

風インタフェースにおける多次元力覚提示

鈴木 由里子[†] 井原 雅行[†] 小林 稔[†]

本論文では、風圧を用いた力覚提示技術である「風インタフェース」に関して、これまで鉛直上方向だけであった力覚提示方向を水平方向へ拡張する方式を提案する。風インタフェースとは、テーブル上に配置された複数のノズルの1つから空気を鉛直上向きに噴出し、利用者が持つ風受容器に風を当てることで力を伝える方式である。力覚提示に空気を利用することで、ワイヤでユーザを拘束することなく、安全に力を提示することができるという利点がある。今回、筆者らは、従来の風受容器の側面にフィンを取り付け、このフィンに当たる噴出空気の噴出位置を制御することにより、上方向の力を水平方向の力に変換して提示する方法を検討した。本論文では、まず、風インタフェースの基本動作原理を紹介したうえで、水平方向の力覚提示を可能とする Wind Abeam 方式について述べる。次に、その実現可能性を確認するために、力の基本計測実験と主観評価実験を行った結果を紹介する。

Air Jet Interface with Multi-directional Force Feedback

YURIKO SUZUKI,[†] MASAYUKI IHARA[†] and MINORU KOBAYASHI[†]

This paper reports the recent advance in the Air Jet Interface, which is a haptic virtual reality interface that eliminates all the wires or arms normally needed to provide force feedback. The Air Jet Interface presents a 3D image of one or more virtual objects on a table that is embedded with 100 air jet nozzles. The airflow impacts the paddle, which is held by the user, and this impact makes the user feel the resistance from the virtual object. By utilizing the air pressure to produce feedback force, the Air Jet Interface realizes the completely untethered haptic interface for virtual reality systems. This paper focuses on overcoming the major limitation of the Air Jet Interface: the inability of presenting horizontal force. The solution is a novel way to produce horizontal force by precisely applying the upward airflow to specially designed fins attached to the paddle. Experimental results confirmed the feasibility of the proposed method.

1. はじめに

利用者にあたかも現実であるかのような仮想体験を提供する VR (バーチャルリアリティ) 技術が各種研究されている。その中でも、コンピュータグラフィックスなどで描かれた仮想空間内の物体に触った感覚を提示する触覚、力覚提示技術は、仮想空間のリアリティを高めるという点において重要と考えられる。しかし、これまで検討されてきた力覚提示技術には、ワイヤやヘッドマウンテッドディスプレイ (HMD) などによって利用者の身体を拘束するものが多く、利用時の快適性や実用化を考慮した場合に問題であった。

筆者らは、この拘束性の問題を解決するために、風圧を利用して無拘束な力覚提示を可能とする「風インタフェース」の開発に取り組んできている^{7),8)}。しか

し、従来の風インタフェースでは、力覚提示の方向が鉛直上向きに限定されており、力覚の表現において制約があった。本論文では、この風インタフェースの基本原則を紹介したうえで、今回新しく検討した水平方向の力覚提示方式について述べる。

2. 関連研究

VR 技術の中でも、力覚提示技術は無拘束化が困難な技術の1つである。なぜなら、力の伝達のためには、利用者と装置との間の物理的接触が本質的に必要となるためである。従来、力覚提示方式としては、6自由度のマニピュレータを手や指で操り、各関節軸の反力を制御して力覚を提示する方式^{1),2)}、糸を張った物体を手を持ち、糸の張力により力覚を提示する方式^{3),4)}、グローブをはめた指の曲げを機械的に制御し、力覚を提示する方式^{5),6)}などが提案されている。しかし、これらの方式にはいずれも、利用時に装着する装置が重い、またはアームやワイヤによって据え付けの装置と

[†] 日本電信電話株式会社 NTT サイバースリユーション研究所
NTT Cyber Solutions Laboratories, NTT Corporation

物理的につながっている状態になる、といった問題がある。このため、利用者は操作時に自由な身体動作を妨げられ、結果として、煩わしい拘束感を感じるようになる。

筆者らが開発した風インタフェース^{7),8)}では、力覚提示に風圧を利用するため、利用者と装置の間に物理的接触はなく、利用者を拘束しないという利点がある。利用者を拘束しない力覚提示技術としては、上下に動くアクチュエータによって仮想オブジェクトの形を表現する FEELEX⁹⁾がある。FEELEX では、ワイヤやアームなどを利用せず、装置自体が仮想オブジェクトの表面を再現し力を提示する。この方式に対して、風インタフェースには 2 つの利点がある。1 つは、空気を噴出するノズルの数を増やすことによって、力覚提示領域を容易に拡張することができることである。もう 1 つは、力覚提示媒体として空気を使用するため、素早い変化をともなう制御が行われる場合にも、利用者に過度の負荷を与えず、安全性が高いことである。

3. 風インタフェース

3.1 基本アイデア

風インタフェースの基本アイデアは、利用者が持つ風受容器の位置や向きに応じて、空気の噴出を制御し、噴出した空気を風受容器に衝突させることで、利用者に力覚を提示するものである。この方式では、風受容器を利用して風を受けるために利用者の身体に直接、風が当たることはなく、利用者は風を風として感じるのではなく、風を圧力として感じる。

風受容器は、利用者が手に持つ棒状の部分と、その棒の先に取り付けられた風受容部からなる。風受容部の形状は、お椀を逆さまにした凹形であるため、噴出した空気を効率的に受け取ることができるだけでなく、空気の提示位置が風受容部の中心から多少ずれていても提示力が変化しにくい、という利点がある。また、棒の先に風受容部を取り付けているため、空気の噴出が弱い場合でも、この原理によって、提示される力を増幅することができる。

