

水泳体験を向上させる水中没入型バーチャルリアリティ環境: AquaCAVE の設計と実装

山下 聖悟 味八木 崇 諏訪 俊一 暦本 純一

本研究では水泳用プールの底や側面に映像を投影することで、バーチャルリアリティ (VR) 環境を構築し水泳体験を向上することを目指した。この水中没入型 VR 環境には、水泳トレーニングの支援効果や、浮遊感を提供する新しい VR 環境として効果が期待される。本研究では、水中に VR 環境を実現する際の技術的課題を明確化し、その解決策を提案した。没入型 VR 環境を構成するためには、ユーザーの目の 3 次元位置の計測と、その位置情報に基づいた適切な映像の提供が必要である。しかし、一般的に VR 環境の構築に使用される赤外線を用いた位置計測装置は、赤外線が大幅に吸収される水中では使用できない。また、可視光を使用した場合も、映像が周囲に表示された環境では安定した計測が難しいことが確認された。本研究では、円偏光による遮光を利用して、投影された映像をカメラからのみ不可視にすることで位置計測を実現した。また、水中を撮影した際に発生する映像の歪みや、他スクリーンからの映像の映り込みが起す没入感の低下を解決する方法についても検証した。

We propose an immersive virtual reality environment configured in a swimming pool. This environment realizes various forms of underwater entertainments and enhanced swimming training environment. However, we have to overcome some technical challenges caused by water and surround-screen. In this research, we focused on investigations on issues related to infrared (IR) radiation absorption and reflection on the walls of the swimming pool and proposed the solutions. The difficulty on position tracking is that existing motion capture systems using IR or blue lights are not feasible for an underwater immersive projection environment. The reason is IR is absorbed, and visible lights are unstable in complex backgrounds. Therefore, we propose a circular-polarization-based technique for position tracking using visible-light LED markers. In addition, we also took investigations on an optical distortion in the water, and reflections causing a decline of immersion.

1 はじめに

水泳は幅広い年齢層に親しまれる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有効であることが知られている。水泳は一般的に水泳用のプールが使用される。水泳トレーニングの際の問題点とし

て、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す必要があるため、運動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ことがあげられる。これに加えて、水泳には地上のスポーツに比べてトレーニング効率を向上することが難しいという問題もある。例えば、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 [8]。しかしながら、水泳の場合は、水泳のコーチからのフォームの修正に関する指示をリアルタイムに受けることができないため、自身の運動フォームを正確に認識することが難しい場合が多い。

そこで本研究では、プールの底や側面に立体映像を表示することで没入型バーチャルリアリティ環境 (CAVE) を構築し水泳体験を向上することを目指し

An Underwater Immersive Virtual Reality Environment for Enhancing the Swimming Experience: The Design and Implimentation of AquaCAVE

Shogo Yamashita, Takashi Miyaki, Sunichi Suwa, Jun Rekimoto, 東京大学学際情報学府, Graduate school of interdisciplinary information studies, the University of Tokyo.

Sunichi Suwa, Jun Rekimoto, ソニーコンピュータサイエンス研究所, Sony Computer Science Laboratories. コンピュータソフトウェア, Vol.29, No.1 (2012), pp.78-84. [研究論文] 2017 年 1 月 10 日受付.

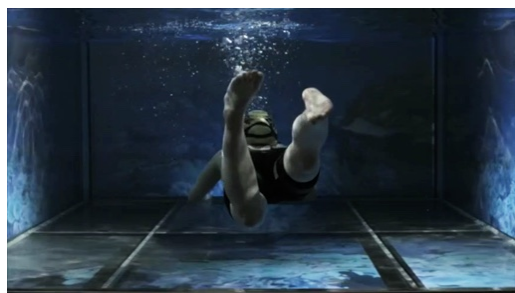


図1 AquaCAVE: 水泳体験を向上させる水中没入型
バーチャルリアリティ環境

た(図1)[5]. プール型VR環境は、仮想的な景色の中で本当に泳いでいるかのような没入的な体験をコンピュータグラフィックにより再現できる. 例えば, サンゴ礁に囲まれた海での水泳体験をユーザに提供する事ができる. また, 本システムは水泳フォームなど3Dキャラクターとしてプール中に重畳表示できる. そのため, 水泳トレーニングの効率を向上する効果も期待される. 例えば, キャラクターに体を重ねて泳ぐことによる水泳のフォームの修正や, 過去の自身の記録との競泳などが実現される. 本論文では, この水中没入型VR環境をAquaCAVEと呼ぶことにする.

しかし, AquaCAVEには, 過去のVR環境に関する研究にて議論されていない新しい技術的課題がある. 例えば, 没入型VR環境の実現には, ユーザーの目の3次元位置を計測するためのヘッドトラッキングが必要である. しかし, 既存の位置計測手法は, ユーザーが水中に存在し周囲に映像が表示されるAquaCAVE中において使用することができない. 例えば, 一般的にVRの実現に用いられる赤外線を用いた位置計測手法は, 水による赤外線の吸収により十分な計測範囲が得られなかった. また, 可視光線を用いた計測手法には, 周囲に投影される映像によって起こされる精度の低下の問題がある. 本研究では, 既存の位置計測手法における技術的課題を明確にした. また, 円偏光による映像の遮光と可視光LEDマーカーの追跡による, 水中没入型VR環境中における位置計測手法を提案し, その有効性について検証した. 加えて, プール側面や水面への映像の映り込みなどが起こす, 映像提供に関する問題の解決手法についても検証した.

2 関連研究

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. 従来のVR環境は地上にてユーザーに臨場的な3D映像を提供するものであった[3][16]. 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. しかし, AquaCAVEの場合, ユーザーが水中に浮かんだ状態でVR環境を体験できるため, 上部方向の動きの制限がなく, 浮力を感じることができる. そのため, 泳いでいる感覚や宇宙遊泳をしている時のような重力をより臨場的に提供できることが期待される[20]. Jainら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, 仮想的なスキューバダイビング経験を提供するVR環境を構成した[7]. しかし, 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.

