



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	ロバスト特徴抽出と点群・画像の融合処理による三次元計測・モデリングとその遺跡、ビル建築物への応用
Author(s)	高地, 伸夫
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(情報科学)
Dissertation Number	甲第11044号
Issue Date	2013-06-28
DOI	https://doi.org/10.14943/doctoral.k11044
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/53209
Type	doctoral thesis
File Information	Nobuo_Kochi.pdf



博士論文

**ロバスト特徴抽出と点群・画像の融合処理による三次元計測・モデリングと
その遺跡、ビル建築物への応用**

高地 伸夫

2013 年 6 月

北海道大学 大学院情報科学研究科
システム情報科学専攻

本論文は北海道大学大学院情報科学研究科に
博士（情報科学）授与の要件として提出した博士論文である。

高地 伸夫

審査委員：	主査	金子	俊一	教授
	副査	金井	理	教授
		田中	孝之	准教授

ロバスト特徴抽出と点群・画像の融合処理による三次元計測・モデリングとその遺跡、ビル建築物への応用

高地 伸夫

概要

本研究は、三次元計測のためのロバストステレオマッチング法の開発と、デジタル写真測量法とレーザー計測法を融合させ、遺跡や建築物の三次元計測、モデリングを高精度かつ自動的にを行うことを目的とする。

そこで課題となるのは、照明変動やオクルージョン、幾何学的変形に強い自動ステレオマッチング法である。そして特徴のないシーンの画像間のステレオマッチング（左右画像の対応点探索）と標定（カメラの位置と姿勢算出）、レーザースキャナから取得された三次元点群と画像から計測した三次元点群との位置合せである。

画像間のステレオマッチング法には、照明、オクルージョン、そして変形にロバストな拡張 **TIN-LSM** 法を開発する。この手法は、**OCM**（方向符号マッチング）法により得られた三次元データを粗密探索過程で **LSM**（最小二乗相関）法に統合することにより、高速かつ高精度な自動三次元計測を行うものである。ロバストステレオマッチング法はマネキンを計測し、**0.26mm** の高精度を得た。さらにこの性能評価を画像計測だけで実在するギリシア共和国とトルコ共和国の遺跡に適用して行い、作成図面と比較して **10mm** 以内という十分実用的な結果を得た。

次に、特徴のないシーンに対応するため、ステレオマッチングのための新しいロバストエッジ抽出法を検討した。それは、直線エッジの抽出により自動標定を行い、カメラ画像からエッジ特徴を利用してモデルを作成し、カメラ画像とレーザースキャナ点群からの三次元エッジにより位置合せを行うものである。

この成果として、撮影から三次元モデル統合まで計測機器分解能（**4mm**）と同等な高精度自動計測を達成し、画像的特徴（テクスチャ）のない建物形状をエッジ特徴により表現可能とした。

キーワード： 3次元計測，ステレオマッチング，方向符号照合，直線エッジ抽出，デジタル写真測量，地上据え置き型レーザースキャナ，点群処理，位置合せ、モデル統合

3D Measuring and Model Integration of Point Cloud and 2D Images through Robust Feature Detection, and Their Application of Architecture and Archeological Ruins

Nobuo Kochi

Abstract

The purpose of this study is the development of a robust stereo-matching method for 3D measurement and to integrate a digital photogrammetry and a laser metrology. That is, it is performing the automatic 3D measurement and the modeling of architecture with high precision from the point cloud of Terrestrial Laser Scanner (TLS) and Camera's Images. Here the problem is (1) to make robust stereo-matching for lighting effects, occlusions and geometric distortions, (2) to make stereo-matching in the scene where there is no feature, (3) to make orientation, and (4) to register the 3D point-cloud obtained by TLS and the 3D data obtained by the digital camera. In order to solve these problems, at first, as for the stereo-matching process, (1) we have developed a robust system which is called "Extended TIN-LSM" method, as it takes over the strong capability in detecting lighting effects and occlusions as well as geometric distortions. This new system, which enable us to obtain highly accurate 3D measurement by LSM (Least Square Matching) with the 3D data obtained by OCM (Orientation Code Matching) integrated into Coarse to Fine Process. The obtained stereo-matching accuracy was 0.26mm, when we experimented on a mannequin. And when we actually experimented on the archeological ruins in Greece and Turkey, the accuracy was within the range of 10mm, compared with their blue-print plan. Its practicality and efficiency was thus confirmed. And then, we have developed a new robust Edge-Detection method for Stereo-Matching, which enabled (2) Automatic orientation by detection of the line edges, (3) Production of model from the camera's images with edge features, and (4) Registration of corresponding points between the 3D edges of point cloud obtained from the TLS and from the 3D edges of camera's images. From these studies, we attained the high accuracy (4mm) which is the resolution of measuring instruments and the automatic measurement through photographing to the 3D Model Integration, and enabled expression of the shape of a building without texture by using edge features.

Keyword : 3D Measurement, Stereo Matching, Orientation Code Matching, Edge Detection, Digital Photogrammetry, Terrestrial Laser Scanner, Point Cloud Processing, Registration, Model Integration

目次

目次.....	i
図目次.....	iii
表目次.....	v
1 章 序論.....	1
1.1 背景と目的.....	1
1.2 本研究における課題と関連研究.....	3
1.2.1 デジタル写真測量法とステレオマッチング法.....	3
1.2.2 特徴抽出に基づく建築物のための点群と画像の融合処理.....	6
1.3 論文の構成.....	11
2 章 ロバストステレオマッチング法を用いた遺跡の三次元計測.....	12
2.1 計測原理.....	12
2.1.1 計測処理の流れ.....	12
2.1.2 システム構成.....	14
2.1.3 内部標定（カメラキャリブレーション）.....	15
2.1.4 外部標定（オリエンテーション）.....	18
2.1.5 三次元計測.....	21
2.1.6 モデル作成、出力.....	21
2.2 ロバストステレオマッチング法による自動面計測.....	22
2.2.1 OCM 法によるロバストステレオマッチング.....	22
2.2.2 拡張 TIN-LSM 法.....	24
2.2.3 結果評価.....	30
2.3 精度評価.....	32
2.4 遺跡計測と実用性能評価.....	34
2.4.1 ギリシアライオン彫刻像の全周計測.....	34
2.4.2 ギリシア教会の全周モデリング.....	36
2.4.3 トルコビザンツ帝国聖堂の 3D モデリング.....	38
2.4.4 床面のオルソモザイク.....	40
2.4.5 計測結果まとめ.....	42
2.5 本章のまとめ.....	44
3 章 ロバスト特徴抽出に基づく点群・画像融合処理による建築物三次元モデリング.....	45

3.1	提案手法.....	46
3.2	レーザー点群処理による三次元エッジ抽出.....	49
3.3	画像エッジマッチングによる三次元エッジ抽出、モデル作成.....	50
3.3.1	エッジ抽出.....	50
3.3.2	エッジ抽出による自動標定.....	54
3.3.3	エッジマッチングによる三次元エッジ抽出、モデル作成.....	57
3.4	三次元エッジによるモデルの位置合せ.....	61
3.4.1	手法概要.....	61
3.4.2	三次元エッジによるスケール調整、位置合せ.....	61
3.4.3	モデル統合.....	66
3.5	実験結果評価.....	67
3.5.1	直線エッジ抽出法評価.....	67
3.5.2	自動標定用特徴点抽出法評価.....	69
3.5.3	位置合せ精度評価.....	72
3.5.4	計測データ取得、解析時間.....	75
3.6	本章のまとめ.....	76
4 章	総括.....	77
4.1	本研究について.....	77
4.2	まとめ.....	78
4.2	今後.....	79
	謝辞.....	80
	参考文献.....	81
	研究業績目録.....	90

图目录

图 1.1	Our new method.....	7
图 2.1	Stereo Method.....	13
图 2.2	Measurement Flow.....	13
图 2.3	Scale Bar, Reflective target , Color-Coded target	14
图 2.4	Camera Calibration	17
图 2.5	Rectified Image.....	18
图 2.6	Relative Orientation.....	20
图 2.7	Orientation Code.....	22
图 2.8	Extended TIN-LSM.....	24
图 2.9	Local Coordinates of Affine Transformation	26
图 2.10	TIN-LSM.....	29
图 2.11	Initial Value by Manual and OCM.....	31
图 2.12	Initial Value by Manual and OCM.....	31
图 2.13	Measurement result.....	31
图 2.14	Error Distribution.....	33
图 2.15	Measurement Result.....	33
图 2.16	Lion Statue.....	35
图 2.17	Byzantine Church of Agia Samarina.....	37
图 2.18	3D model and digital ortho-photo image	37
图 2.19	Photographed and Measured Drawing	39
图 2.20	Measurement Result.....	39
图 2.21	Ortho-Mosaic.....	41
图 3.1	GLS-1500	46
图 3.2	A building to be measured	47
图 3.3	Our new method.....	47
图 3.4	Flow chart of point cloud processing.....	49
图 3.5	Point cloud data, segmentation result, 3D edge detection result.....	49
图 3.6	Corner image of staircase, corner detection.....	51
图 3.7	Edge detection.....	52
图 3.8	Edge detection result: Canny Detector, Our system	53

☒ 3.9	Processing flow of edge detection for automatic orientation.....	56
☒ 3.10	Result of feature points detection.	56
☒ 3.11	Flow of Matching Process	59
☒ 3.12	Parallax Estimation.....	59
☒ 3.13	Matching Result	60
☒ 3.14	Scale adjustment and registration by 3D edges.....	62
☒ 3.15	Flow of registration by 3D edge.....	63
☒ 3.16	Glance at 3D Edge Matching	63
☒ 3.17	3D Edges.	66
☒ 3.18	Model integration.....	66
☒ 3.19	Comparison of Edge detection.....	68
☒ 3.20	Distribution of feature points.....	70
☒ 3.21	Result of SIFT.....	71
☒ 3.22	Assessment of Accuracy.....	72
☒ 3.23	Result of registration	74

表目次

表 2.1	Comparison of measurement accuracy (unit : mm).....	32
表 2.2	Measurement condition and result.....	43
表 3.1	Specification.....	46
表 3.2	Comparison of SIFT and our method	70
表 3.3	Accuracy (unit: mm).....	72
表 3.4	Data acquisition and analysis time.	75

1章 序論

1.1 背景と目的

近年の急進的なデジタル化及びコンピューターパワーの飛躍的増大により、遺跡調査、土木における自動化施工、建築における BIM (Building Information Model)、そして工業計測など、様々な分野のデータを比較的短時間で三次元化し処理することが可能となってきた。これらから、対象物を三次元化し計測、認識、処理する研究開発が活発化され、新たな方式による新市場が模索検討されている。対象物を三次元データ化することの利点は、実物データの記録だけでなく、三次元データを計算機上で再構築し、可視化することによる設計や施工、修復、劣化診断、経時変化等への対応の具体的検討、シミュレーション、疑似体験、進捗状況の把握、見積もりなど多岐にわたる。例えば、遺跡調査や建築物関係では、考古学や建築学の研究だけでなく、図面化や 3D データ再構築を行い修復、改修、縮小モデル作成等行っている[31~33]。そして、デジタル博物館や VR (Virtual Reality)、MR (Mixed Reality)、AR (Augmented Reality) における仮想体験など新たな分野が構築されつつある[34~36]。

その一方、BIM では、新築や既存あるいは建築中、改修中の建物においてビルの企画/計画、設計、施工、改修、維持管理まで建物のライフサイクル全体にその三次元データの活用が期待されており、様々な検討、試行が始まっている[37~39,53]。

このような背景にあって、筆者らの研究開発の目的は、画像計測（デジタル写真測量）技術やレーザー点群処理技術の研究開発を推し進めることにより、誰もが扱えるように自動で高精度かつ高速でロバストな三次元計測処理技術を構築、提案し新市場を創出することである。そのために、筆者は、様々な対象物に対し画像による三次元計測を行ってきた[1~5]。

本研究では、それらから最初に、従来不得意であった照明、オクルージョン、幾何学的な変形に対しロバストな自動ステレオマッチング法を研究開発し、遺跡等の建造物を三次元計測、モデリングし実用化することを目的とする。そして遺跡だけではなく、ビルなどの特徴のない建築物をターゲットとして、画像計測技術とレーザー点群処理技術の長短を検討し、その融合を図ることで新しい計測法を開発することを目指す。それは、地上据え置き型レーザースキャナ (TLS: Terrestrial Laser Scanner) により高密度な点群データを取得し、スキャン時に動くものがノイズやオクルージョンとなる箇所や、小スペース部分、

入組んだ場所などを、設置せずに数分で撮影できるハンディなデジタルカメラの三次元計測で補い、双方の計測モデルを位置合せして統合し実寸の三次元モデルを構築する、というアプローチである。

この際の両手法の重要な共通課題は、この技術の普及の妨げとなっている煩雑なマニュアル操作を自動化することと、応用分野による計測精度の確保適合である。

画像計測では、まず筆者らの開発したステレオマッチングによる 3D 計測手法 (TIN-LSM 法) の粗密探索過程に方向符号マッチング法 (OCM 法) を統合した処理を構築し、照明変動やオクルージョンに加えて幾何学的変形にもロバストである拡張 TIN-LSM 法を開発し自動化と高精度化を図り、遺跡を対象物として実用性能を評価する。

そして、次ステップとして、それらをベースにした画像エッジを用いたマッチング法を新たに検討し、直線エッジ抽出による標定の自動化、模様のない対象物の表現を可能にする三次元モデル作成を行う。

レーザー点群データ処理技術には、既開発の稜線抽出処理を利用し、レーザー点群モデルと画像計測モデルから抽出した三次元エッジによる自動位置合せ手法を開発し、両モデルを統合してオクルージョン部を補間した全体の三次元モデルを作成する。

この際に、工程の自動化と両モデル間の位置合せ精度が課題となるため、それらを考慮した方法の開発を目指すことになった。

1.2 本研究における課題と関連研究

1.2.1 デジタル写真測量法とステレオマッチング法

はじめに本研究における三次元計測の重要な手法である (1) デジタル写真測量 (画像計測) 法について、そして次にその核となる (2) ステレオマッチング法、について説明する。

(1) デジタル写真測量法

筆者らは、パッシブ法であるデジタル写真測量法を利用した三次元画像計測システムを研究開発している。それは、主に小型 (数 10cm) ～中型 (数 m) ～大型 (数 10m 以上) 対象物を、航空機やヘリコプタからの地形計測[77,78]、地上での遺跡計測[8,25,26,28～30]、土木施工現場での計測や災害計測[79]、さらには工業計測[5]、室内計測[80～82]、車体計測[83,84]、そして人体計測[85～87]や脳機能計測のための頭部計測[88,89]など、数 100m～数 m～数 10cm の多岐領域にわたって計測する。

デジタル写真測量法による三次元計測は、デジタルカメラ 1 台と PC に搭載したソフトウェアで計測が可能のため可搬性に優れている。そして領域の大小によらずに、撮影できるものは三次元計測できる可能性がある。さらに撮影された写真自体に記録性があり、記録された画像を見ながら計測することができ、そして作成された三次元モデル、あるいは取得された点群に 1 対 1 で画質の良いテクスチャ (実画像) を貼り付けることが可能である。

その精度は撮影条件、すなわち撮影距離 H 、基線長 (カメラ間距離) B 、画面 (レンズ焦点) 距離 f 、センサの画素サイズ Δp により決まるため、要求する精度に応じて撮影方法を決定することが可能である。例えば、2 枚の画像から計測する場合、以下に示す式(1.1)により 1 画素の平面分解能 Δ_{xy} が得られ、式(1.2)により奥行分解能 Δ_z が得られる。

$$\Delta_{xy} = \frac{H}{f} \times \Delta p \quad (1.1)$$

$$\Delta_z = \frac{H \times H}{f \times B} \times \Delta p \quad (1.2)$$

課題は、標定と面計測 (ステレオマッチング) の自動化である。この二つの処理はいまだにマニュアル操作が介在し、処理する画像枚数が増えたときに無視できない作業量となる[7]。そしてこのことが画像計測の普及を妨げている要因ともなっている。

標定は、カメラの内部パラメータ (内部標定要素: 画面距離、画面中心、レンズ歪曲パ

ラメータ)、カメラの外部パラメータ(外部標定要素:3軸の位置と姿勢)を求める作業および解析処理のことで、内部標定はカメラキャリブレーションとして事前に行うことで対応可能である。外部標定に関しては、以下のようにして対応している。外部標定要素算出には、左右画像上で6点以上の対応点が必要であり、画像の枚数が増えるほどマニュアル処理では効率が悪くなる。我々は、ランドマークなどのターゲットが設置できない対象の計測に半自動関連処理を開発している[8]。これはステレオ計測の際の左画像上の特徴点の上にマウスカーソルを置くと右画像から対応点を自動探索する。これにより全自動化はできなくとも、対象物に特徴点さえあればターゲットを貼れない計測が省力化できる。ターゲットが設置できる場所では、自動検出ソフトウェアを用いてコード化ターゲットを検出し、対応点を求め標定ならびに三次元計測を全自動で行うことが可能である[9,10]。さらに、他のアプローチとして、ターゲットを貼る必要がない動画像を利用した自動標定、三次元計測法も研究開発している[90~95]。

面領域の自動三次元計測として利用されるステレオマッチング法の問題は、未知の標定要素や、対象形状の面の傾きや高低差などに起因する様々な幾何学的歪みが計測精度を悪化させ、ひいてはミスマッチングをひきおこすことである。

筆者らは、この問題を解決するために、TIN (Triangular Irregular Network) [11]を形成しその内挿処理を利用したLSM(最小二乗相関)法を開発した。LSM法[12]は、探索領域を変形しながら誤差が最小となる点をマッチング点とする方法である。LSM法は、変形しながらマッチングを行うために計算コストが高く、初期値がないと解が収束しないことがある[13]。これらの欠点を補うために、我々は粗密探索過程をTIN構築とLSM法にとりいれ、初期値取得と高速化、高精度化を同時にはかり実用化した(以降TIN-LSM法[4,30]と呼ぶ)。しかしこの方法だけでは、ステレオマッチング開始時の初期値が取得できないため、標定点やステレオマッチング範囲を決定するための計測範囲をマニュアル、または半自動にて取得し初期値として利用していた。しかしながらこの方法は、撮影枚数が多くなった場合にその労力は無視できず効率化を妨げていた。これらのことから、ロバストなステレオマッチング法である方向符号化マッチング(OCM)法[14]を導入し、ステレオマッチング範囲を自動で決定するとともにLSM法を開始する際の正確な初期値を取得し、かつ粗密探索TIN-LSM法へと処理を連結させ、各粗密探索過程でOCMの計測値をTIN内挿してマッチングを行う拡張TIN-LSM法[49]を開発することで全自動化をはかった。

初期値をOCM法で求めることの利点は、そのロバスト性により照明変動やオクルージョン等に左右されず正確な対応点が得られることである[15]。この初期値を各粗密探索過程に組み込む拡張TIN-LSM法でさらに画像変形にロバストな高密度、高精度な自動三次元計測を可能とし実用化を達成した。

(2) ステレオマッチング法

左右画像から三次元計測を行うステレオマッチング法では、特徴ベースのマッチング法と領域ベースのマッチング法がある。特徴抽出ベースによるステレオマッチング法としては SIFT 法[20]や SURF 法[21]、それらを改良した様々な方法が研究されている。特徴ベースのマッチング法は、画像変形に強く、大量の画像をマッチングするのに適する。しかし、特徴抽出できず対応付けられない領域が生じるため、密に計測ができず粗になってしまうという欠点がある。例えば、Jazaeri ら[7]は、特徴ベースのマッチングにて、高精度かつ高速化を図っているとの報告があり、その精度は、対象物の形状、大きさによるが、相対精度として $1/15,000$ との報告がなされている。しかしながら従来のマッチング法の画素分解能 (0.3~0.6 画素) と変わらず、エラー点数が多く場所により点群が粗となっており、補間処理による面作成を行っている。また伊藤ら[22]は、計測点密度が疎になってしまうという欠点を補うために、特徴ベースマッチングと領域ベースマッチングを組み合わせた方法を検討し、高密度かつ高精度化を図っている。その計算コストから高速化を検討中である。

領域ベースのステレオマッチング法は、画像全体に分布する密な対応点を得ることが可能である。しかし、計算時間が長いことと、大きな画像変形に対応できないことが従来からの欠点である。たとえば、正規化相関法がよく利用されているが、これは、対象物の幾何学的変形への対応が困難である。

地形などの射影歪や幾何学的歪に対応できる最小二乗マッチング (LSM) 法[12,13]と呼ばれる手法がある。LSM 法は、マッチングウィンドウの位置および形状を計算によって決められるパラメータとし、マッチングウィンドウとテンプレート濃淡の差が最小になるまでマッチングウィンドウの位置と形状を変化させる。そのため、計算コストが高く、かつ照明変動やオクルージョンに弱い。また初期値がない場合は、一定時間内に解が収束しなかったり、ローカルミニマムに解が落ちたりすることが多い[13]。

LSM 法と類似な方法として服部ら[23]は、局所アフィン変形ウィンドウを利用した方法を開発している。この方法は、マッチングウィンドウの変形パラメータを求めたい点の周囲の輝度変化から求め、一意に解を求めているため繰返し演算が不要なくマッチングそのものは高速である。しかしながら、変形パラメータをマッチング点の周囲の輝度により推定しているため精度が保証されないと考えられる。

Bethmann, Thomas ら[74~76]は、LSM 法の前段に正規化相関法を 2 段にしてフォワードとバックワードマッチングを取り入れた方法を提案し[74]、さらに LSM 法の変形をアフィン変形、射影変形、多項式変形にて行い、それぞれ、0.205mm、0.165mm、0.077mm、と高精度化している[75,76]。用途は車体等の工業計測としており、ステレオカメラ構成 (2

台固定) にして計測を行っている。オクルージョンに対しては、車を対象としているため、CAD モデルからの 3D データを事前知識とし利用し、三次元空間内に既知の形状と位置の情報が必要である[76]。この手法は、ステレオマッチングの高精度化として興味深い。

我々は、LSM 法の課題を解決させるため、方向符号マッチング (OCM) 法を TIN-LSM 法に組み込んだ拡張 TIN-LSM 法を開発し、照明変動やオクルージョンと幾何学的な変形に強い新たな領域ベースのステレオマッチング法を開発して自動化を行い、そのマッチング性能評価を行いさらに実用性能評価を遺跡計測にて行った。

1.2.2 特徴抽出に基づく建築物のための点群と画像の融合処理

本節では、筆者らの研究課題である点群と画像の融合処理に対し、(1) デジタル写真測量法とレーザースキャナによる点群処理、と題して両手法の課題について説明し、次に、(2) 点群と画像の融合処理技術の課題と戦略、として両手法を融合する際の課題と戦略について述べる。そしてその各項目である、(2.1) 直線エッジによるステレオマッチング、(2.2) 自動標定用特徴点取得とモデル作成、(2.3) TLS により取得された点群データと画像データとの位置合せ、についてそれぞれの関連研究と対応について説明する。

(1) デジタル写真測量法とレーザースキャナによる点群処理の課題

筆者らは、デジタルカメラを用いたデジタル写真測量法 (Digital Photogrammetry) によるステレオマッチング法とそのシステムを研究開発しているが、計測対象である中型～大型領域の計測に利用されているものとして、アクティブ法であるレーザースキャナがある。計測精度は数 mm 程度であるが、大量の三次元点群が自動で得られる。そこで我々は、地上据え置き型レーザースキャナ (Terrestrial Laser Scanner: TLS) により取得された大量の点群データを処理する技術を開発している。すなわち取得した点群データのセグメンテーション、ラベリングを行い、面と稜線 (三次元エッジ) の抽出を経て更に図面化の補助や抽出した面を利用した位置合せを行う方法を開発している[41～46]。

一般に TLS は、一度に数千万点から 1 億点までの点群を取得できることから大量高密度な点群データの自動取得に向いており、計測された点群データに対応した画像が取得できる。また建築物の側面など画像的 (テクスチャ) 特徴のない箇所の計測も可能である。スキャン密度を高く設定し、適切な位置に設置して計測すれば、複雑な形状の詳細な三次元モデルの作成も可能である。しかしながら、点群データ取得に時間がかかる (計測範囲、密度によるが通常数十分～数時間) のが問題である。さらに建築物など対象となるものの三次元計測に際して、通行人や車、木々の揺れなどがノイズやオクルージョンとなり、対象となる部分の点群データに欠測部分が生じる、といった問題がある。

一方、デジタルカメラによる三次元計測（デジタル写真測量法）は、カメラで瞬時に撮影するので車や通行人などの影響をうけない。また、小スペースの箇所や入りくんだ箇所も設置することなく撮影でき簡便である。しかしながら短所は、画像的（テクスチャ）特徴の少ない部分の計測が困難であり、標定（カメラの外部パラメータを求める処理）を行わなければ三次元モデルを作成できないことである。更に実寸計測には三次元基準点もしくは基準となる長さの情報が必要である。

これら両手法の短所を補い長所を組み合わせ建築物の三次元モデルを作成することを検討する。すなわち、TLS を据え置くことで数千万点の高密度な点群データを一度に取得し、そのオクルージョンとなる部分や、小スペース部分、入組んだ場所などを、数分で撮影できるハンディなデジタルカメラの三次元計測で補う。そして双方の計測データを位置合せ統合し、基準となる長さを TLS から得ることで実寸の三次元モデルを構築する、というアプローチである（図 1.1）。

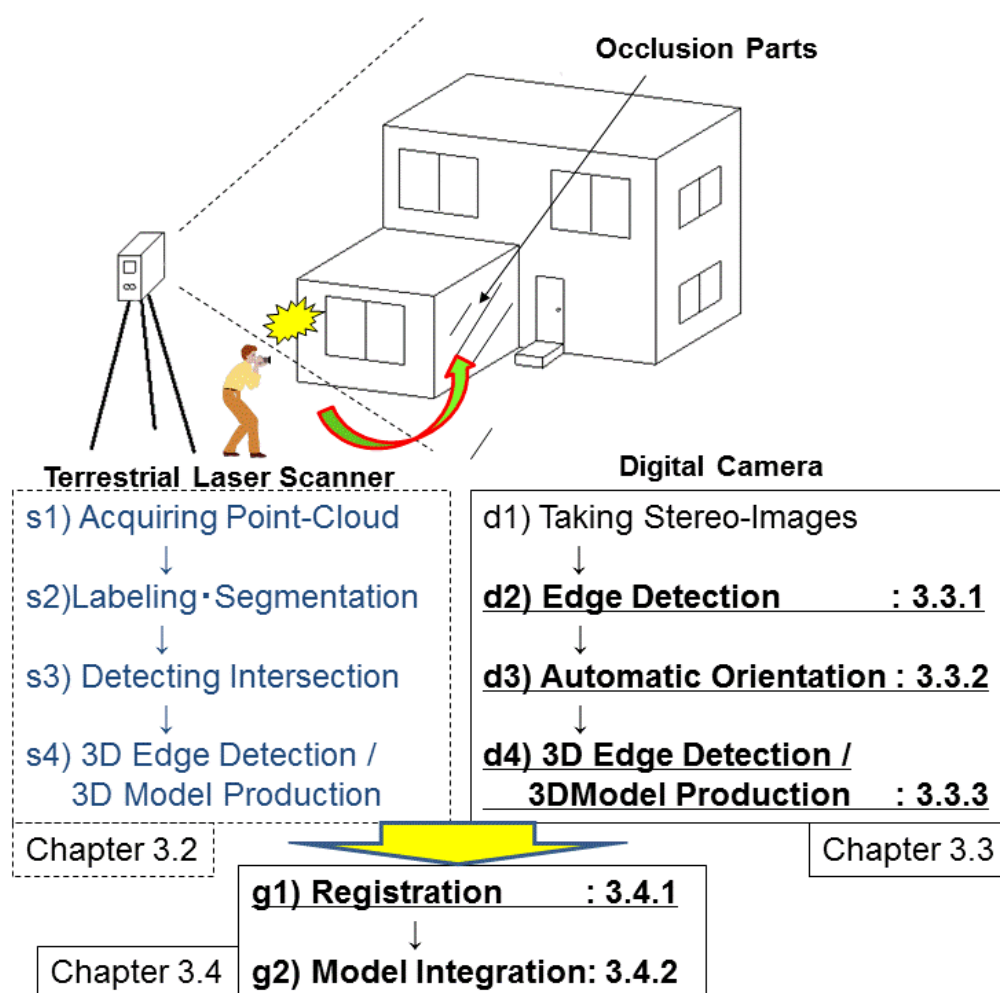


図 1.1 Our new method.

