



# 対向噴流を用いた非接触型力覚提示装置の開発

## DEVELOPMENT OF NONCONTACT - TYPE HAPTIC DEVICE USING COUNTERJETS

内山敬太<sup>1)</sup>, 矢野博明<sup>2)</sup>, 岩田洋夫<sup>2)</sup>

Keita UCHIYAMA, Hiroaki YANO, and Hiroo IWATA

1) 筑波大学 大学院システム情報工学研究科 (〒305-8573 茨城県つくば市天王台 1-1-1,  
k\_uchiyama@vrlab.esys.tsukuba.ac.jp)

2) 筑波大学 システム情報系 (〒305-8573 茨城県つくば市天王台 1-1-1, yano@iit.tsukuba.ac.jp, iwata@kz.tsukuba.ac.jp)

**概要:** 従来の噴流を用いた指先への力覚提示ではバーチャル物体を想定する方向のみから噴流を当てるため、指先が移動しやすくバーチャル物体の形状提示は難しい。本研究では指腹に対向する爪側からも噴流を当てることによって、指位置を安定させたまま力覚提示を可能とする方式を提案する。本稿では 1 自由度のプロトタイプシステムを開発し対向噴流に対するユーザーの知覚実験を通して提案手法の有用性を検証した。

**キーワード:** 非接触, 力覚提示装置, 噴流, 対向噴流

### 1. はじめに

近年、ユーザーに触力覚を提示するハプティックインターフェースの研究が盛んに行われている。その中で、反力提示に伴う反作用力を支持する接地点を持たない非接触型のハプティックインターフェースは、装置を装着する必要がないため装置の機械的拘束による動作の制約がなく、実世界同様の状態での力覚提示が可能となる。現在の研究で指先に刺激を提示する非接触型のハプティックインターフェースは出力が低いため触覚に関する装置が多く、力覚に関する装置は見受けられない。指先に刺激を提示する非接触型のハプティックインターフェースとして、超音波の焦点を作製し触覚を提示する手法[1]、輪状の圧縮空気を用いて触覚を提示する手法[2]や空気噴流に振動を付与し触覚と力覚を提示する手法[3]が提案されている。超音波を用いる手法は正確な位置に素早く触覚を提示することができるが、提示力が弱く力覚を提示することができない。また、空気噴流を用いる手法では、飛んでくるボールのような撃力を指先に提示することが可能である。一方で、バーチャルな机や壁など、ユーザから接触しない限り反力を提示しない物体を提示する場合、指先に噴流を当てると、指がはじかれてバーチャル物体表面にとどまることが困難という課題がある。また、噴流を用いた道具媒介型の非接触型ハプティックインターフェースとして、風圧を利用した力覚提示装置 [4]が挙げられる。この装置では、ユーザは送風装置から風を受け、

力を伝える柄杓状のデバイスを持ち、デバイスの凹部に風を噴射されることで力覚を提示する。このシステムは柄杓状のデバイスを用いることでノズルからの風圧を効率的に集めることができる。一方で、皮膚に直接力覚を提示することができず、装置を把持する必要があるため、自然な力覚提示とは言えない。また、柄杓状のデバイスに大きな力覚を提示する場合、風圧によってデバイスが弾かれることが考えられる。

これらの課題に対して、手のひら側からの噴流に加えて対向噴流を用いて手の甲側からも噴流を照射することで指位置を安定させながら、様々なバーチャル物体からの力覚提示を可能とする手法が考えられる。特に爪がある指の背と爪のない指腹では空気圧の閾値・弁別閾が異なることが予想され、提示圧力を制御することで指先の位置の安定性と指腹での知覚し易さの両立が期待できる。

そこで本研究では、3 次元空間で指先に対して空気噴流を対向照射させるシステムを提案する (図 1(a))。従来の非接触型力覚提示装置よりも高圧の空気噴流を用いることが可能で、より強い力ベクトルの提示が可能と考えられる。本稿では、3 次元空間での対向噴流を用いた力覚提示装置開発の実現を目指し、2 つの噴流のノズルを対向させて空気の流量を制御することで、2 つのノズル間での 1 次元力覚提示装置を開発した (図 1(b))。本装置を用いて対向噴流に対する人間の知覚特性を明らかにする実験を行い、本装置の有用性を検証した。

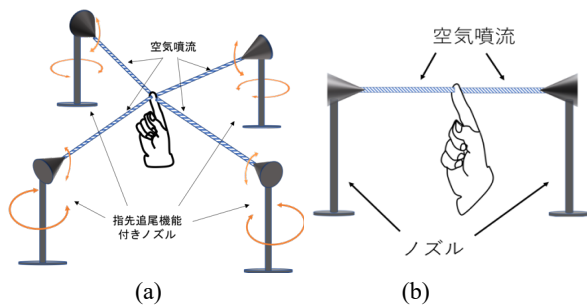


図1: システム概略図. (a)3次元. (b)1次元.

