

触覚フィードバックを提示可能な不可視 AR マーカに関する検討

小俣慎太郎^{†1} 小川剛史^{†2}

概要: 本稿では、デバイスを身につけることなく触覚フィードバックを提示可能で、景観を損ねることのない不可視なビジュアルマーカを提案する。ビジュアルマーカとして空気砲から発射した渦輪を使用し、二酸化炭素で渦輪を構成することにより、不可視で触覚フィードバックを与えるマーカの実現を目指す。基礎検討として、白煙で構成された渦輪をマーカとして利用することで有用性を検討した。また赤外線カメラと帯域通過フィルタを使用して、二酸化炭素で構成された渦輪の撮影し、システムの有用性について考察した。

キーワード: 不可視マーカ, 触覚フィードバック, 渦輪, 空気砲

Study on Invisible AR Markers with Tactile Sensation

SHINTARO OMATA^{†1} TAKEFUMI OGAWA^{†2}

Abstract: In this paper, we propose a transparent visual marker which can provide tactile feedback without requiring users to wear a device and can prevent a deterioration in the beauty of the environment. By using a vortex ring launched from an air cannon as a visual marker and constructing a vortex ring with carbon dioxide, we aim to realize an invisible marker giving haptic feedback. This paper reports experimental evaluation of the system vortex ring markers composed of white smoke. Also, we conducted an experiment for detection of the vortex ring composed of carbon dioxide with the infrared camera and the bandpass filter.

Keywords: Invisible AR markers, tactile sensation, vortex ring, air cannon

1. はじめに

安価な HMD の登場やスマートフォンの高性能化に伴い、VR/AR(Virtual Reality/Augmented Reality)アプリケーションが急速に身近なものとなってきた。エンターテインメントの分野では Pokémon GO¹などの AR ゲームが人気を博し、今後も AR 技術を用いた実世界ベースのエンターテインメントを多くの人々が楽しむと考えられる。

AR アプリケーションでは、仮想オブジェクトのリアリティを高めるために現実世界との幾何学的な整合性を保つことが重要である。古くから現実世界に配置した画像マーカを用いてカメラの位置姿勢を推定するための手法が提案されており、比較的簡易な物理計算でカメラの位置姿勢を推定できたり、マーカの位置に正確に仮想オブジェクトを提示することが可能といった利点がある。しかし、現実空間内に多数の画像マーカを配置すると景観を損ねてしまう問題もあり、現実空間中の自然特徴点を用いた手法や、スマートフォンのような端末に内蔵されたセンサを用いた手法などが提案されている。

一方、仮想オブジェクトとのインタラクションを考慮した場合、そのリアリティを向上させるためには、視覚的な要素だけでなく、ヒトのさまざまな感覚に対してフィードバックを提示することが重要であり、仮想オブジェクトに

触れたときの触覚フィードバックを実現する研究はこれまで盛んに行われてきた。指先や腕など触覚を提示する身体部位にアクチュエータを装着し、仮想オブジェクトの動きやヒトの動きに応じてアクチュエータを作動させることで、触覚の伴うインタラクションを実現している。このようなシステムでは、触覚提示が可能な箇所がアクチュエータを装着した箇所に限定されることや、例えば指先に付けた装置が現実オブジェクトを把持する際に邪魔になるなどの問題点が指摘されている。

本研究では、デバイスを身につけることなく触覚フィードバックを提示可能で、景観を損ねることのない不可視なビジュアルマーカを提案する。提案方式では、触覚フィードバックの提示と不可視であることの双方の条件を、空気塊でビジュアルマーカを構成することで実現する。本稿では、空気塊で AR マーカを構成するために行った基礎検討について述べる。

2. 関連研究

2.1 空気塊による触覚提示に関する研究

Sodhi らは、空気砲の原理を用いて空気塊を手足や顔に向けて発射し、触覚を提示する装置 AIREAL[1]を提案している。例えば、手のひらにプロジェクタで蝶の映像を投影するのに合わせて、AIREAL のノズルの先から手のひらに

