

変調照明を用いた距離計測における 時間領域と空間領域の位相の組み合わせによる曖昧性の解消

榎田 貫弘^{1,a)} 田中 賢一郎¹ 青砥 隆仁² 船富 卓哉¹ 向川 康博¹

概要: Time-of-Flight カメラや位相シフト法による距離計測手法では、位相のラッピングにより距離の曖昧性が生じる問題がある。低周波パターンを用いることでラッピングを解消することはできるが、距離の計測精度が落ちてしまう。また、複数の周波数を組み合わせる手法では計測数が増加してしまう。そこで本研究では、時間領域と空間領域のそれぞれで得られる距離と位相の関係が異なることに着目し、時間領域と空間領域の位相を組み合わせることで距離計測を行う。実験により、提案手法を用いることで従来の計測手法と比べ精度を落とすことなく曖昧性を解消できることを確認した。

1. はじめに

コンピュータビジョン分野において広く知られている距離計測手法に、Time-of-Flight 法 (ToF 法) と位相シフト法の 2 つがある。ToF 法では、時間的に変調した光を計測対象に照射し、対象までの光の飛行時間を計測することで距離を計測する。一方、位相シフト法では、プロジェクタを用いて空間的に変調した光を照射し、プロジェクタとカメラ間の対応点を求め、三角測量法によって距離を計測する。

これらの手法に共通する問題として、位相の曖昧性に起因する計測精度と計測範囲のトレードオフが存在する。低い周波数を用いると、広範囲を計測できるが計測精度が落ちてしまう。高い周波数を用いることで高精度な計測が可能となるが、位相の曖昧性が発生しない計測範囲は狭くなる。複数の周波数による計測を利用することで位相の曖昧性を解消できるが、曖昧性のない範囲が周波数の最小公倍数に限られてしまうため、広範囲を計測するには更に計測数を増やす必要がある。本研究では、少数の計測で位相の曖昧性を解消し、計測精度を落とすことなく広範囲に計測可能な手法を提案する。

本研究では、位相の曖昧性と距離との関係が ToF 法と位相シフト法で異なることを利用する。ToF 法では、計測された時間的な位相は距離に比例するため、曖昧な距離の候補は等間隔に生じる。一方、位相シフト法では、視差を位

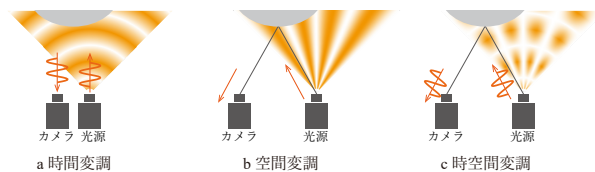


図 1 変調方式の違い。(a) ToF 法では時間的に変調した光を利用する。(b) 位相シフト法では空間的に変調した光を利用する。(c) 提案手法では、光を時間的、空間的に同時に変調する。

相として計測するため、曖昧な距離の候補の間隔は距離が長くなるにつれて広がっていく。この性質の違いに基づくと、時空間的な変調により、少数の計測から位相の曖昧性を解消できる。

本研究では、時間変調と空間変調を組み合わせることで計測精度を落とすことなく広範囲な計測が可能であることを示す。また、提案手法の距離計測精度や計測範囲を理論的に明らかにする。さらに本手法によって曖昧性がどの程度解消されるか解析を行う。最後に、試作機を用いた実環境実験により提案手法の有効性を示す。

2. 関連研究

コンピュータビジョン分野では、これまでにアクティブ計測による距離計測手法が広く研究されてきた。例えば、プロジェクタ-カメラシステムを用いて、グレイコード [1] や正弦波パターン [2] を投影することでプロジェクタの画素の位置を取得する方法が提案されてきた。また、位相シフト法 [2] では、正弦波パターンを投影し、位相を計測することで距離を取得している。Gupta ら [3] は、位相シフト法を発展させ、わずかに異なる周波数を投影することで位相の曖昧性を解消し、少ない投影枚数で間接光に強い計

¹ 奈良先端科学技術大学院大学
〒630-0192 奈良県生駒市高山町 8916-5
² 筑波大学
^{a)} kushida.takahiro.kh3@is.naist.jp

測手法を提案した。

また、光の飛行時間を利用した距離計測として ToF 法がある。ToF 法では振幅変調した光を投影し、シーンで反射して返ってくるまでの遅れを計測することで距離を推定する [4]。ToF 法による計測は計測可能な範囲と計測精度がトレードオフの関係にあるため、より高精度な観測をするためには、計測可能な範囲が制限されてしまう [5]。

ToF 法の別の課題として、間接光によるマルチパスの問題が挙げられる。マルチパスが起きるようなシーンで距離を正確に計測する方法は、これまでに広く研究されている [6], [7], [8], [9], [10], [11], [12], [13]。また、シーン中の距離は最初に観測された光子によって計測できることを利用し、ライトインフライト画像から距離を推定する研究も行われている [14], [15], [16], [17], [18], [19]。他にも、ToF 法とプロジェクタを組み合わせることでマルチパスの影響を解消する研究も行われている。Naik ら [20] は、ToF カメラとプロジェクタ-カメラシステムを組み合わせ、直接光と間接光を分離する方法 [21] を利用してマルチパスを解決した。また、時間と空間を同時に変調できる ToF プロジェクタを用いて同様のアイデアを実現している研究もある [22], [23]。どちらの手法も、直接光と間接光の分離に基づいてマルチパスの影響を除去している。

距離計測の精度を改善する方法として、変調に利用する符号化方式を最適化する方法が提案されている [24], [25], [26]。Kadambi ら [27] は、偏光を利用することでなめらかな表面を計測した。提案手法はこれらの手法の基礎的な部分に関するものであり、提案手法と組み合わせることで、より高精度な計測が可能となる。また、小さい物体であれば光の干渉を利用することで、マイクロメートル精度で計測できるが、利用できる環境が限られてしまう [28]。Li ら [29] は、スーパーヘテロダイン方式を利用したマイクロメートル精度の ToF 法を提案した。Maeda ら [30] は高精度な距離を計測するために、ヘテロダイン方式を偏光イメージングに利用した。

