

# 航空宇宙技術研究所報告

TECHNICAL REPORT OF NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

TR-1263

焦点調節と視線制御による距離測定

五味 広美

1995年3月

航空宇宙技術研究所

NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

# 目 次

1. まえがき	1
1.1 構成	2
2. ヒトの眼	2
2.1 焦点調節	2
2.2 輻輳	3
3. 人工視覚の画像入力部	3
3.1 焦点調節	3
(1) 焦点調節機構	3
(2) 合焦点検出アルゴリズム	4
(3) 合焦点の評価関数	5
(4) 合焦点評価関数の改良	5
(5) 実験	5
3.2 視線制御	6
(1) 視線制御機構	6
(2) 合対応検出アルゴリズム	7
3.3 距離測定	7
(1) 設計方針	7
(2) 処理時間	7
(3) 合焦点と合対応の探索アルゴリズム	8
(4) 距離の計算	8
4. 実験	9
4.1 焦点調節による距離測定	9
(1) 較正	9
(2) 距離測定の安定性	9
4.2 視線制御による距離測定	10
(1) テンプレートと合対応探索	10
(2) 距離測定の安定性	10
4.3 焦点調節と視線制御による距離測定	10
(1) 距離測定の安定性	10
(2) 総合試験 1	11
(3) 総合試験 2	11
5. 考察	12
5.1 光学系の機械的がた	12
5.2 焦点調節と視線制御アルゴリズムの調整と協調	14
5.3 応用	14
6. まとめ	15
参考文献	16
付録A. 被写体深度	16
付録B. 視差による距離弁別	17

# 焦点調節と視線制御による距離測定\*

五味 広美\*<sup>1</sup>

## Distance measurements by accommodation and vergence of video cameras

Hiromi GOMI

### ABSTRACT

A stereo imitating human vision consists of two 1/3 inch CCD video cameras with 50 mm focal length lenses, focussing/vergence controllers, AD converter and MC68040. The algorithms are a contrast method and a template matching. The stabilities of measurements are  $6 \pm 0.5$  m by accommodation and  $6 \pm 0.05$  m by vergence with camera separation of 0.125 m.

**Key words :** computer vision, distance measurement, accommodation, vergence, video camera, image processing.

### 概 要

ヒトの眼と同様な機能を持つ、画像を取り込む時点で焦点調節と視線制御(三角法)により距離情報を得る画像入力部を作った。ヒトの眼と同程度の解像度を得られる様に1/3インチCCDビデオカメラに焦点距離50mmのレンズと焦点調節機構をつけ、ヒトの視覚と同様に広い視野を確保する為にビデオカメラの視線制御を行なった。焦点調節にはコントラスト法を、視線制御による対応点探索には明度分布の領域対応を採用した。焦点調節による距離測定ではレンズ系のがたの為に  $6\text{m} \pm 0.5\text{m}$  程度の安定性しか得られなかったが、左右のカメラ間距離を 0.125m とした視線制御による距離測定では  $6\text{m} \pm 0.05\text{m}$  と理論予測精度を達成した。

### 1. まえがき

ヒトは視線を向けた狭い範囲に関心を集中し分析し、視線を次々に移し、いくつもの分析結果を統合することにより外界を認識している。そうせざるを得ないのは、同じ対象を見、同じ刺激が視細胞に入力し続けると、視細胞の感覚が麻痺することもあるが、網膜の視細胞と脳の細胞の数の制限があり、高い解像度と広い視野とを同時に達成することが出来ないからでもある。また、視野が狭いことにより関心のある点に集中することが出来、結果的に画像認識するのに必要な情報処理量を大幅に減らしている。

ビデオカメラのCCD画素数は網膜の視細胞の数の1/

100程度しかないので、人工視覚の研究を進める道具としてビデオカメラを使う場合、ヒトの眼と同程度の画像情報を取り入れる為には、ヒトの視覚以上に視線制御をしながら外界情報を取り入れる画像入力部が必要である。一方のビデオカメラに関心のある対象に向けると、自動的に、もう一方のビデオカメラも同じ対象に向き、同時に、焦点調節により焦点の合った高い解像度の画像を得、ビデオカメラの視線を動かすことにより広い視野を確保することが出来る。

また、画像は3次元の世界を視線(距離)方向に2次元に圧縮されていて、画像取得後に画像処理により距離情報を復元することは効率が悪い。画像入力する段階で対象までの距離情報を取り入れるべきである。ヒトの視覚では、誕生直後からの視覚経験を通して水晶体の焦点調節と輻輳(視線制御)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り返し

\* 1995年2月1日受付(Received 1 February 1995)

\*<sup>1</sup> 数理解析部(Computational Sciences Division)

ている内に、焦点調節と輻輳が奥行き手掛かりとして働くようになる。人工視覚で焦点調節により距離測定をするには、レンズを動かしながら結像面上の像が鮮明になり最大の画像情報が得られる位置(合焦点の評価関数が最大になる位置)を探し、レンズの公式(ヒトの焦点調節で経験を通して得られる水晶体の状態と距離との関係に相当)から距離を計算する。輻輳により距離測定をするには、左右カメラが同じ対象を見るように視線制御し、三角測量の原理で距離を計算すれば良い。

以上の考えに基づき、視線制御により高い解像度と広い視野を確保し、同時に、右と左のカメラに対してそれぞれ焦点調節の方法と、左右一組のカメラに対して視線制御による方法の合計3つの方法で距離を求めながら、画像を入力する視覚システムの画像入力部の整備を筆者は進めている。今回、焦点調節と視線制御により直接距離測定するアルゴリズムを画像入力部に組み込み実験を行なったので報告する。

この種のアクティブな観測者としての人工視覚の研究は“active” visionと呼ばれ、1980年代後半から研究が開始されている。現在までに製作された画像入力部はFiala<sup>1)</sup>と喜多<sup>10)</sup>の文献に詳しいが、それらはactive visionの研究をする実験手段なので基本的に似ている。画像入力部はヒトの眼に相当する機能を持ち、ヒトの脳の命令に従い眼球が運動する様に、視覚システムで行なわれる画像処理結果により画像入力部のビデオカメラを制御する様に計画されている。筆者が現在整備を進めている画像入力部の特徴を取上げて上げれば、CCD画素とデジタル画像の画素との1対1対応を取り画像データの信頼性を高めたことと、左右のビデオカメラはそれぞれ3軸の回転によりヒトの眼の眼球運動を模擬した画像入力が可能であることである。また、視線制御による距離測定に必要な対応点問題を解く(左右のカメラが同じ点を見るようにする)方法としては筆者が提案した視線制御による対応点探索アルゴリズム<sup>2)</sup>を使っている。

### 1.1 構成

初めに(第2章)、視覚機能を実現しているヒトの眼を光学的に見て焦点調節と輻輳(視線制御)により得られる距離感について推定を行なう。

第3章ではヒトの眼と同様な距離感が得られる人工視覚の画像入力部を実現する為に、合焦点と合対応の検出アルゴリズムに探索アルゴリズムを組み合わせ、焦点調節と視線制御により距離測定することを検討する。

第4章では焦点調節による距離測定の較正を行ない、実験により焦点調節と視線制御による距離測定の個々の安定性を調べる。次に、同時に距離測定を行なった場合の相互干渉について総合試験を行なう。

第5章では実験により明らかになった光学系のがたの対策を検討し、今後の問題として焦点調節と視線制御による距離測定アルゴリズムの微調整と協調について考察し、最後に、焦点調節と視線制御による距離測定の応用について検討する。

第6章はまとめである。

## 2. ヒトの眼

人工視覚の研究では、実世界で実験を行ない、ヒトの視覚と比較することが多く、将来実用化された時にはヒトとの協調・共存が重要になる。また、視覚機能を実現している点からもヒトの視覚の特性を理解することは、人工視覚の研究を進める上で重要なので、ここではヒトの距離感について光学的に検討する。

### 2.1 焦点調節

水晶体の厚さを変え焦点調節により奥行き手がかりが得られる範囲は2～4mであると報告(例えば、文献3)されているが、ここでは網膜上の像の状態から焦点調節によりどの程度の距離感が得られるかを光学的に検討する。

ヒトの眼の値としては次の値を仮定し、付録A.に示す方法で焦点調節による距離弁別(被写体深度)を計算した。距離弁別を決める眼の空間分解能の値としては次の2つのケースについて計算した。

ケース①：網膜中心窩(中心の視力の良い部分)の視細胞の大きさは1～3 $\mu$ mなので、平均値の2 $\mu$ mを空間分解能とした。

ケース②：瞳孔による回折現象による分解能限界を、瞳孔直径を3mm(かなり明るい場合)、光の波長550nmに対して計算し、4 $\mu$ m(視力に換算して1.2相当)とした。

計算によれば(Table 1.)、3mの距離でだけが感じられない範囲はそれぞれ、0.3mと0.8mとなり、奥行き手がかりとして焦点調節が働く範囲2～4mと矛盾しない。

Table 1. Distance thresholds by accommodation in human vision.

Resolution Distance	2 $\mu$ m (Cone-cell size)	4 $\mu$ m (Diffraction by iris of 3 mm dia.)
0.3 m	0.004 m	0.007 m
1 m	0.04 m	0.08 m
3 m	0.3 m	0.8 m
6 m	1 m	4 m

## 2.2 輻輳

対象を注視することは対象の像を網膜中心窩上に結像することであり、その為に両眼は回転運動をし、視線が対象上で交差するように制御(輻輳, 開散)される。眼球の外側にあり眼球を回転運動させる外眼筋の状態(輻輳)が奥行き手がかりとして働く距離は20m位までと報告されている<sup>3)</sup>。

視線制御(補償眼球運動)がどの程度正確かを調べたSteinmanらの頭を左右に±10度の回転運動させた実験によれば、視線(輻輳)の制御には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たが、被験者には対象までの距離が変化しないで安定した外界が見えていた<sup>4)</sup>。3mの距離の対象を見た場合、視線制御の誤差が±0.5度ある時、計算上の距離感覚は1.7m~15mと大きく変化する。ヒトの視覚では何らかの補正により動き回る網膜像が安定化され、平均的な視線(輻輳)の向きに応じた距離感覚が得られている。さらに、安定化された左右像の視差が網膜解像度(以上)の精度で求められ、相対的な距離感覚を得ている。

輻輳角の弁別閾のデータが無いので、ここでは視線制御が完全に網膜像が静止しているものとして、輻輳と言うよりは両眼視差による距離弁別を計算した。ヒトの眼の値としては両眼間距離を65mm, その他の値は2.1の焦点調節と同じ値として、付録B. に示す方法で視差による距離弁別を計算した(Table 2.)。

Tables 1.と2.とを比較すると、視差による距離弁別の方が焦点調節に比べて1桁精度が良いことが解かる。

Table 2. Distance thresholds by binocular parallax in human vision.