^{†1} 東京大学大学院学際情報学府
Graduate School of Interdisciplinary Information Studies, The University of Tokyo

^{†2} 東京大学情報基盤センター

Information Technology Center, The University of Tokyo
1 Pokémon GO : <https://www.pokemongo.jp/>

向かって空気砲を射出することで、蝶の羽ばたく様子を表現するなど、視触覚を融合させたコンテンツの提示が可能である。一方で映像に応じた適切なタイミングで空気砲を射出しなければならず、視触覚刺激の同期を実現する仕組みが必要である。また、ビデオゲームなどへの応用として、ディスプレイから飛び出すボールを手で打ち返す例が示されているが、ボールと手が衝突する様子を視覚的に提示できないなどの課題がある。

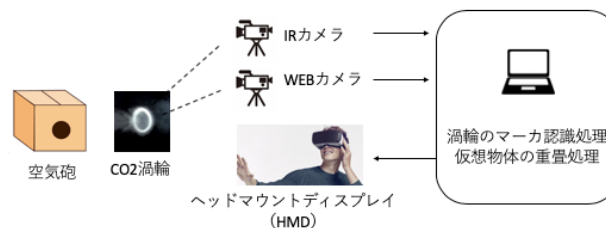


図1 システム概要図

2.2 渦輪を用いた視覚情報提示に関する研究

徳田らは、高い臨場感と存在感のある映像を空間中に表示することを目的に、渦輪をプロジェクションスクリーンとして利用する渦輪ディスプレイ[4]を提案している。渦輪は、輪の中心から外へ巻き出る一定の空気の流れによって、優れた安定性と輸送能力を兼ね備えており、内部に粒子を含んだ状態で長距離を一定の速度で直進する。この特徴を利用して、空気砲から射出する白煙を満たした渦輪に、空気砲下に設置したプロジェクタから映像を投影することで渦輪ディスプレイを実現している。渦輪ディスプレイに多重像のない鮮明な映像を映し出すために、安定した層流の渦輪が必要であり、空気砲による渦輪の射出条件についての検証結果を報告している。

2.3 可視化した二酸化炭素の応用研究

Liger らは、シャンパンをグラスに注ぐ際に拡散する炭酸ガスを可視化して、シャンパンを美味しく味わえる正しい注ぎ方を科学的に検証した[3]。炭酸ガスの可視化に際し、二酸化炭素の赤外放射ピーク波長 $4.2[\mu\text{m}]$ の赤外線をつめるため、 $3[\mu\text{m}]$ から $5[\mu\text{m}]$ までの波長域を撮影できる赤外線カメラと帯域通過フィルタを組み合わせ用いている。

2.4 不可視マーカに関する研究

画像マーカに代表されるビジュアルマーカの多くは、カメラによる検出を容易にするため、高いコントラスト保つよう白黒パターンで構成されている。したがって、ビジュアルマーカを多数配置すると、現実空間の景観が損なわれる。この問題を解決するため、能田らは透明な再帰性反射材を用いたビジュアルマーカを提案している[5]。カメラのレンズ周辺に配置した赤外線 LED よりマーカに対して赤外光を照射し、その反射光をつめることでマーカを認識している。

3. 提案手法

3.1 渦輪を AR マーカとして利用する際の要求条件

AR マーカにおいて、仮想オブジェクトのリアリティを高めるために現実世界との幾何学的な整合性を保つことが重要である。幾何学的整合性とは、現実環境と仮想環境の3次元的な位置合わせを意味しており、現実環境に仮想オブジェクトを位置づれなく合成した画像を作り出すことで、