位相の曖昧性解消は距離計測における課題の一つである。位相シフト法や ToF 法では、計測した位相は 2π で折り返されるため、推定された距離には曖昧性が生じてしまう。計測数は空間解像度を犠牲にすることで減らすことができる。プロジェクタ座標はカラーコード [31] や波線グリッドパターン [32]、ライトフィールド ToF 法 [33] を使うことで一枚の画像から取得できる。提案手法は、これらと同じカテゴリの手法であるが、位相の曖昧性の解消に空間と時間のラッピングの非対称性を利用しているため、空間解像度を犠牲にせず、また多数のパターンを投影する必要がない。

3. 強度変調した照明を用いた距離計測手法

まず、従来法である ToF 法と位相シフト法について説明

する。ここでは、それぞれの手法を時間変調または空間変調した光を用いた位相計測法として説明する。

3.1 時間変調による距離計測手法 (ToF 法)

図 1 (a) に示すように、ToF カメラは時間的に変調した光を計測対象に対して照射する。光は計測対象で反射し、対象までの距離の分だけ遅れて観測される。ToF カメラはこの時間の遅れを位相として計測する。

位相を計測するために、ToF カメラでは照射した正弦波と反射して観測された信号との相関値を計測する。それぞれの周波数について、時間の遅れに対応する位相の遅れは N_s 個の参照信号との相関値を用いて計算できる。カメラのピクセル位置 x で観測された k 番目の信号の相関値 $i_k(x)$ は次のように表現できる。

$$i_k(x) = g \left(\omega_T t + \frac{2\pi k}{N_T} \right) * s(x, t) \quad (1)$$

$$= \frac{A(x)}{2} \cos \left(\phi_T(x) + \frac{2\pi k}{N_T} \right) + O(x), \quad (2)$$

ここで、 ω_T は変調周波数、 $g \left(\omega_T t + \frac{2\pi k}{N_T} \right)$ は位相を $2\pi k/N_T$ ずらした参照信号であり、 $s(x, t)$ は反射した観測信号である。演算子 $*$ はそれぞれの信号の相関演算、 $A(x)$ は信号の振幅、 $\phi_T(x)$ は位相、 $O(x)$ は環境光を表す。 $N_T = 4$ の時、反射して観測された信号の位相 $\phi_T(x)$ と振幅 $A(x)$ は次のように計算できる

$$\phi_T(x) = \arctan \left(\frac{i_3(x) - i_1(x)}{i_0(x) - i_2(x)} \right), \quad (3)$$

$$A(x) = \sqrt{(i_3(x) - i_1(x))^2 + (i_0(x) - i_2(x))^2}. \quad (4)$$

計測された位相を用いて、距離 d は次のように計算できる。

$$d(x) = \frac{c}{2\omega_T} \phi_T(x), \quad (5)$$

ここで、 c は光速を表す。

3.2 空間変調による距離計測手法 (位相シフト法)

位相シフト法は構造化照明法の一つであり、空間的に強度変調したパターンを計測対象に対して投影する。位相シフト法では、プロジェクタとカメラの対応するピクセルを求めるために照射したパターンを利用する。図 1 (b) に示すように、空間的な正弦波パターンを投影し、それぞれのカメラピクセルについて正弦波の位相を計測する。

正弦波パターンの位相をずらしながら撮影した時、 l 番目のパターンに対するそれぞれのピクセルで観測される光の強度 $I_l(x)$ は次のように表される。

$$I_l(x) = A(x) \cos \left(\phi_s(x) - \frac{2\pi l}{N_s} \right) + O(x). \quad (6)$$

このとき、環境光に起因するオフセット $O(x)$ 、反射光の

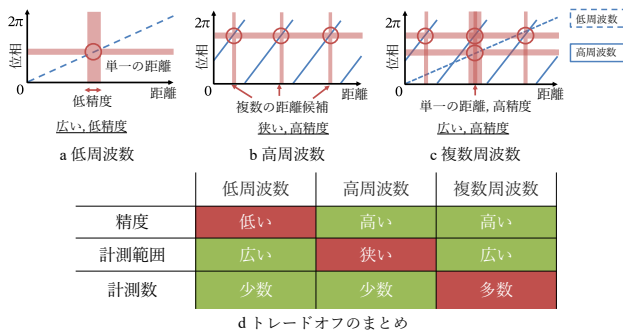


図 2 距離の計測精度，計測範囲，観測数のトレードオフ。青の破線は低周波の時に，青の直線は高周波の時に計測される位相を表す。水平の赤い帯は計測された位相の精度を表す。赤丸で示した青線と赤帯の交点から距離の候補が得られ，位相の計測精度に対応する距離の精度を垂直の赤い帯で表している。(a, b) 計測した位相の精度が同じでも，距離の精度は周波数によって異なる。高周波を用いることで高精度に計測できるが，曖昧性により複数の候補が生じてしまう。(c) 複数の周波数を用いることで高い精度のまま曖昧性のない範囲を広げることができるが，計測数は増加する。(d) トレードオフのまとめ。

強度 $A(x)$ ，空間領域の位相 $\phi_S(x)$ の 3 つの未知数が存在し， $N_S \geq 3$ の観測を用いることでこれらを計算できる。 $N_S = 4$ のとき，位相 $\phi_S(x)$ と振幅 $A(x)$ は ToF 法と同様に次のように計算できる。

$$\phi_S(x) = \arctan \left(\frac{I_3(x) - I_1(x)}{I_0(x) - I_2(x)} \right), \quad (7)$$

$$A(x) = \sqrt{(I_3(x) - I_1(x))^2 + (I_0(x) - I_2(x))^2}. \quad (8)$$

計測された位相は視差に対応するため，三角測量法によりシーンの距離を得ることができる。例えば，並行ステレオを仮定した時，対象までの距離は視差に反比例するため，次のように計算できる。

$$d(x) = \frac{bf}{x - \frac{\phi_S(x)}{\omega_S}} \quad (9)$$

ここで， $x - \frac{\phi_S(x)}{\omega_S}$ は視差を表し， ω_S は投影した正弦波の空間角周波数， f は焦点距離， b はプロジェクタ-カメラ間の基線長である。 x はカメラピクセルの水平位置である。

