

表面下散乱を抑制した三次元形状計測の高精度化

古瀬 達彦† 日浦 慎作† 佐藤 宏介†

†大阪大学 大学院基礎工学研究科

560-8531 大阪府豊中市待兼山町 1-3

Tel +81-6-6850-6371 furuse@sens.sys.es.osaka-u.ac.jp

あらまし:本研究ではスリット光投影法において間接反射成分のうち表面下散乱や相互反射を抑制することにより精度よく計測を行う方法を提案する。これにはまず直接反射成分と間接反射成分を分離する必要があるが、その方法としては空間的な高周波パターンを投影する手法を用いる。本研究ではスリットを点線状にすることによって高周波パターンとすることで高精度化を図る。また高周波パターンにより計測精度が向上することを示すだけでは、様々は種類の物体に対し、具体的にどのような高周波パターンを用いれば効果的であるのかはわからない。そのため M 系列を利用したスリット光を用いて、スリット光投影時の表面下散乱の影響についても解析を行い、最適な高周波パターンを求める。

キーワード: 三次元形状計測, 表面下散乱, スリット光

More Accurate 3D Scanning Method by Controlling Subsurface Scattering

Tatsuhiko FURUSE † Shinsaku HIURA † Kosuke SATO †

†Graduate School of Engineering Science, Osaka University

1-3 Machikaneyama-cho, Toyonaka, Osaka, 560-8531 Japan

Tel +81-6-6850-6371 furuse@sens.sys.es.osaka-u.ac.jp

Abstract In this paper, we propose a method to accurately measure the shape of object by suppressing indirect reflection such as interreflections or subsurface scattering. For this purpose, we use structured light with spatial high frequency component to separate direct reflection from indirect reflection. In this paper, we used dotted line pattern on a slit plane, thus it contains high frequency component which is rapidly attenuated through indirect reflection. However, only showing the improvement of 3D measurement by structured light is not enough to indicate how frequency pattern is efficient for various objects. Therefore, by using M sequences on a slit light, we analyzed the amount of subsurface scattering to seek the optimal frequency.

Keywords: 3D scanning, subsurface scattering, slit light

1 はじめに

物体の形状や寸法を計測することは工業や医療、服飾など様々な分野において必須の技術となっている。特に、物体の一部寸法だけでなく、物体全体の密な形状を得るために三次元形状計測へのニーズが高まっており、工業的な分野では品質検査、点検やリバースエンジニアリング、産業用ロボットの視覚などに用いられている。考古学の分野でも三次元形状計測は考古遺物の形状デー

タの保存などにも用いられており、またコンピュータグラフィックス (CG) や複合現実感 (MR) などの分野では実物のリアルな再現のために用いられる。

三次元形状計測には様々な手法があるが、画像を用いた手法では非接触で緻密な計測結果が得られる。中でもスリット光投影法 (光切断法) は計測可能な対象の範囲が広く、様々な分野で実用化されている。このような光を用いた計測では、大気は透明で計測対象は不透明かつ光を反射することを前提としている。しかし実際に

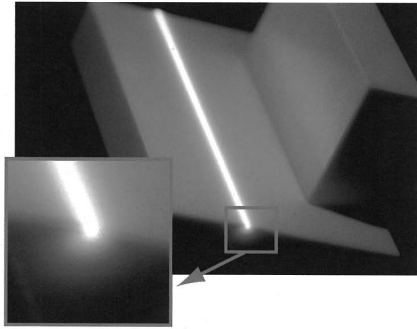


図1 光のにじみの様子

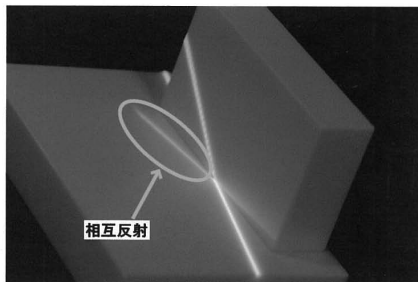


図2 相互反射の様子

は半透明の物体や透明な物体も多く存在する。大理石や皮膚などが典型的な半透明物体として知られているが、プラスチックや果実、野菜なども身近な半透明物体である。高精度に計測しようとするほど、つまり対象を大きく拡大して観察するほど物体内部の光の伝播の影響が大きくなり、透明度が見かけ上大きくなる。そのため図1のような光のにじみが観測される。このような半透明もしくは透明な物体において光を用いて高精度に計測を行うことは難しいのが現状である。