Resolution Distance	2 μm (Cone-sell size)	4 μm (Diffraction by iris of 3 mm dia.)
0.3 m	0.0003 m	0.0007 m
1 m	0.004 m	0.007 m
3 m	0.03 m	0.07 m
6 m	0.1 m	0.2 m

## 3. 人工視覚の画像入力部

初めに、合焦点検出範囲を拡大する為に、合焦点検出アルゴリズムについて検討し、合焦点評価関数の改良を行ない、実験により確認する。次に、視線制御による合対応検出アルゴリズムについてまとめ整理する。以上2つの検出アルゴリズムに探索アルゴリズムを加え、焦点調節と視線制御による距離測定を行なうことが出来る画像入力部を設計する。

## 3.1 焦点調節

現在、製作を進めている人工視覚の画像入力部は、ヒトの視力(空間解像度)と同程度の解像度が得られる様に設計されている。画像入力部のビデオカメラは1/3インチCCDを使用している。その画素サイズは横6.35μm×縦7.4μmで、ヒトの網膜中心窩の視細胞の大きさ1~3μmに較べて約3倍なので、ビデオカメラのレンズ焦点距離を水晶体の焦点距離の3倍50mmとした。使用したレンズの直径は28mmなので絞り全開の時、回折現象による解像度限界は2μmとなり無視出来、このビデオカメラの空間分解能はCCDの分解能(約7μm)によって決まる。ビデオカメラのマクロな解像度は垂直解像度480TV本, 水平解像度280TV本であった。CCDの電荷呼び出し機構の為に水平解像度が悪いが、何とか画素レベルの分解能はある<sup>5)</sup>。

天井蛍光灯照明下の実験ではビデオカメラの電子シャッターを1/100秒にして蛍光灯の明るさのちらつきの影響を受けない様にしなければならない。実験室の明るさとビデオカメラの感度の制約から絞りは開放(レンズの口径比:FNo.=1.8)にしなければならなかったので、被写体深度はヒトの視覚と同程度にすることが出来なかった。その結果、付録A. に示した様に被写体深度はレンズ口径比と結像面分解能に比例し、焦点距離の2乗に逆比例するので、人工視覚の被写体深度はヒトの視覚(分解能2μm)に較べて約1/8になり、距離分解能が向上した(Table 3.)。

Table 3. Distance thersholds in artificial vision.

Distance	Focussing	Vergence
0.3 m	0.0004 m	0.0002 m
1 m	0.005 m	0.002 m
3 m	0.05 m	0.02 m
6 m	0.2 m	0.08 m
10 m	0.5 m	0.2 m
100 m	70 m	24 m

Note 1 : Focal lenght of lens = 50 mm.

Note 2 : CCD unit cell size = 7 μm.

Note 3 : Distance between cameras = 0.125 mm.

### (1) 焦点調節機構

レンズを計算機制御する方法としては、①電動ズームレンズを購入し、制御を工夫する方法と、②手動の固定焦点距離のレンズを購入し、パルスモーターの駆動機構を自作する方法とを検討し、以下に述べる理由により②の方法を選んだ。

#### ① 電動ズームレンズ

市販されている電動ズームレンズは電源のON/OFF

により直流モーターを駆動し、焦点、絞り、焦点距離を制御している。電動ズームレンズの中にはレンズの位置と焦点距離をポテンシオメーターで読み取れるものがあるので、これを使うことが考えられる。このレンズを計算機制御する為には計算機側に電源をON/OFFする為の接点出力とポテンシオメーター出力を読み取るAD変換器入力のインターフェイスボードが必要になる。

計算機が電動ズームレンズを制御する為には、接点出力をON/OFFするごとにポテンシオメーターの出力(現在位置)を計算機に読み込み、現在位置と制御目標とを比較するフィードバック制御をしなければならない。これは②の方法と比較して、制御が複雑で計算機負荷が大きい。また、ズームレンズは固定焦点距離のレンズに較べて、使用しているレンズの枚数が多く、機構が複雑で、その結果、価格が高く重量が重くなる。

## ② 固定焦点距離のレンズ + パルスモーター駆動

パルスモーターの制御には汎用のパルスモーター制御インターフェイスボードを用意すれば良い。固定焦点距離のレンズをパルスモーター駆動する為の駆動機構を自作しなければならないが、レンズの計算機制御は開ループ制御になり、計算機はレンズを移動させるパルス数をインターフェイスボードに送るだけで良い。ただ、自作した機構のがたや過負荷によるパルスモーターの脱調の問題があるが、設計・組立・調整を上手にすれば自作した機構では機構自体のがたは1パルス程度に収まり、脱調も起こらなかった。

## (2) 合焦点検出アルゴリズム

得られる画像は、一般的に、撮像する対象とその動き、対象とカメラ間の距離、照明条件、カメラの状態(向き、レンズの焦点距離、絞り、レンズとCCD受光面との距離、電気的な信号処理方法)によって変化する。焦点調節により画像がどの様に変化するかを考える最初の段階として、レンズとCCD受光面との距離だけが変化する場合を考える。画像に対するその他のパラメーターの影響は合焦点検出のアルゴリズムを改良する過程で考慮することとし、今後の課題とする。この場合、合焦点の検出方法は、①明度の極値と②明度の変化率を使う方法が考えられる。

### ① 明度の極値を使う方法

焦点が合った状態で点光源の像が1つのCCD画素上に像を結ぶ場合を考える。理想的なCCDでは像を結んだ画素の出力は焦点が合った状態で最大になり(Figure 1.の実線)、レンズが移動して焦点が少しずれても像がその画素内に収まれば出力は変わらず、焦点のずれが大きくなり像が隣接画素まで広がるにつれて中心の画素出力は低下する(Figure 1.の破線)。逆に、背景が白地の黒い点

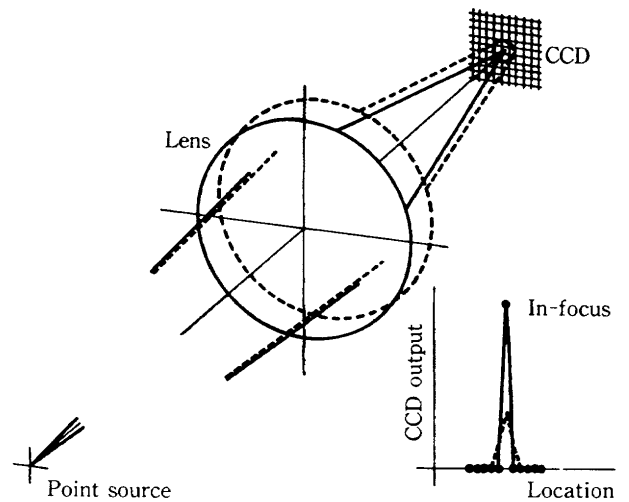


Figure 1. In-focus and out-of-focus.

を撮像した場合には、焦点が合った時に黒い点が結像する画素の出力は最小になる。これをまとめると、画像の中で空間的に明度が極大値または極小値を取る画素は、焦点が合った時、極大値は極大に、極小値は極小になる。

しかし、合焦点の検出に明度の極値を使うこの方法には次の様な問題がある。

- ・画像中で明度が極値を取る位置を探し出すのに時間がかかる。
- ・明度が極値を取る位置の数はそれ程多くない。
- ・極値を取る位置は点なので、明度の測定で外乱の影響を受けやすい。
- ・合焦点の位置を探す為に、1点の明度に対して極値の極大値または極小値を探さなければならないので、さらに外乱の影響を受け易くなる。

### ② 明度の変化率を使う方法(コントラスト法)

焦点が合うと画像の細部が鮮明になり識別が可能になる。別の表現をすれば、画像の明度の差(コントラスト)が大きくなる。したがって、隣接する画素間の明度差が焦点が合った部分すべてで大きくなる。この方法で合焦点を検出する方法はコントラスト法と呼ばれ、ホームビデオカメラのオートフォーカスに広く利用されている。ホームビデオカメラのオートフォーカスでは、高周波フィルターを通し検波した映像信号をAD変換したものを積算し、その和が最大になった位置を合焦点位置と判断している。この方法の長所は次の点である。

- ・多数の測定データを使うことが出来るので外乱の影響を受けにくく、安定した合焦点位置の検出が可能である。
- ・画像の明度が均一で無い限り、何処の位置でも合焦点の検出が可能である。

(3) 合焦点の評価関数

合焦点の空間分解能を上げる為に隣接する 2 × 2 画素のフィルターを使い、合焦点の評価関数として：

$$d_{\text{SQR T}}(i, j) = \sqrt{(I_{ij} - I_{i+1j+1})^2 + (I_{i+1j} - I_{ij+1})^2}$$

を採用し評価値を計算した。合焦点の評価値がなめらかに変化するには 7 × 7 個程度のフィルターを使う必要があった。

製作したレンズの位置調節機構は 1 パルス当たりレンズを光軸方向に 6.5 μm 移動する。付録 A の理論によれば合焦点の位置から 2 パルス程度ずれないと像のぼけは検出出来ないことになるが、レンズの位置調整機構のがたを避ける為に一方向にレンズを移動した実験では 1 パルス程度のレンズの移動に対しても評価値は変化した。パルスモーターの回転方向を時計回りと反時計回りとした実験では合焦点の位置は最大 3 ~ 4 パルス程度ずれた\*。合焦点位置から約 20 パルス程度ずれると合焦点評価関数の値が変化しなくなり、合焦点位置の検出が不可能であった<sup>5)</sup>。

(4) 合焦点評価関数の改良

使用している合焦点検出アルゴリズムは、レンズを移動させながら合焦点位置の検出をしなければならない欠点はあるが、このアルゴリズムの為に特別な機構や検出器も不用で、焦点調節の為にレンズ調節機構を使い合焦点評価関数を計算するルーチンを加えるだけで良い。したがって、このアルゴリズムの良さを生かし、合焦点位置の探索範囲を拡大するには、合焦点評価関数を計算するルーチンを修正するだけで済ませるのが良い。

製作した焦点調節機構で近接から無限遠までの対象に焦点が合う様にレンズの位置を調節するためにはパルスモーターを約 500 ステップ回転させる必要があるので、この範囲で合焦点評価関数は合焦点位置で極大値を取り、合焦点位置から離れるにしたがい単調に減少しなければならない。合焦点位置の検出可能範囲の拡大は付録 A より、受光面の解像度を悪くすれば良い。合焦点検出可能な範囲を 20 パルスから 500 パルスに約 25 倍に拡大するには、受光面の解像度を 1/25 にし、レンズの移動単位を 25 倍にすれば良い。

受光面の解像度を 1/25 にするには 25 × 25 画素の明度の平均値を明度とする仮想の画素を考えればよい。25 × 25

\* その一番大きな原因は焦点調節をする為にレンズが回転しながら位置を変える時にレンズの光軸が歳差(みそすり、すりごぎ)運動をする為である。これを改良する為にはレンズに付けた歯車の周りに、遊びの歯車を 2 つ追加してレンズの歳差運動を小さくすることが考えられる。