3.3 位相の曖昧性と距離計測精度

時間変調，空間変調を用いたそれぞれの方法に共通する問題として，位相の 2π の曖昧性の問題がある。計測された位相は 2π を超えると折り返されてしまうため， 2π の曖昧性を持ち，計測可能な範囲と計測精度の間にトレードオフが存在する。最も単純な解決方法は図 2 (a) に示すように，低い周波数を用いることである。低い周波数を用いると広い範囲を曖昧性なく計測できるが，距離の計測精度が落ちてしまう。一方で，図 2 (b) に示すように，高い周波数を用いることで距離の計測精度を上げることはできるが，位相の曖昧性なく計測できる範囲が狭くなるため，広

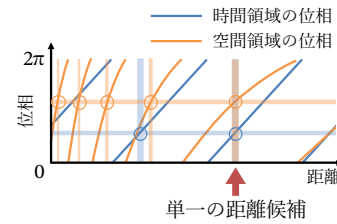


図 3 時間領域と空間領域の位相に対する距離の候補。時間領域の位相に対する距離の候補は同じ間隔で現れるのに対し，空間領域の位相に対する距離の候補は距離が遠くなるにつれて間隔が広がっている。この距離の候補の現れ方の違いを利用することで，時間領域と空間領域の両方の位相を満たす距離を一意に決定できる。

範囲の計測に対しては一意に距離を決定できない。

この位相の曖昧性の問題は，時間変調，空間変調のそれぞれで複数の周波数を用いることである程度解決することはできる。しかし，図 2 (c) に示すように，複数の周波数を計測するには周波数を切替えながら複数撮影する必要があり，計測に時間がかかってしまう。これに対し，我々は時間変調と空間変調の性質の違いを利用した 2 つの手法を組み合わせる手法を提案する。

4. 提案手法

提案手法では，時間領域，空間領域のそれぞれで複数の周波数を用いるのではなく，図 1 (c) に示すような時間変調と空間変調を組み合わせる照明を利用する。時間領域と空間領域の位相を計測し，2 つの位相を利用することで位相の曖昧性を解消する。

4.1 時空間変調照明による距離計測

本手法では，時間領域と空間領域の曖昧性がある位相から得られる距離の候補が異なることを利用する。時間領域の位相の場合，式 (5) に示すように距離は位相に比例するため距離の候補の間隔は等間隔になる。一方，空間領域の位相はステレオ法の視差に相当する。式 (9) に示すように，距離は視差に反比例するため，距離の候補の間隔は離れるほど大きくなる。計測された位相に対応する距離の候補を示したグラフを図 3 に示す。時間領域，空間領域のそれぞれの位相に対して複数の距離の候補が現れているが，時間領域の位相に対応する距離の候補は等間隔であるのに対し，空間領域の位相は距離が大きくなるにつれて間隔が大きくなる。本手法では，この 2 つの位相から得られる距離の違いに基づき，距離の曖昧性を解消する。

図 3 に示すように，時間領域と空間領域の位相を両方満たす距離はほとんど現れないため，この 2 つの位相の組み合わせによって計測可能な距離は従来法のように各領域の周波数の最小公倍数の距離に制限されることなく，広範囲の計測が可能となる。時間領域，空間領域のそれぞれの位相から得られる距離の候補は次式で表現できる。

$$d_T = \frac{c}{2\omega_T}(2\pi n_T + \phi_T) \quad (10)$$

$$d_S = \frac{bf}{x - \frac{2\pi n_S + \phi_S}{\omega_S}} \quad (11)$$

この時、 $d_T = d_S$ を満たす整数の組み合わせ (n_T, n_S) はほとんど存在しない。よって、2つの領域の位相を組み合わせることで距離の曖昧性の問題を解消できる。

4.2 位相の曖昧性の解消と距離の推定

ToF法の位相を $\frac{2\pi k}{N_T}$ 、位相シフト法の位相を $\frac{2\pi l}{N_S}$ ずらしたとき、得られる相関値 $i(x, k, l)$ は次式で表される。

$$i(x, k, l) = \frac{A(x)}{2} \cos\left(\phi_S(x) - \frac{2\pi l}{N_S}\right) \cos\left(\phi_T(x) + \frac{2\pi k}{N_T}\right) + O(x). \quad (12)$$

ここで、時間変調と空間変調の振幅 $A'(x)$ と環境光の影響 $O(x)$ が同じだと仮定すると、時間領域、空間領域のどちらか一方で振幅と環境光を計測するだけで、それぞれの位相を計算できる。 $N_T = 4, N_S = 2$ の時、時間領域で振幅と環境光を計算することで、合計で6回の観測から次式で2つの位相を得ることができる。

$$\begin{cases} \phi_T(x) &= \arctan \frac{i(x,3,0) - i(x,1,0)}{i(x,0,0) - i(x,2,0)} \\ A'(x) &= \sqrt{(i(x,3,0) - i(x,1,0))^2 + (i(x,0,0) - i(x,2,0))^2} \\ O(x) &= \frac{1}{4} \sum_k (i(x, k, 0) - A'(x) \cos(\phi_T(x) - \frac{\pi k}{2})) \\ \phi_S(x) &= \arctan \frac{i(x,3,1) + i(x,1,1) - 2O(x)}{i(x,3,0) + i(x,1,0) - 2O(x)}. \end{cases} \quad (13)$$