3.2 風インタフェースの特徴

3.2.1 ノズルアレイ装置

風インタフェースのシステム構成を図 1 に示す。本システムの最も主要となる構成要素は、2 次元のマトリクス上に配置した上向きのノズルアレイ装置である。風受容器の動きは、仮想空間内に表示されるワンド (= 3 次元カーソル) の動きに反映される。ワンドが仮想オブジェクトに接触しているかどうかを判定し、接触していたならば、適切なノズルから風受容器に対

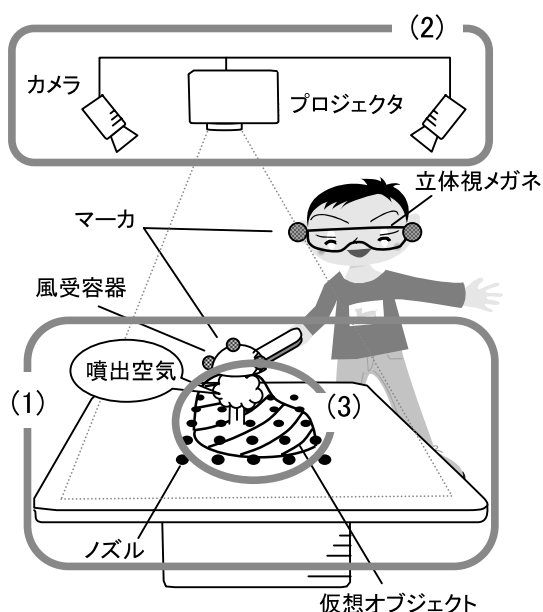


図 1 システム構成

Fig. 1 The system structure.

して空気が噴出される。風受容器が仮想オブジェクトの面に接触している間、空気が噴出され続ける。風受容器をオブジェクトの表面に沿って移動させると、その動きに合わせて、風受容器の下適切なノズルが選択され、空気が噴出される。これにより、利用者は 3 次元オブジェクトの表面を連続的に知覚することが可能となる。

3.2.2 無拘束な位置検出とグラフィック表示

本システムでは、無拘束な表示を実現するために、ワイヤにつながれた HMD などの代わりに、上部からテーブル面への投影を用いており、利用者の視点に応じた 3 次元仮想オブジェクトがステレオ画像としてテーブルに提示される。また、無拘束な位置検出方法として、カメラと 3 次元位置計測を利用した方法を採用している。2 台のカメラを使用して、風受容器や立体視メガネに取り付けたカラーマーカを検出し、画像処理やステレオ計測によってそれらの 3 次元位置を計測する。

3.2.3 ヘこむオブジェクトのデザイン

本システムで表示する仮想オブジェクトは、物体の表面を押し込む動作に対して、その表面をへこませるようにデザインされている(図 2)。空気によって供給される力が、硬いオブジェクトを表現するには十分ではないことから、そのやわらかい感覚に合うようにオブジェクトをへこませ、よりリアリティのある感覚を提示できるよう配慮されている。

3.3 従来方式の限界

筆者らは、風インタフェースを使用したアプリケーションとして力覚提示機能付きの仮想楽器（図2）を開発した．この仮想楽器では、利用者はテーブルの上に立体投影されている立方体オブジェクトの表面を押さえることで、音楽を演奏することができる．この仮想楽器を展示会で来場者に体験してもらったところ、仮想楽器の立方体側面を触ろうとする来場者が数名いた．しかし、従来の風インタフェースでは、噴出空気によって提示可能な力覚は上方向だけであるため、オブジェクトの側面を感じるための水平方向の力覚は提示できない．

力覚提示の表現力向上のためには、水平方向の力覚提示以外にも、硬いオブジェクトの表現、複雑な表面

テクスチャの表現、オブジェクト変形時の反力の提示、オブジェクト衝突時の撃力の提示など、多くの課題がある．本研究では、仮想オブジェクトの表現力向上の初期検討として、まず、力覚提示方向の水平方向への拡張に取り組む．水平方向の力覚を提示することができれば、たとえば、ろくろを回して粘土を成型するような、インタラクティブで創造的な仮想体験も実現できると期待される（図3）．

本論文では、以上をふまえ、これまで開発してきた風インタフェースの無拘束性という利点を損なうことなく、水平方向の力を提示する方法を提案する．本論文では、まず、実際にかかる力の基本計測実験から提案方式の実現可能性を検証し、次に、被験者を用いた主観評価実験により、実際に利用者が感じる力覚について調査する．

4. 多次元力覚提示方式の検討

風圧を用いた多次元力覚提示に関しては、噴出ノズルの配置や向きに着目したさまざまな方式が考えられる．たとえば、図4に示すような、噴出ノズルを球体の表面に放射状に配置する方式が考えられるが、この方式には、表現可能な仮想オブジェクトの形状が球体に近い形状に制限され、平面的な形状は表現できないという問題点がある．

あるいは、力覚提示領域を取り囲むようにノズルアレイ面を配置する方式も考えられる．図5は、ノズルアレイ面を直交するように配置した例であり、各面のノズルからは面で囲まれた内側の領域に空気が噴出される．この方式では、複数のノズルアレイ面が必要で装置が大がかりになるうえに、周囲に配置される多

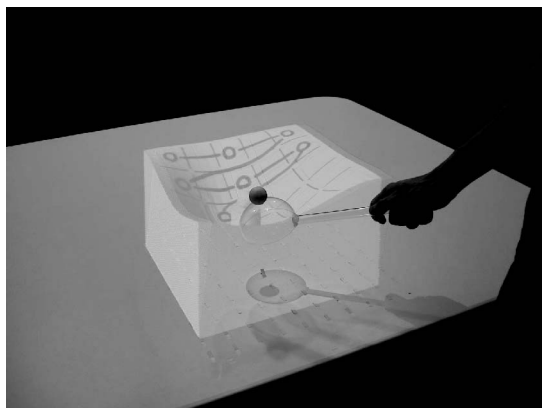


図2 ヘこむオブジェクト（仮想楽器）

Fig. 2 Deformable virtual object (Virtual musical instrument).



