



鏡を用いた運動体の三次元写真計測法とその応用

橋本, 正治

(Degree)

博士 (学術)

(Date of Degree)

1984-03-31

(Date of Publication)

2015-11-05

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

甲0484

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/D1000484>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



鏡を用いた運動体の三次元写真計測法とその応用

— 1984 —

橋 本 正 治

正 誤 表

頁	行、図、式	誤	正	頁	行、図、式	誤	正
1	6	1939	1839	75	式(4,5)	$h \frac{g}{g}$	$h \frac{g}{ g }$
	14	1972	1872		7	方向 は、	方向 g は、
14	31	ものも解析	ものを解析	81	10	結果は 用の	結果は汎用の
28	式(2,18)	$x =$	$X =$	83	19	131mm	130mm
	式(2,19)	$z/\cos \alpha$	$Z/\cos \alpha$	84	図4.22	sec cycle	sec/cycle
	式(2,20)	$y'z$	$y'Z$	85	10	2.3m/sec	2.4m/sec
30	式(2,31)	$\Delta 2a_n$	$2\Delta a_n$	87	17	三元色	三原色
36	図2.16	—	単位(mm)	91	17	図4.27	図4.30
40	式(3,1)	$F_1 - a_1 \hat{u}_1$	$F_1 + a_1 \hat{u}_1$		19	図4.27	図4.30
	式(3,5)	$(\hat{u}_2 \cdot \hat{u}_2)$	$(\hat{u}_1 \cdot \hat{u}_2)$		図4.30	1 バイト入力	(a)1 バイト入力
41	3	$\overline{P_1 P_2}$	$\overline{P_1 P_1}$	98	図4.39	SRNSOR	SENSOR
42	15	レンズ系	レンズ系	106	14	量は、	濃度、
44	式(3,18)	$(x_1 - x_1)^2 = 0$	$(\bar{x}_1 - x_1)^2 = 0$		図5.6	MONTOR	MONITOR
47	式(3,26)	$R_3 u^3$	$R_3 u^3$	107	26	1 MHz	1 KHz
	式(3,29)	$P(u)$	$P(u)$	133	3	$P_{12 ij}$	$P_{12 ij}$
49	式(3,35)	$-d_1$	$+d_1$		3	ベクトル より、	ベクトル j より、
	式(3,38)	-6	$+6$		式(6,4)	$P_{12 jk}$	$P_{12 jk}$
59	23	ておく。	ておく。 ⁵⁰⁾		式(6,5)	$P_{12 ij}$	$P_{12 ij}$
	式(3,39)	$+c_2 \hat{u}$	$+c_2 \hat{\mu}$			$P_{13 jk}$	$P_{12 ij}$
72	5	Bridge	Bridge ⁵⁶⁾	134	6	ベクトル に	ベクトル t_2 に
	式(4,2)	$2(\cos$	$2\cos$		11	相当する θ_s を	相当する P_{36} を
	8	副極、主極	副極は主極	154	3	次社が	次式が
73	14	b 方向	d 方向	155	2	を解くと ³⁸⁾	を解くと ⁵³⁾
74	6	a, c, d	a, b, c, d		式(A.18)	$(b \times \omega_0^2)$	$(b \times \omega_b)^2$

SUMMARY

The present dissertation concerns an investigation on the system of one-directional photogrammetry enhanced with a mirror.

The photogrammetry has been used generally for analyzing the three-dimensional motion of a human body without giving any restrictions on its motion. It is classified into the two-directional photogrammetry with two cameras and the one-directional photogrammetry. Concerning the former, two cameras are set apart at an appropriate distance. The measurement accuracy becomes higher but its implementation becomes more complicated. Concerning the latter, the system can be implemented more simply but the accuracy obtained becomes lower. The conventional one-directional photogrammetry using a mirror has the same accuracy as the two-directional photogrammetry. It has, however, a problem that a relatively large mirror should be set correctly.

In the present study, a new one-directional photogrammetry using a mirror has been developed which holds the merits of one-directional photogrammetry and possesses the improved accuracy and reliability. The size of a mirror becomes smaller using the active mirror whose direction is controlled by the devices that detect a moving body in the space.

The error of the present photogrammetry system is caused during the reading of the film coordinate of the image of the body. In the present study, the motion analyzer system has been developed which allows the automatic reading of the coordinates of the image in the film.

In order to illustrate the usefulness of the photogrammetry system for the measurements of three-dimensional motion, the motion of the human body has been studied using the present system. The results of this research, it is believed, have contributed toward the design of the photogrammetry system.

要 約

物体の三次元運動を記録及び解析する場合、運動に制約を与えずに必要な情報を得るために、写真計測法が用いられる。写真計測法は、一方向写真計測法、鏡を用いた一方向写真計測法、多方向写真計測法に分類できる。多方向写真計測法は高精度に三次元座標を測定することができるが、撮影時における処理が複雑であり、処理画像も多くなり測定結果が得られるまでに多くの労力を必要とする。一方向写真計測法は、計測に要する処理は簡単であるが、測定精度が低いという欠点がある。本研究では、一方向写真計測法の測定精度の改善を行ない、その測定能力の限界を明らかにした。従来の鏡を用いた一方向写真計測法は、多方向写真計測法と同等の高い測定精度を持つものであるが、撮影時において被写体の運動範囲と同等の大きさの鏡を精度良く設置しなければならなかった。本研究では、鏡の位置や向きが自由に設定でき、一方向写真計測法の簡易性と多方向写真計測法の高い測定精度をあわせ持つ、鏡を用いた一方向写真計測法を開発した。さらに、被測定物体が空間内のどの方向に存在するかを検出する装置を製作し、本計測法と併用し、鏡の向きを制御することによって写真計測法の測定能力の向上と鏡の小型化を実現した。次に、写真計測法の測定誤差の要因である像座標の読取り精度を向上させるために、写真画像を計算機に入力する装置を製作し、画像処理によって像座標を求め、被写体の運動を解析するシステムを開発した。次に、本研究で開発した写真計測法の応用例として、人体上肢の運動計測を行ない、上肢の運動機能を総合的に評価した。

目 次

結 論	1
第 1 章 三次元計測に関する理論と実験の現状	4
1・1 緒 言	4
1・2 測尺による三次元計測の現状	4
1・2・1 三次元座標測定装置	4
1・2・2 ゴニオメータ	5
1・3 超音波による三次元計測の現状	7
1・4 映像解析による三次元計測の現状	12
1・4・1 映像の記録法と像座標の読取り	12
1・4・2 三次元位置計測法	14
1・5 結 言	19
第 2 章 一方向写真計測による三次元座標の測定法	21
2・1 緒 言	21
2・2 平行投影処理による計測法	21
2・2・1 平行投影処理として扱うための条件	21
2・2・2 計 測 法	24
2・3 中心投影処理による計測法	25
2・4 誤差解析	29
2・5 精度検定	32
2・5・1 実験装置	32
2・5・2 実験結果	33
2・6 結 言	36
第 3 章 鏡を用いた一方向写真計測法による三次元座標の測定	38
3・1 緒 言	38
3・2 鏡を用いた一方向写真計測法の開発	38
3・2・1 鏡を用いた一方向写真計測法	39
3・2・2 鏡の向き測定	40

3・2・3	像座標入力 of 補正	42
3・3	運動諸量の計算法	44
3・3・1	測定値のデータ処理	44
3・3・2	速度, 加速度の計算法	46
3・4	写真計測システムの構成	49
3・4・1	ハードウェア構成	49
3・4・2	ソフトウェア構成	51
3・5	誤差解析	53
3・5・1	パラメータの計測誤差が標点の測定誤差に及ぼす影響	53
3・5・2	撮影条件が標点の測定誤差に及ぼす影響	57
3・6	精度検定	59
3・6・1	空間四節リンク機構の運動計測	59
3・6・2	放物体の運動計測	62
3・7	結 言	69

第4章 超音波及び光を用いたカメラ及び鏡の向き制御のための物体追跡システム70

4・1	結 言	70
4・2	超音波による位置検出	70
4・2・1	検 出 法	70
4・2・2	検 出 装 置	76
4・2・3	測 定 能 力	81
4・3	イメージセンサによる物体の位置検出	85
4・3・1	検 出 法	85
4・3・2	検 出 装 置	89
4・3・3	測 定 能 力	92
4・4	鏡の向き制御システム	96
4・4・1	ハードウェア構成	96
4・4・2	ソフトウェア構成	98
4・4・3	実験結果と考察	99
4・5	結 言	101

第5章	フィルム座標読取り精度向上のための画像入力システム	102
5・1	緒言	102
5・2	フィルム画像入力装置	102
5・2・1	光学系の設計と光センサの駆動回路	103
5・2・2	フィルム送り機構	104
5・3	画像入力システム	105
5・3・1	画像入力処理	105
5・3・2	標点検出と座標測定	109
5・4	画像入力装置と画像処理プログラムの性能評価	111
5・5	運動計測への応用	115
5・5・1	リンク機構の運動計測	116
5・5・2	測定結果及び考察	119
5・6	結言	120
第6章	人体上肢の運動能力の測定	121
6・1	緒言	121
6・2	被操作物体の運動計測による人間の操作能力の評価	122
6・2・1	平面掃引面積最小問題	122
6・2・2	空間案内掃引面積による人間の器用さの評価	127
6・3	人体上肢の各関節の運動計測	130
6・3・1	上肢各関節の運動機構	130
6・3・2	上肢各関節の運動計測と運動能力の評価	132
6・4	結言	138
結	論	140
参	考	
文	献	142
付	録	147
謝	辞	179

本論文で用いる主な記号と略記号の一覧表

ε	被写体の移動による撮影画像における像の長さの変化率
ε_{\max}	ε の上限値
V	標点の位置ベクトル
F_1	撮影レンズの物空間主点の位置ベクトル
F_2	鏡によって生じる F_1 の虚像点の位置ベクトル
G	鏡面上の任意の点の位置ベクトル
\hat{n}	鏡面の単位法線ベクトル
\hat{u}_1	撮影レンズの物空間主点から標点へ向かう単位ベクトル
\hat{u}_2	撮影レンズの物空間主点から標点の鏡によって生ずる虚像点へ向かう単位ベクトル
\hat{u}'_2	\hat{u}_2 の鏡によって反射した単位ベクトル
\bar{X}, \bar{Y}	補正式による較正平面 ($\bar{z} = \phi$) 上の座標値
b_{1-6}	\bar{X} に関する補正式の係数
c_{1-6}	\bar{Y} に関する補正式の係数
$p_j(u)$	区間 $j, j+1$ におけるスプライン関数
t_j	点 j における接線ベクトル
u	スプライン関数 $p_j(u)$ の無次元パラメータ
ω	角速度
H_G	重心 G まわりの角運動量
λ	波長
θ_1	超音波送波器の正面軸の Y 軸まわりの回転角度
θ_2	超音波送波器の正面軸の Z 軸まわりの回転角度
X, Y, Z	静止座標系および絶対座標系
x, y, z	動座標系および像座標系 (x, y)
CPU	Central Processing Unit
AMP	Amplifier
MIC	Microphone
A/D	Analog to Digital Converter
SW	Switch

結 論

科学技術の進歩の背景には、自然を始めとして対象事象を正確かつ客観的に把握することが、不可欠であることはいうまでもない。対象事象は、大きさ、複雑度、距離、明暗などによって極めて多岐にわたることは勿論であるが、動的か静的かによっても異なる。このような対象事象を把握して忠実に再現する最も原始的な方法は、絵画による映像の記録であり、レオナルドダビンチが、すぐれた芸術家であると共に科学者であったことが、科学技術と映像の記録の関係を如実に物語っている。芸術性は無視するにせよ、描いた対象を忠実に再現する度合は様々であり、1939年にフランスのダゲールによって写真が発明されて初めて本格的な映像の記録が開始される。¹⁾このダゲレオタイプ法と呼ばれた写真術は、しかしながら、強い直射日光の下で30分間もの露出時間を必要とした。そのため、動きの速い物体を撮影するには程遠いものであった。その後、カメラ及び感光材料の性能が向上し、映像の連続記録、すなわち時系列にのった映像が記録されるようになった。このことは、時間的にミクロの世界（高速度撮影による）とマクロの世界（コマ落とし撮影による）を人間の前に開いた。映像の連続撮影が物体の運動を解析する手段として用いられるようになったのは、ごく自然のなりゆきであった。最初に写真を計測の目的に使用したのは、アメリカの写真家E. Muybridge²⁾であった。1972年に彼は、疾走する馬の四本の脚が全て地面を離れて、馬体が宙に浮く瞬間があることを証明するために、1/2000秒のシャッタースピードを持つ数十台のカメラを用いて実験を行なっている。³⁾このように、視覚や聴覚による刺激によっても、その運動が影響を受けるような人間や動物の運動を解析しようとする場合、それらの運動に制約を与えずに必要な情報を得るためには、遠距離から写真によって各瞬間の記録をとり、後にその写真から情報を得る方法が好都合である。

多くの科学技術がそうであったように、撮影技術も第一次、第二次大戦を通じて大きな成長を遂げ、それに伴い写真計測も大きな飛躍を遂げた。ロールフィルムやシネカメラが発明されると、いろいろな分野で映画が使われるようになった。特にスポーツの分野では、結果としての記録以外にプロセスを記録する手段として用いられた。初期のシネカメラは、一秒間に16枚の写真撮影を行なうことができたが、スポーツ等の速い動きをゆっくり観察するためには不十分であった。このような目的のために、高速度カメラが開発された。現在最も多く使われているロータリープリズム方式のカメラは、1932年にベル研究所とイーストマン・コダック社により共同開発されたもので、当時2000コマ/秒の撮影速度であった。現在では、10000コマ/秒の写真撮影も可能となり、人間の目では到底認識することが不可能な、ガスの爆発・焼燃状態や、物体の衝突による破壊等の、

短時間の現象を解析するために高速度カメラが用いられている。⁴⁾

このようにして、時代の要求に応えながら写真撮影技術は応用範囲を広げ、科学技術分野にも写真による計測分野が確立されていくことになった。高速度カメラを用いた写真計測は、運動物体を対象としている。対象としての物体の中には、人間や生物も含まれ、近年では、人間および生物の行動を分析する手段としても用いられてきている。以上を動的対象物とすれば、静的な物も対象となりうる。すなわち、映像を通じての環境測定であり、具体的には被写体の大きさの測定である。現代の最新技術は、人工衛星による地質探査などのリモートセンシングに見られるように、遠く離れた物の性質まで求められるようになってきている。また、マン・マシン・システムの分析などのように、動的な物と静的な物の両方を対象とした例もある。このように映像解析技術の応用分野は、工学、物理学、地学、生物学、医学、心理学、体育学などの幅広い範囲にまで広がっている。⁵⁾

最近のエレクトロニクス技術の進歩は、映像解析技術に新しい可能性を与えている。光を電気信号に変換する技術や、この電気信号を操作する技術の進歩により、光の中に含まれる情報をデータとして抽出するといった、画像処理という概念が生み出された。ここでいう光とは、可視光だけではなく、赤外線、紫外線、X線といった電磁波のことであり、画像処理は、上述した運動物体の解析から、リモートセンシングまでを包括している。さらに、エレクトロニクスの発展により開発されたコンピュータは、今や画像処理において不可欠なものである。従来の映像解析では、像座標を測定し、三次元座標を求めることが目的であったが、画像処理においては、コンピュータを使用することにより、画像に含まれる大量の情報を処理することができ、色や、濃淡、テクスチャ等の情報を元に、画像の特徴を抽出することができるようになった。⁶⁾ また、コンピュータと画像が結びつくことにより、コンピュータ・グラフィックスと呼ばれる新しい分野が創成された。⁷⁾ コンピュータ・グラフィックスは、その緒に着いたばかりであるが、今後、画像処理におけるディスプレイの部分で、大きな力を発揮するものと思われる。

現象を画像として記録する技術が進歩する一方、その画像を解析し物体の三次元位置を求める方法も数多く研究されてきた。特に人間工学においては、シネカメラによる撮影画像を用いた計測法が大きな位置を占め、人間の運動解析に利用されている。被写体の運動を解析するためには、高速度カメラ等によって撮影した連続画像を用い、写真計測法により、ある時間間隔における物体の三次元位置を求め、これらの離散的な時系列データを処理しなければならない。そのために、写真画像から物体の三次元情報を抽出する方法を研究することは、極めて重要となってきている。

本研究は、運動する物体の運動状態を解析するために、一方向からの撮影によって得られる写真画像のみから、物体の三次元座標を精度良く測定する手法を開発することを目的としている。本論文は全体で7章で構成され、各章の内容は次のとおりである。

第1章では、三次元計測法の中で、測尺による方法、超音波を用いた方法、および光学的な方法について従来の研究を概観し、本研究の占める位置や意義を明らかにする。

第2章では、従来より用いられている平行投影処理による一方向写真計測法の撮影条件を明らかにする。そして、より撮影条件がゆるやかで、高精度な計測が行なえと考えられる中心投影処理による一方向写真計測法を開発し、実験によりこの計測法の測定能力を評価する。

第3章では、一方向写真計測法の簡易性と多方向写真計測法の高い測定精度を合わせ持つ、鏡を用いた一方向写真計測法を開発する。そして、写真計測によって得られたデータを用いて、被写体の運動諸量を求める方法について示し、本計測法の運動計測能力を実験と理論により明らかにする。

第4章では、写真計測法とは別の三次元計測法と、写真計測法を併用し、写真計測法の運動測定能力を向上させるために、超音波と光学センサを用いた計測法を開発する。そして、鏡を用いた一方向写真計測法と光学センサを用いた計測法を併用し、鏡の向きを制御した結果について述べる。

第5章では、写真計測法の測定誤差の要因の一つである像座標の読取り精度を向上させるために、フィルム画像を計算機に入力する装置を製作し、画像処理によって標点の検出及び像座標の読取りを行なう。さらに、本装置を用いて得られたデータを処理し、被測定物体の運動モデルの創成を行なう方法について述べる。

第6章では、人体上肢の運動能力を総合的に評価し、実験において、本研究で開発した写真計測システムを用い、実際の問題に対する適応性を評価する。

第1章 三次元計測に関する理論と実験の現状

1.1 緒 言

三次元計測は各種の分野で行なわれ、対象物体も、大は星の運動から、小は結晶内の原子配列まで、その適用範囲は多種多様である。室内程度の空間に限っても、三次元計測には、測尺による方法、超音波を用いる方法、光学的な方法が適用されている⁸⁾。一方、最近のエレクトロニクスの進歩により、各種のセンサが開発され、これらの素子を使用することにより、従来の方法とは全く異なった計測法も開発されている。また、データの記録や処理に関しても、磁気記録装置や、マイクロプロセッサを用いた低価格の計算処理装置が開発され、従来の測定処理能力が向上している。

本論文では室内程度の空間内で運動する物体を対象としており、本章では上述の各種の計測法を概観し、その研究例や特徴について示し、本研究の占める位置や意義を明らかにする。

1.2 測尺による三次元計測の現状

本節では、測尺により空間内に存在する物体上に設けた標点（測定点）の三次元位置を計測し、物体の形状や姿勢を求める方法について述べる。物体の姿勢は、その標点を測定することによっても求めることができるが、物体がいくつかの剛体によって構成され各剛体間の位置が相対的に変化する場合は、その変化を測定することによって姿勢を直接求めることができる。後者の場合、物体を構成する剛体の一つの位置がわかれば、他の剛体の位置を求めることができる。以下に、物体の標点の三次元位置を測定する方法と、物体を構成する剛体間の相対変位を測定する方法について述べる。

1.2.1 三次元座標測定装置

標点の位置は、一般に直交座標系における三次元座標値として測定される。三次元座標を測定する装置は、直交座標型と極座標型にわけられ、前者は直接三次元座標値を測定する方式であり、後者は、極座標値として得られた測定値を計算処理し、直交座標系に関する座標値を求める方法である。以下に、直交座標型と極座標型の三次元座標測定装置について示す。

a) 直交座標型

直交座標系における三次元座標値を直接測定するには、各座標軸に平行に設置した測尺を用い、座標系の原点から標点までの距離を測定すればよい。このような測定に要する処理を精度よく、迅速かつ簡易に行うための装置が開発されている。これは、図 1.1 に示すように、直交座標型のロボ

ットから、その駆動装置を取り除き、各リンクの変位を測定するために、リニアスケールが取り付けられたものである。この装置を用いた測定は、リンクの先端P（プローブ）を被測定物体の標点に移動させ、各リンクの変位を測定することにより行なわれる。測定精度は、各リンク間の直交性と、リニアスケールの読取り精度によって定まり、0.001 mm 程度の測定精度を持つ。

b) 極座標型

極座標型の三次元座標測定装置は、上述の直交座標型のロボットに対して、図 1.2 に示すように極座標型のロボットから、その駆動装置を取り除き、各リンクの回転変位を測定するために、角度測定装置を取り付けたものである。プローブの位置は、各リンクの長さ、リンク間の相対角度より定まるが、直交座標系に関する値を求めるために計算処理が必要である。測定精度は、各リンク間の回転変位の測定精度と、上述の計算による計算精度に依存し、 ± 0.4 mm 程度（ベクトロン，MODEL・VSC14，小坂研究所の場合）である。この方法は、直交座標型と比較すると測定精度は劣るが、測定点へプローブを接触させる方向により多くの自由度があり、複雑な形状の物体の測定に適している。また計算処理を実行する計算機を使用しているために、測定データの記録やそのデータを用いた解析等を行なう機能を持たせることができるという利点がある。

以上に述べた2つの空間座標測定法の共通した欠点は、同時に多数の点の測定ができないということである。さらに、運動している物体の変位を測定しようとするとき、プローブをその物体に接触させなければならないため、その物体の運動に影響を与える恐れがある。よって、これらの測定法は主として静止物体の形状測定に適しており、運動物体の計測には用いることができないと判断される。^{9)~11)}

1.2.2 ゴニオメータ

物体を構成する剛体の相対的な変位を測定する方法について述べる。この場合、物体を構成する一つの剛体の位置がわかれば、他の剛体の位置も求めることができる。例えば、人体上肢の運動を計測するために、この方法を用いると、各関節の変化による各腕（上腕，前腕）の相対変位が求められる。このとき肩関節や体幹の位置が既知であると、手先の位置を求めることができる。このように、人体計測の分野では、ゴニオメータ（goniometer 角度測定装置）を用いた測定法が使用

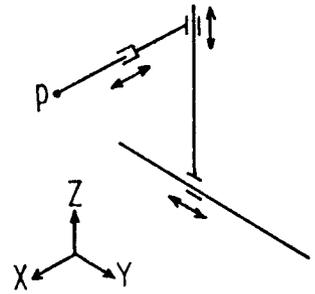


図 1.1 直交座標型測定装置

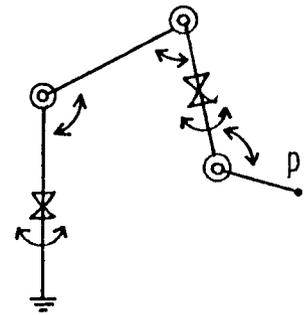


図 1.2 極座標型測定装置

12)
 されている。

この測定法の原理は、関節をはきんでとなりあう各剛体上に、その関節の動作と等価な運動機能を持つピンで連結された二本のリンクを固定し、関節の変位を、そのリンク間の変位として検出するものである。ただし、実際の人間の関節の動作は複雑であり、リンクの測定値と関節の変位が一对一に対応するようなゴニオメータを製作することは非常に困難であり、一般にはリンクの測定値を計算処理し、関節の変位を求めている。

13)
 M. A. Townsend らは、膝関節の動作の計測のために図 1.3 に示すようなゴニオメータを提案している。この方法では、ゴニオメータによって測定されたリンクの動き ($\phi_1, \phi_2, \theta_1, \theta_2, \psi_2$) と、ひざ部の解剖学的な動き (膝関節の屈曲伸展 θ_1 , 下腿の外旋内旋 ψ_2 , 股関節の外旋内旋 ϕ_2) を次式によって関係づけている。

$$[B] = [\theta_2]^t [\phi_2]^t [\phi_1] [\theta_1] \quad (1.1)$$

$$\begin{bmatrix} C\theta_{21} & 0 & -S\theta_{21} \\ S\theta_{21} & S\phi_{21} & C\phi_{21} \\ S\theta_{21} & C\phi_{21} & -S\phi_{21} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C\theta_{21} & S\phi_{21} \\ C\theta_{21} & C\phi_{21} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} \\ b_{31} & b_{32} & b_{33} \end{bmatrix} = [B] \quad (1.2)$$

ここで

$$[\phi_1] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & C\phi_1 & S\phi_1 \\ 0 & -S\phi_1 & C\phi_1 \end{bmatrix}, [\theta_1] = \begin{bmatrix} C\theta_1 & 0 & -S\theta_1 \\ 0 & 1 & 0 \\ S\theta_1 & 0 & C\theta_1 \end{bmatrix} \quad (1.3)$$

ただし、 $S\phi_1 = \sin \phi_1, C\phi_1 = \cos \phi_1$

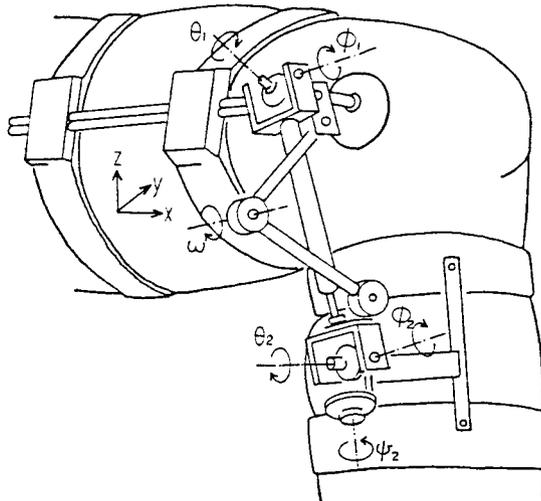


図 1.3 ゴニオメータ装着状態

このとき式 (1.1), (1.2), (1.3) より、ひざ部分の変位 θ_{21} , ϕ_{21} , ψ_{21} は次式より求められる。

$$\tan \theta_{21} = \frac{-b_{13}}{b_{11}}, \tan \phi_{21} = \frac{b_{32}}{b_{22}}, \psi_{21} = -\phi_2 \quad (1.4)$$

一般に、ゴニオメータのリンク機構の変位データはポテンショメータによる電圧として得られるため、記録装置や計算機と簡単に適合するようにできる利点がある。そのため、上述の計算処理やデータ処理が容易となる。この装置の問題としては、装置をしっかりと装着しないと、装着部の皮膚、筋肉、脂肪等の影響により、骨格の動きが正確にゴニオメータに伝わらない恐れがある。逆に装着をきびしくすると、関節の動作に影響を与える。以上の如く、計測装置を人体に装着する方法では、装着の正確さと動作の自由度の間で妥協が必要であり、また装置の重量や、装着したことによる精神的影響も無視できない。装置を装着しない計測法が最も好ましいことは論をまたない。そのため人体の運動計測では、16 mm シネカメラによる画像を用いて運動の数値化が行なわれているが、画面の大きさからくる測定精度の限界と、複雑な動作では、画面上での直視が困難になるという難点があるためゴニオメータによる直接測定がその直接的正確さや、データ処理の簡易さのために、現在でも数々の研究で画像解析と併用されている。^{14)~16)}

1.3 超音波による三次元計測の現状

超音波とは可聴音の上限を超えた周波数の音波であると一般に考えられている。可聴範囲は 20 Hz ~ 20 KHz であり、超音波とは 20 KHz 以上の周波数の音ということになる。しかし、超音波を用いた液面計で 1 KHz, 音波レーダーで 850 Hz, 超音波集塵機で 8 KHz といった周波数が用いられているが、いずれも超音波計測として取り扱われており、物理学や計測工学の分野では、超音波とは人間の耳で聞くことを目的としない弾性と慣性によって起る波動であると考えられている。

超音波が計測に用いられたのは、1921年頃フランスの P. Langevin によって作られた超音波測深機であるとされている。その後、潜水艦探知を目的とし研究が進められたが、軍事技術であることによる機密性、技術水準の低さや、高価格であることなどの理由で一般に使用されるようになったのは、第二次大戦以後であった。空間内での超音波を用いた三次元計測には、波長、振巾、位相、伝搬速度、及びその差を計測することにより各種の手法が開発されているが、それらは直接波を用いる方式と反射波を用いる方式の二つに分けられる。直接波を用いる方式は、超音波の送波器と受波器が相対して位置しており、一方が被検出物体に取り付けられ、他方が測定の基本座標系に取り付けられている。この方式では、被測定物体に送波器か受波器を取り付けねばならず、厳密な意味で非接触での測定であるとは言えない。反射波を用いる方式では、送波器より発射された音波を、被検出物体に反射させてその反射音波を受波器により検出している。この方式は非接触な計測

であるが、直接波ほどきれいな受信波が得られない。また反射波に関して、物体の形状が等方性でない場合、反射波が受波器に達しなくなり、検出不可能になることもあり得る。

超音波等の波動現象を説明するための要因である波長や、振巾、位相、伝達速度等と位置（距離）との関係がわかれば、これらを用いて三次元位置計測を行なうことができる。以下に a) 周波数（波長）、b) 音圧（振巾）、c) 伝搬速度を計測し位置を求める方法について示す。

(a) ドップラ効果を利用する方法

被測定物体に取り付けた送波器から周波数 f_s の超音波が放射されており、もし物体が速度 v_s で受波器の方向に移動すれば、受波器に得られる音波の周波数 f_d は次式で得られる。

$$f_d = f_s \frac{c}{c - v_s} \quad (1.5)$$

ただし、 c は音速である。この場合は、直接波を検出する方式であるが、反射波を検出する場合は、受波器に得られる音波の周波数 f_r は次式で得られる。

$$f_r = f_s \frac{c + v_s}{c - v_s} \quad (1.6)$$

式(1.5)あるいは式(1.6)を用いて、受信周波数を測定することにより、物体の速度が求められるから、得られた速度を積分することによって物体の移動量が測定できる。しかし、物体の移動速度が音速と比較し非常に遅い場合、正確な位置を求めることができないという欠点がある。

(b) 音の強度を測定する方法

送波器から大気中に放射した音波は拡散し、受波器によって検出できる音圧 P は送波器と受波器間の距離 r に関して以下の関係がある。²⁰⁾

$$P = A \frac{\omega^2 \rho}{r} \quad (1.7)$$

ここで、 ω は音波の角周波数、 ρ は大気密度、 A は定数である。音圧 P を測定することによって送波器と受波器間の距離 r が求められる。

(c) 伝搬時間を測定する方法

大気中を音波が伝搬する速さ（音速） c は、次式で定まる。

$$c = 331.5 + 0.607 \theta \quad (\text{m/s}) \quad (1.8)$$

ここで、 θ は周囲温度(°C)である。送波器から超音波を放射し、受波器に超音波が入射するまでの時間 t (sec.) を測定することにより、超音波の伝搬した距離 r が次式により求められる。

$$r = c \cdot t \quad (\text{m}) \quad (1.9)$$

送波器や受波器の応答時間により正確な伝搬時間が得られないため、補正が必要である。

上述のa)～c)の手法やそれ以外の方法を用いた各種の超音波位置計測法が研究されている。超音波を用いた一次元位置計測法は、二次元や三次元の計測法と比較し実用化されているものが多い。工業的には近接センサや液面計として利用されているが、これらの計測法はほとんどの場合、c)に示した伝搬時間の測定による方法を用いている。二次元位置計測法は、三次元位置計測にも応用することが可能なものが多い。以下に、超音波を用いた二次元及び三次元位置計測法の研究例について述べる。

ロボットの運動制御において、作業物体の位置情報を求めるために、超音波を利用するための研究²¹⁾がなされている。高野らは、物体からの反射波の伝搬時間を測定し、50cm～20cmの範囲にある物体の位置を0.1mm～0.2mmの精度で検出した。さらに、物体の存在する方向を最大反射音圧方向であるとし、図1.4に示すように送受波器を回転させ、反射音波の強度を測定することで±1度の精度で測定を行なった。

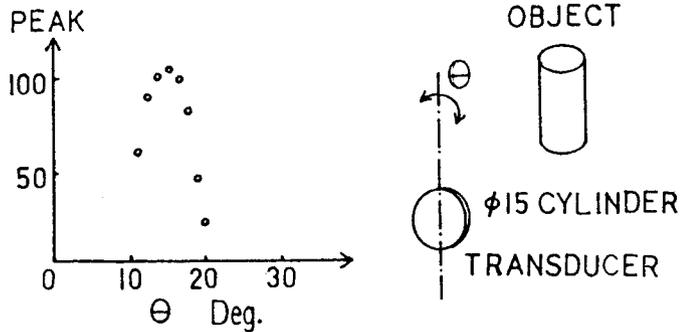


図1.4 音圧測定結果及び測定状態

移動ロボットの移動平面における二次元的位置と、向きを測定するために超音波の利用が研究されている。新井らは、全方向移動車の位置や方向を求めるために図1.5に示すような三対の受波器を全方向移動車上に設置し、その周囲の空間内の三ヶ所に配置した音源の方向を測定した。三ヶ所の音源から、FM変調周波数の異なる超音波を放射し、一对の受波器に入力する音波の位相が一致するように受波器を回転させるモータを駆動している。この結果、受波器は常に発信源の方向を向き、その方向をポテンシヨメータによって測定している。このようにして、三対の受波器の方向すなわち三音源の方向と全方向移動車の方向の相対角度を求め、三角測量の原理を用い、移動車の位置と向きが求められる。

図1.6に、この超音波位置方向センサによる計測結果を示す。

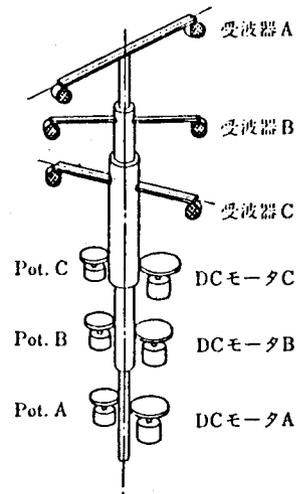


図1.5 3対の受波器

物体の位置決めや、組立てを自動化するために、超音波を用いた位置計測法が研究されている。J. J. Tavormina²³⁾らは、物体の位置変化を、物体からの反射波の位相に関するずれとして検出している。位相の情報を位置の情報に変換するためには、音波の方程式に基づいた数学モデルが必要であるが、実際には困難である。そこで、基準点から物体までの変位と、物体が基準点に存在する時の位相と移動後の位相との変化を、単純な線形モデルと仮定している。そして、較正点を設け、その付近

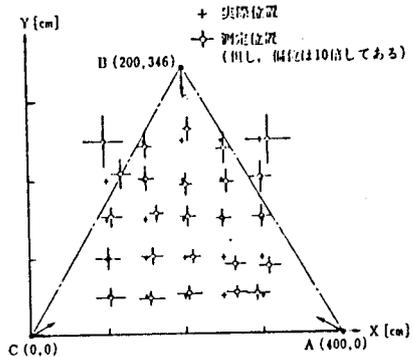


図 1.6 位置方向センサによる測定結果

での位相と位置の変化を測定し、仮定した数学モデルを最小二乗法により定めている。図 1.7 に示すシステムを用い、各種の物体を較正点へ移動させる実験を行なった。その結果、図 1.8 に示すように、0.4 inch (10mm) 離れた開始位置から、数回の反復によって目標位置の 0.01 inch (0.2mm) 以内に達するという結果を得ている。使用した超音波は、周波数 10.4 KHz、波長 1.3 inch (33mm) であり、位置決め精度は、波長の 1% 以内であった。

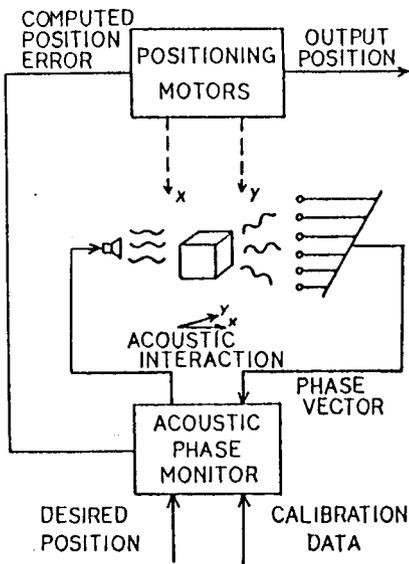


図 1.7 位相計測による測定システム

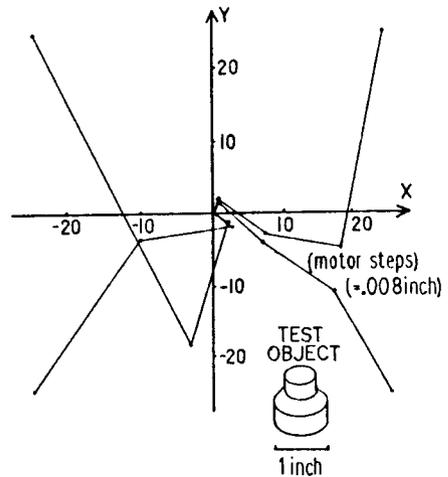


図 1.8 位相計測による測定結果

超音波を用いた三次元的な位置計測は、主に直接波を使用し、伝搬時間を測定する手法を用いている。Moritz²⁴⁾らは、図 1.9 に示すように、各座標軸上に設置した 0.5m の受波器を用い、音源からの最短伝搬時間を測定し、三次元座標を求める計測システムを発表している。このシステムにお

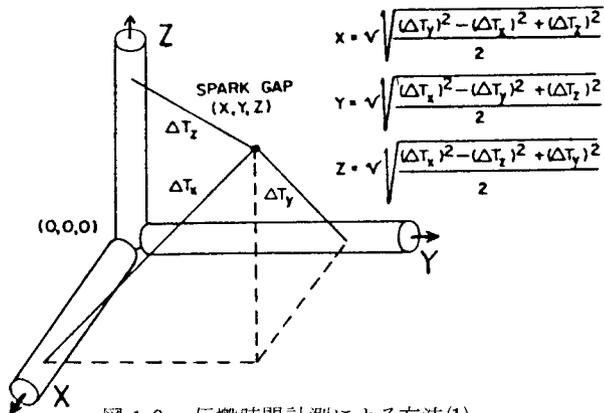


図 1.9 伝搬時間計測による方法(1)

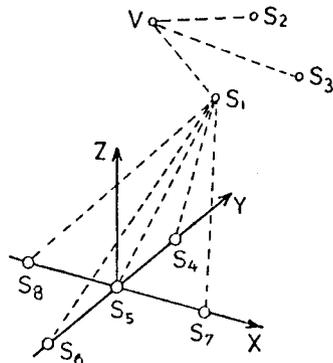


図 1.10 伝搬時間による方法(2)

ける測定誤差は、 $0.5\text{ m} \times 0.5\text{ m} \times 0.5\text{ m}$ の空間内で約 0.1 mm であった。この計測法の欠点は、受波器に特殊なものを使用しなければならないことと、測定範囲が受波器の長さ制限されることである。²⁵⁾大園らは、座標軸上に線状の受波器を設置するかわりに、座標が既知である点に受波器を設ける方法を開発している。この方法では、音源と座標が既知である受波器間の距離を、音波の伝搬時間を測定することにより求め、三角測量の手法を用いて音源の座標を求めている。図 1.10 に示すように、受波器 S_1, S_2, S_3 の座標 $(X_{si}, Y_{si}, Z_{si}, i = 1, 2, 3)$ が既知であり、 S_1, S_2, S_3 間の距離を L_1, L_2, L_3 とすると次式が成立する。

$$(X - X_{si})^2 + (Y - Y_{si})^2 + (Z - Z_{si})^2 = L_i^2 \quad (i = 1, 2, 3) \quad (1.10)$$

上式を解くことにより、音源 V の座標 (X, Y, Z) が求まる。しかし、実際に計測を行なう場合にはこのように位置が既知である三個の受波器を設置できるとは限らない。そこで、基準座標上に五個の受波器 ($S_4 \sim 8$) を設け、それによって前述のセンサ ($S_1 \sim 3$) の位置を測定している。

以上に述べた超音波を用いた位置計測法は、それぞれに超音波の特性を生かしたものであった。しかしその反面、すべての計測法は超音波を用いたことによる欠点を持つ。まず温度、湿度、風、騒音等、測定の大気環境に敏感であることがあげられる。温度、湿度に関しては、補正によりある程度測定精度を改善することが可能である。例えば Canali らは、²⁶⁾温度の補正のために、音波の受信回路に温度補正回路を組込む方法を開発し、 -20°C から 110°C までの温度範囲内で、 1 m の測定距離において $\pm 1\text{ mm}$ の測定精度を実現している。超音波を測定に用いたことによる他の欠点として、使用する超音波の周波数に関するものがある。周波数が高いほどパルス幅の短いパルスが発生させることが可能となり、高精度な測定が期待できる。しかし、周波数が高いほど振幅の減衰が激しく、音波の到達距離が短くなり、測定範囲が狭くなる。他の欠点として、同時に測定できる測定点の一つであることや、反射波を用いた測定法では、被測定物体の形状や、表面状態によって、大

大きく影響を受けること等がある。

本研究では、最大反射音圧を検出することによって、物体の存在する方向を測定する方法を開発した。詳細は、4.2節に示す。

1.4 映像解析による三次元計測の現状

映像解析により三次元計測を進める過程を分類すると、まず映像を記録し、次に目的の要素に着目し画像座標を数値化し、最後に得られたデータを数値解析し位置を求めるという段階がある。以下に、各段階における方法と、その特性について述べる。

1.4.1 映像の記録法と像座標の読取り

物体の運動計測に、映像解析による三次元計測法を用いる場合は、ある時間間隔で画像を記録しなければならない。このための方法として、a)シネカメラを用いて、フィルムに画像を記録する方法、b)一枚のフィルムに、多重露光により各時間の画像を記録する方法、c)ビデオカメラにより、画像をビデオ信号に変換し、磁気テープに画像情報を記録する方法等が考えられる。以下に各方法における特性と、像座標の読取り方法について示す。

a) シネカメラによる記録

シネカメラに使用するフィルムサイズには、8mm、16mm、35mm、75mmがあり、情報の記録という点から見ると70mmが最もすぐれているが、カメラ及びフィルムのコストや取扱いやすさという点で16mmがよく用いられる。通常の映画では24枚/秒の撮影を行なうが、高速運動を撮影するためのハイスピードカメラでは、 10^7 枚/秒の撮影も可能である。しかしながらバイオメカニクス等の分野で用いられる撮影速度は、対象物体の速度が比較的小さいことより、100枚/秒～200枚/秒の速度で十分である。レンズは被写体をフィルム上に結像させる機能を持ち、画像の解像度や歪みに大きな影響を与える。画像の歪みはレンズの歪曲収差によるもので、一般のレンズでは-2%～1.5%の歪曲収差を持ち、²⁷⁾広角レンズほど大きい。

フィルム画像から像座標を読取る方法としては、主に画像をタブレット上へ拡大投影し、スタイラスペンによって物体上の標点を指示することによって行なっている。読取精度は、人間の目の分解能、タブレットの精度、フィルムの解像度によって定まる。人間の目の分解能は、 0.073mm ²⁸⁾と言われており、タブレットの精度がそれ以上に高精度であっても意味がない。フィルムの解像度は、16mmフィルム(7.4mm×10.2mm)の場合、画素数25万個、35mmフィルム(18mm×24mm)で約116万個と言われている。故に、16mmフィルムでは4.2倍、35mmフィルムでは3.8倍以上に拡大すれば、十分である。しかし、いかに高精度で読取りを行なったとしても、読取時に人間が関与している限り、読取データに偶然誤差が混入するのを防ぐことはできない。そ

こで、本研究では、フィルム画像を計算機に入力し、標点の識別と像座標の読取りを画像処理によって行なう装置、及び方法を開発した。このシステムを使用することにより、偶然誤差を排除することができる。詳細は、第5章に示す。

b) 多重露光による記録

この記録法は、同一フィルム上に、多重露光により物体の運動をすべて写し込む方法である。露光は一定間隔とし、一般にはマルチストロボが使用される。この方法では、フィルムサイズを自由に選ぶことができる。フィルムサイズは大きいほど画像の解像度が高いので、必要であれば11inch×14inchのフィルムを使用することも可能であるが、一般には6cm×9cmのフィルムが主に使用されている。露光時間や、一秒間あたりの撮影枚数は、マルチストロボの性能に依存する。発光時間はシャッタ速度に相当し、1/10000秒程度であり、機械式シャッタと比較して非常に短く、高速運動物体の撮影に適している。発光間隔が秒間の撮影枚数に相当し、発光時間と同様に短く設定できる。

像座標の読取は、シネフィルムによる場合と同様の方法で行なう。問題点としては、被写体の運動中に移動する部分と静止している部分があると、静止している部分では画像が重複して標点の検出が困難になる恐れがある。また人間の運動を計測する場合、ストロボを使用することによって心理的な影響による運動の乱れがあると考えられる。

c) ビデオカメラによる記録

撮影をビデオカメラで行ない、ビデオカメラから得られるビデオ信号をVTR(Video Tape Recorder)によって磁気テープに記録する。シャッタスピードは1/30秒であり、一秒間の撮影枚数は、30枚/秒となる。そのため、高速の運動物体の記録には適していない。画像の解像度は画素数で $525 \times 700 = 367500$ 個であるが、テレビモニタ上では20万個程度であり、16mmシネフィルムの解像度より少し低い。

像座標の読取は、フィルム画像の場合と同じようにビデオプロジェクターによってタブレット上に拡大投影して行なう方法と、計算機へ画像を入力し画像処理によって標点の認識及び座標の読取を行なう二つの方法が考えられる。画像をビデオ信号として電気的に処理できるので、計算機への入力は容易である。シャッタスピードと一秒間の撮影枚数を改善するために、高速VTRが商品化され毎秒200枚の撮影が可能である(HSV200, NAC社)。また解像度も改善され、高品位テレビでは、35mmフィルムと同程度になっている。

以上のa)～c)に述べた方法は、画像の記録を行った後に、像座標の読取を行なう方式であったが、画像の記録を行なわないで、直接に標点の像座標が測定できる光電式デジタイザが開発されている。光電式デジタイザとは、空間内にLED(Light Emitted Diode)によって点を指定

すると、その点の像座標の値が測定されるものであり、セルスポット (Selspot) という名称で市販され各種の分野において計測に使用されている。この測定装置は、一秒間に 30 点の像座標を 1024×1024 (10 bit) の解像度で測定できる。測定は、 $1/30$ 秒ごとに一点ずつ行なわれ、同時に複数個の測定点のデータを得ることはできない。また、標点である LED の光は拡散し、実際の解像度は 500×500 (9 bit) 程度である。この測定装置では、LED を時分割で発光させねばならないため、LED と測定装置を信号ケーブルで接続しなければならない。それ故、運動に影響を及ぼす恐れがある場合や、高速に運動する物体の計測に、この装置を使用するのは不適当である。また特殊な装置であるため高価である。しかし、以上に示した欠点を除けば、ほとんどの三次元計測に利用でき、測定値を計算機へ入力することにより実時間で三次元計測が行なえるという利点がある。

他の光電変換素子を用いた、セルスポットと同等の機能を有する計測器も研究されている。増田²⁹⁾らは、赤外発光 LED と半導体位置検出素子 (PSD, Position Sensitive Device) を用いた三次元位置計測システムを開発している。PSD 素子を用いた測定装置の像座標測定の原理を以下に述べる。PSD 素子上に LED より発した赤外光が結像すると、その付近に光電流が生じる。PSD 素子はそれ自体が抵抗体であり、素子の四辺の電極によって検出される電流は結像点と電極までの距離に反比例し、その電流値を電気回路によってアナログ演算を行なうことで結像点の座標が求められる。その他の光電変換素子として、固体イメージセンサがある。この素子はビデオカメラの撮像管のかわりに使用するために研究が進められているが、最近ではファクシミリに利用するために、高解像度の一次元センサの開発も行なわれている。ビデオカメラに使用されるイメージセンサは、たかだか解像度が 500×500 程度であり、またカラーカメラ化への研究が主となり高解像度の素子はあまり見られない。これに比較して、ラインイメージセンサの解像度は高く、 $3000 \sim 5000$ 程度のものが開発されている。³⁰⁾ 固体イメージセンサは、素子の駆動速度が任意に設定でき、その駆動回路も単純であるので計算機に画像を入力することが容易である。

本研究では、ラインイメージセンサを用い、光学系を工夫することにより複雑な画像処理をすることなく、実時間で物体が存在する方向を検出する計測システムを開発した。詳細は 4.3 節に示す。

1.4.2 三次元位置計測法

映像解析による計測法は、以下に示すように大きく三つに分類できる。

- 1 多方向から同時に撮影を行ない、得られた画像を解析する方法
- 2 一方向から一台のカメラによって撮影を行ない、得られた画像を解析する方法
- 3 一方向から一台のカメラによって撮影を行なうが、数個の平面鏡を使用し多方向からの画像を鏡像として一枚の画像に写し込んだものも解析する方法

一般に、多方向からの撮影画像を用いた三次元計測法では、運動物体の計測の場合、各カメラ間の同期をとらねばならないことや、測定空間が各カメラの共通被写界に限定されること等の制限条件がある。各カメラの同期をとるには、専用のカメラを用いるか、あるいは各フィルムに同一の時間的に変化する情報を写し込む方法が考えられる。一方向からの撮影画像を用いる三次元計測法では、多方向からの計測法と比較して画像の情報量が少ないために測定精度が低い。しかし撮影に要する処理は簡単になる。鏡を用いた一方向からの計測法では、多方向からの画像が一枚のフィルム上に得られるため、計測に要する処理が簡単で、かつ高精度な計測が期待できる。しかし、被写体の運動を全て鏡像として撮影するためには、その運動範囲と同程度の大きさの鏡が必要である。以下に、多方向、一方向、及び鏡を用いた一方向からの写真計測法の研究例を示す。

a) ステレオ写真計測法 (Stereophotogrammetry)

ステレオ写真計測法は、図 1.11 に示すように、2 台のカメラを光軸を平行にして、ある距離をおいて並べ、同時に撮影した画像を用いる方法である。この方法によって撮影した二枚の画像は、二台のカメラと被写体の距離に応じたずれを持つ。このずれを測定することにより光軸方向の位置を求め、測定すべき点の三次元座標が測定できる。この計測法の原理は、距離計の原理と同じものである。この方法は、カメラに近い位置では高精度であるが、被写体がカメラから遠ざかるに従い精度が低下する。したがって遠距離でも高精度の計測を行なうには、画像のずれが大きくなるようにカメラ間の距離を大きくする必要がある。また光軸を精度よく平行に保つことが困難であるという欠点がある。

b) 直交多方向からの複数個のカメラ撮影による方法

この方法は、図 1.12 に示すようにカメラをその光軸が互いに直交するように三次元座標軸と一致させて設定し、同時に撮影した画像を用いる方法である。この方法によれば、カメラ A によって

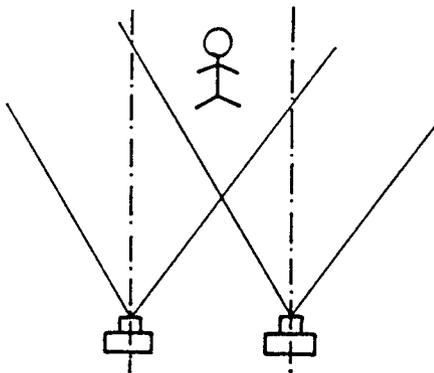


図 1.11 ステレオ写真計測法

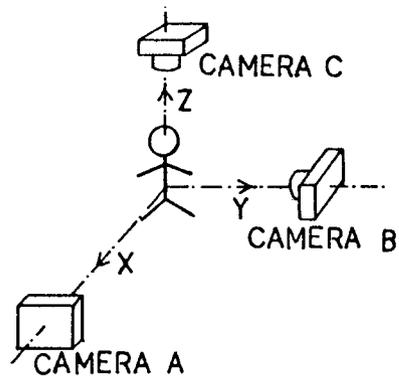


図 1.12 直交多方向からの写真計測法

Y・Z 座標, カメラ B によって X・Z 座標, カメラ C によって X・Y 座標が各カメラの像座標として直接測定できる。このように像座標から空間座標への変換が容易であるため、この方法は多くの研究で用いられている。この計測法の欠点としては、カメラを精度よく設定するのが困難であることと、カメラの設置場所が制限されることがあげられる。^{31)~33)}加藤は、この方法を用い、多重露光方式により撮影した画像を用いて人間の歩行の解析を行なっている。測定範囲を広くするために図 1.13 に示すように、歩行方向とカメラの光軸方向を 45° に設定している。このとき標点 P の x y z 座標に関する測定値は次式で求められる。

$$\left. \begin{aligned} x &= \frac{\ell L(u_l - u_r)}{\sqrt{2}(\ell^2 - u_l u_r)} \\ y &= \frac{2L u_r u_l - \ell L(u_r + u_l)}{\sqrt{2}(\ell^2 - u_l u_r)} \\ z &= \frac{L(v_r u_l + v_l u_r)}{2(\ell^2 - u_l u_r)} - \frac{L(v_r + v_l)\ell}{2(\ell^2 - u_l u_r)} + h \end{aligned} \right\} (1.11)$$

ここで、添字 ℓ, r は左右のカメラを示し、 u_r は像画面中心から被測定点の像点までの X 軸方向の長さであり、同様に u_ℓ は Y 軸方向、 v_ℓ, v_r は z 軸方向の長さである。h は左右のカメラのレンズ中心の高さ、L は x y z 座標の原点からレンズの物空間主点までの距離、 ℓ はレンズの像空間主点からフィルム面までの距離である。フィルムの読取値 u_r, u_ℓ, v_r, v_ℓ と L, ℓ 以外の値は、トラ

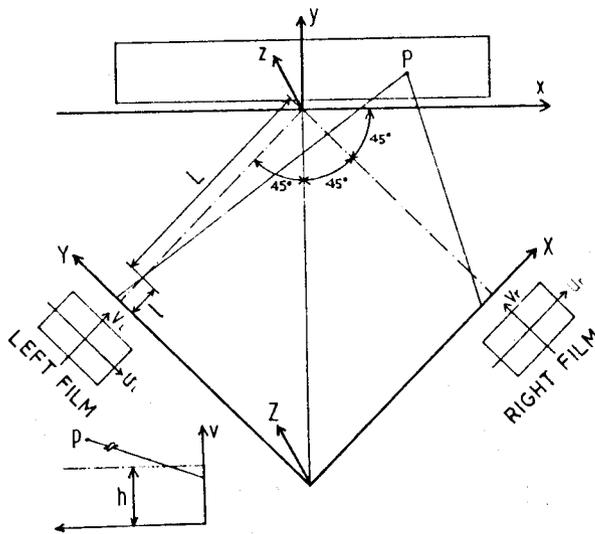


図 1.13 人間の歩行の計測状態

ンシート等を用い設定を注意深く行ない、ほぼ1mm以内の誤差で設定を行なっている。L及びℓは直接測定することが不可能であるため、キャリブレーションにより誤差の二乗和が最小になる値を用いている。撮影は6cm×9cmのサイズのフィルムと焦点距離100mmのレンズを用いて行なわれた。フィルムの読取り精度は約1/20mmであり、この時の測定誤差は $-800\text{mm} < x < 800\text{mm}$, $0 < y < 800\text{mm}$, $200\text{mm} < z < 1800\text{mm}$ の測定範囲内において x, y, z 座標に関して最大 -1.23mm , -2.51mm , -1.52mm であった。

c) DLT (Direct Linear Transformation)法

測定空間の三次元座標と画像の二次元座標の関係式は幾何学的に求められ、三次元座標値 x, y, z と外部パラメータ(カメラの位置, 向き等)と内部パラメータ(レンズの主点の位置, 焦点距離, 像座標 x, y)によって構成されている。DLT法は、この関係式の係数を較正点を用いて定める方法である。図1.14に示すような撮影状態の場合、この関係式を三次元座標値 X, Y, Z と像座標値 x_1, y_1, x_2, y_2 , について整理すると次式ようになる。

$$\left. \begin{aligned} (n_{11}-x_1n_{31})X+(n_{12}-x_1n_{32})Y+(n_{13}-x_1n_{33})Z+x_1 &= 0 \\ (n_{21}-y_1n_{31})X+(n_{22}-y_1n_{32})Y+(n_{23}-y_1n_{33})Z+y_1 &= 0 \\ (m_{11}-x_2m_{31})X+(m_{12}-x_2m_{32})Y+(m_{13}-x_2m_{33})Z+x_2 &= 0 \\ (m_{21}-y_2m_{31})X+(m_{22}-y_2m_{32})Y+(m_{23}-y_2m_{33})Z+y_2 &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (1.12)$$

ここで、 n_{ij}, m_{ij} ($i, j = 1, 2, 3$) はカメラの位置と方向に関するマトリックス関数である。

Van Gheluwe³⁴⁾ は図1.15に示すような空間座標を定める装置を二台のカメラにより撮影し、その座標軸上の点を較正点とした。較正点は各座標軸上に7個存在し、 $7 \times 3 = 21$ 個の既知である三次元座標値と、それを撮影した画像より得られる像座標値を式(1.12)に代入する。そして得られる $21 \times 4 = 84$ 個の方程式を解き、 n_{ij}, m_{ij} ($i, j = 1, 2, 3$) を求めている。

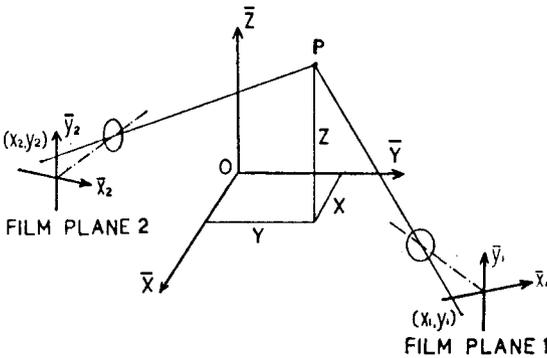


図1.14 DLT法による測定状態

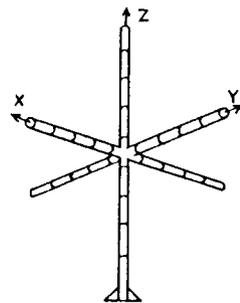


図1.15 較正装置

D L T法は、a), b) に述べた計測法と比較し、より一般的な方法であり、カメラの位置や向きは、全く自由に設定でき、光軸が交わらねばならないといった厳しい撮影条件は存在しない。D L T法の唯一の条件は、較正点を計測を行なう前に一度だけ各カメラに写し込み、それ以後はカメラの位置や向き等を変化させてはならないことである。D L T法の問題点は較正点を正確に設定しなければならないことである。図 1. 15 に示すような較正装置を用いることによりこの問題は解決できる。しかし、測定範囲が較正装置と比較して非常に大きい場合、画像に占める較正装置の面積が小さくなる。そのため較正点の像座標の読取り誤差の影響により正確な変換式が得られなくなり測定誤差が大きくなる。この問題を避けるためには、較正装置を大きくすればよいが、簡易性が損われる恐れがある。³⁵⁾ ³⁶⁾ Dapenaらは、この問題を解決するために、二点間の距離が既知である幾組かの点を用い、空間座標と像座標の関係式の係数を求める方法を開発した。この方法は上述の問題は解決できる反面、手順はより複雑となっている。Dapenaらが行なった実験では5m×2m×2mの空間内に存在する棒の長さをD L T法により計測し、棒の実長と比較した結果、相対誤差がx, y, z方向に関してそれぞれ0.5%, 0.7%, 0.5%であった。

d) 一方向からの撮影画像を用いる方法

一方向からの撮影画像を用いる方法は、被写体の形状をあらかじめ計測しておき、図 1. 16 に示すように被写体の撮影方向への変位によって像が実長よりも短く撮影されることを利用し三次元座標を求める方法である(図 1. 17)。そのため、形状が不定であったり未知であるような物体の測定には利用できない。また、基準座標に関して物体の任意の一点の座標が既知でなければならないため、空中の運動物体の計測には利用できない。

³⁷⁾ 青木らは、人間の歩行の測定をこの方法を用いて行なった。撮影は16mmシネカメラを用い、20m離れた位置から約4mの歩行区間が被写界となるように行なわれた。測定誤差は、頂角120度の二等辺三角形の頂角の角度を頂点の測定値より計算した結果3%以内であった。青木らを用い

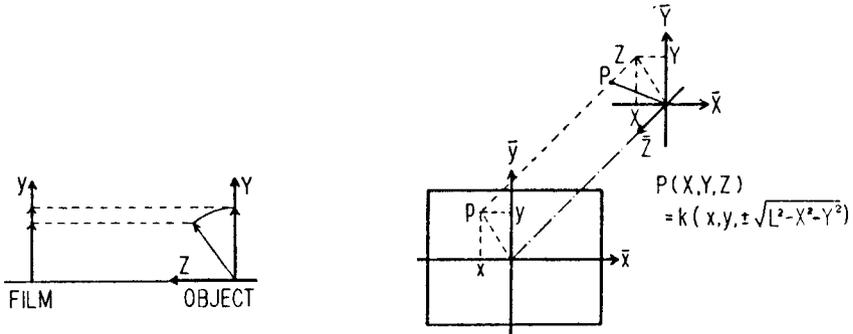


図 1. 16 物体の動きによる画像の変化

図 1. 17 一方向からの撮影画像を用いた計測法

た方法は撮影画像が平行投影像であると仮定したものであり、そのために撮影距離を大きくする必要があった。本研究では、撮影画像を平行投影像とみなすための条件を明らかにし、撮影による三次元・二次元変換と理論的に等しい中心投影を用いる方法を開発した。詳細は第二章に示す。

e) 鏡を用いた一方向写真計測法

平面鏡を用いることにより多方向からの撮影画像を一方向からの撮影画像に写し込むことができる。この結果、多方向からの画像を用いた三次元計測法では同期した撮影画像を得るために複雑な処理が必要であったが、この方法では不必要である。そのため、この計測法は、一方向からの計測の簡易性と多方向からの計測法の高い測定精度の両方を兼ね備えた計測法であると言える。測定原理は、多方向からの画像を用いる方法と同じであり、a), b), c)に述べた方法を用いることで一方向からの撮影のみで実現することができる。a)の方法を鏡を用いて実現するには非常に大きな鏡を必要とするため現実的ではない。一般には、b)の方法を鏡を用いて行なっている。b)の方法では、複数個のカメラを精度よく設定しなければならないという欠点が存在したが、鏡を用いた方法では鏡を精度良く設定しなければならない。鏡の大きさは、被測定物体の運動範囲と同程度のものが必要である。c)のDLT法を鏡を用いて行なう方法では、鏡の向きが任意に設定できて、上述の欠点を解決しているが、鏡の大きさは測定範囲とほぼ等しいものが必要である。鏡を小型化するためには、被写体の鏡像が常に撮影できるように鏡の向きを制御すればよい。しかしDLT法を鏡を用いて実現した方法では、校正点を撮影した後は鏡の向きを変化させてはならないため、この手法を用いることはできない。本研究では、撮影レンズの主点の位置、鏡の任意の一点の位置、鏡面の法線ベクトルおよび像座標をパラメータとする計測法を開発した。詳細は第三章で示すが、本方法では鏡の向きが撮影画像より測定できるため、その向きは撮影中の変化も許される。そのため物体の存在する方向を検出し、鏡の向きを常に物体の鏡像が撮影できるように制御し鏡を小型化できる。本研究では、超音波及び光を用いた物体の方向検出装置を製作し、鏡の向きを制御するシステムを開発した。詳細を第4章に示す。

1.5 結 言

本章では室内程度の運動空間を持つ物体の三次元位置や姿勢を測定するための各種の方法について概観し、本研究の占める位置や意義を明らかにした。三次元位置計測法の中で、測尺による方法、超音波を用いた方法、および光学的な方法についてその使用例や特徴について述べた。その結果、光学的な方法が被測定物体の運動に影響を与えないで、比較的高精度な測定が行なえる特徴を持つことが明らかになった。光学的な方法の中では、鏡を用い多方向からの撮影画像を一方向からの一枚の画像に撮影する方法が、多方向からの計測法と同等の精度を持ちかつ簡単に測定が行なえる特

徴を持つと考えられる。本研究では、単に従来から用いられている多方向からの写真計測法を、鏡を用い一方向からの撮影画像として処理するのではなく、鏡の小型化や向きや位置の自由度に関して考慮した計測法を開発した。

第2章 一方向写真計測による三次元座標の測定法

2.1 緒言

写真撮影による画像を用いて三次元座標を測定するためには、何らかの方法によって二次元画像より三次元情報を抽出しなければならない。最も一般的な方法として多方向写真計測法が考えられる。この計測法の利点は、多方向からの撮影画像より計測に必要な全ての情報が得られることである。すなわち、カメラの位置や向き等の外部パラメータと撮影レンズの焦点距離や像座標等の内部パラメータは撮影画像より算出できる。しかしこの計測法は装置が複雑であり、処理すべき画像データが多く、多方向からのカメラの共通被写界内に測定範囲が制限されるという欠点がある。一方向写真計測法は、前述の外部パラメータ及び内部パラメータを実測することにより、単純な処理で三次元座標が測定できる。一方向からの撮影画像から三次元情報を抽出するために、この方法は被写体の撮影方向への回転によって、被写体の像が実長よりも短く撮影されることを利用している。被写体の形状をあらかじめ実測しておかねばならないため、形状が不定なものは測定不可能である。人間の運動計測等では、このような実測が簡単に行なえるので多くの研究に一方向写真計測法が利用されてきた。従来の研究では、写真撮影による三次元・二次元変換を平行投影による変換と仮定し、三次元座標を求めていた。本章では、従来より用いられている平行投影処理による一方向写真計測法の特性を明らかにし、一方向写真計測法の測定能力の限界を求め、撮影による三次元・二次元変換と理論的に等価な中心投影処理による計測法の開発について述べる。さらに、本方法における誤差解析、および精度検定について述べ測定能力の評価を行なう。

2.2 平行投影処理による計測法

平行投影処理による一方向写真計測法は、写真計測法の分野において最も単純な計測法の一つであり、計測に要する処理が簡単であるため従来から多くの分野で用いられていた。従来の方法では撮影による三次元・二次元変換を平行投影として扱うために、被写体とカメラ間の撮影距離を長くしなければならなかった。しかしこの条件は定量的には明確でなく経験によって撮影条件が定められていた。本節ではこの条件を明らかにし、平行投影処理による計測法の特性について述べる。

