

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	仮想無重力内部空間における空間認知に関する研究
Title(English)	
著者(和文)	青木宏文
Author(English)	
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第5251号, 授与年月日:2002年9月30日, 学位の種別:課程博士, 審査員:
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第5251号, Conferred date:2002/9/30, Degree Type:Course doctor, Examiner:
学位種別(和文)	博士論文
Type(English)	Doctoral Thesis

G2002

A

仮想無重力内部空間における空間認知に関する研究

東京工業大学大学院総合理工学研究科
人間環境システム専攻

青木 宏文

目次

	頁
第1章 序論	1
1.1 研究の背景	2
1.2 既往の研究	5
1.3 研究の目的	9
1.4 論文の構成	10
第2章 一結節点に連結された複数室の位置関係の把握	13
2.1 本章の目的	14
2.2 実験の概要	15
2.2.1 実験方法	
2.2.2 実験装置	
2.2.3 実験設定	
2.2.4 実験手順	
2.3 結果および考察	26
2.3.1 視点の動きの自由度と空間認知	
2.3.2 VRシミュレーションの有効性の検討	
2.3.3 視覚情報と空間認知の関係	
2.3.4 空間認知の方略と室の配置の把握	
2.3.5 空間認知の方略と移動行動	
2.4 まとめ	35
第3章 複数結節点を持つ連結形状の空間認知に関わる諸変数	37
3.1 本章の目的	38
3.2 実験の概要	39
3.2.1 実験方法	
3.2.2 実験装置	
3.2.3 空間の連結形状の選定	
3.2.4 実験手順	
3.3 結果および考察	49
3.4 まとめ	56

	頁
第4章 複数の結節点からなる空間の連結形状と空間認知の関係	59
4.1 本章の目的	60
4.2 実験の概要	61
4.2.1 実験方法および手順	
4.2.2 空間の連結形状の選定	
4.3 実験結果	64
4.3.1 空間の連結形状別の結果	
4.3.2 被験者別の結果	
4.3.3 模型の組み立て方と形状の誤りの関係	
4.4 空間を誤認する要因に関する考察	70
4.4.1 誤りの要因の分類	
4.4.2 空間の連結形状別の傾向	
4.4.3 被験者別の傾向	
4.4.4 上下・左右の回転方向と身体座標系の誤認の関係	
4.5 VRシミュレーションの有効性の再検討	84
4.6 まとめ	86
第5章 内装デザインが空間認知に及ぼす影響	89
5.1 本章の目的	90
5.2 実験の概要	91
5.2.1 実験設定	
5.2.2 空間の連結形状の選定	
5.2.3 実験方法および手順	
5.3 結果および考察	102
5.3.1 設定別の実験課題の成績差	
5.3.2 空間の連結形状および内装デザインと空間認知の関係	
5.3.3 被験者の方向指示時の姿勢と空間認知	
5.3.4 空間認知の容易さと被験者の方略および行動の関係	
5.4 まとめ	112
第6章 結論	115
6.1 結論	116
6.2 今後の課題	118
発表論文	119
引用・参考文献	121

第1章

序論

1.1 研究の背景

1.2 既往の研究

1.3 研究の目的

1.4 論文の構成

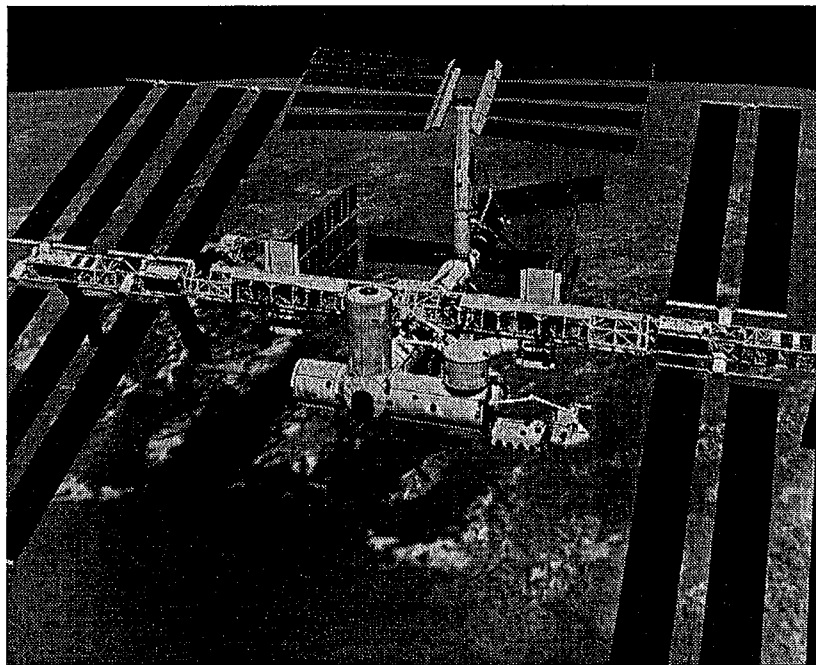
1.1 研究の背景

国際宇宙ステーション(ISS; the Internal Space Station)は、アメリカ、ロシア、ヨーロッパそして日本など世界16カ国の協力の下、2006年の完成を目指して建設が進められている(図1-1)。1961年に打ち上げられたヴォストーク1号の居住空間はわずか 1.6m^3 に過ぎなかったが、12年後のスカイラブの内部空間容積は 330m^3 にまで拡大し¹⁻¹⁾、ISSの完成時には与圧されたモジュール(宇宙ステーションを構成する室)の総内部体積は 1303m^3 に及ぶ¹⁻²⁾。このような居住空間の拡大に伴い、宇宙飛行士たちはその内部を自由に動くことが出来るようになってきたが、その一方で宇宙酔いにかかったり、重力によって上下方向を知覚できない空間を移動中に方向感覚を喪失したりする問題が出てきている。

空間認知は、自身を取り囲む空間構成の把握、およびそこでの自身の位置や方向の把握からなる。空間認知の情報として、主に視覚情報、三半規管や耳石などの前庭器官からの情報、そして皮膚感覚および筋肉や腱の伸縮時に生ずる深部感覚からの体性感覚情報が使用される¹⁻³⁾。地上では重力が働いているため、例えば暗闇の中で視覚情報が得られなくとも、上下方向がわからなくなることはない。しかし無重力環境下^{注1-1)}の宇宙空間では、地上において重力を感受する耳石器からの情報や、足と地面との接触などで得られる体性感覚情報がほとんど得られないため、それらを頼りに自己の姿勢判断を行うことが困難であり、空間認知の手がかりは主として視覚情報に依存することになる¹⁻⁴⁾。他の感覚器官による方向の定位も考えられるが、宇宙ステーション内は、精密機器や実験用の動植物などがある関係で、超音波などの使用は非常に困難である。また、宇宙ステーションの内部は50~60dB SPLほど、ISSを構成するロシアのサービスモジュールでは70~75dBの騒音といわれ、音情報を用いて方向を定位するには、マスキング効果ゆえにそれ以上の大きさの音を出す必要があり、実際上不可能である。

注1-1) 実際には宇宙ステーション内は 10^{-6}G から 10^{-4}G ほどの重力がかかっており、厳密には「微小重力」という用語が正しいが、人間の身体や行動にとっては殆ど影響はない。また、本研究のVRシミュレーションではそのような微小重力は再現していないため、本研究ではより一般的に用いられている「無重力」という用語を用いる。

これまでのスペースラブやISSのモジュールの内部空間設計では、スカイラブでの経験などから床面と天井の色を区別したり、向かい合う実験装置の上下を統一したりするなど様々な試みがなされてきた(図1-2)¹⁻⁴⁾。しかし、宇宙飛行士が方向感覚を喪失する体験についての報告は多く^{1-5)~1-9)}、その割合はミッションによって異なるが、おおよそ50%といわれる¹⁻¹⁰⁾。また、ISSや、2001年3月まで運用されていたロシアの宇宙ステーション・Mir(ミール)(図1-3)は、円筒形のモジュールを水平方向だけでなく垂直方向にも組み合わせて作られているため、個々のモジュールの上下方向だけでなく、それらが組み合わさった場合の各モジュールの上下方向を統一的に設定することが困難である。Mirに搭乗した宇宙飛行士は、自身の姿勢や位置、そして現在いる室と他の室の位置関係を3次的にイメージすることが困難であり、平常時の活動において目的の室の位置を間違えるだけでなく、火災などの緊急時には、速やかな対応や避難の妨げになる恐れがあるという、潜在的な危険性を報告している¹⁻¹¹⁾。故に、2006年の国際宇宙ステーションの完成を間近に控えた今、単に一室内での上下方向の定位だけでなく、一室に連結された複数の室の位置関係をいかに把握するか、また、複数の連結された室同士との三次元的な位置関係および内部での自身の身体姿勢を把握する際に生じやすい誤りやその対策などを検討することが必要である。



©NASDA

図1-1 国際宇宙ステーションの完成予想図

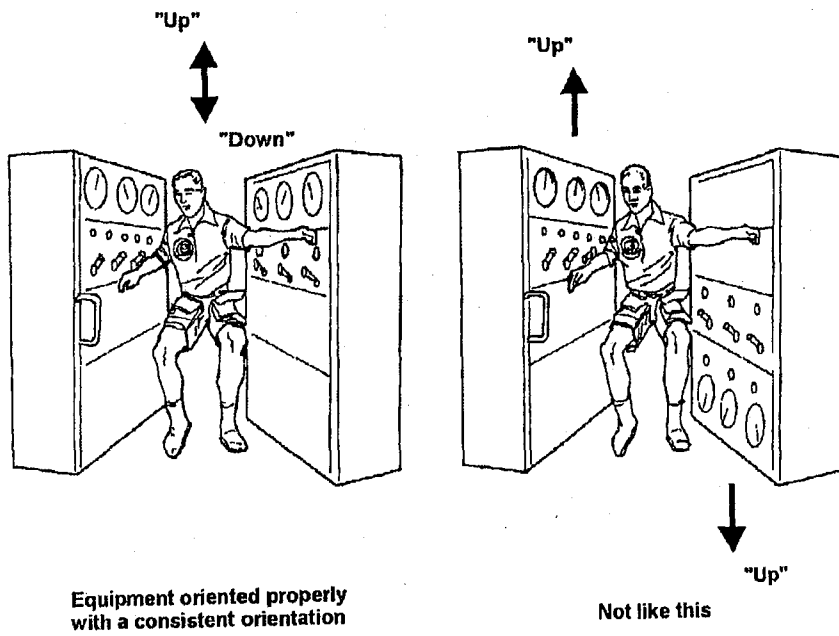


図 1-2 同一モジュール内の向かい合うワークステーションの機器の配置の指針¹⁻⁴⁾

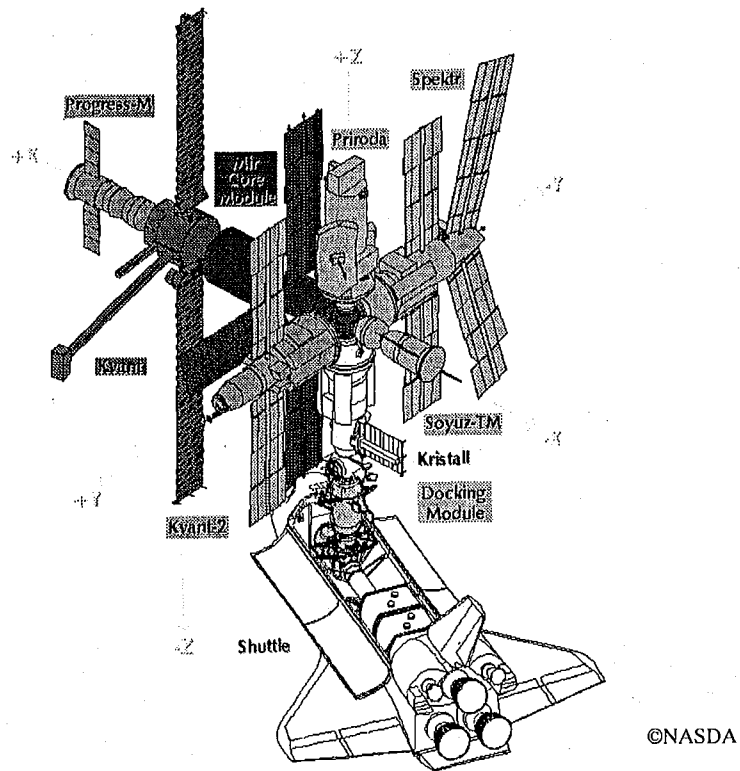


図 1-3 ロシアの宇宙ステーション・Mirの各室の配置

1.2 既往の研究

無重力環境下の閉鎖内部空間における空間認知と周囲の視環境の関係を扱った研究は、実際の宇宙空間や航空機の弾道飛行による無重力環境下や、地上におけるコンピュータグラフィックスや縮尺模型を用いたシミュレーションを用いて行われてきた。

宇宙空間および航空機の弾道飛行による無重力環境下における研究

Youngら¹⁻¹²⁾は、地上および宇宙での開眼・閉眼時の可動台上での姿勢制御の実験から、宇宙空間では自己の姿勢を制御するためにより視覚情報に頼るようになることを明らかにした。

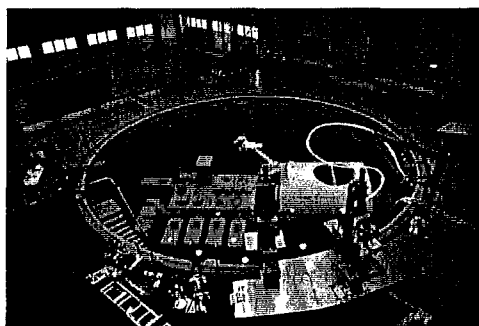
また、Tafforin¹⁻¹³⁾は、宇宙船における宇宙飛行士のビデオ映像から身体姿勢を動物行動学的に観察・分析し、宇宙飛行士が宇宙船内で設定された視覚的な上下に沿う姿勢をとる傾向を示した。

Lackner¹⁻¹⁴⁾は、航空機の弾道飛行による微小重力環境下における実験から、静止した自身の姿勢の認識が、機内の建築的特徴、視線の方向および身体の向きによると報告している。しかし、微小重力の持続時間は30秒程度と短いため、宇宙ステーションのように広い空間を移動する時の空間認知に関する研究を行うことは困難である。

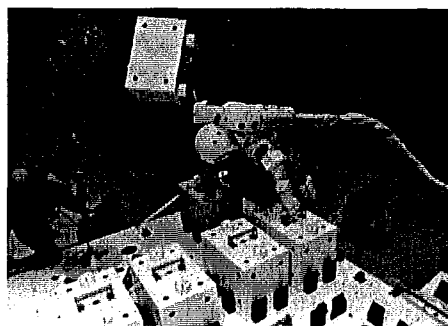
これらの研究により、無重力環境下で自身の姿勢を把握し、制御するためには視覚情報がより重要になることが示された。しかし、これらの研究はいずれも移動を伴わない静止状態または単一の室内での空間認知と視覚情報の関係を扱ったものである。

水中浮力を使用した方法について

宇宙での船外活動のシミュレーションとして、巨大な水槽に宇宙ステーションのモジュールを沈め、宇宙服を模擬した潜水服を着用して訓練を行うことがある。この方法を用いることで、自重は浮力と釣り合って身体は浮いた状態になるが、耳石器官への重力方向の入力は無くならない。また、現在使用されている水槽は直径が16m、深さ10.5mと、宇宙ステーションの1室を入れられる程度の大きさであり、複数の室を移動するシミュレーションはできず、それができる大きさの水槽を建設するには金銭的にも難しい。さらに、移動時に水の抵抗があることや、宇宙飛行士に空気を送るケーブルのために室内での訓練を行うことは困難であることなどの問題がある (図1-4)。



©NASDA



©NASDA

図1-4 水中浮力を利用した擬似無重力環境での船外活動のシミュレーション

縮尺模型を用いたシミュレーション

これまでの宇宙空間における経験談として、狭いトンネルから広い実験室への移動による空間の変化が方向感覚の喪失や宇宙酔いを引き起こすと言われているが^{注1-2)}、複数の室を移動する際の空間認知と視覚情報を扱った実証的な研究は見られない。わずかに、NASA・エイムズ研究所の建築家Cohen¹⁻¹⁵⁾が、複数室からなる宇宙ステーションの連結形状と各室内の上下方向の向き（レファレンス；参照系）について、縮尺模型と人形を用いた検討例を報告しているのみである（図1-5）。

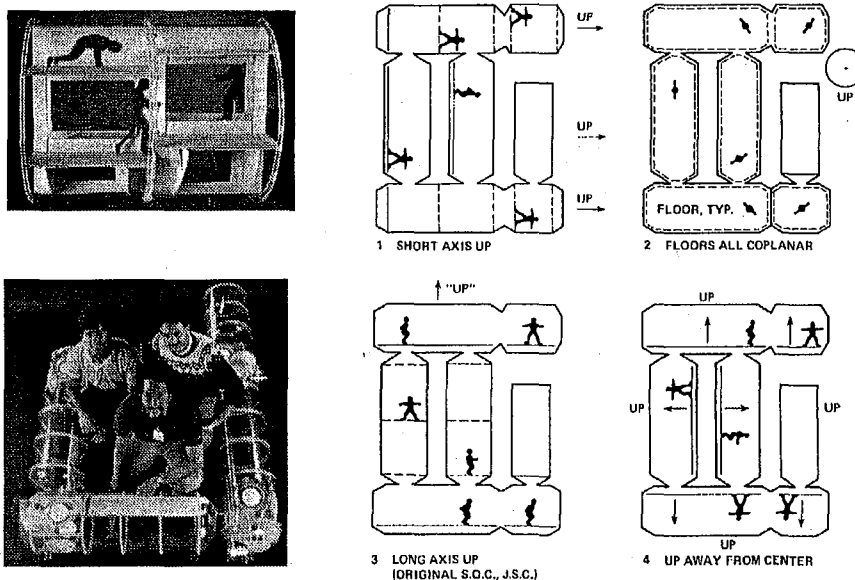


図1-5 縮尺模型と人形を用いた宇宙ステーションの連結形状とレファレンスの検討例¹⁻¹⁵⁾

注1-2) ある宇宙飛行士の報告では、直径1mの狭いトンネルから内径2.5m程度の実験室への移動の際、実験室内の上下方向と自身の上下方向にずれができると、空間識を喪失するとともに非常に気分が悪くなったとある¹⁻¹⁶⁾。

VRシミュレーションを使用した研究

VRシミュレーションを用いて、宇宙における空間認知について扱った既往研究は殆ど見られない。しかし、NASA・ジョンソン宇宙センターでは、VRを用いて地上とは異なる視覚と前庭器官への刺激（ただし重力方向軸まわりの1軸の回転だけの刺激）の組み合わせを与えることで宇宙酔い予防の訓練を行うための装置（DOME-PAT）を開発し、この装置を用いた飛行前訓練は宇宙における空間認知にも役立つことを示唆している¹⁻¹⁷⁾（図1-6）。

また、無重力環境下での空間認知の研究を長年に渡り行っているLacknerら¹⁻¹⁸⁾は、VRシミュレーションの最大の利点として、重力により拘束されないあらゆる方向に移動可能な視点からの見えが再現できることを挙げ、VR技術のこの方面での有用性について述べている。

このように、無重力環境下での空間認知に関する研究に対するVRシミュレーションの可能性は示されているが、系統的な研究はこれまでなされていない。

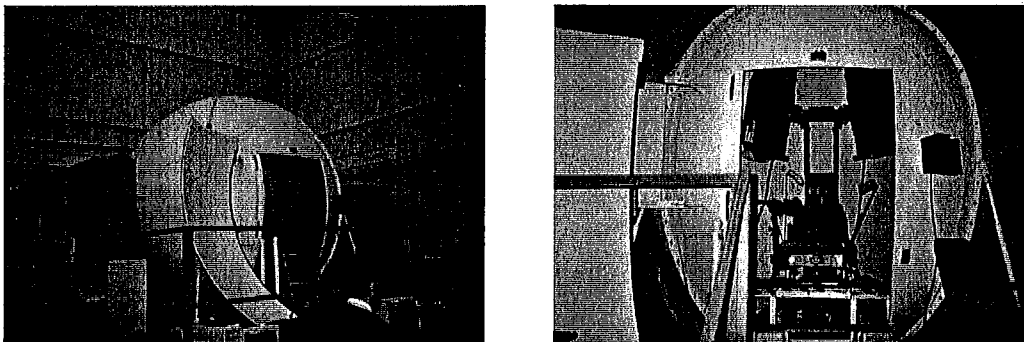


図1-6 NASA・ジョンソン宇宙センターのVRシミュレーション装置(DOME-PAT)

地上における空間認知と構築環境に関する研究

本研究の扱う無重力環境とは状況が異なるが、空間のわかりやすさに影響する空間的な設えの要因を考える上で参考になる、地上の都市・建築空間を対象とした研究は数多く蓄積されている¹⁻¹⁹⁾。

本研究に直接関わる研究として、建物の内部空間の平面形状の複雑さに関する主観的評価と、迷いの経験を扱ったWeisman¹⁻²⁰⁾による研究や、O' Neill¹⁻²¹⁾による、平面形状（分岐数など）の複雑さを示す指標と被験者の認知地図および経路探索行動との関係に

ついて論じた研究などがある。これらは2次元平面上での空間の分かりやすさについてであるが、本研究にも示唆を与えるものである。

大野ら¹⁻²²⁾は、複数階にわたる上下方向の移動を伴う経路探索について研究を行い、上下移動が方向感を失わせること、また一旦失った方向感が周辺環境の情報によって再認識されることを論じている。この研究は上下移動を伴う3次元空間の経路探索を扱ってはいるが、人の行動の基準面^{注1-3)}である床面は常に平行(水平)である。これに対して、無重力環境下でモジュールが垂直に接続され、それまで移動していた床面から、それに直交する床面へと行動の基準面が移った場合には、それに伴って身体軸(自身の身体の上下方向)が回転するなどの影響を受けるものと考えられ、地上での研究とは異なる。

注1-3) 宇宙飛行士は認知的な「下方」を表現するときに、“the downs”という言葉をしばしば用いる。Oman¹⁻²³⁾は、そのような主観的な垂直方向(SV; Subjective Vertical)は、視覚的な垂直方向や自身の身体軸方向(idiotropic vector)などから決定されるとしている。また、主観的な垂直方向に対する下面を主観的床面(subjective floor)と呼んでおり、ここでの基準面と同様の考え方である。

1.3 研究の目的

無重力環境における空間認知の手がかりとして、宇宙飛行士はその多くを視覚情報に依存していることが、既往の研究や宇宙飛行士からの報告で述べられている。自己を取り巻く空間構成やそこでの自身の姿勢を正しく把握するためには、空間内の方向性を示す手がかりが必要であり、現在の宇宙ステーションの内部空間設計では、上下方向について視覚的な特徴付けをしている。しかし、近年の宇宙ステーションは、複数の室が水平のみならず垂直方向にも連結された形状であり、個々の室内の視覚的な上下方向と、全体の上下方向を統一することは難しい。そのために、宇宙飛行士は、自身の位置や姿勢、および各室の空間配置を3次元的に把握することが非常に困難であり、緊急時には特に問題になることが指摘されている。したがって、無重力環境下における複数の室が連結された内部空間の視覚情報と空間認知との関係について研究する必要がある。

しかし、実際に宇宙での無重力環境において、それら空間内部の配色や照明、空間の構成といった各要素を変更することでそれらが空間認知に与える影響を調べることは、空間的にも金銭的にも非常に困難であり、系統的な研究はなされていない。また、航空機の弾道飛行を用いた無重力環境下における実験では、無重力状態の持続時間が限られてしまう問題がある。

本研究は、宇宙ステーションを想定した仮想の無重力内部空間をコンピュータグラフィックス (CG) によるバーチャルリアリティ (VR) 技術を用いて構築する。視覚による擬似的な無重力環境下において、複数の室から構成される空間の配置およびその内部での自身の位置や姿勢の把握と、空間内部の視覚情報との関係を、シミュレーション実験から明らかにし、今後の宇宙ステーションを設計する際の基礎的な指針を示すことを目的とする。

1.4 論文の構成

本論文は、以下の6章より構成されている。

第1章「序論」では、本研究の背景および関連する既往の研究を整理、概観した上で、本研究の目的および構成を述べる。

第2章「一結節点に連結された複数室の位置関係の把握」では、無重力内部空間を視覚的に擬似体験できるVRシミュレーション装置を構築する。地上および仮想無重力環境下での行動の違いを比較し、VRシミュレーションの有効性を検討する。また、一つの結節点に連結された複数の室からなる仮想無重力内部空間において、結節点の視覚情報による方向性の有無による空間内での自身の姿勢や空間配置の把握しやすさの違いを明らかにする。

第3章「複数結節点を持つ連結形状の空間認知に関わる諸変数」では、複数の結節点を持つ空間内を移動する際に、空間の連結形状や自身の姿勢の把握の難易は単に経路の幾何学的な複雑さだけでなく、地上では起こりえない上下方向への回転移動も影響すると考え、それら空間認知の難易に関わる空間の連結形状の各変数を仮説的に設定し、その妥当性を確認する。

第4章「複数結節点からなる空間の連結形状と空間認知の関係」では、第3章で設定した変数に従い分類、選択したより複雑な連結形状を用いて実験を行い、空間の連結形状やその内部での自身の姿勢を把握する際に生じる誤りを分析し、仮想無重力内部空間における空間認知の誤りの要因を明らかにする。

第5章「内装デザインが空間認知に及ぼす影響」では、第4章で明らかになった空間認知の誤りの要因に対して有効であると考えられる、空間内の配色等の視覚的な方向性の手がかりを系統的に変化させた設定で実験を行い、それらの有効性を検討する。

第6章「結論」では、本研究を総括し、今後の展望および課題を述べる。

参考文献

- 1-1) Feoktistov, K.P. and Briggs, G.A.: Access to Space, Space Biology and Medicine: Vol. 1. Space and Its Exploration, AIAA, pp.275-323, 1993
- 1-2) NASDA: Completed International Space Station and its primary elements, [On-Line] <http://jem.tksc.nasda.go.jp/iss/doc04.html>, 2001.7
- 1-3) 黒田勲監修：航空心理学入門・飛行とところ，鳳文書林出版販売，1989.4
- 1-4) NASA: NASA-STD-3000: Man-Systems Integration Standards, Volume I, Rev. B, NASA, pp.8-7 - 8-9, 1995.7
- 1-5) Kerwin, J.P.: Skylab 2 Crew Observations and Summary, NASA SP-377: Biomedical Results from Skylab, NASA, pp.27-29, 1977
- 1-6) Gibson, E.G.: Skylab 4 Crew Observations, NASA SP-377: Biomedical Results from Skylab, NASA, pp.22-26, 1977
- 1-7) Cooper, H.S.F.: A House in Space, Holt, Rinehart and Winston, 1976
- 1-8) Schmitt, H.H., and Reid, D.J.: Anecdotal Information on Space Adaptation Syndrome, Proceedings of the space adaptation syndrome drug workshop, National Space Biomedical Research Institute, pp.179-194, 1985
- 1-9) Richards, J.T., Clark, J.B., Oman, C.M., and Marshburn, T.H.: Neurovestibular Effects of Long-Duration Spaceflight: A Summary of Mir Phase 1 Experiences, National Space Biomedical Research Institute, 2001
- 1-10) NASA: NASA-STD-3000: Man-Systems Integration Standards, Volume I, Rev. B, NASA, p.4-6, 1995.7
- 1-11) Shebilke, W., Tubre, T., Willis, T., Hanson, A., Oman, C.M., and Ericson, J.: Simulating spatial memory challenges confronting astronauts, Proceedings of the IEA 2000/HFES 2000 Congress, pp. 2-350 - 2-352, 2000
- 1-12) Young, L.R., Oman, C.M., Watt, D.G.D., Money, K.E., and Lichtenberg, B.K.: Spatial Orientation in Weightlessness and Readaptation to Earth's Gravity, Science, Vol.225, Issue 4658, pp.205-208, 1984.7
- 1-13) Tafforin, C.: Relationships between orientation, movement and posture in weightlessness: Preliminary ethological observations, Acta Astronautica, Vol.21, No.4, pp.271-280, 1990

-
- 1-14) Lackner, J.R.: Spatial orientation in weightless environments, Perception, Vol.21, pp.803-812, 1992
- 1-15) Cohen, M.M.: Ames Space Station Architectural Research, NASA-CR2426: Space Station Human Factors Research Review, Volume III: Space Station Habitability and Function: Architectural Research, NASA, pp.1-115, 1987.10
- 1-16) 向井千秋, 五十嵐眞: 微小重力環境と宇宙酔い, JOHNS, Vol.11, No.7, pp.967-972, 1995
- 1-17) Parker, D.E., and Harm, D.L.: Mental Rotation: A Key to Mitigation of Motion Sickness in the Virtual Environment?, Presence, Vol.1, No.3, pp.329-333, 1992
- 1-18) Lackner, J.R., and DiZio, P.: Spatial Orientation as a Component of Presence: Insights Gained from Nonterrestrial Environments, Presence, Vol.7, No.2, pp.108-115, 1998.4
- 1-19) 新垣紀子, 野島久雄: 方向オンチの科学, 講談社ブルーバックス, 2001.8
- 1-20) Weisman, J.: Evaluating architectural legibility: Way-finding in the built environment, Environment and Behavior, Vol.13, No.2, pp.189-204, 1981.3
- 1-21) O' Neill, M.J.: Evaluation of a conceptual model of architectural legibility, Environment and Behavior, Vol.23, No.3, pp.259-284, 1991.5
- 1-22) 大野隆造, 串山典子, 添田昌志: 上下方向の移動を伴う経路探索に関する研究, 日本建築学会計画系論文集, 第 516 号, pp.87-91, 1999.2
- 1-23) Oman, C.M.: Human Visual Orientation in Weightlessness, Levels of Perception, Springer Verlag (in press)

第2章

一 結節点に連結された複数室の位置関係の把握

2.1 本章の目的

2.2 実験の概要

2.2.1 実験方法

2.2.2 実験装置

2.2.3 実験設定

2.2.4 実験手順

2.3 結果および考察

2.3.1 視点の動きの自由度と空間認知

2.3.2 VRシミュレーションの有効性の検討

2.3.3 視覚情報と空間認知の関係

2.3.4 空間認知の方略と室の配置の把握

2.3.5 空間認知の方略と移動行動

2.4 まとめ

2.1 本章の目的

第1章で論じたように、従来の研究では、主に無重力内部空間の一室内における視覚と方向感覚の関係が扱われてきた。しかし、ロシアのMIR宇宙ステーションや、現在建設中のISSは、複数の室が連結されて構成されている。図1-3に示すようにMIRは中央に1つの結節点を持ち、ISSでは最終的に6つの結節点を持つようになる²⁻¹⁾。

各結節点は6つのハッチ(出入口)を持ち、それぞれに連結された室へと繋がる。このように、1つの結節点となる室に複数の室が連結されて構成される無重力内部空間では、結節点でしばしば方向感覚を失うことが報告されている²⁻¹⁾。従って、無重力環境下の結節点において空間に対して自身の姿勢を把握するためには、そこで得られる視覚的な方向性の手がかりが重要であると考えられる。

Omanら²⁻¹⁾は、このような宇宙ステーションの結節点を想定した正方形の室内において、6つの壁面の配置の把握に関する研究を行ったが、そこでは主に試行を重ねることによる訓練の効果に着目しており、室内の視覚的な方向性の手がかりと空間認知の関係については扱われておらず、各壁面に示された視覚情報の配置は試行によって変えられたが、その種類は常に同じであった。また、彼らの研究では被験者は静止した状態で空間内部の壁面の配置を記憶しているが、既往研究より空間配置に関する知識は学習時の視点位置に影響され、移動を伴う空間体験の方がより正確に空間配置を把握できることが報告されている^{2-2), 2-3)}。この際の移動体験は、実空間における体験のみならず、バーチャルリアリティを用いた視覚的な自己運動情報による体験でも空間配置の記憶に有効であることが明らかにされている²⁻³⁾。しかし、実際の宇宙空間における無重力内部空間や、地上における仮想無重力内部空間において、視点の移動を伴う状態でこのような空間配置の把握を扱った研究はない。

本章では、無重力環境下の内部空間を視覚的に擬似体験できるVRシミュレータを構築し、視点の動きの自由度を変化させることによりシミュレーション装置の有効性を検討した上で、結節点内部の視覚情報による方向性の手がかりが空間配置の把握に与える影響を明らかにすることを目的とする。

2.2 実験の概要

2.2.1 実験方法

無重力環境下において複数の室から構成される空間内を移動する際に、結節点における視覚的な手がかりが重要であると考えられる。そこで、図2-1に示す、宇宙ステーションにおける結合部分 (node) を想定した3m四方の中央の室に、6つの室が連結されている仮想内部空間を構築し、その内部を実験者の指示通りに各室を移動する課題を被験者に与える。

結合部分の形状および連結される室の形状は、球や他の多面体などの形状も考えられるが²⁻⁴⁾、前節で述べたように、現状の、空間認知が最も容易であると考えられるすべての角が直角の四角い形状においても問題が報告されていることから、本研究ではそのような形状のみ扱う。

VRシミュレーションを用いる方法の有効性を検討するために、視点の動きの自由度を重力下または無重力下のように変化させた時の、移動課題に要する時間や移動時に目的の室を誤る回数を計測する。また、中央の室内の視覚情報による方向性の手がかりを系統的に変化させ、同様の実験を行う。視点の動きの自由度や視覚的な方向性の手がかりの有無により、室の配置や空間内での自身の姿勢の把握のしやすさが異なり、課題の遂行時間や室を誤る回数に違いが生じると考えた。

