

NAIST-IS-MT1151111

修士論文

デザイン支援のための柔軟マーカを用いた 形状計測に基づく投影型拡張現実感システムの構築

山田 朋久

2013年 3月 15日

奈良先端科学技術大学院大学
情報科学研究科 情報科学専攻

本論文は奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科に
修士(工学) 授与の要件として提出した修士論文である。

山田 朋久

審査委員：

加藤 博一 教授	(主指導教員)
横矢 直和 教授	(副指導教員)
武富 貴史 助教	(副指導教員)
山本 豪志朗 助教	(副指導教員)

デザイン支援のための柔軟マーカを用いた 形状計測に基づく投影型拡張現実感システムの構築*

山田 朋久

内容梗概

投影型拡張現実感を用いることで，CGなどの仮想情報を実物体上にプロジェクタを用いて投影し，情報の付加や物体の見かけの操作を行うことができる．このような投影型拡張現実感は，ヘッドマウントディスプレイやモバイル端末などの機器を用いた拡張現実感に対して，複数人が同じ情報を容易に共有可能であるという特長を持つ．このような特長を持つことから，工業製品に対するデザイン支援を目的としたシミュレーションシステムへの応用が期待されており，これまでに様々な手法が提案されている．しかし，これまでに提案されている手法では，投影対象の物体は剛体であることを仮定しており，形状デザインをその場で変更するようなデザインシミュレーションを実現することは困難であった．この問題に対して，本研究では，柔軟物体の形状情報に基づいて適切にテクスチャの投影を行える投影型拡張現実感システムを構築することで，形状デザインの変更が可能なデザインシミュレーションを実現する．提案システムでは，プロジェクタカメラシステムを用いて物体の形状計測と物体表面に配置した再帰性反射素材マーカを認識することで，形状デザインが変更された場合においても適切にテクスチャを投影し，物体表面のテクスチャのシミュレーションを可能とする．その際に，物体表面に配置するマーカパターンとして，一般的な矩形パターンと，部分読み取りが可能な新たなマーカパターンを用いたシステムを作成し，テクスチャの投影精度について検証を行った．検証の結果，部分読み取りが可能なマーカパター

* 奈良先端科学技術大学院大学 情報科学研究科 情報科学専攻 修士論文, NAIST-IS-MT1151111, 2013年3月15日.

ンは、一般的な矩形パターンよりも物体の変形に対して頑健に認識できることを確認した。さらに、提案する部分読み取りマーカを用いた、投影型拡張現実感システムによる形状変更に対応した投影を確認することで、本手法を用いたデザインシミュレーションへの有用性を示した。

キーワード

投影型拡張現実感, プロジェクタカメラシステム, デザイン支援, 柔軟マーカ, 三次元形状計測

Design Support System by Projection-based Augmented Reality with Flexible Markers*

Tomohisa Yamada

Abstract

A projection-based augmented reality (AR) can add information or change appearance of objects by projecting virtual information like Computer Graphics onto objects. A projection-based AR has an advantage that enables multiple people to share same information easily without any additional appliance like head-mounted display or mobile device. Because of these features, projection-based AR is expected to be applied to the simulation systems in industrial design support and then there are some techniques. However, existing techniques assume that objects are rigid material, so that why it is difficult to design simulations if the shape is changing. In this research, we constructed a projection-based AR system that projects textures correctly based on the shape data of the flexible objects. This system can be used to simulate designs allows to change shape design. The constructed system can simulate a surface texture by projecting textures correctly even if the shape is changed in the measurement of object 's 3D shape and the detection of the retro-reflective marker which is placed on the object 's surface with a projector-camera system. We made two types of markers which could be used on object 's surface, first was based on the commonly used square marker and second one was a marker pattern that can be recognized partially, and verified by the texture projection precision. We tested both markers

* Master's Thesis, Department of Information Science, Graduate School of Information Science, Nara Institute of Science and Technology, NAIST-IS-MT1151111, March 15, 2013.

and confirmed that the marker pattern is more robust than a square marker for object deformation.

Keywords:

Projection-based Augmented Reality, Projector-Camera System, Design Support, Flexible Marker, 3D Shape Measurement

目次

1. はじめに	1
2. 投影型拡張現実感に関する従来研究と本研究の位置づけ	3
2.1 プロジェクタのみを用いた投影型拡張現実感	3
2.2 プロジェクタカメラシステムを用いた投影型拡張現実感	5
2.3 投影型拡張現実感のデザイン支援への応用	5
2.4 本研究の位置づけと方針	7
3. プロジェクタカメラシステムによる三次元形状計測	12
3.1 グレイコードパターン投影による物体の三次元形状計測	12
3.2 形状計測精度の定量評価	17
4. 矩形マーカを用いたテクスチャ投影	19
4.1 矩形マーカの概要と認識手法	19
4.1.1 マーカの検出および輪郭の抽出	19
4.1.2 ばね質点系を用いた制御点の内挿	21
4.2 形状情報と矩形マーカの認識結果に基づくテクスチャ投影	21
4.3 矩形マーカの変形の制約に関する考察	24
5. 部分読み取り可能なマーカを用いたテクスチャ投影	25
5.1 マーカパターンの設計と認識手法	25
5.1.1 点検出および領域分割によるマーカパターンの検出	28
5.1.2 部分領域を利用したマーカパターンの対応付け	30
5.2 形状情報とマーカの認識結果に基づくテクスチャ投影	30
6. マーカを用いた投影精度の定量評価	34
6.1 実験概要	34
6.2 マーカを用いたシステムの投影精度結果	37
7. まとめ	40

謝辭	41
参考文献	42

目 次

1	製品開発におけるデザインプロセス [1]	2
2	Shader Lamps [5]	4
3	ジオラマアニメーション [6]	4
4	没入型仮想環境への投影 [7]	4
5	Dynamic Shader Lamps [8]	4
6	物体底面のマーカ認識による投影対象物体の位置・姿勢推定 [16] .	6
7	自動車のデザイン支援システム [19]	7
8	再帰性反射マーカを表面に配置した Quimo 素材 (左: 赤外カメラ で撮影した場合, 右: 人間の目を見た場合) [26]	8
9	コンセプトモデル作成の手順 ((a): 従来の場合, (b): Quimo 素材 を投影型拡張現実感に利用した場合) [26]	9
10	提案システムの外観	11
11	提案システムの処理の流れ	11
12	グレイコードパターン投影手法における各座標系の関係	13
13	グレイコードの符号化 (3 ビットの場合)	13
14	ポジティブ・ネガティブパターンによる 2 値化	16
15	パターン境界位置のサブピクセル精度推定	16
16	形状計測精度の定量評価に用いた計測対象物体 (柔軟マーカ) . .	18
17	矩形マーカの寸法	20
18	カメラ画像内からのマーカの検出および輪郭の抽出	20
19	マーカ内部のばね質点系モデル	22
20	投影するテクスチャの変形	22
21	変形した矩形マーカにおけるテクスチャ投影	23
22	カメラでの認識が困難な柔軟マーカの形状変化	24
23	一意に識別可能な部分マーカの集合によるマーカパターン [30] . .	26
24	左: 文献 [30] のマーカパターン, 右: 提案するマーカパターン . .	26
25	上段: 試作した柔軟マーカ, 下段左: 赤外カメラで撮影した場合, 下段右: 文献 [30] のマーカパターン	27

26	マーカパターンの検出処理	29
27	変形したマーカパターンにおけるテクスチャ投影と格子点の認識 結果	32
28	変形前後の位置関係に対応したテクスチャ投影	33
29	テクスチャ投影精度の実験環境	35
30	矩形マーカの定量評価における基準点と投影点 (青: 基準点 (真 値), 赤: プロジェクタからの投影点)	36
31	部分読み取り可能なマーカパターンの定量評価における投影点 (赤: プロジェクタからの投影点)	36
32	テクスチャ投影精度の定量評価に用いた非平面の矩形マーカ . . .	37
33	テクスチャ投影精度の定量評価に用いた非平面のマーカパターン と格子点の認識結果	38

表 目 次

1	形状計測精度の定量評価における機器構成	17
2	計測した各形状の計測点数と距離誤差の平均値	18
3	テクスチャ投影精度の定量評価における機器構成	35
4	投影点と制御点との距離誤差の平均値 (総数: 各 100 個)	37
5	投影点と格子点との距離誤差の平均値 (総数: 各 20 個)	38

1. はじめに

日常生活で利用する家具・家電製品や自動車，携帯電話といった商品の有するデザインが販売に大きく影響する分野において，形状だけでなく，色や質感を含めたデザイン検討を製品開発プロセスの初期段階から行うことは非常に重要である．製品開発におけるデザインプロセスは，図1のように製品の特徴や機能などの仕様設計の後，デザイナーやエンジニアによる製品のプロトタイプが作成され，関係者による評価を経て製品化される [1]．この中で Conceptual Design プロセスは，製品の仕様に基づいてデザインをデザイナーが構想し具体化する重要なプロセスである．この段階では複数のアイデアから選択されたデザインに対してプロトタイプの作成，修正を繰り返す．従来のデザインプロセスにおけるプロトタイピングは，デザイナーが描いた製品スケッチを専門業者の手作業によってクレイや土型を用いてプロトタイプを作成していたため，多くの時間，労力が必要であることが問題であった．一方で，近年，3DプリンタやCADソフトの普及によりプロトタイプ作成までのプロセスの効率化，時間短縮化が可能となってきている．さらに，拡張現実感 (AR; Augmented Reality) 技術を用いることで，見た目や形状の変更，インタラクションの検討など，デザインプロセスにおける効率的なプロトタイピングの実現を目的とする AR プロトタイピングが提案され，その発展が期待されている [2]．

現実空間にコンピュータで生成した CG や注釈などの仮想情報を重畳表示する AR 技術を用いたプロトタイピングシステムは，仮想情報を切り替えて異なるデザインを一度に検討できるだけでなく，情報を保存しておくことで再利用することも可能である．中でも情報提示機器としてプロジェクタを用いる投影型拡張現実感は，機器にヘッドマウントディスプレイやモバイル端末を用いる場合よりも，複数人が同じ情報を容易に共有可能であるといった特長を持つ．このような特長を持つことから，これまでに空間のレイアウトや工業製品に対するデザイン支援を行うといったシミュレーションへの応用が提案されている [3,4]．これまでに提案されている投影型拡張現実感に関する研究の多くは，重畳表示する対象が形状の固定された剛体であることを仮定しており，デザイン検討において物体形状に変更を加えた場合，物体表面への適切な投影を行うことができない．実際のデザ

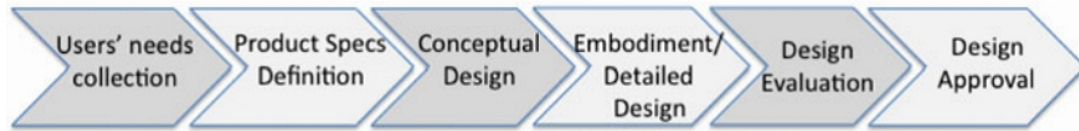


図 1 製品開発におけるデザインプロセス [1]

イン検討の段階では、モデルの伸展や曲げ、掘削、切断、接合といった物体形状に対して加工を行うことは必須であり、投影型拡張現実感においても対象物体の形状変化を考慮したデザイン支援が可能であることが望ましい。

本研究では、柔軟物体の形状情報に基づいて適切にテクスチャ投影が可能な投影型拡張現実感システムをプロジェクタカメラシステムを用いて構築し、デザイン検討時での形状変更を可能とする。これにより、Conceptual Design プロセスにおいて、従来よりも効率的なデザインの検討が可能となる。

以下、2章では、投影型拡張現実感に関する従来研究と本研究の位置づけを述べた後、それらを踏まえて提案する投影型拡張現実感によるデザイン支援システムの構成について述べる。3章では、提案システムにおける物体の三次元形状計測処理について述べる。4章、5章では、それぞれ、投影するテクスチャと物体表面の位置を対応付けるためのマーカパターンについて、矩形マーカの場合と、部分読み取り可能なマーカを用いた場合について述べる。6章では、提案システムの投影精度を定量評価し、2種類のマーカを用いた場合について考察する。最後に7章では、本研究についてまとめ、今後の展望について述べる。

2. 投影型拡張現実感に関する従来研究と本研究の位置づけ

本章では、まず投影型拡張現実感をプロジェクタのみを用いた研究と、プロジェクタとカメラを併用するプロジェクタカメラシステムを用いた研究に大別し、概観する。次に、従来手法の中でも、特にデザイン支援を目的とした研究について述べる。最後に、本研究の位置付けと方針について述べる。

2.1 プロジェクタのみを用いた投影型拡張現実感

プロジェクタのみを用いた投影型拡張現実感では、あらかじめ物体形状およびプロジェクタと物体の位置関係を計測しておくことで、物体表面へのテクスチャの投影を実現している。このような投影型拡張現実感として、物体表面の陰影や質感をシミュレートするものや、インタラクティブに物体表面のテクスチャを変更するものが提案されている。[5-8]

Raskar らは、図2のような複雑な形状をもつ物体に対して、テクスチャや陰影などを投影することで物体の外観を自由に変更できる Shader Lamps を提案している [5]。この研究は、色や質感を自由に切り替えることで、物体表面のデザインをシミュレーションする方法として広く利用されている [6-8]。文献 [6] では、物体の動きを投影により再現することで、図3に示すように、動作時の見た目をシミュレートするジオラマアニメーションを提案している。この手法では、物体の形状は固定であるが、プロジェクタによって投影されるテクスチャを変更で、疑似的に形状変化を加えた場合の見えを再現可能である。Low らは、図4のように複数のプロジェクタを用いて、赤外センサを取り付けた利用者の視点に応じて投影位置を動的に変化させ Shader Lamps を実物大の物体へ適用した例を示している。このシステムを用いることで、事前に建築物の構造や内装など空間的なデザインのシミュレーションを行うことが可能となる [7]。Bandyopadhyay らは、図5に示すように、赤外センサや磁気センサを用いて物体の位置・姿勢をリアルタイムで認識することで、Shader Lamps を、物体が移動するような動的なシーンにおいても適切なテクスチャ投影を実現する Dynamic Shader Lamps を提案して

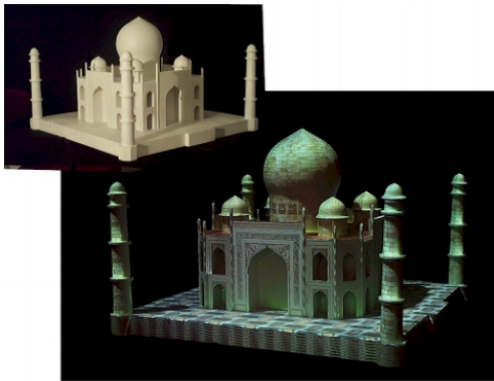


図 2 Shader Lamps [5]



図 3 ジオラマアニメーション [6]



図 4 没入型仮想環境への投影 [7]



図 5 Dynamic Shader Lamps [8]

いる [8]. この手法では、物体を手に取り対象を自由な角度に変更しながら、デバイスを用いて物体表面へ任意の描画を行えるといった、インタラクティブなシミュレーションが可能である.

