

人工現実感誘導型ディスプレイの開発

廣瀬通孝、古賀昌史、石井威望

東京大学工学部産業機械工学科

頭部搭載式の立体映像提示装置を開発した。この方式のディスプレイの特徴を解説し、技術的な問題点を明らかにした。

試作したディスプレイでどの様に三次元空間が再現されるかを考察した。遠隔のカメラに取り込まれた画像による立体映像をこのディスプレイで提示し、利用者が把握しうる奥行き知覚の精度を測定した。このディスプレイの運動を画像処理で検出するシステムと、立体コンピュータ・グラフィックスを組み合わせ、人工現実感を誘導する映像を提示する試みを行った。

DEVELOPMENT OF HEAD MOUNTED DISPLAY SYSTEM (HMD)

MICHITAKA HIROSE, MASASHI KOGA AND TAKEMOCHI ISHII

Faculty of Engineering, the University of Tokyo

7-3-1, Hongu, Bunkyo, Tokyo, 113 Japan

The object of this study is to realize advanced visual human interface called Artificial Reality. In this environment, the image of the display changes according to the movement of viewpoint, so that the image represents object which exist in the space created by the environment. Display mounted on operator's head is developed for this object, and its performance is tested. Using the display, Artificial Reality system is constructed. To input movement of eyes, system observes movement of display by image processing.

I はじめに

本研究室で試作された、頭部搭載式の立体映像表示装置（HMD）、およびこれを用いた、仮想的な環境の提示の実験を紹介する。

II 仮想環境誘導型ディスプレイ

1 三次元空間内作業用のインタフェース

当研究室では、これまでに、マニプレータの遠隔操作や、マニプレータの軌道の作成、あるいは、分散システムのプログラミング環境などを三次元空間内作業として取り上げ、そのためのインタフェースを開発してきた。映像の提示には液晶シャッターを用いた時分割式の立体視システムを用い、入力には当研究室で開発された三次元マウスと呼ばれるデバイスを用いた環境で研究を行ってきた。

2 高臨場感の三次元空間内作業環境の開発

現在当研究室では、より直接的に三次元的な情報を扱えるインタフェースを実現するために、高い臨場感をもたらす環境を開発している。この環境では、操作者の視点の位置や向きが変化すると、それに応じた映像が得られるようにする。また、提示される映像の中に操作者の身体が現れ、動作によって直接システムに対して入力ができる。同様の考え方に人工現実感、テレイグジスタンスと呼ばれるものがあり、本研究も、これらに大きな影響を受けた。^{[3], [4]}

テレイグジスタンスでは、視線の変化に応じて遠隔のカメラを操作し、利用者があたかもカメラのある場所にいるかのような映像を提示する。カメラのある環境に対しては、利用者の自然の動作に応じて制御されるロボットなどによって、作業を行う。

NASAのエイムズ研究所で行われている人工現実感の研究では、視線の変化に応じた映像をコンピュータ・グラフィックスで描画する。システムに対する入力は、人間の手の自然の動作に応じた形式でできるようにする。

3 従来の立体視システムの問題点

従来の映像提示システムでは、以下のような点が問題となった。

- a 眼鏡などを用いる違和感
- b 視野の制限
- c 視点の移動に伴う立体映像の変化
- d 立体映像以外のものが見えてしまう
- e 画面のちらつき

さらに、入力デバイスの操作性も、より向上させる必要があった。

4 頭部搭載型ディスプレイ

以上に挙げたような点を改善するために、新しいタイプの立体映像提示用のデバイスのプロトタイプの試作をした。試作されたディスプレイには、ディスプレイ2台を頭部に装着して、左右の目に応じた映像をそれぞれの目に表示するという方式を採用した。NASAのエイムズ研究所の人工現実感の研究などで用いられている方式である。この方式には、以下に挙げるような特徴がある。

- a 視野が広い。また、HMDの動きに応じた映像を表示することによって、全周に及ぶ視野を得られる。
- b 視点と映像面の相対位置が不変なので、生成される立体映像が、視線の動きによって変化することが無い。このため、動体視差を利用して立体感を得るのに適している。
- c 提示される立体映像以外の物が見えない。
- d 一つのHMDを、一人しか利用することができない。

