

# 位相シフト法における深度高精度化のための 陰影再構成に関する検証

浦川 雄気<sup>\*1</sup>渡辺 義浩<sup>\*1</sup>

**Abstract** ー 近年、製品検査やロボティクス、拡張現実など様々な分野で高速かつ高解像度に深度画像を計測する技術の需要が高まっている。これを実現する手法として、構造化光法が注目されている。そのなかでも位相シフト法は、正弦波パターンを投影・撮像することにより、高解像度な深度画像を得ることができる手法である。しかし、運動物体の計測を行う際には、露光時間が短く、パターン枚数が少ないほど望ましいが、それに伴い深度画像の精度が低下する問題がある。そこで精度の高い陰影画像を取得し、さらに深度画像から再構成される陰影画像が同取得画像に整合するように深度画像を補正することで、深度画像の精度を向上させる手法を提案する。この際、正弦波パターンの特性を利用して、相互反射の影響が小さい陰影画像を取得する。また本手法ではパターン枚数を増やすことなく、深度画像を高精度化することが可能である。

**Keywords** : 深度計測, 陰影再構成, プロジェクタ

## 1 はじめに

近年、製品検査やロボティクス、拡張現実など様々な分野で運動物体への深度計測の需要が高まっている。特に運動物体を対象とした投影型拡張現実に応用する場合、500 fps 程度の高いセンシングレートで深度画像を取得できることが求められる [1]。これを実現する計測手法として、プロジェクタとカメラを用いて深度を計測する構造化光法が注目されている [2]。

なかでも、位相シフト法は高解像度な深度画像の計測が可能である。位相シフト法は正弦波パターンを投影・撮像することで深度を計測することができる。しかし、運動物体の計測を行う際には、露光時間が短く、パターン枚数が少ないほど望ましいが、それに伴い深度画像の精度が低下する問題がある。

一方、深度画像だけでなく陰影画像を用いることで、深度画像を高精度化する手法がある [3, 4, 5]。深度画像と光源、カメラの情報を用いて再構成される陰影画像が、実測された陰影画像と整合するように深度を補正する、すなわち陰影最適化によって、深度画像の高精度化を実現している。しかし、これらの手法は位相シフト法とは異なる手法で深度計測をしており、高速かつ高解像度な深度画像の計測との両立が難しい問題がある。また、光源として点光源や環境光を用いており、入り組んだ形状を持つ物体を対象とする際に、光線が物体で複数回反射する相互反射の影響により精度が低下する問題がある。

そこで、位相シフト法に陰影最適化を加えることで、精度を向上させる手法を提案する。ここで、陰影画像は位相シフト法の正弦波パターンの撮像画像から計算

する。この際、正弦波パターンの特性を利用して、相互反射の影響が小さい陰影画像を取得する。本手法では、位相シフト法におけるパターン数を増やすことなく、深度画像の精度を向上させることができる。

実験では、正弦波パターンの撮像画像から相互反射の影響が小さい陰影画像を計算できたことを確認した。また、計算された陰影画像を用いた陰影最適化によって深度画像を補正し、精度が0.68%向上したことを確認した。

## 2 関連研究

### 2.1 位相シフト法

位相シフト法は図1に示すような複数枚の正弦波パターンを投影・撮像することで、カメラとプロジェクタの対応関係を得て、深度情報を計測することができる。これらの計算は全て画素独立に計算可能であり、高速に計算することができる。

同手法では高周波の正弦波パターンの周期数を求める位相接続と呼ばれる処理が必要である。これには高周波と低周波の正弦波パターンを用いる手法やグレイコードパターンを用いる手法、複数の周波数の正弦波パターンを用いる手法がある [6]。特に Gupta らは高周波のみの複数の周波数の正弦波パターンを用いて位相接続を行うことで、相互反射の影響を抑える手法を提案した [7]。しかし、いずれの手法も露光時間が短い場合やパターン枚数が少ない場合に、ノイズによって精度が下がる問題がある。

### 2.2 深度精度向上

深度だけでなく別の情報を計測することで、深度の精度を上げる手法がある。Miyashita らは深度画像と

<sup>\*1</sup>東京工業大学

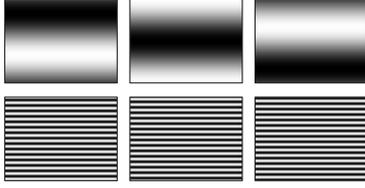


図1 位相シフト法で用いられる正弦波パターン例 (6枚). 位相シフト量を変えて, パターン数を増やすこともできる.

