

AquaCAVE：水泳体験を向上させる水中バーチャルリアリティ環境

山下 聖悟* 張 鑫磊* 曆本 純一*†

概要. 水泳は最も人気のあるスポーツの一つであり,心身を健康に保つためにとても有益である.しかし,プール中での水泳は,海で泳ぐ場合と違い風景の変化を楽しむこともできず,単調な動作を繰り返す必要がある.そのため,水泳を続けるモチベーションを保つことができない人も多い.加えて,水泳フォームの指導は他のスポーツに比べて難しいという問題もある.これは,水泳が水中でのスポーツであるため,水泳フォームを自身やコーチが認識できることや,リアルタイムに指導を伝えることができないことに起因する.本研究では水槽の底や側面に立体映像を投影することにより,サンゴ礁や深海などの仮想的な環境の中で水泳を楽しむことが出来るプールを実現した.このシステムは,水中での新しいバーチャルリアリティ体験を提供する.また,水泳へのモチベーション持続や,水泳フォームの投影などによるトレーニングの支援効果も期待される.水中にバーチャルリアリティ環境を実現するにあたり,水の持つ赤外線の吸収や歪曲収差,反射が障害となる.本論文では,これらの特性を持つ水がバーチャルリアリティ環境にどのような影響を与えるのか述べた.また,その解決策について検証した.

1 はじめに

水泳は幅広い年齢層に親しまれる健康的で人気のあるスポーツの一つである.水泳に一般的に使用される場所としてプールが挙げられる,しかし,プールの中での水泳は風景の変化を楽しむことができず,単調な動作を繰り返しとなる場合が多い.そのため,水泳を続けるモチベーションを保つことができない人も多い.加えて,水泳のトレーニングや指導は他のスポーツに比べて難しいという問題もある.自身のフォームを正確に認識できる人は他の人よりも早く成長する事が出来ることは既に明らかになっている[7].しかし,水中において自身のスイミングフォームを認識することは難しく,水泳のコーチからの指示をリアルタイムに受けることができない場合も多い.これらの問題を解決するための一つの方法として,ヘッドマウントディスプレイ(HMD)を装着することがある[5,6].また,Morales らが提案したダイバー支援のための拡張現実感(AR)ディスプレイもある[8].これらのディスプレイは主に情報を水中のユーザーに伝えるために使われるものであり,水泳者の視野全体をカバーすることは難しかった.そのため,本当の海で泳いでいるかのような体験を作り出すことはできなかった.CAVE[1]は,ユーザーをスクリーンで囲んだ空間に立体的に CG 映像を表示させて,バーチャルリアリティ(VR)を体験できるようにしたものである.しかし,歪曲収差や反射のある水中に



図 1. AquaCAVE: バーチャルリアリティ環境における浮遊体験と水泳支援が可能な新しいプール

おいて没入的な VR を実現する技術は従来存在していないなかった.

2 AquaCAVE

本研究では CAVE として知られる VR 環境のように,側面や底面を立体視可能なリアプロジェクションスクリーンで構成したプールを提案する.この構成によりユーザーは,周囲全体を美しいサンゴ礁の海や深海などの映像に覆われた状態で水泳を楽しむことができる.本システムは風景を映し出すだけではなく,水泳フォームなど 3D キャラクターとして映し出すことができるため,水泳のトレーニングにも有効である.

ユーザーはアクティブシャッターグラスが組み込まれたゴーグルを装着する.これは通常の水泳用ゴーグルに近い装着感を提供することが可能であり,本来の水泳動作に与える影響が可能な限り少なくな

Copyright is held by the author(s).

