

プロジェクタ画像超解像を利用した 3次元変動強調の超解像化

吉木 昌康^{1,a)} 坂上 文彦^{1,b)} 佐藤 淳^{1,c)}

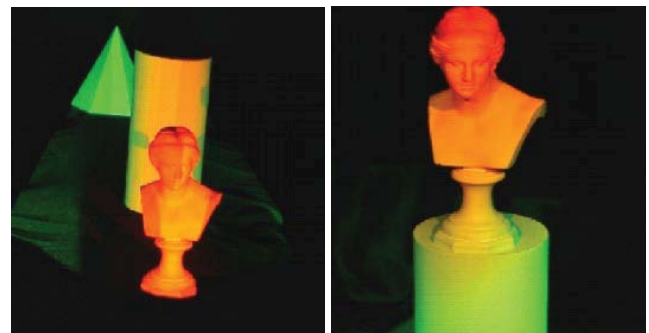
概要: 本研究では、複数プロジェクタを利用した画像超解像技術を用いて、対象3次元物体の形状変化の可視化・強調を超解像化する方法を提案する。プロジェクタ投影画像の超解像技術には、サブピクセル単位の画像重畳が用いられており、この技術を形状変動強調に応用することで、対象物体の変動をより細かい単位で可視化・検出、すなわち超解像化することができる。本稿では、このような可視化・検出を実現するための投影パターン導出法を提案する。提案法を用いることにより、従来の3次元形状強調技術と比べて、より高精度に3次元形状を強調することが可能となることを、実験結果により示す。

1. はじめに

3次元空間における、距離計測・形状計測はコンピュータビジョン分野における重要問題の一つであり、非常に多くの応用が考えられる。そのため、これまでに数多くの研究がなされており、様々な方法が提案されている。これらの方法の多くは、複数台のカメラ使用したステレオカメラシステムとして構成されており、撮影されたシーンから画像間の対応点を検出することにより三角測量の原理を用いて距離・形状を計測している。また、カメラとプロジェクタなどの投光器を組み合わせることにより、安定な距離計測を実現したシステムも多く用いられている。このようなシステムでは、投光器から特定のパターンを投影し、これをカメラで観測することで、3次元計測を実現する。そのため、撮影された画像から受動的に対応点を探索する通常のステレオカメラシステムと比べて、安定な計測を実現することが可能になっている。

また、光を利用した距離計測システムとして、ToF(Time of Flight)カメラと呼ばれるシステムも多く利用されている。このシステムでは、投光器より発せられた光が物体上で反射され、カメラに入射するまでの時間を計測することで、距離の計測を実現している。

これまでに述べた計測システムでは、細かい原理の違いはあるものの、カメラにより撮影された画像を解析し、その結果から距離を計測するという点では一致している。こ



(a) 距離情報の可視化

(b) 高さ情報の可視化

図1 プロジェクタからの重畳画像投影を用いた距離・高さの可視化

れに対し、坂上ら [1] はカメラを用いずに、複数の投光器の関係のみを利用して距離計測を行う方法を提案している。この方法では図1に示すように、複数のプロジェクタから特定のパターンをシーンに向けて投影し、それを対象物体上で重畳させることで、距離の計測・提示を実現する方法である。これは、物体と投光器の距離が変化すると、対象物体上で重畳される画素の関係が変化することを利用したものであるため、通常のステレオカメラと同様に距離による視差の変化に基づくシステムといえる。この方法は、対応点の探索などの画像処理を一切行う必要がなく、これに基づく遅延が発生しないという非常に大きな利点を持つ。また、距離計測結果を観測者に対して直接的に提示可能であるため、工業分野における異常部品の検出などへの利用が期待できる。

同様の原理を利用して、高田ら [2] は対象物体の表面形状変動を検出する方法を提案している。この方法では対象物体・シーンの表面形状に着目し、想定しているシーンへの投影が行われた場合には自然な着色が、シーンが変動して

¹ 名古屋工業大学
466-8555 名古屋市昭和区御器所町
a) yoshigi@nitech.ac.jp
b) sakaue@nitech.ac.jp
c) junsato@nitech.ac.jp

いる場合には不自然な着色が行われる。これにより、対象シーンにおける変動箇所をカメラによる観測を利用することなく強調することが可能である。この方法は、先述した距離の可視化と比較して、より細かな形状の違いを際立たせることが可能であるため、工業部品における傷やへこみの検出に応用することが可能である。