三次元形状計測を不安定にする他の要因として、乱反射の問題もある。表面に光沢があるような物体では図2のような相互反射が観測される。このような乱反射が観測される場合、本来光を投影した点とは異なる点を検出してしまうことがある。

2 直接反射成分と間接反射成分

能動的な三次元形状計測法のうち光を用いた方法では、投影した光が物体表面へ到達し、その表面で光が反射した位置をカメラで観測することによって三次元形状を計測している。つまり三次元形状計測では投影した光が到達した点だけが明るく輝くことを前提としている。しかし一般に、反射光には直接反射成分と間接反射成分がある。直接反射成分とは光源から出た光が物体の表面

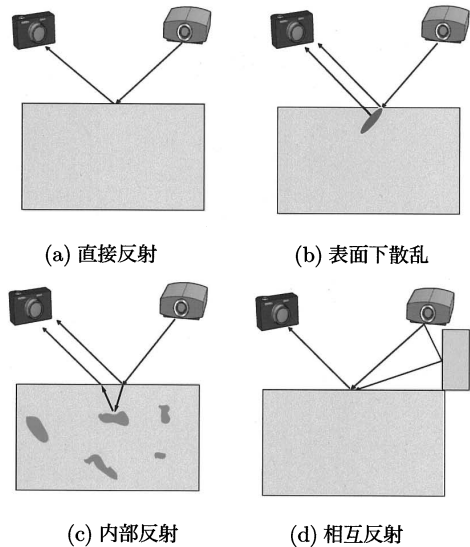


図3 直接反射成分と間接反射成分

で1回だけ反射して観測される成分である(図3(a))。一方、間接反射成分とは物体の表面付近で複数回反射して観測される成分である。間接反射成分が生じる原因は複数あり、さらにこれは表面下散乱(図3(b))や内部反射(図3(c))、相互反射(図3(d))に分類することができる。このような間接反射成分の影響によって、光が到達した点に対し明るく輝く点の位置がずれたり、大きく離れた点が画像上で誤検出されたりして計測精度が悪化する。

- 表面下散乱(図3(b))
物体の表面で反射するのではなく、物体の内部に光がしみこんでから反射する。
- 内部反射(図3(c))
物体の内部に光が入り込み、そこで起こる三次元的に複雑な反射をする成分。
- 相互反射(図3(d))
シーン内の物体の表面で複数回反射されてから観測される成分。

これらの間接反射成分は計測精度に影響を与える。そのため直接反射成分と間接反射成分を分離し、直接反射成分のみを利用すれば三次元形状を精度良く計測可能となる。T.Chen [2]らは偏光フィルタを用いて直接反射成分と間接反射成分を分離し、表面下散乱を含む物体に対して三次元形状計測を行った。またNayarら[3]は高周波パタンの投影を用いて、直接反射成分と間接反射成分を高速に分離した。またデジタルアーカイブの分野

では、大理石の石像などを計測することが多い。しかし大理石などの半透明な物体では表面下散乱などを含むため、光を照射すると物体の表面でにじむ。そのため光を用いた計測が難しい。そこで光のにじみの研究は盛んに行われている。Jensen ら [5] は BSSRDF に基づいて、表面下散乱のライトトランスポートのモデルを作成した。Godin ら [6] は大理石にスポット光を投影し、そのにじみとノイズについて解析を行った。Goesele ら [7] はレーザーと HDR (High Dynamic Range) カメラを用いて、物体の表面の各点でにじみの様子をとらえ、半透明物体の計測を行った。