2.2 水泳トレーニング支援

人間が普段生活していない水中において, 自身の運動フォームを認識することはより難しいことが考えられる. 加えて, 水中にて行われるスポーツのトレーニングの際には, コーチが運動フォームの修正等に関する指示をトレーニーにリアルタイムに伝えることができない場合が多い. そのため, コーチにはフォーム修正に関するより具体的な説明能力が望まれ, 水中のスポーツにおけるトレーニング指導の難易度は他のスポーツに比べて高い[25][26]. 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[1][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[12]. しかし, HMDは技術的に光学系のサイズを小さくすることが難しく, 装着して泳いだ場合には, 水泳動作や水の抵抗に影響を与えることが懸念される. AquaCAVEにおいて, ユーザーは立体映像を見るためにアクティブシャッター方式の3Dメガネが組み込まれたゴーグルを装着する. この方式でVR環境を構成する場合,

ユーザーが装着するゴーグルを、水泳ゴーグル程度のサイズに小型化することが技術的に可能である。水泳は本来、水泳ゴーグルを装着して行うスポーツであるため、同程度のサイズのゴーグルが水泳環境に与える影響はHMDに比べて少ないと考えられる。また、CAVEの場合、水泳者が自身の腕やプールの壁、レーンを分ける敷居などを普段の水泳時と同じように直接見ることができるという利点もある。

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 [18]。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、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かった。

Dungeons & swimmers [11] は音声によるフィ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。

3 水中没入型 VR 環境におけるヘッドトラッキングに関する課題

水中没入型 VR 環境を構築するためには、水中のユーザーの目の3次元位置を計測する必要がある。ヘッドトラッキングにより頭部の位置姿勢を計測することで、目の位置を算出することができる。しかし、水中没入型 VR 環境内での位置計測には様々な技術的課題が存在する。本章では、既存の位置姿勢計測手法と、その手法を水中没入型 VR 環境の実現に使用する場合の問題について述べる。

3.1 光学式位置計測

3.1.1 赤外線を用いた位置計測における問題

3次元位置計測には赤外線が使用される場合が多い。例えば、OptiTrack [13] に代表されるモーション

キャプチャーデバイスは、ユーザーに赤外線を反射する球状の再帰性反射材製マーカーを装着し、赤外線を発する複数のカメラによりマーカーを観測する。また、それぞれのカメラの映像を用いて三角測量によりマーカーの3次元位置を計測する。赤外線を対象に照射し、反射が返ってくるまでの時間から深度を計測するようなデバイスも存在する。しかし、水は赤外線を大きく減衰するため、水中にて赤外線を用いる位置計測装置を使用することは難しい [4]。

3.1.2 可視光を用いた位置計測における問題

波長の短い可視光の場合、水中においても光の減衰が少ない。Oqus Underwater [15] は、赤外線の代わりに、青色の可視光を断続的に照射することで水中にて3次元位置計測を実現したデバイスである。しかし、このようなデバイスをCAVE中にて使用した場合には、投影した映像を妨害してしまうことが考えられる。また、可視光LEDのような自発光マーカーを使用する方法も考えられる。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、画像処理によりマーカーの領域のみを背景映像中から抽出することが難しく、映像の一部をマーカーとして誤認識してしまうなどの問題が実験により確認されている [19]。

3.1.3 視覚マーカーを用いた位置計測における問題

計測対象に一定のパターンが印刷されたマーカーを設置し、そのマーカーをカメラによって識別することで計測対象の位置姿勢を求める位置計測手法も存在する。位置姿勢の計算には、マーカーの大きさや傾きの情報が用いられる。この方式を用いて位置計測を行う場合、マーカーを認識するために計測環境が十分に明るい必要がある [14]。しかし、没入型 VR 環境においてユーザーへ鮮明な映像を提供するためには、周囲が暗い方が好ましい。また、映像の一部をカメラがマーカーとして誤認識してしまう可能性は、この方式を使用した場合にも考えられる。

3.2 慣性センサ式位置計測

光学式以外の位置姿勢計測手法として、ジャイロセンサ (角速度計) を計測対象に複数個設置し、動きの情報から位置を逆算して求める慣性センサ式位置計

測手法があげられる [29]. しかし, この方法を使用した場合, プールの内における計測対象の絶対位置を計測することが難しい. また, 時間経過で誤差が蓄積してしまうという問題もある. CAVE を実現するためにはユーザーの目の絶対位置が必要となるため, 慣性センサ式位置計測は水中没入型 VR 環境におけるヘッドトラッキングのための位置計測手法として適切ではない.

3.3 磁気式位置計測

磁気式位置計測は計測対象にレシーバー (磁気センサ) を設置し, それに対してトランスミッター (磁気発生器) により磁気を送ることで位置計測を実現するものである. 受信機内には 3 軸方向に直行したコイルが設置されており, それぞれのコイルにて発生する電流量の違いからトランスミッターからの位置・姿勢を求めることができる. しかし, 磁気式位置計測方式の欠点として, 計測環境に金属や磁性材料がある場合, 計測の乱れが生じてしまうことがある [22]. 本研究で使用了プールは補強のための金属で覆われており, このような環境において磁気式の位置計測手法を用いる場合には, 磁気の乱れを考慮して位置情報を補正する技術が必要となる [27]. また, 磁界は距離の 3 乗に反比例して急激に減衰するため, 計測範囲の拡大が難しいという問題もある. 加えて, この方式の場合, 受信機内の計測データをパソコンなどの計算機器に送信する必要がある. 水中でデータを送信するためには, 超音波通信や可視光通信を実現するための通信装置が必要となる. 通信機器のユーザーへの設置や, 可視光通信による光の照射は水中没入型 VR 環境におけるユーザ体験を低下させる可能性がある. 上記の理由から, 磁気式位置計測は水中没入型 VR 環境中での位置計測手法として適切ではないことが推測される.

3.4 超音波式位置計測

水中での位置計測には, 超音波を用いることができる [24]. 超音波は, 周波数が低いいため水中での減衰が少ないことが知られている. 超音波式位置計測では, 計測対象に超音波センサーを設置し, 3 点の超音波スピーカーから発生した超音波を計測する. また, それ

ぞれスピーカーからの超音波の強度を用いて, 三角測量により計測対象の位置を求める. しかし, 超音波を利用して水中で移動する計測対象の位置を取得する場合, ドップラー効果による計測位置のずれを考慮する必要がある. また, 超音波は水の流れによっても影響を受けることが知られている [28]. 超音波式位置計測を, ランダムなユーザーの動きと水流の発生が想定される水中没入型 VR 環境中にて使用する場合には, 上記したような解決困難な技術的課題が存在する.

