



# 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

初鹿デニック<sup>1)</sup>, 長田一馬<sup>1)</sup>, 橋本悠希<sup>1)2)</sup>

1) 筑波大学 (〒305-8573 茨城県つくば市天王台 1-1-1,

d\_hatsushika@vrlab.esys.tsukuba.ac.jp, nagata.kazuma@entcomp.esys.tsukuba.ac.jp, hashimoto@iit.tsukuba.ac.jp)

2) 国立研究開発法人科学技術振興機構 さきがけ (〒332-0012 埼玉県川口市本町 4-1-8)

**概要**: 近年中高年のスキューバ事故が多く, ほぼ死亡事故に繋がっていると報告されている. 事故低減のため, 我々は手頃な水域で安全に任意の水中環境での訓練を VR で実現することを目指し, ウェアラブル型のスキューバ訓練用 VR 海中体感システムを提案する. 本稿では, 水中で使用可能な有線型 HMD の開発を行い, 提示映像の立体視及び水深 3.8m における防水性・耐水性といった基礎的性能の検証を報告する.

**キーワード**: 水中 VR, 防水 HMD, スキューバダイビング, 訓練シミュレータ

## 1. 序論

### 1.1 研究背景・目的

日本では社会高齢化の影響でスキューバ人口の高齢化が進行している. それに伴い, スキューバダイビング(以下, スキューバ)事故における 40 代以上の中高年の割合が近年大きな割合を占めるようになり, ほぼ 100% 死亡事故に繋がっている[1]. 技術未熟及び海水誤飲によるパニックが主な原因であることが報告されている[2].

将来中高年の割合が増加することが予想されることから, 従来よりも手軽で安全にスキューバを行うことができるように, 低負荷でかつ十分な訓練を行うことが可能な環境を構築することが望まれる. しかし, 従来のスキューバ訓練は実地訓練以外に熟達の道はなく, 不測の事態を冷静に対処できる練度に達するまで多大な時間を要する. また, 実地訓練の際に海中の様々な状況を再現することが難しいという問題も存在する.

そこで我々はプールや浅瀬などの限定水域に居ながら, VR 技術で任意の水中環境を体験し, スキューバの訓練を実現することを目指すため, スキューバ訓練用水中 VR システムの開発を提案する.

### 1.2 従来の水中 VR/AR システムと本提案システム

陸上における水中 VR システムはこれまで数多く開発されている[3][4]. しかし, 水の無重力感や抵抗感がないため, 訓練効果があまり感じられない. それに対し, 水中でリアルタイムに海中の視覚提示を行う研究が発表されている[5][6]. しかし, 体勢の自由度や遊泳可能な範囲が制限されていることや, 可搬性の問題がある. また, 近年スマートフォン等を利用した一体型水中 HMD が多く発表されている[7][8][9]. しかし性能限界上, トラッキング性能や CG 品

Denik HATSUHIKA, Kazuma NAGATA, and Yuki HASHIMOTO

質の低さによる VR 酔いを招く可能性があることや高度訓練の実現性・再現性が低い問題がある.

我々は従来の水中 VR/AR の問題点を改善した新たなシステム, ウェアラブル型の VR 海中体感システムを提案する. 安全で手頃な水域で水の感覚をリアルに感じつつ, 本システムを用いて没入感の高い任意の海中環境をバーチャルに体感することで, スキューバの基礎的な訓練の上達度を早めることが期待できる. 本稿では, 水中で使用可能な有線型 HMD (Underwater Wired Head Mounted Display : UWMD) のプロトタイプ開発及び基礎的性能の検証のためにシステムテストを行った結果を報告する. 表 1 に従来の水中 VR/AR システムと本提案システムの比較を示す.

表 1 水中 VR/AR システムの比較

	Amphibian [4]	DOLPHYN [5]	AquaCAVE [6]	一体型水中HMD[9]	UWMD
水中使用	×	○	○	○	○
身体自由度	×	×	○	○	○
可搬性	△	○	×	○	○
性能・品質	○	△	○	×	○

## 2. システム設計

### 2.1 設計方針

本システムの使用場所として基礎訓練に用いられるプールや浅瀬を想定している. このため, 全身が水中に沈んだ状態で潜水できる水深 4m 程度において使用できることを条件とした. 映像については, 今後様々な検証実験を行うことを想定し, 高クオリティで没入感が高く, 高フレームレートの一人称立体視映像をリアルタイムに操作できることを条件とすることにした. センシングについては, 動作に合わせてリアルタイムに映像を変化させる必要があるため, 頭部位置を即座に映像に反映できる高応答性のセンサが求められる.