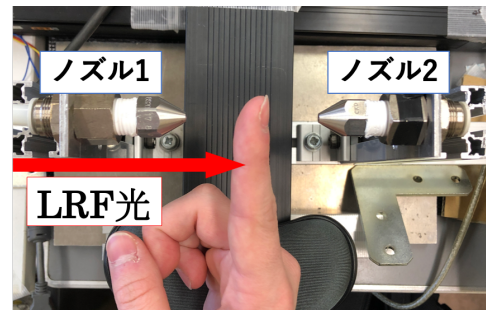


図2: 作製した装置

## 2. システム構成

本システムは直線上に並べたノズルの間に指を置き、2つのノズルの流量をそれぞれ制御することによって任意の力を指先に提示することを目標とする。システムは、指位置計測システム、噴流提示システムの2つによって実現した。なお、制御ボードは筑波大学岩田・矢野研究室で開発されたデバイスアート・ツールキットを使用した。この制御ボードを用いてPCとUSB接続することで電磁弁の制御やレーザレンジファインダ(以下、LRF)のデータ収集を行った。

### 2.1 指位置計測システム

指位置計測システムとしてレ LRF (KEYENCE ヘッド: LK-G500 コントローラ: LK-G3000) を用いた。LRF はインタラクティブシステムを作製する際にその指位置の検出に使用した。本研究では、LRF の最小出力単位は 0.01 mm とした。これは人が指の位置を制御可能な分解能に比べ、十分な精度であると考えられる。指先は常にノズルを結んだ直線上に伸ばし手全体を直線と平行に動かすこととし、指位置は図 2 のようにノズルに干渉しないうち指先に最も近い 1 点を計測した。

### 2.2 噴流提示システム

作製した噴流提示システムの概要を図 3 に示す。空気噴流の生成、制御は空気ポンプ(最大充填 14.7 MPa)、圧力調整器(ヤマト産業株式会社 MSR-1B-R-11NTF02-2204)、チューブ(8 mm, CKD F1508-20-W)、ノズル(CKD BN-8S20P)、電磁弁(CKD FCM-0100AI-H80AN3B)を用いた。また、チューブと各機器の間はワンタッチ継手(CKD GES8-8)を用いて接続した。噴流の拡散半径はノズル径[mm]の噴出距離[cm]倍に広がることから、噴出距離 5 cm に対し指先に拡散した噴流が収まるようにノズル径は 2 mm とした。ポンプから出力された圧縮空気は圧力調整器を用いて電磁弁の動作範囲である 0.3 MPa 以下に調整し、電磁弁のみを用いて流量を制御した。噴出流を対向させるため、アルミフレームを用いてノズルの噴出口が一直線状になるように固定した。ノズル間の距離は電磁弁が安定して出力できる最小流量に対して、力が安定して出力できる距離を考慮し、50 mm とした。以下、左側のノズルをノズル 1、右側のノズルをノズル 2 とし、ノズル 1 が指腹側、ノズル 2 が爪側に噴流を提示した。

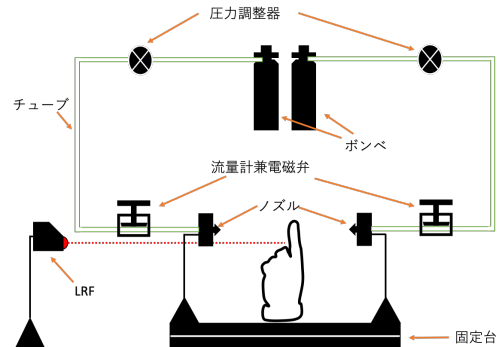


図3: 力覚提示システム概要

## 3. 爪側噴流による指腹側の知覚特性の検証

対向噴流を指先に提示したシステムは筆者が知る限り前例がなく、知覚に関する特性も明らかにされていない。また、指先に任意の力を提示する際に爪側と指腹側の提示力をそれぞれ独立に制御可能なため、最適パラメータを一意に決めることができない。そこで、本稿では、指腹側の流量を固定し、爪側流量を複数提示することで、爪側の流量に対する指腹側の力の知覚特性を検証した。これを明らかにすることで、指腹側の力の知覚に影響のない爪側の流量範囲が明らかとなり、システムを構成する際に爪側の噴流を決定する 1 つの指標とすることができる。

