

簡易型非接触三次元スキャン技術に関する研究（第 3 報）

生産技術部

中野太郎 田中徹 福島章吾

本研究では、検査工程を含む製造プロセス全体の一貫したデジタル化を支援するために、汎用的に活用できる簡易型非接触三次元スキャンシステムを開発する。本年度は、空間分解能の高精細化・高精度化に取り組み、フーリエ変換位相シフト法と、位相分布を安定的に連結する位相接続アルゴリズムを実装した GUI アプリケーションを開発した。また、民生品を組み合わせた簡易的な計測装置と GUI アプリケーションで構成される非接触三次元スキャンシステムを試作した。本システムを用いて三次元形状の計測実験を行った結果、撮影画像の画素分解能に近い高密度な三次元座標データを取得できることを確認した。

1. はじめに

近年、消費財・産業財を含むあらゆる分野の製造業は、経済のグローバル化や急成長するアジア諸国との激しい国際競争に直面しており、製品の多様化や短サイクル化への対応が急務となっている。このような情勢を受け、県内企業の設計製造部門においても、業務効率の向上やコスト削減、設計技術の高度化に寄与するものとして、CAD・CAM を活用したデジタル設計が広く普及してきている。

一方、生産現場における最終品の検査工程は、ノギスや自製テンプレートを用いた形状確認、または目視による外観検査が依然として主流となっている。これらの検査方法は、判断基準に個人差があるため再現性に乏しく、熟練した検査員を育成することが難しいという問題がある。加えて、デジタル設計の普及により、自由曲面で構成される繊細で複雑な製品形状の割合が増え、ノギスなどの汎用的な点間距離測定器のみでは対応が困難な案件が増加しており、画像処理技術を応用した効率的で再現性の高い定量的な計測技術に対するニーズが高まっている。

本研究では、検査工程を含む製造プロセス全体の一貫したデジタル化を支援するために、簡易型非接触三次元スキャンシステムを開発する。昨年度はプロジェクタとカメラの対応点を空間コード化法を用いて検出し、測定対象の立体形状を三次元点群データとして復元できることを確認した¹⁾。しかし、空間を識別する分解能が十分ではないため、取得できる計測点の密度が低いという課題が残った。そこで、本年度は、空間分解能の高精細化・高精度化を実現するために、より高密度で実用的な計測データを取得する三次元スキャン技術について検討した。

2. 位相シフト法による非接触三次元計測

2.1 空間コード化法の問題

空間コード化法²⁾による三次元形状計測では、明 [1]、暗 [0] で表現される 2 進コードの格子パターンをプロジェクタから投影し、空間を分割することによって投影領域を一意に識別している。このとき、各投影領域に付与される固有の空間コードから、カメラとプロジェクタの対応点を検出することができるが、投影格子の幅やプロジェクタの解像度に制約を受け、得られる空間コードが整数値で離散的なものになるため、対応点の高精細化には限界がある。

2.2 位相シフト法

空間分解能を向上させるために、より高い密度で対応点を検出する手法として位相シフト法³⁻⁵⁾がある。位相シフト法では、余弦波状の輝度分布を持つ格子パターンを、位相を 1 周期分変化させながらプロジェクタから投影し、その様子をカメラで撮影する。その際、位相変化に伴って推移する撮影画像の輝度を解析することによって、カメラとプロジェクタの対応点に相当する空間情報を、各画素ごとに初期位相として推定することができる。

一般的によく利用される位相シフト法として、位相を $\pi/2$ ずつシフトした輝度情報から輝度の推移を解析する 4step 法があるが、この手法の場合、観測された輝度情報のどれか 1 つにでもノイズが含まれていると、初期位相の推定精度が低下しやすいという欠点がある。そこで、本研究では、観測誤差などのノイズ成分を効果的に除去し、各画素の初期位相を高精度に推定することができるフーリエ変換位相シフト法⁶⁻⁹⁾を用いることにする。

2.3 フーリエ変換位相シフト法

2.3.1 解析手順

フーリエ変換位相シフト法の解析手順について説明する。まず、プロジェクトから投影する余弦波状の格子パターンの位相を、0 から 2π まで等間隔にシフトさせながらカメラで順次撮影する。投影格子の位相シフト量を α とするとき、1 周期を 6 分割して撮影した画像を時系列に並べた例を図 1(a) に示す。ここで、図 1(a) に赤い線で示した、画像座標系の Y 座標が v となるライン上の輝度分布を模擬的に表すと図 1(b) のようになる。さらに、ある 1 つの画素 (u, v) に注目し、その画素における輝度の推移を $I_0, I_1, I_2, I_3, I_4, I_5$

