

没入映像と力覚の統合による空間情報の呈示

橋本 渉[†], 岩田 洋夫[†]

本論文は空間情報を人間に呈示する方法として、没入型ディスプレイと力覚ディスプレイを導入することを提案するものである。人間の視野全体に空間情報を表示することで、より多くの情報を呈示できるだけでなく、空間情報の立体構造を表現することがねらいである。また力覚情報は操作補助となるばかりでなく、視覚では表示の困難な中身のつまった容積を持つ空間データを表現する際に有効であろう。本論文では、提案する呈示方法の効果を調べるため、HMD (Head Mounted Display) および大型平面スクリーン、力覚情報がない場合の環境と比較し、提案する手法が有効であることを確認した。

Representation of Volumetric Data with Immersive Image and Haptics

WATARU HASHIMOTO[†], and HIROO IWATA[†]

This paper proposes a representation method for volumetric data using both an immersive projection display and a haptic device. The aim of using an immersive display is not only an increase of information for the viewer, but also to present him/her to the spatial structure of volumetric data. Haptic sensation also helps the user to manipulate the data. Using the haptic device further enables the user to observe an accurate volumetric images. In this paper, to evaluate this method, we developed a prototype system that consists of a spherical immersive display and a haptic display. Then we compared the system with other test environments which use a HMD (Head Mounted Display) or a large plain screen. After these comparisons, we confirmed that the method is more effective to manipulate the data than the methods used in the other environments.

1. 研究の目的

計測やシミュレーションで得られる測定結果は、一般に空間的で膨大な量のデータを含む。昨今の計測、計算機技術の向上により、高精度のデータを測定し、膨大なデータを扱うことが珍しくなくなってきた。このような膨大かつ高次元のデータから、もとの情報をなるべく損なわず、重要な情報だけを取り出し、人間の直感的理解をうながす表現技術が必要とされてきている。

こうした背景より、高次元かつ高密度の情報を人間にいかに表示するかという研究が活発に行われてきた。たとえば可視化の代表的な表現手法である Volume Graphics¹⁾では、半透明ボックスの集合として3次元情報を俯瞰表示する。この手法は内部の構造や

状態を知るうえで威力を発揮している。また大型ディスプレイによる表示や、立体視による奥行き感覚の表現など、表示装置自体の工夫もされてきている。

一般に人間の視覚を用いて情報呈示を行う場合、視機能が優れている中心視野が用いられる。しかし、人間の視覚には中心視だけでなく周辺視を含めると水平で200度までの視野を持っている。周辺視には空間的な広がり感を表現する役割があり、これは空間情報を表現するのにきわめて有用だと考えられる。周辺視を利用することによって、従来の俯瞰表示のみならず、ミクロの視点より観察するといった効果を期待できる。本研究では、まず人間の周辺視を利用するため、空間情報を没入型ディスプレイで表現することを提案している。

視覚における表示の限界は、映像を平面的にししかとえられないことである。両眼立体視や Volume Graphicsの技法により、対象物を3次元的に表現することは可能だが、人間が受け取る情報量としては2枚の2次元網膜情報で、表現にはおのずと限界がある。こうした視覚表現の限界に対する1つの取組みとして、視覚以外の感覚を導入することが考えられる。たとえば

[†] 筑波大学機能工学系

Institute of Engineering Mechanics and Systems, University of Tsukuba

現在、大阪工業大学情報科学部

Presently with Faculty of Information Science and Technology, Osaka Institute of Technology

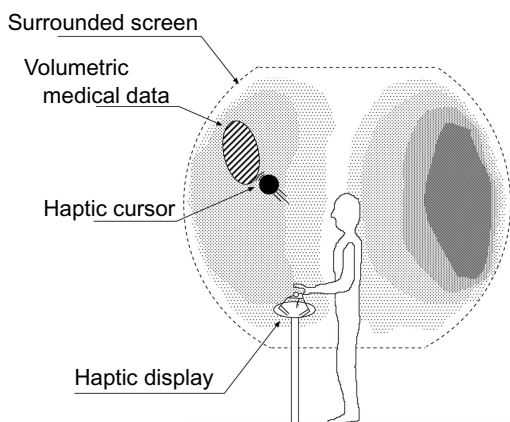


図 1 没入映像と力覚の統合による応用例

Fig. 1 An application of immersive image and haptic representation.

