

航空宇宙技術研究所報告

TECHNICAL REPORT OF NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

TR-1231

視覚センサーとしてのビデオカメラ(その2)

五味 広美

1994年3月

航空宇宙技術研究所
NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

目 次

第1章 まえがき	1
1.1 構成	2
第2章 ビデオカメラとデジタル画像処理系	2
2.1 解像度と視野	2
2.2 光学系と視線の制御	3
2.3 CCDの画素サイズ	3
2.4 マイクロレンズ	3
2.5 画素1対1対応のAD変換	3
2.6 デジタル画像処理系	4
第3章 実験	6
3.1 ビデオカメラとレンズの選択	6
3.2 実験系	6
(1) ビデオ信号のAD変換	6
(2) 照明	7
(3) ビデオカメラのパラメータ	7
(4) CCD撮像素子	7
3.3 実験	7
3.3.1 CCD画素1個の特性	7
(1) 測定方法	7
(2) AD変換タイミングの微調整	8
(3) 画素の空間分解能	9
(4) 照射面積による出力の変化	10
(5) スリットを使った実験	10
(6) SONYのXC-007との比較	11
(7) マクロな解像度との比較	12
3.3.2 画素感度のばらつき	12
(1) 感度のばらつきと安定性	13
(2) 非直線性	13
3.3.3 レンズ系	13
(1) 歪曲収差	13
(2) 中心/周辺光量比	14
(3) レンズのがた	14
3.3.4 スミアとブルーミング	14
3.3.5 焦点合わせ	15
(1) 焦点調節機構とアルゴリズム	15
(2) 実験結果	16
第4章 考察	16
4.1 変動とがた	16
4.2 研究の進め方	17
第5章 まとめ	18

付録 A. ミクロンオーダーの光強度分布の測定の難しさ	19
付録 B. AD 変換器の分解能と測定データの精度	19
付録 C. ドレイファスの主張	20
付録 D. 参考文献	20

視覚センサーとしてのビデオカメラ(その2)*

五味 広美*¹

Video camera as a visual sensor (Part 2)*

Hiromi GOMI*¹

ABSTRACT

A video camera was calibrated with one-to-one correspondence between picture elements of CCD and digital image by synchronising VD/HD signals of video camera and an AD converter. Measurements were made on space resolution and sensitivity of the picture element, stability of the video signal, and on lens characteristics. A picture element leaked the output to the adjacent picture elements and the interference of outputs was linear. There were no defective picture elements. A focussing mechanism and "contrast" algorithm made it possible to measure distance at a space resolution of 2×2 picture elements.

Key words : video camera, visual sensor, vision sensor, camera calibration.

概 要

ビデオカメラとAD変換器の水平・垂直同期信号の同期を取りながらAD変換を行ない、ビデオカメラのCCD画素と1対1の対応の取れたデジタル画像を得て、CCD画素の空間分解能、感度のばらつき、安定性、直線性、スミア特性を測定した。画素出力の隣接画素への漏れが観察され、画素間の出力の干渉は線型と見なすことが出来た。画素欠陥が存在しないことを確認して、焦点合わせのレンズ移動機構を製作し焦点合わせのアルゴリズムの特性を調べた。

第1章 まえがき

電波を利用した情報獲得・伝達手段は昼夜と気象の影響を受けにくく、高い信頼性があるので、電波を利用した各種のレーダーや通信機器が航空機の安全な運行を確保する為に使われている。安全のレベルは高く、完全な自動化も可能で、パイロットと管制官の仕事の重点は運行システムの監視に徐々に移行するものと考えられる。現在パイロットが機上に居るのは、通信系の故障、運行システムが想定していない事態、社会的コンセンサスを考慮し、最終的判断を自立したパイロットが行なう為である。パイロットは通常の運行では、計器類と外界の監視、聴覚を通しての情報を受け取り、触覚(体感、加速度)により機体の姿勢・運動の検出を行ない、各情報間の整合性から総合的に判断

している。運行システムが故障した場合には、ヒトは衝撃と酸欠に弱い、パイロットは運行システムの故障・欠陥を克服しながら数時間程度なら主として視覚と触覚を使い、飛行機を操縦することが可能である。空港管制塔の航空管制官は空港内の安全を確保する為に、滑走路、誘導路、エプロン等を走行する航空機、車両に対する地上管制と飛行場管制を行なっている。大きな空港では雨、霧、夜間等肉眼では目視困難な時に空港地表面を監視する施設として空港面探知レーダー(ASDE)が設置されているが、飛行場を見渡せる管制塔から航空管制官は主として目から得られる情報を使い地上管制と飛行場管制を行なっている(篠原他1993)。この様なパイロットや管制官などの視覚を支援することを目標に我々は航空宇宙に於ける画像処理の研究を進めている。

* 平成6年2月25日受付 (received 25 February 1994)

*¹ 数理解析部 (Computational Sciences Division)

現在の画像処理では、既知のものを画像の中から捜し出すこと位しか出来ないが、人工視覚の優れている点は見落としが無いことである。ヒトは時々見落としをし、それが事故に至ることがある。飛行機同士の空中衝突防止装置の様な役割が、近い将来の人工視覚の活躍出来る分野である。人工視覚の研究は、視覚センサーから信号処理過程の順番に低レベルの画像処理、中レベルの画像照合と領域分割、高レベルの情景の記述に分類されているが、低レベルの画像処理の個々のアルゴリズムの研究は大体終わっているが、それらを統合した中レベルの領域分割の実用的なアルゴリズムは存在しない。

私の人工視覚の研究の第 1 期として、画像処理以前の視覚センサーの特性評価と視覚システムに必要な視線制御と焦点合わせが可能な視覚センサー作りを進めている。視覚センサーを通して得た視覚情報は、視覚センサーの特性に応じたバイアスがかかっているため、適切な視覚情報処理を行なうためには、視覚情報を得た視覚センサーの特性が必要である。今回はビデオカメラの CCD 画素とデジタル画像の画素との 1 対 1 対応を取りながら画素レベルの較正を行なった。また、ヒトの眼と同程度の解像度を確保する為に長い焦点距離のレンズを使った為に焦点深度が浅くなり、計算機側から焦点合わせを行なう制御機構が必要になり追加したので、併せて報告する。

1.1 構成

第 2 章では視覚システムを構成するビデオカメラ、AD 変換器、デジタル計算機について検討する。視覚情報量を定める解像度と視野について検討し、それらに関連する技術：ビデオカメラの視線制御、CCD の画素サイズ、マイクロレンズについて調べる。ビデオカメラの CCD 画素とデジタル画像の画素との 1 対 1 対応を取ることを提案し、デジタル画像処理系に適した計算機の構成について検討する。

第 3 章ではビデオカメラの較正について報告する。画素の 1 対 1 対応の取り方、CCD 画素 1 個の特性、画素感度のばらつき、スミアとブルーミング、レンズの特性の測定について述べる。視覚システムに追加した焦点調節機構とアルゴリズム、その実験結果について報告する。

第 4 章では実験によって新たに問題になった変動とがたに対する対策、今後の研究の進め方について考察を行なう。

第 5 章は全体のまとめである。

第 2 章 ビデオカメラとデジタル画像処理系

視覚システムを構成するハードについて検討をする。初めに情報量の多さが視覚にとって重要であることと、視覚

センサーに必要な解像度のレベルについて議論をする。それらを達成する為の技術：光学系と視線の制御、CCD の画素サイズ、マイクロレンズについて調べる。ビデオカメラの CCD の画素とデジタル画像の画素との 1 対 1 対応を取ることの重要性を指摘し、画像処理に適したデジタル処理系について検討する。

2.1 解像度と視野

画像認識にいかにか多くの情報を使っているのかは次の例で解かる。計算機内部では、JIS コードの様に 1 文字の漢字を 2 バイトで表現すると $2^8 \times 2^8 = 65536$ 種の漢字を表わすことが可能である。視覚的に 1 文字の漢字を表現しようとする場合でも（例えばプリンターで印刷）、理論的には 4×4 ドット（2 バイト）あれば 65536 種の漢字を表現することが可能であるが、実際には 24×24 ドット（72 バイト）程度が使われている。72 バイトを使えば計算機内部では $2^{24 \times 24} = 2.5 \times 10^{173}$ 種の文字の表現が可能である。

画像処理では各種のフィルターが使われるが、一定の面積に対してフィルターをかける場合、解像度を上げることによりフィルターが作用する画素数が増えるので、フィルターの結果が安定することが期待出来る。解像度を上げた場合、画像処理結果にどのような効果が見られるのかを実験的に検証することが私の当面の研究課題である。

唯一実現しているヒトの視覚に学び、人工視覚の実現を目指すのならば、視覚センサーはヒトの眼と同程度の視野と視力（解像度）を持つべきである。実験をする時、外界をそのまま使うことが出来、視覚アルゴリズムとヒトの眼との比較が容易だからである。また、ヒトの眼より悪い特性の視覚センサーを使った場合、ヒトの脳における視覚情報処理以上の処理が必要になったり、センサーレベルで検出されない情報を得る為に無駄な処理を行ない失敗に終わることも考えられる。

ヒトの眼の視細胞が 1 億個以上あるのに対して入手の容易な CCD の画素数は 40 万個前後であるので、視覚センサーでヒトの眼の視野と解像度を同時に達成するのは難しい。多くの人工視覚研究では数十度の広い視野のレンズをビデオカメラに着け外界の画像を取り入れているので、得られる画像の解像度はヒトの眼の中心窩に較べて悪い。現在入手が容易な CCD を使って中心窩程度の解像度を得ようとすると、視野は数度に制限される。さらに中心 / 周辺光量比が一定なレンズ光軸付近の像だけを使うことにすると、視野は 1 度位になる。この様に狭い視野の視覚センサーで対象全体を見る（広い視野を確保する）為には視線制御が必要である。ヒトの眼の視細胞は 1 億個以上あるにもかかわらず、ヒトの視覚でも限られた視細胞、視神経、大脳皮質で中心窩程度の高い解像度で広い視野を確保する為に視線制御が行なわれている（五味 1992）。

2.2 光学系と視線の制御

最適な条件で画像を取り込む為には、ヒトの眼と同様に、対象とカメラ間の距離に応じた焦点合わせと、対象の明るさに応じた絞り調整が必要である。視野が狭いと焦点合わせと絞り調整が正確に出来る様になる。

市販されている固定焦点レンズには焦点合わせと絞り調整が遠隔制御出来るものはない。市販されているズームレンズには焦点距離、焦点合わせ、絞りを遠隔制御出来るものが沢山あるが、その制御方法は、ズームレンズの駆動用直流電源の極性と通電時間を変えることにより焦点距離の長短、焦点合わせの遠近、絞りの開閉をアナログ的に調整している。焦点距離、レンズの位置、絞りの状態はポテンショメーターのアナログ出力である。

焦点距離、焦点合わせ、絞りを計算機制御する方法としてはパルスモーターを使うのが簡単だが、過負荷により脱調することがあるので、エンコーダーを併用することが望ましい。この様な光学系は市販されていない。

視線制御は市販の回転台、移動台を適当に組み合わせることによりカメラをヒトの眼の様に回転運動させることが可能である。その場合、視線制御がヒトのそれに比べて遅いことが問題である。

機械的精度は生体の精度より優れているので、視覚系を構成する時に問題になるのは速度と耐久性である。速度と耐久性の問題はお金をかければ解決可能である。

2.3 CCDの画素サイズ

視覚センサーとして CCD を見た場合、CCDは小さい方が良い。固体撮像素子としての CCD は、1974年アメリカ RCA が512×320画素、大きさ13mm×19mmの CCDを開発し、商用白黒テレビ並の解像度を実現したビデオカメラを試作した。1981年には日本で家庭用単板カラーカメラ用固体撮像素子(2/3インチ)が量産され始めたが、しばらくは撮像管優位の状態が続いた。1990年には1/3インチで25万画素の CCD が量産され始めた(長原 1992)。約10年で CCD の大きさが長さで1/2になったが、このペースで技術進歩が進むものとすれば、製造技術的には今後20年程でさらに長さで1/4になり、ヒトの網膜中心窩の錐体視細胞と同程度の大きさの CCD 画素が可能になるかもしれない。

解像度を一定にした場合、CCDが小さくなれば、それに比例してレンズの焦点距離も短くなり、光学系が小型になり、ビデオカメラの視線制御(回転運動)が容易になる。また、焦点距離が短くなれば、カメラの被写体深度が深くなり、焦点合わせが楽になる。焦点合わせが楽になるということは、焦点合わせに伴うレンズの移動から得られる距離情報の分解能が低下することを意味する。1/3インチ CCD を使った場合、立体視による距離測定と焦点合わせ

による距離測定との精度は同程度であるが、ヒトの視覚では視差による方が、1桁位精度が良い。したがって、1/3インチ CCD を使った視覚システムとヒトの視覚では各アルゴリズムの重点の置き方が異なるものと予想される。

現在の大きさの CCD の統計的変動は1%以下だが、CCD が小さくなるにつれ画素に入射する光子の数が減少して統計的変動が大きくなり、画像信号出力が変動する主因になることが予想される。対象までの距離がレンズの焦点距離に較べて遠い場合、レンズの口径比(レンズの焦点距離/レンズの直径)が一定の時、像の照度は変わらないので、CCD の画素(正確には窓)の大きさが1/4になると、統計的変動は4倍になる。CCD の大きさが小さくなると開口率(画素に占める光を感じる窓部分の割合)も小さくなり、統計的変動はさらに大きくなる。しかし、積層構造あるいはマイクロレンズを採用することにより有効開口率をほぼ100%とすることが出来れば、ヒトの眼の視細胞程度(現在の CCD 画素の1/4程度)の大きさまでならば、統計的変動は数%程度に収まるので CCD の画素は小さい方が良い。