次に、計測された時間領域と空間領域の位相の組み合わせから距離を推定する。2つの位相の組み合わせから距離を推定する問題は、ToF法や位相シフト法で利用されている複数の周波数を使って計測した位相の組み合わせから曖昧性を解消する問題と同じように、ルックアップテーブルを用いて解くことができる [3]。距離に対する時間領域の位相と空間領域の位相の組み合わせを計算してテーブルを作成し、計測された位相の組み合わせを探索することで距離を得ることができる。ある距離 d に対する時間領域の位相、空間領域の位相は次のように計算できる。

$$\tilde{\phi}_T(d) = \frac{2\omega_T d}{c} \bmod 2\pi \quad (14)$$

$$\tilde{\phi}_S(d, x) = \omega_S \left(x - \frac{bf}{d} \right) \bmod 2\pi. \quad (15)$$

空間領域の位相と距離の関係はピクセル位置 x によって変化するため、カメラのピクセルごとにルックアップテーブルを作成する。平行ステレオの場合、画像の水平位置のピクセルに対してルックアップテーブルを作成する。水平方向のピクセル位置 x 、距離 D_i に対応する位相の組み合わせのベクトルを $\Phi_{D_i, x} = [\tilde{\phi}_T(D_i), \tilde{\phi}_S(D_i, x)]$ とすると、

テーブル \mathcal{T}_x は次のように表せる。

$$\mathcal{T}_x(D_i) = \Phi_{D_i, x} = [\tilde{\phi}_T(D_i), \tilde{\phi}_S(D_i, x)]. \quad (16)$$

それぞれのピクセルで得られた位相の組み合わせに対し、ルックアップテーブルを探索することで距離を推定できる。

$$\hat{d}(x) = \operatorname{argmin}_d \|\mathcal{T}_x(d) - [\phi_T(x), \phi_S(x)]\|_2^2. \quad (17)$$

視差への変換によるルックアップテーブルの削減

空間領域の位相と対応する距離の関係はピクセル位置によって変化するが、視差と対応する距離の関係はピクセル位置によらず一定である。そのため、空間領域の位相とカメラのピクセル位置から視差を計算することで、視差と時間領域のルックアップテーブルを一つ構築するだけですべてのピクセルの距離を推定できる。視差 $\delta(x, \phi_S(x))$ は空間位相とカメラのピクセル位置 x を用いて次のように計算できる。

$$\delta(x, \phi_S(x)) = x - \frac{\phi_S(x)}{\omega_S} \quad (18)$$

$$= \frac{bf}{\tilde{d}}, \quad (19)$$

ここで、 \tilde{d} は位相の折返しにより折り返された距離を表す。よって、テーブル \mathcal{T}' は距離の候補 D_i に対応する組み合わせからなるベクトル $\Phi'_{D_i} = [\tilde{\phi}_T(D_i), \tilde{\delta}(D_i)]$ を用いて次のように表せる。

$$\tilde{\delta}(D_i) = \frac{bf}{D_i} \bmod \frac{2\pi}{\omega_S} \quad (20)$$

$$\mathcal{T}'(D_i) = \Phi'_{D_i} = [\tilde{\phi}_T(D_i), \tilde{\delta}(D_i)], \quad (21)$$

ここで、 $\tilde{\delta}$ は各距離の候補から計算される視差を表す。それぞれのピクセルに対してルックアップテーブルを探索することで距離を推定できる。

$$\hat{d}(x) = \operatorname{argmin}_d \|\mathcal{T}'(d) - [\phi_T(x), \delta(x, \phi_S)]\|_2^2. \quad (22)$$

5. 提案手法の特性

5.1 距離の計測精度

従来のToF法と位相シフト法の距離精度は次式で表される [4], [23]。

$$\Delta d_T = \frac{c\pi}{\omega_T} \frac{\sqrt{B}}{2\sqrt{8A}}, \quad (23)$$

$$\Delta d_S = \frac{2\pi d^2}{bf\omega_S} \frac{\sqrt{B}}{2\sqrt{8A}}, \quad (24)$$

ここで、 A, B はセンサが蓄積可能な光電子の数であり、それぞれ信号の振幅成分と直流成分を表す。 A, B はセンサ固有の値のため、本稿では定数とみなす。式 (23) と式 (24) を用いて距離と精度の関係を表したグラフを図4に示す。ToFの精度はすべての距離に対して一定であるのに対し、位相

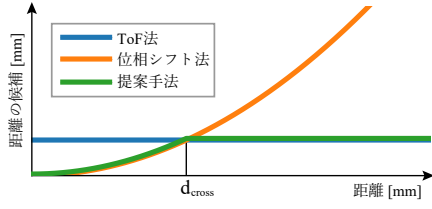


図4 距離に対する計測精度の変化。ToF法の精度は一定である(青線)のに対し、位相シフト法の精度は距離の二乗に比例して悪くなっている(橙)。 d_{cross} はToF法と位相シフト法の精度のグラフが交わる距離を表す。提案手法を用いることで、 d_{cross} より近い範囲では位相シフト法に近く、遠い範囲ではToF法に近い精度を実現できる(緑)。

シフト法は距離の二乗に比例することがわかる。これに対し、提案手法ではToF法と位相シフト法に近い精度を達成できる。

ToFと位相シフト法の精度が入れ替わる距離を d_{cross} とすると、 d_{cross} より近い範囲では提案手法の精度は位相シフト法に近く、遠い範囲ではToF法に近い精度で計測が可能である。 d_{cross} は次の式で与えられる。

$$d_{\text{cross}} = \sqrt{\frac{cbf\omega_s}{2\omega_T}}. \quad (25)$$

ToF法の精度を向上させる場合、最大計測範囲が d_{cross} 以下となるように各パラメータを設定する必要がある。

5.2 計測可能な範囲

提案手法を用いて計測可能な範囲は、時間周波数と空間周波数の関係によって決まる。

最短距離: 空間周波数が時間周波数に比べて非常に高いとき、図5(a)に示すように、ToF法の計測精度の間に位相シフト法の複数の距離の候補が生じてしまい、位相の曖昧性を解消できない。プロジェクタは透視投影であるため、空間周波数は距離に応じて変化し、距離が短いほど高周波になる。よって提案手法を用いて計測可能な最小距離 d_{min} は、空間位相によって得られる距離の候補の間隔がToF法の精度と等しくなる距離であり、次式により計算できる。

$$d_s|_{n_s=n'_s} - d_s|_{n_s=n'_s-1} = \frac{\Delta d_T}{2}, \quad (26)$$

ここで、 $d_s|_{n_s=n'_s}$ は曖昧性を解消した距離、 $d_s|_{n_s=n'_s-1}$ は隣接する距離の候補であり、式(11)により与えられる。式(15)を代入し、 d_{min} について解くことで、最短距離を計算できる。

$$d_{\text{min}} = \frac{\Delta d_T}{4} + \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\Delta d_T^2}{4} + \frac{\omega_s b f \Delta d_T}{\pi}} \quad (27)$$

