

グラビトンハンド： モーメント変化を用いた装着型の重量感変化提示デバイス

田中 貴士^{1,a)} 片寄 晴弘¹

概要：本研究は体験者に擬似的な重量感の変化を知覚させる装着型デバイス「グラビトンハンド」を提案する。グラビトンハンドはデバイスの重りの位置を変位させることにより、前腕を振る際のモーメントを変化させることで重量感の変化の提示するデバイスである。本デバイスを用いて、VR コンテンツの課題の一つである視覚的な重量感の知覚と、実際の重量感の知覚の不一致の解消を目指す。本稿では、モーメント変化を与えるための本デバイスの設計、及び実際の応用環境を想定して行ったデバイスの性能検証実験の結果について述べる。

Graviton-Hand: A wearable weight changing device using moment shifting

TAKASHI TANAKA^{1,a)} HARUHIRO KATAYOSE¹

Abstract: In this research, we propose a wearable device "Graviton-Hand" which makes experiencers perceive a pseudo weight change. Graviton-Hand is a device that changing the moment when shaking the forearm by changing the position of the weight of the device, thereby presents a change in weight sensation. Using this device, we aim to resolve the discrepancy between visual perception of weight sense, which is one of the subjects of VR contents, and perception of actual weight feeling. In this paper, we describe the design of this device to affect a moment change, and the verification result of the effect when a general user actually uses the device.

1. はじめに

昨今 VR システムは急速な発展を遂げており、HMD を用いたエンタテインメントコンテンツが多数開発されている。これらのコンテンツは、体験者に視覚的に高い没入を与える一方で、視覚に対応した力覚を伴わない場合に体験者が違和感を覚えてしまうという課題がある。この問題を解決する技術として、以前より執り行われてきた力覚フィードバック技術がよりクローズアップされている。特に昨今では、重量感覚に着目した研究が注目を集めている。重量感覚に着目した研究の多くは、把持しているコントローラのモーメントに変化を与えることでコントローラを介して掴んでいる物体の重量感の提示を行なっている。

VR システムにおける物体とのインタラクションの別のアプローチとして、LeapMotion 等、把持型コントローラを介さず直接体験者の手を VR 空間に反映させるデバイスが一般に普及・開発されており、今後、VR 空間を構築する機器の小型化や安価化から、把持型コントローラを必要としない VR システムが構築されると考えられる。

そこで、我々は把持型コントローラに依存しない VR システムに備えて、装着型の重量感提示デバイスの開発を進めている。本稿では、そのデザインの一つとして前腕に装着して重心の位置を変位させることで、前腕のモーメントに変化を与え擬似的な重量感の提示を行う「グラビトンハンド」の開発とその応用事例について紹介する。

2. 関連研究

人の重量感の知覚に関する既存研究より、人は視覚で物体を知覚していなくとも、物体を振り回しモーメントを

¹ 関西学院大学
Kwansei Gakuin University, Sanda, Hyogo, Japan
^{a)} Chicken1925@gmail.com

知覚することで物理的特徴を知覚できることが知られている [1]. この特性の VR への応用例として、藤縄らの研究 [2] ではモーメントと視覚的に感じる大きさのモデルを形成し、VR コンテンツで用いる任意のコントローラの形状を縮小させることを実現した。

Zenner らの shifty[4] は、視覚的に把持している物体の重量感を与える把持型コントローラである。体験者が把持しているコントローラのモーメントを変化させることで、コントローラの手で取得した物体の擬似的な重量感の提供に成功している。廣瀬らの重み調味料グラビトミン酸 [7] では、把持しているフォークのモーメントを変化させることで、フォークの先にある食物の重量感を変化させ、食感の変化を実現している。Hemmert らは、スマートフォンに連動して力覚フィードバックを与える Weight shift mobile[3] の開発を行った。このデバイスでは、スマートフォンが平面のデバイスであることに着目し、2軸の重心移動を与えることで重量変化だけでなく質点分布の再現を行った。これらの研究事例は、視覚情報に対応したモーメント制御が重量変化の提示に有効であることを示しており、そのモーメント変化は重りの制御によって与えることができる。