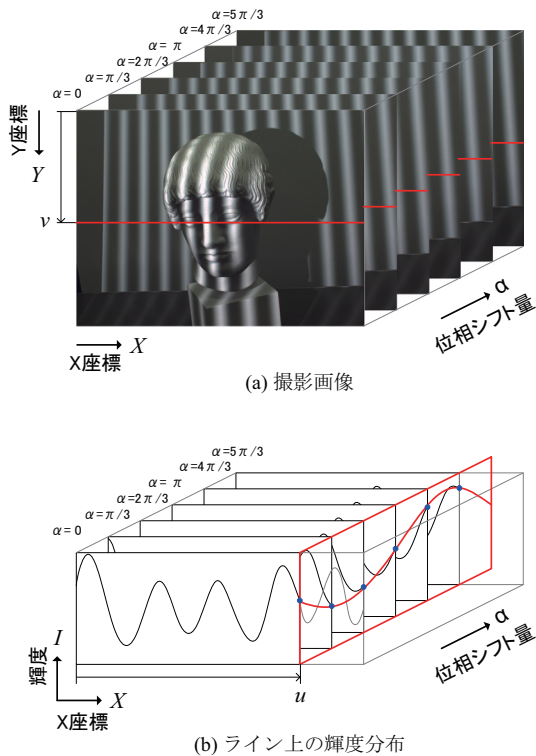


図 1 フーリエ変換位相シフト法

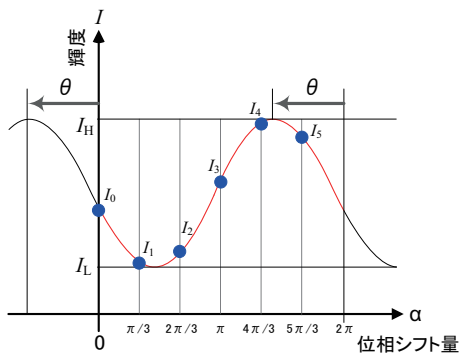


図 2 位相シフト量に伴う輝度の推移

として時系列でプロットしたものが図 2 である。このとき、画素 (u, v) の輝度の初期位相 θ は、 $\alpha = 0$ における位相と一致するため、位相シフト量 α に伴う輝度の推移を厳密に解析することで、画素 (u, v) の初期位相 θ を高い精度で推定できる。

2.3.2 計測原理

任意の画素 (u, v) に投影された格子の輝度分布 I は、位相シフト量 α を用いて次式のように表現できる。

$$I(u, v, \alpha) = a(u, v) \cos\{\theta(u, v) + \alpha\} + b(u, v) \quad (1)$$

$a(u, v)$: 画素 (u, v) における輝度振幅
 $b(u, v)$: 画素 (u, v) における背景輝度
 $\theta(u, v)$: 画素 (u, v) における初期位相

簡略化のために画素の座標値 (u, v) を省き、基本周波数を ω_0 、周期を T 、虚数単位を j として、式 (1) を複素フーリエ級数で表すと

$$I(\alpha) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} c_n e^{jn\omega_0\alpha} \quad (2)$$

となる。このとき、フーリエ係数 c_n は、複素共役 $e^{-jn\omega_0\alpha}$ との積の積分により次式となる。

$$c_n = \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} I(\alpha) e^{-jn\omega_0\alpha} d\alpha \quad (3)$$

さらに、式 (2) をフーリエ変換すると、周波数 w のスペクトルは、ディラックのデルタ関数 δ を用いて

$$F(w) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} 2\pi c_n \delta(w - n\omega_0) \quad (4)$$

と表される。

式 (4) により得られるスペクトルはノイズなどの不要な情報が含まれたものであるため、より高精度に初期位相を推定するためには、投影した格子パターンの位相変化に相当する周波数 1 の成分のみを抽出すれば良い。

式 (4) から周波数 $\omega = 1$ の成分のみを抽出し、式 (3) を代入すると、 $\omega_0 = 1$ 、 $n = 1$ 、 $T = 2\pi$ より

$$\begin{aligned} F(1) &= \sum_{n=-\infty}^{\infty} 2\pi c_1 \delta(0) \\ &= \delta(0) \int_{-\pi}^{\pi} I(\alpha) e^{-j\alpha} d\alpha \end{aligned} \quad (5)$$

式 (5) に式 (1) を代入すると

$$\begin{aligned} F(1) &= \delta(0) \int_{-\pi}^{\pi} \{a \cos(\theta + \alpha) + b\} e^{-j\alpha} d\alpha \\ &= \pi a e^{-j\theta} \delta(0) \end{aligned} \quad (6)$$

