



多様な形状知覚を提示する トルクフィードバック VR コントローラ

Rendering various shapes of virtual objects using Torque Feedback

橋本健¹⁾, 吉田成朗^{1,2)}, 鳴海拓志^{1,2)}, 廣瀬通孝¹⁾

Takeru HASHIMOTO, Shigeo YOSHIDA, Takuji NARUMI, and Michitaka HIROSE

1) 東京大学 大学院情報理工学系研究科 (〒 113-0033 東京都文京区本郷 7-3-1,

{hashimoto,shigeodayo,narumi,hirose}@cyber.t.u-tokyo.ac.jp)

2) 国立研究開発法人科学技術振興機構 さきがけ (同上)

概要: 人は把持している物体を振ることで、力覚を通じてその形状を知覚可能である。バーチャル環境においては、把持物体から視覚的・力覚的に知覚される形状の整合性を取ることは体験のリアリティ向上やアフオーダンスの点において重要な課題である。本研究では形状知覚に影響を与える要素としてトルクに注目し、人間の手の運動に対してトルクをフィードバックすることで力覚を通じて知覚されるバーチャル把持物体の形状を自在に操作する手法を提案する。

キーワード: 形状知覚, ダイナミックタッチ, 触覚ディスプレイ, ジャイロ効果

1. はじめに

ヘッドマウントディスプレイ (HMD) や立体音響に代表される視覚・聴覚的なバーチャルリアリティ (VR) 技術の発展により、人々は高い没入感や臨場感を得ながらバーチャル環境 (VE) での体験を行うことが可能となった。このような高品質化された VR 体験をよりインタラクティブなものにするために、VR における操作インタフェースへの期待も高まっている。特に手持ち操作コントローラは単なるボタンやスティックによる入力操作だけでなく、その位置をトラッキングしてユーザの腕や手の運動を直接 VE に反映可能なため、重要性が高い。

従来の VR における手持ち操作コントローラでは、VE におけるコントローラの見え目を変えることで把持物体の形状の情報をユーザに与えている。一方、コントローラを操作した際に手に感じられる、触力覚から生起される形状知覚はしばしば無視されてきた。視覚から想起される形状と触力覚から生起される形状知覚が食い違うことは、没入感や臨場感を損なう原因となり得る。

触力覚による把持物体の大まかな形状知覚は、物体の慣性モーメント (回転運動における運動の起こりにくさ) に依存することが示されている [1, 2]。この特性に注目し、VE での把持物体の形状を触力覚的に再現するような最適なインタフェースを合板で作成する研究 [3] や、おもりの位置を 1 次元や 2 次元方向に操作して把持物体の触力覚的な長さ/幅知覚を動的に変化させる装置 [4, 5] の開発が行われている。

しかし、これらの装置は慣性モーメントといった物体の静的な特徴を変化させているため、提示可能な形状の大き

さや形状の変化における応答性に限界がある。本稿ではこれらの装置よりもより広範囲で多様な形状を表現でき、高い応答性をもった VR コントローラを開発するための理論について考察する。

2. 関連研究

本研究は生態心理学における人間の把持物体に対する形状知覚に関する研究と VE における触覚分野の様々な先行研究に着想を得て行われている。以下に参考にした研究について記す。

2.1 形状知覚とその提示装置

生態心理学の分野において、把持している物体の大きさや形状 (以下、まとめて形状と記す) を触覚的に知覚できる人間の能力のメカニズムについての研究が行われている。Turvey et.al. によってダイナミックタッチと名付けられたこの能力のメカニズムについて、物体固有の慣性モーメントが把持物体の形状知覚に重要な役割を果たしていることが明らかになっている [1, 2]。

この特徴を基に人間の把持物体に対する形状知覚を操作する VR コントローラがいくつか開発されている。Shifty[4] は棒についた 1 つのおもりの位置を動かす事によって、様々な長さのバーチャル物体を把持している感覚を表現できる VR コントローラである。Transcalibur[5] は 2 つのおもりの位置を 2 次元平面内で独立に動かすことで、左右非対称な物体を含む様々な形状の物体を把持している感覚を提示可能にした。

