

複数プロジェクタの重ね合わせ投影による高精細画像実現

和田 幹生 岡谷 貴之 出口 光一郎

東北大学大学院情報科学研究科

最近、プロジェクタを複数台使いそれらの投影像を重ね合わせることで、単体のプロジェクタを超える解像度を持つ画像を表示できることが示された。われわれは以前、この方法が実現する画像の画質に関するいくつかの特徴的な性質を、理論的な解析に基づいて示した。具体的には、実現画像の画質が、表示させようとする目標画像の濃淡構造や全体的な明るさに依存することなどである。本稿では、実際にシステムを構築しそれを用いた実験を行って、それらが現実のシステムでも成立することを示す。さらに、重ね合わせ投影のためのシステムのキャリブレーション方法を示す。これは、3次元形状復元で一般的な位相シフト法を本システムに応用したもので、精度において従来法を大きく上回ることを示す。

Realizing High-resolution Image by Superimposed Projection Using Multiple Projectors

Miki Wada, Takayuki Okatani, and Koichiro Deguchi

Graduate School of Information Sciences, Tohoku University

Recently, it has been shown that it is possible to realize a higher-resolution image by superimposing multiple low-resolution images projected by different projectors. In our previous study, we pointed out several peculiar properties with the images realized by this superimposed projection based on theoretical analyses. For example, the quality of the realized images depends on the brightness structure and the overall brightness of a target image. In this paper, we show that they hold in the case of real systems by constructing a working system of superimposed projection and conducting experiments. Furthermore, we present a novel method for the calibration of the system, which is based on phase shifting that is widely used in 3D shape reconstruction. We then show that the method is superior to conventional methods in terms of calibration accuracy.

1 はじめに

最近、複数台のプロジェクタを用いた投影画像の超解像化が実現可能なことが示された [3, 2] ([4, 5] も参照)。すなわち、複数台の低解像度プロジェクタの投影画像を重ね合わせて、一枚の高解像度の画像を生成できるということである。

同じように複数台のプロジェクタを用いて一枚の高解像度画像を実現する方法に、プロジェクタの投影像をタイル状に並べる方法があり、こちらは既に実用化されている [1]。上述のプロジェクタの投影像を重ねる方法 (以降「重畳投影」と呼ぶ) を、この良く知られた投影像を並べる方法 (以降「並列投影」と比較すると、重畳投影は、その柔軟なスケラビリティに長所がある。並列投影では、画像のアスペクト比を維持す

るにはプロジェクタの台数の増減に制約がある (3×3 , 4×4 , ...) が、重畳投影では1台単位でプロジェクタを増減できる。また、プロジェクタの設置方法の違いも運用面では長所となり得る。さらに重畳投影では、濃淡や色の階調表現力が向上させられる可能性があり、これは並列投影には不可能である。

これら並列投影に対する長所の一方で、重畳投影には明確な短所がいくつかある。1つは、並列投影に比べてはるかに高い精度のキャリブレーションが必要となることである。各プロジェクタの投影画像の位置合わせを、プロジェクタの投影画像すべてにおいてサブピクセルの誤差で、具体的には画素サイズの $1/100$ 程度以下の誤差で行うことが必要となろう。これは不可能ではないにしても、それなりのコストを要する。また、並列投影では、ほぼ台数に正確に比例して解像度

は向上するが、重畳投影では必ずしもそうならないと
 予想され、これも短所として挙げられる。

以上のように、並列投影に比べてとき、重畳投影には
 長所短所があり、その工学的な価値は現在のところは
 はっきりしない。

これに対し、われわれは [6] で、重畳投影が実現する
 画像の画質—表示したい目標画像に対する、重畳投
 影の実現画像の再現精度—について、いくつかの重要
 な性質を導いた。これは重畳投影の価値を判断する上
 で材料となるものである。具体的には、重畳投影の画
 像の画質が、表示させようとする目標画像の濃淡構造
 に依存することを述べた。つまり、投影する画像には、
 得意なものとうでないものがあるということである。
 さらに、画質が目標画像の全体的な明るさにも依存し、
 画質と明るさがトレードオフの関係にあることを述べ
 た。そしてこのトレードオフの傾向は、再び目標画像
 の濃淡構造に依存することも示した。以上の議論は、
 [6] ではもっぱらシミュレーションと理論的解析を中心
 になされていた。

