

ランダムパターンを用いた鏡面相互反射の影響を抑制可能な 高速アクティブ3次元計測法

住吉 信一^{1,a)} 吉田 悠一¹ 石川 康太¹ 安倍 満¹ 日浦 慎作²

受付日 2020年12月20日, 採録日 2021年5月11日

概要: プロジェクタ投影光の変調方式に工夫を施すことで相互反射の影響を抑制し, 金属物体の3次元計測の精度を向上させる手法が提案されているが, 単純なグレイコード法に比べると投影枚数が非常に多く, 計測に長時間を要するという課題があった. そこで本研究では, ランダムパターンの相関演算に基づく対応付けに幾何学的な制約を導入することで, 高速化と高精度化を両立させた3次元計測法を提案する. また実運用における対象シーンと投影数による計測精度見積もりのために, 投影パターンの観測モデルを作成し数値解析により対応付けの精度を見積もる. 実験では投影枚数が30枚と少ない場合でも相互反射光の影響を抑制し, 良好に形状を復元可能であることを確認した.

キーワード: 3次元計測, 相互反射, 鏡面反射, ランダム符号化

High-speed Active 3D Measurement Method Suppressing the Effect of Specular Interreflection by Using Random Patterns

SHINICHI SUMIYOSHI^{1,a)} YUICHI YOSHIDA¹ KOHTA ISHIKAWA¹ MITSURU AMBAI¹ SHINSAKU HIURA²

Received: December 20, 2020, Accepted: May 11, 2021

Abstract: Several methods to improve the accuracy of 3D measurement of metal objects have been proposed to suppress the effect of interreflection by modulating projection light. However in those methods, the number of projections is much larger than that of the gray code method which can minimize it. In this paper, we introduce geometric constraints to a correlation based method with 2D random patterns. In order to estimate the measurement accuracy in actual operations with target scenes and the number of projection patterns, we create an observation model of the projection patterns and estimate the accuracy of the correspondence by numerical analysis. In the experiment, we confirmed that our method can suppress the effect of interreflection and reconstruct the shape of optically complex scenes even when the number of projections was limited to 30 frames.

Keywords: 3D measurement, interreflection, specularity, random coding

1. はじめに

3次元計測は, 生産現場におけるワークの傷の検査や, 乱雑に置かれたワークのロボットによる把持など, 多様な応用が期待されている技術の1つである. なかでもプロジェ

クタとカメラを組み合わせたシステム (以下, ProCam) に基づくアクティブ計測法は, 視野全体を同時に計測できるため計測時間が短い. また, レーザ光の走査や特殊な光学系を用いる計測装置に比べ小数の汎用部品で構成されているためにコストを下げやすく, 工業的な利用価値が高い. ProCamに基づく3次元計測法については1980年代から多くの研究がなされており [1], グレイコード法 (以下, GC) [2] や位相シフト法 (以下, PS) [3] などの代表的な手法のほか, 単一の固定パターンの投影により高速性を高めた手法 [4] なども提案されている.

¹ 株式会社デンソーアイティラボラトリ
DENSO IT Laboratory, Inc., Shibuya, Tokyo 150-0002, Japan

² 兵庫県立大学
University of Hyogo, Himeji, Hyogo 671-2280, Japan

^{a)} ssumiyoshi@d-itlab.co.jp

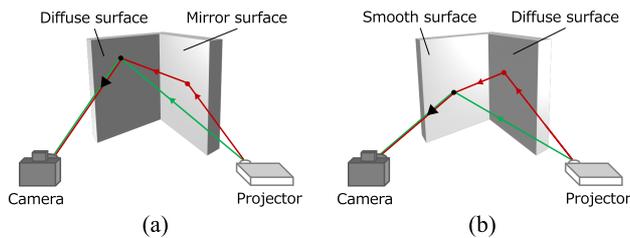


図 1 直接反射成分と鏡面相互反射成分とが重畳する 2 つの例
Fig. 1 The figure shows two examples of which the direct reflection component and the specular interreflection component superimposed.

ProCam を用いた計測法に共通する課題として、対象物の凹部において生じる相互反射の影響による誤計測の問題がある。工業的に用いられているワークには金型や切削加工品など、鏡面反射率が高くランバート反射とは大きくかけ離れた物体が多い。このようなワークでは凹み部で鏡面相互反射が生じ、これが誤計測の原因となる (図 1)。本論文で扱う鏡面相互反射現象の典型例について述べる。1 つは図 1(a) に示すような、第 1 の反射面で生じる強い鏡面反射により、第 2 の反射面上で直接反射光と相互反射光が重畳する場合である。もう 1 つは図 1(b) に示すように、第 2 の反射面が平滑であるために、拡散反射面である第 1 面に照射されたパターンが映り込む場合である。ただし図 1(b) の第 2 の反射面が完全な鏡面である場合のように、計測の対象となる面が拡散反射をまったく生じない場合、直接反射成分がほとんど観測されず、三角測量に基づく形状計測は困難であるため本論文では対象外とする。

第 1 の手法は、直接反射と間接反射の空間周波数特性の違いを利用する方法である。相互反射は間接反射の一種である。間接反射は観測点とは別の点に入射した光が回り込む現象であり、観測点の輝度は各点への入射光の強度の重み付き和で表される。よって多くの場合、間接反射は入射強度分布に対する平滑化フィルタと同様の効果を持ち、空間周波数が低いパターンが観測されやすい。この原理を用い、空間的に投影した高周波パターンが観測できるか否かで直接反射と間接反射を分離する手法 [5] と、これを 3 次元計測に応用した手法が提案されている。しかし、これらの手法は主に拡散反射物体の凹部で生じる拡散相互反射に対して有効であるが、図 1 に示すような、光路中に鏡面反射を含む鏡面相互反射現象の影響を十分に抑制することは困難である。

第 2 の手法として、重畳した投影光を、そのもととなるプロジェクタの各画素に分離する手法がある。一般に直接反射しか生じないシーンでは、カメラ画像上の各点に対しプロジェクタ画像上のただ 1 点だけが対応する。GC や PS はこのような性質を前提とすることで、少ない投影パターン数での 3 次元計測を実現している。それに対し鏡面相互反射が生じる物体では、カメラ画像上の 1 点に対し、プロ

ジェクタ画像上の異なる 2 点以上の光が入射することがある (図 1)。よって第 2 の手法では、プロジェクタの各画素の輝度変化パターンに豊富な情報を埋め込むことで、反射点で投影光が重畳しカメラ画像上の 1 点で観測されたとしても分離ができ、直接反射の対応点を推定できる。しかし必然的に多くの投影パターン数を必要とし、計測に長時間を要したり、計測時間の短縮のために ProCam のフレームレートを高める必要が生じる。