これらの手法を用いることで、物体の見かけの変化を再現することは可能である. しかし、物体形状が変化した場合には、再度、物体形状の計測および物体とプロジェクタ間のキャリブレーションが必要となる.

2.2 プロジェクタカメラシステムを用いた投影型拡張現実感

2.1節で述べた、プロジェクタのみを用いた投影型拡張現実感では、物体の形状に変更が加えられた場合、物体形状の再計測や物体とプロジェクタ間の再キャリブレーションが必要となるという問題がある。このような問題を解決するために、プロジェクタカメラシステムを用いて、投影のみだけでなく物体形状の計測も可能なシステムが提案されている [9-11] また、物体の形状情報だけでなく、シーンにおける物体の位置・姿勢をカメラで推定することにより、動的な物体へのテクスチャ投影システムを構築できる [12,13]. 楠本らは、利用者の位置を仮想光源とし、利用者の動きを推定するために磁気センサを利用することで、物体の位置・姿勢だけでなく、利用者の動きに応じて床面へ物体が落とす影や写りこみ投影を変更するデザインシステムを提案している [14,15].

プロジェクタカメラシステムを利用することで、物体表面のテクスチャや、プロジェクタが投影する情報を動的に認識した情報提示が可能となる。投影するテクスチャと物体表面の正確な位置合わせを行うために、物体表面に貼り付けたマーカをカメラで認識することで投影を行う手法も提案されている [16-18]. 投影対象にマーカを配置することで、容易にテクスチャと物体表面の位置合わせを実現する事が可能となるが、マーカ上へのテクスチャ投影時に、マーカの色によって投影されたテクスチャの色が想定と異なる場合があるという問題がある。永井らは、物体底面にマーカを貼り付け図6のようにアクリル板におき、板の下からカメラでマーカを認識することで物体の位置・姿勢を推定している [16].

これら手法のように、プロジェクタカメラシステムを用いることで、他の機器を用いることなく物体の形状計測と物体へのテクスチャ投影だけでなく物体の位置・姿勢の推定も同一システムで可能となる。

2.3 投影型拡張現実感のデザイン支援への応用

デザイナーが工業製品をデザインする際には、まず製品の形状を設計し、形状に合わせて色やテクスチャといった表面属性の設計を行う。これを様々な角度から評価、修正を繰り返すことで製品開発を行う。2.1節、2.2節で概観したように、

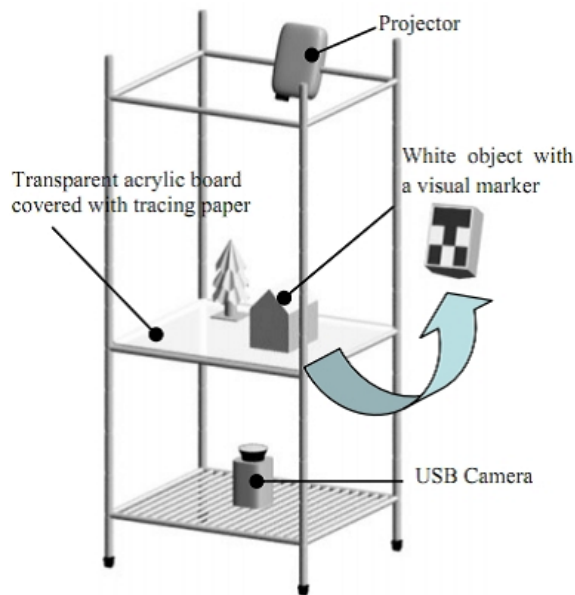


図 6 物体底面のマーカ認識による投影対象物体の位置・姿勢推定 [16]

物体形状とテクスチャの位置を対応付けて任意の情報を投影し、これを複数の視点から眺めることができる投影型拡張現実感ではデザイン支援への応用が可能となる [19–24].

Verlinden らの提案している WARP (Workbench for Augmented Rapid Prototyping) システムは、Raskar らの Shader Lamps を自動車のデザイン支援へ用いたシステムである [19,20]. Verlinden らのシステムでは、図 7 に示すように作業台の上に形状デザインした物体を設置し、表面のテクスチャや照明環境を自由に变化させて見た目のデザインをシミュレーションできる. このシステムでは、物体を設置する作業台に埋め込んだマウスホイールの回転量を取得することで、作業台を回転させると投影像も合わせて回転し、任意の視点から物体のデザインを評価できる. また、久田らは、人間の視覚特性に基づいてシェーディングを修正したテクスチャを投影することで、疑似的に物体表面の凹凸などの形状変化を再現する HYPERREAL システムを提案している [23]. しかし、このシステムでは、物体表面の凹凸などの細かな形状の変化を再現することはできるが、形状を大き

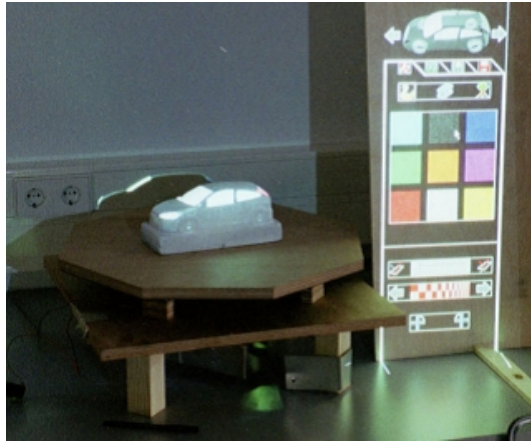


図 7 自動車のデザイン支援システム [19]

く変更する場合には物体表面への適切なテクスチャ投影に失敗する。

初期のデザイン検討段階では、色や質感だけでなく製品の形状も含めた修正が考えられるため、剛体を対象としたこれまでの投影型拡張現実感におけるデザイン支援では、形状に変更を加えた場合、物体表面へ投影するテクスチャの位置合わせが失敗することから、新たな形状デザインした物体を用意する必要がある。これに対し、Maasらはデザインプロセスにおいて生じる物体形状の変更に対応した投影型拡張現実感を実現するために、曲げや切断加工といった形状変更が容易に行える、柔軟な Quimo (Quick Mock-up) 素材を提案している [25]。Quimo 素材の表面に、図 8 に示すような再帰性反射マーカを配置し、赤外カメラでマーカを認識することによって、物体表面へのテクスチャ投影を実現している [26]。

2.4 本研究の位置づけと方針

これまで述べたように、投影型拡張現実感に関する研究では、対象物体として剛体のみならず自由な形状変更が可能な柔軟物体を用いた情報投影が提案されている。Maasらが提案している Quimo 素材は、デザイン検討において図 9 に示すように、Conceptual Design プロセスで従来のような物体形状に変更が生じる度

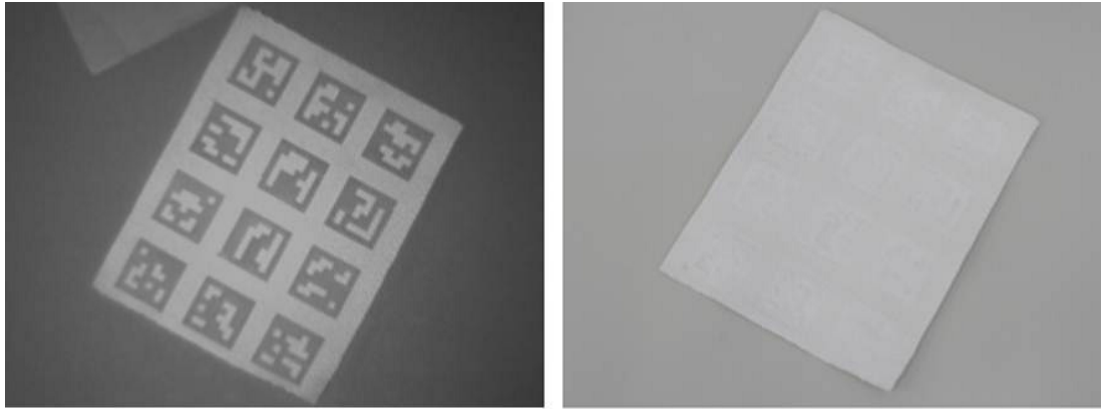
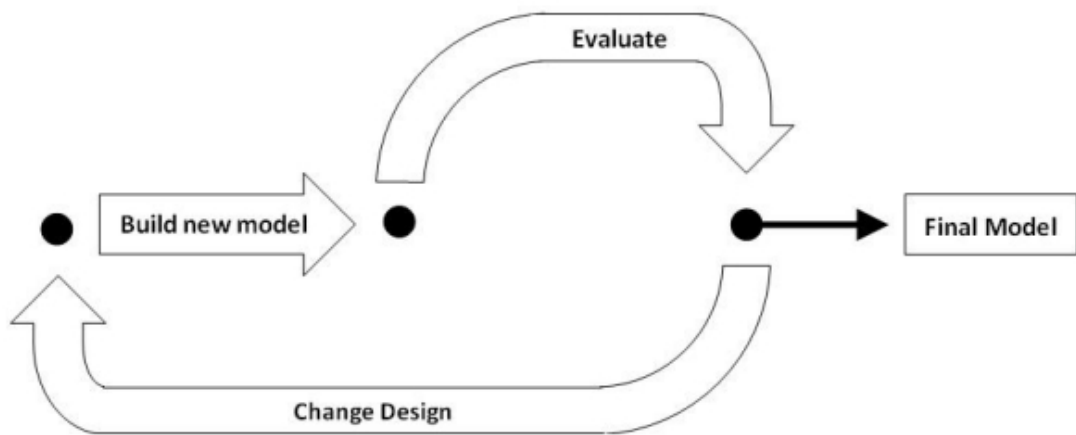


図 8 再帰性反射マーカを表面に配置した Quimo 素材（左：赤外カメラで撮影した場合，右：人間の目を見た場合） [26]

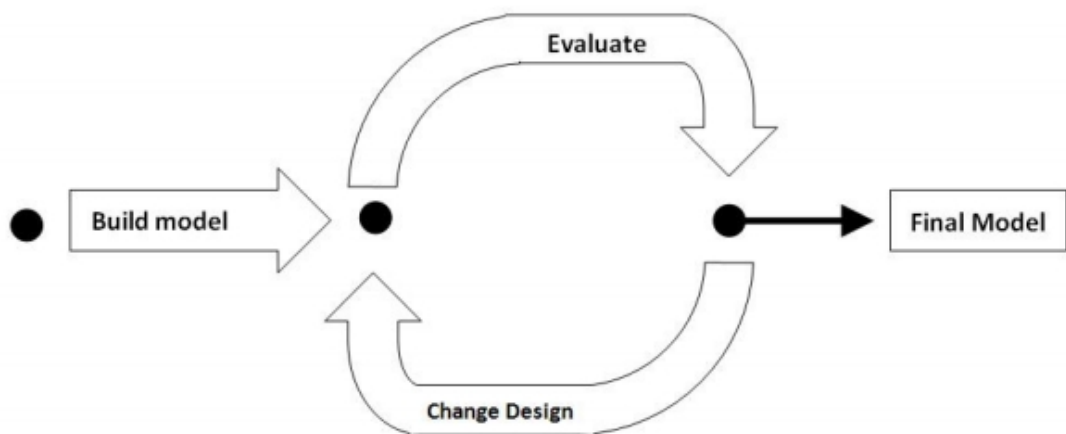
に新たな形状デザインした物体を追加で作ることなく，プロトタイプ作成までに必要な時間と材料コストを減らしながらより効率的なデザイン検討が行えるという利点がある．しかし，Maas らの手法では，物体の正確な形状情報を取得しておらず，Quimo 素材で作成された物体形状に変更を加えた場合には，マーカ認識による位置合わせのみでは変形の前後で投影されるテクスチャの幾何学的な整合性を保つことは難しい．また，物体表面のマーカを平面と仮定し認識しているため，実際に変更できる物体形状が限られてしまう制約が生じる．

そこで，本研究では，これらの問題に対して物体の三次元形状計測と，独自に設計したマーカパターンの認識処理を行うことで形状変化に基づいて適切なテクスチャ投影を行う投影型拡張現実感システムをプロジェクタカメラシステムを用いて構築する．これにより，物体形状の変更に対して変形の前後で幾何学的な整合性を保ったテクスチャの投影が可能なデザイン支援のためシミュレーションシステムを実現する．

