

電子 1241

修士論文

ランダムパターン光投影による
ステレオ視三次元計測手法

山本 一統

東京大学大学院 工学系研究科 電子工学専攻

学籍番号 46416

指導教官 浅田 邦博 教授

2006年2月3日提出

目次

第1章	序論	1
1.1	研究の背景と目的	1
1.2	三次元計測手法	2
1.2.1	受動的手法	3
1.2.2	能動的手法	5
1.2.3	光投影を用いたステレオ法	7
1.3	本論文の構成	8
第2章	ランダムパターン光投影によるステレオ視	9
2.1	提案手法の概要	9
2.2	撮像系の周波数特性	11
2.2.1	光学系	11
2.2.2	センサ開口領域における積分特性	13
2.2.3	センサ開口領域におけるサンプリング	15
2.3	二次元的ランダムパターン	18
2.4	パターンの生成	20
2.5	マッチングにおけるウィンドウサイズの最適化	22
第3章	実験装置	24
3.1	装置の構成	24
3.2	キャリブレーション	28
3.3	三次元座標計算	33
3.4	処理の流れ	34
第4章	測定結果	37
4.1	撮像系の周波数特性	37
4.2	投影パターン	38
4.2.1	投影パターンの周波数成分	38
4.2.2	投影パターンの自己相関	39
4.3	三次元計測結果	39

4.3.1	平板の測定結果	39
4.3.2	投影パターンの周波数による測定結果の変化	40
4.3.3	ウィンドウサイズによる測定結果の変化	41
4.3.4	円錐の測定結果	41
4.3.5	球の測定結果	42
第 5 章	結論	54
	参考文献	56
	本研究に関する発表	59
	謝辞	60

目次

1.1	ステレオ法の原理	3
1.2	領域ベースステレオマッチング	4
1.3	エッジの誤対応	5
1.4	(a) スポット光投影法 (b) 光切断法	6
1.5	Time-of-Flight 法	7
2.1	実際のレンズ	12
2.2	レンズの周波数応答	12
2.3	センサ開口領域における積分特性	14
2.4	センサ開口での積分特性による周波数応答	14
2.5	開口率による MTF の違い	15
2.6	ナイキスト条件を満たす場合のサンプリング	16
2.7	ナイキスト条件の満たさない場合のサンプリング	17
2.8	サンプリングによる折り返し雑音の様子 (a) サンプリング周波数の 2/3 の周波数のアナログ信号 (b) サンプリング周波数の 1/3 の周波数のアナログ信号	18
2.9	エピソード幾何	19
2.10	投影パターン	20
2.11	投影パターンの自己相関	22
3.1	実験装置の概観	24
3.2	測定システムの構成	25
3.3	ベースライン長と距離計測可能範囲	27
3.4	中心投影方式	27
3.5	既知パターンによるキャリブレーション	29
3.6	画像座標系とカメラ座標系、ワールド座標系の関係	30
3.7	使用したキャリブレーションターゲット	32
3.8	キャリブレーション点を用いた三次元計測結果	34
3.9	二段階のマッチング	36

4.1 撮像系の周波数特性 (a) 水平方向 (b) 垂直方向	43
4.2 投影パターンの周波数成分	44
4.3 投影パターンと二値ランダムパターンの周波数成分	44
4.4 投影パターンの自己相関 (27×27 の場合)	45
4.5 投影パターンの自己相関 (29×29 の場合)	45
4.6 平板の (a) 左右カメラ画像 (b) 投影光を当てたときの左右カメラ画像 (c) レンジマップ	46
4.7 平板の測定結果の断面図 (a)x-z 平面 (b)y-z 平面	47
4.8 平面の測定結果の三次元プロット	48
4.9 二値のランダムパターンを投影光として使用した場合	48
4.10 ウィンドウサイズを変化させた場合の結果 (a)5×5(b)7×7(c)9×9 (d)11× 11(e)13×13(f)15×15	49
4.11 円錐の (a) 左右カメラ画像 (b) 投影光を当てたときの左右カメラ画像 (c) レンジマップ	50
4.12 円錐の測定結果の断面図 (a)x-z 平面 (b)y-z 平面	51
4.13 球の (a) 左右カメラ画像 (b) 投影光を当てたときの左右カメラ画像 (c) レンジマップ	52
4.14 球の測定結果の断面図 (a)x-z 平面 (b)y-z 平面	53

表目次

3.1 EPSON ELP-7500 の仕様	25
3.2 Orange Micro iBOT2 の仕様	26
3.3 キャリブレーションパラメータ	31
3.4 左右カメラ座標間の回転行列および並進ベクトル	33
3.5 キャリブレーション点を用いた三次元計測結果	34
4.1 カメラおよびプロジェクタに関するパラメータ	38
4.2 投影パターンの周波数による測定結果の変化	41
4.3 ウィンドウサイズを変化させた場合のマッチング精度	42

第1章

序論

1.1 研究の背景と目的

近年、コンピュータグラフィックス (CG) 技術の発達により三次元映像の応用は我々の身近なところへと急速に広まっており、現在ではテレビなどのメディアを通してリアリティのある三次元映像を見ることができる他、ゲーム機やパソコンを通して三次元映像を操作することができるようにまでなってきた。現在も三次元映像情報技術は目ざましい進歩を続けており、今後もさまざまな分野において映像情報メディアの三次元化が進んでいくものと考えられる。

しかし、三次元情報を取り扱うための技術には未解決の問題が数多く残っている。三次元映像技術の要素技術である三次元計測技術は従来、産業用ロボットの視覚や物体の形状計測、外観検査などの産業分野における応用や、人間の視覚をコンピュータで再現するコンピュータビジョンの分野における利用が主なものであった。しかし現在では、三次元計測技術は医療、建築、高度道路交通システムや知能ロボットの視覚機能など、さまざまな分野へとその応用は広まっており、三次元計測のさらなる高速化、高精度化、高解像度化が求められている。複数のカメラで撮影した画像から三次元距離情報を計算するステレオ法はその原理の簡単さからさまざまな分野において利用されている。ステレオ法ではそれぞれのカメラから計測点への視線を決めることによって三角測量の原理により対象物体の三次元情報を取得する。この視線を決定するためにはステレオ画像対から対応点を検出する必要があるが、対象物体上に明確な特徴が少ない場合には対応点検出が非常に困難であることに加え、対応点検出のための計算量が非常に膨大であり、高速に処理することが困難である、という問題点があった。計算量の問題に関しては、現在では集積回路技術の進歩によってチップ上に集積できるトランジスタ数が増加したことにより単位時間あたりに処理することのできる情報量が増加し、高解像度のステレオ画像をビデオレートで処理することも可能となっている [1][2]。対応点検出の問題については、光などを利用して対象に人工的に特徴を与えることによって、特徴量の少ない物体に

についても正確に対応点の検出を行うことが可能となる。このように光投影法とステレオ法を合わせた三次元計測手法の研究は現在数多く行われている [3][4][5]。しかし、これらの手法では三次元情報を得るために複雑な計算を必要としたり複数のフレームに分けてパターンを投影することを必要とするため、より高解像度な三次元情報の取得や三次元計測の高速化が困難である。対応点検出のための計算量を考慮すると、動物体の三次元計測のためには1フレームの画像から簡単な計算のみで対応点の検出を行うことが必要となる。他にも、対応点を探索するための方法である領域ベースのステレオマッチングでは、それに用いるウィンドウの大きさが三次元計測の精度を大きく左右するため、高精度の三次元計測を実現するためにはウィンドウの大きさを適切な値に設定することが必要となる。一般的には周囲の画素から受ける影響を少なくするためある程度のS/Nがある最小のウィンドウが使用されるが、このウィンドウの大きさを最適化するためには対象物体に与える特徴をできる限り細かく、かつ明確なものにすることが求められる。

本研究では、より高速・高精度・高解像度な三次元距離情報を得るための手法として、ランダムパターンを投影光として利用するステレオ法に基づいた三次元計測手法を提案する。提案手法では対象に与える特徴をできる限り細かく、かつ元の投影パターンを完全に復元することが可能なものとするために測定システムの周波数特性を解析し、これに基づいて最適な投影パターンを作成した。この投影パターンを対象に投影することによって、簡単な計算のみで正確な対応点検出を行うことが可能となる。また、対応点の検出のために行う領域ベースのステレオマッチングにおいて重要なパラメータであるウィンドウサイズについても、投影パターンの自己相関を利用することによって最適化を行った。

1.2 三次元計測手法

三次元計測手法は接触式のものと非接触式のものに分類することができる。接触式の三次元計測手法では、装置のアーム先端にあるプローブを測定物に接触させ、表面をなぞることによって対象物体の三次元情報を測定する。高精度な三次元情報を得ることができるが、計測時間が長く、プローブを対象に接触させる必要があり測定対象に限られる、プローブにより対象物が傷ついたりストレスを受けたりする、などといった問題点がある。一方、非接触三次元計測手法は様々な手法が提案されており、大きく受動的手法と能動的手法の二つに分類することができる [9]。ここでは、その中でもイメージセンサを利用して三次元計測を行う手法について紹介する。