そこで本研究では、鏡面相互反射成分を除去するために、独立な乱数系列は互いに無相関となることを利用し、投影された 2 次元ランダムパターンの相関演算に基づき 3 次元計測を行う。ここで、相関演算を行う範囲に幾何学的な制約を導入することで投影パターン数を削減し、頑健かつ高速な 3 次元計測を実現する。さらに鏡面相互反射が起こるシーンでの提案法の投影パターンの観測モデルを作成する。このモデルを用いた数値解析から、実運用時に必要となる提案法の対象シーンと投影数による計測精度を見積もる。実験では、GC による投影枚数に近い 30 枚の投影パターン数でも鏡面相互反射の影響を除去しながら良好な 3 次元計測が行えることを示す。

2. 関連研究

ここでは ProCam に基づく 3 次元計測において、相互反射の影響を除去することで計測を頑健化する手法 [6] について述べる。簡単のため、以下ではプロジェクタとカメラが左右に並べられている (エピポーラ線がほぼ水平である) として記述する。

2.1 空間周波数特性を利用した手法

Nayar らは高周波パターンを複数投影し、反射光を直接反射成分と間接反射成分とに分離する手法を提案している [5]。この手法は 3 次元計測における相互反射の影響の抑制に応用できる。たとえば Furuse らの研究 [7] ではスリット光投影法 (以下、SLP) や GC の投影パターンの明部を、さらに M 系列で縦方向に符号化する手法を提案している。また同様に Gupta ら [8], [9] は PS や GC の投影パターンを高周波数化することで、同様の原理に基づき相互反射を抑制している。しかし、他の手法 [10], [11] も含め、これらの相互反射の空間周波数特性を利用した手法では、図 1 に示したようなシーンにおいて、鏡面相互反射の影響を十分に除去できない。なぜなら鏡面相互反射では非鏡面の間接反射と比較して影響するプロジェクタ画素数が少ないために平滑化フィルタのような効果が得られず、高周波パターンも観測されてしまうからである [5]。

2.2 エピポーラ面外からの伝播を抑制する手法

図 2(a) に示すように、直接反射成分はつねにエピポーラ制約を満たすのに対し、鏡面相互反射成分は必ずしもエ

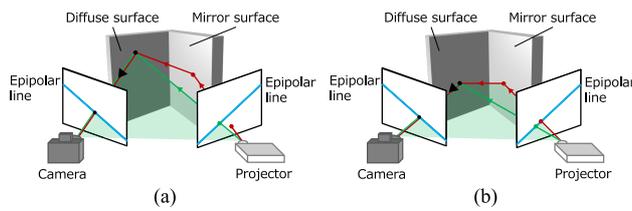


図 2 鏡面相互反射成分がエピポーラ制約を満たさない場合と満たす場合

Fig. 2 When the specular interreflection component does not satisfy the epipolar constraints and when it does.

エピポーラ制約を満たさない。この性質を用いることで、エピポーラ面外からの相互反射を抑制する手法が提案されている。たとえば前述の Furuse ら [7] や O’Toole ら [12] の研究では、単純な高周波パターンの代わりに M 系列や乱数など、相異なる符号間が直交する、または直交することが期待できる符号を用いている。これは直交符号の自己相関がインパルス状となることを利用し、直接反射成分だけを選択的に抽出するためである。しかしこれらの手法ではいずれも、基本となる SLP や GC の各投影パターンをさらに縦方向に符号化するために、投影パターン数が増加し計測に時間を要するという問題を有する。たとえば、Furuse らの研究 [7] では横 1,024 画素のプロジェクト画像を用いる場合、投影数 620 枚を要する。また図 2(b) に示すように、鏡面反射成分が偶然エピポーラ制約を満たす場合、これを除去することもできない。

O’Toole らは計測時間の問題を解決するため、CMOS 型画像センサのローリングシャッター現象とレーザプロジェクトの走査を同期させた装置構成により、エピポーラ面外からの間接成分を除去する手法 EpiScan を提案した [12]。この手法ではフレームレートを低下させることがないという利点を持つが、プロジェクト・カメラ双方の走査線をすべてエピポーラ線に一致させる必要があるなど精密な位置合わせが必要である、使用できる機器の種類が限定されるなどの問題がある。原理的には、プロジェクトからエピポーラ線に沿った水平線を投影し、その線上の画素値をカメラ画像から抽出する処理を繰り返すことと等価である。このため、投影パターン数がきわめて多い計測法をハードウェアの工夫により高速化したものであるといえる。

2.3 エピポーラ面内の符号の重畳を分離する手法

PS や GC では、複数の符号が相互反射により重畳された部分では視差の復元が不安定になる。そこで、PS や GC と同様の縦縞状のパターンでありながら直交符号を横方向に配置し、複数の符号が重なった場合でも、それぞれの位置（視差）と強度が復元できる手法が提案されている [13], [14]。これらの手法では横 600–1,000 画素程度のプロジェクト画像を用いる場合、投影数に 100 枚程度を要する。

これらの手法は SLP の高速化手法と見なすことができる。SLP では、プロジェクト画像の視差方向（横）の画素数を M とすると M 回の投影と撮影を行わなければならない（以下、これをブルートフォース法（BF 法）と呼ぶこととする）。そのかわり、各カメラ画素では最も強い影響を受けるスリット番号を特定することが容易である。一方、GC は投影パターン数を $N_{GC} = \log_2 M$ に圧縮する手法であり、 M 通りの視差を決定するのに冗長性のない符号であるが、複数の符号が重畳されない、あるいは重畳があっても主たる符号の復号化が誤りなく行える程度に他の符号の影響が小さいことを前提としているために相互反射に対し脆弱である。直交符号に基づく手法はこれらの中間に位置する手法であるといえ、スリット光の重畳を許しつつも M よりも大幅に少ない投影パターン数での計測を可能にすることを志向した手法であるといえる。

2.4 2次元符号化

2.2 節と 2.3 節で述べた手法はそれぞれ、プロジェクト画像の縦または横に直交性の高い符号を割り当てる方法であった。それらを組み合わせ、2次元的な符号化を行う手法が提案されている。

プロジェクト画像とカメラ画像との対応関係を表すための表現法としてライトトランスポート（以下、LT）がある。LT は重ね合わせの原理に基づくシーンに対する光の入出力関係の記述である。ProCam において LT を取得するためには、プロジェクトの各画素を 1 つずつ点灯して、そのつど、画像を撮影する方法がある。しかし、この手法（BF 法）には長時間を要するため、やはり符号化により高速化する手法が提案されている。Peers らは LT を、圧縮センシングアルゴリズムを用いて高速に取得・復元する手法を提案している [15]。また Chiba らは LT 行列が疎行列となる性質を用いて、ランダムパターンを複数回照射して得た観測行列から、投影光の直接反射成分を高速に抽出する手法を提案している [16]。しかし 2次元符号化では使用される符号の数が非常に多いため、1次元的な符号化に比べ非常に多くの観測を必要とし、計測には長時間を要する。たとえば、Chiba らの研究 [16] では 256×256 の解像度のカメラ・プロジェクト画像を用いる場合、投影数 113 枚、投影・撮影および計算時間を合わせ 342 秒程度の時間（計算機の性能により変化する）を要する。また、相互反射が生じる場合は観測行列のスパース性が損なわれ、LT の復元が困難となる恐れがある。

