

推薦論文

Scoopirit：水面反射を用いた空中像とのインタラクション

松浦 悠^{1,a)} 小泉 直也^{1,2}

受付日 2018年4月20日, 採録日 2018年11月7日

概要：本論文では、水中および水上に直立表示した映像を、素手で水ごとすくいあげることのできるシステム Scoopirit を提案する。古来より水は空間設計に欠かせない重要な物質である。情報技術が発達した現代では、公共空間の水辺におけるインタラクティブな視覚表現システムが多数存在するが、ユーザが直接水に触れて情報を操作することは実現されていない。筆者らは、空中に結像した映像である空中像を表示する光学系に、反射素材として水面を導入した。また水面の高さを超音波センサによりトラッキングし、素手で映像をすくい上げるインタラクションを可能とした。

キーワード：空中像, 複合現実感, 水面反射, インタラクション

Scoopirit: Interaction with Mid-air Images on Water Surface

YU MATSUURA^{1,a)} NAOYA KOIZUMI^{1,2}

Received: April 20, 2018, Accepted: November 7, 2018

Abstract: In this paper, we propose a system Scoopirit that can scoop up images that appeared under and on water surface with their palms. Water has been an important material for public space design since ancient times. There are many interactive visual expression systems used in waterside of public space in advanced information society of recent years. However, users cannot manipulate those systems directly by touching water and images. We made scooping up images possible by installing water surface as a reflective material to an optical system that displays mid-air images and measuring the water level with an ultrasonic sensor.

Keywords: mid-air images, mixed reality, water surface reflection, interaction

1. はじめに

古来より建築や芸術の分野において、時代に合わせて水を活用した空間設計が行われてきた [1]。情報技術が発達した現代ではインタラクティブな視覚表現を導入することで、公共空間の水辺の魅力を向上させる試みが行われている。たとえば、海に設置したウォータースクリーンに表示された魚を、来場者のスマートフォン操作により釣り上げるイベント [2] や、池に投影された映像の鯉が、実物体の船に集まったり、あるいは船を避けたりする作品 [3] など

がある。

しかし、公共空間に適用可能な、ユーザが直接水に触れて情報を操作するインタラクティブな視覚表現システムは実現されていない。実物体を用いた情報の操作は、デジタル空間と現実空間をシームレスに接続し、両者間のギャップを解消する手段である [4]。デジタル・ディバイドの問題がつかまとう高度情報化社会の、特に不特定多数のユーザが存在する公共空間という場では、日常的で容易な操作方法を持つインタラクションを実現することが重要である。本研究の目的は、公共空間の水辺に、ユーザが直接手で水に触れて操作するインタラクションが可能な映像表現を導入することである。

¹ 電気通信大学
The University of Electro-Communications, Chofu, Tokyo
182-8585, Japan

² JST さきがけ
JST PRESTO, Chiyoda, Tokyo 102-0076, Japan

a) matsuura@uec.ac.jp

本論文の内容は 2018 年 3 月のインタラクション 2018 で報告され、同プログラム委員長により情報処理学会論文誌ジャーナルへの掲載が推薦された論文である。



図1 提案システムによって直立映像をすくい上げる様子
Fig. 1 Scooped mid-air image using Scoopirit.

目的とする映像表現システムの設計において想定される課題として、「1. 非加工」, 「2. 非装着」, 「3. 幾何学的整合性」, 「4. 衣類が濡れないこと」の4要件の充足があげられる。「1. 非加工」は、特殊な物質を水に投与して特性を変化させないという要件である。公共空間の水を特殊な物質で濁すことは環境問題につながるうえ、水量に合わせた大量の溶質を必要とするためこの要件が必要となる。「2. 非装着」の要件は、共有しやすい視覚表現システムのために必要となる。コントローラーやHMDの装着を必要とするシステムは、不特定多数のユーザによる同時利用が難しく、公共空間に適さない。「3. 幾何学的整合性」は、現実空間と表示映像の3次元的な位置関係がつねに保たれるという要件である。これを満たすことで、ユーザが現実空間と映像の関係を理解しやすくなる。本論文における幾何学的整合性は、現実空間の水面が動くことで、映像も現実空間の水面の動きの影響を受けるといった性質を含む。「4. 衣類が濡れないこと」は、操作の際に水飛沫がユーザの衣類を濡らしてしまうという問題を生じにくくするという要件であり、ユーザが近づいて触れやすいシステムにするため必要となる。

以上4つの要件を満たす、公共空間の水辺において、ユーザが直接手で水に触れてインタラクションする映像表現システムとして、Scoopiritを提案する。

本研究では水に触れて行うインタラクションとして、液体をすくう動作に着目した。すくう動作は液体を操作するための最も基本的な動作であり、洗顔時などにほとんどの人々が行う、日常的で容易な動作でもある。

Scoopiritは水中水上に直立した映像を表示する光学装置を持ち、水をすくう動作の計測機器、位置計測に合わせて映像をコントロールする計算機、光源となる映像ディスプレイから構成される。光学装置は、何もない空中に映像を結像する空中像の技術を応用し、水中や水上の任意の3次元空間に直立した映像を表示する。また超音波センサを用いて手が水をすくった高さを計測し、空中像の結像位置を制御する。この制御によって水に浮かぶ空中像の反射面となる水面の高さに対する相対的な位置を保ち、空中像を

水ごとすくい上げるインタラクションを実現する。

本論文では、2章で関連研究、3章で提案するScoopiritの設計と実装、4章では実装したシステムの表示能力やインタラクションに関する評価について述べる。5章では展示を通して得られたユーザ観察の結果について述べる。6章ではScoopiritの有用性について議論する。最後に7章をまとめとする。

2. 関連研究

2.1 水を利用したインタラクティブシステム

これまでに、水の性質を利用したインタラクティブな映像表現システムが数多く提案されてきた。それらのシステムを前述した4つの必要要件の観点から議論し、本研究の位置付けを説明する。