(2) 点群と画像の融合処理技術の課題と戦略

この際に課題となるのは、①特徴量として信頼性の高いステレオマッチングのための直線エッジ抽出 (図 1.1 d2)、②自動標定用特徴点の取得とモデル作成 (図 1.1 d3、d4)、そして③TLS から取得された点群データと画像から計測した三次元データとの自動位置合せである (図 1.1 g1)。そこで、建築物は様々なエッジの直線成分から構成されることに着目して①~③の課題に対して検討を行った。そして信頼性の高い直線エッジ抽出法としてエッジどうしのマッチングを行うのではなく、エッジの特徴量を直線エッジ端点とし、確実に抽出できる端点のみをマッチングに利用する戦略とした。すなわち、本手法は、信頼性の高い高精度なモデル合成を行うことに主眼をおき、建築物のエッジの直線成分をできるだけ抽出して形状を表現しようとするものではない。また、本論文では、モデル間の位置合せに利用する三次元エッジは鉛直方向の三次元の直線エッジであり、自動標定及びモデル作成では、二次元の直線エッジ (端点) の特徴量を利用して視差推定を行い、この視差推定量をもとに確実に求められた対応点を 3D エッジを構成する点として処理する。

(2.1) 直線エッジによるステレオマッチング

エッジ特徴量そのものや line segments (本論文では直線エッジと呼ぶことにする) といった高次の特徴量を利用したステレオマッチング法が古くから提案されている[55~59]。これらの方法は直線エッジの端点や中点を利用し、距離や類似度、共線条件、直線の方向などを利用し対応点を求めるものであるが、本質的な欠点として、(a)マッチングに使うエッジ端点や中点に曖昧さやノイズを含んでいると信頼する結果が得られない、(b)対応する直線が二つ以上に分断されると対応点が求まらない、(c)エピポーララインと平行に近いエッジは原理的に対応点が正確に求まらない、といった問題がある。

Deriche ら[58]は curve segments という特徴量、すなわち曲率の高い点を曲線から抽出し対応をとる方法を提案している。これは上記欠点を克服するため対象までの距離や形状の連続性を使い、さらにミスマッチングの低減に三眼でのマッチングを提案した。しかしこの手法は適応できる視野が狭いと述べている。

(a)~(c)の欠点を幾何学的だけでなくアルゴリズム、遮蔽などの物理的要因や照明、反射などの観点から分析し、Zhang[59]は、端点が不安定であることから直線どうしのオーバーラップの最大な部分を利用し、エピポーララインと向きが近いものは捨てる方式としたが、画像中に大量の直線成分 (例えば 50) が必要である。同様な観点から、Karimian ら[60]は、直線のオーバーラップ率とコントラストの概念を導入し、ミスマッチング低減に視差推定を用いてその結果は 96%としている。OK ら[61]は、いまだにこれら問題はチャレンジ

ングな領域であり、数多くの研究がなされているが解決されていないと述べており、彼らは(c)の問題に対して、エピポーラと直線の角度が 10 度以下の場合、領域に重みをつけ仮想三次元点を設定することで高さを推定し解決しようとしている。これらの研究は、直線どうしの厳密な対応を求めようとしている。

我々は高精度なモデル統合を行うため、建築物の直線成分を利用するが、確実に対応が求まらない不確かな点は利用せず、ステレオマッチングをサブピクセル精度で行う方針にした。具体的には、(a)の課題に対し、エッジ強度と長さを利用することでノイズ除去し、曖昧さにはコーナーを除去することで対処する方法を新たに提案する。そして(a)~(c)に対し、各マッチングの前段に視差推定を入れることで不確かな対応を削減させた。(c)に対しては、エピポーラと直交する鉛直方向の垂直な直線エッジ上の端点を利用することで対応した。

(2.2) 自動標定用特徴点取得とモデル作成

多視点ステレオや自動標定などへの応用[22,48]を中心として、SIFT[20]、SURF[21]などの特徴ベースの手法が利用されている。これらは、スケール変化や回転に強い有用な手法であり、テクスチャが豊富な対象物における比較的粗な特徴点に基づく処理に向いている[22]。SIFT 法は原理上キーポイントの設定を開口やノイズの問題から、エッジ上の点と DOG (Differential of Gaussian) 出力の小さい点を主曲率とコントラストを用いて削除する[107]。この原理から、建築物は多数の直線成分から構成されるため、本手法のモデリングには向いていないと考えられる。また、特徴点群の偏在が生じ、標定精度が確保できないとの報告もある[48]。そこで前述の直線エッジ抽出手法をベースに、新たに計測対象に対して画像全体から特徴点を抽出した標定点推定法を開発した (図 1.1 d3)。また、特徴点の少ない建築物から直線エッジ抽出法の直線エッジを利用することで、形状の表現を可能とするエッジマッチング法を検討し、既開発の独自の高密度形状再構成が可能な拡張 TIN-LSM 法に組み込むことにより三次元モデルを構築した (図 1.1 d4)。

(2.3) TLS により取得された点群データと画像データとの位置合せ

点群を二次元画像化したレンジ画像と、デジタルカメラの画像をマッチングさせ、対応点の座標から標定を行い、点群データと画像データの位置合せを行うという試みがなされている[48,50~52]。マッチング手法には、特徴抽出ベースの SIFT が利用されているが、この方法は TLS が取得したレンジ画像と大きく向きが異なるとミスマッチングが多く標定ができないとの報告がある[48]。

さらに、Becker ら[50]は、撮影距離 50m でデジタルカメラ NikonD2x に 20mm レンズを装着した場合、TLS (Leica HDS3000) に対しカメラ位置を 1m 以内で撮影しないと精

度よく計測できない（良好な対応点が得られない）と報告している。また、レーザースキャンの計測密度が低いと信頼できる標定点が自動で取得できない、といった問題があり結果として半自動、またはマニュアルにて標定しているとの報告がある[51,52]。

他の手法として、三次元点群データと二次元画像のマッチングを行った手法が多数提案されている。その代表的なものとして、画像をベースにした Photo Tourism[62]、Samantha[63]やランドマークデーターベース[64]を利用した手法がある。画像だけを利用した方法は、画像から点群データを生成させるため誤差が累積され精度が保証されず[62,65]、マニュアルで実寸法を与える必要がある。

またランドマークを利用し自動化と高精度化を行った代表的なものとして Taketomi ら[64]の方法がある。彼らは高精度化のために TLS から取得した点群を利用したが、取得画像とデーターベース上のランドマークとのマッチング誤差が混入し、精度は屋外で 200mm、屋内で 50mm と報告している。これら手法の目的は、AR や MR に代表される三次元空間のナビゲーションや疑似体験、ビジュアライゼーションであり、それら用途には利用可能と考えられるが、BIM 等の利用には精度不足である。

これら課題を解決するために、我々は三次元エッジを画像データ、点群データ双方から抽出し自動位置合せする手法を新規に提案する（図 1.1 g1）。さらに詳細な位置合せには上記結果を初期値として ICP 法[54]を適用した。ある程度精度のよい初期値がないと処理コストの点から実用的でないため、上記アプローチの後採用する。

本提案手法の利点は、両データから不確かなエッジ端点の厳密な対応を最初から求めずに、各モデルの精度を保ちつつ対応する直線エッジがどの直線エッジであるかを探索し位置合せすることである。このことによりオクルージョンによるエッジ端点の隠れや、スキャン密度によるエッジ端点の消失、精度劣化などの少ない高精度（計測機器分解能と同等）な TLS 点群データと画像データの位置合せを可能とした。

1.3 論文の構成

本論文の構成は以下の通りである。

- 1 章 本研究の背景と目的、課題と関連研究について述べる。
- 2 章 三次元計測を一貫としてあつかえる画像計測システムの計測原理を述べ、2 章のメインである新たな照明変動、オクルージョン、幾何学的な変形に強い領域ベースのロバスト自動ステレオマッチング法について説明し、その後、実用性能評価としてマッチング精度と遺跡計測に利用した実応用例について検証評価する。
- 3 章 2 章にて提案したステレオマッチング法を発展させ、建築物は様々なエッジの直線成分から構成されることに着目した新手法を検討し、レーザ一点群処理による三次元エッジ抽出、直線エッジ抽出方法と自動標定、三次元エッジ抽出、モデル作成について検討する。さらに点群データと画像データの三次元エッジの位置合せについて検討提案する。そして 3 章の最後に、実験結果評価としてエッジ抽出法と自動標定用特徴点抽出、モデルの位置合せ精度と計測データ取得、解析時間についてそれぞれ評価検証する。
- 4 章 本研究の総括を行う。本研究により得られた知見、展望、所感について述べ、まとめを行う。

我々の論文がこの分野に対して貢献するのは次の点である。すなわち、照明、オクルージョン、幾何学的変形にロバストなステレオマッチング法（2.2 節）とその実用性能評価（2.3, 2.4 節）、信頼性の高いステレオマッチングのための直線エッジ抽出法（3.3 節）による自動標定とモデル作成、三次元エッジによるレーザ一点群モデルと画像計測モデルの位置合せ法（3.4 節）とその性能評価（3.5 節）である。

2章 ロバストステレオマッチング法を用いた遺跡の 三次元計測

本章では、開発したデジタル写真測量法による三次元計測システムの計測原理を順に、2.1.1 計測処理の流れ、2.1.2 システム構成、2.1.3 内部標定、2.1.4 外部標定、2.1.5 三次元計測、2.1.6 モデル作成、出力、と述べ、2.2 節で本研究として新たにマニュアル操作の自動化とマッチング精度向上のために検討、組込みしたロバストステレオマッチング法について説明し、そのマッチング法の精度評価を 2.3 節に、応用例として遺跡計測での実用性能評価を行ったのでその結果を 2.4 節で述べる。

2.1 計測原理

2.1.1 計測処理の流れ

本基本原理は、平行撮影した左右 2 枚の画像を用いて三角測量の原理により三次元計測を行うものである（図 2.1）。この原理を幾何学的に厳密に成立させるために、あらかじめカメラキャリブレーション（内部標定）によりカメラの主点位置、画面（焦点）距離、レンズ歪を求めておく。撮影後は、撮影時の左右カメラの三軸の傾きと三次元位置を求める外部標定を行う。その後、偏位修正処理を施し、エピポーラ拘束により画像を対象物に対して平行で縦視差のない偏位修正画像を作成する。そしてこの画像から三次元計測、図化を行う。ここでは、画像を表示、確認しながら半自動、マニュアル計測が可能となる。面の自動計測には左右画像の対応点を自動抽出するステレオマッチングを行い、算出された座標から三次元の面再構築を行う。出力は目的によって再構築像を図面として印刷やファイル出力、CAD への転送、造形等行う。計測フローを図 2.2 に示す。図 2.2 の右は、ベースとなる本計測システムの各処理の機能を示す[101]。

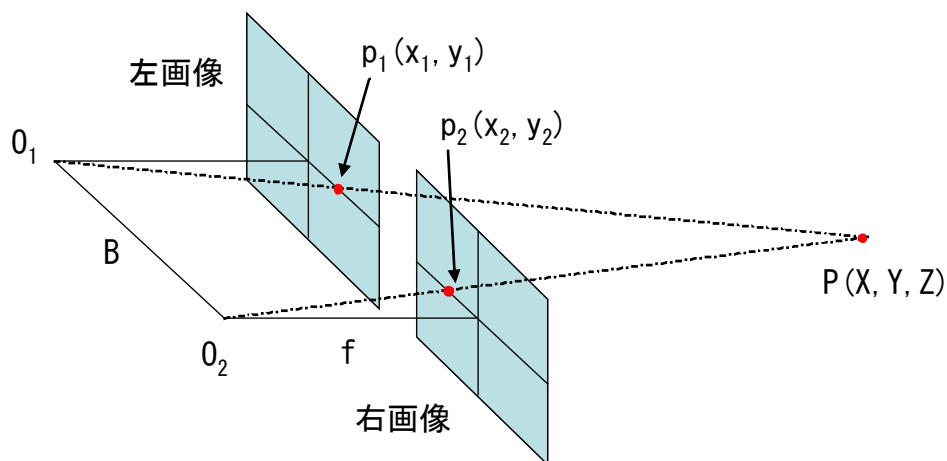


図 2.1 Stereo method.

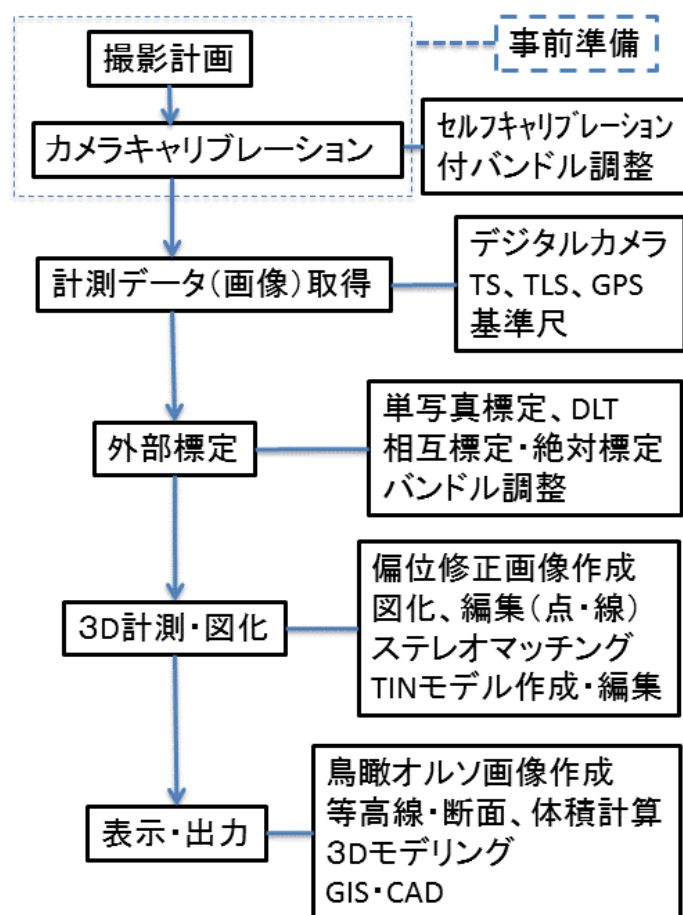


図 2.2 Measurement Flow.

2.1.2 システム構成

開発しているシステムは、市販の PC とデジタルカメラで構成させる。さらに、計測補助あるいは、計測現場の確認のために立体視用モニタ、偏向眼鏡が利用でき、高精度化のために基準尺、レトロ（反射）ターゲット、コード化ターゲットを開発している（図 2.3）。また、屋外での利用では、三次元基準点として GPS、トータルステーション、レーザースキャナーなどにより取得されたデータが利用可能である。



図 2.3 Scale Bar (left), Reflective target (middle), Color-Coded target (right).

本方式は、立体視可能なステレオ画像（偏位修正画像）を計測の過程で作成するため、立体視用モニタを利用すれば、撮影した計測現場、対象物を立体視できるだけでなく、それらを見ながら計測、図化（三次元上の点をプロットして図面化する作業）が可能となる。本システムは、1 台のカメラで計測対象物を撮影するが、2 台以上のカメラを複数台設置して計測することも可能である。

画像はステレオ撮影とし、各画像にオーバーラップ領域を設定する。使用するカメラは、事前あるいは、事後にカメラキャリブレーションを行い、各カメラの内部パラメータを取得しておけば高精度計測が可能となる。

計測は、カメラキャリブレーションソフトウェア[71]にてカメラ内部パラメータ取得し（内部標定）、画像計測ソフトウェア（㈱トプコン PI-3000、ImageMaster [40]）に撮影画像を読み込み、外部標定（外部パラメータ取得）、偏位修正画像作成、三次元計測（点、線の半自動計測ならびに自動面計測：ステレオマッチング）、TIN 内挿による画像再構築（テクスチャマッピング含む）といった一連の処理を行う（図 2.2）。

2.1.3 内部標定（カメラキャリブレーション）

画像による高精度計測を可能とするため、カメラの内部標定要素（画面距離、主点位置、レンズ歪係数）を求めるカメラキャリブレーション法を開発している[16,71,72]。

内部標定要素を求めるには、1台のカメラで異なる位置・方向から二次元、または三次元に配置された精密基準点を撮影し（図 2.4(a)）、複数枚の画像から画像処理によりその基準点を抽出し、それらの座標から計算処理により各内部パラメータを算出する。

計算には、セルフキャリブレーション付きバンドル調整法[17,100,101,110]を使う。

セルフキャリブレーション付きバンドル調整法とは、カメラの外部標定要素、地上点の三次元座標、タイポイントに加えて、内部標定要素を同時に調整する手法である。内部標定要素は系統的誤差($\Delta x, \Delta y$)としてモデル化して扱う。すなわち、バンドル法で利用される共線条件式に誤差モデルの項を追加して未知量を解く。セルフキャリブレーション付きバンドル調整の共線条件式を以下に示す。

$$x = -c \frac{a_{11}(X - X_0) + a_{12}(Y - Y_0) + a_{13}(Z - Z_0)}{a_{31}(X - X_0) + a_{32}(Y - Y_0) + a_{33}(Z - Z_0)} + \Delta x \quad (2.1)$$

$$y = -c \frac{a_{21}(X - X_0) + a_{22}(Y - Y_0) + a_{23}(Z - Z_0)}{a_{31}(X - X_0) + a_{32}(Y - Y_0) + a_{33}(Z - Z_0)} + \Delta y$$

c : 画面距離、 x, y : 写真座標

X, Y, Z : 対象空間座標（基準点、未知点）

X_0, Y_0, Z_0 : 投影中心座標

a_{ij} : 3×3 の回転行列の要素

$\Delta x, \Delta y$: カメラの内部標定補正項

レンズディストーションの補正モデルは、式(2.2)に示す放射方向歪みと接線方向歪みを補正する比較的単純な、Brown(1971)の式の高次の項を省略したモデルを使用した[72,99]。

$$\begin{aligned} \Delta x &= (K_1 r^2 + K_2 r^4 + K_3 r^6) \bar{x} + P_1 (r^2 + 2\bar{x}^2) + 2P_2 \bar{x}\bar{y} \\ \Delta y &= (K_1 r^2 + K_2 r^4 + K_3 r^6) \bar{y} + 2P_1 \bar{x}\bar{y} + P_2 (r^2 + 2\bar{y}^2) \end{aligned} \quad (2.2)$$

$$\bar{x} = x - x_p, \bar{y} = y - y_p, r = \sqrt{\bar{x}^2 + \bar{y}^2}$$

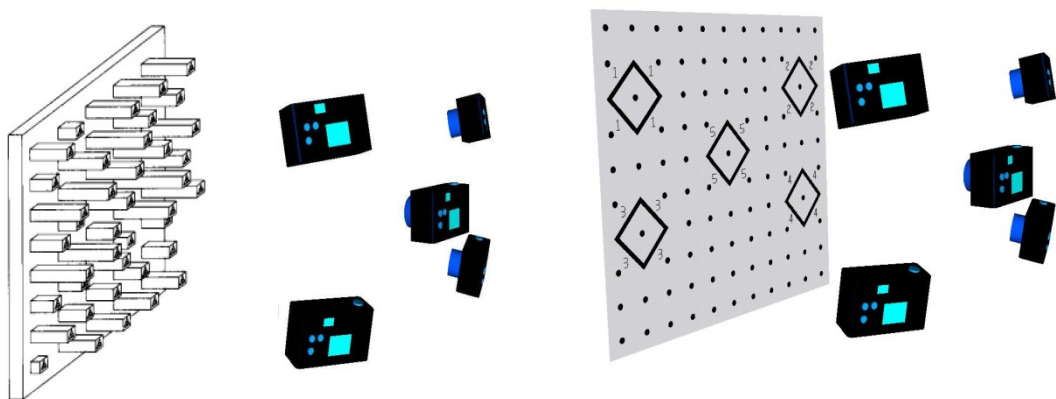
ここで、 x_p, y_p : 主点位置座標
 $\Delta x, \Delta y$: カメラの内部標定補正項
 r : 主点位置から対応する写真座標までの距離
 $K_1 \sim K_3$: レンズの放射方向歪曲収差のパラメータ
 $P_1 \sim P_2$: レンズの接線方向歪曲収差のパラメータ

図 2.4(a)左は、高精度キャリブレーション用基準フィールドで、三次元上に配置されたターゲット（突起部）は、事前に高精度に三次元計測して値付けを行っておく。

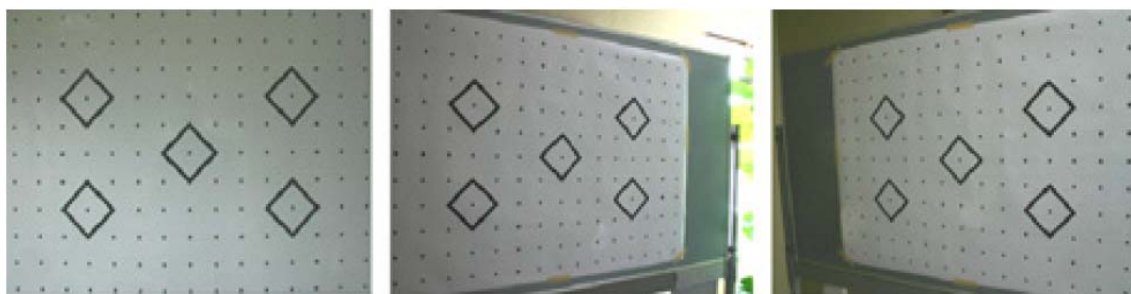
図 2.4 右は簡易キャリブレーション用で、シート平面上に印刷したターゲットを短時間（数分）で全自動計測する。

撮影は、図 2.4(b)のようにレンズの歪みが補正されるように、全体が撮影されたもの 1 枚と撮像素子の 4 辺をいっばいに撮影できるようカメラを傾けて左右上下方向から撮影する。このようにすることで、擬似的に三次元のバリエーションをつける。

カメラキャリブレーションをすれば、ステレオ写真測量法で、 $1/1,000 \sim 1/20,000$ （撮影距離 10m で 0.5mm 以下: 図 2.4 右平面シートで $\sim 1/5000$ ）の精度を得ることができる[16]。また、工業計測用の超精密写真測量では、レトロ（反射）ターゲットを利用した計測で、 $\sim 1/200,000$ まで計測できるとの報告がある[96]。



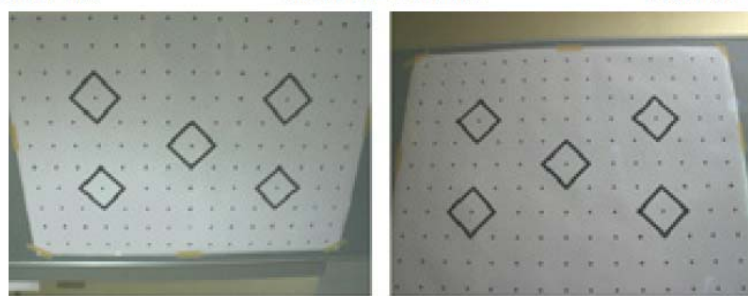
(a) 3D field (left) and Sheet (Right).



正面からの画像

左方向からの画像

右方向からの画像



上方向からの画像

下方向からの画像

(b) Photographing method

図 2.4 Camera Calibration.

2.1.4 外部標定（オリエンテーション）

外部標定（オリエンテーション）とは、カメラの外部パラメータ、すなわち三次元位置と三軸の姿勢を求めることである。この外部標定要素を求め、ステレオモデルを形成させるために相互標定機能[19,110]を開発した。これは、2枚の画像から、6点以上の対応点を求めることで可能となる。これら外部標定要素算出のための対応点を求めるために、特徴点を左画像上で指定し、LSM法で右画像の対応点を検出する半自動相関法を開発した。また、この標定計測の高精度化のためにレトロターゲットを使用すれば（図 2.3 中央）、ターゲットの重心点を画像処理にて簡単に精度良く検出できる[8]。この計測にカラーコードターゲットを利用すれば、その位置検出ならびに番号の検出を全自動にて行うことが可能となる[9,10]。

複数枚のステレオペアを相互標定し、バンドル調整[100~106,110]により算出された外部標定要素を一括して調整計算する。バンドル調整は、式(2.1)のカメラの内部標定要素の補正項 Δx 、 Δy を省いた共線条件式となる。バンドル調整により、誤差を最小になるように分配することによって、高精度な三次元計測が可能となる。そして、外部標定要素を求めた後に、それらのパラメータとカメラキャリブレーションで求めた内部標定要素から、偏位修正画像を作成する[6]。偏位修正画像は、左右画像のエピポーララインを同一線上に整列させた画像（図 2.5）のことで、この2枚の画像を立体モニタに映し出すことで、偏向眼鏡等を利用して、撮影した画像を立体視することが可能となる。

以下、相互標定について説明する。



図 2.5 Rectified Image.

ここでは、共面条件を用いる方法について説明する。2本の光束が交会するためには、図2.6に示すように、2本の空間直線が同一平面に含まれるという条件が成立することを利用した方法である。共面条件を用いた方法は、座標系として投影中心を結ぶ方法と左側のカメラ座標を固定する方法がある。ここでは、前者のモデル座標系の原点を左側の投影中心にとる方法について説明する。

図2.6に示されるように、右側の投影中心を結ぶ線を X 軸にとるようにし、縮尺は基線長を単位長さにとる。

このとき求めるパラメータは、左側のカメラの Z 軸の回転角 κ_1 、 Y 軸の回転角 φ_1 、右側のカメラの Z 軸の回転角 κ_2 、 Z 軸の回転角 φ_2 、 X 軸の回転角 ω_2 の5つの回転角となる。この場合左側のカメラの X 軸の回転角 ω_1 は0なので、考慮する必要ない。このような条件にすると、共面条件式は式(2.3)のようになり、この式を解けば各パラメータが求まる。

$$F(\kappa_1, \varphi_1, \kappa_2, \varphi_2, \omega_2) = \begin{bmatrix} Y_1 & Z_1 \\ Y_2 & Z_2 \end{bmatrix} = Y_1 Z_2 - Y_2 Z_1 = 0 \quad (2.3)$$

ここで、モデル座標系 XYZ とカメラ座標系 xyz の間には、次に示すような座標変換の関係式が成り立つ。

$$\begin{bmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \kappa_1 & \sin \kappa_1 & 0 \\ -\sin \kappa_1 & \cos \kappa_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \varphi_1 & 0 & -\sin \varphi_1 \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \varphi_1 & 0 & \cos \varphi_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ -c_1 \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

$$\begin{bmatrix} X_2 \\ Y_2 \\ Z_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \kappa_2 & \sin \kappa_2 & 0 \\ -\sin \kappa_2 & \cos \kappa_2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \varphi_2 & 0 & -\sin \varphi_2 \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \varphi_2 & 0 & \cos \varphi_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \omega_2 & \sin \omega_2 \\ 0 & -\sin \omega_2 & \cos \omega_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ -c_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

そして求められた相互標定要素を用い、偏位修正（モデル）座標系へ変換する[6]。

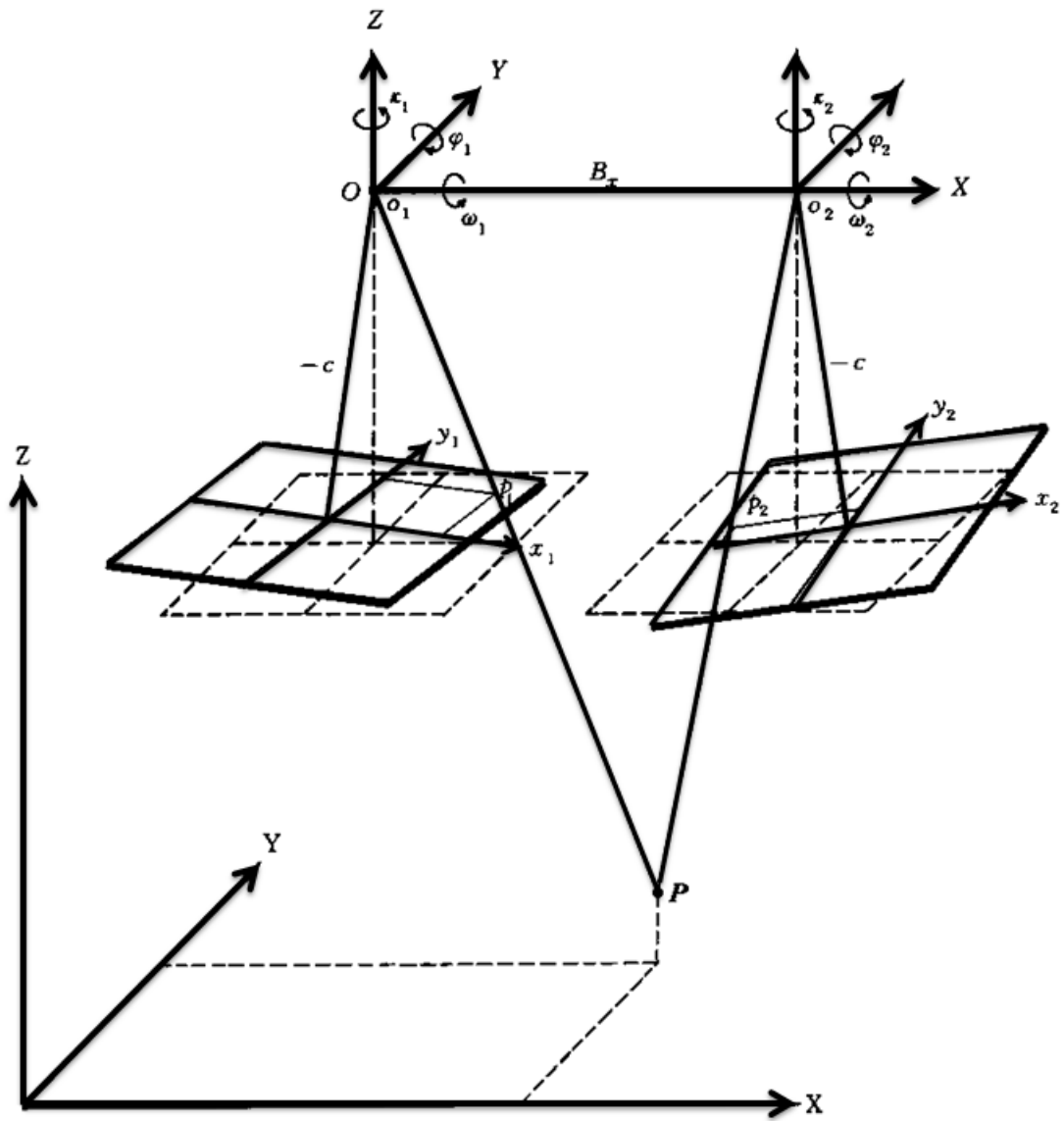


图 2.6 Relative Orientation.

