

水の撥ね掛けを入力として扱う 空中像インタラクションの提案

長田 空大^{1,a)} 秋山 凜太郎^{1,b)} 小池 崇文^{1,2,c)}

概要: 我々にとって水を掛ける行為は日常的な動作である。一方、飛散した水が表示機材や光学素子に付着すると故障等のおそれがある。このため、水の撥ね掛けを入力として扱うには、飛沫対策を講じつつ水が通過する空間を確保できるように、機材の配置と運用を設計する必要がある。しかし、この条件が装置設計と運用を複雑化し、入力手段としての普及を妨げてきた。本手法は、Retro-reflective Mirror Array (RMA) を用いて空中像を提示する。RMA により像の近傍に機材を置かない構成とすることで、水が表示機材や光学素子へ到達しにくい配置を実現し、濡損に起因する機材の故障リスクを低減する。さらに、水が照明光を横切の際に生じる局所的な輝度変化をイベントカメラで計測し、通過する高さを入力強度を推定する。推定結果を空中像の映像に反映し、水の通過位置に対応する領域の映像をリアルタイムに更新することで、水の撥ね掛けと映像変化の対応が知覚できる操作体験を提示する。9名による主観評価では、操作の気持ちよさ、新規性、再体験意欲が高く評価された一方、没入感と入力位置の分かりやすさには改善の余地が見られた。以上より、本手法は水の撥ね掛けを映像変化へ対応付ける体験を成立させるとともに、空中像提示と実世界の流体を統合したインタラクションを提示する。

1. はじめに

水を撥ね掛ける行為は日常的な動作である。一方、これを入力として扱い、コンピュータの反応へ結び付ける体験は十分に検討されてこなかった。その背景には、水濡れに起因する表示機材や光学素子の故障等のリスクがある。

水とコンピュータを組み合わせた体験として、AquaTop Display[1]が挙げられる。同研究は、水面を操作面として用いる研究プロトタイプを提案した。また、噴水を動的なスクリーンとして制御するDIGITAL WATER CURTAIN[2]などの実用例もある。水の撥ね掛けを入力として扱う場合、飛散した水が表示装置や光学素子に付着すると故障等のリスクが生じる。そのため、飛沫対策と水が通過する空間の確保を両立する配置と運用が必要となる。さらに、水の撥ね掛けは短時間で形状が大きく変化するため、通過位置や入力強度の安定した計測が難しい。このため、水の撥ね掛けを入力として空中像の映像変化に結びつける手法は、ほとんど報告されていない。

本研究は、水の撥ね掛けを入力とした空中像とのインタラクションを提案する。空中像の提示方式として Retro-

reflective Mirror Array (以下、RMA) [3] を用いる。これにより、水が通過可能な空間を確保しつつ、機材の濡損のリスクを抑えた配置が可能となる。さらに、イベントベースビジョンカメラ (以下、イベントカメラ) で、水の撥ね掛けが照明光を横切の際の局所的な輝度変化を取得する。取得結果から水の通過する高さを入力強度の指標を推定し、空中像の映像へ反映する。

本研究の貢献は以下である。

- 水の撥ね掛けを入力として扱い、入力位置に応じて空中像の映像を更新し、対応する領域の色を変化させるインタラクションを実現した。
- RMA を用いることで像の近傍に水が通過可能な空間を確保し、水濡れに起因する表示機材や光学素子の故障等のリスクを低減する装置の配置を示した。
- 高速に移動する水の検知に対して、イベントカメラの高時間分解能を用い、インタラクションにおける水の撥ね掛けによる入力の有効性を示した。

2. 関連研究

本研究は水の撥ね掛けを入力とし、その通過する高さに応じて空中像の映像を変化させるインタラクションを扱う。水とコンピュータを組み合わせたインタラクションは、水滴、水面、霧など多様な状態を対象として報告されている。

¹ 法政大学

² ReallImage Inc.

a) sora.osada.2b@stu.hosei.ac.jp

b) rintaro.akiyama.3i@stu.hosei.ac.jp

c) takafumi@hosei.ac.jp

Barnum ら [4] は、落下する水滴を表示要素として扱い、多層に配置した水滴の列に投影映像を対応付け、多層表示を実現した。Fluid Surface[5] は、浴室での環境を想定し、水面への投影と指の位置検出を組み合わせ、水面操作を情報の閲覧や選択に対応付けた。MistForm[6] は、視線追跡に基づいて霧スクリーンの形状を動的に変化させ、観察者に合わせて表示面を生成する手法を示した。