図 10，図 11 にシステムの外観と提案システムの処理の流れを示す．本研究では 1 組のプロジェクタカメラシステムと，投影対象として表面にマーカを配置した形状変更が可能な柔軟物体を用いる．提案システムでは，まず，プロジェクタカメラシステムを用いたパターン光投影法によって，物体上の各点におけるプロジェ



(a)



(b)

図9 コンセプトモデル作成の手順 ((a): 従来の場合, (b): Quimo 素材を投影型拡張現実感に利用した場合) [26]

クタとカメラの各画素の対応付けを行い柔軟物体の形状を取得する。次に、物体表面に配置されたマーカを認識することで、テクスチャの投影位置を算出する。ここで、物体表面に配置するマーカは、再帰性反射素材で構成する不可視マーカを用いることで、テクスチャ投影において投影されるテクスチャ色への影響を与えないようにする。そのため、システムにはプロジェクタのパターン光を認識する可視カメラと不可視マーカを認識するための赤外カメラを必要とするが、本研究で提案するシステムには内部機構で可視光と赤外光の認識を切り替え可能なカメラを用いる。さらに、本研究では、マーカとして矩形パターンと部分読み取り可能なマーカパターンの2種類のマーカを作成する。最後に、計測した物体の形状情報と認識したマーカの位置情報に基づき物体表面へテクスチャを投影し、その投影精度について検証を行う。

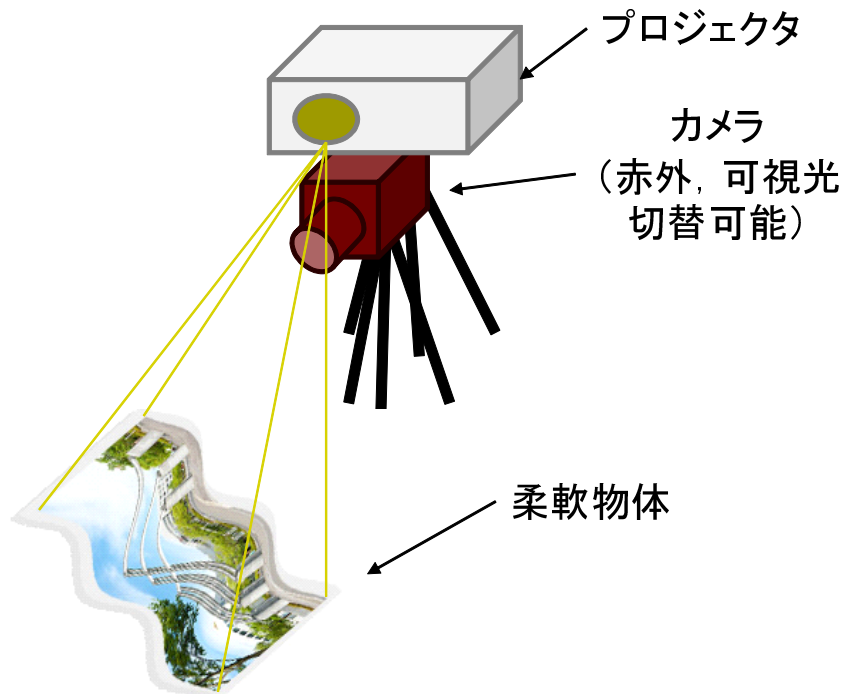


図 10 提案システムの外観

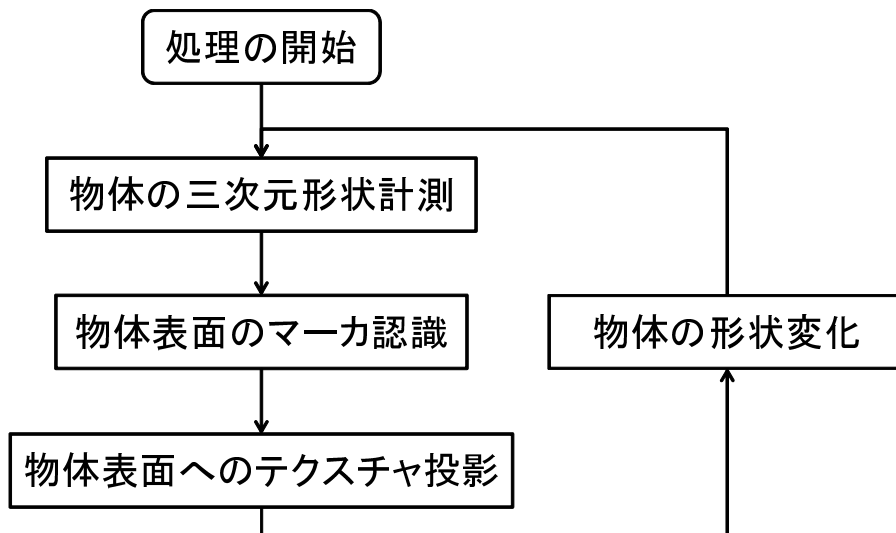


図 11 提案システムの処理の流れ

3. プロジェクタカメラシステムによる三次元形状計測

本章では、提案システムにおいて投影対象となる物体の三次元形状計測手法について述べる。物体表面へプロジェクタを用いてテクスチャ投影を行うためには、物体の各点におけるプロジェクタとカメラ画像間の対応付けを行う必要があるため、本研究ではプロジェクタカメラシステムによる能動的な計測手法であるパターン光投影法を用いた物体の三次元形状計測を行う。

以下では、まず、本研究で利用するグレイコードパターンを用いた時系列空間コード化法による形状計測手法について述べる。次に三次元形状計測の計測精度について、非接触三次元スキャナによる物体の形状計測結果と比較することにより定量的に評価する。

3.1 グレイコードパターン投影による物体の三次元形状計測

本研究では、図 12 に示すように、プロジェクタからグレイコードを物体へ照射することでプロジェクタとカメラ画像における各画素間の対応関係を求める。取得した対応関係より、物体の各点の三次元位置を算出する [27]。

プロジェクタは、各画素の画素値をグレイコード化し、時系列的に各ビットで構成されたパターン光を複数枚に分けて物体へ投影する。1枚のパターン光において、対応するグレイコードのビットが1である領域では光が当たっており、0である領域は何も投影されない。物体上の各点はパターン光が切り替わるごとに1と0が変化するため、それぞれの点においてカメラで撮影した各パターン光を1と0に符号化すると、各点がプロジェクタのどこに対応するかを一意に知ることができる。対応点を求めるには、各パターン光を撮影したカメラ画像において二値化を行い1と0を判別する。

グレイコードで作られたバイナリコードは、図 13 のような隣接するコード間で異なるビット（ハミング距離）が常に1のコードである。これは各コードの境界でのコード化誤りを最小化できる特徴があり、投影するパターン光としてグレイコードを利用するのも、光が物体に当たっているかどうかでカメラの撮影画像を二値化するときの誤りを軽減するためである。プロジェクタの画素値をグレイコー

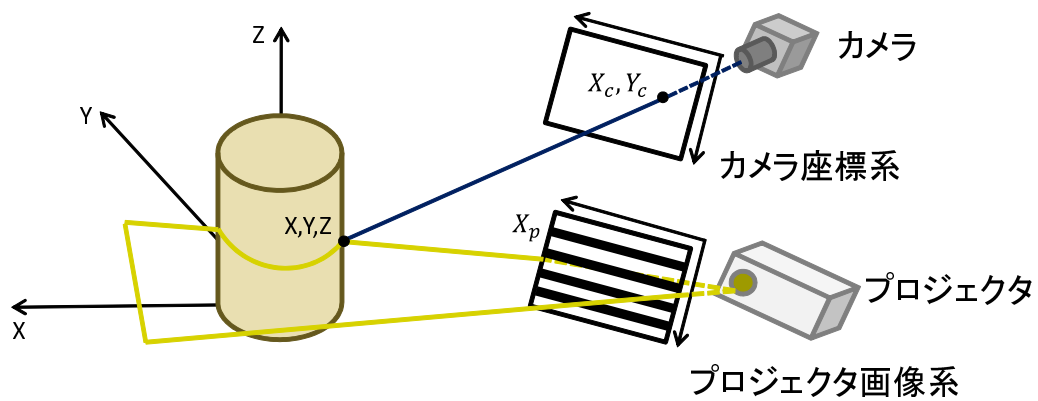


図 12 グレイコードパターン投影手法における各座標系の関係

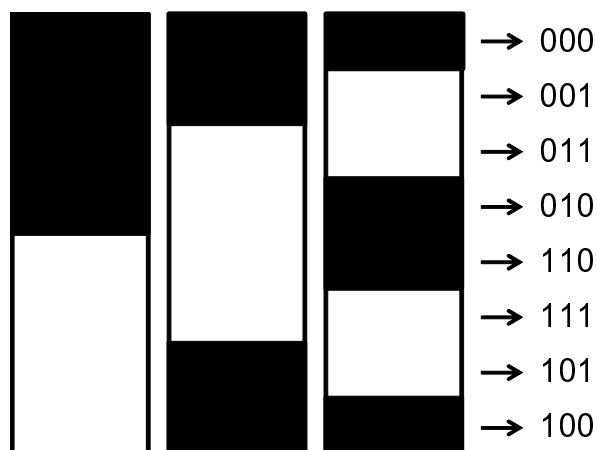


図 13 グレイコードの符号化(3ビットの場合)

ドにコード化するには、プロジェクタの画素値を一度単純2進のバイナリコードにし、グレイコードに変換する。また、カメラで撮影したグレイコードから単純バイナリコードに変換することでプロジェクタの画素値を決定できる。Nビットのグレイコードを $\mathbf{g} = g_0g_1 \cdots g_{N-1}$ 、単純バイナリコードを $\mathbf{b} = b_0b_1 \cdots b_{N-1}$ と符号表示した場合、各コード間の関係は

$$g_0 = b_0, g_{i+1} = b_i \oplus b_{i+1} \quad (\oplus \text{は排他的論理和}) \quad (1)$$

であり、容易に相互変換可能である。

グレイコードパターン投影手法を用いた物体の三次元位置の算出方法を述べる。図12で示したように、コード値がプロジェクタからの光線方向に、画像上での画素の位置が視線の方向に対応し、それらを知ることにより三角測量法で各物体までの距離を取得する。カメラ座標系における画素値を (X_c, Y_c) 、物体の三次元座標値を (X, Y, Z) とすると、物体上のある点とその点のカメラ画像上での関係は、以下のように記述できる。

$$\begin{bmatrix} H_c X_c \\ H_c Y_c \\ H_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{24} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & C_{34} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

ここで \mathbf{C} は、事前校正済みのカメラの内部・外部パラメータを合わせたカメラパラメータを、 H_c は媒介変数を表す。プロジェクタ座標系における画素値を (X_p) とすると、物体上のある点とプロジェクタ画像上での関係も同様にして、以下のように記述できる。

$$\begin{bmatrix} H_p X_p \\ H_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{13} & P_{14} \\ P_{21} & P_{22} & P_{23} & P_{24} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

ここで \mathbf{P} は、事前校正済みのプロジェクタの内部・外部パラメータをあわせたプロジェクタパラメータを、 H_p は媒介変数を表す。式2, 3を用いて、カメラの視

線とプロジェクタから投影されるパターン光線との交点 (X, Y, Z) を求めることで物体の三次元位置が分かる．式 2, 3 を展開し整理すると,

$$(C_{11} - C_{31}X_c)X + (C_{12} - C_{32}X_c)Y + (C_{13} - C_{33}X_c)Z = C_{34}X_c - C_{14} \quad (4)$$

$$(C_{21} - C_{31}Y_c)X + (C_{22} - C_{32}Y_c)Y + (C_{23} - C_{33}Y_c)Z = C_{34}Y_c - C_{24} \quad (5)$$

$$(P_{11} - P_{21}X_p)X + (P_{12} - P_{22}X_p)Y + (P_{13} - P_{23}X_p)Z = P_{24}X_p - P_{14} \quad (6)$$

の連立方程式となる．ここで,

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} C_{34}X_c - C_{14} \\ C_{34}Y_c - C_{24} \\ P_{24}X_p - P_{14} \end{bmatrix}, \mathbf{Q} = \begin{bmatrix} C_{11} - C_{31}X_c & C_{12} - C_{32}X_c & C_{13} - C_{33}X_c \\ C_{21} - C_{31}Y_c & C_{22} - C_{32}Y_c & C_{23} - C_{33}Y_c \\ P_{11} - P_{21}X_p & P_{12} - P_{22}X_p & P_{13} - P_{23}X_p \end{bmatrix}, \mathbf{V} = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad (7)$$

