

時間的周波数を利用した投影コードによる 凹面金属の形状計測

山田 憲^{1,a)} 田中 賢一郎^{1,b)} 久保 尋之^{1,c)} 船富 卓哉^{1,d)} 向川 康博^{1,e)}

概要

アクティブ照明法を用いた計測では、凹面の金属では鏡面反射による強い相互反射が生じるため、照明のパターンが互いに重なってしまい、3次元形状計測が難しいことが知られている。本研究では、投影コードに時間的周波数を利用することで、重なってしまったパターンをフーリエ空間で分離し、相互反射の影響を低減して凹面金属の形状を計測できる手法を提案する。

1. はじめに

金属は様々な工業製品に使用されており、それらの3次元形状の計測技術は産業界を中心として大きな需要が見込まれている。物体の3次元形状の計測には、プロジェクタを用いて構造化光を物体に照射し、その様子をカメラで撮影して視差情報を推定することで3次元形状を復元する、アクティブ3次元計測手法が知られている [1]。アクティブ3次元計測では、 T 枚からなる画像（構造化光）をプロジェクタで投影したときの様子をカメラでそれぞれ撮影して T 枚の画像を取得し、各画素で T 次元からなる輝度の遷移から視差情報を復元する。従来のアクティブ3次元計測では直接反射光が強く観測されることを仮定しているため、各画素にはただひとつの視差情報しか存在しないものとして推定している [2]。しかし、金属では特有の反射が生じるため直接反射光だけでなく鏡面反射による間接光の影響が大きい。そこで本研究では、金属面における指向性の強い鏡面反射によって生じる間接光の強度が直接光の強度を上回りうることを考慮し、各画素に対して反射光の経路に応じて複数の視差情報を推定する。さらに、求められた複数の視差情報の中から、直接反射光に相当する最適な視差情報を求めることで、3次元形状を復元可能にする手法を提案する。本研究のアイデアは、プロジェクタの各ピ

クセルに、異なる時間的周波数を割り当て、カメラピクセルにおいてどの周波数が観測されているのかを検出することで、プロジェクタ・カメラ間のピクセルの対応関係を復元することである。周波数の異なる信号は直交しているため、それぞれの信号は計測に影響を及ぼさない。本手法では、空間的に異なる周波数を割り当てるため、相互反射で信号が空間的に重なり合っても、それぞれの光路に応じた視差情報を独立して推定することができる。こうして得られた候補から、大域的に辻褃の合う視差を投票により推定する。

2. 提案手法

2.1 時間的周波数を利用した投影パターンの作成

指向性の強い鏡面反射によって生じる間接光が直接光と同時に観測される場合、異なる視差情報に対応する T 次元の輝度変化が複数加算されたものが観測されることになる。このような状況下で、観測された T 次元の輝度変化から、重なり合った複数の視差情報を復元することを考える。このような問題は信号処理の分野で従来から取り組まれており、本手法では無線通信から着想を得た投影パターンを設計する。具体的には、投影パターンの各列に異なる周波数を割り当て、 T 次元の輝度変化に埋め込むように投影パターンを構成する手法を提案する (図 1)。列 $x = [1, \dots, W]$ に割り当てる周波数を $\omega(x)$ としたとき、ここでは単純に以下の通りとする。

$$\omega(x) = x$$

T 次元の輝度変化に周波数 $\omega(x)$ の正弦波を割り当てることとした場合、生成される t 番目のパターン画像 $f(x, t)$ は以下のように表される。

