

航空宇宙技術研究所報告

TECHNICAL REPORT OF NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

TR-1185

ヒトの視覚に学んだ
ビデオカメラの視線制御による対応点探索

五味 広美

1992年11月

航空宇宙技術研究所
NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

目 次

第1章 まえがき	2
1.1 構 成	2
第2章 ヒトの視覚	3
2.1 視覚の発達	4
2.1.1 水晶体調節	4
2.1.2 両眼輻輳	4
2.2 左右の網膜中心窩像	5
2.3 視線制御の正確さ	5
2.4 網膜から大脳皮質へ	6
第3章 視線制御による対応点探索	
3.1 立体視に於ける対応点問題	7
3.2 視線制御による対応点探索	8
3.2.1 特徴の選択とその表現形式	8
3.2.2 一致の評価	8
3.2.3 探索範囲	9
3.2.4 自己校正	9
3.3 風景の特徴	10
第4章 実 験	
4.1 実 験 系	10
4.1.1 ビデオカメラと照明	11
4.1.2 視線制御	11
4.1.3 入力画像	11
4.2 カメラ校正と左右カメラ調整	13
4.2.1 レンズの中心 / 周辺光量比	13
4.2.2 γ 特性	13
4.2.3 歪曲収差	14
4.2.4 左右カメラの調整	14
4.2.5 予想される結果	15
4.3 実験結果	15
4.3.1 入力画像	16
(1) 格子	16
(2) テストチャート	16
(3) 風景	16
(4) 立方体	17

4.3.2	照 度	17
4.3.3	視 野	18
(1)	焦点距離	18
(2)	画素数	18
(3)	画素の大きさ	19
(4)	視力	19
4.3.4	左右カメラの調整差	19
(1)	倍率差	19
(2)	視力差	20
(3)	傾き差	20
(4)	感度差	20
第5章	考 察	
5.1	画像入力条件の一般化	20
5.2	感度調整	21
5.3	視野と視線制御	21
5.4	ヒトの視覚との比較	22
5.5	テンプレート・マッチングとの比較	22
5.6	提案アルゴリズムによる距離測定の精度	23
第6章	まとめ	23
付録A.	左右像の計算	24
付録B.	統計的計算	26
付録C.	ヒトの立体視能力	26
付録D.	参考文献	27

ヒトの視覚に学んだ ビデオカメラの視線制御による対応点探索*

五味 広美*¹

An Algorithm for Stereo Correspondence Problems on the Analogy of Human Vision

Hiromi GOMI

ABSTRACT

An approach to stereo correspondence problems imitating human vision is proposed and verified by directing two cameras to the same point in experiments. The algorithm is based on the fact that the illuminance difference between images on left and right human retinal foveae is minimised when both eyes look at the same point because the difference between the images is smaller than the resolution. The algorithm is robust against camera discrepancies and has an operating range similar to that of human vision. The algorithm is an area-based method using 256×256 picture elements much more than ordinary template matchings and is not affected by the relative illuminance of the lens because of convergence control of the cameras.

Keywords: stereo, correspondence problem, human vision, convergence control, active vision, image processing.

概 要

2台のビデオカメラを使い三角測量の原理で距離情報を得る為に必要な、左右のカメラが同じモノ/点を見ているかどうかを判定するアルゴリズムとして、ヒトの視覚から学んだ視線制御による対応点探索アルゴリズムを提案し、実験によりその機能を確認した。ヒトと同程度の解像度を得て、左右中心窩像の差が解像度以下であることを利用した。対応を取る特徴としては明度をそのまま使用し、特徴の表現形式としては中心窩領域の明度分布の領域対応を行なった。左右カメラが同じモノ/点を見ている時、左右画像の明度差の絶対値の平均値は極小値を取り、その極小値はビデオカメラのセンサーとしての信頼性によって決まる。提案したアルゴリズムは、左右カメラの個体差に強く、その機能範囲はヒトの立体視能力の範囲にはほぼ等しい。従来のテンプレート・マッチングに較べて、画素数が多く(256×256画素)、レンズの中心/周辺光量比の影響を受けない。

* 平成4年8月31日受付 (received 31 August 1992)

*¹ 数理解析部 (Computational Sciences Division)

第1章 まえがき

目的地に向かっての移動、障害物の回避、対象物への接近、組立作業、あるいは、自分の位置を決定する為に距離情報は必要不可欠な情報である。必要な距離の範囲と精度は目的により異なる。電波を使ったレーダーは長距離の測定に向いているが、航空機に搭載されている垂直方向のレーダーである電波高度計は低高度（接地直前）での精度（現在数十センチメートルの誤差）が必要である。宇宙船のランデブ・ドッキング用レーダー（相手側宇宙機に取り付けられた反射鏡からの反射光を受信するレーザーレーダー）の誤差は10cm位である。マニピュレータによる組立作業を行なう時、モノを掴む為には1cm以下の誤差でモノの位置を検出することが必要になる。

画像処理 / 視覚による距離情報獲得の特徴は近距離での精度が高いことである。航空機の場合、着陸誘導システムと耐空性基準により着陸方法と構造が決まるので高度計精度の向上の効果は少ないが、動作原理の異なる高度計を併用することにより信頼性を高め、精密な高度計を複数使うことにより機体の姿勢検出や接地時のショックを和らげ乗り心地を改善することが可能である。レーザーレーダーの近距離での精度を向上させる為に反射鏡の配置パターンをビデオカメラで検出し、画像処理することが研究されている。この時併せて相対的な姿勢を検出することも考えられている。マニピュレータによる組立作業では画像処理 / 視覚によらなければ、必要な距離精度を確保出来ない。

画像処理 / 視覚による距離測定で現在実用化されているものは、相手側に目印を前もって貼っておき、目印の大きさ、位置、傾きを画像から読み取り距離を計算する方法と、ビデオカメラの自動焦点として一般的なコントラスト法である。前者の方法は画像の中から目印を背景より分離することが出来れば、目印の見え方からカメラと目印間の距離を幾何学的に計算することが出来る。目印を背景から分離することは、照明を一定にして目印の色または明るさを背景のそれらとは別のものに

することが出来れば、簡単である。後者の方法は焦点が合ったとき細かい所まで見える様になり（コントラストが高くなる）、ビデオ信号の高周波成分が極大になることを利用している。原理的にはヒトの水晶体調節による距離情報獲得と同じである。コントラスト法では相手側に目印を貼る必要はないが、見る対象によっては時々別の極大に安定してしまい、焦点の合わない状態に陥ることがある。距離情報を獲得する視覚的方法の特徴は相手を選ばないことであるが、まだ信頼性が低いのが欠点である。ヒトは複数の視覚的方法により得た距離情報を統合し安定した距離感を得ている。

画像処理 / 視覚による他の方法としては、まだ研究段階であるが、2台のカメラを配置し撮像した左右像の特徴間で対応を求めて、三角測量の原理で距離を求める両眼立体視がある。従来の方法では、カメラの向きを固定し、得られた左右の画像の中から対応点を探索しているが (Fig.1. a.), 計算時間がかかり、対応点が求められる点の数が少なく、間違った対応を求めてしまうことも多い。それに対して、ヒトの両眼輻輳に倣って2台のビデオカメラが同じモノ / 点を見る様に視線制御し対応点探索を直接行なうことが考えられる (Fig.1. b.)。この方法を実現する為には2台のビデオカメラが同じモノ / 点を見ているのかを判定しなければならない。その判定アルゴリズムとしてヒトの視覚に学んだ方法を提案し、そのアルゴリズムが機能することを実験により確認したので報告する。

1.1 構成

第2章ではヒトの視覚に関して文献調査と左右の網膜中心窩像の計算を行なった。第1次視覚野への網膜像の投射のされ方と左右の中心窩像の計算結果から、左右の眼が同じモノを見ているかどうかは左右中心窩像の差によって判断出来ることを導く。

第3章では立体視に於ける対応点問題を4つの課題に分けて検討し、提案している視線制御による対応点探索が4つの課題を解決することが出来

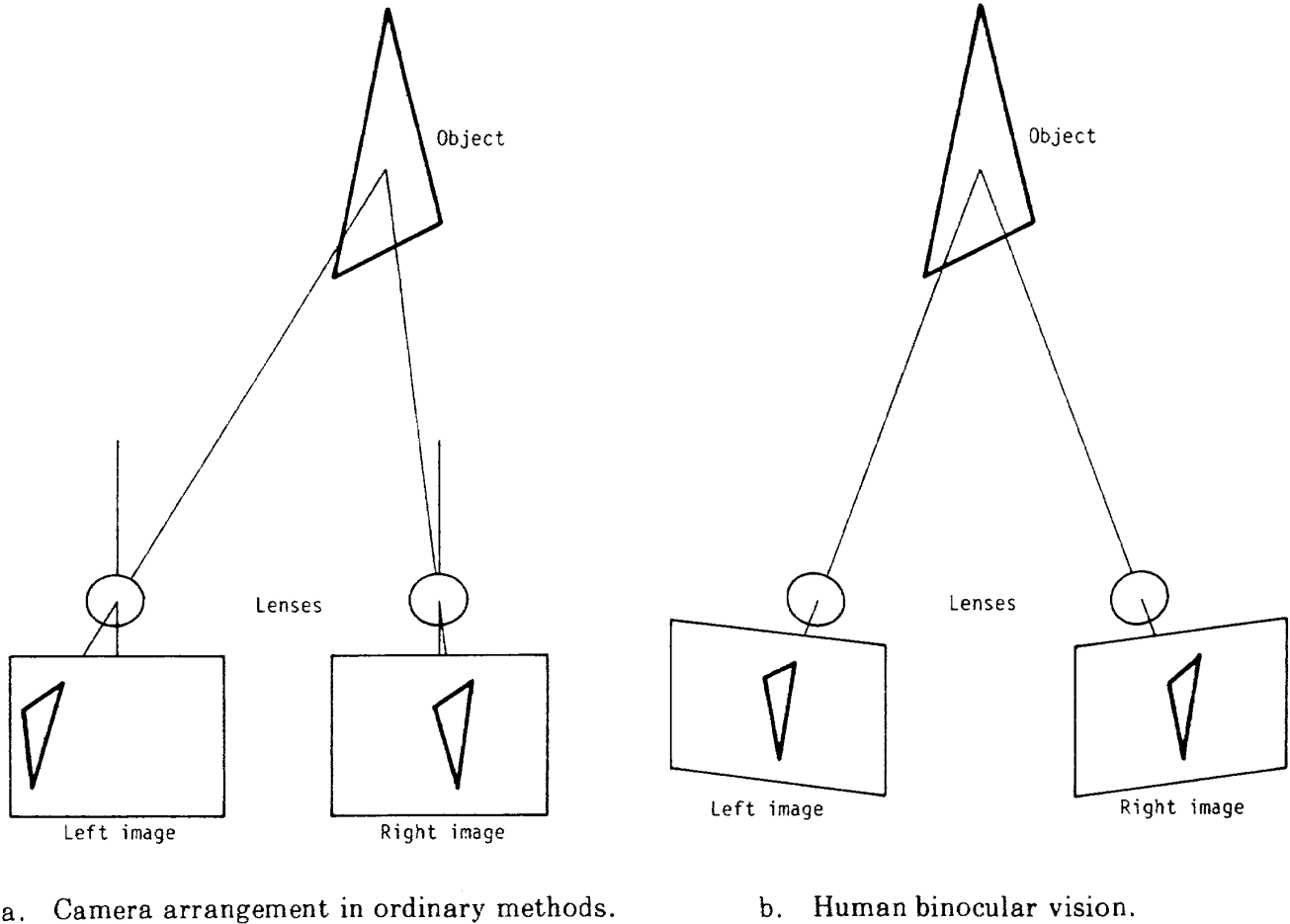


Fig.1. Search algorithms in stereo correspondence problems.

ることを示す。また、この対応点探索を可能にさせるヒトの世界の風景の一般的特徴について考える。

第4章では視線制御による対応点探索の実験について報告する。実験装置の校正結果と入力画像の特徴を表わす自己相関から実験結果を予想し、実験によりこれを確認した。ビデオカメラの正面にありビデオカメラの正面に平行な平面上の絵を主に入力画像として実験を行なった。

第5章では実験結果に基づき、画像入力条件を3次元へ一般化することに付いて検討し、視線制御による対応点探索アルゴリズムに対する感度調整と視野の広さの影響について考察した。提案アルゴリズムの機能範囲とヒトの立体視能力との比較を行ない、提案アルゴリズムとテンプレート・マッチングとの相違と提案アルゴリズムによる距離測定精度について検討した。

第6章は全体のまとめである。

第2章 ヒトの視覚

ヒトは複数の視覚的な奥行き手掛かりから得た距離情報を統合して、安定した距離感を得て行動している。伝統的な奥行き手掛かりをTable 1. に示す¹⁾。「生理的」と「画像的」との2つに分類されているが、「生理的」とは水晶体調節では毛様体筋/毛様体小帯の、両眼輻輳では眼球運動の6つの外眼筋の、両眼視差では大脳皮質の状態に奥行き手掛かりがあることを表わしている。「画像的」とは「網膜上に直接与えられる」という程度の意味合いで、非生理的な手掛かりを「画像的」と呼んでいる。「静止的」とは静止している状態でも機能することであり、観察者が動いていても機能する。生理的な奥行き手掛かりが手掛かりとして機能する為には、誕生後数カ月以上に渡り移動により対象までの距離を変えた時の奥行き手掛かりの変化を経験学習することが必要である。生

Table 1. Visual cues of depth perception (Shimojo 1986).

