



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構築と安定化

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@ccmail.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.ritsumeiji.ac.jp, hanoma@fc.ritsumeiji.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行う手段として, クラスタ型デジタル空気砲 (CDA) の研究開発を行っている. 従来, 渦輪の射出方向を制御するには CDA の射出ヘッド全体を回転させる必要があったが, ノズルを柔軟な素材で製作し変形可能な偏向ノズルにより, CDA 全体を回転させることなく小さな機械的変形で方向制御が可能になった. 本研究では偏向ノズルの構造的な改善を行うとともに, 射出空気の前頭が進行方向に対して直角となるよう電磁弁開放タイミングの個別制御を行い, 渦輪の進行方向の偏向範囲に与える影響を検証した.

キーワード: 香りプロジェクト, 偏向ノズル, 嗅覚

1. はじめに

バーチャルリアリティにおける香り提示の技術は, 香り成分を所望の濃度で生成する香り発生技術と, 生成した香りを人間の嗅覚まで搬送する香り搬送技術に大別される[1]. その中でも我々は香り搬送技術に着目した研究開発を行っている. 匂いを提示するためのデバイスは嗅覚ディスプレイと呼ばれ, 様々な手法が提案されている. 搬送技術には, 香料格納タンク内に空気を送り空間に香料を拡散させる拡散方式[2], ユーザに装着されたデバイスからチューブで鼻先へ匂いを搬送する装着方式[3], 空気砲から射出される渦輪に香りを搭載し搬送する渦輪方式[4]などの方法がある.

特に我々は, 渦輪を利用した搬送技術である香りプロジェクトについての研究を行っている. 香りプロジェクトは, 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で, 局所的な香り提示を行う. これによりユーザが装置を装着する必要がなく, 時間的・空間的に局所的な香り提示を可能にしている.

香りプロジェクトに利用可能な新しい方式の空気砲として園田らが提案したクラスタ方式空気砲 (CDA) [5]は, 板面に複数設けた小型の空気射出孔を組み合わせることで空気を射出し, 1つの渦輪を生成する. 圧縮空気と電磁弁を用いて空気の射出を行うことで, 機械的な構造を変更するこ

となく, 渦輪のパラメータを変更することを可能とした. これはフェーズドアレイレーダなどのアレイ型デバイスの構造に類似しており, いわばデジタルな空気砲といえる.

香りプロジェクトによる香り提示は空間的な局所性を有するため, 対象ユーザに香りを提示するには渦輪の進行方向制御が必要である. CDA における渦輪の進行方向を制御するには, 従来 CDA の射出ヘッド全体を回転させる必要があったが, 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で渦輪進行方向を制御できることを示した[6]. 先行研究で確認できた最大の角度は 30 度であった. 制限された要因として考えられたのが, プレーットの穴からチューブが脱落するため偏向量を大きく取れないという問題である.

そこで本研究では第一に, ノズル構造の改良により射出ヘッド変形時のチューブ脱落を抑制し, 制御範囲の拡大を図った. 第二の目的はタイミング制御の効果を検証である. 前回はタイミング制御を行っておらず, 全体の射出孔から同時に射出していた. その条件でも方向制御は可能であったが, CDA の射出ヘッド全体を回転させた場合と同様の効果を得るためには, 射出空気の前頭が進行方向に対して直角となるよう, タイミング制御を行うことが望ましいと考えられる. ノズル角を偏向させると, 渦輪の進行方向から見て, 遠い射出孔と近い射出孔が生まれる. 例えば上方に偏向する場合では下側に配置されたノズルは距離が

遠くなるため、タイミング制御を実施しない場合では射出空気先端が遅れる。本研究では、渦輪射出方向に応じて射出孔ごとに射出タイミングを変化させ、CDAを構成するすべての射出孔から射出される空気先端位置が進行方向に対して直角に並ぶようにする。このタイミング制御を使用し偏向させ、渦輪の生成を補助し、偏向ノズルの制御範囲を拡大できるか検証を行った。