文献 2) では空間情報に粘性やトルクをマッピングすることで、中身のつまり具合を把握させるものである。本研究では人間の周辺視野効果に加え、力覚を空間情報の表現に用い、内部構造の直感的な把握をねらいとしている(図 1)。

CT や MRI など得られる医用画像は一種の空間情報である。本論文ではこの医用画像の実装を応用例としてあげる。また、空間情報の提示時における周辺視野と力覚表現のメリットを調べるため、他のディスプレイ環境と比較した評価実験を行っている。

2. 従来の研究

一般に計測やシミュレーションが生み出す空間情報は、実際に測定されたリアルなデータであるが、これらのデータは単なる無機的な記号の羅列であり、なんらかの方法で具体化しなければ人間の理解を促すことはできない。実体は持たないけれども、本物として人間に表現する技術として、人工現実感(VR)技術は有用である。

空間情報の表現に VR の技術を利用した典型的な例は、航空機などの流体計算結果をバーチャルな風洞で表現するもの^{3),4)}であろう。本来、観察者が測定現場にいと、観察者が風の影響を受けるだけでなく、流体現象に対して影響を及ぼすなど、不都合が多い。しかしバーチャル風洞を利用することによって、実際は測定現場にいないがあたかもその場にいるような感覚で風の流れを調べることができる。映像の観察には BOOM と呼ばれる可動式の双眼鏡のような装置を用いている。この種の装置では人間の視野全体にカバーすることができないため、最近ではこうした用途の表示装置に大型のスクリーンや没入型ディスプレイが利

用されつつある。たとえば多面ディスプレイを利用したもとして分子結合や流体解析を行うものや⁵⁾、磁気流体の挙動シミュレーションを実現するもの⁶⁾もある。

一方、視覚以外に力覚を空間情報の提示に利用する試みもある。分子結合のシミュレーションにおいて力覚を導入した例⁷⁾などは有名である。また空間データを力覚に変換する手法としては、データにトルクや流線ベクトルを与えるもの²⁾や、空間情報から抽出された等値面に対して反力をあたえる方法⁸⁾、空間情報をセグメンテーション化して反力を呈するもの⁹⁾、空間情報が構成する格子をお互いに結合し、変形時の反力を発生させるもの¹⁰⁾などがある。

ところで、上記の力覚提示では、視覚提示と同時にを行うのが一般的となっている。これらの試みでは CRT 画面や頭部搭載型ディスプレイ(HMD)が視覚提示に用いられるが、大型の平面スクリーンとの組合せの装置も開発されている^{11),12)}。また没入型ディスプレイの中での利用を目的とした、装着型力覚ディスプレイも開発されており¹³⁾、応用を模索する段階へときている。本研究では没入型ディスプレイと力覚提示装置の統合によって、実際に空間情報データを実装する方法に述べ、その効果について報告するものである。

3. 表現方法

複数の感覚を組み合わせる提示を行う場合、各感覚の特徴を把握したうえでの提示が重要である。たとえば、人間の視覚は、中心視や周辺視を含めるときわめて広い範囲から同時に情報を得ることができる。空間構造などを広い範囲に表示することによって、その構造の直感的理解を促すことが期待できる。しかし人間の視覚センサである網膜は 2 次元センサのため、内部の詳細を完全に表すには限界があることは冒頭でも述べたとおりである。一方、人間の力覚には並進、回転を合わせると 3 自由度以上の反力を検知する能力がある。この力覚によって、視覚で完全に表現できない内部の詳細情報を固さや粘性などで表現できる。しかし、人間の皮膚や筋肉に力覚を提示するためには、基本的に装置が身体に接していなければならない。装置の稼働範囲など物理的な制約が生じ、情報を提示できる空間的範囲はおのずと限定される。こうした視覚と力覚の特徴を利用すると、広範囲にわたる空間情報データを視覚表示し、限定された範囲において力覚表現を行うのが望ましいと考えられる。

ところで、空間情報の提示における最も基本的な操作は、観察者の視点位置を変更すること、すなわち空

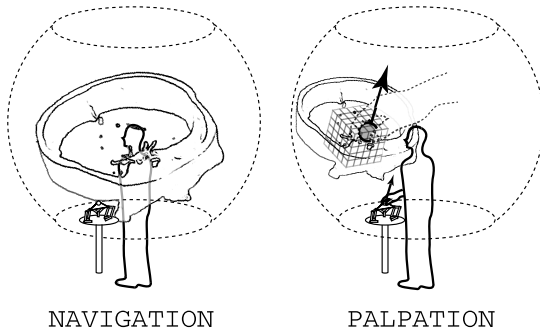


図 2 没入ディスプレイと力覚ディスプレイによる 2 つの表現手法
Fig. 2 Two representation method for a surrounded screen and haptic display.