本稿では、現実のプロジェクタを用いて重畳投影の
 実画像実験を行い、現実のシステムにおいても上述の
 画質に関する傾向が存在するかどうかを調べたのでこ
 れについて報告する。また、先述のように、重畳投影
 によって投影像の超解像化を実現するには、極めて高
 い精度のキャリブレーションが必須となる。本稿では、
 そのための幾何学キャリブレーションの方法を示す。そ
 の方法は、3次元形状計測を行うためのレンジファイン
 ダで使われている位相シフト法をそのまま応用したも
 のだが、われわれの知る限り複数プロジェクタから1枚
 の画像を生成するシステムでの利用は初である。また
 この方法を、空間コード化法をサブピクセル精度に拡
 張した方法 (Venkata らが [3] にて用いている) と、精
 度の面で比較し、われわれの方法が上回ることを示す。

2 重畳投影による超解像化

2.1 重畳投影のモデル

以下では、プロジェクタ輝度値の入出力関係はキャ
 リブレーション済みであるとし、これを線形であるとし、
 さらにグレイ画像のみを考える。プロジェクタ
 k の画素 j のプロジェクタ画像座標系での位置を \mathbf{v}_j 、
 その画素の輝度値を y_j^k と書くと、スクリーン上に生
 成される投影像は、その上の座標系上の仮想的なピク
 セル位置 \mathbf{u}_i においてサンプルした輝度値 \hat{x}_i^k によって
 次のように表せる： ([3] 参照)：

$$\hat{x}_i^k = \sum_j a_{ij}^k y_j^k \quad (1)$$

ただし

$$a_{ij}^k = \int p(\mathbf{u} - \mathbf{u}_i) r^k(\mathbf{f}^k(\mathbf{u}) - \mathbf{v}_j) d\mathbf{u} \quad (2)$$

であり、 $\mathbf{f}^k(\mathbf{u})$ は、プロジェクタの画像投影の幾何を
 表す、スクリーン上の点 \mathbf{u} からプロジェクタ画像上の
 点 \mathbf{v} へのマッピングである。 $p(\mathbf{u})$ 、 $r^k(\mathbf{v})$ はそれぞれ、
 プレフィルタとプロジェクタ画素 PSF の再構成フィル
 タである。 a_{ij}^k は、システムの幾何学的キャリブレー
 ションを行えば計算によって算出できる。

プロジェクタへの入力画像を $\mathbf{y}^k = [y_1^k, \dots, y_n^k]^\top$ 、生
 成される画像を $\hat{\mathbf{x}}^k = [\hat{x}_1^k, \dots, \hat{x}_m^k]^\top$ と表記し、 a_{ij}^k を
 ij 成分とする $m \times n$ 行列を \mathbf{A}^k と書くと

$$\hat{\mathbf{x}}^k = \mathbf{A}^k \mathbf{y}^k \quad (3)$$

となり、 K 台のプロジェクタを重ね合わせて得られる
 画像 $\hat{\mathbf{x}} = [\hat{x}_1, \dots, \hat{x}_m]^\top$ は

$$\hat{\mathbf{x}} = \sum_{k=1}^K \mathbf{A}^k \mathbf{y}^k \quad (4)$$

によって与えられる。

2.2 プロジェクタ入力画像の最適化計算

問題は、表示したい画像 $\mathbf{x} = [x_1, \dots, x_n]^\top$ が与えら
 れたとき、生成される画像 $\hat{\mathbf{x}}$ がこれと最も近くなるよ
 うにプロジェクタの入力 $\mathbf{y}^k (k = 1, \dots, K)$ を計算する
 ことである。そのため、

$$|\mathbf{x} - \hat{\mathbf{x}}|^2 \rightarrow \min. \quad (5)$$

を達成する各プロジェクタ ($k = 1, \dots, K$) の投影像 \mathbf{y}^k
 を計算する [3]。 \mathbf{y}^k の要素はプロジェクタの画素の輝
 度値であるので、その成分は上下限がある。 適当な正
 規化を施せばこれは

$$0 \leq y_j^k \leq 1 \quad (6)$$

と表現できる。つまり、解くべきは (6) 式の不等式制
 約付の (5) 式の最小化問題であり、問題は線形計画法
 に帰着される。 \mathbf{x} の画像全体でこの最適化計算を行え
 ばその計算量とストレージ域は膨大となるが、いくつ
 かの工夫は可能である ([3, 6])。

3 重畳投影による画像の再現精度

本節では [6] で導いた、重畳投影によって実現され
 る画像の画質—望みの画像に対する、重畳投影による
 実現画像の再現精度—に関する性質をまとめる。 5 節
 で、これらを現実のシステムで確かめる。

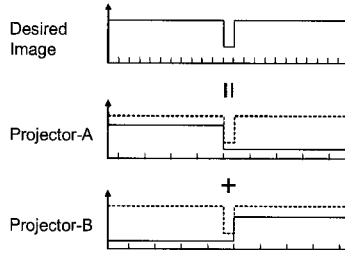


図 1: 重畳投影による微小凹構造の再現. 横軸の刻みは画素の境界を表す. ちょうどよいプロジェクタがあって画素境界が一致すれば, この構造は完璧に再現できる.

