

振動子を用いた全身触覚提示デバイスの開発

矢野 博明*¹ 小木 哲朗*¹ 廣瀬 通孝*¹

Development of Haptic Suit for whole human body using vibrators

Hiroaki Yano*¹ Tetsuro Ogi*¹ Michitaka Hirose*¹

Abstract – This paper describes a method of synthesizing haptic sensation to the whole human body using vibrators in large working volume virtual environment. In such environment, haptic devices must have following characteristics, (1) large working volume (2) light weight (3) easy to move. Vibrating device is satisfied such characteristics. By setting some vibrators to user's body and controlling the pattern of the vibration, we can feel the virtual object. We developed a vibrator suit in CABIN(Computer Augmented Booth for Image Navigation). Using this system, we can feel virtual objects and walls through the whole body and walk virtual world to avoid interfering these walls. The effectiveness of this system is tested through experiment.

Keywords : Virtual Reality, Haptic device, Force display, Vibrating device, Immersive projection display, Walk-through, collision detection

1. はじめに

仮想空間を生成する視覚提示の手法として、ユーザの周りを大型スクリーンによる映像で覆う没入型ディスプレイ技術 [1]が注目を集めている。没入型ディスプレイはユーザの視点にあわせた広視野角の立体映像を提示することで、ユーザが体ごと仮想空間の映像の中に入り込んだような感覚を作り出す。没入型ディスプレイにより仮想都市空間や車などの仮想モックアップを実寸大で表示することが可能になってきた。

さらに没入型ディスプレイでは、ユーザがある程度その中を歩き回って、仮想空間とインタラクションできる。このような場合、仮想物体との接触情報がその認識に重要な役割を果たす。触覚提示装置のないシステムではユーザが把持、移動している仮想物体がほかの仮想物体に干渉した場合、物体内部に侵入しないよう物体表面に仮想物体を拘束するという方法がとられることが多い [2][3]。仮想物体同士が視覚的に干渉しない点で違和感がないが、ユーザが把持している仮想物体と体との相対的な位置関係のずれがあまり大きくなると違和感が生じる。没入型ディスプレイの場合はこれまでのCRT等のディスプレイと違い、ユーザの体全体がそのまま仮想空間の中に入り込んでいる環境であるため、相対的位置関係の変化がより大きな違和感に結び付きやすい。また、いろいろな体の部位が同時に仮想物体と干渉する可能性があるため、視覚的に仮想物体の表面に拘束しても

すべての接触情報をユーザが同時に認識することは困難である。

このような問題に対し、触覚情報を利用して接触を表現する方法が考えられる。触覚ディスプレイの研究としては、これまでに、小型マニピュレータを用いて指先に力覚を提示する PHANToM [4] や HapticMaster [5]、手のひらに空気圧シリンダを取り付け指先に力覚を提示する RutgersMaster [6] や指先や手のひらに振動子を取り付け振動感覚を提示する CyberTouch(Virtual Technologies 社)などが開発されている。これらはいずれもユーザの手に対する触覚提示に限定されている。

全身に触覚情報を提示する際には、(1) 可動範囲が大きくとれ、(2) 軽量で、(3) 動き回りやすいシステムの開発が望まれる。触覚は大きく分けると皮膚に物が触れた際の皮膚感覚と、物を持ったときの筋肉の緊張による深部感覚(力覚)の2種類に分類されるが、実世界と同じ力覚情報を全身に提示するためには高出力のアクチュエータを多数配置する必要があるため、上記の条件を満足することは難しい。

しかしながら仮想物体に接触したという情報だけを提示するためには、皮膚感覚のみを提示すれば十分であると考えられる。皮膚感覚、特に振動感覚のみに限れば、小型軽量の振動モータは安価に入手できるため、それを全身に配置することで全身への触覚提示が可能となる。

そこで本研究では振動子(ページャーモータ)を全身に配置し、振動による触覚情報を提示する振動スーツを開発した。さらにこのシステムと没入型ディスプレイ CABINを用いて仮想物体との接触情報を提示する実験

