



クラスタ型デジタル空気砲における渦輪射出位置の自動検出とキャリブレーション手法の検討

森田尚樹¹⁾, 安藤潤人²⁾, 野間春生²⁾, 柳田康幸³⁾

Naoki MORITA, Mitsuhiro ANDO, Haruo NOMA, and Yasuyuki YANAGIDA

- 1) 名城大学大学院 理工学研究科 (〒468-8502 愛知県名古屋市天白区 1-501, 232426038@ccmailg.meijo-u.ac.jp)
- 2) 立命館大学 情報理工学部情報理工学科 (〒567-8570 大阪府茨木市岩倉町 2-150, anmitsu@fc.ritsumeimei.ac.jp, hanoma@fc.ritsumeimei.ac.jp)
- 3) 名城大学 情報工学部 (〒468-8502 愛知県名古屋市天白区 1-501, yanagida@meijo-u.ac.jp)

概要: 香りの時空間的な局所提示を目的としてクラスタ型デジタル空気砲 (CDA) の研究開発を行っている。過去の研究では、柔軟素材を用いた偏向ノズルを導入することで、小さな機械的変形のみで渦輪の射出方向を制御し、顔認識システムと組み合わせることで対象者の鼻を自動追尾して香りを届けるシステムを構築した。本研究では渦輪の命中率向上のため、渦輪の射出方向を正確に測定する手法を提案する。

キーワード: 香りプロジェクタ, 渦輪, 偏向ノズル, 嗅覚

1. はじめに

バーチャルリアリティ (VR) における香り提示技術は、香り成分を生成する香り発生技術と、生成した香りをユーザの嗅覚まで搬送する香り搬送技術に大別される[1]。筆者らは、香り搬送技術の一つである渦輪方式を採用した香りプロジェクタの研究を行っている。香りプロジェクタは空気砲内部に香料を付加した空気を充填し、押し出すことで生成される渦輪を対象者に当てることにより、時間的および空間的に局所的な香り提示を可能としている。

特に、園田らが提案したクラスタ型デジタル空気砲 (CDA) [2]は、多数の小型空気射出孔を用いて圧縮空気を射出し、一つの渦輪を生成することを特徴としている。この方式は、電磁弁を用いて射出孔を個別に制御するため、渦輪の射出パラメータを柔軟に調整可能である。

香りプロジェクタにおいて対象ユーザが自由に移動する環境で精度高く渦輪を提示するには、渦輪の進行方向を正確に制御し、対象者の鼻に渦輪を当てることが求められる。従来の空気砲において渦輪の射出方向を制御する方法としては、射出ヘッドを回転させる方式があったが、圧縮空気を通すチューブの硬さから CDA に適さないという課題があった。この問題に対して、筆者らは柔軟素材を用いた偏向ノズルを提案し、射出ヘッド自体の変形により渦輪の進行方向を制御可能であることを示した[3]。またサーボモータを用いて偏向ノズルの動作を自動化し、さらにカメラによる顔認識を導入して、ユーザの鼻位置に向けてピン

ポイントで渦輪を射出可能なシステムを構築した[4]。このシステムでは顔の方向と、実際に射出される渦輪の方向のずれが問題となった。チューブを変形させるため直接的に方向を制御できないためである。

このずれを補正するには、渦輪の通過位置を定量的に計測し、制御系へフィードバックする必要がある。従来はフォグマシンで渦輪を可視化し、スクリーン上の衝突位置を目視で記録していたが、主観に依存するため十分な精度と再現性が得られない。背景指向シュリーレン法[5]により空気流を可視化する手法もあるが、射出から数秒後の渦輪では温度・密度勾配が小さくコントラストが得にくい。また煙可視化をカメラで計測する場合も、スクリーン衝突時に煙が拡散して位置特定が難しい。