以上の設計指針を満たすため、各要件に対して以下のような実装を施した。防水・耐水については、水深4mまで完全に水没しても動作するように、回路等の水に弱いパーツをシーリング剤で保護し、防水ハードウェアの実装を行った。映像出力については、可搬性の点も含め VR Ready ノート PC (SOLUTION-17FG101-i7K-VNRS-DevelopVR, CPU: Intel Core i7-8700K, GPU: NVIDIA GeForce GTX 1080) を使用して HDMI 出力した。有線型にした理由として、訓練シミュレータとして不可欠な要件である正確性・リアルタイム性・インタラクティブ性を保障し、さらに外部指令が安易に送れるようにするためである。センシングについては、頭部位置に反映させる映像を遅延及び違和感なく提示できるように、内界センサによる高フレームレート 1kHz 以上のヘッドトラッキングを用いた。表 2 にシステムの設計方針に対する実装をまとめた表を示す。

表 2 設計方針に対する実装

	設計方針
想定場所	水深4m(例:プールや浅瀬)
提示映像	高クオリティ映像
動作検出	高応答なセンサ

	実装
防水・耐水	回路をシーリング剤で保護 防水ハードウェアの実装
映像生成	高性能なGPU搭載 VR Ready ノートPCを使用
センシング	1kHz以上の ヘッドトラッキング

## 2.2 装置構成

映像制作は Unity (Unity Technologies) を用いた。UWHMD 本体には Oculus Rift DK2 (Oculus VR Inc.) を分解して、回路及びディスプレイが搭載された回路基板(以下、DK2 基板)を使用した。DK2 基板には内界センサが内蔵されており、ヘッドトラッキングに利用した。通信・電源供給は USB/HDMI 有線ケーブルで行い、防水ホース(以下、ホース)で覆った。ケーブルの長さは想定水深である 4m 中である程度行動できるように 10m とした。フレームレートが 75fps 以下に低下しないように、CG のオブジェクトやエフェクト量を調整した。図 1 に本システムの構成、図 2 に本システムの概略図を示す。

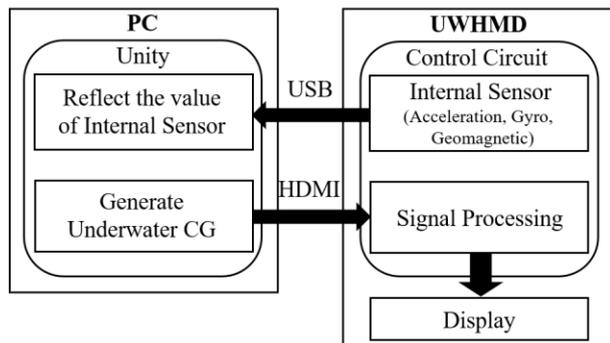


図 1 システム構成

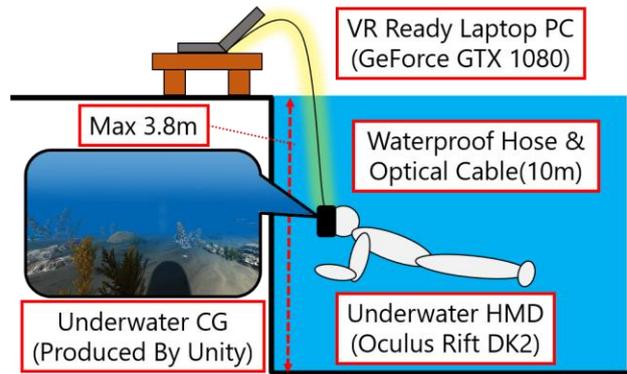


図 2 システム概略図

## 3. ハードウェア設計

本システムのプロトタイプ2号機 UWHMD2 の防水ハードウェアを Solidworks (Dassault Systèmes SOLIDWORKS Corp.) で設計した[10]。