*1: 東京大学 工学部

*1: Faculty of Engineering, Univ. of Tokyo

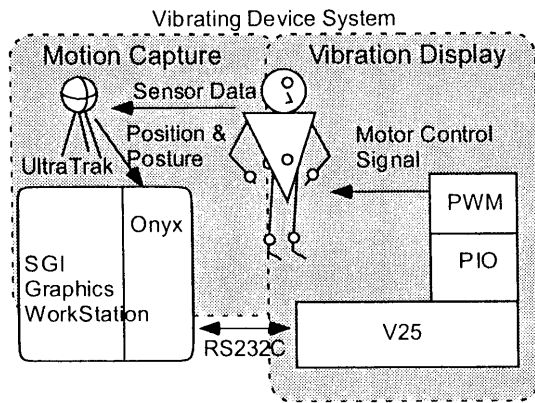


図1 全身触覚システム全体構成
Fig.1 system configuration of haptic device for whole human body

をおこない、その有効性の評価を行った。

2. システム構成

2.1 全身触覚スーツ (Vibrosuit)

2.1.1 全体構成

全身に触覚を提示するためには、身体の動作を計測するための身体動作計測システムと、触覚を提示するための触覚提示システムが必要である(図1)。

計測システムに関しては、機械式、磁気式、光学式という選択肢がある。光学式装置は没入型ディスプレイを利用するとき周りをスクリーンで覆ってしまうため利用は困難である。また、機械式はユーザに対する拘束感が大きい。そこで本研究では、比較的拘束感の少ない磁気センサを用いたモーションキャプチャーシステムを使用する。

触覚提示システムは、振動子を用いて皮膚感覚で触覚を全身に提示することとした。振動子は、小型軽量で安価であり、また暴走しても身体への危険性は小さいため全身に配置する条件を満たしている。

2.1.2 身体動作計測システム

身体動作計測システムには、著者らの研究室で開発されたモーションキャプチャーシステム [7] を使用した。このシステムは、頭、両手、両足、腰に取りつけた合計6つの磁気センサ (UltraTrak) を用いて身体動作の計測をおこなう。人体を34自由度の人体骨格モデル (図3左) に置き換え、6つの磁気センサからの位置と方向データをもとに人体骨格モデルの動作を約50msec毎に更新することが出来る。振動子が取り付けられている位置は、この人体骨格モデルの現在の姿勢から計算によって求めることができる。また人体骨格モデルとユーザの骨格サイズが等しくなるように、プログラム開始時にキャリブレーションを行っている。UltraTrakはUDPを用いてSGI ONYX i-stationへ各センサの位置と方向データを送信し、i-stationで、人体骨格モデルの姿勢の更新を行

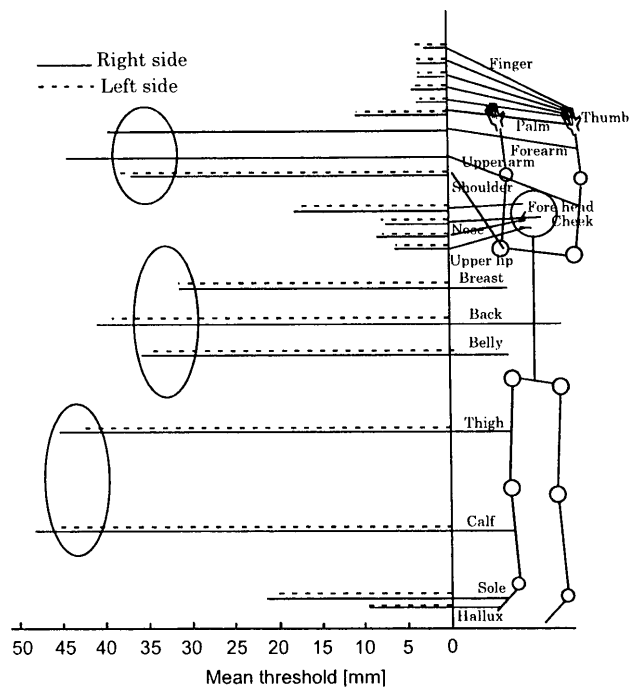


図2 人間 (男子) の2点弁別閾
Fig.2 tactile sensitivity of human body

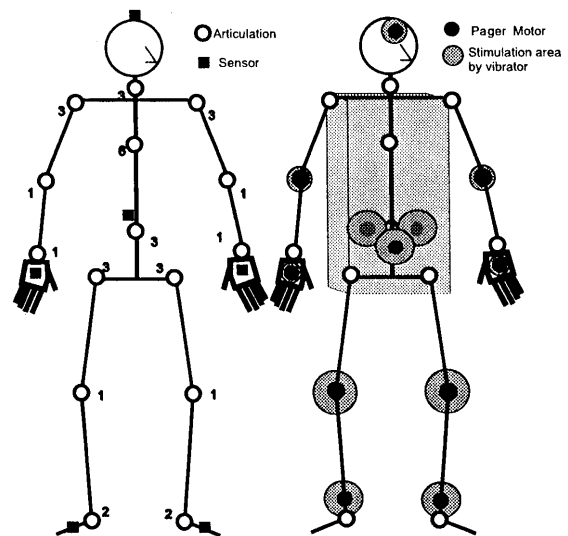


図3 全身触覚スーツのセンサーと振動子の取り付け位置
Fig.3 sensors and vibrators position of haptic device for whole human body

