



多様な物理特性を提示する トルクフィードバック VR コントローラ: 第 2 報

橋本健¹⁾, 吉田成朗^{1,2)}, 鳴海拓志¹⁾

Takeru HASHIMOTO, Shigeo YOSHIDA, and Takuji NARUMI

1) 東京大学 (〒 113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1, {hashimoto,narumi}@cyber.t.u-tokyo.ac.jp, shigeo@star.rcast.u-tokyo.ac.jp)

2) OMRON SINIC X (〒 113-0033 東京都文京区本郷 5-24-5, shigeo.yoshida@sinicx.com)

概要: 人間は、手にかかる力を利用して、振り回す物体の特性（慣性力や粘性など）を推定することができる。我々はこのメカニズムに着目し、手に加える力を動的に変化させることで、振り回す物体の物理的な特性を表現することを目指した。本研究は、Control Moment Gyroscopes (CMG) を用いて、接地していない 3 自由度のトルクフィードバックを生成する力提示装置を提案する。また、ヒトが装置を運動させたときに、角加速度や角速度に応じた力のフィードバックを与えることで、運動の慣性モーメントや粘性抵抗を変化させることを試みた。性能評価により、本装置は、運動の見かけの慣性モーメントと粘性抵抗をそれぞれ 0.01 kgm^2 と 0.1 Ns だけ変化させられることが分かった。

キーワード: 非接地力提示装置, Dynamic touch, Control Moment Gyroscopes, インピーダンス制御

1. はじめに

CG や、ディスプレイ技術、ヒトの動きを高精度で取得するセンサの発達によって視覚的、聴覚的なバーチャルリアリティ (VR) 体験は現実で我々が見て耳にする体験と同等なものに近づきつつある。このような視覚聴覚的な VR 体験が商用の装置でも体験できるようになった現在、VR における操作インタフェースに大きな注目が置かれている。現在、一般的な VR における主な操作インタフェースは把持型のコントローラか、ハンドトラッキング機能によって可能になったユーザ自身の手の二つが挙げられる。自身の手をモデルとしてバーチャル空間に投射したインタフェースは操作の直観性に優れており、現実空間で手を動かすかの如くバーチャル物体とインタラクション可能である。対して、コントローラ型のインタフェースはバーチャル空間における自らの手だけでなく、自らの持つバーチャルな道具の役割を果たし、その道具を通じたインタラクションを表現することが求められるだろう。物体を把持したときに感じる物体の特性を再現するために、様々なアプローチが取られてきた。

基本的にものを「掴む」という動作に関してヒトは機能の異なる二種類の動作を有している [7]。一つは親指と人差指、中指で物体を把持する方法 (Precise Grasp) で、この掴み方はものに与えることができる力は微細だが、ものを繊細に動かすことが可能である。もう一つは手掌全体で物体を把持する方法 (Power Grasp) で、大きな力で物体をしっかり持つことが可能であり、物体をダイナミックに動かすことができる。また、この二種類のつかみ動作によって、

ヒトは物体の大きさや形状、剛性などの特徴を知覚することが可能である。

Precise Grasp に関する物体の特性の知覚は、身体接地型の装置によって多く研究されてきた [6, 2, 8]。人間が精密な把持を行う対象物は軽くて小さいものが多いため、精密な把持の触覚情報を再現するためには、上腕や肩にかかる力を再現する必要はなく、指による力の再現だけで十分である。したがって、Precise Grasp 時の物体の特性を表現するためには、一般的に身体接地型の装置が使用される。

一方で、ヒトがものを Power grasp している際は、腕全体の筋肉を使って物体を動かすことが多い。腕全体にかかる力を表現するために、身体に接地しない、非接地型の装置が多く研究されてきた。Thor's hammer [4] は 6 つプロペラを独立に制御することで 3-DoF の並進力を生み出す非接地型の力提示装置である。装置の姿勢によって力の向きを変化させることで、装置にかかる重力を表現することに成功している。他方、機械工学の分野では、物体の静的な性質（慣性、粘性、剛性）を適切な力の出力で表現しようとする手法をインピーダンス制御と呼ぶ。インピーダンス制御には、人の動きに応じた素早い力のフィードバックが必要である。そのため、プロペラを使った方式では力フィードバックの遅延 (約 300ms) により、インピーダンス制御は難しい。

本研究では、非接地型の力提示装置を用いてインピーダンス制御を行うことで、ヒトが Power Grasp 時に感じる様々な物体の特性を表現することを目指す。低遅延で力を出力できる手法として、本研究では Control Moment Gyroscopes (CMG) に注目した。これまで、様々な CMGs システム

