

# 人工現実感の視覚特性の研究

課題番号：10410021

平成10年度～平成13年度  
科学研究費補助金（基盤研究（B））  
研究成果報告書

静岡大学附属図書館



030850489 3

平成14年3月

研究代表者 林部 敬吉  
(静岡大学情報学部)

# 人工現実感の視覚特性の研究

課題番号：10410021

平成10年度～平成13年度  
科学研究費補助金（基盤研究（B））  
研究成果報告書



平成14年3月

研究代表者 林部 敬吉  
(静岡大学情報学部)

# 目次

## 1. はしがき

## 2. 概要

- 2.1. 研究の背景
- 2.2. 研究の目的
- 2.3. 研究成果の概要

## 3. 研究成果

- 3.1.1 バーチャル・リアリティ空間の視覚特性
  - 3.1.1.1 平面曲率と大きさ恒常性
  - 3.1.1.2 ホロプター特性
  - 3.1.1.3 視えの奥行距離特性
  - 3.1.1.4 視空間特性の個人差
- 3.2. バーチャル・リアリティ空間における運動視差
- 3.3. バーチャル・リアリティ空間におけるテクスチャの効果
- 3.4. 運動要因の立体効果
  - 3.4.1. ドット配置の規則性/不規則性
  - 3.4.2. ドットのグループ化の効果
- 3.5. バーチャル・リアリティ技術の応用
  - 3.5.1. 人間の脳の3次元可視化
  - 3.5.2. 室内デザインの3次元可視化
  - 3.5.3. 室内デザインの操作性での視覚刺激と音刺激の効果
  - 3.5.4. 初心者のプログラミング能力獲得支援システムの作製

# 1. はしがき

## 1.1. 研究組織

研究代表者：林部 敬吉 (静岡大学情報学部 教授)  
研究分担者：辻 敬一郎 (中京大学心理学部 教授)  
研究分担者：阿部 圭一 (静岡大学情報学部 教授)  
研究分担者：中谷 広正 (静岡大学情報学部 教授)  
研究分担者：東山 篤規 (立命館大学文学部 教授)

## 1.2. 研究経費

(金額単位 : 千円)

	直接経費	間接経費	合計
平成10年度	4,100	0	4,100
平成11年度	1,100	0	1,100
平成12年度	1,800	0	1,800
平成13年度	2,100	0	2,100
総計	9,100	0	9,100

## 1.3. 研究成果

### (1) 学会誌等

林部敬吉 心理学における3次元視研究の動向-2001-、静岡大学情報学研究、6、2002。(印刷中)

Hayashibe, K. & Hashimoto, K. Apparent distance in actual, 3-D video-recorded and virtual reality. Perceptual and Motor Skills (in press). 2001

林部敬吉 心理学における3次元視研究の動向-2000-、静岡大学情報学研究、5、68-86、2001.

阿部圭一、林部敬吉、中谷広正、辻敬一郎、東山篤規 人工現実空間における視覚特性 館  
瞭監修、佐藤誠編 パーチャルリアリティの基礎第2巻 人工現実感の設計-究極のイ  
ンターフェースを求めて-、69-77 培風館 2000.

Tsujii, K., Hayashibe, K., Hara, M., Matsuza, T Vision-motor causes detection of visual  
depth from motion and density. Swiss Journal of Psychology, 59, 108-114, 2000

林部敬吉 心理学における3次元視研究の動向-1999-、静岡大学情報学研究、4、61-86、  
2000

### (2) 口頭発表等

高田保 林部 敬吉 パーチャル・リアリティ空間における力覚代替機能としての視覚と  
聴覚刺激の役割、パーチャル・リアリティ学会第6回大会論文集、103-106, 2001.

龍橋 剛 林部敬吉 パーチャル・リアリティを利用した初心者プログラミング能力の  
獲得支援システムの作製 日本パーチャル・リアリティ学会第6回大会論文集

25-26, 2001.

林部敬吉 バーチャル・リアリティ空間におけるテクスチャの効果 日本心理学会第65回大会論文集 287, 2001.

Hayashibe, K Apparent distance in actual, 3-dimensional and virtual reality spaces. *International Journal of Psychology*, Vol. 132, p383, 2000.

相澤正規、林部 敬吉 バーチャル・リアリティを用いた室内デザインの支援、バーチャル・リアリティ学会第5回大会論文集、25-28, 2000.

橋本邦明、増田智宏、林部 敬吉 バーチャル・リアリティを用いた脳模型の作製、バーチャル・リアリティ学会第5回大会論文集、345-348, 2000.

林部敬吉 人工現実空間での運動視差 日本心理学会第64回大会論文集 296, 2000.

林部敬吉 運動要因による立体視(3) 日本心理学会第63回大会論文集 388, 1999.

橋本邦明、林部敬吉、阿部圭一、中谷広正、東山篤規 人工現実空間における奥行距離特性 バーチャル・リアリティ学会第4回大会論文集、3-6, 1999.

増田智弘、林部敬吉、阿部圭一、中谷広正、東山篤規 人工現実空間における視覚特性の個人差 バーチャル・リアリティ学会第4回大会論文集、305-308, 1999.

桑原 智、林部敬吉、杉山岳弘 位相を用いたランダム・ドット・ステレオグラムと実画像ステレオグラムの両眼視差検出 情報処理学会全国大会論文集、1999.

林部敬吉 運動要因による立体視(2) 日本心理学会第62回大会論文集 228, 1998.

林部敬吉、阿部圭一、中谷広正、東山篤規 人工現実空間におけるホロプター特性 バーチャル・リアリティ学会第3回大会論文集、113-114, 1998.

### (3) 出版物等

林部敬吉 しずおか時想 2000年のVR 中日新聞 2002.

林部敬吉 バーチャルリアリティの世界 静大フォーラム 20-23, 2000.

林部敬吉 浜松市制90周年記念こども科学博覧会 静岡新聞 2001.

## 2. 概要

### 2.1. 研究の背景

#### 2.1.1. バーチャル・リアリティとは何か？

バーチャルとは、英語のvirtualのことであり、その意味は「事実上の、実質上の、仮の、虚の」といった形容詞である。つまり、「見かけや形は現物そのものではないが、本質的あるいは効果の上では現物と代わらないもの」である。リアリティ(reality)は現実性を意味するので、バーチャル・リアリティは実質的な現実性を意味し、人工的に構成された現実感をいう。実際は、コンピュータなどのディスプレイ上に出現させた立体的な視覚世界をさし、コンピュータを介して提示する。

立体映画とバーチャル・リアリティは、3次元の世界が見える点ではよく似ているが、次の点で大きく異なる。それは、バーチャル・リアリティの世界では、観察者がその世界の中を歩き回ったり、その中にあるものを手で触ったり、動かしたりできること、つまり観察者とバーチャル・リアリティの世界とが双方向(インタラクティブ)につながっていることである。このようなことが可能なのは、画像がデジタルで構成されているため、観察者からの移動や操作情報にもとづいて画面を書き換えることができるためである。観察者からの情報は、手につけるデータグローブあるいは身体の移動を伝える磁気姿勢センサーなどを通してコンピュータに伝えられ処理される。

#### 2.1.2. バーチャル・リアリティと3次元の視覚世界

バーチャル・リアリティで構成された世界は3次元の視覚世界である。人間に3次元に見えるように画像を提示するためには、両眼視差というしくみを使う必要がある。人間が2次元の網膜像から3次元の視覚世界を知覚できるのは、左右の眼が約6.5cm離れているために各眼に投影される網膜像が水平方向のズレ、すなわち両眼視差情報を得ることができるからである。このしくみを人工的に応用するには、水平方向に位置のズレた2つの画像を作成し、それらを左右眼に別々に投影すれば立体視が再現できる。バーチャル・リアリティでは、左眼用と右眼用画像をディスプレイに高速交替(60Hz以上)提示し、この交替提示に同期して開閉する液晶のシャッター(液晶シャッター眼鏡)を眼鏡のようにかけさせるか、あるいは左右の眼前のそれぞれに小さな液晶ディスプレイを組み込んだヘルメットのようなもの(ヘッドマウントディスプレイ)をかぶせて左眼用と右眼用画像を提示し、3次元の視覚世界を出現させている(図1)。

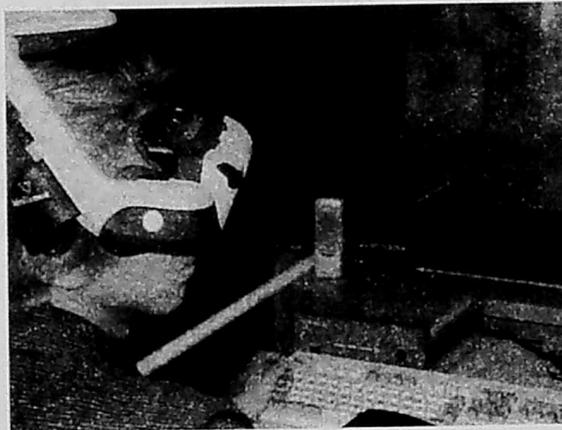


図1 バーチャル・リアリティの提示装置であるヘッド・マウント・ディスプレイ(HMD)。写真では、観察者がHMDを頭に装着してバーチャルな世界を視ている場面である。観察者の前面にある大型ディスプレイにも、HMDと同等な画面が提示できる。

人間は、単眼でも3次元の世界を知覚できる。これは、両眼視差以外の立体視のためのしくみ、たとえば眼球調節、両眼輻輳（奥行位置の異なる対象を注視するとき両眼を鼻側に寄せたりこめかみ側に開いたりする眼球の働き）、運動視差、遠近法的絵画要因、陰影など単眼でも効果的なしくみをもっているからである。臨場感のあるバーチャルな視覚世界を構成するためには、両眼視差以外のこのようなしくみも効果的に利用する必要がある。現実世界の写像を人間の脳に効果的に構成させることができれば、人間は現前してはいないけれども視覚的效果としては現前するのと等しい行動空間を臨場感や現実感をもって体験させ、しかもその中で行動させることが可能である。

それでは、バーチャル・リアリティの空間は、現前している現実空間と寸分違わぬものであろうか。これを実証するためには、バーチャル・リアリティの空間のもつ視覚特性を測定し、現実空間のそれと同等であるかを検討し、そうでなければバーチャル・リアリティの空間構成を現実のそれに近づける工夫がある。人間の視覚は、外界世界の単なる模写（コピー）ではなく、網膜像と網膜像以外からの他種類の情報（手がかり）にもとづいて再構成されたものである。その結果、知覚された世界と物理世界とは、必ずしも一致せず、双曲空間特性、知覚恒常性（後述）、奥行距離特性などで視覚的歪みをもつ特有な心理的空間となる。これらの視覚現象を起こす視覚システムは、人間が外界の有様を知覚し、その中で行動するとき、不都合なものとなるのではなく、適応的なものとして作用している。

### 2.1.3. バーチャル・リアリティの視空間特性

#### (1) 双曲空間特性

人間が外界を知覚し、3次元の視覚世界を成立させると、そこには多くの視覚諸特性が存在するが、そのなかでも基本となる特性は視覚世界はユークリッド空間や楕円空間ではなく、双曲空間となっていることである。

いま、暗室で机の上に観察者の前方にまっすぐに並んだ2本の光点の列を提示し、それら2本の光点の列が、観察者から見てまっすぐで、しかも見かけ上それらの光点列が平行になるように並ばせた後で、照明を点灯し、それらを見ると、図2に示されたように、奥にゆくに従って広がるように配置されていることがわかる。観察者には、2本の光点列がこのように配置されているときに、見かけの上では、平行に見えている。

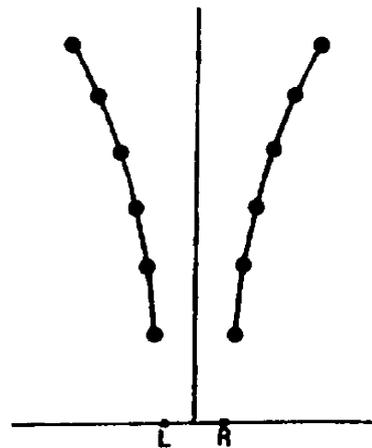


図2 奥行方向の双曲空間特性。暗室内で観察者から前方に延びる2本の光点列を見かけ上それらがまっすぐで平行になるように調整させると、図のように遠方にゆくにつれて広がるような配置がなされる。図中、LとRは左眼と右眼を、黒丸は光点を示す。

同様に、観察者の前方、50cmの奥行の位置に、横方向に1本の光点列を提示し、それ

らが、横方向にまっすぐ（観察者のひたいに平行）になるように配置させると、図3に示されたように、それらの光点列は観察者から見て凸になるように配置されている。この光点列を観察者から100cmの奥行位置に提示し、同様に、横方向にまっすぐになるように並べせると、今度は観察者から見て凹になるように光点列は配置されている。

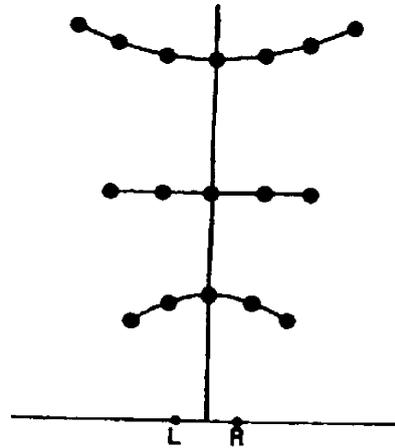


図3 前額平行方向の双曲空間特性。観察者の前方、50cmまたは100cmの奥行の位置に、横方向に1本の光点列を提示し、それらが、横方向にまっすぐになるように調整させると、実際には、それらの光点列は図のように曲がって配置される。ただ、70cm前後の位置では、ほぼ直線上に配置される。図中、LとRは左眼と右眼を、黒丸は光点を示す。

これらの結果は、人間の視空間が、われわれの熟知している幾何学的空間（ユークリッド空間）ではなく、特定の歪みをもった空間であることを示す。たとえば、丸い地球上の2点間に線を引くと、それは直線となるが、これを平面地図に直すと曲線となる。これと同じように、観察者が設定した光点配列は、曲面上の最短線（測地線）であり、これを机のような平面上に再現すると曲線となる。このような視空間の歪みは、数学的には、ガウス(Gauss)の定曲率で表せることをLunebergは示した。定曲率が0のときはユークリッド空間を、正の値をとれば楕円空間を、負の値であれば双曲空間をそれぞれ示す。図2や図3に示された結果から計算すると、定曲率は負の値となるので、人間の視空間は双曲空間特性をもつ。

## (2) 知覚恒常性

知覚恒常性とは、対象の属性（大きさ形状、明るさ、色など）が、観察距離や視点に対応して変わる網膜像に依存しては変化せず、その見かけの対象属性が保存されて知覚されることをいう。たとえば、対象についての網膜像の大きさは対象と観察者との距離で規定されるが、知覚された対象の大きさは網膜像の変化に依存せず、その見かけの大きさが保存されて知覚される。これまでの知覚研究によれば、大きさ恒常性が起きる程度は、奥行や立体を知覚するための手がかり(cue)の多寡によって異なり、すべての手がかりが利いている条件(full cue)で高くなる。Boringの研究では、両眼視差、眼球調節、両眼輻輳、遠近法的絵画要因がすべて働く観察条件を基準とし、この条件から奥行手がかりをひとつずつ除去し、最後にはすべての手がかりを取り除いて網膜像のみを手がかりとして残した4通りの観察条件を設定して、大きさ恒常度を測定すると、すべての奥行手がかりが働く条件では恒常度の高く、また網膜像のみの観察条件では恒常性がなくなることが、そして、ひとつあるいは2つの手がかりを除去した観察条件では、これらの中間の恒常性が生起することがそれぞれ示された。

大きさの恒常性は、Lunebergの理論モデルにもとづいて、その生起が予測できる。それに

よれば、一定の物理的大きさをもつ対象は、定曲率 $K$ が  $-1$ に近いほど、その観察距離が変わっても変化しないことが計算される。

大きさの恒常度は、ザウレスの指数で表すことができ、それによれば、大きさ恒常性が100%生起していれば、指数値は1となり、大きさ恒常性が全く生起していなければ0となる。自然空間では、おおよそ0.85から0.95の値となることが知られている。

### (3) 視えの奥行距離特性

視えの奥行距離特性とは、観察者が視空間の奥行距離をその物理的距離と等しいと知覚しているか、それより遠いものと過大視するか、あるいはそれより近いものと過小視するかをいう。測定の方法としては、(1)メートルなどの日常使用されている距離測度を単位として奥行距離を見積もらせる方法、(2)ある距離を1単位に指定して、奥行距離を見積もらせる量推定法（マグニチュード・エスティメーション法）、(3)指定した奥行距離の半分になるところを指示させる奥行距離分割法などがある。

これらの測定法を用いてのこれまでの研究によれば、視えの奥行距離と物理的奥行距離との間には、次のようなべき関数が成り立つ。

$$d = cD^n$$

( $d$  : 視えの奥行距離、 $D$  : 物理的奥行距離、 $c$  : 定数)

自然空間の室内など比較的小さな空間では、べき指数値( $n$ )1.11、広い戶外空間では0.90を示す。 $n$ が1の値をとると視えの奥行距離と物理的奥行距離とは同等であることを意味し、 $n$ が1より小さい場合には、過小視が起きていることを、それが1より大きい場合には過大視が起きていることを示す。

## 2.2. 研究の目的

人工現実感とはコンピュータが作り出した仮想の世界である。ここでは、人間の視覚、聴覚、触覚、力覚などの諸感覚器官に合成刺激を提示し、実際には存在しない世界を知覚させることができる。人工現実空間の技術は人間とコンピュータとの間の密接な相互作用を可能としたが、この技術によって作り出された仮想世界が人間の感覚、知覚そして認知機能にどのように作用するかは明らかではない。

人工現実感技術を利用して3次元空間や立体形状を表現するには、両眼視差、運動視差、テクスチャ、パースペクティブなどの奥行手がかりを限定して提示し、3次元世界を効果的にシミュレートする必要がある。視空間を両眼視差、パースペクティブそしてテクスチャで表示する場合、日常の視空間とどの程度に類似した視覚特性をもつ空間となるかを、空間曲率、知覚恒常性、奥行分割判断での視えの奥行距離などの知覚指標から確認する必要がある。

本研究の目的は、人間の立体視の視覚情報処理過程を奥行手がかり理論の立場から明らかにするとともに、日常の実空間に近似した視空間の再現を奥行手がかりの組み合わせから追求し、さらにこれを計算機的に表現する適切なアルゴリズムとインターフェイスを開発することにある。

本研究の特色は、人工現実空間の技術を利用して人間の立体視の視覚メカニズムを明らかにしつつ、同時にその知見を利用して3次元空間の表示に応用する点にある。また本研究の独創的な所は、人工現実空間で行動し、操作する人間の視覚的、行動的特性を考慮し、その知見を情報工学的技術に反映させ、立体表現のための適切なインターフェイスとアルゴリズムを開発する点にある。これが可能になれば、バーチャルリアリティ（人工現実空間）技法で表示される視空間の視覚特性を日常での実空間に近似でき、結果としてその現実性を高め、その中で行動する行為者の心理的負荷を減らすことができる。

本研究は、両眼立体視研究、運動による奥行効果問題、ステレオキネティック問題およびCAD、バーチャルリアリティと関連し、心理学、計算機科学、画像工学など国内外で精力的に多くの研究がなされている。立体視研究は、現在、心理学、計算機科学、神経生理学、工学等の分野から研究が進められている。とくにここ数年前から、バーチャル・リアリ

ティ技術 (VR) や CAD 技術の進展に伴い、3次元表現のための心理的要因の効果についての研究成果が望まれている。リアルな空間や形状を再現するためには、人間の立体視のメカニズムを明らかにすることが必要である。このように、計算機工学で表示された空間を視覚・認知心理学と視覚行動学とから分析・測定し、それをフィードバックさせながら、人間の立体視過程を明らかにすると共に、立体を再現するための最適なパラメータ値を得る。

## 2.3. 研究成果の概要

### 2.3.1. バーチャル・リアリティ空間での双曲空間特性

#### (1) 奥行方向の双曲空間特性

VR 広間空間での平面曲率は、 $-0.28$  から  $0.21$  の範囲に分布し、平面曲率値がマイナスを示すものは  $33\%$ 、プラスを示すものは  $66\%$  である。VR 暗室空間での平面曲率値は、 $-0.11$  から  $0.18$  の範囲に分布し、平面曲率値がマイナスを示すものは  $50\%$ 、プラスを示すものも  $50\%$  である。

一方、これとの比較のために、自然空間での平面曲率を測定した結果をみると、それは  $-0.80$  から  $-0.20$  の範囲に分布し (図4)、マイナスを示すことが明らかにされている (東山, 1987)。自然空間では、平面曲率値がプラスを示すものは皆無であるのに対して、VR 空間では、逆に半数以上になる。このことは、VR 空間条件では、VR 技法で表現された空間を両眼視空間として知覚されることに対して個人差が大きいことを示唆し、VR 技法による空間提示にあたって、このことを考慮する必要がある。

#### (2) ホロプター特性 (前額平行面での双曲空間特性)

現実空間で物理的平行と視覚的平行とが一致するところは、観察者から  $100\text{cm}$  近辺である。それよりも遠いところでは、観察者の正中面から周辺に移るにつれて、周辺が過大視され、逆にそれより近いところでは過小視される。一方、人工現実空間では、過大視から過小視に移行する位置が、現実空間より手前にあり、それはおよそ  $30\text{cm}$  である。観察者からディスプレイまでの距離を  $20\text{cm}$  に設定してあることを考慮すれば、人工現実空間で物理的平行と視覚的平行が一致するところは、およそ  $50\text{cm}$  となる。

