

宮 崎 大 学 大 学 院
博 士 学 位 論 文

ランダムドットを組み合わせたマルチスリットの投光による
配管計測に関する研究

2017年9月

宮崎大学大学院農学工学総合研究科
物質・情報工学専攻

吉田久美子

目次

第1章	緒論.....	1
1.1	背景と目的.....	1
1.2	従来の研究.....	5
1.2.1	複数の画像を用いる三次元計測.....	5
1.2.2	ランダムドットの投光による三次元計測.....	5
1.2.3	マルチスリットの投光による三次元計測.....	6
1.3	本論文の概要と構成.....	7
第2章	シングルスリットの投光による管の計測例と課題.....	9
2.1	はじめに.....	9
2.2	計測システムの構成.....	10
2.3	計測手順.....	11
2.4	キャリブレーション.....	13
2.5	配管の再構築.....	14
2.6	実験.....	17
2.7	まとめ.....	19
第3章	マルチスリットを用いた三次元形状計測におけるマルチスリット輝線の同定.....	20
3.1	はじめに.....	20
3.2	シングルスリット投光法とマルチスリット投光法.....	21
3.3	システムの構成とレーザの配置.....	23
3.3.1	システム構成.....	23
3.3.2	レーザ投光器の配置の工夫.....	27
3.4	基準画像の作成.....	28
3.4.1	基準画像の作成とエピポラ方程式の算出.....	28
3.4.2	スリットとランダムドットの分離.....	32
3.5	各スリット輝線の同定方法.....	34
3.6	スリット輝線の連続性を考慮したテンプレート領域の設定.....	37
3.7	実験.....	39

3.7.1	各スリット輝線の同定実験	39
3.7.2	スリット輝線の連続性を考慮したテンプレートの効果	46
3.8	マルチスリット光を用いた計測システムのキャリブレーション	48
3.8.1	座標系	48
3.8.2	カメラパラメータ	50
3.8.3	プロジェクタパラメータ	51
3.8.4	キャリブレーションのための対応点入力	52
3.8.5	グローバル座標系への変換	54
3.8.6	キャリブレーションパラメータの検証	56
3.9	まとめ	60
第4章	マルチスリットの配列を利用した管の中心線と径の計測	61
4.1	はじめに	61
4.2	マルチスリットの配列を利用した管の中心線と径の算出方法	62
4.3	管の中心線と径の算出実験	66
4.4	まとめ	73
第5章	結論と今後の展望	74
5.1	結論	74
5.2	今後の展望	75
参考文献	76
謝辞	79

第1章 緒論

1.1 背景と目的

現在，日本において 70 年代から 80 年代の高度成長期に建設された石油化学プラントの経年劣化が深刻な問題となっている．その中で長期にわたる経済不況や海外との価格競争などにより，業界ではプラント設備に対しスクラップ・アンド・ビルドからストック・アンド・リノベーションへとシフトし，プラントの延命や安全性の向上を図っている．

石油化学プラント設備において管とバルブなどの部品で構成される配管は，原料や製品，そしてスチームなどの用役を移送するための主要な設備の一つであり，設備全体に占める割合が多い．配管の内部流体による摩耗や雨水による外部腐食，圧力や温度の変動による疲労破壊そして建設時の溶接品質不良などにより，漏れなどのトラブルが年々増加している．それに伴い，改修工事が多くなっている．

通常，改修工事は，設備停止による生産機会損失を最小限に抑えるために短時間で行うことが要求される．特に，配管からの漏れなどの設備トラブルでは，プラント周辺の居住者や環境への悪影響を最小限に抑えるために最短での対応が求められる．プラントでの配管工事を効率良く短時間で行うためには，配管のプレファブ率を上げることが重要である．

改修工事を行う場合，事前に既設配管の状況を把握する必要があるが，古い設備では配管改修のもととなる図面がない場合が多い．また，図面があっても，現場は図面寸法の通りに出来上がっていない．過去の補修や改修で電気設備や計装設備などの干渉を避けるために配管ルートが変更されている場合や，建設当時の配管技術の未熟さから図面通りの寸法やルートで配置されていない場合，過去の補修や改造などが図面に反映されておらず図面と現状が異なっている場合などがある．そのため，もとの図面は改修工事のプレファブには活用できないことが多く，改修工事のたびに現場の再計測が行われている[1]．

現在現場計測は，通常設備の稼働中，人手により行われている．このとき，測定者が制御系の計器に誤って接触したり何らかの衝撃を与えることで運転の停止や最悪の場合火災や爆発を発生させる恐れがある．また測定環境が高所，狭隘，高温である場合も多く，測定者も危険にさらされている．このため測定エリアへのアクセスが制限され，正確な計測ができない場合が多い．

このような状況で作成された図面は寸法精度が低く，これをもとにプレファブされた配管は他の設備への干渉や，既設設備との接続部にずれが生じ，プレファブ配管の手直しや後戻り作業がしばしば発生し，配管敷設に時間がかかっている．特に，配管敷設周辺が火災・爆発の危険がある環境では現場での溶接が制限されるため，さらに

高いプレファブ精度が要求される。

近年、物体の三次元情報を非接触で高速、高精度に取得できる三次元レーザスキャナの普及が進んでいる。三次元レーザスキャナは、スキャナから照射されたレーザ光が物体表面で反射して戻ってくるまでの時間と照射角度から照射点の三次元位置を取得し、スキャナを2軸で回転させながら走査することで周囲360度に存在する物体の表面を点群として取得する計測器である。物体の形状や位置関係など現場の状態をそのままデジタル化できるため、遺跡などの文化財調査や災害現場計測などいろいろな分野で広く利用されている。プラントの配管設備においても、設備の相対的位置関係などを高精度に把握するために有効で、計測時の安全性も向上することから現場計測のツールとして活用が広がっている。

配管の製作は、図 1-1 (a) のように配管の設置状態を中心線で表現したアイソメトリック図をもとに行われる。しかし、アイソメトリック図にて指示する配管の中心線位置情報は三次元スキャナで取得された点群データそのものには含まれていない情報であるため、別途、配管部の点群データをモデル化（ベクトル化）する処理が必要となる。配管をモデル化する処理は、図 1-1 (b) の桃色の部分のように管表面で選択した領域の点群データに対して、円筒モデルをフィッティングさせることで実施され、フィッティングされた円筒の中心線が管の中心線として、円筒の直径が管の径として抽出できる。しかしながら、三次元レーザスキャナのデータは、図 1-1 (b) に示すように広範囲、高密度に取得された点群データであるので、モデル化の処理には膨大な点群データを扱いつつながらの作業[2][3]が必要となる。3次元レーザスキャナは現場計測の負荷を大幅に低減できるため非常に有効であるが、配管の情報を得るための後処理（モデル化）の負荷が大きく時間を要するため工事全体としてメリットが得られるような一定規模以上の工事にしか活用されていない。また、点群処理には膨大な点群データが扱えるハイスペックなPCや高価なソフトが必要なため、特定の部署で対応しているのが現状である。一方、現在の日本のプラントにおける配管工事は、プラントを延命させるために行われる補修や更新工事など中小規模のものがほとんどであり、また、それらの工事を施工する企業自体も中小企業のため、高価な機器の導入や後処理の負荷の大きい作業への対応は難しい。そのため、三次元計測の有効性はわかっているものの、中小規模の工事では今なお人手による計測が行われている。

近年、FARO社製FREESTYLEやMicrosoft社製KINECT[4][5]など、カメラを使用した汎用的なハンドヘルドタイプの三次元位置情報を取得する機器が市販されるようになってきた。これらの機器は対象上をハンドヘルドでスキャンすることによって取得したいエリアに絞った計測が可能である。FREESTYLEなど計測を主とした機器は手軽に高精度な計測が行えるものの、機器は高価であり、また三次元レーザスキャナと同様に高密度にデータを取得することを前提に作られているためデータ量は多く、後処理の負荷が大きい。KINECTは安価で手軽に三次元データの取得が行えるため魅力的であるが、得られる点のバラツキは大きく、産業分野で利用するには十分ではな

第1章 緒論

い. そのため, 後処理の負荷が小さく高精度な配管計測システムの開発が期待される.

そこで本論文では, 計測する点群データ自体を配管の情報を取得するために必要なデータに絞ることで, 後処理の負荷を低減する配管計測システムを提案する.

1.2 従来の研究

1.2.1 複数の画像を用いる三次元計測

一般的に非接触で物体の三次元形状を取得するために、レーザなどの構造化光を投光し物体表面にあらわれた輝線をカメラで撮像する方法が用いられている。構造化光上の三次元座標は、レーザの投光方向とカメラの位置関係から三角測量の原理を用いて算出することができる。1本のスリット光を物体表面上でスキャンする方法や異なるグレーコードパターンを時系列的に投影する方法 [6]-[8]、また、明度が正弦波状に変化する格子パターンを物体に投影し、この格子パターンの位相を一定間隔でずらして複数回撮像する位相シフト法[9]などが提案されており、高精度な計測が期待できるので以前から利用されている。しかしながら、これらの方法では固定した位置で複数枚撮像する必要があるため、ハンドヘルドでの計測が必要な場合には不向きである。そのため、1枚の画像で三次元計測ができる方法が望ましい。

1.2.2 ランダムドットの投光による三次元計測

1枚の画像から三次元形状を取得する方法として Microsoft の KINECT のようにランダムドットパターンとデジタル画像相関を用いた方法が知られている。この方法はランダムなドットパターンを物体表面に照射し、距離に応じて生じるパターンの移動量を求め、その移動量から物体の三次元座標を取得するものである。ランダムドットパターンの密度に応じた空間分解能の三次元座標を取得できるものの、ランダムドットは不連続な点によって構成される構造化光であるため、物体の縁など不連続部の認識にあいまいさが残る。図 1-2 は穴の開いた物体に照射されたランダムドット光の例を示す。ランダムドット光は物体の縁などの不連続部にランダムドット光が存在するとは限らない。また図中の拡大図のように、段差など不連続部の認識が困難で検出された点が縁に位置しているかどうかの判別も難しく、正確な形状をとらえるのには不向きである。そのため、スリットのように連続性を持った構造化光の投光が望ましい。

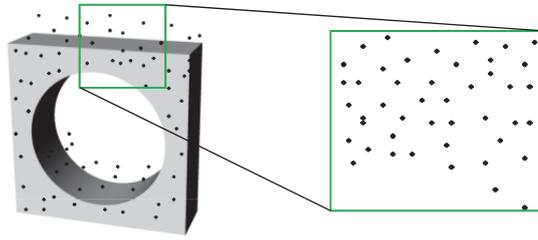


Fig. 1-2 Image of random dots on the surface of object

1.2.3 マルチスリットの投光による三次元計測

連続性を持った構造化光を投光し1枚の画像から三次元形状を取得する方法として、物体に複数本のスリット光を同時に照射する方法が検討されており、ロボット用小型距離画像センサなどが提案されている[10]. この方法はスリット本数分の切断面の形状が一度に取得できるため、瞬間の形状を把握したい場合や生体のように静止させることが難しい対象の計測に有効であるが、1枚の画像内に異なる投光方向を持つスリット輝線が混在することになるので、スリットの投光方向が画像内で交錯し、判別ができなくなる問題がある. そのため、物体表面にあらわれるスリット輝線の変位が隣接するスリット輝線との間隔内に納まるように計測レンジを制限するなどの工夫が必要である. そのほか、スリット光の本数に等しい数のレンズを用いて測定領域を分割し、各領域と画像センサを1対1で対応させる方法[11]などが提案されているが、さらに計測レンジを広げるにはそれぞれのスリット輝線を特定する手段が別途必要となる. スリット特定の手段として、各スリット光の輝度や色相を変えることでスリット輝線を特定する方法[12]-[15]が提案されているが、輝度を制御する必要性から高輝度に固定した構造化光の投光ができないため、外乱光や計測対象自体の色など計測環境の影響を受けやすい問題がある.

本論文では、以上の三次元計測方法の特徴を勘案し、マルチスリットにランダムドットを組み合わせることで、1枚の画像から三次元計測ができるシステムを提案する.

物体の縁など不連続部はスリット輝線の連続性より判断できる. さらに、ランダムドットパターンによる位置同定を組み合わせることで、測定レンジを広げるとともに、構造化光を高輝度に固定することができる.

1.3 本論文の概要と構成

本研究は、配管設備の改修工事などの際に必要な設備の図面化にあたって、安全かつ効率的に配管の三次元的な諸元を取得する配管計測システムの開発を目的としている。

カメラで配管を撮像する場合、カメラの位置から見える曲面の一部しか撮像できないものの、管が円筒形状であることを考慮すると、撮像された曲面の一部から管の径や中心線を推定できる。実際には、曲面の三次元情報がすべて必要というわけではなく、管表面上で異なる位置の複数の円弧輝線の形状と位置関係から管の径や中心線を推定できる。この処理を効率的に行うために、管軸に交差する方向にスリットを投光することで管表面上にあらわれる円弧を取得する。

本論文では、まず、計測例としてシングルスリット光を用いた管の計測とその課題について述べている。この計測システムは、シングルスリット投光器とカメラに KINECT を組み合わせたハンドヘルド型三次元計測システムで、異なる位置で取得した2個の円弧を KINECT により検出された移動情報を用いて連結し、その連結された円弧の位置関係と形状から管の中心線と径を算出するものであった。しかしながら、KINECT による移動情報の検出誤差の影響で2個の円弧が正確に配置されない場合があった。また、スリットは管軸に対して垂直に照射されるとは限らないため、得られる円弧は基本的に楕円弧となる。そのため、断面形状の推定には楕円近似が必要で、得られる楕円弧の長さが短い場合は楕円近似結果が安定しない課題があった。

そこで、シングルスリット投光により生じる課題を解決するために、マルチスリットを投光し、管の複数切断面を一度に計測するシステムを試作した。

マルチスリット投光器はスリットの配置が固定された回折格子によって複数のスリットを一度に投光するもので、おのおののスリットの位置関係は不変である。したがって、事前にスリット間の位置関係を正確に計測することでシングルスリットの場合のような計測器の移動にともなう断面の配置の誤差を削減することができる。また、マルチスリットを投光した場合においても、管軸に対してスリットを垂直に投光するのは不可能であるので、やはり検出されるスリット切断面は楕円弧となる。ただし、マルチスリットを投光した場合、計測される複数のスリット切断面の配列方向から管軸の方向ベクトルが算出できる。具体的には、管表面上にあらわれる3本以上のスリットに共通して接する直線は管軸の方向ベクトルと平行であることに着眼しそれを利用する。方向ベクトルが算出されると、管軸に対して斜めに取得された楕円弧を管に垂直な断面に変換できるため、楕円近似ではなく円近似によって安定した解析を行うことが可能となる。

しかしながら、マルチスリット光を用いた計測は、第1章の1.2.3節で述べたように1枚の画像内に異なる投光方向を持つスリット輝線が混在することになるため、各スリット輝線の投光方向を特定する必要がある。そこで、本論文では、マルチスリットと

第1章 緒論

共にランダムドットを投光することで、各スリット輝線の特特定を効率よく行う方法について提案する。さらに、マルチスリットを投光することによって得られた管上の複数スリット切断面の形状と配列関係から管の中心線と径を効率よく取得する方法を提案する。

本論文は、全5章で構成されており、各章の内容について以下に示す。

第2章では、シングルスリットによる管の計測例とその課題について述べる。

第3章では、シングルスリット投光により生じる課題を解決するために、マルチスリットを投光する三次元計測システムを提案する。ここでは、マルチスリット光を用いることによって生じるスリット輝線の投光方向特定の問題を、マルチスリットと共に投光するランダムドットによって解決する方法について述べるとともに、実験により提案する方法の有効性を示す。また、マルチスリット光を用いた計測システムのキャリブレーション方法について説明する。

第4章では、マルチスリットを投光することで得られる管上の複数スリット切断面の形状と配列関係を用いて、効率よく管の中心線と径を取得する方法について述べる。また、実験により異なる角度に配置された複数の管を計測し、管軸に対してスリットが垂直に投光されていない場合でも安定して管の中心線と径が取得できていることを示す。

第5章では、本論文の結論を述べ、今後の展望について示す。

第2章 シングルスリットの投光による管の計測例と課題

2.1 はじめに

工場の配管設備を改修する場合、事前に既設設備の寸法を計測し、実態を把握する必要がある。近年、三次元レーザスキャナはこれらの目的のために使用されている。三次元レーザスキャナは短時間で三次元位置を持った多くの点群データを得ることができるため、設備の相対的位置関係などを高精度に把握するのに有効である。しかしながら、第1章で述べた通り、点群データは広範囲、高密度に取得されるため、データサイズが膨大になり後処理の負荷が大きい。そのため、配管工事の多くを占める中小規模な工事では、今なお人手による計測が行われている。取得する点群データ自体を配管の情報を取得するために必要なデータに絞ることで、後処理の負荷の小さい配管計測システムの開発が期待されている。

本章では、KINECTに光切断法の原理[16]-[20]を組み合わせ、シングルスリットを投光するハンドヘルド型配管計測システムを紹介する[21]。KINECTはハンドヘルドスキャナとして使用するのに十分コンパクトで、リアルタイムに点群データが取得できる。KINECTはモーションキャプチャや精度を必要としないモデリングシステムに有効である。さらに異なる位置から取得された個々の点群データを連結させることで、エリアサイズに制限のない計測が実現できる。しかしながら、KINECTで得られる点群データはバラツキが大きく、それぞれの点から直接寸法を求めるのは難しい。一方、光切断法は、従来から産業分野において、高精度な計測を行うロボットビジョンシステムなどで利用されている。この方法では、スリット光を計測対象に照射し、表面に現れたスリット輝線をカメラで撮像する。スリット輝線部の三次元座標データは、スリットレーザ投光器とカメラの位置関係から三角測量の原理を用いて求められる。

本システムはハンドヘルドタイプで、計測時、ユーザは計測対象の管にスリット光を照射することで計測を行う。カメラが管表面に現れたスリット輝線を撮像すると同時に、KINECTは点群データを取得する。ユーザは計測したい管の中心線に沿って計測システムを移動させながらスリット輝線を2か所撮像する。その際、画像間で重複する領域が存在するように注意する。管の断面情報は、カメラで撮像されたスリット輝線より算出される。データ連結のための計測システムの移動情報は、KINECTにより得られた点群データより算出する。管の中心線の位置や径は、算出された管の断面情報やシステムの移動情報を参照することによりコンピュータ上に構築される。

本章では、まず2.2～2.5節でシステム構成と基本原理について述べる。次に2.6節で配管を計測した結果について述べ、2.7節では、本方法の有効性と課題について述べる。

2.2 計測システムの構成

図 2-1 に計測システムを示す．計測システムは KINECT と，光切断法を実現するカメラおよびシングルスリットレーザ投光器により構成されている．カメラは KINECT に固定されている．また，シングルスリットレーザ投光器はカメラから 300～500 mm 離し装着されている．計測システムはハンドヘルドスキャナとして使用するのに十分にコンパクトである．

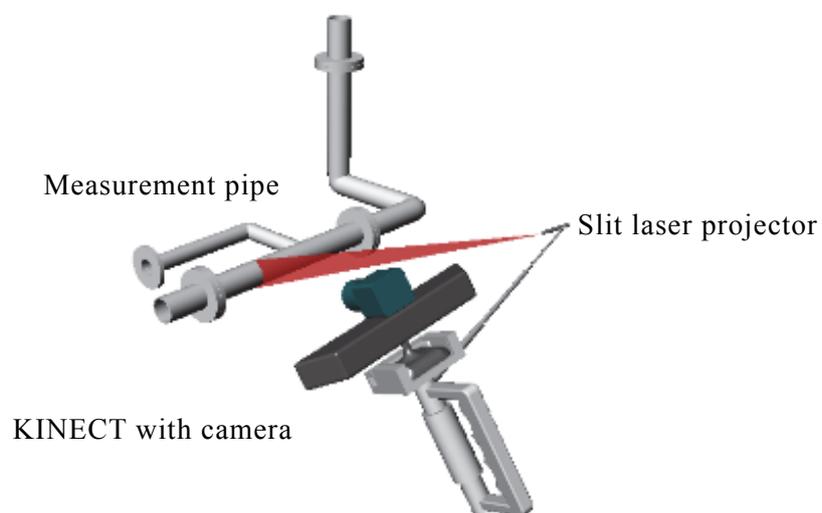


Fig. 2-1 Measurement configuration

2.3 計測手順

計測の流れを図 2-2 に示す。ユーザは管の最初の位置 (エリア k) にスリット光を照射し、計測をスタートする。KINECT は点群データを取得し、同時にカメラはスリット輝線の画像を撮像する。つぎにユーザは計測領域を別の位置 (エリア $k+1$) に移動し、点群データの取得と画像の撮像を行う。以上の処理を繰り返すことで計測を行う。

KINECT の点群データは、計測システムの移動量を算出し異なる位置から取得されたデータを連結するために使用される。KINECT は、KINECT に固定された座標系の点群データを取得する。エリア k とエリア $k+1$ の点群データには重複するエリアを含める必要がある。計測システムの移動量は、ICP アルゴリズム[22]-[26]を用いてエリア k とエリア $k+1$ の点群データを連結することによって算出される。

