



遠隔力提示による動的な人間環境への力学的支援 — 集束超音波を用いた卓球玉の軌道変化によるスポーツ拡張 —

森崎汰雄¹⁾, 森涼馬¹⁾, 森瞭輔¹⁾, 芹澤洗希¹⁾, 牧野泰才^{1,4)}, 伊藤勇太^{2,4,5)}, 山川雄司^{1,4)}, 篠田裕之¹⁾
Tao MORISAKI, Ryoma MORI, Ryosuke MORI, Kohki SERIZAWA, Yasutoshi MAKINO, Yuta ITOH, Yuji
YAMAKAWA, and Hiroyuki SHINODA

1) 東京大学 新領域創成科学研究科 (〒 277-8561 千葉県 柏の葉 5-1-5, morisaki@hapis.k.u-tokyo.ac.jp)

2) 東京工業大学 情報理工学院 (〒 226-8503 神奈川県 横浜市 緑区 長津田町 4259, yuta.itoh@c.titech.ac.jp)

3) 東京大学 生産研究所 (〒 153-8505 東京都 目黒区 駒場 4-6-1, y-yumkw@iis.u-tokyo.ac.jp)

4) JST さきがけ, 5) 理研 AIP

概要: ロボット等で人間や周辺環境を物理的に制御すれば、人間環境に対して直接的な支援ができる。さらに、電磁気力や集束超音波を用いれば、この力学的支援を遠隔化出来る。例えば、磁力によりペン先を操作と絵描動作支援が提案されている。我々は、この遠隔な力学的支援を、人や物が激しく動く動的環境にまで拡張することを提案する。本論文では、動的環境として卓球を選び、力学的な支援として、超音波で卓球玉の軌道を変化させた。また、その変化球がどの程度相手のミス(空振り)を誘発できるか検証し、動的環境への遠隔支援が実現可能か検証した。

キーワード: 力学的支援, 集束超音波, 卓球, 拡張スポーツ

1. 緒言

技術の発展は様々な形で人間の生活を支援してきた。眼鏡、コンタクトレンズによる視力補正は現代では日常的に使用される。また、人間本来の機能にとらわれず、制御計測や情報通信技術を用いて人間の能力を拡張する human augmentation というコンセプトも提案されている。能力拡張により、人は本来の性能を超えたパフォーマンスをスポーツ [4] やクリエイティブ [9] の領域で発揮できる。

中でも、ロボットなど力学系を用いれば、人間自身やその環境を物理的に操作、制御できるため、より直接的な能力拡張、動作支援が可能になる。例えば、外骨格を用いた筋力の増強 [2]、ロボットアームを用いた手の増設と作業支援 [8] が提案されている。

集束超音波 [10, 1] などを用いれば、非接触な力学系を構成できる。すなわち、力の大きさに制限はあるが、ユーザにアクチュエータを持たせることなく、その生活環境に力学的な支援を与えられる。具体例として、Yamaoka らの提案する、磁気を用いてペン先を操作する机型デバイス dePENd がある [9]。ユーザらは市販のペンを持ち机 (dePENd) に向かうだけで、任意の絵を自動で描けるという力学的支援が受けられる。

我々は、この非接触な力学的支援を、物や人が激しく動く動的な人間環境に対して行うことを提案する。動的な環境としてスポーツ、例えば球技においてボールの軌道を変化させ、身体能力の差を埋めることが考えられる。非接触な方法なら、dePENd で市販のペンをそのまま使用できるの

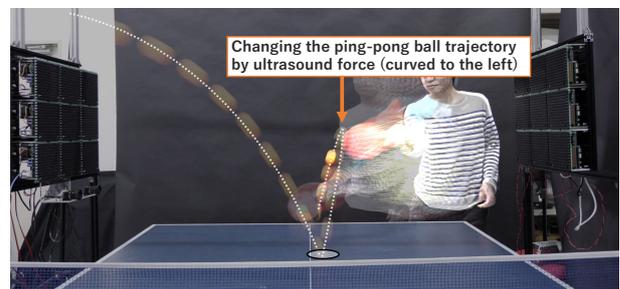


図 1: 超音波による軌道変化が相手プレイヤーのミス(空振り)を誘発する様子。この画像は実際のラリー動画から合成したものである。ただし、点線で示される軌道は著者の判断で上書きした。