間情報における視点移動(ナビゲーション)と、その空間情報に対する作用である。前述の視覚と力覚の特徴を利用すると、空間情報での視点移動時には空間的広がりやを呈示できる視覚表示を行い、空間情報に対する作用時には詳細情報を呈示できる力覚表現(触診)を行うのが適切であろう。この表現方法の概念図を図 2 に示す。

ナビゲーションのモードでは、全方向表示の利点を生かし、任意の位置や角度から空間情報の立体構造を観察することが可能である。このとき、力覚呈示装置は視点の操作するジョイスティック代わりに用いるだけでなく、視点が表示対象データに近づくとき反力を還して、視点移動操作の補助とする。触診のモードでは映像を全方向に表示するが、局所的な構造を力覚表現するため、画面上にカーソルが表示される。カーソル周辺の空間情報はすべて半透明表示される。観察者はカーソルを力覚呈示装置によって操作し、カーソルが空間情報の内部詳細構造と干渉すると反力を発生する。視覚と力覚によって詳細の構造を観察することが可能である。

4. 実装

4.1 実装環境

前述のような呈示を実現するにあたり、本研究では全方向球面ディスプレイ(EnspheredVision¹⁴⁾)、点把持型力覚呈示装置(Haptic Master)を用いた。図 3 は各装置の接続図である。球面ディスプレイの映像生成には Onyx(SGI, Infinite Reality) を利用し、この映像出力は全方向球面ディスプレイのプロジェクタ(Victor, DLA-G10)に入力される。観察者や力覚呈示装置は、映像面と干渉して互いに影を発生しないよう、球面ディスプレイの映像の死角に配置する。また力覚呈示装置の制御には、A/D ボード(NuDAQ,

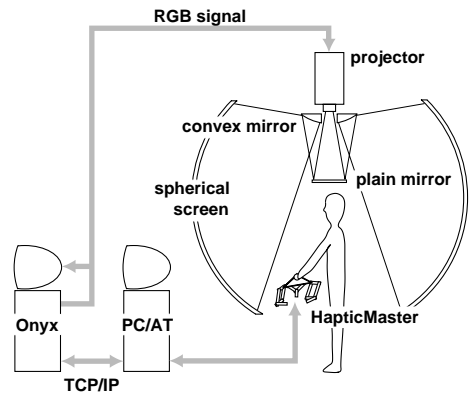


図 3 装置の構成
Fig. 3 System architecture.



図 4 球面没入型ディスプレイ

Fig. 4 Spherical immersive display: User is covered with spherical screen which displays projected image spread by a convex mirror. The screen consists of eight pieces of shaved styrene foam. This photograph shows one of these pieces is removed.

PCI-9112) が装着された PC/AT 互換機を用いている。両方の計算機は TCP/IP によって接続されている。

(a) 球面没入型ディスプレイ

球面没入型ディスプレイは、凸面鏡によってプロジェクタの映像を球殻スクリーンに拡散反射させる仕組みとなっている。球殻の直径は 2.1 [m] で、視点が球の中心にある場合の垂直視野角は 125 度、水平視野角は全方向の 360 度となっている。球殻の材質は発泡スチロールの削り出しによるもので、全体を 8 分割することができる。図 4 は 8 つのうち 1 ユニートを外して内部が見える状態にしたものである。プロジェクタは Victor の DLA-G10 で、全方向に拡散投影するため SXGA に対応したものを利用している。また拡散投影した場合の 1 画素の大きさは 5~17 [mm] 程度で、中心から見たときの視力 0.01~0.06 に相当する。この球面ディスプレイに映像を投影するには、あらかじめドーナツ状に歪ませた映像をプロジェクタに入力しなければならない。映像の歪み補正には OpenGL によるテクスチャマッピングの技法を用い¹⁵⁾、全方向

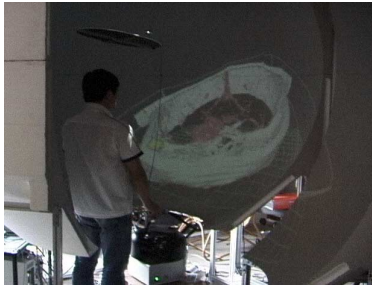


図 5 データの実装例

Fig. 5 An implementation of immersive image and haptic representation.

