

NAIST-IS-DT9661019

博士論文

遺跡の立体再構成

市野 眞己

2002年3月22日

奈良先端科学技術大学院大学
情報科学研究科 情報処理学専攻

本論文は奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科に
博士(工学)授与の要件として提出した博士論文である。

市野 (旧姓 永野) 眞己

審査委員： 千原 國宏 教授
横矢 直和 教授
佐藤 宏介 助教授
(大阪大学大学院 基礎工学研究科)

遺跡の立体再構成*

市野眞己

内容梗概

考古学における遺跡・遺構の測量方法として、遣り方測量や平板測量、写真測量が挙げられる。一般にこれらの方法から得られるのは投影図や等高線図など、平面的な図であり、遺跡の立体モデルなどを復元するための情報は不十分である。また、膨大な手作業が不可欠であり、測量作業、図化作業共に熟練した技術者が必要である。本研究では、このような欠点を克服し、考古学的な解析、可視化が可能な立体情報を得るために、コンピュータによる画像処理を応用した立体計測手法を提案する。

まず、少数の画像マーカを遺跡に貼り付ける。それらを含み、遺跡全体を覆うのに十分な数のステレオ写真を任意の方向から撮影する。次に画像マーカを含む遺跡表面上の点群を、トータルステーションという光波測距を利用した装置を用いて測量する。これら二種のデータをコンピュータ処理により重ね合わせ、遺跡表面を覆う密な点の集合として立体を表現する。

ステレオ写真は画像化を行い、ステレオマッチング処理をすることによりシーンの立体形状を得る。左右画像の同一点を探索するための類似度としては、矩形内の画素値の正規化相関係数を用いる。一般に、このステレオマッチングにおける対応点探索では、不連続やオクルージョン等の問題により誤対応を起こしやすいが、相関係数に閾値を設けて該当部分を除外するほか、最終的にシーンを統合

* 奈良先端科学技術大学院大学 情報科学研究科 情報処理学専攻 博士論文,
NAIST-IS-DT9661019, 2002年3月22日.

した後に孤立点を除外する方法で対処する。

二種データの統合を行うパラメータは内部パラメータと外部パラメータの合計11自由度を持ち、その初期値は、遺跡に添付したカラーマーカのワールド座標と画像シーン中での位置との対応関係を用いて求める。この時点でのパラメータは誤差を含むが、一種のICP(Iterative Closest Point)アルゴリズムを用いて最適化処理を行い、基準点群(トータルステーションにより遺跡表面上をランダムに測量した座標点群)へと収束させる。

このようにして得られた情報はディスプレイ上で立体的に表示でき、更に断面図などへの図化が自動的に行えるなど、考古学的な利用価値は高い。

本稿では、従来の計測手法における問題点を整理し、提案した手法との比較を行い、利点を述べると共に、得られた立体情報の利用例を提示する。更に実際の遺構の計測を行い、本手法の有効性を示した。

キーワード

遺跡、遺構、立体計測、パッシブステレオ法、3D再構成、考古学、カメラキャリブレーション

Shape Integration for 3D Reconstruction of Archaeological Sites*

Maki Ichino

Abstract

The author proposes a 3D measuring method, which is suitable for archaeological sites.

Detailed 3D shapes and surface color distributions of archaeological sites are useful cues for archaeologists. But the conventional ways of survey drawings, which are composed with lines on paper, and which require considerable fieldwork, are still taking place now. Therefore, the author proposed a new method of archaeological survey, which integrates a passive stereo technology and a total station survey.

First, several color markers, which are detectable in the stereo images, are put on the surface of a site. Then irregularly spaced surface points, including the markers, are measured with a total station. Second, a 2.5D local surface shape is made from each of the stereo images. Finally, all of the local scenes are integrated into a colored 3D model of the site composed with dense points on the surface.

The integration process requires 11 parameters for each of the stereo scenes. The initial values of the parameters are derived from the correspondence of the marker points. Using a kind of ICP (Iterative Closest

* Doctor's Thesis, Department of Information Processing, Graduate School of Information Science, Nara Institute of Science and Technology, NAIST-IS-DT9661019, March 22, 2002.

Point) algorithm, the errors in the initial values are optimized, and the stereo scenes are fit on the surveyed points.

The method is evaluated by the measuring of a complex shape archaeological site of a tile kiln. As a result, a precise 3D shape model of the site is made, and it can be observed as a 3D image, where a user changes his/her viewpoint arbitrarily in a 3D virtual space. This visualization method may contribute for realization of virtual museums or Internet museums.

The 3D data of archaeological sites obtained by the proposed method can be used for some special applications, such as 3D database and shape analysis.

Keywords:

Shape Integration, 3D-Reconstruction, Stereo Camera, Archaeology, Sensor Fusion, Camera Calibration

目次

第 1 章 序論	1
1.1 現在の考古学	1
1.2 情報考古学	4
1.3 本論文の構成	6
第 2 章 従来の計測技術	7
2.1 発掘調査における測量方法	7
2.1.1 平板測量	7
2.1.2 遣り方測量	8
2.1.3 写真測量	10
2.1.4 トータルステーションによる点群測量	11
2.2 コンピュータビジョンにおける立体計測	12
2.2.1 光レーダ法	12
2.2.2 モアレ法	13
2.2.3 照度差ステレオ法	14
2.2.4 アクティブステレオ法	14
2.2.5 シルエット法	14
2.2.6 レンズ焦点法	15
2.2.7 パッシブステレオ法	15
2.3 遺跡の全周囲立体再構成への適用	16
2.3.1 従来測量手法の問題点	16
2.3.2 画像計測と全周計測	20
2.3.3 従来測量手法と画像計測の融合	23

第 3 章 二種データ統合による新計測手法	25
3.1 考古データベースのための遺跡デジタルデータ	26
3.2 遺跡計測システムの概要	27
3.3 パッシブステレオ法の問題点と対処法	28
3.3.1 コントラストがない領域	28
3.3.2 視点の違いによる投撮像の歪み	29
3.3.3 オクルージョン	29
3.3.4 鏡面反射成分	30
3.3.5 撮像系による歪み・雑音等	30
3.3.6 エピポーラ拘束の確保	31
3.4 フィールドにおけるデータ取得	32
3.4.1 データ取得の概要	32
3.4.2 基準点群	33
3.4.3 ステレオ写真撮影	33
3.5 統合処理の概要	34
3.6 ステレオマッチング処理	38
3.6.1 ステレオアルゴリズム	38
3.6.2 マーカを用いた左右画像の回転・位置補正	39
3.6.3 相関係数	40
3.6.4 画像ピラミッドによるマッチングと信頼度画像	41
3.6.5 データの分解能について	42
3.7 データ統合処理におけるパラメータ	45
3.7.1 内部パラメータ	45
3.7.2 外部パラメータ	46
3.8 パラメータの初期値算出	47
3.8.1 回転角の算出	48
3.8.2 平行移動パラメータの算出	50
3.9 パラメータ収束処理	51
3.9.1 対応点の選択	51
3.9.2 パラメータの正規化	53

3.9.3 目的関数の定式化.....	53
3.10 再構成点群のノイズ除去.....	55
3.11 再構成点群の解析表示.....	56
3.11.1 色彩による立体表示.....	56
3.11.2 デプス・キューイングによる立体表示.....	56
3.11.3 断面図、等高線表示.....	56
3.11.4 点の座標、二点間の距離抽出.....	57
第 4 章 遺跡計測実験と考察.....	59
4.1 計測対象.....	59
4.2 使用機器.....	61
4.2.1 点群測量用機材.....	61
4.2.2 ステレオ写真撮影機材.....	62
4.3 データ取得.....	64
4.3.1 点群.....	64
4.3.2 ステレオ画像.....	65
4.3.3 マーカ画像.....	69
4.3.4 視差画像と信頼度画像.....	70
4.4 収束処理.....	73
4.5 再構成処理と結果.....	76
4.6 再構成点群の利用例.....	78
4.7 考察.....	82
4.8 今後の課題と展望.....	83
4.8.1 要素技術の改良.....	83
4.8.2 データ利用のための課題と展望.....	84
第 5 章 結論.....	87
謝辞.....	89

参考文献..... 91

研究業績..... 97

図目次

図 1.1 発掘届等件数の推移	3
図 2.1 平板測量の様子	8
図 2.2 遣り方測量の様子	9
図 2.3 写真測量に用いる図化機の例	10
図 2.4 トータルステーションによる測量の様子	11
図 2.5 三面実測図の例	17
図 2.6 等高線で描かれた実測図の例	18
図 2.7 トータルステーションで計測した点群の表示例	20
図 3.1 左右画像パターンの歪み	29
図 3.2 オクルージョンの例	30
図 3.3 フィールド計測の概念図	32
図 3.4 統合処理の流れ	37
図 3.5 ステレオ画像の幾何配置	38
図 3.6 ステレオ写真からの画像の切り出し	45
図 3.7 外部パラメータ(回転)の算出	50
図 3.8 対応点選択の概念図	52
図 4.1 計測した遺構(斜め上から撮影)	59
図 4.2 基準点群測量機材	62
図 4.3 ステレオ写真撮影機材	63
図 4.4 対象までの距離と奥行き分解能の関係	64
図 4.5 計測した点群	65
図 4.6 再構成に用いた 8 シーン	67
図 4.7 ステレオ画像の例	68
図 4.8 ステレオマッチングに不適当な画像の例	69

図 4.9 マーカ画像の例	70
図 4.10 視差画像の例	71
図 4.11 信頼度画像の例	72
図 4.12 収束処理の経過 (シーン 1)	74
図 4.13 再構成点群の色彩表示結果	76
図 4.14 再構成点群のノイズ除去結果	77
図 4.15 画素値による表示とデプス・キューイング表示の例	80
図 4.16 等高線 (点) による立体表示	81
図 4.17 望ましくない対応付け	84

表目次

表 2.1 各種画像計測手法の比較	22
表 3.1 本論文で用いる点群の名称と構成	35
表 3.2 内部パラメータ	46
表 3.3 外部パラメータ	47
表 4.1 パラメータ初期値算出結果	73
表 4.2 パラメータ最適化の結果	75

第 1 章 序論

本章では、本研究の背景として考古学の変遷と現状について述べ(1.1 節)、近年の新しい試みであり本研究の位置付けとしての情報考古学について述べ(1.2 節)、最後に本論文の構成について述べる(1.3 節)。

1.1 現在の考古学

考古学の定義付けは多くの研究者によりなされている[1][2][3][4][5]が、一般に採用されているのは、「考古学とは、物的証拠に基づいて過去の人間活動のありさまを復元し、そこから人類の歴史を再構成する学問である」[6]といった意味合いの定義である。そして、大井氏は「その(考古学の)目的とするところは、過去の人類の遺跡・遺物を考古学的方法をもって処理することにより、それらの歴史の資料としての性格を回復させ、それらを総合してその背後にあった人間あるいは人間集団の性格を解明し、さらに時間的なまた地域的な人間・人間集団の相互の関係をとらえ、人類の歴史を確認することにあるということが出来るであろう。そして、それはさらに、人間・人類の本質的理解にいたる一つの道程ともなり、将来への発展の裏づけともなるであろう」[7]としており、世界の将来を考える上で考古学が重要であることを示唆している。

考古学は比較的若い学問であり、その学問としての体系の完成をみたのはヨーロッパ近代においてである。日本における本格的な考古学研究は、明治 10(1877)年、東京帝国大学に招聘されたエドワード・シルベスター・モースによる、大森

貝塚の発掘と、その報告書刊行に始まる。

以来、学問的課題のもと、純粋な学術調査を目的として進められてきた考古学研究は、昭和40年代後半以降、日本が国土開発ブームに突入したことにより様相が変わってくる。開発による遺跡の大量破壊という現実と直面し、はじめて文化財としての「遺跡の保護」が正面から取り上げられるのである。それまでの「学術調査」に対して、遺跡の「記録保存」という言葉が生まれ、埋蔵文化財包蔵地として登録された場所の工事をする場合には届け出ることが義務付けられ、開発の前提として遺跡の事前調査（緊急調査）が行政の責任として行われるようになった。バブル期の景気上昇とともに開発に伴う緊急調査の発掘件数は急増し、文化庁によると、全国の発掘件数は1995年度に初めて1万件を突破し、以来も多くの発掘調査が行われている（図1.1）。それは言い換えれば、多くの遺跡が毎年破壊され、消滅しているということになる。

このような現状においては、発掘時点での詳細な情報を効率良く採取し、保存する方法の検討が非常に重要である。採取された情報は、後に考古学者などの手により比較・調査・解析が行われる。解析を行う研究者自らが発掘調査にたずさわる場合もあるが、多くの遺物や遺跡データは未解析のまま保存される。それらの資料の多くは、紙や写真の形で棚に積み重ねられており、今後、デジタルアーカイブなどを行い、利用しやすい形に変換する必要があるといえる。また、発掘調査の時点におけるデータ収集の方法自体も、近年の画像計測技術を応用するなど、根本的に見直しを図る必要がある。

遺跡の「破壊」ということに関していえば、発掘された時点ですでに、その遺跡を完全に元通りにすることは不可能であり、たとえ同じ様に埋め戻されたとしても、解析技術の進んだ後世における再発掘調査に少なからぬ影響を与える。発掘された遺跡の完全なる再現はありえないが、採取された遺物や情報をもとに、考えうるすべての手法による解析ができるようにしておくのが望ましいといえる。

現在、発掘に際してはさまざまな考古学的記録がとられており、発掘時には発見された遺物をすぐにとりあげてしまうのではなく、遺物が出土した状態を、他の遺構との関連で記録したりするために、出土状態をある期間そのまま保存し、実測図、写真等をとる。土器や石器のような変質しにくい遺物の場合は問題ないが、空気や日光にさらされると変質が生じたり崩壊したりするような遺物

の場合には、記録をできるだけすみやかにとったあと、すばやく収納し保存処置を施す必要があるため、フィールドにおける実測作業に時間をかけるのは困難である。

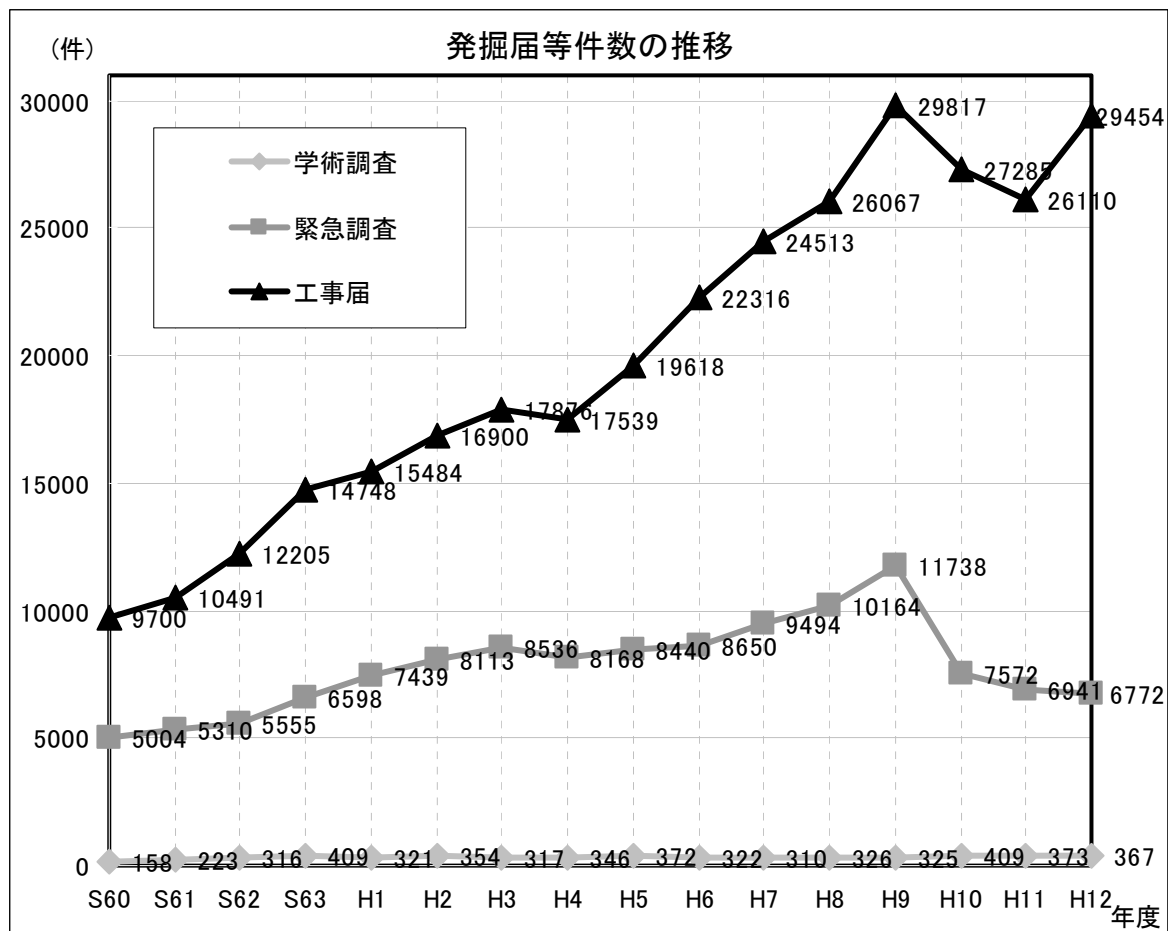


図 1.1 発掘届等件数の推移 [8]

1.2 情報考古学

1.1節で述べたとおり、現在、膨大な数の遺跡が「記録保存」され、データが未解析のまま棚に山積している。これらの大量かつ多種類にわたる考古学資料の整理・登録・分類などのいわゆるデータ処理にはコンピュータを用いるのが妥当であろう。また、大量の調査記録・発掘報告・研究論文などの分類と検索、各種の統計処理の手法を用いた数理分析にも情報処理技術は有用である。更に、遺跡の記録保存のために工事等が中断される例が多く、発掘作業の迅速化が求められている現在、遺跡の図化作業などに自動化処理を取り入れる必要がある。

また、従来の考古学においては、発掘作業や図面作成等、元来手作業に負うところが大きく、発掘調査を行った者の技量や主観が研究結果に反映されてしまうという欠点があった。毎日新聞の2000年11月5日の記事であきらかとなった「日本最古の石器発掘ねつ造」事件は、このような考古学界の欠点を露呈したのもいえる。この問題はコンピュータの導入のみで片付けられるものではないが、多元的で客観性のある解析や、科学的論拠に基づく手法を取り入れる上で、情報処理技術は非常に有用であるといえる。

以上のような背景もあり、考古学界ではコンピュータを研究調査やデータ保存にどのように役立てることが可能かを探る動きが高まっている。これとあいまって、考古学という素材を通して情報処理の新しい課題を発見し、取り組んで行こうという情報処理研究者側の動向もあり、1994年に日本情報考古学会が発足した。

「情報考古学」の分野における研究内容としては、以下のようなものが挙げられる。

データベースとデジタルアーカイブ

埋蔵文化財の発掘調査によって得られるすべての資料(報告書・写真・図面等)をコンピュータ上のデータベースに登録し、検索・閲覧・遺物の貸し出し等が自由に行えるようにするための研究。近年、特に映像・音など、複数のメディアにより情報を表現・蓄積するマルチメディアデータベースの研究が盛んに行われている[9][10][11]。

電子博物館

観光客の招致や考古学への興味を引く等の目的で、遺跡・遺物等のデータの展示をコンピュータ上で行う研究[12][13][14]。

バーチャルリアリティ（仮想現実感）技術を応用した遺物展示や、インターネット上での公開に関する研究が行われている。

分類・統計・解析

遺跡・遺物の形状やその他の特徴量を数値化し、比較・分類・統計・解析に用いる研究。土器の形状や模様などによる数量化分析[15][16]や、古人骨に対する多変量解析の適用[17]などの研究が行われている。

考古システム

遺跡・遺物の計測からデータ保存・解析利用の方法までを一つのシステムとして構築する研究[18][19]。遺跡、遺物の計測の自動化・共通に扱えるデータ形式・ユーザインタフェースの工夫・考古研究の支援システムなどに関する研究が行われている。

数値モデル化

発掘調査の結果得られたデータの空間的配置や時間的分布をもとにモデルを組み立て、実験を試みる研究。人口の変遷[20]や、古代の集落[21]、古代の地形復元[22]などの数値モデル化に基づくシミュレーション研究が行われている。

画像計測技術の応用

コンピュータの画像処理技術を応用することにより、遺跡や遺物の立体形状を取得するための研究[23][24][25][26]。得られる立体データは、考古学における様々な二次利用を目的としている。

本研究は、上記情報考古学への貢献を目的として、画像処理技術を応用した遺跡、特に住居址などの遺構に適した立体計測手法を提案する。本手法により得ら

れる形状データは応用範囲が広く、上記情報考古学分野の様々な研究への二次的利用が可能である。

1.3 本論文の構成

第1章では、本研究の背景として考古学の変遷と現状について述べ(1.1 節)、近年の新しい試みであり本研究の位置付けとしての情報考古学について述べた(1.2 節)。

第2章ではまず、従来考古学の発掘調査で行われてきた遺跡の計測(測量)方法について述べ(2.1節)、現在画像処理技術の応用として行われている画像計測の手法を列挙し、それらを遺跡計測に適用する上での考察を行う(2.2節)。更に、2.3 節において、各計測手法の特徴を比較し、遺跡・遺構の立体計測に適する手法についての考察を行う。

第3章では、(1)トータルステーションによる基準点群 (2)パッシブステレオ法による視差画像 の二種のデータを用いて遺跡の立体を再構成する新手法の詳細を述べ、本研究で提案する計測手法によって得られる点群の解析表示方法について述べる。

第4章では、本研究で提案した遺跡の立体再構成方法の有効性を確認する実験として実際の遺構を計測し、その内容と処理の過程を示し、解析表示した結果をもとに手法の有効性を考察する。

最後に、第5章では結論として、本計測手法を総括し今後の展望について述べる。

第2章 従来の計測技術

本章ではまず、従来考古学界で行われてきた遺跡の計測（測量）方法について述べ（2.1節）次に、現在画像処理技術の応用として行われている画像計測の手法を列挙し、それらを遺跡計測に適用する上での考察を行う（2.2節）。更に、2.3節において、各計測手法の特徴を比較し、遺跡・遺構の立体計測に適する手法についての考察を行う。

2.1 発掘調査における測量方法

現在、発掘調査で一般に用いられる測量方法は、平板測量・遣り方測量・写真測量である。近年、トータルステーションによる測量が取り入れられ、比較的効率良く遺構の図化が行われている。本節では、上記のそれぞれの測量方法の概要と特徴について述べる。

2.1.1 平板測量

平板測量は江戸時代からある測量法であり、用いる道具は、三脚・平板(図紙を貼る)・アリダード(視準器。水平器と定規を備え、平板上に載せて地上の目標の方向・距離・高低差を測定する器具)・コンパス・巻尺など、比較的単純で安価なものばかりである。