Koikeらは、入浴剤によって白濁した浴槽の水面に映像を投影し、手指のジェスチャで映像を操作するシステムを構築した[5]。しかし、プロジェクタの光を水面で拡散させるためには多量の入浴剤が必要となるため、「1. 非加工」を満たさない。

「およぐことば」[6]はプールに表示された文字を専用の柄杓ですくい上げるアート作品である。水に浮かぶ映像をすくうというインタラクションを実現しているが、専用のデバイスを必要とする点で「2. 非装着」を満たしていない。

Ikedaらは、水槽に浸した手の位置をカメラで計測することで、プロジェクタで投影した映像をすくい上げるシステムを提案した[7]。非装着の素手で映像をすくい上げるインタラクションは、本研究の提案するインタラクションにおける入力手法と同一であるが、その出力となる映像は水槽の底に投影されるため、「3. 幾何学的整合性」に欠ける点がある。

ウォータースクリーンは、水の噴射によって作られた水膜に、プロジェクタから映像を投影することで水面上に垂直な映像を表示できるシステムで、近年ではインタラクティブな表現にも使用されている[2]。また、杉原らは流れ落ちる水流の下に円盤を置き、水が跳ね返ってきたドーム状の水膜に映像を投影することで、水と映像に包まれる体験ができる作品[8]を発表した。しかしこれらのシステムで表示した映像に直接触れて操作する場合、水飛沫がユーザの衣類にかかってしまい、「4. 衣類が濡れないこと」を満たさない。

これらの関連研究に対し、本研究は「1. 非加工」, 「2. 非装着」, 「3. 幾何学的整合性」, 「4. 衣類が濡れないこと」を満たし、ユーザが水に直接手で触れてインタラクションする映像表現システムを提案するものである。

2.2 空中像光学系

空中像とは、光源から出た光がレンズなどの光学系に

よって反射・屈折し、空中に結像した像のことである。従来の3Dディスプレイとは異なり、3Dメガネなどを着用する必要がなく、「2. 非装着」の要件を満たしたまま空中に位置する映像を見ることができる。

光学系の手前に空中像を結像する方法は、大きく分けてレンズや凹面鏡を用いるものと、再帰透過光学系を用いるものの2つがある。再帰透過光学系とは、光源から出た光を面対象の位置に結像する光学系のことである。再帰透過光学系の利点として、原理的に収差が発生せず、設計が容易な点がある。再帰透過光学系を実装する結像素子としては、ミラーレイ結像素子がある [9]。本研究では輝度が高い空中像を結像でき、入手が容易なミラーレイ結像素子を用いる。

再帰透過光学系を用いた空中像インタラクションの研究として、Kimらは、実物体を用いてテーブル上で空中像とインタラクションする MARIO [10] を開発した。このシステムでは空中像を再帰透過光学系によって結像しているが、ユーザの目から再帰透過光学系までの空間にしか空中像を表示することができないため、テーブルが空中像の背景となるような視点角度では表示できないという問題があった。これに対し山本らは、テーブル面の反射を用いて空中像を表示する手法を提案した [11]。この手法では、ユーザはテーブル面に置いたハーフミラー越しに再帰透過光学系を見ることがになるため、テーブル面を見ながら空中像を見ることができる。また、再帰透過光学系を視界制御フィルムによって遮蔽することで、表示装置の存在を分かりにくくし、ユーザが空中像に意識を向けやすい環境を構築している。本研究でもこの表示光学系を援用し、水面を背景とした空中像の視認を実現する。

これらの空中像光学系がかかえる問題として、オクルージョンの問題がある。現実空間において、実物体に手を伸ばす際、ユーザから見て実物体の奥に手を伸ばすと、実物体がユーザの手を隠す。しかし、空中像に対して手を伸ばす際、空中像の結像位置より奥に手を伸ばすと、空中像の結像のための光路が遮られてしまうため、空中像が見えなくなってしまう。つまり、空中像はその奥にある物体を隠せないという問題である。そのため、これまで空中像とユーザのインタラクションでは、ユーザは空中像結像位置の手前の空間にしか手を伸ばすことができなかった。空中像を重ねて表示する際のオクルージョンの問題を解決する手法が提案されている [12] が、空中像の奥に手を伸ばせないという問題は解決されていない。

提案システムでは、空中像の奥の水中に手を伸ばしても、像が手を隠した状態で水ごと空中像をすくい上げることができる。これは水面の反射を用いて空中像を結像する際、結像のための光線が水中を通らないためである。この特徴は、従来の空中像光学系では実現できなかった「3. 幾何学的整合性」を満たす特徴の1つである。

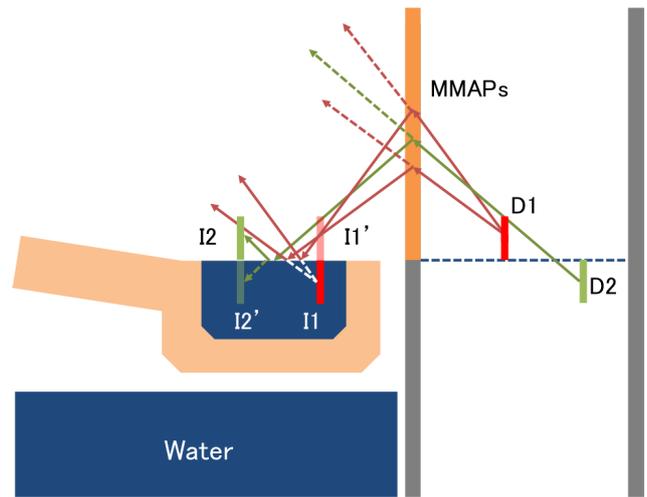


図 2 結像の光路

Fig. 2 Optical paths to form mid-air images.