また、実験の終了後に、中央の室の各壁面とそれらに連結する各室の対応関係や、中央の室の各壁面の位置関係を、縮尺模型を用いて答えさせる課題、および被験者へのインタビューを行い、個人による空間の把握の仕方の違いについて調べる。

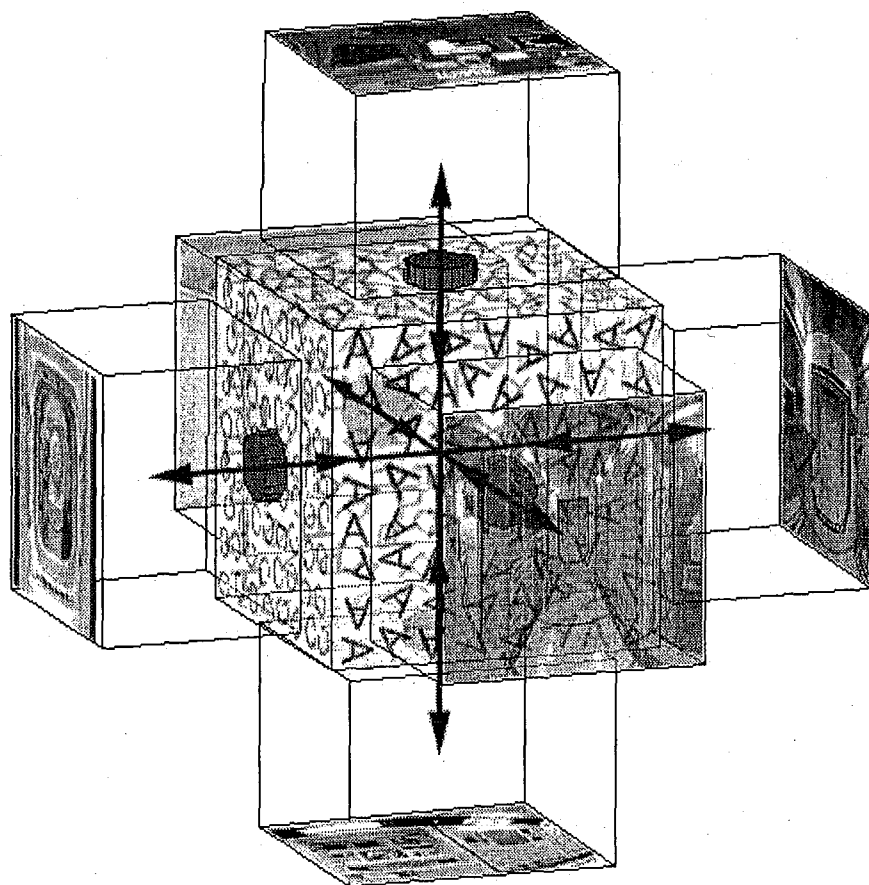


図 2-1 実験空間

2.2.2 実験装置

本章の実験に用いた各装置の仕様を表2-1に示す。

実験に用いる個々の室は、表2-1に示すSGI社製のCGワークステーションによりモデリングを行った。空間内部の壁面に貼り付けるテクスチャは、Windows PCの画像加工ソフト（Adobe社製Photoshop 5.0およびIllustrator 8.0）により編集した。

CGワークステーションのVRソフトにより、先に作成した各室を空間内に配置し、それぞれの壁面にテクスチャを貼り付ける。また、被験者の視点の出発点位置および視点の可動範囲をプログラムにより設定した。

被験者の視点は、コントローラの操作に従いCG空間内を移動する。コントローラは6自由度をもった入力デバイスであり、被験者はコントローラのボールを操作することで、視点方向に対し前後（x軸，前方が正）・左右（y軸，左方が正）・上下（z軸，上方が正）への平行移動（ t_x 、 t_y 、 t_z ）、および各軸を中心とした回転（ r_x 、 r_y 、 r_z ）の動作が可能である（図2-2）。

本研究で用いたVRソフトは、地上でのウォークスルー（空間内移動）を想定してプログラムされているため、無重力環境下のように視点がy軸周りに回転し上下反転することができない。そこで、コントローラのプログラムを改良して、被験者の視点が重力に拘束されずに、あらゆる方向に移動できるようにした。また、視点の可動範囲もプログラムにより制限し、視点が壁面を通り抜けないようにしてある。

空間内部の映像は、リクライニングチェアにリラックスした状態で着座する被験者にHMD（ヘッドマウントディスプレイ，頭部搭載型ディスプレイ）を用いて提示される（図2-3）。なお、本研究では被験者の頭部の動きと仮想空間内の視点の動きは連動させていない。

表 2-1 実験装置仕様

	製造元	製品名
ハードウェア	SGI	O2 R10000/250MHz(CGワークステーション)
	Labtec	Spaceball 2003(コントローラ)
ソフトウェア	Alias Wavefront	Explorer Professional(モデリング)
	Media Lab	Clovis VR(VRソフトウェア)
ヘッドマウントディスプレイ	島津製作所	See-Through Vision STV-ES
デジタルビデオデッキ	SONY	WV-D10000

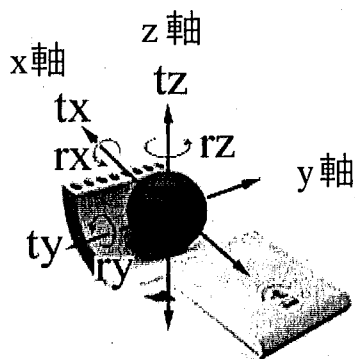


図 2-2 コントローラ (Spaceball 2003) の説明図

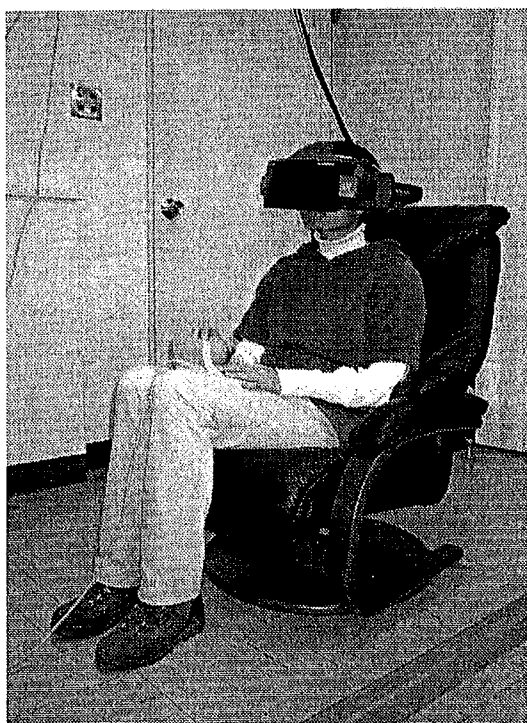


図 2-3 HMD を装着した実験中の被験者

2.2.3 実験設定

前述のように、連結された各室を移動する際に、結節点における視覚的な方向性の手がかりが空間の配置の把握に重要であると考えられる。そこで、宇宙ステーションにおける結節点を想定した3m四方の中央の室内の各壁面に、それぞれ異なるアルファベットの文字を要素とするテクスチャを貼り、アルファベット文字の配列および壁面の配色を操作することで、空間内の方向性の有無を与える（図2-4～図2-6）。

壁面のテクスチャにアルファベット文字を用いた理由は、壁面ごとや設定ごとに異なるアルファベット文字を用いることで連結する各室を示すラベルとして使用できること、個々のアルファベット文字は特別な意味を持たないこと、平仮名やカタカナに比べて形状が単純で視認性が良いことである。しかし、アルファベット文字の多くの種類は方向性を持ち、それが空間やその内部における自身の方向性を知る手がかりとして使われる可能性がある²⁻⁶⁾。そこで、文字要素が整列しているか不揃いかで、方向性の有無を変化させている。各壁面に張られたアルファベット文字はMS Pゴシックのフォントを用い、1文字の大きさはおよそ12.5cm四方である。アルファベット文字の貼られた各壁面のグレイレベルは20%に統一している。

各壁面の中心部分には、ハッチを模擬的に表した円形の灰色部分があり、それぞれ「操縦室」、「実験室」、「コンピュータ室」、「ロッカー室」、「シャワー室」、「宇宙服の室」の、6つの室に通じている（図2-1）。これら6つの室のテクスチャは、NASAのウェブサイト²⁻⁵⁾にある画像を加工して使用した（図2-7）。

まず、地上の重力下と宇宙における無重力下における空間配置の把握や移動行動の違いを予備的に調べるために、視点の動きの自由度を変化させた設定で実験を行う。

表2-2の設定①は、地上において重力により視点の動きが拘束されている状態であり、視点の動きの自由度が4（前後左右の平行移動および見回し、見上げ見下ろし）である。視点の高さが固定されており、上下の室には出入りできない。中央の室の壁面に張られたアルファベットの文字の方向は不揃い（ランダム）であり、それを手がかりに空間の方向を判断することはできない。

設定②は、無重力環境を模擬して、視点の移動が重力による拘束を受けない状態である。視点の動きの自由度は6であり、前後・左右・上下への平行移動および前後（x）、

左右 (y), 上下 (z) 軸周りの回転移動が可能である。視点の動きの自由度の違いによる被験者の行動を設定①と比較するため、「出入りできる室数」は4である。1組の対向する2壁面のハッチはダミーであり、そこから連結される室には出入りできない。中央の室の壁面に張られたアルファベットの文字の方向はランダムであり、それを手がかりに空間の方向を判断することはできない (図2-4)。

さらに、視覚情報による空間の方向性の有無が、空間における自身の姿勢の把握や、連結される各室の位置関係の把握に及ぼす影響を調べるために、中央の室の視覚情報を、表2-2に示すように変化させ実験を行う。

設定③は、中央の室の壁面に張られたアルファベットの文字がグリッド状に整列しており、それを手がかりとして方向を知ることができる。視点の動きの自由度は6であり、宇宙における視点の移動状態を模擬している。また、設定③~⑤は、中央の部屋に連結された6つの室のすべてに出入りできる (図2-5)。

設定④は、1組の対向する2壁面に配色が施されており、それを手がかりに方向を知ることができる。壁面の配色により方向性を示した例として、ロシアの宇宙ステーションSalyut7では、左側の壁面を青りんご色に、右側の壁面をベージュに塗り分けており、Beachらは、このような配色計画により、無重力内部空間において空間認知がしやすくなるであろうと述べている²⁻⁷⁾。そこで、本章の実験の設定④では、1組の対向する2壁面をそれぞれ青色 (マンセル表色系でおよそ10B 6/10) と茶色 (同・5YR 4/3) に塗り1軸の方向性を与え、他の4面は白色とした。また、中央の室の壁面に張られたアルファベットの文字の方向はランダムであり、空間の方向性を知る手がかりにはならない (図2-6)。

設定⑤は、中央の室の壁面に張られたアルファベットの文字の方向はランダムで、配色による方向の手がかりも無い設定である。また、視点の動きの自由度は6である。

表2-2 実験設定

設定	床・天井の色の区別	アルファベットの並び	視点の動きの自由度	出入りできる室数
①	なし	ランダム	地上*	4
②	なし	ランダム	宇宙	4
③	なし	グリッド	宇宙	6
④	あり	ランダム	宇宙	6
⑤	なし	ランダム	宇宙	6

(*)「地上」とは、視点の動きの自由度を4(前後左右の平行移動および見回し、見上げ見下ろし)に制限した状態である。

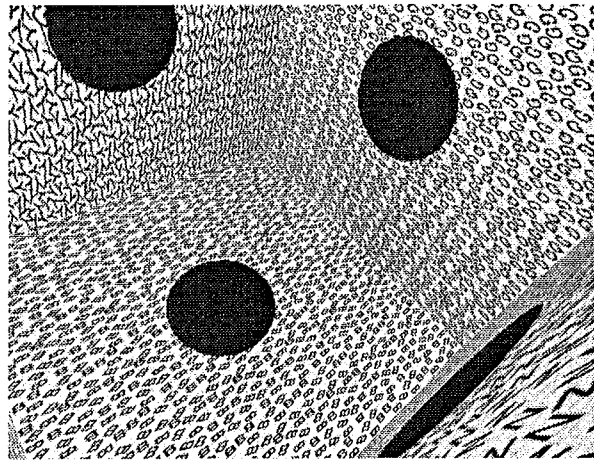


図 2-4 空間内部の映像 (その 1)

(設定 2, 5 ; 床・天井の色の区別「なし」、アルファベットの並びは「ランダム」)

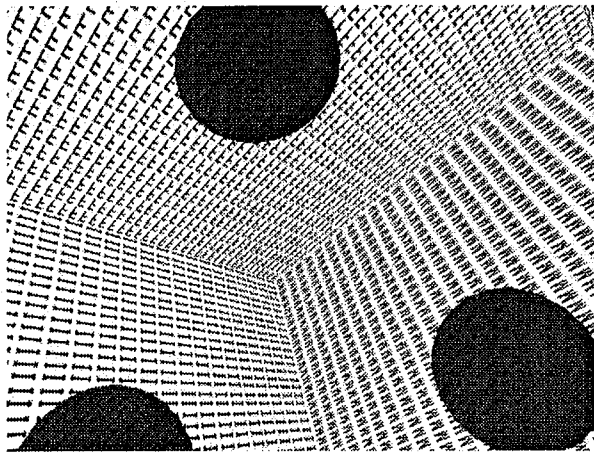


図 2-5 空間内部の映像 (その 2)

(設定 3 ; 床・天井の色の区別「なし」、アルファベットの並びは「グリッド」)

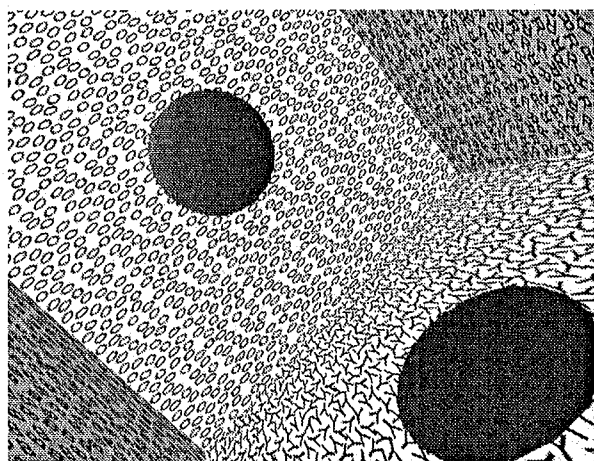
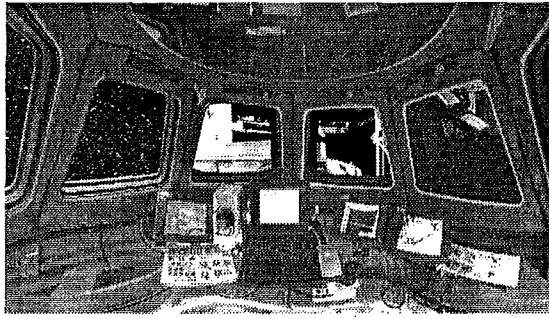
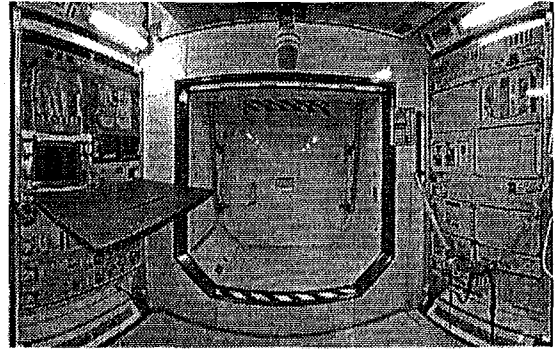


図 2-6 空間内部の映像 (その 3)

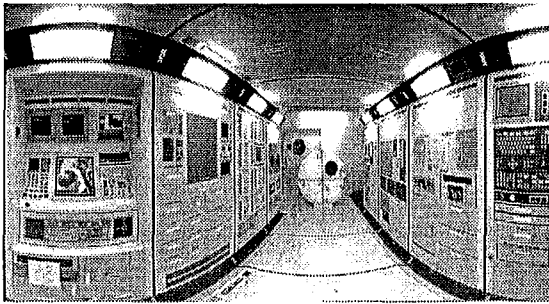
(設定 4 ; 床・天井の色の区別は「あり」、アルファベットの並びは「ランダム」)



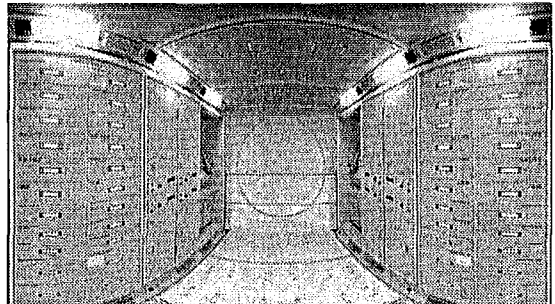
1. 操縦室



2. 実験室



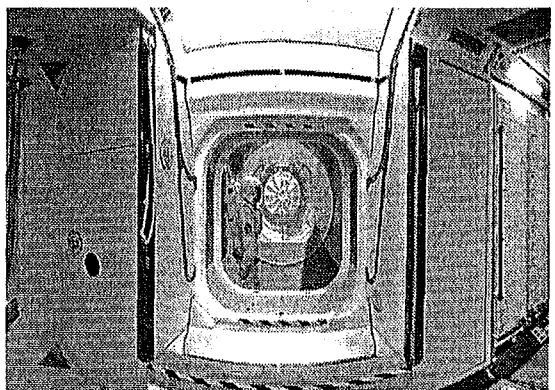
3. コンピュータ室



4. ロッカー室



5. シャワー室



6. 宇宙服の室

図2-7 中央の室に連結する各室のしつらえ²⁻⁵⁾

2.2.4 実験手順

被験者は、壁面にアルファベットが描かれた中央の室から円形の灰色部分を通して操縦室やコンピュータ室などの各室を移動することで、コントローラの操作に慣れるとともに、それぞれの室の位置関係を記憶する。その後、被験者は、中央の室からそれぞれの室を実験者が指示するとおりに移動する課題を行う（約8分間/回）。

視点の動きの自由度や、中央の室の視覚情報による空間の方向性の設定を表2-2のように変化させて、被験者一人につき計5回の実験を行った。その際、部屋の記憶時と課題の遂行時の視点の初期位置は変更する。また、中央の部屋の壁面に張られたアルファベット文字と、それに連結された操縦室やコンピュータ室などの部屋の配置は、設定ごとに変更する（表2-3、図2-10）。さらに、各室の移動の順序や回数も、設定別に偏りが無いように考慮した（表2-4）。

被験者の各課題を行う時に、目的の室の場所を誤らずに移動できるか、課題遂行時の行動分析（行動軌跡を提示映像のビデオ録画から読み取る）、から、視覚的手がかりの違いが方向の認知に及ぼす影響を調べる。

また、設定⑤の終了後に、中央の各壁面のアルファベットの文字と、連結する各室の対応や、中央の各壁面の位置関係を、縮尺模型を用いて答えさせる。最後に、各室の位置関係や、アルファベットの壁面と連結する室の対応の把握の仕方について、インタビューを行う。

被験者は、実験への参加の同意が得られた20歳代の成人20名（男子11名、女子9名）を用いる。なお、実験前後および実験中は各課題ごとに被験者の健康状態を尋ね、各課題の間に充分休憩を取らせる。

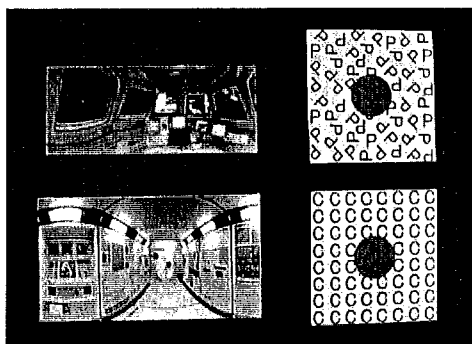


図2-8 実験で用いた壁面の縮尺模型

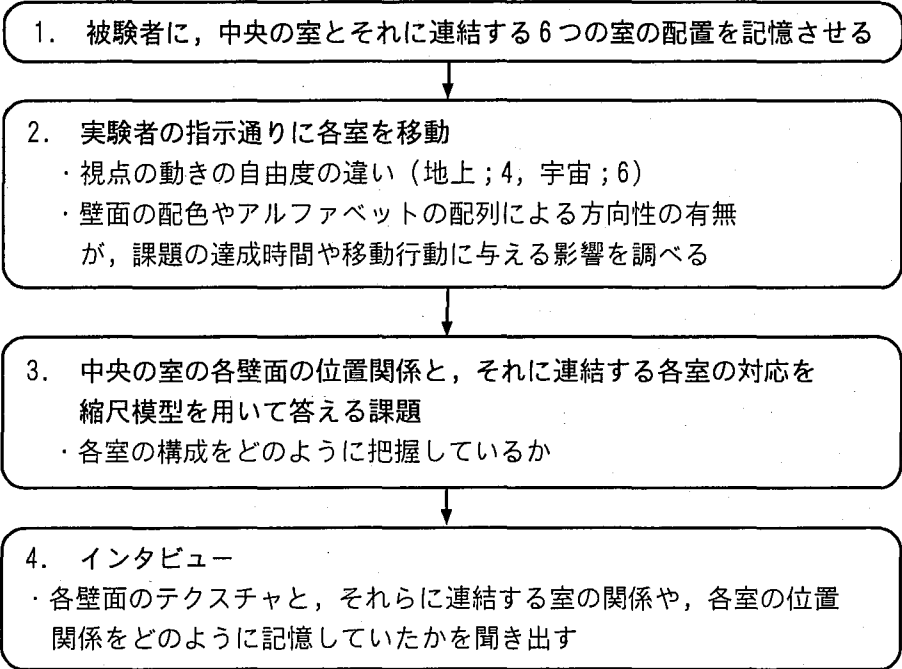


図2-9 実験の流れ

表2-3 設定別のアルファベット文字と連結する室の種類

設定	中央の室の壁面と隣接する室の位置	1	2	3	4	5	6
① 地上、色なし、ランダム、立方体	アルファベット	Q	E	P	H	A	W
	隣接する室名	宇宙服	シャワー室	実験室	操縦室		
② 宇宙、色なし、ランダム、立方体、4	アルファベット	D	V	N	K	T	J
	隣接する室名	シャワー室	操縦室	宇宙服	実験室		
③ 宇宙、色なし、グリッド、立方体	アルファベット	M	I	C	X	F	L
	隣接する室名	操縦室	コンピュータ	ロッカー	シャワー室	実験室	宇宙服
④ 宇宙、色あり、ランダム、立方体	アルファベット	O	R	Z	B	U	Y
	隣接する室名	コンピュータ	実験室	シャワー室	宇宙服	ロッカー	操縦室
⑤ 宇宙、色なし、ランダム、立方体、6	アルファベット	G	V	P	M	S	X
	隣接する室名	ロッカー	操縦室	宇宙服	コンピュータ	シャワー室	実験室

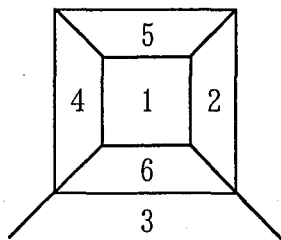


図2-10 中央の室の壁面の位置とその番号

表2-4 設定別の移動順序

設定	移動の順序	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
① 地上、色なし、ランダム、立方体	移動の順序	4	1	3	2	1	4	2	3	1	2	3	4
	隣接する室名	操縦室	宇宙服	実験室	シャワー室	宇宙服	操縦室	シャワー室	実験室	宇宙服	シャワー室	実験室	操縦室
② 宇宙、色なし、ランダム、立方体、4	移動の順序	1	2	4	3	2	1	3	4	1	2	4	3
	隣接する室名	シャワー室	操縦室	実験室	宇宙服	操縦室	シャワー室	宇宙服	実験室	シャワー室	操縦室	実験室	宇宙服
③ 宇宙、色なし、グリッド、立方体	移動の順序	2	6	3	1	4	5	6	1	2	4	3	5
	隣接する室名	コンピュータ	宇宙服	ロッカー	操縦室	シャワー室	実験室	宇宙服	操縦室	コンピュータ	シャワー室	ロッカー	実験室
④ 宇宙、色あり、ランダム、立方体	移動の順序	4	2	5	1	3	6	4	6	5	3	2	1
	隣接する室名	宇宙服	実験室	ロッカー	コンピュータ	シャワー室	操縦室	宇宙服	操縦室	ロッカー	シャワー室	実験室	コンピュータ
⑤ 宇宙、色なし、ランダム、立方体、6	移動の順序	6	3	4	2	5	1	4	1	3	2	6	6
	隣接する室名	実験室	宇宙服	コンピュータ	操縦室	シャワー室	ロッカー	コンピュータ	ロッカー	宇宙服	操縦室	シャワー室	実験室

向かい合う面への移動 (各設定3回ずつ)

<教示文>

「あなたは、室内の各壁面にアルファベットの文字が描かれた空間にいます。アルファベットの文字は、壁面ごとに異なります。各壁面の中心には灰色の丸い部分があり、そこを通じて6つの連結された室に移動できます。連結された室は種類別に、「操縦室」、「実験室」、「コンピュータ室」、「ロッカー室」、「シャワー室」、「宇宙服の室」と名前が付けられています。

あなた自身でコントローラを操作して各室を移動し、それぞれの室の配置を覚えていただきます。その後、こちらが指示する通りに各室を移動していただきます。これを、壁面にアルファベットが描かれた室の様子を変えて、5回行います。

まずは、地上にいるときのように、前後左右の動きと、見回しや見上げ見下ろしだけができる状態で実験します。

実験の間には休憩時間を取りますが、実験中でも疲れたり頭が痛くなったときはすぐに申し出てください。実験を中止して休憩を取っていただきます。また、上下左右の感覚が混乱することで、気持ちが悪くなって吐き気がしたり、頭が痛くなることがありますので、気分がすぐれないときはすぐに申し出てください。実験を中止して安静にさせていただきます。

それでは、自由に移動してください。」

―――実験（設定①）開始―――

「それでは続いて、宇宙空間のように、前後左右や見回し、見上げ見下ろしだけの動きだけでなく、上下や回転もできる状態で実験します。」

―――実験（設定②～⑤）実施―――

「最後に行った空間について、中央の室のアルファベットが描かれた壁面と、それに連結する各室を、この模型を用いて組み合わせてください。」

―――模型組み合わせ実験―――

「次に、中央の室のアルファベットが描かれた各壁面の位置関係を、模型を使って示してください。」

―――模型組み立て実験―――

2.3 結果および考察

2.3.1 視点の動きの自由度と空間認知

実験に要した時間は一人当たり 80 分から 150 分間で、平均約 100 分だった。

設定①および設定②の課題の遂行時間を図 2-11 に示す。図 2-11 の横軸は各設定を表し、縦軸は、中央の室に連結された 6 つの室を実験者の指示通りに 12 回移動する課題に要した平均時間と、その信頼区間 (95%) を示す。

VRシミュレーションを用いた方法の有効性を検討するために設定した、視点の動きが地上と同様に自由度 4 の設定①と、無重力環境下と同様に自由度 6 の設定②を比較する。共に視覚的な方向性の手がかりである色やテクスチャ、および出入りできる部屋数とその方向は等しいが、視点の動きの自由度が異なる。統計的に有意ではないが、設定②の方が課題の遂行に時間が掛かる傾向が見られた。

また、室の移動時に、目的の室を誤って別の室に入ってしまった回数を調べると、はじめに実験を行う設定①では平均 1.6 回誤ったのに対し、続いて実験を行った設定②では平均 0.5 回と誤りが減る学習効果が見られ、明確な結果は得られなかった。

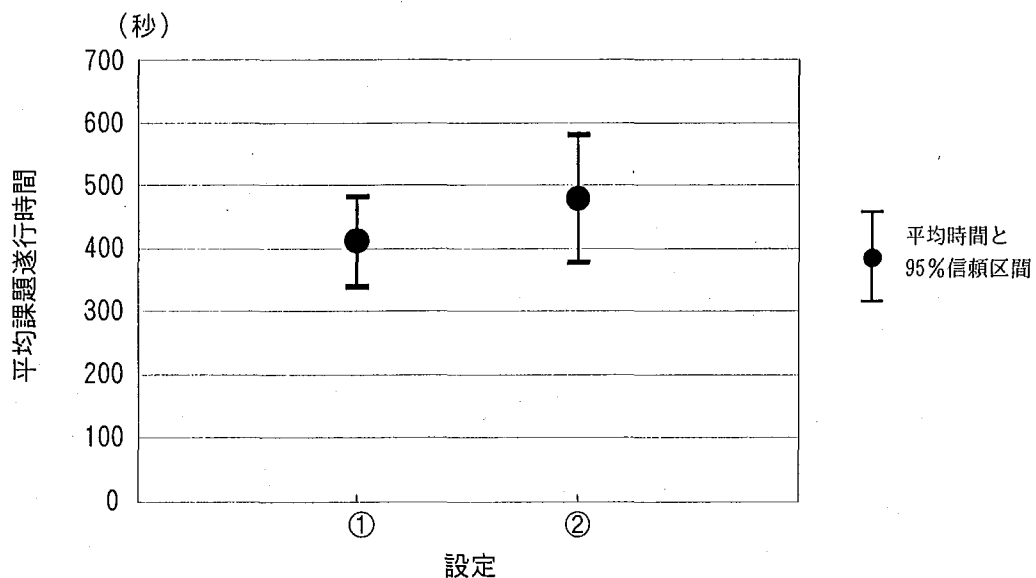


図 2-11 設定①と設定②の平均課題遂行時間

2.3.2 VRシミュレーションの有効性の検討

前節において、地上と同じ視点の動きの自由度である設定①と比較して、無重力環境下での視点の動きの自由度である設定②の課題の平均遂行時間が長くなったのは、視点の動きの自由度が増し、一平面内での動きに拘束されないために、室間を移動する際に余分な動きをして経路が長くなったためと考えられる。

また、設定②において、被験者の視点が斜め（図2-1のrx）に回転したり上下が逆さになったりすることにより、ダミーのハッチのある壁面を連結された室に入出りできる壁面と誤る行動が見られた。

このように、視点の動きの自由度が増したことで、地上では見られない行動が見られ、無重力環境下での動きをある程度再現していると考えられる。

しかし、視覚的には無重力の環境を模擬していても、地上では重力が掛かっており、視覚のみならず他の感覚器官も含めて重力の有無が空間認知に及ぼす影響を検討する必要がある。ここで、無重力環境下と地上での重力下におけるVRシミュレーションで人が受け取る感覚情報の相違点を挙げ、本研究の目的に照らして考慮すべき影響について考察する。

身体感覚（平衡感覚および体性感覚）による重力の把握は、耳石器官への入力による直接的な知覚と、自重によって圧迫される皮膚の圧力感覚や抗重力筋の緊張による間接的な知覚により行われるが、日常的に重力方向は特に意識されることはない^{2-8), 2-9)}。Omanらの行った正方形の6壁面の配置に関する研究²⁻¹⁾では、坐位姿勢と仰臥姿勢の課題の有意な成績差は見られないことから、本章の実験でも重力方向の影響は少ないことが考えられる。しかし、今後の実験で3次元空間の方向感覚に関する課題を扱う場合は、重力方向が手がかりとされる恐れがある。また視覚的な情報からは身体が回転しているにも関わらず、身体軸と重力方向が一致したままである不整合が意識されると混乱を招くかもしれない。いずれにしても、この影響の有無については実験結果から推察せざるを得ない。

本研究では、着座のままの被験者に対して移動・回転がVRで視覚的にシミュレートされても身体の移動・回転に伴う前庭器官（耳石および三半規管）への入力は再現できない点異なる。しかし、実際には動いていないのに視覚情報のみによって移動している

感覚が生じることが知られている。例えば、止まっている電車に乗っているときに、隣の電車が動くと自身の乗っている電車が動いたように感じる現象である。これは視覚誘導自己移動感覚 (vection) と呼ばれ、直線および回転運動について多くの研究がなされている²⁻¹⁰⁾。被験者による主観的な移動感覚の報告や、被験者の頭部や重心位置の変位の測定によって自己移動感覚の度合いが調べられ、前庭器官への入力がなくとも移動した感覚を生じることが示されている。さらに、無重力環境下での三半規管への入力による身体の回転の知覚は地上よりも劣ると言われており²⁻¹¹⁾、地上での移動をVRでシミュレートするよりは影響が少ないと考えられる。

視覚情報については、ヘッドマウントディスプレイ (HMD) を用いたVRシミュレーションでは、視野がある程度制限されるなどの相違はあるが、地上環境のシミュレーションでも同様であり、無重力環境である事による相違ではなく、また、本実験で扱う課題の遂行に直接的な障害にはならないと考えられる。

空間を移動する時の運動感覚 (kinesthesia) について、地上においては歩行運動の体験が空間認知の手がかりになる可能性が論じられている。しかし、無重力環境下では主にハンドレールを掴んで押し出す反動により移動を行うため地上とは異なり、その動作が空間識の形成に大きく影響するとは考えられず、VRシミュレーションでコントローラの操作に置き換えても支障は無いと考える。

以上から、無重力環境とVRシミュレーションによる仮想無重力環境での情報の差異のうち、本研究の目的とする連結された室における空間認知の実験に影響しうると考えられる要因としては、本節のはじめに述べた重力の方向に関する身体感覚のみであるが、それについては次章以降でその影響の有無をさらに吟味する。

2.3.3 視覚情報と空間認知の関係

結節点内部の視覚的な手がかりによる方向性の有無が空間認知に及ぼす影響について検討するため、設定③から設定⑤の課題の遂行に要した平均時間を比較する(図2-12)。図2-12の横軸は各設定を表し、縦軸は、中央の室に連結された6つの室を実験者の指示通りに12回移動する課題に要した平均時間と、その信頼区間(95%)を示す。

