



# バタ足によるバーチャル水中移動インタフェースの開発

折本真毅, 坂口正道

名古屋工業大学 大学院工学系研究科 電気・機械工学専攻

(〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町, 29413058@stn.nitech.ac.jp, saka@nitech.ac.jp)

**概要:** 近年, バーチャル空間を移動する様々なインタフェースが開発されている. 移動インタフェースには, ボタンやジョイスティックを用いた指令入力タイプと, 手足や体幹の動きを利用した動作入力タイプがあり, 動作入力としては, 足を動かして歩行するものや, 手や体幹の姿勢で飛行するものなどがある. 本研究では水中での移動を対象とし, バタ足により移動可能なインタフェースを開発する. また, 水中での挙動を模擬するモデルと組み合わせ, 実際の泳ぎに近い動作での水中移動の実現を目指す.

**キーワード:** ロコモーションインタフェース, 水泳, スポーツ, 訓練

## 1. はじめに

近年のバーチャルリアリティ(以下, VR)技術の発展に伴い, バーチャル空間を移動するロコモーションインタフェースが開発されてきた. 製品として販売されている Virtuix Omni[1]や Kat Walk Mini[2]は, 装置の床面と足裏を滑らせる事で, 疑似的に無制限の歩行を可能にしている. 歩行型インタフェースは平面上を移動するという用途に限れば, 実際の身体動作との整合性が取れているため, 使用者は現実と同じ歩行動作でバーチャル空間を移動できる. また, Rognon らの FlyJacket[3]では, 上肢及び胴体の動作によってバーチャル空間を飛ばす操作を行う事ができる. バーチャル空間は, 訓練や娯楽の用途に応じて無重力や水中のような空間を用意できるが, これらのインタフェースは重力下のバーチャル空間における移動を想定したものであり, 無重力空間や水中等のバーチャル空間では適用が難しいという課題がある. 無重力に適用できる移動インタフェースとしては, Fels らの A Virtual Swimming Interface[4]や市販製品の ICAROS[5]が挙げられる. A Virtual Swimming Interface は全身をカウンターウェイトと繋がれたロープに吊り下げ, 浮遊感と空中での身体動作を可能にしている. ICAROS の筐体は, 固定された台から一箇所で支えられており, 筐体に乗る, 体の姿勢を傾ける事で VR 空間内の自身のアバターを操作する事ができる. しかしながら, ICAROS はトレーニング機器という立ち位置もあり, 疲労のしやすさや, 満足な操作を行うための運動能力が課題となる. また, 大島ら[6]はホームユースにおけるロコモーションインタフェースについて, 1)設置と運用

Masaki ORIMOTO, and Masamichi Sakaguchi

スペース, 2)HMD を併用する事による安全性, 3)身体疲労と運動能力 の 3 つの課題がある事を挙げている. 本研究の目的は, これらの背景を踏まえて, 無重力下や水中のようなバーチャル空間を, 身体動作を用いて移動するインタフェースを実現する事である. 本稿では, その前段階として, バタ足動作によって水中を移動するインタフェースを提案する. バタ足動作は, どの家庭でもあるベッドや布団に体重を預けた状態でも可能である. 加えて, 水中での挙動に倣い慣性によって進むことが可能であるため身体疲労との調整が取りやすいという側面もあり, 先述の課題を達成できる手法だと考えられる.

## 2. 提案するシステム

### 2.1 システム概要

本研究で用いるシステムについて述べる. 本システムは, VR 映像を投影可能な PC, HTC Vive 及び ViveTracker(以下 Tracker と呼称) 4 個, HTC Vive と Tracker の座標を検出するための付属ベースステーション 2 個, 伏臥位でバタ足動作を行うための台から構成される. システムの概要を図 1 に示す.

初めに, 簡易的な方法としてベッド上でのバタ足を検討したが, 股関節の屈曲が難しく, バタ足動作に違和感が生じた. そこで, 胴体を台によって支え, 下肢を緩衝材で支える設計とした. この設計により, バタ足の衝撃を和らげつつ, バタ足動作による抵抗感を得る事が可能となった. バタ足動作を検出するために, Tracker を両足の脛脛に 1 つずつ, 足先に 1 つずつ, 計 4 つ装着した. VR 空間の製作にはゲームエンジン Unity を用いた.