$$f(x, t) = 0.5 \left(\sin \frac{2\pi\omega(x)t}{T} + 1 \right)$$

なお、エイリアシングの発生を防ぐため、投影枚数は $T > 2x$ を満たす必要がある。

2.2 候補別デコード画像の生成

こうして生成されたパターンをシーンに投影し、カメラ

¹ 奈良先端科学技術大学院大学

a) yamada.akira.xt7@is.naist.jp

b) ktanaka@is.naist.jp

c) hkubo@is.naist.jp

d) funatomi@is.naist.jp

e) mukaigawa@is.naist.jp

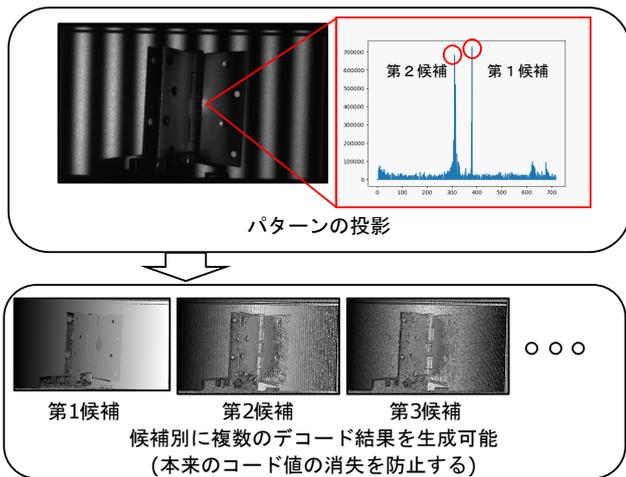


図 1 候補別のデコード結果の抽出。フーリエ変換すると、光路に応じた周波数に強いピークが生じる。それぞれのピークが、直接反射・鏡面相互反射の候補である。

で撮影した T 枚の画像から、各画素で T 次元の輝度変化を得られる。この変化に対しフーリエ変換を施せば、各周波数 $\omega(x)$ の成分を分離することができる。本手法ではこの性質を利用して視差情報のデコードを行う。原理的には、取りうる全ての視差情報についてその強度とコード値の抽出が可能である。しかし、全ての可能性を保持しておく、直接反射光に相当する視差情報を求める後述の処理が煩雑となる上、パターン画像の量子化誤差や標準化誤差、輝度変化をカメラで捉える際の計測誤差などに脆弱になると考えられる。本手法では直接光成分を凌駕するような間接光成分が複数の異なる点から一点に集中して重なり合うことはない、と仮定することで候補を限定し、後述する実験では強度が第 $k = 3$ 位未満の周波数成分については視差情報の候補としては扱わないこととする。各画素でそれぞれ周波数成分の強度順位を求めることで、図 1 の下部に示すような、第 k 候補の視差情報を表わすデコード画像を生成することができる。

2.3 複数候補からの最適な視差情報の選択

本来の形状を復元するためには、直接反射光に対応する視差情報を抽出する必要があるが、先述の通り、例えば指向性の強い鏡面反射によって生じる間接光が直接反射光に重なると、望ましい視差情報の強度が 1 位にならない可能性がある。そこで本手法では、計測対象の形状が空間的に滑らかである点と、強い間接光が空間的に特異となる点を仮定し、多数決原理に基づいて最適な視差情報を求めることとする。形状が空間的に滑らかである場合、エピソード線上にある近傍の画素において、直接反射光に対応する視差情報も近接していると考えられる。一方、間接光による視差情報は近傍の画素で常に候補として保持されるとは限られない。そのため、形状候補の視差の変化や、傾きが大きくなりすぎるといった傾向が見られる。そこで本手法で