	Monocular	Binocular	
Physiological	Accommodation	Convergence Binocular parallax	Static
Retinal image	Apparent size, Light and shade, Occlusion, Perspective, Clearness, Texture		
	Motion parallax		Dynamic

理的手掛かりはこの経験学習無しに他者から知識を与えられただけでは手掛かりとしては機能しない。それに対して、画像の手掛かりは他者からの知識だけでも機能する。

これらの奥行き手掛かりから距離情報を得ることを画像処理により工学的に実現しようとした時、①「生理的」、②「運動視差」、③「静止的で画像的」の順に難しくなる。③はパターン認識そのものである。この順番に研究を進めて行くのが適当と私は考えるので、この報告では①の問題を扱う。

2.1 視覚の発達

2.1.1 水晶体調節

幼児の視覚能力の測定には困難が伴い、発達に個人差があるので測定結果はかなりばらつく。Dobson & Teller (1978) が視力の発達についてまとめたものによれば、新生児は0.01から0.05程度、6月齢では0.1から1.0程度の視力である²⁾。乳児の場合、網膜から大脳までの神経系の発達が充分でなく視力と水晶体調節の間には多少のずれがあることも考えられる。

水晶体調節のメカニズムには弛緩説と緊張説とがあり詳細は解からないが³⁾、水晶体調節により奥行き手掛かりが得られる為には毛様体筋 / 毛様体小帯の働きにより水晶体の厚さ / 水晶体前面の

曲率を主に変えることにより網膜上に鮮明な像を結ぶことが必要である。誕生までに水晶体、毛様体筋 / 毛様体小帯、網膜、視神経は組織的にはかなり出来上がっているが、視力の発達からも解かる様に誕生後数カ月以上(研究者によっては数年)の視覚経験が必要である。

誕生直後は水晶体の厚さ / 曲率に合った位置のモノの像が網膜上に鮮明に結ばれるだけだが、段々水晶体の調節が上手になり、調節範囲も広くなり、常に網膜上に鮮明な像が結ばれるようになる。Howlandらによって開発された写真による検影法を用いて、Braddickら(1979)は自由観察条件での水晶体調節を測定し、新生児および1月齢では観察距離75cm以内、6月齢までには150cm以内の範囲では正確に調節されていることを見出した¹⁾。網膜上に鮮明な像が結ばれるようになるのは鮮明な像を好ましいあるいは快と感じそれを求める生物的原理が働く為と考えるのは自然である。水晶体調節が上手になり、見え方と移動あるいは手を伸ばしたりして得た距離との間で比較を繰返しているうちに、水晶体調節が奥行き手掛かりとして働く様になる。その範囲は2~4mであるといわれている¹⁾。

2.1.2 両眼輻輳

ある対象を両眼で注視する時(注視したいモノを視力の優れた網膜中心窩上に結像させる為に)、

対象が遠方であれば両眼の視線はほぼ平行になる様に外向きに回転し(開散し), 対象が近くなるにしたがって両眼は内向きに回転(輻輳)する(脚注)。

水晶体調節と同様に誕生後の視覚経験により両眼輻輳が上手になり, 輻輳が奥行き手掛かりとして働く様になる。その距離は20m位までといわれている¹⁾。

育児専門書⁴⁾によれば1月齢は眼の前に置かれたモノをごくわずかな間注視したり, あやすと大人と視線が合う。3月齢頃首が座り, 4月齢ではゆっくり上下・左右・旋回させたモノを連続追視することが出来るようになる。

Aslin (1977)によれば2・3月齢の乳児では輻輳角にかなりのエラーが見られる¹⁾。Birchらの研究によれば立体視能力(視差に対する反応性)は2~6月齢頃(平均4月齢)突然発現する¹⁾。

2.2 左右の網膜中心窩像

ヒトの視力は網膜中心窩(視野半頂角約0.7度)の部分が高く, 中心から視野角で2度離れると視力は半分程度に低下する。同じモノ/点を左右両眼で見ている時, 左右の見る角度が少し異なるので左右眼の像は同じではない。しかし, 左右像の差は小さく, 左右の中心窩に対応した部分は解像度(視力)のレベルで一致することを計算で確認した。

顔の正面にあり顔に平行な平面上の絵(2次元)を見た時, 左右の中心窩像の差を計算した。水晶体と網膜間の距離を17mm, 両眼間の距離を65mmとして, 眼から300mmの距離の絵を見た時, 網膜の中心から1度離れた位置で $1\mu\text{m}$ の視差(左右像のずれ)を生じる。絵が眼から遠くなれば視差は小さくなる。中心窩にある視細胞の直径は $1\sim 3\mu\text{m}$, 角度1分(視力1.0)の弧に対する網膜上の距離は $5\mu\text{m}$ である。したがって, 顔の正面にあり顔に平行な平面上の絵を見た時, 中心窩上の左右像は解像度のレベルで一致する(付録A, 参照)。

2.3 視線制御の正確さ

Riggs & Niehl (1960)⁵⁾は頭部を固定し平面鏡付きのコンタクトレンズを使って両眼輻輳の測定を行ない, 輻輳・開散の角度の予測値と測定値との差は約2角度分以内であり, 視線制御はほぼ正確であるとした。この測定結果はそれ以前の実験結果と異なるが, それらは角膜反射法という正確でない測定方法を使った為と彼らは主張している。

Fender & Julesz (1967)⁶⁾の眼球運動があっても網膜像が動かない様にして行なった実験によれば, 両眼に呈示した左右像を融合させる為には6角度分まで視差を近づけなければならなかったが, 一度融合すれば視差を2度まで離しても融合は安定していた。ヒトは視線を動かしても常に左右像を融合させているので, 彼らの実験から視線制御は6角度分以下の誤差で制御されていることが予想される。これらの実験によらなくてもヒトは動いていても鮮明な外界を見ることが出来るので, ヒトの補償眼球運動は完全で網膜像は静止していると一般的には信じられていた。

ところがSteinmanらは頭を固定しないで実験を行ない, 頭を左右に ± 10 度の回転運動をさせた場合, 視線制御には最大1度近い誤差があることを見出した。この視線制御の誤差の為, 網膜上の像は2~3度/秒の速度で動いていたが, 主観的には明瞭に見えていた。さらに驚くべきことには, 頭を動かすことにより, 細かい格子縞(6サイクル/度以上)の明度識別能力は少し低下するが, 荒い格子縞(6サイクル/度以下)では向上が見られた⁷⁾。

Steinmanらの実験では, Robinson⁸⁾の方法を改良したコイル付きのコンタクトレンズを眼に付け, 空間的に均一, 時間的に変動する磁場の中に被験者を座らせ(あるいは立たせ), 頭を固定しないで眼の回転運動を測定した。この測定方法は角度分解能1分, ノイズ成分3分, 測定誤差2% FS, 周波数応答1000Hzである。彼らは網膜上の像の移動速度に関心があり, 視線制御がどの程度誤差を含むかについては表と図とから読み取らなければならない。

被験者(2人)が光学的に無限遠の白熱灯を見

脚注) 普通, 開散を含めて輻輳という。

つめた実験の場合、板を口にくわえて頭を固定した状態では眼の変動（視線制御の誤差）は7～13角度分、網膜上の像の移動速度は13～15角度分/秒であった。座って出来るだけ動かない様にした状態で眼の変動は8～18角度分、像の移動速度は21～26角度分/秒、立って出来るだけ動かない状態で眼の変動は14～18角度分、像の移動速度は22～38角度分/秒であった⁹⁾。

3人の被験者を使った実験では、赤/緑の色眼鏡による立体映像方式を使い、スクリーンから5.5mの距離で頭部を±10度の振幅、4/3Hzの周期で左右に回転させた場合、視線制御の誤差は約±0.5度であった。その為輻輳角も0.5～1度変化したが、奥行き見え方は安定していた。対象から5.8mの距離で頭部を±17度の振幅、4/3Hzの周期で左右に回転させた場合、網膜上の像は2～3度/秒の速度で移動したが、被験者の主観としては明瞭に見えていた⁷⁾。ただし、網膜上の像の移動速度は固定した対象を見つめた時の眼球回転運動に等しいとして求めたもので、網膜上の像の動きを直接測定したものではない。

2.4 網膜から大脳皮質へ

Steinmanらの実験によれば静止したモノを見つめていても網膜上の像は2～3度/秒の速度で動いていて、その輻輳角は0.5～1度変化しているが、ヒトの主観としては明瞭に奥行きも安定して見えている。この様に動いている像が網膜で電気信号に変えられ、視神経を通して脳に送られ処理されている。ヒトの視覚情報過程の研究は急速に進んでいるが、どの様な処理によって像の動きを無くして安定した鮮明な像を見ることが出来るのかはまだ解明されていない。現在までに解かっていることは次のことである。この分野の研究は急速に発展しているので、新しい文献^{10), 11)}を主に参考にした。

視覚情報は大まかな位置や動きの空間情報と色や形の形態情報の2つに分けられて処理されている。解剖学的には左右網膜からの視神経は視交叉で合流し、外側膝状体に入る。外界の右半分の視野は左側の外側膝状体を通り、大脳の左半球の第

1次視覚野の第4層に投射される。霊長類では左右の眼からの情報は第1次視覚野の第4層ではまだ別々に扱われていて、左右の情報を受け取る部分(眼球優位コラム)はシマウマの模様(約0.5mmの幅)のように入り組んでいる。また、少しずつ異なる線の傾きに反応する細胞が規則正しく約1mmの周期で並んでいる傾きコラムがあり、眼球優位コラムと交叉している。左右一對の眼球コラムと1周期の傾きコラムが構成する約1mm区画のブロックはハイパーコラムと呼ばれている(Fig.2.)。ハイパーコラムの幅に対する視角は中心窩で7.5角度分である(Sakitt & Barlow 1982)¹¹⁾。すなわち、第1次視覚野で左右像の対応点は視力の1/10程度の精度で隣合っている。

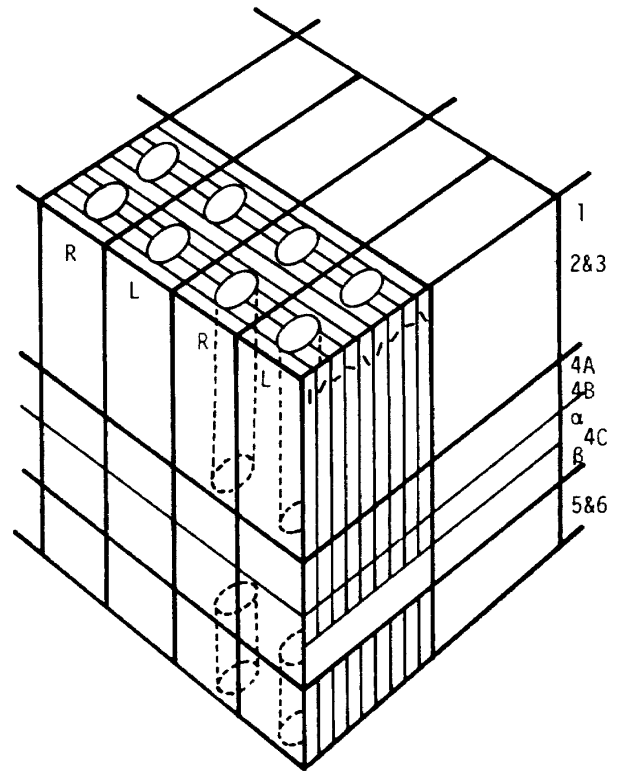


Fig.2. A model of the primate primary visual cortex (Livingstone & Hubel 1984).

乳幼児期に眼の視線が鼻側に偏位した内斜視があると偏位眼に弱視が起ることが多い。偏位眼の中心窩の視力がもう一方の正常眼に較べて特に悪くなる。弱視がどの部位の障害で起きるのかは議論が分かっているが、両眼が同じモノ/点を見ないことによる偏位眼からの異常な情報を脳に入れない様に神経中枢回路を調整した為と考えられ

る²⁾。ということは、皮質では両眼からの画像は融合され1つの画像として情報処理されていると考えることが出来る。

中心窩の錐体(視)細胞と神経節細胞とは1対1に対応し、網膜からの神経繊維は5~6本に枝分かれして外側膝状体の細胞に連絡している。外側膝状体の細胞は2~3本の網膜からの神経繊維の信号を受け取る。外側膝状体の90%が大脳皮質へ信号を送る¹⁰⁾。皮質ではさらに10倍に枝分かれしている。したがって、1個の神経節細胞の情報は50個の皮質細胞に伝えられる¹¹⁾(脚注1)。第1次視覚野の4C β 層の細胞数は外側膝状体の約50倍も多い。4C β 層の細胞は約4 μ m間隔に配置されている。これを網膜皮質拡大因子を用いて視角に換算すると中心窩では3角度秒間隔になる。

第2次視覚野の細胞には左右像が一致した時、注視点が前方にずれた時、あるいは、後方へずれた時興奮するものがある¹⁰⁾。この様な細胞が存在すれば、奥行きを知覚するだけでなく、左右像のずれを検出し眼球の視線を制御することにより左右眼を同じモノ/点に向けることが可能になる。

以上に述べた左右像の差が充分小さいことと大脳皮質への網膜像の投射のされ方から、左右像の一致を検出するアルゴリズムは第1次視覚野の左右眼から信号を受け取る隣合った細胞の多くが同じ強度のパルス信号を受け取った時、一致したと判断出来る。生理学的にどの様を実現するのかは解からないが、計算機上では左右像の明度差の絶対値の平均が最小になった時、一致したとすれば良い。

第3章 視線制御による対応点探索

3.1 立体視に於ける対応点問題

両眼立体視により距離を求める場合、2台のビデオカメラの視線(カメラ光軸)の向きを一定の方向(多くの場合平行)に固定し、左右の像を得る。左右の画像の中から対応する特徴点の組を見

つけ出すことが出来れば、対象までの距離を求めることが出来る。この対応する特徴の組を見つけ出すことは立体視に於ける対応点問題と呼ばれ、非常に難しい問題である。対応点問題には、①特徴の選択とその表現形式、②一致の評価というパターン認識の基本的問題をすべて含むからである。

① 特徴の選択とその表現形式

画像を構成している点(画素)は明るさ/色を表わす。1つ1つの画素毎に対応を取ることは、明るさ/色が同じ/近い画素はいくつもあり、ビデオカメラの明るさ/色のセンサーとしての忠実性を考えると無理がある。複数の画素を1組として左右の画像間で対応を取る場合、どの様な画素の集合(空間的配置、表現形式すなわちパターン)を1組とするのが問題になる。最適のパターンを決める為にパターン認識が必要になり、対応点問題を解決して距離情報を得てパターン認識に利用しようとするとなんげ巡りになる。

② 一致の評価

左右カメラの視点が異なるので見かけの線分の長さや直線の成す角度は変化し、面の傾きが変化することにより面の輝度が変わるので、左右画像間の対応する形や明るさの特徴は変化する。このことは左右の特徴の一致は評価関数の絶対値で判定することが出来ないことを意味する。また、左右のカメラの視点が異なることにより、左右カメラの視野は完全に一致しない為あるいは障害物の為、一方のカメラには写っているのに他方のカメラには対応する点が写っていないことがある。左右画像間に対応点が存在しない場合、一致の評価関数が左右画像の特徴間で極値を取ったからといって、対応点だとすることは出来ない。

①、②の問題に較べれば今まであまり重要視されていない問題に③探索範囲、④自己校正がある。

③ 探索範囲

対応点候補の数を少なくし計算時間を短くする為に最大視差は何度以内、エピソード条件(脚注2)

脚注1) 文献10)と11)との間には矛盾がある。

脚注2) 左右カメラレンズの中心を結ぶ直線(基線)とその直線上にない任意の1点とによって決定される平面(エピソード面)がカメラ撮像面と交わる線をエピソード線と呼ぶ。一方の撮像面のエピソード線上の像の対応点は他方の撮像面のエピソード線上に存在する。多くの場合、左右ビデオカメラの走査線がエピソード線と一致する様にカメラを配置する。

により探索範囲を2次元から1次元にする等の制約を付けて対応点問題の探索範囲を制限することが行なわれている。これらの制約がどの位実際的なのかの検討が必要である。

特徴の対応付けが絶対に正しい組を1組でも探し出すことが出来るのなら、その点を基準に他の点の探索範囲を制限することも考えられるが、すべての特徴の対応付けの確かさらしさが相対的であるとしたら、どの様に探索範囲を制限したら良いのか一義的に決められない。

④ 自己校正

2台のビデオカメラの配置/向きを最初にセットし途中で配置/向きが変化していないことをチェックする方法が必要である。移動あるいは他の視覚的方法により得た距離情報との間で比較をすることにより距離測定系を自己校正出来ることが、測定系の信頼性を上げる為に必要である。この問題は対応点問題の範囲を越えるが、システム的に対応点問題解決の信頼性を高めることになる。