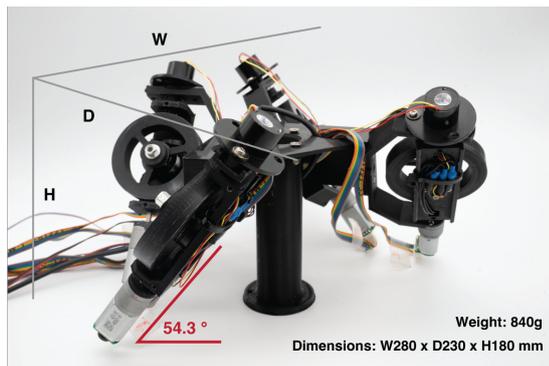


図 1: 提案装置の全体像.

[11, 10] が提案されてきたが、いずれも短時間の衝撃モーメントを発生させるためのものであり、ヒトの動きに応じた連続的なトルクの提示には用いられてこなかった。そこで、本研究では連続的にトルクを出力できる制御手法を CMG システムに適用することでインピーダンス制御を可能にし、ヒトが物体を振った際に感じる様々な物体の特性の表現を試みる。

2. 提案装置

提案装置は 4 つの CMG で構成されており、その概観、大きさ、重さを図 1 に示す。CMG の配置は、3 軸方向に均等にトルクを出力できる 4 ピラミッド型を選択した [5]。また、把持点付近の重心トルクを低減するために、重心位置ができるだけ把持点付近になるように各 CMG を配置した。また、CMG1 台の分解図を図 2 に示す。ベアリングやスリップリングなどの機構部品を除き、すべて 3D プリンタ (UltimakerS5) を用いて PLA で造形した。1 つの CMG はフライホイール、ジンバル機構から構成されている。使用したフライホイールの特性は内径 50 mm、外径 70 mm、質量 30 g、慣性モーメント $2.4 \times 10^{-5} \text{ kgm}^2$ である。また、フライホイールの駆動にはブラシレス DC モータ (BR2205, Racerstar 社製) を用い、その回転数は常に 800 rad/s であった。ジンバル機構の回転には DC ギアードモータ (#3488, Pololu 社製) を用いた。また、装置の動きを検出するために、慣性計測装置 (IMU) MPU9250 を装置の上部に設置した。IMU からは装置の姿勢、角速度が 500Hz で取得され、角加速度は角速度の微分として計算された。

フライホイールモータ、ジンバルモータ、IMU は、マイコン Teensy 4.0 を介して PC に接続した。各マイコンから取得したパラメータ (ジンバル状態、IMU 情報等) は、ROS サーバを介して共有した。ジンバル、フライホイール、IMU は 1 つの Teensy 4.0 で扱うことも可能であるが、今回は扱いやすさのために各コンポーネントに分割した。

現在のジンバル状態からジンバルの速度を算出するアルゴリズムとして本研究では DSEA 法 [9] を選択した。

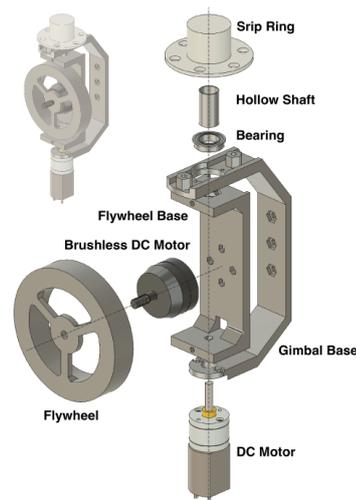


図 2: CMG 単体の分解図。ブラシレス DC モーターがフライホイールを駆動し、DC モーターがフライホイールの土台を駆動する。

3. 角加速度や角速度に応じたトルク出力性能検証

本章では、提案装置によってヒトの動きに応じたインピーダンス制御を行うことができるかどうかを検証する。トルクセンサを把持部とトルク発生器の間に取り付け、所与の力が出力されているかどうかを観察する。トルクセンサにかかるトルク τ_{sensor} は以下のように表される。

$$\tau_{sensor} = -I\dot{\omega} - D\omega + \tau_{gen} + G(\theta) \quad (1)$$

τ_{gen} は CMG によって出力されるトルクである。提案装置と空気の接触による粘性係数 D は十分小さいため 0 と仮定する。重力によるトルク $G(\theta)$ は IMU からの重力ベクトル $g(\theta)$ と重心位置 x_G から $G(\theta) = x_G \times g(\theta)$ となる。したがって、センサーの値から重力によるトルクの影響を取り除くと、トルク τ_{imp} は次のように求められる。