三脚上に製図用の平板を水平に据えつけ、磁石で方位を一定に保ち、アリダードで目標点を見通し、その方向を平板上にプロットする。これとエスロンテープ

(ガラス繊維でできた巻尺)などで測った距離を用い、縮尺作図する(図 2.1)。作図は手作業であるが、簡便であり、縮尺の小さい(対象範囲の小さい)測量図を作成するのに用いられることが多い。



図 2.1 平板測量の様子 [27]

2.1.2 遣り方測量

遣り方測量は、国土座標が既知の基準杭を何本か設定し、周囲に標高が同じになるように横板を巡らせる。この横板に水糸をメッシュ状(主に1メートル格子)に張り、そこから垂球を用いるなどして対象表面までの鉛直距離を測る測量法であり、平面位置及び垂直位置を連続的に測ることができる(図 2.2)。



図 2.2 遣り方測量の様子 [27]

この測量法は、トラバース測量¹と組み合わせることによって、比較的均質で、高い精度での実測が可能である。実測は、対象物を実際に観察しながら実測図が完成されてゆくため、調査者の認識によって遺構を整理し表現することが可能である。こうしたことから大縮尺（1/20 以上）の実測方法として一般的に利用されている。

しかしながら、基準杭の設定や管理が煩雑であり、杭の打ち込み作業で遺構を痛めてしまう点や、杭の設定に時間がかかる点が欠点である。また、実測者の技術の習熟度によって図化精度や仕上がりや実測期間に大きく差が出る。特に斜面地の実測や遺物出土状況の立面図などは、杭や水系の設定が困難で、実測技術の

¹ 測点を折れ線状に配置し、各測点における隣接点間の交角（挟角）と距離を測定して、測点の位置を定める測量。距離はメジャー、角度はトランシットという機器を用いて測定する場合が多い。

差が成果及び実測期間に如実に現れる。また測量中は、水系がメッシュ状に張られるため、調査や写真撮影に影響が出る場合が多く、水系と遺構の間隔が広い部分は垂球を用いて対象の位置を確かめなければならず、測量精度や期間に影響を与える。

2.1.3 写真測量



図 2.3 写真測量に用いる図化機の例 [28]

写真測量とは、測定または調査しようとする対象を写真の像として記録し、これを用いて地形などの測定、判読、調査を行う技術である。一般に、遺跡の調査に用いられるのは等高線などによって表される地形図作成の技術であり、ステレオ航空写真を用いて図化を行う。比較的遠くから撮影を行うので、広い面積を測量するのに適しているが、精度には限界がある。

通常の地図測量に用いる写真は安定に飛行している飛行機から撮影されるので、その視線はほぼ鉛直下向きと考えて良い。このため、写真図に必要な偏位修正(鉛直写真に変換すること)が比較的容易である。しかし遺跡調査の場合、縮尺

の都合上飛行機でなくヘリコプターやバルーン等が用いられる場合がある。この場合視線が鉛直からずれたり、ステレオの二枚の写真間で高度が異なったりしやすく、偏位修正が困難な場合もある。

また、写真はもともと中心投影により作成されるが、そのままの図化法では応用範囲が狭いので、正投影写真(オルソフォト)に変換する²。この変換作業や被写体の高度を測定し、等高線図や断面図を作成する作業は、一般に立体図化機(図2.3)を用いた手作業であるため、密度の高い計測をするのは労力が多く困難である。

2.1.4 トータルステーションによる点群測量



図 2.4 トータルステーションによる測量の様子 [30]

近年、発掘調査において、トータルステーションを用いた測量が普及しつつある。トータルステーションは、光波測距儀³と、自由に回転し得る望遠鏡を用いて

² 写真中の被写体の高度に応じてその引き伸ばし倍率を変え、同縮尺にすること。

³ 輝度変調したレーザ光線を本体側から送り出し、測点上に置いたプリズム・ミラーから反射してくる波形と送り出した波形との位相差、つまり遅延時間を計測し、光速から距離を算出する計器。

水平角と鉛直角を測るトランシットとが一体化した測量器である。ターゲットと呼ばれる反射プリズムを対象物表面にあて、付属の望遠鏡をのぞき、視線をターゲットの中心に合わせるにより2軸まわりの角度が測定できる。その後レーザー光線が投射され、距離が電子測定される(図 2.4)。

遺構などを測量する場合、トータルステーションを設置する視点を何度か変えて全体形状を得るが、それでも対象となる点が望遠鏡から見えない位置にある場合は、測定用ポールを鉛直に立ててターゲットが見える状態で測量し、後に高さを引いて座標値を求めることができる。

2.2 コンピュータビジョンにおける立体計測

コンピュータビジョンの分野では、物体を様々な方法で撮影した画像を用いて非接触で立体の形状を計測し、距離画像として再構成する手法が提案されている。

本研究で用いる受動的(パッシブ)ステレオ法の他に、能動的に光を投光する計測法(光レーダ法・モアレ法・照度差ステレオ法・アクティブステレオ法)やシルエット法・レンズ焦点法などが挙げられる。

それぞれ、計測を適用する対象の制限やデータ収集にかかる時間など、様々な問題があり、対象物に応じて適切な手法を取り入れて計測を行う必要がある。

以下、各手法について簡単に述べる。

2.2.1 光レーダ法

光レーダ法は、光の伝播を利用し、その測定値より投光器から対象物までの距離を算出する方法である。光の飛行時間を直接的に計測する時間差計測法と、光強度を適当な周波数で変調して変調波の位相シフトを計る位相差計測法とが利用されている。基本原理はトータルステーションと同じであるが、強力なレーザー光を用いて環境光の影響を少なくするなどの工夫により、反射ターゲットを用いずに測距ができる。ただしその場合、対象の色や反射率が測距精度に影響を与えるため、特に黒っぽい物体の測量精度はあまり良くない。

近年、上記の強力なレーザ光をメカニカルに二次元走査し、ワイヤーフレーム状の距離データや距離画像を得る3Dスキャナ（ノンプリズムレーザモータ駆動トータルステーションなど、呼び方は様々）が開発されている。

この手法の利点としては、原理的に投光器と受光器を同じ光軸上に置くことができるので、三角測量法に比べオクルージョン⁴の発生が少ないことが挙げられる。

しかし、密な測量には時間がかかる（例えば100×100のスキヤニングで1時間半程度）のと、価格が非常に高いのが欠点である。また、本法に基づく多くの製品は、対象物の色彩情報を同時に得ることができない。

2.2.2 モアレ法

2つの規則的な格子状パターンが合成された時に生じる空間周波数のうなり現象をモアレといい、このとき現れる新たな縞をモアレ縞という。2枚のうち1枚が完全に平行等間隔のとき、現れるモアレ縞はもう1枚の格子の変形を表わしている。

この原理を応用し、格子状パターンを被計測物に照射し、格子マスクを通して被計測物をCCDカメラで撮影した時に観測されるモアレ縞を解析し、対象物体の凹凸を計測することにより、カメラからの距離を等高線図の形で得る方法がモアレ法である。

光レーダ法同様、オクルージョンの影響を受けにくいという利点があるが、環境光の影響を受けやすいため、屋外における計測は困難であり、面単位の測定になるので、不連続な凹凸部分の多い対象（毛足の長い布や砂利など）の計測には不向きである。また、現在商品化されているモアレ3Dカメラの製品は少なく、価格は非常に高額である。

⁴ 視差を利用して三角測量の原理で立体形状を計測する手法を用いる場合、対象物の形状によっては、一方の視点からは見えているのに他方からは見えない不可視領域が存在する。この領域は原理上計測が不可能であり、このような現象をオクルージョンという。

2.2.3 照度差ステレオ法

まず、反射率分布が既知である対象物に、複数の照明用光源により光を照射し、同じ視点からそれぞれの光源に対応する画像を撮影する。このときの各画素の明度変化は対象物面の傾き方向によって決まる。この現象を利用して面の傾きをすべての画素に対して求めることより、対象物の立体形状を求める方法が照度差ステレオ法である。

この手法は、画像の濃淡情報を直接的に利用するため、各種のテクスチャ（模様）があつて表面の反射係数が未知または不均一な物体や、光沢を有する物体の再構成は難しいという欠点を持つ。また、光源の位置と対象物の形状によっては、直接表面に光が当たらないために計測できない部分も生じる（オクルージョンがある）。

2.2.4 アクティブステレオ法

対象物体に照射した光パターンをカメラで撮影した画像から、三角測量の原理で奥行き情報を求め、その奥行き情報から 3 次元形状を求める方法。

対象物に照射する光の種類としては、スポット光、スリット光（光切断法）、ステップ光、コード化パターン光などについて研究されている。

例えばスリット光による光切断法の場合、まずスリット光を対象物体に投影し、投影されたスリットをカメラで撮影する。すると対象物体の形状に応じてスリットが曲がっている画像として得ることができる。このスリット光の位置を順に変化させ、それぞれ画像処理により抽出することにより距離画像を得ることができる。

投光する光としては、レーザー光のメカニカルな走査や、LCD プロジェクタを用いた任意のパターン照射などが挙げられ、必要な機材も安価なものから高価なレンジファインダまでと様々である。

2.2.5 シルエット法

対象物体を周囲から撮影した複数枚の画像を用い、各画像で対象物体のシルエ

ット（輪郭）を抽出した後、全画像のシルエット情報を用いて3次元形状を推定する手法。輪郭で表現できないくぼみの部分などを計測することはできない。

2.2.6 レンズ焦点法

レンズ焦点法（シェープフロムフォーカス法）は、一眼レフカメラの焦点合わせの機能と同じ原理で、カメラのフォーカス位置をもとに対象物体の形状計測をする手法である。カメラのフォーカスリングを回して対象物体にピントを合わせ、そのレンズの距離目盛を読むことで距離が計測できる。つまり、画像のぼけの程度を判定する機能と、レンズの繰り出し機能を用意することで、奥行きを計測することができる。正確な位置を計測するには、ぼけを大きくする必要があり、そのために焦点深度を浅くすることが求められる。

この方法を自動化して距離画像を得ようとする場合、焦点の合っている部分を自動検出する処理が困難であり、精度にも限界がある。また測定深度に限界があるため、現状では顕微鏡での実装がほとんどであり、大きな対象やへの適用は困難である。

上記のパッシブな方法ではなく、スポット光を用いたアクティブな方法も提案されている。これはスポット光を対象に照射し、その光に焦点を合わせることで、その1点までの距離を計測するという操作を、スポット光の走査により対象表面全体に渡って行う方法であるが、非常に時間がかかる割には精度が上がらず、実用的とは言えない。

2.2.7 パッシブステレオ法

古くから用いられてきた画像計測手法であり、写真測量（2.1.3節）と同様、左右2枚（またはそれ以上）の画像の各点の対応関係をもとに立体を再構成する方法である。写真測量・アクティブステレオ法（2.2.4節）と同じく三角測量の原理で立体計測を行う。写真測量と異なる点は、コンピュータにより左右画像の対応

点を探索させることにより、自動的に高密度の立体計測ができることである。また、アクティブステレオ法のように対象物に光を照射することなく、物体表面の模様などを手掛かりにして左右画像の対応点を探索する。しかしこの対応関係を一意に決めるのは容易ではなく、様々な問題を解決しなければならない(3.3節参照)。また、写真測量同様、カメラ側の形状しか求まらないので、複雑な形状の対象は複数の視点からステレオ画像を撮影し、統合処理を行わなければならない。一般に、ステレオ画像から得られる曲面形状のみを用いてこの統合処理を行うのは困難である。

この計測法を遺跡測量に応用する利点は、密な形状が求まること、色彩も保存されることなどが挙げられる。また、必要な装置を安価で手に入れることができ、基線長を変えることにより、自由に奥行き分解能を調節できるという特長がある。

2.3 遺跡の全周囲立体再構成への適用

遺跡の形状データを考古資料として利用する場合、従来の記録方法に加えて汎用性のある立体データが必要である。ここでは旧来の遺跡測量方法の問題点についての議論を行い、画像計測手法を取り入れるための考察を行う。

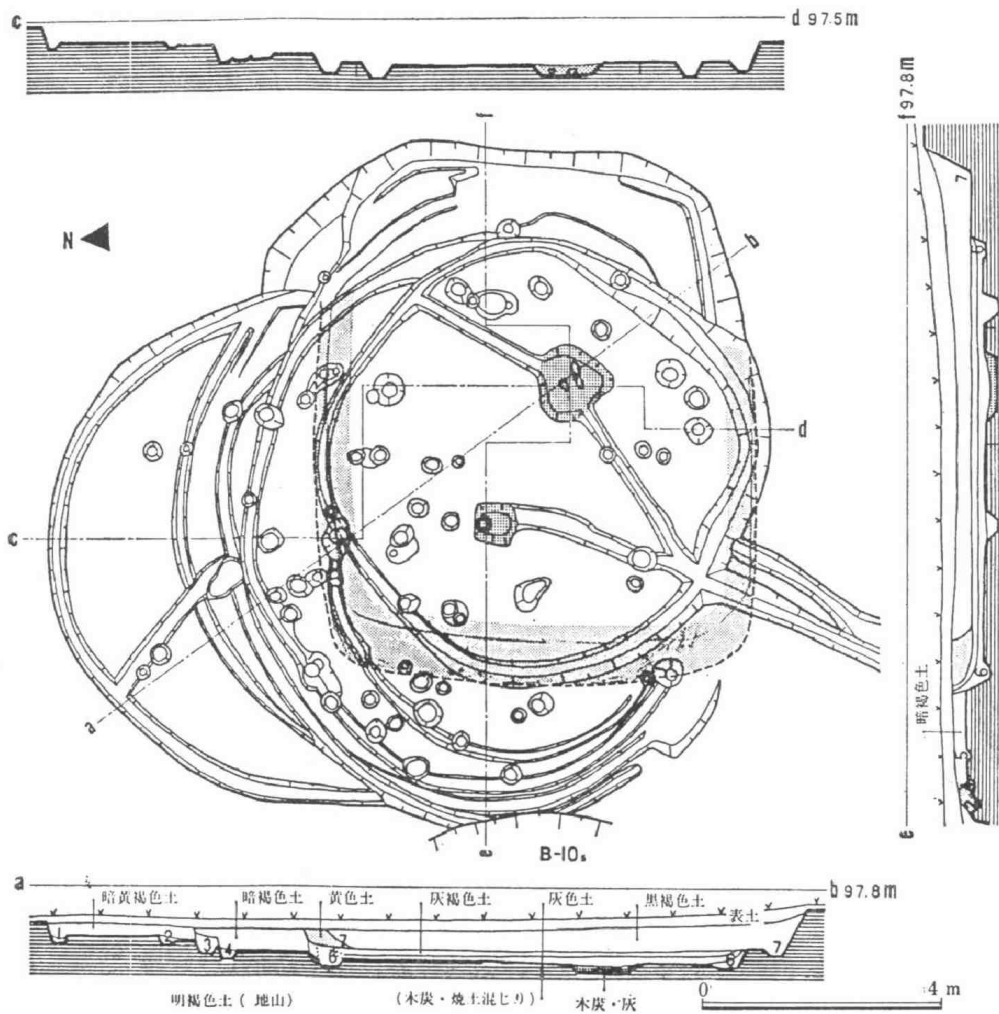
2.3.1 従来測量手法の問題点

2.1節で述べた測量方法は、いずれも遺跡や遺構の形状全体を記録するための方法として発掘調査で用いられてきた。

平板測量も遣り方測量も、基本的にはすべてフィールドで人の手により作図されるため、フィールド計測に時間がかかり、天候の変化などに影響されやすいという問題点がある。

どちらも正射影の作図に向けた測量法であり、稜線などの特徴的な線を写し取った三面実測図(図 2.5)や等高線図(図 2.6)、あるいは断面図を作成する。いずれの場合にせよ、平面上に線を用いて記述するため、線と線の中の細かい曲面

情報は失われる。また、色彩情報は付加されない。したがって、レプリカ作成作業など、立体再構成のための情報は充分でないといえる。



(複雑に重なった住居址 菅原他 1979 より)

図 2.5 三面実測図の例 [27]

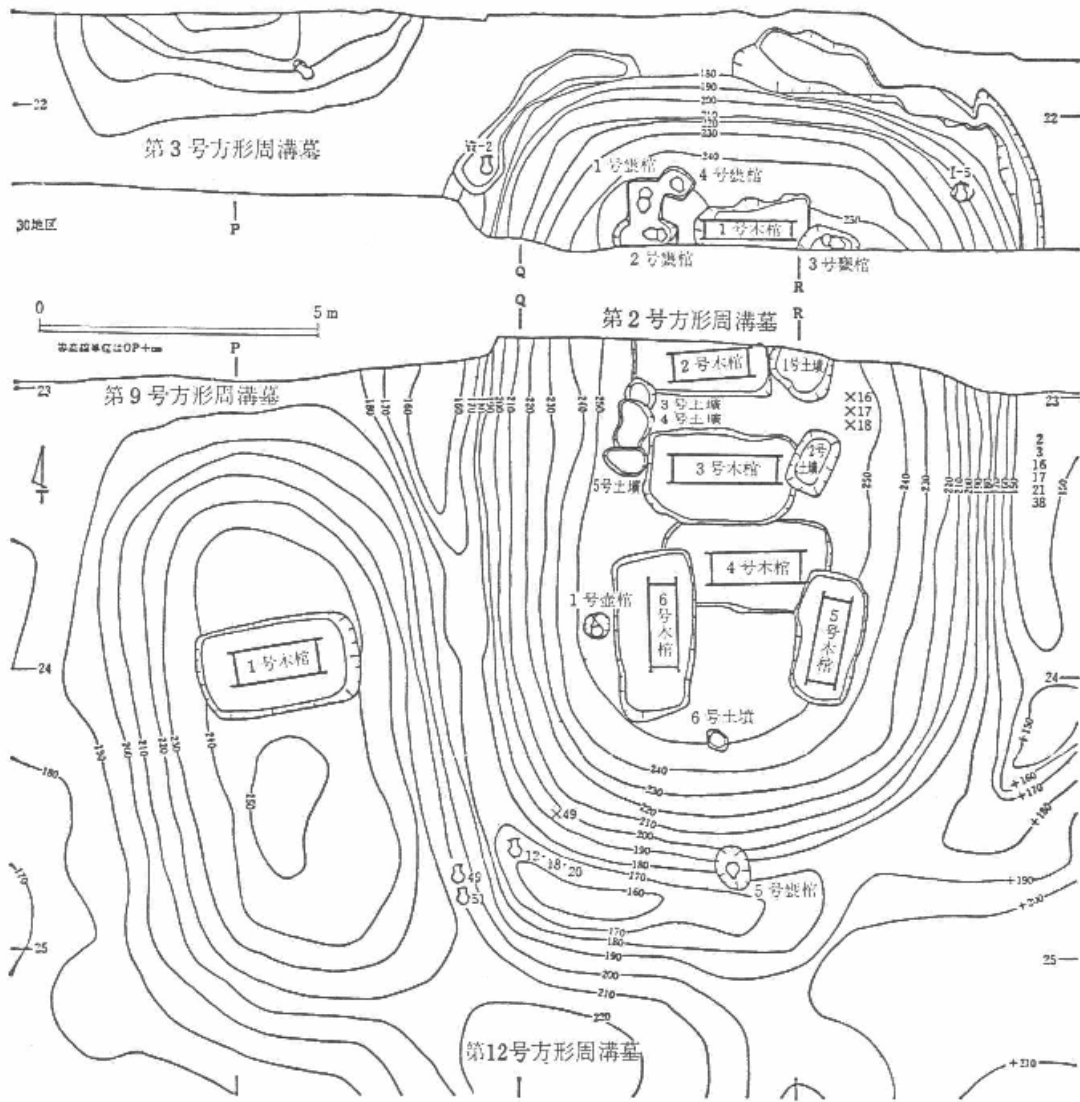


図 15 瓜生堂遺跡第 2 号, 第 9 号方形周溝墓実測図 (阿部他 1981 より)

図 2.6 等高線で描かれた実測図の例 [27]

写真測量は、等高線図で描けるような対象、すなわち対象物のすべての面が隠れないで 1 方向から見えているような対象には向いており、人的手間さえかければかなり精密な立体形状が得られる。また、写真との重ね合わせにより色情報も付加することができ、実際に鳥瞰図作成などに用いられている。

写真測量の欠点の一つとしては、コストがかかることが挙げられる。飛行機やヘリコプターを飛ばしての撮影や、高額な図化機（図 2.1）を用いての等高線図の作成が必要であり、作業にも熟練と労力が必要である。

写真測量の最大の利点は、フィールド計測の時間・手間がかからないことであり、写真さえ撮影しておけば、室内で再調査、再点検、補測が可能である。しかし、実測図の図化作業、校正作業中に、発掘現場を確認することができないため、上記の利点は同時に欠点であるとも言える。

また、遺構が複雑な立体形状をしていたり、鉛直面が存在したりする場合、上空からの撮影だけではステレオ写真に写らない部分が存在する。そのような部分は計測できないので、補助的に測量しておかなければならない。

トータルステーションによる測量は、緯度や経度・高度が既知の参照点を用いて、地球上に固定された座標点（国土座標）を直接的に測定することができるので、得られたデータを地図上に配置することができるという利点がある。これにより、遺物等が出土した場合にも、その位置を簡単に記述しておくことができるため、遺構データベースや遺物データベースの基本となるデータを構築することが可能である。

また、得られるデータは角度と距離から自動的に求められた三次元座標値であり、デジタル化が容易である。

この測量法を用いた場合、1点ずつ計測しなければならないので労力が多く、また、得られるデータは点群、あるいはそれに付随する結線情報である。したがって、平板測量や遣り方測量程度のデータ密度を得るのが限度である（図 2.7）。

石舞台古墳横穴式石室実測図

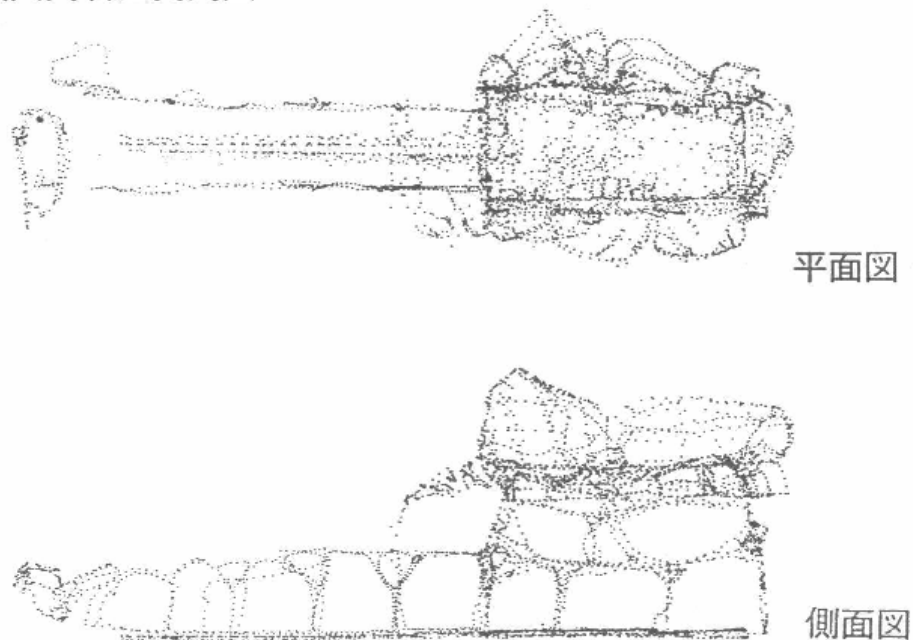


図 2.7 トータルステーションで計測した点群の表示例 [29]

