

無拘束なインターフェースを目指した風圧による力覚提示方式

鈴木 由里子[†] 小林 稔[†] 石橋 聡[†]

[†]日本電信電話株式会社 NTTサイバースペース研究所

あらまし VR 技術等の新しい技術をもとに日常生活に用いる道具を実現していく取り組みにおいては、道具が利用者を拘束しないようにすることが大切である。我々は利用者の身体や所持物に風圧を与えることで、利用者に力覚を提示する力覚提示方式を提案している。本方式の力覚提示装置によれば、利用者は装置に拘束されることなく、自由に動くことができる。本稿では、風圧による力覚提示の方法について述べ、システムの実装、および風圧による豊かな力覚表現の検討について述べる。

Design of wind pressure based force display toward untied human interface

Yuriko SUZUKI[†], Minoru KOBAYASHI[†], and Satoshi ISHIBASHI[†]

[†]NTT Cyber Space Laboratories, NTT Corporation

Abstract In order to apply VR technologies to tools for everyday life, it is necessary to develop human interface technologies that never constrain users' activities. To achieve this goal, we proposed the force display method that utilizes wind pressure to give force sensation to users. This force display does not constrain users' activity, and allows users move freely. This paper introduces the basic idea of the wind pressure based force display, describes the implemented system, and discusses the way of controlling wind pressure to realize the expressive force display.

1. はじめに：無拘束なインターフェース

近年、人工現実感(VR)の技術が急速に発展する中、VR 技術を実現するための様々な研究が進められている。これらの技術は現状では特殊な環境においてのみ利用可能だが、これら VR 技術を一般の日常の生活環境においても利用可能にできれば、利用場面が多様化し、より有効な生活の道具となっていくと期待される。

日常生活で利用する道具に求められるヒューマンインターフェースの要件としては、使いたいときにすぐに使用でき、やめたいときにすぐにやめられること、使用中の負荷が少ないことなどがある。これら利用者を拘束しない特質(無拘束性)を、本研究では目指している。

この無拘束性を軸に、現在の VR の装置を考えると、聴覚についてはヘッドフォンを装着しない立体音場の再生に向けた研究が進んでいる。また、視覚については、CAVE [1]などの没入型仮想環境では、利用者は立体視眼鏡をかけ、ディスプレイで囲まれた空間に入ることによって、身体全体で仮想空間

に入り込み自由に動き回ることができる。またさらに眼鏡なし立体ディスプレイなども試みられている。

しかし、仮想空間の物体に触れるための技術である力覚提示装置を考えると、従来の力覚提示装置としては、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]、グローブを指の曲げを機械的に制御し、力覚を提示する方式[5]

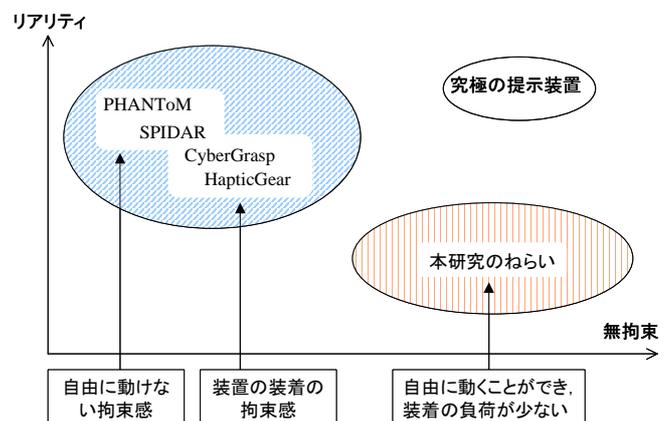


図1 本研究のねらい

などが試みられている。しかし、これらの装置を使用する場合、装置を装着するのに時間がかかり、すぐに使用することおよび止めることができない、または装着する装置が重い、操作部分が据え付けの装置とつながっているため自由に動くことが出来ない等、使用中の負荷が考えられる。従って、利用者は装置に拘束されてしまう。

そこで、日常生活環境において使いやすい無拘束なインターフェースを目指して、我々は風圧による力覚提示方式を提案している[6]。風を利用した提示方式としては、ファンで構成された装置を利用者が手にもち、その手に風覚を知覚させる方法が提案されている[7]。この方式は、風を風として提示することで、風の大きさ・方向等の風覚情報を利用者に提示することを目的としたもので、力覚提示を目的としたものではない。これに対し本方式は、風を風として感じさせるのではなく、力を提示する媒体として利用するもので、仮想環境のイベントに合わせて風を制御し、利用者の身体や所持物に取り付けた風受容器(送風装置からの風を受けて、力を与える板)に風圧を与えて力を提示する方式である。本方式の力覚提示装置によれば、従来方式に比べ、利用者は装置に拘束されること無く、自由に動くことができる(図1)。本稿では、本方式の風圧による力覚提示の方法について述べ、システムの実装、および風圧による豊かな力覚表現の検討について述べる。