室内の視覚情報から方向の手がかりが得られない設定⑤が一番難しく、最も時間が掛かると予想していたが、設定③以降は課題の遂行時間が減少していく傾向が見られた。これは、課題を行っていくに従う学習の効果と考えられ、Omanらの研究結果²⁻¹⁾にも見られたことである。しかし、Omanらの研究では壁面の視覚情報は常に同一であったのに対し、本章の実験では試行ごとに变化させていた点が異なる。本章の実験設定では、被験者に与えた視覚情報による方向性の手がかりの違いに比べ、学習の効果の方がより影響したと考えられる。

このように学習効果が大きく影響した原因として、課題を行っていくに従い、被験者が自身のやり易い方略を取っていくようになったためと考えられ、実験後のインタビューでそのことを述べる被験者も見られた。そこで、実験後のインタビューを分析すると、主に次の4通りの方略が見られた。

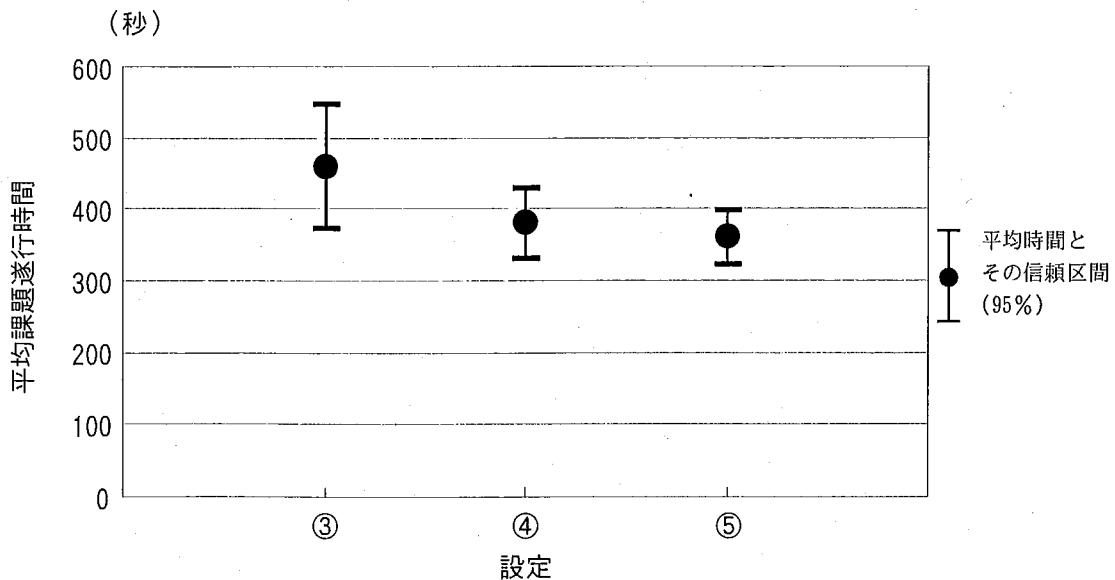


図 2-12 設定別の平均課題遂行時間

ラベル依存型：中央の室の壁面テクスチャの各アルファベット文字と、それに連結する各室の対応関係のみを覚え、各壁面の配置はあまり覚えられない (55%; 20名中11名)。

アンカーポイント型：ある壁面または連結する室を基準とし、それに対する位置関係によって他の壁面または連結する室を覚える (25%; 5名)。

対向3軸型：中央の室の向かい合う2壁面ごとに覚え、それぞれの位置関係も覚える (15%; 3名)。

隣接2面型：中央の室の隣り合う2壁面ごとに覚えるが、それぞれの位置関係は覚えられない (5%; 1名)。

ちなみに、Omanらの研究²⁻¹⁾でも、ノードを模擬した正方形の部屋の6壁面の配置をどのように記憶したか尋ねているが、そこでは対向する2壁面に描かれた物を対に記憶する方略を採った被験者は77% (96名中74名)、各壁面に描かれた物に意味を与えて記憶した方略を採った被験者は9% (96名中9名)、それ以外が14% (96名中13名)であった。

実験方法や課題が異なるので単純に比較はできないが、Omanらの研究に見られた「対向する2壁面に描かれた物を対に記憶する方略」は本実験の対向3軸型に類似しており、2番目の「各壁面に描かれた物に意味を与えて記憶した方略」はラベル依存型に類似した方略と考えられ、本章の実験で見られた方略も充分理解できるものであると考えられる。

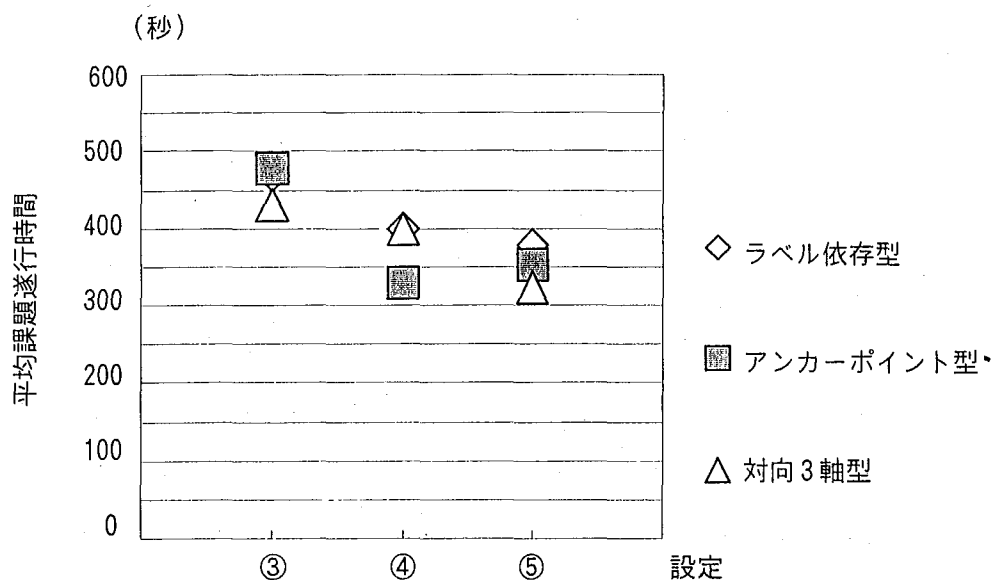


図2-13 被験者の方略別の平均課題遂行時間

Oman らの研究で、「対向する 2 壁面に描かれた物を対に記憶する方略」が多く見られた理由は、被験者は静止した状態で見回しのみ可能であり、各壁面の画像の位置を変更することで、あたかも被験者が室内で回転したように見せかける提示方法を採用していたため、壁面の物の配置が変化した時に見えた物に対向する物を覚えるのが容易であったためと考えられる。一方、本研究では被験者はコントローラの操作により空間内を自由に移動できるため、壁面の配置を正確に覚えなくても、壁面のアルファベットと連結する各室の対応関係のみを覚え、目的の壁面さえ見つけることができればよいから、ラベル依存型の方略が多く見られたと考えられる。

上記の 4 種類の被験者の方略別に、設定ごとの課題の遂行時間を詳しく分析する。このうち、隣接 2 面型の方略により空間認知を行った被験者は 1 名のみであったので、それ以外の方略について実験の遂行時間の平均を求め、図 2-13 に示す。

ラベル依存型の方略の場合、設定別の課題の遂行時間の差が最も少ない。その理由は、この方略を用いた被験者は、設定別の中央の室の視覚的な方向性の手がかりはあまり使用されず、ある室から別の室に移動する際に、各壁面のアルファベットの文字を目的の室を示すラベル的な手がかりとして使用したためと考えられる。

アンカーポイント型の方略の場合、設定③ではラベル依存型とほぼ同程度の課題遂行時間を要しているが、設定④では分散分析では有意差は見られなかったものの、最も短い平均課題遂行時間となる傾向が見られた。これは、向かい合う 2 壁面の配色の手がかりにより、被験者がアンカーとした壁面もしくはそれに連結する室の位置の特定がしやすく、室の移動に要する時間が短くなったと考えられる。

対向 3 軸型の方略の場合、統計的に有意な差があるとは言えないが、設定⑤では平均課題遂行時間が最も短い結果であったことから、そのような無重力環境下で視覚的な方向性の手がかりがない状態では、この方略が有効であることが示唆される。

次に、室の移動時に、目的の室を誤って別の室に入ってしまった回数の平均を、設定別および被験者の方略別にまとめ、表 2-5 に示す。

設定別および被験者の方略別の誤った回数について、設定 (3 通り) × 方略 (4 通り) の分散分析を行った結果、各要因とも統計的に有意な差は見られなかったが、表 2-5 に示すように、対向 3 軸型の被験者は誤りが少ない傾向が見られた。設定別では、試行を重ねるごとに誤りの数が減る傾向がある。これは、課題遂行時間の結果と同様に、試行を重ねることで被験者が自身の方略に慣れていく学習の効果のためと考えられる。

表 2-5 設定別および被験者の方略別の、移動時に目的の室を誤る平均数

方略	設定③	設定④	設定⑤	平均
ラベル依存型	0.6	0.2	0.5	0.4
アンカーポイント型	0.6	0.2	0	0.3
対向 3 軸型	0	0.3	0	0.1
隣接 2 面型	0	1.0	0	0.3
全体平均	0.5	0.3	0.3	0.3

また、実験後のインタビューで、アルファベット文字の並びや壁面の配色を自身の方向を知る手がかりとしたかをたずねた。すると、設定③の整列したアルファベット文字により方向性を与えた設定では、35%の被験者が自身の姿勢を把握しやすいと述べたのに対し、設定④の向かい合う 2 壁面に青色と茶色の配色を施した設定では、90%の被験者が自身の姿勢を把握しやすいと述べた。よって、自身の姿勢を把握し易くするために、配色によって空間全体の方向性を与えることは有効であるといえる。

2.3.4 空間認知の方略と室の配置の把握

設定⑤の実験終了直後に、空間を構成していたアルファベット文字のテクスチャの貼られた各壁面の模型 (10cm×10cm, 図2-8) を、その配置通りに「組み立て」させる課題と、それらの壁面に連結された操縦室やコンピュータ室などの各室を「組み合わせ」る課題を被験者に課した。図2-14にその結果を示す。縦軸は、アルファベット文字の貼られた各壁面の位置関係を正しく組み立てられた数、横軸は、アルファベット文字の各壁面と、それに連結する各室を正しく組み合わせられた数を示す。また、各円の大きさは被験者の数を表わしている。

アンカーポイント型および対向3軸型の被験者は、組み立ておよび組み合わせの成績が共に良かったが、ラベル依存型の被験者は、組み合わせの成績は良かったが組み立ての成績は悪かった。この理由は、ラベル依存型の被験者は壁面の各アルファベット文字と、それに連結する各室の対応関係のみを覚え、各壁面の配置はあまり覚えていないためと考えられる。

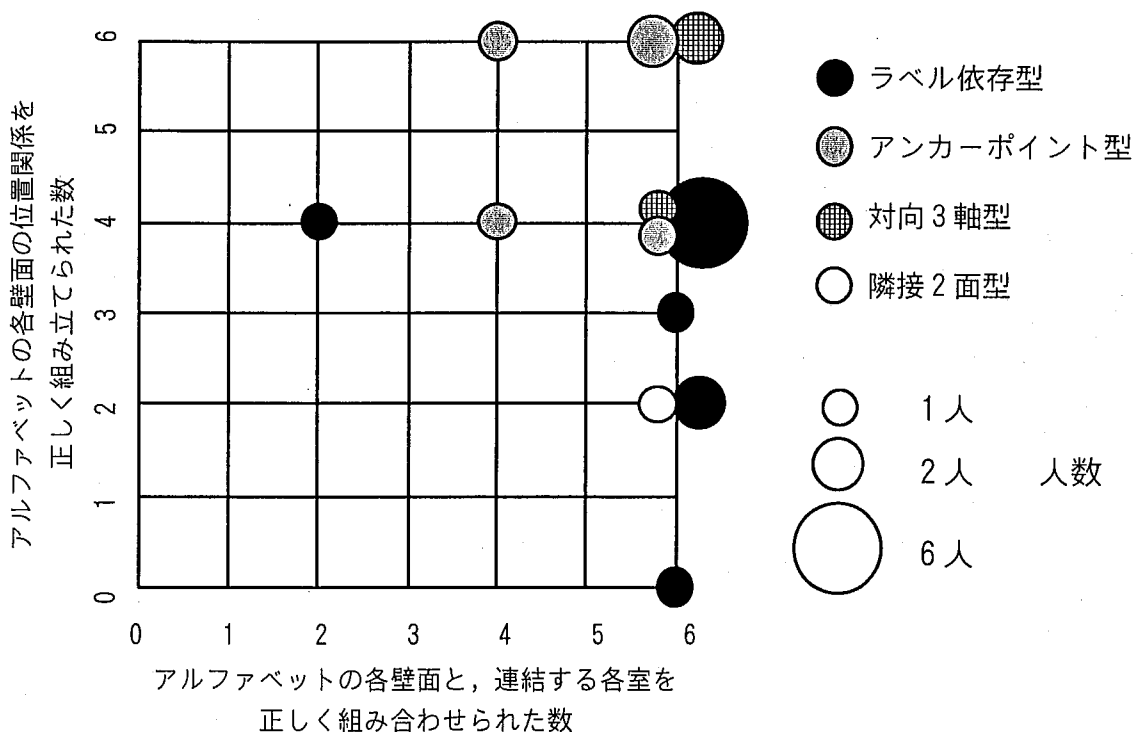


図2-14 実験で見られた被験者の方略と「組み立て」、「組み合わせ」課題の成績

2.3.5 空間認知の方略と移動行動

図2-15は、ラベル依存型と対向3軸型の2人の被験者の行動の違いを示している。設定③における、ある室から別の室への移動行動の、x, y, z軸方向の平行移動 (tx, ty, tz; 図2-1参照) および各軸周りの回転移動 (rx, ry, rz) を、身体に対する相対的な座標系と空間に対する絶対的な座標系で表す。横軸は時間 (秒) を、縦軸は、各座標系の移動方向と移動量を示す。移動方向は、各軸の上側が正、下側が負の方向である。

被験者Aはラベル依存型の被験者であるが、移動時に空間に対して同時に2軸以上回転する、すなわち、空間に対して斜めに回転する行動が見られた。この理由は、被験者Aは目的の室に移動する際に、その室に繋がる壁面のアルファベット文字を探して移動しており、空間に対する自身の身体の方角性を気にしていないためと考えられる。

一方、被験者Bは対向3軸型の被験者で、移動時に空間に対して同時に1軸しか回転していない。この理由は、被験者Bはそれまでいた室に対し、次の室の位置を把握しており、速やかにそこへ移動するために自身の身体の方角性を気にして移動しているからと考えられる。

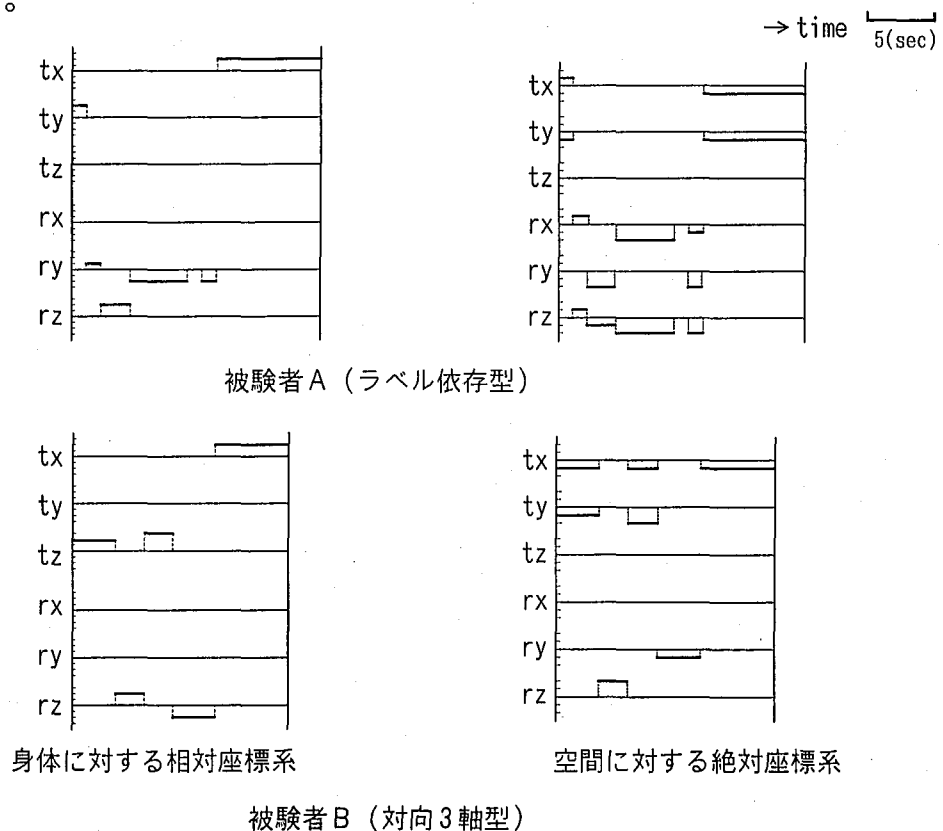


図2-15 方略の異なる2人の被験者の動きの違い

2.4 まとめ

本章では、無重力環境下の内部空間を視覚的に擬似体験できるVRシミュレータを構築し、一つの結節点に連結された複数の室からなる内部空間において、視点の動きの自由度を重力下または無重力下のように変化させ、シミュレータの有効性を検討した。無重力環境下での視点の動きを模擬した設定では、被験者の視点が進行方向軸周りに回転したり上下が反転することにより、目的の室を誤るといった地上では見られない行動が見られ、無重力環境下での動きをある程度再現していると思われる。しかし、本章の実験設定は試験的なものであり、定量的な考察をするまでは至らなかった。次章以降、VRシミュレーションの有効性のより詳細な検討を行う。

結節点の視覚情報による方向性の有無の違いと各室の位置関係の把握のしやすさの関係は、学習の効果や個人差のため明確にならなかった。すなわち、本研究のように、空間構成や自身の姿勢の把握と視覚情報の関係を調べる際には、移動の行為に要する時間を計測する方法は適当でないことが確認されたことから、以降の実験では別な実験方法を検討する必要がある。

また、インタビューの結果から、90%の被験者が向かい合う2壁面に色がついた設定で自身の姿勢を認識しやすいと述べたことから、配色による方向性の付加は効果的であるといえる。

さらに、被験者による空間認知の方略の違いが見られ、それにより中央の室と連結する各室の組み合わせや中央の室の各面の位置関係を答える課題の成績が異なることが確かめられた。このことから、複数室からなる環境の空間構成を把握するためには、連結する室への入り口付近のテクスチャの特徴を示すだけでなく、各室の位置関係を示す視覚情報を与えることの必要性が示唆される。

参考文献

- 2-1) Oman, C.M., Shebilske, W.L., Richards, J.T., Tubre, T.C., and Beall, A.C., and Natapoff, A.: Three dimensional spatial memory and learning in real and virtual environments, *Spatial Cognition and Computation*, Vol. 2, No. 4, pp.355-372, 2000
- 2-2) 松井孝雄:空間認知の異方性と参照枠 — 整列効果はなぜ生じるのか—, 慶應義塾大学大学院社会学研究科紀要, Vol.34, pp.51-58, 1992
- 2-3) 朝倉暢彦, 近江政雄, 鈴木良次:空間記憶の身体方位依存性に及ぼす自己運動情報の効果, 電子情報通信学会技術報告 HIP99-27, pp.1-8, 1999.9
- 2-4) Cohen, M.M.: Ames Space Station Architectural Research, NASA CR-2426: Space Station Human Factors Research Review, Volume III: Space Station Habitability and Function: Architectural Research, NASA, pp.1-115, 1987.10
- 2-5) NASA: The Virtual Tour of the International Space Station. [On-line]
<http://spaceflight.nasa.gov/gallery/vtour/index.html>, 2001.10
- 2-6) Corballis, M.C., Anuza, T., and Blake, L.: Tachistoscopic perception under head tilt, *Perception & Psychophysics*, Vol.24, No.3, pp.274-284, 1978
- 2-7) Beach, L.R., Wise, B.K., and Wise, J.A.: NASA CR-177498: The Human Factors of Color in Environmental Design: A Critical Review, National Aeronautics and Space Administration, 1988.8
- 2-8) 古賀一男:宇宙環境と重力の生理・行動科学, 山崎勝男, 藤澤清, 柿木昇治編, 新生理心理学, 第3巻, 新しい生理心理学の展望, 北大路書房, pp.276-287, 1998
- 2-9) 古賀一男:重力基準の問題, 牧野達郎編, 知覚の可塑性と行動適応, ブレーン出版, pp.75-87, 1998
- 2-10) 狩野千鶴:自己運動知覚と視覚系運動情報, 心理学評論, Vol.34, No.2, pp.240-256, 1991
- 2-11) Glasauer, S., and Mittelstaedt, H.: Perception of spatial orientation in microgravity, *Brain Research Review*, Vol.28, pp.185-193, 1998
- 2-12) Oman, C.M., Howard, I.P., Shebilske, W.L., and Taube, J.S.: Visual orientation in unfamiliar gravito-inertial environments, paper presented at Bioastronautics Investigators' Workshop, Galveston TX, 2001.1
- 2-13) Oman, C.M.: Human Visual Orientation in Weightlessness, Levels of Perception, Springer Verlag (in press)
-

第3章

複数結節点を持つ連結形状の空間認知に関わる 諸変数

3.1 本章の目的

3.2 実験の概要

3.2.1 実験方法

3.2.2 実験装置

3.2.3 空間の連結形状の選定

3.2.4 実験手順

3.3 結果および考察

3.4 まとめ

3.1 本章の目的

第2章では、1つの結節点に連結された、6つの室から構成される空間内を移動する際の空間認知を扱った。その中で、ある1つの場所を基準に全体の空間構成を把握する被験者が見られた。1つの結節点しか持たない空間では、そのような方法で全体の空間構成を把握することができるが、現在建設中のISSや、今後建設されるであろうステーションでは、複数の結節点を持つ複雑な形状となる³⁻¹⁾。そのような場合に、ある一つの場所を基準に全体の空間構成を把握する方法では、結節点ごとに基準となる場所を設ける必要があり、さらに、それらの位置関係をどのようにとらえるかが問題となると考えられる。そこで、このように複数の結節点からなる空間の連結形状や内部での自身の位置や姿勢がどのように把握されるか検討する必要があると考えた。複数の結節点からなる空間の連結形状は、結節点の数が増えるに従い幾通りもの形状があるが、それらを系統的に操作して実験を行う必要がある。

本章は、空間認知の難しさの観点から、複数の結節点を持つ空間の連結形状を分類する変数を仮説的に設定し、予備的な実験を行い、その妥当性を検討することを目的とする。

3.2 実験の概要

3.2.1 実験方法

複数の室が連結された仮想内部空間において、一方の端（出発点）からもう一方の端（終着点）まで移動する課題を被験者に与え、終着点において出発点の方向を答えさせる「方向指示実験」と、体験した経路について模型を用いて再現させる実験（以下「模型組立実験」と呼ぶ）を行う。

空間の認知は、空間構成の把握およびそこでの自身の位置や方向の把握からなるが、模型組立実験により空間の構成がどのように認識されているかを、そして方向指示実験により自身の位置および姿勢がどのように認識されているかを調べる（図3-1）。

地上において街や建物の空間認知を調べるためにスケッチマップを描かせる方法があるが、本研究では3次元的な移動を扱うため、地図の代わりに各室の模型を使って連結形状を組み立てさせる方法を開発した。模型組立実験で用いる60分の1スケールの模型はスタイロフォーム製で、直方体のモジュールの接合部分は粘着質になっているため、被験者は一つずつ分かれている直方体と立方体の室の模型を順次交互に接続していくことが出来る。

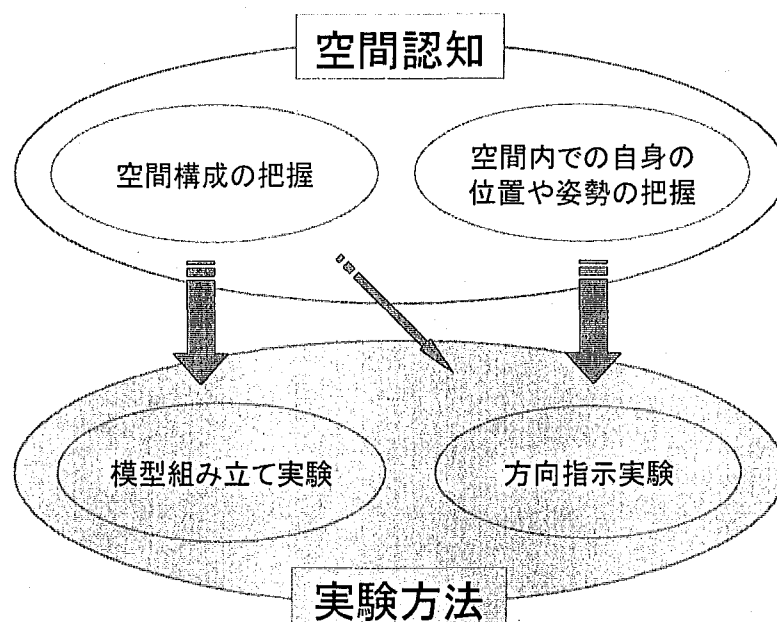


図3-1 被験者の空間認知とそれを捉えるための実験方法

実験において、終着点から出発点を指示させる方法を用いる理由は、あくまで空間配置と自身の姿勢の把握状況を調べるためである。地上においても、自らのおおよその位置や姿勢を把握していないと不安感や、時には恐怖感に襲われることがある³⁻²⁾。さらに無重力の宇宙空間では、それらの感覚が殊更増すと考えられる。しかし、従来の宇宙ステーションの設計は、自身のいる室と、その中での自身の姿勢さえ把握していれば良いという考えでなされてきた。

また、地上での訓練でも、個々の室ごとに体験訓練するだけで、それらが連結された状態での訓練はされていない³⁻¹⁾。そのため、Mirに搭乗した宇宙飛行士は、室から室へ自然に移動できるようになるまで1ヶ月を要したこと³⁻³⁾や、自身の位置や姿勢に対する他の室の位置が3次元的に分からないことで潜在的な危険性を感じたことを報告しており³⁻⁴⁾、自身の位置や姿勢に対する他の室の位置関係を把握していることは必要である。

3.2.2 実験装置

本章で使用した実験装置およびCG画像の作成に用いたソフトウェアの仕様は、第2章と同様である。

宇宙空間における移動時の特徴として、一度動き出したら積極的に制動をかけない限り止まらないという、慣性の影響がそのまま現われることがある。そこで本章の実験では、コントローラのプログラムを変更して、前後 (x 軸)、左右 (y 軸) および上下 (z 軸) の平行移動 (t_x , t_y , t_z) は慣性を考慮したものとし、無重力環境下での状況を再現した。回転の慣性についても同様に変更を試みたが、操作が非常に困難になるために、本実験では取り入れていない。

3.2.3 空間の連結形状の選定

実験に用いた空間は、3または4つの直方体の室（各 $3\text{m} \times 3\text{m} \times 15\text{m}$ ）が、立方体（各 3m 四方）の室で連結された内部空間である。それぞれの室の間は壁で仕切られており、先を見通すことは出来ない。他の室と連結する壁面の中央部分にのみ、ハッチを模擬的に表した灰色の円形部分があり、被験者の視点はそこを通過してある室から連結された別の室へ移動することができる（図3-2）。

上記の連結形状を選定した理由は、第1に、MirやISSが同様の形状であり、これまでの宇宙飛行士の報告³⁻³⁾、³⁻⁴⁾からもISSでは空間認知の難しさが問題になると考えられ、その対策が早急に必要であること、第2に、現在使用されているロケットやスペースシャトルの打ち上げ能力から考えると、実験で用いる直方体の室程度の大きさになることである。

本研究では、空間の連結形状のみが空間認知に与える影響を調べるために、各室内の壁面は、クリーム色（マンセル表色系でおよそ7.5Y 9/3）の単色とした。

また、空間認知の容易さの観点から考えると、一直線の連結形状が最も空間認知が容易であると考えられる。しかし、一直線の形状ではモーメントアームが長くなり、一方の内部での人の動きが他方に影響を及ぼし、材料実験等で求められる $10^{-4} \sim 10^{-6}\text{G}$ の微小重力環境を維持できない問題や、宇宙ステーションの姿勢制御が難しくなる問題が生じる。よって、モーメントアームをできるだけ小さくするために、現在の宇宙ステーションでは、個々の室を中心に集めた、幾つもの折れ曲がりを持つ複雑な形状となっている。

そこで、どのような空間の連結形状の特徴が、空間認知の形成に影響するかを以下のように仮説的に設定し、それに従って本実験で扱う空間形状を定めた。

1. **曲折数**：経路の折れ曲がりの回数である。地上における経路探索の研究においても述べられているように³⁻⁵⁾、曲折数が増えると方向の把握が難しくなると仮定する。本研究では直角の折れ曲がりのみを扱う。
2. **幾何学的な面数**：屈曲した経路の軌跡を含む平面の最小数を表したものである。例えば表3-1の形状3は水平な1面に含まれ、形状4は垂直な1面に含まれるので、幾何学的な面数は共に1である。同一の曲折数を持つ形状でも、幾何学的な面数が増えると空間を把握することが難しくなると仮定する。

3. 身体姿勢を考慮した面数：その空間を移動する際の行動の基準面（主観的な床面）の数である。無重力環境では、移動する際の身体軸（身体の上方向）が重力方向に拘束されず自由である。したがって、上下方向への移動の際に、身体軸を回転させて進むことが可能である。無重力環境下では、頭部を進行方向に向け、身体軸はそのまま移動することも可能であり、その方が局所的な移動時の空間識は容易と考えられる。しかし、本研究ではモジュールが多数連結された長い経路空間を対象としており、そのような空間では不可避である身体軸の変化の影響を求めるため、この変数を設定した。既往研究や宇宙飛行士からの逸話的な情報から^{3-6), 3-7)}、それまで移動していたある平面から、それに直行する平面へと行動の基準面が移り変わることによって、身体軸の方向や身体の向きを正しく把握し続けることが困難になることが考えられる。図3-3上は水平面内を右方向に移動するので身体軸は変化せず行動の基準面は同じであり、「身体姿勢を考慮した面数」は1である。一方、図3-3下は上方への移動の際に身体軸が変化し、それまで水平面であった行動の基準面が垂直面が変わるので、この面数は2となる。身体姿勢を考慮した面数が増えると空間を把握することが難しくなると仮定する。
4. 身体回転の順序：同様の空間形状であっても、出発点の位置やそこでの身体軸の方向および身体の向きの違いにより、経路を移動する際の身体回転の順序が異なり、それが空間認知に影響すると考えられる。例えば、表3-1の形状6と7は同様の空間形

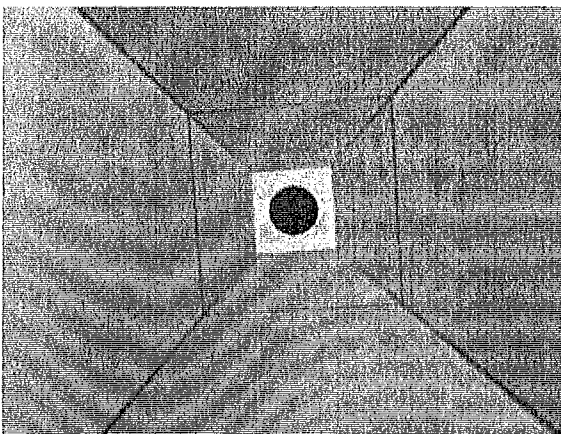


図3-2 被験者に提示した実験映像の例

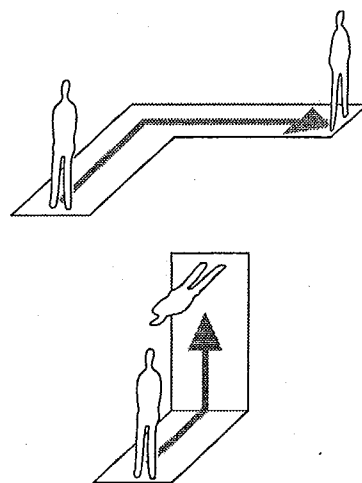
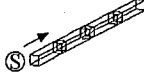
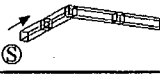
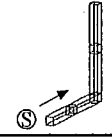
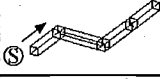
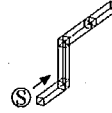
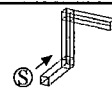
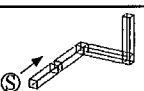
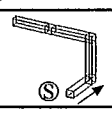
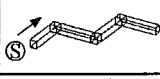
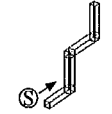
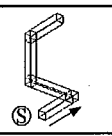
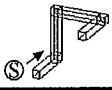


図3-3 移動時の身体軸の変化による基準面の移り変わり

状であるが、形状6は最初右に曲がって次に上に移動するのに対して、形状7は上方に移動したのち左に移動する。これら身体回転の順序の違いによる空間の把握の仕方への影響を検討する。

これらをまとめると、表3-1のように分類される。ここに示す回転の順序および空間形状は、幾何学的面数と身体姿勢を考慮した面数の組み合わせの中で考えられる一例を挙げたものである。実験で使用する空間形状の選定にあたり、考えられるすべての形状の中から、対称性などを考慮し、表3-1の番号の付いている9つの形状を用いる。

表 3-1 本章の実験で用いる空間の連結形状と各変数

曲折数	幾何学的面数	身体姿勢を考慮した面数	身体回転の順序	連結形状	形状番号
0	∞	1	(直進)		—
1	1	1	右		1
		2	上		2
2	1	1	右-左		3
		3	上-下		4
	2	2	上-右		5†
			右-上		6
			上-左		7
	3	1	1	右-左-右	
4			上-下-上		—
2		2	左-上-右		8
		3	上-右-上		9

