

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	文字情報の立体提示の効果に関する研究
Title(English)	
著者(和文)	重田和弘
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4499号, 授与年月日:2000年3月26日, 学位の種別:課程博士, 審査員:清水 康敬
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第4499号, Conferred date:2000/3/26, Degree Type:Course doctor, Examiner:
学位種別(和文)	博士論文
Type(English)	Doctoral Thesis

文字情報の立体提示の効果 に関する研究

2000 年 1 月

重田 和弘

目次

1	序論	1
1.1	本研究の背景	1
1.2	本研究の目的	3
1.3	本論文の構成	4
2	装置構成と基本特性	7
2.1	はじめに	7
2.2	3次元映像の表示技術	8
2.2.1	奥行知覚の要因	8
2.2.2	立体ディスプレイの種類	12
2.2.3	2眼式立体ディスプレイの原理	14
2.3	装置構成	21
2.4	視差と知覚される位置の関係	23
2.4.1	実験の目的	23
2.4.2	実験方法	23
2.4.3	実験結果と考察	25
2.5	融合時間の測定	28
2.5.1	実験の目的	28
2.5.2	実験方法	28
2.5.3	実験結果と考察	29
2.6	第2章のまとめ	33
3	読みやすい文字の提示条件	34
3.1	はじめに	34

3.2	一対比較法による評価	35
3.2.1	実験方法	35
3.2.2	実験結果と考察	36
3.3	正誤判断課題の回答時間	41
3.3.1	正誤判断課題	41
3.3.2	実験方法	41
3.3.3	実験結果と考察	42
3.4	考察	45
3.5	第3章のまとめ	48
4	立体ディスプレイを用いた文字提示の効果	49
4.1	はじめに	49
4.2	文字を背景から浮かせて提示したときの効果	50
4.2.1	実験方法	50
4.2.2	実験結果と考察	51
4.3	立体提示による文字強調の効果	53
4.3.1	単語探索課題	54
4.3.2	視差の大きさと探索時間の関係	55
4.3.3	赤表示や下線との比較	59
4.4	第4章のまとめ	63
5	図形と文字の提示位置と認識時間の関係	65
5.1	はじめに	65
5.2	図中に文字を入れて提示する場合	66
5.2.1	実験方法	66
5.2.2	実験結果と考察	70
5.3	図形にタイトル文字を付けて提示する場合	74
5.3.1	深さ平均位置	74
5.3.2	実験方法	75
5.3.3	実験結果	78
5.3.4	考察	82
5.4	第5章のまとめ	85

6 動画提示におけるタイトル位置の検討	86
6.1 はじめに	86
6.2 深さ平均位置	87
6.3 実験方法	89
6.3.1 装置構成	89
6.3.2 手順	89
6.4 実験結果	92
6.4.1 提示条件による影響	92
6.4.2 回転速度の影響	94
6.4.3 深さ平均位置との関係	95
6.5 考察	97
6.6 第6章のまとめ	99
7 結論	102
7.1 得られた結果	102
7.2 今後の課題	105
謝辞	107
本研究に関する報告	108
参考文献	111

第 1 章

序論

1.1 本研究の背景

映像表示技術の発展により，教育，医療，娯楽などの各分野で，映像を立体的に提示できる立体ディスプレイが普及し始めている．立体ディスプレイを用いた映像提示は，従来の2次元ディスプレイによるものと比較して，立体図形の認識を容易にし [1]，高い臨場感を与えることが出来る [2]．特に，両眼視差を利用して立体感が得られるようにした，2眼式立体ディスプレイは，立体動画像をカラーで比較的簡単に提示できるため，商品開発が進んでいる．2眼式立体ディスプレイは，3次元CADの画面表示用としてすでに利用されており，立体映画を上映する常設の映画館も登場している．

また，最近では，コンピュータ画面上に情報を分かりやすく提示するための，立体ディスプレイを利用した新たなインターフェースが検討されている．例えば，多くの情報を階層構造として3次元的に表示する Cone Tree [3, 4] や，3次元空間上にオブジェクトを配置し，オブジェクトの状態変化を提示位置の奥行きの変化で表現するユーザインターフェースが提案されている [5]．

一方，教育の分野では，パーソナルコンピュータを使用して，映像，音声，文字などを統合的に提示し，学習者との対話性を高めたマルチメディア学習教材が注目されている．コンピュータの構造をわかりやすく説明した教材 [6]，エンジンの動作を理解させるための教材 [7] など，3次元コンピュータグラフィックスを用いたものが数多く開発されている．これらの教材を，立体ディスプレイによる新たなユーザインターフェースを用いて提示すれば，高い教育効果をあげることができると考えられる．

立体ディスプレイを用いた映像提示では、従来の2次元ディスプレイと比較して目が疲労しやすいという視覚疲労の問題 [8] や映像歪の問題 [9, 11, 12, 13, 14, 15] など、立体提示に特有の問題点が指摘されている [16, 17].

特に、学習教材では、内容の理解、学習意欲、動機付けの観点から、見やすい映像提示を行うことが重要である。そのためには、立体映像を提示したときの学習者の生理的特性や認知的特性を明らかにし、画面に見やすく提示するための条件を明らかにすることが必要である。

立体ディスプレイは、これまで主として立体テレビや立体映画の表示装置として開発されてきた。そのため、実写映像や立体図形を対象として、立体像を忠実に再現することと、映像鑑賞時の生理的負荷を軽減することを目標に研究が進められてきた。

たとえば、映像ひずみの許容範囲 [18, 11, 13] や、視覚疲労と視覚機能の関連 [8, 19, 20, 21], などについて研究結果が報告されている。そして、これらの研究成果をまとめた、立体提示に関するガイドライン試案が、1999年6月に発表されている [22].

しかし、文字情報の提示を対象とした研究は、これまでほとんど行われていない。マルチメディア学習教材では、図とともに文字による説明が重要な役割を果たしており、両者が同時に提示されることも多い。したがって、立体ディスプレイに文字情報を見やすく、効果的に提示するための条件を明らかにすることが必要である。

コンピュータ画面への文字情報の提示に関しては、従来の2次元ディスプレイを対象として、これまでも研究が行われている。例えば、画面に提示する文字の適切なサイズや文字間隔 [23], 表示色などが検討されている。また、日本工業規格 [24, 25] において、コンピュータ画面に文字情報を提示するときの要求事項が示されている。これらの研究成果の多くは、立体ディスプレイへの提示においても適用可能である。

しかし、立体提示の場合には、図形や文字をディスプレイの画面上だけでなく、画面の前後の奥行位置に配置して提示できる。そのため、提示する図形や文字の奥行位置についても、十分考慮して提示する必要がある。文字情報は、実写映像や立体図形と異なり、リアリティのある提示ではなく、読みやすく、理解しやすい提示を行うことが求められる。そのため、これまでとは異なる観点からの検討が必要となる。

1.2 本研究の目的

以上で述べたように，立体ディスプレイの特長を生かし，効果的に教材提示を行うためには，実写映像や図形に加え，文字情報を対象とした検討が必要である．そこで，本論文では，立体ディスプレイに文字情報を見やすく，効果的に提示するための指針を得ることを目的として，以下の内容について研究を行った．

(1) 画面に見やすく文字情報を提示するための条件の明確化

本研究では，特に立体提示に固有の問題である，ディスプレイ画面の前後方向の奥行位置に着目して，画面に見やすく文字情報を提示するための条件を明らかにした．主観評価と客観評価の2つの評価による実験結果から，文字情報の提示に適した奥行位置を明らかにした．文字情報だけが画面に提示されている場合と，立体図形と文字情報が同時に画面に提示されている場合について，それぞれ検討を行った．

(2) 立体提示の特長を生かした文字情報の提示手法の提案と評価

立体提示の特長を生かした文字情報の提示方法として，背景模様の中に文字を表示するとき，文字を背景から手前に浮き出させて読みやすくする方法と，画面に提示した文字列の一部を他の文字よりも手前に浮き出させて強調する方法の2つを提案し，それぞれについて，実験によりその有効性を示した．

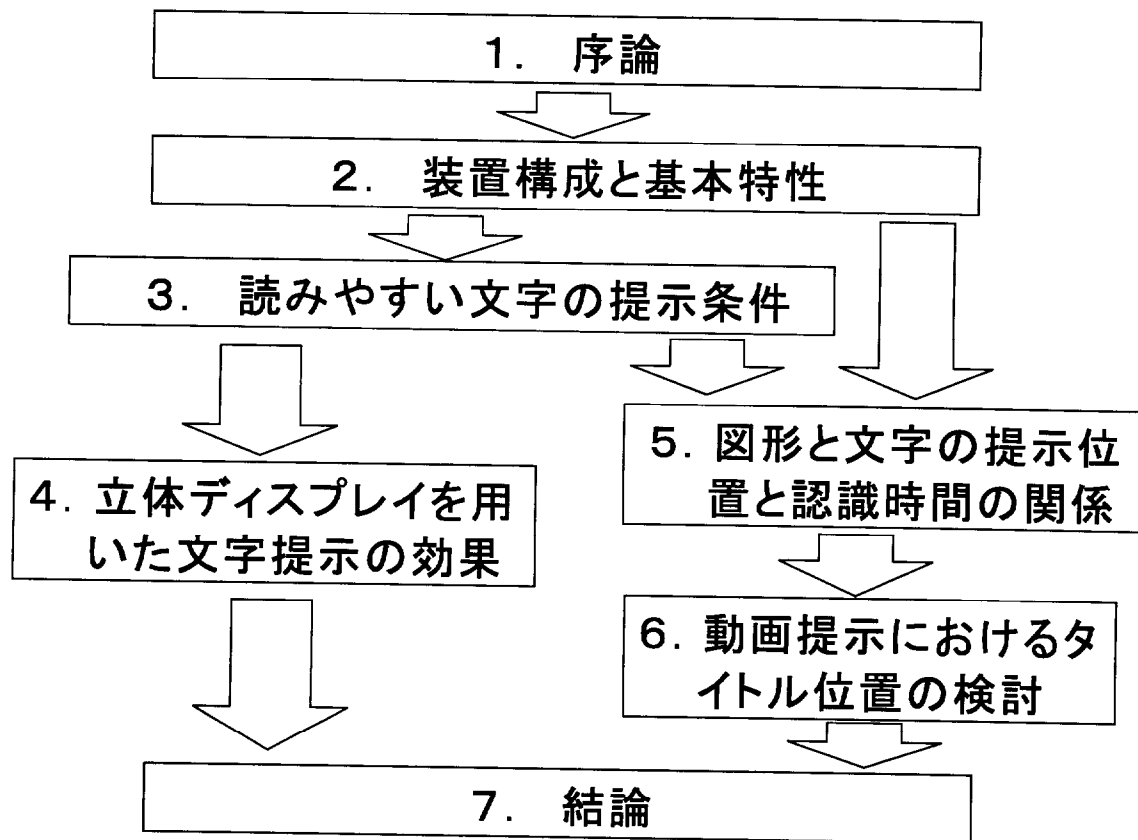


図 1.1 本論文の構成

1.3 本論文の構成

本論文の構成を図 1.1に示す。

第2章「装置構成と基本特性」では、本研究で使用した立体ディスプレイの装置構成の説明と立体提示に関する基本特性の測定を行った。はじめに、立体ディスプレイ全般について概説し、次に本研究で使用した2眼式立体ディスプレイの動作原理と装置構成を説明した。本研究に関連する用語の解説もここで行った。

続いて、文字情報が提示されている場合を対象に、画像に与える視差の大きさとその画像が知覚される奥行位置の関係を実験により測定し、文字情報をディスプレイ画面の前後の奥行位置に正しく提示できることを示した。さらに、文字情報を立体提示したとき、画像が二重像とならずに鮮明に見えるようになるまでに必要な融合時間を測定し、実写映像やランダムドットステレオグラムを対象とした先行研究の結果と比較した。

第3章「読みやすい文字の提示条件」では、画面に文字情報だけが提示されている場合について、文字を読みやすく提示するための条件について述べた。文字が読みやすい奥行位置の範囲を、一対比較法による主観評価の結果と、正誤判断課題の回答時間による客観的な評価の結果から検討した。そして、文字情報の提示に適した奥行位置は、ディスプレイ画面の奥行位置から前後に視差1度の範囲内であることを示した。

第4章「立体ディスプレイを用いた文字提示の効果」では、立体ディスプレイの特長を生かした提示方法を提案し、その有効性について述べた。まず、文字を背景模様の中に提示する場合に、文字を背景から手前に浮き出させて、読みやすく提示する方法を提案した。背景模様の中に、正誤判断課題を背景から浮き出させて提示し、浮出量を変化させて回答時間を測定した結果、文字を背景から浮かせて提示すれば、回答時間が短くなり、文字が読みやすいことを示した。次に、画面に提示した文字列の一部を他の文字よりも手前に浮き出させて強調する方法を提案した。強調された部分の探索に要する時間を、赤表示や下線による方法と比較した結果、立体提示による強調は赤表示と同じ程度の探索時間であること、赤表示と立体提示を併用すれば、これらを単独で用いるより探索時間が短く、高い強調効果が得られることを示した。

第5章「図形と文字の提示位置と認識時間の関係」では、立体図形と文字情報が画面に同時に提示されている場合を対象として、適切な文字の提示位置について述べた。まず、図中に文字を入れて提示する場合について、図形と文字を提示する奥行位置を変化させて提示し、その認識時間を調べた結果、図形を立体提示したうえで、文字を図中の対応する部分と同じ奥行位置に提示すれば見やすいことを示した。次に、図形とそのタイトル文字を画面に同時に提示する場合について検討した結果、画面が最も見やすいタイトル文字の奥行位置は、図形全体の平均的な奥行量をあらかず場所として、本研究において新たに定義した、深さ平均位置とよく一致することを示した。また、この位置に提示すれば、画面の認識時間も短いことを示した。

第6章「動画提示におけるタイトル位置の検討」では、回転提示された立体図形とタイトル文字が画面に同時に提示された動画を対象として、タイトル文字の提示に適した奥行位置について述べた。第5章で定義した深さ平均位置を、回転提示の動画にも適用できるように拡張したのち、立体図形とタイトル文字を同時に提示して、画面が最も見やすいタイトル文字の位置を測定し、両者の値を比較した。その結果、ソリッドモデルで表現された図形を提示する場合には、見やすいタイトル文字の位置は、本研究で定義した深さ平均位置とよく一致し、この位置に提示すれば

良いことを示した。一方、ワイヤフレームモデルで表現された図形を提示する場合には、同じ図形をソリッドモデルで表現して提示したときの深さ平均位置とよく一致し、この位置に提示すれば良いことを示した。さらに、これらの結果は、図形の回転速度に影響されないことを示した。

第7章「結論」では、本研究で得られた結果と今後の課題について述べた。文字情報を見やすく提示する方法と立体ディスプレイの特長を生かした文字の提示方法について述べた。そして、立体ディスプレイを用いた学習教材の提示効果を明らかにすることが、今後の課題であることを述べた。

以上の結果は、立体ディスプレイを対象とした、マルチメディア学習教材やユーザインタフェースの設計指針として有用と考えられる。

第 2 章

装置構成と基本特性

2.1 はじめに

立体ディスプレイは，人間の立体視の機能を巧みに利用して，実際には画面上に平面的に表示しているにもかかわらず，奥行感のある映像を提示することができる．本章の前半では，このように映像を立体的に提示するための技術について説明する．特に，本研究で使用した 2 眼式立体ディスプレイの装置構成について詳しく説明する．

本章の後半では，基本特性として，文字情報が提示されている場合を対象に，視差の大きさと提示した文字が知覚される奥行位置の関係を測定した．さらに，融合時間を測定し，実写映像やランダムドットステレオグラムを提示した場合の先行研究の結果と比較した．

表 2.1 奥行知覚の要因

分類	項目
生理的要因	調節 輻輳 両眼視差 運動視差
心理的要因	網膜像の大きさ 線遠近法 大気遠近法 重なり合い 陰影 きめの勾配

2.2 3次元映像の表示技術

ここでは、3次元映像の表示技術を概説する。はじめに、奥行き知覚の要因を示したのち、これまでに開発された立体ディスプレイについて、主なものを紹介する。続いて、本研究の対象とした、2眼式立体ディスプレイにつて、その原理と理論的な背景について述べる。

2.2.1 奥行知覚の要因

人間は、奥行を知覚するために、多くの手掛かりを利用している [27, 28, 29, 30]。奥行知覚の手掛かりは、表 2.1に示すように、生理的要因と心理的要因に分類することができる。表 2.1に示した各要因について、以下で説明する。

生理的要因

(1) 調節 (accomodation)

眼の水晶体の膨らみを毛様筋の収縮によって変化させ、水晶体の焦点距離を変化させる作用を調節という。毛様筋の緊張の情報は、注視している対象までの距離を知る手掛かりとなる。

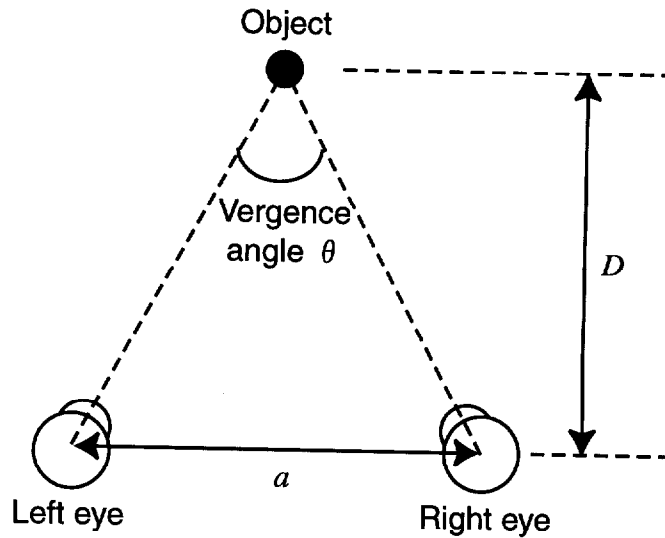


図 2.1 輻輳角

(2) 輻輳 (convergence)

両眼で対象物を注視したとき、その注視点において両眼の視線がなす角を輻輳角 (vergence angle) という。注視点が手前にあるほど、輻輳角は大きくなる。ある輻輳角をつくるために、両眼球を内側に回転させる筋肉の緊張の情報は、注視している対象までの距離を知る手掛かりとなる。

図 2.1において、対象 (object) を注視しているときの、輻輳角 θ は、観察者から対象までの距離を D 、両眼回転中心間の距離 (両眼間隔) を a とすると、次のように表せる。

$$\theta \simeq \frac{a}{D}(\text{rad}) \quad (2.1)$$

(3) 両眼視差 (binocular disparity)

人間の眼は左右に約 6cm 離れているため、両眼で得られる網膜像の間には、ずれが生じる (図 2.2)。この網膜像のずれは、両眼視差と呼ばれ、奥行き知覚の手掛かりとなる。両眼視差は、視覚探索課題において、色や明るさなどと並んで、ポップアウトする初期特徴の一つに数えられている [26]。健康な人の眼では、視差が 10 秒 (視角) 以上あれば、それを知覚できる。約 10m 以内の距離においては、両眼視差が奥行き量の検出感度が最も高く、近距離での奥行き知覚で重要な位置を占めている。

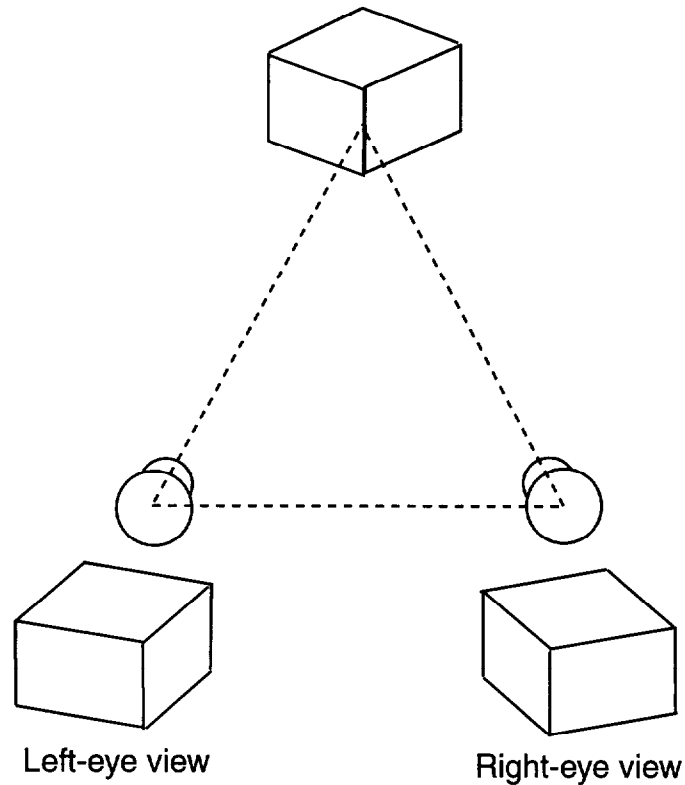


図 2.2 両眼視差

(4) 単眼運動視差 (monocular movement parallax)

動く列車の窓から景色を眺めているとき、注視対象よりも観察者に近いものは、後方に動いて見える。一方、注視対象よりも遠いものは、列車の進行方向に動いて見える。このように、観察者が観察対象が移動して、視点が動くと、単眼であっても継時的に視差が生じ、両眼視と類似した効果が現れる。この視差は、奥行き知覚の手掛かりとなる。

心理的要因

(1) 網膜像の大きさ (retinal image size)

同一対象であっても、遠くにあるものほど網膜像は小さくなる。この大きさの違いが奥行き知覚の手掛かりとなる。

(2) 線遠近法 (linear perspective)

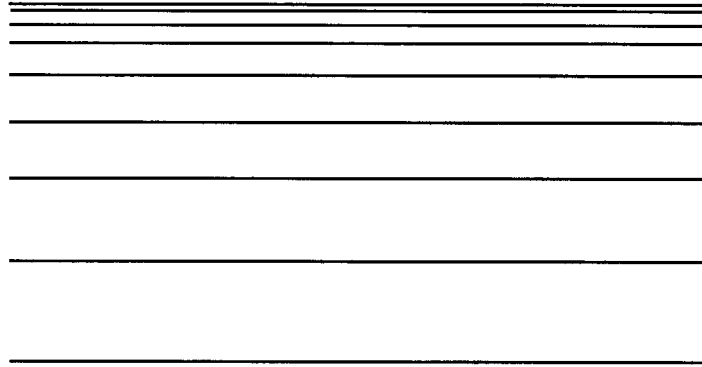


図 2.3 きめの勾配

奥行き方向に無限に延びた2本の平行線は、遠方の一点に収束して見える。実際には、幅は変化していないが、遠方のものほど網膜上の像では幅が狭くなる。このような線遠近法の効果が奥行き知覚の手掛かりとなる。

(3) 大気遠近法 (aerial perspective)

遠方のものほど霞がかかってぼやけて見える。これが奥行き感を与える。

(4) 重なり合い (overlapping)

ある図形が別の図形の一部を隠しているとき、隠している図形は隠されている図形の前方にあるように見える。輪郭線が連続的に見えるものほど、手前にあるように感じられる。これを手掛かりに、対象図形の前後関係を知ることが出来る。

(5) 陰影 (light and shade)

日常生活では、上部から照明が当たることが多い。そのため、物体の下側に陰があると凸部として、上側に陰があると凹部として感じられる。このように、陰影の場所や明るさは、奥行き知覚の手掛かりとなる。

(6) きめの勾配 (texture gradient)

平面上に模様が均一に分布している場合でも、遠方の模様ほど前後の間隔が狭く見える (図 2.3)。これを手掛かりに奥行きを知ることが出来る。

各要因の相互関係

人間は、以上で示した多くの手掛かりを統合して、3次元空間を認識している [32]. 両眼で対象物を捉えるためには、左右眼の中心窩に対象物のシャープな像がくるように、輻輳運動と水晶体の調節が行われる. このとき、主として調節、輻輳、心理的要因に基づく情報によって、観察者から注視している対象までの大まかな距離が検出される. そして、両眼視差と単眼運動視差に基づく情報によって、注視点から他の対象までの相対距離が精度良く検出される.

2.2.2 立体ディスプレイの種類

立体ディスプレイの開発の歴史は古く、既に 1838 年には、イギリスのホイットストーン (C. Wheatstone) によって、立体鏡 (Stereoscope) が発表されている. 1915 年にはアメリカで立体映画が始めて公開され、1928 年にはイギリスのベヤード (J.L. Baird) が立体テレビの実験を行っている [33]. その後も、映画技術やテレビ技術の進歩に伴い、様々な改良が行われ、新しい技術も数多く開発されている.

近年では、コンピュータ内に構築した仮想的な空間を、各種インターフェース機器を用いて、視覚、聴覚、触覚などで知覚できるようにした、バーチャルリアリティ技術が注目されている [31]. 立体ディスプレイは、このバーチャルリアリティ技術の中で、リアリティのある 3次元映像を提示する装置として、重要な役割を占めている.

これまでに開発された立体映像の表示技術のうち、主なものを表 2.2 に示す [32].

立体映像の表示技術は、立体画像を表示するものと、3次元画像を表示するものとに大別できる. 立体画像とは、ある特定の視点における左右 2 眼分の情報を有するものである. そのため、立体画像を提示するディスプレイは、2 眼式立体ディスプレイまたは立体ディスプレイと呼ばれている.

それに対して、3次元画像とは、複数の視点から眺めた情報を有するものである. 3次元画像を表示するディスプレイは、視点移動に応じて異なった画像を表示することが可能である. そのため、立体像の正面からだけではなく、左右に回り込んで側面から眺めた様子を表示することができる.

表示できる情報量の点では、立体画像よりも 3次元画像の方が優れている. しかし、取り扱う情報量が多過ぎることや、表示装置の開発が十分進んでいないことなどの理由から、現時点では、立体画像を提示する 2 眼式立体ディスプレイが普及している. その中でも、偏光メガネや液晶シャッターメガネを使用する方式は、立体

表 2.2 立体映像の表示技術

分類		方式
立体画像	のぞき式	ミラー式 プリズム式 レンズ式
	メガネ式	アナグリフ式 濃度差式 偏光式（偏光メガネ） 時分割式（偏光メガネ，液晶シャッターメガネ）
	メガネなし式	パララックス・ステレオグラム レンティキュラ式 大凹面ミラー式 大凸レンズ式
3次元画像	多眼式	パララックス・パノラマグラム レンティキュラ式 インテグラル式
	奥行き標本化式	バリフォーカル・ミラー式 回転円筒式 表示面振動式 表示面積層式 ハーフミラー合成式
	ホログラフィ	レーザ再生ホログラム 白色光再生ホログラム

映画や立体テレビの表示方式として良く用いられている。

近年は，パーソナルコンピュータを用いて立体像を提示できる，液晶シャッターメガネ方式による装置が低価格で発売されている。また，従来から視覚疲労の原因として指摘されている，視覚機能における輻輳と調節のミスマッチを防止できる，新たなディスプレイの開発も行われている [34]。このようなシステムを用いれば，立体映像を手軽に提示することができる。今後は，このような立体ディスプレイへの提示を前提とした，学習教材が開発されるようになって考えられる。

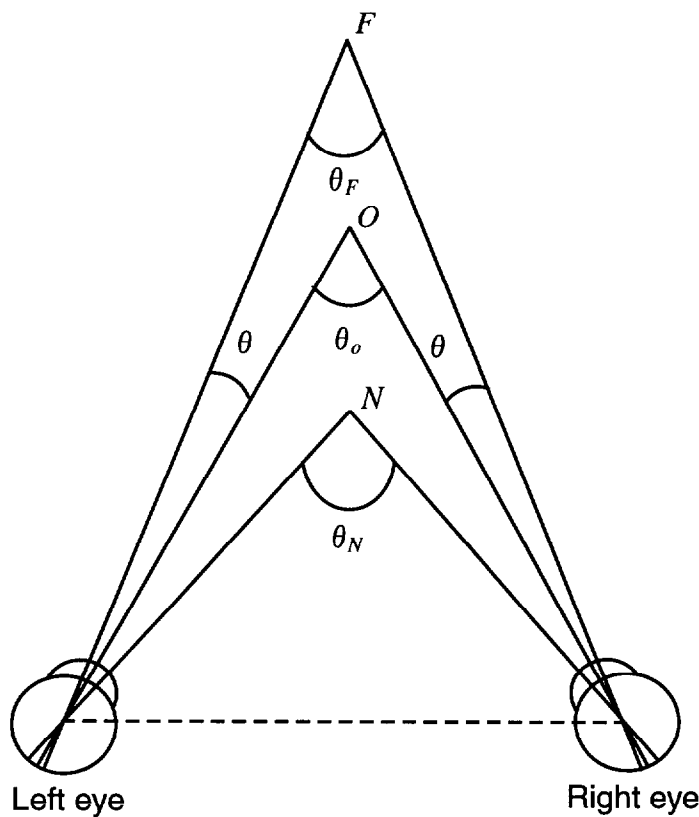


図 2.4 両眼絶対視差と両眼相対視差

2.2.3 2眼式立体ディスプレイの原理

本研究で用いた立体ディスプレイの原理を述べる。

両眼視差

両眼視差は、両眼絶対視差 (absolute disparity) と両眼相対視差 (relative disparity) の2つが定義される [35][36]。

両者の違いを、図 2.4 に示すように、観察者からの距離が異なる視標 N、視標 O、視標 F がある場合を例に説明する。ここで、視標 N、視標 O、視標 F を注視したときの輻輳角を、それぞれ θ_N 、 θ_o 、 θ_F とする。

視標 O を注視しているときの両眼の中心窩には、視標 O の像が結ばれている。しかし、視標 N と視標 F の像が結像する網膜上の位置は、左眼と右眼では異なる。左眼では、視標 F は視標 O から鼻側へ θ 離れた位置に結像する。右眼では、それと

は反対方向の視標 O から鼻側へ θ 離れた位置に結像する。

このように、同じ対象に対する網膜上での結像位置のずれを両眼絶対視差という。視標 F と視標 N の両眼絶対視差をそれぞれ、 δ_F と δ_N とすると、次のように表される。

$$\delta_F = \theta_F - \theta_o \quad (2.2)$$

$$\delta_N = \theta_N - \theta_o \quad (2.3)$$

注視点が視標 N の場合の両眼絶対視差 δ_F と δ_N は、それぞれ次のように表せる。

$$\delta_F = \theta_F - \theta_N \quad (2.4)$$

$$\delta_N = 0 \quad (2.5)$$

以上から明らかなように、輻輳によって注視点が変わると、両眼絶対視差も変化する。

これに対して、両眼相対視差は、2つの対象の両眼絶対視差の違いで定義される。視標 F と視標 N の両眼相対視差 δ_{NF} は、視標 F と視標 N の両眼絶対視差の差によって、次のように表せる。

$$\delta_{NF} = \delta_N - \delta_F \quad (2.6)$$

$$= \theta_N - \theta_F \quad (2.7)$$

輻輳によって注視点が変わっても、両眼相対視差は変化しない。

一般に、単に視差と表現する場合は、両眼相対視差を指すことが多い。本論文でも、特に断らない限り、両眼相対視差を視差と表現する。

提示画像の許容範囲

立体ディスプレイでは、左右の眼に視差のある異なった画像を与えることによって奥行き感を生じさせている。しかし、左右の画像間に著しく差がありすぎると立体視ができなくなったり、不自然な見え方になる。これまでに明かにされている左右画像間差の許容範囲を表 2.3に示す [32]。

時分割方式の立体ディスプレイの場合には、表 2.3の中で、提示時間差の許容範囲が特に重要である。時分割方式では、同一画面に左眼用画像と右眼用画像を交互に切り替えて提示する。そのため、画面の切り替え時間だけ、両画像の提示時間に差が生じる。従って、画面の切り替え周波数は 50Hz 以上とする必要がある。しかし、切り換え周波数が 50Hz 程度では、画面のちらつきが気になる。一般的には、画面の

表 2.3 提示画像の許容範囲

項目	許容範囲
大きさの差	5%以内（幾何学図形） 10～15%以内（一般画像）
明るさの差	30%以内
色相差	±15nm 以内（580 nm の場合）
解像度差	10%以内（高解像度画像） 30%以内（低解像度画像）
提示時間差	20ms 以内

切り換え周波数が 110Hz 以上であれば、ちらつきが気にならないとされている [37]. そのため、最近の立体ディスプレイは、切り換え周波数を 120Hz としたものが多い.