図3 仮想ろくろのイメージ

Fig. 3 Shaping a virtual pot on the wheel.

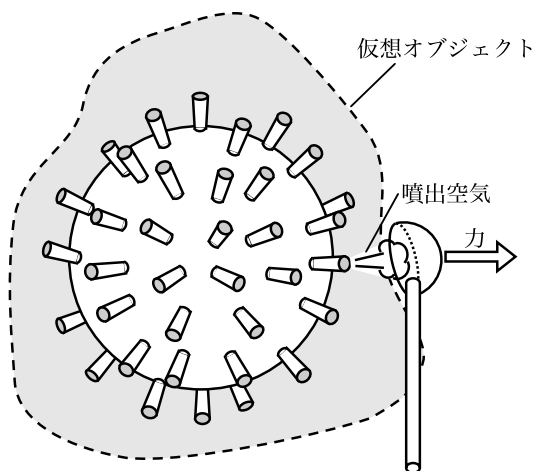


図4 放射状に空気を噴出するノズル配置を用いた方式

Fig. 4 Radial air jet arrangement.

数のノズルアレイ面が提示領域を取り囲んでしまい、風受容器を提示領域内で操作できなくなるという問題点がある。仮に、ある方向からの力の提示をあきらめて開口部を用意したとしても、風受容器の操作はその開口部からだけに制限される。さらに、大きく振りかぶってから仮想オブジェクトに触るといった、可動範囲の大きい動作を行う場合に、周囲の他のノズルアレイ面が操作の妨げになるという問題点もある。

さらにもう1つの方式として、図6に示すように、ノズルの向きを制御して空気の流れを変化させる方式が考えられる。この方式では、利用者の操作を妨げることはなく、ノズルの数も少なくすむが、やはり、平面的な形状の表現が困難である。また、表現力向上のためには、ノズルを複数用意して、各ノズルから噴出される空気が提示する力の合力として力覚を提示することになるが、その際、ノズルを制御する機構がノズルの数だけ必要となり、全体として装置は大きかりとなる。

筆者らは、噴出ノズルだけでなく、風受容器にも着

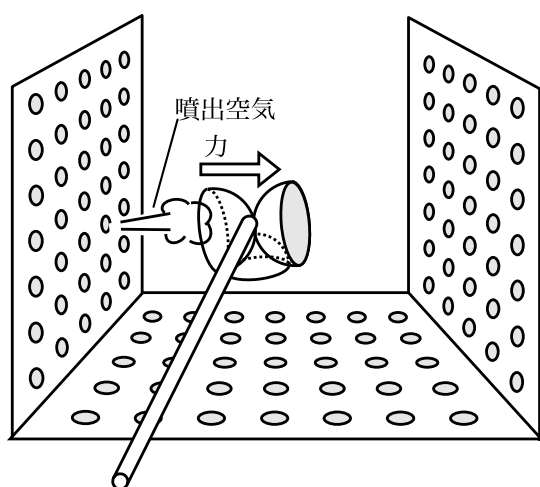


図5 噴出ノズルアレイ面の直交配置を用いた方式
Fig. 5 Orthogonal air jet arrangement.

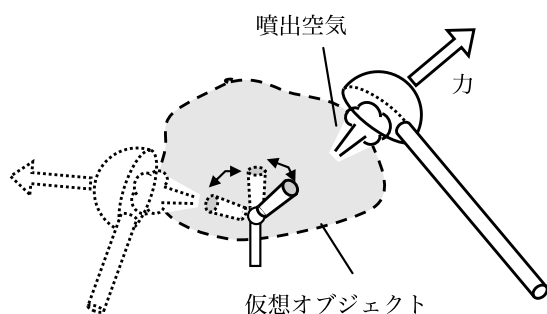


図6 噴出ノズルの向きを制御する方式
Fig. 6 Control of air jet nozzle direction.

目し、ヨット帆走の原理を用いた Wind Abeam 方式を考案した¹⁰⁾。ヨットは、帆の方向を制御することで風の流れる方向を変化させ、風向きとは異なる方向に移動することができる。すなわち、1方向からの風のみを利用し、さまざまな方向の力を発生させることができる。この原理を応用すれば、従来方式の1方向の空気噴出によって、前後左右へ水平方向の力を発生させることが可能となる。次章では、この Wind Abeam 方式による力覚提示の実現に向けた風受容器の設計、空気噴出制御について述べる。

5. Wind Abeam 方式

5.1 風受容器の設計

この方式では、噴出空気の流れる方向を変化させるために、ヨットの帆に相当する仕組みが必要となる。ヨットでは帆の向きを変化させることができるが、風インタフェースでは、ヨットの帆のように向きが変化するパーツを取り付ける代わりに、空気の噴出箇所を局部的に制御することで代用できる。ただし、前後左右いずれの方向にも流れを変化させるためには、従来の風受容器に対し、環状に等しく形状を変更する必要がある。以上を考慮して設計した風受容器の例を図7に示す。この風受容器では、外側に環状のフィンが取り付けられており、下から噴出される空気はこのフィンに衝突して水平方向に流れる空気に変換される。

5.2 噴出制御方法

先述した環状型フィンを持つ風受容器を用いる場合には、風受容器の位置に応じて、噴出ノズル装置を局部的かつ精密に制御する必要がある。通常、上向きの力を提示するには、風受容器の中心の真下にあるノズルから空気を噴出すればよい(図8(a))。しかし、水平方向に力を提示する場合、たとえば、図8(b)に示

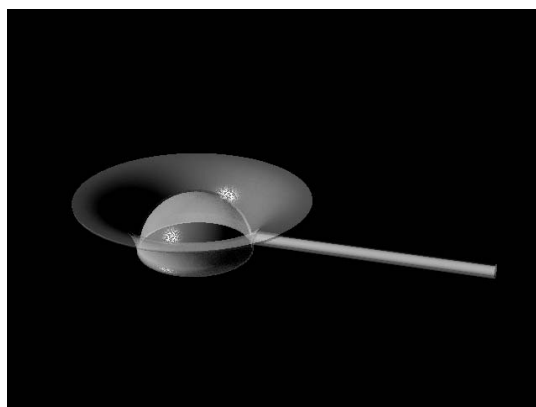


図7 環状にフィン取り付け付けた風受容器
Fig. 7 Air receiver with annular fin.

