

Blastnel: 気流噴出を利用した衝突感覚提示デバイスの提案

新井 貴紘¹ 井上 亮文²

概要: 本研究では、バーチャルリアリティ (VR) の触覚提示技術の一つとして、圧縮空気を利用して衝突感覚を提示するシステムを提案する。提案システムでは、強い気流を噴出可能なノズルがアレイ状に配置されている。システムは各ノズルから噴出される気流のパルスパターンを独立して設定できるため、従来の単一ノズル型の微弱気流よりも複雑で強力な衝突感覚を提示できる。仮想空間内でユーザーに様々な CG を衝突させ、これに合わせてプロトタイプシステム Blastnel で触覚を提示する実験を実施した。評価実験の結果から、どのような CG が Blastnel の触覚提示と相性が良いのかについて考察する。

1. はじめに

バーチャルリアリティ (以下: VR) 技術を利用したコンテンツは急速に増加している。特にエンターテインメントの分野では、VR 技術の特徴である高い没入感や臨場感がゲーム体験の質を向上させるとして期待される。現在はヘッドマウントディスプレイ (以下: HMD) を用いて映像提示と音声提示を行うものが主流となっている。これらに加えて既存の提示刺激だけでなく触覚提示をすることで、さらに没入感や臨場感を得ることができると見込まれている。

これまでの触覚提示技術では、振動素子や電気刺激を用いてユーザーの身体の表面付近のみを刺激するものが多かった [1][2]。しかし、現代のアクションゲームでは、非常に強い衝撃や、現実では存在しないゲーム独自の触覚も発生する。例えば、前者ではユーザーの身体に物体が当たるような感覚、後者では魔法の弾が当たるような感覚などである。これらの触覚を擬似的に再現するには、ユーザーの身体を押し動かすような衝撃や力覚が必要である。振動素子や電気刺激を用いた触覚提示技術では、このような表現力に欠ける。

振動素子や電気刺激を用いずに触覚を提示する手法としては、空気などの媒体をユーザーの身体にぶつける手法がある。現状の空気を用いた手法では、空気砲モデルのデバイスで空気の渦輪を打ち出すものが主流になっている [3]。これは、遠距離から空気を発射し力覚と衝撃を提示するため、ユーザーはデバイスを装着する必要がない。さらに、表面的な触覚刺激と同時に、身体を押しされるような衝撃や力覚を

ユーザーに提示できる点が長所として考えられる。

一方で、この種のデバイスから発射された空気によってユーザーが感じる力覚は微弱なものである。触覚の提示範囲もごく狭い一部に限定され、噴出の継続時間も瞬間的である。空気を用いた触覚技術を仮想環境の表現が多様化している現代で利用するには、空気の威力、提示範囲、時間的な分解能をさらに高める必要がある。

本研究では、圧縮空気を用いて VR における仮想物体衝突感覚を提示するデバイスを提案する。本デバイスでは、圧縮空気を用いることで威力の強い触覚提示を行うことが可能となる。これによってユーザーに提示できる力覚が微弱であった点を解消した。さらに複数のノズルをアレイ状に配置し、それぞれを独立制御することで空間的制御を行った。各ノズルから噴射される気流は弁の開閉によって制御されるため、時間的制御も可能となった。

以下に、本論文の貢献を示す。

- 関連研究を整理して本研究の位置付けを明確にし、プロトタイプシステムである Blastnel を開発した。
- Blastnel を用いた初期的な評価実験を行い、デバイスの表現力を調査した。
- 評価実験でアンケートを実施し、実践的な意見やデータを取得しまとめた。