これらの研究ではスポット光を照射したときの光のにじみについて研究されている。しかし、スポット光投影法では計測に時間がかかるためあまり実用的ではない。そこで本研究ではスリット光を投影したときの光のにじみについて解析を行い、間接反射成分の影響、特に表面下散乱の影響を抑制し精度良く計測する手法を提案する。Nayar らが示したように、空間的に高周波なパターンを投影することによって直接反射成分と間接反射成分を分離することができる。本研究ではこれを応用し、スリットを点線状にすることによって空間的に高周波パターンを投影したものとみなすことができる。これによって間接反射成分を分離し、精度の良い計測が可能となる。

3 高周波スリット光を用いた計測

間接反射成分に対して頑健なスリット光計測法について述べる。提案手法において、三次元形状計測の原理はスリット光投影法と同様である。

従来のスリット光投影による計測では半透明物体などでは計測精度が悪いことがある。精度が悪くなる原因は様々あるが、原因の一つとして内部反射や表面下散乱などの間接反射成分の影響によるものがある。そのため精度良く計測を行うには直接反射成分と間接反射成分を分離し、直接反射成分のみを抽出する必要がある。Nayar ら [3] によると空間的に高周波パターンを投影することによって直接反射成分と間接反射成分の分離が可能であると述べられている。そこでスリット光を図 4 のように点線状にすることによって空間的に高周波パターンとし、直接反射成分と間接反射成分を分離して精度良く計測する方法を提案する。

まず図 5 のように座標軸を定める。ここでは簡単のため、取得画像上でスリットは水平に観測されているものとする。つまり $y = y_i$ で x 軸に平行に点線スリット光が観測される。また $f(x)$ をスリット上 ($y = y_i$) で座標 x に沿った入射光強度の分布、 $PSF(d)$ を点像強度分布関数 (Point Spread Function) とする。

点像強度分布関数は物体に点光源を投影したとき

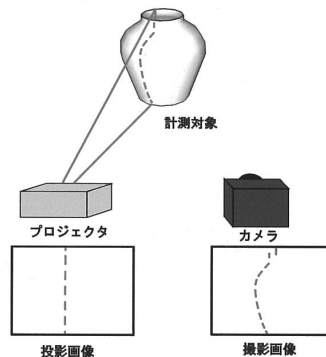


図 4 提案手法の概念図

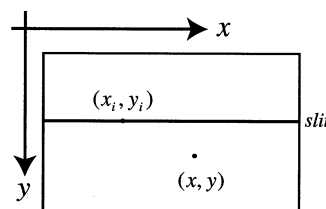


図 5 座標設定

の、物体表面でのにじみを表現する関数である。より一般的に言うと、システム理論におけるインパルス応答に相当する。ここでは 2 次元的に等方的な距離の関数とする。すると任意の点 (x, y) での輝度値 $L(x, y)$ は

$$L(x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} PSF(\sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2}) f(x_i) dx_i \quad (1)$$

と表せる。ここで $\Delta y = y - y_i$ とすると、

$$L(x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} PSF(\sqrt{(x-x_i)^2 + \Delta y^2}) f(x_i) dx_i \quad (2)$$

となる。ある Δy に対して

$$PSF(\sqrt{(x-x_i)^2 + \Delta y^2}) = PSF_{\Delta y}(x-x_i) \quad (3)$$

とおくと、

$$L(x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} PSF_{\Delta y}(x-x_i) f(x_i) dx_i \quad (4)$$

となり畳み込みの式になる (図 6)。一般に $PSF_{\Delta y}$ は非負の関数であり、 $L(x, y)$ は $f(x_i)$ の重みつき平均となるため、この畳み込み演算の結果、 $L(x, y)$ の高周波成分が減衰する。