1.2.1 受動的手法

受動的手法の代表的なものとしてはステレオ法が挙げられる。ステレオ法は複数の異なる視点から撮影した画像をもとに対象までの距離情報を計算する方法で、計測に必要とするのはカメラ二台のみである。二台のカメラの位置が既知であれば、それぞれのカメラから対象までの視線方向を定めることにより、三角測量の原理によって対象までの距離が計算できる。

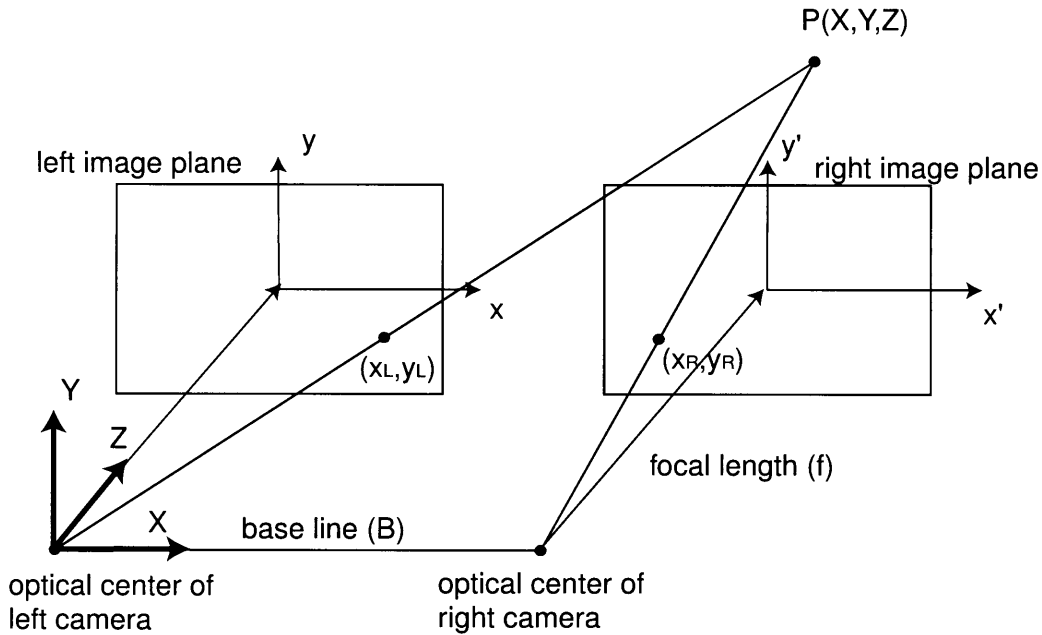


図 1.1 ステレオ法の原理

図 1.1 のように二台のカメラを水平方向に、それぞれの光軸および画像座標軸が互いに平行になるように配置したとき、計測点 $P(X, Y, Z)$ が左右の画像面上でそれぞれ (x_L, y_L) 、 (x_R, y_R) に撮影されたとすると、計測点の三次元情報は次式のように求められる。

$$(X, Y, Z) = \left(\frac{x_L B}{d}, \frac{y_L B}{d}, \frac{f B}{d} \right) \quad (1.1)$$

ここで、 d は視差 (mm)、 B はカメラ間の距離 (mm)、 f はカメラの焦点距離 (mm) であり、三次元座標の原点は左カメラのレンズ中心、 X 、 Y 軸はそれぞれ画像座標軸の x 、 y 軸と平行となり、 Z 軸はカメラの光軸と一致するように設定されている。

このように、ステレオ法によって三次元計測を行うためには、左右カメラにより撮影された画像から対応点 (同じ対象物が投影された点) を検索する必要がある。ス

テレオ画像より対応点を検索することをステレオマッチングという。複数の画像中の対応点を人間の目で発見することは容易であるが、これをコンピュータで正確に行うことは非常に困難である。マッチングの方法は領域ベースと特徴量ベースの二つに分類することができる。

領域ベースステレオマッチング

領域ベースのステレオマッチングでは図 1.2 に示すように、画像中の注目点の周りにある大きさの小領域(ウィンドウ)を切り出し、その領域中の濃淡情報を比較して最も類似度が高いものを対応点として検出する方法である。処理が簡単なことから一般的に広く利用されている。原理上、画像中の全ての点に対して距離情報を求めることができるが、対象表面に特徴が少ない場合や対象がベースラインに対して大きく傾いている場合、対応点を精度良く検出することは非常に困難である。また、ウィンドウの大きさが距離計測精度に大きな影響を及ぼす。画像中の全ての点に対してウィンドウ同士の類似度を比較しながら対応点を検索するため、計算量が膨大なものとなる。

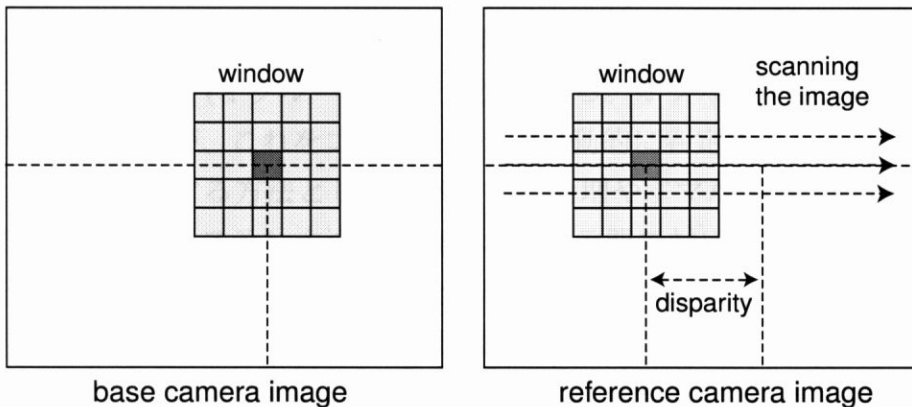


図 1.2 領域ベースステレオマッチング

特徴量ベースステレオマッチング

画像からあらかじめ特徴量を抽出し、その特徴量同士を対応させる。特徴量としてはエッジを抽出した二値化データ、画像から線を抽出したベクトルの距離あるいは角度等が用いられる。対応点の候補が限定されるので、領域ベースのマッチングに比べて計算速度は速くなる。しかしながら、特徴量の選定や特徴量を抽出すること自体が困難であるため、適応可能な画像が制限される他、図 1.3 に示すような

エッジ同士の対応の問題の影響を受ける。また、特徴の存在する画素についての距離情報しか求めることができないため、得られる距離情報は疎なものとなる。

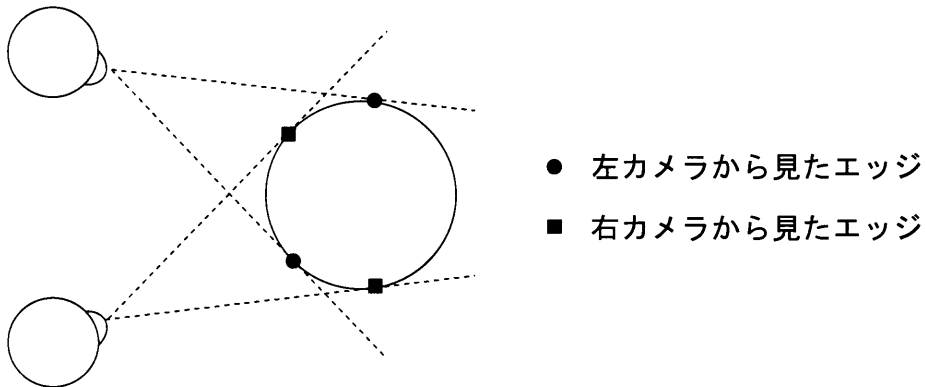


図 1.3 エッジの誤対応

受動的手法では一般に能動的手法に比べて三次元計測精度は悪くなるが、それでもカメラのみで三次元計測が可能であり、装置の構成が簡単であることから、さまざまな分野において応用されている。

ステレオ法では二つのカメラによって距離計測を行うことができるが、視点が複数存在するため、死角(オクルージョン)が発生する。オクルージョン領域では本来対応点が存在しないが、これをコンピュータで自動的に判定することは非常に困難である。これを解決する方法としてカメラの数を増やすマルチステレオ法[6]が提案されている。マルチステレオ法では複数のカメラ間で対応点検索を行った際の評価関数を統合することによって対応点を検出する。このため、ある画像の組にオクルージョンが存在しても、他の画像の組の評価関数を調べることによってオクルージョンを検出することができる。さらに、複数の評価関数を足し合わせるため、二枚の画像のみを使用した場合に比べて対応点において評価関数がより鋭いピークを示す。また、画像の組合せを変えることによりカメラ間の距離を変えることができ、装置を変更することなく広い距離範囲の計測が可能となる。

1.2.2 能動的手法

能動的な手法とは測定対象に対して光や音波などの何らかの意味のあるエネルギーを投射する手法のことを指す。代表的なものとしてスポット光投影法や光切断法、パターン投影法、Time-of-Flight法などが挙げられる。