Fig. 1 An example of sinusoidal patterns used in the phase shifting (6 patterns). The number of patterns can be increased by changing the amount of phase shift.

法線画像を同時に取得し, それらを統合することで深度画像の精度を向上させる手法を提案した [8]. しかし, 同手法では深度画像・法線画像を計測する際に可視光と赤外光を使用しており, 拡張現実などの可視光のプロジェクタを用いるようなシステムへの適用が難しい問題がある.

また, Choe らは Kinect v1 を使用して, ドットパターンを用いた構造化光法で得られる深度画像に加えて, 点光源を用いた陰影画像を利用して, 陰影最適化により深度を高精度化する手法を提案した [3]. しかし, 深度画像と陰影画像を別々に取得しているため低速である問題や, 相互反射の影響を考えていない問題がある.

さらに, Cao らは 2 視点から点光源あり・なしの陰影画像を撮像して, 2 視点の画像の対応点を探索することで深度画像を取得し, さらに陰影最適化を使って深度画像を高精度化する手法を提案した [5]. しかし, 2 視点の画像の対応点を探索する処理が低速である問題や, 相互反射の影響を考えていない問題がある.

加えて, Wu らは Kinect v2 を使用して, 赤外光の投影で得られる深度画像に加えて, 可視光の未知の環境光陰影画像を取得し, 同画像を用いた陰影最適化により深度画像の精度を向上させた [4]. さらに同手法は, 陰影最適化計算を並列化することで, 高速化を実現した. しかし, 相互反射の影響を考えていない問題や, 拡張現実などの可視光のプロジェクタを用いるようなシステムへの適用が難しい問題がある.

### 3 位相シフト法のための陰影最適化による深度画像の高精度化

#### 3.1 手法概要

本稿では, 図 2 に示すような手法を提案する. 具体的には位相シフト法に以下の手法を加える. まず, 正弦波パターンの撮像画像から陰影画像を計算する. この際, 高周波の正弦波パターンを用いることで, 相互反射成分の影響が小さい投影光陰影画像を計算するこ

とができる.

さらに, 深度画像とプロジェクタ, カメラの情報を用いて再構成される投影光陰影画像が, 正弦波パターンの撮像画像から計算した投影光陰影画像に整合するように深度画像を補正する. これにより, 深度画像の精度を向上させることができる.

#### 3.2 正弦波パターンの撮像画像からの陰影画像計算

本手法では, 図 1 に示すような 3 枚の高周波の正弦波パターンと 3 枚の低周波の正弦波パターンを用いる位相シフト法に注目する. 以下に計算を詳述する.

まず, 投影画像の  $y$  座標  $\tilde{p}_y$  に対して, 高周波の正弦波パターンの位相  $\phi_H$ , 低周波の正弦波パターンの位相  $\phi_L$  を次式で与える.

$$\phi_H = \frac{2\pi\tilde{p}_y}{T_H} \quad (1)$$

$$\phi_L = \frac{2\pi\tilde{p}_y}{H} \quad (2)$$

ただし,  $T_H$  は高周波の正弦波パターンの周期,  $H$  は投影画像の高さである. よって,  $\phi_H$  の周期数が 1 以上となる  $\tilde{p}_y$  もあるが,  $\phi_L$  の周期数は全ての  $\tilde{p}_y$  に対して 0 である.

次に, 投影光の強さ  $I_s^p$ , 位相シフト量  $D$  を用いて, 投影画像を求める. 位相  $\phi_H$  の高周波の正弦波パターンの画素値  $I_{\phi_H}^{pH1}, I_{\phi_H}^{pH2}, I_{\phi_H}^{pH3}$ ; 位相  $\phi_L$  の低周波の正弦波パターンの画素値  $I_{\phi_L}^{pL1}, I_{\phi_L}^{pL2}, I_{\phi_L}^{pL3}$  を次式で与える.