しかし、このような応用を考えた場合、検出すべき傷やへこみは非常に細かいものであることが多く、場合によってはマイクロメートル単位の強調が必要となる。この方法で検出可能な変動の限界は使用するプロジェクタの解像度に依存しているため（詳細は後述）、通常のプロジェクタを用いてこのような極小の変動を検出することはできない。プロジェクタの光学系を取り換え、非常に狭い領域のみに投光を行うようにできれば対象物体上での解像度を向上させることが可能であるが、対象物に合わせて光学系を毎回取り換えることは、非常に効率が悪い。さらに、後述するサブピクセル単位の重畳ずれの問題により、光学系を取り換えるだけでは必ずしも高精度な変動強調を実現することができない。

そこで本研究では、複数のプロジェクタを用いた投影画像の超解像技術 [3], [4] を利用することにより、通常のプロジェクタを用いた場合でも高精度なシーン変動を強調する方法を提案する。画像の重畳投影を利用した投影画像の超解像化技術では、画像重畳時に発生するサブピクセル単位のずれが利用されている。そのため、今回提案する方法は、従来の変動強調技術で問題となっていた画像重畳のずれを積極的に利用した方法であるといえる。これにより、変動強調の精度を向上させるだけでなく、従来法の問題点を軽減させることが可能となっている。この提案法を用いることで、通常のプロジェクタを利用した場合でも、シーンの変動強調を超解像化することが可能となり、高精度な変動強調を実現することができる。

2. 画像重畳投影を利用した3次元情報の強調

2.1 重畳投影を利用した3次元空間の着色

まずこれまでに提案されている、複数プロジェクタからの画像重畳投影を用いた3次元情報強調について簡単にまとめ、その長短について議論する。中村ら [5] は3台以上のプロジェクタを用いて特定のパターンを投影することで、標準化された3次元空間の各領域にそれぞれ異なる着色を行う方法を提案している。この方法では、図2に示すようにあらかじめ対象となる3次元空間に任意の着色情報を与えておき、その着色を実現するためのパターン導出法が示されている。この方法により導出されたパターンを用いることで、正面側からプロジェクタ画像を投影するだけで、図2に示すように、あたかもスポットライトから光が投影されているようなシーンを実現することが可能である。

この方法では、十分に多くのプロジェクタを利用するこ

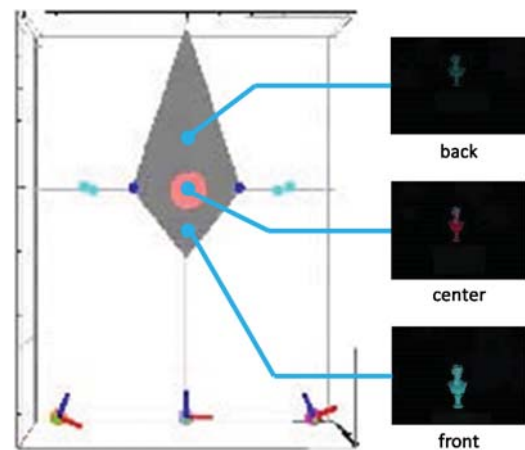


図2 複数画像の映像投影を利用した特定領域の強調

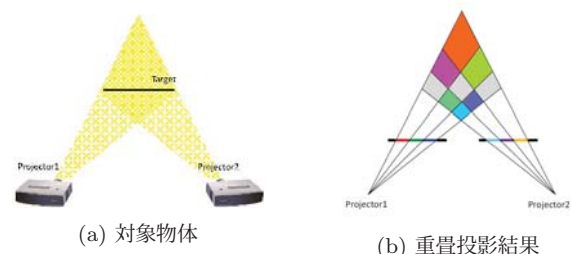


図3 画像の重畳投影を利用した3次元変形の強調結果

とができれば任意の3次元着色を作成することが可能であるが、現実的に使用可能なプロジェクタの数は限られているため、着色可能なパターンには限度がある。これは、プロジェクタからの投影される画像が2次元情報であるのに対し、表現すべきシーンが3次元空間であることに起因する。そのため、着色が実現不可能なパターンが与えられた場合には、境界部分がぼやけるなどの問題が生じる。

2.2 対象表面への着色を利用した3次元変動強調

先の問題に対し、高田ら [2] は3次元空間ではなく、投影が行われる対象の表面のみに着目した方法を提案している。この方法では、図3に示すように、互いに補色となる色の組からなるパターンを2台のプロジェクタから投影し、対象表面上で重畳させる。このとき、実際に投影が行われたシーンが想定されたシーンと同一の形状（基準形状）であれば、図4(a)のように対象物体上では白色が観測される。一方、対象の形状が想定と異なる場合、補色の関係がくずれるため図4(b)のように変形箇所では白色以外の色が観測される。この原理を利用することで、対象表面上に部分的な変動、例えば異物の付着や傷へこみなどが生じた場合、即座にそれを検出することが可能である。