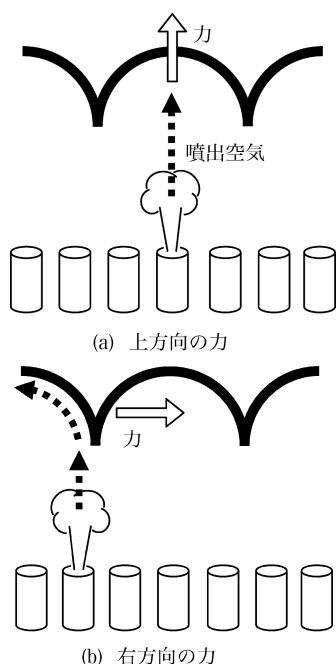


図 8 上方向の空気噴出による水平方向の力提示
Fig. 8 Lateral force production by upward air jet.

すように右方向の力を提示する場合には，左側のフィンの下にあるノズルから空気を噴出する．

6. 水平方向の力の基本計測実験

提案する Wind Abeam 方式の実現可能性を確認するため，この方式によって発生する水平方向の力を計測する実験を行った．これまでの風インタフェースの使用経験や予備実験から，利用者が仮想オブジェクトの存在を知覚できるには，50 g 重の力が必要であることが分かっている．そこで，本章の実験では，水平方向の力が約 50 g 重以上あるかどうかを判断基準とした．

6.1 曲線状のフィンによる実験

6.1.1 実験の目的と手順

最初に，曲線状のフィンによって発生可能な力を計測する実験を行った．この実験では，図 9 に示すように，曲線状のフィンを荷重計測器に取り付け，フィンに噴出空気を当てて計測を行った．なお，噴出空気により与えられる力はつねに変動しているため，計測データについては，1 サンプル/msec のデータを 5 秒間計測し，合計 5,000 サンプルの平均値を代表値とした．

提案方式では，ノズルとフィンの距離（図 10 の D ）が大きくなったり，あるいは，フィンのオフセット（図 10 の O ）が変化すると，発生する水平方向の

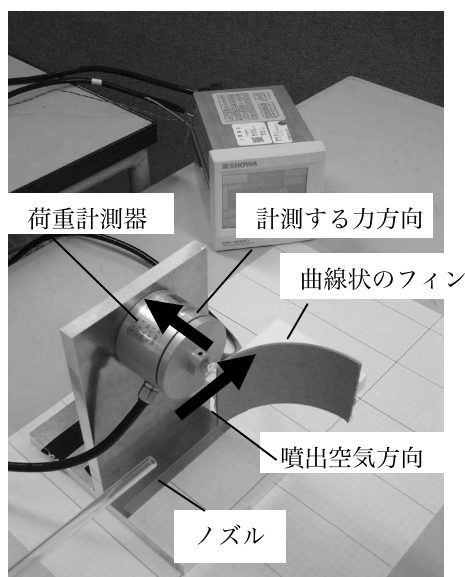


図 9 曲線状のフィンを使用する実験装置
Fig. 9 Experimental setup with flat fin.

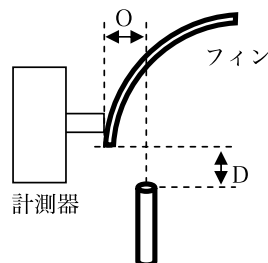


図 10 フィンとの距離とオフセット
Fig. 10 Distance and offset.

力が弱くなる可能性がある．そこで，フィンの下端を原点として，ノズルとフィンの距離 D を 0 cm から 40 cm まで変化させ，また，オフセットを 0 mm から 35 mm まで 5 mm 間隔で測定した．曲線状のフィンには，従来システムの風受容器の半径が 5 cm であることから，半径 5 cm 長さ 5 cm の筒状の厚紙を 4 分の 1 の弧となるように切ったものを使用した．また，使用したノズルの内径は，従来システムと同じく 4 mm である．なお，参考までに，今回使用するノズルが本来どのような力を発生させるのか調べたところ，ノズルから 10 cm 離れたところに縦横 5 cm の平面を設置して計測した場合で，噴出力は約 90 g 重であった．

6.1.2 実験結果

実験結果を図 11 に示す．距離 10 cm 以下の場合，オフセット 15 mm 程度まで 50 g 重以上の力を発生しており，仮想物体の提示に十分であることを示している．しかし，距離 15 cm 以上では，オフセットの量

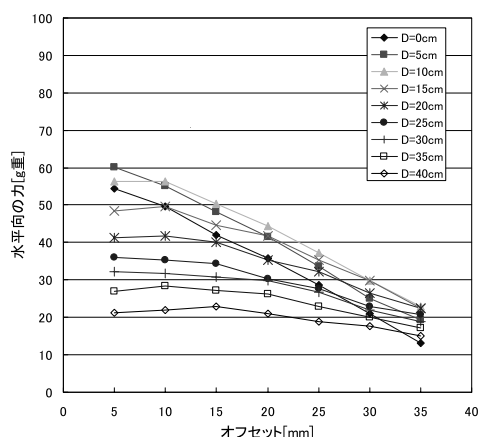


図 11 曲線状のフィンを使用した場合の水平方向の力

Fig. 11 Lateral force produced by curved fin.