$$I_{\phi_H}^{pH1} = I_s^p (1 + \cos(\phi_H - D)) \quad (3)$$

$$I_{\phi_H}^{pH2} = I_s^p (1 + \cos(\phi_H)) \quad (4)$$

$$I_{\phi_H}^{pH3} = I_s^p (1 + \cos(\phi_H + D)) \quad (5)$$

$$I_{\phi_L}^{pL1} = I_s^p (1 + \cos(\phi_L - D)) \quad (6)$$

$$I_{\phi_L}^{pL2} = I_s^p (1 + \cos(\phi_L)) \quad (7)$$

$$I_{\phi_L}^{pL3} = I_s^p (1 + \cos(\phi_L + D)) \quad (8)$$

ここで, 相互反射を含んだ投影・撮像の関係について考える. まず, 撮像画像の画素位置を  $(c_x, c_y)$ , 投影画像の画素位置を  $(p_x, p_y)$ ,  $(c_x, c_y)$  と真に対応する投影画像の画素位置を  $(\tilde{p}_x, \tilde{p}_y)$  とする. また, 投影画像の  $x$  座標  $p_x$  において, 相互反射による  $(c_x, c_y)$  への影響を無視できない  $p_y$  の集合を  $S_{p_x}$ , 投影画像の画素位置  $(p_x, p_y)$  の画素値を  $I_{(p_x, p_y)}^p$  とする. さらに,  $(\tilde{p}_x, \tilde{p}_y)$  から  $(c_x, c_y)$  への直接反射の光輸送係数を  $\alpha_{(\tilde{p}_x, \tilde{p}_y)(c_x, c_y)}$ ,  $(p_x, p_y)$  から  $(c_x, c_y)$  への相互反射の光輸送係数を  $\beta_{(p_x, p_y)(c_x, c_y)}$  とする. すると, 撮像画像の画素位置  $(c_x, c_y)$  の画素値  $I_{(c_x, c_y)}^c$ , プロジェクタによる直接反射成分  $A_{(c_x, c_y)}$ , プロジェクタによる相互反射成分  $B_{(c_x, c_y)}$ , プロジェクタ以外の光源による相互反射成分も含んだ環境光成分  $I_{(c_x, c_y)}^e$  は次式で

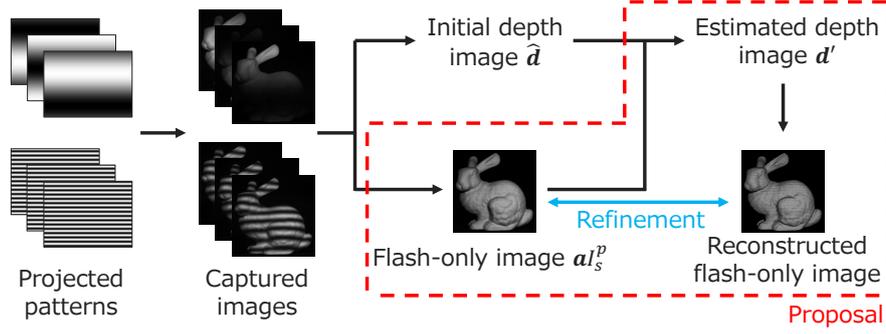


図2 手法概要図

Fig.2 Method Overview

表される。

$$A_{(c_x, c_y)} = \alpha_{(\tilde{p}_x, \tilde{p}_y)(c_x, c_y)} I_{(\tilde{p}_x, \tilde{p}_y)}^p \quad (9)$$

$$B_{(c_x, c_y)} = \sum_{p_x} \sum_{p_y \in S_{p_x}} \beta_{(p_x, p_y)(c_x, c_y)} I_{(p_x, p_y)}^p \quad (10)$$

$$I_{(c_x, c_y)}^c = A_{(c_x, c_y)} + B_{(c_x, c_y)} + I_{(c_x, c_y)}^e \quad (11)$$

さらに,  $S_{p_x}$  を  $\beta_{(p_x, p_y)(c_x, c_y)}$  が一定の値  $\beta_{(c_x, c_y)}^j$  と近似できる, 連続した小領域  $S_{p_x}^j$  に被りなく分割すると,  $B_{(c_x, c_y)}$  は次式で表される。

$$S_{p_x} = \bigcup_j S_{p_x}^j \quad (12)$$

$$j \neq k, S_{p_x}^j \cap S_{p_x}^k = \emptyset \quad (13)$$

$$\forall p_y \in S_{p_x}^j, \beta_{(p_x, p_y)(c_x, c_y)} \sim \beta_{(c_x, c_y)}^j \quad (14)$$

$$B_{(c_x, c_y)} = \sum_{p_x} \sum_j \beta_{(c_x, c_y)}^j \sum_{p_y \in S_{p_x}^j} I_{(p_x, p_y)}^p \quad (15)$$

ただし,  $\beta_{(c_x, c_y)}^j$  は  $p_x$  によって変化するが, 省略している。集合  $S_{p_x}^j$  の区間が  $[p_{y_j}^{\min}, p_{y_j}^{\max}]$  であるとき, 次式のようになる。

$$\sum_{p_y \in S_{p_x}^j} I_{(p_x, p_y)}^p = \sum_{p_y^{\min} \leq p_y \leq p_y^{\max}} I_{(p_x, p_y)}^p \quad (16)$$

