

仮想空間における風圧による力覚提示

鈴木 由里子、 河野 隆志、 石橋 聡
NTT サイバースペース研究所

仮想空間の臨場感を高める事が一つの重要な研究テーマとなっているが、その一つとして没入型多面ディスプレイを表示装置として操作者が身体全体で仮想空間を体験できる没入型等身大仮想環境が提案されている。本論文では没入型仮想環境でさらに臨場感を高めるため、風圧による力覚提示が可能なことを物理モデルで示し、現実世界の操作者の身体や所持物に風を受ける物体を取り付け、仮想環境のイベントに合わせて風を制御し、現実世界の風を受ける物体に対して風圧を与え操作者に圧力として提示することで、操作者の身体や所持物に力覚を提示する方式を提案する。さらに、そのプロトタイプについて報告する。

A study of force display using wind pressure for cyber space

Yuriko Suzuki, Takashi Kouno, Satoshi Ishibashi
NTT Cyber Space Laboratories

Virtual environments with immersive multi displays that allow the user's body to enter the virtual world have been proposed. However, such environments must be enhanced to provide more sensation to the user. This paper proposes a force generation method using wind pressure to enhance the reality of the environment and discusses physical models to show the feasibility of the method. We describe a prototype system for an immersive virtual environment.

1. まえがき

近年、人工現実感の技術が急速に発展しつつある中、仮想空間の臨場感を高めることが一つの重要な研究テーマとなっている。そのため、没入できる多面ディスプレイを表示装置として操作者は仮想空間に入り込み、通信相手と音声やジェスチャーによるコミュニケーションを行って、身体全体で仮想環境を体験できる没入型等身大仮想環境を提案しているが[1]、さらに臨場感を高めるため仮想空間内での力覚の提示について検討を行っている。

従来の力覚提示装置では、6自由度のマニピュレータを手等で操り各関節軸の反力を制御して力覚を提示する方式[2]、糸の張力により力覚を提示する方式[3]、グローブの指の曲

げを機械的に制御し力覚を提示する方法[4]などが試みられている。しかし操作者が自由に動き回る環境では、これらの装置を使用する場合、操作者の動きが制約され、または重い装置を装着することが問題となる。また没入型の仮想環境においては、手以外の部分にも力覚を提示する方法が有効である。

そこで、本論文では風圧による力覚提示が可能であることを物理モデルで示し、没入型仮想環境で使用することを目的として、現実世界の操作者の身体や所持物に風を受ける物体を取り付け、仮想環境のイベントに合わせて風を制御し、現実世界の風を受ける物体に対して風圧を与え操作者に圧力として提示することで、操作者への動作の制約をすること

なく、操作者の身体や所持物に力覚を提示する方式を提案する。さらにそのプロトタイプについて報告する。

2. 流体による力覚提示の物理モデル

風圧による力覚提示を考えるため流体による力の物理モデルについて述べる。

(a) 流体が平面との衝突時に平面に与える力

流体が平面に衝突した時の平面にかかる力を考えると、流体は質点の定常的な流れであり、質点に変化することから、短時間 Δt 中に一定に保たれる副の質点系 S を定めて考える。なお、質点とは質量だけがある広がりや大きさのない理想化した物体である。

時刻 t において、 Δt の時間に S に入ってくる質点と、時刻 $t+\Delta t$ において Δt 時間に S から離れる質点を考えると、両場合とも同じ質点が含まれる。また、 S の全質量 m は一定に保たれるから、 Δt 時間中に、 S に入る質点と S から出て行く質点とは同じ質量 Δm を持っている。従って、 S に入る質点と、 S から出て行く質点の速度をそれぞれ、 \vec{v} 、 \vec{v}' で示し、 S にはたらく力 \vec{f} を考えると、以下が成り立つ [5]。

$$(\Delta m) \vec{v} + \sum \vec{f} \cdot \Delta t = (\Delta m) \vec{v}' \quad (1)$$

ここで、図1のような x - y 平面において、角度 γ ($0 \leq \gamma \leq \pi$) で固定された滑らかな平面に、ノズルから速度 \vec{v} で噴出する流体が角度 θ ($-\pi/2 \leq \theta \leq \pi/2$) で平面に衝突し、2つの流れ①および②となる場合を考える。平面は流体より力 \vec{f} を受け、平面が固定されていることから、その力 \vec{f} を反作用の力 \vec{f}' として返す。噴流は、その内部の全ての点で静圧が等しく、曲がる際に運動エネルギーの損失がないとし、非粘性流体とすると、平面に平行方向のせん断力は作用せず、力 \vec{f}' は平面に垂直な成分のみと