慣性モーメントの変化を用いたこれらの装置は、視触覚間の相互作用による効果を用いても実際の装置の 1.5 倍 ~ 2

倍ほどの大きさの物体の表現にとどまっている [5]。しかし、HMD や CG 技術の発展により、視覚的には鉛筆や、団扇のような小さくて軽い物体からダンベルやバット、ゴルフクラブのような大きくて重い物体まで広範囲の大きさ・重さの物体を表現することが可能である。そのため、より広範囲の形状を触覚的に表現できれば、より多くの VR 体験のリアリティを高めることが可能である。

さらに、慣性モーメントを変化させるこれらの装置は様々な形状を表現できるものの、それぞれの形状の切り替えに時間がかかる。Zenner et.al. による Drag:on[6] は扇子状の機構を開閉することで装置の空気抵抗を変化させ、ユーザの把持物体に対する形状知覚を変化させた。さらに、ユーザの動きに合わせて機構を高速に変化させることで把持物体とバーチャル物体とのインタラクションを表現した。

以上のように、広範囲での形状の表現だけでなく、形状の高速な切り替えによっても表現の幅を広げることが可能である。したがって、本研究ではユーザの形状知覚を従来よりも広い範囲で俊敏に操作することを目標とする。

2.2 力覚提示装置

方向誘導や VR での力覚提示等のために非接地型の力覚提示装置は多く開発されてきた。LevioPole[7] や Thor's hammer[8] はプロペラを回転させることで発生する風力で力覚を提示した。これらは十分な力覚が得られるものの、プロペラから生じる高周波数の大きな音や強い風が体験を阻害する可能性がある。

GyroCube[9] はフライホイールを 3 軸それぞれの方向に回転させ、角運動量を変化させることでトルクを発生させる装置である。また、GyroCubeSensous[10] は 2 つの偏心回転子を制御することでユーザに振動や並進力、トルクを知覚させる装置である。これらの装置で大きな出力を得るためには、重いフライホイールの加減速を高速で繰り返さなければならない、応答性に問題がある。

同じく角運動量の変化に注目し、フライホイールの自転軸を回転させることで生じるジャイロモーメントを用いた装置も存在する [10, 11, 12]。ジャイロモーメントの大きさは回転体の回転角速度という物体の大きさや質量に依らない物理量に比例するため小型の装置でも大きな力を出力でき、回転体の自転軸を回転させることでトルクが瞬時に発生するためフライホイールの角速度を変化させる手法よりも応答性が高い。

したがって本研究ではこのジャイロモーメントを用いて形状知覚を変化させることを目標とする。

3. トルクフィードバックによる形状知覚操作手法

3.1 トルク発生による形状知覚変化の仮説

本研究の目標は慣性モーメントの変化以外の手法を用い、形状知覚を従来よりも広い範囲で俊敏に操作可能にすることである。人間の知覚とは自分の行った入力に対する出力の解釈である [13]。したがって、「形状知覚には慣性モーメントが影響する」という事実から、形状知覚は以下の方

