

令和 3 年 6 月 24 日現在

機関番号：12102

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2018～2020

課題番号：18K19796

研究課題名（和文）無限海遊錯覚と心理状態のリアルタイムフィードバックを用いたVR潜水訓練システム

研究課題名（英文）VR Diving Training System Using Real-Time Feedback of Infinite Sea-Diving Illusion and Psychological State

研究代表者

橋本 悠希（hashimoto, yuki）

筑波大学・システム情報系・助教

研究者番号：10601883

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,900,000円

研究成果の概要（和文）：本研究期間では、潜水用頭部搭載型ディスプレイの実装および改良、水中モーションキャプチャシステムの導入および最適化、水中での身体引き戻し機構の検討を行った。その結果、水深2m以下の浅瀬において4m x 4mの範囲での高精度トラッキングおよび高品質視覚フィードバックを実現した。実装システムはユーザーテストにより、装着性に問題が無く、リアリティの高い海中体験が可能であることが示唆された。また、視覚刺激と引き戻し機構を組み合わせ、上記範囲内で無限に海遊可能な手法の設計ができた。生体情報センシングでは、心拍、視線に関する防水センサの試作および水中での動作検証を行い、HMD組込の目途がついた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究結果から、潜水状態のユーザの位置姿勢が高精度・低遅延でフィードバックされる高品位な水中バーチャルリアリティ体験を世界で初めて実現した。これにより、実地訓練に頼らざるを得ない潜水作業員、ダイバー、救助隊等に対して効率的な訓練を提供し、安全性と技術力向上に大きく寄与する。また、無重力・低重力下における人の知覚特性が容易に検証可能となることから、知覚心理学分野の発展に大きく寄与する。

研究成果の概要（英文）：We implemented and improved a head-mounted display for diving, introduced and optimized an underwater motion capture system, and investigated a body pull-back mechanism in water. As a result, high-precision tracking and high-quality visual feedback in a 4m x 4m range were achieved in shallow water less than 2m deep. User tests indicated that the implemented system had no problems with wearability and could provide a highly realistic underwater experience. In addition, by combining visual stimuli with a pull-back mechanism, we were able to design a method that allows infinite sea travel within the above range. In the area of biometric sensing, we developed a prototype of a waterproof sensor for heartbeat and gaze, and verified its operation in water.

研究分野：バーチャルリアリティ、インタラクティブ技術

キーワード：潜水 スクーバ バーチャルリアリティ 訓練

## 1. 研究開始当初の背景

島国である我が国の周辺海域では、海運、漁業、マリレジャーなど幅広い分野に渡る活動が行われている。中でも、海難救助活動やサルベージ作業、潜函工事など、海の安全や産業にとって潜水作業は欠かせず、潜水技術を持つ人材の早期育成が求められている。潜水作業にとって、海中の様々な状況を十分に体験し、いかなる状況にも対処できる対応力を身に着けることは必須であるが、プール訓練では状況の再現が難しい。そのため、実地訓練に頼らざるを得ないが、天候や波など、意図した海中状況になるとは限らない。また、訓練中における心理状態の把握が困難で、訓練プログラムや訓練中の指示内容が最適化されていない。以上から、十分な練度に到達するには多大な費用と時間を要する。申請者は、数ある潜水技術の中で最も基本であるスクーバ潜水訓練を一般プールで低コストに行うバーチャル海中体験環境の構築を行ってきた。これを踏まえて本研究は、この環境をベースに視覚効果による無限海遊感覚を付加することで様々な海中環境を高いリアリティで海遊することを実現し、さらに運動・生体情報計測機能を組み込むことで訓練者の心理状態に合わせた適切な支援をリアルタイムで行う潜水訓練システムの開発を構想した。

## 2. 研究の目的

これまで実地訓練に頼っていた潜水訓練を、一般プールという身近な設備を用いて実現するバーチャル潜水訓練システムの開発を目的とする。地上で行う従来型海中 VR システムでは得られなかった水特有の浮遊感や抵抗感をプールでの潜水によって解決し、没入型視覚提示による移動量・移動方向の錯覚提示と身体引き戻し機構によって、定位置付近にいなながら行動範囲の広い海中探索を高いリアリティで再現する。また、行動指標(身体・視線運動)・生理的指標(心拍・皮膚温度)を計測可能なシステムを開発し、これまで難しかった水中におけるヒトの心理状態に沿った訓練支援をリアルタイムに行う。バーチャル潜水体験と心理状態のリアルタイムフィードバックにより、潜水訓練の大幅な効率化を目指す。