3.1 再現精度と目標画像の構造の関係

重畳投影では投影光を重ねて濃淡値を制御するが, その際濃淡の加算ができるだけで減算はできない. この結果, 実現画像の再現精度は, 投影すべき目標画像の濃淡構造によって変化することになる:

結果 1. 重畳投影による画像の再現精度は, 表示させようとする目標画像の濃淡構造に依存する. 具体的には, 濃淡の微小凹構造の再現は高い精度でできるが, 反対の微小凸構造の再現はそれより低い精度でしか行えない.

簡単のため1次元画像で考える. また, プレフィルタ p と再構成フィルタ r はともに, 画素幅と同じボックス型関数を仮定する. 今, 図1のように, 明るさが一画素だけ落ち込んでいるような画像を表示させたいとする. この微小凹構造を再現するには, もし十分な数のプロジェクタがあってそれらがまんべんなく分布している場合には, 図のようにその画素境界が, 望む画像の画素境界と一致するような適当な2台のプロジェクタを選ぶことができ(プロジェクタ台数が少ない場合でも偶然そのようなプロジェクタがあれば), それらに図のような入力画像を与えれば, 望みの画像を完璧に再現できる.

現実にはプロジェクタの台数は限られているので, 望みの画像と「正確に」画素境界が一致するようなプロジェクタが存在する可能性は小さいが, 画素境界が近ければそれだけ(5)式の評価関数が小さくなるのであって, 連続性を考えると, 図1の例が意味するところには普遍性がある. つまり, このような特定画素が落ち込んでいるような画像に対しては, 重ね合わせ投影による解像力の向上のポテンシャルは極めて大きい(画質の上限は, 望み画像との完全な一致).

一方, 図2のような微小凸構造を実現することを考える. さきほどの例とは異なり, この場合には仮にプロジェクタが無数あっても, 望みの画像と完全に一致した画像を得ることは不可能である. つまり, 図1

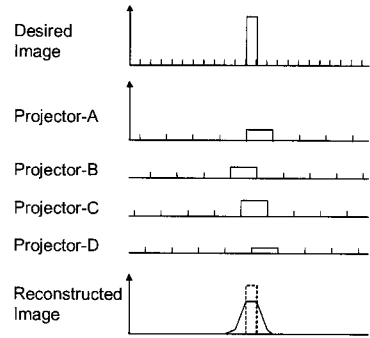


図 2: 重畳投影による微小凸構造の再現. プロジェクタの数が十分あっても, この構造を完全に再現するのは不可能である.

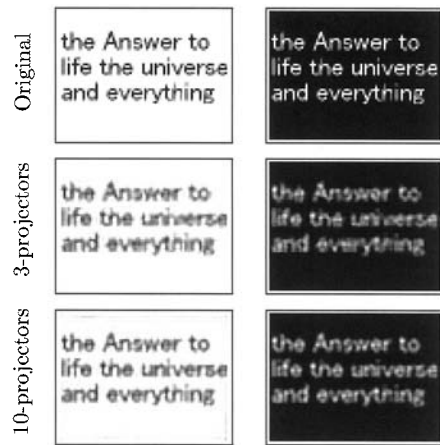


図 3: 重畳投影による文書画像 (80 × 60 画素) の再現シミュレーション. 上から目標画像, プロジェクタ台数 3, 10 台による実現画像.

の画像と比較するとその画像は明暗を反転させただけにもかかわらず, 画像の再現精度には一定の限界があるということである. 仮に無数のプロジェクタがあったとしても, このことは変わらない.

以上を裏付ける重畳投影のシミュレーション実験を図3に示す. 図の一番上に示す2種類の目標画像 (80 × 60 画素) に対し, 不等式制約 (6) 付の (5) 式の最適化計算によって入力画像 (約 40 × 30 画素) を計算してある (解像度の倍率は2倍強). 図から, 白い背景に黒の文字の画像 (以下黒字画像) と, 黒い背景に白の文字の画像 (白字画像) とでは, 概して右側の白字画像の方が再現精度が低いことが分かる. これは (5) 式のコストの最小化後残差をプロットした図4においてより明確となる.