これらの結果から、人工現実空間と現実空間のホロプター特性は、両空間ともその形状は等しい。すなわち、そこでは物理的平行と視覚的平行が一致する空間帯をもち、それより遠いところでは、中心視野より周辺視野で距離の過大視が、逆に近いところでは、周辺視野がわずかに過小視される。その結果、遠いところでは、周辺視野に置かれた対象は、より手前に位置して見える。また、比較的近い空間では、周辺視野にある対象は、わずかに遠くにシフトして見える。

### 2.3.2. バーチャル・リアリティ空間での大きさ恒常性特性

VR 空間の各観察距離での恒常性指数を観察者別およびその平均で示したものが表1の最下行である。観察距離  $2\text{m}$  から  $10\text{m}$  までの恒常性指数の観察者別の平均値を求めたものが表1である。全被験者の総平均は、 $0.88$  (標準偏差  $0.05$ ) となる。

VR 視空間の大きさ恒常性を自然空間でのそれと比較してみよう。自然空間での大きさ恒常性は、久米の研究にもとづいて、ザウレス指数に直して表にまとめてある。ここでは、通常の採光をもつ廊下空間 (小学校の廊下)、広大なビル屋上空間および暗室空間が利用され、その各々で大きさ恒常性が測定されている。廊下空間と屋上空間 (横幅  $10\text{m}$ 、奥行  $120\text{m}$ ) では、主要な奥行手がかり、すなわち、両眼視差、運動視差、両眼輻輳、眼球調節、パースペクティブ、テクスチャ、陰影などが働いているが、暗室空間では、主要な手がかりのほとんどが制限されている。自然空間条件下での大きさ恒常性は、観察距離  $8\text{m}$  程度の屋上もつとも高く ( $0.98$ ) 暗室空間ではもつとも低い ( $0.50$ - $0.59$ )。また、廊下空間お

表1 VR空間と自然空間における恒常性指数

空間 (m)	1	2	3	4	5	6	8	10	12	16	20	30	40	50	60	70	80	90	100
略視			.59		.50														
廊下	.78	.88	.90	.91		.90	.90		.91	.90									
屋上							.98				.97	.95	.94	.92	.91	.90	.87	.87	.85
VR		.85		.88		.88	.88	.88											

よび屋上空間では、距離が近い位置（2mまで）と遠い位置（80-100m）で、恒常度は幾分低くなる。これらは、いずれも、奥行きがかりの効果と関係し、十全な条件で大きさ恒常性が高いといえる。とくに、両眼視差、両眼輻輳、眼球調節など奥行き距離が遠いと、その効果が利きにくいと考えられる屋上空間（20-40m）でも、大きさ恒常度がかかなり高いのは、パースペクティブやテクスチャが利いているためである。

### 2.3.3. バーチャル・リアリティ空間での奥行き距離特性

バーチャル・リアリティ空間（VR空間）、3次元実写空間、現実空間のそれぞれにおける奥行き距離特性を測定した。現実空間として、奥行き10m、横幅7m、高さ3mの屋内教室空間および奥行き1.00m、横幅50mの屋外街路空間を選定し、3次元実写空間は、これらの現実空間をステレオビデオカメラで撮影したものを、VR空間は、これらの空間を人工的にシミュレートしたものから構成された。VR空間は、立体視のための奥行きがかりである両眼視差、パースペクティブ、陰影、テクスチャ勾配を用いて構成した。VR空間、3次元実写空間とも、37インチの大型ディスプレイに提示し、液晶シャッター眼鏡を通すことよって立体視させて観察させた。3種類の空間における物理的奥行き距離に対する視えの奥行き距離は、マグニチュード推定法およびメートル尺度による推定法で測定した。実験の結果は次のようになった。

#### (1) 現実空間での奥行き距離特性

マグニチュード推定法による屋内教室空間でのベキ指数は1.27、屋外街路空間のそれは1.3となり、それぞれ視えの奥行き距離は過大視傾向を強く示した。メートル尺度報告法での結果は、屋内教室空間ではやや過小視傾向を、屋外街路空間では物理的距離と視えの奥行き距離とがほぼ一致する事を示し、マグニチュード推定法による結果とやや異なった。

#### (2) 3次元実写空間での奥行き距離特性

マグニチュード推定法による屋内教室空間でのベキ指数は1.19、屋外街路空間のそれは0.97となり、前者では視えの奥行き距離はやや過大視傾向を、後者ではやや過小視傾向を示す。メートル尺度報告法での結果も、ほぼ同様な結果となる。

#### (3) VR空間での奥行き距離特性

屋内教室空間では、ベキ指数は1.32、屋外街路空間でのそれは0.84となり、前者では明瞭に過大視傾向を、後者では過小視傾向が示された。

### 2.3.4. バーチャル・リアリティ空間における視覚特性の個人差

バーチャル・リアリティ空間における視覚特性の個人差を、奥行き方向の双曲空間特性、ホロプター特性、大きさ恒常性、視覚的奥行き距離特性についてしらべた。その結果、今回の実験では、大きさ恒常性特性の個人差が小さいので、双曲的空間特性と大きさ恒常性との間およびホロプター特性と大きさ恒常性との間には顕著な個人差はみられない。しかし双曲的空間特性とホロプター特性との相関を見ると、双曲的空間特性とホロプター特性を顕

著に示すもの（3名）、全く示さないもの（3名）、わずかに示すもの（6名）とがみられた。このことから、バーチャル・リアリティ空間における視覚特性の個人差は大きいと考えられる。

### 2.3.5. バーチャル・リアリティ空間における運動視差の効果

バーチャル・リアリティ空間での主要な手がかりある運動視差の効力についての分析を行った。運動視差は、奥行10m、横幅7m、高さ3mの屋内空間内の市松模様を配した床面に導入された。観察者の頭部運動を検出するために磁気センサーを装着させ、左右に一定速度で運動しながらディスプレイを注視すると、観察者は、その運動に伴って床面に奥行落差が出現して見える。実験条件は、「運動視差条件」、「両眼視差条件」、「運動視差+両眼視差」条件である。実験の結果、両眼視差が含まれる条件では予定した落差距離が知覚されたが、運動視差単独条件では、十分な奥行手がかり効果が得られなかった。そこで、運動視差の運動速度を通常の2倍に増大したところ、落差距離の増大が観察された。このことから、運動視差をバーチャル・リアリティ空間で利用するには、自然な事象よりその運動速度を増強する必要があることが確認された。

### 2.3.6. バーチャル・リアリティ空間におけるテクスチャの効果

室内空間での天井面と床面上のテクスチャの組み合わせを変えたVR空間を構成し、その空間内に提示した対象までの奥行を測定し、もっとも奥行効果が高いテクスチャの組み合わせ条件を求めた。VR空間は両眼視差とテクスチャを用いて構成された。空間は遠方に伸びる天井面と床面で構成され、それぞれの面状にはテクスチャが張り付けられた。また、空間内には、奥行距離測定ターゲットとなる2つの対象（円筒）を距離を違えて提示した。天井面に配するテクスチャは、水平線奥行方向勾配テクスチャ、収束テクスチャ、碁盤目状テクスチャの3種類のパターンとした。床面に配するテクスチャは、床面の中心領域に配するものと、その周辺領域に配するものを変えて組み合わせた。床面の周辺に配するテクスチャは天井面に使用するものと同種類のものを使用し、中心領域に配するものは、水平方向テクスチャ、水平方向木目調テクスチャ、水平方向陰影テクスチャ（グラデーション）とした。実験の結果、次のことが明らかにされた。(1)天井面のテクスチャによる奥行効果は、3種類のテクスチャの組み合わせのいずれにおいても差が無く、したがって、視えの奥行距離に与える影響は小さい。(2)床面の中心領域に配したテクスチャの中で木目調パターンは、遠位置に対する対象の視えの奥行距離をより遠くに知覚させる。(3)床面の周辺領域に配したテクスチャの中では、遠位置の対象をより遠くに知覚させるパターンは水平線奥行勾配条件で、近位置の対象をより手前に知覚させるものは収束パターンである。(4)視えの奥行距離を効果的に増強するテクスチャの組み合わせ条件は、天井、床面とも水平線で描かれた奥行勾配を持つテクスチャに床面中心領域に木目パターンを付置させた条件である。

### 2.3.7. バーチャル・リアリティ技術の応用

#### 2.3.7.1. バーチャル・プレーンの作製

バーチャル・リアリティ技術を利用して複雑な3次元形状をもつ人間の脳の3次元可視化を試みた。既製のプラスチック脳模型を3次元スキャナーで取り込み、そのポリゴンモデルをグラフィックソフトで修正した上で、バーチャル・リアリティ上で復元した。評価テストの結果、脳の構造と機能の理解が、脳の3次元可視化で格段に向上することが示された。

#### 2.3.7.2. 室内デザイン支援システムの作製

VR技術を利用した室内デザイン支援システムの作製を試みた。このシステムでは、VR空間内に置かれた様々な対象をデータグローブを使用して仮想的に移動でき、もし対象とデータグローブとが接触すれば、接触判定を行い、同時に接触したことをユーザーに視覚的、聴覚的信号で知らせることができる。このシステムや実装し評価実験を行ったところ、視

覚的認知性、対象のデータグループによる操作性とも、良好な結果が得られた。

#### 2.3.5.3. 初等プログラミング教育支援システムの作製

プログラミング環境をコンピュータのモニタ上からバーチャル・リアリティの空間へ取り出して、初心者にはわかりやすい表現を使用した、初等プログラミング教育支援を目的としたツールが作製された。このプログラミング環境では、(1) 複数の人間で話し合いながら共同作業でプログラミングを行うことが可能、(2) いろいろな物や形を利用してプログラム列を表現することが可能 (3) 物の表現に工夫を加えることによってプログラムを学習する者にとって作業を楽しく行わせることも可能 (4) プログラムを表現するための物体に回転などの操作を加えることによって、プログラムを考える手がかりを与えることが可能となること、などを行うことができる。この支援システムでは、バーチャル・リアリティの技術を利用することで、プログラミング環境に使用するための特別のツールを用意することなく、プログラムするとはどういうことかを理解させることができ、さらに、物理的な制約が解除されるため、より自由にいろいろなものや形を利用してプログラミングを行うことが可能となっている。

## 3. 研究成果

### 3.1. バーチャル・リアリティ空間の視覚特性

#### 3.1.1. 平面曲率と大きさ恒常性

#### 人工現実空間の視覚特性

阿部 圭一<sup>1)</sup> 林部 敬吉<sup>1)</sup> 中谷 広正<sup>1)</sup> 辻 敬一郎<sup>3)</sup> 東山 篤規<sup>3)</sup>

Keiichi ABE, Keikichi HAYASHIBE, Hiromasa, NAKATANI, Keiichiro TSUJI,

Atunori, HIGASHIYAMA

(1) 静岡大学 情報学部

〒432-8561 浜松市城北3丁目5-1

(2) 名古屋大学 文学部, tsuji@challenger.riem.nagoya-u.ac.jp

〒464-01 名古屋市中種区不老町464-01

(3) 立命館大学 文学部, higashiyama@archan.ritsu.ac.jp

〒603-77 京都市 北区等持院北町56-1

#### (1) はじめに

人工現実空間 (VR空間) では, CRT や HMD ディスプレイなどに提示された視空間が立体的に表示されているとともに, VR空間自体あるいはVR空間内の事物が観察者の行動や操作によって変化あるいは移動することができる. このことを可能にするためには, 人間が2次元の網膜像から3次元の視覚世界を再現するためのしくみをどのように利用したら臨場感の高いVR空間を構成できるかを研究するとともに, そこに再現されたVR空間の視覚特性が自然空間のそれとどの点で類似した相違するかを明らかにする必要がある.

人間の視覚は, 外界世界の単なる模写 (コピー) ではなく, 網膜像と網膜像以外からの他種類の情報 (手がかり) にもとづいて再構成されたものである. その結果, 知覚された世界と物理世界とは, 必ずしも一致せず, 錯覚, 錯視や視覚的歪みなどの視覚現象が生起する. これらの視覚現象を起こす視覚システムは, しかしながら, 人間が外界の有様を誤って知覚し, そしてその中で行動するとき, 不都合なものとなるのではなく, すべて適応的なものとして作用する.

ここでは, VR空間の視覚諸特性を測定し, 自然空間のそれと比較することを通して, その臨場感の程度を明らかにする.

#### (2) 自然空間での視覚特性

##### (a) 視空間の双曲空間特性

人間が外界を知覚し, 3次元の視覚世界を成立させると, そこには多くの視覚諸特性が存在するが, そのなかでも基本となる特性は視覚世界はユークリッド空間や楕円空間ではなく, 双曲空間となっていることである.

Luneberg は, 物理的空間と両眼視空間との対応関係を理論的に検討した. 物理的空間とは, デカルト座標で表示される空間 (図1) で, 両眼の回転の中心をL (左眼), R (右眼), その中点を原点とし, その原点から互いに直交するように3方向に伸びた  $x$ ,  $y$ ,  $z$  の座標軸をもつ. このような物理的空間は両極座標でも表示できる. 図1に示されたように, 両極座標では, 輻輳角 ( $\gamma$ ), 両極緯度 ( $\Phi$ ), 仰角 ( $\theta$ ) が表示できる. とくに, 一定の仰角平面内において輻輳角が一定である点を結んだ曲線は, 点Lと点Rを結んだ円 (フィートミュラ円) となる. また, 両極緯度が一定である点を結んだ曲線は双曲線となり,  $\Phi$ の値が正のときは左眼を通る双曲線となり, 負の場合は右眼を通る双曲線となる.

両眼視空間は, 観察者の主観的な自己の中心を座標軸の原点とし, この自己の中心から前方向 ( $\xi$  軸), 左方向 ( $\eta$  軸), 上方向 ( $\zeta$  軸) に伸びた3つの互いに直交する軸で表示できる.  $\xi$  軸,  $\eta$  軸,  $\zeta$  軸は, 物理的空間の  $x$  軸,  $y$  軸,  $z$  軸にそれぞれ対応し, また主

視的な自己の中心は  $(0, 0, 0)$ , 主視的な水平面は  $\zeta = 0$ , 主視的な前額平行面は  $\xi = 0$  となる. Luneburg は, 両眼視空間をこのような座標系で表現し, さらに両眼視空間は定曲率のリーマン空間であると仮定した. そして, 両眼視空間での距離関数の計算から, そこにおける曲率が  $K = 0$  のときにはユークリッド空間が,  $K > 0$  のときには楕円的空間が,  $K < 0$  のときには双曲的空間特性を示すことを導き出した.

後述するように, 並木実験とよばれる心理実験の諸結果を距離関数にあてはめて計算すると, 両眼視空間は負の曲率をもつことが明らかにされている.

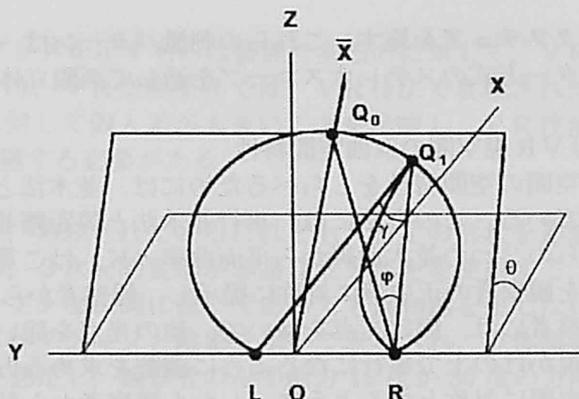


図1 物理的空間と両眼視空間

#### b) 知覚恒常性

知覚恒常性とは, 対象の属性(大きさ形状, 明るさ, 色など)が, 観察距離や視点に対応して変わる網膜像と連動して変化せず, その見かけの対象属性が保存されて知覚されることをいう. たとえば, 対象についての網膜像の大きさは対象と観察者との距離で規定されるが, 知覚された対象の大きさは網膜像の変化とは連動せず, その見かけの大きさが保存されて知覚される. これまでの知覚研究によれば, 大きさ恒常性が起きる程度は, 奥行や立体を知覚するための手がかり(cue)の多寡によって異なり, すべての手がかりが利いている条件(full cue)で高くなる. Boring の研究では, 両眼視差, 眼球調節, 両眼輻輳, パースペクティブ要因がすべて働く観察条件を基準とし, この条件から奥行手がかりをひとつずつ除去し, 最後にはすべての手がかりを取り除いて網膜像のみを手がかりとして残した4通りの観察条件を設定して, 大きさ恒常度を測定すると, すべて of 奥行手がかりが働く条件では, 過恒常が, また網膜像のみの観察条件では恒常性が零となること, そして, ひとつあるいは2つの手がかりを除去した観察条件では, これらの中間の恒常性が生起することがそれぞれ示された.

大きさの恒常性は, Luneberg の理論モデルにもとづいて, その生起が予測できる. それによれば, 一定の物理的大きさをもつ対象は, 定曲率  $K$  が  $-1$  に近いほど, その観察距離が変わっても変化しないことが計算される.

#### (3) 人工現実空間(VR空間)の視覚特性

ここでは, VR空間を実際に構成し, その視覚特性を, (1)空間特性(双曲的空間あるいは楕円的空間), (2)大きさ恒常性についての視覚実験を通して明らかにする.

##### a) VR視空間の構成

人工現実空間は, 両眼視差, パースペクティブ, テクスチャ, 陰影の4要素を用いて構成された. 空間の大きさは, 奥行15-20m, 横幅7-10m, 高さ2.5-3mを想定した(但し, 空間の奥行, 横幅, 高さ間の関係は, 相対的に規定されたものである). また空間の構造は天井, 床面, 側壁, 列柱を構成要素とするオープンな広間で, 椅子, 机などは置いてない(図2). 天井, 床面, 側壁, 列柱にはパースペクティブと陰影を, また天井, 床面には

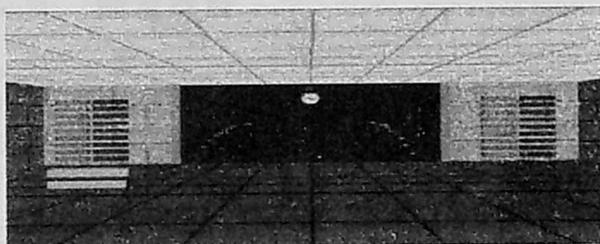


図2 構成されたVR空間

テクスチャを施す。これらの刺激パターンは、14インチのCRTに提示され、液晶シャッター方式のステレオスコープを通して両眼立体視できる。

(a) VR 視空間の双曲空間特性

空間の空間特性をしらべるためには、並木法とよばれる視覚実験を行う方法が良く知られている。この方法には、平行並木法と等距離並木法があり、自然空間での研究では、これらの2つの並木曲線から平面曲率(K)は計算される。平行並木法とは、複数対の光点を観察者の正中線に対称に提示し、観察者からみて最遠点にある1対の光点は固定する。観察者には、固定光点を除いて、他の光点を除いて横方向に自由に移動させ、光点すべてが視かけの上で平行になるように調整を求める方法である。等距離並木法とは、観察者の正中線に対称となるように、しかも観察者から最遠点に1対の固定光点を提示し、もう1対の光点をこれとの比較調整のために提示して、両対の光点の横幅が、視かけの上で、等距離になるように調整させる方法である。ここでは、常に固定光点と、比較調整の光点のみを提示して等距離調整を求めるが、比較調整の光点は観察者から遠いところから、奥行位置を変えて順次に提示される。

平行並木法と等距離並木法で得られる平行曲線は一致せず、平行並木曲線の方が等距離並木曲線よりも内側に位置する。平面曲率の算出にあたっては、まず、平行並木法と等距離並木法の両方で得られた曲線の最遠点(固定光点)に接線を引き、y軸との交点の座標を  $b_p$ 、 $b_D$  とする。この時、 $b_p$ 、 $b_D$  は瞳孔間距離の 1/2 を単位として表現する。 $b_p$ 、 $b_D$  を式1と式2に代入して  $\alpha$ 、 $K$  の値を求める。

$$\alpha = (1/2 \tan \phi_0) (b_p \times b_D)^{1/2}$$

$$K = \varepsilon^{2\alpha \gamma_0} \{ (b_p / b_D)^{1/2} - 1 \} / \{ (b_p / b_D)^{1/2} + 1 \}$$

このKが視空間の平面曲率を示し、 $\alpha$ は写像関数に含まれるパラメータを表す。式中の $\gamma_0$ は、最遠点に対して両眼がなす輻輳角であり、 $\phi_0$ はその輻輳角と最遠点の固定光点が観察者の眼に対してなす角である両極緯度であり、単位はともにラディアン(rad)である。平面曲率(K)がマイナスの時は双曲空間特性を、ゼロのときはユークリッド空間特性を、プラスの時は楕円空間特性をそれぞれ示す。

オープンな広間空間を表現したVR広間空間と暗室空間を表現したVR暗室空間(測定のために提示した並木刺激以外は何も存在しない両眼視空間で、並木刺激は両眼視差によって立体表現される)で測定された平行並木法と等距離並木法で得られた測定結果から、前述した算定法にもとづいて

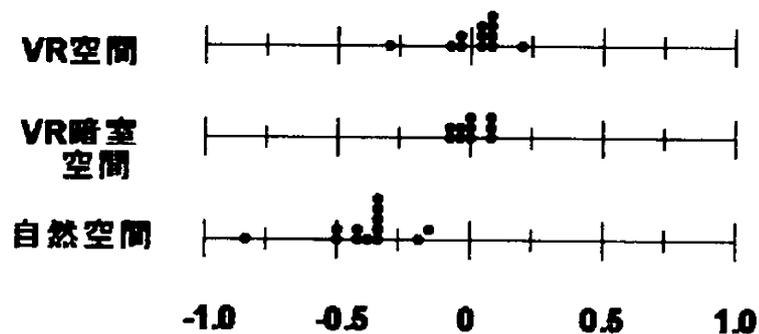


図3 平面曲率の分布

VR広間空間とVR暗室空間の平面曲率をそれぞれ算出する。VR広間空間での平面曲率は、-0.28から0.21の範囲に分布(図3)し、平面曲率値がマイナスを示すものは33%、プラスを示すものは66%である。VR暗室空間での平面曲率値は、-0.11から0.18の範囲に分布(図3)し、平面曲率値がマイナスを示すものは50%、プラスを示すものも50%である。

一方、これとの比較のために、自然空間での平面曲率を測定した結果をみると、それは-0.80から-0.20の範囲に分布し(図4)、マイナスを示すことが明らかにされている(東

山, 1987). 自然空間では, 平面曲率値がプラスを示すものは皆無であるのに対して, VR空間では, 逆に半数以上になる. このことは, VR空間条件では, VR技法で表現された空間を両眼視空間として知覚されることに対して個人差が大きいことを示唆し, VR技法による空間提示にあたって, このことを考慮する必要がある.