† 結節点数2, (S) スタート位置
 — 本章の実験では使用しない空間の連結形状

3.2.4 実験手順

実験の流れを図3-4に示す。

実験に先立って、被験者にコントローラの操作に慣れさせるためダミーの空間内で十分練習させる。被験者は自身のコントローラの操作により実験空間内を移動体験した後、出発点の方向を指示し、体験した空間の模型を組み立てる。これを1回の試行とし、形状ごとに4回の試行を行う。各試行の移動は、出発点から終着点までの一方向のみである。また、各試行の終了時において、被験者に正解は教えない。

ここで、以降の議論において、被験者の移動方向を明確にするために、身体を中心とした座標系（身体座標系）を定義する（図3-5）³⁻⁸⁾。身体を中心にして前後方向をx軸（前方が正）、左右方向をy軸（左方が正）、足先から頭頂部方向をz軸（上方が正）とし、各軸は重心で交わる。また、各軸周りの回転をそれぞれroll, pitch, yawとする。実際の宇宙における無重力環境下で移動する際には、頭部のみをpitch方向で上に回転させ、泳ぐような姿勢で移動することがあるが、本研究では頭部と身体は固定された状態としている。

方向指示実験では、被験者に方向を指し示させつつ、自身を中心に水平面上、仰角45度、俯角45度について、方位角を前後、左右、およびその中間の8方向に分割した24方向、および真上、真下を加えた計26方向のいずれかに最も近い方向を「後方斜め下」というように言葉で答えさせ記録する（図3-6）。

模型組立実験では、被験者は個別の直方体（各3m×3m×15m）と立方体（各3m四方）の室の模型（スタイロフォーム製60分の1スケール）を、交互に接続していく。組み立ては、まず直方体の室の端の粘着部分に立方体の室を付け、その立方体の残り5方向のいずれに次の直方体の室が繋がるかを考え、接続する。これを交互に繰り返し、体験した空間の連結形状を組み立てていく。

以下、簡単のため、特に明記がない限り、「左」「右」は身体座標系でyaw方向の左右、「上」「下」はpitch方向の上下とする。

被験者は、20歳代の大学院生6名（男子4名、女子2名）を用いる。空間の提示順序による結果の偏りを考慮して、3名（男子2名、女子1名）の被験者には、形状番号3→7→8→1→5→6→4→9→2の順序で実験を行い、残り3名は逆の順番で行う。

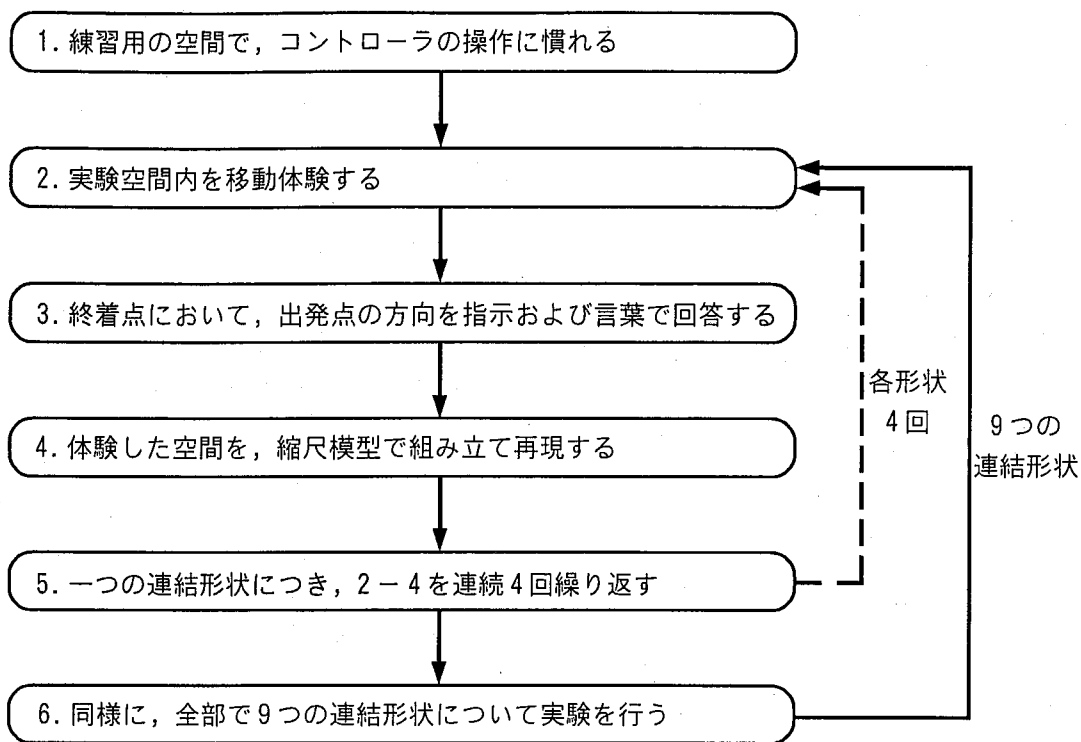


図3-4 実験の流れ

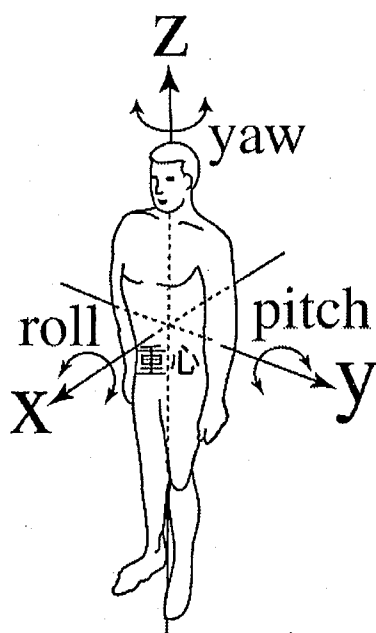


図3-5 身体座標系の定義

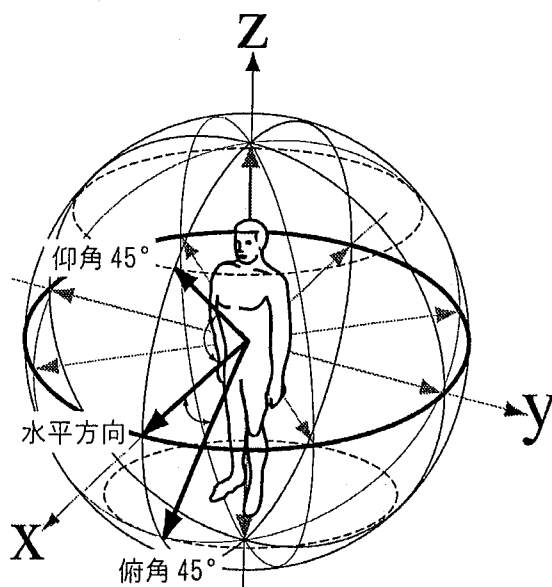


図3-6 出発点の指示方向

<教示文>

「あなたは、連結された幾つかの室から構成される宇宙ステーション内の一方の端にいます。ここが出発点です。宇宙ステーションは、3または4つの直方体の室が、立方体の室で連結されてきています。正面に見える灰色のハッチを模擬した部分を通り抜けることで、次に連結されている立方体の室に行くことができます。立方体の室内は、入ってきた壁面と、次に室が連結されている一壁面のみ、ハッチがついています。立方体の室で、経路が分岐することはありません。次々に室を移動し、白いハッチがある他方の端まで進んでください。そこが終着点です。終着点で自身の見ている方向に対して、出発点の方向がどちらの方向であるか、指で指し示してください。同時に、その方向を言葉でも答えてください。方向を指し示す言葉は、上下、左右、前後の組み合わせで、『左後方下』のように答えてください。また、方向の回答後に、体験した空間の形状を、縮尺模型を組み立てて再現してください。それでは、この空間内で、少し練習してみましょう。」

――練習開始――

「それでは、次から本番です。1つの形状につき、4回連続して試行を行っていただきます。各試行の終了時に、正解は教えません。全部で9つの形状について、実験を行っていただきます。

実験の合間には休憩時間を取りますが、実験中でも疲れたり頭が痛くなったときはすぐに申し出てください。実験を中止して休憩を取っていただきます。また、上下左右の感覚が混乱することで、気持ちが悪くなって吐き気がしたり、頭が痛くなることがありますので、気分がすぐれないときはすぐに申し出てください。実験を中止して安静にさせていただきます。

それでは、はじめます。」

――実験開始――

3.3 結果および考察

各被験者の試行ごとの方向指示および模型組立実験の結果を図3-7に示す。縦軸はそれぞれ、各被験者の全試行（各被験者36回）に対する誤り割合の総和を表す。方向指示および模型組立を全く誤らない被験者Aから多く誤った被験者E, Fまで、被験者間に大きな個人差が見られた。誤りの少ない被験者（被験者B, C）は、1回目の試行で誤っても、2回目以降は正しく答える傾向がある。しかし、誤りが多い被験者D, E, Fは、2回目以降の試行でも正しく答えられない比率はほとんど変化していない。

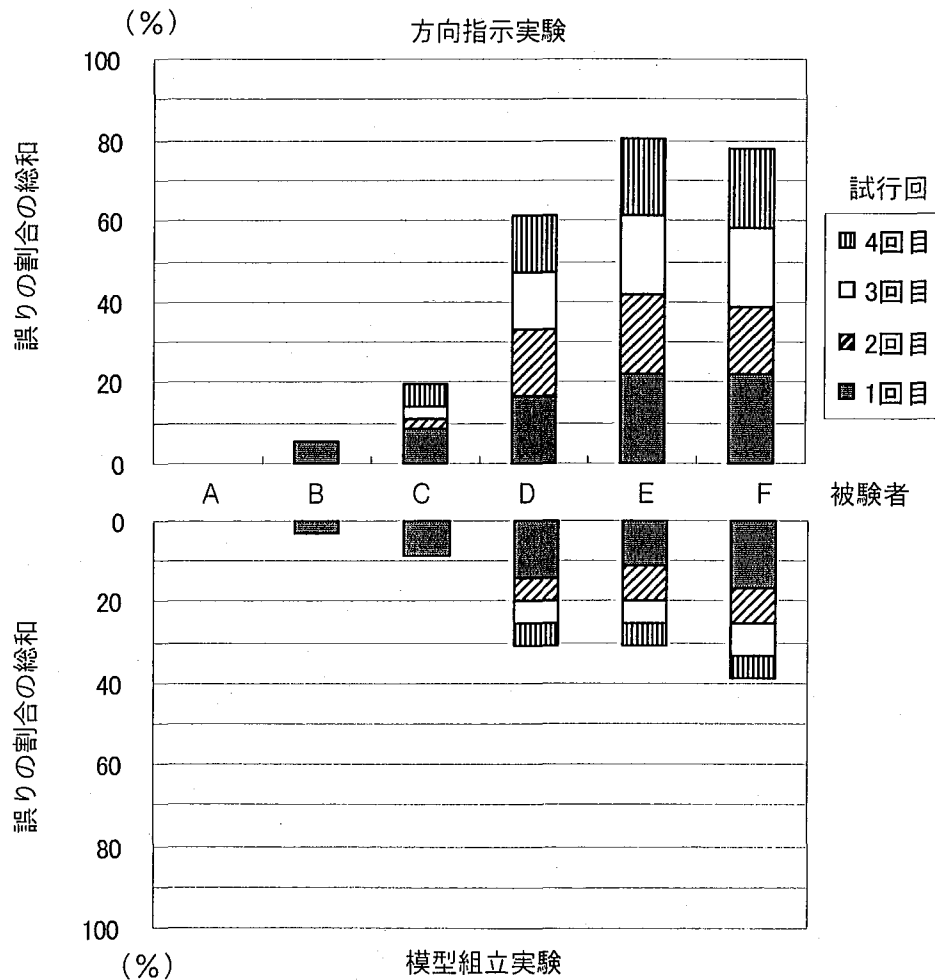


図3-7 各被験者の試行回別の方向指示および模型組立実験の結果

試行回ごとの方向指示および模型組立実験の誤りの割合を図3-8に示す。方向指示実験では、1回目の試行を除き、試行回数を重ねることによる学習効果はほとんど見られなかったが、模型組立実験では、2回目以降の試行においても、試行ごとに若干ではあるが誤りが少なくなる傾向が見られた。

また、方向指示実験の誤りの割合の総和が、模型組立実験のそれよりも多いのは、方向指示実験には空間形状と終着点での視点の位置および方向の関係全体を一度にとらえることが要求されるのに対し、模型組立実験では、各曲折における視点移動方向に対する次の室が連結されている方向のみを順次想起すれば良いためであると考えられる。これは、模型を組み立てる作業中に、方向指示の誤りに気付く場合が数例あったことからもうかがえる。

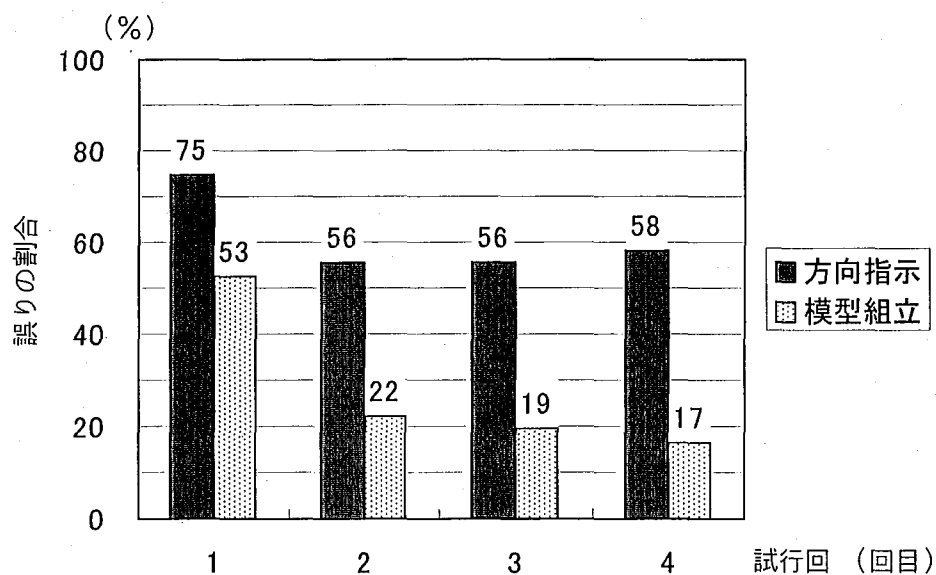


図3-8 試行回別の方向指示および模型組立実験の誤りの割合

図3-9に、形状別の全試行（各形状24回）に対する方向指示および模型組立実験における誤りの割合の総和を示す。図3-9上の方向指示実験の結果では、全体的な傾向として、曲折数が増えるに従い、出発点の方向を誤る割合が増えている。同一の曲折数を持つ形状では、幾何学的面数が増えるに従い（形状3、4と形状5、6、7）、同一の幾何学的面数を持つ形状では、身体姿勢を考慮した面数が増えるに従い（形状1と2、形状8と9）、誤る割合が増えている。水平・垂直の両方向の誤りの割合は、形状の曲折数および幾何学的面数が増えるに従い多くなっている。また、図3-9下の模型組立実験の結果においても、曲折数および幾何学的面数が多い形状8、9で間違いが特に多く見られ、身体姿勢を考慮した面数の多い形状9の方がやや誤りが多いことから、本研究で設定した空間の連結形状に関する各変数が妥当であることが示された。

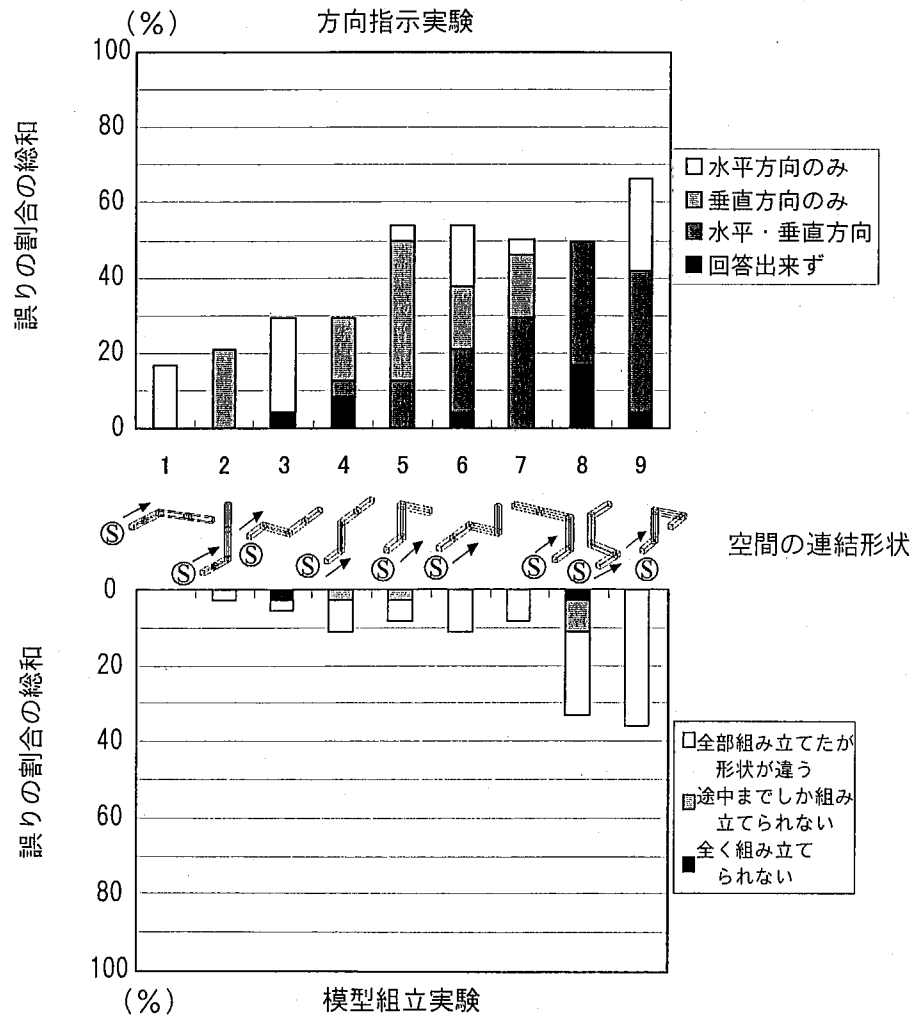


図3-9 形状別の方向指示および模型組立実験の結果

次に、模型は正しく組み立てたが、方向指示を誤った場合の原因について考察する。右方向へ1回曲がる形状1について、実際には終着点での姿勢に対して右後ろに出発点が位置する場合でも、誤って左後ろを指す回答が17%見られた(図3-10右)。このことから、指示方向を誤った被験者は、実際には右に回転する映像を体験しているにもかかわらず、自身の身体座標系が回転していることを認識せず、終着点での身体座標系を出発点のままであると認識していると推測できる。

同様に、曲折で上方に1回曲がる形状2では、身体座標系の回転を認識したと考えられる被験者は出発点の方向を「後上」と答えたが(図3-11左)、上方への移動時にそれを意識せず、終着点での身体座標系の方向を出発点のままであると認識していると推測できる17%の被験者は出発点の方向を「後下」と答えた(図3-11右)。なお残り4%(1試行回)は組み立てられた形状が正しくなかった。

また、曲折数2の形状では、各曲折において身体座標系の回転を正しく認識できたか否かで4通りの可能性がある。形状7について、両方の曲折で身体座標系の回転を正しく認識した場合、終着点での身体座標系は図3-12-aのようになり、それに対する出発点の方向は「左後上」である。以下、1番目の曲折で上への移動時には身体座標系の回転を正しく認識したが2番目の曲折で左への回転移動を誤認した場合(図3-12-b)、1番目の曲折で身体座標系の回転を誤認し、2番目の曲折では正しく認識した場合(図3-12-c)、両方の曲折で誤認した場合(図3-12-d)それぞれの指示方向は図中に示すようになるが、実験の結果得られた割合は、順に50%、4%、17%、25%の計96%であり、方向を答えられなかった1試行を除きすべての場合を説明できる。その他の形状についても、身体座標系の回転の認識の有無により方向を誤ると考えると、多くの場合について方向指示の誤りを説明できることが確認された。

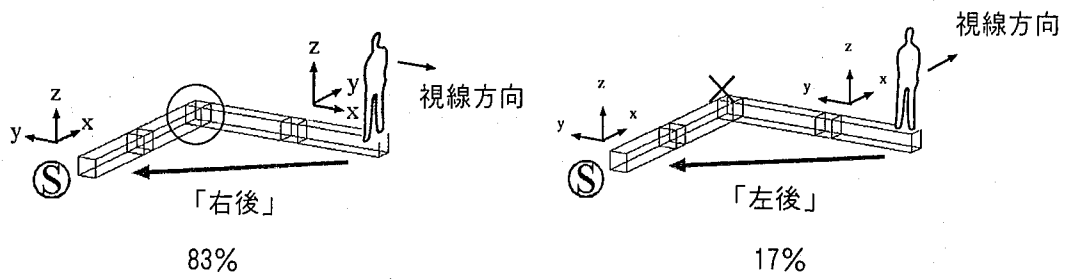


図3-10 右方向への移動で身体座標系が回転することの認識の正誤による指示方向の違い

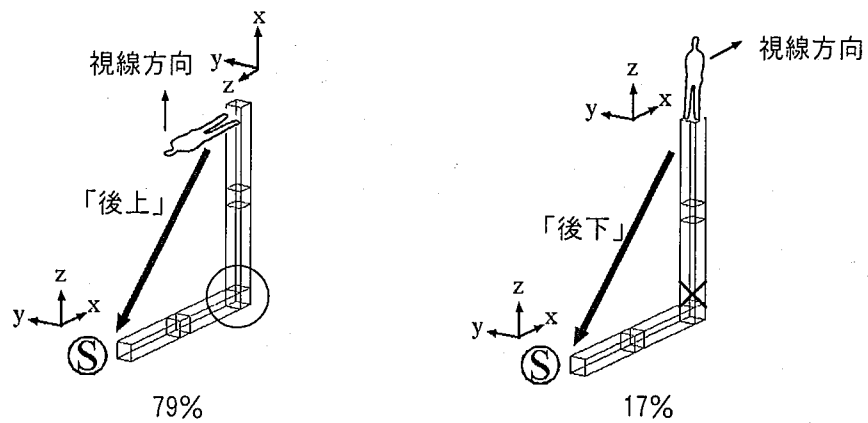


図3-11 上方移動時に身体座標系が回転することの認識の正誤による指示方向の違い

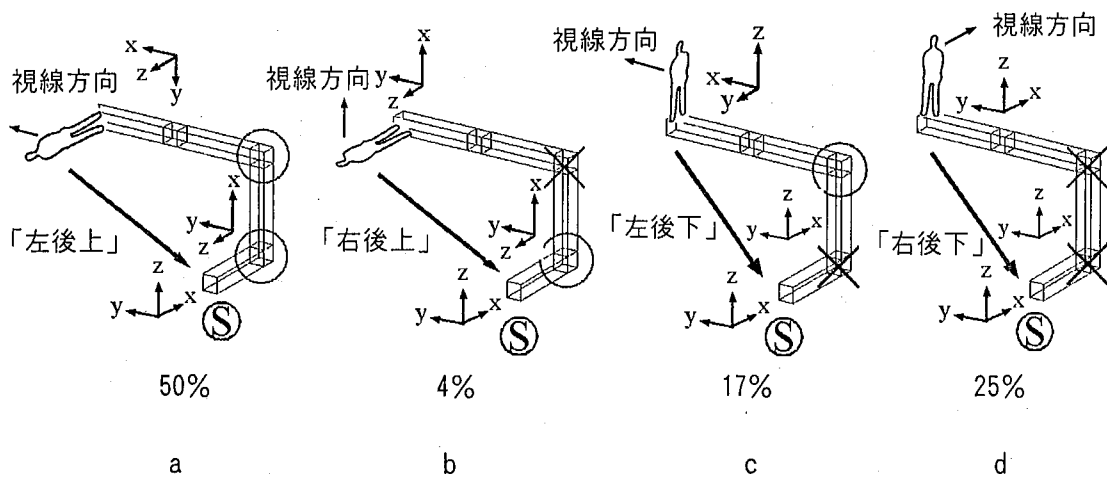


図3-12 各曲折において身体座標系が回転することの認識の正誤と方向指示

その他の影響要因として、回転方向の順序の違いの影響については、図3-9に示すように同一の形状である形状6と7の方向指示の誤りの差はわずか（1試行回）であった。

また室の数の違いを形状5と形状7の結果から検討したところ、これも誤りの数は形状7の方が1回少なかったが、形状5では上方向の回転を誤る試行が多いの対し、形状7では上、左の両方向の回転を誤認して指示方向を誤る割合が多かった。

さらに、形状8は形状5や6と比べて誤りが1試行回数分少ないが、その内容を見ると、形状8では上方向と左右方向の両方向の誤りや、方向が全く分からなくて回答できないことがあった。しかし本実験の範囲では、被験者数や扱った形状の数が限られているため、これらの影響について明確な結果は得られなかった。

模型組立実験で誤りが特に多く見られた形状8, 9の実験において、組み立て時の誤り方を吟味すると、そこには共通性が見られた。すなわち、図3-13に示す形状8の3番目の曲折において、その直前の空間内での身体軸を中心とした系で「右」への移動を模型で組み立てると、正しくは図3-13左となるが、誤った3名の被験者は図3-13右のように組み立てた。この誤りは、そこまでの曲折で自身の身体座標系が回転したことを考慮せず、出発点での姿勢を基準とした空間座標系で「右」に組み立てたためと考えられる。これら3名の被験者は、図3-14に示す形状9の3番目の曲折点においても、その直前での身体座標系での「上」への移動を模型を用いて組み立てる際に、出発点での姿勢を基準とした空間座標系で「上」に組み立てていた（図3-14右）。

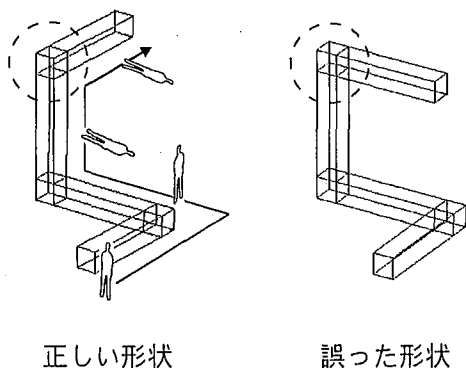


図3-13 模型組立実験の結果（形状8）

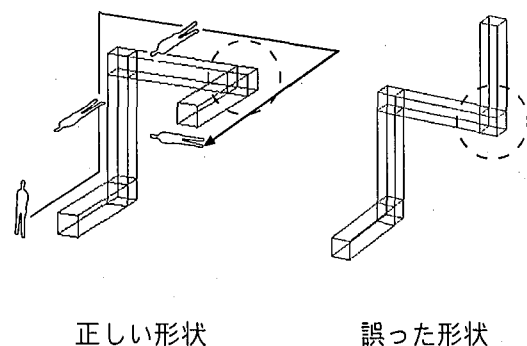


図3-14 模型組立実験の結果（形状9）

本章の実験で得られた結果から、第2章3.2の「VRシミュレーションの有効性の検討」で論じた、身体感覚を通して感じる重力の方向の認識が影響したか否かを考察する。

図3-10, 3-11に示すように、水平方向および垂直方向の回転において、8割程度の被験者は視覚的な情報によって自身の身体座標系の回転を認識し方向を正しく答えているので、多くの場合は重力の方向が意識されることはなかったと考えられる。実際に実験中、視覚誘導自己移動感覚 (vection) の実験³⁻⁹⁾で報告されているような身体姿勢の揺れが被験者に見られたことから、被験者は視覚情報によって自身の移動を知覚していたと考えられる。

ただし、図3-13, 3-14に示した模型組み立ての実験では、出発点での姿勢が保持されて誤る場合が多い。これは、VRによる空間体験時ではなく、視覚的な体験を模型によって構成する時の環境が影響している可能性もある。これについては、本章の実験で用いた単純な構成の限られた範囲の実験からは問題点を指摘するに留め、次章の実験結果からも考察する。

以上、方向指示の結果からは、同一の曲折数を持つ空間でも幾何学的面数や身体姿勢を考慮した面数が異なると、そこでの方向の把握のしやすさは異なり、特に地上では起こりえない身体座標系の回転を伴う移動が方向の認識に大きく影響することが示された。Lacknerら³⁻¹⁰⁾も指摘しているように、これまで重力による「上下」のある世界に住んできた我々が持つ、そこで培われてきた規準的な視点(canonical view)のため、上方への移動により身体座標系が回転しているにも関わらず、終着点での身体座標系の方向を出発点のままである誤認してしまうと考えられる。また、模型組立実験の結果からも同様に、被験者を中心とした身体座標系と、出発点での姿勢を基準にした空間座標系が混同されてしまうことがあることが示された。

3.4 まとめ

本章の実験より明らかになったことを以下にまとめる。

1. 方向指示の間違いは、空間形状の曲折数、幾何学的面数、および身体姿勢を考慮した面数が増えるに従い増える傾向が明らかになり、空間認知の難易に影響する要因として今後の実験で扱う妥当性が確認できた。
2. 曲折における回転移動により身体軸が回転しているにも関わらず、それを認識せずに誤った方向指示をしたり、空間形状の再構成では、身体軸を中心とした相対座標系と、出発点での姿勢を基準にした絶対座標系を混同することがあることが明らかになった。

本章は空間の連結形状に関する諸変数の妥当性を確認するための予備的な実験であり、被験者数が少なく、扱った形状が比較的単純で殆ど誤らない被験者もいたことなどから、限られた結論しか導けないが、重力のレファレンスのない3次元空間ではどのような空間が認知し難いのか、といった前例のない研究課題に対して、初歩的な解答の手がかりと今後の研究の軸となる枠組みが得られた点で重要であると考え。次章では、より多くの被験者に対して複雑な形状を用いて実験を行い、空間構成やその内部における自身の姿勢を誤る要因を明らかにする。

参考文献：

- 3-1) Oman, C.M., Shebilske, W.L., Richards, J.T., Tubre, T.C., and Beall, A.C., and Natapoff, A.: Three dimensional spatial memory and learning in real and virtual environments, *Spatial Cognition and Computation*, Vol. 2, No. 4, pp.355-372, 2000
- 3-2) Lynch, K.: *Image of the City*, p.4, The MIT Press, 1960, 丹下健三, 富田玲子訳, 都市のイメージ, p.4, 岩波書店, 1968
- 3-3) Richards, J.T., Clark, J.B., Oman, C.M., and Marshburn, T.H.: *Neurovestibular Effects of Long-Duration Spaceflight: A Summary of Mir Phase 1 Experiences*, National Space Biomedical Research Institute, 2001
- 3-4) Shebilke, W., Tubre, T., Willis, T., Hanson, A., Oman, C.M., and Ericson, J.: *Simulating spatial memory challenges confronting astronauts*, *Proceedings of the IEA 2000/HFES 2000 Congress*, pp. 2-350 - 2-352, 2000
- 3-5) Golledge, R.G. Ed.: *Wayfinding behavior*, The Johns Hopkins University Press, 19990
- 3-6) 大野隆造, 串山典子, 添田昌志: 上下方向の移動を伴う経路探索に関する研究, *日本建築学会計画系論文集*, 第516号, pp.87-91, 1999.2
- 3-7) 向井千秋, 五十嵐眞: 微小重力環境と宇宙酔い, *JOHNS*, Vol.11, No.7, pp.967-972, 1995
- 3-8) Howard, I.: *Human Visual Orientation*, John Wiley & Sons, pp. 6 - 7, 1982
- 3-9) 矢野澄男: 映像と身体の反応, *テレビジョン学会誌*, Vol.50, No.4, pp.429-435, 1996
- 3-10) Lackner, J.R., and DiZio, P.: *Human orientation and movement control in weightlessness and artificial gravity environments*, *Experimental Brain Research*, Vol.130, Issue 1, pp.2-26, 2000

第4章

複数結節点からなる空間の連結形状と 空間認知の関係

4.1 本章の目的

4.2 実験の概要

4.2.1 実験方法および手順

4.2.2 空間の連結形状の選定

4.3 実験結果

4.3.1 空間の連結形状別の結果

4.3.2 被験者別の結果

4.3.3 模型の組み立て方と形状の誤りの関係

4.4 空間を誤認する要因に関する考察

4.4.1 誤りの要因の分類

4.4.2 空間の連結形状別の傾向

4.4.3 被験者別の傾向

4.4.4 上下・左右の回転方向と身体座標系の誤認の関係

4.5 VRシミュレーションの有効性の再検討

4.6 まとめ

4.1 本章の目的

第3章では、2または3つの結節点を持つ9種の連結形状について、6名の被験者を用いて実験を行った。しかし、被験者数の少なさや、扱った形状の簡単さから、空間の連結形状別や個人別の誤りの特徴を解明するには至らなかった。

そこで、本章では、新たに4つの結節点を持つ9種の連結形状について、20名の被験者を用いて実験を行い、複数の室が連結されて構成される仮想無重力内部空間において、空間の連結形状やその内部での自身の姿勢を把握する際に起こる誤りを分析し、それらの誤りの要因を明らかにすることを目的とする。

4.2 実験の概要

4.2.1 実験方法および手順

本章の実験で用いた実験方法および実験装置は、第3章と同様である。

複数の室が連結された仮想内部空間において、一端（出発点）から他端（終着点）まで移動する課題を被験者に与え、終着点において出発点の方向を答えさせる「方向指示実験」と、体験した経路を模型により再現させる「模型組立実験」を行った。方向指示実験から、空間内における被験者自身の位置や姿勢の把握のしかたを、そして模型組立実験から、空間の構成の把握のしかたを調べる。