とおくと, 上述した連立方程式は以下のように記述できる．

$$\mathbf{F} = \mathbf{Q} \cdot \mathbf{V} \quad (8)$$

よって \mathbf{Q} の逆行列が存在すれば物体の三次元座標値 \mathbf{V} が算出できる．

$$\mathbf{V} = \mathbf{Q}^{-1} \cdot \mathbf{F} \quad (9)$$

これを画像上のすべての点に対して繰り返すことで物体の三次元形状情報を取得する．

この時, 画像入力時の量子化誤差により, 計算された三次元形状が階段状になってしまう問題がある．本研究では, より正確な形状を得るために, 投影するパターン光の 1 と 0 の境界位置を, 撮影したカメラ画像中においてサブピクセル精度で求め計算に利用することで高精度な三次元位置の算出を行っている．境界位置を安定して検出するために, 投影する各パターン光 (ポジティブパターン) では図 14 のように白黒反転させたネガティブパターンも併せて投影し, 各画素ごとに輝度を比較することで二値化を行っている．各パターンでこのネガ・ポジ相補パターンの輝度値が交差する図 15 のような箇所が真のパターン境界位置であり, 式 10 を用いてサブピクセル精度で境界位置 s を求める．

$$s = \frac{A - B}{(A - B) + (C - D)} \quad (10)$$

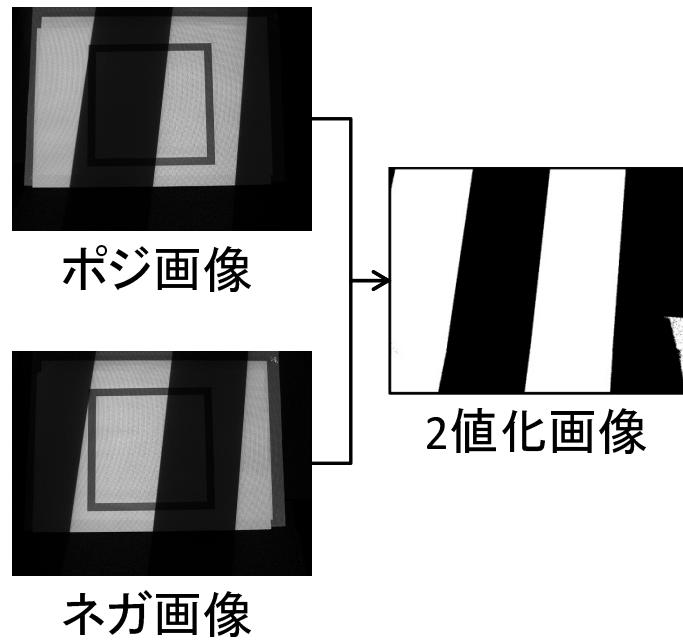


図 14 ポジティブ・ネガティブパターンによる2値化

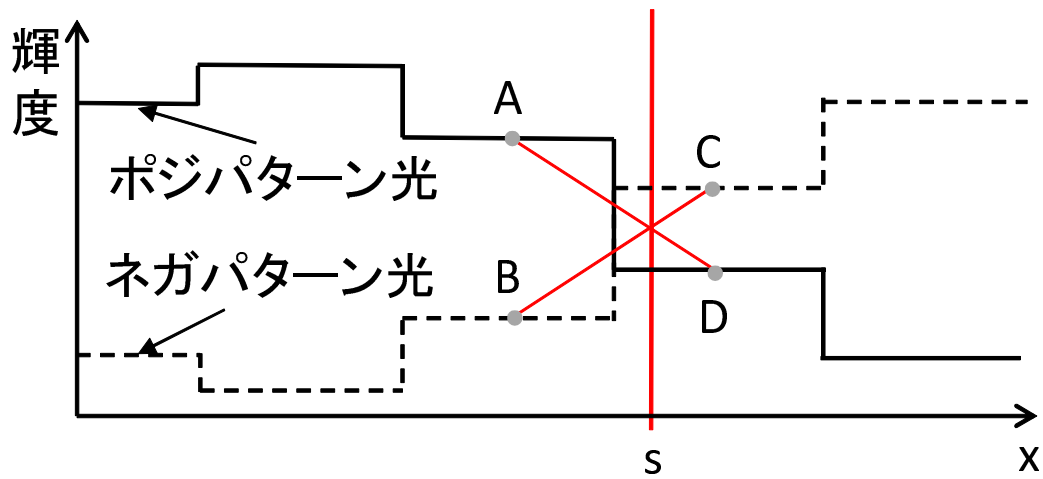


図 15 パターン境界位置のサブピクセル精度推定

ここで、 A , B , C , D は各画素における輝度値である。加えて、パターン光の幅は十分に細く、その区間は物体表面が同一平面で近似できると仮定し、求めた境界位置の画素のみで物体の三次元位置を計算し、間を線形補間により内挿する。最後に各点の周囲近傍の点を使いメディアンフィルタによる平滑化を行うことで、スパイクノイズを除去した滑らかな物体の三次元形状を取得する。

3.2 形状計測精度の定量評価

プロジェクタカメラシステムを用いて、実際に提案手法で利用する柔軟物体に対し、前節で述べたグレイコードパターン投影手法による物体の三次元形状計測を行い、計測精度を定量評価した。

定量評価に利用する実験環境を述べる。表 1 に実験で用いた機器構成を示す。物体の三次元形状計測にはプロジェクタのパターン光を撮影するため可視カメラのみを必要とする。形状計測精度の定量評価では、提案手法で用いる赤外、可視光切り替え可能なカメラで利用する解像度と同じ解像度を持つ可視カメラを代替して用いている。計測対象は、Maas らと同様の柔軟素材で作成した正方形の白色物体に、黒色の輪郭をもつ矩形マーカを用いる。矩形マーカの概要は 4 章で述べる。柔軟マーカを用いて図 16 のような 3 種類の形状の異なる物体の形状計測精度について検証した。定量評価の方法を述べる。各柔軟マーカに対し、市販の非接触三次元スキャナ (KONICA MINOLTA RANGE7) を用いて三次元形状計測を行い、計測結果を真値とする。プロジェクタカメラシステムと柔軟マーカを 1m

表 1 形状計測精度の定量評価における機器構成

OS	Microsoft Windows7 Enterprise 64bit
CPU	Intel Core2 Duo E8500 3.16GHz
RAM	3072MB
Camera	Point Gray Research Grasshopper 2 (1024*768, 30 FPS)
Projector	EPSON EB-1720 (1024*768)

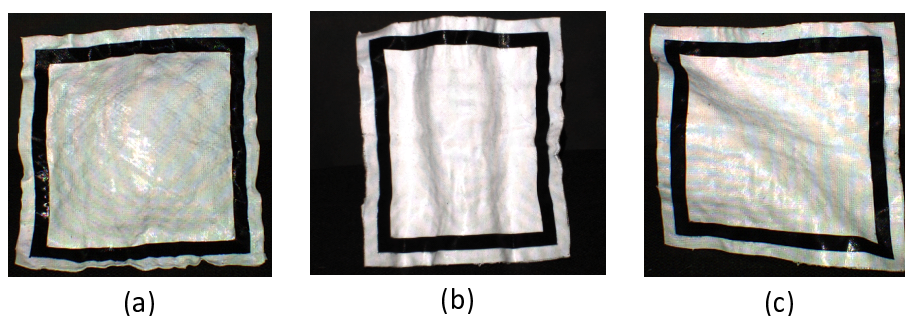


図 16 形状計測精度の定量評価に用いた計測対象物体（柔軟マーカ）

離した状況において，マーカの三次元形状計測を行った結果と，真値との値で三次元ユークリッド距離を計算し，距離誤差として全ての点の平均値を算出する．二つの三次元形状間における位置合わせには，二つの点群において各対応点間の距離誤差が最小となるよう繰り返し計算することにより，位置合わせをおこなう ICP (Iterative Closet Point) アルゴリズムを用いる [28]．また，定量評価には柔軟マーカのうち，輪郭内のみの形状で位置合わせを行った．柔軟マーカの各形状における，三次元形状で取得した物体の計測点数と，全ての点を用いて ICP アルゴリズムによる位置合わせを行った距離誤差の平均値を表 2 に示す．真値と比較した結果，プロジェクタカメラシステムを用いたグレイコードパターン投影手法による柔軟マーカへの三次元形状計測は平均 0.807mm の計測誤差であることを確認した．

表 2 計測した各形状の計測点数と距離誤差の平均値

	(a)	(b)	(c)
RANGE7 による計測点数 (個)	491027	478521	417081
プロジェクタカメラシステムによる計測点数 (個)	132695	115898	120441
距離誤差の平均値 (mm)	0.807	0.866	0.747

4. 矩形マーカを用いたテクスチャ投影

本章では、矩形マーカを用いた提案システムのテクスチャ投影手法について述べる。まず、本研究で提案する柔軟マーカの一つである矩形マーカの概要と認識手法について概説し、各処理を述べる。次に、物体の三次元形状計測によって取得した形状情報と、矩形マーカの認識結果に基づいた物体表面へのテクスチャ投影について述べる。最後に、矩形マーカの変形の制約に関して考察する。

4.1 矩形マーカの概要と認識手法

柔軟物体は、内部にアルミニウム製の金属メッシュを挟んだ白色シリコン素材で作成しており、物体形状を素手で変更し変形後の形状を保持可能な特徴を持つ。本研究では図 17 のような寸法で柔軟マーカを試作し、物体の表面に黒色輪郭の矩形を埋め込んでいる。本研究ではこの矩形マーカの変形を許容した認識手法を提案する。なお、カメラで撮影される画像内には、矩形マーカのみが一つ撮影されていると仮定して、ここでの矩形マーカの認識手法は以下の流れで処理する。

1. カメラ画像中からマーカを検出し、輪郭を抽出する (4.1.1)
2. 輪郭上の分割点を基準点とし、ばね質点系を用いてマーカ内部の制御点を決定する (4.1.2)

4.1.1 マーカの検出および輪郭の抽出

本項における処理結果を図 18 に示す。マーカの検出は、まず大津の手法を使いカメラ画像を二値化し、画像端と小領域を除いた各領域のラベリングを行う [29]。矩形マーカは輪郭領域の内側に領域があることから、階層的に小領域をもつ領域をマーカの輪郭として抽出する。輪郭の内側の領域に対し、一定距離毎に内角を調べることで領域内のコーナ検出を行い四つのコーナを検出する。検出したコーナ間の各輪郭に対し、輪郭上の各点の三次元情報から求める輪郭の三次元ユークリッド距離を等間隔に分割する。等分割し求めた輪郭上の点を、マーカ内部にテクスチャ投影するための制御点を決定するための基準点とする。

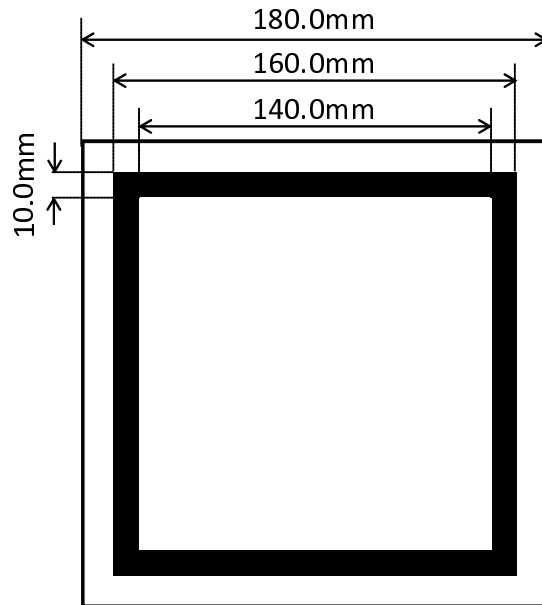


図 17 矩形マーカの寸法

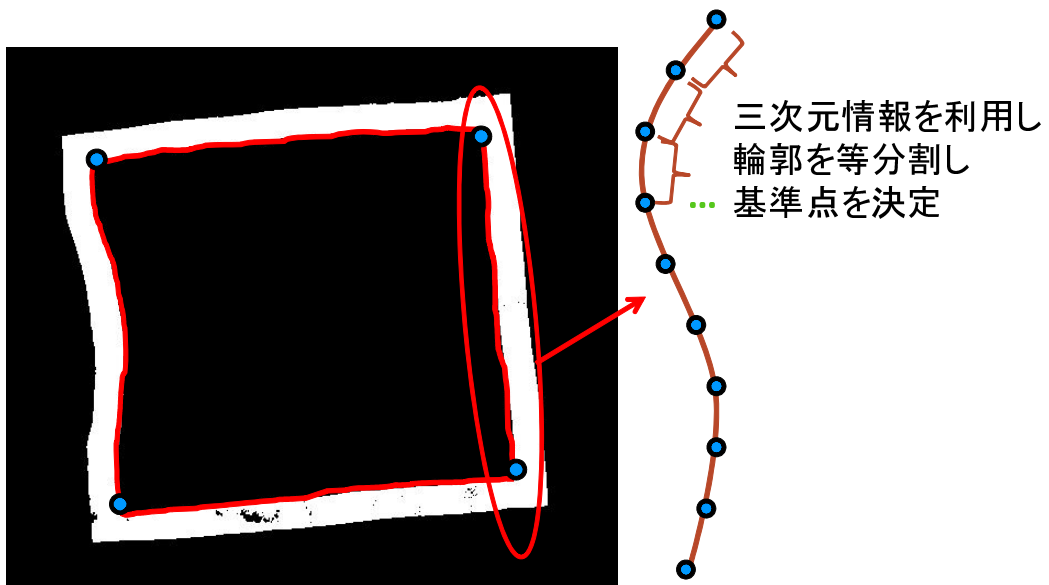


図 18 カメラ画像内からのマーカの検出および輪郭の抽出

4.1.2 ばね質点系を用いた制御点の内挿

提案手法では、矩形マーカの変形表現として、ばね質点系を用いることで、マーカ内部にテクスチャを投影するための制御点の位置を決定する。ばね質点系は、計算コストが少なく、構築が容易であるなどの理由から、コンピュータグラフィックスの分野で非剛体モデルのシミュレーションに広く利用されており、本研究では、マーカ内部を質点とばね格子でモデル化する。図 19 に示すように、輪郭上の点を基準点として固定し、求める内部の制御点を質点 i とすると、バネ格子で繋がる八近傍の質点から質点 i に働く力 \mathbf{F}_i を用いて、ある微小時刻 dt 後における質点 i の位置 \mathbf{r}_i と速度 \mathbf{v}_i は以下の式で記述できる。

$$\mathbf{v}_i(t + dt) = \mathbf{v}_i(t) + \frac{\mathbf{F}_i(t)}{m} dt \quad (m \text{ は質点の質量}) \quad (11)$$

$$\mathbf{r}_i(t + dt) = \mathbf{r}_i(t) + \mathbf{v}_i(t) dt \quad (12)$$

全ての質点でこれら位置 \mathbf{r}_i と速度 \mathbf{v}_i の変化が収束するまで反復することで制御点の位置を決定する。

4.2 形状情報と矩形マーカの認識結果に基づくテクスチャ投影

カメラ画像中で決定した輪郭上とマーカ内部の各制御点の形状情報から、各点の三次元位置を求めることで、プロジェクタ画像中での各点の対応する座標値が求まる。したがって、制御点を利用してテクスチャを図 20 のように変形した三角パッチへと分割し投影することで、矩形マーカ内部の変形にあわせて物体表面へプロジェクタからテクスチャ投影を行う。変形した矩形マーカを用いたテクスチャ投影結果を図 21 に示す。図 21 では 100 個の制御点を用いてテクスチャ投影を行っている。これより、平面形状でない場合においてもマーカを認識し、マーカにあわせた物体表面へのテクスチャ投影を行っていることが確認できる。

