

# 空気噴出を利用した力覚による情報伝達インターフェースの開発 Development of force feedback device for hands using air-jet mechanism

精密工学専攻 15D4100053C 保井 拓巳  
Takumi Yasui

## 1. 緒言

近年、情報技術の進歩によりサイバー空間が実空間へ大きな影響を与えている。サイバー空間から実空間への情報伝達インターフェースには映像や音、振動、力覚など様々な方法がある。映像と音による伝達は提示できる情報の量が膨大かつ簡易的なため広く普及している<sup>(1)-(3)</sup>。また、振動による伝達は小型軽量化が進み様々な場面で応用が期待される<sup>(4)-(6)</sup>。一方、力覚による情報伝達は触覚部分より大きいアクチュエータや制御システムが必要なため装置が複雑化し、適応される例が少ない。

しかし、力覚による情報伝達は、視覚・聴覚・触覚と異なり大きさと向きを持つベクトル量であるため、映像や音、振動による伝達と比べてより効果的なサイバー空間から実空間への情報伝達インターフェースの実現が期待できると考える。そこで力覚による情報伝達を対象として考える。

既存の力覚による情報伝達する装置には据え置き型<sup>(7)(8)</sup>と外骨格型<sup>(9)(10)</sup>に分類できる。しかしこれらの方法はそれぞれ問題がある。据え置き型は使用者の移動が制限されるという問題がある。一方、外骨格型は人の関節可動域に制限がかかることや提示力覚の反力支持部に違和感が生じるといった問題がある。

そこでこれらの問題を解決するため、著者らは空気噴出を用いた装着型の力覚提示装置を提案した<sup>(11)</sup>。先行研究で提案された装着型力覚提示装置を Fig. 1 に示す。本装置はノズルの空気噴出を用いることにより、反力支持を必要とせず、指への弾性体の力覚提示に成功している。

しかし、先行研究で開発された装置は仮想物体の提示のみを目的としており、誘導や運動教示といった情報伝達インターフェースとしての応用は検討されていない。そこで、本研究では、先行研究で開発された力覚提示手法の情報伝達インターフェースへの応用を行う。

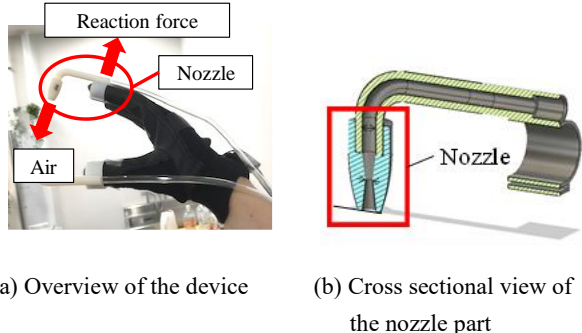


Fig. 1 Equipment in previous research

## 2. 空気噴出による力覚提示

### 2.1 コンセプト

本研究のコンセプトとして全方位に力覚提示可能なデバイスの開発を考える。Fig. 2 に提案する力覚提示手法の情報インターフェースとしての応用例を示す。このように道の誘導や運動教示などのインターフェース化を実現するためには、身体部位に対して任意の方向に力を与える必要がある。また、ノズルによる空気噴出が不要なモーメントを発生せず、身体部位に力を与えることが望ましい。

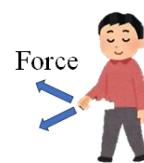


Fig. 2 Example of application as an interface

### 2.2 提示システム

手先への力覚提示装置のイメージ図を Fig. 3 に示す。Fig. 3 のように手の重心を原点とする直角座標系に合わせて6つのノズルを配置する。これより、モーメントの発生を抑えつつ全方向に力を発生できる。このとき噴出した空気が手に直接当たらないように図のような向きにノズルの軸を設計することを考える。そして Fig. 3 のように手に装着し空気チューブを腕の方向に付けることを想定する。