4 水中没入型 VR 環境におけるヘッドトラッキングの実現

4.1 検証環境

本研究では, 水中没入型 VR 環境 (AquaCAVE) の実現可能性を検証するために映像を側面や底面に表示可能な小型のプールを使用した (図 1). プールの寸法は [長さ]3m, [幅]2m, [深さ]1.5m (水深 1m) であり, 3cm の厚みを持つアクリルで構成されている. 映像の表示は, プールの底面と側面に貼り付けたリアプロジェクションシートにプロジェクターによって映像を投影することで実現した. 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方式の 3D メガネを装着することで立体映像を見ることができる.

位置計測は水泳用キャップに設置した可視光 LED マーカーを追跡することによって行う. 複数のカメラによって同一のマーカーを追跡することができれば, 三角測量を用いてその 3 次元位置を求めることができる. また, 位置関係が固定された 3 つのマーカーのそれぞれの 3 次元位置を取得できれば, 水泳キャップの 3 次元位置と姿勢を算出できる. 水泳キャップの位置と姿勢からは CAVE の実現に必要なとされるユーザーの目の 3 次元位置を算出できる.

4.2 円偏光による映像の遮光を用いた可視光 LED マーカーの位置計測

本研究では, 赤外線が吸収され, かつ, 周囲が複雑な映像に囲まれた環境において光学式位置計測手法を用いたヘッドトラッキングを実現する方法を提案する. 本研究では, 周囲を映像に囲まれた環境において可視光 LED の安定した追跡を可能とするために, 2

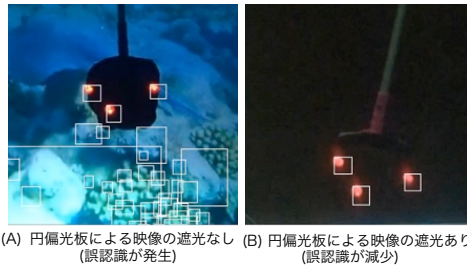


図 2 背景映像の遮光によるマーカー誤認識の低減

種類の回転方向の異なる円偏光板による映像の遮光を用いた。以下に必要構成と、原理について述べる。

ヘッドトラッキング用のカメラはプール内部の水中に設置し、カメラのレンズには左円偏光板を設置する。また、プールの内側全体には右円偏光板を貼り付ける。この構成により、カメラにはプールの各面に投影された映像が映らなくなり、可視光 LED マーカーの安定した追跡が可能となる。この映像の遮断は2つの回転方向の異なる円偏光板によって起こされる遮光によるものである。ユーザーが装着する水泳キャップについた可視光 LED マーカーからの光は偏光されていない。そのため、カメラには暗い背景中に明るく発光するマーカーが存在しているように見える。結果として、この構成は、位置計測用のソフトウェアが背景映像をマーカーとして誤認識してしまう問題を解決することができる(図 2)。

図 2 (A) は、円偏光による映像の遮光を用いずに可視光 LED マーカーの検出を試みた際の結果、図 2 (B) は映像が遮光し、(A) と同一の環境においてマーカーの検出を行なった際の結果である。

4.3 水中撮影時に発生する歪曲収差の補正

水中にて光学式位置計測手法を使用する場合、水中で映像を撮影した際に発生する糸巻き型歪曲収差の補正が必要になる。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この歪曲収差が現れる。水中撮影時に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

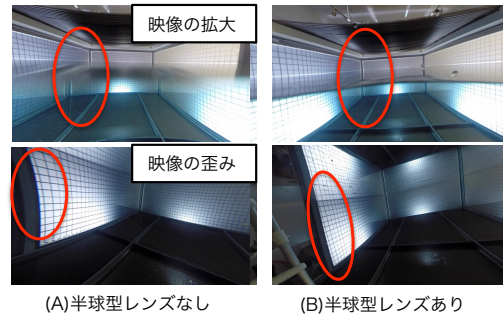


図 3 半球型のレンズによって補正された映像の歪みと拡大

に屈折率の違いがあるためである [17]。歪曲収差は、ユーザの目の 3 次元位置の取得に影響を与える。

水による歪曲収差は、半球形のレンズを用いて補正可能であることが既存研究によって明らかになっている。半球形のレンズは、水と空気の層で起こる屈折を光学的になくすことで、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の撮影を可能にする [2]。図 3 (A) はカメラを表面が平らな防水ハウジングに入れて、水中からグリッドを表示したプール側面を撮影した際の写真である。図 3 (B) は光学的に水と空気間の屈折率の違いを吸収するように設計された半球型防水ハウジング (TELESIN T03 Dome Port) にカメラ (GoPro Hero 4) を入れて、水中から同じ側面を撮影した際の写真である。図 3 (A) 上では、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 3 (A) 下では歪曲収差が発生していることが確認できる。しかし、図 3 (B) ではこれらの影響があまり見られない。

画像処理によって歪曲収差を補正する手法も存在する [10]。しかし、この補正手法を適応した場合、水による映像の拡大(図 3 (A) 上)によって、カメラの視野が狭まってしまう問題は解決されない。複数のカメラを用いてマーカーの位置計測を行うことでヘッドトラッキング実現する場合、カメラが撮影可能な範囲は広い方が好ましい。そのため本研究では、カメラの視野が狭くなってしまいう問題も同時に解決する半球型のレンズを使用することとした。

正確にマーカーの位置を計測するためには、カメラのレンズによる歪曲収差の補正も必要となる。レンズ

の歪曲収差の補正方法として、Zhang の方法が広く用いられる [21]。本論文での検証では、GoPro の広角レンズによる映像の歪みを、正確なカメラパラメーターを用いて補正が可能な公式ソフトウェアである GoProStudio^{†1} によって補正した。