2.2.1 平行投影処理として扱うための条件

写真撮影によって得られる撮影画像は、撮影レンズの主点を中心(eye-point)とした中心投影図と解釈できる。中心投影で得られる画像を平行投影で得られる画像として処理するには、遠距離から撮影を行ない、中心投影によって得られる像と平行投影によって得られる像との遠近誤差が、

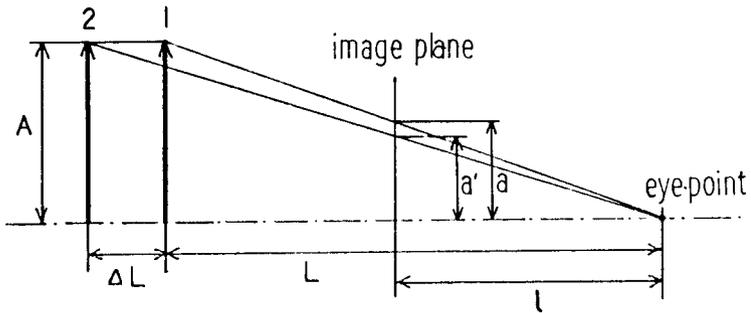


図 2.1 物体の平行移動による撮影像の変化

ある範囲内におさまる必要がある。図 2.1 に示すように被写体が撮影方向へ ΔL 移動するとき、得られる中心投影像は a から a' に変化する。このとき a 、 a' は次式で求められる。

$$a = \frac{l}{L} A, \quad a' = \frac{l}{L + \Delta L} A \quad (2.1)$$

平行投影では被写体の位置にかかわらず像の大きさは一定でなければならない。そこで被写体の移動による像の長さの変化率 ϵ を像座標の読取誤差に起因する測定値と実長との相対誤差以下に制限することによって中心投影を平行投影とみなせる。変化率 ϵ は次式のように求められる。

$$\epsilon = \frac{a - a'}{a} = \frac{\Delta L}{L + \Delta L} \quad (2.2)$$

変化率 ϵ の制限値を ϵ_{\max} とすると、中心投影を平行投影にみなすために必要な最小撮影距離 L_{\min} は次式から求められる。

$$L > \frac{1 - \epsilon_{\max}}{\epsilon_{\max}} \Delta L \quad (2.3)$$

式 (2.3) の関係は図 2.2 のように示される。制限値 ϵ_{\max} と物体の撮影方向への変位量 ΔL は、

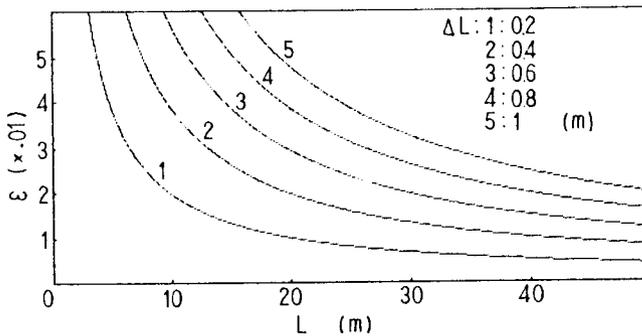
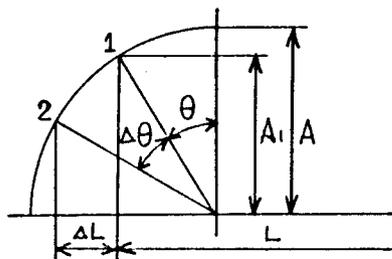


図 2.2 平行移動量と最小撮影距離の関係

物体の運動範囲および姿勢によって異なる。一方
向からの撮影画像を用いた三次元計測法は、物体
の撮影方向への回転運動によって生じる画像面
における物体の長さの変化を測定し、撮影方向の三
次元座標を求める方法である。そのため図 2.1 に
示すように、物体が撮影方向に並進運動を行なう



ような撮影状態を設定することは少ない。図 2.3
に示すように、物体が姿勢 1 から姿勢 2 までの運動範囲を持つ場合、前述の撮影方向への移動量に
相当する ΔL は次式で得られる。

$$\Delta L = A(\sin(\theta + \Delta\theta) - \sin\theta) \quad (2.4)$$

物体の撮影方向への回転量 θ , $\Delta\theta$ が増し、像面に得られる物体の長さが短くなるにしたがい、像
座標の読取誤差に起因する画像における物体の長さに関する相対誤差が増加し、変化率 ε の制限が
緩和される。物体が直立し、画像における物体の長さが A の時の相対誤差を γ とし、物体の運動範
囲内での相対誤差を位置 1 における値で代表すると、 ε_{\max} は次式によって得られる。

$$\varepsilon_{\max} = \frac{A\gamma}{A_1} = \frac{\gamma}{\cos\theta} \quad (2.5)$$

式 (2.3), (2.4), (2.5) より、最小撮影距離 L_{\min} は次式から求められる。

$$L > \frac{\cos\theta - \gamma}{\gamma} A (\sin(\theta + \Delta\theta) - \sin\theta) \quad (2.6)$$

式 (2.6) の関係は、 $A = 1\text{ m}$, $\gamma = 0.01$ の時、図 2.4 のように示される。図から明らかなよう
に、物体の撮影方向への回転変位 θ が小さい場合、撮影による三次元・二次元変換を平行投影とみ
なせるためには、遠距離からの撮影を行なわねばならない。

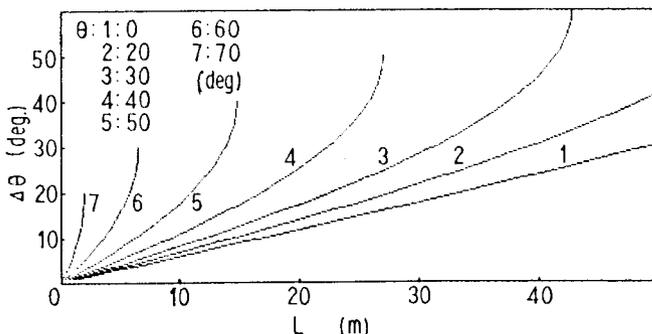


図 2.4 θ , $\Delta\theta$ と最小撮影距離の関係

2.2.2 計測法

撮影による三次元・二次元変換が平行投影として仮定できるように前述の条件の下で撮影した画像を用いて、三次元座標を求める方法について述べる。被写体と撮影像の関係が図 2.5 で示される場合、撮影画像の倍率 α は、 L/ℓ で求められるから、測定点の X, Y 座標は倍率 α を用いて次式で得られる。

$$X = \alpha x, \quad Y = \alpha y \quad (2.7)$$

被写体のリンクモデルの各リンク長は、実測され既知であり、三次元座標値に関して以下の関係が成立する。

$$L_1 = \sqrt{X_1^2 + Y_1^2 + Z_1^2} \quad (2.8)$$

$$L_n = \sqrt{(X_n - X_{n-1})^2 + (Y_n - Y_{n-1})^2 + (Z_n - Z_{n-1})^2} \quad (2.9)$$

式(2.7)より求められた X, Y 座標を用い、式(2.8), (2.9)より Z 座標は次式によって求められる。

$$Z_1 = \pm \sqrt{L_1^2 - X_1^2 - Y_1^2} \quad (2.10)$$

$$Z_n = Z_{n-1} \pm \sqrt{L_n^2 - (X_n - X_{n-1})^2 - (Y_n - Y_{n-1})^2} \quad (2.11)$$

式(2.10), (2.11)の複号は、標点 n が標点 $n-1$ より $+Z$ 軸方向に近づいた位置にあるとき正を選ぶ。この情報は撮影画像からは得られないため、他の方法を用いねばならない。測定点の運動方向を求め、この情報を利用し複号が変化したことを判定する方法が考えられるが、この方法では最初の画像において複号を定めることができない。また複号が変化する位置で運動が静止した場合にもこのような判定法を利用することはできない。従来の方法では主に上記の判定法と人間の介在によって複号を定めていた。

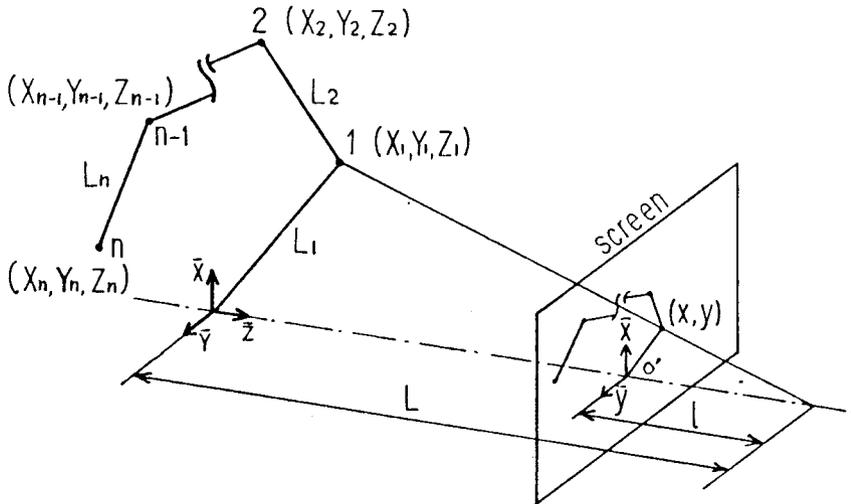


図 2.5 平行投影処理による被写体と撮影像の関係

2.3 中心投影処理による計測法

平行投影処理による計測法の欠点を除去し、一方向写真計測法の測定能力を向上させ、その限界を明らかにするために、撮影による三次元・二次元変換と理論的に等価な中心投影を用いた計測法を開発した。これにより撮影距離に関する制限が除去できる。本節では、計測法で用いる中心投影による三次元・二次元変換の逆変換の導出を行なう。

中心投影による投影像は透視図であるが、像座標と空間座標の位置関係によって単点透視図、二点透視図、三点透視図に分類できる。⁷⁾三次元座標 (X, Y, Z) と像座標 (x, y) と各透視図の関係を以下に示し、画像の相違を図 2.6 に示す。

単点透視図：X軸とx軸，Y軸とy軸がそれぞれ平行な場合（図 2.6, b）

二点透視図：X軸とx軸のみが平行，あるいはY軸とy軸のみが平行な場合（図 2.6, c）

三点透視図：X軸とx軸，Y軸とy軸がそれぞれ平行でない場合（図 2.6, d）

一般の撮影において得られる画像は三点透視図となる。この場合、三次元座標と像座標の関係式が複雑になるため、便宜的に三次元座標の方を像座標に一致させて、撮影によって得られる画像を単点透視図とすることが望ましい。しかし、カメラが傾き角（レンズの光軸と水平面のなす角度）を持つ場合、三次元座標の垂直軸（Y軸）を鉛直方向以外に設定することは不自然であり、像座標のy軸と平行にすることはできない。そのため、三次元座標のX軸と像座標のx軸のみが平行になるように三次元座標が設定され、撮影画像が二点透視となる場合の三次元座標と像座標の関係式を求める。二次元・三次元変換式の導出が容易になるように、二点透視図を単点透視図に変換し、単点透視図と三次元座標の関係式を導出する。

図 2.7 (a) に示すように、カメラの傾き角 α は単点透視図が得られる画面 b と二点透視図の画面 a のなす角度に相当する。二点透視図画面上の点 A から、単点透視図画面上の点 A' への変換について考える。このとき図 2.7 (b) に示すように投影中心 S と y, y' 軸を含む平面において次式が成立する。

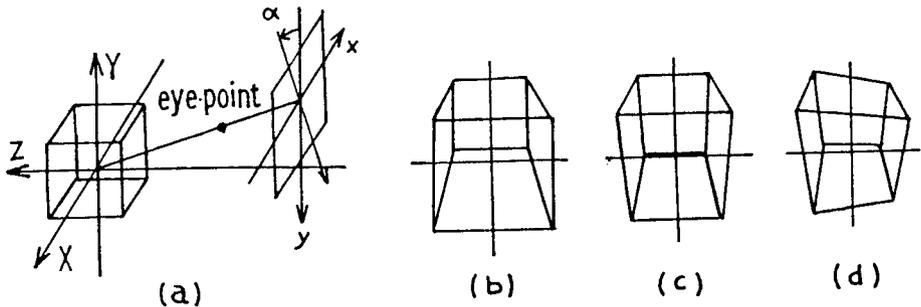


図 2.6 透視図

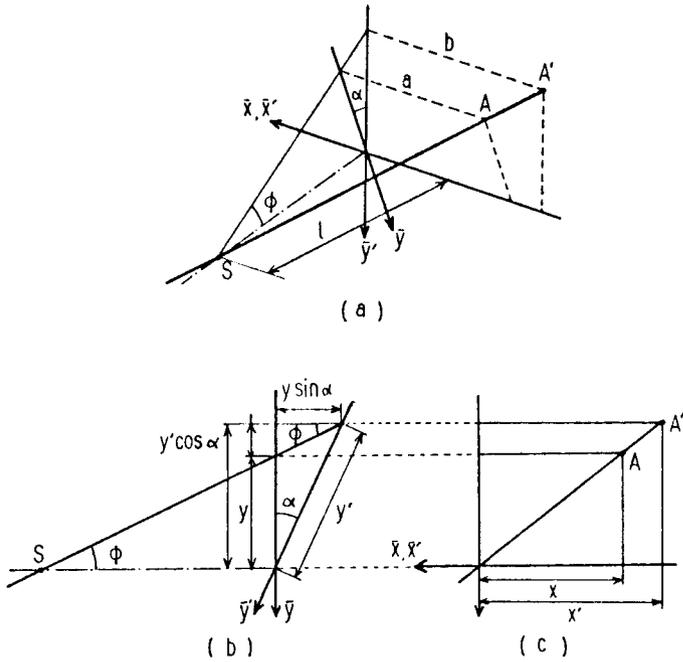


図 2.7 二点透視図と単点透視図の変換

$$y' \cos \alpha = y + y' \sin \alpha \tan \phi \quad (2.12)$$

式 (2.12) より、 y' は次式によって求められる。

$$y' = \frac{y \cos \phi}{\cos(\alpha + \phi)} \quad (2.13)$$

図 2.7(c) に示すように、 x y 平面において次式が成立する。

$$\frac{y' \cos \alpha}{y} = \frac{x'}{x} \quad (2.14)$$

式 (2.13), (2.14) より、 x' は次式によって求められる。

$$x' = \frac{x \cos \alpha \cos \phi}{\cos(\alpha + \phi)} \quad (2.15)$$

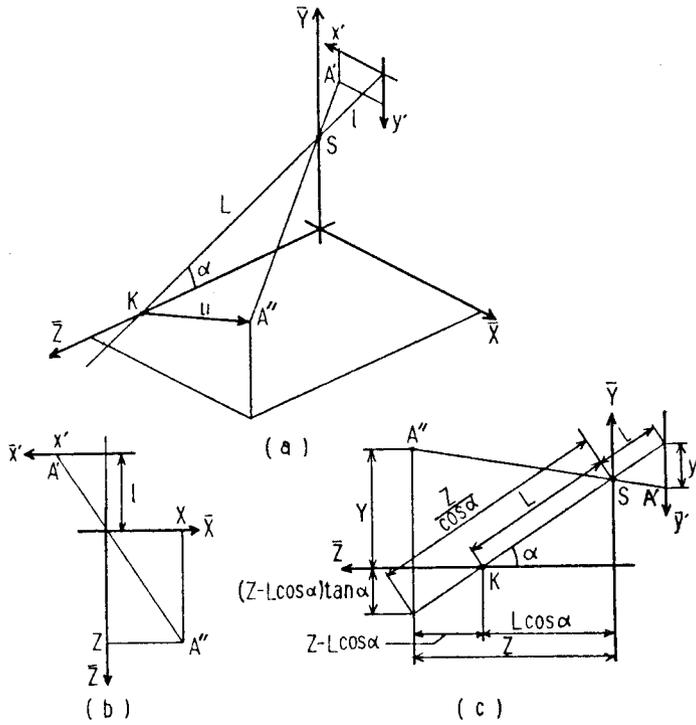


図 2.8 単点透視図と空間座標の関係

ここで、 ϕ は像座標における標点 A の y 座標成分における画角であり次式で求められる。

$$\phi = \tan^{-1} \frac{y'}{l} \quad (2.16)$$

次に単点透視図画面の座標 (x', y') と空間座標 (X, Y, Z) との関係式を導出する。単点透視図画面上の点 A' と空間内の点 A'' の関係を図 2.8(a) に示す。図 2.8(b) に示すように X, Z 平面において次式が成立する。

$$\frac{x'}{l \cos \alpha} = \frac{X}{Z} \quad (2.17)$$

式 (2.14) より、 X は次式によって求められる。

$$x = \frac{x'}{\ell \cos \alpha} Z \quad (2.18)$$

図 2.8 (c) に示すように、Y, Z 平面において次式が成立する。

$$\frac{y'}{\ell} = \frac{Y + (Z - \ell \cos \alpha) \tan \alpha}{Z / \cos \alpha} \quad (2.19)$$

式 (2.19) より、Y は次式によって求められる。

$$Y = \frac{y' Z}{\ell \cos \alpha} + (L \cos \alpha - Z) \tan \alpha \quad (2.20)$$

空間内のリンク長 ℓ_i が実測により既知であると仮定し、リンクの両端点の空間座標を $(X_{i-1}, Y_{i-1}, Z_{i-1})$, (X_i, Y_i, Z_i) とすると次式が成立する。

$$\ell_i = \sqrt{(X_i - X_{i-1})^2 + (Y_i - Y_{i-1})^2 + (Z_i - Z_{i-1})^2} \quad (2.21)$$

式 (2.21) に式 (2.18), (2.20) を代入し、 Z_i について解くと次式のように求まる。

$$Z_i = \frac{-b_i \pm \sqrt{b_i^2 - a_i c_i}}{a_i} \quad (2.22)$$

ここで

$$\left. \begin{aligned} a_i &= \frac{1}{\cos^2 \alpha} \left(\frac{x_i'^2 + y_i'^2}{\ell^2} - \frac{2y_i' \sin \alpha}{\ell} + 1 \right) \\ b_i &= Z_{i-1} \left(-\frac{x_i' x_{i-1}' + y_i' y_{i-1}'}{\ell^2 \cos^2 \alpha} + \frac{\sin \alpha}{\ell^2 \cos^2 \alpha} (y_i' + y_{i-1}') - \tan^2 \alpha - 1 \right) \\ c_i &= a_{i-1} Z_{i-1}^2 - \ell_i^2 \end{aligned} \right\} \quad (2.23)$$

ただし、リンクの最初の点は、図 2.8 (a) の基準点 K にあり、初期値として次式が成立しているものとする。

$$\left. \begin{aligned} x_o' &= y_o' = 0 \\ X_o &= Y_o = 0, \quad Z_o = L \cos \alpha \end{aligned} \right\} \quad (2.24)$$

L 及び ℓ は次のようにして求められる。撮影画面と基準点 K までの距離を実測により求め、その値を a とすると次式が定まる。

$$a = L + \ell \quad (2.25)$$

撮影レンズの焦点距離を f とすると次式が成立する。

$$\frac{1}{L} + \frac{1}{\ell} = \frac{1}{f} \quad (2.26)$$

式 (2.25), (2.26) より L 及び ℓ は次式のように求められる。

$$L = \frac{a + \sqrt{a^2 - 4fa}}{2} \quad (2.27)$$

$$l = \frac{a - \sqrt{a^2 - 4fa}}{2} \quad (2.28)$$

本方法においても、複号の判定をしなければならぬが、中心投影処理による方法を用いたことにより、簡単に行なうことができる。式(2.22)の複号の判定法について以下に述べる。本計測法

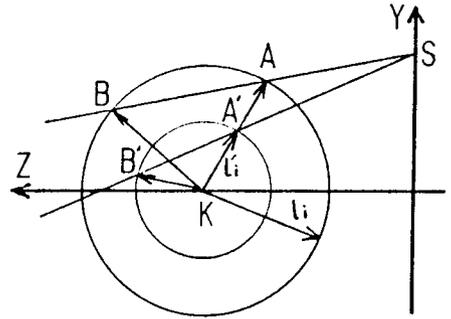


図 2.9 複号の判定法

は、半径がリンク l_i に等しい球を、ある直線でつらぬいた時の交点を求めることと幾何学的に等価である。複号による二つの解は、図 2.9 に示すように交点 A, B に相当する。リンク l_i 上に、さらに標点 l_i' を設けた場合、交点 A', B' に相当する複号による二つの解が得られる。交点 A, B, A', B' に相当する四個の解を比較すると、交点 A と A' の解においてリンクの方向が一致し、交点 A 及び A' における解が求める測定値であることが判定できる。この現象は、中心投影処理による測定法特有のものであり、前節で述べた平行投影処理による測定の場合、交点 A, A' と交点 B, B' の解において、リンクの方向が一致し、上述の判定法を利用することはできない。

2.4 誤差解析

中心投影処理による一方向写真計測法の測定誤差について検討する。写真計測法の場合、撮影によって得られる画像を用いた間接的な測定法であるため、多くのパラメータを使用している。これらのパラメータの測定誤差が、写真計測法の測定誤差の原因となる。写真計測を用いた運動計測では、一般にシネカメラによって撮影した複数枚の画像やスチルカメラを用い多重露光により撮影した画像を用いるが、共にカメラの向きや位置、基準点の位置、レンズの焦点距離等のパラメータは一定である。そのため、これらのパラメータの測定誤差は写真計測法の系統誤差となる。偶然誤差の原因としては、像座標における読取り誤差が考えられる。一般にパラメータの誤差とその結果による誤差の関係は次のように解析できる。

写真計測に用いる関数を次式のように表わす。

$$R = f(a_1, a_2, a_3, a_4 \dots a_n) \quad (2.29)$$

このとき、各パラメータ a_n の誤差 da_n による測定結果の誤差 dR は次式で示される。

$$dR = \frac{\partial R}{\partial a_1} da_1 + \frac{\partial R}{\partial a_2} da_2 + \dots + \frac{\partial R}{\partial a_n} da_n \quad (2.30)$$

ここで各偏微分係数は、各パラメータの微小変化を Δa_n とするとき、近似的に次式のように表わ

せる。

$$\frac{\partial R}{\partial a_n} \approx \frac{f(a_n + \Delta a_n) - f(a_n - \Delta a_n)}{\Delta 2a_n} \quad (2.31)$$

以上の式を用いて、中心投影処理による一方向写真計測法における誤差が解析できる。図 2.10 に示すような撮影条件において、標点が半径 300 mm の球面（中心は基準点 K）に存在すると仮定し、その時の誤差を球の中心から見て標点方向に加えて表示したものを図 2.11 (a), (b), (c) に示す。図より明らかなように、撮影レンズの主点を通る光線が球面と接する付近において誤差が生じている。特に Z 座標に関する誤差は、その傾向が激しく値も大きい。このような傾向は一方向撮影による計測法特有のものであり、平行投影処理による計測法の場合でも同様の分布状態になると考えられる。ここで用いた各パラメータの測定誤差 da_n の値は、像座標の読取誤差として x, y 座標共に 0.01 mm, レンズの焦点距離 0.01 mm, カメラの傾き角 0.2° , リンクの長さ 1 mm, 撮影距離 1 mm とした。これらの値は計測が実施される状態によって異なるが、次節の精度検定で行なった実験状態における値を用いている。

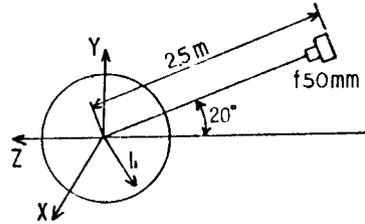


図 2.10 撮影条件

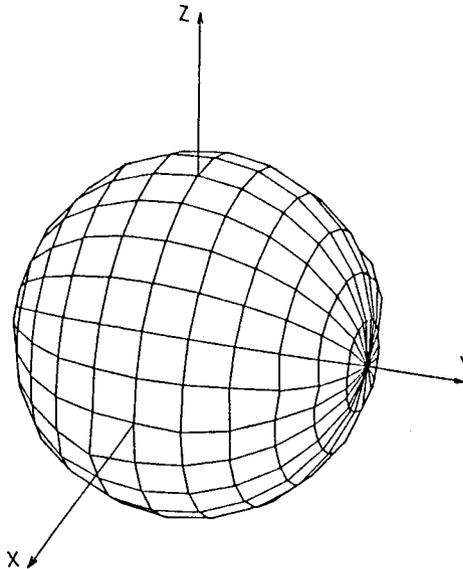


図 2.11 (a) X 座標に関する誤差 (誤差量 $\times 5$)

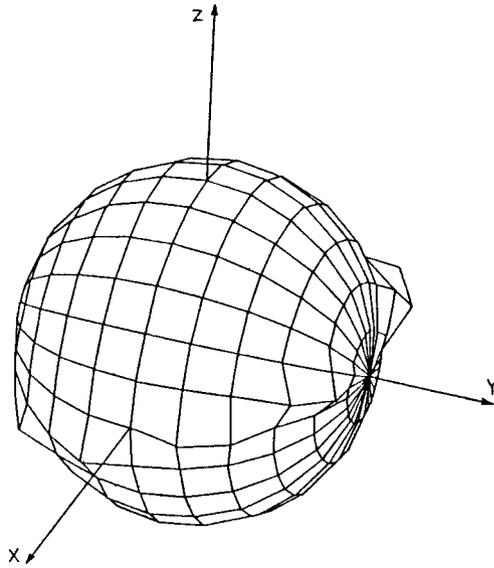


図 2.11 (b) Y座標に関する誤差 (誤差量×5)

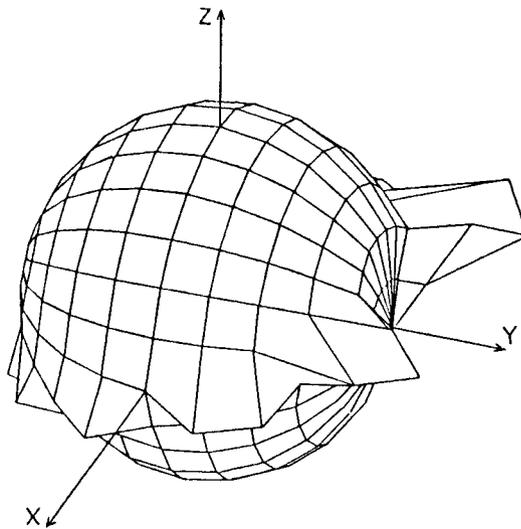


図 2.11 (c) Z座標に関する誤差 (誤差量×5)

2.5 精度検定

中心投影処理による一方向写真計測法によって測定した三次元座標値に関する精度、信頼性を実験により検定する。そのために、前もって空間内に任意な座標値が既知である標点を与えることができる装置を製作し、その装置によって与えられた座標値の標点を写真計測し、得られた測定値と座標値を比較した。

2.5.1 実験装置

空間内に任意の座標値を持つ標点を与えるために写真2.1に示すような回転台を製作した。回転台は図2.12に示すようにカルダン支持され、各軸まわりにパルスモータの駆動により約 $\pm 20^\circ$ の範囲内を回転する。各軸まわりの回転は互いに影響を受けないように、ワイヤロープ及び滑車により伝達している。

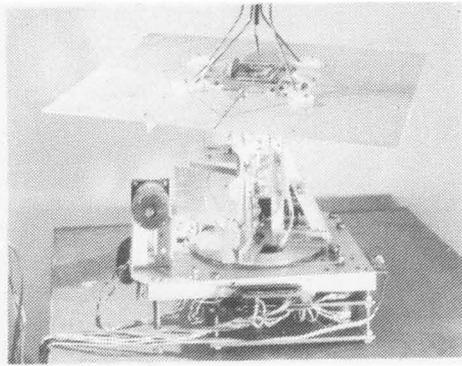


写真2.1 回転台

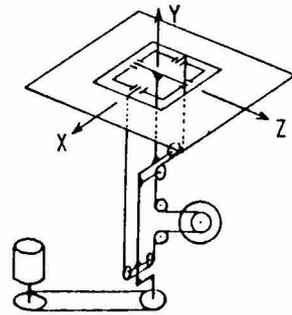


図2.12 回転台の構造

回転台を駆動するパルスモータは、パルスモータドライブ回路と制御回路によって駆動されている。図2.13に製作した制御回路とドライブ回路の構成を示す。制御回路は連続的な回転を行なうための発振器と、1ステップの回転を行なうためのスイッチと、これらの出力波形を整形するパルス整形回路より構成されている。写真2.2に制御装置を示す。回転台の各軸まわりの回転角度はパルスモータに与えた駆動パルス数によって測定することができる。しかし滑車とワイヤロープ間の滑りにより正確な回転量が得られない恐れがあるため、各回転軸に取付けたポテンシオメータの電圧を測定し回転角度を求めた。ポテンシオメータから出力される電圧を測定し、その値より角度を求めるために、マイクロプロ

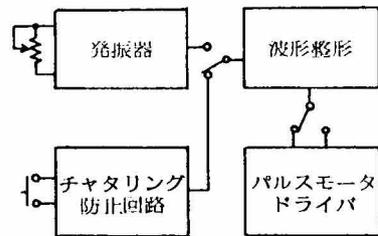


図2.13 パルスモータ制御回路のブロック図

セッサを用いた測定装置を製作した。写真 2.8 に角度測定装置を示し、図 2.14 にその構成を示す。本装置は、A/D変換器を通してポテンシヨメータからの電圧を入力し、平均化の後あらかじめ実測により求めておいた電圧・角度変換テーブルを利用し、角度データを求め表示を行なう。

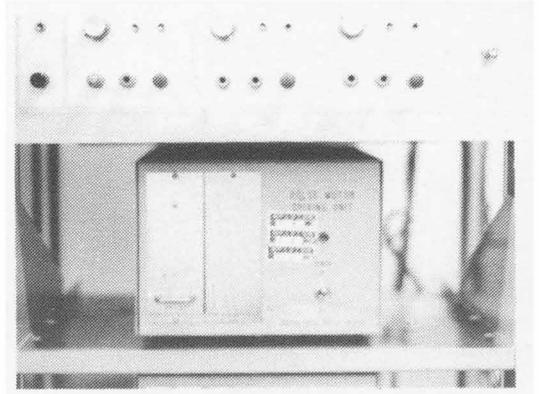


写真 2.2 パルスモータ制御回路

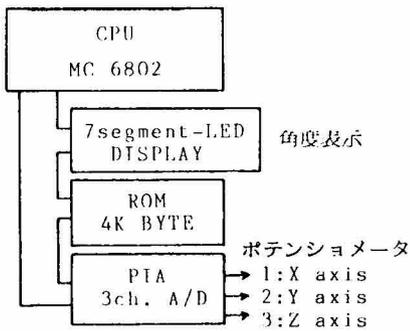


図 2.14 角度測定装置の構成

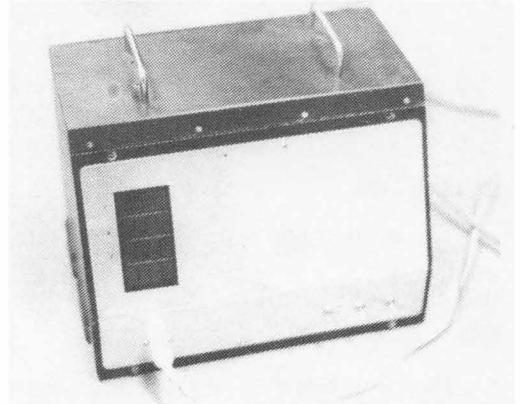


写真 2.3 角度測定装置

回転台の各軸の回転角度が求まると、台上に乗せた物体の三次元座標を求めることができる。回転台の X, Y, Z 軸の回転角度を θ, ϕ, ψ とすると、台上の任意の点の座標 (x'', y'', z'') (台座標に関する値) の基準静止座標系から見た時の座標 (X, Y, Z) は次式で求められる。

$$\begin{bmatrix} Z \\ X \\ Y \end{bmatrix} = \mathbf{A} \begin{bmatrix} z'' \\ x'' \\ y'' \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L \cos \alpha \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.32)$$

ただし

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} C\phi C\psi & S\theta S\phi S\psi - S\psi C\theta & S\phi C\theta C\psi + S\psi S\theta \\ S\psi C\phi & S\theta S\phi S\psi + C\psi C\theta & S\phi S\psi C\phi + S\theta C\psi \\ -S\phi & C\phi S\theta & C\phi C\theta \end{bmatrix}$$

ここで $S = \sin$, $C = \cos$ である。

2.5.2 実験結果

回転台に四種類の姿勢をとらせて、それらを中心投影処理による一方向写真計測法を用い計測を

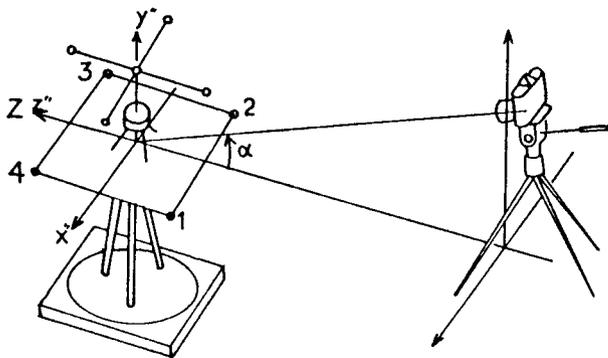


図2.15 撮影状態

行なった。撮影状態を図2.15に示す。回転台上の標点はLEDを点灯したものとし、撮影条件を、以下のように定めた。

撮影距離 $L + \ell$: 2687 mm
 レンズの焦点距離 f : 54 mm
 カメラの傾き角 α : 12 deg.

撮影フィルムは、85 mm判を用い、四切の大きさに引伸した画像を測尺し、標点の像座標を求めた。回転台の回転角度と、それによって与えた標点の三次元座標を表2.1に示し、写真計測による測定結果と測定誤差を表2.2、表2.3に示す。

表2.1 回転台によって与えた標点の座標

		X (mm)	Y (mm)	Z (mm)
NO.1	1	252.00	0.00	2227.37
	2	-252.00	0.00	2227.37
	3	-252.00	0.00	2731.37
	4	252.00	0.00	2731.37
NO.2	1	149.15	24.24	2156.71
	2	-323.44	24.24	2331.71
	3	-149.15	-24.24	2802.12
	4	323.44	-24.24	2627.02
NO.3	1	250.14	-69.49	2235.22
	2	-242.32	36.70	2220.64
	3	-250.14	69.49	2723.51
	4	242.32	-36.70	2728.09
NO.4	1	255.01	-36.91	2233.17
	2	-247.20	4.12	2222.69
	3	-255.01	36.91	2725.56
	4	247.20	-4.12	2376.04
angle of rotation (deg.)				
NO.1		0.0	0.0	0.0
NO.2		5.5	20.0	0.0
NO.3		-3.7	-0.8	-12.1
NO.4		-3.7	-0.8	-4.6

表 2.2 測定結果

		X (mm)	Y (mm)	Z (mm)
NO.1	1	254.78	-0.94	2330.18
	2	-249.10	18.77	2180.43
	3	-251.79	8.73	2684.32
	4	251.85	-0.12	2701.09
NO.2	1	146.22	25.86	2155.39
	2	-330.30	24.09	2319.52
	3	-149.93	-28.27	2787.21
	4	322.14	-28.41	2610.68
NO.3	1	252.67	-72.61	2138.77
	2	-246.17	34.75	2224.50
	3	-252.44	55.74	2728.02
	4	240.89	-47.37	2729.67
NO.4	1	261.25	-38.87	2240.11
	2	-244.96	13.55	2204.54
	3	-256.33	31.50	2708.09
	4	246.63	1.12	2696.99
reference point		0.00	0.00	2479.37

表 2.3 測定誤差

		X (mm)	Y (mm)	Z (mm)
NO.1	1	-2.78	-0.94	-2.81
	2	-2.90	18.77	46.94
	3	-0.21	8.73	47.05
	4	0.15	-0.12	30.28
NO.2	1	2.93	-1.62	1.32
	2	6.86	0.15	12.19
	3	0.78	4.03	14.91
	4	1.30	4.17	16.34
NO.3	1	-2.53	3.12	3.55
	2	3.85	1.95	-3.86
	3	2.30	13.75	-4.51
	4	1.43	10.67	8.42
NO.4	1	-6.24	1.96	-6.96
	2	-2.24	-9.43	18.15
	3	1.32	5.41	17.47
	4	0.57	-5.33	39.05
mean		0.29	3.46	14.85
max.		6.86	18.77	47.05

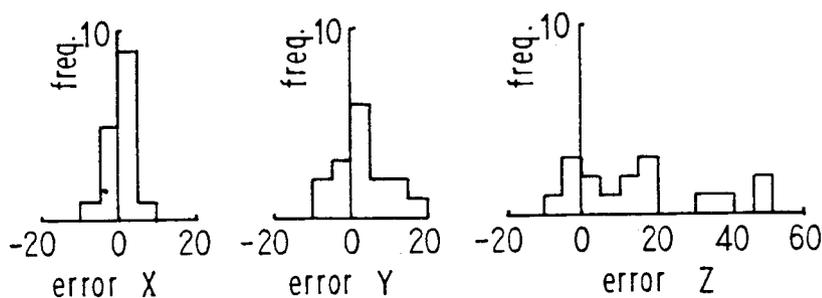


図 2.16 測定誤差の度数分布

表 2.1, 2.2, 2.3, において $\theta_1, 2, 3, 4$ は四つの姿勢を表わしている。姿勢 θ_1 の時の点 2, 3, 4 及び θ_4 の時の点 4 の Z 座標において、特に大きな測定誤差がみられる。標点の位置は、前節で述べたような特に測定精度が低下する状態ではないため、その原因は像座標の読取り誤差による計測値の偶然誤差や、他のパラメータの測定誤差による系統誤差であると考えられる。系統誤差は測定値の平均と真の値との差であると考えられるから、測定誤差の平均値が系統誤差を表わす。表 2.3 より誤差の平均値すなわち系統誤差は、X, Y, Z 座標値の順に大きくなっている。偶然誤差は測定値のばらつき（精密さ）であるから、測定誤差の分布によって偶然誤差を検討することができる。図 2.16 に測定誤差の度数分布を示す。図より明らかなように、偶然誤差においても、X, Y, Z 座標の順に大きくなっているのが見られる。

2.6 結 言

本章では、従来より用いられている平行投影処理による一方向写真計測法の撮影条件を明らかにした。そして写真撮影による三次元・二次元変換と理論的に等しいと考えられる中心投影を用いた一方向写真計測法を開発した。さらに中心投影処理による一方向写真計測法の測定精度について、三次元空間中に任意の姿勢を発生できるような検定用回転台を製作し、実験によりその測定能力を評価した。本章で得られた結論は以下のとおりである。

- (1) 撮影によって得られる画像を、平行投影による画像であるとみなすための条件を、被写体の撮影方向への動きによる画像の変化が読取り誤差による画像における被写体の相対誤差よりも小さいことであるとし、平行投影とみなすための最小撮影距離を求める式を導出した。
- (2) 一方向写真計測法において物体の撮影方向への移動は、物体の撮影方向への回転によって生じると考え、物体の運動範囲と最小撮影距離の関係を明らかにした。
- (3) 写真撮影による三次元・二次元変換と理論的に等しいと考えられる中心投影を用い、三次元座標と像座標の関係式を幾何学的に求め、中心投影処理による写真計測法を開発した。
- (4) 中心投影処理による写真計測法の誤差解析を行ない、被写体の姿勢による誤差の分布を求めた

結果、その分布に特徴的な傾向がみられた。

- (5) 中心投影処理による写真計測法の測定能力を評価するために、空間内で、任意の姿勢を発生できるような検定装置を用い、検定装置によって与えた標点の座標と写真計測によって得られた測定値を比較し、測定値の各座標成分の傾向を明らかにした。

第3章 鏡を用いた一方向写真計測法による三次元座標の測定

3.1 緒言

一方向からの撮影画像を用いた三次元計測法は、多方向からの撮影画像を用いる計測法と比較して、撮影に要する処理や画像データの処理が容易であるという利点を持っている。前章では一方向からの撮影画像を用いた計測法の測定能力の限界を明らかにするため、中心投影処理による計測法を開発し、測定能力の評価を行なった。その結果、被写体の姿勢によって大きな測定誤差が現われることや、この誤差が一方向からの撮影画像を用いた計測法固有のものであり、補正等の手段を用いても除去できないことが明らかになった。さらに、この計測法では被写体の形状をあらかじめ計測しておかねばならないことや、被写体の基準となる任意の一点の座標が既知でなければならない等の条件が存在した。一方、これらの問題点を解決する方法として測定精度が高く、上述のような条件を必要としない計測法として多方向からの撮影画像を用いた計測法がある。平面鏡を用いれば、多方向からの画像を一方向からの撮影画像に写し込むことが可能であり、一方向からの撮影による簡易性と多方向からの画像を用いた高い測定精度の両方を兼ね備えた計測を行なうことができる。しかし多方向写真計測法において撮影される画像と等しい画像を、鏡を用いることによって一方向からの撮影で得るためには、鏡の向きや位置等に関して新たに制限条件が生じる恐れがある。そのため、鏡を用いた一方向写真計測法は、既存の多方向写真計測法を単に鏡を用いて一方向からの撮影で実現するのではなく、新たな考えに基づいた計測法であるべきであると考えられる。本章では上述の考えに基づき開発を行なった鏡を用いた一方向写真計測法について述べる。さらに開発した計測法の誤差解析と実験による精度検定を行なう。また、放物体及び空間リンク機構の計測を行ない、本方法の測定能力を評価する。

3.2 鏡を用いた一方向写真計測法の開発

従来より鏡を用いた一方向写真計測法は、人体の動作の三次元分析等に用いられていた。³⁹⁾ 従来の方法では図3.1に示すように三枚の鏡が用いられており、それぞれの鏡はX軸、Y軸、Z軸方向からの被写体の撮影像が一方向からの撮影画像内に鏡像として得られるように設置されている。これらの鏡像と直接撮影された被写体の像の中から適当に二つの像を選び、それぞれの像の対応する標点の像座標を測定することにより、標点の三次元座標を簡単に求めることができる。この計測法は本質的に、直交多方向からの写真計測法と等しいと考えられ、以下のような欠点があげられる。

1. 被写体の動作中の全ての鏡像を得るために、動作範囲に応じた大きさの鏡が必要である。

2. 各鏡像が各軸方向からの撮影像となるように、鏡を精度良く設置しなければならない。
3. 撮影方向が任意でなく、被写体の運動を計測に最適な画像として捕えることができない。
4. 一枚の画像に四方向からの画像を写し込むため、それぞれの画像が小さくなり像座標の読取り精度が悪くなる。

本研究では以上の欠点を改善し、鏡の位置及び向きが任意に設定できる計測法の開発を目的としている。

3.2.1 鏡を用いた一方向写真計測法

鏡を用いた一方向写真計測法の原理図を図3.2に示す。図3.2において

V は、測定対象である被写体上の標点の位置ベクトル

F_1 は、撮影レンズの物空間主点の位置ベクトル

F_2 は、鏡によって生じる F_1 の虚像点の位置ベクトル

G は、鏡面上の任意の点の位置ベクトル

\hat{n} は、鏡面の単位法線ベクトル

\hat{u}_1 は、撮影レンズの物空間主点から物体の標点へ向かう単位ベクトル

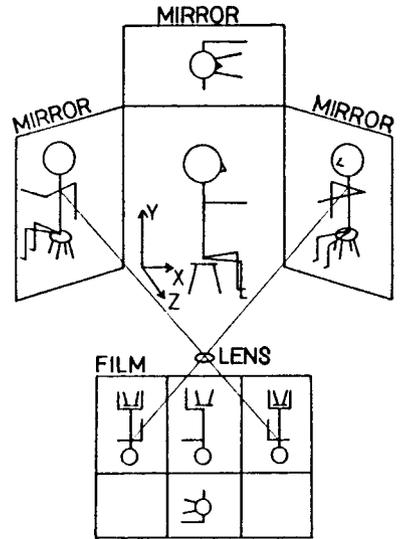


図3.1 従来の鏡を用いた一方向写真計測法

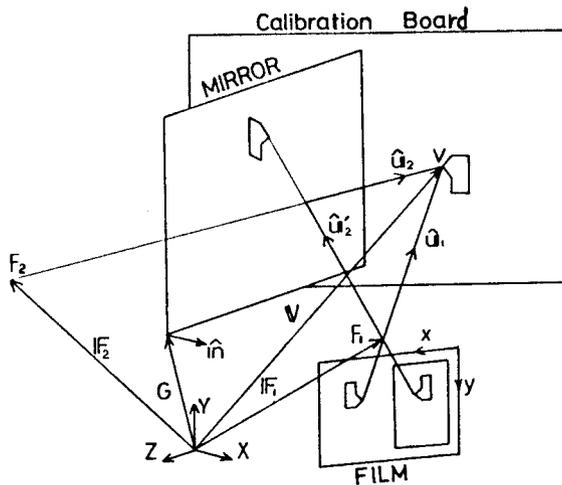


図3.2 鏡を用いた一方向写真計測法の原理図

\hat{u}_2 は、撮影レンズの物空間主点から物体上の標点の鏡によって生じる虚像点へ向かう単位ベクトル
 \hat{u}_2 は、 \hat{u}_2 の鏡によって反射した単位ベクトルである。

標点の位置ベクトル \mathbf{V} は、次式のように \hat{u}_1 、 \hat{u}_2 によって示される。

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{V}_1 &= \mathbf{F}_1 - a_1 \hat{u}_1 \\ \mathbf{V}_2 &= \mathbf{F}_2 + a_2 \hat{u}_2 \end{aligned} \right\} \quad (3.1)$$

\hat{u}_1 、 \hat{u}_2 が測定誤差を含むため、式(3.1)で示される直線は空間内で食い違う。そのために \mathbf{V}_1 と \mathbf{V}_2 は一致せず、式(3.1)を解いて a_1 、 a_2 を求めることはできない。そこで \mathbf{V}_1 、 \mathbf{V}_2 の終点間距離が最小になる a_1 、 a_2 を定める。終点間距離を自乗したものを H とすると、 H は次式で示される。

$$H = a_1^2 - 2a_1 \hat{u}_1 \cdot (\mathbf{F}_2 - \mathbf{F}_1) - 2a_1 a_2 \hat{u}_1 \cdot \hat{u}_2 + 2a_2 \hat{u}_2 \cdot (\mathbf{F}_2 - \mathbf{F}_1) + (\mathbf{F}_2 - \mathbf{F}_1)^2 + a_2^2 \quad (3.2)$$

故に H は次式を満たす場合に最小となる。

$$\frac{\partial H}{\partial a_1} = a_1 - \hat{u}_1 \cdot (\mathbf{F}_2 - \mathbf{F}_1) - a_2 \hat{u}_1 \cdot \hat{u}_2 = 0 \quad (3.3)$$

$$\frac{\partial H}{\partial a_2} = a_2 + \hat{u}_2 \cdot (\mathbf{F}_2 - \mathbf{F}_1) - a_1 \hat{u}_1 \cdot \hat{u}_2 = 0 \quad (3.4)$$

式(3.3)、(3.4)より a_1 、 a_2 は次式のように求められる。

$$a_1 = \frac{\hat{u}_1 \cdot (\mathbf{F}_2 - \mathbf{F}_1) - [\hat{u}_2 \cdot (\mathbf{F}_2 - \mathbf{F}_1)] (\hat{u}_1 \cdot \hat{u}_2)}{1 - (\hat{u}_1 \cdot \hat{u}_2)^2} \quad (3.5)$$

$$a_2 = \frac{[\hat{u}_1 \cdot (\mathbf{F}_2 - \mathbf{F}_1)] (\hat{u}_1 \cdot \hat{u}_2) - \hat{u}_2 \cdot (\mathbf{F}_2 - \mathbf{F}_1)}{1 - (\hat{u}_1 \cdot \hat{u}_2)^2} \quad (3.6)$$

標点の位置ベクトル \mathbf{V} は、式(3.5)、(3.6)より得た a_1 、 a_2 を式(3.1)に代入し、次式で求められる。

$$\mathbf{V} = \frac{\mathbf{V}_1 + \mathbf{V}_2}{2} = \frac{\mathbf{F}_1 + \mathbf{F}_2 + a_1 \hat{u}_1 + a_2 \hat{u}_2}{2} \quad (3.7)$$

ここで \mathbf{F}_1 は実測により、また \hat{u}_1 は標点 \mathbf{V} の像座標を測定することによって求められる。 \mathbf{F}_2 、 \hat{u}_2 は、鏡の位置と向きを定めることにより求めることができる。

3.2.2 鏡の向きの測定

鏡の向きを画像情報より求める手法について示し、鏡の位置と向きの情報を用いて、鏡によって生じる撮影レンズの物空間主点(位置ベクトル \mathbf{F}_1)の虚像点の位置ベクトル \mathbf{F}_2 と、 \hat{u}_2 が鏡によって反射したベクトル \hat{u}_2 を求める。

運動物体の鏡像がうまく撮影できるように鏡の向きを調整するときは、その度毎に鏡面の位置と向きを測定しなければならず、撮影時における作業手順が非常に複雑となる。そこで写真に撮影さ

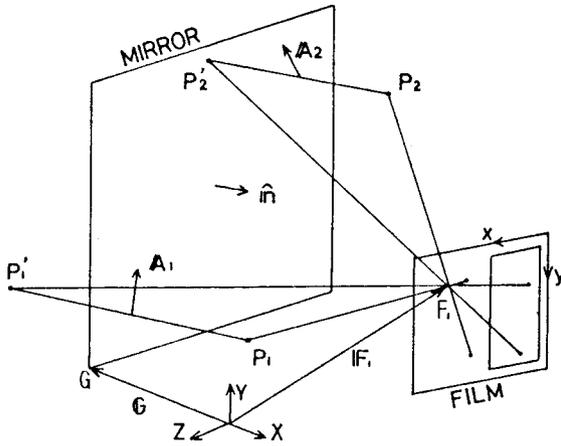


図 3.3 鏡面の法線ベクトルの測定

れている情報より、鏡面の法線ベクトルを求めることにする。

図 3.3 に示すように、標点 P_1, P_2 が鏡による虚像点 P_1', P_2' を持つとすると、撮影レンズの物空間主点から、それぞれの点へ向かう単位ベクトル $\hat{P}_1, \hat{P}_2, \hat{P}_1', \hat{P}_2'$ が撮影画像より測定できる。 $\overline{P_1 P_2'}$ は鏡面に垂直であるから、 \hat{P}_1, \hat{P}_1' で定まる平面は鏡面に垂直である。この平面に垂直なベクトルは次式で求められる。

$$A_1 = \hat{P}_1 \times \hat{P}_1' \quad (3.8)$$

同様に、 \hat{P}_2, \hat{P}_2' によって定まる平面に垂直なベクトル A_2 が求められる。 A_1, A_2 は鏡面に平行なベクトルであるから、外積をとることにより鏡面の法線ベクトル \hat{n} が次式で求められる。

$$\hat{n} = \frac{A_1 \times A_2}{|A_1 \times A_2|} \quad (3.9)$$

ただし、 \hat{n} は鏡面の表面方向を向くように、次の条件を満たす必要がある。

$$(\mathbf{G} - \mathbf{F}) \cdot \hat{n} < 0 \quad (3.10)$$

次に、鏡面上の任意の点 G の位置ベクトル \mathbf{G} と鏡面の法線ベクトル \hat{n} が既知であると仮定し、鏡によって生じる撮影レンズの物空間主点（位置ベクトル \mathbf{F}_1 ）の虚像点の位置ベクトル \mathbf{F}_2 を求める。 \mathbf{F}_2 は、図 3.4 に示すように、ベクトル $\overrightarrow{GF_1}$ の鏡像変換によるベクトル $\overrightarrow{GF_2}$ と、鏡面上の任意の点 G の位置ベクトル \mathbf{G} の和として次式によって求められる。⁴⁰⁾

$$\mathbf{F}_2 = \mathbf{G} + M(\mathbf{F}_1 - \mathbf{G}) \quad (3.11)$$

ここで M は鏡像変換の行列であり、次式で求められる。

$$M = I - 2 \hat{n} \hat{n}^T \quad (3.12)$$

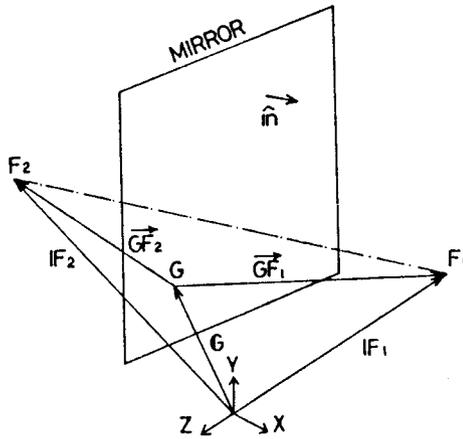


図 3.4 位置ベクトル F_2 の測定

ただし I は単位行列である。撮影レンズの物空間主点から、鏡による標点の虚像点へ向かう単位ベクトル \hat{u}_2 を同様に鏡像変換すれば、 \hat{u}_2 が次式で求められる。

$$\hat{u}_2 = M\hat{u}'_2 \quad (3.13)$$

3.2.3 像座標入力 of 補正

撮影画像にひずみを与える原因として、印画紙やフィルムの伸縮及び平面性によるひずみが考えられる。一般のフィルムの伸縮は、現像の後に乾燥するまでに 0.1% ~ 0.2% 縮むが、特に高精度な計測でないかぎり無視できる値である。しかもフィルムベースは材料を熱溶解させて薄層にしながらロールに巻き取られているから巻き取り方向に結晶が並びやすく、伸縮の方向に関し異方性を生じ、以下に示す補正法によりある程度補正が可能である。一般の写真用印画紙は、水分や湿度の影響によりかなりの伸縮を生じ、伸縮量が繊維の方向によって不規則であるため、計測に用いるには不適當である。したがって、印画紙上の画像を用いて測定を行なうには、測定用として供給されている安定印画紙あるいは防水印画紙を用いる必要がある。本研究では、引伸機によりフィルムをタブレット上に拡大投影し座標データを入力することにより印画紙の伸縮による誤差の混入を排除した。

その他の誤差の原因としてレンズ系の収差によるものが考えられる。被写体の運動を被写界内に包括し、狭い室内においても撮影を可能にするために、広角系の撮影レンズを使用しなければならない場合、標準及び望遠系レンズと比較して撮影画像のゆがみが大きくなる。この原因としてレンズの歪曲収差が考えられる。他のレンズの収差（色収差，球面収差，非点収差，コマ収差，湾曲収差）は、映像に錯乱を生じさせ、鮮明度を悪くするものであり、形状に対して影響を及ぼすもので

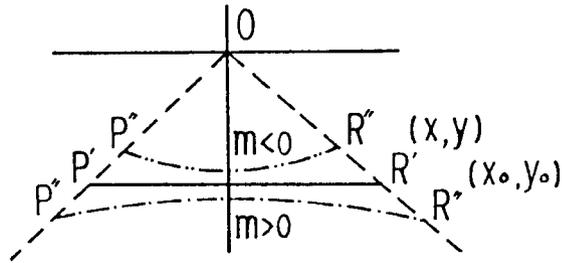


図3.5 歪曲収差による像のひずみ

はない。また、レンズの絞りを小さくすることにより、これらの影響を減少させることが可能である。

歪曲収差による像面の状態を図3.5に示す。図3.5において、点0は光軸と像面との交点であり、空間内の水平直線PRの像をP'R'とする。直線PRが歪曲収差によってP''R''となっているとするとR'(x₀, y₀)とR''(x, y)の関係は次式で示される。

$$\sqrt{(x-x_0)^2+(y-y_0)^2}=m(x_0^2+y_0^2)^{\frac{3}{2}} \quad (3.14)$$

式(3.14)は、 $x_0 = \text{const.}$ または $y_0 = \text{const.}$ とおけば直線 $x = x_0$ または $y = y_0$ の像の方程式であり、 m の符号により直線が中心の方または外方へ曲った曲線となる。従って物体が正方形であれば、その像は糸巻形または樽形になる。

本研究では、上述のような画像のひずみを補正するために、多項式マッピングの手法を用いた。⁴²⁾
補正式は以下に示すように二次の多項式を用いた。

$$\bar{X}=b_1+b_2x+b_3y+b_4xy+b_5x^2+b_6y^2 \quad (3.15)$$

$$\bar{Y}=c_1+c_2x+c_3y+c_4xy+c_5x^2+c_6y^2 \quad (3.16)$$

ここで (\bar{X}, \bar{Y}) は図3.6に示すように、較正点 (X, Y) の補正式による三次元座標値であり、較

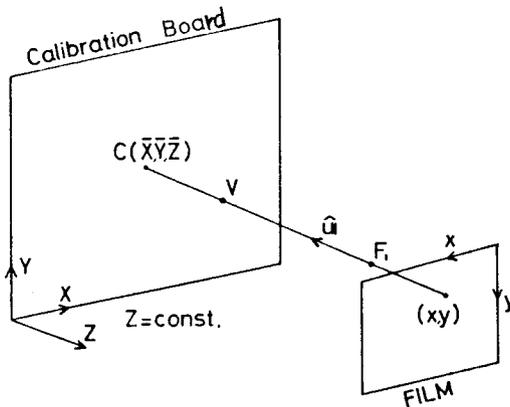


図3.6 補正值と像座標値の関係

正点は $Z = \text{const.}$ の平面上に設定されている。座標 (x, y) は較正点に対応する像座標値である。式 (3.15) (3.16) の 12 個の未知の係数 $(b_1 \sim b_6, c_1 \sim c_6)$ は、 $n (\leq 6)$ 個の較正点 $(X_1, Y_1) \sim (X_n, Y_n)$ と、相当するフィルム座標 $(x_1, y_1) \sim (x_n, y_n)$ を用いて、真の値 (較正点の三次元座標値) と近似値 (補正式による計算値) との誤差の自乗和を最小にすることにより求められる。X 座標について $b_1 \sim b_6$ を求める。X 座標に関する誤差の自乗和 D_x は次式によって示される。

$$D_x = \sum_{i=1}^n (\bar{X}_i - X_i)^2 \quad (3.17)$$

D_x は、次の 6 個の式を満たすことにより最小化できる。

$$\frac{\partial D_x}{\partial b_j} = \frac{\partial}{\partial b_j} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X}_i)^2 = 0, \quad j=1 \dots 6 \quad (3.18)$$

これらの方程式は 6 個の未知の係数値に関して線形であり、次式が得られる。

$$\begin{bmatrix} n & S_x & S_y & S_{xy} & S_x^2 & S_y^2 \\ & S_y & S_{xy} & S_x^2 y & S_x^3 & S_{xy} \\ & & S_y^2 & S_{xy}^2 & S_x^2 y & S_y^3 \\ & & & S_x^2 y^2 & S_x^3 y & S_{xy}^3 \\ & & & & S_x^4 & S_x^2 y^2 \\ \text{Symmetric} & & & & & S_y^4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ b_4 \\ b_5 \\ b_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S X \\ S_x X \\ S_y X \\ S_{xy} X \\ S_x^2 X \\ S_y^2 X \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

ここで

$$S_x = \sum_{i=1}^n x_i, \quad S_x^2 y = \sum_{i=1}^n x_i^2 \cdot y_i \text{ etc}$$

式 (3.19) を解いて $b_1 \sim b_6$ が求められる。同様にして $c_1 \sim c_6$ も求められる。

撮影レンズの物空間主点 F_1 から標点 V へ向かう単位ベクトル \hat{u} は、図 3.6 に示すように、主点の位置ベクトル F_1 と式 (3.15), (3.16) によって定まるキャリブレーション平面上的位置ベクトル $C(\bar{X}, \bar{Y}, \bar{Z})$, ($\bar{Z} = \text{const.}$) により次式で求められる。

$$\hat{u} = (C - F_1) / |C - F_1| \quad (3.20)$$

3.3 運動諸量の計算法

計測によって得られた三次元座標値のデータは、フィルタリング処理が施された後、スプラインによって補間され、その値を用いて速度、加速度を計算する。本節では、フィルタ処理及び、スプライン補間による速度、加速度の算出法について述べる。

3.3.1 測定値のデータ処理

写真計測法によって得られた標点の三次元座標値には、像座標の読取り誤差による測定誤差が含

まれている。本研究では、像座標を読取るためにフィルムを引伸機によってタブレット上に投影し計算機に入力しているため、以下のような理由により読取り誤差が発生する。

- (1) タブレットのペン先は有限の大きさを持ち、正確に標点を指示することができない。
- (2) 写真そのものの不鮮明さによって標点が不明瞭になっているとき勘に頼って標点を指示する。

特に(1)は被写体の運動速度が大きくなったり、照明が不十分な場合に起こる。このような読取り誤差は、偶然誤差であり、図3.7のような形でデータに混入する。サンプリング周期を T とすると最も多く存在する誤差の周波数成分は、 $2T$ を一周期とする成分であると考えられる。したがって、変位データの周波数の主成分が、 $2/T$ より十分小さい場合には、 $2/T \sim 1/T$ の範囲の周波数成分を遮断する低域通過フィルタを用いることにより、変位データから偶然誤差を除去することができる。数値微分により速度や加速度を求める場合、変位データにこのような低域通過フィルタをかけることは不可欠である。Pezzack⁴³⁾らは、変位データだけでなく数値微分して得られた結果にも低域通過フィルタをかけるると良い結果が得られると主張している。すなわち、微分によって高周波成分は周波数に比例して増大するため、高周波成分の多い誤差が拡大される。そのため、あらためて低域通過フィルタをかけることは効果があると考えられる。

本研究では次式のようなニア・フィルタ型の低域通過フィルタを利用する。⁴⁴⁾

$$h_k = \frac{f_k + 2f_{k+1} + 3f_{k+2} + 3f_{k+3} + 2f_{k+4} + f_{k+5}}{12} \quad (3.21)$$

このフィルタの周波数特性(パワー・スペクトラム)は次のようなノイズを表わす交番入力について論じられる。

$$f_k = e^{i\omega k} \quad (3.22)$$

$$\omega = 2\pi\sigma \quad (3.23)$$

ここで σ は図3.8に示すように、サンプリング周期と関係した周波数であり、サンプリング間隔中に何個の波が含まれているかを示す値である。式(3.22)を式(3.21)に代入し次式が得られる。

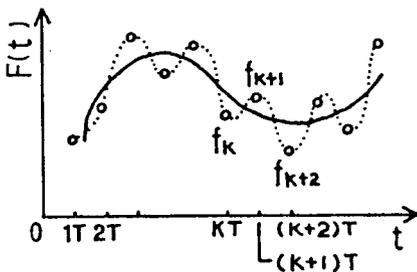


図 3.7 読取り誤差を含む変位データ

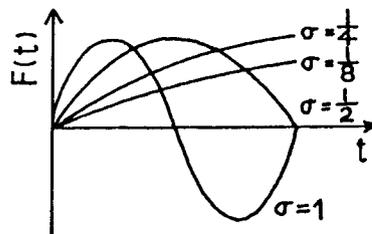


図 3.8 サンプリング間隔と σ の関係

$$h_k = e^{i\omega k} \left\{ \frac{1}{3} (1 + e^{i\omega} + e^{2i\omega}) \right\} \left\{ \frac{1}{4} (1 + e^{i\omega} + e^{2i\omega} + e^{3i\omega}) \right\} \quad (3.24)$$

故に

$$|h_k|^2 = \frac{1}{12} (1 + 2\cos \omega)^2 \left\{ \frac{\sin 2\omega}{\sin(\omega/2)} \right\} \quad (3.25)$$

式(3.25)を図示すると図3.9のようになり、高周波成分の減衰の良さがわかる。

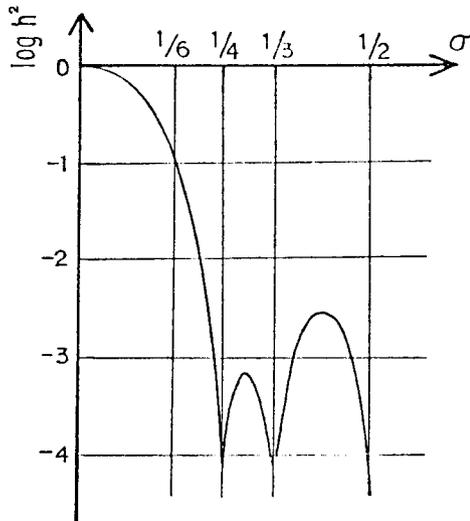


図3.9 フィルタの周波数特性

3.3.2 速度，加速度の計算法

計測によって得られた物体の三次元座標値は、時間的にほぼ等間隔であるが連続ではないので、速度、加速度を求めるために補間する必要がある。補間とは既知の一群のデータ点から曲線を定義することであり、多項式による補間を用いれば、すべての既知の点を通る曲線を創成することも可能である。一方、与えられるデータ点がある未知の真の値に対する近似を表わす場合には、創成曲線は、データの正しい傾向を表現していることが要求される。そのため補間に用いる多項式の設定はデータがつくられる物理現象の知識をもとにして行なわれねばならない。写真計測法は、人間等の生物を対象として用いられることが多い。そのため運動は滑らかで速度や加速度は連続であり、補間に用いる多項式は、この点に留意して定めねばならない。本研究では、ハラメトリックスプラインによる補間を採用した。^{45)~47)}

スプラインとは薄板のことであり、これがあらかじめ決められた点を通るように曲げられる時、薄板は内部ひずみエネルギーが最小でかつ与えられた点を通るように曲がろうとする。この時の曲線は三次関数で表わされる。またこの曲線は各点において位置、傾き、曲率が連続でなければならない。以下にこの曲線を表わすスプライン関数の導出を行なう。

図 3.10 に示すように、2 点間におけるスプライン関数は、位置ベクトル \mathbf{A} 及び \mathbf{B} で定まる点 A 及び点 B を通り、各点におけるベクトル \mathbf{t}_A 、 \mathbf{t}_B を接線ベクトルとする三次関数として以下のように表わすことができる。

$$\mathbf{P}(u) = \mathbf{R}_0 + \mathbf{R}_1 u - \mathbf{R}_2 u^2 + \mathbf{R}_3 u^3 \quad (3.26)$$

ここで u は $0 \leq u \leq 1$ の無次元のパラメータであり、関数 $\mathbf{P}(u)$ は以下の境界条件を満たさねばならない。

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{P}(0) &= \mathbf{A}, \quad \mathbf{P}(1) = \mathbf{B} \\ \left. \begin{aligned} \frac{d\mathbf{P}}{du} \Big|_{u=0} &= \mathbf{t}_A \\ \frac{d\mathbf{P}}{du} \Big|_{u=1} &= \mathbf{t}_B \end{aligned} \right\} \quad (3.27) \end{aligned} \right\}$$

