

多方向から撮られた画像による大型対象物の

3次元形状の計測方法に関する研究

Study on Three-Dimensional Measurement
of Huge Object Using Multiple Images

1997年12月

長崎大学大学院
海洋生産科学研究科

藤本和貴

多方向から撮られた画像による大型対象物の 3次元形状の計測方法に関する研究

Study on Three-Dimensional Measurement of Huge Object Using Multiple Images

目次

	ページ
第1章 緒言	1
1.1 3次元情報とその計測手段について	1
1.2 3次元情報の利用について	5
1.3 本研究の目的	8
1.4 本論文の構成	11
第2章 対象物の幾何形状を考慮したカメラ校正方法とその3次元計測 および景観シミュレーションへの利用	13
2.1 はじめに	13
2.2 長方形形状に着目した校正手法	16
2.3 2つの画像からの3次元計測	21
2.4 測定実験	23
2.5 景観シミュレーションの実施例	28
2.6 考察と結論	33

第3章	輪郭形状解析による3次元計測とコンピュータグラフィクス	36
3.1	はじめに	36
3.2	複数画像解析による3次元形状の復元	39
3.3	輪郭形状解析による3次元形状の復元	41
3.4	測定実験	44
3.5	考察と結論	70
第4章	低高度リモートセンシングシステムのための複数画像の接続手法	72
4.1	デジタル画像の解像度と低高度リモートセンシングシステム	72
4.2	複数画像の接続	77
4.3	複数画像の接続手順	81
4.4	実験	82
4.5	考察と結論	88
第5章	連続ビデオ画像から QuickTime Virtual Reality データへの変換手法	90
5.1	はじめに	90
5.2	全周画像から QTVR の作成	93
5.3	QTVR のステレオ表示	97
5.4	実験	99
5.5	考察と結論	102
第6章	結言	103
	謝辞	115
	参考文献	117

第1章 緒言

1.1 3次元情報とその計測手段について

最近、デジタルカメラ等の画像入力装置の性能が向上し、安価に入手できるようになってきた。また、近年のコンピュータ技術の目覚ましい発達とあいまって、画像処理や画像合成技術が多方面で利用されるようになりつつある。測量の分野においても、画像処理や画像合成の技術を用いて、建物や河川などの大型の物体の形状計測やコンピュータシミュレーションの試みが行われている。特に3次元形状計測についての関心は高く、巨大な建造物や岩、像などの3次元形状を景観シミュレーションや安全性の評価、さらに遺跡等の保存に使いたいとの要望が強い。例えば、長崎県内においても平和祈念像やさばくさらかし岩などの3次元形状を計測し、景観シミュレーションや安全性の評価、さらに保存、保守に使いたいとの要望が強い。

画像を用いて3次元形状を求める手法として、光切断法やステレオ視等の手法が提案されているが、巨大な建造物や岩、像などの物体を対象とした場合には、外部参照光を使いづらい点や測定装置の設置位置が制約される点、さらに読み取りに時間を要する点等の問題を有し、従来からの測量装置を用いた測定が行われているのが現状である。このような問題を解決するための具体的な研究状況としては、例えば、ノンプリズム型のレーザセオドライトを用いる計測手法や、孫 暁らによる輪郭形状を用いる計測手法⁴⁸⁾が提案されているが、実現する上で、測定時間、精度、測定装置の取付の煩雑さ等に問題を有している。

3次元形状の情報を求めることは多くの工業分野で重要な意味を持っており¹⁾、これまで工業分野では種々の計測手法が用いられている。その手法を大別すると、対象物に接触することによって計測を行う接触式の手法と、対象物に機械的には接触しないで計測を行う非接触式の手法とに分けられる。

接触式の最も簡単な計測方法は、対象となる物体を直接に物差しで計ることであるが、その他にも、プローブで対象物の表面をなぞることによって、そのプローブ先端の位置により対象物表面の3次元形状を得ることができる3次元形状計測機等、多くの計測手法が存在する。このような接触式の3次元形状測定手法については、これまでに種々の研究が行われて

いる^{2)~4)}。

これに対し、非接触式の計測についても種々の研究がなされている^{5)~48)}。非接触式の計測手法は、建物、山、星、等の場合のように計測対象物が手が届かないほど遠くにあったり非常に大きい場合、あるいは、高温物体の場合のように危険であるために触れることができない場合、等のように対象物に直接接触して計測することができない場合に、対象物に非接触で3次元情報を計測する方法として開発されてきた。その計測に用いる手段として、画像、光（レーザ光、等）電波、磁気、音響、等を用いている。その代表的な手法を Fig.1.1 に分類した。

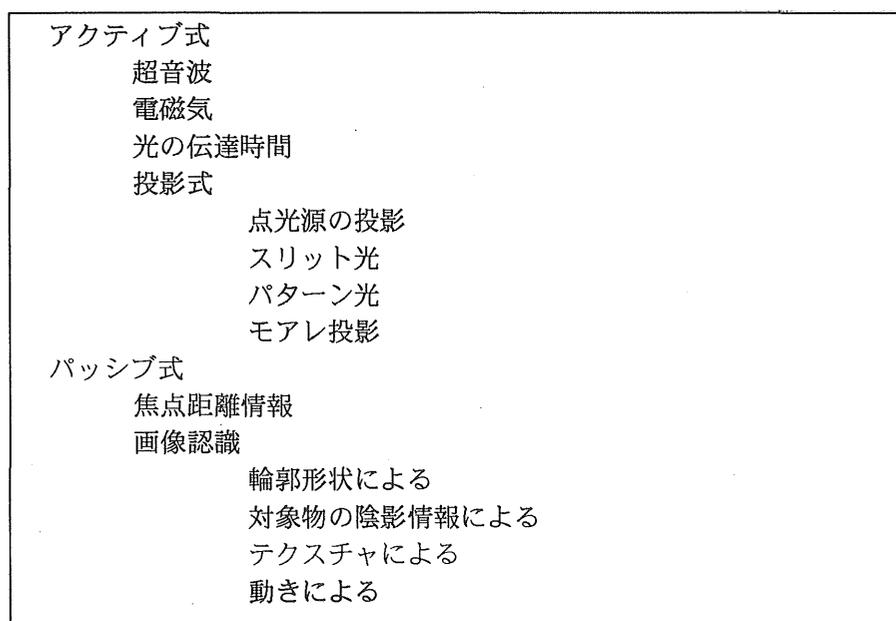


Fig.1.1 非接触式の3次元形状計測手法

非接触式の多くのものは光学的な手法、あるいは画像認識による手法である^{5)~8)}。計測手法はアクティブ式のものとはパッシブ式のものに2つに大別されるので、それぞれについて以下に分類する。

アクティブ式の計測とは、対象物に対して何らかの働きかけを行い、その結果、対象物に起こる変化を観測することによって3次元形状を計測するものである。代表的なものにレーザレーダセンサがある⁹⁾。その測距方式により、対象物へ超音波やレーザ光を放射した時の

反射に要する時間によって距離情報を取得する時間測定法、反射光や反射音の位相、周波数によって距離情報を取得する位相測定法、周波数測定法がある。また、投影式のものには、スポット光、スリット光、モアレ投影等の手法やその組み合わせによる手法¹⁰⁾がある。スポット光投影式では、対象物にレーザ光等のスポット光を投影し、その対象物上の投影位置をカメラにより計測する。スリット光投影式では対象物にスリット状のレーザ光を投影し、その対象物上への投影形状を計測する¹¹⁾。スリット光投影式はそのスリット光により対象物を切断するように見えることから光切断法^{12),13)}とも呼ばれている。

また、スリット光投影法では対象物全体の3次元形状を取り込むために、スリット光を対象物全面に渡って走査しなければならないという問題があったが、それを解決するために考えられたのが、パターン投影法である¹⁴⁾。ここでは、対象物上に特定のパターンを投影し、その画像を2つのカメラを用いて撮影して両眼立体視を行うことにより、対象物の3次元形状を計測する。また、モアレ投影法では対象物上へ光の干渉縞によるモアレ等高線を投影して3次元形状を計測する手法である¹⁵⁾。

このように対象物に対してなんらかの働きかけを行った結果、対象物上に起こる変化を観測するアクティブ式に対し、パッシブ式の計測では、対象物から発せられるもの（通常、対象物表面からの反射光）を用いて計測する。例えば、対象物をカメラで撮影する際のレンズの合焦距離の情報から距離情報を得たり、対象物の画像を解析する画像計測を用いている。また、陰影情報によるもの¹⁶⁾では、対象物表面の明るさを観察する。対象物表面の明るさである放射輝度は、対象物外部の光源からの光が対象物表面で反射したものであるため、光源の位置、明るさ、対象物表面の光学的反射特性が判れば、対象物表面の方向により定まる。つまり、対象物表面の明るさは、対象物表面と光源、カメラの相対位置を反映している。したがって、カメラにより撮影した画像上の対象物の陰影（明るさ）から対象物表面の各点における方向を再現できることになる。しかし、この手法は対象物の表面の反射特性が予め判っている時、あるいは対象物表面が一様な特性を持つときには有効であるが、一般に計測対象物の表面の反射特性が判っていることは少なく、また、自然界の物体（岩、丘、等）はその表面の反射特性は一様ではないため、適用が難しい場合もある。

この他の非接触式の計測手法として、得られる画像に含まれる情報のみからその中に含まれる物体を認識する手法^{17)~29)}、画像中で対象物を抽出してその3次元情報の計測を行おうと

する試みも行われている^{30)~47)}。

実際、動物が行っているパッシブ式の3次元形状計測はステレオによるものが主であるが、この手法をコンピュータで行おうとすると画像認識の技術が必要になる。しかし、パッシブ式の3次元形状計測は、対象物へ対して働きかける必要がなく、対象物へ影響を及ぼさないという利点があり、また、対象物が非常に遠くにあつて計測器からの光、音波が届かないような場合、あるいは、対象物が自然光下のように非常に明るい環境にあつたり対象物自身が発光していてレーザー光を投影しても画像上でその投影位置を判別できない場合でも計測が可能である⁴⁸⁾という利点がある。さらに、古写真に写っている建物を計測する場合のようにアクティブ式による計測が根本的に不可能な場合にも適用可能である。

この画像を用いた非接触式の3次元形状計測手法のほとんどは三角測量の手法を用いたものであるため、計測を行う際には測量機器を設置する位置、設置する方向等を予め測定する校正作業が不可欠である。そして、この校正結果の精度が計測する3次元形状にも直接影響するため、この校正作業は重要な意味を持っている。この校正を行うために種々の手法が用いられている。土木測量の現場で最もよく用いられるのは、測量機器の設置位置の絶対座標を通常の測量手法を用いて手動により計測することである。この手法は、通常の使用には十分な精度の校正結果を得ることができるが、校正作業に要する時間がかかるという問題点がある。また、画像を用いる校正方法としては、3次元座標が予め判っている点をカメラで撮影し、その点の画像上の座標を読み取り、数値計算により求める方法がある。これは、3次元座標が予め判っている点が6点あれば、カメラの位置、姿勢は数学的に一意に解くことができるという事実を用いている。あるいは、3次元座標は判らないがいくつかの画像上で共通して現われることが判っている多くの点の画像上での座標から繰り返し計算により、その多くの点の座標とカメラの位置、姿勢を同時に求めるバンドル法と呼ばれる手法もあり、この手法を用いたPhotoModelerと呼ばれる市販ソフトもある。

1.2 3次元情報の利用について

3次元情報が取得できれば、その利用分野は広く、その計測結果を種々の用途に用いることが可能になる。

まず、その3次元数値データをそのまま利用できる直接的な用途としては、建築分野において、既に存在している建物や地形の形状の計測やその工事のための基礎データとして用いることができる。あるいは、土木分野では傾斜地の形状の計測や河川の形状計測による土石流の予測、あるいは活火山の形状計測による火砕流の予測による災害予防への利用が考えられる。また、測量への適用では、土地や建物の測量の他に遺跡発掘の際の発掘現場の効率的な計測に用いることができる。さらに、既に存在しないが古写真に残っている建物について、その古写真の画像だけから建物の3次元形状を復元することが可能である。

また、衣料、アパレルの分野では人体の3次元形状を計測して商品開発に利用することが行われている。人体のように柔らかい対象物は、接触式のセンサでは変形してしまって測定が難しいため、非接触式を用いる計測手法が適している。また、測定に際して画像を撮影するだけでよい画像計測手法は、計測に際して被験者に苦痛を与えないという意味でも人体の計測に適している。

さらに、3次元情報の計測だけではなく、取得した3次元情報を基にして、ロボット制御にも利用することが行われている^{49)~58)}。また、その他にも取得した3次元情報を基にして自律移動物体の移動の制御、経路の制御等への利用が可能である。例えば、自律走行体の例としては電動車椅子が考えられる。通常の電動車椅子は使用者がその操縦を行う必要があり、操作には多少の熟練が必要であるのに対し、自律走行を行う電動車椅子では車椅子自身が周囲の3次元情報を基にして自らの位置、方向を判断し、使用者が指定した位置へ安全な経路で走行する。これにより、使用者は目的地を指定するだけでよく、車椅子の操縦に気を使う必要がなく、安全に移動することができるようになる。

その他の自律移動体の例として、自律飛行を行う飛行体が考えられる。これは飛行体自身が周囲の3次元情報を認識して、自らの姿勢、速度、飛行経路を制御するものである。これにより、例えば、自動飛行による自動撮影等が容易に行えるようになる。

また、さらに興味ある分野として、得られた3次元情報から3次元映像を作成して利用する広範な利用分野がある。特に、今日のコンピュータのハードウェア、ソフトウェア技術の発達は目覚ましく、コンピュータグラフィックスによる景観シミュレーションが建築や土木等の分野で多く用いられている^{59)~66)}。また、これまで2次元の景観シミュレーションが主流であったが、最近はより高品質な3次元の景観シミュレーションも行われるようになってきた。

例えば、土木分野においては、山体の景観シミュレーションや河川の流れのシミュレーション^{67)~73)}等が行われている。これは災害予防の点からも重要である。

また、住宅内での歩行のシミュレーション^{74)~85)}や、観光案内²³²⁾やゲーム等のエンターテインメント分野への利用、また、研究、芸術、スポーツ等への利用が考えられる。

また、単なる景観シミュレーションではなく、さらに臨場感を高める技術として、バーチャルリアリティ (Virtual Reality、仮想現実感、以下ではVRと略す)^{94)~102)}がある。VRではオペレータがあたかもその空間にいるかのような感覚を得ることができ、様々な利用が考えられている。例えば、医療への利用においては、外科手術の際の事前のシミュレーションや術中支援システムが開発されている^{103)~116)}。さらに3次元形状をインターネット上でも取り扱うことが可能な言語仕様としてVirtual Reality Modeling Language (VRML)^{117)~125)}等がある。

このような用途のために3次元情報をコンピュータ上で表現する方法として、これまでに種々の方法が提案されており、大別すると、3次元形状をそのまま持つものと擬似的に3次元形状を表すものがある。3次元形状をそのまま持つ形式のものには、CAD (Computer Aided Design) における表現方法を継承したものも多い。その例として挙げることができるものに、DXF、OpenGL、VRML等がある。例えば、DXFはCADの中間言語として開発されたものである。そのため、3次元形状を数値データとして表わすことはできるが、表面のテクスチャ等の表面性情を持つことはできない。これに対し、OpenGL、VRMLは3次元形状の他に物体表面の状態を持つことができるものである。その多くの方法においては、対象物の数が増えたり、形状の複雑さが増すに従い、3次元形状を表すための形状データ量が大きくなり、3次元立体の表示を行う計算機においてCPU能力、メモリ容量に大きなものが必要とされるという問題がある。

これに対処する1つの技術として、擬似的に3次元形状を表す手法が開発された。その代表としてApple社が提供するQuickTime Virtual Reality¹²⁶⁾（以下、QTVRと略す）やInteractive Picture 社が提供するIPIX²⁴⁰⁾という手法がある。いずれも広い角度範囲（通常、360°）のパノラマ画像を、ユーザのマウス、キーボードのパン操作に応じて、視野画像の歪みを補正しながら高速に表示することができる。QTVRでは実際にコンピュータ上で記録される形態は2次元の円筒上に描かれたパノラマ画像であり、IPIXでは球面上のパノラマ画像である。ユーザは空間内の特定の位置から任意のカメラアングルに相当するシーンをインタラクティブに眺めることができ、その場において周りを見渡しているかのような印象を得ることができる。

いずれのシステムもシーンを3次元立体としてではなく、パノラマ画像として作成するために、シーンに複雑なオブジェクトが含まれる場合にも、記録するために使用するファイルサイズが3Dモデルを構築するよりも非常に小さくて済み、また、パノラマを再生する計算機にもそれほどのCPUパワー、メモリを必要としないという利点がある。

1.3 本研究の目的

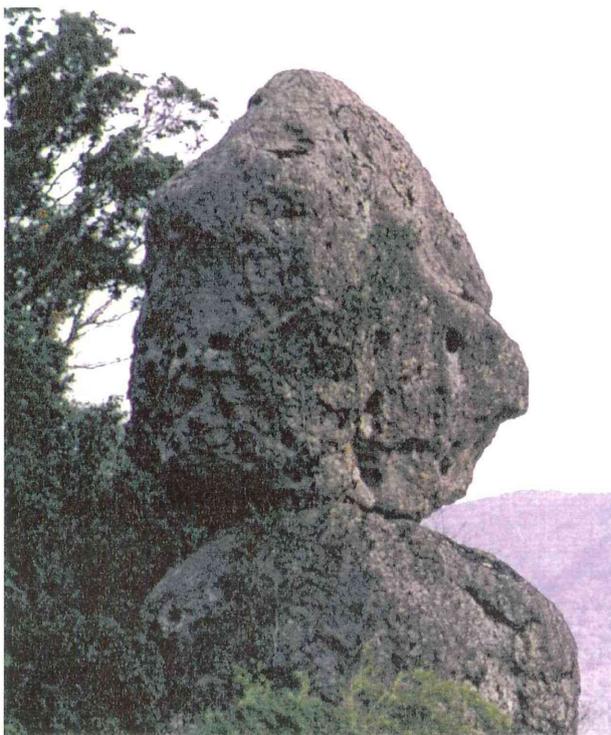
カメラの画像を用いて3次元形状を計測する画像計測システムには、これまでにスリット光を用いた光切断法やステレオ視等の手法が提案されているが、巨大な建造物や岩、像などの物体を対象とした場合には、外部参照光を使いづらい点や測定装置の設置位置が制約される点、さらに読み取りに時間を要する点等の問題を有し、従来からの測量装置を用いた測定が行われているのが現状である。

また、3次元画像計測システムのほとんどは三角測量の原理に基づくものであって、画像撮影時のカメラの位置と姿勢を予め計測しておくカメラ校正作業が必要であり、校正結果の精度が3次元形状計測結果の精度に直接影響するので、カメラ校正作業が極めて重要である。しかし、多くの3次元形状計測手法では計測方法に重点がおかれ、カメラ校正は従来からの測量機器を用いて行われることが多かった。そのため、実際に3次元画像計測システムを使用するにあたってはカメラの校正作業に時間を要し、本来簡便な計測技術であるはずの画像計測の使い勝手が悪いという問題があった。

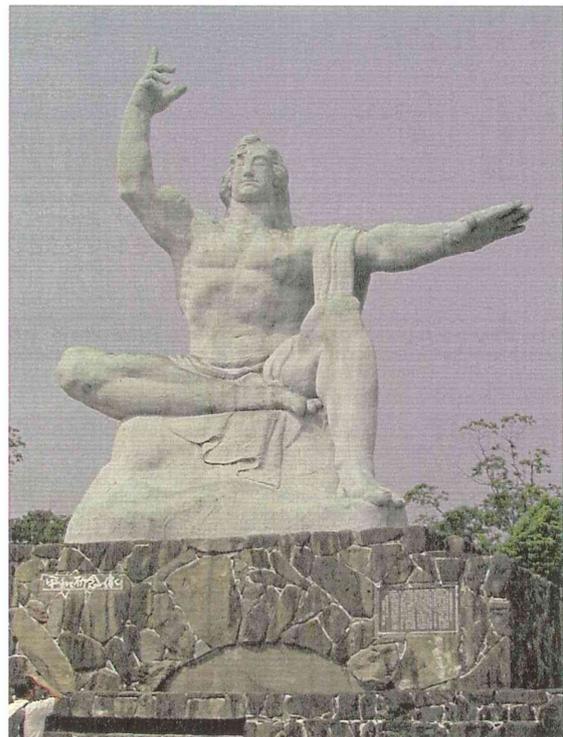
このような状況を考慮して、本論文の前半部では巨大な物体を対象とする3次元形状の画像計測方法を2つ提案する。2つの方法は共に多方向から対象物を撮影した画像内に含まれる情報を解析することだけで、撮影条件（カメラの位置、姿勢、焦点距離、等）の校正を行い、3次元形状を求めるものである。第1番目の方法の特徴は、対象物の幾何学的形状に特徴を有する場合にその特徴に着目することで、極めて容易に撮影条件を自動校正し、3次元形状を求めることができる点が挙げられる。第2番目の方法は多方向から対象物を撮影した複数画像において、カメラから対象物上の点への線分が相互に交わるという交線条件から撮影条件を校正するもので、その特徴はテレビカメラ等の画像入力装置の位置姿勢を任意に設定できる点、および測定対象物の輪郭情報を効果的に利用することで、これまでの方法に比べて、人力による読み取り作業が大幅に軽減される点が挙げられる。また特に、自然環境下でも計測が可能であることを目標とし、自然光下での3次元形状計測の具体的な計測対象物として、Fig.1.2に示すような自然物（巨岩）や平和祈念像の計測に適用を試みる。

また、本論文の後半部では、画像計測で得られる3次元情報を、その有効な利用方法の1つである景観シミュレーションで用いようとする際に筆者が開発した手法を提案する。それ

らは、低高度で得られたリモートセンシング画像を画像間の幾何学的な位置関係を算出して、画像の接続を行う手法、および、QTVRと呼ばれる遠隔臨場感を与える3次元画像表現のデータ作成手法である。さらに、QTVRのステレオ表現等を用いた、より臨場感のある3次元立体の表現を行う方法についても検討を行う。



(a) Huge Rock



(b) Statue of Peace

Fig.1.2 Samples of Measurement

1.4 本論文の構成

本論文は6章から構成されている。以下に各章の概要を示す。

まず、第2章では、対象物の幾何形状の特徴を考慮したカメラ校正方法と景観シミュレーションへの利用について述べる。

建築物のように巨大な対象物の3次元形状を画像計測により求めようとする、カメラの設置位置や方向等を測定するカメラ校正作業に時間がかかるという問題があるが、長方形形状のように幾何学的に特徴がある対象物の場合は、その対象物がカメラの撮像面上にどのような投影形状で投影されるかを解析することにより、カメラと対象物との間の相対的な位置関係やカメラの焦点距離を求めることができ、カメラ校正を容易に行うことができる。市街地における多くの建造物のように、その形状に直方体や長方形の形状が含まれている対象物について、この手法を用いることによりビル等の巨大な構造物の幾何学的な形状の特徴を用いてカメラの校正、および、その3次元形状の計測を容易に行うことができることを示し、実際に計測を行った例を示す。この場合、計測にあたって必要になるのは対象となる建築物を相異なる2地点から撮影した画像だけである。本章ではその校正手法と計測手法を示し、実際に建築物の計測を行った例を示す。また、その計測結果を用いた利用例として、3次元景観シミュレーションを行った結果についても示す。さらに、本章で用いた対象物の幾何形状の特徴を利用する校正手法、計測手法について、その特性、問題点の検討も行った。また、計測を行うに先だって、各種の画像入力手法、主に、フィルムを用いるカメラとCCDを用いるデジタルカメラについて、その比較を行ったのでその考察についても述べる。

第3章では、第2章で述べた対象物の幾何形状の特徴を利用する校正手法、計測手法を適用することが難しい、自然界の岩や巨大な像のように幾何学的な形状の特徴を持たない対象物についても適用可能な手法として、輪郭形状解析による3次元形状計測の手法とその結果を用いたコンピュータグラフィクスについて述べる。

自然界の岩や巨大な像のように幾何学的に規則的な形状特徴を持たない対象物を計測する場合、第2章で述べた対象物の幾何形状の特徴を利用するカメラ校正手法を用いることができない状況がある。また、自然光下での計測を考えた場合、光切断法等の参照光を使用する計測手法も用いることが困難である。このような場合、対象物上で判別できる数点の特徴点

に着目し、多方向から撮影した画像上でこの特徴点の対応付けを行い、バンドル法の概念（各カメラ位置から特徴点への視線ベクトルが特徴点の位置において交わる）を用いてカメラの設置位置と方向を校正することができる。その校正結果を用いて、各カメラで撮影した画像上における対象物の輪郭形状を対象物を任意の位置で切断する平面に投影し、その交叉領域を解析することによって、自然光の条件下で対象物の3次元形状を計測することができる。

本章では上記の考えに基づく手法を述べた後に、予備実験としてプラスチックボトルの計測を行って、上記の手法によりカメラ校正および3次元形状の計測を良好に行うことが可能であることを示し、次に実際に自然光下での計測対象物として巨岩（さばくさらかし岩）と平和祈念像の計測を行った結果を示す。

第4章では、第2章および第3章で示した手法を用いて求めたカメラの設置位置、方向の情報を利用して、低高度リモートセンシングシステムで得られる複数画像の接続を行う手法とその利用結果について述べる。

低高度リモートセンシングシステムでは上空に浮かべた気球にカメラを搭載して地上の対象物の撮影を行うが、カメラの焦点距離や解像度の制約があって、必要な角度範囲の画像が1枚の画像に撮影できるとは限らない。そのため、撮影対象範囲を複数枚の画像に分割して撮影し、撮影した画像の間の相対的な位置関係を解析し、撮影した複数の画像を接続することが必要になる。この画像撮影時にカメラの方向を完全に把握、記録することは困難なので、画像に含まれている情報だけを用いてカメラの方向や焦点距離の解析を行い、画像間の相対的な位置関係を算出し、画像の接続を行うことが必要になる。本章では撮影した画像に含まれる情報だけを用いて複数の画像を接続し、通常のカメラにより撮影した画像を用いて広視野角の画像を得ることができることを示す。実際に本手法を用いて遺跡の撮影を行い、画像の接続を行った例を示す。

また、低高度リモートセンシングシステムの撮影に際しては、最も適切な構図を得るためにビデオカメラのズーム機能を用いるので、画像毎に焦点距離が異なる場合も有り得る。そのような状況に対処できるよう、画像に含まれる情報だけから焦点距離の補正を行う手法についても述べる。

さらに、本手法は第2章で問題となったデジタルカメラの解像度の低さを補う手法として用いることができることを示す。

第5章では、第4章で述べた画像接続の特殊な場合として、ビデオカメラを水平面内に限定して回転する条件の下で連続ビデオ画像を撮影した場合に、この画像から QuickTime Virtual Reality (QTVR) データへの変換を行う手法について述べる。

QTVR は簡易的な3次元表現手法の1つであり、完全な3次元形状を表現するわけではないが、ある地点を視点中心とした時の周囲の状況を記録する手法として、必要なファイルサイズが小さく、表示も高速に行うことができるといった特徴を持っている。しかし、QTVR 画像を作成するための画像を得るには、撮影時にカメラを一定角度毎に回転させて撮影しなければならないという制限があり、このために QTVR 画像を作成するのに時間を要していた。本章で述べる手法では、ビデオカメラを三脚上に設置して水平面内で1回転させて連続ビデオ画像を撮影し、撮影した画像から抽出した画像に含まれる特徴点の情報から画像間の相対的な位置関係を解析して画像を接続してパノラマ画像を作成し、カメラを中心とする全周画像を作成し、QTVR 画像を作成する。

また、QTVR の臨場感をさらに高める手法として、左右に視差を持った2台のビデオカメラで撮影した連続ビデオ画像を用いて QTVR を作成し、その2つの画像をコンピュータ上で並べてステレオ表示し、2つの画像をユーザの操作に応じて連動して動くシステムを試作した。これにより、通常の QTVR よりもさらに臨場感を高めることが可能になった。

最後に第6章では、全体の考察、結論について述べる。

第2章 対象物の幾何形状を考慮したカメラ校正方法と その3次元計測および景観シミュレーションへの利用

市街地では多くの建造物の形状は直方体から構成されており、また、その建造物上にも窓枠等の長方形形状や平行線が多数存在する。しかし、これをカメラにより撮影した画像の上では、この幾何形状は透視変換により本来の形とは異なる形で像を結ぶ。この投影像の形状を解析することにより、カメラと対象物との間の相対的な位置関係を求めることができる。この手法を用いることにより、ビル等の巨大な建造物の3次元形状を計測を容易に行うことができる。

本章では、この手法を用いて3次元計測システムにおけるカメラ校正を行う一手法を示す。また、その利用として、3次元景観シミュレーションへの利用について述べる。

2.1 はじめに

今日のコンピュータ技術の目覚ましい発達により、コンピュータグラフィックスによる景観シミュレーションが建築や土木等の分野で多く用いられている^{59)~66)}。また、これまで2次元の景観シミュレーションが主流であったが、最近はより高品質な3次元の景観シミュレーションも行われるようになってきた²³⁶⁾。このような3次元の景観シミュレーションにおいては、正確な3次元形状データを作成することが必要である。最近の土木、建築における設計作業は、そのほとんどをコンピュータ上のCAD(Computer Aided Design)で行われることが一般的なので、新たに作成する建造物の3次元形状データはCAD上の数値データとして存在することが多く、これを取得することは比較的容易である。

しかし、既に存在している建造物について新たに工事を行う場合に、その工事後の外観を評価したり、あるいは、その工事が周囲の風景に与える影響を評価するために景観シミュレーションを行う場合等のように、現実存在している建造物等について3次元形状をコンピュータに入力する必要性が生じることが多い。

このように既に存在している建造物については、上記の新規作成の場合と異なり、コンピ

ュータ上に3次元形状の数値データは存在していないことが多いため、正確な3次元形状データを何らかの方法で得る必要があり、そのために種々の手法が用いられる。例えば、建物の設計図面から形状データを読み取って入力したり、実際の寸法を測量装置で計って入力したり、建物の階数等の形状から概略寸法を推定して入力することが行われている。

しかし、建物の設計図面から形状データを読み込む場合は、建物の設計図面が既に紛失している場合や、設計図面と実際に建築された建物の形状とが合致していない場合もあり、このような場合には設計図面から形状データを読み取る手法は使うことができない。また、通常の測量装置を用いて測定する場合は、その測量結果は正確なものが得られるが、測量を行う前に測量装置の向きや位置を予め正確に校正する作業が不可欠であり、この校正作業に多くの時間を費やすことになる。さらに、建物の形状から概略寸法を推定する方法については、簡便ではあるが必然的に誤差が大きくなるという問題がある。

これに対処する一つの技術として、測量装置の代わりに、TVカメラやスチルカメラにより、異なる方向から対象物の映像をとらえ、その対象物が映像上にどのように映っているかにより、カメラの校正を行うと同時に対象物の形状を求めることが可能である²³⁷⁾。

このような自動校正の方法としていくつかの方法^{91),129),136),156)}があるが、対象物が特徴的な幾何形状を有する場合に興味深い方法がある。特に、Fig.2.1に示すように対象物が長方形の面や平行線を有していれば、その長方形の面がカメラの撮像面にどのような投影形状に映っているかを解析することにより、カメラと長方形形状の面との相対的な位置関係を一意に決定でき、カメラ校正を容易に行うことができる。都合がよいことに通常のビルや構造物はほとんどの場合に長方形の形状を持っているので、この手法を用いればカメラ校正を容易に行うことができ、ビルや構造物の3次元形状計測を容易に行うことができる。この場合、計測に際して必要があるのは、相異なる2点から対象のビルを撮影することだけである。

本章ではこの技術の特徴を考慮し、3次元計測システムにおけるカメラ校正を行う一手法を示し、3次元景観シミュレーションに利用した2つの例を示す。



Fig. 2.1 Sample of Building with Rectangle Surface

2.2 長方形形状に着目した校正手法

本節では、対象物上の長方形形状に着目して、カメラに固定したカメラ座標系と対象物上に設定したワールド座標系との間の幾何学的関係を求めるための一つの校正技術を導く。

[座標系の変換]

Fig.2.2 に示すように、長方形形状の対象物をカメラで撮影した場合を考える。ここで $X_1Y_1Z_1$ はカメラ原点 O_1 を原点とするカメラ座標系、 f はカメラの焦点距離、 q_i ($i=1,2,3,4$) は対象の長方形の i 番目の角の位置ベクトル、 $p_i = (u, v, f)^T$ ($i=1,2,3,4$) は対象の長方形形状の i 番目の角がカメラのフィルム面上に投影された点を表すベクトルである。

ここで p_i は q_i を画像面上へ透視変換したベクトルであるため、 q_i と p_i の関係は、以下の式を満たしている。

$$q_i = k_i \cdot p_i \quad (2.1)$$

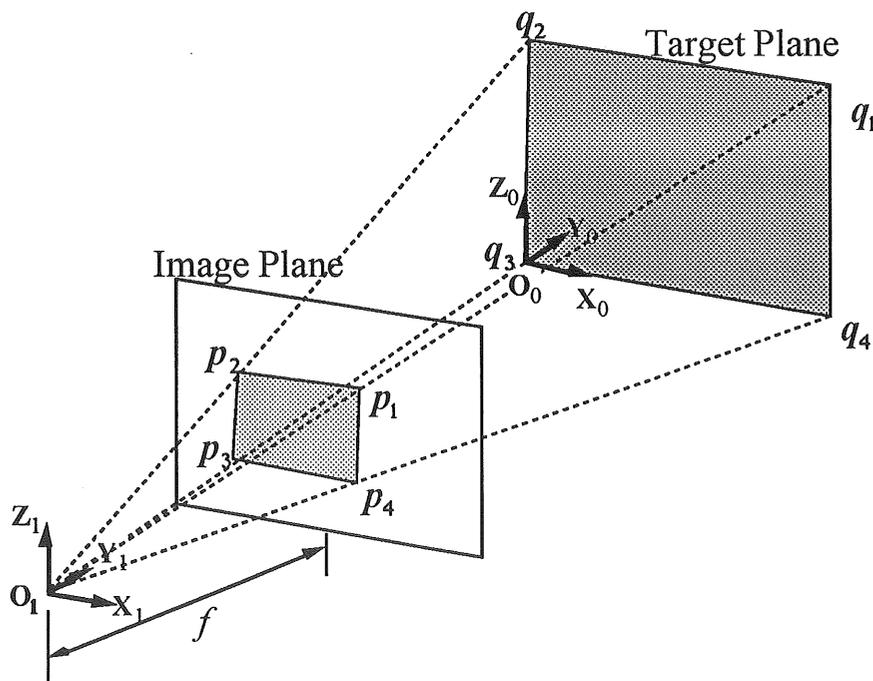


Fig.2.2 Camera Coordinate System

ただし、 k_i は、 i 毎に異なるスカラー量である。

また、長方形形状の特徴から以下の関係がある。

$$\mathbf{q}_1 - \mathbf{q}_2 = \mathbf{q}_4 - \mathbf{q}_3 \quad (2.2)$$

したがって、

$$k_1 \mathbf{p}_1 - k_2 \mathbf{p}_2 = k_4 \mathbf{p}_4 - k_3 \mathbf{p}_3 \quad (2.3)$$

この両辺に $\mathbf{p}_3 \times \mathbf{p}_4$ の内積をとると、 $\mathbf{p}_3 \times \mathbf{p}_4$ は \mathbf{p}_3 、 \mathbf{p}_4 に直交するベクトルであることから、以下の式を得る。

$$k_1 \mathbf{p}_1 \cdot (\mathbf{p}_3 \times \mathbf{p}_4) - k_2 \mathbf{p}_2 \cdot (\mathbf{p}_3 \times \mathbf{p}_4) = 0 \quad (2.4)$$

これを定数間の比の形に整理して、

$$\frac{k_2}{k_1} = \frac{\mathbf{p}_1 \cdot (\mathbf{p}_3 \times \mathbf{p}_4)}{\mathbf{p}_2 \cdot (\mathbf{p}_3 \times \mathbf{p}_4)} \quad (2.5)$$

同様に、定数 k_i の間の比が以下のように求められる。

$$\frac{k_3}{k_1} = -\frac{\mathbf{p}_1 \cdot (\mathbf{p}_2 \times \mathbf{p}_4)}{\mathbf{p}_3 \cdot (\mathbf{p}_2 \times \mathbf{p}_4)} \quad (2.6)$$

$$\frac{k_4}{k_1} = \frac{\mathbf{p}_1 \cdot (\mathbf{p}_2 \times \mathbf{p}_3)}{\mathbf{p}_4 \cdot (\mathbf{p}_2 \times \mathbf{p}_3)} \quad (2.7)$$

すなわち、 k_1 が決まれば定数 k_i は全て決定できることになり、カメラ座標系から見た対象とした長方形の各頂点の3次元座標が求められる。

これは、カメラから対象物上の1点までの実際の距離が判れば、他の全ての点の3次元座標が求められることに相当する。実際には、カメラからの距離でなくても、対象物上の2点の間の距離でもよい。

この結果、カメラ座標系と対象としている長方形との間の幾何学的な位置関係が求められる。

ここでFig.2.2に示すように、対象物上にワールド座標 $O_0X_0Y_0Z_0$ を設定する。原点 O_0 は長方形の頂点 q_3 により指定される角とし、 X_0 軸を長方形の辺に沿うベクトル $q_4 - q_3$ 上に、 Y_0 軸をベクトル $q_2 - q_3$ 上に設定する。カメラ座標系 y_1 とワールド座標系 x との関係は以下のように容易に得られる。

$$x = T_a y_1 + x_a \quad (2.8)$$

ここで、

$$T_a = [q_4 - q_3, q_2 - q_3, (q_4 - q_3) \times (q_2 - q_3)] \quad (2.9)$$

$$x_a = T_a (y_1 - q_3) \quad (2.10)$$

である。

上式は長方形形状上の座標系とカメラ座標系との間の幾何学的関係を表している。

[焦点距離の算出]

これまで述べたように、カメラ座標系とワールド座標系との幾何学的位置関係を求めるためには、画像を撮影するカメラの焦点距離 f の値が必要である。なお、画像上での座標は通常、ピクセル (pixel) で取り扱うので、カメラの焦点距離もピクセルを単位として取り扱うことが普通である。以下でもカメラの焦点距離の単位はピクセルとして取り扱う。

通常、画像の撮影に使用するレンズの仕様は前もって判っているので、コンピュータに取り込んだ後の画像面の大きさ (ピクセル単位) から逆算してピクセル単位での焦点距離の値を求めることは容易である。また、正確な焦点距離の値が必要な場合は、長さが判っている

物体を長さが判っている距離から撮影し、その画像上での大きさからレンズの焦点距離を求めることもできる。

しかし、既に存在している写真を使う場合には撮影時のレンズの条件が不明な場合もあり、さらには、古写真に写っている建物の3次元形状を計測する場合のように、撮影をやり直すこともできないこともある。そのような場合でも、画像上の幾何学的特徴物の情報だけから撮影に使用したレンズの焦点距離を推測することができる。ここでは、長方形形状の対象物がカメラのフィルム上に投影されている画像において、その画像上の消失点の情報からカメラの焦点距離 f を計算する手法を示す。

Fig.2.3 のように長方形形状がフィルム面上に投影されているとする。この長方形形状がフィルム面上に投影された点を $\mathbf{p}_1 \sim \mathbf{p}_4$ とすると、ベクトル $\mathbf{p}_1 - \mathbf{p}_4$ とベクトル $\mathbf{p}_2 - \mathbf{p}_3$ の交点が投影平面上で消失点の1つを示している。

この消失点のフィルム面上での座標を $\mathbf{v}_1 (= (u_1, v_1, f)^T)$ と仮定し、同様にベクトル $\mathbf{p}_1 - \mathbf{p}_2$ と $\mathbf{p}_4 - \mathbf{p}_3$ から決定される消失点の座標を $\mathbf{v}_2 (= (u_2, v_2, f)^T)$ とすると、消失点の位置ベクトルで定義される2つのベクトル $\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2$ が直交するという幾何学的関係から、以下の式が得られる。

$$\mathbf{v}_1 \cdot \mathbf{v}_2 = u_1 u_2 + v_1 v_2 + f^2 = 0 \quad (2.11)$$

したがって、

$$f = \sqrt{-(u_1 u_2 + v_1 v_2)} \quad (2.12)$$

この式を用いて、焦点距離を得ることができる。

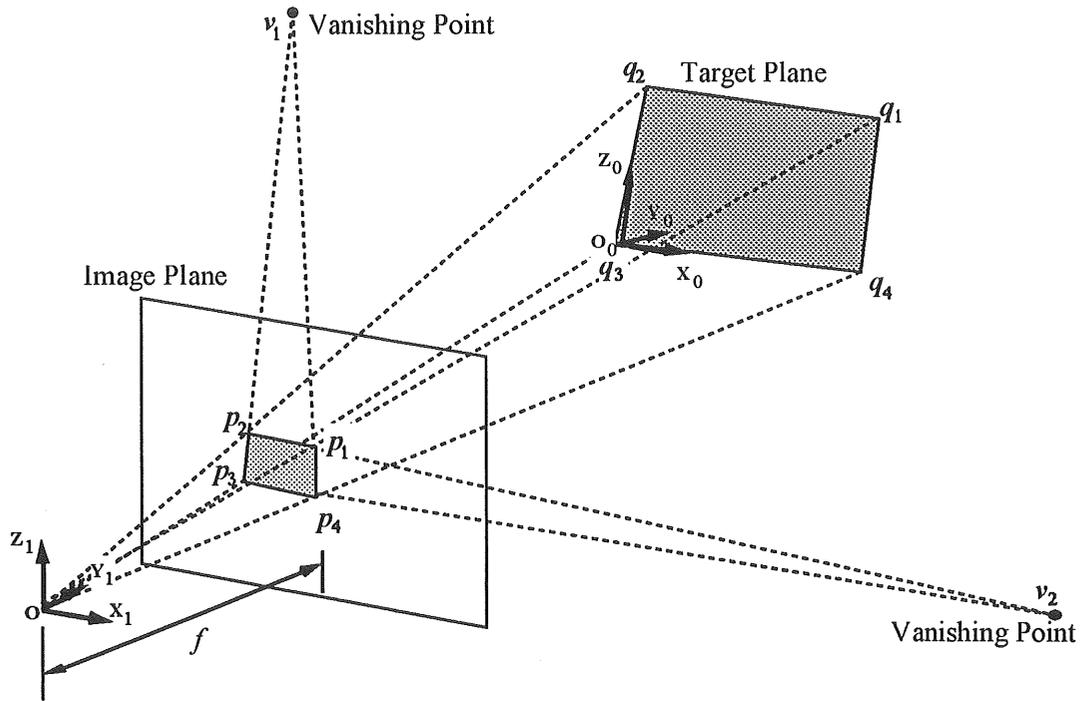


Fig.2.3 Vanishing Points

2.3 2つの画像からの3次元計測

前節で述べた手法により、対象とする長方形形状の4つの角の画像上の座標を使って、カメラに固定したカメラ座標と対象物上に設定したワールド座標との間の幾何学的な位置関係を求めることができた。この位置関係が一度判れば、対象物の任意の点の3次元座標を以下のように決定できる。