最長距離: 空間周波数が時間周波数に比べて非常に低い時、図5(b)に示すように位相シフト法の計測精度の間にToF法の複数の距離の候補が生じてしまい、位相の曖昧性を解消できなくなってしまう。位相シフト法の精度は距離

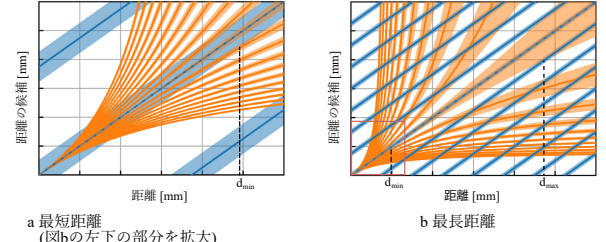


図5 提案手法によって計測可能な範囲。橙色の線は空間領域の位相から得られる距離の候補、青色の線は時間領域の位相から得られる距離の候補を表す。それぞれの色で塗られた領域は距離の精度を表す。(a)距離が d_{min} より短い範囲では、時間領域の精度(青)の中に複数の空間領域の距離の候補(橙)が現れてしまうため、曖昧性を解消できない。(b)同様に、距離が d_{max} より遠い範囲では、空間領域の精度(橙)の中に複数の時間領域の距離の候補(青)が現れてしまう。

に反比例するため、距離が遠くなるほど精度が低下する。よって、提案手法を用いて計測可能な最長距離 d_{max} は時間位相によって得られる距離の候補の間隔が位相シフト法の精度と等しくなる距離であり、次式により計算できる。

$$d_T|_{n_T=n'_T} - d_T|_{n_T=n'_T-1} = \frac{\Delta d_S}{2}, \quad (28)$$

ここで、 $d_T|_{n_T=n'_T}$ は曖昧性を解消した距離、 $d_T|_{n_T=n'_T-1}$ は隣接する距離の候補であり、式(10)により与えられる。式(14)、式(24)を代入し、 d_{max} について解くことで、最長距離を計算できる。

$$d_{\text{max}} = \sqrt{\frac{\omega_s b f c^2 \pi}{\omega_T^2 \Delta d_T}}. \quad (29)$$

5.3 提案手法では曖昧性が解消できない距離

提案手法を用いても曖昧性が解消できない距離が存在する。図6は距離に対応する時間位相と空間位相の組み合わせを表すグラフである。縦軸は時間領域の位相、横軸は空間領域の位相を表し、曲線の色が距離を表す。このグラフが交差する点は位相の組み合わせに対して複数の距離の候補が存在するため、距離を一意に推定できない。

一般的なシーンに対し、一意に推定できない点がある程度存在するののかについて、シミュレーションにより検証を行った。屋内のデータセットを用いて、画像中の計測できないピクセルの割合を評価した。データセットに含まれる距離画像から時間、空間領域の位相をそれぞれ計算し、提案手法を用いて距離の推定を行った。時間周波数は50MHz、空間周波数は $1/0.6\text{mm}^{-1}$ を用いた。評価には、データセットからランダムに選んだ100シーンを利用した。

距離推定結果を図7に示す。画像中の一部について、複数の距離の候補が存在するため、距離を一意に推定できないことがわかる。100シーンのそれぞれの画像中で距離を一意に推定できない割合の平均は5%以下であった。この

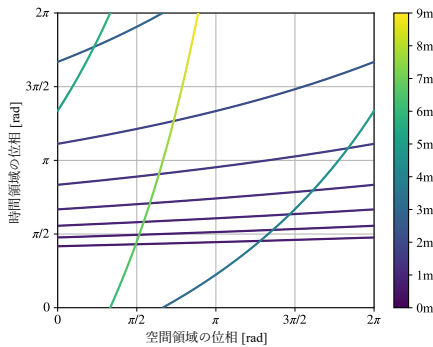


図 6 距離に対する時間領域の位相と空間領域の位相の変化. 縦軸は時間領域の位相, 横軸は空間領域の位相を表し, 色は距離を表す. グラフが交差する点は異なる距離に対し同じ位相の組み合わせを持つため, これらの距離は一意に推定できない.

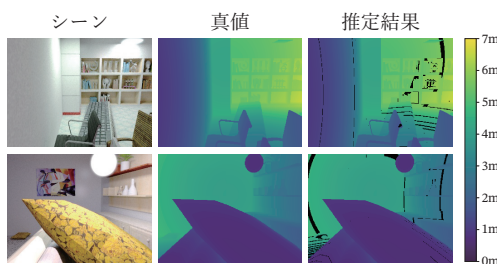


図 7 シミュレーション結果. 黒いピクセルは, 曖昧性により一意に距離を推定できないことを表す. 黒いピクセルは, 画像中にまばらにしか存在しないことがわかる.

ような曖昧性の残る距離は画像中ではまばらに存在するため, 周辺のピクセルから補間することでこれらの領域を補うことができる.

5.4 計測数

時間変調と空間変調を組み合わせる利点として, 時間領域と空間領域は直交しているため, 重畳しても互いに影響を与えずに時間領域と空間領域の位相を計測できる.