## 3. 研究の方法

まず、水中で使用可能な頭部搭載型ディスプレイの実装および水中におけるユーザの位置姿勢および生体情報をリアルタイムで計測するシステムの検証を行う。頭部搭載型水中ディスプレイの実装では、低遅延、高品質な一人称立体視映像を提示可能な方式として有線型の装置の開発を行う。位置姿勢の計測では、水中で利用可能なモーションキャプチャシステムを導入し最小のカメラ台数で実用可能な範囲のトラッキングが可能となるようパラメータの最適化を行う。生体情報の計測では、頭部搭載型水中ディスプレイに視線計測計や脈拍、皮膚温度等が計測可能なセンサを組み込むことを検討する。次に、視覚刺激と引き戻し機構による水中無限海遊環境の構築を行う。視覚誘導性自己運動錯覚水中における身体引き戻し手法の併用によって、定位置付近にいなながら水中を自由に海遊する感覚が得られる環境の実現可能性および実現条件をシミュレーションにより同定する。また、水中における引き戻しの手法について検討し、実装を試みる。最後に、提案システムを用いた体験の評価を行い、有効性を確認する。

## 4. 研究成果

### (1) 頭部搭載型水中ディスプレイの設計・実装

一般プールで利用することを想定し、水深 4 m 程度の防水性能を持ち、高品質な映像を提示可能でかつリアルタイムな姿勢位置や生体情報のフィードバックが可能な装置であることを条件とした。高品質かつ低遅延な視覚フィードバックを考えた場合、有線が最も適切であるため、本システムでは PC と有線で接続する方式とした。また、外部のモーションキャプチャシステムでエラーが生じてもある程度トラッキングを持続できるようにするため、内界センサを内蔵することとした(図 1 左)。試作したディスプレイを図 1 右に示す。

試作機の耐水性能評価を行ったところ、水深 4m 地点において全く浸水はなく、十分な耐水性能を有していることが分かった。また、本試作機に対し、HMD 用視線計測センサや脈拍センサや温度センサを組み込み、水中での計測が可能かどうかを検証した。その結果、脈拍センサは試作機装着時の皮膚との接触状況に大きく受けるものの、他のセンサは問題なく計測できた。

	System Design Requirements
Assumed Place	Water Depth 4 m (e.g. pool and shallow water)
Video Output	High Quality
Motion Detection	Highly Responsive Sensor

Implementation	
Waterproofness	<ul style="list-style-type: none"> <li>Protect Circuit Board with Sealing Agent</li> <li>Implementation of Waterproof Housing</li> </ul>
Video Generation	Use VR READY Laptop PC with High Performance GPU
Sensing	<ul style="list-style-type: none"> <li>Head Tracking at High Frame Rate (1000 Hz or more)</li> <li>Position Tracking at Less Latency (20 ms or less)</li> </ul>



図1 左：頭部搭載型水中ディスプレイの要件および仕様  
右：試作した頭部搭載型水中ディスプレイ

### (2) 水中用モーションキャプチャシステムの検証

水中用モーションキャプチャカメラのパラメータ調整やカメラ配置の最適化，マーカ配置の最適化を行った．その結果，カメラ3台という最小の構成ながら4m x 4mの範囲を安定してトラッキング可能となった．また，外光の影響をパラメータの調整によって最小限に抑え，潜水中のユーザの呼吸時に出る気泡によるトラッキングエラーについても気泡の流れを考慮したマーカ配置とすることで解決した(図2)．稀に生じるトラッキングエラーについても，内界センサ情報を用いたトラッキングに切り替えることで視覚フィードバックの不具合を低減することができた．