### 3.1 実験方法

手首をアームレストに乗せ安定させた状態にさせ、ノズル間の中心(ノズル 1、ノズル 2 と指の中心が 25mm)の位置に示指を伸ばさせた。本システムが安定して噴流を提示することが可能な流量範囲は 40~80 L/min であったため、指腹側流量は本研究では 70 L/min に設定し、爪側流量を 0, 40, 50, 60, 70, 80 L/min の 6 種類とした。実験参加者には順序効果を考慮し、爪側流量の異なる 2 つの組み合わせを 30 回提示した。実験参加者には、2 つ目の噴流に比べて 1 つ目の噴流は“指腹側”にかかる力の知覚を-3 (非常に小さい) ~ 3 (非常に大きい) で回答させた。実験参加者は 22~24 歳の右利きの成人男性 6 名で、利き手である右手の示指に対して行った。なお実験中、実験参加者にはヘッドホンを着用させ、ホワイトノイズを流し聴覚の情報を遮断した。実験終了後、6 名に対して行った実験結果をシェフェの一対比較法(浦の変法)を用

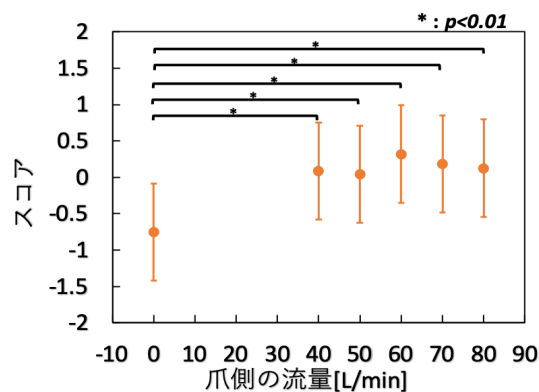
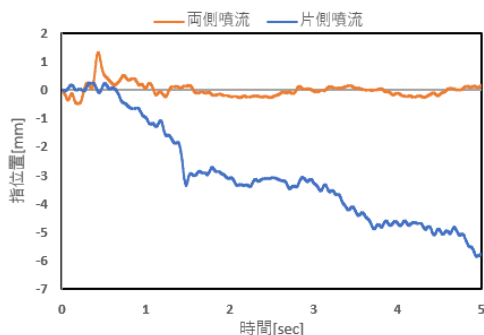


図 4: 一対比較法結果

図 5: 指位置軌跡の典型的なデータ  
指腹側流量 70L/min, 爪側流量 60L/min

いて評価した。

### 3.2 実験結果

指腹にかかる力の知覚量を一対比較法を用いて検定した結果のグラフを図 4 に示す。エラーバーは 99%信頼区間を表している。分散分析の結果、爪側の噴流による指腹側の力の主観的強度について主効果が認められた [ $F(5,62)=4.05, p<0.01$ ]。また、0 L/min と 40, 50, 60, 70, 80 L/min の間で有意差 ( $p<0.01$ ) が認められた。また、噴出時の指先移動を確認するため、噴流を提示した時刻からの指先軌跡の典型的なデータを図 5 に示す。

### 3.3 考察

図 4 より、片側噴流 (0 L/min) に比べて両側噴流は主観的強度が強くなったと言える。これは、爪側から噴流が提示されることで、指の裏側が押さえられて指に垂直に噴流が当たるようになったため力が強くなったように知覚されたことが考えられる。一方、両側に噴流を提示した場合に爪側の流量による知覚に有意差は無かった。また、図 5 で示すように片側噴流に比べて、両側噴流を提示した際に指位置は 1 mm 程度しか動いておらず、両側噴流提示による指位置の移動はほとんど見られない。したがって本節で用いた指腹側の流量で力覚提示を行う場合、爪側の噴流の大きさは 40~80 L/min のどの値を用いても指腹側の知覚には大きな影響は見られないことが示唆された。また、本節では指腹側の流量は 70 L/min に固定し

