視線検出により焦点調節を補償する立体表示装置

正会員 志 和 新 一[†], 大 村 克 之[†], 正会員 岸 野 文 郎[†]

Three Dimensional Display with Accommodative Compensation (3D-DAC) Using by Gaze Detection Technique

Shinichi Shiwa[†], Katsuyuki Omura[†] and Fumio Kishino^{†*}

Abstract An novel binocular display with accommodative compensation is experimentally manufactured for use in fatigueless 3-D displays. The observed distance is measured two ways. One combines the gaze of one eye with a depth map of the image. The other way measures the convergence point using the gazes of both eyes. The former detects the depth correctly, but is limited to the case in which a real-time depth map of the field of view is obtained. The latter produces much depth detection error, but can be applied to an arbitrary image source.

1. ま え が き

立体表示は画像に奥行を与えるので高い臨場感が得られる。表示技術の目的のひとつは臨場感であり、したがって、立体表示の実用化は強く望まれている。立体表示には数多くの方式が知られているが、このなかで両眼視差方式の立体表示はデバイス完成度が高く、既存システムとの整合性に優れているため、最も有力な方法と考えられる。しかし、両眼視差方式は焦点調節を欠いているため、現実の立体物の見え方と異なっている。そして、それが立体画像を見たときに疲労を感じる原因ではないかと疑われている^{1)~4)}。

これに対して従来いくつかの検討が報告されているが、まだ充分なディスプレイ構成は得られていなかった^{5)~7)}。私たちは、この問題を解決するため、注視点位置を検出して注視点位置にディスプレイ面を移動する方式を提案した⁸⁾⁹⁾。そして、視線検出を行わずに視野中央の物体距離にディスプレイ位置を移動する実験機を試作して、動作原理を確認した¹⁰⁾。本論文では、両眼に対する視線検出機構を持った実験機を設計試作し、注視点検出に関して2つの方法を検討して、その得失を比較した。以下、2章では提案方式の概要と注視点検出方法を説明し、3章ではディスプレイを設計試作した結果について説明し、4章では実験機の動作性能と簡単な注視点検出実験の結果について述べ、5章ではまとめと今後の課題を述べる。

キーワード：焦点調節，立体表示，3次元表示，両眼視差，虚像，輻輳

1996年3月5日受付，1996年5月30日再受付

[†] 株式会社 ATR 知能映像通信研究所 (〒619-02 京都府相楽郡精華町光台2-2, TEL 0774-95-1491)

* 現在，大阪大学 大学院工学研究科 (〒565 吹田市山田丘2-1, TEL 06-879-7750)

[†] ATR Media Integration & Communications Research Laboratories (2-2, Hikaridai, Seika-cho, Soraku-gun, Kyoto 619-02, Japan)

* Graduate School of Engineering, Osaka University (2-1 Yamadaoka, Suita, Osaka 565, Japan)

図 1 提案した 3D ディスプレイの概念
Conceptual image of the proposed 3D display.

図 2 虚像移動を説明する図
Explanation of a virtual image movement.

2. 焦点調節補償方式の概要と注視点検出方法

提案した 3D ディスプレイの概念を図 1 に示す。本ディスプレイは両眼視差方式で立体画像を表示するものであり、観察者の注視点を検出する手段と、検出した注視点の奥行位置にディスプレイ面を移動する手段から主として構成される。システムは常に観察者の視線を検出して、視線情報から注視点までの距離を算出し、ディスプレイ面をリアルタイムに前後移動させるため、注視物体に関しては常に焦点調節が補償される。

2.1 虚像表示法

ディスプレイでは重量が大きいため、それを直接動かすことは得策でない。図 2 は、ディスプレイ面また

(a) Displaying way of the right-eye image

(b) Displaying way of the left-eye image

図 3 両眼視差画像を虚像で表示する方法
Displaying way of binocular disparity images by virtual images.

はディスプレイ面の実像を、視野レンズを介して覗く構成を示す。もしディスプレイ面位置を視野レンズの焦点距離 f 以内に配置すれば、観察者はディスプレイの虚像を見ていることになる。この構成では、ディスプレイ面距離 x のわずかな変化が虚像距離 X の大きな変化に増幅されるため、ディスプレイ面を高速に移動させることが可能となる。また、表示される視野角 a が変化しない特徴がある。

図 3 は、両眼視差像を虚像で表示する方法を示す。表示すべき物体が D_0 の距離にある場合、それを物体より手前の位置 D_1 で表示したときと、物体より遠い位置 D_2 で表示したときを並べて示した。図 3(a) は右眼用の表示画像、図 3(b) は左眼用の表示画像である。表示の視野角 a が変わらないことから、表示画像は表示距離に応じて自動的に拡大縮小される。もし左右の虚像の移動が両眼間隔を保ったまま行われるならば、図 3 から明らかなように、表示距離を変えても表示内容を変える必要がないことがわかる。

図 4 注視点距離を検出する 2 つの方法
Two detecting ways of gazing distance.