の映像をドーナツ型に射影して生成している。

(b) 点把持型力覚ディスプレイ

力覚呈示装置は日商エレクトロニクスの HapticMaster を用いた。把持部による 6 自由度の位置入力と力覚出力が可能である。把持部の可動範囲は半径 20 [cm] のドーム型で、この領域での機構的出力は並進力が 1100 [g]、トルクが 5100 [g・cm] (鉛直軸まわり) を保証している。把持部にはタクトスイッチが取り付けられており、ON/OFF 入力が可能となっている。なお、HapticMaster の制御には PC/AT 互換機が用いられる。本環境におけるサーボレートは最大で 3 [kHz] 程度で、これは本研究の力覚呈示に際し十分な速度である。

4.2 データの実装

データの実装例として、空間情報の一種である医用画像を用いた。ここでは 2 種類のデータを本環境に適用して、実装例としている。

図 5 は本環境における呈示の全景を表している。ここで実装した医用画像は人間の頭部断層撮影画像 (512 × 80 × 512) で、骨と病変部の部分を閾値処理された 2 種類の等値面を表示した例である。サーフェスの抽出には Marching Cubes¹⁶⁾ を用いた。観察者は力覚呈示装置を用い、視点を変更したりカーソルを操作したりする。カーソルが骨や病変部に対し作用すると、観察者は力覚呈示装置によって反力を受ける。

図 6 は幼児の頭部断層撮影画像の一部を抽出したものの (100 × 100 × 100) で、歪み補正されていない状態の映像である。球面ディスプレイの内部に表示されているものは皮膚を閾値として抽出したサーフェスデータ (21645 [polygon]) である。

視点の移動時には視野全体が大きく変化し、現在位置や方向を見失う恐れがある。医療データのナビゲーションでは、現在位置や方向の把握、とりわけ仮想空間と実空間とのレジストレーションは重要である。こ

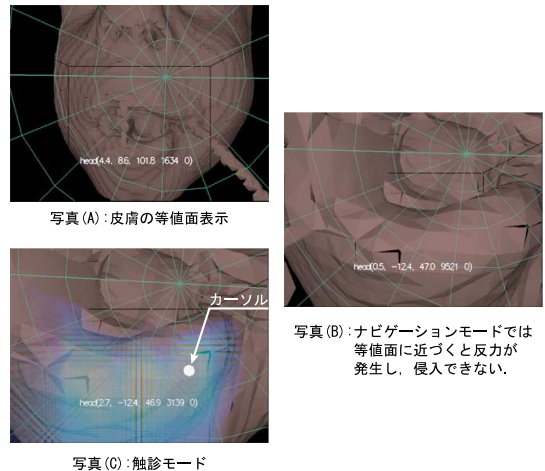


図 6 人間の頭部 CT 画像による呈示

Fig. 6 Image (A) shows iso-surfaced data extracted from CT image of human head. The image (B) was captured when the user's viewpoint approaches to the lower lip. Then palpation mode presents internal structure as volume graphics to the user (image C).

こでは操作中に現在位置や方向を見失わないように、球形のグリッドを重畳表示している。

視点の移動には力覚呈示装置によって自分の観察したい位置に操作する。力覚によって移動操作を補助するため、表示されている皮膚面には抗力を発生させている。この抗力の発生には、元の頭部断層撮影画像を皮膚の閾値によって 2 値化したものから直接算出している。図 6 (B) はナビゲーションのモードで口腔部に接近した状態である。この状態で Haptic Master のスイッチを押すと触診のモードになり、図 6 (C) のようなカーソルが表示される。カーソルの周囲には半透明のボクセルが画素値の高低に応じた配色で表示される。これは皮膚以下の内部構造を示している。観察者がカーソルを操作すると、カーソル位置の分布の高低に応じた粘性が発生する。これは内部詳細構造の把握を促す役割を果たす。

5. 呈示の性能評価

空間情報の呈示において、本研究で提案する没入型ディスプレイと力覚の利用の効果を調べるため、被験者に空間情報の探索などのタスクを課し、従来の典型的な VR 環境と比較評価を行った。従来の典型的な VR 環境とは、大型スクリーンや HMD を利用したもので、各環境は次のとおりである。

(1) HMD による呈示環境 (図 7)

被験者は HMD を介して映像を観察することができる。この環境の特徴は、観察者の頭の向きに応じた映

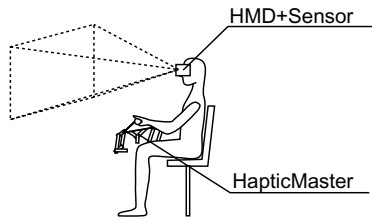


図 7 従来の典型的な VR 呈示環境 (比較 1. HMD)

Fig. 7 Typical Virtual Reality environment (1): This environment consists of a Head Mounted Display (HMD) and a HapticMaster. HMD gives head-tracked visual image to the user.