管の計測はカメラによって得られたデータを用いて行われる。カメラによって撮像されるデータはスリット輝線部のみとなるため、管の断面データのような取得したいデータだけを簡単に抽出できる。管表面に現れるスリット輝線は、楕円弧を描く。楕円の径や中心の情報は、抽出されたスリット輝線をもとに、楕円近似により算出される。異なる位置で得られた楕円は、計測システムの移動情報を考慮することで共通の座標系に配置される。管の三次元形状は、2 個以上の断面データによってコンピュータ上に構築される。2 個の楕円の中心を通る直線が管の中心線として得られ、楕円の短径が管の直径として取得される。

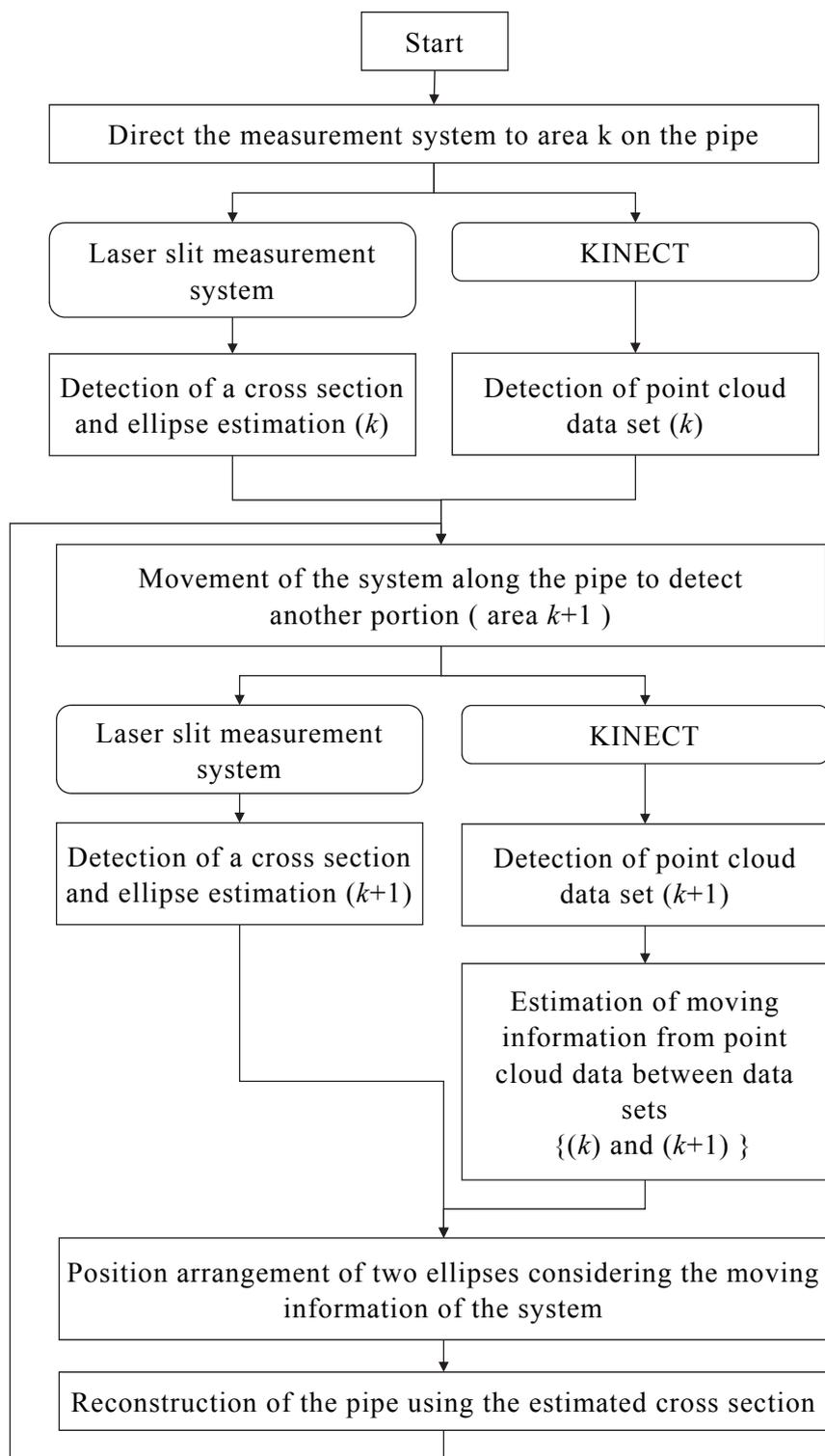


Fig. 2-2 Measurement flow

2.4 キャリブレーション

カメラのキャリブレーション時の構成を図 2-3 に示す。キャリブレーションボードはスリットレーザ平面と一致させる。キャリブレーションボードの目盛の画像をカメラによって撮像し、変換パラメータを決定する。カメラの座標 (u, v) とキャリブレーションボードの座標 (x, y) の関係は、式 (1-1) によってあらわされる[27]-[29].

$$s \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} \\ k_{31} & k_{32} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1-1)$$

ここで、 $k_{11} \sim k_{32}$ は、カメラ座標を実座標に変換する回転や比率、平行移動を考慮したパラメータである。実座標は光切断法を実現するシステムに固定した座標である。これらのパラメータは、カメラ座標と実座標間で対応点を入力することによって決定される。対応点のカメラ座標はマウスによって、実座標はキーボードによって入力する。パラメータ $k_{11} \sim k_{32}$ は4点以上の対応点を入力することによって決定される。カメラ座標から実座標に変換する式を以下に示す。

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{31}u - k_{11} & k_{32}u - k_{12} \\ k_{31}v - k_{21} & k_{32}v - k_{22} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} k_{13} - u \\ k_{23} - v \end{bmatrix} \quad (1-2)$$

スリット輝線上のすべての点を実座標に変換することで、管のスリット切断面の形状を算出する。

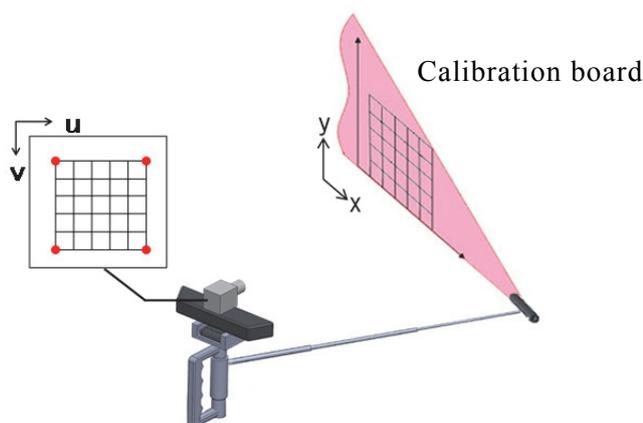


Fig. 2-3 Calibration setup

2.5 配管の再構築

図 2-4 に KINECT によって取得した配管の点群データの例を示す. 図 2-5 (a) と (b) に KINECT で取得した点群データから抽出したスリット部のデータとカメラで取得したスリット切断面データを示す. カメラで取得したスリット切断面データは, KINECT で取得したデータに比べ安定している. KINECT で取得したスリット部のデータは, カメラで得られたデータに置き換えられる. 断面形状 (楕円) は, 図 2-5 のデータから最小二乗法を用いて図 2-6 のように算定できる.



Fig. 2-4 Point cloud data obtained by KINECT



(a) Image of extra camera (b) Image of KINECT

Fig. 2-5 Laser streak on the pipe



Fig. 2-6 Estimated cross section of the pipe

図 2-7 に KINECT によって異なる位置で取得された点群データを示す。各データは、図 2-7 の斜線部分で示されるように、ほかのデータの重複するデータを含む必要がある。これらの点群データは、ICP アルゴリズムを用いて図 2-8 のように連結される。算定した断面 (楕円) の位置と向きは、連結された配管の点群データによって決定され、図 2-9 に示すようにコンピュータ上に構築される。よって、各測定領域の座標は、この連結によって共通の座標系 (グローバル座標系) に変換される。配管の全体形状は、光切断法で得られた複数の断面から構築される。

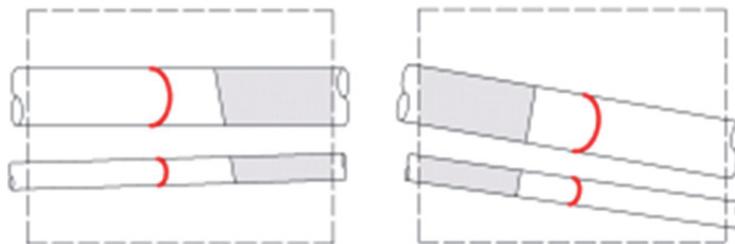


Fig. 2-7 Point cloud data captured from different positions

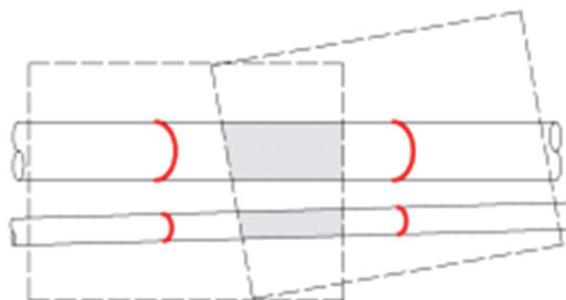


Fig. 2-8 Connection of two point cloud data

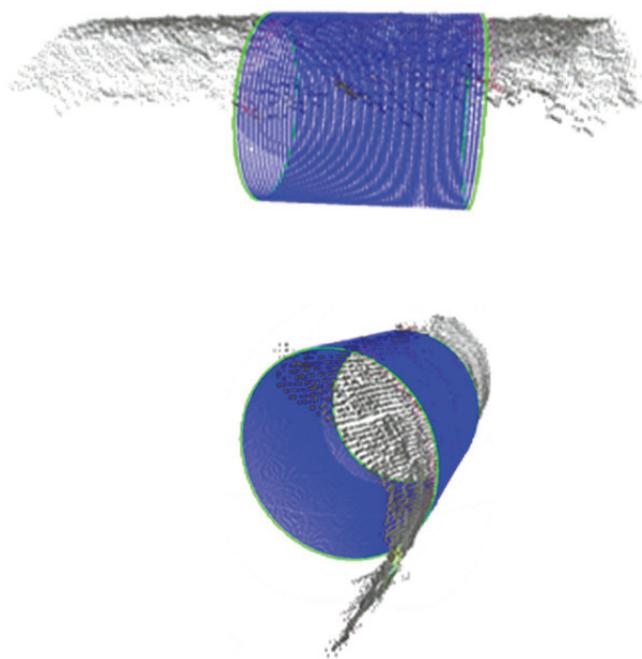


Fig. 2-9 Pipe reconstructed on a computer

2.6 実験

図 2-10 に実験で計測した配管の写真, 図 2-11 に KINECT で取得された点群データ, 図 2-12 に本システムで得られた径と中心線情報を用いて再構築した配管を示す. 点群データは KINECT で取得された 6 つの領域のデータを連結して, コンピュータ上で構築している. おおのこの領域は 1 本のスリット輝線を含んでいる. 赤い円はスリットが投光された位置の径情報から算出された管の垂直断面を示す. 3 本の管が図 2-12 に再構築されている. 図 2-13 に管と計測装置の距離に対する管径の計測誤差を示す. 計測誤差は距離が 2000 mm 以下で約 2 mm, 2000 mm を超えると 0.3%であった.



Fig. 2-10 Photograph of the measured pipe

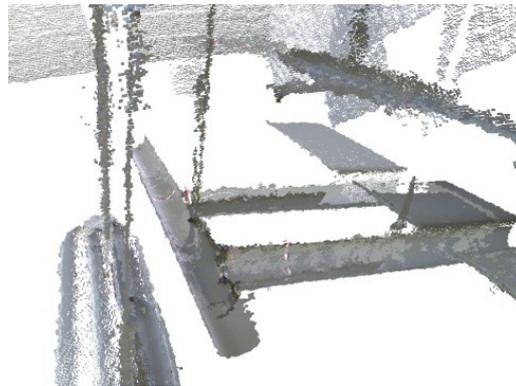


Fig. 2-11 Point cloud data of the pipe

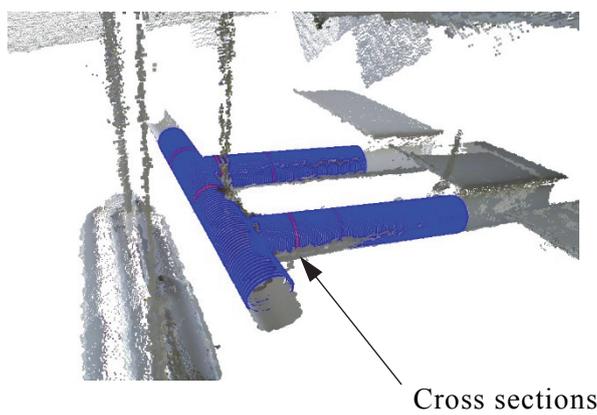


Fig. 2-12 Pipe reconstructed on the computer

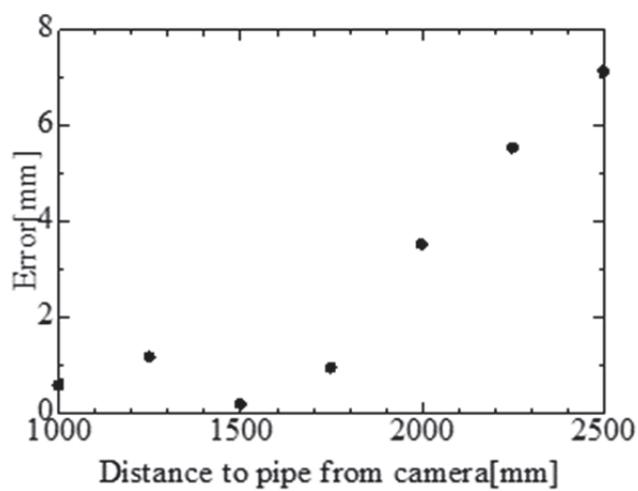


Fig. 2-13 Accuracy of the measurement system

2.7 まとめ

本章では、KINECT に光切断法の原理を組み合わせ、シングルスリットを投光するハンドヘルド型配管計測システムを紹介した。本方法は、スリットを投光することで計測領域が絞られるので取得されるデータ量が少なく、配管の情報を得るための後処理の負荷を低減することができる。

以下に本章のまとめを示す。

- (1) 管が円筒形状であることを考慮して、スリットを投光し得られた2個の切断面データから管の中心線と径を取得する方法を示した。
- (2) KINECT で取得した点群データを、計測装置の移動距離の検出に利用することで、ハンドヘルドでの計測が可能になった。
- (3) スリットを投光した位置に絞ってデータを取得できるので、スキャナ式の計測器に比べてデータ量の削減が可能となった。

計測結果は、管の中心線と径を取得する方法としてスリットの投光による計測が有効であることを示している。しかしながら、シングルスリット光を用いた本方法では管径の算出や中心線位置の取得に楕円近似を必要とするため、後の第4章に示すように管表面にあらわれる楕円弧輝線が短い場合などに楕円近似の不確かさから算出結果が不安定になる課題があった。また、KINECT による移動情報の検出誤差が影響を及ぼし各断面が正確に配置されない場合があった。

次章以降では、これらの課題を解決するために、マルチスリット光を用いた配管計測システムを提案し、配管の情報を効率よく取得する方法について述べる。

第3章 マルチスリットを用いた三次元形状計測における マルチスリット輝線の同定

3.1 はじめに

シングルスリット光を用いた計測における課題に対処するために、マルチスリットを投光する三次元計測システムを試作した。本章では、マルチスリットを投光する三次元計測システムを用いて、1枚の画像から効率よく計測対象の三次元形状を取得する方法について提案する[30]。複数のスリットを同時に投光する方法は、スリット本数分の切断面の形状が一度に取得できるため、ハンドヘルドでの使用など瞬間の形状を把握したい場合に有効である。投光されるスリット光が1本の場合、カメラとスリットの位置関係が一意に決定されるため、スリット輝線上の三次元座標データは三角測量の原理を用いて求めることができる。しかし、スリット光が複数本投光された場合、1枚の画像内に異なる投光方向を持つスリット輝線が複数混在し、判別できなくなる問題がある。計測対象の三次元座標データを取得するためには、各スリット輝線の投光方向を特定する処理が必要となる。そこで、スリット輝線特定の手段としてマルチスリットと共にランダムドットを投光する三次元計測システムを試作した。本システムにおいてランダムドット光は、スリット光が照射される範囲を網羅するように照射され、スリット輝線おのおのの周辺で固有のパターンを形成し、各スリット輝線を特徴づける。すなわち、ランダムドット光は各スリット輝線を識別し投光方向を特定するためのマーカーとして使用される。各スリット輝線の投光方向が特定されるとスリット本数分の三次元断面形状が一度に取得できることになる[31]。

本方法を用いれば異なる投光方向を持つスリット輝線が画像内で混在しても各スリット輝線の特定が可能となる。また、スリット輝線を特徴づけるためにスリット光の輝度や色相を変える必要がないので、レーザ投光器で構造化光を高輝度に固定して投光できる利点がある。

本章では、まず 3.2～3.6 節で、システム構成と基本原理について述べる。次に 3.7 節で複数の物体にマルチスリットとランダムドットを投光し、各スリット輝線を特定(同定)した実験結果について述べる。3.8 節ではシステムのキャリブレーション方法について説明し、キャリブレーションパラメータの検証結果を示す。

3.2 シングルスリット投光法とマルチスリット投光法

図 3-1 は、一般的な光切断法の原理を示している。この図では、シングルスリットはそれぞれ異なる距離の壁に投光されている。壁にあらわれるスリット輝線はシステムと壁までの距離によって変位するので、計測対象とシステムとの間の距離は、スリット輝線の変位を調べることによって計測することができる。

図 3-2 は、シングルスリット投光法の概略図を示す。スリット輝線上の点は、スリットの投光方向を考慮して、三角測量によって計算することができる。したがって、スリット輝線部の切断面形状を推定することができる。計測対象物全体の形状を取得するためには、計測対象の表面をスキャンすることが必要となる。

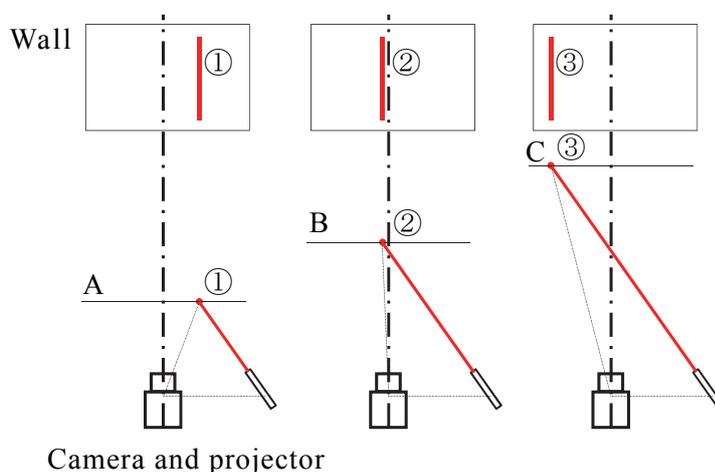


Fig. 3-1 Laser projection and camera setup

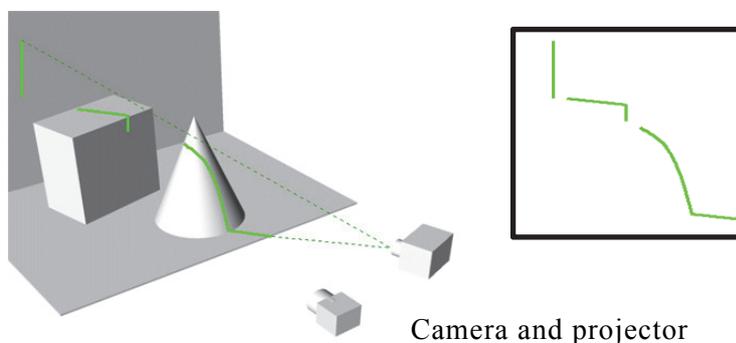


Fig. 3-2 Shape measurement

図 3-3 は、マルチスリット投光法の概略図を示す。スリットの数を増やすと、計測断面の数が増える。しかしながら、計測対象の三次元座標データを得るためには、各スリットの投光方向が特定されなければならない。計測画像において、異なる投光方向を持つスリット輝線が多数存在する場合、各スリット輝線の投光方向を特定することは難しい。