知覚される映像の位置

視差と奥行知覚量の関係を示す. 図 2.5において、観察者から視標 N までの距離を D 、視標 N と視標 F の距離を ΔD とする. このとき、両眼相対視差 δ_{NF} は、式 (2.1)、式 (2.7) より次のように表せる.

$$\delta_{NF} = \theta_N - \theta_F \quad (2.8)$$

$$\simeq \frac{a}{D} - \frac{a}{D + \Delta D} (\text{rad}) \quad (2.9)$$

$$\simeq \frac{a \cdot \Delta D}{D^2} (\text{rad}) \quad (2.10)$$

この関係が成立する視差の範囲には制限があることが、実験によって確認されている. 視差がパーナムの融合域 (Panum's fusional area) と呼ばれる一定の範囲内では、視差の増加に伴って知覚される奥行量も増加する. そして、このときの視差と奥行知覚量の関係は式 (2.10) に従う. しかし、さらに視差が大きくなると逆に奥行知覚量は減少し、最後には 2 重像が知覚されるようになる [36] [38].

パーナムの融合域は、提示画像の種類や網膜上の位置によって異なるが、針を用いた実験の結果では、中心視領域で 10 分（視角）である [39]. パーナムの融合域は中心視領域では狭く、周辺視領域では広がっている [40].

立体ディスプレイは、奥行知覚の要因のうち、両眼視差と輻輳及び心理的要因

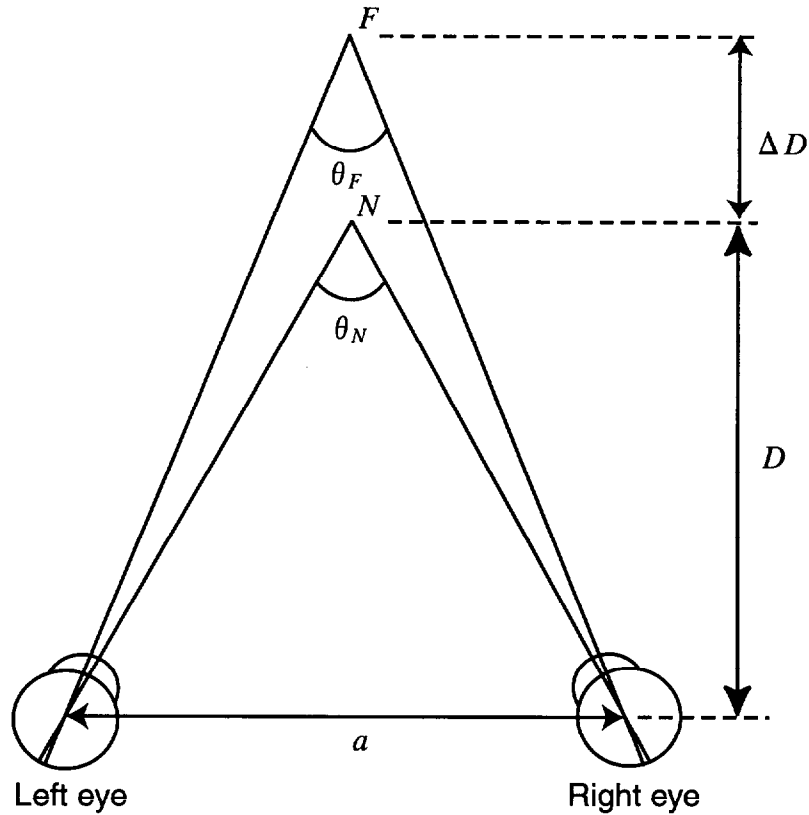


図 2.5 視差と奥行知覚量の関係

によって立体感を与えている．立体ディスプレイでは，図 2.6 に示すように，1 つのディスプレイに左眼用の画像と右眼用の画像を提示する．このとき，2 つの画像の間に水平方向のずれを与えることにより，立体感のある映像を提示することができる．同一画面に提示された 2 つの画像を，左右の眼に別々に振り分けるには，偏光メガネを使用する方法や液晶シャッターメガネを使用する方法などがある．

提示された映像の立体感は，ディスプレイに表示した左右画像間のずれ量を変化させることで調節できる．再生される像の位置は，幾何学的な関係から導くことができる．

図 2.7 に示すように，観察者から距離 D_s 離れたディスプレイに左眼画像 (left-eye image) と右眼画像 (right-eye image) を表示し，これらの画像間に水平方向のずれ e を与えたとき，知覚される像 (perceived image) A の画面に対する両眼視差 $d\theta$ は次の

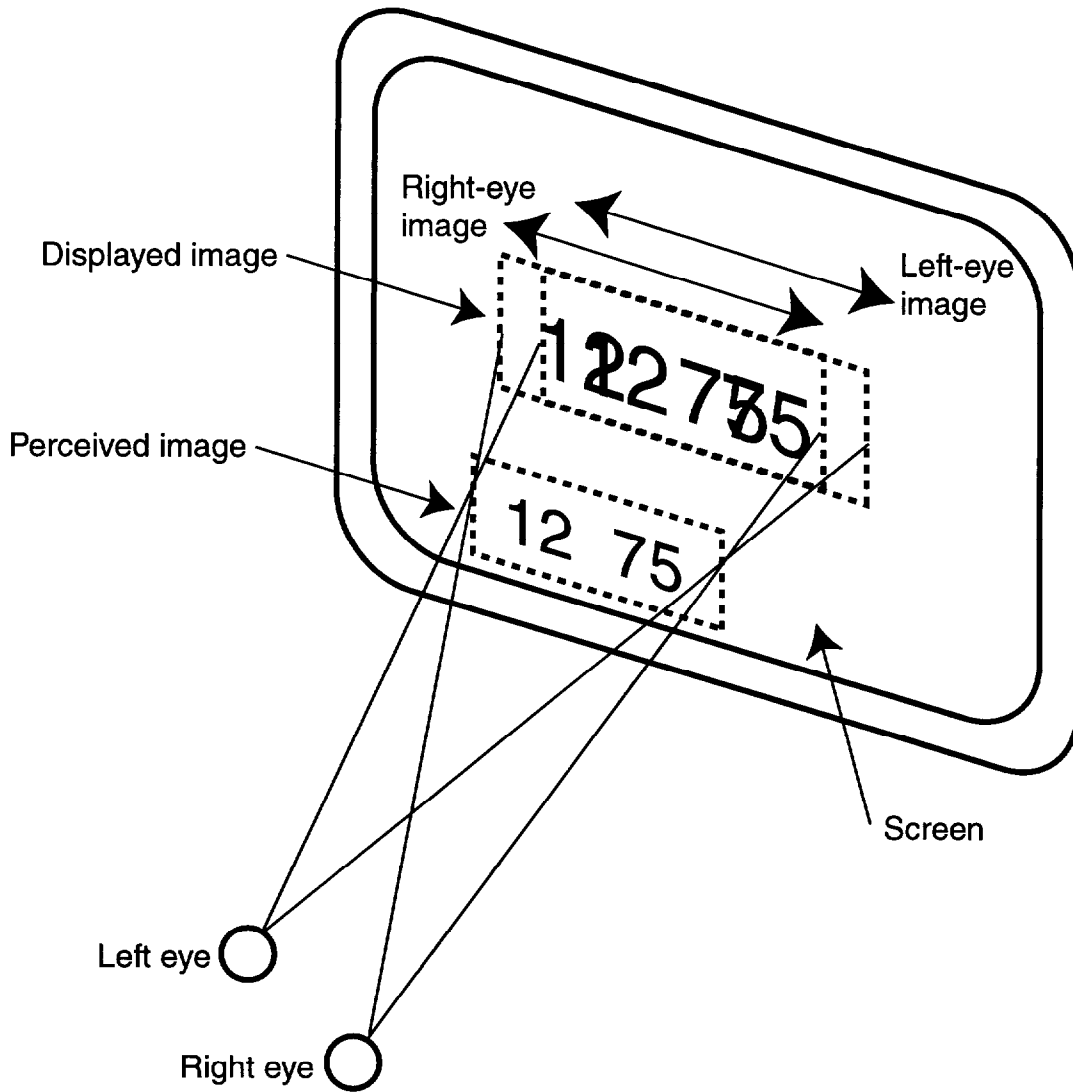


図 2.6 2眼式立体ディスプレイの原理

ように表せる [41].

$$d\theta = \theta_A - \theta_R \quad (2.11)$$

$$\simeq \frac{e}{D_s} \quad (2.12)$$

式 (2.9), 式 (2.12) より, 像 A の位置は, 次のように表せる.

$$D_i \simeq \frac{D_s \cdot e}{a + e} \quad (2.13)$$

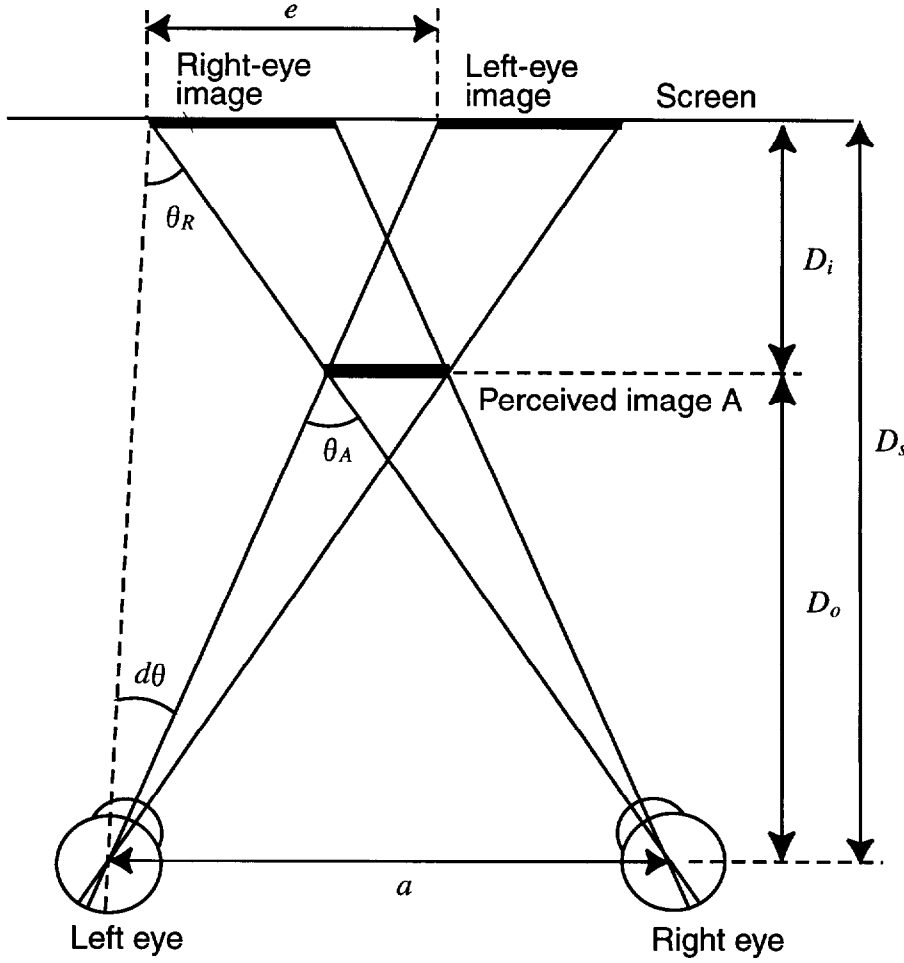


図 2.7 再生像の位置

ここで、 D_S は観察者からディスプレイまでの距離（視距離）、 a は観察者の両眼間隔である。 D_i は、ディスプレイの表面から像 A が知覚される位置までの距離である。

ここで、 e と D_i を、提示位置がディスプレイの表面よりも後方となる時正の値をとり、前方となる時負の値をとるように定めて、それぞれ E と ΔD_S で表すと、式 (2.13) は次のようになる。

$$\Delta D_S \simeq \frac{D_S \cdot E}{a - E} \quad (2.14)$$

このとき、観察者から像 A までの距離 D_o は、次のように表せる。

$$D_o = D_S + \Delta D_S \quad (2.15)$$

知覚される位置には個人差があり，実際にディスプレイに表示した場合には，厳密には上の式に従わない．しかし，ディスプレイの表面に近い位置では，ほぼ一致することが確認されている [42]．

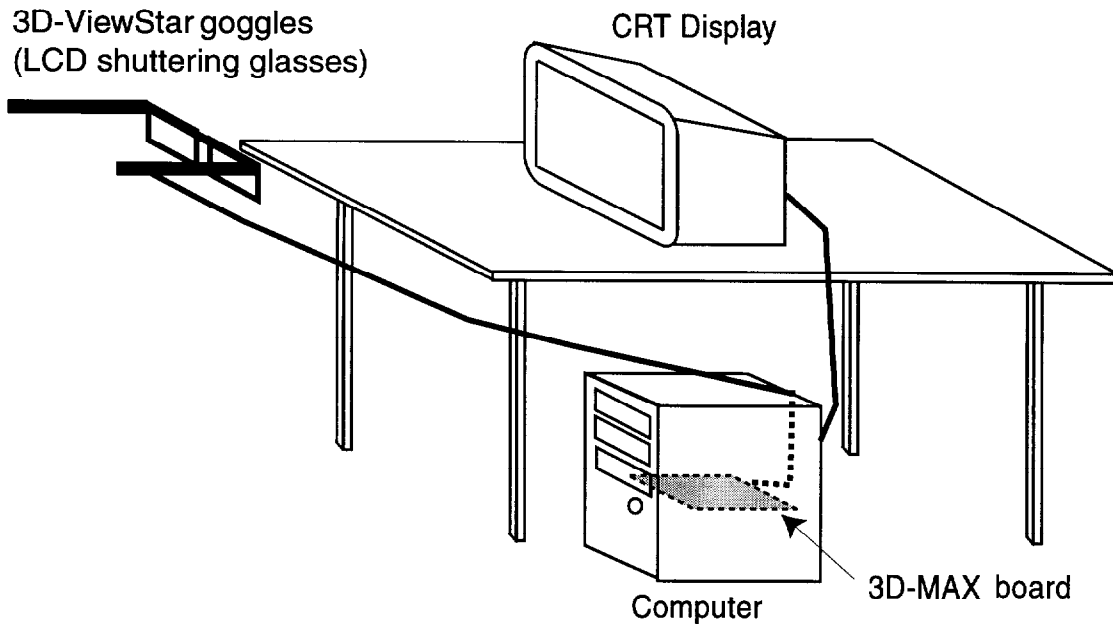


図 2.8 装置構成

2.3 装置構成

本研究で使用した立体ディスプレイについて説明する。実験に使用したのは、液晶シャッターメガネを用いた時分割方式による、2眼式立体ディスプレイである。装置構成を図 2.8 に示す。

本装置は、パーソナルコンピュータ、17 インチ CRT ディスプレイ、3D-MAX ボード、3D-ViewStar ゴーグル（液晶シャッターメガネ）で構成されている。3D-MAX ボードと 3D-ViewStar ゴーグルは、パーソナルコンピュータで立体像を提示するための付加装置で、カサン・エレクトロニクス（株）の製品である。

3D-MAX ボードは、液晶シャッターメガネを制御するための機能拡張ボードで、コンピュータ本体内の ISA スロットに装着されている。そして、液晶シャッターメガネはこのボードとケーブルで接続されている。

製品に附属している専用ソフトウェア（「3D XMOVIE マルチメディア・プレイヤー」）を使用することにより、GIF 形式で保存された画像ファイルを立体像として、提示することができる。ただし、1つの立体像を提示するためには、左眼用と右眼用の2つの画像ファイルを用意しておく必要がある。

本装置は、ディスプレイの垂直周波数を 120Hz とし、左眼用と右眼用の画像を

1/120 秒の間隔で高速に切り替えて表示している。そのため、画面のちらつきは感じられない。液晶シャッターメガネはゴーグルタイプであり、メガネを装着したままでも使用可能である。

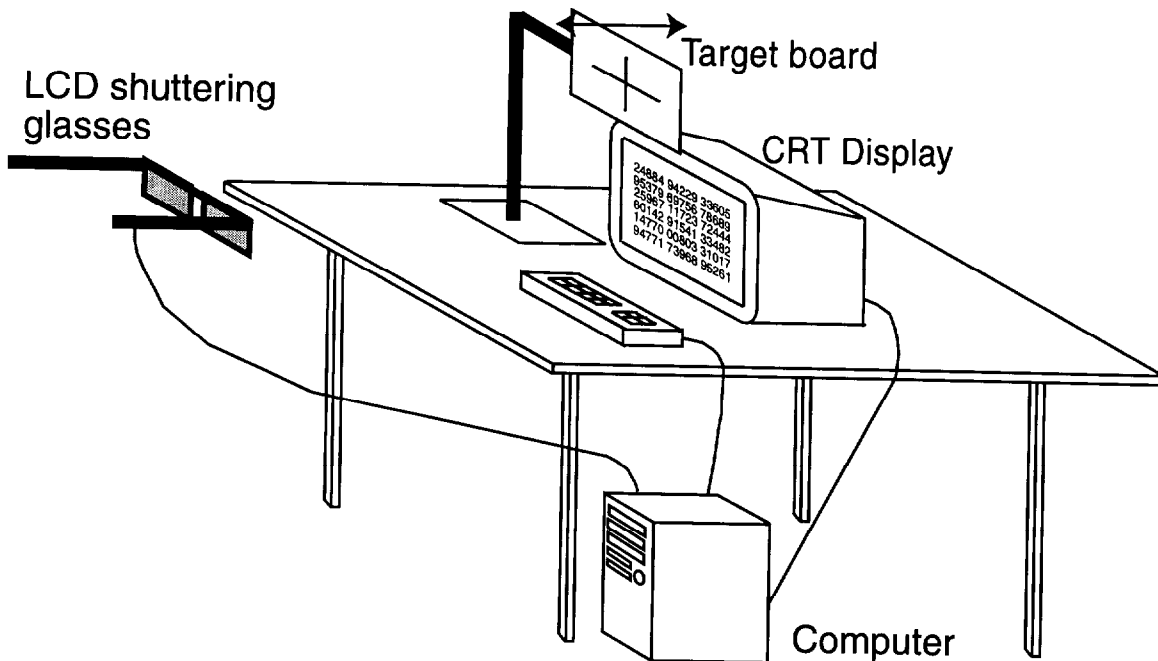


図 2.9 実験システム

2.4 視差と知覚される位置の関係

2.4.1 実験の目的

2.3 節で説明した立体ディスプレイを用いて、文字情報を正しい奥行位置に提示できることを確認するために、視差と文字が知覚される位置の関係を調べた。

2.4.2 実験方法

図 2.9に示すように、ディスプレイの上方に目標版 (Target board) を示し、ディスプレイには図 2.10に示す画像を提示した。

目標板は、中央に十字の印のある、A4サイズの白い板とした。ディスプレイに提示した画像は、キーボード上のキーを操作することによって、被験者自らが視差を変化できるようにした。被験者には、目標板と同じ距離に感じられるように、視差を調節するように教示した。視差を調節するための時間に制限は設けなかった。目標板の位置をディスプレイの表面から、前後に 5cm 間隔で移動させ、それぞれの場合について視差を記録した。そして、視差を調節しても、目標板の位置に画像を提

24884 94229 33609 35039
 95379 69756 78689 15620
 25967 11723 72444 03300
 60142 91541 33482 26094
 14770 00803 31017 41801
 94771 73968 95261 63329
 91838 56389 03768 90066
 41724 09930 79175 85228
 69563 10510 67408 90447
 50757 75850 10818 72878

図 2.10 提示画像

表 2.4 実験条件

画面の解像度	1024 × 768, 白黒 256 階調
室内照度	340 lx (ディスプレイ中央水平面)
視距離	40cm, 60cm
背景	白色 (65cd/m ²)
文字	黒色 (1.3cd/m ²), サイズ (1cm)

示できなくなった時点で測定を打ち切った。

被験者は、両眼とも視力が 1.0 以上（矯正を含む）の 22 歳から 45 歳までの男女 6 名とした。実験条件を表 2.4 に示す。

2.4.3 実験結果と考察

被験者全員について、視差と知覚された位置の関係を図 2.11, 図 2.12に示す。実線は、各被験者の測定結果を表している。破線は、両眼間隔が 6.3cm（日本人の平均値）の場合の理論値を表している。

これらの結果より、視距離が 40cm と 60cm のいずれの場合でも、視差と知覚された位置の関係は、ほぼ理論値に従うことがわかった。また、被験者間の差もほとんどないことがわかった。

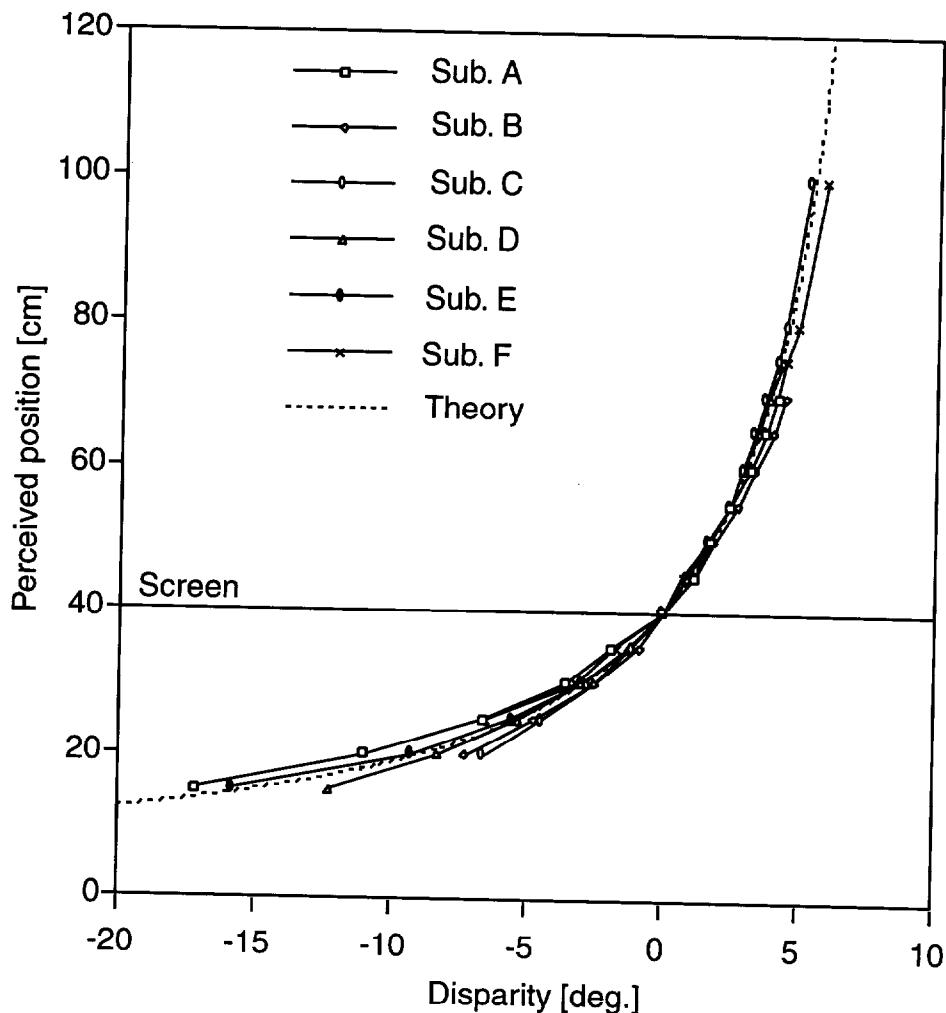


図 2.11 視差と知覚された位置の関係（視距離=40cm）

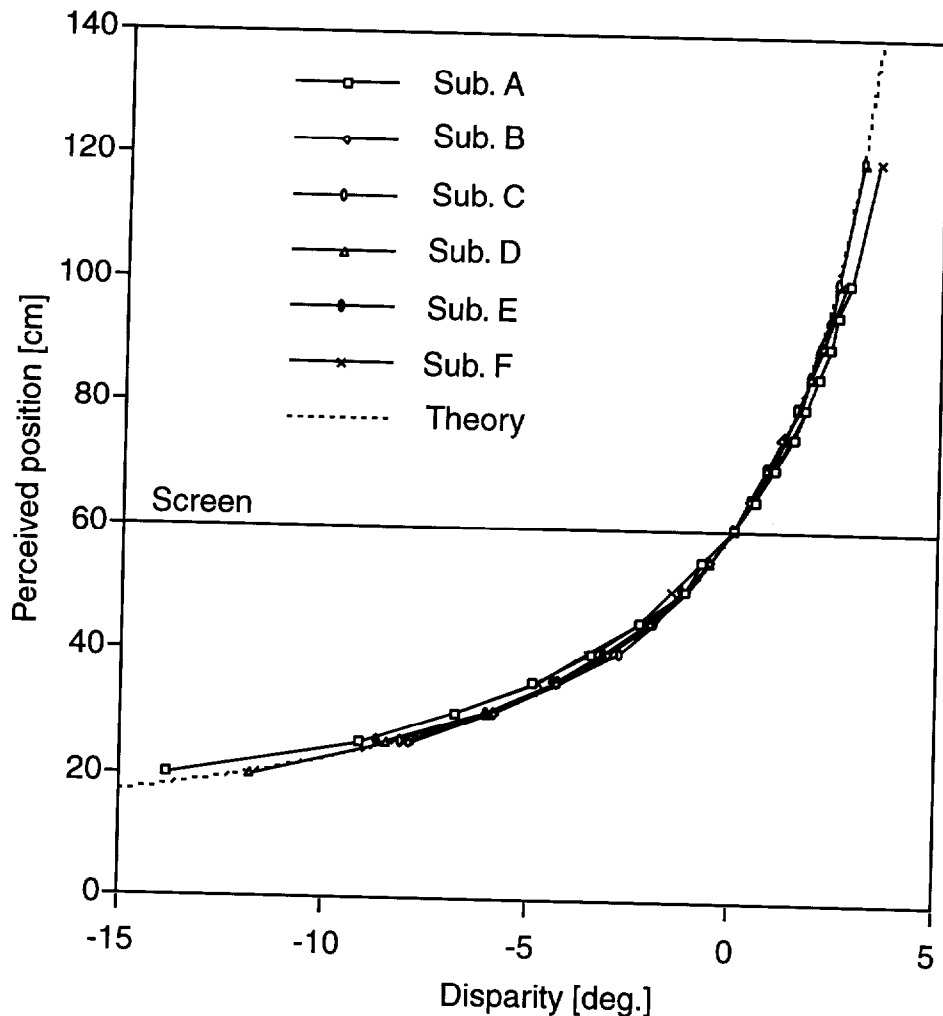


図 2.12 視差と知覚された位置の関係（視距離=60cm）

次に、測定結果をもとに、奥行量を正しく知覚できた視差の範囲をまとめた。その結果を表 2.5に示す。

この結果より、奥行量を正しく知覚できる視差の範囲には限界があり、その範囲は個人差が大きいことがわかった。よって、不特定多数を対象とした教材を制作する場合には、視差を変化させる範囲に注意を払わなければならないことがわかった。

表 2.5より、6 人の被験者全員が奥行量を正しく知覚できた視差の範囲は、視距離が 40cm 場合には、-6.5 度から 3.7 度、視距離が 60cm の場合には、-6.8 度から 2.1 度であった。

視距離が 60cm の場合に、視差を-6.8 度から 2.1 度まで変化させることによって

表 2.5 奥行量を正しく知覚できた視差の範囲

(a) 視距離=40cm

被験者	視差の範囲		
被験者 A	-17.2 度	から	4.2 度
被験者 B	-7.3 度	から	4.4 度
被験者 C	-6.6 度	から	5.3 度
被験者 D	-12.3 度	から	4.3 度
被験者 E	-15.8 度	から	3.7 度
被験者 F	-6.5 度	から	5.9 度

(b) 視距離=60cm

被験者	視差の範囲		
被験者 A	-13.9 度	から	2.8 度
被験者 B	-7.9 度	から	2.6 度
被験者 C	-8.1 度	から	3.1 度
被験者 D	-11.8 度	から	3.1 度
被験者 E	-8.7 度	から	2.1 度
被験者 F	-6.8 度	から	3.4 度

提示できる位置は、ディスプレイの前方 32cm から後方 32cm までの範囲である。これは、通常のプレゼンテーションを行うには十分に広い範囲である。よって、本装置により、立体ディスプレイの特長を活かした視覚効果の高い提示が可能であると考えられる。

以上より、本装置によって、文字の立体提示が十分可能であることが確認できた。

2.5 融合時間の測定

2.5.1 実験の目的

立体ディスプレイに視差のある映像を提示したとき、立体視が成立し、単一の立体像として安定して見えるまでに必要な時間を融合時間という。この時間は、提示図形や視差の大きさによって異なる。

図 2.13に示したランダムドットパターンと方形パターンについて、視差と融合時間の関係が調べられ、次の結果が得られている [10] [11]。しかし、文字情報が提示された場合については、検討されていない。そこで、本節では、文字情報が提示された場合の融合時間の測定を行った。

- (1) ランダムドットパターンでは、視差の増加に伴い融合時間が急激に増加し、視差が 60 分（視角）の付近で、数秒から十数秒である。
- (2) 方形パターンでは、ランダムドットパターンと比較して、融合時間はそれほど増加せず、視差が 65 分（視角）のときで、0.2～0.4 秒である。
- (3) 実写映像による一般画像では、ランダムドットパターンと方形パターンの中間的な傾向を示す。

2.5.2 実験方法

画像が提示されてから、それが単一像として安定して見えるようになるまでに必要な、両眼の融合時間を測定した。測定は、極限法によって行った。

図 2.14に示すように、最初に十字の印をディスプレイの表面に提示して注視させ、5 秒後に視差を与えて「3」の文字を短時間提示した。提示時間を 50 ミリ秒間隔で変化させ、被験者にどのように見えたかを報告させた。回答は、「単一像として安定して見えた」、「単一像として安定して見えなかった」、「どちらともいえない」の 3 つの選択肢の中から選択させた。

測定は、提示時間を次第に短くする下降系列から始め、下降系列と上昇系列を交互に各 3 回ずつ測定した。そして、視差を-3.01 度から 3.01 度まで 13 通りに変化させて測定した。視差の条件を表 2.6に示す。

被験者は、両眼とも視力が 1.0 以上（矯正を含む）の 22 歳から 26 歳の男女 5 名とした。実験条件を表 2.7に示す。

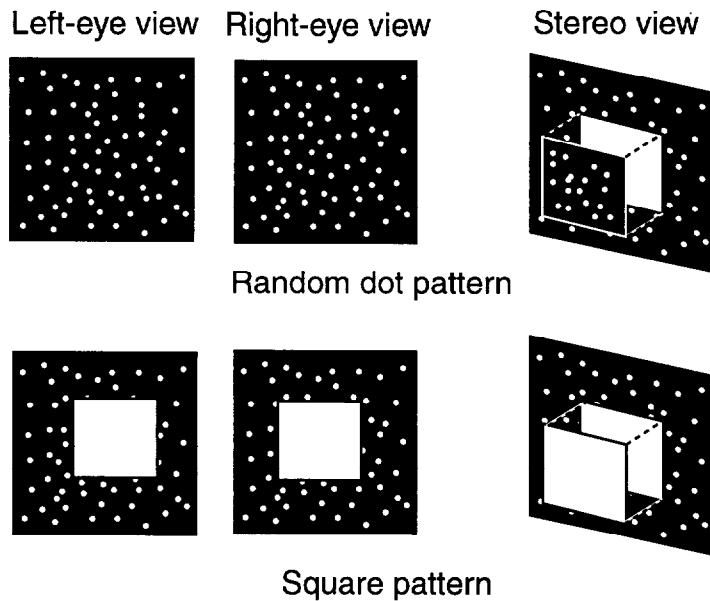


図 2.13 ランダムドットパターンと方形パターン

表 2.6 視差の条件

視差 (度)	-3.01, -2.00, -1.43, -0.95, -0.48, -0.18
	0, 0.18, 0.48, 0.95, 1.43, 2.00, 3.01