スポット光投影法では図 1.4(a) に示すようにステレオ法におけるカメラのうちの1台をプロジェクタなどの光源に置き換え、対象に投射された光の反射像の位置を

カメラで撮影し、三角測量の原理によって対象までの距離を計算する。ステレオ法に比べて単純な処理で対象までの距離を求めることができる。しかしこの方法では対象物体全体の距離情報を得るためにはスポット光を二次元的に走査する必要があり、高解像度の距離情報を得るためには解像度に応じたスポット光の反射像を記録・解析する必要があるため、計測に時間がかかるだけでなく、情報量も膨大なものになってしまう。

光切断法はスポット光の代わりに図 1.4(b) に示すようにシート状の光を投射することによって光の走査を一次元方向のみに限定し、高速化を図ろうというものである。この手法は現在最も高速で高解像度な三次元情報を得ることのできる手法である。スポット光投影法に比べて三次元計測に必要とされる画像を減らすことができ、高速化することができるが、シート光の走査方向の解像度だけ撮影を行う必要があり、センサの撮影速度によって計測速度が制限されてしまう。これを解決するために信号処理回路を受光素子とともにセンサ面上に集積したスマートイメージセンサを用いて投射光の位置を高速に検出することによって三次元計測の高速化を目指した方法が提案されている [7][8]。しかし、レーザを用いるため人物の測定等には不向きである。また、さらに高解像度の三次元情報を得るためにはイメージセンサのフレームレートを上げる必要があるが、それに伴い1フレームあたりの露光時間が減少しセンサの感度が低下してしまうため、これを補うために光強度を上げなければならず、その結果測定対象が限られてしまう。

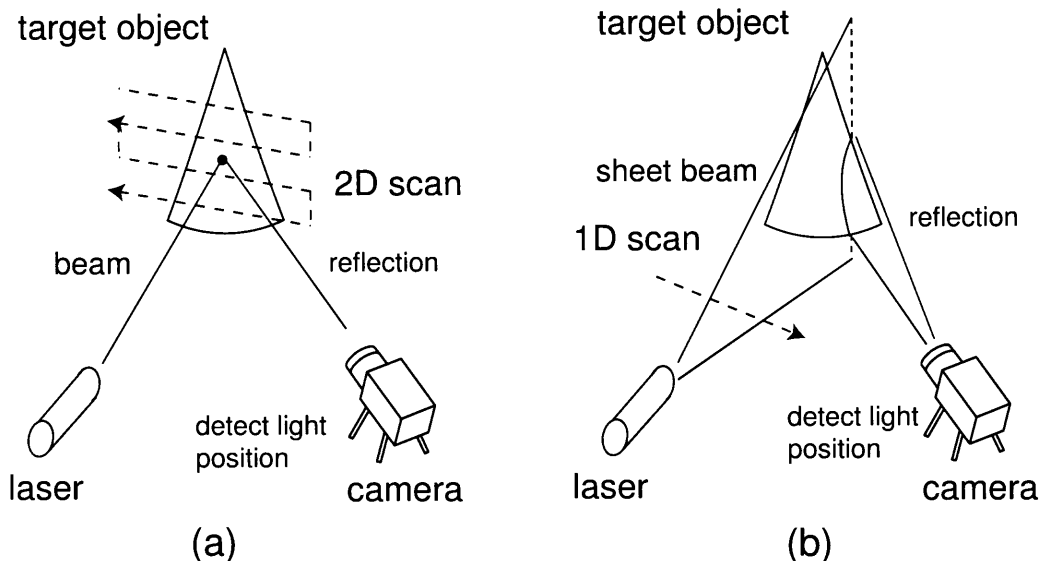


図 1.4 (a) スポット光投影法 (b) 光切断法

パターン光投影法は光切断法におけるシート光を一本ではなく複数同時に投影することによって三次元計測を高速化しようという方法である。

切断法ではシート光の走査と撮影を繰り返す必要があるが、複数のシート光を同時に対象に投影することができれば、投影・撮影回数を減少させることができ、三次元計測を高速化することが可能である。同時に投影した複数のシート光を識別するためには、それぞれのシート光に何らかの特徴を与える必要がある。この特徴として色を用いる手法[10]、濃度傾斜光を投影する方法[11]、シート長[12]やスリットの開口幅を変調する方法、グレイコードを用いる方法[9]等が提案されている。しかし、対象表面の色や形状、および照明の影響を受けやすかったり、断片化してしまった物体に対しては三次元計測が不可能となってしまう、などの問題点がある。

Time-of-Flight法[15][16]では図1.5に示すように測定対象までの距離に応じて生じる発射光と反射光との間の遅延時間から三次元情報を取得する。高速なシャッタースピードを持つイメージセンサで撮影することによって反射光の到達時間を検出する。この手法では光を走査させる必要はなく、高解像度の距離情報を高速に検出することができる。しかし、距離解像度がイメージセンサのフレームレートに依存することと光の速度を距離計測に用いるので、現状では十分な距離解像度を得ることができない。

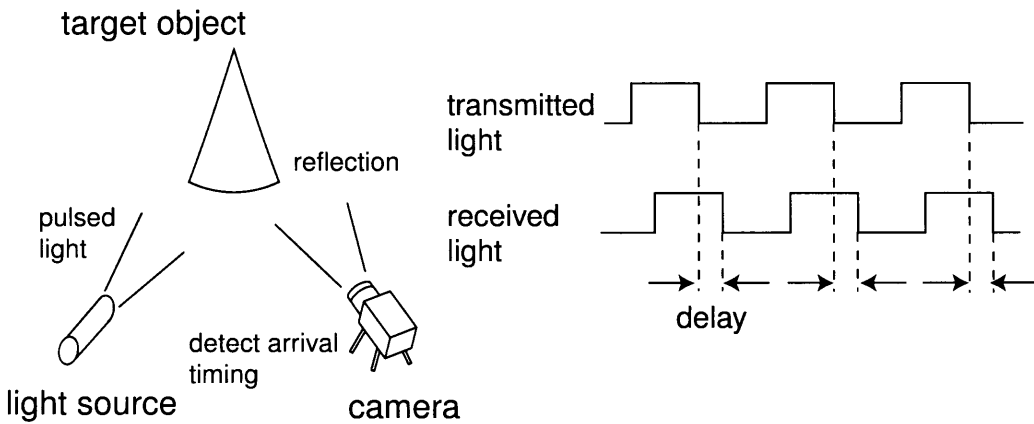


図 1.5 Time-of-Flight 法

1.2.3 光投影を用いたステレオ法

近年では受動的手法であるステレオ法と能動的手法である光投影法を組み合わせた三次元計測手法が提案されている[3][4]。この手法は光投影法とステレオ法それぞれの欠点を補い合うことのできる手法である。ここでは、一組の画像対から高解

像度の三次元情報を得ることができるというステレオ法の特徴を考え、光投影はスポット光投影法やシート光投影法のような走査を必要とするものではなく、パターン光投影法のような高解像度のパターンを投影するものを考える。ステレオ法では対象表面に特徴のない場合、対応点の検出ができないため、三次元情報を計算することができない。しかし、光を投影することによって対象に人工的な特徴を与えることができるので、対応点の検出が容易かつ正確になり、精度の良い三次元計測が可能となる。また、距離計測の原理はステレオ法に基づいているので、光投影法のように投影した光の位置が情報を持つのではなく対応点検出のための特徴量として利用されるのみであり、投影パターンにアドレスを付与するための特徴を持たせる必要がなく、投影パターンの作成が比較的簡単なものとなる。さらに、光投影法では複数の視点から同時に光を投影したときに光が重なり合ってしまった場合、それらを区別することができなければ正確な三次元計測が不可能となってしまうが、距離計測をステレオ法で行う場合には複数のカメラから同時に見ることができれば距離計測が可能となる。他にも、ステレオ法は光投影法に比べて装置の構成が簡単である、という特徴がある。光投影法では測定する距離範囲を変更するときにカメラおよびプロジェクタの位置関係を細かく設定しなおす必要があるが、ステレオ法ではカメラ間の距離を変えるだけで測定可能な距離範囲を自由に変更することが可能である。

1.3 本論文の構成

本論文では高解像度かつ高精度な三次元計測を可能とするために、光投影法とステレオ法を合わせた手法に基づいた三次元計測手法を提案する。第二章では提案手法で用いる二次元的なランダムパターンについて、その特徴および作成法について述べる。また、投影パターンを作成する際に考慮する必要がある撮像系の周波数特性について説明し、投影パターンの性質を利用したウィンドウサイズの最適化について述べる。第三章では実際に構成した実験装置および高精度な距離計測のために行ったキャリブレーションについて述べ、さらに実験における処理の流れについて述べる。第四章では撮像系の周波数応答の測定結果、ステレオマッチングのウィンドウサイズを最適化するために利用した投影パターンの自己相関および三次元計測結果について述べ、第五章で結論を述べる。

第2章

ランダムパターン光投影によるステレオ視

本研究では二次元的なランダムパターンを投影パターンとして用いる光投影法とステレオ法とを合わせた三次元計測手法について提案する。本章では三次元計測手法としてステレオ法を利用する理由、および提案手法の概要について述べ、次に最適な投影パターンとするために考慮する必要のある撮像系の周波数特性について述べる。ステレオ法では複数の画像間で対応点を検索するため、これに用いる特徴とするためには撮影した画像から完全に復号することのできる投影パターンでなければならず、投影パターンの最適化のためには撮像系の周波数特性を考慮する必要がある。また本章ではさらに、二次元的な投影パターンを使用する理由、投影パターンを作成する手順、および三次元計測の高精度化に不可欠なステレオマッチングにおけるウィンドウサイズの最適化について述べる。