本研究では、渦輪がスクリーンとして配置した紙製短冊列に衝突した際に生じる微小な振動を Web カメラで取得し、画像処理により検出することで渦輪の通過位置を定量的に推定する計測手法を提案する。紙片は軽量で空気抵抗が大きく、渦輪の空気流を受け止めることができる。背景指向シュリーレン法や煙による可視化と比較して低コストで計測を実現できる。さらに、高速度カメラや特殊照明を必要とせず、市販のウェブカメラと一般的なコンピュータのみでリアルタイム処理が可能である。本手法により取得した通過位置情報を渦輪射出制御系にフィードバックすることで、香りプロジェクタの自動キャリブレーションを実現しうることを示す。

2. 実験装置

2.1 48 チャンネル空気砲

本実験で使用する CDA は 48 チャンネル CDA である。電磁弁と射出孔が 1 対 1 に対応するため、射出孔から出る空気量のばらつきが少なく安定して渦輪を生成できるという特徴がある。CDA はエアコンプレッサ（コガネイ DPP-AYAD-P）、空気タンク、制御回路、電磁弁（コガネイ YM16F01）、ノズルからなる。PC より射出指令を受け取ると電磁弁が開放され、空気が射出される仕組みとなっている。外観を図 1 に示す。

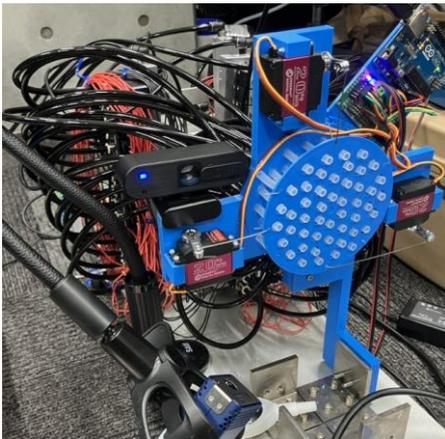


図 1: 実験で用いる CDA の外観

2.2 偏向ノズル

シリコンチューブ製ノズルの構造は、複数のチューブを前後のプレートで挟み込んだ構成である。各シリコンチューブは内径 4 mm、外径 6 mm であり、48 チャンネルの電磁弁からそれぞれ接続されている。チューブは前後 2 枚の硬質プレートに挟まれ、後方のプレートに接着されている。前方のプレートは穴が開けられておりチューブが入る。プレートがサーボモータによってずれることでチューブが変形し射出方向を制御する。変形の様子を図 2 に示す。

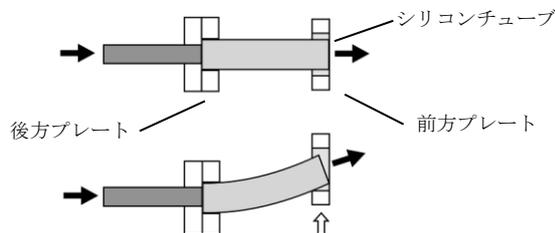


図 2 シリコンチューブ変形の様子

ノズルは中心部のプレート（青色）に多数のシリコンチューブの射出口が配列されている。周囲にはサーボモータ（赤色）が計 3 個配置され、それぞれピアノ線を介してプレートと連結している。サーボが動作することで前部プレートが後部プレートに対して水平方向に動きチューブが変形する。

2.3 スクリーン

本研究では、空気砲から射出される渦輪の着弾位置を可視化するため、紙片を用いた位置可視化スクリーンを試作した。外観を図 2 に示す。



図 2: 位置可視化スクリーンの外観

スクリーンは幅 58 cm、高さ 51 cm の木製フレーム内に鋼線を水平 12 段張り、各段に紙片を取り付けている。紙片は一般的なコピー用紙を縦 35 mm、横 5 mm に裁断し、端 5mm を折り返して糸を挟み込んだうえで糊付け固定した。横方向の紙片ピッチは 5 mm、縦方向の段間のピッチは 35 mm である。紙片の質量はいずれも小さく、渦輪衝突時に紙片が容易に揺動するため、1 m 離れた位置に設置した空気砲からの渦輪を検出できる。

スクリーン左上のフレーム部には視覚マーカー（AprilTag）を貼付し、撮影画像上でのスクリーン座標系をキャリブレーションできるようにした。渦輪発射時にはフル HD、60Hz で撮像可能なカメラをスクリーンに正対させ、背景との差分画像から揺動紙片領域を抽出する。得られた重心座標から渦輪が命中した位置を検出する。紙片は自然減衰により約 3 秒後に静止するため、連続発射においてもスクリーンの物理的リセットを要しない。