図 1:システムの概要図

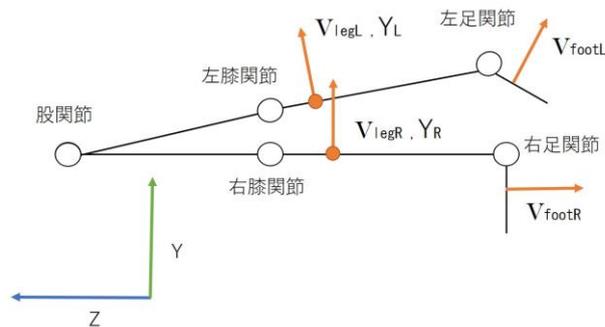


図 2 バタ足動作モデル

## 2.2 バタ足動作による移動

移動インタフェースとして機能するためには、次の3点の操作が使用者の意図に追従して実行される必要がある。

- 加速できる事
- 停止できる事
- 進行方向を変更できる事

これらの操作のうち、a)及びb)については、バタ足によって操作される事が妥当だと判断した。c)については、腕あるいは胴体によって操作する事を検討しているが、現段階では実装まで至っていない。

図2に下肢のモデルを示す。本稿では、Z軸正方向を伏臥位における胴体方向に、Y軸正方向を背中方向にとる座標系を設定し、バタ足動作はこのZY平面上での動作として考える。伏臥位における両足脛脛において、Y軸正方向に単位法線ベクトル $V_{legL}$ 及び $V_{legR}$ を設定する。また、脛脛のY軸座標 $Y_R$ 及び $Y_L$ を設定する。両足刀部において、直立時に足が接地する方向に単位法線ベクトル $V_{footL}$ 及び $V_{footR}$ を設定する。これらの物理量は、装着したTrackerの座標により算出した。

a)の操作については、バタ足の激しさによって加速する量が増える事が望ましい。Unityにおける1フレーム間の時間を $\Delta t$ 、各足の1フレームでの変位をそれぞれ $\Delta Y_R$ 及び $\Delta Y_L$ 、係数を $K_1$ とおく。アバターをZ軸正方向に加速する力 $F$ を次式で定義した。

$$F = K_1(\Delta Y_R + \Delta Y_L)\Delta t \quad (1)$$

b)の操作については、足首の角度によって水から受ける抵抗力が変化する事が望ましい。アバターが進行方向に対して受ける粘性係数を $D$ を次式で定義した。

$$D = K_2\{2 - (V_{legL} \cdot V_{footL} + V_{legR} \cdot V_{footR})\} \quad (2)$$

アバターの質量を $M$ 、1フレーム前の速度を $V_{t-1}$ と置くと、(1)式及び(2)式より、VR上のアバターの移動速度 $V_t$ は次式で表される。

$$V_t = V_{t-1} + \int (F - DV_{t-1})/M \Delta t \quad (3)$$

## 3. 評価実験

試作したシステムを評価する実験を行った。係数については、予備実験により $K_1 = 100$ 、 $K_2 = 5$ と設定した。アバターの質量は、全被験者において $M = 1$ とした。

### 3.1 操作感の評価

本稿では、移動インタフェースとしての性能を評価する軸を、任意の地点まで移動し停止できる事とした。そこで、被験者には試作したシステムを用いて図3に示すVR空間において、伏臥位になった状態の頭部が、20m先に設定した1m立方の目標の内部で停止した状態となるように移動する指示した。各被験者が指定した範囲内で止まれたかまで評価した。被験者は20代の健常な成人男性4名とした。

### 3.2 バタ足の熟練度による差の評価

試作したシステムは、効率的なバタ足動作によってより進む事が望ましい。したがって、競泳経験者のように熟練したバタ足動作ができる被験者が、標準的な泳力を持つ被験者より速く進む事が確認できれば、バタ足動作の巧緻に即した移動インタフェースだと言える。逆に、バタ足の熟練度と本システムの移動速度に相関がなければ、移動にバタ足動作以外の影響が関わっている事が考えられる。そこで、競泳経験者と標準的な泳力を持つ被験者に、試作したシステムを用いて全力でバタ足してもらい、最大速度を測定した。被験者は実験3.1と同じ20代の健常な成人男性4人(競泳経験者1名、標準的な泳力を持つ被験者3名)とした。また、本システムでVR空間を移動した感想を、口頭によるアンケートで答えてもらった。

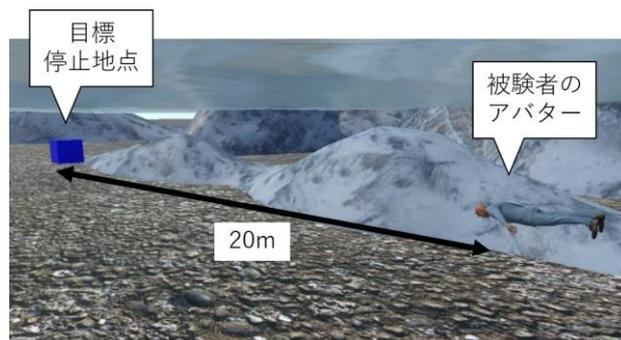


図 3 実験 3.1 の外観

## 4. 結果

### 4.1 操作感について

4 人の被験者のうち、1m 立方のキューブの内部で止まれたのは 4 人全員であった。このことから、任意の地点まで移動し停止出来る機能を持った移動インタフェースとしての性能は達成できたと考えられる。