2.1.5 三次元計測

偏位修正画像（ステレオ画像）を作成した後、偏位修正画像上で三次元計測を行う。三次元計測には、自動面計測とマニュアル、半自動計測を行えるようにした。

偏位修正画像は、左右画像の水平ラインを整列させ、レンズは内部標定によりキャリブレーション補正され、外部標定により、画像の縦方向の射影倍率及び視差が補正されているため、三次元計測は X 方向の一次元探索のみで高速かつ高精度に行える。

計測対象点は、左右画像上の同一水平ライン（Y 座標）上にあるので（図 2.5）、マニュアルにて三次元計測する場合は、左右画像の同一ライン上にマウスカーソルを置いて横視差（X 座標）のみをマウスで指示することにより高さ測定ができる。ここに半自動計測では、ステレオマッチング機能を組み込み、片側の画像をマウス指示した際に対応点を自動計測するようにすれば、三次元図化を行うことが可能となる。立体モニター上にこの画像を表示すれば立体観測と計測が同時に行える。

自動面計測（Digital Surface Model 自動作成）は、左画像上に格子点を配置し、右画像上の対応づけを画像相関処理により自動的に行って（ステレオマッチング）高さデータを計算し、三次元データ（点群）を面状に生成するものである。この詳細については 2.2 節で説明する。

2.1.6 モデル作成、出力

計測された点群からの三次元モデルの再構築は、計測点を点群ではなく面の概念として TIN モデル[11]を扱う。TIN モデルは、ミスマッチング点が除去されていれば、面を滑らかな表面形状として再構築することができる。本デジタル写真測量法では、外部標定によって各ステレオモデルから計測された点の三次元位置と撮影された画像との関係が確立されているので、TIN モデルの合成とテクスチャ位置あわせは必要ない。テクスチャ画像は撮影時のカメラのレンズ歪や射影歪の補正を同時に行うので、計測に使用した画像であれば、計測精度に一致した解像度のテクスチャマッピングが行える。テクスチャつき三次元モデルは、PC 画面上で自由に回転、拡大縮小して様々な方向から確認することができる。

計測結果を正射投影画像（オルソ画像）としてテクスチャを貼り付け図面出力すれば、寸法の反映された画像図面となり、付加価値の高いものとなる。また計測データを様々な三次元フォーマット出力（DXF、VRML、STL、他）し造形システムへデータを受け渡すことによりレプリカの製作を行うことや、CAD との比較も可能となる。

2.2 ロバストステレオマッチング法による自動面計測

2.2.1 OCM 法によるロバストステレオマッチング

従来の LSM 法では、マッチング範囲をオペレータがマニュアル操作し、左右画像の対応点を自動相関機能を使って求め入力し、それを初期値としていた。この初期値は、ある程度正確なものでないと不要な変形を繰り返し、処理時間が長くなる、あるいはミスマッチングを起こしやすいといった問題が生じていた。また、マニュアル操作はオペレータに負担がかかり効率的でない。これらを解決するために、初期値を照明変動やオクルージョンに強いロバストなマッチング法である OCM 法により自動取得し、階層マッチングでの粗密探索過程に取り入れることで解決した。

OCM 法は、マッチングに方向符号と呼ばれる特徴量を用いる。すなわち、近傍画素における勾配方向を量子化した値を方向符号 (Orientation Code) として定義する。対象画像の画素 (x,y) における明度を $I(x,y)$ とし、水平方向勾配を $\nabla I_x = \partial I / \partial x$ 、水平方向勾配を $\nabla I_y = \partial I / \partial y$ とすると、注目画素における勾配方向は、 $\theta(x,y) = \tan^{-1}(\nabla I_y / \nabla I_x)$ として算出できる。本方式では、勾配方向の算出には Sobel フィルタを用いた。方向符号は勾配方向 θ を適当な量子化幅 $\Delta\theta = 2\pi/N$ で量子化した値で、次式で表される。

$$C_{xy} = \begin{cases} \left\lfloor \frac{\theta(x,y)}{\Delta\theta} \right\rfloor & \text{if } |\nabla I_x| + |\nabla I_y| \geq \Gamma \\ N = \frac{2\pi}{\Delta\theta} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2.5)$$

Γ は安定的に方向符号を求めるために設けた閾値で、低コントラスト部分に無効符号として N を割り当てる。すなわち 1 周を N 個で量子化した場合、有効な方向符号は $0 \sim N-1$ で表される。我々は、1 周を 16 方向 ($N=16$) として分割して用いた (図 2.7)。

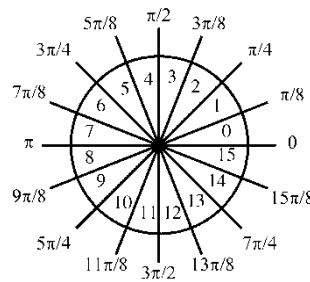


図 2.7 Orientation Code.

特徴点の抽出には OCR (Orientation Code Richness) と呼ばれる特徴量を用いた[15]。この方法は、勾配方向の変化の分布が多い領域を特徴として抽出するため、テクスチャが豊富にある領域が選択されやすく、方向符号を用いて算出するため後に行う方向符号マッピングに安定した結果をもたらすという効果がある。

特徴点の対応付けには方向符号を用いた以下の方法で行う。参照画像を R 、比較する画像を O (サイズを共に $S_x \times S_y$) とし、式(2.5)を用いて方向符号画像を作成し、それぞれ C_R , C_O とすると、それらの残差絶対値 d の平均残差絶対値 D を照合評価値として、次式により定義される。

$$D = \frac{1}{S_x \times S_y} \sum_{S_x \times S_y} d(c_R, c_o) \quad (2.6)$$

$$d(a, b) = \begin{cases} \min\{|a - b|, N - |a - b|\} & \text{if } a \neq N, b \neq N \\ N/4 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2.7)$$

2.2.2 拡張 TIN-LSM 法

我々は、明度変動、隠蔽に強い OCM 法により取得された初期値を有効に各粗密探索過程のステレオマッチングにとりいれ、幾何学的変形に対応するため、階層画像を作成しながら OCM で求めた対応点を TIN 内挿して LSM を行う拡張 TIN-LSM 法を考案した(図 2.8)。すなわち、OCM の計測点と各階層で LSM により計測した点を内挿した格子点を発生させ TIN を作成する。そして格子点から表面勾配を求め探索画像を変形し、画素オーダーのステレオマッチングを行う。そしてその結果から、探索画像を変形させながらサブピクセルでの LSM を行い、その結果と TIN 内挿した点を比較することにより、三次元上での異常点検出を行い正確なマッチングを行う。

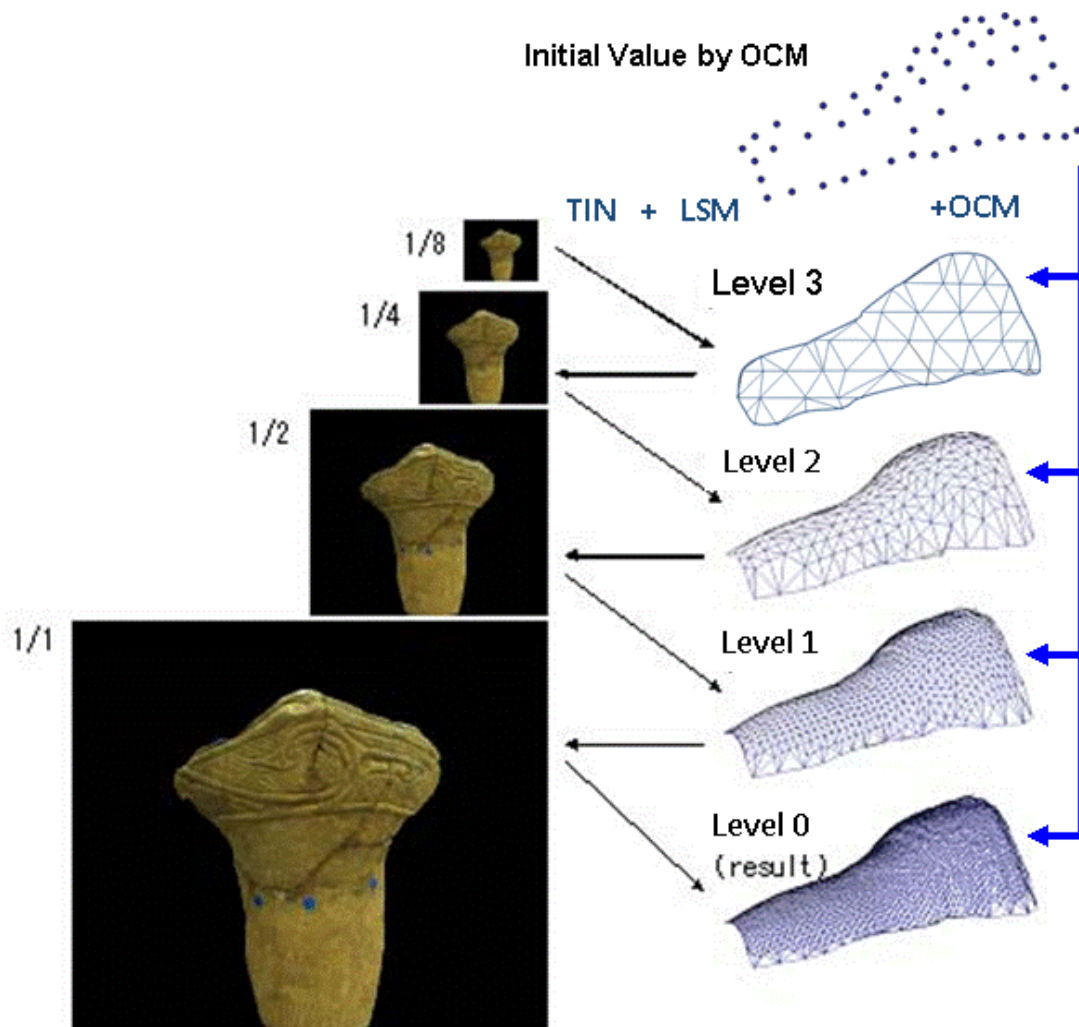


図 2.8 Extended TIN-LSM.

LSM 法のパターン比較を行う際のテンプレートを $t(i,j)$ 、変形されたマッチングウィンドウを $f(x,y)$ とし、マッチングウィンドウの変形を次式のアフィン変換によって近似する。

$$\begin{cases} x = t_0 + t_1 i + t_2 j \\ y = t_3 + t_4 i + t_5 j \end{cases} \quad (2.8)$$

各々の比較する画素における濃度差は以下の式で与えられる。

$$r(i, j) = t(i, j) - f(x, y) \quad (2.9)$$

残差 $r(i,j)$ はテンプレートと幾何学的変換後のマッチングウィンドウ間における濃淡値の差を表す。そして、濃度差の二乗和を最小化するように、パラメータ $t_0 \sim t_5$ を求める。

$$\sum r(i, j)^2 = \sum \{t(i, j) - f(x, y)\}^2 \quad (2.10)$$

ここで、 t_1, t_2, t_4, t_5 はマッチングウィンドウの変形を表し、 t_0, t_3 が求めるべき検出位置の座標となる。

偏位修正画像を用いてステレオマッチングを行う場合、エピポーラライン上の一次元探索が可能であるため、高速化と信頼性の向上が期待できる。エピポーラ拘束条件により、式 (2.8) を次式のように簡略化できる。

$$\begin{cases} x = t_0 + t_1 i + t_2 j \\ y = j \end{cases} \quad (2.11)$$

$t_0 \sim t_2$ を決定すればよく、 t_0 がエピポーラライン上の求めるべき対応点の位置となる。

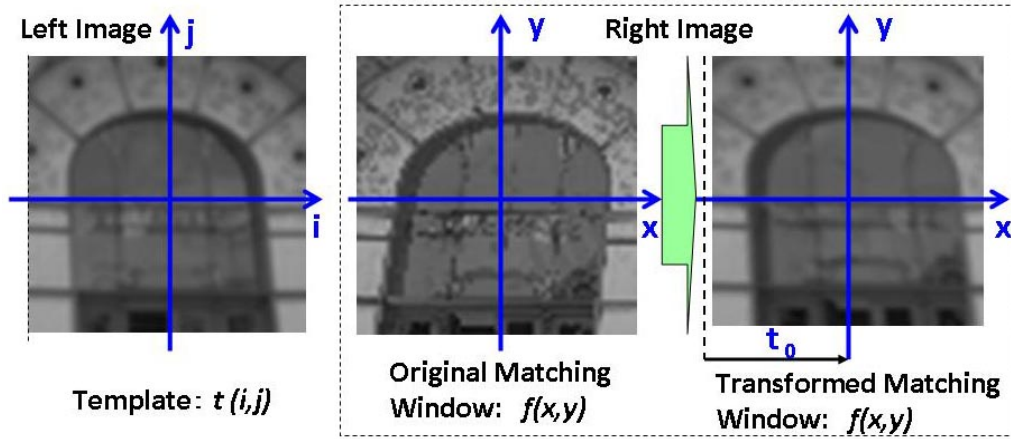


図 2.9 Local Coordinates of Affine Transformation.

図 2.9 にテンプレート画像 (左画像)、変形前後のマッチングウィンドウの画像 (右画像) を示す。式 (2.11) における各座標値 (i,j) 、 (x,y) は、図 2.9 に示すように左画像における切出し中心位置および右画像における視差値 t_0 だけ移動された中心位置に設定した局所的座標系において計られる。

拡張 TIN-LSM 法による自動計測の手順を示す。TIN の作成は原画像上で行い、それを各階層画像上に投影しステレオマッチングする。これは、各階層の圧縮画像にロバストな OCM の計測値を引き継がせるためである。

- a) まず、計測したい分解能 P_t を設定する。また、左右の偏位修正画像の画素数 (H,V) から、粗密探索の階層を決めピラミッド画像を作成する。本論文では、階層数 k を、 H 、 V の画素の小さいほうを 32 画素以下になるまで 2 で割った回数、すなわち $\min(H,V)/2^k \leq 32$ を満たす最小値とした。
- b) OCM により三次元計測する (エピポーラ拘束による一次元マッチング)。マッチング結果を各階層において初期値として利用するために、マッチング画像は原画像を利用する。また低コントラストなものに対応できるように式 (2.4) の $\Gamma=5$ と設定した。
- c) OCM により取得した点群を囲む外接四角形を計測範囲とし、その中心座標の視差 d_m を求め、計測間隔 P_t と視差 d_m から、左右のカメラ間距離を B として、ステレオ画像の関係から計測間隔 $p^{(k)}$ を決定する。

$$p^{(k)} = P_t \times d_m / B \quad (2.12)$$

- d) OCMにより得られた初期値を Delaunay 三角形分割[11]し、計測間隔 $p^{(k)}$ により正方格子に分割して z 値を内挿し、初期値の $TIN^{(k)}$ を求める(図 2.8 Level3)。
- e) 階層を $k-1$ とし 1 階層すすめ、格子間隔を前階層 k の格子間隔 $p^{(k)}$ の半分、 $p^{(k-1)} = p^{(k)}/2$ とする。また、探索幅は、格子間隔の 2 倍、すなわち、 $2 p^{(k-1)}$ とする(図 2.10)。
- f) 新たに、格子間隔 $p^{(k-1)}$ で、 $TIN^{(k-1)}$ を作成する。その際、 $z^{(k-1)}_{ij} = (z^{(k)}_{ij} + z^{(k)}_{i+1,j})/2$ とする。但し、図 2.10(a)の $z^{(k-1)}_{ij}$ は、e) ～i)で得られた LSM マッチング結果を示す。
2回目以降は OCM マッチングした初期値を加え、頂点の法線ベクトルを計算する。頂点の法線ベクトル $\mathbf{n}_{ij}$ は、隣接する面の法線ベクトルの平均として求める。例えば、図 2.10(b)の例では、周囲の 7 つの面 $s1 \sim s7$ の法線ベクトルの平均値が頂点の法線ベクトル $\mathbf{n}_{ij}$ となる。
- g) 求められた頂点の法線ベクトルの傾きに応じて探索領域を変形し、ピクセルオーダーのステレオマッチングをエピポーラライン上で行い、濃度差の二乗和が最小となる対応点を探索する[18]。すべての格子点についてこの処理を行う。
- h) 上記マッチングで得られた対応点上で、さらにサブピクセル位置を検出するために、探索領域を変形させながら最小二乗 (LSM) マッチングを行う。但し、繰り返し演算回数を m としたとき、式(2.13)のとき発散 (対応点は存在しない) したとみなし処理を打ち切る。また、 m の上限を 10 回とし、 $m=10$ または、式 (2.14) のとき収束したと見なす (振動が 1%以下)。 m の値は、マッチングが正常に行われる場合通常数回～5 回で収束するため、その倍の 10 を制限値とした。また、式 (2.14) の振動 1%以下は、アフィン係数値の変化が 1%以下の変動であれば計算上問題ないことから設定した。

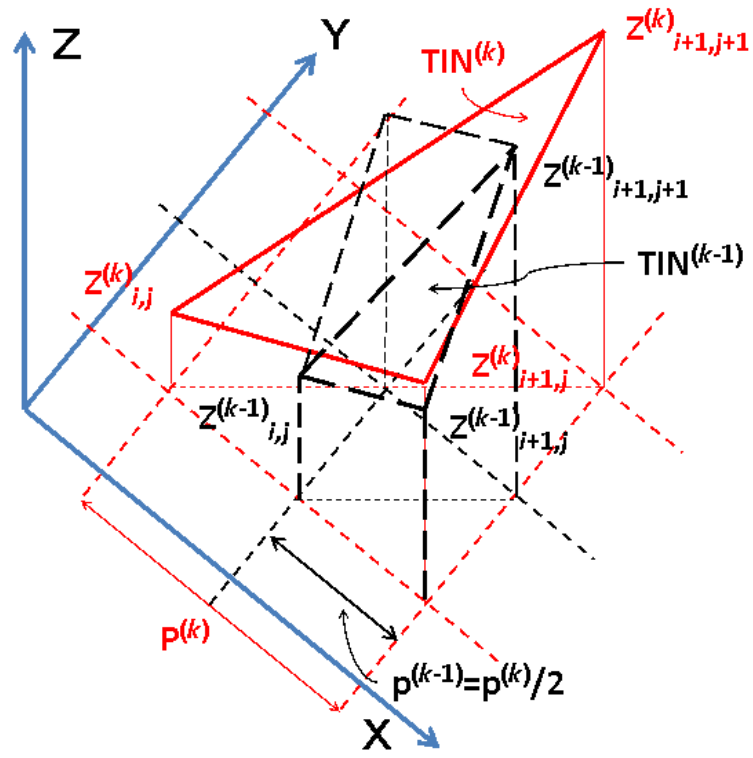
$$\sum r_{m-1}(i, j)^2 \leq \sum r_m(i, j)^2 \quad (2.13)$$

$$0.99 \times \sum r_{m-1}(i, j)^2 \leq \sum r_m(i, j)^2 \leq 1.01 \times \sum r_{m-1}(i, j)^2 \quad (2.14)$$

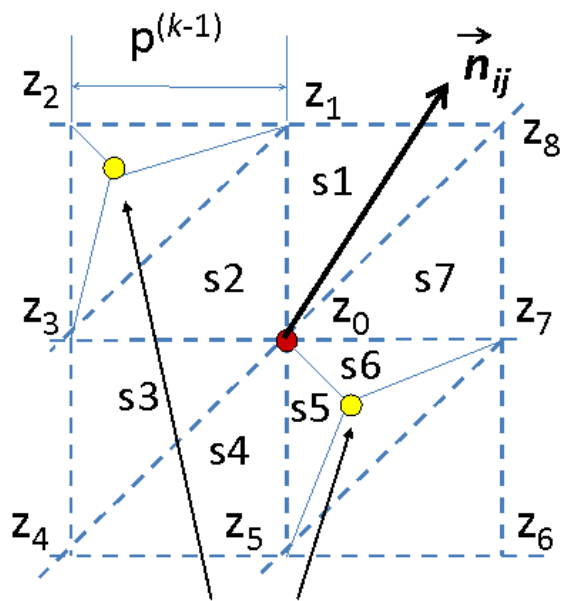
- i) 異常値の判定を行う。対応点は近傍点の値の範囲内にある（局所領域では滑らかとなる）と仮定し、求められた点 $z^{(k-1)}_{ij}(=z_0)$ とする）の8近傍の点を $z_1 \sim z_8$ としたとき（図 2.10(b)）、前階層 k の TIN^④で作成された面からこの位置の $z_1 \sim z_8$ を内挿して求め、式(2.15)に示すようにその最大、最小値の間に点がある場合、そのときの算出された t_0 を検出位置とする。この処理を求めた全点に対し行う。

$$\min z_{1 \sim 8} \leq z_0 \leq \max z_{1 \sim 8} \quad (2.15)$$

- j) 粗密探索 e)～i)を階層数分 $k, k-1, k-2, \dots, 0$ と繰り返す。
- k) 最後に、原画像で処理を行い、得られた TIN^④を最終の三次元計測データとして出力する。



(a) TIN



Measurement Point by OCM

(b) Adding OCM Point

图 2.10 TIN-LSM.

2.2.3 結果評価

開発した拡張 TIN-LSM 法の効果の検証のために、建築物の撮影画像から、ステレオマッチングの計測範囲指定をマニュアルで行う従来法と比較実験を行った。

図 2.11 左に、従来法の結果、右に OCM 法で取得した計測範囲（外枠）と初期値（枠の中の点）を示す。従来法では建物の形状が複雑かつオクルージョンがあるために正確に計測枠をひくことが出来ず概略で入力した。そのため、作成された TIN が大きく不要な面が多く作成されている。

OCM 法による結果は、オクルージョンに強いという利点から建物の外枠を正確に検出し、さらにコントラストが低いところでも計測枠内に密な初期値が得られている。図 2.12 左にマニュアル入力により TIN-LSM 法で得た結果、右に OCM 法を組み込んだ拡張 TIN-LSM 法で得た結果を示す。また、その一部分を拡大したもの（図 2.12 の□枠内）を図 2.13 に、左から原画像、マニュアル入力し TIN-LSM 法を使った結果、OCM 法のみを検出結果、拡張 TIN-LSM 法の結果を示す。拡張 TIN-LSM 法のマッチング結果は、他より忠実に建築物を表現しているのがわかる。特に、マニュアル入力した従来の TIN-LSM 法は、なまけてしまい形状を表現していない。従来法でこのような結果を得るためには、さらに詳細な計測枠を入力するか、マッチングの結果得られたノイズを後処理にて削除する必要がある。しかしながら、図 2.11 左の計測枠作成に 5 分程度かかっており、画像枚数が増えた場合、計測枠入力やノイズ除去作業は無視できないものとなる。それと比較して、OCM 法をとり入れた拡張 TIN-LSM 法では、計測枠入力の作業が必要ないことから、大幅な自動化と省力化が図れることがわかった。

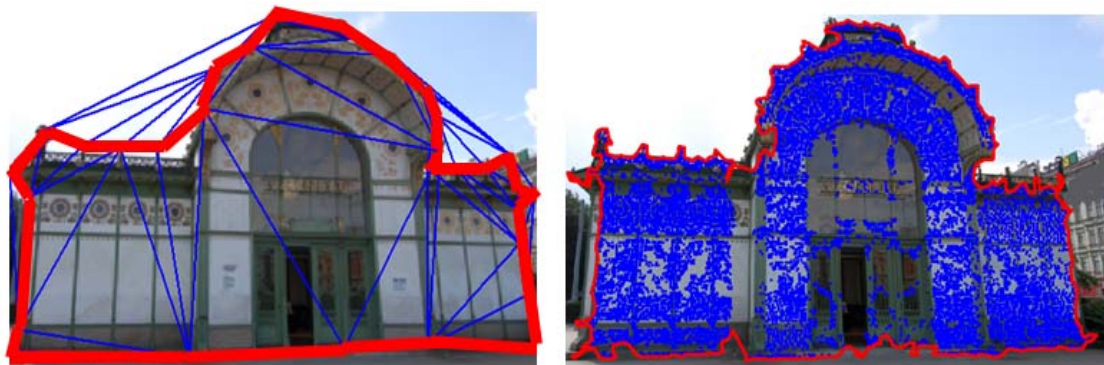


图 2.11 Initial Value by Manual (left) and OCM (right).

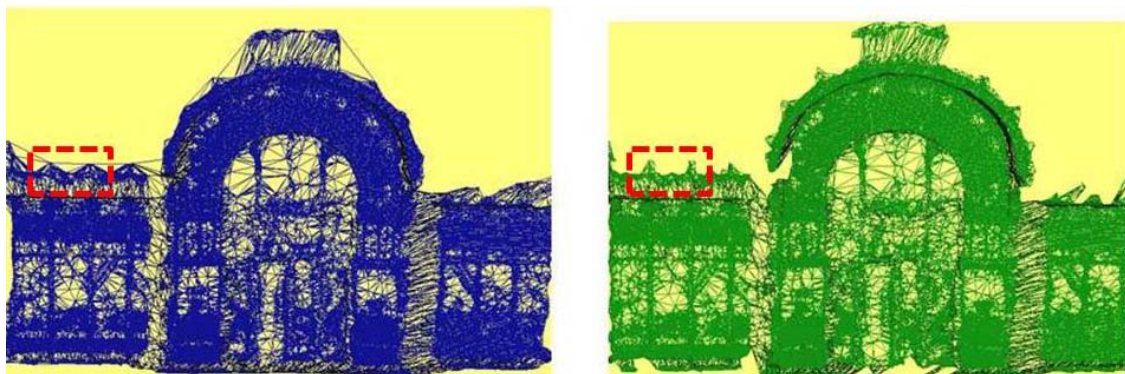


图 2.12 Initial Value by Manual (left) and OCM (right).



Left to Right: Original Image, TIN-LSM(Manual), OCM only, Extended TIN-LSM

图 2.13 Measurement result.

2.3 精度評価

本マッチングアルゴリズムの基本性能評価を行うために、接触式三次元測定機で計測可能な 300mm×300mm の大きさのマネキンを計測し比較を行った。マネキンは、特徴がないためプロジェクターでランダムドットパターンを照射した。これは 1 点 1 点の大量な点群に対する正確なステレオマッチング精度を知るためである。遺跡等の大型対象物に対しては、1 点 1 点に対応する精度評価は困難なため、実際の現場のデータで作成した図面との比較を実用上の評価として行った。それらについては、次節 2.4 で説明する。

マネキンを接触式三次元測定器 (Zeiss UMC550S) により 5 μ m 精度で 2014 点計測した。ステレオマッチングは、TIN-LSM 法と正規化相互相関 (Normalized Cross Correlation : NCM) 法を使った。どちらもミスマッチングの除去のためにバックマッチング法[24]を利用している。撮影カメラは 2560×1920 画素デジタルカメラ (f=50mm)、画素分解能は、奥行き方向で 0.4mm である。

基準 (2014 点) を接触式三次元測定器とした場合のそれぞれの誤差を表 2.1 に、誤差の分布を図 2.14 に示す。これら結果から、平均値は同じであるが、標準偏差で LSM 法が 0.26mm、NCM 法が 0.35mm、最大値と最小値の幅が、LSM 法が 2.36mm、NCM 法が 3.95mm との結果が得られた。LSM 法の誤差分布が狭いのは、傾斜部分のマッチングが NCM 法より優れているからだと考えられる。このことを確認するために、両方法により得られた結果から接触式三次元計測器の測定値を真値とした場合の誤差をプロットした図を図 2.15(a)に示す。図 2.15 (a)左からわかるように、NCM 法では、凹凸が目立ち (濃度 (色) の異なっている点)、誤差が多いが図 2.15 (a)右の LSM 法は誤差が少なく、NCM 法より誤差の分布が狭く安定して求められているのがわかる。図 2.15 (b)には傾斜がきつい目の部分を拡大した TIN 内挿結果を示す。特に図 2.15 (b)左の NCM 法の三角形が大きくなっている部分は傾斜歪によりミスマッチングをおこし、その計測点が省かれているのが原因である。これら結果からもわかるように、期待通り LSM 法は NCM 法より傾斜に強く、ばらつきが少なく安定した結果が得られることがわかった。また、処理速度を図 2.11 の例で TIN 内挿した NCM 法と比較した結果、計測点数が 80,610 点で NCM 法が 211 秒、LSM 法が 171 秒と LSM 法が高速な結果が得られた。

表 2.1 Comparison of measurement accuracy (unit : mm).