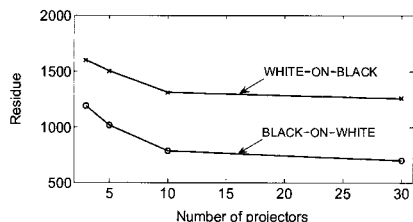


図 4: 最適化後残差 (=再現精度) とプロジェクタ台数の関係。

3.2 再現精度と画像の明るさの関係

同一性能のプロジェクタ N 台の画像を重ね合わせたならば、単体のプロジェクタに比べて理論上 N 倍の明るさの画像が投影できると期待される。画像の明るさは、プロジェクタを使った画像投影システムでは重要なファクタであり、通常、明るければ明るいだけ良いとされるだろう。しかしながら、目標画像の明るさは、重畳投影による画像の再現精度に影響を与える。次のようなことが言える。

結果 2. 重畳投影による実現画像の再現精度は、目標画像が明るいほど低下する傾向がある。さらに、その傾向の強弱は、目標画像の濃淡構造に依存し、微小凸構造よりも微小凹構造の方が、より低下幅が大きい。

目標画像が明るくなると再現精度が低下するのは、プロジェクタの画素の中で明るさの上限に到達するものが出てくることによる。つまり (5) 式的最適化問題において、各プロジェクタの画素の明るさを拘束する不等式制約 (6) が実際に機能し、制約がなければもっと明るい値を出力したいのにそれができないという場合が生じる。言い換えれば、目標画像が明るくなると、プロジェクタ入力画像の自由度が比例的に損なわれるということである。この自由度の低下は、そのまま再現精度の低下につながる。

さらにこのとき、再現精度は、微小凸構造 (図 2) よりも微小凹構造 (図 1) の再現においてより一層低下する。なぜなら凹状の微小構造の場合、最適なプロジェクタの入力画像は、画素ごとに最適なプロジェクタを選別することで決定される傾向があるからである。前節で述べたように、凹構造は目標画像のそれと画素境界が一致あるいは最も近いプロジェクタを選ぶことで、最良に実現される。一方、凸構造の場合、プロジェクタはそれほど選別して使用されることはなく、ある程度均等に使用される傾向がある。このことから、目標画像を明るくすることによるプロジェクタ入力画像の相対的な自由度の低下は、凹構造においてより深刻なものとなるのである。

以上を裏付ける重畳投影のシミュレーション実験を図 5 に示す。設定は図 3 と同じものを用いてある。図

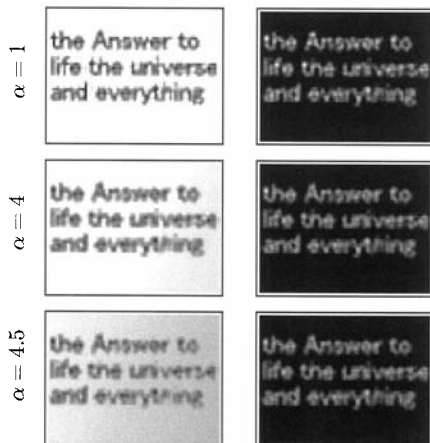


図 5: 目標画像の明るさを α 倍したときの実現画像。プロジェクタ台数 5 台。

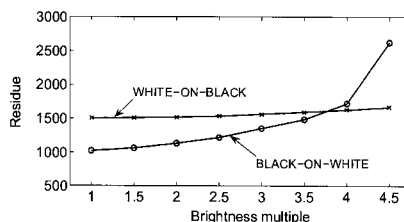


図 6: 最適化後残差 (=再現精度) と目標画像の明るさ (倍数 α) の関係。

より、目標画像を明るくするにつれて両画像ともに画質が単調に落ちているのが見て取れる。また、図左側の黒字画像の方が、右側の白字画像よりも画質の落ち方が大きい。黒字画像では、 $\alpha = 1$ でシャープだった画像が α につれてボケが大きくなるように見える一方、白字画像ではもともとある程度ボケていた画像が、さらに若干ボケた程度であるように見える。この傾向は、図 6 に示す最適化後の残差のプロットにて、より明らかである。黒字画像では、目標画像の明るさの倍数 α に比例して急速に残差が増加し、一方で、白字画像では、 α が増加しても残差はわずかずつしか増加しない。

4 位相シフト法による幾何学キャリブレーション

望みの画像を重畳投影によって実現するには、システムの幾何学キャリブレーションと光学キャリブレーションが必要である。本節では、幾何学キャリブレーションを位相シフト法に基づいて行う方法を述べる。

また, Venkata らの研究 [3] で用いられている空間コード化法に基づく方法との間で, 精度の比較を行う。

プロジェクトの並列投影システム同様, キャリブレーションはカメラを使って行う。幾何学キャリブレーションの目的は, スクリーン上で目標画像が実現されるべく, 各プロジェクトの投影画像の位置あわせ (registration) と, 同時に正規化 (rectification) — 正確なアスペクト比の長方形の画像を実現すること — を行うことにある。キャリブレーションの本質的な難しさは前者の位置あわせにあるとあって良く, そのためここでは, カメラをスクリーンと正対する位置・姿勢に設置することで, 正規化は省略し位置あわせのみを対象とする。