2台のカメラが Fig.2.4 のようにセットされた場合を考える。

前述の校正方法により、Fig.2.4 左側のカメラ座標系 y_1 とワールド座標系 x の関係は以下のように得られる。

$$\mathbf{x} = \mathbf{T}_a \mathbf{y}_1 + \mathbf{x}_a \quad (2.13)$$

同様に、右側のカメラ座標系 y_2 上のベクトルについて、以下のように得られる。

$$\mathbf{x} = \mathbf{T}_b \mathbf{y}_2 + \mathbf{x}_b \quad (2.14)$$

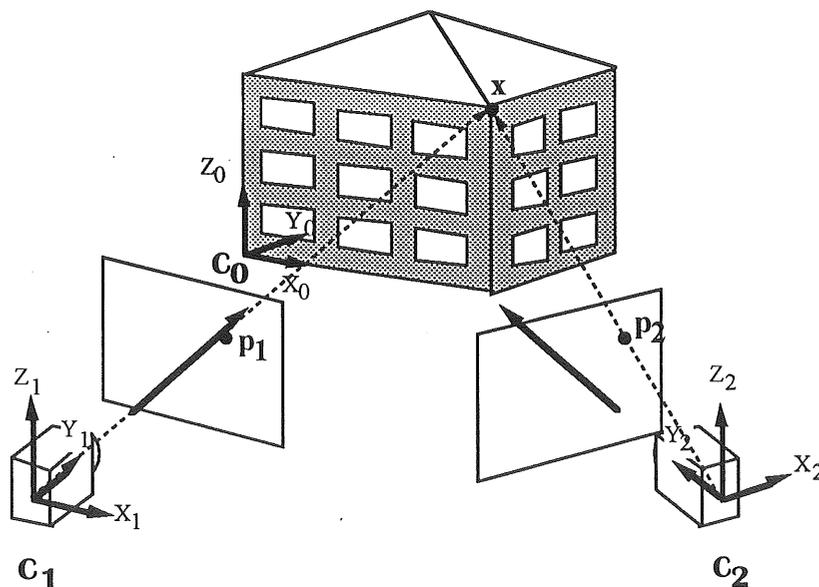


Fig.2.4 Definition of Coordinate System

ここで、対象物上のある点が左側のカメラに \mathbf{p}_1 として、また右側のカメラに \mathbf{p}_2 として投影されるとすると、対象の点の3次元座標は以下の式を満たす \mathbf{x} として決定される。

$$\begin{aligned} \mathbf{x} &= k_1 \mathbf{T}_a \mathbf{p}_1 + \mathbf{x}_a \\ \mathbf{x} &= k_2 \mathbf{T}_b \mathbf{p}_2 + \mathbf{x}_b \end{aligned} \quad (2.15)$$

解の k_1, k_2 は以下の最小自乗法により決定される。

$$\begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \end{bmatrix} = (\mathbf{B}^T \mathbf{B})^{-1} \mathbf{B} \mathbf{x}_c \quad (2.16)$$

ここで

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \mathbf{T}_a \mathbf{p}_1 \cdot \mathbf{T}_a \mathbf{p}_1 & -\mathbf{T}_a \mathbf{p}_1 \cdot \mathbf{T}_b \mathbf{p}_2 \\ -\mathbf{T}_b \mathbf{p}_2 \cdot \mathbf{T}_b \mathbf{p}_1 & \mathbf{T}_b \mathbf{p}_2 \cdot \mathbf{T}_b \mathbf{p}_2 \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

$$\mathbf{x}_c = \begin{bmatrix} (\mathbf{x}_a - \mathbf{x}_b)^T \mathbf{T}_a \mathbf{p}_1 \\ (\mathbf{x}_a - \mathbf{x}_b)^T \mathbf{T}_b \mathbf{p}_2 \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

である。

式(2.15)(2.16)を用いて、対象点の3次元座標を決定できる。

2.4 測定実験

長崎県工業技術センターの建築物の一部を対象にして、その3次元形状を実際に計測を行った例を以下に示す。

[システム構成]

Fig.2.5 に本実験に用いたシステムの構成を示す。

本実験では、Power Macintosh 8100/80AV（アップルコンピュータ株式会社製、以下ではMac と略す）、およびワークステーション AS-4075GX（株式会社 東芝製、以下ではWS と略す）の2台のコンピュータを使用した。2台のコンピュータは共に、工業技術センター内のLAN(Ethernet,10BaseT)に接続されている。

Macは標準でAV 入出力機能を持っており、ビデオカメラ等からのビデオ信号を画像として取り込むこと（ビデオキャプチャ）が可能である。さらに、Mac 本体から SCSI インターフェイスによりフラットベッド型スキャナ ScanMaker IISP（MICROTEK 製）を接続しており、スチルカメラのプリント等の紙の原稿からの入力を行う。また、更に 230MB のMO（光磁気ディスク、ICM 株式会社製）も接続しており、画像データ等の大容量データの格納を行う。

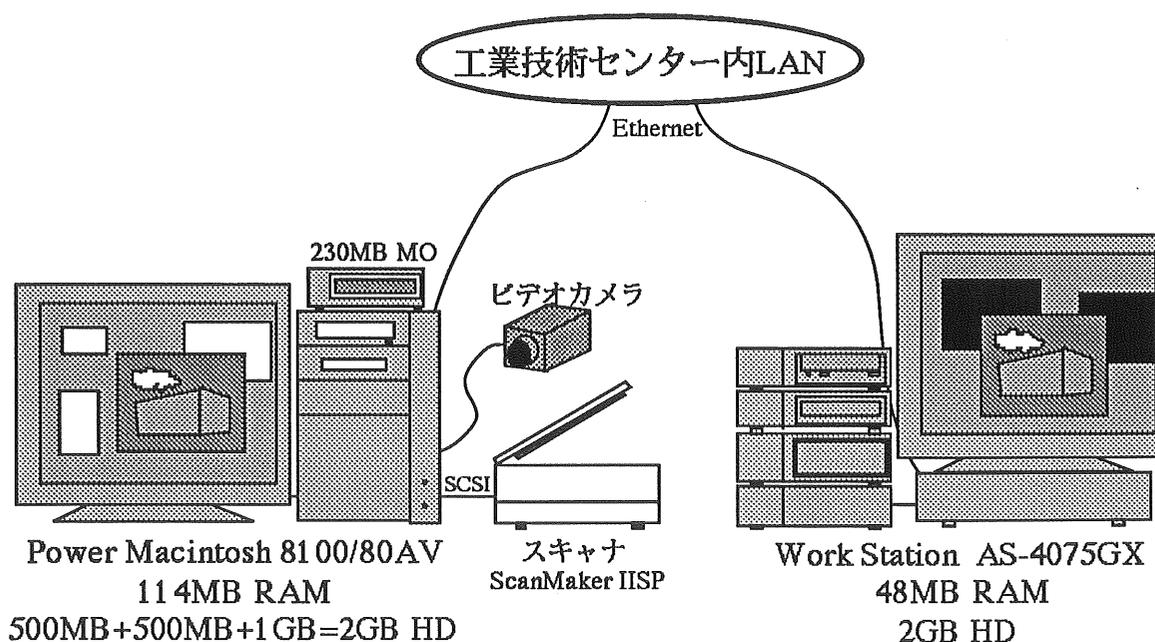


Fig. 2.5 System Configuration

また、WS には画像入力ボード (VideoPix) を内蔵しており、ビデオカメラ等からのビデオ信号を画像として直接 WS へ入力することができる。

以上の2台のコンピュータを使用する目的であるが、Mac では主に画像の入力や、最終的な CG (Computer Graphics)、アニメーション (動画) の作成、出力等、マンマシンへの入出力に関する処理を行い、WS では主にマトリックス演算を中心とした計算に関する部分を行う。

[画像の取り込み]

Fig.2.6 にハンディビデオカメラ (SONY(株)製、TR-705) を用いて建築物 (長崎県工業技術センター研究棟の一部) を撮影し、Macに取り込んだ建物の画像を示す。

この画像を基に焦点距離、変換マトリクス、3次元座標等の算出を行った。

ビデオカメラからのコンピュータへの画像の取り込み (入力) には Mac が標準で持っているソフトウェア「ビデオモニタ」を用いた。これにより、ビデオ信号から 640×480 pixel の大きさに静止画を取り込むことができる。

また、プリント等の紙を媒体とした原稿からスキャナを用いて入力する場合、本研究で用いたスキャナでは 300dpi (ズーム機能を用いると、1200dpi) の分解能で画像を取り込むことができ、一般のサービサイズプリント ($111\text{mm} \times 78\text{mm}$) の場合、約 1300×920 pixel の大きさに取り込むことができる。また、WS においても画像入力ボードからビデオカメラの画像を取り込むことができる。

ビデオカメラから画像を取り込むと、いずれのハードウェアにおいても常に決まった大きさ (640×480 pixel) で取り込むことができ、画像位置も固定であるが、スキャナによる入力の場合、原稿となるプリントをスキャナにセットする際の位置、傾きがどうしても毎

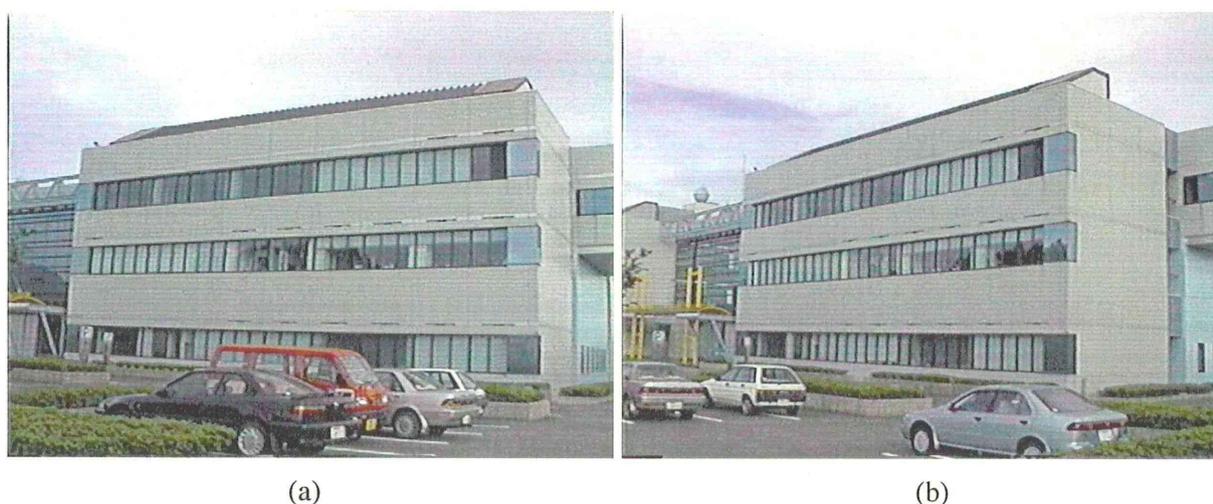


Fig.2.6 Measurement Object

回微妙に異なるため、Mac上の画像処理ソフトPhotoshop（Adobe Systems製）を用いて、入力した画像のサイズ、傾きの調整、余白の切り捨て等の前処理を行う必要がある。

[焦点距離の計算]

焦点距離の算出を行うために、Fig.2.6に示した以外の画像を含めて5枚の画像をビデオカメラにより取得した。この画像上で対象物上に含まれる長方形形状の4隅の点について、コンピュータのマウスの操作によりその座標を指定し、その座標値から式(2.12)により焦点距離の計算を行い、全ての画像について平均値を算出した。その結果、焦点距離として829.9pixelを得た。なお、先に述べたように、画像上での座標をピクセルを単位として取り扱っているため、焦点距離もピクセルの単位で表わした。

撮影の際にはビデオカメラのズームレンズは最も広角側に設定しており、この場合の焦点距離はカタログ上の数値で7.8mmである。

また、実験に使用したビデオカメラのカタログスペックでは、CCD（撮像素子）の対角線の大きさは1 β インチ、その画素数42万の内、有効画素数37万であるので、コンピュータに取り込んだ画像のCCD上の対角線の長さは、

$$\frac{25.4}{3} * \sqrt{\frac{37}{42}} = 7.947(\text{mm})$$

である。

ここで、焦点距離と画面对角線の値の比を、CCD上（単位はmm）、および、画像上（単位はpixel）とで考えると、

$$7.8(\text{mm}) : 7.947(\text{mm}) = f(\text{pixel}) : 800(\text{pixel})$$

$$\therefore f = \frac{7.8 * 800}{7.947} = 785.2(\text{pixel})$$

となる。

これに対し、実験の結果から計算で求めた焦点距離は、829.9pixelであったので、カタログの記述を信用する限りは、精度は約5.4%である。

また、大きさが判っている対象物が画像上に投影される大きさの情報をを用いてビデオカメラのレンズの補正を行った結果、焦点距離は815(pixel)であった。

[座標変換行列]

対象物上に固定したワールド座標系を Fig.2.7 のように設定する。X,Y 軸は図に示すように建物の前面の長方形の辺に沿って設定し、Z 軸はこの X,Y 軸に直交する右手系の座標系と

して定義する。Fig.2.6 の画像のデータから建物前面の長方形形状に着目し、その4隅の画像上の座標 (Fig.2.6 上に $q_1 \sim q_4$ で示した) をコンピュータのマウスで指定して、その座標 (ピクセル単位) を読み取り、(2.9)式に基づいてカメラ座標系と対象物上に固定したワールド座標系との間の変換マトリクス T を計算した。その結果は次のようになる。

左側のカメラ座標系 y_1 とワールド座標系 x との間の変換マトリックス T_a は、

$$T_a = \begin{pmatrix} 0.671 & -0.089 & -0.735 \\ 0.028 & -0.990 & 0.137 \\ -0.740 & -0.113 & -0.662 \end{pmatrix}$$

同様に、右側のカメラ座標系 y_2 とワールド座標系 x との間の変換マトリックス T_b は、

$$T_b = \begin{pmatrix} 0.869 & -0.043 & -0.491 \\ 0.041 & -0.985 & 0.163 \\ -0.491 & -0.162 & -0.855 \end{pmatrix}$$

となる。



Fig. 2.7 World Coordinate on Target Object

[3次元形状の算出]

次に、対象物上の各点について、(2.15)(2.16)式に基づいて、ワールド座標系上の3次元座標を算出した。

例えば、Fig.2.7の前面の長方形の4点 $q_1 \sim q_4$ の3次元座標値は以下ようになる。

$$q_1 = (0.997, 0.463, -0.008)$$

$$q_2 = (-0.007, 0.460, -0.057)$$

$$q_3 = (0.000, 0.000, 0.000)$$

$$q_4 = (0.999, 0.002, -0.001)$$

本実験では基準長さを計測しないで3次元形状を計測しているため、全ての3次元形状の数値は相対的な値として求められる。ここでは q_3 、 q_4 間の長さを1としている。その精度を考察するために、計測の基準とした対象物前面の長方形についてその縦横の長さの比を用いて検証を行った。計測値ではその比は0.458:1となっているのに対し、建物の設計図上で長方形の実際の大きさを読み取ると27800mm×12770mmであり、縦横比は0.459:1である。したがって、相対的な長さの比では約0.3%の精度であった。

この建物前面の長方形の4隅以外にも同様の手順により、壁面の角、窓枠の角等の2つの画像上で明確に識別できる特徴点20点をコンピュータのマウスの操作により、画像上の座標を指定し、各点の3次元座標の計算を行った。

2.5 景観シミュレーションの実施例

対象物の3次元形状を読み取ることができれば、現在のコンピュータのハードウェア、ソフトウェアが有しているコンピュータグラフィクス機能を用いて景観シミュレーションを行うことが可能である。本実験では、3次元形状操作ツールである Shade (Ver.1.2、エクス・ツールズ株式会社製) を用いた。

以下に、前節の手法により求めた3次元形状データを用いて、種々のコンピュータグラフィクスの手法により対象物の景観シミュレーションをコンピュータの画面上に表示した例を示す。前節で示した長崎県工業技術センターの建物、および、長崎市街地において計測した街並みの2つの例を示す。

[長崎県工業技術センターの例]

長崎県工業技術センターの建物の一部について、前節で求めた、画像上の特徴点(合計20点)について、画面上の長方形形状に対応する点間の接続を行った後、ワイヤフレームで表現したものを Fig.2.8 に示す。

次に、Fig.2.9 に示すように、撮影した元画像 (Fig.2.6) から、建物正面と側面のテクスチャを抽出する。このテクスチャを上記のワイヤフレームモデルの壁面に貼り付け (テクスチャマッピング)、さらに任意の方向に光源を設定して建物に陰影を与える (シェーディング) 操作を行う。これにより、コンピュータ上で対象物に任意の光源を与え、任意の方向からの画像を作成することが可能になる。その結果を Fig.2.10 に示す。

さらに、これを Shade のアニメーション作成機能を用いて、カメラパス、視点パスを設定することにより、連続フレームを描画し、アニメーションを作成することを行った。その例を連続画像として、Fig.2.11 に示す。

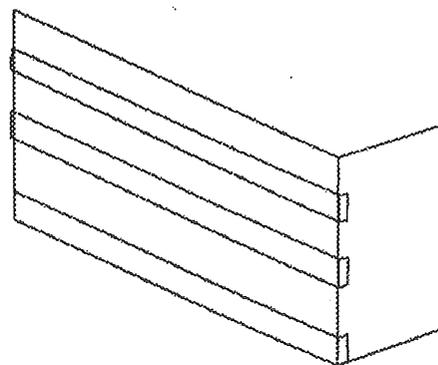


Fig.2.8 Experimental Result
(Wire Frame)

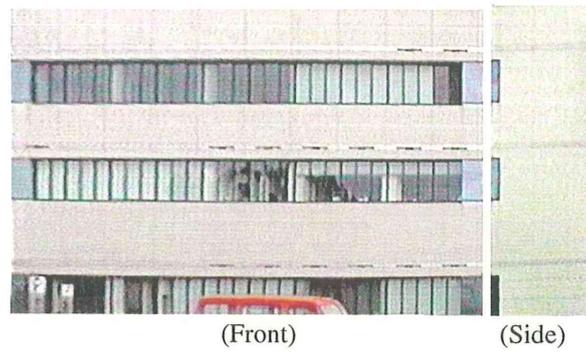


Fig.2.9 Sample of Texture

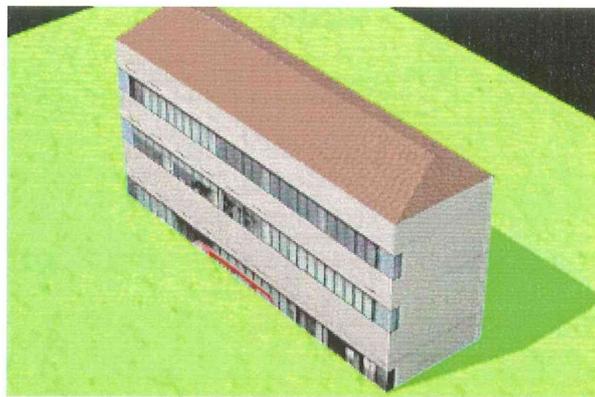


Fig.2.10 Experimental Result (Texture Mapping and Shading)

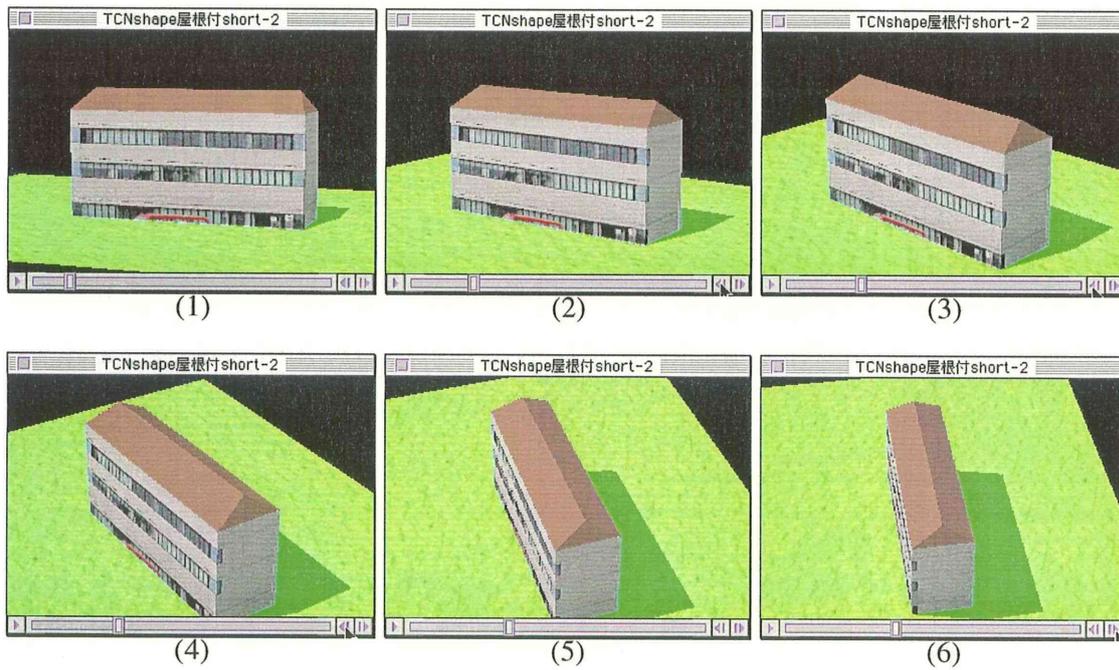


Fig.2.11 Experimental Result (Animation)

[長崎市街地の例]

次に、長崎市街地において建物（ビル）の3次元形状を計測した例を示す。

長崎市街地（桜町付近）において、Fig.2.12に示すように2つの画像を撮影した。この画像に含まれている4つのビルについて、3次元形状の計測を行った。

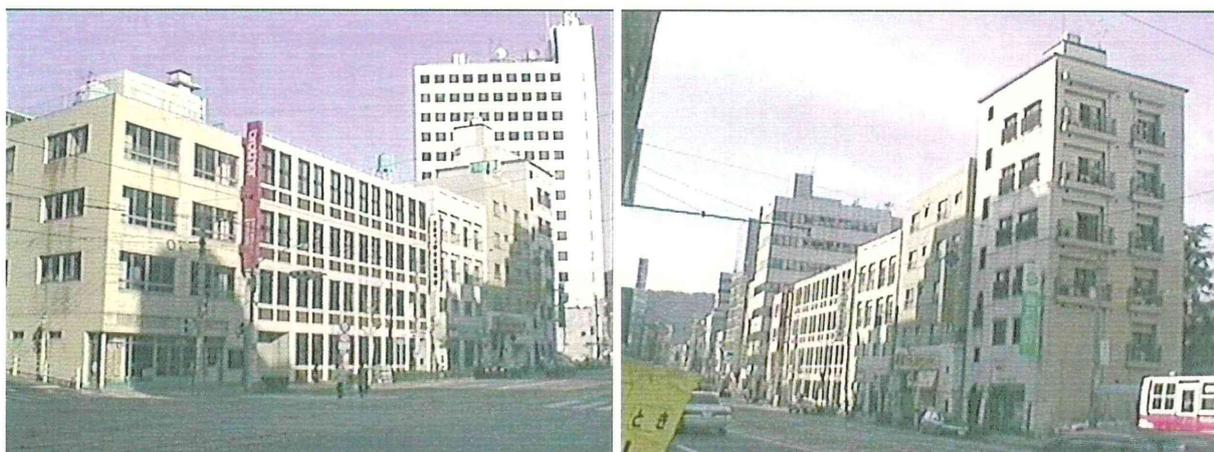


Fig. 2.12 Measurement Objects in Main Street (Nagasaki City)

計測に際しては、左から2番目のビルの前面の長方形形状に着目して座標系の校正を行い、カメラ座標系とこのビルに設定したワールド座標系との間の幾何学的位置関係を求めた。その後、各ビルの角の点について、各々の3次元座標を求めた。なお、一部のビルについては、奥行きを計測することができなかったが、撮影時に実際のビルの奥行きを目視し、推測している。

これにより得られた3次元形状の計測結果を用いてワイヤフレームモデルを作成し、さらにテクスチャマッピング、シェーディングを行った結果をFig.2.13に示す。



Fig.2.13 Experimental Result
(Texture Mapping and Shading)

また、これとは別の場所の市街地を撮影した写真を Fig.2.14 に示す。この写真についても 3次元形状の計測を行った。その結果得られた 3次元形状を Fig.2.13 の 3次元形状に合成して、仮想的な町並みを作成した。これにより得られた 3次元形状の計測結果を用いてワイヤフレームモデルを作成し、さらにテクスチャマッピング、シェーディングを行った。その結果を Fig.2.15 に示す。

また、この町並みについて、視点を移動させた時に得られるであろう画像をアニメーションとして作成した。120 コマのアニメーション作成するのに要した時間は、PowerMacintosh 8100/80AV 上で動作する Shade を用いて約 40 分であった。



Fig. 2.14 Measurement Objects in Main Street (Nagasaki City)



Fig.2.15 Experimental Result of Virtual Street
(Texture Mapping and Shading)

2.6 考察と結論

本章では、カメラで撮影した画像上の対象物の形状の幾何学的情報だけから測定システムの設定を校正し、3次元計測を行う1つの簡単な手法を提案した。本手法を用いることにより、構造物やビルの3次元計測を簡単に行うことが可能である。さらに、その結果を用いて景観シミュレーションへの利用を行った。

以下に、問題点、およびその解決についての考察を行う。

まず、画像をコンピュータ上に取り込む種々の方法についてであるが、本実験ではフィルムを用いるカメラ、ビデオカメラ、デジタルスチルカメラの使用を検討した。いずれも若干の問題点とその対策を検討した。

まず、フィルムを用いるスチルカメラについてであるが、現在、デジタルスチルカメラ、ビデオカメラが普及してはいるものの、画像の分解能、画質を考えた場合には、依然としてフィルムを用いたスチルカメラの方が優れている。例えば、解像度については、デジタルカメラの場合、安価なものは30万画素程度、高機能なもので175万画素程度であるのに対し、フィルムを用いたカメラの場合、通常サイズのプリントを安価な300dpi程度のスキャナで取り込んだ場合でも100万画素以上の解像度が得られ、少し大きめのプリントを用いたり、高解像度のスキャナを使用することにより、200万画素、あるいはそれ以上の解像度を容易に得ることができる。また、階調の深さもフィルムを用いたスチルカメラの方がCCDよりも優れている。CCDの場合、許容される明るさの範囲（ラチチュード）が狭く、明るい箇所は真っ白に、暗い箇所は真っ黒になることがあって、明るさに極端にむらがある対象物の場合にCCDを用いたデジタルカメラでは画像内の全ての箇所を鮮明に撮影できない場合もあるのに対し、フィルムの場合、そのような対象物でも鮮明に撮影できることが多い。

このようにフィルムを用いたカメラには優れている点がある反面、カメラ校正に必要な撮像面（フィルム）上の正確な座標が確定しにくいという問題点がある。これは、ネガフィルム上に写っている画像から印画紙にプリントする際に、焼付機のレンズ歪み、焼き付け時の倍率、トリミング補正、および、プリントからスキャナで取り込む際のスキャナ上での配置のずれや回転等が入ってしまうためである。そのため、コンピュータ上に取り込まれた画像がカメラのフィルム上にどのように写っていたかが判別しづらくなっている。

この問題を回避する方法であるが、ネガフィルムからプリントしたものをを用いるのではなく、PhotoCD へ焼付けてそのデータを使用する手法や、フィルムスキャナを用いてネガフィルムから直接コンピュータへ取り込む手法を用いることにより、焼付機のレンズ歪み、焼き付け時の倍率の影響を除くことができる。しかし、いずれの方法もトリミングされない画像を取り込むために特殊な装置が必要である。

次に、ビデオカメラやデジタルスチルカメラのようなデジタルカメラから画像をコンピュータに取り込む手法であるが、これは上記のフィルムを用いたカメラとは逆に、カメラの撮像面の画像がそのままコンピュータ上のデータになるので、カメラの校正が行いやすいという特長がある。これは画像計測を行う時に非常に有利な点である。その反面、画像の画質、解像度が悪い（640×480 画素程度）という問題点があり、これは計測結果の精度へ直接影響する。画質の問題は、デジタルビデオカメラを使用して、ビデオキャプチャボードを経由しないで直接コンピュータに入力するインターフェイスを用いることによって、ある程度改善することができる。また、解像度の不足については、本論文の第4章で述べる画像の接合を行うことにより、解像度の低さを補うことが可能である。

本実験では、以上のことを検討し、カメラ校正の際の長所を重視して CCD を用いたカメラ（ビデオカメラ、デジタルビデオカメラ）を主に用いて画像の撮影を行った。

次に、カメラ校正結果の精度であるが、焦点距離の精度については、画像上の長方形形状の各辺の消失点の座標から求めた焦点距離の値、レンズの仕様から計算できる値、および、大きさが判っている物体を撮影した画像から校正して求めた値を比較した結果、全て5%以内に収まっていることが判った。

また、計測した3次元形状の精度については、計測結果を実際の建物の設計図面の値と比較した結果、約0.3%の精度であり、相対的な大きさは非常によく合致することが判った。

次に、3次元形状計測を行う上での問題点であるが、画像上の特徴点の指定をコンピュータのマウス操作により行っており、その入力に若干の手間がかかっている。また、特徴点の位置の指定はオペレータが行っているため、入力時に誤差が混入する原因にもなっている。これは、カメラ校正精度の低下、計測した3次元座標の精度の低下を招くことになる。その対策として、第4章で述べる特徴点間の相関を用いる手法が利用できる。

また、本章で述べた計測手法そのものの問題点であるが、カメラ校正を行う基準となる長

方形形状が画像中で大きく写っている必要があり、その大きさが小さいとそれだけカメラ校正精度の低下の原因となる。したがって、計測のための画像の撮影に際して、構図の制約が生じる。

また、本手法の原理上、画像中に長方形形状等の幾何学的特徴がある物体が含まれている必要がある。したがって、街並みのように長方形形状が豊富に含まれる対象物の場合には手軽に使える有効な手法であるが、自然界の岩や地形測量等の場合には常に使える手法ではない。そのような対象物については、次の第3章で述べる輪郭形状を用いる手法やバンドル法を用いる手法が有効である。

なお、本章で示した校正手法は対象物上に長方形形状が見られる場合にのみ可能であるが、この制約は本質的なものではなく、対象物の形状の他の特徴を用いて校正手順を簡単にすることが可能である。例えば、対象物上の平行線を用いる手法が考えられ、それに基づく実施例は、長崎大学大学院工学研究科 綿瀬智晃氏、田中真一郎氏の修士論文において実施されている^{145)~146)}。

第3章 輪郭形状解析による3次元形状計測と コンピュータグラフィクス

前章で、市街地の建物の3次元形状計測においては、長方形形状のような対象物の幾何学的な形状の特徴を利用してカメラ校正を行い、対象物の3次元形状計測を行う手法が有効であることを示した。しかし、自然物のように必ずしもその対象物の形状に幾何学的な特徴が認められないものもあり、前章の手法を適用することができない場合もある。

このような場合、対象物がある程度小さい場合は光切断法^{12),13)}やパターン投影法¹⁴⁾等の手法を用いて3次元形状の計測を行うことも可能であるが、自然物の場合には対象物のサイズが大きく、また、自然光の下に存在する等、計測条件が厳しいため、光切断法は有効でない。

本章では、そのように対象物上に幾何学的な形状の特徴がなく、また計測条件も自然環境下にあるような場合についても有効な手段として、対象物上で判別できる数点の特徴点に着目し、バンドル法の概念を用いてカメラの設置位置と方向を校正し、その校正結果を用いて、カメラで撮影した画像における対象物の輪郭形状を解析することによって、対象物の3次元形状を計測する手法を検討した。まず、予備実験としてプラスチックボトルの計測を行い、次に自然光下での計測対象物として、巨岩と平和祈念像の計測実験を行った。その結果、本手法が適用可能であることが判った。

3.1 はじめに

近年、工学的な分野だけでなく、医療、歯科、教育等の多くの分野で対象物の3次元形状を計測することが必要とされている。このような要求に応えるための3次元形状計測にも種々の手法があるが、画像を用いて対象物の3次元形状を計測するいくつかの方法がこれまでに提案されている。

例えば、スリット光を対象物に投影し、その投影された光の形状を観測することによって対象物の3次元形状を計測する光切断法は、対象物の大きさが数m程度とそれほど大きくない場合に高精度で実用的な計測が可能な1つの有望な技術であり¹⁵⁾、いくつかの製品も

市販されている。

しかし、それより大きな対象物を計測する場合、例えば、土木の分野では災害予防等の見地から Fig.3.1 に示すような巨大な岩や山の 3 次元形状情報を計測することがしばしば必要になるが、このような巨大な対象物の場合、対象物自体が大きいこと、カメラから対象物までの距離が長いこと、日光等の外光の影響があること、対象物表面の条件、等の制御できない環境条件があり、投影したスリット光を認識することが難しい場合が多い。そのため、自然条件下にある自然物の対象物に対して、スリット光を投影する方法を適用することは困難である。

また、3 次元形状の計測においてはスリット光の投影による光切断法以外にも、本論文の第 2 章で述べたステレオビジョンによる方法も適用することができる^{153),154)} が、巨岩のような自然物表面は複雑な形状をしており、ステレオビジョンにおいて必要となる画像間の対応点を見つけることが難しい。もちろん、対象物の表面に予め多くのマーキングを置けば、対応点を見つけることは容易になる¹⁵⁵⁾ が、これでは画像計測を行う目的である、簡単に 3 次元形状を取得するという利点を損なうことになる。

画像を用いる 3 次元形状計測の実用的な手法には、前述の光切断法、ステレオビジョン以外に、本章で述べる輪郭形状を解析する手法がある。本手法では、対象物の周りの様々な地点から対象物の写真（画像）を撮影し、この写真に含まれる対象物の輪郭形状を解析して対象物の 3 次元形状を計測する¹⁵⁶⁾。

このように対象物の輪郭形状を用いて 3 次元形状を近似する手法については、これまで土井、三宅らによって研究されている^{157)~174)}。また、類似の手法は三面図から物体形状を推定する手法として、研究されている^{175)~183)}。しかし、土井、三宅らの手法では、その計測に際してはカメラの位置、方向は予め校正されているものとして計算を行っている。これは、実験室内で計測可能な対象物のような大きさであれば、予めカメラの位置を校正しておくことは容易であるので問題ないが、今回、計測対象としている例のように自然界の岩や巨大な構造物の場合、カメラの位置、姿勢を校正するために測量機器を用いての校正作業が必要になる。もちろん、そのような校正作業を行えば、3 次元形状計測を行うことが可能であるが、本来簡便に使用できるはずの画像計測であるので、もっと簡易に使用できることを目標とする。

そこで、本章で用いた手法では、輪郭形状による計測を行うためのカメラ校正に、「バンドル法 (Bundle Technique)」と呼ばれる手法^{91),156)}を併用した。バンドル法の特徴は、写真を撮影した際のカメラの位置や姿勢を前もって校正しておく必要がなく、撮影に際してカメラを自由にセットできる点である。その原理は、カメラの焦点と対象物上のある対象点とを結ぶ直線として定義されるカメラ視線は全ての画像について、その対象点の位置において交わらなければならないという着想に基づいている。この手法を用いて、画像を撮影したカメラの全ての3次元座標と姿勢を推定することができる。この手法を用いたソフトウェアは既に市販されており、高解像度のカメラを用いて高精度が得られることが報告されている。

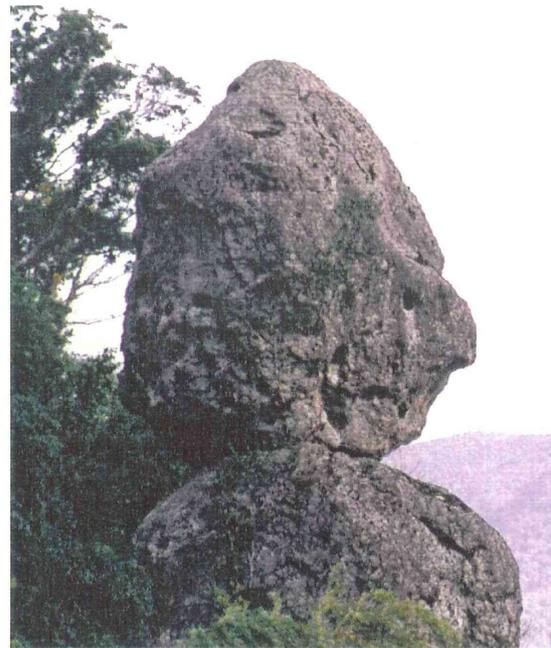


Fig.3.1 Target Huge Rock

この手法の1つの問題点是对象物表面上の特徴点を抽出し、画像間の対応を付ける必要があることである。建造物のように対象物が明確な特徴点を有していれば、この手法は容易に適用できるが、自然界にある巨岩の形状を計測することを考えた場合、明確な特徴点を必要な数だけ見い出すことは困難である。

本章では、このような巨岩のような自然物に適用可能な3次元計測手法について提案し、適用を行った。対象とした巨岩の写真を図.3.1に示す。

本手法の特徴は、複数枚の画像から抽出した輪郭データにより、3次元形状を容易に復元できることである。長崎大学工学部機械制御学研究室ではこれまでに、写真を撮影した3次元座標位置と巨岩上にマークした点の位置を前もって測定しているという条件の下で輪郭解析に基づいた他の手法を提案している¹⁸⁵⁾が、座標が判っているマークを設置するという作業は望ましくない。そこで、本章で示す手法では、数点の明確な特徴点が認識できるだけの条件しか必要としない。この明確な特徴点はカメラの設定をバンドル法に基づいて校正するために用いられる。

3.2 複数画像解析による3次元形状の復元

様々な位置、姿勢で対象物を撮影した複数画像を解析することによって、対象物の3次元形状を推定することができる¹⁸⁶⁾。

Fig.3.2に示すように、カメラが座標 P_i ($i=1, \dots, M$) に設置され、対象物上の明確な特徴点が F_j ($j=1, \dots, N$) で表わされるとする。ただし、ここでカメラの位置(座標) P_i と姿勢、および特徴点 F_j の座標は全て未知である。

位置 P_i においてカメラで撮影した画像のデータを解析することにより、カメラに固定したカメラ座標系において座標 P_i から特徴点 F_j ($j=1, \dots, N$) への方向ベクトル v_{ij} を決定することができる。このベクトル v_{ij} ($i=1, \dots, M$) は特徴点 F_j に向かうベクトルであるから、点 F_j において全てのカメラからのベクトルは相互に交わらなければならないことは明らかである。この交線条件に基づいて、カメラの位置 P_i ($i=1, \dots, M$)、特徴点の位置 F_j ($j=1, \dots, N$)、および対応するカメラの姿勢を推定することができる。