5 HMDの技術的な問題点

a 軽量、小型なディスプレイ

この方式では、ディスプレイの外形が小さくなっていないと、ディスプレイ面の中心を眼球の正面におくことが困難になり、全視野のうちの立体視可能な部分の割合が小さくなる、再現される三次元空間が歪むなどの弊害が起こる。

b 解像度の高いディスプレイ

ディスプレイ面が目に近いために、高い解像度のディスプレイが必要とされる。

c 頭、顔の個人差

眼球とディスプレイ面の位置関係が顔や頭の形の個人差に依存してしまう。

d 高速のグラフィックス

このようなシステムで、あたかも使用者が立体映像で作り出された空間の中にいる様に感じる臨場感をもたらすコンピュータ・グラフィックスを提示するには、かなり高速な描画が必要である。また、左右のディスプレイに別々にグラフィックスを提示しなくてはならないために、システムが大きくなってしまう。

6 HMDの考えうる用途

この方式のディスプレイは、利用者の動作に応じた映像を提示するのに適している。このため、両眼視差による立体感に、動体視差による立体感を付加することができる。この方式のディスプレイは、他の方式に

よる三次元映像ディスプレイと同様の用途をもちうる。しかし、以上に挙げた特徴より、少数の操作者に情報を集中しなければならない状況の下で利用、例えば、大規模なシステムの監視、人的資源が極端に不足する宇宙ステーションでの使用等が有効であると考えられる。

7 データグローブの導入

本研究では入力デバイスとして、データグローブを採用している。これは、手の位置、姿勢と、指の運動をリアルタイムでコンピュータに入力することのできるデバイスである。これにより、映像によって再現された空間に、体感に応じた入力が可能になる。

III 試作したシステム

1 HMD

今回試作したディスプレイの外観を下図に示す。

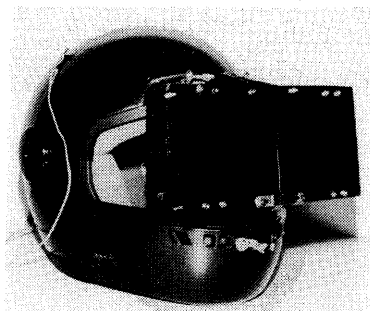
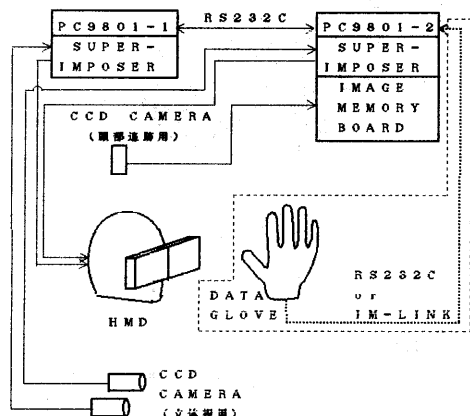


Fig 1 HMD (頭部搭載式立体映像提示装置)

2 システムの構成



2-1 画像提示装置

本システムでは、ディスプレイとして、市販の小型液晶テレビを用いた。この部分がシステム全体の性能を決める重要な要素となるが、今回は、市販のものを改造等を加えずに利用しているために、重量、視界の広さ、解像度等が制約を受けている。特に、全視野に対する両眼視可能な部分の割合を大きくすることが今後の課題となっている。なお、液晶パネルは、4.6 cm×6.2 cm、240×384画素である。

2-2 光学系

本システムでは、ディスプレイを目の前に装着し、ディスプレイの画面が適切な距離(約20cm)に結像するように、眼球とディスプレイの間に凸レンズを配置した。レンズは、軽量であること、大口径のものが入手できること、工作が容易なことから、プラスチックのフレネルレンズを用いた。

2-3 カメラ部

カメラを用いて実空間の立体映像を得るために、2台のCCDをある間隔と角度を持たせて三脚上に固定して用いた。現在、カメラをオペレータの動作に連動させて遠隔操作することを試みている。

2-4 グラフィックス

本システムで立体的なグラフィックスを提示するために、2台のパーソナルコンピュータをRS232Cで連結し、これで、データの交換、同期などを行い、各々が右または左用のグラフィックスを描く。作られた画像は、スーパーインポーズボードを介して、ディスプレイに送られる。グラフィックスによる立体映像をカメラによる立体映像に重ねて表示することも可能である。