#### (b) VR視空間の大きさ恒常性

大きさ恒常性測定のための刺激としては, 熟知されているけれども, 特定の形状を連想しないものが通常は用いられる. ここでは, 3次元の変形が容易な立方体を使用する. 標準刺激, 比較刺激とも, 立方体で, オープンな広間に置いてあっても違和感を生じないように淡い茶色を施す. 立方体は, パースペクティブと陰影を用いて表現され, 立体感をつけてある. 標準刺激は, 一边を60cmと想定し, 観察者の左手前方15度か30度の方向で2, 4, 6, 8, 10mの位置の床面上に提示される. 比較刺激はマウスのクリックで大きさが連続的に変化するように設定され, 観察者の正中面上, 観察距離1mの床面に固定して配置する.

大きさ恒常性の測定は, 各観察距離に置かれた標準刺激の視かけの大きさと比較刺激のそれとのマッチングによる. 観察者には, 液晶シャッター式ステレオスコープを装着してCRTを観察させ, マウスをクリックしながら比較刺激の大きさを変化させ, 標準刺激の大きさと視かけ上等しくなることを調整させる.

実験の結果, 観察距離の変化に伴う視えの大きさは, 観察距離が増大すると, ほぼ直線的に減じる. この結果を自然環境でのそれと比較するためには, ザウレスの恒常性指数を利用すると便利である.

大きさの恒常性は, 標準刺激の大きさとその距離, および比較刺激の距離で変化するもので, これらの要因を含み, 恒常度の指数化のための公式が考案され, その代表的なものにてザウレス(Thouless)の指数がある. それは, 次式で示される.

$$Z = (\log S - \log P) / (\log W - \log P)$$

S: 標準刺激と等価であると判断された比較刺激の大きさ

P: 比較刺激の位置で標準刺激と等しい視角を張る大きさ

W: 標準刺激の大きさ

この指数では, 大きさ恒常性が全く生起しなければ(網膜像の大きさのみで判断されていれば), 指数値は零, 完全な恒常が生起すれば(観察距離が変わっても視えの大きさの縮小が起きなければ), それは1となる

VR空間の各観察距離での恒常性指数を観察者別およびその平均で示したものが表1の最下行である. 観察距離2mから10mまでの恒常性指数の観察者別の平均値を求めたものが表1である. 全被験者の総平均は, 0.88(標準偏差0.05)となる.

VR視空間の大きさ恒常性を自然空間でのそれと比較してみよう. 自然空間での大きさ恒常性は, 久米の研究にもとづいて, ザウレス指数に直して表にまとめてある. ここでは, 通常の採光をもつ廊下空間(小学校の廊下), 広大なビル屋上空間および暗室空間が利用され, その各々で大きさ恒常性が測定されている. 廊下空間と屋上空間(横幅10m, 奥行120m)では, 主要な奥行手がかり, すなわち, 両眼視差, 運動視差, 両眼輻輳, 眼球調節, パースペクティブ, テクスチャ, 陰影などが働いているが, 暗室空間では, 主要な手がかりのほとんどが制限されている. 自然空間条件下での大きさ恒常性は, 観察距離8m程度の屋上ももっとも高く(0.98)暗室空間ではもっとも低い(0.50-0.59). また, 廊下空間および屋上空間では, 距離が近い位置(2mまで)と遠い位置(80-100m)で, 恒常度は幾分低くなる. これらは, いずれも, 奥行手がかりの効果と関係し, 十全な条件で大きさ恒常性が高いといえる. とくに, 両眼視差, 両眼輻輳, 眼球調節など奥行距離が遠いと, その効果が利きにくいと考えられる屋上空間(20-40m)でも, 大きさ恒常度がかなり高いのは, パースペクティブやテクスチャが働いているためである.

VR空間では, 両眼視差, パースペクティブ, テクスチャおよび陰影の各要因が奥行の手がかりとして働いているが, そこでは, 恒常指数でみると平均0.88を示し, 自然条

件下での廊下空間（自然採光下での小学校の廊下）と近似する。VR空間では、大きさ恒常性を奥行距離 2-10m の範囲で測定し、しかもこの距離範囲では重要な手がかりである運動視差を欠いているのに、比較的高い恒常性が得られている。

表1 VR空間と自然空間における恒常性指数

空間 (m)	1	2	3	4	5	6	8	10	12	16	20	30	40	50	60	70	80	90	100	
暗視			.59		.50															
廊下	.78	.88	.90	.91		.90	.90		.91	.90										
屋上							.98				.97	.95	.94	.92	.91	.90	.87	.87	.85	
VR		.85		.88		.88	.88	.88												

### (3)まとめ

VR空間の視覚特性のうち、双曲空間特性と大きさ恒常性についてしらべてきた。その結果をまとめると次のようになる。

#### 1) VR空間では双曲空間特性が成立しているか：

これを平面曲率でみると、平面曲率値はマイナスからプラスにわたって分布し、自然空間のそれがマイナス値に限定されるのに対して相違する傾向をしめす。このことは、VR空間では双曲空間特性の成立が疑われるが、しかし、これはVR技法で表現されたVR空間を両眼視空間として知覚すること対しての個人差が大きいいため、およびVR空間対しての慣れに個人差が大きいためと考えられる。

#### 2) VR空間では大きさ恒常性が成立しているか：

ザウレス指数を用いて、VR空間と自然空間（廊下空間、屋上空間、暗室空間）で大きさ恒常性を比較すると、VR空間でも、ほぼ同程度に大きさ恒常性が成立している。このことは、VR技法による空間提示でも、両眼視差、パースペクティブ、テクスチャ勾配の奥行手がかりが存在すれば、十分な知覚恒常性の成立をみることができる。

これらの特性を総合して考察すると、VR空間においても自然空間と同様に Luneberg モデルが予測する両眼視空間特性が、大体において成立していると考えられる。ただ、VR空間では、視野が狭いこと、提示できる奥行範囲が限定されることから、自然空間と同等の視覚特性をもつとまでは言えないので、この点の改良が求められる。

### 文献

- [1]阿部, 林部, 中谷, 伊東, 辻, 東山：“人工現実 空間性認知・行動からみた仮想現実空間の特性”, 人工現実空間に関する基礎的研究, 平成7年度研究成果報告書, Pp 1996
- [2]阿部, 林部, 中谷, 伊東, 辻, 東山：“人工現実空間性認知・行動からみた仮想現実空間の特性”, 人工現実空間に関する基礎的研究, 平成8年度研究成果報告書, Pp51-52, 1997
- [3]阿部, 林部, 中谷, 伊東, 辻, 東山：“人工現実空間性認知・行動からみた仮想現実空間の特性”, 人工現実空間に関する基礎的研究, 平成9年度研究成果報告書, Pp1998.
- [4]東山：“両眼視空間と輻輳の機能” 心理学モノグラフ Pp27-73 東京大学出版会 1987. 1
- [5]久米：“みえの大きさと観察距離との関係並びに大きさの恒常を規定する要因について (I)” 心理学研究, vol. 22, Pp27-36, 1952.
- [6]久米：“みえの大きさと観察距離との関係並びに大きさの恒常を規定する要因について (II)” 心理学研究, vol. 23, Pp32-43, 1953.

- [7] 齊藤, 石村, 中谷, 林部, 阿部: "人工現実空間での並木法による視空間知覚特性の測定" 日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, vol.1, Pp71-72, 1996. .
- [8] 須藤, 中谷, 林部, 阿部, 佐治, 杉山, 辻, 東山: "空間性認知・行動からみた仮想現実空間の特性—奥行分割判断での奥行距離の評価", 日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, vol.2, 310-311, 1997.
- A. H. Holway & E. G. Boring "Determinants of apparent visual size with distance variant." American Journal of Psychology, Pp21-37, Vol54, .

(阿部圭一、林部敬吉、中谷広正、辻敬一郎、東山篤規 人工現実空間における視覚特性  
館暲暲監修、佐藤誠編 バーチャルリアリティの基礎第2巻 人工現実感の設計—究極  
のインターフェースを求めて—、69-77 培風館 2000. 所収)

### 3.1.2. ホロプター特性

#### 人工現実空間のホロプター特性

林部 敬吉<sup>1)</sup> 阿部 圭一<sup>1)</sup> 中谷 広正<sup>1)</sup> 辻 敬一郎<sup>3)</sup> 東山 篤規<sup>3)</sup>  
Kuniaki HASHIMOTO, Keikichi HAYASHIBE, Keiichi ABE, Hiromasa, NAKATANI, Keiichiro TSUJI,  
Atunori HIGASHIYAMA

(1) 静岡大学 情報学部

〒432-8561 浜松市城北3丁目5-1

(2) 名古屋大学 文学部、tsuji@challenger.riem.nagoya-u.ac.jp

〒464-01 名古屋市千種区不老町 464-01

(3) 立命館大学 文学部、higashiyama@archan.ritsu.ac.jp

〒603-77 京都市 北区等持院北町 56-1

**Abstract:** We investigated the visual horopter in the virtual space. To realize the realistic virtual space, it is necessary to coincide the characteristics of depth perception between real world and virtual world. We measured the horopter in the stereoscopic space represented by the depth cues such as binocular parallax, perspective, texture and shade on the CRT display.

**Keywords:** horopter, depth perception, stereoscopic display, depth cues

#### (1) はじめに

ホロプターとは、凝視点を含む視かけ上の前額平行面をいう。この面状にある点は、すべて凝視点と等距離に知覚されるので、両眼視差はゼロとなり、左右の網膜像は対称的に結像する。同一の輻輳角をとり、同時に左右網膜像が対称的となる点の軌跡はフィート=ミューラー円と呼ばれる。フィート=ミューラー円と視覚的ホロプターとは、実験的に測定してみると実際には一致していなく、視覚的ホロプターの曲率半径の方が大きい。ここでは、VR空間でのホロプター特性を測定する。

#### (2) ホロプター特性の測定方法

##### 1) 人工現実空間の形成

人工現実空間は両眼視差、パースペクティブ、テクスチャの3要因を用いて構成された。空間の大きさは、奥行20m、横幅7m、高さ3mを想定し、また空間の構造は天井、床面、側壁、列柱を構成要素とするオープンな広間で、椅子、机などは置いてない。天井、床面、側壁、列柱にはパースペクティブを、また天井、床面にはテクスチャを施した。これらの刺激は21インチのCRTに提示され、液晶シャッター方式のステレオスコープを通すと両眼立体視できる。

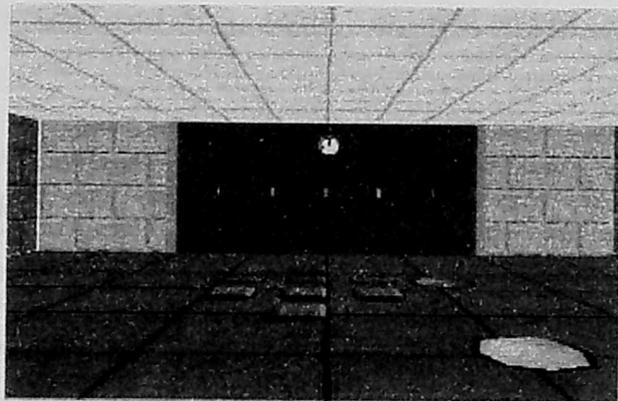


図1 構成されたVR空間と測定のロッド

##### 2) ホロプター特性の測定のための刺激

視察者の正面に5個の短小なロッド刺激(長さ:  $1^\circ$ 、横幅  $0.1^\circ$ )を提示する。5個の

刺激の中で、

中央の刺激は観察者の正中面上に、他の刺激は左右に2°ずつの間隔を置いて配置した。左右両端の刺激は、観察者が画面のもっとも手前に位置していると想定して、奥行距離が0.1mから0.5mまでは10cm間隔で、それ以上3mまでは50cm間隔で提示される。これらの5個のロッドは画面の右下に設定されたボタンをクリックすることによって奥行方向に連続的に移動させることができる(図1)。

### 3)測定方法

ホロプター特性の測定は、各観察距離に置かれたロッド刺激の中、左右両端を除いた3個のロッド刺激を奥行方向に移動させ、5個のロッド刺激が、視覚的に平行に視える位置を求めた。測定に際しては、位置が固定された両端の刺激を除いて、他の3個の刺激の位置はランダムに提示された。観察者には、ステレオスコープを装着してCRTを観察させ、マウスをクリックしながら、3個のロッド刺激を移動させ、5個のロッド刺激が、視かけ上、平行になるところを自由に調整させた。測定回数は各距離10回である。観察者の視点は、椅子に座って観察していることを想定して110cmに、また観察者からディスプレイまでの距離は20cmに設定した。観察者は10名である。

### (3)実験結果

#### 1)各観察距離におけるホロプター特性

視覚的平行を求めたときの各観察距離での左右両端の固定刺激と3個の測定刺激との奥行差が図1に示されている。ここでプラス表示は奥行距離の過大視(観察者から遠くの位置にあるように視える)を、マイナス表示は過小視を示す。この結果から、物理的平行と視覚的平行とが一致するところが存在する。

#### (4)現実空間と人工現実空間でのホロプター特性の比較

現実空間で物理的平行と視覚的平行とが一致するところは、観察者から100cm近辺である。それよりも遠いところでは、観察者の正中面から周辺に移るにつれて、周辺が過大視され、逆にそれより近いところでは過小視される(図2の左図)。一方、人工現実空間では、過大視から過小視に移行する位置が、現実空間より手前にあり、それはおよそ30cmである。観察者からディスプレイまでの距離を

20cmに設定してあることを考慮すれば、人工現実空間で物理的平行と視覚的平行が一致するところは、およそ50cmとなる。

これらの結果から、人工現実空間と現実空間のホロプターを描いてみると、図2の右図ようになる。ホロプター特性は、両空間ともその形状は等しい。すなわち、そこでは物理的平行と視覚的平行が一致する空間帯をもち、それより遠いところでは、中心視野より周辺視野で距離の過大視が、逆に近いところでは、周辺視野がわずかに過小視される。その結果、遠いところでは、周辺視野に置かれた対象は、より手前に位置して視える。また、比較的近い空間では、周辺視野にある対象は、わずかに遠くにシフトして視える。

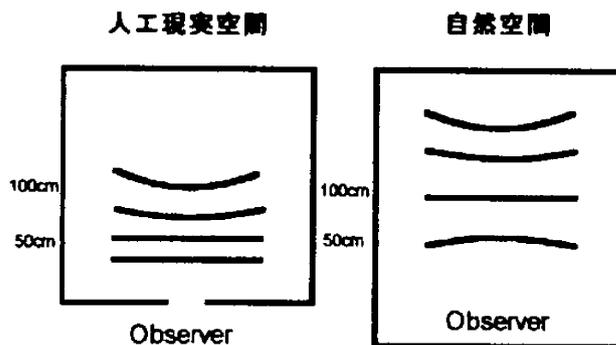


図2 VR空間と自然空間のホロプター特性

(林部敬吉、阿部圭一、中谷広正、東山篤規 人工現実空間におけるホロプター特性  
バーチャル・リアリティ学会第3回大会論文集、113-114、1998. 所収)

### 3.1.3. 視えの奥行距離特性

#### 人工現実空間における奥行距離特性

##### The visual distance in the virtual reality

橋本邦明<sup>1)</sup> 林部 敬吉<sup>2)</sup> 阿部 圭一<sup>2)</sup> 中谷 広正<sup>2)</sup> 辻 敬一郎<sup>3)</sup> 東山 篤規<sup>4)</sup>  
Kuniaki HASHIMOTO, Keikichi HAYASHIBE, Keiichi ABE, Hiromasa, NAKATANI, Keiichiro TSUJI,  
Atunori HIGASHIYAMA

(1) 静岡大学理工学研究科

〒432-8561 浜松市城北3丁目5-1、(2) 静岡大学 情報学部

〒432-8561 浜松市城北3丁目5-1

(3) 名古屋大学 文学部、tsuji@challenger.riem.nagoya-u.ac.jp

〒464-01 名古屋市千種区不老町 464-01

(4) 立命館大学 文学部、higashiyama@archan.ritsu.ac.jp

〒603-77 京都市 北区等持院北町 56-1

**Abstract:** The familiar spaces of classroom and street were recorded by the three-dimensional(3-D) video camera. The virtual reality(VR) spaces, which were similar to the video-recorded spaces, were made. The apparent distance was measured in the natural, 3-D video-recorded and VR spaces. The measuring method was done for magnitude estimation and report by degree of meter rule. The apparent distance in the natural, 3-D video-recorded and VR spaces, showed the linear function. The overestimation was shown in the natural spaces of outdoors and in the artificial spaces of indoors, and the underestimation was shown in the artificial spaces of outdoors.

**Key Words:** *apparent distance, virtual reality space, 3-dimensional video-recorded space*

#### 1. はじめに

人工現実空間 (VR空間)、現実空間 (自然空間) および3次元実写空間における奥行距離視覚特性を測定し、比較することを通して、VR空間の視覚的特性を探る。本研究では、屋内空間と屋外空間を3次元実写ビデオカメラで撮影し、それとほぼ同等のVR空間を構築し、自然、実写空間とVR空間の3種類の空間での、奥行距離感がどの程度類似したものになるかについて分析する。

#### 2. 3次元実写空間とVR空間の構成

##### 2.1 3次元実写空間

3次元実写空間は、3次元実写ビデオカメラ (Kastam社製KS55Z) を用いて撮影された。このカメラは、左右2本のレンズで左眼用画像と右眼用画像を同時に撮影し、ビデオテープに記録する。再生は、3Dモジュレータを通すことによって、左右画像を分離してカラーディスプレイ (Mitsubishi XC-3730C) に交互に提示し、これと同期して開閉する液晶シャッターを通すことによって、両眼立体視が可能となる。

撮影した空間は、屋内空間と屋外空間である。屋内空間は、小教室空間で、横6m、奥行9m、高さ3mの広さで、講義机と椅子および白版が設置してある。撮影時には、視えの奥行距離測定のための指標として、標準刺激に利用する人間を6mの位置に、比較刺激に利用する人間を観察距離2, 4, 6, 8, 9mに配置して記録した。

屋外空間は、キャンパス内の街路空間で横40m、奥行100mの広さで、左右と正面に3階建ての建物があり、中央には2車線幅の道路と分離帯があって樹木が植えられている。屋内空間と同様に、視えの奥行距離測定のための指標として、標準刺激に利用する人間を観察距離10mの位置に、比較刺激に利用する人間を10mから10m間隔で100mまで配置して記録した。

両空間の撮影に際しては、再生した空間がディスプレイの奥に知覚できるように、左眼用画像と右眼用画像の両眼視差を調整した。また、両空間とも、観察者の視点の高さは120cmとして撮影してある。

## 2.2 VR空間の構成

VR空間は3次元実写ビデオカメラで撮影した屋外街路空間と屋内教室空間を、両眼視差、パースペクティブ、テクスチャ、陰影の4要因を用いて再現した(図1と図2)。

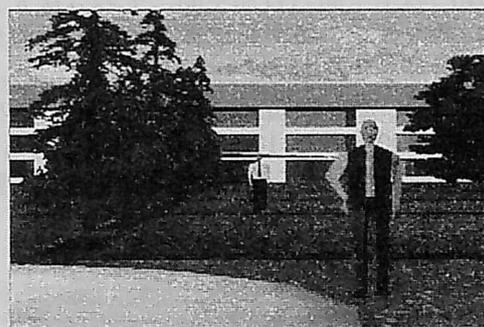
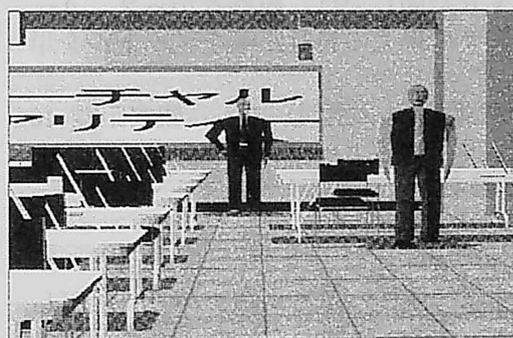
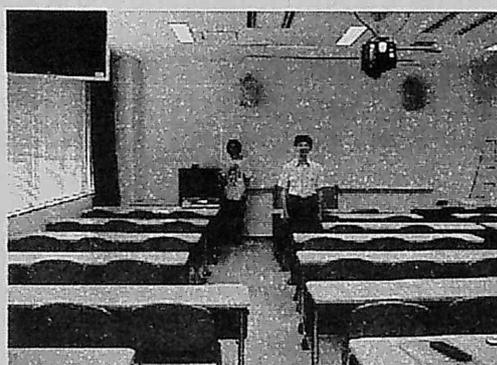
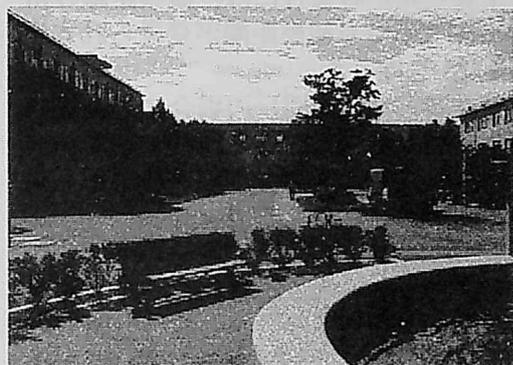