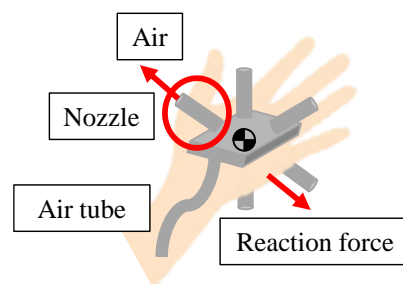


Fig. 3 image of proposed device

## 3. 提案デバイス

### 3.1 提案デバイスの概要

提案デバイスの寸法を Fig. 4 に示す。本デバイスは3Dプリンタで設計されたノズルを先端に搭載し、手の平と手の甲に装置を取り付けノズルに空気を送ることにより手先に力を与える。また、この提案デバイスは手首側でチューブと接続できるようになっている。

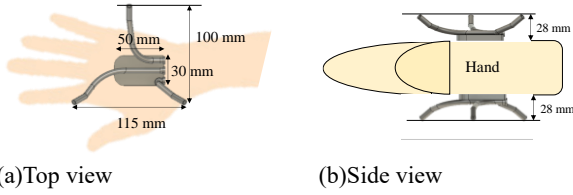


Fig. 4 appearance of the prototype

### 3.2 基礎特性

提案デバイスの駆動にあたり、ノズル単体の基礎特性評価が必要である。基礎特性とは特にノズルへの印加圧力と発生力との関係であり、デバイスの駆動制御に必要である。

#### 3.2.1 実験条件・実験方法

提案デバイスのノズルとその寸法を Fig. 5 に示す。ノズルの寸法は先行研究での結果[11]から Fig. 5(a)の寸法にした。また実験を行う際は、発生力を測定するために Fig. 5(b)のようにノズルと使用する力覚センサを接続できるように形状を変更している。その際、ノズルとセンサの軸を一致させるように形状変更した。このノズルを用いて Fig. 6 に示す実験環境でノズルの基礎特性実験を行った。コンプレッサの圧力は 0.87 MPa、空気チューブは内径 4 mm、各チューブ長さは図中に示した。

次に実験方法について説明する。まず、Fig. 6 のように比例電空弁、圧力計、流量計、力センサを接続し、入力を圧力[MPa]、出力を圧力[MPa]、流量[l/min]、力[N]と設定する。計測方法は 0.05 MPa ごとに圧力を印加した時の圧力、流量、力を計測する。その後圧力と力の関係及び流量と力の関係を調べる。

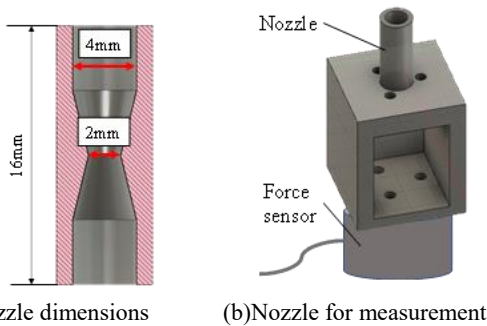


Fig. 5 Nozzle used in the experiment

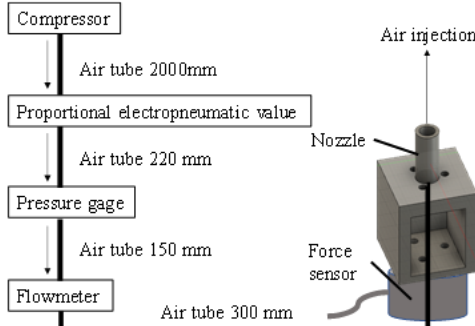


Fig. 6 Basic characteristics Experimental environment

#### 3.2.2 実験結果・考察

Fig. 7(a)に圧力と力の大きさの関係、Fig. 7(b)に流量と力の大きさの関係を示す。Fig. 6 より圧力と力は比例することを

確認した。また、力を  $F$ [N]印加圧力を  $P$ [MPa]とおくとその時の関係式は(1)となった。今後この(1)式を元に 2 章で提案した力覚提示デバイスに適用する。また、Fig. 7 より流量も同様に比例することを確認した。そして 0.65 MPa で最大となり以降圧力を上げて流量が増加しなかったことから、本実験環境においては最大で約 1 N 程度の力を発生できることを確認した。