う。UltraTrakのセンサ計測誤差は2.54cmであり、それぞれの振動子の位置を計ると約3cmの誤差が生じた。本研究でおこなった壁などの比較的凹凸の少ない物体の認識には十分と考えられる。

2.1.3 振動子型全身触覚提示デバイス

振動子としては偏心質量が取り付けられたページャーモータを用いる。この振動子を全身に配置する際、どこに配置すれば効果があるのかを考える必要がある。Weinstein [8]によると人間 (男子) の2点弁別閾は図2のよ



図4 全身触覚スーツ (Vibrosuit)
Fig. 4 system overview of Vibrosuit

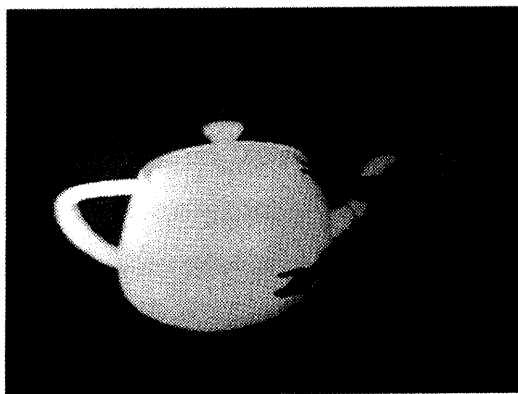


図5 全身触覚スーツを用いた仮想物体とのインタラクション
Fig. 5 interaction with virtual object using haptic device for whole human body

うになる。この図より腕、腹部、足が特に2点弁別閾が大きく、このあたりに取り付けると振動子の数が少なくても効果が大きくなると考えられる。

人間の体を図3右の様に直方体に近似し、前、右前、左前、左右、後、右後ろ、左後ろ、上下どの方向から物体が当たってもわかるという観点から配置を考え、額、左右の手のひら、左右の肘、左右の膝、左右のすね、腹部、腹部の振動子と同じ周上の背中に2つの計12個の振動子を取り付けた(図3右)。このように配置することで仮想の壁を判断することが可能と考えられる。

12個の振動子を取りつけた振動スーツの写真を図4に示す。この振動スーツを用いてポットのモデルを触っている例を(図5)に、仮想の十字路を歩いている様子を(図6)に示す。



図6 全身触覚スーツを用いた仮想空間のウォークスルー
Fig. 6 walk-through with haptic device for whole human body

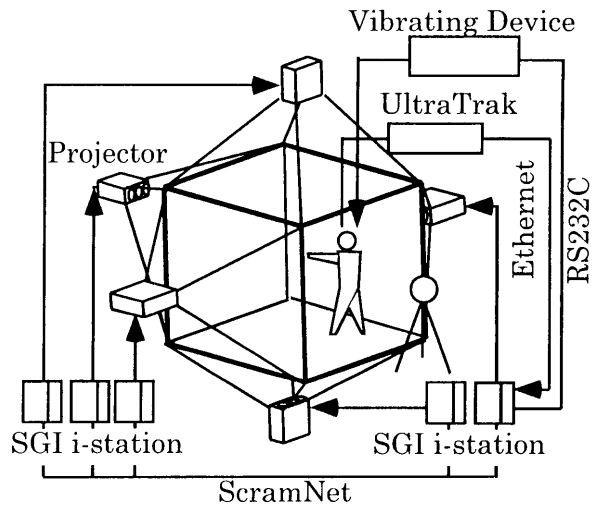


図7 CABINシステム全体構成
Fig. 7 system configuration of CABIN

振動子の制御はホスト計算機(図1のOnyx)からRS232Cを用いておこなう。モータの制御はV25CPUボードを用いておこなっている。V25CPUボードはモータの制御命令をホスト計算機から受けると、PIOを通してPWM(Pulse Width Modulation)方式のモータ駆動回路へ256段階の振動強度信号を送信する。振動モータとしては市販品のシコー技研の超偏平コアレス振動モータF203C(直径20mm,厚さ3mm,5g)を使用した。この振動モータは小型であるがジーンズやセータ等の服越しにも十分に振動を伝えることができる。しかし服越しでは振動の強弱の弁別精度は良くない。そこで本研究では、振動の強弱を付けることはおこなわず、振動のオンオフによって触覚情報を提示している。振動子の磁気センサへの影響は、振動子を動作させないときの計測位置

