

修士論文

金属材料の形状計測のための 輝度平滑化と相互反射除去

山田 憲

奈良先端科学技術大学院大学

先端科学技術研究科

情報理工学プログラム

主指導教員: 向川 康博 教授

光メディアインタフェース研究室（情報科学領域）

令和2年3月12日提出

本論文は奈良先端科学技術大学院大学先端科学技術研究科に
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 憲

審査委員：

向川 康博 教授	(主指導教員)
加藤 博一 教授	(副指導教員)
舩富 卓哉 准教授	(副指導教員)
久保 尋之 助教	(副指導教員)
田中 賢一郎 助教	(副指導教員)

金属材料の形状計測のための 輝度平滑化と相互反射除去*

山田 憲

内容梗概

アクティブ3次元計測手法は、プロジェクタを用いて構造化光を物体に照射し、その様子をカメラで撮影して視差情報を推定することで3次元形状を復元する手法である。これらは材質やテクスチャ情報の影響を受けにくいという特性から主に産業界において重宝される。しかし、計測を困難にさせる素材も多く存在しており、特に金属においては産業界で幅広く用いられる材質でありながら計測が困難である。その原因としては拡散反射成分が少ないことに加え、凹面では強力な相互反射を及ぼすという特徴により誤計測が顕著になる点が挙げられる。Episcan [1] を用いて相互反射を除去し、計測結果を向上させることも可能だがその効果は限定的で特にエピポーラ平面上に相互反射が発生するケースに対応できない。本稿では、そのような特徴を持つ金属の問題点を輝度の偏りと相互反射の2つに絞り、Episcan と併用して金属の計測結果を向上させられる技術の提案を目的に研究を行った。前者の問題点に対してはレンチキュラーレンズ及び再帰投影によるアプローチで検証した。後者に対しては輝度のクラス分け及び時間的周波数を用いたパターン画像を使ったアプローチから検証した。形状依存のない安定したアクティブ三次元計測を実現させる方法に対する研究結果を述べた。その結果、1次元相互反射除去に着眼した時間的周波数パターンとの併用を用いて計測結果を大幅に改善させることに成功した。

キーワード

コンピュータービジョン, Episcan, 三次元形状再構築, 金属材料, 構造化光

*奈良先端科学技術大学院大学 先端科学技術研究科 修士論文, 令和2年3月12日.

Radiance smoothing and interreflection removal for shape reconstruction of metallic object ^{*}

Akira Yamada

Abstract

Active 3D measurement methods are commonly used in the industry because these methods are almost independent on texture information. However, there are many materials that make measurement difficult. Especially for metals, which are widely used in the industry but have a small diffuse reflection component, and have the feature that strong interreflection generated on the concave surface. Unless these two problems are solved, metals cannot be measured stably. In this paper, we focus on the problems of metals with such features as small diffuse reflection and interreflection. And we propose 3D measurement technology that is robust to metal shapes with using Episcan [1] that can remove limited interreflection at high speed. Specifically, We investigated for the former problem by an approach using a lenticular lens and recursive projection, and we investigated for the latter by an approach using a pattern image that uses radiance classification and temporal frequency. As a result, we succeeded in significantly improving the measurement results by using a combination of temporal frequency patterns focused on one-dimensional interreflection.

Keywords:

Computer Vision, Episcan, 3D Shape Reconstruction, Metallic, Structured Light

^{*}Master's Thesis, Graduate School of Science and Technology, Nara Institute of Science and Technology, March 12, .

目 次

1. 研究背景	1
2. 従来手法	5
2.1 輝度強度差を低減することで金属の計測結果を向上させる手法 . . .	5
2.2 相互反射を抑制することで金属の計測結果を向上させる手法 . . .	8
2.3 本研究の立ち位置	10
3. 直接反射光成分の輝度を平滑化するアプローチ	11
3.1 Episcan とレンチキュラーレンズを用いた手法	11
3.1.1 実験	12
3.1.2 検証と考察	13
3.2 フィードバック投影により輝度を平滑化する手法	14
3.2.1 考察	15
4. 相互反射を除去するアプローチ	16
4.1 クラス分けによる候補抽出	16
4.1.1 理論の検証	18
4.1.2 実験と考察	20
4.2 時間的周波数による候補抽出	22
4.2.1 時間的周波数を使用した投影コード	22
4.2.2 候補別デコード画像の生成	22
4.2.3 投票制を用いた候補選択法	23
4.2.4 実験	25
4.2.5 結果と考察	27
4.2.6 課題点と今後の展望	32
5. まとめ	34
謝辞	36

発表リスト	37
参考文献	38

図 目 次

1	鏡面反射成分の多い物体の計測輝度の問題.	2
2	金属物体に発生する相互反射の影響.	3
3	表面材質と光源による輝度強度差の関係.	5
4	Diffuse Structured Light のイメージ.	6
5	Diffuse Structured Light による計測結果.	7
6	ミラーボールの 2 次反射成分を抽出している様子.	9
7	グレイコードを投影したデコード結果.	10
8	Episcan とレンチキュラーレンズによる輝度平滑化のイメージ . .	11
9	計測対象. 金属製のカップ.	12
10	実験の様子.	12
11	Episcan+Diffuse Structured Light によるデコード計測結果. . . .	13
12	フィードバックによる輝度強度差軽減のイメージ.	14
13	実験の様子.	15
14	輝度の 4 クラスと確定/不確定グループの関係.	17
15	輝度グループの分布のイメージ	17
16	実験の様子.	18
17	検証シーンによる結果.	19
18	輝度クラス分けの実験結果.	20
19	輝度を 2 値の足し算と見たことに対する問題点.	21
20	候補別のデコード結果の抽出.	23
21	多数決に基づいた視差情報の選択.	24
22	時間的周波数によるパターン計測の実験環境.	26
23	デコード候補画像.	27
24	推定された視差の比較.	28
25	投票による視差推定.	29
26	推定された視差画像 (蝶番).	30
27	推定された視差画像 (マドレーヌカップ).	31
28	対象候補の深さと候補視差推定結果のエラー率.	32

29	低位の候補に発生しているアーティファクト.	33
----	-------------------------------	----

1. 研究背景

アクティブ3次元計測手法 [2] は、プロジェクタを用いて構造化光を物体に照射し、その様子をカメラで撮影して視差情報を推定することで3次元形状を復元する手法である。これらの技術は一般的に物体に投影する光パターンを変えることで起こる直接反射の輝度変化を手掛かりに視差を導出し、それを手掛かりに形状を捉えている。1ピクセルの視差を得るために複数の照射結果を比較するという特徴から、材質やテクスチャ情報の影響を受けにくいという特性を持ち、主に産業界において重宝される。

しかし、アクティブ3次元計測でも正常に計測できない素材も多く存在しており、特に金属においては産業界で幅広く用いられる材質でありながらアクティブ3次元計測での計測を困難にさせる要素を複数持っている。文献 [3] のように視体積交差法を用いることで材質特徴の影響を受けずに不透明物体の形状を測る手法もあるが、凹面のようにシルエット情報から遮蔽された部位を計測することは出来ない。凹面なども計測可能にすることを考慮し、直接反射光を手掛かりに形状を測る際に発生する問題点を挙げると、特に以下の2点の影響が大きい。

- 拡散反射成分が小さく、ハイライトとの強度差が大きい点。
- 凹面に強力な相互反射が発生する点。

前者の問題点は金属には拡散反射成分が少なく、逆に鏡面反射成分がほぼ支配的であることから起きる問題である。そのため金属は表面の法線に応じて、シーン中で十分な輝度を得られている部位とそれ以外の極端に反射輝度が落ちる部位の間で大きな輝度の強度差が発生する (図 1)。直接反射光の輝度の変化を形状判定の手掛かりにしているアクティブ3次元計測において、輝度の強度差が部位によって極端に変化することは、ダイナミックレンジに収まっている部位、すなわち計測可能なエリアが減ることを意味している。

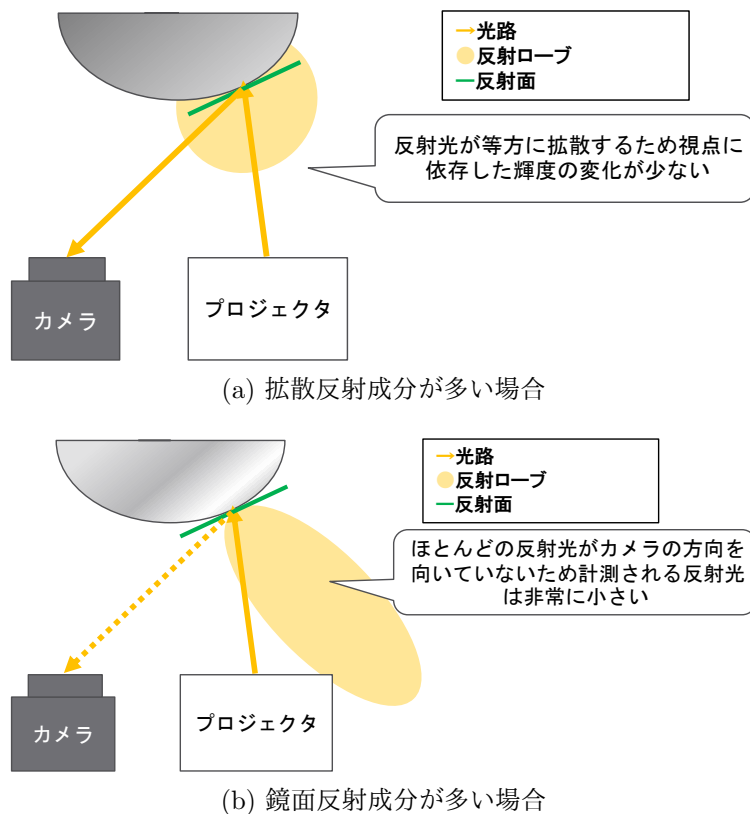
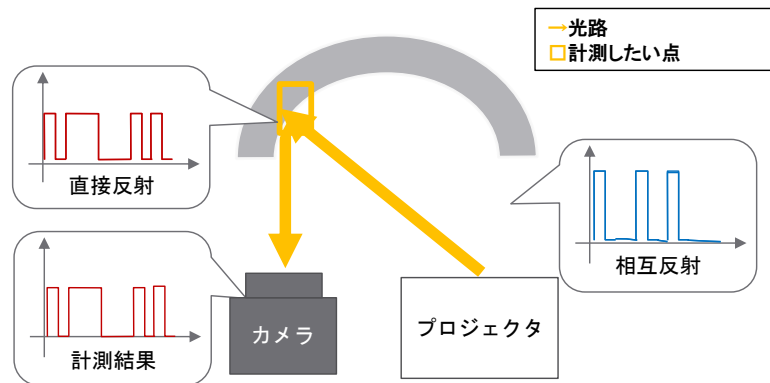


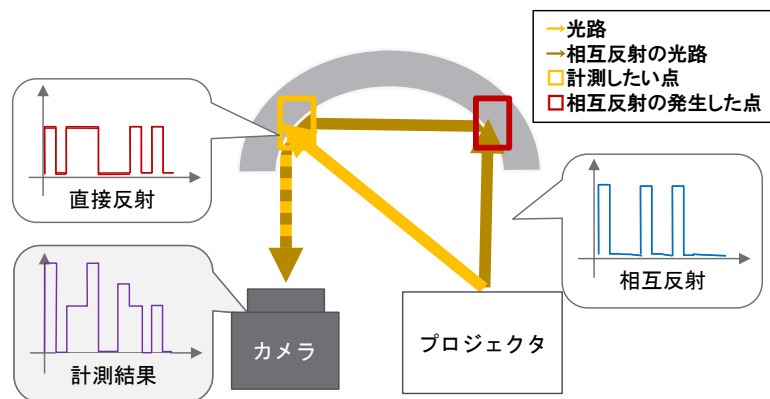
図 1 鏡面反射成分の多い物体の計測輝度の問題. (a) 拡散反射する物体には視点により依存する輝度の変化はわずかであるのに対し、金属の様に鏡面反射成分が多い物体であればカメラと光源の関係によって (b) のようにほとんど反射光が観測されない部位も存在し得る.