3. 提案システム

提案システムを光学装置と、水をすくう動作の計測および空中像の位置の制御手法に分けて説明する。

3.1 光学装置

3.1.1 設計方針

水中から水上にかけて実空間に映像を表示し、水を介したインタラクションを実現可能な光学装置を設計する。本論文では、空中に結像した像が水面で反射することで水中に位置して見える虚像を「水中像」と定義する。

ユーザが水中像や空中像とインタラクションを行うためには、手を伸ばして触ることができる距離に像を表示する必要がある。また、ユーザの興味を空中像に惹きつけるために、その周辺にある表示装置をできる限り目立たなくする。

水中像または空中像を表示するためには、それぞれ異なる光路が必要となる。地面に水平な水面に空中像を表示する場合の光路を図 2 に示す。水面より高い位置にある光源 D1 から出た光は、再帰透過光学素子 (Micro Mirror Array Plates, MMAPs) によって反射され、I1' の位置に空中像として結像する。結像した I1' が、水面によって反射され水中像 I1 の位置に虚像として表示される。このとき、水面を斜め上から見たユーザには、水中像 I1 のみが見えることになる。水面より低い位置にある光源 D2 から出た光は、MMAPs によって反射され、水面での反射後に空中像 I2 の位置に結像する。水面がなかった場合は反射せず、I2' の位置に空中像が結像する。

3.1.2 光学設計

提案システムの光学設計を図 3 に示す。水平な水面に空中像を表示するため、水平面の反射を用いて空中像を結像する、山本ら [11] の手法を適用した。

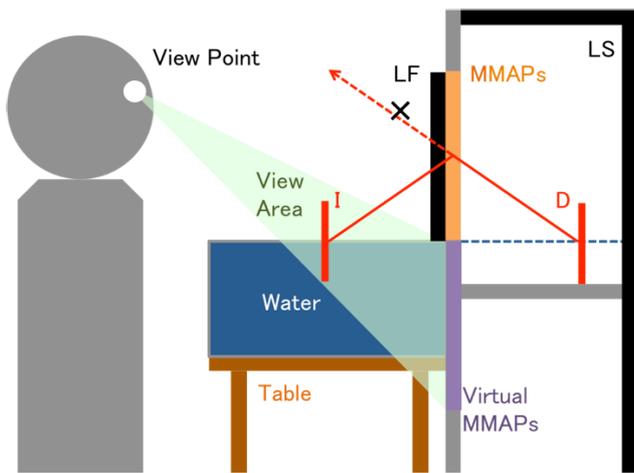


図 3 光学設計
Fig. 3 Optical system.

システムはディスプレイ (D), MMAPs, 視界制御フィルム (Louver Film, LF), 水槽, 暗幕 (Light Shield, LS) から構成される. D は MMAPs によって水中像, 空中像 I を結像する. このとき, MMAPs を透過し上方向に進む光線を, 上向きの光を遮る LF を用いて遮蔽する. LF は MMAPs で反射し, 下向きに進む光線は遮らないため, ユーザから D と MMAPs を隠したまま, I を結像することができる. また, 外光の影響を遮断するため, 装置全体を LS で覆う.

山本らがすでに検証している [11] とおり, ユーザが見ることのできる空中像の表示領域は, ユーザの目を頂点とし, 水面に反射した MMAPs の像 (Virtual MMAPs [12]) を底面とした緑色で表示する四角錐の領域となる. 本研究ではそれをふまえて, インタラクションが可能な範囲を検証する.

3.1.3 実装

実装した光学装置を図 4 に示す. 用いた機器は以下のとおりである. D として ASUS TransBook T303UA, MMAPs として ASUKANET 社のピッチ 0.5 mm の Aerial Imaging Plate [13] を, 水槽として奥行き 450 mm × 幅 300 mm × 高さ 450 mm のガラス製水槽を用いた. また, LF として LINTEC 製の WINCOS Vision Control Film W-0055 を用いた. W-0055 は不透明角度が 0°~55° の一方向不透明フィルムであり, D から出て MMAPs を透過する光をユーザの目から遮蔽するのに最も適しているため選定した.

また, ユーザが手を伸ばせる位置に空中像を表示するため, I が MMAPs から水平距離 30 cm の位置に表示されるように D を配置した. この距離は日常的に手を伸ばす水場である, 洗面台の中心位置 [14] を参考に設計した. さらに, 水面が水槽の外壁を反射しないように, 水面に両手を入れても水がこぼれない程度まで水槽を水で満たした.

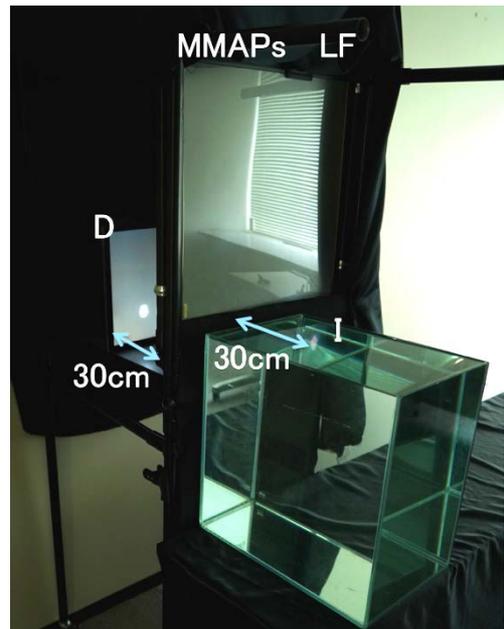


図 4 装置 (装置側面の暗幕を取り除いたもの)
Fig. 4 Implementation.

3.2 水をすくう動作の計測および空中像の制御手法

3.2.1 インタラクションデザイン

本論文では, 日常的に行う水を対象とした操作方法として「すくう」動作に着目した. 水をすくう動作の計測および空中像の制御手法の目的は, 空中像を実物体と同様に水ごとすくい上げることである.

水をすくって反射面となる水面の高さが変化するとき, 水面の高さを基準とした空中像の上下位置も変化する. たとえば水上に空中像を表示している際に水面の高さが 3 cm 上昇すると, 空中像の結像位置はその 2 倍の 6 cm 上昇する. これは水面反射前の光路と反射後の光路の垂直成分が同時に水面の高さの上昇分変化するためである. そこで, この変化を打ち消す制御が必要となる.