この方法は、工業分野、とくに工場における異常部品の検出などに直接的に利用可能な方法であり、さらなる発展が期待される。



(a) 基準形状への投影結果 (b) 変形を含む場合の投影結果
図 4 重畳投影を利用した 3 次元変動の強調結果

2.3 重畳投影による変動検出の課題

前節で示した方法は、そのリアルタイム性や、系の構成のしやすさなどから、幅広いシーンに応用可能であると考えられる。しかし、この方法を用いた場合の変動強調精度は、プロジェクタからの投影画像の解像度に依存しており、それを向上させるためには、プロジェクタの解像度を向上させる必要がある。しかし、プロジェクタ投影画像の解像度は、プロジェクタに用いられているレンズや光学素子により決定されるため、自由にこれを変更することは難しい。

また、2 台のプロジェクタを用いて投影する場合、投影画像にサブピクセル単位でのずれが生じるという問題がある。この問題は、プロジェクタの解像度が有限であることに起因している。通常、このようなシステムを用いる場合、平面射影変換等を用いて 2 台のプロジェクタからの投影画像を同一のスクリーンに投影できるように校正が行われる。しかし、このような校正を行った場合でも、プロジェクタ本来の解像度以上の画像を投影することはできないため、必ず標本化に起因するずれが発生する。その結果、本来白色となるべき箇所においても、白色以外の色が観測されることになる。

本研究ではこれらの問題を解決・軽減するため、より多くの台数を利用した新しい 3 次元変動強調法を提案する。この方法では、従来の変動強調法にプロジェクタ画像超解像技術を加え、変動強調の精度をさらに高めることを目指す。また、この画像超解像はサブピクセル単位でのずれを利用して実現されているため、従来法において問題となっていたずれの問題の軽減が期待できる。

3. 重畳投影を利用した画像超解像

3.1 投影画像超解像の原理

まず、重畳投影を利用した超解像 [3] の原理について説明する。いま、図 5 のように、2 台のプロジェクタがある領域に対して同時に投影を行っている場合を考える。この図において、黄枠はプロジェクタ 1 から投影される画素の境界を表し、緑枠はプロジェクタ 2 から投影された画素の境界を示している。この場合、投影による歪みの影響やプロジェクタの配置ずれなどの影響から、図 5 に示す通り 2 つのプロジェクタの画像が重なった重畳画像上では 1 画素未満のずれ、つまりサブピクセルのずれが発生する。こ

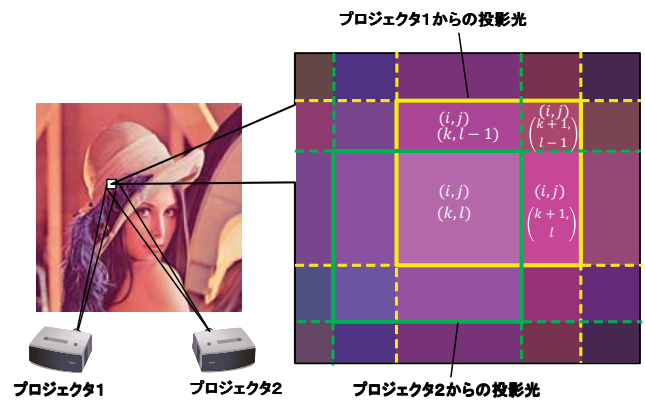


図 5 複数のプロジェクタによる超解像の原理

のとき、プロジェクタ 1 の画素 (i, j) によって照らされた領域に着目すると、この画素内ではプロジェクタ 2 の画素 (k, l) で照らされる領域の他に画素 $(k+1, l)$, $(k, l-1)$, $(k+1, l-1)$ で照らされる領域が存在する。そのため、プロジェクタ 2 から投影される該当画素の色がそれぞれ異なる場合、領域ごとに観測される輝度値もそれに伴い変化する。これにより、本来 1 画素であった領域に対して複数の輝度値を持たせる事が可能となる。つまり、画像の超解像を実現できる。