このような場合、十分な輝度を得る為の一番単純な解決策はプロジェクタの輝度か、カメラの露光量を増やすことでより僅かな光を計測できるようにすることであるが、そうすると後者の問題点が浮き彫りになる。

後者の問題点は、凹面で鏡面反射成分によって発生した強力な相互反射の影響で、コースティクスによるものかプロジェクタによって照らされているのか、また、実際の形状か鏡面に映りこんでいるものなのかの見分けが付きにくくなることによって起きる問題である。具体的にアクティブ 3 次元計測ではパターン重畳により大きく形状情報を誤計測するという形で現れる (図 2)。



(a) 相互反射が発生していない場合



(b) 相互反射が発生している場合

図 2 金属物体に発生する相互反射の影響. (a) 相互反射のない物体上ではプロジェクタで照らされた位置とその観測輝度が 1 対 1 で成立するのでアクティブステレオで計測しやすいが, (b) のように相互反射が発生していると, その 1 点の位置情報を読み取るためには最低でも他のもう一点の情報が混ざりうることを考慮に入れなければならない.

加えて前述のように, 金属には直接反射成分が少ない傾向があるため相互反射によるパターンの方が強く発生しがちであり, そのため金属材質の凹面には広範囲にわたって形状の誤計測が発生すると考えられる.

これらの特徴より, 金属は十分な直接反射成分を得にくく, 加えて直接反射成分を凌駕する相互反射成分が発生するため単に露光を上げるだけでは解決しないという 2 つの問題が絡み合い, 一般的な手法で対策することを困難にしている.

そのため、破綻なく金属の形状を計測するには、直接反射成分をより多く拾えるように計測機器を工夫するか、相互反射による悪影響を抑え、表面に残るわずかな直接反射成分を計測する必要があると言える。

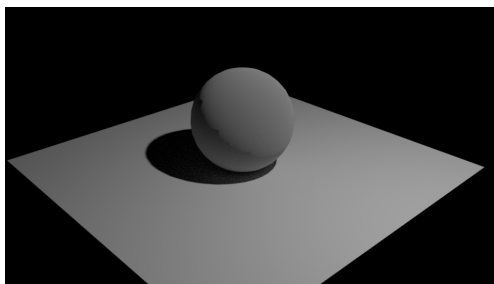
本論文ではこの2方面のアプローチからこれらの問題を解決し、表面に残るわずかな直接反射成分を計測する手法を提案する。実際に、金属凹面を計測し、それぞれの手法の実現可能性と計測結果にどのような改善が見られるかを確認した。

2. 従来手法

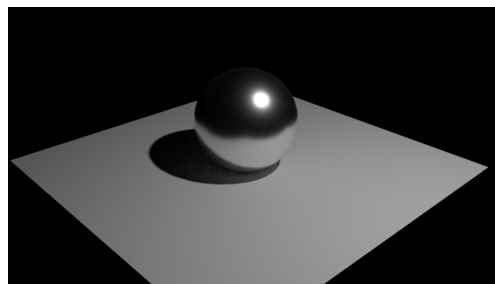
2.1 輝度強度差を低減することで金属の計測結果を向上させる手法

前述のように金属が凹凸に対し極端な輝度変化を及ぼす原因としては物体側の直接反射が拡散しないという理由が挙げられる。しかし、物体の取得できる直接反射成分は光源側の条件でも変化させることが出来、この場合表面粗さの低い金属に対しては光源側を拡散させることでより広域を十分な明るさで照らすことが可能である。

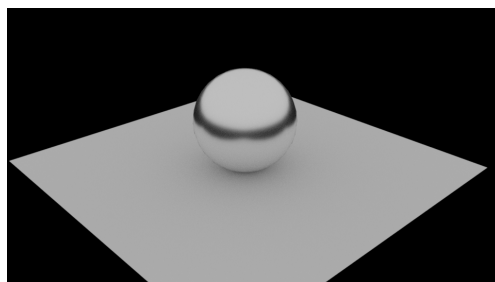
表面粗さの違う物体を平行光線で照らした結果と、表面が滑らかな物体を面光源で照らした様子のイメージを以下の図3に示す。



(a) 表面が粗い材質 (平行光源)



(b) 表面が滑らかな材質 (平行光源)



(c) 表面が滑らかな材質 (面光源)

図3 表面材質と光源による輝度強度差の関係。(a)のように表面の粗い材質では物体自体が拡散反射するためまんべんなく輝度が保持されているが、(b)のように表面が滑らかになると輝度が拡散せず平行光線ではハイライトとそれ以外の部位の輝度の強度差が顕著になる。そのような材質でも(c)のように光源側を拡散させると広域を照らすことが可能である。

フォトメトリックステレオにおいてはこの拡散光源を利用して輝度の強度差を抑制し計測結果を改善させるという試みが盛んにおこなわれてきた ([4], [5], [6], [7], [8])

しかし，このように等方に拡散された光源環境下では意味のあるパターンを照射しても，到達するまでに拡散し，ぼやけてしまうという欠点がある．従来手法では文献 [9] のように，リニアディフューザーを用いて拡散方向を1軸に限定させ，図4のようにパターンの方向と異なる向きにプロジェクタの光源を拡散する手法が提案されている．

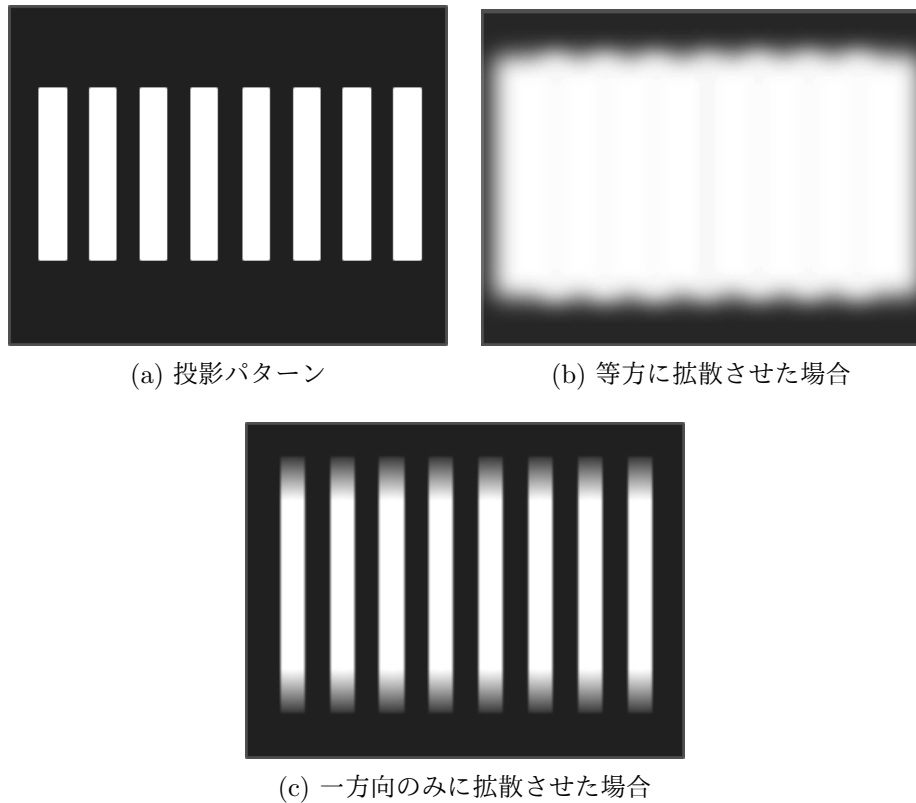
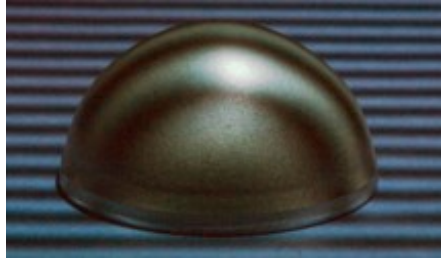
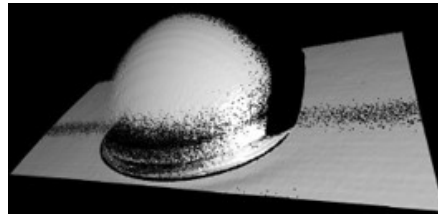


図4 Diffuse Structured Light のイメージ．(a) のように縦方向に伸びたパターンを投影したい場合，一般的なディフューザーなどを用いて光源を拡散させると (b) のように本来存在していたパターン情報も失われてしまうが，レンチキュラーレンズなどの拡散方向1次元に限定できるディフューザーを介すことで (c) のようにパターンの情報を損なうことなく拡散光源に近い効果を与えることが出来る．

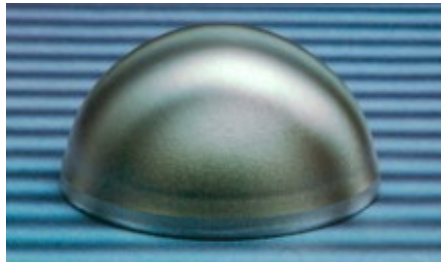
このように拡散方向に制限を加えることでパターンの情報を損なうことなく光源を拡散させる手法が提案されており，それを用いて図5のようにパターン画像の情報を損なうことなく表面の輝度変化を緩和させることが出来る．



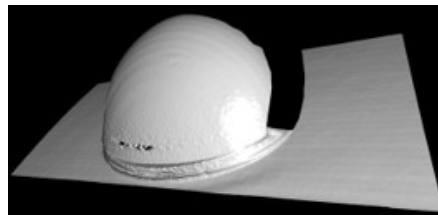
(a) リニアディフューザーを用いない場合



(b) (a) の計測結果



(c) リニアディフューザーを用いた場合



(d) (c) の計測結果

図5 Diffuse Structured Light による計測結果 (文献 [9] より引用)．リニアディフューザーを用いない (a) の場合は輝度の強度差が表れており，それが (b) のように計測できない部位が発生するという形で表れている．一方リニアディフューザーを用いた場合，(c) のように輝度の変化がなだらかになり，結果として (d) のように計測範囲が (b) より改善されているという結果が得られている