Chiba らの研究 [16] と同様に、多数のランダムパターンを投影して得た観測画像に対し相関を求めることでロバストな対応点の取得と形状復元が可能であることが Zhang らによっても示されている [17]。また多くの圧縮センシングに関する研究でも示されているように、ランダムパターンは M 系列などの数理的に定義された直交符号に比べ計

測回数を柔軟に変更できることや、欠測に対して頑健であるなど様々な利点を有する。しかし前述のように、2次元符号化においては依然として多数の符号を用いる必要があり、従来用いられてきた3次元計測法と同等の速度で計測を行う手法はこれまでに示されていない。圧縮センシングを用いる手法では計測シーンのLTを復元するための最適化計算に大きな計算時間がかかる。またこの計算時、演算量の低減のために幾何制約を対応点候補数の削減に用いることも難しい。そこで我々はランダムパターンを用いた2次元符号化に幾何制約を組み合わせ、対応付けの候補数を削減することで、GC法などに比べ遜色のない速度での計測を可能にしつつ、鏡面相互反射の影響も抑制できることを示す。提案法は図1(b)のようなシーンで直接反射成分よりも相互反射成分が支配的となった場合にも、幾何制約を用いることで直接反射成分を同定しうる。また提案法は幾何制約を満たす領域内に限定して直接反射成分があるか否かを相関演算のみで求めるため、既存法よりも演算量を低く抑えることができる。

2.5 偏光などを利用する手法

2.2節で述べた手法の欠点であるエピポーラ面内の相互反射の問題を解決するため、前田らはEpiScanに偏光を組み合わせた手法を提案している[18]。このような光の物理的な性質に基づく手法は本論文が対象とする符号化に基づく手法とは排他的な関係がなく、組み合わせることでより高度な除去を行うことができる。そのため、本論文ではこれ以上論じない。

3. 提案手法

本論文では2.4節で述べた2次元符号化に基づく計測法に幾何学的な制約を組み合わせ、相関を演算する領域を限定することで、投影パターン数の削減による高速化と鏡面相互反射の抑制を両立させる手法を提案する。

3.1 2次元ランダムパターンの投影による対応点の取得

図3は、2次元符号化と相関演算の組合せによる3次元計測の原理を示したものである。プロジェクタからは各画素が点灯または消灯の二値をとるランダムパターンを投影する。二値のランダムパターンを投影するごとにカメラで撮影を行い、得られた各画素の輝度変化パターンをプロジェクタ画像の各画素のパターンと相関演算により比較し、相関値の高い画素を対応点とする。物体の反射率や面の向きなどによる輝度変化の影響を抑制するために、相関演算にはZNCC (Zero-mean Normalized Cross-Correlation) を用いる。

この手法では2.4節で述べたように、BF法に比べ少ない枚数でLTの近似値を得ることができる。しかし後述するように、相関値のノイズ(分散)と投影パターン数はト

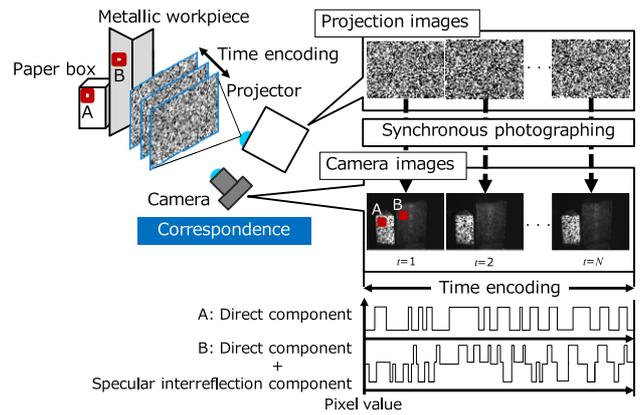


図3 提案法のシステムイメージ。2次元ランダムパターンを複数枚、投影・撮影し、時間符号化を行う。これにより鏡面相互反射で投影光どうしが重畳した点の情報源分離を可能とする

Fig. 3 The system image of the proposed method, in which multiple 2D random patterns are projected and photographed and then time coded. The proposed method can separate the source of information when the projected lights are superimposed on each other by specular interreflection.

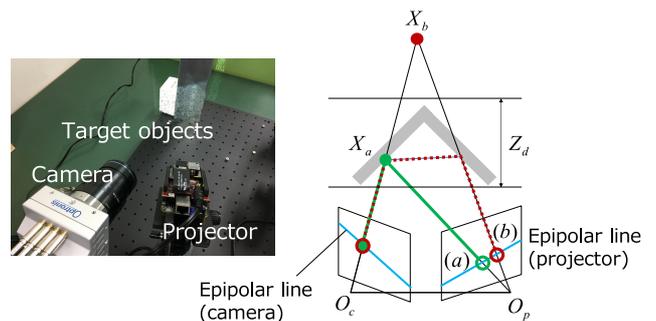


図4 左：実験環境，右：エピポーラ制約と奥行き制約

Fig. 4 Left: System used for the experiments. Right: Epipolar and depth constraints.

レードオフの関係にあり、十分な精度でLTを得るためには依然として多くの投影パターン数が必要である。一方、本論文の問題設定では対象シーンで起こる光学現象を表すLTを求める必要はなく、3次元計測を行ううえで必要な情報である直接反射成分を有するかどうかの二値のみを推定すればよい。これを幾何学的制約を満たす範囲についてのみ取得すれば対応点を求めることができる。よって相関を求める範囲を限定することで、相互反射成分を効果的に除去しつつ、投影パターン数の削減を実現する。

3.2 幾何学的制約の導入

図4は、投影パターン数を削減するための幾何学的な制約について説明した図である。カメラで観測される光には直接反射光(緑で表示)のほかに相互反射光(赤で表示)が重畳することがある。まず、直接反射光はエピポーラ線(水色で表示)上にしか対応点がないため、プロジェクタ画像上の画素のうち、エピポーラ線外の画素はすべて相関

演算の対象から外すことができる（これをエピソード制約と呼ぶ）。さらに、対象物体の存在し得る奥行き Z_d が限定されていれば、点 (b) からの投影光は直接反射として弁別され得ない。鏡面相互反射が問題となるような工業応用においては、計測範囲全体に渡って同等の計測精度を得る必要があることから、たとえばカメラ画像の左端の画素に対してプロジェクタ画像の右端の画素が対応付けられるような条件での計測は行われることはない。よって必然的に、正しい対応点となりうる点はエピソード線上でさらに限定される。これを奥行き制約と呼ぶ。これら2つの制約を用いることで、たとえばエピソード線長が1,024画素のプロジェクタ画像の場合、相関演算の対象となる画素数を数百画素程度に削減できることを予備実験にて確認している。