対応点探索アルゴリズムを評価する場合、以上の4点から評価しなければならない。

3.2 視線制御による対応点探索

Steinman らの実験によればヒトの視線制御には1度位の誤差があり網膜上の像は2~3度/秒の速度で移動している。ロボットの視覚を考えた場合でも、ロボットの移動に伴うビデオカメラの振動を機械的にすべて取り除くことも、ロボットが移動あるいは対象物が移動している時、対象物に対してビデオカメラを正確に向けることも難しい。したがって、ビデオカメラから得られる画像はある範囲で動き廻ることが予想される。

像の動きを止める工学的な方法としては加速度計を使うことが考えられる。ヒトの視覚では内耳前庭(三半器官と耳石器)により直線あるいは回転の加速度を感じて(多くの場合加速度刺激を受けていることは意識されない)眼球運動が引き起こされる。これらは前庭反射と呼ばれ、眼の注視機能を助けることが眼を閉じて身体回転運動をする実験により確かめられる。眼を開いた方が注視機能が高くなるので、加速度情報より視覚情報の方

が注視機能に重要であることが解かる。画像処理により動きを検出する場合、視力/解像度のオーダーで動きを検出出来、対象物を追視出来るが、対象物が動いているのか、その背景が動いているのか区別が出来ない。それを判断する為には広い視野と加速度情報が必要である。動きを止める方法は次の段階の動きの検出の中で研究する計画であるが、動きを止めないで情報処理をする方法をヒトは採用していることも考えられる。

この報告では視線制御は完全であると仮定して対応点探索アルゴリズムを構成し、3.1で設定した4点から対応点探索アルゴリズムを検討する。

3.2.1 特徴の選択とその表現形式

視線制御により左右のカメラが正面の同じ点を見ている時、視線を中心とする視野半頂角1度の範囲では左右の像は視力/画素のレベルで一致するので、左右画像上のすべての形が一致することになる。したがって、視線制御による対応点探索では特徴の選択とその表現形式の問題をそれ程考えないで良い。

特徴としては明度そのものを使うのが一番簡単であり、その表現形式としては左右の中心窩上の像を採用する。明度情報そのものが良いのか、明度情報の変化率が良いのか、また明度情報は輝度情報を電気信号に変換する時の γ 特性により変化するので、どの様な γ 特性が良いのかは実験により確かめなければならない。

3.2.2 一致の評価

一致の評価函数として対応する画素間の明度差の絶対値の中心高平均を考える(脚注)。付録A.に示す様に、左右のビデオカメラが正面の同じ点を見ている時、左右の中心窩像は画素レベルで一致する。左右のビデオカメラが対象面を見る角度の差は輻輳角であり、ヒトの場合300mm前方を見た場合で約12度である。見る角度による面の輝度の差は、面の反射特性が鏡面反射で一方のカメラに光源の光が入射する場合を除き、小さい。したがって、対応する画素間の明度差はビデオカ

脚注) この値は一致した時最小になるので、不一致の評価函数と言うのがより正確かも知れない。

メラが明るさを電気信号に変換するセンサーとしての誤差によって主に決まる。左右のビデオカメラのセンサーとしての誤差の標準偏差をそれぞれ σ_L と σ_R とすると、左右のビデオカメラが同じ点を見ている時、対応する画素間の明度差は平均値 0、標準偏差 $\sqrt{\sigma_L^2 + \sigma_R^2}$ の正規分布をする。この時、明度差の絶対値の平均値は $0.8 \times \sqrt{\sigma_L^2 + \sigma_R^2}$ になる（付録 B. 参照）。 σ_L と σ_R とはビデオカメラを校正することにより得られるので、一致の評価を絶対値で行なうことが出来る。

急激な明度勾配がある場合には一致の評価関数の値は多少大きくなることが予想される。明度勾配がどの程度かは入力画像から求まるので、補正は可能である。

中心窩全域の明度が均一の場合、評価関数の値が一致の値を取ったからといって左右のカメラが同じ点を見ているかどうかは解からない。しかし、全域が均一かどうかは簡単に解かるので、均一の場合は信号を出すようにすれば良い。

つぎに視線制御による探索範囲で対応点が見つけれない場合が考えられる。左右のカメラの視線のどちらか一方に障害物がある場合と対象物を構成している面がカメラと平行でない場合と対象物がでこぼこしていて奥行きが変化している場合である。障害物を確認する方法としては、左右ビデオカメラから対象物までの距離をそれぞれコントラスト法によって測定し、輻輳角を使った三角測量により距離を計算して、3つの距離を比較すれば良い。3つの距離に矛盾があれば、視線上に障害物が存在する。対象物を構成している面が平行でない場合と対象物がでこぼこしている場合は、明度差の絶対値の平均値を取る範囲を小さくして行き、顔に平行な平面で近似出来る範囲を探して行くことが考えられる。近似出来る範囲では左右のビデオカメラが同じ点を見ている時、一致の評価関数の値は $0.8 \times \sqrt{\sigma_L^2 + \sigma_R^2}$ になる。

3.2.3 探索範囲

2台のビデオカメラを同期させて左右像を取り込むことにより、左右像の同時性は保証される。次の節で述べる様に、片方のカメラが見ている点の向きと距離からもう一方のカメラが同じ点を

見る為のカメラの向きと距離が予想出来れば、対応点探索範囲を狭い範囲に限定することが出来る。眼球運動、焦点調節、瞳孔反応は眼の3大機能と呼ばれ、相互に影響し合っていることが知られている¹²⁾。ヒトの場合、視線制御は1度以下の誤差で制御されているので、対応点探索アルゴリズムの探索範囲も視野角で1度程度の範囲で対応点探索をすれば良い。一致が得られなかった場合、対応を取ろうとする視野の広さ程度（現在考えているのは1度程度）視線をずらして対応点探索を行なう。これを繰り返すことにより視野の広さ程度の空間分解能で距離情報を得ることが出来る。

3.2.4 自己校正

左右2台のビデオカメラの焦点合わせはヒトの水晶体と同じ原理によるコントラスト法により制御され、ビデオカメラの視線制御としては上に述べた仕様のアルゴリズムを組み込んだ視覚システムを考える。この視覚システムは知識の点からはルールのものは使わないで手続き的な画像処理として対応点探索を行なっている。視覚システムは自由に移動し、移動距離を知ることが出来るものとする。初期状態として視覚システムには制御プログラムは組み込まれているが、システム調整はされていない。工場製品として組立ラインを出た状態である。動物が誕生後の視覚経験により水晶体調節と両眼輻輳の能力を獲得する様に、この視覚システムは自己校正により視覚的距離計としてのシステム調節が可能である。

- 対象に焦点が合ったら移動または手を伸ばして対象に触れて対象までの距離を知り、レンズの位置と対象までの距離との対応を取る。対応の相関が高くなるまでこれを繰り返し、レンズの位置を入力として対象までの距離を出力とする函数/表を作成する。これを左右のビデオカメラに対して行なう。

- 左右のビデオカメラの焦点が両方とも合った状態で視線制御による対応点探索を行なう。対応点が見つかったら、左右ビデオカメラの向きと距離との対応を取る。対応の相関が高くなるまでこれを繰り返し、左レンズの位置と左ビデオカメラの向きを入力として、右レンズの位置と右カメラの向

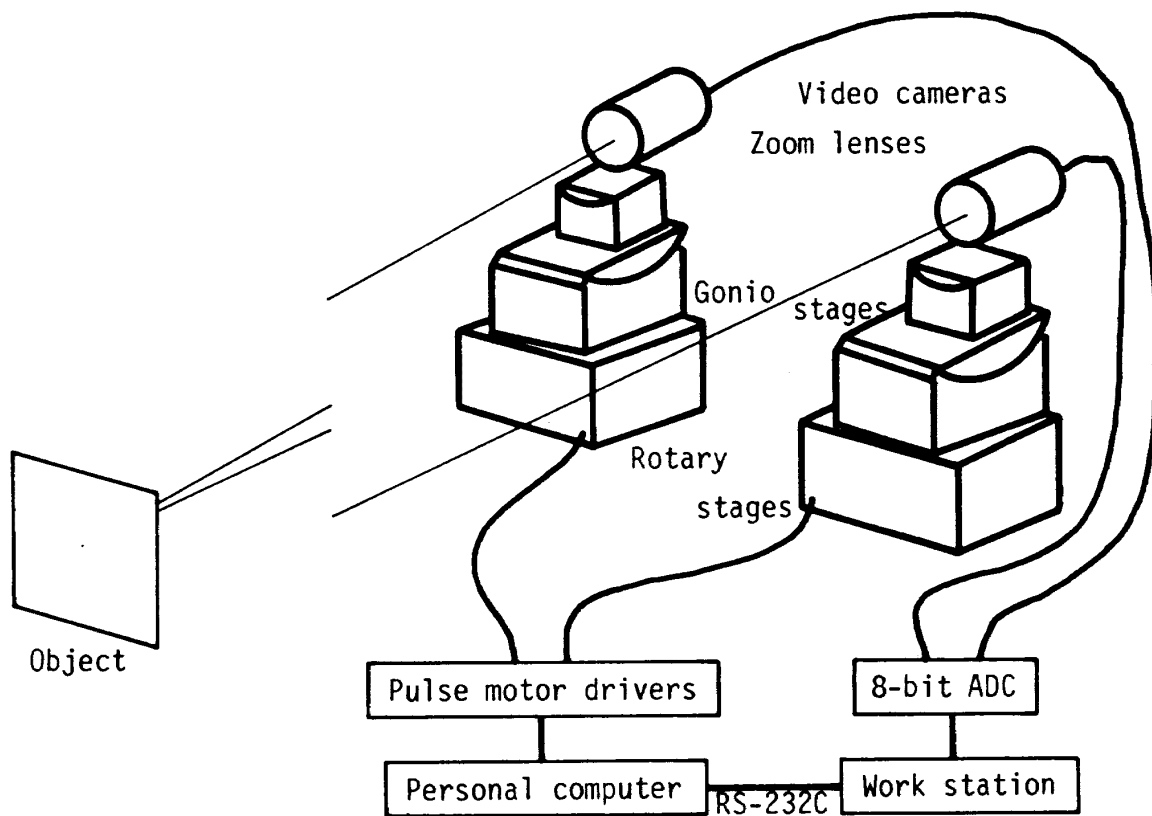


Fig.3. Experimental arrangement.

きを出力とする函数 / 表を作成する。初めは視線制御を10度位の範囲で行ない、対応点探索を行なわなければならないが、この函数 / 表が出来上がるにつれて、探索範囲は1度位に狭くなる。

以上が初期の自己校正で、函数 / 表が出来上がったら、定常状態の運用としては、3つの距離の測定値と移動距離の間で相互比較を行ないながら函数 / 表の維持管理（自己校正）をする。この報告では自己校正の予備的検討にとどめ、実験等による確認は今後の課題として考えている。

3.3 風景の特徴

3.2で述べた視線制御による対応点探索アルゴリズムが機能する為には、眼に映る風景の多くが階層的に構造化されていなければならない。構造化とは2次元的な模様容易に知覚出来ることであり、階層化とはその模様が小さな物から大きな物まで存在することである。部屋の風景を例に取れば、机の上に本立と電気スタンドがあり、本立には何冊かの本があり、本の背には表題が書かれていて、本の背の紙質は光沢があると言うのが小

さい階層の方へ表現した場合である。階層的でない例は、単純な模様の繰り返して、左右像の周期的な多重の対応が可能である。構造化されていない例は、眼の解像度の大きさの点がランダムに配置されたものである。

大きな構造により荒い視線制御が小さな構造により細かな視線制御が可能になる。小さい構造だけでは素早い視線制御は難しく、左右像の正しい対応に失敗することも考えられる。階層的に構造化された風景を主に見ることにより水晶体調節と視線制御の対応が取れる様に学習が行なわれ、階層的に構造化されていない風景を見た時にも左右像の正しい対応が取れる様になる。

第4章 実 験

4.1 実験系

ビデオカメラのCCDとヒトの網膜との視力 / 角度分解能を同程度とする為には、実験系はヒトの視覚系に較べて長さで5倍の大きさになっている。ヒトの水晶体の焦点距離17mm（無限遠を見た時）に対してズームレンズの焦点距離を88mm、ヒト

の両眼間の平均距離の65mmに対して左右ビデオカメラ間距離325mmとした。ビデオカメラから対象物までの距離は実験室の制約から約3.5mとした。この時1画面に映る範囲は250×250mmである。この実験はヒトが約0.7mの距離にある物を見た場合に相当する。実験系全体をFig.3.に示す。

4.1.1 ビデオカメラと照明

使用したビデオカメラはSONYのホームビデオカメラブロックEVI-100を使い、出力のY信号（輝度信号）をNexus6500に輸入し、8ビットでAD変換して(0~255ADU)、縦横比1対1のモノクロの480×480画素のデジタル画像を得た（詳細は文献13)を参照）。

自動利得調整(AGC)を手動にする為に可変抵抗を外付けしたが、絞りの位置がバネと直流モーターの力のバランスによって決まるので機械的不安定が残ったので、バネと直流モーターを外し、絞りの位置を全開で固定した。それでもまだ利得のドリフトが見られたので、基準として白紙を撮像して出力の大きさを確認した。

使用したビデオカメラは外部同期を取ることが出来ない。蛍光灯のちらつきの影響を少なくする為に1/100秒の電子シャッターを使用し、照度の不足を補う為に安定化直流電源によって点灯された白熱灯を使った。

4.1.2 視線制御

直交する3方向の回転軸が1点で交わる様に回転台を3層に積み上げ、回転軸の交点がズームレンズ前面の中心になる様にビデオカメラを回転台に固定した（脚注1）。

左右・上下方向の視線制御はパルスモーターにより左右方向に0.3角度分/パルス、上下方向に0.24角度分/パルスで駆動が可能で、ビデオカメラの角度分解能（約1角度分）以上の精度で位置決めが出来る（脚注2）。カメラ光軸の回りの回転は手動で調節をした。

4.1.3 入力画像

実験系に入力される画像は2次元明度画像なので、その特性を表わすものとして明度分布の空間周波数解析が考えられる。左右像の2つの空間周波数の関係を表わすものは相互相関であり、視線制御により変化する左右像の関係を厳密に表わすことが出来る。しかし、左右像がほぼ一致していることを利用した対応点探索アルゴリズムに使用する入力画像としての評価には入力画像の自己相関係数で充分である。計算手順は入力画像を離散的フーリエ変換しエネルギースペクトルを求め、それを離散的逆フーリエ変換して自己相関（周期的）を求めた。FFTソフトはSPIDERのFFTS2を使用した¹⁵⁾。この方法では入力画像がタイル貼りされた様に繰り返す場合の周期的な自己相関が求まる。

ビデオカメラにより撮像されAD変換された480×480画素のデジタル画像の内、実験に使用する部分は、レンズの中心/周辺光量比の非一様性が±1%以内の範囲がレンズ中心から130画素であることと、歪曲収差が1%以内の範囲がレンズ中心から140画素であることと、2次元のFFTが効率的に計算出来る条件から256×256画素とした。