式 (3.25) (3.26) より次式が成立する。

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{R}_0 &= \mathbf{A}, \quad \mathbf{R}_1 = \mathbf{t}_A \\ \mathbf{R}_2 &= 3(\mathbf{B} - \mathbf{A}) - 2\mathbf{t}_A - \mathbf{t}_B \\ \mathbf{R}_3 &= 2(\mathbf{A} - \mathbf{B}) + \mathbf{t}_A + \mathbf{t}_B \end{aligned} \right\} \quad (3.28)$$

以上より $\mathbf{P}(u)$ は以下のように求められる。

$$\mathbf{P}(u) = u^3 \{2(\mathbf{A} - \mathbf{B}) + \mathbf{t}_A + \mathbf{t}_B\} + u^2 \{3(\mathbf{B} - \mathbf{A}) - 2\mathbf{t}_A - \mathbf{t}_B\} + u\mathbf{t}_A + \mathbf{A} \quad (3.29)$$

式 (3.29) を図 3.11 に示すように n 個の点を持つ $(n-1)$ 個の区間について適用する。

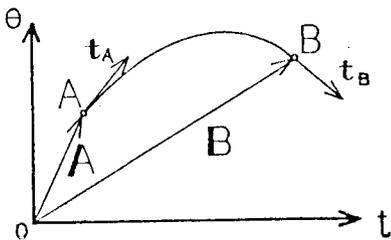


図 3.10 2 点間におけるスプライン曲線

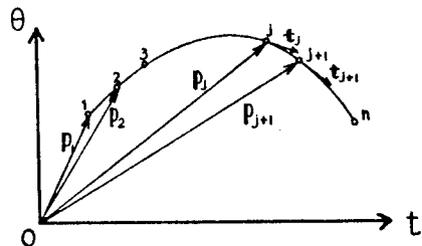


図 3.11 n 点間におけるスプライン曲線

(Step 2) 指定された時間 t が存在する区間におけるスプライン曲線を式 (3.30) より定める。これは次式のように書ける。

$$t_{(u)} = a_1 u^3 + b_1 u^2 + c_1 u - d_1 \quad (3.35)$$

$$\theta_{(u)} = a_2 u^3 + b_2 u^2 + c_2 u + d_2 \quad (3.36)$$

(Step 3) 式 (3.35) において指定された t の値に対する $0 \leq u \leq 1$ を満たす u を求める。

(Step 4) 得られた u を式 (3.36) に代入し θ を求める。

(Step 5) $\frac{d\theta}{dt}, \frac{d^2\theta}{dt^2}$ は次式によって求める。

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{\frac{d\theta}{du}}{\frac{dt}{du}} = \frac{3a_2 u^2 + 2b_2 u + c_2}{3a_1 u^2 + 2b_1 u + c_1} \quad (3.37)$$

$$\begin{aligned} \frac{d^2\theta}{dt^2} &= \frac{\frac{d}{du} \left(\frac{d\theta}{dt} \right)}{\frac{dt}{du}} \\ &= \frac{6(b_1 a_2 - a_1 b_2) u^2 - 6(c_1 a_2 - a_1 c_2) u + 2(c_1 b_2 - b_1 c_2)}{(3a_1 u^2 + 2b_1 u + c_1)^3} \end{aligned} \quad (3.38)$$

上述の方法を確認するために、微分量が解析的に計算できる三種類の関数によって発生させたデータを用い、 $\theta, \dot{\theta}, \ddot{\theta}$ を求めた例を図 3.12 に示す。得られた結果は滑らかであり、有限フーリエ級数による補間のように波うつようなことがないことが分かる。しかし、 $\ddot{\theta}$ については結算結果に高周波の誤差がみられる。そのため、本研究で行なった実験データの処理においては、一度求めた $\dot{\theta}$ をフィルタリング処理し、そのデータを再度スプライン補間及び微分して $\ddot{\theta}$ を求めている。

付録 1 に、Step 1 ~ Step 6 を行なうプログラムを示す。このプログラムはサブルーチンであり、以後の実験におけるデータ処理に利用する。

3.4 写真計測システムの構成

3.4.1 ハードウェア構成

撮影したフィルム中の標点の像座標を読み取り、計算機へ入力しデータ解析を行なう装置は、像座標の測定、像座標データの演算処理、記録といった分野において著しい進歩がみられている。現在バイオメカニクスの分野では、16mm フィルムに記録された現象を解析するシステムが開発されており、このシステムを用いた人体の動作解析が数多く行なわれている。このシステムは図 3.13 に示すように、モーションアナライザ、像座標読取装置、演算処理装置、出力表示装置、記憶装置によって構成されている。

本研究では、上記のシステムと同等の機能を有するシステムを構築した。本システムでは、中央

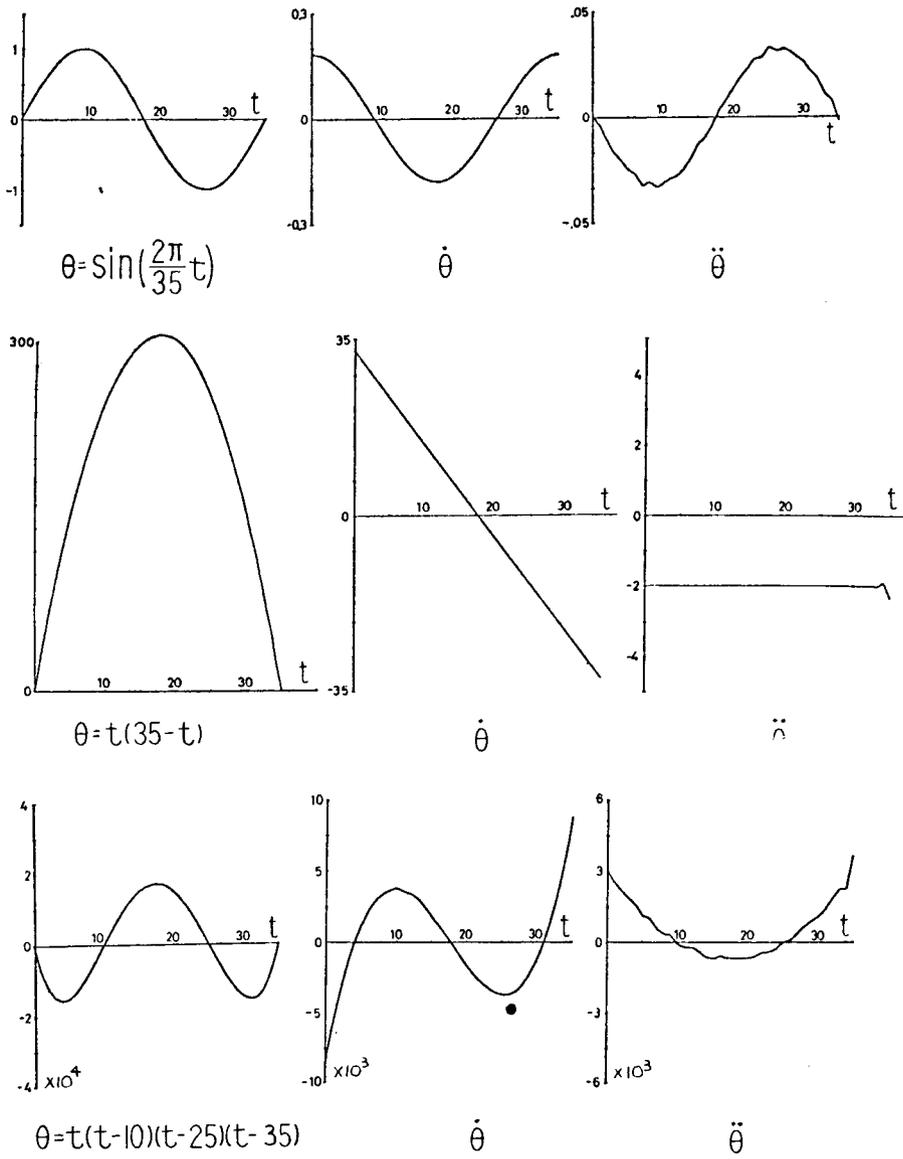


図 3.12 スプライン補間による計算結果

演算処理装置として、汎用のマイクロコンピュータ (APPLE II-plus) を用いた。そのため、出力表示装置として、モニタテレビ、プリンタ、プロッタ等の装置が使用できる。また記憶装置は主記憶として、RAM (Random Access Memory) 48 KByte, 補助記憶としてミニフロッピーディスクが使用できる。図 3.13 のモーションアナライザによる処理は、フィルムのコマ送りと像座標読取り装置への画像の投影であり、本システムでは引伸機を用いている。そのためフィルムのコマ送りは手動で行ない、一コマごとの像座標の初期化を、フィルムに写し込んだ像座標の原点と、 x, y どちらかの座標軸の任意の一点を入力することによって行なっている。処理可能なフィルムの大きさは、使用する引伸機の能力によって定まり、本装置では 6×9 判以下の全てのフィルムが使用できる。像座標読取り装置にはタブレットを利用している。使用したタブレットは $11 \text{ inch} \times 11 \text{ inch}$ ($279 \text{ mm} \times 279 \text{ mm}$) の測定範囲を持ち、 5500×5500 の解像度 (分解能 0.05 mm) である。

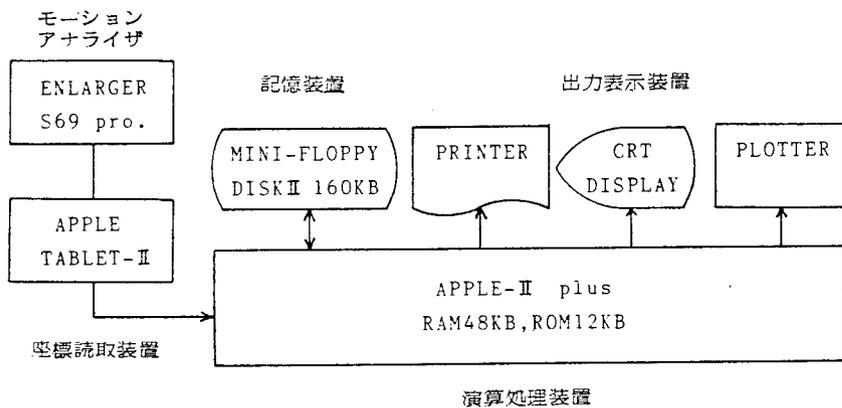


図 3.13 写真計測システムの構成

3.4.2 ソフトウェア構成

本画像解析システムを用いた写真計測のための画像データの処理法について述べる。本システムで用いた計算機は、主記憶容量が小さく、またデータ処理のプログラムは BASIC 言語によって書かれているため、複数の処理を一度に実行させることができない。そこで図 3.14 に示すように各処理ごとの結果は全てディスクファイルに出力し、像座標を入力し三次元座標を求める部分以外は、全て、ファイルされたデータに対して計算処理を行なっている。ここでは、像座標の入力と本写真計測法におけるデータ処理について、図 3.15 に示すフローチャートにしたがって説明する。

(Step 1) 固定パラメータの入力

鏡面の任意の点の位置ベクトル G と、撮影レンズの物空間主点の位置ベクトル F_1 を入力する。

(Step 2) キャリブレーション

3.2.3節で示した像座標入力の補正を行なう。較正点の座標値(X, Y, Z)とそれに対応する像座標(x, y)を入力し、式(3.19)を解いて補正式(3.15)(3.16)の係数値を求める。

(Step 3) 鏡の向きの測定

3.2.2節で示した鏡の向きの測定を行なう。空間内の点Pと鏡による点Pの虚像点P'の像座標を入力し、(Step 2)で求めた補正式を用い、撮影レンズの物空間主点から各点へ向かう単位ベクトル \hat{p}' 、 \hat{p} を求める。そして式(3.8)(3.9)を用いて鏡面の法線ベクトルを求める。

(Step 4) 固定パラメータの計算

(Step 3)で求めた法線ベクトル \hat{n} を用い、式(3.11)より鏡による撮影レンズの物空間主点の虚像点の位置ベクトル F_2 を求める。

(Step 5) 像座標入力

(Step 2)で求めた補正式を用い、撮影レンズの物空間主点から標点へ向かう単位ベクトル \hat{u}_1 と、鏡による標点の虚像点へ向かう単位ベクトル \hat{u}_2 を求める。

(Step 6) 2D・3D変換

(Step 5)で求めた \hat{u}_2 を式(3.13)に代入し \hat{u}_2 を求め、式(3.5)(3.6)(3.7)式に各パラメータの値を代入し、標点の三次元座標を求める。

付録2に以上の処理プログラムを示す。

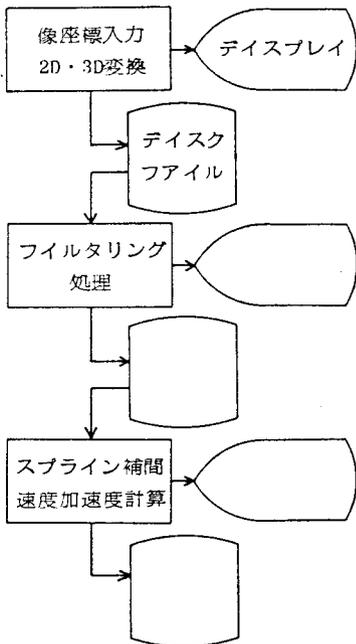


図 3.14 画像解析システムのデータ処理

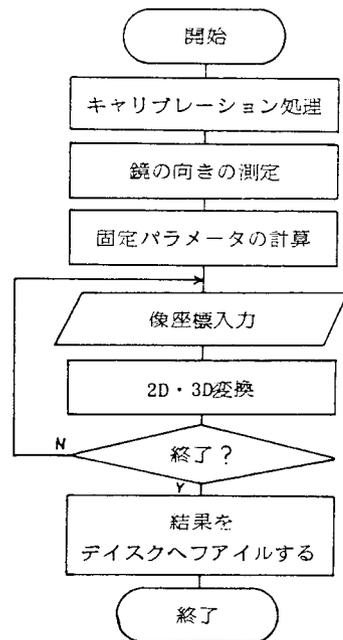


図 3.15 画像の入力と三次元座標の計算処理

3.5 誤差解析

3.5.1 パラメータの計測誤差が標点の測定誤差に及ぼす影響

本研究で開発した鏡を用いた一方向写真計測法を、前節で述べた画像解析システムを用いて実施したときの測定誤差について検討する。まず写真計測法で使用したパラメータの測定誤差が、どの程度、写真計測法の測定誤差に影響を及ぼすかを調べる。このために、図 3.16 に示すような撮影条件を仮定し、各パラメータにその測定誤差を加えた場合と加えない場合の写真計測処理を行なった結果得られた値を比較した。

仮定したパラメータの測定誤差と、その結果生ずる写真計測法の測定誤差を表 3.1 に示す。系統誤差は 3.5.2 節に示すように、測定範囲の全てにわたってほぼ一定であると考えられる。そのため、較正点を写真計測し得られた計測値と真の値との差によって求められる補正値を用いることにより、系統誤差を除去することが可能であると考えられる。一方、偶然誤差は像座標入力時の読取り誤差によるものであると考えられる。

像座標入力時の読取り誤差は、フィルム像の状態、標点の形状、タブレットの性能、及び操作者の標点の指示能力によって異なると思われる。標点の形状による読取り誤差への影響を調べるために、図 3.17 に示すような標点を用い像座標入力を行なった結果、(d) の形状の標点における読取り誤差のばらつきが最も少なかった。この実験は、2 人の操作者が行なったが両者の結果には大きな差

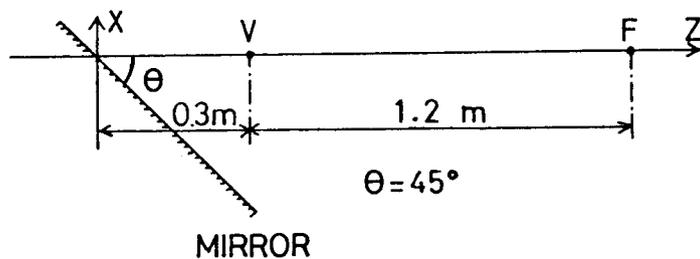


図 3.16 撮影条件

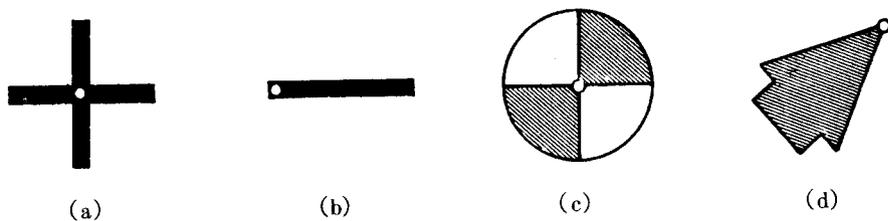


図 3.17 標点の形状

表 3.1 パラメータの計測誤差が標点の測定誤差に及ぼす影響

	(a)	(b)		
		(mm)	(%)	
Ux	0.003 mm	1.44	12.3	accidental error 37.4
Uy		0.6	5.2	
Vx		1.5	12.9	
Vy		0.82	7.0	
Fx	±1mm	1.8	15.5	systematic error 62.6
Fy		1.0	8.6	
Fz		0.2	1.7	
Gx		0.8	6.9	
Gz		0.8	6.9	
T	±1×10 ⁻⁴ rad.	2.62	23.3	

(a) error in the measurement of the parameter

(b) error in the measurement of the target

Ux, Uy : the film coordinates of the body

Vx, Vy : the film coordinates of the virtual
image of the body

Fx, Fy, Fz : the fixed coordinates of the
arbitrary point on the mirror

Gx, Gz : the fixed coordinates of the
arbitrary point on the mirror

T : the unit normal vector of the mirror
plane

がみられなかった。右手及び左手による標点の指示における差違を調べるために、300回のデータ入力の途中で、標点を指示するペンを右手から左手に持ち変えた結果、図3.18に示すような読取り値の分布が得られた。y座標値に関しては一つのピークを持つ分布であるが、x座標については、二つのピークが現われている。x座標は左右方向であるため、x座標に関してのみ右手と左手の違いによる影響が現われたものと考えられる。像座標入力は、フィルムを引伸機によりタブレット上に投影し、スタイラスペンで標点の投影像を指示することにより行なわれている。そのため、ペン先が標点の投影像に達する時は、ペン先や手の影になって標点の投影像が失われる。すなわち、右手にペンを持てば右方向から標点の投影像が見えなくなり、左手にペンを持てば、逆に左方向から見えなくなる。このようなことが原因となって右手、左手における標点の読取り誤差に差が現われたと思われる。この欠点を無くするには、透過形のタブレットを使用し、背後からフィルムを投影した像を用いる方法が考えられる。本研究では、図3.19に示すような装置を用いた。ペンを押し下げた時に接する点aを、ペンを上げた状態で標点の投影像の点に合わせ次に、ペンを押し下げることにより、正確にペン先で標点の投影像を指示することができる。この装置を用い、300回の像座標の入力を行なった結果、図3.20に示すような分布が得られた。ただし、標点の形状は図3.17の(d)を用いた。

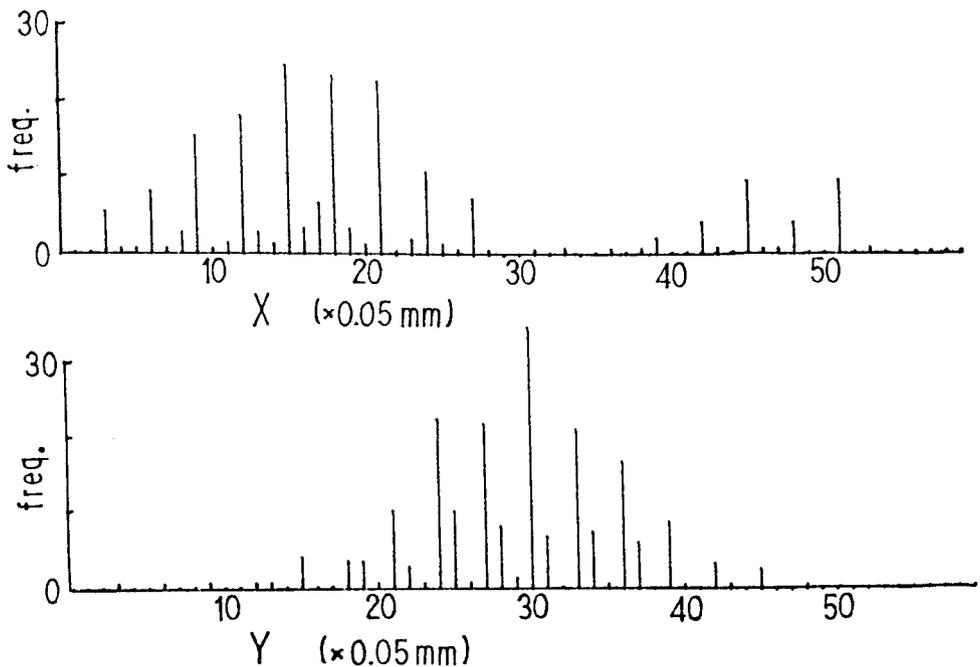


図3.18 手入力による読取り誤差

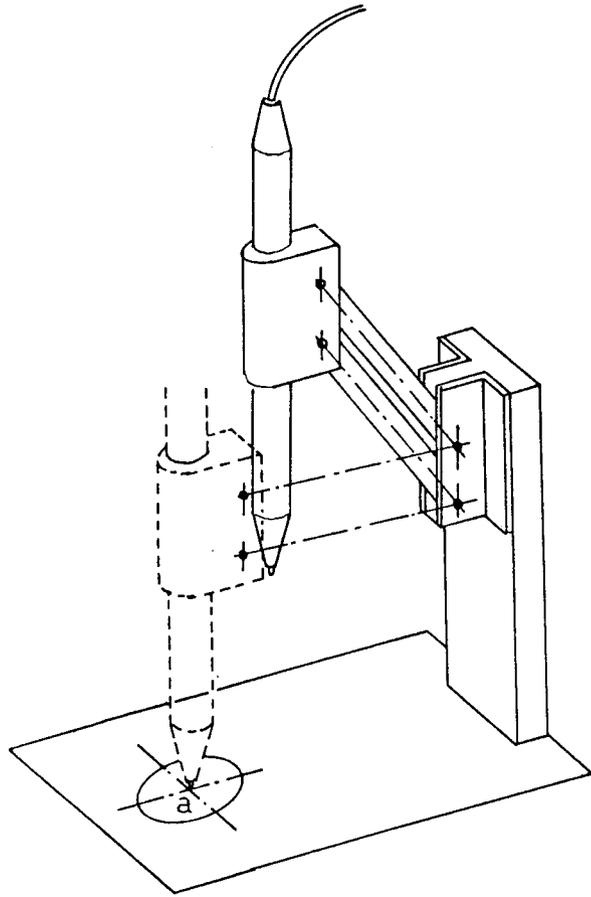


図3.19 スタイルスペンの状態

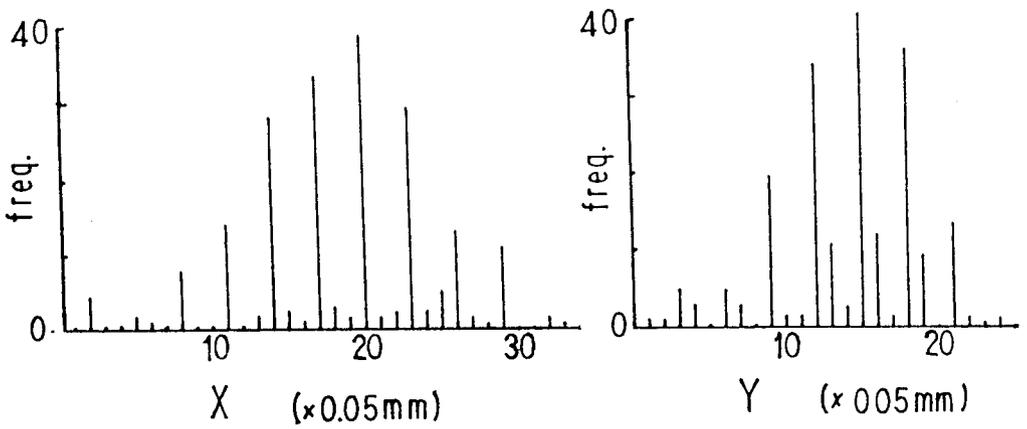


図3.20 機械入力による読取り誤差

手入力の場合の標準偏差は、平均 9.9 単位であり、本装置を用いた場合は平均 6.3 単位であった。ただし、標準偏差は、タブレットからの入力データを用いて計算したものであり、1 読取り単位が $1/500 \text{ inch}$ (0.05 mm) に相当する。

49)

この値を用いて、真の値と試料平均の一致する程度を示すために区間推定を行なった。すなわち与えられた確率 α で、真の値が存在する信頼区間と標本数の関係を求めた。図 3.21 にその結果を示す。この図より、標本数を 8 以上にすることによって 95% 信頼区間を ± 5 以下とすることができ、これ以上標本数を多くしてもその効果が大きくないことが分かる。また逆に、所定の信頼区間を得るために必要な標本数を求めることができる。

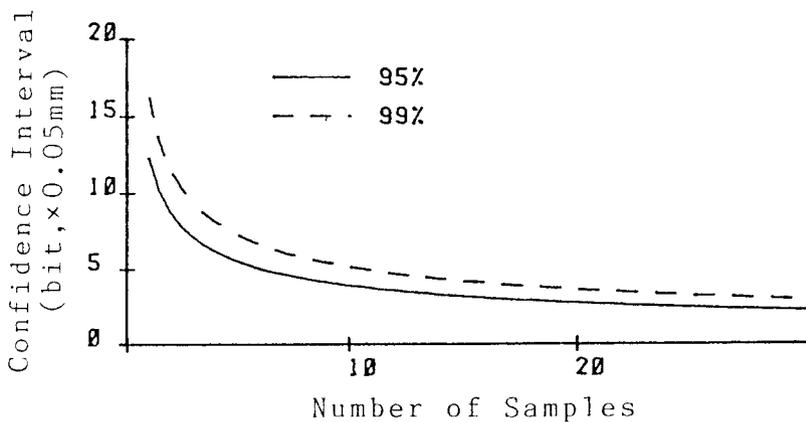


図 3.21 標本数と信頼区間の関係

3.5.2 撮影条件が標点の測定誤差に及ぼす影響

標点の空間位置による測定誤差に対する影響を調べるために、図 3.16 に示す撮影条件の下で、標点が点 V を中心とした直径 200 mm の球面上にあるとし、その時の測定誤差を 2.4 節で述べた手法を用い計算した。図 3.22 に球の中心を通り、X・Y 面、Y・Z 面、X・Z 面に平行な面における誤差を、球の中心から見て標点方向に表示したものを示す。±Y 軸方向、±X 軸方向により大きな誤差がみられるが、空間位置による測定誤差の分布に大きなかたよりは存在していないことが分かる。

次に、カメラ、鏡、被写体の相対位置に関する測定誤差の分布を考える。これらの相対位置は、被写体とカメラを結ぶ直線と鏡面のなす角度として定められる。図 3.16 の撮影条件の下で鏡を Y 軸まわりに回転させた時の回転角度と、その時の測定誤差を 2.4 節で述べた手法を用い計算した結果を図 3.23 に示す。鏡の回転角度 0.68 rad. で測定誤差は最小となるが、0.4 rad. ~1.2 rad. にわたって測定誤差はそれ程大きくならず、鏡の設定位置は測定誤差に大きな影響を与えないことが分かる。

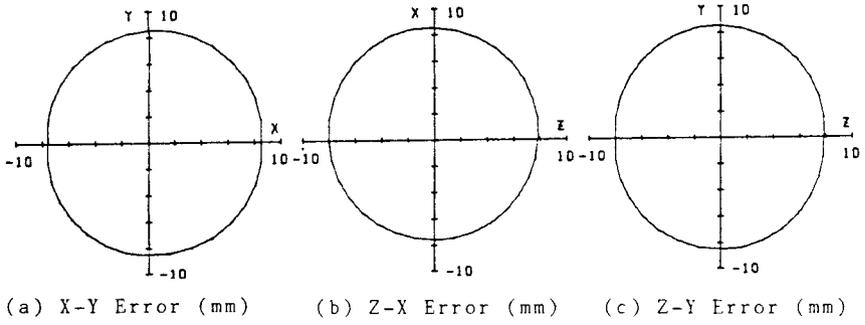


図 3. 22 空間位置による測定誤差の分布

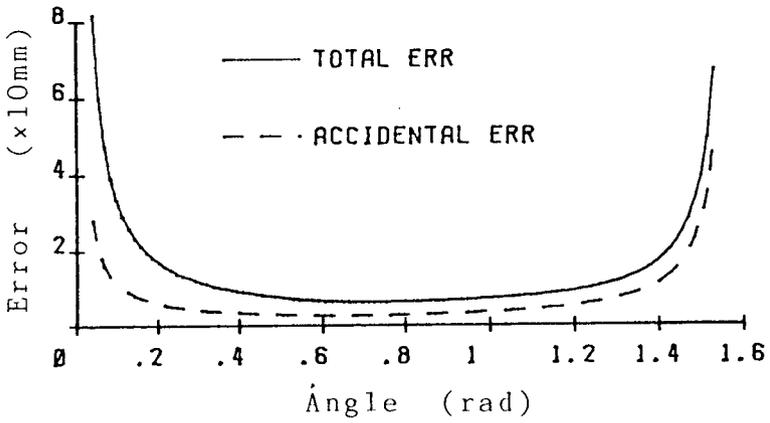


図 3. 23 鏡の向きによる測定誤差の分布

3.6 精度検定

計測システムの精度検定を行なうために、被写体の運動があらかじめ別の手段によって既知であるような場合に本計測法を応用し、その測定能力を評価する。本節では、空間四節リンク機構と放物体について理論的に動作を解析した結果と、鏡を用いた一方向写真計測法による測定値を用いて得られた結果を比較し、本計測システムの測定能力を評価した結果について述べる。

3.6.1 空間四節リンク機構の運動計測

計測システムの精度検定のために、空間四節リンク (RSSR) の運動を理論的に求めたものと、写真計測による測定値とを比較し、本研究で開発した鏡を用いた一方向写真計測システムの運動測定能力を評価する。被測定物体である空間四節リンクの撮影状態を写真 3.1 に示す。四節リンクは入力軸をモータにより 0.58 rad/sec の角速度で回転させている。リンクの形状は、入力リンクが 61 mm 、連接棒が 272 mm 、出力リンクが 110 mm である。鏡の大きさは $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ であり、被写体の鏡像がうまく撮影できるように任意の位置、向きに設定している。写真 3.2 は、撮影によって得られた画像であり、画面の左半分には鏡像が撮影されている。右半分には四節リンクの実像が撮影されており、背景の格子は、空間座標 $Z=0$ に設定したキャリブレーション平面である。この平面上の 60 mm 間隔の格子点を較正点として使用した。その他の撮影条件は以下のとおりである。

撮影カメラ	Nikon F Motor Drive
フィルム	Kodak TRY-X
レンズの焦点距離	30 mm
絞り	f 8
シャッタースピード	1/30 sec.
こま送り速度	3 こま/sec.

以上の条件によって写真計測した結果を検定するために、空間四節リンクの動作を解析的に求めておく。空間四節リンクの構成を図 3.24 のように仮定する。ここで入力リンク a を θ 回転させた時の出力リンクの回転変位 ϕ は次式で求められる。

$$\hat{c} = \frac{1}{\sqrt{1 - (\hat{f} - \hat{u})^2}} \left[\{c_2(\hat{f} \cdot \hat{u}) - c_1\} \hat{\lambda} \pm \sqrt{2c_1c_2(\hat{f} \cdot \hat{u}) - c_1^2 - c_2^2 - (\hat{f} \cdot \hat{u})^2 + 1} \right] \hat{\mu} + c_2 \hat{u} \quad (3.39)$$

ここで

$$\hat{\mu} = \frac{\hat{f} \times \hat{u}}{|\hat{f} \times \hat{u}|} \quad (3.40)$$

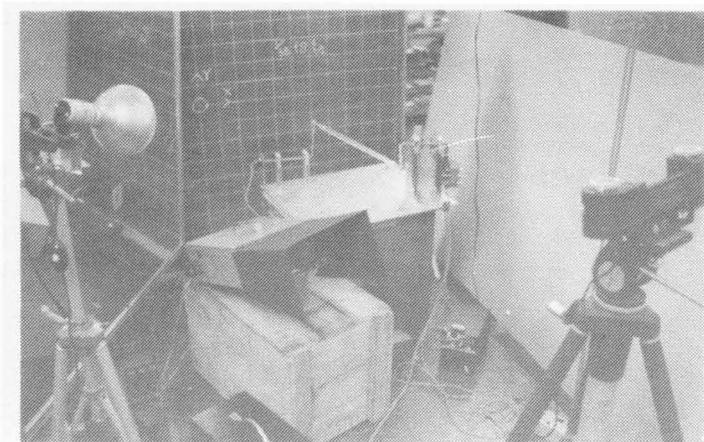


写真 3.1 撮影状態

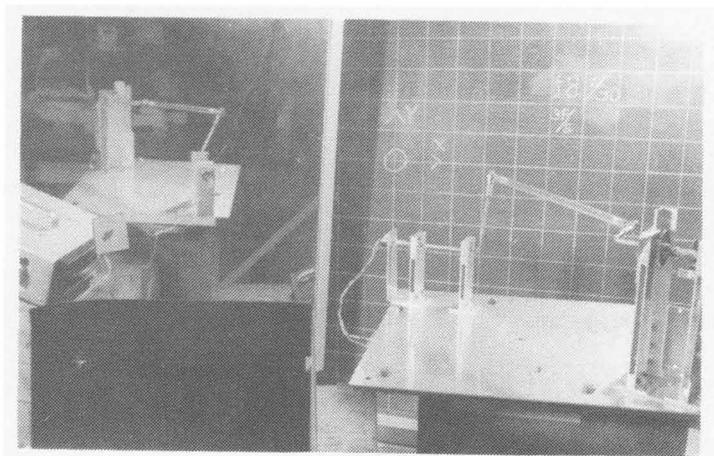


写真 3.2 撮影画像

$$\left. \begin{aligned} \hat{\lambda} &= \hat{\mu} \times \hat{u} = \frac{(\hat{f} \cdot \hat{u}) \hat{u} - \hat{f}}{|\hat{f} \times \hat{u}|} \\ c_1 &= \hat{c} \cdot \hat{f} \\ c_2 &= \hat{c} \cdot \hat{u} = \frac{b^2 - c^2 - u^2}{2cu} \end{aligned} \right\} \quad (3.40)$$

故に、初期値 \hat{c}_0 と式 (3.39) によって求められる \hat{c} より回転角 ϕ が次式で求められる。

$$\cos \phi = \hat{c}_0 \cdot \hat{c} \quad (3.41)$$

リンクの姿勢が式 (3.39) によって定まると、出力リンクの回転角速度 $\dot{\phi}$ は次式で求められる。

$$\dot{\phi} = \frac{\hat{e} \cdot (\mathbf{a} \times \mathbf{b})}{\hat{f} \cdot (\mathbf{c} \times \mathbf{b})} \dot{\theta} \quad (3.42)$$

角速度 $\ddot{\phi}$ は次式で求められる。

$$\ddot{\phi} = \frac{\{(\mathbf{a} \cdot \hat{e})(\mathbf{b} \cdot \hat{e}) - (\mathbf{a} \cdot \mathbf{b})\} \dot{\theta}^2 - \{(\mathbf{b} \cdot \hat{f})(\mathbf{c} \cdot \hat{f}) - (\mathbf{b} \cdot \mathbf{c})\} \dot{\phi}^2 - (\mathbf{b} \times \boldsymbol{\omega}_b)^2}{\hat{f} \cdot (\mathbf{c} \times \mathbf{b})} \quad (3.43)$$

ここで

$$(\mathbf{b} \times \boldsymbol{\omega}_b)^2 = (\hat{e} \times \mathbf{a})^2 \dot{\theta}^2 - 2\dot{\theta} \dot{\phi} (\hat{e} \times \mathbf{a})(\hat{f} \times \mathbf{c}) + (\hat{f} \times \mathbf{c})^2 \dot{\phi}^2 \quad (3.44)$$

式 (3.39)～式 (3.44) の導出は、付録 3 に示している。本実験で使用した四節リンクの場合、以上の式で用いたパラメータの値は、以下のようになる。

$$\omega_a = \dot{\theta} = 0.58 \text{ rad/sec}$$

$$a = 61 \text{ mm}, \quad b = 272 \text{ mm}, \quad c = 116 \text{ mm}, \quad d = 309.4 \text{ mm}$$

$$\mathbf{d} = (-191.5, -73, -183)^T$$

$$\mathbf{f} = (-0.978498, 0, 0.206555)$$

$$\hat{f} \cdot \hat{c} = 0$$

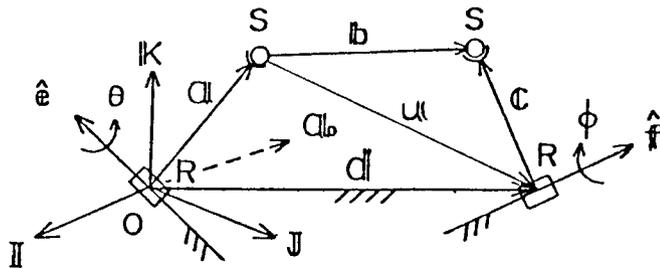


図 3.24 RSSR機構

被写体の標点を入力リンク及び出力リンクの先端の球継手とし、その三次元座標の測定値と理論値を図 3.25 に示す。入力リンク先端の測定値は、理論値と比較して X, Y, Z 座標に関してそれぞれ 1.3, -6.9, 10.9 mm の系統的な誤差が存在している。この値は 3.5 節で考察した結果とほぼ同じ傾向を示している。出力リンク先端の測定値は、誤差の量が周期的に変動している。これは理論値を求める時に使用したパラメータに含まれる測定誤差の原因によるものと思われる。

図 3.26 に入力リンク及び出力リンクの角速度 ($\dot{\theta}, \dot{\phi}$) と角加速度 ($\ddot{\theta}, \ddot{\phi}$) を計測値を用いて計算した結果と、それらの理論値を示す。入力リンクに関する測定結果 ($\dot{\theta}, \ddot{\theta}$) は、標点の測定値に系統的な誤差がみられたにもかかわらず、ほぼ理論値に等しい結果が得られている。これは、写真計測において入力リンクと、その回転軸との交点の測定値を用い計算処理を行なったため、角度変位の測定結果に位置の誤差の影響が現われなかったためであると思われる。出力リンクに関する測定結果 ($\dot{\phi}, \ddot{\phi}$) は、理論値と比較し多少の誤差がみられる。しかし、上述したように理論値が正確にリンクの運動を表わしていないことを考慮しなければならない。計測法の運動特性の検出能力という面から測定結果を考察すれば、本計測結果は出力リンクの運動特性を十分表わしていると考えられる。一般に角加速度のような計測値に対する二度の微分処理の結果は、非常に大きな誤差を含むものであるが、本計測の場合リンクの運動特性を十分に検出しており、その計測能力がすぐれていることが確認できた。

3.6.2 放物体の運動計測

非接触で計測が行なえることは、写真計測法の特徴の一つである。特に空中を運動する物体の計測には有効であり、従来より写真計測法が用いられてきた。しかし空間運動物体に対する運動測定能力の評価のための詳細なテストはなされていなかった。そこで、この点に関して、重力のみ作用する静止座標系に関する物体の重心まわりの角運動量は、時間、位置に無関係に一定となることを測定値より検証することで、写真計測法の運動測定能力を評価することを考えた。

理論的に物体の重心 G まわりの静止座標 (X, Y, Z) に関する角運動量 H_{GXyz} を求める方法について以下に述べる。動座標系 (x, y, z) に関する物体の重心まわりの角運動量 H_{Gxyz} は次式⁵¹⁾によって表わされる。

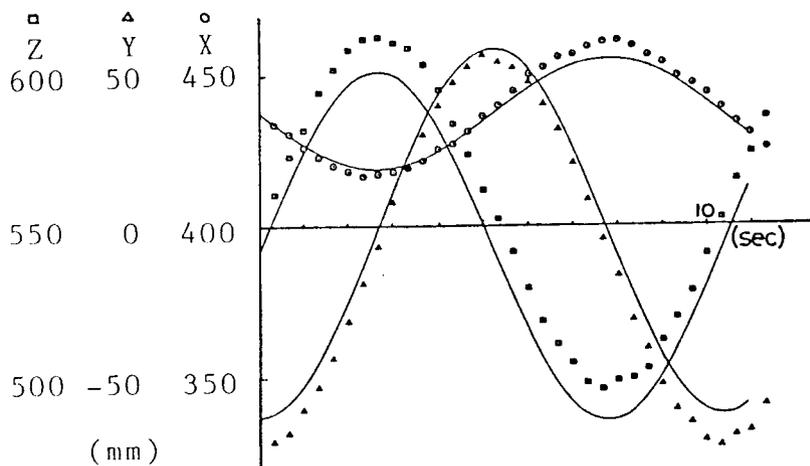
$$H_{Gxyz} = I \omega_{XYZ} \quad (3.45)$$

ここで I は動座標系に関する慣性テンソルであり、 ω_{xyz} は角速度の動座標系に関する記述である。これらは、動座標系と静止座標系の変換マトリックス T を導入することによって次式で表わさる。

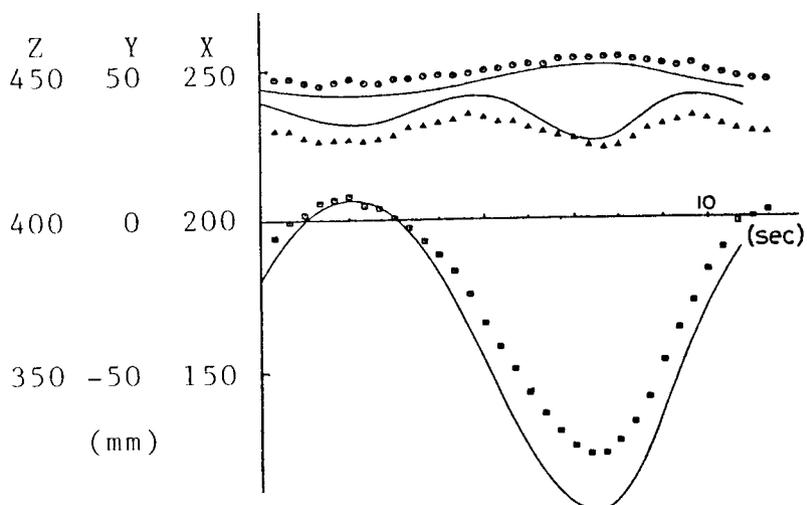
$$\omega_{xyz} = T \omega_{XYZ} \quad (3.46)$$

$$H_{Gxyz} = T H_{GXyz} \quad (3.47)$$

式 (3.45), (3.46), (3.47) より

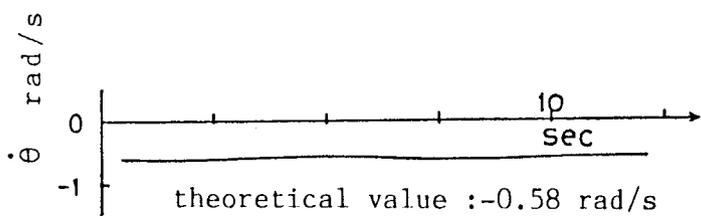


(a) Input Link

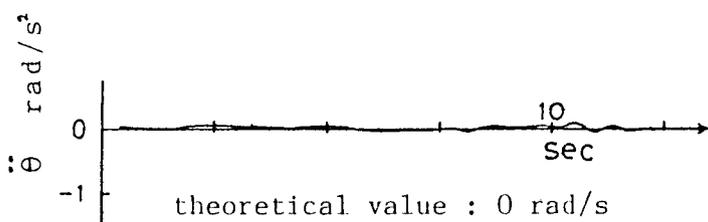


(b) Output Link

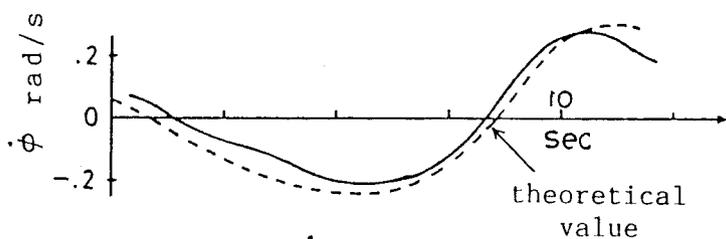
図 3.25 標点の測定結果



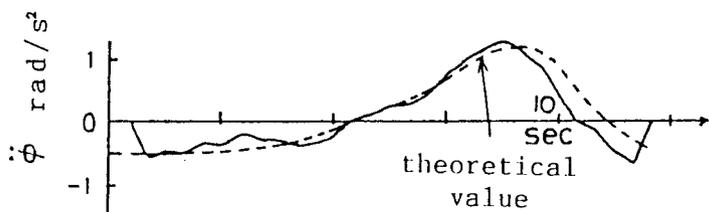
(a) $\dot{\theta}$ Input



(b) $\ddot{\theta}$ Input



(c) $\dot{\phi}$ Output



(d) $\ddot{\phi}$ Output

図 3.26 入出力リンクの運動

$$\begin{aligned}
 \mathbf{H}_{GXYZ} &= \mathbf{T}^{-1} \mathbf{H}_{Gxyz} \\
 &= \mathbf{T}^{-1} \mathbf{I} \boldsymbol{\omega}_{xyz} \\
 &= \mathbf{T}^{-1} \mathbf{I} \mathbf{T} \boldsymbol{\omega}_{XYZ}
 \end{aligned} \tag{3.48}$$

写真測定により \mathbf{T} , $\boldsymbol{\omega}_{XYZ}$ を求めて式(3.48)に代入することにより \mathbf{H}_{GXYZ} が定まる。 $\boldsymbol{\omega}_{XYZ}$ を求めるには、剛体に固定された二つのベクトル \mathbf{a} , \mathbf{b} の各瞬間における位置, 向きを静止座標系⁵²⁾ に関して読取る。そして以下に示す運動学の公式を利用して、間接的に $\boldsymbol{\omega}$ を解くことができる。

$$\left. \begin{aligned}
 \left. \frac{d\mathbf{a}}{dt} \right|_{XYZ} &= \boldsymbol{\omega}_{XYZ} \times \mathbf{a} \triangleq \mathbf{c}_1 \\
 \left. \frac{d\mathbf{b}}{dt} \right|_{XYZ} &= \boldsymbol{\omega}_{XYZ} \times \mathbf{b} \triangleq \mathbf{c}_2
 \end{aligned} \right\} \tag{3.49}$$

以下の条件が成立するとき、

$$\left. \begin{aligned}
 \mathbf{a} \cdot \mathbf{c}_1 &= \mathbf{b} \cdot \mathbf{c}_2 = 0 \\
 \mathbf{a} \cdot \mathbf{c}_1 + \mathbf{b} \cdot \mathbf{c}_2 &= 0
 \end{aligned} \right\} \tag{3.50}$$

式(3.49)は、次のように解ける。

$$\boldsymbol{\omega}_{XYZ} = \frac{\mathbf{c}_1 \times \mathbf{c}_2}{\mathbf{b}_1 \cdot \mathbf{c}_1} \tag{3.51}$$

式(3.49)は左辺の微分は、スプラインを利用した数値微分によって求めることができる。変換マトリクス^{53) 54)} \mathbf{T} は、動座標系を \mathbf{a} , \mathbf{b} を用いて式(3.52)のように定めることにより、式(3.53)に示すように求められる。

$$\left. \begin{aligned}
 \mathbf{i} &= \hat{\mathbf{a}} = \frac{\mathbf{a}}{|\mathbf{a}|} = \ell_1 \mathbf{I} + m_1 \mathbf{J} + n_1 \mathbf{K} \\
 \mathbf{j} &= \frac{\mathbf{a} \times \mathbf{b}}{|\mathbf{a} \times \mathbf{b}|} = \ell_2 \mathbf{I} + m_2 \mathbf{J} + n_2 \mathbf{K} \\
 \mathbf{k} &= \mathbf{i} \times \mathbf{j} = \ell_3 \mathbf{I} + m_3 \mathbf{J} + n_3 \mathbf{K}
 \end{aligned} \right\} \tag{3.52}$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{i} \\ \mathbf{j} \\ \mathbf{k} \end{bmatrix} = \mathbf{T} \begin{bmatrix} \mathbf{I} \\ \mathbf{J} \\ \mathbf{K} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{T} = \begin{bmatrix} \ell_1 & m_1 & n_1 \\ \ell_2 & m_2 & n_2 \\ \ell_3 & m_3 & n_3 \end{bmatrix} \tag{3.53}$$

以上の計算式を用い、放物体の運動を写真計測して得られたデータを処理し、 \mathbf{H}_{GXYZ} を求めた。撮影状態を図3.27に示す。撮影は16mmシネカメラ(Volex H16 Reflex)を用い、42コマ/secで行なった。鏡は、2m×2mの大きさであり、垂直に立てて使用した。物体は、図3.28に示すように、200mm×200mm×300mmの大きさの直方体であり、内部には、慣性能率の測

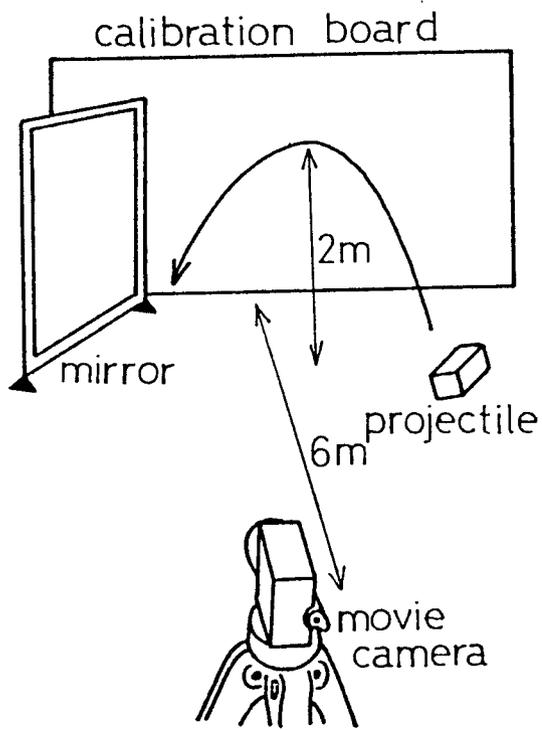


図 3.27 撮影状態

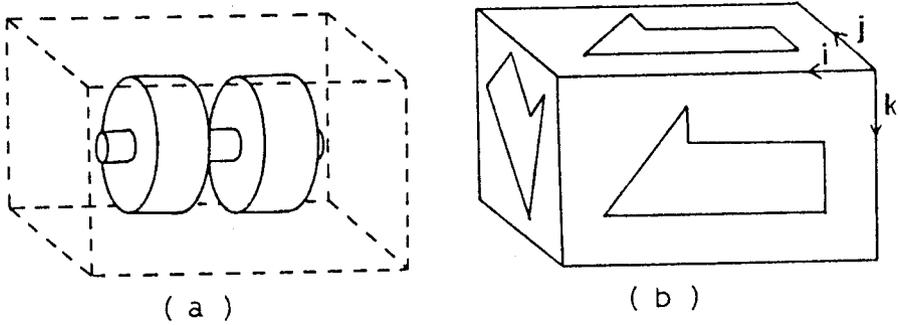


図 3.28 物体の形状

定誤差を少なくし、空力的影響を相対的に減小させるために、おもりを内蔵させ、約2.2kgの重量としている。物体に固定されたベクトル \mathbf{a} , \mathbf{b} は、図3.29に示すように、運動中の全ての画像において、その実際の像と鏡像がとらえられるわけではない。そこで、標点を直方体の各頂点に設定し、測定可能な全ての標点の座標を用い、物体が直方体であることの特性を生かして各ベクトルを求めた。

測定値を計算処理し、得られた結果を図3.30に示す。 H_{GXYZ} は、中央部を除いてほぼ一定である。中央部分に相当する物体の位置は、放物運動の頂点付近であり、物体の移動速度は他の部分と比較して最も小さく、撮影画像における物体のぶれによる標点の像座標の読取り誤差が、測定誤差の原因になったとは考えられない。恐らく、物体の向きがその周辺で各頂点を測定するのに不適當な位置となり、そのため測定誤差が増大したのではないかと考えられる。このように撮影画像における被写体の姿勢が、計測に不適當な状態となって測定誤差が増大することは、他の写真計測法においても同様に起こりうることである。特に本実験では、被写体が放物体であったため、空間内で物体があらゆる姿勢をとることが可能であり、ある定まった計測状態で測定を行なう限り、このような問題は必ず発生すると思われる。対策としては、多方向から撮影を行ない、最も計測に適した撮影画像を用いる方法が考えられる。本方法では、鏡を複数にすることによりこれを実現することができる。

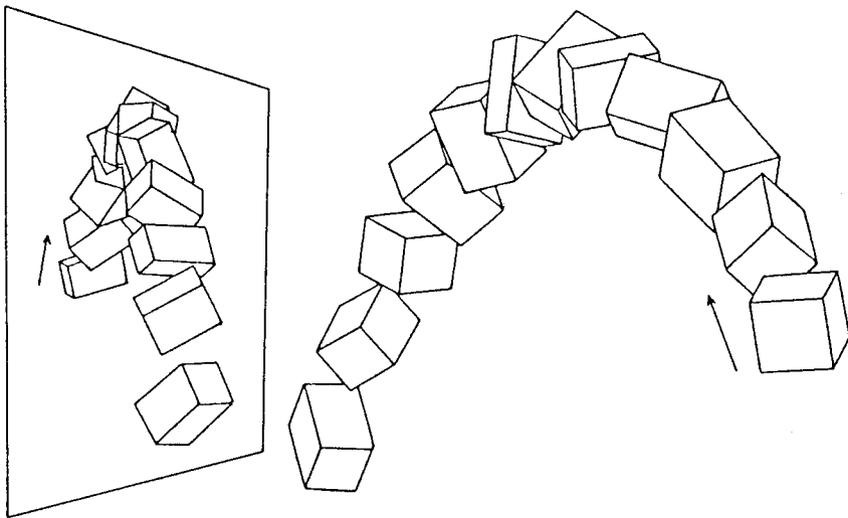


図3.29 被測定物体の運動状態

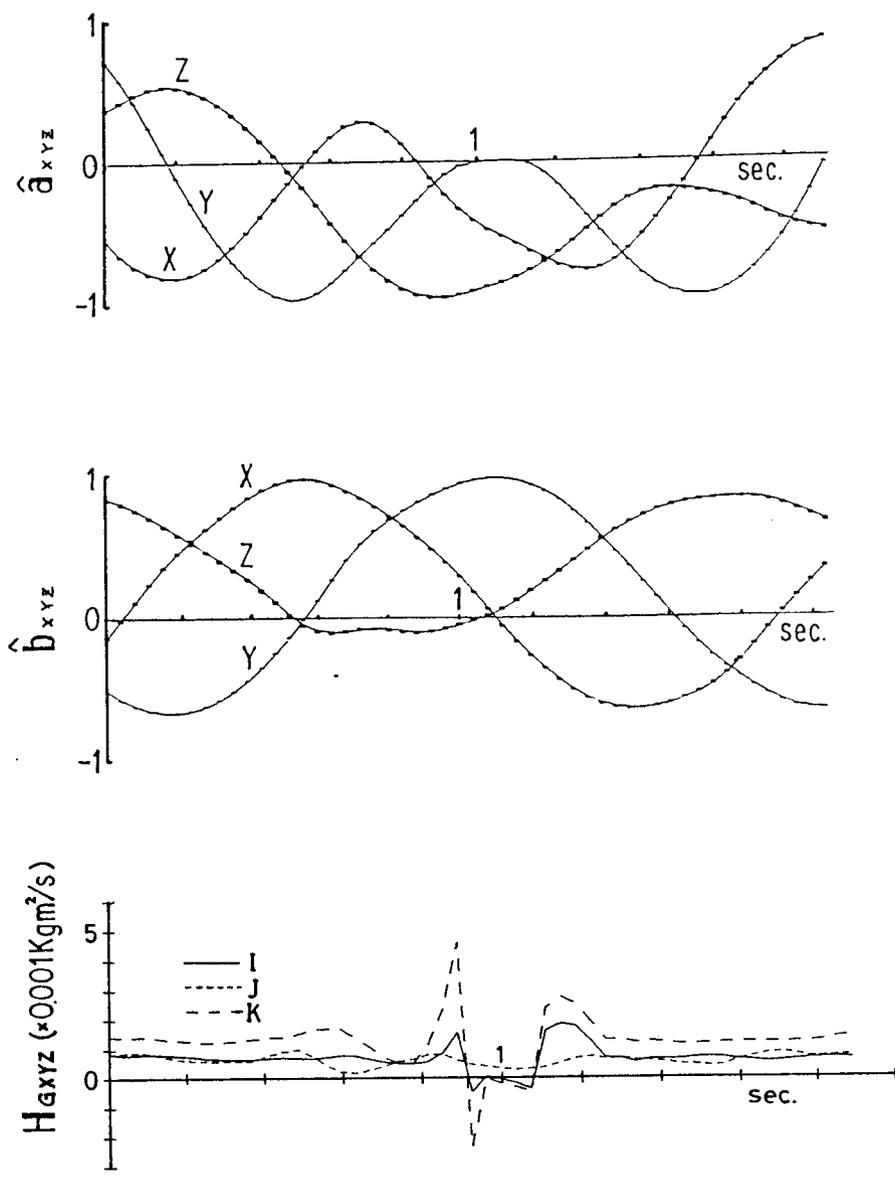


図 3.30 測定値による計算結果

3.7 結 言

本章では、従来より用いられていた一方向写真計測法と比較し、測定能力を向上させた鏡を用いた一方向写真計測法を開発した。そして、測定した三次元座標より運動諸量を求める方法を示し、それを実施するための画像解析システムを構築した。理論的に、本計測システムが持つ測定誤差について検討し、空間四節リンク及び放物体の運動を計測することによって、その測定能力を評価した。本章で得られた結果は以下のとおりである。

- (1) 一方向写真計測法の簡易さと多方向写真計測法の高い測定精度を合わせ持つ鏡を用いた一方向写真計測法を開発した。本計測法は、以下のような特徴を持つ。
 - (a) 鏡及び撮影カメラの位置，向きは任意に設定できる。
 - (b) 計測に必要なパラメータは、標点の像座標値の他に、鏡面の任意の一点の座標と撮影レンズの物空間主点の座標のみである。
 - (c) 像座標は、画像のひずみに対して補正されるため、歪曲収差の大きい広角レンズ等も使用できる。
- (2) 測定した三次元座標値から速度，加速度を求める方法を明らかにした。
- (3) 汎用のマイクロコンピュータを用い、画像解析システムを構築した。
- (4) 本計測法の誤差の原因について詳細な検討を行ない、その解決法を明らかにした。
- (5) 本計測法を用い空間四節リンク及び放物体の運動を計測し、本計測システムの運動計測能力がすぐれていることを確認した。

第4章 超音波及び光を用いたカメラ及び鏡の向き制御のための物体追跡システム

4.1 緒言

写真計測による三次元計測は、その汎用性や非接触性等の特性により、多くの分野で利用されている。しかし、その測定範囲が被写界内に制限されることや、撮影条件を整えねばならない等の短所もある。特に、被測定物体が広範囲にわたって運動する場合や、運動範囲が予測できない場合に不都合が生じる。多方向写真計測の場合、多数のカメラの共通被写界を大きくするには、各カメラの間隔および撮影距離を大きくしなければならない。しかし室内での計測を実施する場合、十分な撮影距離を設定することは困難である。広角レンズを使用する方法も考えられるが得られた画像のひずみが大きくなり、測定誤差が大きくなる。もしも十分広い共通被写界が得られ、被写体を画像として捕えられたとしても、全画像に対して被写体の像が相対的に小さくなり、標点の像座標の読取り誤差が測定誤差に大きく影響する。

このような事態は、一方向写真計測法を用いた場合にも生じる。特に本研究で開発した鏡を用いた一方向写真計測法においては、被写体の運動を、その運動範囲全てにわたって鏡像として撮影するために、大きな鏡が必要となる。そのため鏡の設置に多くの労力が必要となったり、鏡の向きや位置が任意に設定できるという利点が生かせなくなる。もし何らかの方法で運動物体が存在する方位を写真撮影と平行して測定できるようにすれば、撮影方向と鏡の向きを常に物体の像が撮影できるように能動化できる。これによって撮影画像中の被写体の像を大きく撮ることが可能となり、さらに鏡も小型化することが可能となる。

本章では、写真計測システムを能動化するための、超音波及び光学センサを用いた三次元運動物体の方位検出法について述べる。さらに、これらの検出システムを鏡を用いた一方向写真計測と併用して得られた実験結果について述べる。

4.2 超音波による位置検出

4.2.1 検出法

1.3節に述べたように、超音波を用い三次元座標を計測する方法が各種開発されている。これらの方法を用い被写体の三次元位置を求めることは可能であるが、写真計測システムを能動化するために必要な情報は、被写体の存在する方位のみであり、高い測定精度も必要としない。そのため従来よりある計測法は、このような目的のために使用するには過剰性能である。また、運動物体を測定対象としているため、計測時間は短時間であることが望ましく、被写体の存在する方位のみを検

出する計測法を用いるべきであると考えられる。本研究では、指向性の鋭い超音波により空間内を走査し、目標物体から反射する最大反射音圧の方向を求め、物体の存在する方位を検出する計測法を開発した。以下に、a)超音波の指向性を高める方法、b)超音波を用い空間を走査する方法、c)最大反射音圧方向を検出する方法について述べる。

a) 放射音波の指向性

最大反射音圧の方向によって物体の位置を検出する場合、放射音波の指向性が鋭いほど、またはマイクの指向性が鋭いほど測定精度は高くなる。本方法では、放射音波の指向性を高める方法を用いた。図 4.1 に示すような、超音波送波器の指向性は、点 P における速度ポテンシャルと、等距離⁵⁾離れて Z 軸上にある点の速度ポテンシャルの比で定義されて、その指向性関数 D で表わされる。

$$D = \left| \frac{2J_1(ka \sin \alpha)}{ka \sin \alpha} \right| \quad (4.1)$$

ここで、 $J_1(Z)$ は第一次ベッセル関数であり、 a は振動板半径、 $k=2\pi/\lambda$ 、 λ は波長である。使用した送波器は、周波数 40 KHz、振動板直径 9.5 mm の円形セラミックバイモルフ型のものであり、その指向性は式 (4.1) を用いて理論的に図 4.2 のように求められる。図より明らかなように、指向性は半減角 37 度と鈍く、この超音波を使用しても高精度な測定は期待できない。指向性を向上させるには、振動板半径を大きくするか、超音波の波長を短くすればよい。しかし振動板直径を大きくすると振動板の重量が大きくなり、高い振動数で駆動することが困難となる。また、振動数は、送波器固有の値があり、それ以外の振動数で駆動すると効率が落ちる。さらに、高い周波数の音波は、大気中での減衰が大きくなる。

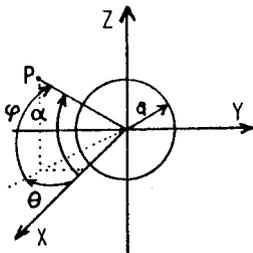


図 4.1 送波器

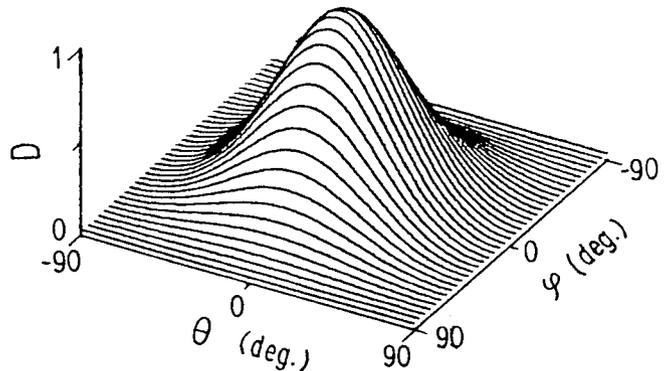


図 4.2 指向性分布

そこで同一の送波器を複数個、同一平面上に設置し、振動板直径を大きくすると同様の効果が得られるようにした。この複数の送波器の正面では、各送波器からの放射音波の位相が一致し、出力は、使用した送波器の個数に比例して、倍増され都合がよい。各送波器の配置は、種々の配置における理論的な指向性分布を比較して、最も指向性が高いものを用いた。図4.3に本方法で用いた送波器の配置を示す。この時の指向性関数は、Bridgeの法則により各送波器を点音源と考えた場合の指向性関数と式(4.1)との積であり、次式のように表わされる。

$$D = \frac{1}{3} \left| \frac{J_1(k a \sin \alpha)}{k a \sin \alpha} \right. \\ \left. \begin{aligned} &+ \cos(k d \cdot q) \\ &+ 2(\cos(k d \cdot \cos \frac{\pi}{6} \cdot p) \cos(k d \cdot \sin \frac{\pi}{6} \cdot q) \\ &+ \cos(k d' \cdot p) \\ &+ 2\cos(k d' \cdot \sin \frac{\pi}{6} \cdot p) \cos(k d' \cdot \cos \frac{\pi}{6} \cdot q) \end{aligned} \right| \quad (4.2)$$

ただし、 $k = 2\pi/\lambda$, $p = \cos \beta$, $q = \cos \gamma$ である。

式(4.2)より指向性分布図は図4.4となり、その半減角は9度となった。また副極、主極に比較してかなり小さく、その影響は少ないと考えられる。図4.2と図4.4に関して実際にそれぞれの場合の指向性分布を測定した結果、ほぼ同じ指向性分布が得られた。