	Average	Standard deviation	Max	Min
NCM	0.06	0.37	2.50	-1.45
TIN-LSM	0.06	0.26	1.56	-0.8

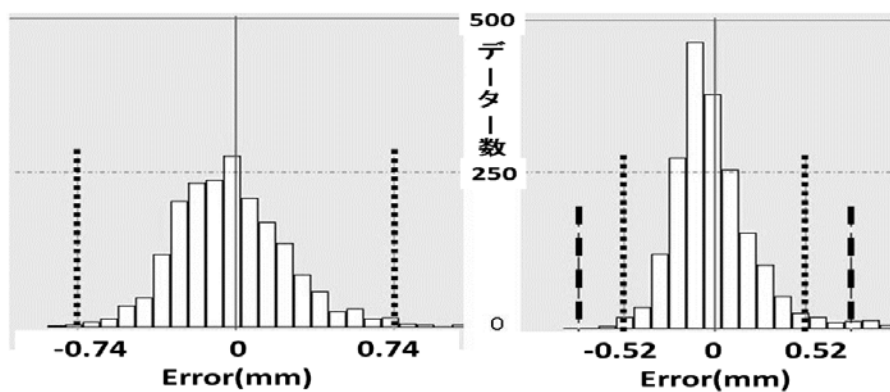
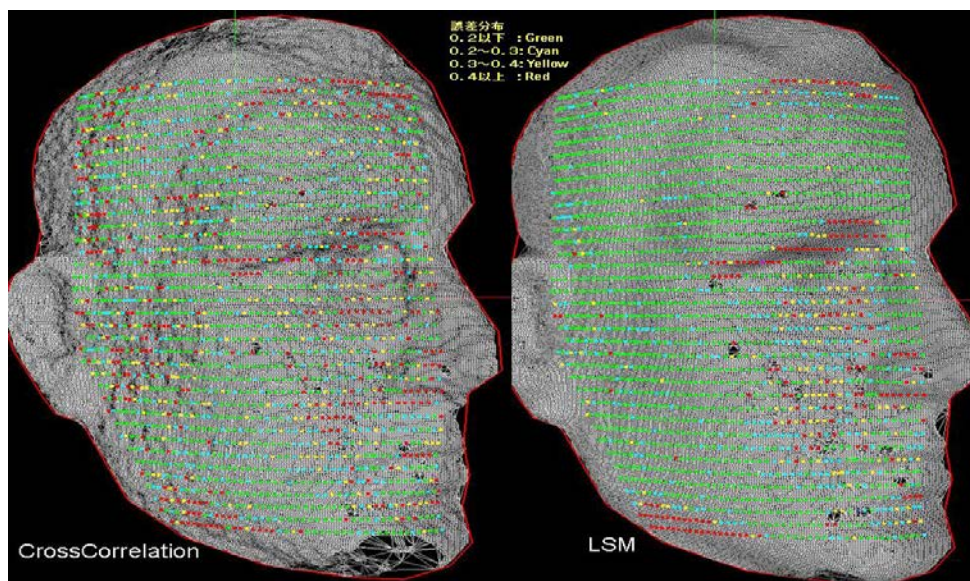
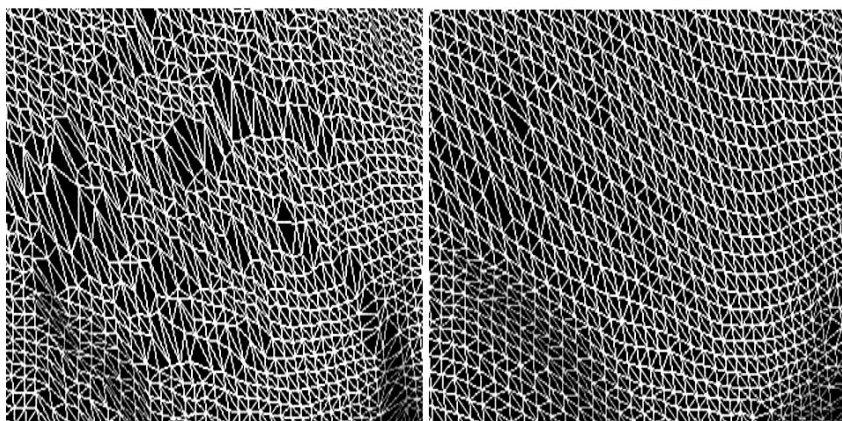


図 2.14 Error Distribution : NCM (left), LSM (right).



(a) Compare result by NCM (left) and TIN-LSM (right)



(b) Measurement result by TIN : NCM (left), TIN-LSM (right)

図 2.15 Measurement Result.

2.4 遺跡計測と実用性能評価

本システムは、デジタルカメラ 1 台にて撮影し、PC で処理して解析が行えるため、現場で撮影～解析まで行うことができる。このシステムの可搬性を利用し、ギリシア共和国、トルコ共和国の遺跡を対象とした実用評価を行った[8,25,26,28～30]。2.4.1 節で従来法のマッチング性能との比較、2.4.2 節でデータ取得について、2.4.3、2.4.4 節で従来の図面作成法との比較における精度と省力化について実際の例から説明する。

2.4.1 ギリシアライオン彫刻像の全周計測

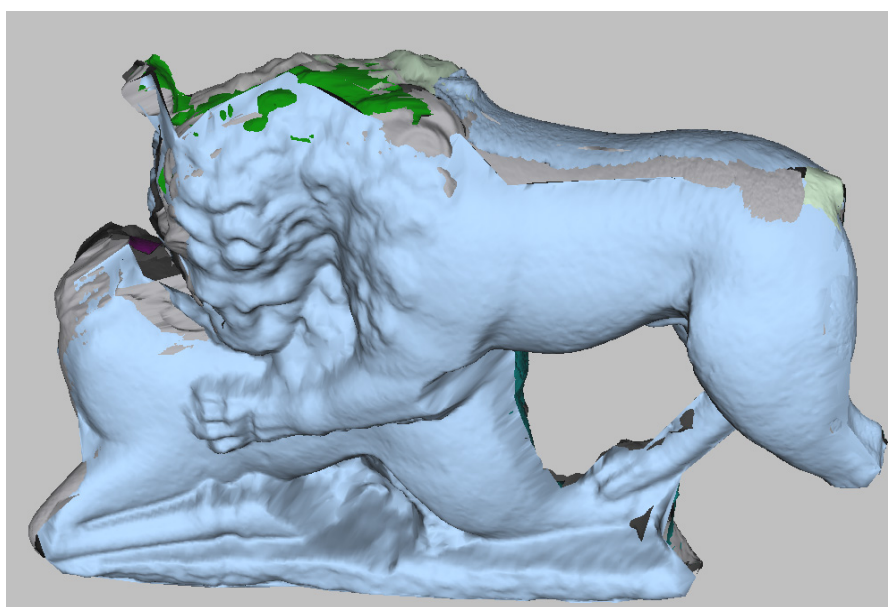
メッセネ（ギリシア共和国の古代都市）の遺跡[29]から出土した彫刻は、鹿を狩るライオンの姿を示した台座付きの彫刻で墓の屋根の上に載っていたと考えられており、現在は博物館の中に展示されている[28]（図 2.16(a)左）。展示場所は、彫像の裏側が 1m 以下と狭くかつ彫像に触れることができないので、ターゲットは貼らず、モデル座標（寸法なし）での全周計測を試みた。スペースの問題から撮影枚数が多くなり、また、照明は用いなかったため撮影位置により画像の明るさが異なった。使用したデジタルカメラは 3072×2048 画素市販一眼レフである。ライオンの全周撮影枚数は約 100 枚、そのうちモデリングに 20 枚使用した。彫像に触れることができず、接続に必要なターゲットは貼ることができなかったため、撮影した 100 枚の画像から 20 枚を選択しながらすべて半自動もしくはマニュアルにて接続及び標定のための対応点計測を行った。全周モデリング結果を図 2.16(a)右、図 2.16(b)に示す。テクスチャマッピング画像の色が異なっているのは撮影場所により明るさが異なったためである。

本計測に、マニュアルで初期値を与え TIN-LSM 法で計測した結果、ステレオ計測に約 7 日間かかった。これは、計測に適した撮影を行うことが困難であったため、各画像によるマニュアル計測に多くの時間を割いたためである。

これを拡張 TIN-LSM 法で計測したところ、マニュアル入力が自動化されたため、ノイズ処理を含めてステレオ計測をおよそ 3 日間で終えることができ大幅に省力化できた。



(a) Photographed-Image (left) and texture-mapping result (right)



(b) Rendering result

图 2.16 Lion Statue.

2.4.2 ギリシア教会の全周モデリング

アギア・サマリーナ教会堂（17m×13m×12m）は、使用されなくなったギリシアのビザンチン時代の教会堂である（図 2.17）。大型建築物のデジタルカメラによる全周計測の能力を試すために、教会の全周を一眼レフデジタルカメラ（焦点距離 18mm）にて撮影し、三次元計測・モデリングを行った。解析に用いた画像は 34 枚である。

この条件では、1 画素の分解能は、平面方向に約 4.5mm、奥行方向に平均で 15mm 程度である。撮影はわずか 30 分程度で行うことができた[25]。

図 2.18 左にモデリング結果にテクスチャマッピングした例を示し、図右に図面化したオルソ画像を示す。

地上からの撮影であったために屋根等の高所付近は計測できていないが、教会正面の石積はきれいに作成できた。

レーザースキャナでは、この規模の計測（データ取得）を行うのに、4 箇所以上から、接続ターゲットや機器の設置を含めスキャンを行い 4 時間以上要する。これら結果から、ハンディな一眼レフカメラを用いることにより、大幅な計測時間の短縮による簡易な計測が可能であることを示すことができた。



图 2.17 Byzantine Church of Agia Samarina.



图 2.18 3D model (left) and digital ortho-photo image (right).

2.4.3 トルコビザンツ帝国聖堂の 3D モデリング

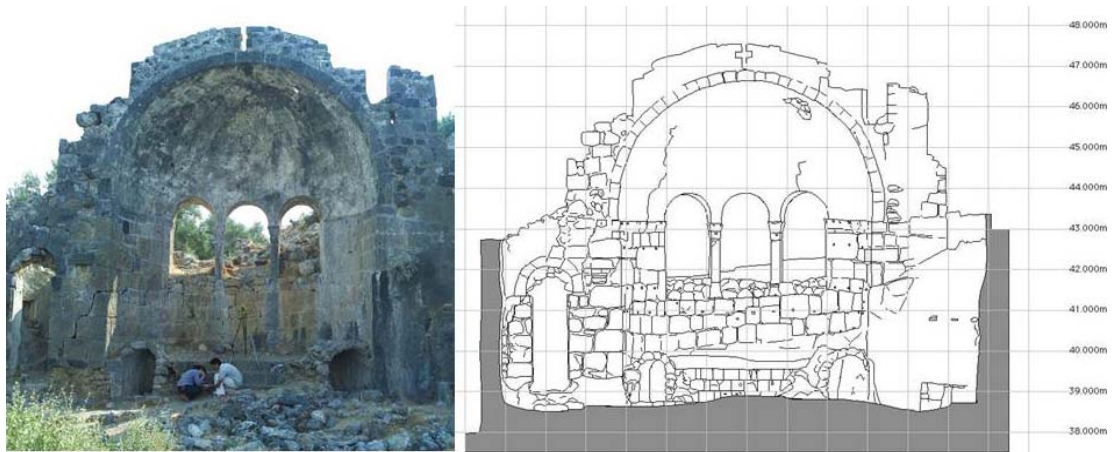
ビザンツ都市遺跡（トルコ共和国ゲミレル島）の第二聖堂[27]の大きさ約 10m×10m の部分（図 2.19 左）を三次元計測・モデリングした。使用したカメラは、4072×4072 画素のデジタルカメラ（本体：Hasselblad 555ELD、レンズ：Distagon 50mm）である。このカメラでテクスチャ用に撮影してあった数枚の画像からステレオ撮影となっている 2 枚の画像を選択し計測を試みた。基準点はトータルステーションにより計測した 3 点の三次元座標を使用した。この条件での画素分解能は、平面方向で約 3mm、奥行き方向で約 8mm である。

図 2.19 右にノンプリズムトータルステーションを使って手書き図化した実測図面を示す。図面作成には、実測に 800 時間、作図に 300 時間かかった[26]。

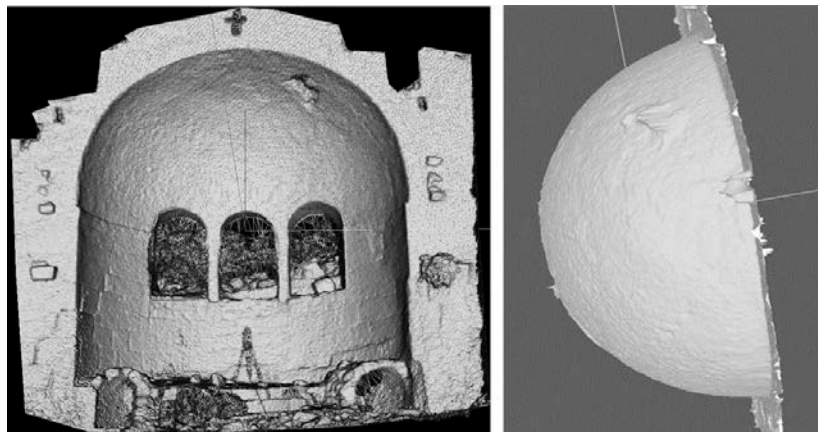
図 2.20(a)左は計測して再構築した正面のレンダリング画像、右はそのレンダリング画像を上からの視点に変えて描画したものである。図左から、ひびわれまで詳細に再現され、図右からドーム形状が再現されているのがわかる。

精度検証のために実測図面と本システムにより三次元計測しオルソ図化を行った結果と重ね合わせた（図 2.20(b)）。そしてひび割れの部分約 1m の範囲を 50mm 間隔で 20 点計測した（図 2.20(b)左）。実測図との差異は、5mm 以内が 12 点、10mm 以内が 8 点で平均 5.25mm であった。全体のひび割れは多くの部分で 10mm 程度を越えず、本解析での実際の分解能は 5mm 以下と考えられる。また本方式における作業時間は、現地での撮影、計測に 1 日以下、解析から正射投影画像作成まで 1 日以下であった。これら結果から作業効率、精度において期待以上の満足できる結果が得られた。

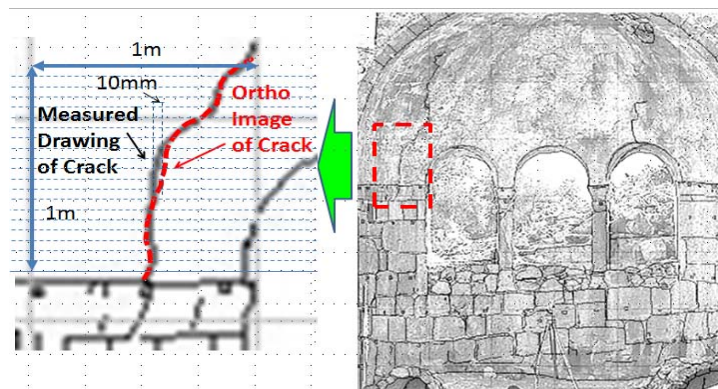
カメラの性能が 1600 万画素と高性能であったこともあり、結果としてレーザースキャナと同等もしくはそれ以上の計測結果が得られた。



☒ 2.19 Photographed (left) and Measured Drawing (right).



(a) Measurement Result: front (left) and Different view (right).



(b) Superposition of Ortho Image and Measured Drawing

☒ 2.20 Measurement Result.

2.4.4 床面のオルソモザイク

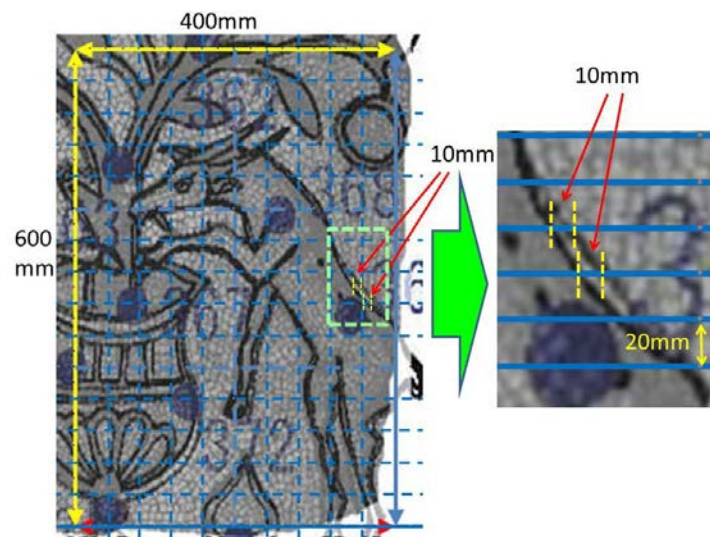
同じく都市遺跡第三聖堂の床モザイク画像を作成した。デジタルカメラは第二聖堂と同じものを使用した。撮影は、足場の問題から約 $5\text{m} \times 1.5\text{m}$ の範囲を斜め撮影し、その中で解析用に画像 25 枚を選択した。基準点は GPS の座標を 4 点使用した。図 2.21(a)左に計測した一部 (約 $3 \times 1.5\text{m}$) の実測図と右に本システムにより作成したオルソモザイク画像を示す。

詳細評価を行うため、重ね合わせた鹿の輪郭の部分 $320\text{mm} \times 480\text{mm}$ (図 2.21 (b)左) に水平に線を引き、垂直に交差している箇所 82 点を比較した (図 2.21 (b)右)。その結果 5mm 以内が 61 点、 $6 \sim 10\text{mm}$ が 21 点あり、平均で 4.5mm の差異となった。重ね合わせは全体でも 10mm 以内であった。

現地での実測から図化までの作業と本システムによるオルソモザイク作成、図化の作業を比較した場合、前者は現地にてビニールシートを床にかぶせ、なぞったものを持ち帰ってスライド撮影し方眼紙に投影して図化を行った。後者は実測の作業は撮影だけで解析時間は PC 上で 3 日と、解析に不確定要素となる余計な機器や作業が入らず、図面との差も 10mm 程度と満足のいく結果となった[26]。床面には凹凸があり、レンズ歪の修正やアフィン変換等の幾何学変換では比高歪が補正できないため、単なる二次元的なパノラマ画像作成とは異なりモザイク画像作成には凹凸を考慮した接続が必要である。本手法によりこれら補正を行い図面と同等精度のオルソモザイク画像を作成することができた。



(a) Measured Drawing(left) and Ortho-Image(right).



(b) Superposition

☒ 2.21 Ortho-Mosaic.

2.4.5 計測結果まとめ

各種遺跡の計測を例とした実応用例について、その精度と作業量をまとめたものを表 2.2 に示す。

遺跡などの対象物にはターゲットを貼ることができないため、標定作業が半自動計測となり時間がかかった。また、これら計測では、当初ステレオマッチングの自動範囲設定機能がなかったため、20 枚以上の画像の解析には合計で 3 日以上を要した。しかしながら、ライオンの彫像計測の例では、拡張 TIN-LSM 法により 7 日間かかったものが 3 日間に短縮できた。計測対象物の形状により一概には言えないが、マニュアル計測でのマッチング範囲の決定（初期値取得）には、全体の作業量の約半分を占めているため、本開発システムでは、全体の解析時間は表の半分以下になると考えられる。また、現場での計測は撮影だけで、解析、修正は画像さえあれば後からオフラインで行えるため、計測ミスなどにより、再度現場に行つての再計測作業等の後戻り工程は少なくなる。

従来の現場での作業は、トータルステーションなどを利用して計測し手書き図面をおこなっているため、それら作業量は膨大で、数週間から数か月を要するものとなっていた。また、レーザースキャナは、点群の取得に数時間を要し、後処理、図面化にはノイズ処理含め膨大な時間がかかるが（計測対象物の規模にもよるが、数日～数週間を要する）、誰でも大量な三次元点群を取得できる簡便性により利用されている。

本システムによる計測は、デジタルカメラ 1 台の撮影とノート PC にて行っている。教会の計測例では、計測のための撮影はわずか 30 分程度で済み、その計測の可搬性及び手軽さ、コストにおいては他の手法では実現できないものである。また、実用性能として、従来の図面化方法と比較したが、その差は 10mm 以内であり、十分その目的に応じたものとなった。これらのことから画像による三次元計測法は有用な手法であると考えられる。

表 2.2 Measurement condition and result

	Mannequin	Church II	Mosaic	Lion Statue	Agia Samarina
Size (m)	0.24×0.15×0.2	10 × 10 × 5	1.5 × 5	2 × 3 × 1	17 × 13 × 12
Number of images	2	2	25	20(100)	34
Photographing time	1 minute	-	-	0.5 day	30 minutes
Photographing distance	2.87 m	16 m	1~2 m	1~3 m	about 11 m
Base length	1.33 m	6 m	0.2~0.8 m	0.2~1 m	about 4 m
Digital camera	Dimage7	DCS Pro-Back	DCS Pro-Back	EOS	EOS
Number of pixels	5 million	16 million	16 million	6 million	6 million
Focal length	50 mm	52 mm	52 mm	18 mm	18 mm
Number of pass points	29	20	297	310	153
Number of control points	55	3	4	—	—
Orientation time	10 minutes	5 minutes	1 day	3 day	1 day
Measurement intervals	1 mm	20 mm	5 mm	-	-
Measured points	44,000	260,000	700,000	810,000	300,000
Total analysis time	10 minutes	1 day	3 days	10 days	4 days
Resolution : Δxy	0.2 mm	30 mm	0.2~0.3 mm	1 mm	4.5 mm
Resolution : Δz	0.4 mm	8 mm	0.1~2 mm	3 mm	15 mm
Accuracy	0.26 mm	10 mm	10 mm	-	-

2.5 本章のまとめ

我々の開発した三次元画像計測システムとその主要機能である標定、そして自動ステレオマッチング法、その計測精度、さらに構築したシステムの遺跡を中心とした応用例の実用性について述べた。

特に、面計測に関して、ステレオマッチング法として、マッチング範囲と初期値取得に照明変動やオクルージョンにロバストな OCM 法を粗密探索過程に組み込み、画像の幾何学的変形にロバストな拡張 TIN-LSM 法を開発した。そして面計測の大幅な省力化、自動化を達成するとともに、従来のマニュアル計測と比較し高速化、精度の高信頼化が図られた、新たなロバスト領域ベースマッチング手法を実用化した（詳細は、2.4.5 節 計測結果まとめ参照）。

次に、このロバストステレオマッチング法を活かし、画像計測システムとレーザースキャナの長所短所を結び付け補い合い、両者の計測により得られた点群からのビル等の建築物の精密な三次元計測法を検討する。遺跡や遺跡物は、その歴史から長年自然環境に置いてあり風化しており、様々な自然特徴点が表面に形成されている。それらのことから、2.4 節で示してきたように遺跡計測は本手法に適している応用例である。

しかしながら、近年のビル等の建築物は、古くなれば取り壊されて新築するという過程を繰り返したものが多い。そしてそれらは、水平や垂直の直線で規則正しく構成されており、遺跡とは異なり壁にはほとんど特徴点がなく、ステレオマッチングには適していない対象である。

そこで、レーザースキャナから取得できる点群の利用を検討し、ビル等の建築物は、水平、垂直方向等の様々なエッジ直線から構成されることから、この直線エッジを利用したレーザ一点群処理及びロバストステレオマッチング法での自動三次元計測を行い、両手法から取得された三次元モデルを自動合成することを検討した。これらについて 3 章で説明する。

3章 ロバスト特徴抽出に基づく点群・画像融合処理 による建築物三次元モデリング

本章では、建築物を対象とし、三次元計測手法としてデジタル写真測量（画像計測）法により取得した三次元データ（点群）とレーザースキャナ（Terrestrial Laser Scanner：TLS）で取得した三次元点群の融合を図ることで、新しい計測法を開発することを検討する。最終目標はスケールの異なる画像計測モデルとレーザ一点群モデルの高精度な位置合せ統合である。その過程で従来煩雑なマニュアル操作が必要であった標定の自動化を行う。本章では直線エッジ抽出法をベースとしたマッチング法とモデルの自動位置合せ統合法を新たに提案し、システムの計測精度の検証を行ったのでそれらを報告する。目標精度は BIM 等の応用も視野に入れ、計測条件を加味した各機器の分解能相当 (σ : 5mm) に設定した[53]。

市販デジタルカメラで撮影した画像データから三次元計測を行うデジタル写真測量法は、可搬性、機動性に優れる反面、特徴のない対象物に対して従来は自動計測が行えず、煩雑なマニュアル作業が必要で三次元モデル構築に多大な時間を要するという問題があった。一方、レーザースキャナは、自動で一度に数千万点から 1 億点までの大量の三次元点群が取得でき、特徴のない壁面などが計測できるという長所がある反面、機器の設置と点群取得に時間がかかるため、動いているものがノイズや欠測部分となり、後処理での膨大なマニュアル作業が必要で、それら処理に労力と時間がかかるのが欠点である。そこで、TLS により高密度な点群データを取得し、そのオクルージョンとなる部分や、小スペース部分、入組んだ場所などを、数分で撮影できるハンディなデジタルカメラの三次元計測で補い、そして双方の計測データを自動位置合せして統合し、基準となる長さを TLS から得ることで実寸の三次元モデルを構築するというアプローチを検討した。この際に、工程の自動化と両モデル間の位置合せ精度が課題となるため、それらを考慮した方法の開発を目指した。

本章では、3.1 節で提案手法について述べ、3.2 節でレーザ一点群処理による三次元エッジ抽出、そして 3.3 節で画像エッジマッチングによる三次元エッジ抽出、モデル作成、について説明し、3.2 節、3.3 節で得られた結果から 3.4 節で三次元エッジによるモデルの位置合せを検討し、3.5 節にて各種法の性能評価を行う。尚、3.2 節のレーザ一点群処理による三次元エッジ抽出は、本論文の主要テーマではなく、筆者らが研究開発した以前の方法を利用するので、詳細に関してはそちらを参照されたい[41,98]。

3.1 提案手法

使用機器は次の通りである。点群データ取得には Topcon 製地上据え置き型レーザースキャナ GLS-1500[40]、点群処理ソフトウェアは PC にて動作するセグメンテーション、ラベリング、三次元エッジ抽出機能[41]を利用する。デジタル写真測量法は、撮影に一眼レフデジタルカメラニコン D200 (3872×2592 画素、28mm レンズ)、そして Topcon 製ソフトウェア Image Master (旧名称 PI-3000) [8,30,40]に今回開発中のエッジマッチング機能を取り入れ改良した。そして基準尺を同時撮影し精度評価を行った。

図 3.1 に、レーザースキャナ GLS-1500 の外観、表 3.1 にその性能を示す。

計測は、ビル側面 28m×17m を対象とし (図 3.2 左上)、TLS 取得点群データ (図 3.2 左下) のオクルージョンとなる部分 (図 3.2 右上 : 矢印) に対し重複を含め、約 3m (横幅) × 2m (高さ) × 3m (奥行) の部分 (図 3.2 右下) をデジタルカメラにて撮影した。計測処理手順は次の通りである (図 3.3)。



図 3.1 GLS-1500.

表 3.1 Specification.

Type	Pulsed
Single Point Accuracy	4mm (σ) / 1~150m
Dual Axis Compensator	6" Accuracy
Spot Size	$\leq 6\text{mm}$ 1~40m (1/e ²)
	$\approx 16\text{mm} / 100\text{m}$
Scan Density	MAX 1mm/20m
Maximum Measurement Numbers	V*H : 100,000,000 points
Digital Camera	Color 2.0 mega pixels



図 3.2 A building to be measured: Photograph (top left), Point- cloud (top right, bottom left), Measuring image (bottom right).

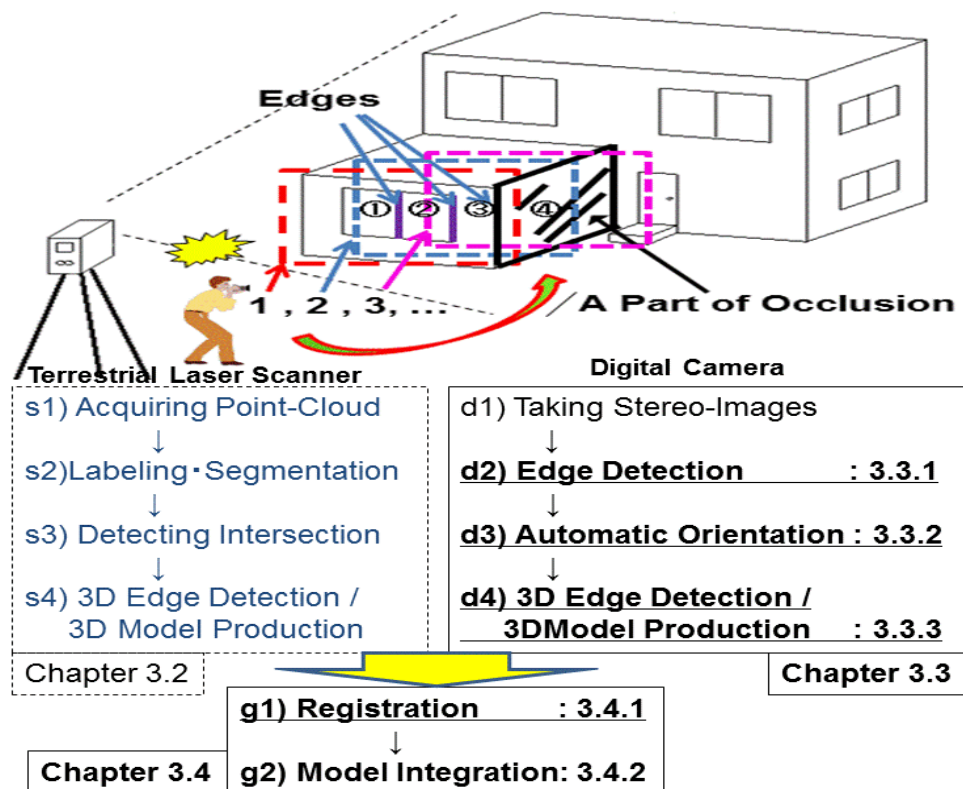


図 3.3 Our new method.