2.1 提案手法の概要

本研究では三次元計測手法として光投影を用いたステレオ法を用いる。前章で述べた通り、ステレオ法は複数の異なる視点から撮影したステレオ画像対から対応点の検出を行うことによって三次元情報を取得する手法であり、1フレームのステレオ画像対から三次元情報を算出することができる。また、領域ベースのステレオマッチングによって原理上画像中すべての画素について距離情報を求めることができる。これらのことを考慮すると、ステレオ法は高速化および高解像度化を同時に実現することのできる手法であるが、実際には計算量が膨大となり、高速に処理することは困難である。計測速度を制限する要因は対応点探索処理であるが、ステレオ法では各画素を独立して扱うことができるため、ハードウェアによる並列処理が可能となる。近年では集積回路技術の発達によってデータ処理の速度および取り扱うことのできるデータ量は増加しており、ステレオ法によるビデオレートでの三次元計測も実現されている。一方で、スポット光および光切断法では1つのレンジマップを得るために光を走査しながら撮影を繰り返す必要があり、情報量が膨大に

なるほか、高解像度化が困難である。また、ステレオ法はその精度が対象物体の持つ特徴量に依存するため、特徴の少ない物体に対しては高精度な三次元計測が出来ないのに対し、光投影法では対象物体に対して積極的に特徴を与えることによって高精度な三次元計測を実現している。しかし、前章で述べたように、ステレオ法においても、光投影を用いて高精度な三次元計測を行うことが可能となる。また、近年では任意視点の画像を生成するために三次元計測手法を用いる研究[13][14]もなされているが、任意視点の画像を生成するためには複数の位置から三次元計測を行い、それぞれのデータを関連付ける必要がある。光切断法で任意視点の三次元計測を行う場合、同時に投影された複数のシート光を区別する必要があり、実現が困難である。これを解決する方法として複数の装置を時分割で動作させることにより複数方向からの三次元計測を試みる手法もあるが、高解像度かつ動画のフレームレートでの三次元情報を得るためには、イメージセンサのフレームレートを上げる必要がある、これを実現できたとしてもセンサに十分な露光時間を与えることができないため光強度を上げる必要がある。そのため、測定対象が限られてしまう、という問題点がある。一方、ステレオ法ではあるがままの状態を撮影した画像から三次元情報を取得できる。任意視点の画像を得ることは複数配置したカメラの組合せを適当に選択することによって実現可能である。同一シーンを撮影した画像を並列に処理し、後で統合することで高速な処理も実現できる。光投影を用いるステレオ法でも、光の位置が三次元情報の取得に重要な意味を持っているわけではなく、対応点検索における特徴として利用されるので、複数のカメラから同じように見えてさえいればよい。そこで、本研究では光投影を用いるステレオ法によって三次元情報の取得を行う。ステレオマッチングの方法としては、高解像度の距離情報を得ることのできる領域ベースのステレオマッチングを行う。

光投影を用いることによって、対象が明確な特徴を持つようになっても、ステレオマッチングには他にも重要な問題が存在する。領域ベースのステレオマッチングにおいては、マッチングに用いるウィンドウの大きさが三次元計測精度に大きな影響を及ぼす。もしウィンドウが小さいと、S/Nが小さくなるために類似する点が多く現れ、正確な対応点検出が困難になる。その一方で、もしウィンドウが大きくなると、距離の異なる点、すなわち視差の異なる点在同一ウィンドウ内に含まれることになり、射影の歪みによって正確な位置でのマッチングを示さなくなる可能性があるほか、距離分解能が落ちてしまう。一般的にはある程度の信号値の変動をその中に含むような最小のウィンドウサイズが使用される。ウィンドウが小さいほど周囲の画素から受ける影響が小さくなるからである。ウィンドウを小さくするために

は対象ができる限り細かくかつ明確な特徴を持つことが必要となる。そこで、提案手法ではできる限り細かい投影パターンを作成することを目的とする。

しかし、実際に投影することのできるパターンの空間周波数には上限が存在する。この周波数帯域を制限する要素としては、次の二つが考えられる。

- パターンを投影するプロジェクタの解像度
- パターンが投影されたシーンを撮影する撮像系の周波数応答

前者については、プロジェクタでパターン光を投影するため当然のことであるが、実際にはそれだけではなく、後者の撮像系の周波数特性によっても投影パターンの周波数帯域は制限されている。撮像系は有限の解像度を持つものだからである。

本研究では、プロジェクタおよび撮像系の性能を考慮に入れ、投影パターンの周波数帯域が撮像系によって制限されるものと仮定して最適な投影パターンについて検討する。また、投影パターンはステレオマッチングにおける特徴として用いられるので、正確な対応点検出のために投影パターンに求められる性質について検討する。

2.2 撮像系の周波数特性

撮像系には様々な低域通過特性が存在する。ここでは、その中でも支配的な影響を持つと考えられる光学系とセンサ開口領域での積分特性についてとりあげる。また、センサ面上では入射した信号が離散的な画素単位でサンプリングが行われるため、サンプリングされた後のデジタル信号から元の信号を復元するために求められる条件について考える。

2.2.1 光学系

通常、カメラではイメージセンサの前にレンズが取り付けられているが、このレンズは低域通過特性を持つ。点の像はレンズを通した場合、図 2.1 に示すように点としてではなくある広がりをもった領域として結像する。

円形開口の無収差理想レンズについて、インパルス応答である点広がり関数は次式で与えられる [17]。

$$h(l) = \left[\frac{2J_1(kdl/2z')}{kdl/2z'} \right] \quad (2.1)$$

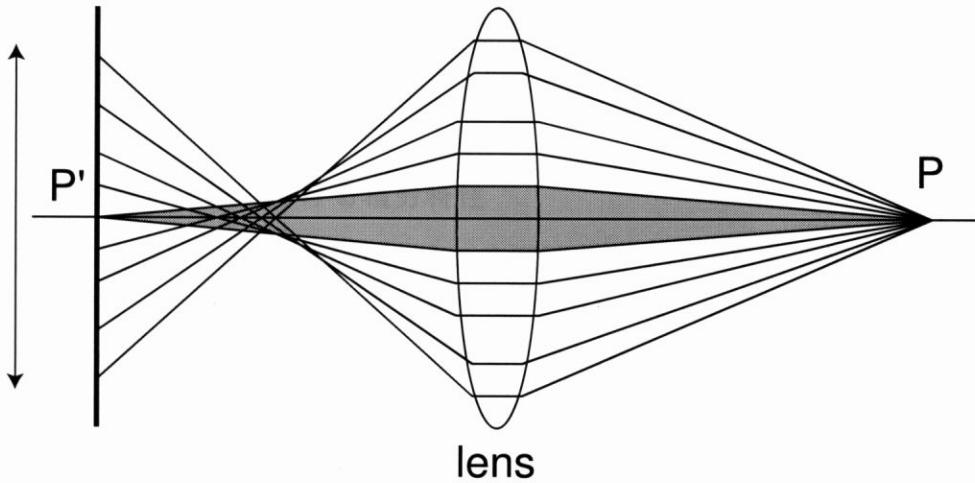


図 2.1 実際のレンズ

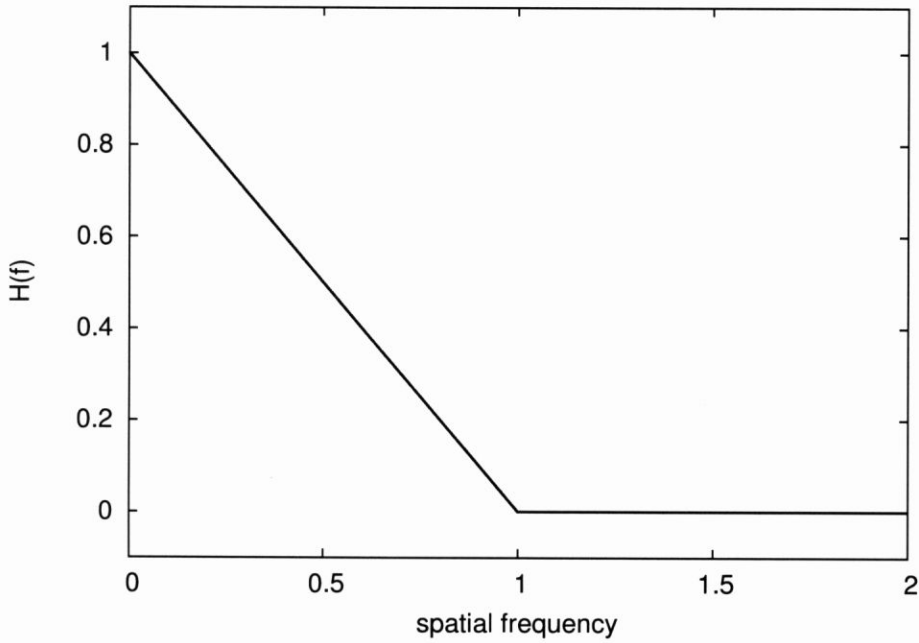


図 2.2 レンズの周波数応答

ここで、 l は中心からの距離、 J_1 は第一種第一次 Bessel 関数、 d は開口直径、 z' は焦点距離、 k は波数 ($= 2\pi/\lambda$) である。この式のフーリエ変換は近似的に次式で表される。

$$H(f) = \begin{cases} 1 - |f/f_c| & |f/f_c| \leq 1 \\ 0 & \text{それ以外} \end{cases} \quad (2.2)$$