### 3.1 防水ハウジング

防水ハウジング(以下、ハウジング)とホースが接続できるようにねじ加工をし、接合部分の隙間の防水に O リング(桜シール株式会社, VMQ-50G-55)を利用した。水中マスク(以下、マスク)との接合部分の隙間の防水に O リング(桜シール株式会社, VMQ-50G-135)を利用した。ハウジングとマスクが接合できるように接合用フレームを作成し、隙間からの浸水が生じないようにシリコンで一体化した。映像の立体感提示のために中心にスリットをつけ、クロストークの防止とした。ピントが合った状態で映像を見ることができたのは、ディスプレイ画面からマスクのガラス面まで 12mm~17mm の距離であった。ここでは 14mm に設定した。図 3 にハウジングの CAD モデルを示す。

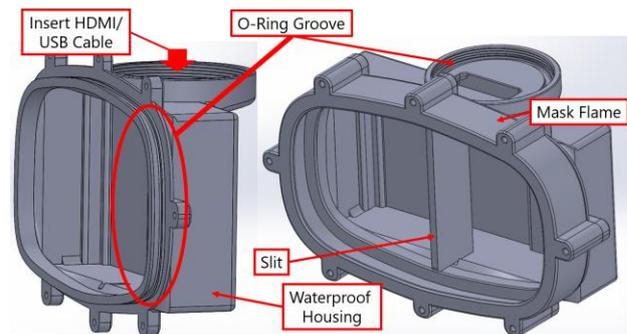


図 3 ハウジング CAD モデル

### 3.2 レンズホルダ

レンズホルダの設計を記す。立体感提示のためにレンズ以外の部分は遮蔽した。ユーザーによって瞳孔間距離 (Pupillary Distance: PD) にズレがあるため、映像のピント合わせにレンズの位置補正が必要となる。上下の位置補正として、マスクのバンドの固定位置を上下に調整する。左右の位置補正については、レンズを左右に動かせるようにした。レンズ挿入口の高さは、マスクを実際に装着する際に、今回は著者の目の位置に合わせるようにした。挿入口の

長さでレンズの左右可動範囲を定めている。日本人成人男性の PD 平均 64mm[11]の半分をレンズ基準位置とする。外側への可動限界は外縁と挿入棒がぶつかった位置、内側への可動限界はレンズが外れないようにレンズ挿入口から 5mm 引いた位置までとした。よって、左右の可動距離は次のような計算になり、レンズの可動距離は計 15mm となる。図 4 にレンズホルダの設計図を示す。

外側への可動距離：

$$27(\text{挿入口の長さ}) - 20(\text{挿入棒の長さ}) = 7(\text{mm})$$

内側への可動距離：

$$20(\text{挿入棒の長さ}) - 7(\text{外側への可動距離}) - 5(\text{レンズ挿入棒が外れない限界距離}) = 8(\text{mm})$$

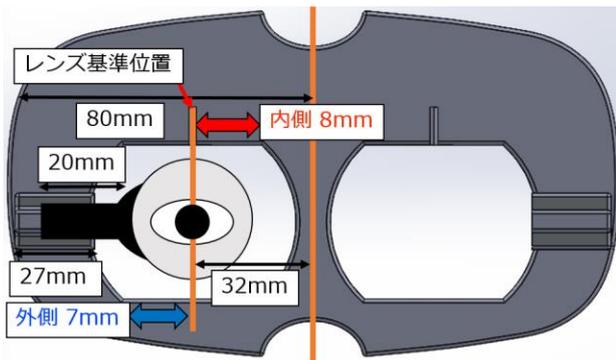


図 4 レンズホルダ設計図

### 3.3 実装

レンズは可動式レンズ(Durovis, Dive5 Lens Upgrade Kit)を利用した。HDMIは映像の安定性の点から、10m 光ケーブル(株式会社アルパニクス, NP-AOC-HDMI/HDMI-10), USBは10m 延長ケーブル(サンワダイレクト, 500-USB005)を導入した。水中マスクは一眼タイプのダイビングマスク(Gull, A-0102)を利用した。ホースは泳ぎやすさの点から、しなやかさと軽量感のある消防散水用ホース(株式会社岩崎製作所, 01CALB065A)を導入した。設計した防水ハードウェアのモデルを 3D プリンタで出力した。モデル材料は防水性・強度の点から、アクリル樹脂(Objet, FullCure® 870 Vero Black)を用いた。図 5 に実装した UWHMD2 を示す。