* 東京大学大学院情報学環

† ソニーコンピュータサイエンス研究所

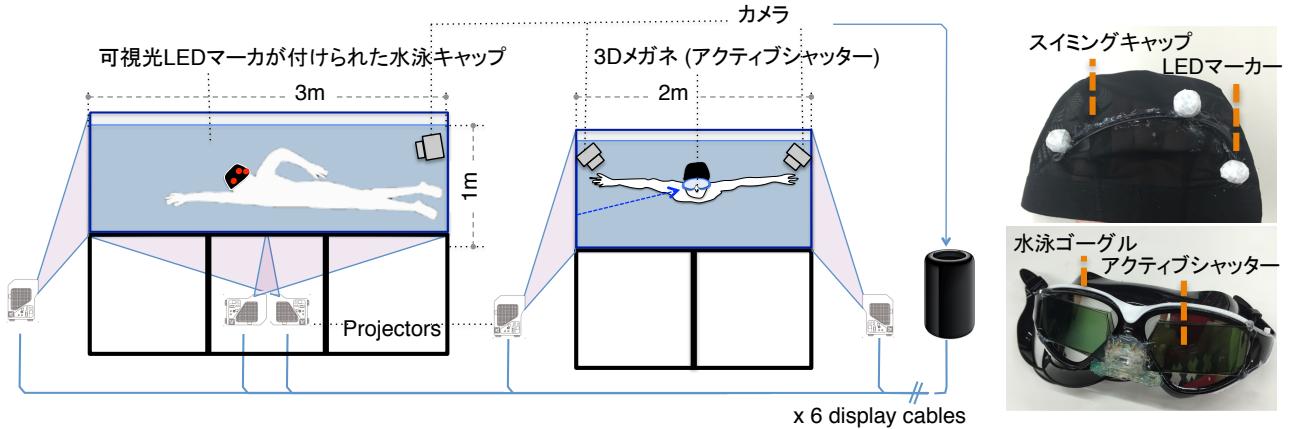


図 2. システム構成図

るよう設計されている。

提案手法 AquaCAVE(図 1)は「新しい VR 体験」と「水泳体験の向上」というふたつの特徴を持つ。

2.1 新しいバーチャルリアリティ体験

AquaCAVE は水中での VR 環境を提供する。CAVE を始めとする多くの没入型バーチャルリアリティ環境は、地上にてユーザーに 3D 映像を提供するものであった。そのため、ユーザーの移動できるのは地面に平行した方向のみに制限されていた。また、水中を再現した映像を提供できたとしても、水が肌に当たる感覚や水圧など、水中特有の感覚を再現することはできなかった。

この制約により、たとえ没入感のある映像が投影されていたとしても、水の中を泳いでいる感覚を体験することは難しかった。しかし、AquaCAVE の場合、ユーザーが水中に浮かんだ状態でバーチャルリアリティ環境を実現できるため、上部方向の動きの制限がなく、水の感覚を正確に再現したより没入的な環境を実現できる。

2.2 水泳体験の向上

ユーザーは景色の変化を楽しみながら泳ぐことが出来るため、水泳のモチベーションを保つことが出来る。また、理想的なスイミングフォームで泳ぐ 3D キャラクターや、スイミングフォームを計測したデータを水泳者の前に表示することができるためトレーニング支援効果も期待される。

3 関連研究

Immersive Terrestrial Scuba Diving Using Virtual Reality [2] は、ヘッドマウントディスプレイを装着したユーザーの腕と足をサスペンションで上部から吊り下げ、映像に合わせて制御することで水

中の感覚を再現し、仮想的なスクuba ダイビング経験を作り出すものである。このシステムは手足に水中の感覚を再現することができる。しかし、実装は地上にあるため、水の肌に当たる感覚や水圧などを再現することができなかった。

Dungeons & swimmers[3] は音声によるフォードバックを用いたインタラクティブな水中用のゲームの実装例である。このシステムは水泳にロールプレイングゲームにおいて敵と戦う際のようなゲーム性を持たせることにより、泳ぐことに対するモチベーションの向上を可能にした。しかし、AquaCAVE の 3D キャラクターによる視覚的なフィードバックは、音声での指示が難しい水泳フォームの指導などの際により効果があると考えられる。