3.2.2 設計要件

空中像を水ごとすくい上げるインタラクションを, 手が水をすくった高さ (図 5, h_s) をトラッキングすることで実現する. 水面の高さの変化と同じ距離だけ光源の像の表示位置を上下に変化させれば, 水面の高さを基準とした空中像の高さはつねに一定となる.

本研究では, 水面の計測装置として超音波距離センサを選択した. 水面計測の方式として, 投げ込み式, フロート式, 超音波式などがある [15]. 投げ込み式とフロート式は水中または水上に装置を設置する必要がある, 装置がユーザの目に入ってしまいうため, 空中像の視認を妨げる可能性がある. これに対し超音波式は, ユーザが空中像を見る際に視界に入らない位置に設置することができる. さらに, 水槽の水面の高さだけでなく, 手ですくった水面の高さも計測することができる. これらの点で, 投げ込み式およびフロート式より今回のシステムに適している.

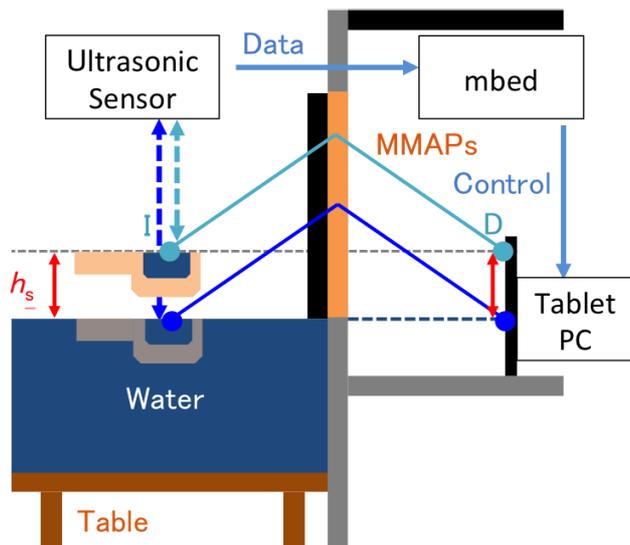


図 5 システム図

Fig. 5 Feedback system.

計測箇所に関して、本システムでは空中像の水面に平行な平面上の位置を固定とした。手ですくう動作が可能な位置は、超音波センサ直下に限定し、その水面の高さを用いて空中像の表示位置を調整した。

3.2.3 実装

3.2.2 項の要件に基づき実装したシステムの概要を図 5 に示す。システムは超音波センサ (PARALLAX 社製 PING)、マイコン (mbed LPC1768)、タブレット PC (ASUS TransBook T303UA) から構成される。超音波センサは空中像の水平表示位置の直上かつ、MMAPs の下端から 50 cm の位置に設置した。使用した超音波センサの計測レンジは 2~300 cm で、50 cm 計測時のリフレッシュレートは約 300 Hz 程度である。タブレット PC は表示領域の下端と MMAPs 下端の高さの差が 10 cm になるように設置した。タブレット PC の垂直方向の表示領域は 26.2 cm である。

水面の高さの値は、超音波センサからマイコンで AD 変換され、タブレット PC に 100 Hz で送られる。タブレット PC 側では、Processing によってシリアル通信でマイコンからのデータを取り込み、Unity で製作したアプリケーションに OSC を用いて高さ情報を送信している。Unity アプリケーションは距離の変化量である ΔL_w だけ表示する光源となる画面上の像の位置を上下に動かす役割を持つ。表示位置のリフレッシュレートは 100 Hz に設定した。ただし距離の変化量をそのまま表示位置に適用すると、細かい水面の揺れが起きた際、像が細かく振動してしまう。そのため、直近の計測 10 回分を平均した変化量から位置を決定した。

さらに、すくう以外の動作に反応しないようソフトウェア処理を行った。超音波センサは水を含まない手などの物体も検出してしまうため、空中像の上に手をかざすといった、すくう以外の動作にも反応し、値を送信してしまう。

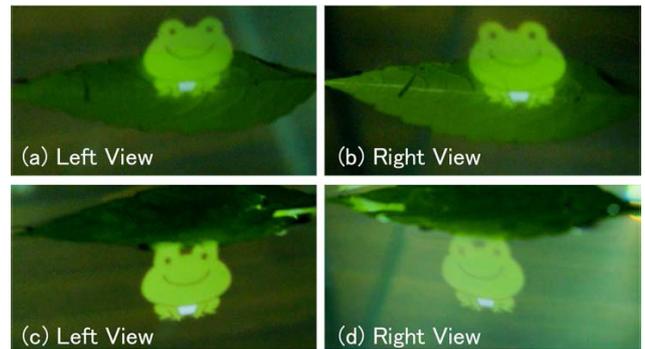


図 6 空中像と水中像の表示 : (a), (b) 空中像, (c), (d) 水中像
Fig. 6 (a)(b) Mid-air image. (c)(d) Underwater image.

その結果、水槽の水面からの手の高さの分像が水中へ沈んでいってしまう。そこで、予備実験を行い、直近 10 回分の平均値から表示する像のサイズより離れた値が送られてきた場合はその値を使わず、表示位置を更新しないように設定した。更新レートは 100 Hz で、10 回分の平均を用いているので、上下にすくう速度が 30 cm/s の速度以下でのすくい上げにおいて像の高さが更新される。

4. 評価

4.1 水中像および空中像の表示の確認

実装したシステムにより、水中像および空中像を表示可能であるかを確認した。図 6 に示すように視点位置を左右に変化させても、水面に浮かぶ実物体の葉に対する結像位置を保っていることが分かる。

4.2 光学装置の輝度評価

4.2.1 計測方法

実装したシステムにおける、水面反射前の空中像と反射後の空中像の輝度を計測し、その輝度比を求め、水面反射率を確認した。計測は図 7 のように、空中像から正面の位置を基準として、緯度方向の角度を θ と定義し、空中像が結像した $\theta : 10^\circ \sim 55^\circ$ の範囲を 5° 刻みで測定した。計測対象として白色の円の空中像を表示し、色彩輝度計 (コニカミノルタ製 CS-150) を用いて計測した。

