

VR 空間中における空中の水平方向運動感覚の提示

仮屋 郷佑¹ 佐々木 智也^{2,a)} 檜山 敦^{3,4,b)} 稲見 昌彦^{3,c)}

概要：本研究では，VR 空間中で空中を移動するコンテンツにおいて水平方向へ移動する場合の運動感覚の提示手法を提案する．空間中の水平方向の二点間の移動を並進運動と回転運動の組み合わせと仮定し，各条件における運動感覚の提示に関して，力覚提示手法を中心に検討する．本稿では，飛行時にユーザーの手にかかる力に着目し，そこから提示する力を決定する方法デバイスを用いた提案手法の実装について示す．

1. はじめに

現実世界で新しい体験をする場合，空間的，物理的制約によるコスト（金銭，時間，場所）が存在し，大きなハードルになっている．VR 技術を用いると，自由にバーチャル空間を構成することが可能なため，現実では体験することが困難な体験も手軽に体験することができる．さらには，生身の肉体では困難な体験をすることも可能である．そのため，VR を用いたエンターテインメント体験には大きな可能性がある．例えば，BANDAI NAMCO が運営する VRZONE [1] では，VR を用いたエンターテインメント体験が商業施設として提供されており，VR のエンターテインメント利用は普及しつつある．このように VR を利用したエンターテインメント体験は今後も拡大し続けると考えられる．

VR 空間を利用するための基礎的な研究は多く行われている．例えば，VR 空間中を歩いて移動する場合の移動感に関する研究は数多く行われている．James ら [2] は，VR 空間において現実世界を歩き回るのに近い方法でユーザに移動させる手法を動きの制御と人の行動，感覚，反応の相互関係を調べた．野間 [3] は VR 空間での歩行感覚の提示をするための様々な装置の紹介をしている [3]．

VR 空間における地上での移動に関する研究が多く行われている一方，空中での飛行体験や落下体験に関する研究は Birdly [4] や，Virtual Super-Leaping [5] などがあるが，その数は限られている．VR のエンターテインメント利用において，多様な方法によって VR 空間を移動できることは，コンテンツ表現の選択肢を増やす意味で重要である．

本研究では，VR 空間中における飛行体験として，空間中を地面に対して水平方向に移動する状況を対象に視覚と力覚提示による飛行の実現を目指す．特に，VR 空間中にあらかじめ設定した動作軌跡に対応した力覚提示を行うための力覚生成手法を提案する．水平方向の運動軌跡を並進運動と回転運動の軌跡に分解して検討し，並進運動感覚と回転運動感覚のそれぞれを提供するような視覚と力覚の提示手法を提案する（図 1）．

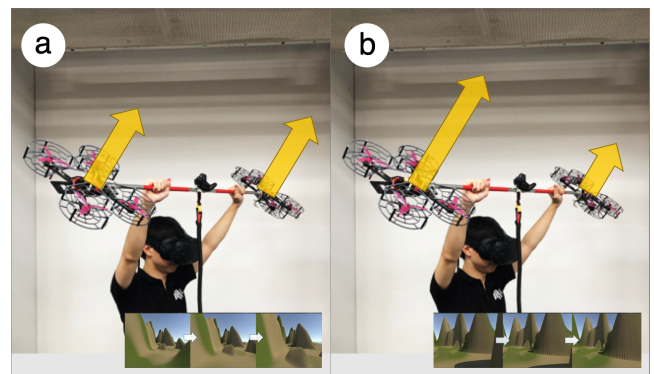


図 1 (a) 並進運動時の力触覚提示 (b) 回転運動時の力触覚提示

2. 関連研究

VR 空間における移動感の提示には，視覚や触覚の感覚提示が主に用いられる．視覚提示では，周辺視野に対して複数の物体が同一方向へ移動する映像を提示することで，自己運動感覚（ベクシオン）が生起することが知られている [6]．触覚提示には，ユーザに力を物理的な力を与える方法として，様々な触覚デバイスが提案されている．また，触覚による力の方向提示が自己運動感覚を改善するという報告 [7] もある．