$$F=1.5546P \quad (1)$$

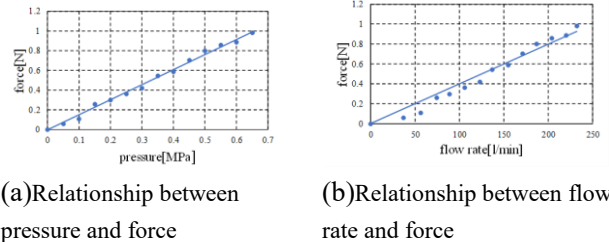


Fig. 7 Basic characteristics of nozzles

## 4. 発生力確認実験

### 4.1 提案デバイス発生力測定実験

提案デバイスが任意の方向に発生力を発揮できるかの確認を行った。まず、定量的に発生力を確認する。

#### 4.1.1 実験条件・実験方法

実験環境を Fig. 8 に示す。コンプレッサの圧力 0.80 MPa とし、空気チューブは内径 4 mm、各チューブ長さは図中に示した。次に実験方法について説明する。まず入力を力[N]、出力を力[N]とし(1)式を用いて 1 N の力を出し、センサの x 軸、y 軸、z 軸それぞれの力の大きさを測定する。次にそのセンサ値から合成した力の大きさと方向を算出する。最後に、その算出した力と幾何学的に各ノズルから出力される値を比較する。

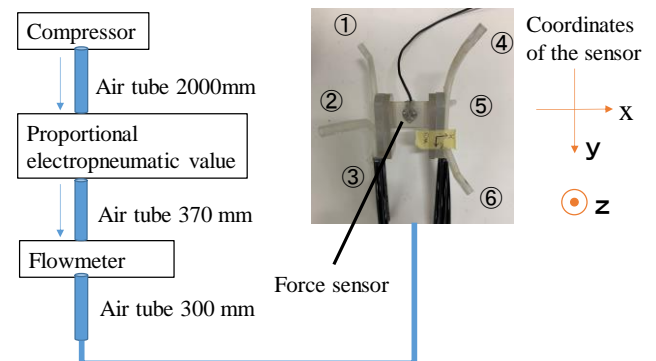


Fig. 8 Experimental environment of measuring generating force

#### 4.1.2 実験結果・考察

各ノズルの力の大きさの表を table 1 に力の方向の表を table 2 に示す。まず力の大きさについて、x 軸方向の力:  $F_x$ , y 軸方向の力:  $F_y$ , z 軸方向の力:  $F_z$ , x 軸 y 軸 z 軸の力を一つの力に合成した力を  $F_a$  とおくと、まず設計値と出力値の力の正負がすべて一致していることから提案する装置の発生力の方向は設計値通りに出力されていると考える。また各ノズルの  $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$  における設計値との力の差はすべて

0.2N 以下であることを確認した。また各座標の力を合成した力  $F_a$  の力の差は最大で nozzle 5 の 0.21 N となった。

次に力の方向について、z 軸周りの角度を  $\theta_z$ 、xy 平面からの角度を  $\theta_{xy}$  とおくと、各ノズルの設計値はノズルとセンサ軸の角度を示し、出力値は先程の x, y, z 軸の力の大きさから表のような結果となった。出力値を比較すると各ノズルすべて 10°以下であることを確認し、最大で nozzle 6 の 9.5°であることを確認した。今後このずれが力覚提示にどれほどの影響を与えるのかを主観評価実験により検証する。