2. 風圧による力覚提示方式

仮想空間における風圧による力覚提示の方法について説明する。本方式の概念図を図2に示す。

現実世界において利用者の身体や所持物に、風受容器を取り付ける。仮想空間においては、仮想的な接触を発生させる接触オブジェクトと、接触オブジェクトとの接触を判定する接触判定オブジェクトを用意する。利用者に取り付けた現実世界の風受容器の動き(位置・向き)を計測し、それに応じて仮想空間内の接触判定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接触判定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、接触が発生した接触判定オブジェクトに対応している現実世界の風受容器に風圧を与える。以上より、仮想物体に接触すると、風圧により力覚が提示されることができる。

なお、風受容器としては、凹形の物体を取り付

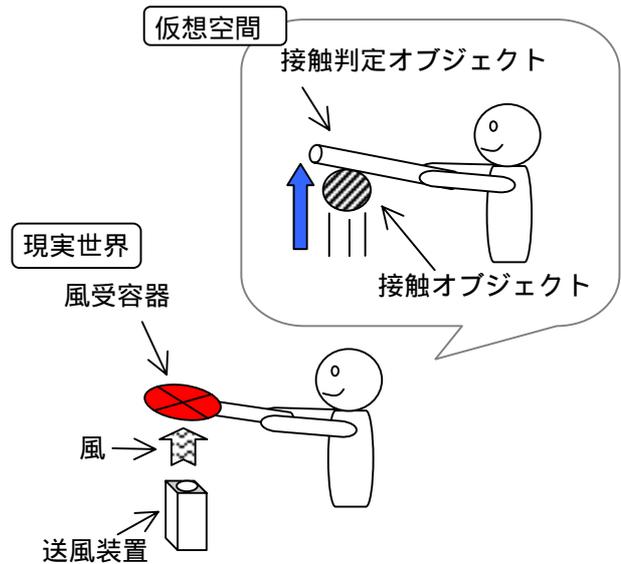


図2 概念図

けることや、操作者の衣服・所持物自体の面を取り付けることが考えられる。

力提示に空気を利用する本方式では、従来方式の様にアームやワイヤーにより利用者を装置に拘束することが無いので、利用者は自由に動くことができ、無拘束性を実現できる。

3. 風圧による力覚提示方式

風圧による力覚提示を実現するため、風圧による力覚提示の物理モデルについて述べる。

3.1 流体による力覚提示の物理モデル

本方式が、風を風受容器の面で受けとめ、力覚として提示する方式であることから、流体が平面に衝突するときの働く力の物理モデルについて述べる。

図3のような $x-y$ 平面において鉛直面より角度

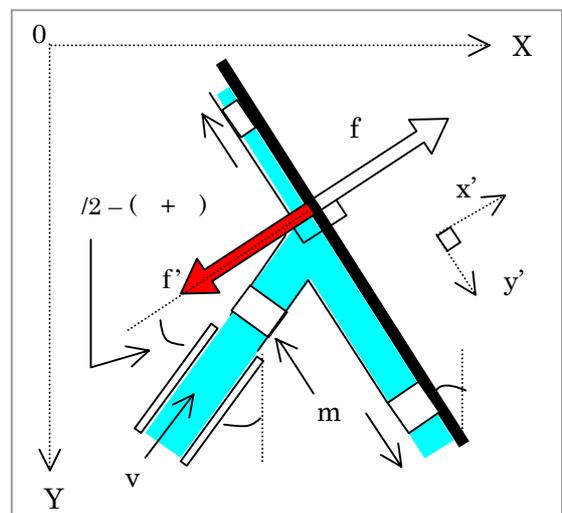


図3 平面に衝突する流体

($0 \leq \theta \leq \pi/2$)で固定された滑らかな平面に対して、ノズルから速度 v で噴出する流体が角度 ($-\pi/2 \leq \theta \leq \pi/2$)で平面に衝突し、2つの流れ および θ となる場合を考える。

平面は流体より力 f を受け、平面が固定されていることから、その力 f を反作用の力 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く、非粘性流体と仮定すると、平面に平行方向のせん断力は作用しない[8]。この時、送風口から t 時間噴出する流体の質量を m 、流体が発射される速度を v 、送風口の単位時間あたりの流体の質量を Q 、送風口の面積を A 、流体の密度(単位体積の質量)を ρ とすると、 $m = Q \cdot t = A \cdot v \cdot \rho \cdot t$ より、平面に対して垂直成分の力 $f'_{x'}$ は、次のように表すことができる。

$$f'_{x'} = \frac{(\rho \cdot m) \cdot v \cdot \sin(\theta + \gamma)}{t} = \frac{Q \cdot v \cdot \rho \cdot \sin(\theta + \gamma)}{A} \quad (1)$$