ここで、 f は空間周波数、 $f_c(= d/\lambda z')$ はカットオフ周波数である。レンズの周波数応答の様子を図 2.2 に示す。横軸はカットオフ周波数によって正規化された空間周波数である。

2.2.2 センサ開口領域における積分特性

図 2.3(a)のように、センサ面上にはある面積を持った受光素子が格子状に離散的に並んでいる。センサ面に入射した光は図 2.3(b)のように受光素子上で積分され、この積分された値が各画素の出力値となる。この積分特性により、入射した光には低域通過特性が働く。

これは以下のように説明することができる [18]。まず、入射光を

$$I = I_0 \frac{1}{2} \{1 - \cos(2\pi f x)\} \quad (2.3)$$

とする。ここで、 I_0 は光強度、 f は空間周波数である。もし受光素子が一辺の長さ a の正方形であると仮定すると、積分することにより出力信号は

$$\begin{aligned} S(x_0) &= \int_{x_0 - \frac{a}{2}}^{x_0 + \frac{a}{2}} I(x) dx \\ &= I_0 \frac{a}{2} \left\{ 1 - \frac{\sin(2\pi f \frac{a}{2})}{2\pi f \frac{a}{2}} \cos(2\pi f x_0) \right\} \end{aligned} \quad (2.4)$$

のようになり、光の変調伝達関数である MTF (Modulation Transfer Function) は

$$MTF = \frac{\sin(2\pi f \cdot \frac{a}{2})}{2\pi f \cdot \frac{a}{2}} \quad (2.5)$$

となる。これは図 2.4 に示すような周波数応答を示す。横軸はカメラのサンプリング周波数で正規化された周波数である。

以上は開口率が 100% の場合であるが、実際のイメージセンサの開口率は 100% には満たず、開口率を考慮に入れる必要がある。特に、CCD イメージセンサは 100% に近い開口率を実現できるのに対し、CMOS イメージセンサでは開口率は 50% 程度しかないため、開口率を考慮することは非常に重要である。式 (2.5) の MTF を開口率 a/p を用いた式に直すと、

$$MTF = \frac{\sin(2\pi \frac{f}{f_s} \cdot \frac{1}{2} \frac{a}{p})}{2\pi \frac{f}{f_s} \cdot \frac{1}{2} \frac{a}{p}} \quad (2.6)$$

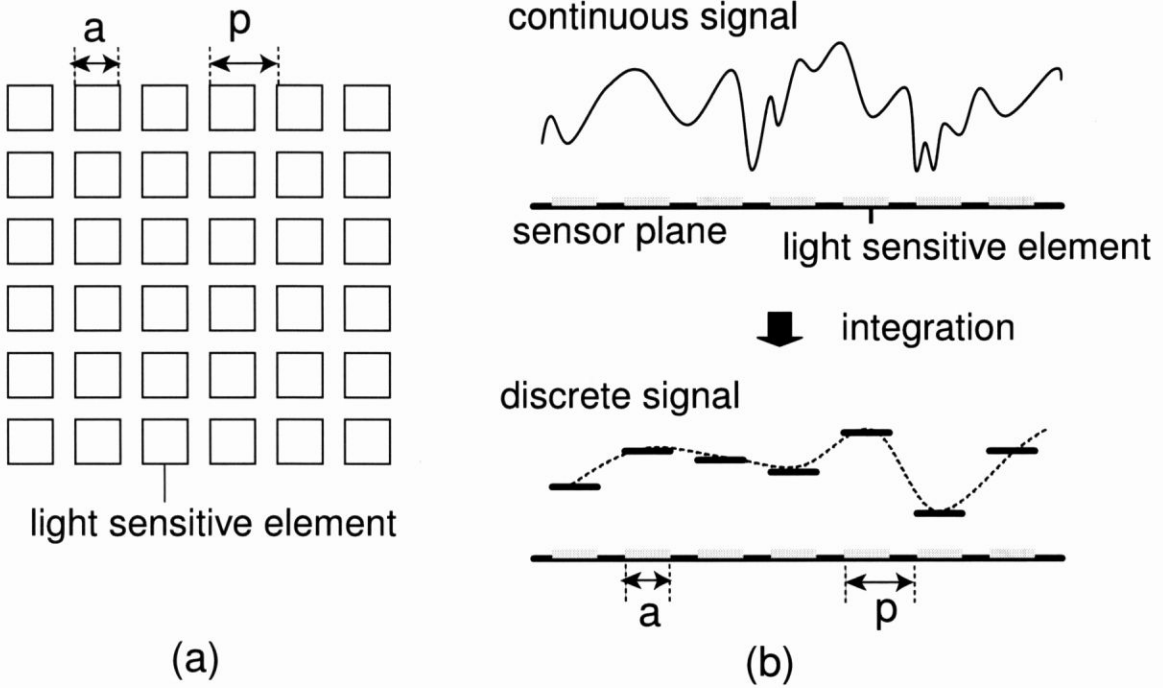


図 2.3 センサ開口領域における積分特性

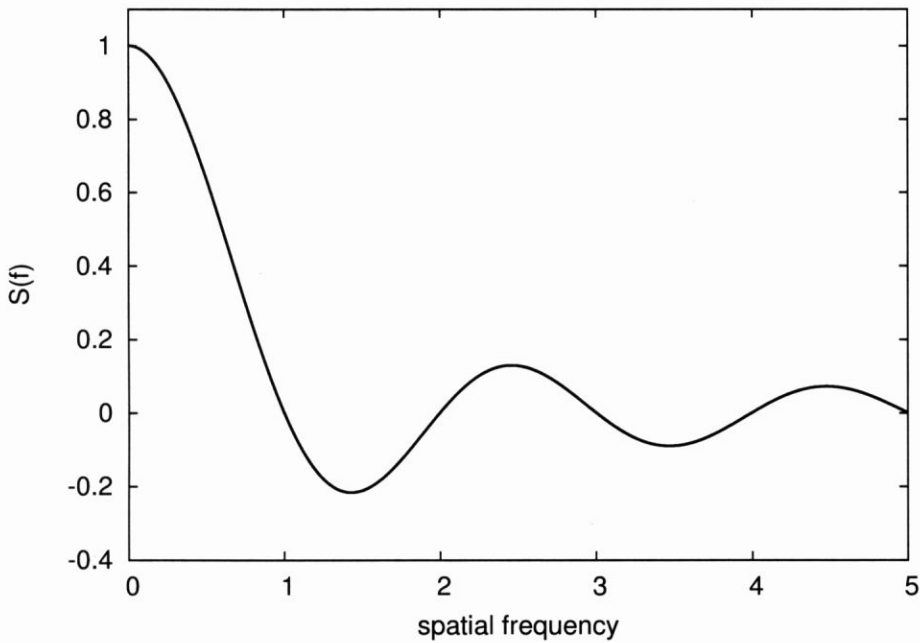


図 2.4 センサ開口での積分特性による周波数応答

となる。開口率が1、0.8、0.5および0.3の場合のMTFを図2.5に示す。開口率が小さくなるほど高周波数領域でのMTFの減衰量が小さくなる。

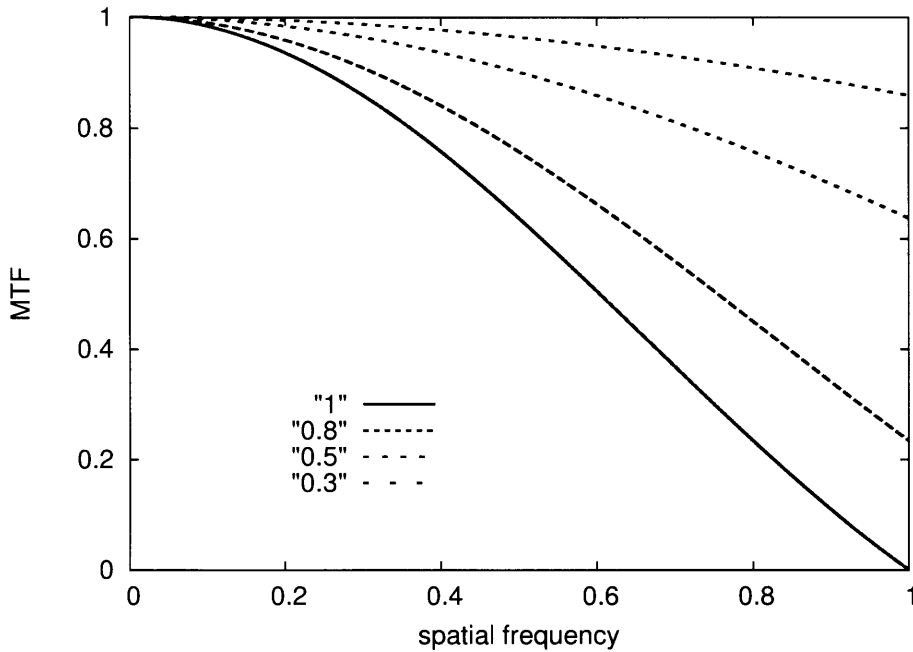


図 2.5 開口率による MTF の違い

2.2.3 センサ開口領域におけるサンプリング

センサ面上では受光素子が離散的に並んでいるため、開口領域での積分に加えて入射信号のサンプリングが行われる。連続信号をサンプリングする場合には、その周波数帯域に注意する必要がある。サンプリング後の信号から元の信号を復元するためには、連続信号の周波数帯域とサンプリング周波数との間に満たすべき条件が存在する。サンプリング定理によると、入力のアナログ信号の最大周波数成分が f_{max} のとき、デジタル信号から元の信号を完全に復元するためには $2f_{max}$ 以上の周波数でサンプリングしなければならない。言い換えると、サンプリング周波数 f_s に対して、アナログ信号の最大周波数がナイキスト周波数 f_N 以下の連続信号であれば完全に復元することができる。連続信号の周波数帯域がナイキスト周波数以下に帯域制限されていることをナイキスト条件という。