相関演算の対象となる画素数の削減は計測速度の向上と精度向上において重層的な効果を有する。まず、相関演算の計算コストがそのまま削減される。さらに、後で詳しく解析するように、投影枚数が少ない場合、符号長が短いいため各投影画素のランダムパターンが偶然類似することがありうる。このような誤った対応付けの発生を抑制でき、これにより投影パターン数も大幅に削減できる。投影パターン数の削減は計測に要する時間と相関演算に要する時間の双方の削減に寄与する。

3.3 投影パターン数と相関値の分布の関係

この節では、投影パターン数と相関値の分布の関係を解析的に調べる。続いて、対応点の候補となる領域を限定することで、誤対応の発生する確率がどの程度減少するのかについて論じる。その結果、3.2節で述べた幾何学的制約を導入することで投影パターン数を削減しても安定な対応付けが可能となることを示す。

3.3.1 非対応点、対応点の相関値の分布モデル

プロジェクタから各画素をランダムに点灯または消灯したパターンを N 枚、順次投影する。ここでは解析のため、点灯と消灯にそれぞれ 1 と -1 の符号を割り当てる。 N 枚のうち1つのパターンに着目し、そのプロジェクタの各画素での投影信号を $S_p \in \{1, -1\}$ とする。カメラでのSNがある程度高く、輝度ノイズよりも投影信号 1 の観測値と -1 の観測値の差が十分に大きく分離可能な場合、たとえばZNCCの正規化処理などによって観測値は 1 か -1 の値をとると見なせる。このためカメラでの各画素での観測信号を $S_o \in \{1, -1\}$ とすると、得られる相関値 c の確率分布は以下のように表せる。

$$P(c | \lambda) = \int P(c | \lambda, S_p, S_o) P(S_p, S_o | \lambda) dS_p dS_o \quad (1)$$

ここで、 λ は非対応点 ($\lambda = F$) か対応点 ($\lambda = T$) を表す記号である。また $P(c | \lambda, S_p, S_o)$ は投影信号と観測信号が与えられたときにとりうる相関値の確率、 $P(S_p, S_o | \lambda)$ は投影信号と観測信号が生成される確率である。

非対応点あるいは対応点で得る相関値の確率分布について考える。ランダムパターンの各画素は 0.5 の確率で点灯および消灯するものとする。この条件下では投影信号と観測信号の組合せは $(1, 1)$, $(1, -1)$, $(-1, 1)$, $(-1, -1)$ の4つがありうる。このため相関値 c は 1 と -1 のいずれかを確率的に得る。この相関値を得る確率は式 (1) から以下のように算出できる。

$$\begin{aligned} P(c | \lambda) &= P(c | \lambda, S_p = 1, S_o = 1) P(S_p = 1, S_o = 1 | \lambda) \\ &\quad + P(c | \lambda, S_p = 1, S_o = -1) P(S_p = 1, S_o = -1 | \lambda) \\ &\quad + P(c | \lambda, S_p = -1, S_o = 1) P(S_p = -1, S_o = 1 | \lambda) \\ &\quad + P(c | \lambda, S_p = -1, S_o = -1) P(S_p = -1, S_o = -1 | \lambda) \end{aligned}$$

対象シーンの光学現象により投影信号 1 が -1 と観測される確率を r_{+-} 、投影信号 -1 が 1 と観測される確率を r_{-+} として、非対応点あるいは対応点で得る相関値の平均 \mathbb{E}_λ と分散 \mathbb{V}_λ を求めると以下ようになる。

$$\begin{aligned} \mathbb{E}_F[c] &= (r_{+-} - r_{-+})^2 \\ \mathbb{V}_F[c] &= 1 - (r_{+-} - r_{-+})^4 \\ \mathbb{E}_T[c] &= 1 + 2(-r_{+-} + r_{+-}^2 - r_{-+} + r_{-+}^2) \\ \mathbb{V}_T[c] &= 1 - \{1 + 2(-r_{+-} + r_{+-}^2 - r_{-+} + r_{-+}^2)\}^2 \end{aligned}$$

ここで N 枚のパターン画像すべての投影と観測について考えると、非対応点あるいは対応点の相関値の N 回の観測の平均の分布は、 N が十分大きい時、中心極限定理により N の回数に漸近的に以下の分布に従う。

$$\mathcal{N}(c | \lambda) = \mathcal{N}\left(\mathbb{E}_\lambda[c], \frac{1}{N} \mathbb{V}_\lambda[c]\right) \quad (2)$$

これらの確率分布を用いて誤対応しない確率を見積もる。

3.3.2 数値解析による対応付け精度の見積もり

幾何学的制約により相関値を求める領域を小さくすることで、どの程度、対応付けの誤り率が減少するかについて考察する。相関の演算対象となる領域の画素数を M とする。式 (2) で求めた非対応点、対応点の2つの確率分布を用いて数値解析を行うことで、 M の範囲の中で誤対応しない確率を求める。

まず、様々な N , r_{+-} , r_{-+} で得たROC曲線 (図5左) から各パラメタでの精度を見積もる。ここで前述したように投影信号と観測信号の組合せは4つであり、様々な光学現象が起こるシーンではそれら4つが等しい確率で起こりうる。このため r_{+-} , r_{-+} は $0 \sim 0.25$ の値をとりうる。投影信号 1 が -1 と観測されるケースは光の吸収が強い物体に投影した場合などが考えられる。これは本研究の想定シーンでは低い確率で起こると考えられるため $0 \leq r_{+-} \leq 0.01$ で検討する。また投影信号 -1 が 1 と観測されるケースは鏡面相互反射が起きた場合などが考えられる。これが本研

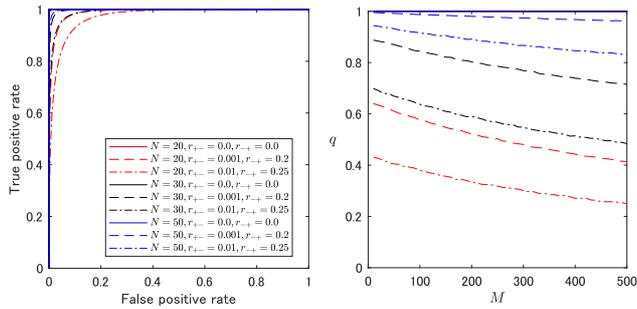


図 5 左: 非対応点と対応点の相関値の確率分布から求めた ROC 曲線, 右: 相関を演算する領域の画素数 M において, その領域内に対応点が存在し, 対応点の相関値が閾値 C_{th} を上回り,かつ, M の中で最大となる確率 q

Fig. 5 Left: ROC curve obtained from the probability distribution of correlation values of non-corresponding and corresponding points. Right: The probability q that the corresponding point exists in the area with M pixels and the correlation value of the corresponding point exceeds the threshold C_{th} and is the largest among M .