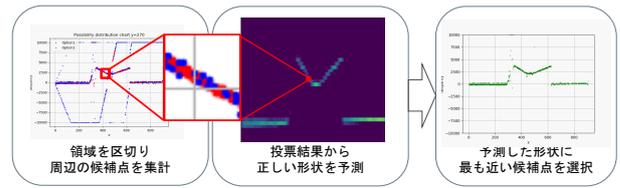


図 2 多数決に基づいた視差情報の選択

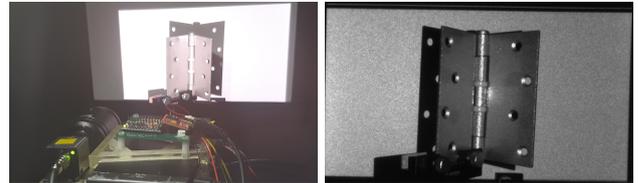


図 3 実験環境。(a) プロジェクタ・カメラシステム (b) 対象物体。金属製の蝶番が 90 度を開いている。

は、各画素が候補として複数保持している視差情報をその近傍で集計し、得票が集中した視差情報に最も近い候補を直接反射光に対応する視差情報として選択する。

具体的には、ある画素に対し、第 k 候補として保持されている視差情報を、その両側の近傍 D ピクセルずつにそれぞれ投票する。このとき、画素毎に視差を任意の量子化幅 S で離散化して得票を集計する。その結果、最大の得票を得た視差推定位置に最も近い視差情報を各画素が保持する候補から選択し、これを直接反射光に対応する視差情報として選択することとした。(図 2) 本研究では $S = 50, D = 8$ と置き、処理を行っている。

最大の得票を得た視差をその画素の視差情報として採用する方法も考えられるが、その場合、3 次元復元の精度が量子化幅 S に依存してしまう。これに対し、前節で保持しておいた視差情報から最も近いものを選択し、量子化幅 S に依存せず、本来投影パターンが持つ分解能 W を損なわずに 3 次元復元をすることが可能である。量子化幅 S は極端に大きい/小さい値でなければ、性能に大きな影響を与えることはない

3. 実験

本手法の有効性を確認するため、間接光が直接反射光よりも強く観測される対象を用意し、実環境で計測実験を行った。図 3 (a) に示すように、レーザープロジェクタ MP-CL1A (SONY 製) によってパターンを投影し、そこから横並びに 6cm の位置に設置したカメラ UI-3240CP-NIR (IDS 製) によって反射光を観測した。なお、実験は環境光の影響を抑えるため暗室内で行った。間接光が直接反射光よりも強く観測される対象として、図 3 (b) に示すように、金属製の蝶番を手前に向かって約 45 度ずつ折りたたまれた状態で設置した。比較対象として、グレイコード法でも計測を行った。

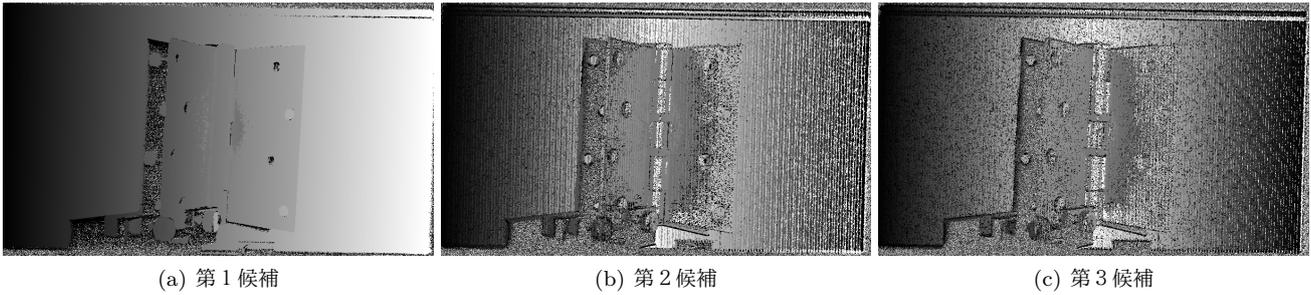
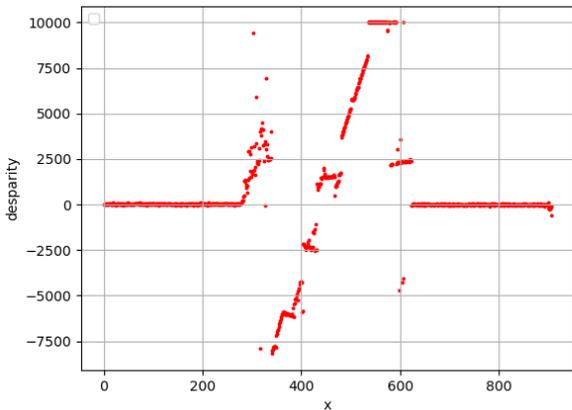


図 4 デコード候補画像. 対応するプロジェクティブピクセルの座標を明るさで表現したもの. 直接反射の経路を表す対応点は, (a) 第 1 候補 (b) 第 2 候補 (c) 第 3 候補のいずれかに含まれる.

