

複数のプロジェクタ・カメラを用いた形状計測システムにおける 未復元投影パターンの再推定

師岡 大志[†] 古川 亮[†] 川崎 洋^{††} 佐川 立昌^{†††} 日浦 慎作[†]
浅田 尚紀[†]

[†] 広島市立大学大学院 情報科学研究科 〒 731-3194 広島県広島市安佐南区大塚東 3-4-1

^{††} 鹿児島大学大学院 理工学研究所 〒 890-0065 鹿児島市郡元 1-21-40

^{†††} 産業技術総合研究所 知能システム研究部門 〒 305-8568 茨城県つくば市梅園 1-1-1

E-mail: [†]morooka@cv.info.hiroshima-cu.ac.jp, ^{††}{ryo-f,hiura,asada}@hiroshima-cu.ac.jp,

^{†††}kawasaki@ibe.kagashima-u.ac.jp, ^{††††}ryusuke.sagawa@aist.go.jp

あらまし 複数カメラによる動的シーンの計測では、計算効率などの点から visual hull に基づく手法が多く用いられてきた。しかし、元々の visual hull の手法では、凹形状の部分が上手く復元できないなど、結果の精度面での問題点がある。我々の研究グループでは、先行研究において、カメラとプロジェクタを複数台並べて能動ステレオ法を適用することで、全周囲の形状を計測する手法を提案した。このとき、複数のプロジェクタの照射範囲におけるパターンの干渉が問題となるが、パターンとして単純な平行線を利用することで、検出画像からの曲線の検出を容易にし、また、曲線どうしの交点を復元に利用した。先行研究における課題の一つに、復元の欠損を減らすことが挙げられる。欠損が生じることの理由として、検出された曲線どうしの交点を手がかりとして利用しているために、交点が少ない孤立した曲線が復元されないことが挙げられる。本論文では、先行研究での復元における未復元の曲線を、後処理として復元するアルゴリズムを提案する。前提条件として、既に多くの曲線が復元されていると期待できるので、これらの復元結果を、未復元の曲線とパターンの対応を決めるための手がかりとして利用する。

キーワード プロジェクタ・カメラシステム、能動ステレオ法、ワンショットスキャン、後処理

1. はじめに

3次元物体の形状計測には、様々な手法が開発されてきている。中でも、複数カメラによって、動的なシーンを全周囲から形状計測することは、モーションキャプチャを含む人体などの動きのモデリング、服などの動きのCGデータの作成など、多くの需要がある。

複数カメラによる動的シーンの計測では、計算効率などの点から、visual hull に基づく手法が多く用いられてきた。しかし、元々の visual hull の手法では、凹形状の部分が上手く復元できないなど、結果の精度面での問題点がある。こうした問題は、photo-consistency に基づいた space carving 手法などによって改善できる場合があるが、今度は、テクスチャ情報が重要になり、十分なテクスチャが物体の表面に無いと、復元の精度が悪化する。

このような問題を解決するために、プロジェクタとカメラによる能動ステレオ法を利用することが考えられる。能動ステレオ法は、プロジェクタから投影されたパターンと、カメラの観測結果との対応から、ステレオアルゴリズムによって3次元復元を行う手法である。特に、プロジェクタから静的なパターンを投影することで形状計測を行う、ワンショット能動ステレオ法は、カメラとプロジェクタの同期が必要ないので、ハイスピードカメラ

などの利用も可能であり、動的シーンの計測に向いていると考えられる。

我々の研究グループでは、先行研究において、カメラとプロジェクタを複数台並べ、能動ステレオ法を適用することで、全周囲の形状を計測する手法を提案した [3]。このような方法では、複数台のプロジェクタからの照射範囲を重ねる必要があり、その際にパターンどうしに干渉が起きることが問題となる。同研究では、パターンとして単純な平行線を利用することで、照射範囲が重なる部分における曲線の検出を容易にし、また、曲線どうしの交点を復元に利用した。これにより、全周囲形状の復元を安定的に行うことができることを実験的に示した。

先行研究における課題の一つに、復元の欠損を減らすことが挙げられる。復元の欠損が生じることの理由として、提案手法が曲線どうしの交点を手がかりとして利用しているために、交点が少ない孤立した曲線が復元されないことが挙げられる。本論文では、このようなパターンについて、先行研究で多くの曲線が復元された後の「後処理」として、復元する方法を提案する。このため、前提条件として、既に多くの観測曲線が復元されており、これらの復元曲線を、未復元の曲線とパターンの対応を決めるための手がかりとして利用する。

2. 関連研究

全周形状計測は、CG や CAD のための形状モデルの作成のために、古くから研究されてきた。多くの形状計測装置は一視点からしか計測ができないため、静的シーンの全周形状計測は、複数の視点から計測し、得られた複数の形状データを位置合わせし、統合することで得ることが一般的である。ただし、このような手法では、CG や CAD のための静止モデルの作成には利用できても、動的シーンの計測が必要となるモーションキャプチャなどへは応用できない。

多視点ステレオ法は、従来から静止シーンの全周形状計測に利用されてきた [4], [5], [11]。この手法は、テクスチャが少ない場合や、画像の数が少ない場合に計測される点の密度や精度が低下するなどの課題が残っているが、近年の研究でそれらの問題は少しずつ解決されてきている。これらの手法は、カメラを並べて同時撮影することで、動的なシーンの計測にも適用可能であるが、多くのカメラ数が必要であること、計算量が大きいこと、アルゴリズムが複雑であることなどの問題がある。このことから、モーションキャプチャなどへの応用としては、シルエットに基づいた手法 [2], [8] が多く用いられている。

