

# 空気圧アクチュエータを用いた全周囲圧力提示システム NaviChoker の開発

吉田匠吾<sup>†</sup> 謝浩然<sup>†</sup> 宮田一乗<sup>†</sup>

**概要**：近年，視聴覚情報の提示による生活支援技術が盛んに開発されているが，実世界において触覚情報による情報提示インタフェースの開発は挑戦的である．そこで，我々はウェアラブル技術を用いた触覚デバイスの開発を目指し，空気圧アクチュエータによる全周囲圧力提示システムを提案する．具体的には，空気圧アクチュエータを仕込んだチョーカーを首に装着し，全周囲からの圧力によってユーザに歩行方向を提示するシステムを開発する．開発したシステムを装着することで，ユーザに全周囲の歩行方向を提示できるだけでなく歩行開始や停止のタイミングも提示することができる．本稿では，デバイスの製作および評価実験を行い，プロトタイプの所感を示すとともに，今後の展開について述べる．

## 1. はじめに

仮想現実（Virtual Reality: 以下，VR）や拡張現実（Augmented Reality: 以下，AR）による仮想世界とのインタラクションにおいて，視覚による情報提示だけでなく，味覚[1]や触覚[2]など，あらゆる刺激を用いた情報提示の手法が盛んに研究されている．特に力覚や触覚による情報提示には，温度や圧力，振動，電気など様々な刺激の提示が可能であり，多方の分野で発展を遂げている[3, 4, 5, 6]．このように，あらゆる情報提示でユーザの体験を拡張させる技術は，エンタテインメントや教育，我々の生活などの多大な恩恵をもたらすと考えられる．

一方，力覚や触覚を提示するデバイスにおいて，人々の行動や生活を支援する研究が行われている．Sasaki らは，棒の両端に合計 8 つのプロペラを付け，空中での並進や回転方向の提示が可能な触覚デバイス LevioPole を開発した[7]．各プロペラで推進力を生成し，回転速度や方向を制御することで，液体のような滑らかな触覚から，剛体のような硬い触覚をユーザに提示することができる．LevioPole の応用例としてユーザへの歩行方向の提示があるが，デバイスそのもののサイズが大きいため，道路や建物内等における狭い場所での使用は考慮されていない．さらに両手でデバイスを握る必要があるため必要な時に手を使うことができず，実用性に欠ける．また Delazio らは，ジャケットの内側に空気圧アクチュエータを仕込み，ユーザに様々な圧力を提示する Force Jacket を提案した[8]．エアコンプレッサーとエアバキュームを用いてジャケットの内側に仕込んだエアバッグを膨らませることで，ボールを当てられた衝撃や蛇に巻かれた感覚などをユーザに提示することができる．しかし Force Jacket は，アクチュエータに空気を送り込むために大型のエアコンプレッサーを用いているため，部屋の中などの限られた空間でしか利用できない．



図 1 空気圧アクチュエータを用いた NaviChoker

そこで本研究では，空気圧アクチュエータを用いたチョーカーの製作を行う（図 1）．ポリエチレンで製作した 4 つのアクチュエータをチョーカーの内側に取り付け，膨らませることでユーザに触覚提示を行う．また，空気圧アクチュエータを複数個取り付けることで，装着者の首の全周囲に触覚を提示することが可能になる．本システムを用いて圧力を提示することで，ユーザは所定の方向に注意を払うことができる．また，アクチュエータの膨らみ方や膨らむ順番にバリエーションを持たせることで，障害物の接近やスマートデバイス等の通知，歩行の開始や停止のタイミング，さらには VR アプリケーションと連携する触覚提示デバイスなど，様々なシチュエーションに応用することが可能になる．加えて，画面表示や音声案内ではなく圧力のみでナビゲーションが可能になると，歩きスマホの防止や騒

<sup>†</sup> 北陸先端科学技術大学院大学

音下での利用も可能になる。他にも設計したアクチュエータは市販のチョーカーに取り付けるため、見た目違和感がなく新しくデバイスの操作を習得する必要もない。したがって、ファッションアイテムとしての利用が可能である。