3.1 直接反射成分と間接反射成分の分離

まず投影するデューティー比 50 の点線のプロジェクタ画素の大きさを単位とした周期を T とする。高周波

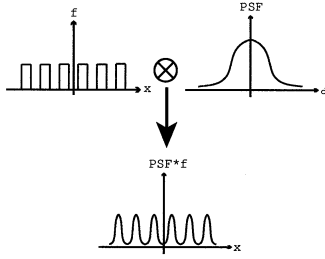


図6 畳み込みの概念図

スリット光をスリットに沿う方向に1画素ずつシフトしながら T 回撮影する。これによって観測画像上の各ピクセルで T 個の輝度値を得る。ここでは矩形波の高周波パターンを投影しているが、高調波成分は表面下散乱などにより減衰され観測されないと仮定すると、点線は近似的に正弦波を投影しているものとみなせる。よって各ピクセルに対して時系列的に見ると、輝度値の変化は正弦波の形になっているとみなせる。そこで最小二乗法によって正弦波関数の当てはめを行う。当てはめる関数を $K \sin(\theta + \phi) + f_{\text{off}}$ とする。ここで n をフレーム番号 ($0 \sim T-1$) とすると、 $\theta = 2\pi n/T$ である。最小二乗法により求めるのは振幅 K と位相 ϕ 、オフセット f_{off} である。直接反射成分と間接反射成分を分離するのに必要となるのは得られた正弦波関数の最大値と最小値である。最大値に直接反射成分と間接反射成分が含まれ、最小値に間接反射成分のみが含まれる。そのためこれらの差 $2k$ をとることによって直接反射成分のみを抽出することができる。

3.2 スリットの抽出

三次元位置はプロジェクトの画素とカメラの画素の対応関係から求められる。しかし、画素は離散的なデータであるので、量子化誤差などの影響によって精度良く三次元位置を算出することができない。そこで精度良く算出する方法としてスリットの重心を求めることによりスリット座標をサブピクセル単位で決定する方法がある。スリットの照射位置を移動させたときのあるピクセルの輝度値の変化は図7のようになる。スリット光の影響を受けていない画素でも様々な外乱により画素値が0でないことがあるので、閾値以上の部分で重心の位置 g を求める。これを式にすると以下の式になる。

$$g = \frac{\sum_{I[p,n] > th} I[p,n] \cdot n}{\sum_{I[p,n] > th} I[p,n]} \quad (5)$$

$I[p,n]$: 走査線の値が n のときのピクセル p での輝度値

th : 閾値

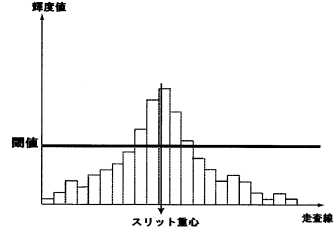


図7 走査線が変位したときの輝度値の変化

これによって画素単位より細かくスリット座標を算出することが可能となる。

4 M系列を用いたスリット光のにじみの解析

パタン光を用いて形状計測を行うと、投影したパタン光が物体の表面でにじんでしまうことがある。これは表面下散乱 (図3(b)) や内部反射 (図3(c)) のような間接反射成分によって起こる。計測誤差の原因となる間接反射成分は高周波パタンの投影によって分離が可能である。しかし、具体的に高周波とはどのような周波数を用いるのが望ましいのかは分かっていない。そこで入射光と観測画像の関係を線形なシステムと見なし、制御・システム理論的に周波数領域で応答を解析する。つまり投影パターンを入力、カメラでの観測値を出力とするようなシステムを考え、この入力として長さ32のM系列を1周期とするスリット光をシフトしながら投影した。カメラで観測された値と投影したパタンの間には伝達関数が存在する。これを式にすると以下ようになる。

$$y_m = \sum_{n=1}^{32} g_{m-n} x_n \quad (n = 1 \dots 32) \quad (6)$$

x_n : 投影パターン

y_n : カメラでの観測値

g_n : 伝達関数

式6の両辺をフーリエ変換すると右辺の畳み込みは積に変換される。

$$Y_k = G_k X_k \quad (k = 1 \dots 32) \quad (7)$$

X_k, Y_k, G_k はそれぞれ x_n, y_n, g_n をフーリエ変換したものである。式7により伝達関数 G_k が求められる。スリット中心でのゲイン特性と周辺部でのゲイン特性の差が大きいほど直接反射成分と間接反射成分を分離しやすい周波数といえる。

