



単一の DC モータによるラケットへの衝撃感と反発感の提示

Presentation of impact and rebound sensations to the racket by a single DC motor

祖父江迪瑠, 加藤総真, 溝口泉, 梶本裕之

Michiru SOBUE, Soma KATO, Izumi MIZOGUCHI, and Hiroyuki KAJIMOTO

電気通信大学 (〒182-8585 東京都調布市調布ヶ丘 1-5-1, {sobue, kato, mizoguchi, kajimoto}@kaji-lab.jp)

概要: HMD 等の普及により VR スポーツの需要が高まっている。ラケット競技に着目すると、打撃感をはじめとする触覚を再現することは体験の質を向上させる。ラケット競技における打撃感には主に皮膚感覚が関与する衝撃感と、主に力覚が関与する反発感の 2 つに分解することができる。従来は片方を主に提示するか、それぞれの感覚を 2 つの装置で提示することが多い。それに対して本研究では、単一の DC モータによって衝撃感と反発感の 2 つの感覚を提示する手法を提案する。

キーワード: 触覚、力覚、皮膚感覚、DC モータ、スポーツ、打撃感

1. はじめに

HMD 等の普及により VR スポーツの需要が高まっている。その中でも Eleven Table Tennis[1]をはじめとするラケット競技の人気は顕著であり、打撃感をはじめとする触覚を再現することは体験の質を向上させると考えられる。

ラケット競技における打撃感には主に皮膚感覚が関与する高周波振動による感覚(本論文では衝撃感とよぶ)と、主に力覚が関与する低周波成分の感覚(本論文では反発感とよぶ)の 2 つに分解することができる。主に反発感(力覚)を提示する手法としては、吉江ら[2]によるジャイロ効果を利用したものや仲田ら[3]によるモータの加速度変化を用いたもの、Zennerら[4]による物理特性を変えるものが提案されている。また、主に衝撃感を提示する手法としては、Chenら[5]による回転可能な移動軸とソレノイドにより多自由度の衝撃感を提示するものや Teckら[6]による振動とねじれ効果を提示するものが提案されている。加えて、それぞれの感覚を提示するためにボイスコイルのような振動提示装置と力覚提示装置の 2 つの装置が使われているもの[7][8][9]も数多く提案されている。

一方で、先行研究から DC モータで高品位な触覚が出せることが示されている。Yemら[10]は通常の DC モータを振動子として用いることでその性能を明らかにし、真鍋ら[11]はハウジングとローターを皮膚に付け、DC モータで強い振動と肌の伸縮を与えることで触覚を提示した。

本研究では前述の知見を活かし、2 つの装置を用いるのではなく単一の DC モータによって衝撃感と反発感の 2 つの感覚を提示する手法を提案する。同様の試みは中村ら

[12]によって行われているが、この研究ではモータの加減速時の慣性力による把持物体への衝撃位置の再現に着目していた。そこで本研究では、高品質な打撃感の提示として反発感と衝撃感のレンダリング方法に着目した。この手法は単一の DC モータというシンプルな構成でありながら、リアルな打撃感を提示可能であることが期待される。

2. デバイス

2.1 デバイス構成

本手法について検討するため、図 1 に示すハンドヘルドデバイスを作成した。内部には DC モータ (118746, Maxon) が搭載されており、下部には加速度センサ (KXR94-2050, Kionix) が取り付けられている。

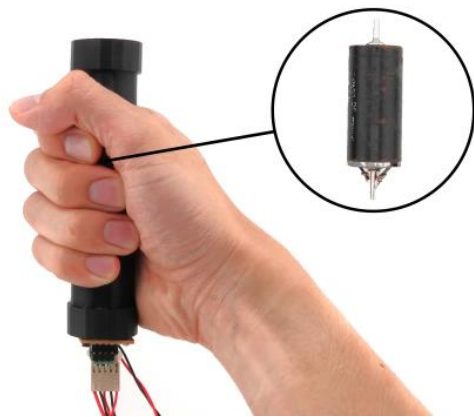


図 1 デバイス把持の様子 (左)、内部モータ (右)