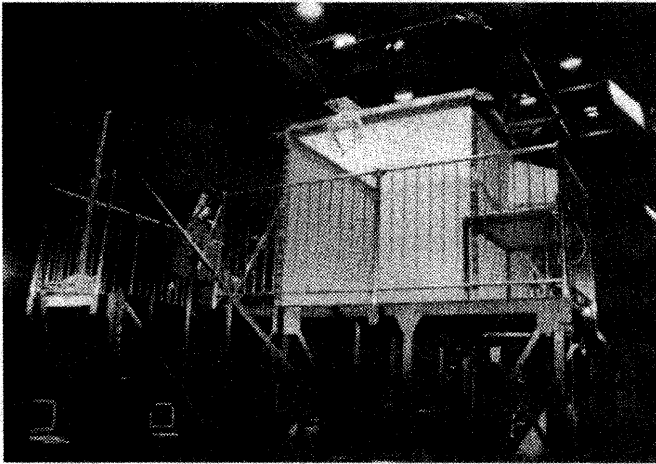


図8 CABIN 全景
Fig.8 over view of CABIN

のばらつきが4mm程度であるのに対して、振動子を最大出力で動作させた場合で7mm程度のばらつきであった。この程度のばらつきであれば壁のような凹凸の少ないものを認識するには十分であると考えられる。

なお、本システムでは、振動子型デバイスの制御に触覚基本ソフトウェア (HIP:Haptic Interface Platform) [10] を用いている。HIPは、触覚デバイスの種類によらず同じ仮想空間を操作することを可能とするためのソフトウェアライブラリである。VRMLなどのデータをフィルタを用いてHIP用のデータに変換することもでき、簡単に仮想物体に触れることが出来る。このライブラリ用に本研究で開発した振動スーツのためのデバイスドライバの開発をおこなった。これにより、HIPを利用して他のユーザが開発したデータや、従来のデスクトップ環境でHIPを使って構築した仮想空間を直ちに振動スーツを用いて体験することが出来る。

2.2 没入型ディスプレイ (CABIN)

本研究では、没入型ディスプレイとしてCABIN (Computer Augmented Booth for Image Navigation) (図8) を使用する。CABIN [9]は、上下、左右、前面の計5面を一辺2.5mのスクリーンによって覆った没入型ディスプレイである。背面投射型のスクリーンを用いているため床面は厚さ3cmの強化ガラスで出来ている。CABINのシステム構成を図7に示す。5画面分のスクリーンの画像生成には、それぞれ1台ずつSGI ONYX i-stationを用いている。UltraTrak(Polhemus社)により利用者の頭部等に取り付けられたセンサの3次元位置と姿勢を計測することで、視点位置に応じた立体映像を提示する。なお、視点位置座標のデータはScramNetを用いて5台の計算機で共有している。振動子型触覚デバイス、磁気センサはi-stationとRS232CおよびEtherNetにより接続する。描画速度は60Hz、デバイスの制御は振動子型全身触覚デバイスが50Hz、UltraTrakが120Hzでおこ