2.4 マイクロレンズ

インターライン形 CCD の開口率は小さく、前に使用した2/3インチ CCD では34%、今回使用する1/3インチ CCD では20%である。窓の面積は49 μm^2 から9.4 μm^2 と約1/5に狭くなっているが、画素ごとに(オンチップの)マイクロレンズを載せ、信号電荷を電圧に変換する効率を上げることにより、視覚センサーとしては2/3インチと同じ飽和信号600mV、暗信号2mVの性能を達成している(廣田他1992)。

マイクロレンズの採用はマイクロレンズ製造上のばらつきと、CCD周辺画素では視野角に比例して斜めに光が入射することにより集光効率が悪化し、画素感度のばらつきの原因になる(川島他 1992)。実験誤差になる様なものは取り除かなければならないが、マイクロレンズが載っていない1/3インチ CCD は販売されていないので、マイクロレンズ付き1/3インチ CCD を使用したビデオカメラを採用した。

マイクロレンズ製造上のばらつきが原因による画素感度のばらつきだけを分離することが出来ないため、それを含めた全体としての画素感度を測定した。斜めに入射することによる集光効率の悪化は今回の実験では視野角が数度と狭いので無視出来る。視野角が広い場合には斜めに入射することによる集光効率の悪化を主レンズの中心/周辺光量比に含めて測定することが出来る。

2.5 画素1対1対応のAD変換

ヒトの眼の網膜では視細胞とその信号を脳に伝える視神

経との結合は並列で安定している。視細胞が1億個以上あり視神経が100万本程度しかないので、複数の視細胞からの信号を処理したものが1本の視神経を通して脳に送られる。中心窩でも1本の視神経に複数の錐体（視細胞の一種）が信号を送っていると考えられているが、網膜中心から5度以内であれば、錐体と視神経との数の比は1対1と報告されている。

個々の CCD 画素（ホトダイオード）から並列に電荷を読み出すことが出来れば、時間軸に関する離散化を自由に出来るが、技術的には不可能である。ビデオカメラからデジタル画像を得る過程では CCD 画素の電荷を直列的に読み出しアナログ信号を作り、それを AD 変換してデジタル画像を得ている。直列に読み出した電荷を電圧に変え、相関二重サンプリング後の出力を直ちに AD 変換することにより、CCD の画素とデジタル画像の画素との厳密な 1 対 1 対応を取ることで、プロセス回路の周波数帯域の制限による解像度の劣化を防ぐことが可能になる (Fig.1.)。

画像処理では多くの場合、AD 変換する時、デジタル画像の縦横の空間的なサンプリング間隔が同じになる様に時間サンプリング間隔（約 12 MHz）が決められている。厳密に CCD とデジタル画像の画素間で 1 対 1 対応を取るためには、1つのクロックを基準にしてビデオカメラと AD 変換器の同期を取りながら AD 変換をしなければならない。その様な AD 変換ボードは市販されているが数百万円するので、経常研究費での購入は出来ないで、今回の実験ではその準備段階としてビデオカメラと AD 変換器のクロック周波数が同じものを購入し、水平と垂直の同期を取りながら AD 変換することにより CCD とデジタル画像の画素との間で 1 対 1 の対応を取ることを試みた。

CCD は受光面が長方形の画素に分割されていて、画素

の面積のうち何十%かを占める窓に入射した光が電気信号に変えられビデオカメラの外に出力される。したがって、受光面上に焦点を結んだ像が受光面での画素配列に従って離散化されるので、画素、特に窓の形状は重要である。

標本化定理によればサンプリング間隔の半分以下の空間周波数の情報は失われるだけでなく、折り返し現象により疑似信号を生じる危険性がある。この危険性は開口率を 100% としてもだめで、危険を避ける為には画像に充分なローパスフィルターをかける為に適当に焦点合わせをずらすなどの対策が必要である。標本化後のフィルター処理は役立たない (Horn 1986)。

もし、CCD 受光面での離散化間隔と AD 変換のサンプリング間隔が一致しない場合、デジタル画像の画素には CCD の画素の 1 つと対応するものや 2 つの画素の出力の中間に対応するものが生じて標本化の問題が複雑になる。標本化の問題を単純にする為にも CCD とデジタル画像の画素が 1 対 1 に対応していることが必要である。

CCD の画素には感度のばらつきがあり、中には欠陥と呼べる画素がある場合もある。画素感度のばらつきを測定し、ばらつきの大きな CCD は交換したり、画素感度のばらつきを知り有効な画像処理をする為にも CCD とデジタル画像の画素が 1 対 1 に対応していることが必要である。

画像を時間微分する場合、CCD の特定の画素からの出力を AD 変換したものを時間微分することにより、画素感度の影響を受けないで安定した信頼性の高い結果を得ることが出来る。

2.6 デジタル画像処理系

視覚システムの中では最も高価であり、視覚研究の時間はデジタル処理系のハードとソフトの改良に使われるので、

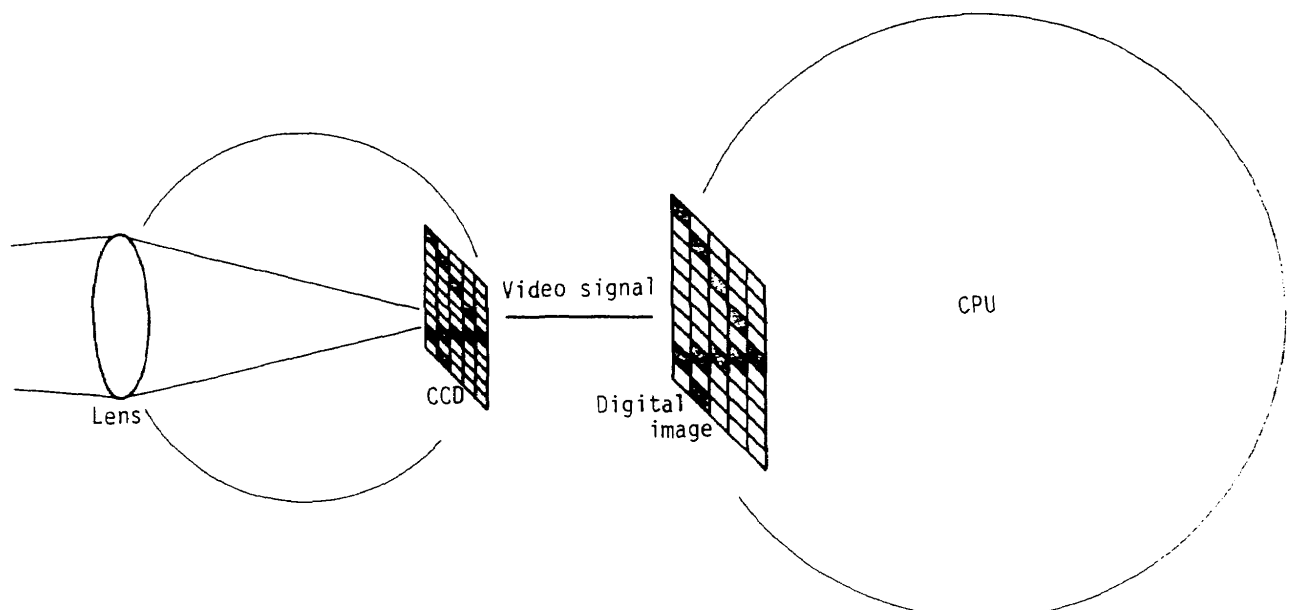


Fig. 1. One-to-one correspondence between picture elements of CCD and digital image.

デジタル処理系の検討は一番重要である。画像データはデータ量が多いので現在のハードの技術レベルでは1台の計算機では処理時間がかかり過ぎる。限られた研究費で最大の処理速度を達成する為には汎用性がある廉価なハードを使い、複数のアルゴリズムを並列/直列的に実行出来る処理系を構成することが必要である。複数の計算機を使うと処理結果を計算機間で転送する方法が問題になる。この種の問題は画像処理の各段階で問題になるので、ビデオカメラから映像をデジタル計算機に取り込む場合の構成について考えてみる。

NTSC方式のビデオ信号は約33msに1枚の画像を送っている。デジタル画像が768×484画素からなり、1画素1Byteの情報量とすると、白黒363k Byte、カラー(3色)約1M Byteの情報量になり、1秒間に転送する情報量は白黒約10M Byte/s、カラー約30M Byte/sになる。2台のビデオカメラを使うステレオではさらに倍になる。

ビデオカメラからデジタル画像を得て処理する手順は、

構成1：汎用計算機に画像入力部を付けた場合、

- ① 計算機よりAD変換器に画像取り込みの信号を送る。
- ② AD変換器はビデオカメラからフレーム開始信号が来たら、AD変換を行ない、結果をメモリーに書き込む。1画面のAD変換を完了したら、終了したことを計算機に知らせる(この間33~66ms)。
- ③ 計算機は画像処理を行なう。画像処理が終了したら次の画像データを取り込む為に①のステップに進む。

この方法ではAD変換してメモリーに書き込む時間が無駄になるが、次の方法ではそれを解決出来る。

構成2：マルチポートメモリーとマルチバス、

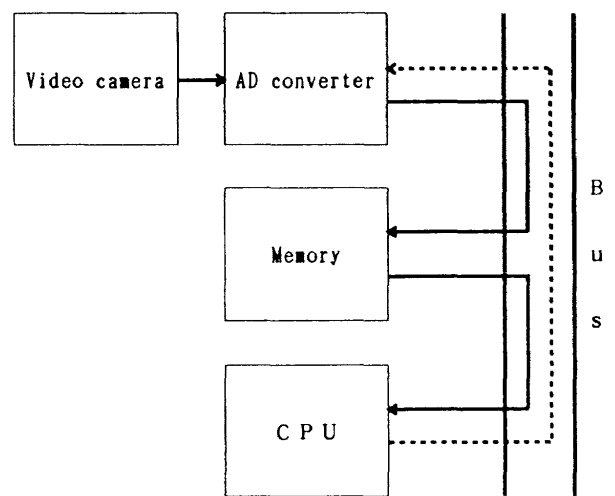
- ① AD変換器は連続してビデオ信号をAD変換して結果をメモリー1に書き込む。
- ② 計算機はメモリー1から画像データを読み込み、処理結果をメモリー2に書き込む。

このシステムはメモリーの読み書きが同時に行なえるデュアルポートのメモリーとデュアルバスの計算機が必要になる。この方法では計算機がAD変換器の制御をしなくても良いが、画像処理中にメモリー1の内容が書き替えられる心配がある。さらに画像処理を並行して行なおうとすれば、複数の計算機から同時にアクセス可能なマルチポートメモリーと複数の計算機間通信が可能なマルチバス計算機が必要になる(Fig.2., 脚注)。あるいは1台の計算機から複数のデュアルポートメモリーにデータを同時に転送(放送)する方法が考えられる。

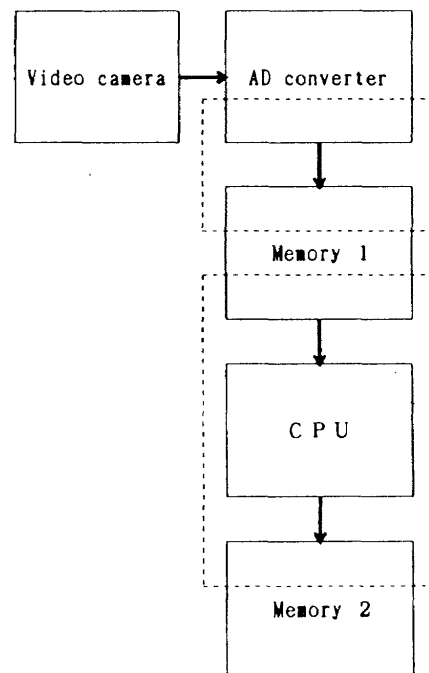
計算機の速度が向上すればデータ転送の速度も向上する

ので転送の問題はいずれは解決するのかもしれないが、現在得られるハードで最大の処理速度を達成する為には転送の問題は充分検討されなければならない。

画像処理系を作る方法として一般的に部品を購入して組み立てる方法からシステムレベルで外注するまでの方法が考えられる。部品を購入して組み立てる方法はハードに関する知識も獲得することが出来、処理系を実験に合わせる事が出来るが、部品の購入・組立に時間が取られる問題がある。システムレベルで外注する方法は数千万円の費用がかかり、基礎研究としては予算的裏付けが難しい。また、新たに研究を始める場合、特に視覚の研究の様に研究方法



Architecture 1. Standard.



Architecture 2. Dual ported memories and dual buses.

Fig. 2. Digital image processing systems.