予備計測としてディスプレイを垂直に置いた状態と水平に置いた状態での空中像の輝度を比較した。縦に置いた状態の方が空中像の輝度が高かったため、ディスプレイを縦に置いた状態で輝度を計測した。

4.2.2 実験条件

水面に揺れが発生すると、反射面の角度が変わり、空中像の輝度が大きく変化してしまう。そのため、赤外線 LED とフォトトランジスタを用いて、水面が揺れを起こすとブザー音を鳴らす検出器を設置した。水槽の側面に定規を貼り付け水面に波を起こし、側面からハイスピードカメラで撮影した映像を確認し、水面が 1 mm 以上大きく揺れたとき、正しく検出器が動作することを確認した。以降の計測

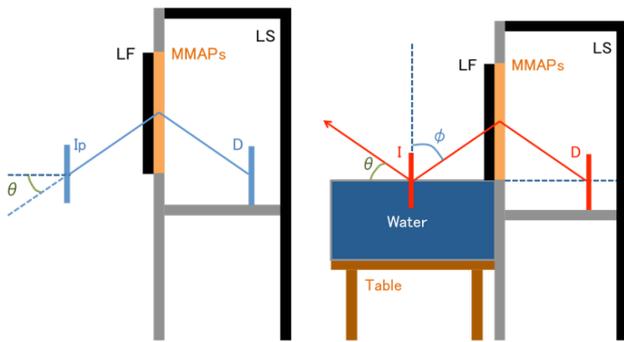


図 7 計測した角度：(左) 水面反射前の空中像，(右) 水面反射後の空中像

Fig. 7 Measurement angle.

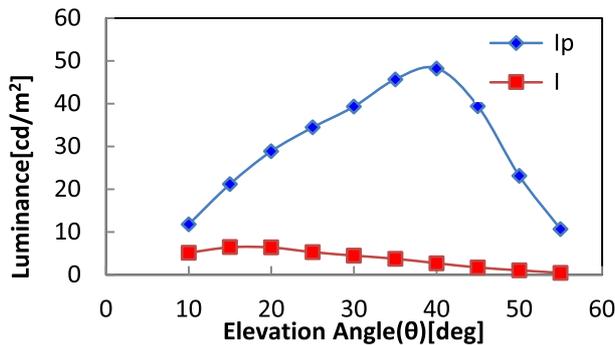


図 8 各光線方向における空中像の輝度 (Ip: 水面反射前の空中像, I: 水面反射後の空中像)

Fig. 8 Luminance. (Ip: Mid-air image without water surface reflection I: Mid-air image with water surface reflection)

の結果は、つねに検出器が作動していない状態において計測したものである。

4.2.3 結果

輝度の測定結果を図 8 に示す。水面反射前の空中像の輝度は $\theta = 40^\circ$ にピークがあるのに対し、水面反射後の空中像の輝度は $\theta = 20^\circ$ をピークに、角度が大きくなるにつれて輝度がゆるやかに減少した。

4.2.4 水面反射率についての考察

計測した水面反射率について考える。スネルの法則より、異なる 2 つの媒質 1, 2 の絶対屈折率が n_1, n_2 のとき、媒質 1 から媒質 2 へ光線が入射角 α で入射した際の屈折角 β には、次の関係が成り立つ [16]。

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{n_2}{n_1} \quad (1)$$

また、ある界面への光線の入射面に対して垂直な成分を持つ光線の、界面における反射率 R_s は、フレネルの公式を用いて次式で求められる [16]。

$$R_s = \frac{\sin^2(\alpha - \beta)}{\sin^2(\alpha + \beta)} \quad (2)$$

本計測において、入射角 α は図 7 の ϕ であるから、

$$\phi = 90^\circ - \theta \quad (3)$$

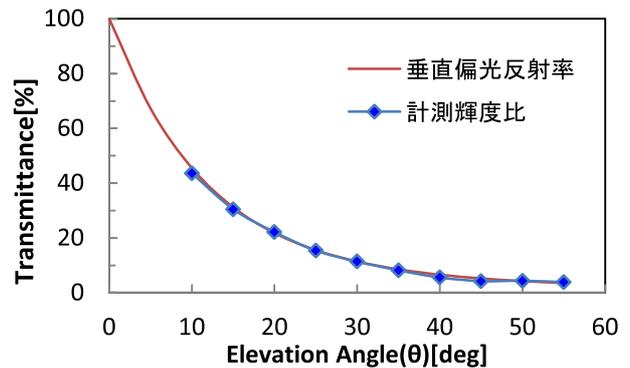


図 9 各光線方向における空中像水面反射前後の輝度比および空気中から水面に向かう入射面に垂直な偏光の反射率

Fig. 9 Measured transmittance and calculated transmittance.

がつねに成り立つ。

空気中の絶対屈折率を 1、水の屈折率を 1.33 とすると、(1), (2), (3) より、 R_s を求めることができる。計測した θ に対応するそれぞれの入射角の際の R_s を求めたグラフを図 9 に示す。さらにそこに図 8 に示す輝度計測値を用いて算出した I/I_p の輝度比をプロットすると、その値はほぼ一致している。したがって、空中像の水面反射後の輝度は、フレネルの公式を適用することで求められると考えられる。

本実験においては偏光板を用いてディスプレイから出る光が直線偏光であることを確認した。空気中から水面へ向かう光線の反射において、入射面に垂直な偏光の反射率 R_s は、水平な偏光の反射率 R_p に対してつねに大きい [17]。加えて、計測の際、ディスプレイを縦に置いた状態の方が水面反射した空中像の輝度が高かったため、今回用いたディスプレイは縦に置いた状態で入射面に垂直な偏光を発するディスプレイであった。光源として直線偏光のディスプレイを用いる際は、入射面に垂直な偏光のみが入射するように設置することで、輝度を最大まで高められることが確認できた。