5 実験と結果

システム概観を図9に示す。実験に使用した機材は表1に示す。計測は暗室環境下で行った。プロジェクト

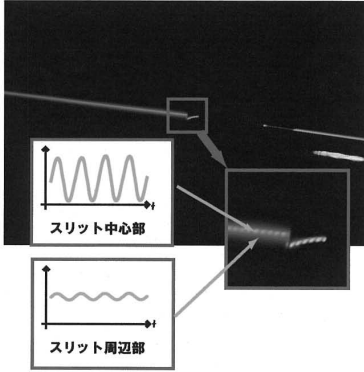


図8 スリット投影時の輝度変化

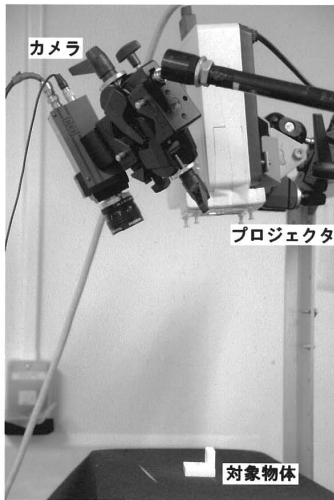


図9 システム概観

の投影レンズの前に凸レンズ（焦点距離 33.3mm）を追加することで、対象物体にパタン光が合焦するようにした。

5.1 計測結果

物体上でのプロジェクタのピクセルの大きさは 5.88pixel/mm である。従来のスリット光、高周波スリット光を用いて計測を行った。高周波スリット光として周期 6 ピクセルの点線を投影した。計測対象を図 10、図 11 に示す。計測対象の素材はジルコニアセラミックスである。

図 10 の計測対象をそれぞれ従来のスリット光、高周波スリット光を用いて計測を行った結果を以下に示す。図 12 が従来のスリット光での計測結果とその断面図である。次に、図 13 が提案手法である高周波スリッ

表 1 実験機材

機材	仕様
CPU	Pentium 4 2.53 GHz
OS	Vine Linux 3.2
メモリ	1GByte
カメラ（計測用）	SONY CV-340 解像度 640 × 480 pixel 8bit
カメラ（解析用）	Apogee Alta U4000 解像度 2048 × 2048 pixel 16bit
プロジェクタ	Epson EMP-1710 解像度 1024 × 768 pixel 16bit

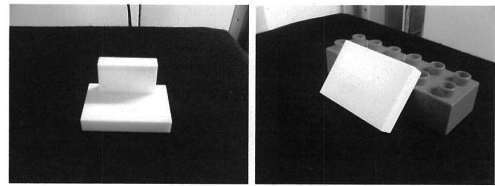


図 10 計測対象 1

図 11 計測対象 2

ト光を用いた計測の結果と断面図である。それぞれの断面図で円の部分に注目すると、違いが見られる。

図 11 の計測対象をそれぞれ従来のスリット光、高周波スリット光を用いて計測を行った結果を以下に示す。先ほどと同じように、図 14 が従来のスリット光での計測結果とその断面図である。次に、図 14 が高周波スリット光を用いた計測結果とその断面図である。それぞれの断面図での円の部分の部分に注目する違いが見られる。

5.2 フーリエ変換による解析

式 7 によりにじみの少ない素材である紙とにじみの大きい素材である発泡スチロールの伝達関数のゲイン特性をそれぞれ求めた。グラフ中の周期 (Period) とはプロジェクタ画素における 32 ピクセルの範囲の正弦波の波数を表す。例えば、1 周期とは 32 ピクセルの間にちょうど 1 周期となる正弦波を表す。また実際の投影像との関係は 5.88 pixel/mm であるので、1 周期は物体上では $\frac{32}{5.88} = 5.44 \text{ mm}$ となる。