2. 実験方法

2.1 実験装置

本実験で使用するCDAは48チャンネルCDAで、電磁弁通過後に流路分岐を行わず、1つの射出孔に対して1つの電磁弁を用いて制御している。電磁弁と射出孔が1対1に対応するため、個々の射出孔から出る空気量とタイミングを個別に制御でき、射出孔から出る空気量のばらつきが少ないため、安定して渦輪を生成できる。システムはエアークンプレッサ（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。エアークンプレッサは空気タンクに圧縮空気を送る。電磁弁は空気タンクとノズルの間に位置し、制御回路からの指令で開放される。制御回路はPCからタイミング制御の角度情報と射出指令を受け取る。電磁弁が開放されると空気タンクからノズルに圧縮空気が送られ、空気が射出される仕組みとなっている。電磁弁とノズルをつなぐチューブの長さは400mmで内径4mm、外径6mmである。外観を図1に示す。

偏向ノズルを柔軟素材の一種であるTPUを用いて製作した。TPUとは熱可塑性ポリウレタンのことで、熱溶解積層方式の3Dプリンタを用いた成形ができる。TPU製ノズルは48本のパイプ状のチューブが2枚のプレートに挟まっている構造を持つ。1本のチューブは内径4mm、外径5.6mm、全長25mmである。チューブはプレートの穴に差し込まれ保持され、前後から硬質な2枚のプレートで挟み込む。実験において偏向させるために、左右の耳部分についてねじと蝶ナットを手動で使って締めこむことで前後プレートを上下にずらす構造である。前後のプレート間距

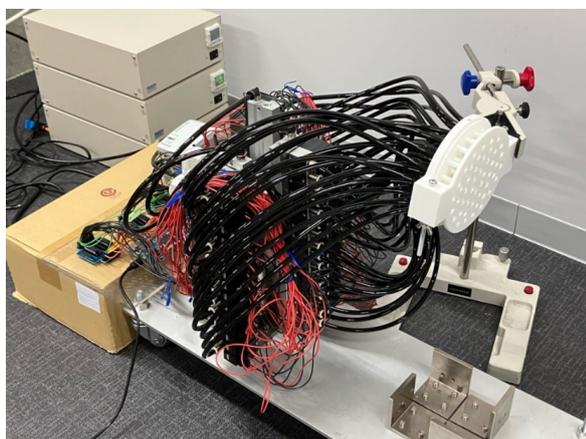


図 1: 実験で使用するCDAの外観

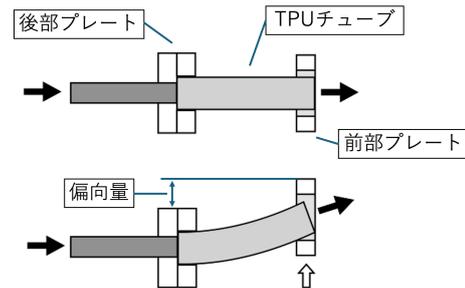


図 2: チューブの変形による射出方向の変化

離は15mmである。一つの射出孔を横から見た断面図を図2に示す。

2.2 実験手順

はじめにタイミング制御におけるノズルごとの射出時刻の計算方法を述べる。実験では渦輪を上方向に偏向させるため、射出時刻はノズル板面で最も上部に位置する射出孔のタイミングに対し、各射出孔がどれだけ早く射出するかによって規定される。計算式を式1に示す。射出時刻 T_n は最も上部の射出孔から何秒早く射出するかを表し、 L_n は最端の射出孔から下側へずれる距離である。 θ はタイミング制御におけるノズルの傾きを定義する量で、角度で表される。この値を以下制御角とする。 V は圧縮空気の流速である。この時の値の関係を図3に示す。

$$T_n = \frac{L_n \cos \theta}{V} \quad (1)$$

ここで流速は風速計を用いて測定を行った。一つの小ノズルを10秒間開放し、流速を測定した。使用した風速計の範囲は最大で20m/sで、圧力を0.2MPaに設定した場合は測定範囲を超えてしまう。圧力を2倍にすると流速は $\sqrt{2}$ 倍になるため[7]、0.1MPaでの流速16.3m/sから、 $16.3 \times \sqrt{2}$ より23m/sとした。制御角を30度に設定した場合、最も早く射出するノズルと最も遅く射出するノズルはおおよそ4msの時間差がある。