画素の明度の平均値を計算する時間を節約する為に 25 × 25 画素の中の 1 点で代表させる方法も考えられるが、この方法では合焦点の評価関数の安定性が低下する。ホーム用ビデオカメラでは合焦点検出可能な範囲を拡大する為に映像信号をローパスフィルターを通し、画像の解像度を低下させてから AD 変換をしたデータを使い評価関数を計算している<sup>6)</sup>。

(5) 実験

受光面の解像度により合焦点の評価値がどの様に変化するかの確認をする為に、説明文が印刷されているワープロソフトの入っていた箱を対象として、実験を行なった。フィルターの画素間距離が前の実験では隣接(dp1 × dp1)であったが、dp × dp の中の 1 点で代表させる方法で、dp3 × dp3, dp14 × dp12, dp56 × dp48\*<sup>1)</sup>のフィルターについて実験を行なった(Figure 2.)。7 × 7 個のフィルターを使う場合、フィルター全体で見る範囲は視角で 10 分から 2.9 度と大きく変化し、その結果、合焦点を評価する範囲も変化するの、厳密には受光面の解像度の影響だけを知ることは出来ない。また、評価関数としては実数演算を避け、計算時間を短くするために、2 乗平方根の代わりに差の絶対値を使った。

$$d_{\text{ABS}}(i, j) = \text{ABS}(I_{ij} - I_{i+1j+1}) + \text{ABS}(I_{i+1j} - I_{ij+1})$$

ここで、ABS は絶対値を与える関数である。

次に、mean(3 × 3) (横 3 画素 × 縦 3 画素の明度平均値)、mean(14 × 12)、mean(56 × 48) で評価関数を計算する方法で実験を行なった。平均値を取るにより評価値の変化はなめらかになったが、画素明度平均値間の差

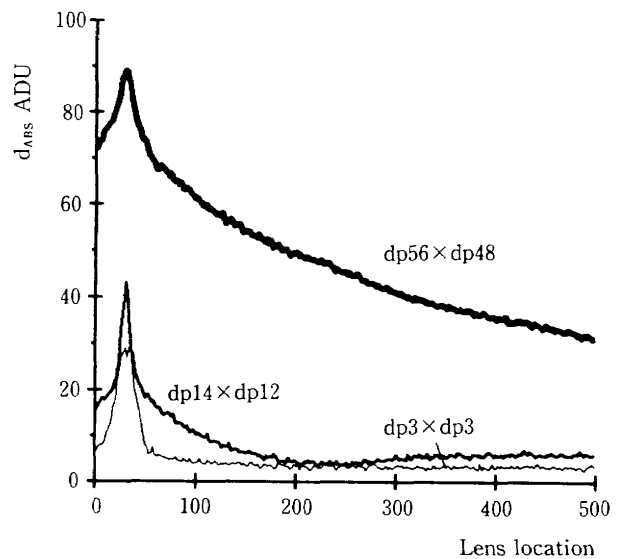


Figure 2. Effect of filter size at 6 m (point data).

\*1 CCDの画素が多少縦長なので、横 7 画素に対して縦 6 画素とするとフィルターはほぼ正方形になる。

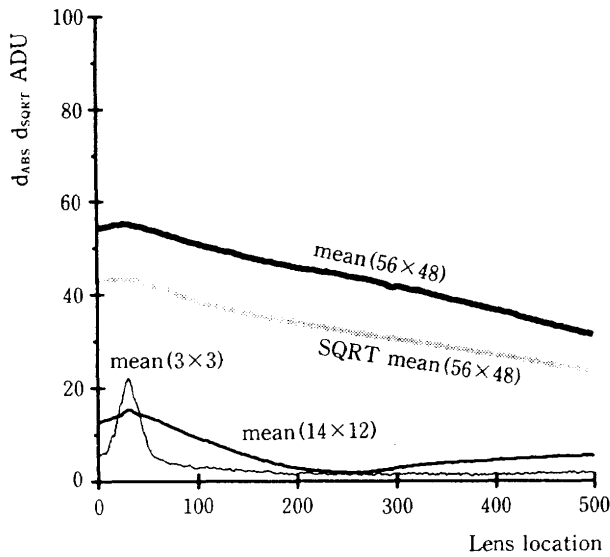


Figure 3. Effect of filter size at 6 m (mean data).

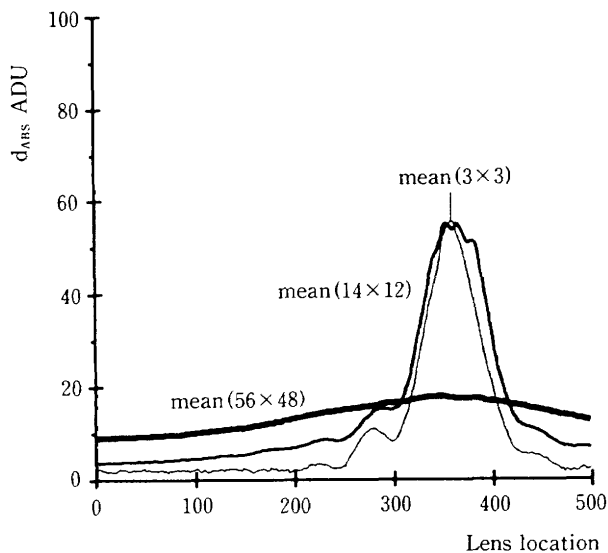


Figure 4. Effect of filter size at 1 m (mean data).

が小さくなり、その結果、評価値の変化、特に合焦点位置付近での変化が小さくなった。評価値の変化の仕方は  $d_{SQRT}$  と  $d_{ABS}$  との差はあまり無かった (Figure 3.)。

対象を 1 m の距離に置いた場合、評価値の変化は小さくなったが、レンズの全移動範囲で合焦点の探索は可能であった (Figure 4.)。

### 3.2 視線制御

#### (1) 視線制御機構

ビデオカメラをヒトの眼と同じ様に回転運動させ視線制御をする為に、3台の回転台をそれぞれの回転軸が1点で交わる様に重ね、回転台にビデオカメラを固定した。ヒトの眼の様に回転中心をビデオカメラ(眼球)の中心よりやや後にする事は可能であるが、外界と画像の対応

を簡単にする為に回転軸の交点とビデオカメラの前レンズの中心とが一致する様にビデオカメラを回転台に取り付けた。

一番下の回転台はパルスモーター駆動で垂直の回転軸を持ち、ビデオカメラ視線(レンズ光軸)の輻輳角(左右)の制御を行ない、中間のパルスモーター駆動の傾斜台は水平の回転軸を持ち、視線の上下角の制御を行ない、上の台は手動の傾斜台で、その回転軸は視線と一致している (Figure 5.)。回転台の仕様を Table 4. に示す。

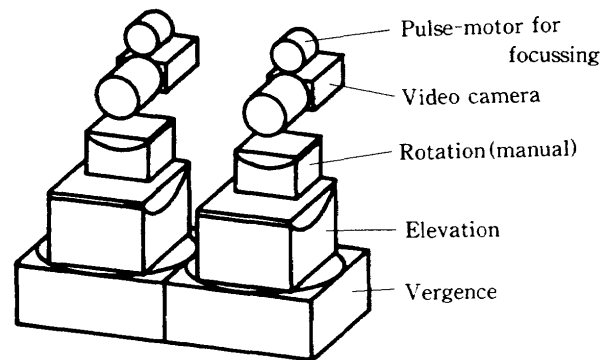


Figure 5. Active stereo camera system.

Table 4. Characteristics of direction control stages.

Position	Lower	Middle	Upper
Direction	Vergence	Elevation	Rotation
Maker	Chuo Precision Industrial Co. (Tokyo)		
Type	PS- $\theta$ -120	PS-G-120	TS-611
Displacement	0.005°	0.004°	(Manual)
Backlash	0.005°	N.A.	N.A.
Range of motion	360°	$\pm 20^\circ$	$\pm 20^\circ$

ビデオカメラ間距離をヒトの瞳孔間距離 65mm にしたかったが、下の回転台同士がぶつかりカメラ間距離を 125mm 以下に近づけることが出来なかった。その後、同じメーカーから小型の回転台が発売されたので検討したが、再現精度(ロストモーション 0.2度)が不十分であった。ビデオカメラの視線制御を行ないながら外界の画像情報を取り込み画像処理の実験を進める最初の段階では、不確定要素を取り除く為に視線制御の精度はビデオカメラの空間分解能以上であることが望ましい。1/3インチの CCD (画素サイズ横 6.35 $\mu$ m × 縦 7.4 $\mu$ m) で、焦点距離 50mm のレンズを使用し、無限遠を見た場合の視角は横 0.0073度 (0.44分) × 縦 0.0085度 (0.51分) であり、測定された空間分解能も同程度であった。

したがって、これらの画像入力部を使って視線制御を行ない、輻輳角から三角測量の原理で得られる距離測定



精度はTable 3.の様になる。焦点調節と輻輳による距離弁別は約1対2となっているが、もし、カメラ間距離を65mmにすることが出来れば、焦点調節と輻輳による距離弁別は同程度になる。

ヒトの場合、焦点調節と輻輳(視差として計算)の距離弁別比の計算値は1対8程度であったが、実際のヒトの距離弁別では、焦点調節ではそれほどの精度は出ず、視細胞の大きさよりも小さな視差の検出が可能なので視差による精度は良くなり、距離弁別比は1対100程度と推定されている。したがって、人工視覚ではヒトの視覚に較べて焦点調節による距離測定に重点を置くことが可能になる。

(2) 合対応検出アルゴリズム

視線制御による対応点探索アルゴリズムとしては、ヒトの視覚で左右の網膜中心窩像の差は解像度以下であることを利用して、中心窩領域の明度分布の領域対応(画素数が多いテンプレートマッチング)を行なう<sup>2)</sup>。左右カメラが同じ点を見ている時、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。このアルゴリズムの特徴は左右のカメラの固体差に強く、レンズの中心/周辺光量比の影響を受けない特徴がある。

視線制御による対応点探索は左右のレンズの焦点距離の差が10%程度まで可能であるが、視覚システムの総合試験では多数のパラメータが結果に影響するので、影響するパラメータの数を減らす為に今回は焦点距離の差は1%以下とし、メーカーで出荷時に焦点距離を測定し条件を満足するペアーを購入した。

3.3 距離測定

(1) 設計方針

画像処理の基本的なステップは、

ステップ 1: 左右画像の取り込み

ステップ 2の1: 左カメラの焦点調節による距離測定

ステップ 2の2: 右カメラの焦点調節による距離測定

ステップ 2の3: 視線制御による距離測定

の繰り返して単純であるが、システムを構成する場合には、使用出来るハードとソフトに制約があり、システムとしての調整が必要になる。

画像処理には、計算機: Motorola 68040(25MHz, VMEボード化されたもの)、オペレーティングシステム Microware OS-9、プログラミング言語: c言語を使った。

画像処理のプログラミングの基本方針としては、プロ

グラミング上のミスを避ける為に、割り込み処理・ポインター等の高度な手法を使わない\*。処理時間を短くする為に、整数演算を使い(実数計算をしない)、大きな配列を使わない様にした。

2台のビデオカメラの内の1台を主カメラとする。主カメラの視線を手動で制御することによりもう1台のカメラ(従カメラ)が同じ対象を見る様に計算機により視線制御する。そうするのは、将来、視覚システムの画像処理結果によって主カメラの視線を計算機制御することを考えているからである。実際の実験では、主カメラを対象に向けて実験を開始し、主カメラの視線上に対象を置いたり、あるいは視線上の対象を取り除いたりし、一連の実験中は主カメラの視線は動かさない。

(2) 処理時間

画像を取り込む、3つの方法で距離を測定する1サイクルにかかる時間は実験としてアピールする、あるいは実用になる為には出来るだけ短くする必要がある。画像処理にかかる時間を見積もり、全体の時間調整を行ないシステムの詳細を決める為に、それぞれの処理時間をclock函数(プロセス時間を10ミリ秒単位で測定)とtime函数(経過時間を1秒単位で測定)を使い測定した(Table 5.)。

Table 5. Process times.