table 1 Force of each nozzle

	Nozzle1			Nozzle2			Nozzle3		
	Input	Output	Difference	Input	Output	Difference	Input	Output	Difference
$F_x[N]$	0.5	0.4	0.1	0.61	0.54	0.07	0.61	0.7	-0.09
$F_y[N]$	0	0.05	-0.05	0.61	0.75	-0.14	-0.61	-0.8	0.19
$F_z[N]$	-0.86	-0.81	-0.05	0.5	0.66	-0.16	0.5	0.45	0.05
$F_a[N]$	1	0.91	0.09	1	1.13	-0.13	1	1.15	-0.15
	Nozzle4			Nozzle5			Nozzle6		
	Input	Output	Difference	Input	Output	Difference	Input	Output	Difference
$F_x[N]$	-0.5	-0.51	0.01	-0.61	-0.75	0.14	-0.61	-0.45	-0.16
$F_y[N]$	0	-0.01	0.01	-0.61	-0.73	0.12	0.61	0.63	-0.02
$F_z[N]$	0.87	0.89	-0.02	-0.5	-0.63	0.13	-0.5	-0.39	-0.11
$F_a[N]$	1	1.02	-0.02	1	1.21	-0.21	1	0.87	0.13

table 2 Direction of each nozzle

	Nozzle1			Nozzle2			Nozzle3		
	Input	Output	Difference	Input	Output	Difference	Input	Output	Difference
$\theta_z[deg]$	0	7.1	-7.1	45	54.2	-9.2	-45	-48.8	3.8
$\theta_{xy}[deg]$	60	63.5	-3.5	30	35.5	-5.5	30	22.9	7.1
	Nozzle4			Nozzle5			Nozzle6		
	Input	Output	Difference	Input	Output	Difference	Input	Output	Difference
$\theta_z[deg]$	180	178.9	1.1	-135	-135.2	0.2	135	125.5	9.5
$\theta_{xy}[deg]$	-60	-60.2	0.2	-30	-31	1	-30	-26.7	-3.3

## 4.2 提案デバイス主観評価実験

次に 4.1 節で測定した提案デバイスの発生力の大きさと方向が十分に手先に感じられるかを空気噴出しているノズルを回答してもらう主観評価実験により確認する。

### 4.2.1 実験条件・実験方法

実験環境を Fig. 9 に示す。空気チューブは内径 4 mm、コンプレッサの圧力 0.7 MPa、印加圧力は基礎特性実験より 0.70 MPa で 1 N の力を加えるものとする。次に実験方法について説明する。被験者は右手に提案デバイスを装着し、Fig. 10 のような四方を囲まれた空間内に右手を入れ、手先が見えないようにして、どのノズルから空気噴出されているかを答えてもらう。各試行は、ランダムな順序で各ノズルそれぞれ 3 回で計 18 回の空気噴出を行う。被験者は各ノズルに振られた番号を 1 回の空気噴出ごとに答え、実験は、次の 2 パターンの印加時間を設定した。①5 秒間の空気噴出②1 秒間隔で各 1 秒間の空気噴出。また被験者は 3 名とし、それぞれの正答率を確認する。

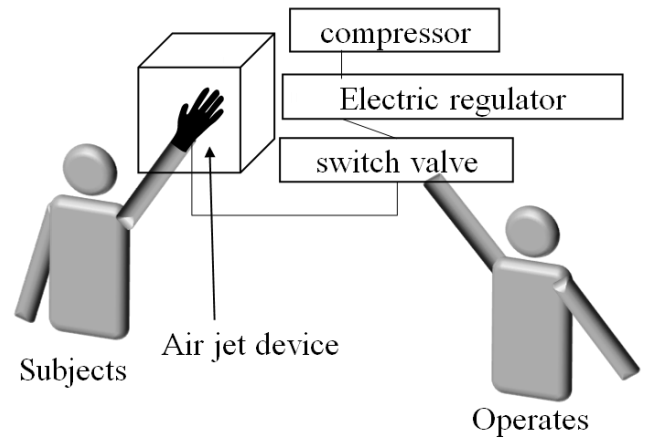


Fig. 9 Environment of subjective evaluation experiments

### 4.2.2 実験結果・考察

①5 秒間の空気噴出を table 3、②1 秒間隔で各 1 秒間の空気噴出実験結果を table 4 に示す。table 3、4 からすべての被験者及びどちらのパターンにおいても正答率 100 %であった。よって 4.1 節の角度のずれは影響しないことを確認した。