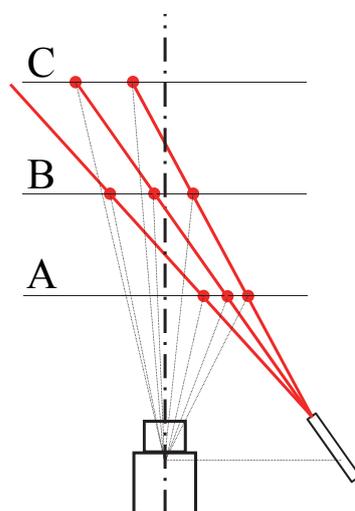


Fig. 3-3 Schematic diagram of multiple-slit projection

3.3 システムの構成とレーザの配置

3.3.1 システム構成

計測システムは、マルチスリットレーザ投光器、ランダムドットレーザ投光器およびカメラにより構成される。図 3-4 に計測時のイメージを示す。マルチスリット光およびランダムドット光は光源の前に複数のスリットや一律のパターンを持つランダムドットを発生させる回折光学素子を配置することによって生成される。様々なスリット本数の回折光学素子が市販されており、状況に応じて選択する。ランダムドットレーザ投光器は多くのスポット光をランダムに発生させるもので、回折光学素子に一律のパターンを持つ。マルチスリットレーザ投光器とランダムドットレーザ投光器は計測対象に対し同方向から照射するように配置する。また、カメラは一定の距離において視線方向がスリット光平面と交差するように設置する。カメラにはレーザの波長域周辺のみを透過するバンドパスフィルタを装着している。図 3-5 (a) のような赤、白、黄色の三種類のボールを撮像した例を示す。図 3-5 (b) はバンドパスフィルタ無し状態で撮像した画像で、図 3-5 (c) はバンドパスフィルタを装着し撮像した画像を示す。バンドパスフィルタを装着した画像は対象の色に影響を受けずスリット輝線とランダムドット輝点を鮮明に撮像できている。このように、高輝度に固定した構造化光とバンドパスフィルタの併用により、外乱光や計測対象自体の色など計測環境の影響を受けにくい。図 3-4 の壁や計測対象上の赤いラインは照射されたスリット輝線のように示す。ランダムドットレーザ投光器は、マルチスリット光が照射される範囲を網羅するようにスポット光を計測範囲全面に照射する。図 3-4 の右上に、照射されたスリット輝線とランダムドット輝点の例を示す。スリット輝線の周辺にランダムドット輝点が分布している。計測は、対象表面にあらわれたマルチスリット輝線とランダムドット輝点をカメラによって撮像することで実行される。本システムで取得した画像内には異なる投光方向を持つ複数のスリット輝線があらわれる。

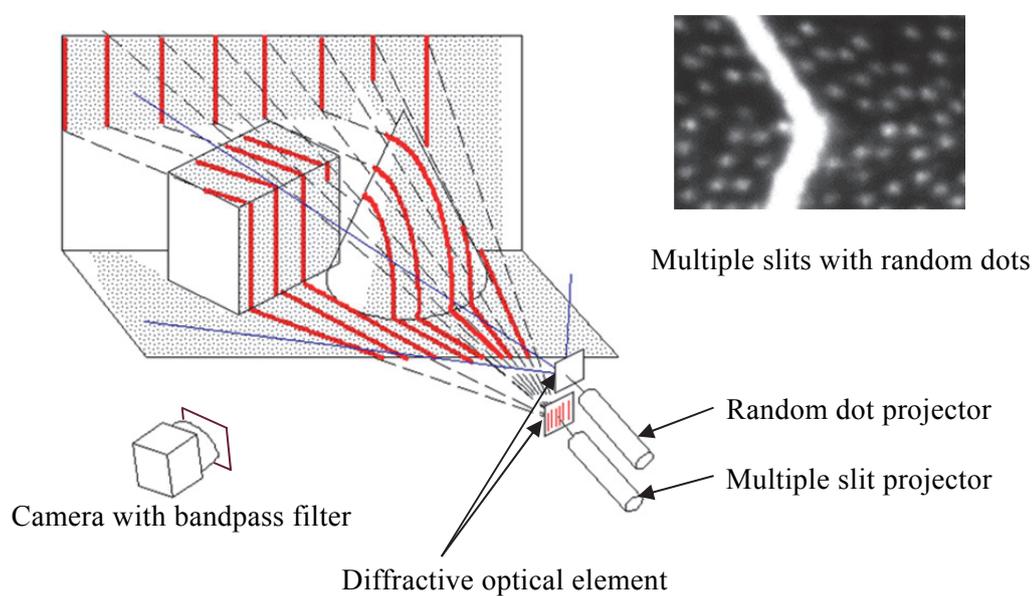
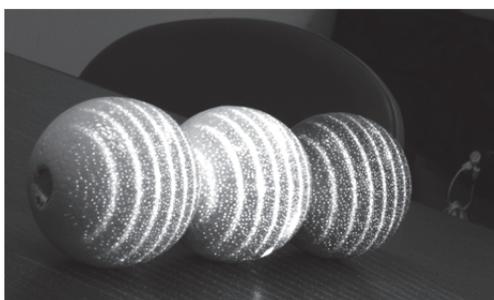


Fig. 3-4 Measurement configuration



(a) Colored balls



(b) Captured image without bandpass filter



(c) Captured image with bandpass filter

Fig. 3-5 Effect of bandpass filter

図 3-6 (a) は壁と本システムの間配置した物体を撮像した画像を示す。黄色い実線で囲んだ部分は配置した物体の位置をあらわす。スリット光はカメラの視線に対して右後方から壁に向かって投光されている。黄色い点線で囲んだ部分は壁上の領域で、スリット輝線が物体によって分断されている。分断されたスリット輝線は物体がレーザ光源に近い位置にあるので画像内では右側にシフトされている。図 3-6 (b) は撮像した画像からスリット輝線のみ抽出した画像を示す。スリット輝線の画像のみではおのおののスリット輝線の識別が困難であるので、スリットの投光方向の判断は難しい。1枚の画像から三次元形状を得るためには、各スリット輝線を識別し投光方向を特定する必要がある。そこでランダムドット光を各スリット輝線識別のためのマーカーとして使用する。本システムではスリット光が照射される範囲を網羅するようにランダムドット光を照射するため、分断されたスリット輝線に対しても周辺のランダムドットパターンから識別が可能となる。スリット輝線が識別され投光方向が特定されると計測対象の三次元形状は、スリット輝線の座標値から三角測量の原理を用いて算出される[31].

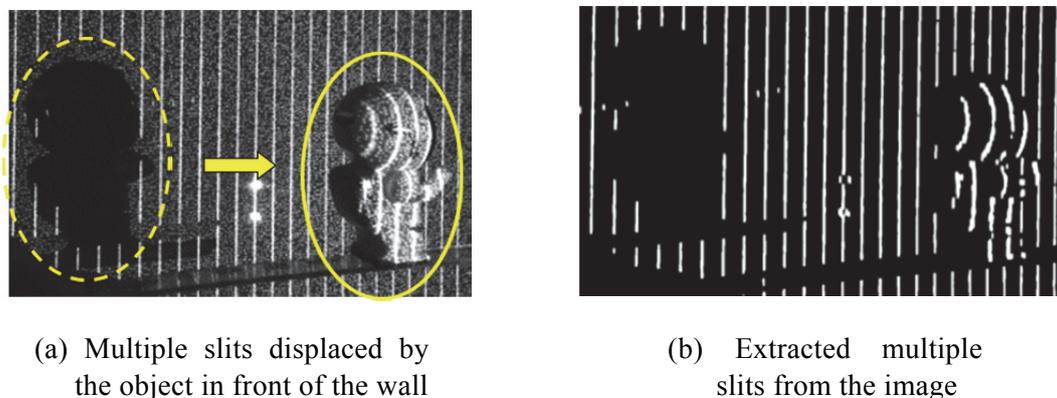
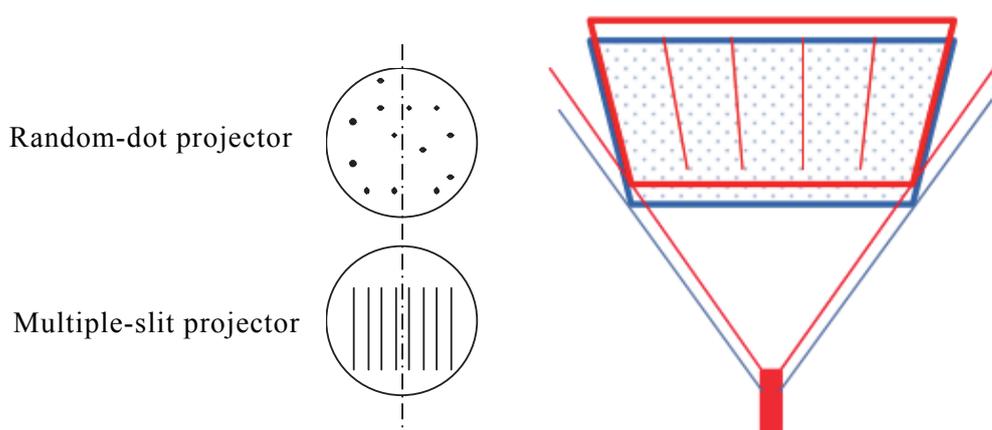


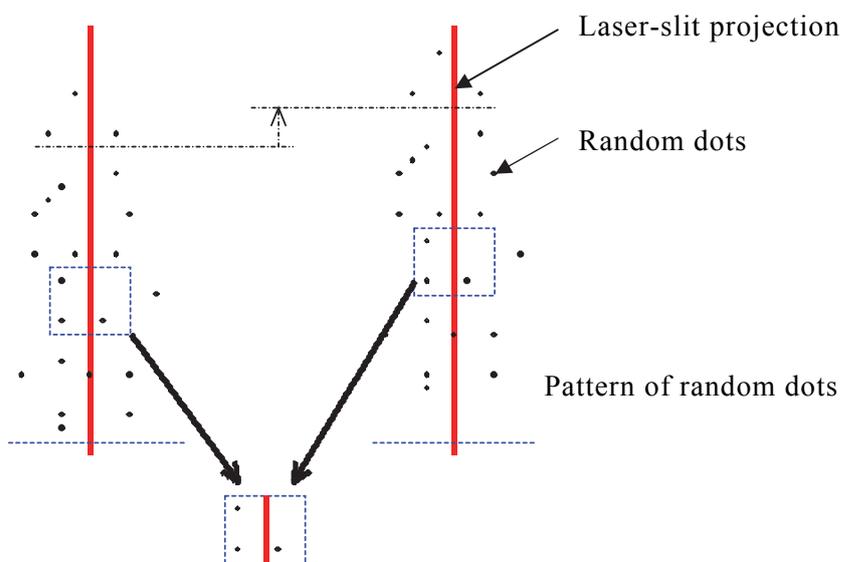
Fig. 3-6 Scene with an object and projected multiple slits

3.3.2 レーザ投光器の配置の工夫

マルチスリットとランダムドットレーザ投光器は計測対象に同方向から照射するように配置しているものの光軸が一致していないことから、図 3-7 (a) に示すように、スリット輝線とランダムドット輝点は照射距離の変化に応じて照射位置に若干のずれが生じる。しかし、図 3-4 に示す通り、ランダムドットレーザ投光器をスリットの長手方向に対し鉛直線上に配置することによって、ランダムドットの照射位置はスリットの向きと同方向にのみずれるので、スリット輝線の同定に影響しない。図 3-7 (b) に示されているようにランダムドット輝点はスリット輝線に対し水平にずれを生じない。



(a) Arrangement of projectors and shifted pattern



(b) Projected pattern

Fig. 3-7 Shift between laser-slit projection and random-dot pattern

3.4 基準画像の作成

1枚の画像に記録された多数のスリット輝線について、一つのマルチスリットレーザ投光器から分岐されたどのスリット光によるものかを特定する処理が必要である。特定するためには、マルチスリット輝線とランダムドット輝点の位置関係およびアドレス(ライン番号)を記録した基準画像と計測画像を対比する同定処理を行う。以下にスリット輝線の特定方法について説明する。

3.4.1 基準画像の作成とエピポーラ方程式の算出

図3-8に基準画像の作成とエピポーラ方程式[32][33]を算出するためのフローを示し、この流れに沿って説明する。

まず、図3-9(a)に示すように、計測範囲を網羅する大きさの壁や平面に対し、スリット光およびランダムドット光を照射する。計測システムと平板までの距離を変えながら平板上にあらわれたスリット輝線およびランダムドット輝点の画像を j 枚($j \geq 2$)撮像する。これらの画像を基準画像と呼ぶ。また、実際の計測時に撮像する画像を計測画像と呼ぶ。図3-10に示すように計測画像内のある点(u' , v')に対応する点は、基準画像(u , v)上ではエピポーラ線上に存在する。エピポーラ線の関係式を式(3-1)に示す。

$$\begin{bmatrix} u' & v' & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = 0 \quad (3-1)$$

このエピポーラ線の関係式における $m_{11} \sim m_{32}$ は、計測画像と基準画像間の回転および並進に関する情報からなる行列で、距離を変えて撮像した基準画像間で共通する点を8点以上対応づけることによって算出することができる。 $m_{11} \sim m_{32}$ が決まると、計測画像内の点(u' , v')に対するエピポーラ線 E の式は式(3-1)を変形し以下のようになる。

$$(u' m_{11} + v' m_{21} + m_{31}) u + (u' m_{12} + v' m_{22} + m_{32}) v + u' m_{13} + v' m_{23} + 1 = 0 \quad (3-2)$$

次に基準画像の各スリット輝線 L_n に対しては図3-9(b)のように $n = 1 \sim s$ (s は投光するスリットの本数)のアドレスを設定する。ここで、アドレスはマルチスリットレーザ投光器から分岐されたスリット輝線を区別するために付与する値を示す。この基準画像上の各スリット輝線を基準スリットとよぶ。また各基準スリットに対して直線の式を算出しておく。以上の初期設定は、カメラとレーザ投光器の位置関係に変更がない限り省略できる。

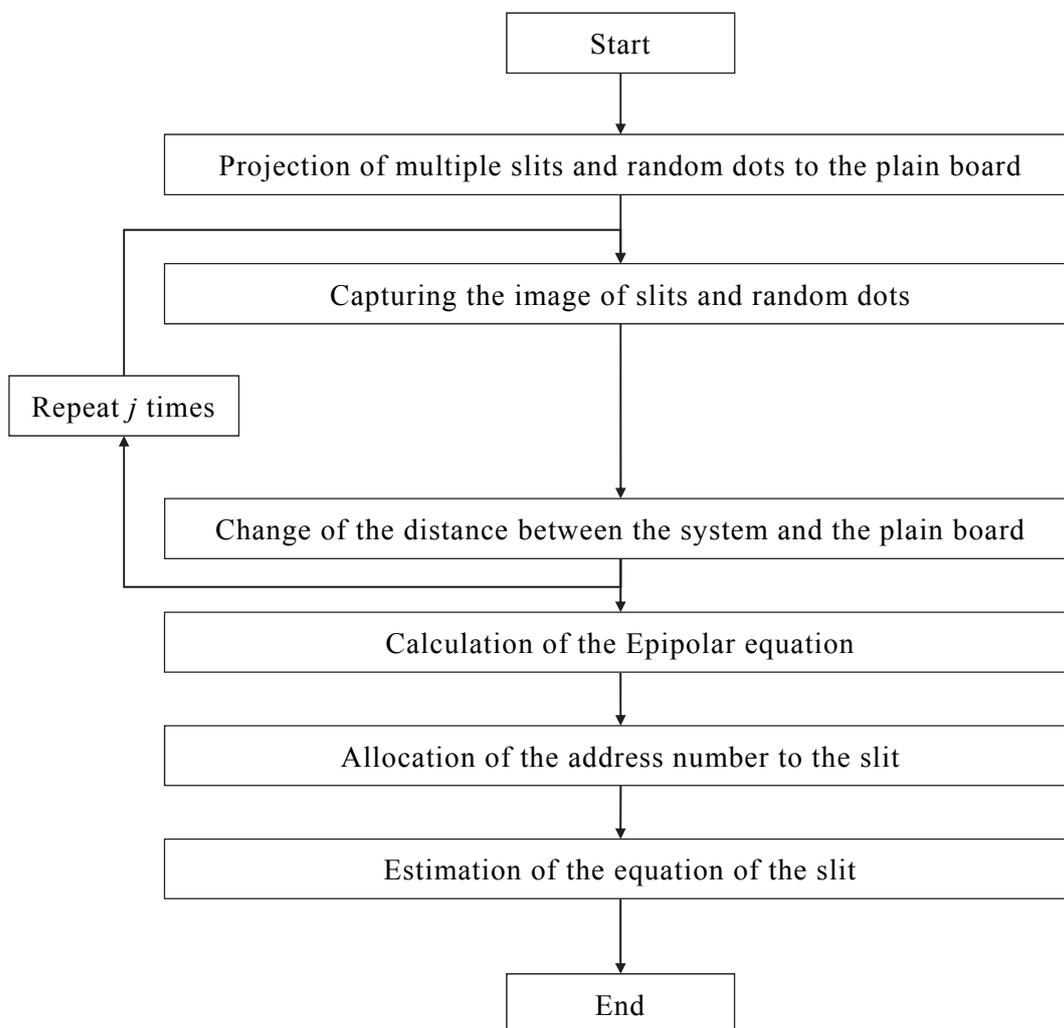
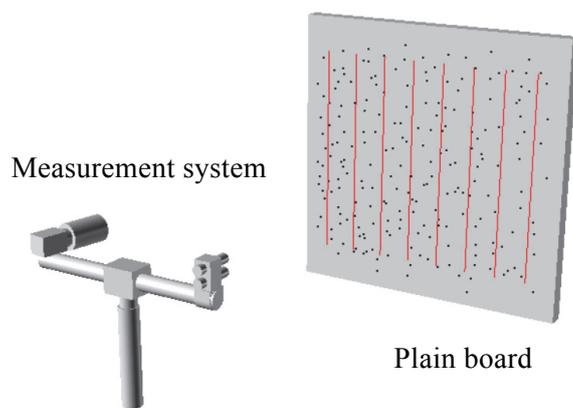
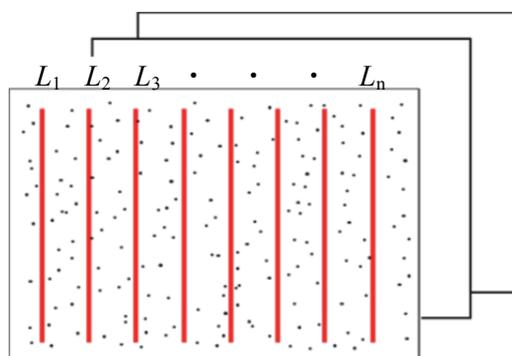


Fig. 3-8 Measurement flow for Initial setting (Basic image)



(a) System setup for basic image capture



(b) Basic images

Fig. 3-9 Preparing basic images

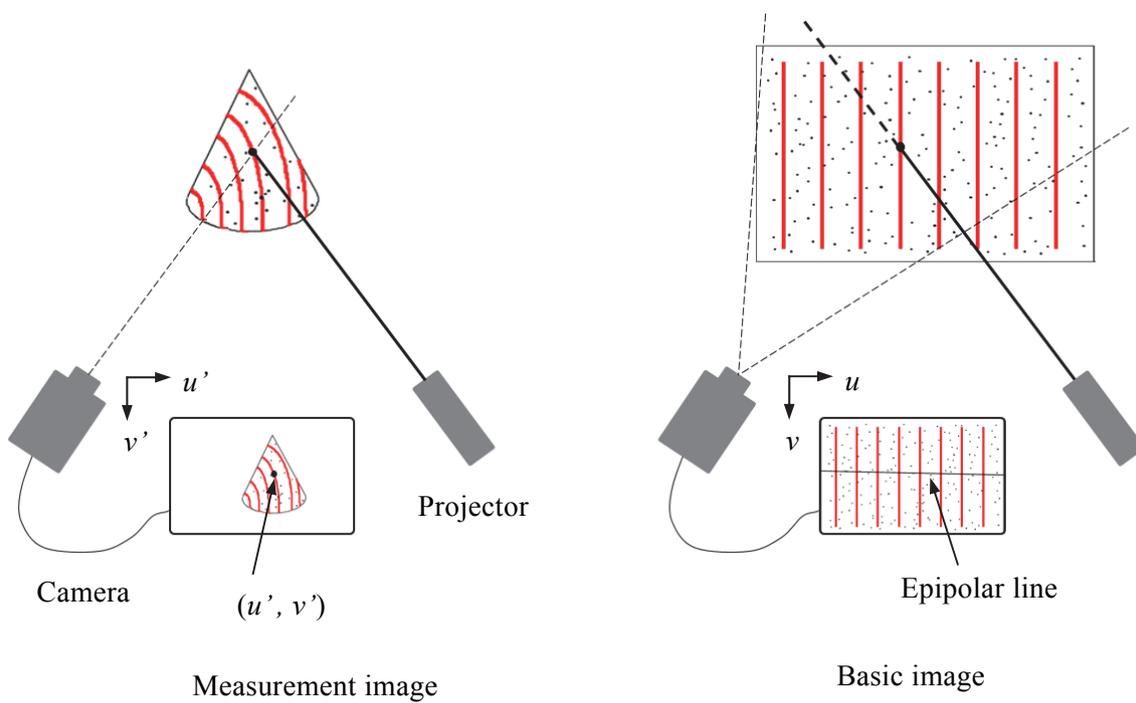
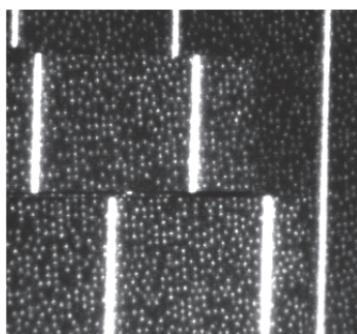


Fig. 3-10 Correspondence point on the Epipolar line

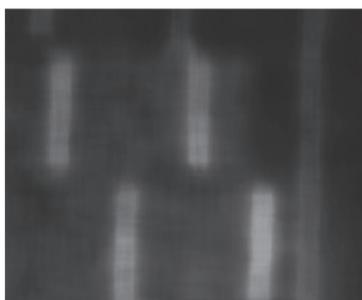
3.4.2 スリットとランダムドットの分離

取得したおのおのの画像に対して，スリット輝線とランダムドット輝点を分離する処理を行う．

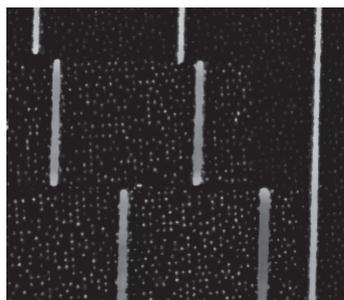
図 3-11 (a) は，システムによって取得されたオリジナル画像を示す．複数のスリット輝線とランダムドット輝点が画像中に同時に記録されている．まず，オリジナル画像にメディアンフィルタを適用する．画像 (b) は，メディアンフィルタを適用した画像を示す．次に，オリジナル画像 (a) から，画像 (b) を減算する．これにより背景の輝度の影響を抑制しスリット輝線とランダムドット輝点を強調した画像 (c) を得ることができる．画像 (c) にモルフォロジー処理[34][35]を適用することによってランダムドット輝点を削除することができる．一般に，モルフォロジー処理は，ノイズ低減などに適用されるが，画像 (d) に示すように，ドットを除去するためにもまた使用できる．スリット輝線が適切に抽出されると，ドットが画像 (c) からの画像 (d) を減算することによって容易に抽出することができる．抽出されたドットを画像 (e) に示す．スリット輝線とランダムドット輝点の 2 つの別々の画像は，スリットアドレスの割り当てのために使用される．



(a) Original image



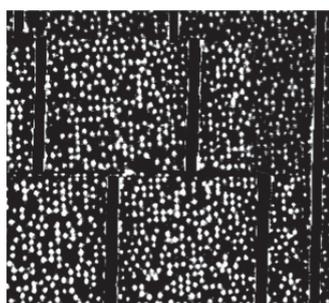
(b) Median filter



(c) Result of subtracting (b) from (a)



(d) Slit extraction by morphology



(e) Dot extraction by subtracting (d) from (c)

Fig. 3-11 Extraction of slits and random dots

3.5 各スリット輝線の同定方法

図 3-12 にスリット輝線同定のフローを示す. 計測対象にマルチスリット光とランダムドット光を照射し撮像する. 図 3-13 (a) は撮像された計測画像のイメージを示す.