実験の手順は第3章と同様に、被験者は実験に先立ち、コントローラの操作に慣れるためダミーの空間内で十分練習した後、自らの操作により実験空間内を移動体験する。各試行の移動は、出発点から終着点までの一方向のみである。終着点にたどり着くと、まず出発点の方向を指示し、その後体験した空間の模型を組み立てる。これを1回の試行とし、各形状につき連続2回の試行を行う。被験者は各試行の終了時に正解を知らされない。

第3章では、1つの空間について4回連続の試行を行ったが、2試行回以降は試行回数の増加による方向指示実験および模型組立実験の成績の向上があまり見られなかったため、今回は1つの空間につき2回連続の試行を行った。

4.2.2 空間の連結形状の選定

表4-1に、第3章の実験で空間認知への関連が確認された空間の連結形状の各変数を示す。これに従い、5つの直方体の室およびそれらを連結する4つの立方体の室からなる、最大4つの曲折を持つ形状を分類し、その中から実験に用いる形状を選択する。

表4-2に示す身体回転の順序および空間の連結形状は、幾何学的面数と身体姿勢を考慮した面数の条件を満たす形状の中の一例である。本章の実験では、表4-2右端に示すAからIの9種の形状を用いる。同欄に数字が振ってある形状は、第3章の実験で用いた形状とその番号である。本章の実験で用いる各形状を選択する上で考慮した点を以下に述べる。

- ・共に一水平面内で左右へ回転移動をする形状で、曲折数の影響を調べるための形状（形状A, E）。
- ・曲折数は等しく、上下方向への移動の影響を調べるための形状（形状A, B, C）。
- ・上下、左右方向へ交互に回転移動することの影響を調べるための形状（形状D, I）。
- ・上方または下方へ、2回連続して「コ」の字状に回転移動する影響を調べる形状（形状G, H）。
- ・同一の曲折数で、幾何学的面数や身体姿勢を考慮した面数の違いを調べる形状（形状A～Cおよび形状E～I）。

被験者は20歳代の男女23名を用いた。そのうち3名が気分を悪くするなどして実験を途中で中止したため、男子12名、女子8名の計20名から欠損のないデータが得られた。空間の提示順序による結果の偏りを考慮して、10名（男子6名、女子4名）の被験者には、形状番号3→5→9→6→4→8→7→1→2の順序で実験を行い、残り10名は逆の順番で行った。

表4-1 空間の連結形状の各変数

連結形状の各変数	説明
曲折数	経路の折れ曲がりの回数
幾何学的面数	折れ曲がった経路を包含する平面の最小数
身体姿勢を考慮した面数	経路を移動する人の身体軸を考慮した基準面(床面)の数で、yaw方向への移動では変化しないが、pitch方向へ移動するごとに1増加する
身体回転の順序	各曲折点における一連の回転移動の方向。連結形状は等しくても、出発点の位置や身体姿勢が違くと身体回転の順序も異なる

表 4-2 実験で用いる空間の連結形状と各変数

曲折数	幾何学的面数	身体姿勢を考慮した面数	身体回転の順序	連結形状	形状
0	∞	1	(直進)		-
1	1	1	右		1
		2	上		2
2	1	1	右-左		A
		3	上-下		4
	2	2	下-右		B
			上-左		C
3	1	1	右-左-右		-
		4	上-下-上		-
	2	2	左-上-右		8
		3	上-右-上		D
4	1	1	右-左-右-右		E
		5	下-上-下-上		-
	2	2	右-右-上-左		F
		3	右-左-下-下		G
		4	上-上-左-下		H
	3	3	上-右-上-右		I

「形状」欄の「-」は本実験では使用しない形状、数字は第3章の実験で用いた形状を表す。

Ⓢ：出発点

4.3 実験結果

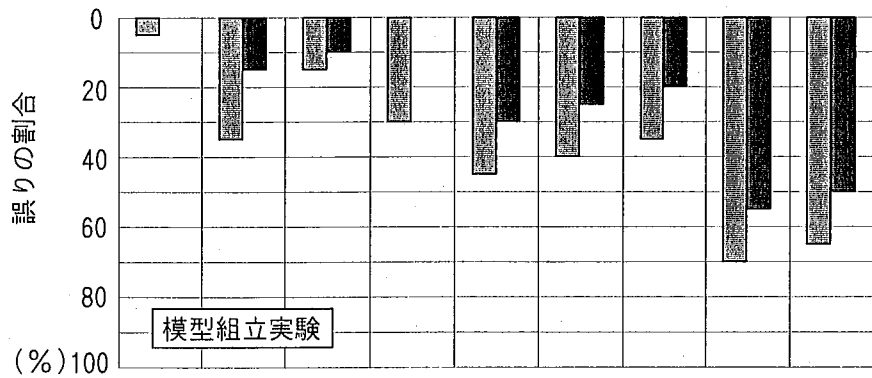
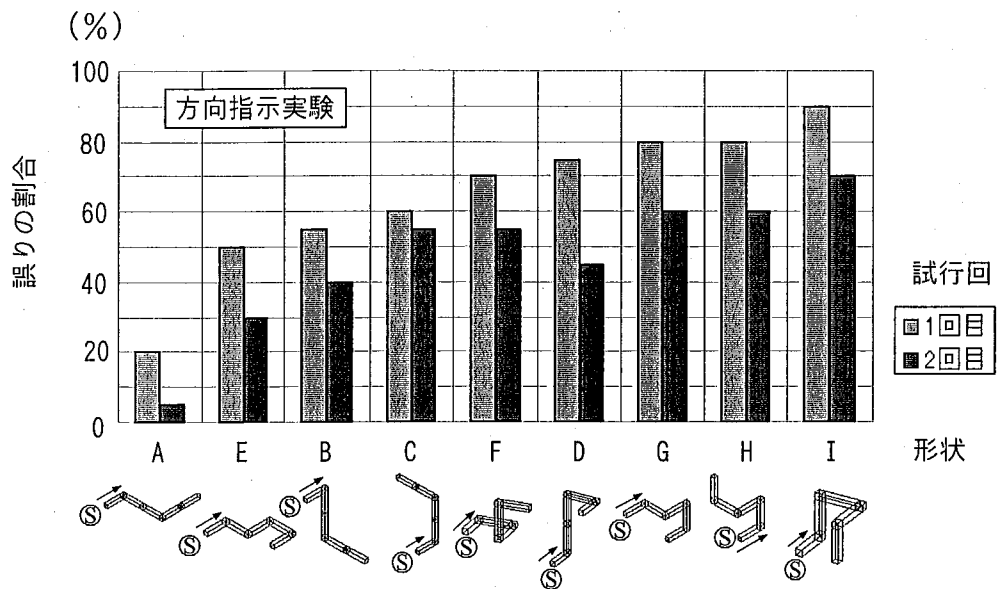
4.3.1 空間の連結形状別の結果

空間の連結形状別の各実験の結果を図4-1に示す。縦軸は、各形状の全試行回数（各形状20回）に対して誤った試行回数の割合（「誤った試行回数」/「各形状の試行回別の全試行回数」×100(%)）を試行回別に示す。ここで、方向指示実験の誤りとは、第3章の実験手順で述べた26通りある指示方向のうち、正解の方向以外を答えた場合である。また、模型組立実験における誤りとは、被験者が体験した形状以外を組み立てた場合である。

方向指示実験では、設定した変数である「幾何学的面数」の増加に伴い、また同一の幾何学的面数では「曲折数」や「身体姿勢を考慮した面数」の増加に伴い、誤りの割合が増加しており、第3章で設定したこれらの変数の妥当性を再確認する結果となった。例えば、形状Eでは「曲折数」は4であるが、重力下と同様に一水平面内の回転移動であるため「幾何学的面数」および「身体姿勢を考慮した面数」は1で、形状B, C, Dのように「曲折数」は少ないが「幾何学的面数」および「身体姿勢を考慮した面数」が多い形状より誤った割合は少ない結果となった。

模型組立実験においても、方向指示実験の結果とほぼ同様の傾向を示した。しかし、形状Eの組み立てを誤る割合は形状B, Cより多いことから、模型組立実験では曲折数が誤りに大きく影響していると考えられる。また、形状Gでは組み立てを誤る割合がやや少なく、形状Hで組み立てを誤った割合が一番多かった。この理由については、後で考察する。

2回の試行を行うことによる被験者の学習の効果については、方向指示実験および模型組立実験ともに、第1回目より第2回目の試行の方が統計的に有意に誤りが少なかった（ χ^2 検定で $p < 0.01$ ）。



曲折数	2	4	2	4	3	4
幾何学的面数	1		2		3	
身体姿勢を考慮した面数	1	2	3	4	3	

図4-1 連結形状別の方向指示および模型組み立てを誤った割合

4.3.2 被験者別の結果

被験者別の方向指示実験および模型組立実験の結果を図4-2に示す。従来の地上における空間認知に関する研究では、個人によって方向指示や空間構成の把握の正確さが異なることが明らかになっている^{4-1), 4-2)}。縦軸は、各被験者の全試行回数(9形状×2試行回=18回)のうち誤った割合を示し、試行回別に色分けしてある。横軸は、方向指示実験において誤りの少ない被験者の順に並べてある。

方向指示実験の結果では、誤る割合が20%に満たない被験者から、90%以上に達する被験者まで、個人によって大きな差があることが分かる。

模型組立実験の結果をみると、全く誤らない被験者から80%以上誤る被験者まで、こちらも被験者間のばらつきが大きかった。しかし、方向指示実験と模型組立実験の誤りの割合の相関はさほど強くはなく(相関係数 $R=0.71$)、被験者12~14のように、模型の組み立ての成績が良くても、方向指示を誤る被験者などが見られた。

また、男女差については統計的に有意な差は見られなかった。これは、性差よりも個人差のほうが大きいためと考えられる。

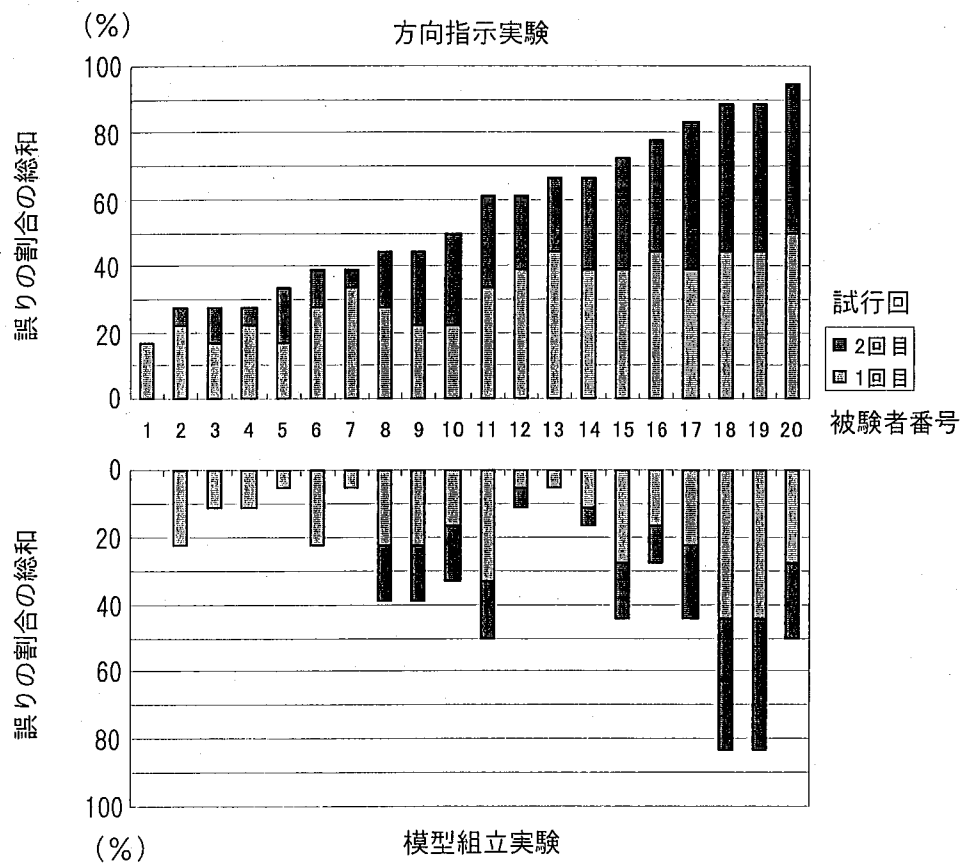


図4-2 被験者別の方向指示および模型組み立てを誤った割合

4.3.3 模型の組み立て方と形状の誤りの関係

第3章の模型組立実験において、曲折での回転移動により、出発点における視点の位置と方向を基準に固定された空間座標系に対して身体座標系が回転することを考慮せずに、模型を誤って組み立てていると思われる例が幾つか見られたので、本章の実験では、被験者が模型を組み立てる様子を観察した。すると、曲折における回転移動に合わせて模型を回しながら組み立てる被験者、模型を回さずに組み立てる被験者、そして試行により模型を回したり回さなかったりする被験者が見られた。

図4-3の縦軸は、各被験者の全試行回数（各被験者18回）に対して、模型を回さないで組み立てた試行回数の割合、横軸は、図4-2下と同様の、各被験者が模型組み立てを誤った割合を表し、各被験者を図中に記入する。この図から、自身の回転移動に合わせて模型を回しながら組み立てる被験者は全体的に形状を誤る割合が低いが、模型を回さないで組み立てる被験者の誤る割合にはばらつきがあり、模型を回さないで組み立てる被験者の方が形状を誤りやすい傾向が見られた。

実験を通じて、試行により模型を回さないで組み立てる方法（固定法）と回転させながら組み立てる方法（回転法）を併用した被験者では、5名中4名の被験者が模型を回転させて組み立てた時の方が誤りが少なかった（表4-3）。

これらの結果は、2次元的な地図の上方向と自身の進行方向が一致しない時に生じる移動の困難さ（整列効果）^{4-3), 4-4)}を、地図を回転させることで減少させるのと同様に、模型を回転させることでその方向と自身が体験した移動方向と一致させたため、模型の形状を誤らずに組み立てることができたと考えられる。

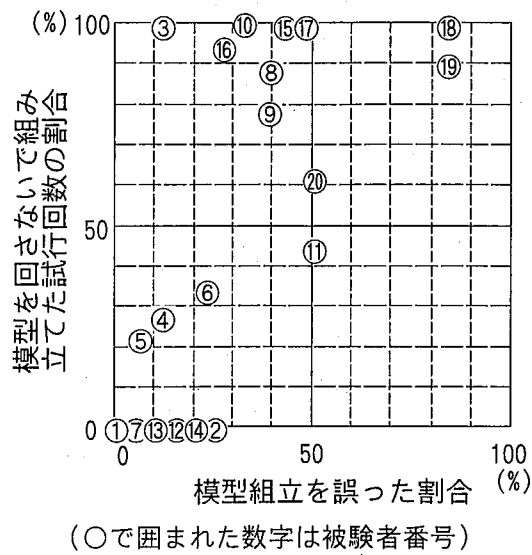


図4-3 模型の組み立て方と誤った形状を組み立てた割合

表4-3 固定方と回転方での組み立て形状を誤る割合

単位 (%)

被験者番号	4	5	6	11	20
全試行での模型組み立てを誤った割合	11	6	22	50	50
固定法による試行において誤った割合	20	0	50	75	73
回転法による試行において誤った割合	8	7	8	30	14

4.4 空間を誤認する要因に関する考察

前節4.3より、空間の連結形状や個人により、課題の成績にばらつきがあることから、空間形状や内部での姿勢の把握を誤るには幾つかの要因があると考えられる。本節では、各実験における被験者の回答から、方向指示および模型組み立ての誤りの要因を考える。それらを形状別および被験者別にまとめ、その傾向を捉える。

4.4.1 誤りの要因の分類

実験結果を誤りの要因別に分類し、それらの割合を表4-4に示す。以下に、誤りの要因について説明する。

a. 方向指示について

第3章および本章の実験結果から、方向指示を誤る主な要因として、認識した空間の連結形状は正しいが、曲折における回転移動時に、空間座標系に対して身体座標系が回転することを誤認して方向を指示した場合と、誤って認識した空間の連結形状をもとに自身の位置や姿勢を考えて方向を指示した場合が考えられる。以下に、それぞれの場合について説明する。

身体座標系の誤認

第3章の実験結果から、曲折における回転移動により空間座標系に対して身体座標系が回転しているにもかかわらず、それを誤認して方向指示をしていると考えられる誤りが見られた。

表4-4 方向指示実験および模型組立実験の回答の分類項目とその割合

実験	方向指示実験					模型組立実験				共通
	正答	身体座標系の誤認	連結形状の誤認	説明不能	無回答	正答	身体座標系の誤認	曲がる場所・方向・順序の誤認	中断	
割合	44.4	18.9	12.5	15.8	1.1	70.0	3.3	18.6	0.8	7.2

単位 (%)

例えば、図4-4に示す、上方に1回曲がる形状では、曲折における上方向への移動時に、身体座標系の回転を正しく認識した被験者は、終着点での自身の視線方向に対して出発点の方向を「後上」と答えたが（図4-4左）、実際には上方に回転する映像を体験しているにもかかわらず、地上における上方への移動のように垂直に移動したと認識したと考えられる被験者は「後下」と答えた（図4-4右）。

このように、身体座標系の回転を誤認したために方向を誤ると考えると、多くの誤りが説明できた。そこで、本報告の実験結果に見られた誤りについても同様に考え、それらを「身体座標系の誤認」と分類する。

連結形状の誤認

空間の連結形状を誤って把握しているために、方向指示を誤っていると思われる場合である。これらの誤りを、「連結形状の誤認」と分類する。

その他、回答された方向が正しい場合は「正答」、上記の2つの考え方では方向指示の誤りが説明できない場合を「説明不能」、方向を答えられなかった場合を「無回答」と分類する。

また、試行中に不意に回転してしまい、それを元の通りに修正できなかった試行を、「試行中回転」と分類し、分析の対象から除外する。

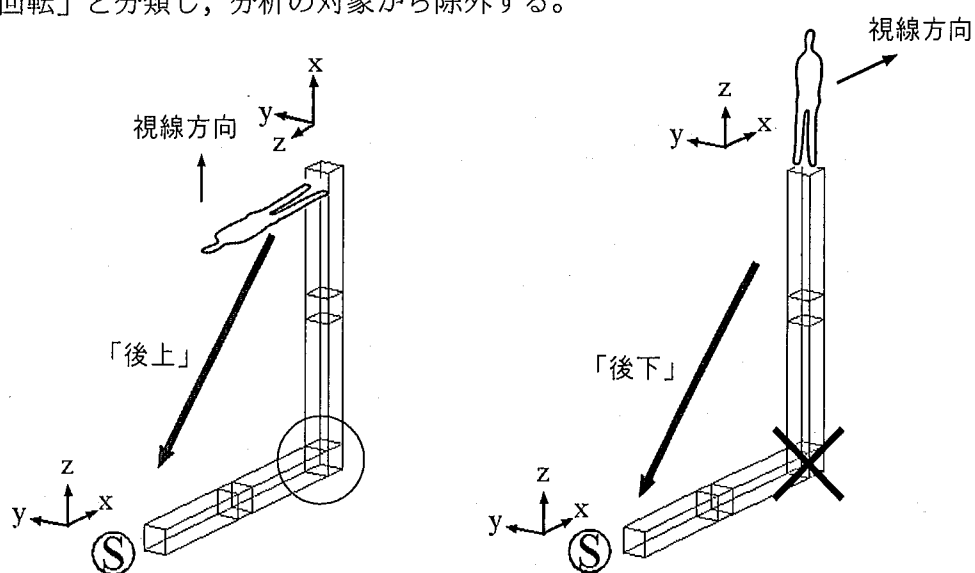


図4-4 上方移動時に身体座標系が回転することの認識の有無による指示方向の違い

b. 模型の組み立て形状について

模型の組み立てを誤る要因として、大きく分けて以下の2つが考えられる。

身体座標系の誤認

曲折において身体座標系が回転することを考慮せずに、誤った空間の連結形状を組み立てていると考えられる場合である。

例えば、図4-5-aは、表4-2の形状Iについて、すべての曲折で身体座標系の回転を正しく認識した時の、正しい組み立て形状である。しかし、2回の上方向への移動の際に、空間座標系に対して身体座標系が回転したことを考慮せず、図4-5-bのように垂直上方に移動したと誤って認識し、それを組み立てたと思われる例が見られた。

また、模型を組み立てる際に、身体座標系でなく、出発点における視点の位置と方向を基準とした空間座標系で模型を組み立てたとも考えられる形状も見られた。再び形状Iを例にとると、正しい組み立て形状である図4-5-aに対して、空間座標系で組み立てた場合は図4-5-cのようになる。ただし、これらについては、身体座標系の回転を誤認して模型を組み立てた場合と絶対座標系で模型を組み立てた場合が同じ形状となり、区別ができない場合もある。

以上をまとめて、「身体座標系の誤認」と分類する。

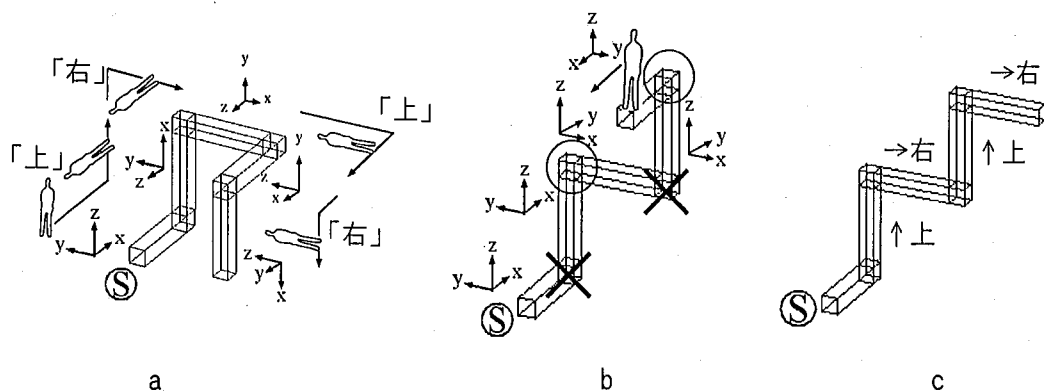


図4-5 正しい組み立て形状(a)と座標系の誤りと思われる組み立て形状(b, c)の例 (形状I)

曲がる場所・方向・順序の誤認

被験者が移動体験した空間を模型を用いて再現する際に、連結形状の配置関係を誤っていると考えられる場合である。すなわち、直進部分を持つ形状A～Dでは、2つ目の立方体で曲がったのに1つ目で曲がったように模型を組み立ててしまう「曲がる場所」を誤る場合や、「上-右-上」を「上-左-上」のように「曲がる方向」を誤る場合、そして、「上-右-上-右」を「右-上-右-上」のように、一連の「曲がる順序」を誤る場合がある。これらが原因と思われるの誤りを、「場所・方向・順序の誤認」と分類する。

その他、組み立てられた形状が正しい場合を「正答」、途中までしか組み立てられない場合を「中断」と分類する。

また、試行中に不意に回転してしまい、それを元の通りに修正できなかった試行を、「試行中回転」と分類し、方向指示実験と同様に、分析の対象から除外する。

これらの誤りの要因を、空間の連結形状別および被験者別にまとめ、その傾向を捉える。

4.4.2 空間の連結形状別の傾向

4.4.1で述べた誤りの要因の分類に基づき、空間の連結形状別に集計したものが表4-5である。各数値は、形状別の全試行（各形状40回）のうち、誤って回答された試行回数割合を示す。

上下方向への回転の認識

形状A, B, Cは、それぞれ曲折数2の形状である。一水平面内での回転移動をする形状Aでは、身体座標系の誤認と思われる方向指示の誤りが無かったのに対し、上下方向へ移動する形状B, Cではそれぞれ28%, 38%と高い割合を占める。左右方向への移動に比べ、上下方向への移動では、空間座標系に対して身体座標系が回転することを認識せずに方向を誤る場合が多いといえる。

空間形状の複雑さと曲がる場所・方向・順序の誤認の関係

曲折数の増加に伴い、模型組立実験の曲がる場所・方向・順序を誤る割合も増えている。分岐数などの平面構成の複雑さが増すと空間の関係性を把握することが難しくなることは、従来の地上における空間認知に関する研究において述べられている⁴⁻⁵⁾。無重力環境下では、曲折数だけでなく、幾何学的面数や身体姿勢を考慮した面数などの空間の3次元的な複雑さが空間構成の把握の難しさに関係することがわかる。

形状GとHの比較

前述4.3.1節に示す模型組立実験の結果（図4-1下）において、形状Hは誤りが多く、

表 4-5 空間の連結形状別の方向指示実験および模型組立実験の誤り

形状	方向指示実験				模型組立実験			試行中 回転
	身体座標 系の誤認	連結形状 の誤認	説明 不能	無回答	身体座標 系の誤認	曲がる場 所・方向・順 序の誤認	中断	
A		3	10			3		
B	28	3	5			10		3
C	38	10	5			10		5
D	10	15	30		10	18		5
E	8	20	8			20		5
F	25	8	13	5	3	20	3	13
G	25	8	25			15		13
H	15	18	18	3	10	33	3	8
I	30	23	20	3	8	43	3	5

x=0 (%)
 0<x<10
 10≤x<20
 20≤x<30
 30≤x

形状Gは誤りが少なかった。これは、形状Hでは、はじめに上方向へ2回連続して移動すると、身体軸（身体の上方向）が、出発点の身体軸に対して上下反対になるにもかかわらず、出発点と同方向に誤認し、続く左方向への移動を模型で組み立てるとき、空間座標系で右方向に組み立てる誤りが多かったためである。一方、形状Gは最後に下方へ2回連続して回転移動するので、その時に身体軸の方向を上下反対に認識しても、模型組み立てには影響しないためと考えられる。

4.4.3 被験者別の傾向

図4-2で示したように、被験者間で実験の正答率に大きな差がある。被験者別の誤りの傾向を捉え、その対策を考えるため、被験者別に実験の正答と誤った回答を要因別に分類し、表4-6に示す。各数値は、各被験者の全試行（各被験者18回）のうち、誤って回答された試行回数の割合を示す。

表4-6の方向指示と模型組み立ての正答の割合を用いたクラスター分析(ウォード法)と、各被験者の誤りの傾向から、被験者を5つのグループに分類した(表4-6, 図4-6)。

また、試行回別の回答の変化を検討する。1回目と2回目の試行で回答が変化した場合の割合をグループ別にまとめ、表4-7に示す。表4-7左端の「回答の変化の種類」がIIの場合は、1回目の試行で模型組立実験は正答で、方向指示実験は身体座標系の誤認をしていたが、2回目の試行では共に正答に変化した場合が、各グループに占める割合を示す。これらの図表から、各グループの空間認知の特徴を捉える。

グループ1: 身体座標系の回転を正しく認識し、回転移動の方向も正確に覚えているため、表4-6の方向指示及び模型組立実験の正答率が共に60%以上と成績の良い被験者のグループである。表4-7左端の「回答の変化の種類」がIの割合が51%であり、1回目の試行から空間の連結形状およびその内部での身体姿勢を正しく把握する場合が多い。また、表4-7左端のIIの割合が14%と比較的多く、1回目の試行では身体座標系の回転を誤る場合があるが、2回目では正しく認識することができる。すなわち、このグループの人達は、この程度の複雑さを持つ連結形状では、視覚的な手がかりを特に与えなくても、簡単な訓練で連結形状や自身の姿勢を正しく把握することができる。

グループ2: 表4-6の方向指示実験の正答率が50%台で、模型組立実験の正答率が60%台の被験者。身体座標系の誤認の割合は11%以下と少ないが、曲がる場所・方向・順序の誤認の割合が22~39%と高いグループである。このグループの人達に関しては、曲がる場所や方向などを分かりやすくするために、サインなどの局所的な視覚情報を空間内部に付加すれば、これらの誤りは減ると考えられる。

グループ3：模型組立実験の正答率は50～72%であるが、方向指示実験の正答率が40%以下の被験者。表4-6において、誤りの要因が分散して見られるグループである。また、表4-7左端のIIIの割合が20%であり、1回目に続き、2回目の試行でも身体座標系の回転を誤る場合がある。そのため、このグループの人達には、グループ2への対策とした局所的な視覚情報に加え、身体座標系の回転を意識させるために、空間全体の方向性を表す視覚的な手がかりを与える必要があると考えられる。

グループ4：移動方向は正しく覚えているために、模型組立実験の正答率は80%以上であるが、「身体座標の誤り」が33～44%と多いため、方向指示実験の正答率は33～39%である。また、表4-7左端のIIの割合は22%であり、1回目の試行では身体座標系の回転を誤認するが、2回目では正しく認識することができる場合がある。したがって、このグループの人達は、空間の方向性を表す視覚情報を与えることで、身体座標系の回転を認識しやすくすれば、自身の姿勢を正しく把握できると考えられる。

グループ5：方向指示及び模型組立実験の正答率が共に20%以下の被験者。模型組立実験で身体座標系の誤認や曲がる場所・方向・順序の誤認が多いため、方向指示実験で連結形状の誤認が多い。また、表4-7左端のIVの割合が11%であり、1回目に続き、2回目の試行でも連結形状の誤認や曲がる場所・方向・順序の誤認をして、向上が見られない場合がある。これらの被験者が空間の連結形状および内部での姿勢を正しく把握するには、視覚的な手がかり以外の方法が必要かもしれない。また、試行中の不意の回転を元に戻せない場合も多かったが、これは空間内に方向性を表す視覚情報を与えれば、解決すると考えられる。

以上、空間の連結形状や内部での自身の姿勢を誤る要因として、主に身体座標系を誤認する場合と、曲がる場所・方向・順序を誤認する場合があり、それらの多寡による空間認知の傾向を個人別に類型化した。個人の類型別に、それぞれの誤りを減らすために効果的な視覚的な手がかりは異なると思う。すなわち、曲がる場所・方向・順序を示すための局所的な視覚情報と、空間全体の方向性を示すための視覚情報が有効であると思う。

表 4-6 被験者別の方向指示実験および模型組立実験の正答と誤り

グループ		1							2			3					4			5	
被験者		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	15	16	17	20	12	13	14	18	19
方向指示	正答	83	72	72	72	67	61	61	56	56	50	39	28	22	17	6	39	33	33	11	11
	身体座標系の誤認	17	6	11	11	33	22	17	6		11	6	22	28	33	28	33	44	33	6	11
	連結形状の誤認		6		11		11	6	11	6		22	17	22	6	22	11		6	50	44
	説明不能			17	6			17	23	28	33	6	28	22	11	33	17	17	22		33
	無回答		17															6			
模型組立	正答	100	78	89	89	94	78	94	61	61	67	50	56	72	56	50	89	94	83	17	17
	身体座標系の誤認				6						6	11	6	11						17	11
	曲がる場所・方向・順序の誤認		6	11	6	6	17	6	39	28	22	11	33	11	11	33	11	6	11	33	72
	中断		17																		
試行中回転						6			11	6		28	6	6	33	11			6	33	

x=0 (%)
 0<x<20
 20≤x<40
 40≤x<60
 60≤x

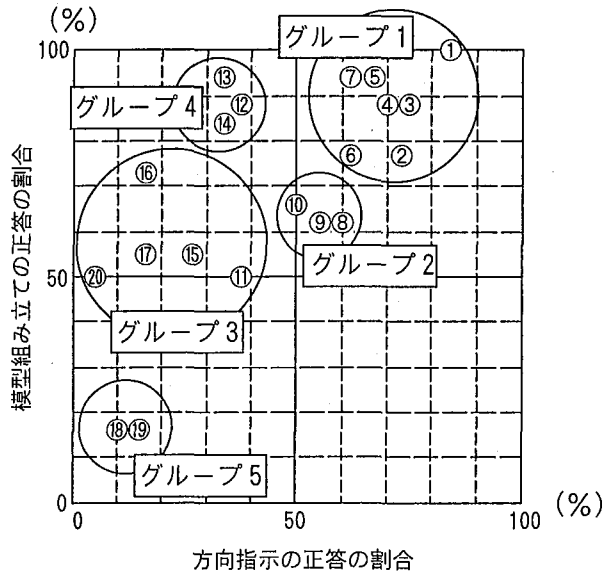


図 4-6 被験者のグループ分け

表 4-7 グループ別の1回目と2回目の試行の回答の変化とその割合

試行回別の回答の変化の種類	試行回別の回答の組み合わせ				被験者のグループ別の回答の割合					
	1回目		→	2回目						
	方向指示	模型組立		方向指示	模型組立	1	2	3	4	5
I	正答	正答	→	正答	正答	51	41	13	15	6
II	身体座標系の誤認	正答	→	正答	正答	14	0	2	22	0
III	身体座標系の誤認	正答	→	身体座標系の誤認	正答	5	4	20	15	6
IV	連結形状の誤認	曲がる場所・方向・順序の誤認	→	連結形状の誤認	曲がる場所・方向・順序の誤認	0	4	2	0	11
V	試行中回転		→	試行中回転		0	0	7	0	11
その他						30	52	56	48	67
合計						100	100	100	100	100

0≤x≤10
 10<x≤20
 20<x
 単位 (%)

4.4.4 上下・左右の回転方向と身体座標系の誤認の関係

4.4.2の「空間の連結形状別の傾向」において、曲折数が2の形状で、一水平面内の回転移動のみの形状Aと、上下方向への回転移動を含む形状B, Cの結果を比較した。左右方向への移動に比べ、上下方向への移動時に、身体座標系の回転を誤認して自身の姿勢を誤ることが多いことが明らかになった。ここで、他の形状についても、上下と左右の回転移動方向の違いと、身体座標系の誤認の関係を考察する。

