

# 重心可変機構による連続的重量変化の提示を取り入れたゲーム開発

木村尚斗<sup>†1</sup> 船藏優弥<sup>†1</sup> 鈴木裕也<sup>†1</sup> 鈴木航平<sup>†1</sup> 佐瀬一弥<sup>†1</sup>

VR(Virtual Reality)における力覚提示のために重心可変機構を用いた非接地・把持型デバイスを用いるアプローチがある。本研究では、その原理を応用して連続的重量変化を提示可能なデバイスを製作し、ゲームへの応用を試みた。試作したゲームに対して行ったアンケート評価の結果、重量変化が知覚可能であるという回答や、重量感提示がある方が楽しく達成感が得られるという回答が高い割合を示した。

## 1. はじめに

VRでの力覚提示技術において、デバイスに取り付けられた錘の移動によって慣性モーメントを変化させることで発生する力覚の変化を利用する研究が行われている。その例として、Swindellsらが開発したTorqueBARや、Shigeyamaらが開発したTranscalibur、Zennerらが開発したShiftyがあげられる[1][2][3]。この原理を用いて連続的に変化する重量感の提示も可能と考えられる。鈴木らの研究では、把持部から錘までの距離をリンク機構とサーボモータを用いて増減させることにより重量感を提示するデバイスを作成した[4]。このデバイスの応用例として、VR空間で把持した物体の体積変化につれて重量感が変わっていくというアプリケーションが提案されている。しかしながら、ゲームにおける具体的な利用方法や、実際に体積の質の向上に影響を与えるのかについての議論は行われていない。

本研究では重心を変化させることで重量感の提示が可能な片手持型デバイスを作成し、バーチャル把持物体の重量変化を体感可能なゲームを試作する。作成したゲームを評価するためにアンケートを行い、その結果を基にデバイスの有効性を評価する。また、解決すべき課題や効果的な利用方法について議論する。

## 2. 重量感の提示原理

本デバイスの重量感提示の基本原則を図1に示す。把持部から錘までの距離を  $L$  [m]、錘の質量を  $M$  [kg]、把持部に加わる力を  $T$  [N・m]、実際の重量によって手に加わる力を  $F$  [N]とすると、