$$\tau_{imp} = -I\dot{\omega} + \tau_{gen} \quad (2)$$

この状態で、インピーダンス制御に従ってトルク $\tau_{gen} = -\Delta I\dot{\omega} - \Delta D\omega$ を発生させれば、トルク τ_{imp} は次のように表される。

$$\tau_{imp} = -(I + \Delta I)\dot{\omega} - \Delta D\omega \quad (3)$$

3.1 実験設定

参加者は装置を持ち、図 3 に示すように、指定した方向 j (x, y, z 軸) 周りの振り運動を行った。なお、運動の軌跡を条件間でできるだけ同じにするために、すべての運動を一人の参加者が行った。参加者は 120BPM または 240BPM のメトロノーム音に同期した振り運動を行った。1 カウントで 1 振り動作を行ったため、各振り運動の周波数は 1Hz または 2Hz となる。

装置の初期インピーダンスは $(I_x, I_y, I_z) = (0.0065, 0.0075, 0.003) \text{ kgm}^2$, $(D_x, D_y, D_z) = (0, 0, 0) \text{ Ns}$ である。この初期インピーダンスに対して、パラメータ ΔI_j と ΔD_j ,

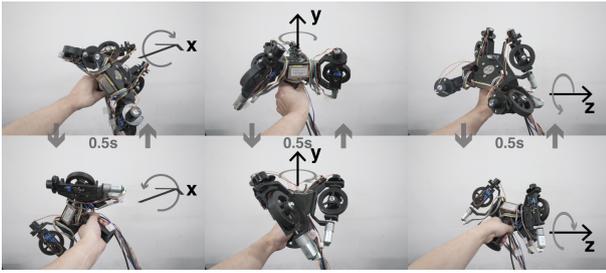


図 3: 振り運動の方向

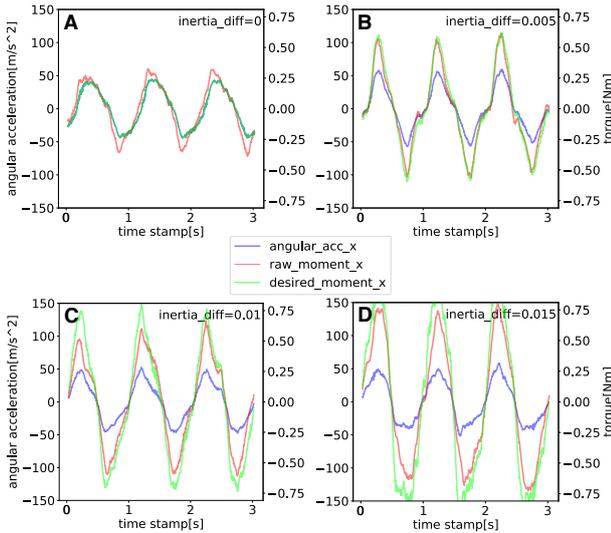


図 4: x 軸周りの 1Hz 振り動作条件における角加速度 (青), 実際出力トルク (赤), 理想出力トルク τ_I (緑). {A,B,C,D} が $\Delta I_x = \{0, 0.005, 0.010, 0.015\}$ に対応する.

($j = x, y, z$) を変化させる. 各軸の動きに対して, 対応する軸の慣性モーメントの変化量 ΔI_j を (0, 0.005, 0.010, 0.015) kgm^2 と設定し, 参加者に振り運動を行わせた. その後, 各軸の動きに対して, 対応する軸の粘性の変化量 ΔD_j を (0, 0.05, 0.10, 0.15) Ns と設定し, 同様に参加者に振り運動を行わせた.

3.2 計測結果

x,y,z 軸周りの運動においてほぼ同様の結果が得られたため, 紙面の都合上, x 軸の運動における結果のみを記載する. 運動の角加速度 $\dot{\omega}$ または角速度 ω と理想出力トルク τ_{imp} の関係が式 (3) で与えられる値であることを確認する. 各条件 (振り運動の周波数と慣性モーメントの変化分) ごとの角加速度, 実際出力トルク, 理想出力トルクの時間変化について図 4,5 に示す.