本提案デバイスは様々な用途に使用が可能である。しかし、任意のアクチュエータを膨らまし、所定の方向に注意を喚起するという基本的な機能の有用性を検証するため、本論文では歩行方向の提示に着目する。また、開発したデバイスを用いて、デバイスの装着感や圧力の提示具合に関する評価実験を行った。デバイスのユーザビリティを確かめ、今後の展開について述べる。

## 2. 関連研究

本研究の関連研究として、空気圧による圧力提示や、首への触覚提示を行うデバイスの研究を挙げる。

### 2.1 空気圧による動作と触覚提示

Niiyamaらは、安価なプラスチックのシートから複数の空気圧アクチュエータを作成し、回転や屈折などの動きを再現する Sticky Actuator を提案しており、正方形や円形、リボン型などの自由形状のアクチュエータを自動作成する機器を開発した[9]。自由形状のアクチュエータを製作することで、折り鶴の羽ばたきやロボットの手足の動作などに応用しているが、人への触覚提示デバイスとしての機能は考慮されていない。Sonarらによる Interactive SPA Skin[10]では、複数の小型の空気圧アクチュエータを用いて、ユーザの腕に様々な触覚を提示しており、タッチやブラシ、物体の移動といった触覚をシミュレートしている。しかし、使用機材が多く、機器の構造も複雑であるため、ウェアラブルデバイスとしての使用はできない。

### 2.2 首周辺への触覚提示

熱刺激による触覚提示として、小野らによる研究がある[11]。首の周囲にペルチェ素子を用いた熱刺激デバイスを取り付け、HMDの映像と連動させることでVR体験における臨場感の向上を図っている。山崎らは、振動の振幅、位相、周波数を動的に変調可能な首かけ形状触覚装置を提案しており、触覚情報のみを用いて不可視彫像にたどり着かせる実験を行った[12]。しかし前者は、熱刺激を提示するためにはデバイスが首に密着している必要があり、その圧迫感がユーザに不快感を与える可能性がある。後者は、首の左右から提示される振動のみで距離や方向を把握し、不可視彫像を探し当てる実験しか行っておらず、VRアプリケーションとの連携や目的地への誘導等の応用はない。

そこで本研究では、空気圧アクチュエータを用いて首の全周囲に圧力を提示するデバイスの開発を行う。空気圧によりアクチュエータが膨らむ仕組みなので、チョーカーが首に密着することなく、全周囲に平等な圧力が提示可能である。本研究では、製作したプロトタイプの有用性を検証



図 2 製作した空気圧アクチュエータの動作

するため、歩行方向の提示に着目し、評価実験を行った。

## 3. NaviChoker

本提案デバイスでは、チョーカーの内側に取り付けられたアクチュエータを用いてユーザの首の全周囲に触覚を提示する。例えば、チョーカーの左側に取り付けられたアクチュエータが膨らむことでユーザの首の左側に圧力を提示することができるため、任意の方向にユーザの注意を向かせることができる。また、個別に動作させることや、1つのアクチュエータを連続的に動作させることもできるため、より多様な触覚をユーザに提示することができる。

### 3.1 空気圧アクチュエータ

本システムで使用する空気圧アクチュエータを図2に示す。アクチュエータに空気が送られ、膨らむことでユーザに触覚を提示することができる。製作したアクチュエータは、2.0×3.0cm 四方にカットされた 0.08mm 厚のポリエチレンフィルムを使用したアクチュエータ、および空気を送るためのシリコンチューブを使用している。なお本研究では、注射筒とシリコンチューブ、およびシリコンチューブ同士を繋ぐコネクタの形状の関係から、外径 3.0mm、内径 2.0mm と外径 6.0mm、内径 4.0mm のシリコンチューブを使用した。フィルムの密閉には、はんだごてを用いる方法を採用した[9]。

チューブの先端を折り曲げ、空気が抜けやすいよう処置を施したのち、チューブの側面に 1.0mm 四方の穴を開ける。同様に、アクチュエータの片面中央にも 1.0mm 四方の穴を開け、両方の穴が合わさるようポリエチレン対応のアロンアルファで接着する。