焦点距離が88mmのレンズを使用した時の視野角は±1.0度となり、網膜中心窩によって見る範囲を含んでいる。中心窩は円であるが、画像処理の計算を簡単にする為に対応を取る領域は正方形にした。

入力画像としてはFig.4.に示す4つを考えた。入力画像0は歪曲収差の測定に使った格子で、縦・横10.6mm(5/12インチ)間隔で線が引かれている。入力画像1はテレビ用テストチャートであり、入力画像0と2との中間的なものと考えられる。入力画像2は自然の風景で手近にあったカレンダーの絵の中から階層的に構造化されているものを選んだ。入力画像3は木肌模様の見られる白木の立方体(1辺が5cm)を1つの面がカメラに

脚注1) ヒトの眼球運動ではあまり大きくない眼球運動の範囲では1点(回旋点)を中心とする回転運動で近似することが出来る。正視眼では回旋点は眼球中心よりやや後ろに位置する¹⁴⁾。

脚注2) CCDユニットセルの視野角は約0.5角度分である。

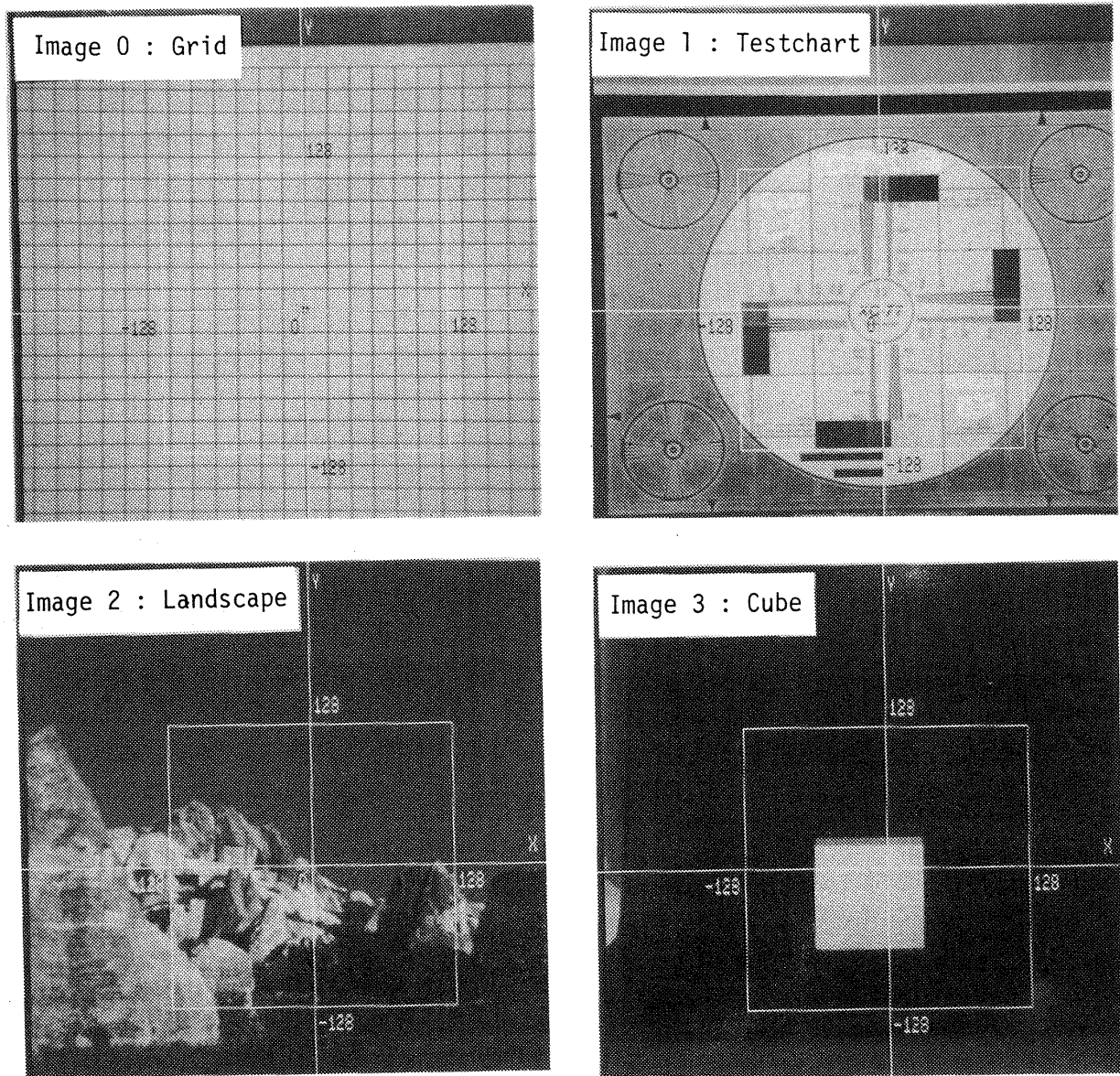


Fig.4. Input image data.

向く様にして撮像した。

入力画像に対して計算したX方向の自己相関を Fig.5.に示す。Y方向もほぼ同じである。グラフの横軸の距離は角度で示してあるが、0.5度で61画素のずれである。周期的自己相関なので $x=128$ 画素を中心として自己相関係数は対称になっている。256画素の位置で自己相関係数は再び1となる。自己相関による評価は眼で見た感じと一致していて、最も階層的に構造化されていると考えられる自然の風景を入力画像として主に実験に使った。

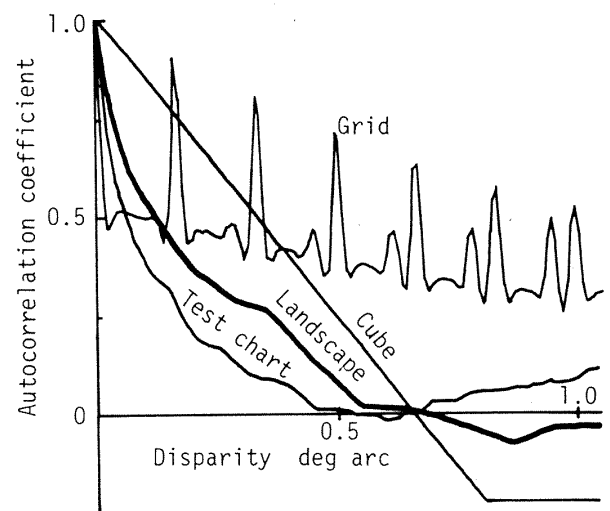


Fig.5. Autocorrelation coefficients of input images.

4.2 カメラ校正と左右カメラ調整

4.2.1 レンズの中心 / 周辺光量比

ビデオカメラを1.5m離れた白紙を見る様にセットし、デジタル画像1画面を12×12の領域に分割して、その中心の領域の1つに対応する白紙上の領域(約10mm×10mm)を基準面として、これを見る様にビデオカメラを上下・左右に振る。

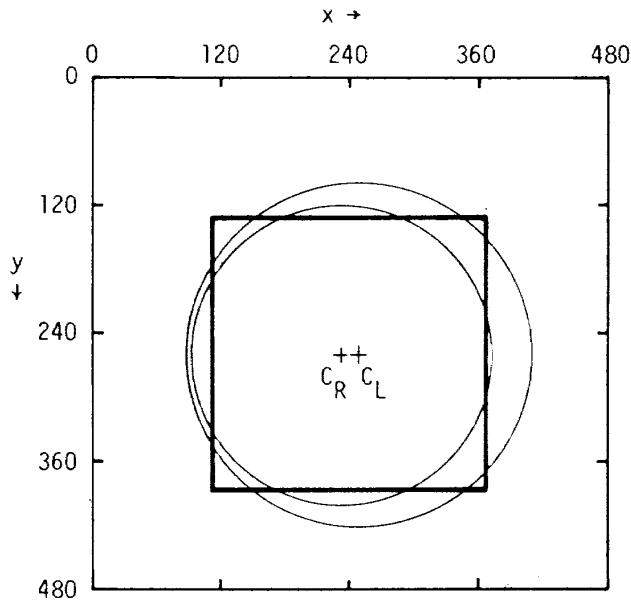


Fig.6. Correspondence areas on CCD.

この時の領域に含まれる画素の明度の平均値は CCD 受光面の照度に比例するものとして、ズームレンズの中心 / 周辺光量比を求めた¹³⁾。左右のビデオカメラのレンズ中心の CCD に対する位置は 24 ユニットセルずれていたが (Fig.6.)、中心のずれを補正すれば左右のズームレンズの中心 / 周辺光量比は良く一致していた (Fig.7.)。ビデオ信号を AD 変換するタイミングを調節することにより、左右デジタル画像のレンズ中心の位置を一致させた。

4.2.2 γ 特性

使用したビデオカメラは γ 補正を OFF にすることが出来ないので、校正した ND フィルター (透過率 1/2, 1/4, 1/8) を使って γ 特性を測定した (Fig.8.)。得られた測定結果を Table 2. に示す様に区間に分け、区間ごとの γ 特性を求め、計算により補正用ルックアップテーブルを作成し、入出力特性を直線化 (γ 特性を 1 に) した。さらに、ND フィルターと計算により利得調整を行ない、左右ビデオカメラの入出力特性を揃えた (Fig.9.)。非直線性は 5% FS 程度であったので、ビデオカメラの入出力特性をヒトの眼と同じ対数特性にすることは誤差を増幅するので、今回は行なわなかった。

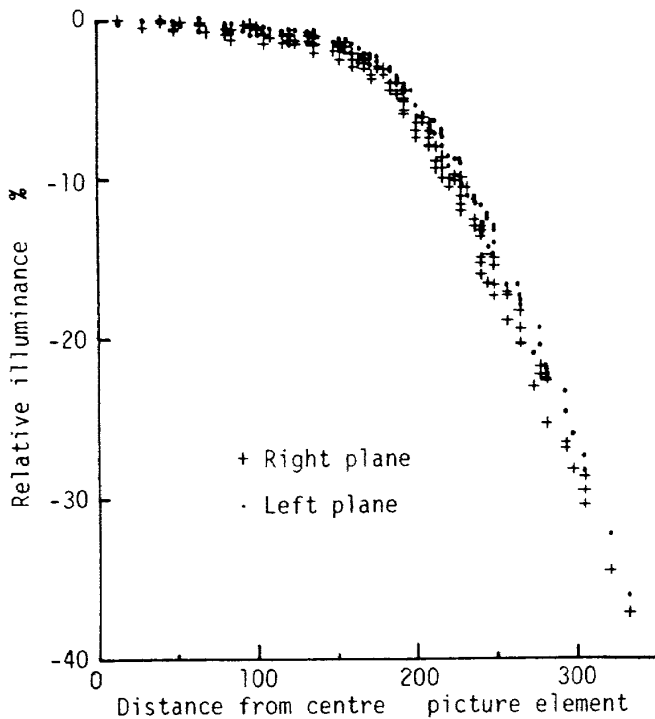


Fig.7. Relative illuminances of image planes due to lenses.

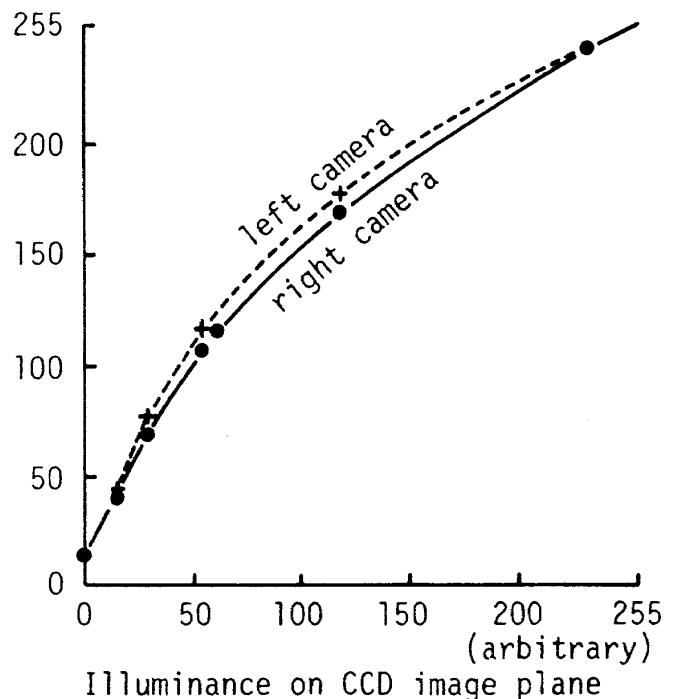


Fig.8. Gamma characteristics.

Table 2. Linealisation of video camera outputs (E).

Right camera		Left camera	
E range (ADU)	Illuminance on CCD	E range (ADU)	Illuminance on CCD
13 - 69	$0.54 E^{-7}$	13 - 77	$0.47 E^{-6}$
69 - 107	$0.1063 E^{1/0.75}$	77 - 117	$0.06107 E^{1/0.70}$
107 - 170	$0.02262 E^{1/0.60}$	117 - 178	$0.009555 E^{1/0.55}$
170 - 244	$0.00876 E^{1/0.54}$	178 - 244	$0.001923 E^{1/0.47}$
244 - 255	$0.001145 E^{1/0.45}$	244 - 255	$0.001145 E^{1/0.45}$

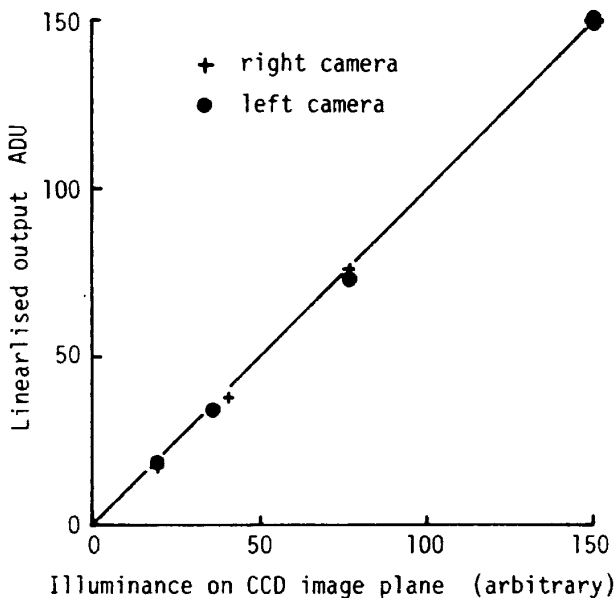


Fig.9. Linearities of video cameras.

4.2.3 歪曲収差

レンズの歪曲収差を測定する為に縦横10.6mm (5/12インチ)ピッチの格子(入力画像0)をレーザープリンターで作った。レーザープリンターの構造から考えて、横方向の精度はかなり高いと考えられるが、縦方向はローラーによる紙送りの精度によって決まる。また、トナーの定着処理の為に加熱や湿気などによる紙の収縮なども考えられる。物差しによる測定では印刷された格子の線の位置は $\pm 0.5\text{mm}$ (3.5mの位置で撮像した時の

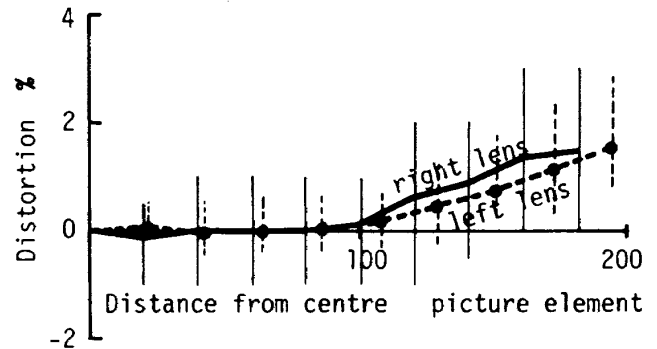


Fig.10. Distortions of lenses.