2.2 注視点検出方法

図 4 は、注視点距離を検出する 2 つの方法を示す。図 4(a) は片方の眼の視線の向きを検出し、その眼で見る画像との交点 (x,y) を求める方法を示している。ただし、表示画像に対応した奥行きデータマップはすでに求められているとし、その交点の奥行き値 Z を読出すものである。図 4(b) は両眼の視線の向きを検出し、その交点（輻輳点）を求めて奥行き値を算出する。

表 1 は、2 つの注視点検出方法の比較を示す。入力画像の制限の有無、および奥行き検出精度に関して比べた。(a) の片眼視線検出法は、入力画像はコンピュータグラフィックス(CG)のようなリアルタイムで奥行きデータマップが得られる画像に制限されるが、奥行き検出精度は高い。一方、(b) の両眼視線検出法は、奥行きデータマップを必要としないため CG 画像に限らず実写画像も含む任意の画像に対して適用でき

表 1 2 つの注視点検出方法の比較
Comparison of two detecting ways for gazing distance.

	(a) Gaze direction and depth map	(b) Convergence detection
Image source limitation	Yes (Realtime acquisition of depth map) e. g. CG	No e. g. Picture taken by camera, CG, etc.
Detecting data precision	High -Error only at object border	Low -Independent on image content -Error increasing for large distance area

るが、(a) と比べると奥行き検出精度は低い。奥行き検出精度について細かく比べれば、(a) は奥行きの急激に変化するエッジ付近では誤差が出やすいが、(b) は画像の内容には依存しない特徴がある。

このように、2 つの注視点検出方法は一長一短があるので、実際の実験により得失を比較する必要がある。

3. ディスプレイ実験機的设计と試作

3.1 視野角の検討

両眼で虚像を眺める構成の光学系では、視野角により解像度や融像領域（左右眼で同時に見える表示領域）が変化する。図 5 は、視野角をパラメータとしたときの解像度と表示画素数の関係を示す。ディスプレイの表示画素数は表示方式により特定の値を持つので（例えば VGA, SXGA など）、ディスプレイの表示方式を決めれば、視野角と解像度(pixel/deg)は対応関係がある。例えば CG 表示における典型的な表示モードとして SXGA (水平 1280 画素) を選択した場合、視野角 α が 15° で解像度は約 85 pixel/deg となる。通常、人間が識別できる最大の解像度は 100 pixel/deg 程度なので、解像度限界以上の表示を行うという観点からは、SXGA 表示モードを使用する場合は視野角を 15° 以下になるように光学系を設定する必要がある。しかしながら視野角を狭くする条件は、人間の眼球の水平視野(120° 以上)がはるかに広いことから不都合なだけでなく、両眼立体視の観点からも好ましくない。

図 6 は、視野角をパラメータとしたときの融像面積比とスクリーンからの距離の関係を示す。ここで融像面積比とは、両眼で立体視をする場合に、左右眼で同時に見える共通領域の面積と片眼で見える面積の比と定義した。したがって、融像面積比 0% は左右眼で同

図 5 解像度と表示画素数の関係 (パラメータ: 視野角)
Relationship between resolution and number of pixel. (parameter: viewing angle)

図 6 融像面積比とスクリーン距離の関係 (パラメータ: 視野角)
Relationship between fusion area ratio and distance of a screen. (parameter: viewing angle)

時に見える部分が存在せず、融像面積比 100% は左右の表示視野が完全に重なっていることを示す。本方式では、虚像で表示されるスクリーンの距離が無限遠に遠ざかったときに融像面積比 100% となり、スクリーンが観察者に近づくと急激に融像面積比は低下する。本ディスプレイで表示する最も近い距離を 20 cm と仮定すると、視野角 15° では 25 cm より手前を立体表示できないことになり、融像面積比が大きければ大きいほど良いという条件では、視野角を 90° 以上にする必要がある。

図 7 試作実験機のシステム構成
System block diagram of the experimental display.