4.2.5 提案システムの輝度についての考察

今回実装したシステムでは、蛍光灯などの明かりのない部屋で、日中に視認できる程度の輝度で空中像を表示できた。部屋の照度を、空中像と同じ位置に置いた照度計 (コニカミノルタ製 T-10A) によって計測したところ、照度は 62.3lx であった。その際の様子を図 10 に示す。計測した空中像の輝度は、 $\theta: 10^\circ \sim 25^\circ$ の範囲において 5.15 ~ 6.46 cd/m^2 以上であり、これは iPhone6 で白色を表示し、最もバックライトを暗い設定にした状態で正面から測定した輝度 4.84 cd/m^2 と同程度以上の値である。

山本ら [11] のテーブル面の反射を用いて表示した空中像は、 $\theta = 40^\circ$ における輝度が最も高く、 $\theta = 20^\circ$ における輝度はその半分程度であった。これに対し、今回実装したシステムでは $\theta = 20^\circ$ における輝度が最も高く、 $\theta = 40^\circ$ における輝度はその半分程度であった。この結果は水面の反

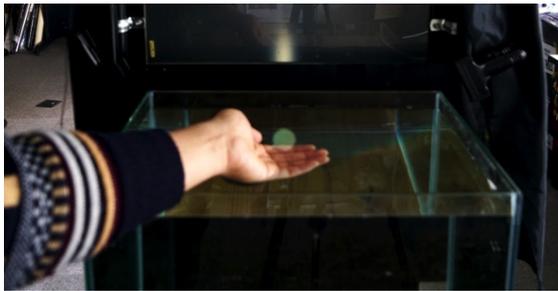


図 10 照度 62.3lx の環境下で撮影した空中像
 Fig. 10 Mid-air image under 62.3lx environment.

射率が光線の入射角によって異なるため生じる。よって今回の光学設計は、山本らの先行事例よりも低い視点で空中像を視認する用途に適しているといえる。

本計測に使用したディスプレイの最大輝度を計測すると、315.4 cd/m² だった。現在は 2,000 cd/m² 程度の高輝度ディスプレイが入手可能であり、これを提案システムのディスプレイとして用いた場合、 $\theta: 10^\circ \sim 25^\circ$ の範囲における空中像の輝度は約 6.3 倍の 32.4~40.7 cd/m² 程度になると推定できる。この値は山本ら [11] が「空中像が見える輝度」として定義した 30 cd/m² を超える値となる。

4.3 システムの評価

4.3.1 超音波距離センサによる水面の高さ計測精度の確認

超音波センサが水槽の水位を正しく計測できているかを確認した。設計したインタラクションにおけるすくい上げの高さを 100 mm とし、水槽が満たされている状態から水位を 5 mm 間隔で最大 100 mm 下げ、水面の揺れが収まったのを計測ごとに確認し、水位を超音波センサで合計 20 回計測した。計測の際の水位は水槽の側面に貼り付けた定規の目盛 (1 mm 間隔) を基準に調整した。センサ下端から水位までの計測距離の範囲は実測値で 389.1 mm~489.3 mm だった。計測の結果、誤差の絶対値の最大値は 1.4 mm であり、誤差の絶対値の標準偏差は 0.4 mm だった。

4.3.2 水面高さ変化に応じた空中像の表示高さの確認

水面の高さの変化に合わせて光源の高さを変化させる制御により、水上に表示した空中像の水面の高さを基準とした高さを保てることを確認する。水槽の上端から 5 cm 低い水位の水面の水上に表示した空中像と、そこから水槽の水で満たしたときに、水面計測による水位の変動にあわせた光源の制御を行って表示した空中像、制御を行わずに表示した空中像をそれぞれ撮影した様子を図 11 に示す。表示する像は、高さで最大幅が 3 cm のものを表示した。制御を行って表示した像の高さが、水位の上昇分と同じだけ上昇した。

また図 1 に、両手で空中像と水をすくった様子を示す。空中像が手ですくった水面上に結像していることを確認できた。

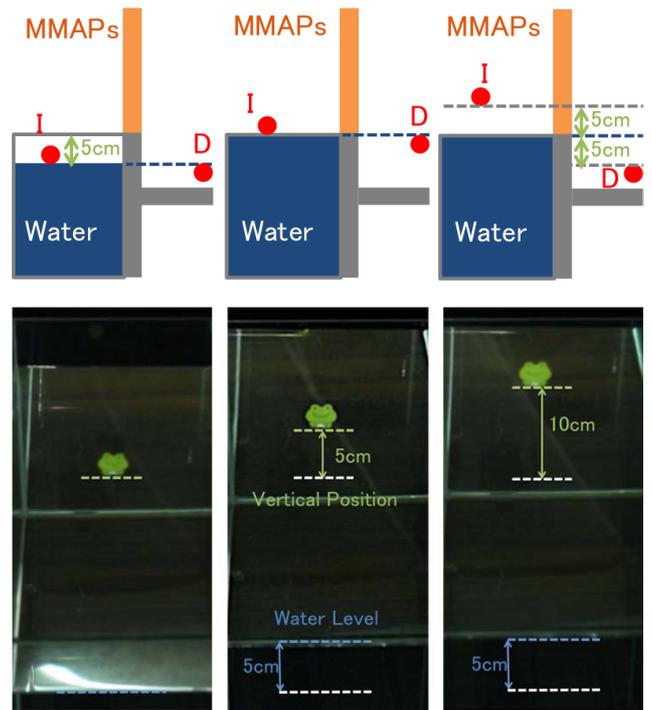


図 11 (上) 光源 D と水位と空中像 I の位置関係。(下) 水位を変化させた際の空中像。左から水位上昇前の像、水位上昇後水位に合わせて光源位置を制御した像、光源位置を制御せず表示した像

Fig. 11 Position relationship between light source display, height of water surface and mid-air image.