$$T = MgL \quad (1)$$

となり、 $L$ が増加することで  $T$ の値も増加していき、 $L$ が減少すると  $T$ の値も減少していく。この時、 $F$ の値は

$$F = Mg \quad (2)$$

であるため変化はない。しかしながら、 $T$ の値の変化を  $F$ の値の変化であると錯覚させることで重量感の提示が行

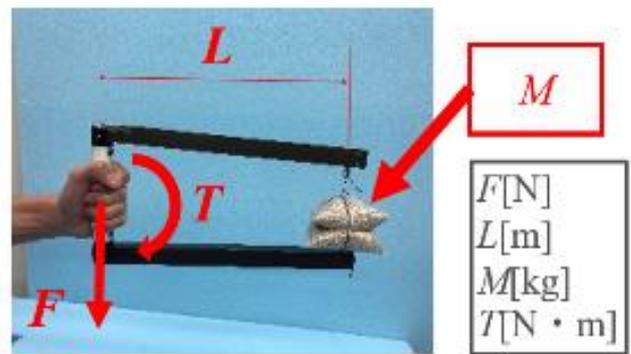


図1 重量感の基本原則

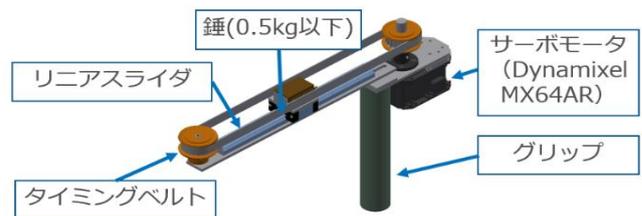


図2 CADで作成したデバイスの外観

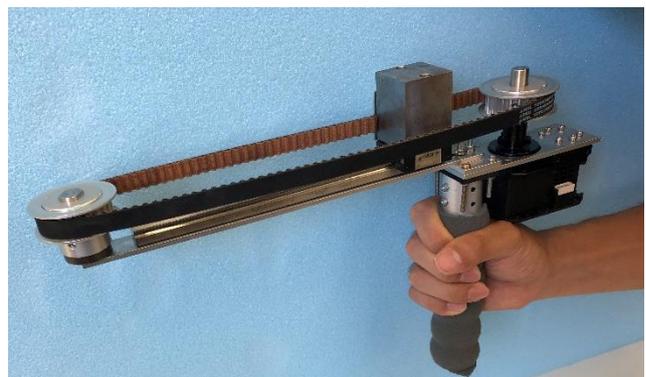


図3 実際に作成したデバイス

われ、実際には重量が変化していないにもかかわらず、重量の増減が体験できる。

今回作成したデバイスでは、錘をリニアスライダ上でタ

<sup>†1</sup> 東北学院大学

イミングベルト、及び、プーリを用いて動かすことで、基本原理を満たした。

### 3. 重量感提示デバイス

本研究では、重心可変とするために、タイミングベルト、および、タイミングプーリをサーボモータ（Dynamixel MX-64）によって駆動させ、リニアスライダに乗せた錘の位置を変えることができる片手持型デバイスを作成した。CAD上で作成したデバイスの外観を図2に示す。

設計においては、0.5 [kg]程度の錘でもたわみが生じないアルミフレームを使用し、重心の偏りがないようにできる限り左右対称にした。リニアスライダのストローク長は190 [mm]であり、錘は約160[mm]の移動が可能である。また、錘は鉄製で、298[g]のものを使用している。これにより、錘は最大 470 [mNm] のトルクの変動を把持部に与えることが可能である。タイミングベルトと錘はアルミ材で挟み込むように固定されている。実際に作成したデバイスを図3に示す。このデバイスの総重量は1064 [g]である。

### 4. ゲーム開発

#### 4.1 ゲームの内容

今回作成した重量感覚提示デバイスを用いたゲームの内容として、視覚で物体が増えていくのが分かり、かつ重量感覚提示でその重さの変化が分かりやすいゲームが望ましいと考えた。

図4に作成したゲームのプレイ画面を示す。このゲームの構成要素は、ボール、ゴール、箱、床である。空から落ちてくるボールを箱を操作して集め、ゴールの中に入れていくゲームであり、ゲーム終了時にゴールに入っていたボールの個数が得点となる。ゲームの制限時間は60秒である。また、今回のゲームにはHMDを使用せず、被験者（ユーザー）はPCの液晶ディスプレイにて、図4のような光景を目視することができる。デバイスの位置はARマーカーをカメラで認識することで取得され、ゲーム内の箱の位置と同期される。そのため、本ゲームではデバイスがコントローラとなる。箱から1つボールが出入りするごとに錘の位置が最大速度0.13 [m/s]で約8[mm]変動し、約23.5 [mNm]のトルク変化を把持部に与えることができる。また、錘の稼働限界の制約のため、20個目以降のボール入手の際には錘が変動しないようにしている。ゲーム要素を高めるために、スコア表示とランキングを画面右上に表示した。このようにすることで、自己ベストの更新や他者のスコアを超えるために被験者が動機づけられると考えた。

#### 4.2 ゲームの評価

##### 4.2.1 ゲーム体験とアンケート

今回作成したデバイス、および、ゲームを使用して実際に被験者にプレイしてもらい、ゲームの評価を行った。なお、今回の被験者の人数は5人である。被験者の全員が日

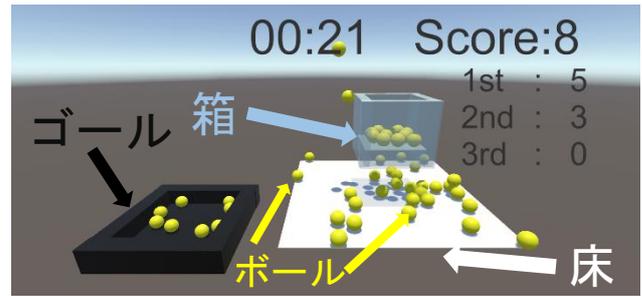


図4 ボールキャッチゲーム

表1 アンケートの質問内容

質問	ゲームプレイ中に感じた腕の疲れについて
1	最も当てはまるものを選んで下さい。
回答	1 まったく疲れを感じなかった。
	2 疲れはあるが、ゲームプレイには全く問題なかった。
	3 疲れがあり、ゲームプレイは少しつらかった。
	4 かなり疲れがあり、プレイ中にデバイスを持ち続けるのが難しかった。
	5 非常に疲れてゲームプレイが困難であり、プレイ中にデバイスを放してしまった。
質問	「重さ変化あり」のゲーム（2回目と4回目）では、実際に重さの変化が感じられましたか？
回答	1 まったく感じられなかった。
	2 あまり感じられなかった。
	3 どちらともいえない。
	4 少し感じられた。
	5 よく感じられた。
質問	「重さ変化あり」と「重さ変化なし」のゲームを比べて、より楽しいと感じたのはどちらですか？
回答	1 重さ変化有り
	2 重さ変化無し
	3 どちらともいえない。
質問	「重さ変化あり」と「重さ変化なし」のゲームを比べて、達成感が大きいと感じたのはどちらですか？
回答	1 「重さ変化あり」
	2 「重さ変化なし」
	3 どちらともいえない。