- s1) TLS により建物の点群データを取得する。
- d1) TLS により取得できなかった箇所の画像をデジタルカメラでステレオ撮影する。取得できなかった部分は、計測者やモデル・図面などの作成者が判断する。例えば本例のオクルージョンとなる部分（図 3.2 矢印部分）では、計測経験者は、TLS の位置から見て判断可能であるが、点群を取得後、視点を変えて点群データを描画させれば誰でも容易に抜けている部分が確認できる（図 3.2 右上）。TLS のプリスキャン機能などを利用すれば短時間（スキャン時間は数十秒）で確認することができる。ステレオ撮影は、スキャナから見える箇所からオクルージョン部へ順次オーバーラップさせながら撮影していく（図 3.3: 1,2,3 の点線枠）。点群データと画像データの重複部には 3 本以上の鉛直方向の直線エッジが含まれるよう撮影する（ex.図 3.3: 1,2 の点線枠内の①~③右のエッジ）。TLS の走査間隔 c と本処理の面抽出分解能 d (≥ 14 : 本点群処理にて内部的に平面と認識する水平方向の画素数閾値) から、計測に必要な 1 平面の大きさは $c \times d$ 以上である。仮に TLS の奥行き分解能が 4mm なので、 $c=4\text{mm}$ と設定すれば、本例では、段差 4mm 以上で $4 \times 14 = 56\text{mm}$ 以上の平面が 4 枚隣接（図 3.3①~④）していれば直線エッジ 3 本の条件を満たす。それらから通常のコーナーや段差、窓枠等で直線エッジは処理上認識できるが、判断が難しい場合は、プリスキャンもしくはオクルージョン部周辺をスキャンさせ、順次距離画像もしくは段差があった場合にアラーム表示させ直線エッジが 3 本以上ある箇所を確認する。あるいはスキャン後に点群処理にて三次元エッジ抽出（3.2 節）を行い表示することでも短時間（処理は数分）で確認できる。尚、TLS のオクルージョン部の計測は通常コーナー部分が含まれ、ビルは複数の鉛直方向の直線エッジから構成されるため、撮影は難しくないが、その場合それらエッジが十分入るように重複部を広範囲にわたり複数枚撮影解析処理してもよい。オーバーラップは、画像間の対応をとるために、目安として 2 枚で 50%以上、3 枚以上で 60%以上あれば各画像上に重複部がとれる[66]（図 3.3: 1~3 点線枠内が撮影部分を示す）。
- s2~s4) TLS で得られた点群データからセグメンテーション、ラベリングを行い、面の抽出を行って三次元エッジを抽出しモデルを作成する。
- d2) デジタルカメラで取得した画像でエッジ抽出する。
- d3) 得られた直線エッジ端点を利用して自動標定する。
- d4) 標定後に偏位修正画像（左右画像のエピポーララインを同一水平線上に再配置した画像）を作成し、エッジマッチングを行い、三次元エッジを抽出するとともに画像計測モデルを作成する。
- g1) 画像データと TLS の点群データから得られた三次元エッジの対応を推定し、それらからスケール補正を行うと同時に位置合せする。
- g2) レーザ一点群モデルと画像計測モデルを三次元モデルとして統合する。

以下 3.2 節~3.5 節において、s2)~g2)を説明する。

3.2 レーザー点群処理による三次元エッジ抽出

TLS から得られる点群データから三次元エッジを抽出する方法について説明する。この処理には我々が以前開発した方法[41~43,45]を適用する。図 3.4 にフローチャートを示す。TLS は垂直角と水平角でビームの方向をコントロールしているので、これら二つの角度を画像の二軸とみなし、点群の二次元表現（レンジ画像）を生成しこの処理を視点毎に行う。セグメンテーションには、この生成されたレンジ画像を用いる。注目点と近隣点の法線ベクトルのそれぞれの向きと座標から向きの違いと距離を計算し、それらが予め決めた閾値より小さければ同じラベルを割り当てる。抽出された面は、重心、法線、属している点の数、面積、バウンダリ等の情報を持っている。また、隣接する二つの面からそれらの交線を計算し三次元エッジとして抽出する。こうすることでオクルージョンによるエッジ点の隠れや、スキャン密度によるエッジ点の消失、精度劣化の影響を低減することができる。図 3.5 左は TLS で取得した点群データを、中央はセグメンテーションの結果（抽出した面ごとに異なる色で示している）、右に三次元エッジを抽出した結果を示す。

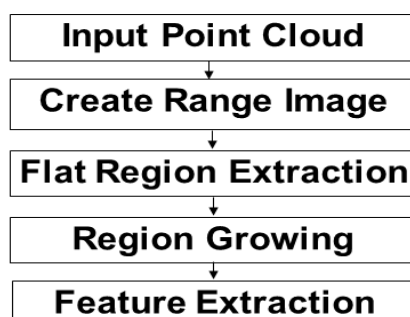


図 3.4 Flow chart of point cloud processing.

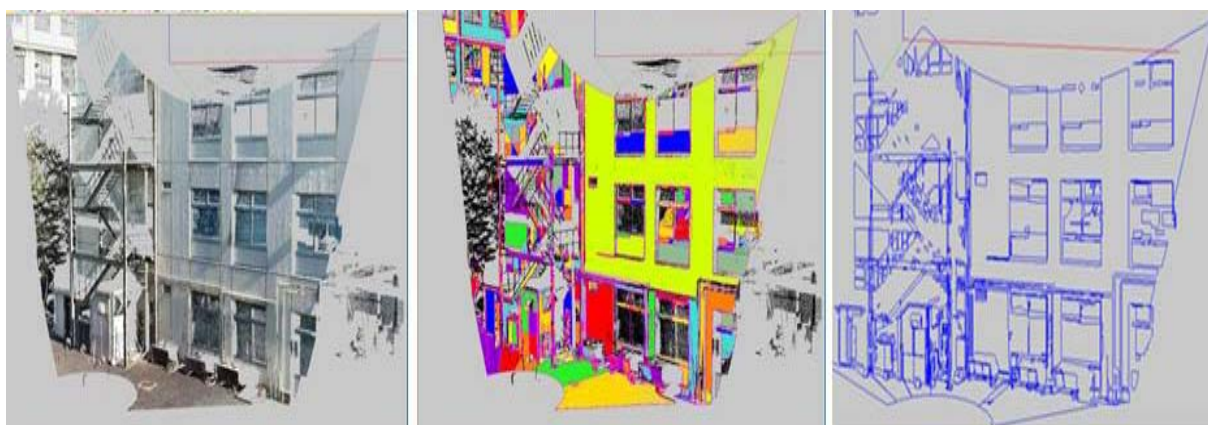


図 3.5 Point cloud data (left), segmentation result (middle), 3D edge detection result (right).

3.3 画像エッジマッチングによる三次元エッジ抽出、モデル作成

画像からの三次元エッジ抽出、モデル作成は図 3.3 d2)~d4) に示した手順で行う。そのエッジ抽出法を 3.3.1 節、自動標定処理を 3.3.2 節、三次元エッジ抽出とモデル作成のためのエッジマッチング処理を 3.3.3 節で説明する。特に高速かつ確実な直線エッジ抽出と直線エッジによる自動標定処理が全体の自動化や高精度位置合せ、モデル化の際の形状表現に貢献する。

3.3.1 エッジ抽出

エッジ抽出処理は、Canny オペレータ[68]が広く利用されている手法である。しかしながら、本研究のための構造物の特徴を表す直線の抽出には、処理結果として不要なノイズが出現し、エッジの判別が困難であり、後段のステレオマッチング過程でミスマッチングを引き起こす。そこで次の方法を新たに開発した。

(1) エッジ抽出方法 エッジ抽出には Sobel フィルタを用い、エッジ強度と向きを用いた NMS[68] (非最大値抑制) で細線化したのち、エッジ強度により閾値処理を行った。輪郭の忠実な検出は次の直線抽出で行うため、ここでは、エッジ強度 I の閾値を低くし (20 以下と設定)、多くのエッジを残す処理とした。 f_x 、 f_y を x 軸、 y 軸方向の微分とするとエッジ強度 I は次式で表される。

$$I = \sqrt{(f_x^2 + f_y^2)} \quad (3.1)$$

(2) 直線抽出方法 コーナーは特徴としては豊富であるが、形状は左右画像で異なり (図 3.6 左) 正確な対応点が得られない。そこで注目している直線のコーナー (変曲点) 検出を行いコーナー除去した残りの線分の端点を直線として抽出する。図 3.6 右にコーナー検出の原理を示す。注目画素 (x_1, y_1) のそれぞれ 2 画素前後の連結画素 (x_0, y_0) 、 (x_2, y_2) による 2 ベクトル間の狭角値を閾値処理 (本論文においては閾値は 30 度以上) により、コーナー点を検出する。

$$\cos \theta = \frac{\langle a, b \rangle}{\|a\| \cdot \|b\|} = \frac{\{(x_1 - x_0)(x_2 - x_1) + (y_1 - y_0)(y_2 - y_1)\}}{\sqrt{\{(x_1 - x_0)^2 + (y_1 - y_0)^2\}} \cdot \sqrt{\{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2\}}} \quad (3.2)$$

(3) エッジ評価方法 抽出した直線の長さ len の各画素の強度 I の累積値を評価関数とし、ある閾値以上としたものを検出されたエッジの中から直線エッジとしてラベリングする。閾値 k については、コーナー部の判定に最低 3 画素以上必要なことから 5 画素以上を直線エッジと定義した。そして分布している画像上のエッジの最大強度 I に対して実験的に確認を行い 5 倍 ($=k$) をエッジとした。以降エッジは始点終点を座標値によって記述される直線分とする。

$$k \cdot \max I < \sum_{i=1}^{len} I(i) \quad (3.3)$$

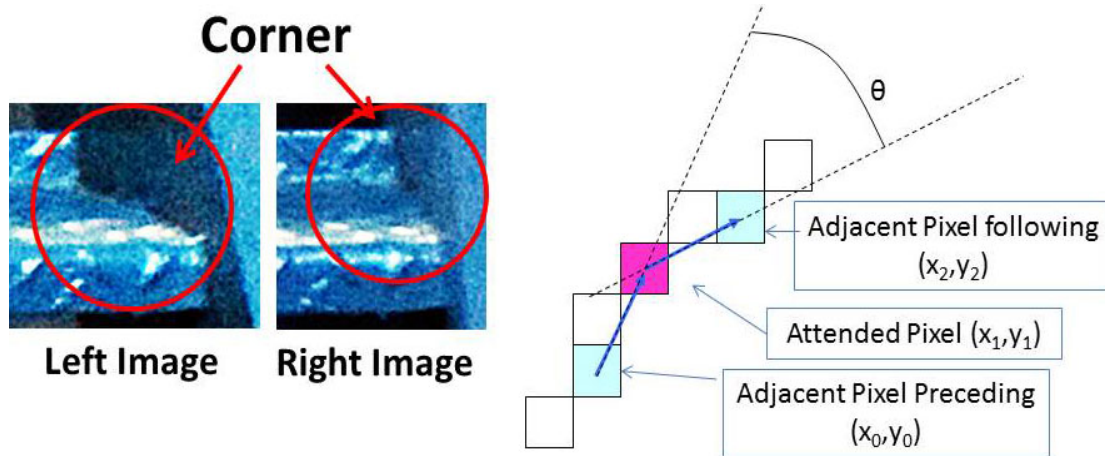


図 3.6 Corner image of staircase (left), corner detection (right).

(4) 結果

図 3.7 にチェッカーパターンのエッジ画像例を示す。強度画像（左上：式(3.1)）では短いノイズが、長さ画像（右上：式(3.3)の $\lambda(j) = 1$ と設定）では長いノイズが検出されるが、エッジ強度の長さ累積画像（左下：式(3.3)）でそれらノイズを除去した。抽出結果を原画像に重ね合わせた図を右下に示す。

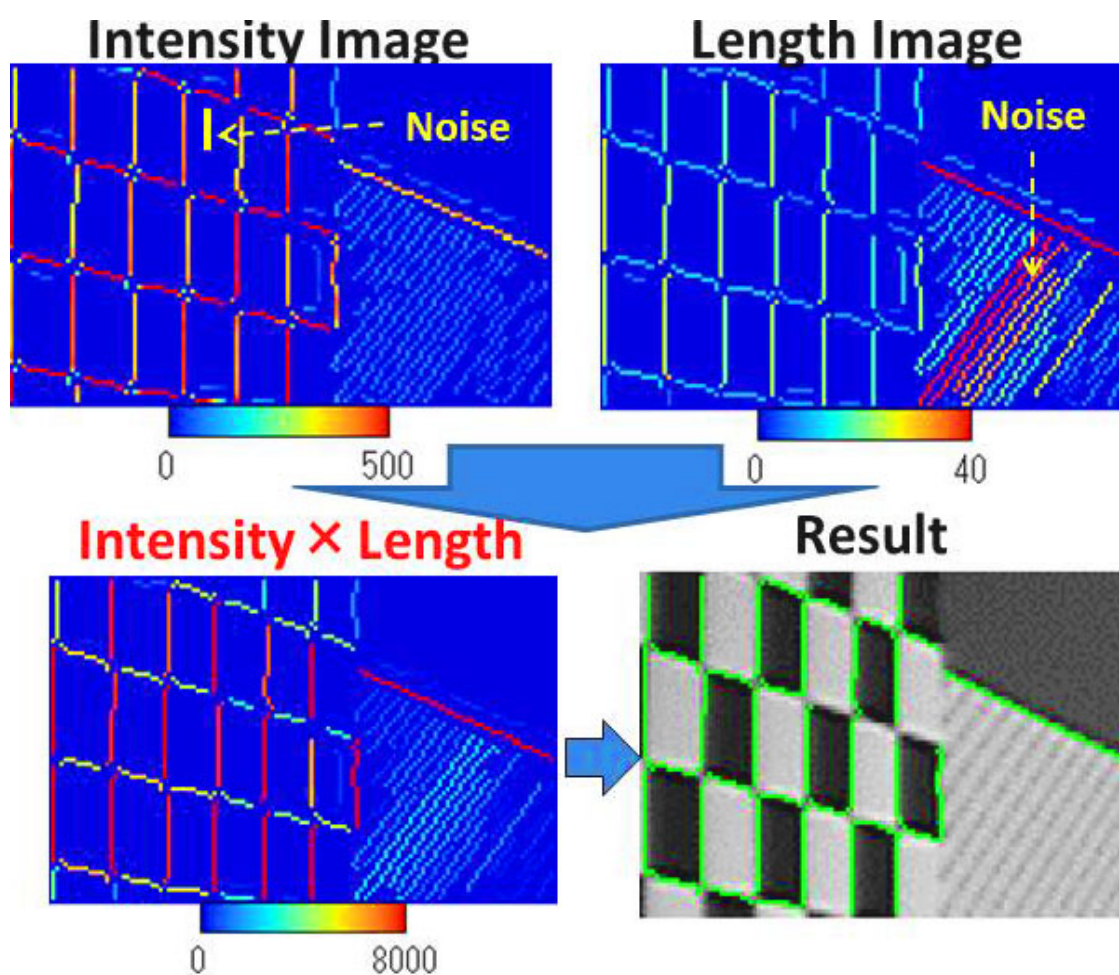


図 3.7 Edge detection.

図 3.8 左に階段部分（オクルージョン部）の、Canny オペレータ、右に本手法による抽出エッジを示す（上：原画像、中：拡大図、下：階段コーナー部分拡大図）。図 3.8 中段を見ると Canny オペレータはノイズとなるエッジを多く含んでいるが、本手法は階段側壁の細かな模様などの細部が除去され、更に階段の各先端部分などの三次元モデリングに必要な特徴部分が比較的長く連結して抽出されている。図 3.8 下段は、図 3.6 左と同じ階段部分を拡大したもので、マッチングに不要なコーナーとノイズが除去されている。

さらに詳細な手法どうしの比較評価は、3.5.1 節 直線エッジ抽出法評価で説明する。

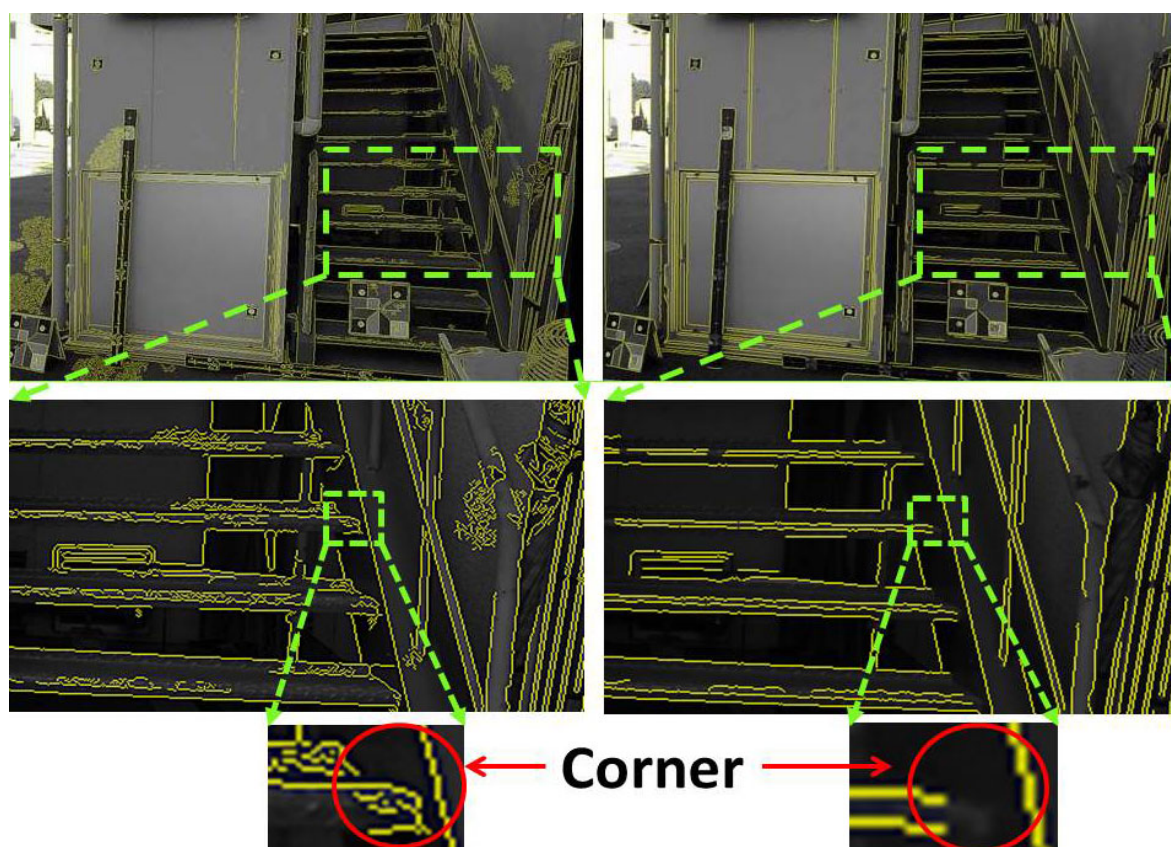


図 3.8 Edge detection result : Canny Detector (left), Our system (right).

3.3.2 エッジ抽出による自動標定

画像計測による建築物のモデリングは、BIM 等の応用を視野に入れた場合、複数画像を接続し精度を劣化させないように計測する必要がある。写真測量法の標定には、2 枚のオーバーラップ領域で計算上最低 6 点以上の点が必要で、3 枚以上では画像接続にタイポイントと呼ばれる 3 枚の画像に共通な部分が必要である (図 3.3: 撮影 1,2,3 の共通部分)。また画像上で特徴点の分布が偏ると、偏位修正画像を作成するうえで縦視差が補正 (計算) しきれずその後の計測精度が信頼できないことがある [48,108]。そのために 1 画像を 3 分割し、各領域に 3 点ずつ配置し合計 9 点以上あると画像の接続が確実に進め標定の信頼性が高くなる。特に航空写真測量では、この条件を満たし標定及びステレオマッチング領域を確保するために、画像を 3 分の 1 ずつオーバーラップさせながら撮影計測させる [66,108]。そこで標定精度確保のためにこの手法を建築物のモデリングに適用させる。

提案手法では、建築物を構成する直線エッジを縮小画像上で 9 ブロックにわけて視差推定用の垂直エッジ端点を抽出するようにし、等倍画像にて視差推定値に基づいてマッチング範囲を絞り射影歪に強くサブピクセル検出する LSM で確実に信頼性の高い特徴点抽出を行う処理とした。

図 3.9 に処理フローを示し、以下手順を記す。尚、詳細な他手法との比較及び本手法の評価は、3.5.2 節の自動標定用特徴点抽出法評価にて説明する。

- a) 処理を高速化するため、縮小画像にて、エッジの端点近傍をテンプレートとして左右画像のステレオマッチングを行う (正規化相互相関法)。
- b) 9 つの各ブロックの相関値が上位のものから、対象が平面だと仮定して (3.4) 式で示す射影変換のパラメータ $b_1 \sim b_8$ を 8 点法 [69] に RANSAC 処理 [97] を行って算出する。
- c) エッジマッチングして得られた対応点 (x_e, y_e) ともとの座標 (x, y) を射影変換した点 (x', y') とのずれ量が小さいものを視差推定量とする。 x', y' は、次式であらわされる。

$$x' = \frac{b_1x + b_2y + b_3}{b_7x + b_8y + 1}, y' = \frac{b_4x + b_5y + b_6}{b_7x + b_8y + 1} \quad (3.4)$$

視差推定量 P は、Gibbs 分布を表す式(3.5)とした。残差 $J(\Delta p, \Delta q)$ が小さいほど特徴点として正しい可能性が高く、 $P=1$ に近いものを上位から選び視差推定量とした[70]。またこのときの係数を実験結果から $s=0.05$ と設定した。

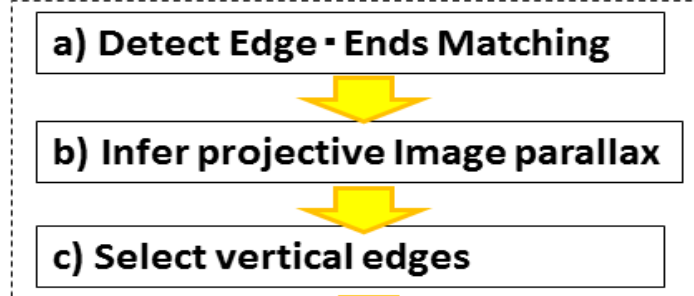
$$p = e^{-sJ(\Delta p, \Delta q)} ; \quad \Delta p = x_e - x', \quad \Delta q = y_e - y' \quad (3.5)$$

- d) 得られた特徴点から鉛直方向の直線エッジを構成している端点を選択する。すなわち、建築物のカメラによる撮影は、オーバーラップ撮影を横に移動しながら行うため、横方向の向きが変わりやすく左右画像が変形しやすいが（例えば水平ラインに沿った直線があれば左右画像でそれぞれ長さが変わる）、縦方向はカメラを意識的にあおらなければ変化が少ない。従って、このようにすることで横向きの変形に強く、かつエッジポラライン上のマッチングを正確に行える。
- e) 等倍画像にて、再度標定用特徴点抽出を行う。
- f) 抽出された特徴点から c) で選択した視差量をもとに、ステレオマッチングを行う。ここでは射影歪に強くサブピクセル検出できる LSM（最小二乗相関）法[12]を用いることで高精度に特徴点を求める。
- g) このようにして求められた特徴点から、8 点法+RANSAC[69,97]にて標定用の対応点を求めた。

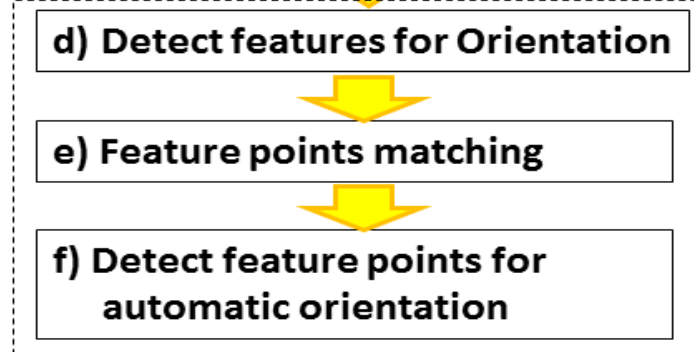
そして求められた標定点をもとに相互標定（2.1.4 節、あるいは[19],[110]）、バンドル調整[17,100~106,110]を自動で行いカメラの外部標定要素を求める。

図 3.10 左は、(3.3)式でエッジ抽出された端点、右は本処理によって求められた自動標定用特徴点を示す。

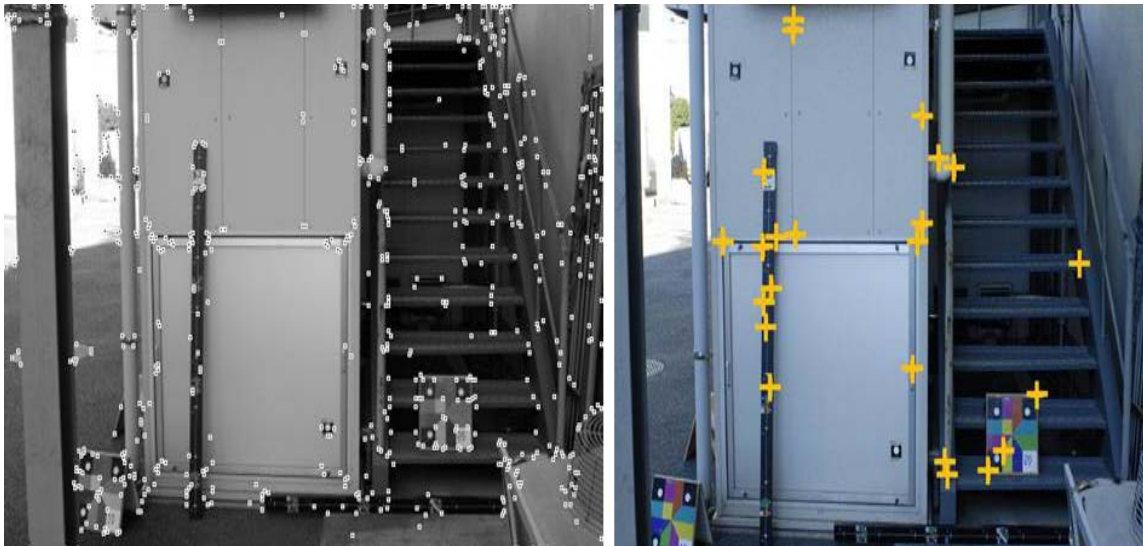
Infer parallax of plane (reduced image)



Detect feature points



☒ 3.9 Processing flow of edge detection for automatic orientation.



Ends of edges (left), Points for automatic orientation (right).

☒ 3.10 Result of feature points detection.