6 考察と課題

6.1 計測についての考察

従来のスリット光を用いて計測を行った場合、相互反射の影響によって精度良く計測できていない部分がある (図 12)。相互反射による成分はプロジェクタから投影

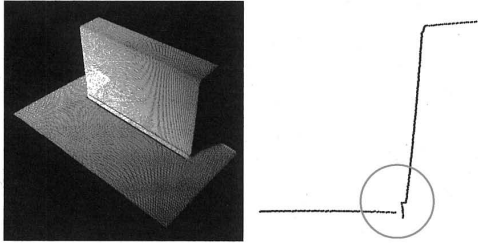


図 12 従来のスリット光での計測結果とその断面図

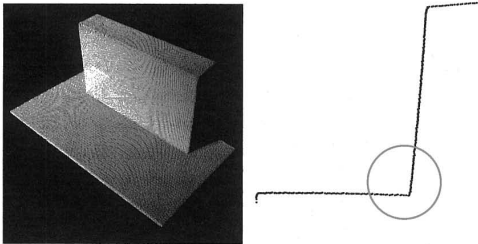


図 13 高周波スリット光での計測結果とその断面図

された光が物体の表面で反射し、その光が物体の別の場所に当たってからカメラに観測される。三次元位置はプロジェクタからの投影光とカメラでの観測方位の交点となるため、投影光が複数回反射して観測された場合、本来の三次元位置とは異なる位置になる(図 22)。一方、高周波スリット光を用いた場合、相互反射の影響を抑制して計測できている(図 13)。相互反射などの間接反射成分は高周波パターンを投影することによって直接反射成分と分離できるため、高周波スリット光を用いて計測を行った場合、相互反射の影響を抑制し精度良く計測できている。

エッジの部分の計測結果であるが、従来のスリット光を用いて計測を行った場合、エッジの部分で計測誤差が発生しているのがわかる(図 14)。これはプロジェクタから投影された光が物体の内部に入り、物体内部から反射するため、投影された場所とは異なる点から反射したように観測される。そのため本来の三次元位置より物体の内側に入ったところとして計測されてしまうことによる(図 23)。一方、高周波スリット光を用いて計測を行った場合先ほどと同じように、間接反射成分を抑制できているため、精度良く計測できていることがわかる。

6.2 表面下散乱の解析についての考察

直接反射成分と間接反射成分を分離するのに適切な周波数とはスリット中心部ではゲイン特性の値が大きく、周辺部ではゲイン特性が小さくなっているような周波数成分である。図 21 を見ると、高周波成分ほどスリット

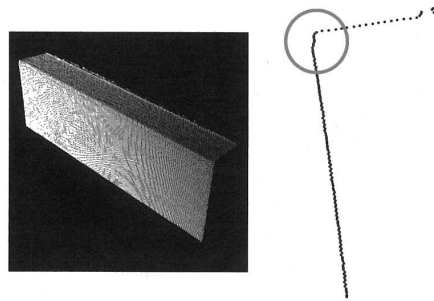


図 14 従来のスリット光での計測結果とその断面図

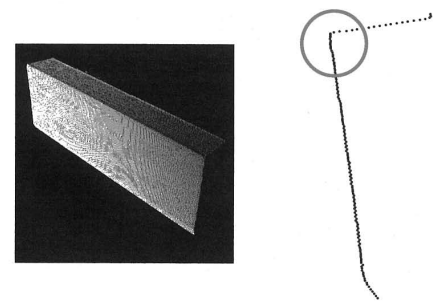


図 15 高周波スリット光での計測結果とその断面図

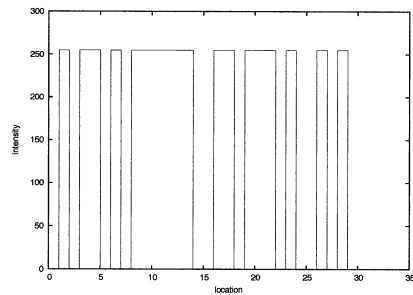


図 16 投影した M 系列

中心から離れるとゲイン特性がより減衰している。このことより空間的に高周波なパターンを投影することによって間接反射成分の影響を抑制しているため、より正確にスリットの位置を検出できる。しかし周波数が高い場合、投影するパターンが細くなりスリットをシフトしても直接投影されている部分でも常に明るい状態になり、カメラでその変化を観測できなくなり適切ではない。また逆に周波数が低い場合ではスリットをシフトしても、明るさが変化しない部分が存在するので適切ではない。