上下および左右方向への回転移動を伴う、7つの形状（形状B, C, D, F, G, H, I）について考える。各曲折で身体座標系の回転を誤認して、方向指示を誤ったと考えられる回答を表4-8および表4-9に示す。これらの表の「回答された試行数」の欄について、方向指示は正答でも、組み立てられた模型の形状から、明らかに曲がる場所・方向・順序を誤っていると考えられる回答は除く。

表4-8および表4-9の「回転誤認数」とは、身体座標系の回転を誤認した曲折数を表す。「身体回転の順序」は、左から順に、出発点から終着点までの曲折における回転方向と、各曲折で身体座標系の回転を正しく認識したかどうかを「○」「×」で示す。

それぞれの回答を、誤りの傾向から次のイ～ホの5つに分類した。

- イ．正答；方向指示が正答の回答（表4-8, 4-9の「回答された試行数」欄の数字が○で囲まれている回答）。
- ロ．上下×；左右方向の移動時は身体座標系の回転を認識するが、上下方向の移動時はそれを誤認したと考えられる回答（同欄が薄いグレーで塗られている回答）。
- ハ．左右×；上下方向の移動時は身体座標系の回転を認識するが、左右方向の移動時はそれを誤認したと考えられる回答：（同欄が濃いグレーで塗られている回答）。
- ニ．上下左右×；上下, 左右両方向の移動時に身体座標系の回転を誤認したと考えられる回答：（同欄の数字が□で囲まれている回答）。
- ホ．特定不能；同じ指示方向でも、上記イ～ニのいずれか複数が考えられ、特定できない回答（同欄が無印の回答）。

以上の分類について、それぞれの回答が見られた試行数と、その割合を表4-10に示す。また、図4-7にそのベン図を示す。

表 4-8 各曲折における身体座標系の認識の正誤と終着点における身体姿勢および方向指示
(その1)

形状	回転 誤認数	身体回転の順序		認識されたと思 われる形状 と身体姿勢	指示 方向	回答さ れた試 行数	形状	回転 誤認数	身体回転の順序				認識されたと思 われる形状 と身体姿勢	指示 方向	回答さ れた試 行数	
		下	右						右	右	上	左				
B	0	○	○		右後下	19	F	0	○	○	○	○		左後	13	
	1	×	○		右後上	8		1	○	○	×	○		後下	6	
	2	×	×		左後上	3		2	×	○	×	○		左後下	1	
						○	×		×	○						
形状	回転 誤認数	上	左	認識されたと思 われる形状 と身体姿勢	指示 方向	回答さ れた試 行数		○	○	×	×		右下	1		
C	0	○	○		左後上	17	3	×	×	○	×		後	2		
	1	×	○		左後下	12		×	×	×	○		下	1		
	2	×	×		右後下	3		4	×	×	×	×				
D	0	○	○	○		右上	15	G	0	○	○	○	○		左前下	12
	1	×	○	○		右後上	6		1	×	○	○	○		左後下	2
							○			○	×	○				
3	×	×	×		左後下	1	○	×	○	○		右下	2			



被験者に認識されたと思われる、
終着点での身体姿勢と視線方向

表4-9 各曲折における身体座標系の認識の正誤と終着点における身体姿勢および方向指示
(その2)

形状	回転 誤認数	身体回転の順序				認識されたと思われ る形状と身体姿勢	指示 方向	回答さ れた試 行数	形状	回転 誤認数	身体回転の順序				認識されたと思われ る形状と身体姿勢	指示 方向	回答さ れた試 行数
		右	左	下	下						上	右	上	右			
G (続き)	2	×	×	○	○		左前下	-	I	0	○	○	○	○		上	8
		○	○	×	×		右前上	6		○	×	○	○		後上	2	
	3	×	×	×	○		左後下	-		○	○	○	×		上	-	
		×	×	○	×		右前上	-		×	○	○	○		右上	1	
H	0	○	○	○	○		後下	8	II	1	○	○	×	○		右	3
	1	×	○	○	○		左後下	1			○	×	○	×		左上	1
		○	×	○	○		後上	2		×	○	○	×		後上	-	
		○	○	○	×		後上	2		○	○	×	×		後	1	
	2	○	○	×	×		右上	2		×	○	×	○		右下	2	
	3	×	×	○	×		後	3		3	×	×	×	○		右後下	2
		×	×	×	○		右	2			4	×	×	×	×		右


 被験者に認識されたと思われる、
終着点での身体姿勢と視線方向

表4-10および図4-7より、左右方向への移動時に身体座標系の回転を誤認する「ハ」の割合は2% (5試行回) と少ない。一方、上下方向の移動時に身体座標系の回転を誤認する「ロ」は16% (44試行回) であり、すべての形状についても上下方向への移動で自身の姿勢を誤ることが多いことが確かめられた。

上下回転移動の方が座標軸の回転を誤認しやすいことについて、認知心理学の分野で扱われているメンタル・ローテーション (心的回転) の研究⁴⁻⁶⁾が重要な手がかりであると考えられる。メンタル・ローテーションについては、宇宙酔いとの関係は以前から示唆されており、これまで幾つかの研究がなされている^{4-7)~4-9)}。また、地上における空間認知能力との関係を扱った研究⁴⁻¹⁰⁾もあるが、本研究のように無重力環境における空間

表4-10 身体座標系を誤認した方向とその割合

分類	名称	回答された試行数	割合(%)
イ	正答	72	26
ロ	上下×	44	16
ハ	左右×	5	2
ニ	上下左右×	14	5
ホ	特定不能	33	12
その他の誤り		112	40
合計		280	100

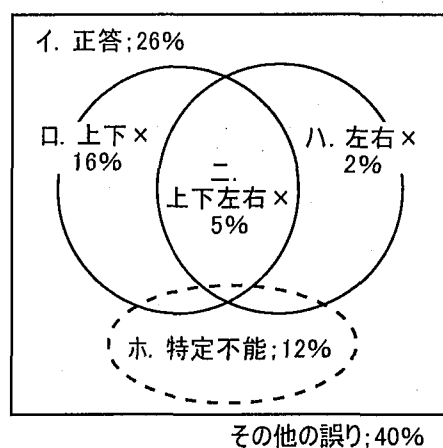


図4-7 身体座標系を誤認した方向とその割合のベン図

認知の問題を扱った研究はない。

本章の実験終了後に行ったインタビューで、どのように方向指示をしたか被験者に尋ねた。20名中15名の被験者が、連結形状を頭の中で思い浮かべて方向を指示しており、残りの5名は感覚で答えた等の回答であった。

前述の15名の被験者について、

1. 出発点を基準に形状をイメージし、その中で自身の座標系を回転させて方向を答える
2. 形状全体を回転させて方向を答える

という2通りの方略が見られ、2番の方略を用いた被験者は3名だったのに対し、1番の方略を用いた被験者は9名見られた。残り3名は不明だった。

従来の3次元図形を2次元的に図示した刺激を用いた研究から、座標系を決定する要因は、外的要因と内的要因に大別され、前者は対象図形自体の持つ性質が決定するもの(対称軸や見慣れた図形との類似性など)、後者は対象図形や観察者の置かれた状況により決まるもの(重力軸など)と述べられている⁴⁻¹¹⁾。

1番の方略を取る際に、自身の座標系を正しく回転させることができないのは、“自身の姿勢は常に上下方向に沿っている”と誤る経験的なものと、重力の影響の2つが主な要因と考えられる。また、本章の実験に用いた空間内部の視覚情報からは、上下の方向性の手がかりが得られないため、主に内的要因が影響したと考えられるが、実際の宇宙ステーション内では、照明や機器の配置といった室内の視覚情報による外的要因も影響すると考えられる。これら室内の視覚情報による方向性の手がかりの影響については、次章で扱う。

4.5 VR シミュレーションの有効性の再検討

第3章において、無重力環境下の空間認知に関する問題を、地上の重力下における視覚的な無重力状態で扱うことの有効性について、予備的な実験の結果から検討した。方向指示や模型の組み立てを行う時に、身体軸と重力方向が一致していることが影響する可能性があるが、実験結果からその影響を検討した。第3章で扱った図4-4に示す形状では、被験者は視覚情報により終着点での自身の姿勢を正しく認識しており、多くの場合は重力の方向が課題の遂行に影響しないことが推察された。

本章で得られた実験結果から、実験への重力の影響をさらに考察する。

形状Gでは、下方へ2回連続して「コ」の字型に回転移動し、終着点で身体軸が上下反対になるので、もし重力が影響しているとすれば、そこでの姿勢や連結形状が重力と同じ方向に誤って認識されると考えた。

方向指示実験では、誤りの説明がつかない場合と、試行中に不意に回転して元に戻せなかった場合の計37.5% (15試行回) を除いて考える。図4-8-aに示すように、身体軸が上下反対になることを正しく認識し、方向指示をした30% (12試行回) の回答や、図4-8-bのように、指示方向は誤っているが、終着点での身体軸は重力方向と一致しない15% (6試行回) の回答は、姿勢の把握に重力の方向が影響していないと考えられる。しかし、図4-8-cのように、終着点での身体軸の方向を、出発点での身体軸の方向のままに誤って方向指示をした17.5% (7試行回) の回答は、方向指示に重力方向が影響した可能性も考えられる。このような誤りの割合は多くないことから、視覚的な情報から自身の姿勢を把握する際に、重力方向の影響は少ないと考えられる。

模型組立実験では、試行中に不意に回転して元に戻せなかった12.5% (5試行回) を除き、模型を正しく組み立てられた割合は72.5% (29試行回) であった。次に、形状は誤っているが、曲がる場所・方向・順序の誤認等、重力の影響ではないと考えられる回答は10% (4試行回) であった。また、図4-8-dのように、下方へ2回連続した移動を垂直下向きに組み立てる例は5% (2名で2試行回) であった^{注4-1)}。このように、出発点における視点の位置および方向を基準にした空間座標系で模型を組み立てた場合は、重力

注4-1) この例は、左右の移動順序も逆に組み立てていると思われる。

方向が影響したとも考えられる。このうち1名の被験者は、上方へ2回連続して回転移動する形状Hでも、2回目の試行で同様の誤りをした。しかし、このような誤りは形状Gおよび形状Hで合計3.75%と少なく、しかも特定の個人に限られることから、模型の組み立てを行う際に重力の方向はほとんど影響しなかったと考えられる。

以上、VRシミュレーションにより、無重力環境下における空間形状およびその内部での自身の姿勢の把握の仕方を調べる際に、重力方向が影響する場合は少なく、その方法は有効であると考えられる。

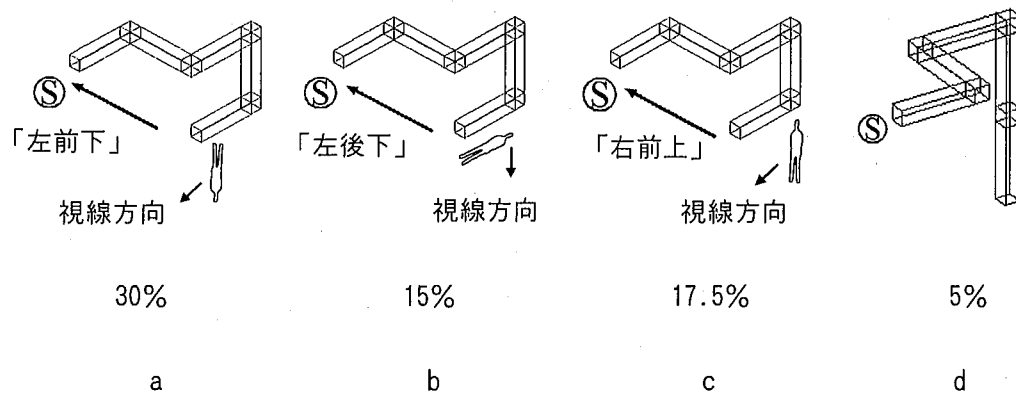


図4-8 形状Gの方向指示および模型組み立ての回答例とその割合

4.6 まとめ

本章では、複数の結節点を持つ仮想無重力内部空間を移動する際の、空間の連結形状と空間認知の関係について扱った。

第3章で設定した、仮想無重力環境下での空間認知の難易に関わると考えられる、空間形状の曲折数、幾何学的面数、および身体姿勢を考慮した面数の各変数の妥当性を再確認した上で、より複雑な形状について多くの被験者を用いた実験により、以下の点が明らかになった。

1. 空間の形状およびその内部での自身の姿勢を誤る主な要因は、曲折における身体座標系の回転の誤認と、曲がる場所・方向・順序の誤認で説明できる。
2. 左右方向への回転移動に比べ、上下方向へ回転移動する場合の方が、身体座標系の回転を誤認しやすい。
3. 個人によって、曲折における身体座標系の回転や、曲がる場所・方向・順序の誤りやすさの傾向が異なり、それらの誤りの対策として、曲がる場所・方向・順序を示すための局所的な視覚情報と、身体座標系の回転を把握しやすくするために空間全体の方向性を示す視覚情報が有効であると考えられる。

また、仮想無重力環境下において、空間の連結形状および自身の姿勢を把握する際に、重力方向が影響することは少ないことを再確認した。

次章では、これまで得られた結果を踏まえ、空間の連結形状および内部での自身の姿勢を把握できる方向性の手がかりを系統的に変化させ、それら付加的な視覚情報の仮想無重力内部空間における空間認知への有効性を検討する。

参考文献：

- 4-1) Kozlowski, L.T., and Bryant, K.J.: Sense of Direction, Spatial Orientation, and Cognitive Maps, *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, Vol. 3, No. 4, pp. 590 - 598, 1977
- 4-2) 添田昌志, 大野隆造: 視環境シミュレーションによる経路探索の方略に関する研究, *日本建築学会計画系論文集*, 第512号, pp. 73 - 78, 1998.10
- 4-3) Levine, M.: You-are-here maps: psychological considerations, *Environment and Behavior*, Vol.14, No.2, pp.221-237, 1982.3
- 4-4) Levine, M., Marchon, I., and Hanley, G.: The placement and misplacement of you-are-here maps, *Environment and Behavior*, Vol.16, No.2, pp.139-157, 1984.3
- 4-5) Golledge, R.G. Ed.: *Wayfinding behavior*, The Johns Hopkins University Press, 1999
- 4-6) Shepard, R.N., and Metzler, J: Mental Rotation of Three-Dimensional Objects, *Science*, Vol.171, pp.701-703, 1971.2
- 4-7) Parker, D.E., and Harm, D.L.: Mental Rotation: A Key to Mitigation of Motion Sickness in the Virtual Environment?, *Presence*, Vol.1, No.3, pp.329-333, 1992
- 4-8) Matsakis, Y., Lipshits, M., Gurfinkel, V., and Berthoz, A.: Effects of prolonged weightlessness on mental rotation of three-dimensional objects, *Experimental Brain Research*, Vol. 94, pp.152-162, 1993
- 4-9) Reschke, M.F., Kornilova, L.N., Harm, D.L., Bloomberg, J.J., and Paloski, W.H.: Neurosensory and Sensory-Motor Function, *Space Biology and Medicine*, Vol.3, *Humans in Spaceflight*, Book1, pp.135-193
- 4-10) Vandenberg, S.G., and Kuse, A.: Mental rotations, a group test of three-dimensional spatial visualization, *Perceptual and Motor Skills*, Vol.47, pp.599-604, 1978
- 4-11) 松井孝雄: 空間認知の異方性と参照枠 — 整列効果はなぜ生じるのか —, *慶應義塾大学大学院社会学研究科紀要*, Vol.34, pp.51-58, 1992

第5章

内装デザインが空間認知に及ぼす影響

5.1 本章の目的

5.2 実験の概要

5.2.1 実験設定

5.2.2 空間の連結形状の選定

5.2.3 実験方法および手順

5.3 結果および考察

5.3.1 設定別の実験課題の成績差

5.3.2 空間の連結形状および内装デザインと空間認知の関係

5.3.3 被験者の方向指示時の姿勢と空間認知

5.3.4 空間認知の容易さと被験者の方略および行動の関係

5.4 まとめ

5. 1 本章の目的

第3章および第4章では、複数の結節点から構成される仮想無重力内部空間を移動する際の、空間の連結形状と空間認知の関係を扱った。その結果、個人によって、曲折における身体座標系の回転や、曲がる場所・方向・順序の誤りやすさの傾向が異なり、それらの誤りの対策として、曲がる場所・方向・順序を示すための局所的な視覚情報と、身体座標系の回転を把握しやすくするために空間全体の方向性を示す視覚情報の有効性が示唆された。しかし、ISSの内部空間は、現在のところそのような空間認知の問題を十分に考慮した設計がなされていない。

本章では、複数の連結点から構成される仮想無重力内部空間において、配色等の視覚的な方向性の手がかりを系統的に変化させた設定の下で実験を行い、それら視覚情報の空間の連結形状および自身の姿勢の把握に対する有効性を検討することを目的とする。

5.2 実験の概要

5.2.1 実験設定

第4章では、複数の結節点から構成される仮想無重力内部空間における、連結形状と空間認知に関する実験を行った。その結果、個人によって曲折における身体座標系の回転や、曲がる場所・方向・順序の誤りやすさの傾向が異なることが明らかになった。それらの誤りの対策として、曲がる場所・方向・順序を示すための局所的な視覚情報と、身体座標系の回転を把握しやすくするために空間全体の方向性を示す視覚情報が有効であることが考えられる。

これまでのスペースシャトルや宇宙ステーションなどの有人宇宙システムにおける内装デザインの経験や既往研究^{5-1)~5-7)}から、自身の位置や方向を知るための視覚的な手がかりとして、以下の4つが考えられる。表5-1に、第4章で見られた方向指示および模型組立実験の誤りの各要因と、それが見られた割合、および4つの方向性を与える視覚的な手がかりが誤りの各要因に対して有効であるかを示す。

1. 照明（照明は天井面だけに取り付ける）
2. 機器の配置（機器の上下方向をそろえ、取り付け位置は壁側にする）
3. 文字情報（位置や方向を示すラベル（文字情報）を室内に貼る）
4. 壁面の配色（床面、天井面、壁面の配色を変える）

1番の照明による方向性の手がかりについては、宇宙飛行士だけでなく、水中でダイバーが自身の方向を定位するために水の明るさの違いを用いたり、飛行機のパイロットが雲中飛行する際に太陽を使用する例が報告されている^{5-1),5-2)}。

2番の機器の配置については、Skylabなどの経験から、内装設計指針として示されている⁵⁻³⁾。これらの手がかりにより、一室内での方向性を知ることができ、第4章で見られた試行中に不意に回転してしまい、元の状態に戻せないこと（表5-1の「試行中回転」）は無くなると考えられる。しかし、1番の照明や2番の機器の配置により、複数室から構成される空間の方向性は与えることができない。

3番の文字情報に関しては、ISSではNASA-JSC-27260C⁵⁻⁴⁾に基づいて、場所や方向性を示すラベルが室内に張られている。したがって、宇宙飛行士はラベルを見れば、自分が何処にいて、どの方向に面しているかを認識できるようになっている（図5-1、図5-2）。

すなわち、文字により、局所的な場所を特定する情報と、空間全体の方向性を示す情報が与えられている。局所的な場所を示す文字情報で曲がる場所・方向・順序を誤ることは減少すると考えられる。また、ISSでは空間全体に対して前後 (forward, aft), 左右 (port, starboard), 上下 (overhead, deck) が決められており、それら空間全体の方向性を示すラベルにより、空間内での自身の姿勢を把握することができ、身体座標系の誤認や試行中に回転して元に戻せないことが減少すると考えられる。曲がる場所・方向・順序についても、移動のシーケンスを覚えれば全体の方向性を示すラベルが手がかかりとなり得るが、それらは自身の姿勢により変わる可能性があるため、局所的な場所を示すラベルに比べて有効ではないと考えられる。

しかし、文字情報から直感的に空間構成や自身の姿勢を把握するのは困難であり、これを軌道上ですぐに認識できるようになるには相当の訓練が必要と考えられ、緊急時など時間的・精神的に余裕がないときに、そのラベルの効果を十分に発揮できるか疑問である。NASA-CR-177498⁵⁻⁵⁾に、Skylabのミッション時の文字によるラベリングについて、「特に斜めや上下逆さで近づいていく場合には、文字が小さく読みにくく、思っていたより役立たなかった」との記述もある。実際に、図5-3に示す建設中のISSの写真を見ても、上記に述べた文字の可読性の問題や、空中に浮遊しないようにマジックテープで貼られた物品等がラベルを遮ってしまう問題がある。

4番の配色による床面と天井面の区別に関しては、ISSの各室では、配色により床面と天井面の区別がされており、試行中に回転して元に戻せないことは減少すると考えられる。しかし、壁面の配色により空間全体の方向性は示していない。表5-1に示すように、文字情報と同様に、壁面の配色により空間全体の方向性を示すことが可能である。本研究の第2章における被験者へのインタビューから、壁面テクスチャのアルファベット文字の配置による方向性をつけた設定では35%の被験者が自身の姿勢を把握しやすいと述べたのに対し、向かい合う2壁面に色を付けた場合には90%であった。さらに、NASA-CR-177498においても、場所の定位や経路探索の際の配色による手がかかりの有効性が示唆されている。

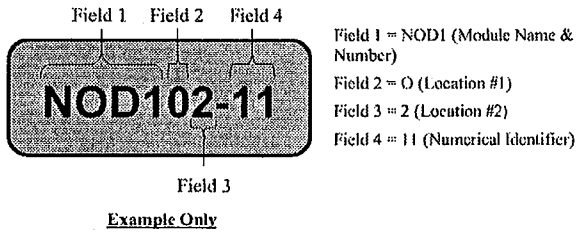
以上、複数の室が連結される空間の構成やその内部での自身の位置や姿勢を把握するために、文字情報および壁面の配色により空間全体の方向性を与えることが有効であるが、本章ではそのうち、より直感的で分かりやすいと考えられる壁面の配色を扱う。

表5-1 第4章の実験で見られた空間を誤認する要因と、それらに対する空間に方向性を与える視覚情報の有効性の検討

	誤りの要因	割合(%)	照明	機器の配置	文字情報		壁面の配色	
					局所的な場所の情報	空間全体の方向性	一室内の上下	空間全体の方向性
方向指示	身体座標系の誤認	22				○		○
	連結形状の誤認	10				△		△
	説明不能	15						
	無回答	1.1						
模型組立	身体座標系の誤認	3.4				○		○
	曲がる場所・方向・順序の誤認	18.9			○	△		△
	中断	0.9						
試行中回転		7.2	○	○		○	○	○

○：誤りの要因に対して有効であると考えられる視覚情報

△：誤りの要因に対して手がかりとなり得ると考えられる視覚情報



Field 1, Module Name & Number
LABs - Habitation Module
LABs - Laboratory Module
APM - ESA Attached Pressurized Module
JPM - Japanese Experiment Module
JEP - Japanese Experiment Logistics Module
MPLx - Mini Pressurized Logistics Module
NODx - Node
AL - Airlock
CEP - Cupola
EMAx - Pressurized Mating Adaptor

The "x" indicates module number.

Field 2, Location #1
P - Port
S - Starboard
O - Overhead
D - Deck

Field 3, Location #2
0 - Forward Face
1 - Alcove
2 - Radial Ports
3 - Midbay
4 - Rackbay
5 - Air Enclosure



図5-1 ISSの内部空間に使用されている、場所や方向を示すラベルの例(その1)⁵⁻⁴⁾

図5-2 ISSの内部空間に使用されている、場所や方向を示すラベルの例(その2)⁵⁻⁴⁾

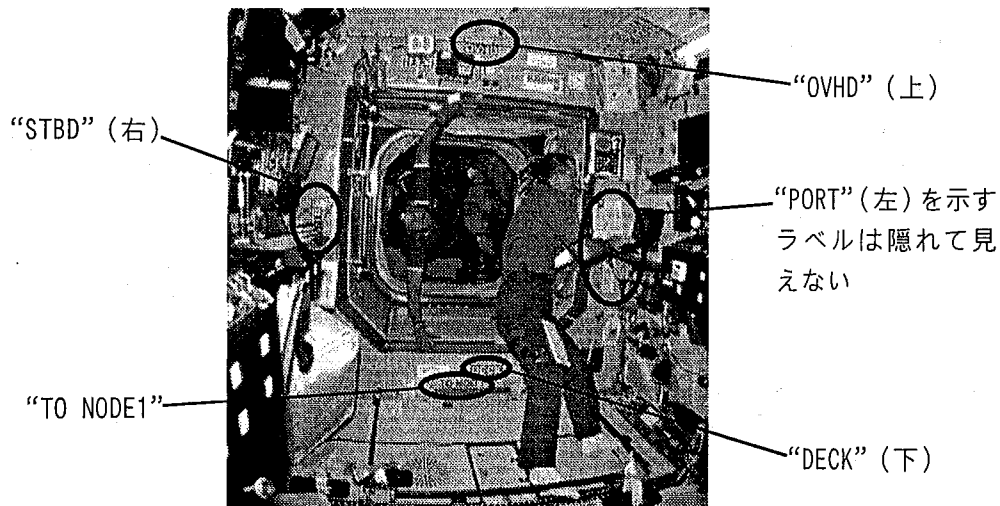


図5-3 ISSのラベルの例(前方から後方を眺める)

配色による空間の方向性の違いが空間認知に及ぼす影響を調べるため、現状のISSの設定に近い個々の室内で床面と天井面の色の区別をした内装デザインと、空間全体の方向性を示す配色を壁面に施した内装デザインを設定する。

また、第4章の結果から、上下方向への移動時に自身の身体座標系の回転を誤認して方向感覚を喪失することが多いことが明らかになった。それらの誤りを減らすために、空間全体の座標系に対して長手方向が水平と垂直に伸びる室（以下、それぞれ「水平方向の室」および「垂直方向の室」とする）を異なる種類にして、水平方向への移動と垂直方向への移動の違いをより明確にする内装デザインも設定する。

これら3つの設定において、方向指示および体験した空間を模型により再現させる実験を行う。被験者が空間の連結形状やその内部での自身の姿勢をどのように把握していたかを調べることで、どのような室内壁面の配色やしつらえの違いが空間認知に及ぼす影響を明らかにする。以下に各設定の説明を示す。

設定Ⅰ（図5-4）：個々の室内で上下方向の手がかりのみ与えられた、現在のISSの内装デザインに近い設定（配色による床と天井の区別；床－茶色，天井－白色，壁面は実験ラック）；被験者を混乱させることが目的ではないので、現状の宇宙ステーション等の設計指針⁵⁻³⁾のように水平および垂直方向の室の上下方向はそれぞれ統一されているが、空間全体の方向性に関する手がかりは無いので、空間構成や内部での自身の位置や姿勢を把握することが困難であることが予想される。

設定Ⅱ（図5-5）：壁面の配色により、出発点を基準とした空間座標系で、連結形状全体の方向性の手がかりを与えた設定（壁面の配色；左－赤色，右－緑色，下－茶色，後－灰色，壁面は実験ラック）；水平方向と垂直方向の室の違いを床面の色を変えることで示している。壁面の配色により、移動による自身の位置や姿勢の変化を把握しやすい。しかし、配色の設定が設定Ⅰに比べて複雑なため、被験者によっては視覚情報を有効に使えず逆に混乱することも考えられる。

設定Ⅲ（図5-6）：水平および垂直方向に連結される室を違う種類にして、壁面の配色により連結形状全体の方向性を与えた設定（壁面の配色；左－赤色，右－緑色，下－茶色，垂直方向の室の壁面はすべて収納棚）；垂直方向の室の種類が異なることで、空間構成を把握しやすくした設定。また、壁面の配色により自身の位置や姿勢を把握しやすいと考える。地上における複数階に渡る移動に近い設定である。垂

直方向の室の使用方法が制限されてしまうことが欠点である。

なお、各壁面の配色をおおよそのマンセル表色系で示すと、赤色 (2.5RP 8/6), 緑色 (10G 9/2), 茶色 (7.5YR 8/2), 灰色 (5B 7/3) である。

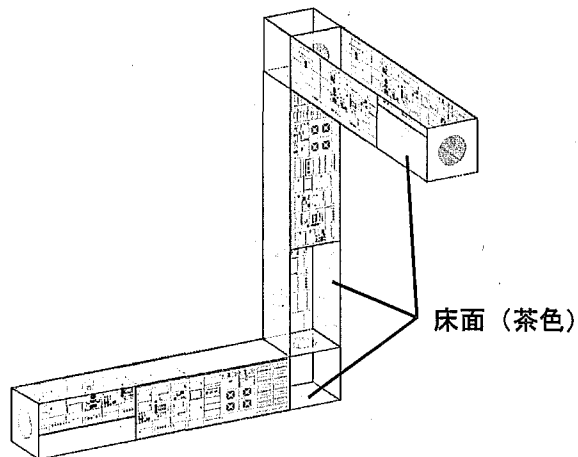


図5-4 設定Ⅰ (各室内で配色による床面と天井面の区別)

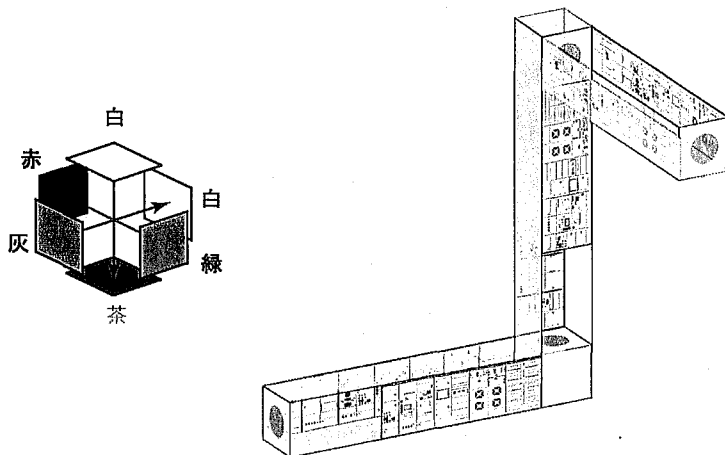


図5-5 設定Ⅱ (壁面の配色による空間全体の方向性)

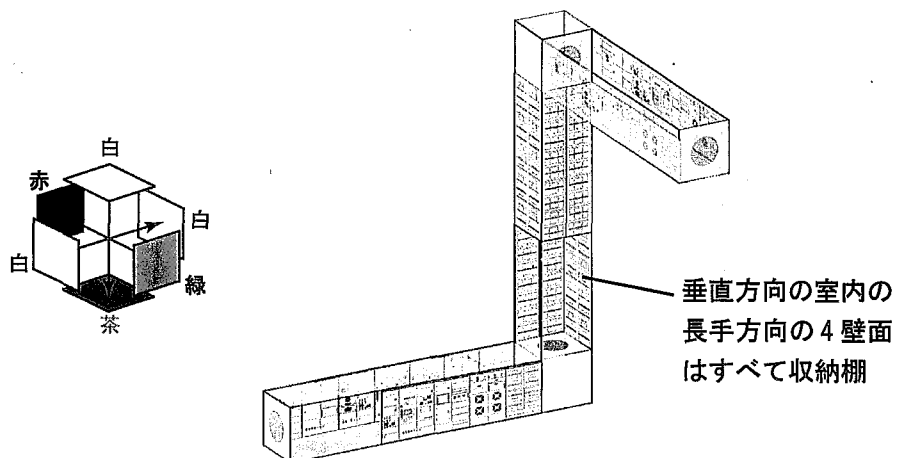


図5-6 設定Ⅲ (壁面の配色による空間全体の方向性+水平, 垂直方向の室の種類が異なる)

5.2.2 空間の連結形状の選定

実験に用いる空間は、第3章および第4章と同様に、5つの直方体の室（各3m×3m×15m）が、立方体の室（3m四方）で連結された内部空間である。第4章の結果において、曲折における回転移動により空間認知を誤ることが明らかになったので、本実験ではすべての結節点で折れ曲がる、4つの曲折を持つ形状とする。

第3章および第4章では、複数の室が連結された空間の連結形状と空間認知の関係を扱うために、空間内部の壁面テクスチャは単色に統一されていた。被験者は空間内部において進行方向軸周りの回転(roll)をすると自身の姿勢を把握することができなくなるので、曲折において上下(pitch)もしくは左右(yaw)方向のいずれかに回転して空間内を移動した。つまり、自身の身体座標系を基準に空間内を移動し、空間認知をしていると考えられる。

しかし、実際の宇宙ステーションでは、宇宙飛行士は作業場の理由のみならず空間認知の理由からも、設定された室内の視覚的な上下方向に沿う姿勢をとることが報告されている⁵⁻⁶⁾。このことから推察すると、本実験の設定においても個々の室内や形状全体に方向性があるため、被験者は自身の姿勢の把握にそれらの視覚的な手がかりを使用すると考えられる。そして、室を移動するごとに自身の姿勢を各室内の視覚的な上下方向に合わせるために、rollの回転をする可能性がある。すなわち、空間全体の座標系(空間座標系)を基準に空間の連結形状および内部での自身の姿勢を把握する場合が考えられる。しかし、空間座標系を基準に空間認知をしない被験者もいると思われ、各個人が空間認知を行う際に自身の身体座標系を基準にするか、空間座標系を基準にするかで移動時の行動が異なると考えられるが、本章の形状の選択に当たっては、基本的に室を移動するごとに姿勢を室内の視覚的な上下方向に沿うことを仮定して考える。

空間形状を選定するに当たり、まず、図5-7に示す3つの直方体の室から構成される連結形状を単位として考える。水平方向の室同士の上方向は統一してあるため、水平方向から垂直方向の室を経て、水平方向の室への移動の方向とrollの回転の組み合わせを考えやすくするためである。しかし、図5-7のeに示す形状は、身体軸の上方向への移動を伴わずに、一水平面内のみで移動する形状で、かつ、左右へ一度ずつ回転移動するために、出発点と終着点の姿勢が同じであり、身体座標系の回転の誤認を判断しか