図1 屋外実写(上)とVR空間(下)

図2 屋内実写(上)とVR空間(下)

両眼視差はディスプレイ面上をゼロとして、全体の空間がその奥に知覚できるように操作した。屋内教室空間では壁、天井、什器類を、屋外街路空間では、建物、道路、噴水などを、パースペクティブ、テクスチャ、陰影を利用して3次元実写空間と同等になるように描画した。

視えの奥行距離測定のために、3次元実写空間と同様に、標準刺激と比較刺激となる人間の画像を配置した。屋内教室空間では、標準刺激とする人間像を観察距離6mに相当する位置に、比較刺激とする人間を2, 4, 6, 8, 9mに相当する位置に配置した。屋外街路空間では、標準刺激とする人間像を観察距離10mに相当する位置に、比較刺激とする人間像を10mから10m間隔で100mに相当する位置まで配置した。

これらのVR空間は、37インチのカラーディスプレイ(Mitsubishi XC-3730C)に提示され、液晶シャッター方式のステレオスコープ(CrystalEyesPC)を通すと両眼立体視できる。実験環境は、ディスプレイと観察者全体を鞘堂のようなもので覆って、余分な刺激を遮断し視環境のリアリティを可能な限り保障するように工夫した。

### 3. 測定方法

#### 3.1 マグニチュード推定法による視えの奥行距離測定

マグニチュード推定法とは、ある刺激  $S_i$  を標準刺激とし、その感覚の強さ（心理量）に、ある数値をあてる場合、同じ感覚の別の刺激  $S_j$  を比較刺激として提示した時、標準刺激と比較してその感覚の強さを数値で表現させる方法である。刺激の物理量を  $S$ 、心理量を  $R$  とした場合、測定値に関しては次のようなべき関数式が成立する。

$$R = kS^n \quad \text{-----} \quad (1)$$

心理量  $R$  は物理量  $S$  のべき乗に比例して変化し、べき指数（ $n$ ）は、感覚の種類によって一定の値をとることが確認されている。

本研究では、標準刺激として提示した刺激に数値 100 を割り当て、それに対して比較刺激にはいくつの数値が当てはまるかを観察者に報告させた。

屋内教室空間（自然空間、その3次元実写空間とVR空間）の場合には、観察距離 6 m の位置に提示した標準刺激（人間）に数値 100 を割り当てるとき、観察距離が変えられて提示された比較刺激（人間）に対していくつの数値が適当かを問うた。

同様に、屋外街路空間（自然空間、その3次元実写空間とVR空間）の場合にも、観察距離 10 m の位置に提示した標準刺激（人間）に対して 100 を割り当てた時、観察距離 10 m から 100 m まで 10 m 間隔で提示される比較刺激に対していくつの数値で表現されるかを問うた。

#### 3.2 メートル尺度報告法による視えの奥行距離測定

人間の視覚システムは、経験を通して獲得した内的な尺度をもち、これに基づいて感覚の強さを表現することができる。本研究では、自然空間、3次元実写空間とVR空間での奥行距離感覚の強さを測定することが目的なので、内的なメートル尺度を用いて報告させる方法も採用した。

屋内教室空間（自然空間、その3次元実写空間とVR空間）では、観察者から 2, 4, 6, 8, 9 m の各奥行位置に配置した対象（人間）までの視えの奥行距離をメートルを単位に報告させた。

同様に、屋外街路空間（自然空間、その3次元実写空間とVR空間）でも、観察距離 10 m から 100 m まで 10 m 間隔で提示される対象（人間）までの視えの奥行距離をメートルを単位として見積もらせた。

### 4. 観察者

観察者は大学生 10 名とし、いずれも両眼視力、両眼立体視力とも正常である（ただし自然空間での測定は 6 名）。

### 5. 実験結果

#### 5.1 自然空間での視えの奥行距離

##### 5.1.1 マグニチュード推定法による結果

自然空間の屋内教室条件での視えの奥行距離をマグニチュード推定法で測定した結果は、図 3 に示されている。それによると、すべての観察者において、視えの奥行距離量は観察距離の増大に伴ってほぼ直線的に増大し、過大視傾向が強い。

自然空間の屋外街路条件での視えの奥行距離をマグニチュード推定法で測定した結果は、同様に図 5 に示されている。それによると、すべての観察者において、屋内教室空間と同様に視えの奥行距離量は観察距離の増大に伴ってほぼ直線的に増大し過大視傾向が非常に大きい。

##### 5.1.2 メートル尺度報告法による結果

自然空間の屋内教室条件での視えの奥行距離をメートル尺度報告法で測定した結果は、図 4 に示されている。それによると、すべての観察者において、視えの奥行距離量は観察距離の増大に伴ってほぼ直線的に増大し物理的距離と視えの距離の一致がみられる。

自然空間の屋外街路条件での視えの奥行距離をメートル尺度報告法で測定した結果は、同様に図6に示されている。屋内教室条件での結果と同様に、すべての観察者において、視えの奥行距離量は観察距離の増大に伴ってほぼ直線的に増大、物理的距離と視えの距離の一致がみられる。

## 5.2 3次元実写空間での視えの奥行距離

### 5.2.1 マグニチュード推定法による結果

3次元実写空間の屋内教室条件での視えの奥行距離をマグニチュード推定法で測定した結果は、図3に示されている。それによると、すべての観察者において、視えの奥行距離量は観察距離の増大に伴ってほぼ直線的に増大し、やや過小視傾向がみられる。

3次元実写空間の屋外街路条件での視えの奥行距離をマグニチュード推定法で測定した結果は、同様に図5に示されている。それによると、すべての観察者において、屋内教室空間と同様に視えの奥行距離量は観察距離の増大に伴ってほぼ直線的に増大し、物理的距離と視え奥行距離とが一致する。

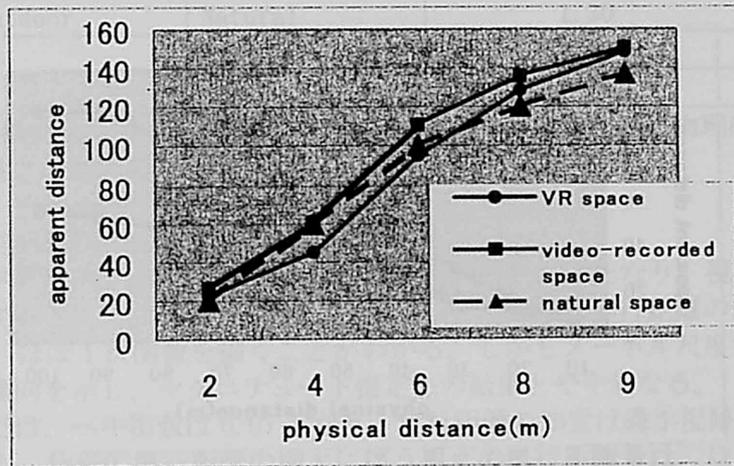


図3 マグニチュード推定法による視えの奥行距離（3次元実写とVRによる屋内教室空間）

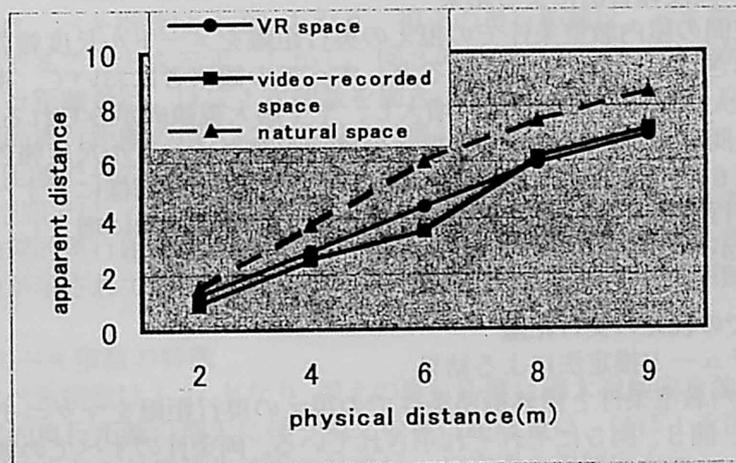


図4 メートル報告法による視えの奥行距離（3次元実写とVRによる屋内教室空間）

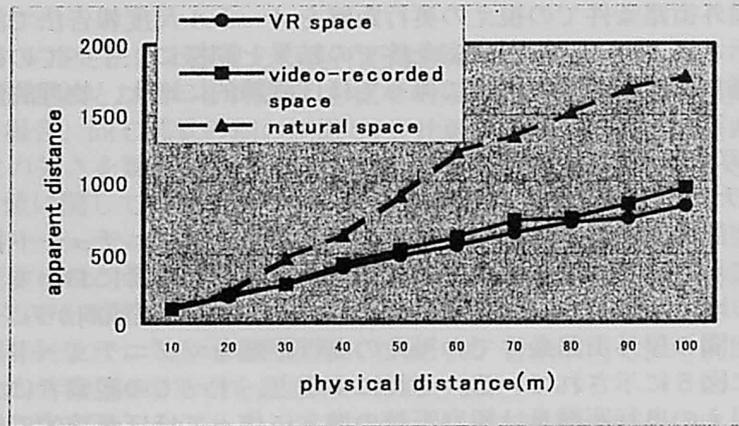


図5 マグニチュード推定法による視えの奥行距離（3次元実写とVRによる屋外街路空間）

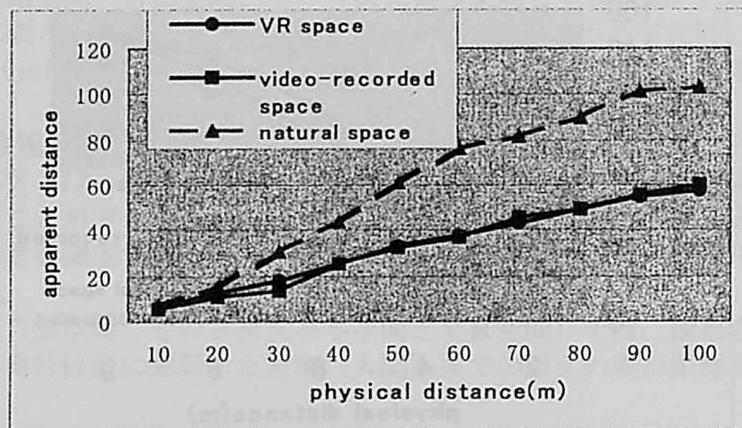


図6 メートル尺度表現法による視えの奥行距離（3次元実写とVRによる屋外街路空間）

### 5.2.2 メートル尺度報告法による結果

3次元実写空間の屋内教室条件での視えの奥行距離をメートル尺度報告法で測定した結果は、図4に示されている。それによると、すべての観察者において、視えの奥行距離量は観察距離の増大に伴いほぼ直線的に増大し、やや過大視傾向がみられる。

3次元実写空間の屋外街路条件での視えの奥行距離をメートル尺度報告法で測定した結果は、同様に図6に示されている。屋内教室条件での結果と同様に、すべての観察者において、視えの奥行距離量は観察距離の増大に伴ってほぼ直線的に増大し、物理的距離と視えの距離の一致がみられる。

## 5.3 VR空間での視えの奥行距離

### 5.3.1 マグニチュード推定法による結果

VR空間の屋内教室条件と屋外街路条件での視えの奥行距離をマグニチュード推定法で測定した結果は、図3、図5にそれぞれ示されている。両条件のすべての観察者において、視えの奥行距離量は観察距離の増大に伴ってほぼ直線的に増大するが、屋内教室条件では物理的距離と視えの距離とが一致しているのに対して、屋外街路条件では顕著な過小視が出ている。

### 5.3.2 メートル尺度報告法による結果

VR空間の屋内教室条件と屋外街路条件での視えの奥行距離をメートル尺度報告法で測

定した結果は、図4、図6に示されている。それによると、両条件のすべての観察者において、視えの奥行距離量は観察距離の増大に伴ってほぼ直線的に増大するが、屋内教室条件では物理的距離と視えの距離の一致がみられるのに対して、屋外街路条件ではやや過小視傾向がみられる。

## 6. ベキ指数による3次元実写、VR、自然空間比較

### 6.1 3次元実写空間とVR空間でのベキ指数

表1 3次元実写空間とVR空間での視えの奥行距離のベキ指数値

Indoor/outdoor	Condition	Maginitude Estimation
Indoor	Natural	1.27
	Vidoe-Recorded	1.19
	Virtual Reality	1.32
Outdoor	Natural	1.30
	Vidoe-Recorded	0.97
	Virtual Reality	0.94

マグニチュード推定法で得られた測定値から、(1)式にしめされた物理的奥行距離量と心理的奥行距離量との関係でのベキ指数を求めると表1のようになる。

### 6.2 3次元実写空間でのベキ指数の特徴

マグニチュード推定法では、屋内教室空間はベキ指数は1.19となり、視えの奥行距離はやや過大視傾向であることを示す。事実、図3からも、物理的奥行距離の増大に伴う視えの奥行距離量は、ほぼ1次関数を描くことがわかる。しかしメートル尺度報告法での結果は、やや過大視傾向を示し、マグニチュード推定法の結果とやや異なる。

屋外街路空間では、ベキ指数は0.97となり、奥行距離の知覚は過小視傾向をわずかに示す。図5の結果も、物理的奥行距離の増大に伴う視えの奥行距離量は、ほぼ1次関数を描くものの、過小視傾向が示されている。メートル尺度報告法による結果は、明瞭に過小視傾向を裏付ける。

### 6.3 VR空間でのベキ指数の特徴

屋内教室空間では、ベキ指数は1.32となり、視えの奥行距離は、ベキ指数で見ると、明瞭に過大視傾向であることを示す。しかし、図3の結果をみると、物理的奥行距離の増大に伴う視えの奥行距離量は、ほぼ1次関数を描き、しかも遠方ではわずかに過小視を示す。これは、物理的奥行距離の増大に伴う視えの奥行距離量が、全体的に、ほぼ1次関数となり、とくに近距離でその傾向が強いためと考えられる。

一方、屋外街路空間では、ベキ指数は0.94となり、奥行距離の知覚は過小視傾向を示す。図5の結果も、物理的奥行距離の増大に伴う視えの奥行距離量は、ほぼ1次関数を描くものの、過小視傾向が示されている。メートル尺度報告法による結果も、明瞭に過小視傾向を裏付ける。

### 6.4 自然空間でのベキ指数の特徴

屋内教室空間はベキ指数は1.27となり、視えの奥行距離は過大視傾向を強く示す。事実、図3からも、物理的奥行距離の増大に伴う視えの奥行距離量は、ほぼ1次関数を描くことがわかる。しかしメートル尺度報告法での結果は、やや過小視傾向を示し、マグニチュード推定法の結果とやや異なる。

屋外街路空間では、ベキ指数は1.3となり、奥行距離の知覚は過大視傾向を強く示す。図5の結果も、物理的奥行距離の増大に伴う視えの奥行距離量は、ほぼ1次関数を描くものの、大きな過大視傾向が示されている。しかしメートル尺度報告法による結果は、物理

的距離と視えの奥行距離とがほぼ一致する事を示し、マグニチュード推定法の結果とは異なる。自然空間と比較すると、VR空間では過小視傾向をもつ。

これまでの自然空間でのマグニチュード推定法による視えの奥行距離のベキ指数は、Stevens<sup>[1]</sup>によれば、0.67である。今回の結果は、これとも異なるので、自然空間をも含めて、再度、吟味することが必要となる。

#### 参考文献

- 【1】 Stevens, S. S. Problems and methods. of psychophysics. Psychological Bulletin, 55, 177-196. 1958

(橋本邦明、林部敬吉、阿部圭一、中谷広正、東山篤規 人工現実空間における奥行距離特性 バーチャル・リアリティ学会第4回大会論文集、3-6, 1999. 所収)

### 3. 1. 4. 視空間特性の個人差

#### 人工現実空間における視空間特性の個人差

The individual difference of the visual space characteristics in the virtual reality

増田 智弘<sup>1)</sup> 林部 敬吉<sup>2)</sup> 阿部 圭一<sup>3)</sup> 中谷 広正<sup>2)</sup> 辻 敬一郎<sup>3)</sup> 東山 篤規<sup>4)</sup>  
Tomohiro MASUDA, Keikichi HAYASHIBE, Keiichi ABE, Hiromasa, NAKATANI, Keiichiro TSUJI, Atunori  
HIGASHIYAMA

(1)静岡大学理工学研究科

〒432-8561浜松市城北3丁目5-1, tomo@pico.cs.inf.shizuoka.ac.jp

(2)静岡大学 情報学部

abe@cs.inf.shizuoka.ac.jp, hayasibe@cs.inf.shizuoka.ac.jp,

nakatani@cs.inf.shizuoka.ac.jp

〒432-8561浜松市城北3丁目5-1

(3)名古屋大学 文学部, tsuji@challenger.riem.nagoya-u.ac.jp

〒464-01名古屋市中千種区不老町464-01

(4)立命館大学 文学部, higashiyama@archan.ritsu.ac.jp

〒603-77京都市 北区等持院北町56-1

**Abstract:** The individual difference of the visual space characteristics was analyzed in the virtual reality space. As a visual space characteristics, the hyperbolicity, size constancy and horopter were chosen. The hyperbolicity was measured by the parallel row of trees and equidistant row of trees methods. The size constancy was required by measuring the apparent size of the cube in each depth position. The horopter was measured by adjusting rod to take the equal distance for the observer's front parallel. The result of the experiment showed that the subjects was divided into any of the group of which both characteristics appeared clearly, the group of which both characteristics hardly were shown, or the group of which only other characteristic appeared.