脚注) だからと言って、私はニューロ計算の様な超並列的な処理を目指すのではなく、手続き的な画像処理によって人工視覚の実現を目指している。

が確立していない分野では、その分野の研究者が持っている最新のものを購入するだけに終わる恐れがある。その結果として、研究を始めてから実験装置の使い勝手が良くなかったり新しいアイデアを確かめることが出来なかったりして、費用対効果が悪い。基礎研究を進める場合、研究費の制約から数十万円のモジュール単位で実験装置の組立あるいはグレードアップが出来ることが必要になる。さらに実験装置を組み立てる各段階で意味のある実験が出来ることが望ましい。

この様な処理系を実現する為に VME バスを採用したデジタル処理系とそのオペレーティングシステムとして OS-9 を選んだ。その理由は、

- ① マルチバスシステムを構成出来る。
- ② オープンアーキテクチャに基づき複数のメーカーが製品を供給している。
- ③ ボード単位(数十万円)のグレードアップが可能である。
- ④ リアルタイム、マルチタスクの OS であり、コンパクトで低価格である。

VME バスは1981年にモトローラ社他3社によって提唱されたダブルハイトのボード用のバス規格で、1987年には IEEE の標準規格として認定された。現在では16/32 bit バスの標準として350社を越えるメーカーから2500種以上のボードが供給されている (Motorola 1993)。

OS-9 は UNIX を参考に作られたマイクロコンピュータ用の OS で、その特徴は実行しようとするタスクをメモリー上に常駐させていることである。OS-9 の基本部分は約52k Byte で、UNIX のそれと較べると非常に小さい (高澤 1989)。

第3章 実 験

初めにビデオカメラ選択の経緯について述べ、カメラ較正の実験系と測定結果について報告する。測定項目は CCD 画素の空間分解能と感度のばらつき、レンズの特性、スマアとブルーミングである。最後に、視覚システムに追加することが必要になった焦点調節機構とアルゴリズムについて報告する。

3.1 ビデオカメラとレンズの選択

今までホームビデオカメラを使って実験を行なって来たが、自動利得調整 (AGC) を手動にし絞りを全開で固定したが、それでも映像出力信号の変動が見られた。また、 γ 補正を OFF に出来ない為に、時間がかかるにもかかわらず入出力特性の較正が正確に出来なかったため、新たに工業用ビデオカメラを購入することにした。

新しいビデオカメラとして CCD 画素が正方形 (11.0 μ m \times 11.0 μ m) の SONY の XC-77ce (出力ビデオ信号が CCIR

(PAL) 方式) の購入を検討したが、窓 (光を感じる部分) の形状が正方形ではないということなので、購入の対象から外した。CCD が小さくなればレンズ系を小型に出来るので、1/3 インチ CCD の工業用ビデオカメラの中で一番早く発売 (1992年8月) された SONY の XC-73 を2台購入した。

レンズは固定焦点距離のものを購入し、焦点合わせを計算機側から制御する為にパルスモーター駆動のレンズ位置調節機構を自作した (3.3.5 参照)。1/3 インチの CCD を使用した場合の角度分解能 (画素当りの視角) が 0.5 分と 1 分となる様に Canon の固定焦点距離のレンズ VF50 (f=50mm, F=1.8) と VF25 (f=25mm, F=1.4) とを2本ずつ購入した。視線制御による対応点探索アルゴリズムは左右のカメラレンズの倍率 (焦点距離) 差が 10% 程度まで機能し (五味 1992)、メーカーの話では VF シリーズの焦点距離の公称値からのずれは 5% 以内ではあったが、メーカーで焦点距離を測定し、それぞれの焦点距離の差が 1% 以内のものをメーカーで特別に選んで貰った。購入したレンズの焦点距離のメーカーに於ける測定値を Table 1. に示す。

Table 1. Focal Lengths measured by Canon co., inc.

Type	Serial No.	Focal length
VF50	112363	49.86mm
VF50	112679	49.70mm
VF25	052699	25.25mm
VF25	053820	25.25mm

3.2 実験系

(1) ビデオ信号の AD 変換

ビデオカメラの CCD 画素とデジタル画像の画素とが 1 対 1 の対応が取れたデジタル画像を得る為に、ビデオカメラのクロック周波数と同じクロック周波数 (14.31818MHz) を持つ AD 変換ボード (NPS の FINEVISION) を購入した。FINEVISION はカラー RGB (赤, 緑, 青) 3 色のビデオ信号用 AD 変換ボードであるが、その内の 2 色に、モノクロの左右ビデオカメラからのビデオ信号を入力した。AD 変換ボードから 2 台のビデオカメラへ水平と垂直の同期信号を入力し、ビデオカメラを外部同期モードで使用した (Fig.3., 脚注)。外部同期モードでは、ビデオカメラ内

脚注) Fig.3. の構成は Fig.2. の Architecture 1. に近い。ビデオカメラと同じクロック周波数を優先した為に、経済的理由からこの様な構成になった。

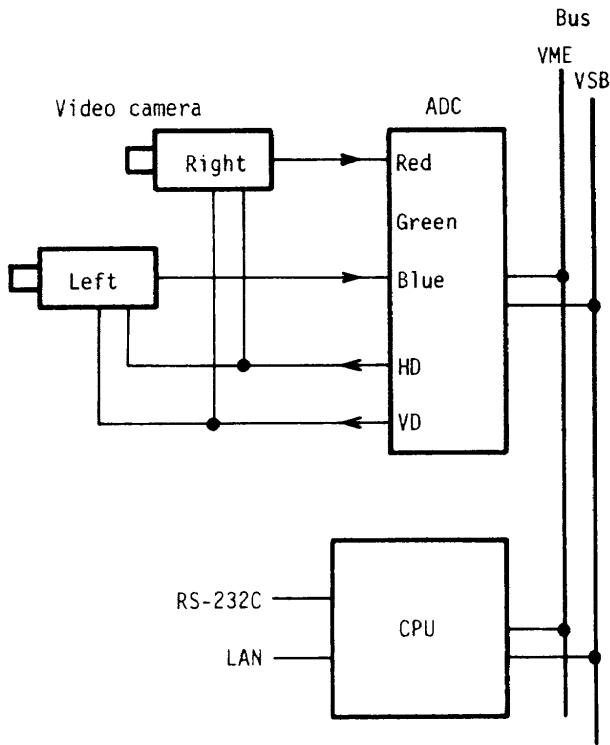


Fig. 3. Block diagram.

のLC発信回路によるクロックを基に作成された水平信号が外部入力の水平信号と位相差が0になる様にLC発信回路の周波数が調整される (Sony 1992)。

AD変換の0点は同期信号後のブランキング期間の映像信号レベル(ペDESTアルクランプ)とし、暗状態のビデオ信号の値を測定出来る様にAD変換はSETUP無しとし、ビデオ出力700mVの時240ADU(AD変換単位, 8ビットAD変換器では255ADUがフルスケール)に調整したものを購入した。FINEVISIONが使用しているAD変換器は富士通の全並列型(フラッシュ型)8ビットビデオ用AD変換器MB40568(富士通 1993)である。

AD変換開始の画面上での水平と垂直の位置(アドレスカウント)は出荷時固定である。左右のデジタル画像はそれぞれ横768×縦484画素からなる。

(2) 照明

照明は主として直流安定化電源によって点灯した白熱灯を使用し、スチールカメラ用露出計の出力をデジタル電圧計で見ながら手動で電圧を微調整した。レンズの中心/周辺光量比の測定では、対象の白紙の照度が均一になる様に実験室天井の商用AC100Vにより点灯した蛍光灯を併用した。

(3) ビデオカメラのパラメータ

利得を固定、 γ 補正をOFF、水平/垂直同期を外部同期信号入力、電荷蓄積をフレーム蓄積、電子シャッターを1/100秒、レンズ絞りを全開にした。ビデオカメラに光が全然入射しない時(暗状態)の出力レベル(ペDESTアルレ

ベル)の規格は3.5IRE(畔津 1987)なので、今回使用したAD変換器で得られる暗状態のデジタル画像の値は約12ADUになる(脚注)。

(4) CCD撮像素子

XC-73に使われているCCD素子はSONYのICX058ALで、有効画素数横768×縦494、画素サイズ横6.35 μ m×縦7.4 μ m、電子シャッター付きである。窓(光を感じる部分)形状は横1.7 μ m×縦5.6 μ m、画素に占める窓の割合(開口率)は20%と推定される(廣田他 1992)。集光率を上げる為にマイクロレンズが画素ごとに付いている(Fig.4)。画素欠陥は無く、したがって、ビデオカメラでは画素欠陥の補正が行なわれていない。

視覚センサーとしては光学系が単純な方が未知数が少なく良いのだが、マイクロレンズ無しのもは無いので、マイクロレンズを含めてカメラ校正を行なった。

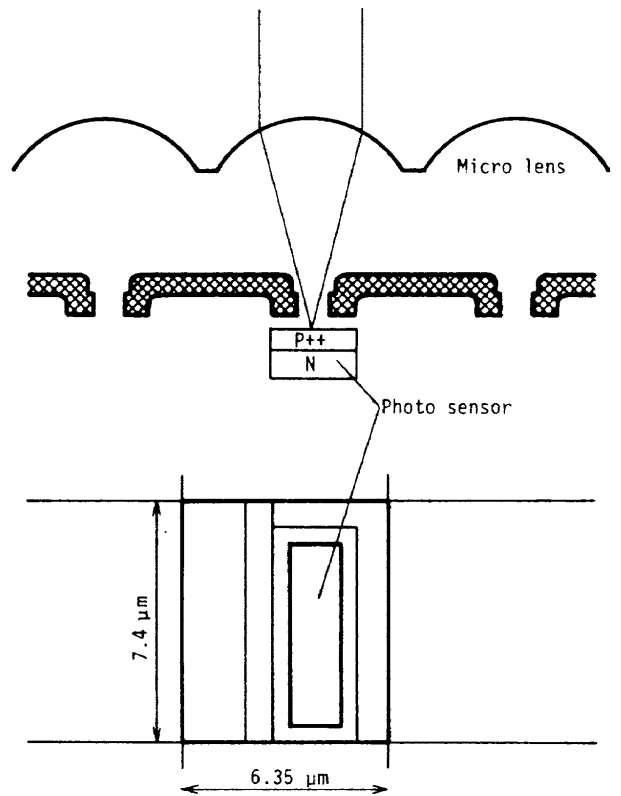


Fig. 4. CCD unit cell.

3.3 実験結果

3.3.1 CCD画素1個の特性

(1) 測定方法

ビデオカメラを厳密に評価するには、CCD素子とレンズ

脚注) この報告では、ビデオ信号をAD変換した直後のデータはADUという単位を付け、暗状態の出力(バックグランド12ADU)を引いたデータは明度と呼び単位は何も付けない。ビデオカメラの γ 特性が直線($\gamma=1$)の場合、明度はCCD受光面の照度に比例する。

の特性を独立に測定しなければならない。その為には、レンズを着けない状態でビデオカメラ CCD 受光面上に当てる直径 $1\mu\text{m}$ 程度のスポット光とマイクロメーターレベルの精密な移動台とレンズの特性を測定する装置が必要になる。手元にはスポット光も精密な移動台もレンズの特性を測定するものも無かった。費用と時間を節約する為と、視覚センサーとして使う場合、撮像対象がどの様に写るのかという End-to-End の特性が解れば良いので、ビデオカメラにレンズを着け、小さな対象を撮像する方法を採用した。

CCD 撮像面上の像の大きさを $1\mu\text{m}$ にする為には、焦点距離 50mm のレンズを使い、 5m の距離に対象を置いた場合、対象の大きさは 0.1mm になる。白紙を切り抜いたりして 0.1mm の対象を精密に作るのは難しいので、ピンホールを使うことにした。手元に回転する円盤に 45 度おきに直径 $0.2, 0.4, 1, 1.5, 2, 3, 4, 6\text{mm}$ のピンホールがあったので、これを使った。レンズの焦点距離を 25mm 、カメラ・ピンホール間の距離 5.8m （実験室で取れる最大の距離）とした場合、CCD 窓の幅 ($1.7\mu\text{m}$) のピンホール像が得られる 0.4mm のピンホールを使うことにした。画素出力を同じにする為には、 0.2mm のピンホールを採用した場合、照明の明るさは 0.4mm のピンホールの場合の 4 倍の明るさにしなければならない。そうした場合、照明の熱による実験装置の変形が問題になった。

ピンホールの後ろ 420mm に置かれた白紙を直流安定化電源で点灯した 4 つの白熱灯で均一になる様に照明した (Fig.5)。ピンホールを通して白紙を見る様にし、焦点をピンホール上に合わせた (脚注)。ビデオカメラをマイクロメーターの精度で移動させる代わりに、ピンホールだけをミリメーターの精度で移動した。焦点距離 25mm 、 $F1.4$ のレンズを使った場合、CCD 受光面上の回折現象による解像度の限界は計算によれば $1\mu\text{m}$ 以下である。直接ピンホール像の光強度分布を測定出来れば良いが、付録 A. に示す様に難しい。

(2) AD 変換タイミングの微調整

CCD からの出力信号は相関二重サンプリング後では画素出力を高さとする段階的な信号で、毎秒 14.31818M サンプルで AD 変換した場合、階段のステップ幅は約 70ns である。信号処理回路の周波数特性の為にビデオカメラの映像信号は滑らかに変化する信号として出力される。AD 変換するタイミングとしてはステップ中央になる様に調整する

脚注) ピンホール (小さな対象) に焦点を合わせる場合、画素出力が最大になる様に調整すると焦点調整がずれることも考えられる。焦点合わせの為にレンズを回転させると像が移動し、ピンホールの像が画素のどこに位置するのかによって、画素出力が変化するからである。

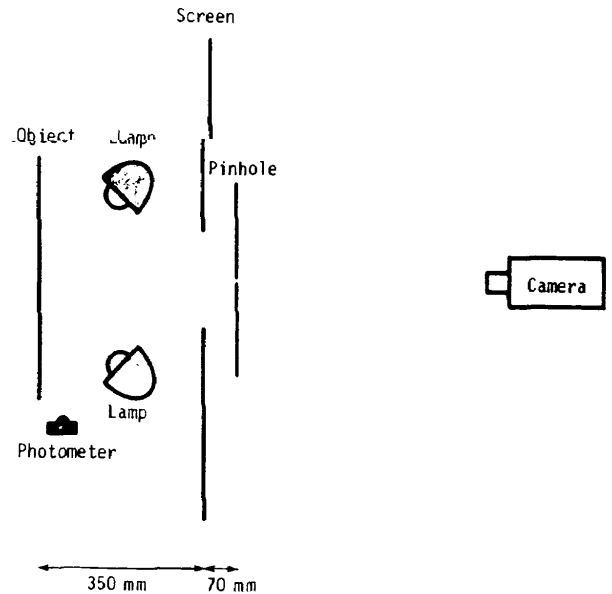


Fig. 5. Experimental arrangement.