VR 体験のための触覚を生成する手法として，プロペラの推力を用いたデバイスが提案されている．佐々木らは棒

¹ 東京大学 工学部
² 東京大学大学院 工学系研究科
³ 東京大学 先端科学技術センター
⁴ 理化学研究所 革新知能統合研究センター
a) sasaki@star.rcast.u-tokyo.ac.jp
b) hiyama@star.rcast.u-tokyo.ac.jp
c) inami@star.rcast.u-tokyo.ac.jp

の両端にマルチロータを取り付けることでプロペラにより推力を発生させ、それぞれのプロペラを個別に制御することで並進方向や回転方向の力を生成するデバイスを提案している [8], [9]。このデバイスは、持ち運び可能で、かつ両端に複数のロータを取り付けているため大きな出力を出せる点、棒のメタファーによって操作方法がわかりやすいといった利点がある。一方、デバイスの構造上、全てのロータが同一平面上に配置してあるため、提示できる力の方向に制約がある。Thor's hammer [10] は、手持ち型デバイスで、持ち手の先端の立方体の角面に合計 6 つのロータが設置されているデバイスである。このデバイスは、出力に制限はあるが、並進方向に 3 自由度の力の生成が可能である。Wind-blaster [11] は、軸が回転する 2 つのロータを手首に装着するデバイスである。軸が回転することにより手首に提示する触覚の表現の幅が増している。

VR を用いた飛行体験に関する研究では、ユーザが鳥のような飛行体験ができる Birdly [4] がある。これは、羽の位置に手を固定する設置型のデバイスにユーザを乗せ、ヘッドマウントディスプレイを用いた視覚提示によって飛行体験を提供する。Virtual Super-Leaping [5] は、通常では不可能な高さの垂直跳びを体験できるものである。プロペラ推力による棒状の触覚提示デバイスとヘッドマウントディスプレイを用いて VR 空間中の空中を鉛直方向に移動する。Birdly においては、大型の設置型装置を使用しているため空間的な制約が大きく、移動感覚は視覚刺激のみで提示している。Virtual Super-Leaping では、視覚刺激のみでなく、触覚提示も行っているが、空中での移動感覚の提示としては鉛直方向の状況のみを扱っている。

以上を踏まえて本研究では、VR 空間中での視覚と力触覚提示による、空中での水平方向の移動感の提示を試みる。

3. 提案手法

本研究では、視覚提示と力覚提示によって VR 空間中で空中における水平方向の運動感覚を提供する手法を提案する。本提案手法では、特に力覚提示を中心に扱う。視覚提示については、運動方向に沿った移動映像の提示とする。空間中の水平方向の平面における任意の 2 点間の経路は、並進運動と回転運動の組み合わせで構成できると仮定することで、並進運動と回転運動時の力の状態を考慮した力覚提示手法についてそれぞれ説明する。

力覚提示により移動感を表現する手法は図 2(a) のように慣性力を表現する手法と図 2(b) のように力の生じている方向に力を提示する手法が考えられる。前者では、例えば、電車や車が移動する場合に進行方向の映像に対して逆方向の力が提示される。後者は、移動体に引っ張られる場合に進行方向と同じ方向の力が提示される。今回は後者の方法によって移動感を提示する。

本手法では、ユーザの手の位置に力覚を提示する。これ

は、ハングライダーのように手で棒状の物体に捕まり飛行する体験が存在し、そのアナロジーから飛行体験を想起しやすいためである。また、先行研究 [5] を踏まえ、両手を頭上にあげた状態で手に対して力覚を提示し、体験中ユーザの姿勢は提示した力覚によって変化しないものと仮定する。

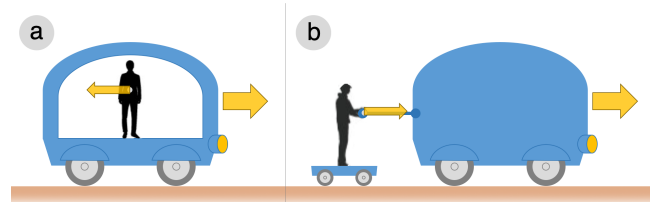


図 2 (a) 慣性力による移動感の表現 (b) 移動方向の力の提示による移動感の表現

3.1 空中における物体の移動時に必要な力の検討

はじめに、空中における運動で必要な力を検討し、次に力覚の提示手法について述べる。

空中において物体が並進運動と回転運動をしている状態に必要な力を考える。回転運動は円運動の組み合わせで近似表現できるため円運動の検討をする。

3.1.1 空中における並進運動の検討

現実において物体が空中で一定の速度 v の並進運動をしている状態を考える。この状態では、鉛直下向きに重力が、進行方向逆向きに速度 v に比例する抵抗が存在している (粘性抵抗が主要項になるような速度とする)。よって、この運動をするためには物体の進行方向の速度に比例する力、鉛直上方向に重力と同じ大きさの力を加えればよい。