### 3.2 プロトタイプの製作

空気圧アクチュエータを用いて製作した NaviChoker のプロトタイプを図 3a に示す。4つのアクチュエータを首の周囲に等間隔に取り付けることで、8方向の圧力提示が可能になる。例えば、前方2つのアクチュエータを作動すると、ユーザは前方へ、前方斜め左側の1つのアクチュエータを作動させると、前方斜め左側へ注意を払うことができ

ると仮定した。また、装着感とアクチュエータの安定性向上のため、アクチュエータの上から柔らかい布をかぶせた(図 3b)。

提案手法では、各アクチュエータは電子機器で制御され、自動で空気を送り、圧力を提示する仕組みを想定している。しかし本研究では、プロトタイプ製作を行い、その所感を確かめることを目的としているため注射筒を用いた手動でのアクチュエータ操作を行う。

### 3.3 予備実験

本実験を行う前に、7人の被験者を集い圧力提示方向と実際にユーザが感じる刺激方向との関係を確認するための予備実験を行った。なお、被験者のうち6名が男性、1名が女性であり、年齢層は20~30代である。アクチュエータを作動させる個数や、アクチュエータを設置する箇所によって感じる刺激方向は、ユーザによって異なる可能性がある。そのため、圧力提示方向とユーザが感じる刺激方向との関係を検証した。具体的には、15通りの圧力パターン(図4)をユーザに提示し、その圧力がどの方向から提示されたように感じたかを答えてもらった。そして回答の結果から、8つの各方向への適切なアクチュエータ動作の組み合わせを確かめた。

予備実験の結果、8つの方向をユーザに提示するために、本実験で使用する圧力提示方法を図5のように設定した。

## 4. 実験と評価

製作したプロトタイプを用いて、提案システムの装着感や圧力提示および方向提示の有効性を検証した。また、本システムをユーザに装着してもらい、圧力提示のみで目的地へ移動を行う実験を行った(図6)。曲がり角に差し掛かる度に、ユーザに目的の方向へ圧力提示を行いながら棟をまたぐ移動を行ってもらおう(図7)。圧力の提示方法として、一度に複数回の圧力をユーザに提示することとした。

### 4.1 NaviChoker を用いた歩行実験

本実験として、9人の被験者に対して提案システムの評価実験を行った。なお、被験者のうち7人が男性で、2人が女性であり、年齢層は20~30代である。評価実験は、NaviChokerを用いた歩行実験とアンケート調査からなる。歩行実験は、アクチュエータの操作を手動で行う Wizard of Oz 法を用いた[13]。ユーザが歩行中に所定の曲がり角に差し掛かると、実験者が注射筒を用いて空気圧アクチュエータを作動させ、ユーザに進むべき方向を提示する。その際、被験者には目的地を伝えず、かつノイズキャンセリングイヤホンを使用して外部の音を遮断することで、ユーザは NaviChoker からの圧力提示のみの情報を頼りに歩行する。なお、本実験では歩行方向だけでなく歩行の開始と終

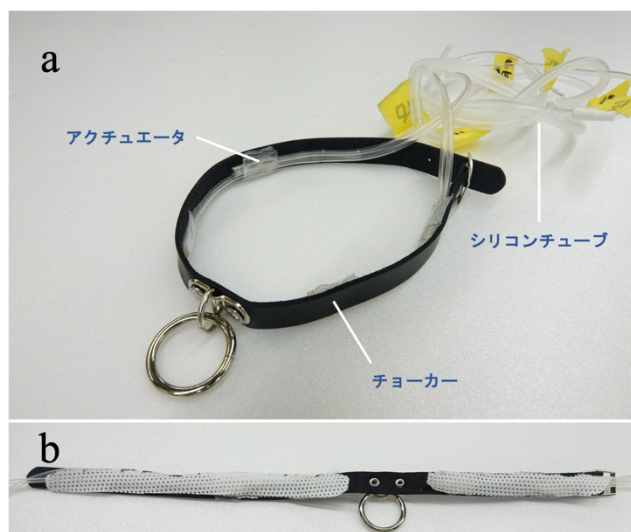


図3 NaviChokerのプロトタイプ (a) およびチョーカーの内側に布を被せた様子 (b)