ことにより、CCD の各画素とデジタル画像の画素との対応が良くなる。この微調整を AD 変換ボードからビデオカメラへ水平同期信号を送る同軸ケーブルの長さを変えることにより行なった。(1) のセットアップで、特定の画素出力が最大になる様に次の ①, ②, ③ を何回か繰り返した。

- ① ピンホールを水平に移動する。
- ② ピンホールを垂直に移動する。
- ③ 水平同期のケーブルの長さを変える。

同軸ケーブルの長さを変えた場合のデジタル画像の画素出力の変化を Fig.6. に示す。安定した画素出力を得る為には 100 画面の平均を取らなければならなかった。また、同軸ケーブルの長さによる出力の周期的変化の仕方が少し異なることと左右ビデオカメラの同軸ケーブルの長さに干渉があ

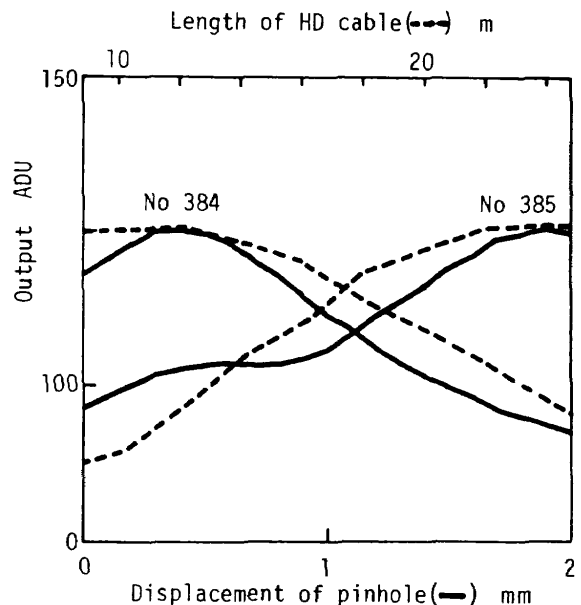


Fig. 6. Outputs of CCD unit cells.

ることが観察された。この様にして求めた同軸ケーブルを伝わる信号の速度は約19万 km/s であった。ポリエチレン絶縁の同軸ケーブル中の電気信号速度は約20万 km/s である(畔津 1987)。

(3) 画素の空間分解能

Figure 7. に撮像対象のピンホールを移動させた時の1個の CCD 画素の出力を折れ線で、ピンホールを固定した時の軸方向に隣接した各画素からの出力を点で示す。垂直方向に較べて水平方向の方が空間分解能がやや優れている(感度のピークが鋭い)が、CCD 画素の縦横比が横 $6.35\mu\text{m}$: 縦 $7.4\mu\text{m}$ 、窓の縦横比が横 $1.7\mu\text{m}$: 縦 $5.6\mu\text{m}$ が影響していると考えられる。しかし、空間分解能の切れ(感度特性の裾の狭さ)では垂直が良く、水平は数画素離れても変動している。映像信号の読み出し機構が影響していると考えられる。また、Fig.7. より画素内で感度は均一では無いことが解かる。

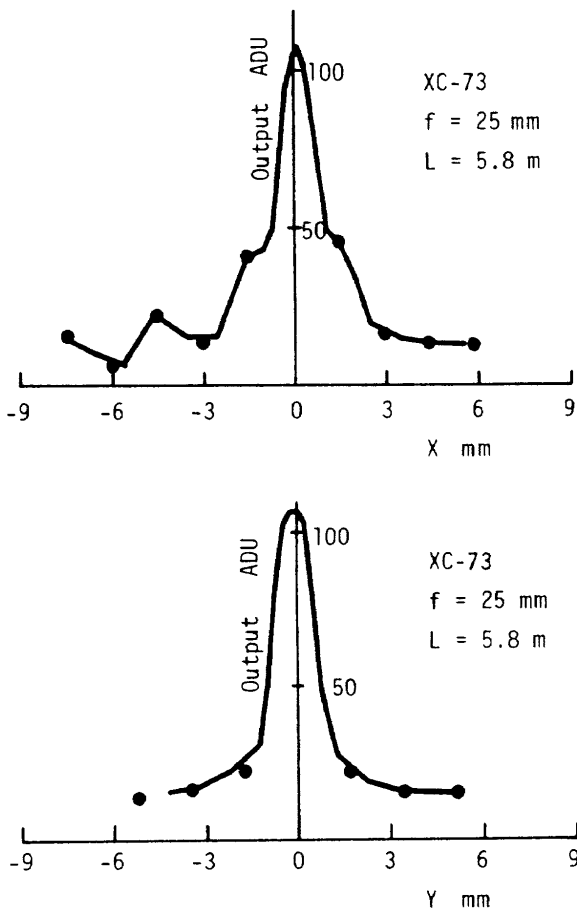


Fig. 7. Outputs of a 1/3 inch CCD unit cell.

ピンホール像の位置により画素出力(明度)がどのように変化するのはFig.7. から予想出来る。中心画素出力が最大の時にピンホール像は画素中央にあるものと仮定して、ピンホールを水平に 0.7mm (約0.5画素)、垂直に 1mm (約0.5走査線) 移動した実験により予想が正しいことを確認した(Fig.8.)。

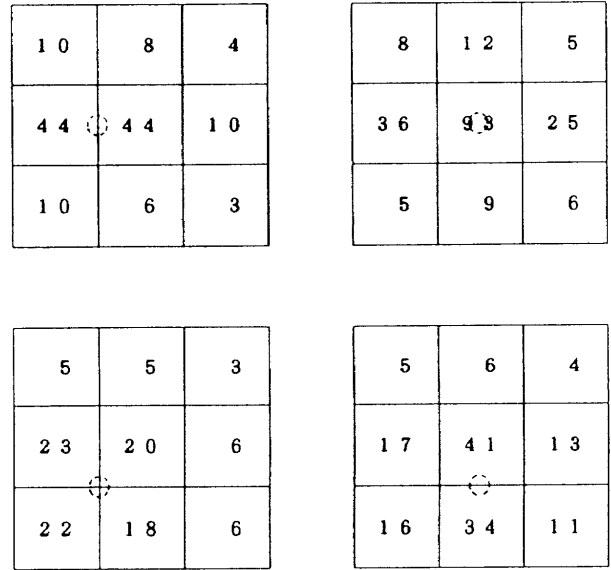


Fig. 8. CCD unit cell outputs versus a spotlight location.

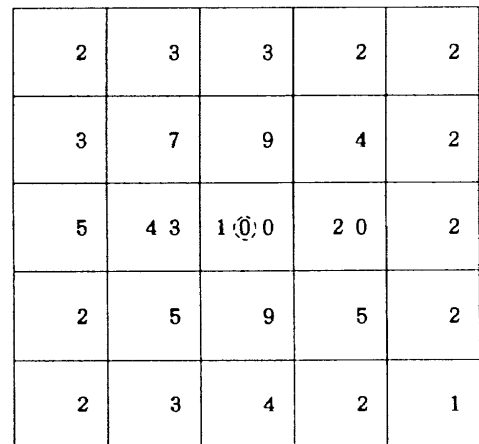


Fig. 9. Leakage from the unit cell illuminated by a spotlight. (normalised)

Figure 9. は暗状態の出力を0とし、ピンホール像が結んだ画素の出力(明度)を100として規格化したものである。ピンホール像の直径は CCD 画素の $1/4$ 程度の幅なのでピンホール像の広がり CCD 画素を越えるとしても、越えた部分の明るさは弱いので、隣接画素の出力は、見方を変えると、中心画素から隣接画素へ漏れている出力の大きさを示していると考えることが出来る。画素間の感度のばらつきを無視すれば、周辺への漏れは、中心画素の周りの8画素(8近傍)の合計は102、さらにその外側の16画素の合計は40になり、それらの合計は中心の出力の約1.4倍になる。中心画素から離れるにしたがい1個の画素への漏れは小さくなるが、画素数が増えるので漏れの合計はそれ程小さくはならない。ピンホール像が結んだ画素から遠くなると画素感度のばらつきや出力の変動や誤差が無視出来なくなるので、あまり遠くまで漏れを考えるべきではない。こ

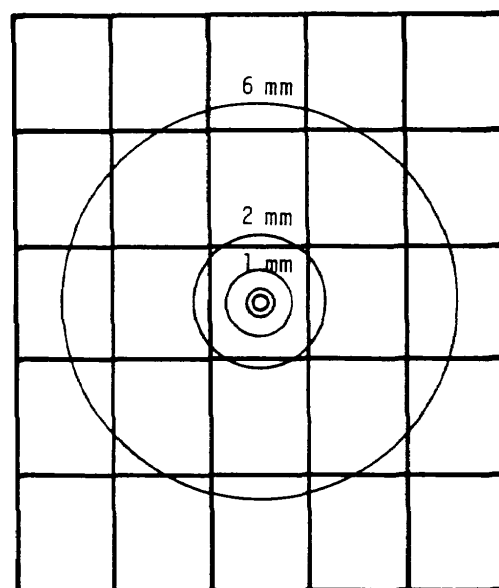
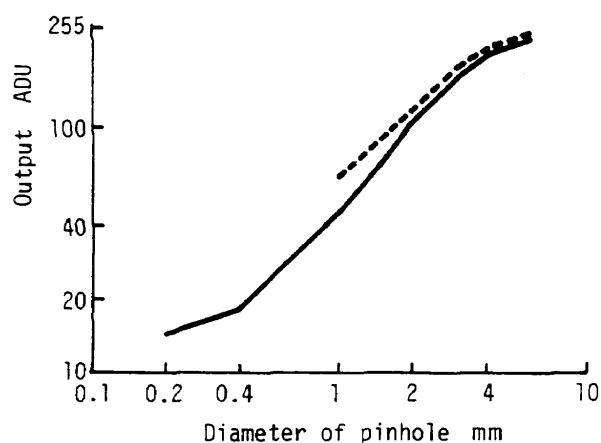


Fig.10. Effect of pinhole size.

の漏れはマクロ的に見れば CCD のスミア特性になる。

(4) 照射面積による出力の変化

直径0.2mmのピンホールの像が適当な画素の出力を最大にする様にピンホールの位置を調節し、ピンホールの直径を0.2mmから6mmへ増加させると中心画素の出力は単調に増加し、直径0.4mmから3mmの間はほぼ比例している (Fig.10.)。ピンホールの代わりに紙を切り抜き、一辺が1, 2, 3, 4, 6mmの正方形を対象とした場合でも同様な結果が得られるので (Fig.10.の破線), 対象が大きくなるにつれて出力が大きくなるのはピンホールを使ったのが原因ではない。原因としては隣接する CCD 画素の出力の漏れ・干渉が考えられる。Figure 9.に示す様に、0.4mmのピンホールを撮像した場合、垂直方向の隣の画素の出力は10%程度に低下しているが、水平方向の隣の画素の出力はまだ20~40%もある。出力の漏れの原因がピンホール像の光強度分布の広がりとしても、その割合は垂直方向の10%程度なので、水平方向にはピンホール像が結像した画素の出力が隣接した画素に10~30%程度漏れていることになる。

次の様な仮定をすると CCD 画素間の干渉がかなり定量的に説明出来る。レンズの焦点距離25mm, ビデオカメラ・ピンホール間距離が5.8mの時、直径2mmのピンホール像はほぼ CCD 1画素を被い、直径6mmのピンホール像は隣接する8つの画素を被う大きさになるので、

仮定1: Fig.9.は1つの画素全体を均一に照らした場合の CCD 画素出力の漏れを示す。

仮定2: 2mmのピンホールは中心画素のみを均一に照らしている。

仮定3: 6mmのピンホールは3×3画素を均一に照らしている。

仮定4: 画素からの出力はその画素に入射した光により

生じた出力と隣接画素からの漏れの単純和(線型性)とする。

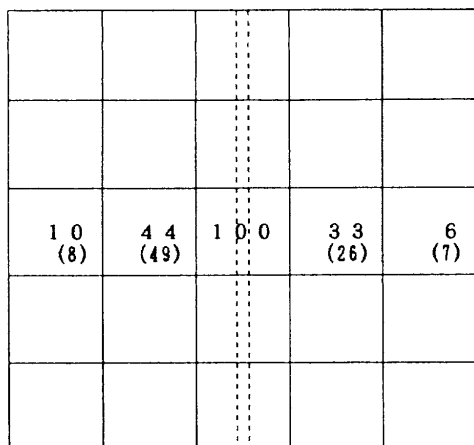
以上の仮定から2mmの実験結果を左右1画素, 上下1走査線ずらした9画面を加算したものが6mmの実験結果になることが予想される。予想される中心画素出力は202となり、2mmの約2倍の出力になる。実験では Fig.10.より直径6mmの中心画素出力は直径2mmの中心画素出力の約2.3倍になる。

(5) スリットを使った実験

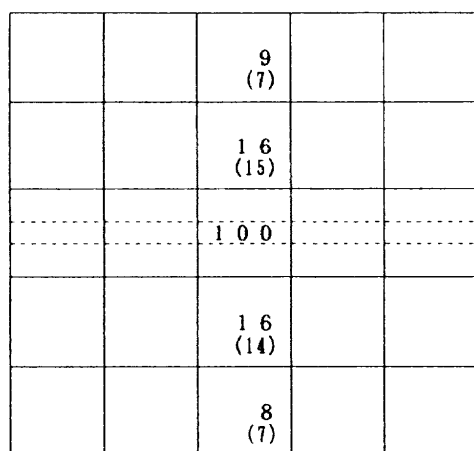
画素間の干渉を定量的に検討する為にピンホールの代わりにスリットを使った実験を行なった。スリットの幅を0.1mmにして中心の画素出力が最大になる様にスリットの位置調整をした時の出力を中心出力を100として規格化したものを Fig.11.に示す。ピンホールと同様にこれらは中心の画素から周辺の画素に出力が漏れている大きさを示したものと見ることが出来るが、ピンホールに較べて出力の漏れが大きい様に見える。しかし、Fig.9.を行ごとにあるいは列ごとに合計したものを中心画素の値を100で規格化すると Fig.11.の()の中に示した値になり、スリットとピンホールの実験結果は近づく。

より正確に画素間の干渉を定量的に評価する為に0.5mmと4mmのスリット幅の実験を行なった。0.5mmのスリット像の幅は1/3画素の幅である。もし、CCD受光面上に結像した入力画像とデジタル出力画像との間に空間的な線型性があれば、4mmのスリットは0.5mmのスリットが8本連続したものと考えることが出来るので、4mmのスリット像のデジタル出力画像は、0.5mmのスリットを0.5mmずつずらした8本のデジタル出力画像の和となる。

0.5mmのスリットの出力像の最大値を100ADU程度になる様に白熱灯を点灯している安定化直流電源の電圧を調



A vertical slit-light.