ねるため、実験では使用しない。

これらの連結形状を2つ組み合わせた形状の中から、表5-2に示す各設定3種類の形状を実験空間として用いる。各設定で移動方向 (pitch, yaw, roll) に偏りが無いように考慮して選択した。形状1は図5-7の形状dと形状aを、形状2は同じく形状bと形状cを、形状3は形状aと形状bを組み合わせて構成されている。ここで示す「身体姿勢を考慮した面数」は、各室の視覚的な上下方向に合わせるように行動した場合の数である。また、設定Iの形状1は第4章で用いた形状F (表4-2) と同形状であり、それらと比較することで視覚的な方向性の手がかりの有無が空間認知に及ぼす影響を調べることができる。

設定ごとの形状の違いの影響をできるだけ少なくするように、異なる設定では同形状の回転対称または鏡映対称の形状を用いる (表5-3)。表5-3に示す人の向きは、各室内の視覚的な上下方向に合わせてある。

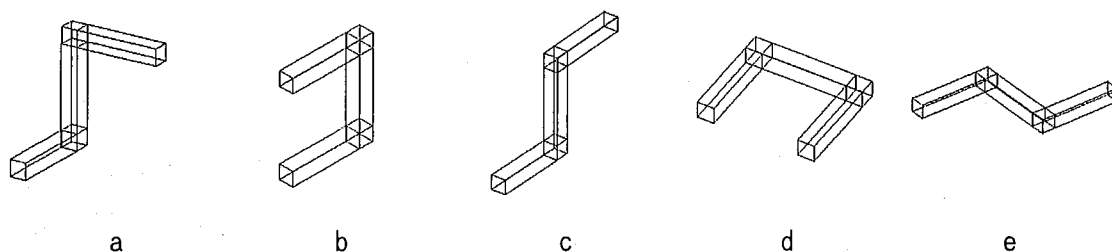


図5-7 空間の連結形状を選択する際に単位となる連結形状

表5-2 空間の連結形状の各変数

曲折数	幾何学的面数	身体姿勢を考慮した面数	空間の連結形状
4	2	3	1
	1	5	2
	2	5	3

表5-3 実験で用いる空間の連結形状

内装の設定	形状1	形状2	形状3
I (1室内上下)			
II (色で方向性)			
III (垂直は棚)			

5.2.3 実験方法および手順

実験方法は第3章および第4章と同様であり、着座姿勢でヘッドマウントディスプレイを装着した被験者は、複数の室が連結された4つの曲折を持つ仮想内部空間において、一端（出発点）から他端（終着点）まで自身でコントローラを操作して移動し、ある地点において出発点の方向を答える「方向指示実験」と、体験した経路について模型を用いて再現する「模型組立実験」（図5-8）を行う。方向指示実験から、空間内における被験者の位置や姿勢の把握を、模型組立実験から空間構成の把握の難易の傾向を調べる。模型は150分の1の大きさで、空間内部の壁面テクスチャが外側に貼ってある（図5-9）。

第3章および第4章で行った方法からの変更が2点ある。第1点は、第3章および第4章では、方向指示の回数は終着点における一度のみであったが、本章の実験では、形状1は終着点のみ、形状2は終着点と中間地点の2回、形状3は新たな直方体の室に移動するごとに出発点の方向を尋ねる。第2点は、出発点の方向を指示させる直前に、位置の壁面に書かれた簡単な四則演算の計算問題を答えさせ、その後出発点の方向を指示させる。計算問題の数字の向きを室内の視覚的な上下方向に合わせ、その問題を解かせることで、被験者は自身の姿勢を部屋の上下方向に合わせると考え、それにより被験者の移動を統制するためである。

実験の流れを図5-10に示す。まず、被験者は、実験空間やコントローラの使用法など、実験の概要について説明を受ける。その後、被験者は設定Iから設定IIIのいずれかから実験を行う。設定の提示順序による結果の偏りを考慮して、被験者を3群に分け、それぞれI→II→III、II→III→I、III→I→IIの順序で実験を行う。

各設定では、はじめにその設定の内装デザインを示す図（図5-4～図5-6のいずれか）を被験者に見せ、設定の説明をする。次に、大型プロジェクタテレビに提示された映像を見ながら、被験者は練習用の空間内でコントローラの操作に慣れると同時に、設定の確認をする。その後、HMDを装着し、形状1→形状3→形状2の順番に実験を行う。各設定の最後に、その設定でどのように連結形状および自身の姿勢を把握したか聞き取り調査をした。

練習時にプロジェクタテレビを使用する理由は、実験者と被験者が同一の画面を見ることで、設定の確認を行いやすくするためである。また、実験時には、周辺視野を遮り、

仮想無重力空間への没入感がより得られるHMDを用いる。

これを、設定を変更して合計3回、全9形状について実験を行う。また、実験の最後に、どの設定が空間の連結形状や自身の姿勢を把握するのに容易であったかについて、順位を付けさせた。

被験者は20～30代の30名（男子18名、女子12名）を用いる。提示順序による結果の偏りを考慮して、被験者を各10名（男子6名、女子4名）の3群に分け、それぞれI→II→III、II→III→I、III→I→IIの順序で実験を行う。



図5-8 模型組立実験を行う被験者

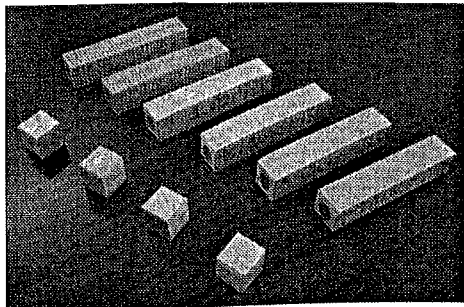


図5-9 実験で使用した模型

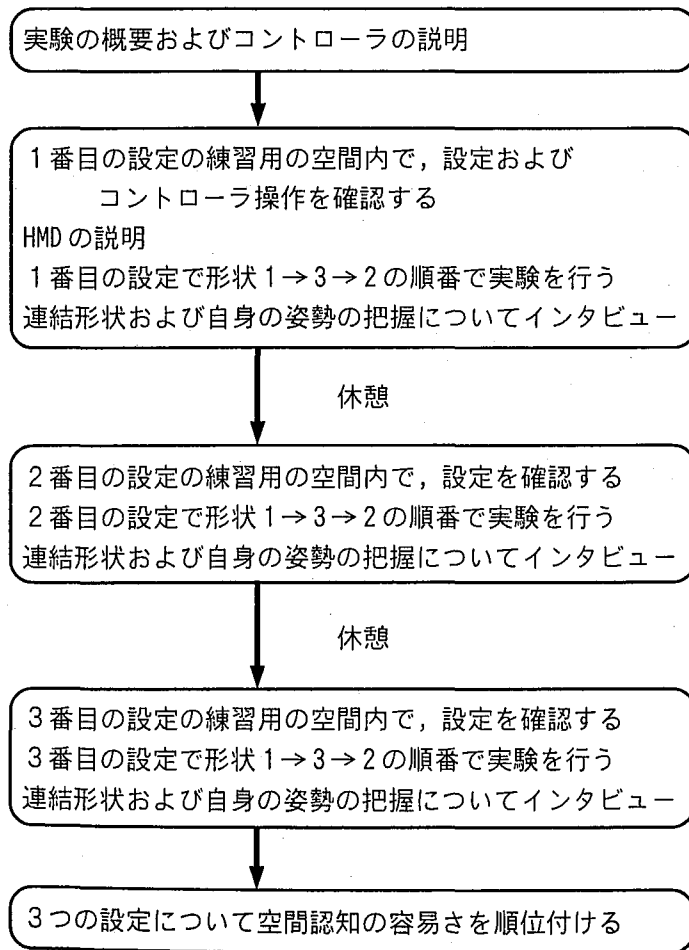


図5-10 実験の流れ

<教示文>

「これから、連結された幾つかの室から構成される宇宙ステーション内での方向感覚に関する実験を行います。宇宙ステーションは、5つの直方体の室が、4つの立方体の室で連結されています。直方体の室の両端の壁面には、灰色のハッチを模擬した部分があります。そこを通り抜けることで、次に連結されている立方体の室に行くことができます。立方体の室内は、入ってきた壁面と、次に室が連結されている一壁面のみ、ハッチがついています。経路は4つの曲折がありますが、分岐することはありません。経路の一方の端から出発し、次々に室を移動して、他方の端まで進んでください。その壁面には簡単な四則演算の計算問題が書かれています。そこが終着点です。まず、計算問題に答えていただきます。次に、終着点で自身の見ている方向に対して、出発点の方向がどちらの方向であるか、指で指し示してください。同時に、その方向を言葉でも答えてください。方向を指し示す言葉は、上下、左右、前後の組み合わせで、『左後方下』のように答えてください。また、方向の回答後に、体験した空間の形状を、縮尺模型を組み立てて再現してください。」

「実験は、3種類の異なる内装デザインの設定で行います。一つの内装デザイン設定につき、3つの異なる空間内を移動して課題を行っていただきます。すなわち、全部で9回課題を行っていただくことになります。その時の行動軌跡を記録します。また、それぞれの設定の終了後には簡単な質問に答えていただきます。各内装デザイン設定ごとに充分休憩時間を取りますが、実験中でも疲れたり頭が痛くなったときはすぐに申し出てください。実験を中止して休憩を取っていただきます。」

それでは、1番目の内装デザイン設定について説明します」

――設定Iの場合――

「この設定は、直方体の一室内では床、天井、壁の区別があります。しかし、すべての直方体の室は同等で、室ごとの区別はありません。床面は茶色、天井面は白色の無地の壁面で、両側の壁面は実験ラックを模擬したテクスチャが貼られています。また、立方体の室内は、1壁面のみ茶色に塗られていますが、それ以外の5面は白色です。直方体の室では、茶色の床面の方向は統一されています。すなわち、直方体の長手方向が水平に伸びる室同士の床面は同じ方向であり、垂直に伸びる室同士の床面も同じ方向です。また、立方体の室の床面の方向は、水平方向に伸びる直方体の床面と同じ方向です。それでは、練習用の空間で設定やコントローラの操作に慣れてください。」

――練習開始――

「それでは、次から実験を開始します。この設定では、3つの異なる空間の連結形状で課題を行っていただきます。はじめの連結形状では、終着点の壁面に計算問題があります。2つめの形状では、中間と終着点の2箇所計算問題があります。3つめの形状では、曲がる度に、4箇所計算問題があります。各計算問題に答えていただき、そこでの視線方向に対する出発点の方向を答えていただきます。それでは、実験を開始します。」

――実験開始――

――設定IIの場合――

「この設定は、個々の室内で床、天井、壁の区別があり、また壁面の配色により空間全体に対する方向が示されています。空間全体の座標系（空間座標系）に対して、右側の壁面は緑色、左側の壁面は赤色、下側

の壁面（床面）は茶色、後側の壁面は灰色、前側と上側（天井）の壁面は白色で塗られています。ただし、これらの壁面の配色の関係は変わりませんが、出発点での視線方向は形状ごとによります。つまり、ある形状では出発点で空間座標系に対して赤色（左側）を向いている場合もあります。直方体の長手方向に位置する両側の壁面は、実験ラックを模擬したテクスチャが貼られています。その場合、実験ラック間の棧に方向を示す配色が施されています。直方体の長手方向が水平に伸びる室では、茶色の壁面が床面であり、垂直に伸びる室では灰色の壁面が床面です。また、立方体の室内も、直方体の室内と同様の配色が施されています。それでは、練習用の空間で設定やコントローラの操作に慣れてください。」

---練習開始---

「それでは、次から実験を開始します。この設定では、3つの異なる空間の連結形状で課題を行っていただきます。はじめの連結形状では、終着点の壁面に計算問題があります。2つめの形状では、中間と終着点の2箇所にも計算問題があります。3つめの形状では、曲がる度に、4箇所にも計算問題があります。各計算問題に答えていただき、そこでの視線方向に対する出発点の方向を答えていただきます。それでは、実験を開始します。」

---実験開始---

---設定Ⅲの場合---

「この設定は、個々の室内で床、天井、壁の区別があり、また壁面の配色により空間全体に対する方向が示されています。空間全体の座標系（空間座標系）に対して、右側の壁面は緑色、左側の壁面は赤色、下側の壁面（床面）は茶色、その他の壁面は白色で塗られています。ただし、これらの壁面の配色の関係は変わりませんが、出発点での視線方向は形状ごとによります。つまり、ある形状では出発点で空間座標系に対して赤色（左側）を向いている場合もあります。直方体の長手方向が水平に伸びる室の両側の壁面は、実験ラックを模擬したテクスチャが貼られています。その場合、実験ラック間の棧に方向を示す配色が施されています。ただし、直方体の長手方向が垂直に伸びる室は種類が異なり、長手方向の4壁面はすべて収納棚になっています。空間座標系で左右に位置する収納棚の棧は、それぞれ赤色および緑色になっており、空間全体の方向性を示しています。また、垂直方向の室の両端の壁面は、それぞれ茶色（床面）および白色（天井面）です。それでは、練習用の空間で設定やコントローラの操作に慣れてください。」

---練習開始---

「それでは、次から実験を開始します。この設定では、3つの異なる空間の連結形状で課題を行っていただきます。はじめの連結形状では、終着点の壁面に計算問題があります。2つめおよび3つめの形状では、中間と終着点の2箇所にも計算問題があります。各計算問題に答えていただき、そこでの視線方向に対する出発点の方向を答えていただきます。それでは、実験を開始します。」

---実験開始---

5.3 結果および考察

5.3.1 設定別の実験課題の成績差

実験に要した時間は、休憩時間も含めて、各被験者につき2時間から5時間で、平均約3時間であった。

設定の提示順序の違いによる結果の差を見るために χ^2 検定を行ったが、有意な差は見られなかったため、すべてを合わせたデータで以降の考察を行う。

方向指示および模型組立実験の結果を図5-11に示す。縦軸は、設定別および連結形状別の、回答の割合の総和を示す。方向指示実験において、正しい方向の回答を「方向○」、それ以外の誤った方向の回答を「方向×」とする。また、模型組立実験において、模型の形状および各面の配色を正しく組み立てられた回答を「模型○」、模型の形状は正しいが、配色を誤った回答を「模型△」、それ以外の誤った模型形状を組み立てた回答を「模型×」とする。

方向指示実験および模型組立実験において、個々の室内にのみ床面と天井面の配色の区別がされている設定Iで最も誤りが多く、方向指示や模型組み立てが正しくできた回答の割合（正答率）が最も低かった。壁面の配色により空間全体の方向性が示されている設定IIと、壁面の配色に加えて水平方向と垂直方向の室の種類が異なることで空間全体の方向性を与えている設定IIIを比較すると、形状1の方向指示実験の結果を除き、設定IIIが若干正答率が高い結果であった。また、模型組立実験において、模型の形状は正しいが、配色を誤った回答である「模型△」は、設定Iの形状1では20%であるが、それ以外は10%以下と少ない。設定Iでは、個々の室の配色が空間全体の方向を示しておらず、空間構成を知る手がかりにならないため、特にこの設定で最初に試行を行う形状1では垂直方向の室の床面の方向が意識されなかったために、他の形状に比べ「模型△」の割合が多かったと考えられる。

また、設定Iの形状1と、第4章の実験で用いた同形状である形状Fの結果を比較し、空間の方向性の有無が空間認知に及ぼす影響を調べる。

方向指示実験の結果は、第4章の形状Fの第1回目の試行で正答が30%、誤りが70%であったのに対し（図4-1上）、本章の実験の形状1では正答36%、誤りが63%であり、

統計的に有意な差は見られなかった。模型組立実験の結果は、形状Fの第1回目の試行で正答が45%、誤りが55%であったのに対し（図4-1上）、形状1では正答30%、形状は正しいが配色を誤った回答20%、形状の誤りが50%であり、配色を誤った回答は形状は正しいので正答とみなしても、両者に統計的な有意差は見られない。すなわち、個々の室に方向性を与えても、空間形状および姿勢の把握の面では効果が無いことが明らかになった。

設定別および形状別の、方向指示および模型組立実験の課題の成績差を調べるために、各実験の正答（○）の割合について、設定（I, II, III）×形状（1, 2, 3）の分散分析を行った。すると、各実験で設定の要因に有意な差が認められた（ $p < 0.05$ ）。最小有意差法により水準間の平均値の差の検定を行った結果、正答の割合は、方向指示実験では設定Iに比べて設定IIIで、模型組立実験では設定Iに比べて設定IIおよび設定IIIで有意に高かった（表5-4）。

設定IIIは、地上でのエレベータなどによる上下方向への移動に似た設定であり、複数の水平面とそれらを繋ぐ上下方向の移動部分として捉えることができるため、水平と垂直のどちらの方向に移動しているか分かり易いので課題の成績が良かったと考えられる。しかし、デザインの的に垂直方向の室の用途が限られてしまう点が問題である。

設定IIは、壁面の配色による方向性の手がかりから、空間座標系に対する自身の姿勢を把握することができる。実験課題の成績は設定IIIより若干劣るが、室の連結方向による内装デザインの制限が無い場合、無重力環境に適した空間認知を容易にする方法と考えられる。

以上より、今後新たに建造される宇宙ステーションを設計する際や、現在の国際宇宙ステーションに新たな室を接続する際に、空間認知を容易にするために、連結形状の幾何学的面数や身体姿勢を考慮した面数が少なくなるような連結形状を選択したり、同一の幾何学的面数や身体姿勢を考慮した面数であれば、水平方向の室は実験室、垂直方向の室は居住室や荷物室というように、水平方向と垂直方向の室は異なる種類の室を配置することが考えられる。

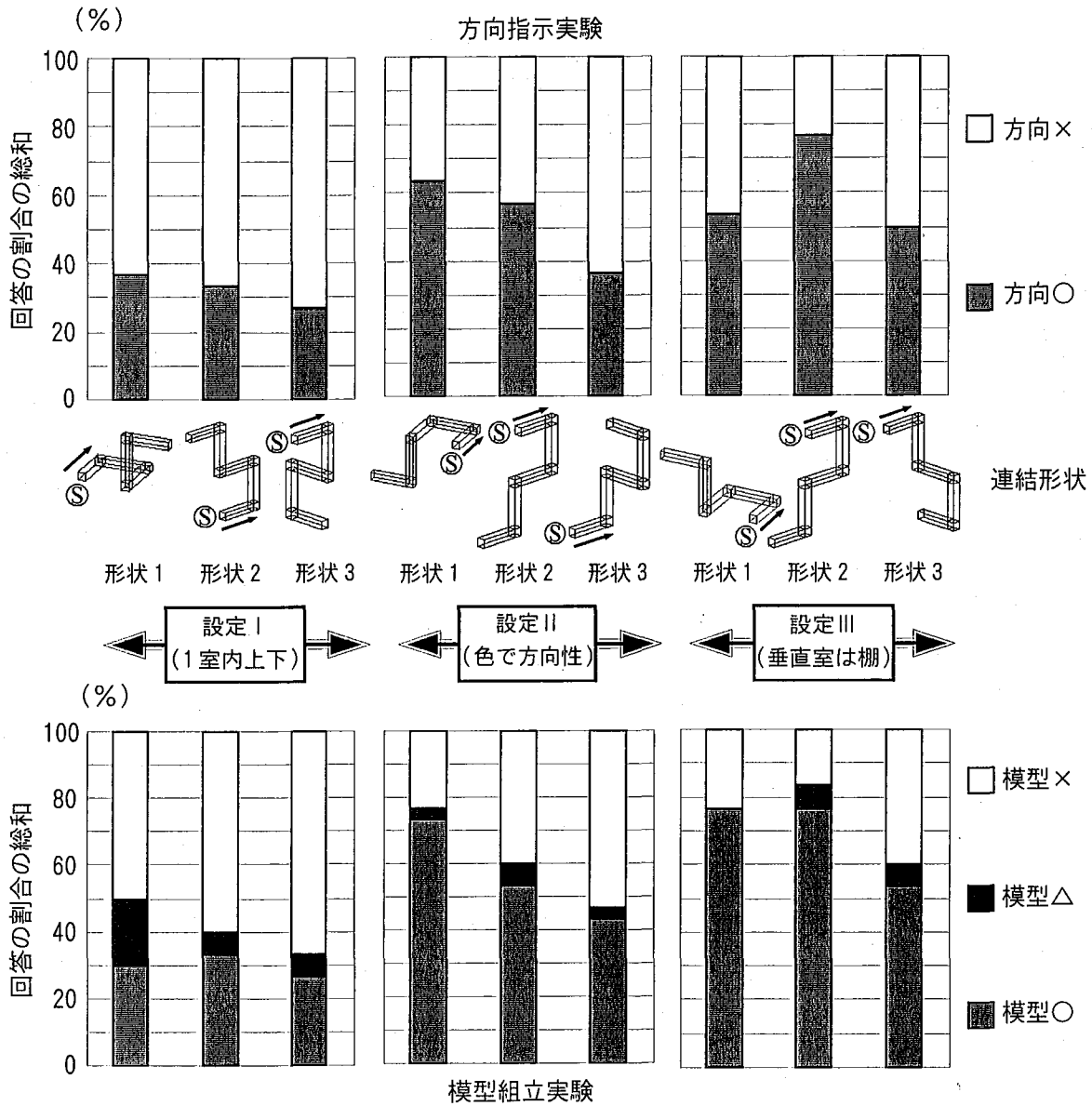


図 5-11 方向指示および模型組立実験の結果

表 5-4 方向指示および模型組立実験の水準間の差の検定

p値	設定 I	設定 II	設定 III
設定 I	—	0.0579	0.0216 *
設定 II	0.0182 *	—	0.3634
設定 III	0.0049 **	0.1516	—

□ 方向指示実験
 ■ 模型組立実験

* p<0.05

** p<0.01

5.3.2 空間の連結形状および内装デザインと空間認知の関係

次に、形状別の方向指示および模型組立実験の結果をさらに詳しく分析する。形状別の各実験結果を表5-5および図5-13、図5-14に示す。図5-13および図5-14の縦軸は、方向指示実験および模型組立実験における設定別の回答の割合の総和を示す。

形状1は、垂直方向の室が1つの形状であり、経路の幾何学的面数は2の形状である。 χ^2 検定の結果、方向指示実験および模型組立実験において、設定Iに比べ、設定IIおよび設定IIIで統計的に有意に正答率が高く、誤りが少なかった。形状1のように、上下方向への移動が少ない形状では、設定IIの壁面の配色により空間全体の方向性が与えられていれば、空間の連結形状および内部での自身の位置や姿勢を正しく把握できる場合が多い。

形状2は、垂直方向の室が2つで、幾何学的面数は1の形状である。方向指示実験および模型組立実験で、すべての設定間で正答率に有意な差が見られた。すなわち、設定Iに比べて設定IIおよび設定IIIは有意に正答率が高く、設定IIに比べて設定IIIでも有意に正答率が高かった。設定別に方向指示および模型組立実験で正答率が約20%異なり、正答率の傾きはやや急である。このように、2つの垂直方向の室を持つが、経路の幾何学的な形状は単純な空間では、上下方向の移動のわかりやすさが空間認知に関係していることがわかる。

形状3は、垂直方向の室が2つで、幾何学的面数が2の形状である。方向指示実験では、設定Iと設定IIの正答率には有意な差が見られなかった。設定Iと設定IIIの正答率は有意な差があった。模型組立実験の結果では、設定Iに比べて設定IIおよび設定IIIで、正答率に有意な差が見られた。形状3と比較して、形状2では設定別の正答率の傾きが緩やかになり、かつ、正答率も全体的に低くなっている。すなわち、この程度の複雑な空間の連結形状になると、設定IIの壁面の配色により空間全体の方向性を与えるだけでは自身の姿勢を把握するのに充分でなく、設定IIIのように水平方向と垂直方向の室を異なる種類にしたり、視覚情報以外の手がかりが必要であると考えられる。

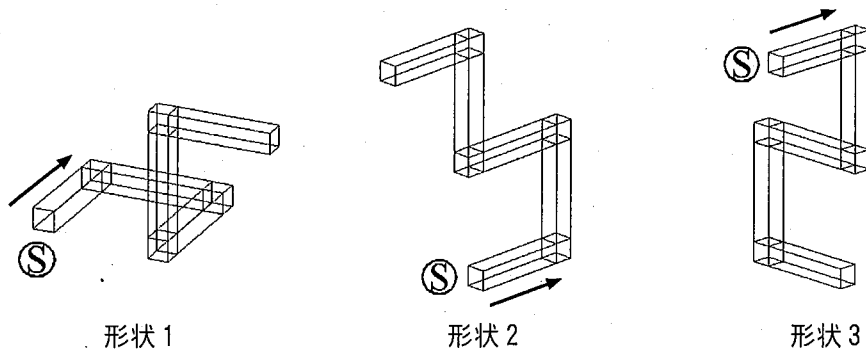


図5-12 実験で用いた各形状の例（設定1）

表5-5 形状別の χ^2 検定結果

形状	形状1			形状2			形状3		
	I	II	III	I	II	III	I	II	III
I	-	**	*	-	**	**	-	-	**
II	**	-	-	**	-	**	**	-	-
III	**	**	-	**	**	-	**	**	-

* p<0.05
** p<0.01

方向指示実験
 模型組立実験

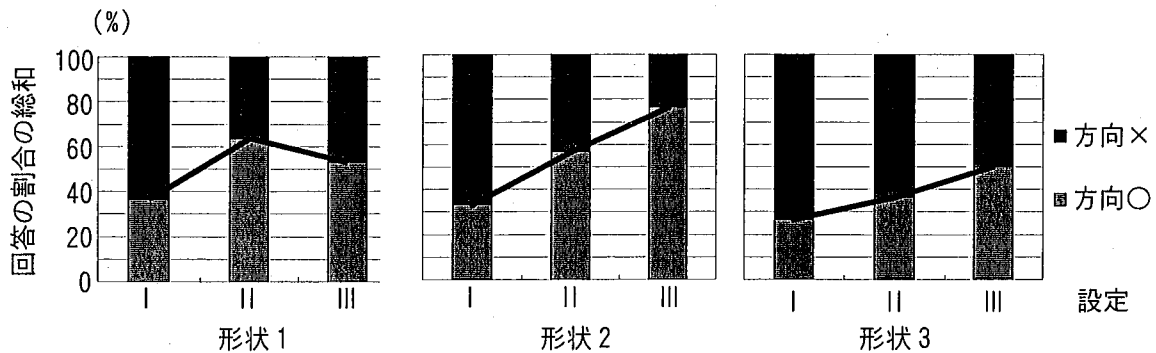


図5-13 形状別の方向指示実験結果

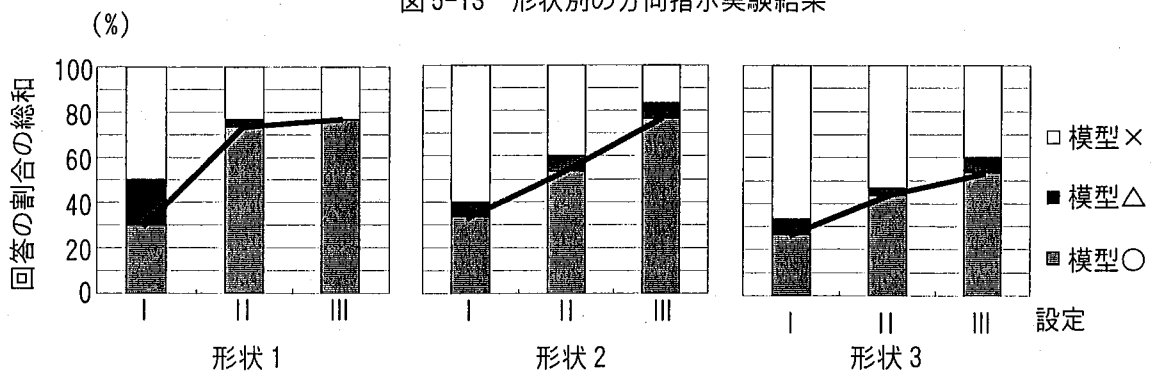


図5-14 形状別の模型組立実験結果

5.3.3 被験者の方向指示時の姿勢と空間認知

形状2では、室を移動するごとに4回(2, 3, 4, 5番目の室, ただし設定IIIでは3番目と5番目の室の2回), 形状3では, 3番目と5番目の室の2回, 壁面に書かれた計算問題を解き, その後に出発点の方向を指示させた。その際に, 回答された指示方向および被験者が実際に室に対してどの方向を向いていたかを記録した。これらのデータから, 地上におけるSaddala⁶⁻⁸⁾らによる空間認知に関する研究等で述べられているように, 空間内部のしつらえの設定や被験者により, 主に自己中心的な系(egocentric orientation system)と, 客観的な系(allocentric orientation system)により空間の連結形状や自身の姿勢を把握していると考えられる。しかし, 本研究では出発点における自身の姿勢に対して水平方向の室と垂直方向の室を移動する際に, 地上では起こりえない身体軸の回転が生じるため, 水平方向の室と垂直方向の室で異なる系を用いる方略も見られた。以下に, 本章の実験で見られた方略を述べる。

1. a型: 客観的(allocentric)な系による空間認知

方向指示の際は, 自身の姿勢が室内の視覚的な上下方向に沿った状態で指示している(図5-15の①)。

2. e型: 自己中心的(egocentric)な系による空間認知

室内の視覚的な上下方向ではなく, 自身の姿勢(身体座標)に対する自己中心的な系で移動し, 方向指示をしている(図5-15の②)。

3. ae型: 水平方向の室では客観的(allocentric), 垂直方向の室では自己中心的(egocentric)な系による空間認知

垂直方向の室から水平方向の室へ移動した際には, 室内の視覚的な上下方向に自身の姿勢を合わせ方向指示を行うが, 水平方向の室から垂直方向の室への移動は自己中心的な系で移動し, 方向指示をしている(図5-15の③)。

4. u型: 水平方向の室では客観的(allocentric)な系, 垂直方向の室では出発点の身体軸を基準にした空間座標系による空間認知

室内の視覚的な上下方向に自身の姿勢を合わせ方向指示を行い, 垂直方向の室では身体軸を出発点と同じ方向に姿勢を合わせたり, 身体軸の方向に垂直移動した姿勢で方向指示をしている(図5-15の④)。

5. o型：その他

その他、方向指示時の姿勢がばらばらで、上記の分類に当てはまらないもの。

表5-6に、設定I～IIIの形状2および形状3において見られた上記の方略と、それらの形状での方向指示実験および模型組立実験の結果を被験者別にまとめる。ただし、上記の方略の3番「ae型」および4番「u型」については、室を移動するごとに4回方向指示をさせた形状2の設定Iおよび設定IIのみ該当する場合がある。

表5-6より、形状2の設定IIでは、e型の方略を用いた被験者が14人と多い。これは、設定Iは形状全体の方向を知ることが得られないが、形状2は経路の幾何学的面数が1の形状であるため、自身の姿勢に基づく自己中心的な系で移動すればpitchの上下方向への回転のみで移動でき、その方が室の移動時に室内の上下方向に姿勢を合わせるよりも空間認知が容易なためと考えられる。しかし、形状3の設定Iではe型の方略を用いた被験者は7名であり、設定IIと同数で多くはない。形状3は経路の幾何学的面数が2であり、身体座標系で上下方向だけでなく左右方向の移動も生じて空間認知が困難なため、自己中心的な系で移動する被験者は多くない結果になったものと考えられる。

被験者別に見ると、視覚的な方向性の手がかりの有無に関わらず、すべての場合でa型の方略を用いた被験者1から4は方向指示および模型組立実験の成績はあまり良くないのに比べ、被験者6から9のように、空間全体の方向性の手がかりが得られない形状2の設定Iではae型の方略を用い、空間全体の方向性の手がかりが得られる設定IIや設定IIIではそれらを基に室内の上下方向に沿った姿勢をとる方略を用いた被験者は、方向指示および模型組立実験の成績は全体的に良かった。このことから、視覚情報の変化に応じて自身の空間認知の方略を臨機応変に変化させることで、空間の連結形状や自身の姿勢を正しく把握することができるといえる。

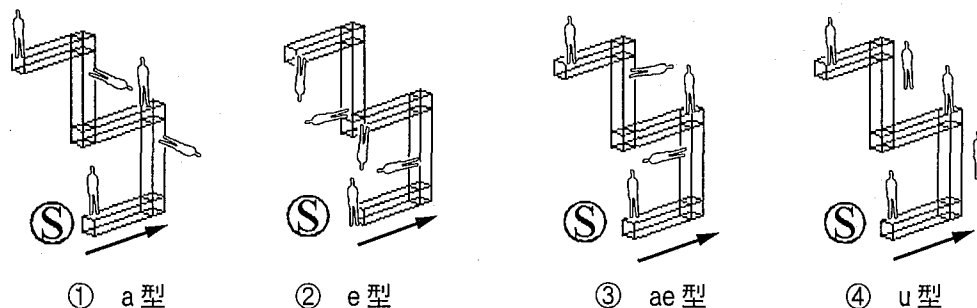


図5-15 方略別の方向指示時の姿勢（設定I，形状2の場合）

また、すべての場合でe型の自己中心的な系による方略を用いた被験者28から30について、被験者28および29は方向指示および模型組立実験の成績は良かった。しかし、被験者30では模型の組み立てた形状は正しいが、配色を誤る場合が多い。すなわち、自己中心的な系では主に自身の身体座標系を基に空間の形状や自身の姿勢を把握しているため、空間内部の視覚情報を正しく把握していないと考えられる。