空間領域におけるサンプリングによって、周波数領域では元のアナログ信号の周波数スペクトルがサンプリング周波数を周期として繰り返される。ナイキスト条件を満たす場合、図 2.6 のように隣り合う周波数スペクトル同士が重なり合わず、ナイキスト周波数以下の周波数成分のみを通過させる周波数フィルタによって元の信号の周波数スペクトルをそのまま取り出すことができ、そこから元の連続信号を完全に復元することができる。一方でナイキスト条件を満たさない場合には、図 2.7

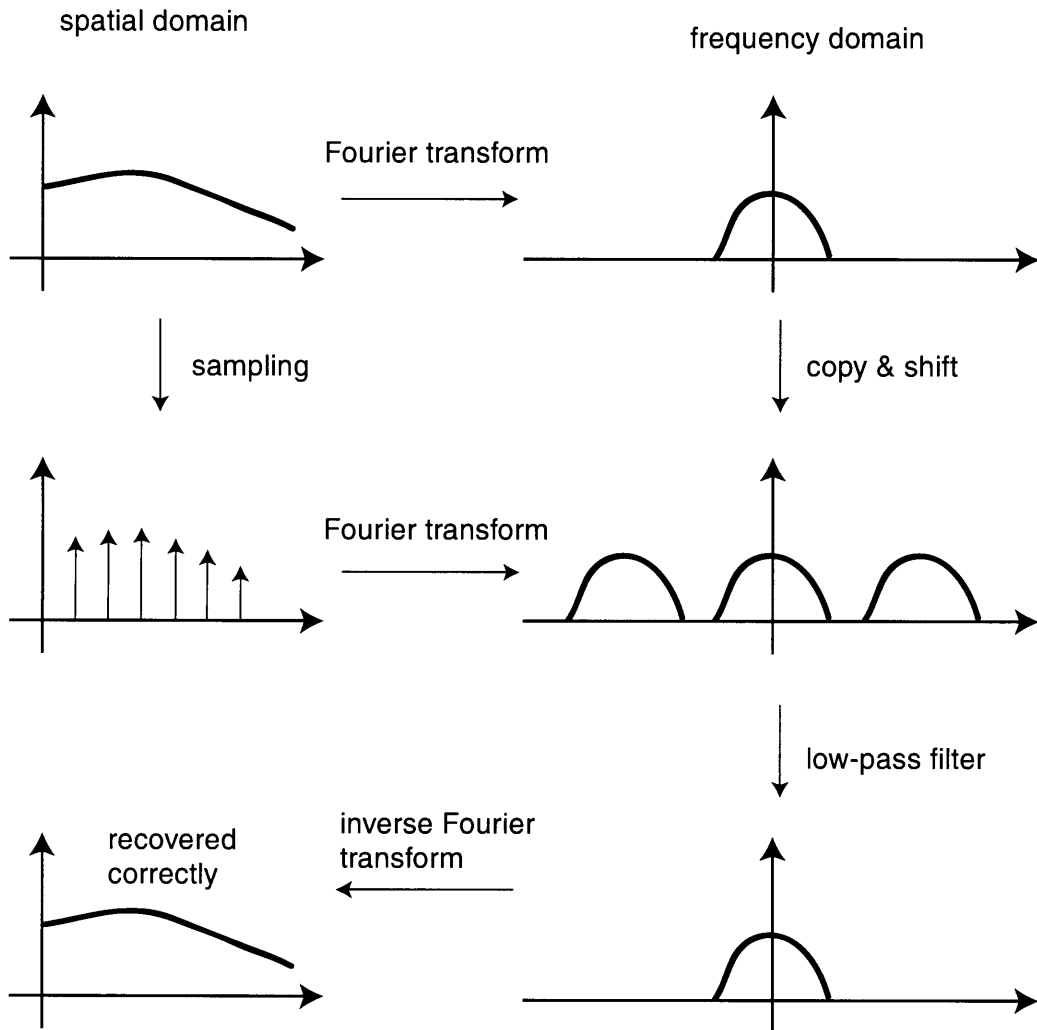


図 2.6 ナイキスト条件を満たす場合のサンプリング

のように隣り合う周波数スペクトルが重なり合ってしまうため、元の信号の周波数スペクトルを取り出すことができず、元の信号を完全に復元することができなくなってしまいます。周波数フィルタによって取り出した信号には周波数スペクトルの重ね合わせによって元の信号の周波数スペクトルからの歪みが生じるが、この歪みのことを折り返し雑音という。

折り返し雑音は空間領域においては次のように説明することができる。図 2.8(a) はサンプリング周波数の $2/3$ の周波数のアナログ信号、(b) は $1/3$ の周波数のアナログ信号をサンプリングしたときの様子である。サンプリングされた後のデジタル信号はどちらの場合も同じ信号となり、元の信号を区別することができなくなってしまいます。このように、デジタル信号においては、折り返し雑音によってナイキスト周

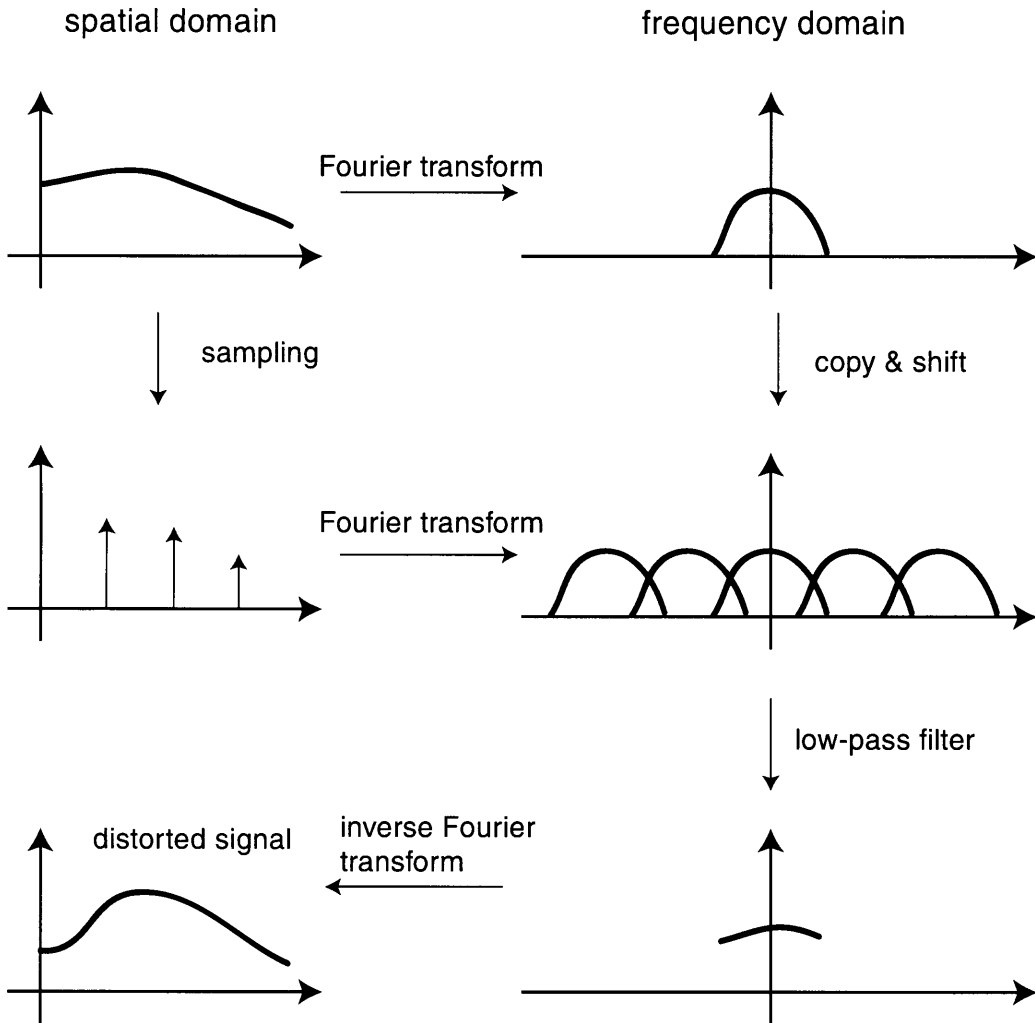


図 2.7 ナイキスト条件の満たさない場合のサンプリング

波数を対称軸として、ナイキスト周波数以上の周波数成分がナイキスト周波数以下の周波数成分であるかのように見える。

以上は一次元における説明であるが、容易に二次元へと拡張することができる。一般的な受光素子の配列である長方形配列の場合には、水平・垂直方向それぞれについてナイキスト条件を満たせば、元の二次元連続信号を完全に復元することができる。