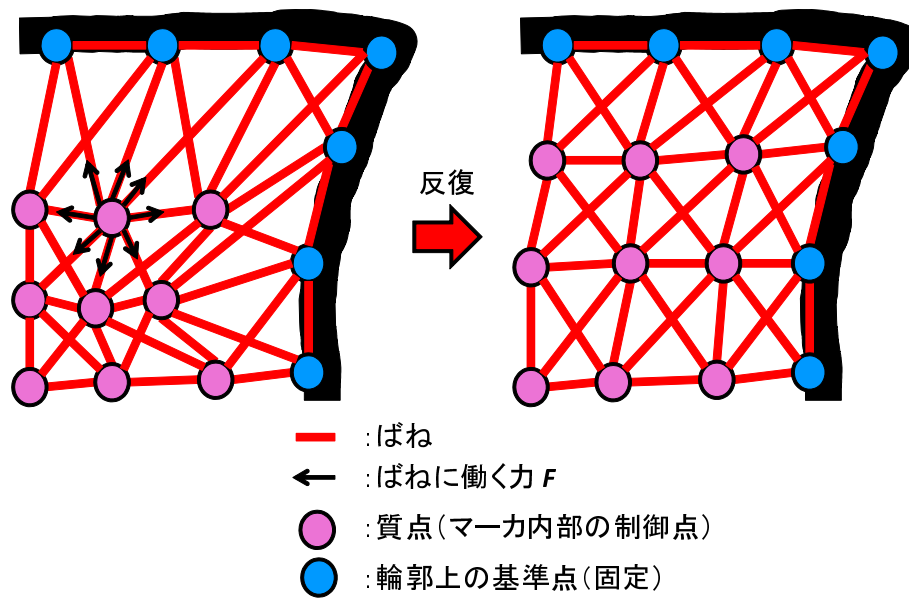


図 19 マーカ内部のばね質点系モデル

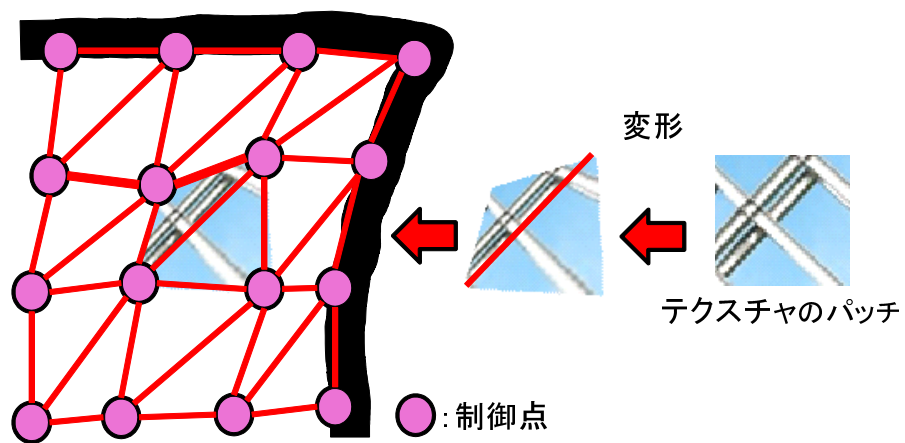


図 20 投影するテクスチャの変形

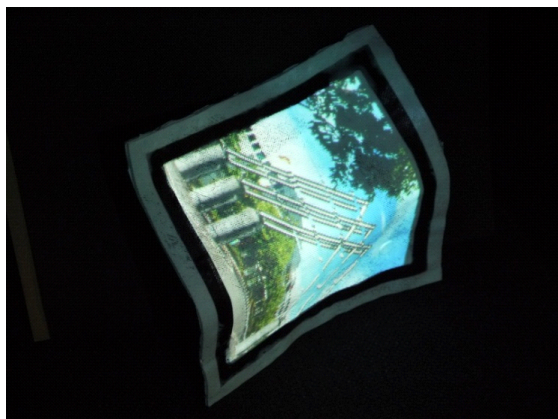
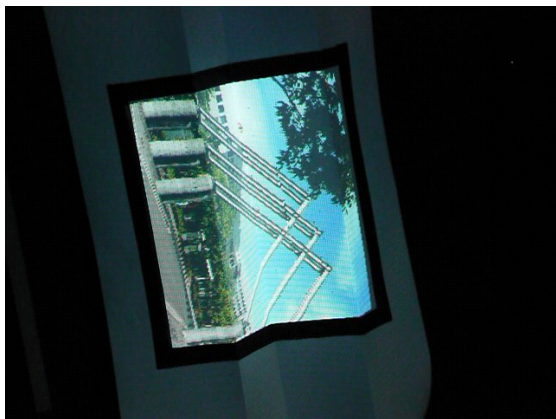
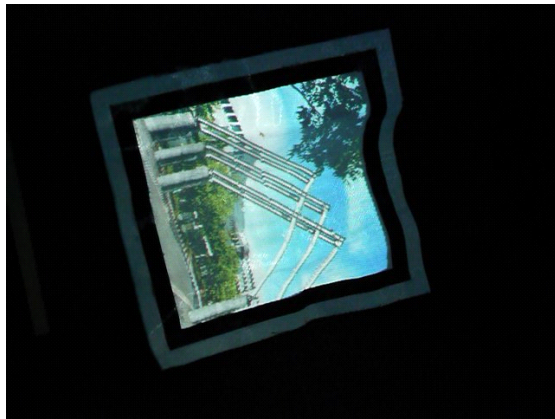


図 21 変形した矩形マーカにおけるテクスチャ投影

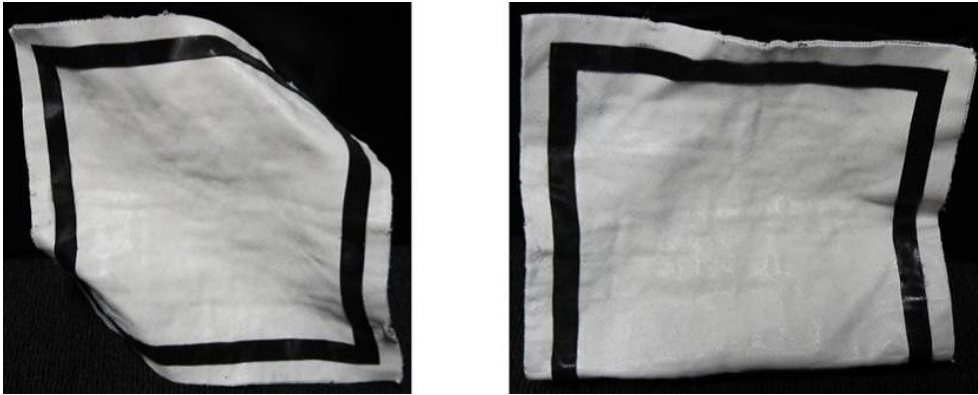


図 22 カメラでの認識が困難な柔軟マーカの形状変化

4.3 矩形マーカの変形の制約に関する考察

本章では、変形を許容する矩形マーカを用いた柔軟物体へのテクスチャ投影を提案し、物体の三次元形状情報を用いたマーカ認識手法により、物体表面のマーカが平面でない場合も、提案システムにおいてマーカにあわせたテクスチャ投影を実現した。しかし、矩形マーカを用いたテクスチャ投影では、矩形の認識手法により変形に関する制約がある。まず、カメラ画像中に矩形部分が認識される必要があるため、矩形上の大幅な形状変更を行うことができない。そのため、図 22 に示すようなマーカの端を折り曲げるといった小領域での形状変化に対応できない問題がある。矩形をより小さな寸法にしてマーカを作成すればこの問題に対応可能であるが、柔軟マーカを用いて任意形状の物体を作成する場合、多数の矩形マーカを同時に利用する必要があり、マーカ認識の計算量が負担となる。また、複数の矩形マーカを個別に認識するためには、各マーカ内部に対し一意に識別可能な独自のパターンを埋め込む必要があり、小型化したマーカパターンの認識には、分解能の高い高性能なカメラが必要となる。

このような問題から本研究では、矩形マーカとは別に、部分的な領域のみでマーカとして認識可能で、かつ全体で一つのマーカとして構成されたもう一つのマーカパターンを設計する。マーカパターンを用いたマーカ認識結果と物体の形状情報を用いたテクスチャ投影手法を次章で述べる。

5. 部分読み取り可能なマーカを用いたテクスチャ投影

本章では、部分的な領域でマーカとして認識可能なマーカパターンを用いた提案システムのテクスチャ投影手法について述べる。まず、本研究で提案する部分読み取り可能なマーカの概要と認識手法について概説し、各処理を述べる。次に物体の三次元形状計測によって取得した形状情報と、部分読み取り可能なマーカの認識結果に基づいた物体表面へのテクスチャ投影について述べる。

5.1 マーカパターンの設計と認識手法

本研究では、図 23 に示すような、一意に識別可能な部分マーカが相互に重なり合った集合から構成されるマーカパターンを用いる [30]。マーカパターンは白黒 2 値の要素で構成された格子模様の領域をもち、 $n \times n$ (n は 3, 4, 5 いずれかの値) を最小単位として、部分領域毎に個々のマーカとして一意に検出と位置合わせが行えるという特徴がある。しかし、この手法ではマーカ領域を平面と仮定して認識しており、形状変化の起こる柔軟物体表面で認識することは困難である。そこで、本研究では、マーカパターンが非平面上に存在する場合にも認識可能な手法を提案する。本研究では、利用するマーカは 4×4 を最小の読み取り可能な部分領域とし、文献 [30] とマーカパターンが共通したものを利用する。マーカパターンは、柔軟物体表面に配置することを仮定するため、白黒の要素を分離して配置する必要があり、図 24 に示すように、各格子点が白黒要素に対応し規則的に離れたパターンを設計する。本研究で試作した 24×16 の格子を持つ柔軟マーカを図 25 に示す。マーカは、アルミニウム製の金属メッシュの表面にアクリルフォーム基材の白色粘着テープを貼り、その表面上に格子を仮定し、白の要素である格子点に再帰性反射素材を用いて作られた格子点を設置する。最後に、テープの表面反射と粘着力を軽減するために白色砥の粉を表面になじませる。この柔軟マーカは、4 章の矩形マーカと同様に物体形状を素手で変更可能で、変形後の形状を保持する。部分読み取り可能なマーカパターンの認識は、赤外カメラの画像から検出した再帰性反射素材による格子点と間に存在する黒の要素の格子点を用いて、参照パターンと対応付けを行うことで認識する。しかし、物体形状によってはカ

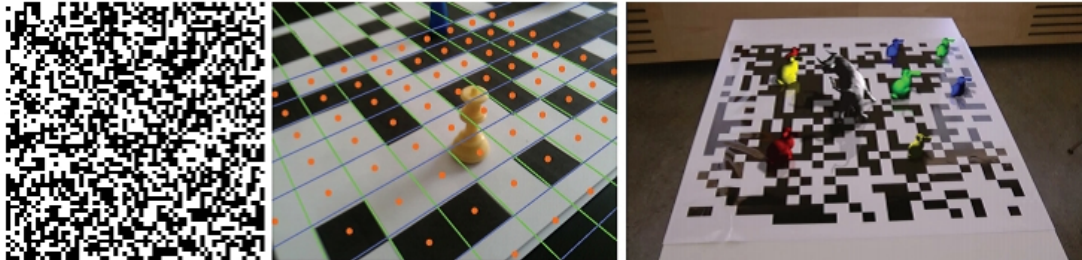


図 23 一意に識別可能な部分マーカの集合によるマーカパターン [30]