式(1)より、単位時間あたりの流体の質量 Q または送風口の面積 A を変化させることで、平面に与える力が制御可能であることが分かる。

次に、流体を受ける面が、凹・凸形面の場合を考える。図4のように角度 ($0 \leq \theta \leq \pi/2$)の固定された面に流体が衝突し、角度 ($-\pi/2 \leq \theta \leq \pi/2$)で面から流体が出て行く場合の運動を考える。送風口から速度 v で噴出する流体が角度 ($-\pi/2 \leq \theta \leq \pi/2$)で面に衝突し、2つの流れ および θ となる。

面は流体より力 f を受け、面が固定されていることから、その力 f を反作用の力 f' として返す。

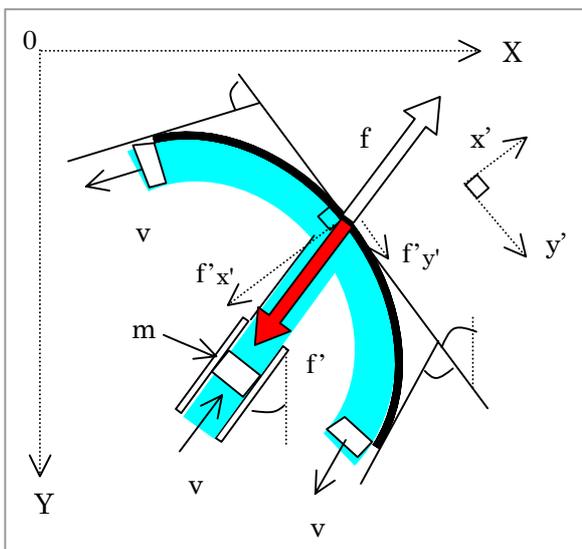


図4 凹凸面に衝突する流体

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、 θ および θ の流体の速度は、 v と等しくなる[8]。この時、送風口から t 時間噴出する流体の質量を m 、流体が発射される速度を v とすると、面に対する垂直成分の力 $f'_{x'}$ は、次のように現わすことができる。

$$f'_{x'} = \frac{(\Delta m) \cdot v \cdot \{\sin(\theta + \gamma) + \sin(\epsilon)\}}{\Delta t} \quad (2)$$

式(2)より、($\epsilon = 0$)のとき流体を受ける面は平面となり、また($0 < \theta \leq \pi/2$)のとき流体を受ける面は凹形となり、その面に受ける力は平面時より大きくなる。また($-\pi/2 \leq \theta < 0$)のとき流体を受ける面は凸形となり、その面に受ける力は凹形面、平面時より小さくなる。ことがわかる。

3.2 風圧による力の特性検証

次に、これまで述べた物理モデルを検証し、構築するシステムを検討するため、実際の風による提示力を計測した。

検証1：風量の変化による力の変化

式(1)で示した、平面に与える力の制御が可能であることを検証するため、平面に与える力を制御し受ける提示力を計測した。平面に与える力の制御は、前述のモデルより、単位時間あたりの風量や送風口面積を変化させる方法が考えられるが、実現の容易性から、前者により制御することとした。そのために、単位時間あたりに噴出する空気 の体積を制御する送風装置を用いた。図5は、ある一定の高さに設置したノズルから、真下の電子秤に向かって空気を一定時間噴出し、その風量を

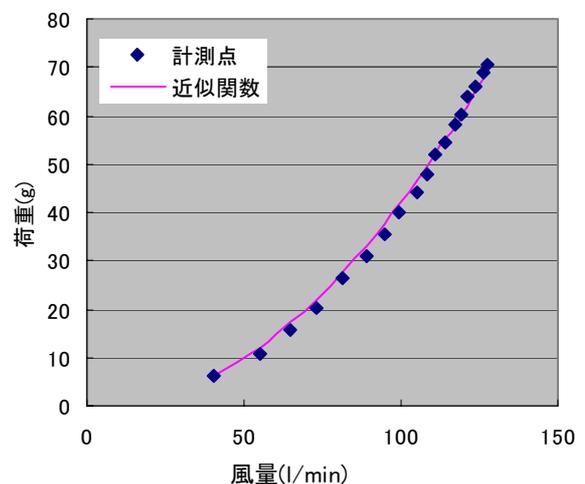


図5 風量に対する荷重変化

変化させて、秤にかかった荷重を計測した結果である。

なお、風量変化の範囲は、流量計(使用基準0.02MPa,20)で計測可能な範囲,空気を噴出する装置の限界から、約 40(l/min) - 約 130(l/min)まで変化させている。