table 3 5-second air-applied time

①	subjects1	subjects2	subjects3
Correct answer rate[%]	100	100	100

table 4 1-second air-applied time is 3times

②	subjects1	subjects2	subjects3
Correct answer rate[%]	100	100	100

## 5. 誘導実験

### 5.1 誘導実験の概要

開発したデバイスの評価として最も適切な評価実験は 3 次元平面内において手先を任意の位置に誘導することであるが、初期段階として 2 次元平面内で提案デバイスの誘導実験を行い、手先の誘導が可能かを確認する。

平面内を誘導するため、手先の角度を固定し装置の出力方向を 4 方向に指定する。次にカメラの画像から手先のマーカ一点を計測し現在位置を取得、目標点までの角度を算出、角度が最も近い方向のノズルを出力する。最後に目標点に達すると音が鳴り空気噴出が止まる。また、マーカ一点が検出できない場合やカメラの範囲外に出てしまった場合には空気噴出を止める。

次に実験条件について考える。上記の方法で実験するにあたりカメラの画角(誘導する距離)、目標点の位置を決める。カメラの画角は腕が問題なく動かせる範囲内に設定し、目標点はスタート位置を中心として円形状に 8 か所設定する。

### 5.2 誘導実験

#### 5.2.1 実験条件・実験方法

実験環境を Fig. 10 に示す。まず提案デバイスを右手に装着し力を抜いた状態で手の向きは変えないでマーカを真

上にしてもらう。マーカーを中心に合わせたら空気噴出開始  
 ゴールしたら音が鳴り、一旦空気弁を閉じ中心に戻る。この  
 作業を円状の目標点8か所ランダムに一回ずつ行い、目標点  
 までの時間を確認する。また、被験者は5人とする。

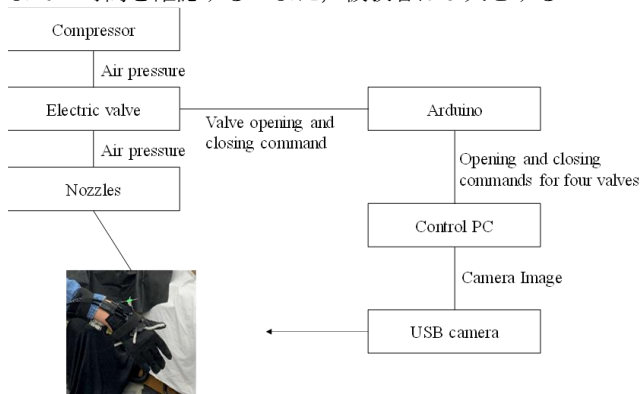


Fig. 10 Environment of induction experiments

### 5.2.2 実験結果・考察

手先の移動時間を table 5 に示す。まず前後左右方向の実験  
 について考察する。目標点の位置について、左右方向に誘導  
 するとき所要時間が少なく最短距離に近い軌道で誘導で  
 きていることを確認した。

次に前後上下方向の実験について考察する。目標点の位置  
 について、前後方向に誘導するとき所要時間が少なく最短  
 距離に近い軌道で誘導できていることを確認した。

table 5 Time in front, back, left, and right directions

Time[s]	Target point								
	a	b	c	d	e	f	g	h	
Subjects									
1	4.4	3.6	4.2	2.2	4.8	3	1.8	8	
2	3.2	3	4	2.4	4.2	9.6	4.2		
3	14.2	4.4	7.2	4.6	16.8	4.2	8.4	4.2	
4	2.4	4.4	4.8	2.8	4	2.4	2.4	3	
5	26.8	1.2	1.8	1.6	8.2	2.6	2.4	3	
Average	10.2	3.32	4.4	2.72	7.6	3.05	4.92	4.48	
Stdev	9.327807888	1.183892	1.72974	1.016661	4.844791	0.698212	3.36	1.84	