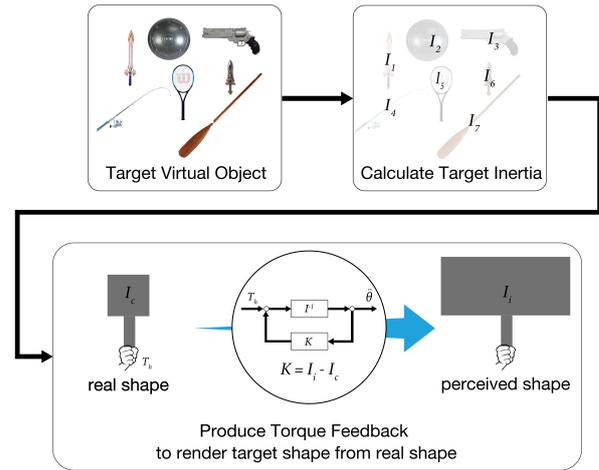


図 1: 目的形状を表現するシステム

な入出力の関係性のもとに成り立つと考えられる。

1. 物体を動かすために物体にトルク T_h を加える
2. 運動方程式 $I\ddot{\theta} = T_h$ によって物体が角加速度 $\ddot{\theta} = I^{-1}T_h$ で運動する
3. 生じた角加速度 $\ddot{\theta}$ の大きさから I を推定し、形状を知覚する

つまり、人間の形状知覚に関して、「入力 T_h に対する出力 $\ddot{\theta}$ の大きさから人間は把持物体の形状を知覚している」と仮説を立てることができる。

従来の研究では慣性モーメント I を変化させることで、入力 T_h に対する出力 $\ddot{\theta}$ の大きさを変化させたが、本研究ではトルクに注目する。人間が物体にトルクを与えるときに入力トルク T_h とは別にトルク T_f をフィードバックする。このとき、運動方程式が

$$I\ddot{\theta} = T_h - T_f \quad (1)$$

となり、実際に人間が与えているトルク T_h と慣性モーメント I が不変でも T_f を変化させれば $\ddot{\theta}$ が変化する。特に、トルクフィードバックを $T_f = K\dot{\theta}$ とすれば、

$$(I + K)\ddot{\theta} = T_h \quad (2)$$

となり、慣性モーメントが $(I + K)$ の物体の形状を表現できると考える。したがって、フィードバックのパラメタである K を適切に定めることで様々な慣性モーメントの物体を表現するシステムを構築できると考えられる (図 1)。

3.2 トルク発生装置の開発

Walker et.al. による 2 つのジンバル機構を使用したジャイロモーメントによる力覚提示装置 [12] を参考に、図 2 のようなトルク発生装置のプロトタイプを作成した。

プロトタイプは PLA 製の手持ち部、ジンバル、フライホイールから構成される。ジンバル制御用に Pololu 社のマイクロメタルギアドモータ 150:1 と同社製の磁気式エンコーダを 4 つずつ使用し、フライホイールの回転用にマブチモーター



図 2: ジャイロモーメント発生装置のプロトタイプ

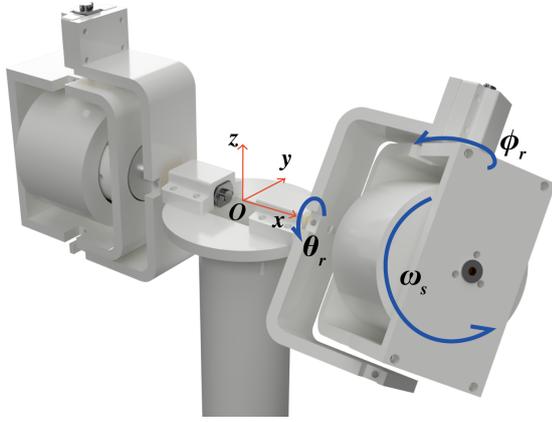


図 3: 装置における座標系と変数

ター社の RS-380PH を 2 つ使用している。また、装置の姿勢角を取得するために BOSCH 社の慣性計測装置 BNO055 を使用し、以上の電子部品すべての制御にマイクロコントローラ Teensy3.6 を使用している。

3.3 目標トルクを得るための制御

本章では、目標のトルク T_{target} を出力するためのジンバルの制御法について考察する。本装置では先行研究で考察されていたジンバルの制御によって発生するジャイロモーメントに加え、ユーザが装置を動かすことによって生じるジャイロモーメントがあるため、それについても合わせて考える。図 3 のように xyz 座標系を定め、ジンバルの回転角度をそれぞれ θ , ϕ とおく。