た。今後、指腹側の流量を複数変更し、指腹側の力の知覚特性を検証する必要があると考えられる。

## 4. 評価実験

本節では、ノズル間にバーチャルな壁を想定し、指位置を計測することで指先が壁に触れた際に噴流を用いてバーチャル物体を提示するインタラクティブなシステムを作製した。指腹側のみの片側噴流と、腹側と爪側の両側噴流のそれぞれで壁を提示し、指位置の安定性を比較することで本装置の有用性を検証した。

### 4.1 提示力の制御

本研究では、指腹側に噴流を提示するノズル 1 の先端を基準点とし、基準点から 22.5mm の地点にバーチャルな壁を提示した(以下、壁提示位置)。指先のスタート地点はノズル 2 の先端付近である、ノズル 1 から指腹までがおおよそ 40mm の地点とした。反力の提示アルゴリズムにはペナルティ法を用いた。提示する流量を  $F[\text{L/min}]$ 、壁提示位置を  $X_{obj}[\text{mm}]$ 、指先位置を  $X_{fin}[\text{mm}]$  とすると、 $X_{fin}$  は壁に触れるまでは  $X_{obj} < X_{fin}$  であることに注意すると、任意のゲイン  $K$  を用いて、

$$F = K(X_{obj} - X_{fin}) \quad (1)$$

と表すことができる。本研究では、想定する指位置の変位が最大で 8mm 程度、本装置が提示可能な流量範囲が最大 80 L/min を考慮し、 $K$  を 10 とした。なお、爪側の流量は 4 章で扱った流量の中央値である 60 L/min とした。

### 4.2 実験方法

実験参加者にはノズル 2 の先端からノズル 1 側へ、指先をゆっくり移動させた。指先が移動中もノズル間の中心を維持できるようにするため、手首を沿わせてノズル 1 側へ移動可能な台を用意した。その後バーチャルな壁を感じた位置を回答し、その場所で 10 秒間静止させることで指位置の安定性を検証した。試行は実験参加者に対して、片側噴流、両側噴流をそれぞれ 3 回ずつ行なった。実験参加者は 22~24 歳の成人男性 6 名で、利き手である右手の示指に対して行った。実験中、実験参加者にはヘッドホンを着用させ、ホワイトノイズを流し聴覚の情報を遮断した。

### 4.3 実験結果

図 6 に片側噴流、両側噴流それぞれの条件での指位置移動軌跡の典型的な時系列データを示す。図 7 にバーチャルな壁を感じたと回答した位置に 10 秒間静止させた際の二乗平均平方根誤差の全被験者の平均値を示す。図 7 のエラーバーは標準偏差である。また、バーチャルな壁を感じたと回答した位置から 10 秒間の指位置の変位の二乗平均平方根誤差について、対応あり  $t$  検定を行ったところ、片側噴流と両側噴流に有意差が認められた ( $t(5) = 2.996, p < 0.03$ )。