と同様、ボールに細工する必要がない。従って、ボールを強く弾ませるなど普通のスポーツと同様にプレイできる。

本研究では、動的な人間環境の例として卓球を選び、力学的な支援の例として集束超音波により卓球玉の軌道を相手の手元で変化させた。さらに、その超音波による変化球が相手のミスをどの程度誘発できるか、すなわち卓球という動的環境において能力支援が可能であるか検証する。図 1 に例として、超音波による変化球が相手プレイヤーのミス(空振り)を誘発する様子を示す。この画像は実際のラリー動画から生成したものである。ただし、点線で示される軌道は著者の判断で上書きしている。

卓球を「動的環境」の例としたのは次の 3 点が理由である:

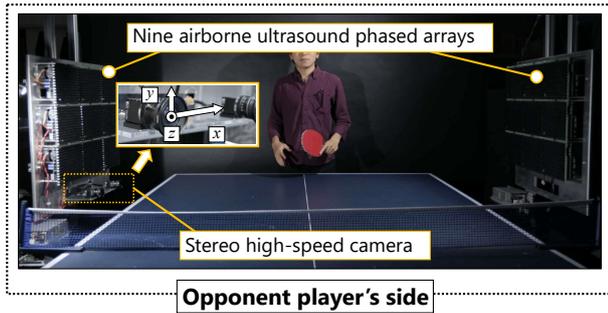


図 2: 相手プレイヤー側のシステム構成

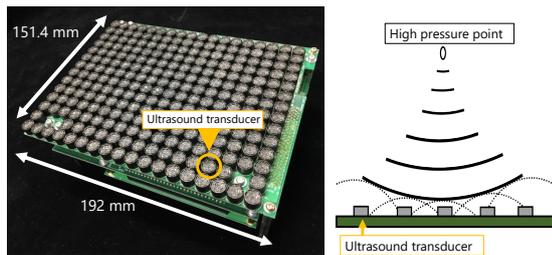


図 3: 空中超音波フェーズドアレイと動作の模式図

1) 卓球ではボールもプレイヤーも高速に動く、2) メジャーなスポーツのため経験者が多く、多人数でのユーザスタディが可能でありコンセプト検証に適している、3) 卓球玉は軽量であり、超音波の力で十分な軌道変化が見込めることが既に示されている [5]。

開発した変化球システムは、力学的機能を備えかつ、ラケットなど道具に細工をしなくてよい初めての Augmented Sports システムとしても位置づけられる。変化球システムにおいて、プレイヤーらは強くスマッシュを打つなど、普通の卓球と変わらずにプレイできる。Augmented Sports とは、技術を用いてスポーツの楽しさを高めたり初心者への補助を行う試みである。その力学的機能については、ロボットハンド [4] やアクチュエータを内蔵したボール [7, 6] など人が利用する道具に機能を組み込む手法が主であり、本論文で提案する環境側がサポートする手法はこれまで提案されてこなかった。

2. システム構成

開発した卓球における変化球システムの構成と座標系を図 2 に示す。座標系はカメラのレンズ中心を原点とした右手系とし、以後共通とする。本システムは、卓球玉に力を加える空中超音波フェーズドアレイ [1, 3]、卓球玉の三次元位置を計測する 2 台の高速カメラ (Ximea MQ003CG-CM) で構成される。これらは Windows PC (Panasonic Let's note CF-SZ6) で制御した。

空中超音波フェーズドアレイとは、振幅と位相の個別制御が可能な超音波振動子をアレイ状に並べたものである (図 3) [1]。本システムで用いたアレイには、40 kHz の超音波振動子が一台当たり 249 個搭載されており、合計 18 台が