一方でこの手法では相互反射に関しては同様に拡散されるものの影響を取り除くことが出来ないため，直接的に凹面に有効であるわけではない．

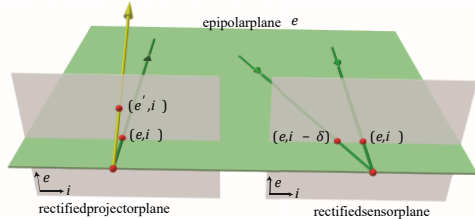
2.2 相互反射を抑制することで金属の計測結果を向上させる手法

金属凹面を計測するためには相互反射の影響を抑える必要があり、代表的な手法としては、大きく以下の2つのアプローチに分けることができる。

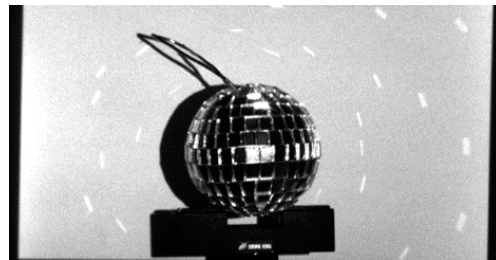
- 相互反射の影響の特徴から無効化する手法
- 相互反射を根本的に分離する手法

前者の代表的なものとしては文献 [10] のように相互反射等のグローバルイルミネーションの効果の焦点がずれ、像がぼやける現象を利用して相互反射の影響を抑制する micro-phase shifting や、伝搬距離の特性を利用して相互反射の影響を抑制する文献 [11] 等が挙げられる。これらの技術は少ない枚数で相互反射による形状の誤計測の影響を緩和し、高い実用性と同時に説得力のある結果を得ることが出来る。しかし、デコードの段階で視差を一意に確定させてしまうという特徴から、想定される最小の伝搬距離や形状に拘束条件が付く。また、複雑に相互反射が折り重なるシーンでは得られる結果に曖昧性が生じる。

後者の手法はより直接的に相互反射成分を除去することが出来、代表的なものとして高周波照明法を用いた間接光の除去 [12] [13] やライトトランスポート行列のを直接解析しその解を導く研究 [14] [15] 等が挙げられるが、これらの間接光成分を除去された画像は一枚の除去画像を生成するのに対し特殊なデバイスや膨大な投影枚数の上で実現される。中には Episcan(文献 [1]) のように比較的一般的な機材を用いてかつ高速にエピソード画像の作成し、相互反射を除去した画像を生成できる技術 (図 6) 等が挙げられるが、Episcan はエピソード画像の特性上、光路がエピソード平面上を通る間接光成分を除去することが出来ず、部分的に取り切れない相互反射成分が発生してしまう (図 7)。



(a) Episcan の動作原理 (文献 [1] より引用)



(b) 通常撮影



(c) エピポーラ画像



(d) ノンエピポーラ画像

図 6 ミラーボールの 2 次反射成分を抽出している様子. (a)Episcan の動作原理. レーザープロジェクタとラインスキャンカメラを同期し, プロジェクタが走査している 1 平面だけが露光された状態を作り出すことによりエピポーラ平面を通らない光路をもつ光線=間接光成分を除去した映像を作ることが出来る (b) 通常撮影. スクリーンにミラーボールの 2 次反射が映りこんでいる (c) エピポーラ画像. エピポーラ平面上以外の光路から来た光線を取り除くことにより近似的に求まった直接反射のみの画像. (d) ノンエピポーラ画像. (c) と同様の試行で, 逆にエピポーラ平面上の光路を通った光のみを取り除くことにより, 近似的に求まる間接光のみの画像. いずれも Episcan を用いて生成.

しかし, Episcan はプロジェクタとカメラの同期処理を除けば比較的一般的な機材を用いるところから, 文献 [16] のように他の手法と組み合わせて相乗効果を出しやすい.

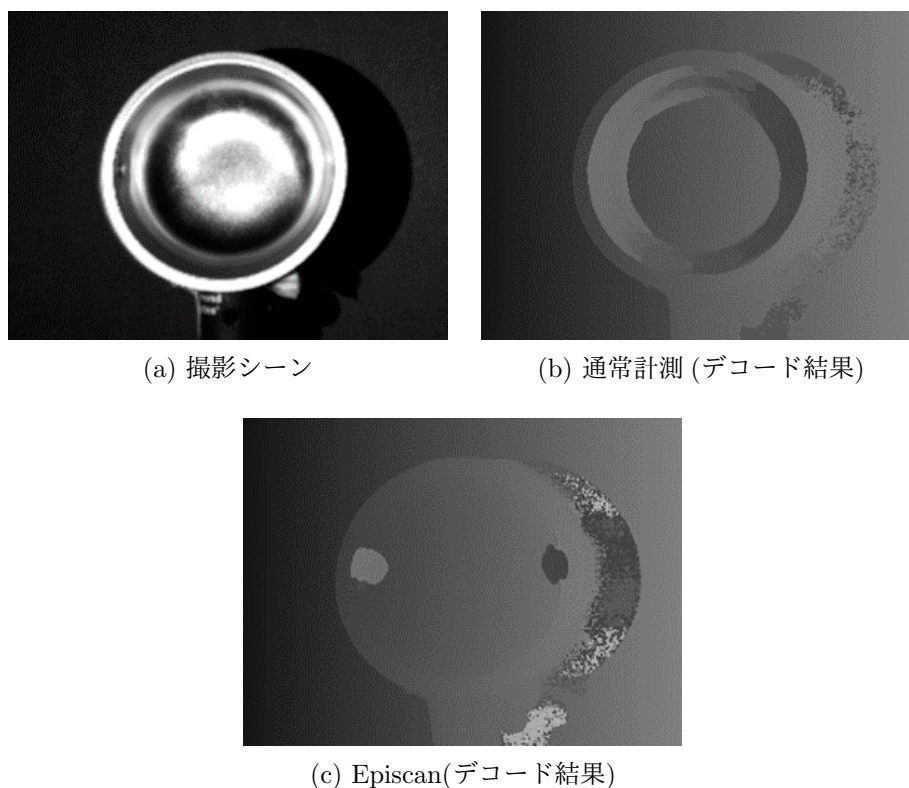


図 7 グレイコードを投影したデコード結果. (a) 撮影シーン. 金属製のカップがカメラ側に凹面を向けるように配置されている. (b) 通常撮影&グレイコードによる計測結果. 撮影シーンで見られるように広範囲にわたる計測エラーが見られる. (c)Episcan &グレイコードを用いた計測結果. 全体的に相互反射を除去することに成功している一方で, 相互反射が水平に発生する画像中部に関しては相互反射の影響を除去することが出来ていない.

2.3 本研究の立ち位置

本論文では Episcan と併用可能かつ Episcan が持つ金属の形状計測上で発生する欠点を改善させることが出来る手法を, 直接反射成分の強度差を改善させるアプローチと, 相互反射を除去するアプローチの 2 方面から取り組み, 金属の計測結果を改善させることを目的としていく.

3. 直接反射光成分の輝度を平滑化するアプローチ

本章では直接反射成分の輝度の強度差を低減することにより金属の計測結果を改善させるという目的で提案したアプローチとその実現性の検証に関して述べていく．特に本稿では Episcan との併用可能で，十分な直接反射成分を得ることで相互反射の影響を相対的に低減させることで凹面の計測を実現させることを目的と置く．

3.1 Episcan とレンチキュラーレンズを用いた手法

レンチキュラーレンズ（ラインディフューザー）と Episcan を併用し、エピポーラ平面上で拡散させる方法を提案する．文献 [9] で示した Diffuse Structured Light では、前述のとおり拡散方向を限定することで意図したパターンを照射しつつ拡散光源の特徴を得ることを実現させる技術である．この手法を応用し、レンチキュラーレンズの拡散方向をレーザープロジェクタのスキャンラインと一致させることにより、Episcan 相互反射除去と Diffuse Structured Light による光源拡散効果のメリットを両立させられるのではないかと考えた．具体的にはプロジェクタの前方にレンチキュラーレンズを配置し、エピポーラ平面方向にプロジェクタの光を拡散させる．そしてプロジェクタとカメラを Episcan として同期を取りながら計測することで、相互反射を抑えつつより広域の計測を行うことを目指す．(図8)

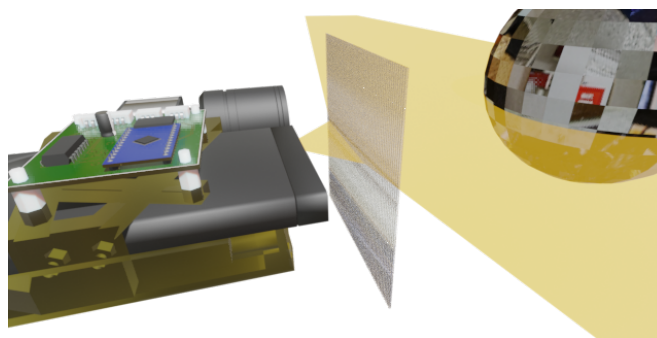


図 8 Episcan とレンチキュラーレンズによる輝度平滑化のイメージ

3.1.1 実験

本手法の有効性を確認するため、計測対象としては、図9のような金属製のカップを計測することにした。



図 9 計測対象. 金属製のカップ.

図 10 に示すように、レーザプロジェクタ MP-CL1A (SONY 製) によってパターンを投影し、そこから約 1 cm ほど先にレンチキュラーレンズを配置して拡散させたパターンを横並びに 6cm の位置に設置したカメラ UI-3240CP-NIR (IDS 製) によって反射光を観測した。カメラとレーザプロジェクタは Episcan としてエピポーラ画像が撮影できるようセッティングされている。なお、実験は環境光の影響を抑えるため暗室内で行った。

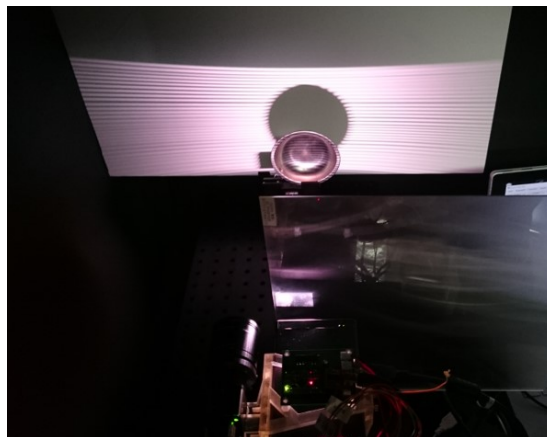


図 10 実験の様子.

