

〔非公開〕

T R - M - 0 0 1 2

焦点調節補償型立体表示装置の補償特性評価

大 村 克 之  
Katsuyuki OMURA

志 和 新 一  
Shinichi SHIWA

宮 里 勉  
Tsutomu MIYASATO

1 9 9 6 . 9 . 3 0

A T R 知能映像通信研究所

# 焦点調節補償型立体表示装置の補償特性評価

大村 克之, 志和 新一, 宮里 勉  
ATR 知能映像通信研究所

## Study of Accommodative Compensation Effects by 3DDAC (3D Display with Accommodative Compensation)

Katsuyuki Omura, Shinichi Shiwa, Tsutomu Miyasato  
ATR Media Integration & Communications Research Laboratories

### あらまし

我々が提案した焦点調節補償型立体表示装置の概要を述べ、提案した焦点調節補償の優位性を評価するために、(1)実物と立体表示オブジェクトが混在した場合に必要な焦点調節補償範囲、に注目して2つの実験を行い考察した。その結果、ストライプ指標を用いた場合およびランダムドットステレオグラム指標を用いた場合ともに、同じ奥行きに同時に存在する実体オブジェクトと指標を同時に良好に観察するためには、焦点調節が焦点深度程度に補償されている必要があることを確認した。

さらに、(2)オブジェクトの奥行きが動的に変化した場合の両眼融合時間、に注目してランダムドットステレオグラムをオブジェクトとして、提案したシステムの評価を行った。その結果、ランダムドットステレオグラムによる仮想オブジェクトの奥行きが時間的に変わる場合、焦点調節補償を行った方が、融像時間の短縮が認められ、提案したシステムでは両眼立体視映像の観察が容易という点で優位であることが検証できた。

### Abstract

Overviews of the 3D display with accommodative compensation we proposed are shown, and some experimental results are discussed to evaluate the advantage of the accommodative compensation in binocular stereoscopic display we proposed based on, (1) required range for accommodative compensation to obtain satisfactory view with real objects and virtual objects. By these results, it is found that the accommodation should be compensated as the same order as a focal depth of a human eye to obtain satisfactory view.

Experimental results based on, (2) fusional time to fuse a random dot stereogram, are also discussed. By these results, decrease of fusional time caused by the accommodative compensation in such a case that the disparity of a random dot stereogram is temporary varying, is obtained. Therefore, it is found that the 3D display with accommodative compensation we proposed has the advantage of easiness for observing stereoscopic images.

## 1. まえがき

我々は、遠隔地にいる人間があたかも対面しているかのような感覚でコミュニケーションできる環境を生成するための研究を行っている。高い臨場感を持った立体表示技術は、これを実現する上で重要な要素技術となる[1]。我々はレンティキュラスクリンを用いた立体表示装置をはじめとして、両眼立体視方式ディスプレイシステムの研究を行ってきた[2-3]。

一方でホログラフィをはじめとした体積表示方式ディスプレイの研究も盛んに行われている。従来、ホログラフィ方式ディスプレイでは大画面化、高精細化および動画像再生等において技術的困難があった。しかし近年、光音響素子を用いて高密度な1次元素子を光学的に走査する方法や[4]、高密度な小型液晶パネルにホログラムを直接記録再生する、ビデオとのハイブリッドシステム[5]等が提案され動画像化をはじめとして、活発な研究が行われている。

高い臨場感を持つ表示系では、観察者を取り囲む視覚刺激すなわち光波面（複素振幅）の忠実な再生が可能な系が理想的である。立体知覚に関与する視覚刺激を忠実に再生できる系が、原理的にホログラフィ方式ディスプレイであることは既に知られている。しかし観察者に高い臨場感を与える大画面、高精細画像の生成をこの方式で実現するためにはキーデバイスの出現を待たねばならず、先の技術と言える。よって我々がめざす、高い臨場感を与える立体表示系では当面、両眼立体視方式が有望な技術であると考ええる。

両眼立体視方式の立体ディスプレイは多くの方式が研究され、必要なキーデバイス技術も大きく進歩してきた。特にアミューズメント用途では、高い臨場感を与えるシステムが実用化され、偏光眼鏡をかける方式をはじめとして、一般でも多く目にすることができる。これらシステムでは演出効果のため、立体の飛び出し量が多い場合が多い。ところがこのような立体画像を長時間観察した場合、観察者に眼精疲労が認められることが報告されている[6]。

図1に両眼立体視系で立体表示を行った場合の輻輳と調節の関係を示す。ディスプレイ面からオブジェクトが飛び出して表示されている場合、観察者の両眼の輻輳により融像して知覚される距離を $D_c$ 、観察者から表示オブジェクトまでの光学長すなわちディスプレイまでの距離を $D_a$ とする。オブジェクトがディスプレイ面位置と一致する奥行きに表示される場合、輻輳距離 $D_c$ と焦点調節距離 $D_a$ は一致し、実物を観察する場合と等しい。ところがオブジェクトがディスプレイ面以外の奥行きに表示された場合、 $D_c$ と $D_a$ は一致せず視差 $d$ が生じ、これが疲労感・違和感の原因と考えられている。

両眼立体視による両眼視差刺激変化が与えられた場合、輻輳変化と焦点調節は連動していることが知られている。しかしディスプレイ面位置は変化しないため、この焦点調節変化によって網膜にボケを生じる。この時、眼球の調節制御系が働き焦点調節変化を押し戻そうとする。疲労感、違和感はこの動作が大きく関わっていると考えられている[7]。両眼立体視により輻輳変化のみを与えた場合、焦点調節の値の変化は眼の焦点深度とほぼ一致する値で飽和することが実際に測定されている[8]。このように両眼立体視系では実際の視覚刺激のうち、輻輳と調節の関係が原理的に保存されない。これは立体画像を長時間観察する可能性がある表示系では、観察者にとって大きな負担となる。

また、実物と両眼立体視によるオブジェクトが混在したシーンにおける、実物による仮想物体融像の妨害の検討では、オクルージョンの矛盾などの理由により、融像時間が増加したと報告されている。[9]。

我々はこの焦点調節を輻輳に応じて補償した、新しい焦点調節補償型立体表示装置を既に提案した[10-11]。本論文では我々が提案した立体表示装置の概要と、焦点調節補償機能の有効性について、(1)実物と立体表示オブジェクトが混在した場合に必要な焦点補償範囲、(2)オブジェクトの奥行きが動的に変化した場合の両眼融像時間、に注目して評価したので報告する。

## 2. ディスプレイシステムの原理

ディスプレイシステム原理の概念図を図2に示す。両眼立体視方式のディスプレイではディスプレイ面と同じ奥行きに表示されているオブジェクト（オブジェクトB）を注視する場合、注視点で輻輳と焦点調節は一致し視差は発生しない。これは実物を観察する場合と等価であり、違和感・疲労感はない。ところがディスプレイ面と異なる奥行きに表示されたオブジェクト（オブジェクトB）を注視する場合、両眼はオブジェクトに輻輳するが焦点はディスプレイ面に調節されるため、輻輳と焦点調節が一致せず視差を生じる。そこで、観察者の注視点を常に検出し、注視オブジェクトに対する輻輳と同じ奥行きにディスプレイ面を常に移動する。これにより表示オブジェクトの奥行き変化がある場合でも、常に観察者の輻輳と焦点調節を補償した立体表示が可能となる。