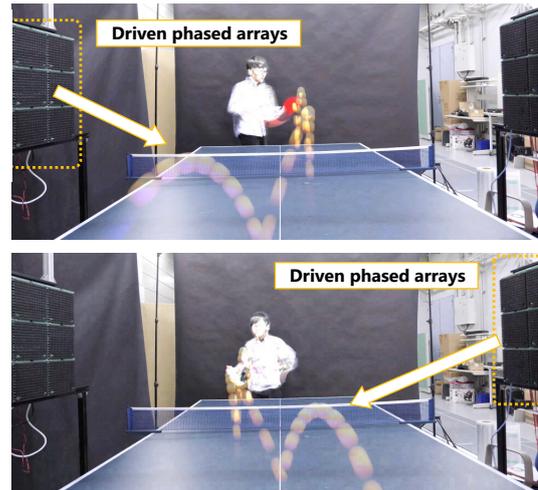


図 4: サーブした卓球玉が左右に曲がる様子。この画像は実際にサーブを打つ動画から生成した。

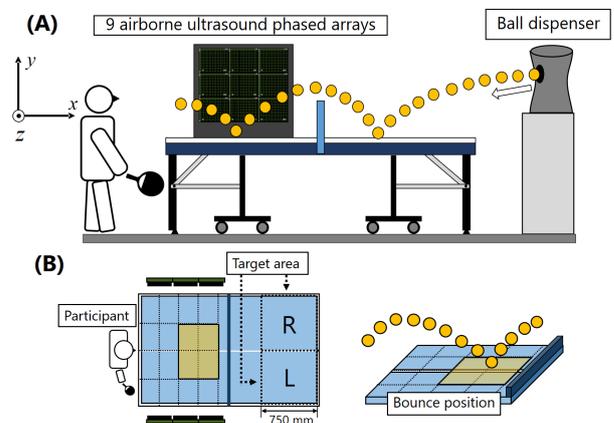


図 5: 実験のセットアップ

EtherCat で制御用 PC と接続している [3]。また、接続したフェーズドアレイは卓球台の左右に 9 台ずつまとめて配置されている。

超音波フェーズドアレイにおいて、各振動子から出力された超音波が一点に集束するよう位相を設定すれば、局所的に圧力の高い点を空中に生成できる [1]。この非接触力は音響放射圧と呼ばれる現象に基づくものであり [10]、圧力点の直径は波長程度、すなわち本システム (40 kHz) の場合は 1 cm^3 程度まで絞られる [1]。これは卓球玉の半分以下のサイズである。本システムでは、常に卓球玉の位置一点に超音波が集束するよう毎フレーム位相を変化させている。

2 台の高速カメラはキャリブレーション済みであり、カラートラッキングを用いてピンポン玉の三次元位置を計測している。本計測セットアップは先行研究と同様であり、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 [5]。また、卓球玉の位置は計測後、システムの遅れ分を考慮した予測位置に補正される [5]。

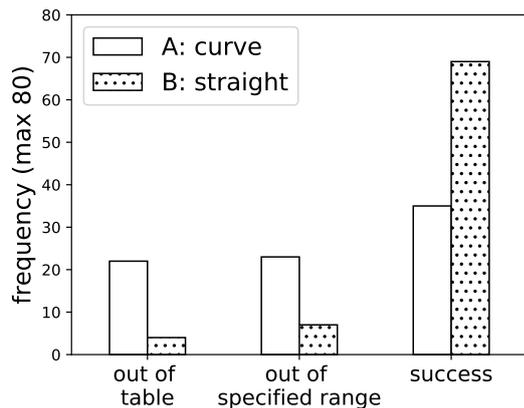


図 6: 返球結果を分類したヒストグラム

3. 被験者実験

超音波による変化球が、実際に相手プレイヤーのミスを生み出せるか確認する。

3.1 実験セットアップ

実験セットアップを図 5-A に示す。卓球玉は球出し機を用いて投擲された。

3.2 実験手順

被験者は男性 4 人であり、年齢は 24-26 才であった。被験者らはまず卓球になれるため、変化球あり、なしでそれぞれ 3 分程度投擲されたピンポン玉を返球した。

被験者は、投擲された卓球玉を卓球台の指定区域に返球する指示を受けた。今回は、卓球台の右半分、左半分の $xx \text{ cm}^2$ を指定した。この指摘区域を図 5-B に示す。球数は変化球が混ざる群 (A 群) で 15 球、変化しない群 (B 群) で 10 球とした。A 群においては、変化なし、右カーブ、左カーブがそれぞれ 5 球ずつランダムな順番で投擲される。変化なしの B 群を 10 球としたのは、A 群のうち変化を与えた 10 球分と比較するためである。以上より、被験者は指定区域の左右、A 群、B 群の組み合わせで $2 \times (15 + 10) = 50$ 球だけ返球する。本実験では、試行回数を減らすため、初めのターゲットは左側で統一した。被験者らは左側を狙って AB 両群の試行を終えた後、右側の区域に移行する。順序効果を避けるため、被験者の半分は A 群から、もう半分は B 群から行った。