**Keywords:** visual space characteristics, hyperbolicity, size constancy, horopter, virtual reality

#### 1. はじめに

人工現実空間（VR空間）の現実度を高め、その空間内での操作性を容易にするためには、VR空間と現実空間の視覚的特性を可能な限り一致させる必要がある。これまで、筆者らは、両眼視差、パースペクティブ、テクスチャと陰影の奥行手がかりで表現された人工現実空間の視覚特性を、空間の平面曲率、大きさ恒常性、ホロプター特性、奥行距離特性を指標としてしらべてきた。その結果、全体的傾向として、人工現実空間は現実空間と比較して、(1)大きさ恒常性は比較的高く現実空間とほぼ同等を示す、(2)平面曲率は双曲的空間特性が弱く、どちらかといえばユークリッド的空間特性を示す、(3)ホロプター特性は現実空間と同様に、物理的平行と視覚的平行が一致する空間帯をもち、それより遠いところでは、中心視野より周辺視野で距離の過大視が、逆に近いところでは、周辺視野がわずかに過小視される。しかし、物理的平行と視覚的平行とが一致する空間帯は現実空間に比較して観察者に近い位置になる。

VR空間におけるこれらの2つの視覚特性は、観察者の平均的傾向を示したもので、個人間の傾向を探ると観察者ごとにその傾向が異なる。ここではこれら2つの視覚特性の個人間

差をしらべることを通して、現実度の高いVR空間に必要な条件を探る。

## 2. VR空間の構成

### 2.1 VR空間の大きさ

人工現実空間は両眼視差、パースペクティブ、テクスチュア、陰影の4要因を用いて構成された。空間の大きさは、奥行10m、横幅6m、高さ3mを想定し、また空間の構造は天井、床面、側壁、列柱を構成要素とするオープンな広間で、椅子、机などは置いてない(図1)。天井、床面、側壁、列柱にはパースペクティブを、また天井、床面にはテクスチュアを

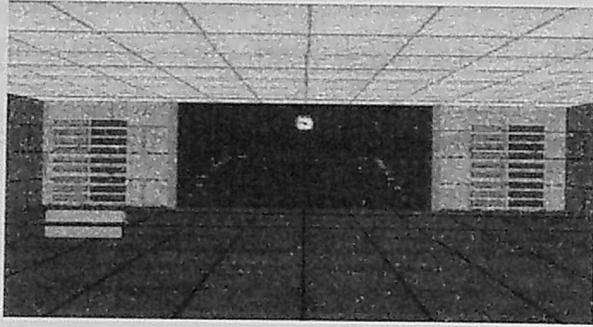


図1 平面曲率測定のためのVR空間

施した。これらの刺激は37インチのカラーディスプレイ(Mitsubishi XC-373 0C)に提示され、液晶シャッター方式のステレオスコープ(CrystalEyesPC)を通すと両眼立体視できる。実験環境は、ディスプレイと観察者全体を鞘堂のようなもので覆って、余分な刺激を遮断し、VR提示された視環境のリアリティを可能な限り保障するように工夫した。

### 2.2 双曲的空間特性測定のための刺激条件

双曲的空間特性をしらべるためには、並木法とよばれる視覚実験を行う。この方法は、平行並木法と等距離並木法の2つの方法を用いる。自然空間での研究では、これらの2つの並木曲線から平面曲率(K)が算出される。

平行並木法では、複数対の光点を観察者の正中線に対称に提示し、観察者からみて最遠点にある1対の光点は固定する。観察者には、固定光点を除いて、その他の光点(調整光点)を横方向に自由に移動させ、光点すべてが視かけの上で平行になるように調整を求める。そのために、1対の固定光点を観察者から奥行距離500cm、高さ152cm、正中線から各70cmの位置に対称に配置する。9対の調整光点は、同様に正中線に対称に、それぞれの奥行距離が387、300、232、180、139、108、83、65、50cmに配置する。各光点の大きさは、その奥行配置が異なっても網膜上での大きさが一定となるように、視角0.25度を保つように操作した。9対の調整光点は、観察者に対して水平方向(左右方向)に、正中線をはさんで、それぞれ独立に可動できる。可動は画面下に設定された9対の赤(左光点)と青のボタン(右光点)をマウスでクリックすることで行う(図1)。

等距離並木法では、観察者の正中線に対称となるように、しかも観察者から最遠点に1対の固定光点と1対の調整光点を提示して、両対の光点の横幅が、視かけ上、等距離になるように調整させ、以下順次、調整光点の奥行位置を変えながら同様な測定をする。1対の固定光点と1対の調整光点は、平行並木法と同一の位置に提示し、その視角も0.25度で一定とした。調整光点は、平行並木法と同様に、赤(左光点)と青のボタン(右光点)をマウスでクリックして可動させる。なお、両方法における観察者の視点の高さは160cmに設定した。

### 2.3 大きさ恒常性測定のための刺激条件

標準刺激、比較刺激とも、立方体で、広間に置いてあっても違和感を生じないように淡い水色を施した。立方体は、パースペクティブと陰影を用いて表現され、立体感をつけてある。標準刺激は、一辺を60cmに想定し、観察者の正中面上で400、500、600、700、800cmの位置の床面上に提示された。比較刺激は観察者の左手前方15度の方向に、観察距離1mの床面に固定して配置し、その大きさが画面下部に設定された1対のボタンのいずれかをマウスでクリックすると、連続的に拡大あるいは縮小するように設定された。なお、観察者の視点の高さは約45cmに設定した。

## 2.4 ホロプター特性の測定のための刺激

観察者の正面に5個の短小なロッド刺激(長さ $1^\circ$ 、横幅 $0.125^\circ$ )を提示する。5個の刺激の中で、中央の刺激は観察者の正中面上に、他の刺激は左右に $3^\circ$ ずつの間隔を置いて配置した(図2)。左右両端の刺激は、観察者からの奥行距離60、80、100、150、200cmに相当する位置に配置する。これらの5個のロッドは画面の右下に設定されたボタンをクリックすることによって奥行方向に連続的に移動させることができる。観察者の視点の高さは、約140cmに設定した。

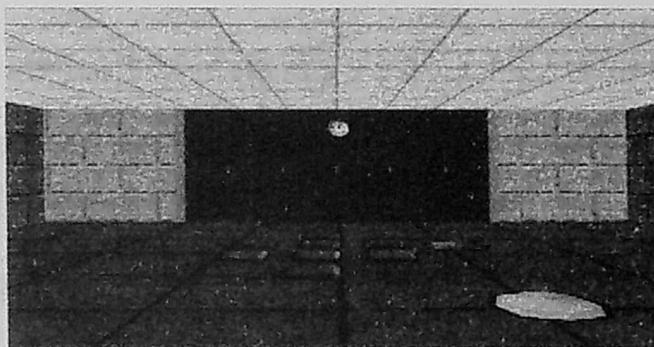


図2 ホロプター特性測定のためのVR空間

## 3. 測定方法

### 3.1 双曲的空間特性の測定

平行並木法の測定では、1対の固定光点と9対の調整光点をすべて提示し、観察者に9対の調整光点を自由に可動させて、10対の光点が視かけ上で平行になるように調整させる。視かけの平行とは、10対の光点が正中線をはさんですべて等距離となり、しかもどこまで伸びても交わらない状態(収束点をもたない状態)とする。観察者には、実験に先立ってこの点を強調して教示する。実験回数は1回とし、観察者には視えの平行について確信がもてるまで時間をかけて判定を求める。

等距離並木法の測定では、固定光点と1対の調整光点を提示し、観察者には正中線をはさむそれらの光点間の距離が互いに等距離になるように調整光点を可動させて求める。測定は常に固定光点と1対の調整光点の間でのみ行われるが、調整光点の提示順序は最遠点からはじめて最近点まで順次に9対の調整光点すべてについて行われる。実験回数は1回とし、観察者には測定ごとに等距離と視えるまで時間をかけて判定を求める。

### 3.2 大きさ恒常性の測定

大きさ恒常性の測定では、各観察距離に置かれた標準刺激の視かけの大きさを比較刺激のそれにマッチングさせることで求めた。はじめに、比較刺激を明らかに小さく視えるようにセットし、視えの大きさの等価点を求める系列(上昇系列)とその逆の系列(下降系列)を設定し、それぞれの系列をランダムに10回試行した。観察者には、液晶シャッター眼鏡を装着させてディスプレイを観察し、マウスをクリックしながら比較刺激の大きさを変化させ、標準刺激の大きさと視かけ上等しくなる場所を調整させた。観察者には、立方体の画面上の客観的な大きさではなく、視えたままの大きさについてのマッチングを求めるよう注意して教示した。

### 3.3 ホロプター特性の測定

ホロプター特性の測定は、観察距離150cmに置かれたロッド刺激の中、左右両端を除いた3個のロッド刺激を奥行方向に移動させ、5個のロッド刺激が、視覚的に前額に平行に視える位置を求めた。測定に際しては、位置が固定された両端の刺激を除いて、他の3個の刺激の位置はランダムに提示された。観察者には、ステレオスコープを装着してCRTを観察させ、マウスをクリックしながら、3個のロッド刺激を移動させ、5個のロッド刺激が、視かけ上、平行になるところを自由に調整させた。測定回数は各距離5回である

#### 4. 観察者

観察者は大学生12名とし、いずれも両眼視力、両眼立体視力とも正常である。

#### 5. 実験結果

##### 5.1 平面曲率の算出と結果

平面曲率の算出にあたっては、平行並木法と等距離並木法の両方で得られた曲線の最遠点（固定光点）に接線を引き、y軸との交点の座標を $b_p$ 、 $b_D$ とする。この時、 $b_p$ 、 $b_D$ は瞳孔間距離の1/2を単位として表現する。 $b_p$ 、 $b_D$ を式1と式2に代入して $\alpha$ 、 $K$ の値を求める。

$$\alpha = (1/2 \tan \phi_o) (b_p \times b_D)^{1/2} \quad (1)$$

$$K = \varepsilon^2 \alpha \{ (b_p/b_D)^{1/2} - 1 \} / \{ (b_p/b_D)^{1/2} + 1 \} \quad (2)$$

この $K$ が視空間の平面曲率を示し、 $\alpha$ は写像関数に含まれるパラメータを表す。式中の $\phi_o$ は、最遠点に対して両眼がなす輻輳角であり、 $\phi_o$ はその輻輳角と最遠点の固定光点が観察者の眼に対してなす角である両極緯度であり、単位はともにラジアン (rad)である。平面曲率( $K$ )がマイナスの時は双曲空間特性を、ゼロのときはユークリッド空間特性を、プラスの時は楕円空間特性をそれぞれ示す。

表1 VR空間における平面曲率 (観察者別)

subject	P	D	$b_p$	$b_D$	$\sigma$	K
sub1	4.6	5.5	1.4153 846	1.69230 77	5.5312 39	-0.0515 48
sub2	3.6	6.3	1.1076 923	1.93846 15	5.2370 134	-0.1592 74
sub3	5.9	5.1	1.8153 846	1.56923 08	6.0321 656	0.04259 47
sub4	3.5	4.2	1.0769 231	1.29230 77	4.2161 964	-0.0508 26
sub5	3	4	0.9230 769	1.23076 92	3.8093 667	-0.0792 72
sub6	3.6	2.9	1.1076 923	0.89230 77	3.5531 408	0.05922 98
sub7	3.4	4.6	1.0461 538	1.41538 46	4.3489 112	-0.0844 56
sub8	3.9	5.4	1.2 85	1.66153 85	5.0465 124	-0.0925 58
sub9	5.75	7.25	1.7692 308	2.23076 92	7.1001 102	-0.0696 21
sub10	4.75	5.25	1.4615 385	1.61538 46	5.4914 701	-0.0288 55
sub11	8.25	3.75	2.5384 615	1.15384 62	6.1165 252	0.22814 43
sub12	5.5	6.75	1.6923 077	2.07692 31	6.7003 177	-0.0608 89

このようにして算出された平面曲率を観察者別に示したものが表1である。VR空間では、 $K < 0$ を示すものが9名、 $K > 0$ を示すものが3名である。

現実空間での平面曲率をみると、観察者9名のうち、すべてのものが、-0.13から-1.02の間に分布し、多くは-0.5から-0.9の間にあることが報告されている（東山篤規1987）〔1〕

### 5.2 大きさ恒常性測定の結果

実験で得られた測定値を次に示したザウレスの恒常性指数公式にもとづいて恒常性指数に変換した。

$$Z = (\log S - \log P) / (\log W - \log P)$$

ここで、W：標準刺激の大きさ、P：標準刺激と等しい視角を張る比較刺激の大きさ、S：標準刺激と等しいと知覚された比較刺激の大きさである。

VR空間で得られたザウレス指数を観察者別に示したものが表2である。

表2 ザウレス指数（観察者別）

distance(cm)	400	500	600	700	800	mean
sub1	0.5	0.39	0.3	0.29	0.25	0.35
sub2	0.63	0.6	0.55	0.39	0.32	0.5
sub3	0.36	0.3	0.22	0.22	0.25	0.27
sub4	0.63	0.47	0.41	0.42	0.42	0.47
sub5	0.5	0.47	0.41	0.39	0.42	0.44
sub6	0.5	0.3	0.22	0.22	0.18	0.28
sub7	0.56	0.43	0.45	0.49	0.5	0.49
sub8	0.63	0.56	0.48	0.39	0.32	0.48
sub9	0.5	0.62	0.58	0.59	0.61	0.58
sub10	0.24	0.25	0.35	0.32	0.31	0.29
sub11	0.54	0.53	0.49	0.37	0.37	0.46
sub12	0.47	0.57	0.48	0.46	0.35	0.47
mean	0.51	0.46	0.41	0.38	0.36	0.43

自然空間での大きさ恒常性は久米(1952, 1953)〔2, 3〕の研究にもとづいて、ザウレス指数に換算すると次のようになる。通常の採光をもつ屋上空間（横幅10m、奥行120m）で対象が観察距離8m程度に提示された条件で0.98、廊下空間（学校の廊下）および屋上空間で対象が2mに提示された条件で0.91である。これらは、いずれも、両眼視差、両眼輻輳、眼球調節、パースペクティブやテクスチャの奥行手がかりが十分に働いている条件である。これらの手がかりを縮減し、眼球調節に限定すると大きさ恒常性は低下し、たとえば暗室空間では0.50-0.59程度となる。大きさ恒常性測度は、奥行手がかりがどの程度に効果的に働くかの指標となることがわかる。VR空間では、両眼視差、パースペクティブ、テクスチャおよび陰影の各要因が奥行の手がかりとして働いているが、そこでは、恒常指数でみると平均0.43を示し、自然条件下での暗室空間と近似する。VR空間では、大きさ恒常性を奥行距離2-8mの範囲で測定し、しかもこの距離範囲では、主要な手がかりを用いてあるのに大きさ恒常性が低く出ている。

### 5.3 ホロプター特性の測定結果

視覚的平行を求めたときの各観察距離での左右両端の固定刺激と3個の測定刺激との奥行差が図3に示されている。ここでプラス表示は奥行距離の過大視（観察者から遠くの位置にあるように見える）を、マイナス表示は過小視を示す。

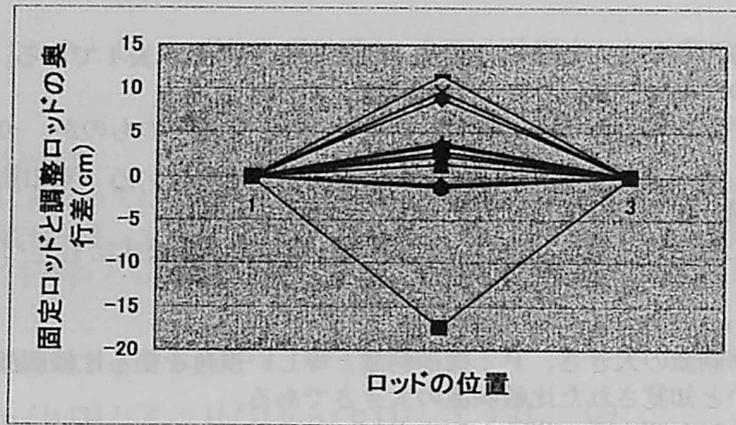


図3 ホロプター特性 (1と3は固定点)

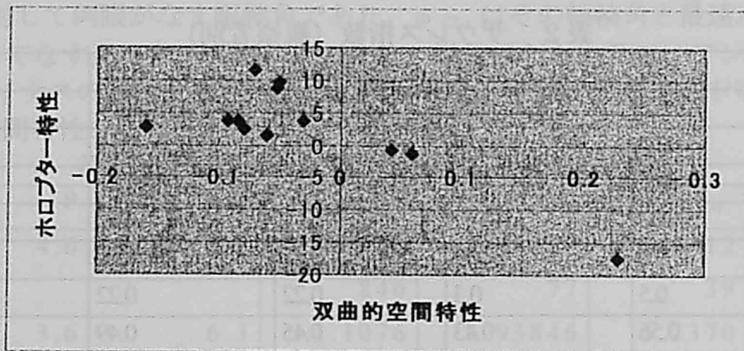


図4 双曲的空間特性とホロプター特性との相関

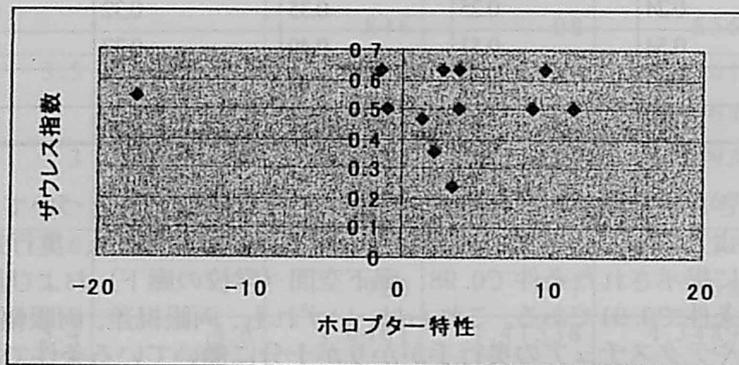


図5 ホロプター特性と大きさ恒常性との相関

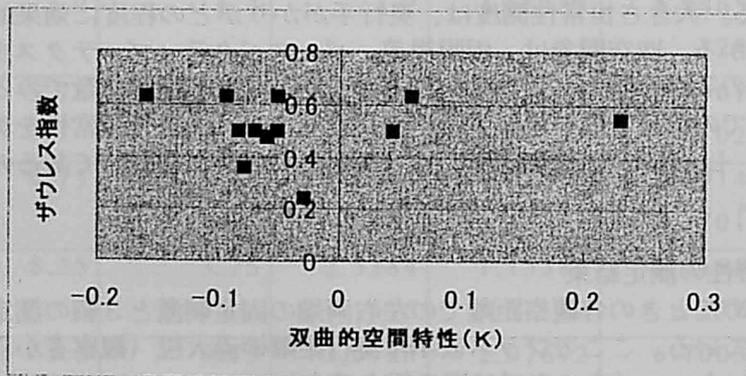


図6 双曲的空間特性と大きさ恒常性との相関

## 6. 双曲的空間特性と大きさ恒常性との相関

VR空間の双曲的空間特性とホロプター特性の相関関係をとると、図4のようになる。同様にホロプター特性と大きさ恒常性との相関は図5に、双曲的空間特性と大きさ恒常性の相関は図6にそれぞれ示されている。

図5と図6においては、大きさ恒常性特性の個人差が小さいので、双曲的空間特性と大きさ恒常性との間およびホロプター特性と大きさ恒常性との間には顕著な個人差はみられない。しかし双曲的空間特性とホロプター特性との相関を見ると、双曲的空間特性とホロプター特性を顕著に示すもの(3名)、全く示さないもの(3名)、わずかに示すもの(6名)とがみられる。

## 参考文献

- 【1】東山 篤規 両眼視空間と輻輳の機能 心理学モノグラフ 東大出版会1987
- 【2】久米 京子 みえの大きさと観察距離との関係並びに大きさの恒常を規定する要因について 心理学研究 22, 1952.
- 【3】久米 京子 みえの大きさと観察距離との関係並びに大きさの恒常を規定する要因について II 心理学研究23, 1953.

(増田智弘、林部敬吉、阿部圭一、中谷広正、東山篤規 人工現実空間における視覚特性の個人差. バーチャル・リアリティ学会第4回大会論文集、305-308, 1999. 所収)

### 3.2. バーチャル・リアリティ空間における運動視差

#### 人工現実空間での運動視差

林 部 敬 吉

(静岡大学情報学部)

運動視差 人工現実空間 両眼視差

問題：人工現実空間（VR空間）の現実度を高め、その空間内での操作性を容易にするためには、VR空間と現実空間の視覚的特性を可能な限り一致させる必要がある。これまで、筆者らは、両眼視差、パースペクティブ、テクスチャと陰影要因で表現された人工現実空間の視覚特性を、空間の平面曲率、大きさ恒常性、ホロプター特性、奥行距離特性を指標としてしらべてきた。その結果、全体的傾向として、人工現実空間は現実空間と比較して、(1)大きさ恒常性は比較的高く現実空間とほぼ同等を示す、(2)平面曲率は双曲的空間特性が弱く、どちらかといえばユークリッド的空間特性を示す、(3)ホロプター特性は現実空間と同様に、物理的平行と視覚的平行が一致する空間帯をもち、それより遠いところでは、中心視野より周辺視野で距離の過大視が、逆に近いところでは、周辺視野がわずかに過小視される。しかし、物理的平行と視覚的平行とが一致する空間帯は現実空間と比較して観察者に近い位置になる。(4)奥行距離特性は、屋内のような狭い空間では、現実空間と同等の特性を示すが、屋外のような大きな空間では、奥行距離の過小視が著しい。

このように、VR空間は現実空間と比較して、いまだ十分な現実度をもつまでにはいたっていない。これは、奥行き手がかりのなかで、運動視差が働いていないためと考えられる。本実験では、VR空間で運動視差が働く事態を作成し、その奥行効果を両眼視差のそれと比較する。

VR空間の構成：VR空間(図1)は両眼視差と運動視差を用いて構成された。空間の構造は遠方に伸びる床面に、運動視差あるいは両眼視差で段差(落差)をつけた。床面は市松模様を配し、パースペクティブやテクスチャ勾配はなるべく除去した。VR空間は37インチのカラーディスプレイ(Mitsubishi XC-3730C)に提示され、液晶シャッター方式のステレオスコープ(CrystalEyesPC)を通すと両眼立体視できる。運動視差を有効にするために観察者の頭部運動情報を磁気姿勢センサー(FASTRACK)で検出した。実験環境は、ディスプレイと観察者全体を覆い、余分な刺激を遮断し、VR提示された視環境のリアリティを可能な限り保障するように工夫した。

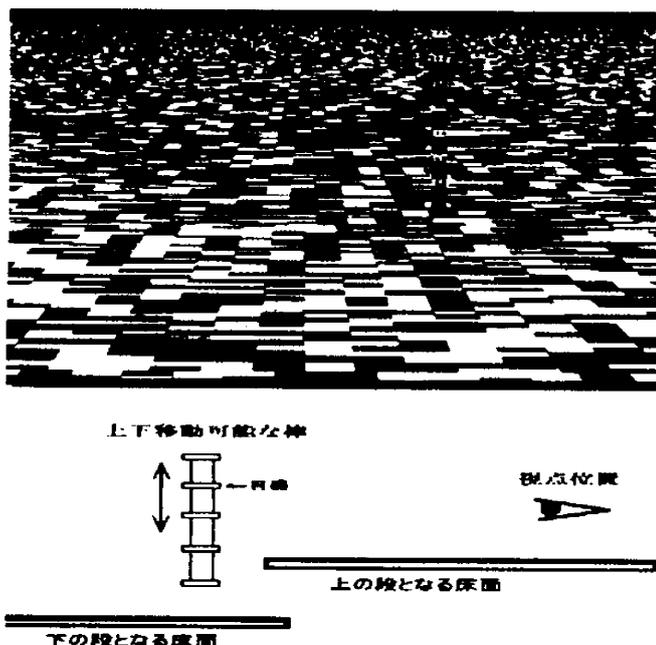


図1 実験に用いたVR空間

実験条件：(1)運動視差単独条件、これは運動視差単独で床面間に奥行き手がかりを付けた。  
 (2)両眼視差単独条件、これは両眼視差単独で床面間に奥行き手がかりを付した。  
 (3)運動視差と両眼視差複合条件、これは両方の視差要因で床面間に奥行き手がかりを与えた。  
 運動視差、両眼視差量は、ともに同一の落差距離をとるように設定する。両要因の視差量は4段階（10、20、30、40cm）に変化させる。また、現実空間で生起するのと同じの運動視差量を与えた条件（空間1）と運動視差量を通常の2倍に増強した条件（空間2）を設定した。