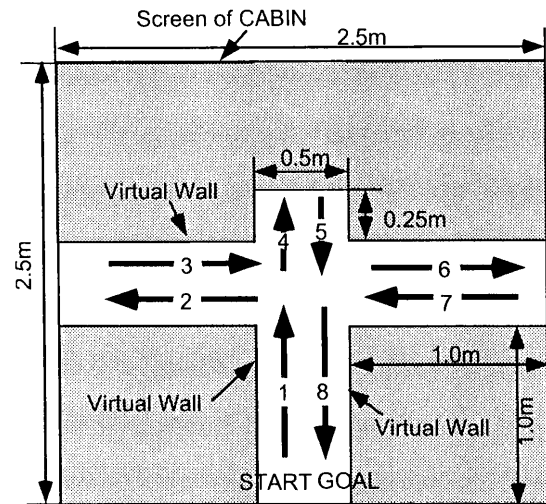


図9 実験タスク
Fig.9 task of experiment

なわれる。

3. 実 験

振動スーツによる触覚提示の効果を調べるためにCABIN内に仮想の壁を作り、そのあいだを歩行する実験をおこなった。この実験環境では物体内部に身体の一部が侵入している間、振動子を最大出力で振動させる。実験の環境はCABINの四隅に1.0mX1.0mX2.0mの仮想の角柱を4本配置し、幅0.5mの十字路を設定する(図9)。この十字路を手前から前進(1)→左へ曲がる(2)→引き返して(3)前方へ進む(4)→引き返して(5)右側の通路を歩く(6,7)→戻る(8)。という順路で歩いてもらい、その時の各振動子の取り付けられている場所の軌跡を記録する。なお、通路の前方、CABINの中心から奥行き方向に0.5mの部分に壁による行き止まりを設けた。これは、それ以上奥に行くとセンサの計測範囲外になり各振動子の位置の計測が困難になるためである。左右の通路には特に行き止まりは設けていない。実験前に通路からできるだけはみ出さないようにという指示をただけで、自由に歩かせた。左右の通路についてはできるだけスクリーンのそばまで進むように実験前に指示した。しかし、ソフトスクリーンを用いているためスクリーンを痛めないように、もし被験者がスクリーンにぶつかりそうになったときにはその場で引き返すよう指示した。実験の条件は、「視覚あり振動あり(V-F)」、「視覚あり振動なし(V-nF)」、「視覚なし振動あり(nV-F)」、「視覚なし振動なし(nV-nF)」の4種類の条件について同じ環境を用いておこなった。なお、視覚提示なしの時は被験者にはあらかじめ十字路の形を覚えてもらった。また、単に映像を表示しただけではCABINのスクリーンのフレームが手掛かりになるため、視覚なしの場合は目隠しをした状態で実験をおこ

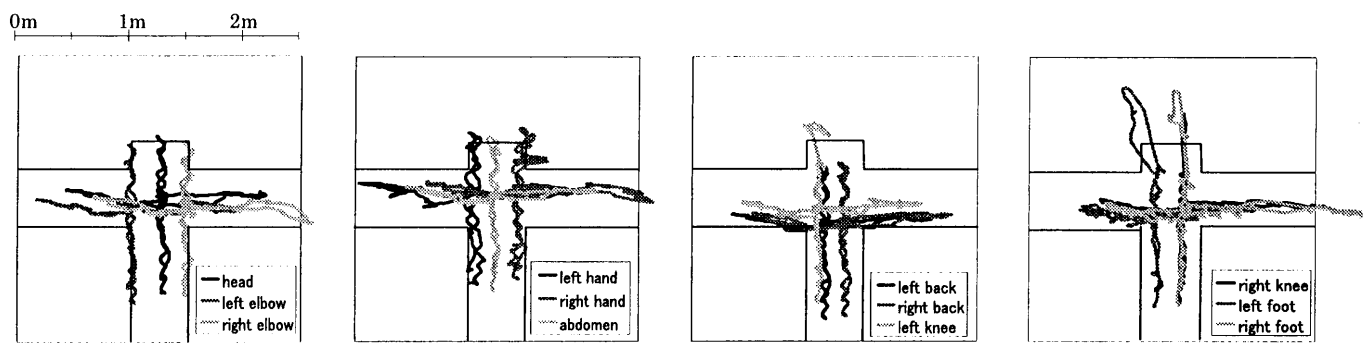


図10 視覚、振動提示ありの場合の各部位の位置
 Fig.10 position of each vibrator with visual and vibration feedback

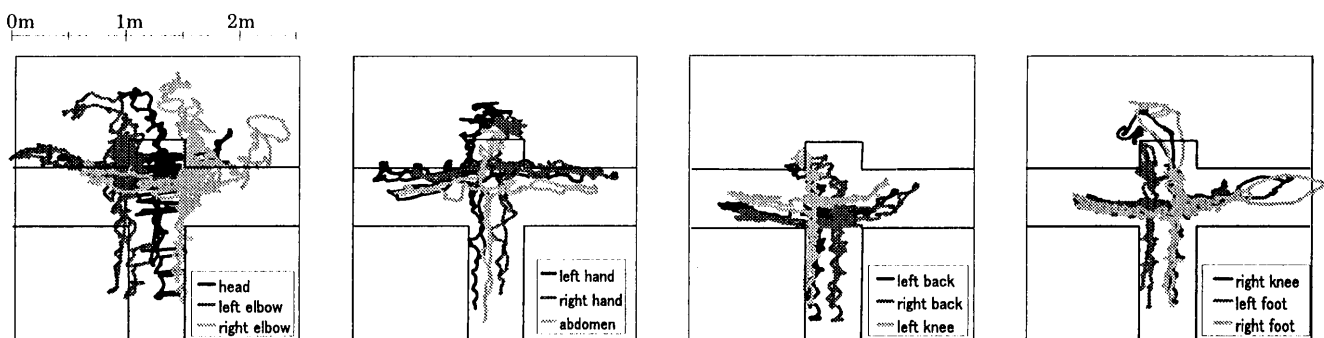


図11 視覚提示あり、振動提示なしの場合の各部位の位置
 Fig.11 position of each vibrator with visual and without vibration feedback