2.3.2 画像計測と全周計測

2.1節で述べた考古学における測量手法が遺跡の全体形状を記述するのに対し、コンピュータビジョンにおける立体計測は、対象をある側面から観測し、距離画像に代表されるいわば2.5次元の再構成を行うものが多い。そして、それら2.5次元のデータから対象物の全周囲の形状を再構成する場合、以下のいずれかの方法がとられる。

- (1) 対象物を測定台の上に載せて回転させるなど、幾何配置の分かる状態で動かし、各シーンの撮影を行う
- (2) 複数シーンの曲面同士が重なり合う部分の形状マッチングにより各シーンの相対的な位置関係を求めることによりシーン合成を行う
- (3) 各シーンにおける座標が既知の基準点を用いて、そのシーンを観測したカメラの位置や方向を求めることにより、シーンの合成を行う(カメラキャ

リブレーション)

遺跡・遺構を移動させることはできないので、上記のうちの(1)の手法を適用することはできない。(2)の方法では、各シーンの立体形状がよほど精度良く再現されていない限り、自動合成に失敗したり、ゆがみやひずみが生じて再構成結果が不正確だったり、様々な問題が生じてしまう。一般に屋外の物体の立体計測を精度良く行うことは困難であり、この方法は不向きである。また、遺構などの計測においては、地球上の緯度・経度・高度との関連付けが資料作成にあたり必要となるため、補助的手段を用いてこれを行わなければならない。

本研究では、(3)の手法が遺跡・遺構計測に適していると考え、2.3.1節における考察をふまえ、トータルステーションで測量した点のワールド座標を基準にして画像計測の結果得られる距離画像を合成する方法を提案する。

ここで、遺跡・遺構の計測において重要と考えられる画像計測手法の特徴について表 2.1 に示した。

1.1節で述べたとおり、近年の遺跡計測はフィールド作業に迅速を要するケースが多い。そして、できる限り多くのデータを現場で収集すれば、持ち帰ったデータを処理する時間は多少長くかかっても問題ない。また、発掘件数の多さを考慮すると、用いる測定機材は安価で誰にでも手に入ることを望ましい。

壊れやすい貴重な遺跡・遺構を破損しないためにも、足場や取り扱いに細心の注意を払わなければならない。更に遺跡・遺構表面の色彩分布も資料として活用したいということを考慮すると、夜間のフィールド作業は避けるべきである。また、遺跡・遺構表面は様々であり、色彩や反射率は一様でなく、黒色に近い場合が多いという性質も考慮すべきである。

表 2.1 各種画像計測手法の比較

	光レーダ法	モアレ法	照度差ステレオ法	アクティブステレオ法	シルエット法	レンズ焦点法	パッシブステレオ法
オクルージョンの影響	○ (なし)	○ (なし)	× (あり)	× (あり)	(凹部分)	○ (なし)	× (あり)
データ取得に要する時間	× (長い)	○ (短い)	○ (短い)	(照射する光による)	(撮影枚数による)	× (撮影枚数による)	○ (短い)
ステレオ対応点探索	-	-	-	○ (容易)	-	-	(困難)
機材の価格	× (高額)	× (高額)	○ (安価)	(手法による)	○ (安価)	○ (安価)	○ (安価)
精度	○		×	○	○	×	(対象による)
屋外での計測	(照射光の工夫が必要、または夜間の計測に限る)				×	○	○
色彩情報の利用	×	○		○	○	○	○
テクスチャ性の高い対象物	(精度に影響)	×	×	(困難)	○ (影響なし)	○	○
鏡面反射成分のある対象物	○	×	×	×	○	(自動化は困難)	×
黒っぽい対象物	(照射光の工夫が必要)				○	○	○

2.3.3 従来測量手法と画像計測の融合

本研究では、2.3.1 節で述べたトータルステーションによる測定の利点を生かし、立体の骨組みとなる基準データとして用いる。トータルステーション測定のデータ密度に関する欠点を補うため、画像計測の手法であるパッシブステレオ法を取り入れ、立体の密な再構成を行う。

パッシブステレオ法は、2.3.2 節で述べたとおり精度やオクルージョンの問題、処理の難しさはあるが、データ取得に要する時間が短く、屋外計測が可能で、機材が安価であるという点が遺跡・遺構の計測に適していると考え、本研究において用いることとした。

第 3 章 二種データ統合による新計測手法

第 2 章では、従来の計測手法についての比較を行い、従来の測量方法では十分な測量結果を得ることができないことを述べた。そして全周囲立体再構成への画像計測の適用について考察し、遺跡の全周囲立体計測のための手段として、

- (1) トータルステーションによる基準点群
- (2) パッシブステレオ法による視差画像

の二種の異なる属性のデータを利用するという結論を得た。本章では、それら二種のデータを用いて遺跡の立体を再構成する新手法の詳細を述べる。

以下3.1節において、測定目標とする点群データについて述べ、3.2節において計測の概要を述べる。

次に3.3節において、本研究に用いるパッシブステレオ法の問題点を整理し、その対処法について考察する。そして3.4節において遺跡の発掘現地でのデータ収集について述べ、3.5節においてデータ統合処理の概要を述べる。更に、3.6節において、統合処理の前処理としてのステレオマッチング処理の詳細を述べ、3.7節において、二種データの統合処理に用いるパラメータについて述べる。3.8節においてマーカ点同士の対応付けによる統合処理パラメータの初期値算出について述べ、3.9節において統合パラメータの最適化処理について述べ、3.10節においてステレオマッチング時の誤対応などにより生じたノイズを除去する手法について述べる。最後に、以上の処理により得られた点群の利用例として、様々な解析表示の手法について述べる。

3.1 考古データベースのための遺跡デジタルデータ

考古学において、遺跡・遺物の外観や形状を記録し保存することは重要な目的の一つであり、コンピュータ上でデータベース化するにあたり、どのような情報を電子化し、登録しておくかを考慮する必要がある。

通常は、外観を撮影した写真・三面実測図・所在地を示した地図などをデジタル画像として蓄積する方法がとられる。しかし、これだけでは三次元形状を正確に把握したり、様々な方向からの外観を再現したり、あるいは形状を復元するには不十分である。

特に、1.2 節で述べたような情報考古学的な技術への応用について考慮すると、以下の条件を満たすデータが望ましい。

- ・ 任意の視点からの外観を取得できる
- ・ 任意の方向・位置における断面図が作成できる
- ・ 地図上の位置・方角との対応関係がはっきりしている
- ・ 表面上の詳細な模様や色彩の情報を備えている

本研究では、上記の条件を実現するために必要なデータ構造は、対象物全周囲にわたる、いわば立体デジタル画像のようなものであると考えた。

通常のデジタル画像は、縦横に並べられた「画素」と呼ばれる最小単位から成り、カラー画像の場合、それぞれが二次元座標・色彩パラメータ（通常 R,G,B の三値で表現される）の情報を持つ。ここでいう立体画像とは、それぞれの最小単位が二次元座標の代わりに三次元の空間座標を持つものである。すなわち、何枚かの二次元画像を遺構表面の曲面に沿わせて張り付けた張子のような構造である。

上記のような手法で一旦電子化されたデータの応用には制約がなく、(1)異なる遺構データをコンピュータ内部で重ね合わせて、形状の比較・分類を行う (2)異

なる遺物包含層⁵の表面形状データを同時に表示し、経年変化を表現する、など、これからの考古学研究の成果が望まれる。

3.2 遺跡計測システムの概要

本研究では、以下の三点を目標とし、遺跡を計測・再構成する手法を提案する。

- (1) 密なワールド座標点群
- (2) 遺跡全周囲に渡る立体再構成
- (3) 半自動的な計測

具体的には、まず2.1.4 節で述べた点群測量を行い、その測量結果を骨組みとして2.2.7 節で述べたパッシブステレオ法による画像計測の結果を全周囲にわたり合成するというものである。

計測手順は以下のとおりである。

- (1) フィールドワーク (3.4 節)
 - 遺跡へのマーカ添付
 - トータルステーションによる点群測量
 - ステレオ写真の撮影
- (2) ステレオ写真からの部分的立体再構成 (3.6 節)
 - デジタル画像化処理
 - マーカ位置の抽出
 - マーカ位置を用いた左右画像の位置・回転補正
 - ステレオマッチング処理による視差画像作成
- (3) データ統合処理による全周形状の再構成
 - マーカ点同士の重ね合わせによるパラメータの初期値算出 (3.8 節)

⁵ 考古学資料が含まれている土層のこと。同じ場所に複数の遺物包含層が存在する場合も多く、出土遺物と遺物包含層との関連づけ（層位の確認）は発掘記録の基本である。

(視差画像からワールド座標への変換)
最適化関数によるパラメータ修正 (3.9 節)

3.3 パッシブステレオ法の問題点と対処法

三角測量法の原理を用いたステレオマッチング法においては、一方の画像上にある各点に対し、他方の画像上での対応点の位置を求める必要がある。これがステレオ対応点探索である。この対応付けの拠り所になるものは各画素の濃度値(画素値)である。ところが、同じ濃度値は、画像中のいたるところに存在し、その1点(対応を求めようとしている位置)の濃度値のみでは、一意に対応を決定することは到底できない。そのため、ステレオマッチングでは、その周囲の領域における濃度パターンを利用して対応する部分を探索する。これをパターンマッチングというが、この手法を用いても対応を一意に決めるのは容易ではなく、誤った対応関係(偽対応)から座標値が計算されてしまう現象が起こりやすい。このためステレオマッチングは一般に不正確な結果を多く含むものとされ、理論は研究されても実際の計測にはあまり利用されてこなかった。

以下の節でステレオ対応点探索において対処すべき問題点を列挙し、遺跡・遺構の画像を処理する場合の解決策について考察する。

3.3.1 コントラストがない領域

濃度が空間的に一様でテクスチャ性のない領域に対しては、パターンマッチングにより対応点を求めることは困難である。

遺跡・遺構に関してはそのような部分はまず存在しないといって良い。ただし、ステレオカメラの視線方向によっては、空や人工物が画像に写り込む可能性がある。本手法では、そのような領域はステレオマッチング処理の対象外とし、背景として例外処理を行う。

3.3.2 視点の違いによる投撮像の歪み

ステレオマッチングにおいては、左右の異なる視点から撮影した画像のパターンをマッチングさせるが、必然的にその左右の濃度パターンは幾何学的に歪みを受け、パターンとして左右で完全に一致することはまずない(図 3.1)。

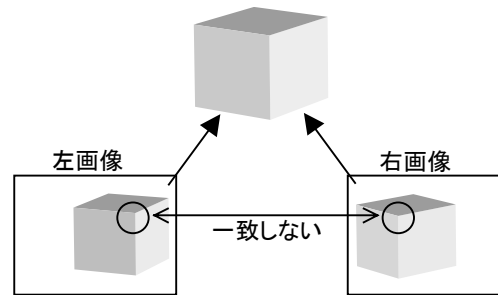


図 3.1 左右画像パターンの歪み

この問題を完全に解決することは困難であるが、本研究では分解能による画像ピラミッドを用いて、マッチングさせる矩形のサイズを変化させながら対応点探索を行うことによりマッチング性能を高める。この画像ピラミッドの処理の詳細については3.6.4節において述べる。

3.3.3 オクルージョン

ある視点から見て奥行きが不連続に変わる物体の境界部では、オクルージョンが発生し、両方の画像から共通に見えない(片方の画像でしか見えていない)領域が必ず存在する。そのような部分では、対応関係をつけることはできない。例えば、図 3.2の例では、斜線部分は右カメラからは観測できるが左カメラからは見えない。

遺跡・遺構の計測の場合は、全周囲にわたって欠損のないデータの取得が望ましいが、オクルージョンの発生しそうな部分は視点や基線長を変えて多重に撮影することにより対処できる。

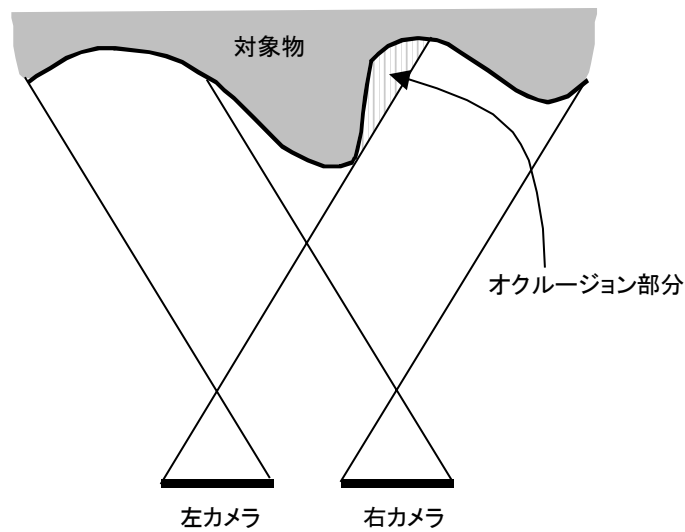


図 3.2 オクルージョンの例

3.3.4 鏡面反射成分

物体の表面の反射特性が鏡面反射成分を持っているとき、面の向きに対する光源と視点の位置関係により、別の物体の写り込みが生ずる場合がある。この場合、左右画像中の同じ領域のパターンが大きく異なってしまうため、対応点探索に失敗してしまうという問題が生ずる。

遺跡や遺構に関しては、鏡面反射成分を持つ部分が存在しない場合も多い。しかしながら、遺構の発掘作業においては地下水が湧き出してしまう場合も多々あり、水が溜まった状態では水面下の形状を計測することはできない。なるべく水を排除するようにして撮影し、それが困難な場合はトータルステーションによりその部分を密に計測しておき、データの欠損を補うといった方法で対処するしかない。

3.3.5 撮像系による歪み・雑音等

画像を取得するための撮像系（特にレンズの歪曲収差）に起因する幾何学的な

画像の歪み、レンズの絞りやシャッター速度による左右画像の全体的な明度の違い、デジタル画像化処理に起因するノイズの存在は、対応付けを困難にする要因となる。本研究では、歪曲収差の少ないレンズを用い、絞り・シャッター速度・ピントを固定にした状態で撮影を行う。

3.3.6 エピポーラ拘束の確保

カメラを2つ水平方向に並行になるように左右に並べて観測し場合に、任意の点Pと左右画像の焦点で決定される平面をエピポーラ平面と呼ぶ。左右画像においてこの平面が1本の直線で表されるように撮影することをエピポーラ拘束の確保という。この場合、一方のエピポーラ線上に存在する点の、他方の画像上での対応点は、もし存在するならば、必ずそれと対をなすエピポーラ線上に存在するという性質がある。ステレオ画像対の対応点の探索範囲を限定するためには、上記エピポーラ拘束を用いることが重要であるが、左右カメラの位置関係がずれてしまった場合、対応点探索が困難となる。

本研究では、左右画像の両方に写り込んだ2点のマーカ対の位置関係をもとに右画像の一次変換を行い、エピポーラ拘束を確保する(3.6.2節)。

3.4 フィールドにおけるデータ取得

3.4.1 データ取得の概要

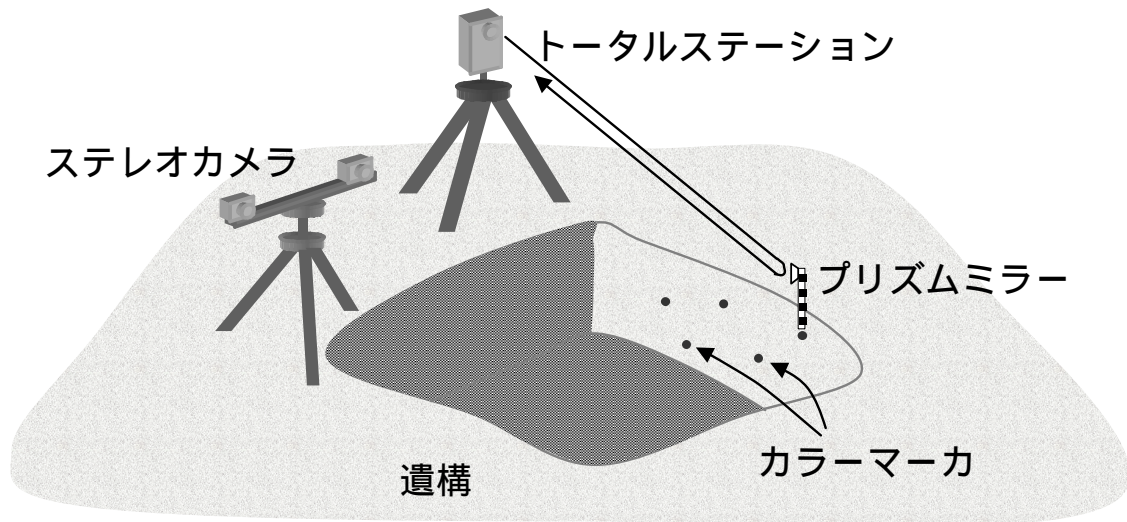


図 3.3 フィールド計測の概念図

図 3.3 にフィールドにおけるデータ収集の様子を示す。
本計測手法における立体形状取得に用いるデータとして、以下の二種をフィールドで取得する。

- (1) トータルステーションにより測量した点群 (3.4.2節)
 - ・遺跡表面上の点を形状的に特徴のある点 (頂点や稜線等) や考古学上意味のある点の他、遺跡全体をランダムに測量する。
 - ・一箇所のみトータルステーション設置では全周囲に渡る点群を測量できない場合、基準杭の座標を参考にしてデータの座標変換を行う。
- (2) 対象表面を覆うのに十分な数のステレオ写真 (3.4.3節)

- ・標準ステレオ幾何拘束(3.4 節)を満たす。
- ・ステレオ対は任意の視線から撮影して良い。

この際、遺跡表面にカラーマーカを添付しておき、各ステレオ対の左右写真の重なり合う部分に3点以上が写り込むように撮影する。これらのマーカは画像から半自動抽出するため、遺跡表面に存在しない色で、画像上で数画素～数百画素に収まる大きさのものを用いる。そして、同じシーンに同じ色のマーカが複数写り込まないように、数種類の色を用いる。また、金属や樹脂類などの鏡面反射成分を含む素材はステレオマッチング処理に悪影響を及ぼすので、光沢のない色紙や色粘土を鋏に貼り付けたものを用いるか、つや消し処理を施す等の工夫をする。

このカラーマーカはトータルステーションによっても測量し、各データにタグを付け、画像中のマーカと対応が取れるようにしておく。このマーカ点は、後の処理におけるおおまかな位置合わせに用いる。

3.4.2 基準点群

2.1.4節で述べたトータルステーションによる点群測量方法により、遺跡表面上の三次元座標を取得する。考古学的手法では、遺跡・遺構の稜線部分をなぞるように点群を測量してゆき、後にそれらを結線し、図面を作成する方法がとられるが、本手法では特に稜線を重視する必要はない。もともと稜線が遺構表面に明確に存在しない場合も多く、測量者が恣意的に決定している面もあるため、得られる図面は測量者によって異なる。

窯跡や横穴墓のように複雑な立体構造をしている場合はターゲットポールと呼ばれるポールにプリズムを設置し、水準器で鉛直を保ちながら点の測量を行い、ポールの高さをデータから差し引く。

3.4.3 ステレオ写真撮影

ステレオ写真撮影のためのレンズとしては、画像処理を正確に行うため、歪曲収差の小さいもの、更に左右オーバーラップ部分を最大限にするため、なるべく広

角なものを用いる。また、基線長を長く取ると立体データの分解能が向上するが、ステレオ偽対応が起こりやすくなる。分解能については3.6.5 節で詳しく述べる。

ステレオ写真は、コンピュータで処理を行うため、デジタル画像化する。デジタル画像の処理は画素の配列方向に沿って行うと都合が良く、特に横方向の画素並びはステレオマッチング時に重要な意味を持つ。したがって、ステレオ写真撮影のためのレンズとしては、歪曲収差の小さいものを選ぶ必要がある。

また、ステレオ画像処理に用いることができるのは左右写真のオーバーラップ部分のみであり、その部分を最大限にするため、なるべく広角なものを用いる。

3.5 統合処理の概要

本計測手法では、ステレオマッチングの結果得られる視差画像の画素それぞれが持つ局所座標を、データ統合パラメータによりワールド座標に変換することにより多視点からのステレオシーンを統合し、全周囲にわたる立体形状を得る。

ここで、表 3.1に示すように、本論文ではステレオマッチング処理により得られる視差画像の画素集合を画像点群と呼び、それぞれが持つ各シーンで独立した座標を局所座標とする。また、トータルステーションで測量された点群を「基準点群」とし、それらが持つ統一した座標をワールド座標とする。

基準点群は、遺跡上の点をランダムに測量した「ランダム点」と、遺跡に添付したマーカを計測した「マーカ点」とに分けられる。マーカ点はステレオ画像中で識別可能な点であり、各ステレオ画像ペアの中に必ず3点以上含まれるように配置し、撮影してあるものとする。

表 3.1 本論文で用いる点群の名称と構成

名称	データ取得方法	点の座標	構成
画像点群	ステレオマッチング 処理	局所座標 (撮像系に固定 された座標)	視差画像の画素
基準点群	トータルステーション による測量	ワールド座標 (地球上に固定 された座標)	マーカ点 (画像上で識別可能な点) ランダム点 (対象表面をランダムに測定した点)

シーンを統合する手法として、Iterative Closest Point (ICP) アルゴリズム[31]が挙げられる。これは、対応関係が未知の二種の座標データセットを重ね合わせるアルゴリズムであり、Beslらは複数の初期パラメータを用いて仮に重ね合わせ、得られる有限個の局所解の中で目標値に最も近い解を大域的最適解とする方法を用いている。ここでは、各データセットは変形のない剛体であり、回転・平行移動の6自由度、すなわち6パラメータによる統合という前提条件での変換を行っている。また、統合した結果、両データ集合の領域や重心はおおまかに一致しているという前提条件を持つ。

これと異なり、本手法で統合する二種データは以下の特徴を持つ。

- データの包含割合が低い(基準点群の領域のうち、ほんの一部分を画像点群が占める)
- 自由度を多く取り(11パラメータ)、変形を含んだ変換を行う(剛体変換ではない)
- 二種データの密度が極端に異なる(基準点群は疎であり、画像点群に対応させる点の数が少なく、該当位置を一意に確定することが困難)

以上より本手法では、マーカ点の対応関係を用いて、大域的最適解に充分近い初期解を算出し、ICPアルゴリズムでの最適化を行う。すなわち、まずマーカ点を用いて各ステレオシーンの初期位置合わせを行い、統合パラメータの初期値を求

