

令和 5 年 6 月 5 日現在

機関番号：12102

研究種目：挑戦的研究(萌芽)

研究期間：2018～2022

課題番号：18K19797

研究課題名(和文)対向空気流を用いた指先への3次元動作提示

研究課題名(英文)3D motion presentation for a fingertip using head-on air jet

研究代表者

矢野 博明(Yano, Hiroaki)

筑波大学・システム情報系・教授

研究者番号：80312825

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,900,000円

研究成果の概要(和文)：対向する空気噴流を指先に当てる方式を新たに提案した。まず、三次元空間中での指先位置の保持と、爪と皮膚とで力の感覚が異なることを利用して噴流の圧力を制御するだけで、指腹側で感じる圧力を制御することができることが明らかとなった。次に指腹に対して接線方向から噴流を当てると指腹が噴流によって変形することでより多くの噴流が指先に当たるようになること、さらには指腹に衝突した空気が指腹の法線方向に跳ね返り、結果として指先に法線方向に押し力が感じられること、噴流に沿って見えない線があるように感じられることがわかった。また対向ノズルを指の動きに合わせて移動させることで見えない平面を表現できる可能性が示唆された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

空気噴流を用いることで、空中で安定して指先位置を保持しつつ、力ベクトルを提示することが可能であることから、指先を動かす方向の指示や、透明な壁を触ったような感覚を提示することが可能となった。これによって、指先を誘導したり、逆に抵抗力を提示するなどして指の動作のリハビリテーションに用いたり、空気は無色透明であることから、例えば三次元立体映像提示装置にこの装置を取り付けることで、三次元表示されたコンピュータグラフィックスに素手で直接接触すると押し返されるような感覚を提示することも可能で、衛生的な操作環境を実現することもできる。

研究成果の概要(英文)：A new method of applying head-on air jets to the fingertip is proposed. First, it was found that the fingertip position can be maintained and the pressure felt at the fingertip can be controlled simply by controlling the pressure of the jets using the different force sensitivity between the fingernail and the skin. Next, it was found that when the jets are applied tangentially to the finger belly, the finger belly is deformed by the jets, causing more jets to hit the fingertip, and that the air hitting the finger belly bounces in the direction normal to the finger belly, resulting in the fingertip feeling a pushing force in the normal direction, as if there were an invisible line along the jets. Finally, it was suggested that a flat surface can be presented by moving the nozzles in accordance with the finger's movement.

研究分野：バーチャルリアリティ

キーワード：バーチャルリアリティ 力覚提示 空中非接触力覚提示 空気噴流

1. 研究開始当初の背景

バーチャルリアリティの分野においてバーチャル物体に手で触れた際に感じる重さや硬さ、形状を再現するために、手に反力を提示する装置(力覚提示装置)を用いて動作誘導する方式が提案されている。特にジャイロモーメントや非対称振動触覚による擬似力覚のような、ロボットなどで必要となる作用反作用のための地面との接地が不要な非接地機構での動作指示により動作や可動範囲に原理的に制限のない指示方式の研究が進んでいる。しかしながら、依然として装置を身につける必要があるため、機械摩擦や慣性の影響を受ける。装置を身につけずに非装着で力覚を提示する方法として、超音波スピーカアレイを使った方法があるが提示力が数グラム重で動作指示には十分とは言えない。また、空気噴流を用いる方法も考えられるが、噴流に当たりながらその場所を安定的に維持することは難しい。

2. 研究の目的

本研究では、非接触・非接地で指先に力覚提示する方式として、噴流単体ではなく、指先に対して対向する方向から噴流を当てることで、指先の位置を安定させつつ、力覚を知覚させる方式を提案し、本手法の適用範囲など装置開発に必要な要件を明らかにすることが目的である。