次に実験装置全体の配置について説明する。偏向ノズル

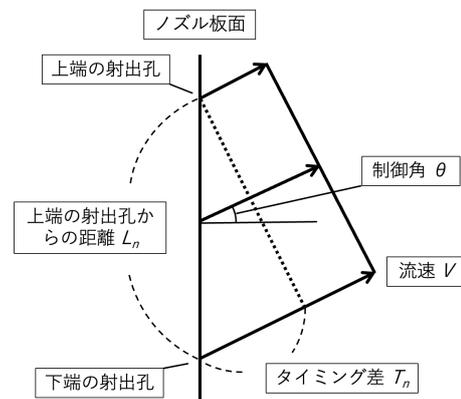


図 3: 実験装置の配置図

の板面が床面に対して水平を向き、偏向する方向が鉛直上向きになるように設置した。偏向ノズルの角度を設定し、ノズルの板面から 1 m 先で渦輪が通過する高さを計測する。床面からノズル中央までの高さは 30.0 cm であった。実験装置の配置を図 4 に示す。渦輪を可視化するため、フオグマシンで霧を発生させノズル付近に滞留させたのち空気を射出する。圧縮空気の圧力は 0.2 MPa であり、電磁弁の開放指令時間は 60 ms である。

前後のプレートをずらすことで間接的にノズルを傾ける。そのためノズルの角度は直接指定して制御することができない。したがって図 2 下側のように前後のプレートをずらす量を偏向量と定義した。偏向させる角度の大きさは前部プレートと後部プレートのずれ量を偏向量とし、射出角度を設定した。これは設定する偏向量は 0 mm から 10 mm の間で 2 mm 刻みである。推定ノズル角はプレート間の距離と偏向量によって求める。

ある偏向量に対してタイミング制御を行う場合、適切な角度と速度のパラメータが不明である、したがって制御角度はタイミング制御を行わない条件に加え、ノズルの角度とその前後 5 度を設定し合計 4 条件とした。基準となるノズルの角度はプレート間の距離 (15 mm) と偏向量によって算出し、式 2 で表される。

$$\text{基準制御角} = \tan^{-1} \frac{\text{偏向量}}{\text{プレート間の距離}} \quad (2)$$

偏向量に関する 6 条件と偏向量が 0 より大きい場合でタイミング制御を行う 4 条件からなる合計 21 条件で検証した。偏向量 0 mm ではタイミング制御を行わなかった。一つの条件に対して 20 回の試行を実施した。

3. 実験結果

実験結果から得られる通過高さ、そこから計算される標準偏差、渦輪進行角度、生成率を表 1 の(a)から(f)に示す。条件の項目は偏向量と制御角を示している。はじめの数値は偏向量で、後ろの記号は制御角の条件である。A は偏向を行なっておらず、C が制御角をノズル角に揃えた条件である。B、D はその角度の前後 5 度の条件である。表中で

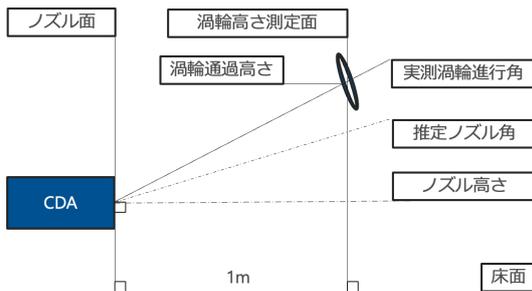


図 4: 実験装置の配置図

表 1: 実験結果

(a): 偏向量 0mm

高さ (cm)	標準偏差 (cm)	渦輪角度 (度)	生成率 (%)
1.0	3.9	0.6	100

(b): 偏向量 2mm

条件	2-A	2-B	2-C	2-D
制御角 θ (度)	0	2.6	7.6	12.6
高さ平均(cm)	7.1	5.8	8.2	4.7
標準偏差(cm)	3.8	3.1	4.4	4.9
渦輪角度(度)	4.0	3.3	4.7	2.7
生成率(%)	100	95	95	100

(c): 偏向量 4mm

条件	4-A	4-B	4-C	4-D
制御角 θ (度)	0	9.9	14.9	19.9
高さ平均(cm)	20.3	23.9	17.7	20.9
標準偏差(cm)	3.3	2.9	4.1	3.5
渦輪角度(度)	11.5	13.4	10.1	11.8
生成率(%)	85	90	95	95