ただし,  $[p_{y_j}^{\min}, p_{y_j}^{\max}]$  は  $p_x$  によって変化するが, 省略している。

また,  $I_{(p_x, p_y)}^p$  は  $p_y$  に対して正弦波であるため, 周期  $T = T_H, H$  と位相シフト量  $\theta = 0, \pm D$  を用いて次式のように表せる。

$$I_{(p_x, p_y)}^p = I_s^p \left( 1 + \cos\left(\frac{2\pi p_y}{T} + \theta\right) \right) \quad (17)$$

まず, 周期  $T$  が区間  $[p_{y_j}^{\min}, p_{y_j}^{\max}]$  に対して十分小さい, すなわち高周波の場合を考える。交流成分は打ち消し合うため, 次式のように表せる。

$$\sum_{p_y^{\min} \leq p_y \leq p_y^{\max}} I_{(p_x, p_y)}^p \sim |S_{p_x}^j| I_s^p \quad (18)$$

一方, 周期  $T$  が集合  $S_{p_x}$  の区間に対して十分大きい, すなわち低周波の場合を考える。集合  $S_{p_x}^j$  に含まれる

画素の位相は, 真に対応する投影画素の  $y$  座標  $\tilde{p}_y$  の位相  $\frac{2\pi\tilde{p}_y}{T}$  と近似できるため, 次式のように表せる。

$$\sum_{p_y^{\min} \leq p_y \leq p_y^{\max}} I_{(p_x, p_y)}^p \sim |S_{p_x}^j| I_s^p \left( 1 + \cos\left(\frac{2\pi\tilde{p}_y}{T} + \theta\right) \right) \quad (19)$$

簡単のため, 係数  $a_{(c_x, c_y)}$ ,  $b_{(c_x, c_y)}$  を次のように定義する。

$$a_{(c_x, c_y)} = \alpha_{(\tilde{p}_x, \tilde{p}_y)(c_x, c_y)} \quad (20)$$

$$b_{(c_x, c_y)} = \sum_{p_x} \sum_j \beta_{(c_x, c_y)}^j |S_{p_x}^j| \quad (21)$$

すると, 撮像画像の画素位置  $(c_x, c_y)$  の画素値  $I_{(c_x, c_y)}^{cH1}, I_{(c_x, c_y)}^{cH2}, I_{(c_x, c_y)}^{cH3}, I_{(c_x, c_y)}^{cL1}, I_{(c_x, c_y)}^{cL2}, I_{(c_x, c_y)}^{cL3}$  は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} I_{(c_x, c_y)}^{cH1} \\ = I_{(c_x, c_y)}^e + I_s^p \left( b_{(c_x, c_y)} + a_{(c_x, c_y)} (1 + \cos(\phi_H - D)) \right) \end{aligned} \quad (22)$$

$$\begin{aligned} I_{(c_x, c_y)}^{cH2} \\ = I_{(c_x, c_y)}^e + I_s^p \left( b_{(c_x, c_y)} + a_{(c_x, c_y)} (1 + \cos(\phi_H)) \right) \end{aligned} \quad (23)$$

$$\begin{aligned} I_{(c_x, c_y)}^{cH3} \\ = I_{(c_x, c_y)}^e + I_s^p \left( b_{(c_x, c_y)} + a_{(c_x, c_y)} (1 + \cos(\phi_H + D)) \right) \end{aligned} \quad (24)$$

$$\begin{aligned} I_{(c_x, c_y)}^{cL1} \\ = I_{(c_x, c_y)}^e + (a_{(c_x, c_y)} + b_{(c_x, c_y)}) I_s^p (1 + \cos(\phi_L - D)) \end{aligned} \quad (25)$$

$$\begin{aligned} I_{(c_x, c_y)}^{cL2} \\ = I_{(c_x, c_y)}^e + (a_{(c_x, c_y)} + b_{(c_x, c_y)}) I_s^p (1 + \cos(\phi_L)) \end{aligned} \quad (26)$$

$$\begin{aligned} I_{(c_x, c_y)}^{cL3} \\ = I_{(c_x, c_y)}^e + (a_{(c_x, c_y)} + b_{(c_x, c_y)}) I_s^p (1 + \cos(\phi_L + D)) \end{aligned} \quad (27)$$