2. 気流噴出を利用した衝突感覚提示デバイスの提案

提案するデバイスは、吐出圧を高めた圧縮空気を噴出し、衝突感覚をユーザーに提示することを目的としている。

これまでの空気を用いた研究では、風覚や蝶の羽ばたき、軽いボールを受ける力覚などの、やさしい触覚を提示することに注目している。もし気流の威力を強くすることがで

¹ 東京工科大学大学院
バイオ・情報メディア研究科 コンピュータサイエンス専攻
² 東京工科大学 コンピュータサイエンス学部

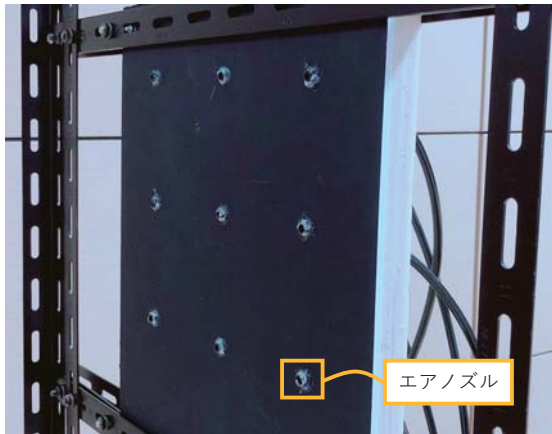


図 1 アレイ状に配置された気流噴出ノズル

きれば、これまでより多くの種類の触覚提示を行うことができる。気流を利用した際の表現力も大きく向上する可能性がある。そこで本研究では、吐出圧の高い圧縮空気を用いることで噴出の威力を強めることとした。

気流噴出を行うノズルは図 1 のようにパネル面に設置する。多数のノズルをアレイ状に配置し、独立で制御することで空間的制御を行う。これにより、ユーザの身体に衝突する物体の形状や、衝突する部位を増やす。また、あらかじめ貯めておいた圧縮空気と電磁弁で気流噴出を制御することで、時間的制御を行う。これにより、噴出の継続時間や位相を制御する。このように空間的、時間的制御を行うことによって表現力が増加すると考えられる。

ユーザはノズルの並んだパネルの前に立つ。そして仮想世界の視覚提示と、視覚提示に対応した気流の噴出を行うことで衝突感覚を感じることができる。

Sodhi らは、空気砲のような構造のデバイスで空気を発射し、ユーザにぶつけて触覚を提示する Aireal を提案した [4]。Aireal では、筐体内部の空気をスピーカーコンポで圧縮し、瞬間的に押し出された空気をユーザにぶつける。これを用いることで、ユーザにデバイスを装着させることなく蝶が羽ばたくような触覚などを再現することができる。ユーザも、実際に空気が提示部に当たることで、表面的な触覚だけでなく力を受ける力覚を得ることができる。しかし、デバイスから発射される空気の威力はとても微弱なものである。提示範囲も、空気砲の渦輪と同程度の狭い範囲に限定され、提示時間も瞬間的なものとなる。よってこの手法を、仮想環境の表現が多様化した現代で利用するためには、空気の威力、提示範囲、時間的な分解能をさらに高める必要がある。

また、ドーム状の骨組みにブローファンを固定し動作させて風覚を提示する風覚ディスプレイ [5]、圧縮空気を用い東部周辺に風覚の提示を行う VaiR など [6] がある。これらはファンや圧縮空気を利用することで時間的な制御がしやすいという長所がある。しかしファンを用いる場合に

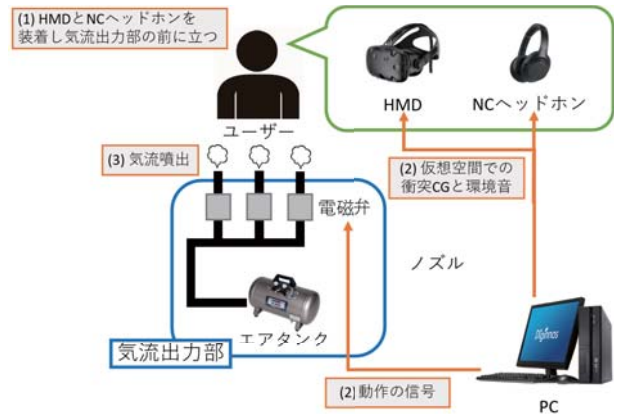


図 2 Blastnel による衝突感覚提示までの流れ

は、瞬間的な触覚の表現が難しい。物体がユーザの身体に当たった瞬間の触覚を再現するにはラグが発生してしまう。圧縮空気を用いる場合には、噴出を弁で制御しているため瞬間的な表現力が高い。そのため、気流の生起は圧縮空気を用いることで、噴出のタイミングや持続時間を自在に調整可能となる。

3. 実装

本章では気流による衝突感覚の提示を行うために実装したプロトタイプシステム Blastnel について述べる。

3.1 システム構成

Blastnel の構成と動作の流れを図 2 に示す。本システムは、VR 空間の 3D キャラクターを表示する HMD、任意の効果音を提示するヘッドホン、圧縮空気を貯めておくエアタンク、気流の噴出孔であるノズル、気流噴出のコントロールを行う電磁弁、さらに HMD に表示する映像とヘッドホンから提示する効果音を出力する PC から構成される。処理の流れを以下に示す。