3.1.2 空中における円運動の検討

現実において質量 m の物体が一定の回転半径 r 、一定速度 v の円運動をしている状態を考える。簡単のため空気抵抗は考えない。この状態では並進運動の時と同じく鉛直下向きに重力が生じている。また、この時存在する各物理量は回転半径を含む平面中で θ を以下のように取ると、表 1 のようになる。

位置	$(r \cos \theta, r \sin \theta)$
速度	$(-r \frac{d}{dt} \theta \sin \theta, r \frac{d}{dt} \theta \cos \theta)$
加速度	$(-r (\frac{d}{dt} \theta)^2 \cos \theta, -r (\frac{d}{dt} \theta)^2 \sin \theta)$

表 1 円運動の物理量

一定速度での運動より θ は時間依存しないことに注意する。表より回転方向向きに $\frac{v^2}{r}$ の加速度が生じていることがわかる。以上からこの運動をするために必要な力は鉛直上向きに重力と同じ大きさの力、回転中心の方向に $m \frac{v^2}{r}$ の力を加えればよいことがわかる。

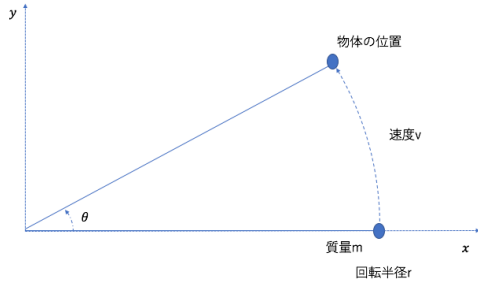


図 3 円運動

3.2 並進運動感覚提示のための力覚的刺激

3.1.1における空中における物体の移動に必要な力の検討からユーザに進行方向に速度とともに単調増加する力 F_f と鉛直上向きに一定値の力 F_g を加える。また、対称性から左右に同じ力を加える。左右の手にかける力をそれぞれ F_l, F_r とおく。本研究では、

$$F_l = F_r = \frac{1}{2}(F_f + F_g)$$

となる力 F_l, F_r を左右の手に加えることで並進運動感覚を与える。

3.3 回転運動感覚提示のための力覚的刺激

本手法においては回転半径、回転速度が変化する運動をユーザが体験する際に、ユーザの左右の手に加える力の大きさを物理モデルから妥当と考えられるように変化させることで、ユーザに回転運動をしていると錯覚させることを考える。ユーザが最初に述べたユーザの姿勢で回転半径 r 速度 v の円運動している状態を考える。以下、内側と外側の手の距離を l 速度をそれぞれ v_1, v_2 、ユーザの質量を m とし、左右の手の位置に均等にユーザの質量が存在している考える。位置関係は図4ようになる。

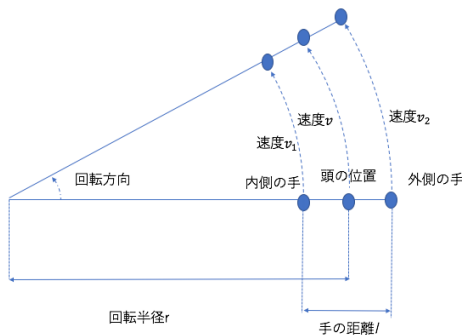


図 4 各物体の位置

3.1における円運動の際に必要な力の検討から左右の手の円運動に必要な力の大きさの差は $v_1 \neq v_2 \neq v$ として考えると

$$\frac{m}{2} \left(\frac{v^2}{\frac{r-l}{2}} - \frac{v^2}{\frac{r+l}{2}} \right) = \frac{m}{2} \frac{v^2 l}{r^2 - \frac{l^2}{2}}$$