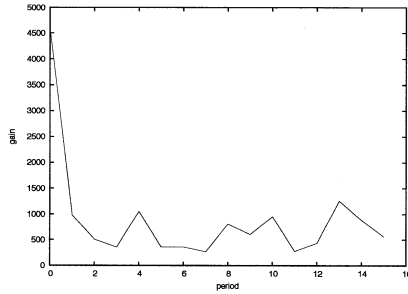
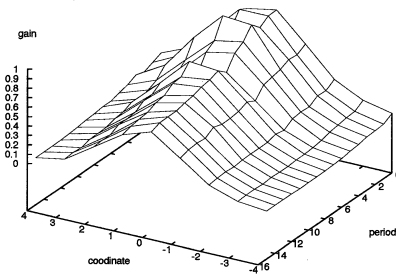


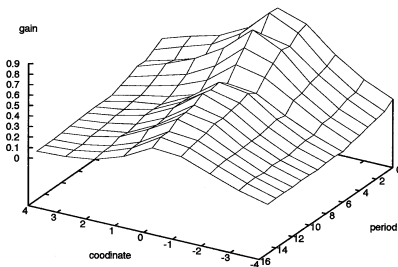
図 17 投影した M 系列のフーリエ変換したもののゲイン特性

7 結論

本論文では相互反射や表面下散乱が生じる物体の高精度な形状計測を目的とし、三次元計測の 1 手法であるスリット光投影法を改良する手法を提案した。

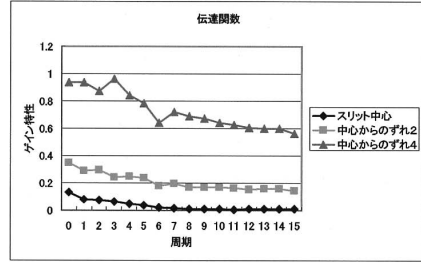


(a) 紙

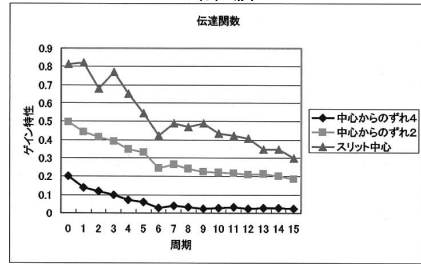


(b) 発泡スチロール

図 18 伝達関数



(a) 紙



(b) 発泡スチロール

図 19 伝達関数でのゲイン特性

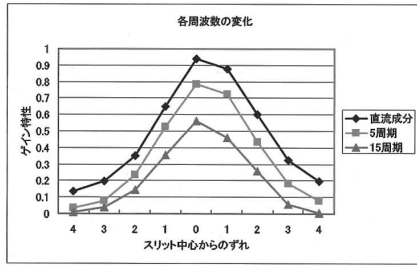
提案手法ではスリット光を点線状にして投影することによって間接反射成分の影響を抑制した。その結果従来のスリット光投影法による計測より精度良く計測できるということが示された。

また M 系列を利用したスリット光を用いて、スリット光投影時の表面下散乱について解析を行った。解析手法としては投影パターンを入力とし、撮影して得られた輝度値を出力とするようなシステムを考え、フーリエ変換を用いて解析を行った。解析の結果、計測に適した高周波パターンを見つけることができた。

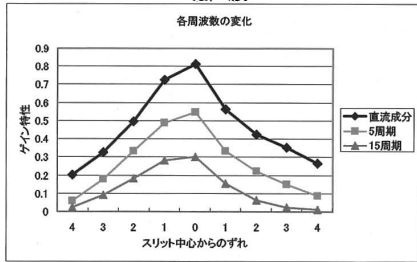
今後の課題を以下に述べる。半透明物体でも透明度が高い物体では計測できていないので、より透明度の高い物体でも精度良く計測できるような工夫が必要である。また現在のシステムでは従来のスリット光投影法に比べて、計測に時間がかかるため、実用的とは言い難いので、高速化できるようなアルゴリズムを考えなければならない。