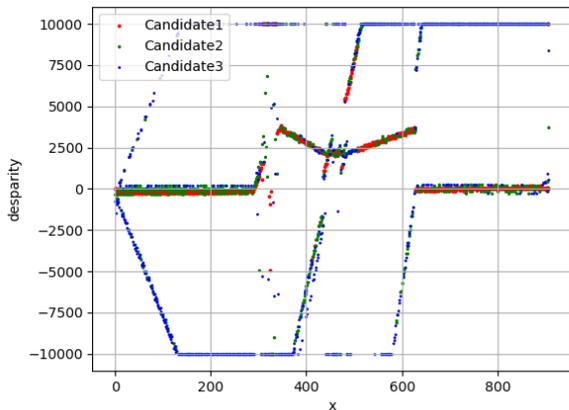
3.1 結果

提案パターンを投影して得られた視差情報のうち, 第 1 候補から第 3 候補までのデコード候補を図 4 に示す.

図から, 視差情報の第 1 候補では, 平板上で視差が比較的滑らかに変化している一方, 蝶番の中央部分では視差が不連続となっている箇所が見られた. 第 1 候補の視差情報は多くが直接反射光成分によるものであると考えられ,



(a) グレイコード



(b) 提案手法

図 5 推定された視差の比較. (a) グレイコード法により推定された視差. 視差が不連続でかつ大きくゆがんでいる. (b) 各ピクセルにおいて第 3 位までの候補を視差空間にプロットした様子. 正しい視差に多数の点がプロットされていることが確認できる.

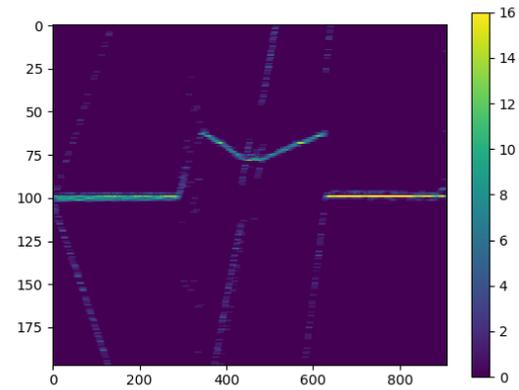


図 6 投票結果. 投票数を色で表した図. 色が明るくなるほど, 周辺に点が密集していることを意味する.

比較的滑らかに変化している部分は計測対象物の形状を良く表していると見ることが出来る. 一方, 中央部分に見られる不連続な視差情報を持つ箇所は, 実際の物体形状にはそぐわない. この原因として, 左右の平板からの相互反射による間接光成分が直接反射光に比べて強く, 直接反射光に対応する視差情報が第 1 候補とならなかった点が考えられる. また, 視差情報の第 2 候補以下では, 蝶番の左右端に近づくにつれて視差情報が不安定になっているが, 第 1 候補で視差が不連続となっていた中央部分では, 直接反射光によるものと思われる視差情報が含まれていた.

図 5 には, 観測画像のある 1 行において, グレイコード (a) と提案パターン (b) を用いて復元した視差を図示する. なお (b) では視差情報の第 1 候補から第 3 候補までの結果をプロットしてある. 計測対象に金属特有の反射が生じるため, グレイコード (a) ではほとんど正しい視差が得られていないように見える. 一方, 提案手法 (b) では視差情報の候補を適切に選択することで正しい形状が取得できることが示唆されている.

図 5(b) に示した候補に対し, 投票を行った結果を図 6 に示す. 図より, 正しい形状を示す位置に投票数が集中していることが確認できる.

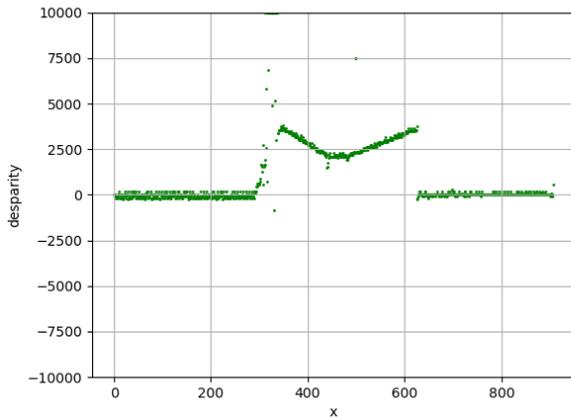


図 7 投票により 1 つに絞られた視差候補.