光源を利用する能動的な 3 次元計測は、簡単で精度や信頼性が高い復元手法として利用されてきた。カメラを利用したシステムの代表例としては、プロジェクタ・カメラ系でパターンを投影するシステム [1], [14] 等がある。パターンの投影による手法は、大きく 2 種類に分類できる。時間的なコードをパターンにする方法と、空間的なコードをパターンにする方法である。時間的なコードによるパターンは高密度で精度が高いが、複数のパターンを順次投影する必要があり、動的シーンの計測に適用するには、高速にパターンを切替えながら同期撮影を行う必要があり、実現が難しい [9]。

空間的なコードによるパターンを用いた能動ステレオ法では、静的な一つのパターンの照射を照射し、撮影された画像から復元を行う [6], [13]。このため、ハイスピードカメラなどの利用に制限がなく、動的シーンの計測を行うためには都合がよい。しかし、一般にこのようなパターンは、位置情報を一枚の画像から得るために、複雑な模様や、多くの色を利用することが多く、テクスチャや、表面の傾きによる歪みなどに影響されやすい。また、複数のパターンが重なり合った時にこれら分離することが困難になる。

近年、静的なパターンによる手法の一つとして、グリッド状パターンによる形状計測手法が提案されている [7], [10], [12]。これらの手法では、単純なグリッドパターンを利用するが、複数のグリッドパターンを同一領域に照射した場合、それらパターンの分離は容易ではない。

先行研究 [3] では、2 プロジェクタ + 1 カメラの最小シ

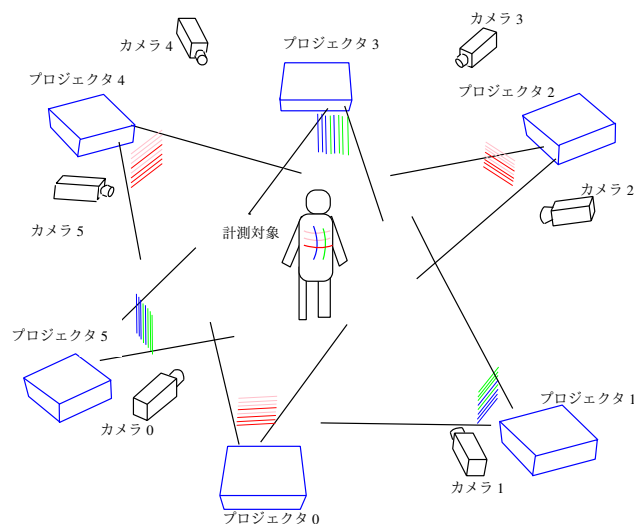


図 1 全周囲復元システム：6 台のプロジェクタと 6 台のカメラを対象を囲むように交互に配置する。

ステムで、形状推定を行う方法が提案された。この方法では、線形方程式を利用して、2 プロジェクタ + 1 カメラで検出された曲線の 3 次元再構成が行われる。上記文献では、2 個のプロジェクタが一般の位置にある場合、この線形方程式は一意解を持ち、解くことができるが、特に観測された曲線群の交点が、カメラから見て小さな視野角度の内部にある場合など、方程式系がほぼ退化した状態になる場合があることが指摘されている。その対策として、別のカメラからの情報を利用して、退化によって生じる曖昧さを解消することが提案されている。

3. 平行線パターンを利用した全周囲形状復元手法

3.1 機器構成

本論文では、先行研究 [3] の後処理として、復元されなかった曲線の対応の推定が行われる。まず、上記文献における 3 次元計測システムについて説明する。このシステムでは、複数のプロジェクタから投影されたパターンをカメラで観測する。プロジェクタからは固定されたパターンを投影し、カメラ・プロジェクタ間で同期の必要が無い。実際の計測では、6 台のカメラ、6 台のプロジェクタによる 3 次元形状計測システムを構築している。このシステムでは、カメラとプロジェクタが約 30 度ずつ交互に計測対象を 360 度囲むように配置している。この様子を図 1 に示す。

3.2 概要

先行研究 [3] の復元手法の概要を説明する。この手法では、図 1 中のプロジェクタ 0, 1 とカメラ 0, 1 の最小構成 (図 2) での 3 次元形状計測アルゴリズムを述べる。これらのプロジェクタとカメラはキャリブレーション済みであり、カメラとプロジェクタの位置姿勢は既知である。それぞれのプロジェクタから、平行線パターンが投影