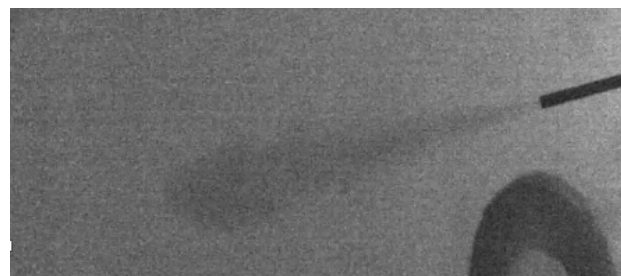


図2 二酸化炭素を撮影した様子

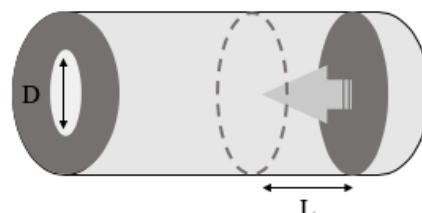


図3 パラメータ

ユーザの違和感の解消に大きく影響する。この整合性の問題はユーザ視点の位置・姿勢推定の問題に帰着される。そこで本研究では、ユーザ視点から撮影した渦輪の画像からユーザの位置と姿勢を推定することを考えている。ユーザと渦輪の距離に関しては、渦輪の進行速度と大きさから推定し、ユーザと渦輪の傾きに関しては、渦輪の縦横比の変化から推定することを検討している。

システムの概要を説明する。図1に示すように、空気砲から二酸化炭素で構成した渦輪を射出し、赤外線カメラとWEBカメラで撮影する。赤外線カメラから得られた動画から渦輪のマーカ検出・認識処理を行い、WEBカメラから得られた動画に仮想オブジェクトの重畳処理を行う。最後に重畳処理を行った動画をヘッドマウントディスプレイでユーザに提示する。渦輪を二酸化炭素で構成することで、肉眼では見えないマーカとして利用するとともに、渦輪に仮想オブジェクトを重畳することにより触覚フィードバックを提示する。二酸化炭素は、赤外線を吸収する特性を持つため、その赤外吸収波長帯に絞って撮影を行えば、図2のように可視化することが可能である。

3.2 空気砲の設計

提案システムでは、渦輪をカメラで撮影した画像から認識するため、構成粒子濃度の高い渦輪を射出できる空気砲

を作成する必要がある。

渦輪中の粒子濃度と形状の安定性は、空気砲の吹き出し口から渦輪が射出される瞬間の条件によって決定される。この安定性は、渦輪の生成機構をピストンとシリンダで構成した場合、図3に示すように渦輪が射出されるまでにピストンが移動した距離 L と噴き出し口の直径 D の比 L/D によって決まる。これを formation time(Ft)と呼ぶ。formation time の値を 1 から 4 程度とするのが最適であると文献[4]で報告されている。

3.3 渦輪による AR マーカのパターン設計

本研究で利用する渦輪マーカのパターン例を図4に示す。図のように渦輪の上側が薄く、下側が濃いパターンや、その逆で上側が濃く、下側が薄い濃淡パターンなど、渦輪内部で構成粒子の濃度が異なる部分を意図的に生成することでパターンとして利用する。これらパターンをマーカの ID とすることで、重畳する仮想オブジェクトの決定などに用いる。この渦輪内の濃淡パターンを表現するために、図5のように空気砲の中に仕切りを設けて部屋を作り、それぞれに異なる量の流体を充填して射出する。本稿では、上下と左右でパターンを生成した結果について述べるが、空気砲の内部をより多く分割することで、マーカの表現できる ID 数を増やすことが可能であると考えている。

3.4 渦輪マーカの検出処理から重畳処理まで

カメラから取得した飛行する渦輪の動画に検出処理と重畳処理を行う。検出処理の流れは、ARToolkit のマーカ処理手順と武井らの文献[6]を参考にしている。まず、カメラから入力される動画からカラー画像を取得し、グレースケール画像に変化する。設定された閾値にしたがい2値化処理を行って2値画像にする。さらにマーカ候補から領域の大きさが一定の大きさ内のものを選択し、輪郭抽出処理を行うことにより渦輪を検出する。続いて、検出された渦輪内部の濃淡の違いから割り当てた ID を識別する処理を行う。渦輪内の濃度差を閾値によって、いくつかの領域に分割する。分割された領域の濃度と配置から ID を識別し、渦輪マーカを同定する。最後に、同定した渦輪マーカに対応する仮想オブジェクトを重畳する。プログラミング言語には Python を使用し、画像処理ライブラリには OpenCV を利用する。