デジタル画像の1画素の大きさ、0.5角度分)以内であった。左右のズームレンズの歪曲特性はほぼ同じで、レンズの中心から140画素の位置での歪曲収差は $+1\% \pm 1\%$ であった(Fig.10.)。

4.2.4 左右カメラの調整

左右ビデオカメラの正面に入力画像を貼り、左右のビデオカメラの焦点を手動で合わせてから、3つの回転角を調整して左右のデジタル画像が一致する様にする。次にズームレンズの倍率を調整して左右の画像の大きさが同じになる様にする。これらの調整は、左カメラの出力を緑色で、右カメラからの出力を赤色でカラーモニター上に表示させながら行なった。左右カメラ利得を最大にして、NDフィルターで荒い調整を行ない、かつ、飽和画素を無くし、最後に、ソフト的に利得の微調整を行ない、一致の評価関数が最小になる様にした。

Table 3. Experimental parameters.

Input image	Grid, Test chart, Landscape, Cube
Illuminance	1:2
Field of view/ Resolution	Focal length: 88mm, 11mm Number of picture elements: 256x256, 32x32, 4x4 Size of picture elements: 1x1, 5x5, 20x20, 60x60, 240x240 Visual acuity: 1.2, 0.4, 0.1
Difference between left and right cameras	Magnification: 0%, 5%, 10% Visual acuity: right: 1.2, Left: 1.2, 0.4, 0.1 Roll angle: 0°, 2°, 8° Sensitivity: 0%, 30%, 50%

4.2.5 予想される結果

一致の評価関数としては、相互相関の代わりに計算時間を少なくする為に左右画像の明度差の絶対値の平均値

$$d_{\text{mean}} = \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^n |R_{ij} - L_{ij}| / n^2$$

を採用する。この評価関数が最小となる位置を中心視差0とし、右カメラは固定し、左カメラを左右・上下に振った角度を中心視差として横軸にとり、左右のデジタル画像（明度データ）から計算した評価関数の値 d_{mean} を縦軸にプロットする (Fig.11.) (脚注)。

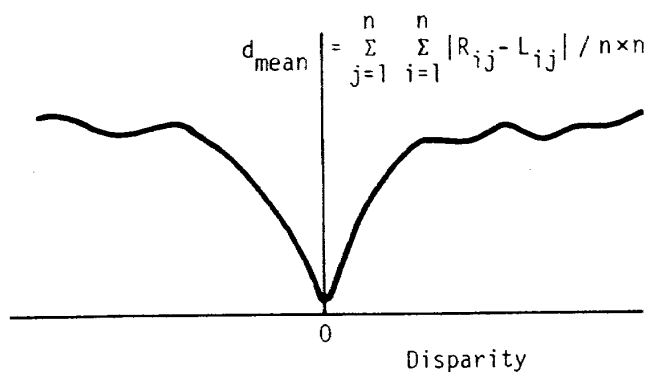


Fig.11. An expected result.

脚注) 中心視差とは左右画像の中心に於ける視差である。中心視差が0でも画像中心以外では視差（左右像のずれ）は0ではない。

ビデオカメラのセンサーとしての変動（標準偏差）は前回の報告¹³⁾より1.3%であるから、3.2.2で述べたことから一致した時の評価関数の最小値は4ADU（AD変換単位）となり、その安定性は256×256画素の対応を考える場合、4ADUの1/256となることが予想される。実際には左右画像には多少の画素のずれがあるので、2値画像（入力画像0）や明度がステップ状に変化する画像（入力画像1）では、 d_{mean} はそれ程小さくならないと考えられる。

自己相関係数と同様に d_{mean} も変化するものとするれば、入力画像0では正しい対応を見つけ出すことが出来ないが、その他の入力画像では一致からの左右の視線のずれ（中心視差）が0.5度程度の範囲内であれば視線制御により対応点探索が可能であると予想される。

4.3 実験結果

左右のビデオカメラの特性が同じになる様に調整し入力画像、照度、視野を変えた実験と、左右ビデオカメラの特性で倍率、視力、傾き、感度に差を付けた実験とを行なった (Table 3.)。以下の実験では撮像条件は特に断わらない限り、ズームレンズの焦点距離は88mm、対応を取る画素数は

256×256である。

4.3.1 入力画像

(1) 格子

一致の評価関数はX, Y方向とも中心視差が0.18度間隔で繰り返し極小値が現われ (Fig.12.), 自己相関係数の極大が0.17度間隔に現われ, 10.6 mm 間隔の格子を3.5mの距離から見た時の0.17度とはほぼ一致する。また, 多重の対応が可能であることをこの評価関数は適切に表わしている。

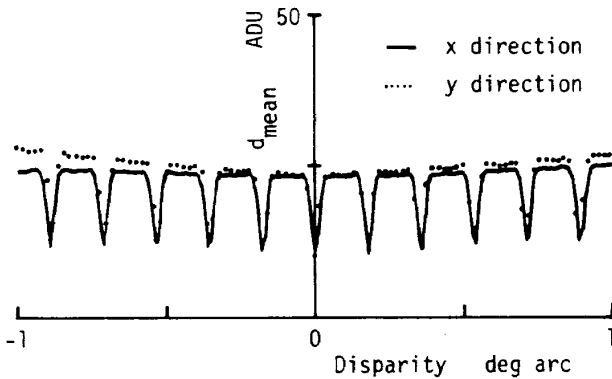


Fig.12. A variation of d_{mean} (grid).

(2) テストチャート

一致の評価関数はX方向で中心視差約0.7度以下, Y方向で0.6度以下で中心視差0に向かって単調に減少する (Fig.13.). このテストチャートはX, Y方向とも似たパターンになっているので評価関数の値もX, Y方向ともほぼ同じ値を取っているものと考えられる。中心視差0.4度以上でXとY方向の評価関数の値が異なるのはテストチャ

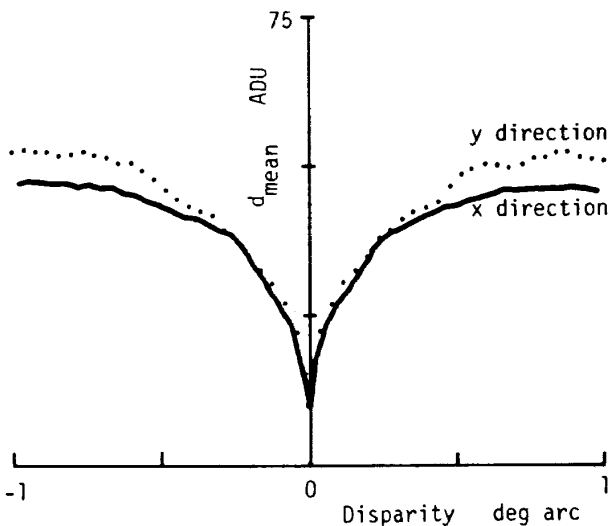


Fig.13. A variation of d_{mean} (test chart).

ートが縦横比3対4の長方形であることによる縁の影響が考えられる。

(3) 風景

風景では一致の評価関数の等高線図を作成した (Fig.14.). 中心視差が±1度の範囲ではX, Y方向とも0.1度間隔で441点の評価関数値を求めた。周辺の5箇所に極小値が存在し, 8近傍の評価値が最小になる位置に視線を動かすことにより441点中79点がそれらの極小値に安定した。中心視差が0.5度以内であれば8近傍の評価値が最小にな

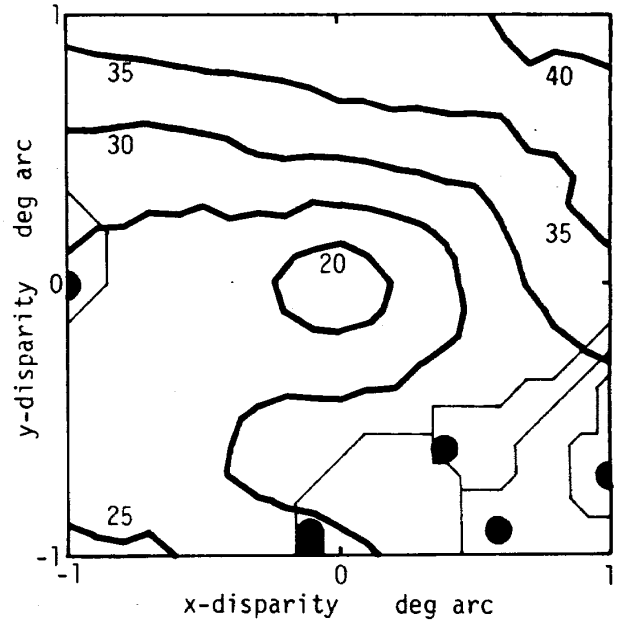


Fig.14. A contour map of d_{mean} (landscape).

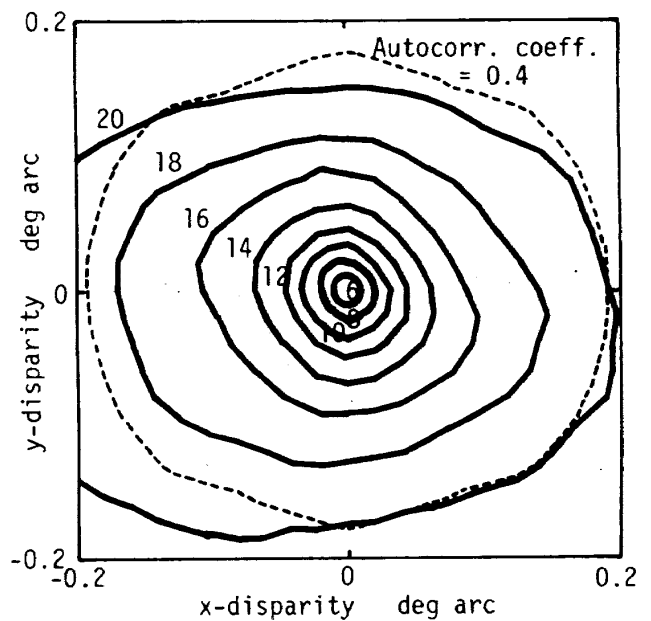


Fig.15. A contour map of d_{mean} (central part of landscape).

る位置に視線を動かすことにより中心視差 0 の位置に視線を導くことが可能であった。中心視差が ± 0.2 度の範囲では X, Y 方向とも 0.02 度間隔で評価函数値を求めた (Fig.15.)。この範囲であれば等高線はほぼ同芯円的である。Figure.15. には自己相関係数が 0.4 の位置を点線で示してある。この自己相関係数は周期的なので、X 軸と Y 軸とに関して対称である。

(4) 立方体

背景に木目のある合板を使ったので、背景だけでも左右のビデオカメラの視線が一致した時、評価函数はわずかだが最小値を示した (Fig.16.)。立方体の積木の 1 つの面 (正面) をカメラ光軸に対してほぼ垂直にし立方体側面と上面はあまり見えない様に背景に追加した場合、一致の評価函数の極小ははっきりしなくなった。この時立方体が画面に占める割合は 15% 程度であった。背景を濃い緑色にして立方体だけを見た場合には一致の評価函数は中心視差が約 0.1 度ずれた位置に明瞭な極小値が現れた。この位置は背景 (立方体の背面) 上で合っていたビデオカメラの左右の視線が立方体の正面で合った位置であった。奥行きがある対象では、奥行き方向の変形が大きく左右の画像が異なり、一方のカメラで見える面が他方で見えなかったり、照明による影が発生したりする。3次元物体を対象とする研究は次の実験課題として計画しているので、今回は予備実験にとどめた。

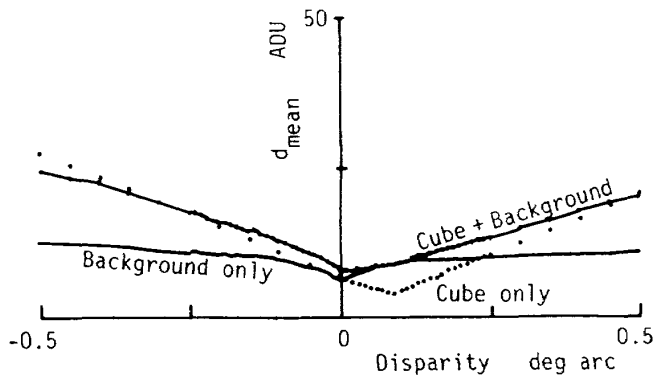


Fig.16. A variation of d_{mean} (cube).

4.3.2 照度

基準になる照明条件は、白熱灯を点灯している安定化直流電源の電圧を調整しデジタル画像の最大明度を 255 ADU 以下にした。この時の平均明

度は 51 ADU, 標準偏差は 37 ADU, 最大明度は 192 ADU であり、風景画の近くに置いたスチールカメラ用露出計の出力は 7 mV であった。

原理的に対応点探索アルゴリズムは照度の変化に強いと考えられるが、照度の影響を見る為に露出計の出力が 15 mV になる様に照明を明るくした実験を行なった。この時の平均明度は 126 ADU, 標準偏差は 70 ADU, 約 15% の画素の明度は飽和していた。基準の照明条件に較べて照度は、露出計の測定値では約 2.1 倍、ビデオカメラの画像の平均出力では約 2.5 倍、明度ヒストグラムピークの移動からは約 2.7 倍になった (Fig.17.)。この時の一致の評価函数の値は中心視差が ± 1 度付近では約 2 倍になったが、中心視差が 0 度では 5.8 ADU と 7.3 ADU とあまり差が無かった (Fig.18.)。AD

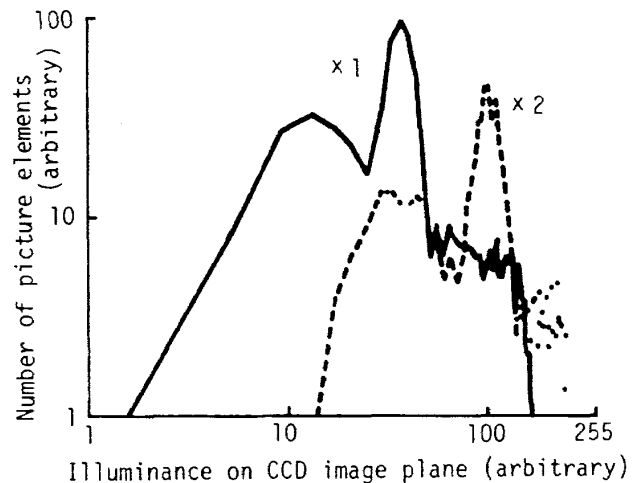


Fig.17. Histograms of illuminance.