2.5.3 実験結果と考察

実験結果を図 2.15に示す。

図 2.15は、提示した文字が単一像として安定して見えるために必要な融合時間を表している。グラフの値は、被験者全員の平均値である。縦線は、標準偏差を表している。

視差が0度のときの値は、平面提示の場合に文字が安定して見えるために必要な時間である。立体提示によって新たに必要となる時間は、グラフの各値から視差0度のときの値である約190ミリ秒を減じた時間である。

この結果より、融合時間は、視差が大きく、提示位置がディスプレイの表面から離れるほど長くなることがわかった。また、融合時間は、視差の大きさが3度の場合でも高々550ミリ秒程度であることもわかった。

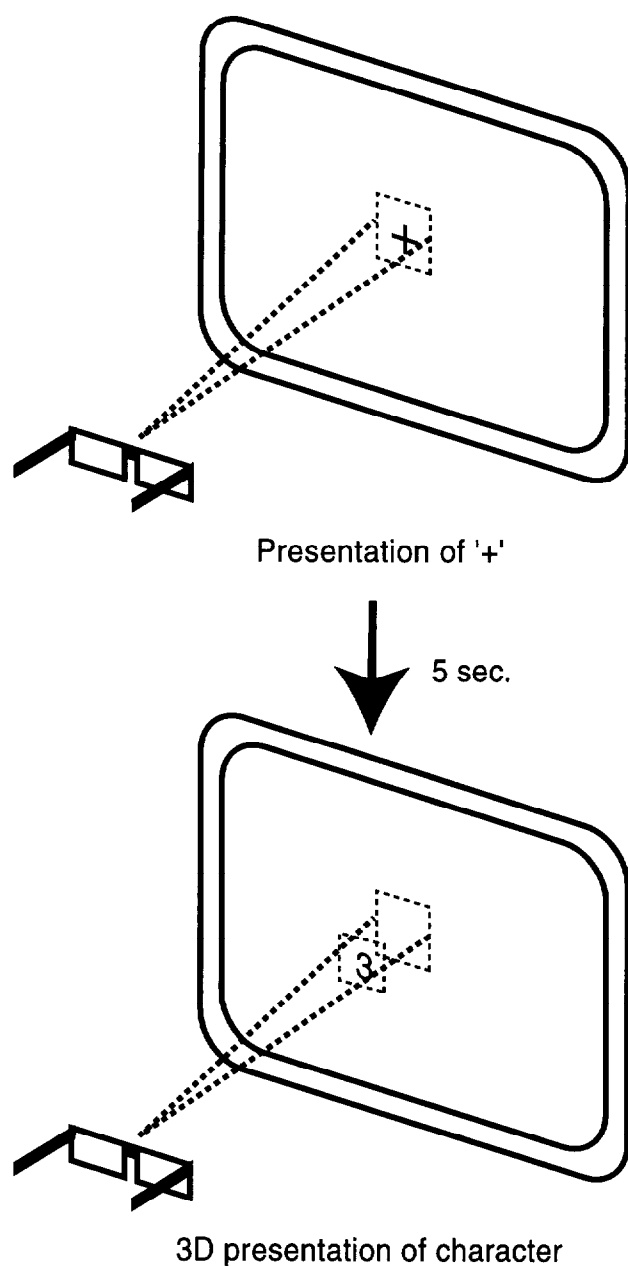


図 2.14 実験の様子

先行研究 [37] において、方形パターンの融合時間は視差が約 1 度の場合で 0.2～0.4 秒であるとの結果が得られている。これは、文字を対象とした本実験結果とほぼ一致している。よって、文字の融合時間は方形パターンと同様の傾向を示すものと考えられる。なお、先行研究では、ディスプレイの前方に提示する場合についての

表 2.7 実験条件

画面の解像度	1024 × 768, 白黒 256 階調
室内照度	340 lx (ディスプレイ中央水平面)
視距離	60cm
背景	白色 (65cd/m^2)
文字	黒色 (1.3cd/m^2), サイズ (1cm)

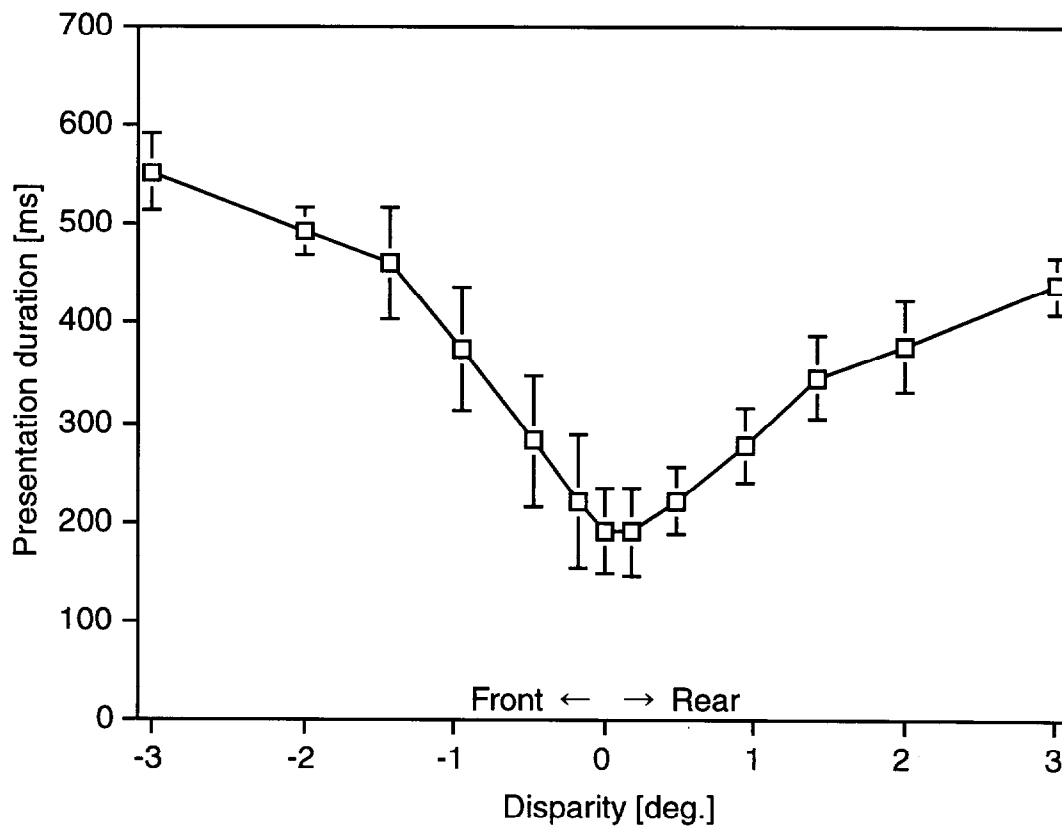


図 2.15 立体視の成立に必要な融合時間

み検討が行われていた。本研究により、融合時間は、ディスプレイの前方よりも後方の方がやや短い、ほぼ同様の傾向であることが明らかになった。

本実験では、極限法を用いて測定を行った。この方法は、提示時間を変化させて、同じ提示位置に何度も繰り返して提示する。そのため、被験者は提示位置を予め知

ることができた。本実験結果は、そのような条件において得られたものである。

実際に教材を制作するときには、読みやすさを考慮して提示するため、学習者が提示位置を予想できることが多いと思われる。従って、多くの場合には、本実験結果が適用可能である。

しかし、学習者が全く予想していない位置に提示する場合も考えられる。その場合には、融合時間は本実験結果よりも、さらに長くなる可能性が高い。よって、今後、位置をランダムに変更して提示する場合についても検討を行う必要がある。

2.6 第2章のまとめ

本章では，立体ディスプレイに関する基本特性を測定した。

文字情報が提示されている場合を対象に，視差の大きさと提示した文字が知覚される奥行位置の関係を測定し，次の結果を得た。

- (1) 提示位置がディスプレイの表面に近い場合は，理論式で求められる位置に，ほぼ正しく文字を提示することができる。

立体画像が提示されてから，立体視が成立するまでに必要な融合時間を，提示位置を変化させて測定し，次の結果を得た。

- (2) 視差を大きくし，提示位置をディスプレイの表面から離すほど，融合時間は長くなる。
- (3) 融合時間は，視差が3度の場合でも高々550ミリ秒である。

第 3 章

読みやすい文字の提示条件

3.1 はじめに

CRT ディスプレイに文字を読みやすく提示するための条件は、平面的な提示を対象に、これまでも研究が行われている。そして、文字の大きさ、文字間隔、行間隔などについて、読みやすく提示するための条件が明かにされている [23]。立体ディスプレイに提示する場合においても、これらの条件が適用できると考えられる。

しかし、立体ディスプレイは、文字をディスプレイの表面以外に、ディスプレイの前後に浮かせて提示できる点に特長がある。そのため、ディスプレイの前後に提示位置を変化させた場合に、文字の読みやすさがどのように変化するかわかる必要がある。

そこで、本章では、立体ディスプレイに文字を読みやすく提示するための条件を検討した。

まず、提示位置の異なる 7 種類の画像を対象に、一対比較法による主観評価を行った。その結果、ディスプレイの表面と同じ奥行位置に文字を提示した場合が最も読みやすさの評価が高く、提示位置がディスプレイから離れるにしたがって、評価が下がることがわかった。

素早い文字の読み取りが要求される正誤判断課題を、提示位置を変化させて提示し、その反応時間を測定した。その結果、視差が-1 度から 1 度の範囲の提示位置であれば、ディスプレイの表面と同じ奥行位置に提示した場合と反応時間に差がないことがわかった。

最後に、以上の結果に基づいて、文字を読みやすく提示するための条件を考察した。

3.2 一対比較法による評価

3.2.1 実験方法

一対比較法による主観評価を行い，提示位置と読みやすさの関係を検討した．一対比較法は，複数の測定対象から2つずつを選択した全ての組み合わせについて，被験者にある基準によって比較させ，どちらか一方の対象を選択させる方法である．この結果を，サーストンの比較判断の法則 [43] に基づいて処理することにより，測定対象の間隔尺度を構成することができる．

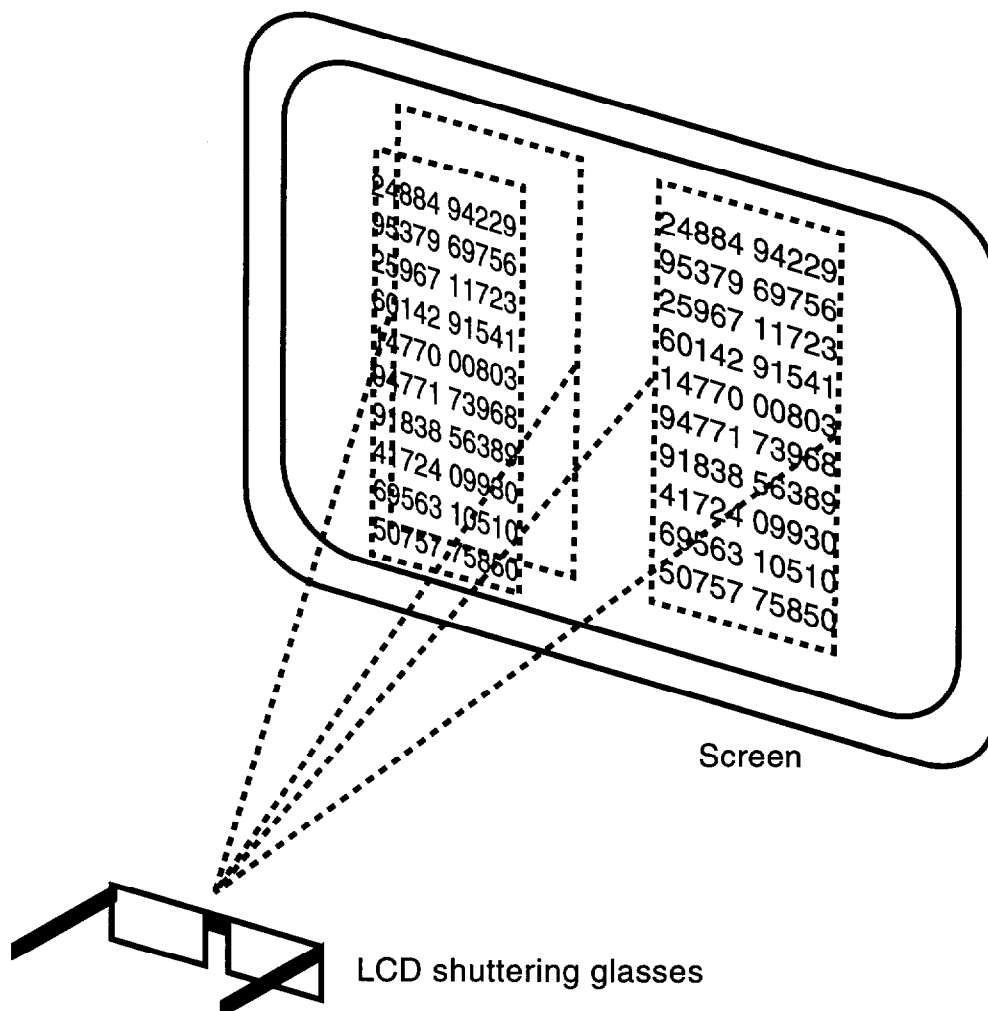


図 3.1 実験の様子

24884 94229	24884 94229
95379 69756	95379 69756
25967 11723	25967 11723
60142 91541	60142 91541
14770 00803	14770 00803
94771 73968	94771 73968
91838 56389	91838 56389
41724 09930	41724 09930
69563 10510	69563 10510
50757 75850	50757 75850

図 3.2 提示画像

図 3.1に示すように、視差の異なる画像を左右に並べて提示し、どちらが読みやすいかを、被験者に判断させた。提示画像を図 3.2に示す。

提示画像は、視差が-4度から2度までのものを1度間隔で用意した。対比較の数は画像の左右の位置を入れ替えた場合も含めて、被験者一人あたり42通りとした。

被験者は、両眼とも視力が1.0以上（矯正を含む）の22歳から45歳の男女7名とした。実験条件は、第2章の実験と同じとした。

3.2.2 実験結果と考察

実験結果を表 3.1に示す。表 3.1は、視差 i が視差 j よりも読み易いと回答した度数を、視距離が40cmと60cmの場合についてそれぞれ集計したものである。

さらに、表 3.1の各度数から、サーストンの比較判断の法則 [43] に基づいて、各画像間の読みやすさの距離を求め、視差の異なる7種類の画像の間隔尺度を構成した。

まず、表 3.1の各度数を対比較の回数（42回）で割って判断比率を計算し、次に、各判断比率に対応する標準得点（ z 得点）を求めた。そして、各視差についてそれぞ

標準得点の平均値を計算することにより、尺度値 (score) を求めた。その結果を、図 3.3と図 3.4に示す。ここで、尺度値は読みやすさの距離を表しており、全体の平均を 0 と定めている。尺度値が大きいものほど、読みやすいことを表している。

図 3.3と図 3.4より、視距離が 40cm と 60cm のどちらの場合でも、視差を 0 度として、ディスプレイの表面に提示した場合が、最も読みやすさの評価が高いことがわかった。また、視差を大きくし、提示位置をディスプレイから離すほど読みやすさの評価が下がることもわかった。

視距離が 40cm と 60cm のどちらの場合でも同様の結果が得られた。よって、読みやすさは被験者から提示位置までの距離ではなく、ディスプレイの表面から提示位置までの距離に依存していると考えられる。

以上より、ディスプレイの表面に文字を提示した場合が最も読みやすく、提示位置がディスプレイから離れるほど読みにくくなることがわかった。

表 3.1 判断度数表

視差 i が視差 j よりも読み易いと回答した度数

(a) 視距離=40cm

視差 j (度)	視差 i (度)						
	-5.72	-4.30	-2.86	-1.43	0	1.43	2.86
-5.72	—	8	10	12	12	6	6
-4.30	6	—	7	11	11	6	4
-2.86	4	7	—	8	12	3	1
-1.43	2	3	6	—	11	5	3
0	2	3	2	3	—	2	1
1.43	8	8	11	8	12	—	1
2.86	8	10	12	11	13	13	—

(b) 視距離=60cm

視差 j (度)	視差 i (度)						
	-3.82	-2.86	-1.91	-0.95	0	0.95	1.91
-3.82	—	9	12	11	13	7	8
-2.86	8	—	7	12	12	8	8
-1.91	2	7	—	9	12	11	5
-0.95	3	2	5	—	11	7	6
0	1	2	2	3	—	3	3
0.95	7	6	3	7	11	—	3
1.91	6	6	9	8	11	11	—

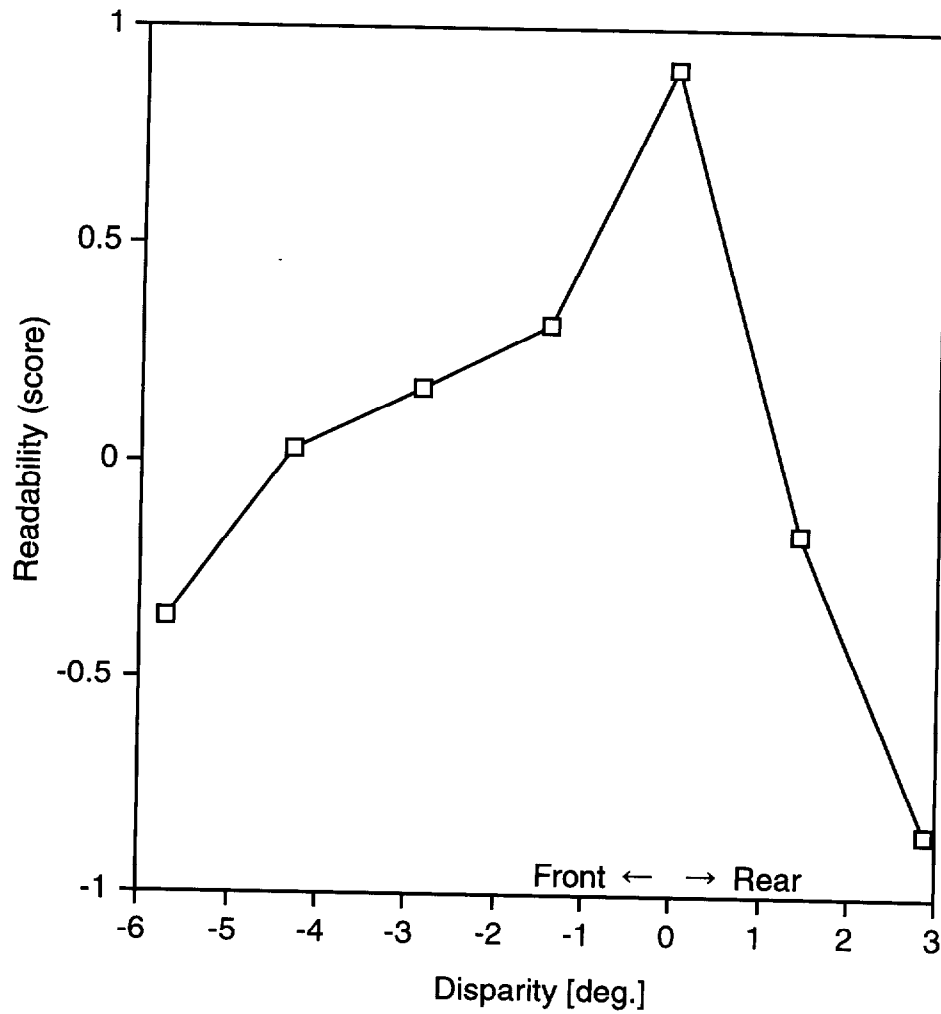


図 3.3 視差と読みやすさの関係（視距離=40cm）

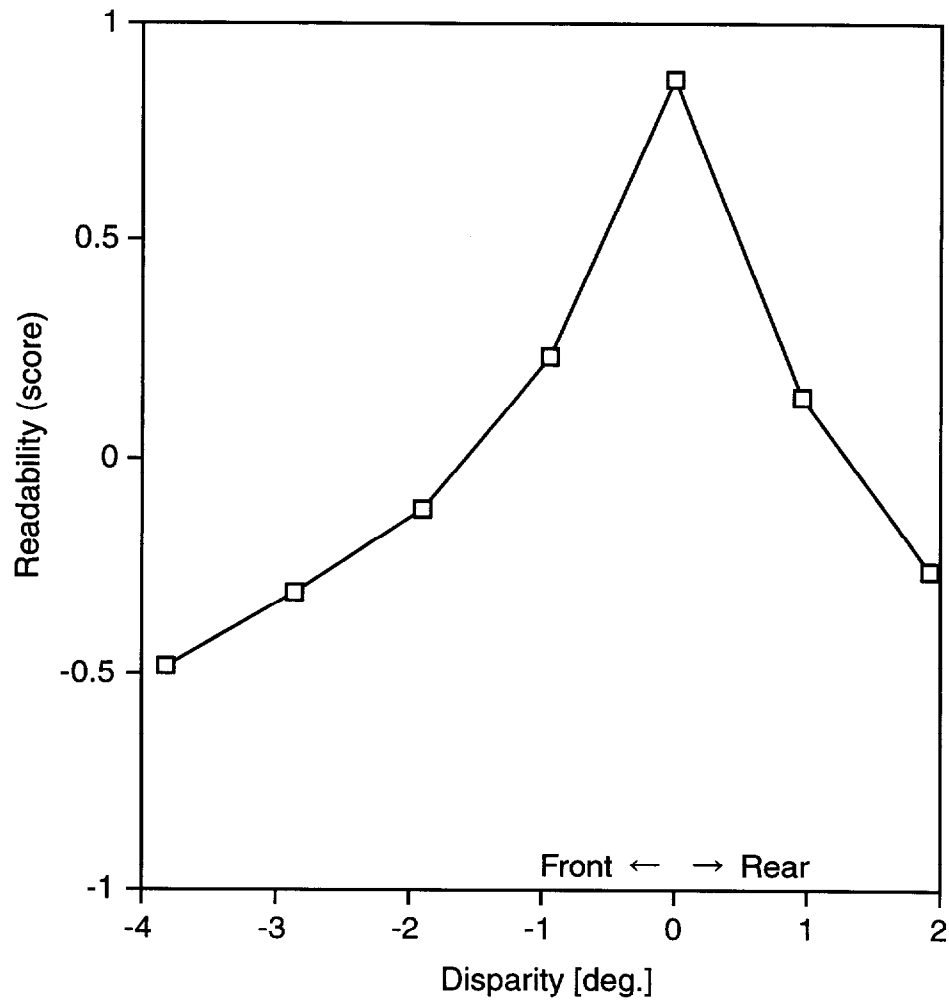


図 3.4 視差と読みやすさの関係（視距離=60cm）

153206748 153296748

図 3.5 9桁の数字による正誤判断課題の一例

3.3 正誤判断課題の回答時間

2眼式立体ディスプレイは、視差を大きくして立体感を強調し過ぎた画像を提示すると、眼が疲労しやすいことが知られている [8]。また、視差を大きくして提示すると、文字認識にも影響を及ぼす可能性がある。そこで、文字の視差を変化させて正誤判断課題を提示し、その反応時間を測定した。

3.3.1 正誤判断課題

正誤判断課題は、9桁の数が左右に並べて提示され、両方の数が同じであるかを判断する課題である。課題の一例を図 3.5に示す。

被験者には、左右の数をできるだけ早く読み取り、回答するように教示した。

3.3.2 実験方法

文字の視差を変化させて正誤判断課題を提示し、回答までの反応時間を測定した。

視差のある画像が提示されてから、両眼融合による立体視が成立するまでには、融合時間と呼ばれる一定の時間が必要なことが知られている [11]。融合時間は、提示画像の種類や視差の大きさに依存する。そこで、本実験では、反応時間に融合時間が含まれないようにするために、課題の提示方法を工夫した。

まず、例題を提示し被験者に注視させ、文字列が単一像として安定して見えるようになったら、被験者にキーを押させた。そして、キーが押されたら例題と同じ位置に本題を提示した。例題は、本題と容易に区別できるようにするため、図 3.6に示すように数字の周囲を長方形で囲み、本題と同じ視差を与えて提示した。

回答はキーボードの2つのキーで入力させ、問題が提示されてから回答が行われるまでの反応時間を10ミリ秒の精度で測定した。

課題の提示条件は、視差が ± 1.43 度の範囲の7条件とした。問題は、視差0度のものと、視差0度を除く6条件のなかの1つを交互に提示した。そして、視差0度

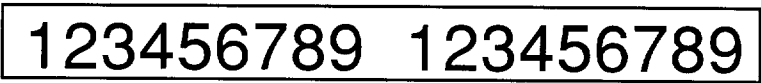


図 3.6 例題

と視差-1.43度の組み合わせから視差0度と視差1.43度の組み合わせまでについて、6つの実験セッションに分けて測定を行った。

各実験セッションでは、両条件の問題を交互に12題ずつ提示し、それぞれ左右の数字がすべて一致するものを8題、1桁だけが異なるものを4題とした。

そして、すべての実験セッションについて2回ずつ測定を行った。すべての実験セッションで共通に視差0度を測定したのは、課題に対する慣れや、疲労が反応時間に影響を与えたかどうかを確認するためである。

問題は、背景と文字のコントラストが大きい、白色の背景に黒色の文字で提示した。提示範囲は、ディスプレイの中央部、縦1cm×横15cm（視角で0.95度×14.3度）の範囲とした。被験者には予め練習課題を与え、課題に十分慣れた後に実験を行った。その他の実験条件と被験者は、前記の実験と同じである。

3.3.3 実験結果と考察

正誤判断課題において、左右の数が同じ問題は、回答のために9桁すべての照合が必要である。これらの問題の回答時間は、問題間で差がないと考えられる。そこで、左右の数が同じ問題を対象に分析を行った。ただし、誤答は分析の対象から除いた。

課題の正答率は、全体で99.3%と高かった。

各条件の被験者全員の平均反応時間を図3.7に示す。縦線は標準偏差を表している。

まず、すべての実験セッションで共通に測定を行った視差0度の条件を対象に、実験セッション間の反応時間の差の有無を調べた。分散分析の結果、実験セッションを要因とする反応時間の分散と、偶然誤差を要因とする反応時間の分散の比が1.87であった。そして、被験者数、測定回数を考慮したうえで、水準（危険率）5%のもと、統計的に両者の分散に有意な差はないことがわかった（ $F(5,559)=1.87$, $p > 0.05$ ）。これは、実験セッション間で反応時間に差はなく、すべての実験セッションは、課

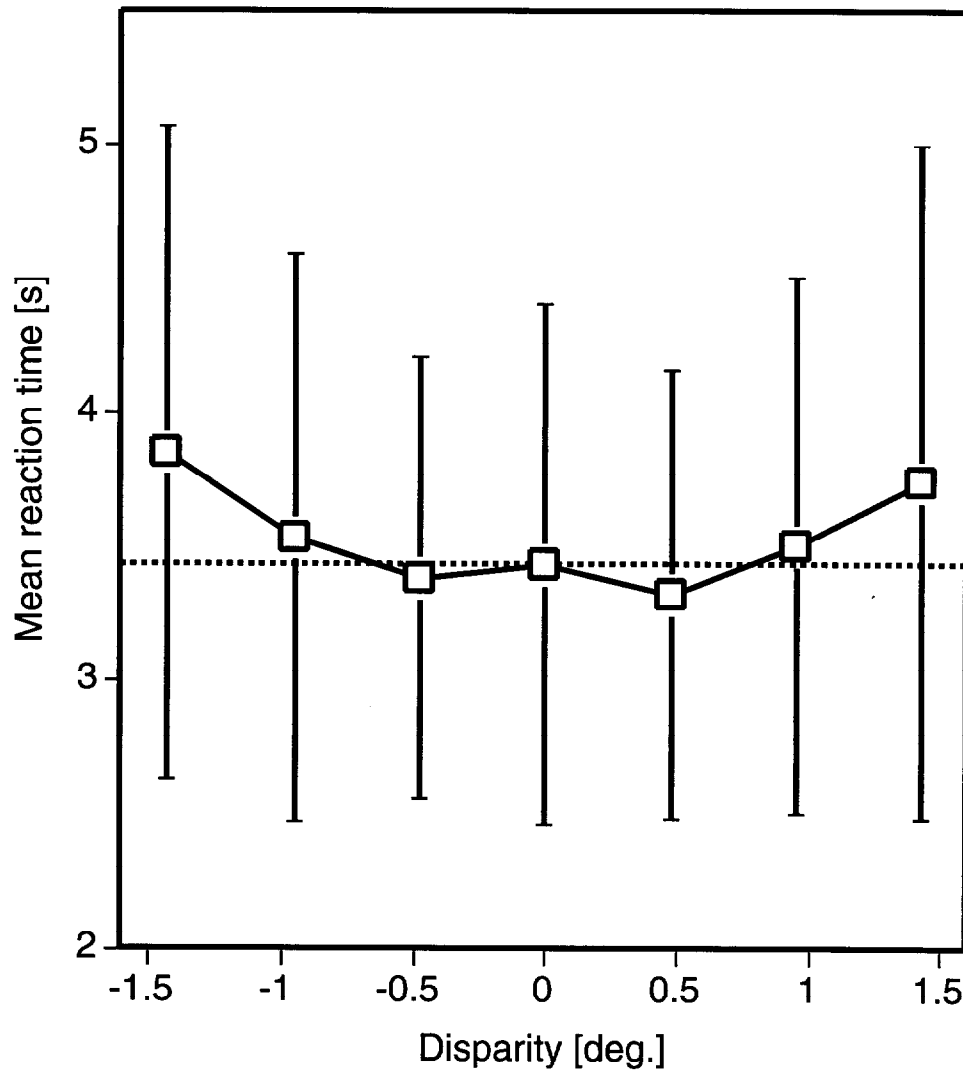


図 3.7 視差に対する反応時間

題に対する慣れや、疲労の影響もなく、同じ条件のもとで実施されたことを意味している。

そこで、提示条件間の比較を行った。分散分析の結果、提示条件の違いが反応時間に影響を与えていることがわかった ($F(6,1132)=7.58$, $p < 0.01$)。多重比較（水準 5%）の結果、視差が-1.43 度と 1.43 度の条件は、視差 0 度の条件と反応時間に有意な差があった。しかし、視差が-0.95 度から 0.95 度の範囲では、視差 0 度と差がなかった。

以上の結果から、視差がおよそ±1 度の範囲では、視差 0 度の平面提示の条件と

反応時間に差がないことがわかった。これより、視差を1度以内として提示すれば、文字認識に与える影響は無視できると考えられる。

立体映像を鑑賞中の眼球運動の変化と鑑賞後の調節機能の変化を測定し、映像の持つ視差の量が1度以内であれば、視覚系にあまり負担とならないとした研究結果が報告されている [20]。本検討の結果から、文字認識の観点からも、1度以内が望ましい視差であることが明らかになった。

3.4 考察

以上の実験結果に基づいて、文字を読みやすく提示するための条件を考察する。一対比較法による主観評価より、次の結果を得た。

- (1) ディスプレイの表面に提示した場合が最も読みやすい。
- (2) 提示位置がディスプレイの表面から離れるほど読みにくい。

以上の結果より、立体提示によって特別な効果が期待できる場合を除いては、原則としてディスプレイの表面に提示することが望ましいと言える。文字を立体提示することによって得られる効果が、読みやすさを損なうデメリットを上回ると判断される場合に限り、立体提示を行うべきである。

文字をどの程度浮かせて提示するかを判断するには、立体提示による効果と読みやすさを表す客観的な尺度が必要となる。そこで、以下では、読みやすさについて検討する。

文字の読みやすさを表す客観的な尺度の一つとして、文字の読み取り時間があげられる。文字の読み取りに必要な時間が長いほど、読みにくいと判断することができる。

第2章で述べたように、立体像を提示した場合には、画像が表示されてから立体視が成立し、単一像として安定して見えるようになるまでに、数百ミリ秒の融合時間が必要である。従って、文字の読み取り時間は、この融合時間と立体視成立後の文字の読み取り時間の和で表せる。

そこで、提示位置と融合時間の関係、提示位置と立体視成立後の読み取り時間の関係について、それぞれ考察する。

まず、2.5節で提示位置を変化させて融合時間の測定を行い、次の結果が得られている。

- (3) 視差が大きく、提示位置がディスプレイの表面から離れているほど、融合時間は長くなる。
- (4) 融合時間は、視差が3度の場合でも高々550ミリ秒である。

一度立体視が成立し、単一像として安定して見えるようになると、同じ視差を与えた注視点周辺の文字は、容易に読むことができる。そのため、融合時間は文字列の長さに関係なく一定である。

提示した文字列が長い場合には、この融合時間が文字の読み取り時間全体に占める割合が小さくなり、この時間をほとんど無視することができる。しかし、単語や短いタイトルなど、文字数が少ない場合には、融合時間は相対的に長くなり、無視できなくなる。

例えば、1文字を提示した場合には、図 2.15 より、視差が-3度のとき、単一像として安定して見えるために必要な提示時間は約 550 ミリ秒である。視差を 0 度とし、ディスプレイの表面に提示したときは約 190 ミリ秒であるから、立体提示によって、約 3 倍の時間が必要になったことになる。この場合は、立体提示によって著しく読みにくくなったと感じられる。

しかし、読み取り時間が 1 分以上かかる文章の場合には、文章全体の読み取り時間に与える影響は 1% 以下となり、融合時間は無視できる。従って、通常の文章を立体提示した場合には、その読み取り時間は、立体視成立後の読み取り時間と同じと考えて良い。

次に、立体視成立後の読み取り時間について検討する。提示位置を変化させて正誤判断課題を提示し、反応時間を測定して、次の結果を得た。ただし、反応時間には、融合時間が含まれないようにした。

- (5) 視差が-1 度から 1 度の範囲の提示位置であれば、ディスプレイの表面に提示した場合と反応時間に差がない。

この結果より、視差が-1 度から 1 度の範囲の提示位置であれば、立体視成立後の読み取り時間に差がないと言える。よって、視差が-1 度から 1 度の範囲に提示すれば、読み取り時間にほとんど影響を与えずに、立体提示が可能である。これは、先行研究 [20] において、視機能への負担が少く疲れにくいとされる範囲と一致している。従って、文字を読み取りやすく提示することにより、疲労も少くできる考えられる。

視距離が 60cm の場合、視差を-1 度から 1 度まで変化させることにより、提示位置をディスプレイの前方 8.6cm から後方 12.0cm まで、約 20cm の範囲で変化させることができる。したがって、この提示範囲を有効に活用して立体提示を行えば良いことになる。

以上より、文字を読みやすく提示するための条件をまとめると、次のようになる。

- (1) 立体提示によって特別な効果が期待できる場合を除いて、原則としてディスプレイの表面に提示する。

- (2) 立体提示によって視覚効果を高める場合には、視差を必要最小限度の大きさとし、できるだけディスプレイの表面近くに提示する.
- (3) 文章を立体提示する場合には、視差が-1 度から 1 度の範囲となる位置に提示する.