3.3.3 エッジマッチングによる三次元エッジ抽出、モデル作成

自動標定で求められた特徴点から、偏位修正画像を作成し、その画像から三次元エッジ推定と三次元モデル作成を行う。三次元エッジ推定は、エッジ端点を利用したエッジマッチングにて、三次元モデル作成は抽出したエッジ端点を拡張 TIN-LSM 法に組み込む。この手法は、OCM（方向符号照合）マッチング法[14]と TIN-LSM 法[8]を統合させたもので、照明変動やオクルージョン、射影歪に強い領域ベースのマッチング法である（拡張 TIN-LSM 法の詳細は 2.2 節参照）。今回建築物等の形状やエッジが急峻なものに対応するため、抽出したエッジ端点・変曲点を拡張 TIN-LSM 法に組み込み三次元モデル作成を行った[111]。ここでは、最終的な Surface モデルを作成するため、“3.3.2 エッジ抽出による自動標定”とは異なる平面に限定しないエッジ特徴点に注目したエッジマッチングを行う。すなわち、3.3.2 では標定を確実に精度よく行うため画面全体から平面を推定し、エッジ端点の特徴点を抽出する方針としたが、モデル形成には、特徴を有するところからなるべく数多くのエッジ特徴点を抽出し形状を表現する方針とする。そのために端点だけでなく変曲点等エッジを構成する点を加えてマッチングを行う。

処理は図 3.11 に示すように[47] [111]、(1)エッジマッチング用視差推定、(2)エッジマッチングによる三次元エッジ抽出、そして、(3)その三次元エッジを処理に組み込んだ TIN-LSM 法によるエリアベースのエッジ Surface マッチング、の順に行う。

以下図 3.11 に示される処理フローに従って説明する。

(1) 視差推定用に、特徴量 OCR を用いた OCM マッチングを行う（2.2.1 節参照）。そして求められた対応点をもとに誤対応除去を行う。誤対応除去には、バックマッチング法等を使う。ここで求められた対応点は次にエッジマッチング用の視差推定に利用する。この処理を階層化することで、より高速かつ信頼性の高い視差推定値を得ることが可能となる。OCM マッチングは照明条件、オクルージョンにロバストであるという特徴を有し、後段のエッジマッチングを行う際に信頼性の高い視差推定値とすることができる。

(2) エッジマッチングを行う。ここでは、エッジの端点・変曲点をテンプレートとしてステレオマッチングすることで、三次元エッジを抽出する。

エッジ抽出は、3.3.1 で説明したエッジ強度と長さの評価する手法で行う。ここでは形状を表現するために、なるべく数多くのエッジ特徴点を抽出する。そのために、端点だけでなく変曲点等エッジを構成する点を加えてマッチングを行う。変曲点はコーナー除去の角度（本論文では 30 度）以下の点を利用する。

図 3.12 にエッジマッチングを行う際の視差推定方法について示す。対応点として求めたエッジ端点・変曲点 **F** の近傍にある **OCM** により求めた視差推定用特徴点 3 点を見つけ ($P_1 \sim P_3$)、エッジ端点・変曲点 **F** からの距離に基づいた重みを算出し、これを視差 D とする (式 (3.6))。そしてこの D の範囲内を探索する。

$$D = \sum_n \frac{L_s - L_n}{2L_s} D_n \quad (3.6)$$

ここで、 D_n : 各特徴点 P_n の視差、 L_s : 距離の合計

L_n : エッジ端点・変曲点 **F** から特徴点 P_n までの距離

このようにすることで探索幅を狭め高速化を行うと同時にミスマッチングを減少させた信頼性の高いエッジマッチングが行える。

端点・変曲点すべての点でマッチングが成功した点を三次元エッジとして使用する。

(3) 求められた三次元エッジを、粗密探索を用いた最小二乗マッチングに組み込み **Surface** モデルを作成する。このとき、エッジマッチングにて得られた端点、変曲点を“2.2.2 拡張 **TIN-LSM** 法”の各階層での処理 **a)~k)**の **OCM** で得られた特徴点の代わりに挿入し、処理を実行することにより、エッジ特徴点を利用したステレオマッチングによる **Surface** モデルが作成される。

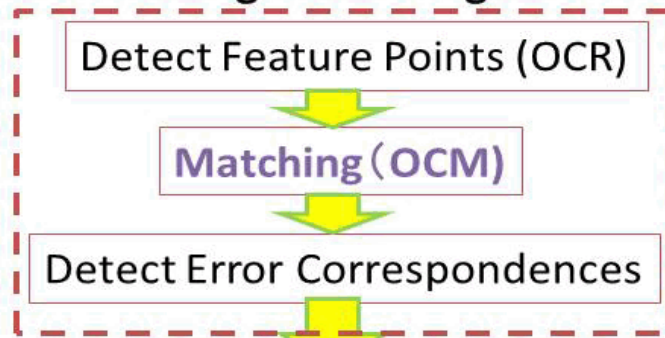
これら処理により求められた結果を図 3.13 に示す。

図 3.13 (a)が、従来法である **TIN-LSM** 法による結果、(b)がエッジマッチングによる三次元エッジ抽出結果、(c)が直線エッジ抽出による拡張 **TIN-LSM** 法の結果、(d)はそれにテクスチャマッピングし三次元エッジを重ね合わせたものである。

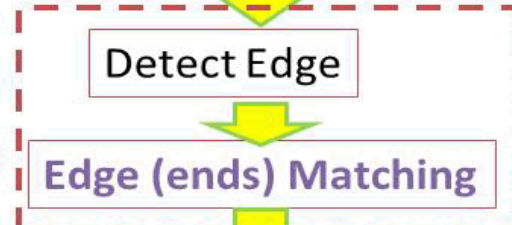
従来法では、階段部分が潰れて再現されていないが (図 3.13 (a))、本提案手法では階段の直線部を明確に抽出し形状が表現されているのがわかる (図 3.13(b)~(d))。

さらに、視差推定の能力を確認するため、**OCM** 法と正規化相関 (**NCM**) 法を比較した。図 3.13 (e)左は、図 3.13 (b)の視点を左に回転させて描画した図で、図 3.13 (e)右は視差推定を **NCM** 法で行った同じ視点での結果である。図右から、**NCM** 法は、隣接する面の直線エッジやコーナー部分のエッジが推定できずにミスマッチングを引き起こしているのがわかる (エッジ端点・変曲点に長い線が出現)。**OCM** 法は、オクルージョンや明度変動に強いという特徴から、これらミスマッチングを引き起こさずに良好な結果が得られている。

(1) Estimated Parallax for Edge-Matching



(2) Edge- Matching



(3) Edge Surface-Matching

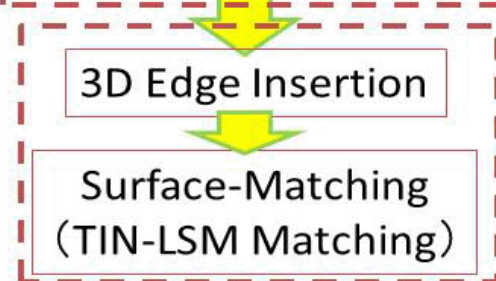


図 3.11 Flow of Matching Process.

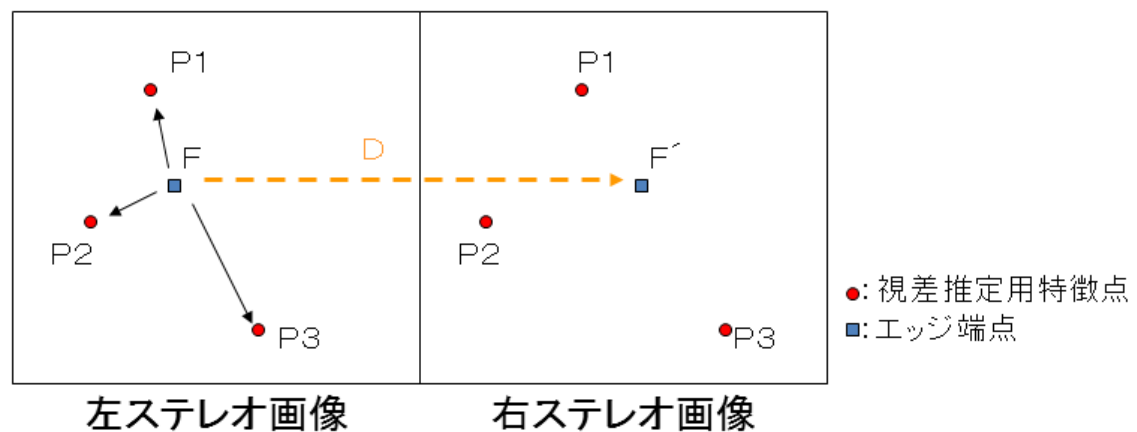
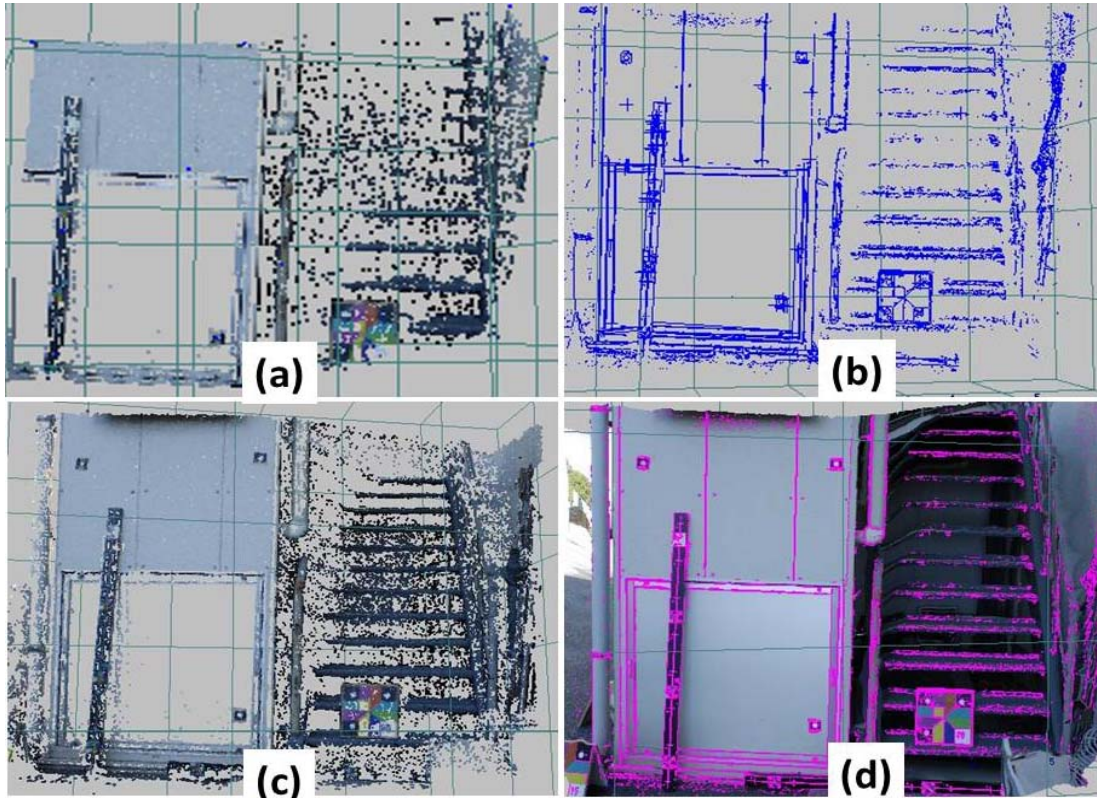
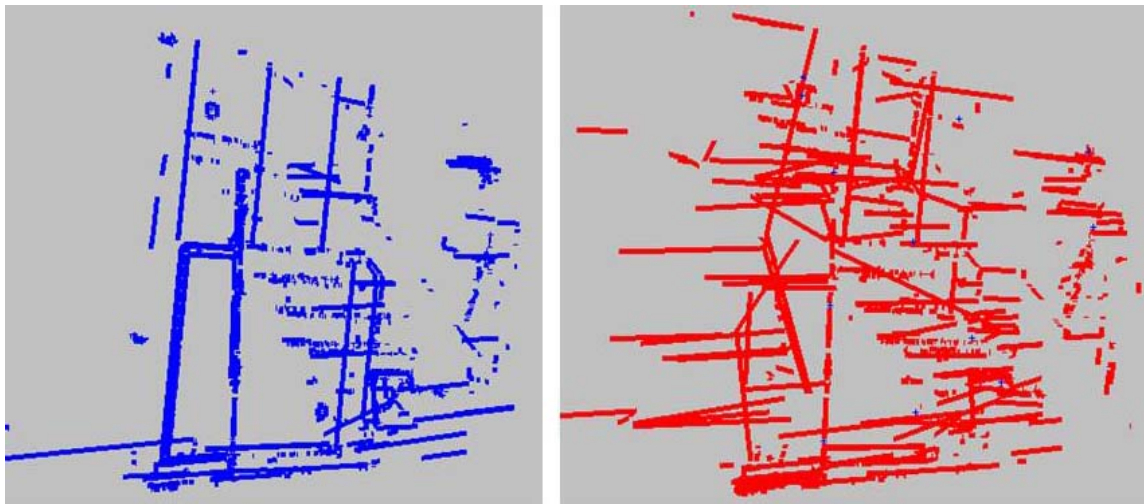


図 3.12 Parallax Estimation.



(a) Only TIN-LSM method. (b) Edge-matching (3D edges).
(c) Extended TIN-LSM method. (d) Superposition of 3D edges onto the texture-mapped Extended TIN-LSM result.



(e) Result Comparison of 3D Edges : OCM (left), NCM (right)

☒ 3.13 Matching Result.

3.4 三次元エッジによるモデルの位置合せ

3.4.1 手法概要

本章では、レーザー点群モデルと画像計測モデルから得られる三次元エッジを用いて位置合せする方法を提案する。従来レーザー点群と画像計測データの位置合せは、1.2.2節(2.3)で述べたように点群を画像化したレーザーレンジ画像とカメラ画像のステレオマッチング手法で行っている。しかしながら、この手法では標定が難しく精度が確保できないと報告され[48,50]、実際筆者らもこの手法で試みたが、TLS (GLS-1500) に搭載されているカメラ画像は解像度が低く画角が狭いため（画素数：1600×1200、画角：22°(V)×16.5°(H)）[40]、ステレオマッチングが行えずこの手法が適用できなかった。また、点群どうしの位置合せ法は、点群そのものが実寸法を持っているため、スケール調整してからでないと本事例には適用できない。そこで本研究では、建築物の構造上のエッジ特徴と TLS の点群は実寸を持つことに着目し、画像モデルと点群モデルは相似形であることから、建築物を構成する 3 方向の平面の向きを利用してモデルの向きを合わせ、平面の交線から形成される稜線（三次元エッジ）から位置とスケールを合せる方法を考案した。

図 3.14 に位置合せの概念図を示す。

本手法は、(a)垂直方向の三次元エッジ抽出、(b)エッジ間の距離と角度を用いて対応点を探索する、(c)スケール調整を含めた位置合せ、の 3 つの要素から構成されている。

本提案手法の位置合せ性能評価は、スケール調整を含めた画像モデルとレーザー点群モデルの位置合せ方法が他になかったことから、スケール精度に関しては精密に計測された長さスケールを本手法で計測した数値と比較した。位置合せ精度に関しては、面との誤差を比較し計測機器の分解能程度であれば OK とした。これら詳細に関しては、3.5.3 節の位置合せ精度評価で説明する。

3.4.2 三次元エッジによるスケール調整、位置合せ

3.3 節までの処理で、画像計測モデルにはこの段階で実寸法が入っていないため、スケール調整を含めた位置合せを行う。各モデルの概略向きを合せ、移動量を X-Y 方向シフトのみとさせ、シフト後スケール調整を含めた位置合せを行う。各モデルの三次元エッジは高精度に求められているため、精度を保ちつつ位置合せの高速化を図った（結果は 3.5.3 節で説明）。

更なる高精度化には本処理を初期値として ICP 法[54]を適用する。

提案手法のフローチャートを図 3.15 に示す。

建築物を構成する三次元エッジ群は、

- ① 隣接した直交する三つのベクトルで構成されたとするマンハッタンワールド仮説[67]に基づき、それぞれのモデルから主要な 3 方向の法線ベクトルを求め、モデルの向きを揃えたアライメントを行う。すなわち、点群モデルは抽出した面の法線ベクトルから、画像計測モデルは、抽出した 3 次元エッジから面の向きを推定して法線ベクトルを抽出する（図 3.14 各モデル上の矢印）。TLS とカメラは、同じ向きの視点から計測及び撮影を行っているため（3.1 節 d1）、モデルの向きを直交するベクトルから推定し揃えることができる。次に、
- ② それぞれのモデルから得られる垂直方向の三次元エッジを取り出し、
- ③ エッジ間の距離と角度を用いて、同様の位置関係を持つエッジの組合せを探す。前述したように画像計測モデルはまだ実スケールを持っていないので、ここでは相対的な位置関係を用いる。

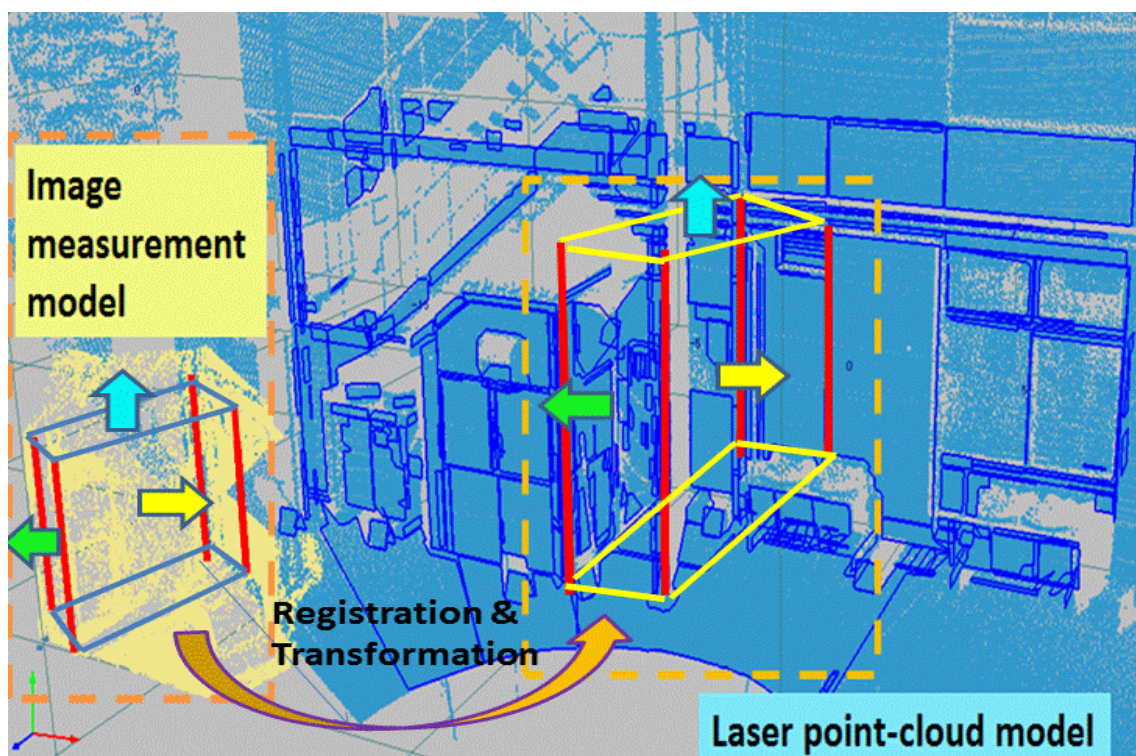


図 3.14 Scale adjustment and registration by 3D Edges.

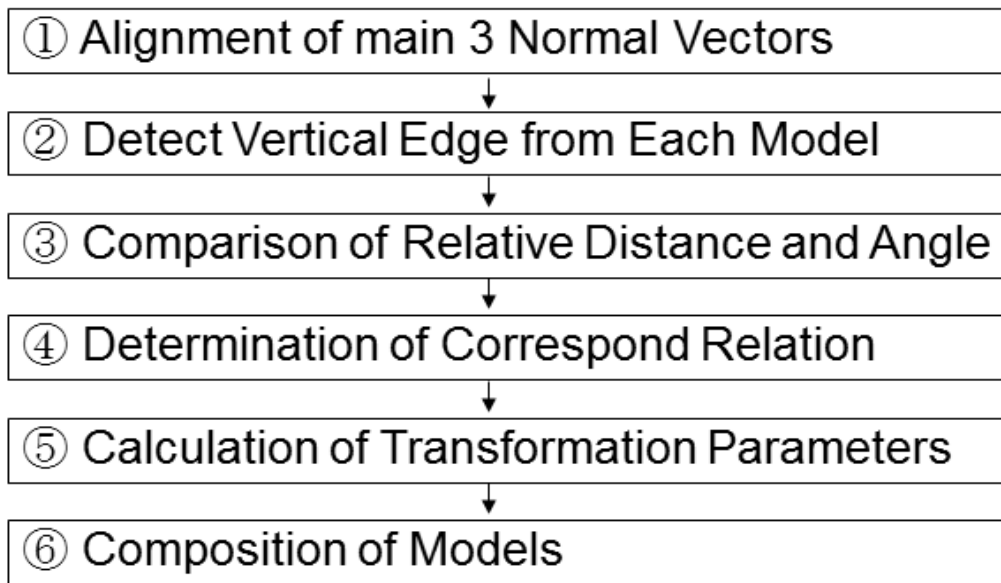


图 3.15 Flow of registration by 3D edge.

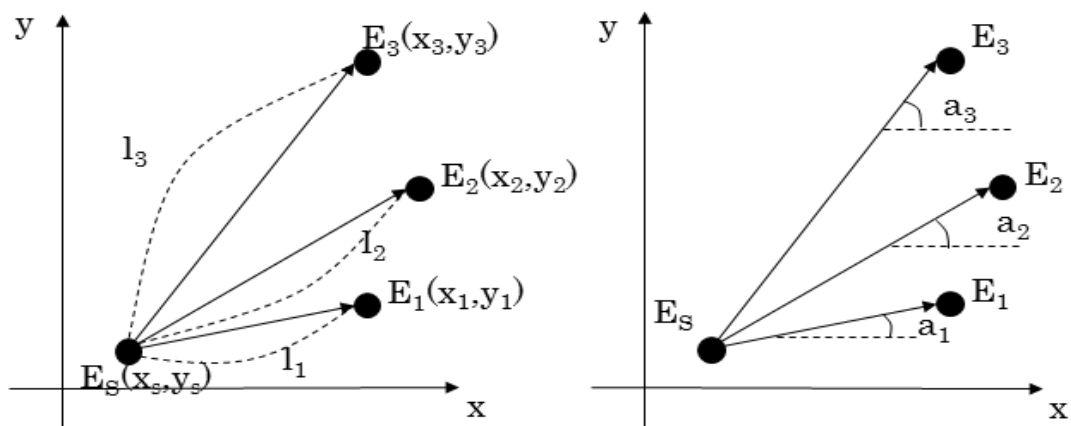


图 3.16 Glance at 3D Edge Matching: Calculation from the standard edge(left), calculation of angle from the standard edge (right).

図 3.16 左は、取り出した垂直エッジを上から見た様子を示しており、黒丸は垂直エッジである。

取り出した垂直エッジの中から一本を基準エッジ E_s と決め、その基準エッジと残りのエッジ E_i (E_1, E_2, E_3) との距離 l_i (l_1, l_2, l_3) を計算する。この例では、基準エッジ以外に 3 本のエッジを利用している ($i=1\sim 3$)。

$$l_i = E_i - E_s = \sqrt{(x_i - x_s)^2 + (y_i - y_s)^2} \quad (3.7)$$

角度の計算については図 3.16 右の図を用いて説明する。①で説明した処理から既にモデルの向きのアライメントを済ませているので、角度計算の値は絶対値とし基準エッジから残りのエッジに向けて引いたベクトルと x 軸との角度差 a_i (a_1, a_2, a_3) を計算する。以上のように基準エッジを中心とした残りのエッジまでの相対距離と角度の各モデルのセット $((l_i, a_i)$: 画像計測モデル、 (l'_i, a'_i) : レーザ一点群モデル) を全ての組合せにおいて計算し、

④ 最も類似度の高い組み合わせを対応エッジとして決定する。各モデル間のセットの残差 $\mathcal{J}(\Delta m_i, \Delta a_i)$ を、基準長さ l_s に対する l_i の比の残差 Δm_i ($=\Delta l_i / \Delta l_s = l_i / l_s - l'_i / l'_s$) と角度残差 Δa_i ($=a_i - a'_i$) とする。残差は小さいほど類似の可能性が高く、次式に表される類似度 $S_i = 1$ に近くなる[70]。類似度 S は(3.8)式とした。

n は比較するエッジ本数で、図 3.16 の例は $n=3$ で l_s は、 l_1, l_2, l_3 のどれか一つとし、Gibbs 分布の係数 $r=0.05$ とした。この例では $S \approx 3$ に近くなる組合せが最も類似度が高くなる。

$$S = \sum_{i=1}^n S_i = \sum_{i=1}^n e^{-r \cdot j(\Delta m_i, \Delta a_i)} \quad (3.8)$$

実データでは、TLS データから検出した直線の数の方が多い。その場合、

(a) 画像計測モデルから探索する直線を直交する 3 方向で直線の長い順から決定する。

そして、

(b) TLS データから比較する組を複数組用意する。各組には、直線の長いものから n 本以上 (例えば 2 倍以上) の候補を用意しておく。そして、

(c) 最初基準にしたセット内で n 本探索する。

(d) もし見つからなければ類似度 S_i の低い直線を候補から外し候補を入れ替えて探索する。

- (e) これらの処理を組を変えて繰り返す。
- (f) 最終的に全組の中から一番高い類似度のセットを選択する。
- (g) もしこれで見つからない場合は、画像計測モデルの探索する直線を入れ替えて同様の処理を繰り返す。
TLS データの検出される直線が多いので、対応する組を見つけることは大抵の場合できると考えられるが、もしそれでも見つからない場合があれば、
- (h) マニュアルにて直線を選択して位置合せする。仮に画像計測モデルの直線が TLS データよりも多い場合は逆の処理とする。
そして対応エッジが決まったら、

⑤ 画像計測モデルとレーザー点群モデルの倍率とアフィン係数を求め、

⑥ 各軸のスケールを同一倍率としたアフィン変換により、画像計測モデルに実寸法を与え位置合せする。

図 3.17 左に偏位修正画像から抽出した三次元エッジ（太い線、赤色で表示）、右にその位置合せ結果と点群モデルから抽出した三次元エッジ（青色）を表示したものを示す。ここでは、長い順に 6 本のエッジを位置合せに用い、点群モデルから抽出したエッジとの組み合わせの探索を行った。

ここでの前提条件として、最初のエッジ比較時に相対的な距離を用いるので、それぞれのモデルから少なくとも 3 本の垂直エッジが抽出されていることとした。さらに、スケール推定と位置合せ精度を高める必要がある場合、ここでの処理結果を初期位置合せとして ICP 法[54]を用いることで、より高精度な位置合せを行う。すなわち、位置合せ部分には構造的な特徴（3 本の鉛直方向の直線エッジ）があり、両モデルの誤差となる大きなノイズは除去されているため（3.2、3.3 節）、距離に制約条件をいれ、点の数が多い方を面とし少ない方を点とする ICP 法で高精度位置合せが可能である。

本論文では TLS の分解能の 12 倍を距離の制約条件とし、TLS の点群を面とし、画像計測モデルを点として位置合せを行った。

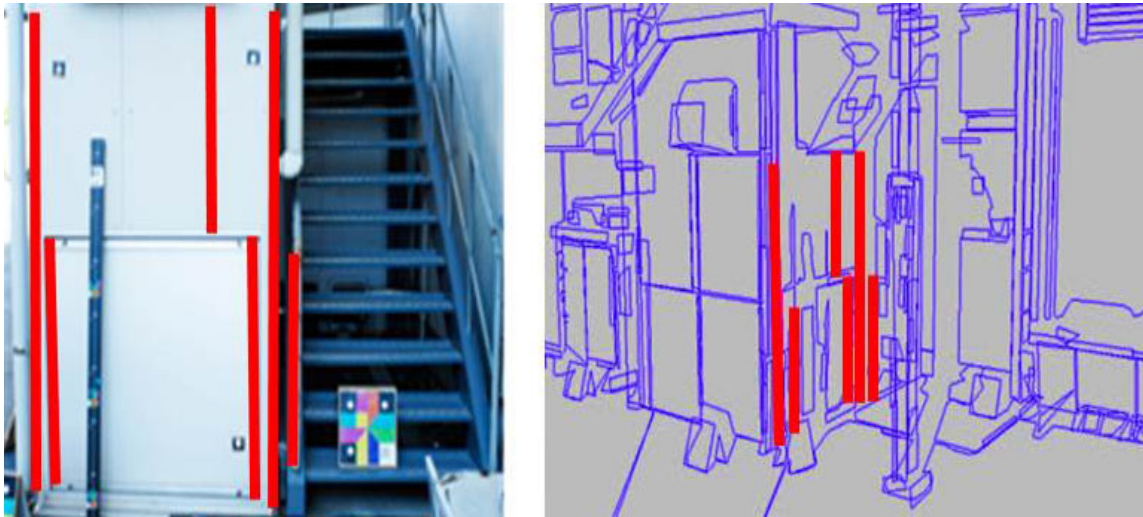


図 3.17 3D Edges : The edge detected from the rectified image (left),
The result of 3D edge-matching (right).