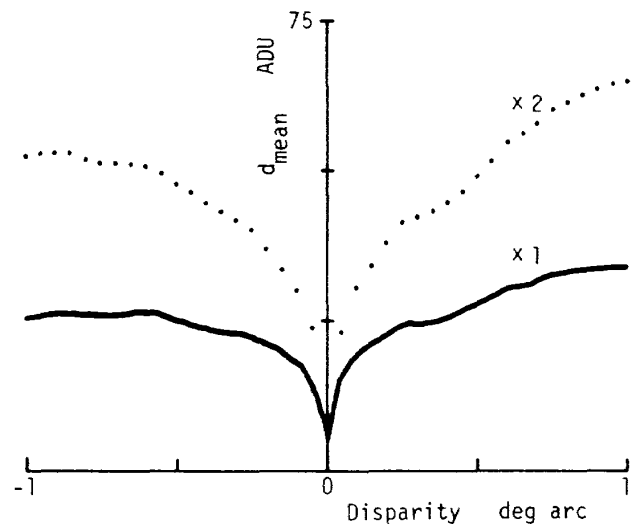


Fig.18. Effect of illuminance.

変換と γ 特性1の補正が飽和しない範囲では入力画像の照度(露出計の測定値)とデジタル画像の明度とは比例する。ヒストグラムのピークの移動から求めた照度は飽和の影響がないので、露出計の測定値と一致しなければならない。一致しない原因としては照明のむらと補正の不完全さが考えられる。

4.3.3 視野

視線制御による対応点探索アルゴリズムの機能範囲が視野の広さによってどの様になるかを調べる為に、焦点距離を変えた実験を行なった。焦点距離を変えると解像度も変化するので、さらに、対応を取る画素数を変えることにより解像度は一定に保ちながら対応を取る領域の広さを変えた実験と、画素の大きさあるいは視力を変えることにより対応を取る領域は一定に保ちながら解像度を変えた実験を行なった。

(1) 焦点距離

ズームレンズの焦点距離の最大値88mmと最小値11mmで実験を行なった(脚注)。この時の視野半頂角は計算により1.0度と8.6度となる。撮像対象は同じ風景画を使ったので、ズームレンズの焦点距離を変えると撮像範囲が変化し、焦点距離の影響だけを抽出することは出来ない。焦点距離が88mmの場合、探索範囲が風景画(視野 ± 3.6 度)に収まるが、焦点距離が11mmの場合、カメラを5度振ると画像の中心が風景画を取り付けてある板から外れて背景の濃い緑色の暗幕が写った。

焦点距離を88mmから11mmにすると視野角は約8倍になるが、視野角に比例して対応点探索アルゴリズムが機能する角度範囲は0.6度から5度へ増加した(Fig.19.)。画素数で表現すれば、焦点距離が変化してもアルゴリズムが機能する範囲は73画素と74画素とあまり変化はなく、視野の幅(± 128 画素)の1/2程度のずれまでアルゴリズムは機能した。付録A.に示す様に焦点距離11mmで視野角が広がった場合でも、対応を取る領域の周辺でも左右像は2画素程度のずれしか生じない為と考

脚注) 焦点距離の最大値88mmと最小値11mmは公称値であり、実測値ではない。

えられる。

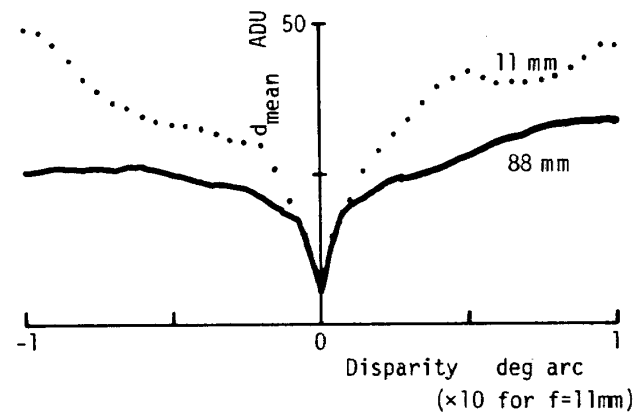


Fig.19. Effect of focal length.

(2) 画素数

1つの画素の大きさは入力デジタル画像の画素の大きさとして、対応を取る画素数を 256×256 画素(視野半頂角1.0度)、 32×32 画素(7.9角度分)、 4×4 画素(1角度分)とした場合、それぞれ73画素、18画素、4画素の左右視線のずれの範囲で左右像の一致の指標は単調に変化した(Fig.20.)。

対応を取る画素数が少なくなるにつれて、その画素数で表わされる画像が階層的に構造化されているとは言えなくなり、この報告で提案しているアルゴリズムの機能の仕方は、対応を取る領域の特徴、したがって、領域の位置に依存する様になると考えられる。しかし、画素数が少なくなっても、左右の視線が一致した時の d_{mean} の極小値はあまり変わらなかった。

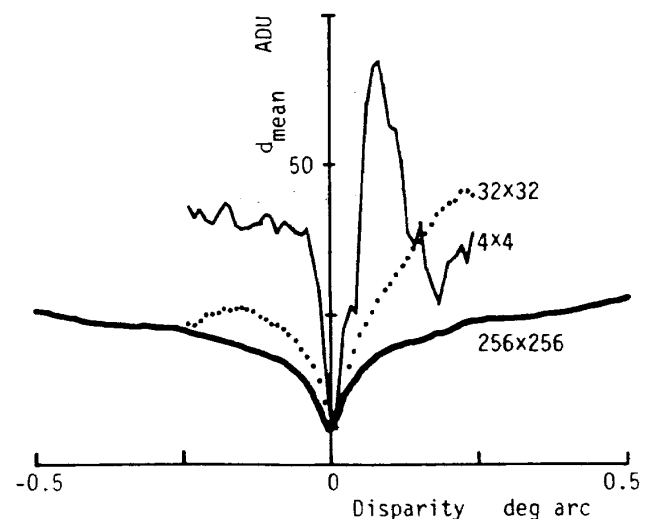


Fig.20. Effect of picture element number.

(3) 画素の大きさ

CCDのユニットセルの大きさを何種類も用意するのは困難なので、得られたデジタル画像からソフト的に画素の大きさの異なるデジタル画像を計算した。5×5画素毎の明度平均を新しい1画素としたものは角度分解能約2.5分(視力0.4)、20×20画素毎の明度平均を新しい1画素としたものは角度分解能約10分(視力0.1)になる。この程度の大きさまでならば一致の評価函数による対応点探索が可能な範囲は変わらなかった。60×60画素毎の明度平均を新しい1画素としたものは、対応を取る領域を4×4画素で表現することになるが、一致の評価函数による対応点探索が可能な範囲は拡大した。240×240画素毎の明度平均を新しい1画素としたものは、対応を取る領域を1画素で表現することになり、一致の評価函数の極小値の位置は中心視差0の位置から少しずれたが、対応点探索はまだ可能であった(Fig.21.)。

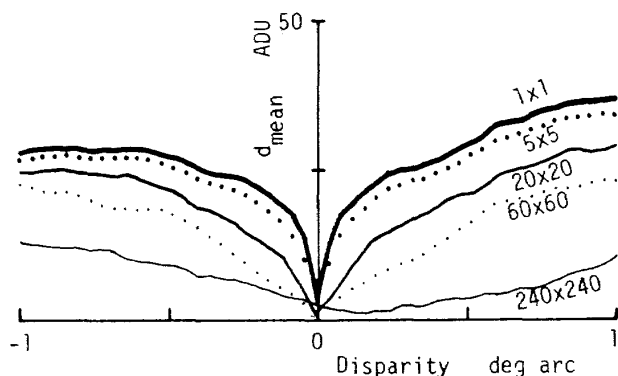


Fig.21. Effect of picture element size.

(4) 視力

焦点合わせを調整してビデオカメラの角度分解能を1.2(合焦点)、0.4、0.1と変えて実験を行った。視力は、ランドルト環の視力表をビデオカメラで撮像しモニターに表示したものを人が見て判定した(脚注)。

焦点合わせにより視力を変えた時の一致の評価函数の変化は、画素の大きさにより角度分解能を

脚注) 前報では合焦点の視力は1.0であった。より厳しい判定基準を採用した(変調深さが0.5になる角度分解能を視力とした)為と考えられる。

変えた時の結果とほぼ同じであった(Fig.22.)。

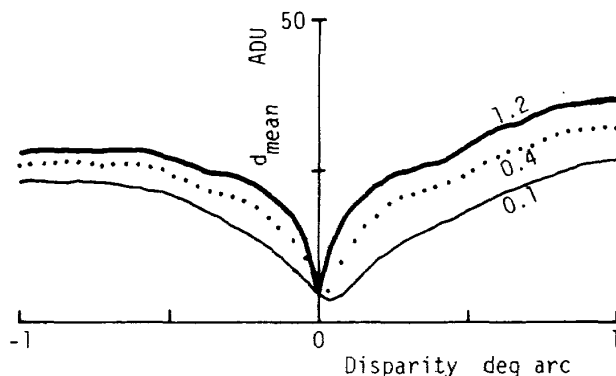


Fig.22. Effect of visual acuity.

4.3.4 左右カメラの調整差

左右ビデオカメラの個体差と調整差がどの程度まで許容されるかを調べる為に、以下の実験を行った。

(1) 倍率差

左のズームレンズの焦点距離を短くして、左右の像の倍率の差を5%、10%として、実験を行った。10%程度の倍率差までアルゴリズムは充分機能した(Fig.23.)。

対応を取る右の領域は±63角度分であるが、倍率差を5%、10%とした時の左の領域はそれぞれ±66角度分、±69角度分となり、対応を取る左右の領域の中心が一致した時、領域の周辺ではそれぞれ3角度分、6角度分の視差が生じる。領域全体で画素数の重みを掛けて平均視差を求めると、2.1角度分、4.2角度分となる。左右のカメラの倍率が同じ場合で、中心視差が2.3分、4.6分の時の d_{mean} を求めるとほぼ倍率差が5%、10%の時の d_{mean} の極小値とほぼ一致した。

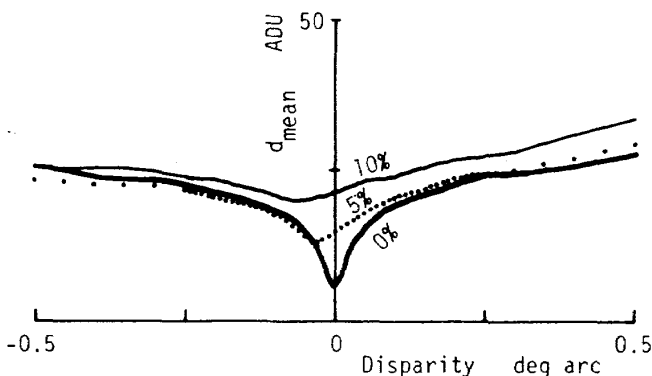


Fig.23. Effect of magnification difference.

(2) 視力差

右のカメラは焦点が合った状態にして(視力1.2), 左のビデオカメラの焦点を調節して視力を1.2, 0.4, 0.1として実験を行なった(Fig.24.)。

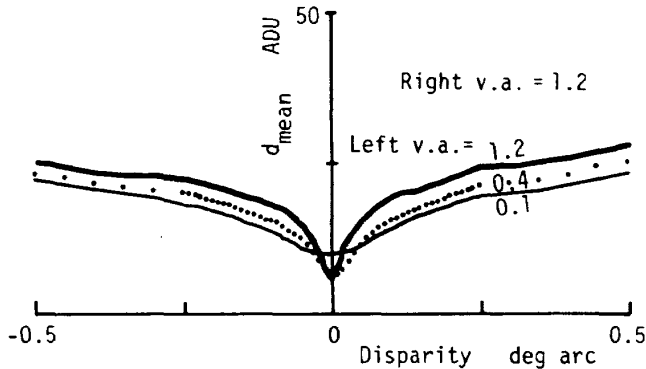


Fig.24. Effect of visual acuity difference.

左右のビデオカメラの視力を同じ様に変えた場合(4.3.3(4)), d_{mean} の極小値はあまり変わらないが, 片方の視力だけを変えた場合には, 視力差が大きくなるにつれて d_{mean} の極小値は大きくなった。視力が低下するにつれて, 画像がぼやけて明度が平均化されるので, 焦点が合った画像との明度差の絶対値の平均が大きくなる為と考えられる。

(3) 傾き差

左右ビデオカメラの水平または垂直方向を一致した状態から左カメラを右カメラに対しカメラ光軸回りに2度と7.6度(カメラの回転台への取り付け方により制約された)回転した場合の一致の指標の変化をFig.25.に示す。

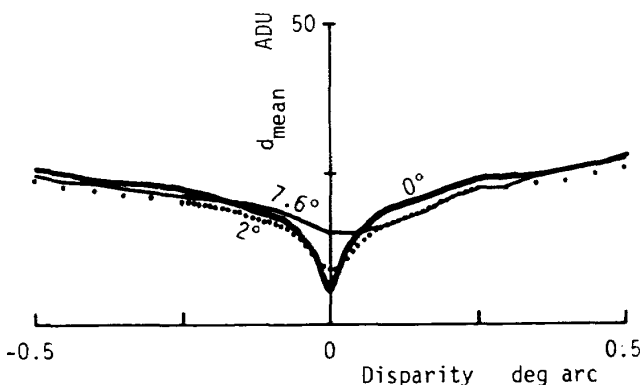


Fig.25. Effect of roll angle difference.

この時の対応を取る領域での重み付き平均視差は1.7分, 6.4分となった。左右のカメラの水平または垂直方向が一致した場合で中心視差が1.7分, 6.4分の時の d_{mean} に較べると, 傾き差が2度, 7.6度の時の d_{mean} の極小値の方が小さかった。

(4) 感度差

左カメラのデジタル画像データ(濃淡情報)に0.9, 0.7, 0.5の係数を掛けて, ソフト的に左右のカメラの感度に差を付けた時の指標の変化を求めた(Fig.26.)。感度差が10%の時の指標の変化は感度差が0%の時とほぼ同じであったので, 図からは省略した。30%の感度差に対しても対応点探索アルゴリズムは機能した。

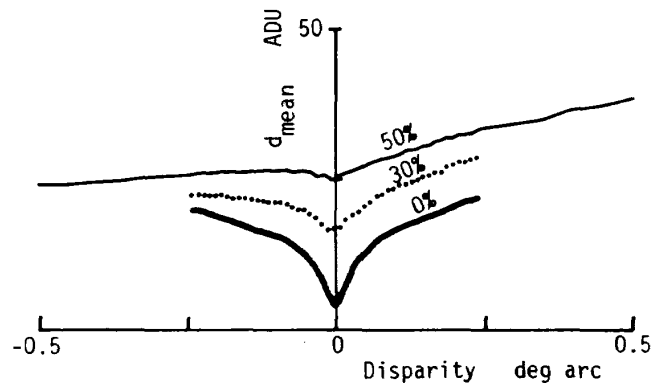


Fig.26. Effect of sensitivity difference.