把持部は ABS 製であり、ラケットを握るように把持する。このデバイスを、スマッシュを打つような動作で前方に振ることで適切なタイミングで打撃感を提示する。現時点では重心位置や重量を実物のラケットに合わせることは行っていない。

DC モータの制御はマイコン (Raspberry Pi Pico) にて PWM 制御で行っており、マイコンは PC と接続されシリアル通信によってデータを受信可能な状態となっている。マイコンは PC から加速度のデータを受信し、図 2 のように x 軸と z 軸の加速度の値が共に減少し始めた際に DC モータを駆動させる。このアルゴリズムは我々が実験的に、実際の打撃タイミングと合うことを確認したものである。

2.2 反発感提示

反発感 (力覚) を提示するためには、モータの回転速度を急変させることによって角加速度を感じさせることが有効である[3]。

一方で、この方式だと、一方向の回転トルクを明瞭に感じる。これはヒットポイントがラケットの左右にずれた際の「外れた感じ」を出すには都合が良いが、中心軸に沿ったヒットポイントで打った場合には対応しない。言い換えれば、常に失敗した打撃感を提示することになる。そこで、モータを一方向に回転させた後に逆方向に回転させることで、ユーザには左右のどちらにもトルク感を生じることなく反発感のみ生じるのではないかと考えた。

実験的に DC モータを打撃のタイミングで一方向に回転し、その後逆方向に回転させてみると、時間タイミングが 10ms 以下の際に、左右のいずれにもトルク感を生じないことが示唆された。

つまり、それぞれの方向への回転は単独では回転トルクとして知覚されるが、短時間に 2 回の回転を提示することで反発感として感じることができると考えられる。

2.3 衝撃感提示

衝撃感を提示するためには、以下の方式で表される減衰正弦波 (Okamura ら[13]による近似モデル) を用いた振動提示が有効である[14][15]。

$$y = A \sin(2\pi ft) \exp(-Bt) \quad (1)$$

ここで、 f 、 t はそれぞれ周波数と時間である。また、 A 、 B はそれぞれ振幅と減衰率である。本実験では、DC モータに 50Hz の減衰正弦波を PWM で表現したものが入力された。振幅や減衰率の値は、事前に著者 1 名を含む 3 名への打撃感の提示を基に設定した。

減衰正弦波の継続時間は 0.8s である。この振動により皮膚感覚が提示されることで衝撃感として感じることができる。

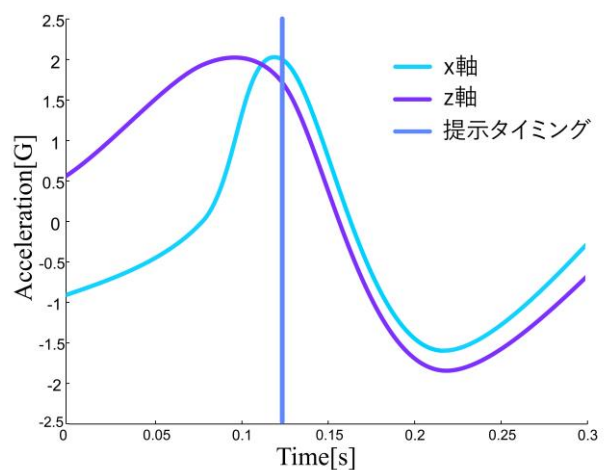


図 2 提示タイミングの一例

3. 実験

提案手法である反発感と衝撃感の 2 つの感覚の提示の有効性を検証するために、デバイスによる打撃感のリアリティを評価する実験を行った。

実験参加者は男性 7 名、女性 1 名 (21 歳~25 歳、全員右利き) とした。参加者にはヘッドフォン (MDR-CD900ST, SONY) を装着するよう指示した。感覚提示時、聴覚遮断のため実験担当者は参加者が装着したヘッドフォンにホワイトノイズを提示し、視覚遮断のため目を閉じるよう指示した。実験の様子を図 3 に示す。