3.1.2 検証と考察

計測された結果を図 11 に示す．図のように，レンチキュラーレンズを用いることで逆に横筋状のノイズが多数発生する結果になった．原因としては図 10 の様にプロジェクタとレンチキュラーレンズが接近しているとレンチキュラーレンズ端になるにつれ入射角が鋭くなってしまうため投影される像が屈折してしまう点が挙げられる．このように像が屈折すると，エピポーラ平面上の光とそれ以外を分離する Episcan というセッティングの特性上，パターンが部分的に想定されたエピポーラ平面から逸れて計測されなくなってしまう．

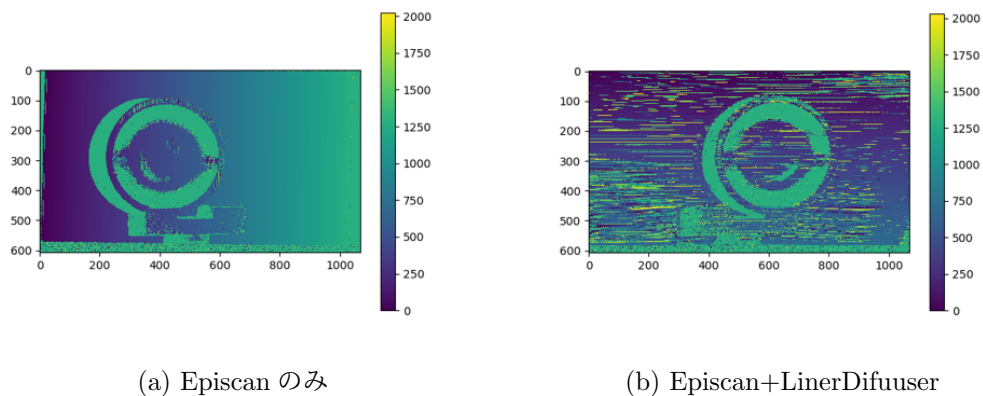


図 11 Episcan+Diffuse Structured Light によるデコード計測結果．Episcan のみの場合 (a) に対しリニアディフューザーも併用させた (b) の方には筋状のノイズが発生するという状態になってしまった．

対策としてはプロジェクタからレンチキュラーレンズを遠ざけ，入射角を緩やかにするという方法が挙げられるが，この場合もレーザープロジェクタとカメラを平行に配置するという EpiScan のセッティングの条件によりカメラを邪魔する形でレンチキュラーレンズを取り付けるしかなく，対象物体をカメラに収めるセッティングが困難であることが分かった．また，横に投影光を拡散するため縦筋のパターンを投影することが出来なくなっており，理想的な Episcan のセッティング下では意味のある視差情報を得ることも困難である．そのためレンチキュラーレンズの組み合わせはあまり有効ではないという結論に至った．

3.2 フィードバック投影により輝度を平滑化する手法

次に暗い部位を照らしているピクセルの輝度を上げ、逆に明るい部位を照らしているピクセルの輝度を下げることでプロジェクタで投影する輝度をピクセル単位で最適化する手法を試みた。これにより全体的な輝度の強度差が緩和され、計測結果を向上する効果を見込める。具体的には、Episcan で得られたエピソード画像を投影中のプロジェクタ画像から一定量ずつ減算するというポストプロセスを行い、一度プロジェクタから投影させるという試行を繰り返す。これにより各ピクセル毎のシーン中の輝度を最適解に収束させ、輝度の平滑化を目指す。(図 12)

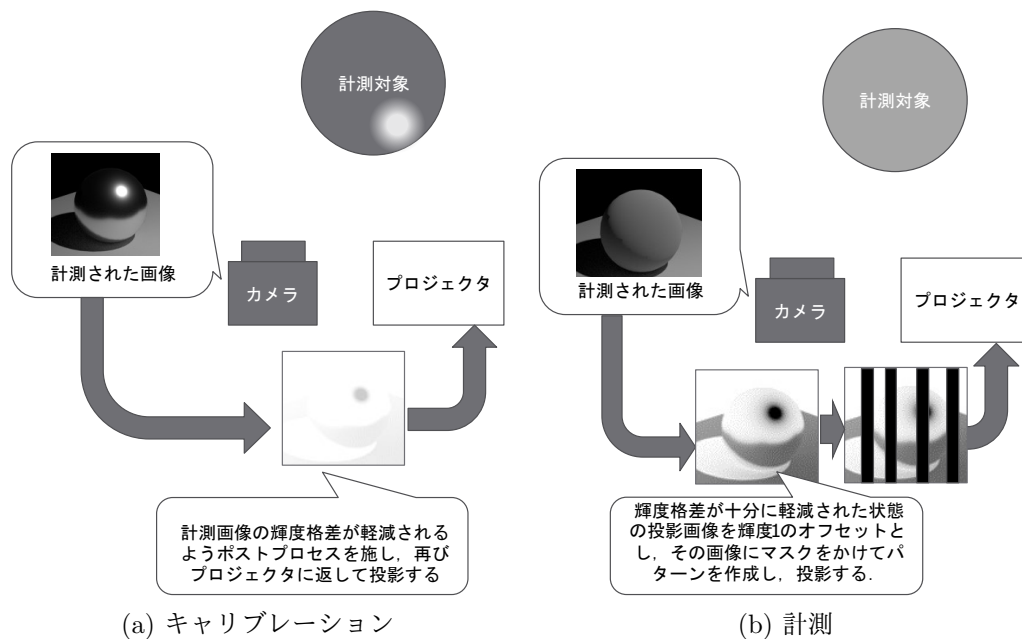


図 12 フィードバックによる輝度強度差軽減のイメージ。(a) キャリブレーション、カメラで計測された結果のうち、ハイライトが出ている部位を暗く、そうでない部位を明るくした画像を作成し、それを再度プロジェクタに投影し、同じ工程を繰り返す。(b) 計測、キャリブレーション結果が収束し、全体の輝度が安定したらその投影画像の輝度を 1 としたパターン画像を作成して計測していく。

輝度を平滑化させたのち、あとはそのキャリブレーションによって収束したパ

ターンにマスクをかけてパターン画像を作成し，それをもとに形状を測ることを想定している．

3.2.1 考察

結果としてこの手法は非常に実現が困難であることが分かった．カメラで取得した画像にはプロジェクタ投影からの視差も含まれているため，プロジェクタにフィードバックする度に対応画素が視差の分だけずれて重なっていく現象が問題となった．(図 13)

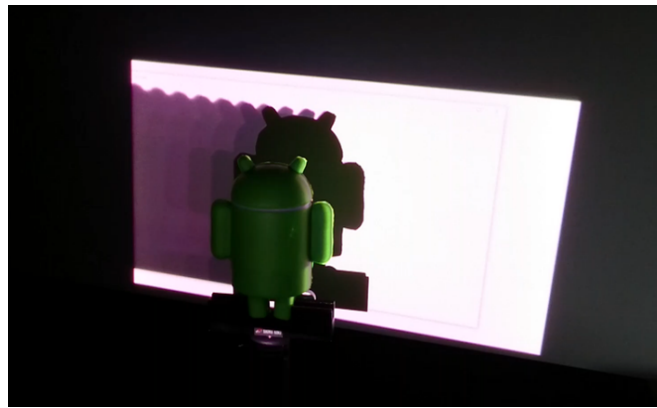


図 13 実験の様子．

視差が不明な状態でこの条件が成立させる為にはカメラとプロジェクタが同軸である必要があり，仮にカメラをもう一台用意して同軸系の映像を撮れるようにしても，鏡面反射は視点依存で輝度に変化してしまうため，形状を導き出すという目的でこの手法が持つ条件を満たすことは困難であると考えた．また，金属の輝度が得られていない面に十分な光を照射できたとしても，そこで得られる輝度以上のエネルギーを持った光が正反射方向に反射していくことになり，その分強力な相互反射を発生させる可能性が有るため金属の形状を測る手法としてもあまり適切ではないと考察した．

4. 相互反射を除去するアプローチ

本章では相互反射成分による形状の誤計測を防ぐことにより金属の計測結果を改善させるという目的で提案したアプローチとその実現性の検証に関して述べていく。

特に本稿では1次元方向のコード化されたパターンを用いて形状を計測しつつEpiscanで除去不可能なエピソード平面上に発生した相互反射の除去に特化した手法の確立を目的とし、中でもデコード段階で直接相互反射を除去せず、相互反射成分によるコードと直接反射によるコードの両者を別々に取得し、後処理で形状を確定させることにより相互反射による影響を最低限に抑えるアプローチを取る。

4.1 クラス分けによる候補抽出

相互反射を考慮した場合、2次反射までの相互反射成分と直接反射成分の2つの定数の輝度の足し算であると仮定すると、金属凹面で計測できる輝度は以下の4パターンに分類できると考えた。

- 直接反射成分も相互反射成分も届いていない
- 相互反射成分のみ観測
- 直接反射成分のみ観測
- 直接反射成分と相互反射成分が混じりあっている（2つのコードの足し算）

構造化光を当てることで得られた輝度の集合がこの4パターンの組み合わせであるならば、各パターンによって得られた1（直接光が当たっている状態）と0（直接光が当たっていない状態）のビットは図14の様に確定が出来るビットと不確定な関係になっているビットの2グループに分類できることが分かる。つまり、この2グループの分類が出来れば、その物体の持ちうる形状情報を列挙出来るのではないかと考えた。

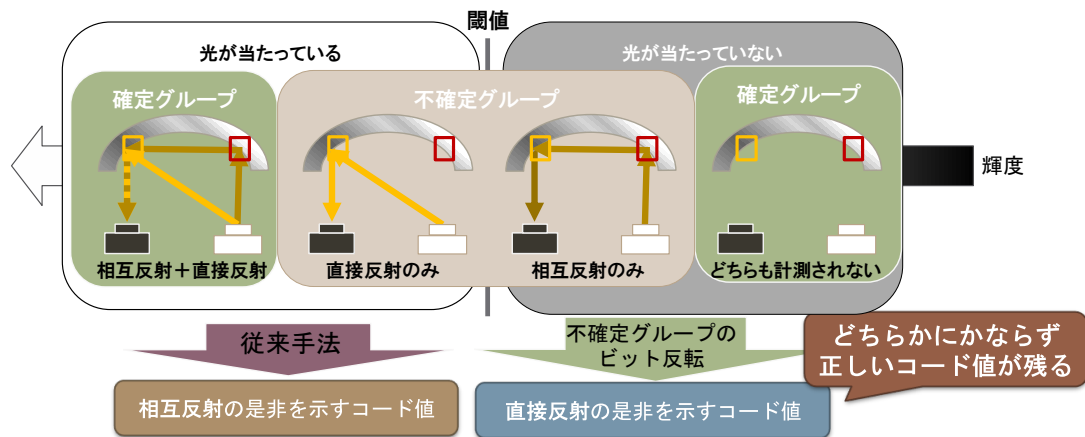


図 14 輝度の4クラスと確定/不確定グループの関係。

この仮定が成立すると考え、グレイコードの場合を考慮してみる。白黒パターンと、その色を反転させた黒白パターンで1セットのビットを表す場合、片方のパターンでは直接反射と相互反射の足し算で最大の輝度を出した場合、対となる反転パターンの投影下ではどちらの光も当たっていないため最小の輝度を出すことになる。一方で片方のパターンで相互反射か直接反射の片方しか計測されない場合、反転パターンの投影下では計測されなかったもう片方の輝度が得られるため、両パターンでの計測輝度が極端に変化しないものを不確定グループと見ることが出来る。その結果、輝度の分布は以下の図15のようになる。