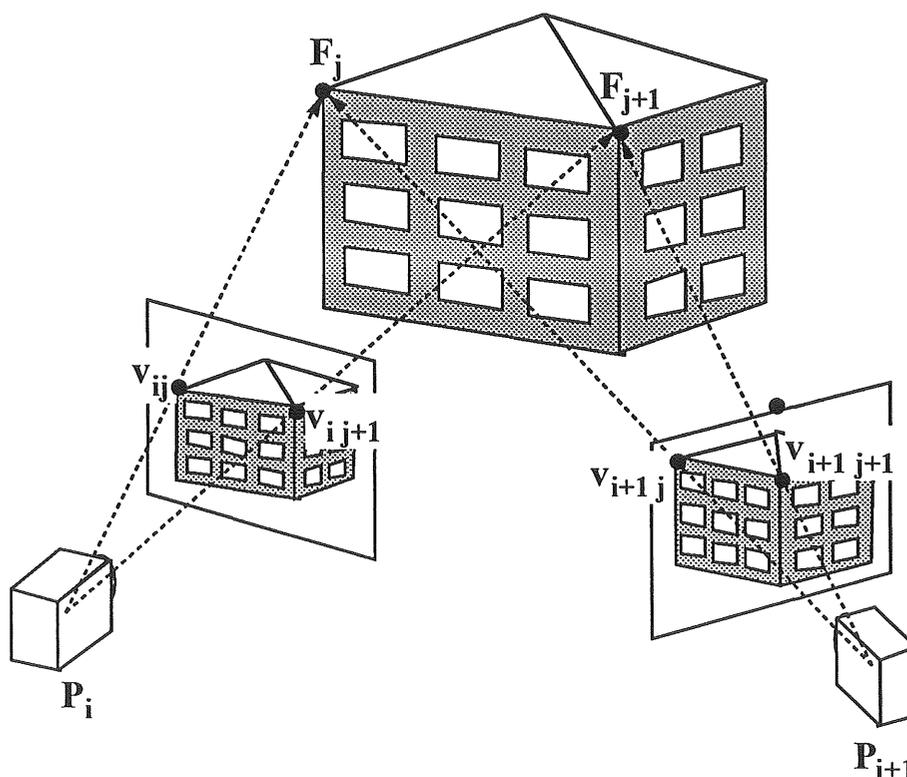


Fig.3.2 Camera Position and Prominent Feature Position

このアイデアは現在市販されている PhotoModeler という名称のソフトウェアで既に使用されており、以下の実験ではこのソフトウェアを用いてカメラの位置、姿勢の校正を行った。なお、このソフトウェアは本来3次元形状計測ソフトウェアである。このソフトウェアでは、各位置において撮影した画像において明確な特徴点の位置をコンピュータのマウスで指定し、その特徴点相互の対応関係を指定することにより、撮影したカメラの位置、姿勢の校正を行い、対象物の3次元形状の計測を行うことができる。これは、対象物が建築物等の人工物の場合、対象物の3次元形状を復元するのに十分なだけの多数の明確な特徴点を得ることは容易であるが、巨岩のような自然物の場合、明確に認識できる特徴点の数は限られており、3次元形状を復元するには十分な数の特徴点を得ることはできない。したがって、以下に述べる実験では、この限られた数の特徴点を用いて PhotoModeller によりカメラの位置や姿勢のようなシステム設定の校正を行い、3次元形状は次に述べる輪郭形状を解析することにより求める。

3.3 輪郭形状解析による3次元形状の復元

対象物を様々な地点から様々な方向で撮影した複数画像から、3次元形状を復元する手法を以下に述べる。

Fig.3.3に示すように、カメラを O_i に設置して巨岩等の対象物の画像の撮影を行い、その画像データから対象物の輪郭データ C_i を得たと仮定する。また、カメラの位置と姿勢は既に校正されていて判っているものと仮定する。この条件の下で、高さ z に配置した仮想的な平面 (imaginary surface) $IS(z)$ を考える。対象物の輪郭線 C_i を平面 $IS(z)$ 上に投影することにより、曲線 $M_i(z)$ が得られる。幾何学的な考察により、対象としている岩の平面 $IS(z)$ による断面は、この曲線の内側部分に制限されることが言える。

例えば、対象物の画像を4カ所から撮影したとすると、Fig.3.4に示すように対象物の輪郭線として4つの曲線を平面 $IS(z)$ 上に投影することができ、この高さ z における対象物の切

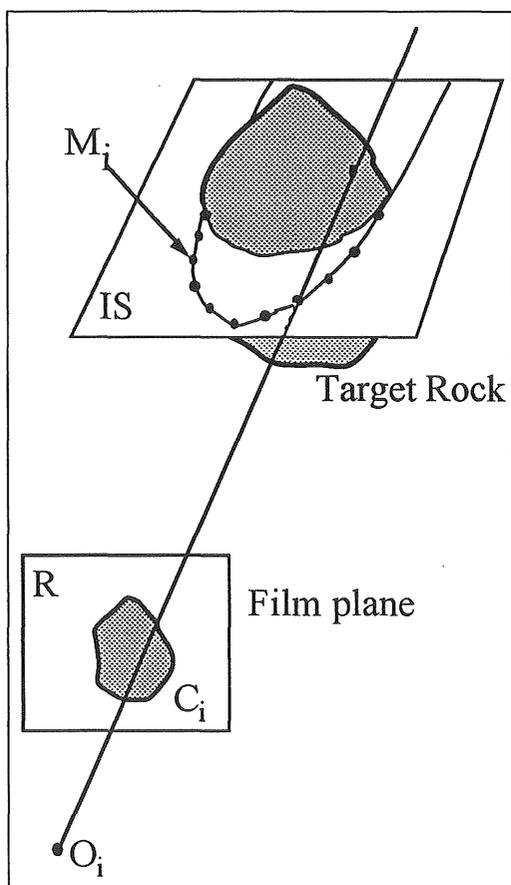


Fig.3.3 Projected Contour Curves

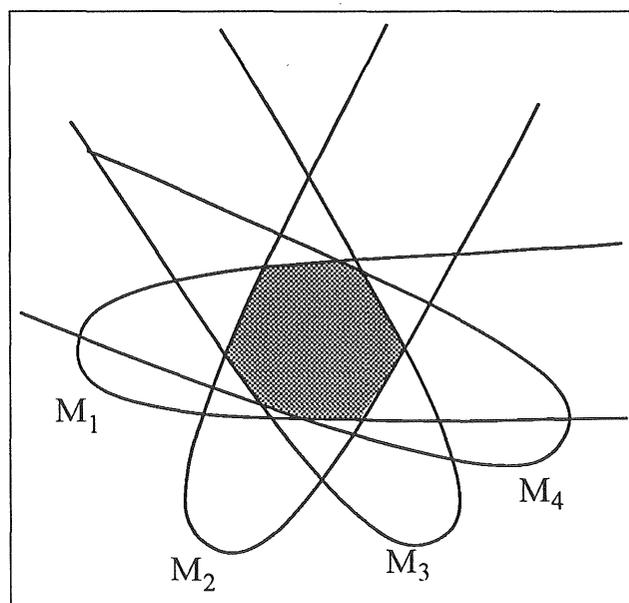


Fig.3.4 Projected Multiple Contour Curves

断面はこの全ての曲線の内側に存在することが判る。画像の数を増やすと、対象物の断面形状を精度良く推定することができることになる。

しかし、画像の数を増やすことは3次元形状を得るのに要する時間が長くなることを意味するので、限られた数の画像を用いて正確な断面形状を推定することが必要とされる。そのための1つの手法は、対象物の断面形状を以下で定義する多角形で近似することである。

Fig.3.5 に示すように、N角形を平面 IS(z) 上に投影することを考え、以下の操作を行う。

Step 1: 曲線 M_j, M_{j+1} ($j=1,2,\dots,N$) の交点 c_{j+1} を順次求める。

Step 2: c_j と c_{j+1} の中点 d_j を求める。

Step 3: d_j と d_{j+1} の中点 e_j を求める。

Step 4: e_j と c_{j+1} とを結ぶ線分を以下により定義される比 k で内分する点 m_j を求める。

$$k = \frac{\cos\left(\frac{\pi}{2N}\right) \cdot \left(\frac{\pi}{2N} - \sin\left(\frac{\pi}{2N}\right) \cos\left(\frac{\pi}{2N}\right)\right)}{\sin^3\left(\frac{\pi}{2N}\right)}$$

Step 5: 点 d_j と m_j とを順次結ぶことによって得られる多角形を、目的とする断面形状として推定する。(Fig.3.5 の破線)

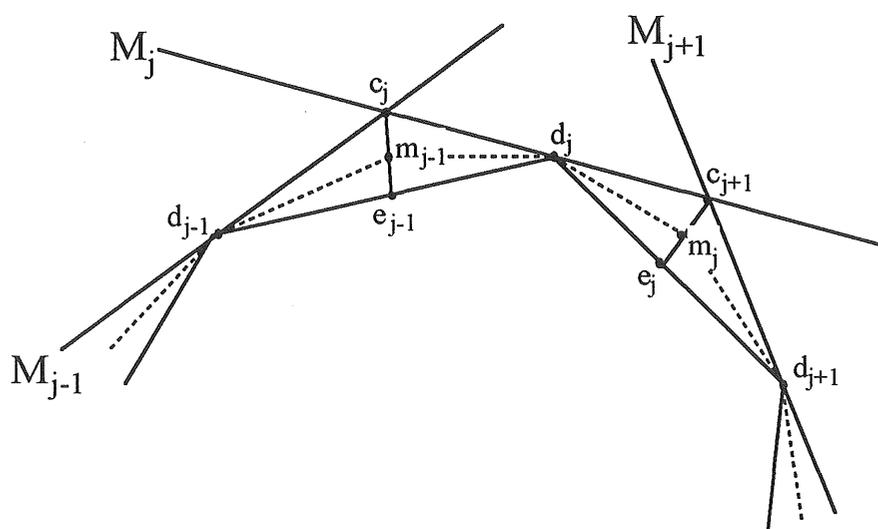


Fig.3.5 Approximation by 2N Polygon

なお、上記の比 k は、近似した多角形の断面積が計測している対象物の対応する箇所
の断面積とが以下の条件の下で同一になるように選定したものである。

- (1) 対象物の断面は円形とする。
- (2) 各画像は、対象物から等距離で、対象物を角度 π/N 毎に囲む、 N 点において撮影したものとす。

上記の比 k は、 $N=4$ の場合に $k=0.64$ 、 $N=6$ の場合に $k=0.65$ 、 $N=20$ の場合に $k=0.66$ 、 $N=100$ の場合に $k=0.67$ となる。（理論的には、 $N \rightarrow \infty$ の場合、 $k \rightarrow 2/3$ ）

一般には上記の条件は完全には満たされないがほぼ形状を近似することができるので、以下の実験では、 $k=0.66$ の値を採用している。

上記の方法により全ての高さ z における断面形状を推定することによって、対象物の全体の3次元形状を復元することができる。

なお、輪郭形状解析は3次元形状を得るのに有効ではあるが、表面に凹部がある形状は計測できないことに注意しなければならない。したがって、対象物の表面に凹部がある場合は、ステレオ画像の利用等、他の手法も併用する必要がある。

3.4 測定実験

本章で目的としている巨岩と平和記念像の計測を行う前に、予備実験としてプラスチックボトルの計測を行った。

Fig.3.6 に示すように、小さな箱を台としてボトルをその上に設置した。そして、ボトルの周囲の9ヵ所から撮影を行い、Fig.3.7 に示す9枚の画像を得た。画像の撮影は市販のデジタルビデオカメラ（SONY VX-1000）により行い、ビデオキャプチャによりRGB各8ビット、画像サイズ640H×480Vのコンピュータ上の画像データに変換した。

その後、コンピュータのマウス操作により、各画像上で6点以上の特徴点を選択した。特徴点のうちの数点は台とした箱の角、数点はボトルのラベル上の印刷の角である。この特徴



Fig.3.6 Target Plastic Bottle

点のデータを用いて、画像を撮影した時のカメラの位置と姿勢を校正する。

カメラの3次元位置と姿勢が一度求められれば、輪郭曲線の仮想面上への投影が可能になる。次に、ボトルの輪郭曲線をコンピュータのマウス操作により指定し、これにより得られたボトルの輪郭形状を各z高さの投影面に投影する。

z=30mm (ボトル下端) からz=270mm (ボトル上端) までの各z高さにおいて、各画像から抽出した9本の輪郭曲線を投影した結果と、さらに、3.3節で示した手法により断面形状の近似を行った結果を Fig.3.8 に示す。この図は前節の簡単なアルゴリズムにより断面形状を推定できることを示している。

次に推定した3次元形状の精度を確認するため、ノギスにより実物を計測したデータと推定値とを比較した。その結果を Table 3.1 に示す。ここで、Cross-section 1 はボトルの首の近傍で断面積が最小になる箇所で計測し、Cross-section 2 は断面積が最大になる箇所で計測した。各列で、左側のデータが上記の手法により推定した結果、右側のデータが実測値である。両方のデータの差異はカメラの解像度の不足とコンピュータのマウスによって点を指定する際の精度の不足によるものと考えられる。

全ての高さにおける断面形状を得た後、3次元形状操作ソフトウェア Shade を用いて、ボトルの3次元形状をコンピュータグラフィクスで表現することを行った。ここでは、ワイアフレームモデルとして復元し、さらに復元したワイアフレームモデルにボトルのテクスチャのマッピングも行った。 Fig.3.9にその結果を示す。

Table 3.1 Experimental Data
(right data is obtained by manual measurement)

	Maximum width	Minimum width
At Cross-section 1	53.0 mm (52.2 mm)	49.8 mm (48.0 mm)
At Cross-section 2	100.6 mm (98.0 mm)	61.8 mm (58.4 mm)

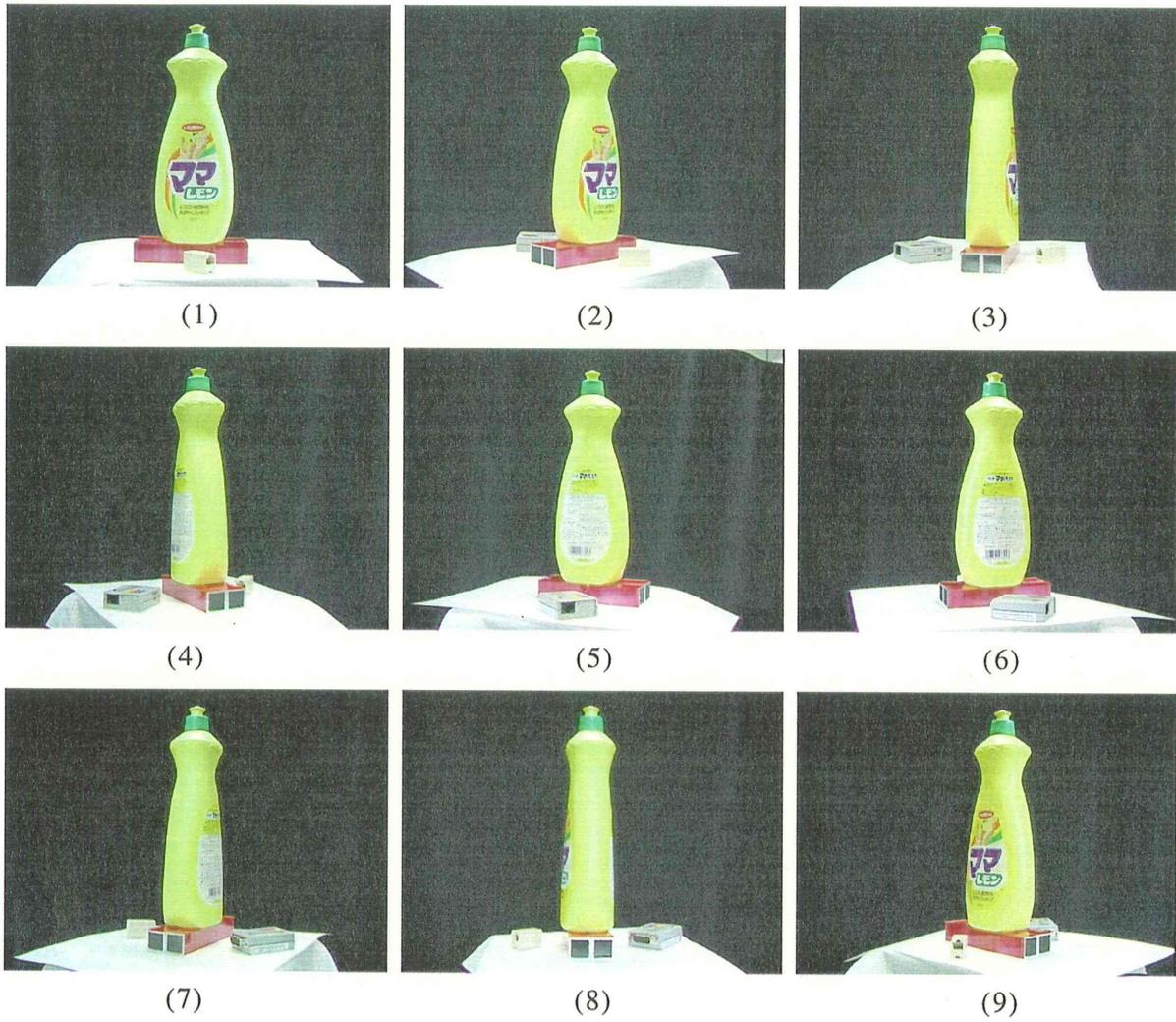


Fig.3.7 Sample Images of Target Plastic Bottle

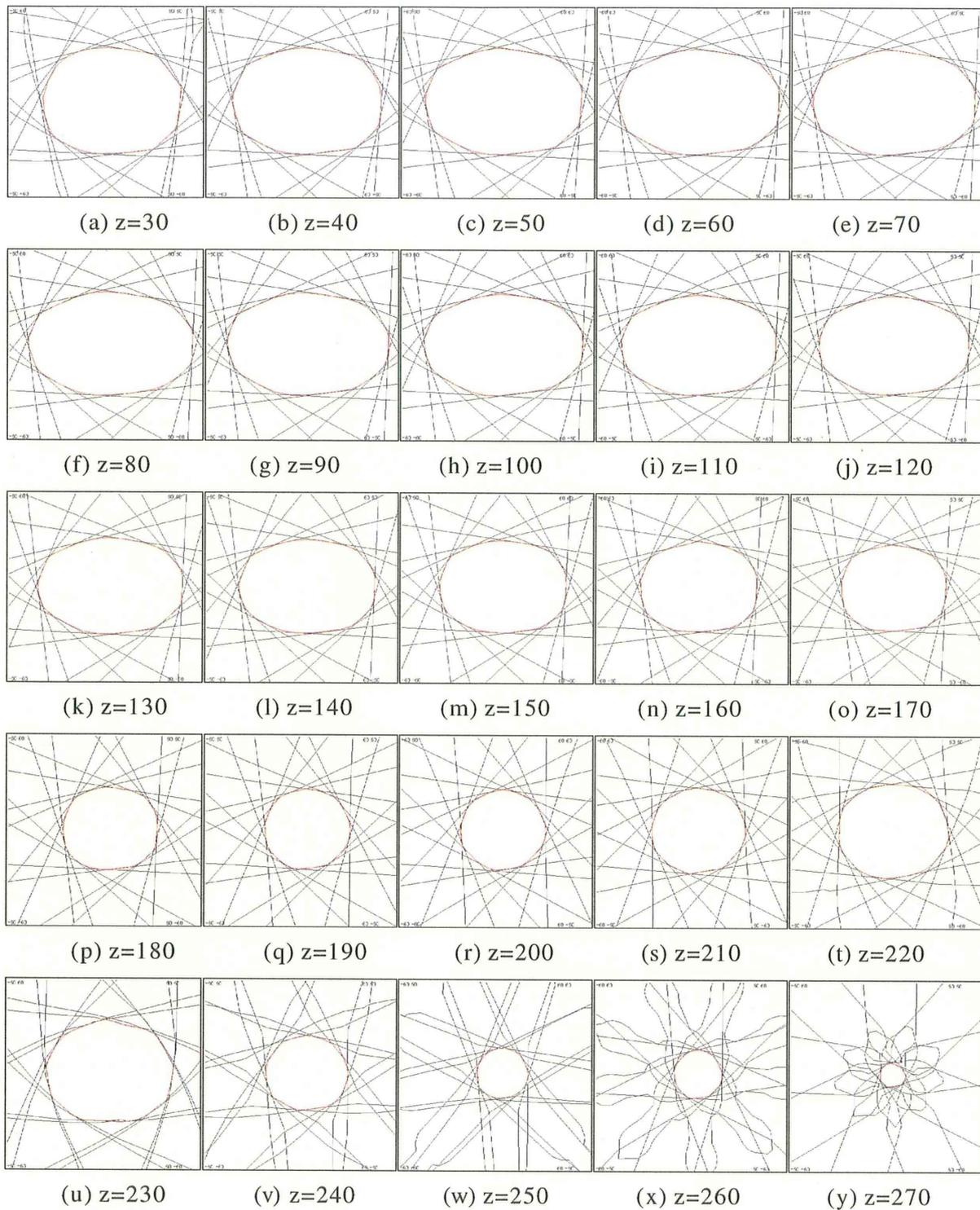


Fig.3.8 Estimated Cross-section of each z -plane

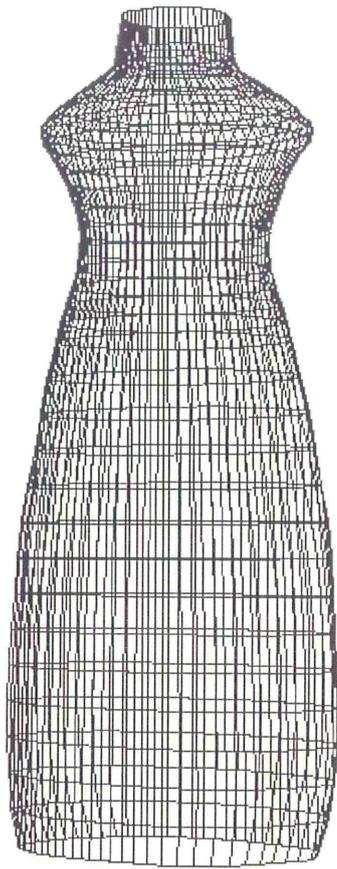


Fig.3.9 Recovered Plastic bottle

[巨岩の計測]

予備実験では研究室内の小さな対象物について3次元形状の計測を行ったが、3.1節で述べたように、本手法の特徴は自然界の岩のように巨大な対象物について、それも自然環境下の条件で計測できることである。したがって、予備実験に続いて、ここまで示してきた手法を自然光下の対象物である巨岩の計測について適用した。この巨岩は長崎市郊外（時津町）の丘の上に立っているもので、その直下の幹線道路に落下する危険があるか否かの判定のために計測を行ったものである。

まず、Fig.3.10 から Fig.3.17 に示すように丘の周囲の様々な地点から8枚の写真を撮影した。なお、この時にレーザセオドライトを用いて、測定地点の位置を測定しているが、これは別の手法による計測実験を行う都合上であり、本実験ではその座標値は用いておらず、後述のカメラ校正結果の検証についてのみ参照した。

次に、この画像をイメージスキャナを用いて読み込み、画像サイズ900H×600V程度のコンピュータ上のデータ（ビットマップ形式）に変換した。なお、撮影時には撮影位置から対象となる岩の見え方によって、カメラを縦位置（ポートレート）、横位置（ランドスケープ）に適宜持ち変えて撮影しているので、画像の幅、高さが異なるように見えるが、コンピュータ上では全て横位置（900H×600V）で記録されている。

また、撮影の際にはカメラのレンズに標準レンズ、望遠レンズ、合計3種類を取り替えながら撮影したが、後述のカメラ校正の際にその焦点距離の情報は使用していない。画像上の情報だけからレンズの焦点距離の算出も行っている。

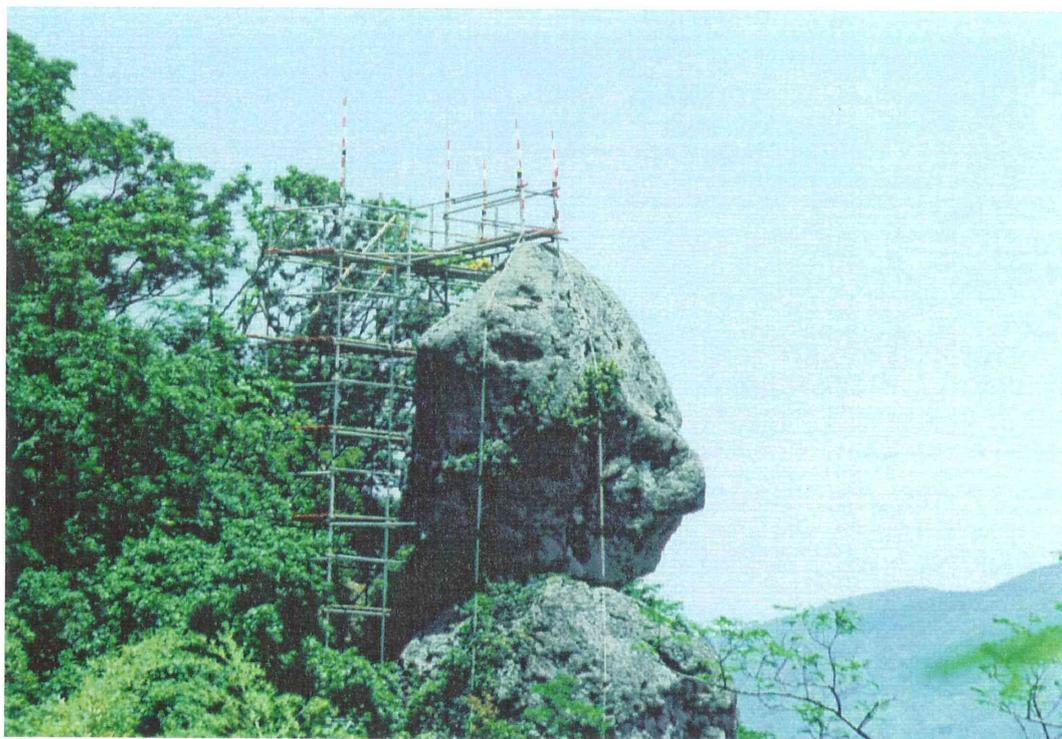


Fig.3.10 Taget Huge Rock from site T-2A



Fig.3.11 Taget Huge Rock from site T-4A1

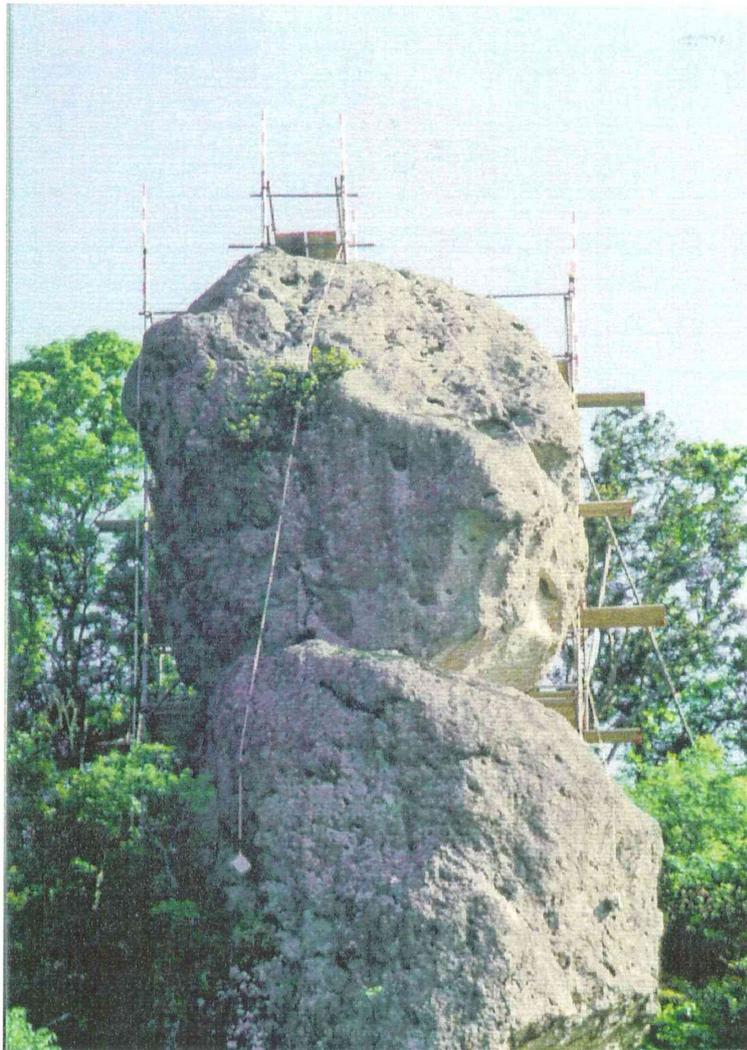


Fig.3.12 Taget Huge Rock from site T-5B

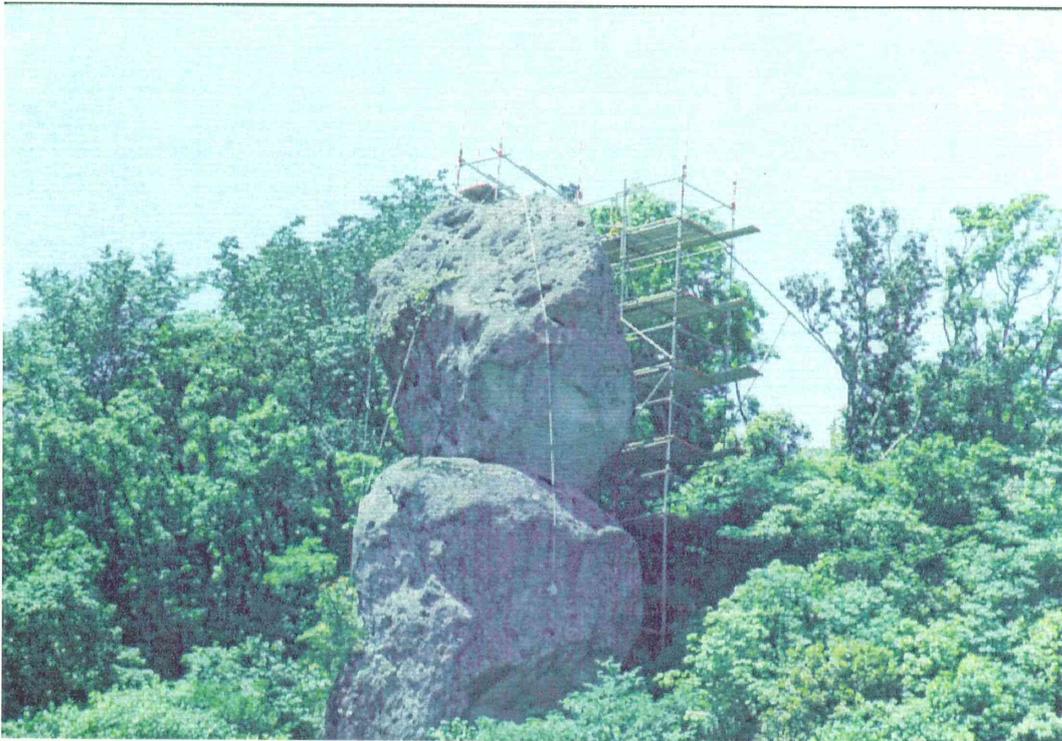


Fig.3.13 Taget Huge Rock from site T-6A

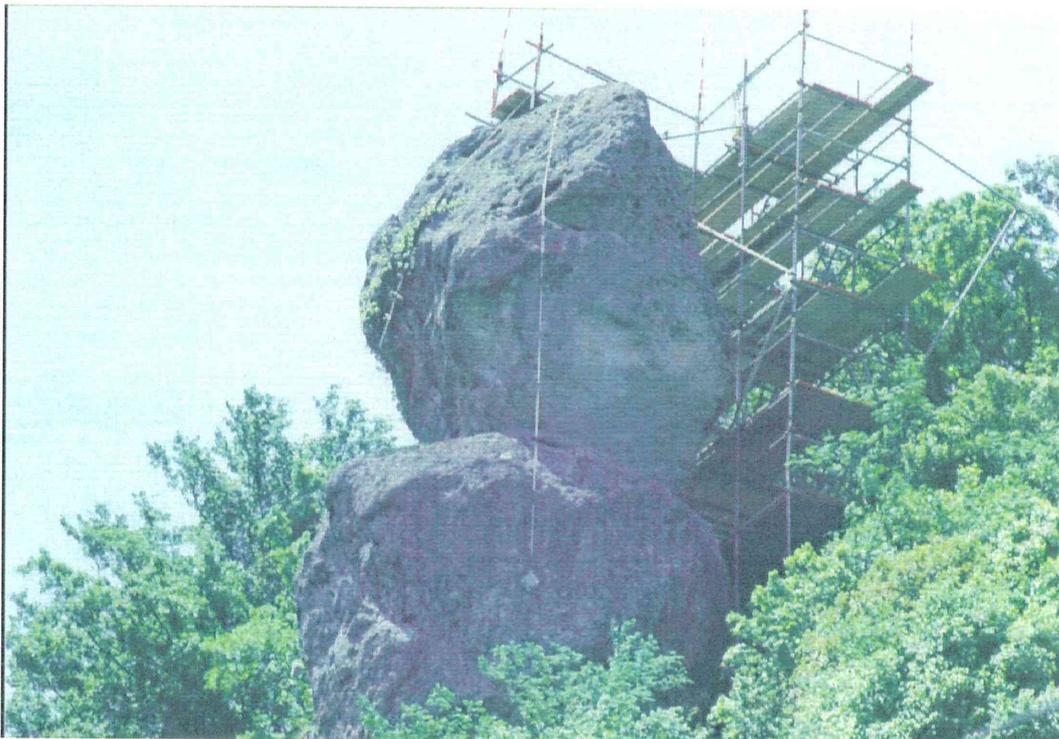


Fig.3.14 Taget Huge Rock from site T-7A

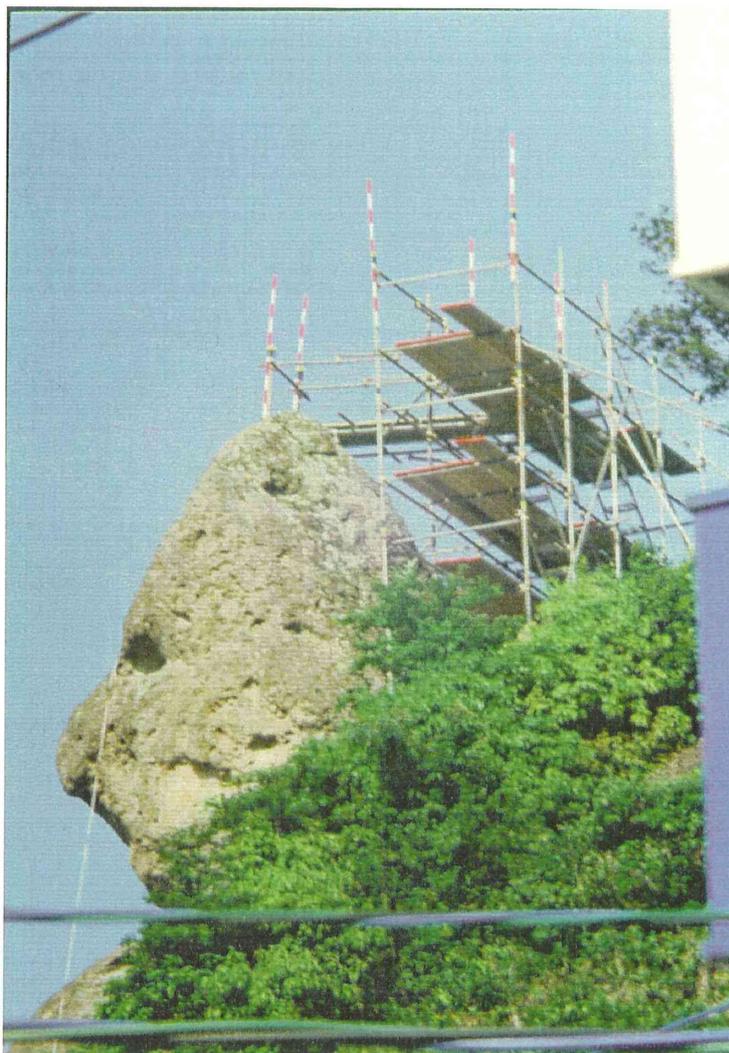


Fig.3.15 Taget Huge Rock from site T-8

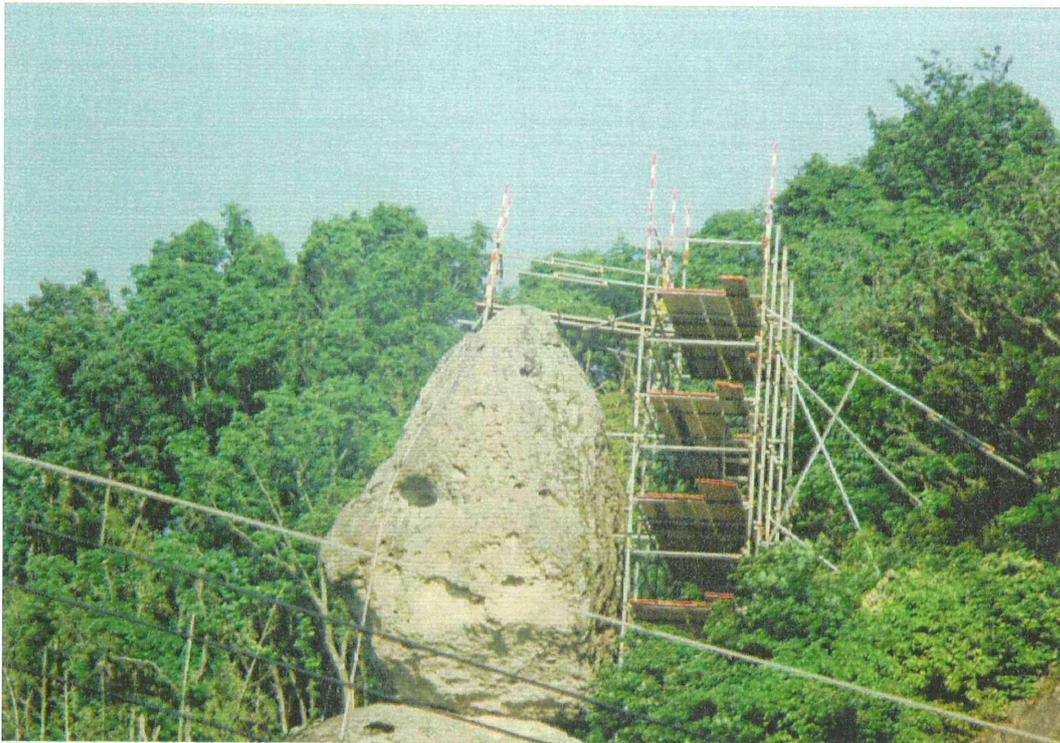


Fig.3.16 Taget Huge Rock from site T-9

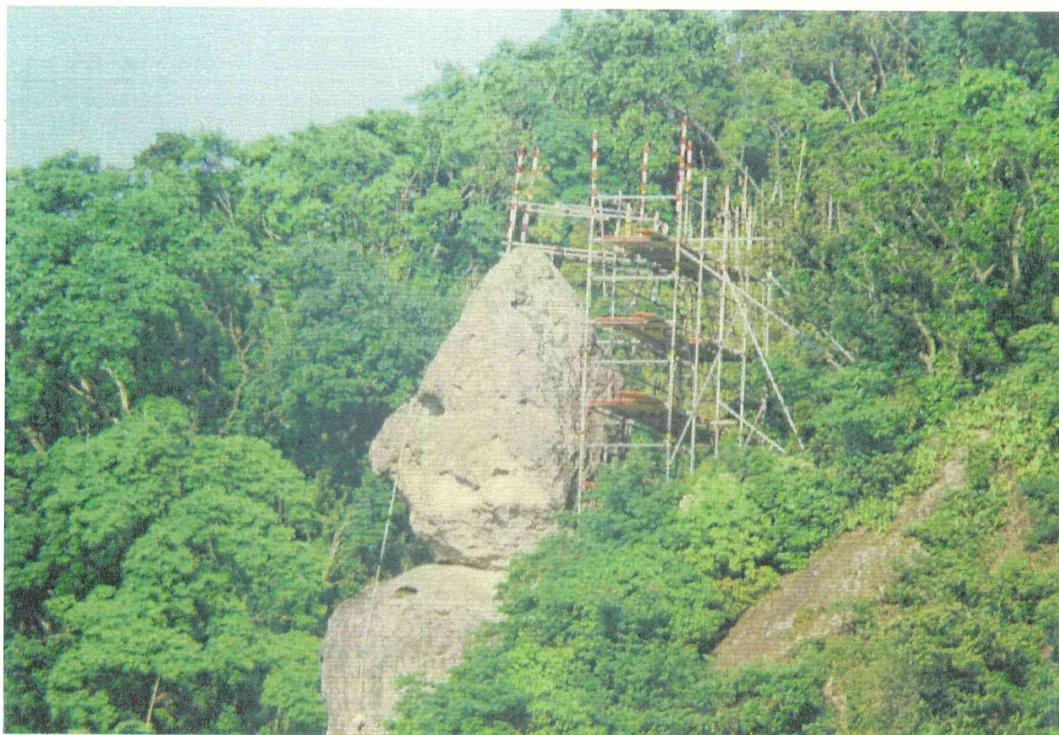


Fig.3.17 Taget Huge Rock from site T-10B

次に、岩の表面上の特徴点をコンピュータのマウス操作により指定し、この特徴点のデータを用いて、カメラの位置と姿勢をPhotoModelerにより校正した。Table 3.2 に校正した位置データとレーザセオドライトにより計測した結果との比較を示す。なお、この座標系では、対象としている巨岩はXYZ座標の原点に立っているものとしている。

この結果を見ると、X座標とY座標の値は精度良く校正されているが、Z座標のデータは比較的大きな校正誤差を持っていることがわかる。これは、画像毎のカメラ位置の変化を考えた場合、水平方向の位置(X,Y座標)は顕著に変化しているのに対し、カメラの鉛直方向の位置(Z座標)である撮影位置の高さはほとんど変化していないために、高さ方向に関する情報が少なかったためと考えられる。

次に、岩の輪郭曲線をコンピュータのマウス操作により指定し、先の校正データを用いて、 $z=-0.8\text{m}$ から $z=6.1\text{m}$ まで 0.3m 毎の24断面について、各高さ毎に輪郭形状曲線の投影、断面形状の推定を行い、巨岩の断面形状の推定を行った。