Image acquisition	0.100 sec (max)	
Focussing evaluation	square root	5.18 sec (768x484 pe) 0.06 sec (77x49 pe)
	Absolute val.	2.77 sec (768x484 pe) 0.03 sec (77x49 pe)
Correspondence eval.	1.39 sec (768x484 pe) 0.02 sec (77x49 pe)	
Pulse-motor control	3 line x 0.15 sec	

① 画像をAD変換して計算機に取り込む時間

フレームグラバ(画像のAD変換器)としてはカラー用のRGB(3色)入力可能なNPS社のFINEVISIONを使用した<sup>5)</sup>。フレームグラバからの同期信号により左右のモノクロカメラの同期を取り、R(赤)入力に右ビデオカメラを、G(緑)入力に左ビデオカメラを接続することにより、同時に左右の画像をAD変換することが出来る。画像を取り込む手続きは、flow命令で同期信号のフレーム開始信号を待ち、映像信号のAD変換を開始し、画像メモリーを書き換える。画像メモリーを書き換えている間は画像メモリーに計算機からアクセス出来ない為、計算機から画像メモリーにアクセスする為には、snap命令でAD変換を中止し、画像メモリーの書き換えを終了し

\* 製作者の技能と好みに大きく依存することは言うまでもない。

なければならない。

最初、flow命令とsnap命令を単純に使っていたが、画像メモリーのデータが書き換えられないことがあったので、プログラム上でclock函数を使い画像メモリーを書き換えるのに十分な時間を確保した。理論的には、flow命令を出してから同期信号のフレーム開始信号が来るまでの待ち時間は0~33ミリ秒、画像メモリーを1回書き換える時間は33ミリ秒かかるので、flow命令とsnap命令の間では33~66ミリ秒の時間をあけなければならない。snap命令を受けてから1画面の画像メモリーの残りを書き換えるのには0~33ミリ秒かかる。clock函数の時間分解能は10ミリ秒なので、flow命令とsnap命令の後にそれぞれ70ミリ秒の時間をソフト的に確保した。

#### ② 合焦点の評価函数の計算

2×2画素の大きさのフィルターを768×484画素(全画面)計算するのに、2乗和平方根では5.2秒、差絶対値の和では2.8秒かかった。評価対象の範囲(画素数)を狭くすると、比例して、フィルターの数が少なくなり、計算時間が短くなる。評価値がなめらかに変化するためには7×7個程度のフィルターが必要だが、その計算時間は1ミリ秒以下である。

#### ③ 合対応評価函数の計算

2つの画像の差の絶対値の和を768×484画素(全画面)に渡り計算するのに1.4秒かかり、対象の範囲に比例して計算時間も変化する。

#### ④ パルスモーター制御

左右の焦点調節と右カメラの視線制御はパルスモーターにより駆動されている。計算機ボードとパソコンNEC-PC9800とはRS-232cのポートで接続されている。パソコンの拡張スロットに挿入されたパルスモーター・インターフェイスボード(マイクロサイエンス社)を介してパルスモーター用ドライバ電源を制御しパルスモーターを駆動している。パルスモーターの制御時間はパルスモーターの移動量(ステップ数)に依存するが、最小の1ステップ移動に0.15秒かかった。

### (3) 合焦点と合対応の探索アルゴリズム

#### ① 合焦点の探索アルゴリズム

画像を取り込み評価函数を計算し、レンズを移動させて画像を取り込み評価函数を計算し、評価函数値が増加する場合は同じ方向にレンズを移動させ、評価関数値が減少する場合は反対方向にレンズを移動させる、単純な探索法を採用した。dp16×dp16とdp48×dp48のフィルターは広範囲のレンズの位置から合焦点の位置の探索が可能であるが、正確な焦点合わせが出来ないので、評価値がある程度以上になった場合にはdp2×dp2のフィルターの評価に変更して焦点調節を行なった。したがって、

合焦点の評価函数は左右の画像に対して1回ずつ計算すれば良いので、合焦点の評価函数の計算時間はそれ程問題にはならない。

#### ② 対応点の探索アルゴリズム

視線制御による対応点探索範囲が安定して行える範囲はビデオカメラの視野角の半分というアルゴリズム上の制約がある<sup>2)</sup>。1/3インチCCDを使用したビデオカメラに50mmのレンズを着けた場合の視野半頂角は最大2.8度なので、安定した対応点探索が可能な範囲は1.4度以下になる。今回の実験では主カメラの視線は制御しないので、対象を画像入力部のほぼ正面の距離3mと6m(実験室で取れる最大の距離)とに置いた場合の従カメラの視線の向きの変化は約1.2度になるので、実験はこの範囲で行なった。

視線制御による対応点探索では、合焦点の探索と同様に、ビデオカメラの視線を制御しながら2台のカメラにより得た画像に対して差の絶対値の和を計算し、前の評価値と比較して、視線を動かす向きを決めるのが原則である。こうすることにより、レンズの中心/周辺光量比の影響と光軸から離れるにつれて増加する画像の歪みを避けることが出来、対応点探索の信頼性を高めることが可能になる。しかし、1/3インチのCCDを使用したビデオカメラに50mmのレンズを着けた場合には視野半頂角が3度以下なので、レンズの中心/周辺光量比の影響による周辺画像の明度の減少は20%以下であり、また、光軸からずれることによる画像の歪みは小さいので、新たな画像を取り込むこと無しに計算機内部だけの処理で、一組の画像の中から対応点(領域)を探し出すことが可能である。

一組の画像の中から計算機の内部処理により対応点探索するには計算時間がかかるので、何らかの対策が必要である。横320×縦274画素(ほぼ視野角±1.2度の正方形)の差の絶対値の和を1回計算するのに0.33秒かかるので、横320×縦274画素の全域に渡り合対応を評価する為には320×274回計算しなければならないので、約8時間かかることになる。

左右2台ビデオカメラを配置した場合には、距離測定に必要なのは視線の輻輳角だけなので、合焦点の評価計算を横方向の320回にすれば、計算時間は約100秒になる。さらに、横方向の対応点探索の分解能と信頼性を確保する為には横方向は320画素のデータが必要であるが、縦方向の画素数は単にデータ数を増やして信頼性を確保する為のものなので、極端な場合では縦1画素にすることが可能である。その場合の計算時間は約0.4秒となる。

#### (4) 距離の計算

焦点調節と視線制御による距離測定の原理は明解なの

で、較正をすることにより、距離測定の絶対精度を向上することが可能になる。しかし、今回の実験では、焦点調節と視線制御による距離測定の特性を明らかにして、問題点の洗い出しを目的とするので、絶対精度の問題は今後の課題とし、測定値の再現性または安定性で評価すれば充分なので、距離の計算は簡単な式によって計算した。

#### ① 焦点調節に於ける距離計算

焦点が合った状態で成り立つレンズの公式から距離を計算した。

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f}$$

ここで、aはCCD結像面とレンズの距離、bはレンズから対象までの距離、fは焦点距離である。焦点距離はメーカーに於ける測定値：49.70mm(右)、49.86mm(左)を使い、1パルス当たりのレンズの移動量は、対象をレンズからの距離1mから6mに置き換えた場合に焦点合わせに必要なパルス数を実験により求め、レンズの公式からレンズの全移動量を計算し、1パルス当たりの移動量6.4~6.5 $\mu$ mを求めた。この値は、500パルスに対するレンズの移動量をノギスで直接測定し3.25mmを得て計算した6.5 $\mu$ m/パルスと一致した。

#### ② 視線制御に於ける距離計算

50mmのレンズを使用し、対象がビデオカメラのほぼ正面の距離3mと6mの範囲にあれば、左カメラをほぼ正面を見るように固定した場合、対象までの距離dは、左右ビデオカメラレンズ中心間(回転中心間)を結ぶ線と右カメラの視線との成す角度を $\alpha$ とすれば、

$$d = 125 \times \tan \alpha \text{ (mm)}$$

で距離の計算が可能である(付録B.)。

## 4. 実験

焦点調節と視線制御による距離測定の安定性を調べ、問題点の洗い出しを行なった。照明は実験室天井の蛍光灯を主として、暗い場合は、蛍光灯スタンドを併用した。撮像対象はワープロソフトの入っていた箱、岩山の写真、カレンダーの数字(日にち)が並んだ部分で、いずれも平面で、それらの面がカメラの視線に対してほぼ垂直になる様に置いた。その他の実験系は文献5と同じものを使用した。

### 4.1 焦点調節による距離測定

#### (1) 較正

焦点調節のアルゴリズムの不備等によりパルスモーターが暴走した場合に備えて、焦点調節の遠近両端にリミットスイッチを設けたので、遠側をハード上の原点とした。リミットスイッチの位置はレンズの取り付けと駆動

機構の組立調整により変化するので、一連の実験の間は光学系はいじらない様にした。リミットスイッチのONとOFFの位置は4~5パルスのヒステリシスがあったが、ONの位置の再現性は1パルス程度であった。

合焦点位置の検出精度を上げる為に、2画素ごとの画素データ(dp2 $\times$ dp2)の2 $\times$ 2画素のフィルターを31 $\times$ 31個の平均を評価値とした。

較正は次に示す手順で行なった。

- ①撮像対象をカメラから1mまたは3mまたは6mの位置に置く。
- ②遠側のリミットスイッチがONになる位置までパルスモーターを回転し、レンズを移動させる。
- ③指定したパルス数になるまで、パルスモーターの1パルス回転、画像の取り込み、合焦点評価関数の計算を繰り返す。
- ④パルスモーターを逆方向に、③で指定したパルス数になるまで、1パルス回転、画像の取り込み、合焦点評価関数の計算を繰り返す。