3. 研究の方法

対向噴流による非接触力覚提示装置を試作し、動作教示実現のための制御アルゴリズムや性能評価、心理物理学実験等を実施して提案手法の有効性や適用範囲を明らかにする。

4. 研究成果

本研究では、図1に示すように2つのノズルを対向させて、噴流を指先に当てることで指先位置を安定させつつ、指腹に当たる噴流の圧力を変更する。図1の構成に基づいて開発したノズル部分の写真を図2に示す。指の姿勢による実験がスムーズに行えるように、左右及び上下方向に空気噴流を噴出させるノズルを配置した。このノズルの向きは指先位置に応じてサーボモータによって変更できるようになっている。指先の位置計測は再帰性反射マーカを用いるモーションキャプチャシステム (OptiTrack V120:Trio)によってリアルタイム計測した(図2ではマーカ1個であるが最終的には複数個用いて指先の位置と姿勢を計測した。画像処理方式のハンドトラッキングセンサも試したがオクルージョンの問題で十分な精度を得ることができなかった)。図3に装置の構成図を示す。本システムは、ノズル方向制御システム、噴流提示システム、指位置計測システムの3つによって実現した。なお、制御ボードはデバイスアート・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接続することでノズルに取り付けたサーボモータの制御や電空レギュレータの制御を行った。噴流提示システムには、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)、2ミリ径のノズル(CKD BN-8S20P)を用いた。また、噴流の制御機器として電空レギュレータ(EVD-1900-108AN-C3L1-3)を使用した。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。ポンプから出力された圧縮空気は圧力調整

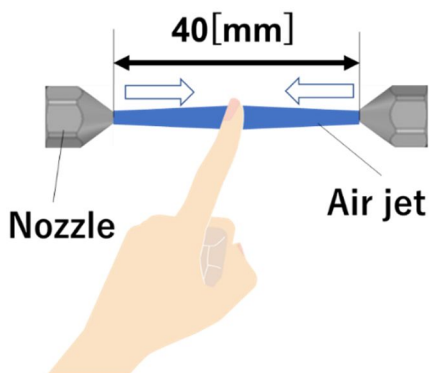


図1 対向噴流の概念図

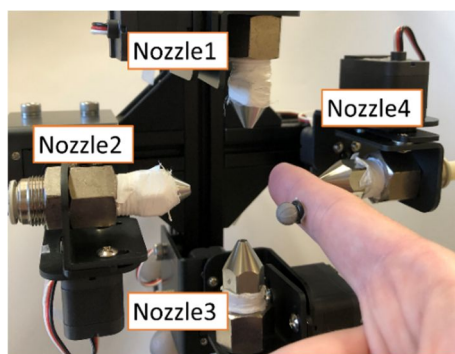


図2 対向ノズル方向制御システム

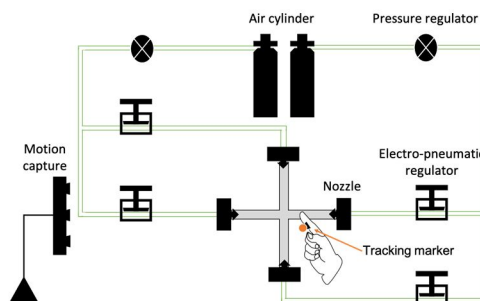


図3 試作装置構成図

器を用いて電空レギュレータの動作範囲である 0.8 [Mpa] 以下に調整し、電空レギュレータのみを用いて噴出圧力を制御した。実機による計測で噴流による安定した力覚提示が可能な最大圧は 500[kPa]、最小圧は 150 [kPa]であった。装置の性能評価としては、指先への力ベクトルとしては最大 1.5N、0[kPa]から最大圧までの電空レギュレータの応答はおよそ 0.2 [sec]以下であった。さらに、図 2 のシステムを図 4 に示す構成の 5 自由度のマニピュレータの先端に取り付けて、ユーザの手の動きに合わせて直径 30 [cm]ほどの可動範囲を持つシステムとして各種実験を行なった。

水平位置 0[mm]の位置に指先を留めさせる実験を行なった。指先水平 0 [mm]の対向噴流と片側噴流提示時の指先位置の変化の典型例を図 5 に示す。これより対向噴流を用いた場合、指先位置が安定して保持されることがわかった。また、上下、左右のノズルの圧力の組み合わせを変えた時の対向噴流同士の圧力差の知覚実験を行なったところ、ノズルでの圧力差が 150[kPa]以上であれば知覚可能であること、さらには指腹側と指の背(爪側)の圧力の組み合わせの場合、爪側の圧力に寄らず、指腹側の圧力変化を知覚できることがわかった。これは皮膚と比べて硬い爪部分での圧力知覚の閾値が大きく、相対的に指腹の圧力知覚がしやすいことが考えられ、この性質をうまく利用することで安定して力ベクトル提示が可能であることを示唆する結果と言える。