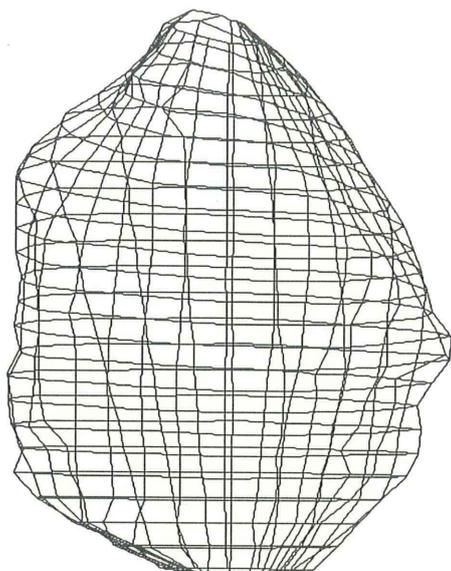
しかし、8枚の写真には岩の背面は完全には写っていないため、背面の形状は完全には得ることができなかった。そのため止むを得ず、背面の形状は別途人手により計測した。その人手により計測した点の総数は62点であった。また、この点に加え、46点の特徴点の3次元座標をステレオ画像の手法により別途計測している。このデータも岩の24断面の形状を決定するために用いた。

この全ての断面形状を用いて、巨岩の3次元モデルを Fig.3.18, Fig.3.19 に示すように復元することができた。それぞれ、ワイヤフレームモデルと陰影を付けたシェーディングモデ

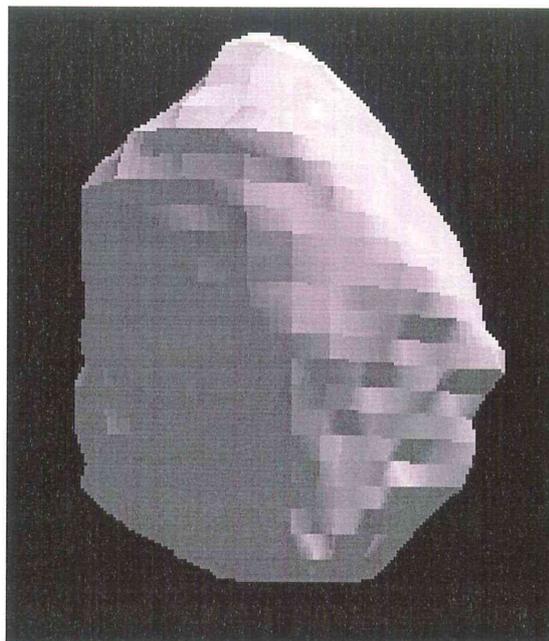
Table 3.2 Calibrated Data of Camera Coordinate
(right data are obtained by laser theodolite)

Point	X (m)	Y (m)	Z (m)
1	-92.63 (-99.78)	-97.33 (-95.33)	-6.34 (-10.01)
2	-89.27 (-89.78)	-18.56 (-18.31)	-32.50 (-33.32)
3	-89.60 (-89.69)	2.68 (2.54)	-35.98 (-41.79)
4	-113.77 (-114.87)	88.81 (88.29)	-51.35 (-59.81)
5	-47.78 (-48.11)	-71.52 (72.39)	-57.64 (-56.83)
6	59.36 (61.36)	142.25 (140.06)	-54.68 (-58.10)
7	21.85 (21.67)	212.89 (210.65)	-59.23 (-48.94)
8	92.45 (93.95)	260.71 (255.60)	-47.03 (-37.23)

ルを示す。Fig.3.10 , Fig.3.14 に示す写真と比較すると、巨岩の形状を良好に復元していることがわかる。

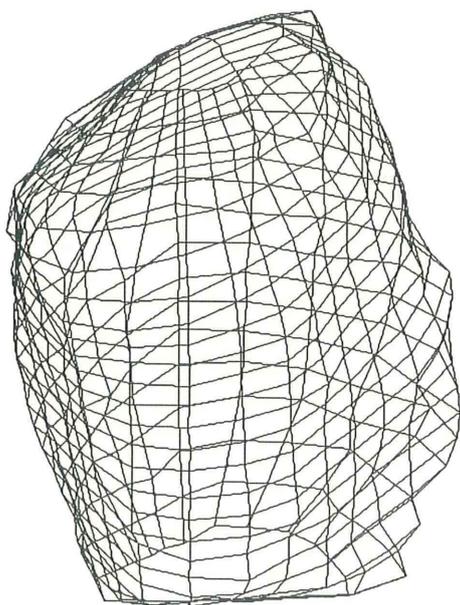


(a) Wire-frame model

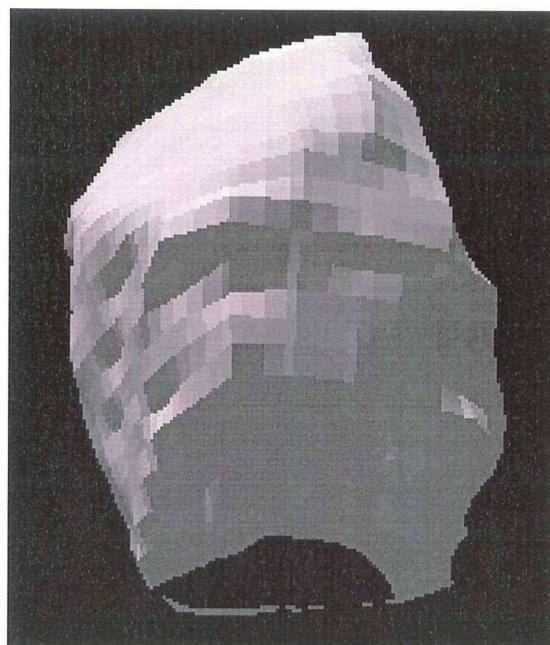


(b) Surface Model

Fig.3.18 Recovered 3-D Model of the Rock from site T-2



(a) Wire-frame model



(b) Surface Model

Fig.3.19 Recovered 3-D Model of the Rock from site T-7

[平和祈念像の計測]

次に、自然光下の対象物の3次元形状計測の例として、長崎市松山町にある平和祈念像 (Statue of Peace) について3次元形状計測を行った例を示す。平和祈念像は、原爆犠牲者の慰霊と世界恒久平和の願いをこめて、被爆10周年にあたる昭和30年8月9日に完成したもので、原爆落下中心地の北側の丘、平和公園内にある。制作者は長崎県出身の故北村西望氏で高さ9.7メートル、重さ30トンの青銅製である。上に指した右手は原爆の脅威を、水平に伸ばした左手は平和を、軽くとじたまぶたは原爆犠牲者の冥福を祈っているといわれている²⁴⁾。近年その老朽化も問題になっており、その3次元形状の計測は意味があることである。

この場合は先の巨岩の場合と異なって非常に複雑な形状であり、また、輪郭形状を用いる計測手法にとって苦手とする凹部も多数含まれている。そのため、全体の詳細形状を一度に計測することは困難であるので、本章では、まず全体の概略形状を計測し、次に、平和祈念像の特徴である高く掲げた右腕と頭部について詳細形状の計測を行った結果を示す。

本実験での画像の撮影にはデジタルスチルカメラ (MINOLTA (株) 製、RD-175) を使用した。このカメラの画像サイズは1528H×1146V (約175万画素) であり、ビデオカメラよりも高い分解能が得られる。また、CCDを用いるデジタルカメラであるのでカメラ校正を行う上で非常に有利である。このカメラのレンズには28-105mmのズームレンズを最も広角側 (f=28mm) で使用し、対象物の構図の関係から主に縦 (ポートレート) 位置で撮影を行った。なお、このレンズの場合の実際の焦点距離の値を、大きさが判っている物体が画像中に写る大きさから逆算して求めたところ、f=2750pixelであった。本カメラはコンピュータへのインターフェイスをSCSI、PCMCIAカードの2種類を持っており、撮影した画像を直接コンピュータ上に取り込むことが容易にできる。

平和祈念像の周囲から撮影した画像を Fig.3.20 から Fig.3.32 に示す。

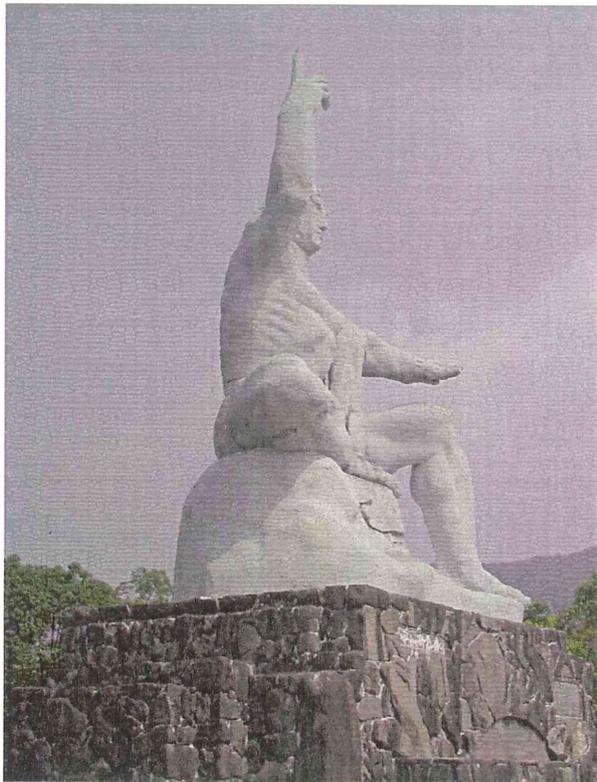


Fig.3.20 Target Statue (1)

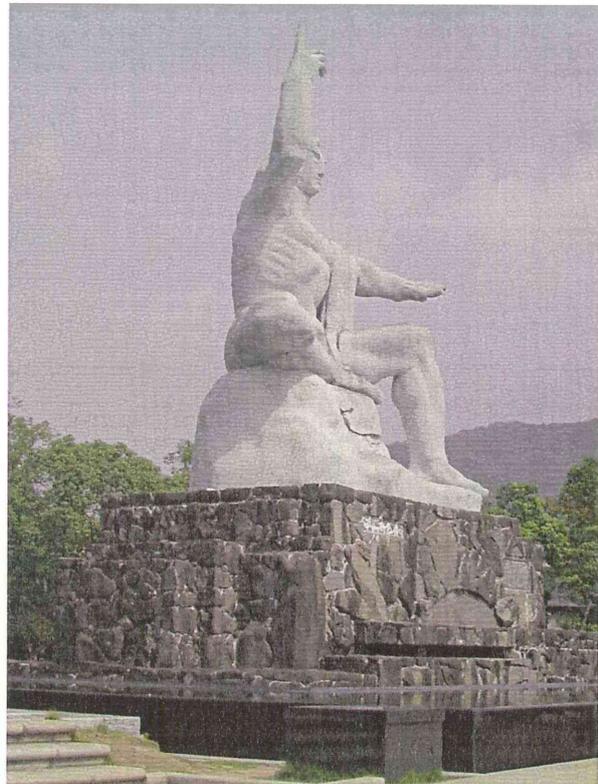


Fig.3.21 Target Statue (2)

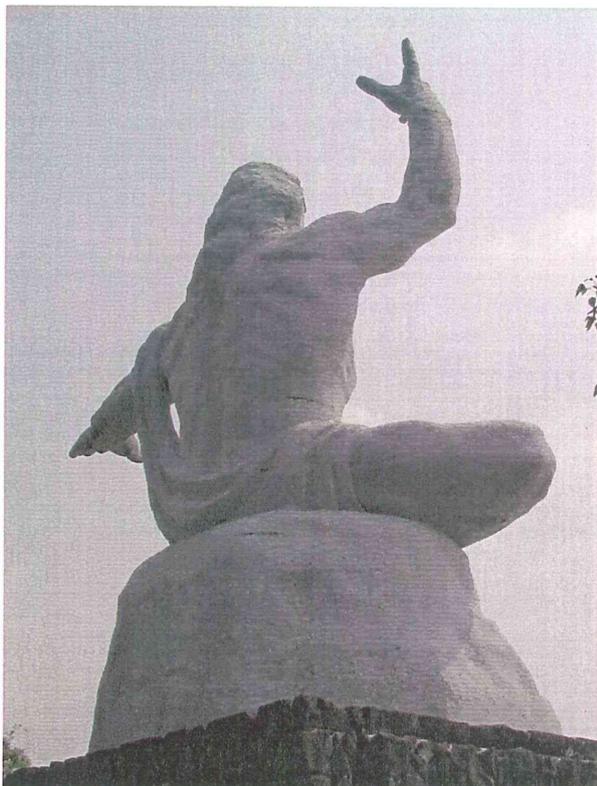


Fig.3.22 Target Statue (3)



Fig.3.23 Target Statue (4)

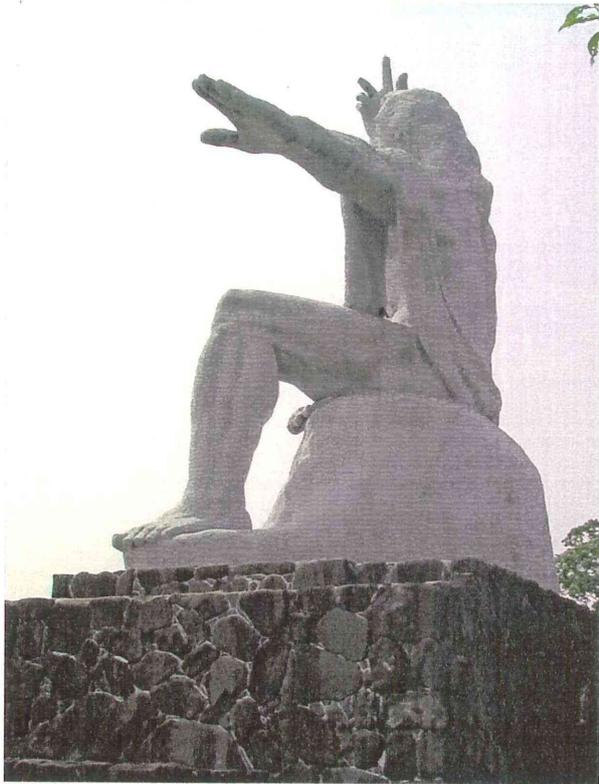


Fig.3.24 Target Statue (5)

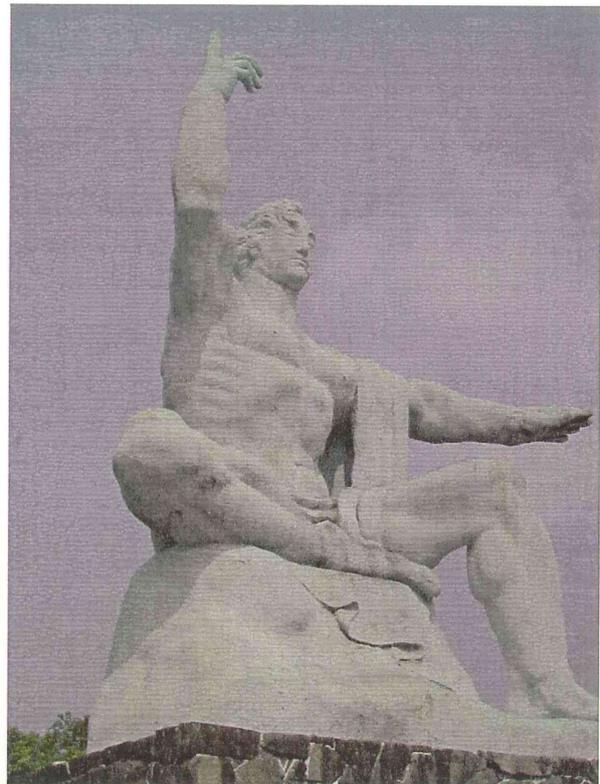


Fig.3.25 Target Statue (6)

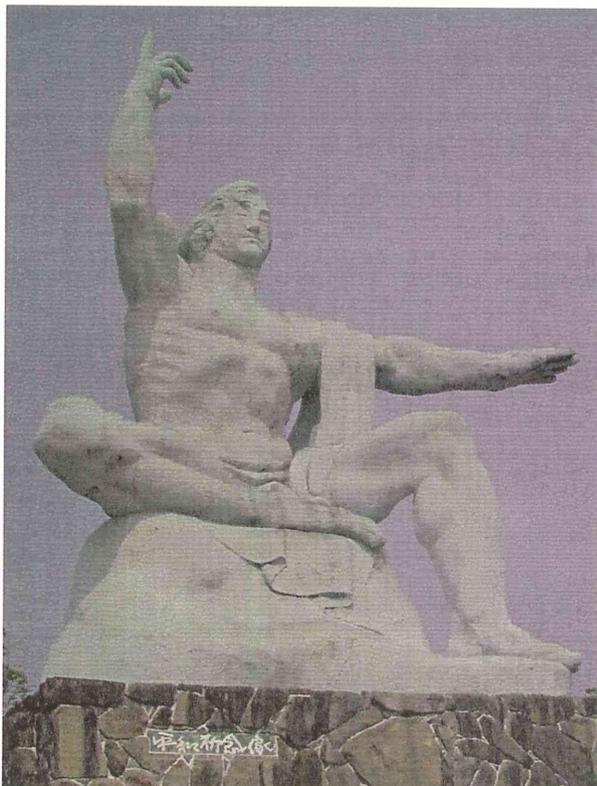


Fig.3.26 Target Statue (7)

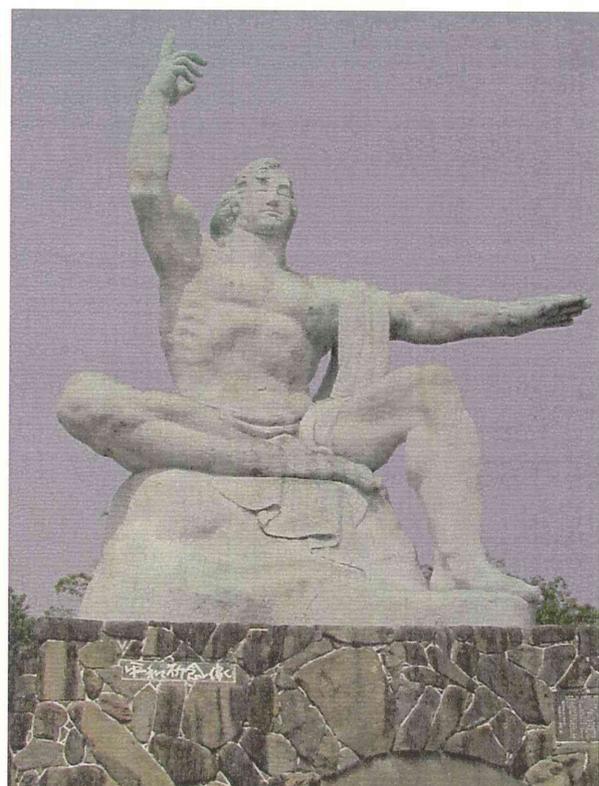


Fig.3.27 Target Statue (8)

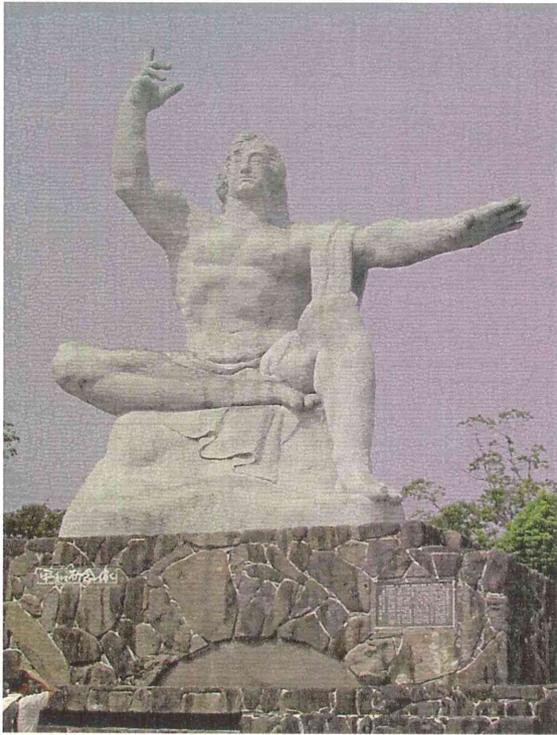


Fig.3.28 Target Statue (9)

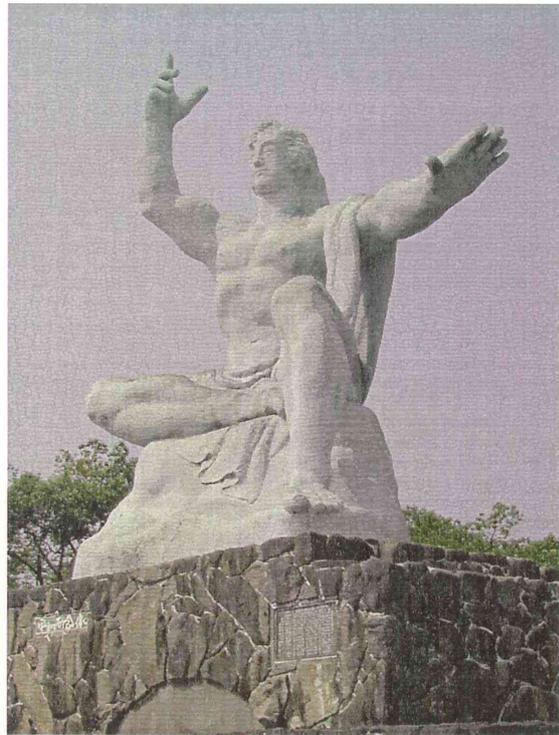


Fig.3.29 Target Statue (10)

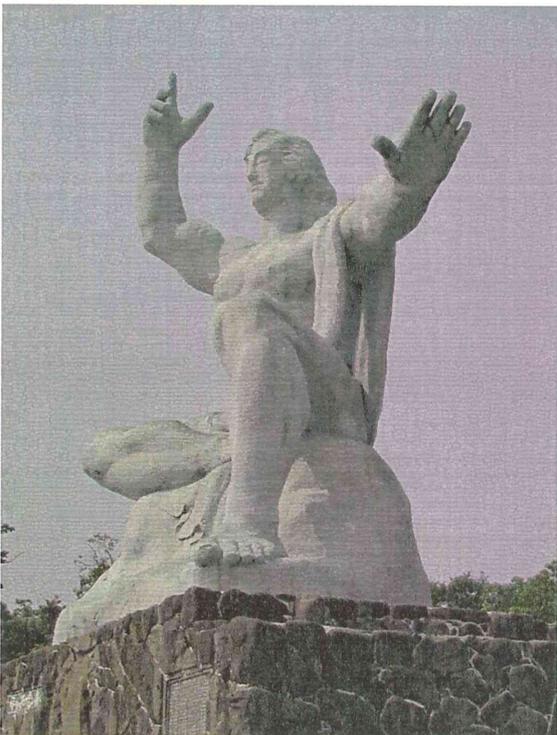


Fig.3.20 Target Statue (11)

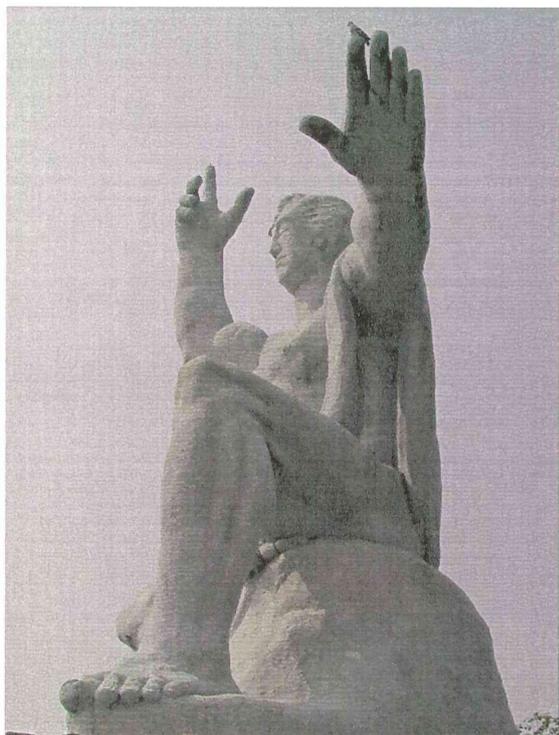


Fig.3.31 Target Statue (12)

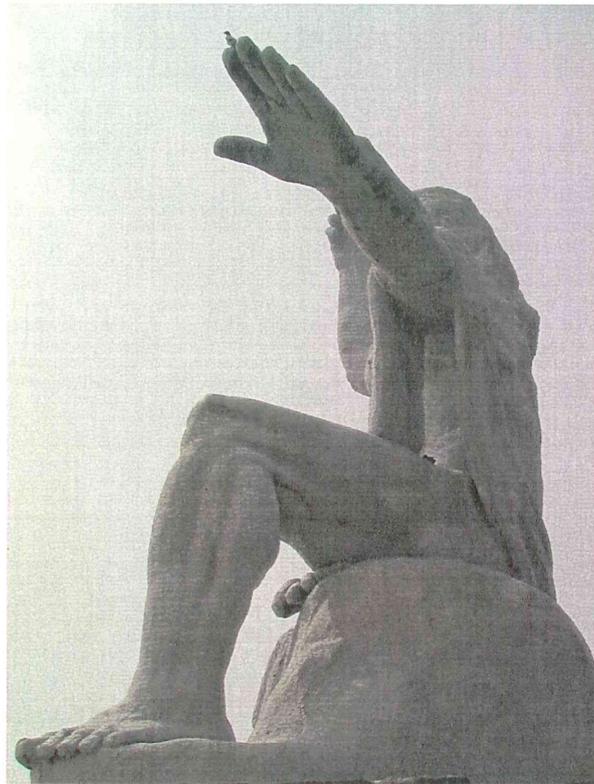


Fig.3.32 Target Statue (13)

この13枚の画像上で、像の表面上や台座上の特徴点をコンピュータのマウス操作により指定する。この特徴点のデータを用いて、カメラの位置と姿勢を校正した。次に、Fig.3.33に示すように像の輪郭曲線をコンピュータのマウス操作により指定する。Fig.3.33(a)はFig.3.20の画像において、Fig.3.33(b)はFig.3.28の画像において、それぞれ指定した輪郭曲線である。次に、先に求めたカメラ校正データを用いて、各z高さ毎に輪郭形状曲線の投影を行い、その交わる領域について断面形状の推定を行い、断面形状を推定した。Fig.3.34に13枚の画像から求めた輪郭形状曲線を投影した例を示す。Fig.3.34(a)の投影においては像の右腕と頭の断面の、Fig.3.34(b)の投影においては像の右腕の親指と人さし指の断面の、それぞれ形状が現れていることがわかる。

この全ての断面形状データを用いて、3次元形状操作ソフトウェア Shade により平和祈念像の3次元モデルを Fig.3.35 ~ Fig.3.40 に示すように復元することができた。それぞれの図に示す番号(1)~(13)は、Fig.3.20 から Fig.3.32 に示す写真に付した番号と対応しており、それぞれの図の(a)には解析に用いた元の画像を示し、(b)には復元した3次元ワイヤフレームモデルを元の画像と同じ位置から眺めた場合に得られる画像を示した。それぞれの画像にお

いて比較すると、平和祈念像の全体形状が良好に復元されていることがわかる。また、先に述べたように、平和祈念像の形状が非常に複雑なので全体の詳細形状を一度に求めることが難しいため、平和祈念像の右腕と頭の部分についてのみ詳細形状の推定を行い、右腕については19断面について、頭部については22断面について、それぞれ断面形状の推定を行った。右腕と頭部についてワイヤフレームモデルと陰影を付けたシェーディングモデルを各図の(c)~(f)に示す。それぞれの画像において比較すると、頭部については顔の凹凸や前頭部の頭髮の形状が良好に復元されている。また、右腕については、特徴的な2本の指（親指と人さし指）の形状を復元していることがわかる。しかし、その他の3本の指は判別することができない。これは、ほとんどの画像において3本の指の輪郭形状が掌の部分と一体になって見えているためと、各断面への投影を行う際に入り組んだ複雑な形状をしている指の部分の輪郭形状曲線が交錯してその交叉領域を求めることが難しいためである。

また、興味深いことであるが、撮影した画像では見えていなかった部分の形状を見ることができる。例えば、Fig.3.32では、像の左腕が隠しているために右腕、頭ともほとんど見えていなかったにもかかわらず、復元した3次元形状ではFig.3.40に示すようにこの方向から見えるであろう右腕と頭部の形状を復元することができる。これは他の方向からの画像の情報があるために復元できるからであるが、非常に興味深く、また、種々の利用の可能性が考えられるものである。

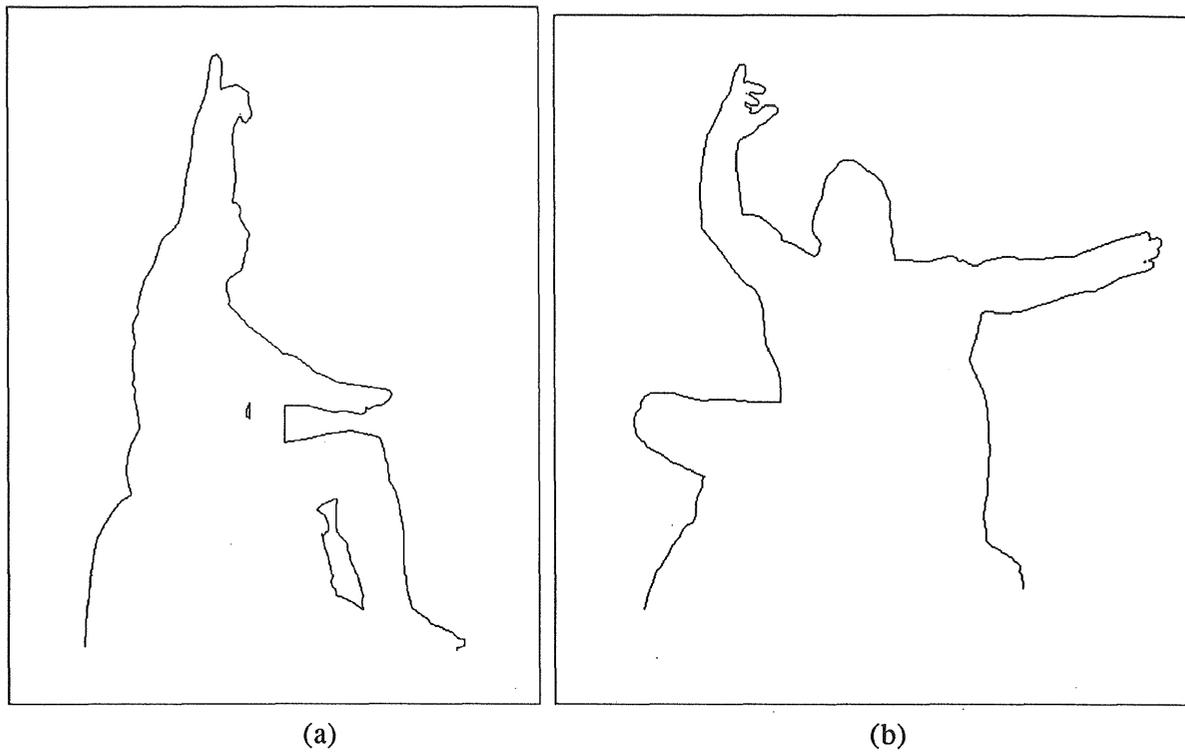


Fig.3.33 Samples of Contour of the Statue

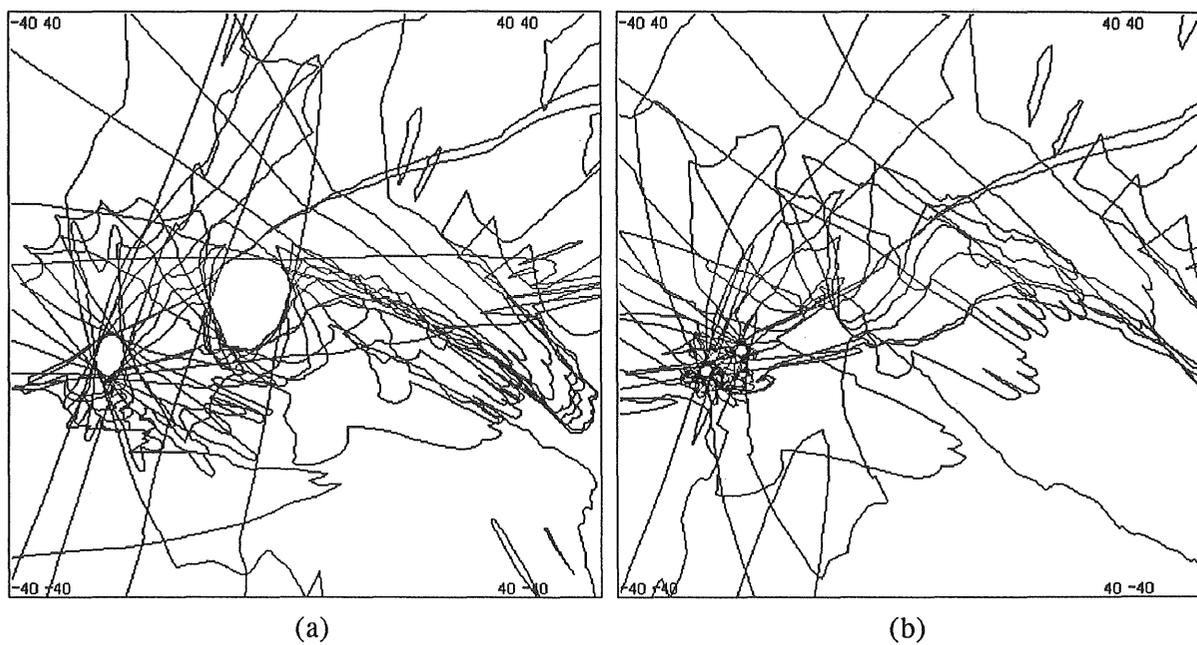
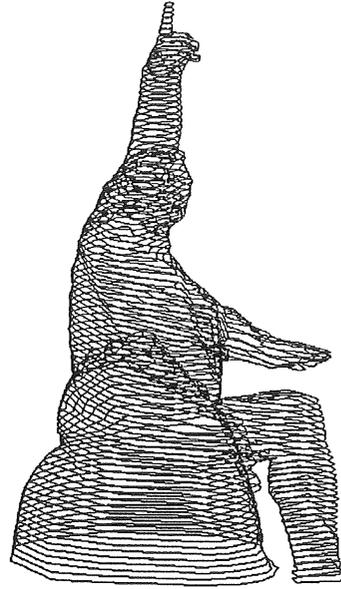


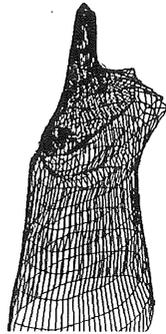
Fig.3.34 Samples of Estimated Cross-section of the Statue



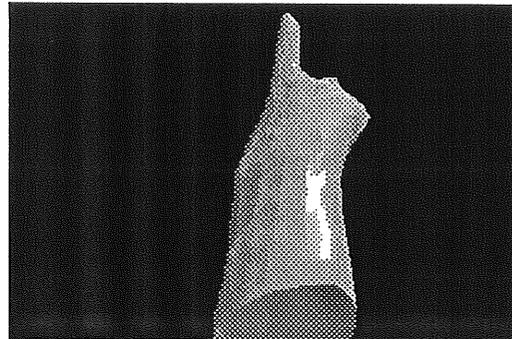
(a) Original Image of the Statue



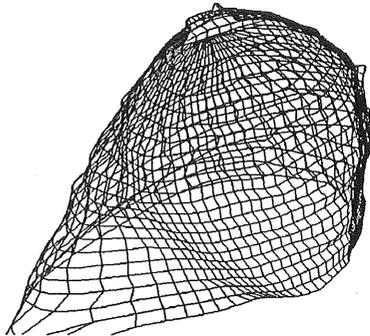
(b) Wire-frame Model of the Statue



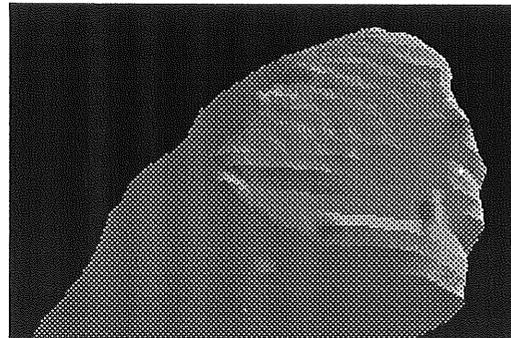
(c) Wire-frame Model of Right Arm



(d) Surface Model of Right Arm

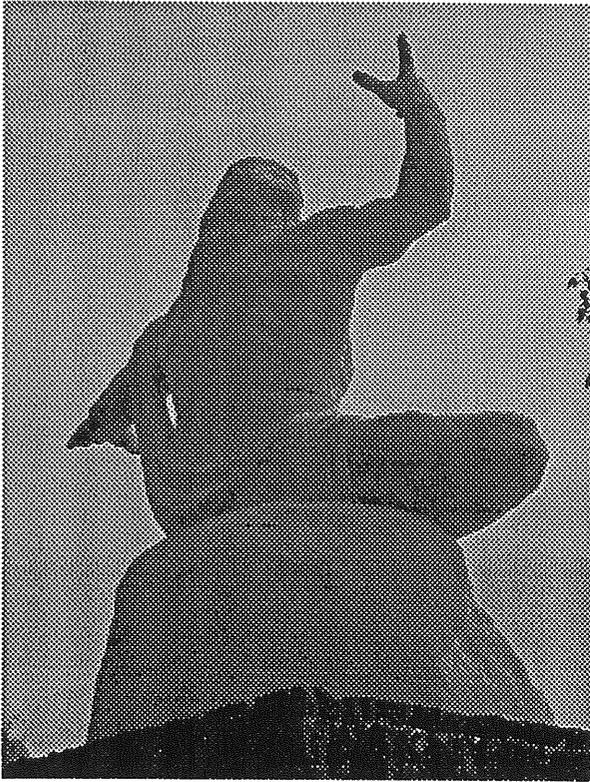


(e) Wire-frame Model of Head

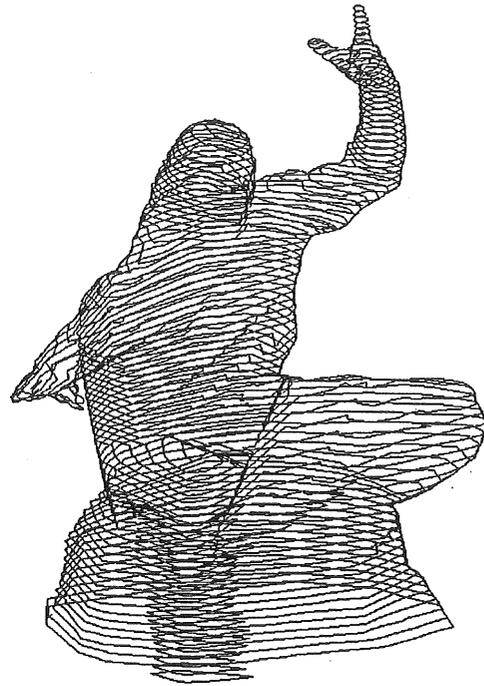


(f) Surface Model of Head

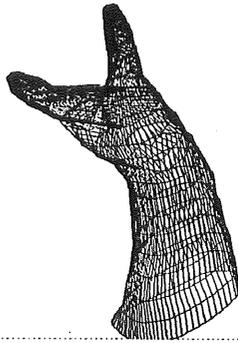
Fig.3.35 Recovered 3-D Model of the Statue (1)