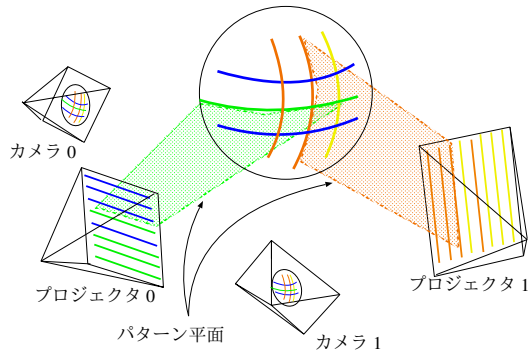


図2 復元システム最小構成：それぞれのプロジェクタから平行線パターンを投影し，その様子をカメラで観測する。

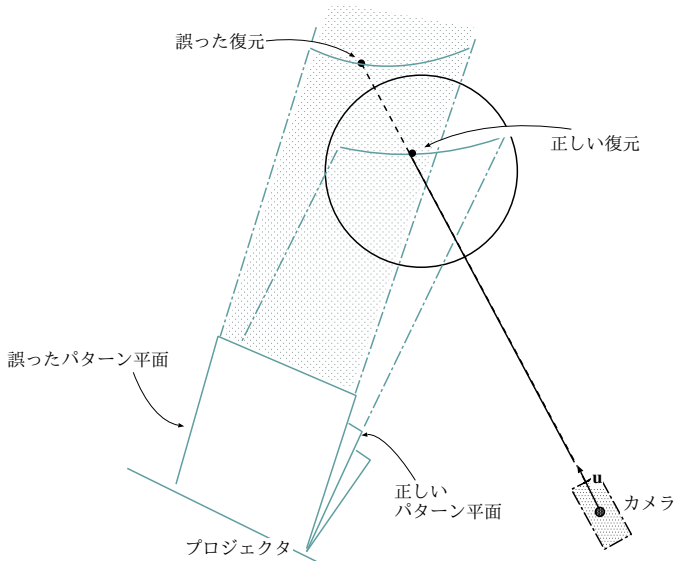


図3 観測曲線とパターン平面の対応と観測曲線の復元

される。隣り合ったプロジェクタから投影されるパターンは，交差して交点を作る(図2)。以後，これらの平行線パターンを便宜的に，プロジェクタ0からのパターンを横パターン，プロジェクタ1からのパターンを縦パターンと呼ぶこととする。プロジェクタから投影される平行線パターン中の一つの直線パターンは，3次元空間中の平面を掃引する。このように，直線パターンが掃引する平面をパターン平面と呼ぶ。

観測画像中に観測された曲線(観測曲線)を復元するには，この曲線を照射するパターンが，どのパターンであるかという情報が必要である。この情報を，観測曲線とパターン(あるいはパターン平面)の対応と呼ぶ。観測曲線とパターン平面の対応が既知の時，光切断法により観測曲線の3次元位置が求められる(図3)。

先行研究[3]では，観測曲線とパターン平面の対応付けのため，観測曲線の縦パターンと横パターンの交点を利用した線形方程式を作成している。これらの方程式は理論的には正則であるが，特に交点の分布範囲の視野が狭い場合に縮退に近い状態にあり，一意に解を決定しても誤差が大きくなる場合がある。この時，方程式の状態

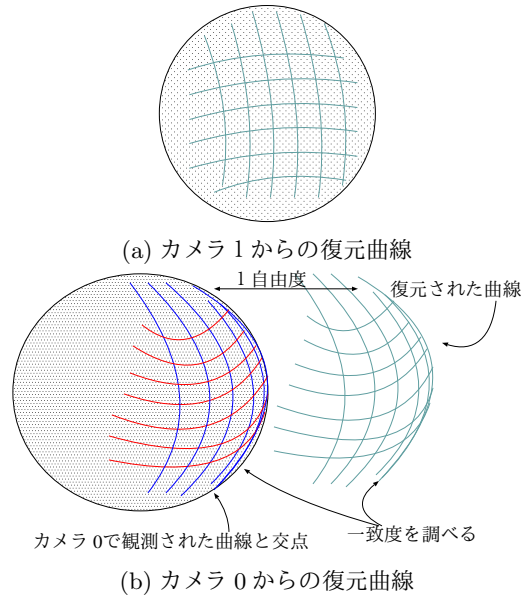


図4 カメラに投影された復元曲線：(a)はカメラ1で観測した曲線をカメラ1に復元曲線を投影した図である。(b)はカメラ1の観測曲線を復元した曲線を別視点にあるカメラ0に投影した図である。

は，1自由度の不定性のある不定方程式に近い。このため，1自由度の曖昧性を持つ解空間を求める。

これらの解をカメラ1に投影しても，投影結果は観測曲線と常に一致する(図4(a))。よって，上記の解の曖昧性は，カメラ1での観測結果のみからでは決定しにくい。しかし，カメラ1とは異なるカメラ0に解空間から得られる異なった解を投影すると，異なった投影結果が得られる(図4(b))。このため，投影結果と観測曲線のマッチングを行うことで，より適する解を求めることができる。

4. 初期復元を利用した復元の改良

4.1 前提条件と概要

本論文では，先行研究[3]のアルゴリズムで，既に多くの曲線とパターンの対応が得られていることを前提とする。ここでは，この計測結果を初期復元と呼ぶこととする。

初期復元では，カメラによって観測されているにも係わらず復元されていない曲線が存在する。原因としては，(1)観測された曲線に十分な交点が無い，(2)対象の曲線，或いは，対象の曲線と交点で連結された曲線群が，他のカメラで観測されていないため，解の曖昧性を解消できない，(3)観測された曲線が誤ったプロジェクタに対応づけられており，信頼できる解が発見できないなどが挙げられる。これらの曲線を後処理で復元できれば，計測結果を向上させることができる。本論文では，復元されなかった観測曲線を初期復元の情報を利用することで復元し，復元を改良する手法を提案する。

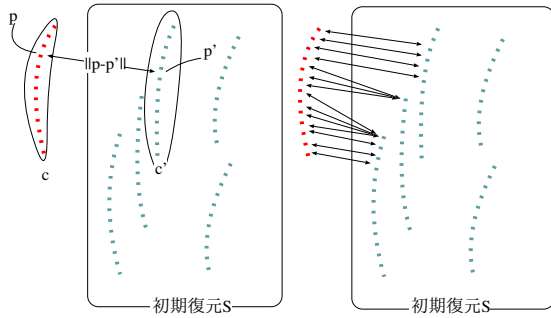


図5 最小距離の探索：赤色の破線はパターン平面推定対象曲線 c ，水色の破線は復元済みの曲線 c' ，水色の破線の集合が初期復元 S ， $\|p-p'\|$ は曲線 c 中の点 p と初期復元 S 中の点 p' との最小距離