サンプリングされる信号はレンズおよび開口領域での積分によって低域通過特性が働いたあとの信号であるが、開口領域での積分特性では高周波数成分は減衰するものの残るので、実際に入力する信号の周波数帯域をナイキスト周波数以下に制限する必要がある。また、開口率が低くなるほど高周波数における伝達関数の値が大

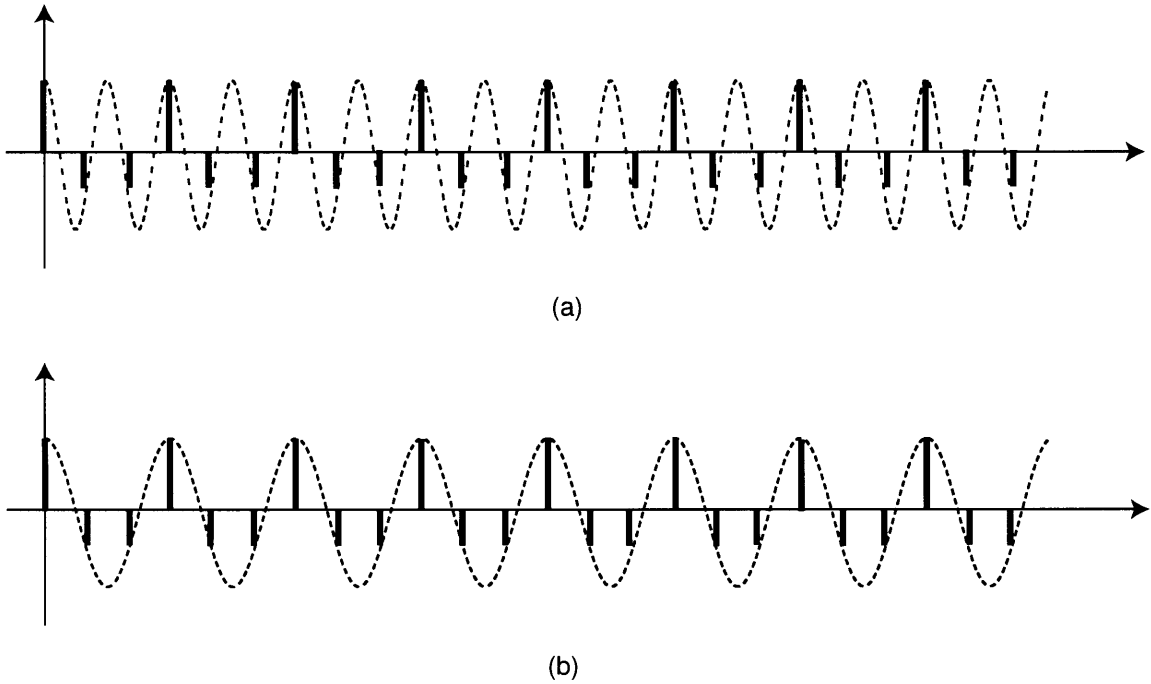


図 2.8 サンプルによる折り返し雑音の様子 (a) サンプル周波数の $2/3$ の周波数のアナログ信号 (b) サンプル周波数の $1/3$ の周波数のアナログ信号

きくなり折り返し雑音の影響を受けやすくなるため、ナイキスト周波数よりもある程度余裕を持たせた周波数帯域とすることが必要となる。

2.3 二次元的ランダムパターン

光投影を用いたステレオ法は従来にもいろいろな手法が提案されているが、それらはストライプパターンなどの一次元的なパターンのみを使用している。しかし実際にステレオ法によって距離計測を行う場合、対応点を正確に検出するためには、一次元的に変化するパターンでは問題がある。

ステレオ画像対の間にはエピポーラ幾何という幾何関係が存在する。図 2.9 のように左右カメラのレンズ中心と測定点とを含む平面のことをエピポーラ平面といい、このエピポーラ平面とそれぞれの画像の交線をエピポーラ線という。一方の画像中の点に対して、他方の画像中の対応点の位置は必ずエピポーラ線上に限定される。

二台のカメラを水平方向に、それぞれの光軸および画像座標軸がそれぞれ互いに平行になるように、かつ焦点距離が等しくなるように配置することができれば、エピポーラ線は画像座標の水平方向の軸と平行となる。このような理想的なカメラ

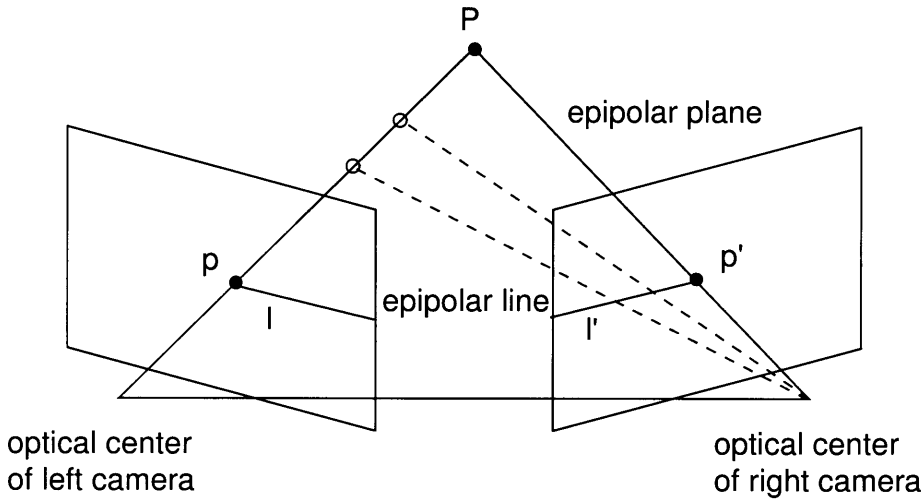


図 2.9 エピポーラ幾何

配置に対しては、対応点の探索は一次元で済むので、投影パターンの変化の方向を探索方向と同じにすることにより、一次元方向のみに変化する投影パターンでも正確な対応点の検出を行うことができる。しかし、実際にこれらの条件を満たすようにカメラを配置することは非常に困難である。もしカメラを平行に配置することができない場合でも、エピポーラ線を求めることによって対応点の探索範囲を一次元に限定することが可能であるが、エピポーラ線を求めるためには複雑な計算が必要となるだけでなく、実際にエピポーラ線に沿って対応点探索を行うには複雑な処理を必要とする。また、画像は離散的な画素を単位としているため、デジタル誤差によって実際の探索経路とエピポーラ線の間にはずれが生じてしまう。このような場合においても射影変換によってあたかも平行カメラによって取得したかのような画像を作り出すこともできる [20] が、そのためにはエピポーラ線を求めるのと同様複雑な計算を必要とする。ステレオマッチングでは計算量が膨大であるため、リアルタイムでの処理のためにはハードウェアを使用した並列処理が必要不可欠であり、また簡単な計算のみで対応点探索を行う必要がある。このためにはエピポーラ線を求めることなく、また画像の射影変換を行うことなく画素単位での対応を検出する必要がある。

エピポーラ線を求めずに対応点探索を行うためには二次元方向に対して対応点探索を行う必要があり、一次元方向のみに変化するような投影パターンでは正確な対応点の検出は困難である。パターンの変化の方向に垂直な方向には同じパターンが並んでおり、この方向の対応点検索はもともと対称物体表面に存在していた模様依存するためである。提案手法では二次元方向に対する対応点探索を正確に行うた

めに、二次元的なランダムパターンを投影パターンとして用いる。ここでは、「ランダム」とは「何の規則性も持たない」ことを指す。

2.4 パターンの生成

前述した通り、投影パターンの周波数帯域は撮像系の周波数特性によって制限される。もしこの制限を越えるような高周波数成分を持つ投影パターンを使用した場合には撮影画像中に折り返し雑音が生じてしまい元の信号を完全に復元することができなくなってしまうため、左右カメラで撮影したパターンにずれが生じ、正確な対応点の検出を行うことができなくなってしまう。そこで、この制限を越えないような周波数成分のみを持つような投影パターンを作成することを考える。