図 5 より、力の変化が式(1)で示した、風量に対する2次関数曲線($y=0.0043 \times Q^2 + \dots$)に近似していることがわかる。つまり風量を制御することでおよそその2乗に比例した力が噴出空気を受ける面にかかることが分かる。

なお理想解では風量の2乗に比例する係数が約0.0026 ($A=2.0[\text{mm}], \rho=1.2[\text{kg} \cdot \text{s}^2/\text{m}^4], 25[^\circ\text{C}]$)となるが、実験では理想解の値より大きい力が出ている。その理由の一つとして、温度、圧力により流体比重量が変化するため、流量計の指示誤差より風量を少なく計測していることが考えられる。

検証2：流体を受ける面の形状に対する力の比較

式(2)で示した、風を受ける面の形に対する風圧から受ける力の違いを検証するため、ある凹形面の受容器の場合と平面の場合において、受ける力の違いを比較する。平面(秤皿を利用：半径6.5cm)および凹形の物体(半径5.5cm)の風受容器それぞれに対して、受ける力の違いを計測した。さらに、実際の利用では、利用者の持つ風受容器が必ずしも風を受けるのに適切な位置にこないことも考えられる。その様な状況を想定し、風受容器とノズルとの高さおよび水平方向での位置関係を変化させ、空気を噴出した場合の荷重の違いを比較した。図6に計測結果を示す。

図6(a)より、風受容器が凹形の方が、比較的大きな力を受けていることが分かる。また、凹形の物体に対してノズルが高くなるほど力が減少すること、ある高さまではそれほど減少せず、それを境に急激に減少していることがわかる。力覚提示する高さが増える場合にはノズルに対する提示位置に応じて、風圧を制御する必要がある。

図6(b)より、風受容器が平面の場合は、噴出する空気を受け取る位置が中央からずれると、受ける力が減少し、風受容器が凹形面の場合は、噴出する空気を受け取る位置が中央から多少ずれても、力は減少していないことを示している。

また、実際に平面または凹形面の風受容器それぞれを手を持ち、噴出した空気を受けた時の力のかかり方を比較した。風受容器が平面の場合は、

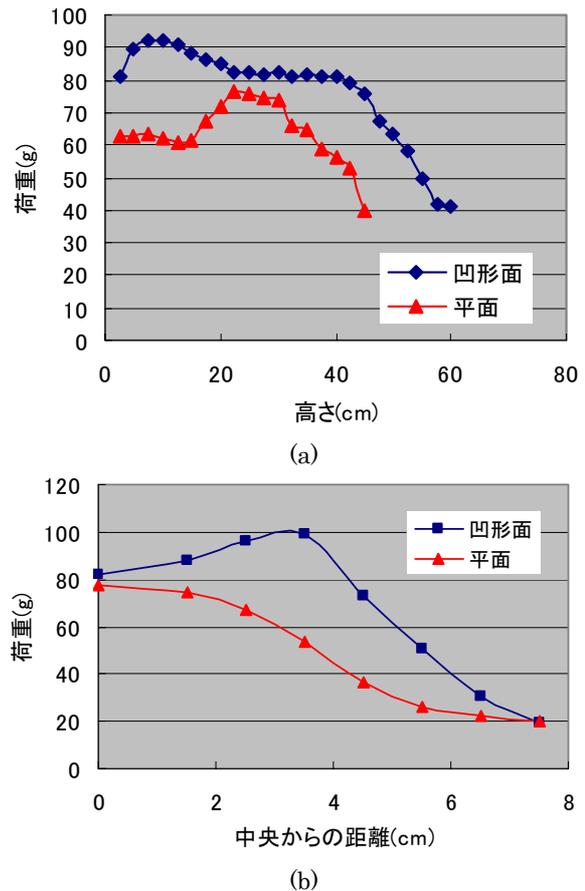


図6 風を受ける面の形状の違いによる荷重比較

受ける力がある点にかかっているように感じられ、提示される位置が風受容器の中心から少しずれると、面を回転させる力を受けるように感じる。そのため提示したい力の方向が変化しやすいと思われる。風受容器が凹形面の場合、ノズル延長上に面があれば、噴出した空気を受ける風受容器の位置が少々左右にずれて動いても、面全体に力がかかっているように感じられ、面を回転させる力もかかりにくかった。

平面に比べ凹形面で風を受けることで、大きな力を受けることだけでなく、提示位置がずれても受ける力の大きさや方向が変化せず意図している力を提示しやすいことも分かった。

4. 実装システム

本方式の実現性を確認するシステムを構築した。風圧による力の制御は、前記の検証方法と同様の風量を制御する方式を採用した。実際には、電圧により風量を制御するエアポンプを用いた。また、風受容器としてはユーザの衣服の面を利用することが最も負荷が少ないが、肌の露出した部分に少