実験方法：被験者は、頭頂部に磁気姿勢センサーを装着し、液晶シャッター眼鏡をかけて、観察距離75cmの距離でディスプレイを一定の速度で頭部を動かしながら観察する。各実験条件ごとに提示された2つの床面の落差距離を、画面内に設定された落差測定スケール（垂直に移動させることのできる細長の棒状のものさし）を上下させてマッチングする。

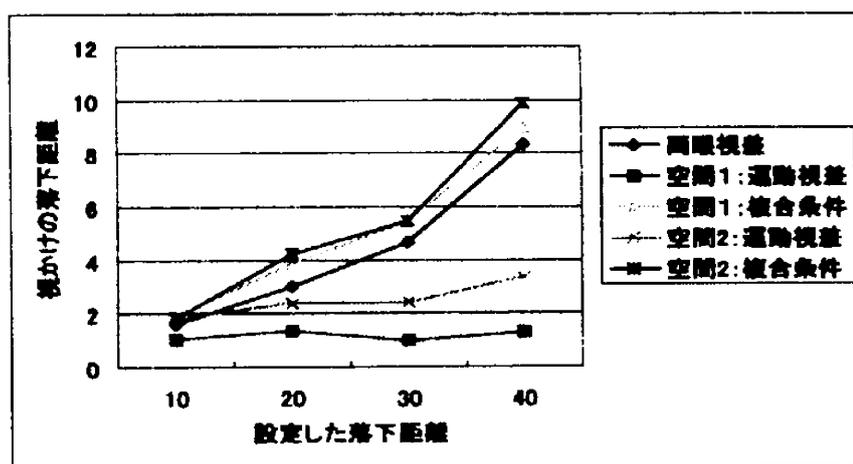


図2 運動視差の奥行効果

観察者：大学生11名。

実験結果：結果は、図2に示されている。まず、両眼視差単独条件では、落差距離の増大にともなって視えの距離も増大する。しかし、設定した深さは知覚されていない。運動視差単独条件では、落差距離がほとんど知覚されていない。両眼視差と運動視差複合条件では、落差距離が知覚されたが、これは両眼視差量に依存したものと考えられる。運動視差単独条件で、その視差量を2倍に増加した条件（空間2）では、奥行距離の増大に伴って視えの奥行距離も増大を示すが、その奥行量は設定したものより、かなり小さい。これらのことから、VR空間で運動視差のみで奥行距離を提示するのはかなり困難であると考えられる。

(林部敬吉 運動要因による立体視 (3) 日本心理学会第63回大会論文集 388, 1999. 所収)

### 3.3. バーチャル・リアリティ空間におけるテクスチャの効果

#### 人工現実空間でのテクスチャの奥行効果

林 部 敬 吉

(静岡大学情報学部)

テクスチャ 人工現実空間 両眼視差

問題：人工現実空間（VR空間）の現実度を高め、その空間内での操作性を容易にするためには、VR空間と現実空間の視覚的特性を可能な限り一致させる必要がある。これまで、筆者らは、両眼視差、パースペクティブ、テクスチャと陰影要因で表現された人工現実空間の視覚特性を、空間の平面曲率、大きさ恒常性、ホロプター特性、奥行距離特性を指標としてしらべてきた。とくに、VR空間では奥行距離特性は、過小視される傾向があり、したがって、テクスチャ、陰影、パースペクティブなどの絵画的要因を効果的に組み合わせる必要がある。

本研究では、室内空間での天井面と床面上のテクスチャの組み合わせを変えたVR空間を構成し、その空間内に提示した対象までの奥行を測定し、もっとも奥行効果が高いテクスチャの組み合わせ条件を求めた。

VR空間の構成：VR空間（図1）は両眼視差とテクスチャを用いて構成された。空間は遠方に伸びる天井面と床面で構成され、それぞれの面状にはテクスチャが張り付けられた。また、空間内には、奥行距離測定のターゲットとなる2つの対象（円筒）を距離を違えて提示した。VR空間は37インチのカラーディスプレイ(Mitsubishi XC-3730C)に提示され、液晶シャッター方式のステレオスコープ(CrystalEyesPC)を通すと両眼立体視できる。実験環境は、ディスプレイと観察者全体を覆いでおおって、余分な刺激を遮断し、VR提示された視環境のリアリティを可能な限り保障するように工夫した。

実験条件：天井面に配するテクスチャは、水平線奥行方向勾配テクスチャ、収束テクスチャ、碁盤目状テクスチャの3種類のパターンとした。床面に配するテクスチャは、床面の中心領域に配するものと、その周辺領域に配するものを変えて組み合わせた。床面の周辺に配するテクスチャは天井面に使用するものと同種類のものを使用し、中心領域に配するものは、水平方向テクスチャ、水平方向木目調テクスチャ、水平方向陰影テクスチャ（グラデーション）とした。

表1 テクスチャの組み合わせ条件

床面	天井面（水平）／収束／碁盤								
周辺	水平			収束			碁盤		
中心	水 平	陰 影	木 目	水 平	陰 影	木 目	水 平	陰 影	木 目

テクスチャの組み合わせ条件の総計は、（天井面3条件）×（床の周辺領域3条件）×（床の中心領域3条件）で、27条件である（表1）。

実験方法：被験者は、液晶シャッター眼鏡をかけて、観察距離150cmの距離でディスプレイに提示されたVR空間を観察する。視えの奥行距離の測定は、マグニチュード推定法による。はじめに、基準VR空間（天井面水平テクスチャ、床周辺領域水平テクスチャ、床中心領域テクスチャ）のほぼ中央に提示された円筒対象までの距離に100の数値を割り当て、次いで実験VR空間を提示し、遠、近に配置した2つの対象までの推定値を報告させる。遠位置にあ

る対象は、近位置にある対象の3倍の距離に設置してある。測定回数は、各条件1回である。  
 観察者：大学生7名。

実験結果：テクスチャの組み合わせと視えの奥行距離との関係は、表2、表3に示されている。

表2. 視えの奥行を増強するテクスチャの組み合わせ (遠対象条件)

天井/床中央/床周辺	推定量
水平/木目/水平	342
水平/木目/碁盤目	316
碁盤目/木目/収束	315

表3. 視えの奥行を増強するテクスチャの組み合わせ (近対象条件)

テクスチャパターン	推定量
水平/水平/集中	102
水平/水平/碁盤目	100
集中/水平/水平	99

実験の結果、次のような知見が得られた。

- (1)天井面のテクスチャによる奥行効果は、3種類のテクスチャの組み合わせのいずれにおいても差が無く、したがって、視えの奥行距離に与える影響は小さい。
- (2)床面の中心領域に配したテクスチャの中で木目調パターンは、遠位置に対する対象の視えの奥行距離をより遠くに知覚させる。
- (3)床面の周辺領域に配したテクスチャの中では、遠位置の対象をより遠くに知覚させるパターンは水平線奥行勾配条件で、近位置の対象をより手前に知覚させるものは収束パターンである。
- (4)視えの奥行距離を効果的に増強するテクスチャの組み合わせ条件は、天井、床面とも水平線で描かれた奥行勾配を持つテクスチャに床面中心領域に木目パターンを付置させた条件である。

### 3.4. 運動要因の立体効果

#### 3.4.1. ドット配置の規則性/不規則性

### 運動要因による立体効果 (3)

林 部 敬 吉  
(静岡大学情報学部)

運動視差 モーションパースペクティブ 運動性立体効果

問題：運動要素から立体が生起する現象は、運動性奥行効果(kinetic depth effect)と運動性立体効果(stereo-kinetic effect)があり、対象の回転軸がそれぞれ相違するもの(X軸/Y軸)、どちらも運動による対象の網膜上での速度勾配が立体印象を生起させる。運動速度勾配がどのようにして立体視を生起させるかについてこれまで以下のような分析を試みてきた。

前々回の報告では、3角形、4角形、円形、不規則輪郭形を同心円上に5個から10個を配置し、それらを水平、垂直、あるいは円を描くように、運動速度勾配をつけてシフトさせたところ、形状が同心円的に複数の輪郭線で表示され、しかもその輪郭線に速度勾配が存在すると、明瞭な立体印象が生起することが確認された。しかし、小矩形、小さい不規則多角形などを不規則に配置した場合には、それらの間に速度勾配をつけても立体効果は皆無であった。

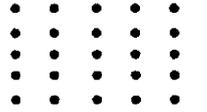
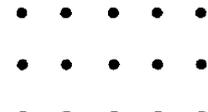
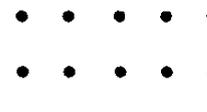
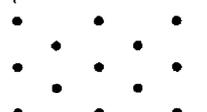
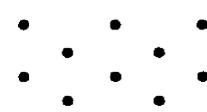
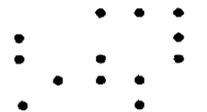
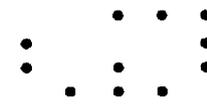
前回の報告では、5本の短線分を、パースペクティブ配置、非パースペクティブ配置、ランダム配置に設定したパターンを作成し、そのパターンを構成する5本の線分間に速度勾配をつけて観察したところ、パースペクティブ配置条件のパターンでのみ、明瞭な立体効果が生起することが明らかにされた。この結果は、パターンを構成する各刺激要素が、運動の結果、パースペクティブを生じさせ、それが立体効果をもたらすことを示した。

今回、そこで、2個から25個の小黒点(ドット)を規則的もしくは不規則的に配置し、小黒点間、あるいはグループ化した黒点群間に運動速度勾配を導入して、その立体効果の有無を実験した。

実験方法：(1)刺激条件には、表1に示したような、小黒点で形成された8個のパターンを用いた。パターンは、それを構成する小黒点の数、その小黒点の配置が規則的/不規則的、その速度勾配が規則的/不規則的という点で異なる。(2)運動速度勾配は、小黒点間、あるいは小黒点群間に設定した。小黒点は1行をグループ化の1単位とし、それらの間で速度勾配を規則的あるいは不規則的に設定する。運動は単位時間内にピクセル単位でシフトさせ、また運動速度勾配は等差級数的に設定した。今回は、運動速度勾配を3の等差級数とし、3, 6, 9, 18, 27の勾配をつけた。すなわち、規則的速度勾配条件では、5行の小黒点の、例えば1行目を1フレーム当たり3ドット分シフトさせた場合には、以下順次、2行目を6ドット、3行目を9ドット、4行目を18ドット、5行目を27ドット分シフトさせた。不規則速度勾配条件では、1行目から5行目までの小黒点の速度勾配をランダムに設定した。(3)パターンの運動は、はじめ右水平方向に定められたピクセル範囲でシフトし、次いではじめの位置に戻り、さらに左水平方向に同等のピクセル範囲でシフトし、またはじめの位置に戻ることを反復する。(4)運動速度は7fps(1秒間に7フレーム)に設定した。(5)観察者には、頭部を固定し、単眼で、ディスプレイ上の運動するパターンを観察させ、それがどのような形状でどの方向に立体的に凹凸しているか、また凹凸の反転有無、および体出現の程度を3段階で判断させた。観察距離は60cm、観察回数は1回である。(6)観察者：大学生10名でいずれも正常視力(矯正視力で1.0前後)をもつもの。

実験結果：表1に示されたように、(1)小黒点の配置が規則的で速度勾配が規則的に変化す

る条件では、すべて、明瞭な立体印象が生起する、(2) 小黒点の配置が不規則で、速度勾配も不規則化する条件では、すべて立体印象は生起しない、(3) 小黒点の配置が不規則で、速度勾配が規則的に変化する場合、および小黒点の配置が規則的で、速度勾配が不規則化する条件では、小黒点の数が少なくなると、立体印象は生起しにくくなる、などの結果が得られた。

		速度勾配			
		規則的变化		不規則的变化	
的 配					
		明瞭な 立体出現	明瞭な 立体出現	明瞭な 立体出現	明瞭な 立体出現
的					
		明瞭な 立体出現	明瞭な 立体出現	立体出現は 生起しない	立体出現は 不明瞭
的					
		立体出現は 不明瞭	立体出現は 生起しない	立体出現は 生起しない	立体出現は 生起しない
					
		立体出現は 生起しない	立体出現は 生起しない	立体出現は 生起しない	立体出現は 生起しない

まとめ：これらの結果から、運動要因によって立体印象が生起するのは、パターンを構成する刺激要素が運動した結果、そこに連続して変化する運動速度勾配が明瞭に知覚される場合のみであった。これは、各刺激要素の運動の結果、パースペクティブが成立したため、すなわちモーション・パースペクティブが形成されたためと考えられる。

(林部敬吉 運動要因による立体視 (2) 日本心理学会第62回大会論文集 228, 1998 所収)

### 3.4.2. ドットのグループ化の効果

#### 運動要因による立体効果 (4)

林 部 敬 吉

(静岡大学情報学部)

運動視差 モーションパースペクティブ 運動性立体効果

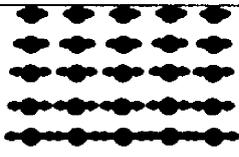
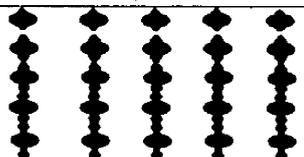
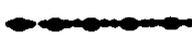
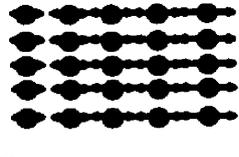
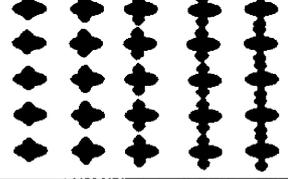
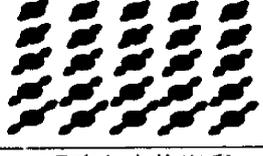
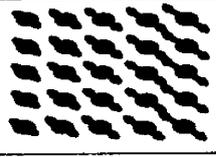
問題：運動要素から立体が生起する現象は、運動性奥行効果(kinetic depth effect)と運動性立体効果(stereo-kinetic effect)があり、対象の回転軸がそれぞれ相違するものの(X軸/Y軸)、どちらも運動による対象の網膜上での速度勾配が立体印象を生起させる。運動速度勾配がどのようにして立体視を生起させるかについてこれまで以下のような結果が得られた。(1)形状を同心円的に複数の輪郭線で表示し、その輪郭線に速度勾配をつけて反復運動させると、明瞭な立体印象が生起するが、小矩形、小さい不規則多角形などを画面に不規則に配置した形状の場合には、それらの間に速度勾配をつけても立体効果は生起しないこと、(2)5本の短線分を、パースペクティブ配置、非パースペクティブ配置、ランダム配置に設定したパターンを作成し、そのパターンを構成する5本の線分間に速度勾配をつけた条件では、パースペクティブ配置条件のパターンでのみ、明瞭な立体効果が生起すること、(3)ドットで形状を表現しその配置が規則的で速度勾配が規則的に変化する条件では明瞭な立体印象が生起すること、(4)ドットの配置が不規則で、速度勾配も不規則変化する条件では立体印象は生起しないこと、(3)ドットの配置が不規則で、速度勾配が規則的に変化する条件、およびドットの配置が規則的で速度勾配が不規則変化する条件でもドット数が少なくなると立体印象は生起しにくくなること、などの結果が得られた。今回、そこで、5から25個のドットを規則的に配置し、ドットの間、あるいはグループ化したドット群の間に運動速度勾配を導入して、その立体効果の有無を実験した。

実験方法：(1)刺激条件には、表1に示したような、ドットで形成された12個のパターンを用いた。パターンは、それを構成するドットの数、そのドットの運動方向が観察者に対して水平、垂直、斜め方向か、並びにドットの運動方向とドットの運動勾配の方向との関係が同方向か異方向かで異なる。(2)運動速度勾配は、ドット間、あるいはドット群間に設定した。ドット群間に速度勾配をつける場合には、ドット1行をグループ化の1単位とし、それらの間で速度勾配を規則的に設定する。運動は単位時間内にピクセル単位でシフトさせ、また運動速度勾配は等比級数的に設定した。今回は、運動速度勾配として、5, 10, 20, 40の勾配をつけた。例えば2行目を1フレーム当たり5ドット分シフトさせた場合には、以下順次、3行目を10ドット、4行目を20ドット、5行目を40ドット分シフトさせた(1行目は固定)。(3)パターンの運動は、はじめ水平/垂直/斜め方向に定められたピクセル範囲でシフトし、次いではじめの位置に戻り、さらに逆の水平/垂直/斜め方向に同等のピクセル範囲でシフトし、またははじめの位置に戻ることを反復する。(4)運動速度は7fps(1秒間に7フレーム)に設定した。(5)観察者には、頭部を固定し、単眼で、ディスプレイ上の運動するパターンを観察させ、それがどのような形状でどの方向に立体的に凹凸しているか、また凹凸の反転有無、および立体出現の程度を3段階で判断させた。観察距離は60cm、観察回数は1回である。(6)観察者：大学生10名でいずれも正常視力(矯正視力で1.0前後)をもつもの。

実験結果：表1に示されたように、次の結果が示された。(1)ドットの運動方向と運動の勾配方向とが異方向(90度あるいは45度)の場合にのみ、立体的な形状は出現する。(2)ドットの運動方向と運動の勾配方向と同方向条件では、形状が伸縮して知覚されるかが立体

的な形状は出現しない。(3)ドット数は形状の立体知覚には影響しない。

表1. 実験条件と実験結果

		運動方向	
		水平方向	垂直方向
水平方向 向配			
	明瞭な立体出現	立体出現は生起しない	
			
	立体出現は生起しない	立体出現は不明瞭	
垂直方向 配置			
	立体出現は生起しない	立体出現は不明瞭	
			
	明瞭な立体出現	立体出現は生起しない	
水平配置	斜め運動方向	斜め運動方向	
			
	明瞭な立体出現	明瞭な立体出現	
垂直配置			
	明瞭な立体出現	明瞭な立体出現	

(林部敬吉 運動要因による立体視 (3) 日本心理学会第63回大会論文集 388, 1999. 所収)

## 3.5. バーチャル・リアリティ技術の応用

### 3.5.1. 人間の脳の3次元可視化

#### バーチャル・リアリティを用いた脳模型の作製 System for understanding human brain using virtual reality

増田智弘<sup>1)</sup>, 林部敬吉<sup>2)</sup>

Tomohiro MASUDA and Keikichi HAYASHIBE

1) 静岡大学大学院理工学研究科

2) 静岡大学情報学部

**Abstract:** The system for understanding human brain was produced by using virtual reality technique. In this system, the various fragments and the cross section such as horizontal, vertical and front parallel of the human brain are presented 3-dimensionally. As being linked the brain structure to its function in this system, users are possible to call the structure from function and vice versa. University students etc. can utilize this system in order to understand structures and functions of the human brain.