### 4.2 バタ足の熟練度による差の評価

本システムによって全力で移動した際の、競泳経験者と標準的な泳力を持った被験者との最大速度の差を表 1 に示す。表 1 より、標準的な泳力を持った被験者は競泳経験者に比べて、本システムでは 30~60%程の速度となることが確認された。これより、本システムはバタ足動作の巧緻性を反映できたシステムだと考えられる。

## 5. 考察と得られた知見

評価実験では、本システムによる操作の適否を測る事を目的としていたが、予備実験によって設定された係数 $K_1$ 及び $K_2$ の値が適切だったかについては再考の必要がある。

4.1 節の結果では、全員が 20m 先の指定した範囲内へ移動し停止するタスクを達成できたが、平均して 26 秒かかっていた。移動し、停止する事は移動インタフェースには重要な要素である一方、素早く目標までたどり着く事も移動インタフェースとしては重要である。

また、口頭のアンケートから、腕の置き場所に困る事、進んでいる事を感じられる要素が視覚しかないため触覚としてのフィードバックが欲しい事等の意見が得られた。腕の置き場所に困る事から、伏臥位における上半身の姿勢の保持が不自然な状態となっている事が示唆される。力を抜いた姿勢でバタ足できるよう、上半身の保持についても装置の改良の余地がある。また、進んでいる実感が得られるように、風を当てたり、霧吹き上の水を用いたりすることで視覚以外にも移動を感じられる要素の付加も没入感を高める上では必要となる。

## 6. まとめ

本研究では、無重力空間や水中のようなバーチャル空間を、身体動作で操作する移動インタフェースの開発を目指した。本稿では、水泳のバタ足動作に着目し、バタ足動作によって水中を移動するインタフェースの基礎部分の開発を行った。試作したインタフェースの操作性と、バタ足動作に準拠したインタフェースである事を実験から評価した。その結果、加減速を使用者の意図に応じて操作出来る事、操作がバタ足動作の巧緻に即している事を確認した。一方で、予備実験によって決めたパラメータに再考の余地がある事も確認された。

今後の課題としては、2 章で述べた進行方向を変更する操作をシステムに組み込む事や、没入感を高めるため、加速に応じた抵抗を触覚でフィードバックさせることが挙げられる。

表 1:水泳経験者と未経験者の最大速度の比較

被験者 (競泳の経験)	最大速度 [m/s]	A に対する各被験者の 最大速度[%]
A(有り)	2.8	-
B(無し)	0.90	32
C(無し)	1.2	42
D(無し)	1.5	55

また、ホームユースでの利用を考慮すると、ベッドに敷くだけでバタ足がしやすくなるようなマット等で代用する事で、このシステムを利用できる場面が増えると考えられる。

## 参考文献

- [1] Virtuix Omni : <http://www.virtuix.com/>  
(2018 年 7 月 27 日閲覧)
- [2] Kat Walk Mini : <http://katvr.com/product/kat-walk-mini/>  
(2018 年 7 月 27 日閲覧)
- [3] Carie Rognon,Stefano Mintchev, Fabio Dell’Agnola, Alexandre Cherpillod , David Atienza , and Dario Floreano : FlyJacket: An Upper Body Soft Exoskeleton for Immersive Drone Control , IEEE ROBOTICS AND AUTOMATION LETTERS, VOL. 3, NO. 3, pp2362-2369, 2018,
- [4] Sidney Fels ,Steve Yohanan ,Sachiyo Takahashi ,Yuichiro Kinoshita ,Kenji Funahashi ,Yasufumi Takama ,Grace Tzu-Pei Chen : User Experiences with a Virtual Swimming Interface Exhibit,(International Conference on Entertainment Computing ICEC 2005: Entertainment Computing - ICEC pp 433-444 , 2005
- [5] ICAROS : <https://www.icaros.com/>  
(2018 年 7 月 27 日閲覧)
- [6] 大島登志一 , 枝元 瑠 , 舘脇望 , 柴田龍輝 : Virtual ISU:材姿勢での疑似歩行運動による歩行感覚提示インタフェース(第 3 報),「エンタテインメントコンピューティングシンポジウム(EC2016)」,pp295-300 , 2016