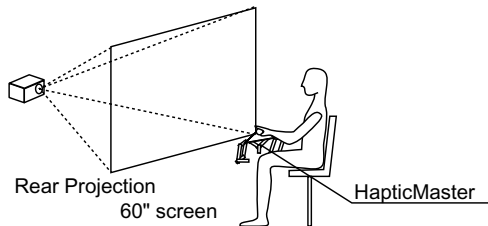


図 8 従来の典型的な VR 呈示環境 (比較 2. 大型スクリーン)

Fig. 8 Typical Virtual Reality environment (2): The environment consists of a large plain screen and a HapticMaster.

像がつねに視線正面に表示されることである。ただし HMD で呈示できる視野角は一般に狭く、解像度も低い。本実験では HMD に Glasstron (PLM-50: 水平画角 40.2 度) を用いた。解像度は NTSC と同等である。また磁気センサには Fastrak を用いた。

(2) 大型平面スクリーンによる呈示環境 (図 8)

被験者は大型平面スクリーンを介して映像を観察する。この種類の環境では通常、観察者をスクリーンに近づけるため背面からプロジェクタで映像を投影することが多い。この環境の特徴は比較的大きな視野角を有していることである。ただしスクリーン面の方向にしか映像がないため、映像中の視線を変更するにはジョイスティックなどの補助装置が必要となる。本実験では対角 60 インチスクリーンにプロジェクタ (PLUS: U3-880, SVGA) を背面投影し、被験者はスクリーンから 80 cm 離れた距離から映像を観察するものとした。この場合、水平画角は約 80 度である。

力覚の有無の効果も同時に調べるため、HapticMaster のトルク出力を ON/OFF することとした。同じインタフェースを利用することで、純粋な力覚の効果と比較することができる。

5.1 ナビゲーションタスクの操作評価実験

目的: 空間データを観察するうえで重要な機能の 1 つは、観察者の視点を任意の位置に移動することで

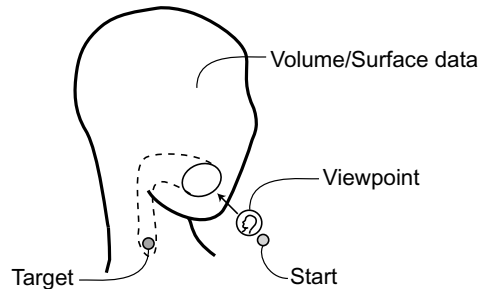


図 9 ナビゲーションタスク

Fig. 9 Navigation task.

る。そこでナビゲーションタスクとして、観察者が空間データ内の所定の位置を探し、その目的地まで視点を移動する際の所要時間とコースアウトの頻度について調べた (図 9)。

方法: 被験者は HapticMaster によって自分の視点を操作し、開始地点から目的地に移動する。このときに到達までに要した時間とサーフェスへのめり込み頻度を記録する。実験用データには頭部 CT 画像のほか、人間の食道などを模した経路モデルを用意し、映像や力覚は 3 章の表現手法に従って図 6 のように表示する。比較対照となる HMD、大型スクリーンの各環境には、それぞれに画角に対応した映像を表示する。

手順: 被験者には経路を表現するサーフェス部分になるべく侵入しないよう、実験前に指示し、各環境で数回ずつ練習してもらった。被験者は学生 6 名で、3 種類の視覚ディスプレイおよび力覚の有無の組合せによる、全 6 種類の環境で本タスクを課した。実験に用いたデータは合計 5 種類で、反復による習熟を分散するため、実験の順序はランダムとした。