3.4.3 モデル統合

提案手法により得られた統合モデルを図 3.18 に示す。左の図では統合前の点群のみを示し、右の図ではレーザ点群モデルと画像計測モデルを統合した結果を示す。TLS からはオクルージョンとなり計測できなかった階段部分(図 3.18 左円内)のモデルが統合された。



図 3.18 Model integration : Before integration (left), After integration (right)

3.5 実験結果評価

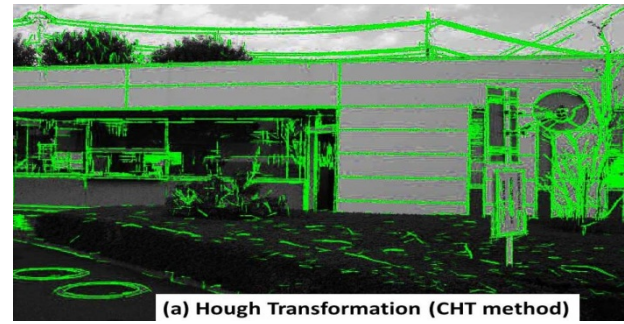
3.5.1 直線エッジ抽出法評価

長短のエッジが混在する例として、草木を含んだ建築物の画像に対する直線エッジ抽出を Hough 変換、Canny オペレータ、提案手法で行った。それらを図 3.19(a)～(e)に示す。

Hough 変換は、通常長い直線に投票が集まり直線間の特徴点が抽出されにくくなるが、自動標定用及びモデル作成用に画像全体から特徴点を抽出させるために、セグメント分割して短い直線を抽出することができる CHT (Combinational Hough Transform) 法[109]にて直線抽出を検討した。結果は図 3.19 (a)をみるとわかるように草木がノイズとして抽出されている。Hough 変換は多数の直線候補が抽出されるため（図では抽出した線が重なり太くなって見える）、候補を絞る処理が後段でさらに必要である。例えば他手法で抽出したエッジと AND をとることや（Canny オペレータや本手法でもよい）、その他の手法にて候補を決める必要がある。Hough 変換は前処理でもエッジ抽出しておくことが必要で本研究では効率的でないため採用しなかった。

Canny オペレータのパラメータは、エッジ強度の ThH （提案手法(3.1)式の I に相当）とその閾値に連鎖する弱い勾配を残す閾値 ThL と、ガウシアンフィルタ (σ) の 3 つからなる[68]。 σ は前段階でのぼかし処理のパラメータである。本例では実際の効果は認められなかったため一定とした。

図 3.19 (b)は、建物の構造（壁面の縦横の線）が抽出できるように調整した例（ $ThH=ThL=1$ ）で、草木が細かいノイズとして抽出されている。(c)は、草木を除去するようにエッジ強度の閾値を高くした結果である（ $ThH=2.6$ 、 $ThL=1$ ）。草木は除去できるが建築物のエッジも抽出されない。(d)では、(c)の結果から $ThL=0.6$ として建築物のエッジが抽出できるか確認したが、それらは抽出できず(c)で抽出したエッジに関連した草木の箇所にノイズが出現した。(e)は提案手法で、ノイズとなる草木を除去し、目的とする建築物を表すエッジを抽出している（(3.2)式右辺：エッジ強度と長さの累積値 $\Sigma I = 28$ ）。これら実験結果から、建築物の形状抽出には、Canny オペレータはエッジ強度の閾値 ThH が主に関係し ThL はそれに連鎖したエッジが抽出され所望の結果が出力されなかった。提案手法はエッジ強度だけでなく強度に長さを累積させた値で判定する方式としたため、建築物の形状を表すエッジを抽出しノイズとなる草木を除去できた。



☒ 3.19 Comparison of Edge detection.

3.5.2 自動標定用特徴点抽出法評価

抽出された特徴点の分布と標定精度を提案手法と SIFT 法で画像を 9 分割することで確認した。SIFT 法は、homography（二平面間の射影）拘束をいれた SIFT 法[73]を使った（以下の実験はすべてこの手法を利用）。

分布の比較は、画像を 9 分割し、分割した領域に 1 つ以上特徴点が抽出されれば 1 とカウントした。図 3.20 左に SIFT 法、右に提案手法での 5 組のステレオペア（Image1～5）の分布結果を示す。図 3.20 Image1 左の例では 9 分割した領域中 4 領域に抽出（円の部分）され分布は $4/9=44\%$ である。すなわち%が高くなると特徴点が全体に分布していることを表す。表 3.2 に各ペアでの分布率を示す。

本方式で画像を接続する場合、縦方向に $1/3$ ずつ分割した 2 番目の中央領域に特徴点が必要であり、SIFT 法では、5 例中 3 例（Image1,2,4）抽出ができなかった。全体では、SIFT 法 38%、本手法 89%となり、本手法では特徴点が偏らず全体に分布する傾向が認められた。

標定精度に関しては、従来マニュアル操作により標定点を検出していたため、マニュアル計測した点から偏位修正画像を作成しそれを基準とした。そして自動抽出した点から偏位修正画像を作成し、2 点を左右の偏位修正画像から画像計測し、三次元空間上の点として 2 点間の距離を双方で算出した。各ステレオペアはスケール（寸法）がないため、各カメラ間距離を 1 と設定しペアごとに相対的に行った。2 点間距離は 9 分割した画像のコーナー 4 領域の中に写っているターゲット点を計測し、縦横 4、斜め 2 の計 6 つの距離である（例えば図 3.20.Image2 左の 6 直線）。これを 5 組のステレオペアに対し提案手法と SIFT 法で行った。その結果を表 3.2 の Difference に示す。

結果から、SIFT は分布率が 45%以下では偏位修正画像が作成できないものが 2 つあった（Image1,2）。本実験は、絶対値ではなく各ステレオペアでの相対比較であるため、各ステレオペアで SIFT と提案手法を比較すると、Image3 以外は、分布率の高い方がマニュアル計測との差が小さかった。Image3 は、図を見ると左側 $1/3$ には計測対象物が写っておらず、実質の抽出点は残り $2/3$ 領域となり分布と差の数値の相関がとれなかったと考えられる。これらの結果から、本提案手法はマニュアル計測との差が少なく標定に有効な特徴点を画像全体から抽出することができたと考えられる。

尚、実寸による精度評価は 3.5.3 節で説明する。

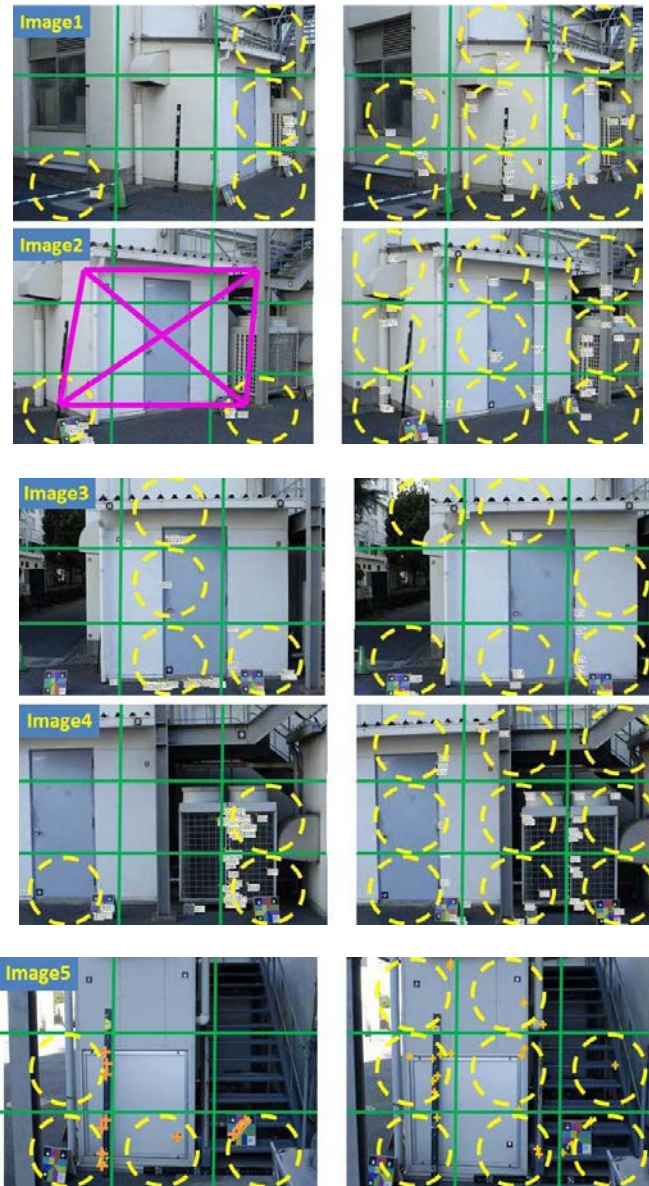


图 3.20 Distribution of feature points : SIFT (left),Our method (right).

表 3.2 Comparison of SIFT and our method

		Image1	Image2	Image3	Image4	Image5	Total
SIFT	Distribution:%	44(4/9)	22(2/9)	44(4/9)	33(3/9)	56(5/9)	38(17/45)
	Difference	X	X	-12	-8	-67	
Our method	Distribution:%	89(8/9)	100(9/9)	67(6/9)	100(9/9)	89(8/9)	89(40/45)
	Difference	-4	6	16	1	-12	

さらに、SIFT 法を利用して、キーポイントが画像中で分散できないか実験した。左画像を 9 分割し、それぞれの領域をテンプレートとして右画像とマッチングをとった。図 3.21 左は、図 3.20. Image5 の 9 分割画像の下段中央部をテンプレートし、図 3.21 右の画像とマッチングをとった例である。左図のテンプレート画像中の+印（番号が付されている）が抽出されたテンプレート特徴点、右図はその対応点のマッチング結果である（右図点線枠内がテンプレート画像と同じ領域）。

テンプレート画像から SIFT 特徴点が 26 点抽出されたが、対応点は 3 点しかとれず 23 点はミスマッチング点となった（表示されていない点は右図中の点に重なった）。全体では分割した 9 領域中 6 領域はミスマッチングにより対応点が検出できなかった。探索画像領域を部分的に切り出しても同様に対応点検出ができなかった。

この原因は、SIFT 法は原理上エッジ上の点を候補としないが、本例は建築物であり、画像を 9 分割したためテンプレート画像は縦横のエッジ成分しかなくなり（図 3.21 左）、分割しない画像でマッチングをとる（図 3.20）より条件が悪くなり抽出できなくなったものと考えられる。

これら結果に対し提案手法は、ブロック分けした領域を中心に視差推定用の建築物の垂直エッジ端点を抽出し、射影歪に強くサブピクセル検出する LSM でマッチングを行う処理としたため、画像全体からミスマッチングのない信頼性の高い特徴点を抽出できたと考えられる。

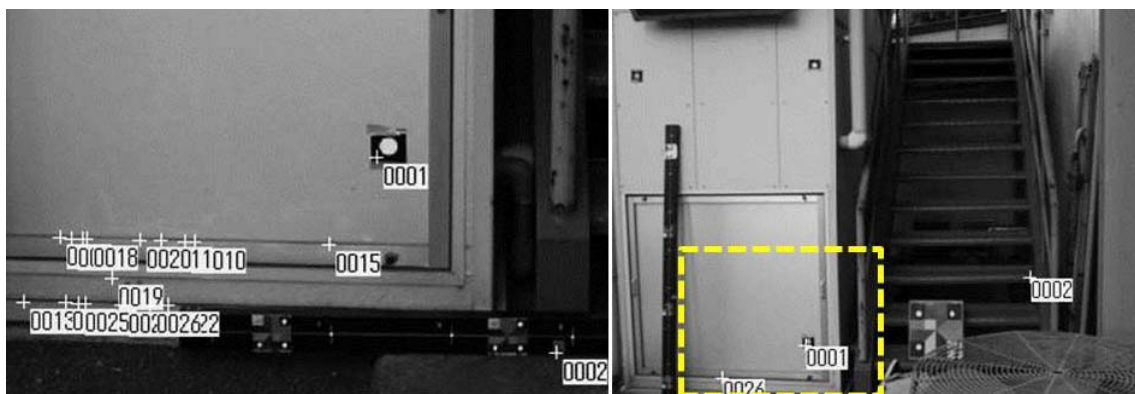


図 3.21 Result of SIFT : template (left), search area (right)

3.5.3 位置合せ精度評価

三次元エッジによるスケール調整と位置合せ結果の精度評価を、前者は基準尺の実寸法と比較し、後者は両モデルのオーバーラップ部分で面の位置合せ精度を比較することで行った（図 3.22）。後者は場所と条件を変えて二か所で比較した。一つは統合モデルを作成した箇所（Position 1：図 3.22 左）において、もう一つは、TLS の位置を変えて再度点群データを取得し、位置合せ処理を行い比較した（Position 2：図 3.22 右）。結果を表 3.3 に示す。

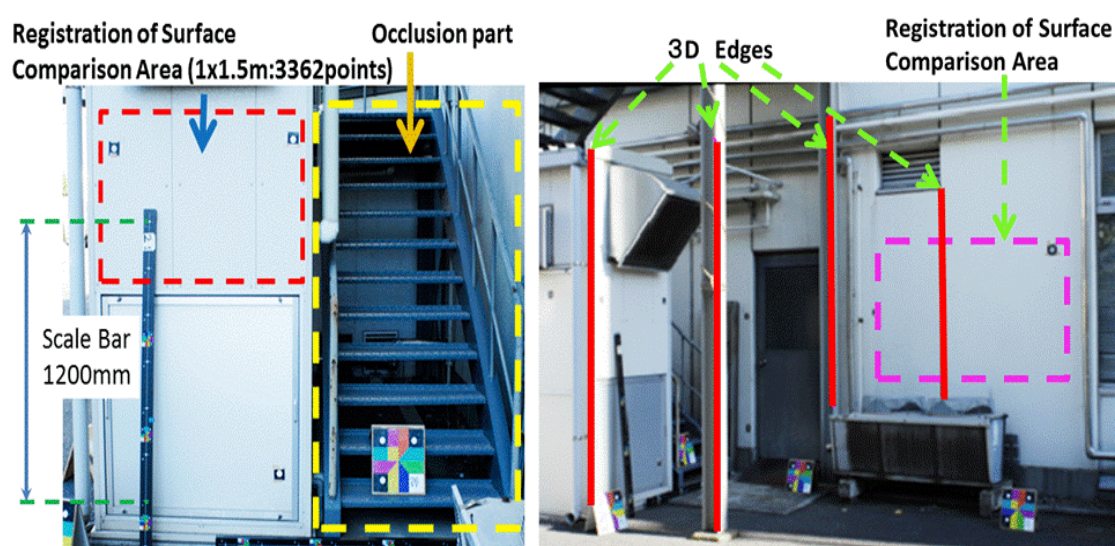


図 3.22 Assessment of Accuracy : Position1 (left), Position2 (right).

表 3.3 Accuracy (unit: mm).

Position /Number of points Compared	3D Data	Measurement Distance	Base Length	Resolution (σ)	Accuracy of Length (Scale Bar)	Accuracy of Registration	
						3DEdge (Width)	3DEdge + ICP (σ)
Position1 /3362 points	Photogrammetry	4322.6	724.6	5.4	0.6	16.0	4.4
	Laser	About 10000	—	4.0			
Position2 /20676 points	Photogrammetry	4039.2	1147.4	3.0	—	20.8	4.1
	Laser	About 10000	—	4.0			

(1) 長さ評価

基準尺の長さ 1199.2mm (精度 0.1mm) は統合モデル上で計測した結果、1199.8mm で誤差 0.6mm であった。計測コンディションは、TLS の計測距離が 10m で測距精度 σ が 4.0mm、画像計測の撮影距離が 4.3m で奥行分解能 σ が 5.4mm であった (表 3.3)。本実験での基準尺の長さ精度は、各モデルとも図 3.22 の平面 (縦横) 方向において点の内挿を行っているため、計測 (撮影) 距離と奥行分解能で決まる。換算すると画像計測モデルが 0.56mm、レーザー点群モデルは 0.25mm となり誤差 0.6mm に対し妥当な結果が得られたと考えられる。

(2) 面による評価

a) 三次元エッジによる位置合せ

位置合せ精度を検証するため、TLS により得られた点群データとステレオマッチングで得られた画像計測データ 3362 点 (図 3.22 左上枠内の領域 1m×1.5m : Position 1) の領域の面どうしのずれ量を比較した。

図 3.23 左に三次元エッジによる位置合せのモデル間のずれ量を示す。図は比較領域の面の部分を正面 (図 3.22 の向き) から 90 度回転させた図である。上から下に 16mm 程度傾斜している。

b) ICP 法による詳細位置合せ

さらにこの状態を初期値として詳細位置合せを ICP によって行った。その結果傾斜は補正され、ずれ量のばらつきは標準偏差 σ で 4.4mm となった。

詳細位置合せした結果の誤差ヒストグラムを図 3.23 中央に、その誤差の分布を面的に表示したものを図 3.23 右に示す。図右は薄い (赤) 色が $\pm\sigma$ 以内の点、濃い (黄色) 点が $\pm 2\sigma$ を示している。

この箇所の写真測量の画像計測分解能は平面方向 $\Delta_{xy}=0.9\text{mm}$ 、奥行方向 $\Delta_z=5.4\text{mm}$ であり、TLS の分解能が標準偏差 σ で 4.0mm である。同様の評価を Position2 (図 3.22 右図枠内 1.8m×1.5m : 比較点数 20676 点) で行った結果を表 3.3 下欄に示す。三次元エッジでの位置合せ結果は 20.8mm、ICP での詳細位置合せ結果は 4.0mm と Position1 とほぼ同様の結果が得られた。

c) 位置合せ評価まとめ

これらのことより、三次元エッジにて位置合せした結果は、計測分解能の幅 3σ の範囲内であり、詳細位置合せして得られた結果は、写真測量、TLS の計測分解能と標準偏差で同等であることから、妥当な結果が得られたと考えられる。本計測は、TLS のスキャン密度が 10mm だったことを考慮にいと、処理結果はこれら分解能を内挿したものとなり満足いく結果が得られた。

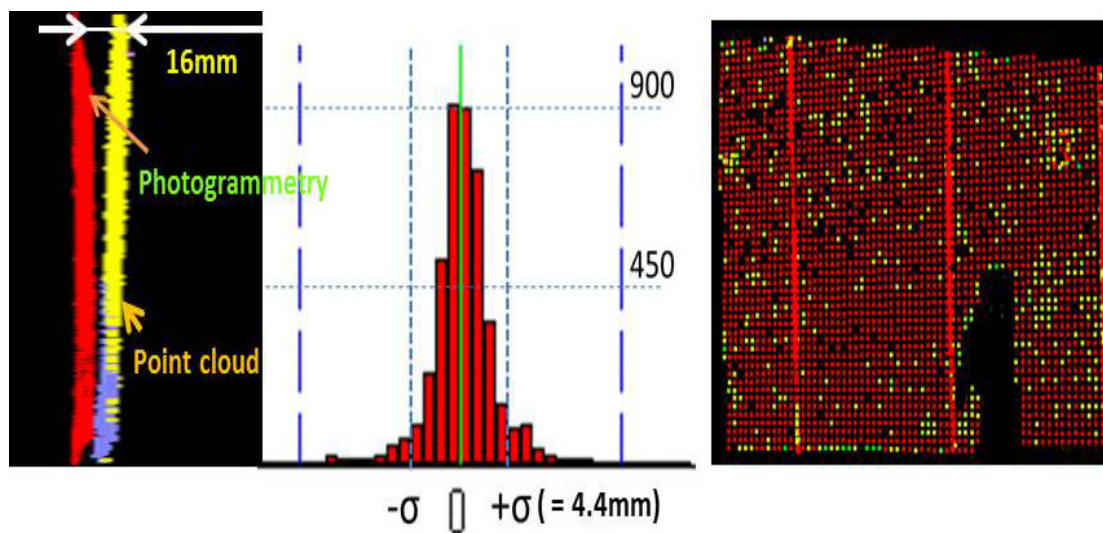


图 3.23 Result of registration : 3D edge method (left), Histogram of 3D edge +ICP (Middle), Distribution of errors of 3D edge +ICP (right).

3.5.4 計測データ取得、解析時間

データ取得時間、解析時間とモデル統合時間を表 3.4 に示す。本事例の 28m×17m 規模のビルに対して、スキャナ計測の前準備とスキャンニング時間あわせて約 60 分、オクルージョン部のカメラ撮影は 1 分で合計約 1 時間程度である。TLS 点群データ処理時間は、三次元エッジ抽出まで 250 万点で 67 秒、写真測量法は、1 枚 3872×2592 画素のステレオ画像で自動標定 20 秒、エッジマッチング処理 65 秒、三次元モデル作成処理（55832 点）35 秒で合計 120 秒であった。モデル統合は点群データから抽出した三次元エッジ 549 本、画像から抽出した三次元エッジ 6 本に対する処理で 1 秒と高速に行えた。これらを総合した全体の解析処理は合計 187 秒である（使用 PC: Intel Core2Duo P8700 2.53GHz and 2.8GB RAM）。

これらの結果から、本計測規模のビルであれば、点群データ取得に 1 時間かかるが解析処理は 2 分以内と高速に行える。さらに写真測量法は撮影から解析まで 1 モデル 3 分と機動性を活かした高速な結果を得ることができた。

表 3.4 Data acquisition and analysis time.

	Amount of Data	Data Capturing Time	Analysis Time	Total Time	Integration Processing	
					Edge	Time
Photogrammetry	55832 points Stereo Image (3872×2572)	1 min	120 sec	180 sec	6	1 sec
Point cloud	2.5 million points	60 min	67 sec	3667 sec	549	
Total	—	61 min	187 sec	3847 sec	—	All: 3848 sec

3.6 本章のまとめ

レーザースキャナ (TLS) から得られた点群データとデジタルカメラの撮影画像から計測した三次元データを統合し三次元モデルを作成した。

画像データからはエッジ抽出とエッジマッチングから自動標定、三次元エッジ抽出、モデル作成を行い、これら工程の全自動化とともに、ビルなどの建築物の形状を表現し三次元モデル作成までの時間を短時間で可能にした。

詳細には、エッジの強度と長さを評価することで、ノイズや変形にロバストな直線エッジ抽出法を実現し、それらエッジと平面推定を用いた自動標定法により標定の自動化を行い、さらにエッジベースの拡張 TIN-LSM 法とすることで、画像計測では従来不得意であった建造物の形状表現を可能として計測の自動化を達成した。

そしてエッジ抽出法、自動標定法、エッジマッチング法をそれぞれ従来手法と比較して性能の向上を確認した。またその一方で、TLS により取得した点群データを使ってモデル作成、三次元エッジ抽出を行った。

そしてレーザー計測によりビル全体を 3D モデル化したデータと、オクルージョン部を画像計測法により 3D モデル化したデータの統合を各モデルから 3D エッジを抽出することで実現した。

位置合せ結果は 16～20mm で、さらに詳細位置合せを行いスキャン密度 10mm に対し標準偏差で 4.0～4.4mm と機器の計測分解能と同等の精度を得、本提案手法は従来法と比較して高精度であることを示すことができた。

統合位置合せ精度と画像計測の機動性、全体の解析時間の向上を確認できたことから、本研究の優位性を示すことができた。

4章 総括

4.1 本研究について

本研究は、ステレオマッチング法の改良を中心に行い、従来の画像計測法の欠点であったマニュアル処理の自動化と変形に強い高精度なマッチング法を開発することができた。ここでの計測対象約 300mm にたいし σ で 0.26mm は、工業計測分野も視野に入れられる精度であり、さらに 10m 対象物に対しおよそ 10mm 以内は、遺跡等の図面化において充分活用できるものである。これら成果は、近年活発に研究開発が進められているレーザー計測技術と合わせ、作業工程そのものを変革させるものである。

そして、エッジに対応することにより形状を表現できるようになったのは大きな進歩と考える。従来のステレオマッチング法は、急峻な形状に対して膜を張ったような形状となりこれら形状を表現することはできなかった。従来研究では、完全なエッジ抽出を模索検討し、様々なアプローチによりこの手法は困難なものとされてきた。しかしながら、本研究では視点を変えて確実なもののみ利用する、といった戦略が功を奏している。

ステレオマッチング技術に関しては、今後計測の信頼性をさらにます必要がある。本研究や関連する研究開発を進展させ、コンピュータビジョン、ロボティクス、写真測量等の分野で新たな試行を行い、新市場による可能性を提示することで、3D 計測全体を活性化させこれら分野の技術と市場の発展に大きく寄与させることができると考えられる。

レーザー点群モデルと画像計測モデルの融合においては、近年 UAV、航空写真測量等、全体を取得し詳細をレーザー (TLS) 計測で補う、という我々の方法とは逆のアプローチが発表されている。そのような状況の中で、デジタルカメラの機動性とエッジ抽出によるモデルの表現性を活かすべくカメラをオクルージョン部の計測に用いることを提案した。このように 3D 計測・モデリング分野に一石を投じることで、更に今後この分野が活発化され、新規分野が創出されていくことが期待される。

まとめとして、画像計測は、高精度化、自動化、ロバスト化において更なる進化をとげ、レーザー計測を含むこれら技術全体は、センサの小型化にあわせてあらゆるプラットフォームに搭載され、新しい計測・モデリング技術として進展するだろう。

4.2 まとめ

本研究では、建造物の自動三次元計測、モデリングを目的として、まず明度変動、オクルージョン、幾何学的な変形にロバストなステレオマッチング法を検討、開発しその能力を実在の遺跡計測において評価した。さらに、画像計測法としてのデジタル写真測量法とレーザー点群計測法の長所短所を補った三次元計測を検討し、ビル等特徴のない建築物に対し、エッジ直線に着目したロバスト特徴抽出に基づくステレオマッチング法を考案、画像モデル形成過程の自動化を行った。そしてレーザー計測によりビル全体を 3D モデル化したデータと、オクルージョン部を画像計測法により 3D モデル化したデータの統合を各モデルから 3D エッジを抽出することで実現した。そして、統合位置合せ精度と画像計測の機動性、全体の解析時間の向上を確認できたことから、本研究の優位性を示すことができた。

これら研究成果をまとめると、以下のようになる。

- (1) TIN-LSM 法の粗密探索過程に OCM 法を組み込み、照明変動、隠蔽、幾何学的変形にロバストなステレオマッチング法（拡張 TIN-LSM 法）を開発し、3D 計測を高精度化し、結果、対象 30cm で $\sigma: 0.26\text{mm}$ を得た。そしてマッチング自動化を達成した。
- (2) 拡張 TIN-LSM 法により、様々な遺跡物を計測し、その実応用性を確認した。
ex.図面化：精度は対象 10m で 10mm 以内、作業時間約 7 日→約 3 日に短縮。
- (3) エッジ抽出法を開発し、エッジを用いたエッジマッチング法により標定機能を自動化した。
- (4) エッジを用いた拡張 TIN-LSM 法により、建造物の 3D モデル化を自動で行い形状表現を可能にした。
- (5) レーザー点群モデルと画像計測モデルそれぞれから 3D エッジを抽出し、両モデルの位置合せを高精度化し、計測機器分解能相当（本例では 4mm 前後）を達成。
- (6) レーザースキャナのオクルージョン部分を画像計測法で計測し、3D モデル統合処理自動化を含む解析処理高速化を行った。本事例では、対象 28m×17m でレーザー計測は機器の性能と設定分解能により 60 分かかったが、画像計測法は 5 分以内で、統合処理 1 秒と高速な結果を得た。

4.3 今後

本提案手法の利点は、TLS で取得した点群データのオクルージョン部分や、複雑な形状やスキャナの設置が困難な小領域などの箇所に対し、ハンディなデジタルカメラを使って短時間でデータを取得し自動計測できることである。すなわち、本方式によれば、画像計測は寸法なしの相対モデルスケールで行え、ターゲットの設置やその計測が不要となるため、撮影～自動標定～モデル作成、そしてモデル統合まで 1 モデルわずか 5 分以内で終了することができる。

今後はさらに規模が大きくなったビルやその詳細なモデル作成に、複数のレーザー点群データと複数の画像データから自動標定を行い、トータルで点群処理や点群どうしのレジストレーション、3D モデル化などの膨大な時間を短縮することを目指す。

この際、エッジマッチング法に対して、さらなるロバスト性の向上とモデル作成精度向上、そして広範な領域に対する自動標定による画像接続、自動計測を行う。

今後これら研究開発の成果が 3D 計測を行う関係分野に対し有用な手法となり、活発化されていくことが予想される。それらのことから、さらに広範な領域にわたって本手法を適用し、画像とレーザー計測を結びつけた新しい計測法を確立普及させ新分野を構築していきたい。

謝辞

本論文は、筆者が所属する株式会社トプコン研究所画像応用研究室と金子俊一教授のシステム制御情報学研究室との情報交換、共同研究をきっかけに始まり、株式会社トプコンで研究開発してきた成果と北海道大学大学院情報科学研究科システム情報科学専攻に社会人博士課程として入学して取り組んだ研究成果をまとめたものです。本研究を進めるにあたり、多くの方々にご支援、ご協力をいただいたことを、この場を借りて深く感謝いたします。

博士後期課程への入学する機会を与えてくださり、大学での研究の方針や考え方、内容について多大なるご指導を賜りました、北海道大学大学院情報科学研究科教授金子俊一先生に厚く御礼申し上げます。特に本論文執筆にあたるまでの多大なるご助言及びご指導をいただき、重ねて深く御礼申し上げます。

本論文の作成、研究につきまして、講座や研究会での活動を通じて先端技術の情報、知識取得とご厚情に満ちたご指導、数々の有益なご教示、機会を賜りました、北海道大学大学院情報科学研究科教授金井理先生に厚く御礼申し上げます。

本研究をまとめるにあたり、ご厚情に満ちたご指導、数々の有益なご教示を賜りました、北海道大学大学院情報科学研究科准教授田中孝之先生に深く御礼申し上げます。特に共同研究におきましても有益なご助言及びご指導をいただき、重ねて御礼申し上げます。