しでもあたと、本来の風の感覚と受け取られてしまう可能性が高い。このため、ラケットなどの所持物を利用することとし、その先端には、前記検証2で述べたように、風の提示位置がずれても提示力が変化しにくい凹形の物体を取り付けた。

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、ハンマーが接触判定オブジェクトである。それらが接触することで、ユーザに力覚を提示することとする。

本システムの構成を図7に示す。

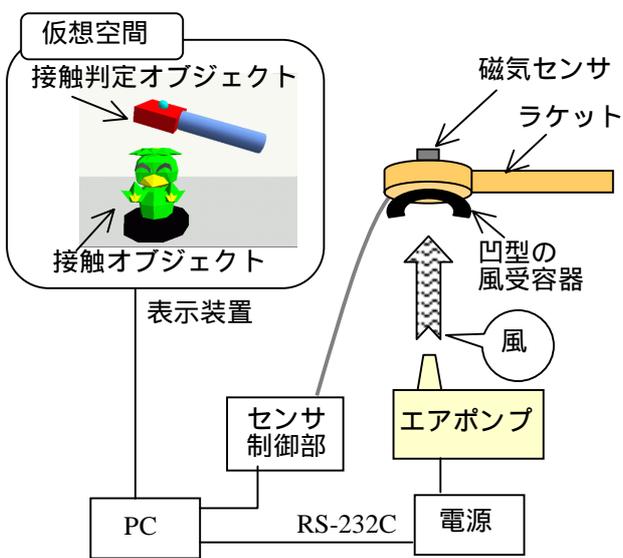


図7 システム構成

システムの処理の流れを説明する。

先端に風受容器を取り付けた軽量のラケットを用意する。仮想空間内では、接触オブジェクトとしてカップを、接触判定オブジェクトとしてハンマーを用意する。そして、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。

仮想空間におけるカップが出現する穴の位置を、現実世界におけるノズルの位置に対応させるためキャリブレーションを行う。具体的には、ラケットに取り付けた風受容器を、ノズル口に接触させる。その時の風受容器の位置を検出し、その位置に対応した仮想空間内の座標を、カップが飛び出す穴の座標に設定する。以上により、ユーザは現実世界のラケットを自由に動かすことで、仮想空間のハンマーを動かす、上下に動くカップをたたきすることができる。

仮想空間内でハンマーとカップが接触した時、

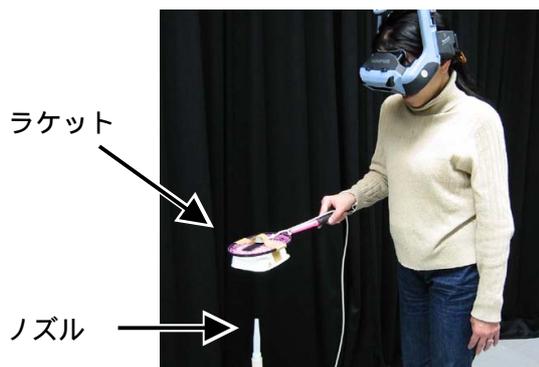


図8 使用している様子

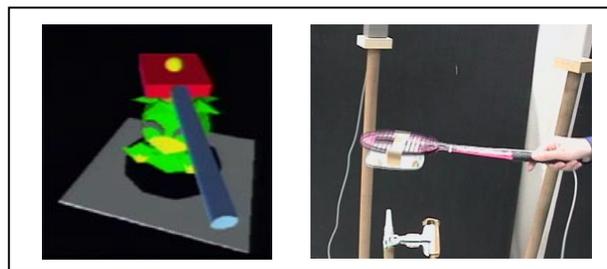


図9 仮想空間と現実空間

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受容器は、ノズルの真上に位置しているため、風圧を与えることで、風受容器に力がかかり、ラケットを通してユーザに接触したことを提示する。

使用している様子を図8に示す。また、使用中の仮想空間と現実空間の対応の様子を図9に示す。

表示方法は、それについても拘束しないことが求められるため、一般的な平面ディスプレイや、CAVEおよびHMDの没入型ディスプレイを使用し、その使用感を比較した。

一般的な平面ディスプレイに比べ、CAVEおよびHMDなどの没入型立体ディスプレイに表示することで、仮想接触している位置と風圧による力覚提示位置が近づき、違和感のない直感的な力覚提示が可能となった。

CAVE版では仮想空間の接触判定オブジェクトであるハンマーを表示せず、現実空間に所持しているラケットと、立体視によって浮かび上がったカップが接触したように見える擬似的接触を行った。ただ、実際には仮想空間内のハンマーとの接触によって衝突を判定しているため、磁気センサによる位置の誤差などから、両者の位置関係がずれることがあり、違和感を感じることもあった。このため、仮想空間内のハンマーと現実空間のラケットの位置が、厳密に一致している必要がある。