3.2 インパルス応答に基づく投影のモデル化

次に、重畳投影を用いて投影画像超解像を実現するための方法について考える。まずはじめに、プロジェクタからスクリーンへの画像投影のモデル化を行う。対象スクリーンが平面であることが分かっている場合、画像の投影は平面射影変換を用いてモデル化可能であることが知られている [6]。しかし、本研究では 3 次元的な形状を持つ物体に対して投影を行うため、平面射影変換だけでは投より一般化されたインパルス応答画像を用いた投影モデル化を行う [3]。

インパルス応答画像（以下、インパルス応答）とは、投影画像中の一点、つまりインパルス画像を投影した場合に観測される画像を示す。これは、プロジェクタ画像中の 1 点がどのように広がるかを表現したものであるため、点広がり関数（PSF: Point Spread Function）とも考えることができる。投影画像の変動が画素ごとに独立であると仮定した場合、全ての画素について PSF を取得しておくことで、任意の画像を投影した場合の観測画像を得ることが出来る。

いま、図 6 のように画素数 N のプロジェクタから投影される画像の画素 j を輝度値 1 で発光させ、これを画素数 M のカメラで観測した場合を考える。このときカメラによる撮影画像の解像度は、投影画像の解像度よりも十分に高いものとし、カメラによる撮影画像を \mathbf{P}_j とする。またこの撮影画像における画素 i における輝度値を P_{ji} として表す。

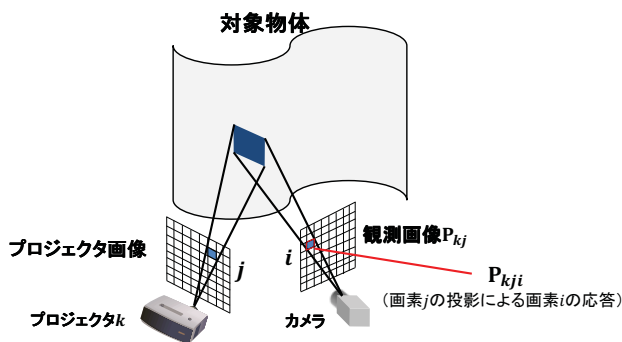


図 6 インパルス応答に基づく投影モデル

このとき $\mathbf{P}_j = [P_{j1}, \dots, P_{jM}]^T$ がプロジェクタの画素 j を発光させた場合における PSF 画像である。このインパルス応答を用いることで、プロジェクタ j から画像 \mathbf{x} を投影した場合の観測画像 \mathbf{I} を以下のように表現できる。

$$\mathbf{I} = \begin{bmatrix} \mathbf{P}_1 & \dots & \mathbf{P}_N \end{bmatrix} \mathbf{x} \quad (1)$$

このように計算される観測画像 \mathbf{I} は、プロジェクタから投影される光だけでなく、スクリーン形状に伴って発生する相互反射なども表現することができる。これにより、平面射影変換を用いて画像を表現する場合と比べて非常に精度よく投影画像を推定することが可能となる。

3.3 超解像のための投影画像の導出

次に、このような投影モデルを用いて超解像を行うための画像導出方法を考える。いま、 K 台のプロジェクタそれぞれについて第 k プロジェクタの座標 j に対応するインパルス応答 \mathbf{P}_{kj} が求まっているものとする。このとき、観測画像 \mathbf{I} は、それぞれのプロジェクタからの投影画像 \mathbf{x}_k を用いて以下のように表される。

$$\mathbf{I} = \sum_{k=1}^K \begin{bmatrix} \mathbf{P}_{k1} & \dots & \mathbf{P}_{kn} \end{bmatrix} \mathbf{x}_k \quad (2)$$

これは、以下のようにまとめることができる。

$$\mathbf{I} = \begin{bmatrix} \mathbf{Q}^1 & \dots & \mathbf{Q}^K \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x}_1 \\ \vdots \\ \mathbf{x}_K \end{bmatrix} = \mathbf{W} \mathbf{x}^{all} \quad (3)$$

ここで \mathbf{Q}^k は各プロジェクタのインパルス応答を並べた行列であり、以下のように表すことができる。

$$\mathbf{Q}^k = \begin{bmatrix} \mathbf{P}_{k1} & \dots & \mathbf{P}_{KN} \end{bmatrix} \quad (4)$$

また、 \mathbf{x}^{all} は全ての投影画像を並べたものである。このとき、高解像目標画像 \mathbf{I} が与えられたとすると、それぞれのプロジェクタから投影すべき画像は、以下の評価式 E を最小化することにより求めることができる。

$$E = \|\mathbf{I} - \mathbf{W} \mathbf{x}^{all}\|^2 \quad (5)$$

ここで、プロジェクタから投影可能な画像は非負であり、また、投影可能最大輝度値 I_{max} を超えることができない。そのため、この範囲の中で E を最小化する \mathbf{x} を求めることにより、適切な画像を投影することができる。