- (1) ユーザは HMD とヘッドホンを装着した状態でノズルが配置された気流噴出を行うパネルの正面に立つ。
- (2) PC は 3D キャラクターの動作と、動作に対応する効果音、気流噴出の信号を HMD、ヘッドホン、電気回路にそれぞれ出力する。
- (3) ユーザは処理 2 の 3D キャラクターの動作に対応する効果音と、気流噴出による衝突感覚の提示を受ける。この動作を 1 セットとし、処理 2, 3 を複数回繰り返して体験を行う。体験を終える際は処理 3 で VR アプリケーションを終了させる。

3.2 プロトタイプ

Blastnel を利用している様子を図 3 に、構成要素を表 1 に示す。HMD には HTC の VIVE を、ヘッドホンには sony のノイズキャンセリング機能付きヘッドホンである WH-1000XM2 を使用した。ユーザは気流を噴出するノズ

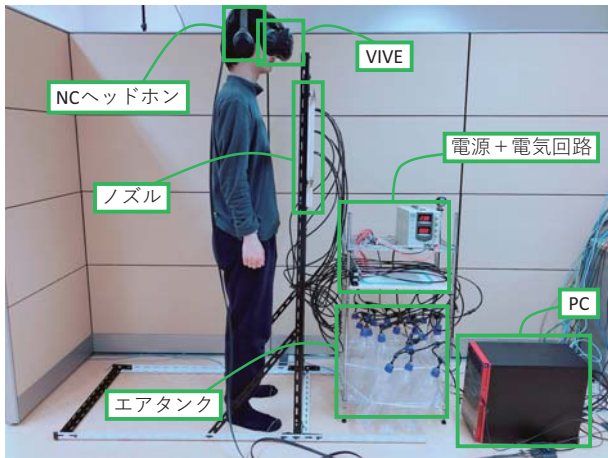


図 3 Blastnel 外観

表 1 Blastnel の構成要素

品名	詳細
HMD	VIVE
ヘッドホン	WH-1000XM2
エアチューブ	チューブ径 6mm
マイクロコンピュータ	Mbed
電磁弁	パイロット式 2 ポート

表 2 ソフトウェア実装環境

名称	詳細
OS	Windows 10
プロセッサ	Intel(R)Core(TM) i5-7500CPU
実装メモリ	8.00GB
開発言語	C++, C #
ゲームエンジン	Unity2018.3

ルが並んだ板の正面に立ち、VIVE をかぶったのちに上からヘッドホンを装着する。ヘッドホンからは風の吹く環境音を再生し、実世界の物音が聞こえないようにした。この状態で VR 体験を行ってもらい、VR 空間内の環境に対応した気流噴出を行った。

本システムで提示可能な衝突感覚の種類は、雪玉を投げ当てられる感覚、石を投げ当てられる感覚、魔法の弾を当てられる感覚、魔法の光線で貫かれる感覚といった 4 種類に限定して設計を行った。これらはそれぞれ、見た目でも柔らかそうな物体が衝突する衝撃、固そうな物体が衝突する衝撃、現実には存在しない瞬間的な衝撃、継続的な衝撃といった特徴を持っているため選択した。

次にソフトウェアの実装環境を表 2 に示す。4 種類の VR アプリケーションは Unity 2018.3 を使用して作成し、物体や魔法を放つ人型モデルとして Unity Technologies Japan が提供する Unitychan を用いた。Unitychan が行う 4 種類の動作を図 4、図 5、図 6 にそれぞれ示す。このように Unitychan がユーザに雪玉を投げ、石を投げ、魔法の弾を放ち、光線を撃つ動作を行う。そしてそれぞれに対応した気流噴出を行い、衝突感覚を提示する。

表 3 実験の種類と Unitychan の動作

実験名	Unitychan の動作
実験 1	雪玉を投げる
実験 2	石を投げる
実験 3	魔法の弾を撃つ
実験 4	魔法の光線を放つ

気流噴出は、エアタンクに接続された電磁弁を開閉させることで制御をした。エアタンクには、あらかじめエアコンプレッサーによって圧縮空気を貯めておき、電磁弁が開くと噴出、閉じると停止となるよう接続した。今回の圧縮空気の取り出し圧は、デバイスから離れた場所でも強い力覚を提示することができる 0.6MPa で実施した。

4. 評価

本研究では、実装したプロトタイプシステム Blastnel がどのような感覚提示に適切であるかを検証する必要がある。そこで、実際にユーザに Blastnel を利用して体験を行ってもらいアンケート調査を行った。これにより Blastnel が表現するのに向いている感覚提示を調査する。この実験のユーザは 20 代の男性 8 名である。