提案手法では, 6つの相関値から2つの位相を計算している. 一般的な2タップ ToF センサがサブフレームを用いて2つの観測を1フレームで取得していることを利用することで, 6つの観測を3フレームで得ることができる. 具体的には, $i(x, 0, l)$ と $i(x, 2, l)$, $i(x, 1, l)$ と $i(x, 3, l)$, をそれぞれ同時に取得できる.

5.5 投影パターンの明るさ

提案手法では空間パターンに正弦波を利用しており, すべてのピクセルに光が当たるため, 基本的にはすべてのピクセルで時間領域の位相を計測できる. しかし, 仮に空間パターンが完全に真っ暗になるピクセルがある場合, 光が当たらないため, 時間領域の位相を計測できない. すべてのピクセルに光が当たるよう, 空間パターンのすべてのピクセルにオフセットを加えることでこの問題を解決できる. ただしこの場合, 時間変調と空間変調の振幅成分と環

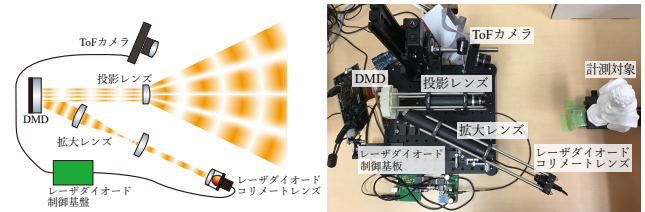


図 8 計測システム. 光源ユニットはレーザダイオードと DMD で構成されている. レーザダイオードは ToF カメラと接続されており, 時間変調した光を生成する. 光は DMD によって空間変調され, 投影レンズにより計測対象へと投影される. 投影したパターンを横に設置した ToF カメラで観測する.

境光成分が等しいという式 (13) の仮定が崩れ, 未知数の数が増加してしまうため, $N_s \geq 3$ の観測が必要となる.

6. 実験

計測システムは, ToF カメラ (Texas Instruments OPT8241-CDK-EVM) を元に制作した. 空間パターンを生成するために, カメラの光源を波長 830nm のレーザダイオード (Hamamatsu Photonics L9277-42) と DMD で構成したプロジェクタシステムに取り替えた. レーザダイオードは ToF カメラと同期しており, 時間変調パターンを生成できる. レーザダイオードの光をコリメートレンズによって平行化し, レンズペアにより拡大し, DMD (Texas Instruments DLP6500, 1920 × 1080) へと入力する. DMD により空間パターンを生成し, 投影レンズを通してシーンへと投影する. 計測システムを図 8 に示す. 計測システムのキャリブレーションは次のように行った. まず, 一般的なプロジェクタ-カメラシステムと同様の手法 [34] を用い, プロジェクタ-カメラ間のキャリブレーションを行った. 次に, プロジェクタ-カメラシステムの座標系と ToF カメラの座標系が一致するように ToF カメラの位相のキャリブレーションを行った. 白色板を動かしながら, それぞれの距離で時間領域の位相と空間領域の位相を撮影し, 真値として従来法の位相シフト法により距離を計測した. 位相シフト法により得られた距離と観測された位相に対して直線フィッティングを行うことでパラメータを推定した.

カメラから約 350mm 離れた位置に少し傾けて設置した白色板を計測した. 実験環境を図 9 (a) に示す. 時間周波数を 60MHz, 空間パターンをプロジェクタ画像上で 1 周期が 60 ピクセルとなるように設定した. カメラとプロジェクタ間のベースラインは約 70mm, カメラのレンズの焦点距離は 35mm を用いた.

比較として, 1つの低周波のみ用いた ToF 法, 1つの高周波のみを用いた位相シフト法を用いて計測を行った. 推定された距離画像を図 9 (b) に示す. 位相シフト法は, 距離の候補が複数あり, 画像として表示できないため, ToF 法と提案手法のみを載せている. 画像中の赤線の断面の距離のグラフを図 9 (c) に示す. ToF 法はノイズが多く, ま

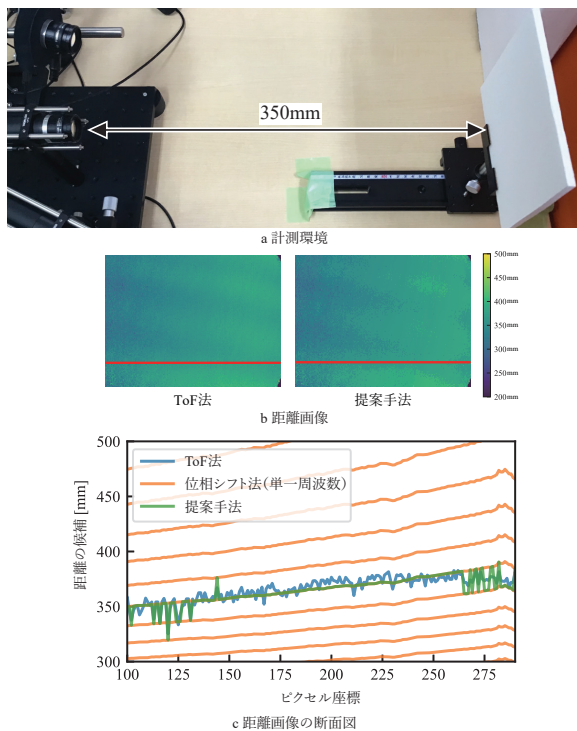


図9 白色板の計測結果. ToF法, 位相シフト法, 提案手法の比較を行った. (a) 実験環境. 白色板をわずかに傾けて設置している. (b) 計測結果の距離画像. 位相シフト法では曖昧性により複数の距離候補があるため, 画像として表示できない. (c) 距離画像中の赤線の断面のグラフ. ToF法ではノイズが多く, 位相シフト法では複数の候補があるのに対し, 提案手法では, 曖昧性を解消しつつノイズの少ない結果が得られている.