なお、このような最適投影画像の計算には多大な計算量が必要となるため、これを効率的に計算する方法について議論が行われている [7]。ただし、この問題は本稿の主題から外れているためここでは取り扱わない。

4. 投影画像超解像を利用した形状変動強調の超解像化

4.1 PSF に基づく変動強調パターンの導出

次に、前節で述べた超解像技術をコード化プロジェクションに適用することにより、より高精細な形状強調を実現する方法を考える。最も単純な方法としては、複数のプロジェクタを利用して仮想的な高解像度プロジェクタを構成し、これにより形状強調を実現する方法が考えられる。しかし、この方法では少なくとも 4 台のプロジェクタが必要となる。また、各仮想プロジェクタごとに超解像画像を生成する必要があるため計算コストが大きい。そこで本稿では、超解像画像を求める際に画像強調のための条件を付加することで、形状強調のための投影画像を導出する方法を提案する。

投影画像重畳を用いた変動強調法では、物体の変形に伴うプロジェクタ間の画素対応が変化した際に補色の関係が崩れ、その結果対象物体が着色されるよう構成されている。したがって、目標超解像画像の白色画像とし、さらに、画素対応の変化により観測色が大きく変動するような投影画像を導出することで、適切な投影パターンを計算できる。次節以降では、このようなパターンを導出するためのいくつかの方法を示す。

4.2 エピポーラ幾何に基づく投影パターンの導出

まず、物体の変動に伴う対応関係の変動について考える。いま、図 7 に示すように、プロジェクタ 1 の画素 \mathbf{m}_1 により照らされている点 \mathbf{X} がその光路に沿って $\Delta \mathbf{Z}$ 移動した場合を考える。この場合、プロジェクタ 1 から点 \mathbf{X} に向けて照射される色は変化しないが、プロジェクタ 2 から照射される光は \mathbf{X} の移動に伴い変化する。このとき、この 2 台のプロジェクタの関係はステレオカメラと同様にエピポーラ幾何 [6] により記述することが可能である。そのため、 \mathbf{m}_1 に対応する点 \mathbf{m}_2 は、 \mathbf{m}_1 より計算されるエピポーラ線上に存在する。つまり、画素対応の移動はエピポーラ線上のみで発生するため、投影画像の導出に際しても、エピポーラ線上の移動のみを考慮すればよい。そのため、以降の議論では画像中のあるエピポーラ線のみに着目して議論を進める。

いま、3 次元空間中のあるエピポーラ平面、つまり、2

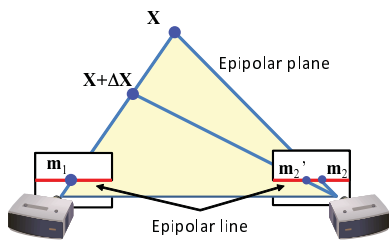


図7 2台のプロジェクタにおけるエピポーラ幾何

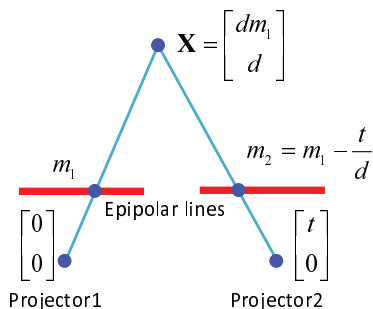


図8 エピポーラ平面上の点のエピポーラ線への投影

台のプロジェクタのレンズ中心を含む平面に着目する。この場合、3次元空間から2次元画像への投影は、図8に示すような2次元エピポーラ平面から1次元エピポーラ線への投影として考えることができる。また、議論の簡単化のため、2台のプロジェクタは平行な画像平面をもち、プロジェクタ1のレンズ中心は $[0, 0]^T$ 、プロジェクタ2のレンズ中心は $[t, 0]^T$ により表現できるものとする。このようなシーンにおいて、エピポーラ平面上の点 \mathbf{X} がプロジェクタ1の m_1 によりてらされているとする。このとき、点 \mathbf{X} は奥行き d を用いて、 $\mathbf{X} = [dm_1, d]^T$ として表現できる。また、この点 \mathbf{X} を照らすプロジェクタ2上の点 m_2 は以下のように計算できる。

$$\mathbf{m}_2 = \frac{dm_1 - t}{d} = m_1 - \frac{t}{d} \quad (6)$$

各プロジェクタからの投影輝度を $I_1(m_1)$ 、 $I_2(m)$ として表すとすると、点 \mathbf{X} へ投影される光の総量は以下のように表現できる。