ディスプレイ面を移動する方式として、ディスプレイ面の縮小実像をリレー光学系により形成し、観察レンズによりこの縮小実像の虚像を観察する方法を用いた。図3にディスプレイシステムの構成を示す。縮小実像形成位置の移動はリレーレンズをモーターにより移動することで行った。その結果、虚像は観察レンズ位置から無限遠まで移動させることができる。左右眼それぞれの映像を表示する2台の17インチCRTディスプレイを光路分割された光学系により接眼レンズで観察する構成となっている。2台のCRTディスプレイ画面は反転光学系およびリレーレンズを経由して、正立縮小実像として接眼レンズ焦点付近に結像、像形成される。リレーレンズはモーターにより計算機制御で移動可能で、正立縮小実像形成位置を変化させることにより、CRTディスプレイの見かけの光路長のみ、すなわち焦点調節のみを制御することが可能となる。観察映像はCGとして各々のCRTに表示される。CG生成および焦点調節系の制御はSilicon Graphics社のグラフィックワークステーションを用いた。

## 3. 評価の概要と目的

提案した立体表示装置の焦点調節補償機能の有効性を検証するために、以下に示す2点に注目して評価実験を行う。

第1に、同じ奥行きにある実物（以下、実体オブジェクト）と両眼立体視により表示されたオブジェクト（以下、仮想オブジェクト）を同時に観察する場合を考える。従来方式の立体ディスプレイでは、ほとんどの場合両オブジェクトは異なる光学的距離にあり、これらを同時に良好に観察するためには困難さや違和感をともなう。このとき、仮想オブジェクトの光学的距離を奥行きに合わせて実体と一致させ、困難さや違和感を抑えるために、本方式では焦点調節補償は非常に有効に機能すると期待される。従って従来方式では実体オブジェクトを注視すると、仮想オブジェクトがぼけて鮮明に見えなくなる場合でも、焦点調節補償により両方のオブジェクトが鮮明に観察できる効果が期待される。ここでは両オブジェクトを同時に良好に観察するために必要な焦点調節補償の範囲を測定し、その有効性を検証する。

第2に輻輳と焦点調節の連動関係に注目する。実物を観察する場合、輻輳と焦点調節は一致した連動関係にある。ところが従来の両眼立体視ではオブジェクトの奥行きがディスプレイ位置以外に表示される場合、輻輳と焦点調節の不一致により、実物を観察する場合の連動関係と異なる動きを眼は強いられる。そのため観察困難や違和感が発生するといわれている。焦点調節補償は調節を輻輳と一致させ、これを抑えるために非常に有効に機能すると期待される。

具体的な検討方法を図4に示す。図4(a)は同じ奥行きにある実体オブジェクトから仮想オブジェクトに視点を移動する場合を示す。ディスプレイ位置が仮想オブジェクトの奥行きと一致しない場合、従来の両眼立体視方式では視点移動のときに、輻輳は変化しないが焦点調節だけが変化するという眼の動きを強いられる。図4(b)は仮想オブジェクトの奥行きが動的に変化する場合を示す。従来の両眼立体視では焦点調節をディスプレイ面に固定したまま、輻輳のみを奥行き変化に合わせて動かすとい

う目の動きを強いられる。

これらの動作は輻輳・調節の連動関係を不安定にし、実物を観察する場合に比べて融像時間が増大すると考えられる。これに対し、提案した焦点調節補償は輻輳・調節の連動関係を安定にし、容易にオブジェクトを融像することが可能となることが期待される。そこで輻輳と焦点調節が一致して変化する映像提示と、不一致の状態に変化する映像提示を観察者に与え、その映像を融像するまでの時間を測定し指標とすることで、焦点調節補償の有効性を検証する

#### 4. 焦点補償範囲の測定

##### 4.1. 実験方法

実体オブジェクトを観察する輻輳と調節を生じている両眼の状態を、図5に示すように仮想オブジェクトを観察するために前述のディスプレイシステム接眼レンズ前面に透明プラスチック板を設置し、この先に実体オブジェクトを設置した。観察者には仮想オブジェクトと実体オブジェクトが同時に観察される。実体オブジェクトと仮想オブジェクトは観察者に同じ奥行き感（輻輳）を与える位置に設定した。実体オブジェクトには発光させたペンライトの先端を用いた。仮想オブジェクトは、オブジェクトが良好に観察できたとする指標として、(1)指標が鮮明に観察できること、および(2)両眼映像が良好に融像できること、を判断できることを考慮して、以下に示す指標を用いた。

第1に、映像が鮮明に観察できることを判断する仮想オブジェクトとして、図6に示すストライプ指標を用いた。指標は水平方向視野角約 $40^\circ$ 、垂直方向視野角約 $30^\circ$ の白黒からなるランダムドットパターンの上に、水平視野角約 $12^\circ$ 、垂直視野角約 $9.6^\circ$ の矩形パターンを重ねて表示した。矩形パターン上に垂直方向周期約 $5'$ の白黒ストライプ上の周期パターンを表示しストライプ指標とした。このストライプ指標と背景となるランダムドットパターンにそれぞれ両眼視差を与えて、図7に示す奥行き配置となるように表示した。ストライプパターンには、実物オブジェクトと同じ奥行き ( $D_p$ ) に常に配置されるように視差を与えた。この状態で実体オブジェクトおよび仮想オブジェクト (ストライプパターン) の奥行き ( $D_p$ ) を変えて、焦点調節刺激 (ディスプレイ位置  $D_d$ ) のみを変化させ、両オブジェクトを観察する。観察者には実体オブジェクトを注視するように指示した。これは実体オブジェクトと焦点調節のみが異なる仮想オブジェクトを、実体オブジェクトを見るときと等価な輻輳と調節の状態を観察させるためである。このとき仮想オブジェクト上の周期パターンが鮮明に観察できたかどうかを回答させた。

第2に、両眼映像が良好に融像できることを敏感に判断する仮想オブジェクトとして、図8に示すランダムドットステレオグラム指標を用いた。指標は水平方向視野角約 $40^\circ$ 、垂直方向視野角約 $30^\circ$ の白黒からなるランダムドットパターン(a)の上に、水平視野角約 $12^\circ$ 、垂直視野角約 $9.6^\circ$ のランダムドットパターン(b)を重ねて表示した。このランダムドットパターンに両眼視差を与えて、図9に示す奥行き配置となるように表示した。ランダムドットパターン(b)には、実物オブジェクトと同じ奥行き ( $D_p$ ) に常に配置されるように視差を与えた。ランダムドットステレオグラムを用いた研究では指標水平視野角 $12^\circ$ では数度以下の相対視差のパターンは十分安定に融像できると報告されている [12]。これを考慮し背景ランダムドットパターン(a)はランダムドットパターン(b)に対して、常に相対視差で $0.5^\circ$ 後方に知覚される位置に配置しステレオグラムとした。この状態で実体オブジェクトおよび仮想オブジェクト (ランダムドットパターン(b)) の奥行き ( $D_p$ ) を変えて、焦点調節刺激 (ディスプレイ位置  $D_d$ ) のみを変化させ、両オブジェクトを観察する。