撮像された計測画像からスリット輝線 (総数 g 本) を抽出し, ラベリング処理によってそれぞれの輝線にラベル付け ($0 < m \leq g$) する. ここで, ラベル m は計測画像から抽出した連続した輝線に対してコンピュータによって自動的に付加された番号である. アドレスの同定はラベル付けされたスリット輝線ごとに行う. 輝線 (ラベル m) 上からランダムに f 個の点 A_k ($k=0 \sim f$) をサンプリングする. 輝線上のすべての点についてアドレスの同定を行うのではなく, ランダムにサンプリングした複数点について処理を行うことで高速化を図っている. サンプリングした点 $A_k(u'_k, v'_k)$ を中心に周辺の画像からテンプレートを作成する. テンプレートには, 点 A_k を特徴づけるランダムドット輝点が含まれる. 図 3-13 (b) に作成された点 A_k のテンプレートの例を示す. 点 A_k に対するアドレスの同定は, 別途準備しておいた基準画像から, 点 A_k のテンプレートに含まれるランダムドット輝点と類似度の高い位置を探索することにより行う. 輝線上の点 A_k に対応する点は, 基準画像内でエピポーラ線 E_k 上に存在する. 点 $A_k(u'_k, v'_k)$ に対応するエピポーラ線 E_k は, 初期設定で求めたエピポーラ線の式 (3-2) から算出される. また, 計測画像の点 A_k はスリット輝線上の点であるため, 基準画像内で点 A_k の対応点が存在する範囲は, 図 3-13 (c) に示すようにエピポーラ線 E_k と各基準スリットの直線の交点 $p_1(u_1, v_1) \sim p_n(u_n, v_n)$ に限定される. これらの交点に対し, テンプレートマッチングを実行し, マッチングの評価値の高い対応点を選定し候補アドレスを決定する. マッチングの評価値 V_n は以下の式 3-3 [36] を用いた.

$$V_n = \frac{\sum_{j=-N/2}^{N/2} \sum_{i=-M/2}^{M/2} \{I_{A_k}(u'_k+i, v'_k+j) \cdot I_n(u_n+i, v_n+j)\}}{\sqrt{\sum_{j=-N/2}^{N/2} \sum_{i=-M/2}^{M/2} I_{A_k}(u'_k+i, v'_k+j)^2} \sqrt{\sum_{j=-N/2}^{N/2} \sum_{i=-M/2}^{M/2} I_n(u_n+i, v_n+j)^2}} \quad (3-3)$$

ここで, M , N はテンプレートのサイズで, I_{A_k} および I_n はそれぞれ計測画像と基準画像での輝度値である.

輝線上でランダムにサンプリングした f 個の点すべてに対し候補アドレスを決定する. f 個の点の評価値を比較し最も評価値の高い点のアドレスを最終的なアドレスとして決定する. 以上により輝線 (ラベル m) のアドレスが特定される. 特定されたスリット輝線のアドレスからスリットの投光方向が決まり, 三角測量の原理によりスリット輝線の三次元座標が求められる[31].

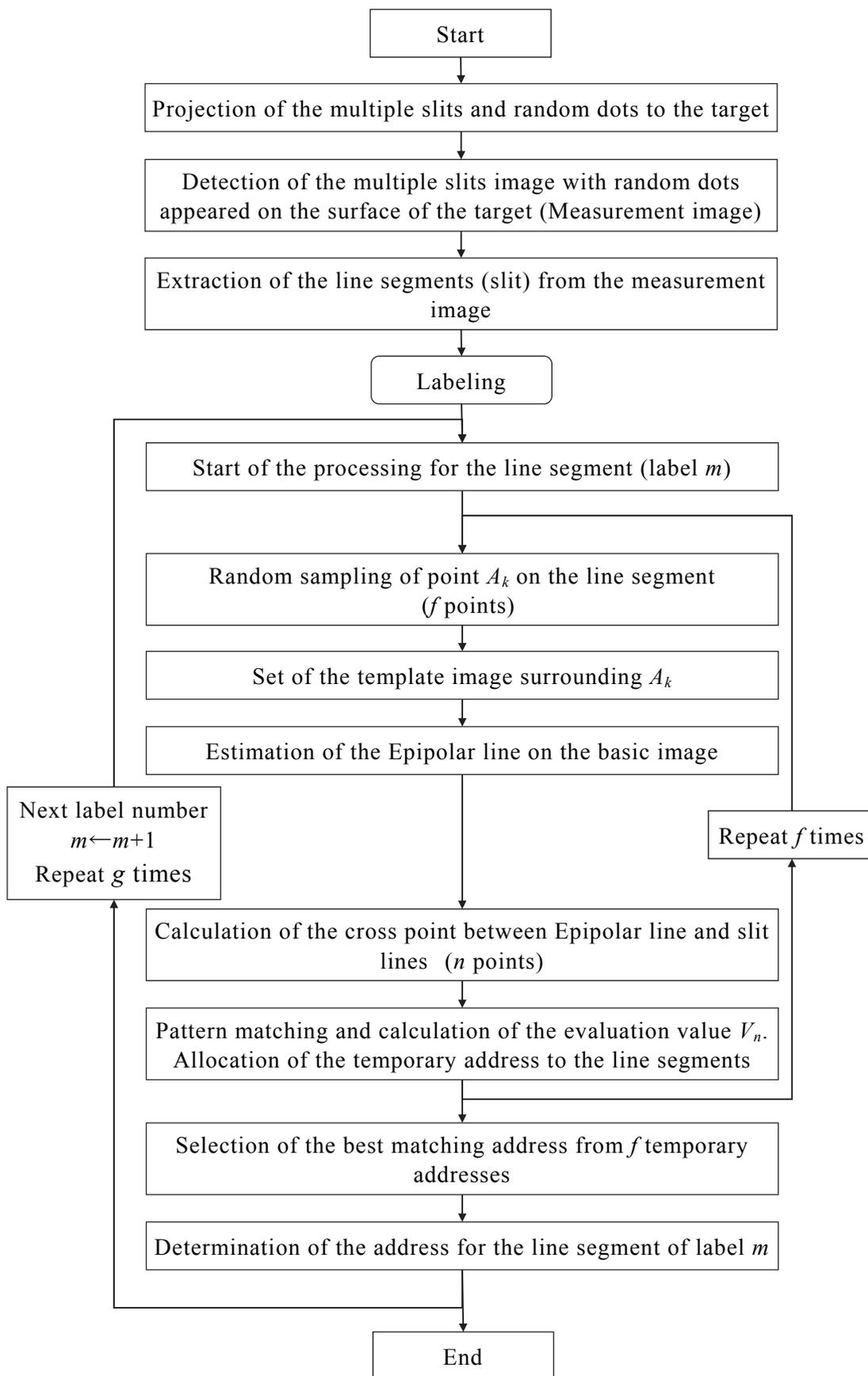


Fig. 3-12 The flow of the measurement process

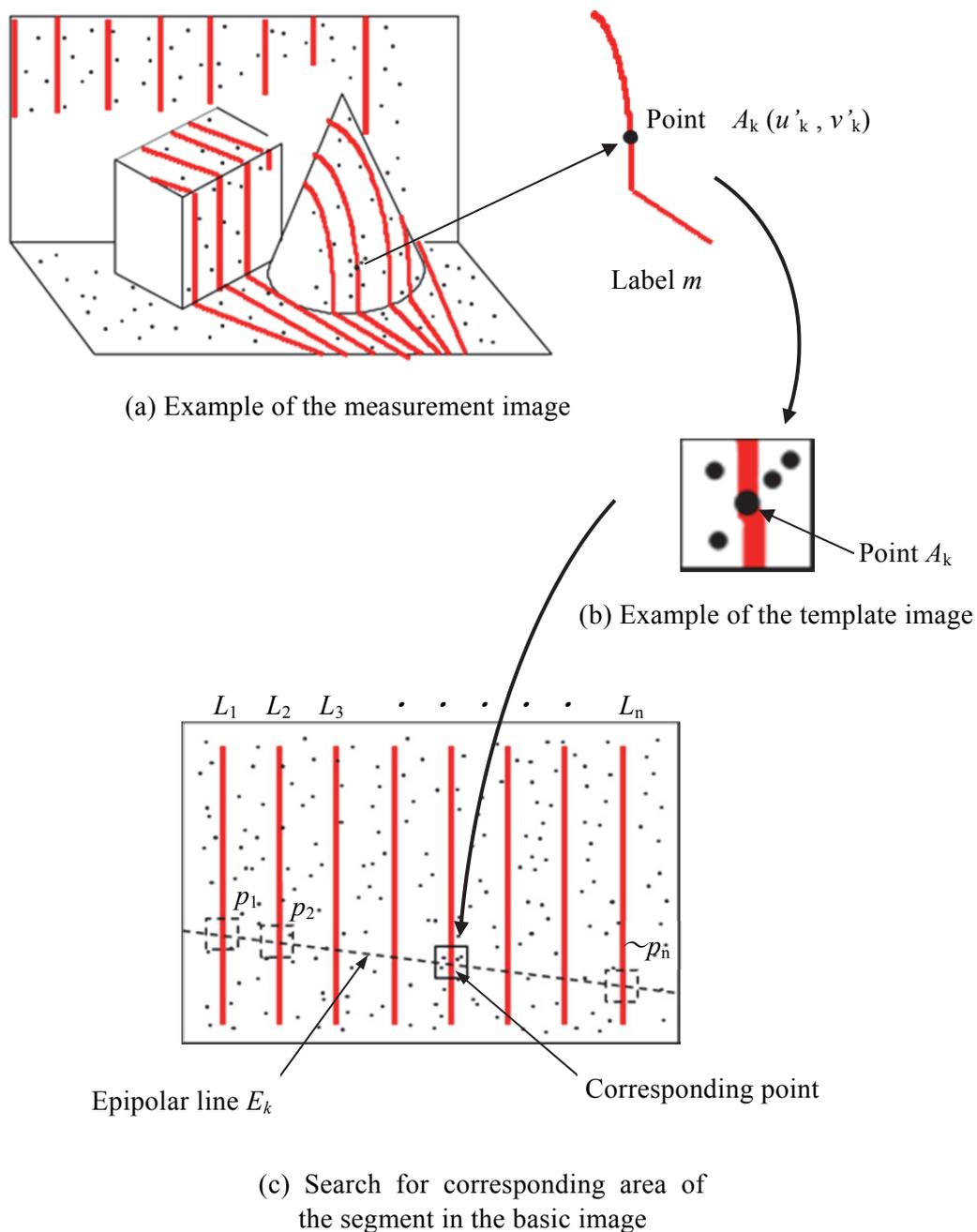


Fig. 3-13 Identification method of each line segment

3.6 スリット輝線の連続性を考慮したテンプレート領域の設定

本方法では、テンプレート作成の際にスリット輝線の連続性を考慮しテンプレートの範囲を設定することで、スリット輝線同定の信頼性を高めている。ランダムドット光は段差などの不連続部の認識が困難で、検出された点が縁に位置しているかどうかの判別が難しい。一方スリット光の場合は物体の縁や段差などの位置が輝線の形状に明確にあらわれ、スリット輝線が不連続になっているようすから物体の不連続部が判断できる。図 3-14 は壁面の前に置かれた物体にランダムドット光とスリット光を照射した例を示す。通常は、輝線上の点 A に関するテンプレートは、 A を中心に、指定したサイズで作成する。ただし、物体の縁のほうに位置する点では、図 3-14 (a) の青枠で示すようにテンプレートが物体側と壁面側の両方のランダムドット輝点を含み、テンプレートマッチング処理において誤対応の要因となる。本システムでは物体の連続性はスリット輝線の連続性より判断できるので、テンプレート領域の設定に利用している。図 3-14 (b) に示すようにスリット輝線の不連続位置周辺でテンプレートを作成する際、テンプレートを輝線の連続性を考慮して設定する。これにより壁面側のランダムドット輝点のみを含んだテンプレートと物体側のランダムドット輝点のみを含んだテンプレートに分けて作成することが可能となる。すなわち図 3-14 (b) のように壁面側 B と物体側 C の位置でそれぞれのランダムドット輝点のみを含んだテンプレートが作成される。

以上のように、スリット輝線の連続性を考慮することでランダムドットのみでは困難であった計測対象の輪郭部の判別が明確になり、スリット輝線の同定処理の信頼性を高めている。

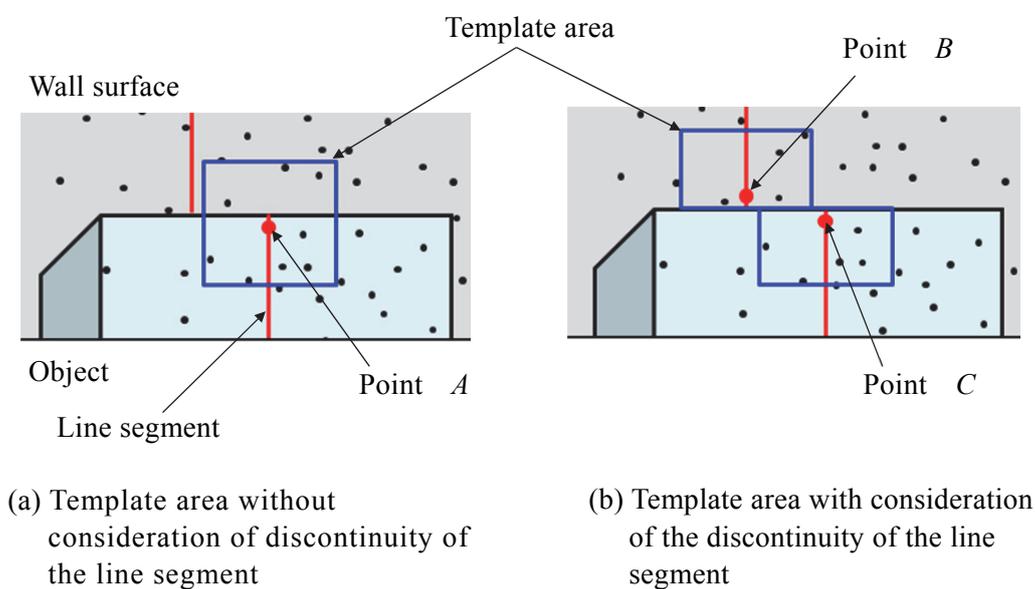


Fig. 3-14 Template image at discontinuous area

3.7 実験

3.7.1 各スリット輝線の同定実験

提案するスリット輝線同定の効果を確認するために実験を行った。図 3-15 に実験に使用した計測システムを示す。実験用のデバイスは 25 本のスリットを投光するマルチスリットレーザ投光器 (波長 660 nm, 80 mW), ランダムドットレーザ投光器 (波長 660 nm, 50 mW), レーザの波長域を透過するバンドパスフィルタ (中心波長 675nm, 半値幅 40nm) を装着したカメラ (Basler acA1300 130 万画素 60 fps) を使用した。カメラとレーザ投光器の基線長は 450 mm, 計測システムから計測対象までの距離は約 1.8 m で実験を行った。

図 3-16 (a) に計測対象の写真, (b) に計測画像, (c) に基準画像の例を示す。計測画像では, 複数のスリット輝線とランダムドット輝点を確認できる。基準画像は平面までの距離を変えて 3 枚作成した。各基準画像には図 3-16 (c) の例に示すように 25 本のスリット輝線 L_n に対してアドレス $n=1 \sim 25$ が割り当てられる。また, テンプレートマッチングにおいて, 計測画像のテンプレートのサイズは 41×41 , スリット輝線ごとにランダムにサンプリングする点は 10 点とした。これにより, 処理するデータ数が削減され, 処理時間は 20 分の 1 になった。サンプリングした 10 点に対し複数の候補アドレスが割り当てられた輝線を例に, アドレス同定の結果を説明する。図 3-17 (a) の円柱に照射されたスリット輝線 (ラベル $m=31$) 上で, ランダムにサンプリングされた 10 点のうち最初の 1 点 ($k=0$), 点 A_0 を例に示す。図 3-17 (b) の基準画像上に描かれた黄色い線は, 点 A_0 から算出されたエピポーラ線を示す。また, 青い四角で囲んだ部分はエピポーラ線と基準スリット $L_1 \sim L_{25}$ の直線の式から算出された交点を示す。点 A_0 の対応点は算出された 25 個の交点の中からマッチング評価値の高い点を選択され, 輝線には候補アドレスが割り当てられる。ここでは, 交点 p_9 の評価値が最も高く, 評価値 V_9 は 0.378 であった。したがって, 輝線 (ラベル $m=31$) の候補アドレスは L_9 と割り当てられた。ランダムにサンプリングされた残りの 9 点についても同じ処理を行い, 最終的には点 $A_0 \sim A_9$ おのおのに対し選定された候補アドレスの中から, 評価値 V_n が最も高いアドレスを選定し, その輝線のアドレスとして決定する。

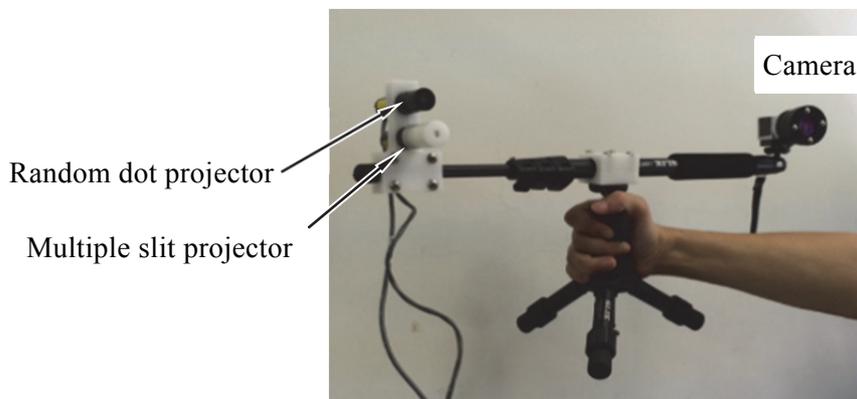
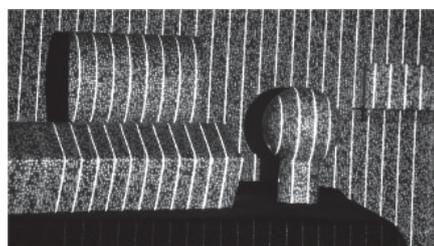