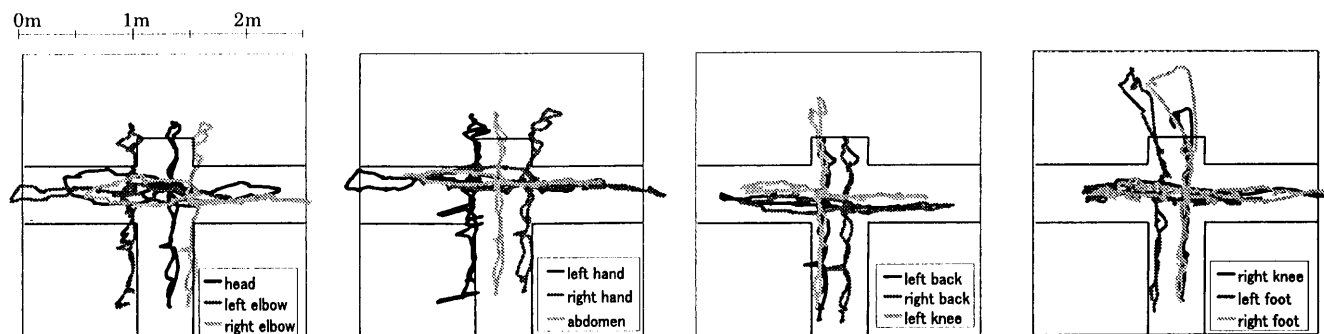


図12 視覚提示なし、振動提示ありの場合の各部位の位置
 Fig.12 position of each vibrator without visual and with vibration feedback

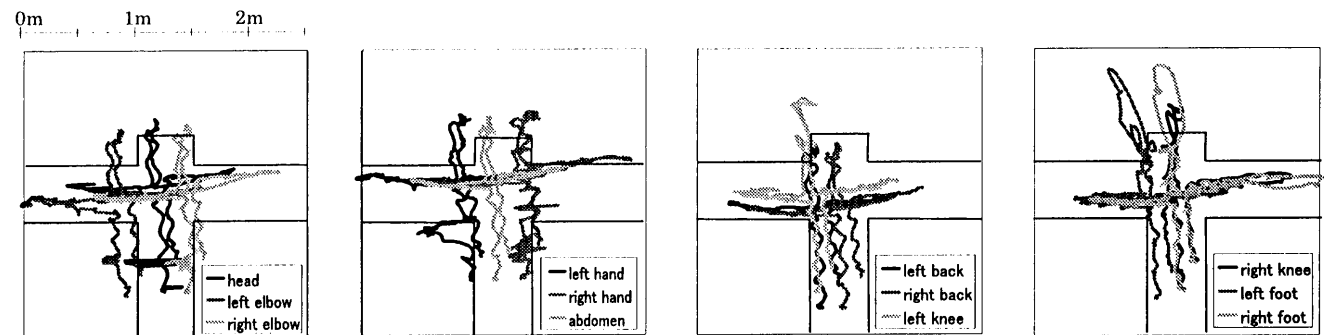


図13 視覚、振動提示なしの場合の各部位の位置
 Fig.13 position of each vibrator without visual and vibration feedback

なった。被験者は23才から37才までの男性5名で各試行を2回ずつおこなった。

図10に視覚提示、振動提示ともに有りの条件(V-F)で前述の十字路を歩いたときの各振動子の取り付け部分の軌跡の例を示す。図11は視覚提示有り振動提示無し(V-nF)の条件、図12は視覚提示無し振動提示有り(nV-F)、図13は視覚提示、振動提示両方とも無い条件(nV-nF)での各振動子の軌跡の例である。なお、それぞれはCABINの上部からみた図である。外側の正方形がCABINを真上から見た時のスクリーンの位置で、内側の太線が壁を表している。触覚情報を提示した場合は、壁の部分に手や肘が頻繁にあたっており、通路の位置を確認しながら歩いていることがわかる。一方、触覚を提示しなかった場合では、壁への侵入量が多くなっている。また、図11と図12をくらべると視覚提示無しの場合でも肘や手先が壁を移動しており、壁を認識しながら歩いていることがわかる。