**Keywords:** human brain, virtual reality technique, 3-D visualization of human brain structure

#### 1. はじめに

新しいインターフェイス技術として注目されているバーチャル・リアリティ (VR) 技術は建築や医療、アミューズメントといったさまざまな分野での応用が期待されている。とりわけ医療の分野では、VR を使って構築された身体や内臓などを教育目的で使うことが多くなっている。これまでも VR で「脳」を扱う研究は行われており、医者や医学生を対象として、治療の「訓練」を目的としたシステムの開発が行われてきた。ここでは、一般の大学生などの幅広い層を対象に、人間の脳の基本的な構造と機能についての理解を支援するバーチャル・プレーンとでもよぶべき脳模型を3次元的に作製し、脳の構造や脳部位の機能理解のための支援システムの作製を試みる。脳の模型は大学の医学部などの教育現場で主に利用されている。これは人間の脳が3次元的に複雑な構造をしており、2次元的な図などの表現ではその構造を理解するのが難しいことから、脳模型を用いて教えることによって構造の理解を容易にするためである。しかし、実際の脳模型では、主に脳の表層の構造が示されているのみで、その深部構造や、各種断面での構造は明らかにできない。人間の心理機能を担うのは脳の各部位であり、人間の脳の構造と機能についての理解を深めるためには、脳の各部位とその心理的機能との関係を知る必要がある。構造と機能とを関連付けて理解させるには、平面的よりも立体的に表示されている方がよい。本研究では実際の脳模型のような3次元提示によって得られる空間的構造の把握しやすい点に、一般の教科書や医学辞典にあるような、機能等の詳しい説明を加え、バーチャル・リアリティ上で再現し、両方のメリットをあわせもったシステム、さらにさまざまな角度から脳の機能と構造との関係の理解を支援できるシステムの作製を試みる。

#### 2. 研究の背景

VR を用いて人間の身体の一部を再現する研究には以下のものがある。そのひとつは VR の医学応用に関連した研究[1]で、VR 上の人体を、解剖図のような汎用モデルとして、さらに医学知識の伝達、保存のためのメディアとしての利用を試みている。また、脳外科手術の構築と臨場感の改善をめざした VR 上での脳外科手術シミュレーション・システムの構築についての研究[2]がある。これは、医学生の教育、患者へのインフォームド・コンセント、

脳手術の方針決定などへの応用をめざしたものである。使用するデバイスに、データグローブ、ヘッドマウント・ディスプレイ (HMD) などを用いて、臨場感あふれる VR システムを構築している。

このような研究にみられるように、VR 技術を用いることにより、現実の世界では体験できないことをバーチャルな世界でリアルタイムに体験することができるし、また、3 次元的提示によって、テキストの購読や単なる講義を受けただけでは学び難い部分も、効果的に理解できる。

### 3. 脳部位のデータ構造

人間の脳は非常に複雑な構造をしており、多くの神経や血管、神経核によって構成されている。その全ての情報を含み、必要に応じて取り出すことができるシステムが理想であるが、それを実現するためには脳についての専門家と同等の知識が要求され、また各部分の 3 次元データの数は膨大になり、作成には長い時間が必要となる。そこで、本研究では脳の構造を理解する上で重要となる脳の構造、大脳皮質の機能地図、脳の断面図の 3 点について提示するシステムを考える。

### 4. データベースの作成

#### 4.1 データベース作成の手順

脳のデータベースの作成は以下の手順で行う。

- 1) 実際の脳模型を 3D スキャナで 3 次元データとして取り込む。
- 2) 取り込んだ 3 次元データを、必要に応じて 3D モデリングソフトで修正する。
- 3) 脳の構造、大脳皮質の機能地図、脳の断面構造についてのデータ構造を作成する。
- 4) 3 次元データと 3) で作成したデータ構造を関連付けする。

#### 4.2 3D スキャナによる 3 次元データの作成

実際の脳模型を 3D スキャナで取り込み 3 次元データを作成する。3D スキャナによる取り込みは、全体模型と分解したパーツごとに行う (図 1)。



図 1 3D スキャナーでとりこんだ脳模型

#### 4.3 脳の構造

脳の構造を以下のように分類した。

##### 4.3.1 脳の表層の構造についての分類

脳は大きく分けて大脳、脳幹部と小脳に大別される。大脳は左右の大脳半球とその間にはさまれた棒状の脳幹とで構成される。左右の大脳半球は脳梁という神経線維の束で連結する。

##### 4.3.2 脳の深層の構造についての分類

脳幹は上から順に、間脳、中脳、橋、延髄に区分される。間脳は視床を中心にして、視床上部、視床下部、視床腹部で構成される。中脳は中脳蓋と下丘と被蓋と大脳脚に区分される。

#### 4.4 大脳皮質の機能地図

人間の脳皮質はその機能ごとに領域が分かれている。その領域によって区分したものが大脳皮質機能地図である。以下のように区分を行った (表 1)。

表1 主な機能と関連脳部位

主な機能	下位機能	関連部位
感覚	視覚 聴覚 体性感覚	視覚野 聴覚野 体性感覚野
運動	骨格筋の制御	運動野
記憶	エピソード記憶 作業記憶	側頭葉 (海馬)
思考	思考・創造・意欲 知覚・理解・認識	前頭連合野 前頂・後頭連合野
言語	言語の理解 言語の発話	感覚性言語中枢 運動性言語中枢

#### 4.5 脳の断面構造

脳の水平、前額、正中の各断面の構造を、断面図として提示するための画像を用意する(図2)。

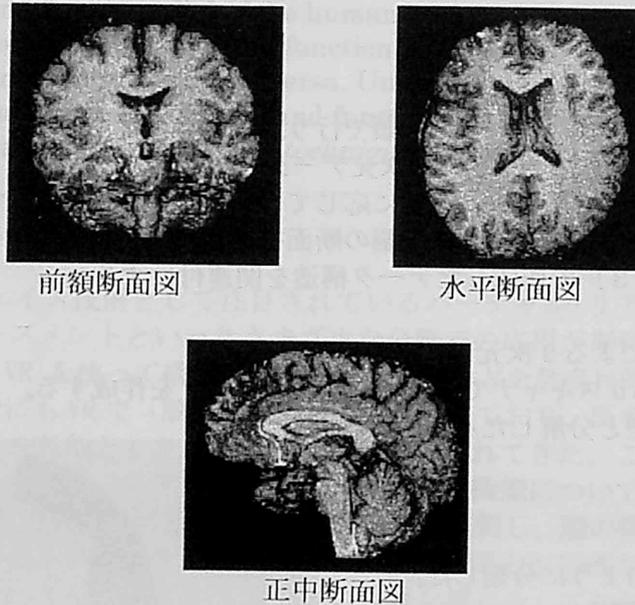


図2 前額、水平、正中の各断面

#### 5. 3次元データと、各データ構造の関連付け

3D スキャナで取り込んだ3次元データと各データ構造の関連付けを行う。

##### 5.1 脳構造の関連付け

取り込んだ脳模型の部分パーツの3次元データを、分類した脳部位ごとに区分を行う。階層的なデータ構造にすることで、脳構造の理解が容易な提示を行う。

##### 5.2 大脳皮質機能地図の関連付け

大脳半球の大脳皮質部分の表面を区分した機能ごとに分ける。その際、機能領域ごとに色分けすることにより、視覚的に理解しやすい機能地図の作成を行う。

##### 5.3 脳の断面構造の関連付け

脳の全体模型を前額、水平、正中の各断面で分割できるようにする。切断面には用意した断面図の画像をテクスチャとして張り付ける。

#### 6. 開発環境

## 6.1 3D スキャナ

CyberModeler Ver1.6 (三洋電機ソフトウェア製) を用いる。これは、回転テーブル上に対象物を置き、一定角度で順次回転させ、それをビデオカメラで撮影し、それぞれの回転角度から抽出された輪郭線をもとにモデリング計算を行うことで3次元データを作成できる。

## 6.2 WorldToolKit

VR を構築するソフトウェアとして、WorldToolKit (WTK, SENSE8 社) を使用した。WorldToolKit は、リアルタイム3Dグラフィックスアプリケーションを制御する1000以上のC言語関数ライブラリをもつ。

## 7. システムの概要

本システムは大きく分けて「構造別モード」、「断面図モード」、「機能別モード」の3つのモードで構成されている。まず、本システムを立ち上げると「メニュー画面」が表示される。「メニュー画面」では各モードがそれぞれどのようなモードであるかの簡単な説明と各モードに移行するためのメニューバーが表示される。以下に、各モードに共通する動作を挙げる。

- 1) 利用者は提示された脳オブジェクトに対して、見たい脳部位を選択する。選択された部分はクローズアップされ、解説文が同時に表示される。
- 2) 提示された脳オブジェクトはすべてマウスによって自由に動かせるように設計される。
- 3) いずれのモードにおいても他のモードに自由に移行することができる。
- 4) 利用者は液晶シャッター付き眼鏡を用いて、立体的に見ることができる。

### 7.1 構造別モード

「構造別モード」は脳の基本的な構造を理解できるモードである。最初にパーツごとに色分けされた脳の外観が表示され、利用者は好きなように分解することができる。また各パーツを個別に観察することもでき、その名称や簡単な説明も表示される。ここでは小脳、中脳、脳幹といった脳の表層および深層の構造についての分類を再現しており、それらのパーツは十数種類に分けられる。

### 7.2 断面図モード

「断面図モード」は主に、脳の内部構造がどのようになっているかを明らかにするモードである。最初に断面図モード用の脳の全体図が表示される。全体図には切断される部分にラインが入っており、そのラインに沿って切断された部分の切断面がデータベースとして用意されている。主に、垂直断面、前額断面、正中断面などがサブモードとして用意されている。

### 7.3 機能別モード

「機能別モード」は主に人間の行動や思考とそれを司る脳の各部位の関係を明らかにするモードである。脳のどの部分がどのような働きをしているのか、またどのような機能が脳のどの部分に該当するのかを提示する。大脳皮質の機能地図の分類表をもとに、各機能系の分類を再現している。まず、感覚、運動、記憶といった主な機能領域ごとに色分けして表示し、適当な機能領域が選択されるとその下位機能も同様に色分けし、瞬時に位置を把握できるようにする。また、提示方法として、適当な脳部位が選択されるとその機能が提示される場合と、その逆に機能を選択させ、その機能が脳のどの部分で営まれているかを提示する場合の二通りを設定する。

## 8. システムの制御方法

WTK で仮想空間内に光源および視点を設定する。光源には位置や方角に関係なくすべてのポリゴン表面を均等に照射する環境光源を用い、必要に応じて方向光源やスポット光源を用いて、脳オブジェクトを効果的に表示させる。入力デバイスには主にマウス、キーボードを用いる。WorldToolKit のセンサーオブジェクトによって、各デバイスにより生成され

た各入力から、3次元的な位置/方角や他の種類のデータを生成する。これらの入力はシミュレーションの各種オブジェクトの動作や振る舞いを制御するために用いられる。マウスによる操作を可能にするため、マウスを視点にリンクさせ、自由に視点を移動できるようにする。また視点を固定した条件も（前後左右など）同時に生成し、これらを切り替えて表示できるようにする。各脳オブジェクトは空間内でばらばらにされるので、それぞれ別々に保存しておく。各モードにおけるメニューの選択肢や、脳オブジェクトを選択した時に表示される解説文の表示に関しては WTK の UI 機能を用い、可能な限り操作しやすいシステム構築を試みた。また、液晶シャッター付き眼鏡を用いて両眼立体視を可能にするための設定をした。図3は、WorldToolKit によって作成された仮想空間内に表示された脳モデルの一部である。

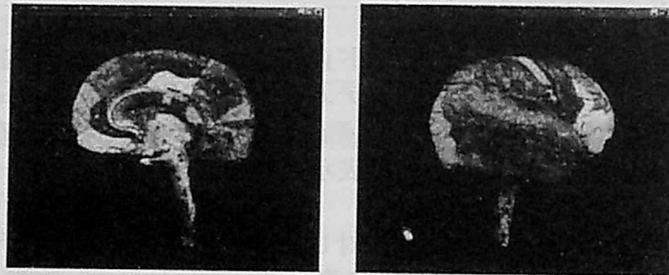


図3 仮想空間内の脳モデル

#### 9. まとめ

本研究ではバーチャル・リアリティを用いて人間の脳を再現し、脳の機能と構造の関係を理解できるようなシステムを提案した。課題としては利用者にストレスなく動作可能なシステムの構築、脳の機能と構造が理解しやすい提示方法、脳モデルのリアリティの追求などが挙げられる。

#### 参考文献

- [1]鳥脇純一郎：バーチャルリアリティの医学応用  
－仮想化された人体をめぐる－ 日本バーチャルリアリティ学会第2回論文集 pp1-3 1997.9
- [2]田中 博, 中村 洋之, 成相 直, 平川 公義：脳外科手術の構築と臨場感の改善、日本バーチャルリアリティ学会第2回論文集 pp111-114 1997.9

(橋本邦明、増田智宏、林部 敬吉 バーチャル・リアリティを用いた脳模型の作製、  
バーチャル・リアリティ学会第5回大会論文集、345-348、2000. 所収)

### 3.5.2. 室内デザインの3次元可視化

#### バーチャルリアリティを用いた 室内デザインの支援

The system for designing layout of indoor space using virtual reality

相澤正規<sup>1)</sup>, 林部敬吉<sup>2)</sup>  
Masaki AIZAWA and Keikichi HAYASHIBE

1) 静岡大学大学院理工学研究科

2) 静岡大学情報学部

**Abstract:** The system for designing layout of the indoor space by the technology of virtual reality was devised. This system is possible for users to place desks, chairs, decorative materials, etc. freely in the virtual indoor space. Devising the decision of the contact reaction between the household goods and the data globe enabled the grasp and transfer of these goods in the hand. The feedback by the sound was carried out in the contact between the goods and data globe instead of the tactile sense. User can watch the household goods in the indoor space presented on the HMD and can operate them with the data glove until he likes it.

**Key Words :** layout of indoor space, data glove, virtual reality, HMD

#### 1. はじめに

屋外や室内の景観デザインを行う場合、本来は図面を描き、模型を製作して検討が行われる。この方法ではミニチュアの模型をつくるという大変な作業がある。近年、コンピュータグラフィック技術の向上から3DCGで家や庭などをデザインするアプリケーションがでてきている。これはあくまでコンピュータ上でマウスとキーボードでの操作が基本となるアプリケーションである。

そこで、室内外のレイアウトを疑似体験できるものを提案する。そのために、多種多様なデザインや形状の異なるインテリア・家具類をポリゴンとテクスチャによって構成して、そのデータベースを作成する。次に、バーチャルリアリティ空間内でこれらのインテリア・家具類を自由にレイアウトさせる。このようにすれば、仕上がりがどの程度であるかを体験できる上に、作業効率の向上が望める。

ここでは、景観デザインのためにVR空間を用いる方法を提案する。VR空間の利点として以下の3点を挙げられる。

- 1) 空間的制限がないこと：VR空間は無遠慮で生成されるので必要な範囲だけ地面や床を生成できる
- 2) 重量を感じないこと：ものの持ち運びはVR空間のポリゴンの移動なので重いものでも容易に移動が可能
- 3) 対象物表面が変更可能であること：物体のポリゴンの模様・色を、テクスチャを用いることで利用者の好みに応じて容易に

変更できるので効果的かつ効率的な作業が望める

VRの技術を利用するにあたり、重要な要として現実感がある。われわれは実世界からの様々な感覚情報を感じとることにより現実感を得ているので、VR空間においても現実世界で起こりうる現象を再現することが非常に重要といえる。しかし全ての感覚情報や物理現象をVR空間で表現する事は大変困難なので、本システムでは視覚情報と力覚に代わる情報を

組み込むことにする。

## 2. バーチャルリアリティ空間での現実感の向上

VR 空間でもっとも重要な事は、観察者の能動的な疑似体験が可能なることである。これは現実感を高める主要な要素である。VR 空間で行った事象が現実空間と同じ反応として返ってくる事が理想的である。このことを技術的に考察すると、人間動作の検出、感覚情報の提示そしてそれらをVR空間で統合することの3点が必要となる。第1に人間動作の検出のためには、位置情報センサーあるいはモーションキャプチャなどを用いる。第2に感覚情報の提示のためには、大型ディスプレイやHMDを使用する。第3にVR空間でのこれらの要因を統合するためには、利用者の動作（入力）と感覚情報の提示（出力）、さらにこれらのVR空間での統合が重要になる。入力と出力の因果関係が正しく構成されないと、VR空間に現実感はいずれも生まれないであろう。

### 2.1 視点

現実世界では360度全方位に世界が広がっている。人間の視線は細かい範囲では眼球の動きで視界を移動するが、広い範囲では頭部の動きによって決定される。よって、VR空間でも使用者の頭部の動きを何らかの方法で入手すれば現実に近い視点の動きが期待できる。今回は磁気式の位置/方位センサーを頭部に装着することで実現する。さらに頭部をどんな方向へ動かしてもディスプレイが目前にあるようにするため、視界に余計なものを入れずに没入感の向上を図るためにHMDを利用する。

### 2.2 接触判定

現実世界では物体に触れば触覚により認知することができる。そのごく当然のことが、VR空間で実現することが非常に困難である。そこである特定の条件のもと接触判定を行い、触覚の代用が必要である。現段階で多く用いられる手法としては、ポリゴン同士が重なっているかを判断する方法がある。しかし、現実には物体をすり抜けることはありえないので、現実感の向上という点で新たな手法を検討する。

まず、物体を掴むということ以上に物体を押すという観点で接触判定の新しい方法を提案する。この手法では、手と他の対象物の位置関係が重要になる。つまり手と対象物のポリゴンが重なっていたら、手が対象物と接触しない位置まで移動させる。さらに、今回使用するデータグローブには力覚提示の機能が無い。そこで「手」が対象物と触れていると判断されたらまず音を鳴らし、その後に移動の処理を行う。

この手法を行うには、第1に“手がどの対象物を触っているかの判断”、第2に“どの方向に対象物を移動させるか”、第3に“掴む行為の表現方法”の課題がある。第1の対処として、扱う対象物が少ないならば全てに対してポリゴン同士の接触判定も可能である。しかし、多くの対象物の利用が見込まれるので新たな選別方法を考える。「手」と対象物の現在位置情報を格納し、特定条件を満たしたもののみ、接触判定を行う方法である。特定条件としては、対象物のポリゴン群を全て覆う球を考え、その半径を格納する。以上の情報から「手」と「対象物」の位置情報をもとに二つの距離を測定し、先ほどの半径との大小比較をして、その距離が半径より小さいならば、接触判定を行う。

第2の対処として、今回のVR空間での物理現象をどこまで再現するかによって大きく変化する。そこで、押された対象物の移動方向は手の移動方向ベクトルのみから決定して、「手」と対象物のポリゴンが重なっていないならばそこで移動も停止させる。

図1の(a)に示すように、重心が中心にある長方形の物体に矢印のような力を加える。現実世界では(b)のように、摩擦がおこり回転と平行移動が組み合わさった複雑な移動する。しかし、本システムでは重力の概念を取り入れていないので摩擦など複雑な物理現象を考慮に入れていない。よって(c)のように動作する。

第3の対処として、掴むという動作を考え、親指と他の指の位置関係から判断する方法を提案する。各指の第一関節部のポリゴンに対して、その位置情報を獲得する。次に親指と他の4本の指とで4本の直線情報を獲得する。この情報をもとに接触を判断するが、親指の

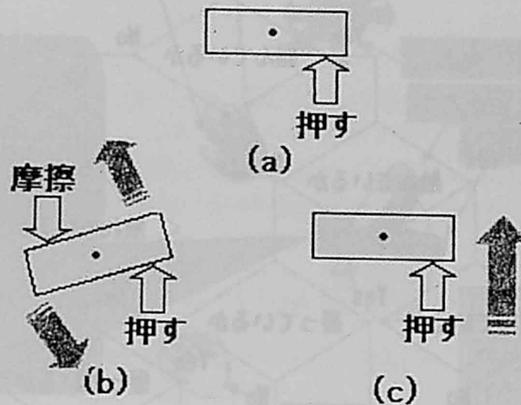


図1 物体の移動

位置が非常に重要となる。また、正確に接触しているとはいえない場合がある。そこで、軽く握った手の内側に対象物が入った状態を表現する(図2)。さらに指の曲げを数値化して、ある値以上曲がっているときにのみ、物体を掴む処理を組み込む。



図2 掴むの判定条件

図3のように、対象物を掴んだ状態で「手」が他の対象物に触れたとき、もし図2の掴むの条件を満たしていてもこのときは無視するようにした。しかし、同じ状態で対象物を押し移動することは可能である。

### 2.3 テクスチャ

現実世界に、おいてグラフィカルオブジェクト面は模様や質感を持っている。これを詳細な3次元幾何学形状情報として製作するならば多大な労力が必要とされる。しかし、ポリゴン面にテクスチャを貼り付けることで実際のものに近い質感を表現できる。さらに、面の詳細なモデリングに比べ、実行パフォーマンス負荷なしに複雑かつ効果的な効果を得ることもできる。同様に、多様な形状も各々作り直さなくともテクスチャの張替えでまったくの別物も表現可能となる。

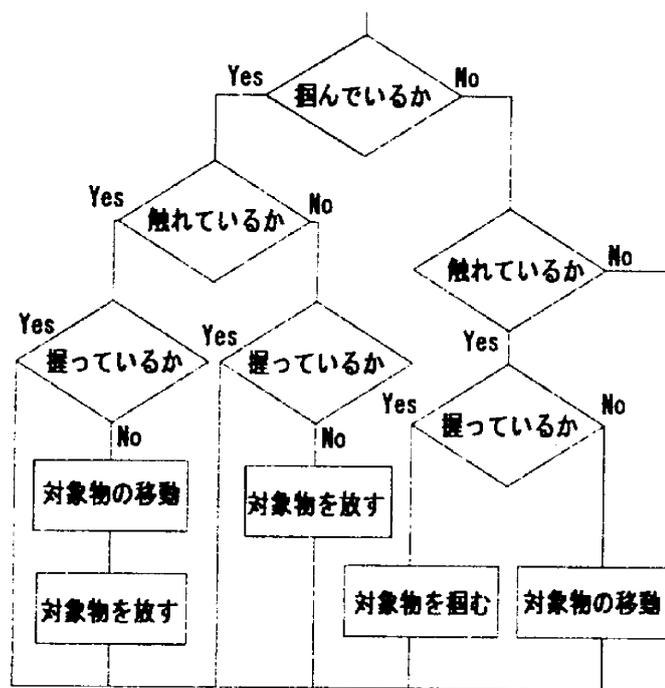


図3 掴むのプロセス

### 3. システム

#### 3.1 システムの構成

ユーザーには、位置センサーを取り付けたHMDを頭部に、同様のセンサーを取り付けたデータグローブを右手に装着し、プログラムを実行する(図4)。作成されたVR空間には、位置センサーにリンクされた「視点」と、もうひとつの位置センサーにリンクされた「手」が出現する。「手」は位置センサーによりVR空間を実際の手の動きから得た位置/方角データをもとに移動する。同様に「視点」も実際の頭部の動きに合わせて移動する。しかし、今回のコンセプトとして、省スペースでも実際に近い世界を体験させることである。つまり、座ったままの状態でもVR空間を自由に動かすことを想定している。よって、「視点」と「手」の移動には、上述の磁気センサーだけでは不十分となった。そこでマウスを使用する。マウスを用いて、「視点」・「手」の動きを制御する。実際には、空いている左手でマウスを操り、VR空間内で大きな移動を行うときに用いる。移動方向は磁気センサーから取得した状態をもとに前後左右と単純なものだけに限定する。この手法によって、本人は席から立つことなく無限遠のVR空間を移動する事を可能にする。

#### 3.2 データベース

実際に使用する家具類、装飾品などは、ポリゴン情報とテクスチャ情報のデータベースとして用意する。今回試作したシステムにはデータベースから必要とするインテリアを呼び出すようには作成されていない。しかし、POP-UP形式で呼び出せるように組み込む

#### 3.3 試用結果

VR空間に床と壁をロードして室内空間を表現し、そこで景観デザインを行う試作システムを作成した。このシステムでは、「手」と対象物の押す動作と掴む動作について重点的に確認した。



### 5.3. 室内デザインの操作性での視覚刺激と音刺激の効果

#### バーチャルリアリティ空間における 力覚代替機能としての視覚と聴覚刺激の利用

The utilization of visual and auditory stimulus as a substitution of  
inner force sensation in the space of virtual

高田保<sup>1)</sup>, 林部敬吉<sup>2)</sup>

Tamotsu TAKATA and Keikichi HAYASHIBE

1) 静岡大学大学院理工学研究科

2) 静岡大学情報学部

**Abstract:** The system using visual and auditory information which replaced the inner force sense in order to raise the operability of the VR space was devised. Auditory stimulation was presented when object and hand with data-base glove contacted each other in VR space. In comparison with the condition in which auditory stimulation did not exist, the result of the evaluation experiment showed that the operability of the user is improved.