図 6 の投票結果に基づき, 図 5(b) の視差を一意に求めた結果を図 7 に示す. 図より, 複数存在していた視差の中から, 計測対象の本来の形状を示す視差情報を抽出できていることが確認できる.

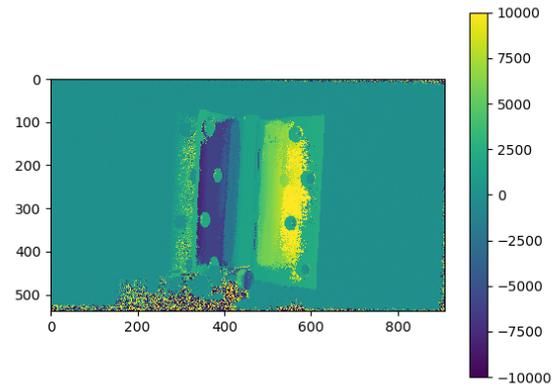
最後に, 提案手法を画像全体に適用して視差を求めた結果と, 比較対象にグレイコードから視差を求めた結果を図 8 に示す. グレイコードの結果では, 直接反射光に間接光が重なり合い, 視差情報のデコードを大きく誤っていることが見て取れる. 一方で, 提案手法の結果では, 計測対象のほぼ全域で視差を正しく推定できていることが確認された.

4. まとめ

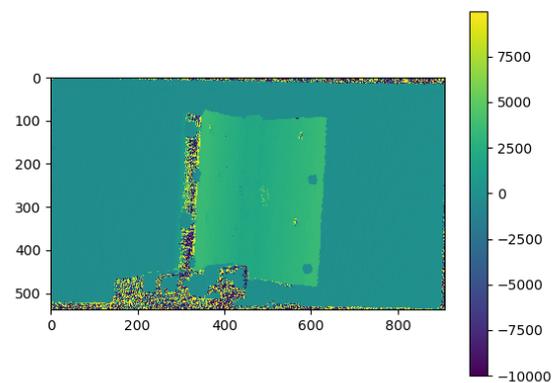
本論文では, 金属物体の 3 次元形状計測を目的とし, プロジェクタで投影するパターンと, 撮影画像からの視差情報の推定手法を提案した. 金属は 3 次元形状計測が困難とされ, 特に凹面を持つ金属物体では, 指向性の強い鏡面反射による間接光など, 直接反射光を凌駕する強度の間接光が重なり合って観測され, これが視差情報を大きく誤る原因となりうる. この問題を解決するため, 各列に異なる時間的周波数を割り当てた投影パターンを提案した. また, フーリエ変換の利用により, 撮影した画像列から画素ごとに大きな強度を持つ複数の周波数成分を視差情報の候補として抽出する手法を提案した. さらに, 多数決原理に基づき, 視差情報の候補から直接反射光に対応する視差情報を選択する手法を提案した. さらに, 強い相互反射が発生している凹面金属を対象とした実験を通して, 提案手法の有効性を示した.

謝辞

本研究の一部は, JST CREST JPMJCR1764, 科研費 JP18H03265, JP18K19822, JP19H04138 の支援を受けた.



(a) グレイコード法



(b) 提案手法

図 8 推定された視差画像. (a) グレイコード法による視差推定結果. 鏡面反射の影響を強く受けている. (b) 滑らかな視差が得られている.

参考文献

- [1] Mirdehghan, P., Chen, W. and Kutulakos, K. N.: Optimal Structured Light à La Carte, *The IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)* (2018).
- [2] Nayar, S. K.: Micro Phase Shifting, *Proceedings of the 2012 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, CVPR '12, Washington, DC, USA, IEEE Computer Society, pp. 813–820 (2012).