4. 検証実験

4.1 空気砲の動作確認

パイプ径 $\phi 105[\text{mm}]$ の塩化ビニルパイプをシリンダとして、開口径 $\phi 52.5[\text{mm}]$ の空気砲を作成した。開口径がシリンダ径の 70%以上の大きさでは渦輪が生成されず、60%の大きさから安定した渦輪が生成されたとの文献[4]の報告を参考にした。

続いて、formation time の式

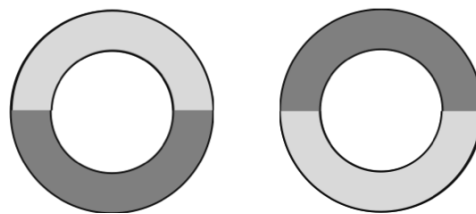


図4 渦輪マーカのパターン

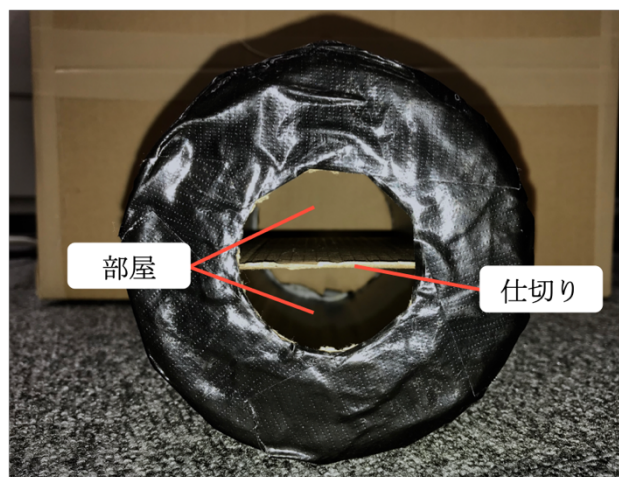


図5 空気砲内の部屋と仕切り

$$Ft = \frac{L}{D} \quad (1)$$

より、 Ft が 1 から 4 の範囲になるように押し込みのストロークを 15[mm], 25[mm], 35[mm], 45[mm]と変化させて、渦輪の様子を確認したところ、押し込みのストロークが 15[mm]と 25[mm]のときに安定して濃度の濃い渦輪が射出された。なお渦輪には、PS Lazer 社のスモークマシン(Z-400)で生成した白煙を入れて実験を行った。

4.2 濃淡のある渦輪の生成

4.2.1 実験 1

構成粒子濃度の違いによるマーカパターンの表現が可能であるかを確認するため、空気砲内に作成した部屋の片側のみに白煙を充填し渦輪を射出した。空気砲は 4.1 節で作成したものを利用した。空気砲の内径と同じ高さをもつ厚紙で仕切り、隙間が生まれないようにテープで固定した。また 2 つの部屋の流体を同時に押し出せるように、それぞれの部屋のサイズに合ったピストンを用意した。

上下左右いずれか 1 つの部屋のみに白煙を入れて射出した。その後、白煙を入れる部屋の位置を変え同様に射出し、合計 4 通りの渦輪の挙動を比較した。撮影は WEB カメラで行い、WEB カメラを設置した位置から空気砲までの距離は 1.5[m]である。押し込み距離は 4.1 節と同様に 15[mm]となるようにした。