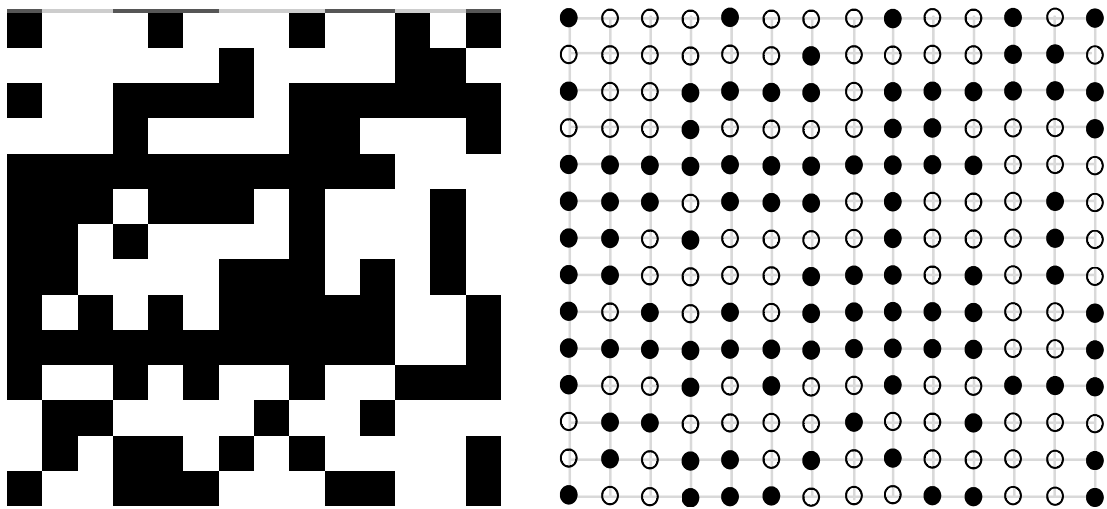


図 24 左：文献 [30] のマーカパターン，右：提案するマーカパターン

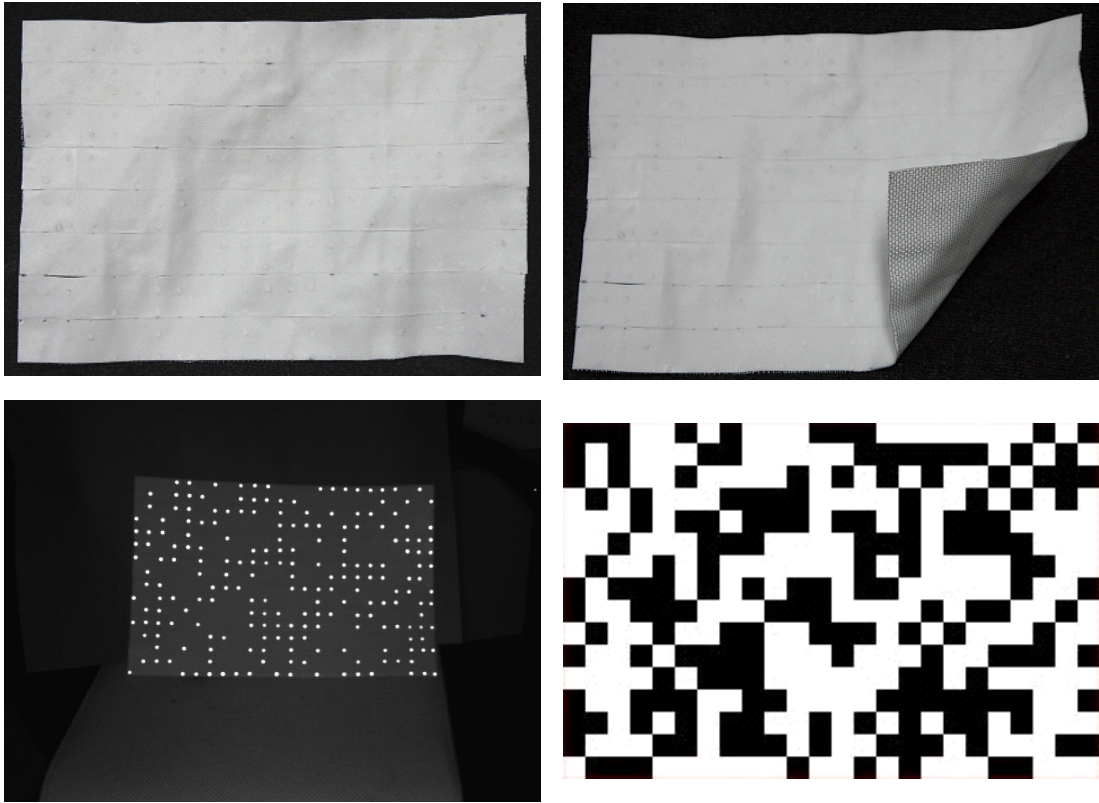


図 25 上段：試作した柔軟マーカ，下段左：赤外カメラで撮影した場合，下段右：文献 [30] のマーカパターン

メラ画像中から検出できる格子点の位置関係が参照パターンと異なりマーカ認識に失敗する可能性がある。そこで提案手法では、カメラ画像中から検出した点を近傍の点群で領域分割し、領域毎に格子を作成し、各格子を統合することで、全体のマーカパターンを検出し参照パターンとの対応付けを行う。提案手法の処理の流れを図 26 に示す。

1. 赤外カメラ画像から検出した各点を部分的な点群に基づき領域分割し、領域内の点群から領域に存在する格子がもつ 2 つの角度を算出する。求めた角度に合わせて点同士を結んだ線分から各領域内で格子を作成し、全ての領域の格子を統合することで全体のマーカパターンを検出する (処理 1 から処理 6)
2. 検出したパターンの最小の部分領域と、参照パターンの部分領域との対応付けを行いマーカパターンの認識を行う (処理 7 から処理 9)

事前処理として、利用するマーカパターンに対し 4×4 の各部分領域に以下の計算式を用いて、一意な整数値 v_i を算出し、参照するマーカパターン ID: $i (i = 0, 1, \dots)$ を割り当てた集合 \mathbf{V} 保持する。

$$v_i = \sum_{n=0}^{15} 2^n d \quad (\text{格子点}が\text{白の場合 } d = 1, \text{ 黒の場合 } d = 0) \quad (13)$$

5.1.1 点検出および領域分割によるマーカパターンの検出

提案手法の認識処理は、カメラ画像中から検出した各点が、参照マーカパターン内のどの点に対応するかを決定するものである。まず、赤外カメラで撮影した画像に対して各近傍領域毎に適応的な閾値処理を施して二値化を行い、画像中から白の要素の格子点を検出する (処理 1)。次に、検出した点を基に、点群を階層的に範囲の異なる領域で分割する (処理 2)。提案手法では、各点の重複を許して大小異なる 2 種類の領域分割を行った。小さな領域のみの分割では、範囲内の検出した点が少ない場合にマーカパターンの検出が困難であり、大きな領域のみの分割では、カメラ画像中で近傍とみなした点群も、実際の物体形状によっては離れた領域を含めてしまい、誤ったマーカパターンを検出する可能性がある。複

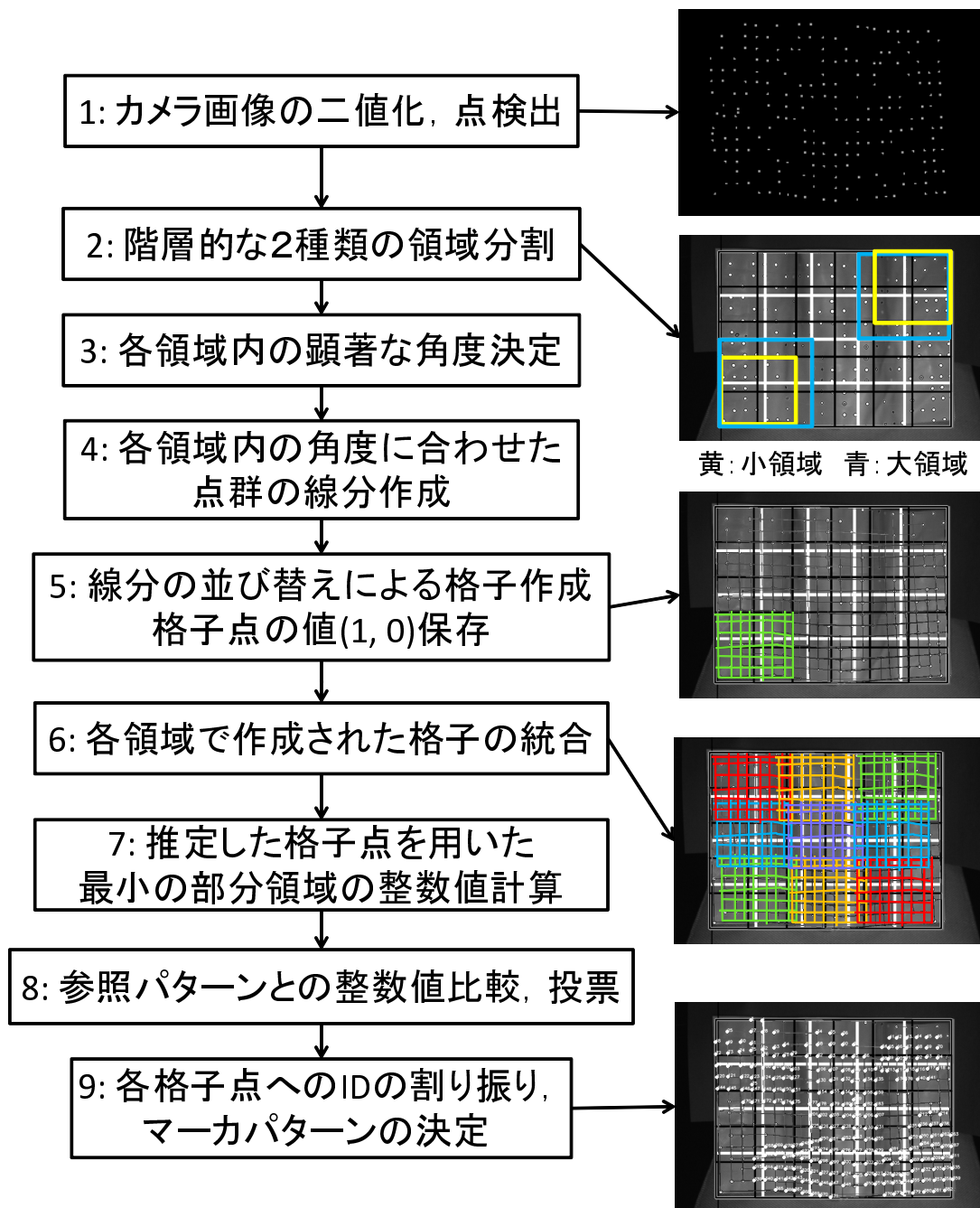


図 26 マーカパターンの検出処理

数の異なる範囲の領域分割を行うことで双方の欠点を補い頑健な格子の作成を可能とする。この時、各領域内に存在する全ての点を利用し、2点間を繋いだ直線とカメラ画像の x 軸とがなす角度 ($0\sim 180$ 度) を逆正接関数より算出し、角度毎に投票を行うことで、最も投票数の多い上位二つの角度を領域内における格子の角度とみなす (処理 3)。次に、領域内の各点に対し、求めた二つの角度に適するような近傍の点間を線分で連結し、直線フィッティングを行うことで各領域内に格子を作成する (処理 4)。この作成した各領域内の格子直線の交点から格子点の位置を算出し、格子点座標近傍に対してカメラ画像中で白の要素の格子点を検出している場合、その格子点に 1 を、なければ 0 の値を与えて保持する (処理 5)。最後に、全ての領域について格子を作成し、重複する格子点を除いて他の格子点と統合することで、マーカパターンを検出する (処理 6)。

5.1.2 部分領域を利用したマーカパターンの対応付け

検出したマーカパターンと参照パターンとの対応付けを行う。まず、統合前の各領域で保持した格子点の値を用いて、 4×4 の最小の部分領域の値を上下左右の回転も含め 4 方向に対して算出し、各値に対して参照するマーカパターンの整数値 v_i の集合 \mathbf{V} との比較を行う (処理 7)。集合 \mathbf{V} 内の整数値 v_i と領域内の値が一致した場合、一致した格子点に対しマーカパターン ID : i に投票を行い、全ての領域における部分領域の値に対し、集合 \mathbf{V} との比較、投票を行う (処理 8)。最後に、最も投票数の多いマーカパターン ID を格子点の ID として割り当てることで、マーカパターンの認識を行う (処理 9)。

5.2 形状情報とマーカの認識結果に基づくテクスチャ投影

部分読み取り可能なマーカを用いた物体へのテクスチャ投影は、矩形マーカを用いたテクスチャ投影同様、決定した物体表面における格子点の形状情報から、各点の三次元位置を求めることで、プロジェクタ画像中での各点の対応する座標値が求まる。投影するテクスチャは、格子点を利用して矩形ポリゴンへと分割し投影することで、マーカパターンの変形にあわせて、物体表面へプロジェクタか

らテクスチャ投影を行う。また、部分読み取り可能なマーカパターンは、物体形状によってマーカパターンの検出が困難となり、検出した格子点の参照パターンとの対応付けが失敗した領域が存在しても、矩形マーカと異なり部分的に他の領域では認識を行っている。そこで、提案手法では、参照パターンとの対応付けが失敗した格子点を、認識している格子点を用いて補間しマーカパターン ID を割り当てることで、投影可能な領域を広げる。まず、参照パターンとの対応付けの失敗している白の要素の格子点の位置をカメラ画像中で検出していることから、各格子点近傍の格子直線において対応付けが成功している格子点を探索し、成功している格子点の格子直線の値からマーカパターン ID を算出し失敗している格子点に ID を割り当てる。次に、対応付けの失敗している黒の要素の格子点の座標位置を、格子点の上下、もしくは左右における対応付けの成功している格子点を用いて、格子点間における、カメラ画像中の二次元距離を線形的に等分割した値を失敗している格子点に割り当てる。

変形した部分読み取り可能なマーカパターンにおけるカメラ画像中の格子点の認識結果と、物体平面へのテクスチャ投影結果を図 27 に示す。図 27 では、下段に示す格子点の認識結果に基づいて、参照パターンとの対応付けが失敗した格子点に対して補間を行ったテクスチャ投影が行われている。これより、平面形状でない場合においてもマーカパターンを認識し、認識していない格子点上も含めてマーカにあわせた物体表面へのテクスチャ投影を行っていることが確認できる。しかし、提案手法では参照パターンとの対応付けの失敗した格子点が対応付けの成功した格子点間に存在しない場合、認識失敗した領域が補間されないため、マーカの端において対応付けの失敗した黒の要素の格子点に対し補間を行うことができない制約がある。