た位相シフトは曖昧性によって複数の候補が現れているのに対し, 提案手法では, 曖昧性なく滑らかな平面を復元できている. グラフの端の方では, 投影したパターンが暗く, 時間領域の位相が空間領域の位相の間隔を超えてしまい, 曖昧性の解消が正しくできていないが, 空間周波数を少し下げることによって解決できると考えられる. また, この計測システムでは高品質な時空間変調パターンを生成できず, 十分な解像度を得られなかった. 原因として, DMDによるレーザーの回折, アライメントの調整不足, 光量の不足などが挙げられる.

そこで, これらを改善するために, 新たに図10(a)に示す装置を構築した. このシステムでは, ToFカメラの光源の前に縞模様を印刷したOHPフィルムを設置することでパターンを生成している. フィルムを平行移動することで投影するパターンをシフトすることができる. ToFカメラはMelexis社製EVK75027を用い, 時間周波数を40MHzとした. 縞模様は1周期を1mmとした. 新たに構築した装置を用いてカメラから約300mm離れた位置に設置した石膏像を計測した. 実験環境を図10(a), 推定した距離から復元したメッシュを図10(b)に示す. 提案手法を用いることでなめらかな形状が復元されていることがわかる.

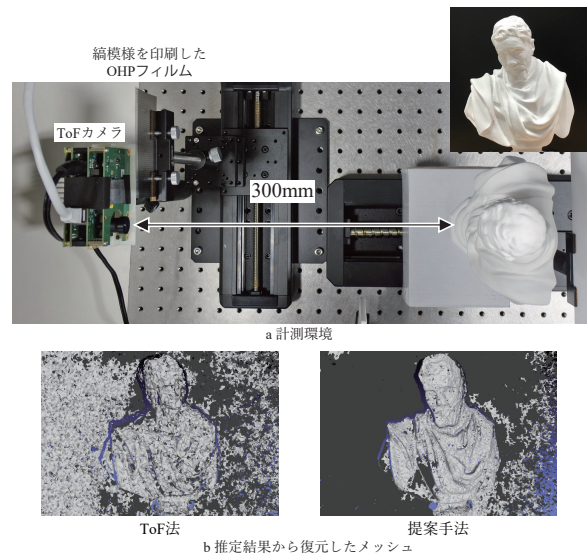


図10 石膏像の計測結果. (a) 計測環境. (b) 距離の推定結果から復元したメッシュ. 提案手法ではなめらかな形状が復元されている.

7. おわりに

本研究では, 時空間変調した光を用いて距離を計測する方法を提案した. 時間領域と空間領域の位相から得られる距離の曖昧性が異なることを利用し, 少数の計測から計測精度を落とすことなく曖昧性を解消できることを示した.

提案手法はToFカメラと位相シフト法の利点だけでなく, それぞれの欠点も合わせて持っている. 提案手法を用いることで広い範囲を精度を落とすことなく計測できるが, 一方でToFカメラではほとんど問題にならないオクルージョンの問題が発生する可能性がある. 実際には, 通常のToFカメラはセンサと光源が完全には同軸に設置されていないが, ほとんどオクルージョンは発生していない. よって, 時空間変調可能なプロジェクタを現在のToFカメラの光源の位置に設置することで, オクルージョンの影響をほとんど受けることなく計測できると考えられる.

謝辞 本研究の一部は, JST CREST JPMJCR1764, 科研費18H03265, 18K19822の助成を受けた.

参考文献

- [1] Inokuchi, S., Sato, K. and Matsuda, F.: Range Imaging System for 3-d Object Recognition, *Proc. International Conference on Pattern Recognition*, pp. 806–808 (1984).
- [2] Salvi, J., Fernandez, S., Pribanic, T. and Llado, X.: A state of the art in structured light patterns for surface profilometry, *Pattern Recognition*, Vol. 43 (2010).
- [3] Gupta, M. and Nayer, S.: Micro Phase Shifting, *Proc. CVPR*, pp. 813–820 (2012).
- [4] Lange, R. and Seitz, P.: Solid-state time-of-flight range camera, *IEEE Journal of Quantum Electronics*, Vol. 37, No. 3, pp. 390–397 (2001).
- [5] Yasutomi, K., Usui, T., Han, S.-m., Takasawa, T., Kei-ichiro, K. and Kawahito, S.: A Submillimeter Range Res-