較正結果としては、

- ・合焦点の位置は、正転と逆転で、最大4パルスのずれがあった。
- ・撮像対象とカメラとの距離の誤差は数センチメートル程度あるが、6mと1mの位置に焦点が合うまでの移動量の差は右カメラ342パルス、左カメラ337パルスであった。

焦点距離は右カメラ49.70mm、左カメラ49.86mmなので、較正結果とレンズの公式より、1パルス当たりのレンズの光軸方向の移動量は右カメラ6.4 $\mu$ m、左カメラ6.5 $\mu$ mとなる。したがって、レンズとCCDとの距離aは  
右カメラ： $a_R = 49.70 + \text{パルス数} \times 0.0064 \text{ (mm)}$   
左カメラ： $a_L = 49.86 + \text{パルス数} \times 0.0065 \text{ (mm)}$   
として、レンズの公式に代入することにより対象までの距離bが計算出来る。組立・調節により原点(リミットスイッチ)のソフト上の位置は変わるが、実験を行なった時は右カメラ50パルス、左カメラ4パルスとなった。

#### (2) 距離測定の安定性

6mの位置での距離測定の安定性を見る為に、

- ①6mの対象に焦点を合わせた状態から距離測定を開始し、100回の測定
  - ②レンズは3mの位置に焦点が合った状態で、カメラを6mの対象に向け、合焦点を探索し、6mの対象に焦点が合ってから100回の測定
  - ③レンズは1mの位置に焦点が合った状態で、カメラを6mの対象に向け、合焦点を探索し、6mの対象に焦点が合ってから100回の測定
- をそれぞれ数回ずつ行ない、安定性(標準偏差)を求め、

Table 6. Stabilities of distance measurements by focussing. (Standard deviation, Unit : pulse (distance m))

Distance	6 m	3 m	1 m
Right camera	2.4 (0.2 m)	3.0 (0.07 m)	2.2 (0.005 m)
Left camera	4.0 (0.4 m)	2.4 (0.05 m)	3.1 (0.007 m)

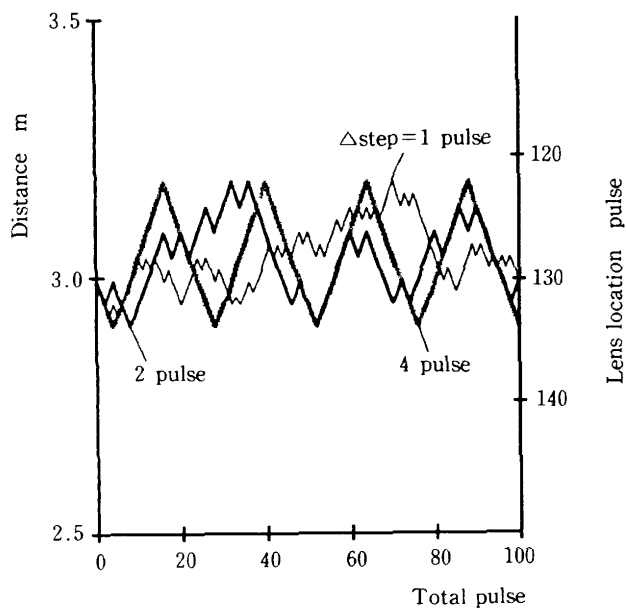


Figure 6. Stabilities of lens location versus  $\Delta$ step of pulse motor.

約10の標準偏差の平均値を計算した。同様に、3mと1mの位置での安定性を測定した。Table 6.の標準偏差(平均値)は安定している様に見えるかもしれないが、個々の測定で得られた標準偏差は0.9~7.6の範囲でばらついていた。

これらの実験では、細かいフィルターとしては4画素ごと(dp4×dp4)の2×2画素のフィルターを7×7個の平均値で合焦点を評価した。

また、パルスモーターの1回当たりの移動量を1~4パルスと変化させたが、距離測定値の変動範囲はあまり変わらなかった(Figure 6.)。1回当たりのパルスモーターの移動量が大きくなると、パルスモーターの回転方向が変わる時にレンズの光軸が移動し、得られる画像が移動するのが観察された。

## 4.2 視線制御による距離測定

### (1) テンプレートと合対応探索

カメラの回転台には1度間隔の目盛りが付いているが、真正面に対する左カメラの視線の向きの誤差は1度程度

と考えられる。付録B.に示す様に、視線制御による距離測定では、カメラ正面で左右のカメラの視線が合っている位置までの距離を初期値として与えれば、十分な精度で距離測定が出来るので較正実験は行なわなかった。具体的手順としては、初めに左(主)カメラが正面を見る(左右カメラのレンズ中心を結ぶ基線に対してレンズ光軸が直交する)様にする。次に、右カメラの視線を、例えば、6mの位置の対象に視線が合うように向けた場合、3.3(4)の②に示す式の $\alpha$ の初期値を88.8065度とすれば良い。

左右画素の合対応を取るテンプレートの大きさは2画素ごと(dp2×dp2)に、横255画素(視野角±1.9度)×縦3画素とした。合対応探索にかかる時間を短くする為に、右画像のソフトなずらし量を*i*、ずらし量*i*の時の合対応評価値をdt(*i*)、*i*の取る範囲を0, ±2<sup>*n*</sup>(*n*=0~7)とする。*i*=0より計算を開始し、dtが極小を取る*i*で計算を打ち切り、その向きに右カメラの視線を向ける様にした。こうすることにより、合対応の評価値dtの計算は最小3回(*i*=0, 1, 2または*i*=0, 1, -1)、最大10回(*i*=0, 1, -1, -2, -4, ..., -128)となり、合対応の計算時間は0.03秒と予想される。

### (2) 距離測定の安定性

6mの対象に焦点と視線を合わせた状態から、焦点調節を行わず視線制御だけを行ない距離測定をした実験では、dt(0)が最小値を取り続け、右カメラの視線は動かなかった。1パルス当たりのカメラ視線の左右(横方向)の移動量は0.005度(1画素当たりの左右の視角は0.0073度)なので、距離の安定性は6m±0.025mとなる。

4.1(2)の②に相当する実験は焦点調節が必要なので、次の4.3で行なうこととし、対象までの距離を変えないで対象を正面から横にずらし主カメラの視線を手動で対象に向けてから合対応を探索する実験は、距離計算の方法がそこまでカバーしていないので、行なわなかった。

## 4.3 焦点調節と視線制御による距離測定

### (1) 距離測定の安定性

6mの位置の対象に焦点と視線が合った状態から測定を開始し、対象を変えない場合の焦点調節と視線制御による3つの距離測定値をFigure 7.に、3mの場合をFigure 8.に示す。この時の安定性(標準偏差)は、6mの距離で、右焦点調節1.5パルス、左焦点調節1.4パルス、視線制御0.5パルス、3mの距離で、右焦点調節2.2パルス、左焦点調節1.7パルス、視線制御1.0パルスで、Table 6.に較べて安定性の良い実験結果である。視線制御だけの距離測定では右カメラの視線は動かなかったが、焦点調節と視線制御による距離測定では、焦点調節によりレンズ

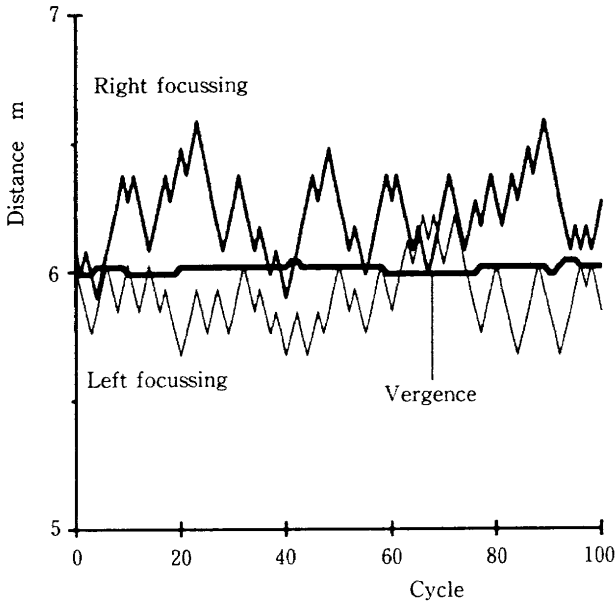


Figure 7. Stabilities of distance measurements at 6 m.

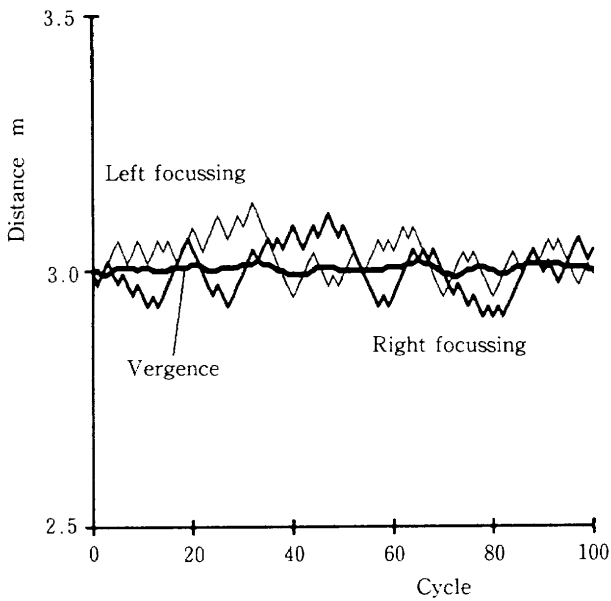


Figure 8. Stabilities of distance measurements at 3 m.

光軸が移動し、その結果、画像が移動する為に、6 mで-2 ~ +1 パルス ( $3 \times 0.005$ 度), 3 mで-3 ~ +2 パルス ( $5 \times 0.005$ 度) 右カメラの視線が動いた。

(2) 総合試験 1

3 mの位置のカレンダーに焦点と視線が合った状態から距離測定を開始する。カレンダーを取り除くと主(左)カメラの視線は6 mの位置のワープロソフトの入っていた箱に合っているが、従(右)カメラの視線は合対応のアルゴリズムにより制御されながら、主カメラと同じ位置を見るようになる。カレンダーが取り除かれた時、6 mの対象の画像がぼけて得られるが、対象がそれまでの3 m

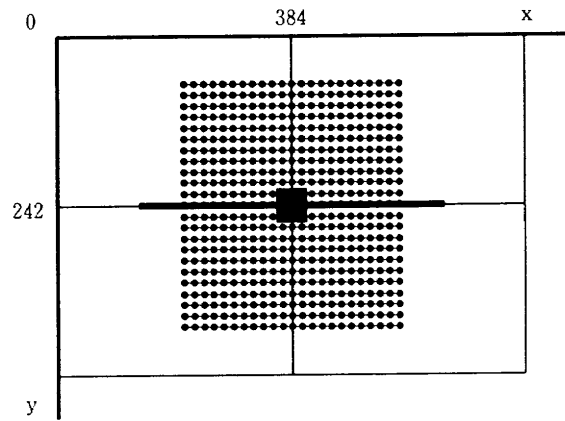


Figure 9 Filters and template (point data).