(d): 偏向量 6mm

条件	6-A	6-B	6-C	6-D
制御角 θ (度)	0	16.8	21.8	26.8
高さ平均(cm)	41.3	38.4	34.8	36.4
標準偏差(cm)	4.3	5.2	3.0	3.4
渦輪角度(度)	22.4	21.0	19.2	20.0
生成率(%)	90	95	95	95

(e): 偏向量 8mm

条件	8-A	8-B	8-C	8-D
制御角 θ (度)	0	23.1	28.1	33.1
高さ平均(cm)	58.3	55.9	55.4	59.8
標準偏差(cm)	8.3	6.6	6.0	8.3
渦輪角度(度)	30.3	29.2	29.0	30.9
生成率(%)	75	85	90	70

(f): 偏向量 10mm

条件	10-A	10-B	10-C	10-D
制御角 θ (度)	0	28.7	33.7	38.7
高さ平均(cm)	-	82.5	74.0	77.5
標準偏差(cm)	-	14.0	4.2	3.5
渦輪角度(度)	-	39.5	36.5	37.8
生成率(%)	0	20	10	10

の高さ平均は、ノズル高さに対する渦輪の通過高さの平均である。制御角とは射出孔のタイミングを求める式1での、ノズル角度のパラメータである。渦輪角度は実際に渦輪が進行した渦輪の角度である。生成率とは渦輪が正しく生成できた割合である。(a)から(f)まで設定した偏向量毎に表に記した。(a)の偏向量0mmではタイミング制御を行っていないため一行で表されている。(b)から(f)の偏向させている場合には、タイミング制御を行い、制御角の条件ごとに各列で通過高さや標準偏差等の結果が示されている。

偏向量0mmでは渦輪の進行角は0.6度であった。そのため偏向させていない状態ではおおそノズルの向きに対して直進している。偏向量8mmで渦輪進行角は約31度であった。偏向量10mmでは生成率が悪化し、特にタイミング制御なしでは渦輪が生成されなかった。タイミング制御ありでは渦輪は20回のうち2回から4回生成できた。偏向量2mmから8mmではタイミング制御を行うと、いずれかの制御角の条件でタイミング制御を行わない場合と比較して標準偏差が小さくなっている。

4. 考察

タイミング制御を行わない場合に、最大の角度は30.3度となり、先行研究の30度と比較して、ノズルの改善による効果は見られなかった。

タイミング制御ありでは偏向量2mmから8mmにおいて標準偏差が減少していることから安定性が向上したと見られる。ただし偏向量4mmなど、安定性が向上するタイミング制御角がノズル角と一致するとは限らず、パラメータが最適であるとは言えない。これはノズルの変形によりチューブの抵抗の変化と、それに伴う流速の変化が原因として考えられる。偏向量10mmではタイミング制御ありの条件で数回渦輪が生成できた。香りプロジェクトとして実用的な渦輪生成率ではないが、偏向ノズルは40度付近まで渦輪の進行方向を制御しうる可能性が示された。

5. 今後の課題

今後の課題として40度付近まで渦輪の進行方向を変化

させた場合の生成率の向上とタイミング制御が渦輪進行方向の安定化するパラメータに関する検討がある。

6. まとめ

本研究では柔軟素材による偏向ノズルを持つCDAにおいて、偏向ノズルの改善とタイミング制御の導入によって偏向範囲を向上できるか検証を行った。その結果、ノズルの構造の修正による角度の向上は確認できなかった。また、渦輪生成率は低いものの、タイミング制御を用いることで40度付近まで渦輪の進行方向を制御しうる。さらにタイミング制御によって偏向させる場合の進行方向の安定性を向上させる可能性が示された。

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] 重野寛, 本田新九郎, 大澤隆治, 永野豊, 岡田謙一, 松下温: 仮想空間における風と香りの表現手法—仮想空間システム Friend Park, 情報処理学会論文誌, Vol. 42, No. 7, pp. 1922–31 (2001)
- [3] T. Yamada, S. Yokoyama, T. Tanikawa, K. Hirota, and M. Hirose, Wearable Olfactory Display: Using Odor in Outdoor Environment, IEEE VR 2006, pp. 199–206 (2006)
- [4] 柳田康幸: 渦輪を利用した局所的香り提示技術の現状と課題, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 19, No. 1, pp. 29–36 (2014)
- [5] 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)
- [6] 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)
- [7] 豊倉富太郎, 亀本喬司: 流体力学, 実教出版, p274-276 (2024)