A horizontal slit-light.

Fig.11. Leakage from the unit cells illuminated by a slit-light. (normalised)

整し白紙の照度が一定になる様に電圧を微調整する。スリットを水平に移動しながら出力の変化を測定する。次に、スリット幅を 4mm にすると出力画像が飽和するので、ND-4（透過率 24%，較正值）フィルターをビデオカメラレンズの前に着け、スリットを水平に移動しながら出力像を得る。Figure 12. に示す様に 4mm の実験値と 0.5mm の実験値からの 4mm の予想値は最大値の 5% の誤差で一致している。

(6) SONY の XC-007 との比較

ビデオカメラが使用している 1/3 インチ CCD の窓形状がかなり縦長（縦横比約 3 対 1）になっているにもかかわらず、水平と垂直の画素分解能があまり変わらないのはマイクロレンズの影響が考えられるので、マイクロレンズの付いていない 2/3 インチ CCD の画素分解能を測定した。手元に 2/3 インチのモノクロのビデオカメラが無かったので、3 CCD の SONY の XC-007 を使った。

2/3 インチ CCD の画素は横 11μm × 縦 13μm で、長さで 1/3 インチ CCD の約 1.7 倍である。2/3 インチ CCD の特

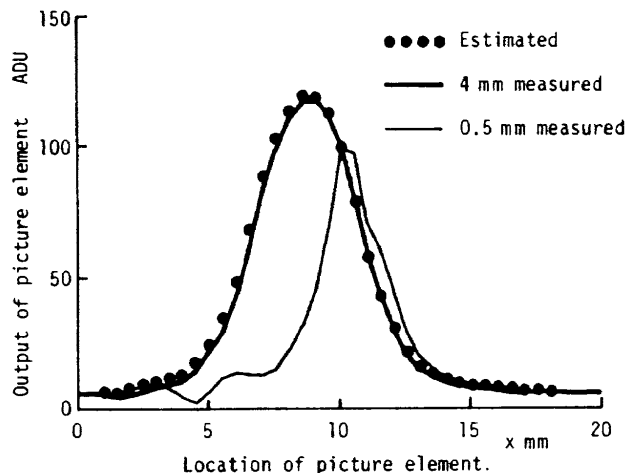


Fig.12. Estimation of 4mm-slit-light from 0.5mm slit-light data.

性は 1/3 インチ CCD とほぼ相似で、画素の大きさに比例した分解能であり、水平方向の出力の干渉が見られる (Fig. 13.). 2/3 インチ CCD の開口率は 34% だが、窓形状については公表されていない。縦横比はかなり正方形に近い 3 対 2 程度と推定される。窓の形状の影響はレンズの解像度がそれ程良くないので現れない、あるいは、水平と垂直の分

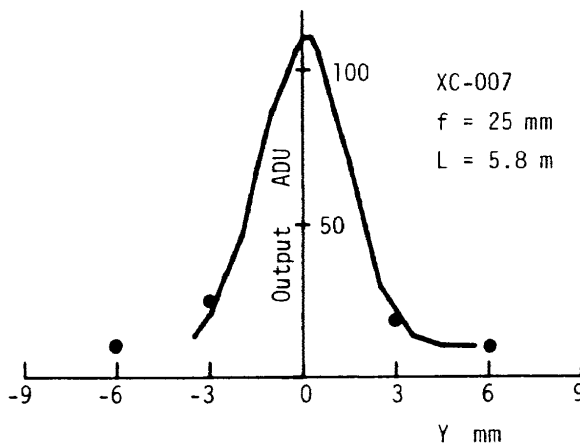
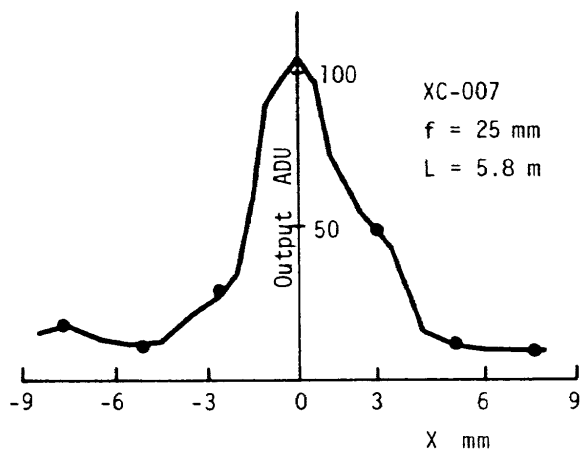


Fig.13. Outputs of a 2/3 inch CCD unit cell.

Table 2. Estimation of grid testchart result from slit-light data.

location	-4 pe	-3 pe	-2 pe	-1 pe	centre	1 pe	2 pe	3 pe	4 pe
7.05mm	104.7	44.5	21.5	21.7	7.7	14.6	11.4	11.4	12.6
10.00mm	25.7	60.9	105.2	44.5	21.5	21.7	7.6	14.7	11.5
12.95mm	14.8	17.6	25.4	60.1	104.8	44.5	21.5	22.0	7.8
15.90mm	12.4	13.1	14.8	17.4	25.1	60.1	106.3	45.6	21.7
18.85mm	12.0	12.0	12.4	13.1	14.8	17.6	25.2	59.5	105.8
Estimation	121.6	100.1	131.3	108.8	125.9	110.5	124.0	105.2	111.4

unit : ADU, pe : picture element

解能が同程度になる様に窓の縦横比を決めているのかもしれない。

(7) マクロな解像度との比較

上で測定したマイクロな画素の空間分解能とテレビの世界で使われるマクロな解像度との関係を調べた。テレビでは明度がステップ状に変化するチャートを使用して AR (Amplitude Response) を測定し解像度とすることが多いので、EIAJ (日本電子機械工業会) のテストチャートを使い、解像度を測定した。映像信号の変調の深さが空間周波数 0 の時の半分になる時の空間周波数を解像度と定義すると、垂直解像度は 480 TV 本、水平解像度は 280 TV 本であった (Fig.14.)。

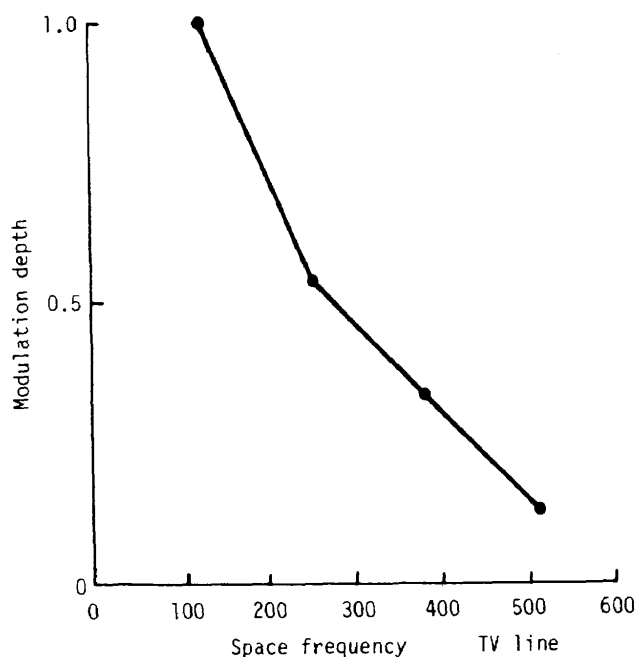


Fig.14. Horizontal space resolution.

テストチャートによる実験はスリットを使った実験とはほぼ等価と考えることが出来る。テストチャートの縦格子の像が CCD 受光面上で水平方向に画素ごとに明暗が交互になる様に、焦点距離 50mm レンズとテストチャート L の No. 4 の格子を使い、ビデオカメラとテストチャート間の距離を調整した (約 4.5m)。この時の変調の深さは 0.09 であった。

スリットの幅 1.5mm、ビデオカメラ・スリット間距離 5.8m、焦点距離 25mm のレンズを使うとスリット像の幅は CCD 画素の幅にはほぼ等しくなる。スリットの像が結んだ CCD 画素の出力が最大になる様にスリットの位置を調整した時の画素出力を Table 2. に示す。テストチャートの格子の像はスリット像が 1 画素おきに像を結んだ場合に相当するので、左右に 2 画素ずつずらした場合の出力を加えた場合の出力を求め変調深さを計算すると 0.08 となり、テストチャートを使った場合の変調深さにはほぼ等しくなる。

3.3.2 画素感度のばらつき

撮像対象はビデオカメラから 4m の位置に貼った複写用白紙を、直流安定化電源によって点灯した白熱灯で照明した。レンズの焦点距離は 50mm のものを使った。CCD 画素を横 11×縦 9 ブロックに分割し、撮像対象の照度と反射率のブロック間の差をなくす為にビデオカメラを上下・左右に走査し、CCD の各ブロックが白紙上の特定の領域を見る様にした (五味 1991)。

画素間に出力の干渉があるので 1 画素ごとにスポット光を当てて特性を測るべきだが、スポット光を作る手間と約 40 万ある CCD 画素の測定時間を考えると非現実的であるので、次の様にした。複数画面のデータに対して画素ごとの平均値 (以下、各画素平均) のブロックごとの平均 (以下、ブロック平均) と標準偏差 (以下、ブロック標準偏差)

を求め、極端にブロック平均値から外れている画素だけを個々に調べる方法を採用した。CCD画素の分割は、撮像対象の照度と反射率の空間的むらが無視出来る程度に、CCD受光面中心の横616×縦432画素を、横11×縦9のブロックに分割した(脚注1)。各ブロックは横56×縦48画素からなる、一辺が355μmの正方形領域である。1つのブロックは白紙上では一辺が28mmの正方形に対応する。

(1) 感度のばらつきと安定性

100画面のデータに対して各画素平均と各画素標準偏差を求め、各画素平均のブロック平均とブロック標準偏差と、各画素標準偏差のブロック平均とブロック標準偏差を求めた。

各画素平均のブロック標準偏差は出力がフルスケール付近の時、CCD中心付近の3×3ブロックで1.1~1.4ADU、CCD周辺ブロックでは大きくなり1.9~3.4ADU(平均2.5ADU)であった(Fig.15., 脚注2)。CCDの中心は大体レンズ光軸付近でブロック内ではレンズの像の明るさはほぼ一定で、同じブロック内では照明や白紙反射率の空間的むらも小さいと考えられるので、各画素平均のブロック標準偏差の主要原因としては、CCD画素の感度の空間的ばらつきが考えられる。

2.8	2.7	2.6	2.6	2.6	2.8	2.8	2.8	2.8	3.0	3.4
2.6	2.5	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.5	2.6	2.6	3.0
2.4	2.3	2.2	1.9	1.8	1.8	1.8	2.0	2.0	2.1	2.5
2.3	2.3	2.1	1.7	1.4	1.2	1.2	1.6	1.7	1.8	2.2
2.0	2.1	1.9	1.6	1.2	1.1	1.2	1.4	1.7	1.9	2.0
1.9	1.8	1.8	1.6	1.3	1.1	1.1	1.4	1.8	1.9	2.3
1.9	1.7	1.6	1.7	1.5	1.4	1.3	1.5	1.6	2.0	2.3
2.0	1.7	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.7	2.0	2.4
2.3	2.0	2.0	2.0	2.1	2.1	2.1	2.2	2.3	2.4	2.6

Fig.15. Block standard deviations of picture element means. (ADU)

脚注1) 横は13ブロックまで可能であるが、測定結果を見易くA4サイズの紙に印刷しデータを管理すること、実験に使うブロックは中心の3×3ブロック程度なので、横11×縦9ブロックをカメラ校正の対象とすることにした。

脚注2) デジタルデータの平均値と標準偏差に対するAD変換器の分解能の影響については付録B.を参照。

各画素平均はブロック平均の周りにはほぼ正規分布していて、ブロック平均から6ADU以上離れている画素数は842画素(616×432画素の約0.3%)であった。ただ一つだけデジタル画像上の座標で(x=309, y=213)の画素だけがブロック平均からのずれが10.7ADUと大きかった。この画素が属している各画素平均のブロック標準偏差が1.4ADUなので、平均から7標準偏差以上離れているが、正規分布の場合その確率は 3×10^{-12} であるので、かなり特異的である。

各画素標準偏差のブロック平均とブロック標準偏差はどのブロックでもそれぞれ大体1.7ADUと0.12ADUであった。平均を取る画面数を1000とするとブロック平均は変わらず、ブロック標準偏差は0.04ADUと小さくなった。各画素標準偏差の原因としては、読み出し回路の変動、統計的変動、照明の時間的変動が考えられる。

実際のデータ処理では画面間の時間的変化(動き)が重要で、複数の画面の平均を取ることは少ないので、1画面のデータに対してブロック標準偏差を求めた。CCDの中心3×3ブロックでは出力がフルスケール付近の時、1画面のブロック標準偏差は2.0~2.3ADUであった。したがって、

$$(1 \text{ 画面のブロックごとの標準偏差})^2 \\ = (\text{各画素平均のブロック標準偏差})^2 \\ + (\text{各画素標準偏差のブロック平均})^2$$

の関係が成り立つ (Table 3.)。

Table 3. Video camera as a visual sensor.