4.1 実験手順

実験では、ユーザに HMD とヘッドホンを装着した状態で Blastnel による感覚提示を行い、体験終了後にアンケートを回答してもらった。Blastnel による感覚提示は表 3 の 4 種類を順に 3 施行ずつ実施した。

それぞれに対応する気流の噴出パターンの概要を図 7 に示す。一番左の図は、ノズルが並んだパネルを正面から見た状態のデフォルメ図である。各ノズルの噴出を表現するために、ノズルには 1 から 9 までの識別番号を割り当てた。また、各体験で動作するノズルの遷移を図 7 の右 4 つに表す。これはパルス図となっており、山部分がノズルが開いている状態を、谷部分が閉じている状態を意味している。図中の t_a は、Unitychan の放った物体や攻撃がユーザの身体に衝突した瞬間を意味している。また、パルス図は、それぞれの真下を書いてある動作が Unitychan の動作と対応している。例えばパルス図の「雪玉を投げ当てられる感覚」というのは Unitychan の「雪玉を投げる」の動作と対応しており、実験 1 でのノズルの動作を表していることとなる。

各ユーザは計 12 回の感覚提示を受ける。実験中はヘッドホンにより周囲の音声聞こえず指示を出すことができないため、12 回の施行すべてが終了するまでその場に留まるよう指示を出した。

ユーザには、12 回の施行終了後にアンケートの回答を行ってもらった。アンケートは、3 種類用意し、4 種類のそれぞれの体験が面白く感じたかを二択で尋ねるもの、総合的な感想を自由記述で回答するもの、Blastnel で体験し



図 4 Unitychan の動作 (雪玉, 石を投げる動作)



図 5 Unitychan の動作 (魔法の弾を放つ動作)

てみたい感覚を自由記述で回答するものを用意した。

4.2 結果

実験で調査を行った 4 種類の結果を図 8 に示す。

実験 1(雪玉を投げ当てられる感覚), 実験 3(魔法の弾を撃ち当てられる感覚), 実験 4(魔法の光線で貫かれる感覚) の 3 つでは 7 名がよかったと回答した。一方で, 実験 2(石を投げ当てられる感覚) では 6 名がよかったと回答した。どの実験でも過半数が好意的な評価をしていた。

これらを有意水準 5% として相互に比較した結果, どの組み合わせにも有意差があるとは言えなかった。この実験結果より, 実験した 4 種類の中から Blastnel で提示するのに適した感覚を特定することはできなかった。

自由記述で回答してもらった感想では, 「石に切り替わった時避けそうになった」「石というよりは大きさが岩レベルだったので怖かった」といった好意的な意見が得られた。一方で, 「石を投げられる時は風の効果とあまりマッチしていないように感じた」「石は一回目は驚いたが二回目以降だと当たった感じが冷たいせいであんまり石のように感じなかった」といった改善点も見つかった。他にも, 「短時間で一点に噴射されたときが一番良かった」「正面だけでなくあらゆる方向からブラストを出せるともっと表現できるものが増えそうだと思います」といった性能に関する意見も見受けられた。

Blastnel で体験してみたい感覚を自由記述で回答するものに関しては, 「クレバスに落ちる感覚」「パラシュート降下」と, 風覚を感じる体験をしてみたいという意見が見受けられた。また, 「銃で撃たれたい」「槍」などの衝突感を求める意見も得ることができた。特に面白かったのは, 「温風で炎を吹きかける」といった, 温度の変化に関する意見が得られたことである。空気砲モデルの気流発生装置では

触覚の提示と同時に香りを提示する先行研究がある。空気の温度を変化させることで, 同様に触覚以上の価値を付加することができる可能性が示唆された。

5. 議論

5.1 実験結果に対する考察

実験の結果, Blastnel で表現することに向いている体験を 4 種類の中から特定することはできなかった。しかし, 当初の想定以上に全体の評価が高く, 雪玉や石を投げ当てられる感覚に過半数以上の被験者が好印象を示していた。石を投げ当てられる感覚以外は得票数が同数で優劣をつけがたい状況に陥っていた。今後はさらに体験できる VR 環境を増やし, リッカート尺度やシェッフェの一対比較法などを用いることで, より詳細な調査をしていきたいと考えている。