観察者には実体オブジェクトを注視するように指示した。これは実体オブジェクトと焦点調節のみが異なる仮想オブジェクトを、実体オブジェクトを見るときと等価な輻輳と調節の状態を観察させるためである。このとき仮想オブジェクトであるランダムドットステレオグラムが融像し、奥行きが良好に観察できたかどうかを被験者に回答させた。表1に被験者の条件を示す。

## 4.2. 実験結果

表1のうち被験者OKYに対する実験1の測定結果を図10、実験2の測定結果を図11に示す。横軸は表示した仮想オブジェクトおよび実体オブジェクトの奥行き、縦軸は仮想オブジェクトに与えた焦点調節刺激（ディスプレイ位置Dd）である。破線は眼の焦点深度を $\pm 0.3D$ とした場合の焦点深度[13]を示している。○および×は図10では、(1)仮想オブジェクトである矩形パターン上のストライプを鮮明に観察できた場合、およびできなかった場合、図11では、(2)仮想オブジェクトであるランダムドットステレオグラムが融像でき、奥行きが良好に観察できた場合、および観察できなかった場合、を示している。

## 4.3. 考察

仮想オブジェクトに実体オブジェクトを重ねて表示し、実体オブジェクトを注視するように指示することによって、実体オブジェクトと焦点調節のみが異なる仮想オブジェクトを、実体オブジェクトを見るときと等価な輻輳・調節の状態を観察させた。この結果、ストライプ指標を用いた実験では仮想オブジェクトのディスプレイ位置が輻輳距離からはずれた場合、仮想オブジェクトに焦点ボケが生じ鮮明に見えなくなることがわかった。例えば2m先に設置されたディスプレイ面に対して、手を伸ばして掴むことができる450mm程度の奥行きに、焦点調節補償をしない従来方式で仮想オブジェクトを表示した場合、同じ奥行きに存在する実体オブジェクトと同時に鮮明に観察することができない。これらを良好に観察するためには2m先のディスプレイ面を少なくとも300mmから600mm程度の範囲内に焦点調節補償する必要があることを図10は示している。

また鮮明に見えなくなる範囲は眼の焦点深度とほぼ同様の分布をしていることがわかった。図10,11に示した焦点深度の上限と下限は瞳孔解散時の値とされている。しかし実際に有限の輝度を持つオブジェクトを観察している本実験の場合、瞳孔は絞り込まれる方向にあり、焦点深度は更に深くなっていることが予想される。実験で用いた実体オブジェクトは高輝度のペンライトの光であることから、より低輝度の実体および仮想オブジェクトの場合は、鮮明に見える範囲は狭くなり、図10, 11, の焦点深度（破線）に近づくと考えられる。また実験で用いた指標はストライプ周期が約5'であり眼の空間解像度に比べ、十分低い空間周波数の指標である。眼の空間解像度は網膜上もっとも高い部位で0.5程度[14]とされているので、5'より十分高い空間周波数を持つオブジェクトを観察する場合、鮮明に観察することができるディスプレイ位置Ddの範囲はさらに狭くなると予想される。従ってより高解像度なストライプ指標を用いると焦点深度の特性により近づくと考えられる。

次にランダムドット指標を用いた実験で、仮想オブジェクトが鮮明に観察される範囲は、焦点深度とほぼ同様の領域であることが認められた。この融像範囲はストライプ指標での実験結果で示された、焦点ボケが発生しない範囲に比べて若干狭くなっているが、ほぼ同様の傾向が認められた。これはランダムドットステレオグラムによる仮想オブジェクトでも、このディスプレイ位置が輻輳距離からはずれた場合、仮想オブジェクトに焦点ボケが生じ、ランダムドットパターンを鮮明に解像できない減少が生じたためと考えられる。

## 5. ランダムドットステレオグラムによる融像時間測定実験

### 5.1. 概要

輻輳と焦点調節が変化する画像提示を以下に示す2つの条件で提示し、融像時間の測定実験を行う。

第1の実験の概念図を図12に示す。はじめに基準刺激として輻輳と調節が一致したオブジェクト

を提示する。次に基準刺激として同じ奥行きにある指標刺激（ランダムドットステレオグラム）を提示する。このとき焦点調節すなわちディスプレイ位置を常にランダムドットステレオグラムの奥行きと一致させる場合（補償モード）と、常に一定距離2mに固定する場合（従来モード）の2種類の提示を行う。それぞれの提示モードで、オブジェクトを提示する奥行きを変化させ、ランダムドットステレオグラムが提示されてから融像するまでの時間を測定する。従来モードではランダムドットステレオグラムが提示されたときに、焦点調節が変化するため輻輳の変化が引き起こされ、輻輳・調節の関係が不安定になり、融像時間の増大が予測されるが、補償モードでは補償の効果により輻輳と調節は一致が保たれ、融像時間の変動は少ないことが期待される。この実験は、実体オブジェクトから同じ奥行きにある仮想オブジェクトに視点を移動する場合、と対応する。

第2の実験の概念図を図13に示す。はじめに基準刺激として固定された奥行き2mに輻輳と調節が一致した仮想オブジェクトを提示する。次に指標刺激としてランダムドットステレオグラムを、ある奥行きに融像するように表示する。このときディスプレイ位置を常にランダムドットステレオグラムの融像位置と一致させる場合（補償モード）と、常に融像位置と一致させずに一定距離2mに固定する場合（従来モード）の2種類の提示を行う。それぞれの提示モードで、仮想オブジェクトを提示する奥行きを変化させ、提示されてから融像するまでの時間を測定する。ランダムドットステレオグラムが提示されたときに、もしそれが基準刺激と奥行きが異なれば輻輳が変化しなくてはならない。このとき従来モードでは眼は焦点調節を2m先のディスプレイ面に固定したままなので、その状態では輻輳を修正するのに時間がかかる。これに対し補償モードでは、ランダムドットへの焦点調節により輻輳が引き寄せられ、より短時間で融像すると期待される。

## 5.2. 実験1

基準刺激および指標刺激の提示シーケンスを図14に示す。基準刺激と指標刺激を交互に5sec表示する。基準刺激の後に提示される指標刺激が表示されてから融像するまでの時間を毎回測定する。

基準刺激は観察者より2mの位置から始めて1.3m（視差 $1^\circ$ ）、1.0m（視差 $2^\circ$ ）と段階的に視差 $1^\circ$ ずつ20cm（視差 $16^\circ$ ）まで近づけた。観察者には、指標刺激が提示された段階で、ランダムドットステレオグラムにより表現された立体感が知覚されたらマウスをクリックするように指示した。