め、後にランダム点群を用いて ICP アルゴリズムによるパラメータの微調節を行う。図 3.4 に統合処理の流れを示す。

まず、各ステレオシーンに、以下に示す 11 個の位置合わせパラメータを設定する。これらを用いて、カメラに固定された局所座標系を、地球上に固定されたワールド座標系へと変換する。

- (1) 左画像の原点と光軸との位置関係(2 次元)
- (2) 視差の横方向の平行移動定数(1 次元)
- (3) 焦点距離に関するパラメータ(1 次元)
- (4) 基線長(1 次元)
- (5) 局所座標からワールド座標への回転角度(3 次元)
- (6) 局所座標からワールド座標への平行移動(3 次元)

これらのパラメータを以下の手順で求める。

1. 初期値を求める

- (1)と(2)のパラメータについては、写真(あるいはフィルム)からデジタル画像化をする際におおまかな値を記述しておく。
- (3)と(4)は撮影時におおまかな値を記述しておく。
- (5)と(6)は、画像点群と基準点群の 3 個のマーカ位置関係を用いて概算する。

2. 位置合わせ評価関数を用いて両データ間の整合性を調べる

- 位置合わせが完了したと判断されれば終了
- 誤差が大きければ次のステップへ

3. パラメータの誤差修正

- 点群同士の対応関係を用いて、平均距離を最小化するようなパラメータを探索する
- 処理が完了したらステップ 2 に戻る

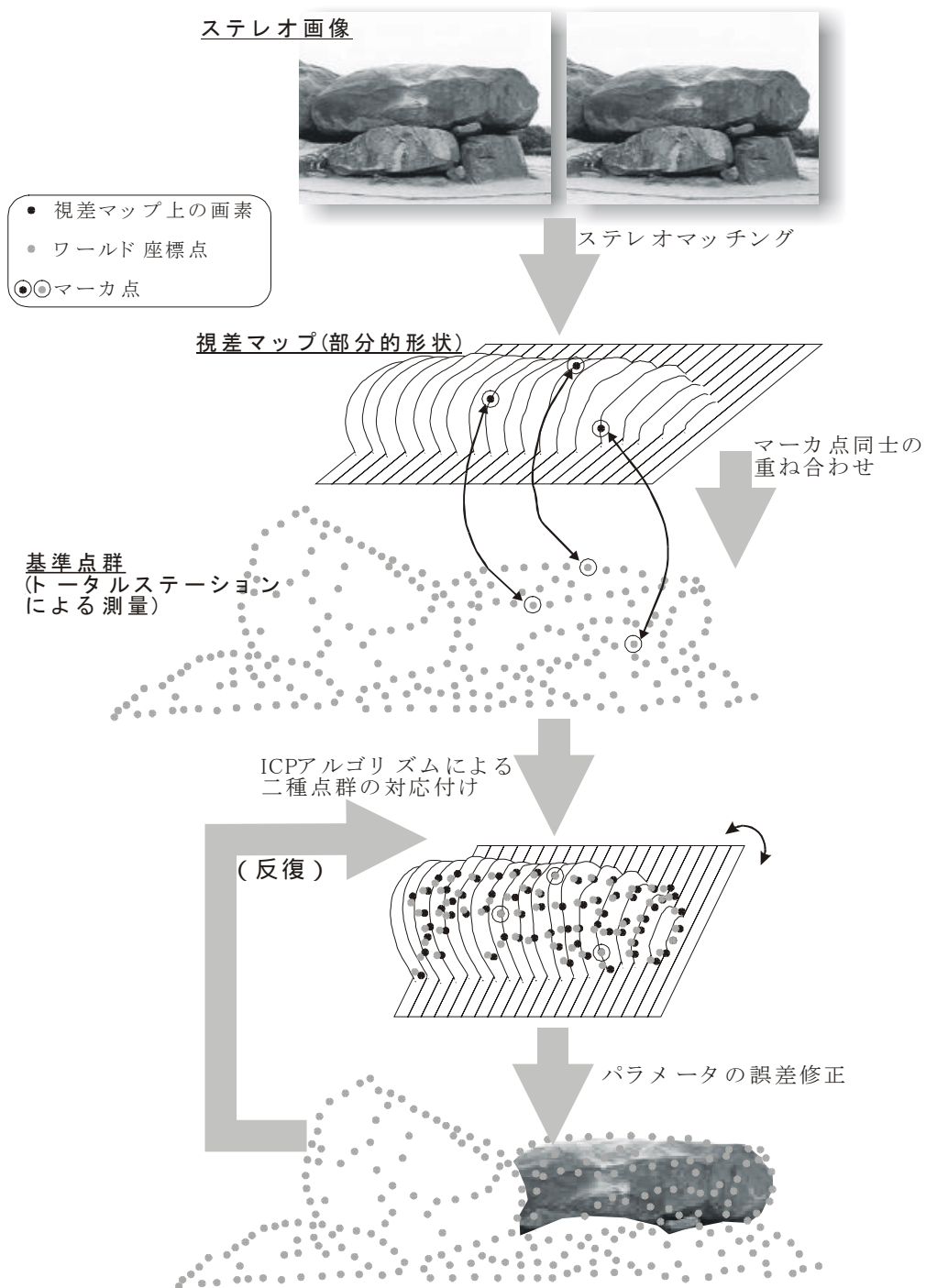


図 3.4 統合処理の流れ

3.6 ステレオマッチング処理

3.6.1 ステレオアルゴリズム

本手法におけるステレオマッチング処理は、左画像のそれぞれの画素に対して右画像を探索し、画素毎の視差を求める。結果として、視差を画素の輝度値とした視差画像を作成することができる。ここでいう視差は、後述する式(3.1)における $X_l - X_r$ に相当する。視差画像のすべての輝度値から、各ステレオ左カメラに固定された座標を算出すれば、各部分の曲面形状を再構成することができる。三次元座標を持ったこの点群を、「画像点群」とする。

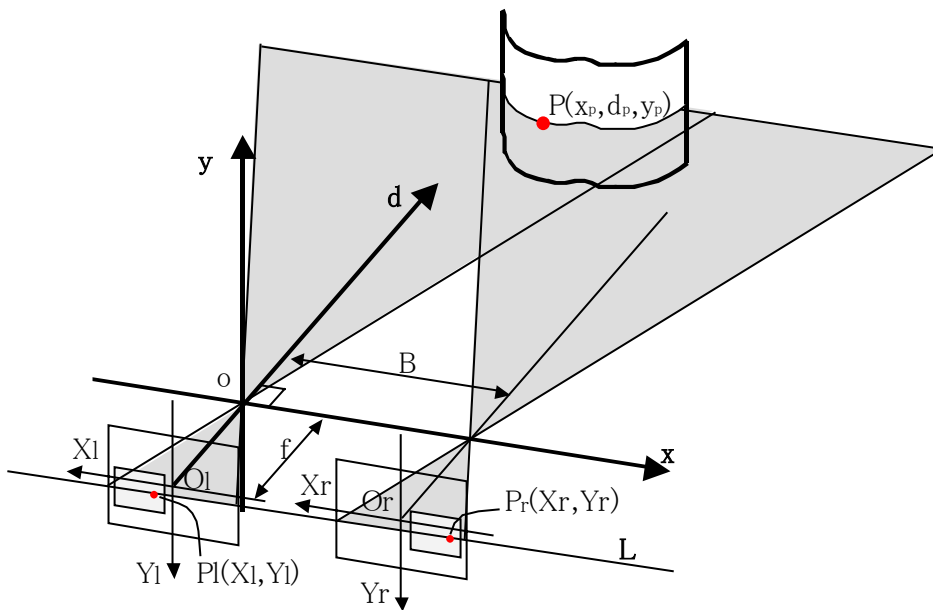


図 3.5 ステレオ画像の幾何配置

ステレオマッチングのための画像の撮影条件、コンピュータ処理の方法は多種多様であるが、ここでは最も単純と思われる手法を紹介する。

ステレオ画像撮影の条件は以下のとおりである。(標準ステレオ幾何とする。)

- ・ 左右カメラの視線方向(光軸)は平行
- ・ 二つのカメラのレンズ中心を結ぶ線(基線)と、両カメラの視線は互いに垂直
- ・ 画素の横並びと基線は平行
- ・ 左右カメラの焦点距離が等しい

図 3.5 はステレオ画像の幾何配置を示している。左画像中のある画素の横並び L 上に点 P が観測されたとすると、右画像でも同じ横並びの上に点 P が観測される。

このように撮影すると、対象物表面上の点 P と、その左右のフィルム上の像 P_l, P_r を結ぶ三角形を用いて距離 d を求めることができる。

点 P の左右の画像座標 $(X_l, Y), (X_r, Y)$ 、更に基線長 B 、焦点距離 f を用いて左カメラのレンズ中心を原点とした相対座標が以下の式(3.1)で求まる。

$$\begin{pmatrix} x \\ d \\ y \end{pmatrix} = \frac{B}{X_l - X_r} \begin{pmatrix} X_l \\ f \\ Y_l \end{pmatrix} \quad (3.1)$$

ただし、 x 軸は基線方向、 d 軸はカメラの視線方向、 y 軸はそれらに直交する方向とする。

コンピュータで画像輝度の類似度(3.6.3 節参照)を計算することにより、左画像の各画素について、対応する右画像上の画素位置を自動的に探索することができる。すなわち、左画像すべての画素に対応する立体座標が求まり、被写体の曲面形状を知ることができる。

3.6.2 マーカを用いた左右画像の回転・位置補正

前節のステレオ幾何拘束を利用して、銀塩フィルムで撮影された写真をスキャニングし、デジタル画像としてステレオマッチング処理を行う。

ステレオ写真撮影時やフィルム読み取り時に位置および回転によるずれが生じるため、デジタル画像化しただけではエピポーラ拘束を有効に活用すること

ができない。そこでまず、左右画像のマーカ点の位置関係をもとに、画素の横並びとエピポーラ線が一致するような画像変換を行う。本研究では、2点のマーカを選び、それらの左右画像における位置が同じ横並びになるように右画像を一次変換する。

3.6.3 相関係数

本手法では、左右画像の小領域の類似度を正規化相関係数により計算する。画像中のある矩形 ($N \times N$) 内の画素値を $\{I(i, j) \mid i = 1, \dots, N, j = 1, \dots, N\}$ とすると、平均 \bar{I} および分散 σ^2 は、

$$\bar{I} = \frac{1}{N^2} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N I(i, j) \quad (3.2)$$

$$\sigma^2 = \frac{1}{N^2} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N (I(i, j) - \bar{I})^2 \quad (3.3)$$

と表せる。分散の平方根 $\sigma = \sqrt{\sigma^2}$ は、標準偏差と呼ばれる。添え字 l, r がそれぞれ左画像、右画像を表すものとする、左右画像の矩形の類似度を測る統計量として正規化相関係数 ρ は以下の式(3.4)で表すことができる。

$$\rho = \frac{\frac{1}{N^2} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N (I_l - \bar{I}_l)(I_r - \bar{I}_r)}{\sigma_l \sigma_r} \quad (3.4)$$

この相関係数 ρ は、-1 から 1 の範囲の値をとり、この値が大きいほど左右画像の矩形の類似度が高いことを示している。

本手法ではまず、画像の R,G,B それぞれの画素値に対して、エピポーラ線上の視差のある範囲に対して相関係数を求め、その最大値 ρ_R, ρ_G, ρ_B をとる視差

d_R, d_G, d_B をそれぞれ求める。ある閾値 t_1 に対し ($\rho_R > t_1, \rho_G > t_1, \rho_B > t_1$) のすべてを満たし、 d_R, d_G, d_B がほぼ同一値をとる (ある閾値 t_2 に対して $|d_R - d_G| < t_2, |d_B - d_R| < t_2, |d_G - d_B| < t_2$ のすべてを満たす) 場合、視差の平均値

$$\bar{d} = \frac{(d_R + d_G + d_B)}{3} \text{ を左右画像の視差とする。}$$

3.6.4 画像ピラミッドによるマッチングと信頼度画像

本節では、パラメータの収束処理 (3.9節) で用いる信頼度について述べる。

ステレオマッチングにおける対応点探索が困難であることは3.3節で述べた。本研究ではエピポーラ線と画素の横並びを一致させ、左右画像の矩形内の正規化相関係数を用いて対応点探索を行うが、その際オクルージョンや不連続な部分への対処として、相関係数値に閾値を設け、除外する処理を行う。ただし、相関係数が低くなるのはオクルージョン部分のみではなく、表面の細かな凹凸が影響している場合も考えられる。このような部分は局所的な不連続等はあるが、大域的には連続とみなすことができる。したがって、相関係数を計算する矩形領域を大きくすることにより、探索の分解能は落ちるが同一物点に近い部分を探し出すことが可能である。

すなわち、一つのシーンに対して複数の解像度の画像を用意し、解像度の順に積み重ねたピラミッド画像を用いてステレオマッチング処理をすると、除外される部分を減少させることができる。また、このような多重スケールの画像を解像度の低い順に(最上層:第N層から)ステレオマッチング処理をすることにより、探索範囲が限定され、演算時間の短縮にもつながる。

本研究では、最下層(第0層)の画像の画素数を $2^K \times 2^L$ [pixel] とし、1層上がるごとに縦・横方向の解像度がそれぞれ $1/2$ となるピラミッド構造を用いる。第0層での画素間隔を r [m/pixel] とすると、第 n 層における画素間隔は $r \times \frac{1}{2^n}$ であり、画像の大きさは $2^{K-n} \times 2^{L-n}$ [pixel] となる。上層の画像(粗い画像)同士でしか閾値を上回る相関係数が得られない場合、その結果を採用する。

ステレオマッチング処理は横方向に1画素ずつスキャンしてゆくので、その量子化誤差がどの方向に対しても r に比例することを考慮すれば、ステレオマッチ

ングの結果得られた座標の信頼度は、ピラミッド構造における一つ上の層では $1/2$ になると考えることができる。すなわち、第 n 層における信頼度を $\omega^{(n)}$ とすると、

$$\omega^{(n)} = \omega^{(0)} \times \frac{1}{2^n} \quad (3.5)$$

となる。

しかしながら、画像ピラミッドは $N+1$ 層しか存在せず、 $\omega^{(n)}$ もまばらな値しか取らない。そこで $\omega^{(n)}$ の間を補間するために、座標の信頼度を左右するもう一つのパラメータとして、ステレオマッチング時の相関値を用いる。

本研究で用いた正規化相関係数は $0 \sim 1$ の値をとる。この値と座標の信頼度の関係は明確ではないが、 1 に近い程信頼度が高いとみなすことができる。ここでは $\omega^{(n)}$ と $\omega^{(n-1)}$ の間を相関値 x_n で線形補間する。 $\omega^{(0)} = 1/2$ とし、信頼度 ω を以下の式で表すと、すべての ω が $0 \sim 1$ の値をとる。

$$\begin{aligned} \omega &= \omega^{(n)} + x_n (\omega^{(n+1)} - \omega^{(n)}) \\ &= \frac{1 + x_n}{2^{n+1}} \end{aligned} \quad (3.6)$$

本研究では単純なピラミッド法を採用したが、他の手法を用いた場合、それぞれの方法で信頼度を定義すれば、最適化処理を行うにあたって一般性を失わない。

3.6.5 データの分解能について

本節では、ステレオ写真撮影時の設定値と、局所座標の分解能との関係について考察し、撮影時の条件決定の方法を述べる。

ステレオ法による画像計測では、視差画像から得られる局所座標値の分解能は

撮影条件・画像化の条件により大きく異なる。したがって、必要とするデータの質を満足し、かつデータ収集の手間を小さくする条件を決定しておく必要がある。

また、遺跡の凹凸形状や状態・遺跡周辺の環境・撮影したい方向により、遺跡に近づける限界や遠ざかることのできる限界が存在する場合が多い。例えば周囲に建造物などの遮蔽物がある場合は被写体から遠ざかる限界がある。あるいは、遺構の保存状態を保つために内部への三脚の設置ができない場合もある。以上により、カメラを設置する位置、すなわち被写体までのおおよその距離を考慮して計測を行わなければならない。

求める必要がある条件は以下のとおりである。

- ステレオ写真撮影における基線長 B [m]
- カメラから被写体までのおおよその距離 D [m]

また、用いる機器に依存するパラメータとして、以下が挙げられる。

- レンズの焦点距離 f [m]
- 画角 2 [radian]
- 画像化することのできる画素密度 r [pixel/m]

また、以下のパラメータは、撮影の手間や対象物の大きさ・形状・求めるデータの質により決定する。

- (x, d, y) の各方向の分解能 (それぞれ R_x, R_d, R_y)
- 左写真における右写真のオーバーラップ部分の割合 w
- 一度に計測できる奥行き d

ステレオマッチング処理をした場合の奥行き方向の分解能 R_d は以下の式で表せる。

$$R_d = \frac{rd^2}{Bf} \cdot \frac{1}{1 - \left(\frac{rd}{Bf}\right)^2} \quad (3.7)$$

奥行き(d)方向の分解能は対象までの距離が遠い程悪く、オーバーラップ部分の割合は、距離が短い程小さくなってしまふ。したがって、被写体までの最小距離・最大距離をそれぞれ d_{\min} , d_{\max} とすると、以下の式が成り立つ。

$$R_d \leq \frac{rd_{\max}^2}{Bf} \cdot \frac{1}{1 - \left(\frac{rd_{\max}}{Bf}\right)^2} \cong \frac{rd_{\max}^2}{Bf} \quad \left(\because \left(\frac{rd_{\max}}{Bf}\right)^2 \ll 1 \right) \quad (3.8)$$

また、画像と平行な方向の分解能 R_x , R_y は、以下の式で表せる。

$$R_x \leq \frac{rd_{\max}}{f} \quad (3.9)$$

$$R_y \leq \frac{rd_{\max}}{f} \quad (3.10)$$

ここで、実際には $\frac{rd_{\max}^2}{Bf} > \frac{rd_{\max}}{f}$ となるので、全方向に関して同様の分解能を得たい場合は、ステレオマッチング処理の間隔を調節すれば良い。必要とする分解能が先に決まっている場合は、式(3.8)より逆算し、以下の距離(d_{\max})におさまるように撮影する。

$$d_{\max} \leq \sqrt{\frac{B \cdot f \cdot R_d}{r}} \quad (3.11)$$

基線長 B は、最短距離 d_{\min} での左右画像オーバーラップ部分の割合 w により、以下の式を用いて決定する。

$$B \leq 2 \cdot d_{\min} (1 - w) \tan \theta \quad (3.12)$$

ここで、 $\Delta d = d_{\max} - d_{\min}$ であるので、シーンの奥行きが広範囲に渡る場合は、

$$\Delta d \geq \sqrt{\frac{B \cdot f \cdot R_d}{r}} - \frac{B}{2(1 - w) \tan \theta} \quad (3.13)$$

を満たす基線長 B にする必要がある。

上記の設定はシーンに応じて変更する。例えば表面上の細かい溝や模様を再現したい場合などには、その部分をクローズアップし、基線長や画角を変更したステレオ画像を補助的に撮影しておくことも考えられる。

3.7 データ統合処理におけるパラメータ

3.7.1 内部パラメータ

ステレオマッチング処理では、左右の画像から対象物の同じ部分を探し出す対応点探索を行うため、左画像または右画像のどちらか一方にしか写っていない部分は利用できない。3.6.1節で述べた標準ステレオ幾何においては、左画像の左部分と右画像の右部分に不必要な領域が生じる。したがって、フィルムをスキャンする際に、図 3.6 のように左右画像のオーバーラップ部分のみを画像化する。

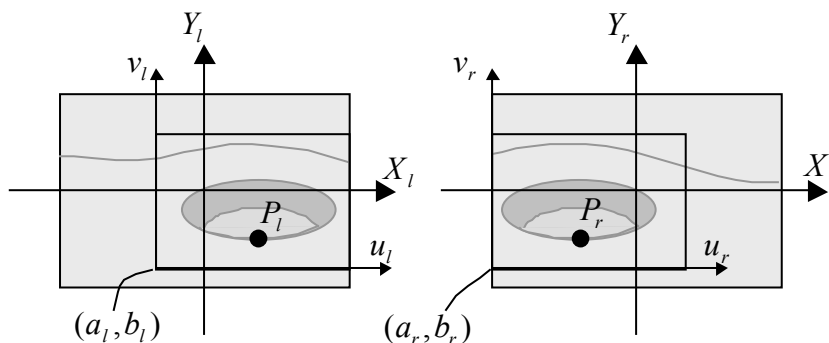


図 3.6 ステレオ写真からの画像の切り出し

作成された画像の左下を原点とし、左右画像の画素の座標をそれぞれ (u_l, v_l) , (u_r, v_r) [pixel] とすると、式(3.1)により、左右画像中の同一点 P の局所座標 (x, d, y) は以下のように求まる。本論文においては、局所座標とは、地球上の緯度・

経度に対してではなく、カメラに固定された座標を指すものとする。

$$\begin{pmatrix} x \\ d \\ y \end{pmatrix} = \frac{B}{(u_l - u_r) + (a_l - a_r)} \begin{pmatrix} u_l + a_l \\ f/r \\ u_l + b_l \end{pmatrix} \quad (3.14)$$

ただし、フィルム全体からの画像の切り出し位置を、左画像： (a_l, b_l) [pixel]、右画像： (a_r, b_r) [pixel]とし、画素間隔を r [m/pixel]とする。

式(3.14)におけるパラメータのうち、 f/r と $(a_l - a_r)$ はそれぞれ 1 個のパラメータとみなすことができる。以下、表 3.2 に示す 5 個のパラメータを内部パラメータとして、後述する外部パラメータと共に二種データ統合処理に用いる。

ステレオマッチング処理は、式(3.14)における $(u_l - u_r)$ を求める処理として置き換えることができる。

表 3.2 内部パラメータ

パラメータ	意味
a_l, b_l	部分画像の切り出し位置 (オフセット) [pixel]
$(a_l - a_r)$	視差のオフセット [pixel]
f/r	焦点距離 [m] / 画素間隔 [m/pixel]
B	基線長 [m]

3.7.2 外部パラメータ

画像点群の局所座標を一次変換し、ワールド座標系へと変換するためのパラメータを外部パラメータとする。一次変換は、三軸回りの回転と三次元の平行移動から成るため、表 3.3 に示すとおり、外部パラメータは 6 個である。これらはステレオカメラの位置や姿勢を求めるキャリブレーションに関わるパラメータであるといえる。

式(3.1)における x, d, y 軸回りの回転角をそれぞれ θ, ϕ, φ とし、 x, d, y 軸方向への平行移動のパラメータをそれぞれ δ, ζ, η とすると、空間の一次変換の式は以下の式で表すことができる。

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta & -\sin\theta \\ 0 & \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\phi & 0 & \sin\phi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\phi & 0 & \cos\phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\varphi & -\sin\varphi & 0 \\ \sin\varphi & \cos\varphi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