2-5 ディスプレイ追跡部

本システムでは、画像処理によってディスプレイの運動を検出し、これに応じた画像を提示することができる。この方法だと、観察者の運動を拘束することが無いという利点がある。ディスプレイにLEDを取り付け、これを小型のCCDカメラで観察し、そのデータをパーソナルコンピュータに実装されたフレームメモリに取り込み、LEDの輝点の位置をもとめて、ディスプレイの運動を検出する。

2-6 入力部

本システムでは、入力デバイスとしてデータグローブを用い、オペレータの手の動作に応じた入力を行うことを可能としている。

3 光学系の考察

3-1 表示される投影図の条件

このシステムでは、ディスプレイに左右各々の眼球を焦点とした中心投影図を表示することによって、立体映像を生成する。しかし、眼球の位置には個人差があり、それに応じてディスプレイに表示される映像の投影の条件は調整されなくてはならない。コンピュータ・グラフィックスを提示する場合には、ソフトウェアで投影図の焦点の調整を行えるようにした。カメラを用いた立体映像でも、眼球の位置の個人差による調整が必要となる。カメラが遠隔操作できるようになった際には、カメラによる映像の調整もソフトウェアで自動的に行えるようにする予定である。

3-2 空間の再現

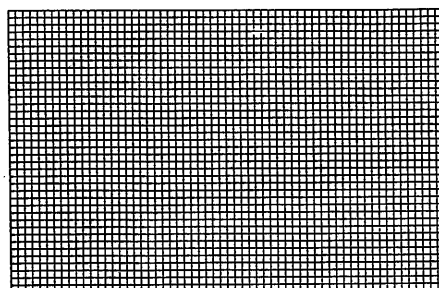
カメラで取り込まれた三次元映像がディスプレイで正確に再現されるためには、カメラの光学系とディスプレイの光学系が完全に相似に作られていなければならない。今回試作したシステムでは、比較的視野の狭いカメラの画像が、ディスプレイでは大きな視野に拡大されて提示されている。このため、提示される空間の中では、奥行き方向と水平方向が異なる倍率で再現されている。また、使用したディスプレイの液晶パネルが比較的大きかったので（3インチ）、ディスプレイの中心に対して外側にずれた位置に配置されている。このため、全視野のうち立体視ができるのは、中央の部分のみとなり、しかも、カメラから画像を取り込む際には、左右の像がカメラをある程度外に向けておかなければならない。このために、ディスプレイを通して見える空間は、実空間を線形に変換したものでなく、歪んだものとなる。この様子をFig 3に示す。a)が下の空間上におかれた格子であるとする、カメラを外向きにしたためにb)の様な歪が、ディスプレイの中心と眼球の軸がずれているためにc)の様な歪が再現される空間に生じる。しかし、適切な条件でb)とc)を組み合わせるとd)の様に視野の中央部での歪をなくすることができる。

3-3 実験

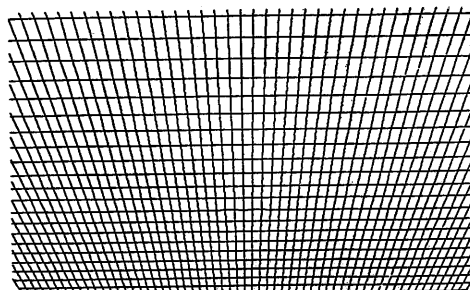
このシステムでどの位の精度で空間が再現できているかを検証するために、以下の二つの実験を行った。

(a) 単眼視との比較

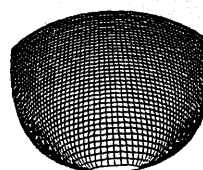
このディスプレイを用いてカメラの映像を見ながら、作業空間内の目標をポインティングする実験を行った。ポインタとしては、約1.7メートルの棒の先に矢印を取り付けたものを、目標には、直径約10センチメートルの輪を用い、被験者がその棒で



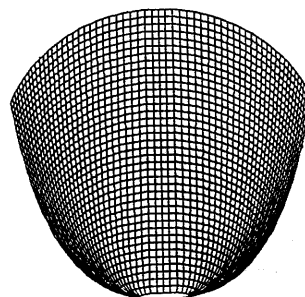
a)



b)



c)



d)