究の想定シーンでは高い確率で起こりうると考えられるため $0 \leq r_{-+} \leq 0.25$ で検討する. これらの範囲でパラメタ設定し得た ROC 曲線から, r_{-+} の値が高ければ高いほど主に鏡面相互反射の影響で精度が低下していくことが見積られる. また N が大きければ大きいほど投影画像の各画素の信号の直交性が高くなるため対応付け精度も高くなると推測される.

次に相関を求める画素数 M と, N, r_{+-}, r_{-+} を変化させ, 対応付けの精度を見積もる. 誤対応しない確率を以下の 2 つの条件を満たす確率から求める.

1. 対応点の相関値が閾値 C_{th} を上回る
 2. M 個の中に対応点が 1 つあるとし, 対応点の相関値が $M - 1$ 個の非対応点の相関値をすべて上回る
- この確率を求める式は以下ようになる.

$$q = \mathbb{E}_{c_t \sim \mathcal{N}(c|T), c_f^1, \dots, c_f^{M-1} \sim \mathcal{N}(c|F)} [\mathbb{1}\{c_t > C_{th}, c_f^1 \dots c_f^{M-1} < c_t\}] \quad (3)$$

この式 (3) を解析的に求めることが難しいため以下の式を数値解析することで求める.

$$q = \mathbb{E}_{c_t \sim \mathcal{N}(c|T)} [P(c_t)]$$

$$P(c_t) = \begin{cases} \text{when } c_t \leq C_{th} & 0 \\ \text{otherwise} & [\int_{-\infty}^{c_t} c_f \sim \mathcal{N}(c|F) dc_f]^{M-1} \end{cases}$$

ここではモンテカルロ法にて解析をして得た M と q の関係を図 5 右に示す. 工業的に良好な運用が可能という観点から False positive rate が 0.005 となる C_{th} を求めて解析を行った. 図 5 右から投影パターン数 N が 30 と小さい場合でも相関を求める対象領域が小さい場合では誤対応の確率が十分小さくなると推測される. また N が 50 で r_{-+} が 0.2 以下の場合には対応付けの精度がきわめて高いと

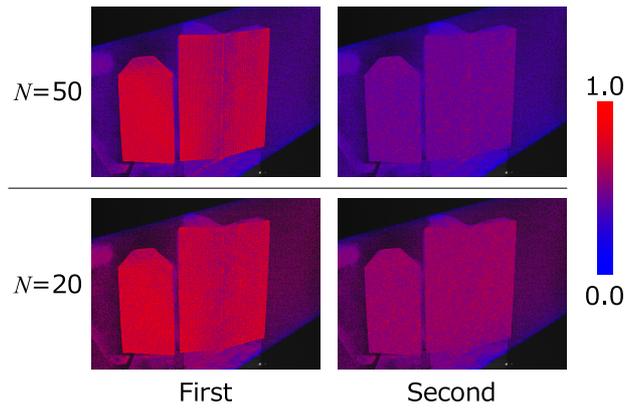


図 6 実シーンに対する実験における相関値の分布. ZNCC で得た最大の相関値 (左) と 2 番目の相関値 (右) を表示している

Fig. 6 Distribution of the correlation values in the experiment for the real scene. The figure shows the largest (left) and the second largest (right) correlation values obtained by ZNCC.

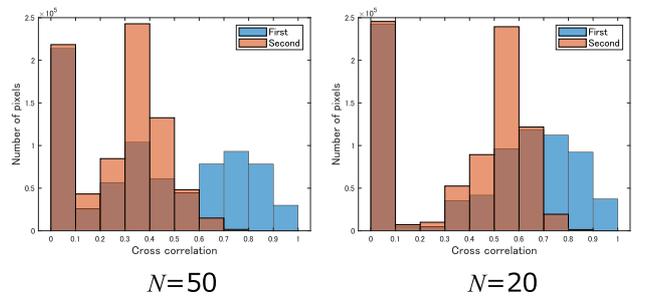


図 7 図 6 のシーンの相関値のヒストグラム. ZNCC で得た最大の相関値と 2 番目の相関値のそれぞれの画素数を示している. 0 に近い相関値が得られている領域は背景部である

Fig. 7 The histogram of correlation values for the scene in Fig.6 shows the number of pixels for the largest and second largest correlation values obtained by ZNCC, respectively; the regions with correlation values close to 0 are background areas.

見積られる. 誤対応はランダムに発生するため, belief propagation 法など周囲画素との関係を用いた正則化を施すことで容易に除去できる*1.

実シーンに対する実験により相関値の分布を求めた例を図 6 に示す. この図では各点の輝度は相関値を表しており, First は対象画素内で見つかった最大の相関値 (正しい対応点である可能性が高い), Second は 2 番目の相関値である. ただし, この図は奥行き制約を課していない出力であることに注意する. 図 6 の相関値のヒストグラムを図 7 に示す. 図 6 と図 7 から, 背景部を除き, First の相関値に違いが少ない一方で, $N = 20$ の場合の第 2 位の相関値は $N = 50$ の場合に対し大きくなっていることが分かる.

*1 本論文では提案手法そのものの特性を示すため, 正則化によるノイズ除去は導入していない.

4. 実験と評価

提案法の有効性を確かめるため、鏡面相互反射が生じる環境を想定した実験を行った。実験系を図 4 左に示す。図 8 (a) 光沢があり等方性反射であるアルミ製 L 字アングルとランバート反射である紙箱を用いたシーン、弱い光沢があり表面化散乱も起こる樹脂模型（スタンフォードパニーの 3D プリント出力物）で、図 8 (b) 不透明と図 8 (c) 半透明の 2 種、アルミ製 L 字アングルより光沢が強く等方性反射である金属製品（図 8 (d) 金属製のボウルと図 8 (e) 杯の 2 種）をそれぞれ設置したシーンを用いた。

カメラは Optronis 社のモノクロカメラ CP70-1HS-M-1900 を用い、入力画像の解像度は $1,024 \times 768$ 画素とした。またプロジェクタは TEXAS INSTRUMENTS 社の DLP2000 を用い、プロジェクタ画像の解像度は 480×360 画素とした。これらについて Zhang のキャリブレーション法により参照物体に対する ProCam システムの内部・外部パラメータを求めた [19]。

実験に用いた計測対象の多くでは間接反射成分の影響を非常に強く受けるため、SN 比を向上させるために、提案手法の実装においてはプロジェクタ画像の 5×5 画素を 1 画素

と見なし、画素の中心を対応点とした。よって投影パターンに含まれるランダム符号の種類は $480 \times 360 / (5 \times 5) = 6,912$ 種類であり、これらの生成にはメルセンヌツイスタを用いた [20]。