3.5 第3章のまとめ

本章では，立体ディスプレイに文字を読みやすく提示するための条件を検討した．提示位置の異なる7種類の画像を対象に，一対比較法による主観評価を行い，読みやすさを比較した．そして，次の結果を得た．

- (1) ディスプレイの表面に提示した場合が最も読み易い．
- (2) 提示位置がディスプレイの表面から離れるほど読みにくくなる．

文字の提示位置を変化させて正誤判断課題を提示し，その回答時間を測定して，次の結果を得た．

- (3) 視差が-1度から1度の範囲の提示位置であれば，ディスプレイの表面に提示した場合と反応時間に差がない．

以上の結果より，文字を読みやすく提示するための条件を考察し，次の結論を得た．

- (1) 立体ディスプレイに文字を提示するのに適した奥行位置は，ディスプレイ画面の奥行位置から，前後に視差1度以内の範囲である．

第 4 章

立体ディスプレイを用いた文字提示の効果

4.1 はじめに

立体ディスプレイは、図形や文字をディスプレイの画面上だけでなく、画面の前後の奥行位置に配置して提示できる点に特長がある。このような特長を生した文字の提示方法として、次に示した2つを提案し、その有効性を実験によって確認した。

- (1) 文字を背景模様の中に提示する場合に、文字を背景から手前に浮き出させて、読みやすく提示する方法
- (2) 画面に提示した文字列の一部を他の文字よりも手前に浮き出させて強調する方法

まず、模様のある背景の中に、正誤判断課題の文字を背景から浮かせて提示したときの回答時間を測定した結果、文字を適切に背景から浮かせて提示すれば、回答時間が短くなり、文字が見やすくなることを示した。

次に、文字列の一部を他の文字よりも手前に浮き出させて強調する立体提示による方法を、赤表示や下線で強調する方法と比較した。その結果、強調された文字の探索時間を比較した結果、立体提示は赤表示と同じ程度の探索時間であることを示した。そして、赤表示と立体提示を併用すれば、赤表示や立体提示だけの場合よりも探索時間が短くなり、高い強調効果が得られることを示した。

4.2 文字を背景から浮かせて提示したときの効果

視覚効果を高める目的で、模様のある背景の中に文字を表示することがある。3章で、視差を1度以内として提示すれば、文字認識に与える影響は無視できることを確認した。そこで、立体提示の特長を生かした文字情報の提示方法の一つとして、模様のある背景の中に文字を浮かせて提示する方法を提案し、その有効性を検討した。

4.2.1 実験方法

図 4.1に示すように、2桁の数字による正誤判断課題を、模様のある背景とともに、文字の浮出量を変化させて提示し、反応時間を測定した。提示課題の一例を図 4.2に示す。

被験者には、できるだけ早く回答するように教示した。

本実験では、文字は常に視差を0度としてディスプレイの表面に提示した。そして、背景をディスプレイの後方に提示し、背景の視差を変化させることにより、文字の背景に対する相対的な浮出量を変えた。これは、文字の提示位置を常にディスプレイの表面とし、文字の提示条件を変えずに、文字の浮出量だけを変化させるためである。

背景と文字のように、奥行提示位置の異なるものを同時に提示したときに、その両方が二重像とならずに、単一視でき、明確な奥行感が得られる視差の範囲には、パーナムの融合域と呼ばれる限界がある [11]。背景と文字の両方を単一視できるためには、この範囲内で提示する必要がある。パーナムの融合域は、針を提示刺激とした実験で、その範囲は視差 10 分 (0.17 度) 以内と報告されている [39]。

そこで、この結果に若干余裕を持たせた、視差を 0 度から 0.24 度まで、0.06 度間隔で変化させて実験を行った。

各条件について左右の数が同じものと、異なるものをそれぞれ 3 題ずつ用意し、合計 30 題をランダムな順序で提示した。問題は 5 秒間隔で提示し、回答後は直ちに白色画面を提示した。そして、同じ課題を 4 回ずつ繰り返し実施した。

背景は、岩石のテクスチャ画像をモノクロ 256 階調で表示した。背景の平均輝度は、白色の 80%、背景の最も暗い部分の輝度は、白色の 60%とした。この背景をディスプレイの中央部、縦 3cm×横 7cm (視角で 2.9 度×6.7 度) の範囲に提示し、問題は、背景の中央部、縦 1cm×横 5cm (0.95 度×4.8 度) の範囲に黒色で提示した。被験者とその他の実験条件は前記の実験と同じである。

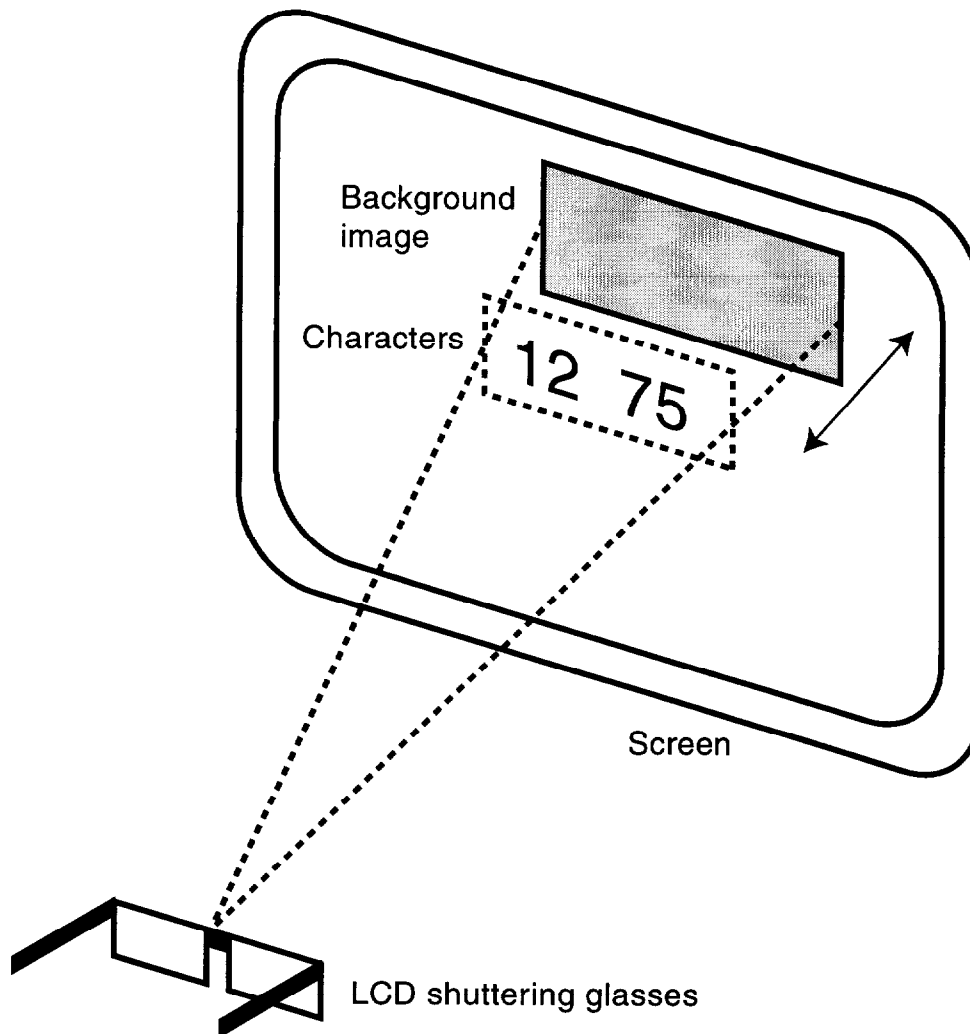


図 4.1 実験の様子

4.2.2 実験結果と考察

左右の数が同じ問題を検討の対象とし、誤答は分析の対象から除いた。

課題の正答率は、全体で 98.3%と高かった。そこで、条件間の比較を行った。

提示条件に対する被験者全員の平均反応時間を図 4.3に示す。縦線は、標準偏差を表している。

図 4.3において、視差 0.18 度の反応時間は、視差 0 度よりも約 7%短くなった。

分散分析の結果、提示条件の違いが反応時間に影響を与えていることがわかった ($F(4,344)=4.70, p < 0.01$)。多重比較（水準 5%）の結果、視差の大きさが 0 度と

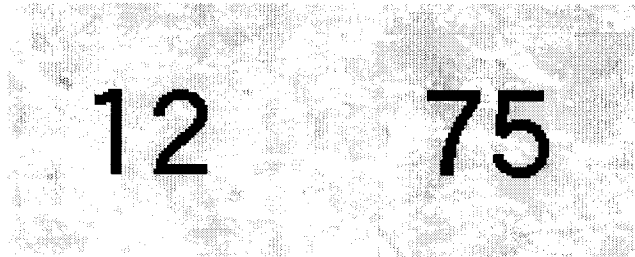


図 4.2 背景付きの 2 桁の数字による正誤判断課題の一例

0.18 度, 0.06 度と 0.18 度の各条件間で反応時間に有意な差があった。この結果から, 視差の大きさを 0.18 度とし, 浮かせて提示したときは, 視差が 0 度の平面提示のときよりも, 反応時間が短くなることがわかった。

反応時間の短縮率は, 背景の模様によって変化する可能性があるが, 文字を背景から浮かせて提示すれば, 反応時間が短くなることが確認できた。これより, 文字を背景から浮かせて提示すれば, 文字を認識しやすくなると考えられる。

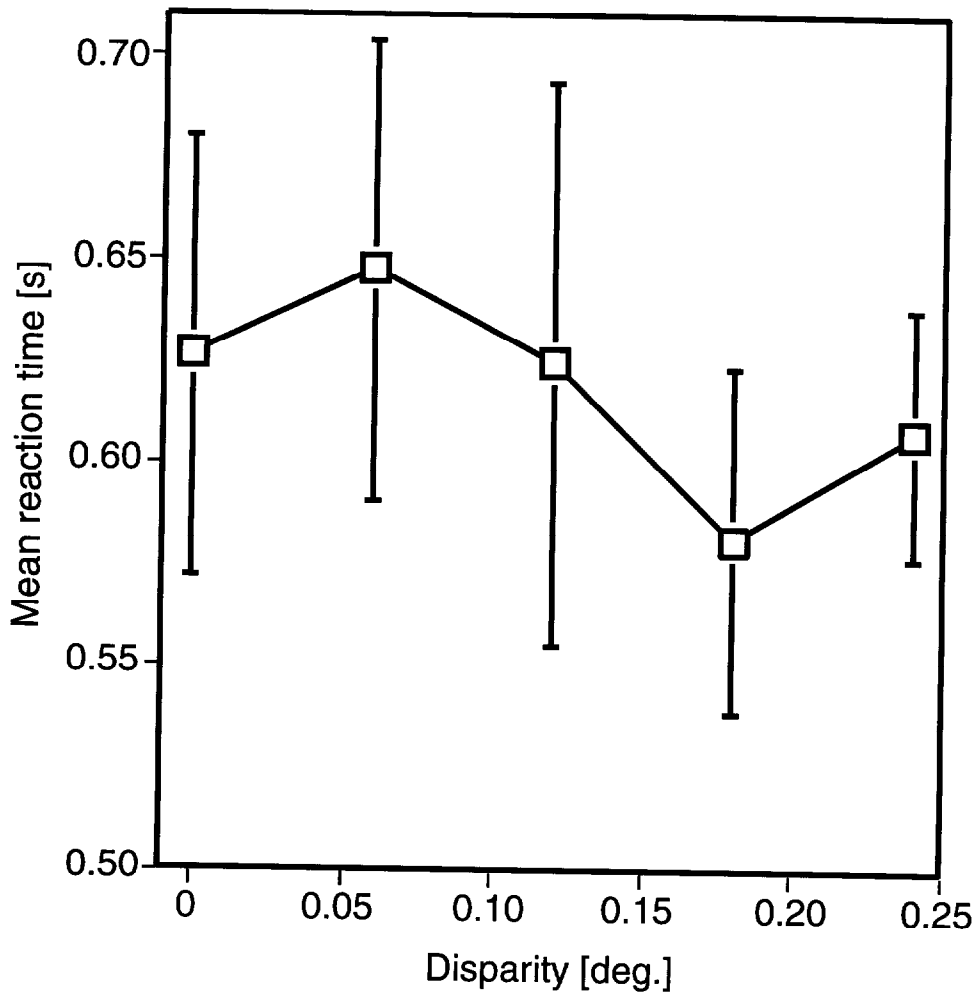


図 4.3 視差に対する反応時間

4.3 立体提示による文字強調の効果

文章提示において、キーワードや重要項目に注目させたり、情報の検索を容易にする目的で強調が行われる。立体ディスプレイを用いれば、強調させたい文字に視差を与えて、一部の文字を他の文字よりも浮き出させ、目立たせて提示することができる。そこで、立体提示による強調の効果を検討した。

まず、強調させる文字の視差を変化させて、単語探索課題の反応時間を測定し、強調に適した視差の大きさを検討した。次に、立体提示による強調の効果を赤表示や下線と比較した。

ふてすわらつをはかいまぬねへむせやほえれ
 めならすれねのらまをえとておしみそめすた
 せへはりふさこちておりさをそつなひちおえ
 ゆれからるまふてむくいへれよせゆやねしゆ
 くはさこまろもかひとおによのつへをてなう
 みやむほみやくふのりぬてよそもむわみほま
 おからのほすれむたねなつによえりしきくゆ
 みそふさおかへえいとむそぬれちすひあくほ
 うせみよはるさなめゆいとみてうぬろちこけ
 ふいとほをくえたのにまれひしせすろちそあ
ろとひもかいそひめみほうにへわおのしつと
 あよりやゆせのしあなたわこせぬそゆにとみ
 らさいろひしけやよすちてひしまひめなねも
 のゆさをふろきとるおらりへやこうほみほや
 らよかたあおさくめふもにきけわりちつのそ

図 4.4 下線で強調された探索画面の一例

4.3.1 単語探索課題

単語探索課題は、まずターゲットの単語が提示され、次に文字列の一部が強調された探索画面が提示される。そして、強調された部分を探索し、ターゲットをできるだけ速く見つけ出す課題である。

本検討では、提示文字の視覚的複雑さ [44] を統一するために、平仮名だけを使用した。ターゲットは平仮名 2 文字からなる無意味単語とし、探索画面は 20 文字×15 行の無意味な平仮名文字列とした。下線で強調された探索画面の一例を図 4.4 に示す。

探索画面は、各行につき一ヶ所ずつ連続する 2 文字を強調し、ターゲットの位置を変化させて課題を提示した。

4.3.2 視差の大きさと探索時間の関係

強調させる文字の視差を変化させて、単語探索課題を提示した。そして、課題の反応時間を測定し、文字に与える視差の大きさと探索時間の関係を調べた。

実験方法

まず、ターゲットの単語を2秒間提示し、続いて探索画面を提示した。被験者には、探索画面が提示されるまでは、ターゲットを注目させた。そして、探索画面が提示されたら、画面の上段から下に向かって順番に強調された部分を探索させた。回答の信頼性を高めるために、ターゲットの含まれていない問題を混ぜて出題し、ターゲットの有無を判断させた。

ターゲットがある場合は、キーボードの「M」キー、ない場合は、「Z」キーを押下させて、判断結果を入力させた。そして、回答に要した反応時間を10ミリ秒の精度で測定した。被験者の回答後は、直ちに白色画面を提示し、5秒後に次の課題を提示した。キーの押し間違えによる誤答を把握するため、操作ミスがあった場合には、白色画面が提示されている間に口頭で報告させた。

キー操作時間には個人差があり、探索時間の比較には、反応時間からこの影響を除く必要がある。反応時間からキー操作時間を除いて、探索時間だけで比較できるようにした実験手法が、Neisser [45] によって提案されており、視覚探索時間の検討で良く用いられている。これは、探索課題を、ターゲットのある行を変化させて提示し、その反応時間からターゲットの位置と反応時間の関係を表す回帰直線を求め、回帰直線の傾きを比較する方法である。回帰直線の傾きは、一行あたりの探索時間を表しており、キー操作の時間を含まないため、キー操作時間の個人差の影響を除いて比較できる。そこで、本実験でも、この方法を採用した。

課題の提示条件は、立体提示として、視差の大きさが0.06度、0.18度、0.30度の3条件、さらに赤表示の合わせて4条件とした。問題は立体提示によるものと赤表示によるものを交互に提示した。そして、視差0.06度と赤表示、視差0.18度と赤表示、視差0.30度と赤表示の各組み合わせによる3つの実験セッションに分けて測定を行った。

各実験セッションでは、立体提示と赤表示の問題を交互に10題ずつ提示した。両条件とも、ターゲットが含まれている問題を8題、含まれていない問題を2題とした。ただし、ターゲットが含まれている問題は、両条件とも同じ内容とし、ランダムな順番で提示した。そして、大学生8名の被験者を対象に2回ずつ測定を行った。

すべての実験セッションで共通に赤表示の測定を行ったのは、赤表示の反応時間を比較し、実験セッション間で、練習効果や提示課題の難易差があったかを確認するためである。

提示画面の背景は白色とし、問題は、ディスプレイの中央部、縦 21cm×横 25cm（視角で 19.9 度×23.5 度）の範囲に黒色の文字で提示した。その他の実験条件は、前の検討と同じである。

実験結果

ここでは、ターゲットが含まれている問題を対象とし、2 回分の測定結果を用いて分析を行った。ただし、誤答は分析対象から除いた。

実験全体の課題の正答率は、ターゲットが含まれている問題が 99.6%，ターゲットが含まれていない問題が 99.5%といずれも高かった。さらに、誤答の過半数はキー操作のミスによるものであった。これより、被験者の回答は十分信頼できると判断した。

立体提示の 3 条件について、測定結果を図 4.5 に示す。

図 4.5 は、各問題について被験者全員の平均反応時間をプロットしたものである。グラフの横軸は、各問題の探索画面でターゲットがあった行を表している。直線は、最小 2 乗法によって求めた回帰直線である。

本実験では、探索画面の各行につき一ヶ所ずつ強調を行い、ターゲットのある行を変化させて提示した。そして、被験者には、画面の上段から順番に強調部分を探索させた。そのため、ターゲットの位置が探索画面の下に行になるほど、反応時間は長くなった。

図 4.5 より、測定結果は回帰直線と良く一致している。また、ターゲットの提示位置と反応時間の相関を表す相関係数 r を、すべての実験セッションについて、各条件毎に被験者別に求めた結果、最も相関が低いもので 0.83、平均は 0.95 と、高い相関があった。

これは、1 行あたりの探索時間が、どの行も等しかったことを示している。このとき、回帰直線の傾きは、1 行あたりの探索時間を表している。この探索時間は、強調された部分を見つけ出す時間と強調部分の文字を認識し、ターゲットか否か判断する時間を反映している。

そこで、傾きを強調効果の評価指標とし、傾きの大きさを比較することにした。傾きが小さいほど、強調部分の探索が容易で、強調効果が高いといえる。一方、回

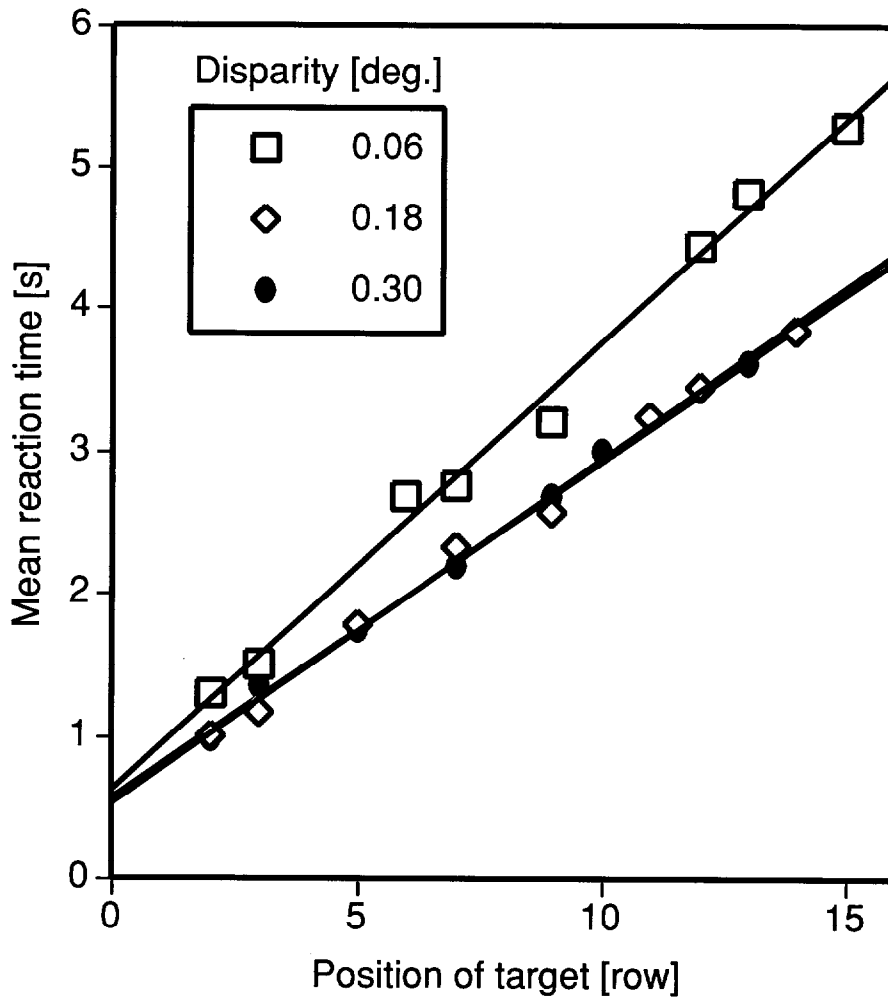


図 4.5 ターゲットの位置に対する平均反応時間

帰直線の切片は、回答のためのキー操作時間など、ターゲットの位置と無関係な処理時間を表している。

まず、すべての実験セッションで共通に測定した赤表示を対象として、被験者別に回帰直線を求め、実験セッション間の差の有無を調べた。分散分析の結果、傾き ($F(2,14)=1.95$, $p > 0.05$) と切片 ($F(2,14)=2.18$, $p > 0.05$) のいずれも、実験セッションの違いによる有意な差はなかった。

傾きに差がなかったことから、セッション間で探索時間に差がなかったことがわかった。また、切片にも差がなかったことから、ターゲットの位置とは無関係な処理時間も、セッション間で差がなかったことがわかった。

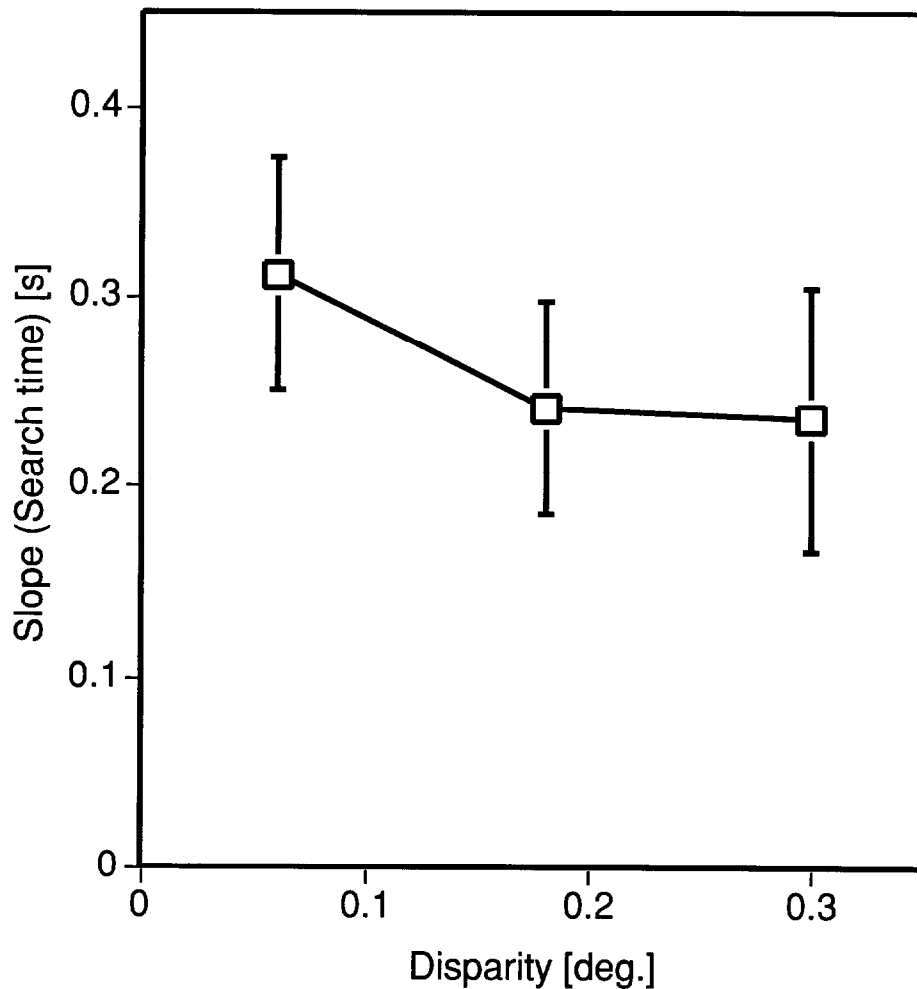


図 4.6 視差に対する回帰直線の傾き

この結果から、すべての実験セッション間で、課題に対する反応時間に差はなく、練習効果や提示課題の難易差はなかったと判断した。そこで、立体提示の3条件について比較した。

各条件について被験者別に回帰直線の傾きと切片を求めた。図4.6は、条件別に傾きの平均値を求めた結果である。ただし、縦線は標準偏差を表している。

分散分析の結果、傾きは、視差による影響があったが ($F(2,14)=56.39$, $p < 0.01$)、切片は、視差の影響はなかった ($F(2,14)=1.59$, $p > 0.05$)。そこで、傾きについて多重比較（水準5%）を行った結果、視差の大きさが0.06度と0.18度、0.06度と0.30度の間で、それぞれ有意な差があった。

これより、視差の大きさが0.06度よりも0.18度の方が探索時間が短い、0.18度と0.30度の間では、探索時間に差がないことがわかった。

考察

実験終了後、全ての被験者に対して、視差の異なる3条件の探索画面の中で、画面全体の文字が最も読み易いものを選択させた。その結果、視差の大きさが0.18度の画面を選択した者が7名、0.06度の画面を選択した者が1名であった。この結果から、文字の読みやすさに関する主観評価では、視差の大きさが0.18度の場合に最も評価が高いことがわかった。

3章で、文字に1度以内の視差を与えて提示したときは、視差がその文字自体の認識に与える影響を無視できることを示した。この結果と主観評価の結果から、視差0.18度と0.30度では、強調された文字の認識のしやすさに差はないが、0.30度の方が、背景の文字と強調文字の奥行提示位置が大きく離れているために、画面全体の文字が読みにくかったと思われる。

0.18度と0.30度では、探索時間に差がなかったことから、強調の目的で文字を浮き出させて提示する場合は、視差の大きさを0.18度前後とするのが適切と考えられる。そこで、次の検討では、視差の大きさを0.18度として立体提示を行った。

4.3.3 赤表示や下線との比較

立体提示による強調効果を調べるために、赤表示や下線と探索時間を比較した。

実験方法

文字の強調方法を変えて単語探索課題を提示し、課題の反応時間を測定した。提示条件は、赤表示(赤, Red), 下線(Underline), 立体提示(立体, 3D), 赤表示と立体提示の併用(赤+立体, Red+3D), 下線と立体提示の併用(下線+立体, Underline+3D)の5条件とした。併用とは2つの強調方法を同時に適用して、文字を強調することである。

問題は立体の条件によるものと、立体を除く残りの4条件のなかの1つを交互に提示した。そして、下線と立体、赤と立体、赤+立体と立体、下線+立体と立体の組み合わせによる4つの実験セッションに分けて測定を行った。

各実験セッションでは、両条件の問題を交互に10題ずつ提示した。提示画面の背景は白色とし、文字の色は、赤表示による強調の場合を除き、すべて黒色とした。

また、下線はすべて黒色で表示した。その他の実験条件と被験者は、前記の実験と同じである。

実験結果

ターゲットが含まれている問題を対象とし、誤答を除いて分析した。ただし、赤と立体の組み合わせによる実験セッションのデータは、前の検討で行った視差 0.18 度と赤の組み合わせによる実験セッションの結果を用いた。

課題の正答率は、ターゲットが含まれている問題が 99.1%，ターゲットが含まれていない問題が 99.2%といずれも高かった。そして、誤答の半数はキー操作のミスによるものであった。また、ターゲットの提示位置と反応時間の相関を表す相関係数 r は、最も相関の低いもので 0.83、平均は 0.96 と、高い相関があった。そこで前の検討と同様に分析を行った。

まず、すべての実験セッションで共通に測定した立体を対象として、被験者別に回帰直線を求め、実験セッション間の差の有無を調べた。分散分析の結果、傾き ($F(3,21)=0.52, p > 0.05$) と切片 ($F(3,21)=2.77, p > 0.05$) のいずれも、実験セッションの違いによる差はなかった。そこで、次に 5 つの提示条件を比較した。