これに対し、撮像画像の画素位置  $(c_x, c_y)$  に対応する高周波の正弦波パターンの位相  $\phi_H^c$ 、低周波の正弦波パターンの位相  $\phi_L^c$  は次式で求められる。

$$\phi_H^c = \arctan\left(\tan\left(\frac{D}{2}\right) \frac{I_{(c_x, c_y)}^{cH1} - I_{(c_x, c_y)}^{cH3}}{2I_{(c_x, c_y)}^{cH2} - I_{(c_x, c_y)}^{cH1} - I_{(c_x, c_y)}^{cH3}}\right) \quad (28)$$

$$\phi_L^c = \arctan\left(\tan\left(\frac{D}{2}\right) \frac{I_{(c_x, c_y)}^{cL1} - I_{(c_x, c_y)}^{cL3}}{2I_{(c_x, c_y)}^{cL2} - I_{(c_x, c_y)}^{cL1} - I_{(c_x, c_y)}^{cL3}}\right) \quad (29)$$

ただし、 $0 \leq \phi_H^c, \phi_L^c < 2\pi$  である。 $\phi_H^c$  は周期数がわからないが精度が高い。一方、 $\phi_L^c$  は周期数は 0 とわかるが精度が低い。そこで、次式のように  $\phi_H^c$  の周期数  $k$  を求める。

$$k = \text{NINT}\left(\frac{\phi_L^c H}{2\pi T_H} - \frac{\phi_H^c}{2\pi}\right) \quad (30)$$

この計算は位相接続と呼ばれる。ここで、NINT は最も近い整数への丸めを表す。このため、 $\phi_H^c$  が正確であるとき、 $\phi_L^c$  には  $\frac{\phi_L^c H}{4\pi T_H}$  未満の誤差が許容される。さらに撮像画像の画素位置  $(c_x, c_y)$  に対応するプロジェクタの  $y$  座標  $\tilde{p}_y$  は次のように求められる。

$$\tilde{p}_y = \frac{T_H(2\pi k + \phi_H^c)}{2\pi} \quad (31)$$

この対応関係を撮像画像全画素に対して求めることで、初期の深度画像  $\hat{\mathbf{d}}$  を計算できる。ただし画像を太字で表している。

さらに、画素位置  $(c_x, c_y)$  の撮像画像の環境光成分  $I_{(c_x, c_y)}^e$  と投影光成分  $a_{(c_x, c_y)} I_s^p$  は、撮像画素値から次のように求められる。

$$\begin{aligned} & (a_{(c_x, c_y)} I_s^p)^2 \\ &= \left(\frac{I_{(c_x, c_y)}^{cH1} - I_{(c_x, c_y)}^{cH3}}{2 \sin(D)}\right)^2 \\ &+ \left(\frac{2I_{(c_x, c_y)}^{cH2} - I_{(c_x, c_y)}^{cH1} - I_{(c_x, c_y)}^{cH3}}{2(1 - \cos(D))}\right)^2 \end{aligned} \quad (32)$$

$$\begin{aligned} & ((a_{(c_x, c_y)} + b_{(c_x, c_y)}) I_s^p)^2 \\ &= \left(\frac{I_{(c_x, c_y)}^{cL1} - I_{(c_x, c_y)}^{cL3}}{2 \sin(D)}\right)^2 \\ &+ \left(\frac{2I_{(c_x, c_y)}^{cL2} - I_{(c_x, c_y)}^{cL1} - I_{(c_x, c_y)}^{cL3}}{2(1 - \cos(D))}\right)^2 \end{aligned} \quad (33)$$

これは一般的に、それぞれ高周波の正弦波パターンと低周波の正弦波パターン位相シフト法における振幅を求める計算である。これにより高周波の正弦波パターンの撮像画像から、プロジェクタによる相互反射の影響がない投影光成分  $a_{(c_x, c_y)} I_s^p$  を計算できる。一

方、低周波の正弦波パターンの撮像画像から、プロジェクタによる相互反射の影響を含んだ投影光成分  $(a_{(c_x, c_y)} + b_{(c_x, c_y)}) I_s^p$  が計算できる。この計算を撮像画像全画素に対して行うことで、それぞれ投影光陰影画像  $\mathbf{a} I_s^p, (\mathbf{a} + \mathbf{b}) I_s^p$  を得ることができる。

### 3.3 陰影最適化による深度画像高精度化

深度画像から再構成される陰影画像が、前小節で得られた高周波の正弦波パターンによる投影光陰影  $\mathbf{a} I_s^p$  に整合するように深度を補正することで深度画像を高精度化することができる。