評価実験全体の感想からは, 石を投げ当てられる体験に関しては否定的な意見が多く読み取れた。4 種類の体験の中で, 石は見た目の質感で一番固そうな印象を受ける。そのため, この固そうな見た目に対して, 衝突時の気流噴出が大きく相違していたことが原因と考えられる。また, 気流噴出はあらかじめ圧縮しておいたものを利用してため, 気流の温度が下がってしまった。よって, Blastnel で固い質感の物体が衝突したときの衝突感覚を提示するのは適していない可能性がある。固い質感の物体の, サイズや飛んでくる勢いなどの体験の種類を制作し, さらに詳細な評価実験を行う必要がある。

Blastnel で体験してみたい感覚のアンケートからは, 風を受ける (風覚) 体験をしてみたいといった意見があった。今回のプロトタイプでは, 噴出ノズルの開閉を行うのみの実装としていた。そこで噴出する気流の威力を調整し, 弱く噴射することで風覚の再現も行ってゆきたい。銃や槍で



図 6 Unitychan の動作 (光線を撃つ動作)

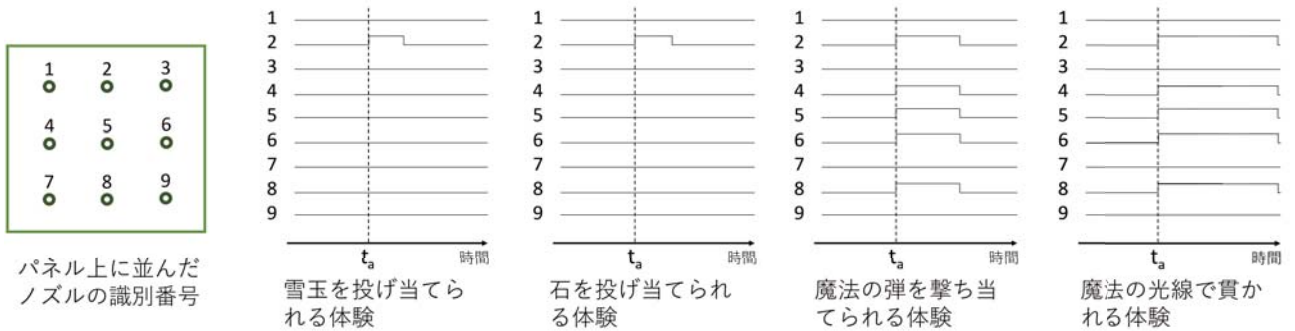


図 7 ノズルの対応と噴出パターンの概要図

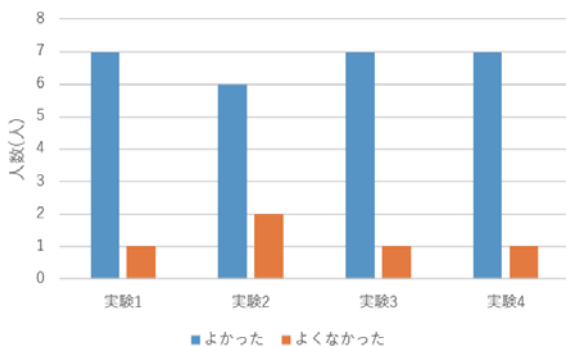


図 8 体験それぞれに対するユーザの回答結果

攻撃される感覚は、アクションゲーム等でよく用いられる。仮想世界で被験者にぶつかるのは固い物体であるが、衝突時の衝撃が非常に強いと想定されるため、これらも表現できる可能性は大いにある。また、剣で斬撃を受ける感覚などの、部位によって触覚の位相が変化するものを調査したい。温風で炎を吹きかけられる感覚は、再現することができれば Blastnel の表現力が向上する。空気を媒体として香りを遠距離に提示する研究があるが [7]、空気という媒体に温度変化といった付加価値を期待できる。そのため温度制御もまた、今後の実装で調査していきたいと考えている。

また実験中に、被験者の何人かは飛んでくる石を避けようとしたり、小さな悲鳴を漏らしている様子が見受けられた。そのため、デバイスが VR 体験の臨場感や没入感を阻害していた可能性は低く、衝突感覚のみをうまく提示することができていたと考えられる。