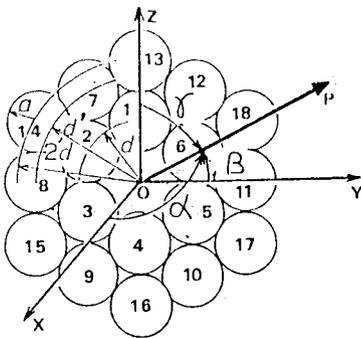


図4.3 送波器の配置

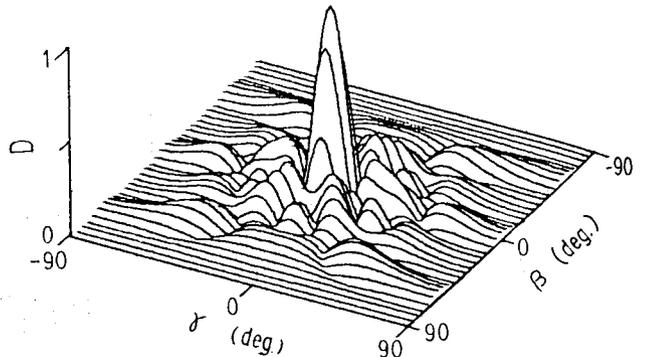


図4.4 12個の送波器による指向性分布

(b)放射音波による空間の走査

被検出物体からの反射音圧がより高くなる方向を探索し、最大反射音圧が得られる方向を測定するためには、空間内の物体が存在する範囲に超音波を放射しなければならない。超音波の放射方向を微小に変化させ、ある範囲の空間を走査するには、送波器の方向を機械的に変化させる方法が考えられるが、その処理速度は、超音波の放射及びその反射音圧の測定の処理速度に比較して非常に遅く、物体の方向検出に要する時間に占める割合が大きくなるから、運動物体を追跡する上で問題となる。本研究では、各送波器に与える発振波の位相を電氣的に制御し、超音波の放射方向を変化させる方法を開発した。この方法では、機械的な動作が含まれないため、物体の方位検出に要する時間が短縮できると考えられる。

図 4.5 に示すように、各受波器を 5 個のグループ ($L_1 \sim L_5$) に分け、各グループに与える正弦波信号の位相をそれぞれ $2\psi, \psi, 0, -\psi, -2\psi$ としたときの放射音波の指向性関数は次式によって表わされる。

$$D = \frac{1}{3} \left| \frac{J_1(ka \sin \alpha)}{ka \sin \alpha} \right| \left[\begin{aligned} &\cos(kdq) \\ &+ \cos \left\{ kd \left(\cos \frac{\pi}{6} \cdot p - \sin \frac{\pi}{6} \cdot q \right) - \psi \right\} \\ &+ \cos \left\{ kd \left(\cos \frac{\pi}{6} \cdot p + \sin \frac{\pi}{6} \cdot q \right) \right\} \\ &+ \cos \left\{ kd' \left(\sin \frac{\pi}{6} \cdot p - \cos \frac{\pi}{6} \cdot q \right) - 2\psi \right\} \\ &+ \cos(kd'p + \psi) \\ &+ \cos \left\{ kd' \cdot \left(\sin \frac{\pi}{6} \cdot p + \cos \frac{\pi}{6} \cdot q \right) + \psi \right\} \right] \quad (4.3) \end{aligned}$$

ただし、 $k = 2\pi/\lambda$, $p = -\sin \frac{\pi}{6} \cdot \sin \alpha$, $q = \cos \frac{\pi}{6} \cdot \sin \alpha$ である。d, d'は図 4.3 に示す。このとき超音波は、図 4.5 に示す b 方向へ放射される。図 4.6 に式 (4.3) を用いて求めた

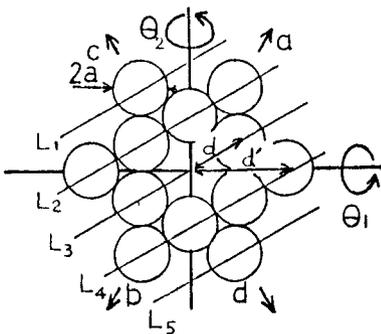


図 4.5 受波器のグループ

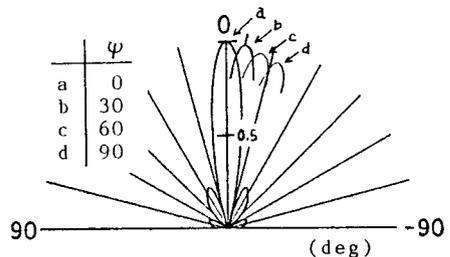


図 4.6 放射波の偏向

放射音波の偏向の状態を示す。放射音波の偏向角度が大きくなると副極が大きくなり具合が悪い。また放射音圧もそれにつれて減少している。そのため、広い範囲にわたって超音波を放射することはできないが、被検出物体が存在する限られた範囲内で超音波による空間の走査を行なうには十分であると考えられる。

送波器のグループの構成を変えれば、空間内の任意の方向に超音波を放射することも可能であるが、これを実現するための電気回路は非常に複雑となる。本研究では、図 4.5 に示した a, c, d 方向に音波を偏向させる回路を製作して用いた。また、本装置を用い音波の偏向の状態を実測した結果、主極の方向はほぼ理論値と同じ値であったが、偏向量を大きくした時の副極が理論値と比較して大きくなった。これは、使用した送波器が平面音源でないためであろうと考えられる。そのため反射音圧の極値探索では偏向角を大きくすることはできない。

c) 最大反射音圧方向の探索

b) で示した電気的な制御による放射音波の空間走査によって得られた反射音圧の情報を用い、最大反射音圧がどの方向に存在するかを定め、送波器をその方向に機械的に変化させる。この処理を繰り返すことで、常に送波器の正面は物体の方向を向き、その方向を求めることで物体の存在する方位が求められる。電気的な空間走査によって得られた反射音圧の値を用いて、最大反射音圧がどの方向に存在するかを求め、送波器の正面を物体の方向に向ける方法について以下に示す。

送波器の正面 (X 軸) を、図 4.7 に示すように θ_1, θ_2 の回転によって変化させる場合、目標物体からの反射音圧 S の θ_1, θ_2 に関する傾斜 (gradient)⁵⁷⁾ g は次式のように表わされる。

$$g = \begin{pmatrix} \partial S / \partial \theta_1 \\ \partial S / \partial \theta_2 \end{pmatrix} \quad (4.4)$$

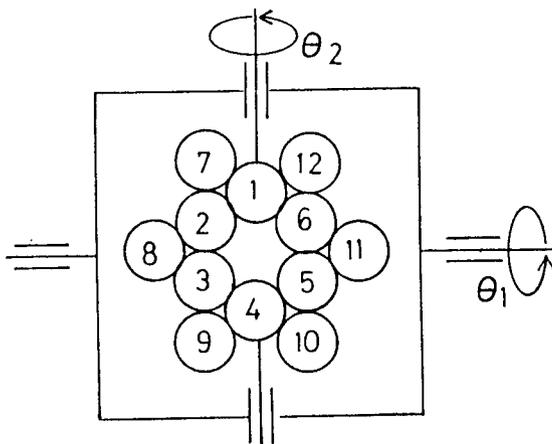


図 4.7 送波器の向きの変化

式(4.4)の \mathbf{g} は、目標物体からの反射音圧 S の最大傾斜方向を示しているから、目標物体の方向は次式を繰り返し実行することにより求められる。

$$\theta_{i+1} = \theta_i + h \frac{\mathbf{g}}{g} \quad (4.5)$$

ここで θ_i は $(\theta_{1i}, \theta_{2i})^T$ であり、 h は探索ステップの長さを示すスカラー量である。

電気的な放射音波の偏向による反射音圧が、 a, b, c, d 方向においてそれぞれ S_a, S_b, S_c, S_d であったと仮定し最大傾斜方向を求める。電気的な放射音波の偏向の回転軸を図4.8に示すように、 k_1, k_2 とし、その回転角を $d\omega_1, d\omega_2$ とすると、 s と ω は次式によって関係づけられる。

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial S}{\partial \omega_1} &\doteq S_c - S_d \\ \frac{\partial S}{\partial \omega_2} &\doteq S_a - S_b \end{aligned} \right\} (4.6)$$

故に最大傾斜方向は、式(4.6)によって次式で表わされる。

$$\begin{aligned} \frac{\partial S}{\partial \theta_1} &= \frac{\partial S}{\partial \omega_1} \cdot \frac{\partial \omega_1}{\partial \theta_1} + \frac{\partial S}{\partial \omega_2} \cdot \frac{\partial \omega_2}{\partial \theta_1} \\ &= -\frac{\partial S}{\partial \omega_1} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{1}{\cos \theta_2} + \frac{\partial S}{\partial \omega_2} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{1}{\cos \theta_2} \\ &= \frac{-\sqrt{3}}{2 \cos \theta_2} \left(\frac{\partial S}{\partial \omega_1} + \frac{\partial S}{\partial \omega_2} \right) \\ &\doteq \frac{-\sqrt{3}}{2 \cos \theta_2} (S_a - S_b + S_c - S_d) \end{aligned} \quad (4.7)$$

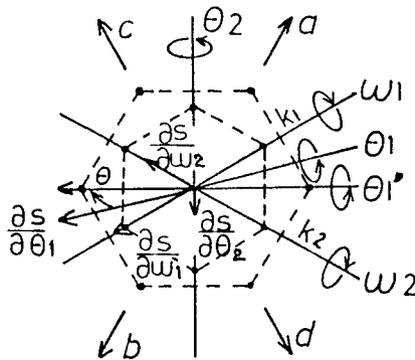


図4.8 放射波の偏向方向

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial s}{\partial \theta_2} &= \frac{\partial s}{\partial \omega_1} \cdot \frac{\partial \omega_1}{\partial \theta_2} + \frac{\partial s}{\partial \omega_2} \cdot \frac{\partial \omega_2}{\partial \theta_2} \\
 &= -\frac{\partial s}{\partial \omega_1} \cdot \frac{1}{2} + \frac{\partial s}{\partial \omega_2} \cdot \frac{1}{2} \\
 &= -\frac{1}{2} \left(\frac{\partial s}{\partial \omega_1} - \frac{\partial s}{\partial \omega_2} \right) \\
 &\doteq \frac{1}{2} (s_a - s_b - s_c + s_d) \tag{4.8}
 \end{aligned}$$

探索のためのステップ幅 h は、送波器の正面軸の方向が検出物体の方向を向くにしたがい、反射音圧が大きくなることを利用し、音圧と反比例した値を設定している。

4.2.2 検出装置

製作した検出装置の構成は図 4.9 に示すように、a)送波器の向きを制御し、方向検出を行なう部分、b)各送波器に与える波形の位相を制御し、電氣的に放射音波を偏向させる部分、c)反射波の音圧を測定し、被測定物体からの反射波のみを抽出する部分、d)装置全体を制御する部分に分けられる。以下に各部の装置の構成と処理内容について述べる。

a) 送波器の向きの制御部

送波器の向きの制御部は、送波器の正面軸が常に空間運動物体の方向を向くように制御を行なう。その構成を図 4.10 に示す。受波器はカルダン支持された台上に設置してあり、各回転軸は、DCサーボモータによって駆動している。DCサーボモータは、各回転軸に取り付けたポテンシオメータを検出値とし、マイクロコンピュータから出力されたデータを D/A 変換した値を目標値とした位置制御を行なっている。8 bit D/A 変換器は 1/256 の分解能を持ち、各軸の回転量は ± 40

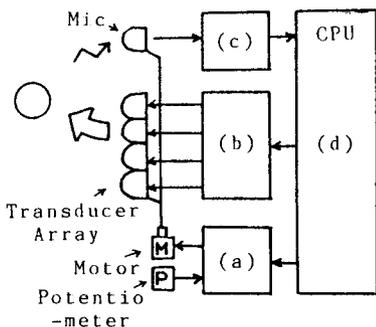


図 4.9 検出装置の構成

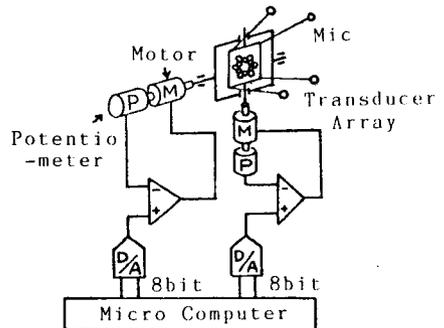


図 4.10 送波器の向きの制御

度であるので、 $80/256 = 0.3 \text{ deg}$ の精度で送波器の方向を設定できる。カルダン支持された台上の送波器と、その駆動部の状態を写真4.1に示す。

b) 位相制御部

位相制御部では、超音波の放射方向を電気的に制御するために、各送波器に与える発振波の位相を制御している。回路のブロック図を図4.11に示す。

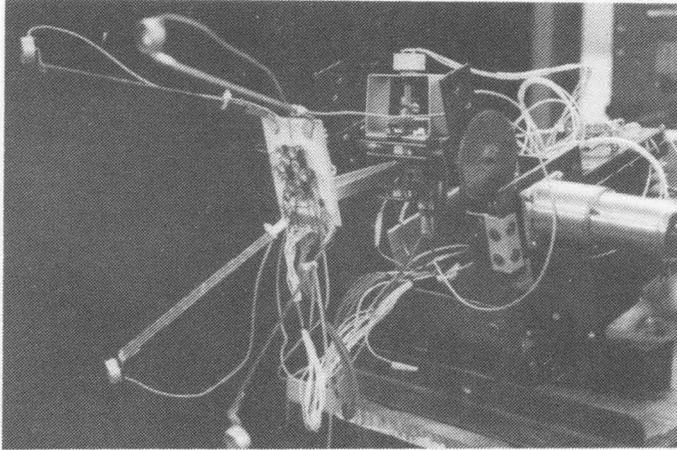


写真 4.1 送波器とその向きの駆動部

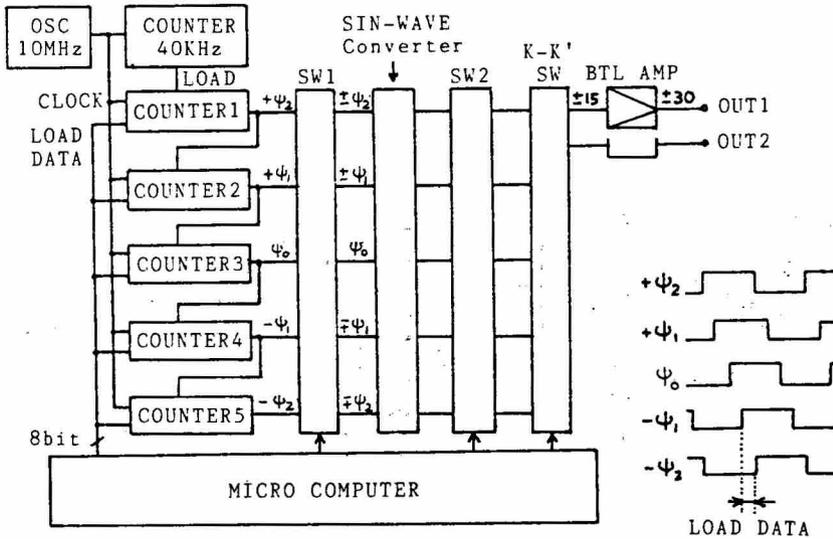


図 4.11 位相制御部のブロック図

受波器の5組のグループには、それぞれ 一つづつ位相がずれた5組の正弦波を与えねばならない。位相のずれはマイクロコンピュータからそれぞれカウンタへLOAD信号によってセットされる。その値は、カウンタのCLOCK端子へ入力する10MHzの発振波によってダウンカウントされる。その結果、LOAD信号と比べて位相が遅れた波形がOUT端子より出力される。この信号を次のカウンタのLOAD信号とすることにより、さらに同じ量だけ位相が遅れた出力が得られる。

このようにして得られた位相の異なる発振波($+\psi_2$, $+\psi_1$, ψ_0 , $-\psi_1$, $-\psi_2$)の中から、アナログスイッチ(SW₁)により必要な発振波を選択する。以上の処理における波形は方形波であり、それを正弦波に変換し、アナログスイッチ(SW₂)によってトーンバースト波にしている。そしてK-K' SWによって送波器の組合わせを切換えている。以上のスイッチは全てマイクロコンピュータによって制御している。

c) 反射音圧検出部

図4.12に示すように、反射音圧検出部では、被検出物体からの反射音波を検出し、その音圧を測定している。受波器は、送波器が設置されているカルダン支持された台上に、それぞれ異なる方向に4個設置されており、その指向性を鈍くしている。また送波器が設置されている付近は、放射音波により音場が乱れて正確に反射音波が検出できないため、受波器の位置を送波器から遠ざけて設定した。4個の受波器からの入力は、ピークホールドされた後、加算回路により加算され、10 bit A/D変換器を通じてマイクロコンピュータに入力される。この時の放射音波と、その音波に

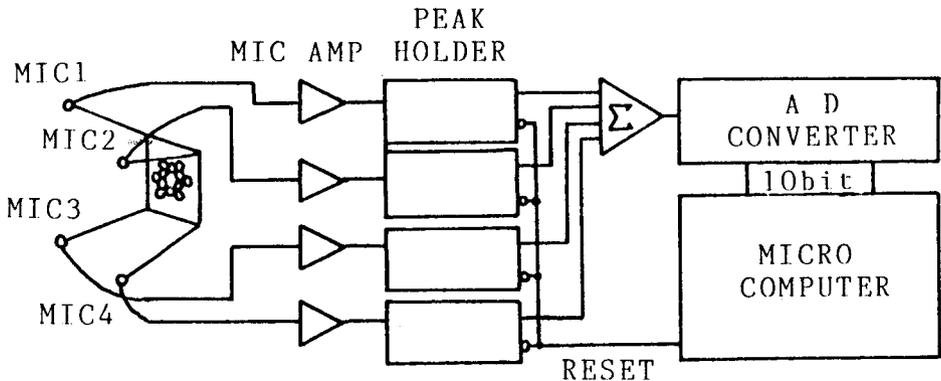


図4.12 反射音圧検出部の構成

よる物体からの反射波の状態を図4.13に示す。図4.13のAは放射音波、Bが受波器の入力を増幅し整流して得られた波形であり、Cがピークホールド回路を通過した後の信号である。受波器の入力波における S_1 は放射波が直接受波器に検出された信号であり、 S_2 が目標物体からの反射波、 S_3 が背景からの反射波である。また計測を周期的に行なうと、直前の検出サイクルにおける背景からの反射波が含まれることがある。送波器からの直接波の受波信号と目標物体からの反射波を分離し、必要な信号を取り出すために、ピークホールド回路のリセット端子を制御している。その状態を図4.13のCに示す。前の検出サイクルの反射波の影響を除去する最も簡単な方法は、その音波が完全に減衰するまで次のサイクルを実行しないことであるが、測定時間が長くなる。そこで本方法では、二回放射を行ない、反射音波の到達時間が等しい組の中で最も時間の短いものを目標物体からの反射波であると同定し、乱数によって検出サイクルの周期を定め、最短の到達時間における音圧を測定している。

d) 検出装置の制御部

前述のa), b), c)の装置及び回路は、マイクロコンピュータにより制御している。制御装置の外観を写真4.2に示し、その構成を図4.14に示す。マイクロコンピュータはマイクロプロセッサとしてMC6802を使用し、制御プログラムはすべて機械語で書かれている。処理の内容を図4.15のフローチャートに示す。プログラムサイズは約2.2 Kバイトである。探索に要する処理時間は、装置と目標物体までの距離によって異なる。例えば、1.3 mの距離に置かれた目標物体の場合、音波が放射され、反射波が検出できるまでの時間は、音波の速度を344 m/secとすると約7.6 msecである。反射波の同定を行なうのに必要なパルス数は2パルスであり、この処理において15.2 msecかかる。次に、四方向の反射音圧の計測を行なうのに8パルスの放射を行なっているが、近接した2つのパルスを連続的に放射しているため実質的には4パルスを放射している。この処理

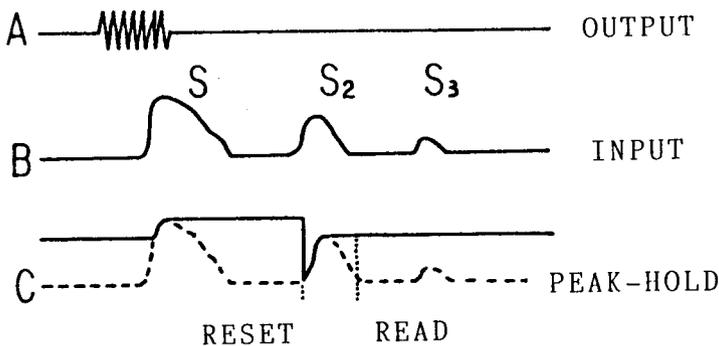


図4.13 反射音圧信号の処理

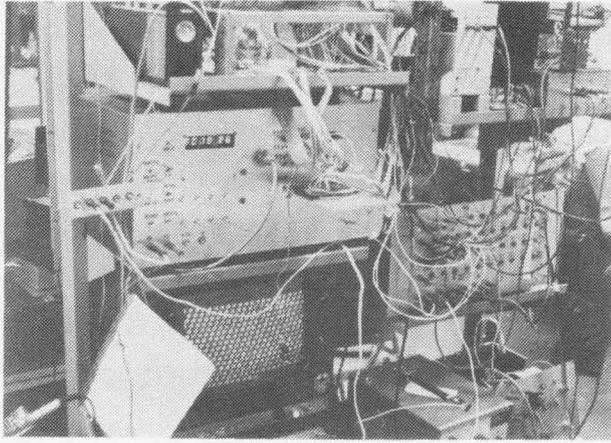


写真 4.2 制御装置の外観

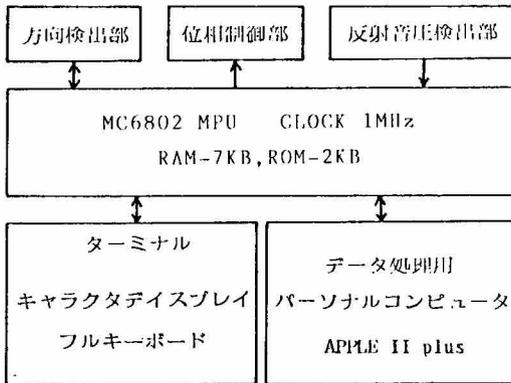


図 4.14 制御装置の構成

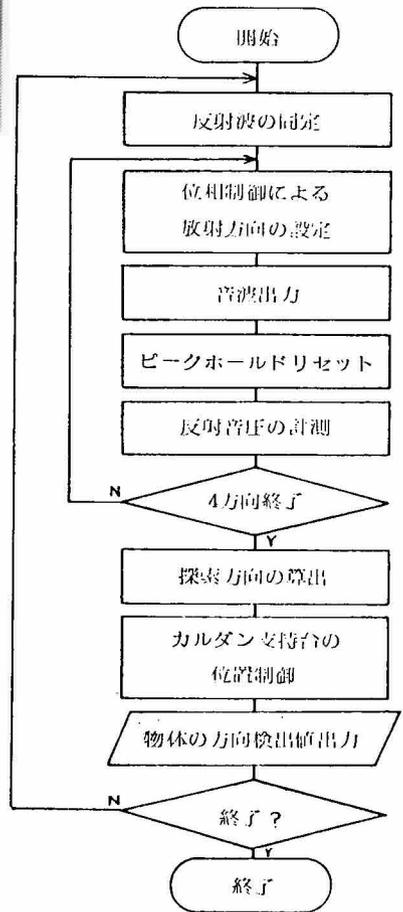


図 4.15 制御処理

のための所要時間は結局 30.4 m secである。このような計測状態で実際に計測を行ない、これらの処理時間を計測した結果、反射波の同定に約 30 m sec, 4 方向の音圧測定と探索方向の計算処理に 50 m sec かかった。この結果、一回の計測に占めるプログラム処理は、43%であり、残りの 57%は超音波が放射されている時間である。すなわちソフトウェアによる処理時間は、一回の探索において約 35 m sec となる。ただし、計測サイクルの周期を乱数によって定めているため、この処理時間は一定ではなく、計測サイクルに含まれる時間遅れ処理のための時間や、放射波がトーンバースト波として空中へ放射される時間をも含んでいる。そのため、純粋なソフトウェアによる処理時間は、さらに短いと考えられる。

図 4.15 に示した処理を繰り返すことにより、送波器の正面軸は常に物体の方向を向くから、この方向が計測結果となる。計測結果は用のマイクロコンピュータ (APPLE II-plus) へ転送しデータ処理を行なっている。

4.2.3 測定能力

製作した装置が、設計時に要求した性能を満たしているかどうかを a) 位相の制御による放射音波の偏向と指向性, b) 目標物体からの反射波の検出と探索処理、について評価する。さらに実験により、空間運動物体の追跡動作を行なった結果について以下に述べる。

a) 位相の制御による放射音波の偏向と指向性

複数の送波器による放射音波の指向性分布を計測するために、送波器から 1 m 離れた位置にマイクを設置し、送波器を設置したカルダン支持台の各軸を回転 (θ_1, θ_2) させ、音圧を求めた。各送波器に与える発振波の位相のずれ ψ が 0 のときの音圧分布を図 4.16 に示す。理論的に求めた音

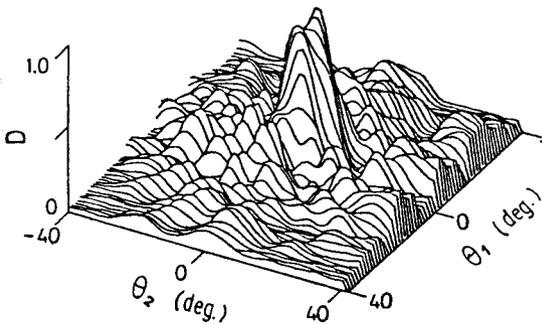


図 4.16 送波器の指向性分布 ($\psi = 0$)

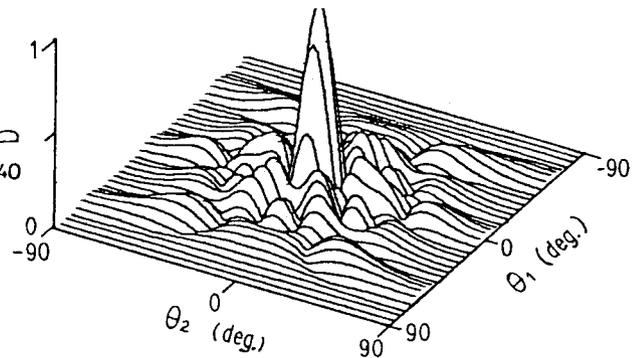


図 4.17 理論的な指向性分布

圧分布 (図 4.17) とほぼ等しい分布が得られていることが分かる。

図 4.18 に、各送波器のグループに与える位相 ψ を 45 度ずらした時の音圧分布を示す。図 4.16 と比較すると、確かに主極の方向が変化しているのが分かる。また、副極が現われているが、主極の音圧と比較してその値は小さく、実際の使用においては、問題とならないであろうと思われる。

b) 目標物体からの反射波の検出と探索処理

目標物体からの反射音圧は、物体の表面状態、形状、材質によって異なる。一般の物体の表面は、滑らかでなく、無数のおうとつが存在し、ある微小面は放射音波に対し垂直であると考えられる。物体による反射音圧は、このような微小面の総面積によって大きく変化する。そこで、実験に用いた物体の形状は、その反射波に関して等方性となるように球面を用いた。

目標物体の材質は、音波の反射率に影響を与えられられる。反射率 R_p は、入射音圧と反射音圧の比であり、媒質の固有音響インピーダンス Z を用いると次式で表わされる。⁵³⁾

$$R_p = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} \quad (4.9)$$

ここで、 Z_1 は空気の、 Z_2 は物体の固有インピーダンスである。空気の固有インピーダンスは、固体と比較し $1/10^4$ 以下であるため、目標物体が空気を多く含むもの以外であれば、音波はほぼ 100% 反射する。実験で用いた球の材質は紙であり、その表面を樹脂でコーティングしている。

目標物体が球の場合、その直径が音波の波長と比較し、同じかそれ以下になると回折が現われる。使用した音波 (40 KHz) の波長は約 8 mm であるから、回折の影響を避けるために、実験で用いる球の直径を 130 mm とする。図 4.19 に、この物体を、送波器から 1 m 離して求めた反射音圧の

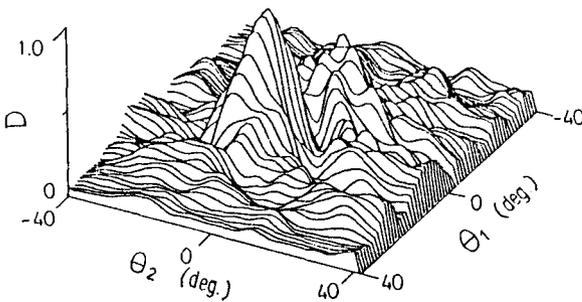


図 4.18 放射音波の偏向の状態 ($\psi = 45 \text{ deg.}$)

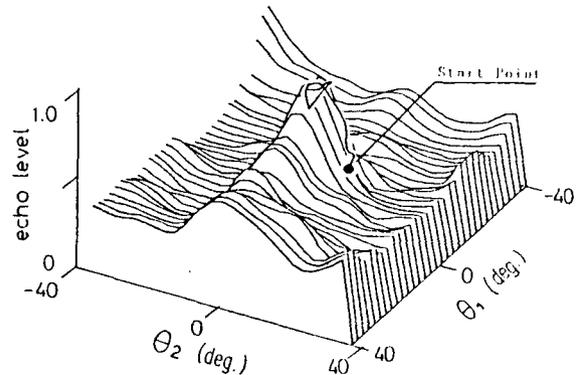


図 4.19 反射音圧の分布

分布を示す。図の中央部のピークが物体の存在する方向である。物体は、送波器の正面 ($\theta_1 = 0$, $\theta_2 = 0$) より約 12 度 ($\theta_1 = 0$, $\theta_2 = 12$ 度) ずれた位置に設置されており、ほぼその位置に音圧の最大値が存在していることが分かる。同図に、実際に音圧の最大値を探索したときの初期位置と探索経路を示した。探索方向は、ほぼ直線的に最大音圧方向を向いており、本研究で用いた探索法の有効性が確認できた。

本装置の物体追跡速度の限界は、目標物体の方向を探索中に目標物体が放射波の主極外に出て、反射音圧が得られなくなる速度であると考えられる。放射波の主極は図 4.16 に示すように ± 15 度の範囲を持ち、物体からの反射波も図 4.19 に示すように約 ± 15 度の範囲となっている。目標物体は、この範囲内に必ず存在しなければならない。物体の追跡速度の限界は、一回の探索に要する時間と、一回の探索ステップによって定まる。初期探索ステップは 2.5 度であり、4.2.2 節 (d) に示したように、目標物体までの距離が 1.3 m の場合の探索に要する処理時間は 80 m sec であるから、追跡速度の限界は、31.25 deg/sec (789 mm/sec) となる。しかし、この 80 m sec には、送波器の向きを変化させる時の機械的動作に要する処理時間が含まれていないため、実際の追跡速度の限界は、さらに小さい値となる。

c) 実験による物体検出能力の評価

運動物体の存在する方向を、本装置を用いて測定し、その測定精度や物体追跡能力を評価する。目標物体に任意の運動をさせるために、図 4.20 に示すような装置を製作し用いた。この装置は、マイクロプロセッサによって制御されたパルスモータにより、目標物体をある平面内の任意の位置に設定することができる。目標物体には、直径 131 mm の半球を使用し、直線運動及び楕円運動を

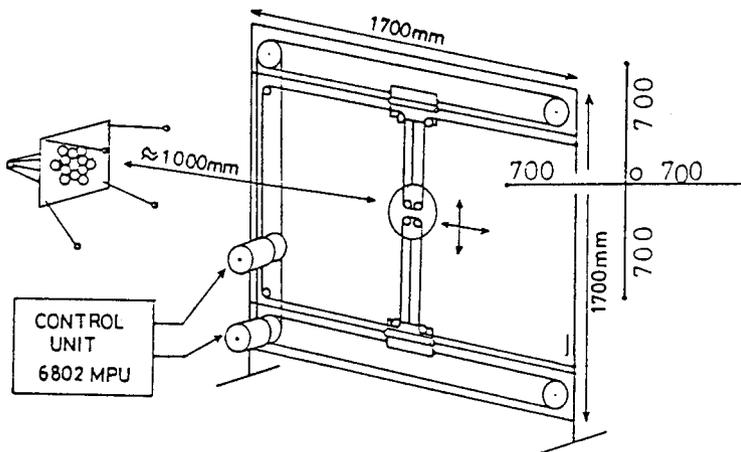


図 4.20 実験状態

行なわせ、その運動を計測した。目標物体と送波器間の距離は約 1 m である。

目標物体を直線運動させた時の、物体の運動速度と測定誤差の関係を図 4.21 に示す。目標物体の移動速度が増すに従い、測定誤差が大きくなる傾向がみられる。しかし θ_1 に関しては、物体の移動速度が遅いにもかかわらず、大きな測定誤差となっている。この傾向は、物体を楕円運動させた時にもみられる。図 4.22 に、物体を楕円運動させた時の追跡の軌跡を示す。移動速度が遅い場合 (50 sec/cycle) の方が、速い場合 (17 sec/cycle) と比べて、 θ_1 の測定結果に多くの変動を含んでいる。その原因は、物体の運動が遅いため、探索によって反射音圧に達したあとも、探索が継続されるためであろう。 θ_2 の測定値においてこの傾向が見られないのは、各軸を駆動しているサーボモータの位置制御回路のゲインが、それぞれで異なっているためであると考えられる。各軸まわりのモータの負荷が異なるため、同一のゲインで駆動すると、静止状態で振動することがあり、このような誤差を防ぐには、最大反射音圧に達したことを判断し、方向検出の制御を実行しないようにプログラムを改良すれば良い。物体の移動速度が速い場合、 θ_1 、 θ_2 共に大きな誤差が存在するが、これは最大音圧方向を検出する前に物体が移動したためであると考えられる。

d) 一方向写真計測システムの能動化に対する適用性の検討

一方向写真計測システムの能動化に必要な、目標物体の方位測定精度について検討する。一般の撮影レンズの画角 (被写界をレンズの主点から見た角度で表わしたもの) は、標準レンズで約 50 度である。画角内に被写体が占める割合が 80% の場合、常に被写体の画像を捕えるために必要な被写体の方位検出装置の測定精度は、画角の 10% となり、画角が 50 度であれば、5 度となる。本検出装置の測定精度は、図 4.21 より、かろうじてこの条件を満たす程度である。一般の被写体に

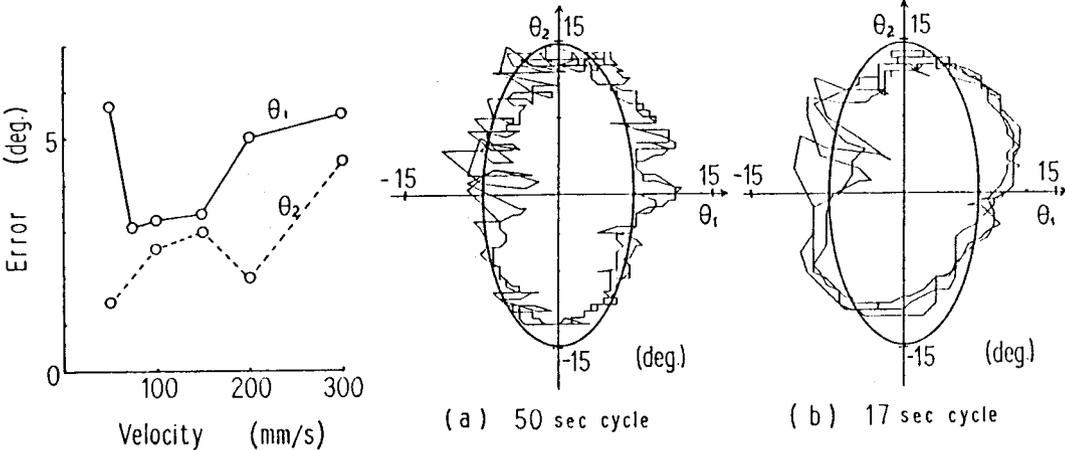


図 4.21 直線運動における誤差

図 4.22 楕円運動における追跡の軌跡

においては、目標物体が球の場合のように、その画像の中心と反射音圧が最大値となる位置が一致することは、まれである。そのため、画像に占める被写体の割合をさらに小さく設定しなければならない。また、被写体が音波の反射に関して異方性であるとする、反射音波が検出できなくなる恐れがある。例えば外形が平面で構成された物体の検出を行う場合、その平面が受波器の方向を向いていない場合、その平面による反射波は、受波器の方向へ伝播せず、反射音圧を検出することが不可能となる。

次に追跡速度について検討する。本方法を用いた目標物体の追跡速度の限界は、検出装置まわりの角度において 25 rad/sec であった。例えば、撮影距離が 5 m であった場合の被写体の限界速度は 2.4 m/sec となったが、一方人間の歩行速度は $1 \sim 2 \text{ m/sec}$ であるから、追跡可能である。⁵⁸⁾ 同じ撮影条件で、被写体が放物体であれば、最高 2.3 m/sec の速度で垂直に打ち出された物体を追跡することができるが、物体が達する高さは、わずか 0.3 m でしかない。したがって、このような運動の測定対象には適用不可能である。

次に信頼性について検討する。実験において追跡不可能となる場合が、目標物体の運動速度や、反射波に対する等方性等の制限条件を満たしているにもかかわらず、発生することがあった。原因は、背景からの反射波の影響によるものと思われる。背景からの反射波の影響を除去するために、本研究では、目標物体からの反射波をその到達時間により同定し、検出サイクルの周期を乱数によって定め、目標物体を同定した時の到達時間における反射音圧を測定した。しかし、偶然に背景からの反射波が、目標物体からの反射波と一致し、正しい音圧が測定できず、まちがった探索方向を算出してしまうのであろう。この欠点を改善する最も簡単な方法は、反射音圧のサンプリング回数を増し、その平均値を用いることである。ただし、この方法を用いると方向探索に要する時間が増し、追跡速度の限界が低下することは免れない。

4.3 イメージセンサによる物体の位置検出

物体が空間内のどの方向に存在しているかを検出する方法として、超音波を用いる方法や、光学的な方法が考えられる。^{59)~63)} 超音波を用いる方法では、周囲条件によって測定値が影響を受けやすい短所があり、光学的な方法は、画像の処理が複雑で時間がかかるという短所がある。本研究で開発した方法は、光学系を工夫することにより、複雑な画像処理をせずに短時間で物体の方向検出を可能にする。したがって、運動物体の追跡のためのセンサシステムとして使用することができるものである。

4.3.1 検出法

一般に光学的な方法で物体の三次元位置を検出しようとする場合、得られる画像が二次元である

ために、物体像の確認のための処理時間が長くなる。図 4. 23 に示す画像のように、もし背景と物体の明るさが明確に異なっている場合や、背景が物体の像による信号と比較して低周波または高調波ノイズとして扱える場合は、各軸に平行に明るさの平均をとっても、物体の各軸方向における位置が検出できる。さらに、物体の照明光の波長と同じ波長の光だけを透過するフィルタを用いることで、背景のノイズを除去することも可能である。このような画像の平均化を光学系で実現すれば、平均化のための処理時間が短縮でき、またフォトセンサは一次元のものを使用できるため検出装置が簡略化されて都合が良い。以下にこの方法の原理について述べる。

図 4. 24 (a) に示すように、光学センサとスリットを空間的に 90 度、食い違った状態にセットすると、光学センサ上の点 a, c では、その点からスリットを通して見ることができる空間内の情報が得られる。すなわち、空間内の点 A から C に及ぶ範囲の明るさを加算した情報が求められることになる。一般に、画像の明るさをある方向に加算する場合、全画面を微小な画素に分割し、それぞ

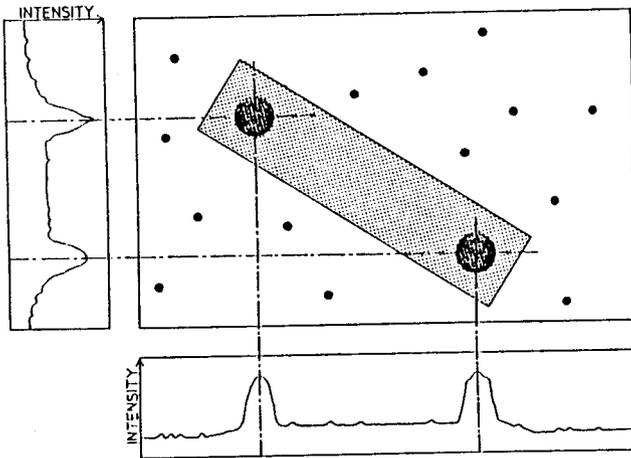


図 4. 23 画像の各軸方向への加算

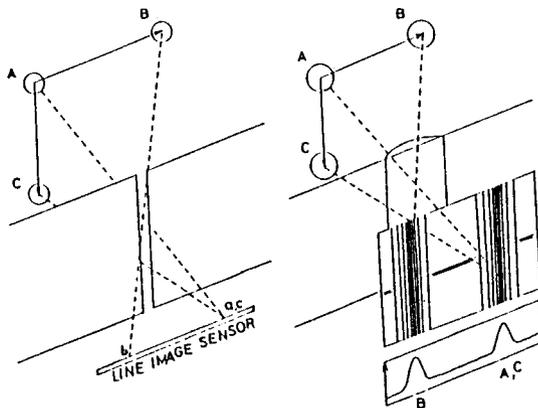


図 4. 24 検出法の原理図

れの明るさを加算する。スリットの間隔は、この画素の横方向の長さに相当し、縦方向の長さは無限小となる。このため、スリット間隔を小さくすればするほど解像度は向上し、理論的な加算による値に近づく。しかし、スリットの間隔をあまり小さくすると、光学センサ上に得られる光量が減少し、高感度な光学センサを使用しなければならなくなる。そこで、十分な光量と高い解像度を得るために、スリットの代わりにシンドリカル・レンズを用いる。この時得られる像は、図 4.24 (b) のように、レンズの軸方向に長く尾を引いたものとなる。得られた画面上に、横方向に光学センサを設置すれば、レンズの軸方向に画像の明るさを加算したものが測定できる。このような装置を 2 台使い、各光学センサを三次元座標の X 軸、Y 軸に一致させれば、検出物体のそれぞれの軸方向での変位が測定できる。

本方法の複数の標点の運動測定に対する適用可能性について以下に論じておく。標点が二個ある場合は、それぞれの軸方向に関して二個ずつの像が得られる。それらの変位のうち、どちらがどの標点に対応するかを判定することはできない。もし最初に、その対応関係を人間が定めてやれば、物体の運動している方向を検出し、運動学の知識を使用して計算機によって判定することが可能である。⁶⁴⁾しかし、標点が X, Y のどちらかの三次元座標軸と平行に位置し、その軸に垂直な方向に動く場合が一度でも存在すると判定は困難になる。背景の明るさが一様であれば、二個以上の標点であっても、標点の明るさを変化させることで判定することが可能である。また、標点の色を変えておき、三個の光学センサ上に三元色のフィルタをかけて、それぞれの光学センサからの出力を処理することによっても標点の判定が可能である。⁶⁵⁾

標点の濃度分布より、標点の代表点を認識する手法について述べる。濃度分布は、標点の形状や向きによって異なる。例えば図 4.25 に示すように、三角形の標点の場合、同じ形状の標点であるにもかかわらず、標点の向きによって異なった濃度分布が得られる。すなわち、濃度分布には標点

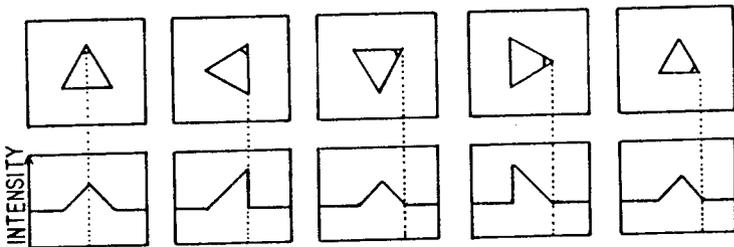


図 4.25 三角形の標点による濃度分布

の位置だけでなく、向きの情報も含まれる。故に、向きによって得られる濃度分布が全て異なるような形状の標点を用いれば、標点の向きも計測することが可能である。しかし、本計測法は、標点の位置を求めることを目的としているため、このような形状の標点を用いる必要はない。むしろ、得られる標点の濃度分布が、標点の向きにかかわらず一定である方が、標点の位置を求める処理は単純化されて都合が良い。そこで、本方法では、円形の標点を用い、その中心を代表点とした。

円形の標点による濃度分布より、その代表点である中心を求める方法には、濃度分布が最大値となる位置を測定する方法と、図 4.26 に示すように、標点の濃度分布をある値に対して比較し、二値化されたデータの両端のエッジの間を測定する方法が考えられる。背景のノイズの影響は、図 4.27 に示すように、濃度分布が最大値となる位置を測定する手法の方が、より大きいと考えられる。すなわち、濃度分布が最大値となる付近では、濃度分布の傾斜がゆるやかであり、微小なノイズであっても、最大値の位置が大きく変動すると考えられる。逆に、二値化する値の付近における濃度分布の傾斜は急であり、ノイズの影響は少ないと考えられる。また濃度分布の二値化は、ハードウェア化も可能であり、処理データの量も少なくなり高速な計測が可能となる。

以上の理由により、本方法では二値化による標点位置の検出法を用いた。この方法で問題となるのは、二値化のためのしきい値をいかにして定めるかという事である。物体が、検出装置との距離が変化するような運動をする場合、得られる光量は距離の二乗に反比例して変化するため、濃度分布のレベルが大きく変動することが予想される。また、照明光の不均一さや、背景の変化によっても同様の事が起こりうる。そのため、二値化のためのしきい値を一定にすると、標点の濃度分布のレベルが下がり、検出不可能になったり、逆に全体の濃度レベルが上がり、背景のノイズを標点として検出してしまふ恐れがある。本方法では、しきい値を濃度分布に応じて変化させて、この問題を解決した。その手順を以下に示す。

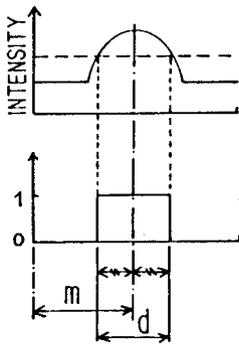


図 4.26 二値化による中心の検出

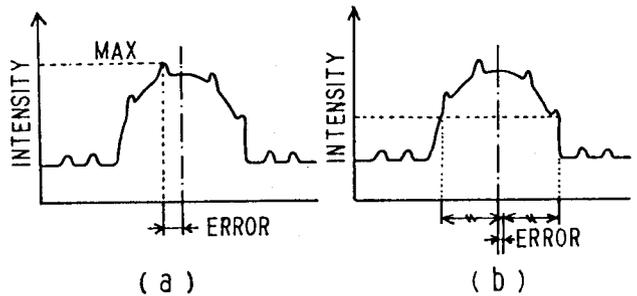


図 4.27 背景のノイズの影響

- Step 1) 計測を開始する前に、得られた像の濃度分布を表示し、適当なしきい値を設定する。
- Step 2) 定めたしきい値を用い、センサーから出力される信号を二値化する。このとき標点の大きさ(図4.26の長さd)を求める。
- Step 3) 定めたしきい値を用い、センサーから出力される信号を二値化し、標点の位置(図4.26の長さm)を求める。
- Step 4) Step 3における標点の大きさをStep 2における値と比較し、大きければしきい値を上げ、小さければ下げる。
- Step 5) Step 3へ戻り、計測を継続する。

Step 4において、しきい値を変化させる量は、標点の濃度分布の特性によって定めなければならない。例えば、標点の濃度分布がゆるやかで、その最大値も大きくない場合は、変化させる量を小さくしなければならない。この量は、Step 1の段階で濃度分布を観察し、適当な値を設定している。もし、しきい値とそれによって得られる標点の大きさの関係があらかじめ分かっていたら、その関係より、しきい値を変化させる量を求めることも可能である。

4.3.2 検出装置

製作した装置は、a) 光学系、b) 光学センサの駆動回路、c,d) センサ出力データの処理部によって構成されている。以下に各部について説明する。

a) 光学系の設計

シリンダリカル・レンズと光学センサを正確に90度食い違った状態に設定し、レンズ以外からの光がセンサに入射しないような装置を製作することは困難である。そのため、市販の一眼レフカメラを改造し、そのレンズマウント部にセンサを設置する。製作した装置の外観を写真4.3に示す。

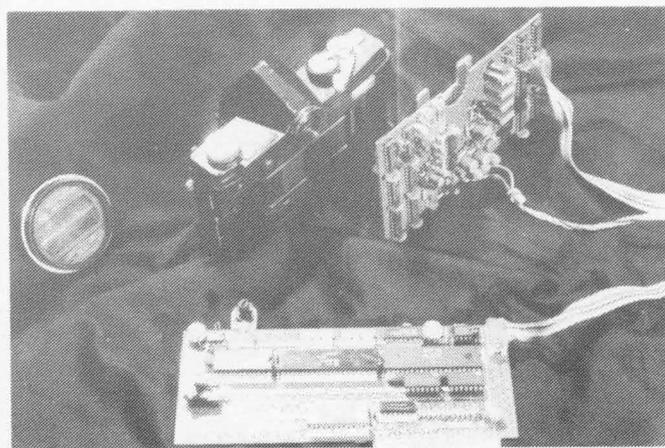


写真4.3 センサーカメラ

カメラのフィルム面に光学センサを設置しているため、シリンドリカル・レンズによって得られる画像をファインダより観察できるようになり好都合である。

シリンドリカル・レンズは、長さが40mm、焦点距離が44mmのものを用いた。光学センサ(ライン・イメージ・センサ)の長さは14.4mmであり、光学センサとレンズ間の距離は、約44mmとした。そのため画角は、センサ方向で18.6度、レンズの軸方向で49度となる。すなわち、物体の検出範囲が18.6度、画像の明るさを加算する範囲が49度となる。

b) 光学センサの駆動回路

使用した光学センサは、自己走査型512bit MOSライン・イメージ・センサ(MN512K)である。その特徴を以下に示す。

1. 512個のホト・ダイオードを28 μ m間隔(受光部28 μ m \times 28 μ m)で直線上に並べた構成である。
2. 5MHz/bitの高速走査ができ、暗電流が極めて小さいため1KHz/bitまでの低速走査が可能である。
3. 分光感度分布が広く、入射光量に対する信号出力が直線的である。

製作した駆動回路のブロック図を図4.28に示す。駆動回路は、マスター・クロック、発振器、スタートパルス発生用カウンタ、4相クロック・パルス発生器及びMOSドライバから構成されている。マスター・クロックの発振周波数は、可変抵抗により1KHzから5MHzまで変えることができる。本装置を使用する光学系には、一般のレンズの絞りに相当するものが無い。そこで、この発振周波数(シャッタ・スピードに相当)を変えることにより、露光量を調整している。イメージセンサからの出力は、ノイズ成分を含むビデオ信号とノイズ成分のみの信号であり、差動増幅器によりノイズ成分を除去したビデオ信号を得ている。

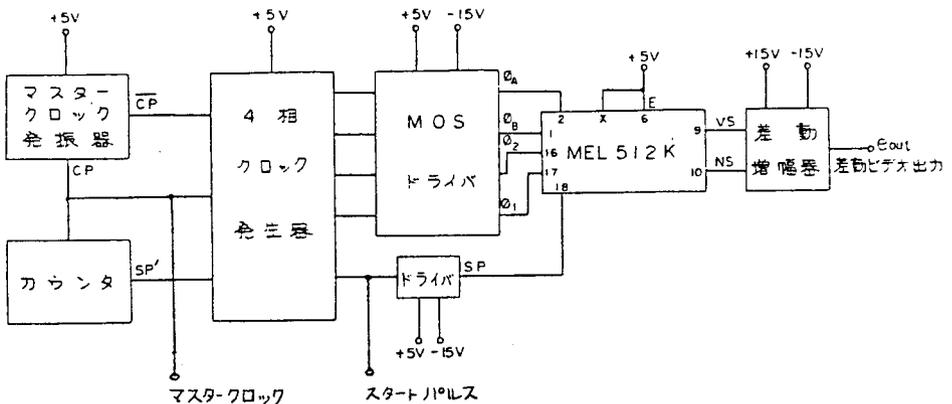


図4.28 駆動回路のブロック図

c) データ処理部 (ハードウェア)

イメージ・センサから出力されたビデオ信号を、計算機へ入力するインターフェース回路について述べる。図 4. 29 に製作した回路のブロック図を示す。ビデオ信号はアナログ信号であるため、これを計算機へ入力するためには A/D 変換器によりデジタル量に変換しなければならない。本回路では、高速化のために、ビデオ信号を比較回路により二値化している。比較電圧は、8 bit D/A 変換器を用いて計算機より任意に設定できる。そのため、検定などのために、ビデオ信号を 8 bit の A/D 変換器を用いて入力した場合と同等の情報を得ることも可能である。比較回路から出力されたシリアルなデータを、直並列変換器 (シフト・レジスタ) により 8 bit の並列データに変換し、計算機に入力している。

d) データ処理部 (ソフトウェア)

イメージ・センサから出力した 512 bit のデータを、計算機に入力するプログラムのフローチャートを図 4. 30 に示す。ソフトウェアによる入力処理時間の、計測処理に占める割合は非常に大きいから、可能な限り高速に実行するために、プログラムは機械語で書いている。使用した計算機は、汎用のマイクロコンピュータ (APPLE-II plus) であり、その CPU は、S6502 で 1MHz のクロックで駆動されている。

計測のための所要時間について、以下に検討する。機械語のプログラムサイズは、33 バイトであり、図 4. 27 の a の部分は 16 バイトで 26 マシンサイクルである。故に 8 bit 入力するのに、26 μ sec かかる。これによりイメージセンサの駆動クロックの上限は、307.7 KHz となる。したがって、512 bit 入力するために要する時間は、約 1.7 m sec となる。付録 4 に、図 4. 27 の処理を実行する機械語プログラム (CCDIN) を示す。

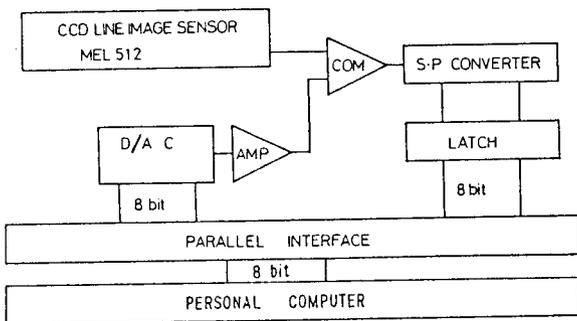


図 4. 29 インターフェース回路のブロック図

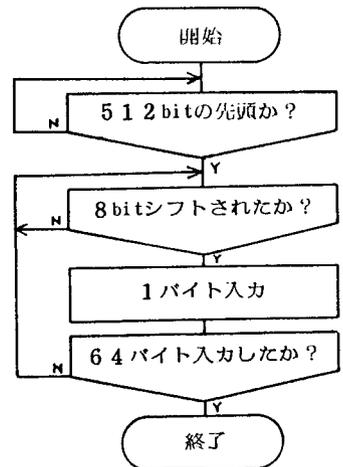


図 4. 30 データ入力処理

4.3.3 測定能力

製作した装置が、設計時に要求した性能を満たしているかどうかを次の事項について評価した。

- a) シリンドリカル・レンズを用いた光学系による、画像の明るさのレンズ軸方向への加算性能、
- b) 運動物体の方向検出能力。

a) 画像の加算性能

本装置で用いた光学系によって、正しく画像の明るさの加算がなされていることを、種々の形状の標点を用いて確認した。写真4.4に、シリンドリカル・レンズを用いて、三角形の標点を撮影したものを示す。この写真では、横方向に画像が加算されたように見えるが、フィルムの光-濃度特性が明らかでないため、この像より像加算がなされていることを検定することはできない。画像の濃淡レベルを求めるために、イメージセンサからの出力データを直接A/D変換してみる。使用したイメージセンサの光電変換特性は、図4.31に示すように、飽和光量以下では入射光量（光の強さ×繰り返し走査時間）に対して良い直線性を示しており、その出力データは光量に比例している。

図4.32(a)～(d)に、形状が異なる標点の、縦方向に明るさが加算された場合のセンサからの出力信号を示す。例えば、図4.32(a)では、理論的にはパルス状の値となるはずであるが、角が丸くなっている。原因としては、レンズの解像度及びピントのずれによるものと考えられる。しかし、各標点に関して、それぞれ幾何学的形状に対応した出力が得られている。図4.33に背景のみの濃度分布を示す。図4.32と比較すると、標点の濃度分布に背景のノイズ成分が加わっているのが分かる。背景のみの濃度分布が既知であれば、計測時の濃度分布から背景の成分を差し引くことで、ある程度ノイズ成分を除去することが可能である。しかし、標点ノイズの発生原因である部分に位置する場合には、そのノイズは測定した濃度分布に現われなくなる。そのため、画一的に計

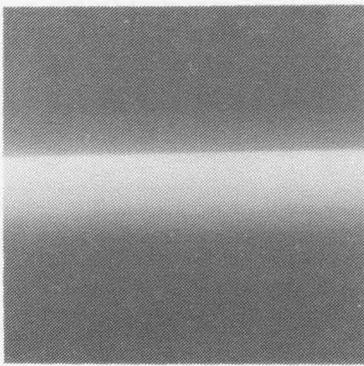


写真 4.4 三角形の標点の映像

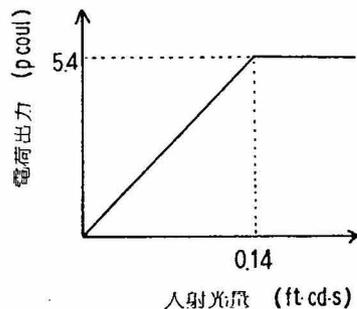


図 3.31 光電変換特性

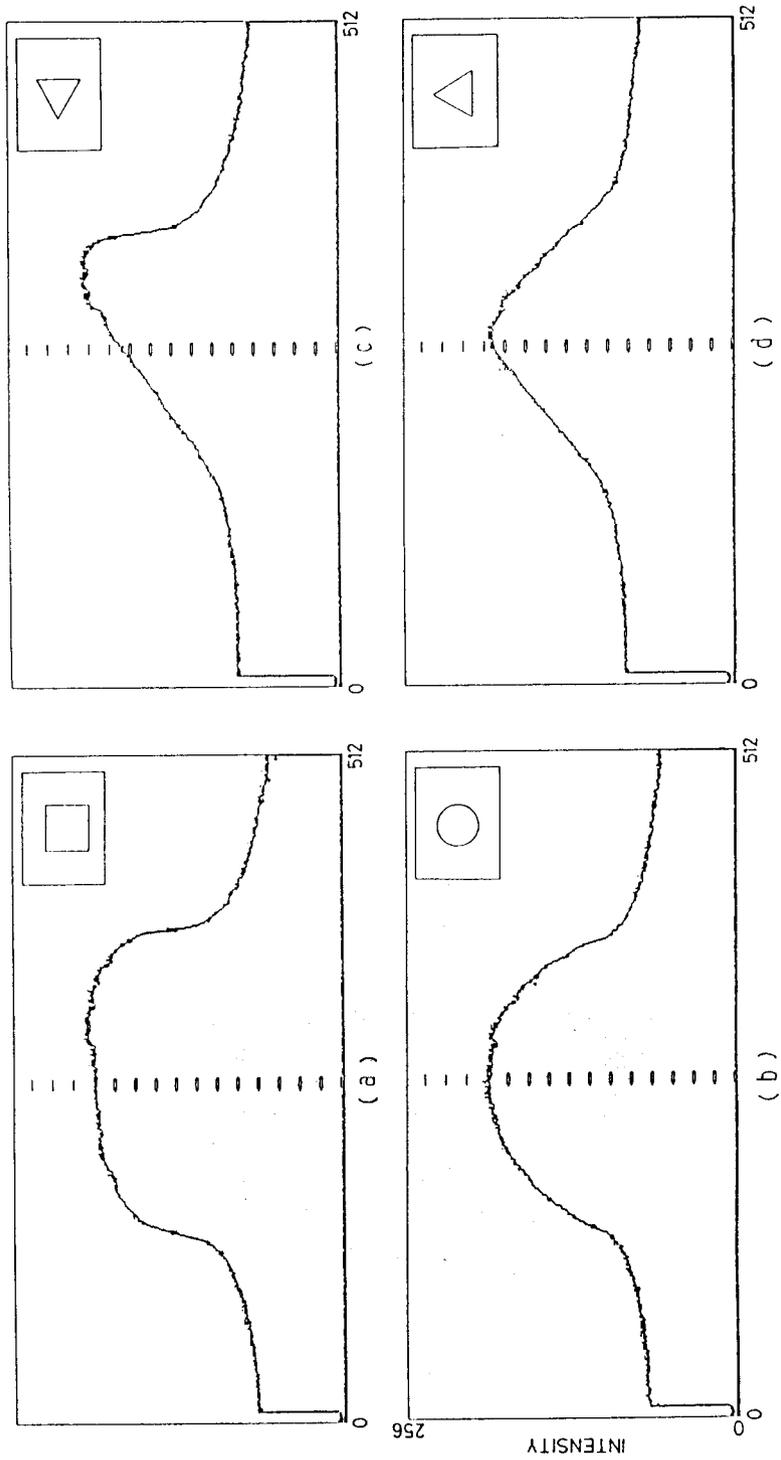


図 4.32 標点の濃度分布

測時の濃度分布からノイズ成分を差し引くことは許されない。ノイズには高周波成分が存在していないが、これは、レンズのピントが正確に合っていないためであると考えられる。この現象を利用し、作為的にピントをずらすことによって、得られた濃度分布から高周波ノイズを除去することができる。

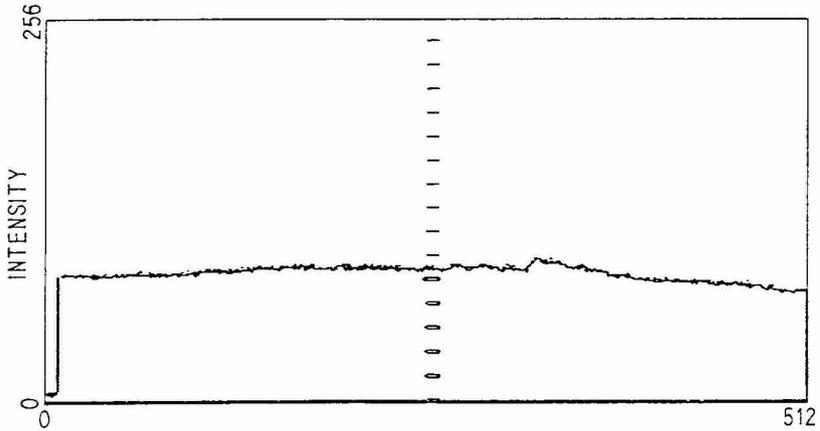


図 4.33 背景の濃度分布

b) 運動物体の方向検出能力

運動物体の存在する方向を本装置を用いて測定し、その測定能力を評価した。物体に任意の運動をさせるために、4.2.3 (c) で用いた装置を使用しても良いのであるが、物体に与えられる運動速度が、本計測法の処理速度と比較して、非常に遅いため、ここでは別の装置を用いた。

写真 4.5 に計測状態を示す。標点は直径 150 mm の円であり、それを半径 160 mm の回転板に取り付け、一回転を 1.84 秒で回転させ、計測を行なった。撮影距離は約 1 m で、照明は 2 m 離れた側方から 500 W のレフランプ一個を用いた。イメージセンサの駆動クロックの周波数は、適切

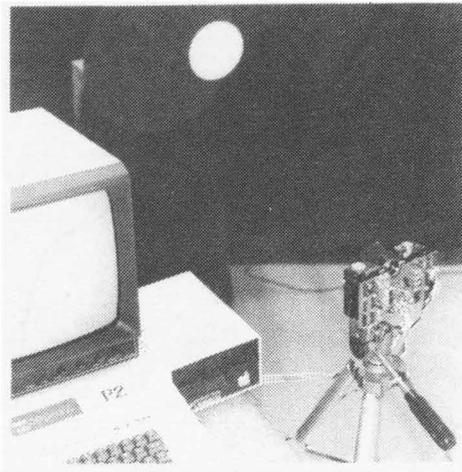


写真 4.5 計測状態

な露光量が得られるように、約 6.5 KHz に設定した。それ故、センサからの 512 bit のデータのサンプリングタイムは約 79 m sec となり、標点が一回転する間に、約 23 回の計測を行なっている。

図 4.34 にセンサからの入力データを示す。照明を側方から行ない、センサ出力を二値化する時の比較電圧を一定としたため、入力データの 0 に近い部分（図中の左側）で標点の大きさ（図 4.26 の d に相当する部分）が、入力データの 512 に近い部分（図中の右側）と比較して、大きくなっているのが分かる。このデータを元に、標点の中心を求めたものを図 4.35 に示す。図より、計測値が、ほぼ理論値の正弦波の運動として求められているのが分かる。サンプリングの周期は、ソフトウェアの処理時間とイメージセンサに与える駆動クロックを開始するタイミングによって変化する。一定のサンプリング周期で計測を行なうためには、ソフトウェアによってセンサの駆動クロックの開始パルスを与え、タイマーを使用する必要がある。

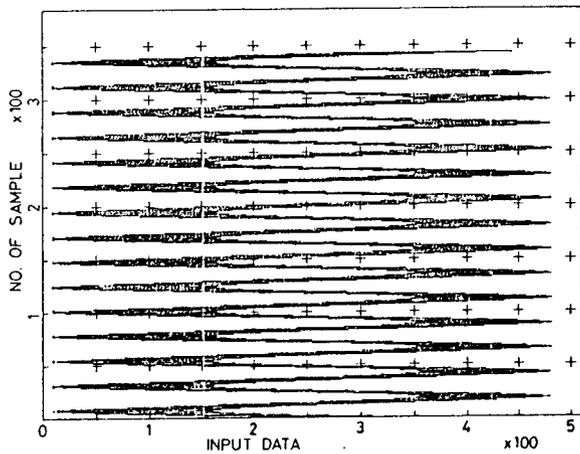


図 4.34 センサからの入力データ

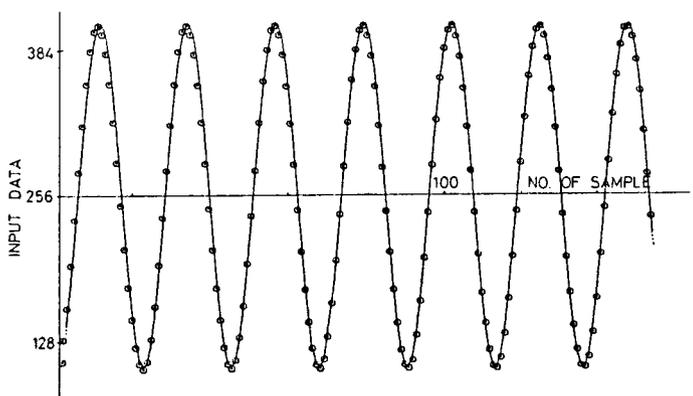


図 4.35 標点の中心の計測結果

4.4 鏡の向き制御システム

鏡を用いた一方向写真計測法と、前節で述べた物体の存在する方向を検出する装置を併用すると、撮影カメラ、照明、鏡等の向きを制御し、その測定能力を向上させることができる。特に、鏡の向きを制御し、物体の鏡像が常に撮影できるようになると、鏡を小型化することができて、その効果は大きいと考えられる。前節では、二種類の物体の方向検出装置を開発したが、光学センサを用いる方法と比較して、超音波を用いる方法では、周囲の状態や被測定物体に対する制限条件を満たすことが困難であると考えて、本研究では光学センサを用いた方向検出装置を用いて、物体の鏡像が常に得られるように鏡の向きを制御するシステムを製作した。