グラフから各軸の慣性モーメント変化分 ΔI_j が大きいほど, 同じ角加速度に対して大きなトルクが出力されるが, 各条件における理想出力トルクと実際出力トルクはほぼ一致していることがわかる. しかし, $\Delta I_j = 0.015$ のときは, 1Hz, 2Hz の両条件において理想出力トルクと実際出力トルクの差が大きくなっていることが観察された. こ

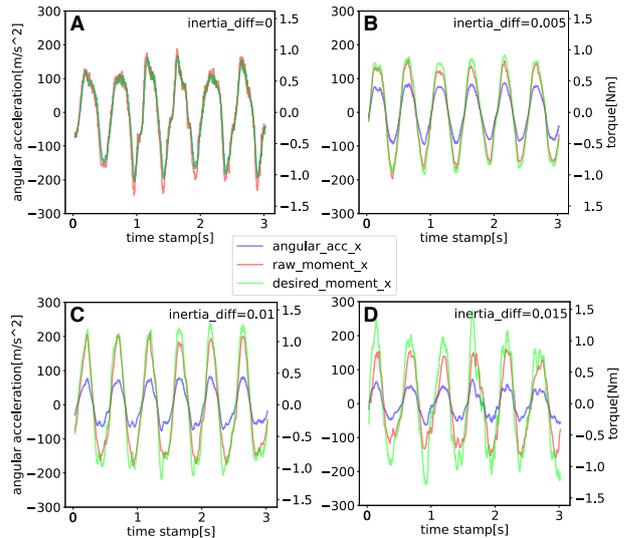


図 5: x 軸周りの 2Hz 振り動作条件における角加速度 (青), 実際出力トルク (赤), 理想出力トルク τ_I (緑). {A,B,C,D} が $\Delta I_x = \{0, 0.005, 0.010, 0.015\}$ に対応する.

の乱れは, 1 回の振りで目標トルクが装置の出力できる許容トルクを超えた事による影響であると考えられる. 従って, 本装置がヒトの運動に対して適用できる慣性の差は約 $\Delta I_j \approx 0.01 \text{kgm}^2$ であることが分かる. 装置のももとの慣性モーメントが $(I_x, I_y, I_z) = (0.0065, 0.0075, 0.003) \text{kgm}^2$ であり, 慣性モーメントに関するウェーバー比は 11-22%[3] であることから, 本装置によって表現される慣性モーメント増加分をヒトは十分知覚可能であると言える.

次に, 各条件 (振り運動の周波数と粘性の変化分) ごとの角速度, 実際出力トルク, 理想出力トルクの時間変化について図 6,7 に示す. 各軸の粘性変化分 ΔD_j が大きいほど, 同じ角速度に対して大きなトルクが出力されるが, 各条件における理想出力トルクと実際出力トルクは各条件でほぼ一致していることがわかる. しかし, $\Delta D_j = 0.15$ のときは, 理想出力トルクと実際出力トルクの差が大きく, トルクが乱れていることが観察された. この乱れは, 慣性モーメントのときと同様に 1 回の振りで目標トルクが許容トルクを超えたためであると考えられる. 従って, 本装置がヒトの運動に対して適用できる粘性の差は約 $\Delta D_j \approx 0.1 \text{Ns}$ であることが分かる. 装置の粘性抵抗は各軸方向ともに $O(10^{-5}) \text{Ns}$ 程度であり, 粘性抵抗のウェーバー比は 30-100%[1] であるため, 本装置によって表現される粘性抵抗増加分をヒトは十分に知覚可能であると言える.

4. まとめ

本研究では非接地型の 3 軸トルク出力装置を提案した. ヒトの動きに対してインピーダンス制御を用いることで, 装置を振った際の見かけの慣性モーメントや粘性抵抗が変化することを計測によって確認した. 今後は, ヒトが本装置による力提示をどう知覚するのかについて心理物理実験やイン

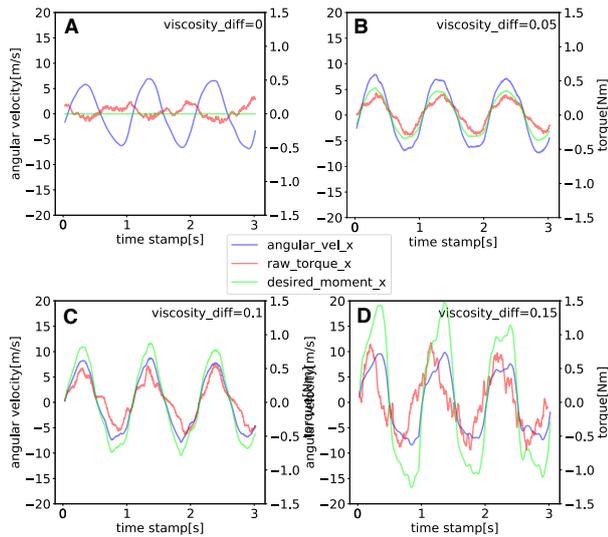


図 6: x 軸周りの 1Hz 振り動作条件における角速度 (青), 実際出力トルク (赤), 理想出力トルク τ_D (緑). {A,B,C,D} が $\Delta D_x = \{0, 0.05, 0.10, 0.15\}$ に対応する.