Error (standerd deviation)	2.1 ADU
Sensitivity error	1.2 ADU
Drift error	1.7 ADU
Non-linearity	1% F S

(2) 非直線性

校正したND2, ND4, ND8の減光フィルターを使ってビデオカメラの直線性を測定した。基準になるNDフィルターの透過率(較正值)に含まれる1%程度の誤差を含めて、ビデオカメラの入出力の非直線性は1%以内であった。

唯一、感度がブロック平均から大きくずれていた画素(x=309, y=213)に関しても非直線性は1%以内であった。

3.3.3 レンズ系

(1) 歪曲収差

レーザープリンターで印刷した縦横10.6mmピッチの格

子テストチャートをビデオカメラから4mの距離に置いて、レンズの歪曲収差を測定した。焦点距離50mmのレンズを使った場合、カメラ校正を行なった視野半頂角3度の範囲では歪曲収差は測定限界(2画素)以下であった。

(2) 中心/周辺光量比

3.3.2(1)で測定した各画素平均のブロック平均は CCD 受光面上の像の明るさと CCD の画素感度によって決まる。CCD 受光面の各ブロックが同じ白紙の部分を見る様にした場合、各ブロックから見た白紙の輝度変化は無視出来るので、CCD 受光面の像の明るさはレンズの中心/周辺光量比によって決まる。画素感度が CCD 受光面上の位置によらないではば一定と仮定すれば、3.3.2(1)で測定した各画素平均のブロック平均を最大のブロック(レンズの中心に対応)平均で規格化したものはレンズの中心/周辺光量比になる。ブロック平均を採用するのは個々の画素感度のばらつきを平均化し、画素感度が CCD 受光面の位置によらない仮定に近づける為である。あるいは、CCDの画素感度の影響を含めたものを中心/周辺光量比と定義すれば、ブロック平均は中心/周辺光量比となる。この様にして求めた、ビデオカメラと白紙間の距離が4mの時の中心/周辺光量比をFig.16.に示す。距離1mの時の中心/周辺光量比も4mの時とほとんど同じであった。レンズの中心(中心/周辺光量比が最大)の位置は CCD の中心から約1.5ブロック右にずれていた。

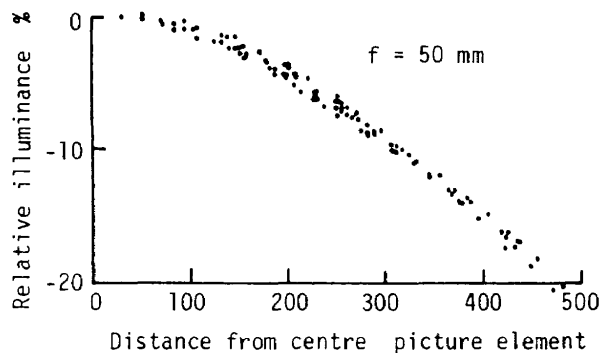


Fig.16. Relative illuminance of image plane due to lens.

ブロック内の像の明るさがレンズの中心/周辺光量比によって変化した時の各画素平均の変化を求め計算した各画素平均のブロック標準偏差は測定された各画素平均のブロック標準偏差 (Fig.15.)のオーダーであった。

(3) レンズのがた

焦点を合わせる時、モニター上の像が上下・左右に平行移動することが観察された。対象までの距離を変えた時、レンズの中心がどの様に移動するのかを測定したが、再現性のある結果が得られなかった。焦点距離50mmのレンズを使い距離4mの場合、ビデオカメラを載せている移動台を指で押した時の像は水平方向に0画素、垂直方向に1画

素とほとんど動かなかった。レンズ先端を指で押した時の像は水平方向に10画素、垂直方向に5画素程度移動した (Fig.17.)。移動台を上下・左右に振った時の像は2画素程度移動した。4mの距離に較べて1mの方が像の動きが大きく、指でレンズの先端を押しても1mの方がレンズのがたが大きいたことが感じられた。焦点距離50mmで10画素のがたは、4.4角度分になり、ステレオビジョンによる距離測定誤差の大きな原因になる。

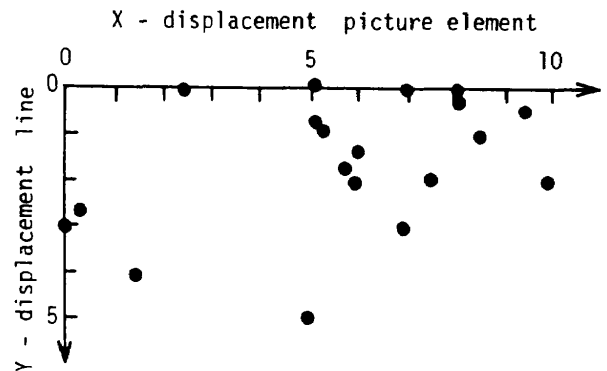


Fig.17. Displacement of pinhole image due to external force on lens.

3.3.4 スミアとブルーミング

A3判複写用白紙中心に直径5.3mmの円孔を切り抜き、円孔を通過した光が反射しない様に終端処理をする。ビデオカメラと白紙間距離を3m、レンズの焦点距離を50mmとし、ビデオカメラの全視野を白紙が被う様にする。照明の明るさを上げて行き、円孔周囲のビデオカメラの出力がほぼフルスケールになる照明の明るさを1単位とする。1単位の明るさでもレンズの中心/周辺光量比の為に画面周

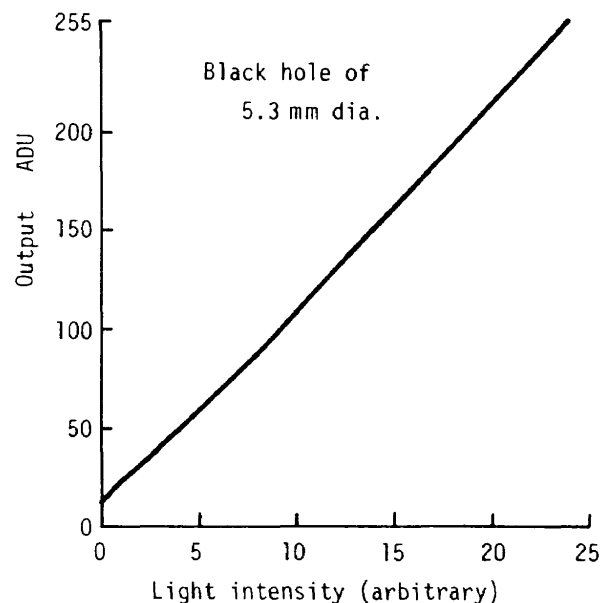


Fig.18. Effect of smear.

辺の出力はフルスケールにはならない。2, 4, 8, 16, 24と明るくした場合の円孔中心のビデオカメラの出力をプロットすると、円孔中心の出力は明るさに比例して、24単位の時、円孔中心の出力はフルスケールになり、円孔は見えなくなる (Fig.18.)。この時の円孔の幅(出力が1/2フルスケール以下の部分)の減少を Fig.19.に示す。照明が16単位の時、円孔の出力の最小値は172ADUとなり、円孔の幅は0となる。

逆に、対象として直径4.0mmのピンホールを使い、ピンホールの中心の出力がフルスケールになる時の照明の明るさを1単位として、2, 4, 8, 16と明るくした場合のピンホールの像の大きさの増加も Fig.19.に示す。画面上の円孔径の減少とピンホール径の増加は照明が1から2になった場合はほぼ同じであった。このことから、画面上に小さな面積でフルスケールを越えていてもその対象がやや大きく見えるだけだが、画面のほとんどがフルスケールを越えている場合には黒い小さな対象は見えなくなることが予想される。

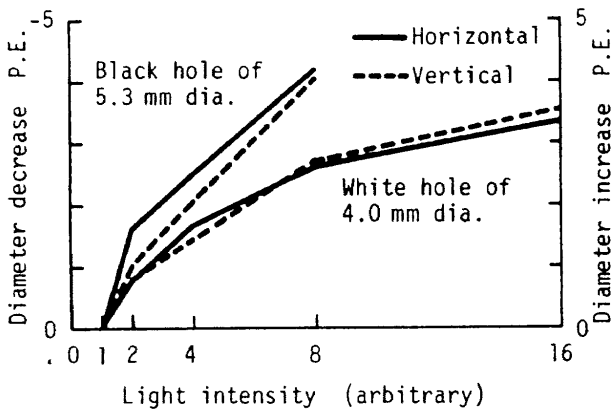


Fig.19. Apparent size.

3.3.5 焦点合わせ

視線制御による対応点探索アルゴリズムの有効な範囲を調べる実験を続ける予定であったが、ヒトの眼と同程度の解像度を得る為に長い焦点距離のレンズを使い焦点深度が浅くなった。視線制御と一緒に焦点調節することが必要になったので、焦点調節のアルゴリズムの研究を先に進めることにした。

(1) 焦点調節機構とアルゴリズム

焦点調節をする為にレンズを回転するのに必要なトルクを測定し、レンズとパルスモーターの大きさの関係から歯数比4対1として、オリエンタルのPH533-A(0.72度/ステップ)を選んだ。歯車はモジュール0.4の平歯車を採用した。500パルスでレンズ先端が3.25mm移動したので、1パルス当りレンズは光軸方向に約6.5μm移動することになる。歯車の噛み合わせによるがたは1パルス程度になる様に組み立て調整した。

パルスモーターは制御が簡単であるが、過負荷の場合に脱調が起り、制御信号から予想される位置と実際の位置とがずれることがある。実験中に何度か脱調が観察されたので、位置の基準点を兼ねたりリミットスイッチを設けた。

合焦点のアルゴリズムはコントラスト法を採用し、フィルターは距離測定の間分解能を上げる為に、2×2画素の高周波フィルターを使った。合焦点の評価は次式で行なった。

$$dd_{ij} = \sqrt{(I_{ij} - I_{i+1j+1})^2 + (I_{ij+1} - I_{i+1j})^2}$$

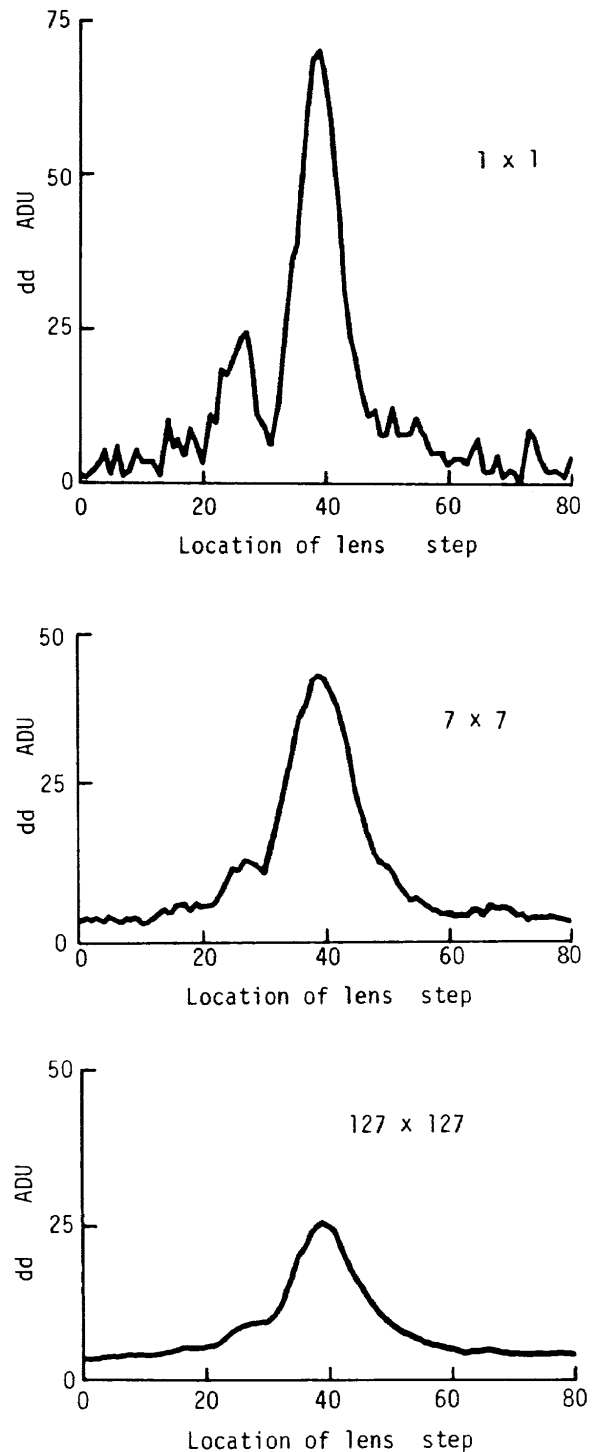


Fig.20. Effect of filter number.