5 映像提供に関する問題

5.1 プール側面や水面に起こる映像の写り込み

箱型にスクリーンが設置された CAVE 環境の場合、各スクリーンや水面に別のスクリーンに表示された映像が写り込んでしまう。CAVE は、ユーザーの目の位置と各面の位置関係を考慮して映像を適切に歪めることで、CG による仮想的な世界に本当に入り込んだような体験をユーザーに提供する。しかし、反射により写り込んだ映像は適切な位置関係を元にレンダリングされたものではないため、これらの映像をユーザーが視認できる場合には没入感が低下してしまうことが考えられる。

5.2 頭部を傾けた際に発生する映像の明度変化

ユーザーへ立体映像を提供するためには、右目と左目にそれぞれに異なる映像を届ける必要がある。映像をそれぞれの目に届ける仕組みとして、液晶による映像の遮断 (アクティブシャッター式) か円偏光による映像の遮断 (偏光式) が一般的に用いられる。本研究では、プール中のユーザーへ立体映像を提供するために、アクティブシャッター方式の 3D 眼鏡を水泳ゴーグルに組み込んだものを使用することとした。

本研究で提案する位置計測手法と立体映像の提供を両立するためには、円偏光板とアクティブシャッター方式の 3D 眼鏡の組み合わせによって起こる問題を解決する必要がある。アクティブシャッター方式の 3D 眼鏡には、液晶シャッターが使われている。液晶シャッターは 2 枚の直線偏光板の間に、液晶層を挟むことによって構成されている。つまり、この 3D メガネは光学的に直線偏光板と同じ特性を持つ。直線偏光板を通して円偏光を観測する場合、お互いの角度によって遮光度が変化する。そのため、ユーザーが頭の角度を

傾けた際に、映像が暗くなったり明るくなったりしてしまうという問題が発生する。不要な明暗変化は映像のエンターテインメント性を低下する恐れがある。

6 映像提供に関する問題の解決方法

6.1 映り込みの軽減

映像の映り込みは、ユーザーが装着するアクティブシャッター方式の 3D 眼鏡への 1/4 波長板の設置によって防止できる。1/4 波長板とは、直線偏光板の光学特性を円偏光板へと変える光学フィルタである。1/4 波長板の遅延軸が偏光板の偏光軸に対して -45° になるように貼り付けると、その偏光板は右円偏光板と同じ光学特性を持つようになる。また、 45° で貼り付けると、左円偏光板と同じ光学特性を持つようになる。本研究では、ユーザーが装着する 3D 眼鏡を、プール内部に張られた円偏光板と同じ回転方向の円偏光板と同じ光学特性を持つように変更することで映り込みを軽減した。以下に原理を説明する。

プール内部に設置された円偏光板が右円偏光板である場合、プロジェクターで投影された映像は右円偏光された光としてユーザーに届く。ユーザーは右円偏光板と同様の光学特性を持つ 3D メガネを装着しているため、遮光は発生せず、投影された映像を鮮明に見ることができる。円偏光が反射した場合、その回転方向が反転することが知られている [23]。そのため、他の面に反射した映像は、右円偏光された光ではなく左円偏光された光としてユーザーへ届く。この構成には、他の面や水面にて発生する映像の写り込みの軽減が期待される (図 4)。

6.2 映像の明暗変化の軽減

ユーザーが頭を傾けた際の映像の明度の変化による問題も、1/4 波長板の 3D 眼鏡への設置によって同時に解決される。図 5(A) はアクティブシャッター方式の 3D メガネを通して見た映像、図 5(B) は光学的に右円偏光板となった同じ 3D メガネを通して見た映像の例である。3D メガネ (G15-DLP) は、偏光軸が縦方向 (顎から頭部の方向) であったため、1/4 波長板の遅延軸が -45° で重なるように貼り付けた。ユーザーが装着する 3D 眼鏡は、プール内面に設置された

^{†1} GoProStudio:
<https://gopro.com/help/GoPro-Studio>

円偏光板と同じ回転方向の円偏光板として機能する。同じ回転方向の円偏光板の組み合わせの場合、お互いの角度によらず常に光を透過するため、ユーザの頭部の傾きにに応じた映像の明度変化の問題は解決される。

7 システム構成

7.1 全周囲スクリーンのための構成

図 6 に AquaCAVE のシステム構成についてまとめる。本研究では、CAVE を 3D 映像の投影機能を持つ 6 台の短焦点プロジェクター (RICOH PJ WX4141) とプールの底面と側面に貼り付けたリアプロジェクションシートによって実現した。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方式の 3D メガネを装着することで立体映像を見ることができるようになる。映像は MacPro を用いてレンダリングした。

7.2 ヘッドトラッキングのための構成

プール内には 2 台以上の防水加工されたカメラを設置する。複数のカメラでユーザーの水泳キャップについた可視光 LED マーカー検出することで、三角測量によりマーカーの 3 次元位置を算出することができる。また、3 つ以上のお互いの位置関係が既知のマーカーを認識することで、ユーザー頭の位置と姿勢が計測可能となる。ユーザーの目の 3 次元位置は頭部位置姿勢から推測できる。

可視光 LED の安定した追跡を実現するために、本研究ではプール内部とプール外部に設置されたカメラのレンズに円偏光板を設置した。本研究で実装したプロトタイプにおいては、プール内面には右円偏光板、カメラには左円偏光板を用いた。

ユーザーが装着するアクティブシャッター方式の 3D メガネの外側には 1/4 波長板を貼り付けた。この構成は、アクティブシャッター方式の 3D 眼鏡を構成する直線偏光板が引き起こす、頭部姿勢に応じた映像の明度変化を防ぐことができる。

ヘッドトラッキング用のカメラは、水中撮影時の歪曲収差を補正するために半球型レンズのついた防水ケースに入れる。歪曲収差を完全に補正するためには、それぞれのカメラのレンズの焦点距離や CMOS イメージセンサーの位置に合わせたレンズ設計が必