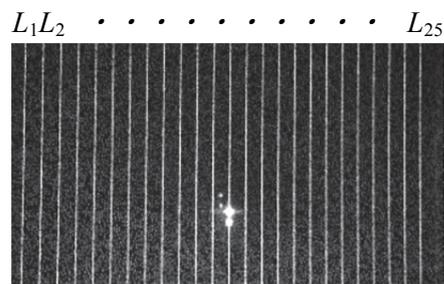
Fig. 3-15 Measurement system



(a) Object



(b) Measurement image



(c) Basic image

Fig. 3-16 Measurement image and basic image

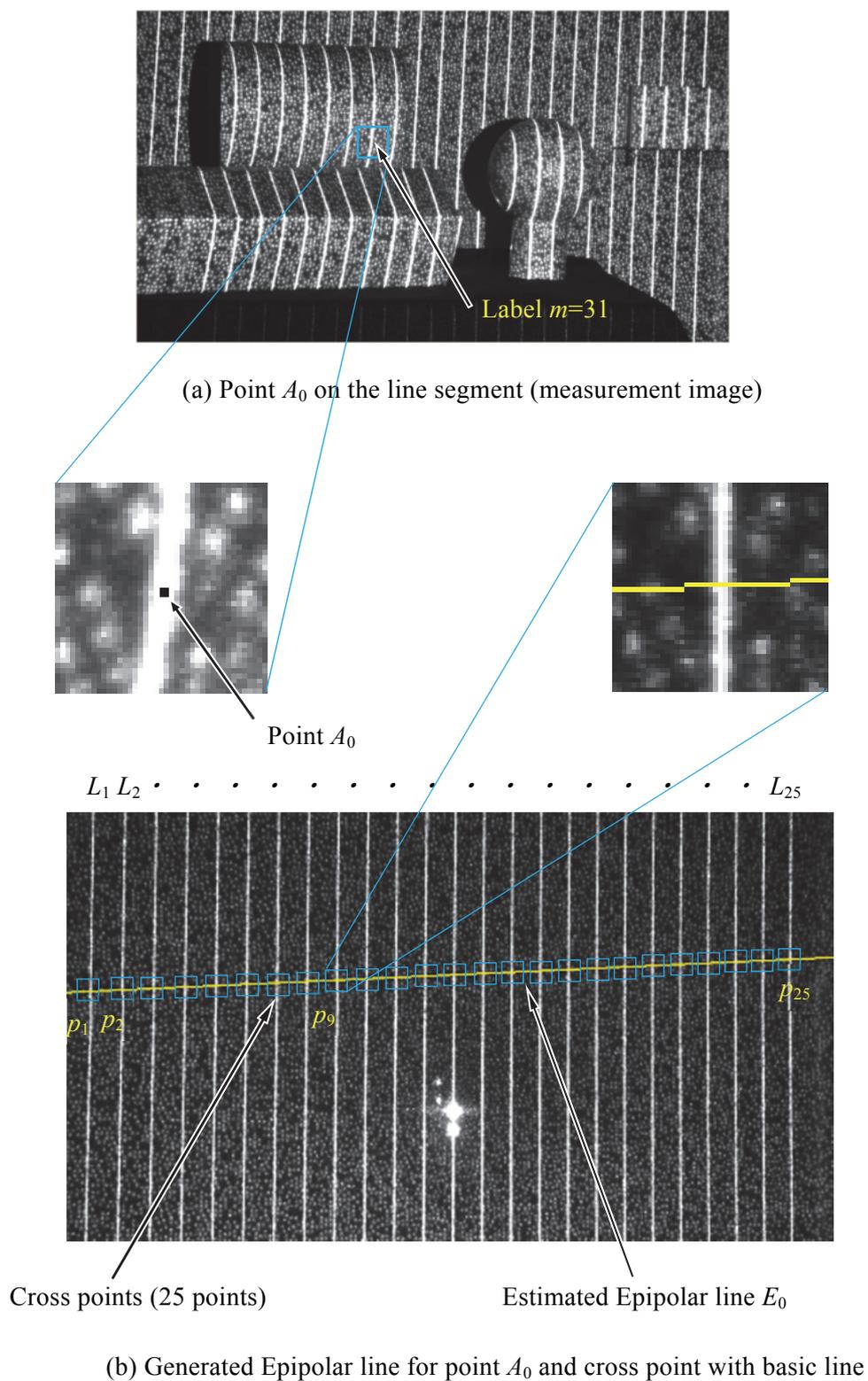


Fig. 3-17 Identification method of line segments

表 3-1 にランダムにサンプリングされた 10 点に対し割り当てられた候補アドレスと評価値を示す。

正しいアドレスは L_9 であるが $A_0 \sim A_9$ の 10 点には L_9 以外にも L_1 と L_{15} の候補アドレスが間違っって割り当てられている。ただし、正しく割り当てられた点の評価値は間違っって割り当てられた点の評価値より高く、3 倍以上となる点が複数存在している (赤枠部分)。この例では最終的に輝線 (ラベル $m=31$) のアドレスとして、評価値が最も高い A_9 のアドレス L_9 が正しく割り当てられた。

このように 1 本の輝線について、複数回の判定を行うことで処理のロバスト性を高めている。

図 3-18 に計測対象に照射されたスリット輝線の正しいアドレスを示す。また、図 3-19 に本方法によるアドレスの割り当て結果を示す。アドレス番号が色分けして表示されており、この画像では、撮像されたすべての輝線に対し適切にアドレスが割り当てられたことが確認できる。もし同じ輝線上で異なる複数のアドレスが割り当てられ、かつそれらの評価値が設定した閾値を超える場合は、その輝線上のすべての点に対しアドレスの割り当てを行い画面上に色分けして表示する。その表示結果から人為的な判断と修正を行う。図 3-20 に以上の割り当て結果を利用して、スリット輝線上の点を実座標に変換し再構築した画像を示す。

Table 3-1 Allocated slit address and evaluation value

Point No. (k)	Randomly selected points (A_k)	Slit address candidate	Maximum evaluation value (V_n) in cross points ($p_1 \sim p_{25}$)
0	A_0	L_9	0.378 (V_9)
1	A_1	L_9	0.517 (V_9)
2	A_2	L_9	0.244 (V_9)
3	A_3	L_9	0.404 (V_9)
4	A_4	L_9	0.266 (V_9)
5	A_5	L_9	0.624 (V_9)
6	A_6	L_9	0.625 (V_9)
7	A_7	L_{15}	0.169 (V_{15})
8	A_8	L_1	0.155 (V_1)
9	A_9	L_9	0.651 (V_9)
Actual address		L_9	

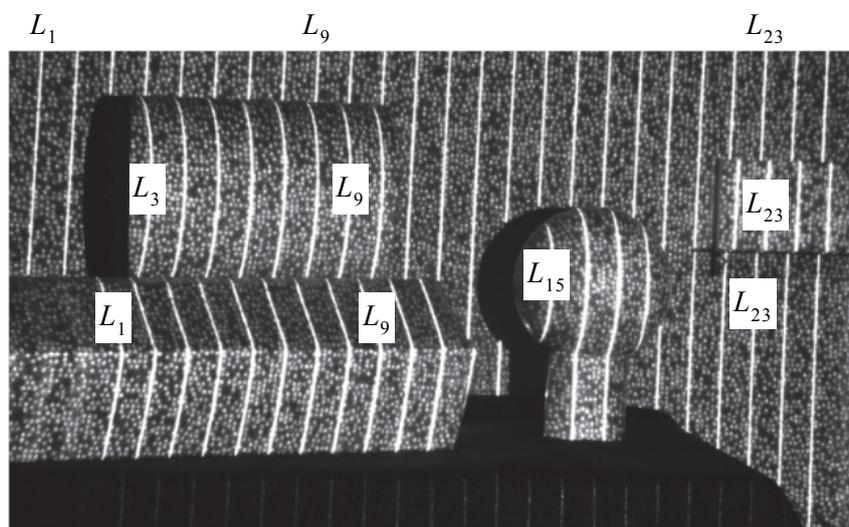


Fig. 3-18 Addresses of slits projected on the object (Actual address)

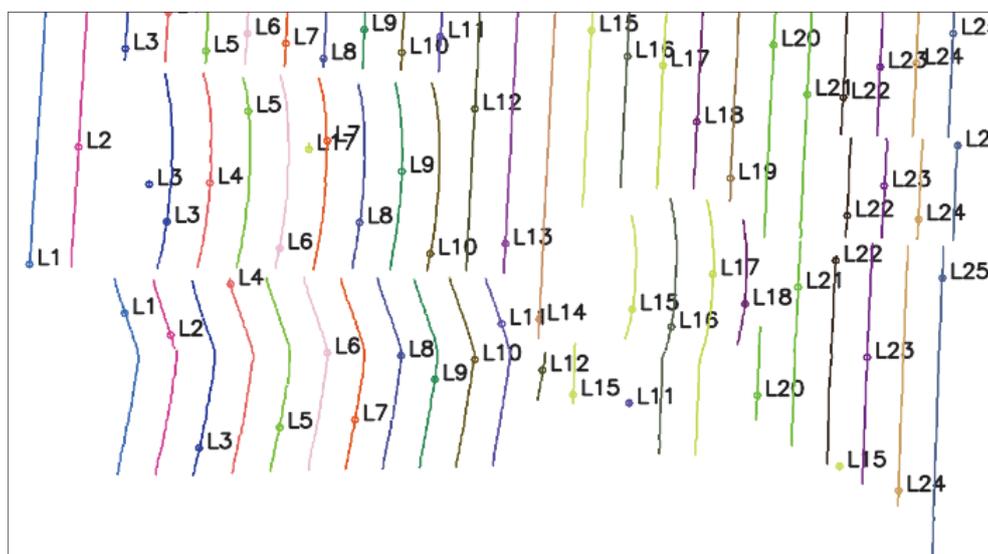


Fig. 3-19 Line segment with estimated slit address

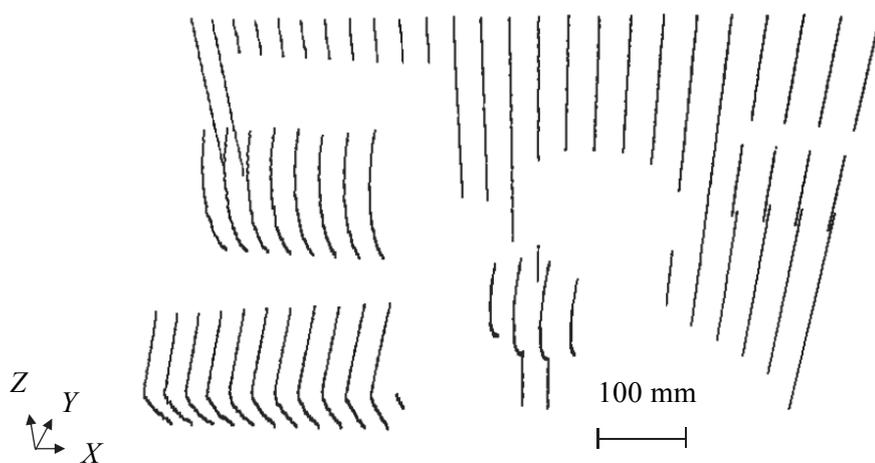
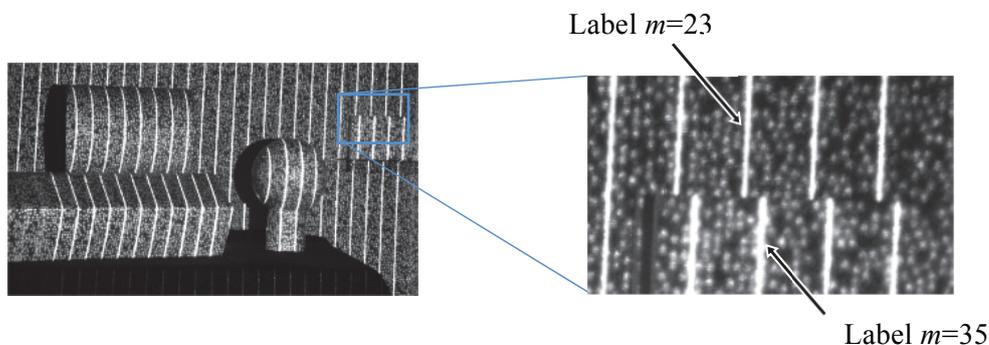


Fig. 3-20 Reconstructed image from measured data

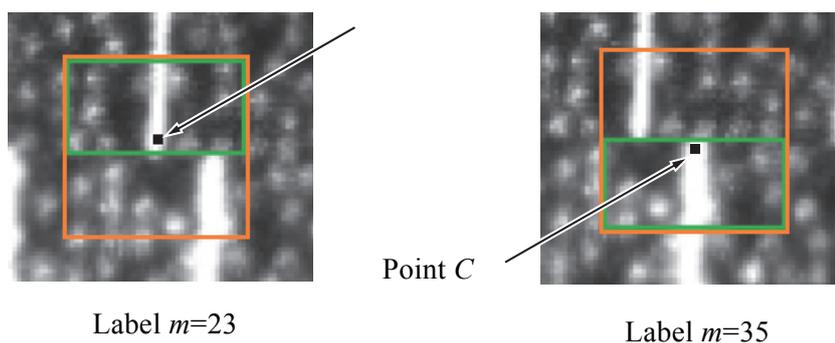
3.7.2 スリット輝線の連続性を考慮したテンプレートの効果

スリット輝線の連続性を考慮したテンプレート範囲の設定が評価値に与える効果を確認した. 図 3-21 (a) の壁面の輝線 (ラベル $m=23$) と立方体上の輝線 (ラベル $m=35$) の端点 B , C に対し, 図 3-21 (b) のようにスリット輝線の連続性を考慮せずにテンプレートを作成した場合 (オレンジの枠) と考慮して作成した場合 (緑の枠) の評価値を算出した. 表 3-2 に算出された評価値を示す. 両輝線ともスリット輝線の連続性を考慮することによって評価値が向上しており, スリット輝線の連続性を考慮したテンプレート領域の設定はスリット輝線同定の信頼性を高めるのに有効であることが確認できた.



(a) Line segments of the discontinuous area

Point B



(b) Example of the template image surrounding point B and point C

Fig. 3-21 Set of the template image in discontinuous part of line segments

Table 3-2 Difference of evaluation values on considering the discontinuity of the line segment

Point(Label number)	Consideration of the continuity of the line segment	
	No	Yes
<i>B</i> ($m=23$)	0.228	0.441
<i>C</i> ($m=35$)	0.199	0.267

3.8 マルチスリット光を用いた計測システムのキャリブレーション

計測対象の三次元座標は、カメラで撮像されたスリット輝線部の座標と、それに対応するスリットのアドレスから算出される。以下に、マルチスリット光を用いた計測システムのキャリブレーション方法[31]について説明する。

3.8.1 座標系

グローバル座標系の計測位置は、1枚のスリット光とカメラの視線との交点を求めることによって一意に決定される。カメラの視線は、計測点とカメラの焦点を通過する。図 3-22 は、グローバル座標系 (X, Y, Z) とカメラ座標系 (u, v) およびマルチスリットプロジェクタ座標系 (n) の関係を示す。グローバル座標とカメラ座標の関係からカメラパラメータが、グローバル座標とプロジェクタ座標の関係からプロジェクタパラメータが得られ、この2つのパラメータを組み合わせることによって計測システム全体の系が決定される。グローバル座標の計測点は、2つのパラメータを用いることによって、スリットアドレスとカメラ座標から求められる。図 3-23 にグローバル座標への変換行列算出の手順を示す。

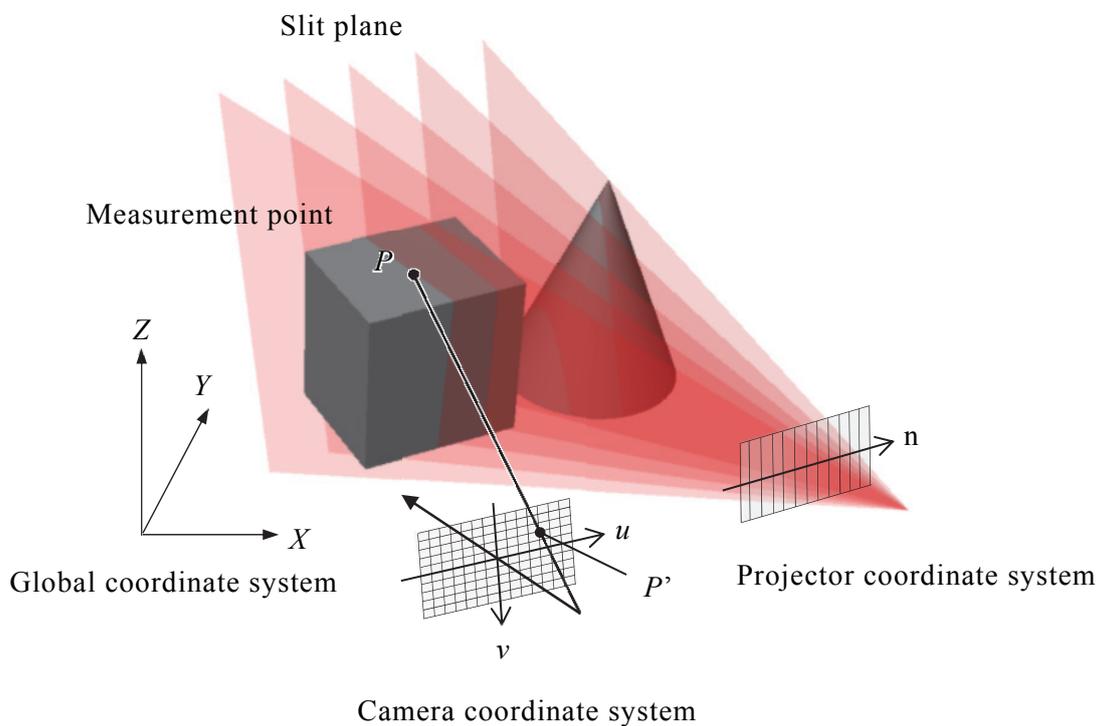


Fig. 3-22 Relations between coordinate systems

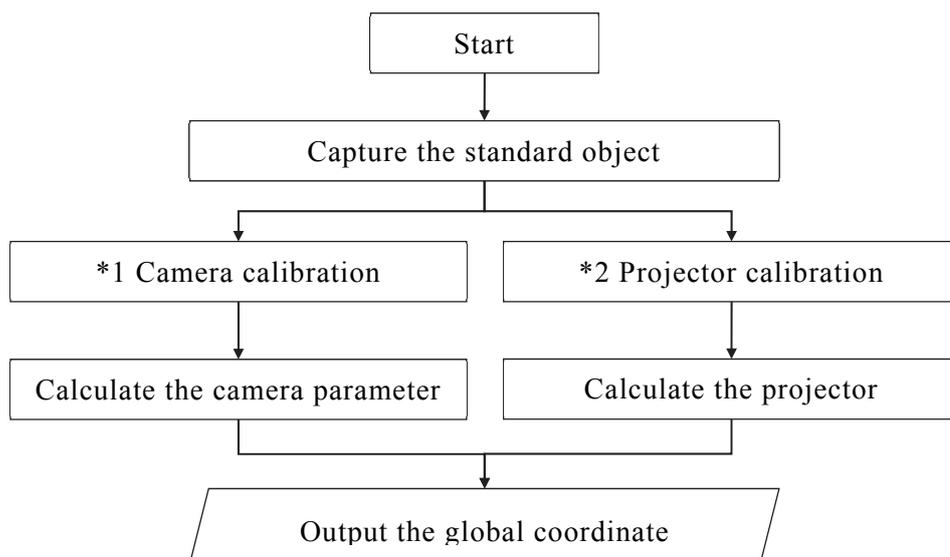


Fig. 3-23 Construction of conversion matrix

3.8.2 カメラパラメータ

グローバル座標系 (X, Y, Z) とカメラ座標系 (u, v) との関係は同次座標系表現を用いて、以下のようにあらわすことができる[37].

$$\begin{bmatrix} H_c u \\ H_c v \\ H_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & c_{14} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} & c_{24} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} & c_{34} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3-4)$$

ここで、 H_c は同次座標系のための媒介変数で、 $c_{11} \sim c_{34}$ はカメラパラメータをあらわし、このパラメータに、計測器の位置や姿勢、画角などカメラに関するすべてのデータが含まれる。式 (3-4) を展開し H_c を消去すると式 (3-5) が得られる。

$$\begin{aligned} (c_{11} - c_{31}u)X + (c_{12} - c_{32}u)Y + (c_{13} - c_{33}u)Z &= c_{34}u - c_{14} \\ (c_{21} - c_{31}v)X + (c_{22} - c_{32}v)Y + (c_{23} - c_{33}v)Z &= c_{34}v - c_{24} \end{aligned} \quad (3-5)$$

グローバル座標系で基準となる点 (X, Y, Z) とそれに対応するカメラ座標 (u, v) が 1 組わかれば式 (3-5) が成立する。カメラパラメータ $c_{11} \sim c_{34}$ の 12 個の未知数は、同一平面上にない 6 個の基準点を入力することで求められる。式 (3-5) によって与えられる二つの平面の交線が、計測点 (X, Y, Z) とカメラ画像面 (u, v) を通るカメラ視線である。