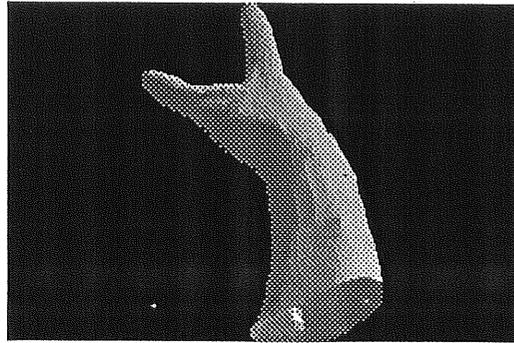
(a) Original Image of the Statue



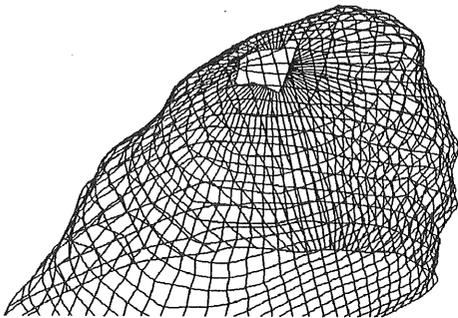
(b) Wire-frame Model of the Statue



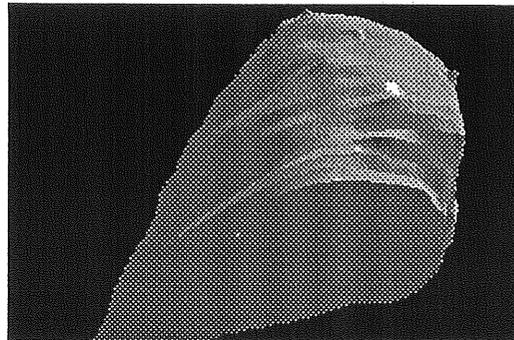
(c) Wire-frame Model of Right Arm



(d) Surface Model of Right Arm

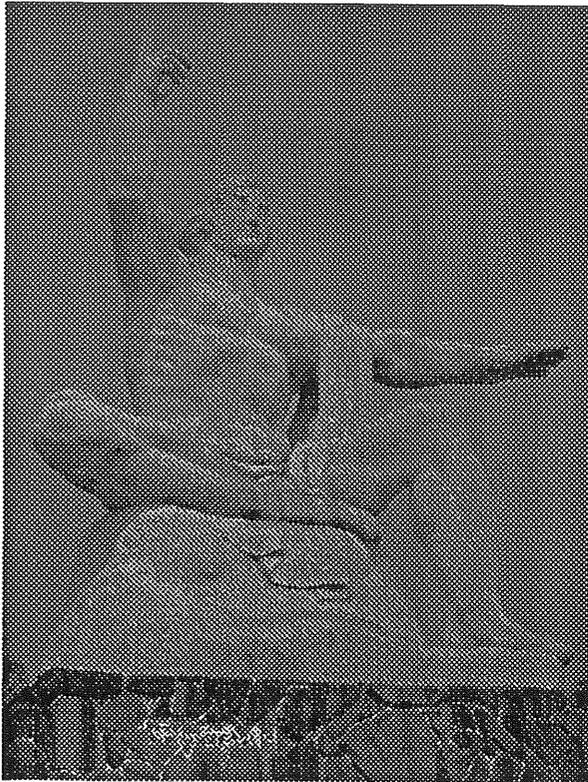


(e) Wire-frame Model of Head

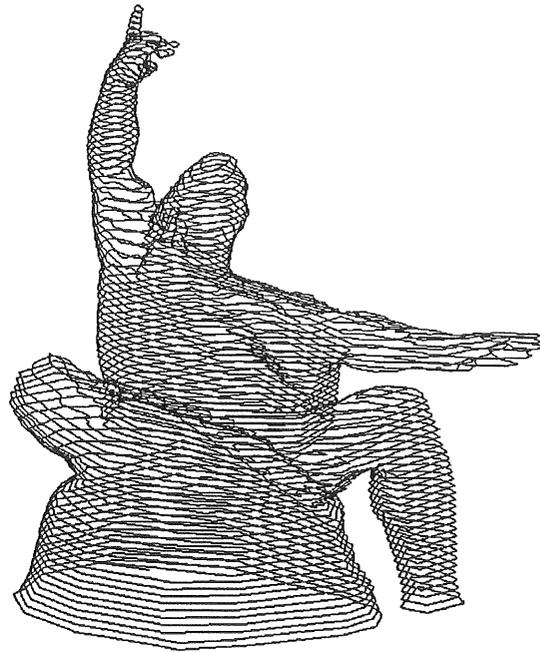


(f) Surface Model of Head

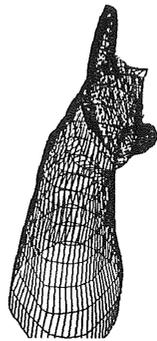
Fig.3.36 Recovered 3-D Model of the Statue (3)



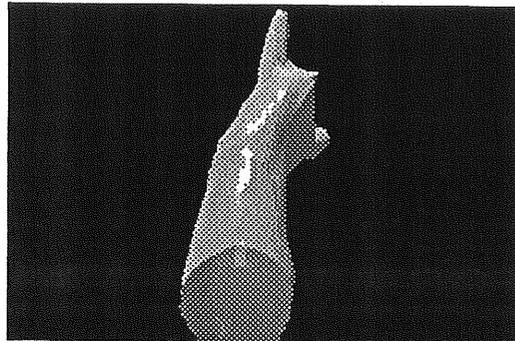
(a) Original Image of the Statue



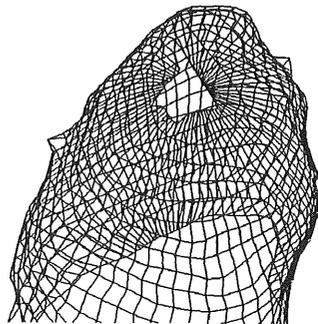
(b) Wire-frame Model of the Statue



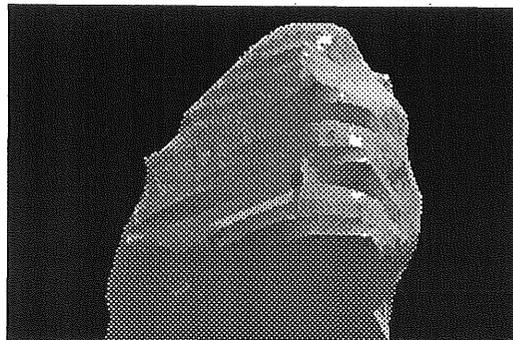
(c) Wire-frame Model of Right Arm



(d) Surface Model of Right Arm

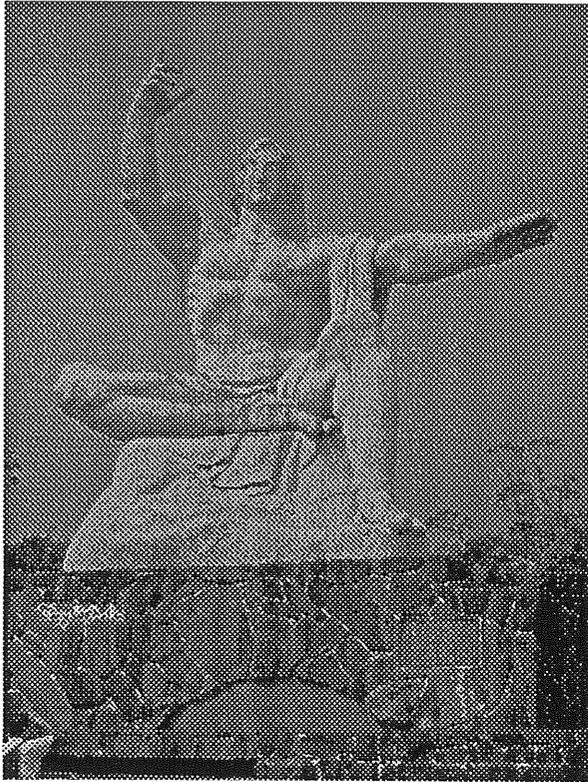


(e) Wire-frame Model of Head



(f) Surface Model of Head

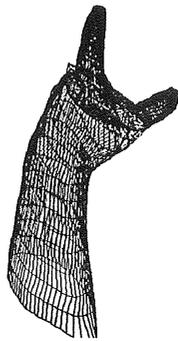
Fig.3.37 Recovered 3-D Model of the Statue (7)



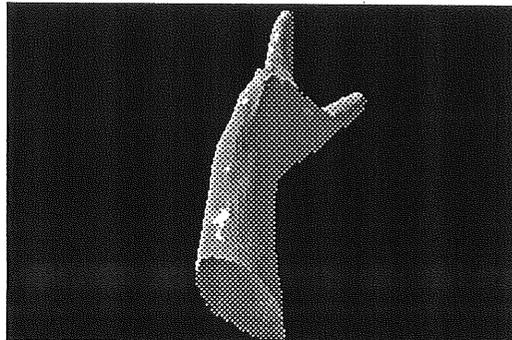
(a) Original Image of the Statue



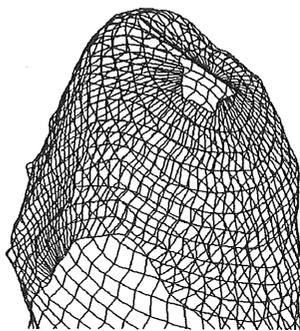
(b) Wire-frame Model of the Statue



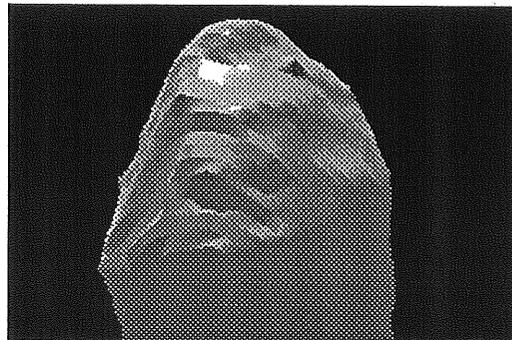
(c) Wire-frame Model of Right Arm



(d) Surface Model of Right Arm

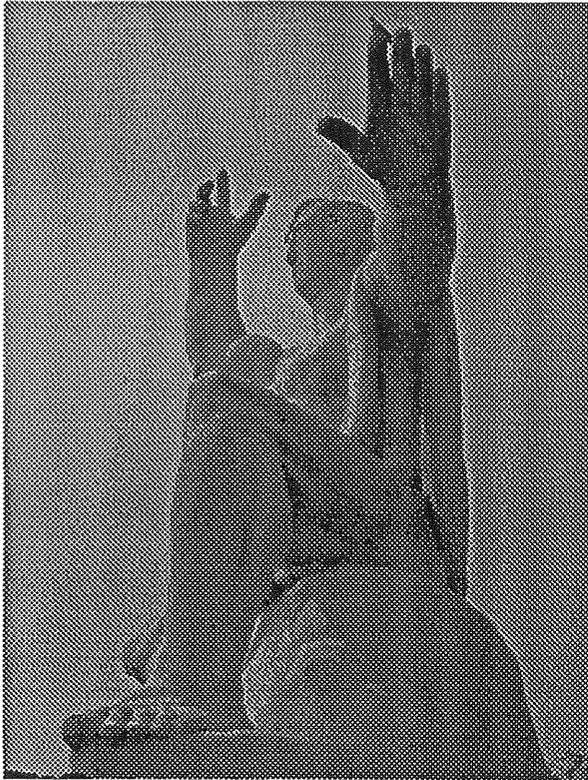


(e) Wire-frame Model of Head

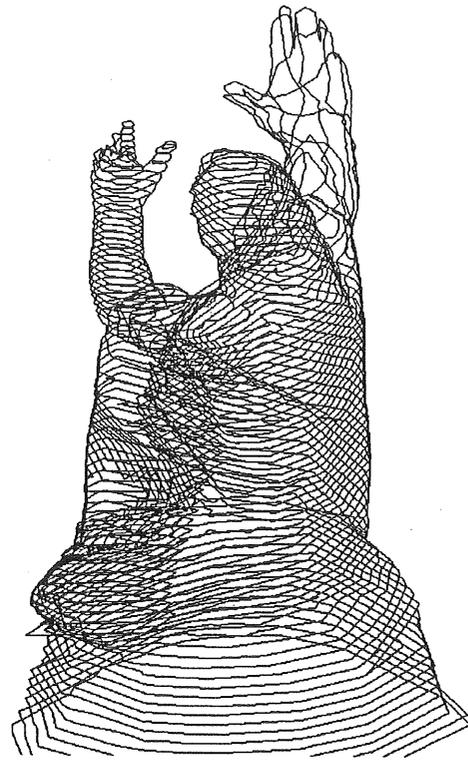


(f) Surface Model of Head

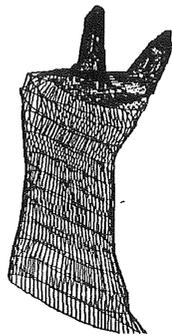
Fig.3.38 Recovered 3-D Model of the Statue (9)



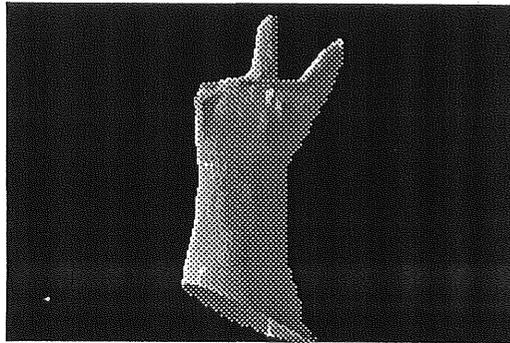
(a) Original Image of the Statue



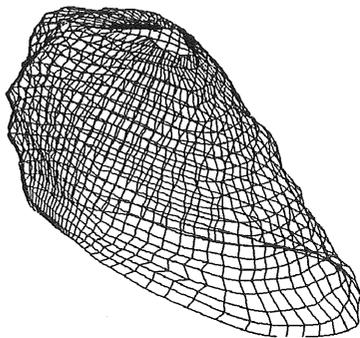
(b) Wire-frame Model of the Statue



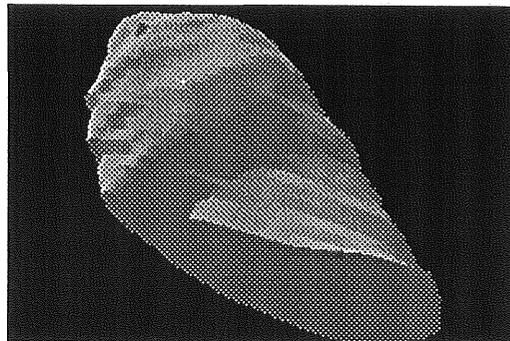
(c) Wire-frame Model of Right Arm



(d) Surface Model of Right Arm

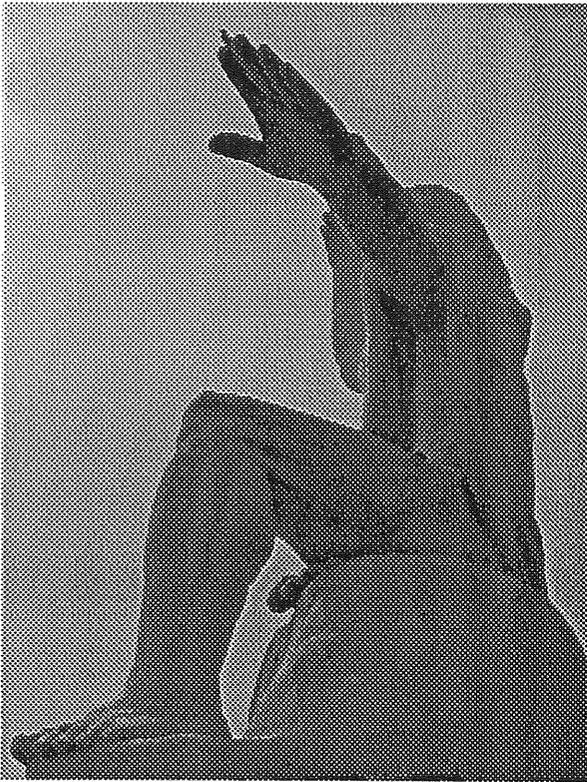


(e) Wire-frame Model of Head

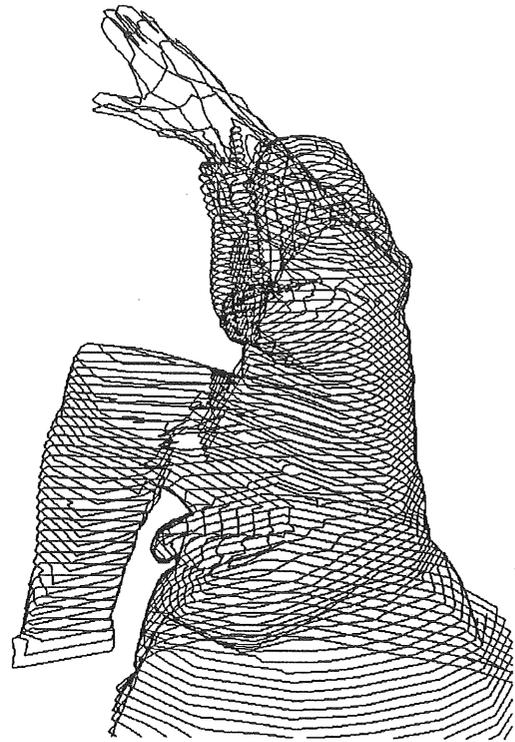


(f) Surface Model of Head

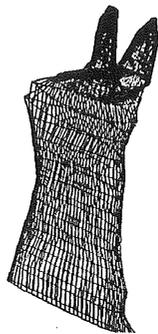
Fig.3.39 Recovered 3-D Model of the Statue (12)



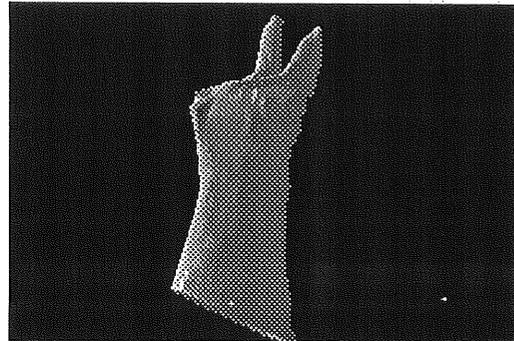
(a) Original Image of the Statue



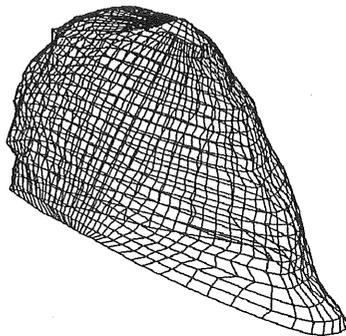
(b) Wire-frame Model of the Statue



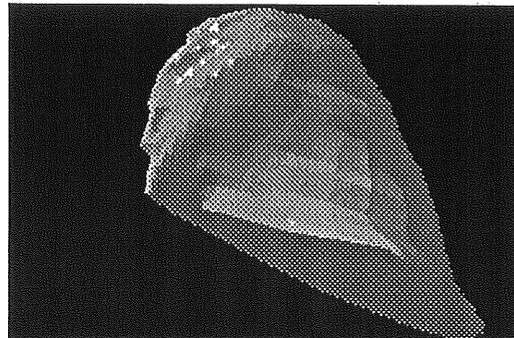
(c) Wire-frame Model of Right Arm



(d) Surface Model of Right Arm



(e) Wire-frame Model of Head



(f) Surface Model of Head

Fig.3.40 Recovered 3-D Model of the Statue (13)

3.5 考察と結論

第2章で検討した対象物の幾何学的形状の特徴を用いるカメラ校正手法や、ステレオ画像による3次元形状計測手法は有効な計測手法であるが、この手法は自然物のように複雑な表面を持つ対象へ適用する場合には、その対象物表面上に幾何学的な形状の特徴が認めにくいこと、あるいは、複数の画像間で共通する対応点を抽出する作業において数点の特徴点以外は見い出せないことから、適用が難しいという弱点を持っていることが判った。この問題を解決するため、本章では、数点の特徴点でカメラの位置、姿勢の校正を行う手法、および、輪郭形状を解析することによって3次元形状を推定する手法を示した。

輪郭形状を解析する手法を用いることにより、光切断法等の一般的な画像計測手法では計測困難な自然条件下での対象物の3次元形状の計測を行うことが可能である。これにより、例えば、土木分野における山体、河川、岩等の計測が容易に行うことができ、災害予防や災害復旧において有効な手段になると思われる。

輪郭形状を用いて3次元形状を計測する手法についてはこれまで、土井、三宅らによって研究されている^{175)~174)}が、カメラの位置、方向は予め校正したものを用いていた。これは実験室内で計測可能な対象物のような大きさであれば、予めカメラの位置を校正しておくことは容易であるが、今回計測を行った例のように自然界の岩や巨大な構造物の場合、測量機器を用いてカメラの校正を行う作業が必要になる。そのために、これまでは対象物の表面上に座標値が判っている点を予めマーキングしておく手法を用いていた¹⁵⁵⁾。

本章では、そのような条件を必要としない、さらに実用的な手法を示した。この手法では、撮影した画像中の情報だけからカメラの撮影位置、姿勢を校正することができる。プラスチックボトルを計測する実験において、その適用可能性を示し、さらに、自然光下での巨岩や平和祈念像の3次元形状計測を行い、その実用性を示した。

なお、カメラの校正を行うために PhotoModeler というバンドル法の手法を取り入れた校正ソフトウェアを一部の作業に使用したが、このソフトウェアはカメラの設定を校正し、岩の形状を復元するのに有効であった。

また、カメラ校正精度については、巨岩の撮影に使用したカメラの位置の校正結果を予めレーザセオドライトで実測した値と比較した結果、良好な校正結果を得たが、高さ方向につ

いては若干の誤差を含んでいた。これはカメラの高さ方向の変化が少なかったためである。これは平和祈念像の計測においても同様で、ほぼ同一面内である地表からのみ画像の撮影を行っているために高さ方向の変化が少なく、高さ方向に関する情報が少ない。しかし、これは逆にこの高さ近傍から見た画像の景観シミュレーションを行うにあたっては、カメラ校正結果の中の高さ方向の情報の影響が少ないことも意味している。つまり、カメラ校正結果の高さ方向の情報に多少の誤差が含まれていても、得られる画像の差が少ないということである。

また、本章で用いた輪郭形状を用いる手法の本質的な問題点として、凹部の形状を復元することができないという点がある。例えば、平和祈念像の右腕について計測を行った結果を見ると、腕の部分と親指、人さし指の2本の指については良好な3次元形状を得ることができたが、残りの3本の指については掌の部分と一体になって見えているためと、各断面への投影を行う際に入り組んだ複雑な形状をしている指の部分の輪郭形状曲線が交錯してその交叉領域を求めることが難しいために、3次元形状を復元することができなかった。この対策として、投影された輪郭形状曲線の交叉領域を簡単に探索するアルゴリズムの検討を行っている。また、これに対する他の解決方法として、土井らも述べているが凹部の形状を見通すことができる方向からの画像を使用する手法がある。例えば、平和祈念像の場合、像の直下、あるいは上空からの画像も併用すればよい。もちろん、対象物によっては撮影構図に制約を受ける場合もあるが、次章で述べる低高度リモートセンシングシステムを用いた上空からの撮影が有効であると考えられる。また、そのほかの手法として、ステレオビジョンやレーザスポット等の他の3次元形状計測手法を併用することも可能である。

第4章 低高度リモートセンシングシステムのための 複数画像の接続手法

第2章で述べたようにデジタルカメラの画像を用いて3次元形状計測を行うにあたって、画像の視野角と分解能が常に問題になる。1つの解決策は広角レンズを使用することであるが、カメラの解像度をそのままとして広角レンズを用いると画像の分解能が低下する。これを避けるためには高解像度のデジタルカメラ、あるいはフィルムを用いたスチルカメラを用いるが必要になるが、高解像度のデジタルカメラは一般に高価であり、フィルムを用いたカメラの場合は2.6節で述べたようにフィルム面上の位置とコンピュータに取り込んだ時の座標との補正が面倒である。また、いずれのカメラでも、その視野角以上の広視野角の画像が必要とされる場合も生じる。

このような状況は、長崎大学工学部機械制御学研究室で研究している低高度リモートセンシングシステムにおいても同様であり、このシステムに搭載するカメラにより撮影した画像を接続する必要が生じている。

本章では、画像に含まれる情報を用いて画像間の相対的な位置関係を解析し、複数画像を接続する手法について述べる。この接続を行うことにより、通常のカメラにより撮影した画像を用いて、分解能を落とすことなく高視野角の画像を得ることができることを示す。さらに、本手法を気球を用いた低高度リモートセンシングシステムで撮影した画像に適用した例を示す。

4.1 デジタル画像の解像度と低高度リモートセンシングシステム

最近のコンピュータのハードウェア、ソフトウェアの著しい進歩により、コンピュータ上で画像を表示、操作することが多くなり、デジタル画像が多くの場面で用いられるようになってきている。例えば、医療分野においては手術シミュレーションやバーチャルリアリティ

(Virtual Reality、仮想現実感、以下ではVRと略す)^{94)~102)}を用いた術中支援システム^{103)~116)}、土木分野においては河川の計測や水流のシミュレーション^{67)~73)}、建築分野では建物内の歩行のシミュレーション^{74)~85)}、その他、化学、設計、観光²³²⁾、等の多くの分野で使用されている。

また、このようなデジタル画像をコンピュータに取り込む方法であるが、写真や印刷物等の既存の媒体からのスキャナによる取り込みの他に、近年、デジタルカメラ（スチルカメラ、ビデオカメラ）が一般的に用いられるようになっており、コンピュータへデジタル画像を取り込むことが非常に容易になっている。

一旦、コンピュータへ画像を取り込んでしまえば、種々の手法による画像処理を加えることは容易な作業である。画像処理の種類、用途には色々なものがあるが、工業的に重要な典型的な例として、対象物が写っている複数画像を用いる3次元形状計測²³⁷⁾がある。このような3次元計測を行うソフトウェアは既に現在、市販されてもおり、3次元CG（コンピュータグラフィクス）のデータを作成、出力することもできるようになっている。

ところで、このようにデジタル画像を使用する際に、その画像の視野角と解像度が重要なポイントになるが、簡便に使えるデジタルカメラで撮影することができる画像の視野角では不足する場合がある。1つの解決策は広角レンズを使用することであるが、カメラの解像度は通常 640H×480V 前後であり、解像度をそのままとして広角レンズを用いると画像の分解能が低下することになる。しかし、解像度を落とさずに広視野角の画像が求められる場合がある。その具体的な例として、長崎大学工学部機械制御学研究室で研究を行っている低高度リモートセンシングシステム（Low Altitude Remote Sensing System）が挙げられる。このシステムでは、Fig.4.1 に示すように気球に市販の（安価な）デジタルビデオカメラを取り付け、このカメラを用いて地上の画像を撮影している。

カメラで撮影した画像は電波により地上のオペレータの下ヘリアルタイムで送信し、オペレータはその画像を見ながら、カメラの方向（上下、左右）、ズームの比率をラジオコントロールにより調整する。

このような上空からの写真撮影（いわゆる、航空写真）は一般にセスナ飛行機のような航空機が用いられることが多いが、飛行機は航空法の規制により高度300m以下で飛行することができないために低高度で撮影することができない、あるいは、航空機は時速数百kmで飛行

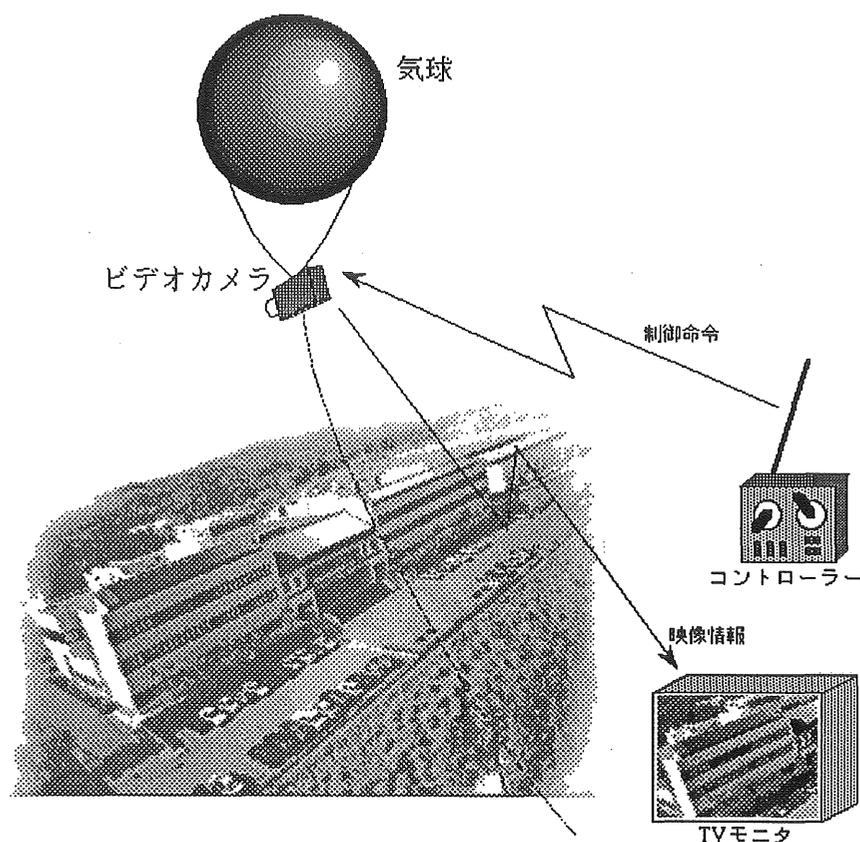


Fig. 4.1 Low Altitude Remote Sensing System

しているために1ヵ所に係留して安定して撮影することができない、といった問題点がある。これに対し、気球を用いると、30mから100mの高度に浮揚して画像を安定して撮影することが容易にできる。

Fig.4.2 に撮影に使用している気球を示す。この気球の下にデジタルビデオカメラ、スチルカメラ等を搭載して地上の対象物の画像を撮影を行う。

また、Fig.4.3 に本システムにより撮影した画像の例を示す。この画像は長崎県工業技術センターの建物を上空約20~30mの位置から撮影したものである。撮影は、35mmフィルムを用いるスチルカメラ（CONTAX G2+28mmレンズ）により行った。

このようにスチルカメラを用いて撮影することによって、良好な画像を得ることが出来るが、撮影時には風による揺れによって気球が安定しない場合も多く、TVモニタによって画像を確認しながら撮影しても必ずしも1枚の画像中に必要な範囲が全て入っているという保証はない。また、レンズの焦点距離の制約があって、必要な角度範囲の画像が1枚の画像に撮

影できるとは限らない。さらに、1枚の画像により得られる解像度には限界があり、それ以上の解像度を求められる場合もある。

このような場合の解決策として、高価な広角レンズと高解像度のカメラを用いるのも1つの手段ではあるが、別の解決策として、簡便に使用できる（安価な）デジタルカメラを用い

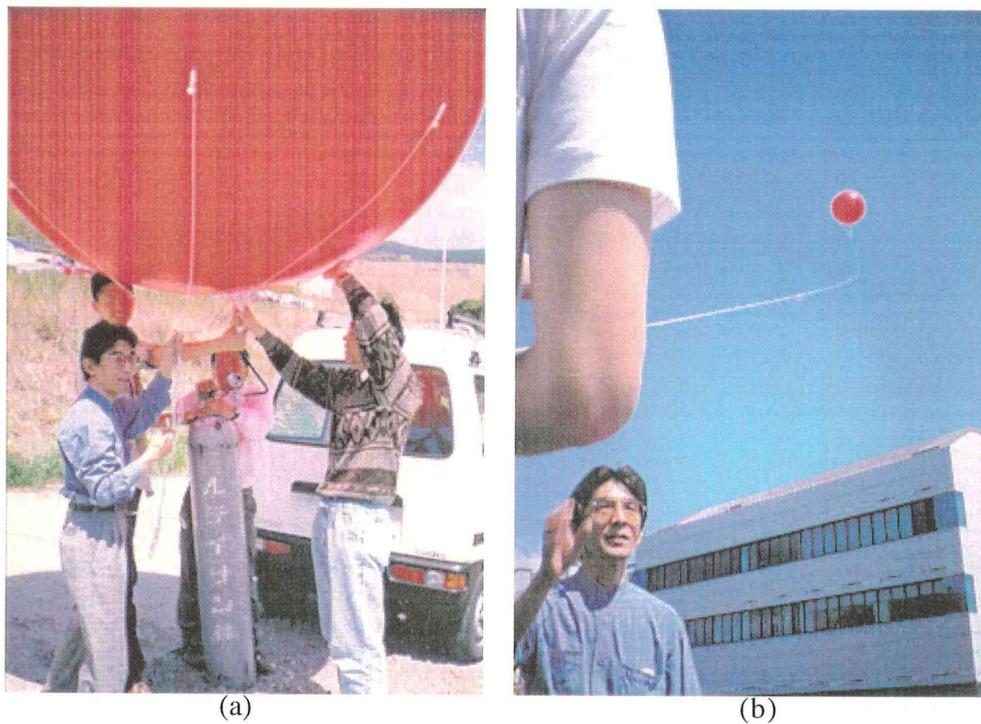


Fig.4.2 Low Altitude Remote Sensing Using Balloon

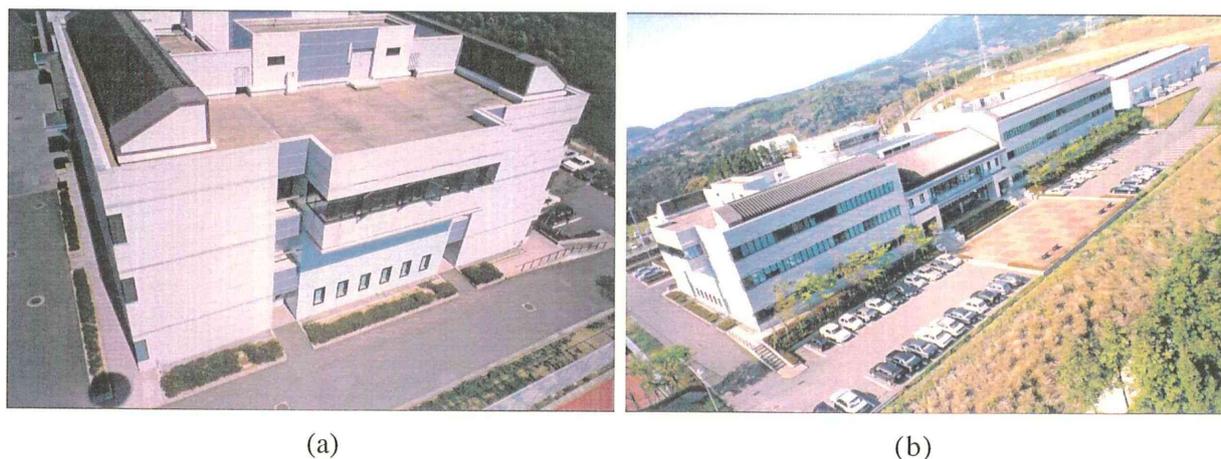


Fig.4.3 Sample Images from Low Altitude Remote Sensing Using Balloon

て Fig.4.4 に示すように撮影対象範囲を分割して撮影し、その複数画像の間の幾何学的な相対的位置関係を考慮して接続するという方法がある。この手法により、広視野角の画像や高解像度の画像を得ることができる。なお、画像撮影時にカメラの方向を完全に把握、記録することは困難なので、撮影した画像に含まれる情報だけを用いて画像間の相対的な位置関係を解析して画像の接続を行う必要がある。この手法により、通常のカメラにより撮影した複数の画像を接続して広視野角の画像を得ることができる。また、画像の接続を行う際に、撮影された画像についてはビデオカメラのズーム機能により画像毎に焦点距離が異なる場合も有り得る。そのような状況に対処できるように、画像に含まれる情報だけから焦点距離の補正を行う手法についても述べる。これまでに、画像接続については様々な研究が行われているが、本章では画像に含まれる情報だけからカメラの方向、焦点距離等の撮影条件の校正を行い、複数画像間の幾何学的な関係を算出して画像の接続を行う手法を示し、そのいくつかの利用例について述べる。

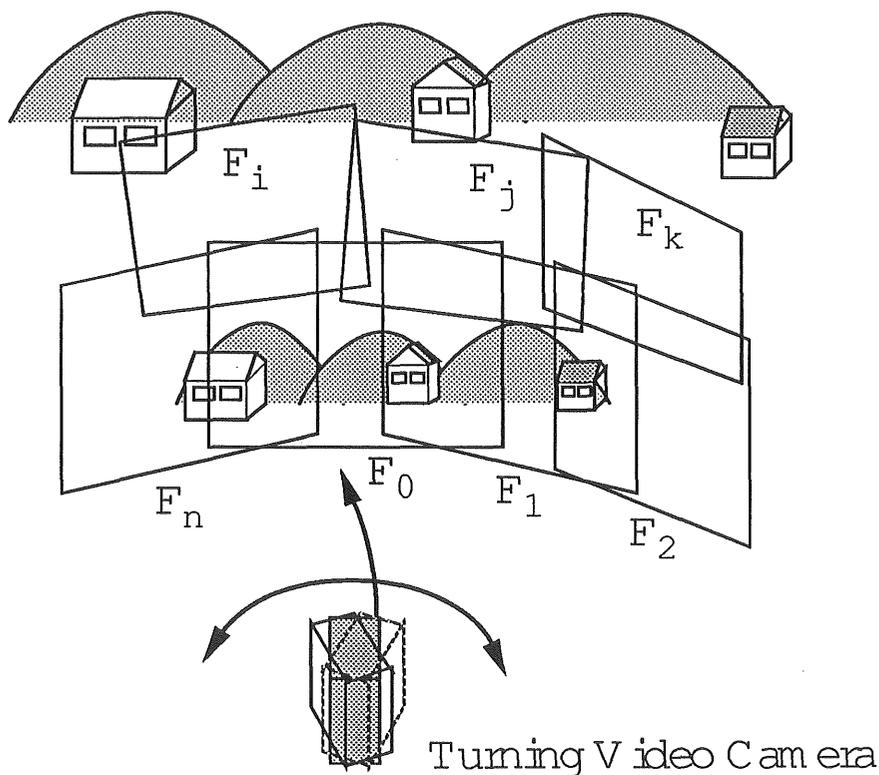


Fig. 4.4 Obtaining Images in Circumference

4.2 複数画像の接続

以下で、画像に含まれている情報から画像間の相対的な幾何学的位置関係を算出し、その結果に基づいて複数画像を接続する手法を示す。

[画像間の変換行列]

Fig.4.4 に示すように、固定した点から様々な方向へカメラを向けて、複数画像を撮影したと仮定する。この画像を以下の手法により接続することによって、解像度を落とすことなく広視野角の画像を得ることができる。

まず、Fig.4.5 に示すように重なる領域を持つ2つの画像を接続することを考える。次に、両方の画像中で共通して現われる特徴点を抽出し、これをPとQとし、左側の画像 (Image 1) 中の P, Q を P_1, Q_1 、右側の画像 (Image 2) 中の P, Q を P_2, Q_2 と表す。

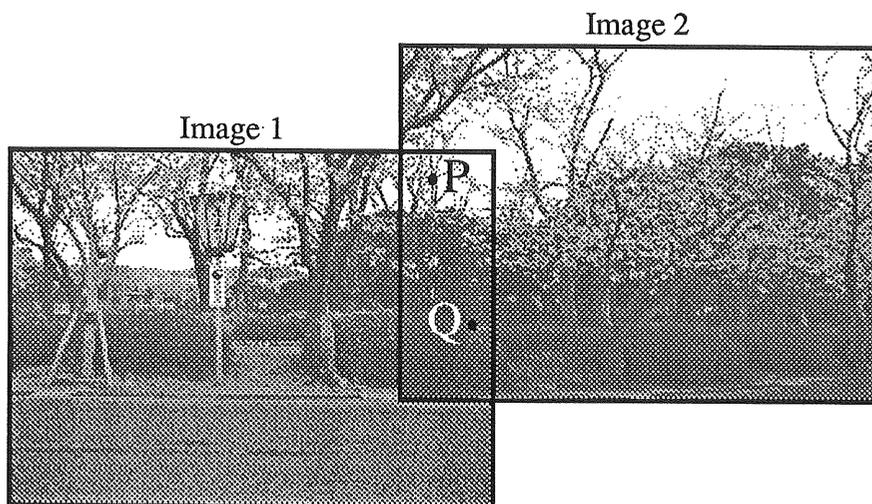


Fig.4.5 Featuring Points P and Q

Fig.4.6に示すように、カメラの撮影位置を原点とした時の点 P への方向ベクトル (単位ベクトル) を p 、点 Q への方向ベクトル (単位ベクトル) を q と表すものとする。次に、原点と点 P, Q から校正される平面 OPQ に直交する単位ベクトル (平面OPQのNベクトル) を n とする。さらに、2つのベクトル外積のベクトル $p \times n$ により定義されるベクトルを l と

する。すると、以下に定義される行列

$$\mathbf{R} = (p \ n \ l) \quad (4.1)$$

は、各画像の撮影時のカメラの方向を表わすカメラ座標系とベクトル p, n, l により定義される座標系との関係を表している。

両方の画像について、座標系の関係を表す行列 \mathbf{R} を求めることができ、これをそれぞれ $\mathbf{R}_1, \mathbf{R}_2$ とする。

ここで、行列 $\mathbf{R}_2 \mathbf{R}_1^T$ が左側の画像から右側の画像へ、つまり、点 P_1, Q_1 を P_2, Q_2 への投影を行う変換行列であることは容易に判る。

$$\mathbf{R} = \mathbf{R}_2 \mathbf{R}_1^{-1} = \mathbf{R}_2 \mathbf{R}_1^T \quad (4.2)$$

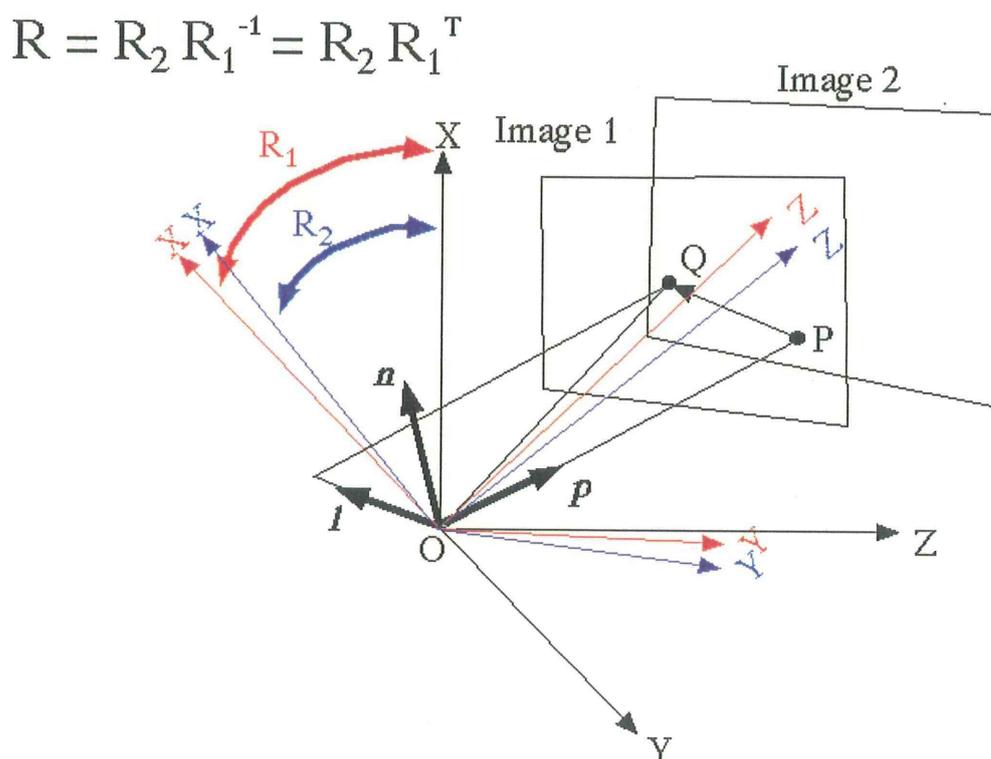


Fig.4.6 Relation between the Base Coordinate

[焦点距離の補正]