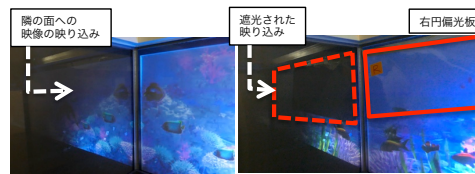


図 4 円偏光板による映像の映り込みの低減

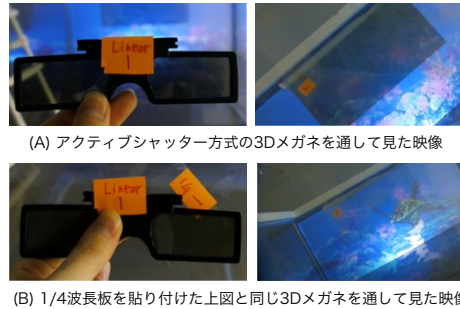


図 5 ユーザーに明瞭な視界を提供するための構成

要となる。本研究において検証に使用した半球型防水ハウジングは、GoPro の設計情報に合わせた設計された半球型のレンズを持つ^{†2}。

8 評価

本研究では周囲に映像が表示された水中において、カメラによる可視光 LED マーカーの安定した追跡が可能とする手法を提案した。

既存の研究により、複数のカメラにより継続的にマーカーを認識することができれば、その 3 次元位置が計測可能であることが明らかにされている。加えて、水中撮影時に発生する歪曲収差は、半球型のレンズによって正確に補正可能であることがわかっている。提案手法を既存の位置計測手法と組み合わせることで、水中没入型 VR 環境におけるヘッドトラッキングが実現可能性となると推測される。

ヘッドトラッキングの実現可能性を示すためには、提案手法によってカメラが継続的にマーカーを認識することができることを確認する必要がある。本章では、円偏光による遮光が、可視光 LED マーカーの追

^{†2} 一般的に DomePort という名前で市販されている

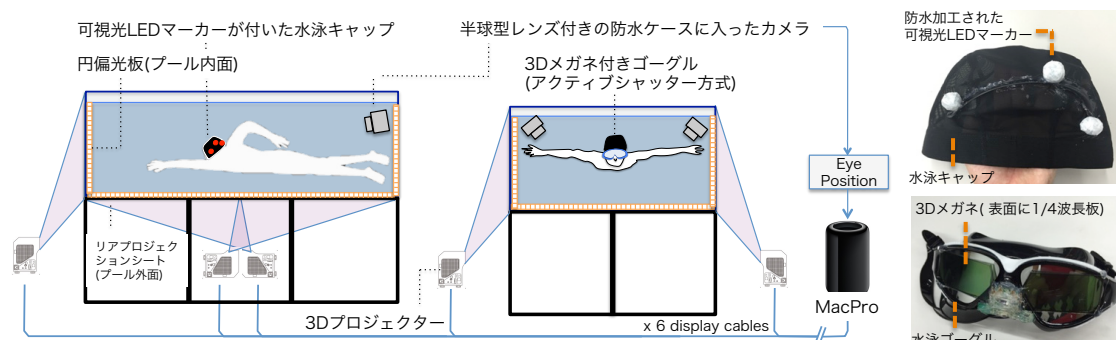


図 6 システム構成

跡の安定性にどの程度貢献するかを検証した。また、半球型防水ハウジングの有効性を確認した。

8.1 マーカーの継続的な認識に関する検証

本研究では、提案手法がどの程度可視光 LED マーカーを追跡する際の誤認識の低減に有効であるかを検証した。

検証は、提案手法による映像の遮光を用いない場合、どの程度の可視光 LED マーカーの誤認識が発生するか調査し、提案手法を用いた場合と比較することによって行った。以下に検証方法と結果について述べる。まず、AquaCAVE のアプリケーションとして使用されることが想定される、水中で撮影された 3 種類の映像を準備した。^{†3} また、これらの映像をプールに投影した状態で、プール内部に設置された可視光 LED マーカーのみを計測用のソフトウェアが認識できたフレームを 1 秒ごとに記録した。可視光マーカーの検出には、BlobDetection と呼ばれる映像中から明度の高いピクセルの塊を検出する機能をもつ Processing 用のソフトウェアライブラリを用いた^{†4}。

図 7 (A) はそれぞれの背景上で、可視光 LED マーカー 1 点の検出を 20 秒の間試みた際の結果である。表中の○は、マーカーのみを認識できたフレーム、×は背景映像の一部もマーカーと誤認識してしまったフレームを示している。提案手法を用いない場合、どの背景においても継続的に安定したマーカーの検出を行うことはできなかった。しかし、提案手法による背景映像の遮光を利用した場合には、すべての期間において、マーカーのみを認識し続けることができた。図 7 は、図 7 (A) 中に示す (B), (C) の期間にどのような映像が表示されていたか示したものである。期間 (C) では、マーカーに加えてイソギンチャクの触手の先端をマーカーとして誤認識しており、期間 (C) では海中のサンゴの一部を誤認識していることがみてとれる。本検証では、位置関係が固定された 3 点の可視光マーカーを、カメラによって同時に継続的に認識することが可能であることも確認した (図 2)。3 点以上のマーカーを認識できる場合、計測対象の 3 次元位置だけではなく姿勢を計測することができる。注意点として、カメラに設置された円偏光板と、プールに設置された円偏光板の角度が平行ではなくなるほど、映像の遮光度が下がってしまうことがわかった。そのため、複数のカメラを用いて可視光 LED マーカーの計測を行う際にはそれぞれの円偏光板を、プールに設置された円偏光板と平行にすることが好ましい。

^{†3} 背景 1: イソギンチャクとクマノミの映像 (動画 1 0:20-0:40) 背景 2: 海中にてカラフルな魚が泳いでいる映像 (動画 1 8:50-9:10) 背景 3: ウミガメがゆっくり泳いでいる映像 (動画 2 5:00-5:10)。映像は以下にあげる動画から取得した。動画 1 Title: Beautiful Undersea World - Coral Reefs, Clownfish And Colorful Underwater Animals, Creater: Serey V, License: CC. 動画 2 Title: Underwater - Journey to the Red Sea Coral Reef, Creater: Roberto "Lope" Carrozza, License: CC.