新旧含めた株式会社トプコン画像応用研究室における共同研究者、北村和男氏、伊藤忠之氏、佐々木剛氏、大谷仁志氏、画像応用研究室メンバーには、様々な形でのご助言とご協力をいただき、ありがとうございました。深く感謝いたします。

そしてこれまでの成果をまとめ、さらに研究を発展させる機会を与えてくださった株式会社トプコン、ならびに北海道大学大学院情報科学研究科の関係者皆様に厚く御礼申し上げます。

最後に、日頃から様々な面において筆者を支え、励ましてくれた家族に、心より深く感謝いたします。

参考文献

- [1] 高地伸夫、“デジタル画像による 3D 計測とその応用例～ミクロからマクロまで～”、2003 年度精密工学会春季大会、学術講演論文集、3 月 (2003)
- [2] 高地伸夫、“フォトグラメトリ応用技術”，吉澤徹編著「最新光三次元計測」，朝倉書店，pp.98-105 (2006)
- [3] N.Kochi, "Photogrammetry", *Handbook of Optical Metrology, " Principles and Applications*, Yoshizawa,T.'(Ed.), Taylor and Francis, Chapter 22 (2009)
- [4] N. Kochi, H. Watanabe, T. Ito, H. Otani and M. Yamada, " 3Dimensional Measurement Modeling System with Digital Camera on PC and its Application Examples", International (SPIE) Conference on Advanced Optical Diagnostics in Fluids, Solids and Combustion, Tokyo, Japan, December 4-6, pp.V0038-1-10 (2004)
- [5] N. Kochi, M. Yamada, T. Watanabe, H. Aoki, "3D-Measuring-Modeling- System based on Digital Camera and PC to be applied to the wide area of Industrial Measurement", The International Society for Optical Engineering (SPIE) Conference on Optical Diagnostics, August, pp.588015-1-10 (2005)
- [6] 服部進：ステレオ計測の前処理のための偏位修正処理、福山大学工学部紀要 第 31 巻，pp175-178 (2007)
- [7] I.Jazaeri, C.S.Fraser and S.Cronk：Automated 3D Object Reconstruction Via Multi-Image Close-Range Photogrammetry, The International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. XXXIII Part5 Commission V Symposium, Newcastle upon Tyne UK, pp.305-310 (2010)
- [8] N. Kochi, T. Ito, T. Noma, H. Otani, S. Nishimura, J. Ito：PC-Based 3D Image Measuring Station with Digital Camera an Example of its Actual Application on a Historical Ruin, International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol.XXXIV-5/W12, p.195-199 (2003)
- [9] T. Moriyama, N. Kochi, M. Yamada, N. Fukaya：Automatic Target-Identification with the Color-Coded-Targets, The International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Beijing, XXI Congress, WG V/I, pp.39-44 (2008)
- [10] 森山拓哉, 高地伸夫, 山田光晴, 深谷暢之, 村井俊二, “カラーコードターゲットによ

る自動識別方法の開発 “, 写真測量とリモートセンシング Vol.49, No.1, pp.10-20 (2010)

- [11] F.Aurenhammer : A Survey of a Fundamental Geometric Data Structure, ACM Computing Surveys, Vol.23, No.3, pp.345-405 (1991)
- [12] A. Grun : Adaptive Least-squares correlation: a powerful image matching technique. South Africa Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Cartography, 14(3), pp.175-187 (1985)
- [13] T. Shenk : Digital Photogrammetry Vol1, Terra Science, pp.237-263 (1999)
- [14] F. Ullah, S. Kaneko, and S. Igarashi : Orientation code matching for robust object search, IEICE Trans. of Inf. & Sys, E84-D(8), pp.999-1006 (2001)
- [15] Y. Domae, H. Takauji, H. Stier, S. Kaneko, T. Tanaka : Extraction and Tracking Of Orientation Coded Features Being Robust Against Illumination Changes, Proceedings of the ISPRS Commission V Symposium, Vol. XXXVI, Part5, Dresden, Germany, September (2006)
- [16] T.Noma, H.Otani, T.Ito, M.Yamada, N.Kochi : New system of digital camera calibration, *ISPRS Commission V Symposium*, pp.54-59 (2002)
- [17] H.Karara : Camera-calibration in non-topographic photogrammetry, *Non-Topographic Photogrammetry*, 2nd ed., Fryer, J.G., American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Falls Church, chap.5. (1989)
- [18] N.D'Apuzzo : Surface Measurement and Tracking of Human Body Parts from Multi Station Video Sequences. *PhD dissertation*, Institute of Geodesy & Photogrammetry, ETH Zurich, Mitteilungen No. 81, pp.27-35 (2003)
- [19] K.W.Wong : Basic Mathematics of Photogrammetry ,4th ed., H.Karara, American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Falls Church, chap. 2 pp. 54-57,(1980)
- [20] D. Lowe : Distinctive image features from scaleinvariant keypoints, Int'l. J. Computer Vision, **60**, 2, pp. 91–110 (2004).
- [21] H. Bay, A. Ess, T. Tuytelaars and L. Gool : Supeeded-up robust features (SURF), Computer Vision and Image Understanding, 110, pp. 346-359 (2008)
- [22] 伊藤康一、高橋徹、青木孝文 : 高精度な画像マッチング手法の検討、第 25 回信号処理シンポジウム、pp.547-552 (2010)
- [23] 服部寛 : 複数視点画像からの 3 次元形状復元、コンピュータビジョンとイメージメディア、109-5、pp.33-40 (1998)
- [24] M. Hannah : A system for digital stereo image matching, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol. 55, No. 12, pp.1765-1770 (1989)
- [25] R.Yoshitake, J.Ito, H.Watanabe, N.Kochi : Photogrammetry in Architectural

- Sturdy: A message from architect to surveyor, The 7th International Symposium on Virtual Reality, Archaeology and Cultural Heritage VAST(2006) , CIPA/VAST conference in Cyprus (2006)
- [26] R.Kadobayashi, N, Kochi, H.Otani, and R.Furukawa : Comparison and Evaluation of Laser Scanning and Photogrammetry and Their Combined Use for Digital Recording of Cultural Heritage, The International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, ISTANBUL, XXth Congress, WG V/4, pp.401-406 (2004)
 - [27] 太記祐一 : ゲミレル島第二聖堂の建築的概要ーゲミレル島遺跡調査報告 (その 3)ー日本建築学会 2002 年度大会 (北陸) 学術講演梗概集 F-2, pp.13-14 (2002)
 - [28] 渡邊広登, 山田光晴, 高地伸夫, 伊藤重剛, 吉武隆一, “デジタルカメラを用いた歴史的彫像物から建造物の 3D 計測・モデリング 測, 光計測シンポジウム 2005, 6, pp31-34 (2005)
 - [29] R.Yoshitake and J.Ito, “The use of 3D reconstruction for architectural study”, The Asklepion of ancient Messene, XXI International CIPA Symposium, Athens, Greece, paper No.149 (2007)
 - [30] 高地伸夫, 伊藤忠之, 渡邊広登, 大谷仁志, 門林理恵子, 太記祐一, 伊藤重剛, “デジタルカメラを用いた PC ベースの 3 次元画像計測, モデリングシステムとその実応用例について”, 第 10 回画像センシングシンポジウム講演論文集, pp.323-328 (2004)
 - [31] 和田雅昭、鈴木恵二、長野章、西村正三、増田稔、” 3D レーザスキャナによる函館漁港船入潤防波堤の三次元計測”、平成 18 年度日本水産工学会学術講演会講演論文集 pp.207-210(2006)
 - [32] 西村正三、巽耕一、山内裕之、” 地上レーザーを活用した皇居東御苑内本丸「中之門石垣」修復工事”、測量 Vol.58 No.5 (Vol.686),pp.22-25 (2008)
 - [33] 西村正三、出水享、松田浩、” 軍艦島の調査・検証からみた今後のインフラ構造物調査への提案 -3D レーザ・写真解析・UAV・AR-”、日本実験力学学会、12 巻 3 号 (2012)
 - [34] 井村誠孝、浦西友樹、池田聖、眞鍋佳嗣、大城理、千原国宏、” 平城京ウォークスルー多様な環境に対応したヴァーチャル空間散策システムー”、芸術科学会論文誌、Vol.10、No.4、pp.215-225 (2011)
 - [35] 武富貴史、佐藤智和、横矢直和、” AR 観光システムのための全周レンジファインダを用いたランドマークデータベース構築に基づく幾何的位置合わせ”、画像の認識・理解シンポジウム(MIRU2010)、講演論文集、pp.1947-1953(2010)
 - [36] トップアン VR・デジタルアーカイブ、<http://www.toppan-vr.jp/bunka/vr/contents.shtml>
 - [37] 山梨和彦, “BIM 建設革命”, 日本実業出版社 (2009)
 - [38] 森谷靖彦, "ビルディング・インフォメーション・モデリング (BIM) の可能性", 建築の研究, 2010 年 10 月号, pp. 20-23, (2010)

- [39] 田淵 統, "清水建設の建築施工における BIM の活用について", 建設コスト研究, 2010-Winnter, Vol. 68, pp. 34-38, (2010)
- [40] 株式会社トプコン <http://www.topcon.co.jp/>
- [41] K.Kitamura, N.D'Apuzzo, N.Kochi, S.Kaneko : "Automated extraction of break lines in TLS data of real environment", The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. 34, Part XXX Commission V Symposium, pp.331-336 (2010)
- [42] 北村和男, N. D'Appuzo, 高地伸夫, 金子俊一, "実環境での測定を考慮したレーザスキャナからの点群データを用いたブレイクライン抽出", 第 16 回画像センシングシンポジウム SSII2010, (2010)
- [43] 北村和男, 高地伸夫, 金子俊一, "複数視点からの点群データを用いたエッジ抽出", View2010, ビジョン技術の実利用ワークショップ, pp.353-357 (2010)
- [44] 北村和男, 高地伸夫, 金子俊一: 「特徴抽出に基づいた点群データのレジストレーション」, 画像電子学会誌, Vol.40, No.4, pp.642-649 (2011)
- [45] 北村和男, 高地伸夫, 金子俊一, "地上据え置き型レーザースキャナからの点群データを用いた特徴抽出", 精密工学会 2011 年度春季大会 (2011)
- [46] K.Kitamura, N.Kochi, S.Kaneko, "Automated Feature Based TLS Data Registration for 3D Building Modeling", International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XXXIX-B5, V/3, Melbourne, pp.205-210 (2012)
- [47] N.Kochi, K.Kitamura, T.Sasaki, S.Kaneko, "3D Modeling of Architecture by Edge-Matching and Integrating the Point Clouds of Laser Scanner and Those of Digital Camera", International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol.XXXIX-B5,V/4, Melbourne, p.279-284 (2012)
- [48] N.Meirerhold, M.Spehr, A.Schilling, S.Gumhold, H-G. Maas : "Automatic feature matching between Digital Images and 2D representation of a 3D Laser scanner point cloud", The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XXXVIII, Part 5, Commission V Symposium, pp.446-451 (2010)
- [49] N.Kochi, T.Ito, K.Kitamura and S.Kaneko : "Development of 3D Image Measurement System and Stereo-matching Method, and Its Archeological Measurement", *IEEEJ Trans. Information and Systems*, Vol.132, No.3 pp.391-400 (2012) (in Japanese)

- 高地伸夫, 伊藤忠之, 北村和男, 金子俊一 : 「デジタルカメラを用いた三次元計測システムおよびステレオマッチング法の開発と実応用例としての遺跡計測」、電学論 C、Vol.132、No.3 pp.391-400 (2012)
- [50] S.Becker and N.Haala : "Combined feature extraction for façade reconstruction", The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences Workshop on Laser Scanning 2007 and CivLaser 2007, pp.44-49 (2007)
 - [51] N.Meirerhold and A.Schmich : "Referencing of Images to Laser Scanner data using linear feature extracted from digital images and range images", IAPRS, Vol. XXXVIII, Part 3/W8, Laser scanning, pp.164-170 (2009)
 - [52] Y.Alshawabkeh and N.Haala : "Integration of digital photogrammetry and laser scanning for heritage documentation", The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences , (2004)
 - [53] 嘉納成男 : 「建築生産におけるレーザースキャナーの活用」, SPAR2010J 第 6 回 3 次元計測フォーラム, (2010)
 - [54] P.J.Besl and N.D.Mckay : "A method for registration of 3-D shapes", IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol.14, no.2, pp.239-256 (1992)
 - [55] R. Nevatia and K. Babu : " Linear feature extraction and description", Computer Graphics and Image Processing 13, 257-269(1980)
 - [56] M.Fisher and R.Bolles : " Perceptual Organization and curve partitioning problem", IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence Vol.8 Issue 1, pp100-105(1986)
 - [57] R.Weiss and M.Boldt : "Geometric grouping applied to straight lines", CVPR, pp.489-495(1986)
 - [58] R.Deriche and O.Faugwras : "2-D Curve matching using high curvature points : applied to stereo vision", IEEE 10th International Conference on Pattern Recognition, pp.240-242(1990)
 - [59] Z.Zhang : "Estimating Motion and Structure from correspondences of line segments between two perspective images", IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence Vol.17, No.12, pp1129-1139(1995)
 - [60] G.Karimian, A.Raie, and K.Faez : "A new efficient stereo line segment matching algorithm based on more effective usage of the photometric, geometric and structural information", IEICE Transaction on information and systems, Vol.E89-D, No.7, pp2012-2020(2006)
 - [61] A.Ok, J.Wegner, C.Heipke, F.Rottensteiner, U.Soergel, V.Toplak : "Accurate

- matching and reconstruction of line features from ultra high resolution stereo aerial images”, The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XXXVIII-4/W19, Commission III Workshop, (2011)
- [62] N.Snavely, S.Seitz, R.Szeliski :”Photo tourism : Exploring photo collections in 3D”, ACM Transaction on Graphics, Siggraph, 25(3), pp.835-846(2006)
 - [63] M.Farenzena, A.Fusiello, and R.Gherardi :”Structure-and-motion pipeline on a hierarchical cluster tree”, IEEE 12th International Conference on Computer Vision Workshops, pp.1489-1496(2009)
 - [64] T.Taketomi, T.Sato and Y.Yokoya :”Real-time and accurate extrinsic camera parameter estimation using feature landmark database for augmented reality”, International Journal of Computers and Graphics, Vol.35, No.4, pp.768-777(2011)
 - [65] L.Barazzeti, F.Remondino, and M.Scaioni :”Automation in 3D reconstruction: Results on different kinds of close-range blocks”, The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XXXVIII, Part 5, Commission V Symposium, pp.55-61 (2010)
 - [66] 鈴木惣一, 長谷川博幸 : 「セールスエンジニアのための空中写真測量(4)」, APA, No.63-5 (1996)
 - [67] C.A.Vanegas, D.G.Aliaga and B.Benes : ”Building reconstruction using Manhattan-World Grammars”, CVPR, pp.358-365
 - [68] J.Canny : ”A computational approach to edge detection”, IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 8:678-714 (1986)
 - [69] R.Hartley and A.Zisserman : “Multiple View Geometry in Computer Vision”, Cambridge University Press, Cambridge, U.K. (2000)
 - [70] 金澤靖, 金谷健一 : 「大域的な整合性を保証するロバストな画像の対応付け」, 情報処理学会論文誌, コンピュータビジョンとイメージメディア, Vol. 44, No. SIG 17, pp.70-77 (2003)
 - [71] 野間孝幸, 伊藤忠之, 永嶋輝一, 山田光晴, 大谷仁志, 高地伸夫, ”市販デジタルカメラの画像計測用キャリブレーションソフトの開発”, 光計測シンポジウム, (2002)
 - [72] 野間孝幸, 伊藤忠之, 大谷仁志, 山田光晴, 高地伸夫, ”カメラキャリブレーションソフトの開発とズームレンズ対応について”, 第9回画像センシングシンポジウム, 講演論文集, pp.35-40, (2003)
 - [73] M. Brown and D.G. Lowe : “Recognising Panoramas”, ICCV, pp.1218-1225 (2003)
 - [74] F. Bethmann, B. Herd, T. Luhmann, J. Ohm, “Free- Form surface measurement with image sequences under consideration of disturbing objects.” *Optical 3D*

- Measurement Techniques*, Vienna, Vol. 2, pp.51-61.,(2010)
- [75] F. Bethmann, T. Luhmann, "Least-squares matching with advanced geometric transformation models.", International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XXXVIII, Part 5 Commission V Symposium, Newcastle upon Tyne, UK, pp.86-91, (2010)
 - [76] T. Luhmann, F. Bethmann, B. Herd, J. Ohm, "Experiences with 3D Reference Bodies for Quality Assessment of Freeform Surface Measurements", International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XXXVIII, Part 5 Commission V Symposium, Newcastle upon Tyne, UK., pp.405-410, (2010)
 - [77] H. Otani, H. Aoki, M.Yamada, T. Ito, N.Kochi, "3DModel Measuring System", The International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, ISTANBUL, XXth Congress, WG V/2, pp.165-170 (2004)
 - [78] 佐藤宏一, 大谷仁志, 青木博幸, 山田光晴, 伊藤忠之, 高地伸夫, "3D モデル計測システムの開発", 応用測量論文集, 17, pp.25-32 (2006)
 - [79] 高地伸夫, 大谷仁志, 伊藤忠之, 永嶋輝一, "地上用デジタルカメラによる災害調査", 写真測量とリモートセンシング, Vol.45, No.2, pp.26-29 (2005)
 - [80] 廣瀬駿, 安藤悟, 水島靖典, 菅田昌宏, 森山拓哉, 高地伸夫, "カラーコードターゲットのスパースな3次元点を用いた室内3D計測モデルの自動生成システム", View2011, ビジョン技術の実利用ワークショップ, pp.470-474 (2011)
 - [81] 菅田昌宏, 水島靖典, 廣瀬 駿, 森山拓哉, 高地伸夫, "コード化ターゲットを用いたステレオ写真計測による室内 CAD モデルの自動生成システム", 建築学会, 2011 年度大会, pp.509-510 (2011)
 - [82] S. Hirose, "Simple Room Shape Modeling with Sparse 3D Point Information using Photogrammetry and Application Software", International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XXXIX-B5, pp.267-272 (2012)
 - [83] 森山拓哉, 高地伸夫, 山田光晴, 深谷暢之, 藤田光伸, "カラーコードターゲットを用いた自動三次元画像計測", 光計測シンポジウム 2008, pp.43-46, (2008)
 - [84] 森山拓哉, 高地拓哉, 渡邊広登, "解説 自動車のボディパネルの自動 3 次元画像計測について", 日本塑性加工学会誌, 塑性と加工, Vol.51, No.596, pp.37-41, 2010 年 9 月号 (2010)
 - [85] N.Dapuzzo, N.Kochi, "Three-Dimensional Human Face Feature Extraction From

- Multi Images”, Optical 3D Vol1, pp.140-147 (2003.9)
- [86] K.Kitamura, N.Kochi, H.Watanabe, M.Yamada and S.Kaneko, “Human Body Measurement by Robust Stereo Matching”, 9th Conference on Optical 3-D Measurement Techniques, Vol.2, pp.254-263 (2009)
 - [87] 北村和男, 高地伸夫, 渡邊広登, 山田光晴, 金子俊一, “ロバストステレオマッチング手法を用いた人体計測システムの開発”, 電気学会論文誌 C, Vol. 130, No. 6, pp. 1010-1016 (2010)
 - [88] 森山拓哉, 檀 一平太, 高地伸夫, 山田光晴, “リングカラーコードターゲットを用いた NIRS プローブ位置の三次元画像計測”, 第 16 回画像センシングシンポジウム SSII10 (2010)
 - [89] 檀一平太, 森山拓哉, 山田光晴, 高地伸夫, 渡辺英寿, “フォトグラメトリック法による NIRS データのレジストレーション”, 第 40 回臨床学会学術大会, 2010 年 11 月, 臨床神経生理学 38 巻, 5 号 pp.356 (2010)
 - [90] 穴井哲治, 高地伸夫, 大谷仁志, “ビデオカメラによるカメラの位置, 姿勢の高精度自動推定”, 画像センシングシンポジウム講演論文集, SSII06, pp.456-459 (2006)
 - [91] T.Anai, N.Kochi, H.Otani, “ Exterior orientation method for video image sequences using robust bundle adjustment”, 8th Conference on Optical 3-D Measurement Techniques, July 9-12 – ETH Zurich, Switzerland, Vol.1 pp141-148 (2007)
 - [92] N. Fukaya, T. Anai, H. Sato , N. Kochi , M. Yamada , H. Otani : Application of Robust Regression for Exterior Orientation of Video Images、The International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Beijing, XXIth Congress, WG III/V, pp.633-638 (2008)
 - [93] T.Anai, N.Fukaya, T.Sato, N.Yokoya, N.Kochi, ”Exterior Orientation Method for Video Image Sequences with Considering RTK-GPS Accuracy”, 9th Conference on Optical 3-D Measurement Techniques, July 1-4 – Viena University of Technology, Vol.1 pp231-240 (2009)
 - [94] T.Anai, N.Kochi , N.Fukaya, N.D’Apuzzo , “Application of Orientation Code Matching for Structure from Motion”, The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. 34, Part XXX Commission V Symposium, Newcastle upon Tyne, UK. ,pp33-38 (2010)
 - [95] T. Anai, T. Sasaki, K. Osaragi , M. Yamada. F. Otomo , H. Otani, “Automatic Exterior Orientation Procedure for Low-Cost UAV Photogrammetry using Video Image Tracking Technique and GPS Information”, International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol.XXIX-B7,V/I, Melbourne , p.469-474 (2012)

- [96] C.Fraser, M.Shotis and G.Ganci, “Multi-sensor system self-calibration”, *Videometrics IV*, Vol.2598, SPIE, pp2-18 (1995)
- [97] M.Fisher, and R.Bolles, “Random sample consensus: A paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography”, *Comm, ACM*, Vol24.No.6, pp.381-395 (1981)
- [98] 北村和男, “大型建築物の 3 次元計測のための画像及び 3 次元点群データのロバスト特徴抽出”, 博士論文, 北海道大学 (2011)
- [99] D.C.Brown, “Close-range camera calibration”, *Photogrammetric Engineering*, 37(8), pp. 855-866 (1971).
- [100] 那須充, ”講座：バンドル法 第二回 バンドル法と空中三角測量の歴史”, 写真測量とリモートセンシング, VOL.51, NO.2, pp.108-120. (2012)
- [101] 高地伸夫, ”講座：バンドル法 第七回 地上測量におけるバンドル法とカメラキャリブレーション”, 写真測量とリモートセンシング, VOL.52, NO.1 (2013).
- [102] 織田和夫, ”講座：バンドル法 第一回 バンドル法概論と用語”, 写真測量とリモートセンシング, VOL.51, NO.1, pp.54-61. (2012)
- [103] 新名恭仁, “講座：バンドル法 第三回 空中三角測量におけるバンドル法の実装(1)”, 写真測量とリモートセンシング, VOL.51, NO.3, pp.155-162. (2012)
- [104] 新名恭仁, ”講座：バンドル法 第四回 空中三角測量におけるバンドル法の実装(2), 写真測量とリモートセンシング, VOL.51, NO.4, pp.237-245. (2012)
- [105] 小野徹, “講座：バンドル法 第五回 フリーネットワークのバンドル法への適用”, 写真測量とリモートセンシング, VOL.51, NO.5, pp.310-320. (2012)
- [106] 小野徹, “講座：バンドル法 第六回 精密工業計測におけるバンドル法とカメラキャリブレーション”, 写真測量とリモートセンシング, VOL.51, NO.6, (2012)
- [107] 藤吉弘亘, “Gradient ベースの特徴抽出”, 情報処理学会 研究報告, CVIM 160, pp.211-224 (2007)
- [108] C.C.Slama, “AeroTrianguration”, *Manual of Photogrammetry*, 4th ed., H.Karara, American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Falls Church, chap. IX, pp. 456-457,469-475(1980)
- [109] D. Ben-TZVI and M.B.Sander, “A combinational Hough transform”, *Pattern Recognition Letters* Volume11 Number3, pp.167-174 (1990)
- [110] 村井俊二, “解析写真測量”, 日本写真測量学会編：改訂版(1997)
- [111] 佐々木剛、高地伸夫、北村和男、金子俊一, “エッジマッチングを用いたロバストな三次元面計測”, 第 19 回画像センシングシンポジウム講演論文集 (2013)

研究業績目録

学位論文関連

査読付学会誌等

- (1) 高地伸夫, 伊藤忠之, 北村和男, 金子俊一, ” デジタルカメラを用いた三次元画像計測システムおよびステレオマッチング法の開発と実応用例としての遺跡計測”, 電気学会論文誌 C (電子・情報・システム部門誌) Vol.132 No.3 2012, pp.391-400
- (2) 高地伸夫, 北村和男, 佐々木剛, 金子俊一, ” 三次元エッジに基づく点群と画像の融合処理による三次元モデリングとその建築物への応用”, 電気学会論文誌 C (電子・情報・システム部門誌) Vol.133 No.6 2013 (2013 年 6 月号掲載決定)

査読付き国際学会プロシーディング

- (1) Nobuo Kochi, Tadayuki Ito, Takayuki Noma, Hitoshi Otani, Syozo Nishimura, Juko Ito:, ”PC-Based 3D Image Measuring Station with Digital Camera an Example of its Actual Application on a Historical Ruin”, International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol.XXXIV-5/W12, Ancona, Italy pp.195-199 (2003)
- (2) Nobuo Kochi, Hiroto Watanabe, Tadayuki Ito, Hitoshi Otani and Mitsuharu Yamada:, ”3Dimensional Measurement Modeling System with Digital Camera on PC and its Application Examples”, International Conference on Advanced Optical Diagnostics in Fluids, Solids and Combustion, December 4-6 ,Tokyo, Japan, pp.V0038-1-10 (2004)
- (3) Nobuo Kochi, Mitsuharu Yamada, Hiroto Watanabe, Hiriyuki Aoki, “ 3D Measuring-Modeling-System based on Digital Camera and PC to be applied to the wide area of industrial measurement”, The International Society for Optical Engineering (SPIE) Conference on Optical Diagnostics, pp.588015-1-10, (2005)
- (4) Nobuo Kochi, Kazuo Kitamura, Takeshi Sasaki, Shun'ichi Kaneko:, ”3D Modeling of Architecture by Edge-Matching and Integrating the Point Clouds of Laser Scanner and Those of Digital Camera”, International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol.XXXIX-B5, Melbourne, Australia , pp.279-284 (2012)

論文（その他）

- (1) 北村和男, 高地伸夫, 渡邊広登, 山田光晴, 金子俊一, ” ロバストステレオマッチング手法を用いた人体計測システムの開発”, 電気学会論文誌 C 電子・情報・システム部門誌, Vol.130, No.6, pp.1010-1016 (2010)
- (2) 森山拓哉, 高地伸夫, 山田光晴, 深谷暢之, 村井俊二, ” カラーコードターゲットによる自動識別方法の開発”, 写真測量とリモートセンシング Vol.49, No.1, pp.10-20 (2010)
- (3) 北村和男, 高地伸夫, 金子俊一, ” 特徴抽出に基づいた点群データのレジストレーション”, 画像電子学会誌. Vol.40, No4, pp.642-649 (2011)

学術講演

- (1) 高地伸夫, ” デジタル画像による 3D 計測とその応用例～マイクロからマクロまで～”, 2003 年度精密工学会春季大会, 学術講演会, pp.415-416 (2003)
- (2) 高地伸夫, 伊藤忠之, 渡邊広登, 大谷仁志, 門林恵理子, 太記祐一, 伊藤重剛, ” デジタルカメラを用いた PC ベースの 3 次元画像計測, モデリングシステムとその実応用例について”, 第 10 回画像センシングシンポジウム, pp.323-328 (2004)
- (3) 高地伸夫, ” デジタルフォトグラメトリ”, 第 15 回三次元工学シンポジウム, 資料集, pp.15-32 (2005)
- (4) 高地伸夫, ” 産業界における最新の画像処理の動向とその応用事例”, 第 21 回ファジィシステムシンポジウム 企画セッション知的画像処理, サーベイ講演 (2005), pp.537-539
- (5) 高地伸夫, ” 最新光三次元計測”, フォトグラメトリによる三次元計測”, 光応用シンポジウム Senspec2007 (2007)
- (6) 高地伸夫, ” デジタルカメラと PC を利用したデジタル写真測量システムと文化財への様々な応用”, 第 1 回 文化遺産のデジタルドキュメンテーションと利活用に関するワークショップ, 1-3, http://www.chikatsu-lab.g.dendai.ac.jp/arida/The1stWorkshopDDCH/2007_1stDDCH_presentation.html (2007)
- (7) 高地伸夫, ” 大規模環境三次元計測装置の現状と将来”, 2011 年精密工学会 秋季大会シンポジウム資料集, pp.39-42 (2011)
- (8) 北村和男, 高地伸夫, Nicola D'Apuzzo, 金子俊一, ” 実環境での測定を考慮したレーザスキャナからの点群データを用いたブレイクライン抽出”, 第 16 回画像センシングシンポジウム SSII2010, IS1-08 (2010)

特許

本論文に関係した特許 7 件