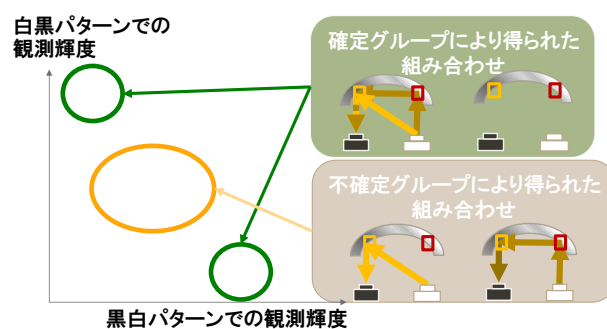


図 15 輝度グループの分布のイメージ

以後この前提で検証を進めていくこととする。

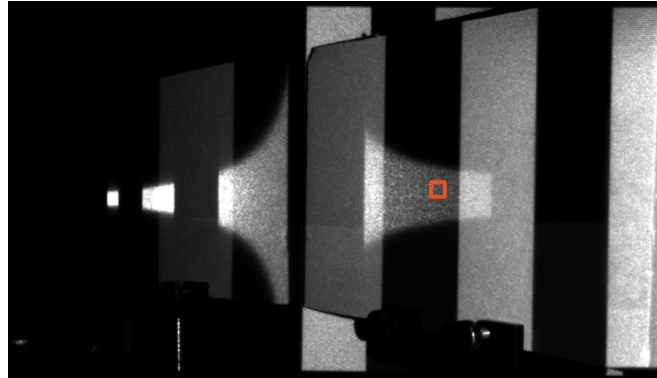
4.1.1 理論の検証

この輝度のクラスが2グループに分類できるかどうかを検証するため、検証実験をおこなうこととする。図16に示すように、鏡と発泡スチロール板をやや向かい合うように配置し、意図的に相互反射が発生する状況を作り出し、そこにレーザープロジェクタ MP-CL1A (SONY 製) によってグレイコードのパターンを投影し、横並びに6cmの位置に設置したカメラ UI-3240CP-NIR (IDS 製) によって反射光を観測した。カメラとレーザープロジェクタはEpiscanとしてエピポーラ画像が撮影できるようセッティングされている。

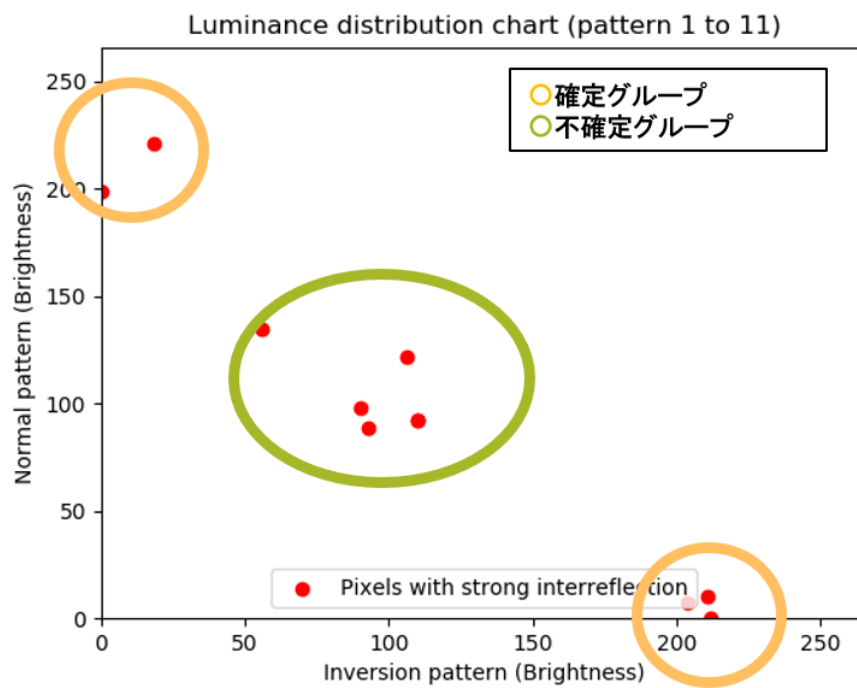


図 16 実験の様子.

これによって得られた結果を以下の図17に示す。検証の結果、輝度の分類は○枠で示すように、輝度に中心に集まっているグループと端に寄っているグループの2つに分離された結果が得られた。この結果は前述の仮定と一致しており、この結果は検証実験のシーン上で不確定グループと確定グループのビットが分類可能であることが示されている。



(a) 計測したピクセルの位置



(b) 計測結果

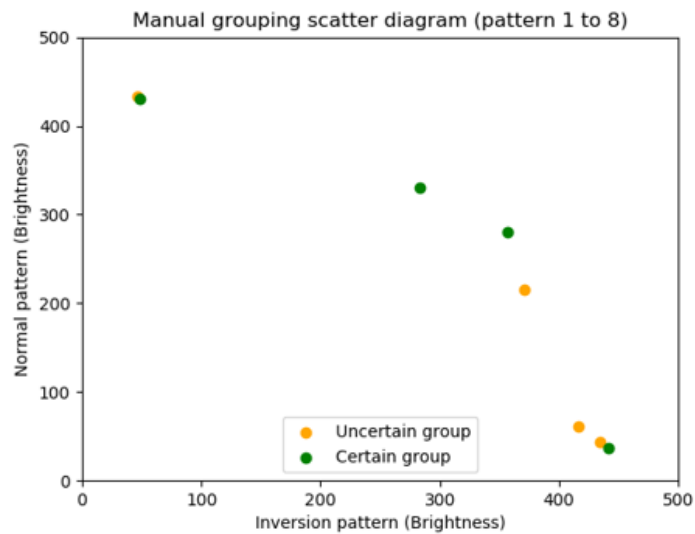
図 17 検証シーンによる結果. (a) 計測したピクセルの位置. クラスが分かっているか確認する目的のため, あえて相互反射の存在する部位を選択している. (b) 該当ピクセルの輝度分布. 縦軸が通常パターン, 横軸が反転パターンの輝度である.

4.1.2 実験と考察

検証を受け、輝度平滑化実験でも用いた金属製のカップを用いて同様の実験を行った。その結果を図 18 に示す



(a) 計測したピクセルの位置



(b) 計測結果

図 18 輝度クラス分けの実験結果。(a) 計測したピクセルの位置。クラスが分かれているか確認する目的のため、あえて相互反射の存在する部位を選択している。(b) 該当ピクセルの輝度分布。点の色は目視によりマニュアルでグループ分けしたもの。(明確に認識可能な範囲の物に限定するため、11 枚中 8 枚分の情報を散布図にした)

検証時とは変わり，2つのグループは混ざりあい，グレイコードで導き出されるサンプルからはグループ分けが困難であるという結果が得られた．原因として，検証時は表面粗さのないと仮定できる鏡を対象としたのに対し，実験に用いた金属は直接反射成分が表面に残る程度の粗さがある点が挙げられる．表面の粗さが存在していると反射ローブが広がり，実態が単純な2値の足し合わせではないと考えられるからだ．(図19)

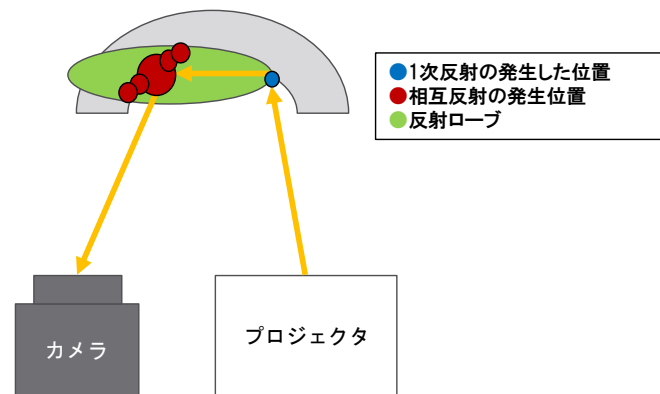


図19 輝度を2値の足し算と見たことに対する問題点．カメラに入る光路だけ注目すると1本の光線でも表面粗さがある場合2次反射は反射ローブに沿って広がって照射されることになる．そのため，1つの直接反射を示す値に対し，相互反射は複数の点から来ていると考えることが出来，当初定めた定義である1対1の4通りのクラス分けは成立しない．

4.2 時間的周波数による候補抽出

投影コードに時間的周波数を利用することで、重なってしまったパターンをフーリエ空間で分離し、残った候補から現形状を抽出することで、相互反射の影響を低減して凹面金属の形状を計測できる手法を提案する。

4.2.1 時間的周波数を使用した投影コード

指向性の強い鏡面反射によって生じる相互反射成分が直接反射成分と同時に観測される場合、異なる視差情報に対応する T 次元の輝度変化が複数加算されたものが観測されることになる。このような状況下で、観測された T 次元の輝度変化から、重なり合った複数の視差情報を復元することを考える。このような問題は信号処理の分野で従来から取り組まれており、本手法では無線通信から着想を得た投影パターンを設計する。具体的には、投影パターンの各列に異なる周波数を割り当て、 T 次元の輝度変化に埋め込むように投影パターンを構成する手法を提案する (図 20)。列 $x = [1, \dots, W]$ に割り当てる周波数を $\omega(x)$ としたとき、ここでは単純に以下の通りとする。

$$\omega(x) = x$$

T 次元の輝度変化に周波数 $\omega(x)$ の正弦波を割り当てることとした場合、生成される t 番目のパターン画像 $f(x, t)$ は以下のように表される。

$$f(x, t) = 0.5 \left(\sin \frac{2\pi\omega(x)t}{T} + 1 \right)$$

なお、エイリアシングの発生を防ぐため、投影枚数は $T > 2x$ を満たす必要がある。

4.2.2 候補別デコード画像の生成

こうして生成されたパターンをシーンに投影し、カメラで撮影した T 枚の画像から、各画素で T 次元の輝度変化を得られる。この変化に対しフーリエ変換を施せば、各周波数 $\omega(x)$ の成分を分離することができる。本手法ではこの性質を利用して視差情報のデコードを行う。原理的には、取りうる全ての視差情報について

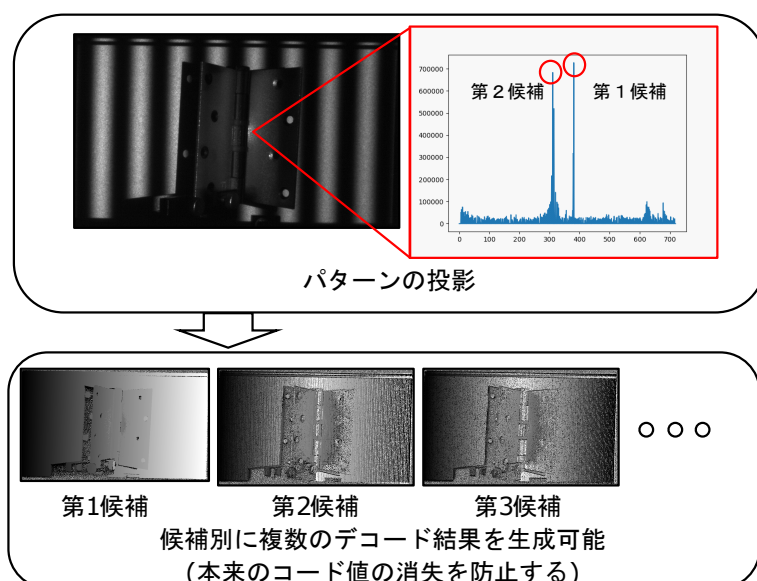


図 20 候補別のデコード結果の抽出. フーリエ変換すると, 光路に応じた周波数に強いピークが生じる. それぞれのピークが, 直接反射・鏡面相互反射の候補である.