$$I = I_1(m_1) + I_2(m_1 - \frac{t}{d}) \quad (7)$$

ここで、奥行き d に変化に対して見えの変動を最大化するというは、式(7)により表される観測輝度を d により微分し、この微分を最大化するものとして言い換えることができる。このような微分は以下のように計算できる。

$$\frac{dI}{dd} = \frac{t}{d^2} \frac{dI_2(m_2)}{dm_2} \quad (8)$$

このようにして導出された式(8)には、投影輝度のエピポーラ線方向の微分が含まれている。そのため、エピポーラ線上の輝度微分を最大化するように投影画像を作成することで、奥行き変動に伴う見えの変化を最大化することが可能

となる。

なお、式(8)には奥行きに d の逆数の2乗が含まれているが、これは、物体からの距離が近いほど奥行き変動に伴う見えの変化が大きいことを表している。

4.3 隣接画素間の差異に基づく投影画像の導出

前節で説明した通り、2台エピポーラ線上の輝度微分を最大化することで、奥行き変動に伴う投影輝度の変化を最大にできる。3台以上のプロジェクタを使用する場合でも、2台のプロジェクタ組それぞれについて上記を満たすような画像を作成することにより、輝度変化を最大化することが可能となる。しかし、このような方法を採用する場合、プロジェクタの台数が増加すると、評価関数が非常に複雑なものになってしまう。

そこで、本稿ではエピポーラ線方向とは無関係に、画像の水平方向微分および垂直方向微分を最大化することで、投影パターンを導出を行う方法を採用する。この方法では、エピポーラ線方向に関する情報が使用されていないため、必ずしも対象の変形に伴う見えの変化を最大化できるとは限らない。しかし、水平、垂直それぞれの微分を最大化しているため、エピポーラ線の方向がどのようなものであっても、近似的にその線上の微分を大きくすることができる。また、エピポーラ線の向きに関わらず投影画像を導出可能であるため、プロジェクタ台数が増加した場合でも、その台数に関係なく投影パターンを導出することが可能である。

これらを踏まえて、投影パターンを導出するための評価関数を以下のように定義する。まず、形状変動による輝度変化を強調するための評価関数 E_d を以下のように定義する。

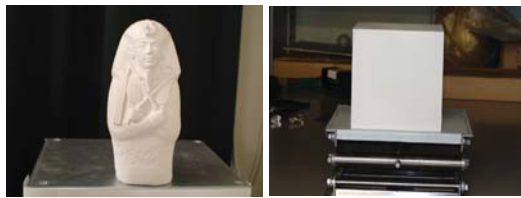
$$E_d = \sum_{k=1}^K \|\mathbf{D}_x \mathbf{x}_k\|^2 + \|\mathbf{D}_y \mathbf{x}_k\|^2 \quad (9)$$

ここで \mathbf{D}_x は投影画像の x 方向に隣接する画素の差を計算する行列であり、 $\mathbf{D}_x \mathbf{x}$ は x 方向の差分画像を表す。同様に \mathbf{D}_y は投影画像の y 方向に隣接する画素の差を計算する行列であり、 $\mathbf{D}_y \mathbf{x}$ は y 方向の画素との差分画像を表す。したがって式(10)は各プロジェクタからの投影画像 \mathbf{x}_k の微分画像のノルムを計算していることに相当する。この評価式を最大化することで、変動に伴う輝度の変化を大きくすることができる。

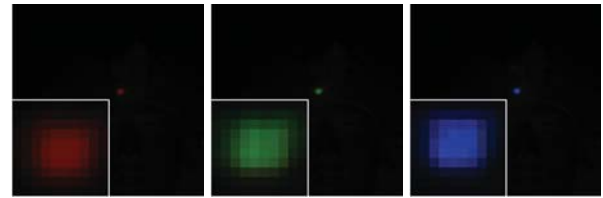
さらに、この評価式を式(3)に示した画像超解像の評価式と組み合わせることで、最終的な評価式を以下のように定義する。

$$E = \|\mathbf{I} - \sum_{k=1}^K \mathbf{Q}^k \mathbf{x}_k\|^2 - \lambda E_d \quad (10)$$

ここで、第1項における \mathbf{I} は目標超解像画像である。この目標画像は通常白色の画像が用いられるが、任意の画像に



(a) 曲面物体 (b) 平面物体
 図 9 対象物体



(a) PSF (Red) (b) PSF (Green) (c) PSF (Blue)
 図 11 計測されたインパルス応答の例



図 10 実験環境



図 12 投影画像 (提案法)