視線の向きは、図の下から上方向

Fig 3 再現される空間の歪

直接目標の中心をポインティングし、ポインティングされた点と目標の中心の距離を測定する。この作業は、立体視を用いると高い精度が得られることが知られている⁽¹⁾。目標は、カメラから1mから2mの距離に4つ設定され、四人の被験者が各目標を三

回つつポインティングする。カメラの間隔は135 mm、角度は外向きに約11度から13度間の見やすい角度に被験者毎に調整した。作業は、両眼視をした場合と、各眼の視野の一部を覆って単眼視で行った場合を比較した。結果を以下のグラフに示す。有効な奥行き知覚が両眼視によって得られていることが判る。

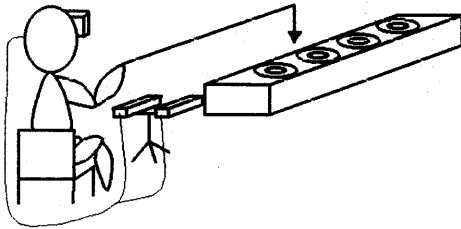


Fig 4 実験(a)の方法の説明図

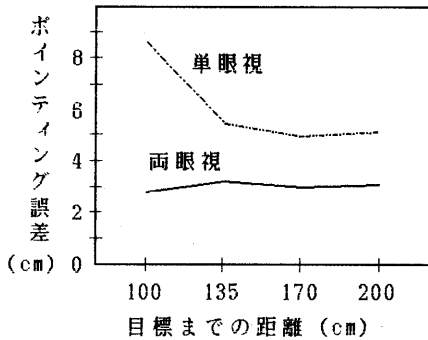


Fig 5 ポインティング成績

(b) 奥行き知覚の精度

このシステムで、どの程度の精度で奥行きが判るかを、次のような実験で確認した。二本の棒を目標として視界の中央に配置する。もう一本の棒を実験者が動かして、被験者がちょうどその棒が目標の中間にきたと判断したところで、その棒と目標の奥行き方向のずれを測定した。一被験者につき四箇所て5回づつ繰り返して測定した。カメラの間隔は135 mm、角度は外向きに約11度から13度間の見やすい角度に被験者毎に調整した。目標と移動する棒の大きさの関係から奥行きが判らないようにするために、各々の両端は視界の外になるようにした。その結果を下のグラフに示す。かなりの精度で奥行きが再現されていることが判る。

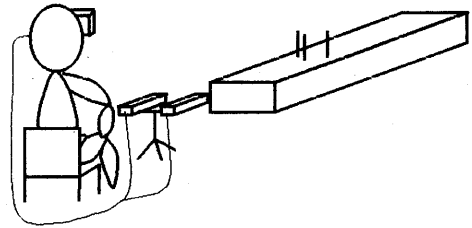


Fig 6 実験(b)の方法の説明図

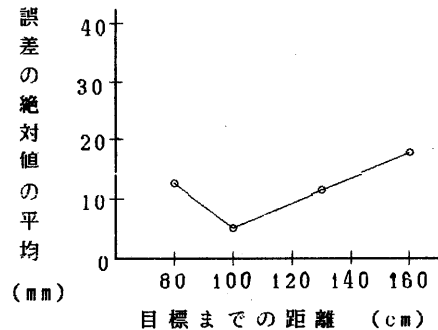


Fig 7 奥行き知覚の精度

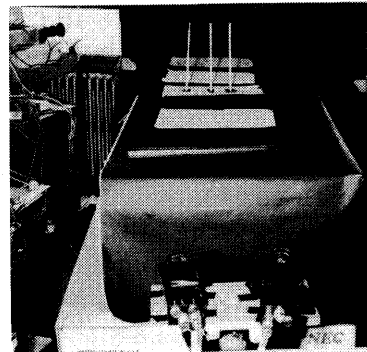


Fig 8 実験風景

(c) 再現された空間の歪み

光学系の不一致による立体映像の歪が生じているかどうかを測定する

これは、実験bにおいて、目標の棒の間隔が80 mmであったところを160 mmにし、目標からのずれを測定する。距離1300 mmでは、計算により8 mm程度目標よりずれて（遠くに）見えることが予想されたが、結果は、平均で10.8 mm遠くにずれて見えることが判った。予想された歪みが生じているようである。

しかし、実際にこのディスプレイによる立体映像を見ても、主観的には空間が歪んでいるような違和感は感じられない。これは、映像の中央部では歪が小さく、また、映像の周辺部の立体感、両眼視差以外の要素に依っているためと考えられる。

