

高周波照明法における高周波パターンの評価

鈴木 瑛斗^{†1,a)} 楽 詠瀬^{†1} 金子 直史^{†1} 鷲見 和彦^{†1}

概要：従来、物体の表面反射光と内部散乱光を分離する手法に用いられる高周波照明にはチェッカーパターンが用いられてきた。しかし、チェッカーパターンの照明には、撮影対象にパターン投影する際に焦点ずれがあると、パターン輪郭のぼけによるアーティファクトが発生するという周波数特性に起因する課題がある。本研究では、高周波照明としてチェッカーパターン以外の高周波パターンを用いれば、非合焦時の周波数特性が変化することに着目した。そして、チェッカーパターンに代わるパターンとして、高周波照明として成り立つ条件から検討した、風車状の図形を並べたウィンドミルパターンの利用を提案した。照明パターンの性能を比較するために、高周波パターンが焦点ずれなどで平滑化した際に、元のパターン形状をどれだけ保つかを評価する関数を定義して、ウィンドミルパターンがチェッカーパターンに比べて焦点ずれに頑健であることを示した。また、実際にウィンドミルパターンとチェッカーパターンをシーンに投影して、得られた直接反射成分に対してフーリエ解析を行い、ウィンドミルパターンを用いた高周波照明ではアーティファクトを低減することを実証した。

キーワード：高周波照明、チェッカーパターン、ウィンドミルパターン、フーリエ変換

1. はじめに

一般的にカメラで観測される画像は、図1に示すように、光源から出発した光が様々な経路で反射や散乱を繰り返し、カメラ内のイメージャー上に結像した結果である。例えば、光沢のある金属表面では光が一度だけ反射する鏡面反射が発生し、表面がざらついた面では反射方向が拡散する拡散反射が発生する。また、光が散乱するような粒子を含む媒質中では一度だけ散乱する単一散乱と何度も粒子に光が衝突する多重散乱が発生する[1]。

反射や散乱などの光学現象が混成すると、撮影シーンか

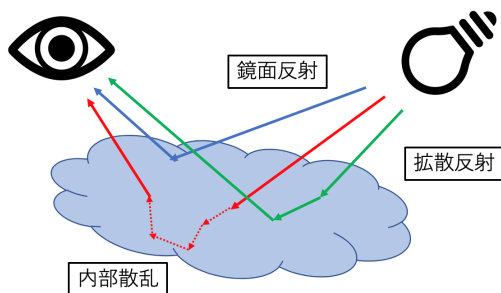


図1: 様々な光の経路

ら特定の光の成分を分離するのが困難になる。そのため、光の伝播モデルの利用や光学系など撮影方法を工夫する光の成分分離法が提案された。Michael と Nayar は荒い面における拡散反射の反射率をモデル化した [2]。Narasimhan らは媒質中の単一散乱をモデル化することで散乱媒質中の散乱光の分離を可能にした [3]。カメラの光学系を工夫したものでは、撮像レンズの光学系を平行にコリメートして物体を透過してくる透過光を撮影することで、回折光を陰影として撮像するシュリーレン撮像法がある [4]。Kim らは撮影シーンの光線空間情報を記録できるライトフィールドカメラを用いて、物体表面の鏡面反射と拡散反射と内部散乱を分離した [5]。複雑な計算や特殊な光学系が必要ない光の分離の手法として Nayar らが提案した高周波照明法 [6] がある。この手法は、プロジェクタを用いて細かいチェッカーパターンを撮影シーンに投影し、パターンの位相をシフトすることで、鏡面反射や拡散反射などの直接反射成分と表面下散乱などの間接成分を分離した。

高周波照明法は特殊な光学系やキャリブレーションの必要ない比較的簡易な手法で、この原理を拡張した手法 [7][8][9] が多く提案されてきた。Lamond らは半球状のスクリーンにチェッカーパターンを投影して物体に写すことで物体表面の鏡面反射と拡散反射を分離した [7]。Takatani らは高周波照明法と円偏光板を用いることで撮影シーンから鏡面反射と拡散反射、単一散乱と多重散乱の4つの成分を分離