基準刺激（写真）は焦点調節の変化を引き起こすために提示した。従って容易にしかも確実に融像できるものでなくてはならず、本検討では自然風景画像を用いた。指標刺激は前節図8に示したランダムドットステレオグラム用いた。

## 5.3. 実験結果

図15(a),(b)に測定結果を示す。被験者は2名で計3回ずつ測定を行い平均値をプロットした。■は焦点調節補償をしていない場合（従来モード）、●は補償した場合（補償モード）である。被験者OKY, SSIともに補償モードでは視差が増大しても、融像時間1secでほぼ一定値を示した。従来モードでは、指標視差が $0^\circ$ では1secであるのに対し、視差 $16^\circ$ で3sec程度まで増大した。

## 5.4. 考察

基準刺激提示時には融像の幾何学的手がかりがある刺激を提示しているので、観察者の眼は良好に輻輳、調節が成されていると考えられる。この時点で、補償モードでは基準刺激からこれと同じ輻輳とディスプレイ位置にある指標刺激に切り替えられる。よって刺激が切り替わる段階で、観察者の目は焦点調節、輻輳ともに変化させる必要がない。そのため視差が増大しても融像時間は短く一定となったと考えられる。ところが従来モードでは指標刺激は2m先のディスプレイ面に表示されたまま

であり、基準刺激を観察した状態から焦点調節をやり直す必要がある。その結果輻輳変化が誘発されて一旦正しい輻輳条件から離されてしまう。そのため融像時間が増大した。

### 5.5. 実験2

基準刺激および指標刺激の提示シーケンスを図16に示す。基準刺激と指標刺激を交互に5sec表示する。基準刺激の後に提示される指標刺激が表示されてから融像するまでの時間を毎回測定する。

基準刺激は毎回観察者より2mの位置に表示した。指標刺激は観察者より2mの位置から始めて1.3m（視差 $1^\circ$ ）、1.0m（視差 $2^\circ$ ）と段階的に視差 $1^\circ$ ずつ20cm（視差 $16^\circ$ ）まで近づけた。観察者には、指標刺激が提示された段階で、ランダムドットステレオグラムにより表現された立体感が知覚されたらマウスをクリックするように指示した。

基準刺激（写真）は輻輳の変化を引き起こすために提示した。従って容易にしかも確実に融像できるものでなくてはならず、実験1同様、自然風景画像を用いた。指標刺激は前節図8に示したランダムドットステレオグラム用いた。

### 5.6. 実験結果

図17(a),(b)に測定結果を示す。被験者は2名で計3回ずつ測定を行い平均値をプロットした。■は焦点調節補償をしていない場合（従来モード）、●は補償した場合（補償モード）である。被験者OKYでは視差ゼロでは融像時間は1secであるのに対し、視差 $16^\circ$ では従来モードでは約2.5sec、補償モードでは約1.7secを示し、補償モードで融像時間の減少が認められた。また被験者SSIでは視差ゼロでは融像時間は1secであるのに対し、視差 $16^\circ$ では従来モードでは5sec以上、補償モードでは約3.3secを示し、補償モードで融像時間の減少が認められた。またいずれの被験者でも、視差の増大に対し、補償モードでの融像時間の増大が認められた。

### 5.7. 考察

被験者OKY, SSIともに補償モードでは、従来モードに比べて融像時間の減少が認められる。眼が基準指標を注視した状態から刺激指標を注視する状態に移る場合、従来モードでは輻輳だけを変化させれば良いのに対し、補償モードでは輻輳と焦点調節の両方を変化させる必要がある。この動作を考慮した場合、従来モードの方が融像に要する時間は短いと考えられる。しかし実験結果は逆であった。

このことは以下のように考察することができる。すなわち、指標刺激提示前に基準刺激によって輻輳と調節が一致した状態にリセットされる。その後、指標刺激を観察する場合、指標はランダムドットステレオグラムであり、正しい輻輳を得るための幾何学的な手がかりがない。そのため両眼は左右画像の相関探索を行い正しい輻輳を得る。もし指標刺激の奥行きに対応した焦点調節補償が行われたならば、画像が基準刺激から指標刺激に切り替わったときに、相関探索を始める直前では、焦点調節と輻輳の連動関係によって、指標刺激の奥行き近傍に輻輳が誘発される。ところが焦点調節補償が行われていない場合、指標刺激が表示されても相関探索開始直前は基準刺激を観察するときの輻輳のままである。この相関探索の初期状態の違いが融像時間の差になったと考える。

また従来モード、補償モードともに指標刺激の視差が大きくなるにつれて融像時間が増大している。従来モードでの融像時間の増大は、上記で考察した相関探索にかかる時間の増大で説明できる。しかし補償モードでの融像時間の増大は上記考察では説明できない。刺激が提示された後、焦点調節補償によって速やかに正しい奥行き近傍に輻輳が誘発された場合、相関探索にかかる時間は視差に関わらず同程度と推定できるからである。補償モードで、指標刺激を融像するまでの眼の挙動を考える

と、以下のような説明が考えられる。すなわち、補償モードでの視差変化に対する融像時間の増大は、補償された焦点位置に焦点を合わせ直す時間と考えられる。

## 6. まとめ

提案した焦点調節補償型立体表示装置を用いて、両眼立体視における焦点調節補償の優位性について、(1)実物と立体表示オブジェクトが混在した場合に必要な焦点補償範囲、について2つの実験を行い考察した。その結果、ストライプ指標を用いた場合およびランダムドットステレオグラム指標を用いた場合ともに、同じ奥行きに同時に存在する実体オブジェクトと指標を同時に良好に観察するためには、焦点調節が焦点深度程度に補償されている必要があることを確認した。その結果、例えば2m先に設置されたディスプレイ面に対して、手を伸ばして掴むことができる450mm程度の奥行きに仮想オブジェクトを表示した場合、従来方式では同じ奥行きに存在する実体オブジェクトと同時に鮮明に観察することはできないが、提案した装置では、2m先のディスプレイ面を少なくとも300mmから600mm程度の範囲内に焦点調節補償することで鮮明に観察することができることを確認し、提案した方式ではこの範囲内に焦点調節を行えばよいことがわかった。

さらに(2)オブジェクトの奥行きが動的に変化した場合の両眼融像時間、に注目して提案したシステムの評価を行った。実体オブジェクトから仮想オブジェクトに視点を移し融像する想定条件では、従来モードでは指標視差 $0^\circ$ で融像時間が1secであるのに対し、視差 $16^\circ$ で3sec程度まで増大したが、補償モードでは視差が増大しても、1secでほぼ一定値を示し、融像時間の減少が認められた。また一定視差からの視差変化を想定した条件では、両被験者ともに視差ゼロでは融像時間は1secであるのに対し、被験者OKYでは視差 $16^\circ$ では従来モードでは約2.5sec、補償モードでは約1.7secを示し、被験者SSIでは視差 $16^\circ$ では従来モードでは5sec以上、補償モードでは約3.3secを示し、両者とも補償モードで融像時間の減少が認められた。2つの実験から、ランダムドットステレオグラムによる仮想オブジェクトの奥行きが時間的に変わる場合、焦点調節補償を行った方が、融像時間の短縮が認められ、提案したシステムでは両眼立体視映像の観察が容易という点で優位であることが検証できた。