図 5 UWHMD2

## 4. システムテスト

### 4.1 映像確認テスト

レンズ越しの映像が立体視できるか簡単な映像確認テストを健康な視力を持つ被験者 3 名に行った。図 6 に映像確認テストの映像の様子を示す。結果として、ブレがなく立体的に見ることができたことが確認された。

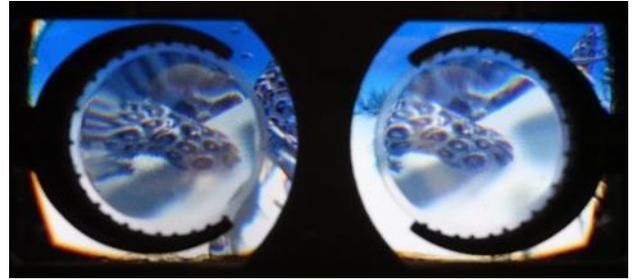


図 6 レンズ越しの出力映像

### 4.2 浸水テスト

ハードウェアの防水・耐水性を確認するために浸水テストを行った。万一浸水による DK2 基板の故障が生じないように本テストでは、ケーブル類及び DK2 基板を外した状態で行った。水深 0.40m, 1.3m, 3.8m の 3 種類において、それぞれ静止状態のまま底に沈ませた場合と、底で上下左右に動かす場合を行い、計 6 つのパターンにおいて確認した。水深 0.40m では水槽(KOTOBUKI, レグラスフラット F-3050), 水深 1.3m 及び 3.8m では筑波大学屋内プールを利用した。テスト時間は全て 5 分とした。5 分とした理由は、エアタンク(MiniDive, MiniDive Pro+)が使える時間が未経験者の場合、早くて 5 分程度であるためである。浸水の有無は目視を通して水没管理シール(アズワン: MZ-R)で確認した。図 7 に浸水テストの様子を示す。

結果として、いずれの場合にも浸水が見られなかったため、想定場所である水深 4m 程度において防水・耐水性があることが確認された。

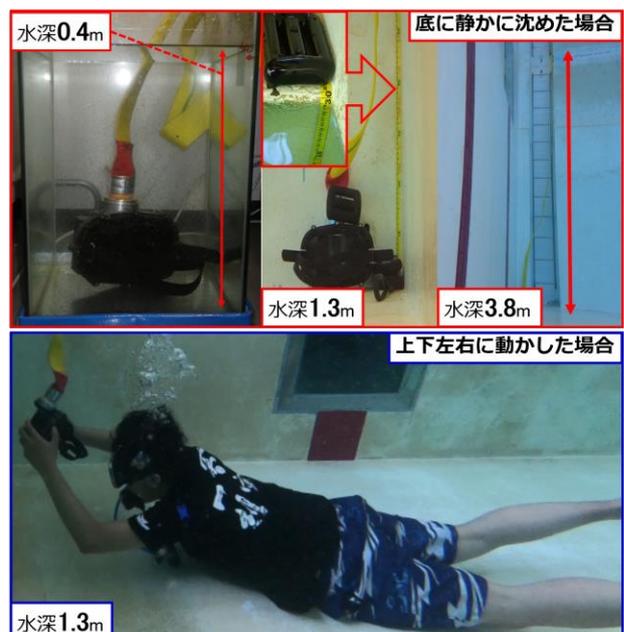


図 7 浸水テスト

## 5. 今後の計画

4章の結果から、UWHMD2は水深4m程度において、使用できることが確認できた。今後、以下の実験を行うことを計画している。

### 5.1 ハードウェア動作確認実験

屋内プール水深1.3mにてハードウェア動作確認実験を行う。水中で使用した時、映像が途切れずに安定して提示できているか(映像の安定度)、重く感じたり、水の抵抗でズレてしまうか(装着感)、ホースが煩わしく感じるか、普段通りに自由に泳ぐことができていないか(泳ぎやすさ)、地上と同じように映像が十分な追従性を見せているか(ヘッドトラッキング精度)、以上のUWHMD2の基礎的性能について7段階評価(1. 否定的 7. 肯定的)のアンケート調査によって評価を行う。実験は以下の通りを行う。