提案手法を適用する工業的なタスクによって設定すべき False positive rate, C_{th} は変わる。今回の分析では、ロボットによるワークの把持タスクにおいて妥当な対象物の姿勢推定精度が得られると考えられることを基準に、False positive rate を 0.005 とし、相関値の閾値を求めた。実験の対象物は拡散反射性があるため $r_{-+} = 0.25$ で想定する対象物よりも鏡面相互反射の発生率は低く、 r_{-+} が 0.2 程度以下が妥当であると考えられる。ゆえに $r_{-+} = 0.25$ で求めた相関値の閾値 C_{th} よりも小さな 0.4 を閾値とし、この値以上の相関値が得られた画素を対応点とした。

比較のため、グレイコード法 (GC) と位相シフト法 (PS) を組み合わせた手法を実装した。前述のように間接反射の影響が大きいため、GC のみで線幅を細くすると計測が不安定となった。そこで GC では最小線幅を 30 画素とし、カメラ画像上の各画素に対しプロジェクタ画像上の対応点を 15 画素の分解能で得る。そのうえで正弦波の 1 周期を 30 画素とした PS を用いることで、より高分解能な形状が得

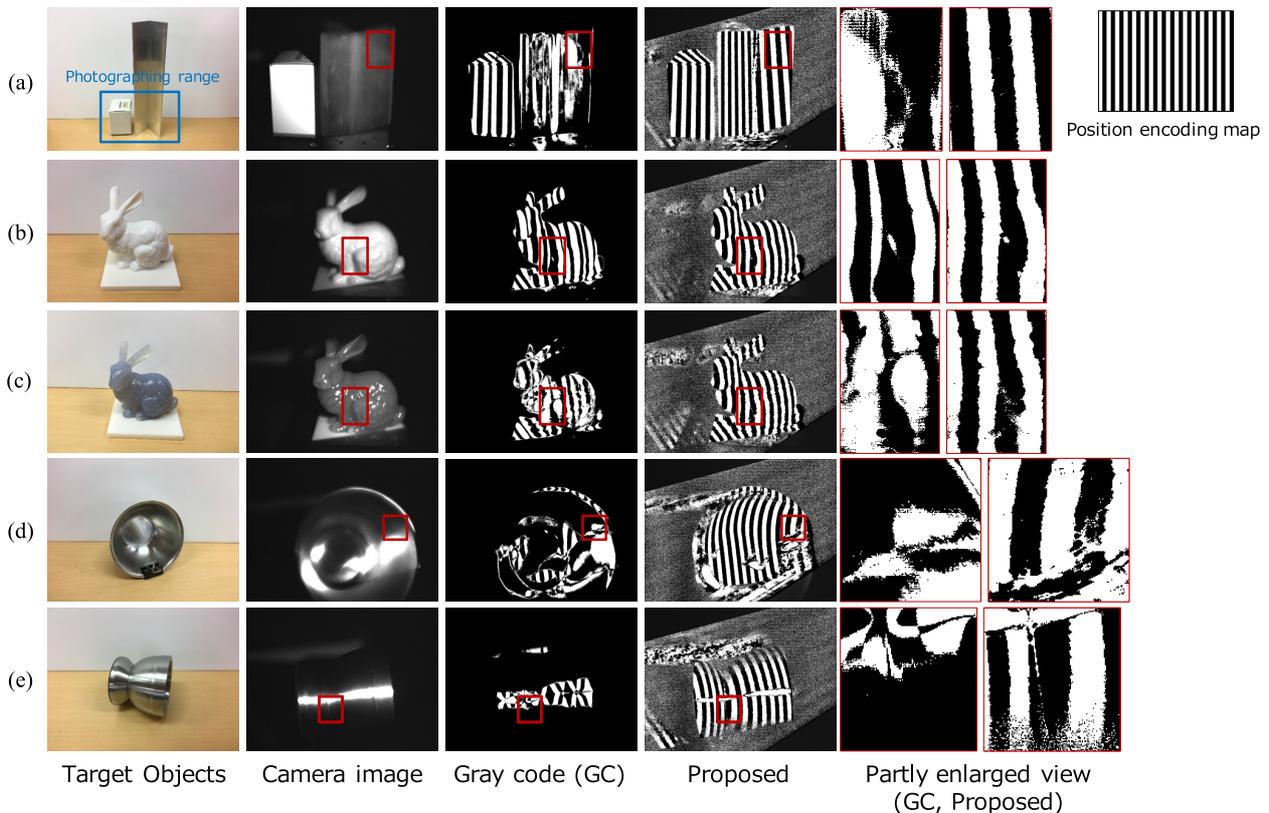


図 8 GC, および, $N = 50$ の場合の提案法による対応付けの結果. 右上に示す座標符号化マップのように、得られた視差値を周期的に白・黒に変換して図示している

Fig. 8 GC and the result of mapping by the proposed method for the case of $N = 50$. As shown in the coordinate encoding map on the upper right, the obtained disparity values are periodically transformed to black and white and illustrated.

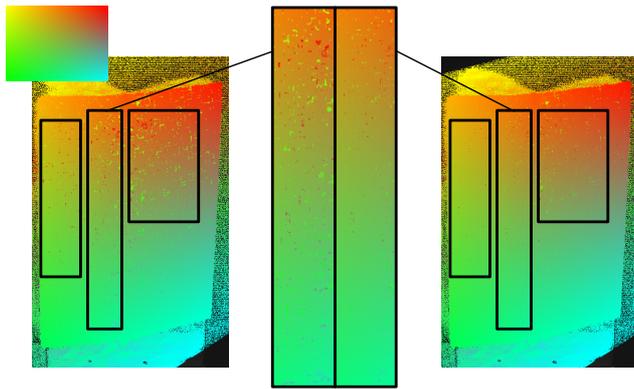


図 9 $N = 30$ の時の提案法による復号化の結果. 左: エピポーラ制約を用いた結果, 中: 結果の一部拡大図, 右: エピポーラ制約と奥行き制約を用いた結果. 座標符号化マップは左上の図を参照. 特に黒枠部にて奥行き制約の有無による差異が見られる

Fig. 9 Decoding results using the proposed method for the case of $N = 30$. Left: The result with epipolar constraints, Middle: The enlarged images of a part of the results, Right: The result with epipolar and depth constraints. See the top left figure for the coordinate encoding map. In particular, the black frames show the difference between the results with and without the depth constraints.

られる設計とした. 投影枚数は GC で 10 枚 (反転二値化を用いるため, ネガ・ポジ画像それぞれ 5 枚), PS では投影枚数 (ステップ数) として一般的に用いられている 4 枚とし, 合計 14 枚である.

4.1 奥行き制約の効果に関する実験

まずこの実験では, 奥行き制約の効果を確認する. 図 9 はアルミ製 L 字アングル (図 8(a) の右側の対象物) に対し相関演算により得られた対応付け結果で, 左はエピポーラ制約のみを用いた結果, 右はそれに加えて奥行き制約を用いた結果である. 本来はなめらかなグラデーション状に表示されるべき対応付け結果に現れるノイズの量から, エピポーラ制約に加え奥行き制約を用いることで, 鏡面相互反射によって起こったと見られる対応付けの誤りが低減できることを確認した.