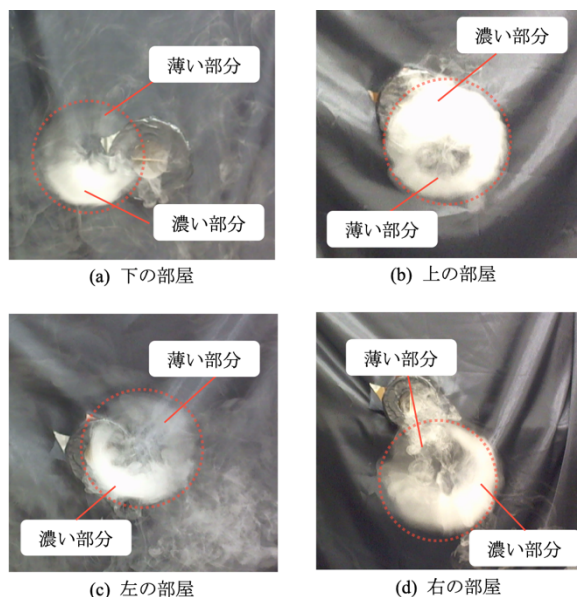


図6 濃淡のある渦輪

4.2.2 実験1の結果と考察

実験1の結果を図6に示す。4.1節と比較して、いずれの渦輪も形状と飛行距離がやや不安定な渦輪となったものの、渦輪の濃淡が確認された。射出直後から1[m]を図のような濃淡が確認できる状態で飛行し、その後の0.5[m]では渦輪全体に白煙が広がった。また渦輪に対して正面から撮影を行うと、直前に飛行していた渦輪の白煙が空間中に漂ってしまうことや、尾と呼ばれる渦輪自身が飛行する際に空間に残していく白煙が重なってしまうことが、画像処理を行う上での課題としてわかった。

また図6に示すように、(b)上の部屋、(c)左の部屋、(d)右の部屋に白煙を充填したとき、渦輪の飛行中に白煙が下方に移動することが確認された。これは白煙が重力により、下方に移動してしまうためであると考えられる。射出する直前も空気砲の開口部から下方に白煙が流れでている様子が確認された。

4.2.3 実験2

実験1から渦輪内での白煙の下方移動傾向が確認されたため、空気砲の上側の左右どちらかの部分に白煙を充填して射出実験を行った。渦輪の飛行中に白煙が下方に移っていくことにより、充填した側の半分が濃くなった渦輪が確認されるであろうと仮説を立てた。

空気砲内に図7のように、空気砲全体の1/2の大きさを持つ部屋を1つ、1/4の大きさを持つ部屋を2つになるよう仕切りを設け、ピストンも同様に作成した。白煙を充填した1/4の大きさの部屋をカメラから見て右上の位置に設置して、渦輪を射出した。実験環境は実験1と同じである。