スイングのばらつきを減らすために、参加者はあらかじめ、デバイスを振る練習を行った。

練習後、参加者はスマッシュを打つような動作で前方にデバイスを 5 回程度振った。この際、加速度センサによって適切なタイミングで打撃感が提示された。参加者は提示された打撃感のリアリティを 7 段階のリッカートスケール (1:まったくリアルでない~7:実物と同程度) で回答した。実験は打撃感 3 条件 (反発感のみ、衝撃感のみ、反発感と衝撃感) について行った。実験終了後、参加者はラケット競技の経験年数に関するアンケートに答え、実験に対して自由にコメントした。



図 3 実験の様子

4. 実験結果

実験結果を図 4 に示す。縦軸はリッカート尺度で回答した衝撃感のリアリティの値である。

これらの反復測定データに対して Friedman 検定を行い ($p < 0.01$)、Bonferroni 法による多重比較の結果、反発感のみ—衝撃感のみ ($p < 0.01$)、衝撃感のみ—反発感と衝撃感 ($p < 0.01$) の間で有意差が見られたが、反発感のみ—衝撃感と反発感の間では有意差は観察されなかった。

5. 考察

5.1 反発感と打撃感の関係

実験結果から、反発感が含まれる条件は含まれない条件に比べてリアリティが有意に高いことが確認できた。このことから、提示された感覚を打撃感と認識するためには反発感が必要であることが示唆される。被験者から「反発感が強いほどリアルに感じる」というコメントを得ており、これは力覚が作用するためであると考えられる。

5.2 反発感と衝撃感の組み合わせ

反発感のみ—反発感と衝撃感の間では有意差が見られなかった。要因の一つとして、被験者は反発感のみの提示でも打撃感のリアリティが高いと感じていたことが考えられる。これに関して、複数の被験者が「反発感があるとガツとぶつかる感覚がする」「ボールの打撃感に近い」とコメントしている。実際、反発感のみの評価の中央値は 6、最大値は 7 であり、より範囲の広いリッカートスケールを用いる必要があったと考えられる。

加えて、衝撃感に関して、被験者は衝撃感のみの提示では打撃感と感じられなかったものの、「衝撃感がガツに当たった時の振動感に近い」「ガツに当たって食い込む感覚に近い」というコメントを残している。

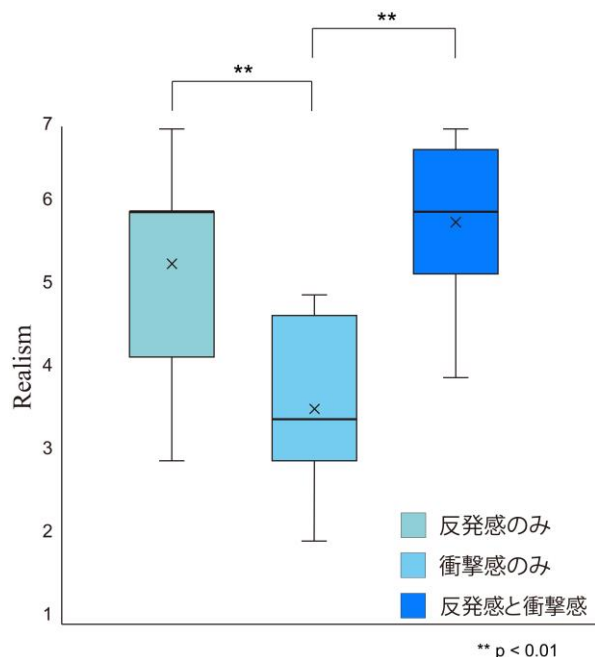


図 4 実験結果

このことから、有意差は得られなかったものの、反発感と衝撃感の組み合わせが打撃感の向上に繋がる可能性が示唆される。

5.3 実験条件

実験条件について、複数の被験者から「デバイスの振り方や速さによって評価が変わる」「テニスや野球の打ち方をすると異なる感触になる」というコメントを得た。今回は振り方を、スマッシュを打つように前方に振り下ろすように指定した。スイング方向や速さが変わるといことは、力のベクトルが異なるということであるため、それぞれに適した反発感と衝撃感の強さがあると考えられる。これらを調査することで打撃感のリアリティを高められる可能性が示唆される。