4.4.1 ハードウェア構成

物体の鏡像の撮影を可能にする条件を、図4.36に関して導出する。鏡面上の点Oから撮影カメラに向かうベクトルcと、鏡面の法線ベクトル \hat{t} のなす角度を θ_t とし、ベクトルcと点Oから物体に向かうベクトルvのなす角度を θ_v とすると、次の式が成立しなければならない。

$$\theta_t = \frac{1}{2} \theta_v \tag{4.10}$$

このとき、物体の存在する方向 θ_v を、光学センサを用いた方向検出装置を用いて測定し、式(4.10)を満足させるように鏡の向きを制御すればよい。

方向検出装置の検出角度の範囲は、18.6度と狭く、装置を固定して計測を行なうと、大きく運動する物体の方向を測定することは困難となる。そこで、検出装置のレンズの軸まわりに装置を回転させ、レンズの光軸が常に物体の方向を向くように制御し、その回転角度 θ_v の半分の回転角度に鏡の向きを設定することで、常に鏡像が撮影可能となる。製作した装置では、鏡の向きと検出装

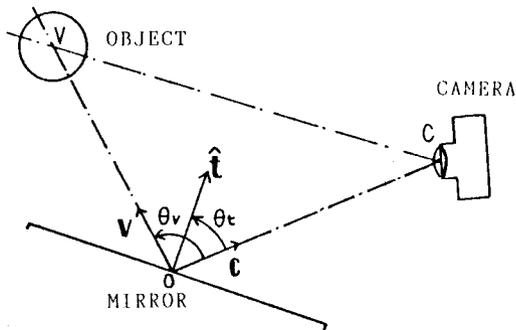


図 4.36 鏡像の撮影条件

置の向きを単一のDCモータで駆動し、鏡の向きの回転量と検出装置の回転量を歯車により1:2に設定している。鏡は1m×1mの大きさであり、図4.37に示すようにカルダン支持され、上下方向と左右方向に向きが変化する。検出装置は、鏡の各回転軸まわりの目標物体の方位を検出するために、二台設置している。DCモータは、検出装置に用いた計算機(APPLE II-plus)によって制御しており、D/A変換器によって与えた電圧をPWM方式DCサーボアンプによって増幅し、駆動している。この回路のブロック図を図4.38に示し、製作した装置を写真4.6に示す。

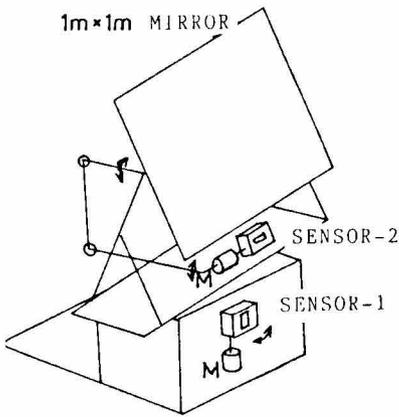


図4.37 鏡の支持状態

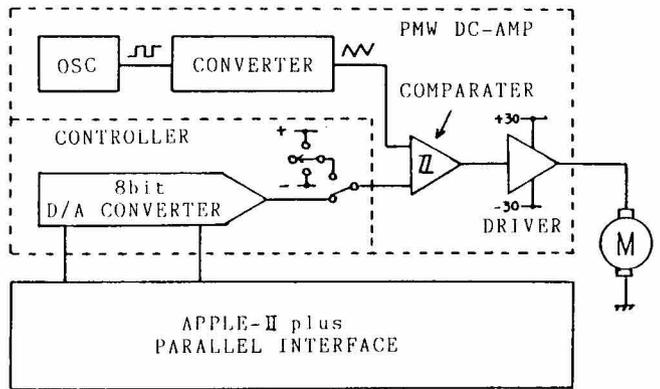


図4.38 DCモータの駆動回路

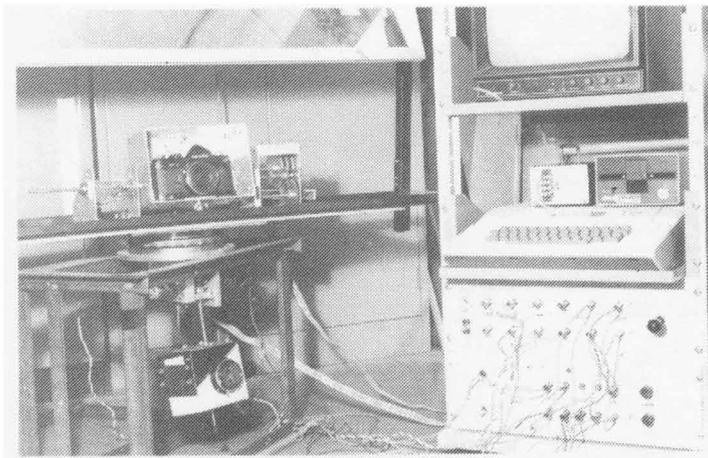


写真4.6 装置の全景

4.4.2 ソフトウェア構成

方向検出装置のレンズの光軸が、物体の存在する方向を向くようにDCモータを駆動することにより、物体の鏡像が常に撮影できるようになる。計算機による、方向検出装置の方向制御は、図4.39に示すような位置制御であると考えられる。すなわち、方向検出装置によって得られる標点の位置Kは0～511の値を持ち、位置制御の検出値に相当する。そして、方向検出装置の方向が制御され、レンズの光軸が物体の存在する方向を向いた時、検出装置によって得られる標点の位置は255となり、この値が位置制御の目標値となる。そのため、次式に示す誤差量EをDCモータの駆動回路に与える。

$$E = K - 255 \quad (4.11)$$

式(4.11)より、Eは-255～256の値を持つが、D/A変換器に与える値は0～255であり、スケーリングを行ない、次式のようにする。

$$E' = \frac{E + 255}{2} = \frac{K}{2} \quad (4.12)$$

プログラムは全て機械語で書かれており、その処理も非常に単純であるので、物体の移動時間や検出装置の計測時間に比較して、短時間に位置制御が実行できる。光学センサを用いた検出装置における標点の検出処理は、簡単であり、以上の処理と共に、高速化のためにハードウェア化することも可能である。

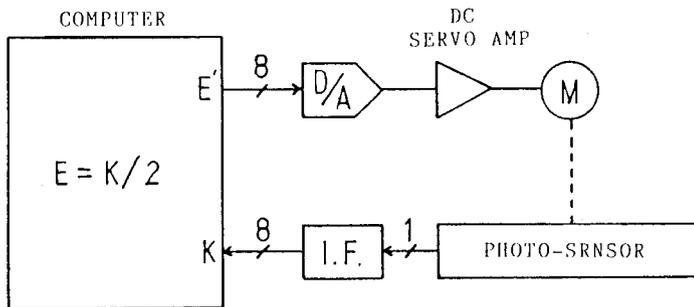


図 4.39 位置制御のブロック図

4.3.3 測定能力

実験状態を図 4.40 に示す。撮影カメラは 35 mm シネカメラを用い、鏡は、その前方 6 m の距離に設置した。被写体は、図中の START 位置から END 位置までの運動を行なう。背景からの雑音を最小限度に保つために、方向検出装置から見た被写体の背景には暗幕を張っている。また、床にも暗幕を敷きつめ、照明は鏡の近くから被写体の方向へ一方向に行なう。

被写体として直径 250 mm の白いボール（サッカーボール）を用い、地上から約 50 cm の高さで、約 200 mm/sec の速度で移動させた時の撮影画像を写真 4.7 に示す。ボールの移動中の全ての撮影画像において、ボールが正しく鏡像として得られた。方向検出装置に得られる物体の濃度分布は、背景のレベルと比較し、十分認識できる状態であったが、ボールの位置によって、そのレベルが大きく変化した。これは、ボールと照明器具及び検出装置との距離が変化するためであると考えられる。

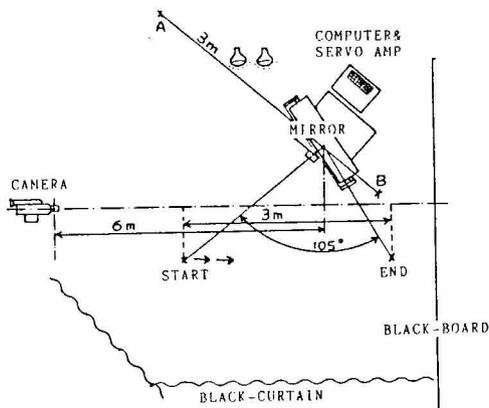


図 4.40 撮影状態

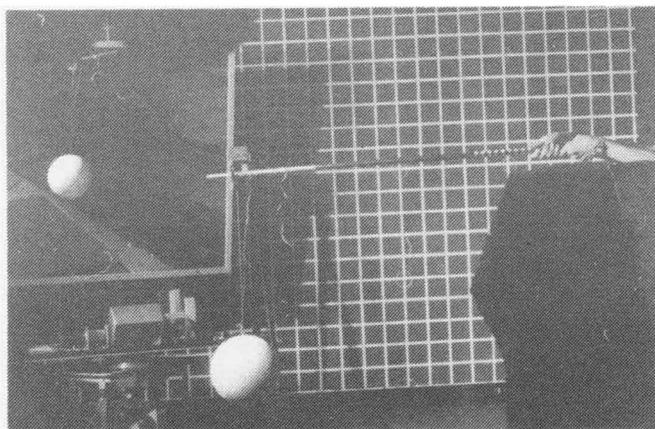


写真 4.7 撮影画像（ボール）

被写体として人体を考え、その歩行運動について実験を行なった。歩行の方向、開始位置、終了位置は、ボールの実験と同様である。標点を人体の一部分に取り付けると、標点以外の人体の部分が背景となり、その部分を標点の明るさよりも暗くしなければならない。本実験で用いた鏡は、1 m × 1 m であり、人体の大部分を鏡像としてとらえることができるので、ここでは、人体全てを標点とし、その方向を検出し、鏡の向きを制御した。検出装置に得られる人体の濃度分布は、水平方向については十分認識できたが、垂直方向については検出装置の画角が18.6度であるのに比較して、人体の被写角が34度～59度と大きく検出できない。そのため、垂直方向の鏡の向きの制御は行わず、鏡の角度を固定して実験を行なった。

写真4.8に撮影画像を示す。歩行運動中の全ての撮影像において、人体が鏡像として捕えられた。ただし、歩行中に足が開いた状態では、検出装置に得られる濃度分布が2つのピークを持ち、どちらか一方を標点として検出し、正しく人体の中心を検出しない場合が生じた。

ボール及び人体について行なった実験の結果、どちらも検出装置の回転軸まわりの角速度に関して、約15 deg/sec以上の運動を追跡することはできなかった。原因として、鏡を駆動するモータのトルクが、鏡の慣性力と比較して小さすぎたことと、鏡の駆動機構の剛性不足と、駆動部に使用した歯車のバックラッシュ等が考えられる。この対策として、発生トルクの大きなモータを使用し、鏡の向きと検出装置の向きを別々の機構を用いて駆動すること等が考えられる。光学センサを用いた方向検出装置の計測に要する速度は、人体の運動等に比較し、十分高速であるため、以上の様な対策を行なえば、十分満足な測定を行なえるであろうと考えている。

従来の鏡を用いた一方向写真計測法では、例えば図4.40の撮影状態の場合、被写体が移動する範囲を全て鏡像として捕えるためには、点Aから点Bまでの約3 mもの大きな鏡が必要である。しかし、本章で開発した方向検出装置を併用することで、1 m × 1 mの鏡で計測を行なうことができ

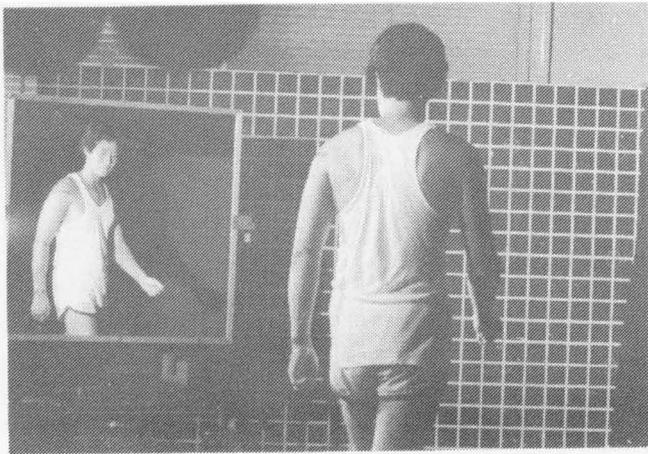


写真4.8 撮影画像（歩行動作）

。また、鏡の向きだけでなく撮影カメラや照明等の向きの制御を行えば、さらにその計測能力向上すると思われる。

5 結 言

本章では、写真計測法における被写界内でしか計測が行えないという欠点を除去するために、写体の存在する方向を検出し、その情報を元にして被写体を画像として捕えればよいと考え、超音波と光学センサを用いた二種類の物体の存在する方向を検出する装置を開発した。超音波を用いた方向検出装置は、電気的な処理により空間を音波で走査し、高速に方向を検出できる特徴を持つ。光学センサを用いた装置では、複雑で時間のかかる画像処理を、光学系を工夫することにより、短時間で実行している。そして、鏡を用いた一方向写真計測法に、光学センサを用いた方向検出装置併用し、従来、大きな運動範囲を持つ物体の計測に必要であった大きな鏡を小型化し、その運動計測能力が向上したことを実験により確認した。本章で得られた結果は以下のとおりである。

- 1) 超音波を用いた、物体の存在する方向を検出する装置を開発した。本装置は、以下のような特徴を持つ。
 - (a) 物体からの最大反射音圧が得られる方向を求めることにより、物体が存在する方向を測定している。
 - (b) 超音波の放射方向を電気的に制御し、探索方向を定めるための反射音圧を短時間で測定できる。
 - (c) 目標物体からの反射波を同定し、計測サイクルを乱数によって定めることにより、背景からの反射波の影響を小さくさせた。
- 2) 光学センサを用いた、物体の存在する方向を検出する装置を開発した。本装置は、以下のような特徴を持つ。
 - (a) 時間のかかる画像処理を、光学系を工夫することにより、実時間で行なえる。
 - (b) 計測時間が短かく、高精度の測定が行なえる。
 - (c) 計測に要する処理が簡単であり、ハードウェア化が可能である。
- 3) 鏡を用いた一方向写真計測法と、光学センサを用いた物体の方向検出装置を併用し、常に物体の鏡像が撮影できるように鏡の向きを制御した。その結果、小型の鏡であっても、大きな計測範囲が可能となり、写真計測法の測定能力が向上した。

第5章 フィルム座標読取精度向上のための画像入力システム

5.1 緒言

物体の運動を記録し、その運動を解析する場合、運動に制約を与えないで必要な情報を得るために、写真計測法が主に用いられる。写真計測法において像座標を読取る段階で誤差が混入し、測定値の偶然誤差の原因となる。従来より用いられている像座標の測定法は、タブレット上に画像を投影し、スタイラスペンで標点を指示し、その出力値より座標を求める方式であった。スタイラスペンの先端は有限の大きさを持ち、標点を指示する段階において、投影像がペンの影によって失われるために、正確な座標測定ができなかった。測定値をより真の値に近づけるためには、標本数を多くし、その平均値を用いればよいが、座標入力に多くの労力と時間が必要となる。もし像座標を機械的に読取ることができれば、この偶然誤差を全て除去することも可能である。像座標を機械的に読取るために、画像を計算機に入力し、画像処理とパターン認識技術により標点を検出し像座標を求める装置も、最近数多く発表されている。特にビデオカメラを用いて画像入力を行なうものが多い。計算機に入力した画像を実時間で処理し、像座標を求めることは、画像処理及び標点認識のための処理時間が長く、実現は困難である。^{66)~69)}撮影をビデオカメラで行ない、ビデオ信号を磁気テープに記録して、その再生画像を用いる方法も考えられるが、画像が劣化する恐れがある。また、一般に使用されているビデオカメラは、解像度が500×400程度であり、撮影速度も毎秒60枚と少ない。特に計測用に用いるために、解像度が1000×1000程度の装置や(C1145:浜松ホトニクス)、撮影速度が毎秒200枚~300枚の装置(C1188:浜松ホトニクス, HSV200:NAC社)等が開発されているが、高解像度と高速撮影が共に実現されているものはない。シネカメラによる撮影によって得られる画像は、ビデオカメラによる画像と比較して、非常に高解像度であり、記録による画像の劣化が少ない。

本章では、シネフィルムを画像の記録媒体として用い、その画像を計算機に入力する装置と、画像処理及び標点認識による像座標読取り法について述べる。さらに本画像処理システムを用い、運動物体をリンクモデルとして再構築した結果について述べる。

5.2 フィルム画像入力装置

製作したフィルム画像入力装置は、図5.1に示すように構成されている。フィルム画像の計算機への入力、フィルムをラインイメージセンサと直角な方向に送りながら、ラインイメージセンサによって読取られる。以下に、光学系の設計と光センサの駆動回路、フィルム送り機構と駆動回路

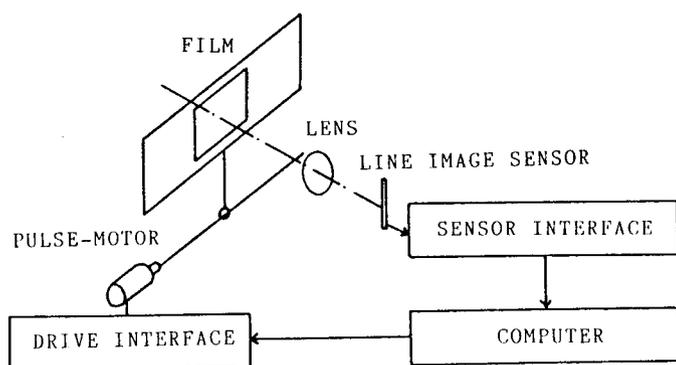


図 5.1 画像入力装置の構成

及び画像入力処理について述べる。

5.2.1 光学系の設計と光センサの駆動回路

フィルム画像を計算機へ入力するために、ラインイメージセンサを用い、フィルムをイメージセンサの方向と直角な方向に送ることによって、計算機内に二次元画像を得ている。二次元のイメージセンサを使用し、一度に画像を入力する方法も考えられるが、センサの解像度がただか 512 × 512 程度であり、ビデオカメラを用いた画像入力装置と同程度の性能となる。二次元イメージセンサは、主にビデオカメラに用いられ、放送用のビデオ信号においては高い解像度を必要としないため、高解像化よりもカラー化のための研究が主になされている。一方、ラインイメージセンサは、ファクシミリや各種計測器に利用され、3000～5000 程度の高解像度のものが開発されて^{70)~72)}いる。本装置では、解像度が 512 のものを用いたが、将来のグレードアップも可能な回路構成を用いている。

画像入力の対象としたフィルムサイズは、35 mm であり、シネカメラ及びモータードライブカメラで撮影して得られる画像を処理できる。製作した装置の光学系の状態を図 5.2 に示す。レンズは、焦点距離 55 mm のマクロレンズを使用し、長さ 24 mm のフィルム像を、長さ 14.4 mm のイメージセンサー上へ投影するために、中間リングを併用している。フィルムは、背後からコンデンサレンズによって集光した光によって照明している。

使用したラインイメージセンサは、4 章で用いたものと同じ MEL 512 K であり、その駆動回路も同様である。画像を入力する計算機には、汎用のマイクロコンピュータ (APPLE II-plus) を使用した。故にセンサの駆動回路から得られるビデオ信号を計算機へ入力するためのインターフェース回路も、4 章で製作したのものを用いた。

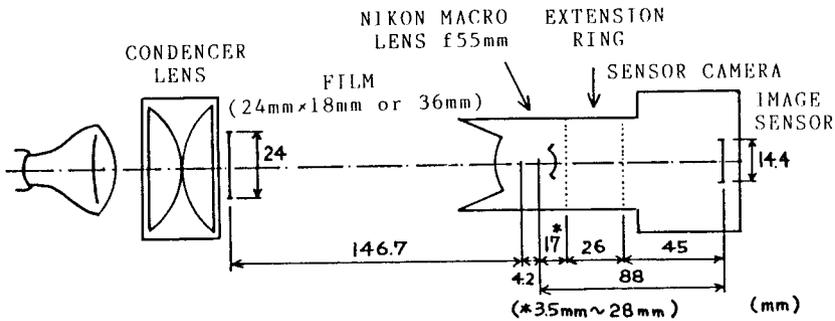


図 5.2 光学系の状態

5.2.2 フィルム送り機構

フィルム画像の大きさは、35 mm シネフィルムの場合 24 mm × 18 mm であり、24 mm を 512 bit の解像度で入力するから、計算機内に得られる画像の解像度は、512 × 384 となる。したがって、フィルムの送りピッチは、 $18 / 384 = 0.047 \text{ mm}$ となる。このような微小なフィルムの送り量を実現するために、図 5.3 に示すようなネジ機構を用いている。ネジ機構を駆動するパルスモータ（4 相 32 step）は、1-2 相励磁方式で駆動し、64 step で一回転する。送りネジのピッチは、1.2 mm である。パルスモータの回転を歯車で 4 : 1 に減速して、約 10 step の回転変位でフィルム送り機構を 0.047 mm のピッチで送ることが可能になる。

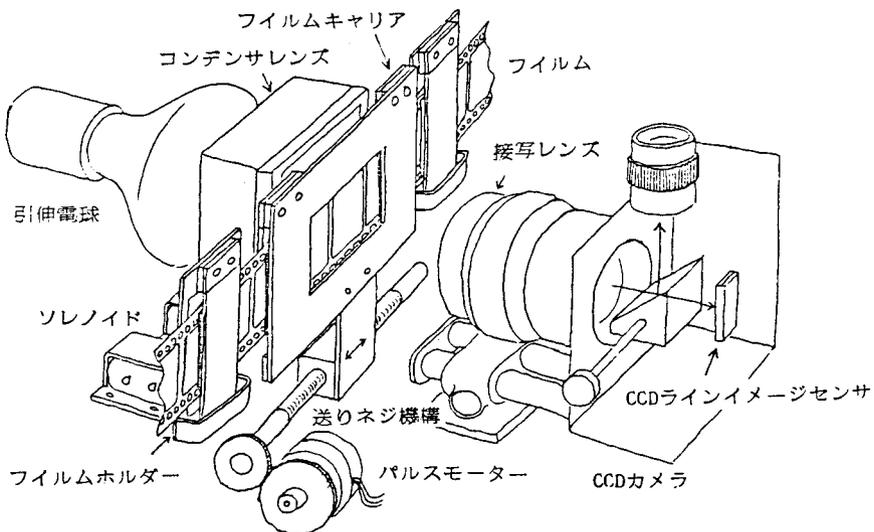


図 5.3 フィルム送り機構と光学系の構成

パルスモータに与えられる最大許容クロックレートは、一周期が1.8m secであり、必要な移動量を得る時間は18m secである。フィルムは、フィルムキャリア上にソレノイドにより固定され、横方向に送られる。左右には、リミットスイッチを設定して、フィルムキャリアの可動範囲を制限している。図5.4に、パルスモータ及びソレノイドの駆動回路と、計算機とのインターフェースのブロック図を示す。写真5.1に画像入力装置の全景を示す。

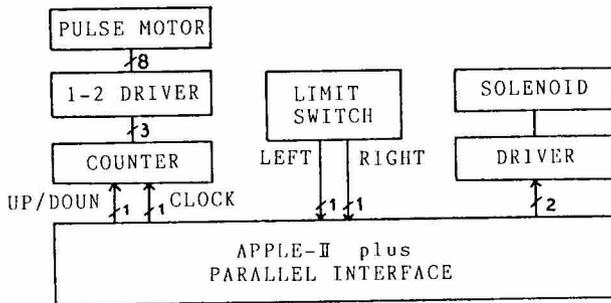


図 5.4 制御回路のブロック図

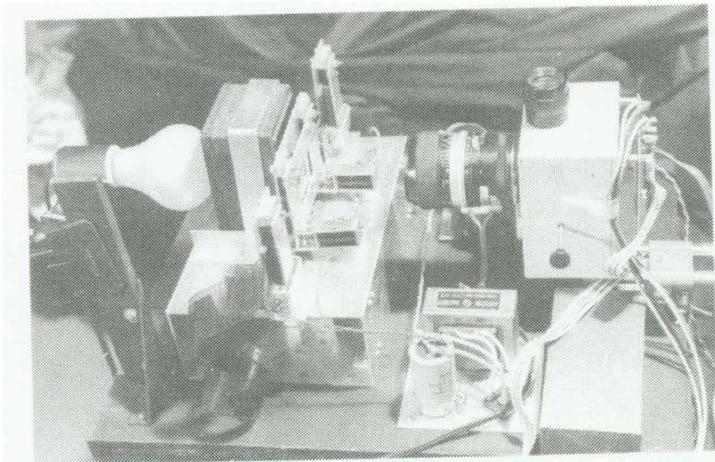


写真 5.1 装置全景

5.3 画像入力システム

画像入力装置の制御、画像処理による標点の抽出、および得られた像座標の読取り処理は、汎用のマイクロコンピュータ（APPLE II - plus）で行なう。本節では、これらの処理の詳細について述べる。

5.3.1 画像入力処理

文字や線画以外の画像処理では、一般に少なくとも32～64段階の階調の情報を取り扱う。し

しかし、実際に画像から対象パターンの特徴を抽出し、認識する時、必ずしも階調の情報を必要としない場合が多い。何らかの方法を用いて、対象物と他の対象物を分離した二値画像が得られれば、画像処理に要するCPU時間の大幅な減小、および記憶容量の低減が計れる。階調のある濃淡画像から、対象物の情報を含む二値画像を得るには、以下に示す種々の方法が考えられる。

- (1) 対象物が他の対象物や背景の濃度と比較して、明らかに異なっていることを利用し、設定可能な比較値により二値化する。
- (2) 対象物の濃度が明らかなき、ある範囲内の濃度のみを抽出し、濃度等高線に相当する二値画像を得る。
- (3) 濃淡の変化の大きな部分に、対象パターンの情報が含まれている場合、画像の微分を求め、その値に対して閾値操作を行ない、二値画像を得る。
- (4) 対象物が、ある固有の模様を持つ領域であれば、テクスチャ解析により等質領域を抽出し、二値化する。

このように、二値化は、ある特徴量に対し閾値処理を行なうことにより求まり、その特徴量は対象量は、対象パターン、識別目的により異なる。本システムでは、対象物体が標点であり、撮影時に任意の明るさの標点を使用し、他の物体と区別することが可能である。また、画像処理で問題となる背景のノイズも、撮影を工夫することにより低減することができるため、(1)の方法を用いて、二値画像を計算機に入力する。

図 5.5 に、本システムのブロック図を示す。フィルム画像を二値化し、 512×384 の解像度で計算機に入力するためには、24 K Byte (= $(512 \times 384) / 8$) のメモリを必要とする。図 5.6 のメモリマップに示すように、画像デー

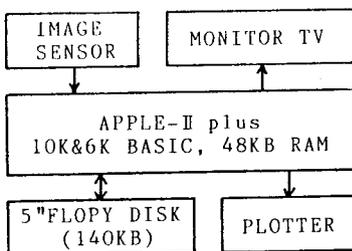


図 5.5 システムの構成

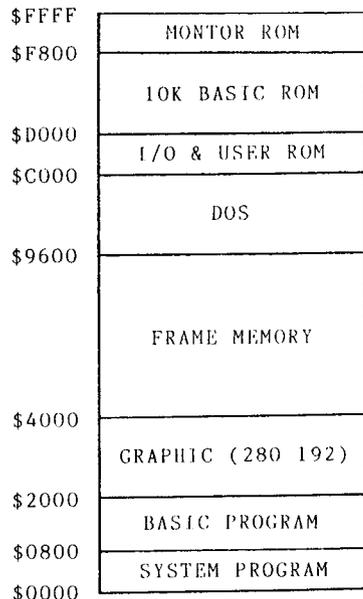


図 5.6 メモリマップ

タとして、24 K Byte のメモリを確保することは可能であるが、画像処理した結果をグラフィック画面で観察し、DOS, BASIC, 及び機械語プログラムのためのメモリを考慮すると、画像のために使用できるメモリは、21.5 K Byte である。そのため、本システムでは、画像データを 512×344 の解像度で画像入力し、画像処理を行なう。

画像の計算機への入力は、以下に示す手順により行なった。

(Step 1) フィルムを固定し、フィルムキャリアの移動によってフィルムが移動しないようにする。

(Step 2) 右側のリミットスイッチが作動するまでフィルムキャリアを移動し、フィルムキャリアの位置を初期化する。

(Step 3) フィルムキャリアを中央へ移動させ、フィルムキャリアにフィルムを固定する。

(Step 4) 左へフィルムを移動させ、頭出しを行なう。もし左のリミットスイッチが作動すれば、フィルムを固定し、フィルムキャリアのみを中央へ移動し、この処理を繰返す。頭出しが完了すれば、再びキャリアのみを中央へ移動し、次のステップへ進む。

(Step 5) 画像データの 512 bit (64 Byte) を入力し、画像メモリへ転送する。

(Step 6) フィルムを 0.047 mm 左へ移動する。

(Step 7) Step 3 へ戻る。ただし、Step 3 ~ Step 6 が 344 回実行されれば終了する。

以上の処理により、フィルム画像を計算機に一画面入力できる。この処理を実行するために、以下に示すような機械語プログラムを製作し、使用している。

CCDIN : イメージセンサから 512 bit のデータをラインバッファに入力する。

FIN : フィルム画像を画像メモリへ一画面入力する。

HEAD : フィルムの頭出しを行なう。

LCHOME : フィルムキャリアの位置を初期化し、中央に移動する。

LROT, RROT, ROT : フィルムキャリアの移動 (パルスモータの回転) を行なう。

LSET, RSET : フィルムキャリアの移動方向を設定する。

フィルム画像を計算機に一画面入力するために必要な時間を、以下に検討する。

イメージセンサからの画像データの入力時間は、センサに与える駆動クロックの周波数によって定まる。駆動クロックの周波数は、5 MHz から 1 MHz まで変化させることができるが、イメージセンサに適切な露光量を与えるように調整する。本装置の場合、露光量は、フィルム後方からの照明光や、レンズの絞りによって調整できるため、任意の値に駆動クロックの周波数を設定できる。この周波数の上限は、プログラムの処理時間により制限され、4.3.2.節(d)で示したように 307.7 KHz となる。本装置では、高速度で画像を入力する必要がないため、余裕を見て 73 KHz に設定した。そのため、512 bit の画像データを入力するために必要な時間は 7 msec となる。パル

モータを駆動し、フィルムを0.047 mm 移動させるのに約18 m sec 必要であるから、 512×344 の解像度で画像を一画面入力するために必要な時間は、 $(18+7) \times 344$ m sec, すなわち8.6 sec となる。さらに画面の頭出しや、フィルムキャリアの位置の初期化等の時間も必要となる。

フィルム画像をイメージセンサ上に結像させる時、レンズの焦点が合っていないと、イメージセンサ上に鮮明な画像が得られない。本装置では、センサからの出力値を二値化し、画像入力を行っているため、ピントが合っていないと、実際の標点の形状や大きさは異なったものが入力される。図5.7に、合焦点からレンズと被写体の距離を近づけた場合と、遠ざけた場合のイメージセンサからの出力波形を示す。レンズと被写体の距離を近づけたり、遠ざけるに従い、像のエッジ部が丸くなると共に、ピーク値が下がる。この現象を計算機のグラフィック画面上で観察し、ピントを合わせるために利用する。さらに、イメージセンサの出力信号を二値化するときの比較値を検討する場合にも利用する。この比較値は、8 bit のD/A 変換器により設定している。そのため、イメージセンサからの出力信号は、256 段階の濃淡値として入力できる。この情報を用いて、イメージセンサの信号をグラフィック画面上に表示するために、以下に示すような機械語プログラムを製作し、使用した。

FADIS : グラフィック画面は、 280×192 の表示能力を持ち、イメージセンサから出力される512個の画素に関する256段階の濃淡情報の一部分をパドル(またはジョイスティック)により指定し表示する。このプログラムは、PDLL, CCDIN, DADD, FTRAN 等のサブルーチンにより構成されている。

PDLL : パドルの値を入力する。

DADD : グラフィック画面のビデオメモリの番地を計算する。

FTRAN : ラインバッファの内容をディスプレイフォーマットに変換し、画像メモリへ転送する。

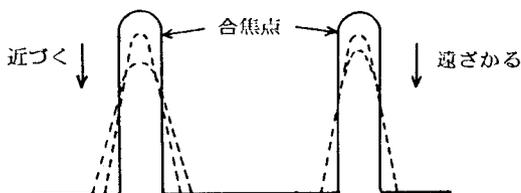


図5.7 イメージセンサからの出力波形

5.3.2 標点検出と座標測定

標点の検出法は、標点の形状や大きさによって異なる。さらに、標点の形状は、その標点を取り付けた物体が空間を運動するために、処理される画像ごとに変化する恐れがある。そのため、標点の形状が変化しても、その影響を受けないような検出法及び標点の形状を選ばねばならない。本方法では、円形の標点を使用し、その中心点の座標を測定した。円形の標点を取り付けた物体が空間内を運動すると、画像に得られる標点の形状は楕円となる。円及び楕円の中心を求めるには、図5.8に示すように、上下、左右のエッチの座標を求め、それぞれの中央の値を求めればよい。しかしノイズが標点の外周部に存在し、測定誤差が大きくなる恐れがある。

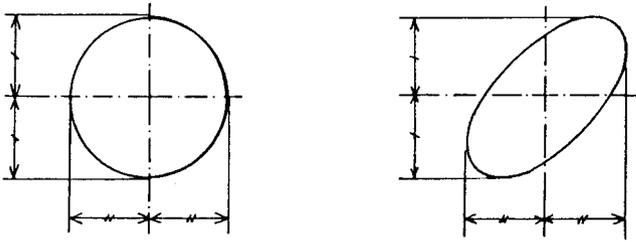


図5.8 標点の中心を求める方法

標点の外周部に発生するノイズは、その発生率が全画面において一様であると考えられるため、標点の外周の長さに比例し、図5.9に示すような分布となる。本研究では、ノイズの影響を押さえるために、図5.10に示すような重み付きフィルタを用い、画像を走査し、最大値が得られる位置を求め、標点の中心を定めた。

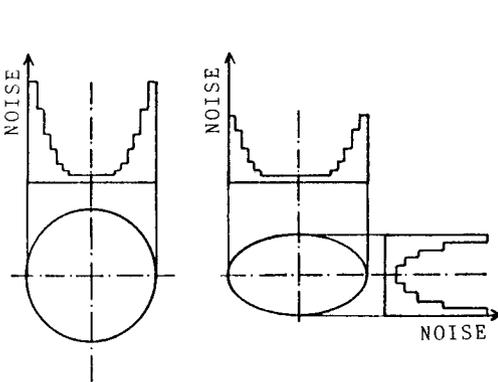


図5.9 ノイズの発生率

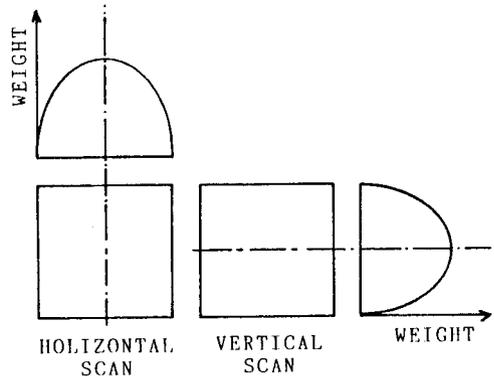


図5.10 重み付きフィルタ

- 標点を検出し、上記の重み付きフィルタを用いて標点の中心の座標を求める手順を以下に示す。
- (Step 1) 図 5.11 に示すように、画像 (512 × 344) の x 軸に平行に一画素ごとに検査し、標点に達するまで Step 1 をくり返す。
 - (Step 2) 図 5.10 に示した横方向走査用フィルタを用い、x 軸方向に走査し、最大値に達した時点でこの処理を終了する。この位置が標点の中心の x 座標となる。
 - (Step 3) Step 2 を終了した位置から、図 5.10 に示した縦方向走査用フィルタを用い、y 軸方向に走査し、最大値に達した時点でこの処理を終了する。この位置が標点の中心の座標となる。
 - (Step 4) 次の標点を探索するために、検出した標点を画像から消去し、Step 1 で検出した標点の位置から再び標点を探索するために、Step 1 へ進む。

以上の手順は、処理時間を短縮するために、全て機械語でプログラムした。プログラムサイズは、約 1.2 K Byte である。この処理を実行するプログラム (BALAN) で使用したサブルーチンを以下に示す。なお、本章で開発した機械語プログラムを付録 4 に示す。

PATCH : Step 1 で検査する点が画面の左端に達したかどうかをチェックする。

PADD : Step 1 で検査する画素のメモリの番地を計算する。

SADD : PADD で求められた番地の内容を読み出す。

WSETH : Step 2 で使用するフィルタの重みと画像データを掛け合わせる。

WSETV : Step 3 で使用するフィルタの重みと画像データを掛け合わせる。

RESET : 求めた標点の中心の座標をメモリへ退避させる。

ADLINE, ADSQR : WSETH, WSETV で求めた結果をそれぞれ加算する。

WCOMP : フィルタ処理した結果を比較する。

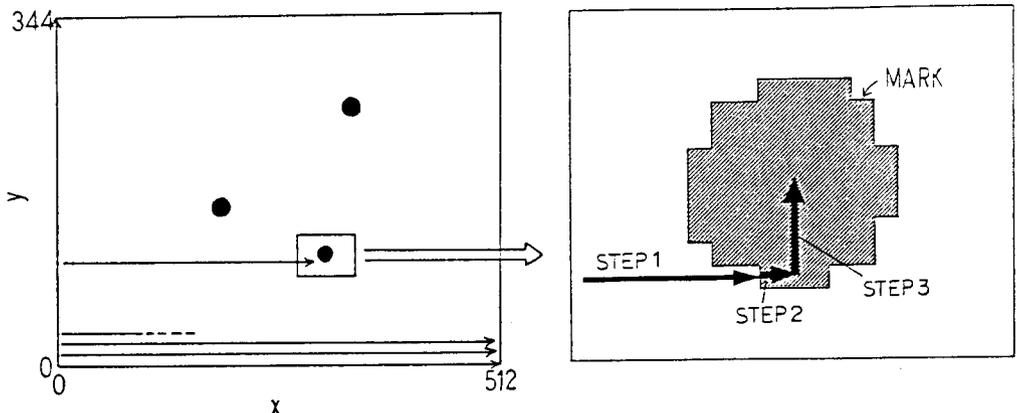


図 5.11 標点の検出と座標の読取りの手順

5.4 画像入力装置と画像処理プログラムの性能評価

画像入力装置の性能を評価するために、図 5.12 に示すようなテストチャートを撮影したフィルムの画像入力処理を行なった。テストチャートは、濃淡の違いによって標点を識別できるかどうかを調べるための、濃度の異なったグレースケールチャートに相当するものと、解像度を調べるための、大きさの異なった同心円と、送りピッチの変動を調べるための、放射パターンと、形状及び大きさの異なった標点により構成されている。図 5.13 に、グレースケール部での、イメージセンサからの出力レベルを示す。グレースケールの濃淡に応じた値が得られており、濃淡の違いにより標点を分類することが十分可能であると考えられる。図 5.14 に、ある比較値により二値化し入力したものを示す。テストチャートの放射線状の部分が、少し歪んで入力されている。原因として以下の要因があげられる。

- (1) フィルムを移動させるためのネジ送り機構のバックラッシュ
- (2) フィルム位置ぎめ機構のオープンループ制御
- (3) フィルムを固定しているフィルムキャリアを案内するレール部の変動
- (4) フィルムキャリアを片持ち梁形式により固定したことによるレンズの光軸方向へのゆらぎ

以上の原因の他に、本装置は外部からの振動に敏感であり、駆動部の振動も影響していると思われる。標点の形状は、それぞれの特徴は十分捕えられているが、小さくなると、それらの判別は困難である。同心円の部分に関して、細い同心円の部分では、位置によって検出できない部分が存在している。原因としては、フィルムの背後からの照明の不均一さや、テストチャートのフィルム自体の濃度が不均一である場合が考えられる。また、画像入力時に設定する二値化のための比較値によっても、この現象は大きく変化した。

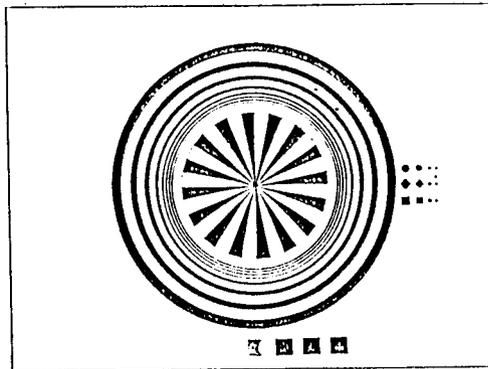


図 5.12 テストチャート

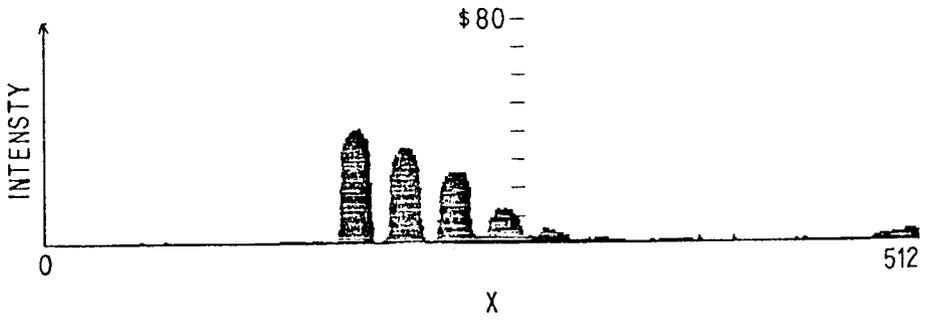


図 5.13 グレースケールの濃淡分布

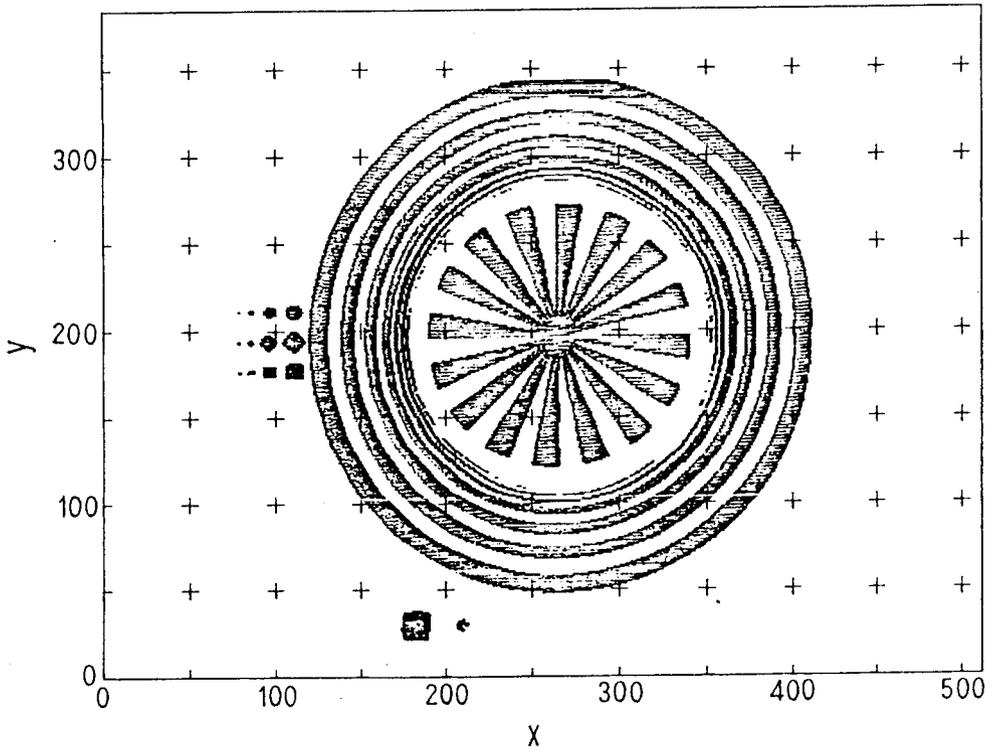


図 5.14 テストチャートの入力図

画像の二値化のための比較値が、入力画像に及ぼす影響を調べるために、同心円の部分が大きく写っているテストチャートフィルムを画像入力した。図 5.15 に、入力画像と、一つの位置での濃度分布を示す。細い線の濃度が、他の線と比較して低くなっている。これは、像のエッジ部が丸くなったためであると考えられる。レンズのピントを調節しても、このことは改善されないから、原因は、レンズの解像度やフィルムの特性にあると考えられる。二値化のための比較値を低く設定すれば細い線も検出できるが、背景のノイズを検出する恐れがあるため、あまり低くすることはできない。非常に小さい標点でない限り、その標点の明るさに対応する出力が得られているのが分かる。このような時は、二値化のための比較値を、ノイズレベルよりも高く設定できて都合が良い。

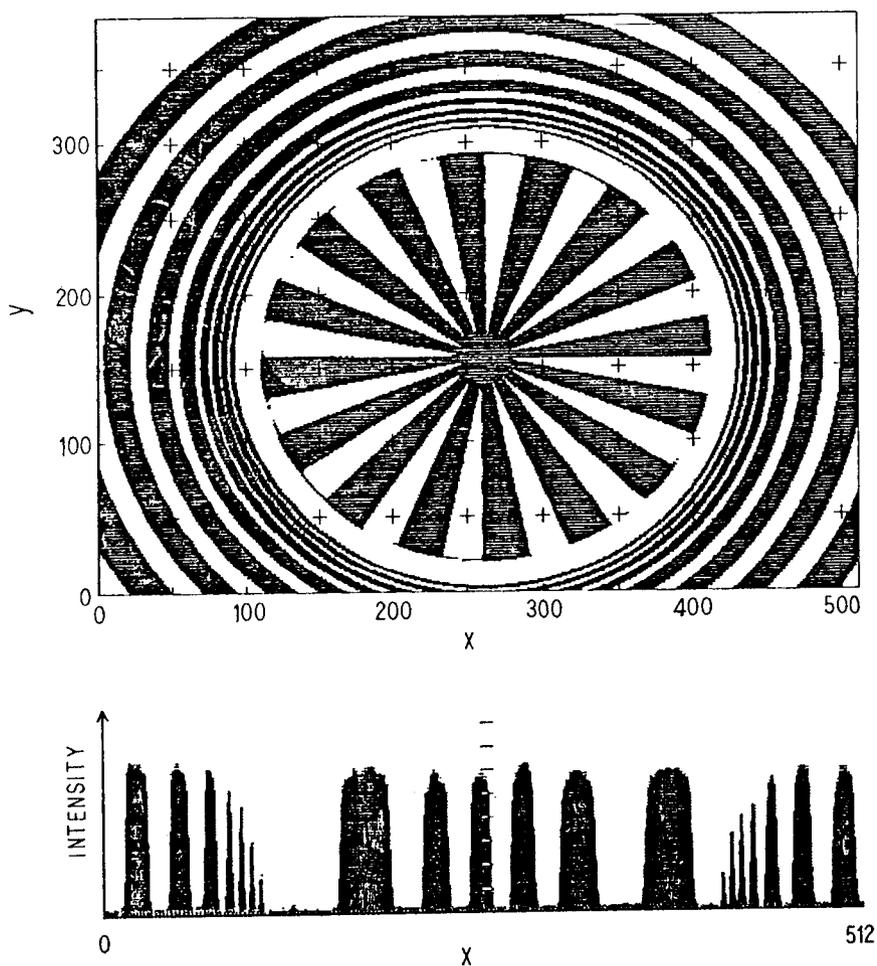


図 5.15 テストチャートと濃度分布

次に、実際に標点を取り付けた物体の画像を入力した。図 5. 16 に入力した画像の濃淡を三次元表示したものと、ある位置での濃度分布を示す。図より明らかなように、背景のノイズが検出されているのが分かる。このノイズレベルより高い比較値を用い、二値画像を入力すれば、図 5. 17 に示すような画像が得られる。

図 5. 16 に示す画像に、前述の標点検出及び座標測定処理を行ない、検出値の変動を調べることにより、画像入力装置及び画像処理プログラムの評価を行なった。同一画像の 100 回の画像入力を行ない、各標点の座標を求めた結果、ラインイメージセンサ方向での測定値の変動は、 $1/512$ であった。また、フィルムの送り方向での測定値の変動は $2/344$ であった。3. 5 節で示したよう

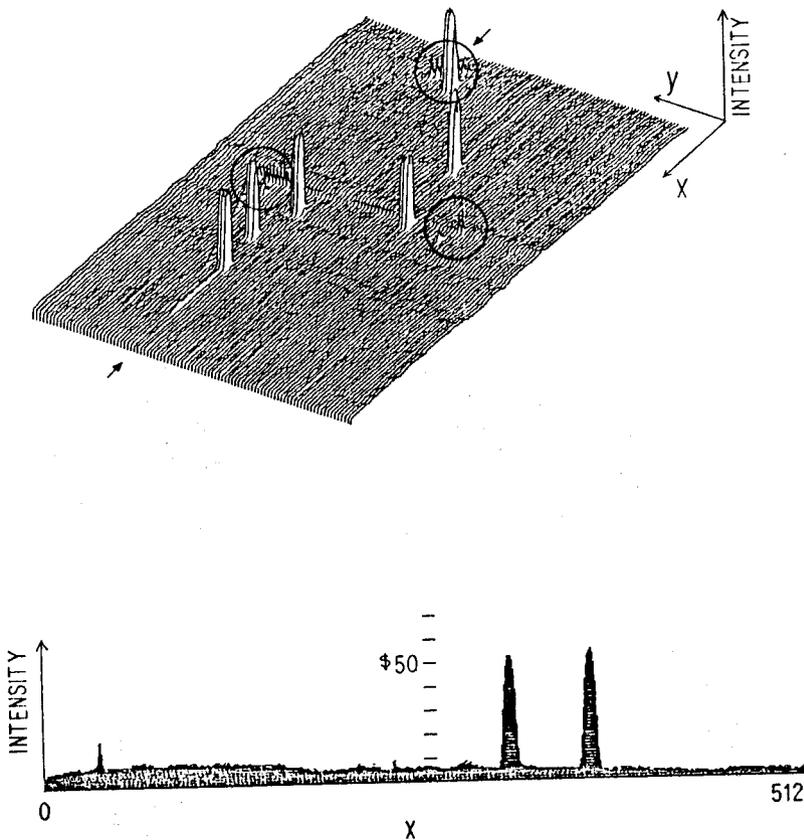


図 5. 16 フィルム画像の濃度分布

に、フィルム画像をタブレット(解像度 5500×5500)上に投影し、標点の座標を測定する場合は、10回の測定値を平均して得られた値は、99%の確率で真の値から $\pm 5/5500$ 以内に存在した。すなわち、10回の平均を行なって得られる測定値の変動は $10/5500$ となり、本システムにおける測定値の変動は、十分実用になるであろうと思われる。また、ラインイメージセンサ方向での測定値の変動は、センサの解像度を上げても $1/\text{解像度}$ となると思われるので、画像入力装置のフィルム送り部の精度を高くすれば、さらに高精度の測定が行なえる。

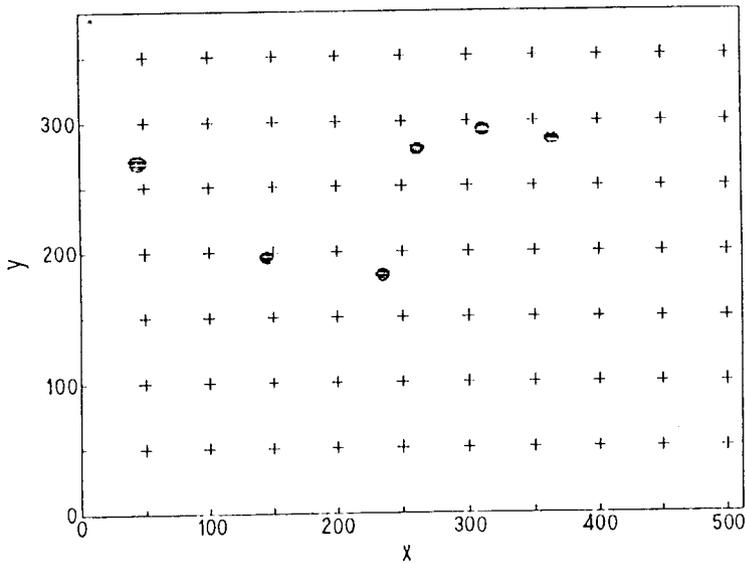


図 5.17 入力画像

5.5 運動計測への応用

本画像処理システムを用いて標点の像座標を測定した場合、その座標データが物体上のどの標点と対応しているかが不明であるため、このままでは物体の運動を計測することはできない。そこで以下に示す手順によって、物体の運動計測を行なう。

- (Step 1) 各標点間の運動を解析し、同一剛体上に存在する標点の組を求める。
- (Step 2) 各組の運動を解析し、剛体ごとの運動を求める。
- (Step 3) 各剛体間の相対運動を求め、物体の構成(各剛体間の接続関係)を求める。
- (Step 4) 物体の運動計測を行なう。

本節では、被測定物体として四節リンクを考え、各リンクの任意の位置に標点を設け、その運動を計測して得られた情報を元に、リンクの再構築を行ない、運動を計測する方法について述べる。

5.5.1 リンク機構の運動計測

リンクの構造が未知である機構の剛体モデルを再構築する場合、以下に示すようなリンク機構の特徴を検出することにより、機構の再構築の手がかりが得られる。

- (1) 同一剛体上の標点の間隔は変化しない。
- (2) ピンジョイントでフレームと結合された剛体上の標点の瞬間中心は、常にピンジョイントと一致する。
- (3) スライダ上の物体の瞬間中心は、無限遠点にある。

本計測では、図 5.18 に示すような、平面四節リンクの運動を写真撮影し、本画像処理システムを用い、その運動を計測した。標点には、白色の直径約 20 mm の円形のものを使用し、各リンクに二個、フレームに三個取り付け、背景及び各リンクは黒色である。そして、35 mm シネカメラを用い、リンク L1 を回転させて、系全体の運動を撮影した。図 5.19 に撮影によって得られた画像の濃度分布と、計算機に入力した二値画像を示す。背景のノイズ成分は、ほとんど検出されず、標点のみの二値画像が入力できた。

被写体が平面四節リンクであり、標点が設置された剛体間が全てピンジョイントによって結合されていると仮定し、各リンクの長さ、フレーム上のピンジョイントの位置、および標点と各リンクの対応関係を求める。標点の座標データより、四節リンクモデルを再構築するには、最小三画面の情報が必要である。以下に、その手順を示す。

- (Step 1) 一画面目、二画面目、三画面目の標点の座標（以後、座標と呼ぶ）を読み込む。この時、フレーム上の標点は移動しないので、一画面目から三画面目を通して座標の変化しない点が、フレーム上の標点であることが分かる。

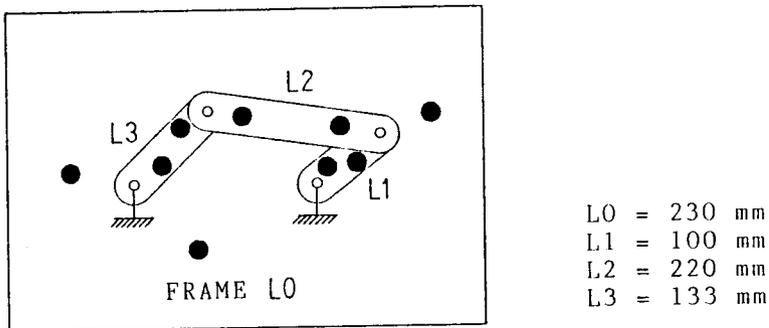


図 5.18 平面四節リンクの構成

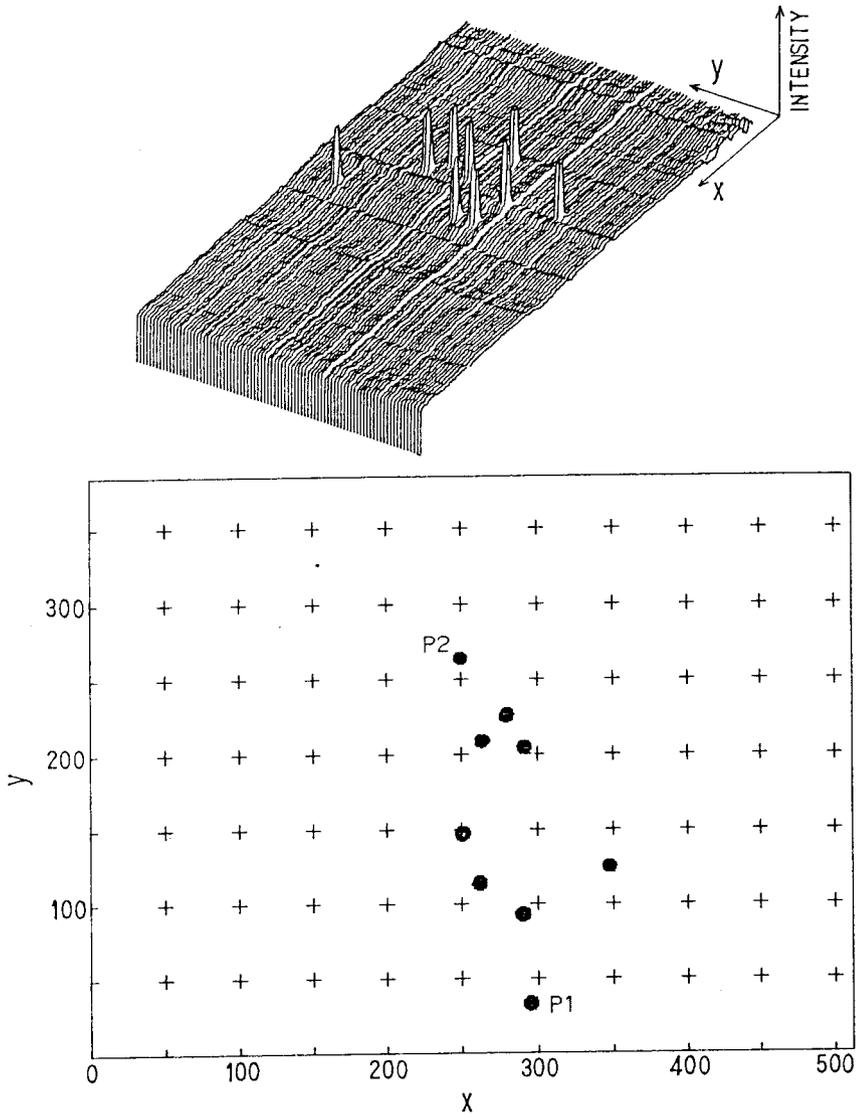


図 5.19 入力画像とその濃度分布

- (Step 2) 各画面ごとの座標の変化量は微小であるので、各画面ごとに座標値を比較し、最も近接した座標を検出することで、同じ標点の座標の変化を追跡し、標点ごとの座標をグループ別に分類する。
- (Step 3) 一画面目、二画面目、三画面目のフレーム上の標点の座標を除いた各座標間の距離を計算する。同一剛体上の標点間の距離は一定であるから、一画面目から三画面目を通して座標間距離が変化しない標点の組が、同一リンク上にあることが分かる。
- (Step 4) 四節リンクにおいて、フレーム以外の他の三個のリンクのなかで、二個はフレームとピンジョイントによって結合されており、他の一個は隣接していない。フレームとピンジョイントで結合されたリンクを定めるために、一画面目から三画面目にかけて各リンク上の標点の組の移動の瞬間中心を求める。瞬間中心の座標が変化しないリンクが、フレームと結合しているリンクであり、その瞬間中心の座標がピンジョイントの座標である。
- (Step 5) 他の二個のピンジョイントの座標を求めるには、フレームと隣接していないリンクと、フレームと結合しているリンクとの間でインバージョンを行ない、その上で瞬間中心を求めることによりピンジョイントの座標を求めることができる。

以上の操作により、四節リンクの各瞬間（各画面）における四個のピンジョイントの座標を求めることができ、四節リンクモデルを再構築することができる。プログラムの構成は、処理時間を短縮するために、図 5.20 に示すように、画像入力及び標点の検出と座標測定を行なう機械語プログラムと、Step 1～Step 5 の処理を行なう BASIC 言語のプログラムにより構成している。付録 5 に、BASIC 言語のプログラムを示す。

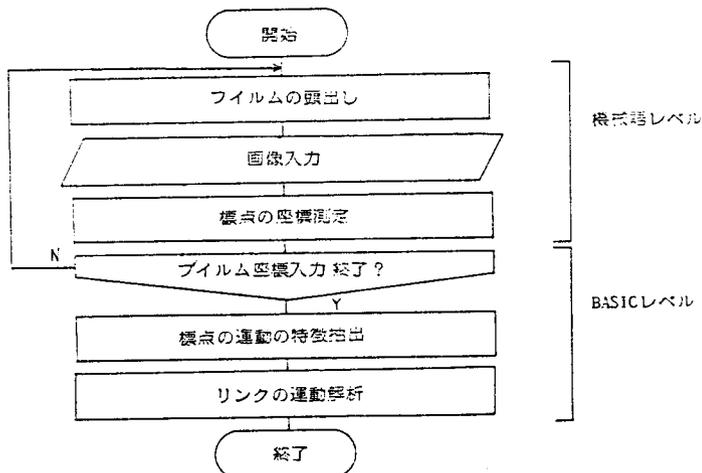


図 5.20 画像解析プログラムの構成

5.5.2 測定結果及び考察

画像処理によって得られた標点の軌跡を図 5.21 に示す。このデータを用いて、前述の処理を行ない、リンクの形状を表 5.1 のように求められた。ただし、測定値（像座標）から実長を求める時 P1P2 の値と、その実測値の比率を求め、測定結果を算出した。5.4 節で述べたように、画像入力装置、及び画像処理プログラムによる像座標の読取り誤差は、ラインイメージセンサの方向で $1/512$ (0.2%)、フィルムの送り方向で $2/344$ (0.6%) であり、リンク長さの測定誤差と比較し、小さな値である。故に、測定結果の誤差の原因は、5.5.1 節で示した処理プログラムにあると考えられる。

一般に標点の測定値から物体の運動を計算処理する場合、測定データに含まれる偶然誤差を排除するために、測定値にフィルタ処理を施すが、本方法では、フィルタ処理を全く行なわなかった。そのため、測定値の誤差が結果に大きな影響を与えたものと考えられる。また、5.5.1 節で示した処理法では、フレームと入・出力リンクの回転中心を求めるために、各リンク上の標点の座標が、一定距離だけ移動したコマ毎に瞬間中心を求めて、その平均値を回転中心の座標とした。移動距離を

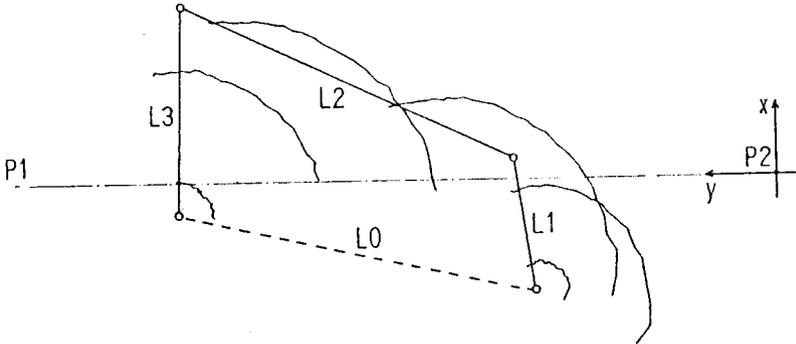


図 5.21 標点の軌跡

表 5.1 測定結果及び誤差

	測定値 (像座標)	測定結果	実測値	誤差量	誤差 (%)
L0	108.55	217.10	230	-12.90	-5.6
L1	54.20	108.40	100	8.40	8.4
L3	117.03	234.06	220	14.06	6.4
L4	60.64	121.28	133	-11.72	-8.8
PP	235.54	471.00	471	-	-

(mm)

大きくとった方が精度は良くなると考えられるが、撮影枚数に制限があるために、移動距離を大きくとると、平均する回数が少なくなる。この移動距離と平均回数の最適な組み合わせにより、誤差を改善することができる。

本方法を実行させるためには、次のような時間が必要である。画像入力を行なうためのフィルムの頭出しに約 17 秒、一画面 512×344 を入力するのに約 9 秒かかる。実行例では 30 画面を画像入力しているため、合計 780 秒 ($= (17 + 9) \times 30$) の時間がかかる。また、入力した画像より、リンクの機械モデルを構築するためのプログラムの処理時間は、457 秒であった。

5.6 結 言

本章では、フィルム座標の読取り精度を向上させ、測定値に混入する偶然誤差を排除するために、フィルム画像入力装置を製作し、標点の検出及び座標測定のための処理プログラムを開発した。しかし、この処理によって得られる座標値がどの標点に対応しているのかは明らかでない。そこで、この対応関係を定めるために、同一剛体上に設置された複数の標点に相当する座標値を求め、各剛体間の運動をリンクモデルとして再構築する手法を開発した。平面四節リンクの運動を、画像入力装置により計算機へ入力し、各リンクに設置した標点の座標値の変化を解析し、平面四節リンクの再構築を行ない、本画像解析システムの能力を評価した。本章における結果は、以下のとおりである。