4.2 距離による改良

観測曲線とパターンとの対応が確定していないとする。パターンはプロジェクタで投影された一組の平行線であり、有限である。そこで、全てのパターンの対応を仮定して復元を行う。復元された複数の曲線のうち、この対応が誤っている曲線については、復元された曲線の位置は誤ったものとなる(図3)。通常、正しい位置に復元された3次元曲線は、他の曲線との連続性等の条件を満たすが、誤った対応で復元された曲線は、そのような条件を満たさないと考えられる。これを利用して、正しい対応を推定する。

未復元の観測曲線とプロジェクタのパターン平面の対応関係を決定するために、コスト関数として、式(1)を設定する。

$$f(c, S) = \frac{1}{|c|} \sum_{p \in c} \min_{\substack{c' \in V(S, C(c)) \\ p' \in c'}} \|p - p'\| \quad (1)$$

c はあるパターンで復元された曲線、 S は初期復元。 p は曲線 c 中の点、 $|c|$ は曲線 c に含まれる点 p の数、 c' は初期復元 S 中の曲線、 p' は c' 中の点、 $\|p - p'\|$ は点 p と点 p' のユークリッド距離を表す。

上記コスト関数は、曲線 c と、集合 S の曲線要素から曲線 c を観測したカメラから視認可能なものを抽出した集合 $V(S, C(c))$ 中の曲線 p' の距離で定義される(図5)。ただし、 c と p' の距離は c 中の各点から p' への最小距離の平均値とする。あるカメラから視認可能な曲線を選択する処理 V は、本論文ではヒューリスティクスで処理されている。具体的には、 c を観測したカメラ $C(c)$ と、別の曲線 c' を観測したカメラ $C(c')$ との角度が90度以上なら、 c' は $V(S, C(c))$ に含まれないと判断している。曲線の視認性を導入することは、結果の精度改善は重要である。

パターン平面と曲線の対応関係が分からない曲線に対して、各パターンに対応させ、光切断法で曲線の復元を行い、得られた各曲線 c について式(1)のコスト関数を計算する。各曲線 c について、最小のコスト関数となる

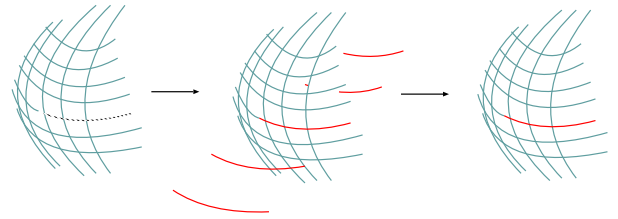


図6 初期復元物と各投影パターン平面での復元：(左)元の復元曲線。点線の曲線は未復元。(中)再推定される曲線位置の候補(各パターン平面との対応の仮定より)。(右)コスト関数最小の候補(再推定結果)。

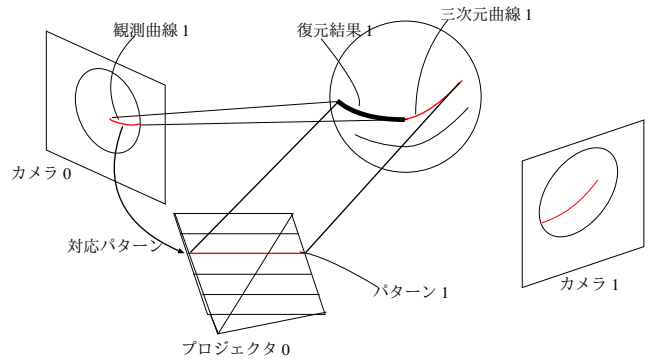


図7 対応の双方向性1:対象に投影された曲線の一部をカメラ0で観測し、カメラ1からの情報を用いてパターン平面と対応付けられる。

曲線を復元位置とする(図6)。

4.3 対応の双方向性による改良

初期復元を行う際、3.2節で述べたように、解空間の1自由度の曖昧性を解消するために観測カメラとは別視点のカメラに復元曲線を投影し、復元曲線と別視点カメラから観測された曲線とのマッチングを行っている(図4)。仮に、復元された曲線が真値であるのなら、別視点カメラによって観測された曲線と一致するはずである。これを利用し、より一致度の高い解を探索し、それを真の値として選択する。

このような、観測カメラと別視点カメラとの観測曲線の対応関係には、「双方向性」があるはずである。つまり、観測カメラの観測曲線1が別視点カメラの観測曲線2に対応するなら、逆に観測曲線2は観測曲線1に対応するはずである。このような関係を、観測曲線2の復元に利用することができる。

具体的に、図7, 8を用いて説明する。カメラ0で観測した観測曲線1を、平面パターン1と対応し、別視点カメラ1で観測した観測曲線2により解の探索を行い、復元した復元曲線を復元結果1とする。復元結果1をカメラ1に投影した曲線を投影結果1とする。観測曲線2と投影結果1は同じパターン平面に対応するはずであるので、観測曲線2を二次元曲線1と同じパターン平面パターン1と対応させることで、復元を行い復元結果2を得る。

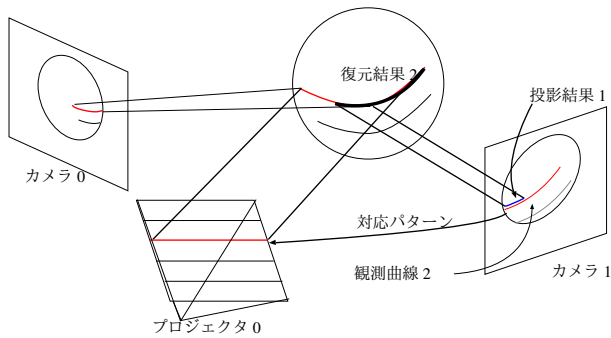


図8 対応の双方向性 2:カメラ1とカメラ0は同じ曲線を観測しているため、カメラ0と同じパターンを対応させる。

4.4 連続性による改良

前節で述べたように、初期復元の際に1自由度の曖昧性を解消するため、別視点のカメラに復元曲線を投影している。しかし、この曖昧性の解消手法では、仮に別視点から同じパターン平面の投影曲線を観測できない場合、解を求めることができず復元できない。