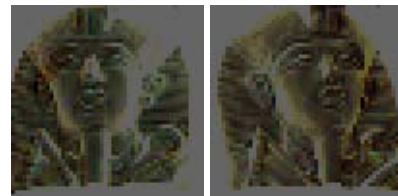


図 13 投影画像 (従来法)

置き換えることも可能である。また、 λ は正の値を持ち、評価式 E_2 の重みを表す。これらにより定義される評価式を最小化することで高精度に変動を強調可能な投影パターンを導出できる。

以上の方法により複数台のプロジェクタを用いた超解像技術を用いる形状強調を実現できる。この方法では、複数のプロジェクタの投影ずれを利用してより高精度な投影画像を生成しているため、従来の 2 台のプロジェクタのみを用いた方法と比較してより高精度に形状強調を行えると考えられる。以降では、提案法を用いて実際に形状強調を行った結果を示す。

5. 実験

5.1 実験環境

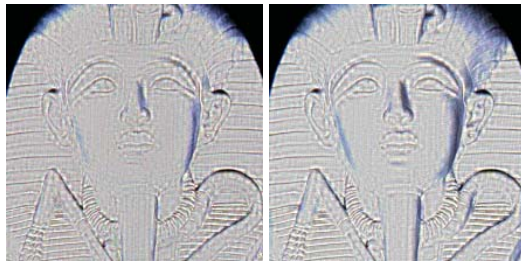
まず、3 次元形状強調実験の環境を示す。本実験では、図 9(a) に示す曲面物体を対象物体として投影を行い、これらの物体の奥行きが変動した場合の形状強調結果を調べた。プロジェクタは図 10 に示すように 3 台を横に並べて配置し、各プロジェクタから指定した解像度の投影画像を投影した。これをカメラで撮影し、超解像後の画像が指定した解像度となるように、インパルス応答を要素として構成される特性行列から投影画像を導出した。図 9(a) を対象とした場合のインパルス応答の例を図 11 に示す。図中左下部は図中央のインパルス応答を拡大したものである。このように撮影されたインパルス応答から、提案法を用いて変動強調のための投影パターンを導出した。

5.2 着色精度の比較

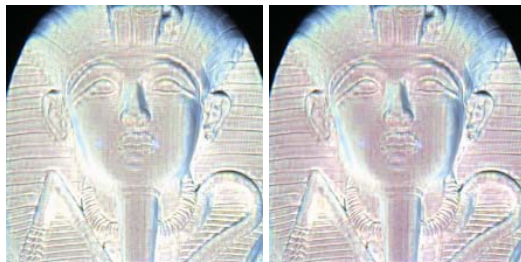
まず、図 9(a) に示す対象物体に対して三次元形状強調を行った結果を示す。このとき、各プロジェクタから投影される投影画像の解像度は 50×50 とし、カメラにより観測

する PSF の影響範囲は 230×230 としている。提案法に従い 3 台のプロジェクタを用いて投影画像を導出したところ、図 12 に示す結果が得られた。また、比較のために 2 台のプロジェクタを用いて投影画像を導出したところ、図 13 に示す画像を得た。さらに、これらの画像から投影結果画像を再構成したところ、図 14 に示す結果が得られた。これらの投影画像を実際に対象物体へ向けて投影したところ、図 15 に示す結果が得られた。これらの投影結果を見ると、プロジェクタの台数が 2 台の場合、3 台の場合どちらについても、対象をある程度白色に着色できており、提案法により妥当な投影パターンを導出できていることがわかる。しかし、2 台のプロジェクタを利用した場合は、3 台のプロジェクタを使用した場合と比べて全体がやや赤みがかった状態になっている。これは、プロジェクタ 2 台の投影だけではサブピクセルの位置ずれ問題を軽減できず、その結果、観測結果が白色からやや逸脱したものと考えられる。

次に対象物体を初期位置から奥行き方向に並進させ、そのシーンを撮影したこれは、対象全体が変形し、全ての点において奥行きが変動したことを模擬している。図 16 は、並進後の撮影画像を示している。この結果を見ると、画像全体が白色の状態から変動しており、提案法により形状の変動が強調できていることが分かる。また、2 台の場合と 3 台の場合を比較すると、3 台の場合と比べてより細かく色に変動していることが確認できる。これは、より多くのプロジェクタを利用することでサブピクセル単位の位置ずれを有効に活用できているためと考えられる。