今回は一定の限られたシーンでの、焦点ボケと融像時間に注目して提案したシステムの有効性を評価した。今後はより一般的なシーン観察時の疲労感、違和感に対する客観的評価法を探索し、本システムの有効性を評価して行きたい。

最後に本研究の機会を与えてくださった、ATR知能映像通信研究所、酒井保良会長ならびに中津良平社長に感謝し、むすびといたします。

## 参考文献

- [1] F. Kishino and K. Yamashita; "Communication with realistic sensations applied to teleconferencing", IECE Technical Report, Vol.IE-89-35, pp.1-6, 1989
- [2] N.Tetsutani, K.Omura and F.Kishino; "Wide-screen autostereoscopic display system employing head-position tracking", Opt. Eng., Vol.33, No.11, pp.3690, 1994
- [3] K. Omura, S. Shiwa and F. Kishino; "Development of Lenticular Stereoscopic Display System: Multiple Images for Multiple Viewers", SID95 Digest, pp.761, 1995
- [4] P. Hilaire, S. A. Benton, et. al. "Electronic display system for computational holograpy", proc. SPIE, 1212, 1990, pp. 174
- [5] N. Hashimoto and S. Morokawa; "Motion-Picture Holography Using Liquid-Crystal Television Spatial Light Modulators", SID95 Digest, pp. 847, 1995
- [6] 畑田, "疲れのない立体ディスプレイを探る", 日経エレクトロニクス, No.444, 1988
- [7] 畑田, 齊田. "奥行き知覚の要因とメカニズム", テレビ誌, 43, 8, pp.755, 1989
- [8] 比留間, 福田, "焦点調節応答から見た両眼融合式立体画像の観察条件", 信学論 D-II, Vol. J73, No.12, pp.2047, 1990
- [9] 桑原 他, "2眼立体表示と実物との混在表示における融像特性", テレビ学技報, 17, 38, pp.1, 1993
- [10] 志和, 大村, 岸野, "焦点調節が連動する両眼視差立体表示方式の提案", 信学会 情報システムソサイエティ大会講演論文集D-168, pp.170, 1995
- [11] 大村, 志和, 岸野, "両眼立体視ディスプレイにおける調節補償の検討", 信学技報, EID95-53 (1995-10), pp.83
- [12] 矢野, "両眼融合可能な視差の範囲 - 指標の大きさと空間周波数の変化に対する検討", 信学論 D-II, Vol.J75, No.10, pp.1720, 1992
- [13] W.N.Charman, H.Whitefoot, "Pupil diameter and the depth-of-field of the human eye as measured by laser speckle", OPTICA ACTA, 24, 12, pp.1211, 1977
- [14] 田崎他, "視角情報処理", 朝倉書店, p.234, 1979

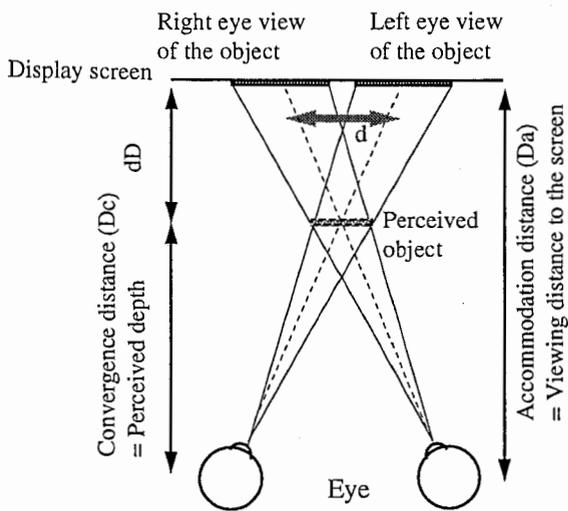


図1 両眼立体視  
Fig.1 Binocular Stereopsis

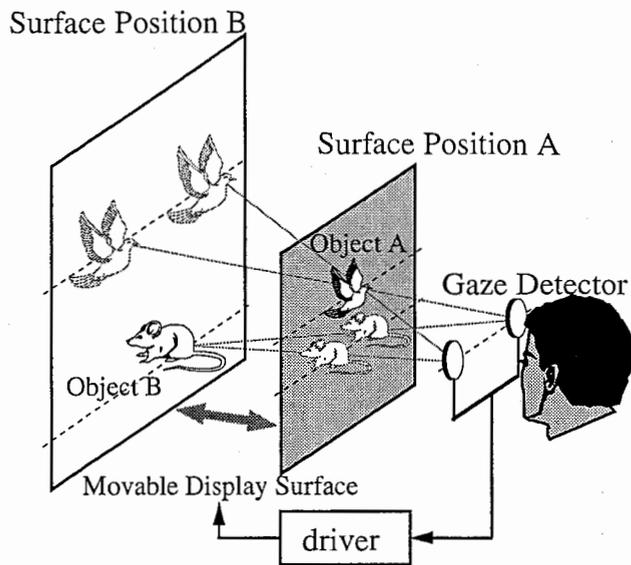


図2 ディスプレイシステム概念図  
Fig.2 Conceptual Illustration of the System

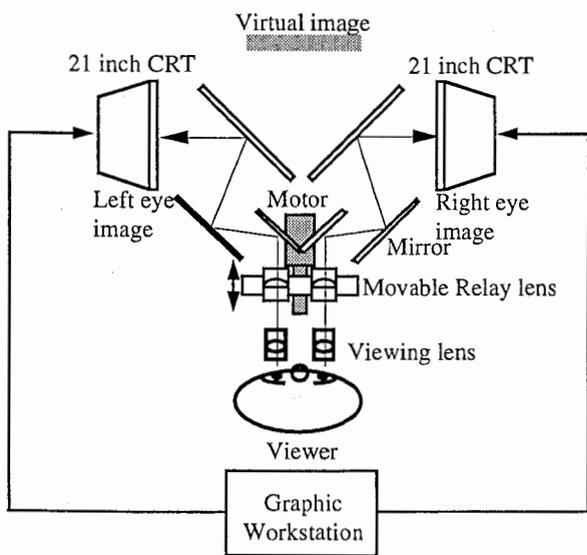
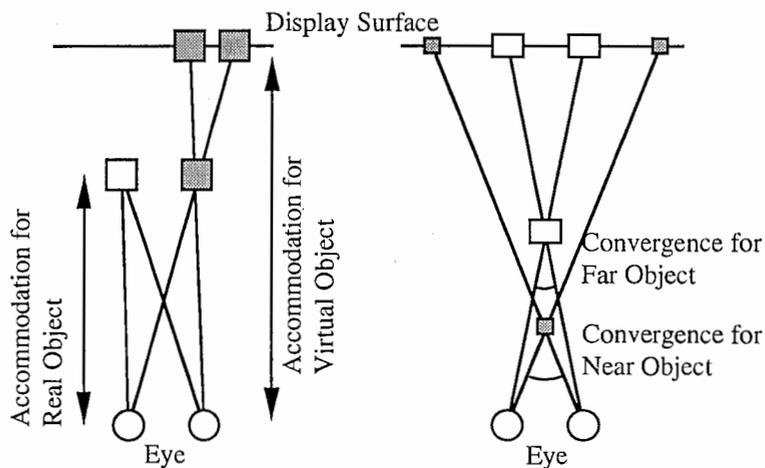


図3 ディスプレイシステム構成  
Fig. 3 Schematic Setup of the System



(a) Varying the Accommodation while fixing the Convergence.