4.2.4 実験2の結果と考察

実験2の結果を図8に示す。射出後、カメラから見て右上に溜まっていた白煙は、空気砲から60[cm]付近で図に示

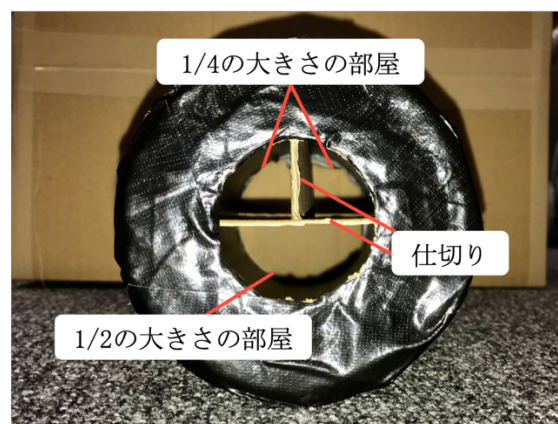


図7 4.2.3節における空気砲内の部屋と仕切り

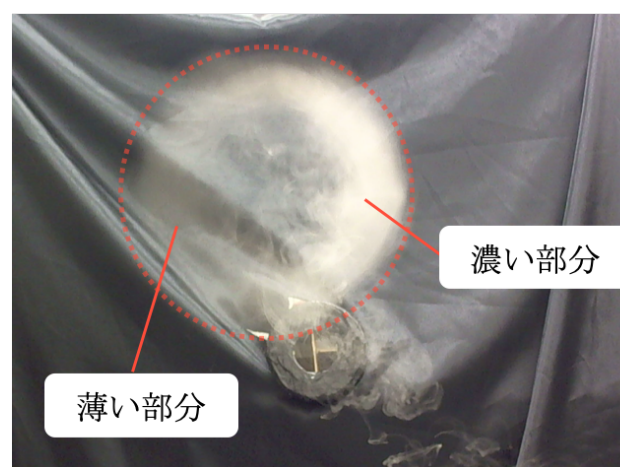


図8 実験2における濃淡パターン

すような右側半分に行き渡った状態となった。その後は徐々に左半分にも移っていくことが確認された。また白煙を充填する量が実験1の半分であるため、実験1に比べ白煙濃度が薄くなっていることが確認される。実験1と比較して、渦輪は安定した渦輪を射出することが難しく、飛行距離も短くなった。

4.3 渦輪の検出処理と触覚フィードバック

渦輪をマーカとして利用する際の有用性と、飛行してくる渦輪からの触覚フィードバックを確認する実験を行った。

WEBカメラと赤外線カメラを用意し、空気砲にスモークマシンから白煙を充填して射出された渦輪に対してリアルタイムで検出・重畳処理を行った。処理はそれぞれ赤外線カメラからの入力動画に検出処理を行い、WEBカメラからの入力動画に重畳処理を行った。仮想オブジェクトには野球ボールを用いた。空気砲には白煙を十分に充填し、押し込み距離は15[mm]となるようにした。WEBカメラと赤外線カメラを設置した位置から空気砲までの距離は2[m]である。また、飛行してくる渦輪による触覚フィードバックの観測者を空気砲から2[m]の距離に置き、触覚フィードバックの有無を観測した。

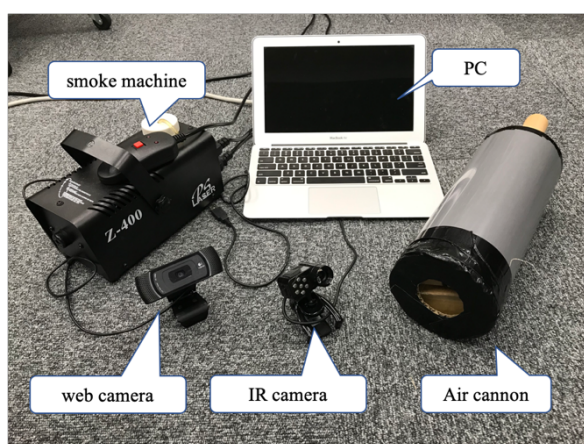


図9 4.3節の実験環境

実験で使用した機材を図9に示す。Apple社製のノートPC(OS:MacOS Mojave)に, Logicool社製のWEBカメラとハンファ・ジャパン社製の赤外線カメラを接続し撮影した。白煙の生成には, PS Lazer社のスモークマシン(Z-400)を使用した。

4.3.1 実験結果と考察

実験結果を図10に示す。赤外線カメラからの入力動画に検出処理を行った結果が左図であり, WEBカメラからの入力動画に重畳処理を行った結果が右図である。検出処理と重畳処理の間に遅延は見られず, リアルタイムでの処理がされた。また, 観測者は渦輪が肌に触れた時に触覚フィードバックを得ることができた。この時の渦輪は, 速度75[cm/s], 高さ6.5[cm]であった。

4.3.2 二酸化炭素で構成した渦輪の撮影

二酸化炭素で構成した渦輪の可視化をするために, 空気砲に二酸化炭素を充填して射出した渦輪を, 赤外線カメラと帯域通過フィルタを用いて撮影した。撮影環境を図11に示す。空気砲の後ろに暗幕を張り, 障害物が映らないようにした。空気砲の開口部から水平に20[cm]の長さを撮影範囲とし, 空気砲と赤外線カメラの距離は1.2[m]である。

実験機材には, FLIR社の赤外線カメラ(A6751, 波長感度範囲3-5[μm], 640×512[pixel], 125[fps])とアイ・アール・システム社の4.2[μm]付近の帯域通過フィルタを使用した。撮影した動画の解析ツールとしてFLIR社のResearchIR Maxを用いた。二酸化炭素には, ナリカ社の実験用二酸化炭素ボンベ(純度95%)を使用した。