重量感の提示を目指した装着型インターフェイスとしては、前腕を圧迫することにより重量感を与えることを目指した満田らの研究 [5] がある。この研究では、空気圧で腕を圧迫することで強い重量感を提示することを可能としているが、その重量を提示するまでに時間がかかることから即応性を要求するエンタテインメントコンテンツの重量感提示には向かない。また、IVRC2017 にて発表されたゴムゴムのシューティング [6] では高速な重量変化を与えることを可能としているが、変化する対象を体験者の腕としており、体験者の手に把持している物体の重量感の変化を提示することはできない。

3. グラビトンハンドの概要

グラビトンハンドでは装着型デバイスという制約のもとで、把持型コントローラを使わずに重量感の変化を与えることを目的とする。この目的を実現には、十分なモーメント変化を与える重りをコンテンツに合わせて動かす必要がある。デバイスはコンテンツに依存せず、様々なコンテンツで応用できるように設計を行う必要がある。また、将来的に携帯可能なデバイスを目指して、デバイス自体の質量を軽量にする必要がある。これらの制約に基づいて、装着型の重量提示デバイス、グラビトンハンドを実装する。

デバイスの外観を図 1 に示す。グラビトンハンドでは、前腕のモーメント変化によって把持物体の重量変化を提示するために、デバイスの大きさは前腕を覆えるように長さを 260[mm]、幅を 50[mm]、高さを 72[mm] と設定した。アクチュエータとしては軽量なデバイスを目指す一方で、十分な質量の重りを牽引する必要があるため、3[V] の DC

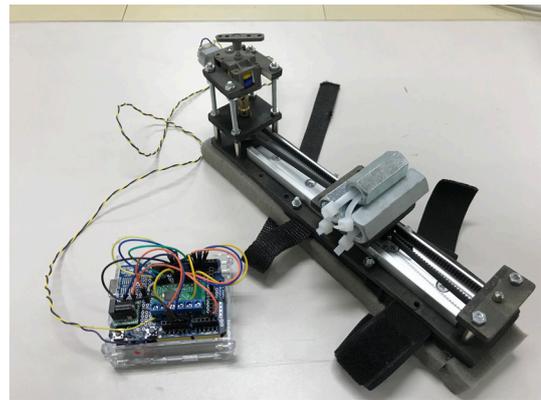


図 1 グラビトンハンドの概観
Fig. 1 The Graviton-Hand device

モータをタミヤのシングルギヤボックスにセットし、ギヤ比 114.7:1 に設定して使用した。重りを牽引する直動機構に、軽量であり、長さの可変が容易な点から、プーリーベルト機構を採用した。これらにより、重りを除いた本デバイスの質量は約 300[g] となった。アクチュエータによって重りの質量は 250[g] の重りを牽引可能であり、デバイス全体に対する重りの質量は約 45[%] である。重量感の擬似的な変化を実現した類似研究の重りとデバイスの質量の割合は、shifty[4] が 29[%] であり、廣瀬らのグラビトミン酸 [3] が 16[%] であることから、本デバイスの質量設定は、重量感の変化を与えるには十分であると考えられる。重りは前腕の中心部から手の甲にかけて 150[mm] 移動し、約 2.8[秒] で最大地点まで到達可能である。デバイスには装着用のベルトを二つつけており、装置の裏面にポリウレタンを貼り付け、デバイスと腕が密着するようにしている。

本デバイスは一般的な VR コンテンツで使用することから、VR コンテンツ制作の上で利用されるゲームエンジンと連携するようにした。今回は対象とするゲームエンジンは Unity とし、Unity から Arduino へモータを制御する命令を送り、本デバイスの制御を行なった。

4. 基本性能の検証

本デバイスの VR コンテンツへの応用の有効性を確認するために、装着型デバイスのモーメント変化が重量変化の知覚に影響し、その影響が VR コンテンツの臨場感に貢献するかどうかを検証した。また、検証に合わせて実際にデバイスが使用される環境化で本デバイスが問題なく動作するかを調査する。この検証では、デバイスの基本性能を VR コンテンツと同期して適切なモーメント変化を与えることとする。これらの検証のため、実際にデバイスが利用される環境を想定して本デバイスを用いた VR コンテンツを制作し、一般の体験者を対象に腕のモーメントと重量感の関係に関するデータの収集を行なった。



図 2 実験時に用いた VR コンテンツのスクリーンショット
Fig. 2 Screen capture of VR Contents for the experiment



図 3 性能検証実験の様子

Fig. 3 Test environment of performance verification experiment

4.1 デバイスの応用を想定した VR コンテンツ

基本性能の検証するにあたり、実際に本デバイスが VR コンテンツとともに使用される状況を想定した環境を用意する必要がある。この環境を構築する上で、重量が増えても不自然に感じにくく、楽しい体験となるように視覚効果を加えることを目的とし、今回は図2のような大きさが変化する卵を把持する VR コンテンツを用意した。