5.2 関連研究

ここでは、気流噴出を利用した触覚提示の研究を紹介しつつ、本研究との違いについて述べる。

鈴木らは、圧縮空気を利用した力覚提示手法を提案した [8]。被験者は実世界で風受容器を持ち、HMD を装着する。仮想空間では、仮想的な接触を発生させる接触オブジェクトと接触判定を行う接触判定オブジェクトを用意する。接触オブジェクトと接触判定オブジェクトが接触していたら、接触判定オブジェクトに対応する風受容器に風圧を与える。このように、噴出部と受容器の対でセットになったデバイスである。この手法ではテニスボールや、ゴムボール、ぬいぐるみなど柔らかい衝突感の力覚を表現する。一方本研究では気流の噴出をユーザに直接行う。表現する感覚も、雪玉のような柔らかいものの衝突感から石のような固いもの、エネルギー弾や光線のような実世界に存在しないものを表現している。受容器を使わない分気流の制御も難しくなるが、幅の広い感覚の評価を取ることで気流噴出に最適な表現を調査するアプローチである。

酒匂らは、エアコンプレッサから噴出される空気噴流を周期的に遮ることにより噴流に振動を付与し、力覚と触覚を同時提示するデバイスを提案した [9]。空気噴出の際の圧と、周期的な遮蔽による振動を利用して感覚提示を行っている。評価実験では自由記述のアンケートを行い、ユーザの受けた感覚を調査した。この研究では、触覚提示の方法の一つとして気流を振動をさせた手法を提案しているが、本研究は時間的、空間的制御を行い触覚を提示している。

6. まとめ

本論文では、圧縮空気を噴出することで仮想物体の衝突感覚を提示する手法を提案した。今回実装した Blastnel を用いての評価実験の結果、提示するのに適した感覚を特定するには至らなかったが、全体的に過半数が好印象を示していた。またアンケート調査の結果として、石を投げ当てられる感覚は不適である可能性が示唆された。これは石以外の固そうな見た目の物体やサイズを変えて、より詳細な実験を行う必要があると考えられる。

今後の課題として、VR 環境の種類を増やし、Blastnel で表現可能な感覚の種類を増やすことが挙げられる。今回の実装では4種類の感覚提示に限定して実施したが、アクションゲームでは斬撃や銃撃、爆風を受ける感覚や炎を浴びる感覚すら存在する。これらをいかに表現し実装してゆくかを検討したい。また、気流噴出の強弱や噴出場所の位相などを調整可能にし、風覚や身体を撫でられる感覚なども提示可能か調査する必要がある。さらに最終的にはこれらを組み込んだゲームを作り、実践的なデータをとることも可能ではないかと考えている。

参考文献

- [1] 田村隆幸, 矢野博明, 岩田洋夫: ウェアラブル振動子アレイにおける物体知覚特性, 日本バーチャルリアリティ学会大会論文集= Proceedings of the Virtual Reality Society of Japan annual conference, Vol. 8, pp. 237-240 (オンライン), 入手先 (<https://ci.nii.ac.jp/naid/10013959762/>) (2003).
- [2] 宮本靖久, 青山一真, 古川正紘, 前田太郎, 安藤英由樹: 皮膚触覚電気刺激と筋肉電気刺激による空中における触覚提示手法の検討 (ヒューマン情報処理), 電子情報通信学会技術研究報告 = IEICE technical report : 信学技報, Vol. 114, No. 483, pp. 21-25 (オンライン), 入手先 (<https://ci.nii.ac.jp/naid/110010022156/>) (2015).
- [3] Gupta, S., Morris, D., Patel, S. N. and Tan, D.: AirWave: Non-contact Haptic Feedback Using Air Vortex Rings, *Proceedings of the 2013 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing*, UbiComp '13, New York, NY, USA, ACM, pp. 419-428 (online), DOI: 10.1145/2493432.2493463 (2013).
- [4] Sodhi, R., Poupyrev, I., Glisson, M. and Israr, A.: AIREAL: Interactive Tactile Experiences in Free Air, *ACM Trans. Graph.*, Vol. 32, No. 4, pp. 134:1-134:10 (online), DOI: 10.1145/2461912.2462007 (2013).
- [5] 宮下芳明, 小坂崇之, 服部進実: 没入型三次元風覚ディスプレイのためのコンテンツ開発, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 12, No. 3, pp. 315-321 (2007).
- [6] Rietzler, M., Plaumann, K., Kränzle, T., Erath, M., Stahl, A. and Rukzio, E.: VaiR: Simulating 3D Airflows in Virtual Reality, *Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '17, New York, NY, USA, ACM, pp. 5669-5677 (online), DOI: 10.1145/3025453.3026009 (2017).
- [7] 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 (2018).
- [8] 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, Vol. 43, No. 12, pp. 3643-3652 (2002).
- [9] 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, インタラクション 2018, pp. 736-737 (2018).