常にスポーツ（剣道、合気道、テニス）を行っている。

被験者には、重量感覚を提示する場合（条件 y）と重量感覚を提示しない場合（条件 n）を n, y, n, y の順に合計4回行った。また、今回のゲーム体験では、被験者は1回ゲームをプレイするごとに30秒休憩をはさんだ。それぞれの休憩中にゲームプレイ中の疲労感についてアンケートを5段階評価で行った。この時の数字は疲労感の度合いを示しており、大きいほど疲労感が大きかったことになる。また、全ゲーム体験終了後、重量感覚の有無、重量変化の有無ではどちらが楽しいか、どちらが達成感が大きいかを選択式のアンケートにて評価してもらった。アンケートの質問内容を表1に示す。

##### 4.2.2 結果

今回得られた、疲労感に関する実験の結果を図5に示す。

この質問の回答に 4,5 番を選択する被験者はいなかった、また、一回目の回答は 2,3 を選ぶ人の割合が同じ程度であったが、回数を重ねると 3 を回答する被験者が増えた。全ゲーム終了後のアンケートの結果を図 6 に示す。このうち、重量感の変化の程度を調査する質問では、重量感の変化をまったく感じるができなかった被験者はおらず、「少し感じられた」と回答した被験者が 4 人、「よく感じられた」と回答した人が 1 人であった。楽しさの度合いを調査する質問では、「重量変化ありの方が楽しい」と回答した被験者が 4 人、「重量変化なしの方が楽しい」と回答した被験者が 0 人、「どちらともいえない」と回答した人が 1 人という結果であった。達成感を調査する質問では、「重量変化ありの方が達成感がある」と回答した被験者が 4 人、「重量変化なしの方が達成感がある」と回答した被験者が 0 人、「どちらともいえない」と回答した人が 1 人であった。

また、実験中の被験者との会話にて、デバイスの設計について、「グリップが持ちにくい」、「角度が変えられるようにしてほしい。」という意見があった。感覚特性に関する意見としては、「錘が動いていた時 (条件 y) の方が、ボールが箱に入っていくような感覚があった。」、「錘が離れるほど重量感覚の変化が感じられた。」、「多数あったボールが一斉になくなった時、重量変化が遅く、違和感があった。」、「落ちてくるボールに対してかかる向きが合っていない。」等の意見があった。

#### 4.2.3 考察

ゲーム体験にて、疲労感に関してはゲームプレイの回数が多くなっていくほどに疲労感が増していることから、デバイスの総重量が重すぎると考えた。この対策として、現在アルミフレームを用いて作成している部分を木材等の軽量素材に変えることで軽量化をはかることができると考える。重量感覚の変化に関する質問から、重量感覚の提示が成功していることが示唆された。楽しさ、達成感においても、重量感覚の提示があった方がよい結果であった。しかしながら、ボールが一斉になくなった際の重量感の減少の違和感は、錘の戻る速度が遅すぎることが理由として考えられる。ボールが一斉になくなった際の速度調整を行う必要がある。設計においてはグリップの握りにくさの改善が必要であり、ユーザー自身がグリップ部の角度を調整できるような機構を作る必要があると考えた。これにより持ちやすさが向上し没入感が高められると考えられる。落ちてくるボールによって本来鉛直方向に加わるはずの力が感じられないという問題については、この形状のデバイスでは鉛直方向の力の再現が難しいと考える。代わりに振動を振動子等で再現することで違和感なくゲームを体験できるのではないかと考える。