にかかわらず不十分な力しか発生できていない。したがって、物体の提示範囲を表示面から高さ 10 cm 程度に限定すれば、本方式により物体からの水平方向の反力を表現可能であるといえる。

6.2 2本の噴出ノズルによる実験

6.2.1 実験の目的と手順

前記の実験の結果から分かるように、フィンを用いて上方向の力を水平方向の力に変換する場合には、水平方向に変換される力はかなり減衰してしまう。仮想物体の表示面からの高さを 10 cm より高くして物体の表現可能領域を拡張するためには、ノズルの形状を工夫して噴出空気の流れを抑える方法や、噴出空気の空気圧を高める方法が考えられる。しかし、これらいずれの方法も、追加の装置や加工コストが必要になるといえる。

そこで、筆者らは、ノズルを 2 本利用して水平方向に変換される力の絶対量を増やすこととした。しかし、隣あう 2 本のノズルから空気を噴出すると、一方は他方に対してオフセットが大きくなり、風受容器に提示できる力は小さくなる。また 2 つの噴出空気の流れがお互いに干渉することも考えられる。そこで、図 9 の実験装置におけるノズルを 2 本にして、その 2 本のノズルから空気を噴出する場合に風受容器に提示される水平方向の力を計測した。なお、2 本のノズルは 15 mm 間隔で平行に配置した。また、ノズル 1 本の実験と同様に、ノズルとフィンの距離 D を 0 cm から 40 cm まで変化させ、オフセット O を 0 mm から 35 mm まで 5 mm 間隔で変化させた。

6.2.2 実験結果

図 12 の結果によれば、距離 D が 20 cm 以下であれば、オフセット O が 15 mm の条件でも十分な力を

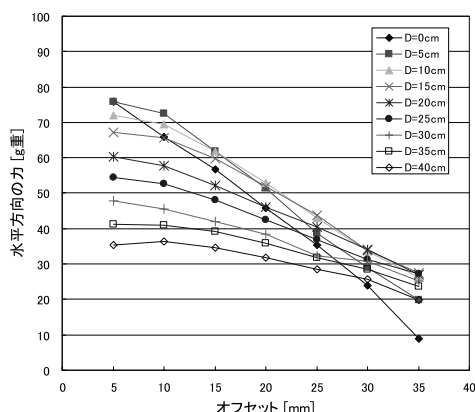


図 12 2本の噴出ノズルを使用した場合の水平方向の力

Fig. 12 Lateral force produced by double air jets.

発生できており、ノズルが 1 本の場合に比べて提示可能範囲を拡大できていることが分かる。

6.3 平面フィンによる実験

6.3.1 実験の目的と手順

曲線状のフィンは、曲線面に沿って噴出空気の流れを変化させることによって少ない損失で上方向の力を水平方向の力に変換できる点において有利であるが、フィンの形状製作上の困難さの問題がある。そこで、製作がより簡単と考えられる平面状のフィンについて、水平方向の力の提示能力を調べた。図 9 における曲線状フィンの代わりに、平面フィンを 45 度の角度で計測器に取り付けて実験を行った。この実験では、ノズルとフィンの距離を 5 cm から 25 cm まで変化させ、オフセットを 5 mm から 35 mm まで変化させた。平面フィンにはスチレンボードを使用した。大きさは、面を 45 度に傾斜させたとき、噴出方向に対して 5 cm 平方の正方形と同等の面積になるように、長さ 7 cm 幅 5 cm とした。

6.3.2 実験結果

図 13 の結果によれば、平面フィンを使用した場合には、オフセットの大きさにかかわらず、十分な力を発生できていないことが分かる。提示される力が、ノズルとフィンの距離やオフセットにかかわらず比較的一定であることから、力提示の安定性の面では優れていると考えられるが、水平方向に大きな力を発生させる点においては、オフセットの小さい場合を活用できる曲線状フィンの方が優れているといえる。

6.4 噴出方向の力の計測

6.4.1 実験の目的と手順

フィンを用いて上方向の力を水平方向の力に変換する場合には、同時に上方向の力も発生する。この影響を調べるために、ノズル噴出方向の力の計測を行った。

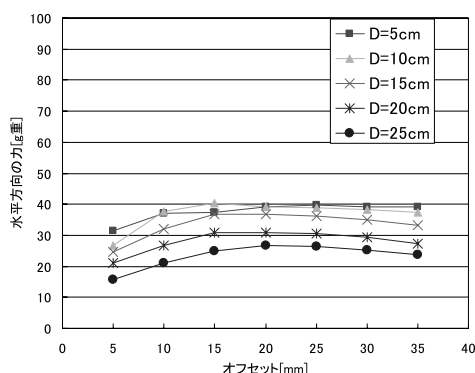
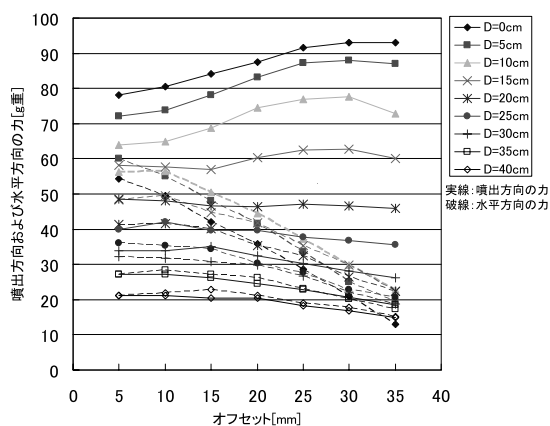


図 13 平面フィンを使用した場合の水平方向の力
Fig. 13 Lateral force produced by flat fin.