結果: 環境別による本タスクの平均所要時間および標準偏差を図 10 に示す。全方向ディスプレイや HMD によるものと比べ、大型スクリーンによるもので著しく時間を要している。全方向ディスプレイや HMD では頭部を動かすだけで視線を変更できるが、大型スクリーンでは HapticMaster による方向変換動作が必要となることを顕著に示している。また全方向ディスプレイと HMD にも有意差が見られたが、これは目的地が視野に入りやすいかという、画角の大きさに起因しているものと考えられる。力覚の有無においては、総じて所要時間を短縮する傾向にあった。力覚によって経路面から抗力を受けるような反力呈示を行っているため、手探り状態である程度の移動可能な方向が把握できていたものと考えられる。視点移動の補助効果として、この場合の力覚は有益であるといえる。

一方、経路を外れサーフェスへの侵入を許した頻度

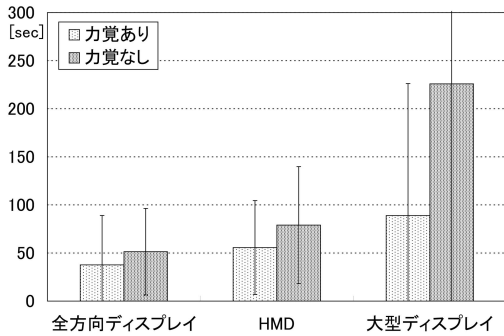


図 10 ナビゲーションに要した時間

Fig. 10 Required time through the navigation task.

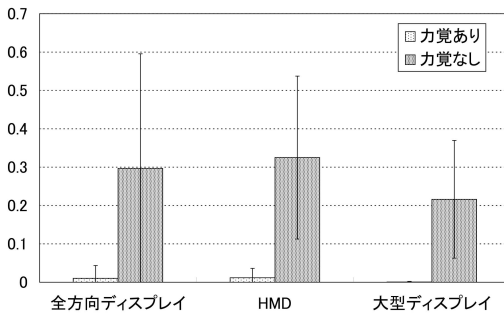


図 11 ナビゲーション時に侵入を許した時間の割合

Fig. 11 Rate of invasion time through navigation task.

の平均と標準偏差を図 11 に示す．力覚の有無による侵入頻度の差が顕著に表れているのは，経路に対して力覚を発生させている効果によるものと考えられる．力覚に逆らって侵入する場合もあり，必ずしも侵入を完全に防ぐものではないが，力覚によって経路を逸脱することなく移動できることをこの結果は意味している．

視覚ディスプレイ間の比較では，大型スクリーンを用いた場合で経路への侵入頻度が少ない傾向にあった．ある被験者の感想として，頭部を動かす際どうしても手元が狂ってしまう，という指摘があった．大型スクリーンではつねに映像は前方にあり，頭部を動かすことなく周囲を見渡すことができる．その反面，他のディスプレイで見まわし動作をする際，頭部動作につられて手元がぐらついてしまい，操作が乱れたと考えられる．力覚はこの操作の乱れを軽減する役割を果たしている．

5.2 触診タスクの操作評価実験

目的：空間データ中を探索し，より詳細の構造を知るためには，少なくとも周囲とは明らかに異なった領域を探索，指示できることが必要である．ここでは触診タスクとして，表示されるボリュームデータ中の

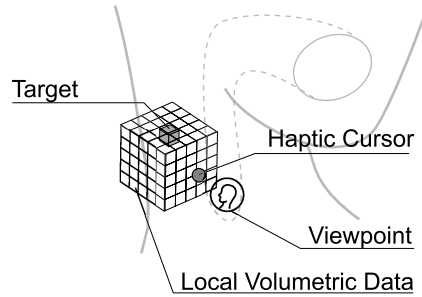


図 12 触診タスク

Fig. 12 Palpation task.

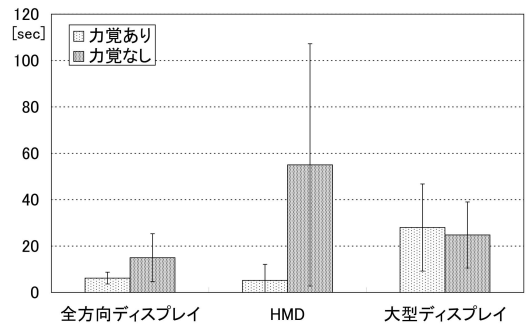


図 13 触診モードにおける目標指示に要した時間

Fig. 13 Required time through exploration task.

ターゲットを探索する性能について調べた (図 12) .