^{†1} 青山学院大学
〒252-5258 神奈川県相模原市中央区淵野辺 5-10-1
^{a)} suzuki.eito@vss.it.aoyama.ac.jp

した [8]. Tanaka らは高周波照明の周波数を変調させて対象物体に照射することで、内部の点拡がり関数を推定して特定深度のスライス面の像を鮮明に可視化した [9].

高周波照明の位相シフトの回数を減らす研究として, Subpassa らは高周波パターンに主成分分析を利用して得られた高周波パターンを用いることで単一画像から直接反射成分と間接成分を分離した [10].

また, 体積散乱を発生させる媒質の内部可視化は現在でも困難な問題であり, Mukaigawa らは高周波照明の原理を利用してストライプ状の高周波パターンを用いて, 体積散乱を発生させる物体に照射し, 単一散乱と多重散乱のライトトランスポートを解析した [11]. Tanaka らは焦点距離を無限遠に持つテレセントリックレンズと高周波照明法を組み合わせた平行高周波照明を用いて, 多重散乱を発生させる媒質中の物体のシルエットを鮮明に撮像した [12]. この手法では照明の空間的な広がりやを制御して散乱の影響を受けにくい赤外線を用いて透過光と散乱光を分離した. しかし, 奥行きのある物体は多重散乱を発生するため高周波照明の高い周波数成分が失われてしまうという課題が残った.

これらの手法は, いずれも照明に高い空間周波数を付加して, 直接成分に対応する光を高周波照明をハイパスフィルタとして作用することで間接成分と分離する. しかし, 照明が高周波成分を失うような環境や条件では高周波照明の有効性が低くなることが課題である. そこで本研究では高周波パターンの平滑化に対する頑健性の評価関数の提案と, チェッカーパターンよりも焦点ぼけに頑健なウィンドミルパターンを提案した.

2. 高周波照明法の原理

Nayar らの提案した高周波照明法 [6] の原理は, 高い空間周波数を持つ細かいチェッカーパターンを撮影シーンに投影し, 撮影した画像の輝度値の差分を計算合成することで光の成分を分離するものである. 照明をチェッカーパターンで明るい部分と暗い部分に分けると, 光が当たる部分は直接反射する光と物体の表面下で散乱する光によって輝度値が高くなる. 一方で光が照射されていない部分はチェッカーの隣接する明るい画素からの間接的な経路の表面下散乱などの成分による輝度値が観測される.

この表面下散乱による間接的な光は光が当たる部分と当たらない部分に一樣の強度で広がるため, 投影した高周波照明の位相を図 2 のようにシフトさせて撮影を繰り返すことで直接反射成分の輝度のみが変化する画像が得られる. 最終的に撮影した全画像の最大値と最小値の強度の差分を合成することで直接反射成分と間接成分を分離する.

ここでカメラで通常撮影したシーンの画像のピクセル i における輝度値を $L[i]$ で表すと, 直接成分 $L_d[i]$ と間接成分

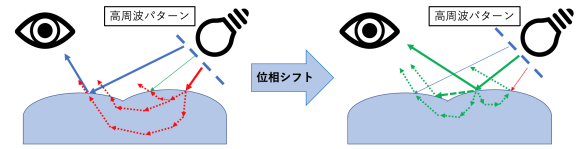


図 2: 高周波パターンの位相シフト

分 $L_g[i]$ を用いて次の式で表せる.

$$L[i] = L_d[i] + L_g[i] \quad (1)$$

また, チェッカーパターンの光の透過率は 50% で, 間接成分は光の透過率に比例して強度が変化するため実際の間接成分の輝度値の強度は通常の照明の 50% となる.