空中像を用いたインタラクションも報告されている。Touching the Void[7] は視差補正により空中像への直接の操作を安定化し、HaptoMime[8] は超音波の触覚提示により空中像に触れた感覚を付与した。また、水と空中像を組み合わせた例として FairLift[9] がある。FairLift は水面の上方に空中像を提示し、水を介した体験を実現した。ただし、これらの研究が主に扱う入力は身体動作、視線、または水面操作であり、水の撥ね掛けのように短時間で形状が大きく変化する水の運動を入力として扱う設計は扱われていない。このため、水の撥ね掛け入力の通過位置を推定し、空中像の映像変化へ反映する手法は、報告されていない。

空中像の提示方式として、FairLift が用いる Micro-Mirror Array Plates (以下、MMAPs) や、プレート状の反射光学素子で空中像を結像する Dihedral Corner Reflector Array (以下、DCRA) [10]、再帰反射材とハーフミラーを用いる Aerial Imaging by Retro-Reflection (以下、AIRR) [11] がある。MMAPs や DCRA のように像の近傍へ光学素子を配置する方式では、水の撥ね掛けを扱う際に飛散した水が光学素子や光源に付着し、故障等のリスクが生じるため、機材の配置や遮蔽が運用上の制約となりやすい。また、AIRR は透過と反射を複数回経由するため、光量の損失と散乱が増えやすく、飛び出し距離を大きくすると像の明るさが低下し、輪郭がぼやけやすい。本研究は、像の近傍に水が通過可能な空間を確保しやすい RMA を用いる。RMA は反射によって結像し、光路に透過素子を含まない。また、光学素子から離れた位置に像を結像できるため、像の近傍に光学素子を置かない配置をとりやすい。この特性により、水が像の近傍を通過しても機材へ到達しにくい提示構成を実現できる。

3. 提案手法

3.1 概要

本研究は、水の撥ね掛けを入力とした空中像インタラクションを実現する。人形等の空中像に対し、水が通過した高さに応じて映像を更新する。空中像は RMA により提示し、像の近傍に水が通過可能な空間を確保する。

水の撥ね掛けの計測にはイベントカメラを用いる。イベントカメラは、各画素の輝度変化が閾値を超えた瞬間のみを非同期イベントとして出力し、変化時刻を高時間分解能で取得できる [12]。本システムでは、暗室環境で背景光の影響を抑え、水の通過領域のみに指向性照明を照射する。

この条件設定により、背景光や周辺反射に起因する輝度の変動を抑制し、水の撥ね掛けが照明光を横切るときの局所的な輝度変化を安定して取得する。

全体の処理は以下の順に行う。イベントカメラが出力するイベント（画素座標、時刻、および輝度変化の極性を含む非同期データ）を時間幅 1ms ごとに集計し、集計結果から水が通過する高さや入力強度の指標を推定する。推定結果に基づき、空中像の通過位置に対応する領域の色を更新し、塗り進むように見せる。これにより、水の撥ね掛けと空中像変化の対応が知覚できる操作体験を実現する。

3.2 実装

図 1 および図 2 にシステム構成を示す。本システムでは、空中像を提示する光学系、水の撥ね掛けによる輝度変化を取得する計測部、取得データから入力位置と入力強度の指標を推定する解析部、および推定結果に基づいて空中像へ表現を重畳する提示部から構成する。

空中像の提示には、RMA と液晶ディスプレイ（アイ・オー・データ機器、EX-LDGC242HTB）を用いた。液晶ディスプレイは空中像の光源であり、表示面が縦向きとなるように 90° 回転させて設置した。水が RMA や周辺機材へ到達する可能性を低減するため、液晶ディスプレイと RMA の距離を約 1.9m、RMA と水鉄砲先端の距離を約 2.1m とした。また、液晶ディスプレイへの水滴の付着を防ぐため、プラバンを加工した遮水板を追加した。