被験者にはまず実験群が明示される。その後卓球玉が投擲され、被験者はこれを指定区域に返球する。卓球玉は、図 5-B に示す様に、卓球台の中心付近でバウンドするよう投擲された。これは事前の検証において、被験者らが最も返球し辛かった位置である。また、この範囲から逸れた場合は試行に数えず、再度投擲した。送球の間隔は、被験者が姿勢をもとに戻すまで 10 秒程度空けて行った。送球するタイミングも毎回明示した。

被験者らは実験後、超音波による変化球について「楽しさ」と「悔しさ」についてを 0-7 点で回答した。

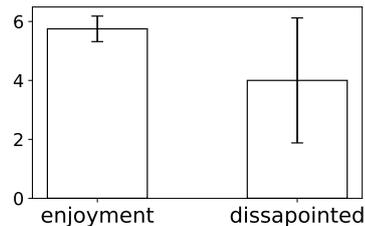


図 7: 「楽しさ」と「悔しさ」のアンケート結果

3.3 実験結果

図 6 に被験者の返球結果を分類したヒストグラムを示す。ここでは、被験者が指定範囲に返球できた試行を成功とした。失敗した試行は、更に以下の 2 つに分けた: 1) 空振りなどで、相手側のコートに返球できなかった、2) 相手側のコートには返球できたが、指定範囲は外れた。

変化球を織り交ぜた A 群において、被験者がタスクに失敗した回数は、80 試行のうち 45 回であった。また、そのうち 22 回が、相手のコートに返せなかった失敗 (1) であった。ここでは変化球のみを数えており、A 群で変化させなかった試行は集計から除外した。変化球を用いない B 群において被験者が失敗した回数は、80 試行のうち 11 回であった。また、そのうち 4 回が失敗 (1) であった。

図 7 に実験後に行ったアンケートの結果を示す。「楽しい」については平均 5.75 点、標準偏差 0.43 であった。また、「悔しい」については平均 4 点、標準偏差 2.12 であった。

4. 議論

実験結果より、本実験で設定したタスクにおいては、超音波による変化球はプレイヤーのミスを誘発できると考えられる。変化球により、相手コートに返せなかった回数は 5 倍以上に増加した。したがって、卓球という動的環境においては、力学的支援を非接触に実現できると考えられる。

実験後に行ったアンケートの結果より、多くの被験者が超音波による卓球への介入を楽しみ、肯定的にとらえていることが分かった。「悔しい」に 6 点など高得点を付けた被験者でも、例外なく「楽しい」に高得点を付けた。このため、実施の卓球にこの能力支援を導入した場合、スポーツの楽しさを損なうのではなく、むしろ高められると考えられる。ただし、今回は変化球を受ける側の心理のみを評価しているため、変化球を打つ側の心理も今後評価する必要がある。

5. アプリケーション

実際の卓球に適用するため、プレイヤーが任意のタイミングで変化球を打つためのラケット型コントローラを開発した (図 8-上) にラケット型コントローラを示す。このデバイスは、市販の卓球ラケットとゲームコントローラ (Nintendo Switch Joy-Con) から構成され、制御用 PC と Bluetooth で接続される。

動作の模式図を図 8(下) に示す。フェーズドアレイは卓球

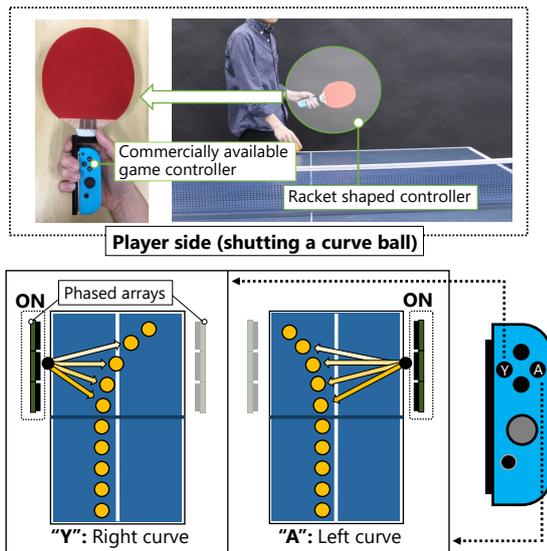


図 8: ラケット型コントローラとその動作

台の左右に 9 台ずつまとめて配置され、ラケット型コントローラでは左右どちらのフェーズドアレイを駆動するかが決定できる。A ボタンを押すと右側のフェーズドアレイが駆動し、左カーブが打てる。Y ボタンを押すと左側のフェーズドアレイが駆動し、右カーブが打てる。