- (1) フィルム画像を、ある比較値により二値化し、計算機へ入力し、標点の検出、像座標の測定を行なう画像入力装置を製作した。この装置は、約 9 秒で一画面を 512×344 の解像度で入力することができる。
- (2) 本画像入力装置の座標測定精度は、現段階では従来より用いられてきた方法と同程度であるが、さらに高解像度のイメージセンサを使用すれば、測定精度を高くすることが可能である。製作した画像入力装置は、将来、このような改良が可能な回路構成及び機構である。
- (3) 物体上の標点との対応関係が不明な、標点の座標値を用い、物体の構成や運動を求める手法を明らかにした。この手法を用いると、標点の設定位置は任意であり、従来より行なわれてきたように、リンクの結合部に標点を設ける必要がない。そのため写真撮影に適切な位置に設定した標点を用いて運動計測が行なえる。さらに、人体の計測のように、各関節の位置や構造が明確でないものに応用するときには好都合である。また、関節の複雑な機構をリンク機構として再構築し、その特性を評価することにも応用できるであろう。

第6章 人体上肢の運動能力の測定

6.1 緒言

人体の構造とその複雑さは、従来、生物学的見地からよく研究されてきた。その動作は、下肢の動作目的が、主として歩行（移動）という単一の機能であるのに比較して、上肢のそれは多種多様である。上肢の機能は、基本的には手による物の保持動作と、腕による手の位置決め動作の二つに分けることができる。従来より上肢に関しては、特に位置決め動作に関して数多くの研究が行なわれてきたが、その機能を評価するために、特定の実際的な動作を選択することが困難であるため、基本的な単純動作を設定し、それに関して研究されてきた。一方、位置決め動作の評価項目として、位置に関する精度（位置決め精度，繰返し精度，位置再確精度），動作時間，速度，加速度，可搬重量等が考えられるが、それぞれが相互に大きく影響を与える。そのため、ある評価項目に関する性能を評価するためには、他の評価項目の値を実験における制限条件として与え、これらの条件をさまざまに変化させた場合の実験を行なわねばならない。

人体上肢の機能を評価した結果を、何に利用するかということが定まっていれば、評価対象に適した動作を設定することで、十分な結果を得ることができる。最近の研究では、義手の設計変数や、その動作パターンの数値化，上肢機能障害者のリハビリテーションを進める際の治療プログラムの作成，及びその回復経過チェック等のために、人体の運動解析が行なわれてきた。本章では、人間の腕の器用さを評価するために、腕の運動計測のかわりに、被操作物体の運動計測を行なった結果について述べる。また、被操作物体の重さや、作業回数による腕の動作の変化を計測し、運動能力を評価する。

上肢の運動を計測する方法としては、従来よりゴニオメータによる方法と、高速度カメラを用いる光学的方法が主に用いられてきた。ゴニオメータによる計測法は、電気信号としてデータが得られるため、直接に計算機に入力することにより、測定結果の解析やデータ処理に関して有利である。しかし、被写体の運動に、肉体的及び精神的な影響を与えたり、皮膚と骨のずれによる測定誤差が発生する恐れがある等の欠点も多い。特に本実験においては、被操作物体の運動を測定しなければならず、ゴニオメータを使用することは困難である。高速度カメラを用いた光学的方法は、非接触で計測が行なえるという利点があるが、被写体が複雑な運動をする場合、標点在被写体の陰になって測定が行なえない場合が生じる恐れがある。本実験では、3章に示した、鏡を用いた一方写真計測法を用いることにより、被写体の運動が鏡像として十分に撮影できるように鏡を設置し、複雑な動作を高精度に測定する。

6.2 被操作物体の運動計測による人間の操作能力の評価

人間の上肢の器用さを評価するための一つの方法として、サービス角による評価法が考えられる。サービス角とは、物体にアクセス可能な範囲を角度で表わしたものであり、主に産業用ロボットの機能評価のために用いられてきた。⁷³⁾ 人間の上肢は、一般の産業用ロボットと比較して自由度が大きく、運動範囲内の大部分で大きなサービス角を持つ。サービス角は、腕の機構と各関節の可動範囲⁷⁴⁾ が分かれば、理論的に求めることが可能であるため、実験によりサービス角を直接測定するような研究は、あまりなされていない。他の器用さを表わす評価項目として、被操作物体の姿勢や位置を、目的とする状態に正確に制御できることがあげられる。そこで、被操作物体の運動を計測し、目的とした運動がなされているかどうかによって器用さを評価することができる。人間の上肢の制御は、体からの力感覚を用いた開ループ的な制御と、視覚を用いた閉ループ的な制御が、運動中枢により³⁹⁾ 行なわれていると考えられている。故に、器用さを評価するために設定する動作は、視覚と体内での力感覚を考慮に入れたものでなければならない。

器用さを評価するための他の項目として、知能的な能力が考えられる。例えば、上述したことが腕の機構的な面から見た操作能力や、感覚機能や、制御機能であったのに対して、対象物体や腕の状態に対する認識能力がこれに相当する。本研究では、これらの能力を評価するために、被操作物体の運動の開始位置と終了位置を、視覚と体からの力感覚を考慮に入れて設定し、掃引面積最小という課題を与えて物体を移動させ、その掃引面積を測定した。掃引面積最小化という課題において物体の移動状態を認識し、いかに操作すればより少ない掃引面積で移動できるかを判断する能力が、知能的な能力に相当する。本節では、まず機構的な面から見た操作能力や、感覚及び制御機能によらない、人間の知能的な判断機能のみを評価する実験を、平面掃引面積最小化という課題を用いて行なう。次に、空間掃引面積について実験を行ない、人間の上肢の器用さを評価する。また、実験には本研究で開発した鏡を用いた写真計測法を用い、本計測法の実際の問題への適用性も評価する。

6.2.1 平面掃引面積最小問題

平面内で移動する線分が掃引する領域の形状と面積について考察し、実験により求めた掃引面積が最小になる案内法と、最適化法により求めた最小解とを比較する。これにより、人間の物体の操作における判断機能を評価する。以下に a) 従来の研究の概要、 b) 実験装置、 c) 実験結果、 d) 最適化法による最小解について示す。

a) 従来の研究の概要

線分の掃引面積最小問題は、古くから数学者によって研究されてきた。1917年にKaakeyaは、⁷⁵⁾ 次の問題を提出した。

“線分 \overline{AB} が、その中で回転して、AとBが入れかわることができるような

平面図形のうち、最小面積になるものはどのようなものか”

1928年に Besicovitch は、有限の長さを持つ線分が、その中で完全に一回転できるような、いくらでも小さい面積の図形が存在することを証明し、この問題が解かれた。しかしこの場合、線分は無限の広がりを持つ平面上を動くことが要求され、現実実現可能な運動とはいえない。现阶段では、求める図形が有限領域内になければならぬという条件をつけた Kakeya の問題は、解として三角ハイポサイクロイドを持つものであろうと考えられている⁷⁶⁾。通常の剛体の運動では、有限な平面内を動くだけでなく、運動の自由が限定されていることが多い。これらの場合については、掃引面積を最小ならしめる案内法および面積最小領域の図形的特徴も未知であるため、それが真に最小であることの証明法についてもまだ明らかではない。

b) 実験装置

本実験では、図 6.1 に示すように、位置1から位置2までの線分移動に対して、次の拘束条件がある場合の掃引領域を最小にするような移動法を探索することを試みた。

(拘束条件) 線分 \overline{AB} の端点Bが必ずX軸上を移動する。

この問題を解くために、グラフィックディスプレイ画面に線分とその掃引領域を表示し、新しい線分位置を与えられるたびに旧掃引領域に新しい領域を付加し、常に領域を更新することができる装置を製作した。図 6.2 に製作したグラフィックディスプレイシステムのブロック図を示す。装置は

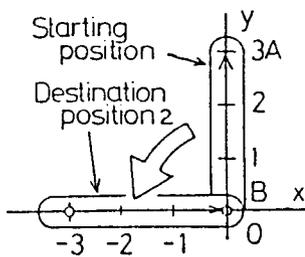


図 6.1 線分の移動状態

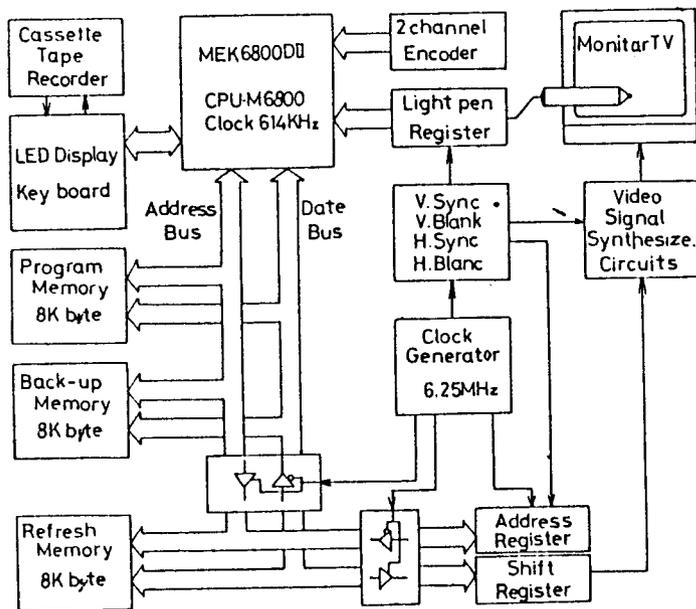


図 6.2 グラフィックディスプレイシステムのブロック図

マイクロプロセッサ M6800 により制御している。画面の解像度は 256×256 で 4 段階の白黒濃淡表示が可能であり、線分と、それが掃引した軌跡を濃淡をかえて表示している。また、画面に表示した線分を案内するために、二組のロータリーエンコーダを使用した。操作者は、ディスプレイ画面上に濃く書き込まれた出発位置にある線分に対して、目標位置に重なるように案内してゆく。そして、案内が終了した時点でそれまでに発生した領域の面積を求めて、運動過程、領域形状とともに表示する。

以上の処理は、全て機械語プログラムによって記述し、ロータリーエンコーダの操作速度に追従できる処理速度を得ている。線分の表示をくり返すことで線分の掃引図形を求めているため、線分は連続した点により表示されなければならない。そのため、DDA (Digital Differential Analyzer) 方式で線分を発生させている。表示画面と画面のメモリの関係は、線分が白色で表示され、画面のメモリに 0 が書き込まれる。掃引図形も同様であり、その面積は画面のメモリ中の 0 の個数を数えることで求められる。

c) 実験結果

前述の装置を用いて線分の掃引領域を求めた。図 6.3 は、直交する壁に沿って線分を案内した場合であり、発生した掃引領域は x 軸と y 軸と包絡線であるアステロイド曲線によって囲まれる。この場合は、解析的に掃引面積が次式によって求められる。

$$S_A = \frac{3}{32} \pi \ell^2 \quad (6.1)$$

式 (6.1) より求めた値と実験によって得た値を比較すると、約 +4% の誤差であった。

図 6.4 は、100 回の実験の結果、最も面積が小さかったものである。図 6.5 は、その時のディスプレイ上の表示である。装置の操作者は、各瞬間において、それまでに発生させた領域の面積が小さくなるように努力するのが普通である。しかし、最初にかなり大きい面積の領域であっても、途中からすでに発生した領域の中で移動すれば、最後には、その方が領域面積を最小にする可能性

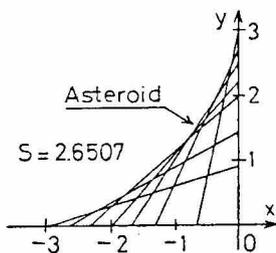


図 6.3 アステロイド

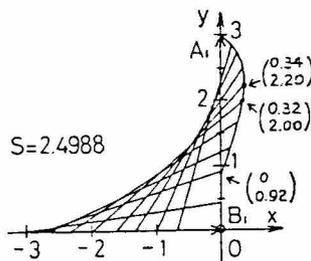


図 6.4 実験による最小値

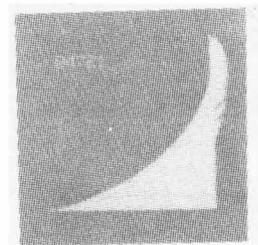


図 6.5 実験結果の表示

があり、線分の案内法は単純ではない。図 6.4 のように得られた最小解の性質について述べる。

一般の平面運動は、移動瞬間中心と固定瞬間中心の軌跡のところがり運動として表わせる。例えば、図 6.3 の場合は、図 6.6 に示すように、両瞬間中心軌跡が円弧となることがよく知られている。実験によって得られた最小解の場合は、図 6.7 に示すように固定瞬間中心軌跡が直線となることが特徴的である。両瞬間中心軌跡は、図 6.8 に示すように、線分の両端点の移動方向を示すベクトル（点 A は、ベクトル t_i 、点 B は $-x$ 軸方向）に垂直な両端点を通る直線の交点によって求められる。図 6.7 の点 Q から以後の線分の移動は、図 6.3、図 6.6 の場合と等しい。もし、固定瞬間中心軌跡が直線であるとすれば、壁 W の形状は、解析的に求めることができる。図 6.9 に示すように、点 A (a, b) における法線 の満たすべき条件より、次の方程式が得られる。

$$\frac{db}{da} = \frac{\sqrt{\ell^2 - b^2}}{h - b} \quad (6.2)$$

この方程式は、解析的に解けて、次のパラメータ表示の解を得る。

$$a = \ell \sin \theta - h \theta, \quad b = \ell \cos \theta \quad (6.3)$$

ここで $\ell = 3$ 、 x 軸に平行な固定瞬間中心軌跡の高さ $h = 2.2$ を与えることにより、実験による最小掃引面積を与える壁が定まる。図 6.10 に実験結果と式 (6.3) による壁の状態を示す。

d) 壁を円弧と仮定した場合 及び 最適化法による最適解

壁 W を図 6.11 に示すように、円弧（中心 C (c, h)、点 (0, 3) を通過する）と仮定し、c, h

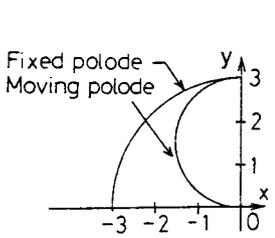


図 6.6 アステロイドの瞬間中心軌跡

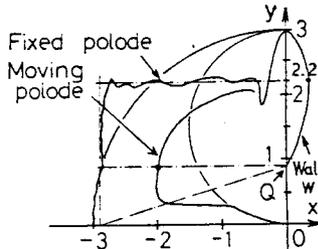


図 6.7 実験結果の瞬間中心軌跡

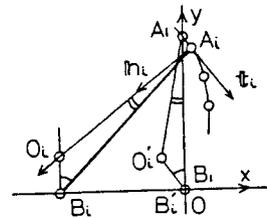


図 6.8 瞬間中心

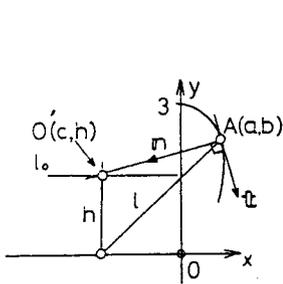


図 6.9 移動瞬間中心

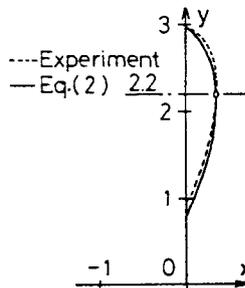


図 6.10 壁の形状

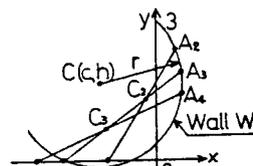


図 6.11 円弧状の壁

を 0.1 きざみで $c = -1.4 \sim -0.6$, $h = 2 \sim 2.4$ の間で全数検査により面積を求め、最小掃引面積を求めた。このとき、線分掃引領域を解析的に表わして、定積分を実行することは、困難である。そこで、図 6.11 に示すように、ディスクリートの位置について面積を数値的に求めた。その結果 $h = 2.2$, $c = -0.8 \sim -1.0$ 付近で最小値が得られた。次にこの問題を掃引面積を最小とするような壁 W の形状を求める変分問題とみなして解いた。

壁の形を図 6.12 に示すように $y = 0 \sim 3$ を 0.05 きざみでディスクリート化し、面積が最小になるように、対応する x_i ($i = 1 \sim 59$) を定める 59 次元最小化問題として定式化し、目的関数の値である面積は、前述の方法を用い計算した。最適化法として Fletcher と Reeves の共役傾斜法を用い、グラジエントは、数値微分により近似的に求めた。出発解を $x = 0$ (垂直な壁に相当し、面積は 2.649) とし、得られた最小解を図 6.13 に、壁を円弧として求めた最小解と共に示す。この結果、以前に述べてきた掃引面積の中で最も小さい値 (2.486) が得られた。ここで使用した計算機は HITAC・10 であり、探索方向変更回数 262 回、求積サブルーチンコール 32756 回、計算所用時間 50 時間であった。

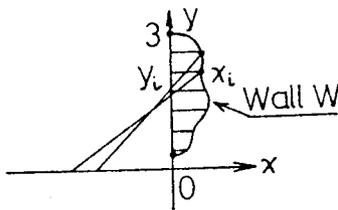


図 6.12 壁の形状

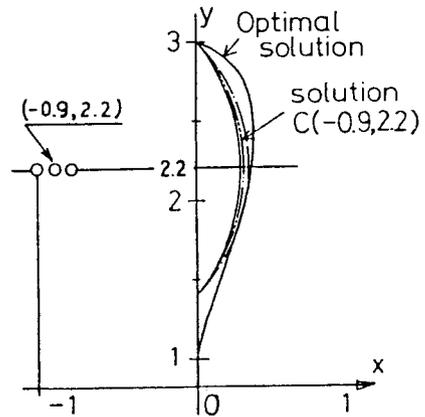


図 6.13 最適化によって得られた最小解

e) 考察

実験装置を使用して求めた案内法と、最適化法を用いて求めた結果は、ほぼ等しく、実験により求めた最小掃引面積 (2.4988) の測定誤差 (+4%) 内に最適化による最小値が存在している。この結果、人間の掃引面積最小問題における認識や判断等の能力は、秀れたものであることが分かる。ただし、この結果は数十回の実験の後に得られたものであり、その学習効果も考慮に入れなければならない。

最適化法を用いて、物体の案内法を求めたが、本実験で対象とした運動は、一般の運動と比較して、非常に単純であったにもかかわらず、その最適化に要した時間は、非常に長かった。そのため、一般的な場合の操作法を定めるために、この最適化法を用いるのは、合理的ではない。また、掃引面積を計算する際に、その図形が単純な凸図形であったために、簡単に求めることが可能であった

が、凹凸がはげしいものや、図形の内部に空所が存在するような場合は、面積を求めることは困難となる。本実験で用いた装置による面積の計測は、上記のような場合でも面積を簡単に求めることができる。しかし、測定誤差が大きい(4%)という欠点がある。この欠点を改善するためには、ディスプレイの解像度をふやすことが考えられる。近年のエレクトロニクスの進歩により、高い解像度を持つ安価なパーソナルコンピュータが開発されており、このような問題に対して有効に利用できると思われる。

6.2.2 空間案内掃引面積による人間の器用さの評価

棒を指定された空間内の出発位置から目的位置まで案内するとき、空間内を掃く面積(掃引面積)が最小となるように案内せよという課題を与える。その棒の移動軌跡を測定して掃引面積の値を求めれば、その値が人間の器用さを表わす数値となるという仮定を設定して、その妥当性を確認するために、以下に述べるような実験を行なった。ここで、実験に用いる、棒の運動計測には、本研究で開発した、鏡を用いた一方向写真計測法を用い、本計測法の実際の問題に対する適応性も合わせて評価した。以下に a) 実験方法 b) 実験結果及び考察について示す。

a) 実験方法

図 6.14 に、実験状態を示す。棒 ab を位置 AB から $A'B'$ へ、掃引面積が最小になるように移動させる。位置 AB 、 $A'B'$ は空間的に食い違った相対位置にある。棒の長さは 300 mm であり、その保持部は棒の中央部に取り付けられており、図に示すように、人間の手部により保持されている。操作者の位置及び姿勢は自由であり、最も操作しやすい状態で実験を行なったが、全ての被験者はほぼ同一の位置、姿勢をとった。

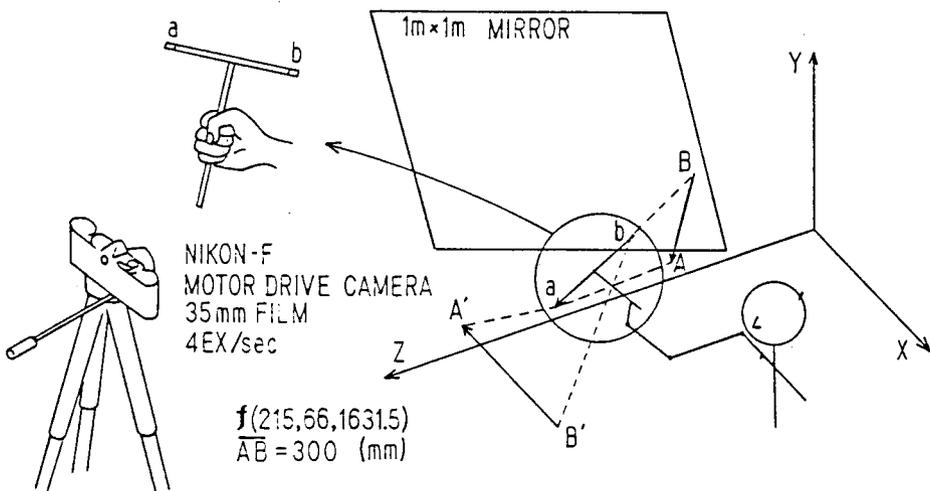


図 6.14 実験状態

棒の両端の三次元座標値を、鏡を用いた一方向写真計測法により計測した。鏡は、1 m×1 mの大ききで、棒の移動が最も良く撮影できる位置に設定した。撮影は、撮影距離 1 mで、35 mm モータードライブカメラを用いて、4枚/秒の撮影を行なった。撮影によって得られた画像を、写真 6.1 に示す。

b) 実験結果

写真計測によって求められた棒の両端点の三次元座標の情報を用いて、掃引面積を計算した。掃引面積は、図 6.15 (a) に示すように、四辺形 $A_i B_i A_{i+1} B_{i+1}$ を $\triangle A_i B_i B_{i+1}$, $\triangle A_i B_{i+1} A_{i+1}$ の二つの三角形要素に分割し、それぞれの面積を加算することにより求めている。平面における掃引面積を、三角形要素に分割する方法で求める時は、図 6.15 (b) に示すように、棒が交差するときは、正しい掃引面積が得られない⁷⁸⁾。しかし、本計測法では、三次元的な掃引面積を対象としているので、このように、線分が交差することは少ないと考えられる。

写真計測を実施する前に、数回移動動作を行ない、最も掃引面積が小さいと思われる操作に習熟したときの動作を写真計測した。図 6.16 に掃引面積が最も小さかった場合の棒の移動軌跡を示す。全体にわたって、なめらかな動作となっている。開始位置 AB の直後から、すぐに大きく移動し、終了位置 $A'B'$ に近くなると変動量が小さくなり、精密な位置制御が行なわれて、最終位置に位置ぎめしようとしているのが分かる。開始位置 AB の直後の動作は、主に体からの力感覚を用いた開ループ的な位置制御動作と考えられる³⁹⁾。終了位置 AB の近くでは、主に視覚を用いて、三関節を閉ループ的に位置制御する動作である。

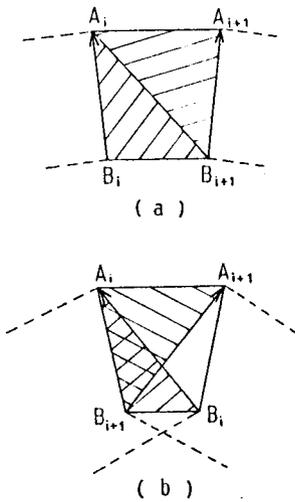


図 6.15 面積の三角形要素による分割

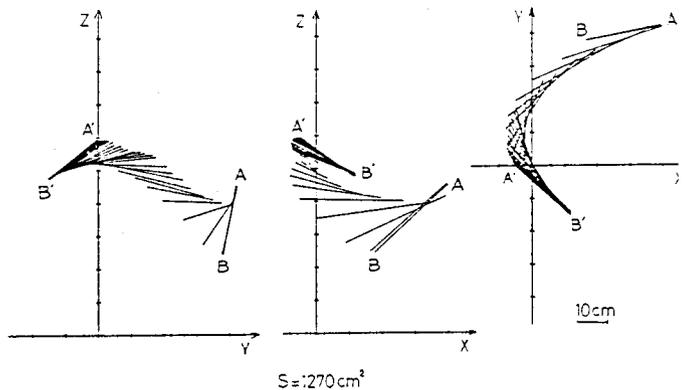


図 6.16 実験結果 (1)

次に視覚の位置制御に対する効果を明確にするために、片目が不自由な操作者について実験を行った。図6.17に測定結果を示す。移動の開始位置及び終了位置において正確な位置制御が行なわれず、微小な移動を繰り返し位置を確認するような動作を行なっている。特に終了位置は開始位置と比較して眼の位置から遠距離にあり、上述の動作がより多く見られ掃引面積が大きくなる原因となっている。開始位置及び終了位置以外の部分では、視覚に欠陥がない操作者の場合と同じくなめらかな動作であり、体内からの力感覚による開ループ的な制御を行なっているものと考えられる。

以上の測定された動作は、操作者が動作を数回繰り返した後に定めた習熟動作であった。そのため、開始位置及び終了位置以外の部分では、主に体内からの力感覚を用いた開ループ的な制御が行なわれ、視覚情報の多少にかかわらず運動がなめらかになったのであろう。視覚による位置制御は、開始位置と終了位置付近で行なわれているが、移動中における視覚の位置制御に対する効果を明確にするために、体内での力感覚による位置制御を排除した動作を行なわせた。図6.18に示すように、棒の両端点の移動経路が、開始位置と終了位置を結ぶ直線となるような案内法を設定した。棒の移動はなめらかでなく、移動中の全てにわたって棒の向きがこきぎみに変化している。しかし、

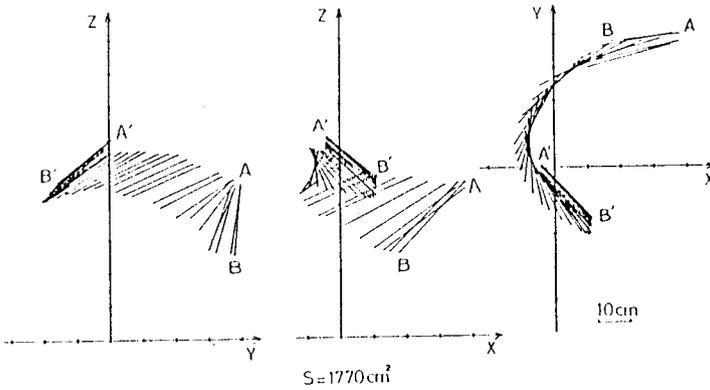


図 6.17 実験結果 (2)

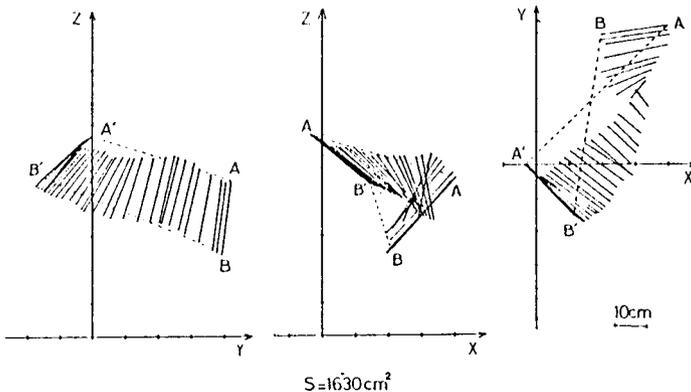


図 6.18 実験結果 (3)

このときの位置に関する精度は、あまり良くない。原因として、視覚による三次元位置の検出能力の低さが考えられる。さらに、腕の関節は、全て回転を基本とした動作（ねじり、まげ）を行なうから、直線的な動作を能動的に行なうことは、得意ではないためであろうと考えられる。

以上に示したように、三種類の実験を行なったが、案内掃引面積が求められるまでに時間がかかるから、最小案内掃引面積を求めるために、実験を繰り返して行なうことは現実的ではない。しかし、視覚の特性が開始位置や終了位置における物体の移動状態に現われることや、上肢の各関節の協調特性が特に直線運動において現われることより、腕の器用さを被測定物体の運動計測によって評価できると考えられる。また、本実験のように、被測定物体が複雑な運動を行なう場合にも、本研究で開発した鏡を用いた一方向写真計測法の測定能力は十分であることが確認できた。

6.3 人体上肢の各関節の運動計測

人間の上肢の構造と機構は非常に複雑であり、関節の評価のために種々の動作が解析されてきた。

上肢の運動に影響を与えないで測定を行なうために、写真計測法がよく用いられているが、実際に行なわれている運動は、非常に複雑でかつ運動範囲も広い。そのため、写真計測法で測定可能な単純な動作を設定し、計測が行なわれてきた。本研究では、鏡を用いた一方向写真計測法を用いることにより、複雑な三次元動作を計測することができるので、計測する動作を任意に設定することが可能となる。そして、被操作物体の重さや作業回数による腕の動作の変化を計測し、その運動能力を評価する。

6.3.1 上肢各関節の運動機構

上肢の構造は、図 6.19 に示すように複雑であり、上肢帯、上腕、前腕、手指部に分けることができる。以下に、各部の構造と運動について述べる。

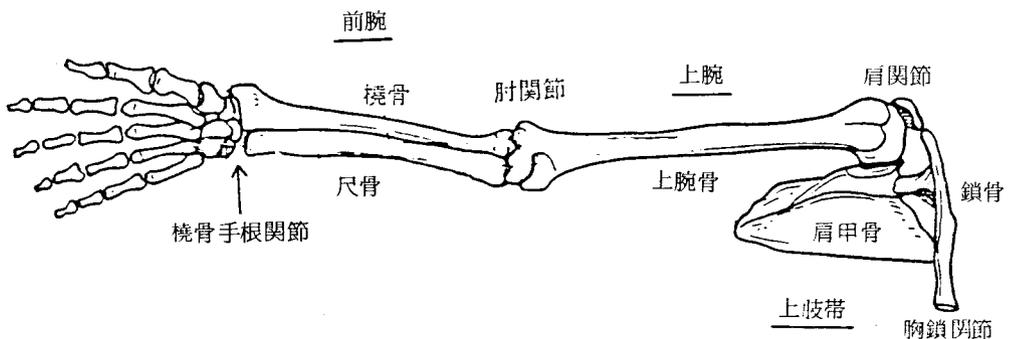


図 6.19 上肢の構造

a) 上肢帯

図 6.20 に示すように、上肢帯には、胸鎖・肩鎖・肩関節の三つの関節がある。胸鎖関節は、上肢帯と体幹を結合する唯一の関節であり、鎖骨はこの関節によって鎖骨末端（肩峰端）の動きで表わすと、基本肢位から上方 100 mm，下方に 30 mm，前方に 100 mm，後方に 30 mm の可動範囲を持つ。鎖骨の長軸方向を軸とした軸回旋は、約 30 度の可動範囲を持つ。肩鎖関節は、肩甲骨と鎖骨を結合する関節であり、軸回旋について約 30 度の可動範囲を持つ。肩甲骨の運動は、胸鎖関節と肩鎖関節の動きを伴って起こり、胸壁に沿って上下方向に 100 mm～120 mm，内外側方へ 150 mm 移動する。肩関節は、上腕骨と肩甲骨を結合する多軸性関節（球関節）である。また、上腕骨は関節腔内でゆるやかに包まれており、20 mm～50 mm の自由度がある。肩関節の骨動の自由度は 3 であり、図 6.20 に示すように

- 1：上腕の前方への挙上（屈曲）と後方への挙上（伸展）
- 2：上腕の側方への挙上（外転）と体幹に引きつける動作（内転）
- 3：上腕の内方への回旋（内旋）と外方への回旋（外旋）

によって、上肢の運動を表わすことができる。上腕の動作範囲は、上肢帯が共同して動くため、肩関節のみの動作範囲よりも広がる。

b) 肘関節

肘関節は、上腕骨下端，橈骨上端，尺骨上端のそれぞれの組み合わせによる 3 つの関節からなる複関節である。前腕の骨動には、図 6.21 に示すように、屈曲，伸展，回外，回内があるが、回外及び回内運動は、肘関節と下橈尺関節との協動によって行なわれる運動であり、肘関節は、屈曲，伸展運動を受け持つ。

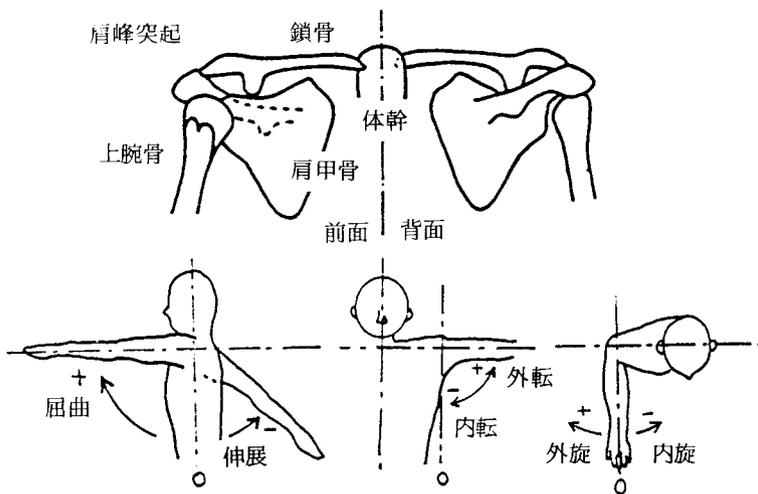


図 6.20 肩関節の動作

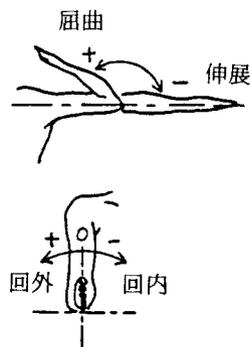
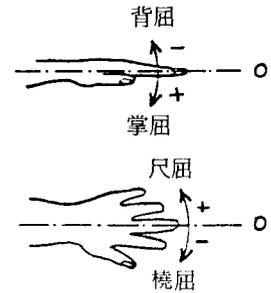


図 6.21 肘関節の動作

c) 橈骨手根関節

橈骨手根関節は、橈骨と手根骨の間の楕円関節であり、尺骨と手根骨とは直接に関節をつくらない。手関節の自由度は2であり、図6.22に示すように、背屈、掌屈及び橈屈、尺屈がある。

手指部には、橈骨手根関節の他に、手根間関節、手根中央関節、豆状骨関節、各指の手根中手関節、中手骨関節、中手指節関節、指節関節があり、巧緻性の高い運動を行なう。一般に、上肢の運動計測は、肩、肘、前腕および手関節の上肢計測と、手指計測に



分割して実施されている。本研究では、前者の上肢計測を行なう。図6.22 橈骨手根関節の動作

6.3.2 上肢各関節の運動計測と運動能力の評価

上肢の分析は、行為、動作、運動について行なうことができる。行為とは、行動の持つ意味との関連でとらえられるものであり、本研究では取り扱わない。動作とは、仕事や課題が与えられた時の行動の変化として計測されるものであり、前節で述べた掃引面積最小問題に関する分析が、これに相当する。運動は、姿勢が時間的に連続して変化したもので、動きの方向、相対的な位置関係の変化として計測される。運動を分析する方法は、運動学の立場から見れば、運動学的分析と運動力学的分析に分けることができる。本節では、上肢の運動を運動学的に分析した。すなわち、上肢の運動を、力の概念から離れて、各関節の変化や運動を計測することにより分析した。以下に、測定した各関節の三次元座標より、各関節の変位角度を求める方法と、実験及び実験結果について述べる。

a) 各関節の角度変位の計算法

ほとんどの関節の角度変位は、各関節の座標値が求めれば、計算により求めることが可能であるが、前腕の回旋は、従来の方法では測定不可能であった。また、写真計測法を用いた従来の研究では、ほとんどが平面運動とみなせるような動作を対象としていたため、このような事は問題とはならなかった。逆に言えば、複雑なねじり運動には、写真計測法は用いられていなかった。本計測では、被操作物体の形状を工夫し、その変位を計測することで前腕の回旋だけでなく、手指部の背屈、掌屈、橈屈、尺屈をも計測した。以下に各関節の角度変位の計算法を示す。

(肩関節の屈曲・伸展・外転・内転)

従来の研究では、肩峰突起を基準とし、図6.20に示すように、上腕の変化により、肩関節の角度変位を計算していた。しかし、実際の運動では、図6.23に示すように、鎖骨の運動により肩関節(肩峰突起)が移動する。そこで本方法では、図6.24に示すように、胸鎖関節付近の体幹に基準点 P_0 を設け、基準点と肩関節 P_1 を結ぶ直線をx軸に一致させ、絶対座標のY軸と平行にy軸

を設定し、肩関節の角度変位 (θ_0 : 屈曲・伸展, θ_1 : 外転・内転) を計算する基準となる動座標系を定めた。動座標系から見た、肩関節 P_1 から肘関節 P_2 に向かうベクトル P_{12} の j, k 成分及び i, j 成分よりなるベクトル P_{12jk} , P_{12ij} とベクトル P_{13jk} より、肩関節の変位 θ_0, θ_1 は次式で求められる。

$$\cos \theta_0 = \frac{P_{12jk} \cdot \mathbf{J}}{|P_{12jk}|} \quad (6.4)$$

$$\cos \theta_1 = \frac{P_{12ij} \cdot \mathbf{J}}{|P_{12ij}|} \quad (6.5)$$

上腕の内旋・外旋 θ_2 は、図 6.25 に示すように、点 P_0, P_1, P_2 によって定まる平面の法線ベクトル \hat{t}_1 と、点 P_1, P_2, P_3 によって定まる平面の法線ベクトル \hat{t}_2 より次式によって求められる。

$$\cos(\pi/2 - \theta_2) = \hat{t}_1 \cdot \hat{t}_2 \quad (6.6)$$

ただし、肘関節の屈伸が 0 となり、点 P_1, P_2, P_3 が一直線上に存在すると、ベクトル \hat{t}_2 が求められないため、被験者の動作の設定には注意が必要であるが、一般的な運動では、このように関節が伸びきってしまう場合は少ないと思われる。

(肘関節の屈曲・伸展)

肘関節の屈曲・伸展 θ_3 は、図 6.25 に示すように、点 P_1, P_2 によって定まるベクトル P_{12} と点 P_2, P_3 によって定まるベクトル P_{23} より、次式で求められる。

$$\cos \theta_3 = \frac{P_{12} \cdot P_{23}}{|P_{12}| |P_{23}|} \quad (6.7)$$

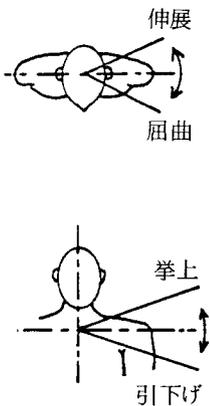


図 6.23 肩関節の移動

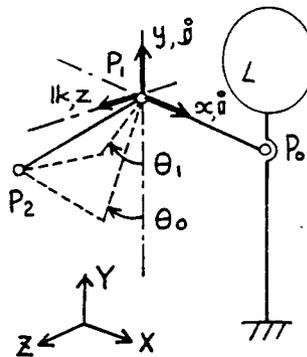


図 6.24 肩関節の角度変位

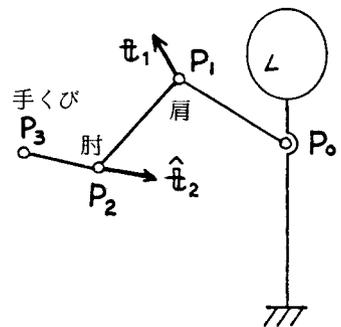


図 6.25 上腕の内旋・外旋

(前腕の回外・回内)

前腕の回外・回内 θ_4 は、手指部の変化を測定しなければ計算できないが、手指部は小さく、変化が小さいため、現実的に、その変位を計測しても正確な値が得られにくい。この困難を解決するために、図 6.26 に示すように、手指部によって棒をしっかりと把握し、その棒の両端点 P_4, P_5 を測定した。 θ_4 は、橈骨手根関節 P_3 と点 P_4, P_5 によって定まる平面に存在し、 $\vec{P_2 P_3}$ に垂直な単位ベクトル \hat{t}_3 、および点 P_1, P_2, P_3 によって定まる平面の法線ベクトル \hat{t}_2 により、次式で求められる。

$$\cos \theta_4 = \hat{t}_2 \cdot \hat{t}_3 \quad (6.8)$$

(手指部の背屈・掌屈, 尺屈・橈屈)

これらの量も、肩関節における屈曲・伸展, 外転・内転の解析手法と同様な手法で求めることができる。動座標系を x 軸が、先ほど求めた \hat{t}_3 と一致し、 y 軸が $\overline{P_3 P_2}$ に一致するように定めた。点 P_4, P_5 の中間点 P_6 と点 P_3 より、ベクトル $\vec{P_3 P_6}$ に相当する θ_5 を求めた。背屈・掌屈 θ_5 , 尺屈・橈屈 θ_6 は、次式により求められる。

$$\cos \theta_5 = \frac{\vec{P_3 P_6} \cdot \vec{J}}{|\vec{P_3 P_6}|} \quad (6.9)$$

$$\cos \theta_6 = \frac{\vec{P_3 P_6} \cdot \vec{J}}{|\vec{P_3 P_6}|} \quad (6.10)$$

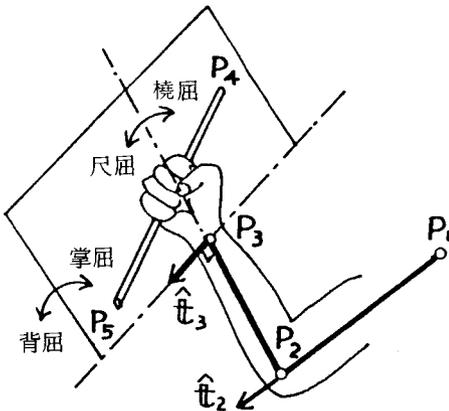


図 6.26 操作物体の把握状態

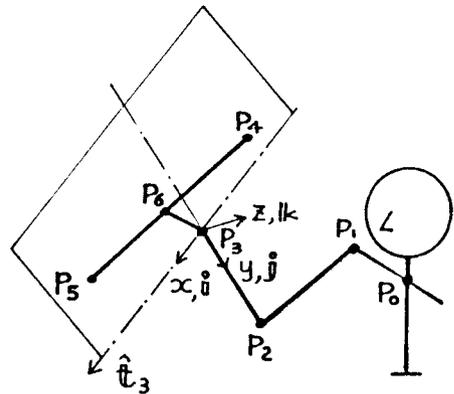


図 6.27 手指部の角度変位

b) 実験方法

人体の上肢は、下肢の運動が主に歩行（移動）であるのに比較して、多数の動作を行なうことができる。動作は、同じ課題を実行する場合でも、操作される物体の状態によって変化する。例えば、被操作物体の大きさ、形状、重さ等がこの変化要因となる。課題が異なっていれば、当然動作も変化するが、例えば操作物体の初期位置と最終位置が定まっている場合であっても、移動速度および加速度、物体が能動的に動く場合やそうでない場合等によっても動作の変化がみられる。

本実験では、各関節の動作が全て含まれるような動作を設定した。実験状態を図 6.28 に示す。標点は、胸鎖関節の近くの胸骨柄、肩峰突起、肘関節、橈骨手根関節、被操作物体である棒の両端に設定した。被操作物体は、バーベルのようにおもり（ $470g$ 、 $960g$ 、 $1450g$ 、 $1960g$ ）を付加することができ、棒自体では $220g$ であり、長さ（ $\overline{P_4P_5}$ ）は $700mm$ である。標点の三次元位置計測は、鏡を用いた一方向写真計測法を用いた。鏡は $1m \times 1m$ の大きさで、作業中の動作が全て鏡像として捕えられるように設定した。このような複雑な動作を測定するとき、鏡の位置や向きが任意であることは、非常に有効であると考えられる。撮影は、 $16mm$ シネカメラを用い、 20 枚/秒で行なった。動作速度は比較的小さいから、撮影速度を高くする必要はなかった。実験は、おもりの重量を変化させた場合と、操作回数を変化させた場合について実施した。被操作物体の重量が $2140g$ の場合に 20 回、 $3100g$ の場合を 15 回、 $4100g$ の場合を 8 回、 $6020g$ の場合を 18 回実施した。

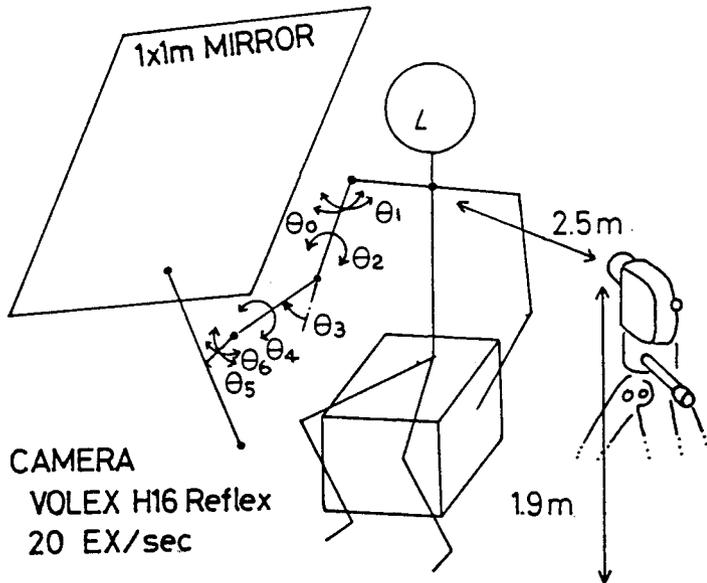


図 6.28 実験状態

c) 実験結果及び考察

実験結果は、写真計測法により各標点の三次元座標として求められる。図 6.29 に、被操作物体の重量が 2140 g，操作回数 3 回目の場合の三次元座標の変化を示す。鎖骨と体幹の間の関節 P₀ が、前後に変化している。このため、前述のように、P₀ を基準とすると正しい角度変位が得られない恐れがあるが、実験中の動作を観察すると、図 6.30 に示すように上体が前後に移動はするが、傾きは少なかった。そのため、各関節の変位を計算するために必要であった動座標系は、平行移動し、計算結果には影響が少ないと思われる。肩関節 P₁ も体幹 P₀ の変化に従って移動しているが、全く同じ軌跡ではなく、図 6.23 に示した鎖骨の屈曲・伸展，拳上・引下げが行なわれていることが分かる。このため、従来のように肩関節に基点を設けていては正確な動作を測定できず、本研究で用いたような計算処理が必要である。

図 6.34 より、肘関節と橈骨手根関節は、動作の行きと帰りに同じ軌跡をたどらないことが分かる。動作が上下方向であったため、重量の影響が現われたものではないかと考えられる。おもりの重量を大きくすればするほど、または、操作回数が増せば増すほど体幹の移動量と共に、軌跡のヒステリシスは大きくなった。原因として、操作回数が増し、疲労が大きくなるにつれ、より小さな力で操作するために、体幹の近くで操作しようとするものが考えられる。

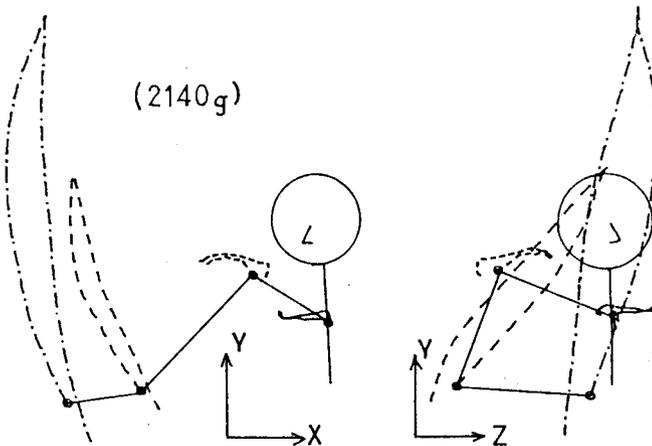


図 6.29 標点の測定値の軌跡

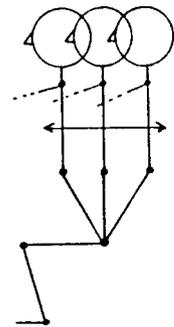


図 6.30 体幹の揺動

図 6. 31 に、測定した標点の三次元座標を計算処理し、各関節の角度変位を求めたものを示す。
 ここで、 $\theta_0 \sim \theta_6$ は以下に示すような関節の角度変位である。

- | | |
|------------------------|---------------------------|
| θ_0 : 肩関節の屈曲・伸展 | θ_4 : 前腕の回外・回内 |
| θ_1 : 肩関節の外転・内転 | θ_5 : 橈骨手根関節の掌屈・背屈 |
| θ_2 : 肩関節の外旋・内旋 | θ_6 : 橈骨手根関節の尺屈・橈屈 |
| θ_3 : 肘関節の屈曲・伸展 | |

ただし、符号は図 6. 20 ~ 図 6. 23 に示すように定める。

$\theta_0 \sim \theta_3$ は、動作の全域に渡って、ゆるやかに変化している。これらの関節の変位は、主に手指部に対する位置制御において変化するものであり、本実験では被操作物体の向きが大きく変化するような操作ではあるが、操作の開始位置と終了位置に関して、これらの角度変位が複雑に変化するよう特に考慮しなかったためであろうと考えられる。実験時の視察において、おもりの重量が増加すると、開始位置と終了位置の間の移動時間が短くなっていたが、この現象は図 6. 31 の $\theta_0 \sim \theta_3$ において変化が静定するまでに要する時間が短くなっている所に計測されている。

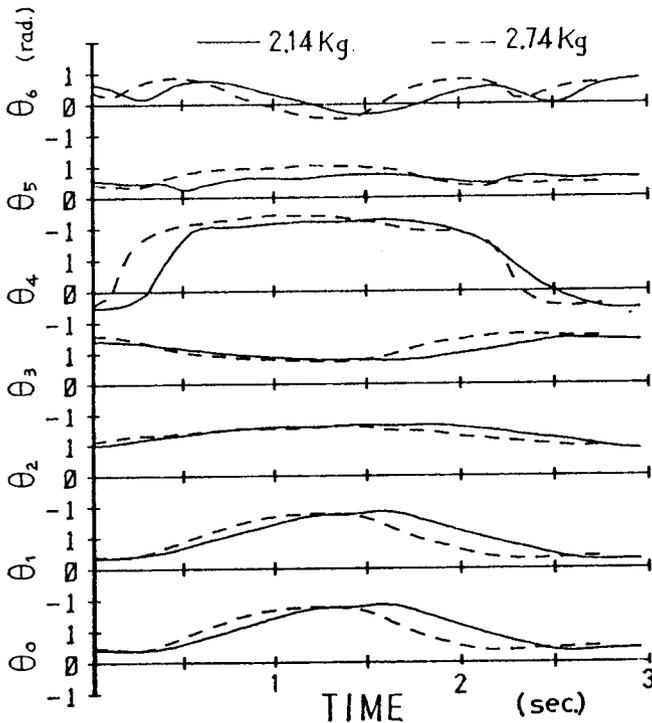


図 6. 31 各関節の角度変化

$\theta_4 \sim \theta_6$ は、主に被測定物体の向きの制御を行なうための角度変位である。 θ_4 の可動範囲は、 $\pm 1.57 \text{ rad}$ であるが、正方向にそれ以上の変化が現われている。これは、図 6.26 に示す 骨手根関節と操作物体の両端点の座標により定まる平面と、手掌面が一致せず、正しい \hat{t}_3 が得られなかったために、系統的な誤差が生じたのではないかと考えられる。 θ_4 は、運動の開始時に大きく変化し、その後は一定となっている。また、おもりの重量が増すと、この変化に要する時間が短くなっている。

θ_5 の可動範囲は、 $+1.57 \text{ rad} \sim -1.22 \text{ rad}$ であるが、本実験では、ほぼ一定であった。 θ_5 は、被操作物体である棒の、長手方向の向きの制御には関係しないためであろうと考えられる。 θ_6 の可動範囲は、 $+0.96 \text{ rad} \sim -0.44 \text{ rad}$ であり、ほぼ全範囲にわたって変化している。これは、 θ_5 の場合とは逆に、棒の方向制御のために行なわれた動作であろうと考えられる。 θ_4 は、開始位置及び終了位置付近では、ほとんど変化していないから、微小な方向制御はほとんど θ_6 によって行なわれていると考えられる。また、 θ_6 のおもりの重量の違いによる変化はほとんど見られなかった。

6.4 結 言

本章では、本研究で開発した鏡を用いた一方向写真計測法を用いて、人体上肢の運動を測定し、上肢の運動能力を多方面から評価すると共に、本計測法の実用性も評価した。

6.2 節では、操作能力(器用さ)を評価するために、被測定物体の掃引面積最小問題を考え、人間の中枢と視覚を含めた制御系に関する操作能力を評価した。まず、平面での掃引面積最小問題を考え、視覚や肉体的な操作能力の要因を排除するために、グラフィックディスプレイ上で物体を操作し、掃引図形を求めた。そして、最適化法を用いて求めた最小掃引面積における掃引図形と、実験によって得られた図形とを比較することによって、中枢の知能的な判断機能を評価した。次に、三次元的な、案内掃引面積最小問題を考え、被操作物体の変位を写真計測法を用いて計測し、その操作状態や掃引面積により、視覚等の感覚機能や、腕の肉体的な制御機能を評価した。

6.3 節では、人体上肢の各関節の運動を運動学的に分析した。被操作物体の重量や、操作回数による上肢の運動の変化を写真計測法により計測し、各関節の三次元位置に関する軌跡や、各関節の角度変位を求め、各関節が関与する運動を分析した。本章で得られた結果は、以下のとおりである。

- (1) 平面における掃引面積最小問題において、実験により人間が求めた案内法と、最適化法を用いて求めた結果は、ほぼ等しい。これより、人間の掃引面積最小問題における認識や判断等における能力は、秀れたものであることが分かる。ただし、この結果は数十回の実験の後に得られたものであり、その学習効果も考慮に入れなければならない。

- (2) 空間における案内掃引面積最小問題において、被操作物体に対する上肢の運動は、視覚による閉ループ的な制御と体内での力感覚による開ループ的な制御によって行なわれるが、視覚による三次元位置の測定能力は低く、物体の案内は主に体内での力感覚による制御によって行なわれる。
- (3) 物体を操作中の上肢の各関節の三次元位置を計測した結果、動作の往復において同一の軌跡をたどらず、ヒステリシスを生じる。また、被操作物体の重量や、操作回数が増すと、このヒステリシスは大きくなる傾向がみられた。
- (4) 被操作物体の重量や操作回数が増すと、物体の操作を体幹の近くで行なおうとして体幹が揺動する。また、肩関節の位置は鎖骨の運動により移動する。そのため、従来のように肩峰突起に基点を設けて、各関節の角度変位を求めることはできない。体幹の揺動は並進運動であり、上体は傾かないため、体幹に基点を設けることによって正確な角度変位を求めることができる。
- (5) 上肢の各関節の角度変位を計測結果より求めた結果、以下のことが分かった。肩関節及び肘関節の動作は、被操作物体の精緻な方向の制御には関与していない。また、前腕の回外・回内、橈骨手根関節の動作は、主に被操作物体の方向の制御を行ない、精緻な方向の制御は手指部により行なわれる。
- (6) 本章で行なった人体上肢や被操作物体の運動計測には、鏡を用いた一方向写真計測法を用いた。その結果、本計測法は、本実験で対象としたような被写体の運動を分析するために必要な、運動測定能力を持つことが実証できた。

結 論

本論文では、物体の運動計測を行なうための三次元位置計測法として鏡を用いた一方向写真計測法を開発し、さらに、写真計測法の支援システムとして、物体の空間内に存在する方向を検出する装置と、画像を計算機に入力し、標点を検出し像座標を求めるシステムを開発した。また、人体上肢の運動能力を総合的に評価した。この実験には本研究で開発した写真計測法を用い、本計測法の現実の問題に対する適用性を評価した。各章で得られた主な結論は以下のとおりである。

第1章では、従来より用いられてきた各種の三次元計測法の中で、測尺による方法、超音波を用いる方法、映像分析による方法等について、その測定能力や特性について考察し、本研究の占める位置や意義を明らかにした。すなわち、写真計測法は非接触での計測を可能とし、測定精度がすぐれていること等の特徴を持ち、人間や生物の運動計測に適していると結論された。

写真計測法の中では、多方向写真計測法は高い測定精度を持つが処理が複雑であり、一方向写真計測法は処理が簡易であるが測定精度が低いという特徴がある。第2章では、一方向写真計測法について考察し、従来より用いられている平行投影処理による写真計測法の測定条件や欠点を明らかにし、測定精度や欠点を改善するために中心投影処理による写真計測法を開発した。そして、この計測法の測定能力を、理論的及び実験により評価した結果、被写体の姿勢によっては、補正等の手段によっては除去することが不可能な、像座標の読取り誤差に起因する測定誤差が増大することが明らかになった。

第3章では、一方向写真計測法を持つ簡易性という利点を生かし、多方向写真計測法と同等の測定精度を持つ、鏡を用いた一方向写真計測法を開発した。従来の鏡を用いた一方向写真計測法は、鏡の向きや位置に関して、精度良く設定しなければならないという欠点が存在したが、本計測法は鏡の向きは任意に設定でき、位置に関しては鏡面上の任意の一点の座標のみが既知であれば良いという特徴を持つ。本章では、さらに、写真計測法を用いて得られた時系列にのった三次元位置のデータより運動諸量を算出する方法について示し、空間四節リンクと放物体の運動計測を行ない、本計測法の運動測定能力がすぐれていることを実証した。

第4章では、写真計測法とは別の方法で運動物体の存在する方向を検出する装置と、写真計測法を併用すれば、さらに測定能力が向上すると考え、超音波及び光学センサを用いた方向検出装置を製作した。超音波を用いた方向検出装置は、多数の超音波放射器を用いて指向性の鋭い音波を発生させることによって、測定精度を向上させる。また、各放射器から放射する音波の位相を電氣的に制御し、超音波の放射方向を変化させて、空間内を走査し、動きの速い運動物体でも検出できる特

徴を持つ。光学センサを用いた方向検出装置は、複雑な画像処理を光学系を工夫することにより実時間で行ない、短い測定時間と高い測定精度を持つ。光学センサを用いた方向検出装置と、本研究で開発した鏡を用いた一方向写真計測法を併用し、鏡の向きを制御することによって、小さな鏡でも大きな測定空間を持ちうることを実験により実証し、本システムの有用性を評価した。

第5章では、写真計測法における測定誤差の大きな要因である像座標の読取り誤差を除去するために、フィルム画像を計算機に入力する装置を製作し、画像処理により標点の検出及び像座標の読取りを行なうための画像処理ソフトウェアを開発した。さらに本システムの画像処理能力を評価するために、平面四節リンクの運動を撮影したフィルム画像を用い、リンクの標点の像座標の運動から、リンクの再構築を行なった。その結果、本装置を用いることにより、像座標の読取り精度が向上し、さらに、リンクの再構築の手法と本画像処理システムを併用することで、写真計測における測定能力が向上することが分かった。

第6章では、本研究で開発した鏡を用いた一方向写真計測法の応用例として、人体上肢の運動能力を総合的に評価した。まず、中枢や感覚機能による上肢の制御能力を評価するために、平面及び空間における被操作物体の案内掃引面積最小問題を課題として与え、実験を行なった。その結果、人間の掃引面積最小問題における認識や判断等の能力は、秀れたものであることが明らかにされた。また、視覚による三次元位置の測定能力は低く、物体の案内は主に体内での力感覚によって行なわれることが分かった。次に、人体上肢の各関節の運動機能を評価するために、被操作物体の重さや操作回数の違いによる各関節の運動軌跡や角度変位の変化を、実験により求め、各関節の動作を分析した。その結果、各関節における被操作物体に対する役割等が明らかになった。また、実験に用いた鏡を用いた一方向写真計測法は、この種の問題に対して十分な測定能力を持つことが実証できた。

将来の展望として以下のようなことがあげられる。第4章で開発した方向検出装置は、それ自体でも三次元位置計測に用いることが可能であり、処理ソフトウェアの変更により他の分野にも応用可能であろう。特に光学センサを用いた方法では、本研究で開発したソフトウェアは単純であり処理時間に余裕があり、さらに高度な機能を付加することができる。第5章で開発した画像入力装置は、対象とする画像はフィルムに記録されたものであった。現段階では、記録密度や保存性の面でフィルムに対抗可能なものは少ないが、光ディスクの記録密度や保存性、高品位テレビの解像度等は、フィルムに取って変わる可能性を秘めている。また本装置では、画像の持つ情報の僅かな部分しか利用していないが、より高い画像処理能力を持つ計算機を使用することにより、さらに高度に被写体の運動を把握することも可能であると考えられる。

参 考 文 献

- (1) 鎌田：写真知識，印刷学会（昭42），p. 10
- (2) E.Muybridge：The Human Figure in Motion，Dover Publications（1955）
- (3) ライフ写真講座：特殊撮影，タイムライフブックス（昭46）
- (4) 植村：瞬間，共立出版（昭54）
- (5) 渡辺：写真計測法，共立出版（昭51）
- (6) 安居院，中島：コンピュータ画像処理，産報出版（昭54）
- (7) 山口：コンピュータグラフィックス，日刊工業新聞社（昭54），pp. 72 - 79
- (8) 中野，小森谷，新井：ロボット工業応用技術（15），機械の研究33 - 10（昭56）
pp. 77 - 82
- (9) 橋本，村田：一方向写真計測法の精度検定と応用，日本機械学会講演論文集814 - 10
（昭56），pp. 75 - 77
- (10) 橋本，内田，村田：一方向写真計測法を用いたヒトの腕の動作解析，日本機械学会講演
論文集824 - 10（昭57），pp. 54 - 56
- (11) 内田：空間運動の計測精度改善のための基礎研究，神戸大学工学部機械系学科卒業論文
（昭57）
- (12) Y.S.Chao：Justification of Triaxial Goniometer for the Measurement of
Joint Rotation，J.Biomechanics,13（1980），pp.989-1006
- (13) M.A.Townsend, M.Izac, R.W.Jackson：Total Motion Knee Goniometry，
J.Biomechanics,10（1977），pp.183-193
- (14) G.L.Kinzel, A.S.Hall,Jr, B.M.Hillberry：Measurement of the Total
Motion Between Two-Body Segment-1. Analytical Development，
J.Biomechanics,5（1972），pp.93-105
- (15) H.J.Sommer，N.R.Miller：A Technique for the Calibration of
Instrumented Spatial Linkages Used for Biomechanical Kinematic
Measurement，J.Biomechanics,14（1981），pp.91-98
- (16) 斎藤，舟久保，山内，一青：腕の運動機構に関する研究，バイオメカニクス（人体の機
構と制御），pp. 130 - 141
- (17) 笹倉：超音波ホログラフィによる三次元情報の処理，画像技術7（昭50）pp. 27 -

- (18) 小野, 杉本, 高野: 超音波センサを用いた物体の形状認識, 精機学会春期大会講演論文集(昭58), pp. 175-176
- (19) 丹羽: 超音波計測, 昭晃堂(昭57)
- (20) 山本: 超音波基礎工学, 日刊工業新聞社(昭56)
- (21) 高野, 佐々木: 超音波による距離測定とロボットへの応用, 精機学会春期大会講演論文集(昭57), pp. 566-568
- (22) 新井, 中野: 移動車搭載形位置方向計測装置の開発と性能評価, 計測自動制御学会論文集18-10(昭57)
- (23) J.J.Tavormina, S.Buckley: Automatic Positioning and Assembly under Microcomputer Control via Acoustic Phase Monitoring, 6th. NAMRC, ASE (1978)
- (24) W.E.Moritz, P.L.Shreve: A Microprocessor-Based Spatial-Locating System for Use with Diagnostic Ultrasound, IEEE, 64-6 (1976), pp.966-974
- (25) 大園, 高増, 山下: 超音波を利用した三次元位置測定の研究(試作機とその誤差解析) 精機学会春期大会講演論文集(昭58), pp. 863-864
- (26) C.Canali, G.de Cicco, B.Morten, M.Prudenziati, A.Taroni: A Temperature Compensated Ultrasonic Sensor Operating in Air for Distance and Proximity Measurements, IEEE, IE-29-4 (1982), pp.336-341
- (27) 写真レンズハンドブック, 写真工業出版社(昭53), pp. 33-38
- (28) 久保田: 光学, 岩波書店(昭39)
- (29) 増田, 萩原, 二川: 半導体位置検出装置による3次元位置検出システム, インターフェース 7(昭58), pp. 264-273
- (30) 高村: 固体イメージセンサとその応用, 第15回光学理学会関西支部連合講演論文集(昭57) pp. 1-10
- (31) 加藤: 立体写真法による人間歩行の解析, 愛知工業大学研究報告10(昭50)
- (32) 加藤, 村田: 立体写真法による人間の歩行の解析, 第5回バイオメカニクスシンポジウム前刷集(昭52), pp. 234-243
- (33) 加藤, 村田: 立体写真法による人間の歩行の解析, バイオメカニズム18(昭52)
- (34) B.Van Gheluwe: Computerized Three-dimensional Cinematography for Any Arbitrary Camera Setup, Biomechanics, VI-A (1978), pp.343-348
- (35) M.W.Whittle: Calibration and Performance of a 3-Dimensional Television System for Kinematic Analysis, J.Biomechanics, 15-3 (1982) pp.185-196
- (36) J.Dapena, E.A.Harman, J.A.Miller: Three Dimensional Cinematography with Control Object of Unknown Shape, J.Biomechanics, 15-1 (1982) pp.11-19