他のアプローチとして、ユーザーと一緒に泳ぐスイミングロボットに情報を写しだすものもある[4]。このシステムはユーザーの水泳フォームをカメラで撮影しロボット上のディスプレイに表示することができる。しかし、このシステムのような用途で使用できるディスプレイのサイズには限度があるため、本当の海で泳いでいるかのような体験を作り出すことはできない。

4 システム構成

AquaCAVE のシステム構成を図 2 に示す。プールのサイズは 3m × 2m × 1m であり、リアプロジェクションシートを貼り付けた 3cm の厚みを持つアクリルで構成されている。CAVE 環境は 3D 映像の投影機能を持つ 6 台の単焦点プロジェクター(RICOH PJ WX4141)によって実現される。側面 3 面は、それぞれ 3 台のプロジェクターによって投影し、底面は 3 台のプロジェクターを同時に使って投影した。各プロジェクターは Mac Pro1 台に搭載されている 6 つの Thunderbolt ポートに接続されている。

AquaCAVE：水泳体験を向上させる水中バーチャルリアリティ環境

ユーザーはゴーグルに組み込まれたアクティブシャッターグラスを装着する。また、プールの内には防水加工されたカメラが設置されている。このカメラはユーザーの水泳キャップについて可視光 LED マーカー検出し、ヘッドトラッキングを実現する。カメラから見た頭の 3 次元位置と角度からは、ユーザーの目の位置を算出することが出来る。プールの各面と水泳者の目の位置関係が既知である場合、VR の世界の座標と実物の座標が一致した CAVE 環境を実現することができる。つまり、実際はプール側面や底面に投影された映像であったとしても、環境に実物があるかのように見える。

映像は左目用と右目用にそれぞれ、CAVE を実現するためのフラスタムを設定してレンダリングする。3D プロジェクターは、DLP Link により左目と右目の映像の間に同期のための信号を挿入し、フレームシーケンシャル方式で投影する。ユーザーに立体映像を提供するためには、右目用の映像の時は右目のみに映像を届け、左目用の映像の時は左目のみに映像を届ける必要がある。アクティブシャッターグラスは同期信号を識別し適切なタイミングで右目か左目一方のシャッターを下ろす。これにより、ユーザーはプールに映し出される映像を立体的にみることができる。

5 コンテンツ

図 3 に 3 つのコンテンツの例を示す。図中の写真はそれぞれコンピュータグラフィックスによる海中映像(A)、海中を撮影した全天球映像(B)、理想的なスイミングフォーム(C)を撮影したものである。

5.1 コンピュータグラフィックスによる海中映像

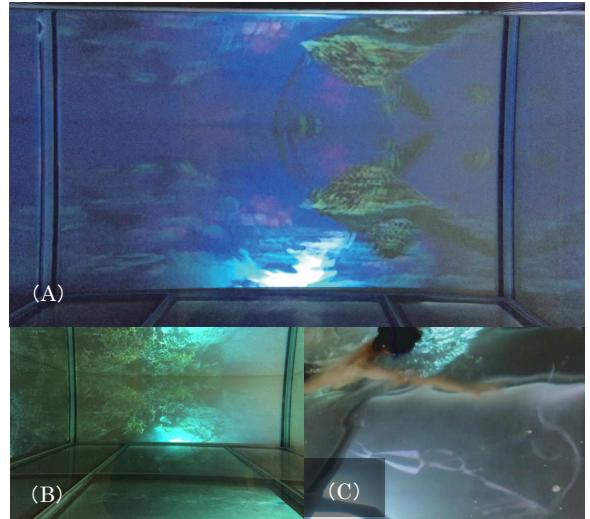
海の生物と共に海中を遊泳しているようなコンピュータグラフィックスを作成した。また、立体映像として OpenGL のサンプルとして提供されている魚が遊泳するようなシーンのプログラムを使用した。