第5章 考 察

5.1 画像入力条件の一般化

今回の実験では見る対象はビデオカメラの正面の位置にあって, その表面はビデオカメラの光軸にほぼ垂直であった。対象がビデオカメラの正面からずれたり, 対象表面が傾いたり, でこぼこ(遠近)がある場合, 左右カメラが同じ点を見ている, 対応を取る画像全体としては左右像の差は大きくなる。

対象がビデオカメラの正面からずれた場合, 例えば, 対象までの距離が300mm, 正面から左または右へのずれが20度の場合, 左右の眼から対象までの距離が異なることによりヒトの左右の網膜像の大きさには7%程度の差が生じる。これはかなり極端な例で, 対象までの距離が遠くなれば,

左右網膜像の大きさの差は小さくなる。また、ヒトの視覚では頭の回転により顔の正面で対象を見ようとするので、対象の顔の正面からのずれはあまり大きくはならない。

4.3.4の(1)倍率差と(3)傾き差の実験から、画面の平均視差が数角度分位までは視線制御による対応点探索アルゴリズムは機能したので、対象の位置やその表面の傾きやでこぼこによる左右像の差が画面平均で数角度分程度までは対応点探索は可能であると予想される。

対象表面が傾いたりでこぼこして、左右カメラの光軸の交点（凝視点）より前後にあることによる像のぼけに対しては、レンズの焦点深度内であればぼけは無視出来、4.3.3(4)の視力の実験より視線制御による対応点探索アルゴリズムはぼけに強い。したがって、実際の3次元の風景を入力した場合でも視線制御による対応点探索はかなりの範囲で可能であると考えられる。詳細な計算と実験は次の研究として行なう予定である。

5.2 感度調整

ヒトの眼は見る対象の明るさに応じて瞳の大きさを変え、錐体と杆体とが交代し、視細胞の感度を変えることにより広範囲の照明条件に対応しているが、同時に識別可能な範囲は1対30程度（5ビット）である。ビデオカメラが同時に識別可能な範囲は1対100程度（7ビット）であるが、絞りと電子シャッターを使うことにより 10^2 ルクスから 10^5 ルクス（直射日光下）の照度に対して、高次の画像処理に適した露出と高解像度の画像を得ることが出来る。今回の実験では絞りと電子シャッターを固定した為、照度を2倍程度変えただけであるが、視覚アルゴリズムの検証には照度を広範囲に変えた実験が必要である。

左右のビデオカメラの感度調整は4.3.4の(4)感度差の実験から視線制御による対応点探索アルゴリズムにはそれ程の厳密さは必要なさそうである。左右独立に感度調整が可能かもしれない。4.3.2の照度の実験では照明を明るくした時、約15%の画素が飽和していたが、対応点探索アルゴリズムは機能している。原理的にはかなりの画素が飽和

していてもアルゴリズムは機能すると考えられるので、それ程頻りに感度調整をする必要はなく、ステップ的な感度調整で良いものと考えられる。

5.3 視野と視線制御

ヒトの眼球の内側には網膜が水晶体の近くまで伸びていて、計算によれば眼の光軸に対して90度より大きな角度で眼に到達する光でも眼に入り、ヒトの視野は左右±100度にも達する^{16,17)}。

焦点距離を変えて視野を±1度と±8度とした4.3.3(1)の実験では視野の1/2以上のずれに対して視線制御による対応点探索アルゴリズムは機能した。また、(3)の画素の大きさを変えた実験でもアルゴリズムは機能した。これらの結果からヒトの視覚と同程度の広い周辺視機能が与えられ歪曲収差の影響がなければ、左右の中心視差が50度以上ずれても正しい対応点を捜し出すことが出来るものと考えられる。

ヒトの眼1個当たり視細胞は錐体650万個、杆体1億2千万個、視神経百万本程度と報告されている。もし、全視野に渡って中心窩の解像度で見ようとするならば、錐体細胞の数は現在の十倍以上必要になる。視神経の数も、脳に於ける視覚情報処理もそれに比例して増加しなければならない（脚注）。半球（立体角 2π ）の視野に渡って視力1（角度分解能1分）を得る為には、約8000万ユニットセルのCCDが必要になる。

ヒトの視覚が限られた視細胞、視神経、皮質で鋭い視覚（視力）を得る為には、均一で広い視野は締めて、鋭いピークのある視力分布が得られる様に視細胞、視神経、皮質を配分しなければならない。入手が容易なCCD（約40万個のユニットセル）とハーフミラーを複数使うことによりヒトの網膜の様な視力分布を持ち、広い視野のビデオカメラを構成することが考えられる。

視力分布がある場合、見たい所を高い解像度で見ると視線制御が必要になる。機械的な視線制御を行なうことは、視覚系の応答時間を遅くし、

脚注) ニホンザルやアカゲザルなどの大脳皮質の総面積の約55%が視覚機能に関連した領野で占められている¹⁰⁾。

Table 4. Comparison between the present algorithm and human vision.

Difference between left and right cameras/eyes	Operating range of the algorithm	Human stereopsis (Hatada 1988)
Magnification	10%	a few percentage (possible up to 15%)
Visual acuity	1.2/0.1	10% (vagueness)
Roll angle	8°	6°
Sensitivity	30%	30% (unstable more than 70%)

信頼性を低下するが、ヒトの場合、視線制御と情報処理を上手に行なうことにより主観的には全視野に渡って必要な解像度で見えている様な感じさえる。

視野を狭くすることにより見ている狭い範囲の輝度に合わせて視細胞の感度を調整して最適の条件で画像を取り込むことが可能になる。もし全方位を同時に見ることが出来る場合、屋外で日向に居る時には常に太陽が見えてしまい、太陽のまぶしさの為それ以外のものが見えなくなることも考えられる。

レンズ光軸付近は像の歪みも少なく、明るく、レンズの特性が優れている。視線を固定して左右像を得る従来の対応点探索では、左カメラの中心で見たモノを右カメラの端で見る場合、今回使用したレンズの特性では40%程度の明度差が生じる。しかし、視線制御による対応点探索アルゴリズムではレンズの中心/周辺光量比の分布が同じであればその影響を受けない。

眼球運動により視線制御し注視点を移動させながら見慣れないモノを視線でなぞり認識することと手の指を使って外界を手探りして認識することには近いものがある。感覚系の情報処理は同様なアルゴリズムで行なわれているものとすれば、視線制御は視覚情報処理の重要な一過程となる。

広い視野は動物の生存にとって外敵から身を守る為に必要不可欠であり、兎や馬にとって死角は自分の体により視野が遮られる範囲だけとも言われている。ヒトの視野は左右±100度程度に制限されているが、両眼の共通視野が左右±60度も

あり、視線制御により左右像を融合させることによりわずかな視差の検出(立体視)が可能である。立体視により外界の3次元世界を直接知覚出来る様になり、視野中心に神経を集中することにより高度の認識と作業が可能になり、ヒトは文字を発明し文明を発展させることが出来た。

5.4 ヒトの視覚との比較

左右像を左右眼にそれぞれ呈示する方法による立体視の研究が行なわれ、左右眼に呈示する画像に極端な差異があると視野闘争が発生することが報告されている¹⁸⁾。

立体視する為には左右像が単一像として知覚(融像)出来なければならない。融像する方法として対応点探索により左右像をある視差内に維持し続けることが考えられる。このことから立体視可能な条件と対応点探索アルゴリズムの機能範囲とはかなり近いことが予想される。

立体視が可能な条件と左右カメラの調整差がある場合の視線制御による対応点探索アルゴリズムの実験結果をまとめたものをTable 4.に示す。今回提案したアルゴリズムは上の条件をほぼ満足している。比較の対象としたヒトの立体視能力に関しては畑田がまとめた文献¹⁸⁾から引用した(付録C.を参照)。

5.5 テンプレート・マッチングとの比較

対応点探索は領域に基づく方法と特徴に基づく方法の大きく2つの方法に分けることが出来るが、提案アルゴリズムとテンプレート・マッチングは

ともに前者の方法に分類される。テンプレート・マッチングは予め標準図形(テンプレート, 鋳型の意)を用意しておき, 画像の一部とテンプレートとを重ね合わせ対応を取る方法である。立体視における対応点問題に対するテンプレート・マッチングの適用では, 左右画像の一方の画像の一部をテンプレートとして他方の画像の一部と照合し対応点を求めることが行なわれている。今回採用した一致の評価函数(対応を取る領域の明度差の絶対値の平均)は従来のテンプレート・マッチングでも使われている。

従来のテンプレート・マッチングでは, 画面はヒトの視野と同じ位広く, それを 512×512 程度の画素で表わしている。その中で対応点探索をするのでテンプレートの大きさはあまり大きく出来ないし, 画面の解像度はヒトの視覚に較べて悪い。テンプレートの大きさは計算時間を少なくする為と左右カメラ視点の相違による左右像の差を小さくする為に多くの場合 16×16 画素程度である。

提案している視線制御による対応点探索アルゴリズムの特徴はヒトの視覚系と相似の光学系を採用した点にある。現在のCCD製造技術ではヒトの視覚と同程度の解像度を確保しようとする長い焦点距離のレンズを使わなければならない。この様な2台のビデオカメラで同じモノ/点を撮像した時得られる左右像は解像度のレベルで一致する。したがって, 対応を取る領域を多数の画素(今回は 256×256 画素)で表わすことが可能になる。対応を取る領域を多数の画素で表わすことは, 解像度により画素データの精度が変わらないものとするれば, 一致の評価の信頼性を向上させる。

長い焦点距離のレンズを使うと視野が狭くなり, 視線制御により対応点探索をしなければならない。視線制御による対応点探索では対応を取る領域を常にレンズ光軸付近の狭い視角の範囲で見るので, 5.3に書いた様にレンズの歪曲収差と中心/周辺光量比の影響を受けない。また, 撮像範囲が狭いので, 焦点合わせと感度を最適の条件にして撮像することが出来る。

5.6 提案アルゴリズムによる距離測定の精度

視線制御による対応点探索による距離測定精度は, ビデオカメラ視線制御の正確さ, ビデオカメラの角度分解能, 一致の評価函数の感度によって決まる。今回使用した実験系では, 左右方向の回転台のバックラッシュは 0.3 角度分, ビデオカメラの角度分解能は約 1 分, 一致の評価函数は 0.6 角度分/ 2 パルスの移動の検出が可能であった。これらのパラメータの中で, 実験系の距離測定精度を決めるものはビデオカメラの角度分解能である。今回使用した実験系で距離測定の精度を計算すると, 1m の距離で 0.2% の誤差, 10m の距離で 2% の誤差になる。ヒトの視覚に換算すると(カメラ間距離が 65mm の場合), 0.2m の距離で 0.2% の誤差, 2m の距離で 2% の誤差になる。

ヒトの視覚では視線制御に 1 度程度の誤差があるので, 実験系程の精度では絶対距離を得ることは出来ない。しかし, ヒトは両眼視差を検出して実験系より高い精度で相対的距離感覚を得ることが出来る。

第6章 まとめ

ヒトが視線制御をしながら左右網膜像の中心窩で同じモノ/点を見ていることに学んだ, 視線制御による対応点探索アルゴリズムを提案し, 実験によりその機能を確認した。

- ①従来の対応点探索はヒトの視覚に較べて解像度が悪く, カメラ光軸を固定して得られた画像に対して対応点問題を解いているが, 提案している方法はヒトと同程度の解像度を得て, 左右中心窩像の差が解像度以下であることを利用している。
- ②対応を取る特徴としては明度をそのまま使用したが, 他の特徴や特徴の変化率を使うことは可能である。
- ③特徴の表現形式としては中心窩領域の明度分布の領域対応を行なった。
- ④左右カメラが同じモノ/点を見ている時, 左右画像の明度差の絶対値の平均値が極小値を取り, その極小値はビデオカメラのセンサーとしての信頼性によって決まる。すなわち, 提案アルゴ

リズムは手続き的な画像処理によって対応点探索を行なっている。

- ⑤探索可能な範囲は視野角の1/2以上であった。
- ⑥制御規則を初めに与えれば自己較正が可能である視覚システムを構成出来る。
- ⑦提案したアルゴリズムは、左右カメラの個体差に強く、その機能範囲はヒトの立体視能力の範囲にほぼ等しい。
- ⑧実験はカメラ正面に置かれた2次元画像を主として入力して行なったが、画像入力条件を一般化して三次元対象物に拡張しても、⑦より提案アルゴリズムは機能すると予想される。
- ⑨従来のテンプレート・マッチングに較べて、画素数が多く(256×256画素)、レンズの中心/周辺光量比の影響を受けない。

付録 A. 左右像の計算

網膜像を計算する為に左右眼のそれぞれの像空間と外界の3つの左手系座標軸を考える(Fig.A1.)。左右の像空間の座標軸であることを示す為に下付き添え字 L または R を付けるが、左右を区別する必要がなく単に像空間の座標であることを示す場合には下付き添え字 i を付ける。外界座標には添え字を付けない。座標軸は大文字の X, Y, Z を使い、座標の値は小文字の x, y, z を使う。

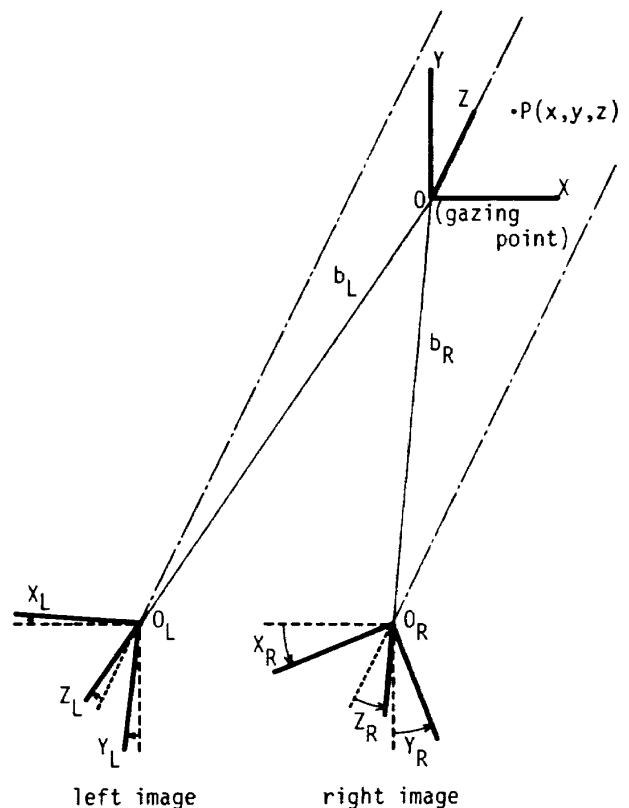


Fig.A1. Cartesian coordinate systems for images.