このように別視点カメラからの情報が利用できない場合、「3次元形状の連続性」を利用することが考えられる。実在の3次元形状は、通常ある程度の連続性を持つので、復元曲線についても、連続性を持つことがほとんどの領域で期待できる。そこで、復元できなかった曲線と同じカメラから復元された曲線との連続性を用いて改良する。

具体的な説明を図9を用いて行う。図9のカメラ0からは、連結集合A,Bの両方が観測されているとする。また、この連結集合とは、[3]のアルゴリズムで復元を行う最小単位である。カメラ1からは連結集合Bのみが観測できるとする。カメラ0で観測された連結集合Aを復元し、カメラ1に投影した場合、カメラ1は連結集合Bのみ観測しているため、図4のような探索を別視点カメラからの行えないため、復元されない。一方で、連結集合Bは両方のカメラから観測されているため復元される。

そこで、物体の形状やカメラの位置により復元できなかった連結集合Aと連続する連結集合である連結集合Bの端点を用いて探索を行う。連結集合Aの端点が連結集合Bの端点と最も近くなるパターン平面を求める。

5. 実験

5.1 距離による改良

5.1.1 シミュレーション：スタンフォードバニー

3次元形状が既知である物体を用いてシミュレーション実験を行った。まず、6台のカメラとプロジェクタを用いた全周囲形状計測システムをシミュレーションを行い、スタンフォードバニーの形状計測を行った。

バニーへの平行線の投影と、観測は理想的な環境で行うことができる。また、カメラ位置プロジェクタ位置等のキャリブレーション誤差は発生しない。しかし、画像

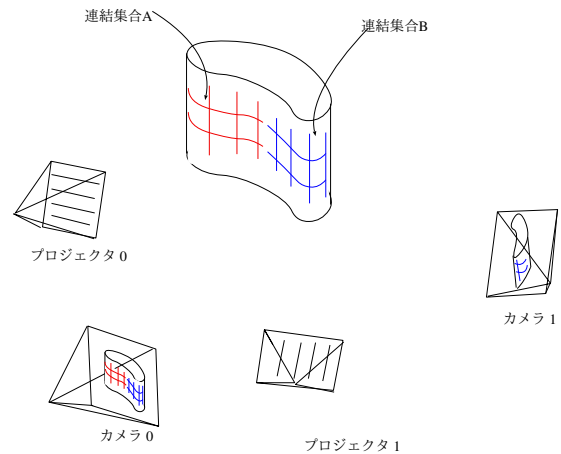
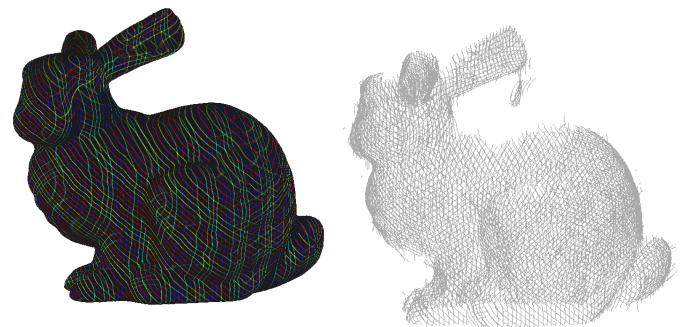


図9 連続性による改良：カメラ0からは連結集合AとBどちらも観測できているが、カメラ1からは連結集合Bしか見えていないため、図5に示す解の探索が行われない。そこで、連結集合の端点をから連続する曲線を見つける。



(a) シミュレーション画像 (b) 3次元復元結果(初期復元)

図10 シミュレーションデータ：(a)はスタンフォードバニーに平行線を投影するシミュレーションの画像であり、この画像を用いて形状復元を行った。(b)は(a)の画像から形状復元して得た3次元形状の画像である。

処理を行う為、線検出結果はノイズが発生する。図10にシミュレーション観測画像、線検出結果、3次元復元結果を示す。図10(c)に示す3次元復元結果を調べると、耳付近等の一部形状を除いて、正しい結果であった。そこで、シミュレーションにより復元した結果を真値と仮定し、その中から復元曲線を無作為に100本サンプリングし投影パターンと曲線の再推定を行い評価した。

サンプリングした曲線のパターン平面と検出曲線の対応関係の推定を距離により行った結果を表1に示す。再推定結果より、3次元復元を行った結果を図11に示す。オレンジの曲線が再推定結果、グレーの曲線が全周囲計測システムによる結果である。バニーの耳の付近にパターンと曲線の対応付けの失敗によるノイズが確認できる。