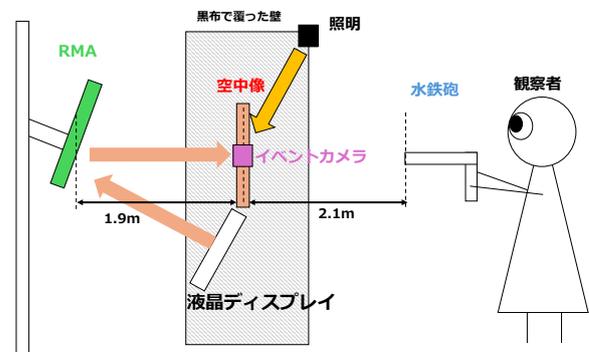


図 1: システム構成の側面図

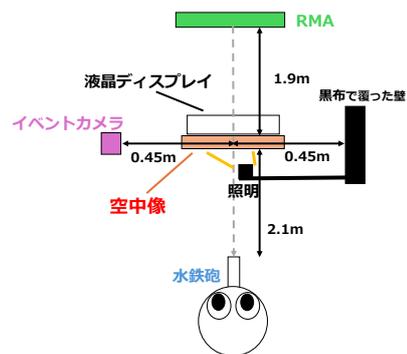


図 2: システム構成の上面図

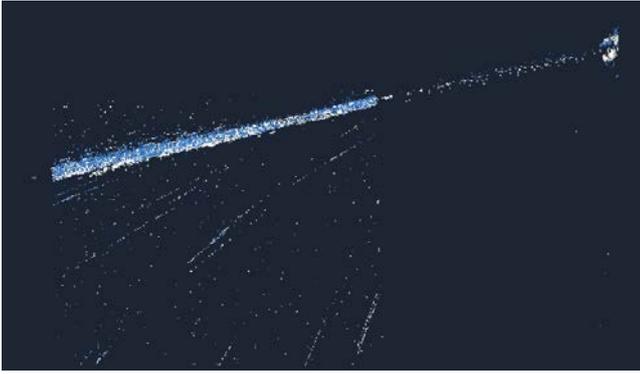


図 3: イベントカメラの撮影画像例 (実験環境と同条件), しぶきの広がりがイベント分布として現れる

水の撥ね掛けの計測には, イベントカメラ (センチュリーアークス製, SilkyEvCam (VGA)) を用いた. イベントカメラは床から高さ 1.5m の位置に設置し, 水の通過領域を側方から撮像した. 室内の輝度を 0.281 cd/m^2 とする暗室環境を構成した. さらに, 水の通過領域のみに指向性照明を照射し, 背景光の影響を抑えた. 図 3 にイベントカメラの撮影画像例を示す.

解析部では, イベント分布を時間幅 1ms ごとに集計し, 水の通過する高さを入力強度の指標を推定する. まず, 撮像領域から解析対象の関心領域 (Region of Interest, 以下, ROI) を切り出す. 次に, ROI 内のイベント数分布を得るため, ROI を鉛直方向に 7 分割し, 各帯域のイベント数をヒストグラムとして算出する. ヒストグラムのピーク位置から水の通過する高さを正規化して推定し, イベント数の総和を入力強度の指標とする. ピークが複数得られた場合は, 同一スライス内で複数の水流が通過した入力とみなし, 最大 2 本までの通過位置を推定する. 推定した通過位置と入力強度の指標は, UDP 通信で提示部に送信する.

提示部では, 受信した通過位置を空中像モデルの高さに対応付け, 対応する領域の映像を変化させて, 水が当たった位置が塗られるように見せる. 本実装では, 水平方向の位置をモデル中心に固定し, 高さに応じて着色を表す映像が上下に移動するように見せる. 着色の大きさは, 入力強度の指標に比例して増減させる. 複数の入力とみなした場合は, 各高さに対して同様に着色を付与する. 描画では,