(b) Varying the the Convergence while fixing the Accommodation.

図4 輻輳と焦点調節の不一致  
Fig.4 Inconsistency Relationship between Accommodation and Convergence

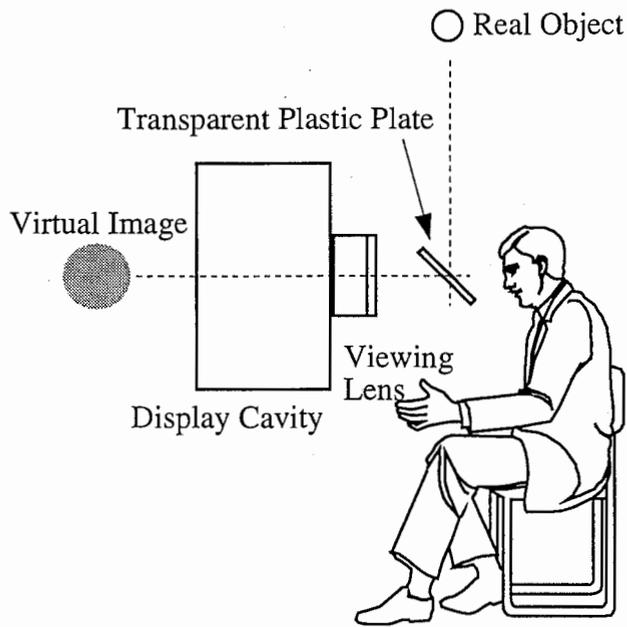


図5 実験系配置  
Fig.5 Geometrical Setup of the Experiment

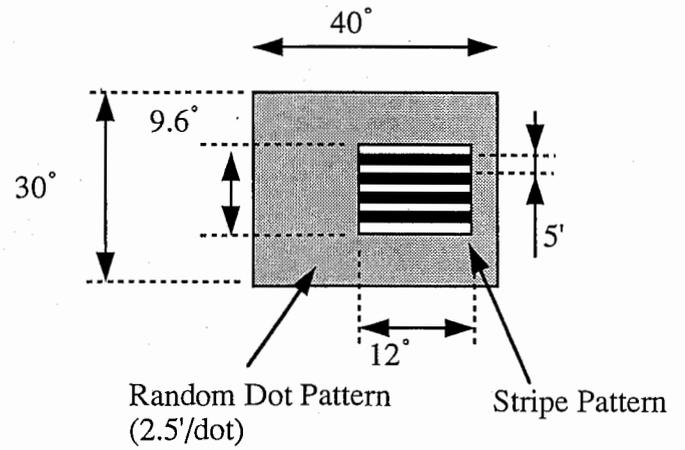


図6 ストライプパターン  
Fig.6 Stripe Pattern

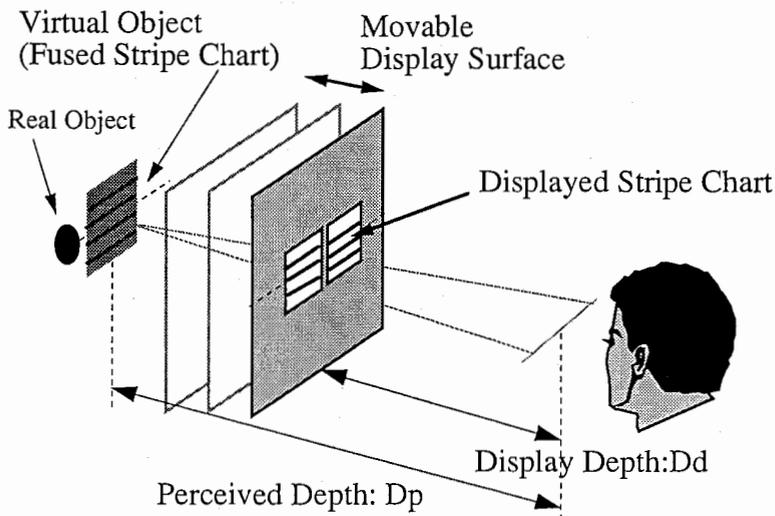


図7 観察オブジェクト配置  
Fig.7 Geometrical Setup of the objects

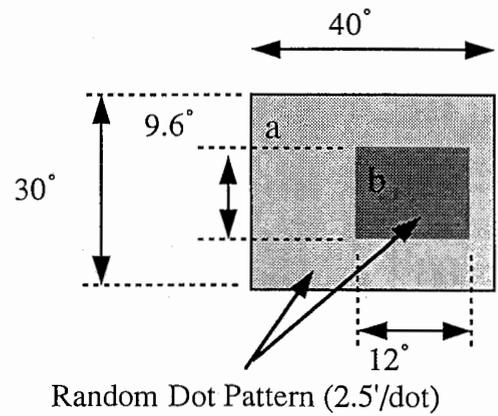


図8 ランダムドットパターン  
Fig.8 Random Dot Pattern