として

$$\begin{pmatrix} x' \\ d' \\ y' \end{pmatrix} = A \cdot \begin{pmatrix} x \\ d \\ y \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \delta \\ \zeta \\ \eta \end{pmatrix} \quad (3.16)$$

これら 6 個のパラメータの初期値は、対応関係が既知であるマーカ点を用いて求める (3.8 節)。

表 3.3 外部パラメータ

パラメータ	意味
θ, ϕ, φ	三軸回りの回転角[radian]
δ, ζ, η	三次元の平行移動[m]

3.8 パラメータの初期値算出

3.7.2 節の外部パラメータ (一次変換のパラメータ) の初期値は解析的に求まる。以下、3.8.1 節において回転角、3.8.2 節において平行移動パラメータの初期値算出過程を示す。

本節で求める初期値には誤差が含まれるため、3.9 節において最適化処理を行う。

3.8.1 回転角の算出

回転角を求めるために、式(3.16)における回転行列 A を求める。
基準点群における i 番目のマーカの位置ベクトル (ワールド座標) を q_i とし、その点に対応する画像点群におけるマーカの位置ベクトル (局所座標) を p_i とする。
マーカ点は 3 点用いるので、 $i=1,2,3$ である。仮の回転中心を両座標における 3 番目のマーカ点とし、次式(3.17, 3.18)に示すベクトルの方向をそれぞれ合致させることを考える。

$$Q_i = q_i - q_3 \quad (3.17)$$

$$P_i = p_i - p_3 \quad (3.18)$$

ただし、 $i=1,2$ とする。

局所座標の算出に用いたパラメータには誤差を含むので、 Q_1 と Q_2 の成す角度と P_1 と P_2 の成す角度とは厳密には一致しない。したがって、

1. Q_1 と P_1 の方向を一致させ、
2. Q_1 と Q_2 の成す平面と、 P_1 と P_2 の成す平面を一致させる

ような変換を求めることとする。

まず、 P_1 を x 軸に一致させ、 P_2 を xy 平面上に合わせるために、 P_1, P_2 を回転させる角度 $\theta_p, \phi_p, \varphi_p$ を求める(図 3.7 参照)。このときの各角度が満たす条件は以下のとおりである。

y 軸回りに φ_p だけ回転させることにより P_1 が xy 平面上にのる。

次に d 軸回りに ϕ_p だけ回転させることにより P_1 の方向が x 軸に一致する。

更に x 軸回りに θ_p だけ回転させると P_2 が xy 平面上にのる。

同様にして、 Q_1 を x 軸に一致させ、 Q_2 を xy 平面上に合わせるために Q_1, Q_2 を回転させる角度 $\theta_q, \phi_q, \varphi_q$ を求める

以上で求めた6個の角度を用いると、行列 A が以下の式で求まる。

$$A = \begin{bmatrix} \cos \varphi_q & -\sin \varphi_q & 0 \\ \sin \varphi_q & \cos \varphi_q & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \phi_q & 0 & \sin \phi_q \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \phi_q & 0 & \cos \phi_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_q & -\sin \theta_q \\ 0 & \sin \theta_q & \cos \theta_q \end{bmatrix}. \quad (3.19)$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_p & -\sin \theta_p \\ 0 & \sin \theta_p & \cos \theta_p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \phi_p & 0 & \sin \phi_p \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \phi_p & 0 & \cos \phi_p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \varphi_p & -\sin \varphi_p & 0 \\ \sin \varphi_p & \cos \varphi_p & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

式(3.15)の行列と、式(3.19)の行列は一対一対応であるため、回転角 θ, ϕ, φ は係数比較により求まる。

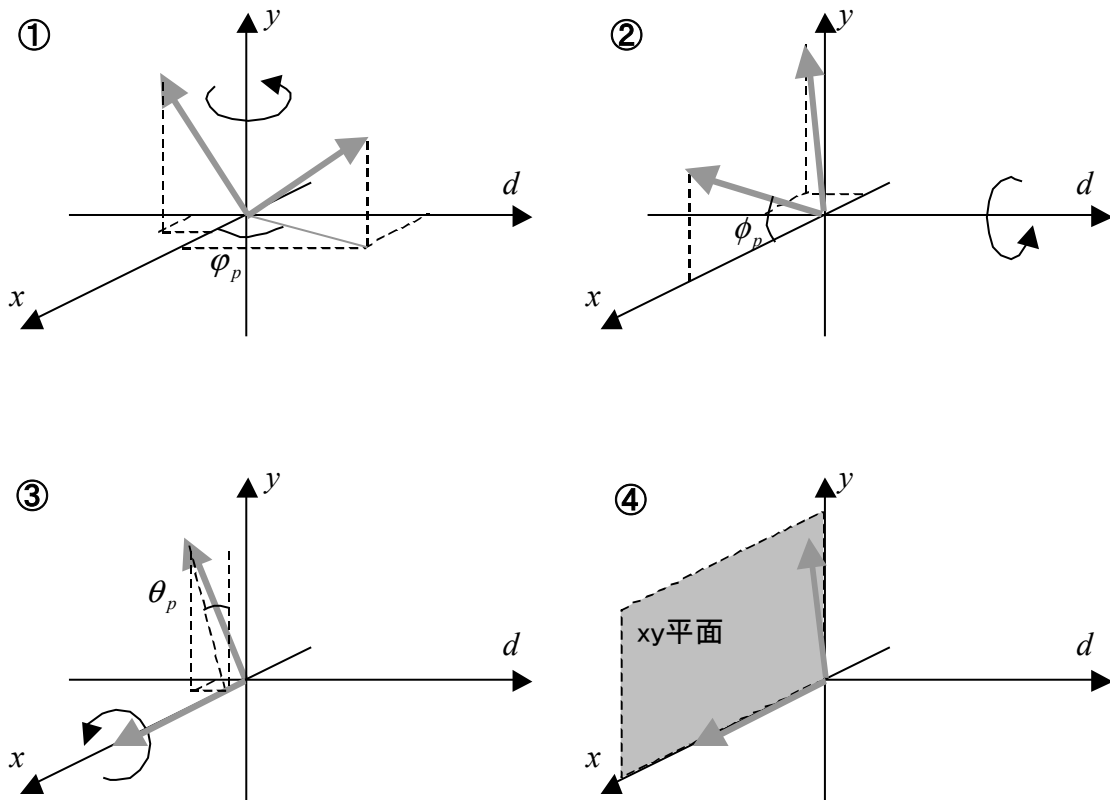


図 3.7 外部パラメータ(回転)の算出

3.8.2 平行移動パラメータの算出

平行移動のベクトル m を以下のように定める。

$$m = \begin{pmatrix} \delta \\ \zeta \\ \eta \end{pmatrix} \quad (3.20)$$

式(3.16)より、 $i=1,2,3$ として

$$q_i = Ap_i + m \quad (3.21)$$

と書き換えることができるので、

$$m = q_3 - Ap_3 \quad (3.22)$$

として算出する。

3.9 パラメータ収束処理

3.7.1節で述べた内部パラメータは、以下の要因による誤差が含まれる。

- ・ステレオ写真撮影時の光軸やカメラ位置のずれ
- ・設定した基線長の誤差
- ・画像のディジタイズ時における切り出し座標の誤差

外部パラメータの初期値算出には、これら誤差を含む内部パラメータを用いており、更に以下の要因が重なるため誤差が増大し、正確な値からかなりずれていることが考えられる。

- ・画像からのマーカ位置検出における誤差
- ・マーカ位置の測量における誤差
- ・浮動小数点の丸め誤差

これらの誤差を最小限にするため、本節ではマーカ点以外の基準点群（ランダム点）も用いてパラメータの最適化を行う。まず、基準点群と画像点群の対応関係を求め(3.9.1節)、次にそれらの距離平均を最小化するパラメータを算出する。

3.9.1 対応点の選択

基準点群と画像点群のそれぞれの点は一対一対応ではない。基準点群が疎であるのに対し、画像点群は密で曲面形状を表している。したがって、個々の基準点に収束させる画像点を決定し、それらの距離を最短にする方法でパラメータの修正を行う。点の対応関係を求める方法は各種考えられるが、ここでは単純に、距離の一番近い点を選択することにする。ただし、すべての基準点に対応する点が1シーンの画像点群に存在するわけではないため、距離に閾値を定め、各基準点

を中心とした球形の内部で探索を行う（図 3.8 参照）。

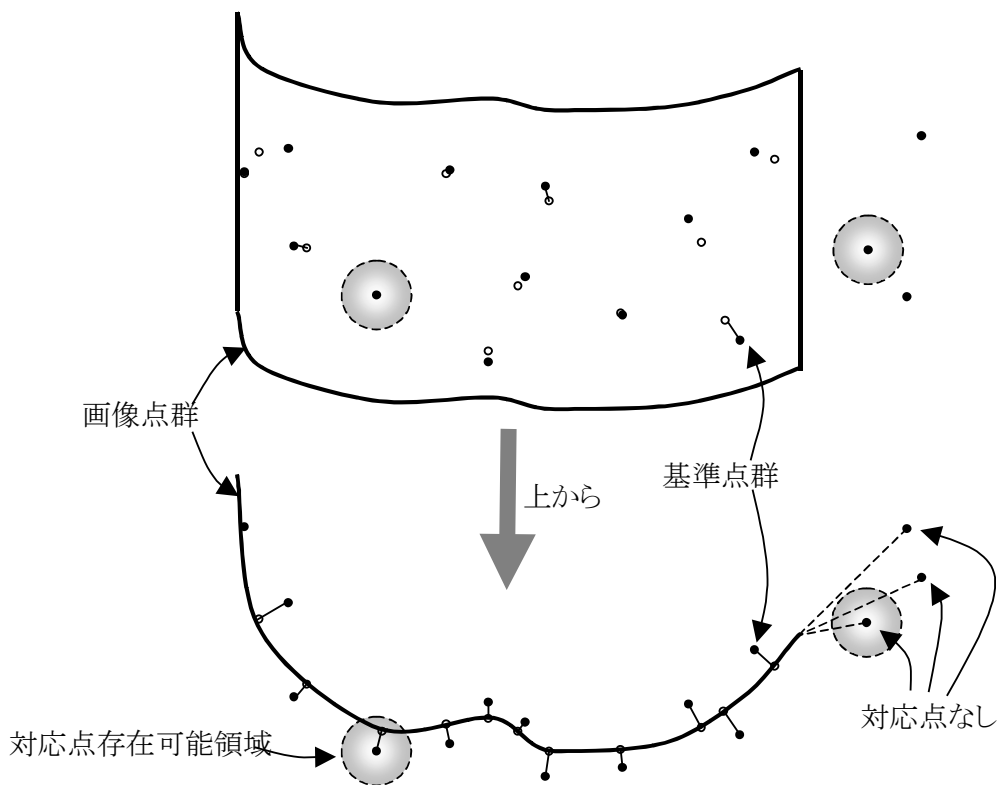


図 3.8 対応点選択の概念図

手順は以下の通りである。

1. 現在決定しているパラメータの値を用いて画像点をすべて変換する
2. 個々の基準点に関して、一番近い距離に変換された画像点を対応点として選択する
3. 距離が閾値以上の座標点对を除外する

ただし、マーカ点に関しては対応関係が既知なのでそのまま座標点对として加える。

3.9.2 パラメータの正規化

3.7 節で述べた 11 個のパラメータを $\boldsymbol{\rho} = (\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_{11})^T$ と、11 次元のベクトルで表す。これにより、他のパラメータ（例えば画像の歪みの係数など）を新たに用いた場合でも一般性を失わない。

このループに入った時点でのパラメータの値を初期値 $\boldsymbol{\rho}^{(0)}$ として、 n 回目の誤差修正を行った後の時点でのパラメータを $\boldsymbol{\rho}^{(n)} = (\rho_1^{(n)}, \rho_2^{(n)}, \dots, \rho_{11}^{(n)})^T$ とする。

各パラメータは単位も動きうる範囲も異なるので、まず 3.8 節で求めたパラメータの初期値 $\boldsymbol{\rho}^{(0)}$ を用いておおよその正規化を行う。この正規化によって各パラメータの変化に対する座標の実空間での移動率をほぼ一定にしたい。 ρ_i に対する正規化定数 σ_i は、 M 個の一次変換された画像点 $\{(x'_j, d'_j, y'_j) \mid j=1, 2, \dots, M\}$ （式 3.16 参照）と $\boldsymbol{\rho}^{(0)}$ を用いて以下のように算出する。

$$(\sigma_i)^2 = f_i(\boldsymbol{\rho}^{(0)}) \quad \text{ただし}$$

$$f_i(\boldsymbol{\rho}) = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M \left(\left(\frac{\partial x_j(\boldsymbol{\rho})}{\partial \rho_i} \right)^2 + \left(\frac{\partial d_j(\boldsymbol{\rho})}{\partial \rho_i} \right)^2 + \left(\frac{\partial y_j(\boldsymbol{\rho})}{\partial \rho_i} \right)^2 \right) \quad (3.23)$$

上記の σ_i を用いて新しいパラメータベクトル $\boldsymbol{\tau}^{(n)}$ を、
 $\boldsymbol{\tau}^{(n)} = (\rho_1^{(n)} \cdot \sigma_1, \rho_2^{(n)} \cdot \sigma_2, \dots, \rho_{11}^{(n)} \cdot \sigma_{11})^T$ と定義し、これを変数として最適化を行う。

3.9.3 目的関数の定式化

3.9.1 節で得られた M 個の対応点对の集合を、

$$\{(q_i, p_i) \mid q_i : \text{ワールド座標}, p_i : \text{局所座標}, i=1, 2, \dots, M\} \quad (3.24)$$

と表す。マーカ点も含むこれらの対応点对の集合を用いて、パラメータ最適化の目的関数は以下の式で表せる。

目的関数：

$$g(\boldsymbol{\tau}) = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \frac{1}{\omega_i} \| \mathbf{q}_i - \mathbf{p}_i \|^2 \rightarrow \text{最小} \quad (3.25)$$

ただし、パラメータ ω_i は i 番目の局所座標の信頼度を表す。このパラメータの意味するところは3.6.4節で述べた。

この目的関数を解析的に扱うため、非線形計画法である勾配法[32]を用いて最適化を行う。本研究では最急降下方向 ($-\nabla g(\boldsymbol{\tau}^{(n)})$) を用いた手法を採用する。

Step1 (初期化)： 初期値は、 $\boldsymbol{\tau} := \boldsymbol{\tau}^{(0)}$ である。

Step2 (探索方向の計算)： 探索方向ベクトル $-\nabla g(\boldsymbol{\tau}^{(n)})$ は、

$$-\nabla g(\boldsymbol{\tau}^{(n)}) := - \left(\frac{\partial g}{\partial \tau_1^{(n)}}, \frac{\partial g}{\partial \tau_2^{(n)}}, \dots, \frac{\partial g}{\partial \tau_{11}^{(n)}} \right)^T \quad (3.26)$$

となる。もし、 $\| \nabla g(\boldsymbol{\tau}^{(n)}) \| < \varepsilon$ (ε は充分小さい正の定数) が成り立てば計算を終了する。

Step3 (直線探索)： 1次元の最適化問題

$$\min_{0 \leq t \leq T} g(\boldsymbol{\tau}^{(n)} - t \nabla g(\boldsymbol{\tau}^{(n)})) \quad (3.27)$$

を解いてステップ幅 $t = t^{(n)}$ を求め、 $\boldsymbol{\tau}^{(n)} := \boldsymbol{\tau}^{(n)} + t^{(n)} \nabla g(\boldsymbol{\tau}^{(n)})$ とし、Step2に戻る。

この関数 $g(\boldsymbol{\tau}^{(n)})$ は、局所解を持つ多くの関数の和になっているため、局所最適解が多く存在することが予想される。そこで t の動きうる範囲を $0 \leq t \leq T$ に限定し、一度に大きくパラメータが変化するのを防ぐ。

この最適化が完了した時点で $g(\boldsymbol{\tau}) < \xi$ (ξ は充分小さい正の定数) が成立すれ

ば、このシーンに対する処理は完了する。もしまだ誤差が大きければ、新たな対応点の探索（3.9.1 節参照）から再度行う。

パラメータの初期値算出に用いる 3 点のマーカ点は高精度に測量されている基準点群の一部であり、得られる初期解が最適解に十分近い値であるため、局所解を多く持つ上記関数においても初期値近傍の局所解が大域的最適解に一致していると考えることができる。

画像計測による距離画像パッチを複数枚統合する処理においては、まず隣り合うパッチ同士をオーバーラップ部分形状の類似性などから重ね合わせ（ローカルレジストレーション）次に全パッチの整合性が整うように調整する（グローバルレジストレーション）方法がとられる場合が多いが、本手法では高精度に測量された基準点群を骨組みとしてシーンを統合するため、このような 2 段階の処理は必要なく、いわば「ローカルなファインレジストレーション」処理のみで最適解に至ることができる。

3.10 再構成点群のノイズ除去

3.9 節の方法で求めたパラメータを用い、複数のシーンすべてを同一のワールド座標に変換し、立体の再構成を行う。このとき、ステレオマッチング時に生じる対応点探索エラーや奥行き分解能の範囲外でのマッチングの影響で、シーンから離れた位置に孤立した点が現れる。本研究では、このように孤立した点をノイズとみなし除去する。

ノイズでないと考えられる点は、近傍に多くの点が存在する。本研究では、まず距離の近い点同士をグループ化し、グループ内の点の数が少ないものを除去する方法を用いた。

3.11 再構成点群の解析表示

本節では、統合処理によって得られる点群(「再構成点群」とする)の解析表示について述べる。

3.11.1 色彩による立体表示

再構成点群は、コンピュータグラフィクス技術を用いて、立体表示をすることができる。各点はR,G,Bの三パラメータで表される色彩を持つ。これはデジタル画像そのものが持っていた色彩である。この色彩を用いて、画面上で再構成点群を透視図的に配置する。立体データなので、任意の視点からの観測が可能である。グラフィクス用のワークステーションなどを用いれば、視点はマウスやキーボードを用いて視点を実時間で動かすことが可能である。実際の外観を忠実に再現する手法である。

3.11.2 デプス・キューイングによる立体表示

色彩を用いるかわりに、視点からの奥行きにより点の色濃度を变化させる表示方法がデプス・キューイングである。例えば、視点から遠い点を黒色で表示し、近い点ほど白に近い色で表示するなどして、連続的な奥行きを表現する。色彩による表示同様、視点を実時間で動かすアプリケーションにより、より全体の立体形状を把握しやすくなる。

3.11.3 断面図、等高線表示

遺跡の解析などにおいて、断面の形状は重要な意味を持つ。再構成点群は任意の角度・位置における断面図を作成することができる。ただし、立体の表面上に点が存在するので、点が曲線状に並んだ図となる。特に、ある一定の標高に存在する点群を抽出し、真上から観測することにより、等高線的な表現をすることが可能である。一般に、地図上で等高線同士が交差することは少ないが、遺構などの垂直な壁面においては、交差は頻繁に起こる。したがって、地図と同じように、複数の等高線を表示し真上から観測すると、繁雑になることが多い。対処法

の一例として、等高線の濃度を段階的に変化させて表示し、さまざまな視点から観測する方法がある。これらの表示方法は、立体の図化を容易にするものとして有効である。

3.11.4 点の座標、二点間の距離抽出

上記の三通りの表示手法を用いてコンピュータ上で画面表示し、それを直接解析に利用する例として、点の座標、あるいは二点間の距離の抽出が挙げられる。例えば、観察する視点を決定したら、座標値を調べたい位置をマウスでクリックするとその点が点滅し、座標値が表示されるというアプリケーションが考えられる。2点目のクリックにより、点と点の距離を表示するようにすれば、任意の点間の距離を調べることができる。

第4章 遺跡計測実験と考察

本研究で提案した遺跡の立体再構成方法の有効性を確認するため、実際の遺構を計測する実験を行った。本章では、行った計測実験の内容と処理の経過過程を示し、解析表示した結果をもとに手法の有効性を考察する。

4.1 計測対象



図 4.1 計測した遺構（斜め上から撮影）

本実験で計測した遺跡は、乙女不動原瓦窯跡遺跡（おとめふどうはらかわらが
まあといせき）という国指定の史跡で確認された 4 基の窯跡の一つである（図
4.1、計測協力：栃木県、小山市教育委員会）。

この遺跡は昭和 39 年に初めて試掘調査が行われ、国指定史跡の下野薬師寺跡
から出土した鎧瓦（軒丸瓦）・宇瓦（軒平）と同じ瓦が発見されたことから、薬師
寺跡と密接な関係がある瓦窯跡として注目された。その後、昭和 51 年 7 月と昭
和 52 年 2 月から 3 月に確認調査が実施され、4 基の窯跡（瓦を約いた所）、灰原
（木の燃え糟を捨てた所）、粘土採掘坑（粘土を掘り出した所）など貴重な遺構が
見つかった。また出土した物は、鎧瓦・宇瓦・男瓦（丸瓦）・女瓦（平瓦）がほと
んどで、瓦を焼いた時期は西暦 750 年度前後（奈良時代、今から約 1250 年前）
で、当時の都である平城京から瓦をつくる職人が来て指導をしていたと思われる。
この史跡は昭和 53 年 5 月 11 日に国史跡とし国指定され、昭和 58 年 3 月に用地
の買収が終わった。指定面積は 6,120 平方メ - トルである。その後、この遺跡の
整備のため窯跡・工房跡・灰原・粘土採坑の性格や配置や規模などを確認するた
め、昭和 62 年から平成 6 年まで再度発掘調査が行われた。平成 6 年～7 年に作
成された保存整備計画と実施計画にもとづき、平成 8 年～9 年にかけて遺跡の整
備が行われ、平成 10 年 4 月 25 日には史跡公園としてオ - プンしている。

このタイプの窯は有牀式平窯（ロスト式平窯）と呼ばれ、おおよその外形は深
さ 1.3 m 長辺 3 m 短辺 2 m である。薪を燃やす室（燃烧室、写真右部分）と
瓦を焼き上げる室（焼成室、写真左部分）が上下 2 室にわかれ、分炎孔と呼ばれ
る 3 本の小さなトンネルでつながっている。焼き上げる焼成室の床には、炎が均
等に分散する工夫として 6 条の溝が掘られ、その上に瓦を並べて補強されている。
天井部は崩落していて現存しない。有牀式平窯は、イランからインド・中国など
アジアの広い地域でみられ、一般に土器の窯とされているが、日本では瓦専用の
窯となっている。省エネルギー - で均一な焼きあがりが見られるという面で非常に
優れた構造の窯である[33]。

窯内部は当時の火の温度状況により赤みのある部分と黒い部分が存在する。こ
れは考古学上重要な手がかりであるため、本手法のように色彩を同時に保存でき
る手法は有効である。また、窯の内外を仕切る壁の部分はほぼ垂直に立っており、
火入れ口の部分などにオーバハング（真上からは見ることのできない壁面）が存

在する。すなわち、従来の写真測量などのように鉛直下向きにカメラを設置するタイプの測量方法による計測は困難であり、本手法のように多視点画像を統合する手法は有効である。