3.8.3 プロジェクタパラメータ

グローバル座標系とプロジェクタ系座標との関係は、グローバル座標系とカメラ座標系との関係と同様に表現することができる。スリット輝線は連続した線の状態であられるので、スリットアドレスは一つの変数 (n) によってあらわすことができる。したがって、スリットアドレスをあらわすプロジェクタ座標 (n) とグローバル座標 (X, Y, Z) の関係はカメラ座標系とプロジェクタ座標系を置き換えることによって以下で示される。

$$\begin{bmatrix} H_p n \\ H_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{13} & P_{14} \\ P_{21} & P_{22} & P_{23} & P_{24} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3-6)$$

ここで、 H_p は媒介変数、 $P_{11} \sim P_{24}$ はプロジェクタパラメータをあらわす。式 (3-6) を展開し H_p を消去すると式 (3-7) が得られる。

$$(P_{11} - P_{21}n)X + (P_{12} - P_{22}n)Y + (P_{13} - P_{23}n)Z = P_{24}n - P_{14} \quad (3-7)$$

この式は、スリットアドレス n におけるレーザ平面の方程式をあらわす。プロジェクタパラメータ ($P_{11} \sim P_{24}$) は、グローバル座標で基準となる点 (X, Y, Z) とそれに対応するスリットアドレス (n) を 8 点入力することによって求められる。

3.8.4 キャリブレーションのための対応点入力

カメラパラメータおよびプロジェクタパラメータは三次元形状が既知の基準となる物体を撮像することにより決定できる。図 3-24 にキャリブレーションに使用する基準物体を示す。基準物体のフレームにはチェッカーボードマーカと目盛りが表示されており、グローバル座標は基準物体に固定されている。図にフレーム部の拡大画像を示す。チェッカーボードマーカは、カメラキャリブレーションに使用され、目盛りはプロジェクタキャリブレーションに使用される。図 3-25 および図 3-26 に、カメラキャリブレーションとプロジェクタキャリブレーションのフローを示す。キャリブレーションの精度を向上させるためには、できるだけ多くの対応点を入力し、最小二乗法によりパラメータを決定する。

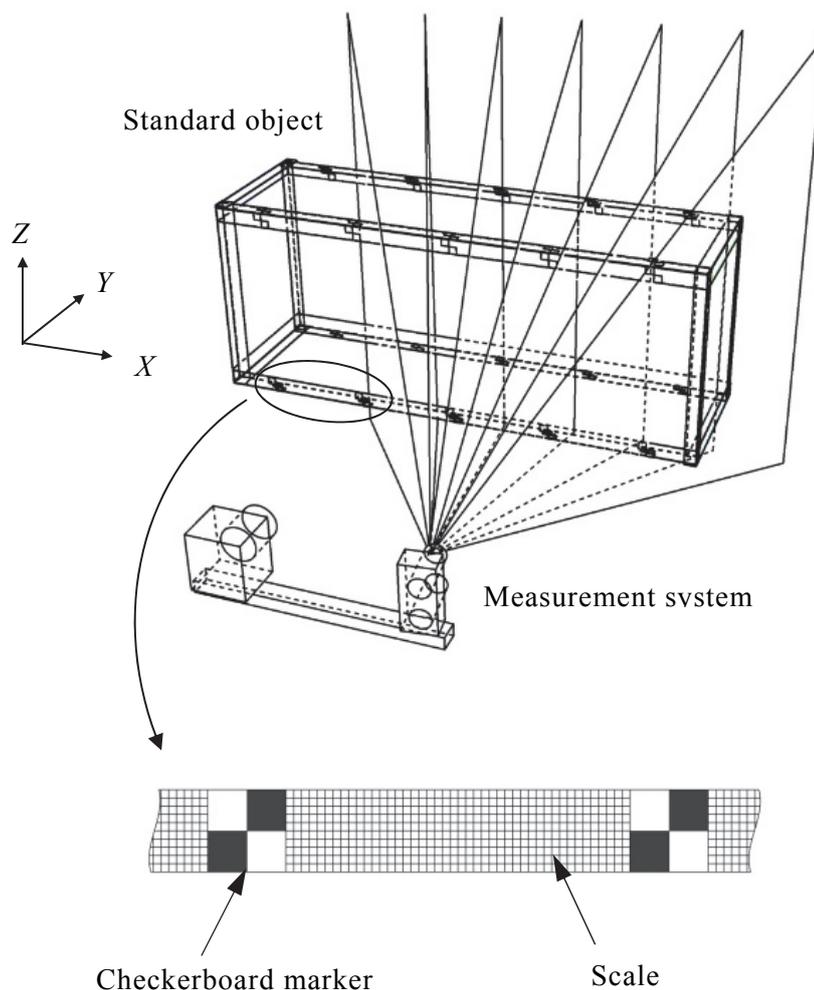


Fig. 3-24 Calibration setup

*1 Camera calibration

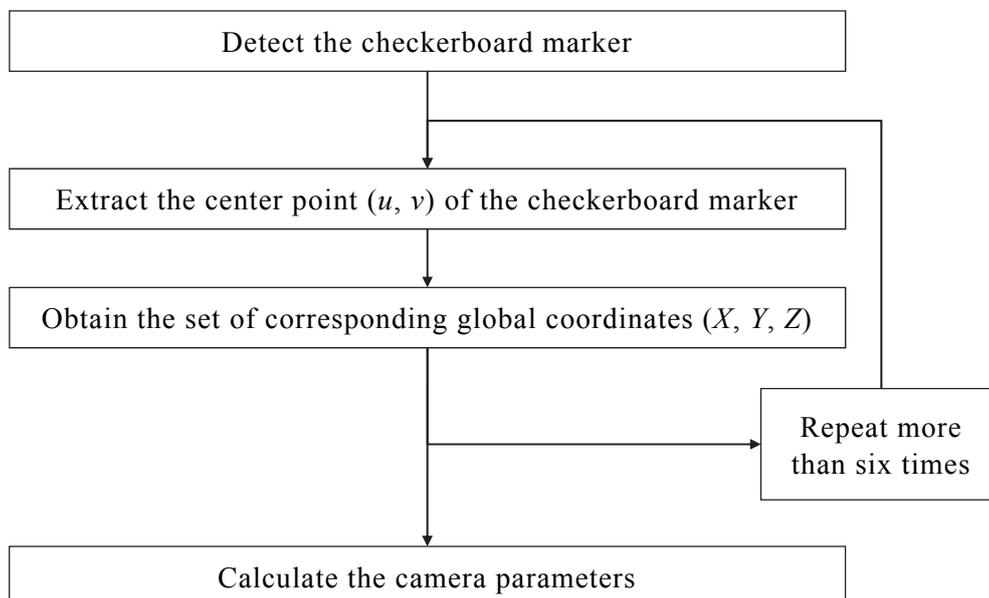


Fig. 3-25 Flowchart of camera calibration

*2 Projector calibration

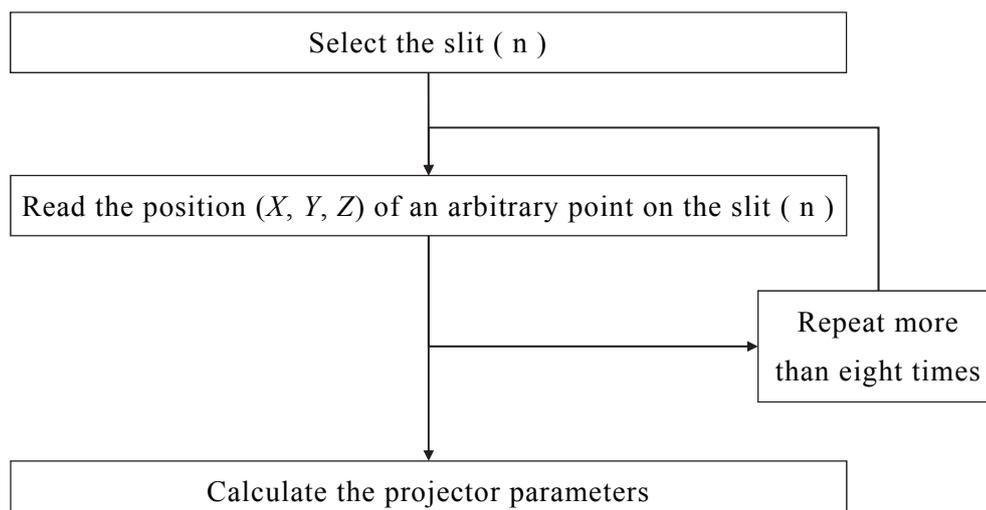


Fig. 3-26 Flowchart of projector calibration

3.8.5 グローバル座標系への変換

3.8.2 節の式 (3-5) は、計測点とカメラの焦点を通過するカメラの視線をあらわし、式 (3-7) は、スリット光平面をあらわしている。計測位置はカメラ視線とスリット光平面との交点であるので、式 (3-5) と式 (3-7) を組み合わせることで算出することができる。図 3-27 にフローを示す。撮像された画像内のスリット n 上の点 (u, v) は、式 (3-5) と式 (3-7) を用いてグローバル座標系に変換される。

グローバル座標への変換式は以下のようにあらわされる。

$$F=QV \tag{3-8}$$

ここで、

$$F=\begin{bmatrix} c_{34}u - c_{14} \\ c_{34}v - c_{24} \\ P_{24}n - P_{14} \end{bmatrix}$$

$$Q=\begin{bmatrix} c_{11} - c_{31}u & c_{12} - c_{32}u & c_{13} - c_{33}u \\ c_{21} - c_{31}v & c_{22} - c_{32}v & c_{23} - c_{33}v \\ P_{11} - P_{21}n & P_{12} - P_{22}n & P_{13} - P_{23}n \end{bmatrix}$$

$$V=\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \tag{3-9}$$

それゆえに、

$$V=Q^{-1}F \tag{3-10}$$

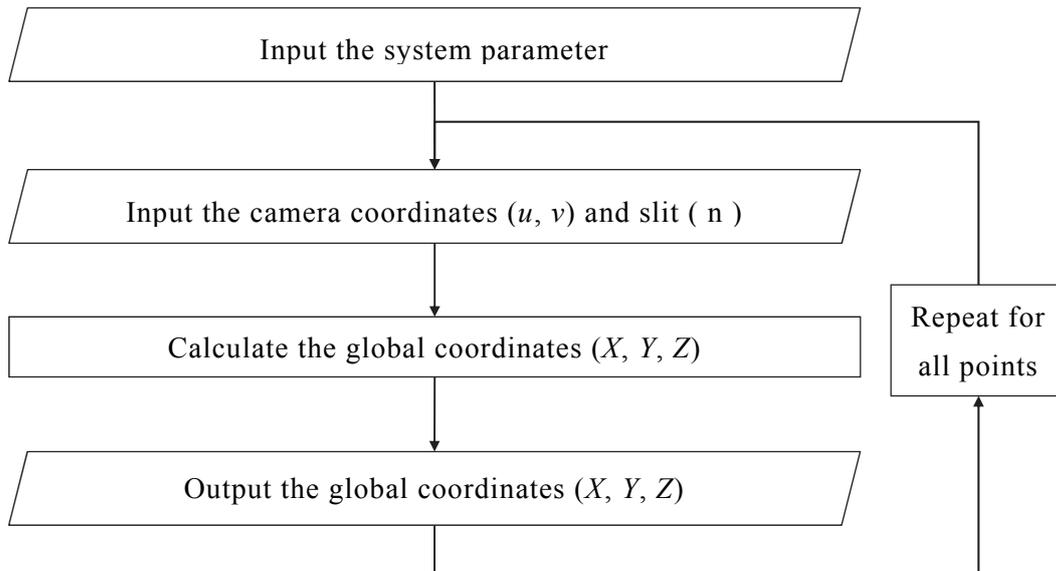


Fig. 3-27 Flowchart of conversion to global coordinates

3.8.6 キャリブレーションパラメータの検証

キャリブレーションパラメータを検証するために簡単な実験を行った。

(1) キャリブレーション構成

図 3-28 にキャリブレーションに使用した基準物体の写真を示す。基準物体の外形寸法は 200 mm×600 mm×300 mm で、各フレームのチェッカーボードマーカは 100 mm 間隔、目盛りは 1 mm 刻みで表示されている。基準物体と計測システムの距離は約 1,000 mm でキャリブレーションを行った。

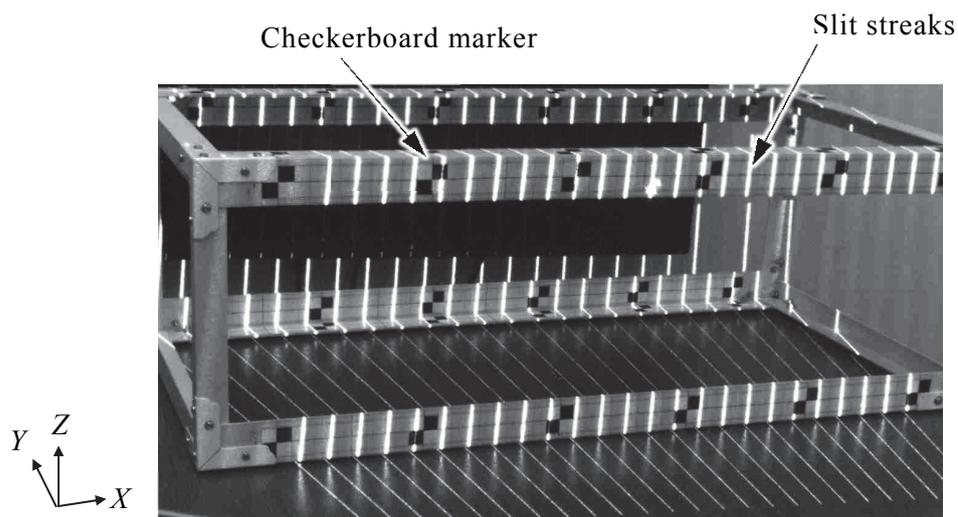


Fig. 3-28 Standard object

(2) カメラキャリブレーション

計測システムと基準物体の位置を固定し，基準物体を撮像した．チェッカーボードマーカは，カメラパラメータを取得するために使用した．撮像された画像からは，図 3-29 の色付けされた点のようにチェッカーボードマーカの交点の座標 (u_i, v_i) を，コンピュータによって自動的に抽出した．抽出された交点の座標とそれに対応するグローバル座標を 6 点以上基準点としてコンピュータに入力することで，カメラパラメータが決定される．基準点は，グローバル座標系で同一平面上にならないように選択する必要がある．実験では 8 点の基準点を選択した．

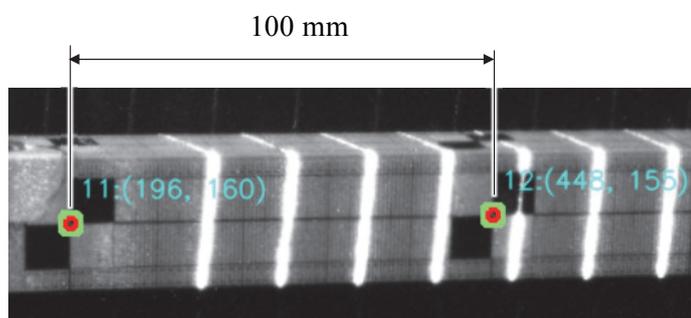


Fig. 3-29 Checkerboard markers used in camera calibration

(3) プロジェクタキャリブレーション

計測システムと基準物体の位置を固定したまま，マルチスリットを基準物体に投光した．なお，カメラキャリブレーションとプロジェクタキャリブレーション時で，計測システムと基準物体の位置関係は変わってはならない．図 3-30 にマルチスリット光が投光されたフレーム部の写真を示す．赤いラインは基準物体に照射されたマルチスリット輝線をあらわす．マルチスリットのアドレスは一番左のスリットを 1 とし通し番号とした．スリット輝線上でキャリブレーションの入力点とする位置を選択し，その点に対応するグローバル座標をフレームの目盛りから読み取った．選択した位置のグローバル座標とスリットのアドレスを 8 点以上基準点としてコンピュータに入力することによって，プロジェクタパラメータが決定される．実験では 12 点の基準点を選択した．

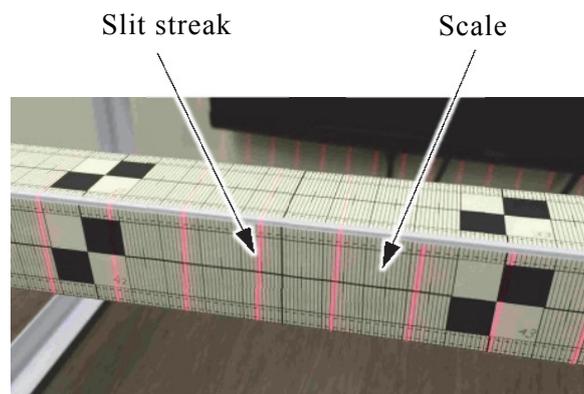
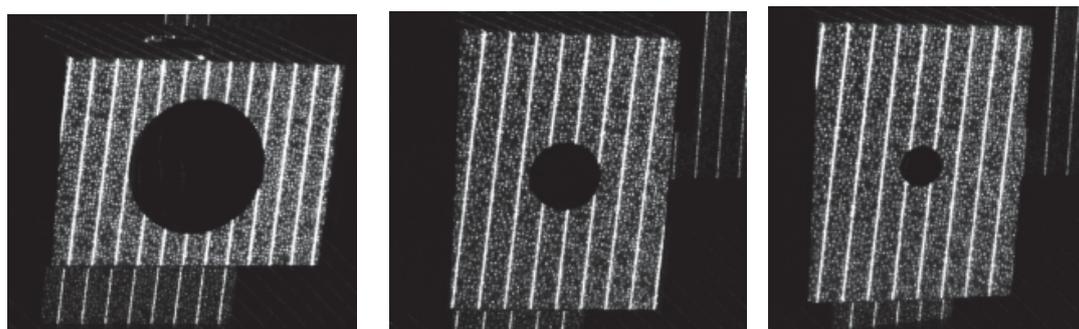


Fig. 3-30 Scale used in projector calibration

(4) キャリブレーションパラメータの検証

キャリブレーションパラメータを検証するために、円形穴あき平板の穴部の三次元座標を取得し、穴エッジ部の点に対し円近似することで穴径を算出する実験を行った。計測対象の穴径は 100 mm, 50 mm, 30 mm で計測対象までの距離は約 900 mm で実験を行った。図 3-31 (a) は、計測対象の撮像画像を示し、図 3-31 (b) は計測システムによって得られた穴径 100 mm の D_1 の三次元形状を示す。図 3-31 (c) は図 (b) の三次元形状から穴エッジ部の点を抽出したものを示し、これらの点に対し円近似を行った。表 3-3 に円近似の結果を示す。実際の穴径に対し、円近似で推定された穴径の誤差は 0.5 mm 以下であった。

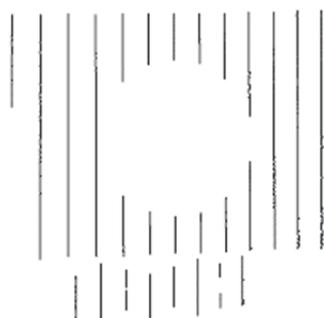


D₁ (φ 100 mm)

D₂ (φ 50 mm)

D₃ (φ 30 mm)

(a) Recorded image



(b) Three-dimensional shape of the object (D₁)



(c) Detected edge of the hole

Fig. 3-31 Detection of the edge of the hole and hole size measurement

Table 3-3 Results of the estimation of the hole diameter

	Actual diameter [mm]	Estimated diameter [mm]	Error [mm]
D ₁	100.0	99.7	-0.3
D ₂	50.0	49.5	-0.5
D ₃	30.0	29.9	-0.1

3.9 まとめ

マルチスリットと共にランダムドットを投光することで、1枚の画像から三次元形状を取得するシステムを試作した。本章では計測システムの概要を示し、スリットの投光方向を特定するアルゴリズムを提案した。これにより、シングルスリットの場合のような計測器の移動に伴う断面の配置の誤差を削減することができた。

以下に、本章のまとめを示す。

- (1) 各スリット輝線を特定するために、スリット輝線の周辺に分布するようにランダムドットを投光するシステムを試作した。
- (2) ランダムドットの照射位置はスリットの長手方向と同方向にのみにずれるように、ランダムドットレーザ投光器をスリットの方角に対し鉛直線上に配置し、スリット輝線の同定に影響しないようにした。
- (3) ランダムドット光を各スリット輝線のアドレスを同定するためのマーカーとして用い画像内に複数存在する各スリット輝線の特定を効率よく行うアルゴリズムを試作した。
- (4) 撮像された各スリット輝線上の対応点の探索はエピポーラ線と基準画像上の各スリット輝線との交点を求めることで候補を絞り処理の信頼性を高めた。
- (5) マルチスリット光とランダムドット光を組み合わせることで、ランダムドット光だけを用いる方法における不連続部のあいまいさを改善できる。具体的には、物体輪郭など画像内の不連続部においては、スリット輝線の連続性を考慮しテンプレート領域を設定することで、スリット輝線同定の信頼性を高めた。
- (6) マルチスリットを投光するシステムのキャリブレーション方法を説明し、円形穴明き平板の穴径を算出する実験によりキャリブレーションパラメータの検証を行った。