なる [6]。よって、 Δt 時間の流体の質量を Δm とすると、式(1)より平面に対して垂直成分の平面に作用する力 $f'_{x'}$ は、

$$f'_{x'} = \frac{(\Delta m) \cdot v \cos\left\{\frac{\pi}{2} - (\theta + \gamma)\right\}}{\Delta t} = \frac{(\Delta m) \cdot v \sin(\theta + \gamma)}{\Delta t} \quad (2)$$

なお、平面に対する平行方向の成分は、外力が加わらないことから、運動量は保存され、

①および②の運動量となる。

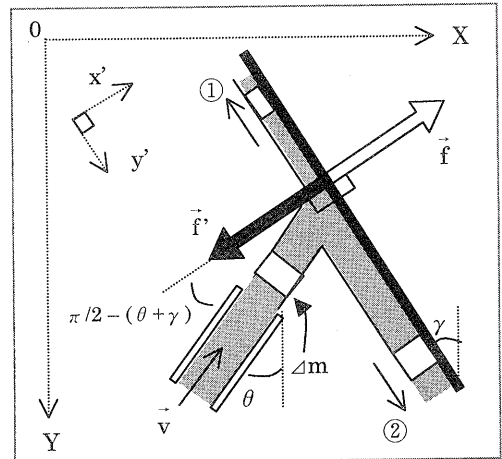


図1：平面に衝突する流体

また、単位時間あたりの流体の量を Q とし、ノズル口の面積を A 、空気の密度を ρ とすると、 $\Delta m = Q \cdot \Delta t = \rho A v \cdot \Delta t$ (つまり、 $v = Q / \rho A$) が成り立ち、式(2)より平面に対して垂直成分の力 $f'_{x'}$ は、

$$f'_{x'} = \frac{Q^2 \cdot \sin(\theta + \gamma)}{\rho A} \quad (3)$$

従って式(3)より、 ρ, A, θ, γ を一定とすると、単位時間あたりの流体の量を変化させることで、平面に与える力(風圧)が制御可能であることがわかる。

(b) 平面が物体との衝突時に平面が受ける力と風圧による力覚提示

平面が物体との衝突時に、平面が受ける力

を考える。質量 M の平面が動かないほど重いものに速度 \vec{V} でぶつかり、 Δt 時間の間物体と接触した後、 \vec{V}' で跳ね返った時、衝突の瞬間に働く力を \vec{F} とすると、以下が成り立つ[5]。

$$M\vec{V} + \Sigma \vec{F} \cdot \Delta t = M\vec{V}' \quad (4)$$

図2のように角度 β で傾いている滑らかな平面が、動かないほど重く表面の摩擦がない球形のある物体に、平面に対して角度 α でぶつかり跳ね返る運動を考える。また、衝突時に力を加えないとする。平面は滑らかであることから、平面とある物体が接触している間、平面に対して平行方向の力は作用せず、反力は平面に垂直な成分のみとなる。よって、速度 V で動かないほど重いものに衝突したときの跳ね返り係数を $e(0 \leq e \leq 1 : e$ は2物体の材質、形、大きさ、衝突速度に関係し、 $e=0$ なら完全塑性衝突、 $e=1$ なら完全弾性衝突)とすると平面に対する垂直成分 x' の速度は $V'_{x'} = eV_x$ で跳ね返ることから、式(4)より平面に対する垂直成分を考えると、その方向に働く力を $F_{x'}$ とすると以下が成り立つ。

$$F_{x'} \cdot \Delta t = MV(1+e) \cdot \sin \alpha \quad (5)$$

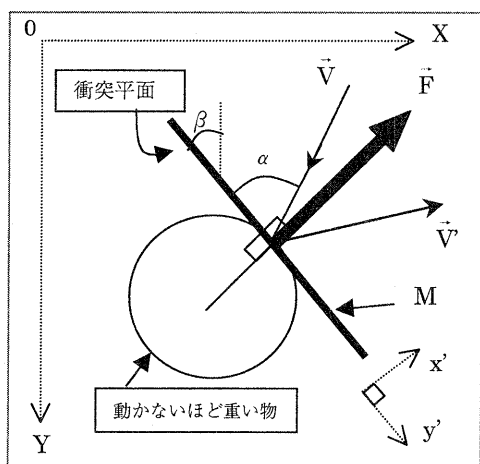


図2：物体に衝突する平面

従って、平面で叩いた時の衝撃を流体による圧力として風圧で提示するには、平面に対しての垂直成分が、式(3)(5)より以下になればよい。なお、平面が流体を受け取る面となるので、 $\beta = \gamma$ となる。

$$MV(1+e) \cdot \sin \alpha = \frac{Q^2 \cdot \Delta t \cdot \sin(\theta + \gamma)}{\rho A} \quad (6)$$