^{†4} BlobDetection library:

<http://www.v3ga.net/processing/BlobDetection/>

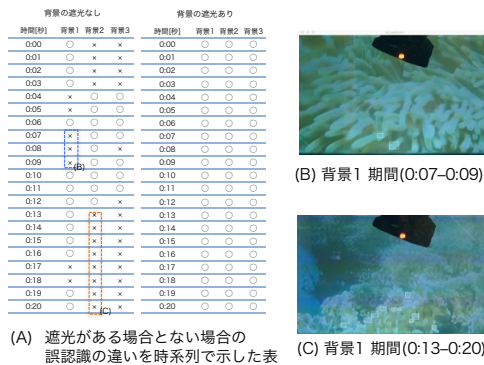


図 7 マーカーの誤認識に関する比較検証

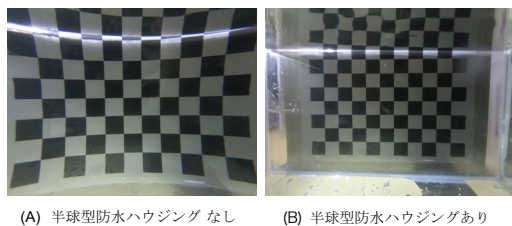


図 8 半球型防水ハウジングの有効性の確認

8.2 半球型防水ハウジングの有効性の確認

図 8 は水のいった水槽に設置されたカメラから、チェスボードを撮影したものである。図 8 (A) は半球型防水ハウジングを用いずに撮影したもので、(B) は半球型防水ハウジングを用いて撮影したものである。撮影には GoPro Hero 6 を用いた^{†5}、また半球型防水ハウジングとして TELESIN GP-DMP-T03-YL を用いた。水槽にはカメラからチェスボードまでの距離が 25cm になるものを使用した。チェスボードは A4 サイズに大きさに印刷した。それぞれの写真は同じ場所から撮影した。図 8 (B) からは半球型防水ハウジングが歪曲収差を大幅に補正していることが見て取れる。市販されている半球型防水ハウジングを用いた補正が、どの程度水中での 3 次元位置計測に有効であるか今後さらなる検証が必要とされる。

^{†5} GoPro hero 5 以降のバージョンには、レンズ歪みを撮影時にカメラ内で補正する Linear FOV と呼ばれる機能が搭載されており、本検証ではこの機能を用いた。

9 議論・今後の課題

9.1 3 次元位置・姿勢計測の精度に関する検証

本研究では、可視光 LED マーカーをカメラを用いて継続的に認識できることを検証により確認した。マーカーの継続的な認識が可能であれば、既存手法との組み合わせによりマーカーが貼り付けられた対象の 3 次元位置・姿勢が計測可能であると推測される。上記した既存手法の例としては、複数のカメラによって同じ 1 つのマーカーを認識することでその 3 次元位置を計測する三角測量や、1 つのカメラによって 3 点以上のマーカーを一度に認識することでマーカーが設置された対象の 3 次元位置と姿勢を計測可能とする手法などがあげられる。水中での歪曲収差の補正には、半球型レンズやチェックボードを用いた水中でのカメラキャリブレーションなどを用いることができる [9]。

本研究では、3 つの LED マーカーを認識できればその 3 次元位置を計測できることを確認するために、OpenTrack と呼ばれるソフトウェアを使用した^{†6}。OpenTrack には、3 点以上のマーカー (周囲に比べて明度が高い画素の塊) をカメラ画像から識別し、その 3 次元位置を計測するソフトウェアである Freetrack と、計測された 3 次元位置データを他のデバイスあるいはアプリケーションに UDP を使って送信するソフトウェアが組み込まれている^{†7}。没入型 VR 環境 (CAVE) を構成するためのソフトウェアには、頭部の 3 次元位置のデータをヘッドトラッキング用のソフトウェアから受信することができる機能を実装した。

立体映像をユーザーの頭部位置に合わせて提供することで VR 環境を実現する CAVE が適切に実装されていることの確認は、プール内のある任意の 3 次元位置に頭部がある際の立体映像を表示し、その位置から立体映像を観察することによって行った。判断基準として、CAVE が正確に実装されていれば、VR 空間中の棒のような長細い四角柱状のグラフィックスをプール内の適切な 3 次元位置から映像を観測する

^{†6} opentrack:
<https://github.com/opentrack/opentrack>

^{†7} FreeTrack:
<http://www.free-track.net/>

とき、スクリーン各面をまたいで表示される対象のグラフィックスが折れ曲がって見えまっすぐに見えることを使用した。ランダムに選択した複数の3次元位置から映像の観測を行い、CAVEが正確に実装されていることを確かめた。

今後の課題として、計測対象の3次元位置姿勢の計測精度や遅延などを調べ、それらがユーザーに没入的なVR環境を提供するために十分であるかどうかを検証することがある。計測範囲や精度に影響与える可能性がある項目として、水による可視光の波長ごとの吸収率の違いや、スクリーンとカメラ上の偏光板の角度の差が大きくなった際に見られる遮光性能の低下によるカメラの設置角度の制限などがあげられる。

9.2 歪曲収差が立体映像に与える影響

水と空気の屈折率の違いによって発生する映像の歪みが、ユーザーへの正確な立体映像の提供に影響を与える可能性が考えられる。本研究では、影響の有無を調べるために4人の実験参加者に一人ずつ、水の入ったプール背後からプール中表示される立体映像を観察してもらいコメントを得た。検証は、ヘッドトラッキングによって計測されたユーザーの頭部位置が、プールの背後の亚克力板の表面の中心である際に表示される立体映像をCAVE内に表示し、実際に実験参加者にその位置に頭を置いて映像を観察してもらうことによって行った。図9(A)は実験参加者の頭の位置とプールの位置関係、(B)は実験参加者が観測する立体映像の例を示している。

歪曲収差の影響は視野の中心付近において最も少なく、外側に行くほどに強くなることが予測される。本検証ではまず、視野の中心付近に立体映像が表示された際に、実験参加者が立体映像の奥行きを認識できるか調べた。この検証ではプール前面に複数個の直方体の3Dグラフィックスを表示し、正面を向いた(プール後部から前面を見た向き)実験参加者の視野の中心周辺にグラフィックスが写るようにした。立体映像の表示には、OpenGLでレンダリングしたグラフィックスをアクティブシャッター方式の3Dメガネに対応した立体映像として提供可能にするソフトウェ