3-4 仮想環境の試作

先に述べた高度の臨場感をもたらす環境の、映像の部分を開発したHMDを用いて試作した。これは頭部の運動に応じた映像を提示することで、操作者の見たい方向の映像が得られると同時に、視点の動きに応じた視差が与えられるようにするものである。頭部の動きを検出するには様々な方法があるが、今回は、操作者の動作を妨げず、また、HMDの重量を増加させないために、画像処理を用いた。HMDにLEDを二個取り付け、これを上方から小型のCCDカメラで観察して、水平面内の回転、運動を検出し、これに応じて投影のパラメータを変化させたコンピュータ・グラフィックスを提示する。これで原理的には、コンピュータ・グラフィックスで提示された物体は、HMDが動いても、絶対位置は動かないように見えるようにすることができる。即ち、ディスプレイに提示された像というよりは、現実の空間にある形状と位置、姿勢を持った物体を見ているように感じられるはずである。Fig 9にこのシステムを用いた実験風景を示す。

約一秒に三枚から十枚のグラフィックスを提示することができる。提示される映像がワイヤフレームによるものなので、描画速度は問題となっていない。画像処理によってLEDを発見するのに要する時間が、画面を書き換える速度への大きな制約となっている。現在、専用の画像処理用プロセッサの導入を検討中である。このシステムで、若干の違和感があるものの、グラフィックスによって物体がある絶対的な位置を保って表示された。しかし、特に、素早く頭を動かした場合にLEDを発見するのに時間がかかり、違和感を生じた。

V 終わりに

本研究では、頭部搭載型の立体映像提示装置を試作した。これを用いたシステムでは、再現される空間は歪んだものになるが、適切な設定をすることによって、ディスプレイの中央部での歪をなくすことができ、歪による違和感は避けられる。このディスプレイを用いて実空間内の奥行きをかなりの精度で把握することができる。

このディスプレイを用いて、人工現実感をもたらす環境を試作した。

今後は、カメラを頭部の運動に応じて遠隔操作し、テ

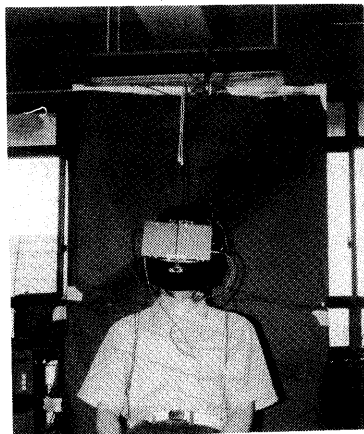


Fig 9 人工現実感の実験

レイグジスタンス的な環境を作る予定である。さらに、実画像による立体映像に立体コンピュータ・グラフィックスをスーパーインポーズして、三次元空間内作業を支援することを試みる。

また、より高速にグラフィックスを提示するために、描画、入出力、座標計算、画像処理などの機能をいくつかの計算機に適切に分担させることを検討している。

将来は、このようなシステムにより、人間と電算機の間、高度なビジュアル・インタフェースを実現することができるであろう。この環境の中では、アイコン、プルダウンメニュー、ウィンドウ等は、提示された空間内に、ある形状と位置を持った物体として表示される。人間の空間認知能力が活かされて、より円滑なヒューマンインタフェースが実現されると予想される。

参考文献

- [1] 廣瀬通孝, 須藤純吾, 石井威望: 三次元空間内作業におけるヒューマン・インタフェース, SICE第二回ヒューマンインタフェースシンポジウム, pp.237-pp.244, 1986
- [2] 廣瀬通孝, 于冬, 古賀昌史, 石井威望: 三次元空間内の遠隔操作システムの研究, SICE第三回ヒューマンインタフェースシンポジウム, pp.383-pp.387, 1987
- [3] 館, 荒井, 畑田, 反町: テレイグジスタンスの研究, 日本ロボット学会第三回学術講演回予稿集, 1985
- [4] 濱崎義二: 三次元映像と動画像, 3D映像Vol.1, No.1, p11-19, 1987
- [5] 近未来のインタフェース, Scientific American 日本版12月号, pp.76-pp.85