4.1 位相シフト法による対応点の計算

プロジェクトからは N 枚の正弦波パターンを投影するとし, $n(=1, \dots, N)$ 枚目のパタンの画像座標 (u, v) の明るさ $B(u, v, n)$ を

$$B(u, v, n) = B_1 + B_2 \cos\left(\phi(u, v) + \frac{2\pi}{N}n\right) \quad (7)$$

のように決める。ただし B_1, B_2 は定数で, $\phi(u, v)$ は 1 枚のパタン画像上の正弦波の位相 (初期位相) であり, u, v 方向への周波数をそれぞれ λ, μ とし, $\phi(u, v) = \lambda u + \mu v$ とする。

今, この正弦波パターンを 1 台のプロジェクトからスクリーンに投影し, その投影像をカメラで撮影したとする。必要な光学キャリブレーションが既に済んでいて, プロジェクトの入力画像とカメラの画像間の明るさの関係が恒等関数で表されるとすれば, n 枚目のパタンのカメラの画像上の 1 点 (x, y) における明るさは

$$I(x, y, n) = I_1(x, y) + I_2(x, y) \cos\left(\varphi(x, y) + \frac{2\pi}{N}n\right), \quad (8)$$

という形で表され, その初期位相 $\varphi(x, y)$ は, 投影パタンの対応する (u, v) での初期位相 $\phi(u, v)$ に一致するはずである。この φ を, (x, y) での $n=1, \dots, N$ での明るさ変化 $I(x, y, n)$ を用いて最小 2 乗推定すると

$$\hat{\varphi} = \tan^{-1} \left\{ \frac{-\sum_{n=0}^{N-1} I(x, y, n) \sin(2\pi n/N)}{-\sum_{n=0}^{N-1} I(x, y, n) \cos(2\pi n/N)} \right\} \quad (9)$$

となる。 u 方向への正弦波 $\phi(u, v) = \lambda u$ と v 方向への正弦波 $\phi(u, v) = \mu v$ の 2 種類を用いて投影と撮影を繰り返し, それぞれについて上の計算にて初期位相 $\hat{\varphi}$ を求めれば, 初期位相を媒介として (x, y) に対応する (u, v) を決定できる。なお, 位相接続はスクリーンの平坦性を前提とした連続性によって行う。

以上の方法で, カメラ画像の画素 i の座標 (x_i, y_i) に対し, これと対応するプロジェクト画像の点の座標値 (u, v) が (離散値ではなく) 連続領域にて計算される。これにより, カメラ画像とプロジェクト画像の対応がサブピクセルの精度で推定できるというわけである。カメラ画像の画素でない連続座標値 (x, y) の点に対する, プロジェクト画像上の点の座標は, 局所的に求めた 2 次元射影変換を使って内挿する。この 2 次元射影変換は, 求めたい画像の点 (x, y) に最近傍の正方形を構成する 4 つの画素の座標と, それらのプロジェクト画像の対応点によって決まる 2 次元射影変換 $[u, v, 1]^T \propto \mathbf{H}[x, y, 1]^T$ (\mathbf{H} は 3×3 行列) を用いる。

4.2 空間コード化+直線フィッティング (従来法)

文献 [3] では, 空間コード化法に基づく方法でキャリブレーションを行っている。空間コード化法とは, プロジェクトからバイナリパターンを対象に投影し, これをカメラで撮影してプロジェクトとカメラの画像間の対応点を算出する方法である。この方法で得られる情報は, 最良の場合で, プロジェクトの各画素について, それに対応するカメラ画像上の位置を (カメラ画像の) 画素単位で表現したものである。つまり位相シフト法とは異なり, プロジェクト画像とカメラ画像の対応関係はその双方で画素単位でしかない。

さらにサブピクセルの精度での推定を行うため, カメラ画像上でバイナリパタンの直交するエッジにそれぞれ直線をフィットし, それらの交点を計算し, 連続領域でカメラ座標を求めることとした。文献 [3] の方法はその詳細は不明だが, これと基本的に同じであると思われる。

4.3 キャリブレーション精度の比較

4.3.1 評価の方法

この問題では「グラントトゥールース」を得るのが難しい。そこで, 上述の 2 方法で求めたプロジェクト画像・カメラ画像間の写像の精度を評価するために, これを用いてカメラ画像上にある画像が得られるようなプロジェクトの入力画像を逆算し, それを実際に投影・撮影して得られた画像が, 最初の画像をどの程度正確に再現しているかを調べることにした。