それに対しHMD版では仮想空間内のハンマーと

現実空間のラケットの位置が一致していなくても、違和感を感じなかった。つまり、仮想空間内でハンマーが接触する視覚的な接触位置と、現実にはラケットが提示を受ける力覚提示位置がずれていても、ほとんど違和感を感じないことが分かった。今後、拘束しない表示方法と違和感のない力覚の双方についても、ある程度両者を満たす方法を検討していく必要がある。

本システムより動いている物体との衝突感覚を提示できることを確認した。また使用感として、柔らかい物体との衝突感覚を受けることが分かった。また、ヒヤリングより“実際に叩いている感じがする”、“ハンマーをカップの穴にかざすと、カップがぶつかる感じがする”、“ビーチボールを叩いたように感じる”、“意外に風とは感じず、物にあたっている感じがする”、“自由な姿勢で叩ける”、“装置と接触していないので、壊してしまう心配がなく安心して使える”、等の回答を得た。今後さらに他の力覚提示方式との比較等を行うことで、詳しく評価を行っていく必要がある。

5. 力覚表現の検討

実装したシステムより、提示された衝突感覚をより豊かにするための方法を検討する。

5.1 現実の衝突力

まず、現実の物体の衝突力を、風圧による提示で模倣することを検討した。物体が衝突した時の衝突力を調べるために、実際の衝突時の力の波形を計測した。計測装置としては、非常に短い衝突時間に対応可能な高いサンプリング周期の荷重センサ(定格容量 10kg)を使用した。

この荷重センサによって、サンプリングレート 2kHz で荷重計測を行った。衝突させる物体は、風圧から受ける提示感覚がやわらかい衝突感であったため、今回は柔らかいまたは弾力性のあるものを選んだ。以下の 3 つの同程度の質量の物を、それぞれ続けて示す高さから、荷重センサに落すことで衝突させ計測を行った。

- 硬球テニスボール(58.1g)：約 40cm, 50cm
- やわらかいゴムボール(59.9g)：約 1m
- むいぐるみ(46.8g)：約 1m

なお、硬球テニスボールの高さが異なるのは、上記以上の高さから落とすと荷重が 10kg を超えてしまい計測できなかったためである。

表 1 現実物体の衝突力

	衝突力 [kg・msec]	衝突時間 [msec]
硬球ボール(40cm)	25.95	8
硬球ボール(50cm)	29.81	9
ゴムボール	32.105	30
むいぐるみ	14.05	10

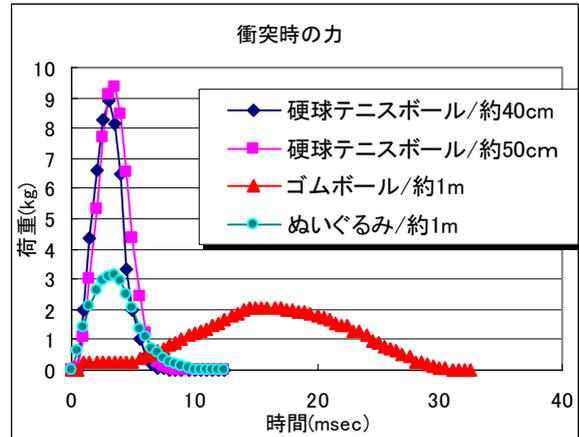


図 10 現実物体の衝突時の荷重変化

表 1 は衝突力(荷重を時間で積分した値： $F \cdot t$)と、衝突時間を記したものであり、図 10 はそれぞれ計測した荷重の時間変化を表したものである。

表 1 や図 10 より、衝突した物質が異なると、衝突力や衝突時間が異なり、その違いから、衝突した力のかかり方が異なることが分かる。この違いで衝突を受ける力覚が異なると考えられる。

5.2 風圧による衝突力

次に、風圧から受ける力を計測した。それぞれ噴出している時間を 50msec, 100msec, 300msec で指定し噴出させた。計測装置は定格容量 500g の荷重センサで試みた。送風装置は、実装システムで使用したエアポンプを使用している。計測結果を図 11 に示す。