ところで、空気噴流のノズルを指腹正面に配置して、指腹に対して垂直に噴流を射出するのではなく、接線方向から射出して指腹に当たった空気が指腹法線方向に跳ね返り、その運動量変化によって、法線方向の力が指先に加わったような感覚を提示することが可能である(図 6 の右)。さらにはこの力覚提示方式はノズルを指腹側面に配置できることから、タッチパネルディスプレイと併用することも原理的には可能となる。さらに、指腹は空気噴流によって押されることで変形する(図 7)。それによって、剛体の指(図 6 左)より多くの空気が指腹に当たって大きな力が指先に加わることもわかった(図 8)。図 9 はバーチャルな壁を提示して壁に沿って指先を上下方向に移動させた時の噴流の種類ごとの移動軌跡の平均値をプロットしたものである。A と B は $x = 10$ [mm]の位置に壁を設定した時の様子で、指腹に法線方向から噴流を当てた場合を A、A に加えて爪側からも噴流を当てた場合が B である。統計的な有意差はなかったものの A よりも B の方がバーチャルな壁に近い位置に留まる傾向が見られた。一方の、C、D は接線方向から噴流を当てる方式であり、D はさらに爪側から噴流を当てた場合である。噴流の半径はおよそ 4[mm]で指先位置が 4[mm]付近で安定しており、D の方がより噴流の中心に近い位置で止まっていたことがわかる。また、Y 軸座標の絶対値が大きい部位では指先がノズルに近付いてより大きな法線方向力が働いたことが原因と考えられる。いずれにしても中央付近($y=0$ [mm]付近)では安定して位置を保持できることがわかった。