ただし, I_{ij} は画素 (i, j) の明度である。

(2) 実験結果

見る対象は1.6mmのゴシック体による文章(ワープロソフトの説明文)を使った。6mの距離の対象を焦点距離50mmのレンズで見た場合、1文字は1個のフィルター(2×2画素)の大きさになる。フィルターを1個だけしか使わない場合でもピントが合うと鋭いピークが観察されるが、評価関数が滑らかに変化しない。複数のフィルターを使い、広い範囲に対して個々のフィルターの評価値の平均値を計算して評価するとフィルターの数が増えるに従い評価値が滑らかに変化する様になった(Fig.20.)。

レンズの基準点としてリミットスイッチを取り、それから一方向に回転させた場合、合焦点位置の分解能は1パルス程度であった。正転と逆転との場合ではレンズのがたが加わり、合焦点の位置は最大4パルスの差が観察された(Fig.21.) (Table 4.)。

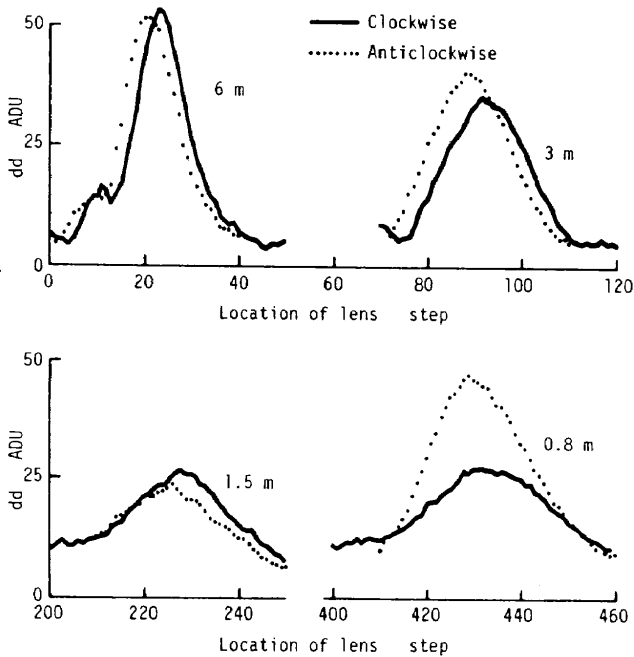


Fig.21. Effect of turning direction.

Table 4. Distance measurement by focussing.

Distance	Error	
6 m	4.5 %	270 mm
3 m	3 %	90 mm
1.5 m	0.3 %	5 mm
0.8 m	0.4 %	3 mm

対象を複写用白紙とした場合、6mの距離では評価値の

変化は検出出来なかったが、0.8mの距離では広い範囲に対象を取れば白紙表面の不均一の為かわずかなピークが見られた。

背景として6mの距離に白紙を貼り、対象として3mの距離に白紙で作った円柱を置き、照明による円柱表面の輝度が背景の白紙の輝度と異なれば、円柱表面にピントが合う辺りで評価値のピークが検出された。

第4章 考 察

カメラ較正を行ない明らかになったビデオカメラ出力の変動と光学系のがたに対する対処の仕方と今後の研究の進め方について検討する。

4.1 変動とがた

視覚センサーとしてビデオカメラを使った人工視覚では、ビデオカメラ内の信号変換・処理過程で変動と雑音に加わり、ビデオ信号をAD変換する時に量子化誤差が加わり、同じ外界を同じビデオカメラで見ているでもデジタル計算機に入力されるデジタル画像データは時間的に変動する。デジタル計算機の処理でも、ビデオカメラ以外にも温度計、気圧計、時計、騒音計などの外界センサーからの入力信号によって条件判断の結果が異なる様にすれば、ヒトの様に同じ風景を見てもその時の状態により関心を持つ部分が異なり、処理結果が変わる様にすることが可能である。この意味ではビデオカメラの変動と光学系のがたはヒトの様な視覚を実現する為の重要な要素である。

人工視覚はヒトと同様に見る、あるいは見間違ふことは必要ではない。人工視覚の研究を進める上でも、人工視覚を実際に利用する上でも、人工視覚内部での情報処理過程は明解で処理結果は安定している方が良い。したがって、人工視覚の研究を進める上でビデオ信号の変動と光学系のがたに対する対処の仕方は、計算機に入力する画像データには変動と誤差が含まれることを前提に計算機での画像処理を進めることである。また、外界は照明条件や見る角度により得られる画像は異なり、よく見ればほとんどの物は外見的には傷などの欠陥があり、障害物により見えない部分があったり、動物が動いたりして、完全な像が得られないことも画像処理の前提に含めなければならない。人工視覚の研究の工学的アプローチとしてビデオ信号の変動と光学系のがたを少なくする為にビデオカメラとレンズの改良を行なうことも考えられるが、現在のビデオカメラとレンズはヒトの眼と同等以上の性能があるので、人工視覚の研究を進めるには、ビデオカメラとレンズの改良より画像処理の研究を進めるべきである。

明度差の判定は合焦点アルゴリズムや微分演算等の画像処理の基礎になるので、ビデオ信号の変動に対する対応の仕方の例として、明度差の判定について検討してみる。

今回評価したビデオカメラは CCD 画素に入射する光子の数の統計的変動, CCD内部の電荷読み出し回路とビデオ信号処理回路のドリフトや雑音の為に CCD 画素出力に含まれる誤差の標準偏差は CCD 中心付近で2.0~2.3 ADUであったので, 安全を見て2.5 ADU とする。

- ①このビデオカメラを使って得られた2つの画素間の明度差(測定値)は再生性の定理より標準偏差 $\sigma = \sqrt{2} \times 2.5 \text{ ADU}$ の分布をする。
- ②測定された明度差が, 例えば, 3σ 以下の時, 対象の明度が均一と判定する場合の正解率は次の様になる。
 - 対象の明度差が0の時, 正解率は0.997
 - 対象の明度差が σ の時, 正解率は0.977
 - 対象の明度差が 2σ の時, 正解率は0.841
- ③測定された明度差が, 例えば, 3σ 以上の時, 対象の明度差がある(模様がある)と判定する場合の正解率は次の様になる。
 - 対象の明度差が 3σ の時, 正解率は0.500
 - 対象の明度差が 4σ の時, 正解率は0.841
 - 対象の明度差が 5σ の時, 正解率は0.977
- ④計算結果をまとめて Fig.22. に示す。横軸は明度差ある/なしの判定閾値を, 縦軸には正解率を, 点線は明度差がない(均一)と判定した場合, 実線は明度差がある(模様がある)と判定する場合で, 線の側の数字は対象の明度差である。

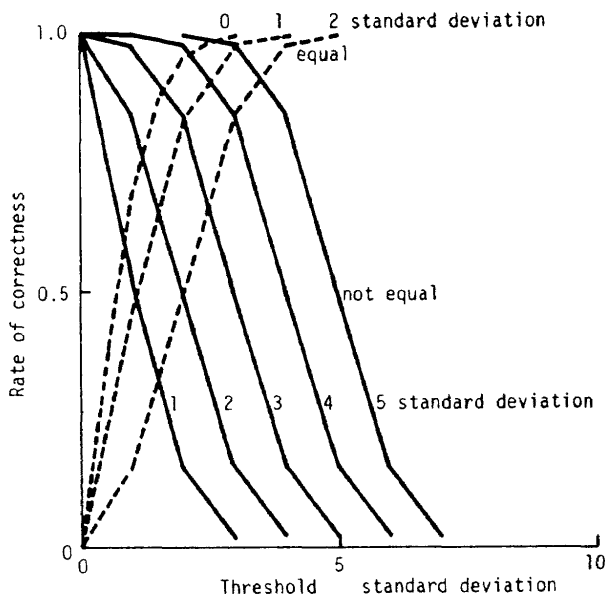


Fig.22. Decision whether measurements are equal or not.

- ⑤閾値は明度差ありとなしと別々に取ることも可能であるが, 同じ値を取るのが常識的である。画素間の明度差の判定の正解率は対象の明度差がビデオカメラの誤差に較べて充分大きければ, 高い正解率で判定するこ

とが可能であるが, ビデオカメラ出力の変動はフルスケールの1%程度である。今回カメラ校正したカメラでは, 画素間の明度差の標準偏差 σ は3.5ADUであるので閾値 3σ は約10ADUになる。対象の明度差が σ 以下の時均一と判断する正解率と対象の明度差が $5\sigma=18$ ADUの時明度差があると判断する正解率が0.977であるので, この当りが実際的ではないのだろうか。

明度差判定の正解率が基礎となってより高次画像処理の信頼性が決まり, 高次画像処理の組み合わせ方により視覚システムの信頼性が決まる。信頼性を高めるには入力画像の特性(外界の物や風景の特徴)を理解して利用することが不可欠で, その為には外界の画像を使った実験を行ない, 試行錯誤しながら画像処理を改良しなければならない。

4.2 研究の進め方

人工視覚を構成するハードとして現在考えられるのはビデオカメラ, AD変換器, デジタル計算機である。2台のビデオカメラの視線制御をしながら, 焦点調節と絞り調整をし最適の条件で外界の情報を取り入れる視覚システムを構成する。視覚システムは視線, 焦点, 絞りの制御ソフトと画像処理ソフトから成り, 個々のソフトは独立に改良したり, 新しいソフトの追加が可能であること(モジュール性)が必要である。画像処理ソフトは視覚システムに組み込み, 実世界の画像データを使った実験により評価が行なわれる。この様な視覚システムを作り, その構成要素を改良し, 視覚システムとしての機能を向上する。距離情報獲得, 対象の追跡など短期的に実現可能な課題を設定し, それを実行する視覚システムを作る。これが私の研究の進め方である。

人工視覚を実現することを目標として画像認識・画像理解の研究が行なわれているが, 現在までの成果は画像処理・図形処理に限られ画像認識・画像理解と呼べる様なものは無い。背景から対象を分離する様な基礎的な領域分割でも対象が何であるかを認識しなければならないので難しく, 信頼性の高い領域分割を実行する人工視覚は存在しない。

人工視覚の研究が行なわれているにもかかわらず信頼性のある人工視覚が実現していないことから考えて, 人工視覚は現在までに作られたシステム以上に複雑なシステムになり, 多数の画像処理の協調と競合によらなければならないことが予想される。1つの画像処理の中でも画素単位あるいは複数画素の局所的な処理から画面全体に渡る処理までが階層的に協調・競合的に行なわなければならない。画素レベルの処理は比較的単純かもしれないが, 数十万画素のデータの組み合わせは多数あり, 1つの画像処理だけでも計算量は膨大になる。例えば, 領域分割では, 明度や明度変化率による領域分割, 合焦点や立体視により得られる距離による領域分割, 動きによる領域分割等の画像処理, 境

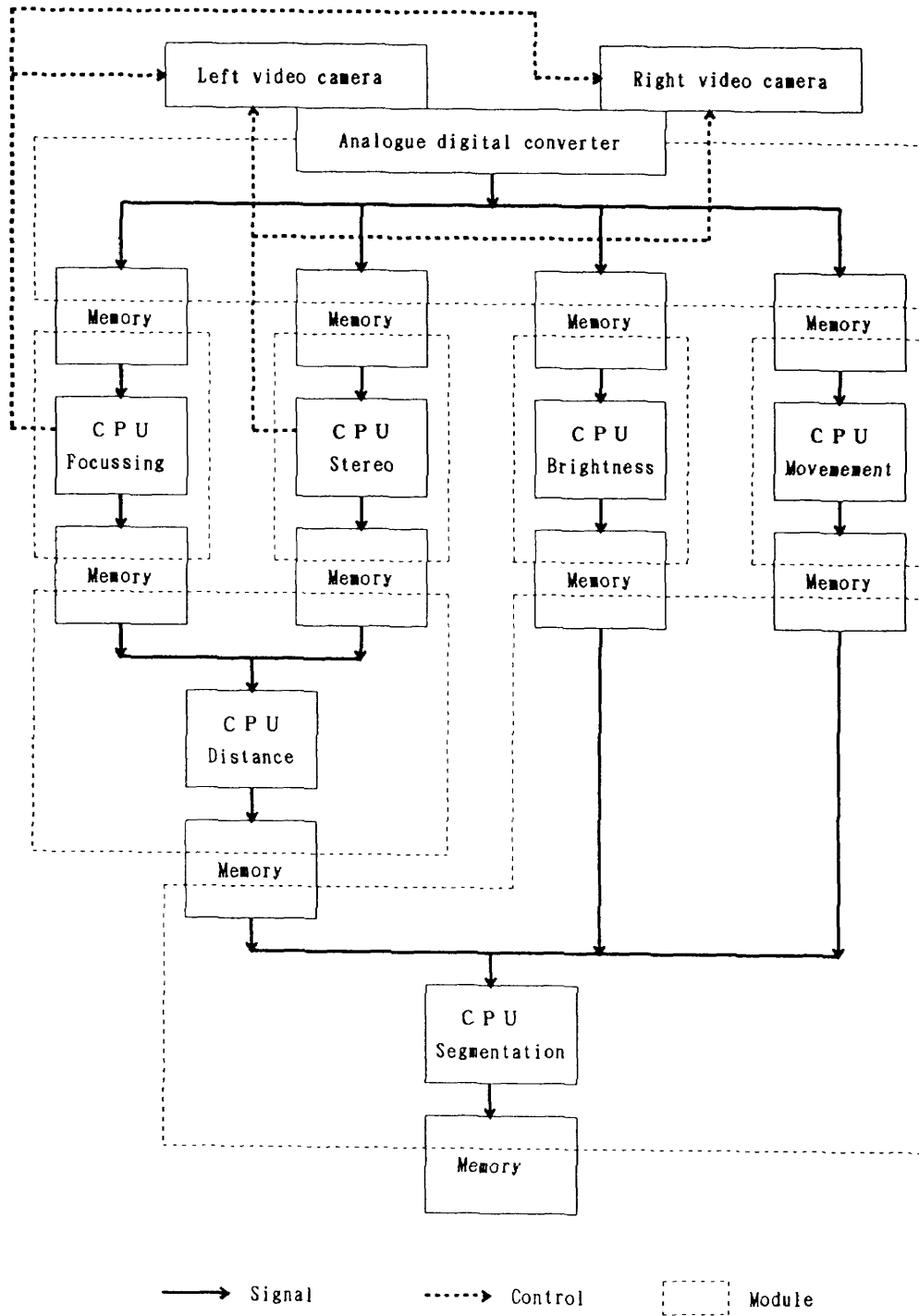


Fig.23. A vision system.