まず、カメラ、プロジェクタの情報と深度画像  $\mathbf{d}$  から投影光陰影画像を再構成することを考える。ただし物体の反射はランバート反射のみとする。位置  $\mathbf{t}_p$  のプロジェクタからの強度  $I_s^p$  の光線が、位置  $\mathbf{p}$ 、法線  $\mathbf{n}$ 、反射率  $\rho$  の点に当たり、位置  $\mathbf{t}_c$  のカメラに入るとき、画素値  $I_{(c_x, c_y)}^{cr}$  は次式で計算される。

$$I_{(c_x, c_y)}^{cr} = \frac{\rho I_s^p}{\|\|\mathbf{p} - \mathbf{t}_p\| + \|\mathbf{p} - \mathbf{t}_c\|\|^2} \frac{(\mathbf{t}_p - \mathbf{p}) \cdot \mathbf{n}}{\|\mathbf{t}_p - \mathbf{p}\|} \quad (34)$$

プロジェクタとカメラの位置情報は事前にキャリブレーションによって求める。点の位置や法線は深度画像  $\mathbf{d}$  から計算することができる。法線を求める際には、深度画像の周囲の画素との勾配を用いて計算する。また計測対象の反射率  $\rho$  は一定であると仮定して、陰影画像の全画素に対して式 (34) を立式し、最小 2 乗法で  $\rho$  を求める。求めた  $\rho$  と深度画像を式 (34) に代入して、陰影画像を再構成できる。深度画像  $\mathbf{d}$  から再構成された陰影  $I_{(c_x, c_y)}^{cr}$  と正弦波パターンから計算された投影光陰影  $a_{(c_x, c_y)} I_s^p$  の差の 2 乗和  $E_I$  は次のように表される。

$$E_I(\mathbf{d}) = \sum_{(c_x, c_y)} (I_{(c_x, c_y)}^{cr}(\mathbf{d}) - a_{(c_x, c_y)} I_s^p)^2 \quad (35)$$

また、位相シフト法によって得られた初期の深度  $\hat{\mathbf{d}}_{(c_x, c_y)}$  と補正された深度  $d_{(c_x, c_y)}$  の差の 2 乗和  $E_C$  は次式のように表される。

$$E_C(\mathbf{d}) = \sum_{(c_x, c_y)} (d_{(c_x, c_y)} - \hat{\mathbf{d}}_{(c_x, c_y)})^2 \quad (36)$$

これらで構成された次に示すようなエネルギー関数  $E(\mathbf{d})$  を最小化する  $\mathbf{d}'$  が補正された深度画像である。

$$E(\mathbf{d}) = w_I E_I(\mathbf{d}) + w_C E_C(\mathbf{d}) \quad (37)$$

$$\mathbf{d}' = \underset{\mathbf{d}}{\operatorname{argmin}} E(\mathbf{d}) \quad (38)$$

## 4 実験

### 4.1 実験条件

実験で用いたシステムと計測対象を図 3 に示す。プロジェクタには、赤外光プロジェクタと可視光プロジェ

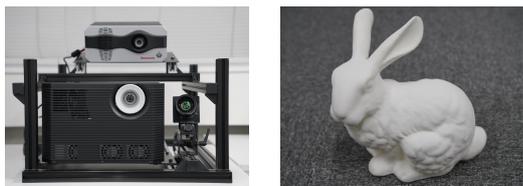


図3 実験システム(左)と計測対象(右). 実験システムの赤外光プロジェクタ(上)と可視光プロジェクタ(左下), カメラ(右下)を使用した.

Fig. 3 Experimental system (left) and measurement target (right). We used an infrared light projector (top), a visible light projector (bottom left), a camera (bottom right) in the experimental system.

クタを用いた. 解像度は  $1024 \times 768$  pixels であった. カメラは EoSens 1.1CXP2 を使用した. 解像度は  $1280 \times 864$  pixels であり, 撮像画像から対象が写っている範囲の  $540 \times 535$  pixels を抽出した. 2つのプロジェクタとカメラは同期しており, フレームレートは 500 fps とした. 計測対象は, システムから約 950 mm の位置に設置した. 位相シフトパターンの高周波の周期は  $T_H = 50$  pixels, 低周波の周期は  $H = 768$  pixels, 位相シフト量  $D = \frac{2\pi}{3}$ ,  $w_I = 1$ ,  $w_C = 650$  であった.