映像として提示する卵は、キーの入力によって少しずつ大きくなるようにし、その変化中にアクチュエータを駆動させ、卵が大きさと重りの位置が同期するようにした。提示重量が最大まで到達した時にキー入力を行うと、卵が破裂し、それと同時に重りの位置を初期位置に戻す演出も加えた。

4.2 実験手続き

実験中の様子を図3に示す。体験者には簡単に展示内容の説明を行い、椅子に着席してもらった。椅子に着席した状態で、腕にデバイスを装着し、その後頭に HMD を装着した。コンテンツ起動後に、VR 空間上では卵となる VIVE トラッカーを体験者に渡し、体験者には重量変化を知覚してもらうため軽く腕を振るように教示した。体験中は実験者のキーボード操作で映像を制御し、体験者に重量の変化

を体感してもらった。体験終了後、アンケートを実施し、重量変化感と臨場感についてのデータを取得した。

アンケートでは、腕の重心変化が物体の重量の知覚に作用するかどうかを評価した。アンケート内容として、バーチャルな卵を持っているような感覚を「臨場感」、卵の重量が増えているかのような感覚を「重量変化感」とする2つの評価項目を設定し、体験者に5段階評価で評定させた。

4.3 結果

本実験はナレッジキャピタル The Lab の一角にて、9月12日から9月19日の一週間行ない、51件の有効回答が得られた。

表 1 コンテンツ体験後のアンケートの結果

Table 1 Survey results of VR Contents

評価指標	5	4	3	2	1	平均	標準偏差
重量変化感	7	25	7	9	3	3.47	1.11
臨場感	3	25	10	13	0	3.35	0.93

表1はコンテンツを体験した体験者のアンケートの集計結果である。表1から、64[%]の体験者が重量の変化を知覚することが確認された。自由記述のコメントからは、「まったく重さが違うことがわかった。」「微妙な差はわかりにくいかもしれませんが、最大ぐらいまで大きくなった時には重さの違いはまったく違うと感じました。」といった自由記述が得られたことや、質量が変わっていないことに驚く様子や、重量感が変化することを楽しむ様子が観察された。

臨場感に関しては55[%]の体験者が卵を持っているような感覚を知覚することが確認された。把持している物体に関するコメントとして、「持っているものが卵で、所詮軽いだらうという先入観があった」「仏像とかインパクトのあるものだと重く感じるかもしれない」といった卵のイメージと重量感の不一致を感じるコメントが得られた。

デバイスの動作に関しては、コンテンツ体験中に重りの牽引が十分でできずに十分なモーメント変化を与えることができない状況があった。また、視覚的な重量が急激に減少する演出を加えた際に、重りの牽引速度と映像の不一致から違和感を感じる体験者が見られた。

4.4 考察

重量変化感に関しては、アンケート結果や把持している物体の質量や大きさが変化していないことに驚いた反応が得られたことから、本デバイスは重量変化の提示は可能であることがわかった。一方で、約4割の体験者は重量変化を知覚することができなかった。この理由としては、廣瀬らの研究[7]でも述べられていたように、デバイスを意識していたことに加えて、デバイスを支える腕が疲れるといっ

た体験者が見られたことから、体験者の腕の負担による影響も考えられる。

臨場感に関しては、アンケート結果と自由記述から体験者が持つ現実の卵の重量イメージとデバイスが提示する重量感との不一致が発生していたことが考えられる。このため、約6割の体験者が卵を持っているかのような感覚を感じたものの、臨場感への影響を評価するにはより詳しく調査する必要があると考える。

デバイスの精度の問題に対しては、今回実装したデバイスでは重りの位置をVRコンテンツへとフィードバックする機能を設けていなかったため、外的要因による位置のずれが生じたと考えられる。このため、重りの位置をVRコンテンツへフィードバックする機構を実装し、重りの位置精度を高める必要がある。重りの牽引速度については、物理的な限界があるため、牽引速度による差を払拭するにはVRコンテンツのデザインに制約を設定する必要があると考える。しかし、重りの牽引速度の向上はデバイスの表現力の向上に繋がるため、高速化のためのデバイス設計が必要となると考える。