- (37) 青木, 矢部, 三田: 一方向撮影画像による三次元計測法の開発, 人間工学 15 - 2
(昭 54), pp. 73 - 78
- (38) H.Murata : Kinematic Design of Articulated Robot Arm , Memoirs of the
Faculty of Engineering, Kobe Univ., 22 (1976), pp.83-92
- (39) 田中, 伊藤, 岩崎, 徳田, 山田, 飯田, 萩島, 矢崎, 加藤, B. Ebskov : 上肢動作の
三次元分析 (分析システムの開発とリーチ動作の分析), バイオメカニズム 10 (運
動の解析と構成), pp. 98 - 105
- (40) 戸川: マトリクスの数値計算, オーム社 (昭 54), pp. 157 - 159
- (41) 高橋: X線物理実験法, 丸善, p. 300
- (42) T.P.Andriacchi, S.J.Hampton, A.B.Schultz, J.O.Galaute :
Three-Dimensional Coordinate Data Processing in Human Motion
Analysis , J.Biomechanical Engineering, 101 (1979), pp.279-283
- (43) J.C.Pezzack, R.W.Norman, D.A.Winter : An Assessment of Derivative
Determining Techniques Used for Motion Analysis , J.Biomechanics,
10 (1977), pp.377-382
- (44) R.W.Hamming : Numerical Method for Scientists and Engineers ,
McGraw-Hill (1962), pp.313-322
- (45) R.S.Pressman, J.E.Williams : Numerical Control and Computer-Aided
Manufacturing , John-Wiley & Sons (1977), pp.237-246
- (46) K.Soudan, P.Dierckx : Calculation of Derivatives and Fourier
Coefficients of Human Motion Data, While Using Spline Function ,
J.Biomechanics, 12 (1979), pp.21-26
- (47) 市田, 吉本: スプライン関数とその応用, 教育出版 (昭 54)
- (48) H.Hatze : The Use of Optimally Regularized Fourier Series for
Estimating Higher-Order Derivative of Noisy Biomechanical Data ,
J.Biomechanics, 14 (1981), pp.13-18
- (49) 水田, 川口, 岩田: 機械計測, 朝倉書店, pp. 82 - 93
- (50) C.H.Suh, C.W.Radcliffe : Kinematics and Mechanism Design , John Wiley
& Sons (1978)
- (51) 守屋, 鷺津: 力学概論, 培風館, pp. 166 - 169
- (52) F.P.Beer, E.R.Johnston : Vector Mechanics for Engineers-Dynamics ,
McGraw-Hill (1977)
- (53) M.A.Chace : Vector Analysis of Linkages , Trans.ASME, Ser.B, 85 (1963)
pp.289-297
- (54) M.A.Chace : Solutions to the Vector Tetrahedron Equation , Trans.ASME,
J.Engineering for Industry (1965), pp.228-234

- (55) 川村：電気音響工学概論，昭晃堂（昭56），pp. 39-37
- (56) 城戸：音響工学，コロナ社（昭57）
- (57) J.Kowalik, M.R.Qsborne : Method for Unconstrained Optimization Problems
American Elsevier Pubulishing (1968)
- (58) 大道：歩・走の力学(3)，新体育48-10（昭53），pp. 791-795
- (59) 上田，田部井，中村，吉見：レーザーと1次元アレイセンサを用いた三次元座標測定装置，理研シンポジウム論文集（昭56），pp. 12-13
- (60) 永田：ホログラフィ干渉による三次元変位測定，画像技術12（昭47），pp. 21-36
- (61) 笠井，東野，辻：CCDイメージセンサを用いた眼球運動計測法とその測定分解能
電子通信学会論文誌J65-D2（昭57），pp. 274-281
- (62) 出澤，谷田：高精度標識位置検出のための一方法，理研シンポジウム論文集（昭56）
pp. 14-17
- (63) 新井，遠藤，美濃越：フォトアレイを利用した物体の位置姿勢測定システム（実験システムの制作），精機学会春期大会講演論文集（昭58），pp. 171-172
- (64) 中村，上田：カルマンフィルタによる移動ロボットの位置測定，計測自動制御学会論文集19-1（昭58）
- (65) 鳥毛，吉本：特定色の領域の抽出法による物体確認システムの開発と応用，日本ロボット学会講演論文集1（昭58），pp. 75-76
- (66) 中島，安居院：デジタル論郭線のデルタ符号化について，電子通信学会論文誌J64-D2（昭56）
- (67) 植田，大久保，藤田：フーリエ変換領域における位相差抽出法による境界検出，電子通信学会論文誌J64-D3（昭56）
- (68) 岡田，小倉：水平垂直要素の分類を用いた線順次細線化法，電子通信学会論文誌J64-D5（昭56）
- (69) 白井，諏訪，辻，谷内田：インダストリアル・アイ，バイオメカニズム5（昭54）
pp. 56-70
- (70) 中谷，高村，小林：最近のMOSイメージセンサとその使い方，電子材料10，12（昭51）
- (71) 田子島：固体撮像デバイスの現状と動行，オプトロニクス3（昭57），pp. 8-17
- (72) 前田：光電変換デバイス，電気工学大系15，コロナ社（昭55）
- (73) A.E.Kobriniskii, Y.A.Stepanenکو : Some Problems of the Theory of Manipulators ; (in Russian), Sb. Mehanika machin,7-8 (1969)

- (74) 栗山：マニピュレータの運動学的特性に関する研究，神戸大学修士論文（昭57）
- (75) I.Szabo : Geschichte der Mechanischen Prinzipien , Birkhäuser Verlag
.(1979), pp.120-122
- (76) ベーゲー・ボルチャンスキー（田中，山内訳）：線分の回転，現代数学10-11(昭52)
pp. 11 - 14
- (77) 穂坂，村田：DDAによる関数と図形の発生，計測と制御4-7（昭40），pp.12-25
- (78) D.M.Himmelblau : Applied Nonlinear Programing , Mc Graw-Hill (1972)
pp.96-98
- (79) 岡田：物体の運動領域とその計算法について，神戸大学修士論文（昭54）
- (80) Y.Youm, R.F.Dryer, K.Thambyrajah, A.E.Flatt, B.L.Spvaque :
Biomechanical Analysis of Forearm Pronation-Supination and
Elbow Flexion-Extension , J.Biomechanics,12 (1979), pp.245-255
- (81) A.J.Padgaonkar, K.W.Krieger, A.I.King : Measurement of Angular
Acceleration of a Rigid Body Using Linear Accelerometer ,
Trans. ASME, J.Applied Mechanics (1975), pp.552-556
- (82) N.A.Langrana : Spatial Kinematic Analysis of the Upper Extremity
Using a Biplaner Videotaping Method , J.Biomechanics,103 (1981)
pp.11-17
- (83) J.G.Andrews, Y.Youm : A Biomechanical Investigation of Wrist Kinematics
J.Biomechanics,12 (1979), pp.83-93
- (84) M.J.L.Alexander, J.Colbourne : A Method of Determination of the Angular
Velocity Vector of a Limb Segment , J.Biomechanics,13 (1980)
pp.1089-1093

付 録

付録1 スプライン補間のプログラム

```

34000 REM .....SPLINE.....
34001 REM ...INPUT.....
34002 REM .....SN.....:NO. OF INPUT DATA.....
34003 REM .....SK.....:NO. OF OUTPUT-DATA.....
34004 REM .....SD(SN-1,0):TIME.....
34005 REM .....SD(SN-1,2):DATA.....
34006 REM ...OUTPUT.....
34007 REM .....SS(SK,0):TIME.....
34008 REM .....SS(SK,1):DATA.....
34009 REM .....SS(SK,2):VELOCITY.....
34010 REM .....SS(SK,3):ACCELERATION.....
34011 REM ...WORK VARIABLE.....
34012 REM .....S1,S2,S3,S4,SE,SE,SU,SV,SX,SY.....
34013 REM ...WORK DIM.....
34014 REM .....SA,SO,SP,SQ,SR,.....
34015 REM ...PRE DIMED.....
34016 REM .....SA(SN-1,3),ST(SN-1).....
34017 REM .....SO(SN-2,1),SP(SN-2,1).....
34018 REM .....SQ(SN-2,1),SR(SN-2,1).....
34019 REM ...LOOP COUNTER.....
34020 REM .....SI,SJ,SL.....
34021 FOR SJ = 0 TO 1
34022 SA(0,3) = 3 * (SD(1,SJ) - SD(0,SJ)):SA(SN - 1,3) = 3 * (SD(SN - 1,SJ) - SD(SN - 2,SJ))
34023 FOR SI = 1 TO SN - 2
34024 SA(SI,3) = 3 * (SD(SI + 1,SJ) - SD(SI - 1,SJ))
34025 NEXT SI
34026 GOSUB 34060
34027 FOR SI = 0 TO SN - 2
34028 SD(SI,SJ) = 2 * (SD(SI,SJ) - SD(SI + 1,SJ)) + ST(SI) + ST(SI + 1)
34029 SP(SI,SJ) = 3 * (SD(SI + 1,SJ) - SD(SI,SJ)) - 2 * ST(SI) - ST(SI + 1)
34030 SQ(SI,SJ) = ST(SI)
34031 SR(SI,SJ) = SD(SI,SJ)
34032 NEXT SI
34033 NEXT SJ
34034 SX = (SD(SN - 1,0) - SD(0,0)) / SK
34035 FOR SI = 0 TO SK
34036 SY = SD(0,0) + SX * SI
34037 FOR SJ = 0 TO SN - 2
34038 IF SY > = SD(SJ,0) GOTO 34040
34039 GOTO 34041
34040 IF SY < = SD(SJ + 1,0) GOTO 34043
34041 NEXT SJ
34042 SJ = SJ - 1
34043 S1 = SD(SJ,0):S2 = SP(SJ,0):S3 = SQ(SJ,0):S4 = SR(SJ,0) - SY

```

```

34044 REM *** S1*SU^3+S2*SU^2+S3*SU+S4=0 ***
34045 REM *** NEWTON METHOD *****
34046 SU = .5
34047 SF = S1 * SU * SU * SU + S2 * SU * SU + S3 * SU + S4
34048 IF ABS (SF) < 1E - 6 GOTO 34052
34049 SE = 3 * S1 * SU * SU + 2 * S2 * SU + S3
34050 SU = SU - SF / SE: GOTO 34047
34051 REM *****
34052 SS(SI,1) = SQ(SJ,1) * SU * SU * SU + SP(SJ,1) * SU * SU + SQ(SJ,1) * SU + SR(SJ,1)
34053 SS(SI,2) = (3 * SQ(SJ,1) * SU * SU + 2 * SP(SJ,1) * SU + SQ(SJ,1)) / (3 * SQ(SJ,0) * SU
    * SU + 2 * SP(SJ,0) * SU + SQ(SJ,0))
34054 SS(SI,3) = 6 * (SP(SJ,0) * SQ(SJ,1) - SQ(SJ,0) * SP(SJ,1)) * SU * SU + 6 * (SQ(SJ,0) *
    SQ(SJ,1) - SQ(SJ,0) * SQ(SJ,1)) * SU + 2 * (SQ(SJ,0) * SP(SJ,1) - SP(SJ,0) * SQ(SJ,1))
34055 SV = 3 * SQ(SJ,0) * SU * SU + 2 * SP(SJ,0) * SU + SQ(SJ,0)
34056 SS(SI,3) = SS(SI,3) / (SV * SV * SV)
34057 SS(SI,0) = SY
34058 NEXT SI
34059 RETURN
34060 REM *** SUBROUTIN INVERSE *****
34061 SA(0,0) = 2:SA(0,1) = 1:SA(0,2) = 0:SA(SN - 1,0) = 0:SA(SN - 1,1) = 1:SA(SN - 1,2) = 2
34062 FOR SI = 1 TO SN - 2
34063 SA(SI,0) = 1:SA(SI,1) = 4:SA(SI,2) = 1
34064 NEXT SI
34070 FOR SI = 0 TO 3
34071 SA(1,SI) = SA(1,SI) - SA(0,SI) / SA(0,0)
34072 NEXT SI
34073 FOR SI = 2 TO SN - 2
34074 SA(SI,1) = SA(SI,1) - SA(SI - 1,2) / SA(SI - 1,1)
34075 SA(SI,3) = SA(SI,3) - SA(SI - 1,3) / SA(SI - 1,1)
34076 SA(SI,0) = 0
34077 NEXT SI
34078 SA(SN - 1,1) = 0:SA(SN - 1,2) = SA(SN - 1,2) - SA(SN - 2,2) / SA(SN - 2,1):SA(SN - 1,3)
    = SA(SN - 1,3) - SA(SN - 2,3) / SA(SN - 2,1)
34079 ST(SN - 1) = SA(SN - 1,3) / SA(SN - 1,2)
34080 FOR SI = 1 TO SN - 2
34081 ST(SN - 1 - SI) = (SA(SN - 1 - SI,3) - ST(SN - SI) * SA(SN - 1 - SI,2)) / SA(SN - 1 - S
    I,1)
34082 NEXT SI
34083 ST(0) = (SA(0,3) - ST(1) * SA(0,1)) / SA(0,0)
34084 RETURN

```

付録2 鏡を用いた一方向写真計測の処理プログラム

```

100 HOME : DIM SM(6,6),SX(6),SY(6),C(6),D(6),SW(6),W(20)
105 REM .....INIPUT INIT.....
110 READ EE: REM ....HOW MANY FILM EXP.?.....
115 READ FX: REM ....X-COORDINATE OF CAMERA ?....
120 READ FY: REM ....Y-COORDINATE OF CAMERA ?....

```

```

125 READ FZ: REM ....Z-COORDINATE OF CAMERA ?....
130 READ GX: REM ....X-COORDINATE OF MIRROR ?....
135 READ GY: REM ....Y-COORDINATE OF MIRROR ?....
140 READ GZ: REM ....Z-COORDINATE OF MIRROR ?....
145 READ CZ: REM ....Z-COORDINATE OF CAL. PLANE ?....DATA2800....
150 VTAB 22
155 D$ = CHR$(4)
160 PRINT D$;"PR#5": PRINT "T1,S1,X570,Y540,R,A,P": PRINT D$;"PR#0"
165 REM .....FILM-TAB. INIT.....
166 N = 91
170 PRINT "SET! FILM OF CAL."
175 GOSUB 7000
180 DIM AA(14): FOR I = - 7 TO 5: READ AA(I + 7): NEXT I
185 DIM BB(8): FOR II = - 4 TO 2: READ BB(II + 4): NEXT II: REM ..DATA2900..
190 FOR I = - 7 TO 5: FOR II = - 4 TO 2
195 PRINT : PRINT : PRINT "CAL. NO. "; I * 7 + II + 53
200 XX = AA(I + 7)
205 YY = BB(II + 4)
210 PRINT "TAB! 2D(X,Y)=( "; I; ", "; II; ")=( "; AA(I + 7); ", "; BB(II + 4); ")": GOSUB 2000: X = SX: Y =
SY
215 X2 = X * X: X3 = X2 * X: Y2 = Y * Y: Y3 = Y2 * Y
220 SM(1,2) = SM(1,2) + X
225 SM(1,3) = SM(1,3) + Y
230 SM(1,4) = SM(1,4) + Y * X
235 SM(1,5) = SM(1,5) + X2
240 SM(1,6) = SM(1,6) + Y2
245 SM(2,4) = SM(2,4) + X2 * Y
250 SM(2,5) = SM(2,5) + X3
255 SM(2,6) = SM(2,6) + Y2 * X
260 SM(3,6) = SM(3,6) + Y3
265 SM(4,4) = SM(4,4) + X2 * Y2
270 SM(4,5) = SM(4,5) + X3 * Y
275 SM(4,6) = SM(4,6) + Y3 * X
280 SM(5,5) = SM(5,5) + X2 * X2
285 SM(6,6) = SM(6,6) + Y2 * Y2
290 SX(1) = SX(1) + XX
295 SX(2) = SX(2) + XX * X
300 SX(3) = SX(3) + XX * Y
305 SX(4) = SX(4) + XX * Y * X
310 SX(5) = SX(5) + XX * X2
315 SX(6) = SX(6) + XX * Y2
320 SY(1) = SY(1) + YY
325 SY(2) = SY(2) + YY * X
330 SY(3) = SY(3) + YY * Y
335 SY(4) = SY(4) + YY * Y * X
340 SY(5) = SY(5) + YY * X2
345 SY(6) = SY(6) + YY * Y2
350 NEXT II: NEXT I
355 PRINT : PRINT : PRINT : PRINT "OK! NOW CAL. WAIT!"
360 SM(1,1) = N

```

```

365 SM(2,2) = SM(1,5):SM(2,3) = SM(1,4)
370 SM(3,3) = SM(1,6):SM(3,4) = SM(2,6)
375 SM(3,5) = SM(2,4):SM(5,6) = SM(4,4)
380 FOR I = 2 TO 6:J = 1
385 SM(I,J) = SM(J,I)
390 J = J + 1: IF I > J THEN 385
395 NEXT I
400 SN = 6: GOSUB 1000
405 FOR I = 1 TO 6: FOR J = 1 TO 6
410 C(I) = C(I) + SM(I,J) * SX(J)
415 D(I) = D(I) + SM(I,J) * SY(J)
420 NEXT J: NEXT I
425 PRINT CHR$(4);"PR#4": PRINT CHR$(9);"K": PRINT
430 FOR I = 1 TO 6
435 PRINT "C(";I;")=";C(I),"D(";I;")=";D(I)
440 NEXT I: PRINT CHR$(4);"PR#0
445 REM .....MIRROR POSITION.....
450 PRINT "NOW CAL. MIRROR POSITION"
455 INPUT "HOW MANY POINT OF CAL.":GN
460 W(1) = 0:W(2) = 0:W(3) = 0
465 W(4) = GX - FX:W(5) = GY - FY:W(6) = GZ - FZ
470 PRINT "SET FILM OF MIRROR!"
475 GOSUB 7000
480 FOR I = 1 TO GN
485 PRINT "TAB! POINT OF OBJECT NO.":I
490 GOSUB 2000: GOSUB 6000
495 W(7) = SL:W(8) = SM:W(9) = SN
500 PRINT "TAB! POINT OF MIRROR NO.":I
505 GOSUB 2000: GOSUB 6000
510 SX = W(7):SY = W(8):SZ = W(9)
515 GOSUB 4000
520 W(10) = SX:W(11) = SY:W(12) = SZ
525 PRINT "TAB! NEXT POINT OF OBJECT NO.":I
530 GOSUB 2000: GOSUB 6000
535 W(7) = SL:W(8) = SM:W(9) = SN
540 PRINT "TAB! NEXT POINT OF MIRROR NO.":I
545 GOSUB 2000: GOSUB 6000
550 SX = W(7):SY = W(8):SZ = W(9)
555 GOSUB 4000
560 SL = W(10):SM = W(11):SN = W(12)
565 GOSUB 4000
570 IF W(4) * SX + W(5) * SY + W(6) * SZ > 0 THEN SX = - SX:SY = - SY:SZ = - SZ
575 W(1) = W(1) + SX:W(2) = W(2) + SY:W(3) = W(3) + SZ
580 NEXT I
585 SX = W(1) / GN:SY = W(2) / GN:SZ = W(3) / GN
590 GOSUB 5000
595 TX = SL:TY = SM:TZ = SN
600 REM .....CAMERA'POSITION.....
605 W = (W(4) * TX + W(5) * TY + W(6) * TZ) * 2
610 EX = FX + TX * W:EY = FY + TY * W:EZ = FZ + TZ * W

```

```

615 WX = EX - FX:WY = EY - FY:WZ = EZ - FZ
620 PRINT CHR$(4);"PR#4": PRINT CHR$(9);"K"
625 PRINT "MIRROR POSITION": PRINT "TX=";TX,"TY=";TY,"TZ=";TZ
630 PRINT "CAMERA POSITION": PRINT "EX=";EX,"EY=";EY,"EZ=";EZ
635 PRINT CHR$(4);"PR#0"
640 REM .....CAL.3D-COOD.....
645 INPUT "HOW MANY POINT OF MARK";OB: DIM UU(OB * 3)
650 FOR I = 1 TO OB
655 PRINT "SET! FILM NO.";I
660 GOSUB 7000
665 REM .....INPUT U.....
670 FOR J = 3 TO OB * 3 STEP 3
675 PRINT "TAB! OBJECT POINT NO.";J / 3
680 GOSUB 2000: GOSUB 6000
685 UX = SL:UY = SM:UZ = SN
690 REM .....INPUT V.....
695 PRINT "TAB! MIRROR POINT NO.";J / 3
700 GOSUB 2000: GOSUB 6000
705 VX = SL:VY = SM:VZ = SN
710 SX = TX:SY = TY:SZ = TZ: GOSUB 4000
715 SL = TX:SM = TY:SN = TZ: GOSUB 4000
720 GOSUB 5000
725 W(1) = VX * SL + VY * SM + VZ * SN
730 W(2) = VX * TX + VY * TY + VZ * TZ
735 SX = W(1) * SL - W(2) * TX
740 SY = W(1) * SM - W(2) * TY
745 SZ = W(1) * SN - W(2) * TZ
746 GOSUB 5000
747 VX = SL:VY = SM:VZ = SN
750 REM .....CAL.3D-COOD.....
755 W = UX * VX + UY * VY + UZ * VZ
760 A1 = UX * WX + UY * WY + UZ * WZ
765 A2 = - VX * WX - VY * WY - VZ * WZ
770 W(1) = A2 * W:W(2) = A1 * W
775 A1 = (A1 + W(1)) / (1 - W * W)
780 A2 = (A2 + W(2)) / (1 - W * W)
785 UU(J - 3) = (FX + A1 * UX + EX + A2 * VX) / 2
790 UU(J - 2) = (FY + A1 * UY + EY + A2 * VY) / 2
795 UU(J - 1) = (FZ + A1 * UZ + EZ + A2 * VZ) / 2
800 NEXT J
805 REM .....SAVE 3D-COOD.....
810 READ F$
815 FA$ = ""
820 ST = NX:NX = NE
825 NE = PEEK (109) + 256 * PEEK (110)
830 ST = PEEK (107) + 256 * PEEK (108)
835 IF ST > = NE THEN PRINT "ARRAY NOT FOUND": STOP
840 FA$ = CHR$ ( PEEK (ST)) + CHR$ ( PEEK (ST + 1))
845 NX = PEEK (ST + 2) + 256 * PEEK (ST + 3)
850 IF FA$ < > "UU" THEN ST = ST + NX: GOTO 835

```

```

855 PRINT D$;"BSAVE ARRAY-";F$;" ,V0,A";ST;" ,L";NX
860 PRINT CHR$(4);"PR#4": PRINT CHR$(9);"K"
865 PRINT "FILM NO. ";I
870 FOR II = 3 TO DB * 3 STEP 3: PRINT "NO. ";II / 3, UU(II - 3);" " ;UU(II - 2);" " ;UU(II -
1): NEXT II
875 PRINT CHR$(4);"PR#0"
880 NEXT I
885 END
1000 REM .....INV.MATRIX.....
1001 REM ....SM:INPUT MATRIX.....
1002 REM ....SN:D.NUMBER >=1.....
1003 REM ....SI,SJ,SK:LOOP COUNTER.....
1004 REM ....SW,SP:WORK VARIABLE.....
1005 REM ....SW:WORK DIMENSION.....
1006 IF SN = 1 THEN SM(1,1) = 1 / SM(1,1)
1007 FOR SI = 1 TO SN:SW(SI) = SI: NEXT SI
1008 FOR SK = 1 TO SN
1009 SW = 0
1010 FOR SI = SK TO SN
1011 IF SW < ABS (SM(SI,1)) THEN SW = ABS (SM(SI,1)):SP = SI: GOTO 1012
1012 NEXT SI
1013 IF SW < = 1E - 10 THEN PRINT "M.ELEMENT<<0...ERR": END
1014 SW = SW(SP):SW(SP) = SW(SK):SW(SK) = SW
1015 FOR SJ = 1 TO SN
1016 SW = SM(SP,SJ):SM(SP,SJ) = SM(SK,SJ):SM(SK,SJ) = SW
1017 NEXT SJ
1018 SW = SM(SK,1)
1019 FOR SJ = 2 TO SN:SM(SK,SJ - 1) = SM(SK,SJ) / SW: NEXT SJ
1020 SM(SK,SN) = 1 / SW
1021 FOR SI = 1 TO SN
1022 IF SI = SK THEN 1026
1023 SW = SM(SI,1)
1024 FOR SJ = 2 TO SN:SM(SI,SJ - 1) = SM(SI,SJ) - SW * SM(SK,SJ - 1): NEXT SJ
1025 SM(SI,SN) = - SW * SM(SK,SN)
1026 NEXT SI
1027 NEXT SK
1028 FOR SK = 1 TO SN
1029 FOR SJ = SK TO SN
1030 IF SW(SJ) = SK THEN 1032
1031 NEXT SJ
1032 SW(SJ) = SW(SK)
1033 FOR SI = 1 TO SN
1034 SW = SM(SI,SJ):SM(SI,SJ) = SM(SI,SK):SM(SI,SK) = SW
1035 NEXT SI
1036 NEXT SK
1037 RETURN
2000 REM .....TAB.INPUT.....
2001 REM ....SX:0<&>6000.....
2002 REM ....SY:0<&>6000.....
2003 REM ....SZ:(SZ<0)KEYBOARD HAS BEEN PRESSED.....

```

```

2004 REM ....SZ:(SZ=0)PEN IS DOWN, AND HAS BEEN DOWN.....
2005 REM ....SZ:(SZ=1)PEN WAS JUST LIFTED.....
2006 REM ....SZ:(SZ=2)PEN WAS JUST PRESSED DOWN.....
2007 REM ....SZ:(SZ>=10)PEN IS OFF-SCALE.....
2008 GOSUB 2200
2009 SX = SX - XO:SY = SY - YO
2010 SW = - SX * SIN (RO)
2011 SX = SX * COS (RO) + SY * SIN (RO)
2012 SY = SW + SY * COS (RO)
2013 RETURN
2200 PRINT D$;"PR#5": PRINT "N"
2201 PRINT D$;"IN#5": INPUT SX,SY,SZ
2202 IF SZ < > 2 THEN POKE - 16368,0: GOTO 2201
2203 PRINT D$;"PR#0": PRINT D$;"IN#0"
2204 POKE - 16368,0: PRINT "":SY = 5600 - SY
2205 RETURN
2800 DATA 34,435.68,202.6,1442.024,-291.62,-52.76,487.56,0
2900 DATA -849,-728.5,-607.5,-485,-364,-241.5,-120.5,0,121,243,365,486,607,-486,-365,-244,-1
    22,0,121,243
3000 DATA A0,A1,A2,A3,A4,A5,A6,A7,A8,A9
3001 DATA B0,B1,B2,B3,B4,B5,B6,B7,B8,B9
3002 DATA C0,C1,C2,C3,C4,C5,C6,C7,C8,C9
3003 DATA D0,D1,D2,D3,D4,D5,D6,D7,D8,D9
3004 DATA E0,E1,E2,E3,E4,E5,E6,E7,E8,E9
3005 DATA F0,F1,F2,F3,F4,F5,F6,F7,F8,F9
3006 DATA G0,G1,G2,G3,G4,G5,G6,G7,G8,G9
3007 DATA H0,H1,H2,H3,H4,H5,H6,H7,H8,H9
4000 REM .....VEC.....
4001 REM ....(SX,SY,SZ)=(SX,SY,SZ)*(SL,SM,SN).....
4002 SW(1) = SY * SN - SZ * SM
4003 SW(2) = SZ * SL - SX * SN
4004 SW(3) = SX * SM - SY * SL
4005 SX = SW(1):SY = SW(2):SZ = SW(3)
4006 RETURN
5000 REM .....UNIT VEC.....
5001 REM ....(SX,SY,SZ):INPUT VEC.....
5002 REM ....(SL,SM,SN):OUTPUT VEC.....
5003 SW = SQR (SX * SX + SY * SY + SZ * SZ)
5004 SL = SX / SW:SM = SY / SW:SN = SZ / SW
5005 RETURN
6000 REM .....CAL. COOD.....
6001 REM ....(SX,SY):INPUT FILM COOD.....
6002 REM ....(SL,SM,SN):OUTPUT UNIT VEC. (U).....
6003 CX = C(1) + C(2) * SX + C(3) * SY + C(4) * SX * SY + C(5) * SX * SX + C(6) * SY * SY
6004 CY = D(1) + D(2) * SX + D(3) * SY + D(4) * SX * SY + D(5) * SX * SX + D(6) * SY * SY
6005 SX = CX - FX:SY = CY - FY:SZ = CZ - FZ
6006 GOTO 5000
7000 REM .....INIT. TAB(X,Y).....
7001 REM ....(XO,YO):ORIGIN.....
7002 REM ....RO:ROTATION.....

```

```

7003 PRINT "TAB! (X,Y)=(0,0)": GOSUB 2200
7004 XO = SX:YO = SY
7005 PRINT "TAB! H. LINE *(LEFT)": GOSUB 2200
7006 X = SX:Y = SY: PRINT " -----"*(RIGHT)": GOSUB 2200
7007 RO = ATN ((SY - Y) / (SX - X))
7008 RETURN

```

付録3 空間四節リンクの動作解析、式(3.39)～式(3.44)の導出

入力軸を θ 回転させた時の出力軸の回転変位 ϕ を求める。入力軸において対偶拘束条件より、

$$\hat{a} \cdot \hat{e} = \alpha \quad (\text{A. 1})$$

入力軸の回転に関して次社が成立する。

$$\mathbf{a} = R(\theta, \hat{e}) \mathbf{a}_0 \quad (\text{A. 2})$$

ここで $R(\theta, \hat{e})$ は回転マトリックスである。出力軸においても同様に

$$\hat{c} \cdot \hat{f} = c_1 \quad (\text{A. 3})$$

閉ループ方程式より、

$$\mathbf{a} + \mathbf{b} = \mathbf{c} + \mathbf{d} \quad (\text{A. 4})$$

\mathbf{b} について表わすと、

$$\mathbf{b} = \mathbf{c} - \mathbf{d} + \mathbf{a} \quad (\text{A. 5})$$

両辺をそれぞれ自乗すると、

$$b^2 = c^2 + 2c \cdot \hat{c} \cdot (d - a) + (d - a)^2 \quad (\text{A. 6})$$

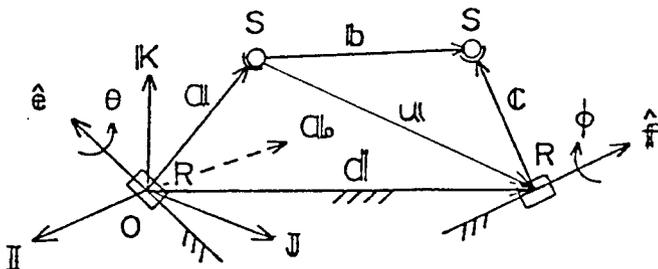
$$\therefore \hat{c} = \frac{d - a}{|d - a|} = \frac{b^2 - c^2 - (d - a)^2}{2c|d - a|} \quad (\text{A. 7})$$

ここで

$$\hat{u} = (d - a) / |d - a| \quad (\text{A. 8})$$

とおくと

$$\hat{c} \cdot \hat{u} = \frac{b^2 - c^2 - u^2}{2cu} = c_2 \quad (\text{A. 9})$$



図A.1 RSSR機構

結局次の連立スカラー方程式を解けばよい。

$$\begin{aligned}\hat{c} \cdot \hat{f} &= c_1 \\ \hat{c} \cdot \hat{u} &= c_2\end{aligned}\tag{A. 10}$$

式 (A. 10) を解くと ³⁸⁾ 式 (3.39) が得られる。式 (A. 4) の両辺を時間 t で微分すると

$$\boldsymbol{\omega}_a \times \mathbf{a} + \boldsymbol{\omega}_b \times \mathbf{b} = \boldsymbol{\omega}_c \times \mathbf{c}\tag{A. 11}$$

式 (A. 11) の両辺と \mathbf{b} の内積をとると

$$\mathbf{b} \cdot (\boldsymbol{\omega}_a \times \mathbf{a}) + \mathbf{b} \cdot (\boldsymbol{\omega}_b \times \mathbf{b}) = \mathbf{b} \cdot (\boldsymbol{\omega}_c \times \mathbf{c})\tag{A. 12}$$

ここで $\mathbf{b} \cdot (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{b}) = 0$ であり

$$\boldsymbol{\omega}_a = \dot{\theta} \hat{\mathbf{e}}, \quad \boldsymbol{\omega}_c = \dot{\phi} \hat{\mathbf{f}}\tag{A. 13}$$

より

$$\begin{aligned}\dot{\theta} \mathbf{b} \cdot (\hat{\mathbf{e}} \times \mathbf{a}) &= \dot{\phi} \mathbf{b} \cdot (\hat{\mathbf{f}} \times \mathbf{c}) \\ \dot{\theta} \hat{\mathbf{e}} \cdot (\mathbf{a} \times \mathbf{b}) &= \dot{\phi} \hat{\mathbf{f}} \cdot (\mathbf{c} \times \mathbf{b}) \\ \therefore \dot{\phi} &= \frac{\hat{\mathbf{e}} \cdot (\mathbf{a} \times \mathbf{b})}{\hat{\mathbf{f}} \cdot (\mathbf{c} \times \mathbf{b})} \dot{\theta}\end{aligned}\tag{A. 14}$$

式 (A. 11) の両辺を時間 t で微分すると

$$\begin{aligned}\dot{\boldsymbol{\omega}}_a \times \mathbf{a} + \boldsymbol{\omega}_a \times (\boldsymbol{\omega}_a \times \mathbf{a}) + \dot{\boldsymbol{\omega}}_b \times \mathbf{b} + \boldsymbol{\omega}_b \times (\boldsymbol{\omega}_b \times \mathbf{b}) \\ = \dot{\boldsymbol{\omega}}_c \times \mathbf{c} + \boldsymbol{\omega}_c \times (\boldsymbol{\omega}_c \times \mathbf{c})\end{aligned}\tag{A. 15}$$

両辺と \mathbf{b} の内積をとると

$$\begin{aligned}\mathbf{b} \cdot (\dot{\boldsymbol{\omega}}_a \times \mathbf{a}) + \mathbf{b} \cdot \{\boldsymbol{\omega}_a \times (\boldsymbol{\omega}_a \times \mathbf{a})\} + \mathbf{b} \cdot (\dot{\boldsymbol{\omega}}_b \times \mathbf{b}) + \mathbf{b} \cdot \{\boldsymbol{\omega}_b \times (\boldsymbol{\omega}_b \times \mathbf{b})\} \\ = \mathbf{b} \cdot (\dot{\boldsymbol{\omega}}_c \times \mathbf{c}) + \mathbf{b} \cdot \{\boldsymbol{\omega}_c \times (\boldsymbol{\omega}_c \times \mathbf{c})\}\end{aligned}\tag{A. 16}$$

ここで $\boldsymbol{\omega}_a = \text{const.}$ とすると $\dot{\boldsymbol{\omega}}_a = 0$, また $\mathbf{b} \cdot (\dot{\boldsymbol{\omega}}_b \times \mathbf{b}) = 0$ より

$$\mathbf{b} \cdot \{\boldsymbol{\omega}_a \times (\boldsymbol{\omega}_a \times \mathbf{a})\} + \mathbf{b} \cdot \{\boldsymbol{\omega}_b \times (\boldsymbol{\omega}_b \times \mathbf{b})\} = \mathbf{b} \cdot (\dot{\boldsymbol{\omega}}_c \times \mathbf{c}) + \mathbf{b} \cdot \{\boldsymbol{\omega}_c \times (\boldsymbol{\omega}_c \times \mathbf{c})\}\tag{A. 17}$$

式 (A. 17) を整理すると

$$\mathbf{b} \cdot \{\boldsymbol{\omega}_a (\boldsymbol{\omega}_a \cdot \mathbf{u}) - \boldsymbol{\omega}_a^2 \mathbf{a}\} - (\mathbf{b} \times \boldsymbol{\omega}_b^2) = \dot{\boldsymbol{\omega}}_c \cdot (\mathbf{c} \times \mathbf{b}) + \mathbf{b} \cdot \{\boldsymbol{\omega}_c (\boldsymbol{\omega}_c \cdot \mathbf{c}) - \boldsymbol{\omega}_c^2 \cdot \mathbf{c}\}\tag{A. 18}$$

ここで $\dot{\boldsymbol{\omega}}_c = \ddot{\phi} \hat{\mathbf{f}}$ より

$$(\mathbf{a} \cdot \hat{\mathbf{e}})(\mathbf{b} \cdot \hat{\mathbf{e}}) \dot{\theta}^2 - (\mathbf{a} \cdot \mathbf{b}) \dot{\theta}^2 - (\mathbf{b} \times \boldsymbol{\omega}_b)^2 = \ddot{\phi} \hat{\mathbf{f}} \cdot (\mathbf{c} \times \mathbf{b}) + (\mathbf{b} \cdot \hat{\mathbf{f}})(\mathbf{c} \cdot \hat{\mathbf{f}}) \dot{\phi}^2 - (\mathbf{b} \cdot \mathbf{c}) \dot{\phi}^2\tag{A. 19}$$

式 (A. 19) より式 (3.43) が得られる。式 (3.44) は、式 (A. 11) を解いて得られる。

付録 4.1 画像処理プログラム（機械語）1

```

0036-      1000 CSMW .EQ $36      CSM (CHARACTER SW.)
0037-      1010 CSMH .EQ $37
C000-      1020 INT  .EQ $C000    ROM CARD SELECT SW.
C001-      1030 FP   .EQ $C001    ROM ON BOARD SW
C00A-      1040 CCD  .EQ $C0A0    PIA A-PORT CCD
C0A1-      1050 CCDCR .EQ $C0A1
C0A2-      1060 DA   .EQ $C0A2    PIA B-PORT D/A
C0A3-      1070 DACR .EQ $C0A3
C0A4-      1080 RPM  .EQ $C0A4    PIA A-PORT RELAY & PULSE MOTER
C0A5-      1090 RPMCR .EQ $C0A5
C0A6-      1100 PR2  .EQ $C0A6    PIA B-PORT PRINTER
C0A7-      1110 PR2CR .EQ $C0A7
CFFF-      1120 ROMSW .EQ $CFFF    RESET ROM ($C000-$CFFF) SW
D000-      1130 BALAN .EQ $D000
00FC-      1140 CPL  .EQ $FC
00FD-      1150 CPH  .EQ $FD
FDE3-      1160 PRHEX .EQ $FDE3    PRINT HEX DIG IN A-REG
FDED-      1170 COUT .EQ $FDED    USER OUTPUT ROUTINE
FDF0-      1180 COUT1 .EQ $FDF0    PRINT TEXT
00FE-      1190 HEXL  .EQ $FE
00FF-      1200 HEXH  .EQ $FF
          1210 *
          1220      .OR $C200
          1230      .TA $0000
          1240 *
          1250      PR#2
          1260 *
C200- 40   1270 PR.2 PHA
C201- A9 04 1280 LDA #$04
C203- 2C A7 C0 1290 BIT PR2CR ALREADY INIT?
C206- 00 21 1300 BNE HOT IF YES THEN GOTO HOT
C208- A9 00 1310 LDA #$00
C20A- 80 A7 C0 1320 STA PR2CR
C20D- A9 7F 1330 LDA #$7F
C20F- 80 A6 C0 1340 STA PR2
C212- A9 34 1350 LDA #$34
C214- 80 A7 C0 1360 STA PR2CR
C217- A9 00 1370 LDA #$00 CSM=$C200
C219- 85 36 1380 STA CSMW
C21B- A9 C2 1390 LDA #$C2
C21D- 85 37 1400 STA CSMH
C21F- A9 48 1410 LDA #$48 OUTPUT "H"
C221- 20 ED FD 1420 JSR COUT
C224- A9 00 1430 LDA #$00 OUTPUT "CR"
C226- 20 ED FD 1440 JSR COUT
C229- A9 80 1450 HOT LDA #$80
C22B- 2C A6 C0 1460 BUSY BIT PR2
C22E- 00 F0 1470 BNE BUSY IF BUSY THEN GOTO BUSY
C230- 68 1480 PLA
C231- 80 A6 C0 1490 STA PR2 OUTPUT DATA
C234- AD A7 C0 1500 LDA PR2CR OUTPUT STROBE
C237- 09 00 1510 ORA #$00
C239- 80 A7 C0 1520 STA PR2CR
C23C- 29 F7 1530 AND #$F7
C23E- 80 A7 C0 1540 STA PR2CR
C241- AD A6 C0 1550 LDA PR2
C244- 09 00 1560 ORA #$80 SET MSB OF DATA
C246- 4C F0 FD 1570 JMP COUT1 PRINT AT TEXT
          1580 *
          1590      INITIALIZE THE PIA
          1600 *
C249- A9 00 1610 PINIT LDA #$00
C24B- 80 A1 C0 1620 STA CCDCR
C24E- 80 A3 C0 1630 STA DACR
C251- 80 A5 C0 1640 STA RPMCR
C254- 80 A0 C0 1650 STA CCD
C257- A9 FF 1660 LDA #$FF
C259- 80 A2 C0 1670 STA DA
C25C- A9 F3 1680 LDA #$F3
C25E- 80 A4 C0 1690 STA RPM
C261- A9 04 1700 LDA #$04
C263- 80 A1 C0 1710 STA CCDCR
C266- 80 A3 C0 1720 STA DACR
C269- 80 A5 C0 1730 STA RPMCR
C26C- A9 F3 1740 LDA #$F3
C26E- 80 A4 C0 1750 -STA RPM
C271- 2C FF CF 1760 BIT ROMSW RESET THE ROM ($C000-$CFFF)
C274- 60 1770 RTS

```

```

1780 *
1790 *      TRANSFORM 16 TO 10
1800 *
C275- A9 80 1810 ASCII LDA #400      CONSTANT POINTER = %C280
C277- 85 FC 1820      STA CPL
C279- A9 C2 1830      LDA #4C2
C27B- 85 FD 1840      STA CPH
C27D- A0 00 1850      LDY #400      TERM = 0
C27F- A2 FF 1860 L2   LDY #4FF      RESULT = -1
C281- 38      1870      SEC      (HEX-DATA)-(DEC-DATA)
C282- A5 FE 1880 LI   LDA HEXL
C284- F1 FC 1890      SBC (CPL),Y
C286- 85 FE 1900      STA HEXL
C288- C8      1910      INY
C289- A5 FF 1920      LDA HEXH
C28B- F1 FC 1930      SBC (CPL),Y
C28D- 85 FF 1940      STA HEXH
C28F- 80      1950      DEY
C290- E8      1960      INX      RESULT = RESULT + 1
C291- 80 EF 1970      BCS L1   IF (HEX-DATA) > 0 THEN GOTO L1
C293- 8A      1980      TXA
C294- 20 E3 FD 1990      JSR PRHEX  PRINT RESULT
C297- 18      2000      CLC      (HEX-DATA) + (DEC-DATA)
C298- A5 FE 2010      LDA HEXL
C29A- 71 FC 2020      ADC (CPL),Y
C29C- 85 FE 2030      STA HEXL
C29E- C8      2040      INY
C29F- A5 FF 2050      LDA HEXH
C2A1- 71 FC 2060      ADC (CPL),Y
C2A3- 85 FF 2070      STA HEXH
C2A5- C8      2080      INY      TERM = TERM + 1
C2A6- 98      2090      TIA
C2A7- C9 00 2100      CMP #400   TERM = 4 ?
C2A9- D8 04 2110      BNE L2   IF TERM <> 4 THEN GOTO L2
C2AB- A5 FE 2120      LDA HEXL
C2AD- 4C E3 FD 2130      JMP PRHEX
C2B0- 18 27 2140 HEXDAT .DA 10000
C2B2- E8 03 2150      .DA 1000
C2B4- 64 00 2160      .DA 100
C2B6- 0A 00 2170      .DA 10
2180 *
2190 *      PR#0
2200 *
C2B8- A9 F0 2210 PR.0  LDA #4F0      CSM = %FDF0
C2BA- 85 36 2220      STA CSHL
C2BC- A9 FD 2230      LDA #4FD
C2BE- 85 37 2240      STA CSHH
C2C0- 68      2250      RTS
2260 *
2270 *      JUMP SR.BALAN
2280 *
C2C1- AD 80 C0 2290 JBAL LDA INT      SELECT THE ROM CARD
C2C4- 20 00 D8 2300      JSR BALAN
C2C7- AD 81 C8 2310      LDA FP      SELECT THE ROM ON 8000
C2CA- 60      2320      RTS

```

SYMBOL TABLE

D000- BALAN	0017- CSHH	00FE- HEXL	C200- PR.2
C220- BUSY	0036- CSHL	C229- HDI	C0A6- PR2
C0A0- CCD	C0A2- DA	C0B0- INT	C0A7- PR2CR
C0A1- CCDCR	C0A3- DACR	C2C1- JBAL	FDE3- PRHEX
FDE0- COUT	C0B1- FP	C2B2- LI	CFFF- ROMSW
FDF0- COUT1	C275- ASCII	C27F- L2	C0A4- RPM
00FD- CPH	C2B0- HEXDAT	C2A9- PINIT	C0A5- RPMCR
00FC- CPL	00FF- HEXH	C2B8- PR.0	

付録 4.2 画像処理プログラム（機械語）2

0300-	1000 XREG	.EQ #0300	X-REGISTER
0301-	1010 YREG	.EQ #0301	Y-REGISTER
0302-	1020 ZREG	.EQ #0302	Z-REGISTER
0303-	1030 ZREGH	.EQ #0303	
0006-	1040 LBL	.EQ #06	LINE BUFFER POINTER
0007-	1050 LBH	.EQ #07	
0008-	1060 DBL	.EQ #08	DISPLAY BUFFER POINTER
0009-	1070 DBH	.EQ #09	
0019-	1080 MASK	.EQ #19	

```

001A-    1090 XP0L .EQ $1A      X-POINTER 0
001B-    1100 XP0H .EQ $1B
001C-    1110 XP1L .EQ $1C      X-POINTER 1
001D-    1120 XP1H .EQ $1D
001E-    1130 RREG .EQ $1E      RESULT REGISTER
001F-    1140 ADP .EQ $1F      ADDRESS POINTER
003C-    1150 STARTL .EQ $3C    START ADDRESS
003D-    1160 STARH .EQ $3D
003E-    1170 FINALL .EQ $3E    FINAL ADDRESS
003F-    1180 FINALH .EQ $3F
C050-    1190 GR .EQ $C050     GR-SWITCH
C052-    1200 MIX .EQ $C052    MIX-SWITCH
C054-    1210 PG1 .EQ $C054    PAGE 1 -SWITCH
C057-    1220 HRES .EQ $C057   HIGH RES. SWITCH
C0A0-    1230 CCD .EQ $C0A0    PIA A-PORT CCD
C0A1-    1240 CCDCR .EQ $C0A1
C0A4-    1250 RPM .EQ $C0A4    PIA B-PORT RELAY & MOTER
FB1E-    1260 PDL .EQ $FB1E    PDL INPUT SR.
FCAB-    1270 DELAY .EQ $FCAB  DELAY SR.
FECD-    1280 CSAVE .EQ $FECD  SAVE CASSETTE SR.
FEFD-    1290 CLOAD .EQ $FEFD  LOAD CASSETTE SR.
        1300 *
        1310 .OR $C800
        1320 .TA $0800
        1330 *
        1340 *      INPUT CCD DATA ($40 BYTE)
        1350 *
C800- AD 00 1360 CCDIN LDY $400 ADDRESS POINTER =0
C802- A2 40 1370 LDX $440 ADDRESS COUNTER =$40
C804- AD A0 C0 1380 LDA CCD
C807- AD A1 C0 1390 L1 LDA CCDCR
C80A- 29 40 1400 AND $440
C80C- F0 F9 1410 BEQ L1 IF NOT LINE-TOP THEN L1
C80E- AD A0 C0 1420 LDA CCD
C811- AD A1 C0 1430 L2 LDA CCDCR
C814- 29 00 1440 AND $800
C816- F0 F9 1450 BEQ L2 IF NOT 8BIT IN THEN L2
C818- AD A0 C0 1460 LDA CCD INPUT CCD DATA
C81B- 91 06 1470 STA (LBL),Y STORE CCD DATA
C81D- C8 1480 INY AP.=AP.+1
C81E- CA 1490 DEX AC.=AC.-1
C81F- 00 F0 1500 BNE L2 IF AC.<0 THEN L2
C821- 60 1510 RTS
        1520 *
        1530 *      TRANSFORM DATA TO DISPLAY FORMAT
        1540 *
C822- AD 00 03 1550 TRAN LDA XREG IF X-REGISTER >$EB THEN XR.=$EB
C825- C9 E8 1560 CMP $EB
C827- 90 02 1570 BCC M1
C829- A9 E8 1580 LDA $EB X-POINTER 0 = XR.
C82B- 85 1A 1590 M1 STA XP0L X-POINTER 1 = XR.
C82D- 85 1C 1600 STA XP1L
C82F- A9 00 1610 LDA $EB
C831- 85 1B 1620 STA XP0H
C833- 85 1D 1630 STA XP1H
C835- 85 1F 1640 STA ADP ADDRESS POINTER =0
C837- A2 07 1650 M6 LDX $07 BIT COUNTER =7
C839- 46 1D 1660 M5 LSR XP1H XP1.=XP1./8
C83B- 66 1C 1670 ROR XP1L
C83D- 46 1C 1680 LSR XP1L
C83F- 46 1C 1690 LSR XP1L
C841- A9 00 1700 LDA $EB SET MSB OF MASK
C843- 85 19 1710 STA MASK
C845- A9 07 1720 LDA $07 CALC. MOD(XP0./8)
C847- 25 1A 1730 AND XP0L
C849- A8 1740 TAY
C84A- C8 1750 INY
C84B- 00 1760 M3 DEY
C84C- F0 05 1770 BEQ M2
C84E- 46 19 1780 LSR MASK SHIFT MASK MOD(XP0./8)TIMES
C850- 18 1790 CLC
C851- 90 F8 1800 BCC M3
C853- A5 1C 1810 M2 LDA XP1L XP1.+LINE BUFFER POINTER
C855- 18 1820 CLC ;CALC. ADDRESS OF X-REGISTER
C856- 65 06 1830 ADC LBL
C858- 85 1C 1840 STA XP1L
C85A- A9 00 1850 LDA $EB
C85C- 65 07 1860 ADC LBH
C85E- 85 1D 1870 STA XP1H

```

C860-	A0	00	1880	LDY #000	MASK (AND) (XP1.)	
C862-	B1	1C	1890	LDA (XP1L),Y	:CHECK MASK BIT	
C864-	25	19	1900	AND MASK		
C866-	18		1910	CLC	STORE TO RESULT REGISTER	
C867-	F0	01	1920	BEQ M4		
C869-	30		1930	SEC		
C86A-	66	1E	1940	ROR RREG		
C86C-	A5	1A	1950	LDA XP0L	XP0.=XP0.+1	
C86E-	18		1960	CLC	XP1.=XP0.+1	
C86F-	69	01	1970	ADC #01		
C871-	85	1A	1980	STA XF0L		
C873-	85	1C	1990	STA XP1L		
C875-	A5	1B	2000	LDA XP0H		
C877-	69	00	2010	ADC #00		
C879-	85	1B	2020	STA XP0H		
C87B-	85	1D	2030	STA XP1H		
C87D-	CA		2040	DEX	BC.=BC.-1	
C87E-	D0	B9	2050	BNE M5	IF BC.<0 THEN M5	
C880-	A5	1E	2060	LDA RREG	STORE RR. TO DBP. IN AP.	
C882-	4A		2070	LSR		
C883-	A4	1F	2080	LDY ADP		
C885-	91	00	2090	STA (DBL),Y		
C887-	C8		2100	INY	AP.=AP.+1	
C888-	84	1F	2110	STY ADP		
C88A-	98		2120	IYA		
C88B-	C9	2B	2130	CMP #02B	IF AP.<02B THEN M6	
C88D-	D0	A0	2140	BNE M6		
C88F-	60		2150	RTS		
			2160	*		
			2170	*	FAST TRANSFORM LINE-BUFFER TO DISPLAY-BUFFER	
			2180	*		
C890-	AD	00	03	2190	FRAN LDA XREG	X-REGISTER / 0
C893-	4A		2200	LSR		
C894-	4A		2210	LSR		
C895-	4A		2220	LSR		
C896-	C9	18	2230	CMP #01B	IF X-REGISTER > 01B THEN X-REG. = 01B	
C898-	90	02	2240	BCC N1		
C89A-	A9	18	2250	LDA #01B	X-POINTER-0 = X-REGISTER	
C89C-	18		2260	CLC	X-POINTER-0 = LINE-BUFFER + X-POINTER	
C89D-	65	06	2270	ADC LBL		
C89F-	85	1A	2280	STA XF0L		
C8A1-	A9	00	2290	LDA #00		
C8A3-	65	07	2300	ADC L0H		
C8A5-	85	1B	2310	STA XP0H		
C8A7-	A0	27	2320	LDY #027	ADDRESS-POINTER = 027	
C8A9-	A2	07	2330	L0X #007	BIT-COUNTER = 7	
C8AB-	81	1A	2340	LDA (XP0L),Y		
C8AD-	4A		2350	LSR		
C8AE-	26	1C	2360	ROL XP1L		
C8B0-	CA		2370	DEX	BIT-COUNTER - 1	
C8B1-	D0	FA	2380	BNE N2	IF BIT-COUNTER < 0 THEN N2	
C8B3-	A5	1C	2390	LDA XP1L	CLEAR MSB OF RESULT	
C8B5-	29	7F	2400	AND #07F		
C8B7-	91	00	2410	STA (DBL),Y	STORE RESULT TO DISPLAY-BUFFER	
C8B9-	88		2420	DEY	ADDRESS-POINTER - 1	
C8BA-	10	ED	2430	0PL N3	IF ADDRESS-POINTER > 0 THEN N3	
C8BC-	60		2440	RTS		
			2450	*		
			2460	*	CALCULATE DISPLAY ADDRESS	
			2470	*		
C8D0-	A9	20	2480	DADD	LDA #020	
C8BF-	85	09	2490	STA DBH		
C8C1-	AD	01	03	2500	LDA YREG	IF Y-REGISTER > 01F THEN Y-REG. = 01F
C8C4-	C9	BF	2510	CMP #0BF		
C8C6-	90	02	2520	BCC 01		
C8C8-	A9	BF	2530	LDA #0BF		
C8CA-	AA		2540	TAX		
C8CB-	29	C0	2550	AND #0C0	DISPLAY-BUFFER = (Y-REG. / 64) * 020	
C8CD-	4A		2560	LSR		
C8CE-	85	1A	2570	STA XP0L		
C8D0-	4A		2580	LSR		
C8D1-	4A		2590	LSR		
C8D2-	18		2600	CLC		
C8D3-	65	1A	2610	ADC XP0L		
C8D5-	85	00	2620	STA DBL		
C8D7-	8A		2630	TXA		
C8D8-	29	38	2640	AND #038	DISPLAY-BUFFER + MOD(Y-REG. / 64) / 8 * 000	
C8DA-	0A		2650	ASL		
C8DB-	0A		2660	ASL		

C80C- 0A	2670	ASL	
C80D- 26 1A	2680	ROL XP0L	
C80F- 0A	2690	ASL	
C8E0- 26 1A	2700	ROL XP0L	
C8E2- 18	2710	CLC	
C8E3- 65 08	2720	ADC DBL	
C8E5- 85 08	2730	STA DBL	
C8E7- A5 1A	2740	LDA XP0L	
C8E9- 29 03	2750	AND #03	
C8EB- 18	2760	CLC	
C8EC- 65 09	2770	ADC DBH	
C8EE- 85 09	2780	STA DBH	
C8F0- 8A	2790	TXA	
C8F1- 29 07	2800	AND #07	DISPLAY-BUFFER + \$400 * MOD(Y-REG. / 8)
C8F3- AA	2810	TAX	
C8F4- E8	2820	INX	
C8F5- CA	2830 03	DEX	
C8F6- F0 0A	2840	BEQ 02	
C8F8- A5 09	2850	LDA DBH	
C8FA- 18	2860	CLC	
C8FB- 69 04	2870	ADC #04	
C8FD- 85 09	2880	STA DBH	
C8FF- 18	2890	CLC	
C900- 90 F3	2900	BCC 03	
C902- 60	2910 02	RTS	
	2920 *		
	2930 *	CALCULATE FRAME MEMORY ADDRESS	
	2940 *		
C903- AD 03 03	2950 MADD	LDA ZREGH	IF Z-REGISTER > \$17F THEN Z-REG. = \$17F
C906- C9 01	2960	CMP #01	
C908- 98 0C	2970	BCC P1	
C90A- A9 01	2980	LDA #01	
C90C- 85 18	2990	STA XP0H	
C90E- AD 02 03	3000	LDA ZREGL	
C911- 29 3F	3010	AND #3F	
C913- 18	3020	CLC	
C914- 98 05	3030	BCC P2	
C916- 85 18	3040 P1	STA XP0H	
C918- AD 02 03	3050 P1	LDA ZREGL	X-POINTER = Z-REGISTER
C91B- 85 1A	3060 P2	STA XP0L	X-POINTER * \$40
C91D- A9 00	3070	LDA #00	
C91F- 66 18	3080	ROR XP0H	
C921- 66 1A	3090	ROR XP0L	
C923- 6A	3100	ROR	
C924- 46 1A	3110	LSR XP0L	
C926- 6A	3120	ROR	
C927- 85 06	3130	STA LBL	LINE-BUFFER = X-POINTER + \$4000
C929- 18	3140	CLC	
C92A- A5 1A	3150	LDA XP0L	
C92C- 69 40	3160	ADC #40	
C92E- 85 07	3170	STA LBH	
C930- 60	3180	RTS	
	3190 *		
	3200 *	INVERSE HGR	
	3210 *		
C931- A9 20	3220 INV	LDA #20	X-POINTER = \$2000
C933- 85 18	3230	STA XP0H	
C935- A9 00	3240	LDA #00	
C937- 85 1A	3250	STA XP0L	
C939- A2 20	3260	LDX #20	COUNTER1 = \$20
C93B- A0 00	3270 02	LDY #00	COUNTER2 = 0
C93D- B1 1A	3280 01	LDA (XP0L),Y	INVERSE DATA BIT (0-6)
C93F- A9 7F	3290	EOR #7F	
C941- 91 1A	3300	STA (XP0L),Y	
C943- C0	3310	INY	COUNTER2 + 1
C944- D0 F7	3320	BNE 01	IF COUNTER2 <> 0 THEN 01
C946- E6 18	3330	INC XP0H	X-POINTER + 1
C948- CA	3340	DEX	COUNTER1 - 1
C949- D0 F0	3350	BNE 02	IF COUNTER1 <> 0 THEN 02
C94B- 60	3360	RTS	
	3370 *		
	3380 *	CLR HGR	
	3390 *		
C94C- A9 20	3400 CLR	LDA #20	X-POINTER = \$2000
C94E- 85 18	3410	STA XP0H	
C950- A9 00	3420	LDA #00	
C952- 85 1A	3430	STA XP0L	
C954- A2 20	3440	LDX #20	COUNTER1 = \$20
C956- A0 00	3450 R2	LDY #00	COUNTER2 = 0

```

C95B- 91 1A 346B R1 STA (XP0L),Y CLEAR DATA ( X-POINTER + COUNTER2 )
C95A- C8 3470 INY COUNTER2 + 1
C95B- D0 FB 3480 BNE R1 IF COUNTER2 (<) 0 THEN R1
C95D- E6 1B 3490 INC XP0H X-POINTER + 1
C95F- CA 3500 DEI COUNTER1 - 1
C960- D0 F4 3510 BNE R2 IF COUNTER1 (<) 0 THEN R2
C962- 60 3520 RTS

3530 *
3540 * SET HGR
3550 *

C963- 8D 50 C0 3560 HGR STA GR SET GRAPHIC MODE
C966- 8D 57 C0 3570 STA HRES SET HIGH RESOLUTION
C969- 8D 54 C0 3580 STA PGI SET PAGE 1
C96C- 8D 52 C0 3590 STA MIX SET MIXED MODE
C96F- 60 3600 RTS

3610 *
3620 * ROTATING PULSE MOTOR
3630 *

C970- A9 15 3640 RDT LDA ##15 DELAY
C972- 20 A8 FC 3650 JSR DELAY
C975- A9 FE 3660 LDA ##FE LOW-LEVEL OUTPUT
C977- 2D A4 C0 3670 AND RPM
C97A- 8D A4 C0 3680 STA RPM
C97D- A9 15 3690 LDA ##15 DELAY
C97F- 20 A8 FC 3700 JSR DELAY
C982- A9 01 3710 LDA ##01 HIGH-LEVEL OUTPUT
C984- 8D A4 C0 3720 ORA RPM
C987- 8D A4 C0 3730 STA RPM
C98A- 60 3740 RTS

3750 *
3760 * LSET,RSET,ON1-4,OFF1-4
3770 *

C98B- A9 02 3780 LSET LDA ##02 LEFT ROTATION SET
C98D- 8D A4 C0 3790 S2 ORA RPM
C990- 8D A4 C0 3800 S1 STA RPM
C993- 60 3810 RTS
C994- A9 FD 3820 RSET LDA ##FD RIGHT ROTATION SET
C996- 2D A4 C0 3830 S3 AND RPM
C999- 18 3840 CLC
C99A- 90 F4 3850 BCC S1
C99C- A9 10 3860 OFF1 LDA ##10 SL-1 : ON CARRIER
C99E- 18 3870 CLC
C99F- 90 EC 3880 BCC S2
C9A1- A9 EF 3890 ON1 LDA ##EF
C9A3- 18 3900 CLC
C9A4- 90 F0 3910 BCC S3
C9A6- A9 20 3920 OFF2 LDA ##20
C9A8- 18 3930 CLC
C9A9- 90 E2 3940 BCC S2
C9AB- A9 DF 3950 ON2 LDA ##DF
C9AD- 18 3960 CLC
C9AE- 90 E6 3970 BCC S3
C9B0- A9 40 3980 OFF3 LDA ##40 SL-3 : ON BASE
C9B2- 18 3990 CLC
C9B3- 90 D0 4000 BCC S2
C9B5- A9 BF 4010 ON3 LDA ##BF
C9B7- 18 4020 CLC
C9B8- 90 DC 4030 BCC S3
C9BA- A9 80 4040 OFF4 LDA ##80
C9BC- 18 4050 CLC
C9BD- 90 CE 4060 BCC S2
C9BF- A9 7F 4070 ON4 LDA ##7F
C9C1- 18 4080 CLC
C9C2- 90 D2 4090 BCC S3

4100 *
4110 * CLOAD & CSAVE
4120 *

C9C4- A9 00 4130 SFSET LDA ##00 START ADDRESS : #4000
C9C6- 85 3C 4140 STA STARTL
C9C8- A9 40 4150 LDA ##40
C9CA- 85 3D 4160 STA STARTRH
C9CC- A9 FF 4170 LDA ##FF FINAL ADDRESS : #95FF
C9CE- 85 3E 4180 STA FINALL
C9D0- A9 95 4190 LDA ##95
C9D2- 85 3F 4200 STA FINALH
C9D4- 60 4210 RTS
C9D5- 20 C4 C9 4220 LOAD JSR SFSET
C9D8- 4C FD FE 4230 JMP CLOAD GOTO LOAD ROUTINE
C9DB- 20 C4 C9 4240 SAVE JSR SFSET

```

```

C9DE- 4C CD FE 4250 JMP CSAVE GOTO SAVE ROUTINE
          4260 *
          4270 * PDLL INPUT
          4280 *
C9E1- A2 00 4290 PDLL LDX #*00
C9E3- 20 1E FB 4300 JSR PDL
C9E6- 98 4310 TYA
C9E7- 0D 00 03 4320 STA XREG X-REGISTER = PDL-0
C9EA- E8 4330 INX
C9EB- 20 1E FB 4340 JSR PDL
C9EE- 98 4350 TYA Y-REGISTER = PDL-1
C9EF- 0D 01 03 4360 STA YREG
C9F2- 60 4370 RTS

```

SYMBOL TABLE

001F- ADP	C811- L2	C8F5- 03	C0A4- RPM
C0A0- CCD	0007- LBH	C99C- OFF1	001E- RREG
C0A1- CCDCR	0006- LBL	C9A6- OFF2	C994- RSET
C800- CCDIN	C9D5- LOAD	C900- OFF3	C990- S1
F0FD- CLOAD	E98B- LSET	C98A- OFF4	C98D- S2
C94C- CLR	C82B- M1	C9A1- ON1	C996- S3
F0CD- CSAVE	C853- M2	C9AB- ON2	C9D8- SAVE
C88D- DADD	C84B- M3	C985- ON3	C9C4- SFSET
0009- DBH	C86A- M4	C98F- ON4	003D- STARTH
0008- DBL	C839- M5	C916- P1	003C- STARTL
FCAB- DELAY	C837- M6	C91B- P2	C822- TRAN
003F- FINALH	C983- MADD	FB1E- PDL	001B- XP0H
003E- FINALL	0019- MASK	C9E1- PDLL	001A- XP0L
C890- FTRAN	C052- MIX	C054- PG1	001D- XP1H
C050- GR	C89C- N1	C93D- Q1	001C- XP1L
C963- HGR	C8AD- N2	C93B- Q2	0300- XREG
C057- HRES	C8A9- N3	C95B- R1	0301- YREG
C931- INV	C8CA- O1	C956- R2	0303- ZREGH
C807- LI	C902- O2	C970- ROT	0302- ZREGL

付録 4.3 画像処理プログラム (機械語) 3

```

0301- 1000 YREG .EQ #0301 Y-REGISTER
0302- 1010 ZREGL .EQ #0302 Z-REGISTER
0303- 1020 ZREGH .EQ #0303
0304- 1030 CPL .EQ #0304 CARRIER-POINTER
0305- 1040 CPH .EQ #0305
0306- 1050 SL1 .EQ #0306 SLASH-LEVEL1
0307- 1060 SL2 .EQ #0307 SLASH-LEVEL2
0006- 1070 LBL .EQ #06 LINE-BUFFER POINTER
0007- 1080 LBH .EQ #07
0020- 1090 SCALE .EQ #020 SCALE POSITION
C8A2- 1100 DA .EQ #C8A2 D/A CONVERTER OUTPUT
C8A4- 1110 RPM .EQ #C8A4 RELAY & PULSE MOTOR
C98B- 1111 LSET .EQ #C98B LEFT ROTATION SET
C994- 1112 RSET .EQ #C994 RIGHT ROTATION SET
C800- 1120 CCDIN .EQ #C800 INPUT CCD-DATA TO LINE-BUFFER
C822- 1130 TRAN .EQ #C822 TRANSFORM LINE-BUFFER TO DISPLAY-BUFFER
C890- 1140 FTRAN .EQ #C890 FAST TRAN
C88D- 1150 DADD .EQ #C88D CALCULATE DISPLAY ADDRESS
C903- 1160 MADD .EQ #C903 CALCULATE FRAME MEMORY ADDRESS
C970- 1170 ROT .EQ #C970 ROTATION PULSE MOTOR
C99C- 1200 OFF1 .EQ #C99C SL1 : ON CARRIER
C9A1- 1210 ON1 .EQ #C9A1
C980- 1220 OFF3 .EQ #C980 SL2 : ON BASE
C985- 1230 ON3 .EQ #C985
C9E1- 1240 PDLL .EQ #C9E1 PDLL INPUT
          1250 *
          1260 .OR #C800
          1270 .TA #0800
          1280 #
          1290 # FAST FLAME DISPLAY
          1300 #
C800- A9 00 1310 FFDIS LDA #000 Z-REGISTER (HIGH) = 0
C802- 0D 03 03 1320 STA ZREGH
C805- 20 E1 C9 1330 JSR PDLL Y-REGISTER = PDL1
C808- AD 01 03 1340 LDA YREG IF Y-REGISTER (<) #98 THEN Y-REG. = #98
C80B- C9 98 1350 CMP #98
C80D- 90 02 1360 BCC L1
C80F- A9 98 1370 LDA #98
C811- 0D 02 03 1380 L1 STA ZREGL Z-REGISTER (LOW) = Y-REGISTER
C814- 20 03 C9 1390 JSR MADD SET LINE-BUFFER