## 6. 結言

本論文では、空気噴出を利用した力覚による情報伝達イン  
 ターフェースの開発を行った。本装置を用いて発生力確認  
 実験、主観評価実験、誘導実験を行い、手先の誘導が可能で  
 あることを確認した。

## 参考文献

(1) R. Hamilton, "Coretet: A 21st Century Virtual Reality Musical Instrument for Solo and Networked Ensemble Performance," 2019 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR), Osaka, Japan, 2019, pp. 1305-1306, doi: 10.1109/VR.2019.8797825.

(2) F. Wang, H. Nagano, K. Kashino and T. Igarashi, "Visualizing Video Sounds With Sound Word Animation to Enrich User Experience," in IEEE Transactions on

Multimedia, vol. 19, no. 2, pp. 418-429, Feb. 2017, doi: 10.1109/TMM.2016.2613641.

(3) P. Chen, Y. Zhang, M. Tan, H. Xiao, D. Huang and C. Gan, "Generating Visually Aligned Sound From Videos," in IEEE Transactions on Image Processing, vol. 29, pp. 8292-8302, 2020, doi: 10.1109/TIP.2020.3009820.

(4) D. Weik et al., "Integrating Tactile Feedback in an Acetabular Reamer for Surgical VR-Training," 2019 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR), Osaka, Japan, 2019, pp. 1227-1228.

(5) S. Ohtsuka, H. Chiba, N. Sasaki and T. Harakawa, "Alternative vibration presentation methods for the two-point Body-Braille system," 2016 IEEE 5th Global Conference on Consumer Electronics, Kyoto, 2016, pp. 1-3, doi: 10.1109/GCCE.2016.7800451.

(6) N. Nishimura, D. Leonardis, M. Solazzi, A. Frisoli and H. Kajimoto, "Wearable encounter-type haptic device with 2-DoF motion and vibration for presentation of friction," 2014 IEEE Haptics Symposium (HAPTICS), Houston, TX, 2014, pp. 303-306, doi: 10.1109/HAPTICS.2014.6775472.

(7) M. Okui, M. Kobayashi, Y. Yamada and T. Nakamura, "Delta-Type 4-DOF Force-Feedback Device Composed of Pneumatic Artificial Muscles and Magnetorheological Clutch and its Application to Lid Opening", 2019 Smart Mater. Struct. <https://doi.org/10.1088/1361-665X/ab192a>, (2019.4)

(8) S. Kim, S. Hasegawa, Y. Koike and M. Sato, "Tension based 7-DOF force feedback device: SPIDAR-G," Proceedings IEEE Virtual Reality 2002, Orlando, FL, USA, 2002, pp. 283-284, doi: 10.1109/VR.2002.996540.

(9) Y. Onozuka, M. Oba, M. Okui and T. Nakamura, "Rendering friction and viscosity using a wearable 4 degrees of freedom force feedback device with magnetorheological fluid clutches and pneumatic artificial muscles", Proceedings of the 45st Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON2019), Lisbon, Portugal, TC02-3 (2019.10)

(10) Koo et al., "Development of A Meal Assistive Exoskeleton made of Soft Materials for polymyositis patients," 2014 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Chicago, IL, 2014, pp. 542-547, doi: 10.1109/IROS.2014.6942612.

(11) M. Okui, T. Masuda, T. Tamura, Y. Onozuka and T. Nakamura, "Wearable Air-Jet Force Feedback Device without Exoskeletal Structure and Its Application to Elastic Ball Rendering," 2020 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM), Boston, MA, USA, 2020, pp. 276-281, doi: 10.1109/AIM43001.2020.9158981.