ここで最大輝度値を $L_{max}[i]$, 最小輝度値を $L_{min}[i]$ とすると, 直接成分 $L_d[i]$ と間接成分 $L_g[i]$ を用いて次の式で表せる.

$$L_{max}[i] = L_d[i] + \frac{1}{2}L_g[i] \quad (2)$$

$$L_{min}[i] = \frac{1}{2}L_g[i] \quad (3)$$

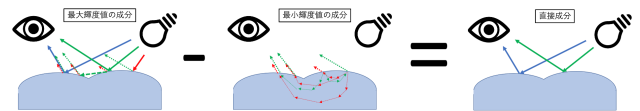


図 3: 光のコンポーネントの分離

これらの関係から直接成分 $L_d[i]$ と間接成分 $L_g[i]$ は図 3 に示すような次の式で表せる.

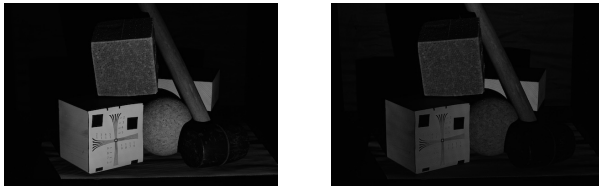
$$L_d[i] = L_{max}[i] - L_{min}[i] \quad (4)$$

$$L_g[i] = 2L_{min}[i] \quad (5)$$

2.1 プロジェクターの焦点ぼけの問題点

Nayar らは高周波照明のチェッカーパターンの格子サイズを変化させて観測される間接的な光の強度変化を検証した [7]. 検証から撮影シーン中に投影する高周波パターンよりも著しく高い空間周波数を持つ鏡面のような物体がなければ, 投影するチェッカーパターンの空間周波数の高さにかかわらず間接成分の光の強度には大きな変化がないことを検証した.

また, 標本化定理より撮影シーンの空間周波数の二倍の空間周波数を持つパターンを高周波照明として利用すれば, 直接成分にそのシーンの空間周波数を再現ができることから高周波パターンはシーンに許容される範囲でより高い空間周波数を選択することが理想だと考えられる. しかし, 高周波パターンをプロジェクターで奥行きのあるシーンに投影すると, 投影レンズの焦点ぼけによってパターンにぼけが生じる. この時入力されたチェッカーパターンは矩形

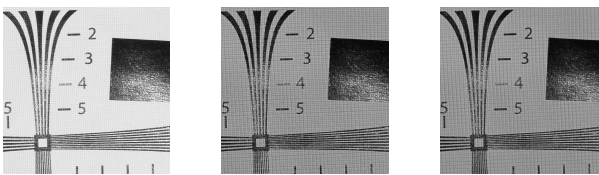


[1] 手前側に合焦

[2] 奥側に合焦

図 4: 照明の合焦位置による直接反射成分の違い

波であるが、焦点ぼけの点拡がり関数によって畳み込まれ、信号は平滑化される。信号が平滑化すると信号の最大値と最小値の差が小さくなり図 4 に示すように手前と奥で極端に信号強度のバランスが崩れる。



[1] 通常照明

[2] 表面に合焦

[3] 5cm 奥に合焦

図 5: 照明の焦点ぼけによるアーティファクト

プロジェクタで高周波成分が失われたパターンが繰り返すことで、図 5 に示すような直接反射成分に格子状のアーティファクトが発生し、画像の分解能を低下させる原因となる。さらに多重散乱を発生させる媒質中では、透過光と散乱光の信号が混成しやすく、光の成分分離をより困難にさせる問題がある。この問題を避けるためには、点拡がり関数による畳み込みの影響を小さくするためにパターンマスクの透過部分の距離を離すか、チェッカーの格子サイズを大きくさせる必要がある。しかし、パターンマスクの透過部分の距離を離すと光を透過させる面積の割合が低下するため、撮影枚数が増加し光の成分の正則化が必要となる。そこで本研究では、チェッカーパターンに代わる透過と非透過の面積比率が 1:1 を満たし、プロジェクタの焦点ぼけに頑健なパターンを探索する。