#### 4.2 正弦波パターンの撮像画像からの陰影画像計算

赤外光プロジェクタから図1に示すパターンを, 可視光プロジェクタから環境光としてドットパターンを投影し, それをカメラで撮像して陰影画像を計算した. 図4に示すように, 高周波パターンから計算された投影光陰影画像  $\mathbf{a}I_s^p$  と, 低周波の正弦波パターンから計算された投影光陰影画像  $(\mathbf{a} + \mathbf{b})I_s^p$  を比較した.  $(\mathbf{a} + \mathbf{b})I_s^p$  では首の付け根などの入り組んだ形状の部分が, 相互反射の影響で明るくなっている一方で,  $\mathbf{a}I_s^p$  では同部分の陰影を再現できていることがわかる. 位相シフト法における正弦波パターンの撮像画像から投影光陰影画像を計算できたこと,  $\mathbf{a}I_s^p$  の方がプロジェクタによる相互反射の影響が小さいことが確認できた.

#### 4.3 陰影最適化による深度画像高精度化

前小節で求めた高周波の正弦波パターンの撮像画像から計算した投影光陰影画像  $\mathbf{a}I_s^p$  を用いて, 陰影最適化した. 図5に示すように, 初期の深度画像  $\hat{\mathbf{d}}$  で再構成した陰影画像, 陰影画像  $\mathbf{a}I_s^p$  を利用して補正した深度画像  $\mathbf{d}'$  で再構成した陰影画像, 陰影画像  $\mathbf{a}I_s^p$  を比較した. 陰影最適化によって, 凹凸をより正確に再現できるようになっており, 深度画像が陰影画像を元に補正されたことが確認できた.

さらに, 表4.3に示すように, 初期の深度画像と補正した深度画像について, ICP アルゴリズム [9] を用いて真値との位置合わせを行い, 平均誤差と標準偏差

表1 ICP アルゴリズムによる精度評価  
Table 1 Accuracy evaluation by ICP algorithm

Depth	Mean error [mm]	SD [mm]
Initial	1.1554	0.5802
Estimated	1.1475	0.5333

を計算した. 陰影最適化により, 深度画像の誤差について精度が 0.68% 向上したことを確認した.

## 5 考察

図5に示されるように, 正弦波パターンから計算した投影光陰影画像と補正された深度画像から再構成された投影光陰影画像に違いが見られる. これは陰影最適化が不十分であるためだと考えられる.

また, 本手法では陰影最適化の際に物体の反射率が一定である前提を用いている. しかし, 投影光陰影だけでなく, 環境光陰影を用いることで, 反射率が一定でない物体に対しても陰影最適化が可能となる [5]. そこで, 位相シフト法でも次のような計算により, プロジェクタによる相互反射成分を除いた環境光陰影を求められる.

$$I_{(c_x, c_y)}^e = \frac{I_{(c_x, c_y)}^{eL1} + I_{(c_x, c_y)}^{eL3} - 2 \cos(D) I_{(c_x, c_y)}^{eL2}}{2 - 2 \cos(D)} - (a_{(c_x, c_y)} + b_{(c_x, c_y)}) I_s^p \quad (39)$$

これは低周波の正弦波パターンの撮像画像から計算される. これによりパターン枚数を増やすことなく, 同手法を適用できると考えられる.

さらに, 本手法では運動する物体の陰影画像を計算することはできない. これは運動により, 位相シフト量が既知の値  $D$  から変化するためである. そこで, 運動を補正する手法 [10] を用いることで, 解決できると考えられる.

加えて, 本稿ではリアルタイムでの処理の実装はできておらず, 高速性について確認できていない. 式 (38) について, 小さなグリッドに分割し, ガウス・ニュートン法を用いて並列に計算することで高速に行うことができると考えられる [4].

## 6 まとめ

本稿では, 位相シフト法に陰影最適化を加えることで, 精度を向上させることを提案した. この際, 正弦波パターンの特性を利用して, 相互反射の影響が小さい陰影画像を取得する. 本手法では, 位相シフト法におけるパターン数を増やすことなく, 深度画像の精度を向上させることができる.