5.2 360 度の全天球映像

沖縄にてサンゴ礁に囲まれた海中の全周囲映像を撮影した。全天球映像は 6 台の GoPro カメラを 360 度すべての映像が撮影できる状態で設置し撮影した。また、ソフトウェアで表示する際には、映像を 360 度パノラマビデオとして使用される正距円筒図法に変換して使用した。

5.3 スイミングフォームの投影

一定の間隔で理想的なスイミングフォームを繰り返す 3D キャラクターをプールの底面に表示した。ユーザーは表示された映像を参考しながら正確な水泳フォームを学ぶことが出来る。



(A) コンピュータグラフィックスによる海中の映像

(B) 沖縄で撮影された海中の全天球映像

(C) 理想的なスイミングフォーム

図 3. コンテンツ



水面での反射

糸巻き型歪曲収差

図 4. 水がCAVEに与える影響

6 水が CAVE 環境に与える影響と解決方法

周囲を映像に囲まれた CAVE のような VR 環境に、水は以下のような影響を与える。

- 糸巻き型歪曲収差
- アクリル表面や水面での映像の反射

図 4 左は水面での反射、図 4 右は映像を投影したプール中に発生する糸巻き方歪曲収差の例である。以下にそれぞれの特徴と、解決手法を述べる。

6.1 水中の糸巻き型歪曲収差

糸巻き型歪曲収差とは、望遠レンズに見られるような中心に向かって丸みを帯びた映像のゆがみの事である。カメラや目を通して水中の映像を見た場合には、空気と水の屈折率の違いから糸巻き方歪曲収差が現れる。歪曲収差は、正確に目の位置を取得する必要がある CAVE 型 VR に大きく影響を与える。また、ユーザーが見る映像にも歪みが発生する。

6.1.1 画像処理による歪み補正

水中での糸巻き型歪曲収差は、画面の中心からの距離と角度が比例する等距離射影方式の魚眼レンズを補正する時のように、距離と角度を指定すること

で大幅に軽減できる。よって、歪曲収差を吸収するよう適切に設定したフィルターを使用することで、空中と同じようなヘッドトラッキングが可能となる。図5 左はプール前面にグリッドを表示し、防水機能に優れたSony XperiaZで撮影した写真である。図5右は画像処理により歪みを補正した後の画像である。

6.1.2 光学的な屈性矯正

糸巻き型歪曲収差が発生するのは、カメラ内の空気とレンズ、外部の水との間に屈折率の違いがあるためである。半球形のレンズを用いて光学的に屈折を補正することで、水中においても空気中と同じように歪みや拡大のない映像を撮影することができるようになる。図6,7右は光学的にこの歪曲を吸収するように設計されたドーム型ハウジングにGoProを入れて水中からCAVE側面を撮影した際の写真である。また、左は通常の防水ハウジングに入れて同じ場所から撮影した写真である。なおGoProの広角レンズ特有の映像の歪みは、公式ソフトウェアであるGoProスタジオによって補正した。このソフトウェアは正確な歪み補正のためのパラメータを持ちGoProで撮影した動画の歪みを正確に補正する事ができる。図6左からは、水による拡大の影響により視野が狭くなっていること、図7左からは歪曲収差が発生していることが確認できる。しかし図6,7右ではそれらの影響がほぼ見られない。

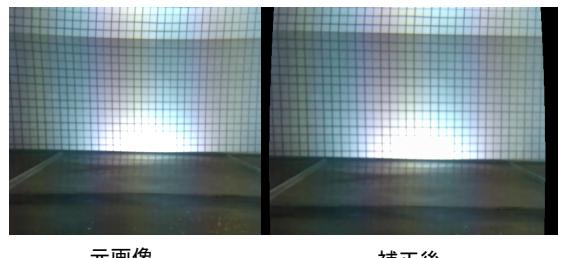
ヘッドトラッキング用カメラには、光学的に屈折をなくす特性を持つ防水ハウジングを装着することとした。理由は、視野角の広さを保てることと、コンピュータ側での計算処理が必要ではないことである。カメラからの映像はWi-Fiネットワークを経由してコンピュータに送信される。水は2.4GHz帯の電波を吸収するため、水中にカメラを完全に沈めた際には、映像の乱れが確認された。そのため、カメラのボディーは水上にあり、レンズからは水中が見える状態で設置することにした。