フライホイールの回転軸の向き v_w は以下ようになる。($\sin A = sA, \cos A = cA$ と略記する。)

$$v_w = \begin{pmatrix} c\phi \\ s\theta s\phi \\ -c\theta s\phi \end{pmatrix} \quad (3)$$

したがって、フライホイールの角運動量 L はフライホイールの自転軸周りの慣性モーメント I と自転角速度 w_s を用

いて式 (4) のように表せる。

$$L = Iw_s v_w \quad (4)$$

また、ジンバルの動きによる角速度 w_{gimbal} と装置自体の傾きによって生じる角速度 $w_{device} = \dot{\psi}$ の和 w がジャイロモーメントに関与する角速度となるため、生じるトルクは式 (5) のように表せる。

$$\begin{aligned} T &= w \times L = (w_{gimbal} + w_{device}) \times L \\ &= \left(\begin{pmatrix} \dot{\theta} \\ \dot{\phi} c\theta \\ \dot{\phi} s\theta \end{pmatrix} + \dot{\psi} \right) \times Iw_s v_w \\ &= Iw_s \left(\begin{pmatrix} -\dot{\phi} s\phi \\ \dot{\theta} c\theta s\phi + \dot{\phi} s\theta c\phi \\ \dot{\theta} s\theta s\phi - \dot{\phi} c\theta c\phi \end{pmatrix} + \dot{\psi} \times v_w \right) \quad (5) \end{aligned}$$

左右のフライホイールを考慮すると、トルクは以下のようになる。(添字の r, l はそれぞれ左右のフライホイールにおける各変数を表す。)

$$\begin{aligned} T &= Iw_s \left(\begin{pmatrix} -\dot{\phi}_r s\phi_r \\ \dot{\theta}_r c\theta_r s\phi_r + \dot{\phi}_r s\theta_r c\phi_r \\ \dot{\theta}_r s\theta_r s\phi_r - \dot{\phi}_r c\theta_r c\phi_r \end{pmatrix} \right. \\ &\quad \left. + \begin{pmatrix} -\dot{\phi}_l s\phi_l \\ \dot{\theta}_l c\theta_l s\phi_l + \dot{\phi}_l s\theta_l c\phi_l \\ \dot{\theta}_l s\theta_l s\phi_l - \dot{\phi}_l c\theta_l c\phi_l \end{pmatrix} + \dot{\psi} \times (v_{wr} + v_{wl}) \right) \\ &= Iw_s \left(\dot{\phi}_r \begin{pmatrix} -s\phi_r \\ s\theta_r c\phi_r \\ -c\theta_r c\phi_r \end{pmatrix} + \dot{\phi}_l \begin{pmatrix} -s\phi_l \\ s\theta_l c\phi_l \\ -c\theta_l c\phi_l \end{pmatrix} \right. \\ &\quad \left. + \dot{\theta}_r \begin{pmatrix} 0 \\ c\theta_r s\phi_r \\ s\theta_r s\phi_r \end{pmatrix} + \dot{\theta}_l \begin{pmatrix} 0 \\ c\theta_l s\phi_l \\ s\theta_l s\phi_l \end{pmatrix} + \dot{\psi} \times (v_{wr} + v_{wl}) \right) \\ &:= Iw_s (\dot{\phi}_r \mathbf{r}_1 + \dot{\phi}_l \mathbf{r}_2 + \dot{\theta}_r \mathbf{r}_3 + \dot{\theta}_l \mathbf{r}_4 + \mathbf{r}_5) \quad (6) \end{aligned}$$

したがって、既知のベクトル $\mathbf{r}_1 \sim \mathbf{r}_5$ に対して $T = T_{target} = K\dot{\psi}$ を満たすパラメタ $\dot{\phi}_r \sim \dot{\theta}_l$ を算出し、その通りにジンバルの角速度を制御すれば、目標のトルク T_{target} を得ることが可能である。