これまでに、カメラを様々な方向に向けて撮影した際の画像間の相対的な幾何学的位置関係を求める手法を示した。しかし、現在のビデオカメラにはほとんどズームレンズが使用されており、実際の撮影時にも、対象物が最も効果的に画面に収まるようにズームの倍率を操作することは日常的に行われている。したがって、画像間の接続を行う際には、カメラのズームレンズの効果を考慮することは不可欠である。また、ビデオカメラのズームレンズは連続的に倍率を変化させることができ、しかも、その時の焦点距離の情報はビデオテープ上に記録されないので、撮影された画像から算出することが唯一の方法となる。以下に画像の情報から焦点距離 f を求める手法を示す。

画像上のある点が画像面（フィルム面、あるいはCCD面）上に投影された点の画像面上での座標が (u,v) であるとする。ここでこの画像の撮影を行った時の焦点距離を f と仮定すると、透視変換の式から画像面上に投影された点の座標は以下のベクトルにより表わされる。

$$v = (u, v, f) \quad (4.3)$$

ここで、 u, v は画像面上での点の座標である。

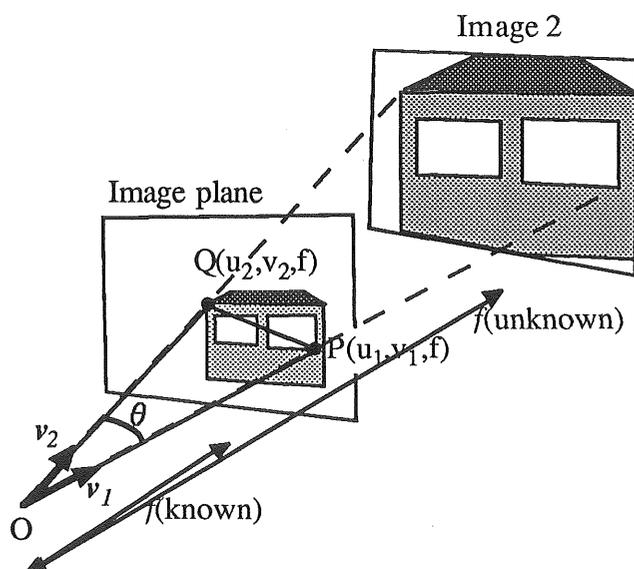


Fig.4.7 Calibration of Focal Length

Fig.4.7 に示すように、2つの点 P,Q を画像中で選定し、それぞれの点が画像上にベクトル $v_1(u_1, v_1, f)$, $v_2(u_2, v_2, f)$ として投影されるとすれば、2つのベクトルの間の角度 θ は以下のように計算される。

$$\cos\theta = \frac{u_1u_2 + v_1v_2 + f^2}{\sqrt{u_1^2 + v_1^2 + f^2} \cdot \sqrt{u_2^2 + v_2^2 + f^2}} \quad (4.4)$$

ここで用いた2点 P,Q が2つの画像 Image1, Image2 で共通して含まれるとすると、(4.4)によりそれぞれ角度 θ_1 , θ_2 を求めることができる。この角度 θ は共通の2点 P,Q を見込む角度であるから、当然、両方の画像について同一でなければならない。したがって、2つの画像のうちの1つの焦点距離 f が判っていれば、他方の焦点距離を求めることができる。この操作を繰り返せば、1つの画像の焦点距離 f が予め判っていれば、他の画像の焦点距離はこれから計算で求めることが可能であることが判る。

4.3 複数画像の接続手順

前節までに、2つの画像の接続を行う手法を示した。この手法を用いて、複数画像を接続する手順を以下に示す。なお、ここで最初の画像について焦点距離 f は既知であるとする。

(Procedure.1) 最初の画像に隣接する画像を選択する。その際、画像間で重なりがあるように考慮しながら、画像の選定を行う。次に、最初の画像と選択した隣接画像とで共通して現われる特徴点をコンピュータのマウスを用いて指定する。

(Procedure.2) 手動で特徴点を指定すると、指定した座標値にある程度の誤差の混入がどうしても避けられない。これを補償するために、最初の画像上の特徴点の周りの微小領域について、2枚目の画像上の対応する領域との相関を、回転角度、相対位置を様々に変化させながら相関を計算し、その結果が最良となるように2枚目に指定した隣接画像上の特徴点の座標値を変更する。なお、変位についてはサブピクセルまで考慮して調整を行うことにより、座標値の指定にともなう精度が向上する。

(Procedure.3) もし、2枚目の画像におけるズーム倍率が最初の画像と異なることが予想されれば、前節(4.4)式により焦点距離の補正值を計算する。なお、撮影時に焦点距離を固定として撮影していれば、焦点距離の補正による誤差の心配がなく、この手順は不要である。

(Procedure.4) 前節(4.2)式により、2枚目の画像から最初の画像への変換行列を決定する。この変換行列を用いることにより、2枚目の画像を最初の画像へ接続することができる。2つの画像が重なる部分では、画像上の色とコントラストを両方の画像上で比較し、両方の画像が滑らかにつながるように色と明るさを調整する。

(Procedure.5) 以上の操作を全ての画像を接続するまで繰り返す。

4.4 実験

本手法を実際に適用するために、デジタルビデオカメラ（SONY, VX-1000）を三脚にセットし、様々の方向の画像を撮影した。大村市内の大村公園で撮影したテスト画像の一部を Fig.4.8 に示す。

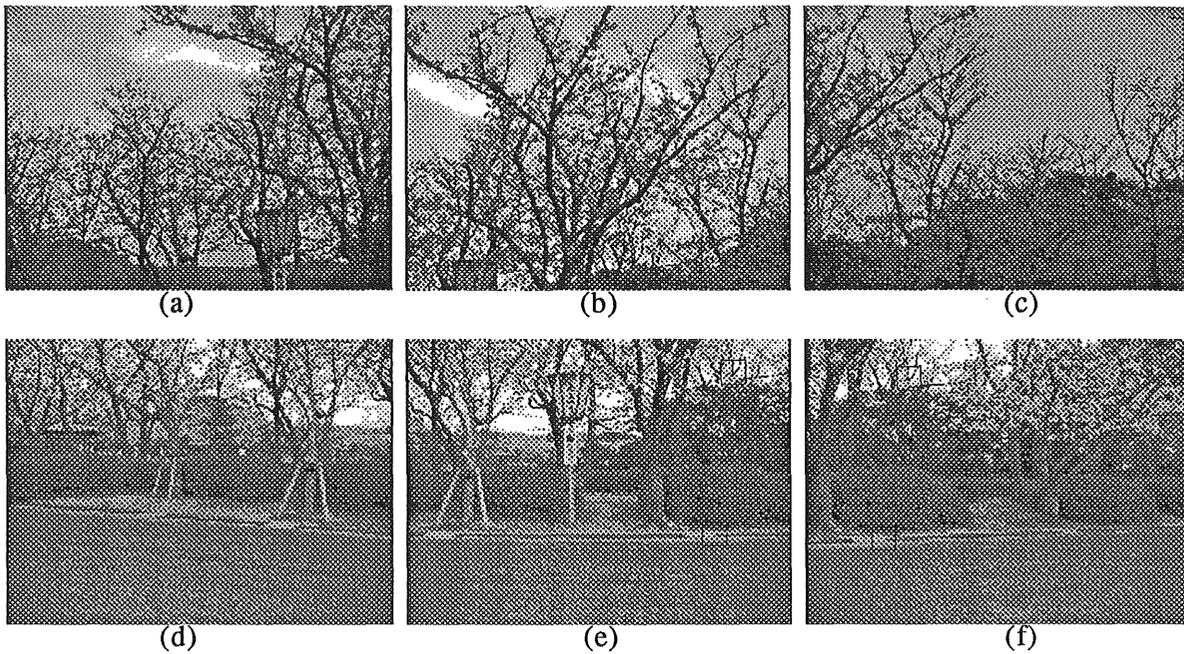


Fig.4.8 Sampled Images Obtained by Video Camera

この画像中で特徴点として指定した箇所を Fig.4.8中の画像(e)(f)において、黒枠で囲って示す。この部分を抜き出したものをFig4.9に示す。

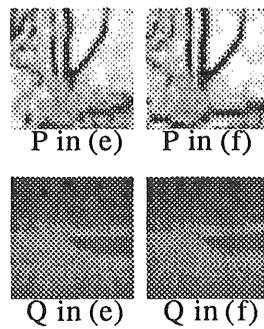


Fig. 4.9 Characteristic Point

さらに、(e)における特徴点の近傍の微小領域について、(f)の画像から画像間の相関が最も合致するように平行移動、回転移動を加えて、画像を切り出した。なお、画像間の相関の評価は(4.5)式に示すRGB各成分毎の絶対値の総和を用いた。

$$\Sigma (|R_1 - R_2| + |G_1 - G_2| + |B_1 - B_2|) \quad (4.5)$$

ただし、ここである点の画素のRGBの値を、 $v(R,G,B)$ としている。

また、平行移動に関するオフセットを行った場合の相関評価関数の変化について、Fig.4.10に示す。これを見ると、明確に最良となる点を得ることが出来ることが判る。

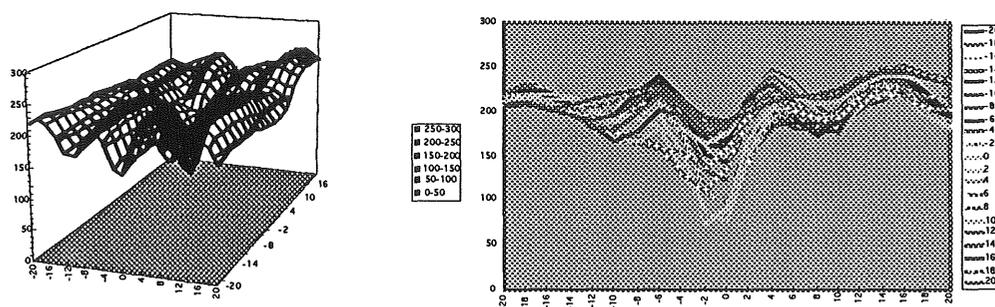


Fig. 4.10 Correlation of Movement

Fig.4.8の画像を含めて12枚の画像を接続した結果を Fig.4.11 に示す。また、画像間の関係が判るように、元画像の枠を含めて描画したものをFig.4.12 に示す。全ての画像が滑らかに接続されていることが判る。



Fig.4.11 Connected Images at Omura Park.

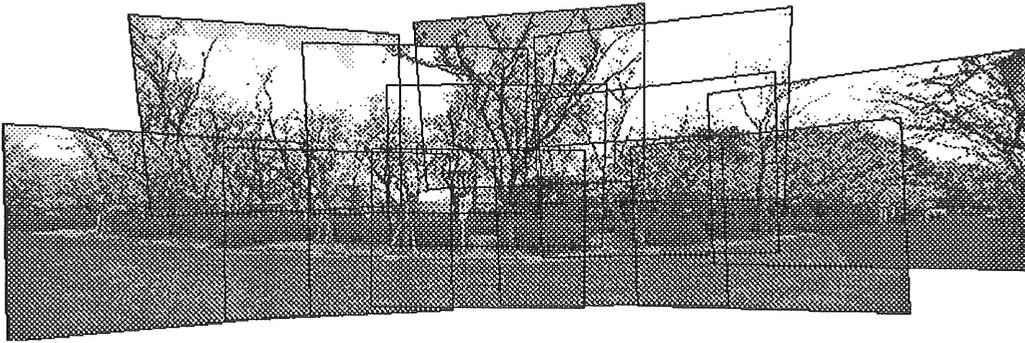


Fig.4.12 Connected Images at Omura Park.
(with image frames)

[低高度リモートセンシングシステムへの利用]

これまで述べた画像の接続手法を、低高度リモートセンシングシステム (Low Altitude Remote Sensing System) によって撮影した画像の接続に適用した例を以下に示す。

Fig.4.13 に、長崎県国見町 (島原半島) において発掘が行われた古代の遺跡 (「佃遺跡」) において低高度リモートセンシングシステムを用いて撮影を行った際の画像の例を示す。この発掘作業は道路の建設工事に伴うものであり、発掘調査後は埋め戻してその上に道路を建設するため、今回の調査で遺跡の全ての形状の計測を行う必要があった。

今回の調査では遺跡発掘現場の形状、内部の構造を全て含んだ高解像度の1枚の画像にしたいという要望があった。低高度リモートセンシングシステムの高度を高くとって広角レンズで撮影すれば1枚の画像に収めることは可能であるが、それでは解像度がデジタルカメラの解像度 (640H×480V) になってしまい、求めたい解像度に達しない。また、カメラの高

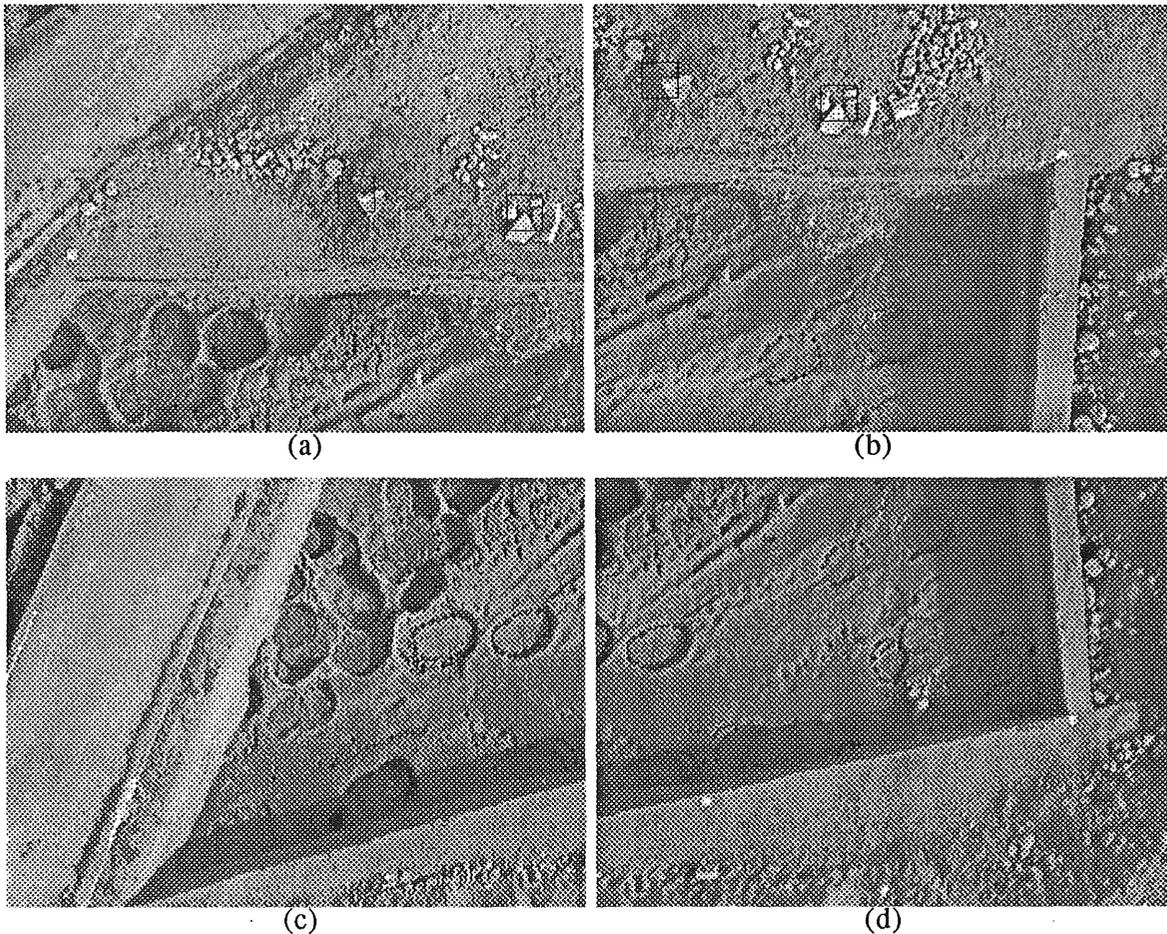


Fig.4.13 Sampled Images from Ancient Ruin

度を下げるかズームレンズを望遠側で使用して撮影すれば、遺跡の細部まで判別可能な画像が得られるが、遺跡全体を1枚の画像に収めることができないという問題があった。そのため、低高度で複数の画像を撮影し、その画像の接続を行うこととした。

Fig.4.13の画像は上空約30mからデジタルビデオカメラにより遺跡を撮影したもので、対象物は紀元前1000年頃の食物貯蔵穴（ドングリピット）である。画像中に多数の小さな円形状の穴が存在することが確認できる。

この画像中で画像間で共通して現われる特徴点をコンピュータのマウスで指定し、画像間の相関により位置の微調整を行う。その特徴点の様子と補正を行った後の特徴点近傍の様子（2倍に拡大して表示している）をFig.4.14に示す。

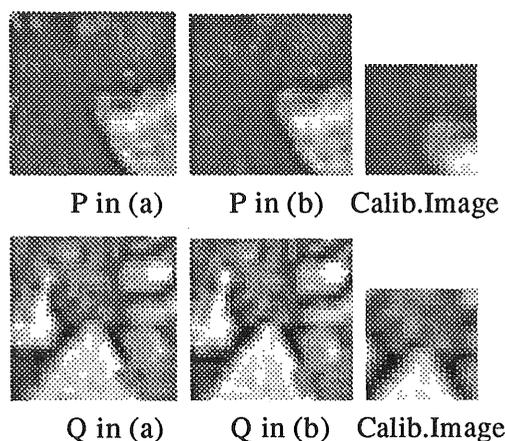


Fig. 4.14 Characteritic Points

この特徴点の情報を用いて画像を接続した結果を Fig.4.15 に示す。

画像を撮影した際に風速 15m 程度の強い風が吹いていたため、気球を一定の場所に安定して係留しておくことができず、気球は絶えず動揺していたために、画像の接続に際して滑らかに繋ぐことができなかった箇所が一部に生じた。

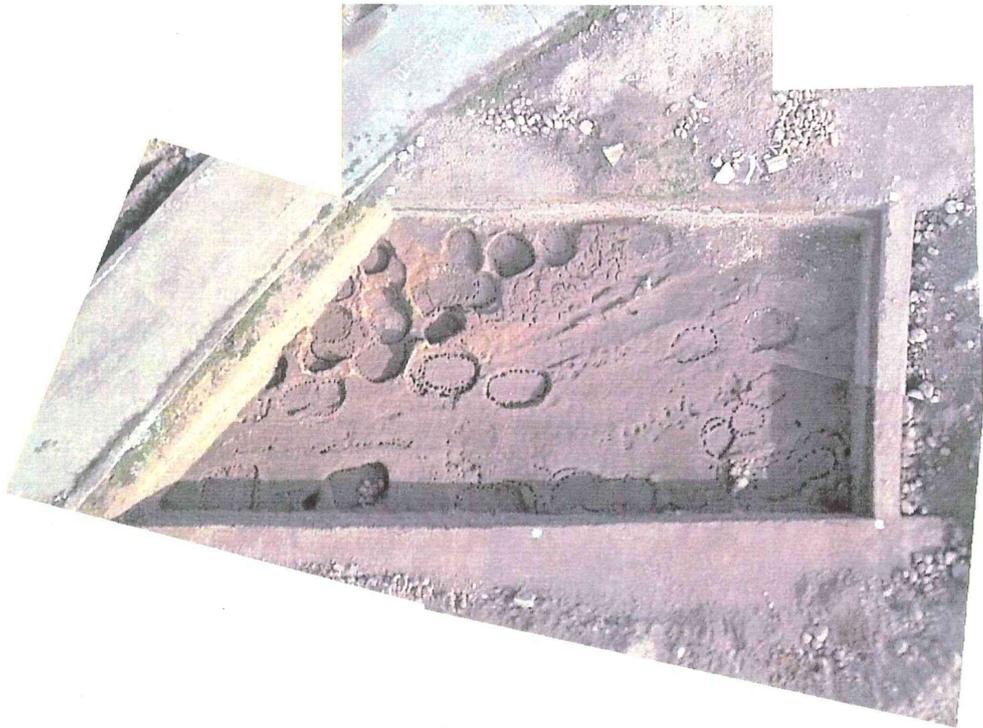


Fig.4.15 Connected Images from Ancient Ruin

4.5 考察と結論

本章では、複数画像の接続について1つの手法を提案した。この手法を用いることにより、複数画像から解像度を落とすことなく広視野角の画像を得ることができ、この手法を長崎大学工学部機械制御学研究室で開発した低高度リモートセンシングシステム（Low Altitude Remote Sensing System、LAReS システム）に適用した結果、撮影した画像を良好に接続することができた。さらに、この手法の操作を簡単にすること、また、精度を向上させることを検討している。

実際の撮影の現場では、最も構図がよくなるようにズーム倍率を変更することは日常なことであるし、また、一般のビデオカメラには標準的にズームレンズが装備されているので、ズームを使用することはごく自然であると思われる。しかし、一般のビデオカメラにおいては、撮影時のレンズのズームの倍率（焦点距離）の値はビデオには記録されないため、画像に含まれる情報だけからズーム倍率の補正を行う必要がある。本手法では、画像に含まれる特徴点の間の角度に着目し、画像間のズーム倍率の補正を行った。このズームに関する考慮を加えた結果、画像を良好に接続することが可能になり、画像接続に対して有効であった。

次に画像の繋ぎの精度であるが、2つの画像を接続する場合はその繋ぎ目も判別できない程度に、まったく問題なく接続することができた。しかし、接続する画像の枚数が増えるに従い、画像間の不整合が生じる場合があることが判った。例えば、Fig.4.16のように3つの画像1,2,3について接続を行う場合に3つの画像が相互に重なりを持つ場合、1と2、2と3の接続を行うと、1と3との間で若干の不整合が発生する場合がある。これは、種々の原因によって混入した誤差により、3つの画像間の変換行列が完全に正確ではなく、その

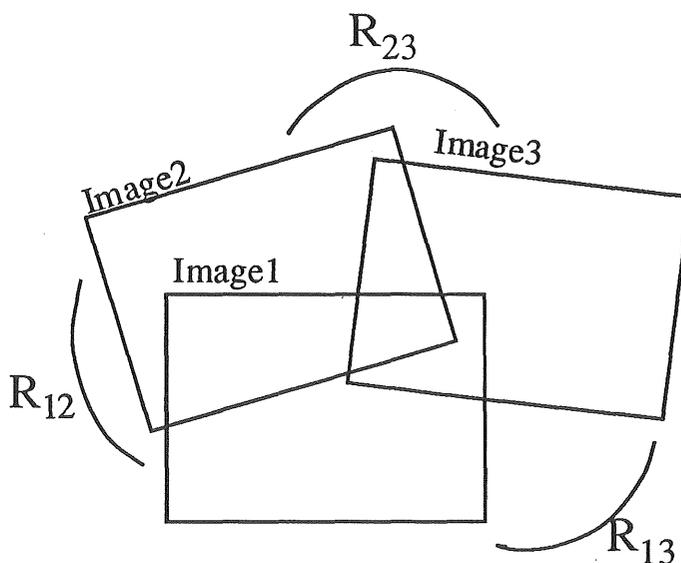


Fig.4.16 Connection of Three Images

誤差が1カ所の画像境界に集中して現れるためである。その対策として、上の例の場合、1と3についても接続を行って変換行列を求めることを行う。1→2、2→3、3→1の変換行列を全て重ね合せると単位行列にならなければならないが、実際には誤差により3つの画像間の変換行列に誤差が混入しているので正確に単位行列にはならない。その誤差成分を3つの変換行列に均等に加えることにより、1カ所の画像間の境目にギャップが現われることを防ぎ、全体として均一な画像を得ることが可能である。なお、本章で示した実験例では、この調整を行わなくても画像がほぼ一致したので、この補正は行っていない。

また、画像間の共通な特徴点の指定にあたって、当初はマウスで指定していたが、どうしても1～2ピクセル程度の誤差が含まれることは防げなかった。この誤差により、変換行列、焦点距離の補正に際して誤差の原因となっていた。これを解決するため、特徴点の近傍の微小領域について画像のパターンマッチングによる特徴点座標の微調整をサブピクセル単位で行うことにより、特徴点座標の精度の向上を図り、変換行列、焦点距離の補正の精度を向上させることができた。

なお、長崎大学工学部機械制御学研究室で研究を行っている低高度リモートセンシングシステムは、手軽に上空からの画像の撮影を行うことができるシステムとして優れており、特に、航空機が飛行することができない低高度での住宅地上空や山中の谷のように、航空機では危険を伴ったり、航空法により規制されている場合に、安全に撮影を行うことができる。また、その問題点としては、強風時に風により気球が流れるため、所定の位置に浮上させるためには若干の技術を要すること、強風時に気球の下流に生じるカルマン渦や風の息と呼ばれる風の強弱により、気球に揺れが生じることがある。しかし、この揺れは画像撮影時にシャッター速度を高速に設定することで実用上は回避可能である。

現在、長崎大学工学部機械制御学研究室では、本章で示した遺跡等の測定の他に建築物の計測のために使用したり、海上でイルカの生態調査のために使用したりしている。また、さらに高度な計測を行うための機器を搭載するため、あるいは現在のものより小径の気球でも浮上できるよう、機器の計量化にも取り組んでいる。また、強風時でもカメラが安定して撮影できるよう、気球の形状の検討、カメラの取り付け方法の検討、安定機構の開発にも取り組んでいる。

第5章 連続ビデオ画像から QuickTime Virtual Reality データへの変換手法について

前章では、視点を固定してさまざまな方向の画像を撮影して得た複数の画像を接続する手法について示した。この撮影の際、カメラの方向を1つの平面内に制限して撮影を行い、その画像の接続を行うと、結果としてパノラマ画像を得ることができる。この撮影操作はビデオカメラを三脚に設置して水平面内でカメラを回転しながら録画することに容易に行うことができる。これにより作成するパノラマ画像はさらに、QTVR (QuickTime Virtual Reality) パノラマ画像の作成に使用することができる。

本章では、水平面内で撮影した連続ビデオ画像から QTVR パノラマ画像を作成する1手法とカメラの設定を校正する1手法について述べる。また、さらに臨場感を高める手法として、ステレオQTVR画像を作成する手法についても述べる。

5.1 はじめに

最近、コンピュータのハードウェア、ソフトウェアの目覚ましい発達により、コンピュータグラフィックスによる3次元景観シミュレーションが土木、建築等の工業分野^{59)~66)}だけでなく、芸術、スポーツ、観光²³²⁾等の様々な分野で多く用いられるようになってきている。また、3次元立体の表現方法、ブラウズ(閲覧)方法として、DXF、OpenGL、VRML^{117)~125)}等の種々の方法が提案されている。

その多くの方法においては、対象物の数が増えたり、形状の複雑さが増すに従い、3次元形状を表すための形状データ量が大きくなるという問題点がある。これは計算機上に記憶するためのファイルサイズが大きくなるということ以外にも、インターネット等の通信によりデータを転送する際に問題となる。また、3次元立体の表示を行う計算機においてCPU能力、メモリ容量に大きなものが必要とされるという問題もある。

これに対処する1つの技術として、2次元映像を用いて擬似的に3次元形状を表す手法が開発された。その代表としてApple社が提供するQuickTime Virtual Reality^{126),231)}(以下、

QTVR と略す) やIPIX(Interactive Picture)²⁴⁰⁾がある。いずれのシステムもシーンを3次元立体としてではなく、パノラマ画像として作成するために、シーンに含まれるオブジェクトの数が多く場合やシーンに複雑な形状のオブジェクトが含まれる場合にも、記録するために使用するファイルサイズが3Dモデルを構築するよりも非常に小さくて済み、また、パノラマ画像を再生する計算機にもそれほどのCPUパワー、メモリを必要としないため、高速に表示を行うことができるという利点がある。

QTVRでは実際にコンピュータ上で記録される形態は2次元の円筒上に描かれたパノラマ画像であり、IPIXでは球面上のパノラマ画像であるが、いずれのシステムも広い角度範囲(通常、360°)のパノラマ画像を、ユーザのマウス、キーボードのパン操作に応じて、視野画像の歪みを補正しながら高速に表示することができる。これにより、ユーザは空間内の特定の位置から任意のカメラアングルに相当するシーンをインタラクティブに眺めることができ、その場において周りを見渡しているかのような印象を得ることができる。

なお、IPIXを作成するためには半球(180°)を写すことが可能な魚眼レンズが必要であるが、魚眼レンズは一般的なレンズではなく高価でもある。本研究では、特殊なレンズではなく通常のカメラを用いて画像を撮影出来ること、および、普及度を考慮して、QTVRを採用している。

いずれのシステムも、その用途として、プレゼンテーション、観光等²³²⁾だけではなく、技術分野においても実用的な利用が期待できる。例えば、海外等の遠隔地の状況を効率よく転送する等の利用が考えられ、1997年のNASAのMars Path Finder Projectにおいても、火星表面の形状を表示するために用いられた²³³⁾。

このように利点が多いQTVRやIPIXであるが、そのデータ作成に際しては若干の問題点が残っている。QTVRを作成するためには、複数枚の映像(写真、ビデオ等)から画像の接合を行ってパノラマ画像を作成することが必要である。QTVRでは通常のカメラにより撮影した画像を用いてパノラマ画像を撮影し、IPIXでは半球をカバーする魚眼レンズを用いて撮影した広角度画像を接続する。このQTVR作成のための画像を撮影する際には、所定の角度毎(例えば、20°毎)の方向にカメラを正しく向けて各角度方向の画像を撮影することが要求される。このために撮影器材には角度を指定することができる三脚等が必要になり、撮影に際して多くの時間を要することになる。

この解決方法として、予め所定の角度にセットした複数台のカメラのシャッターを同時に切るといった方法や、専用治具を使用してカメラを所定の角度に回転させる方法²³⁴⁾が用いられており、そのうちのいくつかは市販されてもいる。

本報ではより簡単な方法として、Fig.5.1 に示すように三脚上に設置したビデオカメラを水平に一周させて連続ビデオ画像を撮影し、この連続ビデオ画像からQTVRの作成に必要なパノラマ画像を直接生成する方法を示す。

また、これまで提案されている多くの3次元映像の表現方法^{238),239)}の中でも簡易に用いることが出来、種々の場面、用途で広く使用されている2眼式の立体視の手法をQTVRへ適用するために、左右に視差がある2台のカメラを用いて撮影した画像を用いてQTVRを作成し、より臨場感のある3次元立体の表現を行うステレオQTVRの手法についても紹介する。

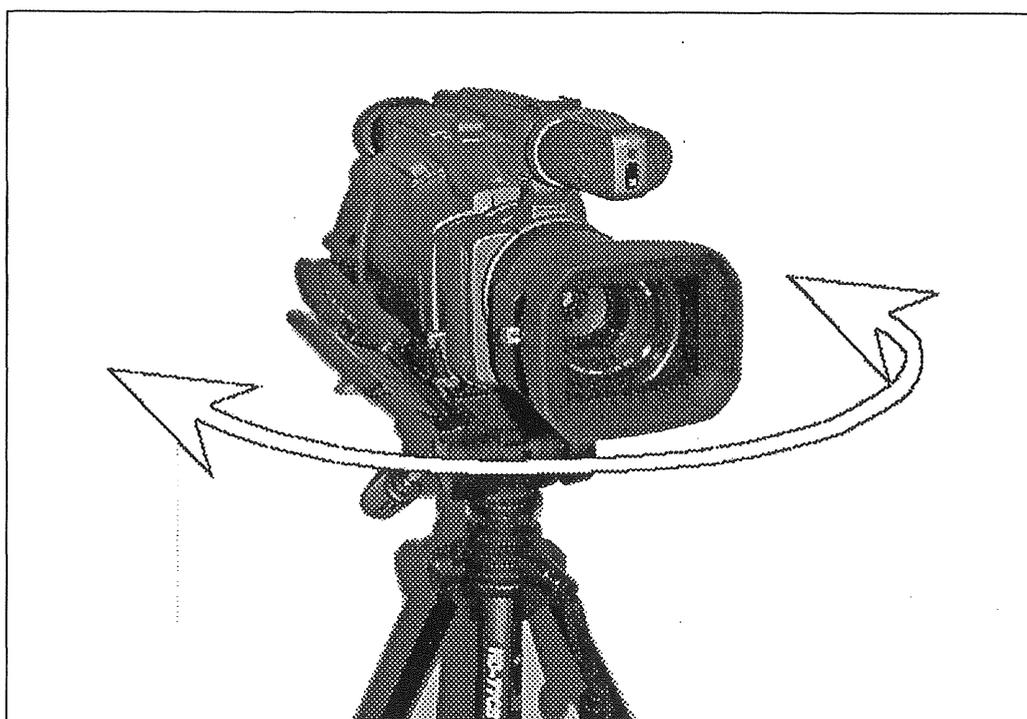


Fig.5.1 Turning of Video Camera

5.2 全周画像から QTVR の作成

全周を撮影した連続ビデオ画像から QTVR データを以下の手順により作成することができる。

まず、Fig.5.1 のように、ビデオカメラを三脚に載せて水平方向に回転させ、カメラを中心とした全周（360°）の画像を連続ビデオ画像として撮影する。なお、この撮影の際にはカメラの角度を決めて撮影する必要はなく、また、ビデオの水平回転の速度も一定である必要もない。

次に、Fig.5.2 に示すように、撮影した連続ビデオ画像からコンピュータのビデオキャプチャ機能により静止画像を取り出し、これを順に $F_0, F_1, F_2, \dots, F_n$ とする。この時、隣接する画像 F_i と F_{i+1} が少しずつ重なるように画像を切り出す。また、最後の画像 F_n は最初の画像 F_0 と一部が重なるようにする。これにより、カメラを中心とする全周画像を得ることができる。

次に、Fig.5.3 に示すように、隣接する画像 F_i と F_{i+1} とで共通して現われる特徴的な点（これを特徴点と呼ぶ）を抽出し、これを P_{i+1} とする。この点は順に P_1, P_2, \dots となり、最後の画像 F_n と最初の画像 F_0 とで共通する点が P_{n+1} ($=P_0$) となり、点列は $P_0, P_1, P_2, \dots, P_{n+1}$ ($=P_0$)

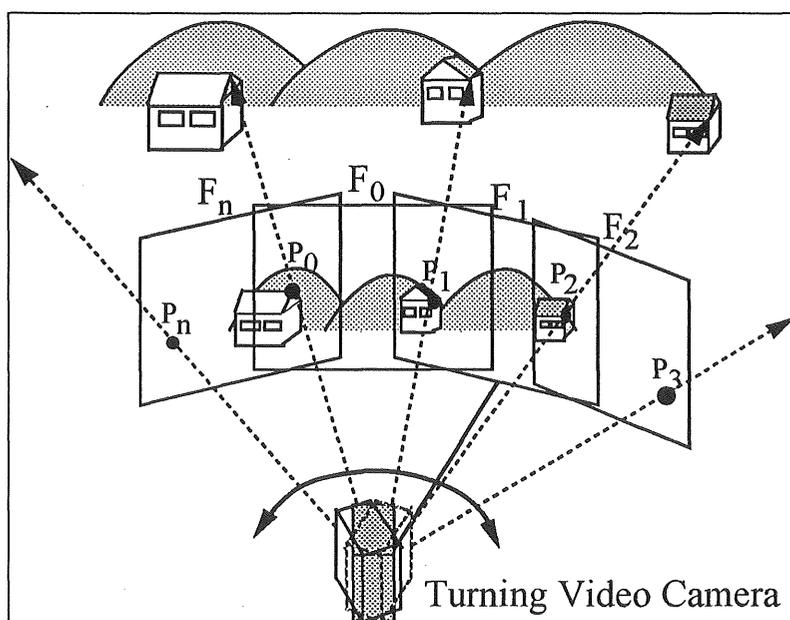


Fig.5.2 Obtaining Images in Circumference

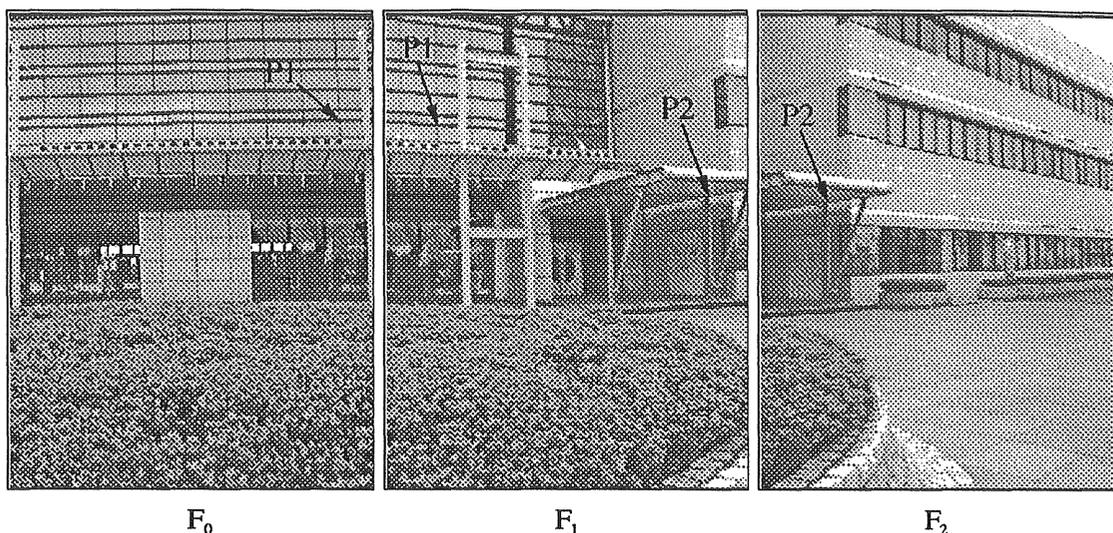


Fig.5.3 Extraction of Characteristic Points

となる。

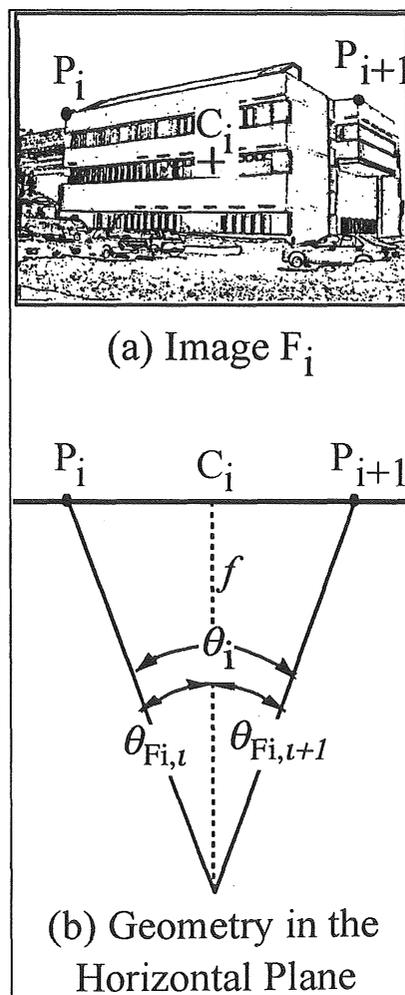
[焦点距離の校正]

一般に、カメラの焦点距離はそのレンズの仕様として、撮影時に予め判っていることが多いが、2.2 節で示したように実際に画像上での情報から校正することが可能である。ここでは、全周の画像が得られているという条件からカメラの焦点距離の校正を行う手法を示す。

ここまで述べた方法により得られた特徴点（群）の情報から、撮影に使用したレンズの焦点距離 f を以下の方法により求めることができる。

Fig.5.4(a)に示すように、画像 F_i には特徴点 P_i 、 P_{i+1} が含まれており、その画像上の座標をそれぞれ $P_i(u_i, v_i)$ 、 $P_{i+1}(u_{i+1}, v_{i+1})$ とする。ここでカメラの焦点距離を f と仮定すると、画像 F_i 上の P_i 、 P_{i+1} の座標値はそれぞれ (u_i, v_i, f) 、 (u_{i+1}, v_{i+1}, f) となる。

これを Fig.5.4(b)のように、カメラの回転軸方向から見た

Fig.5.4 Characteristic Points in Image F_i

水平面内で考えると、画像 F_i の中心 C_i から点 P_i 、 P_{i+1} への角度 $\theta_{F_i,i}$ 、 $\theta_{F_i,i+1}$ はそれぞれ以下のようになる。

$$\begin{aligned}\theta_{F_i,i} &= \tan^{-1}\left(\frac{u_i}{f}\right) \\ \theta_{F_i,i+1} &= \tan^{-1}\left(\frac{u_{i+1}}{f}\right)\end{aligned}\tag{5.1}$$

したがって、2点 P_i 、 P_{i+1} の間の角度 θ_i は、以下のようになる。

$$\begin{aligned}\theta_i &= \theta_{F_i,i+1} - \theta_{F_i,i} \\ &= \tan^{-1}\left(\frac{u_{i+1}}{f}\right) - \tan^{-1}\left(\frac{u_i}{f}\right)\end{aligned}\tag{5.2}$$