このとき, 比較の精度を上げるために再び位相シフト法を用いる。すなわち, カメラ画像上で再現すべき画像を正弦波パターンとし, その位相を変化させたものを複数用意して投影・撮影を繰り返し, 得られた画像からカメラ画像の各画素での初期位相を計算する。再現すべき元の正弦波パタンの初期位相をカメラ画像の座

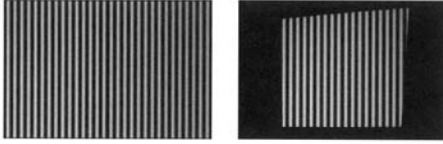


図 7: 位相画像を再現したカメラ画像の例. カメラ画像とプロジェクタ画像の画素サイズ比が約 1:1.2 (左) と 1:0.5 (右) の場合.

標と比例するよう選べば, 計算された各画素での初期位相 (を適切に位相接続したもの) は, 誤差がなければその画素の座標値に一致する. 実際には誤差があってこれは一致しないが, この誤差を (d_x, d_y) としたとき, 真の座標と推定された座標間のユークリッド距離 $d = \sqrt{d_x^2 + d_y^2}$ によって, プロジェクタ画像・カメラ画像間の写像の精度を評価する.

4.3.2 実験結果

上述の位相シフト法と空間コード化+直線フィットによる方法とを比較するため, 実験を行った. プロジェクタはデル 2300MP (1024×768 画素, DLP 方式) を, カメラにはソニーハンディカム HDR-HC3 (720×480 画素でキャプチャ) を用いた. カメラの画像は, 濃淡方向のランダムなノイズを除去するため, 20 フレームを取得後加算したものを用いた. 投影先となるスクリーンには, われわれの研究室の壁面を用いた (壁面の平坦度は高いが, 仮に平坦性に問題があってもキャリブレーション精度にはさほど影響しないはずである).

実験は, カメラのズームの設定を変えて 2 通り行った. プロジェクタの投影像の一部をカメラ画像で切り取るように拡大して撮影した場合と, 全体がカメラ画像上に捉えられるようにした場合である. 前者では, カメラ画像上のプロジェクタ投影像の画素のサイズが, カメラの画素サイズの約 1.2 倍, 後者では約 0.5 倍となっている. それぞれの場合での, キャリブレーション後, 正弦波パタンの再現像 (プロジェクタから投影した画像をカメラで撮影して得たもの) を図 7 に示す.

位相シフト法と空間コード化+直線フィットそれぞれのキャリブレーション結果に対し, カメラ画像上で再現した正弦波パターンを使って決定した上述の d を, 各画素に対して表示したのが図 8 と図 9 である. 画像はその濃淡値が $d = 0$ で 0, $d = 0.5$ で 255 となるように決定して表示したものである. 図 8 が画素サイズ比 1:1.2, 図 9 が画素サイズ比 1:0.5 のときの結果である. 一見すれば分かるように, 位相シフト法の方が画像の全域で誤差が小さくなっていることが分かる.

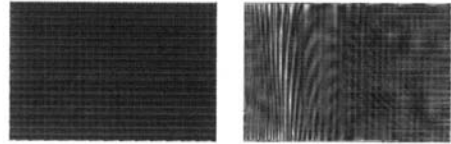


図 8: 位相シフト法 (左) と空間コード+直線フィットによるキャリブレーション (右) の, カメラ画像上の誤差分布. カメラ画像とプロジェクタ画像の画素サイズ比が約 1:1.2 の場合. 誤差の絶対値が 0 画素で 0, 0.5 画素で 255 の明るさを取るように表示.

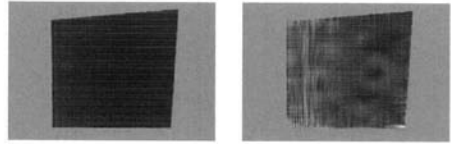


図 9: 位相シフト法 (左) と空間コード化+直線フィットによるキャリブレーション (右) の, カメラ画像上の誤差分布. カメラ画像とプロジェクタ画像の画素サイズ比が約 1:0.5 の場合.