ただし、平面は速度 V で流体に Δt 時間衝突しその間平面は動かないとし、 Δt 時間の間だけ流体を提示して、その後平面は速度 V' で跳ね返るとする。また単位時間あたりの流体の量 Q 、ノズル口の面積 A 、流体の密度 ρ 、ノズルから Δt 時間噴出する質量 $\Delta m (= Q \cdot \Delta t = \rho Av \cdot \Delta t)$ 、流体が発射される速度 $v (= Q / \rho A)$ とし、噴出する流体全てを平面が受け止め、質量を失うことなく滑らかな平面上の2つの流れとなるとする。

式(6)より、平面が物体に衝突した時の反力を、流体で提示するには、流量 Q に対して以下が成り立つ必要がある。

$$Q = \sqrt{\frac{\rho AM(1+e) \cdot \sin \alpha}{\Delta t \cdot \sin(\theta + \gamma)}} V \quad (7)$$

式(7)より、 $\rho, A, \alpha, e, \Delta t, \theta, \gamma, M$ を一定とすると、平面が物体に衝突した時の反力は式(5)のようになり、その反力を流体で提示するには、式(7)より平面の速度 \sqrt{V} に比例した流量 Q を噴出する必要がある。その他、反力を流体で制御するにはノズル口の面積 A を変化させる方法も考えられる。

例えば、 y 軸のマイナスからプラスの方向に沿って平面で叩くとし、力覚を提示するため y 軸のプラスからマイナスの方向に沿って風圧を噴出させるとすると、 $\theta = 0, \beta = \gamma = \pi/2, \alpha = \pi/2$ となり、平面への風量 Q は以下のようになる。

$$Q = \sqrt{\frac{\rho AM(1+e)}{\Delta t}} V$$

(c)流体を受けとめる面が、凹・凸形面の場合

図3のように角度 γ ($0 \leq \gamma \leq \pi$)の固定された平面に流体が衝突し、角度 ϵ ($-\pi/2 \leq \epsilon \leq \pi/2$)で平面の系から流体が出て行く場合の運動を考える。ノズルから速度 \vec{v} で噴出する流体が角度 θ ($-\pi/2 \leq \theta \leq \pi/2$)で平面に衝突し、2つの流れ①および②となる。平面は流体より力 \vec{f} を受け、平面が固定されていることから、その力 \vec{f} を反作用の力 \vec{f}' として返す。噴流は、その内部の全ての点で静圧が等しく、曲がる際に運動エネルギーの損失がないとすれば、①および②の流体の速度は、 \vec{v} と等しくなる[6]。これより 平面に対して垂直成分と、平行成分を考え、それぞれの方向への力を $f'_{x'}$ 、 $f'_{y'}$ とし、 Δt 時間の流体の質量を Δm 、①および②にわかれた質量を Δm_1 および Δm_2 とすると、式(1)より以下が成り立つ。

平面に対して垂直成分 x' :

$$\begin{aligned} &(\Delta m) \cdot v \sin(\theta + \gamma) - f'_{x'} \cdot \Delta t \\ &= -(\Delta m_1) \cdot v \sin(\epsilon) - (\Delta m_2) \cdot v \sin(\epsilon) \\ f'_{x'} \cdot \Delta t &= (\Delta m) \cdot v \cdot \{\sin(\theta + \gamma) + \sin(\epsilon)\} \quad (8) \end{aligned}$$

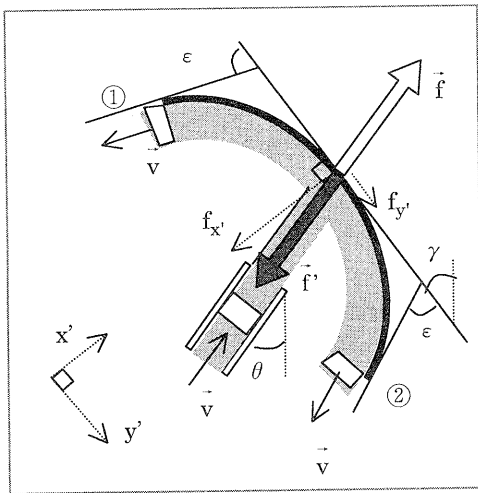


図3：凹凸面に衝突する流体

平面に対して平行成分 y' :

$$\begin{aligned} &-(\Delta m) \cdot v \cos(\theta + \gamma) + f'_{y'} \cdot \Delta t \\ &= -(\Delta m_1) \cdot v \cos(\epsilon) + (\Delta m_2) \cdot v \cos(\epsilon) \\ f'_{y'} \cdot \Delta t &= (\Delta m) \cdot v \cos(\theta + \gamma) \\ &+ \{-(\Delta m_1) + (\Delta m_2)\} \cdot v \cos(\epsilon) \end{aligned}$$