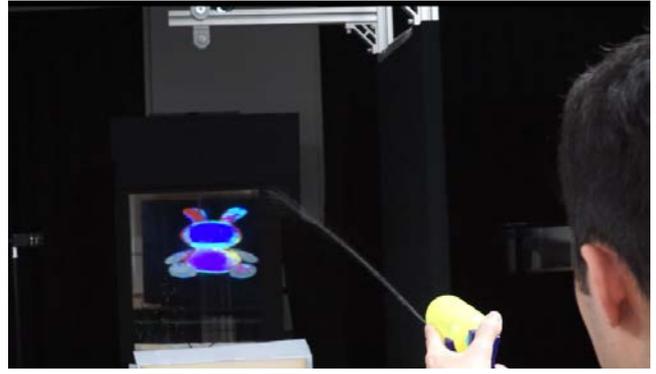


図 4: 体験の様子, 参加者は空中像に向けて水鉄砲を発射し, 入力に応じて着色とキャラクタ反応が変化する

視点からモデル表面の当たり位置を推定し, 表面の対応領域に相当するテクスチャ上へ書き込む. 表示時は, 書き込み結果を元のテクスチャに重ねて提示する. また, 命中位置に応じて簡易モーション (転倒とノックバック) を付与した.

4. 評価

4.1 実験方法

提案手法の体験価値を検証するため, 主観評価を実施した. 本実験のコンテンツでは, 空中像として提示したキャラクタに水鉄砲で水を当てると, 当たった高さに対応して表面の色が増え, 塗られていくようになる. 参加者は水の当て方を変えることで, キャラクタ表面を上から下まで塗り進められる. 図 4 に体験中の様子を, 図 5 に水の撥ね掛け入力に応じた変化例を示す.

参加者は 21~24 歳の 9 名 (平均 22.2 歳, 標準偏差 1.2) であった. 実験前に, 全参加者が空中像を視認できることを確認した. 続いて観察条件を統一するため, 参加者には RMA から約 4m の位置に立つよう指示した. 立ち位置は床面に足跡の印を設け, 参加者が位置を容易に把握できるようにした. 実施時間は 30 秒とし, 空中像に向けて自由に水鉄砲を発射するタスクを課した. 電動式および手動式の水鉄砲を 1 本ずつ用意し, 片手操作と両手操作はいずれも許可した.

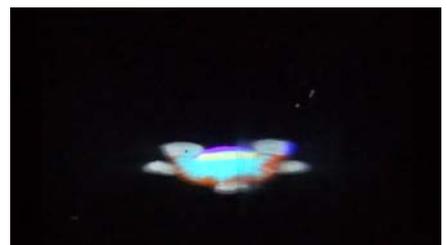
タスク終了後, 楽しさ, 没入感, 操作の気持ちよさ, 身



(a) 通常状態



(b) 着色した状態



(c) 転倒した状態

図 5: 水鉄砲による空中像インタラクションの例

体性、入力位置の分かりやすさ、新規性、再体験意欲の7項目を5件法（1：全く当てはまらない，5：非常に当てはまる）で評価させた。本稿では、没入感を「周囲への注意が薄れ、体験に集中できていると感じる程度」、操作の気持ちよさを「発射動作と空中像の反応が心地よく結び付いていると感じる程度」、身体性を「指先だけで完結する操作ではなく、水鉄砲を構え、狙い、発射する動作を通して体を使って操作していると感じる程度」、入力位置の分かりやすさを「当たった高さで色が増える高さの対応を把握できる程度」、新規性を「水の撥ね掛けをコンピュータの入力として扱う点、および水鉄砲をコントローラとして用いる点に、新しい体験だと感じる程度」と定義する。併せて、各回答の理由を自由記述で収集した。

4.2 結果と考察

7項目の平均した評価値を表1に示す。操作の気持ちよさ、新規性、再体験意欲は、いずれも平均4.6であった。楽しさは平均3.9であり、肯定的な評価を得た。一方で、没入感と入力位置の分かりやすさは平均3.1にとどまった。身体性は平均3.2であり、評価項目の間で差が生じた。以上より、本インタラクションは新規性と操作の気持ちよさの面で有効性を示した一方、没入感と入力位置の分かりやすさが相対的に低かった。これは、狙った位置と映像変化の対応が十分に把握しにくく、体験への没入感を阻害した可能性を示す。

自由記述では、空中像に向けて水を発射する体験そのものを新規性の理由として挙げる回答が多かった。また、入力に対して即時に反応が得られる点を楽しさの理由として挙げる回答が多かった。操作の気持ちよさについては、水鉄砲の操作に伴う運動感覚と反応提示の対応が評価に寄与した。身体性については、水鉄砲を構えて狙い、発射する一連の動作を体を使った操作として捉える回答が得られた。一方で、身体動作が映像の変化へ直接結び付く感覚が弱いという指摘も得られた。

