8] Hoshi, T., Takahashi, M., Iwamoto, T. and Shinoda, H.: Noncontact tactile display based on radiation pressure of airborne ultrasound, *IEEE Transactions on Haptics*, Vol. 3, No. 3, pp. 155–165 (2010).
- [9] Inoue, S., Makino, Y. and Shinoda, H.: Scalable architecture for airborne ultrasound tactile display, *International AsiaHaptics conference*, Springer, pp. 99–103 (2016).
- [10] Suzuki, S., Takahashi, R., Nakajima, M., Hasegawa, K., Makino, Y. and Shinoda, H.: Midair Haptic Display to Human Upper Body, *2018 57th Annual Conference of the Society of Instrument and Control Engineers of Japan (SICE)*, IEEE, pp. 848–853 (2018).