6. おわりに

本論文では、打撃感の提示を目的とした単一の DC モータによる衝撃感と反発感の提示手法を提案し、その有効性を検証するための実験を行った。実験では反発感のみ、衝撃感のみ、反発感と衝撃感の 3 条件を提示し、被験者に評価してもらった。結果として、現状では反発感と衝撃感の組み合わせによる有効性は見られなかったものの、被験者から「衝撃感がガツに当たった時の振動感に近い」というコメントを得た。一方で、実験条件の見直しや提示装置の改良が必要なることも確認できた。今後はこれらの問題点を改善し、打撃感の向上についての検証を進めていく。

謝辞 本研究は JSPS 科研費 JP20H05957、および一般財団法人テレコム先端技術研究支援センター (SCAT) の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] For Fun Labs. 2020. Eleven: Table Tennis VR. <https://elevenvr.com/>
- [2] 吉江 将之, 矢野 博明, 岩田 洋夫: ジャイロモーメントを用いた力覚呈示装置, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 7, No. 3, pp. 329-337, 2002.
- [3] 仲田 謙太郎, 中村 則雄, 山下 樹里, 西原 清一, 福井 幸男: 角運動量変化を利用した力覚提示デバイス, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 6, No. 2, pp. 115-120, 2001.
- [4] A. Zenner and A. Krüger, "Drag:on: A Virtual Reality Controller Providing Haptic Feedback Based on Drag and Weight Shift," In Proceedings of the CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, pp. 1-12, 2019.
- [5] H. Chen, S. Chiu, C. Wen, and H. Tsai, "TransPAF: Rendering Omnidirectional Impact Feedback with Dynamic Point of Application of Force All Round a Controller," In Proceedings of the CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, pp. 1-13, 2023.

- [6] F. Teck, C. Ling, F. Farbiz, and H. Zhiyong, "Ungrounded haptic rendering device for torque simulation in virtual tennis," In ACM SIGGRAPH Emerging Technologies, pp. 1-1, 2012.
- [7] C. Park, J. Park, S. Oh and S. Choi, "Realistic Haptic Rendering of Collision Effects Using Multimodal Vibrotactile and Impact Feedback," IEEE World Haptics Conference, pp. 449-454, 2019.
- [8] D. Kim, J. Lee, and S. Choi, "MMGrip: A Handheld Multimodal Haptic Device Combining Vibration, Impact, and Shear for Realistic Expression of Contact," In SIGGRAPH Asia Posters, pp. 1-2, 2022.
- [9] P. Lopes, A. Ion, and P. Baudisch, "Impacto: Simulating Physical Impact by Combining Tactile Stimulation with Electrical Muscle Stimulation," In Proceedings of the 28th Annual ACM Symposium on User Interface Software & Technology, pp. 11-19, 2019.
- [10] V. Yem, R. Okazaki and H. Kajimoto, "Vibrotactile and pseudo force presentation using motor rotational acceleration," IEEE Haptics Symposium, pp. 47-51, 2016.
- [11] M. Manabe, K. Ushiyama, A. Takahashi and H. Kajimoto, "Vibrotactile Presentation using a Motor within a Housing and Rotor Fixed to the Skin," IEEE World Haptics Conference, pp. 906-911, 2021.
- [12] 中村 美月, 渡辺 亮, 五十嵐 洋 : 把持物体への衝撃位置を再現可能な小型の触覚デバイス, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2023, 2023.6.
- [13] A. M. Okamura, M. R. Cutkosky and J. T. Dennerlein, "Reality-based models for vibration feedback in virtual environments," in IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, vol. 6, no. 3, pp. 245-252, 2001.
- [14] O. Takumu, S. Okamoto and Y. Yamada. "Passive Haptics: Pulsive Damping Brake for Greater Impulse Perception," International Conference on Haptic Interaction - Science, Engineering and Design, pp. 211-216, 2016.
- [15] S. Shimizu, T. Hashimoto, S. Yoshida, R. Matsumura, T. Narumi and H. Kuzuoka, "Unident: Providing Impact Sensations on Handheld Objects via High-Speed Change of the Rotational Inertia," IEEE Virtual Reality and 3D User Interfaces, pp. 11-20, 2021.