- 1) 地上で水平位置のキャリブレーションを行い、UWHMD2を装着する。
- 2) 頭部を上下左右に動かし、提示映像の追従性を確認し、UWHMD2を外す。
- 3) プール(水深1.3m)に入水し、ウェイトベルト、エアタンク、UWHMD2の順に装着し、ゆっくり潜水する。
- 4) 5分間水底で潜水している状態を維持しつつ、自由に浮いたり浮かんだりして上下左右に泳ぐ。
- 5) 画面UIで5分経過を確認した後、ゆっくり浮上し、UWHMD2、エアタンク、ウェイトベルトを外す。
- 6) 映像の安定度・装着感・泳ぎやすさ・ヘッドトラッキング精度の4項目におけるアンケートを回答する。

### 5.2 水深錯覚検証実験

実際の水深によらず一定の深さのCGを提示して、水深を錯覚して感じるかどうかの検証するために心理実験を行う。海中CGは水深10m, 20m, 30m, 40mの4パターンの映像を提示する。実際の水深によらず、提示したCGの水深の中にいるかどうか、7段階評価(1. 否定的 7. 肯定的)のアンケート調査によって評価する。実験環境及び手順は5.1と同様に行う。

## 6. 結論

本稿では、安全で手頃な水域に居ながら、任意の水中環境の体験を実現できることを目指し、スキューバ訓練用水中VRシステムのプロトタイプ開発を行った。システムテストの結果、立体視の確保、水深4mにおける防水・耐水性があることがわかった。

本システムはスキューバ訓練以外に、映像を宇宙空間にすることで、宇宙の無重力体験が出来たり、悪天候下でも屋外で没入感の高いVR体験が出来るなど、様々な分野においても応用できる可能性がある。

今後の展望として、動作確認テストを通して、開発したプロトタイプの水中の映像の安定感、装着感、泳ぎやす

さ、水中でのヘッドトラッキング精度といった残りの基礎的性能の検証を行う。また、実際の水深によらず一定の深さのCGを提示して被験者に水深錯覚の実験を行い、プールなどの限定水域に居ながら、様々な水深での海中体験が可能であるかを検証する。さらに、モーションキャプチャを用いてユーザの動きに連動して映像を変動させるシステムの構築を行い、本システムを用いたVRスキューバ体験に対するiPQ[12]を用いた主観評価実験を実施し、従来の水中VR/ARシステムと没入度について比較する。最終的に、スキューバ訓練への本システムの導入を目指し、システムの構築と検証を進めていく。

**謝辞** 本研究の一部は、科研費萌芽研究(18K19796)の助成を受けたものである。

### 参考文献

- [1] レジャースポーツダイビング産業協会: ダイビング産業における動向調査, 平成13年度ダイビング産業に関する調査研究報告書, 2002
- [2] 野沢: ダイビング事故の傾向とその原因について考える, 2013
- [3] XL Catlin Seaview Survey, 2017
- [4] D. Jain et al.: Amphibian, Proceedings of the 29th Annual Symposium on User Interface Software and Technology, pp.729-739, 2016
- [5] B. Abdelkader et al.: Augmented reality for underwater activities with the use of the DOLPHYN. 10th IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control, 2013
- [6] S. Yamashita et al.: AquaCAVE, Proceedings of the 26th International Conference on Artificial Reality and Telexistence and the 21st Eurographics Symposium on Virtual Environments, pp.25-28, 2016
- [7] theDolphinSwimClub: WILD DOLPHIN WATERPROOF VR, Laval Virtual 2018
- [8] 株式会社Rockin'Pool: 空飛ぶプールVR, 2018
- [9] H. Osonoe et al.: Optimized HMD System for Underwater VR Experience. In 14th International Conference on Advances in Computer Entertainment Technology, 2017
- [10] 初鹿, 長田, 橋本: 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—, ROBOMECH2018
- [11] 河内, 持丸: 日本人頭部寸法データベース 2001, 産業技術総合研究所 H16PRO-212, 2008
- [12] iGroup presence questionnaire, last accessed July, 2018 <http://www.igroup.org/pq/ipq/construction.php>