6.1.3 歪曲収差がCAVE中のユーザーに与える影響

ユーザーが目で見る映像にも歪曲収差は発生する。この歪みは視野の中心から端に向かって強くなる。人間の目の仕組み上、ピントの合う中心部が認識する歪曲収差は少なくVR体験に与える影響は少ないと考えられる。しかし、周辺視野には大きな歪曲収差が発生する。どのような景色の場合、歪曲収差がVRに影響を与えるかについての更なる調査と解決策の検証が必要とされる。

6.2 水面や側部のアクリルでの映像の反射

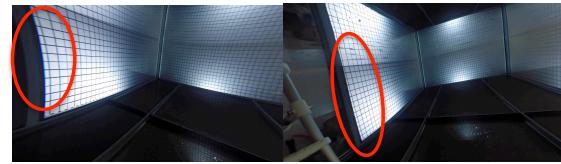
周囲をアクリルやガラスに囲まれた環境の場合、映像が反射する。例えば、前面に表示されている映像



元画像 補正後
図5. 画像処理による糸巻き型歪曲収差の補正



通常のハウジング ドーム型ハウジング
図6. 水による拡大の影響とレンズによる補正



通常のハウジング ドーム型ハウジング
図7. 糸巻き型歪曲収差とレンズによる補正

が反射して側面にも写ってしまう。反射した映像はユーザーの目の位置を考慮した適切なものではない。また反射により、ユーザーはアクリルの存在を認識できるため、CAVE型のVR体験を著しく低下させることが考えられる。

6.2.1 偏光による反射の低減

光はアクリルや水などに反射すると、横方向の振動の大きな光に変化する特性を持っている。この光は偏光されており、適切な角度の偏光板を通してみると反射のみを視界から消すことが出来る。図8は反射光の振動方向と直交する角度に設定した偏光板をつけたカメラで、プールの左側面を撮影した際の写真である。この時、偏光板は偏光軸がプール底面から天井に向かう角度であった。なお、反射した正面の映像の視認性を向上させるため、側面の映像は投影していない。実装として、ユーザーのゴーグルに偏光機能をつける方法と、側面に偏光シートを貼る方法が考えられる。

6.2.2 水面の波による映像のぼかし

水槽の水面にも、正面の映像の反射が確認される。これは、水面が鏡のように反射してしまうことが原因である。水面に水流を発生させ歪みを加えたところ、反射による水面への映像がぼけ、映像の認識が難しくなった(図9)。波の発生は水中のアクティビティにとって自然である。また、水面での反射が影響を与えない映像の際は、反射はむしろ演出を向上させる。この仕組みにより、状況に応じて反射を残す

AquaCAVE：水泳体験を向上させる水中バーチャルリアリティ環境

などの制御も可能となる。

7 周囲を複雑な映像で囲まれた水中でのヘッドトラッキング

正確なヘッドトラッキングには赤外線によるモーションキャプチャが用いる場合が多い。しかし、水には赤外線を大きく減衰する特性がある。また、CAVEのように周囲を複雑な映像で囲まれた状態での可視光を使ったヘッドトラッキングは、ノイズが多く精度の向上が難しい。加えて、可視光用の反射型マーカーへ放射する光は周囲の映像に影響を与える。これらを考慮して、正確なヘッドトラッキングと明瞭な視界を両立する手法を検証した。