4. まとめと今後の展望

本研究では人間が力覚的に知覚する把持物体の形状は物体の慣性モーメントに影響を受けるという事実をもとに、トルクのフィードバックを行うことで人間の形状知覚を変化させるという手法の提案を行った。プロトタイプとして 2 軸ジンバル機構によりジャイロモーメントを発生させる装置を開発し、本装置における適切なフィードバックトルク発生手法について考察を行った。

今後は式 (6) における最適な制御変数の決定法やランク落ちにおける対処法を考察する。さらに、開発した装置を用いてユーザスタディを行い、第 3 節における仮説の検証を試みる。具体的には式 (2) におけるフィードバック変数

K を変化させ、ユーザが装置を振った際に知覚する形状が変化するか検証する。また、実際に形状知覚を操作できる範囲を調査し、様々なバーチャル物体の把持感覚を提示するシステムの構築を目指す。

参考文献

- [1] M T Turvey and Claudia Carello. Dynamic Touch. *American Psychologist*, 51(11):401–490, 1995.
- [2] M. T. Turvey, Gregory Burton, Eric L. Amazeen, Matthew Butwill, and Claudia Carello. Perceiving the Width and Height of a Hand-Held Object by Dynamic Touch. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 24(1):35–48, 1998.
- [3] Eisuke Fujinawa, Shigeo Yoshida, Yuki Koyama, Takuji Narumi, Tomohiro Tanikawa, and Michitaka Hirose. Computational design of hand-held VR controllers using haptic shape illusion. In *Proceedings of the 23rd ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology*, page 28. ACM, 2017.
- [4] André Zenner and Antonio Krüger. Shifty: A Weight-Shifting Dynamic Passive Haptic Proxy. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics (TVCG)*, 23(4):1285–1294, 2017.
- [5] Jotaro Shigeyama, Takeru Hashimoto, Shigeo Yoshida, Takuji Narumi, Tomohiro Tanikawa, and Michitaka Hirose. Transcalibur: A Weight Shifting Virtual Reality Controller for 2D Shape Rendering based on Computational Perception Model. *Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, page 11, 2019.
- [6] André Zenner and Antonio Krüger. Drag: on: A Virtual Reality Controller Providing Haptic Feedback Based on Drag and Weight Shift. In *Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, page 211. ACM, 2019.
- [7] Tomoya Sasaki, Richard Sahala Hartanto, Kao-Hua Liu, Keitarou Tsuchiya, Atsushi Hiyama, and Masahiko Inami. Leviopole: Mid-air Haptic Interactions Using Multirotor. In *ACM SIGGRAPH 2018 Emerging Technologies*, SIGGRAPH '18, pages 12:1—12:2, New York, NY, USA, 2018. ACM.
- [8] 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*, page 525. ACM, 2018.
- [9] Masataka Sakai, Yukio Fukui, and Norio Nakamura. Effective output patterns for torque display 'GyroCube'. In *Online Proceeding of the 13th International Conference on Artificial Reality and Telexistence*, volume 13, pages 160–165, 2003.
- [10] Norio Nakamura and Yukio Fukui. An innovative non-grounding haptic interface 'GyroCubeSensuous' displaying illusion sensation of push, pull and lift. In *ACM SIGGRAPH 2005 Posters*, page 92. ACM, 2005.
- [11] Kyle N Winfree, Jamie Gewirtz, Thomas Mather, Jonathan Fiene, and Katherine J Kuchenbecker. A high fidelity ungrounded torque feedback device: The iTorqU 2.0. In *World Haptics 2009-Third Joint EuroHaptics conference and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems*, pages 261–266. IEEE, 2009.
- [12] Julie M. Walker, Michael Raitor, Alex Mallery, Heather Culbertson, Philipp Stolka, and Allison M. Okamura. A dual-flywheel ungrounded haptic feedback system provides single-axis moment pulses for clear direction signals. *IEEE Haptics Symposium, HAPTICS*, 2016-April:7–13, 2016.
- [13] Alva Noë. *Action in perception*. MIT press, 2004.