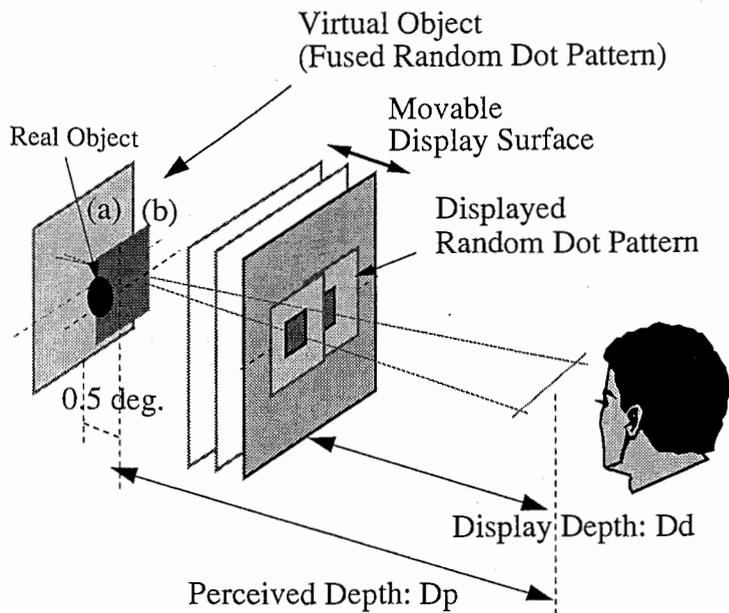


図9 観察オブジェクト配置  
Fig.9 Geometrical Setup of the objects

被験者: OKY	被験者: SSI
33才 男性	43才 男性
矯正視力 1.0	矯正視力 0.8
立体視経験豊富	立体視経験豊富

表1 被験者条件

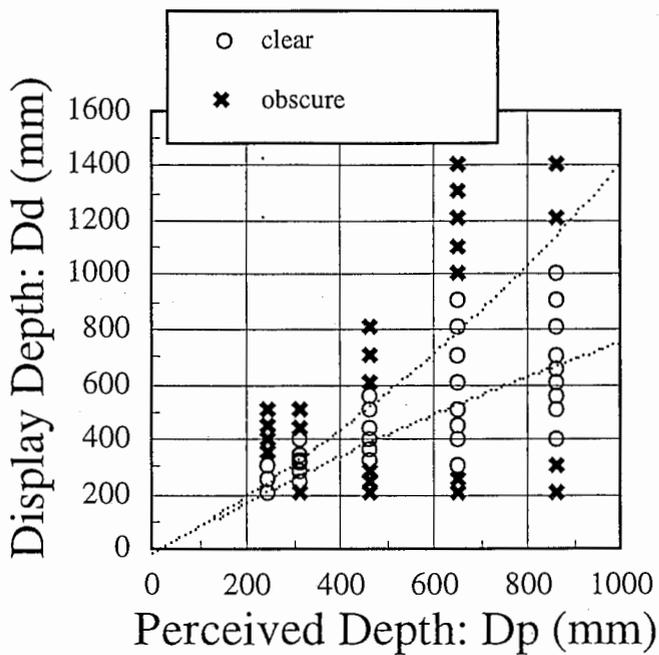


図10 ストライプ指標による評価結果  
Fig.10 Experimental Results for Stripe Target

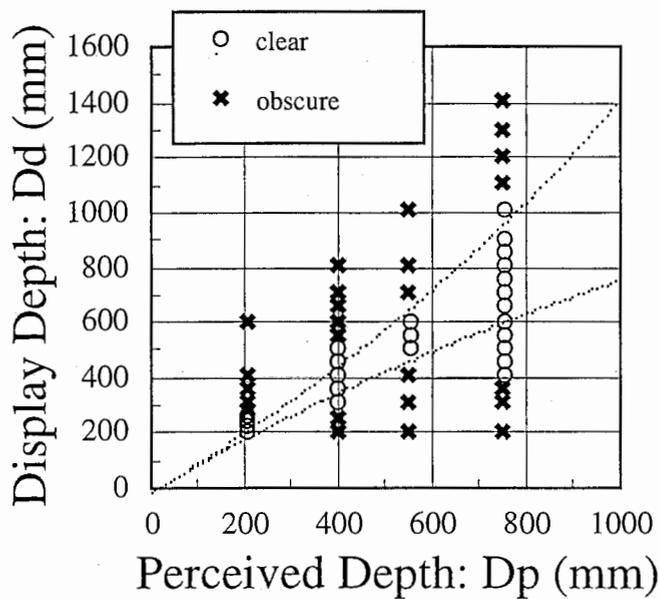


図11 ランダムドット指標による評価結果  
Fig.11 Experimental Results for Random Dot Stereogram Target

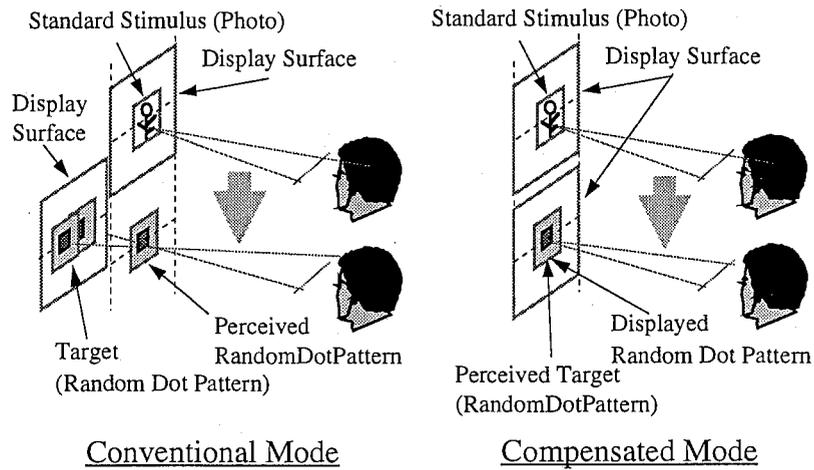


図12 実験1概念図  
 Fig.12 Conceptual Illustration of the 1st Experiment.