眼の像空間の座標原点は水晶体中心とし、眼光軸を Z_i 軸とする。初期状態として無限遠を見て左右眼の光軸が平行になった時、左右水晶体の中心を結ぶ線の方に X_i 軸を取り、 Z_i 軸と X_i 軸とに垂直に Y_i 軸を取る。

外界の座標原点は左右眼光軸の交点(凝視点)とし、座標軸は、無限遠を見た時の像空間の座標軸と点対象になる様にする(脚注)。

脚注) 立体視の研究では外界座標と像座標を同じ側にとることが多い。

水晶体中心から網膜までの距離を a 、水晶体中心から凝視点までの距離を b とする。

ヒトの眼の回転中心はほぼ眼球中心に位置するが、ここでは解析を簡単にする為に水晶体中心を回転中心とする。

無限遠を見ている状態から、眼を次の順番に回転して、眼の光軸を凝視点に向ける。

- ① Y_i 軸を回転軸として ψ 回転する。
- ② X_i 軸を回転軸として θ 回転する。
- ③ Z_i 軸を回転軸として ϕ 回転する。

単に眼を凝視点に向けるだけならば、③の回転は不用である。左右の像の水平/垂直方向を揃える為に ϕ の微調整が必要になるが、 ψ 、 θ があまり大きくない範囲では ϕ はほぼ 0 であるので、③の回転は省略することも考えられる。

外界座標が (x, y, z) である点 P の像の像空間座標 (x_i, y_i, z_i) を求めるには、初めに、外界座標をその原点 O 周りに①、②の順に回転し、原点の位置を O から O_i まで距離 b_i ずらした座標に像の倍率 a/b' を掛ければよい。

$$\begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{bmatrix} = \left\{ \begin{bmatrix} \cos\phi \cos\psi - \sin\phi \sin\theta \sin\psi & -\sin\phi \cos\theta & \cos\phi \sin\psi + \sin\phi \sin\theta \cos\psi \\ \sin\phi \cos\psi + \cos\phi \sin\theta \sin\psi & \cos\phi \cos\theta & \sin\phi \sin\psi - \cos\phi \sin\theta \cos\psi \\ -\cos\theta \sin\psi & \sin\theta & \cos\theta \cos\psi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ b_i \end{bmatrix} \right\} \frac{a}{b'} \quad (1)$$

ここで、 b' は Z_i 座標軸に線分 PO_i を正射した長さである。回転マトリックスの求め方は、外界座標の X, Y, Z 方向の単位ベクトルに対して外界座標軸を①、②、③の順に回転した時の x_i, y_i, z_i 成分をそれぞれ独立に求めてから、成分ごとに和を求めればよい。

計算機で視差を計算するには、凝視点を見つめた時の点 P の像空間座標を(1)式より計算し、視差 d の定義式

$$d^2 = (x_L - x_R)^2 + (y_L - y_R)^2$$

に代入すればよい。

凝視点が顔の正面にあり、点 P が X 軸上にある場合 $(p(x, 0, 0))$,

$$\psi_L = -\psi_R = \psi$$

$$\theta_L = \theta_R = 0$$

$$\phi_L = \phi_R = 0$$

$$a_L = a_R = a$$

$$b_L = b_R = b$$

となるので、これらを(1)式に代入し視差を計算すると、

$$d = \frac{2ax^2 \cos\psi \sin\psi}{b^2 - x^2 \sin^2\psi}$$

顔の正面にあり、顔に平行な平面上の絵を見た場合の視差の計算を、左右水晶体中心間距離 65 mm、水晶体中心から網膜までの距離 17 mm として行なった。

ヒトの視覚では近い距離の所を見た場合(距離 300 mm)でも、凝視点からの距離が 1 度以内であれば左右像の視差は $1\mu\text{m}$ (網膜中心窩の錐体細胞の直径は $1\sim 3\mu\text{m}$) 以内である (Fig.A2.)。

11 mm の焦点距離のレンズを使用した場合、CCD ユニットセルの大きさ $13\mu\text{m}$ を水晶体焦点距離 17 mm に換算すると $20\mu\text{m}$ となる。歪曲収差の影響がなければ今回の実験に対応する 700 mm の距離では、 256×256 画素の周辺でも 2 画素程度の

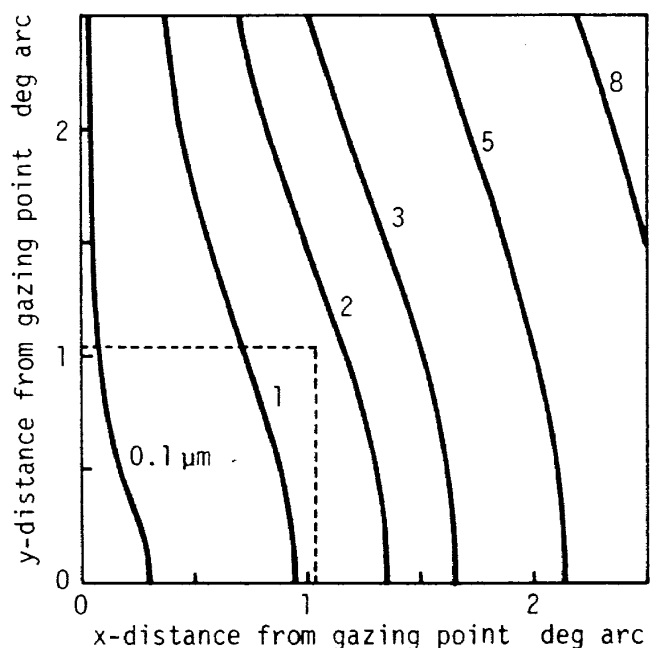


Fig.A2. Difference between left and right images (300mm).

ずれしか生じない (Fig.A3.)。

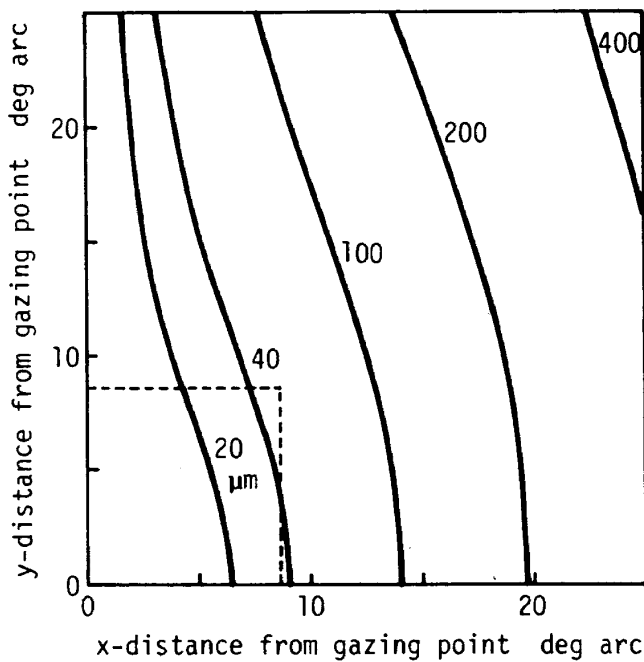


Fig.A3. Difference between left and right images (700mm).

付録 B. 統計的計算

(1) 左右のビデオカメラが輝度を電気信号に変換する時の変換係数が同じになる様に左右ビデオカメラの利得を調整する。調整が完全であれば (左右のオフセットが0であれば), 左右のビデオカメラが同じ点を見ている場合, 左右の像が画素レベルで一致するので, 左右の対応する画素間で明度信号の差を画素毎に充分長い時間に渡ってあるいは画面全体に渡って平均を取れば, 差の平均は0に近づく。

この時, 左右のビデオカメラが輝度を電気信号に変換する誤差が正規分布し, 左右の標準偏差をそれぞれ σ_L と σ_R とすると, 左右のビデオカメラのオフセットが0であれば, 左右画素間での明度信号の差は正規分布の再生性により平均値0, 標準偏差 $\sqrt{\sigma_L^2 + \sigma_R^2}$ の正規分布をする。

(2) 確率変数 x が平均値0, 標準偏差 σ の正規分布をする場合, すなわち, 確率素分が,

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right)$$

で与えられる時の確率変数 x の絶対値の平均値を

計算する。

$$\begin{aligned} \left| \int_{-\infty}^{+\infty} x f(x) dx \right| &= 2 \left| \int_0^{+\infty} x f(x) dx \right| \\ &= \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{\pi}\sigma} \int_0^{+\infty} x \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right) \end{aligned}$$

(岩波公式 I § 50 (iii) より)

$$\begin{aligned} &= \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{\pi}} \Gamma(2) \sigma \\ &\approx 0.7978 \sigma \end{aligned}$$

付録 C. ヒトの立体視能力

畑田は「立体視と視覚情報処理」¹⁸⁾の中で, 両眼視差情報を用いた立体映像の望ましい条件に付いて以下の様にまとめている。

両眼へ呈示する映像情報に極端な差異があると, 視野闘争が発生する。左右眼への情報差による不安定な見え方に関しては,

- 大きさ : 最大15%差まで立体視可能であるが, 疲労を感じない条件としては数%以内にすべきである。
- ボケ : 片眼の映像が鮮明な場合は約10%以内でないと安定しないが, 両眼とも不鮮明な場合は約30%まで立体視可能である。
- 明暗 : 70%以上ではじめて不安定になるが, 30%以内にすべきである。その理由としては, 両眼輝度差が40%以上になるNDフィルターで動画を見ると, プルフリッヒ効果による奥行き効果が生じるからである。
- 回転 : 約6度以内なら問題ないが, 上下方向のずれは融像に悪影響を与え易いため, 注意する必要がある。

文献18)にはその根拠(出典)が書かれていない。著者に教えて戴いたより詳しい文献19)には参考文献が上げられているが, 入手が難しいので, その概略を以下に紹介する。

- 大きさの差

Julesz (1971)によれば, 右眼への呈示図形の大きさが左眼より15%縮小したランダムドットステレオグラムでは立体視が可能であるが, 線画図形では立体視が非常に困難である。

• ボケ量

大谷&三橋は色メガネ2眼方式による立体テレビ画像を用い、左眼用の画像は6.5MHzの帯域で作成した鮮明な画像のままにして、右眼用の画像帯域を制限してボケた画像にした時、画像の奥行き量がどのように変化するかを調べた²⁰⁾。単純な図形では、カットオフ周波数(伝送周波数の制限で図形のコントラストが1/2になる状態)が1MHz、重なるの多い複雑な図形(建物を背景としその前に自動車2台駐車していて、手前に植え込みとポールが3本立っている風景)では6MHzで制限されると、奥行き弁別に影響が現われてきた。このことから畑田は10%のボケ量で影響が出るとした。

• 明暗条件

Fiorentini & Maffeiの実験結果²¹⁾より両眼のコントラスト比が大体0.6程度になると奥行き効果が生じること、視覚刺激の輝度により反応時間が異なることからブルフリッチ効果が生じることの説明がなされている。

• 回転方向のズレ

畑田(1974)は右眼に水平又は垂直方向に固定した線を呈示し、左眼に呈示する線の方向を回転させて両眼での見えの様子を測定した。融像状態(ズレ角度が0)から始めた場合、ズレ角度が水平方向では4.5度、垂直方向では20度で視野闘争が始まり、視野闘争状態から始めた場合、ズレ角度が水平方向では2度、垂直方向では10度で融像した。

ボケに関して不明な点があったので、大谷&三橋の報告を参照した。両眼視差だけが主となる様な被写体では帯域幅が1MHz以下にならないと立体感は変わらないと書かれている。実験の数から推測すると帯域幅が6MHzから奥行き弁別に影響が現われた重なるの多い複雑な図形の実験結果の方が例外的あるいは他の原因が働いていると考える方が自然である。

大谷&三橋はコントラストと輝度とが左右で異なる場合の影響に付いても実験を行ない、輝度とコントラストはよほど極端に違わない限り、立体感には影響しない結果を得た。平均輝度を一定に

保ちながらコントラストを変化させるのであれば、コントラストは変調深さになり解像度そのものになるので、コントラストを変えた実験の意味が私には理解できない。

視線制御による対応点探索アルゴリズムでは視覚刺激の輝度により反応時間が異なる事によるブルフリッチ効果が生じないので、大谷&三橋の輝度の実験結果と比較すべきである。許容できる輝度差は、大谷&三橋の実験ではよほど極端に違わない限り立体視に影響しなかったが、今回の実験では30%程度であった。この相違は、今回使用したビデオカメラの利得は固定してあるのに対して、ヒトの視覚では左右の眼の感度は見る対象の輝度に応じて変化するものとすれば説明可能である。

したがって、Table 4.のヒトの立体視能力の項目で、視力差は10対1程度、感度差はほとんど影響しないと修正した方が良い。

付録D. 参考文献

- 1) 下條信輔; 奥行「手掛り」論, 電子技術総合研究所調査報告 第215号 第3章 第2節, 30-48 (1986).
- 2) 津本忠治; 脳と発達, 朝倉書店 (1986).
- 3) 西田 勇; 生理学大系Ⅵ巻: 感覚の生理学 第9章, 医学書院 (1967).
- 4) 田中昌人, 田中杉恵; 子どもの発達と診断1, 大月書店 (1981).
- 5) Riggs, L. A. & Niehl, E. W.; Eye movements recorded during convergence and divergence, JOSA 50, 913-920 (1960).
- 6) Fender, D. & Julesz, B.; Extension of Panum's fusional area in binocularly stabilized vision, JOSA 57, 819-830 (1967).
- 7) Steinman, R. M. et al.; Vision in the presence of known natural retinal image motion, JOSA A2, 226-233 (1985).
- 8) Robinson, D. A.; A method of measuring eye movement using a scleral search coil in a magnetic field, IEEE trans. BME 10, 137-145 (1963).
- 9) Skavenski, A. A. et al.; Quality of retinal

- image stabilization during small natural and artificial body rotations in man, *Vision res.* 19, 675-683 (1979).
- 10) 三上章允 ; 脳はどこまでわかったか, 講談社現代新書1059 (1991).
 - 11) 乾 敏郎 ; 視覚情報処理の基礎, サイエンス社 (1990).
 - 12) 武田常広他 ; 視線方向と眼の焦点調節, *テレビジョン学会誌*46, 308-314 (1992).
 - 13) 五味広美 ; 視覚センサーとしてのホームビデオカメラの評価, 日本ロボット学会第9回学術講演会予稿集3521(1991). または, 航空宇宙技術研究所報告 TR-1132 (1991).
 - 14) 生井 浩 ; 生理学大系Ⅵ巻 : 感覚の生理学 第8章, 医学書院 (1967).
 - 15) 田村秀行他 ; 画像処理サブルーチン・パッケージ SPIDER user's manual, 電子技術総合研究所 (1980).
 - 16) 池田光男 ; 眼はなにを見ているか, 視覚系の情報処理, 自然叢書8, 平凡社 (1988).
 - 17) 畑中豊彦, 福田忠彦 ; テレビジョン画像情報工学ハンドブック1編3章 視覚, オーム社 (1990).
 - 18) 畑中豊彦 ; 立体視と視覚情報処理, 理研シンポジウム第9回「非接触計測と画像処理」 (1988).
 - 19) 畑中豊彦 ; 両眼視機能と眼鏡, 日本眼光学学会編「眼鏡の科学」1, 27-65 (1977).
 - 20) 大谷禧夫, 三橋哲雄 ; 両眼視差と立体感, *NHK 技研月報*13, 307-311 (1970).
 - 21) Fiorentini, A. & Maffei, L. ; Binocular depth perception without geometrical cues, *Vision Res.* 11, 1299-1305 (1971).

航空宇宙技術研究所報告1185号

平成4年11月発行

発行所 航空宇宙技術研究所
東京都調布市深大寺東町7丁目44番地1
電話三鷹(0422)47-5911(大代表)〒182
印刷所 株式会社三興印刷
東京都新宿区西早稲田2-1-18