図 4.7 と図 4.8 は、ターゲットの位置に対する被験者全員の平均反応時間をプロットしたものである。直線は回帰直線である。

(a) は、赤、立体、赤+立体の 3 条件、(b) は、下線、立体、下線+立体の 3 条件を比較したものである。ただし、立体は、4 つの実験セッションの結果を合わせたものである。

各提示条件について、被験者別に回帰直線を求め、傾きと切片を比較した。図 4.9 は、条件別に傾きの平均を求めた結果である。縦線は標準偏差を表している。

分散分析の結果、傾きは、提示条件による影響があったが ($F(4,52)=18.35, p < 0.01$)、切片は、提示条件の影響がなかった ($F(4,52)=1.29, p > 0.05$)。そこで、傾きについて多重比較 (水準 5%) を行った結果、立体と赤+立体や下線の間では、有意な差があったが、立体と赤や下線+立体の間では、有意な差がなかった。

これより、赤と立体は探索時間に差がないが、赤+立体は立体より探索時間が短いことがわかった。また、立体と下線+立体で探索時間に差はないが、下線は立体や下線+立体より探索時間が長いことがわかった。

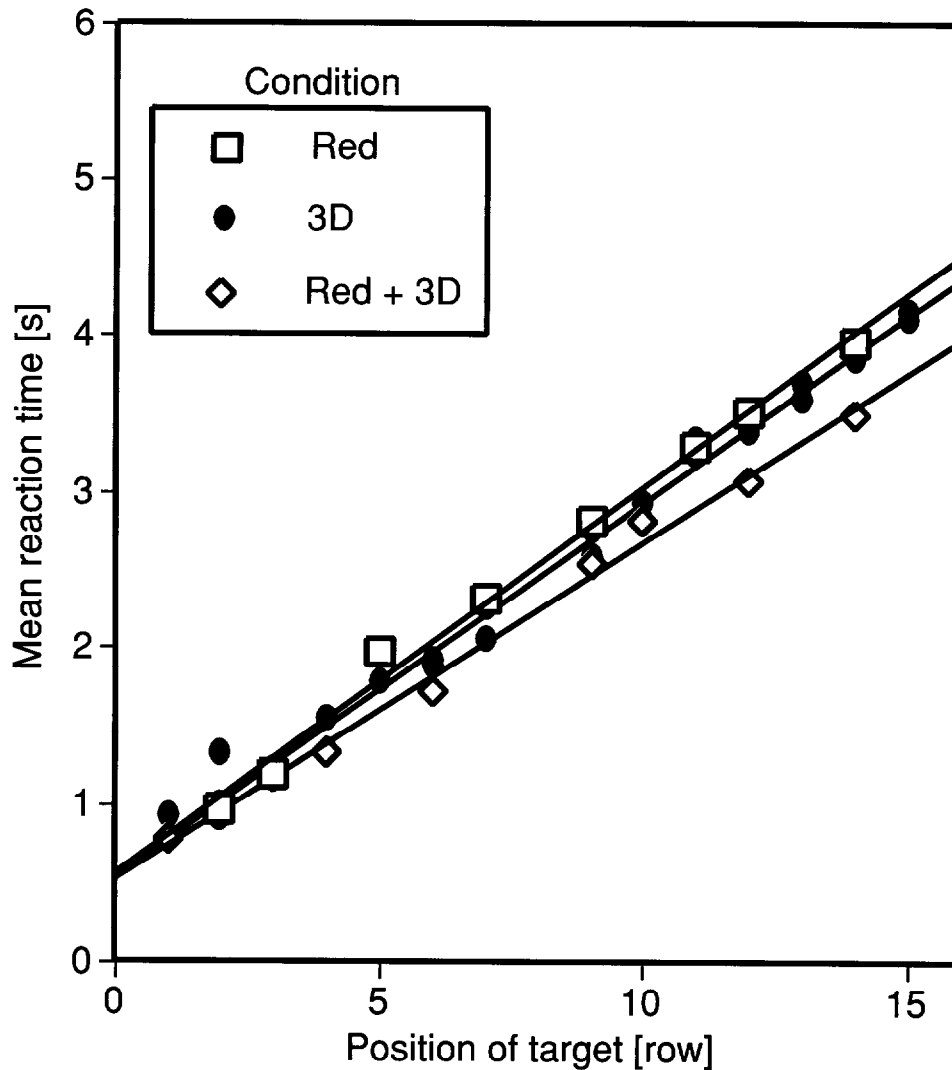


図 4.7 ターゲットの位置に対する平均反応時間（赤，立体，赤＋立体）

考察

赤と立体の間で探索時間に差がなかったことから、立体提示による強調は、赤表示と同じ程度の効果があることがわかった。また、赤＋立体は、赤と立体よりも探索時間が短くなった。よって、赤表示と立体提示を併用して強調すれば、併用しない場合よりも強調部分が目立ち易くなり、高い強調効果が得られると考えられる。

一方、下線は立体よりも探索時間が長く、立体と下線＋立体の間では探索時間に差がないことがわかった。これは、下線と立体を併用した場合には、主に立体によ

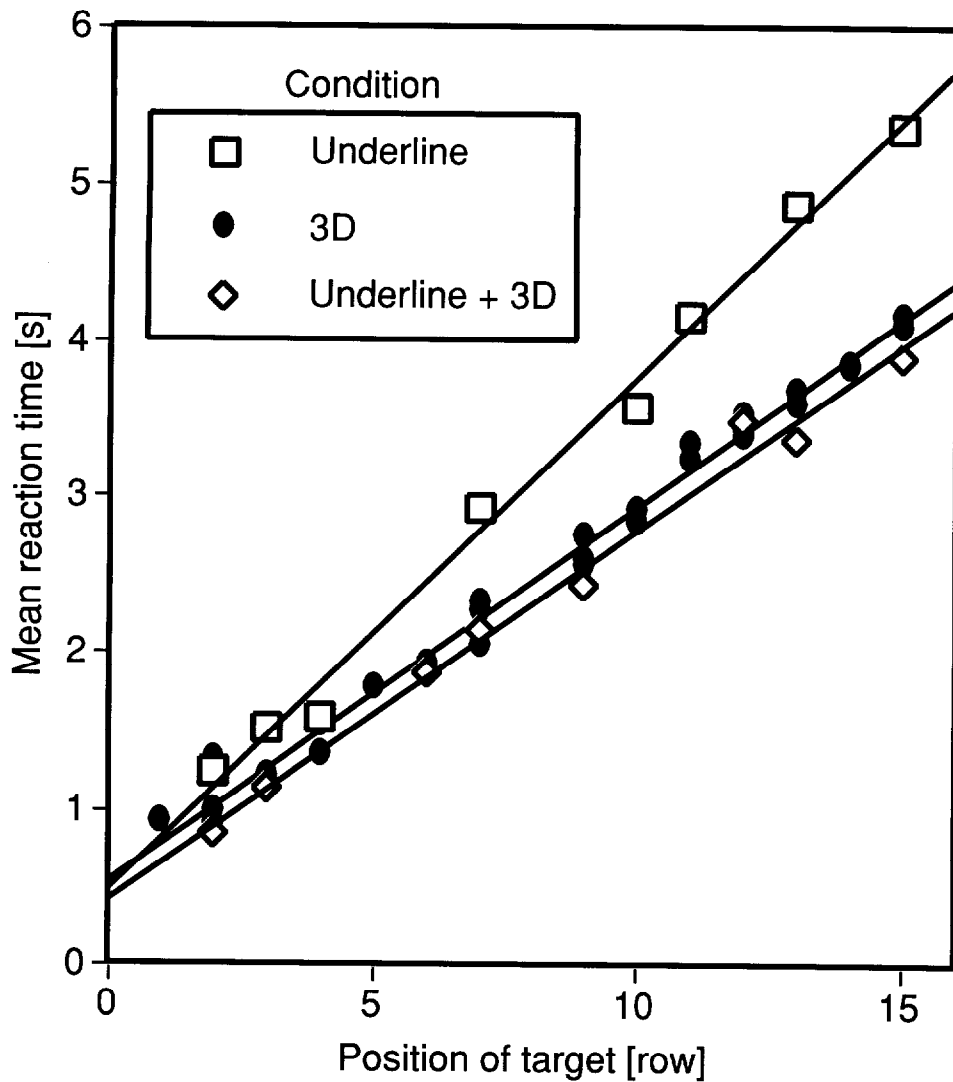


図 4.8 ターゲットの位置に対する平均反応時間（下線，立体，下線＋立体）

る強調を手がかりに探索が行われ、下線が探索の手がかりとして用いられていないことを示している。よって、下線よりも立体提示の方が強調効果が高いが、下線と立体を併用しても、強調効果はほとんど変わらないと考えられる。

以上の結果から、立体ディスプレイを用いて文字の強調を行う場合は、赤表示などのカラー表示と併用するのが効果的であることが明らかになった。

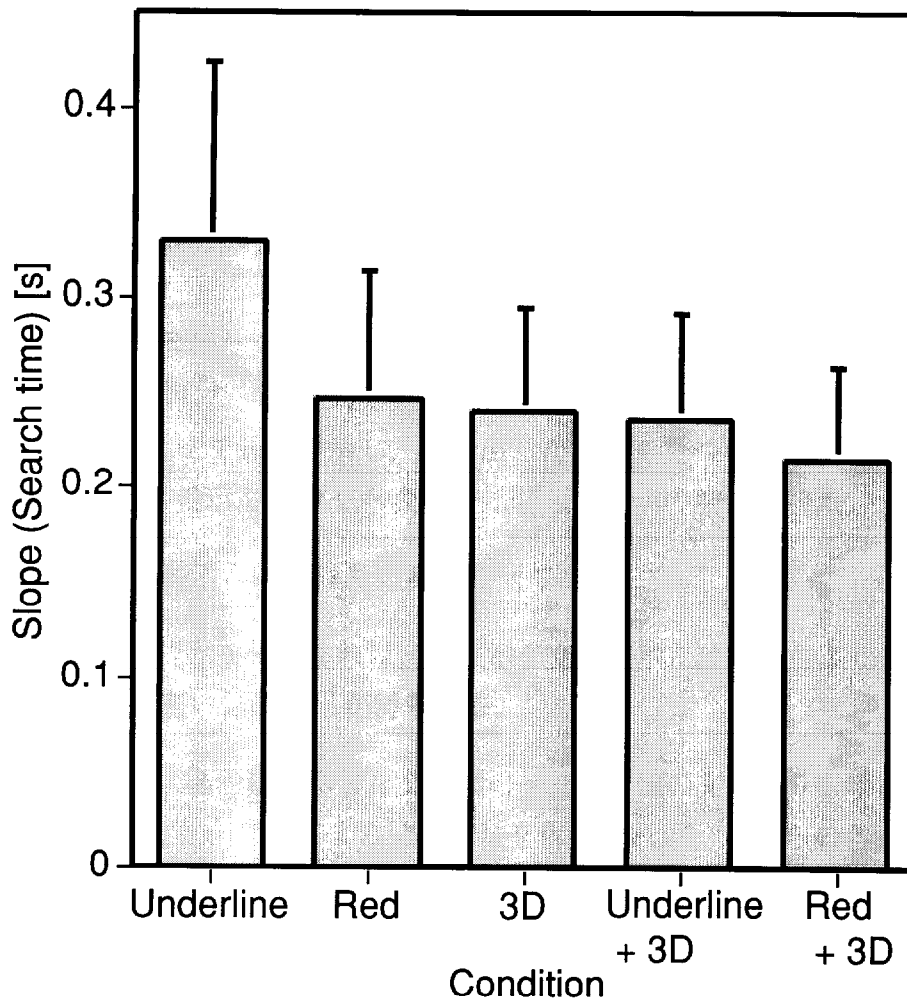


図 4.9 提示条件に対する回帰直線の傾き

4.4 第4章のまとめ

本章では、立体ディスプレイの特長を活かして効果的に文字を提示するための条件を検討をした。立体ディスプレイの特長を生かした2つの提示方法を提案し、その有効性を実験的に検討した。

まず、文字を背景模様の中に提示する場合に、文字を背景から手前に浮き出させて、読みやすく提示する方法について検討した。文字の浮出量を変化させて正誤判断課題を提示して、その反応時間を測定し、次の結論を得た。

- (1) 背景から文字を浮き出させて提示する場合には、視差を 0.18 度前後として提

示するのが良い。

- (2) 背景から文字を浮き出させて提示することにより、平面提示よりも読みやすく提示することができる。

以上の結果から、背景模様の中に、文字を背景から手前に浮き出させて提示する方法が、従来の平面提示の方法と比較して、文字を認識しやすく有効であることを示した。

次に、画面に提示した文字列の一部を他の文字よりも手前に浮き出させて強調する方法について検討した。文字列をディスプレイの中央部に表示し、この中の一部を他よりも浮き出させて強調提示し、浮き出した文字を見つけ出すまでに要した時間を測定した。立体提示を下線や赤表示と比較して、次の結論を得た。

- (3) 立体提示は赤表示と同じ程度の探索時間である。
- (4) 赤表示と立体提示を併用すれば、赤表示や立体提示だけの場合よりも探索時間が短くなり、高い強調効果が得られる。

以上の結果から、画面に表示した文字列の一部を、他の文字よりも手前に浮き出させて強調する方法と赤表示による強調方法を併用すれば、これらの各方法を単独で用いるよりも、強調された文字が認識しやすく、高い強調効果が得られることを示した。

第 5 章

図形と文字の提示位置と認識時間の関係

5.1 はじめに

第4章までは、立体ディスプレイに文字情報だけを提示する場合を対象に検討した。マルチメディア学習教材では、図とともに文字による説明が重要な役割を果たしており、両者が同時に提示されることも多い。しかし、図形と文字を同時に提示するとき、文字を図形に対して、その奥行方向のどの位置に提示すれば見やすいか明らかではない。

そこで、次の2つの場合について、文字の提示位置と認識時間の関係を調べ、適切な文字の提示位置を検討した。

(1) 図中に文字を入れて提示する場合

三角柱の各頂点に頂点名を付けて提示するなど、図形の各部分に名称を付ける場合がこれに該当する。このとき、名称を図形の対応する部分と同じ奥行位置にそれぞれ提示する方法と、ディスプレイの画面上にそろえて提示する方法のどちらが良いか、実験により比較検討した。

(2) 図にタイトル文字を付けて提示する場合

立体図形をその図形の名称と同時に提示する場合などがこれに該当する。このとき、図形に対して奥行方向のどの位置にタイトル文字を提示するのが良いか検討した。

最も奥にあるのは、
頂点Aである。

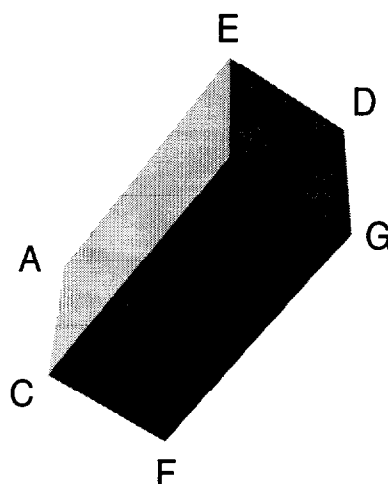


図 5.1 課題の一例

5.2 図中に文字を入れて提示する場合

図中に文字を入れて提示するとき、文字を図形の対応する部分と同じ奥行位置に提示すれば、両者の対応関係がわかりやすいと考えられる。しかし、多くの文字を同時に提示するときは、奥行位置を同じにして提示した方が、画面が見やすい可能性もある。

そこで、どちらの方法が良いか、直方体の頂点に頂点名を付けて提示する場合を対象に比較検討した。また、図形を立体提示した場合と平面提示した場合を比較し、立体提示の効果も確認した。

5.2.1 実験方法

実験で用いた課題は、画面の右側に提示された図を見て、左側に提示された命題文の真偽をできるだけ早く回答するものである。課題の一例を図 5.1 に示す。被験者には、命題が真の場合はマウスの左ボタンをクリックし、偽の場合は右ボタンをクリックするように教示した。

命題文は、例えば「最も奥にあるのは、頂点 A(頂点名) である。」とし、画面に表示された頂点の奥行位置を比較させる内容とした。図は、直方体にアルファベット 1 文字の頂点名を付けて提示した。

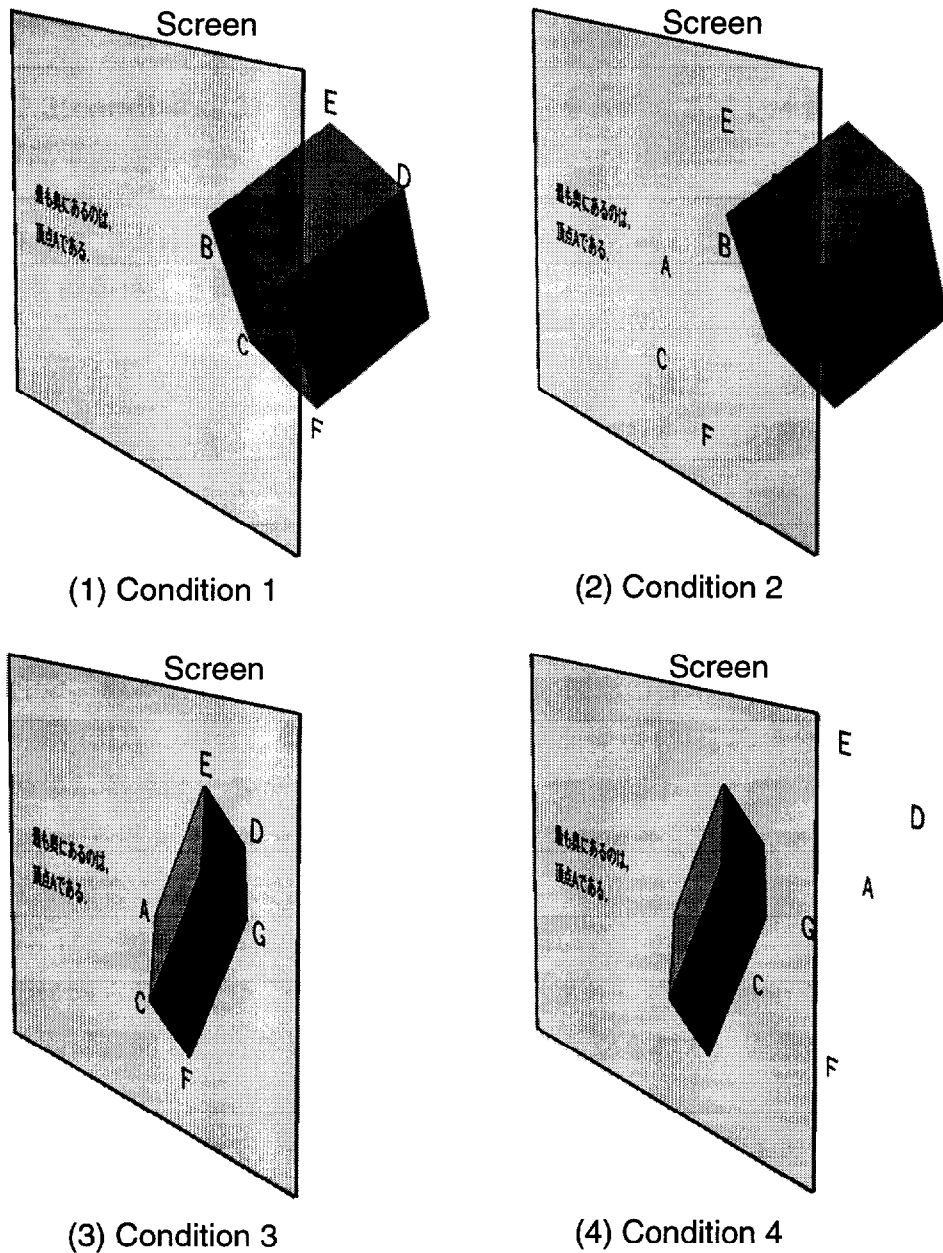


図 5.2 提示条件

この課題を、次の4つの条件(図5.2)で提示し、回答時間を比較した。

- (1) 条件1(condition 1) 図形を立体提示し、頂点名を各頂点と同じ奥行位置に提示する。

- (2) 条件 2(condition 2) 図形を立体提示し、頂点名はディスプレイ画面と同じ奥行位置にそろえて平面提示する。
- (3) 条件 3(condition 3) 図形と頂点名の両方を、ディスプレイ画面と同じ奥行位置に平面提示する。
- (4) 条件 4(condition 4) 図形はディスプレイ画面と同じ奥行位置に平面提示し、頂点名は条件 1 と同じ奥行位置に提示する。

ただし、命題文は、すべての条件でディスプレイ画面と同じ奥行位置に統一して提示した。また、図形を立体提示する場合には、図形を画面の奥に提示し、最も手前の部分をディスプレイ画面と同じ奥行位置に提示した。このとき、図形の最も手前の部分から、最も奥の部分までの奥行差は、視差 0.75 度から 1.07 度の範囲であった。条件 3 と条件 4 は、図形を立体提示した場合の効果を調べる目的で付け加えた。

これら 4 つの条件は、図形の提示に関する 2 つの条件と頂点名の提示に関する 2 つの条件を、組み合わせたものとなっている。図形の提示条件は、条件 1 と条件 2 が立体提示 (3D) の場合、条件 3 と条件 4 が平面提示 (2D) の場合の 2 条件である。頂点名の提示条件は、条件 1 と条件 3 が、頂点名を図中の頂点と同じ奥行位置に提示 (same) する場合、条件 2 と条件 4 は、頂点名を頂点と異なる奥行位置 (different) に提示する場合の 2 条件である。

実験には、図 5.3 に示した 12 種類の図を用いた。これは、一種類の図だけでは特定の図に限られるので、複数の図を用いて、より一般的な結論を得るためである。これらの図は、同じ直方体を異なる角度で提示したもので、提示角度は著者が任意に選択した。

図 5.3 の各図について、命題文が真の問題と偽の問題を各 1 題ずつ作成し、4 つの提示条件で提示し、回答時間を測定した。ただし、命題文と図中の頂点名は、問題毎に変えて出題した。

問題は 24 題ずつ、4 つのセクションに分けて、ランダムな順番で提示した。問題の提示間隔は 5 秒とし、問題を提示していないときは、白色画面を提示した。各セクション間には、2 分間の休憩を入れた。

これを、大学生 10 名の被験者に対して、2 回ずつ繰り返した。

図は、モノクロ 256 階調で表示し、室内照度は 340 lx (ディスプレイ中央水平面)、視距離は 60cm とした。画面の解像度は 1024×768 ドットとし、白色 (65cd/cm²) の背景に黒色 (1.3cd/cm²) の文字で表示した。

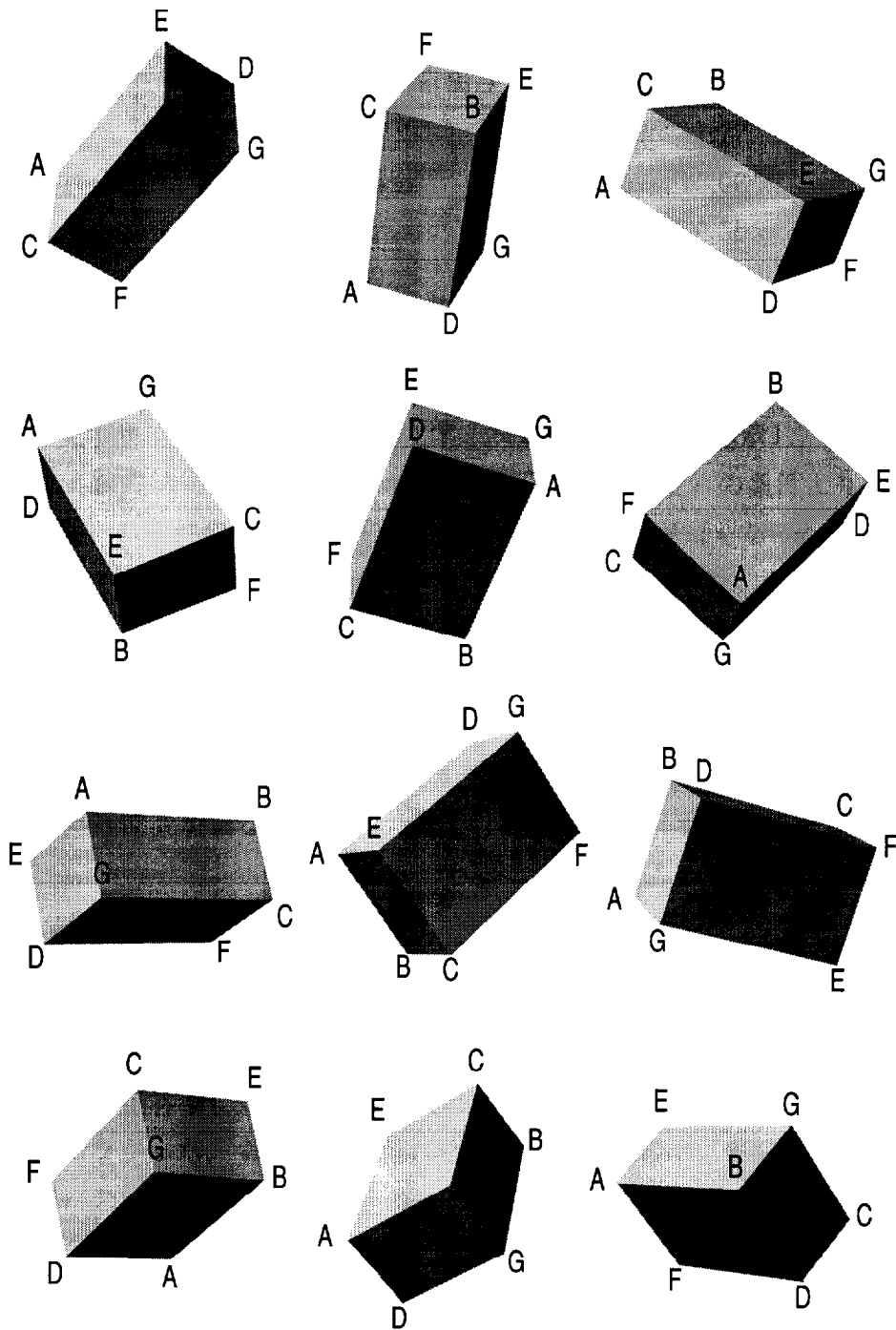


図 5.3 実験で使った図

この文字サイズは、文献 [23] の結果を参考に決定した。すなわち、視距離 50cm

表 5.1 正答率に関する分散分析表

要因	平方和	自由度	平均平方	F 値
提示条件	0.267	3	0.089	1.77
図	8.323	11	0.757	15.02**
交互作用	0.922	33	0.028	0.55
残差	21.769	423	0.050	

** : 1%水準, * : 5%水準で有意

の条件で、文字サイズを変えて平仮名文字（24×24ドット）を提示し、その音読速度を測定した実験の結果、文字サイズが0.45cm（視角0.52度）の条件よりも、0.9cm（視角1.03度）の条件の方が有意（水準1%）に音読速度が短くなったが、0.9cmの条件と1.8cm（視角2.03度）の条件間では有意な差がなかったことが報告されている。これより、文字サイズが視角で約1度あれば、文字は十分に認識できると考えられる。そこで、本実験では、文字のサイズを高さ1cm（視角0.95度、32×32ドット）とした。

なお、本実験では、文字の視角の大きさが全て同じになるようにして提示した。そのため、奥行位置が異なる文字は、見かけの大きさが異なって見える。

5.2.2 実験結果と考察

課題の正答率は、全体で85.4%であった。正答率について、提示条件と図を要因とする2元配置分散分析の結果を表5.1に示す。

表5.1より、正答率に対する図の効果は有意であったが、提示条件と交互作用の効果は有意でなかった。すなわち、図の種類の違いが正答率に影響を与えているが、いずれの図においても提示条件は正答率に影響を与えておらず、4つの条件間で正答率に差がないことがわかった。

この結果から、本実験で用いた問題には、特定の条件で提示した場合に限り正答できるようなものは含まれておらず、すべての条件に対して公平な内容であったことが確認できた。

そこで、次に、回答時間を比較し、提示画面の認識時間に差があるか調べた。回答時間が短い方が、図形と文字の認識に要した時間が短く、画面が見やすかったと判断できる。ここでは、正答時のデータのみを対象とし、さらに、個人差の影響を除

表 5.2 回答時間に関する分散分析表

要因	平方和	自由度	平均平方	F 値
提示条件	12.671	3	4.224	18.28**
図	35.257	11	3.205	13.87**
交互作用	6.260	33	0.190	0.82
残差	367.683	1591	0.231	

**:1%水準, *:5%水準で有意

表 5.3 回答時間に関する分散分析表

要因	平方和	自由度	平均平方	F 値
図形の提示条件	7.505	1	7.505	29.93**
頂点名の提示条件	4.962	1	4.962	19.79**
交互作用	0.559	1	0.559	2.23
残差	410.041	1635	0.251	

**:1%水準, *:5%水準で有意

くために、問題ごとの回答時間の測定値と各被験者の平均回答時間の比を求め、規格化した値を用いて分析を行った。

規格化回答時間について、提示条件と図を要因とする 2 元配置分散分析を行った結果を表 5.2 に示す。

表 5.2 より、規格化回答時間に対する図と提示条件の効果はどちらも有意であったが、交互作用は有意でなかった。この結果から、図の種類の違いと提示条件の違いは、どちらも回答時間に影響を与えているが、これらは独立に影響を与えていることがわかった。すなわち、図の種類によって課題の回答時間に差はあるが、提示条件が回答時間に与える影響は、いずれの図においても同様であることがわかった。

そこで、提示条件間の比較を行った。被験者全員の平均規格化回答時間を提示条件別に図 5.4 に示す。

規格化回答時間について、図形の提示条件と頂点名の提示条件の 2 要因による 2 元配置分散分析を行った。その結果を表 5.3 に示す。

表 5.3 より、図形の提示条件と頂点名の提示条件を要因とする効果はどちらも有

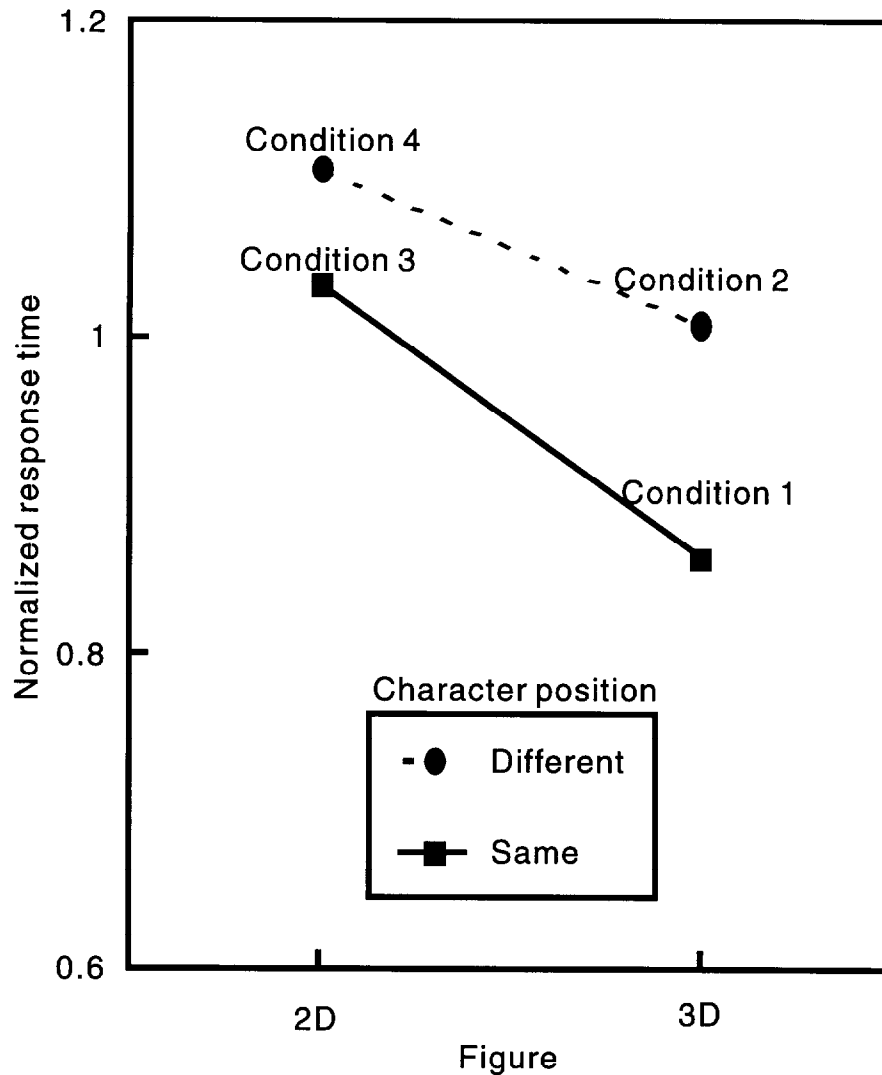


図 5.4 規格化回答時間

意であったが、これらの要因の交互作用は有意でなかった。すなわち、図形を立体提示 (3D) した方が、平面提示 (2D) するよりも回答時間が短く、さらに、頂点名を図中の頂点と同じ奥行位置に提示した (same) 方が、異なる奥行位置に提示する (different) よりも、回答時間が短いことがわかった。また、図形の提示条件と頂点名の提示条件は、回答時間に対して独立に影響を与えていることがわかった。