4.2 使用機器

本実験で使用した機材は以下のとおりである。

4.2.1 点群測量用機材

トータルステーション本体は SOKKIA 社製の SET6ES(図 4.2 左)を用いた。仕様は以下のとおりである。

測角部

最小表示	20 /10 (パラメータで選択。水平角・高度角とも)
精度	(DIN 規格 No.18732 準拠) 水平角、高度角 7
測定時間	0.5 秒以下

測距部

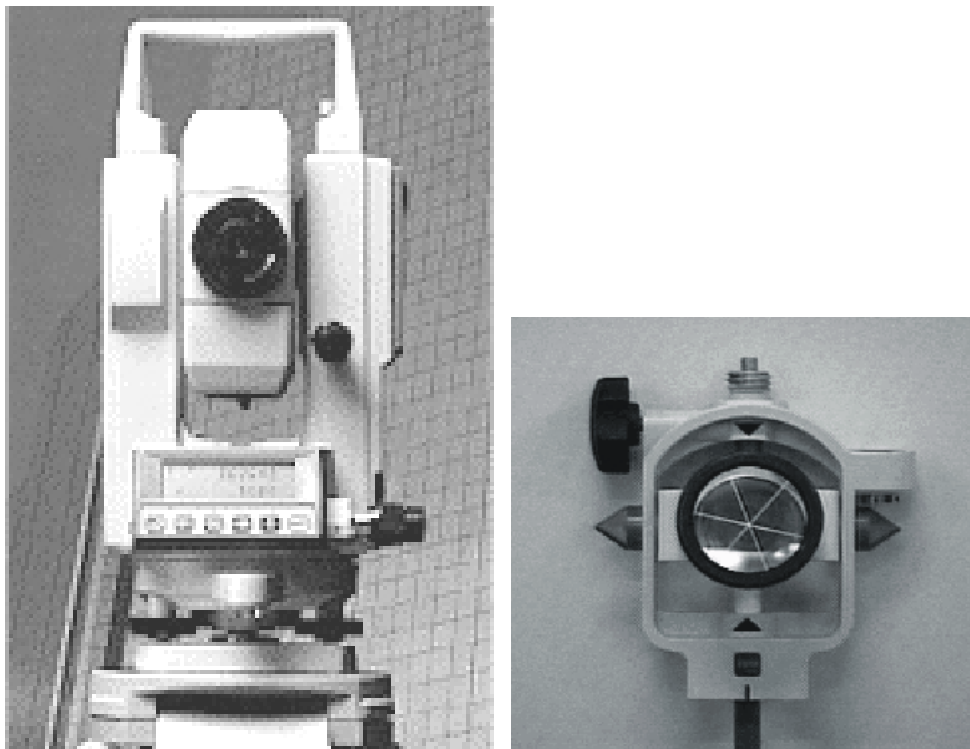
測距範囲	(気象条件通常時) 1.3m ~ 500m
精度	$\pm(5+5\text{ppm} \times D)$ mm (連続測定時)
最小読み取り値	1mm (連続測定時)

諸般

データ出力	RS-232C 規格準拠
-------	--------------

本体と PDA を RS-232C ケーブル経由で接続し、データ取得を行う。その他、点群計測に必要な機材は、本体を据えつける三脚・ターゲットとなる反射プリズ

ム(図 4.2 右)・反射プリズムを取りつけるポールなどである。



トータルステーション(左)とターゲット(右)

図 4.2 基準点群測量機材

4.2.2 ステレオ写真撮影機材

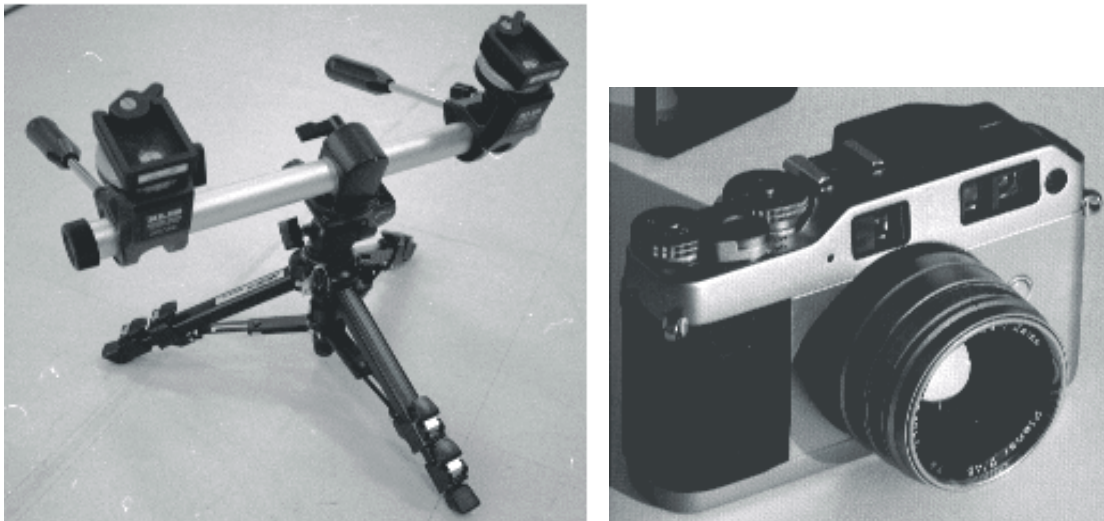
ステレオ写真の撮影には、35mm フォーカルプレーンシャッター式カメラ(図 4.3 右, CONTAX G1)を用い、レンズは歪曲収差の小さい28mm(F2.8)を用いた。雲台が2個ついたポール(SLIK社製 マルチアームII)を三脚に固定し、クイックシュー⁶を二つ、ほぼポールと垂直方向を向くように雲台に取り付け、更に視線が平行になるように無限遠に近い1点がカメラのファインダ上でほぼ同一位置になるよう調節した(図 4.3 左)。そして、カメラ(図 4.3 右)を交互に付け換え

⁶ カメラを雲台に迅速に固定させるために使われるアタッチメント

ながら撮影を行った。

奥行き分解能を2mm以内、写真のオーバーラップ部分の割合を0.5以上とし、一度に計測できる奥行き（被写界深度）を1m以上と設定した。また、撮影した写真をデジタル画像化するフィルムスキャナ（Minolta QuickScan 35）の最小画素間隔はおよそ 9.0×10^{-3} mmである。これらの数値により、3.6.5 節で示した方法で算出した結果、基線長は80cm、左カメラから対象物までの距離は1.24～2.24m となったので、それに従い撮影を行った。

上記設定でステレオマッチングを行った場合の、対象物までの距離と奥行き方向の分解能の関係を図 4.4 に示す。



マルチアーム（左）と35mm スチールカメラ（右）

図 4.3 ステレオ写真撮影機材

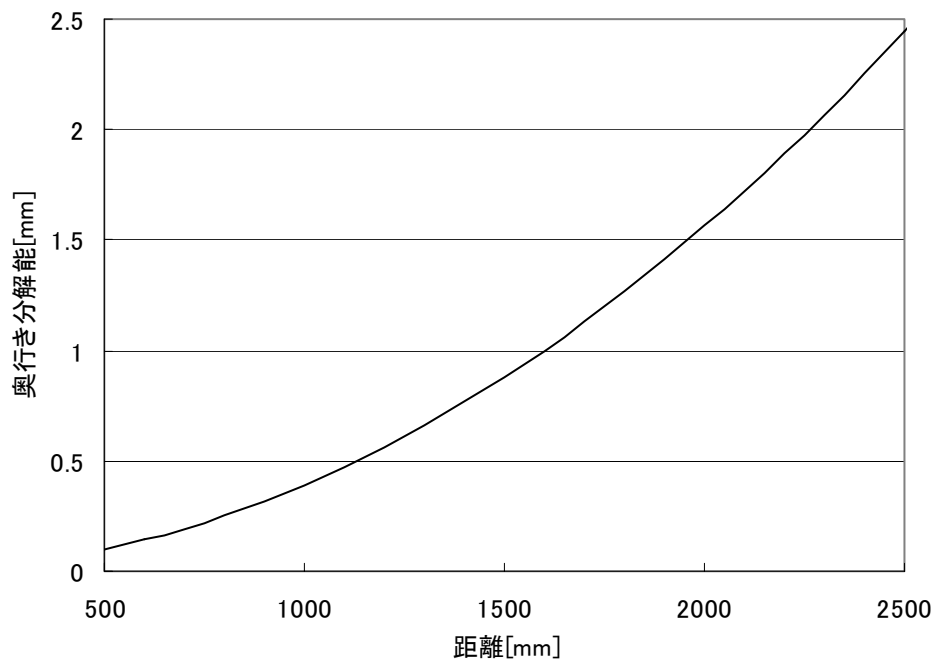


図 4.4 対象までの距離と奥行き分解能の関係

4.3 データ取得

4.3.1 点群

トータルステーションは、三脚に据付け、垂球を用いて基準杭（近くの三角点や水準点から測量を行って、国土座標や標高を明らかにした杭）の真上になるよう調節した。そして、基準杭からトータルステーションまでの高さを測り、入力した。遺構表面上の基準点群の測量は、ターゲットが遺跡表面に触れる状態で行った。

計測対象の遺構の形状が複雑であり、一方向からのみの計測は困難なため、4箇所にわたりトータルステーションの設置位置を変えて、合計 1386 点を測量した。うち、マーカ点は 130 点である。

トータルステーションを設置した4箇所からの位置から死角となってターゲットが直接トータルステーションから観測できない位置にある点は、ポールを用い、後からポールの高さを引いて逆算する方法で測定を行った。

計測した点群を図 4.5 に示す。 は真上から観測した点群であり、表示されているメッシュの間隔は1メートルである。 は窯の奥から、 は横からそれぞれ水平方向に観測した点群である。

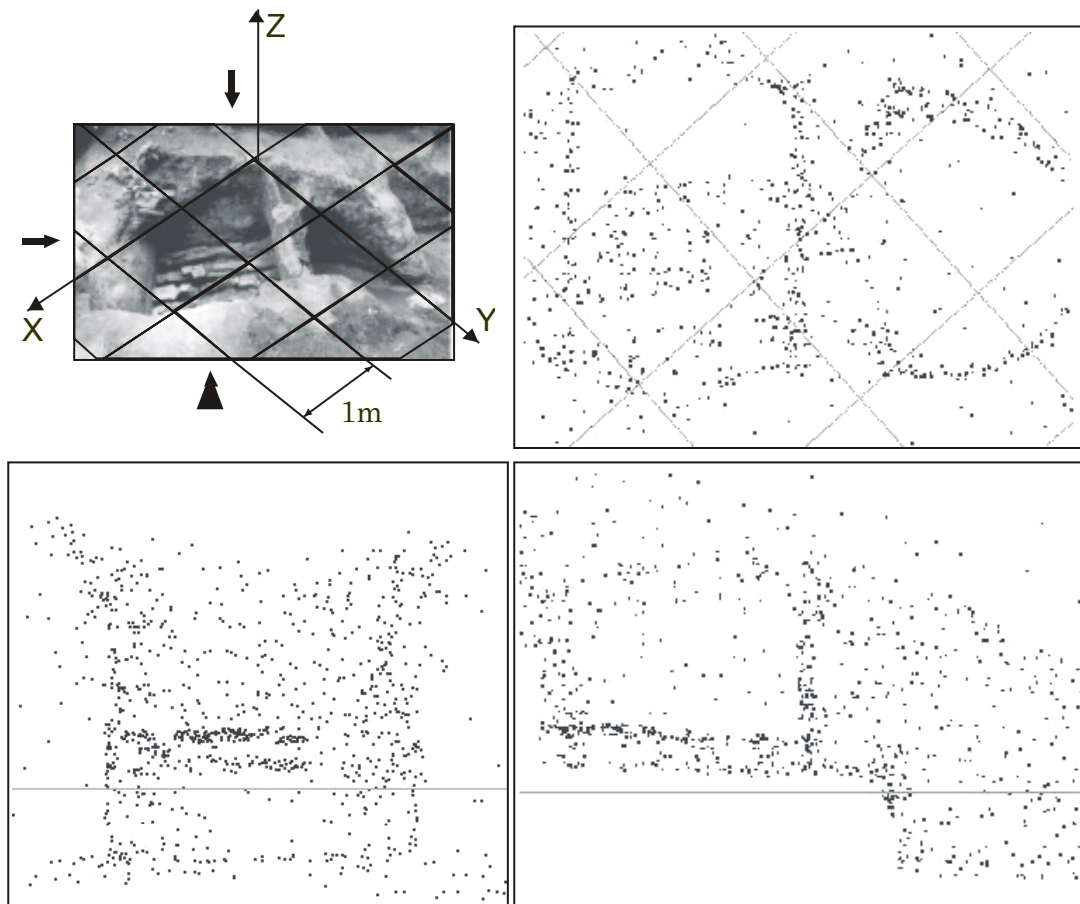


図 4.5 計測した点群

4.3.2 ステレオ画像

撮影したステレオ画像のうち、8シーンを立体再構成に用いた。フィルムスキ

ャナを用いて画像化を行い、左右のオーバーラップ部分を切り出した。そして、右画像を3.6.2 節に示した方法で回転補正を行い、エピポーラ線が画素の横並びとなるようにした。

立体再構成に用いた全 8 シーンを図 4.6 に示す。各画像はオーバーラップ部分を切り出した左画像である。

これらのステレオ画像のうち 2 例を図 4.7 に示す。(a)のシーン 1 は焼成室の底面と 3 本の分炎孔のある壁面部分を撮影したものであり、本実験で用いた画像のうち最も凹凸のあるシーンである。(b)のシーン 2 は焼成室の奥の壁面を撮影したものであり、使用時の焼成状況を示す黒～赤の色分布が見てとれ、遺構の立体再構成をカラー画像で行うことが考古学的に重要な意味を持つことがわかる。画像のサイズは、(a)、(b)ともに 2300×1750 [pixel]である。

マーカ点として、直径 1cm の鋳を 9 色に着色し、1 シーンにつき 6～9 色がオーバーラップするように撮影した。用いた 9 色は、マゼンタ、赤、オレンジ、黄、黄緑、緑、空色、濃紺、紫である。これらマーカ点の抽出処理については4.3.3 節で述べる。

実際にはこれらの他にもう 1 シーン、燃焼室底面部分のステレオ画像(図 4.8)を撮影している。しかしながら、湧き水が絶えず流れ出し、画像に鏡面反射成分が多く存在したため、ステレオマッチング処理に失敗し、再構成処理に用いることができなかった。

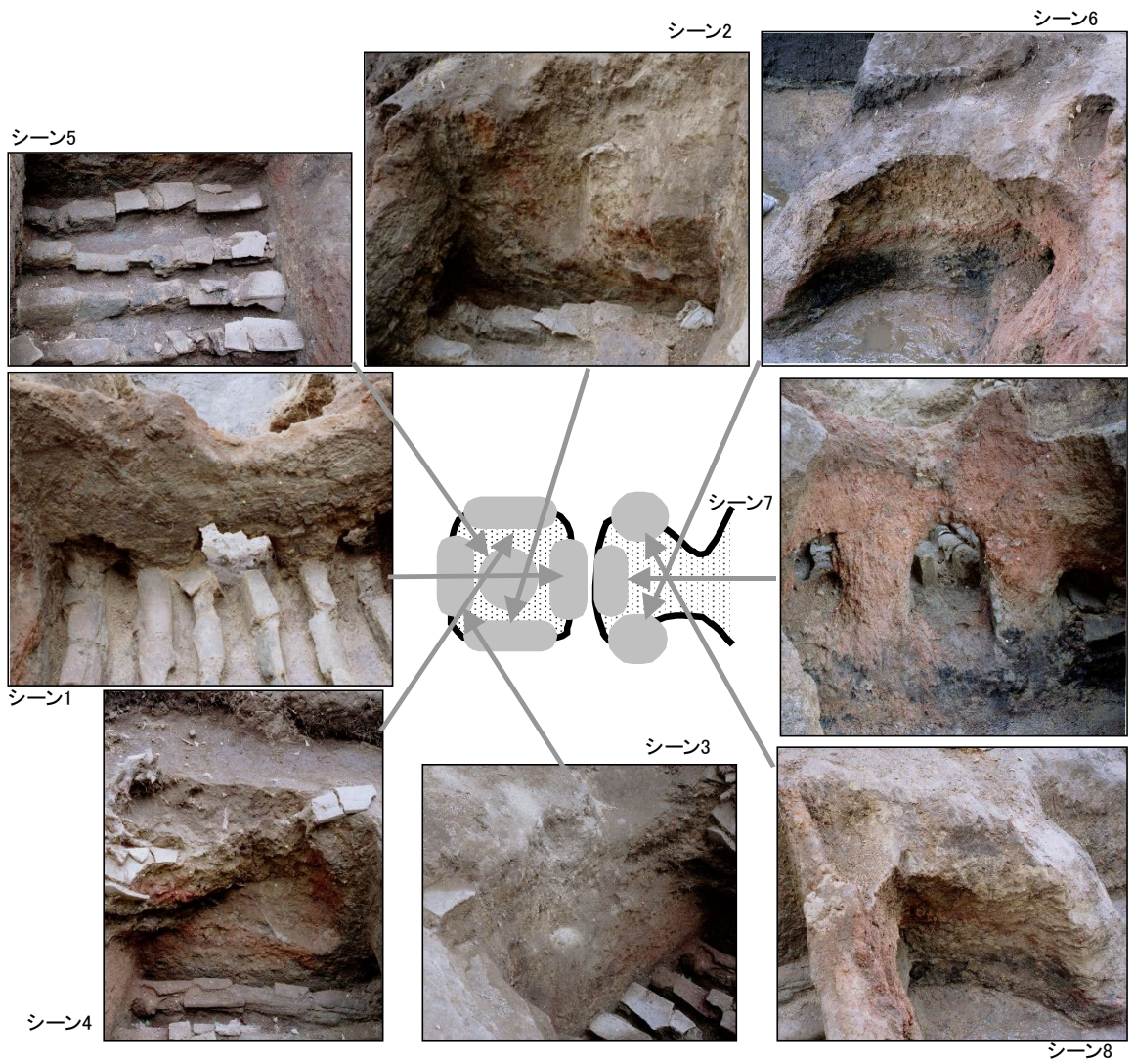


図 4.6 再構成に用いた 8 シーン



(a) シーン 1



(b) シーン 2

図 4.7 ステレオ画像の例



図 4.8 ステレオマッチングに不適当な画像の例

4.3.3 マーカ画像

各ステレオ画像からマーカ位置を検出した。まずおおよそのマーカの各色を原画像で確認し、それらの色に近い部分を画像から抽出した。ただし、色彩 1(R_1, G_1, B_1), 色彩 2(R_2, G_2, B_2)の距離の指標としては以下の式を用いた。

$$\text{距離}^2 = (R_1 - R_2)^2 + (G_1 - G_2)^2 + (B_1 - B_2)^2 \quad (4.1)$$

次に、マーカ領域と認識された各色の画素の重心を計算し、マーカ位置とした。図 4.7 に示したステレオ画像に対応するマーカの画像を図 4.9に示す。

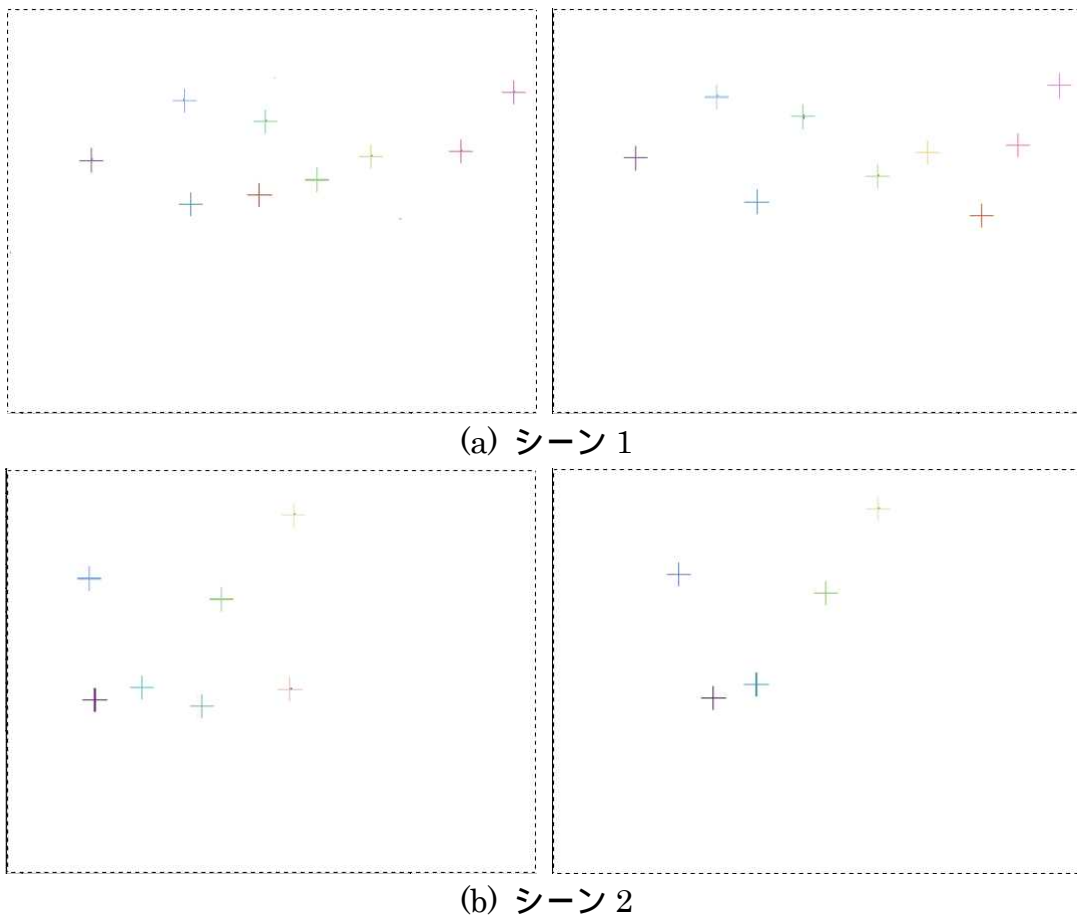


図 4.9 マーカ画像の例

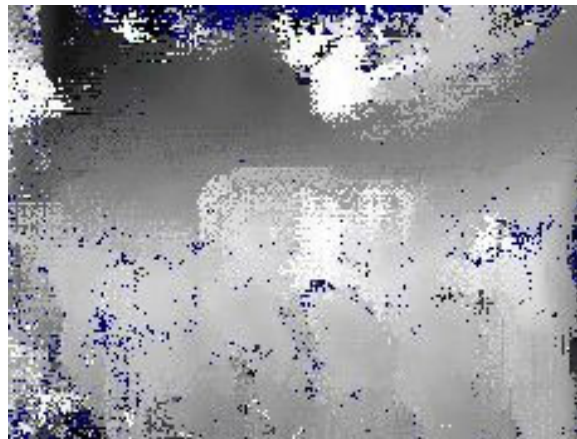
4.3.4 視差画像と信頼度画像

ステレオ画像からエピポーラ線上の類似点を探索し、左の個々の画素に対応する右の類似点の視差を求めた。類似度としては、 23 画素 \times 23 画素の矩形内部の正規化相関係数を用いた。本計測では、 2 のべき乗の解像度で構成されるピラミッド画像を用い、単純に 2^L 画素おきにスキップして得られる右画像に対して処理を行った。最上層は 2^5 画素おきの処理である。