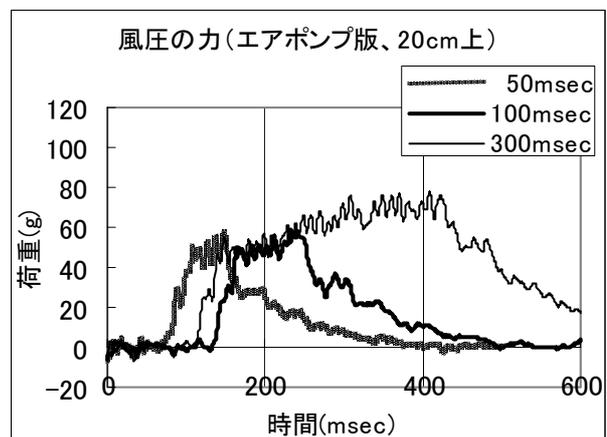
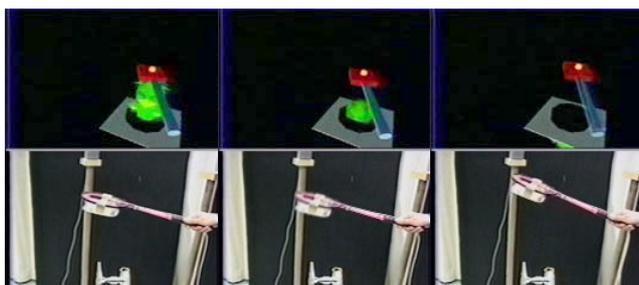


図 11 風圧の計測

図 11 より、指定した提示時間に応じて、ある程度噴出している時間が変化していることが分かる。しかし、風圧装置の提示が始まるまでに 70msec ~ 130msec かかり、その後立ち上がるまでに 40msec 前後かかっている。特に提示が始まるまでのずれがあることがわかる。また、ある程度までは急速に立ち上がり、その後徐々に上がっていく。これより、提示されるまでに時間がかかり、瞬時の提示は困難であることが分かる。(なお、提示始まりまでのばらつきは、エアポンプへの電圧を制御する電源装置の周波数が遅いためと考えられ、チョッパー方式の電源制御による改善を検討している。また、今回実装した装置では噴出風量が可変となる送風装置を使用しているが、代わりに噴出の ON/OFF のみの制御が可能な送風装置を利用することで、より速い応答周期での制御が可能である。)

5.3 仮想空間における力覚提示のタイミング

さらに、本方式は仮想空間の衝突映像と同期して、利用者に力覚を提示することを前提としているため、仮想環境での利用者への提示感覚を検討する必要がある。そこで、仮想空間の映像に対する力覚提示のタイミングを調べることにした。そのために、実装システムの仮想空間と現実空間を同時に映像として取り込み、両空間のタイミングを計測した。図 12 は、力覚提示を受ける時の、仮想空間と現実空間双方の映像である。



左 : 仮想物体衝突 (1 フレーム以内)
中央 : 4 フレーム後(約 130msec)風圧提示
右 : さらに 4 フレーム後(約 130msec)風圧提示終了

図 12 仮想と現実空間

図 12 から、図 11 で示した提示のずれがみられる。図 12 によりユーザが仮想空間で仮想物体の衝突を見た後、現実空間では約 130msec 遅れで風圧が提示されラケットがしなり始め、さらに約 130msec の間、力が加わっていることが分かった。同様の計測を数回行ったが、概ね同様の結果を得た。

また使用感として、提示のずれを感じたという

報告は受けていないが、やわらかい衝突感覚であるというヒヤリング回答を得ている。

5.4 力覚表現の検討

現実の物体の衝突力を、風圧による提示で模倣することを検討するため、図 10 と図 11 を比較する。現実の衝突力と風による提示力の間には、提示力の変化や最大値、提示時間に大きな差がある。そのため、現システムのエアポンプを使用する場合は、風圧を使用して、現実の衝突と同じ力を提示することは難しい。しかし、風圧を使って異なる種類の衝突感覚を表現できれば、仮想空間において多様な種類の衝突感覚を利用者に感じさせることが可能となり、風による豊かな力覚表現が実現すると考えた。そこで今回は、風圧により異なる衝突感覚を表現することを考える。

図 12 では「やわらかい衝突感覚」というヒヤリング回答があった。130msec の提示時間と、130msec の提示タイミングの遅れなどが、利用者が感じる衝突感覚に何らかの影響を与えている可能性が考えられる。

アプローチ 1: 提示時間の制御による検討

図 10 より現実の衝突時間は非常に短く、そのような短い時間制御で、風圧による力を提示することは困難である。しかし図 12 で示したように、130msec の長さの提示時間でも、利用者には衝突感覚と感じられる。この場合の提示感覚は、「やわらかい」感覚であったが、提示時間を短くすることで異なる(硬い)感覚表現の可能性が考えられる。図 11 より風圧により 130msec の長さの提示時間がある程度制御することは可能なので、この制御可能範囲で表現可能な衝突感覚について、提示時間の長短と衝突感覚の間関係を評価していく予定である。