以上の結果から、立体図形の奥行位置を比較する場合には、立体ディスプレイを用いた立体提示が有効であることがわかった。さらに、図形を立体提示する場合には、文字を図中の対応する部分と同じ奥行位置に提示すれば良いことが明らかに

なった。

図 5.4 より、条件 2 と条件 3 の規格化回答時間は、ほぼ同じ値になった。この結果は、立体ディスプレイを用いて図形を立体提示しても、文字の提示位置が適切でなければ、平面提示の場合と認識時間がほぼ同じになることを示している。したがって、立体ディスプレイの利点を十分に生かした提示を行うためには、文字の提示位置に注意を払うことが重要といえる。

本研究では、文字の視角の大きさが、全て同じとなるように提示する場合を対象とした。そのため、奥行位置の異なる文字は、見かけの大きさが異なって見える。

立体ディスプレイに奥行位置の異なる 2 つの指標を示し、これらの見かけの大きさを比較した実験の結果 [46] によれば、2 つの指標が同時に融合可能な範囲にある場合には、これらの見かけの大きさの比 r は、以下に示す幾何学的な関係式 (5.1) と一致することが確認されている。

$$r = a/(a - e) \quad (5.1)$$

ただし、 a は両眼間隔、 e は左眼用画像と右眼用画像のずれ量である。

しかし、2 つの指標が同時に融合できない範囲にあるときは、見かけの大きさの比は式 (5.1) とは一致せず、飽和する傾向にあることが確認されている。

仮に提示画像がすべて融合したとして、本実験条件を式 (5.1) に当てはめれば、ディスプレイ画面と同じ奥行位置に提示した文字と最も奥に提示した文字の見かけの大きさの比は、大きく見積もって 1.22 となる。

文字の見かけの大きさが異なるとき、それが文字認識にどのような影響を与えているかは、本実験結果では明らかにできなかった。これは、今後の課題である。

5.3 図形にタイトル文字を付けて提示する場合

図形にタイトル文字を付けて提示する場合は、タイトル文字が図形全体を指している。そのため、前節と同様の方法では適切な提示位置が定まらない。

そこで、幾何学的な立体図形の下にタイトル文字を付けて提示する場合を対象に、タイトル文字を図形の前後のどの位置に提示するのが適切であるか検討した。まず、提示図形全体の平均的な奥行の位置を、深さ平均位置として、新たに定義した。続いて、タイトル文字の提示位置と画面の認識時間の関係を調べ、深さ平均位置と他の位置を比較した。さらに、主観評価実験により、画面が最も見やすいタイトル文字の位置が、深さ平均位置と一致するかどうか調べた。

5.3.1 深さ平均位置

奥行位置が異なる2つの視標を示し、これらの大きさを比較させたときの視線移動を観測した結果、両眼の視線の交点（輻輳点）は2つの視標の中間の奥行位置に分布することが確認されている [46]。したがって、奥行き量のある立体図形を見ているときも、輻輳点は図形全体の平均的な奥行位置を中心に分布するものと推測される。この位置にタイトル文字を提示すれば、図形からタイトル文字へ視線を移動させたときの輻輳角の変化が小さく、画面が見やすいと考えられる。

そこで、図形全体の平均的な奥行位置を、深さ平均位置 P (position of mean depth) として、次のように定義した。

$$P = \frac{\sum_{i=1}^n (S_{iL} P_{iL} + S_{iR} P_{iR})}{\sum_{i=1}^n (S_{iL} + S_{iR})} \quad (5.2)$$

ここで、 n は画面に提示される面の数である。また、 S_{iL} と P_{iL} は、それぞれ左眼用画像における面 i の面積と深さ平均位置である。 S_{iR} と P_{iR} は、右眼用画像における面 i の面積と深さ平均位置である。面 i の深さ平均位置 P_i は、図 5.5 に示すように、面 i の画面 (screen) 上への射影像を面 i' とするとき、面 i' の重心 $G_{i'}$ に射影される面 i 上の点と定義した。

深さ平均位置は、画面に表示された部分の奥行情報だけに基づいて計算されるため、図形の提示角度に依存し、一般に図形全体の重心の奥行位置とは一致しない。

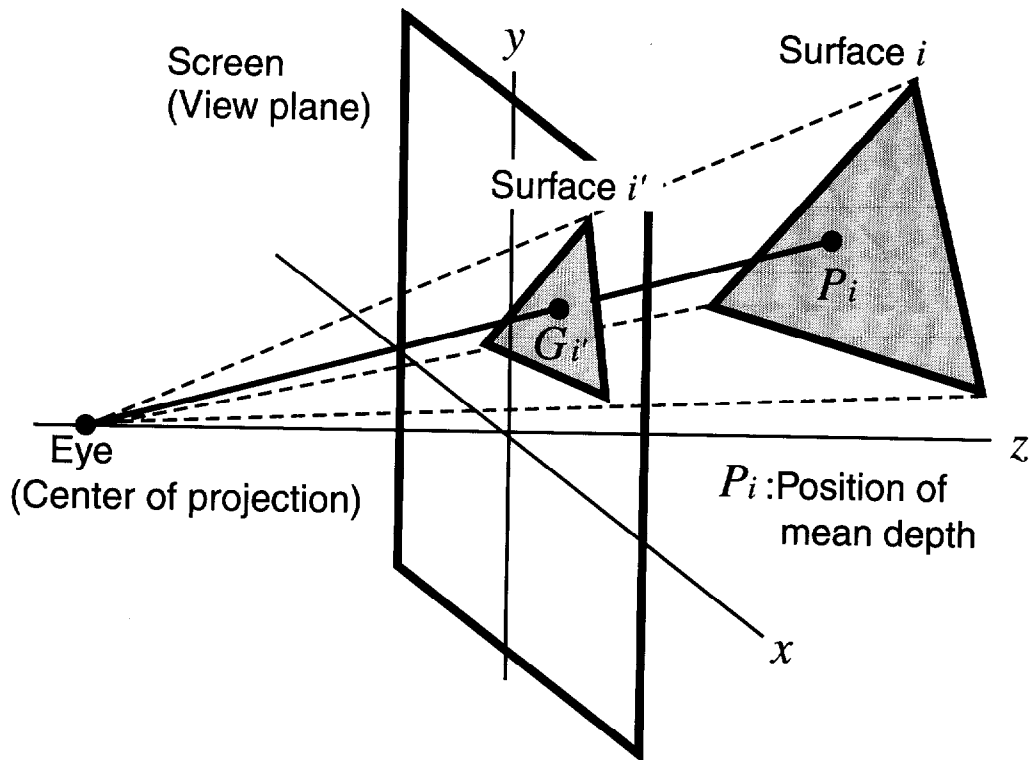


図 5.5 深さ平均位置

5.3.2 実験方法

回答時間の測定

実験で用いた課題は、画面の中央に提示された幾何学的な立体図形とその下に提示されたタイトル文字（図形の名称）を見て、両者が一致しているか否かをできるだけ早く回答するものである。被験者には、図とタイトル文字が一致している場合はマウスの左ボタンをクリックし、一致していない場合は右ボタンをクリックするように教示した。

この課題を、タイトル文字の奥行位置を変えて提示し、回答時間を測定した。タイトル文字の位置は次の5つとした（図 5.6）。

- (1) 前端の手前 (front(-)) 図形の前端からさらに視差 0.5 度手前の奥行位置に提示する。
- (2) 前端 (front) 図形の前端と同じ奥行位置に提示する。

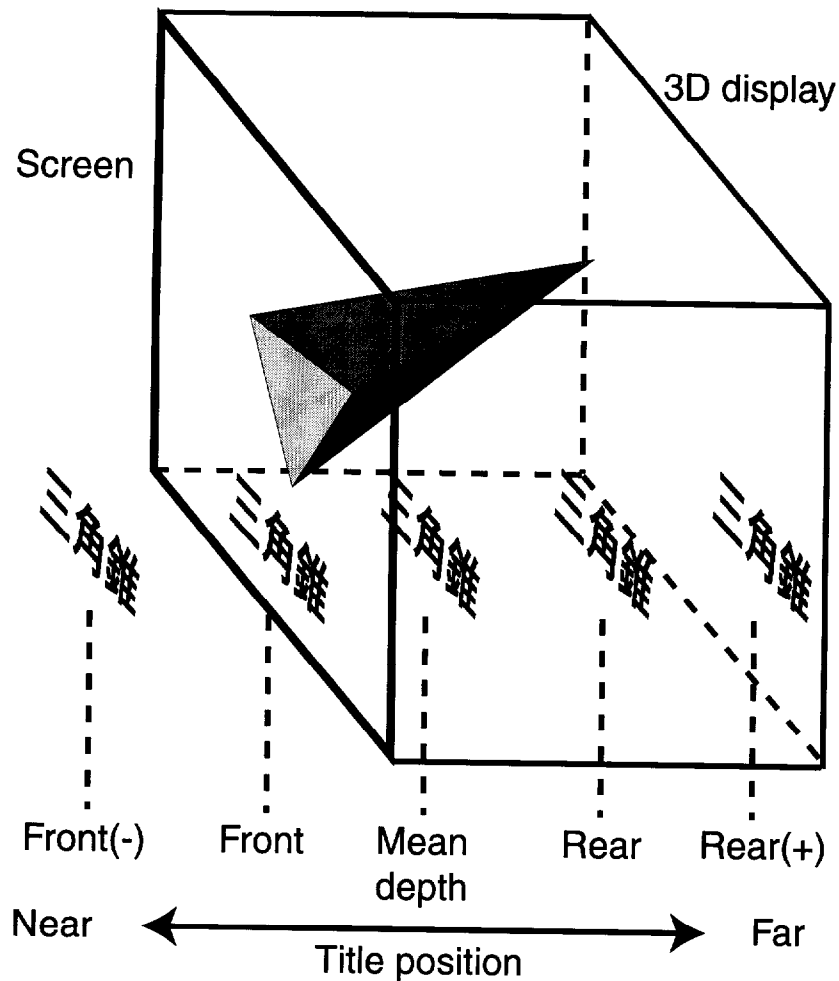


図 5.6 タイトル文字の位置

- (3) 深さ平均 (mean depth) 図形の深さ平均位置と同じ奥行位置に提示する。
- (4) 後端 (rear) 図形の後端と同じ奥行位置に提示する。
- (5) 後端の奥 (rear(+)) 図形の後端からさらに視差 0.5 度奥の奥行位置に提示する。

提示図形は、三角錐、三角柱、四角錐、四角柱の 4 種類とし、各図形について提示角度が異なる図を 2 つずつ作成した。実験に使用した図を図 5.7 に示す。

図 5.7 に示す 8 つの図について、図形とタイトル文字が一致する問題と、一致しない問題を 1 題ずつ作成した。タイトル文字は、「三角錐」、「三角柱」、「四角錐」、「四角柱」のいずれかを用了。

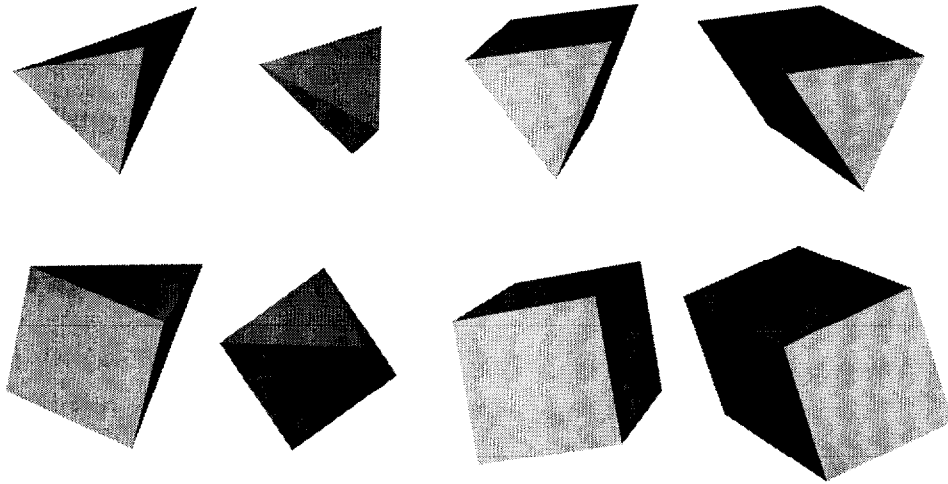


図 5.7 実験に用いた図

問題は 20 題ずつ、4 つのセクションに分けて、ランダムな順番で提示した。そして同じ実験を、被験者一人につき、2 回ずつ繰り返した。

問題の提示間隔は 5 秒とし、各セクション間には、2 分間の休憩を入れた。実験中、問題が提示されていないときは、画面の中央部、縦 2cm×横 2cm（視角 1.91 度×1.91 度）の範囲に十字の印を黒色で提示し、これを注視させた。そして、十字の印は、すべてディスプレイ画面と同じ奥行位置に提示した。これは、問題提示直後の視線位置をすべての条件間で統一するためである。

以上の内容の実験を、文字のサイズと図形の提示位置の違いによる影響を調べるために、これらの条件の組み合わせを変えて、合計 4 回実施した。文字のサイズは、文字の高さが前節の実験と同じ 1.0cm（視角 0.95 度）の場合と、表示面積がその半分となる 0.7cm（視角 0.67 度）の場合の 2 条件とした。

ディスプレイ画面上でのタイトル文字の位置は、画面の上下に最も長い図形の下端から、下方に視角 1.0 度の位置と定め、常に同じ位置にタイトル文字を提示した。これは、タイトル文字の位置を手掛かりにして、回答できないようにするためである。

図形の提示位置は、画面の手前 (in front of screen) と、画面の奥 (behind screen) の 2 条件とした。図形を画面の手前に提示するときは、図形の後端がディスプレイ画面と同じ奥行位置にくるようにし、画面の奥に提示するときは、図形の前端がディスプレイ画面と同じ奥行位置にくるようにした。図形の前端から後端までの奥行差

は、図によって異なるが、画面の手前に提示するときで、視差 1.22 度から 1.34 度、画面の奥に提示するときで、視差 0.87 度から 0.99 度と、ほぼ同じ値となるようにした。

画面の解像度、背景、図、文字の色、室内照度、視距離、被験者などの実験条件は、すべて前節の実験と同じである。

主観評価実験

4.2.1 の実験で用いた図について、被験者全員に実際に画面を見ながら最も見やすいと感じられる位置にタイトル文字を移動させ、その位置を記録した。タイトル文字の位置は、マウスの左右のボタンをクリックすることにより、視差 0.06 度の間隔で前後に移動できるようにした。この間隔は、奥行き差の弁別が十分可能な値である。

タイトル文字の初期位置が、図形の手前の場合と、図形の奥の場合について、交互に各 2 回ずつ測定した。タイトル文字の初期位置は、図形の手前の場合、図形の前端からさらに手前に視差 1.0 度の位置、図形の奥の場合、図形の後端からさらに奥に視差 1.0 度の位置とした。図の提示順序はランダムとした。

5.3.3 実験結果

回答時間

課題の正答率は、全体で 97.2% と高かった。これは、正答時の回答時間について分析するために都合が良い問題であったことを意味する。

そこで、ここでは、図形とタイトル文字が一致する問題だけを対象とし、誤答時のデータは除いて検討した。また、前節の実験と同様に、個人差の影響を除くため、問題ごとの回答時間の測定値と各被験者の平均回答時間の比を求め、規格化した値を用いて分析した。

タイトル文字の提示位置と回答時間の関係を図 5.8 と図 5.9 に示す。

図 5.8 と図 5.9 より、文字サイズが 0.7cm のときは、図形を画面の手前に提示したとき、深さ平均と後端の条件で他の条件より回答時間が短く、図形を画面の奥に提示したとき、深さ平均と前端の条件で他の条件より回答時間が短くなった。しかし、文字サイズが 1.0cm のときは、文字サイズ 0.7cm のときと比較して、回答時間の差は小さいことがわかった。

規格化回答時間に関して、タイトル文字の位置と図を要因とする 2 元配置分散分

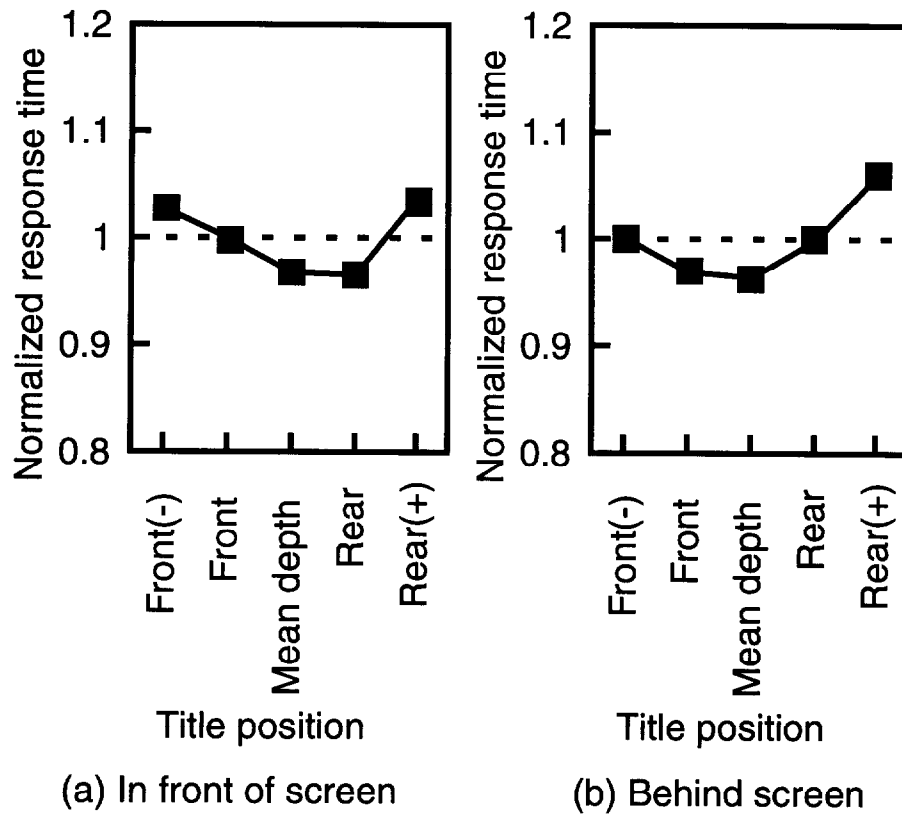


図 5.8 タイトル文字の提示位置と回答時間の関係（文字サイズ 0.7cm）

表 5.4 回答時間に関する分散分析表（文字サイズ 0.7cm，画面の手前）

要因	平方和	自由度	平均平方	F 値
タイトルの位置	0.614	4	0.153	2.77*
図	3.873	7	0.553	9.99**
交互作用	2.106	28	0.075	1.36
残差	41.246	745	0.055	

**:1%水準, *:5%水準で有意

析を行った結果を、表 5.4 から表 5.7 に示す。

表 5.4 から表 5.7 より、規格化回答時間に対する図の効果はいずれも有意であったが、タイトル文字の位置と図の要因による交互作用はいずれも有意でなかった。すなわち、図の種類によって回答時間に差はあるが、タイトル文字の位置が回答時間

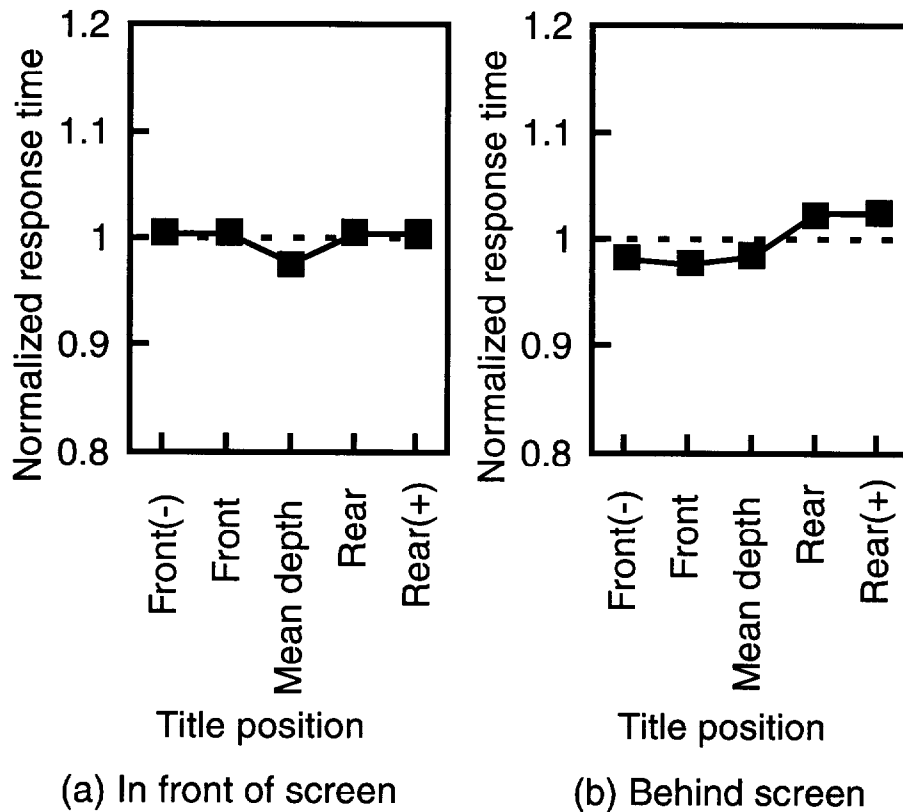


図 5.9 タイトル文字の提示位置と回答時間の関係（文字サイズ 1.0cm）

表 5.5 回答時間に関する分散分析表（文字サイズ 0.7cm, 画面の奥）

要因	平方和	自由度	平均平方	F 値
タイトルの位置	0.880	4	0.220	4.03**
図	3.604	7	0.515	9.44**
交互作用	2.277	28	0.081	1.49
残差	40.596	744	0.055	

**:1%水準, *:5%水準で有意

に与える影響は、いずれの図においても同様であることがわかった。

そこで、次に規格化回答時間に対するタイトル文字の位置の効果に着目すると、表 5.4と表 5.5より、文字サイズが 0.7cm のときは、図形を画面の手前に提示した場合と、奥に提示した場合の両方で有意であった。しかし、表 5.6と表 5.7より、文字

表 5.6 回答時間に関する分散分析表（文字サイズ 1.0cm，画面の手前）

要因	平方和	自由度	平均平方	F 値
タイトルの位置	0.098	4	0.024	0.48
図	3.062	7	0.437	8.55**
交互作用	0.910	28	0.032	0.64
残差	38.164	746	0.051	

**:1%水準, *:5%水準で有意

表 5.7 回答時間に関する分散分析表（文字サイズ 1.0cm，画面の奥）

要因	平方和	自由度	平均平方	F 値
タイトルの位置	0.315	4	0.079	1.15
図	7.881	7	1.126	16.45**
交互作用	2.824	28	0.101	1.47
残差	51.051	746	0.068	

**:1%水準, *:5%水準で有意

サイズが 1.0cm のときは、図形を画面の手前に提示した場合と、奥に提示した場合の両方とも有意でなかった。すなわち、タイトル文字のサイズが 0.7cm のときだけ、タイトル文字の位置の違いが回答時間に影響を与えていることがわかった。

主観評価

被験者が最も見やすいと回答したタイトル文字の位置の平均を求め、式 (5.2) から求めた深さ平均位置と対応させて図示した。図 5.10 に文字サイズ 0.7cm の場合、図 5.11 に文字サイズ 1.0cm の場合を示す。

被験者が最も見やすいと回答した位置と深さ平均位置の誤差は、文字サイズが 0.7cm の場合で、平均 0.05 度、標準偏差 0.06 度、文字サイズ 1.0cm の場合で、平均 0.03 度、標準偏差 0.05 度であった。画面上の 1 ドットのサイズが視角 0.03 度であり、これより高い精度で奥行位置を制御できないことを考慮すると、どちらの文字サイズの場合も、誤差は小さく、両者の値は良く一致しているといえる。

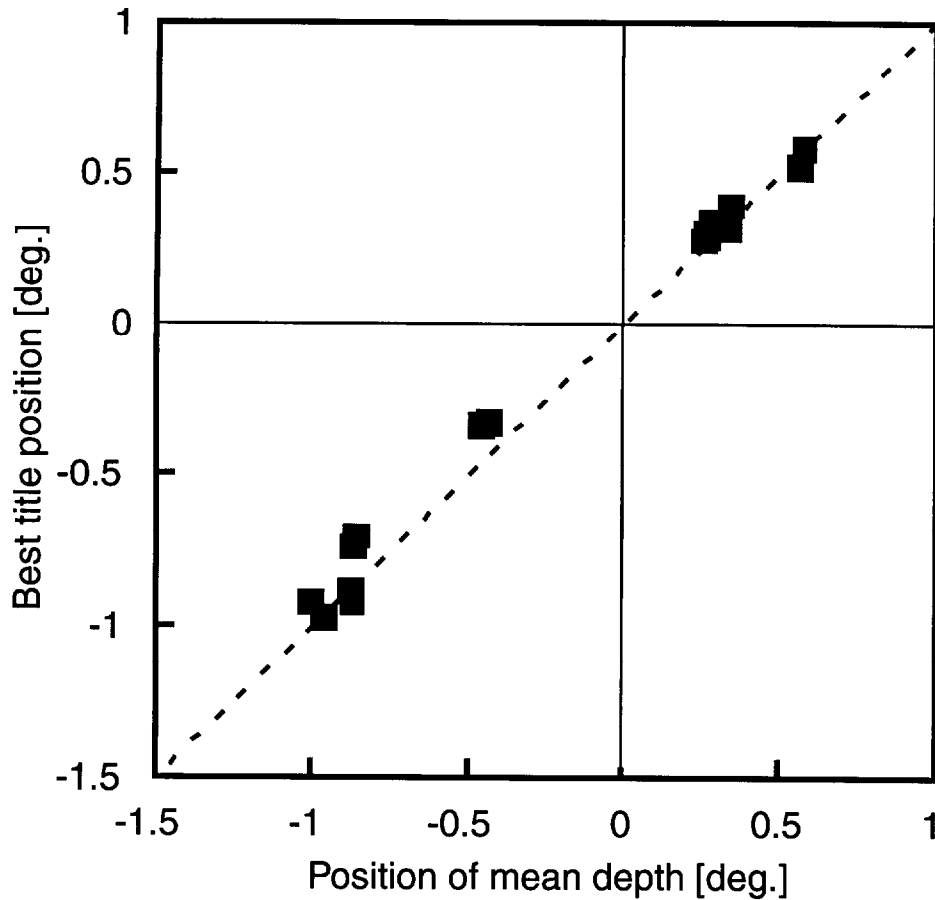


図 5.10 主観評価の結果（文字サイズ 0.7cm）

5.3.4 考察

回答時間を測定した結果から、タイトル文字のサイズが小さい 0.7cm のときは、回答時間がタイトル文字の位置の影響を受けて変化した。1.0cm のときには、回答時間に差が生じるほどの影響はないことがわかった。

タイトル文字のサイズが 0.7cm のとき、図形を画面の手前に提示した場合は、深さ平均位置と後端で回答時間が短くなり、奥に提示した場合は、深さ平均位置と前端で回答時間が短くなった。図形を画面の手前に提示した場合の後端の位置と、画面の奥に提示した場合の前端の位置は、どちらもディスプレイ画面と同じ奥行位置である。本実験では、問題を提示する直前に、ディスプレイ画面と同じ奥行位置に十字の印を提示して、ここを注目させた。タイトル文字をディスプレイ画面と同じ

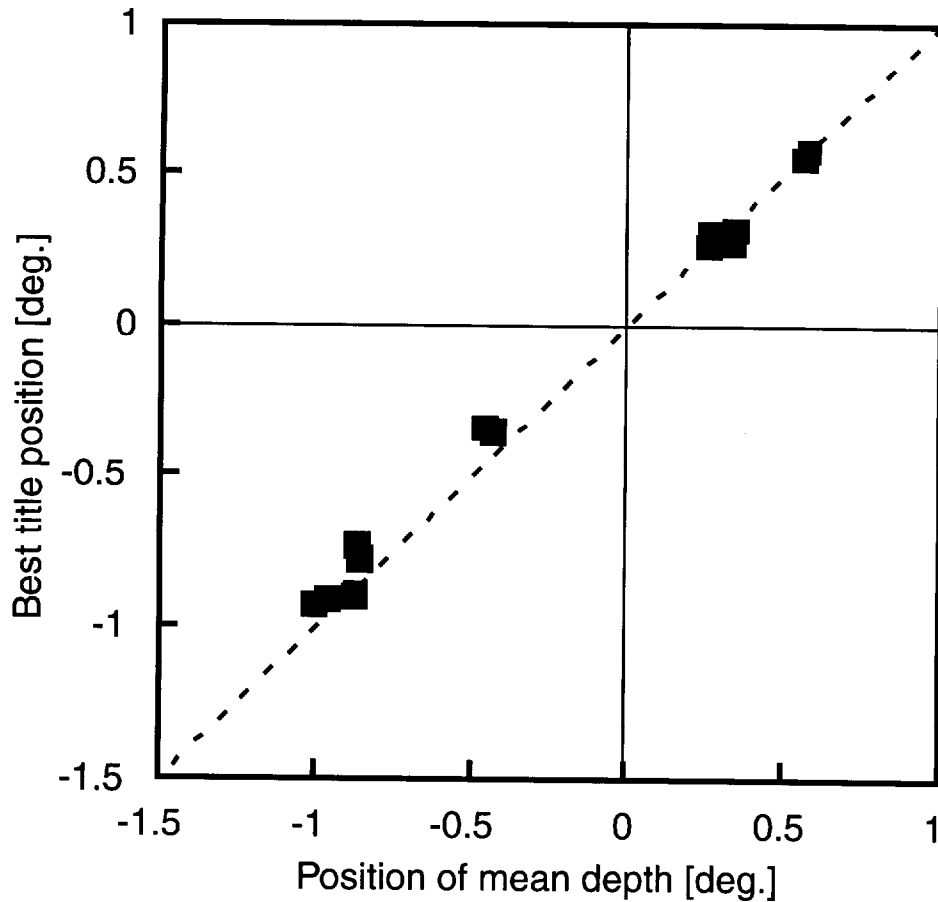


図 5.11 主観評価の結果（文字サイズ 1.0cm）

奥行位置に提示したとき、回答時間が短くなったのは、問題が提示された時点で、既に輻輳点がタイト文字と同じ奥行位置にあり、タイトル文字が認識しやすかったためと考えられる。

タイトル文字を深さ平均位置に提示した場合は、図形を画面の前後のどちらに提示しても回答時間が短くなった。したがって、一般的には、深さ平均位置に提示するのが良いといえる。また、主観評価実験の結果から、被験者が最も見やすいと考えるタイトル文字の位置は、文字サイズに関係なく、深さ平均位置とよく一致した。これらの結果から、図形にタイトル文字を付けて提示する場合には、タイトルを深さ平均位置に提示すれば良いことが明らかになった。