6. 結言

本研究では、人間拡張の新たなコンセプトとして、人や物が激しく動く動的な人間環境に対して遠隔に力を加え、その動作を力学的に支援することを提案した。また、コンセプト評価のため、具体例として「集束超音波による卓球における変化球システム」を開発し、その変化球の性能を検証した。

被験者実験より、特定個所にレシーブするというタスクにおいて、超音波の変化球が相手プレイヤーのミス回数を 4 倍以上に増加させることが分かった。また、アンケートより、ミスを誘発された側もむしろその状況を楽しめることがわかった。

以上より、動的な人間環境である卓球においては、提案コンセプトである遠隔での力学的支援が実現可能だと言える。一方で、実際のラリーにおける力量調整としての効果や、変化球を打つ側、すなわち支援を受ける側の心理状態は今後検討する必要がある。また、今後はスポーツに限らず、提案コンセプトが適応できる様々な動的環境についても探索する。

謝辞 本研究は、JST さきがけ 17939983 及び JPMJPR17J2 の支援を受けて行われた。

参考文献

[1] Takayuki Hoshi, Masafumi Takahashi, Takayuki Iwamoto, and Hiroyuki Shinoda. 2010. Noncontact

tactile display based on radiation pressure of airborne ultrasound. *IEEE Transactions on Haptics* 3, 3 (2010), 155–165.

- [2] Jian Huang, Weiguang Huo, Wenxia Xu, Samer Mohammed, and Yacine Amirat. 2015. Control of upper-limb power-assist exoskeleton using a human-robot interface based on motion intention recognition. *IEEE transactions on automation science and engineering* 12, 4 (2015), 1257–1270.
- [3] Seki Inoue, Yasutoshi Makino, and Hiroyuki Shinoda. 2016. Scalable architecture for airborne ultrasound tactile display. In *International AsiaHaptics conference*. Springer, 99–103.
- [4] Azumi Maekawa, Seito Matsubara, Sohei Wakisaka, Daisuke Uriu, Atsushi Hiyama, and Masahiko Inami. 2020. Dynamic Motor Skill Synthesis with Human-Machine Mutual Actuation. In *Proceedings of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. 1–12.
- [5] Tao Morisaki, Ryoma Mori, Ryosuke Mori, Yasutoshi Makino, Yuta Itoh, Yuji Yamakawa, and Hiroyuki Shinoda. 2019. Hopping-Pong: Changing Trajectory of Moving Object Using Computational Ultrasound Force. In *Proceedings of the 2019 ACM International Conference on Interactive Surfaces and Spaces*. 123–133.
- [6] Kei Nitta, Keita Higuchi, and Jun Rekimoto. 2014. HoverBall: augmented sports with a flying ball. In *Proceedings of the 5th Augmented Human International Conference*. ACM, 13.
- [7] Tomoya Ohta, Shumpei Yamakawa, Takashi Ichikawa, and Takuya Nojima. 2014. TAMA: development of trajectory changeable ball for future entertainment. In *Proceedings of the 5th Augmented Human International Conference*. 1–8.
- [8] MHD Yamen Saraiji, Tomoya Sasaki, Kai Kunze, Kouta Minamizawa, and Masahiko Inami. 2018. Metaarms: Body remapping using feet-controlled artificial arms. In *Proceedings of the 31st Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*. 65–74.
- [9] Junichi Yamaoka and Yasuaki Kakehi. 2013. dePENd: augmented handwriting system using ferromagnetism of a ballpoint pen. In *Proceedings of the 26th annual ACM symposium on User interface software and technology*. 203–210.
- [10] K Yosioka and Y Kawasima. 1955. Acoustic radiation pressure on a compressible sphere. *Acta Acustica united with Acustica* 5, 3 (1955), 167–173.