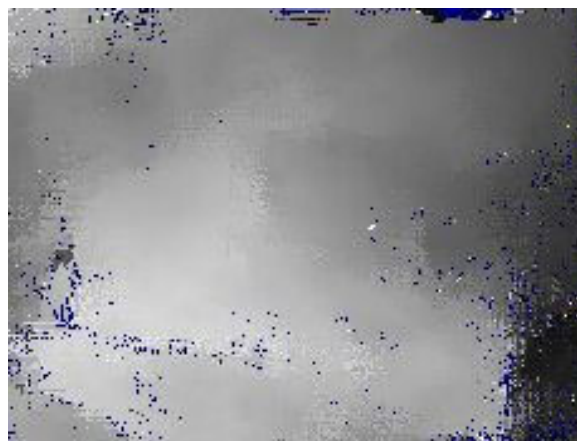
得られた視差画像の例を図 4.10 に示す。視差が大きい(カメラから近い)部分ほど黒に近い色で示している。相関係数が小さく、オクルージョンや処理不能

と判断された部分は青色で示している。ただし、画像と平行な方向の画素密度が奥行き方向の分解能と比較すると高いため、1/5 サイズへの縮小を行った。よって、図 4.10 の視差画像のサイズは 460×350 [pixel]である。

また、これらの視差画像に対応するステレオマッチング時の信頼度を画像化したものを図 4.11 に示す。信頼度の値が高い部分を白に近い色で示している。凹凸の少ない表面形状の部分は、局所座標の信頼度が高いことがわかる。

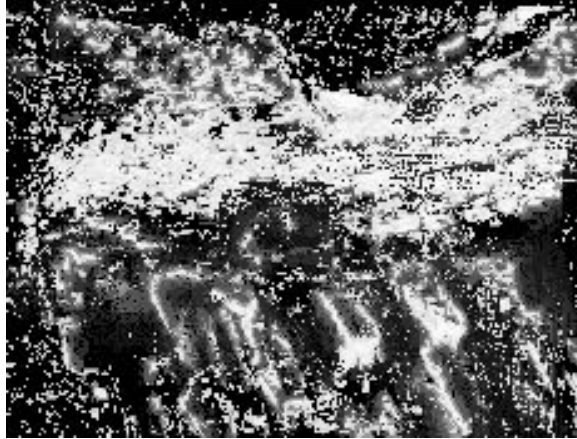


(a)シーン 1



(b)シーン 2

図 4.10 視差画像の例



(a) シーン 1



(b) シーン 2

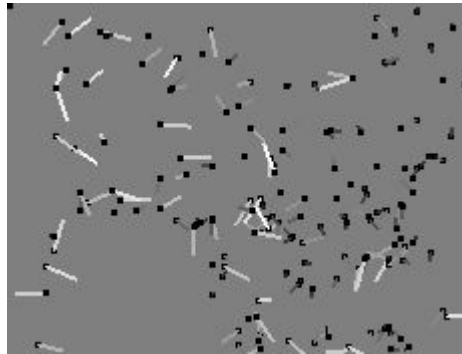
図 4.11 信頼度画像の例

4.4 収束処理

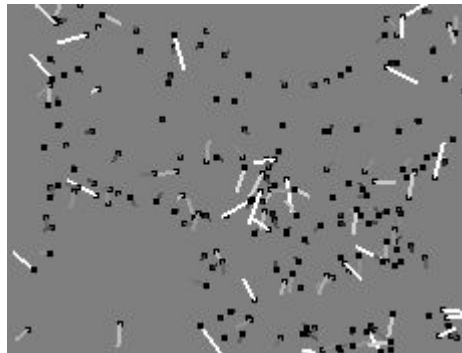
まず、マーカ点を用いて外部パラメータの初期値を求めた。全 8 シーンにおける初期値は、表 4.1 のとおりである。項目は3.7節で述べたパラメータの内容と同様である。

表 4.1 パラメータ初期値算出結果

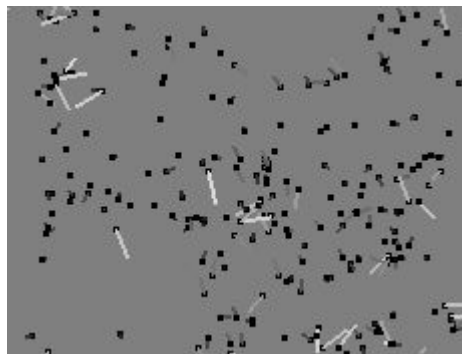
パラメータ	シーン 1	シーン 2	シーン 3	シーン 4	シーン 5	シーン 6	シーン 7	シーン 8
a_l [pixel]	-460	-920	-400	-440	-540	-1630	-830	-570
b_l [pixel]	-600	-800	-1030	-1330	-960	-1320	-1300	-1320
$(a_l - a_r)$ [pixel]	1000	1080	1150	1120	1280	930	1090	1230
f/r [pixel]	3100	3100	3100	3100	3100	3100	3100	3100
B [m]	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
θ [radian]	-0.758	-0.642	0.692	0.363	-0.903	-0.563	0.375	0.315
ϕ [radian]	-0.479	0.261	0.059	-0.382	0.599	0.203	0.272	-0.548
φ [radian]	0.460	-0.306	-3.100	2.784	-0.402	-0.612	-2.514	2.261
δ [m]	4.867	4.315	5.579	5.608	3.841	3.291	2.603	4.724
ζ [m]	8.073	8.105	10.79	10.48	9.112	9.681	12.19	10.69
η [m]	-0.511	-0.272	-0.777	-0.461	-0.403	-0.789	-1.271	-0.729



(a) 初期対応関係



(b) 第2回目の対応関係



(c) 処理終了時 (第4回) の対応関係

図 4.12 収束処理の経過 (シーン 1)

次にこれらのパラメータを用いて画像点群を変換し、収束させる対応点間の距離が $0.1[m]$ 以下となる初期対応点を求めた(3.9.1節参照)。これらに基づき、3.9.3

節の方法で反復計算を行った。反復終了の判定は、最も近い100点の対応点間の距離平均が0.01[m]以下となった場合とした。

シーン1を例にとり、この処理の経過を図4.12に示す。各画像中の黒い点は、視差画像中で対応点が発見された画素であり、そこから伸びる線分は三次元空間での単位ベクトルであり、対応する基準点への三次元空間上の方向を示している。またその線分の色は対応点までの距離を示しており、白に近い程遠いことを示している。処理が進むにつれ対応点の数が増え、距離が小さくなっていることがわかる。

パラメータの収束処理を行った後の8シーンのパラメータを表4.2に示す。

表 4.2 パラメータ最適化の結果

パラメータ	シーン1	シーン2	シーン3	シーン4	シーン5	シーン6	シーン7	シーン8
a_l [pixel]	-462	-926	-407	-444	-540	-1632	-828	-576
b_l [pixel]	-611	-803	-1032	-1330	-960	-1319	-1296	-1321
$(a_l - a_r)$ [pixel]	1082	1090	1152	1127	1284	936	1092	1236
f/r [pixel]	3119	3122	3112	3128	3130	3092	3115	3118
B [m]	0.815	0.822	0.804	0.811	0.813	0.801	0.792	0.808
θ [radian]	-0.789	-0.655	0.650	0.352	-0.889	-0.600	0.375	0.282
ϕ [radian]	-0.473	0.285	0.056	-0.374	0.601	0.249	0.270	-0.551
φ [radian]	0.517	-0.366	-2.906	2.716	-0.466	-0.602	-2.447	2.282
δ [m]	4.918	4.333	5.556	5.510	3.937	3.245	2.644	4.989
ζ [m]	7.960	8.110	10.64	10.60	9.157	9.687	12.31	10.75
η [m]	-0.256	-0.226	-0.529	-0.470	-0.372	-0.903	-1.153	-0.672

4.5 再構成処理と結果

4.4 節で求めたパラメータを用いて 8 シーンの画像点群の座標を変換し、統合した結果、全部で 653,923 点の画像点として再構成された。結果を 3.11.1 節の方法で表示した結果の一例を図 4.13 に示す。ここにはステレオマッチング時のエラー等から生じたノイズと考えられる点が多く存在する。これらのノイズを 3.10 節に示した方法で除去した。点群のグループ化の際には距離の閾値は 0.05 [m] とし、グループ内の点数の閾値は 100 とした。この処理の結果、84,697 点がノイズとして除去され、569,226 点が再構成点群として残った。

得られた再構成点群を図 4.13 と同様の手法で解析表示した結果を図 4.14 に示す。これは、表示する方向を変え、6 視点から色彩による再構成をした結果である。



図 4.13 再構成点群の色彩表示結果

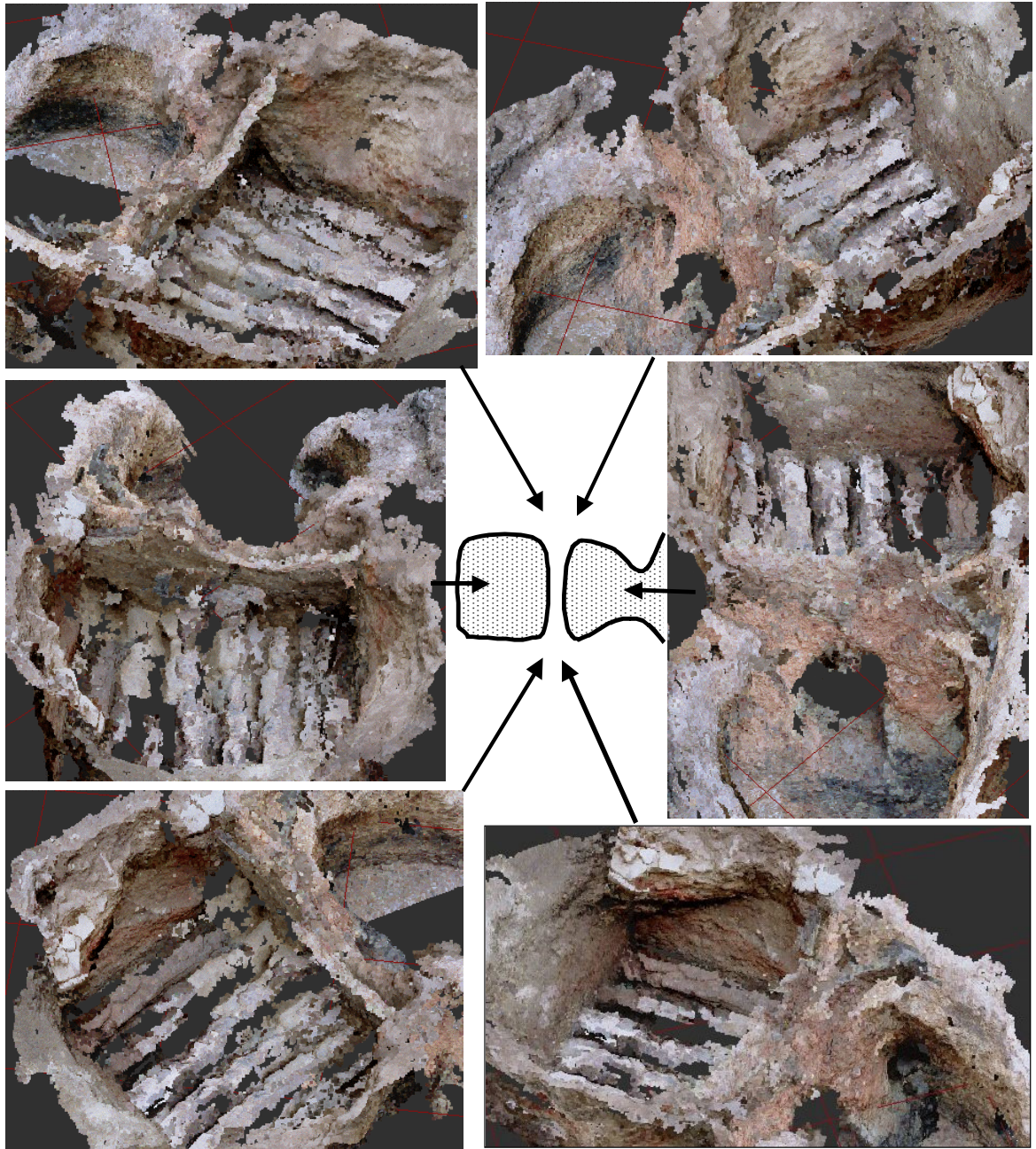
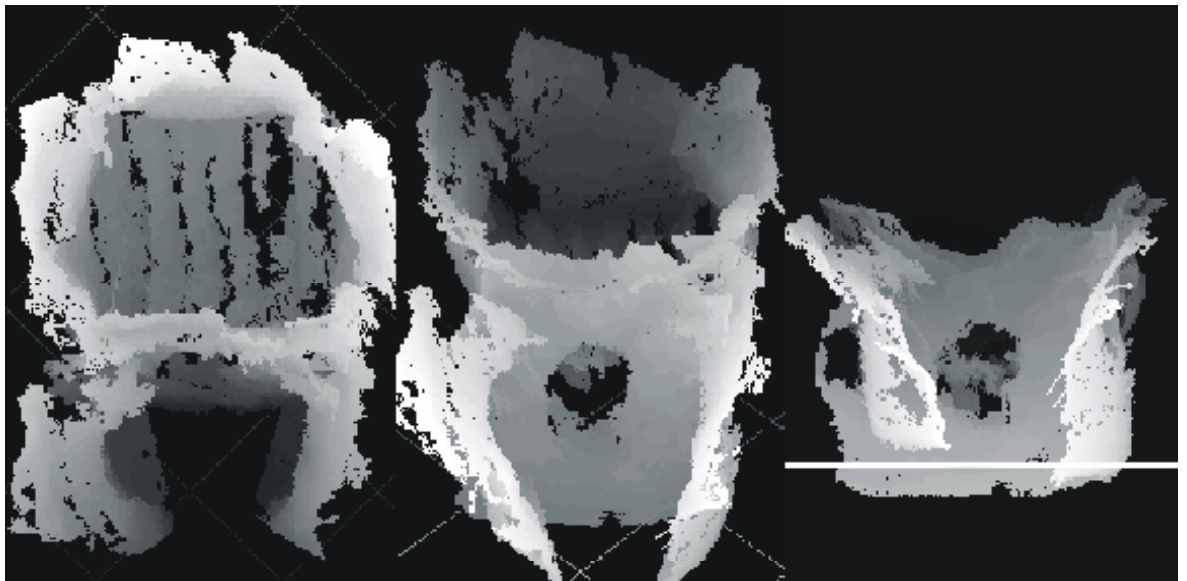
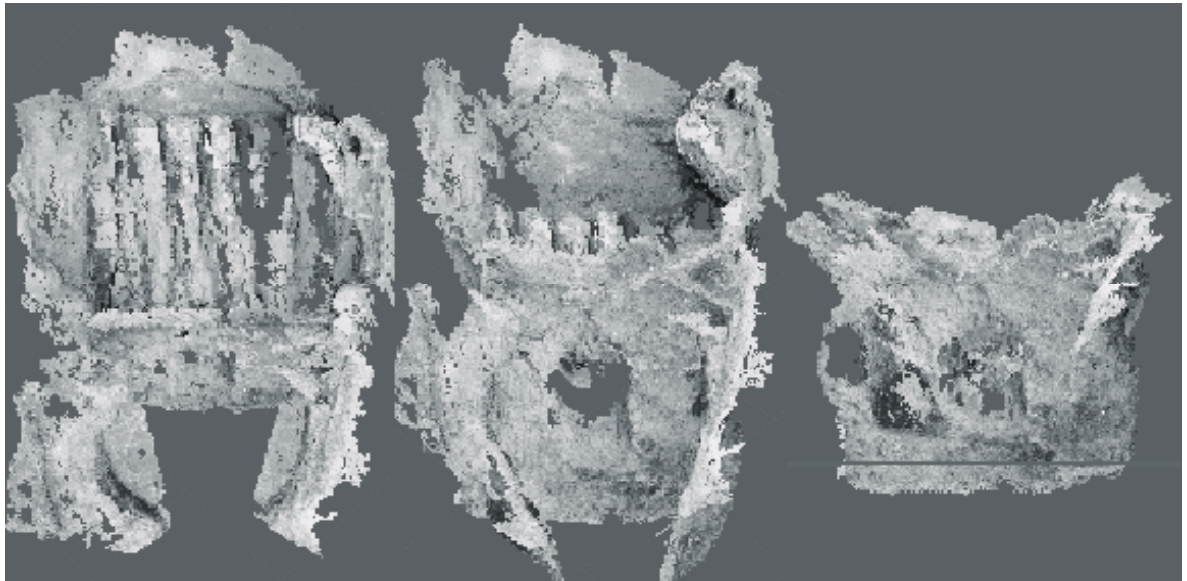


図 4.14 再構成点群のノイズ除去結果

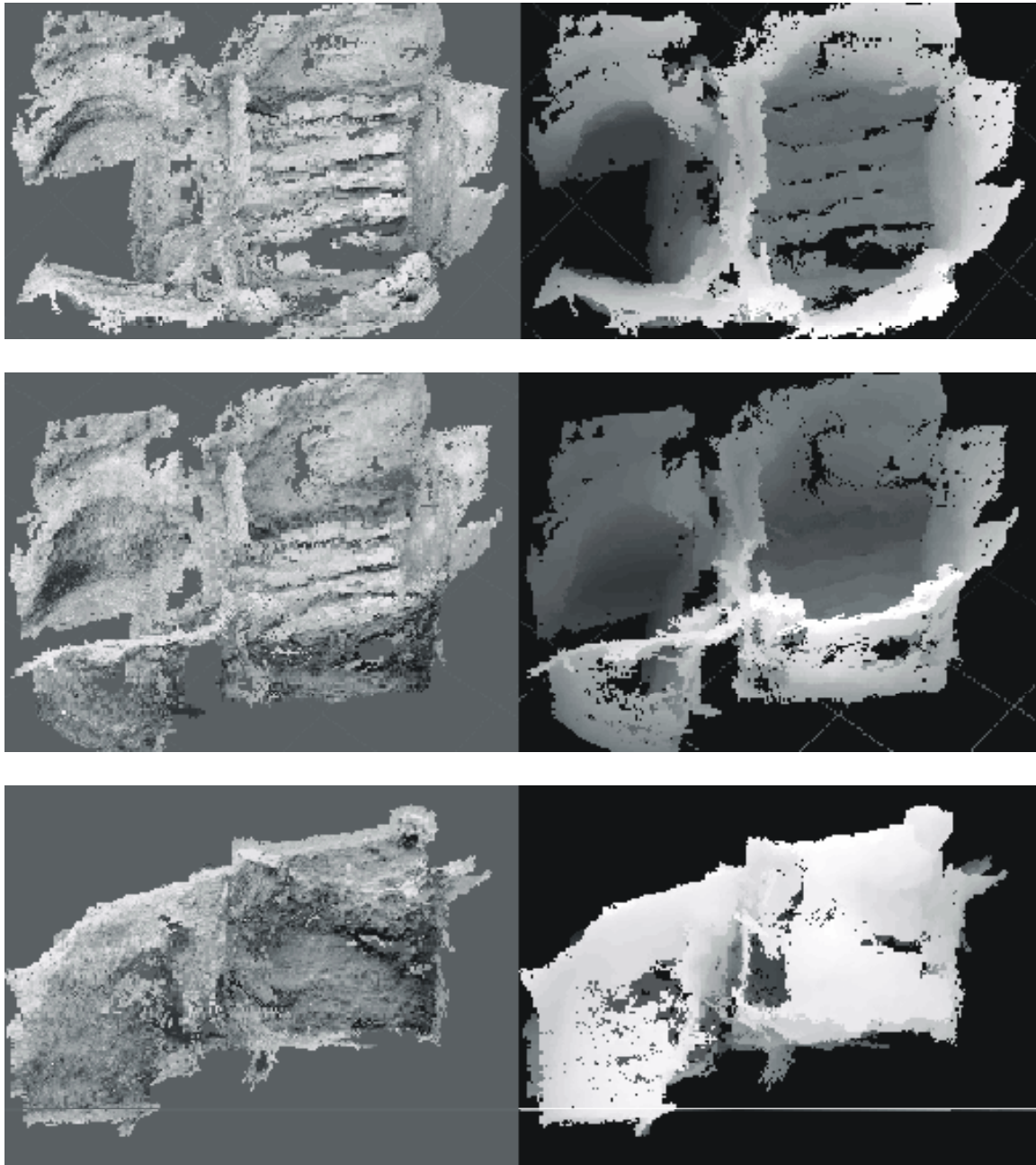
4.6 再構成点群の利用例

3.11.2 節のデプス・キューイング法を用いて再構成点群を表示した例を図 4.15 に示す。これらは、様々な方向から観測した再構成点群を、画素値による表示とデプス・キューイング表示の 2 通りの方法で表示したものである。(b)は実際では見ることのできない方向(裏面)からの観測結果である。点群をそのまま表示しているため、隠面除去の方法を用いることができないためであるが、このような方向からの観測結果も考古学研究に貢献する可能性がある。

また、3.11.3節で述べた方法で等高線検出を行い、Z 軸方向(高さ方向)毎に色分けして表示した結果を図 4.16 に示す。ここでは 10 cm 毎に等高線を検出し、高い位置にある線程白に近い色で表示している。点に粗密があるため、線として表示するのは困難であるが、ほぼ線状に表示されている。