界連結を実行する幾何学的な処理，内部モデルによる処理の協調・競合が考えられる。1つ1つの領域分割のアルゴリズムの信頼性は低くても複数のアルゴリズムの協調と競合により領域分割の信頼性は高くなり，その中から人工視覚の機能が現れてくるのではないかと (Fig.23.)。

ヒトの視覚の様に汎用性のある人工視覚の実現は難しく，当分先になる，あるいは，不可能である (例えば，Dreyfus 1979, 付録C.参照)。したがって，人工視覚の研究を進める上では近い将来人工視覚として実現可能な具体的分野を特定して研究を進めて行くことが必要である。

第5章 まとめ

ヒトの眼と同程度の解像度を確保する為に 1/3 インチ CCD を使っているビデオカメラに焦点距離25mm または 50mm のレンズを着けて，End-to-end のカメラ較正を行なった。ビデオカメラと AD 変換器の水平と垂直の同期信号の同期を取り，CCD の画素とデジタル画像の画素との 1 対 1 対応を取り，画素レベルのカメラ較正を行なった。

①ビデオカメラの画素感度のばらつき標準偏差は時間

- 変動を含めて CCD 中心付近で 2.1 ADU であった。
- ②画素欠陥と呼ばなければならない画素は存在しなかった。
- ③画素出力の隣接画素への漏れが観測された。その大きさは水平方向の隣接画素へは 20~40%, 垂直方向の隣接画素へは 10% 程度であった。画素間の出力の干渉は第 1 次近似として線型と見なすことが出来た。
- ④合焦点のアルゴリズムとしてはコントラスト法を採用し, 2x2 画素の空間分解能で合焦点により距離を測定することが可能であった。
- ⑤CCD 受光面上で像が最大 10 画素移動するレンズのがたが観察された。
- ⑥これらの視覚センサーの特性を考慮した画像処理プログラムを作る方法について検討した。
- ⑦人工視覚を研究する為の実験装置(視覚システム)の構成, 特にデジタル処理系とアルゴリズムの組み合わせについて検討した。

付録 A. ミクロンオーダーの光強度分布の測定の難しさ

CCD 受光面上に結んだ像の強度分布を測定するには, ミクロンオーダーの空間分解能で光強度分布を測定しなければならない。光検出器の受光面の前に直径 1 μm 位のピンホールを付けることにより, その程度の空間分解能の検出器を作ることには可能だが, この測定には次の様な困難が予想される。

- ①光検出器 / ピンホールを 1 μm 程度の精度で動かすこと。
- ②ピンホール上に像を結ぶ様にレンズの位置を調節すること。
- ③ピンホールを通過した光の強度を測定すること。

CCD 受光面上の像の照度は一般に数ルクス程度なので, 光検出器としてホトダイオードを使用した場合, 出力はピコボルトのオーダーで, 測定不可能である。光検出器に入射する光子の数は数千個 / 秒のオーダーなので(五味 1991), 光電増倍管を使わなければならない。

付録 B. AD 変換器の分解能と測定データの精度

AD 変換したデータから計算した標準偏差 σ_{ADC} と AD 変換器の分解能 1 ADU との大小関係により, 次の 3 つの場合に分けることが出来る。

- (1) $1 \text{ ADU} < \sigma_{ADC}$
- (2) $1 \text{ ADU} \approx \sigma_{ADC}$
- (3) $1 \text{ ADU} > \sigma_{ADC}$

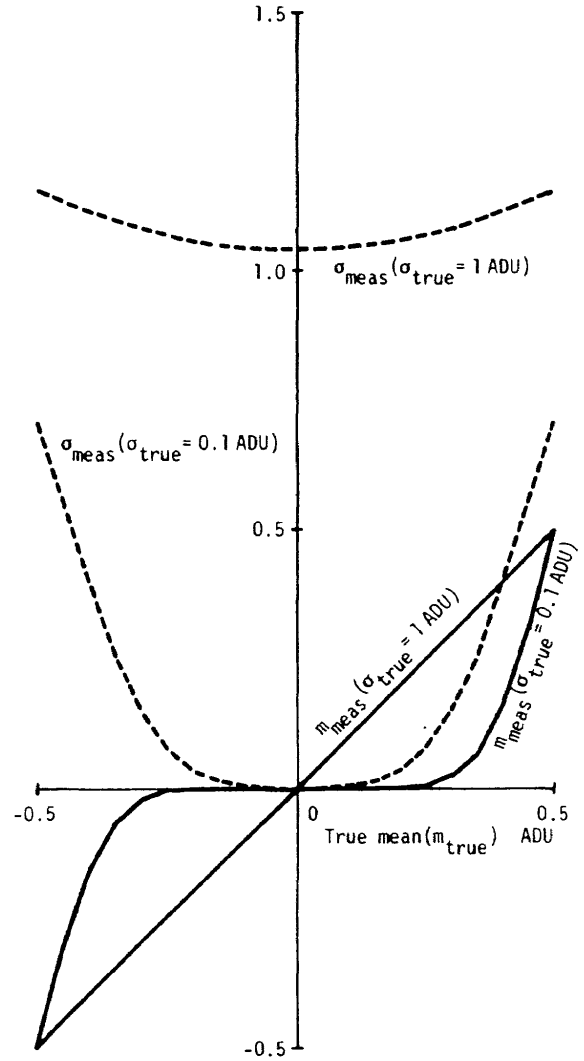


Fig. A. Effect of ADC resolution.

(1)の場合については分解能(離散化)の影響は無いので計算で確かめる必要は無い。今回のカメラ校正では σ_{ADC} は 1~2 ADU のオーダーなので, σ_{true} が 0.1 ADU, 1 ADU, 2 ADU の場合について計算を行なった。

同じ対象を連続して撮像し, 同一画素からの出力を AD 変換した測定データの平均値を m_{ADC} , 標準偏差 σ_{ADC} とする。測定対象の輝度は照明の明るさの変動を受ける。測定対象の輝度が一定としても, それをビデオカメラで撮像した時の出力信号は変動する。出力が正規分布に従い変動するものとし, 真の出力の平均値を m_{true} , 標準偏差を σ_{true} とする。AD 変換器の分解能を 1 ADU とすると, m_{true} は -0.5 ADU から +0.5 ADU の範囲を計算すれば充分である。

充分たくさんデータをとり, 平均値と標準偏差を計算すれば, 標準偏差 σ_{true} が 1 ADU の場合, 平均値 m_{true} と m_{ADC} との差は 0.01 ADU 以下で(脚注), 標準偏差 σ_{true} と

脚注) このことは, 標準偏差が 1 ADU の時, 100 個のデータの平均を取ることで, 平均の標準偏差は 0.1 ADU になるので, AD 変換器の分解能の 1/10 程度の誤差で測定が可能になることを意味する。

σ_{ADC} との差は最大 0.16 ADU である。標準偏差 σ_{true} が 2 ADU の場合、標準偏差 σ_{true} と σ_{ADC} との差は最大 0.08 ADU である。標準偏差 σ_{true} が 0.1 ADU の場合には充分たくさんのデータを取っても、Fig.A. に示す様に計算された平均値 m_{ADC} と標準偏差 σ_{ADC} の信頼性はない。

付録 C. ドレイファスの主張

「コンピュータには何ができないか」で、ドレイファスはデジタル計算機には人間の様に知的に振舞うことは出来ないと主張している。この本の訳者の一人の村若は本の論旨を次の様にまとめている。

- (1) 離散的ビットを用いて明示的に書かれた規則(プログラム)というデジタル・コンピュータの原理に基づく人間知能の理解は、伝統的世界観、つまりは要素主義プラス計算主義の上でのみ成り立つ。
- (2) 人間の知能はその世界観によっては説明できず、現象学的世界観からのみ記述できる。
- (3) それ故、デジタル・コンピュータによる人間知能の実現を目指す人工知能の研究は失敗に終わる。

ドレイファスは人間とデジタル計算機との情報処理の違いとして次の 4 点を上げている(第 1 章、第 2 節)。

人間 対 デジタル計算機

- ① 周辺意識 対 ヒューリスティック探索
- ② 曖昧さに対する耐性 対 文脈に依存しない正確さ
- ③ 本質 / 非本質の識別 対 試行錯誤による探索
- ④ 見通しのよいグループ化 対 特性リスト

「あまり複雑でないパターンの認識でさえも、人間の情報処理の 4 形式を必要とする。パターン認識の研究が、タイプライターの書体や郵便番号といった単純な文字数字式コードのパターンをやっと認識する以上に進展しなかったのは、そのためである。さらに言えば、広く認められているように、ゲーム競技、機械翻訳、問題解決の分野の進展は、パターン認識の研究が突破口を切り開くかどうかにかかっているのである(脚注)。」

第 2 部でドレイファスは、AI 研究者たちが人工知能の実現が可能としている前提「人間は汎用記号操作装置の様に機能する」は、次の 4 つの前提に帰着し、これらの前提は検証されるべき仮説にすぎないと主張している。

- ① 生物学的前提：脳はデジタル計算機の様に情報処理を離散的に行なう。
- ② 心理学的前提：心は形式的規則に従って単位情報を操作する装置と見なすことが出来る。
- ③ 認識論的前提：すべての知識は形式化出来る。

脚注) ドレイファスは 1970 年代にこの本を書いたので、彼は人工知能の分野をゲーム競技、機械翻訳、問題解決、パターン認識の 4 領域に分類している。

- ④ 存在論的前提：存在するものは互いに論理的に独立した事実の集合である。

最後の第 10 章「人工知能の未来」で、人間の知的振舞いを 4 類型に区別する中で、自然言語、なぞなぞ、パターン認識が分類される区域 IV 「非形式的な振舞い」は、進化論的、固体発生的に原始的な知的振舞いであるが、デジタル計算機にはまったく手におえないと結論している。

ドレイファスが指摘する様に、現在のところ、デジタル計算機によるパターン認識はテンプレート(鋳型)や特性リストに基づいて行なわれている。芸術的な様式や人間の顔つきの様な複雑なパターンの特性は数値化が難しく、特性の数が増えるにつれて計算機処理量が指数函数的に増加する問題が発生する。

付録 D. 参考文献

- 畔津明仁 1987 基礎からの映像信号処理。CQ 出版 東京。
- Dreyfus, Hubert L. 1979 What computers can't do. Harper & Row Pub.
- ドレイファス著、黒崎政男&村若修訳 1992 コンピュータには何ができないか。産業図書 東京。
- 富士通株式会社 1993 A/D コンバータ MB40568。富士通半導体デバイス DATA SHEET DS04-28203-4。
- 五味広美 1991 視覚センサーとしてのビデオカメラ。航空宇宙技術研究所報告 TR-1132, または、第 9 回日本ロボット学会学術講演会予稿集 3521。
- 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。
- 廣田功, 古川順一, 高村洋二, 和田隆宏, 慶児幸秀, 大塚洋一, 西堀一彦, 建部竜太郎, 北山尚一, 志村雅之, 松井拓道 1992 1/3 インチ有効 38 万画素 IT 型 CCD 撮像素子。テレビジョン学会技術報告 16 巻 18 号, 7-12。
- Horn, Berthold K. P. 1986 Robot vision. MIT Press Cambridge (USA).
- ホーン著, NTT ヒューマンインタフェース研究所プロジェクト RVT 訳 1993 ロボットビジョン。朝倉書店 東京。
- 川島光, 榎原清彦, 西岡康隆, 山本秀和, 前川繁登, 山脇正雄, 奥村友秀, 野口光一 1992 HDTV カメラ用 1" 150 万画素 IT-CCD 撮像素子。テレビジョン学会技術報告 16 巻 18 号, 25-30。
- 黒崎政男 1987 哲学者はアンドロイドの夢を見たか。哲学書房 東京。
- Motorola, Inc. 1993 Motorola VME solution.
- 長原脩策 1992 本誌記事に見る固体撮像素子カメラこの

18年。日経エレクトロニクス 563号, 261-291。
篠原武三, 永井隆一, 福島荘之助, 北野宏久, 松島久男
1993 ASDEの探知性能の向上について。電子航法研究

所報告 第76号。
Sony Co. 1992 Service manual XCM-7573.
高澤嘉光 1989 OS-9/68000。共立出版 東京。

航空宇宙技術研究所報告1231号

平成6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丁目44番地1
電話三鷹(0422)47-5911(大代表)〒182
印刷所 株式会社 東京プレス
東京都板橋区桜川2-27-12

Printed in Japan