てその強度とコード値の抽出が可能である. しかし, 全ての可能性を保持しておくと, 直接反射成分に相当する視差情報を求める後述の処理が煩雑となる上, パターン画像の量子化誤差や標本化誤差, 輝度変化をカメラで捉える際の計測誤差などに脆弱になると考えられる. 本手法では直接光成分を凌駕するような相互反射成分が複数の異なる点から一点に集中して重なり合うことはないと仮定することで候補を限定し, 後述する実験では強度が第 $k = 10$ 位未満の周波数成分については視差情報の候補としては扱わないこととする. 各画素でそれぞれ周波数成分の強度順位を求めることで, 図 20 の下部に示すような, 第 k 候補の視差情報を表わすデコード画像を生成することができる.

4.2.3 投票制を用いた候補選択法

本来の形状を復元するためには, 直接反射成分に対応する視差情報を抽出する必要があるが, 先述の通り, 例えば指向性の強い鏡面反射によって生じる相互反

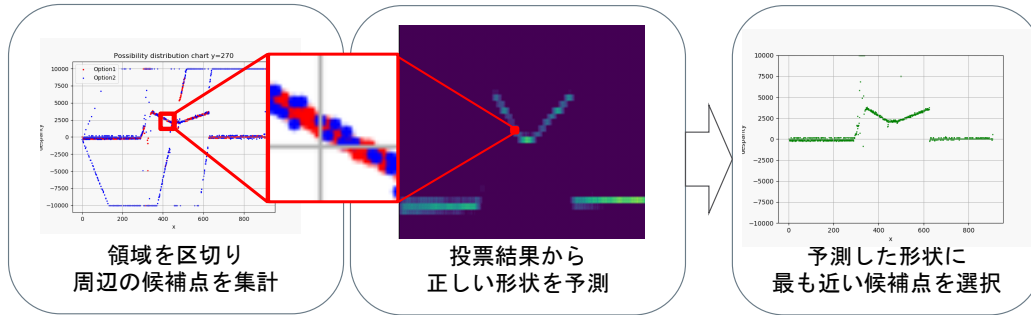


図 21 多数決に基づいた視差情報の選択.

射成分が直接反射成分に重なると、望ましい視差情報の強度が 1 位にならない可能性がある．そこで本手法では、計測対象の形状が空間的に滑らかである点と、強い相互反射成分が空間的に特異となる点を仮定し、多数決原理に基づいて最適な視差情報を求めることとする．形状が空間的に滑らかである場合、エッジ線上にある近傍の画素において、直接反射成分に対応する視差情報も近接していると考えられる．一方、相互反射成分による視差情報は近傍の画素で常に候補として保持されるとは限られない．そのため、形状候補の視差の変化や、傾きが大きくなりすぎるといった傾向が見られる．そこで本手法では、各画素が候補として複数保持している視差情報をその近傍で集計し、得票が集中した視差情報に最も近い候補を直接反射成分に対応する視差情報として選択する．

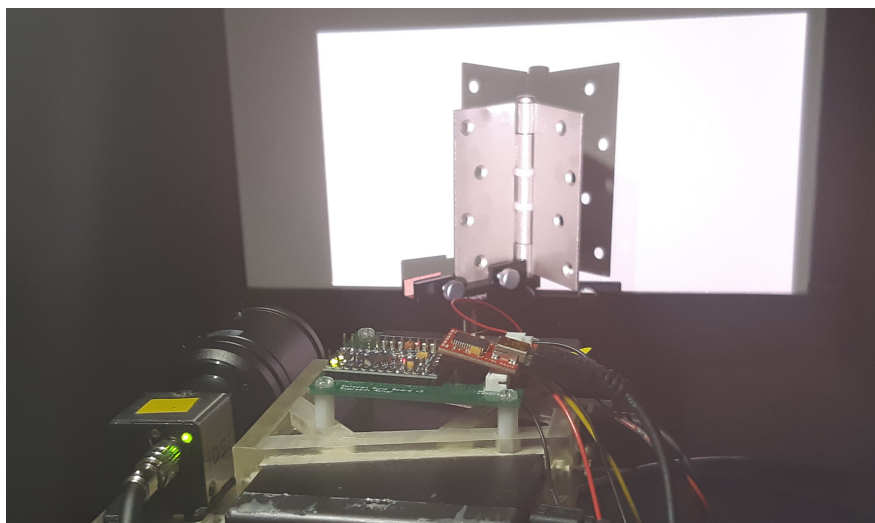
具体的には、ある画素に対し、第 k 候補として保持されている視差情報を、その両側の近傍 D ピクセルずつにそれぞれ投票する．このとき、画素毎に視差を任意の量子化幅 S で離散化して得票を集計する．その結果、最大の得票を得た視差推定位置に最も近い視差情報を各画素が保持する候補から選択し、これを直接反射成分に対応する視差情報として選択することとした．(図 21) 本研究では $S = 50$, $D = 8$ と置き、処理を行っている．

最大の得票を得た視差をその画素の視差情報として採用する方法も考えられるが、その場合、3 次元復元の精度が量子化幅 S に依存してしまう．これに対し、前節で保持しておいた視差情報から最も近いものを選択し、量子化幅 S に依存せず、本来投影パターンが持つ分解能 W を損なわずに 3 次元復元をすることが可

能である．量子化幅 S は極端に大きい/小さい値でなければ，性能に大きな影響を与えることはない

4.2.4 実験

本手法の有効性を確認するため，相互反射成分が直接反射成分よりも強く観測される対象を用意し，実環境で計測実験を行った．図 22 (a) に示すように，レーザプロジェクタ MP-CL1A (SONY 製) によってパターンを投影し，そこから横並びに 6cm の位置に設置したカメラ UI-3240CP-NIR (IDS 製) によって反射光を観測した．なお，実験は環境光の影響を抑えるため暗室内で行った．計測対象として，図 22 (b) に示すように，金属製の蝶番とアルミホイル製のマドレーヌカップを用いた．金属製の蝶番は，手前に向かって約 45 度ずつ折りたたまれた状態で設置した．意図的にエピポーラ平面上の相互反射が強く表れる形で計測し，提案手法がエピポーラ平面上の相互反射成分に有効であるかどうかを確かめることにする．また，全方向に複雑な相互反射成分を発生させる対象としてアルミホイル製のマドレーヌカップにおいても同様のセッティングで実験を行った比較対象として，グレイコード法でも計測を行った．また，計測はプロジェクタとカメラを Episcan として同期を行う形でも行った．



(a) 実験の様子



(b) 対象物体

図 22 実験環境. (a) プロジェクタ・カメラシステム (b) 対象物体. 金属製の蝶番とアルミホイル製のマドレーヌカップ

4.2.5 結果と考察

提案パターンを投影して得られた視差情報のうち，第1候補から第3候補までのデコード候補を図23に示す．

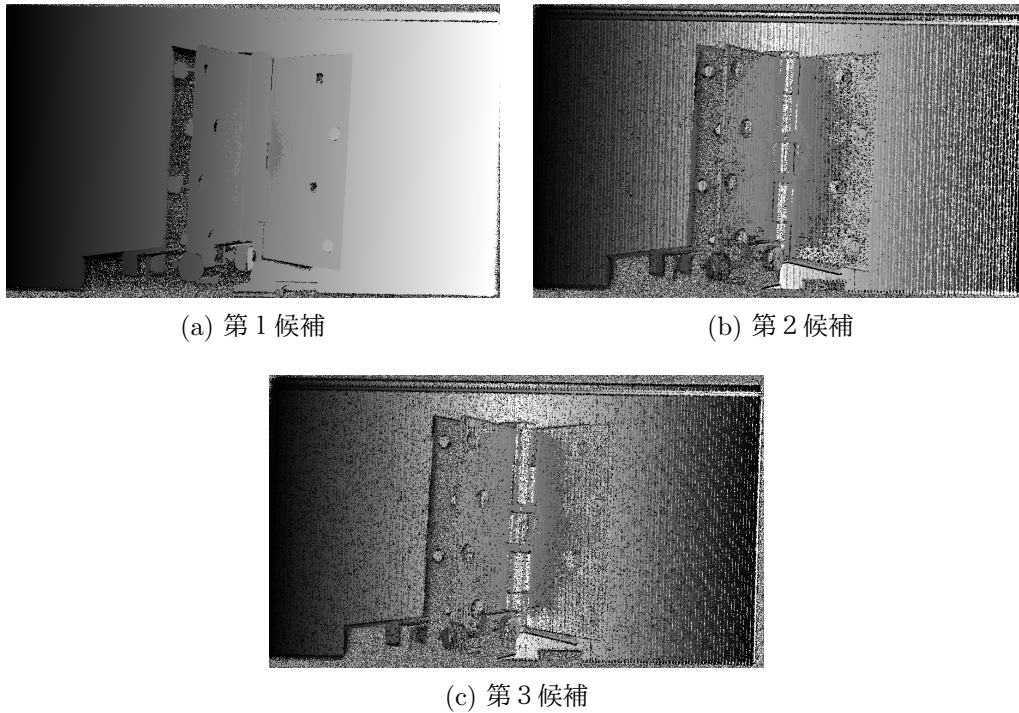
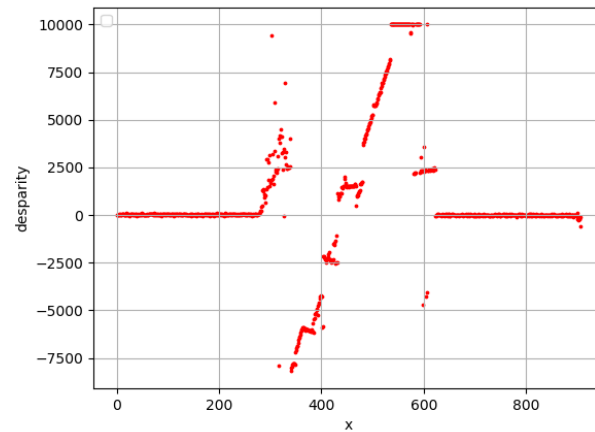


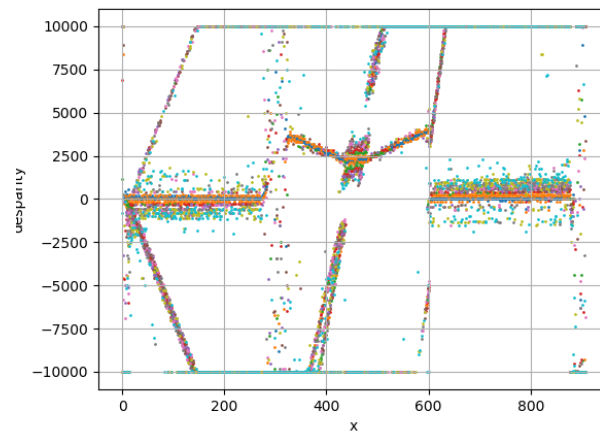
図23 デコード候補画像．対応するプロジェクタピクセルの座標を明るさで表現したもの．直接反射の経路を表す対応点は，(a) 第1候補で失われてしまった視差情報も (b) 第2候補 (c) 第3候補のといったより下位の候補で補償することが出来る．