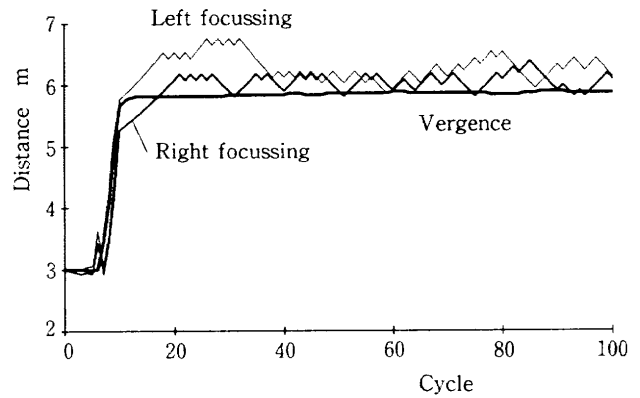


Figure 10 Distance measurements by focussing and vergence (point data).

の距離より遠いのか近いのかが解からないので、施行錯誤により合焦点のある向きを決める。焦点が大きすぎていいる場合には20パルスずつパルスモーターを回転させながら合焦点探索を行なう。焦点が合って来て、合焦点の評価値がある値を超えたら1パルスずつパルスモーターを回転させる。視線制御による距離測定の精度(安定性)は  $6\text{ m} \pm 0.05\text{ m}$  となり、ほぼ理論予測精度 (Table 3.) に等しくなった。(Figures 9., 10.)

逆に6 mの位置に焦点と視線が合った状態から実験を開始し、主(左)カメラの視線上3 mの位置にカレンダーを置くと、カレンダーの日にちの部分で数字が繰り返されるので誤対応することが見られた。

(3) 総合試験 2

アルゴリズムの改良と微調整を行なった。

①合焦点の評価値を画素データの平均値から計算する様にした。

細かいフィルターは、 $2 \times 2$ 画素の平均値  $\text{mean}(2 \times 2)$  を求め、 $2 \times 2$ 平均値のフィルター  $31 \times 31$ 個に対する評価値を計算し、その平均値で評価した。評価の対象領域は横  $0.47 \times$  縦  $0.54$ 度である。

粗いフィルターは、合焦点の探索範囲が距離3～6mの範囲なので、横14×縦12画素(ほぼ正方形)の平均値mean(14×12)を求め、2×2平均値のフィルター7×7個に対する評価値を計算し、その平均値で評価した。評価の対象領域は0.815×0.814度である。探索範囲が狭いので、焦点が大きくなりすぎている時のパルスモーターの回転は10パルス単位とした。

②合対応の評価は1画素ごとの全てのずらし量に対し、水平・垂直方向で計算する様にした。

水平方向の合対応は、横1×縦3画素の平均を求め、横321×縦1平均のテンプレート(±1.2度)を使い、広い探索範囲を確保する為に視野角と同じ±160画素の範囲で評価値が最小になる位置とした。

焦点調節によりレンズ光軸が移動し左右の視線が上下方向にずれることがあるので、それを補正する為に、垂直方向の合対応探索を行なった。時間を節約する為に水平方向の視線移動が無い時だけ、垂直方向の合対応探索を行ない、テンプレートの大きさは、横3×縦1画素の平均を求め、横1×縦32平均とし、±16画素(±0.14度)の範囲で探索を行なった。(Figures 11., 12.)

これらの改良・微調整により、

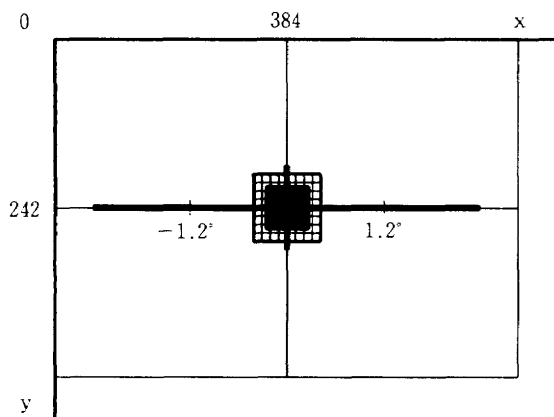


Figure 11. Filters and templates (mean data).

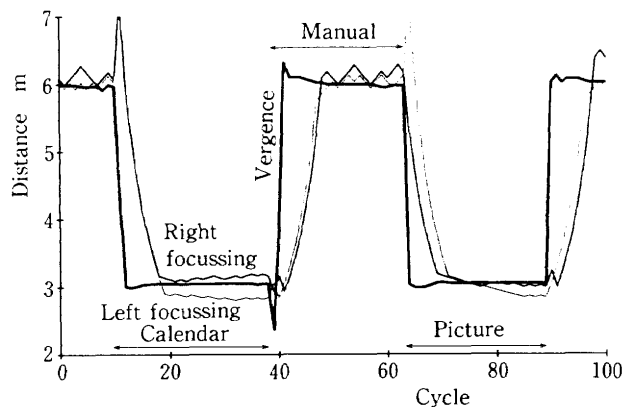


Figure 12. Distance measurements by focussing and vergence (mean data).

- ・画像の取り込みと3つの距離測定の1サイクルで2秒程度かかる様になった。
- ・1～2サイクルで視線制御による距離測定が可能になった。
- ・平均を取ることで画素データの信頼性を高めたが、焦点調節による距離測定は安定せず、距離測定の精度(安定性)は6m±0.5m程度であった。
- ・6mから3m, 3mから6mのいずれの方向でも安定した合対応が可能になった。

## 5. 考察

距離測定で明らかになった光学系のがたについて対策を検討し、アルゴリズムの調整と協調について議論する。最後に焦点調節と視線制御による距離測定を空港面管理へ応用することを考える。

### 5.1 光学系の機械的がた

距離測定の精度(安定性)は

- ① 対象とカメラの相対的位置(姿勢)
- ② 照明条件
- ③ 光学系の機械的がた
- ④ ビデオカメラの電気的安定性
- ⑤ 評価関数の安定性
- ⑥ 探索アルゴリズム

によって決まる。以下の議論では対象は静止していて、照明は天井の蛍光灯とする。

#### 1) 視線制御機構

パルスモーターによる焦点調節を行なわないで、視線制御による距離測定だけを行なった場合には、従カメラの視線は動かなかった。焦点調節を行なう場合には、焦点調節によりCCD受光面上の像が移動する為に従カメラの視線が動いた。したがって、視線制御系の機械的がたは無視出来る大きさである。対応点を求める計算(テンプレートマッチング)に時間がかかるが、これは計算機処理速度の向上により解決されるので、視線制御による距離測定には問題が無い。

#### 2) 焦点調節機構

光学系の機械的がたを見る為に、焦点調節を行なう場合と行なわない場合の合焦点評価関数値の安定性を調べた(Table 7.)。今回の実験に使用した合焦点評価関数は理論的には0～510ADU(AD変換単位)の範囲で変化する。最小値は、輝度が均一な対象、あるいは焦点のずれが非常に大きい場合に理想的な(CCD画素間の感度のばらつきの無い)カメラで撮像した場合に取り、その値は、0ADU、最大値は、対角画素の出力が255ADUと0ADUの場合で、510ADUとなる。実験で細かいフィルターの評

Table 7. Stabilities of evaluation function.(standard deviation/mean, unit : ADU)

Focussing	Filter	L or R	Point data	Mean data
No	Fine	Left	0.19/20.1	0.13/26.3
		Right	0.24/25.1	0.18/23.4
	Coarse	Left	0.21/58.5	0.10/16.3
		Right	0.18/60.9	0.10/17.5
Yes	Fine	Left	1.33/27.7	0.79/21.1
		Right	2.85/30.6	1.49/22.6

価函数の値は焦点がほぼ合った場合には十数ADU~数十ADUになり、その値は対象により変わるが、大きく焦点がずれた場合には対象に拘わらず十ADU以下になった。

焦点調節を行わない場合、評価函数の変化は②照明の変動と④ビデオカメラの電氣的安定性により決まる。ビデオカメラの画素出力の安定性は1.7ADUなので<sup>5)</sup>、照明の変動が無ければ、評価値の変動(標準偏差)は次の様に予想される\*。

- ・点データを使った場合、 0.15ADU
- ・平均データを使った場合、
  - 細かいフィルター：0.05ADU
  - 粗いフィルター : 0.04ADU

実験室の隣に冷房用のコンプレッサーがあり、その振動の影響が考えられたので、コンプレッサーを止めた実験を行ないTable 7.の値を得たが、実験により求めた評価函数の変動は理論的予想値のオーダーである。評価函数の値は点データより平均データを使った方が安定するが、平均を取るにより評価函数の変化範囲が小さくなるので、評価函数の感度(変化範囲/変動の比)はあまり変わらなかった。

合焦点探索を行ないレンズを動かした場合、評価函数の変動はレンズを動かさない場合の数倍から十倍以上になった。光学系の機械的がたに合焦点探索アルゴリズムがカップリングし、評価値の変動が大きくなったものと考えられる。その結果、目で見て明らかに焦点がずれていることが解かる状態になることもあった。

光学系の機械的がたに対する対策として、単純で確実な方法は一方向にパルスモーターを回転して焦点を合わせることである。評価値を計算しながら一方向に回転させる、評価値が極大値を取る位置を過ぎてしまったら、パ

ルスモーターを逆方向に十分戻し、評価値が極大値取った位置までパルスモーターをもとの方向に回転させる。機械的がたに再現性があれば、この方法で正確な焦点調節が可能だが、パルスモーターを逆転・正転させなければならないので合焦点探索に時間がかかる。また、その間は焦点のずれた像しか得られない。その他にも対策は考えられるが、対象とカメラの相対的位置や照明条件が変化したり、視覚情報をフィードバックして行動を決める場合(車の自律走行など)には、合焦点の探索は短時間で行なわなければならないので、今回採用した単純な探索アルゴリズムが实际的である。

### 3) 光学系の改良

今回使用した手作りの焦点機構はがたが大きいので、スチールカメラ用のオートフォーカスの光学系を調べた。キャノンのEFレンズはレンズ側にモーターが内蔵されているので機械的がたは少なそうだが、レンズを制御するのに必要なインターフェイス情報をメーカーが公開しないので、計算機制御が出来ない。

ニコンのAFレンズのコントローラはパルスモーター駆動で計算機制御が可能なので購入し実験により評価した。コントローラ側(カメラ本体側)にパルスモーターが内蔵されていて駆動機構が複雑なのでバックラッシュが大きく、レンズの位置決め精度は現在使っている手作りの数分の一であった。