### 4.4 考察

図 6 のように指位置の移動軌跡について、片側噴流に

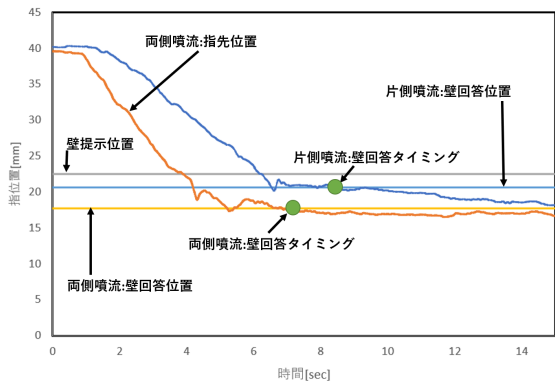


図 6: 指位置の移動軌跡の典型的データ

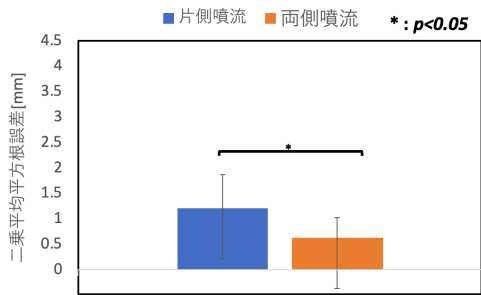


図 7: 壁を感じたと回答した位置から  
10 秒間の平均変位

比べ、両側噴流の方がバーチャルな壁を感じた位置からの変位は小さくなった。これに関して、実験参加者が壁を感じたと回答した位置からの安定性を検証した。壁を感じたと回答した時刻から 10 秒間の指位置の変位について、片側噴流と両側噴流で対応あり t 検定を行った。その結果、片側噴流と両側噴流に有意差が見られた。したがって、図 7 より片側噴流に比べ、両側噴流の方が壁を感じた位置から変位が小さくなった言うことが可能であり、本実験より、指を一定位置に安定させることが可能となったと言える。また、5 人の実験参加者で、片側噴流に比べ両側噴流の方が超過量が大きくなった。これに関して、コメントで「爪側から噴流を当てられることで後ろからも押されている感覚がある」という回答があり、爪側噴流の値が大きすぎたため押される感覚を提示したことが考えられる。また、本実験では、爪側の流量は指位置によらず一定の値としていた。このことから、爪側噴流を指位置に応じて変化するインタラクティブな値にすることで、爪側を押されたと感じない適切な力を提示できると考えられる。

5. まとめ

本研究では、対向噴流を用いた非接触型力覚提示装置のプロトタイプとして、対向噴流を用いて 1 次元力覚提示を可能とするシステムの開発を行った。

第 3 章では、対向噴流における基礎的な知覚特性とし

て、爪側噴流の指腹側の力の知覚への影響を検証した。これにより、片側噴流と両側噴流では、知覚に差があるが、両側噴流で、爪側の流量による知覚の有意差は見られないことが明らかとなった。本研究では、指腹側の流量は一定値としていたため、その他の流量に対しても同様の実験を行い指腹側の力の知覚を検証する必要がある。

第 4 章では、従来の指腹側のみ指先に噴流を提示するシステムに比べ、爪側にも噴流を噴出することで指位置を安定させたまま力覚提示が可能となることを示した。また、今回の実験では一定としていた爪側の流量を指位置の応じて値を変化させるよう設定することで、爪側が支えられているが押されてはいないと知覚できるような爪側の流量の検証が必要であると考えられる。

6. 今後の展望

今後の課題として、現在 1 次元で行っている力覚提示を 2 次元に拡張することが考えられる。2 次元に拡張する際には、対向噴流を提示する装置を 2 組直交するように配置し、ノズルが 2 次元平面内の指先を追従することが可能なシステムを構成する必要がある。また、2 次元平面での力覚提示が可能となった場合、さらに 3 次元空間に拡張し、指先を追従可能な 8 個のノズルを用いて 3 次元力覚提示を行うことが考えられる。2 次元に拡張すると指腹や爪だけでなく、側面にも力覚を提示することになる。したがって、新たな装置の開発とともに指腹と爪だけでなく、側面の知覚特性も検証が必要である。

今後の展望として、本手法を用いてリハビリを行う装置の開発が考えられる。指先の動作提示や動作補助を装置の装着や機械的拘束なく行えることで、リハビリ患者に対して違和感のない動作提示が行うことができると考えられる。また、噴出する空気の温度を制御することで、温度感覚の提示を可能にすることが考えられる。その他、本研究で得た知見をもとに提示部位を手足などに拡張することでまだ明らかではない全身への力覚提示の応用が考えられる。

参考文献

[1] 星貴之, 岩本貴之, 篠田裕之” 日本バーチャルリアリティ学会第 13 回大会論文集, pp. 568-569, 2008.

[2] R. S. P. G. Israr, "AIREAL: Interactive Tactile Experiences in Free Air," ACM Transactions on Graphics, vol. 32, p. 134, 2013.

[3] 酒匂大輝, 山崎陽一, 井村誠孝, “空気噴流を用いた力覚と触覚の同時提示手法の提案,” 情報処理学会インタラクティブ 2018, pp. 736-737, 2018.

[4] 鈴木由里子, 小林稔, 石橋聡, “無拘束なインタフェースを目指した風圧による力覚提示方式,” 情報処理学会論文誌シンポジウム論文集, pp. 117-124, 2002