以上の構成により、シンプルな材料と低コストの画像処理のみで、渦輪の位置計測が可能な位置可視化スクリーンを実現した。

2.4 スクリーン上の紙片揺動の検出方法

本研究では、スクリーン前面に垂下した紙片列を Web カメラで撮影し、渦輪衝突による揺動位置を実時間で推定した。以下に Python で実装した画像処理手順を示す。

(1) 画像取得と参照座標系の構築

取得したフレームをグレースケール化したのち、視覚マーカーを検出してカメラ姿勢を推定した。

(2) 動体領域の抽出（背景差分）

背景モデルを逐次更新し、各フレームとの差分画像を生成して二値化し、紙片の揺動領域を抽出した。

(3) 揺動イベントの同定と重心計算

動体が検出された時点から 0.1 秒間にわたり画素の重心を積算平均し、紙片列の変位位置の中央を求めた。

(4) 視覚マーカー平面への射影

重心の画素座標をカメラ射線上に持ち上げ、視覚マーカー平面との交点を算出した後、視覚マーカー座標系へ逆変換して渦輪着弾位置を得た。

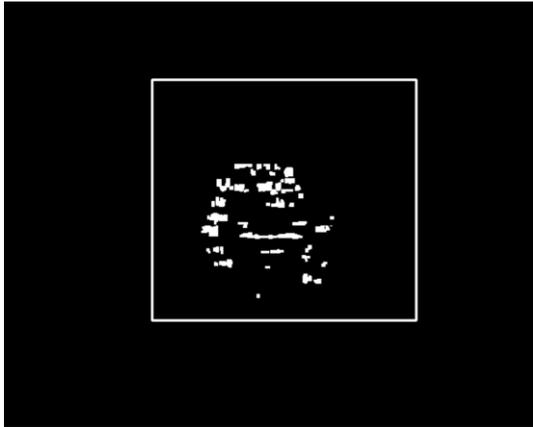


図 3: 背景差分による動体領域抽出の様子変化があった部分が白く表示されている

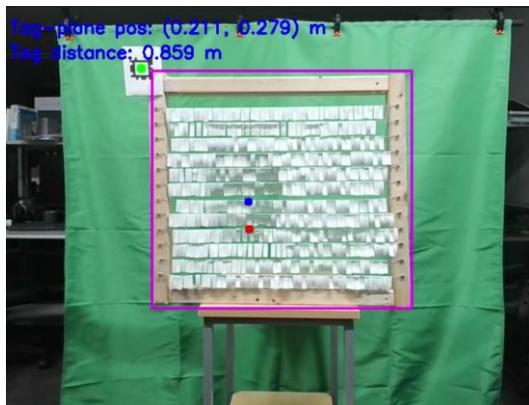


図 4: 動体の重心位置測定の様子
青色の点は検出位置を示す

図 3, 図 4 に Web カメラにより撮影された画像の処理の様子を示す。

以上の手順により、背景差分法を組み合わせることで、渦輪着弾位置を推定できること検証実験にて確認する。

3. 検証実験

偏向ノズルに取り付けた Web カメラによって得られる画像の中心とノズル射出軸をスクリーン中央（基準目標）に合わせ、カメラ、ノズル、スクリーンを水平器で同一水平面に調整した。ノズル先端から 1 m 離れたスクリーン中央を目標に渦輪を 30 回射出した。スクリーン像を用いて

渦輪を自動検出し、目標点に対する渦輪中心の水平・垂直ずれを算出して射出精度を評価した。

4. 実験結果

30 回の射出によって測定された座標を記録した。取得された座標はスクリーン左上にある視覚マーカーの中央を基準としている。そのため視覚マーカーと目標点の距離を測定し座標を目標基準に合わせた。分布を図 5 に示す。また検出された位置と目標位置のずれの平均値と標準偏差を算出して表 1 に示す。横軸はスクリーン中心を基準とし