図2 頭部搭載型水中ディスプレイに設置したマーカの配置

### (3) 水中無限海遊環境の検討

ユーザの身体を引き戻し，水中のある範囲に留まりつつ無限に水中を海遊しているかのような感覚を視覚刺激によって錯覚させるシステムの検討を行った．まず，ダイビングにおけるバタ足時を，初動時と定常時に分け，それぞれの運動時に身体に生じる加速度を調べ，知覚閾値と比較した．その結果，定常時では前提感覚の知覚閾値を超えないため視覚による加速度の補填は必要なく，初動時に対しては必要であった．そのため，視覚によって補填する必要がある加速度を運動感覚知覚モデルによって推定し，ベクションを利用することで十分に補填可能であることを示唆した(図3)．

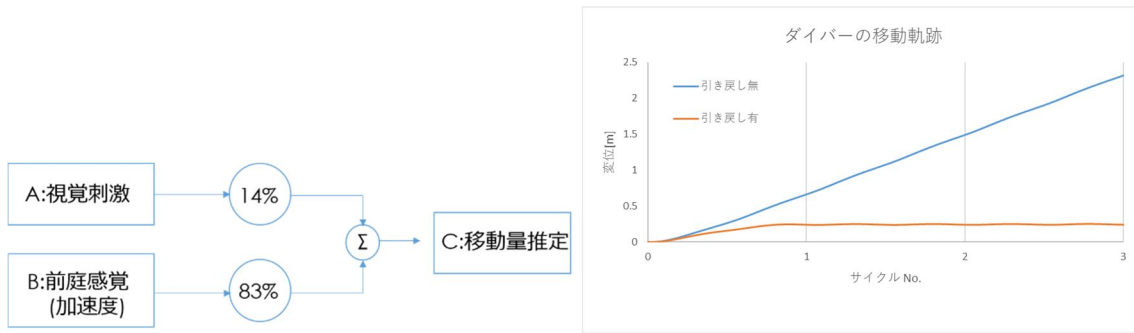


図3 左：移動量推定モデル  
右：ダイバーの移動軌跡

#### (4) システム評価

ユーザによる本提案システムのユーザテストを行い、実装したシステムの評価を行った(図4)。CGで作成した海中フィールドの海遊をタスクとし、数人の被験者に対して数分間の体験後にアンケートを回答させた結果、有線であることの影響が体験に影響することは無く、没入感に対して高評価であった。また、海中をかなり自然に感じられたという意見が多く、本システムの有効性が確認できた。

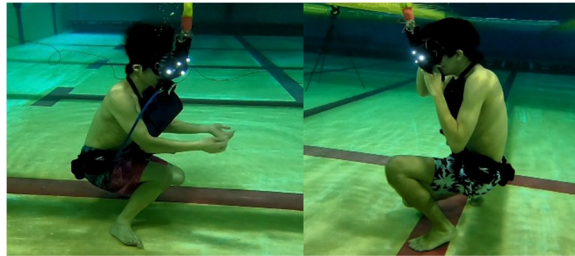


図4 ユーザテストの様子

以上の結果から、本研究課題を遂行することにより、高いリアリティを持つ潜水バーチャルリアリティシステムの構築が実現できた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Denik Hatsushika, Kazuma Nagata, Yuki Hashimoto
2. 発表標題 SCUBA VR: Submersible-Type Virtual Underwater Experience System
3. 学会等名 IEEE VR 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Denik Hatsushika, Kazuma Nagata, Yuki Hashimoto
2. 発表標題 Underwater VR Experience System for Scuba Training Using Underwater Wired HMD
3. 学会等名 OCEANS 2018 MTS/IEEE Charleston (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 初鹿デニック, 長田一馬, 橋本悠希
2. 発表標題 水中で使用可能な有線型HMDの開発及び基礎的性能の検証
3. 学会等名 第23回日本バーチャルリアリティ学会大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 初鹿デニック, 長田一馬, 橋本悠希
2. 発表標題 水中対応HMDを用いたスキューバダイビング訓練システムの開発 水中HMDの防水・耐水性の向上と実装
3. 学会等名 ROBOMECH2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 高野夏樹, 橋本悠希
2. 発表標題 身体引き戻し機構と視覚刺激による水中無限海遊感覚提示手法の検討
3. 学会等名 ROBOMECH2020
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担 者	橋本 朋子 (米村朋子)  (yonemura tomoko)	明海大学・総合教育センター・講師	
	(90456707)	(32404)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------