3. 提案手法

本研究では、チェッカーパターンは単一の二次元矩形波から構成されるために、焦点ぼけが格子状のアーティファクトを発生させると考えた。そこで複合的な矩形波で構成された高周波パターンを高周波照明の成り立つ条件から検討した。

3.1 高周波パターンとなる条件

高周波照明を構成する高い空間周波数のパターンにはいくつかの制約がある。

- 位相の変化が可能な画素サイズのパターン
- 照明は白か黒の矩形波となるバイナリパターン
- 単位図形が全体に均一繰り返されたパターン

高周波パターンは矩形波で位相シフトが可能な画素サイズで、位相のシフト量は標準化定理より矩形波の周期の半分以下である必要がある。また、Nayar らは検証により照明の強度と間接成分の光の強度が比例することを示した [7]。そのため、パターンは細かい単位図形が均一に並べられたパターンであれば照明強度が線型に変化するため、どの位置においても照明の強度が線型に変化することを保証する。以上の制約を満たす最も単純な図形としてチェッカーパターンが用いられてきた。チェッカーパターンは最小の構成単位が 2 画素四方のサイズのものであるため最も高い空間周波数のパターンを投影できる。しかし、実際には光の透過部分のサイズが小さくなるほど空間の奥行きによってプロジェクタの焦点位置がずれてパターンの平滑化が発生し、空間周波数が低下するため実用的でない。そのため実際には 5 から 8 画素四方のサイズのチェッカーパターンが利用される。

また、本研究では光量の差による影響を無くしてチェッカーパターンと比較評価をするため、光の透過面積と非透過面積が 1:1 の光の透過率が 50% のパターンという制約を加えて撮影シーンに許容される周波数特性が高いパターンを検討する。

3.2 ウィンドミルパターンの提案

高周波パターンの制約に当てはまり、焦点ぼけによる影響により頑健なものとして図 6 に示すウィンドミルパターンを検討する。

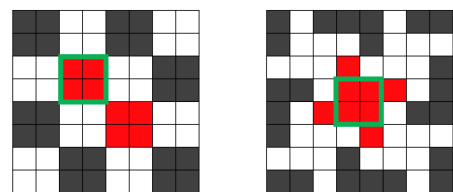


図 6: チェッカー (左) とウィンドミル (右)

図 6 の緑で囲った部分が比較の際に基準とする中心核とする。アーティファクトはこの中心核の形状が焦点ぼけで平滑化されて面積が小さくなり、隣接する格子との明暗差の谷が重なる結果発生すると考える。そこでパターンは標準化定理と制約に従っていれば良いため、点対称図形である風車状のウィンドミル図形を並べた高周波パターンを考案した。

ウィンドミルパターンは複合的な矩形波で構成される高周波パターンであるため、平滑化による輝度の谷がチェッカーよりもまばらで、アーティファクトを発生しにくいと考える。ただし、制約としてチェッカーパターンとは異なる

りウィンドミルパターンは中心核の辺の半分の画素のサイズの面を中心核の周囲に持つため偶数画素四方のものしか作成ができない。

また、ウィンドミルパターンはチェッカーパターンの正方形を 45 度傾けた図形を敷き詰めたものと見做すこともできるため、チェッカーパターンとウィンドミルパターンの平滑化に対する頑健性を定量的に比較する必要がある。そこで焦点ぼけに対する頑健性を定量的に比較するために次の評価関数を定義する。