5. 展望

以上の検証から、実際にVRコンテンツを用いる環境下で、本デバイスによって重量感の変化を提示することを可能としたが、体験者の卵のイメージとデバイスの重量感の不一致から臨場感に関する評価を行うことはできなかった。このため、本デバイスを用いた状態と用いなかった状態の比較を行い、本デバイスがVRコンテンツの臨場感に効果的であるか検討を行う必要がある。デバイスの問題としては、位置精度と牽引時間の二点が挙げられた。重りの位置精度の向上においては重りの位置をフィードバックする機構が必要になると考える。このフィードバック手段の一つとして、現状では光学センサを用いることで重りの位置を計測し、正確なモーメントの変化を与えることを可能とするため、現在改良を進めている。また、重りの牽引時間を高速化する手法として、ギヤ比を下げることによる高速化を検討しているが、牽引できる重りの質量が減少するため、速度と重りのバランスを考慮して検討していく必要がある。

また、Hemmertらの研究[3]では、スマートフォンの情報提示手段として2次元におけるモーメント変化に価値があるとし、その有用性を示している。VRコンテンツの物体の表現においても、二軸に着目することで質量だけでなく、質点の移動も表現できるようにすることができ物体の重量感の表現力を高めるにおいて有用であると考えられる。このことから、グラビトンハンドでは一軸だけでなく二軸のモーメント変化を与えることが出来るようにデバイスを設計している。二軸のモーメント変化を考慮することで、質点の偏りも表現できるようにデバイスを設計しており、あ

らゆる物体を把持している感覚の提供ができるよう、開発を進めている。

6. おわりに

本稿では、重量感の擬似的な提示を目的として、モーメント変化を用いて擬似的な重量変化を与える装着型デバイス「グラビトンハンド」の開発を行い、一般の体験者に対してデバイスの性能検証実験を行った。結果、約6割の体験者が把持物体の質量が増加していると知覚し、把持物体の質量が変化していないことに驚く様子が得られたことから、本デバイスが体験者に対して重量感の変化を知覚させることが確認できた。一方で、臨場感に関しては体験者の把持物体のイメージとデバイスの重量との不一致により、影響を与えるかどうかを確認するには至らなかった。また、デバイスの効果検証中、重りの位置精度と即応性がの二点が体験者に対して違和感を与える要素となり得ることがわかった。

今後は検証実験にて得られた問題点の解消、臨場感の評価に加え、二軸のモーメント変化を与えるデバイスを実装、評価を行い、様々な物体の重量感を再現できる装着型デバイスとして開発を進める予定である。

参考文献

- [1] Burton, G., Turvey, M. T. and Solomon, H. Y.: Can shape be perceived by dynamic touch?, *Perception & Psychophysics*, Vol. 48, No. 5, pp. 477-487 (online), DOI: 10.3758/BF03211592 (1990).
- [2] Fujinawa, E., Yoshida, S., Koyama, Y., Narumi, T., Tanikawa, T. and Hirose, M.: Computational Design of Hand-held VR Controllers Using Haptic Shape Illusion, *Proceedings of the 23rd ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology*, VRST '17, New York, NY, USA, ACM, pp. 28:1-28:10 (online), DOI: 10.1145/3139131.3139160 (2017).
- [3] Hemmert, F., Hamann, S., Löwe, M., Zeipelt, J. and Joost, G.: Weight-shifting mobiles: two-dimensional gravitational displays in mobile phones, *CHI'10 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, ACM, pp. 3087-3092 (2010).
- [4] Zenner, A. and Krüger, A.: Shifty: A Weight-Shifting Dynamic Passive Haptic Proxy to Enhance Object Perception in Virtual Reality, *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, Vol. 23, No. 4, pp. 1285-1294 (2017).
- [5] 満田 隆, 田中伸治: 前腕圧迫による重量感提示時の上肢筋活動 (<特集>ハプティックコンテンツ), 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 19, No. 4, pp. 449-456 (2014).
- [6] 腕 フェチ: ゴムゴムのシューティング, <http://ivrc.net/archive/gomu-gomu-shooting2017/> (2017).
- [7] 廣瀬雅治, 岩崎花梨, 野尻梢, 武田港, 杉浦裕太, 稲見昌彦: おもみ調味料グラビトミン酸: 食材のバーチャルな重さの制御を利用した知覚変化システム (<特集>ハプティックコンテンツ), 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 19, No. 4, pp. 541-550 (2014).