7.1 水による赤外線吸収

赤外線は水中で大きく減衰する。そのため、水中において赤外線 LED を使用したヘッドトラッキングが可能か検証を行った。実験の際には、赤外線 LED(osi5fu5111c-40)をボタン電池 1 つ(3.3V)によって駆動し、USB カメラ(BSW20KM11BK)から赤外線カットフィルターを取りのぞき、可視光カットフィルターを取り付けたものを使用した。結果として、カメラが LED を視認可能な最大距離は約 40cm と短く、拡張性が少ないとわかった。

7.2 可視光を使用したヘッドトラッキング

可視光 LED の場合、水中においても光の減衰が少ない。しかし、CAVE のように周囲を複雑な映像で囲まれた環境の場合、周辺のノイズのため可視光マーカーを認識することができなかった。

7.3 円偏光による映像の遮光

赤外線が吸収され、かつ周囲が複雑な映像で囲まれた環境においてヘッドトラッキングを実現するために、偏光による遮光効果を用いた。図 10 は光を右円偏光にするシートをプール前面に貼り、円偏光を遮光あるいは透過するフィルターを通して撮影した写真の比較である。図 10(A)はフィルターを付けずに撮影したもの、(B)は左円偏光を通すフィルター(右円偏光を通さないフィルター)、(C)は右円偏光を通すフィルター(C)を通して撮影したものである。図 11 は右円偏光を通さないフィルターをカメラに付け、ヘッドトラッキングを行う際の写真である。遮光効果によりプロジェクターからの光はほぼ完全に遮光され、ノイズの少ないヘッドトラッキング環境が実現した。結果として、ヘッドトラッキングの誤認識が大幅な減少が考えられる。反対にユーザーのゴーグルには、右円偏光がよく見えるフィルターを構成した。これらの構成により、水中のユーザーには図 10(C)のようにプロジェクターからの映像が明瞭に見え、か



図 8. 側面への映り込みと偏光による対策

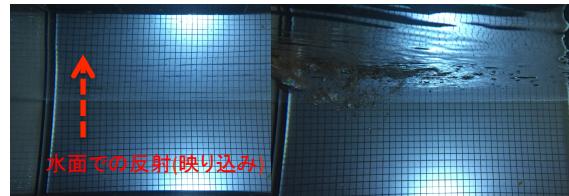


図 9. 波による水面で反射した映像のぼかし効果

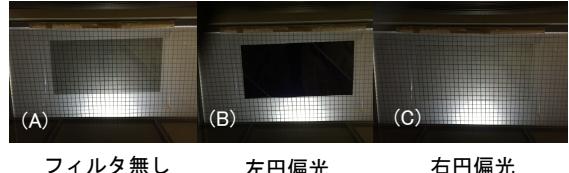


図 10. 円偏光による遮光と透過



図 11. 右円偏光シートを貼ったプール前面と右円偏光を通さないフィルターを通したヘッドトラッキング

つヘッドトラッキング用カメラからみた際には映像が遮断される環境を実現した。また、水中と空気中で偏光による遮光性能には大きな違いはみられなかった。プール内に円偏光シートを設置した理由は、リアプロジェクションシートにより光が拡散され、偏光の特性が維持されないことを確認したためである。また、直線偏光ではなく円偏光を利用する理由は、ユーザーが向きを変えた場合も特性が維持されるためである。直線偏光を用いた場合、ユーザーが頭を傾ける角度に応じて、プロジェクターからの光が暗くなるという問題がある。

図 12 にユーザーが映像を明瞭に見ることができる仕組みを示した。プロジェクターからの映像は、円偏光シートにより円偏光に変えられプール内のユーザーに届けられる。アクティブシャッターは二枚の偏光版で液晶を挟んだ構造になっており、透明時には直線偏光板と同等の機能を持つ。そのため、1/4 波長板の遅延軸を表面に適切な角度で貼り付けることで図 12 のように右円偏光を通すフィルターを構成