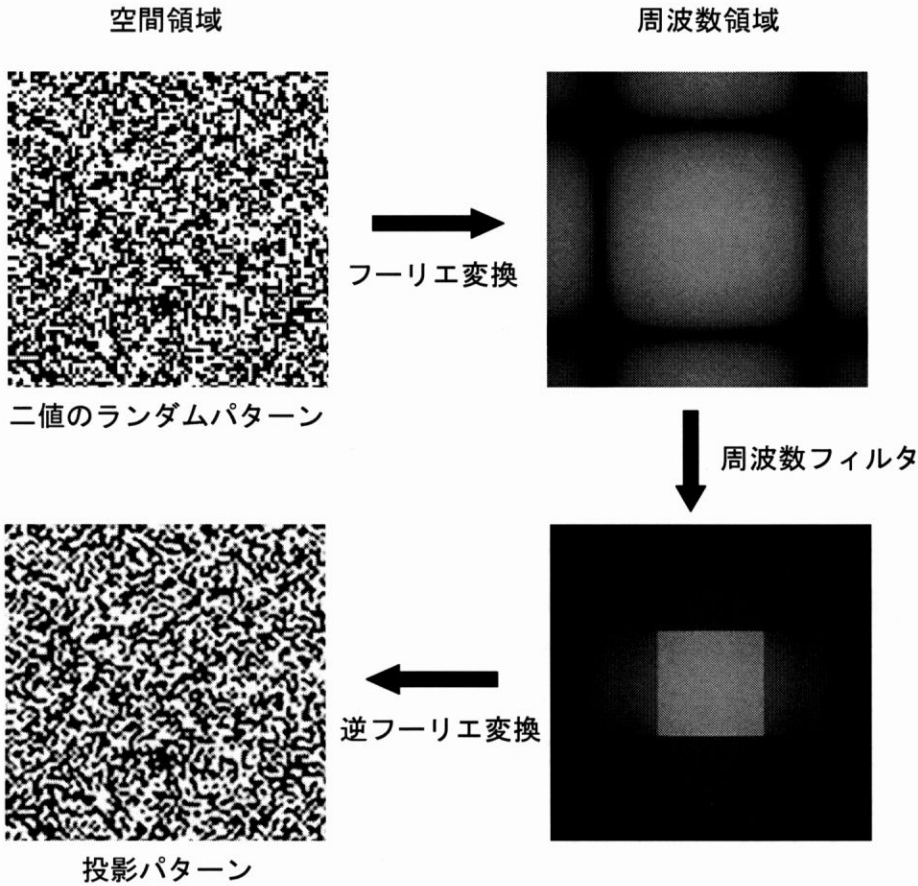


図 2.10 投影パターン

投影パターンの作成の流れは以下のようなになる。

1. 二値のランダムパターンの作成

ある大きさの白黒のブロックを二次元にランダムに配置することにより二値のランダムパターンを作成する。

2. フーリエ変換

周波数フィルタをかけるために周波数領域へと変換する。

3. 周波数フィルタ

水平・垂直方向それぞれに対してあらかじめ決定しておいたカットオフ周波数以下の周波数成分のみを通すローパスフィルタをかける。

4. 逆フーリエ変換

空間領域に戻して投影パターンとする。

この流れを図 2.10 に示す。後述するウィンドウサイズの最適化のため、白黒のブロックはある程度均一な密度で配置される必要がある。

最適な投影パターンとするためには投影パターンのカットオフ周波数を適切に設定する必要がある。カットオフ周波数を高くするほどより細かいパターンを作成することが可能となるが、折り返し雑音の影響を受けやすくなるため、カメラのナイキスト周波数に相当する周波数よりも低い値に設定する必要がある。本研究では、カットオフ周波数を次のようにして決定した。まず、カメラのナイキスト周波数を、ピンホールモデルによってプロジェクタの画素単位で考えた周波数へと変換する。これにより、プロジェクタ側におけるカメラのナイキスト周波数に相当する信号の周期を得ることができる。そして、この周期よりも大きい最小の偶数を投影パターンの基本的な信号の周期として考える。この周期を $2n[\text{pixel}]$ とする。基本的な周期が $2n[\text{pixel}]$ の信号は $n[\text{pixel}]$ の白黒のブロックを交互に並べることによって得ることができる。「基本的な」というのは、二値のパターンのような急峻に変化するパターンでは高周波数成分が含まれるためである。このことは見方を変えると、周期が $2n[\text{pixel}]$ の単一周波数の信号を $n[\text{pixel}]$ ピッチでサンプリングした、とも考えることができる。また、 $n[\text{pixel}]$ の白黒のブロックを交互にではなくランダムに並べることは、基本的な周期が $2n \times k[\text{pixel}]$ (k は整数) の信号を重ね合わせることに等しい。そこで、 $n[\text{pixel}]$ の白黒のブロックをランダムに並べて行き、このようにしてできあがった二値のランダムパターンに対して周期が $2n[\text{pixel}]$ となる信号の周波数 ($1/2n[1/\text{pixel}]$) をカットオフ周波数とすることによって周波数領域でローパスフィルタをかけ、これを空間領域に戻したものを投影パターンとする。周波数領域での

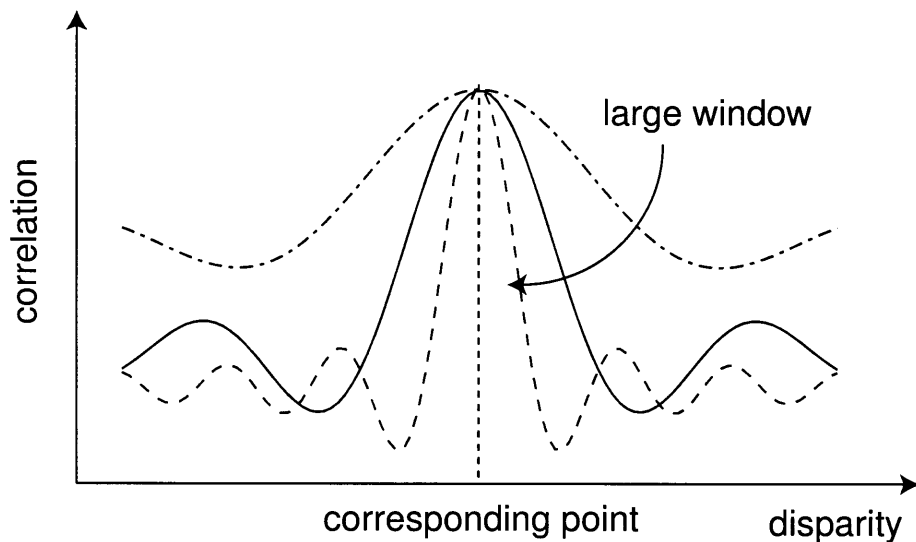


図 2.11 投影パターンの自己相関

ローパスフィルタは、二次元信号に対するサンプリング定理により、水平・垂直方向別々に適用する。

2.5 マッチングにおけるウィンドウサイズの最適化

前述したように、ステレオマッチングにおいては、ウィンドウの大きさは三次元計測精度に大きな影響を持つ重要なパラメータであり、これを適切なものに設定することは必要不可欠である。一般的にはウィンドウ内の特徴量の変化がある程度の値以上となる最小の大きさをステレオマッチングに用いる。従来手法のほとんどは、実験的に選ばれた、ある固定の大きさのウィンドウを使用している。しかしこの方法ではあらかじめ対象物体を測定して最適な大きさを発見する必要があるほか、特徴量の変化量の少ない部分の影響によって大きめのウィンドウが使用されることになる。特徴量の分布は対象物体上の場所によって異なり、局所的な輝度値の変動に合わせてウィンドウの大きさを変化させる手法 [21] [22] が提案されているが、反復計算を必要とするため、リアルタイムでの処理は困難である。提案手法では投影パターンに必要とされる性質を利用してウィンドウサイズを最適化することを考える。

提案手法においては投影パターンはステレオマッチングにおける特徴として利用されるので、投影パターン上の任意の位置から切り出したテンプレート画像について、これを投影パターン上を走査させたときに、テンプレートを切り出したその位置以外ではほとんど相関を示さない、という性質が必要とされる。もしこの性質を満足しない場合、本来の対応点以外の点で対応を示すことになり、正確な対応点の

検出はできない。そこで、投影パターンの自己相関を調べることによってこのような条件を満たすテンプレートの大きさを探しだし、これをステレオマッチングにおけるウィンドウサイズとして使用することを考える。自己相関の評価関数としては以下の式で表される相関係数を用いる。

$$R = \frac{\sum_i^P \sum_j^Q (M_T(i, j) - \mu M_T) \cdot (M(i+x, j+y) - \mu M)}{\sqrt{\sum_i^P \sum_j^Q (M_T(i, j) - \mu M_T)^2} \sqrt{\sum_i^P \sum_j^Q (M(i+x, j+y) - \mu M)^2}} \quad (2.7)$$

ここで、 $M_T(i, j)$ はテンプレート画像中の (i, j) 画素の輝度値、 $M(i, j)$ は投影パターン上の (i, j) 画素の輝度値、 μM_T および μM はそれぞれテンプレート画像内の輝度値の平均値、投影パターンから切り出したテンプレート画像と同じ大きさの領域内の輝度値の平均値を表す。

このようにして得られる相関係数の例を図 2.11 に示す。ウィンドウが小さいとき、S/Nが小さくなり類似したウィンドウが多く現れるが、ウィンドウが大きくなるにつれてS/Nが大きくなり、かつピークがより鋭くなる。提案手法では投影パターンの自己相関についてS/Nが2以上となる最小のテンプレート画像のサイズを探しだし、これをカメラの画素数に変換したものをステレオマッチングにおけるウィンドウサイズとして使用した。