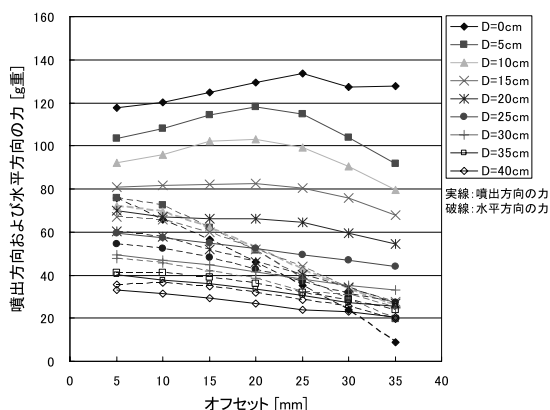
図 9 に示す荷重計測器を 90 度回転させ、ノズルに対して荷重計測器の計測面が垂直になるように配置して計測を行った。水平方向の力計測と同様に、フィンの下端を原点として、曲線状のフィンの 1 本または 2 本の噴出ノズルの場合は、ノズルとフィンの距離 D を 0 cm から 40 cm まで、平面フィンの 1 本の噴出ノズルの場合は 5 cm から 15 cm まで変化させた。また、オフセット O については、0 mm から 35 mm まで 5 mm 間隔で変化させた。

6.4.2 実験結果

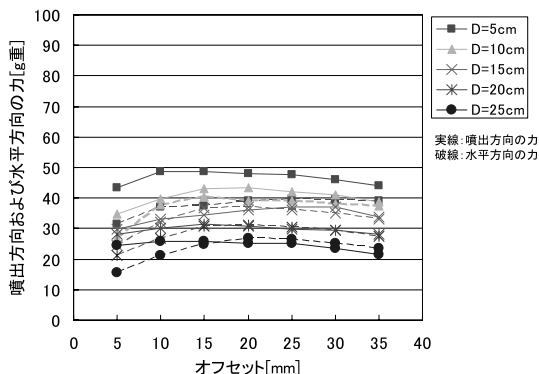
曲線状フィンかつノズルが 1 本の場合、曲線状フィンかつノズルが 2 本の場合、平面フィンかつノズルが 1 本の場合の計測結果を、それぞれ図 14 の (a) から (c) に示す。参考として、図 14 では、図 11 から図 13 に示した水平方向の力の計測結果も、破線で重ねて示している。これまでの実験において水平方向の力覚提示が可能であることが分かった範囲に着目すると、曲線状フィンかつノズルが 1 本の場合は、距離 D が 10 cm、オフセット O が 15 mm までの範囲において、水平方向の力の 1.2 倍から 2 倍の大きさの噴出方向の力が発生している。曲線状フィンかつノズルが 2 本の場合は、距離 D が 25 cm、オフセット O が 15 mm までの範囲において、水平方向の力の 1.1 倍から 2.2 倍の大きさの噴出方向の力が発生している。平面フィンかつノズルが 1 本の場合は、距離 D が 15 cm までの範囲において、水平方向の力の 1.0 倍から 1.6 倍の大きさの噴出方向の力が発生している。これらいずれの場合においても、オフセットが広がることによって、水平方向の力に対して噴出方向の力が大きくなっていることが分かる。したがって、オフセットが小さいフィンの切り立った部分に空気が当たるように噴出制御を行うことが重要と考えられる。今後は、噴出方向、すなわち、風インタフェース使用時の鉛直上方向にかか



(a) 曲線状のフィンかつ一本のノズルを使用



(b) 曲線状のフィンかつ二本のノズルを使用



(c) 平面フィンかつ一本のノズルを使用

図 14 噴出方向の力

Fig. 14 Longitudinal force produced.

る力を軽減するための方法を検討する必要がある。

7. 提案方式の実装

前記の基本計測実験の結果をふまえて、提案する Wind Abeam 方式を実装した。以下、実際に製作した風受容器と空気噴出装置について述べる。

7.1 風受容器

水平方向の力覚提示能力を考慮して、図 7 に示す環状型の曲線状フィンを取り付けた形状の風受容器を実現した。この風受容器は、中央の部分が従来の風受容器と同様の半径 5 cm の半球であり、その周囲には半径 5 cm の円を 4 分の 1 に切り取った弧がフィンとして環状型に取り付けられている。なお、風受容部の素材にはスタイロフォームを使用した。

7.2 空気噴出装置

今回、実現した空気噴出装置では、ノズル間隔を 1.5 cm とした。前記の基本計測実験の結果によれば、ノズル間隔が 1.5 cm であれば、風受容器がノズルアレイの上空 10 cm のどの位置であろうと、十分な水平方向の力を提示可能である。上方向に力を提示する場合は、噴出空気が風受容器の中心に当たるように噴出し、水平方向に力を提示する場合は、風受容器の側面のフィンに当たるように噴出する。力覚提示が可能な範囲については、オブジェクトの側面を両手で挟める程度の大きさとして 30 cm 四方に設定した。ノズル間隔が 1.5 cm であるから、 21×21 個の空気噴出ノズルが設置されていることになる。

8. 主観評価実験

8.1 実験目的

前記の基本計測実験の結果から、提案方式により水平方向の力を発生可能であることが分かったが、鉛直上向きの力の影響が問題である。さらに、実際の利用では、フィンが固定されていた基本計測実験とは異なり、利用者は風受容器を動かしながら操作を行う。したがって、実際に利用者が使用してみてもどのように感じるのかを調べるのが重要である。そこで、前章で述べた実装システムを利用して、主観評価実験を行った。