平面に対してかかる力の垂直成分を、流体を受けとめる面が平面時と凹型時の場合で比較すると、

平面時の力は式(2)より

$$f'_{x'} = \frac{(\Delta m) v \cdot \sin(\theta + \gamma)}{\Delta t}$$

凹・凸型時の力は式(8)より

$$f'_{x'} = \frac{(\Delta m) v \cdot \{\sin(\theta + \gamma) + \sin(\epsilon)\}}{\Delta t} \quad (9)$$

従って、角度 ϵ ($0 \leq \epsilon \leq \pi/2$)のとき流体を受けとめる面は凹型となり、その面に受ける力は平面時より大きくなり、 ϵ が $\pi/2$ に近づくほど大きな力を受ける。また角度 ϵ ($-\pi/2 \leq \epsilon \leq 0$)のとき流体を受けとめる面は凸形となり、その面に受ける力は凹型、平面時より小さくなって、 ϵ が $-\pi/2$ に近づくほど受ける力は小さくなる。

3. 提案方式

仮想空間における風圧による力覚提示の方式について説明する。

- ・ 現実世界の操作者の身体や所持物において力覚を提示する位置に風を受ける物体を取り付ける。
- ・ その風を受ける物体に風圧を与える送風装置を用意する。この送風装置は送風の位置・向き・強さ等を制御可能とする。
- ・ 仮想空間において、仮想的な接触が発生する接触オブジェクトと圧力を受けるオブジェクトを仮想空間内に用意する。
- ・ 現実世界の風を受ける物体の位置・向きをセンシングし、風を受ける物体の位置・

向きに応じて仮想空間内の圧力を受けるオブジェクトを動かす。

- ・ 仮想空間内で接触オブジェクトと圧力を受けるオブジェクトが接触したかを計算する。接触が発生していたら、送風装置の送風の位置・向きと、送風の強さを制御し、接触が発生した部分として対応させた現実世界の操作者の身体や所持物に取り付けた、風を受ける物体に風圧を与える。

本提案の概念図を図4に示す。

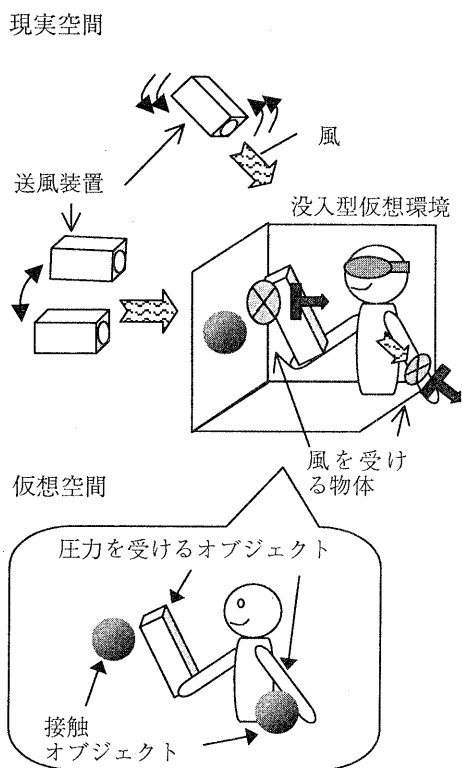


図4：概念図

なお、送風の強さ制御は、式(7)よりわかるように、接触時の風を受ける物体の速度に応じて単位時間あたりの送風の風量を変化させる方式や送風口面積を変化させる方法が考えられる。また、風を受ける物体は、式(2),(9)よりわかるように風を受け止めやすい凹型の

物体が効果的であるが、操作者の衣服・所有物自体等の面でもよい。さらに送風口はディスプレイを隠さないように透明なホース等の使用が考えられる。これにより、本提案は、装備の負荷や操作の制約が少なく、力覚を提示することができる。

4. 実現

本提案のプロトタイプを構築した。アプリケーションは仮想空間内の穴から飛び出したカップをハンマーでたたきカップたたきとした。このカップが接触オブジェクトであり、ハンマーが圧力を受けるオブジェクトである。それらが接触すると、現実世界で操作者の所持物に取り付けられた風を受ける物体に風圧を与える。その接触感覚が操作者に伝わり、間接的に風圧による力覚でオブジェクトに接触したことを提示する。なお、送風の強さは、単位時間あたりの風量を制御することでおこない、風量の制御は送風装置への電圧で制御できるようにした。また、仮想空間の表示方法としては一般的なディスプレイを使用した。本システムの構成を図5に示す。