没入感と入力位置の分かりやすさが相対的に低かった要因として、提示条件と視認性の個人差を挙げる。参加者からは、提示サイズ、飛び出し距離、照準の取り方により距離感を掴みにくいという指摘を得た。本システムでは、観

表 1: 7 指標の平均評価値

指標	平均値
楽しさ	3.9
没入感	3.1
操作の気持ちよさ	4.6
身体性	3.2
入力位置の分かりやすさ	3.1
新規性	4.6
再体験意欲	4.6

察者が同じ立ち位置でも眼の高さが異なると視線方向が変わり、像の見えやすさや見かけ位置がわずかに変動する。この変動により、狙った位置と映像変化の対応が把握しにくい参加者が生じ、没入感および入力位置の分かりやすさを低下させたと考える。

5. まとめ

本研究は、水の撥ね掛けを入力として扱い、通過する高さに応じて空中像の映像を更新するインタラクションを実現した。RMAにより像の近傍へ機材を置かない提示構成をとり、水が通過可能な空間を確保した。さらに、イベントカメラにより水の撥ね掛けの局所的な輝度変化を取得した。取得結果から通過位置と入力強度の指標を推定し、空中像の映像に反映して対応する領域の色を変化させた。主観評価では、楽しさ、操作の気持ちよさ、新規性、再体験意欲が高かったが、没入感と入力位置の分かりやすさは相対的に低く、視点位置に起因する視認性の変動が影響した可能性がある。以上より、本手法は空中像の提示と実世界の流体を統合した新たなインタラクション概念を提示し、エンタテインメント用途における体験価値を示した。

参考文献

- [1] Koike, H., Matoba, Y. and Takahashi, Y.: AquaTop Display: Interactive Water Surface for Viewing and Manipulating Information in a Bathroom, Proc. *ITS '13*, pp. 155–164 (2013).
- [2] Lumiartécnia and Reign, A.: DIGITAL WATER CURTAIN (online), available from <https://www.digitalwatercurtain.com/> (accessed 2025-01-15).
- [3] Koike, T. and Onishi, Y.: Aerial 3D Imaging by Retroreflective Mirror Array, Proc. *ISS '18 Companion*, pp. 25–29 (2018).
- [4] Barnum, P.C., Narasimhan, S.G. and Kanade, T.: A Multi-Layered Display with Water Drops, Proc. *SIGGRAPH '10*, pp. 76:1–76:7 (2010).
- [5] Takahashi, Y., Matoba, Y. and Koike, H.: Fluid Surface: Interactive Water Surface Display for Viewing Information in a Bathroom, Proc. *ITS '12*, pp. 311–314 (2012).
- [6] Tokuda, Y., Norasikin, M.A., Subramanian, S., et al.: MistForm: Adaptive Shape Changing Fog Screens, Proc. *CHI '17*, pp. 4383–4395 (2017).
- [7] Chan, L.-W., Kao, H.-S., Chen, M.Y., et al.: Touching the Void: Direct-Touch Interaction for Intangible Displays, Proc. *CHI '10*, pp. 2625–2634 (2010).
- [8] Monnai, Y., Hasegawa, K., Fujiwara, M., et al.: HaptoMime: Mid-Air Haptic Interaction with a Floating Virtual Screen, Proc. *UIST '14*, pp. 663–667 (2014).
- [9] Matsuura, Y. and Koizumi, N.: Fairlift: Interaction with Mid-Air Images on Water Surface, Proc. *SIGGRAPH '18 Emerging Technologies*, pp. 1–2, Article No. 6 (2018).

- [10] Miyazaki, D., Hirano, N., Maeda, Y., et al.: Floating Volumetric Image Formation Using a Dihedral Corner Reflector Array Device, *Appl. Opt.* Vol. 52, No. 1, pp. A281–A289 (2013).
- [11] Yamamoto, H. and Suyama, S.: Aerial Imaging by Retro-Reflection (AIRR), *SID Symp. Dig. Tech. Pap.* Vol. 44, No. 1, pp. 895–897 (2013).
- [12] Gallego, G., Delbruck, T., Orchard, G., et al.: Event-Based Vision: A Survey, *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.* Vol. 44, No. 1, pp. 154–180 (2022).