8.2 実験手順

この主観評価実験では、映像では表示されない段差のあるオブジェクトを被験者に提示し、接触感覚のみでその段差を見つけることができるかを調べた。段差のあるオブジェクトとして、利用者から見て左側が高く、右側が低い L 字型のオブジェクトを用意した。風受容器が段差オブジェクト右側の低い部分に接触すると、噴出空気が風受容器の中心にあたるように噴出され、従来システムと同様の上向きの力を提示する。風受容器が左側の高い部分に接触すると、噴出空気がフィンの右側の側面に当たるように噴出され、水平方向の力を提示する。また、L 字の内側のコーナー部分において、右の低い部分と左の高い部分の両方に風受容器が接触した場合には、上方向と水平方向の両方の

力提示が発生する。

この実験において被験者が行ったタスクは、以下のとおりである。まず、指定された高さを保ちながら、風受容器を左から右方向に移動させる。指示に従って、L 字型オブジェクトの低い部分の上面をなぞる。L 字型の側面がある段差を見つけた場所で風受容器を止め、その場所を回答する。なお、予備実験により、水平方向の力提示が始まる位置から約 9 cm ずれた位置までを段差があると認識する可能性があることが分かっていたことから、回答した段差の位置がこの 9 cm 以内か否かで、回答した段差の位置の正答を判定した。

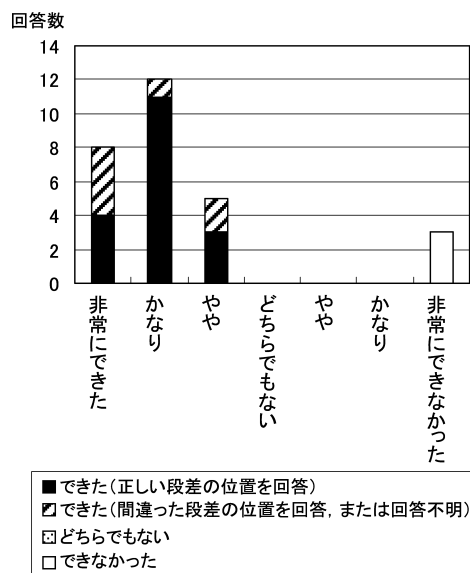
比較のため、左側の段差に当たっても水平方向の力は提示せず、上方向の力のみの提示を行う試行も行った。水平方向の力を提示する場合と提示しない場合について、被験者は各 2 回ずつ試行を行った。また、各試行ごとに、段差の見つけやすさに関して 7 段階評価による質問紙アンケートを実施した。被験者は、20 代から 40 代の男女 14 名である。

8.3 実験結果

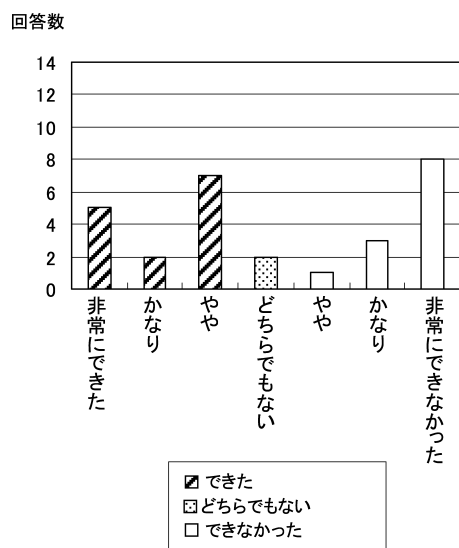
図 15 の (a) と (b) は、それぞれ水平方向の力を提示した場合、提示しなかった場合についての実験結果で、被験者が段差を見つけることができたかについて回答したものである。図 15 (a) の水平方向の力を提示した場合については、被験者が段差を見つけることができたと回答しているものについて、正しい段差の位置を回答した場合と間違った回答をした場合を区別して示した。

図 15 (a) から分かるように、水平方向の力を提示した場合、全 28 回の試行において、段差を見つけることができたのは 25 回であり、そのうちの 18 回において正しく段差の位置を回答している。一方、図 15 (b) によれば、上方向のみの力を提示した場合、全 28 回中、14 回の試行において、段差があると回答している。なお、水平方向の力を提示した場合に間違った段差を答えた回答があったが、これは L 字型オブジェクトの右端を段差と勘違いしたことが原因であった。

また、水平方向の力を提示した場合と提示しない場合について、被験者が回答した段差の位置を調べた。図 16 は、被験者が段差を見つけたと回答した時点での風受容器の位置を、回答数のヒストグラムとして表したものである。横軸は、実際の風受容器の位置を示しており、水平方向の力覚提示が始まる位置を 0 とし 1.5 cm 刻みの間隔で区切っている。縦軸は、風受容器の各位置に関して、段差を見つけたと被験者が回答した回数を示している。なお、先に述べた L 字型オブジェクトの右端を段差と間違えた回答は除外した。



(a) 水平方向の力が提示される場合



(b) 水平方向の力が提示されない場合

図 15 主観評価実験の結果

Fig. 15 Results on subjective evaluations.

図 16 から分かるように、水平方向の力覚を提示しない場合に比べて、提示した場合は、回答のばらつきが小さく、また、力覚提示が始まる位置 0 に近い付近に被験者の回答が多い。この結果から、水平方向の力覚を提示した場合の方が、被験者が正しい段差の位置を回答できているといえる。

以上、提案方式を用いて水平方向の力を提示したことにより、力覚提示における表現力が向上したことを確認できた。

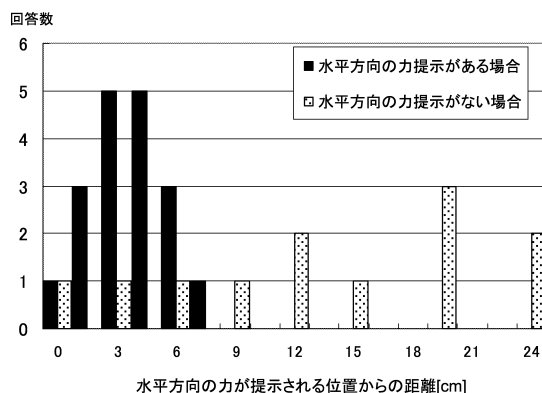


図 16 被験者が回答した段差の位置

Fig. 16 Tier positions that subjects answered.