高橋らはキャノンの電動ズームレンズJ12×10Bを使い高精度のステレオ注視装置を試作した<sup>7)</sup>。私の質問に対して高橋は焦点調節によるレンズ光軸の移動は観察されなかったと回答している。キャノンに確認したところメーカーとして保証しているレンズ光軸の移動量は原理的に他のレンズと同程度という回答を得ている。

焦点調節と視線制御と絞り調整(今回は実験の対象としなかった)の目的は良質の画像を取り込むこと(CCD受光面上にCCDの特性に合った対象の像を結像すること)である。また、取り込んだ画像の処理結果が各機能にフィードバックされる。焦点調節と絞り調整はそれ自体で自律的に制御出来る割合が高いが、どの対象(領域)に焦点を合わせるか、あるいは絞り調整を行なうかは上位の画像処理の結果によって決まる。視覚入力部の3つの機能は動く部分があるので、機構的にもアルゴリズム的にもタフで精度良く計算機制御が可能であることが必要である。今回の実験では計算機間のタイミング調整のミスにより計算機が停止したり、合焦点の機構のがたにより画像の焦点がずれることがあったが、今後の視覚実験はさらに複雑になるので、基礎部分に当たる画像入力部の3つの機能とその信頼性を高める必要がある。

\* 点データの細かいフィルターとしてはdp2×dp2を23×23個、粗いフィルターとしてはdp16×dp16を23×23個。平均データフィルターは総合試験2と同じ。

## 5.2 焦点調節と視線制御アルゴリズムの調整と協調

### 1) アルゴリズムの調整

焦点調節と視線制御のアルゴリズムには実験によって決めた経験的なものが含まれている。

- ・焦点調節
  - ・フィルターの大きさ, 数(対象領域)
  - ・複数のフィルターにより得られた評価値の軽重
  - ・パルスモーターの1回当たりの増減ステップ数
  - ・合焦点の探索方法
- ・視線制御
  - ・テンプレートの大きさ(対象領域)
  - ・対応点の探索方法

これらの選び方により焦点調節と視線制御が上手に行なわれたり, 失敗したりする。焦点調節にはコントラスト法を, 視線制御の対応点探索にはテンプレートマッチング法を適用すべきかどうかの大枠の問題は無いが, アルゴリズムに含まれる定数の決め方は, 小さな問題に見えるかもしれないが, 実用化の点からは重要な問題である。

一般的には, 定数の決め方は, 多数の対象に渡って実験を行ない普遍的な定数を求める方法と, 対象に応じて変化する数を使う方法がある。

普遍的な定数を決める(視覚システムが使われる状況を考え, それらに対応出来る様に定数を決める)方法は, 条件の組み合わせが多数あり, 全ての状況を考えることが出来ないことと, 全ての状況に対して普遍的な定数が存在するかどうか解からない問題がある。しかし, ビデオカメラやスチールカメラの焦点と絞りの自動調整はメーカーの努力により, 一般的な状況で使うにはほとんど問題が無くなりつつあること, また, ヒトの視覚における情報処理も固定的で不完全であること(錯視現象)を考えると, 普遍的な定数を決める方法は実際的でもある。

合焦点と合対応を取る対象領域を対象に応じて決める為には, 対象を背景から分離(図と地の分離)しなければならない。この分離をする為には合焦点と合対応による距離測定を利用すると堂々巡りになることから解かる様に, 図と地の分離はパターン認識の基本的かつ非常に難しい問題でもある。もう1つの方法として, ヒトの網膜中心窩の様に対象に較べて小さな領域を対象領域として固定する方法が考えられる。この場合, 焦点調節と視線制御を安定して行なう為に, 小さい領域に対してある程度の画素数を確保する必要があるため, 解像度により領域の大きさに下限がある。

### 2) 協調

今回の実験では焦点調節と視線制御は独立していた。新しい対象が視野に入って来た時, 焦点がかなりずれて

いても視線制御は新しい対象に視線を合わせることが出来るので, 視線が大きく移動した場合, 初めに視線制御により対象までの距離を求め, その距離の対象に焦点が合うようにレンズの位置を移動し, 次に, その付近で合焦点探索を行なうことが良い。3つの距離がほぼ合っている場合, 焦点と視線が合っていると判断出来る。

今回の光学系では焦点調節と視線制御による距離測定の精度は同程度だが, ヒトの視覚では輻輳(視線制御)による距離感の方が優れている。将来, CCD画素がヒトの視細胞と同程度に小型化・高感度化し光学系が小型化すれば被写体深度が深くなり, 焦点調節による距離測定精度は低下する。また, 焦点調節による距離測定はレンズの位置を移動させながら画像を取り込み, 試行錯誤により合焦点を探索する為に時間がかかるので, 視線制御による距離測定を主とする視覚システムが自然である。

## 5.3 応用

航空交通量の増大と空港の大規模化により空港面に於ける航空機と自動車の安全走行と飛行場官制の効率化が重要な課題となっている<sup>8)</sup>。現在, 空港面の監視は目視, 無線, 及びASDE(空港面探知レーダー装置)からの情報を管制官の頭の中で統合しながら管制業務を行なっている。現在のASDEは航空機の識別情報がレーダー画面上に表示(タグ付け)されていない上に, レーダー画面特有の見にくさがある。ここでは画像処理により航空機の位置を測定するシステムの検討を行なう。

ハイビジョン用ビデオカメラ(解像度:横2000画素×縦1000画素)を空港の上空10km位に設置し, 空港全体が画面いっぱいになる様に焦点距離を調整する。滑走路長を4kmとすると1画素当たり2mの距離分解能となる。2mの距離分解能は大型航空機の識別には充分であり, 自動車に対してはぎりぎりであるが, 得られる画面は空港内の航空機と自動車の位置関係が良く解かる。画像処理により画像中の移動物体を検出し, タグを自動的に着けることが出来れば, 衝突防止装置を作ることが可能になる。しかし, このシステムにはビデオカメラを高空に維持することと長距離から撮像する2つの技術的な問題がある。

空港上空にビデオカメラを設置する方法としては高度10km程度を飛行可能な航空機にビデオカメラを搭載することが考えられるが, 飛行を維持するコストがかかり, 空港という施設の上空に航空機が常に飛行していることは好ましいことではないし, 航空機が故障し高度を維持出来なくなった場合の危険性がある。もし, 次の第2の問題が無ければ, これら第1の問題を技術的に解決することは意義がある。

第2の問題は10km程度の長距離から対象を見ること



による対象の像の劣化の問題である。天候が良い場合には問題が無いが、管制官に対する支援が最も必要な、雲、霧、雨等により視界が悪い場合、画像情報が全然得られないことが予想される。可視光線を使用するビデオカメラの代わりに、より波長の長い電磁波を利用するレーダーを使えば天候に左右されない空港面の監視が可能になるが、ビデオカメラに較べてレーダーの重量と消費電力が大きいことと、レーダーにより得られる空港面のイメージが可視光のイメージとは異なることを検討しなければならない。

したがって、多数のビデオカメラを空港面近く(地上数mから数十m)に設置し、近距離から対象を見ることにより耐天候性を向上させるのが良い。この場合、個々のカメラより得られた画像から画像処理によりカメラに対する航空機の方位と距離、航空機の向きと動き情報を取り出し、空港面監視の画面上に表示する。空港面上の航空機は空港面上の移動と空港面に垂直な軸回りの回転の3自由度の剛体運動で近似出来る。もし、カメラから航空機までの距離が得られる場合はカメラにより得られる航空機の画像は空港面に垂直な軸回りの1自由度の回転により変化する。空港面内に存在する航空機と自動車の種類はそれ程多くないので、それらの数値モデルを計算機内部に持つことにより垂直軸回りの回転をさせ見え方の計算をすることが出来る。ビデオカメラにより得られた像と一致する計算機で計算した見え方を求めることにより航空機の向きが求まる。

航空機までの距離を直接求める方法として、今回実験を行なった焦点調節と視線制御による距離測定を適用することが出来る。実験室の大きさにより実験は距離6mに制限されたが、焦点距離と視線制御による距離測定の精度は理論的予測値と実験結果はほぼ一致した。したがって、レンズの焦点距離とカメラ間距離を変えることにより得られる距離測定精度を理論的に予想することが可能になる。

計算によれば、焦点距離1m、直径200mm(開口比:FNo.=5)のレンズを着けたビデオカメラを左右1m離して設置した場合の焦点調節と視線制御による距離測定精度をTable 8.に示す。焦点調節と視線制御による距離測定は原理的に近距離の測定の精度が良いが、数百mの距離で実用化する上での問題点は広い視野の確保と正確な視線制御である。

距離精度を確保する為に高い解像度が必要になり、その結果、視野が狭くなる。ハイビジョン用の横2000画素のCCDを使用しても視野角は±0.4度となり、1kmの距離の対象の幅14mしか見えないので、航空機全体が見えない。広い視野を確保する方法としては焦点距離の異なるレンズを着けたビデオカメラを光軸が平行になる様に

Table 8. Distance thresholds by artificial vision.

Distance	Focussing	Vergence
100 m	0.34 m	0.14 m
200 m	1.4 m	0.56 m
500 m	9 m	3.5 m
1000 m	35 m	14 m

Note 1 : Focal length of lens = 1 m.

Note 2 : CCD resolution = 7 μm.

Note 3 : Distance between cameras = 1 m.