4.3.3 実験結果と考察

二酸化炭素で構成された渦輪を赤外線カメラで可視化した様子を図12に示す。取得した画像に写る渦輪を肉眼で確認することはできたが, 鮮明には写っておらず, 画像処理にて渦輪を検出することは困難であった。文献[3]では, 二酸化炭素濃度の違いが認識できる画像が取得できている

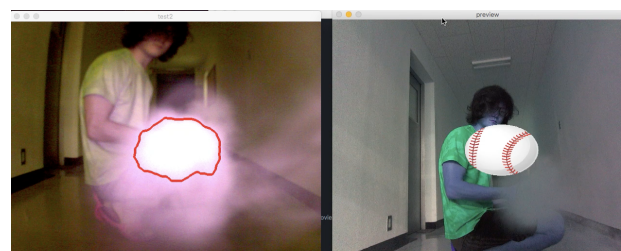


図10 検出処理と重畳処理

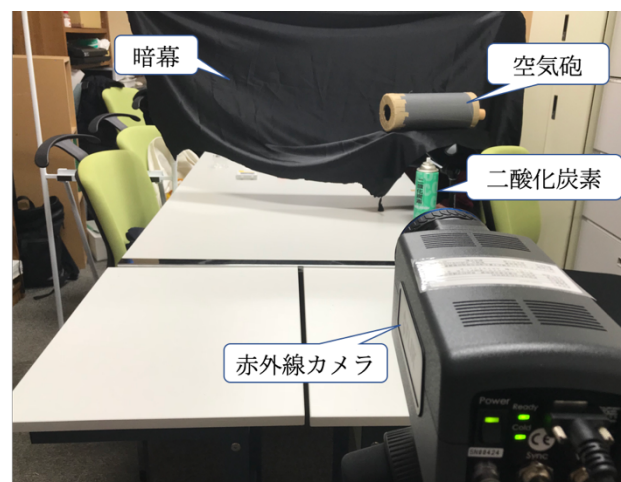


図11 4.3.2の実験環境

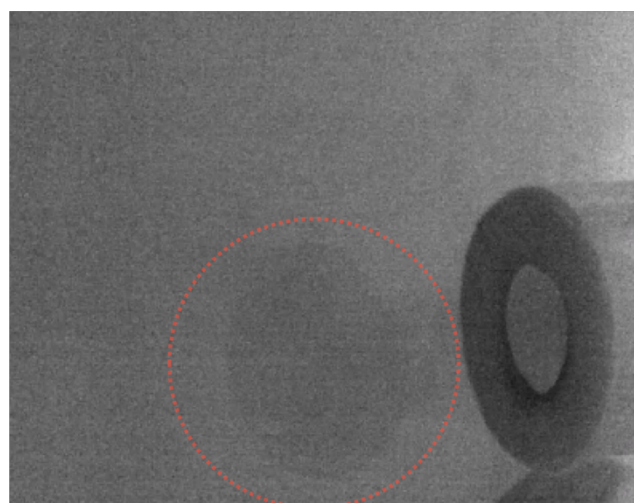


図12 二酸化炭素で構成された渦輪の可視化

ため, 赤外線カメラや撮影ツールの設定について, 再検討する予定である。

5. おわりに

本稿では, デバイスを身につけることなく触覚フィードバックを提示可能で, 景観を損ねることのない不可視なビジュアルマーカを提案し, 渦輪をARマーカとして認識する手法の検討を行った。渦輪をARマーカとして使う際のマーカパターン生成の可能性を示唆し, 渦輪による触覚フィードバックの提示を確認した。また, 二酸化炭素で渦輪