方法：被験者は球形のターゲットを探索し，カーソルを操作してターゲットの中心を指し示す．ターゲットは周囲とは明らかに配色や力覚が異なり，被験者は視覚と力覚よりターゲットの位置を把握することができる．このときに要した時間と，指し示した位置とターゲットとの距離誤差を測定し，それを評価項目とする．

手順：被験者にはターゲットの中心をカーソルで指し示してもらうよう実験前に説明し，各環境で数回ずつ練習してもらった．被験者は学生 5 名で，3 種類の視覚ディスプレイおよび力覚の有無の組合せによる，全 6 種類の環境で本タスクを課した．実験に用いたデータは合計 6 種類で，ランダムな位置にターゲットが生成される．ターゲットは操作空間上で半径 2 [cm] の球形に相当し，領域内を均一に粘性マッピングする．ターゲット内の粘性マッピングの強度は周囲の領域の 2 倍で，これは明らかに弁別できる刺激強度である．反復による習熟を分散するため，実験の順序はランダムな順とした．

結果：本タスクの環境別による平均所要時間を図 13 に示す．誤差棒は標準偏差を表している．

このグラフから，ターゲットの探索に要する時間に

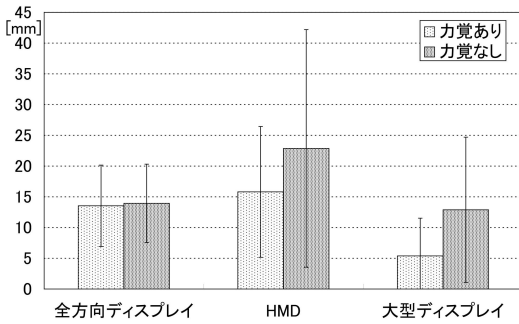


図 14 触診モードにおける目標指示の精度

Fig. 14 Pointing accuracy through exploration task.

については、ターゲットを視覚で発見しやすい没入型ディスプレイが最も有利であるといえる。力覚によって所要時間を短縮する効果があるともいえるが、大型スクリーンの場合には力覚の有無はあまり影響がなかった。大型スクリーンの場合は、視覚および力覚でターゲットを発見してから、見まわし動作をすることなく、頭部を固定した状態を保ったまま、時間をかけて中心を指示することができたものと思われる。これは指示精度のグラフ(図 14)より、大型スクリーンでの指示がターゲットのより中心に近いことが分かる。指示精度で、ほとんどの試行で半径 2 [cm] 内のターゲットを指示できていたが、HMD + 力覚なしの組合せではまれにターゲットを大きく外れて指示してしまう試行もあった。

5.3 評価実験の考察

実験の結果より、空間データの呈示時での没入ディスプレイは、他のディスプレイと比較してつねに周囲の情報を得て経路の構造を把握しやすく、目的地点を短時間に発見できる、という利点があるといえる。全方向に映像があるためつねに見まわし動作が必要となるが、このとき手元の操作に影響を及ぼす。力覚はこの手元のぐらつきによる操作の乱れを少なくし、移動の際の補助的な役割を果たす。一方、詳細を調べる操作では、対象の発見には画角の広い没入型ディスプレイが有利だが、指示精度の面では、時間を要するものの大型スクリーンと力覚の組合せが有利であるという結果を得た。これは大型スクリーンの利用時に頭部をつねに固定するため、正確に指示できることが 1 つの理由であろう。

実験を通して気づいたことだが、没入型ディスプレイによる実験中に疲労を訴える被験者がいた。こうした心理的、生理的疲労の要因は定量評価していないが、操作性の問題のほか、フォースディスプレイから発生するノイズ音がスクリーン内で反響する、周囲を暗く

するためフリッカが目につく、画面の更新速度が遅い、などが原因として考えられる。なお被験者によっては HMD を被るほうが疲れが大きい、という感想もあり、心理的生理的な影響に関して比較することは難しい。

6. 結 論

空間情報の呈示において没入型視覚ディスプレイに加え、力覚ディスプレイを導入することを提案し、ミクロの視点から空間データに対して作用する表現手法について述べ、その手法を実現する環境を構築した。また、空間情報の 1 つである医療画像を用い、人間の骨や皮膚を全方向に表示あるいは詳細部分を力覚によって作用することのできる実装応用例を紹介した。これらの操作環境を用い、没入型ディスプレイと力覚ディスプレイの組合せと、他の標準的な VR 環境である環境との比較評価実験を行い、操作に際し補助となりうることを確認した。