質疑応答 古賀

出澤 今の液晶ディスプレイで、光軸が合せられないと言うことでいろいろ工夫されているみたいですが。光学的な方法でたとえば、プリズムを使うとかミラーを使うとかしてちょっと工夫をするというと思います。

古賀 そうですね、光学的に解決するという方法もたしかにあります。現在重量の問題と言うのが一番のネックになっておりましてプリズムはちょっと。

出澤 たしか計算上からいうと、 10° 位の角度の亚克力で作ったエッジを入れると重なると思います。屈折率を考えてちゃんと計算すれば分かりますけど、メガネと同じくらいですからそんなに重くならないと思いますよ。

吉田 作られたディスプレイというのは、視野角はどれ位なんですか。

古賀 片目について上下に各 24° 、内向き（鼻の方向）に 20° 、外向きに 46° 。なおカメラの焦点距離は 16 mm 、口径比は $1:1.6$ です。

吉田 広角を用いますと、狭い絵が拡大されたような絵になってしまうのではないですか。

古賀 焦点距離が違うために、（再生される映像空間に）正面方向に対してリニアな圧縮が生じています。

竹村 興行精度の実験がありますが、これは心理学の実験では、視差だけ見たときに一直線にならないことが知られていますが、その補正はある程度やっているのでしょうか。

古賀 一応頭にはあったのですが、どの様にしたらよいのかと言うのがちょっと見当がつかなかったもので、今後の実験ではその事を含めて検討してみます。

長田 機械技研の舘さんは並木列の見えと大きさの見えとで評価されています。目的から言って、たとえば、大きさの恒常視のように平行の物はやはり平行に見えないといけなく、それとも並木列の見えのように非ユークリッド空間のように平行に見えないならやはり平行に見えないようにすべきなのか、どちらのお考えですか。

古賀 現実に見ている状態の様な臨場感で物が見え、それによって作業性を向上させる。もしも直線であっても直線に見えないのなら、それはそのようにディスプレイに再現されなければならないと思います。

長田 そうすると操作者は外界を見誤ることがあるのですね。

出澤 最終的な目的は舘さんと同じで、結局ロボットで作業させるという事だと思のですが。例えば、その場合に視覚というのは One of them でほかにもセンサーがある訳ですね。こういう言い方をすると怒られるかも知れないけれど、大体の感じが掴めればよいということですね。

古賀 そうですね、あと研究としましてはマンマシンインターフェースとかプログラミング環境とか、そういったインターフェースの部分の扱うことが多くなってきました。そういったときには精度みたいなものよりも、むしろ直感的に人間の生活空間と同じという方が大切であると考えています。

吉田 ディスプレイと眼の間にフレネルレンズをはさまれたという話ですが、その場合眼と画面との距離はどの様に測定されたのですか。

古賀 顔に定規をあてて測り、5 cmになるのように調整しました。

吉田 しかし、レンズで画面が大きくなるから距離が変わりませんか。この時の正確な値はどの様にして出すのですか。

古賀 レンズにたいして眼の距離が近いというモデルで近似しました。遠近で焦点の大きさは変わりますが像の大きさは変わって見えなだろうと、つまり遠視の眼鏡をかけましても大きさはほとんど変わって見えませんね。あのように非常に眼球とレンズが近いと仮定しています。

長田 仮想イメージというのはどの距離ですか。

古賀 20 cmです。

吉田 そうすると、コンピュータグラフィックスをディスプレイする場合、20 cmにあわせて計算されているのですか。正確に言えば、レンズで画面が広がっていますから、この距離だけでなく画面の大きさも必要になると思うのですが。それから、マッピングされるときはカメラを曲げていますが、あのように曲げて計算しているのですか。

古賀 コンピュータグラフィックの場合はしていません。画面を投影面として眼球を焦点とした投影図でかいています。

吉田 そうすると、グラフィックス上でディスプレイの中心が眼の中心ではないですね。

古賀 はい、もしもそのグラフィックスをカメラで撮った画像にスーパーインボーズする場合を考えますと、当然ずれが生じます。

出澤 先程のようにプリズムを付けて真ん中に像がいくようにすると、今いったちゃんとした像ができる。

吉田 カメラを使う場合、無限遠が画面の中心にきますが、コンピュータグラフィックスで一枚を重ねるときにはそうはならないですから、眼の方を中心に合せるのですか。

古賀 眼の中心があっている状況ではカメラを平行にすれば完全に像が再現できるのです。