3.3 評価関数の提案

提案する評価関数はプロジェクターの合焦面前後のずれによる焦点ぼけで平滑化が発生する際に元の信号強度を保つ度合いを数値化する。

高周波パターンを表す $m(u, v)$ と畳み込み関数 $f(x)$ を用いて畳み込まれたパターン $b(u, v)$ を次の式で表す。

$$b(u, v) = f(m(u, v)) \quad (6)$$

ここで畳み込み関数 $f(x)$ のカーネルが点拡がり関数を想定した、正規化されたガウシアンフィルタを用いれば次の式が成り立つ。

$$\sum_u \sum_v b(u, v) = \sum_u \sum_v m(u, v) \quad (7)$$

ただし、実際の畳み込み処理では画像の周辺部でパディング処理を施すため、実験時にはパディングの影響を受けない周辺部を除いた範囲をサンプリングして評価を行う。

式 (7) より、 $m(u, v)$ とガウシアンフィルタによる畳み込み処理した $b(u, v)$ の総和は変化しないため、各要素の分散を計算することで元のパターンの形状の保持性を数値化できる。そのため高周波パターン $m(u, v)$ の平均値を各要素に持つ $\bar{m}(u, v)$ と正規化されたガウシアンフィルタによる畳み込み関数 $f(x)$ 、高周波パターン $m(u, v)$ を畳み込んだ画像 $b(u, v)$ を用いて、照明の焦点ぼけによる平滑化に対する頑健さの評価関数 $Score$ を以下のように定義した。

$$Score(b(u, v)) = \frac{1}{uv} \sum_u \sum_v (b(u, v) - \bar{m}(u, v))^2 \quad (8)$$

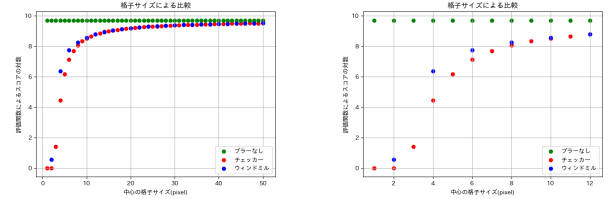
この評価関数 $Score$ の値が高いほど、照明の焦点ぼけによって平滑化が発生しても元のパターンの形状を保つと言える。

4. 実験

4.1 格子サイズの変化における検証

事前実験として格子サイズの違いにより焦点ぼけへの頑健さがどのように変化するのか評価関数を用いて比較した。格子サイズを変化させながら生成したパターン画像に

対してカーネルサイズ 15 画素四方のガウシアンブラーを適用し、400 画素四方の画像 $b(u, v)$ に対してを適用し、定義した評価関数の対数 $\log(Score(b(u, v)))$ を用いてグラフにプロットしたところ図 7 の結果となった。



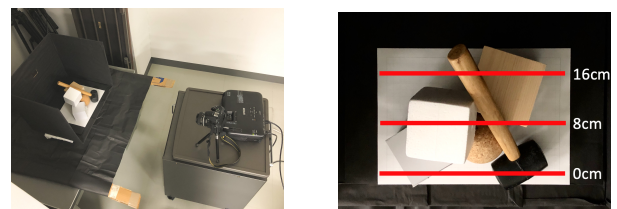
[1] 1 から 50 画素四方の比較 [2] 1 から 12 画素四方の比較

図 7: 格子サイズの変化時の比較

実験の結果、格子サイズが 10 画素四方を超えたあたりからいずれの評価値も一致した。これはどちらも格子のサイズが大きくなりボケの影響を受けにくくなるためだと考えられる。しかし、図 7 から分かるように格子サイズが 10 画素四方より小さい範囲ではウィンドミルの評価値が上回っており、高周波照明法では最小の格子サイズを選択することで撮影シーンの直接反射成分の分解能を高めることから、ウィンドミルはチェッカーよりも焦点ぼけに頑健で高周波照明に適していると言える。