図から，視差情報の第1候補では，平面上で視差が比較的滑らかに変化している一方，蝶番の中央部分では視差が不連続となっている箇所が見られた．第1候補の視差情報は多くが直接反射成分によるものであると考えられ，比較的滑らかに変化している部分は計測対象物の形状を良く表しているといえる．一方，中央部分に見られる不連続な視差情報を持つ箇所は，実際の物体形状にはそぐわない．この原因として，左右の平面板からの相互反射成分による相互反射成分が直接反射成分に比べて強く，直接反射成分に対応する視差情報が第1候補

とならなかった点が考えられる．また，視差情報の第2候補以下では，蝶番の左右端に近づくにつれて視差情報が不安定になっているが，第1候補で視差が不連続となっていた中央部分では，直接反射成分によるものと思われる視差情報が含まれていた．



(a) グレイコード

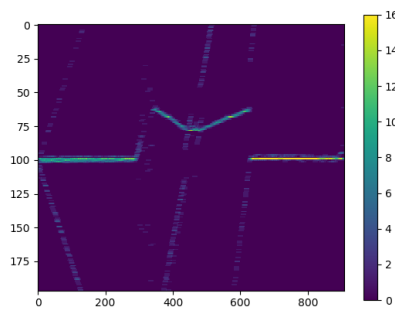


(b) 提案手法

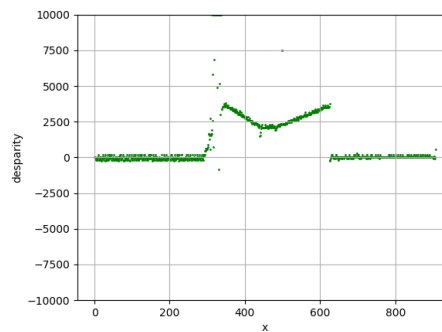
図 24 推定された視差の比較． (a) グレイコード法により推定された視差．視差が不連続でかつ大きくゆがんでいる． (b) 各ピクセルにおいて第10位までの候補を視差空間にプロットした様子．正しい視差に多数の点がプロットされていることが確認できる．

図 24 には、観測画像のある 1 行において、グレイコード (a) と提案パターン (b) を用いて復元した視差を図示する．なお (b) では視差情報の第 1 候補から第 3 候補までの結果をプロットしてある．計測対象に金属特有の反射が生じるため、グレイコード (a) ではほとんど正しい視差が得られていないように見える．一方、提案手法 (b) では視差情報の候補を適切に選択することで正しい形状が取得できることが示唆されている．

図 24(b) に示した候補に対し、投票を行った結果を図 25(a) に、図 25(a) の投票結果に基づき、図 24(b) の視差を一意に求めた結果を図 25(b) に示す．図より、正しい形状を示す位置に投票数が集中し、投票によって計測対象の本来の形状を示す視差情報を抽出できていることが確認できる．



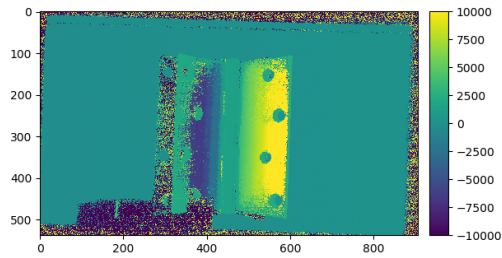
(a) 投票結果.



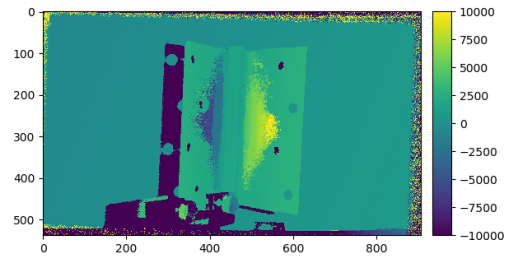
(b) 投票により 1 つに絞られた視差候補.

図 25 投票による視差推定．(a) 投票結果．投票数を色で表した図．色が明るくなるほど、周辺に点が密集していることを意味する．(b) 投票により 1 つに絞られた視差候補．

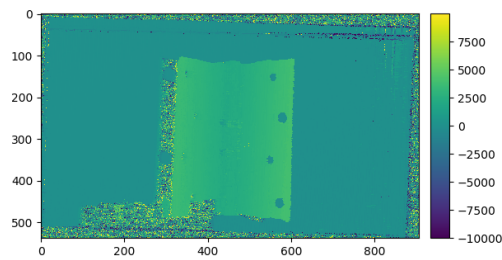
最後に、提案手法を画像全体に適用して視差を求めた結果と、比較対象にグレイコードから視差を求めた結果を図 26 に示す．グレイコードの結果では、直接反射成分に相互反射成分が重なり合い、視差情報のデコードを大きく誤っていることが見て取れる．Episcan の結果においても、エピポーラ平面上的相互反射成分を取り除けないという特徴から、部分的に視差情報の導出に失敗している．一方で、提案手法の結果では、計測対象のほぼ全域で視差を正しく推定できていることが確認された．



(a) グレイコード法



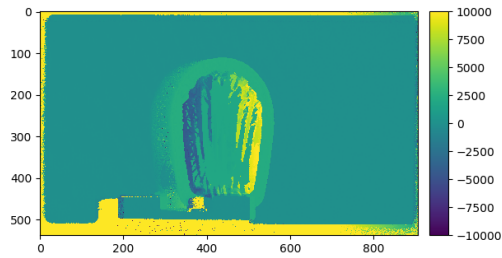
(b) Episcan



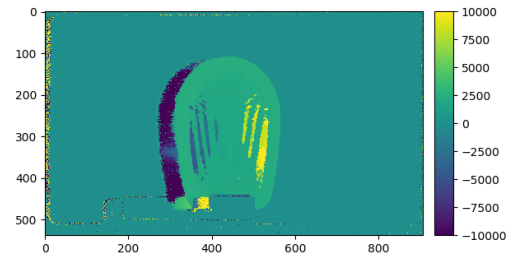
(c) 提案手法

図 26 推定された視差画像．(a) グレイコード法による視差推定結果．鏡面反射の影響を強く受けている．(b)Episcan を用いた視差推定結果．エピソード平面上に発生した相互反射成分を除去しきれていないため，部分的に計測エラーが見られる．(c) 提案手法を用いて出した視差推定結果．エピソード平面上で発生した相互反射成分に対しても滑らかな視差が得られている．

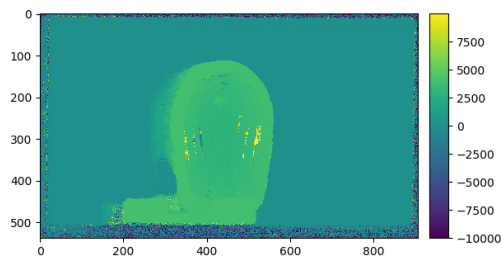
この結果により，提案手法がエピソード平面上に発生した相互反射を取り除き，正しい形状を計測することが出来ることが確認された．次にアルミホイル製のカップに対して同様の実験を行った結果を図 27 に示す．



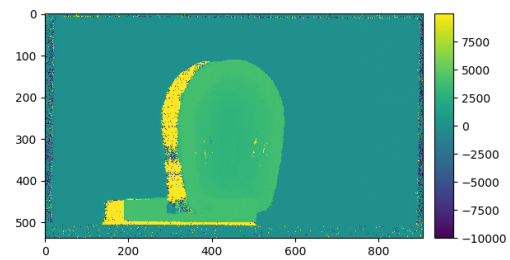
(a) グレイコード法



(b) Episcan



(c) 提案手法



(d) 提案手法+Episcan

図 27 推定された視差画像. (a) グレイコード法による視差推定結果. 鏡面反射の影響を強く受けている. (b) 部分的に相互反射成分を取り除くことは成功したが, エピポーラ平面上の相互反射成分を取り除くことに失敗している. (c) 大方の誤計測を除去できているが, 複雑な相互反射成分の影響を受けて部分的に誤計測を発生させてしまっている. (d) 滑らかな視差が得られている.

この結果が示すように, 時間的周波数を用いたパターンはエピポーラ平面上で発生した相互反射成分に有効に作用するが, ほぼ画像垂直方向に発生する相互反射成分を取り除く能力を持っておらず, 単体で複雑な表面形状に対応することには限界がある.

しかし, Episcan と組み合わせることにより画像上の 2 次元空間で発生する全

方向の相互反射成分に対処することが出来る為，これにより形状依存の少ない金属計測が可能になった．

4.2.6 課題点と今後の展望

現地点では視差候補に優先順位を付けず，投票制により視差を求めるという手法を用いているため，外乱が多いほどに本来の形状を示す視差はより低位の候補に追いやられてしまう傾向がある．そのため，低位の候補まで対象に入れると大量の誤差に引っ張られて結果が悪化してしまうという傾向が見られた．(図 28)

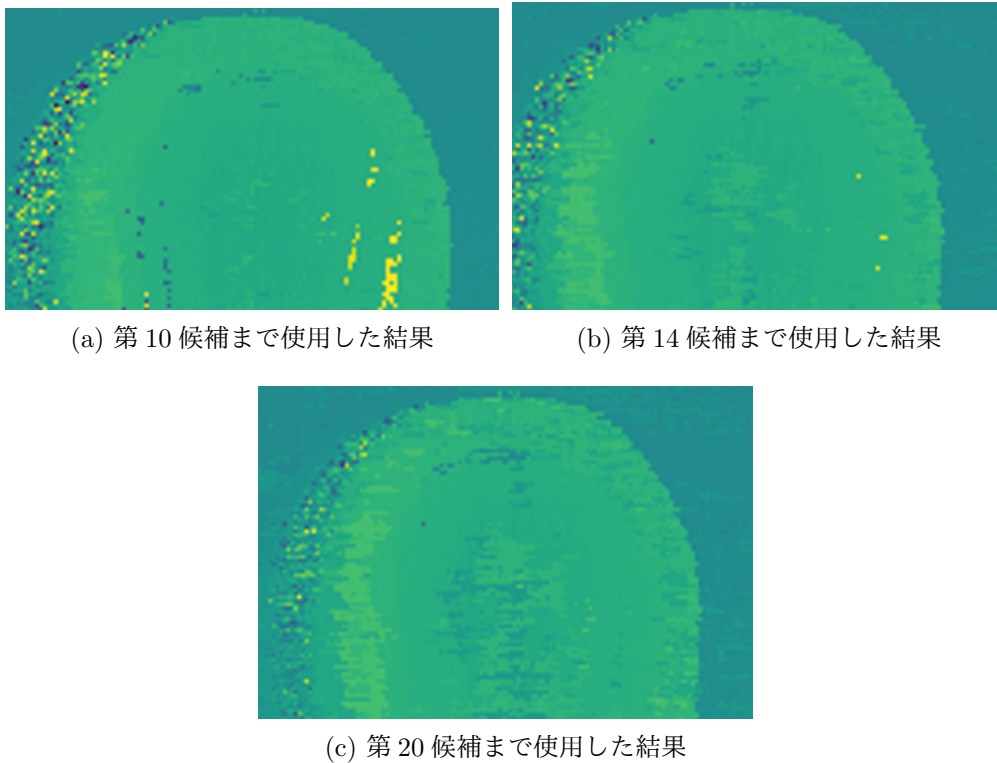


図 28 対象候補の深さと候補視差推定結果のエラー率．マドレーヌカップに対し投票の対象にしたコードを (a) 第 10 候補 (b) 第 14 候補 (c) 第 20 候補にしたそれぞれの視差推定結果．大域的にみると低位の候補まで広げるほど大きな視差の誤りは減っていくが，一方で誤差の影響が顕著に表れてくる．