取り付けることが考えられる。

視線制御による距離測定精度を確保する為には1.4角度秒の精度で視線制御することが必要になるが、屋外で1m離れた2台のビデオカメラの相対的な視線の向きの精度をこの程度に維持することはかなり難しい。

したがって、数百mの距離を測定する方法としては光の往復する時間から距離を求めるレーザー測器を使う方が実際的な解決である。画像処理だけで、解決する方法としては、画像処理速度の向上を考えれば、1台のビデオカメラからの画像を使い、内部モデルを3自由度の運動をさせて得られる見え方とビデオカメラの像との一致により対象までの距離と対象の姿勢を求める方が長期的には実現性が高い。

もう1つのビデオカメラの設置場所は空港面内を走行する航空機と自動車に搭載することである。ビデオカメラより得られる画像の中から特徴あるものをいくつか選び出しその特徴のある方向と距離から現在の位置を知ることが出来る。

## 6. まとめ

ヒトの視覚の情報処理を参考にして信頼性の高い人工視覚を実現することを目指して、外界の画像を取り入れる時に、2台のビデオカメラの焦点調節と視線制御により距離情報を得る画像入力部を試作し、実験を行なった。

- ①ビデオカメラの解像度をソフト的に悪くすることにより、合焦点の評価関数はレンズの全移動範囲で単調に変化することを理論的に示し実験により確認した。
- ②焦点調節(レンズ移動)をしない場合、粗いフィルターに対する合焦点の評価値の変動は、ビデオカメラのセンサーとしての変動から予想される値にほぼ近かった。
- ③焦点調節をした場合、光学系の機械的がたと合焦点探索アルゴリズムがカップリングして、眼で見て焦点がずれていることが解かる状態になることがあった。その結果、1/3インチCCDビデオカメラに焦点距離50mm

のレンズを着けた実験では、焦点調節による距離測定  
の精度(安定性)は  $6\text{ m} \pm 0.5\text{ m}$  となった。

- ④オートフォーカス用スチールカメラレンズを使用して  
みたが、機械的バックラッシュが大きく、距離測定精  
度は手作りの焦点調節機構の数分の1であった。
- ⑤合対応の探索は1回の画像取り込みに対して、視野角  
の範囲でソフト的な探索を行なうことにより、焦点の  
合っていない画像に対しても1~2回の視線制御によ  
り合対応が可能になった。
- ⑥合対応のソフト的2次元探索には数時間かかることが  
予想されたので、左右と上下方向の2つの1次元探索  
に圧縮・分解することにより1秒以下にすることが出  
来た。
- ⑦焦点調節を行なわない場合、従カメラの視線は安定し  
て動かなかったが、焦点調節を行なう場合、焦点調節  
よりレンズの光軸が移動し取り込む画像がずれる為  
に、カメラ間距離を  $0.125\text{ m}$  とした実験では、視線制御によ  
る距離測定は  $6\text{ m} \pm 0.05\text{ m}$  となった。
- ⑧以上のことから、焦点調節と視線制御による距離測定  
の精度を光学的に予測することが出来ることが確認出  
来たので、空港面監視に応用することを検討した。焦  
点調節と視線制御による距離測定は原理的に近距離の  
測定に向いているので、実用的な範囲は数百メータ  
ーまでと考えられる。

### 参考文献

- 1) Fiala, J. C., Lumia, R., Roberts, K. J., and Waver-  
ing, A. J. 1994 TRICLOPS: A tool for studying  
active vision. *Int. J. Comput. Vis.* 12, 231-250.
- 2) 五味広美 1992 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。航空宇宙技術研究所  
報告TR-1185, または、第10回日本ロボット学会学  
術講演会予稿集1435。
- 3) 下條信輔 1986 奥行「手掛り」論。電子技術総合研  
究所調査報告第215号, 30-48。
- 4) Steinman, R. M., Levinson, J. Z., Collewyn, H. and  
Van der Steen, J. 1985 Vision in the presence of  
known natural retinal image motion. *JOSA A2*,  
226-233.
- 5) 五味広美 1994 視覚センサーとしてのビデオカメ  
ラ(その2)。航空宇宙技術研究所報告TR-1231, ま  
たは、第11回日本ロボット学会学術講演会予稿集3  
D12。
- 6) 村島弘嗣, 前田暁 1987 デジタル積分オートフォー  
カスビデオカメラ。テレビジョン学会技術報告11  
巻10号, 13-18。
- 7) 高橋裕信, 末広尚士 1994 高精度ステレオ注視制

御装置の試作。第12回日本ロボット学会学術講演会  
予稿集2291。

- 8) 北館勝彦, 加来伸之 1994 空港面航空機自動識別  
表示システムについて。電子航法研究所研究発表会  
講演概要 49-52。
- 9) Born, M. and Wolf, E. 1980 Principles of optics  
(6th ed.). Pergamon, Oxford.
- 10) 喜多伸之 1995 人に学ぶアクティブ・ビジョン・  
システム。情報処理36, 264-272。

### 付録A. 被写体深度

撮像対象が凸レンズ(または、水晶体)によりCCD受光  
面(または、網膜)上に焦点が合っている状態から撮像対  
象とレンズの距離が変化してもCCDの出力(またはヒト  
の見え方)が変わらない撮像対象の範囲を被写体深度と  
定義する。したがって、被写体深度から対象が外れると  
その像はぼける。光の回折現象を無視し幾何光学として  
考え、撮像対象は点光源とし、凸レンズは収差0の理想  
的なレンズとすれば、受光面上の像は点となる。この時  
の受光面とレンズとの距離を  $a$ , レンズと対象との距離  
を  $b$ , レンズの焦点距離を  $f$  とすると、レンズの公式:

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f}$$

が成り立つ。

点光源がレンズに対して前後に移動することにより受  
光面上の像が広がっても、その広がりの範囲がCCD(ま  
たは網膜)の解像度以下であれば、CCDの出力(またはヒ  
トの見え方)は変わらない。点光源の移動範囲  $\Delta b$  (被  
写体深度)に対する点像の移動距離  $\Delta a$  は焦点深度と呼  
ばれ、レンズの直径を  $d$ , 解像度を  $r$  とすると、三角形の相  
似より、次式が導かれる (Figure A1.)。

$$\begin{aligned} \Delta a &= \frac{a}{d} r \\ &\approx \frac{f}{d} r \\ &\approx \text{FNo.} \cdot r \end{aligned}$$

となり、 $\Delta a$  は口径比FNo. と解像度  $r$  に比例する。

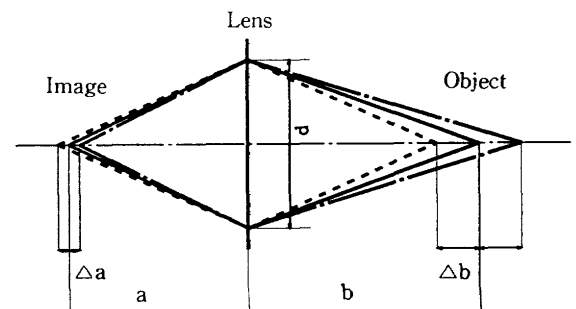


Figure A1. Focussing depth.

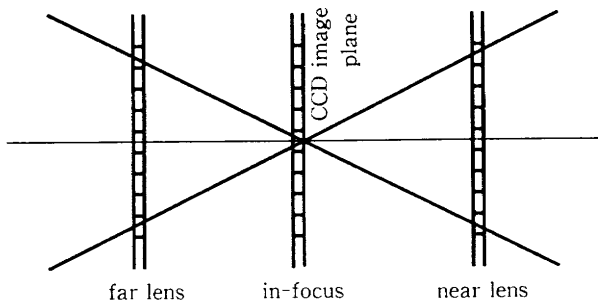


Figure A2. Extension of auto-focussing range.

したがって、レンズの公式を  $a, b, f$  と  $a+\Delta a, b+\Delta b, f$  に適用して連立方程式を解くことにより、被写体深度は

$$\Delta b \approx \Delta a \left(\frac{b}{a}\right)^2$$

$$\approx \text{FNo.} \cdot r \left(\frac{b}{f}\right)^2$$

となる。対象までの距離が一定の場合、被写体深度は FNo. と解像度に比例し、ほぼ焦点距離の 2 乗に反比例することが解かる。したがって、合焦点位置の探索範囲を拡大する為には受光面の解像度を悪くすれば良い (Figure A2.)。

ヒトの眼の水晶体と網膜との距離は約 23mm、水晶体と網膜の間の媒質 (ガラス体) の屈折率は 1.34 なので、水晶体と網膜の光学的距離  $a$  は約 17mm (ほぼ焦点距離に等しい) となる。

カメラまたは眼の解像度は受光面の解像度と光学系の解像度により決まる。受光面の解像度は CCD の画素サイズ (数~十数マイクロメートル) または網膜の視細胞の間隔 (中心窩で 1~3  $\mu\text{m}$ ) で決まり、光学系の解像度は絞りまたはレンズの縁によりレンズを通る光が制限されることによる回折現象により制約される。

2つの点光源 (例えば、星) を見分けるには、一方の回折像の最大点 (第一極大) が他方の回折像の最初の零点 (第一極小) に来ることが限定である (Rayleigh criterion)。Fraunhofer の回折理論より第一極小の暗環半径  $r_{\text{dar}}$  は、光の波長を  $\lambda$  とすれば、

$$r_{\text{dar}} = 1.22 \lambda \text{ FNo.}$$

で与えられる。ヒトの眼では、明るい場合に瞳孔が小さくなり回折現象により解像度が決まる<sup>9)</sup>。

**付録 B. 視差による距離弁別**

ヒトの左右眼間の距離を 65mm の時、視線と左右水晶

体中心を結ぶ線のなす角度  $\alpha$  とする。角度  $\alpha$  が、網膜上で 2  $\mu\text{m}$  と 4  $\mu\text{m}$  の解像度に相当する 0.0067 度と 0.0135 度ずれた時の距離変化を遠近で計算して、その平均を輻轉/視差による距離弁別とした (Table B1.)。

Table B1. Distance thresholds by binocular parallax in human vision.

Distance	$\alpha$	$\pm 0.0067^\circ$ (Cone-sell size)	$\pm 0.0135^\circ$ (Diffraction by iris of 3mm dia.)
0.3 m	83.8171°	-0.0003 m +0.0003 m	-0.0007 m +0.0007 m
1 m	88.1385°	-0.004 m +0.004 m	-0.007 m +0.007 m
3 m	89.3793°	-0.03 m +0.03 m	-0.07 m +0.06 m
6 m	89.6897°	-0.13 m +0.13 m	-0.3 m +0.2 m

**1) 視線制御による距離測定**

視線制御による距離測定の実験では主 (左) カメラの視線を固定し、従カメラの視線の向きから対象までの距離を 3.3 (4) の②に示す簡単な方法で計算した。距離を未知数とする連立方程式を解く方法ではカメラ間距離とカメラの向きにより得られる距離が大きく変化し、カメラ間距離とカメラの向きの測定値には誤差が含まれるので、連立方程式を解く方法では安定した距離が得られない。このことは、以下のことから間接的に解かる。カメラ間距離が 125mm の場合、カメラの向きを左右対称に制御すると、カメラは 6 m で 0.6 度、3 m で 1.2 度内側に向く。視線の向きの誤差は 1 度程度なので、主カメラの  $\alpha_L$  が 90 度と 89 度の時の、従カメラの  $\alpha_R$  を計算した。Table B2. に示す様に  $\alpha_L$  が 90 度から 89 度へ 1 度減少すると、 $\alpha_R$  は 1/1000 度の正確さで 1 度増加している。実験での視線制御の分解能は 5/1000 度であるので、3.3 (4) の②の簡単な方法で充分なことが解かる。

Table B2.  $\alpha_R$  of right camera.

Distance	$\alpha_L = 90^\circ$	$\alpha_L = 89^\circ$
1 m	82.8750°	83.8617°
2 m	86.4237°	87.4209°
3 m	87.6141°	88.6130°
4 m	88.2101°	89.2097°
5 m	88.5679°	89.5678°
6 m	88.8065°	89.8064°

---

## 航空宇宙技術研究所報告1263号

平成7年3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7-44-1  
電話 三鷹(0422)47-5911(大代表) 〒182  
印刷所 株式会社実業公報社  
東京都千代田区九段北1-7-8

---

**Printed in Japan**