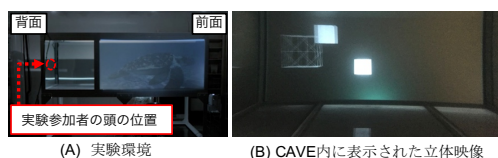


図9 水による歪曲収差が立体映像に与える影響の検証

アライブラリであるLibglsを用いた^{†8}。両目間の距離は10cmに設定した。調査の結果、すべての実験参加者から、それぞれのグラフィックスが立体的に見える(奥行きがあるように感じる)とのコメントが得られた。

次に、それらのグラフィックスを一定のスピードで奥から手前と視野外左側から右側の2種類の方向に一直線に移動させて、グラフィックスがどのように移動しているか判断してもらう実験を行った。結果として、奥から手前にグラフィックスが移動する際にはすべての実験参加者が移動方向を正確に言い当てることができた。しかし、視野外左から右側へグラフィックスを移動させた際には、左から右側へ実験参加者を中心に円を描くように回っているように見える、スピードが一定ではないように見えるなどのコメントも得られた。おそらく、この誤認識の原因は、視野の端になるほど激しくなる歪曲収差の影響によるものであると推測される。

これらの実験の結果から、歪曲収差はCAVEの実現に必要な没入的な立体映像の提供に影響を与える可能性があることがわかる。しかし、歪曲収差はスキューバダイビングなど実際に水中でのアクティビティを行う際にも発生する現象であることから、ユーザーが見る映像に発生する歪曲収差の補正は必要は無く、補正を行わない方がむしろ実際の環境を適切に再現できる可能性も存在する。そのため、今後、水による歪曲収差が具体的にどのような影響をCAVEに与えるのか調査し、必要に応じてこの影響を補正する手法を考案する必要がある。

^{†8} Libgls:
<http://libgls.sourceforge.net/>
 OpenGL:
<http://libgls.sourceforge.net/>

9.3 水中没入型 VR 環境の拡張性

本研究では, AquaCAVE の実現可能性の調査のため小型のプールを使用した. 水中 VR 環境を水泳トレーニングに応用するためにはスペースの拡張が必要とされる. 移動の制限の解決方法として, プール中に水流を発生させユーザーの位置を留めることが考えられる. しかし, 水流が映像の視認性に与える影響についての検証や技術的課題の明確化が必要とされる.

10 まとめ

本研究では, 水泳体験の向上を目的とした水中没入型 VR 環境 (AquaCAVE) を提案し, 実現方法を技術的に示した. 水中に VR 環境を実現するための技術的課題としては, 水が持つ赤外線吸収, 糸巻き型歪曲収差, 反射などがあげられる. AquaCAVE を実現するためには, 水中のユーザーのヘッドトラッキングが必要である. しかし, 水中にユーザーが存在する場合, 水による赤外線の吸収のため, 一般的に VR 環境の実現に使用される赤外線を用いた位置計測技術が使用できない. また, 可視光を用いた位置計測技術を用いた場合も, 投影される映像による障害のため安定したヘッドトラッキングを実現することが難しいことがわかった. 本研究では, 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 LED マーカーの追跡とユーザーへの明瞭な映像の提供の両立を実現した.

没入型 VR 環境には各スクリーンや水面に, 別のスクリーンに表示された映像が写り込んでしまう問題がある. 写り込んだ映像をユーザーが視認できる場合, VR 環境の没入感が低下してしまう. 本研究で提案した構成は映像の写り込みの低減にも有効であることがわかった.

今後の課題として, マーカーの 3 次元位置計測の実現と精度の検証, プールサイズの拡張に関する検証などがある.

謝辞 本研究は, JST, ACT-I の支援を受けたものである.

参考文献

- [1] Blum, L., Broll, W., and Müller, S.: Augmented reality under water, *SIGGRAPH'09: Posters*, ACM, 2009, pp. 97.
- [2] Bruno, F., Bianco, G., Muzzupappa, M., Barone, S., and Raziore, A.: Experimentation of structured light and stereo vision for underwater 3D reconstruction, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 66, No. 4(2011), pp. 508–518.
- [3] Cheng, L.-P., Lühne, P., Lopes, P., Sterz, C., and Baudisch, P.: Haptic turk: a motion platform based on people, *Proceedings of the 32nd annual ACM conference on Human factors in computing systems*, ACM, 2014, pp. 3463–3472.
- [4] Coker, D., Reimers, J., and Watts, R.: The infrared absorption spectrum of water, *Australian Journal of Physics*, Vol. 35, No. 5(1982), pp. 623–638.
- [5] Cruz-Neira, C., Sandin, D. J., and DeFanti, T. A.: Surround-screen projection-based virtual reality: the design and implementation of the CAVE, *Proceedings of the 20th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, ACM, 1993, pp. 135–142.
- [6] Gallagher, D. G.: Development of miniature, head-mounted, virtual image displays for navy divers, *OCEANS'99 MTS/IEEE. Riding the Crest into the 21st Century*, Vol. 3, IEEE, 1999, pp. 1098–1104.
- [7] Jain, D., Sra, M., Guo, J., Marques, R., Wu, R., Chiu, J., and Schmandt, C.: Immersive Scuba Diving Simulator Using Virtual Reality, *Proceedings of the 29th Annual Symposium on User Interface Software and Technology*, ACM, 2016, pp. 729–739.
- [8] Kirschenbaum, D. S., Ordman, A. M., Tomarken, A. J., and Holtzbaumer, R.: Effects of differential self-monitoring and level of mastery on sports performance: Brain power bowling, *Cognitive therapy and Research*, Vol. 6, No. 3(1982), pp. 335–341.
- [9] Lavest, J.-M., Rives, G., and Lapresté, J.-T.: Underwater camera calibration, *European Conference on Computer Vision*, Springer, 2000, pp. 654–668.
- [10] Lavest, J.-M., Rives, G., and Lapresté, J.-T.: Dry camera calibration for underwater applications, *Machine Vision and Applications*, Vol. 13, No. 5(2003), pp. 245–253.
- [11] Lee, H., Moon, M., Park, T., Hwang, I., Lee, U., and Song, J.: Dungeons & swimmers: designing an interactive exergame for swimming, *Proceedings of the 2013 ACM conference on Pervasive and Ubiquitous Computing adjunct publication*, ACM, 2013, pp. 287–290.
- [12] Morales, R., Keitler, P., Maier, P., and Klinker, G.: An underwater augmented reality system for commercial diving operations, *OCEANS 2009, MTS/IEEE Biloxi-Marine Technology for Our Fu-*