解像度と融像面積比に関する上記のトレードオフを考慮して、本検討では水平視野角を約 40° と決定した。このときの解像度は約 30 pixel/deg, 融像面積比は約 50% (スクリーン距離 20 cm のとき) となる。

3.2 光学系および全体システムの検討

図 7 に試作実験機のシステム構成を示す。2 台の CRT モニタに別々に表示した左右画像は、2 枚の反射ミラーおよび 1 つの上下反転プリズムを通してリレーレンズに入射する。リレーレンズは、表示像の縮小像を観察レンズの焦点位置付近に結び、観察者は観察レンズを通して縮小像を虚像として観察する。左右眼用の 2 つのリレーレンズがいっしょに前後することにより、虚像の奥行きを前後させる。観察レンズと観察者の眼球の間には、近赤外光のみを反射し、可視光を透過する材料をコートした透明プラスチック板を傾けて配置し、観察レンズの両側には 2 台の視点検出装置 (nac 製アイマークレコーダ EMR-7) を設けた。視線検出装置は近赤外光の照明部と CCD カメラから構成され、眼球に対して垂直方向から照明した近赤外光の角膜による反射像により視線の向きを検出する。リレーレンズにはモータとリミットセンサが取り付けられてあ

(a) The 3D-DAC system.

(d) Gaze detection block

(c) Optical devices block

図 8 試作実験機の外観
Photograph of the experimental display.

り、それらはモータコントローラで制御される。モータコントローラはイーサネットを介して制御用ワークステーションと通信する。2台の視線検出装置は1台の視線検出コントローラにデータを送り、視線検出コントローラはRS-232Cを介して制御用ワークステーションと通信する。左右眼用の視差画像はそれぞれ2台のグラフィックワークステーションで表示し、そのうちの1台は制御用ワークステーションを兼ねている。

図8は、試作実験機の外観を示す。観察者の視線検出を精度良く行うため観察位置にあご台を設けた。

表 2 ディスプレイ実験機の仕様と特性
Specification and characteristics of the experimental display.

Optical block	Eyepiece lens
	Diameter : 40 mm
	Focal length : 30 mm
	Relay lens
	Focal length : 45 mm
	Magnification ratio : 1/14.5
	Monitor
	Type : 17 in. CRT
	Stripe pitch : 0.25 mm
Motor block	Motor
	Type : AC servo motor
	Motor Controller
	CPU : 68000
	OS : VxWorks
Gaze detection block	Gaze detector
	Type : Cornea reflection detection
	Measure area : 40 deg. circle
	Resolution : 0.3 deg.
	Sampling freq. : 30 Hz
Image generation and system control block	GWS
	Type : SG IIRIS Onyx and Crimson
	Graphics Engine : Reality Engine 2
	OS : Unix
Interpupillary distance : 57.5-72.5 mm	
Characteristics	
Viewing angle : 31 deg. (vertical), 40 deg. (horizontal)	
Number of pixel : 1280×1024 (SXGA), 640×480 (VGA)	
Resolution : 32 pixel/deg. (SXGA), 16 pixel/deg. (VGA)	

表2に、ディスプレイ実験機の仕様と特性を示す。モータはACサーボモータ、モータコントローラはイーサネットのインタフェースを持つマイコン搭載型コントローラ、グラフィックワークステーションはSGI社のIRISである。また、観察レンズを含め左右の光学系は間隔の調整が可能であり、両眼間隔57.5から72.5mmの範囲まで対応できる。

4. 試作機の評価

4.1 ディスプレイ面移動

本ディスプレイ方式が実現性を持つための条件は、ディスプレイ面をリアルタイムで移動させることである。本方式では、観察レンズの手前側焦点位置から覗いた場合、観察位置から測ったスクリーン虚像の距離と観察レンズの背面側の焦点から測ったスクリーン実像の距離の関係は、簡単な反比例関係になる。本試作

実験機の観察レンズは焦点距離が 30 mm であるため、焦点位置でディスプレイ面は無限遠の距離にあり、焦点位置から 0.1 mm の位置で約 10 m に近づき、4.5

mm で 20 cm まで近づく。したがって、4.5 mm のレンズ移動で虚像は、無限遠から 20 cm まで動かすことができる。

図 9 は、ディスプレイ面の移動距離と移動時間の関係を示す。ディスプレイ面を観察者から 20 cm の位置からスタートして、40 cm、1 m、2 m、4 m、10 m と移動させた。また、10 m からスタートして逆の向きの移動も行った。移動距離が大きくなるにつれ 150 ms から 240 ms と移動時間が長くなったが、最大でも 240 ms であり、焦点調節時間が数 100 ms から数秒かかることと報告されていることから¹⁾²⁾、本実験機のディスプレイ面移動速度は、焦点調節速度と同程度またはそれ以上の速さであると考えられた。