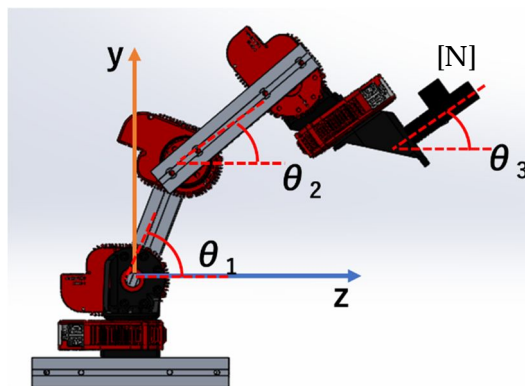


図 4 5 自由度マニピュレータ

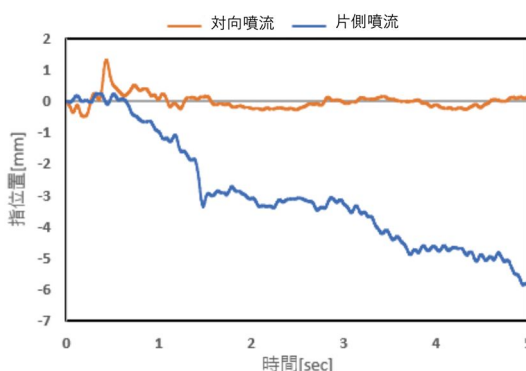


図 5 対向噴流及び片側噴流提示時の指先位置変化の典型例

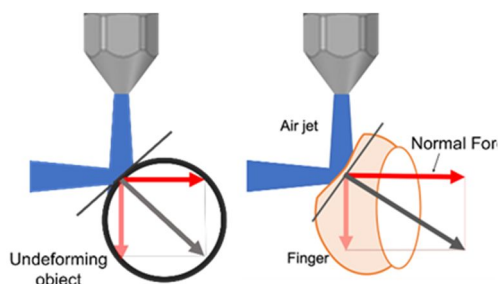


図 6 接線方向からの噴流提示による法線方向力ベクトル知覚の概念図

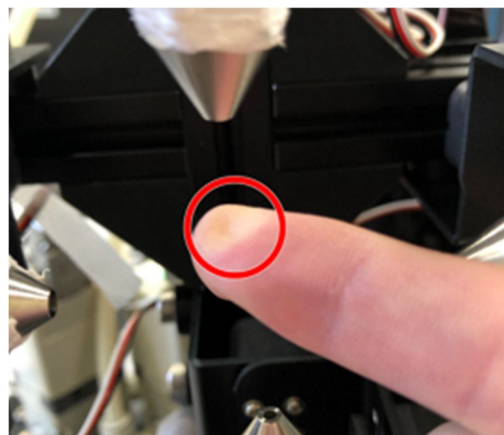


図 7 噴流提示による指先の変形

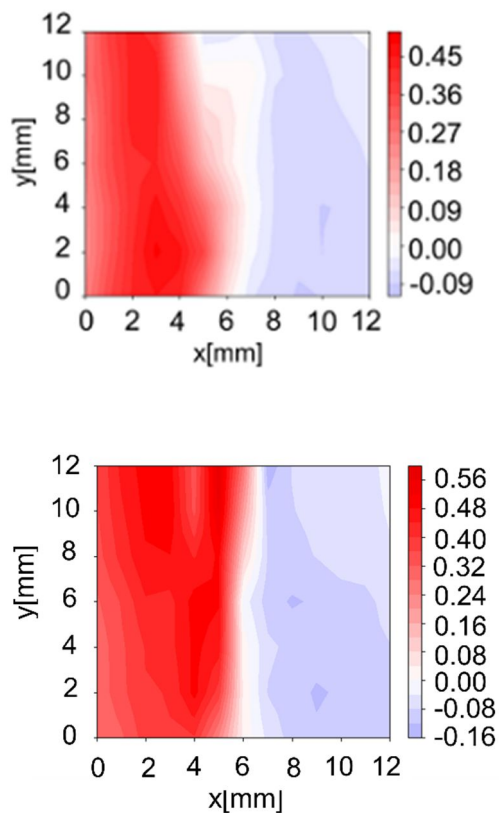


図8 変形しない円柱（上）と変形するゲルを巻いた円柱（下）に接線方向から噴流を当てた時の圧力分布

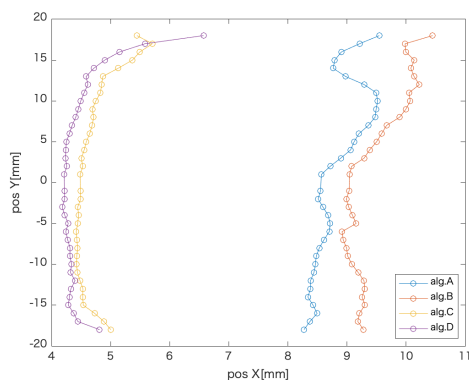


図9 指先の上下方向の移動軌跡（A 指腹噴流、B 対向噴流、C 接線方向噴流、D 接線方向噴流 + 爪側噴流）

接線方向の対向噴流は、法線方向の噴流のように点で押される感覚ではなく、見えない線に触っている感覚が得られる。そこで、これを指先の動きに合わせて動かすことで面を提示することができないか検証することとした。ただし、指先の動きに合わせてリアルタイムにノズル位置を1ミリ以下の精度で移動させることが困難であったことから、実験としては、図4に示したマニピュレータを用いて、対向ノズルを上下、前後、斜め（図10）方向に周期的に動かし、小指をマニピュレータに接触させることでノズルと手の相対位置が概ね一定になるように指先を移動させた。この時に接線方向の噴流の向きと垂直な方向にマニピュレータでノズル全体を動かすことで、指先の左右のずれは噴流によってカバーすることとした。実験の結果、提示面の法線と指腹の法線方向が平行に近いほど面と認識しやすく、その角度が垂直に近くなると面を横から押している（つまりは線を押している）感覚になりやすかった。また、マニピュレータ先端は正弦関数を用いて動かしたため、速度の符号が入れ替わる両端では指先と噴流の相対位置にずれが生じやすかった。この影響と思われるが何人かの実験参加者から摩擦のようなものを感じたとのコメントが得られた。これまでの力覚提示装置は指先位置を剛体の点として制御していたが、本研究を通して、変形する体積を持った柔軟物体として扱うことでより多彩な力覚提示実現の可能性でが示唆される結果が得られたと言える。

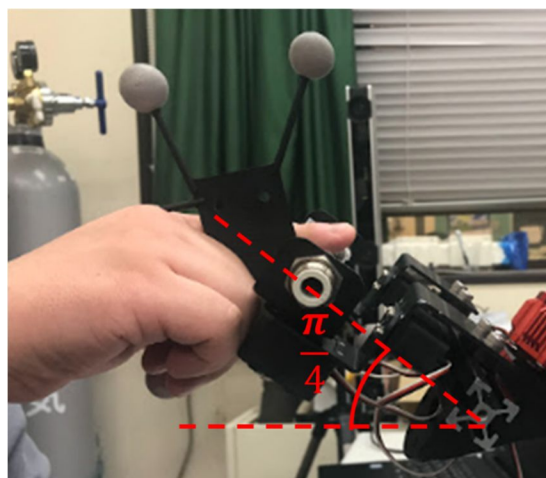


図10 指先移動実験

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 七枝佑哉, 矢野博明
2. 発表標題 指腹接線方向からの対向噴流を用いた指先への非接触法線力提示
3. 学会等名 電気学会2022年3月9日-2022年3月10日知覚情報研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 内山 敬太、矢野 博明、岩田 洋夫
2. 発表標題 対向噴流を用いた非接触型力覚提示装置の開発
3. 学会等名 第24回日本バーチャルリアリティ学会大会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

www.vrlab.esys.tsukuba.ac.jp http://intron.kz.tsukuba.ac.jp

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
連携研究者	京藤 敏達 (Kyotoh Harumichi) (80186345)	筑波大学・システム情報系・教授 (12102)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------