本研究では、タイトル文字の視角の大きさを一定に保ち、視差を与えて奥行位置を変化させる場合を対象にした。そのため、奥行位置の異なる文字は、見かけの大

きさが異なる。5.2 節と同様に、ディスプレイ画面と同じ奥行位置に提示した文字に対する見かけの文字の大きさを求めると、式 (5.1) より、最大に見積もった場合で、文字を画面の手前に提示するとき 0.76、画面の奥に提示するとき 1.31 となる。

見かけの文字サイズが異なるとき、それが文字認識に与える影響については、本実験結果では明らかにできなかったが、これは、今後の課題である。

5.4 第5章のまとめ

立体ディスプレイに、図形と文字を同時に提示するとき、文字を図形の前後のどの位置に提示するのが適切であるか検討した。

まず、図中に文字を入れた場合について検討した。直方体に頂点の名称を付けて提示し、画面の最も奥にある頂点の名称を確認させ、その回答時間を測定した実験の結果から、以下のことがわかった。

- (1) 図形を立体提示すれば、平面提示の場合よりも回答時間が短く、立体図形の奥行位置を認識しやすい。
- (2) 図形を立体提示したとき、文字を図中の対応する部分と同じ奥行位置に提示すれば、ディスプレイ画面と同じ奥行位置にそろえて提示するよりも、回答時間が短い。

次に、図形にタイトル文字を付けて提示する場合について、適切なタイト文字ルの位置を検討した。その結果から、以下のことがわかった。

- (1) 画面が最も見やすいと感じられるタイトル文字の位置は、文字サイズに関係なく、深さ平均位置とよく一致する。
- (2) タイトル文字のサイズが小さい0.7cmのときは、タイトル文字の提示位置が回答時間に影響を与えるが、1.0cmのときには影響を与えない。
- (3) タイトル文字のサイズが0.7cmのとき、深さ平均位置またはディスプレイ画面と同じ奥行位置にタイトル文字を提示したとき、他の位置よりも回答時間が短い。

以上の結果から、立体図形とタイトルを同時に提示する場合には、提示した図形全体の平均的な奥行量をあらわす場所として、本研究で新たに定義した、「深さ平均位置」にタイトルを提示すれば、画面が見やすいことを示した。

第 6 章

動画提示におけるタイトル位置の検討

6.1 はじめに

第 5 章では，立体図形とタイトル文字を画面に同時に提示する場合を対象に，画面が見やすいタイトル文字の提示位置を検討した．そして，提示する図形の種類と奥行位置，提示角度の各条件を変化させて実験を行った結果，画面が最も見やすいタイトル文字の位置は，提示図形の平均的な奥行量を表す場所として定義された，深さ平均位置と良く一致することが確認できた．

この位置は，提示する図形の形状や位置，観察者の視点位置の情報に基づいて計算できるため，これらの情報が与えられれば，見やすいタイトル文字の提示位置を求めることが可能である．ただし，第 5 章では，静止画だけを対象としており，さらに提示図形が，その表面と内部の情報をもったソリッドモデルで表現されている場合に限定されていた．

そこで，本章では，静止画による提示と動画による提示の両方を検討の対象とし，図形がソリッドモデルで表現されている場合に加えて，図形の頂点を結ぶ直線だけで表されるワイヤフレームモデルで表現されている場合について，画面が見やすいタイトル文字の位置を検討した．動画による提示では，立体図形の提示方法として良く用いられる，回転提示を対象とした．

まず，回転提示による動画を対象に，提示画像の平均的な奥行量をあらわす場所を，回転提示における深さ平均位置として，新たに定義した．これは，5.3 節で静止画を対象に定義した深さ平均位置を，回転提示による動画にも適用できるように拡張したものである．

次に，画面が最も見やすいタイトル文字の位置を主観評価実験で測定し，この結

果を深さ平均位置と比較した。そして、ワイヤフレームモデルとソリッドモデルの違いや回転速度の違いが、見やすいタイトル文字の位置に影響を与えるか調べた。

6.2 深さ平均位置

5章では、提示図形全体の平均的な奥行量をあらわす場所を、深さ平均位置 P (position of mean depth) として、次のように定義した。

$$P = \frac{\sum_{i=1}^n (S_{iL}P_{iL} + S_{iR}P_{iR})}{\sum_{i=1}^n (S_{iL} + S_{iR})} \quad (6.1)$$

ただし、 n は画面に提示される面の数、 S_{iL} と P_{iL} は、それぞれ左眼用画面における面 i の面積と深さ平均位置である。 S_{iR} と P_{iR} は、右眼用画面における面 i の面積と深さ平均位置である。面 i の深さ平均位置 P_i は、図 6.1 に示すように、面 i の画面 (screen) 上への射影像を面 i' とするとき、面 i' の重心 $G_{i'}$ に射影される面 i 上の点である。

これは、提示図形が多面体で表されるときのものであるが、図形が曲面で構成されている場合も考慮すれば、(6.1) 式は次のように表すことができる。

$$\mathbf{P} = \frac{\sum_{k=L,R} \iint_{S_k} \mathbf{P}_k(x,y) dx dy}{\sum_{k=L,R} \iint_{S_k} dx dy} \quad (6.2)$$

ただし、 S_k は、 $k = L$ のとき提示図形 S の左眼用画面上への射影像を表し、 $k = R$ のとき右眼用について同様に定義される。また、 $\mathbf{P}_k(x,y)$ は左眼 ($k = L$) または右眼 ($k = R$) 用画面上の点 (x,y) に射影される提示図形 S 上の点の位置ベクトルを表している。

次に、図形を回転提示した場合について、画面が見やすいタイトル文字の位置を考える。奥行位置が異なる 2 つの視標の大きさを比較しているときの視線を観測した実験結果によれば、輻輳点は 2 つの視標の中間の奥行位置に分布する [46]。図形とタイトル文字が同時に提示されているとき、図形からタイトル文字へ視線を移動させたときの輻輳角の変化が小さければ、画面が見やすいと考えられる。5章では、静止画を対象に、提示図形全体の平均的な奥行量を表す場所を深さ平均位置と定義し、この位置が画面の見やすいタイトル文字の位置と良く一致することを実験により確認している。

そこで、回転提示による動画の場合も同様に考え、図形一回転分の動画像が、 n フレームの静止画で構成されるとき、この動画像の平均的な奥行量を表す場所を、

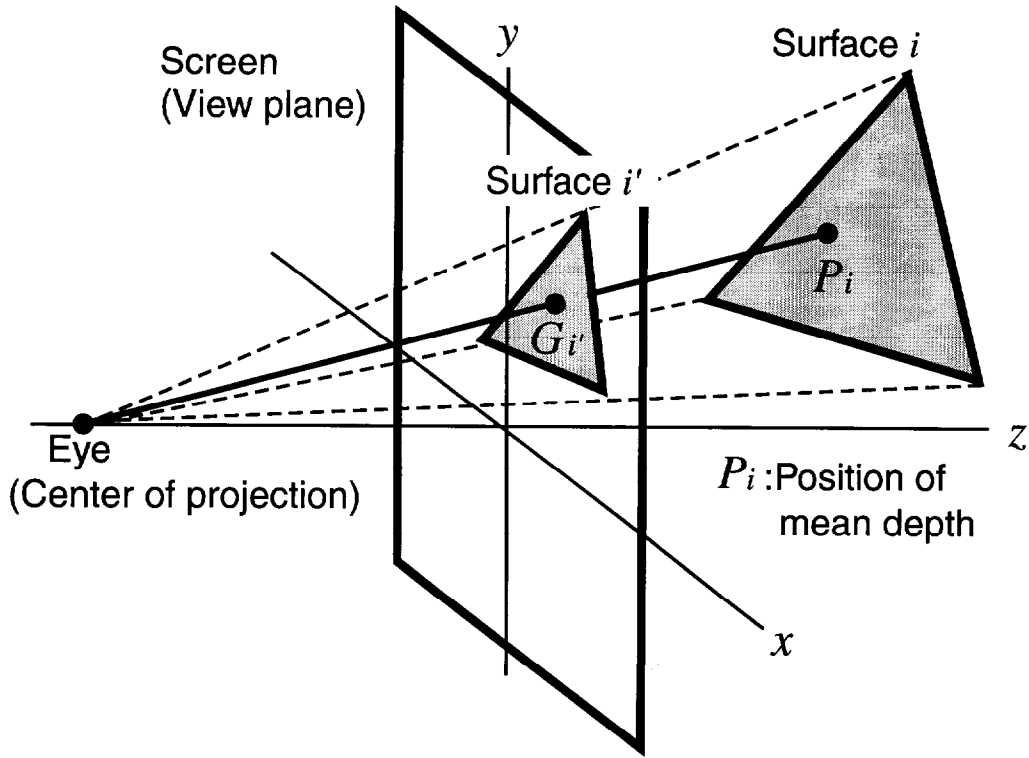


図 6.1 深さ平均位置

回転提示における深さ平均位置 $\mathbf{P}_r$ として、次のように定義した。

$$\mathbf{P}_r = \frac{\sum_{j=1}^n \sum_{k=L,R} \iint_{S_k^j} \mathbf{P}_k^j(x,y) dx dy}{\sum_{j=1}^n \sum_{k=L,R} \iint_{S_k^j} dx dy} \quad (6.3)$$

ただし、 S_k^j および $\mathbf{P}_k^j(x,y)$ は、それぞれ第 j フレームについて定義される S_k および $\mathbf{P}_k(x,y)$ を表す。 $\mathbf{P}_r$ は、図形一回転分の提示画像すべてについて、深さ平均位置を求め、図形の表示面積で重み付けして平均した値である。

(6.3) 式において $n = 1$ とおけば、(6.2) 式の静止画を対象とした深さ平均位置と一致する。そこで、本章の以降では特にことわらない限り、(6.3) 式で求めた位置を深さ平均位置とよぶことにする。

6.3 実験方法

6.3.1 装置構成

実験には、液晶シャッターメガネによる2眼式立体ディスプレイを用いた。グラフィックワークステーション（SGI製O2）で左眼用画像と右眼用画像をリアルタイムに作成し、ワークステーション付属の17インチCRTディスプレイで表示した。液晶シャッターメガネは、ステレオグラフィックス社製のCrystalEYES2を使用した。

本システムは、インターレース方式により、右眼用画像と左眼用画像をそれぞれ奇数フィールドと偶数フィールドに1/120秒間隔で交互に切り替えて表示している。図形や文字の奥行提示位置は、画像に与える両眼視差の大きさ、すなわち左眼用画像と右眼用画像の水平方向のずれ量を変化させて調節する。

視差の大きさと画像が知覚される奥行位置との関係は、幾何学的な関係から導かれる理論式[41]と良く一致することが実験で確認されており[47, 42]、視差の値から奥行位置を求めることが可能である。そこで、以下では、視差を用いて奥行位置を表すことにする。

6.3.2 手順

図6.2に示すように、立体ディスプレイの画面中央部に立体図形を提示し、その下にタイトル文字として図形の名称を漢字3文字で提示した。大学生10名の被験者に、画面を見ながら、画面全体が最も見やすいと感じられる位置にタイトル文字を移動させ、その位置を記録した。タイトル文字のディスプレイ画面上での表示位置は、図形の下端から下方に視角1.0度の位置に固定した。奥行位置は、マウスを前後に移動させることで、画面の手前視差2.5度の位置から画面の奥視差2.5度の位置の範囲内で、視差0.023度の間隔で前後に移動できるようにした。

提示する図形の種類、表現モデル、図形の奥行位置の3つの提示条件を組み合わせた合計12種類の画像を、回転速度を変えて提示し、それぞれ画面が見やすいタイトル文字の位置を測定した。

図形の種類は、立方体（一辺が5cm）と直方体（縦5cm×横10cm×高さ5cm）の2種類とし、図形の表現モデルは、ソリッドモデル(solid model)とワイヤフレームモデル(wireframe model)の2種類とした。図形の奥行位置は、図形の重心がディスプレイ画面の手前にある場合(in front of screen)、画面上と同じ奥行位置にある場合(on screen)、画面の奥にある場合(behind screen)の3種類とした(図6.3)。

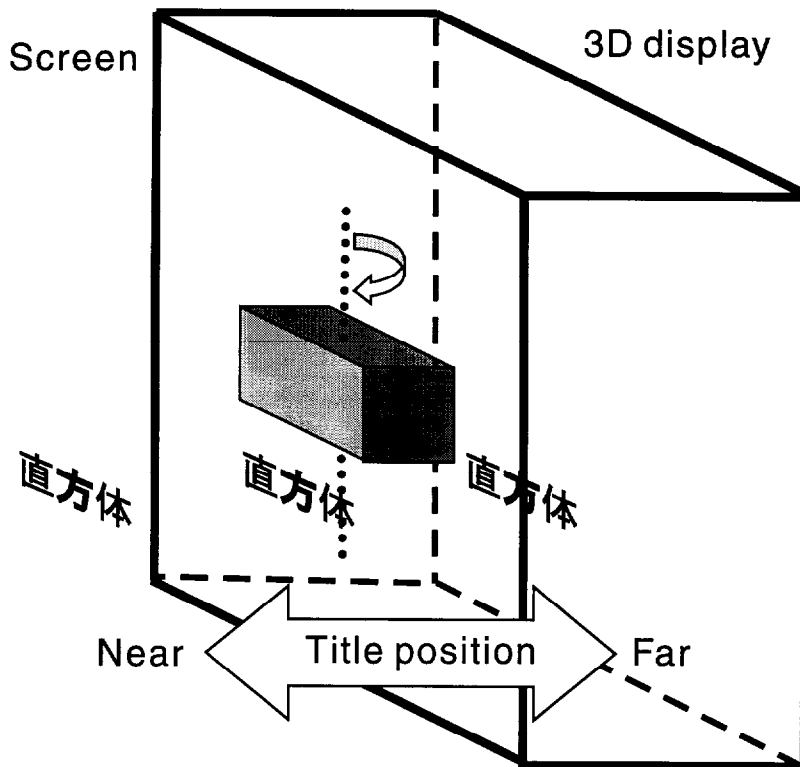


図 6.2 課題の提示方法

回転速度は、0(度/秒)、20(度/秒)、80(度/秒)の3種類とし、図形は、その重心を通る鉛直線を回転軸とし、ディスプレイ画面の上方からみて、時計回りの方向に回転させた。回転速度が0(度/秒)の静止画の条件では、回転提示で表示するフレーム画像の中から選択した図6.3に示す画像を使用した。これらの画像は、異なる表現モデルの間で比較できるように、図形の提示角度は全て同じにした。

図形の回転速度は、予備実験の結果に基づいて決定した。本実験の被験者全員を対象に、本実験で使用する全12種類の画像について、図形の形状を把握するのに最も適していると感じられる回転速度を調べた。その結果、被験者全員の平均値は、最も遅い画像で71.7(度/秒)、最も速い画像で91.9(度/秒)、全画像の平均値は、83.1(度/秒)であった。そこで、回転速度をこの平均値とほぼ等しい80(度/秒)とし、さらに、回転速度の違いによる影響の有無を確認するため、この値の4分の1の速度である、20(度/秒)の条件も加えた。

実験は、回転速度別に3つのセクションに分けて、0(度/秒)、80(度/秒)、20(度/秒)の順序で実施した。各セクションでは、12種類の画像について、タイトル文字の

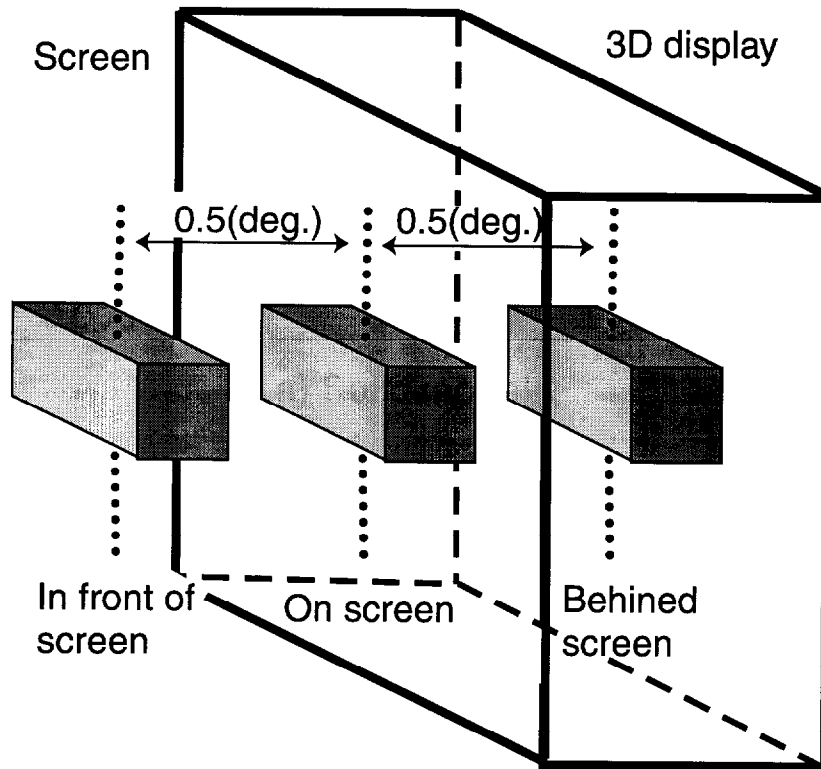
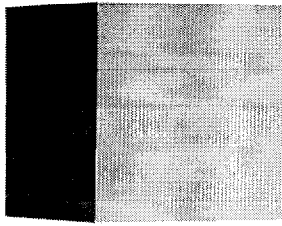


図 6.3 図形の奥行位置

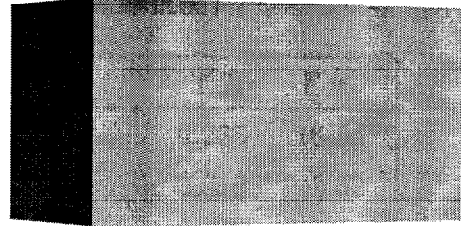
初期位置が図形の手前にある場合と奥にある場合について、交互に2回ずつ、合計4回繰り返し測定した。各セッション内での画像の提示順序はランダムとした。回答時間の上限に制限は設けなかったが、回転提示のときには、図形が一回転した後に回答するよう、被験者に教示した。

動画のフレーム更新レートは、30(フレーム/秒)で一定とし、図形はモノクロ256階調で表示した。画像の解像度は、片眼画像あたり1024×492ドットとし、白色(60.2cd/cm²)の背景に黒色(3.6cd/cm²)の文字で表示した。視距離は60cmとし、この条件で画面を見たとき、図形の大きさが正しく見えるように画像を作成した。

5章では、静止画を対象とした実験結果から、画面が見やすいタイトル文字の位置は、文字サイズが1.0cm(視角0.95度)と0.7cm(視角0.67度)で差がないことが確認されている。そこで、回転提示の場合も文字サイズの違いによる影響はないと考え、文字サイズが1.0cmの場合だけを対象に実験を行った。

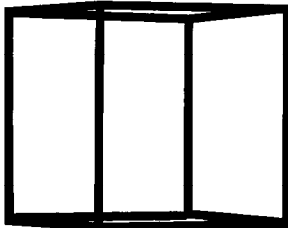


立方体

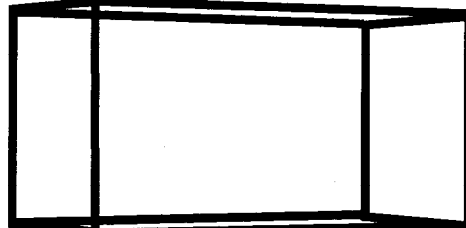


直方体

(a) Solid model



立方体



直方体

(b) Wireframe model

図 6.4 提示図形

6.4 実験結果

実験では、同一条件の画像に対して、各被験者毎に4回ずつ繰り返し測定した。そこで、4回分の測定値の平均値を求め、この値を用いて以下の分析を行った。

6.4.1 提示条件による影響

提示条件がタイトル文字の位置に与える影響を調べるために、回転速度別に、図形の種類、表現モデル、図形の位置の3つ条件を要因とする3元配置分散分析を行った。その結果を、表6.1から表6.3に示す。

表6.1から表6.3より、いずれの回転速度においても、図形の種類と位置の効果は有意であったが、表現モデルの効果は有意でなかった。また、これらの各要因の

表 6.1 分散分析表（静止画）

要因	平方和	自由度	平均平方	F 値
(1) 図形	0.235	1	0.235	16.54**
(2) モデル	0.019	1	0.019	1.32
(3) 位置	20.063	2	10.031	707.19**
(1)×(2)	0.000	1	0.000	0.00
(1)×(3)	0.003	2	0.001	0.10
(2)×(3)	0.015	2	0.007	0.52
(1)×(2)×(3)	0.010	2	0.005	0.35
残差	1.532	108	0.014	

**:1%水準, *:5%水準で有意

表 6.2 分散分析表（回転速度 = 20(度/秒)）

要因	平方和	自由度	平均平方	F 値
(1) 図形	0.119	1	0.119	10.01**
(2) モデル	0.004	1	0.004	0.33
(3) 位置	21.122	2	10.561	885.84**
(1)×(2)	0.000	1	0.000	0.00
(1)×(3)	0.010	2	0.005	0.42
(2)×(3)	0.003	2	0.002	0.12
(1)×(2)×(3)	0.000	2	0.000	0.00
残差	1.288	108	0.012	

**:1%水準, *:5%水準で有意

交互作用は全て有意でなかった。この結果から、画面が見やすいタイトル文字の位置は、提示する図形の種類や提示位置の影響を受けるが、表現モデルの違いによる影響はなく、ソリッドモデルとワイヤフレームモデルでは、両者の結果に差がないことがわかった。

表 6.3 分散分析表 (回転速度 = 80(度/秒))

要因	平方和	自由度	平均平方	F 値
(1) 図形	0.092	1	0.092	6.35*
(2) モデル	0.000	1	0.000	0.00
(3) 位置	20.941	2	10.471	722.12**
(1)×(2)	0.000	1	0.000	0.02
(1)×(3)	0.007	2	0.003	0.24
(2)×(3)	0.003	2	0.001	0.09
(1)×(2)×(3)	0.001	2	0.001	0.04
残差	1.566	108	0.015	

**:1%水準, *:5%水準で有意

表 6.4 分散分析表

要因	平方和	自由度	平均平方	F 値
(1) 速度	0.001	1	0.001	0.07
(2) 図形	0.211	1	0.211	16.75**
(3) 位置	42.063	2	21.031	1674.00**
(1)×(2)	0.001	1	0.001	0.07
(1)×(3)	0.001	2	0.000	0.03
(2)×(3)	0.017	2	0.008	0.66
(1)×(2)×(3)	0.000	2	0.000	0.01
残差	2.865	228	0.013	

**:1%水準, *:5%水準で有意

6.4.2 回転速度の影響

次に、回転速度の違いがタイトル文字の位置に与える影響を調べるために、回転速度が 20(度/秒) と 80(度/秒) の場合を対象に、図形の種類、表現モデル、図形の位置の 3 つを要因とする 3 元配置分散分析を行った。その結果を表 6.4 に示す。

表 6.4 より、図形の種類と位置の効果は前の分析結果と同様に有意であったが、回転速度の効果は有意でなかった。また、これらの各要因の交互作用も全て有意で

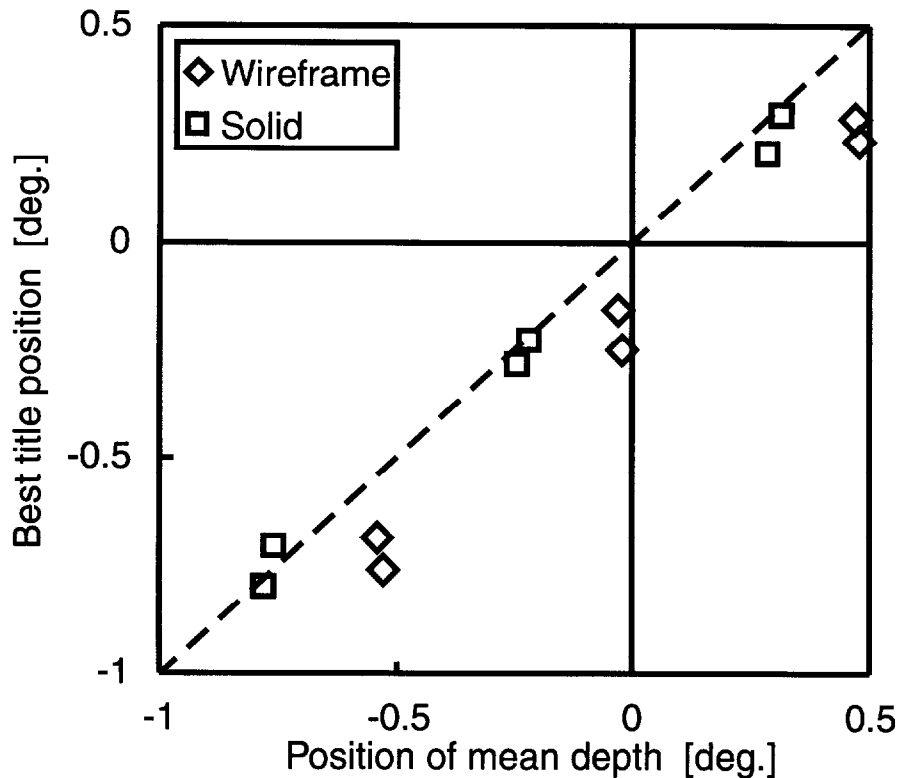


図 6.5 見やすいタイトル文字の位置と深さ平均位置の関係（静止画）

なかった。

この結果から、回転速度が20(度/秒)と80(度/秒)の場合で、画面が見やすいタイトル文字の位置に有意な差はなく、回転速度の影響を受けないことがわかった。

6.4.3 深さ平均位置との関係

測定したタイトル文字の位置と深さ平均位置を比較するため、両者の値を対応させて図 6.5から図 6.7に示した。

図 6.5は静止画の場合を示しており、深さ平均位置は(6.2)式を用いて求めた。図 6.6と図 6.7は、回転提示の場合を示しており、深さ平均位置は(6.3)式を用いて求めた。ただし、ワイヤフレームモデルの場合の深さ平均位置は、画面上に表示されたワイヤフレームの部分だけを表示領域として計算し、フレームで囲まれた部分は、表示領域には含めていない。タイトル文字の奥行位置は、ディスプレイ画面より手前にあるとき負の値で表した。

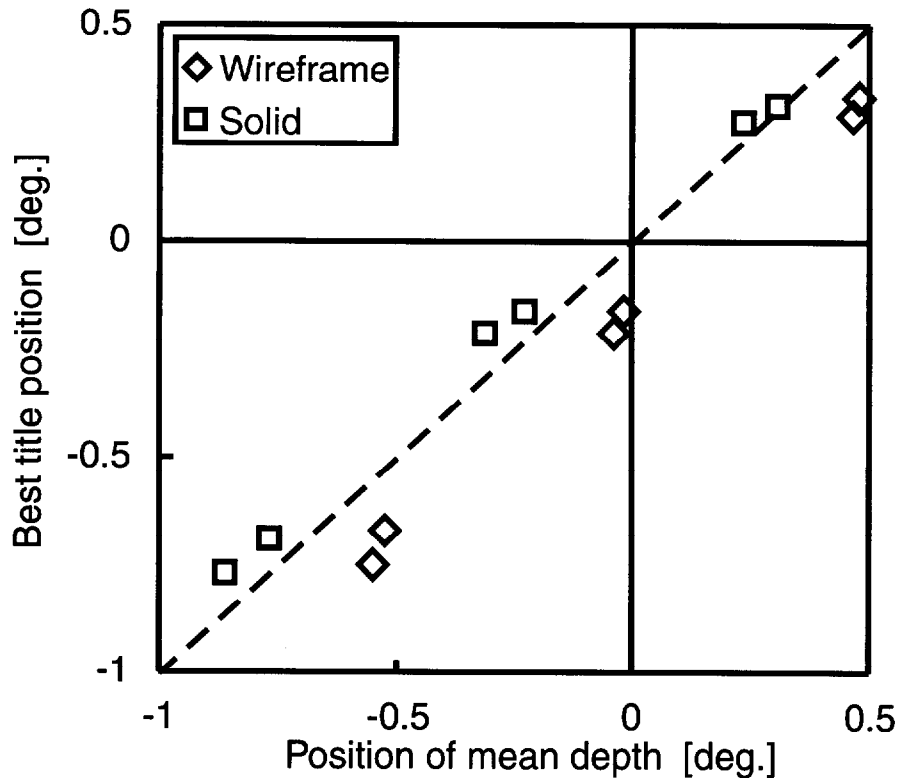


図 6.6 見やすいタイトル文字の位置と深さ平均位置の関係（回転速度=20(度/秒)）

図 6.5から図 6.7より、ソリッドモデルの場合には、画面が見やすいタイトル文字の位置と深さ平均位置は、いずれも良く一致しているが、ワイヤフレームモデルの場合には、両者は一致していない。6.4.1 節の結果から、2つの表現モデルの間では、タイトル文字の位置に有意な差がなかった。

そこで、ワイヤフレームモデルで表現されたときの深さ平均位置を、同じ図形のソリッドモデルで表現した場合の深さ平均位置の値と置き換えて、プロットし直した結果を、図 6.8から図 6.10に示す。

図 6.8から図 6.10では、ワイヤフレームモデルの場合も、両者の値は良く一致している。このとき、測定されたタイトル文字の位置と計算により求めた深さ平均位置の誤差は、静止画の場合で、平均 0.00 度、標準偏差 0.05 度であった。また、回転速度が 20(度/秒)と 80(度/秒)の回転提示では、どちらの場合も、平均 0.07 度、標準偏差 0.03 度であった。

画面上の 1 ドットのサイズが視角で 0.023 度であり、これより高い精度で奥行位

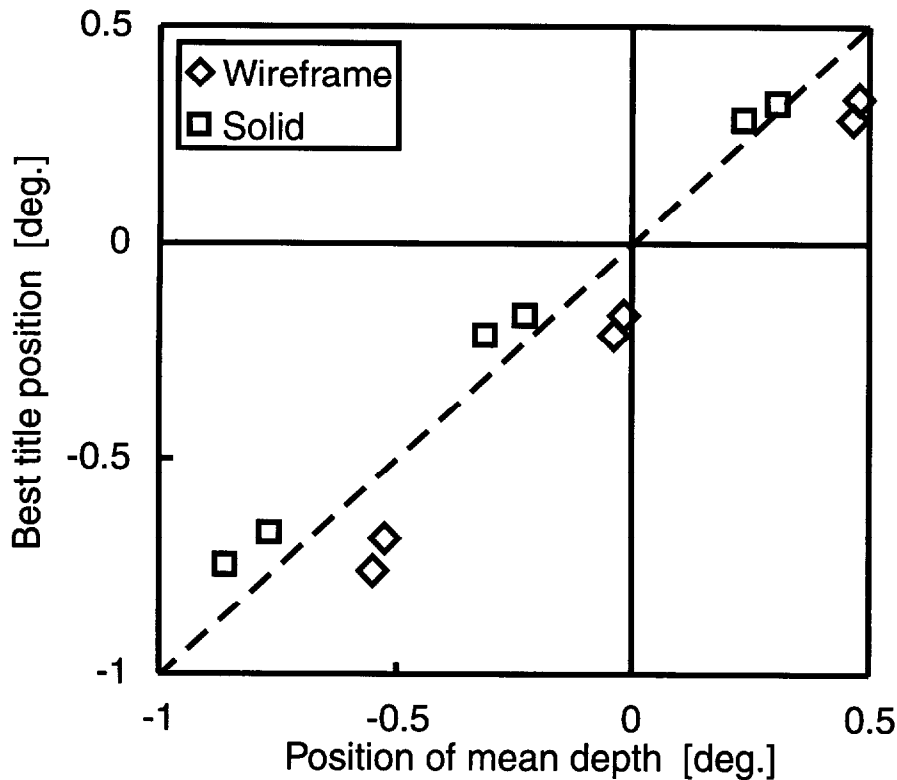


図 6.7 見やすいタイトル文字の位置と深さ平均位置の関係（回転速度=80(度/秒)）

置を制御できないことを考慮すれば、両者は良く一致しているといえる。すなわち、ワイヤフレームモデルの場合は、ソリッドモデルで求めた深さ平均位置と良く一致することがわかった。