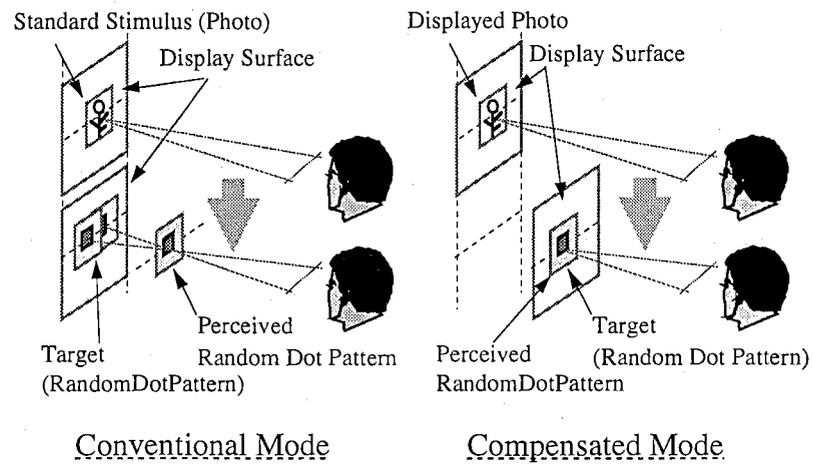


図13 実験2 概念図  
 Fig.13 Conceptual Illustration of the 2nd Experiment

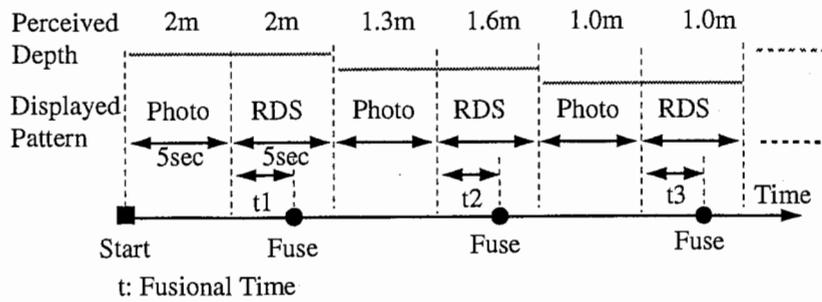
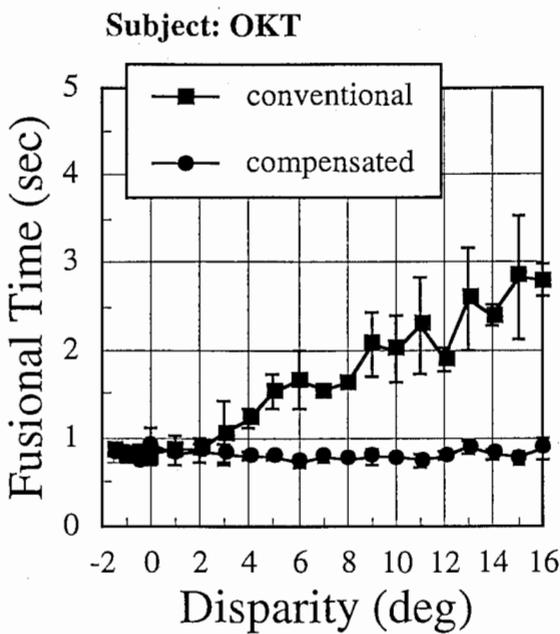
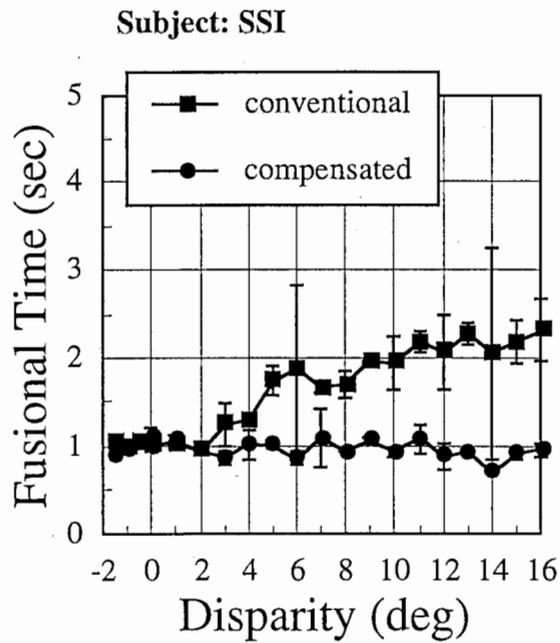


図14 実験1 指標表示シーケンス  
Fig.14 Display Sequence for the 1st Experiment



ただし補償(compensated)モードでの Disparity は  
同じ奥行きで従来(conventional)モードで表示した  
場合の Disparity でプロット

図15(a) 被験者 OKY 測定結果  
Fig.15(a) Experimental Result: Subject OKY



ただし補償(compensated)モードでの Disparity は  
同じ奥行きで従来(conventional)モードで表示した  
場合の Disparity でプロット

図15(b) 被験者 SSI 測定結果  
Fig.15(b) Experimental Result: Subject SSI

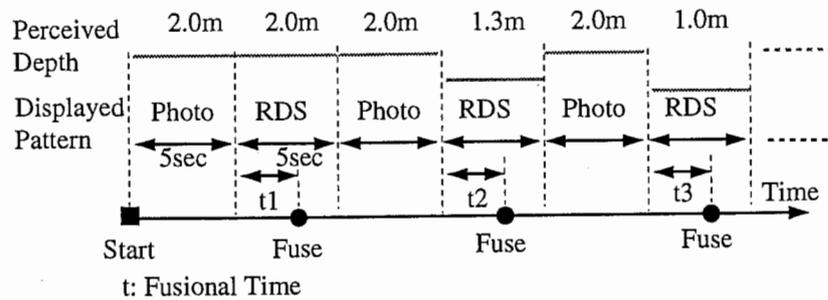
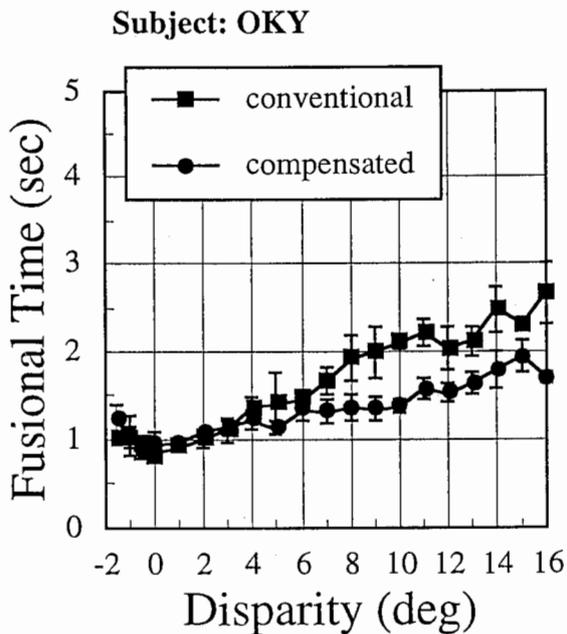
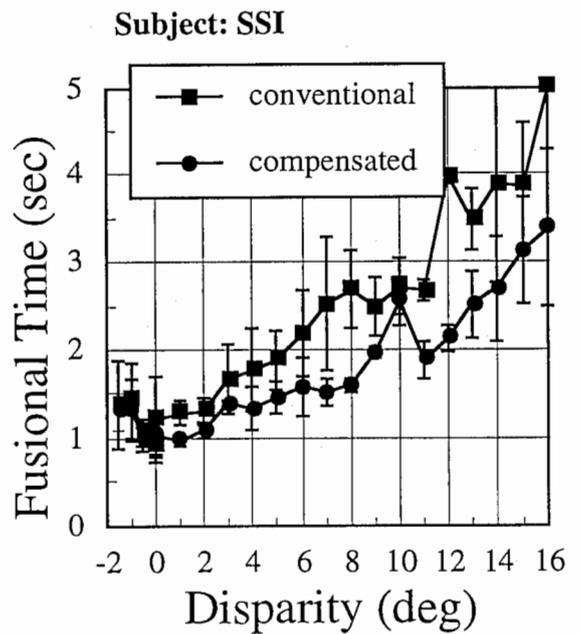


図16 実験2 指標表示シーケンス  
 Fig.16 Display Sequence for the 2nd Experiment



ただし補償(compensated)モードでの Disparity は  
 同じ奥行きで従来(conventional)モードで表示した  
 場合のDisparity でプロット

図17(a) 被験者 OKY 測定結果  
 Fig.17(a) Experimental Result: Subject OKY



ただし補償(compensated)モードでの Disparity は  
 同じ奥行きで従来(conventional)モードで表示した  
 場合のDisparity でプロット

図17(b) 被験者 SSI 測定結果  
 Fig.17(b) Experimental Result: Subject SSI