- ture: *Global and Local Challenges*, IEEE, 2009, pp. 1–8.
- [13] OptiTrack: OptiTrack Motion Capture, <http://optitrack.com/>.
- [14] Pibyl, B., Chalmers, A., and Zemk, P.: Feature point detection under extreme lighting conditions, *Proceedings of the 28th Spring Conference on Computer Graphics*, ACM, 2012, pp. 143–150.
- [15] Qualisys: Qualisys underwater motion capture, <http://www.qualisys.com/>.
- [16] Rheiner, M.: Birdly an attempt to fly, *ACM SIGGRAPH 2014 Emerging Technologies*, ACM, 2014, pp. 3.
- [17] Treibitz, T., Schechner, Y., Kunz, C., and Singh, H.: Flat refractive geometry, *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*, Vol. 34, No. 1(2012), pp. 51–65.
- [18] Ukai, Y. and Rekimoto, J.: Swimoid: a swim support system using an underwater buddy robot, *Proceedings of the 4th Augmented Human International Conference*, ACM, 2013, pp. 170–177.
- [19] Yamashita, S., Zhang, X., Miyaki, T., and Rekimoto, J.: AquaCAVE: an underwater immersive projection system for enhancing the swimming experience, *ICAT-EGVE*, (2016).
- [20] Yamashita, S., Zhang, X., and Rekimoto, J.: AquaCAVE: Augmented Swimming Environment with Immersive Surround-Screen Virtual Reality, *Proceedings of the 29th Annual Symposium on User Interface Software and Technology*, ACM, 2016, pp. 183–184.
- [21] Zhang, Z.: A flexible new technique for camera calibration, *IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence*, Vol. 22, No. 11(2000), pp. 1330–1334.
- [22] 永岡隆, 市川大輔, 内山明彦: 永久磁石を用いた三次元位置センサの開発とその応用, *生体医工学*, Vol. 42, No. 4(2004), pp. 300–306.
- [23] 宮崎大輔, 池内克史, ほか: 偏光の基礎理論とその応用, *情報処理学会論文誌コンピュータビジョンとイメージメディア (CVIM)*, Vol. 1, No. 1(2008), pp. 64–72.
- [24] 穴戸正昭: 水中超音波を用いた海洋計測技術, *計測と制御*, Vol. 19, No. 3(1980), pp. 348–356.
- [25] 柴田義晴: 水泳の運動特性とその指導に関する方法学的研究: 主としてクロール泳の運動特性の見地から, (2015).
- [26] 芝山秀太郎: スポーツ活動に対する ME 機器の応用, *BME*, Vol. 2, No. 4(1988), pp. 252–256.
- [27] 中本将彦, 佐藤嘉伸, 玉木康博, 永野浩昭, 泊克昌, 笹間俊彦, 門田守人, 田村進一: 手術ナビゲーションにおける光磁気ハイブリッド 3 次元センサの構築, *電子情報通信学会論文誌 D*, Vol. 83, No. 1(2000), pp. 396–403.
- [28] 二瓶泰雄, 色川有, 井出恭平, 高村智之: 超音波ドップラー流速分布計を用いた河川流量計測法に関する検討, *土木学会論文集 B*, Vol. 64, No. 2(2008), pp. 99–114.
- [29] 品川佳満, 谷川智宏, 太田茂: 加速度センサを用いた人間の歩行・転倒の検出, *川崎医療福祉学会誌*, Vol. 9, No. 2(1999), pp. 243–250.

山下 聖悟

東京大学 大学院学際情報学府 博士課程学生。2016 年東京大学大学院学際情報学府学際情報学専攻 修士課程修了。2014 年香川高等専門学校 専攻科 電子情報通信工学専攻卒業。平成 28 年度東京大学 総長賞。平成 28 年度東京大学大学院学際情報学府 学府長賞 (最優秀修士論文)。

味八木 崇

東京大学 大学院情報学環 特任准教授。2008 年東京大学大学院新領域創成科学研究科博士後期課程修了。同大学院情報学環・ドイツカールスルーエ工科大学・フランス国立情報学自動制御研究所を経て 2017 年より情報学環ヒューマンオーグメンテーション学 (ソニー寄付講座) 専任教員。ヒューマンコンピュータインタラクションと実世界センシングに関する研究に従事。博士 (科学)。

諏訪 俊一

株式会社ソニーコンピュータサイエンス研究所。2002 年東京工業大学大学院理工学研究科有機高分子物質専攻修士課程修了。旭硝子株式会社。ニー株式会社を経て 2016 年より株式会社ソニーコンピュータサイエンス研究所に勤務。2017 年より東京大学情報学環客員研究員。

暦本 純一

東京大学大学院情報学環 教授。1986 年 東京工業大学理学部情報科学科修士過程修了。日本電気, アルバート大学を経て, 1994 年より株式会社ソニーコンピュータサイエンス研究所に勤務。1999 年よりソニーコンピュータサイエンス研究所 インタラクショナルラボラトリー室長。2007 年より東京大学大学院情報学環教授 (兼 ソニーコンピュータサイエンス研究所副所長)。JST さきがけ総括 (2017-)

ここに掲載した著作物の利用に関する注意 本著作物の著作権は日本ソフトウェア科学会に帰属します。本著作物は著作権者である日本ソフトウェア科学会の許可のもとに掲載するものです。ご利用に当たっては「著作権法」に従うことをお願いいたします。

Notice for the use of this material: The copyright of this material is retained by the

Japan Society for Software Science and Technology (JSSST). This material is published

on this web site with the agreement of the JSSST. Please be complied with Copyright

Law of Japan if any users wish to reproduce, make derivative work, distribute or make

available to the public any part or whole thereof.