第4章 マルチスリットの配列を利用した管の中心線と径の計測

4.1 はじめに

本章では、マルチスリットとランダムドットを組み合わせた三次元計測システムを利用して、1枚の画像から効率よく管の中心線と径を取得する方法を提案する[38]。計測は、計測対象の表面にあらわれた複数のスリット輝線とランダムドット輝点を同時に撮像することで瞬時に実行される。対象の管に異なる投光方向を持ったマルチスリット光を照射すると、管の表面には各スリット方向に円弧状の輝線があらわれる。これらの輝線は管軸の方向に沿って並ぶので輝線の配列の位置関係から高精度に管軸の方向(姿勢)を算出することができる。

算出された管軸の方向を用いて各スリット切断面を管軸に垂直な断面に変換できる。これにより、管軸に対して斜めにスリットが投光されている場合も楕円近似ではなく円近似による解析ができるので安定した解析が実現できる。

このように、提案する方法は1枚の画像に記録された複数切断面の形状と配列状態を利用して、一定の形状を持つ管の情報を効率的に算出するものである。そのため、第2章のシステムのような計測システムの物理的な移動に伴う誤差が削減され、安定した計測が実現できる。

4.2 マルチスリットの配列を利用した管の中心線と径の算出方法

マルチスリット光を利用した計測では、スリット本数分の切断面の形状がワンショットで取得できる。したがって、管表面に照射されたスリット光からはスキャンなどによる移動誤差を含まない切断面が複数取得できることになる。ここでは、本システムで取得された管表面の複数切断面の配列を利用して管の姿勢をあらわす中心線と径を算出する方法について説明する。

管の中心線と径の算出の流れを図 4-1 に示す。まず、管の中心線の方法ベクトルを求める。方向ベクトルは 3 本以上のスリットを通る直線を求めることで算出する。たとえば円筒表面に面が接する場合、接する部分は直線となり、その直線は円筒の中心線と平行となる。すなわち、管の表面に存在する 3 本以上のスリットに共通して接する直線の方法ベクトルは管の中心線と平行な関係を持つ。

図 4-2 に方向ベクトル算出の概略図を示す。管表面のスリットの中から 3 本のスリット (Slit A, Slit B, Slit C) を選択し、Slit A 上の任意の点 $A_i(x_{ai}, y_{ai}, z_{ai})$ に着目する。点 A_i を始点として、Slit B 上の点 $B_i(x_{bi}, y_{bi}, z_{bi})$ を通る直線を考える。この直線は媒介変数 t を用いて式 (4-1) であらわされる。管の方向ベクトルと平行な場合は、この直線は Slit C に接する。具体的には、式 (4-1) の直線と Slit C 上の点 $C_k(x_{ck}, y_{ck}, z_{ck})$ との距離 d は式 (4-2) であらわされ、Slit C 上の点から d が最小となる点を探索することで方向ベクトルを算出する。この処理を Slit B 上のすべての点 $B_i(x_{bi}, y_{bi}, z_{bi})$ を通る直線について行い、Slit C との距離 d がもっとも小さくなる点 $B'_i(x'_{bi}, y'_{bi}, z'_{bi})$ を探索し、点 $A_i(x_{ai}, y_{ai}, z_{ai})$ と点 $B'_i(x'_{bi}, y'_{bi}, z'_{bi})$ を通るベクトルを管の方向ベクトルの候補ベクトルの一つとして決定する。以上の処理を Slit A 上のランダムに抽出した複数点について実施し、それぞれの点で得られた候補ベクトルの中から d が最小となる点を選択することで、管の中心線の方法ベクトルを決定する。

$$\begin{cases} x=a \cdot t+x_{ai} \\ y=b \cdot t+y_{ai} \\ z=c \cdot t+z_{ai} \end{cases} \quad (4-1)$$

ここで、 (a, b, c) は管の方向ベクトルで

$$\begin{cases} a=x_{bi}-x_{ai} \\ b=y_{bi}-y_{ai} \\ c=z_{bi}-z_{ai} \end{cases}$$

である。

$$d^2=(x_{ck}-a \cdot t-x_{ai})^2+(y_{ck}-b \cdot t-y_{ai})^2+(z_{ck}-c \cdot t-z_{ai})^2 \quad (4-2)$$

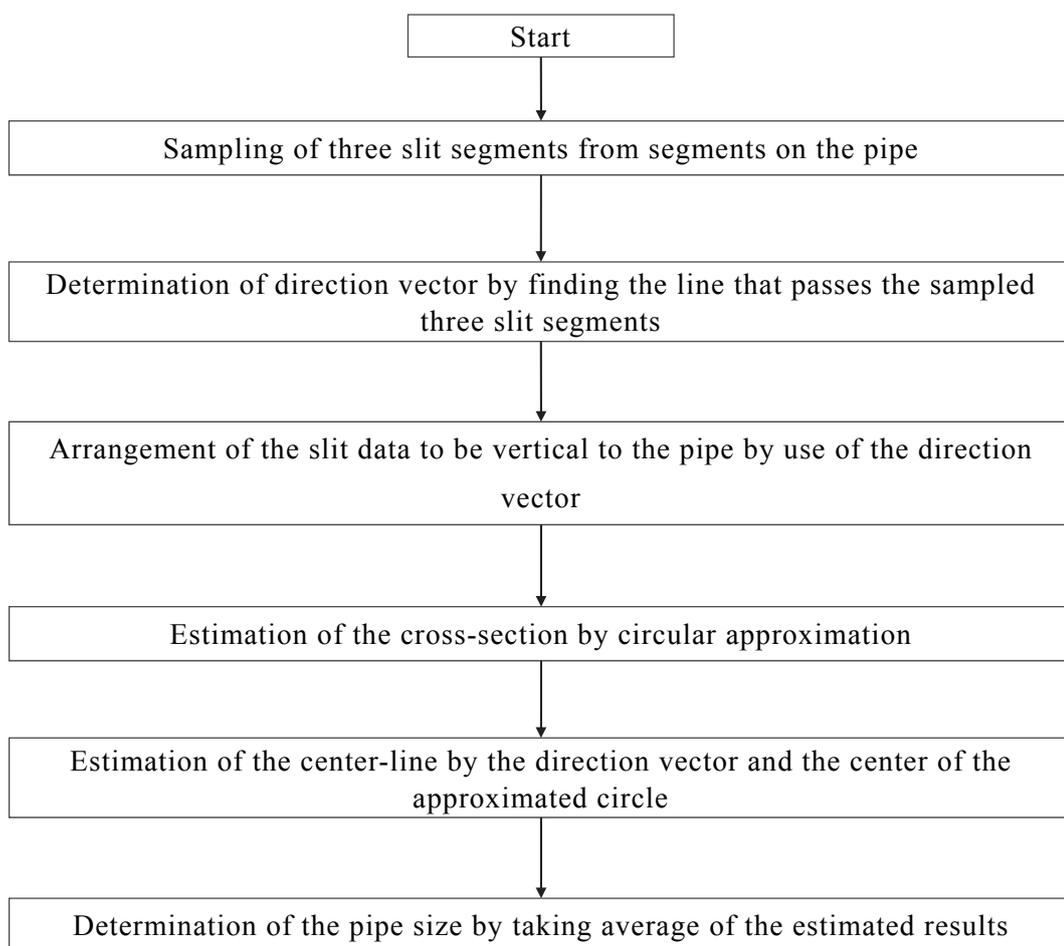


Fig. 4-1 Flow of estimation procedure of pipe specification (centerline and diameter of pipe)

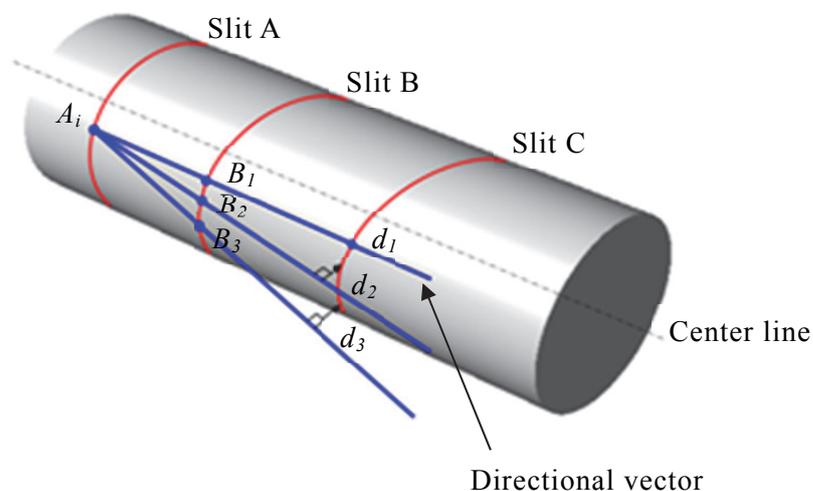


Fig. 4-2 Estimation of directional vector

つぎに管の径を求める．マルチスリットの各スリットは異なる投光方向を持ち，管軸に対して垂直に投光されるとは限らないため，管の表面にあらわれる各スリット輝線は楕円弧の一部として取得される．管の径や中心線の位置は，得られた楕円弧を楕円近似することによっても算出可能であるが，楕円近似は求めるパラメータが多く，算出結果が計測点のわずかな誤差の影響を受ける傾向がある．特に管表面にあらわれる楕円弧輝線が短い場合，近似結果が不安定になりやすい．図 4-3 は同じ管に同方向から照射し得られた 2 個の楕円弧に対し，近似により算出された楕円の例を示す．黒いラインがスリット光による楕円弧で赤いラインが算出された楕円，そして青い円が実際の管径を示す．理論上，近似された楕円の短径が管の径に等しくなるが，2 個の楕円弧からは実際の管径とは異なる大きさの短径の楕円が算出されており，楕円近似の不安定さを示している．そこで，この問題に対処するために楕円弧を管に垂直な断面に射影することによって楕円から円の円弧に変換する処理を行う．これにより楕円ではなく円として近似できるので，処理の安定性を格段に向上することができる．変換は，管の中心線方向ベクトルが管に垂直な断面と直交関係にあることを利用して正射影ベクトルを算出し，楕円弧のすべての点を管の垂直断面に移動することによって行う．図 4-4 に楕円弧から円の円弧への変換イメージを示す．赤いラインはシステムによって取得された楕円弧を，青い矢印は前述した方法で算出された中心線方向ベクトルをあらわす．

変換して得られた円弧を円近似し、円の中心座標と直径を求める。以上の処理で、スリットが投光されている位置の管の中心座標と管の直径が得られ、最終的に管の中心線と径は、求められた複数の断面の情報(中心位置と径)をもとに決定される。このように、本計測システムでは1回の撮像により管の中心線と径を取得することができる。

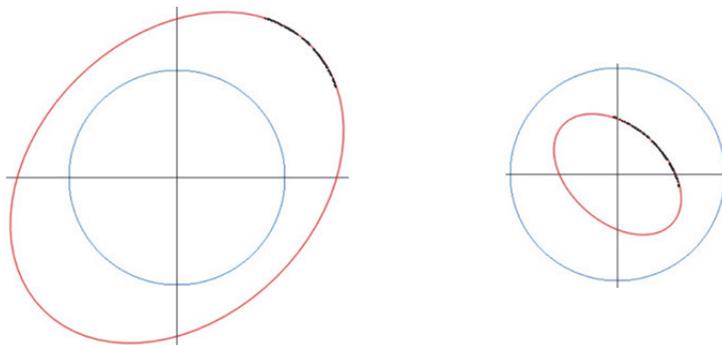


Fig. 4-3 Estimation of diameter by ellipse approximation

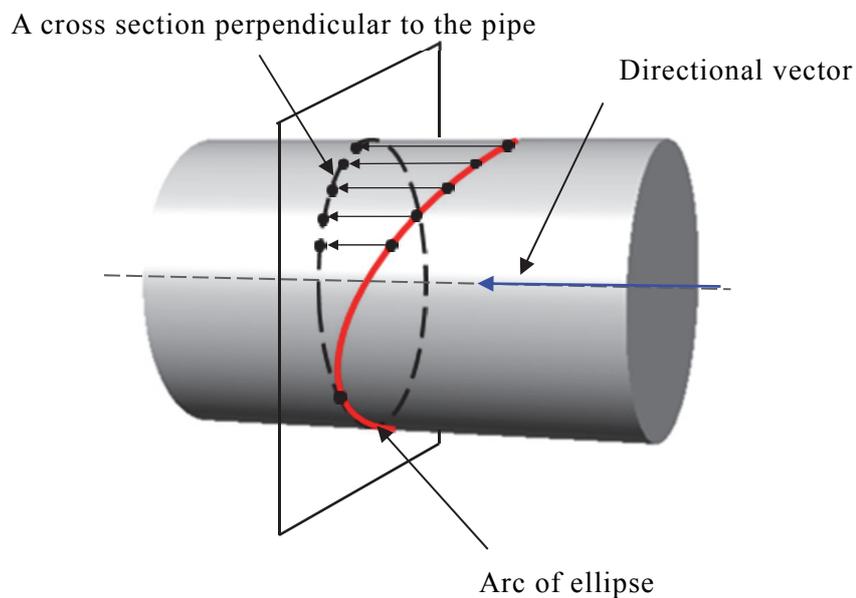


Fig. 4-4 Transformation of slits to be vertical along a pipe

4.3 管の中心線と径の算出実験

本計測システムで取得される三次元座標をもとに提案する方法にて管の中心線と径を算出する実験を行った。図 4-5 に実験に使用した計測システムを示す。実験用のデバイスはカメラ (Basler acA1300 130 万画素 60 fps) , 25 本のスリットを投光するマルチスリットレーザ投光器 (80 mW) , ランダムドットレーザ投光器 (50 mW) を使用し, カメラとレーザ投光器の基線長は 450 mm とした。

計測対象は外径 76 mm, 114 mm, 267 mm の管で, 計測システムから計測対象までの距離は約 1.8 m で実験を行った。図 4-6 (a) に計測対象の管の写真, (b) に計測システムによって撮像された画像を示す。管の外径は手前から 114 mm, 267 mm, 76 mm である。図 4-6 (b) 中のラインは計測システムによって照射されたマルチスリットの輝線で, そのまわりに輝線を特徴づけるランダムドットが分布しているのが確認できる。図 4-7 は図 4-6 (b) の撮像画像から得られた三次元形状をもとに, 管のサイズごとにスリット切断面を抽出したものを示す。管の中心線と径の算出は管ごとに実施した。青いスリット部は方向ベクトルの算出に用いた 3 本のスリットを示す。Slit A 上でランダムにサンプリングする点は 100 点とした。サンプリングされた Slit A 上の点 A_i を始点として, Slit B 上の点 B_i を通り Slit C で距離 d が最小となる直線から方向ベクトルの候補を求めた。さらに, Slit A 上でサンプリングされた残りの点についても同じ処理を行い, その中から最も d が最小となる方向ベクトルの候補を最終的な方向ベクトルとして決定した。

なお, 距離 d は, Slit A と Slit C の距離が離れるほど拡大されるので, Slit A と Slit C はできるだけ離れた位置で選択した方がよい。本実験では, 管上で左端のスリットを Slit A, 右端のスリットを Slit C とした。また, Slit B の位置に関しては, これまでの実験では位置による計測結果の影響を確認できていない。したがって本実験においては, 長さが短い管でも適用できるように Slit A に近接するスリットを, Slit B として選択した。これらの選択は現在のところ撮像画面を見ながら手動で行っている。

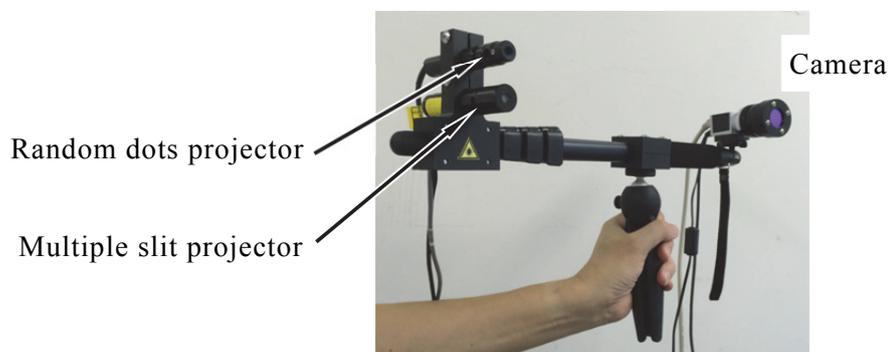


Fig. 4-5 Measurement system

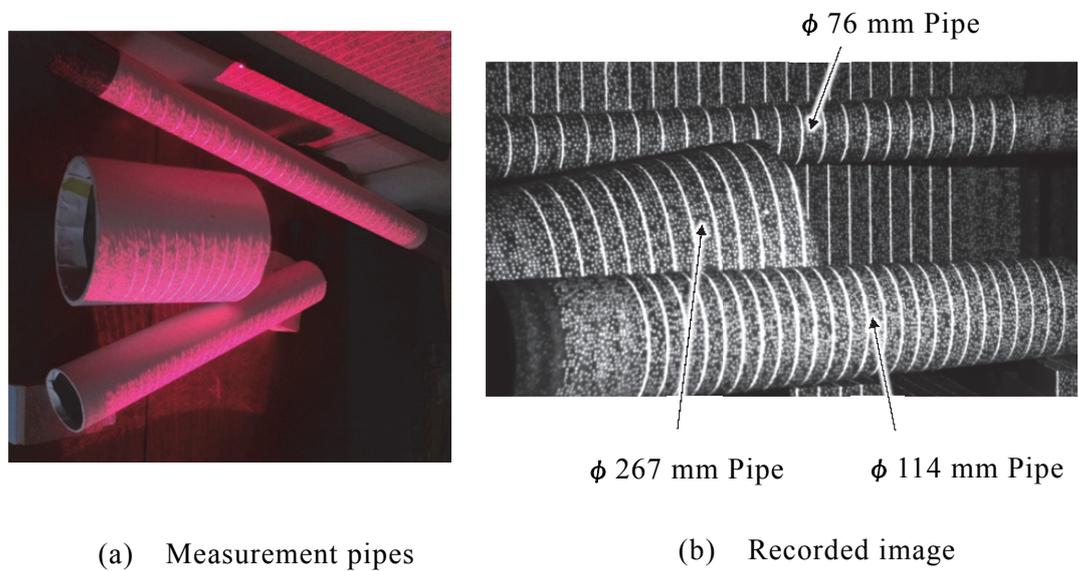


Fig. 4-6 Pipes for experiment

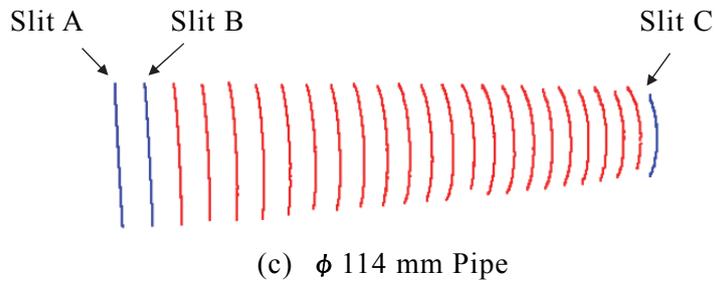
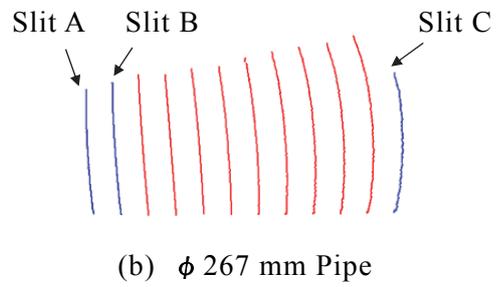
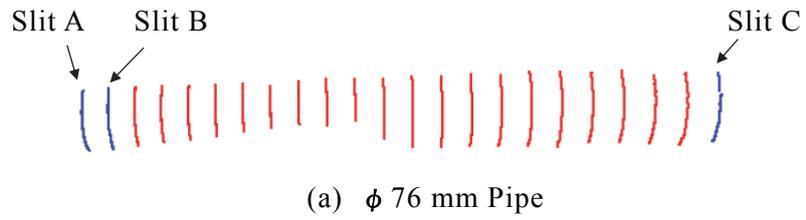


Fig. 4-7 Extracted multiple slit (3D)

図 4-8 は管表面の楕円弧を管の垂直断面に投影し、円近似を行った例を示す。黒い線は近似された円を示し、赤い点は円の中心を示す。図で示す通り、円弧は管の一部にすぎず、特に径が 267mm の管においては、円周に対する円弧の占める割合は 14～19% (Average 16%) と小さい。表 4-1 に 76 mm, 114 mm, 267 mm の 3 本の管について シングルスリットから径を算出した場合と提案する方法でマルチスリットを使用した場合の径の算出結果の比較を示す。径の算出には RANSAC (Random Sample Consensus) を用いた[39]。シングルスリットを投光した場合は投光するスリットが管に対して垂直に投光されているとは限らないので得られるスリット切断面が楕円弧になる。一方マルチスリットを投光した場合も得られるスリット切断面は楕円弧になるものの、管の方向ベクトルを用いて中心線に垂直な断面に変換できることから円近似による断面の解析を行っている。表 4-1 に各断面の近似結果を示す。また、管をノギスにより計測した実測値を真値として、各スリットの近似結果と真値の誤差を RMS で求めた。表で示す通り、楕円近似を行っているシングルスリットを投光する方法では管径のばらつきが多い。特に径が大きい 267 mm の管では前述したとおり輝線の投光範囲が円周に対して小さいので、シングルスリットを投光した方法では RMS 誤差が 119 mm となり大きなばらつきが見られる。それに対し、マルチスリット光を用いた方法ではばらつきが大幅に改善され、安定した径の算出結果が得られている。