4.2 注視点検出精度の評価

次に、視線検出装置の性能を調べた。図 10 は視線検出測定の一例を示す。図 10(a) の 9 点の指標を注視したときの左右眼の注視点検出結果を図 10(b)、(c) に示した。9 点の正方形格子は多少歪んでおり、検出点のバラツキも見られた。しかし、注視点検出のバラツキは角度にして約 2° 以下であった。

片眼の視線を検出し、表示画像との交点から奥行き

図 9 ディスプレイ面の移動距離と移動時間の関係
Relationship between the distance and the time of the screen movement.

(a) displayed test pattern
○ : gaze point

(b) left-eye data

(c) right-eye data

図 10 視線検出の測定例
Example of the gaze direction measurement.

図 11 輻輳点法による奥行き検出精度のシミュレーション

Simulation results of depth detecting error by convergence point detection.

を算出する方法では、検出精度は奥行きデータマップの精度と視線検出の精度の2つに依存する。一方、両眼の視線を検出する輻輳点法では、検出精度は視線検出の精度だけに依存する。図11は、輻輳点法による奥行き検出精度のシミュレーション結果を示す。両眼の視線検出共に、それぞれ1°、2°、3°の誤差があると仮定したときの奥行き値(上限と下限)をプロットした。また図には、参考のため±0.3ジオプタの焦点深度を持たせたときのピントの合う範囲を破線で示した。±0.3ジオプタとは、瞳の直径が約5mmのときの焦点深度の値である¹³⁾。図から明らかなように、10cmから3mの範囲では±0.3ジオプタの焦点深度は1°の視線検出角エラーに対応する。したがって、1°より小さな検出誤差でディスプレイ面の奥行きを制御しても、奥行きの変化が感じられない可能性があり、そのような高精度で視線検出を行う必要はないと思われる。ただし、試作実験機による実測例では2°程度の誤差が生じており、これは焦点深度を越える誤差であるため、さらに精度向上が必要である。

次に、2つの視線検出法を用いた奥行き検出の比較を行った。被験者は、あご台に顔をのせて観察位置を固定した状態で、まず校正用の格子パターンを注視

(a) experimental setup

detection method name of point	(1) gaze direction and depth map	(2) Convergence detection
No.1 (at 2.00m)	2.00±0	>10
No.2 (at 0.20m)	2.00±0	0.23±0.01
No.3 (at 0.20m)	0.20±0	0.23±0.01

(b) detected depths (m)

図 12 奥行き検出の測定例

Example of measured results of depth detection.

し、引続きその状態で奥行き検出用の3つの指標を約10秒間ずつ注視した。図12に奥行き検出の測定結果の一例を示す。図12(a)に示すように、3つの指標はそれぞれ2m (No.1) と0.2m (No.2とNo.3) に配置した。ただしNo.2の指標は0.2mの奥行きに表示した正方形パッチのエッジ部分に配置し、No.3の指標はほぼ中央部に配置した。なお、ディスプレイ面は1mの位置とし、3つの指標は両眼視差で表示した。図12(b)は測定結果の例を示す。奥行きマップは表示画像のZバッファ値を用いた。Zバッファは隠面消去のための奥行きデータ比較用のメモリーで、表示画面の描画後は視点から見て手前にある物体の奥行き値だけを保持している。したがって、見えている物体の奥行き値を知るには、その表示画素のZバッファ値を調べればよい。

(1)の片眼の視線検出と奥行きマップから求める方法では、No.1とNo.3の指標では誤差が0の正確な奥行き値が得られた。しかし、No.2の指標は0.2mにあるにもかかわらず、奥行きが急激に変化するエッ

ジ部にあるため、背景位置にあたる2mと誤検出された。この誤検出の理由は、視線検出に約2°の誤差があるためと思われる。一方、(2)の両眼の輻輳点で検出する方法は、No.1の指標に対しては10m以上と誤った値を出力したが、No.2とNo.3の指標に対しては共に0.23mと15%程度の誤差で正しく検出できており、データのバラツキも±1cmと小さかった。2°の誤差をもつシミュレーションではデータのバラツキは±2cmであり、実測値はほぼシミュレーション通りの結果といえる。特に(1)の方法と比べてNo.2が正しく検出できたことは、輻輳点法の利点である「検出精度は画像内容によらない」特徴を示すものである。