となる。したがって人が円運動をする際は内外の手に生じる向心力の差は、回転半径 r 、手の間隔 l 、速度 v として、

$$\frac{v^2 l}{r^2 - \frac{l^2}{2}}$$

に比例する力の差が生じていることがわかる。

ユーザの内側の手に加える力の大きさを F_{in} 外側の手に加える力の大きさを F_{out} とおく。本研究では半径 r 、速度 v で移動している感覚を提供するために、比例定数を K として、

$$F_{out} - F_{in} = K \frac{v^2 l}{r^2 - (\frac{l}{2})^2}$$

となる大きさの力を提示する。加える力の向きは進行方向成分と鉛直上向き成分を持つベクトルとする。よって、図5のような力を加えることで回転運動感覚を与える。

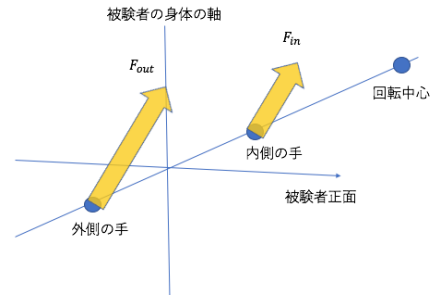


図 5 回転運動時に提示する力

4. 実装

提案手法の有効性を検証するために VR 空間中の空中における並進運動と回転運動を組み合わせた経路を移動するコンテンツを作成した。

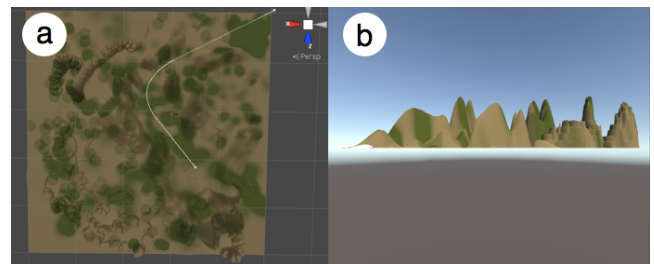


図 6 (a) 移動経路 (b) 実装平面の水平方向視点

ユーザが VR 空間中に作成された起伏のある平面 (図 6(b)) 上の空中を水平方向に、図 6(a) に白線で示されるような並進方向経路と回転半径が滑らかに変化する回転経路をつなぎ合わせたルートを移動するものである。視覚刺激の実装として、ヘッドマウントディスプレイ (HTC Vive) と Unity を用いて VR 空間を実装した。並進運動時には図 7 のような視覚を、回転運動時には図 8 のような視覚をそ

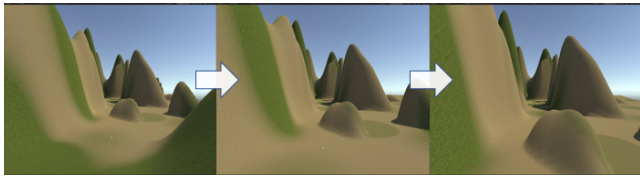


図 7 並進運動時の視覚提示

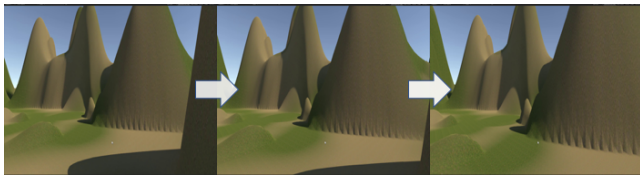


図 8 回転運動時の視覚提示

それぞれ提示した。力の提示には先行研究 [9] で提案された並進方向や回転方向の力を生成するデバイスを用いた。

先行研究 [9] より、デバイスに用いられているマルチロータの特性として入力値 (制御する際に書き込む値) と出力する力に線型性があることがわかっているので提示したい力と入力値が比例するように実装した。

5. 結果と考察

実際に力覚提示と視覚提示による回転運動を体験した際の出力の大きさに比べて、出力の変化により回転している感覚が出ていた。これは人間が力を認知する際に、その大きさよりも差分を感知しやすいためだと考えられる。このことから、今回の左右に提示する力の大きさの差分に対して、物理モデルを適用して力提示の妥当性を担保するのは有効であったと考えられる。