この θ_i を全周に渡って合計した結果は 2π (360°) でなければならないので、以下の式が成り立つ。

$$\delta(f) = \sum_{i=0}^n \theta_i - 2\pi = 0\tag{5.3}$$

ここで、関数 $\delta(f)$ は f に関して単調減少関数なので、二分法等の数学的手法により精度よく f の値を求めることが容易にできる。

この f が決定できれば、各点 P_i の基準位置 (F_0 の画像中心 C_0)からの相対角度、各画像 F_i の中心位置 C_i の相対角度 θ_{C_i} を求めることができ、任意の角度 θ_x の点が画像 F_i 中でどのように投影されるか (座標値 u_x) が以下の式により決定される。

$$u_x = \tan(\theta_{C_i} - \theta_x)\tag{5.4}$$

これにより、全ての画像中の任意の点の相対角度が判るので、この画像を用いてパノラマ画像を直接作成することができ、QTVR画像を作成することができる。

[レンズ周りのカメラ回転の補正]

カメラを水平面内で回転させる際にカメラが直立していない場合が考えられる。その場合、前述の焦点距離の補正に際しての誤差や、後述のQTVR画像の作成に際して画像のずれとして影響するので、データの画像を撮影する際に、カメラ座標の垂直軸が回転軸と一致するように、カメラレンズ軸周りのカメラの回転を調整する必要がある。

しかし、実際には多少のカメラ回転が発生する場合があるので、微小なレンズ軸周りのカメラ回転の場合は、Fig.5.5に示すように、画像間で共通して現われる特徴点の画像における座標値から回転角度を決定し、画像を補正することができる。

[QTVR 画像の作成]

以上の手順により、カメラの焦点距離、カメラ回転の補正を行い、画像間の幾何学的位置関係を求め、カメラ視点を取り囲む円筒上への画像の投影を行い、パノラマ画像を作成する。このパノラマ画像から、Apple社が提供するQuickTime VR Authoring Tools Suiteを用いてQTVR画像を作成する。

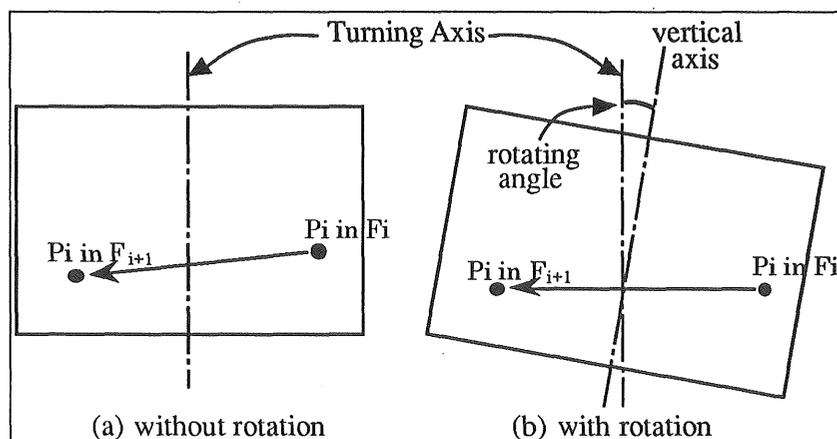


Fig.5.5 Image in Camera Rotation

5.3 QTVR のステレオ表示

本来のQTVRでは、隣接する画像間で視差が生じないように、回転軸上にカメラレンズ中心を正しく設置する必要がある。しかし、Fig.5.6に示すように、ここで敢えて回転軸から左右にずらした2台のカメラを用い、視差がある2系統の画像を撮影し、QTVRを作成することを行う。この2つの画像をコンピュータの画面上に並べて表示すると、QTVRを立体視することが可能になる。さらに、2つのQTVRの表示を連動して動かすことにより、動的にQTVRのステレオ表示を行うことができる。

ステレオQTVRの表示、操作を行うシステムの構成をFig.5.7に示す。本システムでは、ユーザはジョイスティック型のコントローラを用いて、ステレオQTVR画像を動的に動かすことができる。なお、ステレオQTVRの表示、操作は、MACROMEDIA社の Director 5.0を使用して行った。

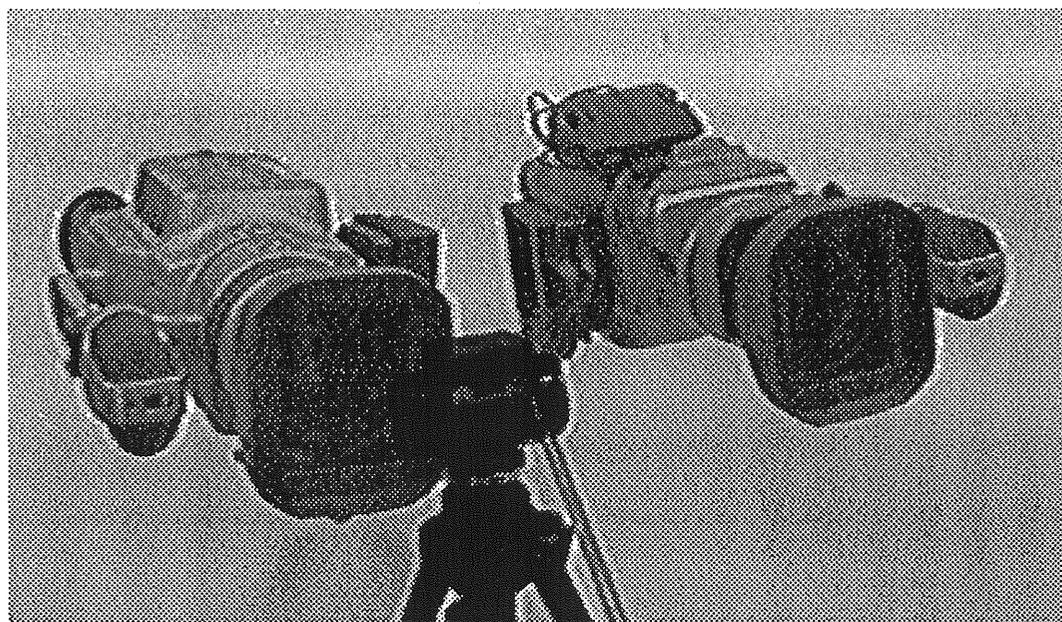


Fig.5.6 Getting Video for Stereo QTVR

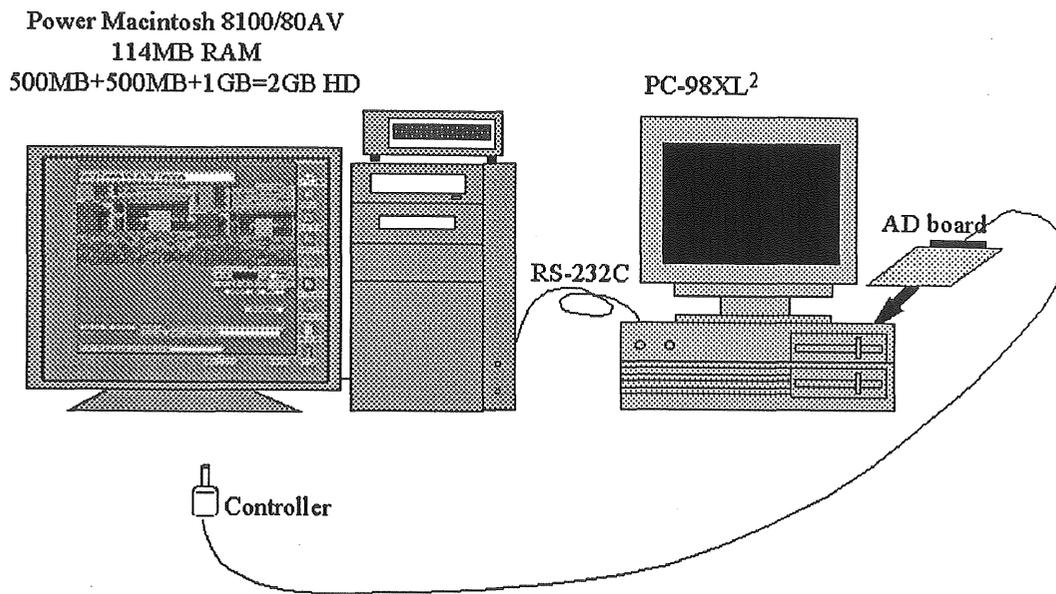


Fig.5.7 System Configuration of Stereo QTVR

5.4 実験

[カメラ校正と QTVR の作成]

実際にハンディビデオカメラ (SONY, VX-1000) を用いて全周の連続ビデオ画像の撮影を行った。なお、この撮影の際、最終的に作成する QTVR の上下方向の画角を確保するためにビデオカメラを縦 (ポートレート) 位置に設置して撮影を行った。

次に、Fig.5.8 に示すようにそのビデオ画像からビデオキャプチャ機能により画像をコンピュータに取り込み、各画像中で特徴点を抽出した。その画像を基に(5.3)式が0になるように二分法で f の値を求めた。その推測値は、 $f=823.68(\text{pixel})$ となり、この値は、2.2 節で述べた長方形画像の特徴を利用する手法により求めた $f=829(\text{pixel})$ とほぼ合致する。この f の値を用いて、画像の校正を行い、QTVR 画像を作成した。

各角度をマッピングした結果を Fig.5.8 に、パノラマ画像の作成結果を Fig.5.9 に示す。

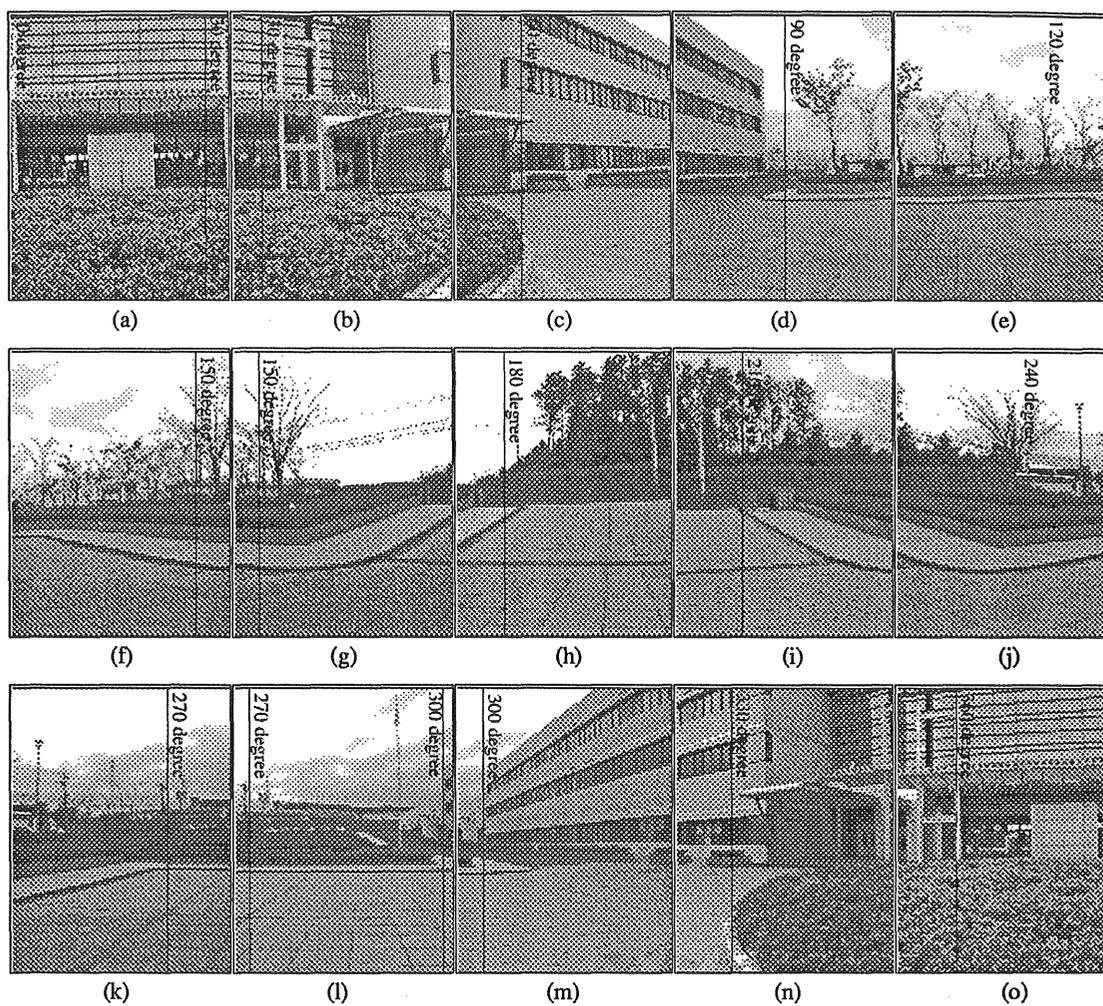


Fig.5.8 Example of Marked Images

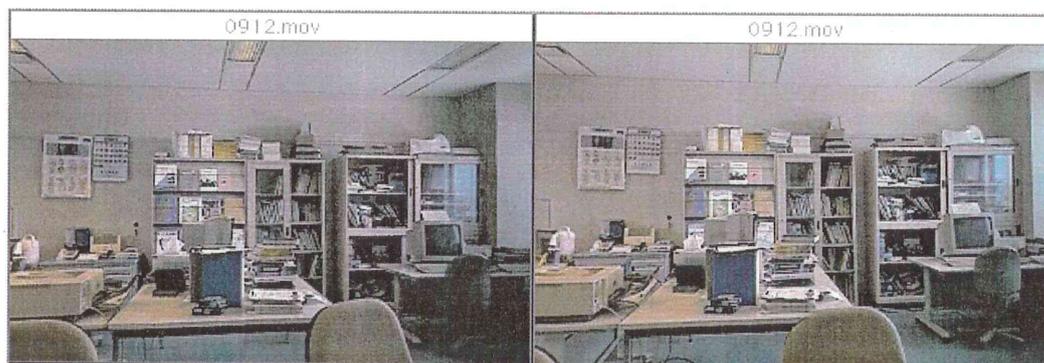


Fig.5.9 Example of Panorama Source Image for QTVR

[ステレオ QTVR]

Fig.5.6に示すように、ビデオカメラのレンズを固定した三脚の中心軸から左右にオフセットして設置し、左右の視野のビデオ画像を撮影した。

研究室内の風景および長崎県工業技術センターの建物の風景を実際に撮影し、作成したステレオQTVR画像をCRTディスプレイに表示した例を Fig.5.10に示す。



(a) room



(b) building

Fig.5.10 Example of Display Stereo QTVR

5.5 考察と結論

本章では、第4章で述べた画像接合の手法について、撮影時にカメラの方向を水平方向に限定するという特殊な条件を加えた場合、撮影時のカメラの焦点距離、方向、傾き等の校正が簡略に行えることを示した。また、そこから導かれる簡略な変換により画像間の幾何学的な位置関係が算出できることを示した。さらに、その結果を用いて、 360° のパノラマ画像を作成し、QTVR画像の作成を行った。これにより、全周方向を撮影した連続ビデオ画像からQTVR画像データへの変換を容易に行うことが可能になった。

本手法の問題点としては、コンピュータ上に取り込んだ画像からQTVRを作成することは容易だが、ビデオカメラの画像からコンピュータに画像を取り込む作業がオペレータの指定によっているために時間がかかっているということがある。実験で使用しているビデオカメラはデジタルビデオカメラでありデジタル入出力端子を持っているので、コンピュータからの制御が可能はずであるが、現状ではそのインターフェイスが公開されておらず、今後の課題となっている。

また、QTVRの利用の1つとして、左右に視差がある2つの画像を組としてコンピュータの画面上に並べて表示し、その画像をユーザのジョイスティックの操作に応じて2つの画像を連動して表示を切り替えることにより、通常のQTVRよりも臨場感を高めた立体表示を簡易的に行うことが可能であることを示し、ステレオQTVRを表示する1つの簡単なシステムを提案した。ただ、現状の表示はコンピュータのCRT上に並べて表示する形式のため、立体視を行うためには多少の慣れが必要である。誰でも立体視を行うことが可能とするために、反射鏡とレンズを用いた簡易型のビューワの製作を検討している。

第6章 結 言

これまでに考案されている3次元画像計測システムのほとんどは三角測量の原理に基づくものであり、画像撮影時のカメラの位置と姿勢を予め校正しておくことが必要であったが、これまでの計測手法では計測方法に重点がおかれ、校正手段についてはあまり重点が置かれていなかった。しかし、実際の計測では校正結果の精度が計測する3次元形状の精度に直接影響し、この校正作業に多くの時間を必要としていた。そのため、3次元画像計測を実際使用するにあたっては、本来簡便な計測技術であるはずの画像計測の使い勝手が悪いという問題があった。

本論文では、主に大型の構造物を対象として、あらためて校正手段と計測手段について検討を加え、実際の計測現場で使いやすい3次元画像計測手法を提案すると同時に、3次元形状データの有効な利用方法として画像データの効果的な表現方法の研究を行った。

本論文では以下の内容について述べた。

第2章では、対象物の幾何形状の特徴を考慮したカメラ校正方法と景観シミュレーションへの利用について述べた。市街地における多くの建造物のような幾何学的形状の特徴を持つ対象物の場合、画像上への投影形状を解析することにより、カメラと対象物との間の相対的な位置関係やカメラの焦点距離等のカメラ校正を行うことができることを示した。この手法を用い、ビル等の巨大な構造物の3次元形状の計測を容易に行うことができることを示し、実際に計測を行った例を示した。また、その計測結果を用いて、長崎市内桜町付近の町並みの3次元景観シミュレーションを行った結果についても示した。また、計測を行うに先だつて、各種の画像入力手法についてそれぞれの特徴の検討を行った。

第3章では、第2章で述べた対象物のような幾何学的な特徴を持たない対象物についても適用可能な手法として、複数の画像に共通して含まれる特徴点の対応関係からカメラの位置、方向を校正し、対象物の輪郭形状を解析することにより3次元形状計測を行う手法を示し、現在、修復工事が予定されている長崎市内の平和祈念像、および時津町にあるさばくさらかし岩を対象とした3次元形状計測を行い、その計測結果をコンピュータグラフィクスとして示した。

第4章では、低高度リモートセンシングシステムにおいて、複数画像の接続により高解像度画像を作成する手法とその利用について述べた。画像に含まれる情報を用いて画像間の相対的な位置関係を解析し、この接続を行うことにより、通常のカメラにより撮影した画像から解像度を落とすことなく広視野角の画像を得ることができることを示した。本手法を用いて、長崎県国見町のつくだ遺跡の航空撮影を行い、画像の撮影を行った例を示した。また、画像に含まれる情報だけから焦点距離の補正を行う手法についても述べた。さらに、本手法は第2章で問題となったデジタルカメラの解像度の低さを補う手法として用いることができることを示した。

第5章では、第4章で述べた画像接続の特殊な場合として、ビデオカメラを水平面内で回転させて連続ビデオ画像を撮影し、この画像から QuickTime Virtual Reality (QTVR) データへの変換を行う手法について述べた。本章で述べる手法では、ビデオカメラを三脚上に設置して水平面内で1回転させて撮影した連続ビデオ画像から抽出した画像に含まれる特徴点の情報を解析して画像間の相対的な位置関係を求め、これに基づいて画像を接続することにより、カメラを中心とする全周画像を作成し、QTVR 画像を作成した。また、QTVR の臨場感をさらに高める手法として、左右に視差を持った2台のビデオカメラで撮影した連続ビデオ画像を用いて QTVR を作成し、その2つの画像をコンピュータ上で並べてステレオ表示し、2つの画像をユーザの操作に応じて連動して動くシステムを試作した。これにより、通常の QTVR よりもさらに臨場感を高めることが可能になることを示した。

以下に本研究で得られた結論をまとめる。

(1) 画像入力方法

画像を基にするカメラ校正や3次元画像計測を行うためには、カメラにより撮影した計測対象物の画像をコンピュータ上に取り込む必要がある。本研究ではその画像入力手法として、フィルムを用いるスチルカメラから画像を取り込む手法と、ビデオカメラ、デジタルスチルカメラのように CCD を用いたカメラから画像を取り込む手法について検討した。それぞれ以下の項目について検討した。いずれの手法も特長点と若干の問題点を有しており、その対策を検討した。

- 画質

画像の画質の要素として、解像度、ラチチュード、ぶれがある。

解像度については、フィルムを用いたスチルカメラの方が優れている。例えば、フィルムを用いたカメラの場合、通常サイズ（いわゆる、サービスサイズ）のプリントを安価な300dpi程度のスキャナで取り込んだ場合でも100万画素以上の解像度が得られ、少し大きめのプリントを用いたり、高解像度のスキャナを使用することにより、200万画素、あるいはそれ以上の解像度を容易に得ることができる。これに対し、CCDを用いたカメラの場合、安価なデジタルカメラは30万画素程度、高機能なもので175万画素程度である。本研究で用いた市販のビデオカメラで撮影し、ビデオキャプチャ機能によりコンピュータに取り込んだ場合、640×480画素であった。この解像度が低いという問題点は計測結果の精度へ直接影響する。なお、この解像度の不足については、第4章で述べる画像の接続を行うことにより、高解像度の画像を得ることが可能であることを示した。

画質のもう1つの要素であるラチチュード（明るさの許容範囲）もフィルムを用いたスチルカメラの方がCCDよりも優れている。CCDの場合、許容される明るさの範囲が狭く、1つの画像の中でも明るい箇所は真っ白に、暗い箇所は真っ黒になることがあって、明るさに極端にむらがある対象物の場合にCCDを用いたカメラでは画像内の全ての箇所を鮮明に撮影できない場合がある。これに対し、フィルムの場合、そのような対象物でも鮮明に撮影できることが多い。

また、ぶれはその原因として撮影時に対象物が動くことによるぶれと撮影時にカメラが動く手ぶれに分けることができる。いずれも、カメラのシャッター速度を高速にすることによって回避できる。そのシャッター速度については、フィルムの化学的な特性によって露光時間が決まるフィルムよりも、電気的な増幅を行うことにより感度を向上させることが可能なCCDの方が優れている場合が多い。ただし、ビデオカメラを用いる場合、インターレース方式により画像を撮影しているために、1フレームの中の奇数フレームと偶数フレームで撮影タイミングに1/30秒のずれが発生するという問題が発生する。この問題は、デジタルビデオカメラからビデオキャプチャボードを経由しないで直接コンピュータに入力する専用インターフェイスボードを用い、そのボードが持っている補正機能を用いることによって、改善することができる。また、最近のビデオカメラの中にはこの問題を回避するために、ノンイン

ターレースで画像の撮影を行うものも現われている。なお、デジタルスチルカメラの場合は、この問題は生じない。

- 座標の再現性

カメラ校正および3次元画像計測を行う場合は、画像上のある特定の座標が元々の撮像面（フィルム、CCD）上でどの位置であったかという情報が必要である。しかし、フィルムを用いたカメラからコンピュータ上に画像を取り込んだ場合は、その正確な座標が確定しにくいという問題点がある。これは、ネガフィルム上に写っている画像から印画紙にプリントする際に、焼付機のレンズ歪み、焼き付け時の倍率、トリミング補正が加わり、さらに、焼付けたプリントからスキャナでコンピュータに取り込む際にスキャナ上でのプリントの配置のずれや回転等が入ってしまうためである。そのため、コンピュータ上に取り込まれた画像がカメラのフィルム上にどのように写っていたかを正確に決定することが難しい。

この問題を回避する方法であるが、ネガフィルムからプリントしたものをを用いるのではなく、ネガフィルムから PhotoCD へ焼付けてそのデータを使用する手法や、フィルムスキャナを用いてネガフィルムから直接コンピュータへ取り込むことにより、焼付け時のレンズ歪み、倍率、トリミング、回転の影響を回避することが可能である。しかし、いずれの方法も通常の処理ではトリミングやフィルムの回転の影響は残るので、フィルムの未露光部である枠（余黒と呼ばれる）を含めたトリミングされない画像を取り込む必要があり、そのために特殊な装置が必要である。

これに対し、ビデオカメラやデジタルスチルカメラのような CCD を用いたカメラから画像をコンピュータに取り込む手法では、カメラの撮像面（CCD）上の画像がそのままコンピュータ上のデータになる。これは、カメラの校正や画像計測を行う時に非常に有利な点である。

本研究では、以上のことを検討し、カメラ校正の際の長所を重視して CCD を用いたカメラ（ビデオカメラ、デジタルスチルカメラ）を用いて画像の撮影を行った。また、特に高解像度の画像が必要な場合には、高解像度（175万画素）のデジタルスチルカメラを用いた。

(2) カメラ校正手段に関する結論

本研究では、カメラ校正手法としてこれまで用いられてきた手法に加え、以下の2つの手法について検討した。

幾何形状の特徴を考慮した校正方法

複数画像の特徴点を用いた校正方法

● 幾何形状の特徴を考慮した校正方法

第2章で、カメラで撮影した画像上の対象物の形状の幾何学的情報だけから測定システムの設定を校正する手法について述べた。本手法を用いることにより、構造物やビルの3次元計測を行う際のカメラ校正を簡単に行うことが可能である。

そのカメラ校正結果の精度であるが、焦点距離については、画像上の長方形形状の各辺の消失点の座標から求めた焦点距離の値、レンズの仕様から計算できる値、および、大きさが判っている物体を撮影した画像から校正して求めた値を比較した結果、全て5%以内に収まっていることが判った。

市街地における多くの建造物には直方体と長方形の形状が含まれており、この長方形形状が、透視変換により撮像面上に投影される形状を解析することにより、カメラと対象物との間の相対的な位置関係を求めることができる。

また、この校正手法の問題点であるが、カメラ校正を行う基準となる長方形形状が画像中で大きく写っている必要があり、その大きさが小さいとそれだけカメラ校正精度の低下の原因となる。したがって、計測のための画像の撮影に際して、構図の制約が生じる。

このように対象物の幾何学的形状の特徴を用いるカメラ校正手法は建築物のように特徴的な形状の場合は有効であるが、自然界の岩や巨大な像のように複雑な表面を持つ対象へ適用する場合、その表面上に幾何学的な形状の特徴が認めにくい、あるいは、複数の画像間で共通する対応点を抽出する作業において数点の特徴点以外は見い出せないため、適用が難しいという弱点を持っていることが判った。この問題を解決するため、第3章では、複数画像において共通して現われる数点の特徴点でカメラの位置、姿勢の校正を行う手法を示した。

- 複数画像の特徴点を用いた校正方法

第3章で、バンドル法の概念を用いて対象物上の限られた数の対応点を解析することによって、自然光の条件下でカメラ校正を行うことができることを示した。予備実験としてプラスチックボトルの計測においてカメラ校正を行い、次に自然光下での巨岩と平和祈念像の計測実験において良好にカメラ校正が可能であることを示した。

また、第3章では、この手法を輪郭解析による3次元形状計測作業に適用した例を示した。輪郭解析による3次元形状計測ではカメラの撮影位置、姿勢を予め計測しておく必要があり、そのために、これまでは対象物の表面上に座標値が判っている点を予めマーキングしておく必要があったが、本章で示した手法はそのような条件を必要としない、カメラの撮影位置、姿勢を撮影した画像中の情報だけから校正することができる、さらに実用的な手法である。

なお、カメラの校正を行うために PhotoModeler というバンドル法の手法を取り入れた校正ソフトウェアを一部の作業に使用したが、このソフトウェアはカメラの設定を校正する際に有効であった。

また、そのカメラ校正精度については、巨岩の撮影に使用したカメラの位置の校正結果を予めレーザセオドライトで実測した値と比較した結果、XY方向（水平方向）においては良好な校正結果を得たが、Z方向（高さ方向）については若干の誤差を含んでいた。これはカメラの高さ方向の変化が少なかったためである。

これは平和祈念像の計測においても同様で、ほぼ同一面内である地表からのみ画像の撮影を行っているために高さ方向の変化が少なく、カメラ校正結果の高さ方向については若干の誤差を含んでいる。

(3) 3次元計測手法に関する結論

本研究では、3次元形状計測手法として以下の2つの手法について検討した。

ステレオビジョン（三角測量）

輪郭形状の解析による手法

- ステレオビジョン（三角測量）

第2章で、カメラで撮影した画像上の対象物の形状の幾何学的情報だけから測定システムの設定を校正し、ステレオ視の手法により3次元計測を行う1つの簡単な手法を提案した。本手法を用いることにより、ビル等の巨大な構造物の3次元形状の計測を容易に行うことができることを示し、実際に計測を行った例を示した。

計測した3次元形状の精度については、計測結果を実際の建物の設計図面の値と比較した結果、約0.3%の精度であり、相対的な大きさは非常によく合致することが判った。

次に、ステレオビジョンにより3次元形状計測を行う上での問題点であるが、画像上の特徴点の位置の指定をコンピュータ上のオペレータのマウス操作により行っているため、その入力に若干の手間がかかっており、入力時に誤差が混入する原因にもなっている。これは、カメラ校正精度の低下、計測した3次元座標の精度の低下を招くことになる。その対策として、第4章で述べる特徴点間の相関を用いる手法が利用できる。

このようなステレオビジョンによる3次元形状計測手法は、直線や面で構成されている街並みのような対象物の場合には手軽に使える有効な手法であるが、この手法では対象物の頂点の3次元座標を計測しているため、自然界の岩や地形測量等のように複雑な表面を持つ対象物の場合、その表面上に幾何学的な形状の特徴が認めにくく、複数の画像間で共通する対応点を抽出する作業において数点の特徴点以外が見い出せないため、適用が難しいという弱点を持っている。この問題を解決するため、第3章では、輪郭形状を解析することによって3次元形状を推定する手法を示した。

- 輪郭形状の解析による手法

第3章では、第2章で述べた計測手法を適用することが難しい、自然界の岩のように明確な特徴点を持たない対象物についても適用可能な手法として、輪郭形状解析による3次元形状計測の手法について述べた。

輪郭解析とバンドル法概念を用いて対象物の輪郭形状を解析することによって、対象物の3次元形状を計測することができることを示し、実際に計測を行った例を示した。予備実験としてプラスチックボトルの計測を行い、次に自然光の条件下での計測対象物として巨岩と平和祈念像の計測実験を行い、良好に3次元形状計測が可能なことを示した。

本章の手法を用いることにより、光切断法等の一般的な画像計測手法では計測困難な自然条件下での対象物の3次元形状の計測を行うことが可能である。これにより、例えば、土木分野における山体、河川、岩等の計測が容易に行うことができ、災害予防や災害復旧において有効な手段になると思われる。

また、本章で用いた輪郭形状を用いる手法の本質的な問題点として、凹部の形状を復元することができないという点がある。例えば、平和祈念像の右腕について計測を行った結果、腕の部分と親指、人さし指の2本の指については良好な3次元形状を得ることができたが、残りの3本の指については掌の部分と一体化しており、判別することができなかった。これに対する方法として、土井らも述べているが凹部の形状を見通すことができる方向からの画像を使用する手法がある。例えば、平和祈念像の場合、像の直下、あるいは上空からの画像も用いればよい。もちろん、対象物によっては撮影方向に制約を受ける場合もあるが、次章で述べる低高度リモートセンシングシステムを用いた上空からの撮影が有効であると考えられる。また、そのほかの手法として、ステレオビジョンやレーザスポット等の他の3次元形状計測手法により計測した結果を併用することも可能である。

(4) 表現手法に関する結論

本研究では、計測した3次元形状に基づき、コンピュータグラフィックス (CG) による種々の表現を行った。その主な手法は以下のものである

ワイアフレーム

シェーディング

アニメーション

QTVR

ステレオ QTVR

第2章では、ワイアフレーム、シェーディング、アニメーションの手法を用いて景観シミュレーションへの利用について述べた。この手法を用い、ビル等の巨大な構造物の3次元形状の計測結果を用いて、3次元景観シミュレーションを行い、その結果について示した。

第3章では、輪郭形状解析による3次元形状計測の結果を用いて、巨岩と平和祈念像のコンピュータグラフィクスによる表現を行った。

第5章では、連続ビデオ画像から QuickTime Virtual Reality (QTVR) データへの変換を行う手法について述べた。

QTVRは簡易的な3次元表現手法の1つであり、完全な3次元形状を表現するわけではないが、ある地点を視点中心とした時の周囲の状況を記録する手法として、必要なファイルサイズが小さく、表示も高速に行うことができるといった特徴を持っている。しかし、QTVR画像を作成するための画像を得るには、撮影時にカメラを一定角度毎に回転させて撮影しなければならないという制限があり、このためにQTVR画像を作成するのに時間を要していた。

本章で述べる手法では、ビデオカメラを三脚上に設置して水平面内で1回転させて連続ビデオ画像を撮影し、撮影した画像から抽出した画像に含まれる特徴点の情報から画像間の相対的な位置関係を解析して画像を接続し、カメラを中心とする全周画像を作成し、QTVR画像を容易に作成することができる。

また、QTVRの臨場感をさらに高める手法として、左右に視差を持った2台のビデオカメラで撮影した連続ビデオ画像を用いてQTVRを作成し、その2つの画像をコンピュータの画面上で並べてステレオ表示し、この2つの画像をユーザのジョイスティックの操作に応じて連動して動くシステムを試作した。これにより、通常のQTVRよりも臨場感を高めた立体表示を簡易的に行うことが可能であることを示し、ステレオQTVRを表示する1つの簡単なシステムを提案した。ただ、現状の表示はコンピュータのCRT上に並べて表示する形式のため、立体視を行うためには多少の慣れが必要である。誰でも立体視を行うことが可能とするために、反射鏡とレンズを用いた簡易型のビューワの製作を検討している。

(5) 画像の接続について

第4章では、複数画像を接続して解像度を落とすことなく広視野角の画像を得る1つの手法を提案した。さらに、この手法を長崎大学工学部機械制御学研究室で開発した低高度リモートセンシングシステム (Low Altitude Remote Sensing System、LAReSシステム) に適用した結果を述べた。

低高度リモートセンシングシステムでは上空に浮かべた気球にカメラを搭載して地上の対象物の撮影を行い、その形状計測を行うが、気球に取り付けたカメラの動きは風の影響等で完全には安定しておらず、必要な角度範囲の画像が必ずしも1枚の画像に撮影できるとは限らない。また、カメラのレンズの焦点距離の制約もあり、必要な画角が得られない場合もある。このような場合、撮影対象範囲を複数枚の画像に分割して撮影し、撮影後に画像間の相対的な位置関係を解析し、複数画像を接続することが必要になる。この接続に際して、画像撮影時にカメラの方向を完全に記録することは困難なので、画像に含まれる情報だけを用いて画像間の相対的な位置関係を解析する必要がある。その結果を用いて画像の接続を行うことにより、撮影した複数画像から解像度を落とすことなく広視野角の画像を得ることができると示した。本手法を用いて、遺跡の撮影を行い、画像の撮影を行った例を示した。

また、低高度リモートセンシングシステムの撮影に際しては、最も適切な構図を得るためにビデオカメラのズーム機能を用いるので、画像毎に焦点距離が異なる場合も有り得る。そのような状況に対処できるよう、画像に含まれる情報だけから撮影時のレンズのズームの倍率（焦点距離）の値の補正を行う手法についても述べた。本手法では、画像に含まれる特徴点の間の角度に着目し、画像間のズーム倍率の補正を行った。

このズームに関する考慮を加えた結果、画像の接続精度は2つの画像を接続する場合は肉眼ではその繋ぎ目も判別できない程度に、良好に接続することができた。しかし、接続する画像の枚数が増えるに従い、画像間の不整合が生じる場合があることが判った。これは画像の接続を一方向について行っているため、接続経路が複数存在する場合に種々の要因により発生した変換行列の誤差の矛盾が1カ所に生じるためである。その誤差成分を全ての変換行列に均等に加えることにより、1カ所の画像間の境目にギャップが現われることを防ぎ、全体として均一な画像を得ることが可能である。

また、画像間の共通な特徴点の指定にあたって、当初はマウスでピクセル単位で指定していたが、どうしても1~2ピクセル程度の誤差が含まれることは防げなかった。この誤差により、変換行列、焦点距離の補正に際して誤差の原因となっていた。これを解決するため、特徴点近傍の微小領域について画像のパターンマッチングによる特徴点座標の微調整をサブピクセル単位で行い、特徴点座標の精度の向上を計った。その結果、変換行列、焦点距離の補正の精度の向上を得ることが出来た。

第5章では、第4章で述べた画像接続の特殊な場合として、撮影時にカメラの方向を水平方向の回転に限定するという特殊な条件を加えた場合、画像に含まれる特徴点の情報から撮影時のカメラの焦点距離、方向、傾き等の校正が簡略に行えることを示した。また、そこから導かれる簡略な変換により画像間の幾何学的な相対位置関係が算出できることを示した。さらに、その結果を用いて、カメラを中心とする 360° の全周パノラマ画像を作成し、QuickTime Virtual Reality (QTVR) データへの変換を行う手法について述べた。これにより、ビデオカメラを三脚上に設置して水平面内で1回転させて全周方向を撮影した連続ビデオ画像からQTVR画像データへの変換を容易に行うことが可能になった。

本手法の問題点としては、コンピュータ上に取り込んだ画像からQTVRを作成することは容易だが、ビデオカメラの画像からコンピュータに画像を取り込む作業がオペレータの指定によっているために時間がかかっているということがある。幸い、実験で使用しているビデオカメラはデジタルビデオカメラでありデジタル入出力端子を持っているので、コンピュータからの制御が可能ならばである。しかし、現状ではそのインターフェイスが公開されておらず、今後の課題となっている。

(6) 低高度リモートセンシングについて

第4章では、低高度リモートセンシングシステムにおいて、複数画像の接続により解像度を落とすことなく広視野角の画像を作成する手法とその利用について述べた。

長崎大学工学部機械制御学研究室で研究を行っている低高度リモートセンシングシステムは、手軽に上空からの画像の撮影を行うことができるシステムとして優れている。特に、航空機が飛行することができない住宅地上空での低高度での撮影、山中の谷での撮影のように、航空機では危険を伴ったり、航空法により規制されている場合に、安全に撮影を行うことができる。また、その問題点としては、強風時に風により気球が流れるため、所定の位置に浮上させるために若干の技術を要すること、強風時に気球の下流に生じるカルマン渦や風の息と呼ばれる風の強弱により、気球に揺れが生じることがある。この揺れにより、画像のぶれが発生したり、所定の方向にカメラを向けるのが困難になったりするが、画像のぶれについては画像撮影時にシャッター速度を高速に設定することで回避可能である。

現在、長崎大学工学部機械制御学研究室では、本章で示した遺跡等の測定の他に建築物の計測のために使用したり、イルカの生態調査のために海上で使用したりしている。また、さらに高度な計測を行うための機器を搭載するため、あるいは現在のものより小径の気球でも浮上できるよう、機器の計量化に取り組んでいる。さらに、強風時でもカメラが安定して撮影できるよう、気球の形状の検討、カメラの取り付け方法の検討、安定機構の開発に取り組んでいる。

謝 辞

私が勤務している長崎県工業技術センターでは研究員の資質向上のために博士号取得を推奨していることもあって、平成7年度に長崎大学大学院・海洋生産科学研究科に入学することができ、それまでも種々の機会に御指導戴いていた本学・海洋生産科学研究科教授 石松隆和 博士の下で、以前から興味を持っていた画像を用いた3次元形状計測の研究を行う好機を得ることができました。

本研究で対象とした画像に関する技術と、画像を用いて3次元形状を計測する技術は、広範なニーズと応用分野が予想される重要な技術分野であり、今後のコンピュータのや通信技術の発達により、その重要性はさらに増していくものと思います。今後も継続して画像と3次元形状計測に関する研究を行い、その成果を長崎県の発展に少しでも寄与していければと考えています。

本研究を進めるにあたって、平成7年度に長崎大学大学院・海洋生産科学研究科に入学以来、御丁寧なる御指導と御鞭撻を賜りました本学・海洋生産科学研究科教授 石松隆和 博士に心から感謝申し上げます。

また、本論文の審査に際して御指導を賜った本学・海洋生産科学研究科教授 黒田英夫 博士、同教授 棚橋由彦 博士、同教授 茂地 徹 博士に厚く感謝の意を表します。

さらに本研究を進めるに当たり、御協力いただいた本学工学部 森山雅雄 博士、王 洪波 博士、今井清利技官を初め石松研究室の各位に感謝し、御礼を申し上げます。

また、低高度リモートセンシングシステムの実験に際しては気球を提供して戴いたり、種々の技術上の示唆を戴き、さらに参考論文に挙げた論文の共著者として御協力戴いた有限会社バルエンタープライズ社 代表取締役 井上哲朗氏に感謝し、御礼を申し上げます。

また、本研究を行う機会を与えて戴き、深い御理解と暖かい御援助を賜りました長崎県工業技術センター所長 長田純夫 博士、機械金属部部长 森田英毅 博士、電子科科长 永田良人 氏を初めとする長崎県工業技術センターの皆様方と長崎県商工労働部企業振興課の皆様方に感謝し、御礼を申し上げます。

その他、本研究を行うに当たりお世話になった全ての方々に深く感謝いたします。

そして最後に、出産、育児で忙しい中、家庭と私を支えてくれた妻 美春、そして、私の大学院入学と機を同じくしてこの世に生まれ、ある時は研究の邪魔をし、また、ある時はその笑顔で励ましてくれた 娘 千尋に感謝します。

平成9年12月

藤本 和貴

参考文献

- 1) Takayanagi, S. : Industrial Robots in Japan - Today and Future, Keynote Speak of IEEE/RSJ Int'l Conf. Intelig. Robot & Sys., Ralaigh (Jul. 1992).
- 2) 真下寛治 : CAD/CAM システムと三次元測定機のリンク化研究 (第 1 報) - 三次元自由曲面の精度評価 - 、昭和 62 年度群馬県工業試験場年報、p.102-107, 1987.
- 3) 真下寛治、布施久康、高木 努 : CAD/CAM システムと三次元測定機のリンク化研究 (第 2 報) - 切削加工物の寸法測定 - 、昭和 62 年度群馬県工業試験場年報、p.108-112, 1987.
- 4) 真下寛治、布施久康、木村 弘 : CAD/CAM システムと三次元測定機のリンク化研究 (第 3 報) - 形状モデルのスケーリングと NC 加工 - 、昭和 62 年度群馬県工業試験場年報、p.113-116, 1987.
- 5) R. A. Jarvis : "A Perspective on Range Finding Techniques", IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol.PAMI-5, No.2, pp.122-139(1983).
- 6) 谷内田正彦 : " 3 次元画像処理入力を中心として" 、O plus E, No.66, pp.59-64, 1987.
- 7) 佐藤宏介、井口征士 : " 画像入力による三次元形状計測を中心として" 、映像情報 (I) 、Vol.16, No.12, pp.19-24, 1984.
- 8) 松下俊夫、柿倉正義 : " 3 次元物体認識のための距離センサと走査技術" 、計測と制御, Vol.26, No.10, pp.59-64, 1987.
- 9) 高橋秀美、木村 実、山田 修、内藤宏之、佐野令而 : 移動ロボット用 CO₂ レーザレーダ 3 次元視覚センサ、日本ロボット学会、Vol.8, No.4, pp.385-389
- 10) 吉澤 徹 : 3 次元形状の自動計測" プロファイライザシステム"、センサ技術、Vol.7, No.2, pp.120-(1987).
- 11) 成瀬 央、野村由司彦、山本俊雄 : " スリット光投影法による高精度距離・姿勢計測" 、電子通信学会論文誌、Vol.J69-D, No.12, pp.1888-1895
- 12) 土井康弘、河辺 峻 : レーザ光切断法による 3D 物体の認識、計測自動制御学会論文集, Vol.9, No.1, pp.16-21 (1973).
- 13) 土井、常包ほか : レーザ光切断による形状計測、第 14 回応用物理学関係連合講演会予稿集, pp.200 (1967 春季).
- 14) 青木則夫、谷内田正彦、辻 三郎 : " パターン投影法と 2 台のカメラを用いた 3 次元物体の計測" 、電子通信学会論文誌、Vol.J68-D, No.3, pp.384-391
- 15) 吉澤 徹、大谷幸利 : " サブミクロン感度を持つモアレトポグラフィ法" 、精密工学会、Vol.55 No.1, pp.152-154(1989)
- 16) Horn, B. K. P. : Obtaining Shape from Shading Information, in Winston, P.H. (ed.), The Psychology of Computer Vision, McGraw-Hill, New York (1975).
- 17) 村瀬 洋 : " 古くて新しい画像認識法" 、情報処理、Vol.38 No.1 (1997) 、情報処理、Vol.38 No.1, pp.54-60 (1997)
- 18) Besl, P.J. and Jain, R.C. : Three-Dimensional Object Recognition, ACM Computing Surveys, Vol.17, No.1, pp.75-145(1985).