- ・ 風を受けるため先端に凹型の物体を取り付けた軽量のラケットを用意する。送風装置としてエアポンプを使用する。エア

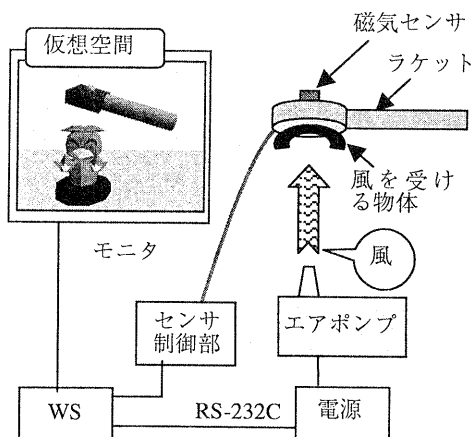


図5：システム構成

ポンプへ供給する電源を制御することで、送風の ON/OFF を制御する。

- ・ 仮想空間内では、仮想的な接触が発生する接触オブジェクトとしてカップを、圧力を受けるオブジェクトとしてハンマーを、仮想空間内に用意する。
- ・ 現実世界のラケットに磁気センサを取り付けセンシングし、その位置・向きに応じて、仮想空間内のハンマーを動かす。
- ・ 本提案は現実世界におけるエアポンプからの送風口の位置に対応する仮想空間の位置を、カップが飛び出す穴の位置に設定する。これにより、仮想空間内でカップとハンマーが接触する位置が現実世界では送風口の位置周辺となる。
- ・ 仮想空間内でハンマーとカップが接触した時、エアポンプへ供給する電圧を制御し、風を発生させる。このときラケットに取り付けた風を受ける物体は送風場所に位置しており、風圧を与えることでラケットに圧力がかかり、操作者の所持部分に力覚を与えることになる。

プロトタイプの実現により、風圧の発生の遅延が気にならないことや、間接的に操作者に提示する力覚として、動いている物体から

の反力を提示できることが確認できた。プロトタイプシステムを図6に、表1にその仕様を示す。

表1：プロトタイプシステムの仕様

エアポンプ	SPP-GL-H(テクノ高槻)
センサ	Fastrak(Polhemus)
交流電源	PCR-500L(菊水電子工業)
WS	O2(Silicon Graphics)

4. まとめ

本稿では風圧による力覚提示の方式を提案しその物理モデルを示した。またその物理モデルより、没入型仮想環境で使用することを目的に操作者の身体や所持物に力覚を提示する方式について提案し、実現したプロトタイプシステムについて述べた。

今回は風圧による力覚提示の効果を確認したが、今後は、ラケットを振り下ろした速度やオブジェクトの動きによって送風の強さを制御する等より現実感に近い力覚フィードバックの制御を目指し、本システムの評価を行う。また没入型仮想環境へ適用し、ネットワーク上での力覚のやり取り等を検討する。

参考文献

- [1] 河野 他: "没入型仮想コミュニケーション環境", 信学技報 MVE99-45, pp.1-8, Jul. 1999
- [2] F.P. Brooks: "Project GROPE - Haptic Displays for Scientific Visualization", Proceedings of ACM SIGGRAPH '90, pp.177-185, 1990
- [3] 佐藤 他: "空間インタフェース装置 SPIDAR の提案", 信学会論文誌 D-II, j749-D-II (7), pp.887-894, 1991
- [4] CyberGrasp: <http://www.virtex.com/>
- [5] F.P.Beer/E.R.Johnston: "力学", プレイン図書出版, 1976
- [6] 生井武文: "流れの力学", コロナ社, 1976

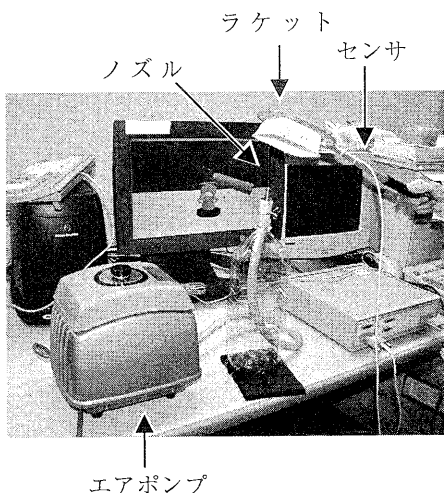


図6：プロトタイプシステム