```

CB17- A9 BF	1400	LDA #BF	
CB19- 8D 01 03	1410	STA YREG	Y-REGISTER = # BF
CB1C- 20 8D C8	1420 L2	JSR DADD	SET DISPLAY-BUFFER
CB1F- 20 90 C8	1430	JSR FTRAN	
CB22- A9 40	1440	LDA #40	LINE-BUFFER + #40
CB24- 18	1450	CLC	
CB25- 65 06	1460	ADC LBL	
CB27- 85 06	1470	STA LBL	
CB29- A9 00	1480	LDA #00	
CB2B- 65 07	1490	ADC LBH	
CB2D- 85 07	1500	STA LBH	
CB2F- CE 01 03	1510	DEC YREG	Y-REGISTER - 1
CB32- D0 E8	1520	BNE L2	IF Y-REGISTER (<) THEN L2
CB34- 60	1530	RTS	
	1540 *		
	1550 *	FLAME DISPLAY (TRAN USED)	
	1560 *		
CB35- A9 00	1570 FDIS	LDA #00	
CB37- 8D 03 03	1580	STA ZREG	
CB3A- 20 E1 C9	1590	JSR PDL1	
	1600 *		
CB3D- AD 01 03	1610	LDA YREG	
CB40- C9 98	1620	CMP #98	
CB42- 90 02	1630	BCC M1	
CB44- A9 98	1640	LDA #98	
CB46- 8D 02 03	1650 M1	STA ZREG	
CB49- 20 03 C9	1660	JSR MADD	
CB4C- A9 BF	1670	LDA #BF	
CB4E- 8D 01 03	1680	STA YREG	
CB51- 20 8D C8	1690 M2	JSR DADD	
CB54- 20 22 C8	1700	JSR TRAN	(NOT FTRAN !)
CB57- A9 40	1710	LDA #40	
CB59- 18	1720	CLC	
CB5A- 65 06	1730	ADC LBL	
CB5C- 85 06	1740	STA LBL	
CB5E- A9 00	1750	LDA #00	
CB60- 65 07	1760	ADC LBH	
CB62- 85 07	1770	STA LBH	
CB64- CE 01 03	1780	DEC YREG	
CB67- D0 E8	1790	BNE M2	
CB69- 60	1800	RTS	
	1810 *		
	1820 *	FAST A/D DISPLAY	
	1830 *		
CB6A- A9 40	1840 FADIS	LDA #40	LINE-BUFFER = #4000
CB6C- 85 07	1850	STA LRH	
CB6E- A9 00	1860	LDA #00	
CB70- 85 06	1870	STA LBL	
CB72- 20 E1 C9	1880	JSR PDL1	Y-REGISTER = PDL1
CB75- AD 01 03	1890	LDA YREG	
CB78- C9 40	1900	CMP #40	IF Y-REGISTER > #40 THEN Y-REG. = #40
CB7A- 90 02	1910	BCC N1	
CB7C- A9 40	1920	LDA #40	
CB7E- 8D A2 C0	1930 N1	STA DA	D/A Y-REGISTER
CB81- A9 BF	1940	LDA #BF	
CB83- 8D 01 03	1950	STA YREG	
CB86- 20 00 C8	1960 M2	JSR CCDIN	
CB89- 20 8D C8	1970	JSR DADD	
CB8C- AD A2 C0	1980	LDA DA	IF DA (<) INT(DA / #10) THEN N3
CB8F- 29 0F	1990	AND #0F	
CB91- D0 08	2000	BNE N3	
CB93- AD 20 40	2010	LDA SCALE	SET SCALE
CB96- 49 FF	2020	EDR #FF	
CB98- 8D 20 40	2030	STA SCALE	
CB9B- 20 90 C8	2040 N3	JSR FTRAN	
CB9E- EE A2 C0	2050	INC DA	DA + 1
CB01- CE 01 03	2060	DEC YREG	Y-REGISTER - 1
CB04- D0 E8	2070	BNE N2	IF Y-REGISTER (<) 0 THEN N2
CB06- 60	2080	RTS	
	2090 *		
	2100 *	FLAME INPUT	
	2110 *		
CB07- 20 94 C9	2120 FIN	JSR RSET	
CB0A- A9 00	2130	LDA #00	LINE-BUFFER = #4000
CB0C- 85 06	2140	STA LBL	
CB0E- A9 40	2150	LDA #40	
CB08- 85 07	2160	STA LBH	
CB02- 20 00 C8	2170 01	JSR CCDIN	
CB05- AD 00	2180	LDY #00	NOISE REDUCTION

CBB7-	B1	06	2190	LDA	(LBL),Y		
CBB9-	0A		2200	ASL			
CBBA-	0A		2210	ASL			
CBBD-	00	04	2220	BCC	02		
CBBD-	4A		2230	LSR			
CBDE-	4A		2240	LSR			
CBDF-	90	03	2250	BCC	03		
CBC1-	6A		2260	RDR	02		
CBC2-	38		2270	SEC			
CBC3-	6A		2280	RDR			
CBC4-	91	06	2290	STA	(LBL),Y		
CBC6-	A2	00	2300	LDX	#\$00	ROTATION 1 DOT	
CBCE-	20	70	C9	2310	JSR	ROT	
CBCE-	CA		2320	DEX			
CBCC-	D0	FA	2330	BNE	04		
CBCE-	18		2340	CLC		LINE-BUFFER + \$40	
CBDF-	A9	40	2350	LDA	#\$40		
CB01-	65	06	2360	ADC	LBL		
CB03-	85	06	2370	STA	LBL		
CB05-	A9	00	2380	LDA	#\$00		
CB07-	65	07	2390	ADC	LBH		
CB09-	85	07	2400	STA	LBH		
CB0D-	C9	96	2410	CMP	#\$96	IF LINE-BUFFER (<) \$96XX THEN 01	
CB0D-	D0	03	2420	BNE	01		
CBDF-	18		2430	CLC		CARRIER-POINTER + \$150	
CBED-	A9	50	2440	LDA	#\$50		
CBE2-	60	04	03	2450	ADC	CPL	
CBE5-	80	04	03	2460	STA	CPL	
CBEB-	A9	01	2470	LDA	#\$01		
CBEA-	60	05	03	2480	ADC	CPH	
CBED-	80	05	03	2490	STA	CPH	
CBF0-	60		2500	RTS			
			2510	*			
			2520	*	MOVE LEFT HOME		
			2530	*			
CBF1-	20	A1	C9	2540	LCHOME	JSR ON1	
CBF4-	20	85	C9	2550	JSR ON3		
CBF7-	20	00	C9	2560	JSR LSET		
CBFA-	20	70	C9	2570	P1	JSR ROT	
CBFD-	AD	A4	C0	2580	LDA	RPM	
CC00-	89	0C	2590	ORA	#\$0C	LIMIT SW = ON ?	
CC02-	80	A4	C0	2600	STA	RPM	
CC05-	AD	A4	C0	2610	LDA	RPM	
CC08-	29	00	2620	AND	#\$00		
CC0A-	D0	EE	2630	BNE	P1	IF NOT THEN P1	
CC0C-	A9	00	2640	LDA	#\$00	CARRIER-POINTER = 0	
CC0E-	80	04	03	2650	STA	CPL	
CC11-	80	05	03	2660	STA	CPH	
			2670	*			
			2680	*	MOVE CENTER HOME		
			2690	*			
CC14-	20	A1	C9	2700	CHOME	JSR ON1	
CC17-	20	85	C9	2710	JSR ON3		
CC1A-	A9	A0	2720	01	LDA	#\$A0	
CC1C-	CD	04	03	2730	CMP	CPL	
CC1F-	D0	00	2740	BNE	02		
CC21-	A9	01	2750	LDA	#\$01		
CC23-	CD	05	03	2760	CMP	CPH	
CC26-	D0	06	2770	BNE	02		
CC2B-	20	9C	C9	2780	JSR	OFF1	
CC2B-	4C	80	C9	2790	JMP	OFF3	
CC2E-	30		2800	02	SEC	IF CARRIER-POINTER > \$1A0 THEN 04	
CC2F-	AD	04	03	2810	LDA	CPL	
CC32-	E9	A0	2820	SBC	#\$A0		
CC34-	AD	05	03	2830	LDA	CPH	
CC37-	E9	01	2840	SBC	#\$01		
CC39-	90	1F	2850	BCC	04		
CC3B-	20	00	C9	2860	JSR	LSET	
CC3E-	A2	00	2870	LDX	#\$00	ROTATION 1 DOT	
CC40-	20	70	C9	2880	03	JSR	ROT
CC43-	CA		2890	DEX			
CC44-	D0	FA	2900	BNE	03		
CC46-	30		2910	SEC		CARRIER-POINTER - 1	
CC47-	AD	04	03	2920	LDA	CPL	
CC4A-	E9	01	2930	SBC	#\$01		
CC4C-	80	04	03	2940	STA	CPL	
CC4F-	AD	05	03	2950	LDA	CPH	
CC52-	E9	00	2960	SBC	#\$00		
CC54-	80	05	03	2970	STA	CPH	

CC57- 18	2980	CLC	
CC58- 90 C0	2990	BCC Q1	GOTO Q1
CC5A- 20 94 C9	3000 Q4	JSR RSET	
CC5D- A2 08	3010	LDX #00B	ROTATION 1 DOT
CC5F- 20 70 C9	3020 Q5	JSR ROT	
CC62- CA	3030	DEX	
CC63- D0 FA	3040	RNE Q5	
CC65- EE 04 03	3050	INC CPL	CARRIER-POINTER + 1
CC68- D0 00	3060	RNE Q1	IF CARRIER-POINTER (<) 0 THEN Q1
CC6A- EE 05 03	3070	INC CPH	
CC6D- 18	3080	CLC	
CC6E- 90 AA	3090	BCC Q1	
	3100 *		
	3110 *	ROTATION RIGHT	
	3120 *		
CC70- 20 94 C9	3130 RROT	JSR RSET	
CC73- A2 08	3140	LDX #00B	ROTATION 1 DOT
CC75- 20 70 C9	3150 R1	JSR ROT	
CC78- CA	3160	DEX	
CC79- D0 FA	3170	RNE R1	
CC7B- EE 04 03	3180	INC CPL	CARRIER-POINTER + 1
CC7E- D0 03	3190	RNE R2	
CC80- EE 05 03	3200	INC CPH	
CC83- 18	3210 R2	CLC	
CC84- 90 1C	3220	BCC R4	GOTO R4
	3230 *		
	3240 *	ROTATION LEFT	
	3250 *		
CC86- 20 88 C9	3260 LROT	JSR LSET	
CC89- A2 08	3270	LDX #00B	ROTATION 1 DOT
CC8B- 20 70 C9	3280 R3	JSR ROT	
CC8E- CA	3290	DEX	
CC8F- D0 FA	3300	RNE R3	
CC91- 38	3310	SEC	CARRIER-POINTER - 1
CC92- AD 04 03	3320	LDA CPL	
CC95- E9 01	3330	SBC #001	
CC97- 8D 04 03	3340	STA CPL	
CC9A- AD 05 03	3350	LDA CPH	
CC9D- E9 00	3360	SBC #000	
CC9F- 8D 05 03	3370	STA CPH	
CCA2- AD A4 C0	3380 R4	LDA RPM	LIMIT SW = ON
CCA5- 09 0C	3390	ORA #00C	
CCA7- 8D A4 C0	3400	STA RPM	
CCAA- AD A4 C0	3410	LDA RPM	
CCAD- 29 04	3420	AND #004	
CCAF- D0 03	3430	RNE R5	IF NOT THEN RETURN
CCB1- 20 14 CC	3440	JSR CHOME	
CCB4- 60	3450 R5	RTS	
	3460 *		
	3470 *	HEADDING	
	3480 *		
CCB5- 20 14 CC	3490	JSR CHOME	
CCB8- A9 00	3500	LDA #000	LINE-BUFFER = #4000
CCBA- 85 06	3510	STA LBL	
CCBC- A9 40	3520	LDA #040	
CCBE- 85 07	3530	STA LBH	
CCC0- AD A2 C0	3540	LDA DA	SAVE D/A DATA
CCC3- 48	3550	PHA	
CCC4- AD 06 03	3560	LDA SL1	SET SLASH-LEVEL
CCC7- 8D A2 C0	3570	STA DA	
CCCA- 20 70 CC	3580 S1	JSR RROT	
CCCD- 20 00 C8	3590	JSR CCDIN	
CCD0- A0 3E	3600	LDY #03E	HEAD LEVEL ?
CCD2- B1 06	3610 S2	LDA (LBL),Y	
CCD4- C9 FF	3620	CMP #0FF	
CCD6- D0 F2	3630	RNE S1	IF NOT THEN S1
CCD8- 88	3640	DEY	CHECK NEXT DATA
CCD9- D0 F7	3650	RNE S2	IF NOT ALL DATA THEN S2
CCDB- AD 07 03	3660	LDA SL2	SET SLASH LEVEL 2
CCDE- 8D A2 C0	3670	STA DA	
CCE1- 20 70 CC	3680 S3	JSR RROT	
CCE4- 20 00 C8	3690	JSR CCDIN	
CCE7- A0 3E	3700	LDY #03E	HEAD LEVEL ?
CCE9- B1 06	3710 S4	LDA (LBL),Y	
CCEB- C9 00	3720	CMP #000	
CCED- D0 F2	3730	RNE S3	IF NOT THEN S3
CCEF- 88	3740	DEY	CHECK NEXT DATA
CCF0- D0 F7	3750	RNE S4	IF NOT ALL DATA THEN S4
CCF2- 68	3760	PLA	LOAD D/A DATA

```

CCF3- 8D A2 C0 3770      STA DA      SET SLASH LEVEL
CCF6- A0 15 3780      LDY #15    RIGHT ROTATION 37 TIMES
CCF8- 20 70 CC 3790 S5  JSR RROT
CCF8- 88 3800      DEY
CCFE- D0 FA 3810      BNE S5
CCFE- 4C 14 CC 3820      JMP CHOME
          3830 *
          3840 *      HEADING-2
          3850 *
CD01- 20 14 CC 3860      JSR CHOME
CD04- A9 00 3870      LDA #1000  LINE-BUFFER = #4000
CD06- 85 06 3880      STA LBL
CD08- A9 40 3890      LDA #140
CD0A- 85 07 3900      STA LBH
CD0C- AD A2 C0 3910      LDA DA    SAVE D/A DATA
CD0F- 40 3920      PHA
CD10- AD 06 03 3930      LDA SL1  SET SLASH LEVEL1
CD13- 8D A2 C0 3940      STA DA
CD18- 20 70 CC 3950 T1  JSR RROT
CD19- 20 00 C0 3960      JSR CCDIN
CD1C- A0 3E 3970      LDY #3E   HEAD LEVEL ?
CD1E- B1 06 3980 T2  LDA (LBL),Y
CD20- C9 00 3990      CMP #100
CD22- D0 05 4000      BNE T3
CD24- 88 4010      DEY
CD25- D0 F7 4020      BNE T2
CD27- F0 E0 4030      BEQ T1
CD29- AC 07 03 4040 T3  LDY SL2  LEFT ROTATION (SL2) TIMES
CD2C- 20 06 CC 4050 T4  JSR LROT
CD2F- 88 4060      DEY
CD30- D0 FA 4070      BNE T4
CD32- 68 4080      PLA
CD33- 8D A2 C0 4090      STA DA    LOAD D/A DATA
CD36- 4C 14 CC 4100      JMP CHOME SET SLASH LEVEL
          4110      .END

```

SYMBOL TABLE

CD00- CCDIN	CC86- LROT	CBFA- P1	CCCA- S1
CC14- CHOME	C98B- LSET	C9E1- PDLL	CCD2- S2
0305- CPH	CB46- M1	CC1A- Q1	CCE1- S3
0304- CPL	CB51- M2	CC2E- Q2	CCE9- S4
CB8A- DA	C983- MADD	CC40- Q3	CCF8- S5
C88D- DADD	CB7E- M1	CC5A- Q4	4020- SCALE
CB6A- FADIS	CB86- M2	CC5F- Q5	0306- SL1
CB35- FDIS	CB98- M3	CC75- R1	0307- SL2
CB00- FFDIS	CB82- O1	CC83- R2	CD16- T1
CB87- FIN	CB81- O2	CC8B- R3	CD1E- T2
CB90- FTRAN	CB84- O3	CCA2- R4	CD29- T3
CB11- L1	CB8C- O4	CC84- R5	CD2C- T4
CB1C- L2	C99C- OFF1	C970- RDT	C822- TRAN
0007- LBH	C980- OFF3	CB84- RPM	0301- YREG
0006- LBL	C9A1- ON1	CC70- RROT	0303- ZREGH
CBF1- LCHOME	C985- ON3	C994- RSET	0302- ZREGL

付録 4.4 画像処理プログラム (機械語) 4

0302-	1000 PXL1	.EQ #0302	X-POINTER 1
0303-	1010 PIX1	.EQ #0303	
0308-	1020 PYL1	.EQ #0308	Y-POINTER 1
0309-	1030 PYH1	.EQ #0309	
030A-	1040 PYL0	.EQ #030A	Y-POINTER 0
030B-	1050 PYH0	.EQ #030B	
030C-	1060 PXL0	.EQ #030C	X-POINTER 0
030D-	1070 PIX0	.EQ #030D	
030E-	1080 PAW0	.EQ #030E	POINT-ADDRESS WORK 0
030F-	1090 PAW1	.EQ #030F	POINT-ADDRESS WORK 1
0310-	1100 W0	.EQ #0310	WORK 0
0311-	1110 W1	.EQ #0311	WORK 1
0312-	1120 W3	.EQ #0312	WORK 3
0313-	1130 W4	.EQ #0313	WORK 4
0314-	1140 PYL2	.EQ #0314	Y-POINTER 2
0315-	1150 PYH2	.EQ #0315	
0316-	1160 PXL2	.EQ #0316	X-POINTER 2
0317-	1170 PIX2	.EQ #0317	
0318-	1180 PYL3	.EQ #0318	Y-POINTER 3
0319-	1190 PYH3	.EQ #0319	

```

031A-      1200 PXL3      .EQ $031A  X-POINTER 3
031B-      1210 PIX3      .EQ $031B
031C-      1220 PD        .EQ $031C  DATA OF (X,Y POINTER)
0006-      1230 PAL        .EQ $06   ADDRESS OF POINT X,Y
0007-      1240 PAH        .EQ $07
0008-      1250 PAL1       .EQ $08   ADDRESS OF POINT X,Y 1
0009-      1260 PAH1       .EQ $09
0019-      1270 LOOP0      .EQ $19   LOOP COUNTER
001A-      1280 WPL        .EQ $1A   WEIGHT POINTER
001B-      1290 WPH        .EQ $1B
001C-      1300 PYL4       .EQ $1C   Y-POINTER 4
001D-      1310 PYH4       .EQ $1D
001E-      1320 PXL4       .EQ $1E   X-POINTER 4
001F-      1330 PIX4       .EQ $1F
3FEB-      1340 WEIGHT      .EQ $3FEB  ADDRESS OF WEIGHT DATA
00EB-      1350 PAL2       .EQ $EB   ADDRESS OF POINT X,Y 2
00EC-      1360 PAH2       .EQ $EC
00ED-      1370 WW         .EQ $ED   WORK
00EE-      1380 REWL        .EQ $EE   RESULT OF WEIGHTING
00EF-      1390 REWH        .EQ $EF
00F9-      1400 LOOP1      .EQ $F9   LOOP COUNTER 1
00FA-      1410 RWL        .EQ $FA   RESULT OF W. WORK
00FB-      1420 RWM        .EQ $FB
00FC-      1430 RWH        .EQ $FC
00FD-      1440 RWL1       .EQ $FD   RESULT OF W. WORK 1
00FE-      1450 RWH1       .EQ $FE
00FF-      1460 RWH1       .EQ $FF
          1470 *
          1480             .OR $D800
          1490             .TA $0900
          1500 *
          1510 *      SEARCH & GET THE WEIGHT POINT OF TARGET
          1520 *
D800- A9 00      1530 BALAN LDA #400  WEIGHT POINTER = $3F80
D802- 05 1A      1540 STA WPL
D804- A9 3F      1550 LDA #3F
D806- 05 18      1560 STA WPH
D808- A9 08      1570 LDA #400  PX0 = $0000
D80A- 00 0C 03  1580 STA PXL0
D80D- A9 00      1590 LDA #400
D80F- 00 00 03  1600 STA PIX0  PY0 = $0000
D812- A9 08      1610 L34 LDA #400
D814- 00 0A 03  1620 STA PYL0
D817- A9 00      1630 LDA #400
D819- 00 08 03  1640 STA PYH0  RW = RW1 = 0
D81C- A9 00      1650 L31 LDA #400
D81E- 05 FA      1660 STA RNL
D820- 05 FB      1670 STA RWM
D822- 05 FC      1680 STA RWH
D824- 05 FD      1690 STA RWL1
D826- 05 FE      1700 STA RWH1
D828- 05 FF      1710 STA RWH1  PY1 = PY0
D82A- A0 0A 03  1720 LDA PYL0
D82D- 00 08 03  1730 STA PYL1
D830- A0 0B 03  1740 LDA PYH0
D833- 00 09 03  1750 STA PYH1  PX2 = PX1 = PX0
D836- A0 0C 03  1760 LDA PXL0
D839- 00 0D 03  1770 STA PXL1
D83C- 00 16 03  1780 STA PXL2
D83F- A0 0E 03  1790 LDA PIX0
D842- 00 03 03  1800 STA PIX1
D845- 00 17 03  1810 STA PIX2
D848- 20 6A DC  1820 JSR PADD
D84B- A5 06      1830 LDA PAL  PA1 = PA
D84D- 05 08      1840 STA PAL1
D84F- A5 07      1850 LDA PAH
D851- 05 09      1860 STA PAH1
D853- A0 00      1870 LDY #400  Y = 0
          1880 *
          1890 *      STEP 1
          1900 *
D855- B1 08      1910 L35 LDA (PAL1),Y
D857- C9 00      1920 CMP #000  MEMORY(1 BYTE) OF (X,Y) = 0 ?
D859- D0 38      1930 BNE L1    IF NOT THEN L1
D85B- C0 00      1940 CPY #000
D85D- D0 1F      1950 BNE L2    IF Y<0 THEN L2
D85F- A9 00      1960 LDA #000  PAW1 = PAW0 - 0
D861- 38         1970 SEC
D862- ED 0E 03  1980 SBC PAW0

```

D865-	8D	0F	03	1990	STI PAW1	
D868-	AD	0A	03	2000	LDA PYL0	PY0 = PY0 + PAW0
D86B-	10			2010	CLC	
D86C-	6D	0F	03	2020	ADC PAW1	
D86F-	8D	0A	03	2030	STI PYL0	
D872-	AD	0B	03	2040	LDA PYH0	
D875-	69	00		2050	ADC #000	
D877-	8D	0B	03	2060	STI PYH0	
D87A-	C8			2070	INY	Y = Y + 1
D878-	4C	57	DC	2080	JMP PATCH	-----> PATCH
D87E-	AD	0A	03	2090	LDA PYL0	PY0 = PY0 + 8
D881-	18			2100	CLC	
D882-	69	00		2110	ADC #000	
D884-	8D	0A	03	2120	STI PYL0	
D887-	AD	0B	03	2130	LDA PYH0	
D88A-	69	00		2140	ADC #000	
D88C-	8D	0B	03	2150	STI PYH0	
D88F-	C8			2160	INY	Y = Y + 1
D890-	4C	57	DC	2170	JMP PATCH	-----> PATCH
				2180 *		
				2190 *	STEP 2	
				2200 *		
D893-	20	D3	DC	2210	JSR SADD	
D896-	AD	1C	03	2220	LDA P0	A = POINT DATA
D899-	AE	0E	03	2230	LDX PAW0	
D89C-	E0	00		2240	CPI #000	
D89E-	F0	04		2250	BEQ L3	IF PAW0 = 0 THEN L3
D8A0-	0A			2260	ASL	A = A * 2
D8A1-	CA			2270	DEX	
D8A2-	D0	FC		2280	BNE L4	LOOP L4 (NUMBER OF PAW0)
D8A4-	0A			2290	ASL	A = A * 2
D8A5-	80	00		2300	BCS L5	IF A>255 THEN L5
D8A7-	EE	0A	03	2310	INC PYL0	PY0 = PY0 + 1
D8AA-	D0	03		2320	BNE L6	
D8AC-	EE	0B	03	2330	INC PYH0	
D8AF-	4C	5B	DA	2340	JMP L7	-----> L7
D8B2-	20	85	DA	2350	JSR WSETH	
D8B5-	20	5A	DB	2360	JSR ADLINE	
D8B8-	20	09	DC	2370	JSR ADSQR	
D8BB-	90	0B		2380	BCC L8	
D8BD-	EE	0C	03	2390	INC PYL0	PX0 = PX0 + 1
D8C0-	D0	03		2400	BNE L9	
D8C2-	EE	0D	03	2410	INC PXH0	
D8C5-	4C	B2	D8	2420	JMP L5	-----> L5
D8C8-	20	2E	DC	2430	JSR WCMP	
D8CB-	EE	0A	03	2440	INC PYL0	PY0 = PY0 + 1
D8CE-	D0	03		2450	BNE L10	
D8D0-	EE	0B	03	2460	INC PYH0	PX0 = PX2
D8D3-	AD	16	03	2470	LDA PXL2	
D8D6-	8D	0C	03	2480	STA PXL0	
D8D9-	AD	17	03	2490	LDA PXH2	
D8DC-	8D	0D	03	2500	STA PXH0	
D8DF-	20	85	DA	2510	JSR WSETH	
D8E2-	20	5A	DB	2520	JSR ADLINE	
D8E5-	20	09	DC	2530	JSR ADSQR	
D8E9-	90	0B		2540	BCC L11	
D8EA-	EE	0C	03	2550	INC PXL0	PX0 = PX0 + 1
D8ED-	D0	03		2560	BNE L12	
D8EF-	EE	0D	03	2570	INC PXH0	
D8F2-	4C	DF	D8	2580	JMP L13	-----> L13
D8F5-	20	2E	DC	2590	JSR WCMP	
D8F8-	90	43		2600	BCC L14	
D8FA-	EE	0A	03	2610	INC PYL0	PY0 = PY0 + 1
D8FD-	D0	03		2620	BNE L15	
D8FF-	EE	0B	03	2630	INC PYH0	
D902-	AD	16	03	2640	LDA PXL2	
D905-	8D	0C	03	2650	STA PXL0	
D908-	AD	17	03	2660	LDA PXH2	
D90B-	8D	0D	03	2670	STA PXH0	
D90E-	20	85	DA	2680	JSR WSETH	
D911-	20	5A	DB	2690	JSR ADLINE	
D914-	20	09	DC	2700	JSR ADSQR	
D917-	90	0B		2710	BCC L16	
D919-	EE	0C	03	2720	INC PXL0	PX0 = PX0 + 1
D91C-	D0	03		2730	BNE L17	
D91E-	EE	0D	03	2740	INC PXH0	
D921-	4C	0E	D9	2750	JMP L18	-----> L18
D924-	20	2E	DC	2760	JSR WCMP	
D927-	80	D1		2770	BCS L19	
D929-	AD	0A	03	2780	LDA PYL0	PY2 = PY0 - 1

D92C-	38	2790	SEC	
D92D-	E9 01	2800	SBC #01	
D92F-	8D 14 03	2810	STA PYL2	
D932-	AD 08 03	2820	LDA PYH0	
D935-	E9 00	2830	SBC #00	
D937-	8D 15 03	2840	STA PYH2	
D93A-	4C 06 09	2850	JMP L20	-----> L20
D93D-	AD 0A 03	2860 L14	LDA PYL0	
D940-	38	2870	SEC	
D941-	E9 01	2880	SBC #01	
D943-	8D 0A 03	2890	STA PYL0	
D946-	AD 08 03	2900	LDA PYH0	
D949-	E9 00	2910	SBC #00	
D94B-	8D 08 03	2920	STA PYH0	
D94E-	AD 16 03	2930	LDA PXL2	PX0 = PX2
D951-	8D 0C 03	2940	STA PXL0	
D954-	AD 17 03	2950	LDA PXH2	
D957-	8D 0D 03	2960	STA PXH0	
D95A-	20 05 DA	2970 L23	JSR WSETH	
D95D-	20 5A DB	2980	JSR ADLINE	
D960-	20 09 DC	2990	JSR ADSOR	
D963-	90 00	3000	BCC L21	
D965-	EE 0C 03	3010	INC PXL0	PX = PX + 1
D968-	D0 03	3020	BNE L22	
D96A-	EE 0D 03	3030	INC PXH0	
D96D-	4C 5A D9	3040 L22	JMP L23	-----> L23
D970-	20 2E DC	3050 L21	JSR WCMP	
D973-	8D C8	3060	BCS L14	
D975-	AD 0A 03	3070	LDA PYL0	PY2 = PY0 + 1
D978-	18	3080	CLC	
D979-	69 01	3090	ADC #01	
D97B-	8D 14 03	3100	STA PYL2	
D97E-	AD 08 03	3110	LDA PYH0	
D981-	69 00	3120	ADC #00	
D983-	8D 15 03	3130	STA PYH2	
D986-	AD 16 03	3140 L20	LDA PXL2	PX0 = PX2
D989-	8D 0C 03	3150	STA PXL0	
D98C-	AD 17 03	3160	LDA PXH2	
D98F-	8D 0D 03	3170	STA PXH0	
D992-	AD 14 03	3180	LDA PYL2	PY0 = PY2
D995-	8D 0A 03	3190	STA PYL0	
D998-	AD 15 03	3200	LDA PYH2	
D99B-	8D 0B 03	3210	STA PYH0	
		3220 *		
		3230 *	STEP 3	
		3240 *		
D99E-	A9 00	3250	LDA #00	
D9A0-	85 FA	3260	STA RWL	RW = 0
D9A2-	85 FB	3270	STA RWM	
D9A4-	85 FC	3280	STA RWH	
D9A6-	85 FD	3290	STA RWL1	RW1 = 0
D9A8-	85 FE	3300	STA RWM1	
D9AA-	85 FF	3310	STA RWH1	
D9AC-	20 F1 DA	3320 L26	JSR WSETV	
D9AF-	20 5A DB	3330	JSR ADLINE	
D9B2-	20 09 DC	3340	JSR ADSOR	
D9B5-	90 00	3350	BCC L24	
D9B7-	EE 0A 03	3360	INC PYL0	PY0 = PY0 + 1
D9BA-	D0 03	3370	BNE L25	
D9BC-	EE 0B 03	3380	INC PYH0	
D9BF-	4C AC D9	3390 L25	JMP L26	-----> L26
D9C2-	AD 14 03	3400 L24	LDA PYL2	PY0 = RY2 - 1
D9C5-	38	3410	SEC	
D9C6-	E9 01	3420	SBC #01	
D9C8-	8D 0A 03	3430	STA PYL0	
D9CB-	AD 15 03	3440	LDA PYH2	
D9CE-	E9 00	3450	SBC #00	
D9D0-	8D 0B 03	3460	STA PYH0	
D9D3-	20 F1 DA	3470 L28	JSR WSETV	
D9D6-	20 5A DB	3480	JSR ADLINE	
D9D9-	20 09 DC	3490	JSR ADSOR	
D9DC-	90 14	3500	BCC L27	
D9DE-	AD 0A 03	3510	LDA PYL0	PY0 = PY0 - 1
D9E1-	38	3520	SEC	
D9E2-	E9 01	3530	SBC #01	
D9E4-	8D 0A 03	3540	STA PYL0	
D9E7-	AD 0B 03	3550	LDA PYH0	
D9EA-	E9 00	3560	SBC #00	
D9EC-	8D 0B 03	3570	STA PYH0	
D9EF-	4C D3 D9	3580	JMP L28	-----> L28

D9F2-	20	2E	DC	3590	L27	JSR	WCMP		
D9F5-	90	17		3600		BCC	L29		
D9F7-	EE	0C	03	3610		INC	PXL0	PX0 = PX0 + 1	
D9FA-	D0	03		3620		BNE	L30		
D9FC-	EE	0D	03	3630		INC	PXH0		
D9FF-	AD	14	03	3640	L30	LDA	PYL2	PY0 = PY2	
DA02-	8D	0A	03	3650		STA	PYL0		
DA05-	AD	15	03	3660		LDA	PYH2		
DA08-	8D	08	03	3670		STA	PYH0		
DA0B-	4C	AC	D9	3680		JMP	L26		
DA0E-	AD	0C	03	3690	L29	LDA	PXL0	-----> L26 PX3 = PX0 - 1	
DA11-	38			3700		SEC			
DA12-	E9	01		3710		SBC	#001		
DA14-	8D	1A	03	3720		STA	PXL3		
DA17-	AD	0D	03	3730		LDA	PXH0		
DA1A-	E9	00		3740		SBC	#000		
DA1C-	8D	18	03	3750		STA	PXH3	PY3 = PY2	
DA1F-	AD	14	03	3760		LDA	PYL2		
DA22-	8D	18	03	3770		STA	PYL3		
DA25-	AD	15	03	3780		LDA	PYH2		
DA28-	8D	19	03	3790		STA	PYH3		
DA2B-	28	4A	D8	3800		JSR	RESET		
				3810	*				
				3820	*	STEP	4		
				3830	*				
DA2E-	20	88	D8	3840		JSR	MCLR		
DA31-	A5	1A		3850		LDA	WPL	WP = WP + 4	
DA33-	18			3860		CLC			
DA34-	69	04		3870		ADC	#004		
DA36-	85	1A		3880		STA	WPL		
DA38-	A5	18		3890		LDA	WPH		
DA3A-	69	00		3900		ADC	#000		
DA3C-	85	18		3910		STA	WPH	PY0 = PY2 + \$0D	
DA3E-	AD	14	03	3920		LDA	PYL2		
DA41-	18			3930		CLC			
DA42-	69	0D		3940		ABC	#00D		
DA44-	8D	0A	03	3950		STA	PYL0		
DA47-	AD	15	03	3960		LDA	PYH2		
DA4A-	69	00		3970		ADC	#000		
DA4C-	8D	08	03	3980		STA	PYH0	PX0 = PX2	
DA4F-	AD	16	03	3990		LDA	PXL2		
DA52-	8D	0C	03	4000		STA	PXL0		
DA55-	AD	17	03	4010		LDA	PXH2		
DA58-	8D	0D	03	4020		STA	PXH0		
DA5B-	A9	F3		4030	L7	LDA	#0F3		
DA5D-	38			4040		SEC			
DA5E-	ED	0A	03	4050		SBC	PYL0		
DA61-	A9	01		4060		LDA	#001		
DA63-	ED	08	03	4070		SBC	PYH0		
DA66-	98	03		4080		BCC	L36	IF PY0 > #01F3 THEN L36	
DA68-	4C	1C	D8	4090		JMP	L31		
DA6B-	EE	0C	03	4100	L36	INC	PXL0	PX0 = PX0 + 1	
DA6E-	D0	03		4110		BNE	L32		
DA70-	EE	0D	03	4120		INC	PXH0		
DA73-	A9	01		4130	L32	LDA	#001	IF PX0 < #014C THEN L34	
DA75-	CD	0D	03	4140		CMP	PXH0		
DA78-	D0	08		4150		BNE	L33		
DA7A-	A9	4C		4160		LDA	#04C		
DA7C-	CD	0C	03	4170		CMP	PXL0		
DA7F-	D0	01		4180		BNE	L33		
DA81-	68			4190		RTS			
DA82-	4C	12	D8	4200	L33	JMP	L34		
				4210	*				
				4220	*	WEIGHTING	FOR HORIZONTAL LINE		
				4230	*				
DA85-	AD	0A	03	4240	WSETH	LDA	PYL0	PY1 = PY0 - \$0B	
DA88-	38			4250		SEC			
DA89-	E9	08		4260		SBC	#00B		
DA8B-	8D	08	03	4270		STA	PYL1		
DA8E-	AD	08	03	4280		LDA	PYH0		
DA91-	E9	08		4290		SBC	#008		
DA93-	8D	09	03	4300		STA	PYH1	PX1 = PX0	
DA96-	AD	0C	03	4310		LDA	PXL0		
DA99-	8D	02	03	4320		STA	PXL1		
DA9C-	AD	0D	03	4330		LDA	PXH0		
DA9F-	8D	03	03	4340		STA	PXH1		
DAA2-	28	6A	DC	4350		JSR	PADD		
DAA5-	A9	08		4360		LDA	#008	PAN1 = \$08 - PAN0	
DAA7-	38			4370		SEC			
DAAB-	ED	0E	03	4380		SBC	PAN0		


```

5190 *
5200 * STORE THE COORDINATE OF THE WEIGHT POINT
5210 *
DB4A- A0 00 5220 RESET LDY #000 Y = 0
DB4C- B9 18 03 5230 D1 LDA PYL3,Y
DB4F- 91 1A 5240 STA (MPL),Y
DB51- 99 1C 00 5250 STA PYL4,Y
DB54- C8 5260 INY Y = Y + 1
DB55- C8 04 5270 CPY #004
DB57- D0 F3 5280 BNE D1 IF Y<>4 THEN D1
DB59- 60 5290 RTS
5300 *
5310 * VERTICAL SCAN FOR HORIZONTAL WEIGHTING
5320 *
DB5A- A9 00 5330 A0LINE LDA #000 REW = 0
DB5C- 85 EE 5340 STA REWL
DB5E- 85 EF 5350 STA REWH
DB60- A2 00 5360 LDX #000 X = 0
DB62- A0 00 5370 LDY #000 Y = 0
DB64- A9 08 5380 P3 LDA #008
DB66- 85 19 5390 STA LOOP0 LOOP0 = 8
DB68- 85 E8 5400 LDA PAL2,X
DB6A- 0A 5410 P2 ASL
DB6B- 90 10 5420 BCC P1 IF MSB OF DATA = 0 THEN P1
DB6D- 48 5430 PHA
DB6E- 89 E8 3F 5440 LDA WEIGHT,Y WEIGHTINTING!
DB71- 18 5450 CLC
DB72- 85 EE 5460 ADC REWL
DB74- 85 EE 5470 STA REWL
DB76- A9 00 5480 LDA #000
DB78- 65 EF 5490 ADC REWH
DB7A- 85 EF 5500 STA REWH
DB7C- 68 5510 PLA
DB7D- C8 5520 P1 INY Y = Y + 1
DB7E- C6 19 5530 DEC LOOP0 LOOP0 - 1
DB80- D0 E8 5540 BNE P2 IF LOOP0<>0 THEN P2
DB82- E8 5550 INX X = X + 1
DB83- E0 03 5560 CPX #003
DB85- D0 DD 5570 BNE P3 IF X<>3 THEN P3
DB87- 60 5580 RTS
5590 *
5600 * CLEAR AROUND THE WEIGHT POINT
5610 *
DB88- A5 1C 5620 MCLR LDA PYL4 PY1 = PY4 - $0B
DB8A- 38 5630 SEC
DB8B- E9 08 5640 SBC #008
DB8D- BD 08 03 5650 STA PYL1
DB8E- A5 1D 5660 LDA PYH4
DB92- E9 00 5670 SBC #008
DB94- BD 09 03 5680 STA PYH1
DB97- A5 1E 5690 LDA PXL4 PX1 = PX4 - $0B
DB99- 38 5700 SEC
DB9A- E9 08 5710 SBC #008
DB9C- BD 02 03 5720 STA PXL1
DB9F- A5 1F 5730 LDA PXH4
DBA1- E9 00 5740 SBC #008
DBA3- BD 03 03 5750 STA PXH1
DBA6- 28 6A DC 5760 JSR PADD
DBA9- A9 08 5770 LDA #008 PAW1 = 8 - PAW0
DBAB- 38 5780 SEC
DBAC- ED 0E 03 5790 SBC PAW0
DBAF- BD 0F 03 5800 STA PAW1
DBB2- A9 18 5810 LDA #18
DBB4- 85 F9 5820 STA LOOP1 LOOP1 = #18
DBB6- A9 FF 5830 LDA #FF
DBBB- AE 0F 03 5840 LDY PAW1
DBBB- 0A 5850 Q1 ASL
DBBC- CA 5860 DEX
DBBD- D0 FC 5870 BNE Q1 LOOP PAW1 TIMES
DBBF- BD 10 03 5880 STA W8
DBC2- A9 00 5890 LDA #000 W1 = W3 = 0
DBC4- BD 11 03 5900 STA W1
DBC7- BD 12 03 5910 STA W3
DBCA- A9 FF 5920 LDA #FF
DBCC- AE 0E 03 5930 LDY PAW0
DBCF- E8 00 5940 CPY #008
DBD1- F8 04 5950 BEQ Q2
DBD3- 4A 5960 Q3 LSR
DBD4- CA 5970 DEX
DBD5- D0 FC 5980 BNE Q3 LOOP PAW0 TIMES

```

DBD7- BD 13 03 5990 Q2	STA W4	
DBDA- A9 10 6000	LDA #S10	REW = \$310
DBDC- 05 EE 6010	STA REWL	
DBDE- A9 03 6020	LDA #S03	
DBE0- 05 EF 6030	STA REWH	
DBE2- A5 06 6040 Q5	LDA PAL	PA2 = PA
DBE4- 05 EB 6050	STA PAL2	
DBE6- A5 07 6060	LDA PAH	
DBE8- 05 EC 6070	STA PAH2	
DBEA- A0 00 6080	LDY #S00	Y = 0
DBEC- B1 EB 6090 Q4	LDA (PAL2),Y	
DBEE- 31 EE 6100	AND (REWL),Y	
DBF0- 91 EB 6110	STA (PAL2),Y	
DBF2- C0 6120	INY	Y = Y + 1
DBF3- C0 04 6130	CPY #S04	
DBF5- D0 F5 6140	BNE Q4	IF Y(<)4 THEN Q4
DBF7- A5 06 6150	LDA PAL	PA = PA + \$40
DBF9- 10 6160	CLC	
DBFA- 69 40 6170	ADC #S40	
DBFC- 05 06 6180	STA PAL	
DBFE- A5 07 6190	LDA PAH	
DC00- 69 00 6200	ADC #S00	
DC02- 05 07 6210	STA PAH	
DC04- C6 F9 6220	DEC LOOP1	LOOP1 - 1
DC06- D0 DA 6230	BNE Q5	IF LOOP1(<) THEN Q5
DC08- 60 6240	RTS	
6250 *		
6260 *	ADDITION THE RESULT OF WEIGHTING	
6270 *		
DC09- A5 EF 6280 ADSQR	LDA REWH	IF REW(<)0 THEN R1
DC0B- C9 00 6290	CMP #S00	
DC0D- D0 0A 6300	BNE R1	
DC0F- A5 EE 6310	LDA REWL	
DC11- C9 00 6320	CMP #S00	
DC13- D0 04 6330	BNE R1	
DC15- 10 6340	CLC	IF REW=0 THEN C=0 & RETURN
DC16- 4C 2D DC 6350	JMP R2	
DC19- A5 FD 6360 R1	LDA RWL1	RW1 = RW1 + REW
DC1B- 10 6370	CLC	
DC1C- 65 EE 6380	ADC REWL	
DC1E- 05 FD 6390	STA RWL1	
DC20- A5 FE 6400	LDA RWM1	
DC22- 65 EF 6410	ADC REWH	
DC24- 05 FE 6420	STA RWM1	
DC26- A5 FF 6430	LDA RWH1	
DC28- 69 00 6440	ADC #S00	
DC2A- 05 FF 6450	STA RWH1	C = 1 & RETURN
DC2C- 30 6460	SEC	
DC2D- 60 6470 R2	RTS	
6480 *		
6490 *	COMPARE THE RESULT OF WEIGHTING	
6500 *		
DC2E- A5 FD 6510 WCMP	LDA RWL1	IF RW1>RW THEN S1
DC30- 30 6520	SEC	
DC31- E5 FA 6530	SBC RWL	
DC33- A5 FE 6540	LDA RWM1	
DC35- E5 FB 6550	SBC RWM	
DC37- A5 FF 6560	LDA RWH1	
DC39- E5 FC 6570	SBC RWH	
DC3B- 00 04 6580	BCS S1	
DC3D- 10 6590	CLC	IF RW1<=RW THEN C=0 & GOTO S2
DC3E- 4C 4E DC 6600	JMP S2	
DC41- A5 FF 6610 S1	LDA RWH1	RW = RW1
DC43- 05 FC 6620	STA RWH	
DC45- A5 FE 6630	LDA RWH1	
DC47- 05 FB 6640	STA RWH	
DC49- A5 FD 6650	LDA RWL1	
DC4B- 05 FA 6660	STA RWL	
DC4D- 30 6670	SEC	C = 1
DC4E- A9 00 6680 S2	LDA #S00	RW1 = 0
DC50- 05 FD 6690	STA RWL1	
DC52- 05 FE 6700	STA RWH1	
DC54- 05 FF 6710	STA RWH1	
DC56- 60 6720	RTS	
6730 *		
6740 *	CHECK X-POINTER	
6750 *		
DC57- A9 F3 6760 PATCH	LDA #SF3	IF PY0#01F3 THEN L36
DC59- 30 6770	SEC	
DC5A- ED 0A 03 6780	SBC PYL0	

```

DC5D- A9 01 6790 LDA #001
DC5F- ED 0B 03 6800 SBC PYH0
DC62- 90 03 6810 BCC L37
DC64- 4C 55 0B 6820 JMP L35
DC67- 4C 6B DA 6830 JMP L36
      6840 *
      6850 *
      6860 *
      6870 *
      6880 *
DC6A- A9 00 6870 PADD LDA #000
DC6C- 8D 0E 03 6880 STA PAW0
DC6F- 4E 09 03 6890 LSR PYH1
DC72- 6E 08 03 6900 ROR PYL1
DC75- 6E 0E 03 6910 ROR PAW0
DC78- 4E 08 03 6920 LSR PYL1
DC7E- 4E 08 03 6930 ROR PAW0
DC81- 6E 0E 03 6940 LSR PYL1
DC84- A2 05 6950 ROR PAW0
DC86- 4E 0E 03 6960 LDX #005
DC89- CA 6970 T1 LSR PAW0
DC8A- D8 FA 6980 DEX
DC8C- AD 08 03 7000 BNE T1
DC8F- 85 06 7010 LDA PYL1
DC91- A9 40 7020 STA PAL
DC93- 85 07 7030 LDA #040
DC95- AD 03 03 7040 STA PAH
DC98- C9 01 7050 LDA PXH1
DC9A- F0 0A 7060 CMP #001
DC9C- AD 02 03 7070 LDA PXL1
DC9F- C9 00 7080 CMP #000
DCA1- F0 2F 7090 BEQ T3
DCA3- 4C BF DC 7100 JMP T4
DCA6- A2 00 7110 T2 LDX #000
DCA8- A5 06 7120 T5 LDA PAL
DCAA- 18 7130 CLC
DCAB- 69 40 7140 ADC #040
DCAD- 85 06 7150 STA PAL
DCAF- A5 07 7160 LDA PAH
DCB1- 69 00 7170 ADC #000
DCB3- 85 07 7180 STA PAH
DCB5- EB 7190 INX
DCB6- D0 F8 7200 BNE T5
DCB8- AD 02 03 7210 LDA PXL1
DCB8- C9 00 7220 CMP #000
DCBD- F0 13 7230 BEQ T3
DCBF- AE 02 03 7240 T4 LDX PXL1
DCC2- A5 06 7250 T6 LDA PAL
DCC4- 18 7260 CLC
DCC5- 69 40 7270 ADC #040
DCC7- 85 06 7280 STA PAL
DCC9- A5 07 7290 LDA PAH
DCCB- 69 00 7300 ADC #000
DCCD- 85 07 7310 STA PAH
DCCF- CA 7320 DEX
DCD0- D0 F0 7330 BNE T6
DCD2- 60 7340 T3 RTS
      7350 *
      7360 *
      7370 *
DCD3- A0 00 7380 SADD LDY #000
DCD5- 81 06 7390 LDA (PAL),Y
DCD7- 8D 1C 03 7400 STA PD
DCDA- 60 7410 RTS
      PD = DATA ( PA )

CALCULATE THE ADDRESS OF X,Y-POINTER
PAW0 = 0
PYH1,PYL1,PAW0 = PY/2
PYL1,PAW0/4
X = 5
PAW0 / 2
X - 1
IF X<0 THEN T1
PA = $4000 + PAL1
IF PXH = 001 THEN T2
IF PXL1 = 0 THEN RETURN
----- T4
X = 0
PA = PA + $40
X = X + 1
IF X<0 THEN T5
IF PXL1 = 0 THEN RETURN
X = PXL1
PA = PA + $40
X = X - 1
IF X<0 THEN T6
LOAD DATA FROM THE ADDRESS OF X,Y-POINTER

```

SYMBOL TABLE

DB5A- ADLINE	DBFA- L19	D9FF- L30	DBC5- L9
DC09- ADSGR	DB7E- L2	DB1C- L31	DB19- LOOP0
DB00- BALAN	D986- L20	DA73- L32	DBF9- LOOP1
DB93- L1	D970- L21	DA82- L33	DAC7- M1
DB03- L10	D96D- L22	DB12- L34	DAC3- M2
DBF5- L11	D95A- L23	D855- L35	DACC- M3
DBF2- L12	D9C2- L24	DA6B- L36	DADB- M4
DBDF- L13	D9BF- L25	DC67- L37	DAEB- M5
D93D- L14	D9AC- L26	DBA0- L4	DAE5- M6
D982- L15	D9F2- L27	DBB2- L5	DAC9- M7
D924- L16	D9D3- L28	DBAF- L6	DBB8- MCLR
D921- L17	DABE- L29	DA5B- L7	DB30- M1
D98E- L18	DBA4- L3	DBCB- L8	DB2C- M2
			DB1F- M3
			DB1B- M4
			DB4C- D1
			DB7D- P1
			DB6A- P2
			DB64- P3
			DC6A- PADD
			DB07- PAH
			DB07- PAH1
			DBEC- PAH2
			DB06- PAL
			DB00- PAL1
			DBEB- PAL2
			DC57- PAICH
			DB3E- PAW0
			DB3F- PAW1
			DB1C- PD
			DB0D- PIX0
			DB03- PXH1
			DB17- PXH2
			DB10- PXH3
			DB1F- PIX4
			DB0C- PXL0
			DB02- PXL1
			DB16- PXL2
			DB1A- PXL3
			DB1E- PXL4
			DB0B- PYH0
			DB09- PYH1
			DB15- PYH2
			DB19- PYH3
			DB1D- PYH4
			DB0A- PYL0
			DB08- PYL1
			DB14- PYL2
			DB18- PYL3
			DB1C- PYL4
			DBB8- Q1
			DBD7- Q2
			DBD3- Q3
			DBEC- Q4
			DBE2- Q5
			DC19- R1
			DC2D- R2
			DB4A- RESET
			DBEF- REWH
			DBEE- REWL
			DBFC- RWH
			DBFF- RWH1
			DBFA- RWL
			DBFD- RWL1
			DBFB- RWM
			DBFE- RWM1
			DC41- S1
			DC4E- S2
			DCD3- SADD
			DCB6- T1
			DCA6- T2
			DCD2- T3
			DCBF- T4
			DCAB- T5
			DCC2- T6
			DB10- W0
			DB11- W1
			DB12- W3
			DB13- W4
			DC2E- WCOMP
			3FE0- WEIGHT
			DB1B- WPH
			DB1A- WPL
			DBB5- WSETH
			DAF1- WSETV
			DBED- WK

付録5 リンク再構築のプログラム

```

1000 DIM PO(29,0,1),NX(29,1),NY(29,1)
1005 :
1010 REM .....INPUT THE IMAGE OF THE FILM (NO.1 - NO.29)
1015 :
1020 FOR I = 0 TO 29
1025 GOSUB 3030
1030 :
1035 REM .....INPUT THE FILM COORDINATE OF THE MARK (NO.1 - NO.8)
1040 :
1045 FOR J = 0 TO 8: FOR K = 0 TO 1
1050 PO(I,J,K) = PEEK (16256 + 4 * J + 2 * K) + 256 * PEEK (16257 + 4 * J + 2 * K)
1055 NEXT K,J,I
1060 :
1065 REM .....GROUP THE MARK BY FIXED POINT OR CONSTANT DISTANCE
1070 :
1075 FOR I = 0 TO 28: FOR J = 0 TO 8
1080 X1 = PO(I,J,0):Y1 = PO(I,J,1)
1085 X2 = PO(I + 1,0,0):Y2 = PO(I + 1,0,1)
1090 GOSUB 4030:D0 = DT:K0(J) = 0
1095 FOR K = 1 TO 8
1100 X1 = PO(I,J,0):Y1 = PO(I,J,1)
1105 X2 = PO(I + 1,K,0):Y2 = PO(I + 1,K,1)
1110 GOSUB 4030
1115 IF DT > D0 GOTO 1125
1120 D0 = DT:K0(J) = K
1125 NEXT K,J
1130 FOR J = 0 TO 8: FOR K = 0 TO 1
1135 J0(J,K) = PO(I + 1,K0(J),K)
1140 NEXT K,J
1145 FOR J = 0 TO 8: FOR K = 0 TO 1
1150 PO(I + 1,J,K) = J0(J,K)
1155 NEXT K,J
1160 NEXT I
1165 FOR J = 0 TO 8:J1(J) = 0: NEXT J
1170 FOR J = 0 TO 8: FOR I = 0 TO 28
1175 X1 = PO(I,J,0):Y1 = PO(I,J,1)
1180 X2 = PO(I + 1,J,0):Y2 = PO(I + 1,J,1)
1185 GOSUB 4030:J1(J) = J1(J) + DT
1190 NEXT I,J
1195 :
1200 REM .....SEARCH THE FIXED MARK WHICH COORDINATE IS CONSTANT
1205 :
1210 FOR I = 0 TO 2
1215 D1 = 1000:K = 0
1220 FOR J = 0 TO 8
1225 IF J1(J) > D1 GOTO 1235
1230 D1 = J1(J):K = J
1235 NEXT J
1240 FL(1) = K:J1(K) = 1000
1245 NEXT I
1250 :
1255 REM .....SEARCH THE SET OF MASK WHICH DISTANCE IS CONSTANT
1260 :
1265 FOR I = 0 TO 7
1270 IF I = FL(0) GOTO 1330
1275 IF I = FL(1) GOTO 1330
1280 IF I = FL(2) GOTO 1330
1285 FOR J = 1 TO 8
1290 IF J = FL(0) GOTO 1325
1295 IF J = FL(1) GOTO 1325
1300 IF J = FL(2) GOTO 1325
1305 IF I > J GOTO 1325
1310 X1 = PO(0,I,0):Y1 = PO(0,I,1)
1315 X2 = PO(0,J,0):Y2 = PO(0,J,1)
1320 GOSUB 4030:D1(I,J) = DT:DS(1,I,J) = 0
1325 NEXT J
1330 NEXT I
1335 :
1340 REM .....DECIDE THE SET OF MASK
1345 :
1350 FOR K = 1 TO 29
1355 FOR I = 0 TO 7
1360 IF I = FL(0) GOTO 1420
1365 IF I = FL(1) GOTO 1420
1370 IF I = FL(2) GOTO 1420
1375 FOR J = 1 TO 8
1380 IF J = FL(0) GOTO 1415
1385 IF J = FL(1) GOTO 1415

```

```

1390 IF J = FL(2) GOTO 1415
1395 IF I > = J GOTO 1415
1400 X1 = PO(K,I,0):Y1 = PO(K,I,1)
1405 X2 = PO(K,J,0):Y2 = PO(K,J,1)
1410 GOSUB 4030:DS(I,J) = DS(I,J) + ABS(DT - D1(I,J))
1415 NEXT J
1420 NEXT I
1425 NEXT K
1430 FOR K = 0 TO 2
1435 D2 = 1000:II = 0:JJ = 0
1440 FOR I = 0 TO 7
1445 IF I = FL(0) GOTO 1500
1450 IF I = FL(1) GOTO 1500
1455 IF I = FL(2) GOTO 1500
1460 FOR J = 1 TO 8
1465 IF J = FL(0) GOTO 1495
1470 IF J = FL(1) GOTO 1495
1475 IF J = FL(2) GOTO 1495
1480 IF I > = J GOTO 1495
1485 IF DS(I,J) > D2 GOTO 1495
1490 D2 = DS(I,J):II = I:JJ = J
1495 NEXT J
1500 NEXT I
1505 LK(K,0) = II:LK(K,1) = JJ
1510 DS(II,JJ) = 1000
1515 FOR L = 0 TO 7: FOR M = 1 TO 8
1520 IF L = II THEN DS(L,M) = 1000
1525 IF L = JJ THEN DS(L,M) = 1000
1530 IF M = II THEN DS(L,M) = 1000
1535 IF M = JJ THEN DS(L,M) = 1000
1540 NEXT M,L
1545 NEXT K
1550 :
1555 REM .....FORMALISE THE COORDINATE OF MARK
1560 :
1565 FOR K = 0 TO 20
1570 A0 = PO(K,FL(0),0):A1 = PO(K,FL(0),1)
1575 A2 = PO(K + 1,FL(0),0):A3 = PO(K + 1,FL(0),1)
1580 B0 = PO(K,FL(2),0):B1 = PO(K,FL(2),1)
1585 B2 = PO(K + 1,FL(2),0):B3 = PO(K + 1,FL(2),1)
1590 GOSUB 5030
1595 FOR J = 0 TO 8
1600 IF J = FL(0) GOTO 1625
1605 IF J = FL(2) GOTO 1625
1610 TR(J,0) = PO(K + 1,J,0):TR(J,1) = PO(K + 1,J,1)
1615 GOSUB 6030
1620 PO(K + 1,J,0) = TR(J,0):PO(K + 1,J,1) = TR(J,1)
1625 NEXT J
1630 PO(K + 1,FL(0),0) = PO(K,FL(0),0)
1635 PO(K + 1,FL(0),1) = PO(K,FL(0),1)
1640 PO(K + 1,FL(2),0) = PO(K,FL(2),0)
1645 PO(K + 1,FL(2),1) = PO(K,FL(2),1)
1650 NEXT K
1655 :
1660 REM .....DECIDE THE INSTANTANEOUS CENTER
1665 :
1670 UN = 16
1675 FOR I = 0 TO 2
1680 K = 0:D2 = 0:PN(I,0) = 0
1685 FOR J = 1 TO 3
1690 X1 = PO(K,LK(I,0),0):Y1 = PO(K,LK(I,0),1)
1695 X2 = PO(K + 1,LK(I,0),0):Y2 = PO(K + 1,LK(I,0),1)
1700 GOSUB 4030:D2 = D2 + D1
1705 IF D2 > J + UN GOTO 1715
1710 K = K + 1: GOTO 1690
1715 PN(I,J) = K + 1:K = K + 1
1720 NEXT J,I
1725 FOR I = 0 TO 2
1730 GX(I) = 0:GY(I) = 0
1735 FOR J = 0 TO 2
1740 C0 = PO(PN(I,J),LK(I,0),0):C1 = PO(PN(I,J),LK(I,0),1)
1745 D0 = PO(PN(I,J),LK(I,1),0):D1 = PO(PN(I,J),LK(I,1),1)
1750 A0 = PO(PN(I,J + 1),LK(I,0),0):A1 = PO(PN(I,J + 1),LK(I,0),1)
1755 B0 = PO(PN(I,J + 1),LK(I,1),0):B1 = PO(PN(I,J + 1),LK(I,1),1)
1760 GOSUB 7030
1765 XS(I,J) = XX:YS(I,J) = YY
1770 GX(I) = GX(I) + X1 / 3:GY(I) = GY(I) + Y1 / 3
1775 NEXT J,I
1780 FOR I = 0 TO 2:GK = 0
1785 FOR J = 0 TO 1

```

```

1790 X1 = XS(I,J):Y1 = YS(I,J)
1795 X2 = XS(I,J + 1):Y2 = YS(I,J + 1)
1800 GOSUB 4030:GK = GK + DT
1805 NEXT J
1810 SU(I) = GK
1815 NEXT I
1820 :
1825 REM .....DECIDE THE CONECTING LINK
1830 :
1835 GT = SU(I):W = 0
1840 FOR I = 1 TO 2
1845 IF GT > SU(I) GOTO 1855
1850 GT = SU(I):W = 1
1855 NEXT I
1860 K = 0
1865 :
1870 REM .....DECIDE THE POINT OF ROTATION
1875 :
1880 FOR I = 0 TO 2
1885 IF I = W GOTO 1895
1890 RX(K) = GX(I):RY(K) = GY(I):K = K + 1
1895 NEXT I
1900 :
1905 REM .....INVERSION
1910 :
1915 FOR N = 0 TO 9
1920 A0 = POIN(LK(W,0),0):A1 = POIN(LK(W,0),1)
1925 B0 = POIN(LK(W,1),0):B1 = POIN(LK(W,1),1)
1930 A2 = POIN + 10,LK(W,0),0):A3 = POIN + 10,LK(W,0),1)
1935 B2 = POIN + 10,LK(W,1),0):B3 = POIN + 10,LK(W,1),1)
1940 GOSUB 5030
1945 XT(0) = X:YT(0) = Y:CC(0) = CO:SS(0) = SI
1950 K = 0
1955 FOR J = 0 TO 2
1960 IF J = W GOTO 2010
1965 TR(J,0) = POIN + 10,LK(J,0),0):TR(J,1) = POIN + 10,LK(J,0),1)
1970 X = XT(0):Y = YT(0):CO = CC(0):SI = SS(0)
1975 GOSUB 6030
1980 POIN + 10,LK(J,0),0) = TR(J,0):POIN + 10,LK(J,0),1) = TR(J,1)
1985 TR(J,0) = POIN + 20,LK(J,0),0):TR(J,1) = POIN + 20,LK(J,0),1)
1990 X = XT(1):Y = YT(1):CO = CC(1):SI = SS(1)
1995 GOSUB 6030
2000 POIN + 20,LK(J,0),0) = TR(J,0):POIN + 20,LK(J,0),1) = TR(J,1)
2005 CR(K) = J:K = K + 1
2010 NEXT J
2015 FX = A0:FY = A1
2020 FOR I = 0 TO 1
2025 A0 = POIN,LK(CR(I),0),0):A1 = POIN,LK(CR(I),0),1)
2030 B0 = POIN + 10,LK(CR(I),0),0):B1 = POIN + 10,LK(CR(I),0),1)
2035 C0 = B0:C1 = B1
2040 D0 = POIN + 20,LK(CR(I),0),0):D1 = POIN + 20,LK(CR(I),0),1)
2045 GOSUB 7030
2050 NX(N,I) = XX:NY(N,I) = YY
2055 P = IX - FX:Q = YI - FY
2060 NX(N + 10,I) = CC(0) * P + SS(0) * Q + FX - XT(0):NY(N + 10,I) = CC(0) * Q - SS(0) * P +
FY - YT(0)
2065 NX(N + 20,I) = CC(1) * P + SS(1) * Q + FX - XT(1):NY(N + 20,I) = CC(1) * Q - SS(1) * P +
FY - YT(1)
2070 NEXT I
2075 NEXT N
2080 END
3000 :
3010 REM .....INPUT THE IMAGE & SERCH MARK & READ COODINATE OF MARK
3020 :
3030 CALL - 15799
3040 CALL - 13327
3050 POKE 774,88
3060 POKE 775,32
3070 POKE 49314,88
3080 CALL - 13055
3090 CALL - 13401
3100 CALL - 15679
3110 RETURN
4000 :
4010 REM .....CALCULATE THE DISTANCE OF MARKS
4020 :
4030 DT = SQR (X1 - X2) * (X1 - X2) + (Y1 - Y2) * (Y1 - Y2)
4040 RETURN

```

```

5000 :
5010 REM .....CALCULATE THE ANGLE
5020 :
5030 X = A0 - A2:Y = A1 - A3
5040 B2 = B2 + X:B3 = B3 + Y
5050 X1 = A0:Y1 = A1:X2 = B0:Y2 = B1
5060 GOSUB 4030:K1 = D1
5070 X1 = B2:Y1 = B3
5080 GOSUB 4030:K2 = D1
5090 CO = 1 - (K2 * K2) / (2 * K1 * K1)
5100 SI = SQR (1 - CO * CO)
5110 RETURN
6000 :
6010 REM .....TRANSLATE
6020 :
6030 TS(J,0) = TR(J,0) - A0 + X
6040 TS(J,1) = TR(J,1) - A1 + Y
6050 TR(J,0) = CO * TS(J,0) - SI * TS(J,1) + A0
6060 TR(J,1) = SI * TS(J,0) + CO * TS(J,1) + A1
6070 RETURN
7000 :
7010 REM .....CENTER OF ROTATION
7020 :
7030 P0 = (A0 + C0) / 2:Q0 = (A1 + C1) / 2
7040 P1 = (B0 + D0) / 2:Q1 = (B1 + D1) / 2
7050 A = (C0 - A0) / (A1 - C1):B = Q0 - A * P0
7060 C = (D0 - B0) / (B1 - D1):D = Q1 - C * P1
7070 XX = (D - B) / (A - C):YY = A * XX + B
7080 RETURN

```

謝

辞

本研究の遂行にあたり、終始かわらぬ御指導、御配慮を頂きました神戸大学川井良次教授、村田英人助教授に心から感謝の意を表します。本研究の達成にあたり、有益な御教示と懇篤な校閲を賜りました神戸大学、中川隆夫教授、岩壺卓三助教授に厚く感謝致します。また研究の過程で多大の御教示を賜りました神戸大学 岩田一明教授、森脇俊道助教授、荒井栄司助手（現、静岡大学）に深甚の謝意を表しますとともに、本論文の実験を遂行するにあたり深い御配慮のもとに有益な御教示を賜りました神戸大学教養部 美崎教正教授、野村治夫助教授、柳田泰義助手（現、神戸大学医療技術短期大学部）に厚く御礼申し上げます。

本論文の作成にあたり、多大な御協力を頂いた、内田満哉氏他、生産機械第二講座の皆様にご心より感謝致します。