実装の検証結果から、ユーザの姿勢や提供する力の分布 (ユーザのどの部位にどの大きさのどのような方向の力を加えるか) を考慮する必要があると考えられる。例えば、力の提示によって実際にはユーザの姿勢が動的に変化するため、提案手法で設定したユーザの姿勢が変化しないという仮定が成立しないためである。ユーザやデバイスの姿勢を踏まえたフィードバック制御の検討が重要であるといえる。

今回は提供する力の大きさのみに注目したが、今後、より良い空中での移動体験を提供するには上述したユーザの姿勢に関する検討が不可欠である。例えば、今回の実装でもユーザを立たせた時に比べて、座らせた時の方がより体験が良いと答えたユーザが多かった。これは座るという姿勢をとることにより、立つ時に比べてユーザの臀部と足が設置していることにより力が分散された結果であると考えられる。

6. おわりに

本研究では、VR 空間における空中での飛行体験を提供する第一段階として、ユーザへの視覚・力覚刺激による空中での水平方向運動感覚を提供するような力の提示手法を

扱った。水平方向の運動を並進運動と回転運動に分解し、それぞれの運動に対して現実における物理的な力を検討した上で、その力に相当する力を提示することでそれぞれの運動感覚を再現した。本提案手法では、運動感覚の提示のために力の変化量の差分に着目した。ユーザに対して力覚提示を行うデバイスでは、一般的に提示できる力に制限がある。本研究で用いた必要な力の差分に注目する力覚提示手法は、デバイスの最大出力に制約されづらいことから、汎用性の高い手法であると考えられる。

今後は、より良い飛行体験を提供することができるよう提示する力の方向とその自由度の拡張を目指す。本研究のように VR 空間での移動感を提供するような研究はバーチャル旅行やフライトゲームといったエンターテインメント性の高いコンテンツの作成への寄与が期待できる。

謝辞 本研究は、JST ERATO JPMJER1701 の支援を受けたものである。

参考文献

- [1] BANDAI NAMCO Amusement. VR ZONE. <https://vrzone-pic.com/> (最終閲覧日: 2019 年 8 月 2 日) .
- [2] James N Templeman, Patricia S Denbrook, and Linda E Sibert. Virtual locomotion: Walking in place through virtual environments. *Presence*, Vol. 8, No. 6, 1999.
- [3] 野間春生. ロコモーションとバーチャルリアリティ. 計測と制御, Vol. 43, No. 2, 2004.
- [4] Max Rheiner. Birdly an attempt to fly. In *ACM SIGGRAPH 2014 Emerging Technologies*. ACM, 2014.
- [5] Tomoya Sasaki, Kao-Hua Liu, Taiki Hasegawa, Atsushi Hiyama, and Masahiko Inami. Virtual super-leaping: Immersive extreme jumping in vr. In *Proceedings of the 10th Augmented Human International Conference 2019*. ACM, 2019.
- [6] Behrang Keshavarz, Bernhard E Riecke, Lawrence J Hettlinger, and Jennifer L Campos. Vection and visually induced motion sickness: how are they related? *Frontiers in psychology*, Vol. 6, , 2015.
- [7] Nizar Ouarti, Anatole Lécuyer, and Alain Berthoz. Haptic motion: Improving sensation of self-motion in virtual worlds with force feedback. In *2014 IEEE Haptics Symposium (HAPTICS)*. IEEE, 2014.
- [8] Tomoya Sasaki, Richard Sahala Hartanto, Kao-Hua Liu, Keitarou Tsuchiya, Atsushi Hiyama, and Masahiko Inami. Leviopole: mid-air haptic interactions using multi-rotor. In *ACM SIGGRAPH 2018 Emerging Technologies*. ACM, 2018.
- [9] 佐々木智也, 伊藤大智, 原口純也, 荻野将拓, 檜山敦, 稲見昌彦. 全身運動のためのマルチロータを用いた空中触覚提示デバイス. エンタテインメントコンピューティングシンポジウム 2018 論文集, Vol. 2018, , 2018.
- [10] Seungkook 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*. ACM, 2018.
- [11] Seungwoo Je, Hyelip Lee, Myung Jin Kim, and Andrea Bianchi. Wind-blaster: a wearable propeller-based prototype that provides ungrounded force-feedback. In *ACM SIGGRAPH 2018 Emerging Technologies*. ACM, 2018.