4.2 実験環境における実験

実験は光源以外の環境光のない暗室で行ない、図 8 に示すようにカメラに Nikon D5600 と撮影レンズには Nikon 50mm/F1.4 を用いて、プロジェクターには EPSON EH-TW510 を使用した。比較する高周波パターンは撮影回数と格子のサイズの条件を統一するために図 6 の緑の枠で示す中心核が 4 画素四方のチェッカーとウィンドミルでそれぞれ 32 回位相をシフトして撮影した。また、出力結果の合成にはプロジェクタで真っ黒な画面を表示した画像をオフセットとして引く処理を行なった。



[1] 撮影機材

[2] 対象物体と合焦の距離

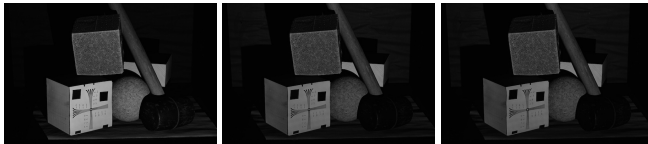
図 8: 実験の概要

実験はカメラのピントを対象物体全域に合うように固定して、プロジェクターの合焦面を図 8 に示すように一番手前を基準に 0cm として奥 8cm と奥 16cm の位置に合わせて撮影を行なった。



[1] 最前面に合焦 [2] 8cm 奥に合焦 [3] 16cm 奥に合焦

図 9: チェッカーパターンの合焦点位置の違いによる直接反射成分の変化



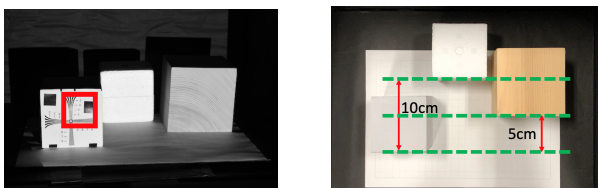
[1] 最前面に合焦 [2] 8cm 奥に合焦 [3] 16cm 奥に合焦

図 10: ウィンドミルパターンの合焦点位置の違いによる直接反射成分の変化

実験の結果、図 9 に示すようにチェッカーパターンは焦点距離が対象物体の範囲で奥に変化するほど奥と手前の直接反射成分の輝度値の強度分布に違いが生じた。一方でウィンドミルパターンを用いた高周波照明は図 10 に示すように全体の輝度強度がやや低下はしたが、焦点の位置がずれても全体の直接反射成分の輝度の強度バランスを崩さなかった。これはウィンドミルパターンがプロジェクタによる焦点ぼけに頑健でピントの位置が変化しても高周波成分が大きく低下しなかったためだと考えられる。

次にフーリエ変換を用いてこの高周波成分の保持性を定量的に評価する。

4.3 フーリエ解析による空間周波数ヒストグラムの比較

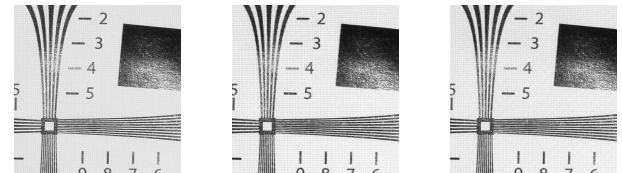


[1] 撮影対象と評価範囲 [2] 対象物体と合焦の距離

図 11: 実験の概要

撮影は 4.2 と同様に図 6 の緑の枠で示す中心核が 4 画素四方の核を構成単位とするチェッカーパターンとウィンドミルパターンを用いて撮影回数を統一して行なった。実験の結果得られた直接反射成分を図 11 中の赤枠で示す 700 画素四方のエリアでクロップして比較する。

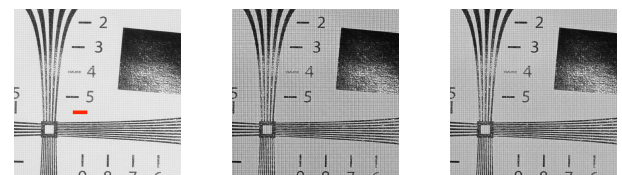
分離した光の成分は、2 章の式 (1) に示すように直接反射成分と間接成分を足し合わせることで通常の撮影シーンを再構成できる。ウィンドミルとチェッカーの比較のため、実験で得られた直接反射成分と間接成分を足し合わせた時