没入型ディスプレイの映像を見まわす場合、頭部の振り向き動作によって手元の操作を乱すことが観察された。この問題を完全に回避するには、力覚呈示装置がつねに人間の動作に追従したり、装着されたりするものが望ましいと考えられる。この際、装置がスクリーン上の映像に干渉して自然さを損わない仕組みが必要とされる。

実装例における表示では、サーフェスによる表示や半透明ボクセル表示によったが、まだ工夫の余地があると考えられる。こうした工夫は計算機の描画能力にも依存するため、最適な表示方法を一概に特定することは難しいが、表示におけるソフトウェア的な面のみならず、没入型ディスプレイに立体視を適用するといった、ハードウェア的な改良も必要だと考えられる。

一方、こうした人間の感覚を利用したシステムにおいて、心理生理的な負の影響が少なからずあることが分かった。したがって、このような装置を利用する場合には、環境や操作性などからくる心理的な疲労や、眼球、腕などの生理的な疲労などについて調査、検討が必要であろう。

参 考 文 献

- 1) Kaufman, A., et al.: Volume Graphics, *IEEE Computer*, Vol.26, No.7, pp.51-64 (1993).
- 2) Iwata, H., et al.: Volume Haptization, *Proc. IEEE Symposium on Research Frontiers in Virtual Reality* (1993).
- 3) Bryson, S.: Virtual Environments in Scientific Visualization, *Proc. ICAT '92*, pp.99-116 (1992).

- 4) Bryson, S.: Virtual Reality in Scientific Visualization, *Comm. ACM*, Vol.39, No.5, pp.62-71 (1996).
- 5) 廣瀬通孝ほか：没入型多面ディスプレイ (CABIN) を利用した数値シミュレーションの可視化, 日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, Vol.2, pp.141-144 (1997).
- 6) Kageyama, A., et al.: Scientific Visualization in Physics Research by ComplexScope CAVE System, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.4, No.4, pp.717-722 (1999).
- 7) Brooks, F.P., et al.: Project GROPE—Haptic Displays for Scientific Visualization, *Proc. SIGGRAPH '90*, Vol.24, No.4, pp.177-185 (1990).
- 8) Avila, R., et al.: A Haptic Interaction Method for Volume Visualization, *Proc. Visualization '96*, pp.197-204 (1996).
- 9) Mor, A., et al.: Interacting with 3-Dimensional Medical Data Haptic Feedback for Surgical Simulation, *Proc. 1st PHANToM User's Group Workshop* (1996).
- 10) Gibson, S., et al.: Simulating Arthroscopic Knee Surgery using Volumetric Object Representations, RealTime Volume Rendering and Haptic Feedback, *The joint Conference on Computer Vision and Virtual Reality in Medicine and Medical Robotics and Computer Assisted Surgery* (1996).
- 11) Grant, B., et al.: Adding Force Display to a Stereoscopic Head-Tracked Projection Display, *Proc. VRAIS '98*, pp.81-88 (1998).
- 12) 矢野博明ほか：多種触覚デバイスに対応した Haptic Work Bench の開発, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.4, No.4, pp.723-730 (1999).
- 13) Hirose, M., et al.: HapticGEAR: The Development of a Wearable Force Display System for Immersive Projection Displays, *Proc. Virtual Reality 2001 Conference*, pp.123-129 (2001).
- 14) 岩田洋夫：シームレス全周球面ディスプレイ, 日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, Vol.3, pp.155-158 (1998).
- 15) 橋本 渉ほか：凸面鏡を用いた球面没入型ディスプレイ：Ensphered Vision, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.4, No.3, pp.479-486 (1999).
- 16) Lorenson, W., et al.: Marching Cubes: A High Resolution 3D Surface Construction Algorithm, *Proc. SIGGRAPH '87*, Vol.21, No.4, pp.163-169 (1987).

(平成 12 年 7 月 3 日受付)

(平成 14 年 6 月 4 日採録)



橋本 渉

昭和 47 年生。平成 12 年筑波大学工学研究科知能機能工学専攻博士課程修了。同年筑波大学機能工学系助手。現在大阪工業大学講師。没入型ディスプレイやハプティックインタ

フェース等, 人工現実感に関する研究開発に従事。博士(工学)。



岩田 洋夫 (正会員)

昭和 32 年生。昭和 61 年東京大学大学院工学系研究科修了。同年筑波大学構造工学系助手。現在筑波大学機能工学系教授。バーチャルリアリティ, 特にハプティックインタフェー

スの研究に従事。工学博士。