4.2 従来手法との比較

次に, 様々な物体に対する対応付け結果を図 8 に示す. ここでは結果を比べやすいよう, カメラ画像の各画素に対応付けられたプロジェクタ画像に, 15 画素幅の白黒の縞を配置した結果を示している. これはちょうど GC のみで算出した視差の分解能に対応している.

(a) の赤四角部はアルミ製 L 字アングルの凹みがあり, この領域で鏡面相互反射が生じる. GC ではその領域で大きな対応付けの誤りが見られるが, 提案法では比較的良好的な復号化がなされている. 次に (b), (c) の弱い光沢のある

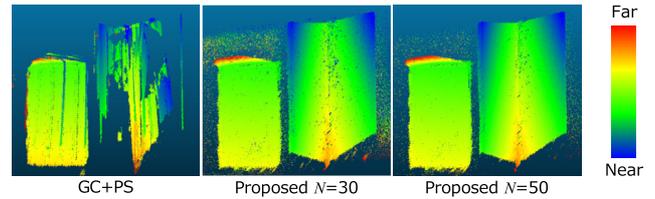


図 10 実験シーン (図 4 左, 図 8(a)) の形状復元結果. 左: 従来法, 中: 提案法 ($N = 30$), 右: 正解としたデータ (提案法 $N = 50$)

Fig. 10 Shape reconstruction results of experimental scenes (Fig. 4 left, Fig. 8 (a)). Left: Conventional method, Middle: Proposed method ($N = 30$), Right: Data as true values (proposed method $N = 50$).

樹脂製の模型では, いずれも赤四角部に凹みがあり, 鏡面相互反射が生じている. 特に拡散反射率が低く, 表面下散乱が生じる (c) では大きな乱れが見られるが, これに比べ提案法は良好である.

また, (d), (e) はいずれも強い光沢を有する, 金属製で凹部を持つ物体であり, どちらも赤四角部で強い鏡面相互反射が発生している. このような場合でも, GC に比べ提案法は対応付けを安定に行えることが分かる.

4.3 3次元計測精度の定量評価

アルミ製 L 字アングルと紙箱が配置されたシーン (図 8(a)) について求めた奥行き値を図 10 に示す. ここでは, 求められた奥行き値が実際の物体を含む範囲から逸脱した場合には復元が失敗したと見なし除外している. カメラから被写体までの距離はおおよそ 300–400 mm で実験した.

従来法では GC と PS を併用して視差を求めているが, ランバート反射と見なすことができる紙箱部分はおおむね良好に形状復元がなされている. しかし, アルミ製 L 字アングルはその凹部で鏡面相互反射が起こり, この影響で形状復元結果が大きく欠け, また, 復元された部分についても誤った奥行き値が多く含まれている. 一方で提案法 ($N = 30$) の復元結果では, いずれの物体でも良好に形状が復元されている.

このシーンでは形状の真値が与えられていない. このため, 同シーンに対し前述した妥当な r_{-+} の設定で得た対応付けの観測モデルから, 十分に良好な復元精度が得られると見積もられた投影枚数 ($N = 50$) で計測した結果を正解とした. これに対する復元成功率, および, 奥行き値の平均絶対誤差を示す (図 11). ここで, 復元成功率 (図 11 左) は前述の処理で除外されなかった画素の割合である. 結果から, 紙箱については従来法と提案法どちらの手法でも同程度の復元成功率であることが分かる. 一方アルミ製 L 字アングルについては, 従来法では復元成功率が約 39%であったのに対し, 提案法では $N = 30$ のときに復

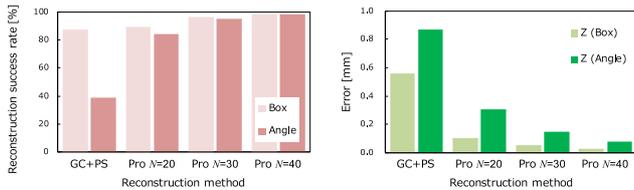


図 11 左：復元の成功率，右：計測点の奥行き方向（Z 軸）の平均絶対誤差．GC+PS：従来法，Pro：提案法

Fig. 11 Left: The success rate of shape reconstruction. Right: Mean Absolute Error in the depth direction (Z-axis) of the measurement points. GC+PS: conventional method, Pro: proposed method.

元成功率が約 95%であり，さらに投影パターン数を減じた $N = 20$ の場合でも大きく悪化しないことが分かる．

奥行き値の誤差についても同様に，従来法・提案法ともに紙箱の部分はアルミ製 L 字アングルに比べ誤差が小さいことが分かる．しかし，アルミ製 L 字アングルの部分については従来法では誤差が約 0.87 mm であったのに対し提案法は $N = 30$ の場合に誤差が約 0.15 mm で， $N = 20$ の場合でも従来法よりも高精度であることが分かる．

ただし提案法には直接反射の対応点の弁別が難しいケースがある．たとえばアルミ製 L 字アングル (図 8 (a) 右側) の凹みの中心付近では直接反射の対応点，鏡面相互反射の対応点の双方がエピソード制約と奥行き制約の 2 つの幾何制約を満たしてしまうことがありうる．このような直接反射光と相互反射光の対応点が近い場合，誤った計測点が得られる可能性が相対的に上昇する．ただしこのような場合でも，誤って復元される点は正しい値から大きく離れてしまうことはなく，位置合わせなどの処理に対する影響は小さい．

4.4 計測時間

計測に要する時間は投影枚数に比例する．前述の評価実験では，従来法として GC と PS の併用により 14 枚の画像の投影により形状を計測した．GC 単独で提案法と同様の奥行き分解能を得るためには， $2^6 < 480/5 \leq 2^7$ より 14 枚 (ネガポジ画像それぞれ 7 枚) で計測が可能である．一方で，提案法は実験により 20~30 枚程度の投影で良好な対応付けと復元ができることが分かった．よって，提案法は GC に比べ多くの投影枚数が必要ではあるものの，幾何学的制約の導入により過大な投影枚数の増加なしに相互反射の影響を抑制しつつ安定な形状復元が可能であることを確認した．また，投影枚数は対象物体の計測の困難さに応じて調整でき，枚数を増やすことで相互反射成分に比べ直接反射成分の SN 比を十分に高くできる反射点においては，より条件の悪い計測にも対応することができるという利点も有する．

5. まとめ

ProCam を用い，鏡面相互反射が生じる物体の 3 次元形状を高速に計測する手法を提案した．提案法では 2 次元ランダムパターンを用いることで，鏡面相互反射現象により投影光が重畳しても，投影光の信号源を分離することができる．本論文ではさらに，エピソード制約と奥行き制約の 2 つの幾何学的制約を導入することで，相関値を求める領域を限定し，投影パターン数を削減し高速化するとともに計測を安定化する手法を提案した．さらに提案法の対応付けの観測モデルを作成し，提案手法の誤対応の発生確率を数値解析した．実シーンでの計測実験では，広く利用されているグレイコード法に近い 30 枚の投影・撮影で，強い鏡面相互反射が生じる物体を良好に形状復元することが可能であることを確認した．