参考文献

- [1] 井口 征士 佐藤 宏介”三次元画像形状計測” 昭晃堂, 1990
- [2] T.Chen, H.P.A.Lensch, C.Fuchs, H.P.Seidel, "Polarization and Phase-Shifting for Scanning of Translucent Object," Proc. CVPR2007, pp. 1-8, 2007.

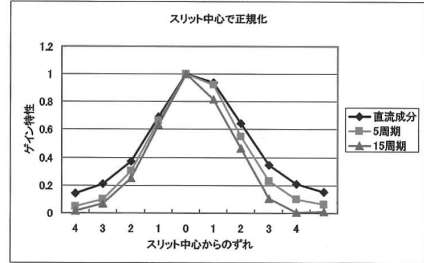


(a) 紙

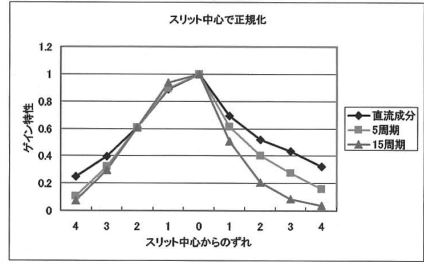


(b) 発泡スチロール

図20 各周波数でのゲイン特性の変化



(a) 紙



(b) 発泡スチロール

図21 各周波数成分のゲイン特性をスリット中心のゲイン特性で正規化

- [3] S.K.Nayar, G.Krishnan, Grossberg,M, and Rasker.R "Fast Separation of direct and global Components of a Scene using HightFrequency Illumination" Transaction on Graphics,vol.25, no 3, pp.935-943, 2006
- [4] M.Levoy, K.Pulli, B,Curless "Digital Michelangelo Project:3D Scanning of Large Statues" SIGGRAPH2000 pp131-144
- [5] H.W.Jensen, S.R.Marschner, M.Levoy,and P.Hanrahan "A Practical model for Subsurface Light Transport" SIGGRAPH2001.pp 511-518
- [6] G.Godin, M.Rioux, J.A.Beraldin "An assessment of laser range measurement on marble surfaces" Conference on Optical 3D Measurement Techniques 2001 pp49-56
- [7] M.Goesele, H.P.A.Lensch, J.Lang, C.Fuchs,H.P.Seidel "DISCO - Acquisition of Translucent Object" ACM SIGGRAPH 2004 pp835-844
- [8] 馬場 充, 小西忠孝, 半田 久志, "スリット光投影法による柱状鏡面物体の形状測定法", 電子情報通信学会論文誌, Vol.J83-D-II, No.8, pp. 1773-1782, 2000.
- [9] 那須督, 日浦慎作, 佐藤宏介, "直接成分と間接成分の分離に基づく照明光の伝播解析," 情報処理学会研究報告 2007-CVIM-159, pp. 153-160, 2007.

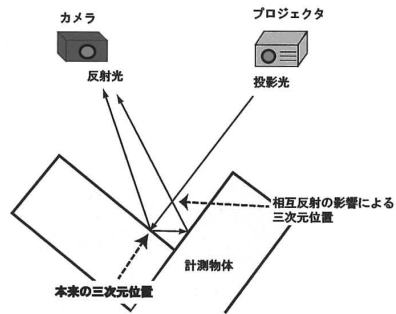


図22 相互反射による影響

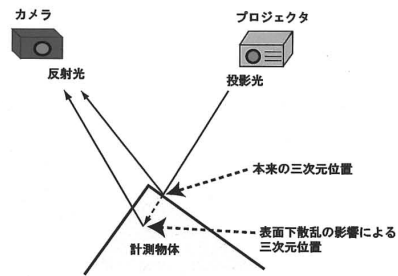


図23 表面下散乱の影響