- olution Time-of-Flight, *IEEE Transactions on Electron Devices*, Vol. 63, No. 1, pp. 182–188 (2016).
- [6] Heide, F., Xiao, L., Kolb, A., Hullin, M. B. and Heidrich, W.: Imaging in Scattering Media using Correlation Image Sensors and Sparse Convolutional Coding., *Optics express*, Vol. 22, No. 21, pp. 26338–50 (2014).
- [7] Kirmani, A., Benedetti, A. and Chou, P. A.: Spumic: Simultaneous Phase Unwrapping and Multipath Interference Cancellation in Time-of-Flight Cameras using Spectral Methods, *IEEE International Conference on Multimedia and Expo (ICME)*, IEEE, pp. 1–6 (2013).
- [8] Freedman, D., Krupka, E., Smolin, Y., Leichter, I. and Schmidt, M.: Sra: Fast Removal of General Multipath for ToF Sensors, *Proc. ECCV*, pp. 1–15 (2014).
- [9] Qiao, H., Lin, J., Liu, Y., Hullin, M. B. and Dai, Q.: Resolving Transient Time Profile in ToF Imaging Via Log-Sum Sparse Regularization., *Optics letters*, Vol. 40, No. 6, pp. 918–21 (2015).
- [10] Kadambi, A., Schiel, J. and Raskar, R.: Macroscopic Interferometry: Rethinking Depth Estimation with Frequency-Domain Time-Of-Flight, *Proc. CVPR*, pp. 893–902 (2016).
- [11] Marco, J., Hernandez, Q., Muñoz, A., Dong, Y., Jarabo, A., Kim, M. H., Tong, X. and Gutierrez, D.: DeepToF: Off-the-shelf Real-time Correction of Multipath Interference in Time-of-flight Imaging, *ACM Trans. Graph.*, Vol. 36, No. 6, pp. 219:1–219:12 (online), DOI: 10.1145/3130800.3130884 (2017).
- [12] Tanaka, K., Mukaigawa, Y., Funatomi, T., Kubo, H., Matsushita, Y. and Yagi, Y.: Material Classification from Time-of-Flight Distortions, *IEEE TPAMI* (2018).
- [13] Su, S., Heide, F., Wetzstein, G. and Heidrich, W.: Deep End-to-End Time-of-Flight Imaging, *Proc. CVPR* (2018).
- [14] Velten, A., Willwacher, T., Gupta, O., Veeraraghavan, A., Bawendi, M. G. and Raskar, R.: Recovering Three-Dimensional Shape Around a Corner using Ultrafast Time-of-Flight Imaging, *Nature communications*, Vol. 3, No. 745 (2012).
- [15] Heide, F., Hullin, M. B., Gregson, J. and Heidrich, W.: Low-Budget Transient Imaging using Photonic Mixer Devices, *ACM ToG*, Vol. 32, No. 4, p. 1 (2013).
- [16] Kitano, K., Okamoto, T., Tanaka, K., Aoto, T., Kubo, H., Funatomi, T. and Mukaigawa, Y.: Recovering Temporal PSF using ToF Camera with Delayed Light Emission, *IPSJ Transaction on Computer Vision and Applications*, Vol. 9, No. 15 (2017).
- [17] Kadambi, A., Whyte, R., Bhandari, A., Streeter, L., Barsi, C., Dorrington, A. and Raskar, R.: Coded Time of Flight Cameras: Sparse Deconvolution to Address Multipath Interference and Recover Time Profiles, *ACM ToG*, Vol. 32, No. 6, pp. 1–10 (2013).
- [18] O’Toole, M., Heide, F., Xiao, L., Hullin, M. B., Heidrich, W. and Kutulakos, K. N.: Temporal Frequency Probing for 5D Transient Analysis of Global Light Transport, *ACM ToG*, Vol. 33, No. 4, pp. 1–11 (2014).
- [19] O’Toole, M., Heide, F., Lindell, D., Zang, K., Diamond, S. and Wetzstein, G.: Reconstructing Transient Images from Single-Photon Sensors, *Proc. CVPR* (2017).
- [20] Naik, N., Kadambi, A., Rhemann, C., Izadi, S., Raskar, R. and Bing Kang, S.: A Light Transport Model for Mitigating Multipath Interference in Time-of-Flight Sensors, *Proc. CVPR*, pp. 73–81 (2015).
- [21] Nayar, S. K., Krishnan, G., Grossberg, M. D. and Raskar, R.: Fast Separation of Direct and Global Components of a Scene using High Frequency Illumination, *ACM ToG*, Vol. 25, No. 3, pp. 935–944 (2006).
- [22] Whyte, R., Streeter, L., Cree, M. J. and Dorrington, A. A.: Resolving multiple propagation paths in time of flight range cameras using direct and global separation methods, *Optical Engineering*, Vol. 54, pp. 54 – 54 – 9 (online), DOI: 10.1117/1.OE.54.11.113109 (2015).
- [23] Agresti, G. and Zanuttigh, P.: Combination of Spatially-Modulated ToF and Structured Light for MPI-Free Depth Estimation, *ECCV Workshop on 3D Reconstruction in the Wild* (2018).
- [24] Mirdehghan, P., Chen, W. and Kutulakos, K. N.: Optimal Structured Light à La Carte, *Proc. CVPR* (2018).
- [25] Gupta, M., Velten, A., Nayar, S. K. and Breitbach, E.: What Are Optimal Coding Functions for Time-of-Flight Imaging?, *ACM ToG*, Vol. 37, No. 2, pp. 13:1–13:18 (online), DOI: 10.1145/3152155 (2018).
- [26] Gutierrez-Barragan, F., Reza, S., Velten, A. and Gupta, M.: Practical Coding Function Design for Time-of-Flight Imagin, *Proc. CVPR* (2019).
- [27] Kadambi, A., Taamazyan, V., Shi, B. and Raskar, R.: Polarized 3D: High-Quality Depth Sensing with Polarization Cues, *Proc. ICCV*, pp. 3370–3378 (2015).
- [28] Gkioulekas, I., Levin, A., Durand, F. and Zickler, T.: Micron-Scale Light Transport Decomposition using Interferometry, *ACM ToG*, Vol. 34, No. 4, pp. 37:1–37:14 (2015).
- [29] Li, F., Willomitzer, F., Rangarajan, P., Gupta, M., Velten, A. and Cossairt, O.: SH-ToF: Micro Resolution Time-of-Flight Imaging with Superheterodyne Interferometry, *Proc. ICCP* (2018).
- [30] Maeda, T., Kadambi, A., Schechner, Y. Y. and Raskar, R.: Dynamic heterodyne interferometry, *Proc. ICCP* (2018).
- [31] Sagawa, R., Kawasaki, H., Furukawa, R. and Kiyota, S.: Dense one-shot 3d reconstruction by detecting continuous regions with parallel line projection, *Proc. ICCV* (2011).
- [32] Sagawa, R., Sakashita, K., Kasuya, N., Kawasaki, H., Furukawa, R. and Yagi, Y.: Grid-Based Active Stereo with Single-Colored Wave Pattern for Dense One-shot 3D Scan, *3DIMPVT*, pp. 363–370 (online), DOI: 10.1109/3DIMPVT.2012.41 (2012).
- [33] Jayasuriya, S., Pediredla, A., Sivaramakrishnan, S., Molnar, A. and Veeraraghavan, A.: Depth Fields: Extending Light Field Techniques to Time-of-Flight Imaging, *2015 International Conference on 3D Vision*, pp. 1–9 (online), DOI: 10.1109/3DV.2015.8 (2015).
- [34] Zhang, Z.: A Flexible New Technique for Camera Calibration, *TPAMI*, Vol. 22, pp. 1330 – 1334 (online), DOI: 10.1109/34.888718 (2000).