アプローチ 2: タイミング制御による検討

図 10 の現実の衝突力を見ると、やわらかいゴムボールは、硬い硬球テニスボールに比べ、立ち上がりが遅く、荷重変化を表した山のピーク位置が後にずれていることが分かる。そこで、仮想衝突の映像のタイミングに対して、提示する力のタイミングを変化させることで、仮想空間を体験している利用者に異なる質の衝突感覚を提示できるのではないかと考えた。つまり、図 10 に示したような硬球テニスボールややわらかいゴムボールの間での力の立ち上がり方の違いを、風による力覚提

示のタイミングの変化により模倣することが可能ではないかと考えた。

具体的には、エアポンプによる提示遅れなども考慮し予め衝突タイミングを予測し、衝突する映像に合わせて、提示力の山を合わせることで、硬球テニスボールのような速い立ち上がりの力を模倣することなどである。このような、タイミング制御による力表現が可能となれば、より豊かな提示ができるのではないと思われる。

今後、本方式を実現し、その使用感を評価していく予定である。

6. 今後のアプリケーションの発展

今回実装したアプリケーションは、提示位置が一箇所であったが、複数に拡張し多人数に対応したアプリケーションに発展させることが考えられる。具体的なアプリケーションの一つとして、ハンマーを持った複数の利用者が、自由に動き回り、複数のカップを叩いていくアプリケーションが考えられる(図 13)。

実現方法としては、風受容器を取り付けたラケットを複数用意する。そのラケットを複数の利用者に持たせ、利用者はそれぞれ自由に動き回る。そして、利用者の風受容器の位置に応じて、それぞれの送風装置から風を噴出する。このように本方式の特質である無拘束性により、一人のユーザに対して特定の送風装置を割り当てる必要がなく、複数の送風装置を複数のユーザがそれぞれ利用し多人数で共有することができるため、多人数への拡張が容易に可能である。

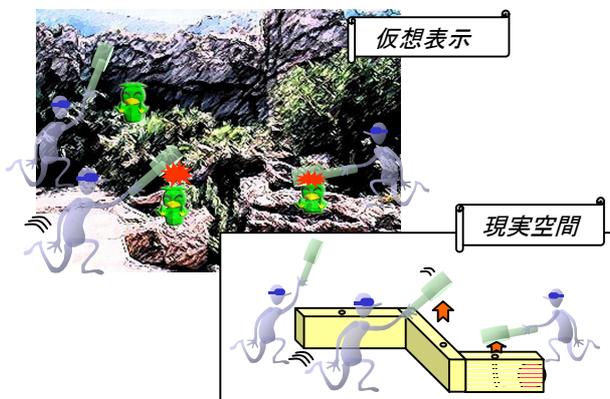


図 13 多人数共有の適用例

7. おわりに

本稿では、無拘束を目指したインターフェースとして、風圧による力覚提示方式について述べ、

システムの実装、および風圧による豊かな力覚表現の検討について述べた。また、本方式の発展として具体的なアプリケーションを紹介し、多人数への拡張が可能であることを示した。以上より、本方式によって無拘束インターフェースの実現の基盤を示した。

我々の最終目標は入出力全てが無拘束なシステムである。その中で、本方式は無拘束性の実現が最も難しいと思われる力覚提示について検討したものである。真に無拘束なシステムを実現するためには、表示方法や位置検出方法についても検討が必要である。これら個別の技術の開発とそれらを組み合わせたシステムの開発を通して、より無拘束性の高いインターフェース技術を実現していきたい。また、今回は1軸での力覚提示について述べているが、2軸に拡張していく等、柔軟な提示位置を実現するための検討も行っていきたい。これらの無拘束な道具の実現によって、家庭の中にその道具が入り、広く一般の日常生活においても利用できるようになることを期待している。

文 献

- [1] C. Cruz-Neira, D. J. Sandin, T. A. Defanti, "Surround-Screen Projection-Based Virtual Reality: The Design and Implementation of the CAVE", Proceedings of SIGGRAPH '93, pp. 135-142, (1993).
- [2] T. H. Massie and J. K. Salisbury. "The PHANTOM Haptic Interface: A Device for Probing Virtual Objects." Proceedings of the ASME Winter Annual Meeting, Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, Chicago, IL, Nov. 1994.
- [3] 佐藤 他: "空間インターフェース装置 SPIDAR の提案", 信学会論文誌 D- , j749-D- (7), pp.887-894, 1991
- [4] 廣瀬,他: "ワイヤーテ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.3pp1-4,(1998.8)
- [5] CyberGrasp: <http://www.virtex.com/>
- [6] 鈴木 他: "仮想空間における風圧による力覚提示", VR 学研報 Vol.4,No.1 CSVC99-20, pp.37-42, Oct. 1999
- [7] 小林, 廣瀬: "風覚ディスプレイによるデータの提示", Progress in Human Interface, Vol.2 No.1 pp.13-18(1993)
- [8] 生井武文: "流れの力学", コロナ社, 1976