各条件について壁に侵入しているときの侵入量(壁からの距離)の全振動子の平均値と標準偏差を図14に示す。それぞれの平均値に差があるのかを検定するための分散分析を行った。その結果、 $F=24.18, p < 0.01$ で有意であった。平均の差の検定では、「視覚あり振動なし(V-nF)」と「視覚なし振動あり(nV-F)」の間は有意ではなかった。これは、本実験の環境では、触覚が視覚と同程度の効果があったことをあらわしている。「視覚あり振動あり(V-F)」と「視覚あり振動なし(V-nF)」の間で5%水準、そのほかは1%水準で有意であった。

振動子の部位別の侵入量の全平均値を図15の折れ線で、部位の提示感覚別の平均値を図15の棒グラフで示す。それぞれの平均の差の検定を行ったところ、手と肘については、ほかの部位との差が1%水準で有意であった。この結果からも手と肘が物体の認識に良く使われていることがわかる。また、「視覚あり振動あり(V-F)」の場合腹部に取りつけた振動子が全く使われなかった。これは障害物が壁だったため、腹部程度の高さの物体を提示する際に必要になるとと思われる。

4. 考 察

実験結果から、振動モータによる触覚情報により、全身で仮想物体を認識可能であることが確認された。

本システムを用いることで、これまで困難であった仮想物体や壁などにぶつかったときの全身への触覚情報の提示が可能になった。このシステムを用いたいろいろな応用システムが考えられる。例えば家具の配置や家の間取りなどを体験するシステム等に組み込むことで、壁など突き抜けることのできない場所を視覚だけでなく、触覚情報によって提示することが可能である。また、仮想世界だけでなく実際の原子炉内部で目に見えない放射線

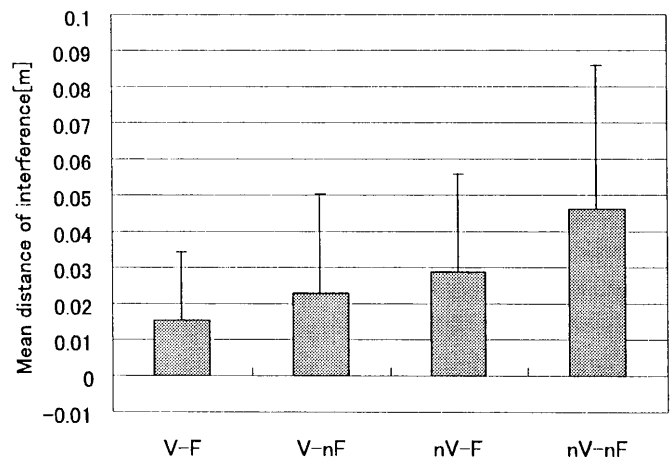


図14 実験結果(提示方法毎)
Fig. 14 result of each methods in the experiment

などが危険レベルになっている場所に立ち入ると、振動によって危険を知らせるシステムも考えられる。

本システムの開発段階で、仮想空間と実空間の位置についての整合性がとれていることが重要であることもわかった。本システムにおいて不整合が起こる部分は、視覚情報提示と身体動作計測システムが考えられる。視覚情報提示ではセンサーの誤差等により視点が完全にユーザの視点と一致せず視点がずれると、仮想物体が実際よりもずれた位置に表示される。また、身体動作計測システムでは、体を実空間で真っ直ぐ動かしたつもりでも、センサの誤差が大きいと実際の身体的位置および姿勢データと仮想の身体との間にずれが生じ、仮想空間では曲がって動いたことになる。また、平面に触れた際に誤差があると平面ではなく曲面として知覚されることもある。本システムでは、センサーの誤差および身体動作計測システムの人体モデルと実際の人間の形状の誤差により3cm程度の誤差があった。本研究でおこなった仮想の壁程度の仮想物体であれば問題はないが空間周波数の高い物体を提示する場合には、さらに精度が要求される。計測システムの精度向上は重要な今後の課題といえる。

5. ま と め

本研究では、全身に触覚情報を提示する一手法として、全身に振動子を配置し、振動子の振動パターンを制御する方式の振動スーツの開発を行った。実験によって触覚だけでも仮想の壁や仮想物体の認識が出来ること、視覚提示装置(没入型ディスプレイ)と組み合わせることでより正確に物体を認知できることが確認された。