この手法の解決策としては、直接反射成分を示すコード付近の候補が上位に上がることを防ぐようにフーリエ変換後のエッジ検出などを工夫することで影響を軽減する事ができると考えられる。

また、輝度周波数を手掛かりにデコードを行うため白飛びしてしまう箇所においては輝度変化の信号が矩形波に近似する。その結果線形のアーティファクトとなって低位の候補に現れる特徴が見られた。(図 29) ダイナミックレンジ内に輝度が収まるよう輝度格差低減の技術と組み合わせるか、輝度周波数ではなく白黒のビットパターンに置き換えることでこの問題が解決するのではないかと考えられる。

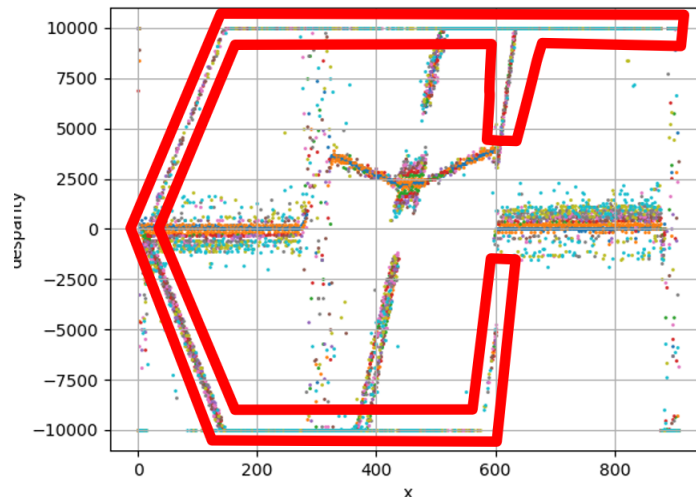


図 29 低位の候補に発生しているアーティファクト．図の赤枠で囲んだ部位．エイリアシングを起こして画像の中心から折り返しているのが分かる．

また、今回の計測において x 軸の分解能を 720 とおいたため、計 1440 枚のパターンを投影しており、実用性の上では現状の膨大な投影枚数を削減する必要がある．文献 [17] のように M 系列等も用いることによって計測にかかるコストを削減する必要があるだろう．

5. まとめ

本論文では金属材料をアクティブ3次元計測を用いて直接反射成分を手掛かりに測る際に発生する問題のうち、輝度格差と相互反射による情報喪失の2つに着目し、それぞれ個別に解決策を提案し、検証を通じてその有効性を確かめた。前者の問題に関してはEpiscanと併用できるシステムを用いて輝度格差を軽減し、より広い計測範囲を確保することを目的としてレンチキュラーレンズを用いた手法とカメラで得た画像をポストプロセスを加えたのち再びプロジェクタに返すことで輝度の最適化を行う手法を提案し、その実現可能性を検証した。

結果としてレンチキュラーレンズを用いたDiffused Structured Lightにより投影パターンの自由度を1次元失うことはEpiscanと相性がいいとは言えず、さらに屈折によってプロジェクタの像が歪む点でも相乗効果を期待することは難しいと考察した。また、再帰反射を用いた輝度の強度差軽減においては形状を求めるためにも視差を求めなければならず、輝度を対応付けるためにも視差が必要であることから、同軸系でないEpiscanにおいてこの問題を解決するのは困難であると考察した。

後者の問題に関しては形状計測可能かつEpiscanで取り除けないエピソード平面上の相互反射の除去機能を併せ持った手法を提案した。具体的には輝度を4つの足し算に分類し、クラス分けを行うことでビットの確定する領域と反転する領域を分けるという手法と、各列に異なる時間的周波数を割り当てた投影パターンを提案し、検証した。また、時間的周波数を用いたパターンを投影する手法では、フーリエ変換の利用により、撮影した画像列から画素ごとに大きな強度を持つ複数の周波数成分を視差情報の候補として抽出する手法を提案した。さらに、多数決原理に基づき、視差情報の候補から直接反射光に対応する視差情報を選択する手法を提案し、強い相互反射が発生している凹面金属を対象とした実験を通して、提案手法の有効性を示した。

その結果、輝度のクラス分けを行う手法では、検証実験を通じて1ピクセル内で発生する相互反射と直接反射は1対1であるという前提を満たさないという考察に至った。また、時間的周波数パターンを用いた研究結果においては金属の計測結果を改善させることが出来た。Episcanを用いたことで計測で発生している

相互反射の次元数が1つ減っていることで、1次元方向のコードを持つパターンで残りの相互反射を除去するという手法が十分な相乗効果を与えることが出来ていると考察した。今後のパターン数省略などの技術が組み合わさることにより、金属の高速計測においてさらなる改善が期待できるだろう。

謝辞

本研究を進めるにあたり，懇切なるご指導とご助言を頂いた光メディアインタフェース研究室 教授 向川 康博 先生 に心より感謝致します。

本研究の副査を引き受けて頂いたインタラクティブメディア設計学研究室 教授 加藤 博一 先生に厚く御礼申し上げます。

本研究における多大なるご助言だけでなく，論文執筆や学会発表において懇切なるご指導を頂いた光メディアインタフェース研究室 准教授 船富 卓哉 先生に心より感謝致します。

本研究を遂行及び学会の発表にあたり，遠方からにも関わらず研究をサポートしていただいた光メディアインタフェース研究室 助教 田中 賢一郎 先生に心より感謝致します。

本研究の行うにあたり，熱心なご指導を頂いた助教 久保 尋之 先生に心より感謝致します。

本研究における貴重なご助言を頂いた光メディアインタフェース研究室 岩口 堯史さんに厚く御礼申し上げます。

本研究における貴重なご助言を頂いた光メディアインタフェース研究室 高谷 剛志さんに厚く御礼申し上げます。

本研究における貴重なご助言を頂いた光メディアインタフェース研究室 櫛田 貴弘さんに厚く御礼申し上げます。

本研究における貴重なご助言を頂いた光メディアインタフェース研究室 北野 和哉さんに厚く御礼申し上げます。

また，研究室生活において様々な活動を支えて頂いた，光メディアインタフェース研究室秘書 登 淑恵さんに厚くお礼申し上げます。

最後に研究に関する議論だけでなく研究室生活において日頃からお世話になった光メディアインタフェース研究室学生の皆様に感謝申し上げます。

発表リスト

- [1] 山田 憲, 田中 賢一郎, 久保 尋之, 船富 卓哉, 向川 康博. 時間的周波数を利用した投影コードによる凹面金属の形状計測, 第 22 回画像の認識・理解シンポジウム (MIRU2019), OS1B-2, 2019.7

参考文献

- [1] O’Toole, Matthew, Achar, Supreeth, Narasimhan, Srinivasa G., Kutulakos, and Kiriakos N. Homogeneous codes for energy-efficient illumination and imaging. *ACM Trans. Graph.*, 34(4):35:1–35:13, July 2015.
- [2] 井口征士 and 佐藤宏介. 三次元画像計測. 昭晃堂, 1990.
- [3] Zuo, Xinxin, Du, Chao, Wang, Sen, Zheng, Jiangbin, Yang, and Ruigang. Interactive visual hull refinement for specular and transparent object surface reconstruction. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision*, pages 2237–2245, 2015.
- [4] Ikeuchi and Katsushi. Determining surface orientations of specular surfaces by using the photometric stereo method. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, (6):661–669, 1981.
- [5] Shree K Nayar and Arthur C Sanderson. Determining surface orientations of specular surfaces by intensity encoded illumination. In *Optics, Illumination, and Image Sensing for Machine Vision II*, volume 850, pages 122–127. International Society for Optics and Photonics, 1988.
- [6] Shree K Nayar, Katsushi Ikeuchi, and Takeo Kanade. Determining shape and reflectance of lambertian, specular, and hybrid surfaces using extended sources. In *International Workshop on Industrial Applications of Machine Intelligence and Vision*,, pages 169–175. IEEE, 1989.
- [7] G McGunnigle. Photometric stereo with gradated extended sources for recovery of specular surfaces. *JOSA A*, 27(5):1127–1136, 2010.
- [8] Wan-Chun Ma, Tim Hawkins, Pieter Peers, Charles-Felix Chabert, Malte Weiss, and Paul E Debevec. Rapid acquisition of specular and diffuse normal maps from polarized spherical gradient illumination. *Rendering Techniques*, 2007(9):10, 2007.

- [9] Nayar, Shree K, Gupta, and Mohit. Diffuse structured light. In *2012 IEEE International Conference on Computational Photography (ICCP)*, pages 1–11. IEEE, 2012.
- [10] Nayar and Shree K. Micro phase shifting. In *Proceedings of the 2012 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, CVPR ’12, pages 813–820, Washington, DC, USA, 2012. IEEE Computer Society.
- [11] Gupta, Agrawal, Veeraraghavan, and Narasimhan. Structured light 3d scanning in the presence of global illumination. *Proceedings of the IEEE*, pages 713–720, June 2011.
- [12] S.K. Nayar, G. Krishnan, M. D. Grossberg, and R. Raskar. Fast Separation of Direct and Global Components of a Scene using High Frequency Illumination. *ACM Trans. on Graphics (also Proc. of ACM SIGGRAPH)*, Jul 2006.
- [13] Nayar, Shree K, Krishnan, Gurunandan, Grossberg, Michael D, Raskar, and Ramesh. Fast separation of direct and global components of a scene using high frequency illumination. In *ACM SIGGRAPH 2006 Papers*, pages 935–944. 2006.
- [14] Chiba, Naoya, Hashimoto, and Koichi. Ultra-fast multi-scale shape estimation of light transport matrix for complex light reflection objects. In *2018 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pages 1–5. IEEE, 2018.
- [15] Chiba, Naoya, Hashimoto, and Koichi. 3d measurement by estimating homogeneous light transport (hlt) matrix. In *2017 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA)*, pages 1763–1768. IEEE, 2017.
- [16] 前田 涼汰, 山田 憲, 久保 尋之, 向川 康博, and 日浦 慎作. 偏光 episcan による金属物体の相互反射の除去. In *MIRU2019*, 2019.

- [17] 住吉 信一, 吉田 悠一, 石川 康太, 安倍 満, and 日浦 慎作. 少数の投影・撮影で鏡面相互反射光を抑制可能なアクティブ3次元計測. In *MIRU2019*, 2019.