4.3.3 システムについての考察

実装したシステムを用いることで、ユーザが空中像をすくい上げるインタラクションが実現できた。ユーザは水面に浮かぶ実物体をすくい上げる動作と変わらない日常的な動作で空中像をすくい上げることができる。

超音波センサの計測誤差の最大値は 1.4 mm だった。手ですくえるサイズを考慮した空中像の高さを 3 cm とすれば、高さの約 4.7% 分表示位置のズレが生じることになるが、インタラクションの阻害要因にはならないと考えられる。

鉛直方向のインタラクション可能空間は、装置を構成するディスプレイと MMAPs の高さによって決まる。水槽を満たした状態の水面から 15 cm 程度すくい上げると空中像が見えなくなる。この制約はタブレット PC の表示領域の限界によるものであり、表示領域の大きいディスプレイを用いて解決できる。しかし、3.1.2 項で述べたように、水面に反射した MMAPs の像が見える範囲までしか空中像は結像しない。つまり実装したシステムでは使用した MMAPs の高さである 40 cm より高くすくいあげるとどの視点から見ても空中像が結像しない。この制約は MMAPs のサイズを大きくすることで解決できる。

水平方向のインタラクション可能空間は超音波センサの指向特性による制約を受ける。今回の実装では空中像の水

平位置を固定することで制約の影響を回避しているが、より広い領域に表示した空中像とインタラクションを行うためには、ステレオカメラを用いる方法や、超音波センサを複数並べて時分割で制御するといった方法など、より良いセンシング方法を検討する必要がある。

本システムの運用上の課題としては、水をすくい上げることを繰り返す中で、水槽の水が溢れてしまい、水槽の水位が下がってしまうことが考えられる。この場合についても、水面の高さを計測し続けることで、空中像の水位に対する相対的な高さを保ち、つねに水面に浮かぶように表示することができる。

本システムによって実現できるインタラクションの一連の流れに関して検討を行い、空中像を両手ですくい上げた後のユーザの行動は、大きく次の3つに分類できると考えた。

1. すくい上げた軌道を通して手を下ろす。
2. 両手を離して水を落とす。
3. すくい上げた水面を水平方向に移動させる。

それぞれの行動に対するシステムの振舞いを述べる。1の場合、下げた手に追従してすくった水面上に空中像を表示できる。2, 3の場合は、反射水面がなくなるために結像位置が変化し、すくい上げた像が水中に落ちたかのような視覚表現になる。これは、すくい上げる動作により光源の高さが水槽の水位より高く上昇したまま、反射水面の高さが水槽の水位まで低くなり、ユーザには空中像ではなく水中像が見えるためである。2の場合はその後、水中に落ちた像が徐々に水上に浮かび上がるように見える。これは計測した水面の高さの10フレーム分の平均値が、徐々にすくった水面の高さから水槽の水面の高さに近づくためである。3の場合は、超音波距離センサが腕などを誤検出するため、像が水中に潜り込んだままの表示になる。この場合、ユーザが再度すくう動作に戻るか、インタラクションをやめて手を戻すため、超音波距離センサの誤検出がなくなり、表示が再び初期状態に戻っていく。

5. 展示

ユーザ観察のため、インタラクション2018で展示を行った。来場者が得た具体的な体験は、水面上に表示されたアニメーションで羽ばたく妖精を、手ですくい上げる体験である。妖精は図1のように白いシルエットで表示した。これには、妖精自体には触れられないことに「光の集まりであるから」という理由づけを行う意図がある。

5.1 観察結果と考察

空中像をすくい上げる様子を見た多くの体験者はデバイスなど非装着の状態でも空中像をすくい上げられることに驚いていた。写真や映像の撮影をする体験者も多く見られた。立体映像が手の中に存在する状況が体験者にとって新

鮮なものであったことが分かった。また、同時に複数人で空中像を見ることができていた。

体験者が空中像の妖精をすくう際、妖精には直接触れず、左右から両手で包み込むように手ですくい上げていた。このことから、体験者に空中像キャラクターへの愛護的な操作を促せた可能性がある。

うまく空中像をすくえないユーザも見られた。水をすくう手に隙間が生まれてしまい、結像に十分な水面を保持できないようであった。ユーザの指の骨格や指の肉付きが影響していると考えられ、すくう操作が万人に可能な動作ではないことが分かった。

インタラクションすることで生まれる水面の揺らぎが像を揺らがせるが、これが独特の美しい視覚表現になっているという肯定的なコメントがあがった。このことから、空中像キャラクターとのインタラクションを行ううえで、ユーザは結像の鮮明さや解像度を最重要視しているわけではないことが示唆された。

6. 考察

6.1 表示可能な輝度の制限

今回提案したシステムでは、 $2,000 \text{ cd/m}^2$ 程度の高輝度ディスプレイを用いた場合でも、 $\theta: 10^\circ \sim 25^\circ$ の範囲における空中像の輝度は $32.4 \sim 40.7 \text{ cd/m}^2$ 程度と予測される。適用可能な環境を広げるためには、より高い輝度を持った空中像を表示する必要がある。この課題に対して、次の2つの手法で提案システムによる空中像の輝度を改善できると考えられる。表示される空中像の輝度が低い理由の1つは、ディスプレイから正面に向かって出る最も明るい光線がMMAPsに入射しないためである。プリズムシートを用いてディスプレイ正面に向かって出る光線を曲げ、MMAPsに入射させることで、輝度の改善が期待される。また、太陽光を光源とすることで、屋外で視認できる輝度を持つ空中像を表示する手法 [18] が提案されており、この手法を用いることでさらなる改善の可能性が見込める。

6.2 水中における実物体との重畳

本システムによって提示する水中像は、水中の実物体を視認する際に生じる光の屈折を考慮できていない。そのため、水中の実物体と水中像を重畳表示した際、表示位置がずれ、「3. 幾何学的整合性」に矛盾が生じるという限界がある。

6.3 提案システムを適用可能な水面

今回の実装では、静止した水面に絞り映像表示を行った。しかし、水面反射を用いた結像手法は、静止した水面に空中像を表示する以外に、流水面の反射を用いた表示や、物体表面を濡らすことで形成した水面上への表示にも適用できる。空中像を噴水から流れ出る水面上に表示した様子



図 12 噴水面上に表示した空中像

Fig. 12 Mid-air image on the fountain surface.