(a)3台のプロジェクト (b)2台のプロジェクト
図 14 再構成結果



(a)3台のプロジェクト (b)2台のプロジェクト
図 15 基準形状における投影結果



(a)3台のプロジェクト (b)2台のプロジェクト
図 16 異常形状における投影結果

5.3 観測範囲全体の検出精度の比較

次に、2台のプロジェクトを用いた場合と、3台のプロジェクトを用いた場合のそれぞれについて、形状変動に伴う観測輝度の変化を調べた。この実験では、図9(b)に示す平面物体を対象物体として、前面の平面上の輝度変化の平均値を調べた。このとき、対象物体は先の実験と同じく並進台上に設置してあり、並進台を0.1mmずつ移動させ、それぞれの位置において基準形状からの変動を調べた。図17に各距離における輝度変化の平均を示す。このグラフの横軸は並進台の移動距離を表し、縦軸は輝度変化を表している。また、グラフ中の赤線は3台のプロジェクトを用いた場合の結果であり、青線は2台のプロジェクトを用いた場合の結果である。このグラフを見ると、3台のプロジェクトを用いた場合の方が、変動に伴う輝度の変化が大きくなっていることがわかる。このことから、提案法を用いることにより対象物体の変動をより大きく強調可能であることが確認できた。

6. まとめ

本研究では、プロジェクト投影画像の超解像技術を複数

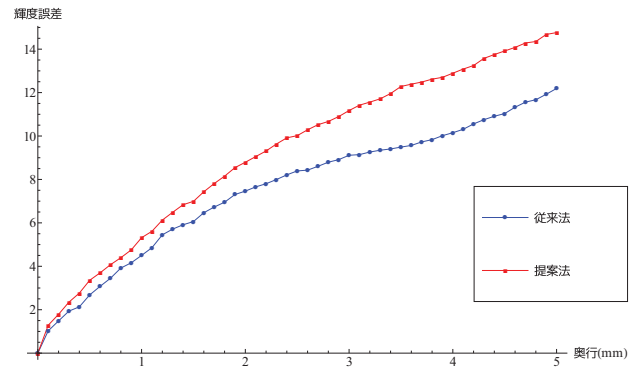


図 17 奥行き方向への並進に対する観測輝度値の変化

プロジェクトからの投影画像重畳を用いた3次元変動の強調に対して、適用することにより、さらに高精度に変動を強調する方法を提案した。この方法では、プロジェクトからの投影画像を重ね合わせた際に発生するサブピクセルの位置ずれに着目し、これを利用することで変動強調の高精度化を行った。また、プロジェクトからの画像投影をインパルス応答を用いてモデル化することで、サブピクセルずれを考慮した投影画像の導出法を提案した。さらに、対象の形状変動に伴う見えの変化を解析し、効果的に変動強調を行うための方法を示した。最後に提案法による実験結果を示すことで、提案法の有効性を確認した。本稿で提案した方法は、生産ラインにおける異物の検出や非常に細かな傷の検出などに応用可能な技術であり、今後はより実践的な応用を目指す。

参考文献

- [1] Sakaue, F. and Sato, J.: Surface Depth Computation and Representation from Multiple Coded Projector Light, *Proc. International Workshop on Projector-Camera Systems (PROCAMS2011)*, pp. 75–80 (2011).
- [2] S. Takada, F. Sakaue, J. S.: 3D Object Emphasis using Multiple Projectors, *International Conference on Computer Vision Theory and Applications (VISAPP2014)* (2014).
- [3] Venkata, N. and Chang, N.: Realizing Super-Resolution with Superimposed Projections, *Proc. International Workshop on Projector-Camera systems (Procams)*, pp. 1–8 (2007).
- [4] Venkata, N. and Chang, N.: ON THE RESOLUTION LIMITS OF SUPERIMPOSED PROJECTION, *In Proc. IEEE International Conference on Image Processing (ICIP)*, Vol. 5, pp. 373–376 (2007).
- [5] R. Nakamura, F. Sakaue, J. S.: Emphasizing 3D Structure Visually using Projection from Multiple Projectors, *Proc. Asian Conference on Computer Vision*, pp. 619–632 (2010).
- [6] Hartley, R. and Zisserman, A.: *Multiple View Geometry in Computer Vision*, Cambridge University Press (2000).
- [7] 和田幹生, 岡谷貴之, 出口光一郎: 複数プロジェクトの投影画像の重ね合わせによる画像の超解像化について, 画像の認識・理解シンポジウム (MIRU2008), pp. 202–209 (2008).