同じ結果について, 画像上の有効領域に渡る誤差の平均を求めたところ表 1 のようになった. ここからも位相シフト法の方が精度が高い (1 画素のサイズの 1/100 以下) ことが確かめられる. さらに, 画素のサイズ比が小さいほど両手法の精度の差が大きくなっていることが分かる (逆に言えばサイズ比が大きくなれば精度の差は縮小する). この傾向は納得できるものである. プロジェクタ投影像に対してカメラのレンズをズームアップし, プロジェクタ投影像の画素がカメラ画像上で大きく写りこむようにすれば, どのような方法によってもキャリブレーションの精度は向上させられるだろう. 実用的には, 少なくともプロジェクタ投影像を 1 枚の画像内に納めるような条件下でキャリブレーションを行えることが望ましい. そのような観点から, 本手法は十分な性能を持っていると言える.

表 1: 位相シフト法と空間コード化+直線フィットによるキャリブレーションの平均誤差 (単位はカメラ画像の画素).

方法	1:1.2	1:0.5
位相シフト法	7.3×10^{-3}	4.6×10^{-3}
空間コード化法	2.4×10^{-2}	2.9×10^{-2}

われわれの手法の比較対象としてここでは, 空間コード化法を基礎としたキャリブレーション法のみを取り上げたが, 以上の比較結果は, 2 値の濃淡値を持つキャリブレーションパターン (例えば線の組み合わせやチェッ

カーボードボタン)を使用する全てのキャリブレーション方法に当てはまると考えている。つまり、位相シフトの方がそれらより常に精度が良い。この位相シフト法の精度の高さは、画像の空間方向の解像力のみならず濃淡方向の解像力も同時にキャリブレーションに利用することに起因している。平面スクリーン(あるいは高々緩やかなカーブを持つ曲面スクリーン)への画像投影を目指す今の問題では、投影対象の反射特性を中心とした性質は一般にかなり良いこと、さらに、プロジェクタから能動的にボタンを投影して(時間の許す限り)何枚でも画像を取得できる性質などから、上述のように位相シフトを用いてキャリブレーションを行えば、重畳投影による投影画像の超解像化が十分現実的なほど高い精度が実現できると言える。

5 重畳投影の実験

5.1 実験装置

実験装置の写真を図 10 に示す。プロジェクタには東芝製の TDP-FF1A を 8 台使用した。このプロジェクタは DLP 方式で LED を光源とし、画像サイズは 800×600 画素 (SVGA) である。図のように 4 台ずつ 2 本のタワー状のラックに収め、横に並べてスクリーンから約 1m の距離に設置した。キャリブレーションを行うためのカメラには、ソニー製のハンディカム HDR-HC7 を用い、これは 2 つのラックの中央に配置した。さらに、投影画像の画質を検証するためのカメラとして、ニコンのデジタルカメラ D80 にシグマの 150mm マクロレンズ (APO MACRO AF 150mm F2.8) を装着して使用した。

5.2 実験結果

以上の装置を使って実験を行った。4 節で述べた幾何学キャリブレーションとさらに光学キャリブレーションを行い必要な情報を取得後、重畳投影を行った。以下の各実験では、それぞれの目標画像に対し、(5)式+(6)式の最適化問題を解いて各プロジェクタへの入力画像を求めた。目標画像は 80×60 画素である。対応するプロジェクタの投影領域は、プロジェクタごとにその配置によりばらつきはあるものの約 60×45 画素であり、解像度の倍率は画素のサイズ(幅)比で約 1.3~1.4 倍となっている。

図 11 は、3 種類の目標画像に対し、1 台、3 台、8 台のプロジェクタを用いて重畳投影を行った結果である(なお、図に示した画像は、検証用のカメラでスクリーン上の投影画像を撮影し、これを適当にトリミングしてある)。この図から、1 台のプロジェクタで投

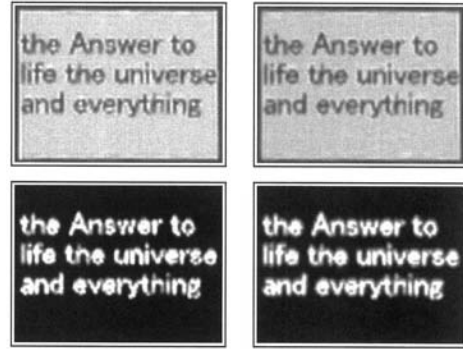


図 12: 目標画像の明るさを 1 倍(左)、5 倍(右)としたときの、8 台のプロジェクタによる重畳投影の実現画像。

影した場合に比べて、3 台、8 台の場合に確実に解像度が向上していることが分かる。そして 3 台よりも 8 台の場合の方が、総じて画質は良いと判断できる。ただし、その差はそれほど大きなものではない。

また、白背景・黒字の画像(以下黒字画像)と黒背景・白字の画像(以下白字画像)を比べると、黒字画像の方が目標画像に対する再現精度は高いと言える。このことは、両者の文字の線の太さを比較すれば分かる。つまり、黒字画像の文字の線幅は細く、目標画像のそれと近いが、白字画像のそれは太く、目標画像に対してかなり乖離している。