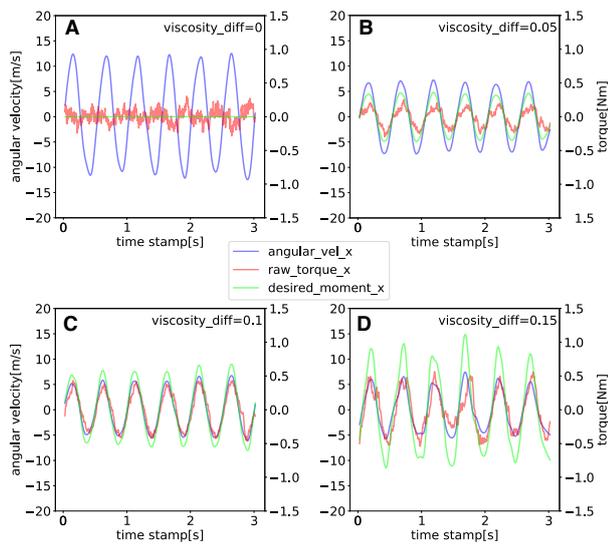


図 7: x 軸周りの振り 2Hz 動作条件における角速度 (青), 実際出力トルク (赤), 理想出力トルク τ_D (緑). {A,B,C,D} が $\Delta D_x = \{0, 0.05, 0.10, 0.15\}$ に対応する.

タビユーなどで調査する予定である.

謝辞 本研究は JSPS 科研費 21J12372, 20K21801, 22H03628 の助成を受けたものです.

参考文献

[1] Wouter M Bergmann Tiest, Anne C L Vrijling, and Astrid M L Kappers. Haptic discrimination and matching of viscosity. *IEEE Trans. Haptics*, Vol. 6, No. 1, pp. 24–34, January 2013.

[2] Inrak Choi, Heather Culbertson, Mark R Miller, Alex Olwal, and Sean Follmer. Grability: A wearable haptic interface for simulating weight and grasping in virtual reality. In *Proceedings of the 30th Annual ACM Symposium on User Interface Software*

and Technology, UIST '17, pp. 119–130, New York, NY, USA, October 2017. Association for Computing Machinery.

- [3] Nienke B Debats, Idsart Kingma, Peter J Beek, and Jeroen B J Smeets. Moving the weber fraction: the perceptual precision for moment of inertia increases with exploration force. *PLoS One*, Vol. 7, No. 9, p. e42941, September 2012.
- [4] Seongkook Heo, Christina Chung, Geehyuk Lee, and Daniel Wigdor. Thor's hammer: An ungrounded force feedback device utilizing Propeller-Induced propulsive force. In *Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, No. Paper 525 in CHI '18, pp. 1–11, New York, NY, USA, April 2018. Association for Computing Machinery.
- [5] Haruhisa Kurokawa. A geometric study of single gimbal control moment gyros. *Report of Mechanical Engineering Laboratory*, Vol. 175, pp. 135–138, 1998.
- [6] Kouta Minamizawa, Souichiro Fukamachi, Hiroyuki Kajimoto, Naoki Kawakami, and Susumu Tachi. Gravity grabber: wearable haptic display to present virtual mass sensation. In *ACM SIGGRAPH 2007 emerging technologies*, pp. 8–es. 2007.
- [7] John R Napier. The prehensile movements of the human hand. *The Journal of bone and joint surgery. British volume*, Vol. 38, No. 4, pp. 902–913, 1956.
- [8] Mike Sinclair, Eyal Ofek, Mar Gonzalez-Franco, and Christian Holz. CapstanCrunch: A haptic VR controller with user-supplied force feedback. In *Proceedings of the 32nd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '19, pp. 815–829, New York, NY, USA, October 2019. Association for Computing Machinery.
- [9] Laurens Valk, Andrew Berry, and Heike Vallery. Directional singularity escape and avoidance for single-gimbal control moment gyroscopes. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, Vol. 41, No. 5, pp. 1095–1107, 2018.
- [10] Julie M Walker, Heather Culbertson, Michael Raitor, and Allison M Okamura. Haptic orientation guidance using two parallel Double-Gimbal control moment gyroscopes. *IEEE Trans. Haptics*, Vol. 11, No. 2, pp. 267–278, April 2018.
- [11] Kyle N Winfree, Joseph M Romano, Jamie Gewirtz, and Katherine J Kuchenbecker. Control of a high fidelity ungrounded torque feedback device: The iTorqU 2.1. In *2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 1347–1352, May 2010.