表 1 スタンフォードパニーの改良結果

	正しく再推定された 曲線	正しく再推定されなかった 曲線
曲線数	87	13

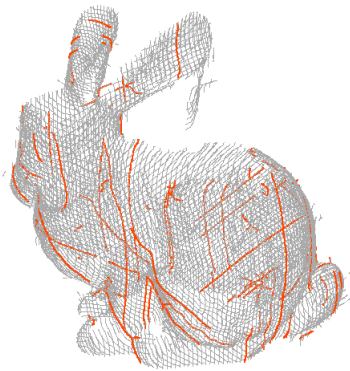
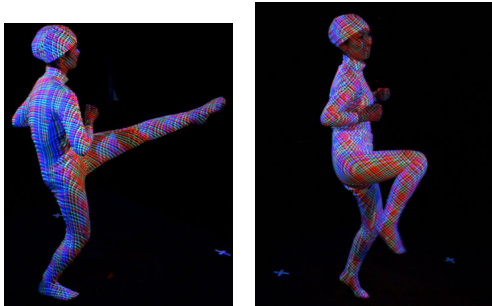


図 11 スタンフォードパニーのパターン再推定結果：シミュレーションにより得た形状を初期形状としてランダムに 100 本の曲線を抽出し、距離による再推定を行った結果である。灰色が初期形状、オレンジが再推定結果である。



(a) 対象 1

(b) 対象 2

図 12 実験対象：人が蹴る動作を 6 台のプロジェクタから平行線を投影し、6 台のカメラでその様子を撮影したものである。

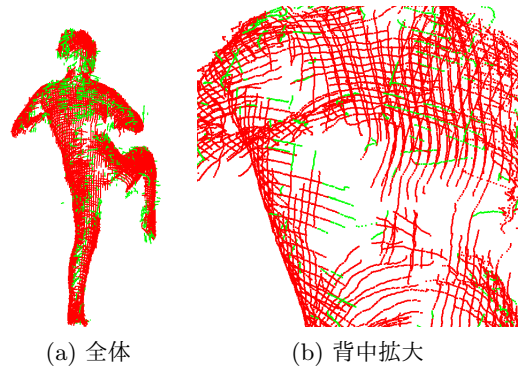
表 1 から分かるように、100 本中 87 本が正しい位置に再推定されており、高い精度で再推定が行われた。

5.1.2 実画像実験

プロジェクタ 6 台カメラ 6 台の全周囲形状計測システムで人が動いている様子を撮影したものを実験対象とした。計測で得られた画像の例を図 12 に示す。図 12(b) に対して、距離による改良を行った。

パターン平面と検出曲線の対応関係が定まらない曲線に対して、パターン平面を再推定した結果を図 13 に示す。図 13 の赤色の曲線が全周囲形状計測システムより得られた初期復元である。緑色の曲線が今回再推定した結果である。図 13(a) は復元結果の全体図である。図 13(b) は復元した人間の背中を拡大した図である。

復元された曲線 (図 13) を見てみると、欠落していた



(a) 全体

(b) 背中拡大

図 13 距離による改良結果：(a) は赤色の曲線が初期形状であり、緑色の曲線が再推定結果である。(b) は人の背中を拡大したものである。

背中の部分など (図 13(b)), 正しそうな位置に復元されたものがある一方で、誤った位置に復元されたものが多く見られ、これは 3 つに分類できる。

1 つ目として、コスト関数 (1) による曲線の近接性の評価がうまくいかない場合である。

2 つ目は復元済み曲線集合 S 中に存在したノイズに引き寄せられた結果。このノイズは、線検出の影響によるノイズや、パターン平面との対応の際、パターンの色に基づく局所 ID 周期分のズレによって誤った場所に復元されたものと考えられる。

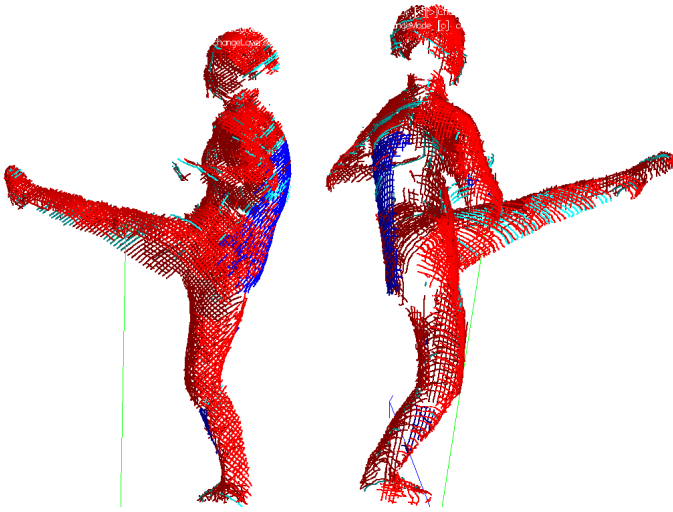
3 つ目の原因として、初期復元に大きな欠落が存在していたことが考えられる。大きな欠落は想定していたが、距離の最小化による推定では正しいパターン平面を与えることに失敗したものと考えられる。

プロジェクト 6 台カメラ 6 台の全周囲形状計測システムで人が動いている様子を撮影したものを実験対象とした。計測で得られた画像の例を図 12 に示す。今回は図 12 の 2 つのシーンを対象として 4.4, 4.3 節で提案した手法を適用した。

4.4, 4.3 節で提案した手法を適用した結果を図 14, 15, 17, 16 に示す。赤色の曲線が初期復元により得られた曲線である。また、水色の曲線が 4.3 節で提案した対応の双方向性による改良結果であり、青色の曲線が 4.4 節で提案した連続性による改良結果である。