また、マーカパターンの部分領域はそれぞれ上下左右の回転も含めて一意に決定できる部分マーカであるため、図 28 に示すように任意のテクスチャを投影後、物体の形状や位置・姿勢を変更した場合でも、連続して三次元形状の再計測と物体表面のマーカ認識を行うことで、形状の変更前と位置関係の対応付いたテクスチャを変更後の物体表面へ投影できることを確認した。認識に失敗するとテクスチャ投影の破綻する矩形マーカの場合と異なり、部分読み取り可能なマーカの場合

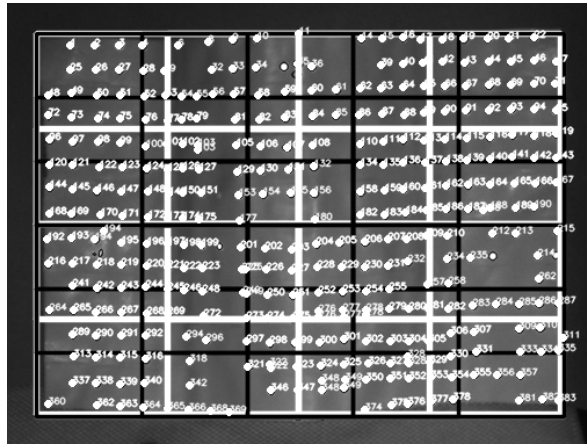
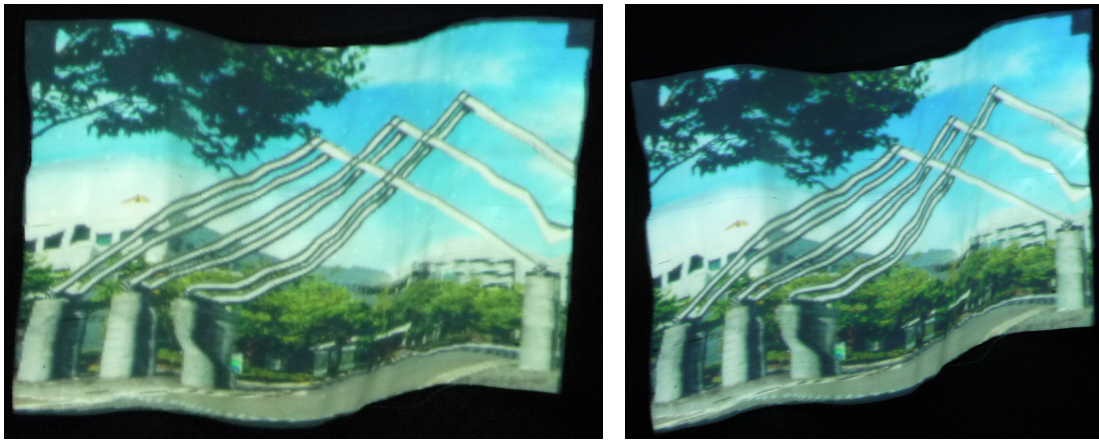


図 27 変形したマーカパターンにおけるテクスチャ投影と格子点の認識結果



図 28 変形前後の位置関係に対応したテクスチャ投影

合，少なくとも，部分的に物体表面の認識した領域へテクスチャ投影を行うことが図 28 から確認できる．これより，物体形状の変更が考えられる初期のデザインプロセスにおいて，本システムの利用はデザイン支援に有用であると推定できる．

6. マーカを用いた投影精度の定量評価

本章では、提案システムに対し、作成したマーカを用いて物体表面へのテクスチャ投影精度について定量評価を行った。以下ではまず、実験の概要について述べる、次にマーカを用いたシステムの投影精度結果について述べる。

6.1 実験概要

提案システムでは、前章までに述べた物体の三次元形状計測と、物体表面のマーカ認識によって物体表面の形状にあうようにテクスチャ投影を行う。本章における定量評価の目的は、提案手法による形状変更可能な物体表面へのテクスチャ投影精度を検証することで、各柔軟マーカを用いたシステムをデザイン支援へ応用すると仮定した場合、どの程度の精度で物体表面へ投影可能であるかを定量的な評価によって明らかにすることである。

実験環境を図 29 に示す。柔軟マーカは、カメラから 1m 離れた位置に、光軸に対し垂直になるよう設置する。実験では形状の変更を加えた非平面のマーカに対し、提案システムを用いて物体表面へ複数の点を投影し、テクスチャ投影に利用するマーカの各基準点の位置を真値とした場合の距離誤差の平均を計算する。ここで用いる基準点とは、矩形マーカの場合、図 30 のように平面時におけるマーカ内部の制御点を予め設定しておき、投影した点との距離誤差を比較する。部分読み取り可能なマーカパターンの場合、赤外カメラ画像から検出のできない黒の要素の格子点の内、参照パターンとの対応付けに成功した格子点の位置と、図 31 のように投影した点との距離誤差を比較する。定量評価に利用した機器構成を表 3 に示す。本研究では、矩形マーカは再帰性反射素材を用いて作成しておらず、マーカ認識も可視カメラで行っているため、定量評価時には Grasshopper 2 を用いている。部分読み取り可能なマーカパターンは再帰性反射素材で作成しているため、定量評価時には赤外・可視光の認識を切り替え可能な OptiTrack Flex13 を用いている。

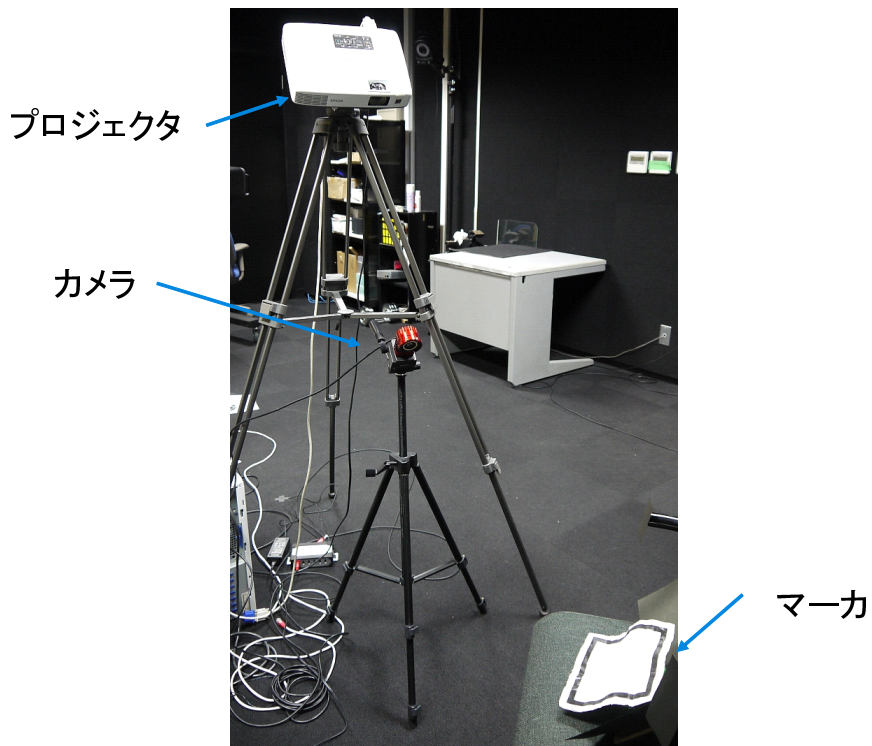


図 29 テクスチャ投影精度の実験環境

表 3 テクスチャ投影精度の定量評価における機器構成

OS	Microsoft Windows7 Enterprise 64bit
CPU	Intel Core2 Duo E8500 3.16GHz
RAM	3072MB
Camera	Point Gray Research Grasshopper 2 NaturalPoint OptiTrack Flex13 (各カメラとも 1024*768, 30 FPS)
Projector	EPSON EB-1720 (1024*768)

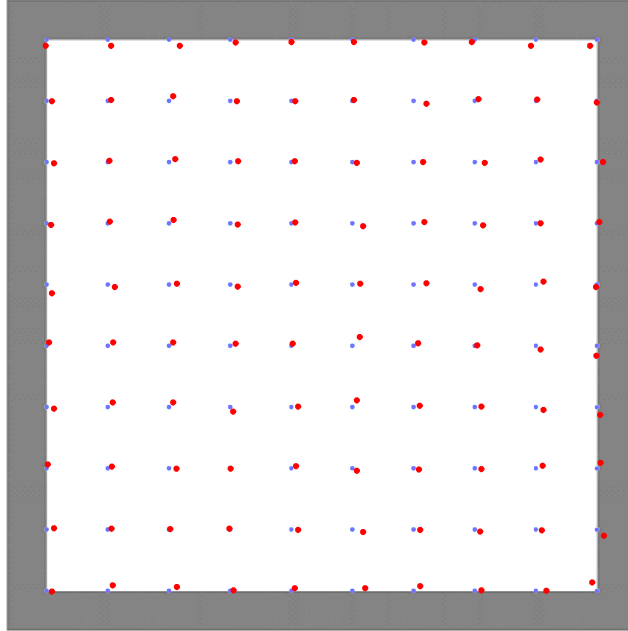


図 30 矩形マーカの定量評価における基準点と投影点（青：基準点（真値），赤：プロジェクタからの投影点）

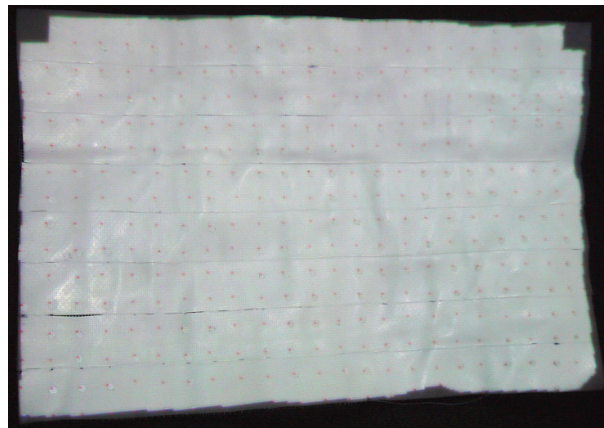


図 31 部分読み取り可能なマーカパターンの定量評価における投影点（赤：プロジェクタからの投影点）

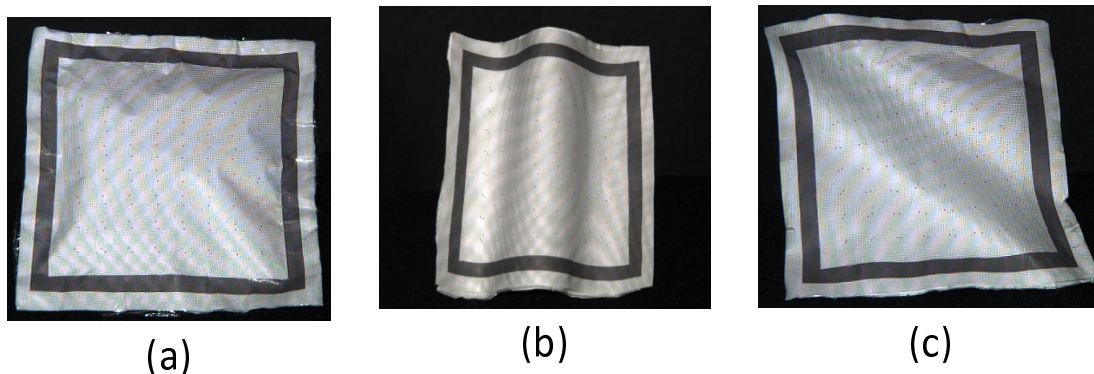


図 32 テクスチャ投影精度の定量評価に用いた非平面の矩形マーカ

6.2 マーカを用いたシステムの投影精度結果

まず、矩形マーカを用いた提案システムの投影精度結果について述べる。投影精度の定量評価には、図 32 に示すように柔軟マーカの形状を変更し、3 種類の形状で評価する。マーカにある 100 個の制御点に対し、プロジェクタから点を投影し、真値との距離誤差を一点毎に定規で計測することで比較を行う。評価結果を表 4 に示す。変更した 3 種類の形状に対する評価結果から、矩形マーカを用いた提案システムでは、物体表面に配置した矩形マーカへの投影精度は平均 3.249mm である。

次に、部分読み取り可能なマーカパターンを用いた提案システムの投影精度結果について述べる。投影精度の定量評価には図 33 に示すように柔軟マーカの形状を変更し、3 種類の形状で評価する。なお、参照するマーカパターンは全て同一のものである。マーカパターンでは、マーカ内部で参照パターンとの対応付け

表 4 投影点と制御点との距離誤差の平均値 (総数 : 各 100 個)