(a) 燃焼室側からの観測



(b) 横方向からの観測

図 4.15 画素値による表示とデプス・キューイング表示の例

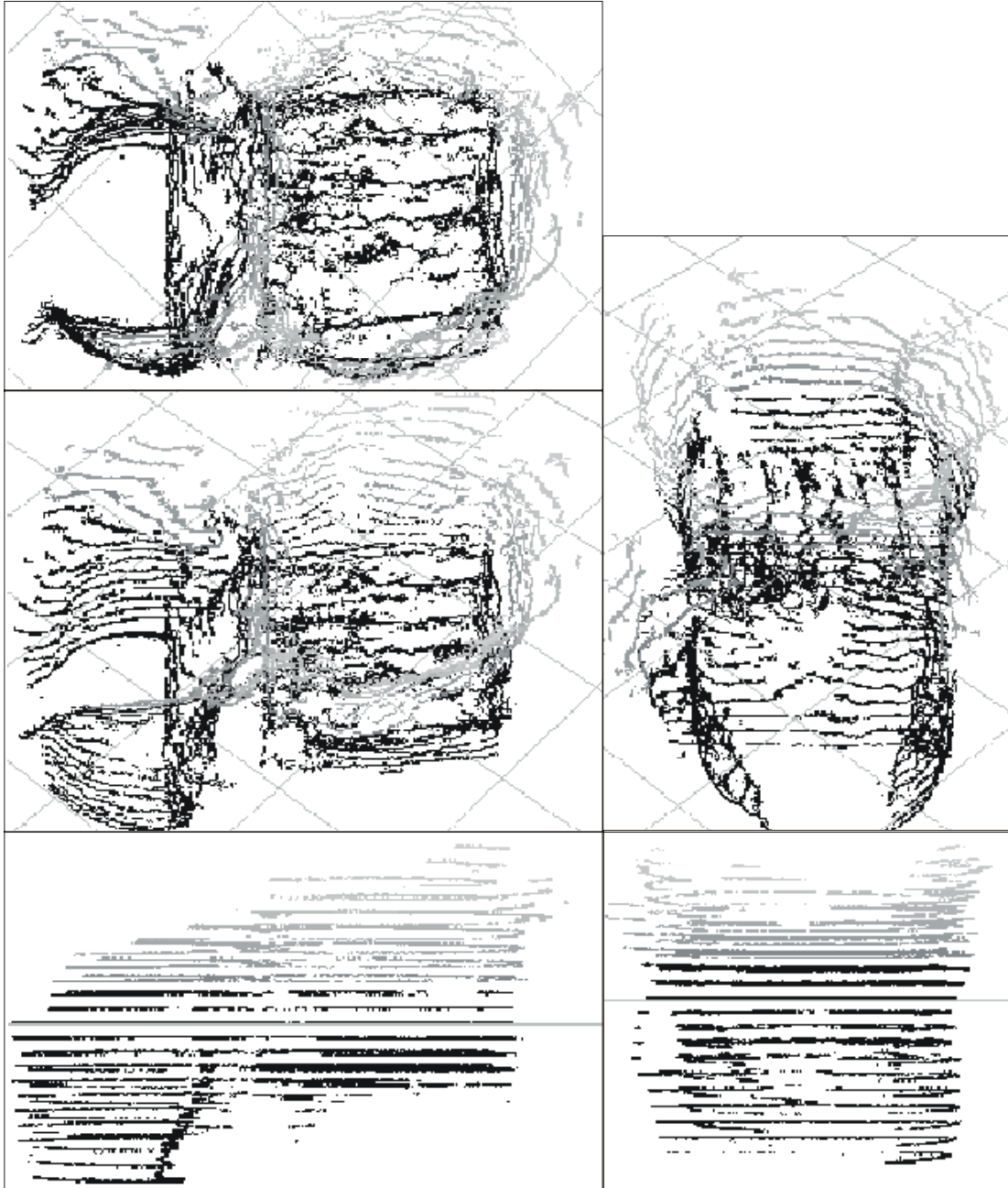


図 4.16 等高線（点）による立体表示

4.7 考察

本実験では、複雑な形状の遺構を三次元計測し、立体の再構成を行うことに成功した。

基準点群の計測においては、プリズムをマーカに接触させながらトータルステーションで点群を計測するという慣れない作業であったため、全周囲 1386 点の計測を行うのに数日を要した。近年、ノンプリズム方式のトータルステーションが発売され始めたため、これらの点群計測はより短時間で行うことができると思われる。

ステレオ写真の撮影には比較的広角なレンズを用い、基線長を長くとり撮影した。これは周囲に撮影台などが無く、底面の撮影時に対象までの距離を長くすることが困難であったことと、形状が複雑で、遠距離からの撮影ではオクルージョンが多く生じてしまうことを考慮したものである。計測する対象に応じて基線長などを自由に変更できるステレオカメラは既製品には存在しなかったが、本実験のように簡易で安価な構造の装置で代用することができる。

彩度の高い色彩のマーカを用いることで画像からの自動抽出と基準点群との自動対応付けが可能であると考えていたが、遺構表面の色彩の彩度が予測していた以上に高かったため、完全な自動化はできなかった。このため、本実験では、9 色のマーカの画像上におけるおおよその色彩を最初に登録しておき、それらに近い色を抽出する方法を用いた。これに対しては、色彩マーカ以外の方法として、形状等を利用して画像から自動抽出する、という対処法も考えられる。

収束処理はほぼ成功したといえるが、最適化の際に誤った局所最適解に陥ってしまっていると思われるシーンも存在する。これはパラメータの初期値算出結果が何らかの原因で最適解から大幅に離れてしまったと考えられる。初期パラメータを求める際に用いたマーカ 3 点の位置関係が直線に近かったことが原因の一つと考えられる。このシーンを除いては最適化結果が良好であり、マーカの配置に留意すれば本手法は有効であるといえる。

一般に、本研究で用いたパッシブステレオ法はステレオ対応点探索に問題が多くエラーが生じやすいが、本手法ではそれらのエラーに逐次対処することなく、

全周囲形状を再構成した後に不連続部分を削除する方法をとり、簡易に非対応点を取り除くことができた。

4.8 今後の課題と展望

本研究では、遺跡計測の手法として疎な点群計測と密な画像計測に基づく立体全周囲計測を提案した。計測処理における各要素技術としては基本的なアルゴリズムを用いたが、これらには様々な改良技術が存在する。主な要素技術として、以下の2点について4.8.1 節で述べる。

- ・ 画像計測アルゴリズムの改良
- ・ ICP アルゴリズムの改良

また、本研究を更に考古研究に役立てるための今後の検討課題として、以下を挙げることができるので、これらについて4.8.2 節で述べる。

- ・ 点群表現から面表現への変換
- ・ 稜線や特徴点の自動抽出などへの応用

4.8.1 要素技術の改良

本研究では、基本的なアルゴリズムによるパッシブステレオ法を用いて密な形状と色彩分布の取得を行った。これは2.2 節の考察に基づき、遺跡・遺構の計測にはパッシブステレオ法が適すると判断したためであるが、他の画像計測手法を否定するものではない。パッシブステレオ法自体も改良が進み、より対応点探索が確実なものとなっている[35][36][37]。また、他の画像計測手法も改良が進み、専用装置も開発されるなど、遺跡計測への適用を最検討する必要がある。

また、二種データの統合には既存のICPアルゴリズムと同様の手法を用いたが、この改良手法が各種研究されており[38][39][40]、これらの適用により更にロバストな位置合わせができる可能性がある。本研究におけるアルゴリズムを用いた場合、図 4.17 の点線矢印で示すように、ステレオシーン（画像点群）の端に

あたる部分等においては、実際には収束させるべきではない基準点への対応付けが行われ、最適化計算への誤差を生じさせる要因となっている。このような望ましくない対応付け（アウトライヤー）は実験の結果（図 4.12）にも見られるが、この問題に関する十分な議論を行っておらず、対処法は今後の課題として残されている。

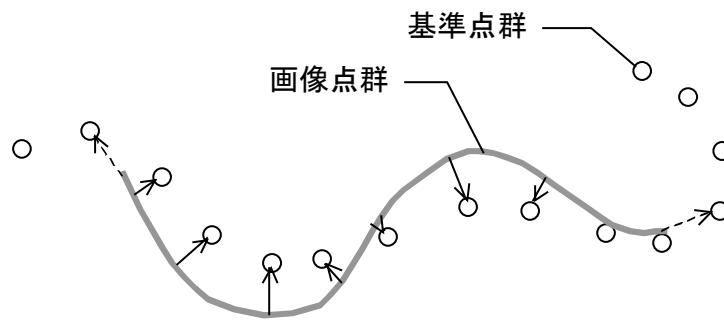


図 4.17 望ましくない対応付け

4.8.2 データ利用のための課題と展望

本手法で得られるデータは密な色彩点群であり、面の情報を持たないため、利用方法が制限される。面の情報は利用価値が高いため、本手法で得られる点群から面情報を得、ポリゴン等のデータ形式で表現できるように変換することが望ましく、不連続な部分やデータ欠落部分の扱いを考慮したアルゴリズム等がその検討課題である。

また、ポリゴン化が成功した場合には、ステレオシーンの重なり部分や平面に近い部分のデータ量を削減することが可能であり、凹凸を保ったままのデータ削減アルゴリズムを検討することにより、より効率の良いデータアーカイブが期待できる。

更に、面の形状を解析し、稜線や特徴点を自動的に抽出することにより、従来考古学で用いられてきた三面実測図を自動作成するという応用が考えられる。こ

の場合、従来の発掘調査で記録されてきた稜線部分等を理論的に定義し、実装することが検討課題となる。

以上に述べたとおり本手法は多くの課題を残してはいるが、複雑な凹形状をした遺構を実際に計測した例は他に見られず、今後の更なる改良により考古資料作成への貢献が期待できる。

第5章 結論

近年、平板測量や遣り方測量に代わる新しい測量方法として、トータルステーションによる測量が取り入れられたことは、測量の高精度化と電子化を共に成し遂げられたという面で、考古学界における画期的な前進であったといえる。旧来の考古学的手法では、遺跡・遺構の稜線部分をなぞるように測量し、結線し、三面実測図を作成する方法がとられてきたが、窯跡や横穴墓のように複雑な立体構造をしている場合は、そのような図化方法は困難を極め、写真撮影のみにとどまる例も多かった。

トータルステーションの導入により、立体の記述に客観性が加わったが、得られるデータの利用方法は相変わらず三面図作成にとどまり、稜線記述という方法も変わらなかった。もともと稜線が遺構表面に明確に存在しない場合も多く、測量点を測量者が恣意的に決定している面も強い。また、詳細な表面の曲面形状や小さな立体模様までを測量することはできず、考古学的に重要な意味を持つ表面の色彩情報との連携もなかった。

一方、コンピュータビジョン分野における画像計測には様々な計測手法があるが、民生向けの安価な装置のみを用いて立体計測できるという利点を持つパッシブステレオマッチングの方法は、対応点探索が難しく、オクルージョンが起こりやすいという欠点のために、理論は研究されても実際の計測にはあまり利用されてこなかった。ステレオマッチング法に適する計測対象とは、表面に規則性のないテクスチャがあり、鏡面反射のない物体であるが、遺跡や遺構はまさにそれに当てはまる。諸処の欠点はあるが、毎年1万件を超える発掘調査が行われている現在、簡単に手に入る機材のみを用いて高品質なデータを得られる計測方法として、ステレオマッチング法は注目に値する。

本研究では、従来のトータルステーションによる遺跡測量の欠点を補うため、ステレオマッチングによる画像計測を取り入れ、両者の利点を生かす方法でデータ統合を行った。この手法では、ステレオ画像取得時の撮像系パラメータを詳細にする必要がなく、トータルステーションで計測した点群の座標値をもとに非線形最適化処理を行うことにより修正し、最適解を得る。この最適化処理では、大まかに算定したカメラパラメータと高精度に測量された3個のマーカ点を基準に初期解を決定するため、距離画像のパッチ全体とワールド座標点群とは大まかに一致しており、いわゆる距離画像パッチのグローバルレジストレーションは必要ない。よって必要な処理は線形探索可能なローカルなファインレジストレーションのみでよく最適解に至ることができ、局所解に陥らずに収束する。

本研究で提案した手法により従来の画像計測分野では計測されたことのない複雑な凹凸形状の遺構の実測を行い、再構成された点群を様々な解析表示方法で表現し、本手法が有効であることを示した。

また、これまで表現し得なかった遺構と遺物の関連について情報を可視化しながら検証することが可能となる。こうした遺構、遺物の3次元計測によって、それを表現する方法も変化し、今後調査報告書とともに遺構、遺物のデータがデジタルデータとして提供されることも考えられる。

今後、こうした遺構群を属性データ別にマッピングすることによって、時期別の掘立柱建造物群の展開状況や地形環境の変遷などを考える重要な研究資料へと発展していく可能性が秘められている。

こうした新しい調査方法は、発掘調査のみならず考古学に新しい展開をもたらすものと考えられる。しかしながら、遺構、遺物の3次元計測については、調査担当者における遺構と遺物に対する関係について深い観察を必要とし、適切なポイントを測量しなければならないことは忘れてはならない。

謝辞

研究を進めるにあたり、指導教官として始終暖かくご厚情に満ちた御指導を賜り、激励してくださった奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科の千原國宏教授に心より感謝申し上げます。ご教示いただきました様々なお助言は、研究生活のみでなく、今後生きてゆく上での非常に有益な拠り所となることを確信いたしております。重ねて御礼申し上げます。

副指導教官として、度重なる機会において多大なる御指導、貴重な御助言をいただきました情報科学研究科の横矢直和教授に心より感謝申し上げます。

常に深い知識と洞察力と熱意をもって研究の方針や内容についての事細かな御指導を賜り、様々な解決策やバイタリティを与えていただきました佐藤宏介助教授(現 大阪大学大学院 基礎工学研究科 システム人間系専攻システム科学分野 知能システム構成論講座 助教授)に感謝申し上げます。特に、様々な分野で活躍する科学研究者と接する機会を与えていただきましたことは、私にとって大変貴重な経験となりました。心より御礼申し上げます。

日頃より研究活動や学生生活についての御指導と暖かな励ましをいただきました先端科学技術研究調査センターの大城理助教授、眞溪歩助手(現 東京大学大学院 新領域創世科学研究科助教授) 陳謙助手(現 和歌山大学システム工学部 デザイン情報学科助教授)に厚く御礼申し上げます。

本件究のきっかけを与えていただき、常に考古学研究者サイドの要望やノウハウをご教授くださり、計測実験にもご協力いただきました岡安光彦氏に深く感謝申し上げます。

情報考古学の先陣としての貴重なご意見とご助言をいただき、また、測定機材の提供をしていただきました堅田直先生(現 帝塚山大学名誉教授)に感謝いたし

ます。

実際の遺構を計測するという貴重な機会を与えていただきました栃木県小山市教育委員会の方々に感謝いたします。

身をもって物事に前向きに取り組む姿勢を教えていただき、常に心の支えとなってくださった堀井千夏氏に心より感謝いたします。

像情報処理学講座助手の安室喜弘氏、金谷一郎氏をはじめとする像情報処理学講座の諸氏には多岐にわたりご協力をいただき、研究活動にブランクがあったにもかかわらず本論文を執筆することができました。心より感謝いたします。

奈良先端科学技術大学院大学に在学中、研究活動や学生生活において公私にわたり暖かく支えていただき、多くの楽しく貴重な経験を与えていただきました像情報処理学講座の友人諸氏、先輩諸氏、歴々の秘書の皆様、筆舌に尽くしがたい感謝の意を表します。

最後に、論文執筆にかこつけて家事がおろそかになる私に深い理解を示し精神的に支えてくれた夫と、始終快く研究を支援し続けてくれた両親に深謝いたします。

参考文献

- [1] 浜田青陵: "考古学入門", 講談社学術文庫, 1976.
- [2] 原田淑人: "日本考古学入門", 吉川弘文館, 1950.
- [3] 小林行雄: "図解考古学辞典", 東京創元社, 1959.
- [4] 斎藤忠: "考古学概論", 吉川弘文館, 1982.
- [5] 角田文衛: "日本大百科全書", 小学館, 1986.
- [6] 鈴木公雄: "考古学入門", 東京大学出版会, 1988.
- [7] 大井晴男: "野外考古学", 東京大学出版会, 1966.
- [8] "埋蔵文化財関係統計資料", 文化庁文化財保護部記念物課, 2000.
- [9] IEEE Computer Society: "Special Issue on Scientific Databases", Bulletin of the Technical Committee on Data Engineering, Vol.16, No.1, 1993.
- [10] J.K. Hong: " A Motion Picture Archiving Technique, and Its Application in an Ethnology Museum", Proc. DEXA92, 1992.

- [11] S. Ueshima, K. Ohtsuki, J. Morishita, Q. Qian, H. Oiso, and K. Tanaka: "Incremental Data Organization for Ancient Document Databases", Proc. of the DASFAA95, Singapore, pp.457-466, 1995.
- [12] 坂村健(編): "DIGITAL MUSEUM (電腦博物館 - 博物館の未来)", 東京大学総合研究博物館, 1997.
- [13] 由良俊介, 鵜坂智則, 坂村健: "デジタルミュージアムマルチメディアMUDのためのブラウザの設計と実装", 情報処理学会論文誌, Vol.40, No.2, pp.661-669, 1999.
- [14] 穴井哲治, 近津博文: "遺物のモデリングとバーチャル博物館への応用", 写真測量とリモートセンシング, Vol.37, No.5, pp.47-53, 1998.
- [15] 吉川義彦: "中世土器の数量化分析", 情報考古学, Vol.1, No.1, pp.3-6, 1995.
- [16] 中園聡: "属性分析と多変量解析を用いた土器の型式分類 その意義と実践", 情報考古学, Vol.2, No.1, pp.1-7, 1996.
- [17] 中橋孝博: "古人骨に対する統計解析法の適用例", 情報考古学, Vol.1, No.1, pp.27-33, 1995.
- [18] 金谷一郎, 陳謙, 千原國宏: "VR 技術を応用した遺物復元システム", 情報考古学, Vol. 3, No. 1, pp. 35-46, 1998.
- [19] 石塚寛, 岡本範之, 小石川剛, 大谷仁志: "遺跡における三次元データの取得と利用について", 情報考古学, Vol.4, No.1, pp.33-40, 1998.
- [20] 門林 理恵子, エドゥアルド ネーテル, 間瀬 健二, 中津 良平: "集落変遷シミュレーションシステム VisTA", 情報考古学, Vol. 2, No. 1, pp.48-55, 1997.

- [21] 小山修三, 杉藤重信: "縄文人口シミュレーション", 国立民族学博物館研究報告, Vol.9, No.1, pp.1-39, 1984.
- [22] 加藤常員, 小沢一雅: "3次元地形データを用いた考古学的仮説の実験的検討", 情報処理学会論文誌, Vol.40, No.3, pp.840-848, 1999.
- [23] 結城宏和, 宝珍輝尚, 郡司達夫: "照度差ステレオ法を用いた遺物の表裏3次元形状の計測", 情報考古学, Vol.6, No.1, pp.28-35, 2000.
- [24] D. Miyagi, T. Ooishi, T. Nishikawa, et al.: "The Great Buddha Project: Modelling Cultural Heritage through Observation", VSMM2000 (6th international conference on virtual systems and multimedia), pp.138-145, 2000.
- [25] 佐藤いまり, 佐藤洋一, 池内克史: "全方位ステレオによる実光源環境の計測とそれにもとづく仮想物体の実画像への重ね込み", 電子情報通信学会論文誌 D-II, Vol.J81-D-II, No. 5, pp.861-871, 1998
- [26] 佐藤宏介, 御崎充, 塚本敏夫, 森下修司: "鑄造遺物の形状マッチングについて", シンポジウム 人文科学とイメージ処理, pp.45-50, 1998.
- [27] 岩崎卓也, 菊池徹夫, 茂木雅博: "考古学調査・研究ハンドブック 第1巻 発掘・調査法", 雄山閣出版, 1998.
- [28] 水尾藤久: "増補 教程 写真測量", 山海堂, 1996.
- [29] 堅田直: "考古学とコンピュータ", 日本情報考古学会第一回大会 予稿集, pp.50-53, 1996.
- [30] "発掘調査支援", <http://www.meidai-k.co.jp/bunka/bunka3.htm>

- [31] Paul J. Besl and Neil D. McKay: "A Method for Registration of 3-D Shapes", IEEE PAMI, Vol.14, No.2, pp.239-256, 1992.
- [32] 福島雅夫, 茨木俊秀: "最適化の手法", 共立出版, 1993.
- [33] "乙女不動原瓦窯跡",
<http://www4.justnet.ne.jp/~wakagi/hakubutukan1.htm>.
- [34] "INTEC Americas Presents Sokkia's Set 6E Total Station",
<http://www.intecamericas.com/SokSet6E.htm>.
- [35] W. Hoff and N. Ahuja: "Surface from stereo: Integrating feature matching, disparity estimation, and contour detection", IEEE PAMI, Vol.11, No.2 pp.121-136, 1989.
- [36] A. Luo and H. Burkhardt: "An intensity-based cooperative bidirectional stereo matching with simulations detection of discontinuities and oclusions", Int. Journal of Computer Vision, Vol.15, pp.171-188, 1995.
- [37] 横矢直和: "多重スケールでの正則化によるステレオ画像からの不連続を保持した曲面再構成", 電子情報通信学会論文誌 D-II, Vol.J76-D-II, No.8, pp.1667-1675, 1993.
- [38] T. Masuda and N. Yokoya: "A Robust Method for Registration and Segmentation of Multiple Range Images", Computer Vision and Image Understanding, Vol.61, No.3, pp.295-307, 1995.
- [39] J.Feldmar, J. Declerck, G. Malandain, and N. Ayache: "Extension of the ICP Algorithm to Nonrigid Intensity-Based Registration of 3D", Computer Vision and Image Understanding, Vol.66, No.2, pp.193-206,

1997.

- [40] Hongbin Zha, Makoto Ikuta, Tsutomu Hasegawa: "Registration of Range Images with Different Scanning Resolutions", Proc. of the 2000 IEEE Int. Conf. on SMC'00
(<http://fortune.is.kyushu-u.ac.jp/~ikuta/SMC00en/SMC.html>), 2000.

研究業績

学術論文

- 永野眞己, 佐藤宏介, 千原國宏: "光波測距と写真測量を組み合わせた遺構全集立体計測とその解析表示", 日本情報考古学会誌 『情報考古学』, Vol.2, No.1, pp.70-81, 1996, 日本情報考古学会 論文賞受賞.

国際会議

- Maki Nagano, Kousuke Sato and Kunihiro Chihara: "Shape Integration of Multi Stereo Images using Surveyed Points for an Archaeological Site", Intl. Conf. on Shape Modeling and Applications, pp.140-148, 1997.
- Maki Nagano, Kosuke Sato and Kunihiro Chihara: "Shape Integration for 3D Reconstruction of Archaeological Sites", International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol.32, Part.5, pp.610-617, 1998.

国内発表

- 永野眞己, 佐藤宏介, 千原國宏: "ステレオ画像処理と光波測量器を用いた遺

構の 3 次元計測", 日本情報考古学学会第 1 回大会発表要旨, pp.15-20, 1996.

- 永野真己, 佐藤宏介, 千原國宏: "ステレオ画像と疎な点群との統合による遺跡形状の取得", 画像の認識・理解シンポジウム(MIRU'96)講演論文集 I, pp.139-144, 1996.
- 永野真己, 佐藤宏介, 千原國宏: "ステレオ画像と計測点群との統合による遺跡の立体計測", 第 39 回自動制御連合講演会(前刷), pp.407-408, 1996.
- 永野真己, 佐藤宏介, 千原國宏: "遺跡の立体計測のための異種データの統合処理", 第 2 回 ASP シンポジウム講演論文集, pp.13-16, 1997.
- 永野真己, 佐藤宏介, 千原國宏: "異種データ統合処理による遺構の立体形状計測法", Proceedings of the 42nd Annual Conference of ISCIE, pp.575-576 1998.