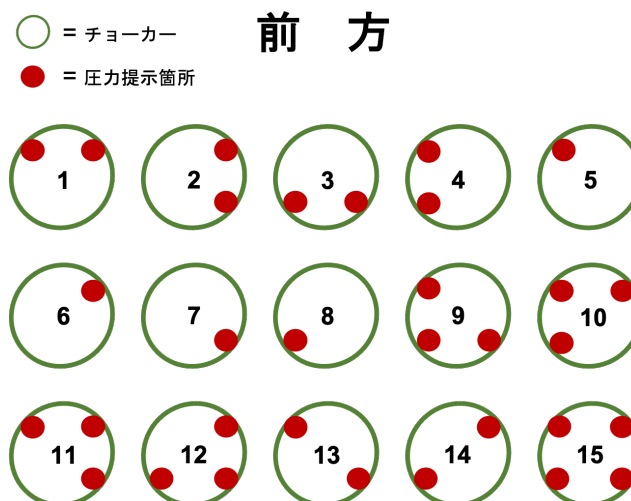


図4 予備実験で用いる圧力提示の全パターン

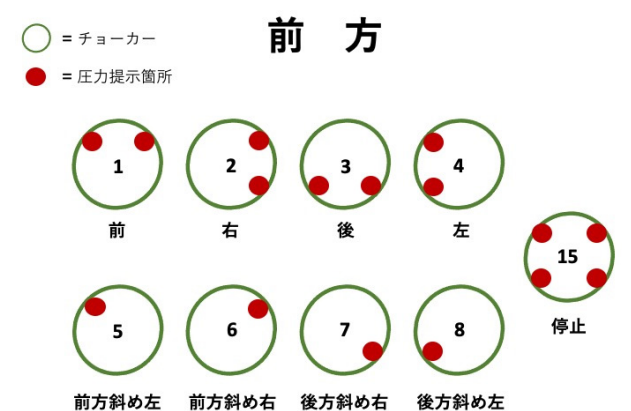


図5 本実験で用いる提示方向別圧力パターン

了を意味する圧力提示も行った。歩行開始の圧力は、実験開始直後に目的の方向へ圧力を提示することであり、歩行終了の圧力は、図 5 中の 15 番の圧力を目的地周辺で提示した。実験後、被験者に対し本システムのユーザビリティや装着感、圧力の提示具合を確かめるため、以下の項目を設定しアンケート調査を行った。なお、いずれも 5 段階評価を用いている（5：最も良い～1：最も悪い）。

1. アクチュエータによる圧力提示はハッキリと感じましたか。
2. 方向提示の違いは明確にわかりましたか。
3. 圧力提示による不快感はありますか。

#### 4.2 結果と考察

実験の結果、8 人が NaviChoker の圧力提示のみで目的の場所にたどり着くことができた。また、実験開始直前のユーザの向きによっては、目的の方向とは違う方向へ向いているユーザもいたが、NaviChoker の圧力提示のみで正しい方向へとユーザの向きを修正することもできた。加えて、ユーザは歩行の開始や終了の合図も認知できており、実験の開始から終了まで全て圧力提示のみで行うことができた。このことから、空気圧アクチュエータを用いた首の周囲への圧力提示は、ナビゲーションシステムとしての利用に有用であることが示唆された。また、モバイルデバイスの画面表示や音声案内によるナビゲーションは、歩きスマホの助長や、騒音下では利用しづらいといった問題がある。しかし、本実験にて圧力のみでユーザを案内することができたため、それらの問題も解決することが可能であると示唆された。一方で、被験者のうち 1 名が目的地に辿り着くことができなかった。理由として、実験終了直前に提示する歩行終了の圧力提示を、後方へ進む圧力と認識したためであった。このように、被験者によって感じる圧力の位置や強さが異なることがある。そのため、ユーザごとの適切な圧力の強さや提示位置を調査、分析し、より多くの被験者が平等に圧力の提示位置を感じられるようアクチュエータの改善を行う必要がある。