図 13 濡れたコンクリートに表示した空中像：(上) 右から撮影した像, (下) 左から撮影した像

Fig. 13 Mid-air image on wet concrete.

を図 12 に、濡らしたコンクリートの上に表示した様子を図 13 に示す。提案手法はこのような環境の変化と情報提示が融合した表現への応用も期待できる。

6.4 水面の揺らぎの影響

水面が揺れることで、反射する光線が乱れ空中像も揺らいで見える。像を水中に表示している場合は「3. 幾何学的整合性」を向上させる要因になるが、水上に表示している場合は低下させる要因になる。現状ではこの現象を回避することは困難だが、対処の1つとして、揺らぐことで魅力的に見えるコンテンツを表示することがあげられる。5.1 節の展示から得られたコメントのように、像の揺らぎをプラスに転換できる可能性がある。川、海、噴水広場など、揺らぎ方は水場の種類によって様々であるため、それぞれの揺らぎを活用できるコンテンツを検討する必要がある。

7. まとめ

本論文では、「1. 非加工」、「2. 非装着」、「3. 幾何学的整合性」、「4. 衣類が濡れないこと」を満たし、ユーザが水に直接手で触れてインタラクションできる映像表現システムとして、水中水上の3次元空間に直立表示した映

像を、実物体のように水ごと素手ですくい上げるシステム Scoopirit を提案した。システムを実装し、映像の水中水上への直立表示およびすくいあげるインタラクションが可能であることを確認した。さらに提案システムによって表示できる輝度を評価した。

謝辞 本研究は、科学技術振興機構戦略的創造研究推進事業（さきがけ, JPMJP16D5）によるものである。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- [1] 鈴木信弘：水空間の演出，鹿島出版会（1981）.
- [2] 香川ウォーターフロント・フェスティバル 2014，入手先 <https://www.teamlab.art/jp/e/kagawa_water_front_fes/>（参照 2018-04-10）.
- [3] 小舟と共に踊る鯉によって描かれる水面のドローイング，入手先 <<https://www.teamlab.art/jp/w/mifuneyama/>>（参照 2018-04-10）.
- [4] Ishii, H. and Ullmer, B.: Tangible bits: Towards seamless interfaces between people, bits and atoms, *CHI '97, Proc. ACM SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp.234-241 (1997).
- [5] Koike, H., Matoba, Y. and Takahashi, Y.: AquaTop Display: Interactive Water Surface for Viewing and Manipulating Information in a Bathroom, *ITS '13, Proc. 2013 ACM International Conference on Interactive Tabletops and Surfaces*, pp.155-164 (2013).
- [6] およぐことば Floating Words，入手先 <<http://moroisatoko.com/works/fw/howtoplay.html>>（参照 2018-04-10）.
- [7] Ikeda, M., Nagira, N. and Hirakawa, M.: A Multi-Dip Interface with Water, *2009 International Conference on Complex, Intelligent and Software Intensive Systems (CISIS)*, pp.169-176 (2009).
- [8] 杉原有紀，舘 暉：かぶり型水ディスプレイの開発，日本バーチャルリアリティ学会論文誌，Vol.6, No.2, pp.145-152 (2001).
- [9] 宮崎大介：三次元像の空中表示技術の現状と展開，光学/応用物理学会分科会日本光学会（編），Vol.40, No.12, pp.608-615 (2011).
- [10] Kim, H. et al.: MARIO: Mid-air Augmented Reality Interaction with Objects, *Entertainment Computing*, Vol.5, Issue 4, pp.233-241 (2014).
- [11] 山本紘暉，梶田 創，小泉直也，苗村 健：EnchanTable：テーブル面の反射を用いた直立空中像ディスプレイ，日本バーチャルリアリティ学会論文誌，Vol.21, No.3, pp.401-410 (2016).
- [12] 梶田 創，小泉直也，苗村 健：OpaqueLusion：多層空中像におけるオクルージョン表現の基礎検討，情報処理学会インタラクション 2015，インタラクション 2015 論文集，pp.1010-1015 (2015).
- [13] 株式会社アスカネット：光学結像装置特開 2012-155345 (P2012-155345S).
- [14] 社団法人日本建築学会：コンパクト建築設計資料集成，p.45，丸善株式会社 (2011).
- [15] JFE アドバンテック株式会社：各種測定方式，入手先 <<http://water.jfe-advantech.co.jp/technical/knowledge/measuring.method/>>（参照 2018-04-10）.
- [16] Born, M., Wolf, E. (著)，草川 徹 (訳)：光学の原理，第 7 版 I，東海大学出版会，pp.65-73 (2005).
- [17] 西信元嗣，岩田耕一，魚里 博：新しい眼光学の基礎，pp.78-80，金原出版株式会社 (2008).

- [18] Koizumi, N.: Sunny Day Display: Mid-air Image Formed by Solar Light, *Proc. 2017 ACM International Conference on Interactive Surfaces and Spaces (ISS '17)*, pp.126-131 (2017).

推薦文

再帰透過光学系で空中映像を提示するシステムが数多く提案されているが、映像の奥に手をかざすと映像が隠れる問題があり、リアルタイムに映像と行うインタラクションにも制限があった。本論文では水面反射を用いることで手を映像の奥に配置できる光学系を設計・試作し、さらに水位を計測することで映像を「すくいとる」といったインタラクションを実現しており、高く評価できる。総じてプログラム委員会において高い評価を受けたため、推薦論文として推薦する。

(インタラクション 2018 プログラム委員長 坂本大介)



松浦 悠

2017年電気通信大学情報理工学部総合情報学科卒業。現在、電気通信大学大学院情報理工学研究科博士前期課程に在籍中。



小泉 直也 (正会員)

2012年慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科後期博士課程修了。博士(メディアデザイン学)。日本学術振興会特別研究員PD、東京大学情報学環研究員を経て、現在、電気通信大学情報理工学研究科助教。JST さきがけ研究員を兼務。空中像インタラクションやクロミック作用を利用したディスプレイの研究に従事。