- 19) Ullman, S. and Basri, R. : Recognition by Linear Combination of Models, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol.13, No.10, pp.992-1006(1991).
- 20) Poggio, T. and Edelman, S. : A Networks that Learns to Recognize Three-Dimensional Objects, Nature, Vol.343, pp.263-266(1990).
- 21) Murase, H. and Nayar, S.K. : Visual Learning and Recognition of 3-D Objects from Appearance, International Journal of Computer Vision, Vol.14, pp.5-24(1995).
- 22) Marr, D.(乾, 安藤訳,) : ビジョンー視覚の計算理論と脳内表現ー, 産業図書(1987).
- 23) 村瀬, CVCV-WG 特別報告 : コンピュータビジョンにおける技術評論と将来展望(VI)ー固有空間法による画像認識ー, 情報処理学会 CV 研究会, 97-9, 11 (1995).
- 24) Turk, M.A. and Pentland, A.P. : Face Recognition Using Eigenfaces, Proc. of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, pp.586-591(1991).
- 25) Murase, H. and Lindenbaum, M. : Spatial Temporal Adaptive Method for Partial Eigenstructure Decomposition of Large Images, IEEE Trans. IP, 5, pp.620-629(1995).
- 26) Murase, H. and Nayar, S.K. : Image Spotting or 3D Objects using Parametric Eigenspace Representation, SCIA95, pp.323-332(1995).
- 27) Murase, H. and Sakai, R. : Moving Object Recognition in Eigenspace Representation: Gait Analysis and Lip Reading, Pattern Recognition Letters, 17, pp.155-162(1996).
- 28) Murase, H. and Nayar, S.K. : Illumination Planning for Object Recognition using Parametric Eigenspace, IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol.16, No.12, pp.1219-1227(1994).
- 29) Edelman, S. and Weinshall, D. : A Self-Organizing Multiple-View Representation of 3D Objects, Biological Cybernetics, Vol.64, pp.209-219(1991).
- 30) 村井祐一、番匠一雅、山本和弥、野田健一 : ” 投球された野球ボールの自然シーン中からの抽出と追跡”、情報処理学会論文誌、Vol.37 No.1、pp.163-166(1996)
- 31) 農宗、芥川 : 可変機能可変構造型パイラインプロセッサをもつ高速画像処理装置、電学論、Vol.112, No.2, pp.81-88 (1992).
- 32) Morozumi,T., Murai,Y., Masuda, S., Kato, T. and Noda, K. : Stereo-Vision observation of Flying Ball Locus, IEEE/RSJ Int'l Conf. Intellig. Robot. & Sys., Raleigh, WP2-4, No.6 (1992).
- 33) 村井, 番匠, 山本, 野田 : 野球ボールの追跡と到達点の予測, 情処学会 コンピュータビジョン研究会, Vol.95, No.68, pp.1-8 (1995).
- 34) 村井祐一、番匠一雅、山本和弥、野田健一 : ” 色距離法を用いた野球ボールの追跡と適合関数切り替えによる到達点の予想”、情報処理学会論文誌、Vol.38 No.3、pp.524-533(1997)
- 35) 千葉昌孝, 小沢慎治 : 勾配法に基づく移動物体追跡のための一手法, 情報処理学会論文誌, Vol.31, No.3, pp.423-432 (1990).
- 36) 鈴木 智, 中根一成 : 時空間輪郭積分法による動柔物体の抽出, 情報処理学会論文誌, Vol.34, No.10, pp.2184-2191 (1993).
- 37) 喜多伸之, Rougeaux, S., 國吉康夫, 坂根茂幸 : 仮想ホログラムを用いた実時間両眼追跡, 日本ロボッ

- ト学会誌, Vol.13, No.4 (1995).
- 38) Takagi, M. and Sakaue, K. : The Analysis of Moving Granules in a Pancreatic Cell by Digital Moving Image Processing, Proc. 4th Int. Joint Conf. Pattern Recognition (1992).
- 39) Yachida, M., Asada, M. and Tsuji, S. : Automatic Analysis of Moving Images, IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol.PAMI-3, No.1, pp.12-20 (1981).
- 40) 白井良明 : コンピュータビジョン, pp.65-75, 昭晃堂 (1980).
- 41) Bansho, K., Hibi, T., Murai, Y. and Noda, K. : Accuracy Improvement Baseball Trajectory Measurement by Stereo-Vision System, Proc. 3rd Int'l Conf. on Electronic Measurement & Instruments, pp.311-313(1997)
- 42) 大田友一 : ” 3次元画像メディアとコンピュータビジョン”、情報処理 特別論説、Vol.37 No.11、pp.981-986
- 43) 田村秀行、池田克夫編 : 知能情報メディア、263p、総研出版 (1995).
- 44) 大越孝敬 : 3次元画像工学、200p、朝倉書店 (1991).
- 45) 大田友一、武川直樹、横矢直和、全 炳東、萩田紀博 : ” 「パターン認識・理解」から「パターン認識・メディア理解」へ”、信学技報、PRMU96-1 (1996).
- 46) 北原 格、佐藤清秀、大田友一 : 多眼ステレオ法を用いた運動視差の再現可能な3次元画像表示、テレビジョン学会誌、Vol.50, No.9, pp.1268-1276 (1996).
- 47) Nakamura, Y., Matsuura, T., Satoh, K. and Ohta, Y. : "Occlusion Detectable Stereo - Occlusion Patterns in Camera Matrix -", Proc. CVPR'96, pp.371-378 (1996).
- 48) 孫 暁 : Study of Three-Dimensional Shape Measurement of Huge Objects Using Vision Sensor、長崎大学大学院、博士論文 (1997)
- 49) 出口光一郎 : ” コンピュータビジョンのための幾何学 4. 視覚によるロボットの姿勢制御”、情報処理 連載講座、Vol.37 No.9, pp.880-887
- 50) 橋本 : 視覚フィードバック制御—静から動へ、システム制御情報学会誌、Vol.38, No.12, pp.659-665 (1994).
- 51) Hashimoto, K. ed. : Visual Servoing, World Scientific (1993)
- 52) Weiss, L. E. et al. : Dynamic Sensor - Based Control of Robots with Visual Feedback, IEEE Journal of Robotics and Automation, Vol.RA-3, No.5, pp.404-417 (Oct. 1987).
- 53) Espiau, B. et al. : A New Approach to Visual Servoing in Robotics, IEEE Trans. Robotics and Automation, Vol.8, No.3, pp.313-326 (1992).
- 54) Samson, C., Borgne, M. L. and Espiau, B. : Robot Control - The Task Function Approach, Oxford University Press, Oxford (1991).
- 55) Feddema, J. T., George Lee, C. S. and Mitchell O. R. : Weighted Selection of Image Features for Resolved Rate Visual Feedback Control, IEEE Trans. Robotics and Automation, Vol.7, No.1, pp.31-47 (Feb. 1991).
- 56) 細田, 浅田 : 構造やパラメータに関する知識を用いないビジュアルサーボ系の構成, 第4回ロボットシンポジウム予稿集 (1994).
- 57) 村瀬, Nayar, S. K. : パラメトリック固有空間法による3次元物体の認識とスポッティング, 画像の

- 認識・理解シンポジウム (MIRU'94) 講演論文集 2 (1994).
- 58) 出口：動きと視覚の幾何学的結び付きの記述とその視覚サーボへの応用，第1回ロボティクス・シンポジウム (1996).
- 59) 大沢 晃：” スペースZ-バッファ：安定で高速な隠線・隠面消去二次元スペースモデルの応用”，情報処理学会論文誌、Vol.38 No.4, pp.779-786(1997).
- 60) 大沢 晃：二次元スペース・モデリングの考察，情報処理学会論文誌、Vol.27, No.12, pp.1174-1185 (1986).
- 61) 大沢,川崎,岩本：スペースモデルによる二次元図形処理システムの試作：注目,局所集合演算,運動図形の衝突検出，情報処理学会論文誌, Vol.29, No.10, pp.933-943 (1988).
- 62) 大沢 晃：計算誤差による暴走のない図形演算アルゴリズム：スペースモデルによる実現，情報処理学会論文誌, Vol.31, No.1, pp.42-55 (1990).
- 63) 今宮淳美：隠面除去アルゴリズム,情報処理, Vol.24, No.4, pp.539-546 (1983).
- 64) 伊理正夫, 杉原厚吉：計算誤差を考慮した幾何的アルゴリズム，情報処理学会アルゴリズム研究会資料, アルゴリズム 1-1 (1988.5.23).
- 65) 杉原厚吉,伊理正夫：計算誤差による暴走の心配のないソリッドモデルの提案，情報処理学会論文誌, Vol.28, No.9, pp.962-974 (1987).
- 66) Appel, A.: The Notion of Quantitative Invisibility and the Machine Rendering of Solids, Proc. ACM Nat. Conf., p.387, Thompson Books (1967).
- 67) 吉 鴻賓, 劉 真, 青木由直：” 測量データに基づく河川の三次元モデルと描画アルゴリズムの研究”，情報処理学会論文誌、Vol.37 No.2, pp.259-268 (1996).
- 68) 本元広次,大野義夫：拡張3次元テクスチャを用いた布地物体の質感表示，信学論, Vol.J75-D2, No.4, pp.706-713 (1992).
- 69) 東海彰吾,安田孝美,横井茂樹,鳥脇純一郎：爬虫類皮革の質感表現の一手法，情報処理, Vol.35, No.5, pp.801-809 (1994).
- 70) Sarraf,S., Kahawita, R. and Nassir, E.: 3-D General Movable Mesh In Water Circulation Modeling, Journal of Computer in Civil Engineering, ASCE, Vol.2, No.2 (1988).
- 71) Shimiz, Y., Yamaguchi, H., Itakura, T. : 3D Computation of Flow and Bed Deformation Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol.116, No.9, pp.1090-1108 (1990).
- 72) 三中西信治, 横山健一郎, 村岡一信, 千葉則茂：粒子の行動モデルによる水流のビジュアルシミュレーション，NICOGRAPH 論文集, pp.44-54 (1993).
- 73) 中前榮八郎, 西田友是, 金田和文, 多田村克己：散乱光モデルを用いたホトリアリスティックな画像生成，電信論, Vol.J76D-2, N0.8, pp.1515-1527 (1993).
- 74) 筒口 拳, 末永康仁, 渡部保日児, 下原勝憲：” 3次元シーン内の人物像歩行動作生成システム”，情報処理学会論文誌、Vol.38 No.4, pp.787-796 (1997).
- 75) Badler, N.L., Bersky, B.A. and Zeltzer, D. : Making Them Move: Mechanics, Control, and Animation of Articulated Figures, Morgan Kaufmann (1991).

- 76) Bezault, L., Boulic, R., Magnenat-Thalmann, N. and Thalmann, D. : An Interactive Tool for the Design of Human Free-walking Trajectories, *Creating and Animating the Virtual World*, pp.87-104, Springer-Verlag (1992).
- 77) Bruderlin, A. and Calvert, T.W. : Goal-directed, Dynamic Animation of Human Walking, *Computer Graphics*, Vol.23, No.3, pp.233-242 (1989).
- 78) Bruderlin, A. and Williams, L. : Motion Signal Processing, *Proc. SIGGRAPH 1995*, pp.97-104 (1995).
- 79) Hodgins, J.K. Wooten, W.L., Brogan, D.C. and O'Brien, J.F. : Animating Human Athletics, *Proc. SIGGRAPH 1995*, pp.71-78 (1995).
- 80) McKenna, M. and Zeltzer, D. : Dynamic Simulation of Autonomous Legged Locomotions, *Computer Graphics*, Vol.24, No.4, pp.29-38 (1990).
- 81) Overveld, C.W.A.M.V. and Ko, H. : Small Steps for Mankind: Toward a Kinematically Driven Dynamic Simulation of Curved Path Walking, *The Journal of Visualization and Computer Animation*, Vol.5, pp.143-165 (1994).
- 82) Perlin, K. : Real Time Responsive Animation with Personality, *IEEE Trans. Visualization and Computer Graphics*, Vol.1, No.1, pp. 5-15 (1995).
- 83) 筒口 拳, 境野英朋, 渡部保日児 : 地形適応型歩行動作生成手法を用いた人物の歩行アニメーション, *信学論(D-II)*, Vol.J77, No.8, pp.1663-1670 (1994).
- 84) Unuma, M., Anjyo, K. and Takeuchi, R. : Fourier Principles for Emotion-based Human Figure Animation, *Proc. SIGGRAPH 1995*, pp.91-96 (1995).
- 85) Van de Panne, M., Fiume, E. and Vranesic, Z. G. : Control Techniques for Physically-based Animation, *EUROGRAPHICS Workshop on Animation* (1992).
- 86) 向川康博, 中村祐一, 大田友一 : ” 2枚の顔写真を用いた任意方向の顔画像の生成”、*情報処理学会論文誌*, Vol.37 No.4, pp.635-644 (1996).
- 87) 末永康仁, 渡部保日児 : 3D形状と輝度(色)の同時計測が可能なスキャナとその顔画像入力への応用, *情処研報*, CV 67-5 (1990).
- 88) 秋本高明, 末永康仁 : 頭部の正面・側面像と基本3次元形状を用いた顔画像生成手法, *信学技報*, PRU 88-47 (1988).
- 89) Skerjanc, R. and Liu, J. : Computation of Intermediate Views for 3DTV, *Proc. 5th Workshop 1992 on Theoretical Foundation of Computer Vision*, pp.190-201 (1992).
- 90) Ullman, S. : *The Interpretation of Visual Motion*, MIT Press, Cambridge, MA (1979).
- 91) Tomasi, C. and Kanade, T. : The Factorization Method for the Recovery of Shape and Motion from Image Streams, *Proc. of Image Understanding Workshop*, pp.459-472 (1992).
- 92) Koenderink, J. J. and Doorn, A. J. van : Affine Structure from Motion, *J. Opt, Soc. Am. A*, Vol.8, No.2, pp.377-385 (1991).
- 93) 大田友一, 正井康之, 池田克夫 : 動的計画法によるステレオ画像の区間対応法, *信学論*, Vol.J68, No.4, pp.554-561 (1985).
- 94) 館 : ” バーチャルリアリティの新しい進展”、*情報処理 特別論説*, Vol.37 No.8, pp.711-716

- 95) 館：人工現実感，日刊工業新聞社 (1992).
- 96) 館，広瀬編著：バーチャル・テック・ラボ，工業調査会 (1992).
- 97) 重点領域研究「人工現実感」平成7年度成果報告書，文部省 (1996).
- 98) ヒューマンメディアの調査研究報告書，新エネルギー・産業技術総合開発機構 (1995).
- 99) 通産省アールキューブ研究会：アールキューブ，日刊工業新聞社 (1996).
- 100) National Research Council: Virtual Reality - Scientific and Technological Challenges, National Academy Press (1995).
- 101) Gott, C. J. and Homan, D. J. : Application of Virtual Reality Technology, Including Force Feedback, for Astronaut Training, Proceedings of the 5th International Conference on Artificial Reality and Tele-Existence(ICAT/VRST'95), pp.143-162, Makuhari, Japan (1995).
- 102) Special Issue : Applying Virtual Reality, IEEE Engineering in Medicine and Biology Magazine, Vol.15, No.2 (1996).
- 103) 北川英志、安田孝美、横井茂樹、鳥脇純一郎：“仮想空間操作を利用した対話型手術シミュレーションシステムの基本機能の実現”、情報処理学会論文誌、Vol.37 No.6, pp.1088-1098 (1996).
- 104) 安田孝美、横井茂樹、鳥脇純一郎：3次元任意形状の骨切断・移動操作が可能な頭蓋形成手術計画支援システム NUCSS0-V2, 情報論, Vol.31, No.6, pp.870-878 (1990).
- 105) 泉田良一、石名田洋一、松本守雄、逸見 治、藤岡睦久、尾崎 茂、守屋禎之：3-DCT画像を用いた股関節手術シミュレーションシステム(SurgiPlan)-(1), 間接外科, Vol.11, No.2, pp.146-150 (1992).
- 106) 泉田良一、石名田洋一、逸見 治、川久保 誠、藤岡睦久、真野三佳、山本鈴子：3-DCT画像を用いた股関節手術シミュレーションシステム(SurgiPlan)-(2), 間接外科, Vol.11, No.8, pp.960-968 (1992).
- 107) 周 欣欣、安田孝美、横井茂樹、鳥脇純一郎：3次元画像データに基づく手術シミュレーションシステムの基本データ構造とソフトウェア機能, Medical Imaging Technology, Vol.12, No.1, pp.74-83 (1994).
- 108) 周藤安造、黒川高秀、小島龍也、小林正之、古旗賢太郎、黄 徳文、菊地きよみ：3次元画像の整形外科への応用, Medical Imaging Technology, Vol.7, No.1, pp.16-21 (1989).
- 109) 正宗 賢、増谷佳孝、鈴木 真、土肥健純、伊関 洋、高倉公明：ノート型ワークステーションを用いた術中支援システム, Medical Imaging Technology, Vol.13, No.3, pp.215-220 (1995).
- 110) 鈴木直樹、服部麻木、松下 聡、甲斐慎也、高津光洋：バーチャルリアリティを用いた外科的手術システムの開発, 第11回 NICOGRAPH 論文コンテスト論文集, pp.179-186 (1995).
- 111) Robb, R.A. and Cameron, B.: VRASP: Virtual Reality Assisted Surgery Program, Journal of Computer Aided Surgery, Vol.1, No.2, pp.33-45 (1995).
- 112) 周 欣欣、安田孝美、横井茂樹、鳥脇純一郎、泉田良一：股関節整形手術における人工関節置換支援システム, 信学論, J76 - DII, No.2, pp.374-381 (1993).
- 113) Kitagawa, E., Yasuda, T., Yokoi, S. and Toriwaki, J. : An Interactive Voxel Data Manipulation System for Surgical Simulation, Proc. '94 ROMAN, pp.204-209 (1994).
- 114) Lorensen, W. E. and Cline, H.E. : Marching Cubes: A High Resolution 3D Surface Construction Algorithm, Computer Graphics, Vol.21, No.4, pp.163-169 (1987).

- 115) 判 秀行、橋詰明英、鈴木隆一：医用 3 次元画像の直接回転操作方式，信学論，J78-D11，No.9，pp.1414-1419 (1995).
- 116) Chen, M., Mountford, S.J. and Sellen, A. : A Study in Interactive 3-D Rotation Using 2-D Control Devices, Computer Graphics, Vol.22, No.4, pp.121-129 (1989).
- 117) 安藤幸央：“次世代のインターネットを形作る VRML の 3 次元の世界”、情報処理、Vol.37 No.10, pp.899-906 (1996).
- 118) Pesce, M. : VRML-Browsing & Building Cyberspace, 400p, New Riders, ISBN1-56205-498-8 (1995).
- 119) The VRML email discussion list, <http://www.vrml.org/www-vrml/>
- 120) Hassinger, S. and Erwin, M. : The Official Internet World 60 Minute Guide to VRML, 256p, IDG Books, ISBN1-56884-710-6 (1995).
- 121) VRML 1.0C Specification, <http://www.vrml.org/VRML1.0/vrml10c.html>
- 122) Virtual Reality Modeling Language, <http://www.webcity.co.jp/info/andoh/vrml/>
- 123) The VRML Repository, <http://www.sdsc.edu/vrml/>
- 124) VRML Architecture Group, <http://vag.vrml.org/>
- 125) The VRML2.0 Specification, <http://vag.vrml.org/VRML2.0/>
- 126) Chen, S. E. : QuickTime VR - An Image-Based Approach to Virtual Environment Navigation, Proc. SIGGRAPH'95, pp.29-38 (1995).
- 127) 金谷健一：“幾何学的補正問題の最適計算と精度の理論的限界”、情報処理学会論文誌、Vol.37 No.3, pp.363-370 (1996).
- 128) Faugeras, O. : Three-Dimensional Computer Vision: A Geometric Viewpoint, MIT Press, Cambridge, MA (1993).
- 129) 金谷健一：画像理解－3次元認識の数理－、森北出版 (1990).
- 130) Kanatani, K. : Geometric Computation for Machine Vision, Oxford University Press, Oxford (1993).
- 131) 金谷健一：画像の 3 次元解釈の統計的信頼性，情報処理学会論文誌，Vol.34, No.10, pp.2062-2070 (1993).
- 132) 金谷健一：コンピュータビジョンのためのくりこみ法，情報処理学会論文誌，Vol.35, No.2, pp.201-209 (1994).
- 133) Kanatani, K. : Renormalization for Motion Analysis: Statistically optimal Algorithm, IEICE Trans. Infor. Sys., Vol.E77-D, No.11, pp.1233-1239 (1994).
- 134) 金谷健一：当てはめ問題の最適推定と精度の理論的限界，情報処理学会論文誌，Vol.36, No.8, pp.1865-1873 (1995).
- 135) 金谷健一：空間データの数理－3次元コンピューティングに向けて－，朝倉書店 (1995).
- 136) 金谷健一：幾何学的補正問題の精度の理論限界と最適計算法，情報処理学会研究報告，95-CV-94-5 (1995-5).
- 137) 金谷健一：画像理解のための統計学：画像の幾何学的解釈の信頼性評価，情報処理，Vol.37, No.1, pp.52-60 (1996).

- 138) Kanatani, K. : Statistical Optimization for Geometric Computation, Theory and Practice, Elsevier Science, Amsterdam (1996).
- 139) Kanatani, K. and Takeda, S. : 3-D Motion Analysis of a Planar Surface by Renormalization, IEICE Trans. Inf. & Syst. Vol.E78-D. pp.1074-1075 (1995).
- 140) Kanazawa, Y. and Kanatani, K. : Direct Reconstruction of Planar Surfaces by Stereo Vision, IEICE Trans. Inf. & Syst. Vol.E78-D, No.7, pp.917-922 (1995).
- 141) Kanazawa, Y. and Kanatani, K. : Reliability of 3-D Reconstruction by Stereo Vision, IEICE Trans. Inf. & Syst. Vol.E78-D, No.10, pp.1301-1306 (1995).
- 142) Maybank, S. : Theory of Reconstruction from Image Motion, Springer, Berlin (1993).
- 143) Ohta, N. and Kanatani, K. : Optimal Structure-from-Motion Algorithm for Optical Flow, IEICE Trans. Inf. & Syst. Vol.E78-D, No.12, pp.1559-1566 (1995).
- 144) Weng, J., Huang, T. S. and Ahuja, N. : Motion and Structure from Image Sequences, Springer, Berlin (1993).
- 145) 綿瀬智晃 : 3次元画像計測システムの校正法に関する研究、平成7年度長崎大学工学研究科修士論文 (1996).
- 146) 田中真一郎 : 実画像を用いた3次元景観シミュレータの開発、平成8年度長崎大学工学研究科修士論文 (1997).
- 147) 藤本 : 動画像認識制御システムの開発、平成7年度長崎県工業技術センター研究報告 No.23 (1996).
- 148) K.Fujimoto, T.Watase, M.Yamamoto, T.Ishimatsu : A Camera Calibration Technique and Landscape Simulation, The 10th Korea Automatic Control Conference, Seoul,Korea, p.295-298 (1995).
- 149) 藤本、石松、綿瀬 : 画像計測におけるカメラ校正技術と景観シミュレーション、第14回計測自動制御学会九州支部学術講演会予講集 p.373-374 (1995).
- 150) A.M.Waxman, S.S.Sinda : Dynamic Stereo, Passive Ranging to Moving Objects from Relative Image Flows, IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. PAMI-8, No.4 (1986).
- 151) S・ハリントン著、郡山彬訳 : コンピュータグラフィックス[I],[II]、マグローヒル出版 (1984).
- 152) T.Ishimatsu et al. : "Fast 3-Dimensional Measuring Technique Using a Look-Up Table", Trans.Jpn.Soc. Mech.Eng., 57,538C, pp.179-183 (1991).
- 153) H.S.Lim : "Curved Surface Reconstruction Using Stereo Correspondence", Proc. Image Understanding Workshop, pp.809-819 (1988).
- 154) E.Grosso : "3D Object Reconstruction Using Stereo and Motion", IEEE Trans.Syst.Man. Siberne., 16(6), (1989).
- 155) K.Sato, H.Yamamoto and S.Inokuchi : "3D Shape Measurement of Megalithic Statue-Moai-", Proc.8thICPR, pp.675-677 (1986).
- 156) C.J.Poelman and T.Kanade : "A Paraperspective Factorization Method for Shape and Motion Recovery", Published at Computer Science of CMU (1992).
- 157) 三宅哲夫、土井淳多 : "立体形状の多面体近似システム"、情報処理学会論文誌、Vol.25 No.5, pp.745-754 (1984).

- 158) 岡田徳次, 土屋誠治 : 人工の手による形状認識, 電子技術総合研究所彙報, Vol.35, No.3, pp.334-345 (1971).
- 159) 梅谷陽二, 菱川 明 : 網目状能動体による曲面のパターン識別, 計測自動制御学会論文集, Vol.14, No.4, pp.413-419 (1978).
- 160) 浮田宏生, 服部憲一 : 輪郭曲線群による 3 次元データの整合と表示, 電子通信学会論文誌 (D) , Vol.J62-D, No.10, pp.665-672 (1979).
- 161) Will, P. M. : Grid Coding: A Novel Technique for Image Processing, Proc. IEEE, Vol.60, No.6, pp.669-680 (1972).
- 162) 渡辺弥寿夫, 新田克己, 榎本 肇 : 三次元物体の形状認識における一考察, 信学技報, PRL 79-19, pp.65-74 (1979).
- 163) 杉山 聡 : 3 次元形状の光学的自動測定, 計測と制御, Vol.19, No.5, pp.470-475 (1980).
- 164) 出沢正徳 : 図形処理に関する研究, 東京大学生産技術研究所報告, Vol.23, No.4, pp.133-176 (1974).
- 165) Baumgart, B. G. : Geometric Modeling for Computer Vision, Stanford Artif. Intell. Lab. Memo, AIM-249 (1974).
- 166) Baumgart, B. G. : A Polyhedral Representation for Computer Vision, Proc. NCC, pp.589-596 (1975).
- 167) Martin, W, N. and Aggarwal, J. K. : Volumetric Descriptions of objects from Multiple Views, IEEE, Trans. Pattern Anal. Mach. Intell., Vol.PAMI-5, No.2, pp.150-158 (1983).
- 168) 佐藤幸男、藤田広一 : 曲面物体の形状測定と記述, 電子通信学会論文誌 (D) , Vol.J62-D, No.1, pp.1-7 (1979).
- 169) 津吉敏明、佐藤幸男、藤田広一 : 運動軌跡からの多面体頂点の座標測定, 電子通信学会論文誌 (D) , Vol.J62-D, No.11, pp.726-733 (1979).
- 170) Ramer, U. : An Iterative Procedure for the Polygonal Approximation of Plane Curves, Computer Graphics Image Process, Vol.1, No.3
- 171) Junta Doi, Tetsuo Miyake : "Automated Geometric Modelling of a Tillage Blade", J. Agric.Engng. Res. 55, pp.207-216 (1993).
- 172) Doi, J., Miyake, T., Asanuma, T. : Three-dimensional flow analysis by on-line particle tracking, Proc. of the 3rd International Symposium on Flow Visualization, Hemisphere-Springer, pp.14-18 (1983).
- 173) Doi, J., Miyake, T., : Three-dimensional analysis of time varying tuft behavior by its successive geometric shape modeling, Proc. of the 4th International Symposium on Flow Visualization, Hemisphere-Springer, pp.229-234 (1986).
- 174) Doi, J., Fujimata, K., Miyake, T. : Three-dimensional boundary element analysis with automated solid modeling system, Proceedings of the 11th International Conference on Boundary Element Method in Engineering, Computational Mechanics Publications-Springer Vol.3, (Stress analysis), pp.405-416 (1989).
- 175) 田村雅之、狩野 均、西原清一 : " 省略のある板金三面図からの 3 次元モデルの復元" 、情報処理学会論文誌、Vol.38 No.4, pp.771-778 (1997).
- 176) 西原清一 : 図面理解による 3 次元モデリング, Computer Today, Vol.10, No.4, pp.18-29 (1993).

- 177) 沼尾雅之、増田 宏：三面図からのソリッドモデル変換技術の現状，人工知能学会誌，Vol.11, No.4, pp.542-549 (1996).
- 178) 秋間正道、今井弘毅、山本晃郎、金光徳弘：Solid-R, Computer Today, Vol.10, No.4, pp.49-52 (1993).
- 179) 青村 茂、石原 肇：図面の認識と立体作成，情報処理学会研究報告，Vol.93, No.62, CG-63, pp.75-82 (1993).
- 180) 高橋正充、佐々木康仁、伊藤 潔：非線形疑似プール計画法による曖昧な三面図からの多面体の一意的合成，人工知能学会誌，Vol.6, No.6, pp.904-911 (1991).
- 181) 内野寛治、狩野 均、西原清一：制約知識ベースに基づく三面図理解，人工知能学会誌，Vol.11, No.4, pp.653-661 (1996).
- 182) 渡辺 崇、田代明子、藤井省三：矛盾を含んだ三面図情報からの物体の推定，情報処理学会論文誌，Vol.35, No.11, pp.2320-2330 (1994).
- 183) 田村雅之、梅潭 顕、狩野 均、西原清一：省略の含まれる三面図からの3次元モデルの復元，情報処理学会研究報告，Vol.95, No.63, CG-75, pp.17-24 (1995).
- 184) Jan.J.Koenderink："What Does the Ocluding Contour Tells Us about Solid Shape", Perception,17, pp.75-114 (1984).
- 185) Sun Xiao, T.Ishimatsu, et al："Reconstruction of Three-Dimensional Shape of Huge Rock Using Visions", Proc.15th IASTED, pp.259-262 (1997).
- 186) Jian Yu Zheng："Acquiring 3D Models from Sequences of Contours", IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 14(2), pp.157-173 (1992).
- 187) 金光秀雄、新保 勝："単峰領域の概念に基づく一変数多峰性関数の複数極大点および最大点探索手法"、情報処理学会論文誌、Vol.37 No.9, pp.1646-1656 (1996).
- 188) ミニ特集：人間の運動計測とその応用、計測と制御、Vol.36, No.9 (1997).
- 189) 出口光一郎："コンピュータビジョンのための幾何学 1. 画像の生成過程を記述する"、情報処理 連載講座、Vol.37 No.6, pp.549-556 (1996).
- 190) 松山、谷口：Image Understanding Environment(IUE)プロジェクト，情報処理，Vol.36, No.3, pp.203-211 (1995).
- 191) 松山：AI マップービジョン研究から見た統合アーキテクチャ，人工知能学会誌，Vol.10, No.6, pp.888-894 (1995).
- 192) Horn, B. K.P.：Robot Vision, MIT Press (1986), (邦訳：ロボットビジョン，朝倉書店 (1993)) .
- 193) Lu, J. and Little, F.：Reflectance Function Estimation and Shape Recovery from Image Sequence of a Rotating Object, Proc. 5th International Conference on Computer Vision, pp.80-86 (1995).
- 194) 鶴田：光の鉛筆－光技術者のための応用光学－，新技術コミュニケーションズ (1984)、および、佐藤：CVCV - WG 特別報告－コンピュータビジョンのための画像センサ、情報処理学会コンピュータビジョン研究会報告、96-CV-98-9 (1996).
- 195) 出口光一郎：画像と空間－コンピュータビジョンの幾何学－，昭晃堂 (1991).
- 196) Weng, J., Cohen, P. and Herniou, M.：Camera Calibration with Distortion Models and Accuracy Evaluation,

- IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol.PAMI-14, No.10, pp.965-980 (1992).
- 197) 出口 : カメラキャリブレーション手法の最近の動向、情報処理学会コンピュータビジョン研究会報告、82-1 (1993).
- 198) 出口 : コンピュータビジョン、グラフィックのための射影幾何学[1]-[4]、計測と制御、Vol.29, No.11 - Vol.30, No.3 (連載) (1990-1991).
- 199) 出口光一郎 : ” コンピュータビジョンのための幾何学 2. ステレオビジョンの仕掛けを解き明かす”、情報処理 連載講座、Vol.37 No.7, pp.662-670 (1996).
- 200) Dhond, R. and Aggarwal, J. K. : Structure from Stereo - A Review, IEEE Trans. on SMC, Vol.19, No.6, pp.1489-1510 (1989).
- 201) Brown, L. G. : A Survey of Image Registration Techniques, ACM Computing Surveys, Vol.24, No.4, pp.325-376 (1992).
- 202) Longuet-Higgins, H. C. : A Computer Algorithm for Reconstructing a Scene from Two Projections, Nature, Vol.293, pp.133-135 (1981).
- 203) Faugeras, O. : What Can Be Seen in Three Dimensions with an Uncalibrated Stereo Rig?, Proc. European Conference on Computer Vision'92 (G. Sandini, ed., Lecture Notes in Computer Science, Vol.588), Springer-Verlag, pp.563-578 (1992).
- 204) Hartley, R. et al. : Stereo from Uncalibrated Cameras, Proc. Computer Vision and Pattern Recognition '92, pp.761-764, IEEE Press (1992).
- 205) Hartley, R. et al. : Estimation of Relative Camera Position for Uncalibrated Cameras, Proc. European Conference on Computer Vision'92 (G. Sandini, ed., Lecture Notes in Computer Science, Vol.588), Springer-Verlag, pp.579-587 (1992).
- 206) Nguyen, T. C. and Huang, T.S. : Quantization Errors in Axial Motion Stereo on Rectangular, Tessellated Image Sensors, Proc. 11th Intern. Conf. on Pattern Recognition, Vol.1, pp.13-15 (1992).
- 207) Rodriguez, J. J. and Aggarwal, J. K. : Stochastic Analysis of Stereo Quantization Error, IEEE Trans., Vol.PAMI-12, No.5, pp.467-470 (1990).
- 208) Luong, Q.-T. et al. : On Determining the Fundamental Matrix : Analysis of Different Methods and Experimental Results, Rapport de Recherche 1894, INRIA Sophia-Antipolis, France (1993).
- 209) Zhang, Z. et al. : A Robust Technique for Matching Two Uncalibrated Images Through the Recovery of the Unknown Epipolar Geometry, Artificial Intelligence, Vol.78, pp.87-119 (1995).
- 210) Faugeras, O. : Stratification of Three-Dimensional Vision : Projective, Affine and Metric Representations, J. Optical Society of America, Vol.12, No.3, pp.465-484 (1995).
- 211) 出口光一郎 : ” コンピュータビジョンのための幾何学 3. 動画像の扱い”、情報処理 連載講座、Vol.37 No.8, pp.759-767 (1996).
- 212) 杉本晃宏 : ” 物体の見え方によらない情報の抽出”、情報処理、Vol.37 No.12, pp.1125-1131 (1996).
- 213) Barrett, E. B., Payton, P. M., Haag, N. N. and Brill, M. H. : General Methods for Determining Projective Invariants in Imagery, CVGIP : Image Understanding, 53, 1, pp.46-65 (1991).

- 214) Burns, J. B., Weiss, R.S. and Riseman, E. M. : View Variation of Point-Set and Line-Segment Features, IEEE Trans. on PAMI, 15, 1, pp.51-68 (1993).
- 215) Carlsson, S. : Multiple Image Invariants Using Double Algebra, Proc. of the 2nd DARPA-ESPRIT Workshop on Invariance, pp.335-350 (1993).
- 216) Duda, R. O. and Hart, P. E. : Pattern Classification and Scene Analysis, Wiley, New York, U.S.A. (1973).
- 217) Faugeras, O. : Three-Dimensional Computer Vision : A Geometric Viewpoint, MIT Press, Cambridge, Massachusetts, U.S.A. (1993).
- 218) Forsyth, D., Mundy, J. L., Zisserman, A., Coelho, C., Heller, A. and Rothwell, C. : Invariant Descriptors for 3-D Object Recognition and Pose, IEEE Trans. on PAMI, 13, 10, pp.971-991 (1991).
- 219) Moses, Y. and Ullman, S. : Limitations of Non Model-Based Recognition Systems, Proc. of the 2nd ECCV, pp.820-828 (1992).
- 220) Mundy, J. L. and Zisserman, A. eds. : Geometric Invariance in Computer Vision, MIT Press, Cambridge, Massachusetts, U.S.A. (1992).
- 221) Rothwell, C. A., Forsyth, D. A., Zisserman, A. and Mundy, J. L. : Extracting Projective Structure from Single Perspective Views of 3D Point Sets, Proc. of the 4th ICCV, pp.573-582 (1993).
- 222) Rothwell, C. A., Zisserman, A., Mundy, J. L., and Forsyth, D. A. : Efficient Model Library Access by Projectively Invariant Indexing Functions, Proc. of CVPR, pp.109-114 (1992).
- 223) Semple, J. G. and Kneebone, G. T. : Algebraic Projective Geometry, Clarendon Press, Oxford, U.K. (1952 (reprinted in 1979)).
- 224) Sugimoto, A. : Projective Invariant of Lines on Adjacent Planar Regions in a Single View, ATR Technical Report TR-H-034, ATR, Kyoto, Japan (1993).
- 225) Sugimoto, A. : Geometric Invariant of Non-coplanar Lines in a Single View, Proc. of the 12th Int. Conf. on Pattern Recognition, Vol.1, pp.190-195 (1994).
- 226) 杉本 : コンピュータビジョンにおける技術評論と将来展望 (II) - ビジョンにおける不変量とその応用 - ”、情報処理学会コンピュータビジョン研究会資料、93-3, pp.19-34 (1995).
- 227) Weinshall, D. : Model based Invariants for 3-D Vision, Int. J. of Computer Vision, 10, pp.27-42 (1993).
- 228) Weiss, I. : Projective Invariants of Shapes, Proc. of DARPA Image Understanding Workshop, pp.1125-1134 (1988).
- 229) Weiss, I., Meer, P. and Dunn, S. M. : Robustness of Algebraic Invariants, Proc. of the 1st DARPA-ESPRIT Workshop on Invariance, pp.345-358 (1991).
- 230) Weiss, I. : Geometric Invariants and Object Recognition, Int. J. of Computer Vision, 10, 3, pp.207-231 (1993).
- 231) Apple - Products - QuickTime, <http://www.apple.com/quicktime/>
- 232) HUIS TEN BOSCH OFFICIAL DATA BASE, <http://sasebo.sasebo.tao.or.jp/>
- 233) Mars Missions, <http://mpfwww.jpl.nasa.gov/>
- 234) Kaidan, <http://www.kaidan.com/>
- 235) 藤本、石松 : 連続ビデオ画像から QuickTime Virtual Reality データへの変換手法について、第 15 回

- 計測自動制御学会九州支部学術講演会予講集 p.259-260 (1996).
- 236) 株式会社インフォマティクス：GIS 読本 (1995).
- 237) 井口征士、佐藤宏介：三次元画像計測、昭晃堂 (1990).
- 238) 高木幹雄、坂内正夫、稲田修一：三次元映像、昭晃堂 (1991).
- 239) 泉 武博：3次元映像の基礎、オーム社 (1995).
- 240) IPIX-JP, <http://www.ipix-jp.ne.jp/>
- 241) 長崎市ホームページ、<http://www.us1.nagasaki-noc.or.jp/~nacity/>