アンケート調査の結果を図 8 に示す。項目の内容は、方向提示の違い、空気圧アクチュエータによる圧力提示の具合、開発デバイスの装着時の不快感に関する評価である。評価の結果、圧力提示に関する項目が高評価であることが確かめられた。特に空気圧アクチュエータによる圧力の提示に関しては、被験者の全員が「圧力を感じる」と回答した。また、方向提示に関しても、多くの被験者が違いを感じていた。方向提示の項目の回答に、違いがあまりわからないとの回答がある理由として、被験者の首が細いためアクチュエータが首に届かなかったことや、触覚を感じにくい箇所にアクチュエータが当たっていたことなどが考えられる。この問題は、アクチュエータの膨らむサイズや



図 6 提案デバイスを用いた歩行方向提示の実験

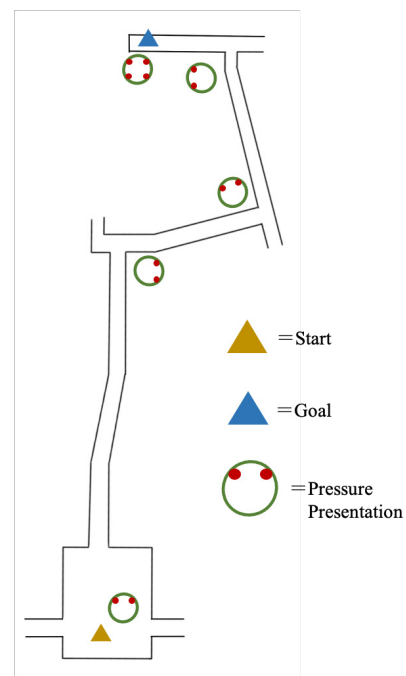


図 7 ユーザの歩行経路および圧力提示場所

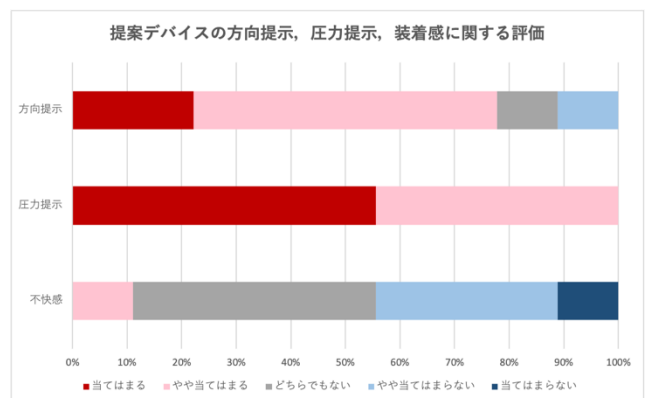


図 8 評価結果のグラフ

首への設置面積の拡大により解決できる可能性があるため、デバイスの改良が必要であると考えられる。デバイスの装着時の不快感については、「不快ではない」と評価した被験者が4人しかおらず、半数以上のユーザが装着感に満足していないことが確かめられた。理由として、そもそも首に巻物を着けることを快く思わないユーザがいることや、アクチュエータにつなげているシリコンチューブの存在が心地よい装着感を阻害している可能性がある。この解決策として、首とデバイス間に柔らかい布を挟むことや、アクチュエータの機構の小型化を行いユーザに与える機構の存在感を小さくする必要があると考えられる。

## 5. まとめ

本論文では、空気圧アクチュエータを用いた全周囲圧力提示システム NaviChoker を提案し、プロトタイプを製作した。また、歩行方向の提示に着目し評価実験を行うことで、空気圧アクチュエータの圧力提示によるユーザの知覚の差異およびアクチュエータの有用性を確かめることができた。特に、ユーザは圧力を明確に知覚できており、歩行方向の提示デバイスとして十分に有用性があることが示唆された。同時に、デバイスの改良を行うことでさらに多様な触覚提示を行えることが期待できる。デバイスの装着感に関しては、被験者の半数以上が満足していないものの、改善の余地があるため今後の課題とする。提案デバイスを用いることで、ナビゲーションとしての使用だけでなく、メッセージ通知機能やタイマー機能、エンタテインメントなどへの応用が考えられる。また、他者との一定の社会的距離を保つためのデバイスとしても活用できる。