9. 今後の課題

風受容器の形状については、今後さらなる検討が必要と考えている。現状、水平方向よりも噴出方向の力が強すぎる場合があることだけでなく、利用者が風受容器の棒部分を強く握っていないと、フィンの端に噴出空気が当たった場合に回転モーメントが発生し、これによって風受容器が回転してしまう場合がある。

さらに、利用者は、オブジェクトの側面に触ろうとするときに風受容器を傾けたり横向きにしたりすることがある。しかしながら、現在の風インタフェースでは、風受容器を傾けると正しく力覚提示を行うことができない。このような風受容器の回転に対しても解決策を検討する必要がある。

また、前記の仮想くろアプリケーションを実現するためには、水平方向の力覚提示だけでなく、オブジェクト変形時の反力の提示や静止時の安定した力覚提示技術も必要となる。また、噴出空気の噴出量や噴出速度を制御することで、仮想オブジェクトの硬さを表現することも可能かもしれない。

10. おわりに

本論文では、これまで開発してきた風インタフェースの無拘束性という利点を損なうことなく、水平方向の力を提示する方法として、Wind Abeam 方式を提案した。実際にかかる力の基本計測実験と被験者を用いた主観評価実験により、提案方式の実現可能性を確認した。今回の検討は、1 方向への力覚提示のみが可能であった従来の風インタフェースの適用範囲を大きく拡張するものである。提案方式により、従来方式の物体上面に触った感覚の提示だけでなく、物体の側面に触った感覚を提示できるようになる。今後は、この

水平方向の力覚提示技術をもとに、力覚提示における表現力向上に向けた基礎検討を行うとともに、力覚提示アプリケーションの開発にも取り組みたい。

謝辞 本研究の実験を実施するにあたり、豊橋技術科学大学の安並妙子氏に多大なるご協力をいただいた。ここに深く感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 1) Massie, T.H. and Salisbury, J.K.: The PHAN-ToM Haptic Interface: A Device for Probing Virtual Objects, *Proc. ASME Winter Annual Meeting, Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems*, Chicago, IL (Nov. 1994).
- 2) Brooks Jr., F.P., Ouh-Young, M., Batter, J.J. and Kilpatrick, P.J.: Project GROPE — Haptic Displays for Scientific Visualization, *Proc. ACM SIGGRAPH '90*, pp.177-185 (1990)
- 3) 佐藤 誠, 平田幸広, 河原田弘: 空間インタフェース装置 SPIDAR の提案, 信学会論文誌 D-II, Vol.J749-D-II, No.7, pp.887-894 (1991).
- 4) 廣瀬通孝, 小林哲朗, 矢野博明, 箕 直之, 中垣好之: ワイヤータンションを用いたウェアラブルフォースディスプレイの開発, 日本 VR 学会大会論文集, Vol.3, pp.1-4 (1998).
- 5) Immersion Corporation: CyberGrasp. <http://www.immersion.com/>
- 6) Gomez, D., Burdea, G. and Langrana, N.: Integration of the Rutgers Master II in a Virtual Reality Simulation, *Proc. IEEE VRAIS'95 Conference*, pp.198-202, Research Triangle Park, NC (Mar. 1995).
- 7) 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).
- 8) Suzuki, Y. and Kobayashi, M.: Air Jet Driven Force Feedback in Virtual Reality, *Computer Graphics and Applications*, Vol.25, No.1, pp.44-47, IEEE (2005).
- 9) Iwata, H., Yano, H., Nakaizumi, F. and Kawamura, R.: Project FEELEX: Adding Haptic Surface to Graphics, *Proc. SIGGRAPH2001* (2001).
- 10) Kobayashi, M. and Suzuki, Y.: Untethered VR

Interface with Multi-directional Force Feedback Based on Air Jets, *HCI International*, (2005). CD-ROM.

(平成 17 年 9 月 28 日受付)

(平成 18 年 5 月 9 日採録)



鈴木由里子 (正会員)

1993 年三重大学工学部情報工学科卒業。1995 年同大学大学院修士課程修了。同年日本電信電話(株)入社。サイバースペースにおけるコミュニケーション環境の研究開発, 特に力覚インタフェースなどのヒューマンインタフェースの研究に従事。現在, NTT サイバーソリューション研究所勤務。ACM 会員。



井原 雅行 (正会員)

1994 年東京工業大学工学部情報工学科卒業。1996 年同大学研究生。1997 年同大学大学院修士課程修了。同年日本電信電話(株)入社。2002~2003 年加国 New Media Innovation Center およびブリティッシュコロンビア大学客員研究員。主に, 人間の好みのモデル化, 仮想空間共有, 価値観共有の研究に従事。現在, NTT サイバーソリューション研究所主任研究員。ACM, 電子情報通信学会, 映像情報メディア学会, 画像電子学会各会員。



小林 稔 (正会員)

1988 年慶應義塾大学工学部計測工学科卒業。1990 年同大学大学院修士課程修了。同年日本電信電話(株)入社。1996 年マサチューセッツ工科大学大学院修士課程修了。主に, CSCW, ヒューマンインタフェースの研究に従事。現在, NTT サイバーソリューション研究所主幹研究員。博士(工学)。ACM, IEEE Computer Society, 電子情報通信学会, 日本バーチャルリアリティ学会各会員。