参 考 文 献

- [1] Bullinger, Riedel, Breining: "Immersive Projection Technology - Benefits for the Industry", 1. Interna-

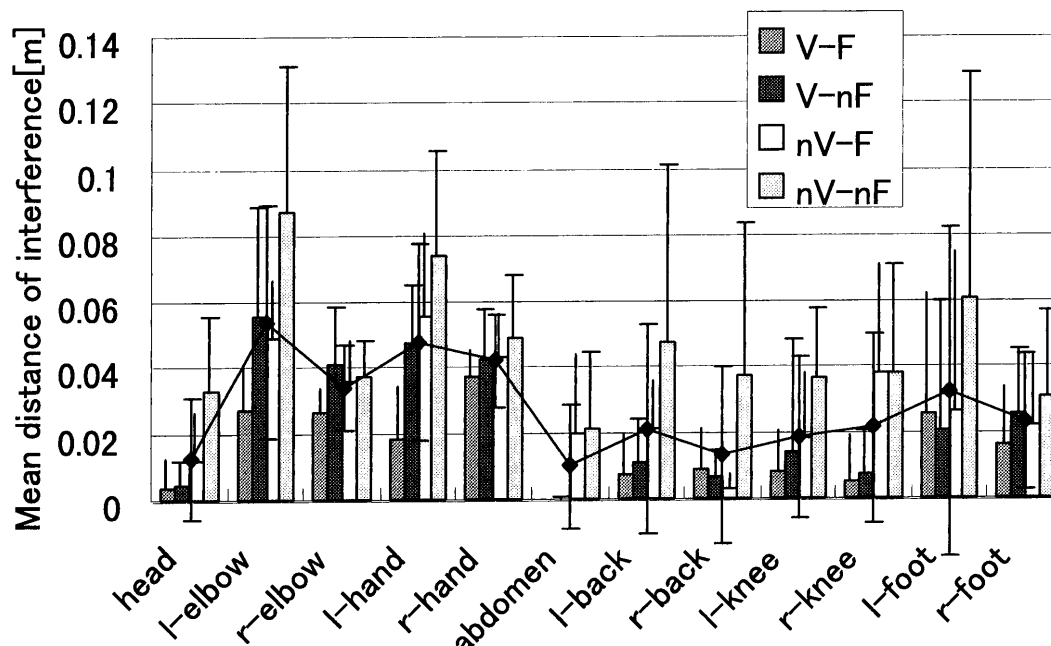


図15 実験結果(場所、提示方法毎)

Fig. 15 results of each method and sensor position in the experiment

- tional IPT Workshop, pp.13-25 (1997)
- [2] 北村, 岸野. "仮想物体と実物体の統一的操作法の提案". 第13回ヒューマンインタフェースシンポジウム論文集, pp.397-402, (1997)
 - [3] 荒木: "バーチャル環境における3次元オブジェクト間の動的インタラクションモデル", インタラクション'98 論文集 pp.73-80 (1998)
 - [4] Thomas H.Massie: "Virtual Touch Through point Interaction "ICAT"96 pp19-38 (1996)
 - [5] 浅野, 矢野, 岩田: "フォースディスプレイを用いた仮想環境における手術シミュレーションの要素技術開発", 日本バーチャルリアリティ学会第一回大会論文集, pp95-98 (1996)
 - [6] Burdea, et al: "Computerized Hand Diagnostic/Rehabilitation System Using a Force Feedback Glove", Proceedings of Medicine Meets Virtual Reality V, San Diego, CA., January, (1997).
 - [7] Hirose, Deffaux, Nakagaki: "Development of an Effective Motion Capture System Based on Data Fusion and Minimal Use of Sensors", VRST'96 pp117-123 (1996)
 - [8] 大山, 今井, 和気編: "感覚・知覚ハンドブック", 誠信書房 pp1232 (1996)
 - [9] 渡辺, 小木, 田村, 矢野: "没入型ディスプレイの流体シミュレーションへの応用", 機械学会第10回計算力学講演会論文集, pp411-412 (1997)
 - [10] 廣瀬, 岩田, 池井, 小木, 広田, 矢野, 寛: "デバイスに依存しない触覚用共通ソフトウェア(HIP)の開発", 日本バーチャルリアリティ学会第二回大会論文集 pp202-205 (1997)

(1998年6月2日受付)