参考文献

- [1] Batlle, J., Mouaddib, E. and Salvi, J.: Recent progress in coded structured light as a technique to solve the correspondence problem: A survey, *Pattern Recognition*, Vol.31, No.7, pp.963–982 (1998).
- [2] Sato, K. and Inokuchi, S.: Three-dimensional surface measurement by space encoding range imaging, *Journal of Robotic Systems*, Vol.2, pp.27–39 (1985).
- [3] Brenner, C., Boehm, J. and Guehring, J.: Photogrammetric calibration and accuracy evaluation of a cross-pattern stripe projector, *Videometrics VI*, Vol.3641, pp.164–173, International Society for Optics and Photonics (1998).
- [4] Sagawa, R., Furukawa, R. and Kawasaki, H.: Dense 3D reconstruction from high frame-rate video using a static grid pattern, *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol.36, No.9, pp.1733–1747 (2014).
- [5] 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 Trans. Graphics (TOG)*, Vol.25, No.3, pp.935–944 (2006).
- [6] Medeiros, E., Doraiswamy, H., Berger, M. and Silva, C.T.: Using physically based rendering to benchmark structured light scanners, *Computer Graphics Forum*, Vol.33, No.7, pp.71–80, Wiley Online Library (2014).
- [7] Furuse, T., Hiura, S. and Sato, K.: Synchronous detection for robust 3-D shape measurement against inter-reflection and subsurface scattering, *International Conference on Image Analysis and Processing*, pp.276–285, Springer (2011).
- [8] Gupta, M. and Nayar, S.: Micro Phase Shifting, *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, pp.1–8 (2012).
- [9] Gupta, M., Agrawal, A., Veeraraghavan, A. and Narasimhan, S.G.: A practical approach to 3D scanning in the presence of interreflections, subsurface scattering and defocus, *International Journal of Computer Vision*, Vol.102, No.1-3, pp.33–55 (2013).
- [10] Gupta, M. and Nakhate, N.: A geometric perspective on structured light coding, *Proc. European Conference on Computer Vision (ECCV)*, pp.87–102 (2018).
- [11] O’Toole, M., Mather, J. and Kutulakos, K.N.: 3D shape and indirect appearance by structured light transport,

- 2014 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), pp.3246–3253, IEEE (2014).
- [12] O’Toole, M., Achar, S., Narasimhan, S.G. and Kutulakos, K.N.: Homogeneous codes for energy-efficient illumination and imaging, *ACM Trans. Graphics (TOG)*, Vol.34, No.4, p.35 (2015).
- [13] Narasimhan, S.G., Koppal, S.J. and Yamazaki, S.: Temporal dithering of illumination for fast active vision, *European Conference on Computer Vision*, pp.830–844, Springer (2008).
- [14] Mirdehghan, P., Chen, W. and Kutulakos, K.N.: Optimal Structured Light a la Carte, *Proc. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp.6248–6257 (2018).
- [15] Peers, P., Mahajan, D.K., Lamond, B., Ghosh, A., Matusik, W., Ramamoorthi, R. and Debevec, P.: Compressive light transport sensing, *ACM Trans. Graphics (TOG)*, Vol.28, No.1, pp.1–18 (2009).
- [16] Chiba, N. and Hashimoto, K.: Ultra-Fast Multi-Scale Shape Estimation of Light Transport Matrix for Complex Light Reflection Objects, *2018 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pp.1–5, IEEE (2018).
- [17] Zhang, Q., Xu, R., Liu, Y. and Chen, Z.: 3D Shape Measurement Based on Digital Speckle Projection and Spatio-Temporal Correlation, *Multidisciplinary Digital Publishing Institute Proceedings*, Vol.2, No.8, p.552 (2018).
- [18] 前田涼汰, 山田 憲, 久保尋之, 向川康博: 偏光 Episcan による金属物体の相互反射の除去, 情報処理学会第 81 回全国大会, Vol.1, p.3 (2019).
- [19] Zhang, Z.: A flexible new technique for camera calibration, *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol.22, No.11, pp.1330–1334 (2000).
- [20] Matsumoto, M. and Nishimura, T.: Mersenne twister: A 623-dimensionally equidistributed uniform pseudo-random number generator, *ACM Trans. Modeling and Computer Simulation (TOMACS)*, Vol.8, No.1, pp.3–30 (1998).



住吉 信一

2010 年北海道大学大学院修士課程修了。同年株式会社リコー中央研究所入社。2016 年株式会社デンソーアイティラボラトリ入社。コンピュータビジョンの研究, 特にプロジェクタ・カメラを用いた 3 次元計測の研究に従事。PRMU 研究会専門委員 (2018 年～)。精密工学会大規模環境の 3 次元計測と認識・モデル化技術専門委員 (2015 年～)。



吉田 悠一

2003 年大阪大学基礎工学部基礎工学研究科修士課程修了。同年日本電信電話株式会社入社。2007 年株式会社デンソーアイティラボラトリ入社後, 現在に至る。コンピュータビジョン, 機械学習, モバイルサービスの研究開発に従事。著作に『iOS 12 Programming』, 『iOS 11 Programming』, 『iOS SDK Hacks—プロが教える iPhone アプリ開発テクニック』等がある。



石川 康太

2006 年東京工業大学大学院理工学研究科修士課程終了。2012 年株式会社デンソーアイティラボラトリ入社。コンピュータビジョン, 信号処理, 機械学習, 深層学習の基礎および応用研究に従事。



安倍 満

2007 年慶應義塾大学大学院博士後期課程修了。博士 (工学)。2007 年株式会社デンソーアイティラボラトリ入社。パターン認識・理解, コンピュータビジョンの研究, 特に処理速度の高速化とメモリ消費量の削減, 二値特徴量に関する研究に従事。2011 年画像センシングシンポジウム (SSII2011) 最優秀学術賞, 2015 年画像の認識・理解シンポジウム (MIRU2015) MIRU 長尾賞他。



日浦 慎作 (正会員)

1993 年大阪大学基礎工学部制御工学科飛び級中退, 1997 年同大学大学院博士課程短期修了。同年京都大学リサーチアソシエイト, 1999 年大阪大学大学院基礎工学研究科助手, 2003 年同助教授。2010 年広島市立大学教授, 2019 年兵庫県立大学教授, 現在に至る。2008~2009 年マサチューセッツ工科大学メディアラボ客員准教授。三次元空間の画像計測と反射現象・表面質感の解析, コンピューショナルフォトグラフィ等の研究に従事。2000 年画像センシングシンポジウム優秀論文賞, 2010 年情報処理学会山下記念研究賞, 2012 年 MIRU 優秀論文賞等受賞。日本バーチャルリアリティ学会会員。博士 (工学)。