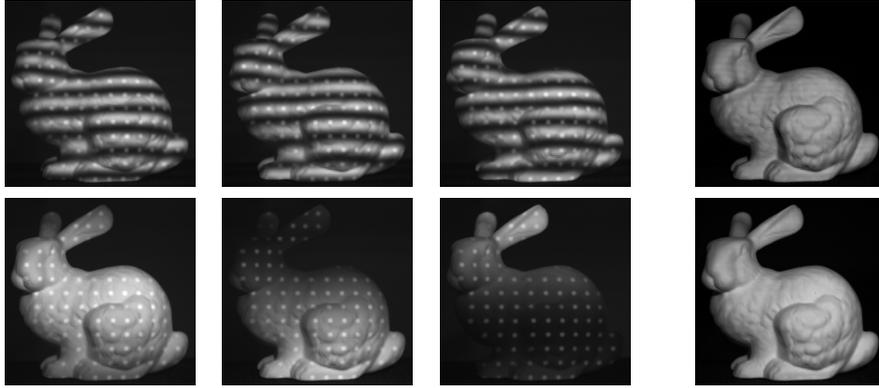


図4 高周波の正弦波パターン（上）と低周波の正弦波パターン（下）. 正弦波パターンの撮像画像（左3つ）と計算された投影光陰影画像（右）.

Fig. 4 High-frequency sinusoidal wave pattern (top) and low-frequency sinusoidal wave pattern (bottom). Captured images of the sinusoidal pattern (left three) and the computed flash-only image (right).

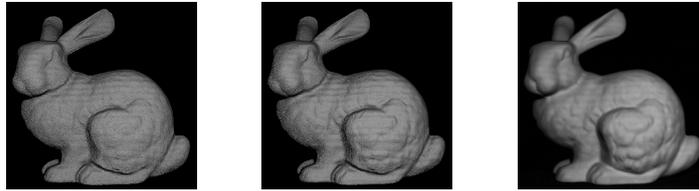


図5 左から順に初期の深度画像から再構成した陰影画像, 補正した深度画像から再構成した陰影画像, 正弦波パターンの撮像画像から計算した投影光陰影画像

Fig. 5 From left: flash-only image reconstructed from initial depth image, flash-only image reconstructed from estimated depth image, and flash-only image calculated from captured images of sinusoidal pattern.

実験では正弦波パターンの撮像画像から, 相互反射の影響が小さい陰影画像を計算できたことを確認した。さらに, 計算された陰影画像を用いて深度最適化をすることで, 深度画像の精度が向上したことを確認した。

#### 参考文献

- [1] Sora Hisaichi, Kiwamu Sumino, Kunihiro Ueda, Hidenori Kasebe, Tohru Yamashita, Takeshi Yuasa, Uwe Lippmann, Petra Aswendt, Roland Höfling, and Yoshihiro Watanabe. Depth-aware dynamic projection mapping using high-speed RGB and IR projectors. In *SIGGRAPH Asia 2021 Emerging Technologies*, pp. 1–2. 2021.
- [2] Yoshihiro Watanabe. High-speed optical 3D sensing and its applications. *Advanced Optical Technologies*, Vol. 5, No. 5-6, pp. 367–376, 2016.
- [3] Gyeongmin Choe, Jaesik Park, Yu-Wing Tai, and In So Kweon. Exploiting Shading Cues in Kinect IR Images for Geometry Refinement. In *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 3922–3929, 2014.
- [4] Chenglei Wu, Michael Zollhöfer, Matthias Nießner, Marc Stamminger, Shahram Izadi, and Christian Theobalt. Real-time Shading-based Refinement for Consumer Depth Cameras. *ACM Transactions on Graphics*, Vol. 33, No. 6, 2014.
- [5] Xu Cao, Michael Waechter, Boxin Shi, Ye Gao, Bo Zheng, and Yasuyuki Matsushita. Stereoscopic Flash and No-Flash Photography for Shape and Albedo Recovery. In *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 3427–3436, 2020.
- [6] Chao Zuo, Lei Huang, Minliang Zhang, Qian Chen, and Anand Asundi. Temporal phase unwrapping algorithms for fringe projection profilometry: A comparative review. *Optics and Lasers in Engineering*, Vol. 85, pp. 84–103, 2016.
- [7] M. Gupta and S.K. Nayar. Micro Phase Shifting. In *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 1–8, 2012.
- [8] Leo Miyashita, Yohta Kimura, Satoshi Tabata, and Masatoshi Ishikawa. High-Speed Depth-Normal Measurement and Fusion Based on Multi-band Sensing and Block Parallelization. *Journal of Robotics and Mechatronics*, Vol. 34, No. 5, pp. 1111–1121, 2022.
- [9] P.J. Besl and Neil D. McKay. A method for registration of 3-D shapes. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 14, No. 2, pp. 239–256, 1992.
- [10] Thibaut Weise, Bastian Leibe, and Luc Van Gool. Fast 3D scanning with automatic motion compensation. In *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 1–8, 2007.