5. む す び

疲れのない立体表示の実現を目的に、観察者の注視点を検出して、その注視点の奥行き位置にディスプレイ面を移動する表示原理にもとづく3D-DACを試作した。その構成は、両眼視差のある画像を観察レンズを通して覗くものとし、リレーレンズの機械的な前後移動によりディスプレイ面の奥行き位置を前後させた。また、両眼の視線方向を同時にリアルタイムに測定した。光学系の設計において表示解像度と融像面積比(左右眼の共通表示領域)はトレードオフの関係にあり、共に大きくできないことを示した。試作機の主な仕様は以下の通りである。

- ・水平視野角：約40°、水平解像度：約30画素/°
- ・リレーレンズの移動量(無限遠から20cm)：4.5mm
- ・視線検出誤差：約2°

次に実験機の性能を評価し、以下のことを明らかにした。

- ・ディスプレイ面の移動時間は240ms以下であった。
- ・2つの視線検出法を比較し、奥行きデータマップを用いる方法は、正確だがエッジ部で誤りやすいこと、一方、輻輳点法は若干不正確だが、画像内容にかかわらず精度が安定していることを示した。

今後は、本方式の疲労に対する改善効果を調べると共に、視線検出精度の改善や視野角の広角化によるディスプレイの高品質化を検討する。また、HMDへの装置の組み込み、実写画像を表示するシステムへの拡張などを検討していく。

最後に、本研究の機会を与えてくださった(株)

ATR 知能映像通信研究所の葉原耕平会長と寺島信義博士(前 ATR 通信システム研究所社長)に感謝いたします。

〔参 考 文 献〕

- 1) 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，pp.205-223 (1988)
- 2) 大頭：“二眼式立体視技術と視覚機能”，精密工学誌，54，2，pp.11-15 (1988)
- 3) 山崎ほか：“調節点距離を利用した二眼式時分割立体表示装置の視覚疲労評価”，Ann. Physiol. Anthropol.，8，3，pp.127-132 (1989)
- 4) 今井：“家庭用ヘッドマウントディスプレイ，懸念される人体への影響”，日経エレクトロニクス，No.618，pp.67-83 (1994)
- 5) T. Miyashita, et al.：“Fatigueless Stereoscopic Display,” 3D映像，4，2，pp.71-74 (1990)
- 6) 比留間ほか：“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，J73-D-II，12，pp.2047-2054 (1990)
- 7) 山内ほか：“二眼式立体表示システム観察時の調節・瞳孔反応”，3D映像，7，1，pp.15-19 (1993)
- 8) 志和ほか：“焦点調節が連動する両眼視差立体表示方式の提案”，1995年信学会情報システムソサイエティ大会，D-168 (1995)
- 9) S. Shiwa, et al.：“A New Binocular Parallax Display Method in which Vergence Changes are Linked to Accommodative Responses”，Digest Asia Display '95，pp.785-788 (1995)
- 10) 志和ほか：“焦点調節を補償する立体表示3DDAC (3D Display with Accommodative Compensation) の提案”，テレビ誌 (投稿中)
- 11) T. Takeda, et al.：“Three-Dimensional Optometer III”，Appl. Opt.，32，22，pp.4155-4168 (1993)
- 12) 比留間ほか：“立体テレビ番組観視中の調節応答の測定”，テレビ誌，48，10，pp.1293-1300 (1994)
- 13) W. N. Charman, et al.：“Pupil Diameter and the Depth-of-Field of the Human Eye as Measured by Laser Speckle”，Optica Acta，24，12，pp.1211-1216 (1977)

し わ しんいち
志和 新一 1979年，北海道大学理学部高分子学科修士課程修了。同年，NTT 茨城電気通信研究所に入社。ヒューマンインタフェース研究所に移り，主として通信用表示方式の研究開発に従事。1994年，(株)ATRに出向。現在，(株)ATR 知能映像通信研究所にて，立体表示の研究に従事。工学博士。正会員。

おおむら かづひで
大村 克之 1987年，筑波大学大学院理工学系修士課程修了。同年，(株)リコーに入社。同中央研究所において，主に光学計測，評価に関する研究開発に従事。1993年より，(株)ATR 通信システム研究所に出向。現在，(株)ATR 知能映像通信研究所にて，立体表示に関する研究に従事。

きのの ふみお
岸野 文郎 1971年，名古屋工業大学電子工学科大学院修士課程修了。同年，NTT 入社。同ヒューマンインタフェース研究所を経て，1989年，(株)ATR 通信システム研究所に出向。画像処理，知識処理，臨場感通信の研究に従事。現在，大阪大学大学院工学研究科教授。工学博士。正会員。