[1] 通常照明 [2] チェッカー [2] ウィンドミル

図 12: 解像度チャート表面に照明合焦時の再構成画像

の光量が高周波パターン用いない通常照明の場合と一致するように正規化を行なった。その結果を図 12 に示す。

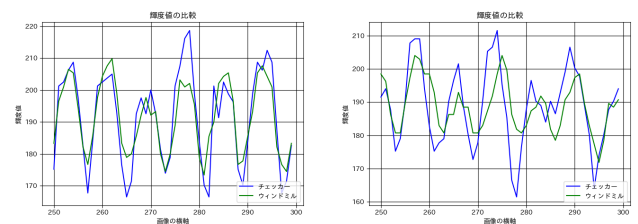


[1] 輝度値比較の切片 [2] チェッカー [2] ウィンドミル

図 13: 解像度チャート表面に照明合焦時の直接反射成分

図 13 に示した高周波パターンの違いによる直接反射成分の違いから、チェッカーパターンによる照明は格子状のアーティファクトが濃く浮き出ていることがわかる。

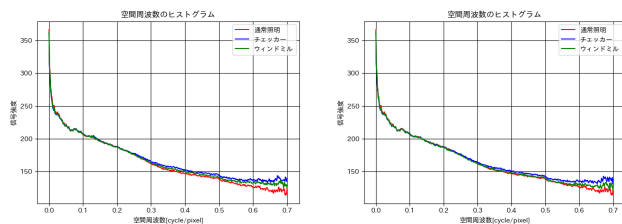
次にアーティファクトの比較のため図 13 に示した赤い切片における横方向の輝度値の変化を比較のために信号の振幅の平均値が一致する正規化処理し、グラフにプロットして図 14 に示す。



[1] 対象表面に照明が合焦 [2] 対象の 5cm 奥に照明が合焦

図 14: 切片における直接反射成分の輝度値の変化

図 14 からチェッカーとウィンドミルの高周波照明で得られた直接反射成分は通常の照明に比べて、輝度の信号が大きく振れていることがわかる。チェッカーとウィンドミルの比較ではチェッカーの方が振幅が大きいことから、アーティファクトとして観測される模様が目立って浮き出ていることが言える。この振幅はプロジェクターの焦点が 5cm 奥にあった場合にも観測され、焦点ぼけが大きいほどチェッカーによるアーティファクトが大きいことがわかった。



[1] 対象表面に照明が合焦 [2] 対象の 5cm 奥に照明が合焦
図 15: 照明の合焦位置の違いによるヒストグラムの比較

次に実験で得られた直接反射成分に対して、含まれる空間周波数の分布を解析するためフーリエ変換を行いパワースペクトルのヒストグラムをグラフにプロットして、一つのグラフにまとめたものを図 15 に示す。

これらのヒストグラムからチェッカーとウィンドミルのプロットは、0.0 から 0.3cycle/pixel 付近までは通常照明を照射した時の赤いプロットの空間周波数の特徴を保っているが、0.3cycle/pixel よりも高い空間周波数では本来存在しない周波数特徴を含んでいることがわかる。この周波数成分は図 13 にみられるアーティファクトの原因の信号だと考えられる。しかし、緑のプロットで示したウィンドミルパターンは 0.5 から 0.7cycle/pixel の周波数の範囲でチェッカーよりもこの信号を抑えていることがわかる。また、照明の焦点が 5cm 奥に合っている時のウィンドミルのヒストグラムは 0.6 から 0.7cycle/pixel で信号が低下し、通常照明の信号に近づいている。対して、チェッカーパターンのヒストグラムは同じ範囲で通常照明にはない周波数特徴の信号が増加している。以上のことからウィンドミルパターンはチェッカーパターンよりも焦点ぼけに頑健で、照明の合焦面の位置が変化してもアーティファクトを発生しにくく高周波照明としての性能を失いにくいと結論づける。