**Keywords:** inner force sensation, space of virtual reality, data glove, auditory information

#### 1. 研究目的

バーチャルリアリティ（以下 VR）の技術を利用したシステムを開発するときに考慮しなければならない重要な点として、現実感の向上があげられる。現実の世界では様々な感覚情報を感じ取る事により現実感を可能としている。しかし、VR 空間においてそれら全てを再現する事は、困難である。VR 空間において、手などを用いることによって現実空間と同じような物体の操作（持つ、押すなど対象物を動かす行為）を実現しようとした時に困難となるものの一つとして力覚がある。もし現実空間と同様な力覚事態を再現しようとした場合、ハード的なシステムが反作用の力を作り出し、その力を現実の手にフィードバックしなくてはならない。つまり、それを実現するにはソフトではなくハード的側面からの工夫が必要となる。

そこで、本システムではソフト的側面から力覚の代わりとなる刺激を、視覚・聴覚から得られる情報により作り出し、より現実に近い感覚事態を作りあげる事を試みる。

それらを用いる事により改善される点は以下のである。

- (1) ハードウェアの設備を充実させようと考えた場合、システムの複雑化、コストの拡大など様々な問題が生じるが、今回の提案ではハードに依存することなくソフト面からの克服が可能となりそれらの問題が軽減される。
- (2) VR 空間内における、バーチャルな手と対象物の接触を視覚、聴覚を用いて判断する事によって、よりリアルに操作を行う事を可能とし、結果的に全体の操作性が向上する。

#### 2. これまでの研究と問題点

これまでの研究としてまずあげられるものに景観デザイン支援システムがある。この景観デザイン支援システムには 2 DCG を用いたものがあつたのだが、それを発展させたものとして VR 空間内におけるデザイン支援システムが作製された（相澤正規、2000）。この研究では、データグローブを用いて対象物を押ししたり、移動させたりする機能や、現実感を上げるために自由落下の概念を実現し、また、力覚の代替機能の予備的研究も行われている。そのシステムでの代替機能として、物を押している場合、物を持っている場合に分けて、単純に

音を鳴らすという聴覚的代替機能と、その動作に入った時、VR 上に生成された自分の手の色と対象物の色を変化させる機能、また、空中で物体を放した場合、自由落下という動きをもたらす事により手から離れたという情報を与える視覚的代替機能が用いられた。

この研究の問題点を以下に上げる。

- (1) 重力の概念の中で実現されているのは、自由落下のみであり、物体に重心が存在していなかったという点が上げられる。これにより物体が実際ではありえない状態で動きが静止するなど、誰かがもしくは何か他の物体が支えていないと起こり得ない状況が作り出され、現実度とさらには操作性を低下させる原因となった。
- (2) 代替機能である視覚、聴覚の表現方法が不自然なものであったことにより現実度が向上しないことが考えられる。つまり、それぞれの聴覚、視覚表現が非現実的なため、「VR の中ではこのように表現されるものだ」とユーザがこれを学習して動作する事によってはじめて代替機能として作用し、現実世界でのようにユーザに負荷をかけない円滑な動作適応が困難であった。
- (3) 物を物で押すという行為を試みた場合、その行為が完全には実現されておらず、対象物同士がすり抜けてしまう点に問題が残った。これは、視覚的に対象物の移動を正確に認識する事をさまたげる結果になった。

### 3. 研究内容

#### 3.1 重心の概念の適用

これまでの研究の中では、第一段階として重力を組み込むことによって自由落下を実現したが、さらに、重心の概念を組み入れることによって物体が傾いたまま静止してしまうなどの不自然さを取り除き、対象物の不自然な傾きを水平に戻して、操作性の向上をはかる。これによって、不自然な体勢で静止することと、その不自然な体勢を水平な自然な体勢にその都度直す作業の手間を省くことができる。

#### 3.2 音刺激を利用した力覚代替機能の評価

既存のシステムの中では、全ての物体に対して押す、持つの行為が働いた場合に生じる音刺激は、全て対象物において同じではなく、物体ごとに固有の音が生じる。もし、すべての物体に何かの操作を加えたときの音が同一であれば、聴覚から得られる力覚情報としてもリアリティに欠ける。そこで、どのような操作がどのような物体に作用したか、その条件ごとにさまざまな音刺激を用意する事により、VR の中でバーチャルな手による操作印象がどのように変化させる事が可能かを検討する。

現実世界では、物体に触れた時に生じる音から、その物体がある程度どのくらいの重量があるかを判別する事ができる事に注目し、音から受ける重さのイメージについて調べる。

また、物をさわった時の握りの強さを音で判別する事が可能かについても、音刺激から受ける握りの強さのイメージを評価することを通してしらべる。

#### 3.3 視覚刺激を利用した力覚代替機能の評価

既存のシステムの中では視覚刺激を用いた力覚代替機能として対象物、もしくはばバーチャルな手に図1のような変化を与えた。しかし、このような変化は明らかに現実世界ではありえないものであり、違和感を作り出すものとなっている。

実際に現実世界ではものを持つことによって物とそれを持った手の色が変わるという事はない。しかし、視覚の特性上、フォーカスされている対象物にはピントが合わされ他の物体とは違う見え方をしている事は確かである。そこで対象物と手に対する不自然でない視覚的变化というものが存在するのではないかと考えこれを検証する。

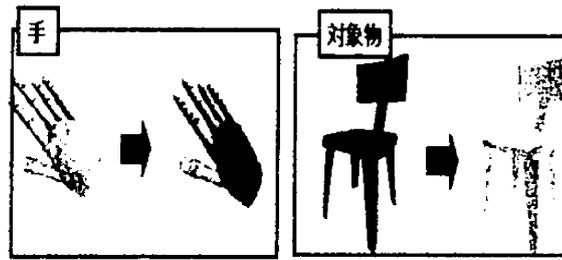


図1 VR空間内のものと手の接触時の視覚変化

### 3.4 対象物同士の交錯

開発中のシステムでは、物体を押す場合、持つ場合のどちらにおいても、自分が直接動かしている対象物が他の対象物と交錯した場合（対象物同士の交錯）、対象物同士が力を作用しあう事がない。そこで、物体同士の間でも力の相互作用が生まれるようにシステムの改善を目指す。これを実装できれば、視覚的によりリアルに力覚情報を与える事を可能にし、システム使用上での操作性の向上と不自然感の軽減が図れると考えられる。

## 4、システム概要

今回の研究におけるシステムにおいては、次のようなハードウェア、ソフトウェアが必要である。

### 4.1 液晶シャッター眼鏡

ユーザには液晶シャッター眼鏡と呼ばれる1秒間に60回右眼・左眼のレンズが交互の開閉する眼鏡を装着させ、それを通して40インチのディスプレイを観察させる。同時にディスプレイには液晶シャッター眼鏡と同期を取らせ、1秒間に60回右眼・左眼用の画像を交互に表示させる。これにより右眼・左眼それぞれに独立した画像を見せる事を可能とし両眼視差を作り出す。これにより3D空間であるVR空間を生成できる。

### 4.2 データグローブ

右手にはデータグローブと呼ばれる手袋状の装置を装着してもらう。このデータグローブには親指に1個、それ以外の指にはそれぞれ2個ずつ関節がある。それらは手の関節の動きを感知し、曲がり具合を数値化しシステムに返す事を可能とする。これにより現実空間の手とVR空間内でバーチャルな手が同期を取っている。

### 4.3 位置センサー

この右手グローブには位置センサー（ファストラック）が付属されている。この装置は別に用意された磁気発生装置との交信により現在の右手の位置を3次元数値化しシステムに返す事を可能とする。これによりバーチャルな手と現実の手との動きに対して同期を取らせばバーチャルな手を操作することを可能とする。

### 4.4 その他の制御システム

視点の位置、もしくは視差の量の変化など、基本的なシステムの操作はキーボードマウスを用いて行う事ができる。

### 4.5 システム制御

これらのシステムをC言語ライブラリ集であるworld-tool-kitを使用する事によりPC内でプログラミングを実行する。これにより現実の手を動かし、VR空間内のバーチャルな手を誘導し対象となる物体を移動させる事などを可能とする。

これらのシステムの概要を図2に示す。また実際にシステムを使用している場景を図3に示す。

### 3.5.2. 初心者のプログラミング環境構築とシステムの実装

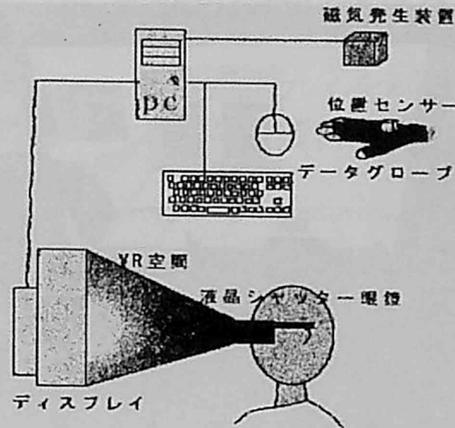


図2 システム構成

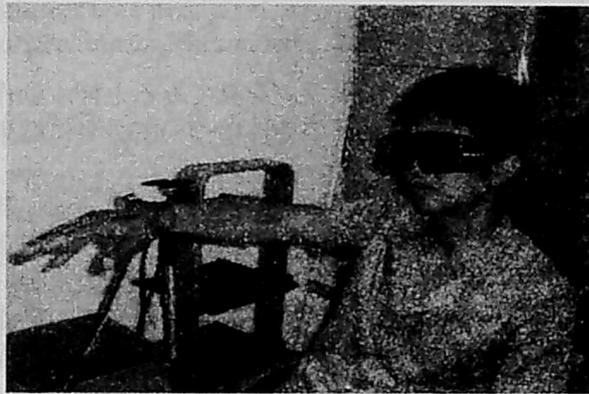


図3 実験システム

## 5. 試用実験

今回、力覚代替機能としての聴覚刺激について評価実験を行った（実験に使用した画像を図4に示す）。

方法は、VR空間内で3つの対象物（赤・青・緑の3つの椅子。これ以外の対象物は移動させる事が出来ないように設定）をそれぞれ教示した目標の位置に移動させるという操作を行わせる。VR空間内で手と対象物とが接触した時に聴覚刺激を提示し、その代替機能の程度についての評価を求めた。

実験条件は、効果音なしの条件と効果音ありの条件で、効果音ありの条件はさらに6種類の効果音（対象を持つという動作時の音刺激を3種、対象を押すという動作時の音刺激を3種、別々に用意）を設定した。試行回数は、“持つ動作”“と”押す動作”別にそれぞれ4回とし、力覚の代替程度を評価させた。評価項目は“音刺激の自然度”“音刺激の重量感”

“VR空間内の操作性”の3つであり、それぞれについて5段階評価させた。効果音なしの条件については操作性のみを質問項目とした。それぞれの効果音は、操作上違和感を感じられるほどの日常的な効果音のイメージから逸脱した効果音ではない。



図4 実験状況

## 6. 実験結果

図5に今回の実験の結果を示す。このグラフを見てみると押す動作と持つ動作それぞれに顕著な傾向がでていいる。そこで、押す動作の条件についてさらに結果を整理したものが図6である。

図5においては、動作音A,B,C条件のそれぞれを比較してある。押す動作音A条件（物に手が接触した時のパタッという接触音）、押す動作音B条件（引き戸を引いたときのゴロゴロという音）、押す動作音C条件（ドアを閉めたときのカチッという音）の中で、特に押す動作時に採録した自然度が高い音刺激（A条件）は、重量感、操作性ともに高い点を与えられた。このことから、聴覚刺激から得られる音情報と、重量感・操作性の間には関係があることが確認できる。

また、効果音がない場合と比較すると操作性において明らかな相違がみられる。このことから、聴覚刺激の力覚代替機能としての効果は明らかであり、さらに効果的な効果音を利用すれば、重量感・操作性の向上がはかれると思われる。

（高田保 林部 敬吉 バーチャル・リアリティ空間における力覚代替機能としての視覚と聴覚刺激の役割、バーチャル・リアリティ学会第6回大会論文集、103-106, 2001. 所収）

### 3.5.2. 初心者のプログラミング能力獲得支援システムの作製

#### バーチャル・リアリティを利用した 初心者のプログラミング能力獲得支援システムの作製

Support tool for primary programming education using VR technique

籠橋剛<sup>1)</sup>, 林部敬吉<sup>2)</sup>

Takeshi KAGOHASHI and Keikichi HAYASHIBE

1) 静岡大学大学院情報学研究科

2) 静岡大学情報学部

**Abstract:** The support tool of primary programming education is developed using the VR space. In this support tool, putting the objects that express individual commands on the programming field in the VR space makes the program. The execution result of the program is shown in the operation in which the object such as robot installed in the VrRspace advances or recedes. In this research, the comprehensible programming environment to the beginner was produced.

**Key Words:** *primary programming education, virtual reality, support tool of primary programming*

#### 1.はじめに

プログラミングという作業は、コンピュータに向かって文字や数字を打ち込んでいくというものである。しかし、初等プログラミング教育を効果的に行うことを考えるとき、単なる文字や数字の集まりであるプログラム言語を通してプログラムのアルゴリズムをより良く理解させるのは困難が伴うことが多い。また、プログラミング学習の初期段階において協同作業方式を導入してプログラミング教育を進めることを考えるとき、コンピュータのモニタ上でのプログラミングでは、画面の物理的広さが制限されているため、共同作業を効果的に行うことが難しい。

本研究では、初等プログラミング教育支援を目的としたツールを開発することを目標とする。すなわち、初心者にわかりやすい表現を使用したプログラム言語を作製し、共同学習を行えるプログラミング環境を作製することである。これにはまず、プログラミング環境をコンピュータのモニタ上から現実の世界へ取り出して新たな環境を構築することを考える。このことによるメリットには以下の4つをあげることができる。(1) 複数の人間で話し合いながら共同作業でプログラミングを行うことが可能となること、(2) いろいろな物や形を利用してプログラム列を表現することが可能であり、その表現の可能性はかなり大きく、プログラミングの学習者にとってわかりやすい、理解を一層促進するような表現を作成することを可能にさせること、(3) 物の表現に工夫を加えることによってプログラムを学習する者にとって作業を楽しく行わせることも可能となること、(4) プログラムを表現するための物体に回転などの操作を加えることによって、プログラムを考える手がかりを与えることが可能となること、である。

加えて、さらに表現の可能性を広げるためにバーチャル・リアリティの技術も導入し構築する。VRを利用することで、プログラミング環境に使用するための機械等を特別に用意することなく構築することが可能である。さらに、物理的な制約が解除されるため、より自由にいろいろなものや形を利用してプログラミングを行うことが可能となる。

## 2. 研究方法

### 2.1 プログラミング方式

上記で述べたようなプログラミング環境の 1 つとして、個々の命令を表現したオブジェクトを並べることでプログラムを作成するというものを採用した。プログラムの実行結果は、学習者にとって結果が理解しやすいように、VR 空間に設置した物体（例えばロボット）が前進したり後退したりという動作であらわすものとする。この方式は、実行結果が物体の動作として直接表現されるため、楽しみながらプログラムを考えることが可能となる。さらに、個々の命令を表現したオブジェクトを使用してプログラミングを行うため、複数でプログラムを作成するときでも、話し合いながらプログラミングをしていくことが容易になる。

### 2.2 実現する命令群

実際に実現する命令群としては、VR 空間に設置した物体を動作させるということから、基本的な命令では前進、後退、上回転、下回転、右回転、左回転を実現する。これらの命令にはある程度変数の概念を取り入れるため、前進・後退は進む距離、回転の命令は回転する角度をこちら側で用意した数種類の中からユーザのほうで選び決めてもらう。また、プログラム言語として重要な、繰り返し命令と条件分岐命令も実現する。繰り返し命令は基本命令と同じく、変数の概念を取り入れるため繰り返しの回数がある程度自由にユーザのほうで決定してもらう。条件分岐命令のほうは、ユーザ側が自由に分岐方法を決定するのではなく、いくつかの条件をこちら側で用意しておき、それをユーザのほうで選んで使用してもらう。

個々の命令を表現するオブジェクトは、VR 空間に構築する利点を生かした形状を考案し採用する。現状では、前進・後退の命令は円錐を利用し、その指し示す方向を変えることで命令を表現した。

### 2.3 VR 空間

バーチャル・リアリティ空間はリアルタイム 3D グラフィックスアプリケーションである World Tool Kit (WTK、SENSE8 製) を使用し構築する。

VR 空間内には、空間的には同一であるが、

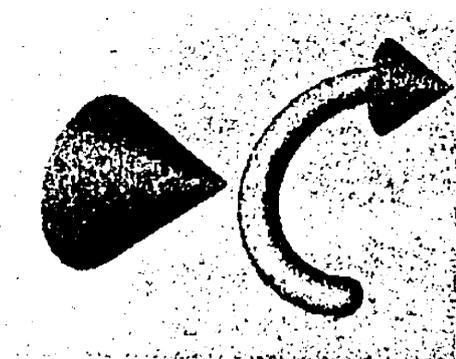


図1 命令例（前進、繰り返し）

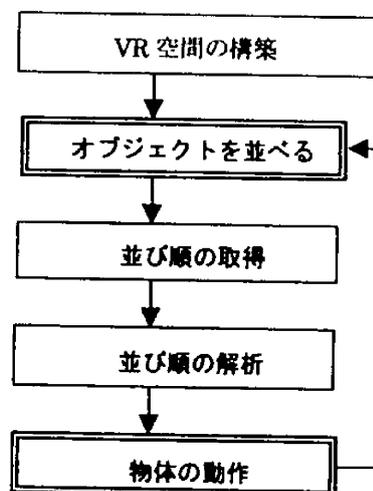


図2 システムの流れ

2 つのフィールドを設定する。1 つはプログラミング・フィールドとし、オブジェクトを並べプログラムを作成してもらうフィールドである。もう 1 つはアクション・フィールドとし、プログラムの実行結果を表示する場所、すなわち物体が

プログラム通りの動作をするフィールドである。これは、それぞれ 2 つのフィールドを設定することにより、プログラムの作成から実行までの流れを見ために区別することが可能になる。さらに、この 2 つのフィールドは空間的な奥のほうにプログラミング・フィールドが存在し、空間的に前のほうにアクション・フィールドが存在する。これにより、物体が動いているときでもカードの並びを確認できるようになる、またはその逆、課題を見ながらカードを並べることが可能になる

### 3.システム

現在のシステムは試作段階であり、視点の移動やオブジェクトを並べる際の移動は全てマウスで行っている。

システムの大まかな流れは図 2 に示す。まずシステムが起動すると、バーチャル・リアリティ空間を構築しオブジェクトや物体のロードや視点の配置などを行う。次にユーザにオブジェクトを並べてもらい、その並び順を取得する。取得された並び順を解析し、物体の動作に反映させる。ユーザが操作する部分は図 2 における 2 重枠で囲まれた部分である。

### 4.まとめ

現在のシステムは試作段階であることから、支援システムとしての効果を試すため、プログラムの課題を与え実際にプログラミングしてもらおうという実験を行っていない。しかし、期待される成果としては、まずカードによる表現の範囲が拡大されているため、視覚を通してのプログラミング命令の理解を一層向上できる点が挙げられる。次に、物体の動きをあらわしたカードを作成することによってプログラム終了後の動作を体験することができるため、プログラミングをより理解しやすくなる。さらに、プログラミングというものを理解させることに適した課題を自由に選択できるので、プログラム学習を促進させることが可能である。

今後、実装し実験をする上で重要となる問題が存在する。まず実装上の問題では、現在は視点の移動やカードの移動は全てマウスで行っている。より 3D 空間への没入感を得るためには、データグローブを利用して視点などの移動を行うことが望ましい。次に、実験をする上での問題は、評価実験の方法とその判定方法、そしてプログラミングというものの理解度をどのように測るかという問題である。特に、課題の設定は重要な位置を占めており、どのような課題を設定するかという事がプログラミングというものの理解度を左右するので、慎重に選定する必要がある。

(籠橋 剛 林部敬吉 バーチャル・リアリティを利用した初心者のプログラミング能力の  
獲得支援システムの作製 日本バーチャル・リアリティ学会第 6 回大会論文集  
25-26. 2001. 所収)