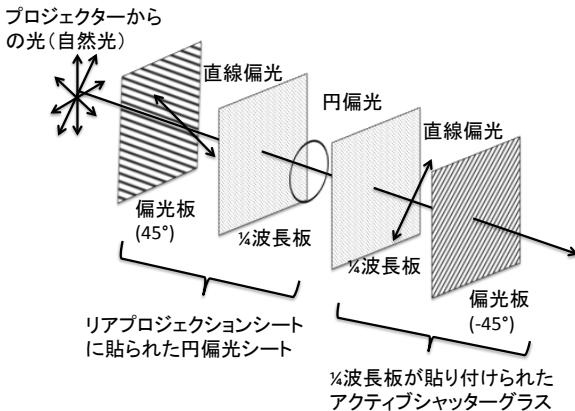


図 12. 映像がユーザーから見える仕組み

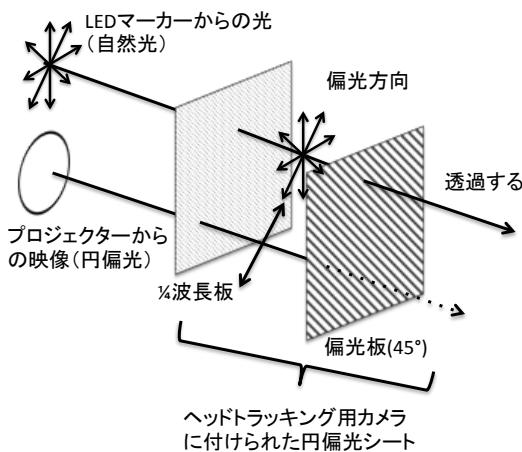


図 13. 映像を遮光しLEDマーカーの光を透過する仕組み

可能である。使用したアクティブシャッターグラス(G15-DLP)は、偏光軸が縦方向(頬から眉の方向)であったため、 $1/4$ 波長板は 45° で貼り付けた。使用した円偏光シートは右円偏光用であるため、図 13 中例において、 $1/4$ 波長板の遅延軸は 90° (縦方向)である。

図 13 に映像の遮光と LED の光の透過が両立される仕組みについて示す。円偏光である映像は $1/4$ 波長板を通して直線偏光になる。この直線偏光に直行した偏光板により映像は遮光される。LED の光は自然光であるためこれらのフィルターを通過する。偏光板による側面の映り込みの防止と、円偏光の遮光を利用したヘッドトラッキングの両立方法については、更なる検証が必要である。

まとめと今後の実装予定

本研究では、水泳体験の向上を目的とした、CAVE 型の VR 環境プール AquaCAVE を提案し、技術的な実現方法を示した。また、水が持つ赤外線吸収、糸巻き型歪曲収差、反射などが CAVE 型バーチャルリアリティに与える影響について述べた。さらに光学的に水による屈折を補正するドーム型レンズが歪曲収差

の削減に有効であること、偏光や波により反射を低減できることを解決策として検証した。また円偏光による遮光と透過を用いて、周囲を複雑な景色に囲まれた水中での可視光ヘッドトラッキングとユーザーへの明瞭な映像の提供の両立が可能とした。