5. おわりに

本研究では、高周波照明法における高周波パターンの焦点ぼけに対する頑健性を定量的に評価する関数を提案した。また、評価関数を用いてチェッカーパターンよりも焦点ぼけの影響に対して頑健なウィンドミルパターンを提案し、その実用性を実験とフーリエパワースペクトルの解析から示した。

ウィンドミルパターンは中心核の画素サイズが必ず偶数となる制約があるため、チェッカーパターンのように小さなステップでの周波数を変調させるということはできない制約がある。しかし、ウィンドミルパターンはチェッカーパターンを 45 度傾けた四辺形と近似することで、チェッカーパターンの中間的な波長を表現できるため周波数を変調させる手法などに応用が可能だと考えらえる。

今後は撮影シーンに許容される最適な高周波パターンを全探索アルゴリズムを用いて検討する予定である。

参考文献

- [1] Eugene, Hecht : ヘクト光学 I -基礎と幾何光学- OPTICS, 4th edition 尾崎義治・朝倉利光 訳, pp.133-227, 丸善出版, 2002.
- [2] Oren, Michael and Nayar, Shree K.: *Generalization of Lambert's Reflectance Model*, SIGGRAPH'94, pp.239-246, 1994.
- [3] S. G. Narasimhan and S. K. Nayar and Bo Sun and S. J. Koppal.: *Structured light in scattering media*, ICCV'05, Vol. 1, pp.420-427, 2005.
- [4] Meier, G.: *Computerized background-oriented schlieren*, Experiments in Fluids, Vol.33, 1, pp.181-187, 2002.
- [5] Kim, Jaewon and Izadi, Shahram and Ghosh, Abhijeet.: *Single-shot Layered Reflectance Separation Using a Polarized Light Field Camera*, EGSR'16, pp.1-11, 2016.
- [6] Nayar, Shree K. and Krishnan, Gurunandan and Grossberg, Michael D. and Raskar, Ramesh.: *Fast Separation of Direct and Global Components of a Scene Using High Frequency Illumination*, ACM SIGGRAPH'06, pp.935-944, 2006.
- [7] Bruce, Lamond and Pieter, Peers and Paul, Debevec.: *Fast Image-based Separation of Diffuse and Specular Reflections*, ICT Technical Report, ICT-TR-02, 2007.
- [8] T. Takatani, Y. Mukaigawa, Y. Matsushita, Y. Yagi.: *Decomposition of Reflection and Scattering by Multiple Weighted Measurements*, IPSJ Transactions on Computer Vision and Applications, Vol.10, 2018.
- [9] K. Tanaka, Y. Mukaigawa, H. Kubo, Y. Matsushita, Y. Yagi.: *Recovering Inner Slices of Layered Translucent Objects by Multi-frequency Illumination*, IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol.39, 4, pp.746-757, 2017.
- [10] Subpa-asa, Art and Fu, Ying and Zheng, Yinqiang and Amano, Toshiyuki and Sato, Imari.: *Separating the Direct and Global Components of a Single Image*, Journal of Information Processing, Vol.26, pp.755-767, 2018.
- [11] Yasuhiro Mukaigawa and Ramesh Raskar and Yasushi Yagi.: *Analysis of Scattering Light Transport in Translucent Media* IPSJ Transactions on Computer Vision and Applications, Vol.3, pp.122-133, 2011.
- [12] K. Tanaka and Y. Mukaigawa and Y. Matsushita and Y. Yagi.: *Descattering of Transmissive Observation using Parallel High-frequency Illumination*, Proc. IEEE International Conference on Computational Photography, pp.1-8, 2013.