を構成することで、肉眼では見えないが赤外線カメラで撮影することで認識できるマーカの可能性も示唆された。

今後の課題としては、渦輪をマーカとして利用する際の、ユーザ視点の位置・姿勢推定手法の検討、パターン認識処理が挙げられる。ユーザ視点の位置・姿勢推定手法に関しては、マーカに渦輪を用いる場合、渦輪から特徴を抽出することが困難であることに加え、時間の経過とともに渦輪の形状が変形してしまうことにより位置と姿勢の推定が難しい。4.2 節で作成した濃淡のパターンのある渦輪を位置・姿勢推定にも利用できないかを今後検討していく予定である。また今回作成した空気砲では、押し込み速度を固定できておらず、ユーザと渦輪の距離を測るためには、機械的に制御可能な空気砲を製作する必要がある。パターン認識処理は、構成流体の濃度に対しての閾値処理を行い、提示する仮想オブジェクトを判断するプログラムを作成する予定である。また、二酸化炭素で構成した渦輪をマーカとして利用することに関しては、文献[3]において二酸化炭素濃度の違いが認識できる画像の取得ができていたため、赤外線カメラの撮影ツールの設定を再検討し、今後取り組む予定である。

謝辞 本研究の一部はJSPS 科研費 16K00266 の助成を受けたものである。

参考文献

- [1] Rajinder Sodhi, Ivan Poupyrev, Matthew Glisson, Ali Israr. AIREAL: Interactive Tactile Experiences in Free Air. ACM SIGGRAPH, 2013, 978-1-4503-2140-2/13/07.
- [2] Yasuaki Monnai, Keisuke Hasegawa, Masahiro Fujiwara, Kazuma Yoshino, Seki Inoue, Hiroyuki Shinoda. HaptoMime: Mid-Air Haptic Interaction with a Floating Virtual Screen. 2014 ACM 978-1-4503-3069-5/14/10
- [3] GE'ARD LIGER-BELAIR, MARIELLE BOURGET, SANDRA VILLAUME, PHILIPPEJEANDET,HERVE'PRON,GUILAUME POLIDORI. On the Losses of Dissolved CO2 during Champagne Serving.
- [4] 徳田雄嵩, 西村邦裕, 鈴木康広, 谷川智洋, 廣瀬通孝. 渦輪ディスプレイの提案. 情報処理学会論文誌, 2009, Vol. 50 No. 12 2853-2862 (Dec. 2009).
- [5] 能田雄規, 河野恭之. 不可視マーカを用いた実世界物体の認識. 情報処理学会論文誌, Vol. 50 No. 12 2889-2893 (Dec. 2009)
- [6] 武井隼人, 武田敦志. 色情報と直線検出を用いた AR マーカ一検出手法. 情報処理学会東北支部研究報告, Vol.2013.
- [7] 福本康秀. 渦輪. ながれ 25. 日本流体学会. PP265 - 280.2006.
- [8] 大島工, 権田知美, 柳田康幸. 香りプロジェクトの最適化に関する研究—空気砲押し出しパラメータの渦輪挙動への影響に関するシミュレーション—. 映像情報メディア学会. HI2009-108.2009.
- [9] 渡辺久馬, 柳田康幸. 空気砲の軌道安定化へ向けた最適な開口部形状の実験的考察. 第 23 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集. 34B-3. 2018.
- [10] 國枝彩乃, 串山久美子. 触覚表現のための空気振動を用いた生成方法の提案. 情報処理学会インタラクション, 2-404-49. 2017.
- [11] MORTEZA GHARIB1, EDMOND RAMBOD, KARIM

SHARIFF. A universal time scale for vortex ring formation. J. Fluid Mech. (1998) vol. 360, pp. 121-140. 1998.

- [12] 中里祐介, 神原誠之, 横矢直和. ウェアラブル拡張現実感のための不可視マーカと赤外線カメラを用いた位置・姿勢推定. TVRSJ Vol.10 No.3 pp.295-304, 2005.
- [13] 大藏信之, 内藤隆, 奥出宗重. 渦輪による物質輸送の特性. ながれ 31, 187-194. 2012.
- [14] 神原誠之. 基礎 1 : 拡張現実感(Augmented Reality:AR)概論. 情報処理 Vol.51 No.4 Apr. 2010, pp.367-372. 2010.