今後の課題として、ユーザーとのインターフェースの実現、水泳フォームの認識、水流などによるユーザー位置の制御の実現がある。

参考文献

- [1] Cruz-Neira, C., Sandin, D. J., & DeFanti, T. A. Surround-screen projection-based virtual reality: the design and implementation of the CAVE. In *Proceedings of the 20th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pp. 135-142. 1993.
- [2] Jain, D., Sra, M., Guo, J., Marques, R., Wu, R., Chiu, J., & Schmandt, C. Immersive Terrestrial Scuba Diving Using Virtual Reality. In *Proceedings of the 2016 CHI Conference Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, pp. 1563-1569, 2016.
- [3] Lee, Haechan, et al. Dungeons & swimmers: designing an interactive exergame for swimming. *Proceedings of the 2013 ACM conference on Pervasive and ubiquitous computing adjunct publication*. pp. 287-290, 2013.
- [4] Ukai, Yu, and Jun Rekimoto. Swimoid: a swim support system using an underwater buddy robot. *Proceedings of the 4th Augmented Human International Conference*, pp. 170-177, 2013.
- [5] Gallagher, D. G. Development of miniature, head-mounted, virtual image displays for navy divers. In OCEANS99 MTS/IEEE. Riding the Crest into the 21st Century, volume 3 , pp.1098-1104, 1999.
- [6] Blum, L., Broll, W., and Müller, S. Augmented reality under water. In SIGGRAPH '09: Posters , SIGGRAPH '09, pp. 97, 2009
- [7] Kirschenbaum, D., Ordman, A., Tomarken, A., and Holtzbauer, R. Effects of differential self-monitoring and level of mastery on sports performance: Brain power bowling. *Cognitive Therapy and Research* 6, pp.335–341, 1982,
- [8] Morales, R., et al. An underwater augmented reality system for commercial diving operations. *OCEANS 2009*, pp.1-8, 2009.

WISS2016採録判定時のコメント

採録区分：ロング採録

判断理由：

プール型のCAVEシステムに関する研究です。近年ではCAVEシステムは安価&簡単に作成できるようになっていますが、水中でのプロジェクトや立体視に関しては未知であり、この点について明らかにしている本論文には、大きな価値があると考えます。高い新規性、将来にわたるインパクトを考慮して、ロング採録としました。

レビューサマリ：

全体の構成：

プール壁面をスクリーンとするいわばプール型CAVE実現に向けて、技術的な困難要因を挙げ、解決可能な手段に着実に絞り込んだ、技術的に堅実な論文であると評価されました。

改良に向けたコメント等：

- ・構成に対する提案：前半のAquaCAVEの体験について提案と、後半の水に関わるVRの課題への対応、という二つの話に分かれており、やや内容が分裂したような印象があります。例えば、前半の話は背景として語り、既に実績を詰みあげている後半の話に重点を絞るような形になると、読みやすくなるかと思います。
- ・歪曲収差の発生に関して：歪曲収差の理解に必要となる、カメラやプールとの空気層や水との位置関係性がやや不明瞭です。6.1.2にそれらの関係性が記述されていますが、歪曲収差の話が初めて出てくる6.1に書いて頂けると、より理解しやすくなると思われます。
- ・人間の視野における歪曲収差に関して：6.1.3で語られている人間の周辺視野の歪曲収差に関する議論は、やや不正確であると考えられます。眼球の光学系における収差の発生議論と、その認識の部分とを分けて議論する必要があります（人間の視覚認識機能を考慮すれば、仮に光学的に歪みが発生しているとしても、人間がそれを認識できているとは限りません）。
- ・水面の映像ぼかしについて：6.2.2の議論は技術面では面白いですし、興味深い知見が得られていると思います。水泳でも水面を見やすい状況（例えばダイビング）、ほとんど見えない状況（通常のプールでの水泳。あまり水面を下から見る状況にはならないかと）があると思います。そういう点も踏まえて考察して頂けると、より深い議論ができるかと思います。
- ・可視光トラッキングについて：実際に実現されているシステムかどうか、判断しづらくありました。この点について明確な記述があった方が良いと思います。
- ・その他表記に関して、以下の修正が望れます：
*3ページ目左カラム1行目：行頭スペースが1字多い
*3ページ目右カラム最終段：行頭スペースが1字多い
*6ページ目左カラム：「直線偏光に直行した」→「直線偏光に直交した」

本論文に対する各査読者の詳しいコメントは以下のページを参照のこと：

<http://www.wiss.org/WISS2016Proceedings/oral/19.html>

*本ページは論文本体ではありません

【AquaCAVE：水泳体験を向上させる水中バーチャルリアリティ環境】