今後の課題として、空気圧アクチュエータの動作の自動化が挙げられる。本研究では、Wizard of Oz 法により手動でアクチュエータを動作させているため、方向提示の素早い変更ができない。自動化によりアクチュエータを自由に制御できるようになると、アクチュエータの膨らみ方の強弱や膨らむ速度、回数を細かく制御できるようになる。加えてアクチュエータの数を増やすことで、複雑かつバリエーション豊かな動作パターンを検討することができ、ユーザが感じる圧力の方向や、提示された圧力はどのような意味を表しているかとユーザが感じるのかを分析することができ、連続的な動作による新しい圧力提示を行うことができる。また、自動化された空気圧アクチュエータを市販のチョーカーに取り付けるためには、コンパクトな空気回路の設計が必要になる（例えば、Bubble [14]など）。デバイスの軽量化や小型化をはかることで、ユーザにかかる負担が小さくなると考えられる。

## 謝辞

プロトタイプ装着イメージの製作にあたり、張萍氏には被写体として写真撮影に協力していただいた。ここに感謝の意を表す。

## 参考文献

- [1] “虫物の多い料理店(2017)”. <http://ivrc.net/archive/the-restaurant-of-many-orders-insect-dishes2017/>, (参照 2020-12-12).
- [2] Mohamed, K. Nora, S. Ceenu, G. Max, P. ElectroCutscenes: Realistic Haptic Feedback in Cutscenes of Virtual Reality Games Using Electric Muscle Stimulation, VRST '19 25th ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology Article No. 13, November 2019
- [3] 串山久美子, 土井幸輝, 笹田晋司, 馬場哲晃. Thermo Drawing: 冷温提示による小型触覚ディスプレイを使用した温度描画システムの開発, 情報処理学会インタラクティブ, 2012, p. 723-728.
- [4] 菊池 武士. 足底面へ圧力分布をもたらす新たな力触覚提示デバイス. ICT イノベーションフォーラム, 2014.
- [5] 鈴木隆裕, 池田篤俊, 高松淳, 小笠原司. 把持型触覚提示デバイスを用いた振動による柔らかさ提示. 日本ロボット学会誌, 2012. Vol. 30 No. 7, p.718-726.
- [6] 衛藤春菜, 的場やすし, 佐藤俊樹, 福地健太郎, 小池英樹, 梶本裕之. Biri-Biri: 指先への電気刺激による感触提示を組み合わせたタッチディスプレイ技術, 情報処理学会研究報告, 2011, vol. 2011, no. 15.
- [7] Sasaki, T. Hartanto, R. S. Liu, K. H. Tsuchiya, K. Hiyama, A. Inami, M.. LevioPole: Mid-air Haptic Interactions using Multirotor, I SIGGRAPH, 2018, ACM, 12.
- [8] Delazio, A. Nakagaki, K. Klatzky, R. L. Hudson, S. E. Lehman, J. F. Sample, A. P.. Force Jacket: Pneumatically-Actuated Jacket for Embodied Haptic Experiences, CHI, 2018, paper320.
- [9] Niiyama, Sun, R. X. Yao, L. Ishii, H. Rus, D. Kim, S.. Sticky Actuator: Free-Form Planar Actuators for Animated Objects, TEI, 2015, 77-84.
- [10] Sonar, H. Joshi, S. Robertson, M. Paik, J.. Interactive SPA Skin, International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2017.
- [11] 小野龍一, 伊藤亘輝, 羽田久一. 首への熱刺激によるVR体験者への方向提示の提案, EC2018, p.220-223.
- [12] 山崎勇祐, 白井暁彦. 首の触覚を用いたナビゲーションシステムの提案, 第24回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, 2019, 1B-01.
- [13] Greenberg, S., Carpendale, S., Buxton, B., & Marquardt, N. (2012). Sketching User Experiences: The Workbook. Elsevier, 227p.
- [14] Zhang, X. Shtarbanov, A. Zeng, J. Chen, K. V. Bove, V. M. Maes, P. Rekimoto, J.. Bubble: Wearable Assistive Grasping Augmentation Based on Soft Inflatables, CHI, 2019, LBW2313.