図 12 に、目標画像の全体的な明るさを変化させたときの実現画像を示す。実験では 8 台のプロジェクタを用いた。図 11 と同じ黒字画像と白字画像について、その明るさを 1 倍、5 倍と変化させたときの実現画像である。黒字画像と白字画像それぞれについて、明るさが異なる場合を比較すると、(それほど大きな差ではないが)5 倍の場合でシャープネスが失われていることが分かる。特にこれは黒字画像においてより顕著で、“e”や“g”の線で囲まれた白の内部領域の見えを比べれば、5 倍の場合の同領域は 1 倍のそれよりも明らかに小さいことが分かる。白字画像でも似た傾向は感じられるが、黒字画像の場合ほどははっきりした差異はない。

以上の結果は、いずれも 3 節で述べた重畳投影の画質の性質を裏付け、現実のシステムにおいてもそれらが正しいことが確かめられた。

6 まとめ

複数の異なるプロジェクタの投影像を重ねて、一台のプロジェクタを越える解像度の画像を実現する手法について述べた。われわれは以前、理論的な考察を通



図 10: 実験装置. 左: 8 台のプロジェクタとスクリーンの位置関係, 右: 奥がキャリブレーション用の (ビデオ) カメラ, 手前が実現画像の画質検証用のカメラ.

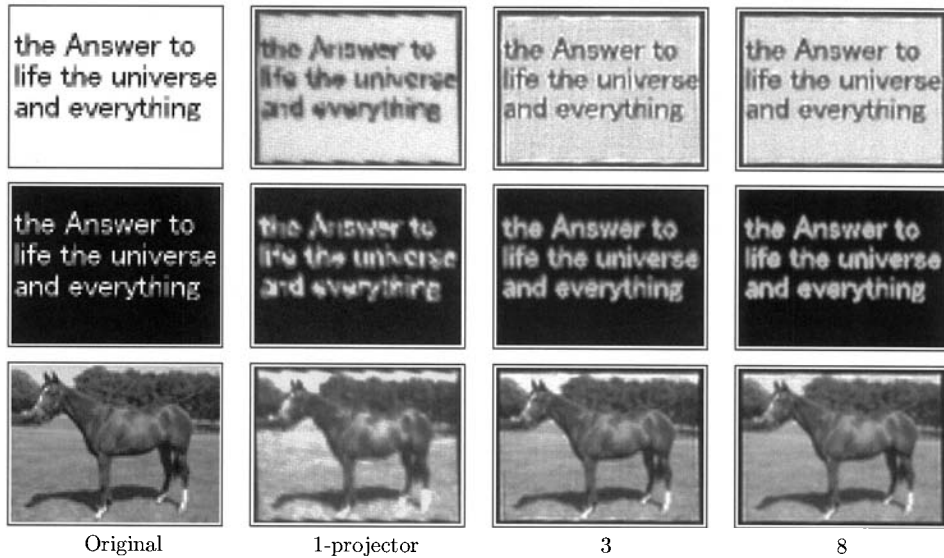


図 11: 目標画像とプロジェクタ 1 台, 3 台および 8 台による重畳投影による実現画像.

じて, 重畳投影が実現する画像の画質に関するいくつかの性質を示したが, 本稿では, 現実のシステムにおいてもそれらが成立することを実験によって示した. さらに, 投影像の位置合わせをサブピクセルの精度で行うための, 位相シフト法に基づくキャリブレーション法を示した. そしてその方法が, 従来手法よりもかなり精度が良いことを実験によって示した.

参考文献

- [1] M. Brown, A. Majumder, and R. Yang. Camera-based calibration techniques for seamless multiprojector displays. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 11(2):193-206, 2005.
- [2] N. Damera-Venkata and N. L. Chang. On the resolution limits of superimposed projection. In *Proc. IEEE International Conference on Image Processing (ICIP)*, 2007.
- [3] N. Damera-Venkata and N. L. Chang. Realizing super-resolution with superimposed projection. In *Proc. IEEE International Workshop on Projector-Camera Systems (Procams)*, 2007.
- [4] C. Jaynes and D. Ramakrishnan. Super-resolution composition in multi-projector displays. In *Proc. IEEE International Workshop on Projector-Camera Systems (Procams)*, 2003.
- [5] A. Majumder. Is spatial super-resolution feasible using overlapping projectors? In *Proc. IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP)*, pages 209-212, 2005.
- [6] T. Okatani, M. Wada, and K. Deguchi. Image quality of superimposed projection using multiple projectors. *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2008. In submission.