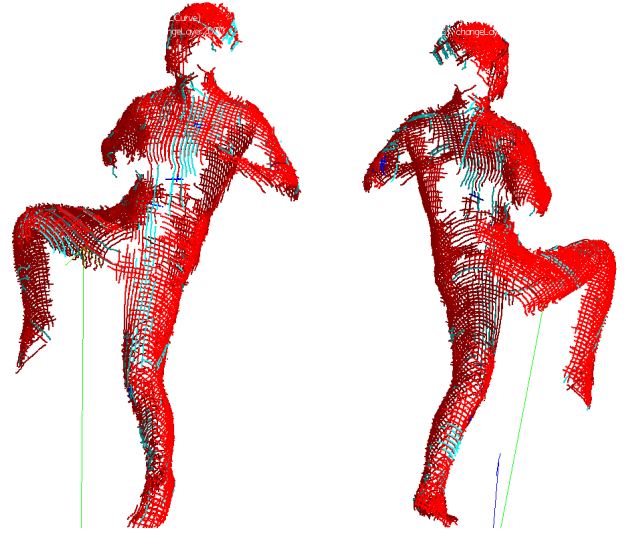
5.1.3 考察

図 14, 15, 16, 17 を見ると、対応の双方向性、連続性ともに復元結果に対して影響を与え、復元が向上していることがわかる。対応の双方向性は、カメラ間で対応する曲線を復元するため、初期復元に比べて曲線が長く復元されている (図 15(a))。また、連続性では、かなり大きな領域の曲線が復元されている場合もあった (図 15(b))。これは、この領域の連結集合の解を求める際、他のカメラの観測情報によるマッチングがうまく行えなかったためである。図 18(a) が図 15(b) の大きな青い線の領域復元する元となった観測曲線を観測したカメラからの検出曲線であり、図 18(b) が別視点カメラからの検出曲線であ



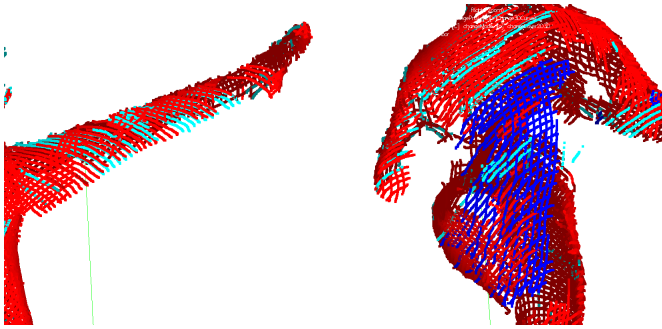
(a) 人の左側からの画像 (b) 対象の右側からの画像

図 14 対象 1 の改良結果：赤色の曲線が初期復元であり，青色が連続性による改良結果，水色の曲線が対応の双方向性による改良結果である．

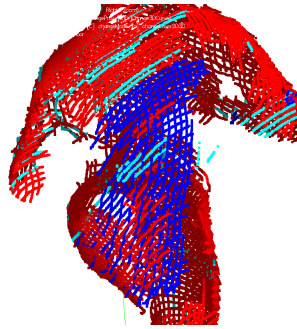


(a) 対象の左からの画像 (b) 対象の右からの画像

図 16 対象 2 の改良結果：赤色の曲線が初期復元であり，青色が連続性による改良結果，水色の曲線が対応の双方向性による改良結果である．



(a) 対応の双方向性



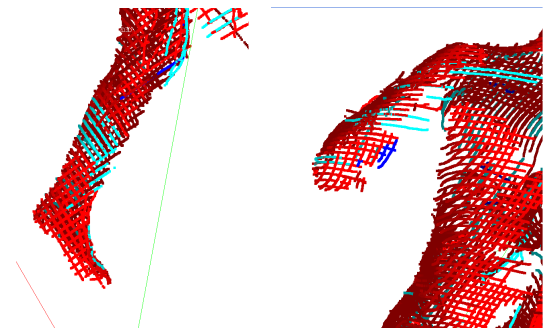
(b) 連続性

図 15 対象 1 の改良結果の拡大図：(a) が対応の双方向性による改良結果の拡大図である．改良結果である水色の線が赤い線を延長するように伸ばしていることが解かる．(b) は連続性による改良結果である．青い線の集合が大きく復元されており，この集合が一つの連結集合である．この連結集合は，これまでは他のカメラの観測による探索が上手く行えないことで，一意に解を決定できず復元されていなかった．

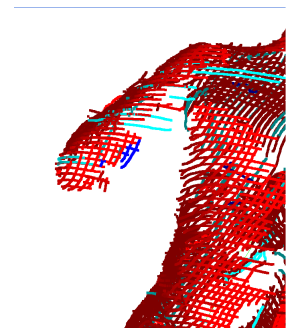
る．この図の黒色で囲んだ領域が図 15(b) で大きく復元された領域であるが，図 18(b) を見てわかるように，対応する領域の曲線検出が乱れている．これにより，初期復元では 3.2 節で述べた解の探索が上手く行えず，この連結集合が復元されなかったが，4.4 節で提案した連続性による改良を用いることで復元することができた．これは，端点同士の探索により，連続する連結集合と対応したためである．

6. おわりに

本論文では，カメラ 6 台プロジェクタ 6 台を用いたアクティブ全周囲 3 次元形状計測システムより計測された結果に対して後処理を加え結果の改良を目指した 3 つの手法を提案した．