図 4-9 (a), (b) は取得された結果をもとに 3 本の管をコンピュータ上に再構築し、それぞれ管を上方と側方から見たものである。赤いラインは図 4-6 (b) の撮像画像のスリット輝線部の三次元形状で、黒いラインは算出された中心線の結果をもとにあらわした管の中心線を示す。

緑色の部分は、得られた径情報を用いて管の中心線に垂直な断面を配置したものである。それぞれの管は、取得された三次元のスリット切断面の配列に沿って再構築されており、それぞれの位置関係が再現されている。267mm の管は 114mm の管の陰になっているため、円周に対する円弧の割合が 14～19% しか取得されていないが、提案する方法によって適切に中心線と径が算出されていることが確認できた。

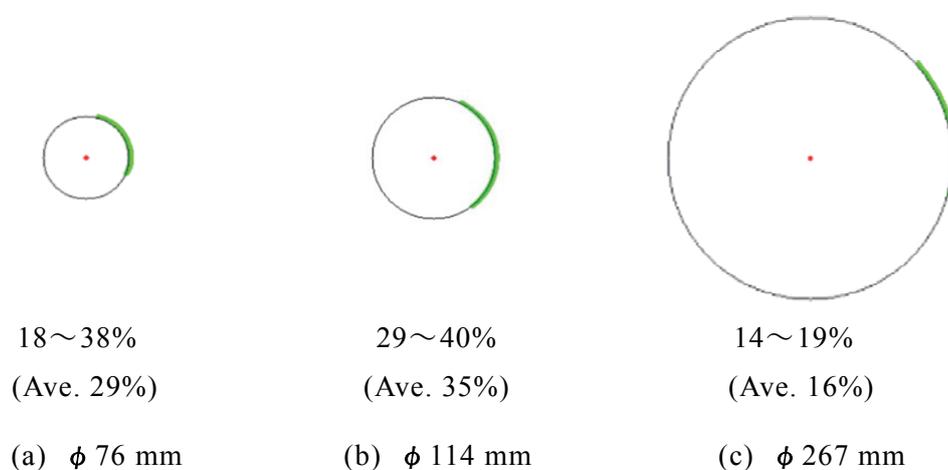
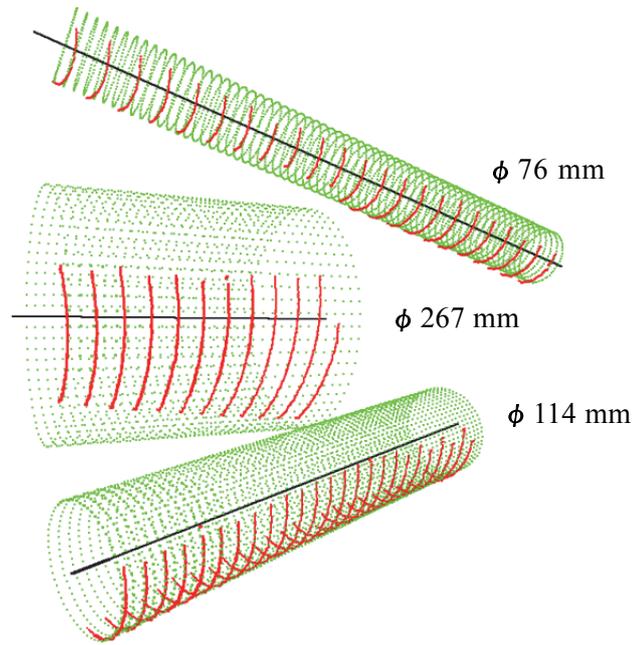


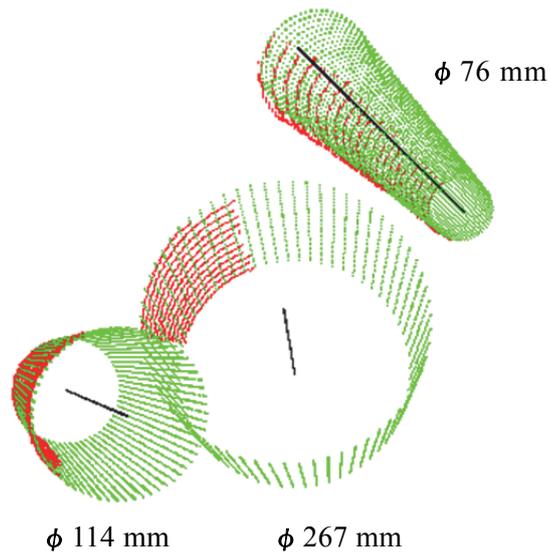
Fig. 4-8 Arc rate against the estimated circle

Table 4-1 Measurement result of pipe size (Single slit vs multiple slit)

Actual size	76 mm		114 mm		267 mm	
	Estimated outer diameter					
Slit No.	Single slit	Multiple slit	Single slit	Multiple slit	Single slit	Multiple slit
1			112.0	117.9	59.7	260.2
2			120.1	117.8	140.2	261.9
3	83.4	72.2	97.6	117.3	310.5	263.2
4	90.4	73.5	107.9	117.2	159.0	264.4
5	56.7	75.0	118.2	116.9	276.3	265.6
6	169.2	75.5	112.9	116.1	220.1	266.7
7	43.4	76.1	115.5	116.1	136.4	267.4
8	131.9	75.9	110.4	115.5	280.9	268.3
9	37.5	75.8	102.4	115.0	157.9	268.7
10	45.1	76.1	115.7	114.6	173.6	269.5
11	20.7	75.7	115.8	114.4	195.2	270.3
12	18.1	75.8	112.6	113.9	42.0	270.7
13	23.8	75.9	119.7	113.7		
14	74.4	75.3	116.2	113.2		
15	76.5	74.2	118.5	113.1		
16	81.5	74.3	116.8	113.3		
17	56.3	74.3	112.1	113.5		
18	62.9	74.7	120.4	114.0		
19	110.4	75.1	109.5	113.7		
20	59.2	75.7	108.9	114.4		
21	59.2	76.4	114.1	115.1		
22	67.0	78.2	121.6	116.3		
23	51.7	79.4	109.9	116.9		
24	69.9	82.0	136.8	118.6		
25	133.6	84.2	107.1	120.0		
Average	70.6	76.1	114.1	115.5	179.3	266.4
RMS error	37	3	7	2	119	3



(a) Upper view



(b) Side view

Fig. 4-9 Detected slits and reconstructed pipes on computer

4.4 まとめ

本章では、配管にマルチスリットとランダムドットを投光し、管表面にあらわれた複数のスリット切断面の配列関係から管の中心線と径を効率よく取得する方法を提案した。提案する方法では、1枚の画像から管の中心線と径を算出できるので、配管の製作図面に必要なデータを効率よく取得できる。

以下に、本章のまとめを示す。

- (1) マルチスリット光を使用することにより、スキャンや計測システムの移動誤差を含まずに、管表面の複数切断面を一度に取得することが可能になった。
- (2) 1回の撮像で複数切断面を取得できるので、スキャンや計測システムの移動時間を要さず、計測時間の短縮が行える。
- (3) 管表面にあらわれるスリットから3本のスリットを選択し、これらのスリットに共通して接する直線を求めることで、管の中心線の方方向ベクトルを取得する方法を提案した。
- (4) 管に対して斜めに投光されたスリット切断面のデータを管の方方向ベクトルを用いて管の中心線に垂直な断面に射影する方法を提案した。この方法により、楕円近似ではなく円近似による解析が行え、安定して管の情報（中心線と径）が取得できるようになった。
- (5) 最終的な管の中心線と径は、管表面にあらわれた複数のスリット切断面の計測結果をもとに算出される。

第5章 結論と今後の展望

5.1 結論

本研究は、配管設備の改修工事などの際に必要な設備の図面化にあたって、安全かつ効率的に配管の三次元的な諸元を取得する配管計測システムの開発を目的とした。

管にマルチスリットを投光することでスリット本数分の管の切断面を一度に計測することができた。しかしながら、スリットの本数が増加すると画像内に異なる投光方向を持つスリット輝線が混在する問題があった。三角測量に基づく計測であるため、それぞれのスリット輝線の投光方向を特定する必要がある。

そこで、本論文では、1枚の画像内に複数混在する各スリット輝線の投光方向を自動的に特定する方法、およびシステムによって得られたデータから管の中心線と径を効率的に取得する方法を提案した。また、実際にさまざまな径と方向の管を計測し、提案する方法の有効性の検証を行った。

以下に本論文で得られた主な結論について総括する。

第2章では、シングルスリット光を用いた管の計測例について紹介し、スリット光を用いた計測が、配管の情報を得るための後処理の負荷の低減に有効であることを示すとともにシングルスリット光を用いることによって生じる課題についても述べた。シングルスリット光を用いた計測では、計測時、照射するスリット光が管軸に対して垂直に投光されるときには限らないことから取得されるスリット切断面が楕円弧となり、管径の算出や中心線位置の取得に楕円近似を必要とする。そのため、楕円近似の不確かさから、管表面にあらわれる楕円弧輝線が短い場合などに算出結果が不安定になる場合があった。また、異なる位置で取得した断面を三次元空間内に配置する際に、計測器の移動情報の検出誤差が影響を及ぼし各断面が正確に配置されない場合があった。本論文では、第3章以降でこれらの課題を解決するための方法を提案した。

第3章では、シングルスリット投光によって生じる課題を解決するためにマルチスリットを投光する三次元計測システムを提案し、システムの画像処理アルゴリズムについて述べた。1枚の画像内に異なる投光方向を持つスリット輝線が混在する問題については、マルチスリットと共にランダムドットを投光し、ランダムドットを各スリット輝線を特徴づけるマーカーとして使用することで解決した。画像内に混在するスリット輝線を特定する実験を行い、提案する方法の有効性を確認した。マルチスリット光を用いた三次元計測システムを用いることで管の複数切断面が一度に取得できるので、シングルスリットの場合のような計測器の移動に伴う断面の配置の誤差が削減された。また、マルチスリット光を用いた計測システムのキャリブレーション方法について説明した。

第4章では、マルチスリットを投光する三次元計測システムにより得られた管表面

上の複数切断面の形状と配列関係を用いて、管の中心線と径を効率よく取得する方法について述べた。ここでは、管表面上にあらわれるスリットから3本を選択し、これらのスリットに共通して接する直線が管軸と平行になることに着眼し、管の中心線の方法ベクトルを算出する方法を提案した。また、管の中心線の方法ベクトルを用いて、管軸に対して斜めに取得された楕円弧を管に垂直な断面に変換することで、楕円近似ではなく円近似によって管の中心線と径を算出することが可能になった。

以上のことから、本論文で提案した配管計測システムが、配管の情報を得るための後処理の負荷を低減でき、配管の情報を効率的に取得する方法として有効であることを確認した。

本論文では、ランダムドットをスリット輝線の特定期間を利用して中心に記述したが、KINECTのようにランダムドット自体の三次元座標を取得する機能を付加することで、マルチスリット投光法とランダムドット投光法の双方の長所を活かした計測が実現できる。

5.2 今後の展望

本論文では、マルチスリットを投光することにより1枚の画像から配管の情報を取得する方法を提案したが、改修工事のためには、改修する範囲すべての配管の情報が必要である。提案した計測システムを実用化するにあたっては、異なる位置で取得したデータの連結やハンドヘルド化の検討、現場での利用を想定した使用条件の検証などいくつかの課題がある。しかし、以上の課題を解決することによって、今後プラントの配管設備の計測における安全性の向上や処理負荷の低減に寄与することが期待される。また、1枚の画像から計測対象の三次元形状を取得できることから、静止が困難な生体の計測など畜産分野での応用も期待されている。

参考文献

- [1] 河村幸二: 2. プラント設備維持管理への 3 次元計測技術の適用. 写真測量とリモートセンシング, Vol. 53 (4), 2014, 154-158.
- [2] 金井理: 大規模環境の 3 次元計測と認識・モデル化技術の現状. 精密工学会誌, Vol. 79 (5), 2013, 379-383.
- [3] 増田宏: 3 次元計測に基づく大規模点群処理の課題と技術動向. 精密工学会誌, Vol. 79 (5), 2013, 384-387.
- [4] Zhang, Z.: Microsoft Kinect sensor and its effect. IEEE Computer Society, Vol.19, 2012, 4-10.
- [5] Dal Mutto, C., Zanuttigh, P. and Cortelazzo, G.: Time-of-flight cameras and Microsoft Kinect. Springer, 2012.
- [6] Posdamer, J. L. and Altschuler, M. D.: Surface measurement by space-encoded projected beam systems. Computer Graphics & Image Processing, Vol. 18 (1), 1982, 1-17.
- [7] Valkenburg, R. J. and McIvor, A. M.: Accurate 3d measurement using a structured light system. Image and Vision Computing, Vol. 16 (2), 1998, 99-110.
- [8] Ishii, I., Yamamoto, K., Doi, K. and Tsuji, T.: High-speed 3d image acquisition using coded structured light projection. In: IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), 2007, 925-930.
- [9] 井上学, 和田俊和: 信念伝搬型位相シフト法による三次元形状計測. 電子情報通信学会技術研究報告, Vol. 112 (385), 2013, 305-310.
- [10] 岩崎一也, 寺林賢司, 梅田和昇: マルチスリットレーザプロジェクタを用いた超小型距離画像センサの構築. 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 79 (803), 2013, 212-220.
- [11] 馬場充, 小西忠孝, 小川慎太郎, 岩井美貴子: 3 次元形状測定高速化のための「領域分割式マルチスリット光符号化法」の提案. 計測自動制御学会論文集, Vol. 34 (8), 1998, 898-906.
- [12] Boyer, K. L. and Kak, A. C.: Color-encoded structured light for rapid active ranging. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, PAMI-9 (1), 1987, 14-28.
- [13] Geng, Z. J.: Rainbow three - dimensional camera: New concept of high - speed three - dimensional vision systems. Optical Engineering, Vol. 35 (2), 1996, 376-383.
- [14] Durdle, N. G., Thayyoor, J. and Raso, V. J.: An improved structured light technique for surface reconstruction of the human trunk. IEEE Canadian Conference on Electrical and

Computer Engineering, Vol. 2, 1998, 874-877.

- [15] Petriu, E. M., Sakr, Z., Spoelder, H. J. W. and Moica, A.: Object recognition using pseudo-random color encoded structured light. Instrumentation and Measurement Technology Conference, 2000. IMTC 2000. Proceedings of the 17th IEEE, Vol. 3, 2000, 1237-1241.
- [16] 山本新, 小関修: 光切断法を用いた部品形状の計測と検査. 精密工学会誌, Vol. 56 (8), 1990, 1371-1374.
- [17] Penney, C. and Corby, N.: Coded aperture light detector for three dimensional camera. US Patent US4830485A, 1989.
- [18] Bhatnagar, D., Pujari, A. and Seetharamulu, P.: Static scene analysis using structured light. Image and Vision Computing, Vol. 9, 1991, 82-87.
- [19] Wang, Y.: Characterizing three-dimensional surface structure from visual images. Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on, Vol. 13, 1991, 52-60.
- [20] Aldon, J. and Strauss, O.: Shape decomposition using structured light vision. Visual Form, 1992, 11-20.
- [21] Yoshida K. and Kawasue K.: Compact three-dimensional vision for ubiquitous sensing. Proceedings of the 8th International Conference on Mobile Ubiquitous Computing, Systems, Services and Technologies, 2014, 157-163
- [22] Feldmar, J., Declerck, J., Malandain, G. and Ayache, N.: Extension of the ICP algorithm to non-rigid intensity-based registration of 3D volumes. Vol. 66, 1997, 193-206.
- [23] Kapoutsis, C., Vavoulidis, C. and Pitas, I.: Morphological techniques in the iterative closest point algorithm. Proceeding of the 1998 ICIP, Vol.1, 1998, 808-812.
- [24] Lee, B., Kim, C. and Park, R.: An orientation reliability matrix for the iterative closest point algorithm. Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on, Vol. 22, 2000, 1205- 1208.
- [25] Gupta, S., Sengupta, K. and Kassim, A.: Compression of dynamic 3d geometry data using iterative closest point algorithm. In: CVIU. , Vol. 87, 2002, 116-130.
- [26] Sharp, G., Lee, S. and Wehe, D.: ICP registration using invariant features. Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on, Vol. 24, 2002, 90-102.
- [27] Busboom, A. and Schalkoff, R.: Active stereo vision and direct surface parameter estimation: Curve-to-curve image plane mappings. IEEE Proceedings-Vision, Image and Signal Processing, Vol. 143, 1996, 109-117.

- [28]Depiero, F. and Trivedi, M.: 3-D computer vision using structured light: Design, calibration, and implementation issues. *Advances in Computers*, Vol. 43, 1996, 243-278.
- [29]Toemoe, S., Rao, N. and Mann, R.: Learning-based method to recognize and localize glassware using laser range images. *Elsevier*, Vol. 14, 1996, 131-134.
- [30]吉田久美子, 川末紀功仁: ランダムドットを組み合わせたマルチスリットの投光による三次元形状計測—マルチスリット輝線の同定方法—. *精密工学会誌*, Vol. 83 (4), 2017, 341-347.
- [31]井口征士, 佐藤宏介: 三次元画像計測. 昭晃堂, 1992, 94-99.
- [32]徐剛, 辻三郎: 三次元ビジョン. 共立出版, 1998, 61-65.
- [33]徐剛: 最新 3 次元写真計測システム. *日本写真学会誌*, Vol. 67 (5), 2004, 445-447.
- [34]Heijmans, H.: Discretization of morphological operators. *JVCIR* 3, 1992, 182-193.
- [35]Heijmans, H.: Connected morphological operators for binary images. *CVIU* Vol. 73(1), 1999, 99-120.
- [36]Stefano, L. D., Mattoccia, S. and Tombari, F.: ZNCC-based template matching using bounded partial correlation. *Elsevier, Pattern Recognition Letters*, Vol. 26 (14), 2005, 2129-2134.
- [37]C. Torras: *Computer Vision: Theory and industrial applications*. Springer-Verlag, 1992.
- [38]吉田久美子, 川末紀功仁: ランダムドットを組み合わせたマルチスリットの投光による配管の計測—マルチスリットの配列を利用した管の中心線と径の算出—. *精密工学会誌*, Vol. 83 (3), 2017, 263-268.
- [39]Fischler, M. A. and Bolles, R. C.: Random sample consensus: A paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography. *Communications of the ACM*, Vol. 24 (6), 1981, 381-395.

謝辞

この博士論文の執筆にあたり、多くの方々のご支援ご厚意を賜りましたことをここに御礼申し上げます。

平成 25 年に、宮崎大学大学院 農学工学総合研究科に入学して以来、主指導教員である宮崎大学工学教育研究部教授 川末紀功仁博士には、ひとかたならぬご指導をいただきました。常に私が研究を遂行しやすい環境を作ってください、たくさんの会話や議論を通して研究の楽しさを教えてくださいました。また、私が研究における問題に悩んだ際には、ご多忙にも関わらず時間を調整し相談に乗ってくださいました。どんな時も変わらない先生の明るく優しいお言葉にどれほど救われたことかわかりません。川末教授のきめ細やかなお心遣いのおかげで、この成果に至ることができたこと心より感謝しております。

副指導教員である本学農学部教授 西脇亜也博士、本学工学教育研究部教授 淡野公一博士、同教授 田村宏樹博士には、折に触れ貴重なご助言、そしてあたたかい励ましをいただきましたことを心より感謝いたします。先生方からいただくご助言のたびに私の研究は前進できたと感じております。

同じく本論文の審査に際してご指導を賜った、本学工学教育研究部教授 椋木雅之博士、同准教授 李根浩博士に深く感謝の意を表します。

研究を進めるにあたり、ご協力をいただきました本学 教育研究支援技術センター長友敏様および川末研究室の皆様には大変お世話になりました。研究室の皆様とは年齢は離れていますが同じ研究室の一員としていつもあたたかく接していただき、学生に戻ったような楽しい時間を過ごすことができました。本当にありがとうございました。

勤務先である向陽鉄工株式会社の皆様には、長きにわたり多大なるご支援をいただき本当に感謝しております。入学から在学中の研究および仕事において全面的にご支援いただいた企画室 舩重豊様、東哲正様には心より感謝しております。業務と研究の両立で余裕がなくなっている私を見守り、広い視点で物事を捉える重要性和ヒントを常に示してくださいました。お二人と議論を交わしながら、研究や仕事の面白さと厳しさを経験できたことは、今後の私の業務において大きな糧になると確信しております。また、同僚たちの励ましは余裕がなくなっている私の気持ちを切り替え元気の源となるものでした。ありがとうございました。これからもよろしく。

最後に、博士課程入学から今日までの長きにわたり日々の家庭生活を支え、どんな時も常にあたたかく私を見守り心の支えになってくれた両親と兄弟、そして励ましサポートしてくれた親戚、友人たちに心より感謝いたします。