図 32 のマーカ	(a)	(b)	(c)
距離誤差の平均値 (mm)	3.021	3.330	3.396

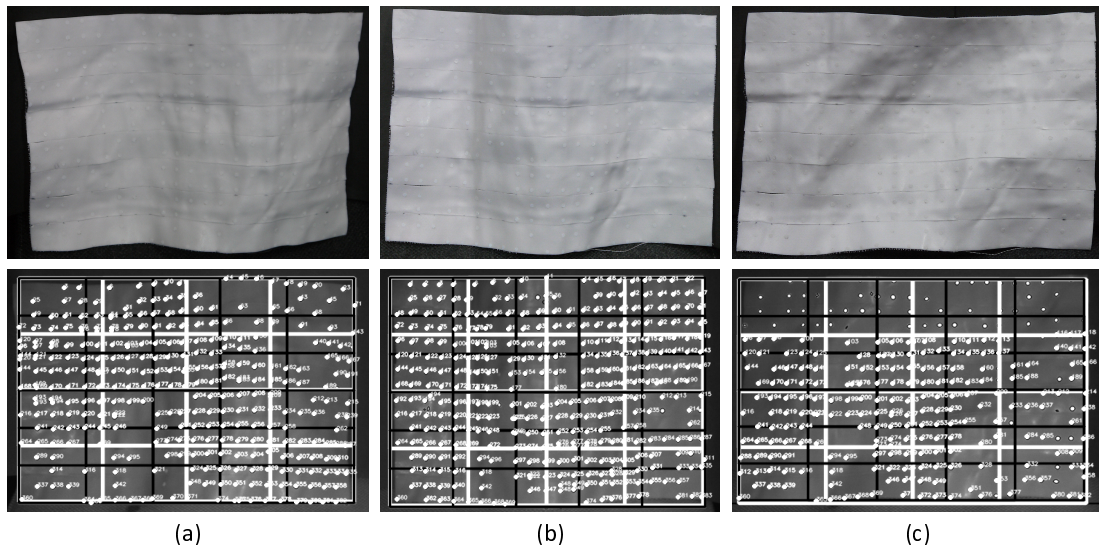


図 33 テクスチャ投影精度の定量評価に用いた非平面のマーカパターンと格子点の認識結果

のとれた格子点のうち、パターンが黒の要素の格子点 20 個の位置と、投影した点との距離誤差を、矩形マーカを用いた場合と同様に一点毎に定規で計測することで比較する。評価結果を表 5 に示す。3 種類の異なる形状を用いた評価結果から、部分読み取り可能なマーカパターンを用いた提案システムでは、物体表面に配置したマーカパターンへの投影精度は平均 1.6852mm である。

各マーカの投影精度の定量評価結果を比較すると、部分読み取り可能なマーカを用いた提案システムの方が矩形マーカを用いた提案システムよりも高い精度でテクスチャ投影を行えることが確認できた。矩形マーカの認識手法は輪郭の制御

表 5 投影点と格子点との距離誤差の平均値 (総数：各 20 個)

図 33 のマーカ	(a)	(b)	(c)
距離誤差の平均値 (mm)	1.81918	1.62222	1.614187

点を定めるために物体の三次元形状情報を利用しているが、マーカ内部の制御点決定はカメラ画像中の二次元情報のみで処理しているため、より高精度で投影を行うには物体表面に配置したマーカの形状情報を利用した内部の制御点決定手法を用いることが考えられる。一方、部分読み取り可能なマーカパターンでは、パターンの検出に矩形マーカ同様カメラ画像中の二次元情報のみしか利用していないが、検出したパターンを実際の格子点を利用して対応付けを行うほか、各格子間の三次元的な距離が狭いためテクスチャ投影のための位置合わせを矩形マーカを用いる場合よりも高精度で行うことができる。よって、実際に提案システムを利用する場合は、部分読み取り可能なマーカパターンがより物体の複雑な形状へのテクスチャ投影に適していることが確認できる。

7. まとめ

本研究では、投影型拡張現実感をデザイン支援に応用することを想定し、柔軟物体に対する三次元形状計測と、物体表面に配置したマーカ認識によって、物体の形状変更に対応した適切なテクスチャ投影を行える投影型拡張現実感システムを構築した。提案手法では、プロジェクタカメラシステムを使い、グレイコードパターン投影手法による物体の三次元形状計測処理と、物体表面のマーカ認識処理で取得した情報を利用することで、物体形状に変更を加えても、適切にテクスチャの投影を行う手法を提案した。

物体表面に配置するマーカでは、一般の矩形マーカの変形を許容する手法と、部分読み取り可能なマーカパターンによる手法を提案した。マーカパターンを用いた手法では、従来の投影型拡張現実感では困難であった、物体形状に変更が加わった場合においても、変形前後における幾何学的な整合性を保った物体表面への適切なテクスチャ投影が可能であることを確認した。投影精度の定量評価では、本研究で提案した2種類のマーカを利用したシステムのテクスチャ投影精度を定量評価することで、実際の利用において、物体表面のマーカへのテクスチャ投影が提案システムでどの程度の精度で投影可能かを検証した。

今後の展望として、マーカ認識手法の拡張による物体表面へのテクスチャ投影の改善や、複数台のプロジェクタカメラシステムの利用による、物体の全周形状計測や物体への全周投影を行うことが望まれる。また、実際にデザイン支援のためのアプリケーションとしての応用例を示すことで、提案システムを用いた、形状変更しながらのデザインシミュレーションを第三者に利用してもらい、その有用性を確認するとともに、評価・改良を行う必要があると考えられる。これら課題を解決することによって、投影型拡張現実感を用いてデザイナーがより効率よく製品のデザイン検討を行うことが可能になると考えられる。

謝辞

本研究の全過程を通じて、終始、貴重な御指導、御教授を賜った主指導教官であるインタラクティブメディア設計学研究室の加藤博一教授に心から深く感謝の意を表す。

本論文の審査過程にあたり、本研究について丁寧な御検討、御教示を賜った視覚情報メディア研究室の横矢直和教授に厚く御礼申し上げます。

本研究に関して、ゼミや発表練習に於いて数多くの御助言を賜った宮崎純准教授に深く感謝の意を表す。

本研究の遂行にあたり、懇切丁寧なる御指導、御鞭撻を賜った武富貴史助教、山本豪志朗助教に厚く感謝申し上げます。

そして、本研究を通じて、有益な御助言を賜った大阪大学大学院基礎工学研究科の池田聖助教、同じく、大阪大学大学院基礎工学研究科の浦西友樹助教に厚く御礼申し上げます。

本研究の遂行にあたり常日頃より事務処理など様々な面において御支援を賜った上野真紀子秘書に心から感謝申し上げます。

本研究の全過程を通じて、直接丁寧なる御指導、御助言を賜った藤本雄一郎氏に心から感謝の意を申し上げます。特に、本研究の遂行および本論文の執筆にあたり終始多岐にわたって多大なる御支援、細やかな御指導を頂いた。ここに謹んで深謝申し上げます。

また、研究室配属当初から苦楽を共にした有田千紘氏、岡田和也氏、小澤拓氏、片山博士氏、久保和樹氏、上月一史氏、寺脇温晃氏、前田淳兵氏には、昼夜を問わず研究の多岐にわたって様々な御助言を賜ったことを心より厚く御礼申し上げます。

日頃から生活の多岐にわたり御世話になったインタラクティブメディア設計学研究室の諸氏に心から感謝申し上げます。

最後に、博士前期課程に進学し本研究の機会を与えてくださり、数多くの支援とご理解を賜った両親に心から深く感謝の意を表す。

参考文献

- [1] Monica Bordegoni and Caterina Rizzi. *Innovation in Product Design: From CAD to Virtual Prototyping*. Springer, aug 2011.
- [2] Jouke C. Verlinden. Augmented Prototyping: Augmented Reality to Support the Design Process. In *AR[t] Augmented Reality, Art and Technology*, No. 2, pp. 62–71. AR Lab, 2012.
- [3] Oliver Bimber and Ramesh Raskar. *Spatial Augmented Reality: Merging Real and Virtual Worlds*. A. K. Peters, Ltd., aug 2005.
- [4] 岩井大輔. 8 応用 5 : プロジェクション型 AR(特集 拡張現実感 (AR)). 情報処理, Vol. 51, No. 4, pp. 408–413, apr 2010.
- [5] Ramesh Raskar, Greg Welch, Kok-Lim Low, and Deepak Bandyopadhyay. Shader Lamps: Animating Real Objects with Image-Based Illumination. In *Proceedings of the 12th Eurographics Workshop on Rendering Techniques*, pp. 89–102, 2001.
- [6] Ramesh Raskar, Remo Ziegler, and Thomas Willwacher. Cartoon Dioramas in Motion. In *Proceedings of the 2nd International Symposium on Non-Photorealistic Animation and Rendering*, pp. 284–300, 2002.
- [7] Kok-Lim Low, Greg Welch, Anselmo Lastra, and Henry Fuchs. Life-Sized Projector-Based Dioramas. In *Proceedings of the ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology*, pp. 93–101, 2001.
- [8] Deepak Bandyopadhyay, Ramesh Raskar, and Henry Fuchs. Dynamic Shader Lamps: Painting on Movable Objects. In *Proceedings of the IEEE and ACM International Symposium on Augmented Reality*, pp. 207–216, 2001.

- [9] 日浦慎作, 向川康博. プロジェクタ・カメラシステムの概観と研究動向. 情報処理学会研究報告. CVIM コンピュータビジョンとイメージメディア, Vol. 2006, No. 115, pp. 49–60, nov 2006.
- [10] 吉田壮伸, 堀井千夏, 佐藤宏介. 複合現実博物館のための反射色計測に基づくプロジェクタ投影テクスチャ. 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 9, No. 1, pp. 97–104, mar 2004.
- [11] Oliver Bimber, Andreas Emmerling, and Thomas Klemmer. Embedded Entertainment with Smart Projectors. *Computer*, Vol. 38, No. 1, pp. 48–55, jan 2005.
- [12] 永井悠文, 向川康博, 大田友一. パターン埋め込みによる動的シーンへの適応的投影. 電子情報通信学会技術研究報告. PRMU パターン認識・メディア理解, Vol. 104, No. 572, pp. 31–36, jan 2005.
- [13] Kohei Okumura, Hiromasa Oku, and Masatoshi Ishikawa. Lumipen: Projection-Based Mixed Reality for Dynamic Objects. In *Proceedings of the 2012 IEEE International Conference on Multimedia and Expo*, pp. 699–704, 2012.
- [14] 楠本拓矢, 内田貴之, 佐藤宏介, 井口征士. A-16-43 テクスチャプロジェクション方式複合現実感ディスプレイにおける影付け表現. 電子情報通信学会総合大会講演論文集, Vol. 2001, p. 366, mar 2001.
- [15] 楠本拓矢, 佐藤宏介, 井口征士. A-16-50 テクスチャプロジェクション方式MRによる質感デザインシステム. 電子情報通信学会総合大会講演論文集, Vol. 2002, p. 370, mar 2002.
- [16] 永井悠文, 向川康博, 大田友一. LI-007 動的シーンに対する仮想光学パターンの投影. 第3回情報科学技術フォーラム (FIT2004), 情報科学技術レターズ, Vol. 3, pp. 179–182, aug 2004.

- [17] Jeremy Bluteau, Itaru Kitahara, Yoshinari Kameda, Haruo Noma, Kiyoshi Kogure, and Yuichi Ohta. Visual Support for Medical Communication by Using Projector-Based Augmented Reality and Thermal Markers. In *Proceedings of the 2005 International Conference on Augmented Tele-Existence*, pp. 98–105, 2005.
- [18] Shilpi Gupta and Christopher Jaynes. Active Pursuit Tracking in a Projector-Camera System with Application to Augmented Reality. In *Proceedings of the 2005 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 111–118, 2005.
- [19] Jouke C. Verlinden, A. de Smit, Aernout W. J. Peeters, and Martijn H. van Gelderen. Development of a Flexible Augmented Prototyping System. In *WSCG*, pp. 496–503, 2003.
- [20] Jouke C. Verlinden, Adrie Kooijman, Edwin Edelenbos, and Celeste Go. Investigation on the Use of Illuminated Clay in Automotive Styling. In *Proceedings of the 6th International Conference on Computer-Aided Industrial Design & Conceptual Design*, pp. 514–519, 2005.
- [21] Tek-Jin Nam. Sketch-Based Rapid Prototyping Platform for Hardware-Software Integrated Interactive Products. In *CHI '05 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, pp. 1689–1692, 2005.
- [22] Eric Akaoka, Tim Ginn, and Roel Vertegaal. DisplayObjects: Prototyping Functional Physical Interfaces on 3D Styrofoam, Paper or Cardboard Models. In *Proceedings of the Fourth International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction*, pp. 49–56, 2010.
- [23] 久田理, 山本景子, 金谷一朗, 佐藤宏介. HYPERREAL 三次元形状デザイン支援システム. 情報処理学会論文誌, Vol. 48, No. 12, pp. 3873–3881, dec 2007.
- [24] Shane R. Porter, Michael R. Marner, Ross T. Smith, Joanne E. Zucco, Bruce H. Thomas, and Peter Schumacher. Spatial Augmented Reality for

- Interactive Rapid Prototyping. *International Conference on Augmented Reality and Telexistence*, pp. 110–117, dec 2010.
- [25] Ewald T. A. Maas, Michael R. Marner, Ross T. Smith, and Bruce H. Thomas. Quimo: A Deformable Material to Support Freeform Modeling in Spatial Augmented Reality Environments. In *Proceedings of the 2011 IEEE Symposium on 3D User Interfaces*, pp. 111–112, 2011.
- [26] Ewald T. A. Maas, Michael R. Marner, Ross T. Smith, and Bruce H. Thomas. Supporting Freeform Modelling in Spatial Augmented Reality Environments with a New Deformable Material. In *Proceedings of Australasian User Interface Conference*, Vol. 126, pp. 77–86, 2012.
- [27] 井口征士, 佐藤宏介. 三次元画像計測. 昭晃堂, nov 1990.
- [28] Paul J. Besl and Neil D. McKay. A Method for Registration of 3-D Shapes. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 14, No. 2, pp. 239–256, feb 1992.
- [29] Nobuyuki Otsu. A Threshold Selection Method from Gray Level Histograms. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, Vol. 9, No. 1, pp. 62–66, jan 1979.
- [30] Istvan Szentandrasi, Michal Zacharias, Jiri Havel, Adam Herout, Marketa Dubska, and Rudolf Kajan. Uniform Marker Fields: Camera Localization by Orientable De Bruijn Tori. In *Proceedings of the 2012 11th IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality*, p. 2, 2012.