6.5 考察

4.3 節で画面が見やすいタイトル文字の位置と深さ平均位置を比較した結果、ソリッドモデルで表現された図形の場合には、両者は良く一致することがわかった。静止画の場合については、5 章で本実験とは異なる画像を用いた実験で同様の結果が報告されており、これを追認する結果が得られた。さらに、回転提示の場合についても、本論文で新たに定義した、回転提示における深さ平均位置と良く一致することが確認できた。

一方、ワイヤフレームモデルで表現された図形の場合には、提示した画像の深さ

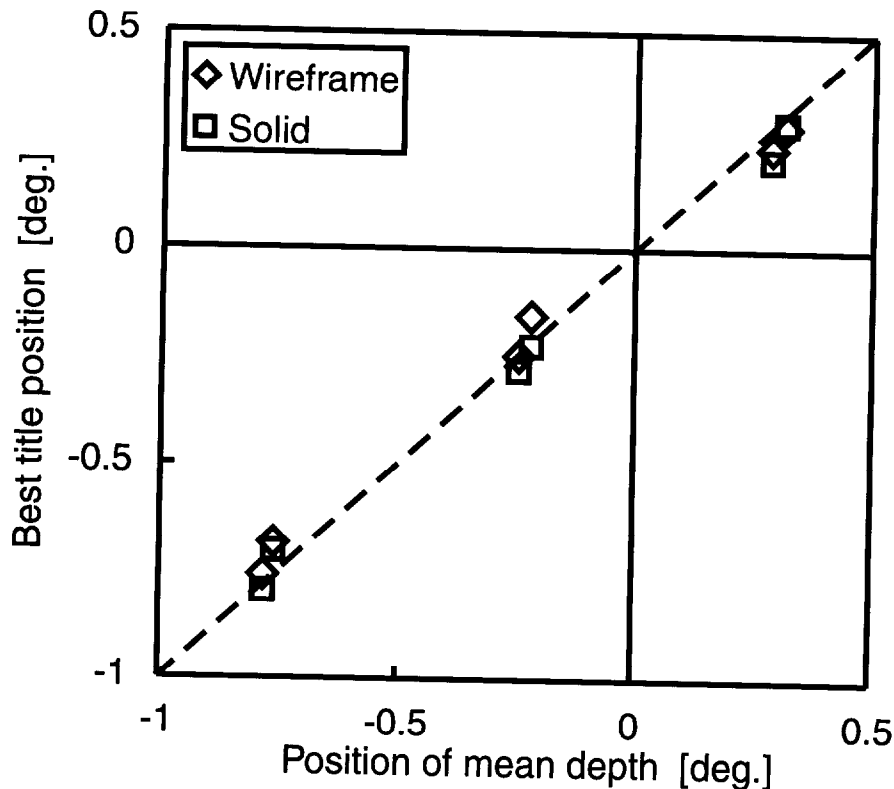


図 6.8 見やすいタイトル文字の位置と深さ平均位置の関係（静止画）—ワイヤフレームモデルの深さ平均位置をソリッドモデルの値で置き換えた場合

平均位置ではなく、同じ図形をソリッドモデルで表現したときの深さ平均位置とよく一致することがわかった。また、6.4.1 節の結果から、画面が見やすいタイトル文字の位置は、表現モデルの違いによる差がなかった。これらの結果から、ワイヤフレームモデルで表現された図形を見ているときの輻輳点の分布は、ソリッドモデルで表現された図形を見ているときと同じであると推測できる。

次に、6.4.2 節の結果から、画面が見やすいタイトル文字の位置は、回転速度の影響を受けないことがわかった。回転速度が 20(度/秒) と 80(度/秒) では、60(度/秒) の大きな差があるにもかかわらず、両者の結果には差がなかった。回転速度を決定するために行った予備実験の結果から、図形の形状を把握するのに最も適していると感じられる回転速度は、画像の種類によって差があることがわかっている。しかし、その差は最大で 20.2(度/秒) であるため、仮に各画像について、それぞれ最適な回転速度で提示したとしても、今回の実験結果と同様の結果が得られたと考えら

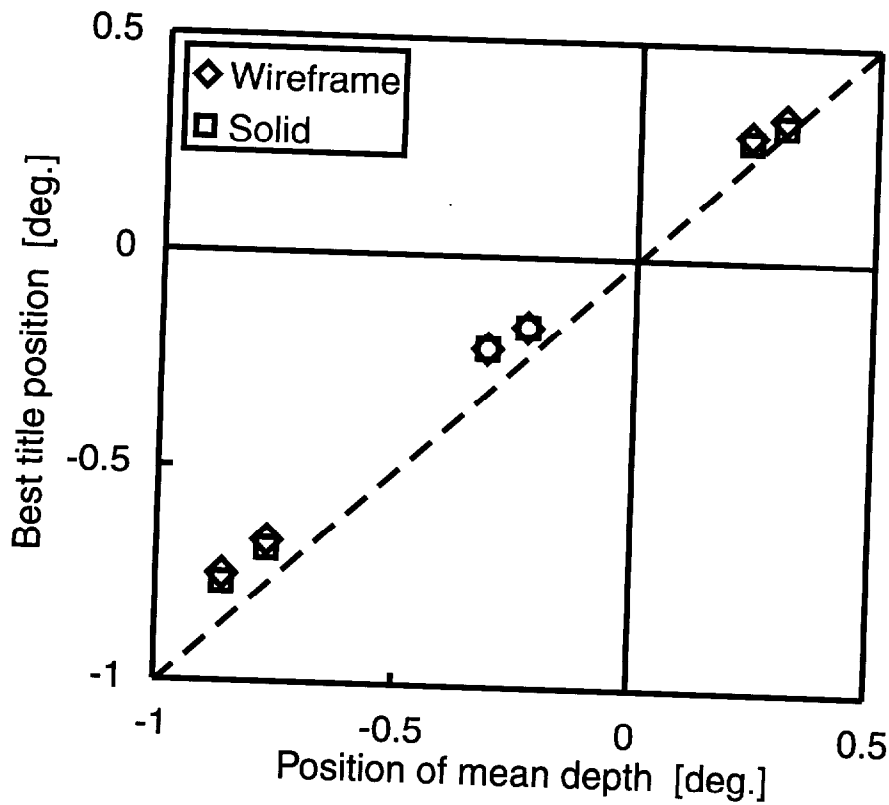


図 6.9 見やすいタイトル文字の位置と深さ平均位置の関係（回転速度=20(度/秒)）－ワイヤーフレームモデルの深さ平均位置をソリッドモデルの値で置き換えた場合

れる。

本実験では、タイトル文字の視角の大きさを一定に保ったまま、その奥行位置を変化させて提示した。そのため、奥行位置が異なる文字は、見かけの大きさが異なる。しかし、5章で、画面が見やすいタイトル文字の位置が、文字サイズの影響を受けなかったことが報告されている。したがって、文字の見かけの大きさが変化することによる、本実験結果への影響はないものと考えられる。

6.6 第6章のまとめ

回転提示された立体図形とタイトル文字が画面に同時に提示された動画を対象として、タイトル文字の提示に適した奥行位置について述べた。提示する図形の種類や表現モデル、図形の奥行位置、回転速度の条件を変化させて、画面が最も見やす

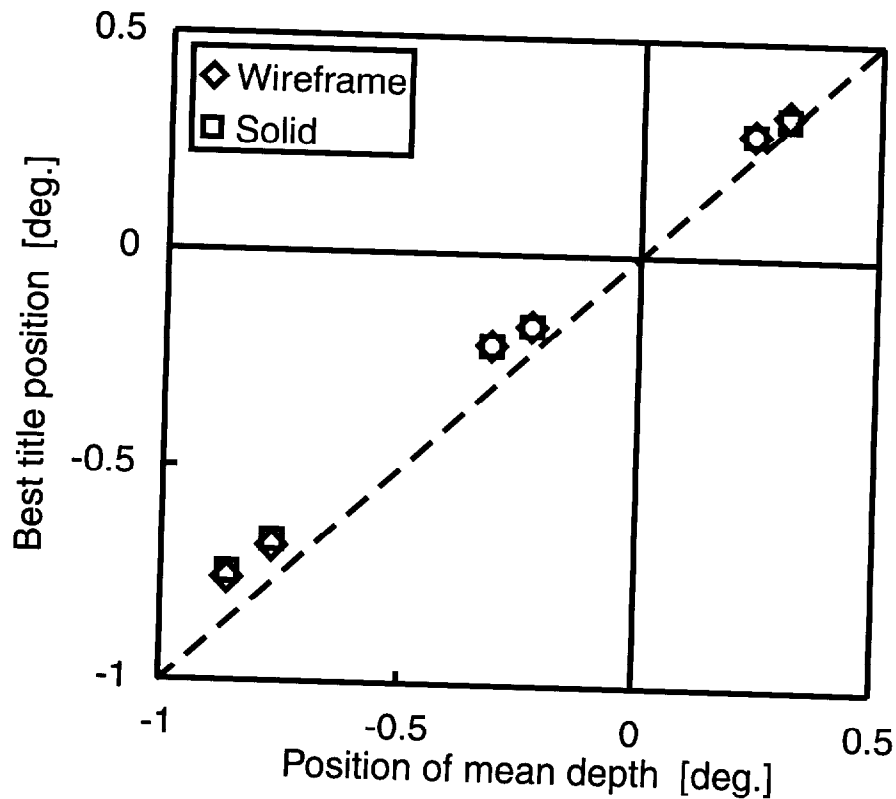


図 6.10 見やすいタイトル文字の位置と深さ平均位置の関係（回転速度=80(度/秒)）—ワイヤーフレームモデルの深さ平均位置をソリッドモデルの値で置き換えた場合

いタイトル文字の位置を主観評価実験により測定した。その結果、画面の見やすいタイトル文字の位置に関して以下のことがわかった。

- (1) ソリッドモデルで表現された図形を提示した場合、タイトル文字の位置は、提示画像の平均的な奥行量を表す場所として新たに定義した、深さ平均位置と良く一致する。
- (2) ワイヤフレームモデルで表現された図形を提示した場合、タイトルの位置は、同じ図形をソリッドモデルで表現して提示したときの深さ平均位置と良く一致する。
- (3) 回転速度が 20(度/秒) と 80(度/秒) で、タイトル文字の位置に差はなく、回転速度の影響は受けない。

以上の結果から、回転提示された立体図形とタイトルを同時に提示するときは、図形一回転分の提示画像全体の平均的な奥行量をあらわす場所とし、本研究で新たに定義した、「回転提示における深さ平均位置」にタイトルを提示すれば、画面が見やすいことを示した。ただし、ワイヤフレームモデルで表現された図形を提示する場合には、ソリッドモデルで表現された場合の深さ平均位置を用いなければならないことを示した。

第 7 章

結論

本章では，本研究によって得られた結果と今後の課題について述べる．

7.1 得られた結果

立体ディスプレイに文字情報を見やすく，効果的に提示するための指針を得ることを目的として研究を行った．本研究によって得られた結果の概略を以下に示す．

画面に見やすく文字情報を提示するための条件の明確化を目的として検討した結果，以下の結論を得た．

- (1) 立体ディスプレイに文字を提示するのに適した奥行位置は，ディスプレイ画面の奥行位置から，前後に視差 1 度以内の範囲である．
- (2) 立体図形の提示された図の中に文字情報を入れるときは，図形を立体提示したうえで，文字を図中の対応する部分と同じ奥行位置に提示すれば見やすい．
- (3) ソリッドモデルで表現された立体図形とタイトル文字を画面に同時に提示するときは，提示した図形全体の平均的な奥行量をあらわす場所として，本研究で新たに定義した，「深さ平均位置」にタイトルを提示すれば画面が見やすい．
- (4) ソリッドモデルで表現された立体図形を回転提示し，タイトル文字と同時に提示するときは，図形が一回転する間に提示されるすべての画像の平均的な奥行量をあらわす場所とし，本論文で新たに定義した，「回転提示における深さ平均位置」にタイトルを提示すれば，画面が見やすい．

- (5) (3), (4)において、ワイヤフレームモデルで表現された図形を提示する場合には、ソリッドモデルで表現された場合の「深さ平均位置」にタイトルを提示すれば、画面が見やすい。

次に、立体提示の特長を生かした文字情報の提示方法の提案と評価を行い、以下の結論を得た。

- (1) 背景模様の中に、文字を背景から手前に浮き出させて提示する方法は、従来の平面提示の方法と比較して、文字が認識しやすく有効である。
- (2) 画面に表示した文字列の一部を、他の文字よりも手前に浮き出させて強調する方法と赤表示による強調方法を併用すれば、これらの各方法を単独で用いるよりも、強調された文字が認識しやすく、高い強調効果が得られる。

以下に各章で得られた結果をまとめる。

第3章では、立体ディスプレイに文字を読みやすく提示するための条件を検討した。提示位置の異なる7種類の画像を対象に、一対比較法による主観評価を行い、読みやすさを比較し、次の結果を得た。

- ディスプレイの表面に提示した場合が最も読み易い。
- 提示位置がディスプレイの表面から離れるほど読みにくくなる。

さらに、文字の提示位置を変化させて正誤判断課題を提示し、その回答時間を測定して、次の結果を得た。

- 視差が-1度から1度の範囲の提示位置であれば、ディスプレイの表面に提示した場合と反応時間に差がない。

第4章では、立体ディスプレイの特長を生かして効果的に文字を提示するための条件を検討をした。立体ディスプレイの特長を生かした2つの提示方法を提案し、その有効性を実験的に検討した。

まず、文字を背景模様の中に提示する場合に、文字を背景から手前に浮き出させて、読みやすく提示する方法について検討した。文字の浮出量を変化させて正誤判断課題を提示して、その反応時間を測定し、次の結論を得た。

- 背景から文字を浮き出させて提示する場合には、視差を0.18度前後として提示するのが良い。

- 背景から文字を浮き出させて提示することにより、平面提示よりも読みやすく提示することができる。

次に、画面に提示した文字列の一部を他の文字よりも手前に浮き出させて強調する方法について検討した。文字列をディスプレイの中央部に表示し、この中の一部を他よりも浮き出させて強調提示し、浮き出した文字を見つけ出すまでに要した時間を測定した。立体提示を下線や赤表示と比較し次の結論を得た。

- 立体提示は赤表示と同じ程度の探索時間である。
- 赤表示と立体提示を併用すれば、赤表示や立体提示だけの場合よりも探索時間が短くなり、高い強調効果が得られる。

第5章では、立体ディスプレイに、図形と文字を同時に提示するとき、文字を図形の前後のどの位置に提示するのが適切であるか検討した。

まず、図中に文字を入れた場合について検討した。直方体に頂点の名称を付けて提示し、画面の最も奥にある頂点の名称を確認させ、その回答時間を測定した実験の結果から、以下のことがわかった。

- 図形を立体提示すれば、平面提示の場合よりも回答時間が短く、立体図形の奥行位置を認識しやすい。
- 図形を立体提示したとき、文字を図中の対応する部分と同じ奥行位置に提示すれば、ディスプレイ画面と同じ奥行位置にそろえて提示するよりも、回答時間が短い。

次に、図形にタイトル文字を付けて提示する場合について、適切なタイト文字ルの位置を検討した結果から、以下のことがわかった。

- 画面が最も見やすいと感じられるタイトル文字の位置は、文字サイズに関係なく、深さ平均位置とよく一致する。
- タイトル文字のサイズが小さい0.7cmのときは、タイトル文字の提示位置が回答時間に影響を与えるが、1.0cmのときには影響を与えない。
- タイトル文字のサイズが0.7cmのとき、深さ平均位置またはディスプレイ画面と同じ奥行位置にタイトル文字を提示したとき、他の位置よりも回答時間が短い。

第6章では、回転提示された立体図形とタイトル文字が画面に同時に提示された動画を対象として、タイトル文字の提示に適した奥行位置を検討した。提示する図形の種類や表現モデル、図形の奥行位置、回転速度の条件を変化させて、画面が最も見やすいタイトル文字の位置を主観評価実験により測定した。その結果、画面の見やすいタイトル文字の位置に関して以下のことがわかった。

- ソリッドモデルで表現された図形を提示した場合、タイトル文字の位置は、提示画像の平均的な奥行量を表す場所として新たに定義した、深さ平均位置と良く一致する。
- ワイヤフレームモデルで表現された図形を提示した場合、タイトルの位置は、同じ図形をソリッドモデルで表現して提示したときの深さ平均位置と良く一致する。
- 回転速度が20(度/秒)と80(度/秒)で、タイトル文字の位置に差はなく、回転速度の影響は受けない。

以上の結果は、立体ディスプレイを対象とした、マルチメディア学習教材やユーザインタフェースの設計指針として有用であると考えられる。

7.2 今後の課題

立体ディスプレイの特長として、立体図形をわかりやすく提示することができる、文字情報や立体図形をディスプレイの画面の前後の奥行位置に自由に提示することができるという点があげられる。本研究では、これらの特長を生かした、見やすい提示を行うための方法について検討を行った。

マルチメディア学習教材を用いた教育では、学習者に教材に対する興味を持たせ、継続した学習が行えるようにすることが大変重要である。立体ディスプレイによる提示では、映像の意外性や面白さなどの効果により、人の興味を大きく引き付けることができるという利点もある。テーマパークや遊園地などの娯楽施設で、立体映画に大変人気があることから、その効果は十分に期待できる。立体ディスプレイによる教材提示は、従来の2次元ディスプレイを用いたものより、学習者の意欲や興味を高めることができると考えられる。

そこで、本研究で得られた成果に基づいて教材を開発し、学習者の教材に対する興味など心理的な側面も含めて、立体提示による教材提示の有効性を総合的に評価

することが、今後の課題である。

謝 辞

本研究を進めるにあたり、指導教官として懇切なる御指導と励ましの言葉を頂きました、大学院社会理工学研究科人間行動システム専攻の清水康敬教授に心から深く感謝いたします。

本研究に対して、日頃から有益な御助言とご教示を頂き、親身な御指導を頂きました、教育学開発センターの中山 実助教授に深謝いたします。

また、数々のご助言を頂きました、教育学開発センターの西方敦博助教授、人間行動システム専攻の室田真男助教授に心から感謝致します。

論文審査員として御指導を賜りました、教育学開発センターの赤堀侃司教授、人間行動システム専攻の中川正宣教授、教育学開発センターの西原明法教授に深く感謝致します。

山口大学工学部、大学院工学研究科在学中に、研究の御指導を賜りました、山口大学工学部電子工学科（現在岩手大学工学部情報工学科）の高浪五男教授、山口大学工学部知能情報システム工学科の井上克司教授に深く感謝致します。

また、日本電信電話株式会社在職中にお世話になり、数々の御指導を頂きました、通信網総合研究所の皆様に心から感謝致します。

最後に、日頃よりお世話になり、快適な研究環境を提供して下さいました、青柳貴洋助手、西郷義則技官、坂口千明技術補佐員をはじめとする清水研究室、中山研究室、西方研究室、室田研究室の皆様に感謝致します。特に、本研究を進めるにあたって、実験に協力して頂いた被験者の皆様に御礼申し上げます。

本研究に関する報告

(論文)

- [1] 重田和弘, 中山 実, 清水康敬, “立体ディスプレイを用いた文字提示の効果”, 電子情報通信学会論文誌 A, Vol.J82-A No.1, pp.158-167(1999.1).
- [2] 重田和弘, 中山 実, 清水康敬, “立体ディスプレイにおける図形と文字の提示位置と認識時間の関係”, 電子情報通信学会論文誌 A, Vol.J83-A No.3, pp.309-318(2000.3).
- [3] 重田和弘, 中山 実, 清水康敬, “立体提示におけるタイトル文字の奥行位置の検討”, 電子情報通信学会論文誌 A (投稿中).

(国際会議)

- [1] Kazuhiro Shigeta, Minoru Nakayama, and Yasutaka Shimizu, “A Study of the Presentation Position for a Title and a 3D Object on a 3D Display,” Proceedings of The Sixth International Display Workshops, pp.1067-1070(1999.12).

(口頭発表)

- [1] 重田和弘, 中山 実, 西方敦博, 清水康敬, “立体ディスプレイにおける文字提示の検討”, 電子情報通信学会総合大会, D-698(1996.3).
- [2] 重田和弘, 中山 実, 西方敦博, 清水康敬, “2眼式立体ディスプレイにおける文字提示条件の認知的考察”, 電子情報通信学会技術研究報告, ET96-64(1996.9).
- [3] 重田和弘, 中山 実, 西方敦博, 清水康敬, “立体ディスプレイにおける文字の立体表示の効果”, 日本教育工学会第12回大会, I1a3A3(1996.11).

- [4] 重田和弘, 中山 実, 西方敦博, 清水康敬, “立体ディスプレイにおける効果的な文字提示の検討”, 電子情報通信学会総合大会, D-15-48(1997.3).
- [5] 重田和弘, 中山 実, 清水康敬, “文字検索課題における立体表示の効果”, 教育工学関連学協会連合第5回全国大会, I1C21n1(1997.9).
- [6] 重田和弘, 中山 実, 清水康敬, “立体提示による文字強調の効果”, 電子情報通信学会技術研究報告, ET97-64(1997.10).
- [7] 重田和弘, 中山 実, 清水康敬, “立体ディスプレイにおける文字強調の検討”, 電子情報通信学会総合大会, D-15-41(1998.3).
- [8] 重田和弘, 中山 実, 清水康敬, “立体提示における図形と文字の提示位置と認識時間の関係”, 日本教育工学会第14回全国大会, 2pA02-9(1998.9).
- [9] 重田和弘, 中山 実, 清水康敬, “立体ディスプレイを用いた図形提示におけるタイトル位置の検討”, 電子情報通信学会総合大会, D-15-13(1999.3).
- [10] 重田和弘, 中山 実, 清水康敬, “立体ディスプレイにおける図形と文字の提示位置に関する考察”, 電子情報通信学会技術研究報告, ET99-23(1999.6).
- [11] 重田和弘, 中山 実, 清水康敬, “立体ディスプレイを用いた動画提示におけるタイトル位置の検討”, 日本教育工学会第15回全国大会, 1aG-07(1999.10).

(その他)

- [1] 重田和弘, 井上克司, 高浪五男, 谷口 弘, “木の網目構造を用いた最短対問題解法アルゴリズム”, 電気四学会中国支部連合大会, No.102114(1986.10).
- [2] 重田和弘, 井上克司, 高浪五男, “SCC ネットワークを用いた並列計算機上でのConvex-hullアルゴリズム”, 電気四学会中国支部連合大会, No.112306(1988.10).
- [3] 重田和弘, 斎藤 勲, “端末移動を考慮した可変アドレッシング方式”, 電子情報通信学会春季大会, B-404(1989.3).
- [4] 重田和弘, 高野 誠, 斎藤 勲, “通信システムにおける分散データ配置方式”, 情報処理学会研究報告, DPS-45-13(1990.5).

- [5] 重田和弘, 高野 誠, “分散システムにおける処理割付方式の検討”, 電子情報通信学会春季大会, B-592(1991.3).
- [6] 神辺元司, 重田和弘, 高野 誠, 松尾直樹, “ネットワーク構成データ管理方式の検討”, 電子情報通信学会春季大会, B-569(1992.3).
- [7] 重田和弘, 高野 誠, 永井直文, “コネクションの重要度を考慮した ATM 輻輳制御方式の検討”, 電子情報通信学会春季大会, B-480(1993.3).
- [8] 重田和弘, 高野 誠, 永井直文, “ATM 構内通信システムにおけるセル優先制御方式の検討”, 電子情報通信学会秋季大会, B-428(1993.9).

参考文献

- [1] 長峰和仁, 中山 実, 清水康敬, “メンタルローテーションへの立体テレビ提示の効果”, 電子情報通信学会論文誌 A, vol. J-75-A, no. 2, pp. 218–225, 1992.
- [2] T. Shimizu, S. Yano, and T. Mitsuhashi, “Objective evaluation of 3-D wide-field effect by human postural control analysis,” Proc. SPIE, vol.1666, pp.457–464, 1992.
- [3] S.K. Card, G.G. Robertson and J.D. Mackinlay, “The information visualizer, an information workspace,” Proc. CHI’91: Human Factors in Computing Systems, pp.181–188, 1991.
- [4] G.G. Robertson, J.D. Mackinlay and S.K. Card, “Cone trees: Animated 3D visualizations of hierachical information,” Proc. CHI’91: Human Factors in Computing Systems, pp.189–194, 1991.
- [5] R. Skerjanc and S. Pastoor, “New generation of 3-D desktop computer interfaces,” Proc. SPIE, vol.3012, pp.439–447, 1997.
- [6] インプレス編集部, “CD-ROM で見るパソコン入門,” インプレス, 東京, 1995.
- [7] 半田 毅, 山路康貴, 中島 守, 井藤良温, 竹内嗣昇, “エンジン学習での三次元グラフィックス教材の開発,” 電子情報通信学会技術研究報告, ET98-141, 1999.
- [8] 畑田豊彦, “疲れない立体ディスプレイを探る”, 日経エレクトロニクス誌, no. 444, pp. 205–223, 1988.
- [9] 山之上裕一, 湯山一郎, “立体画像における大きさの歪と撮像条件の関係,” テレビジョン学会誌, vol.48, no.10, pp.1284–1292, 1994.

-
- [10] 磯野春雄, 安田 稔, 瀬戸茂之 “時分割立体視の融合特性”, 電子情報通信学会技術研究報告, MBE87-56, pp. 25-30, 1987.
- [11] 泉 武博監修, NHK 放送技術研究所編, “3 次元映像の基礎”, オーム社, 東京, 1995.
- [12] 山之上裕一, 矢野澄男, “立体画像における撮像条件と箱庭効果,” 電子情報通信学会誌, vol.79, no.5, pp.485-489, 1996.
- [13] 山之上裕一, 永山 克, 尾藤峯男, 棚田 詢, 元木紀雄, 三橋哲雄, 羽島光俊, “立体ハイビジョン撮影における左右画像間の幾何学的ひずみの検知限・許容限の検討,” 電子情報通信学会論文誌 D-II, vol.J80-D-II, no.9, pp.2522-2531, 1997.
- [14] 石樽康雄, 大塚作一, 金次保明, 吉田辰夫, 臼井支朗, “ステレオ表示における奥行き知覚ひずみとその防止方法”, テレビジョン学会誌, vol. 50, no. 9, pp. 1256-1267, 1996.
- [15] 安居院猛, 長尾智晴, 山崎龍次, 中嶋正之, “2 眼式立体画像のためのステレオクリッピング”, テレビジョン学会誌, vol. 45, no. 1, pp. 94-100, 1991.
- [16] D.F. McAllister (Editor), “Stereo Computer Graphics and Other True 3D Technologies (Princeton Series in Computer Science),” Princeton University Press, Princeton, 1993.
- [17] T. Takeda, K. Hashimoto, N. Hiruma, and Y. Fukui, “Characteristics of accommodation toward apparent depth,” Vision Research, vol.39, pp.2087-2097, 1999.
- [18] 安達恒夫, 宮原 誠, 大和淳二, “2 眼式立体画像における “箱庭”, “書き割り” 現象の解析”, テレビジョン学会技術報告, 40-8, pp. 33-40, 1993.
- [19] 比留間伸行, 福田忠彦, “調節応答から見た両眼融合式立体画像の観視条件”, 電子情報通信学会論文誌 D-II, vol. J73-D-II, no. 12, pp. 2047-2054, 1990.
- [20] 井上哲理, 野呂影勇, 岩崎常人, 大頭 仁, “視覚機能から見た立体映像の呈示条件”, テレビジョン学会誌, vol. 48, no. 10, pp. 1301-1305, 1994.
- [21] 三橋哲雄, “CFF の測定・解析法とテレビ観視者の疲労に関する一検討”, 電子情報通信学会論文誌 A, vol. J-77-A, no. 12, pp. 1768-1776, 1994.

- [22] 機械システム振興協会, “「3次元映像の生体影響総合評価システム開発に関するフイービリティスタディ」報告書”, 日本電子機械工業会, 1999.
- [23] 高柳恒夫, 中山 実, 清水康敬, “コンピュータディスプレイにおける平仮名文字の読みやすさ”, 電子情報通信学会論文誌 A, vol. J-76-A, no. 5, pp. 774-776, 1993.
- [24] 日本工業規格, “JIS X 6041 業務用陰極線管表示装置及びけん盤”, 1987.
- [25] 日本工業規格, “JIS Z 8513 人間工学-視覚表示装置を用いるオフィス作業-視覚表示装置の要求項目”, 1994.
- [26] K. Nakayama and G.H. Silverman, “Serial and parallel processing of visual feature conjunctions,” *Nature*, vol.320, pp.264-265, 1986.
- [27] 大越孝敬, “三次元画像工学”, 朝倉書店, 東京, 1991.
- [28] 田崎京二, 大山 正, 樋渡涓二, “視覚情報処理”, 朝倉書店, 東京, 1979.
- [29] 中島義明, “映像の心理学”, サイエンス社, 東京, 1996.
- [30] 林部敬吉, “心理学における3次元視研究”, 酒井図書, 東京, 1995.
- [31] 廣瀬通孝, “バーチャル・リアリティ”, 産業図書, 東京, 1993.
- [32] 増田千尋, “3次元ディスプレイ”, 産業図書, 東京, 1990.
- [33] 安居院猛, 中嶋正之, 羽倉弘之, “ステレオグラフィックス&ホログラフィ—ザ3D(THE THREE DIMENSIONS)—”, 秋葉出版, 東京, 1985.
- [34] 志和新一, 大村克之, 岸野文郎, “焦点調節を補償する立体表示3DDAC”, テレビジョン学会誌, vol. 50, no. 5, pp. 570-576, 1996.
- [35] 乾 敏郎, “認知心理学1 知覚と運動”, 朝倉書店, 東京, 1991.
- [36] 魚森譲也, 山田光穂, “立体・奥行き知覚”, テレビジョン学会誌, vol. 48, no. 12, pp. 1502-1508, 1994.
- [37] 磯野春雄, 安田 稔, “時分割立体視の成立条件”, テレビジョン学会誌, vol. 41, no. 6, pp. 549-555, 1987.

-
- [38] C. W. Tyler, "Cyclopean Vision, in Vision and Visual Dysfunction vol.9:Binocular Vision, ed. D. Regan", pp. 38-74, CRC Press, Boca Raton, 1991.
- [39] K. N. Ogle, "On the limits of stereoscopic vision", Journal of Experimental Psychology, vol. 44, pp. 235-259, 1952.
- [40] 畑田豊彦, "三次元画像技術 立体視の心理・生理", 電気学会論文誌 C, vol. 112-C, no. 4, pp. 209-215, 1992.
- [41] 長田昌次郎, "両眼式立体画像観視における両眼融合限界の画角および視距離依存特性", テレビジョン学会誌, vol. 43, no. 3, pp. 276-281, 1989.
- [42] H.Kusaka, "Apparent depth and size of stereoscopically-viewed images", Proc. SPIE, vol. 1666, pp. 476-482, 1992.
- [43] 大串健吾, 中山 剛, 福田忠彦, "画質と音質の評価技術", 昭晃堂, 東京, 1991.
- [44] 御領 謙, "読むということ (認知科学選書 5)," pp.121-149, 東京大学出版会, 東京, 1987.
- [45] U. Neisser, "Decision-time without reaction-time: Experiments in visual scanning," American Journal of Psychology, pp.376-385, 1963.
- [46] 森田寿哉, 比留間伸行, 三橋哲雄, 元木紀雄, "両眼融合式立体画像における大きさの知覚と輻輳運動," テレビジョン学会誌, vol.50, no.9, pp.1300-1310, 1996.
- [47] 重田和弘, 中山 実, 清水康敬, "立体ディスプレイを用いた文字提示の効果," 電子情報通信学会論文誌 A, vol.J82-A, no.1, pp.158-167, 1999.