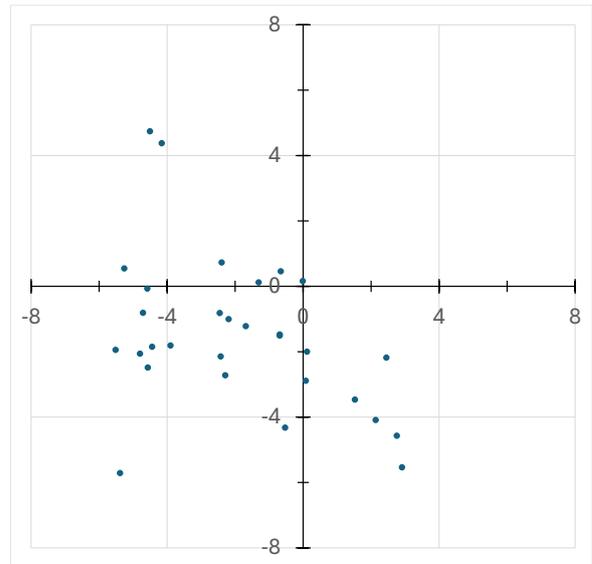


図 5: 渦輪通過位置の分布 (cm)

表 1: 渦輪通過位置の平均値
および標準偏差 (N=30)

左右 平均位置±標準偏差 cm	上下 平均位置±標準偏差 cm
-1.90 ± 2.63	-1.51 ± 2.37

た左右方向（右を正）、縦軸は上下方向（上を正）のずれを表す。なお、負の値はそれぞれ左方向および下方向への偏りを示す。

5. 考察・まとめ

本研究では、紙片スクリーンの揺動を Web カメラで捉え、背景差分で抽出した運動画素の重心をスクリーンに取り付けた AprilTag の座標系へ射影することで渦輪通過位置を算出した。30 試行すべてで通過位置を自動検出でき、検出率は 100%であった。得られた通過位置の平均ずれは左右方向 -1.90 cm, 上下方向 -1.51 cm, 標準偏差は左右 2.63 cm, 上下 2.37 cm であり（試行数 30）、目標からのずれはおおむね ±6 cm 以内に収まった。スクリーンの紙片ピッチ（水平 5 mm, 鉛直 35 mm）と撮像分解能を踏まえると、計測のばらつきは主に渦輪そのものの散逸・乱流に起因する実際のばらつきによるものと判断される。またこのばらつきは過去の研究[4]での値である 3.6cm, 2.7cm と

矛盾しない。

なお、本稿で用いた解析コードはリアルタイム処理が可能な構成であり、今後は自動キャリブレーションへそのまま組み込める見通しが得られた。本手法により、ノズル駆動指令と実際の通過位置の対応付けを短時間で収集できるため、今後は測定結果を用いたモデルフィッティングによるキャリブレーション、測定とノズル駆動を周期的に繰り返すオンラインフィードバック制御、紙片配置や撮像条件の最適化による上下方向分解能のさらなる向上に取り組むことで、より高精度な渦輪方向制御システムの実現を目指す。

参考文献

- [1] 中本孝道(編著): 嗅覚ディスプレイ-匂い・香りのマルチメディアツール-, フレグランスジャーナル社 (2008)
- [2] 園田祐馬, 大井翔, 松村耕平, 柳田康幸, 野間春生: クラスタ方式空気砲の設計と評価, 第 23 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, 34B-4 (2018)
- [3] 森田尚樹, 西川凌, 安藤潤人, 野間春生, 柳田康幸: クラスタ型デジタル空気砲における柔軟素材による偏向ノズルの検討, 日本バーチャルリアリティ学会研究報告, Vol. 29, No. CS-2, pp. 13-18 (2024)
- [4] 森田尚樹, 安藤潤人, 野間春生, 柳田康幸: クラスタ型デジタル空気砲における偏向ノズルの自動化, 日本バーチャルリアリティ学会研究報告, Vol. 30, No. CS-2, pp. 7-11 (2025)
- [5] H. Richard, M. Raffel: Principle and applications of the background oriented schlieren (BOS) method, Measurement Science and Technology, Vol. 12, No. 9, pp. 1576-1585 (2001)