(a) 対応の双方向性



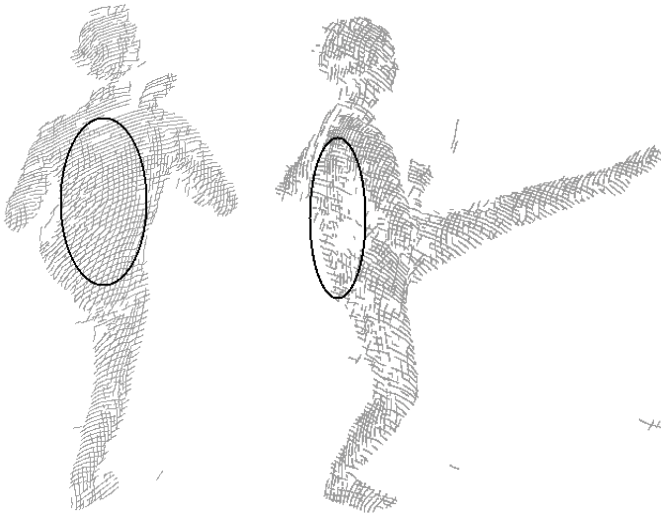
(b) 連続性

図 17 対象 2 の改良結果の拡大図：(a) は対応の双方向性による改良結果であり，15(a) と同様に初期復元の曲線を延長するように復元されている．(b) は小さな領域であるが，復元されていなかった連結集合を復元している．

このシステムでは，プロジェクタから計測対象に対し平行線パターンを投影し，その様子をカメラで観測している．カメラから観測した画像に対し線検出を行い，その検出された曲線とパターン平面の対応付けを行うことで 3 次元復元を行った．このシステムでは，この対応付けが失敗した曲線は復元されていなかった．

そこで，パターン平面と観測曲線の対応付けが失敗した曲線に対応するパターンを再推定し，復元結果の改良を行った．1 つ目の提案として，対応関係の無い曲線に仮のパターン平面を与え，復元済み曲線との最小距離となるパターン平面を探索することで再推定を行った．2 つ目の提案として，ある影曲線に対して観測カメラ間の双方向性な対応関係を用いた改良を行った．3 つ目の提案は，復元曲線の集合の端点を比較することで連続性を探し改良を行った．

実験を行った結果として，それぞれの手法で復元結果



(a) ある視点の検出曲線 (b) 別視点の検出曲線

図 18 検出曲線: 15(b) の青い線で表示されている連結集合は (a) の黒で囲まれた領域である。この領域の別視点からの検出曲線は (b) の黒で囲まれた領域である。3.2 節で述べたように、別視点カメラを用いて一意な解を決定しているが、(b) の囲まれた領域は線の検出が乱れているため、これまでは解の探索が上手く行われていなかった。

の改良が見られた。特に、連続性を用いた改良では、大きな復元曲線の集合が復元されていない場合、連続性を見つけることができれば大きな復元結果の向上が行えた。また、距離と双方向性による改良では、それぞれは細かいが欠けている領域を修復していた。

今後の課題としては、観測結果と復元結果の整合性に関する様々な情報を取り入れ、後処理による結果の向上を高精度化することが考えられる。例えば、観測曲線とプロジェクタそのものの対応関係が間違っている場合、現在の後処理では対応できない。このような場合にも、適切な検索により、結果を向上することが可能なはずであると考える。

謝 辞

本研究の一部は、総務省 SCOPE(101710002)、文部科学省科研費 (21200002) および内閣府 NEXT プログラム (LR03) の助成を受けて実施されたものである。

文 献

[1] J. Batlle, E. Mouaddib, and J. Salvi. Recent progress in coded structured light as a technique to solve the correspondence problem: a survey. *Pattern Recognition*, 31(7):963–982, 1998.

[2] J.-S. Franco and E. Boyer. Fusion of multi-view silhouette cues using a space occupancy grid. In *ICCV*, volume 2, pages 1747–1753, Los Alamitos, CA, USA, 2005. IEEE Computer Society.

[3] R. Furukawa, R. Sagawa, H. Kawasaki, K. Sakashita, Y. Yagi, and N. Asada. One-shot entire shape acquisition method using multiple projectors and cameras. In *4th Pacific-Rim Symposium on Image and Video*

Technology, pages 107–114. IEEE Computer Society, 2010.

[4] Y. Furukawa and J. Ponce. Accurate, dense, and robust multi-view stereopsis. In *CVPR*, 2007.

[5] Y. Furukawa and J. Ponce. Dense 3D motion capture from synchronized video streams. In *CVPR*, 2008.

[6] C. Je, S. W. Lee, and R.-H. Park. High-contrast color-stripe pattern for rapid structured-light range imaging. In *ECCV*, volume 1, pages 95–107, 2004.

[7] H. Kawasaki, R. Furukawa, R. Sagawa, and Y. Yagi. Dynamic scene shape reconstruction using a single structured light pattern. In *CVPR*, pages 1–8, June 23–28 2008.

[8] K. N. Kutulakos and S. M. Seitz. A theory of shape by space carving. *International Journal of Computer Vision*, 38:307–314, 2000.

[9] S. G. Narasimhan, S. J. Koppal, and S. Yamazaki. Temporal dithering of illumination for fast active vision. In *Proc. European Conference on Computer Vision*, pages 830–844, October 2008.

[10] R. Sagawa, Y. Ota, Y. Yagi, R. Furukawa, N. Asada, and H. Kawasaki. Dense 3d reconstruction method using a single pattern for fast moving object. In *ICCV*, 2009.

[11] S. M. Seitz, B. Curless, J. Diebel, D. Scharstein, and R. Szeliski. A comparison and evaluation of multi-view stereo reconstruction algorithms. In *CVPR*, volume 1, pages 519–528, 2006.

[12] A. O. Ulusoy, F. Calakli, and G. Taubin. One-shot scanning using de bruijn spaced grids. In *The 7th IEEE Conf. 3DIM*, 2009.

[13] P. Vuylsteke and A. Oosterlinck. Range image acquisition with a single binary-encoded light pattern. *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, 12(2):148–164, 1990.

[14] M. Young, E. Beeson, J. Davis, S. Rusinkiewicz, and R. Ramamoorthi. Viewpoint-coded structured light. In *IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, June 2007.