表5-6 被験者の空間認知の方略と方向指示および模型組立実験の結果

被験者 No	形状2			形状3			方向指示		模型組立		
	設定I	設定II	設定III	設定I	設定II	設定III	○	×	○	△	×
1	a	a	a	a	a	a	2	4	2	0	4
2	a	a	a	a	a	a	3	3	2	1	3
3	a	a	a	a	a	a	2	4	3	0	3
4	a	a	a	a	a	a	0	6	3	0	3
5	a	a	a	a	a	o	0	6	0	0	6
6	ae	a	a	a	a	a	4	2	4	0	2
7	ae	a	a	a	a	a	5	1	5	0	1
8	ae	a	a	a	a	a	5	1	5	0	1
9	ae	a	a	a	a	a	4	2	4	1	1
10	e	a	a	a	a	a	5	1	5	0	1
11	e	a	a	e	a	a	1	5	1	0	5
12	e	a	a	o	a	a	3	3	3	0	3
13	e	a	a	a	o	a	2	4	2	0	4
14	ae	ae	a	a	a	a	2	4	3	0	3
15	ae	ae	a	a	a	a	2	4	2	0	4
16	ae	u	a	a	a	a	3	3	3	0	3
17	e	ae	a	a	a	a	1	5	2	0	4
18	e	ae	a	a	a	a	5	1	6	0	0
19	o	u	a	a	a	a	2	4	1	1	4
20	ae	u	a	a	e	a	3	3	3	0	3
21	e	ae	a	a	e	a	4	2	4	0	2
22	e	u	a	e	a	a	0	6	3	0	3
23	e	ae	e	e	a	a	4	2	3	1	2
24	e	e	e	a	e	a	1	5	0	1	5
25	o	o	a	a	o	o	0	6	0	0	6
26	o	o	o	a	e	o	0	6	0	0	6
27	e	e	o	e	o	o	1	5	0	1	5
28	e	e	e	e	e	e	6	0	6	0	0
29	e	e	e	e	e	e	5	1	6	0	0
30	e	e	e	e	e	e	4	2	2	4	0
a	5	13	23	22	20	23					
ae	8	6	-	-	-	-					
e	14	5	5	7	7	3					
u	0	4	0	0	0	0					
o	3	2	2	1	3	4					
計	30	30	30	30	30	30					

方向指示	○	正しい方向の回答
	×	誤った方向の回答
模型組立	○	正しい組み立て形状の回答
	△	形状は正しいが配色を誤った回答
	×	誤った組み立て形状の回答

a	a型:客観的(allocentric)な系による空間認知
ae	e型:自己中心的(egocentric)な系による空間認知
e	ae型:水平方向の室では客観的(allocentric),垂直方向の室では自己中心的(egocentric)な系による空間認知
u	u型:水平方向の室では客観的(allocentric)な系,垂直方向の室では出発点の身体軸を基準にした空間座標系による空間認知
o	o型:その他

5.3.4 空間認知の容易さと被験者の方略および行動の関係

実験の最後に、どの設定が空間の連結形状や自身の姿勢を把握しやすいか、被験者に設定ごとの順位を付けさせた。その結果を図5-16に示す。

空間の連結形状や自身の姿勢を一番把握しやすいと答えた割合は、水平と垂直の室の種類が異なる設定IIIが70%だったのに対し、一室内のみ方向性の手がかりが与えられた設定Iでは20%、壁面の配色で空間全体の方向性を示した設定IIは10%だった。また、二番目に連結形状や姿勢を把握しやすいと答えた割合は、設定IIが60%と最も多く、次いで設定IIIで30%、設定Iは10%だった。連結形状や姿勢の把握しやすさが最も低く順位付けされた、つまり一番難しいと答えた割合は、設定Iが70%と最も多く、設定IIが30%で、設定IIIと答えた人はいなかった。

全体的な傾向として、実験前に想定した通り、地上での垂直方向への移動に似た設定IIIが形状や姿勢を一番把握し易しく、空間全体の方向性に関する視覚的な手がかりが得られない設定Iが形状や姿勢を把握しにくいと被験者が主観的に判断している結果となった。また、半分以上の被験者は、設定IIは配色により空間全体の方向性の手がかりが得られるため、設定Iよりは易しいが、設定IIIに比べると難しいと答えている。

設定Iは連結形状や姿勢を把握するために有効な空間全体の方向性に関する視覚的な手がかりが得られないにもかかわらず、20%（6名）の被験者が一番形状や方向を把握

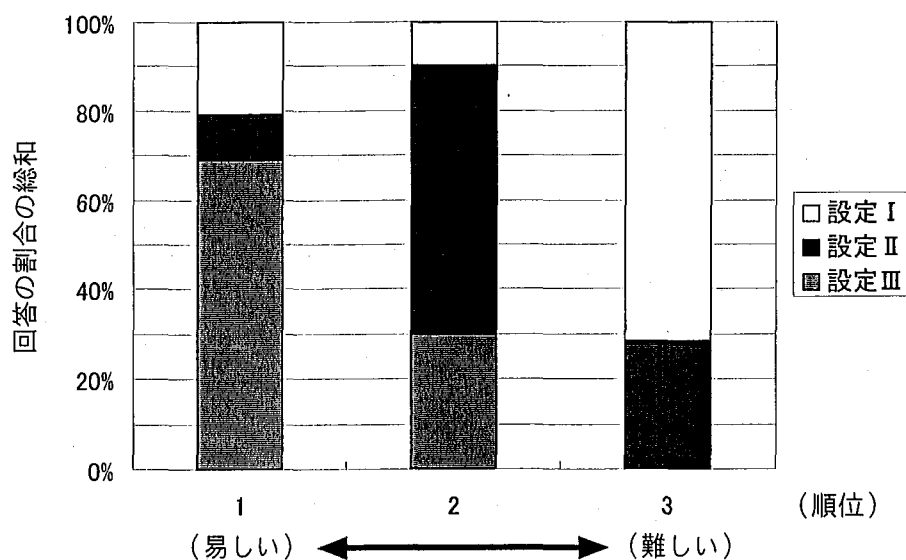


図5-16 各設定の連結形状および姿勢の把握しやすさの順位

しやすいと述べており、これらの被験者は視覚的な空間の方向性以外の手がかりを使って空間認知を行ったと考えられる。そこで、各設定の実験後に行ったインタビューから得られた、被験者の形状を把握の仕方を調べた。すると、6名中4名の被験者が、曲折において、次の室が自身の身体座標系に対してどちらの方向に連結されているかを言葉で覚えて、それをもとに空間の連結形状を把握して方向指示をしていたことがわかった。また、設定Iが2番目に形状や方向を把握しやすいと述べた3名の被験者のうち、2名が同様の形状把握の仕方をしていた。

これらの被験者は、空間認知に身体座標系を主に使用していることから、移動時に空間に対して姿勢を合わせるために進行方向軸周りのrollの回転をせずに、上下方向の回転をすると考えられる。形状2は、上下方向にのみ移動した場合、終着点において上下反転した姿勢になる。そこで、形状2において実際に上下反転した姿勢で方向指示をした回答に着目した。すると、上記の方略を用いた6名の被験者では、形状3の全18試行回中(3設定×6名)うち、約72%に当たる13試行回で終着点の姿勢が上下反転して方向指示をしたことが分かった。それ以外の被験者では、形状2で上下反転して方向指示をした回答数は、わずか3試行回(3/72≒4.2%)であった。

また、設定Iの形状や方向の把握しやすさが3番目、すなわち、形状Iが最も難しいと答えた20名の被験者のうち、2名の被験者が設定Iで上記のように曲折での身体座標系に対する方向を言葉で覚えて形状を把握し、終着点で反転した姿勢をとっていた。このうち1名は、実験課題の成績が最も良い被験者であり、彼はインタビューで意図的にそのような方略を取ることで、「記憶する情報量を減らし、(空間認知を)やりやすくした」と述べた。

しかし、この被験者ように、環境の変化に対応して、視覚的な手がかりから空間全体の方向性が得られない状況では自身の空間認知の方略を変え、空間形状や自身の姿勢を把握できる場合は稀である。ISSの完成後は常時6名の宇宙飛行士が滞在するようになり、今まで以上に宇宙へ行くことができる人が増えることが予想され、訓練の短縮化が求められる。その観点からも、視覚的な手がかりを有効に与えた内装デザインは重要であり、本研究では限られた範囲ながらも無重力内部空間の内装デザインの一指針を示すことができたと考える。

5.4 まとめ

本章では、仮想無重力空間の内装デザインによる空間の方向性の手がかりが空間認知に及ぼす影響について検証した。その結果、壁面の配色による連結形状全体の方向性の手がかりが、空間の構成および内部での自身の位置や姿勢の把握に有効であることが確かめられた。しかし、空間の連結形状がある程度複雑になると、水平方向と垂直方向の室を異なる種類にしたり、視覚以外の手がかりが必要である。また、個々の室に壁面の配色により上下の区別をつけても、空間構成や自身の姿勢の把握には効果が無いことが確かめられた。

環境から得られる視覚情報により、仮想無重力環境下における空間認知の方略を変更し、空間全体の方向性の手がかりが乏しい状態でも空間構成や自身の姿勢を正しく把握することは難しいため、多くの人に分かりやすい内装デザインにすることが重要である。その点においても、壁面の配色により連結形状全体の方向性の手がかりを与える方法は有効である。

参考文献

- 5-1) Barbour, C.G., and Coss, R.G.: Differential Color Brightness as a Body Orientation Cue, *Human Factors*, No.30, Vol.6, pp.713-717, 1988
- 5-2) Coss, R.G., Clearwater, Y.A., Barbour, C.G., and Towers, S.R.: NASA TM-102242: Functional Decor in the International Space Station: Body Orientation Cues and Picture Perception, National Aeronautics and Space Administration, 1989.11
- 5-3) NASA: NASA-STD-3000: Man-Systems Integration Standards, Volume I, Rev. B, NASA, pp.8-7 - 8-9, 1995.7
- 5-4) NASA: NASA JSC-27260C: Decal Process Document and Catalog, National Aeronautics and Space Administration, 1999
- 5-5) Beach, L.R., Wise, B.K., and Wise, J.A.: NASA CR-177498: The human factors of color in environmental design: a critical review, National Aeronautics and Space Administration, 1988.8
- 5-6) Tafforin, C.: Relationships between orientation, movement and posture in weightlessness: Preliminary ethological observations, *Acta Astronautica*, Vol.21, No.4, pp.271-280, 1990
- 5-7) NASA: NASA-SSP 50008: International Space Station Interior Color Scheme, Rev. B, NASA, 1996.3
- 5-8) Sadalla, E.K., and Montello, D.R: Remembering changes in direction, *Environment and Behavior*, Vol.21, No.3, pp.346-363, 1989.5

第6章

結論

6.1 結論

6.2 今後の課題

6. 1 結論

本研究は、宇宙ステーションを想定した複数の室から構成される仮想無重力内部空間における空間認知と視覚情報の関係を明らかにし、今後の宇宙ステーションを設計する際の基礎的な指針を示すことを目的として、バーチャルリアリティ (VR) 技術を用いたシミュレーション実験を行い、以下のことを明らかにした。

第1章「序論」では、空間認知を自身を取り囲む空間構成の把握およびそこでの自身の位置や方向の把握と定義し、宇宙での複数の室から構成される無重力環境内部空間における空間認知に関する研究の必要性を述べた。既往研究より、無重力環境下の空間認知に対する視覚情報の重要性を示し、それらの関係を扱った様々な研究の方法を比較、検討することで、VR技術を用いたシミュレーション方法を使用する本研究の位置付けを示した。

第2章「一結節点に連結された複数室の位置関係の把握」では、無重力内部空間を視覚的に擬似体験できるVRシミュレーション装置を構築し、地上および仮想無重力環境下での行動の違いの比較から、VRシミュレーションの有効性を検討した。宇宙ステーションの室同士をつなぐ接続部を想定した、一つの結節点に連結された複数の室からなる仮想無重力内部空間において、結節点の視覚的な方向性の手がかりが空間認知に及ぼす影響を明らかにすることを目的とし、結節点の視覚情報を系統的に操作した設定のもとで各室を移動する実験と、各室の位置関係を模型を用いて再現する実験を行った。その結果、結節点の視覚情報による方向性の有無と各室の位置関係の把握のしやすさの関係は、学習の効果や個人差のため明確にはならなかったが、空間認知の方略の違いにより空間配置の把握の正確さが異なることが確かめられた。また、壁面の配色により空間に方向性を与えることの有効性が示唆され、連結する室への入り口付近のテクスチャの特徴を示すだけでなく、各室の位置関係を示す視覚情報を与えることの必要性を述べた。

第3章「複数結節点からなる空間の連結形状に関する諸変数の設定」では、複数の結節点を持つ空間内を移動する際に、空間の連結形状や自身の姿勢の把握の難易は単に経路の幾何学的な複雑さだけでなく、地上では起こりえない上下方向への回転移動も影響

すると考え、それら空間認知の難易に関わる空間の連結形状の各変数を仮説的に設定し、その妥当性を検討することを目的とした。空間形状の曲折数、幾何学的面数、および身体姿勢を考慮した面数の各変数に従い空間の連結形状を系統的に分類し、その中から選択した形状を被験者に体験させ、空間構成の把握の仕方を調べるための模型組立実験と、空間内部における位置や姿勢の把握の仕方を調べるための方向指示実験を行った。その結果、各変数が増えるに従い実験の誤りが増える傾向が明らかになり、それらの変数を空間認知の難易に影響する要因として今後の実験で扱う妥当性が確認できた。

第4章「複数結節点からなる空間の連結形状と空間認知の関係」では、第3章で設定した仮想無重力環境下での空間認知の難易に関わる連結形状の各変数に従い分類、選択した、より複雑な形状について多くの被験者を用いた実験を行った。その結果、空間の形状およびその内部での自身の姿勢を誤る主な要因は、曲折における身体座標系の回転の誤認と、曲がる場所・方向・順序の誤認で説明できること、また、左右方向に比べ、上下方向へ回転移動する場合の方が身体座標系の回転を誤認しやすいことが明らかになった。さらに、個人によって、曲折における身体座標系の回転や、曲がる場所・方向・順序の誤りやすさの傾向が異なり、それらの誤りの対策として、曲がる場所・方向・順序を示すための局所的な視覚情報と、身体座標系の回転を把握しやすくするために空間全体の方向性を示す視覚情報を与える必要性を述べた。実験結果から、VRシミュレーションの有効性について再検討し、仮想無重力環境下において、空間の連結形状および自身の姿勢を把握する際に、重力方向が影響することは少ないことを再確認した。

第5章「内装デザインが空間認知に及ぼす影響」では、仮想無重力空間の内装デザインの違いが空間認知に及ぼす影響について検討するために、視覚情報による空間の方向性の手がかりを系統的に変化させた3種類の設定において、方向指示実験および模型組立実験を行った。その結果、空間の連結形状およびその内部での自身の位置や姿勢を正しく把握するために、壁面の配色による連結形状全体の方向性の手がかりを与えることが有効であることが確かめられた。しかし、空間の連結形状がある程度複雑になると、水平方向と垂直方向の室を異なる種類にしたり、視覚以外の手がかりを与えるなどの必要があることを述べた。

6.2 今後の課題

本研究では、仮想無重力内部空間における空間認知と視覚情報に関する実験を行い、VRシミュレーションを用いた方法の有効性を示すと共に、空間認知の誤りの要因およびその対策として有効な内装デザインの一指針を示すことができた。

本研究の成果は、今後の宇宙ステーションの設計の際の基礎的な資料となるだけでなく、現在建設中の宇宙ステーションにも適用できる。また、宇宙飛行士の選抜や、緊急避難の訓練にも応用できる点でも重要であると考えられる。さらに、宇宙酔いの発症機序の解明や、視覚による宇宙酔いの防止にも示唆を与えるものであろう。

しかしながら、地上におけるシミュレーションでは重力の影響が避けられないことから、ISSの完成後は宇宙実験により本研究の結果との整合性を検討し、さらに妥当性を確認することが必要である。

また、本研究では視覚情報の一部を扱ったに過ぎず、文字や照明など他の視覚情報との関係や、さらには視覚情報以外の空間認知の手がかりについてもその有効性は未だ不明である。

その他、仮想無重力環境における空間認知に関する課題を経時的に行うことの、訓練の方法やその効果についても今後検討する必要がある。

さらに、本研究で用いた大多数の被験者は大学院生であるが、宇宙飛行士の中には戦闘機のパイロットとして訓練を積んだ者も多く、3次元的な移動をする際の空間認知の能力には差があることが考えられることから、現在宇宙飛行士を被験者とした実験を計画中である。その際、宇宙飛行の経験の有無や、宇宙飛行の前後で空間認知能力の違いについても検討していきたい。

発表論文

本論文に関連した発表論文

<審査論文>

大野隆造, 青木宏文, 山口孝夫, バーチャルリアリティによる無重力環境における空間識に関する研究 - その1 空間識とモジュールの連結形状の関係 -, 日本建築学会計画系論文集, 第558号, pp.71-77, 2002.8

青木宏文, 大野隆造, 山口孝夫, バーチャルリアリティによる無重力環境における空間識に関する研究 - その2 空間認知を誤る要因の解明 -, 日本建築学会計画系論文集 (審査中)

青木宏文, 大野隆造, 山口孝夫, バーチャルリアリティによる無重力環境における空間識に関する研究 - その3 内装デザインと空間認知の関係 -, 日本建築学会計画系論文集 (投稿予定)

<国際会議論文 (審査付き) >

Hirofumi Aoki, Takao Yamaguchi, Ryuzo Ohno, A Study of Orientation in a Zero Gravity Environment by means of Virtual Reality Simulation, Proceedings of Space Technology and Applications International Forum-2001, pp.29-34, 2001

<その他国際会議論文>

Hirofumi Aoki, Takao Yamaguchi, Ryuzo Ohno, A Study of Orientation in a Zero Gravity Environment by means of Virtual Reality Simulation, Journal of Gravitational Physiology, Vol. 7, No. 2, pp.93-94, 2000

<口頭発表論文>

小松崎敏紀, 青木宏文, 添田昌志, 大野隆造, バーチャルリアリティを用いた無重力環境での空間識に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D-1, pp.787-788, 2000.9

青木宏文, 大野隆造, バーチャルリアリティを用いた無重力環境での空間識に関する研究 - その2 空間の連結形状と空間識 -, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D-1, pp.845-846, 2001.9

青木宏文, 仮想無重力空間の内装デザインが空間認知に及ぼす影響, 人間・環境学会誌 (掲載予定)

<研究報告書>

バーチャルリアリティを用いた無重力環境における空間識に関する研究, 平成11年度「宇宙環境利用に関する地上研究公募」研究成果報告書, (財)日本宇宙フォーラム, 2000.3

その他発表論文

<審査論文>

大野隆造, 青木宏文, 添田昌志, CG画像と模型画像の合成による視覚シミュレーション, 日本建築学会技術報告集, 第12号, pp.135-138, 2001.1

<国際会議論文>

Ohno, R., & Aoki, H., Development of an Interactive Simulation System for Environment-Behavior Study. In R. Franke, & E. Maase (Eds.), Simulation des architektonischen Raums: Farbe und Licht, Mittel und Wirkung, 4th Conference of the European Architectural Endoscopy Association, pp. 36-49, 2001

<口頭発表論文>

青木宏文, 大野隆造, 外国人留学生の異文化環境への心理的適応に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, E-1, pp.1015-1016, 1998.9

青木宏文, 大野隆造, 環境の認知・行動におよぼす動的環境要素の影響に関する研究 -その1 視覚シミュレーションシステムの開発-, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D-1, pp.805-806, 1999.9

大澤昭彦, 青木宏文, 添田昌志, 大野隆造, 環境要素としての人の流れや滞留が経路認知に及ぼす影響, 日本建築学会大会学術講演梗概集, E-1, pp.827-828, 2000.9

引用・参考文献

- 朝倉暢彦, 近江政雄, 鈴木良次: 空間記憶の身体方位依存性に及ぼす自己運動情報の効果, 電子情報通信学会技術報告HIP99-27, pp.1-8, 1999.9
- Barbour, C.G., and Coss, R.G.: Differential Color Brightness as a Body Orientation Cue, *Human Factors*, No.30, Vol.6, pp.713-717, 1988
- Beach, L.R., Wise, B.K., and Wise, J.A.: NASA CR-177498: The human factors of color in environmental design: a critical review, National Aeronautics and Space Administration, 1988.8
- Burrough, B.: *Dragonfly: NASA and the crisis aboard Mir*. Harper-Collins, 1998, 北村道雄訳, 寺門和夫監修, ドラゴンフライ (上・下), 筑摩書房, 2000.5
- Clement, G., Berthoz, A. and Lestienne, F.: Adaptive Changes in Perception of Body Orientation and Mental Image Rotation Microgravity, *Aviation, Space, and Environmental Medicine*, Vol. 58, No.9, Suppl., pp.A159-163, 1987.9
- Cohen, M.M.: Ames Space Station Architectural Research, NASA CR-2426: Space Station Human Factors Research Review, Volume III: Space Station Habitability and Function: Architectural Research, NASA, pp.1-115, 1987.10
- Connors, M.M., Harrison, A.A., and Akins, F.R.: *Living Aloft - Human Requirements for Extended Spaceflight*, NASA SP-483, NASA, 1985
- Cooper, H.S.F.: *A House in Space*, Holt, Rinehart and Winston, 1976
- Coss, R.G., Clearwater, Y.A., Barbour, C.G., and Towers, S.R.: NASA TM-102242: Functional Decor in the International Space Station: Body Orientation Cues and Picture Perception, National Aeronautics and Space Administration, 1989.11
- Feoktistov, K.P. and Briggs, G.A.: *Access to Space, Space Biology and Medicine: Vol. 1. Space and Its Exploration*, AIAA, pp.275-323, 1993
- Gibson, E.G.: *Skylab 4 Crew Observations, NASA SP-377: Biomedical Results from Skylab*, NASA, pp.22-26, 1977
- Glasauer, S., and Mittelstaedt, H.: Perception of spatial orientation in microgravity, *Brain Research Review*, Vol.28, pp.185-193, 1998
- Golledge, R.G. Ed.: *Wayfinding behavior*, The Johns Hopkins University Press, 1999
- Harrison, A.A.: *Spacefaring*, University of California Press, 2001
- Howard, I.: *Human Visual Orientation*, John Wiley & Sons, 1982
-

-
- 狩野千鶴：自己運動知覚と視覚系運動情報，心理学評論， Vol.34, No.2, pp.240-256, 1991
- Kenyon, R.V., and Young, L.R.: M.I.T./Canadian vestibular experiments on the Spacelab-1 mission: 5. Postural responses following exposure to weightlessness, *Experimental Brain Research*, Vol.64, pp.335-346, 1986
- Kerwin, J.P.: Skylab 2 Crew Observations and Summary, NASA SP-377: Biomedical Results from Skylab, NASA, pp.27-29, 1977
- Kidger, N.: The Salyut 6 Space Station, *Spaceflight*, Vol.21, No.4, pp.178-183, 1979
- 古賀一男：宇宙環境と重力の生理・行動科学，山崎勝男，藤澤清，柿木昇治編，新生理心理学，第3巻，新しい生理心理学の展望，北大路書房，pp.276-287, 1998
- 古賀一男：重力基準の問題，牧野達郎編，知覚の可塑性と行動適応，ブレーン出版，pp.75-87, 1998
- Kozlowski, L.T., and Bryant, K.J.: Sense of Direction, Spatial Orientation, and Cognitive Maps, *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, Vol. 3, No. 4, pp. 590-598, 1977
- 黒田勲監修：航空心理学入門・飛行とところ，鳳文書林出版販売，1989.4
- 黒田泰弘監修，清水建設宇宙開発室著：宇宙建築－居住を可能にする技術－，彰国社，1991.5
- 空間認知の発達研究会編：空間に生きる，北大路書房，1995.5
- Lackner, J.R.: Spatial orientation in weightless environments, *Perception*, Vol.21, pp.803-812, 1992
- Lackner, J.R., and DiZio, P.: Spatial Orientation as a Component of Presence: Insights Gained from Nonterrestrial Environments, *Presence*, Vol.7, No.2, 108-115, 1998.4
- Lackner, J.R., and DiZio, P.: Human orientation and movement control in weightlessness and artificial gravity environments, *Experimental Brain Research*, Vol.130, Issue 1, pp.2-26, 2000
- Levine, M.: You-are-here maps: psychological considerations, *Environment and Behavior*, Vol.14, No.2, pp.221-237, 1982.3
- Levine, M., Marchon, I., and Hanley, G.: The placement and misplacement of you-are-here maps, *Environment and Behavior*, Vol.16, No.2, pp.139-157, 1984.3
- Matsakis, Y., Lipshits, M., Gurfinkel, V., and Berthoz, A.: Effects of prolonged weightlessness on mental rotation of three-dimensional objects, *Experimental Brain Research*, Vol. 94, pp.152-162, 1993
- 松井孝雄：空間認知の異方性と参照枠－整列効果はなぜ生じるのか－，慶應義塾大学大学院社会学研究科紀要，Vol.34, pp.51-58, 1992
-

-
- Mittelstaedt, H.: A New Solution to the Problem of the Subjective Vertical, Naturwissenschaften, Vol. 70, pp.272-281, 1983
- 向井千秋, 五十嵐眞 : 微小重力環境と宇宙酔い, JOHNS, Vol.11, No.7, pp.967-972, 1995
- NASA: NASA STD-3000: Man-Systems Integration Standards, Volume I, Rev. B, NASA, 1995.7
- NASA: NASA SSP-50008: International Space Station Interior Color Scheme, Rev. B, NASA, 1996.3
- NASA: NASA JSC-27260C: Decal Process Document and Catalog, National Aeronautics and Space Administration, 1999
- NASA: The Virtual Tour of the International Space Station. [On-line] <http://spaceflight.nasa.gov/gallery/vtour/index.html>, 2001.10
- NASDA: Completed International Space Station and its primary elements, [On-Line] <http://jem.tksc.nasda.go.jp/iss/doc04.html>, 2001.7
- 新垣紀子, 野島久雄 : 方向オンチの科学, 講談社ブルーバックス, 2001.8
- Nicogossian, A.E., Huntoon, C.L., and Pool, S.L. (eds): Space Physiology and Medicine, Third Edition, Lea & Febiger, 1994
- 大野隆造, 串山典子, 添田昌志 : 上下方向の移動を伴う経路探索に関する研究, 日本建築学会計画系論文集, 第516号, pp.87-91, 1999.2
- O'Neill, M.J.: Evaluation of a conceptual model of architectural legibility, Environment and Behavior, Vol.23, No.3, pp.259-284, 1991.5
- Oman, C.M.: Human Visual Orientation in Weightlessness, Levels of Perception, Springer Verlag (in press)
- Oman, C.M., Lichtenberg, B.K., and Money, K.E.: Space motion sickness monitoring experiment: Spacelab 1, AGARD Conference Proceedings 372, Motion Sickness: Mechanisms, Prediction, Prevention and Treatment, Williamsburg, 1984.5
- Oman, C.M., Shebilske, W.L., Richards, J.T., Tubre, T.C., and Beall, A.C., and Natapoff, A.: Three dimensional spatial memory and learning in real and virtual environments, Spatial Cognition and Computation, Vol. 2, No. 4, pp.355-372, 2000
- Oman, C.M., Howard, I.P., Shebilske, W.L., and Taube, J.S.: Visual orientation in unfamiliar gravito-inertial environments, paper presented at Bioastronautics Investigators Workshop, Galveston TX, 2001.1
- 大田憲司 : 有人宇宙基地・ミール, 新読書社, 1995.3
-

-
- Parker, D.E., and Harm, D.L.: Mental Rotation: A Key to Mitigation of Motion Sickness in the Virtual Environment?, Presence, Vol.1, No.3, pp.329-333, 1992
- Reschke, M.F., Kornilova, L.N., Harm, D.L., Bloomberg, J.J., and Paloski, W.H.: Neurosensory and Sensory-Motor Function, Space Biology and Medicine, Vol.3, Humans in Spaceflight, Book1, pp.135-193
- Richards, J.T., Clark, J.B., Oman, C.M., and Marshburn, T.H.: Neurovestibular Effects of Long-Duration Spaceflight: A Summary of Mir Phase 1 Experiences, National Space Biomedical Research Institute, 2001
- Sadalla, E.K., and Montello, D.R.: Remembering changes in direction, Environment and Behavior, Vol.21, No.3, pp.346-363, 1989.5
- Schmitt, H.H., and Reid, D.J.: Anecdotal Information on Space Adaptation Syndrome, Proceedings of the space adaptation syndrome drug workshop, National Space Biomedical Research Institute, pp.179-194, 1985
- Shebilke, W., Tubre, T., Willis, T., Hanson, A., Oman, C.M., and Ericson, J.: Simulating spatial memory challenges confronting astronauts, Proceedings of the IEA 2000/HFES 2000 Congress, pp. 2-350 - 2-352, 2000
- Shepard, R.N., and Metzler, J.: Mental Rotation of Three-Dimensional Objects, Science, Vol.171, pp.701-703, 1971.2
- 添田昌志, 大野隆造: 視環境シミュレーションによる経路探索の方略に関する研究, 日本建築学会計画系論文集, 第512号, pp.73-78, 1998.10
- Tafforin, C.: Relationships between orientation, movement and posture in weightlessness: Preliminary ethological observations, Acta Astronautica, Vol.21, No.4, pp.271-280, 1990
- 高野陽太郎: 傾いた図形の謎, 東京大学出版会, 1987.6
- 高野陽太郎: 鏡の中のミステリー, 岩波書店, 1997.10
- 宇宙開発事業団編, 関口千春他著: 宇宙医学・生理学, 社会保険出版社, 1998.8
- Vandenberg, S.G., and Kuse, A.: Mental rotations, a group test of three-dimensional spatial visualization, Perceptual and Motor Skills, Vol.47, pp.599-604, 1978
- Weisman, J.: Evaluating architectural legibility: Way-finding in the built environment, Environment and Behavior, Vol.13, No.2, pp.189-204, 1981.3
-

Witkin, H.A. and Asch, S.E.: Studies in space orientation. IV. Further experiments on perception of the up-right with displaced visual fields, *Journal of Experimental Psychology*, Vol.38, pp.762-782, 1948

矢野澄男：映像と身体の反応，*テレビジョン学会誌*， Vol.50, No.4, pp.429-435, 1996

Young, L.R., Oman, C.M., Watt, D.G.D., Money, K.E., and Lichtenberg, B.K.: Spatial Orientation in Weightlessness and Readaptation to Earth's Gravity, *Science*, Vol.225, Issue 4658, pp.205-208, 1984.7

謝辞

本論文は、東京工業大学大学院博士課程における研究成果をまとめたものです。研究を進めるにあたり、多くの方々に御世話になりました。ここに記して皆様に深く感謝の意を表します。

東京工業大学教授・大野隆造先生には、筆者が1996年に修士課程の学生として東京工業大学に入学して以来今日に至るまで、終始懇切な御指導を頂きました。宇宙ステーションにおける環境心理学の研究を行いたいという、突拍子も無い筆者の思いを応諾し研究室に受け入れて下さったばかりでなく、その後も自由に研究を進めることができたのは、ひとえに大野先生の御蔭です。

また、御多忙の中、本論文の全般に渡り詳細な御査読を賜り、御指導および御助言を頂きました東京工業大学教授・仙田満先生、同教授・梅干野晃先生、同助教授・中村芳樹先生、同助教授・古谷寛先生に感謝致します。

宇宙開発事業団・山口孝夫博士には、研究に対する御助言や貴重な資料、宇宙開発に関する情報を頂戴したばかりでなく、様々な相談に乗っていただき誠にありがとうございます。

人間環境システム専攻の諸先生およびEEゼミにお集まり頂いた諸先生には、学内の発表会で多くの貴重な御意見、御助言を頂きました。東京工業大学助手の添田昌志博士には、研究室の良き先輩として学生時代から研究や留学など多岐にわたる御助言を頂き、大変感謝します。

前Baylor医科大学教授・五十嵐眞先生には、本論文や今後の研究方針について詳細に渡り御助言を頂き、衷心より感謝申し上げます。

本研究を進めるにあたり、東京大学助教授・高野陽太郎先生、東京工業大学・小池惇平博士、防災都市研究所・川井政知博士には貴重な御意見を頂きました。また、本研究の一部は、(財)日本宇宙フォーラムの「宇宙環境利用に関する地上研究公募」プロジェクトの一環として助成を受けて行いました。

さらに、2000年から1年間アメリカへ留学したことは、本論文をまとめるにあたり大変有意義なことでした。留学先で御指導下さったカリフォルニア大学デイビス校心理学科教授・Albert A. Harrison先生、同教授・Robert Sommer先生、同教授・Richard G. Cossには大変お世話になりました。また、Harrison先生に師事する大学院生として学生室で共に過ごしたJames M. Thomas氏およびDanjel Bout氏には、研究や授業、生活に至る様々な面でお世話になりました。特にJimは、親子ほど年齢が離れているにも関わらず、親友としてお付き合い頂きありがとうございます。

留学中に、マサチューセッツ工科大学・Charles M. Oman博士、カリフォルニア大学サンタバーバラ校・Jack Loomis教授、同校・Andrew Beall博士のもとへ赴いた際には、研究に関して議論を交わし、貴重な御助言を頂きました。また、NASA・ジョンソン宇宙センターのDeborah L. Harm博士には、同センターへ視察の際に施設を御案内頂きありがとうございます。

大野研究室では、当時助手の小林茂雄先生、小林美紀博士をはじめ、共に時を過ごした皆様と充実した研究生生活を過ごすことができたことを感謝致します。

また、数時間にも及ぶ難解な実験に耐えて、貴重なデータを提供していただいた多くの被験者の方々の御協力に御礼申し上げます。

最後に、奔放不羈な道を許し温かく見守ってくれた両親や姉、そして常に共に過ごし心の支えとなってくれた妻・和美に心から感謝します。

2002年9月 青木宏文