### 5. 結言

本研究では、片手持持型の重量感覚提示デバイスを作成

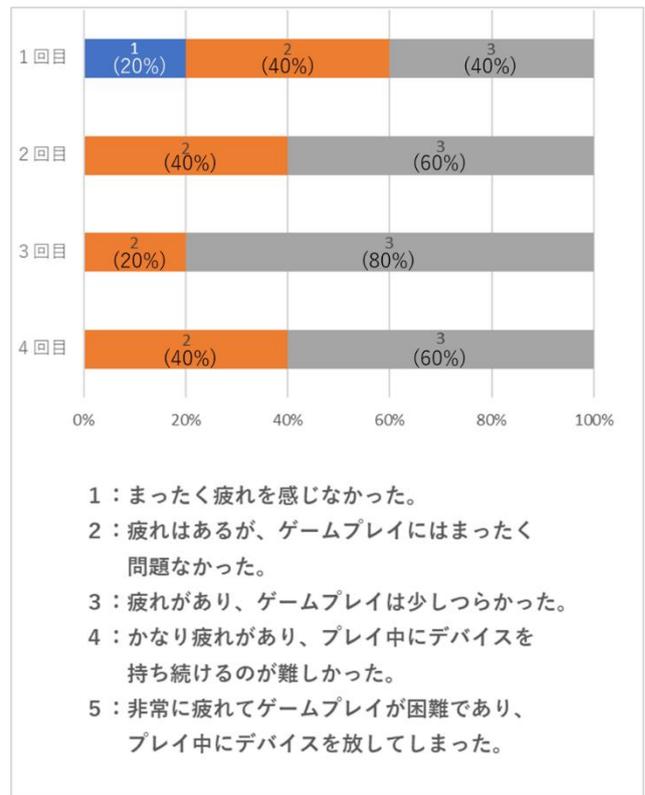


図 5 疲労感に関するアンケートの結果

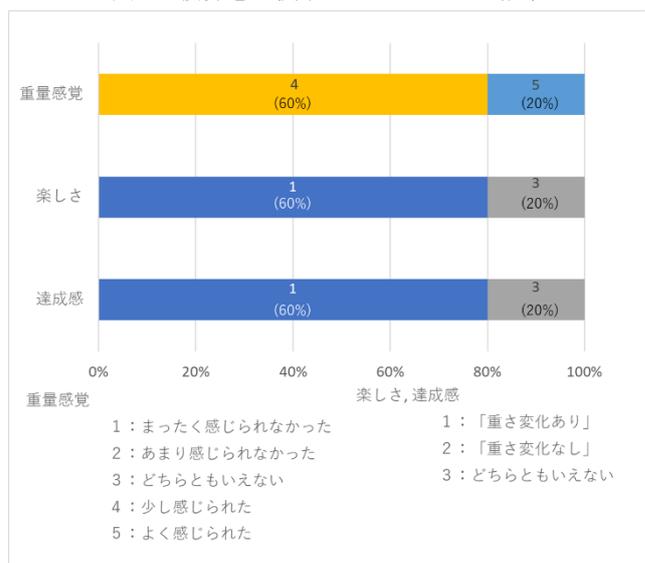


図 6 ゲーム終了後のアンケートの回答割合

し、デバイスを使用したゲーム開発を行った。重量の提示を行う際には、ボールの個数に応じた重量を提示した。ここでは重量の提示を行うためのゲームに必要な要素を検討し、競技性を高めるために、得点を画面に表示させ、ユーザー同士で競うことができるようにした。開発したゲームを被験者にプレイさせたところ、アンケートの結果から、重量感の提示が可能であることが示唆された。また、重量感の提示がゲームプレイの楽しさ、達成感を向上させることが分かった。以上の結果から、トルクの変化による重量感覚提示は VR の力触覚提示において利用が可能であることが示唆された。しかしながら、ゲームプレイ中の疲労

感が大きいことから、デバイスの軽量化を行う必要がある。また、被験者の意見から、グリップ部の持ちやすさを向上させる必要があることが分かった。今後の展望としては、デバイスの軽量と持ちやすさの改善により、疲労感が少なくゲームをプレイできるデバイスの作成および、重量感をテーマとしたゲームの開発を行っていく。

## 6. 参考文献

- 1) Swindells, C. et al.: TorqueBAR: An Ungrounded Haptic Feedback Device, Proceedings of the 5th International Conference on Multimodal Interfaces, pp. 52-59 (2003).
- 2) Shigeyama, J. et al.: Transcalibur: Weight Moving VR Controller for Dynamic Rendering of 2D Shape using Haptic Shape Illusion, SIGGRAPH '18 Emerging Technologies (2018).
- 3) Zenner, A. and Krüger, A.: Shifty: A Weight-Shifting Dynamic Passive Haptic Proxy to Enhance Object Perception in Virtual Reality, IEEE Transaction on Visualization and Computer Graphics, Vol. 23, No. 4 (2017)
- 4) 鈴木航平, 佐瀬一弥: デバイスの重心移動による手へのトルク作用を利用した質量感提示手法, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2018 予稿集, 1P2-J15 (2018).