となる。したがって、初期位相 θ は、 $F(1)$ の複素平面上の偏角として、実部と虚部の値から次式のよう

に求めることができる。

$$\theta = \arctan \frac{\text{Im}\{F(1)\}}{\text{Re}\{F(1)\}} \quad (7)$$

式(7)を用いて、各画素における初期位相をそれぞれ個別に算出することで、図3に示すような撮影画像全体の位相分布が得られる。

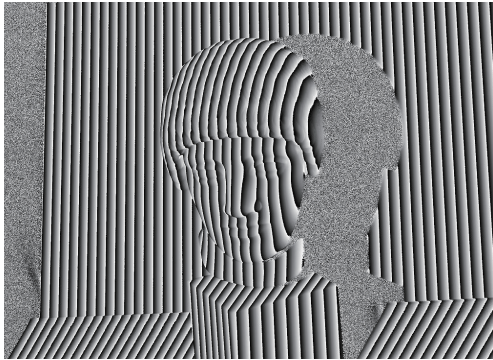


図3 水平方向の初期位相分布

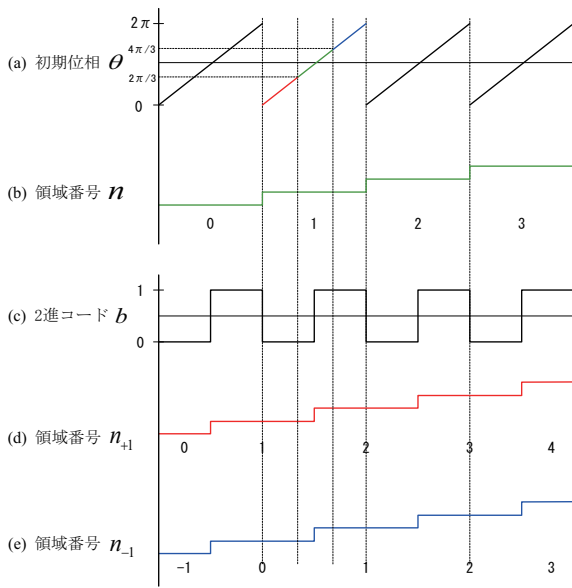
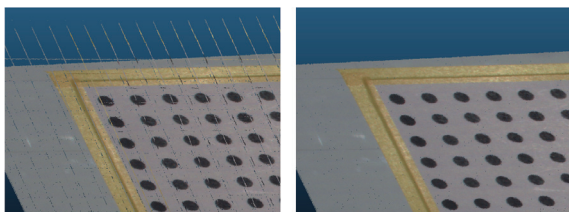


図4 初期位相と領域番号の対応関係



(a) 位相接続対策前

(b) 位相接続対策後

図5 位相接続誤差が形状復元結果に及ぼす影響

2.4 位相接続

2.4.1 空間コード化法を併用した位相接続

式(7)で得られる初期位相 θ は、0から 2π までの値が1周期ごとに繰り返される相対的な値となるため、空間的な情報を一意に求めることができない。この初期位相 θ を、全領域で連続した絶対位相とするために、空間コード化法を併用した位相接続を行う。

図4(a)および図4(b)は、投影空間を4つの領域に分割した場合の、位相シフト法で求めた初期位相 θ と空間コード化法で求めた領域番号 n を示している。このとき、初期位相 θ に $2\pi n$ を加算することで、 $0 \sim 2(n+1)\pi$ までの連続的な絶対位相を求めることができる^{10,11)}。

しかし、実際には位相シフト法の投影領域と空間コード化法の投影領域に微少な位置ずれがあるため、領域番号を用いて単純な位相接続を行うと、各領域の境界部分にスパイク状の接続誤差($\pm 2\pi$)が生じてしまう。そこで、全領域において滑らかな連続性を確保するために次のような対策を行った。

2.4.2 位相接続手順

空間コード化法で投影した格子パターンの幅をさらに1/2にした明暗パターンを投影し、図4(c)に示すような2進コード値 b を得る。ここで得られたコード値 b と格子番号 n を用いて加算・減算を行い、図4(d)および図4(e)に示すような、領域番号を半領域分前倒しした領域番号 n_{+1} と、半領域分遅らせた領域番号 n_{-1} を算出する。

位相接続は、図4(a)において赤、緑、青の線で示すように、初期位相 θ により3つの条件に場合分けを行い、参照する領域番号を変更させながら実施する。位相接続後の絶対位相を ϕ とすると、 $0 \leq \theta < \frac{2\pi}{3}$ では $\phi = \theta + 2\pi n_{-1}$ 、 $\frac{2\pi}{3} \leq \theta < \frac{4\pi}{3}$ では $\phi = \theta + 2\pi n$ 、 $\frac{4\pi}{3} \leq \theta < 2\pi$ では $\phi = \theta + 2\pi n_{+1}$ とし、境界を越えて誤った領域番号が参照されることを未然に防ぐことで、全領域において安定的に位相分布を連結することができる。

2.4.3 空間コード化法を併用した位相接続結果

位相接続誤差が三次元復元後の形状データに与える影響を確認するために、平面上に設置した円形グリッドパターンを三次元形状計測した結果を図5に示す。位相接続誤差への対策を実施していない図5(a)は、位相接続誤差に起因する計測誤差が領域境界部においてノイズ状に発生している。一方、対策を行った図5(b)では同様の計測誤差が殆ど発生していない。空間コード化法で得られた領域同士の連続性が高いという特性を位相接続に利用することで、誤差の少

ない滑らかな絶対位相が安定的に取得されていることを確認できる。

3. 非接触三次元形状計測実験

3.1 三次元スキャンシステム

空間コード化法とフーリエ変換位相シフト法を実装した GUI(Graphical User Interface) アプリケーションを開発し、自由局面形状を有する測定対象を三次元形状復元する確認実験を行った。試作した三次元スキャンシステムの計測装置を図 6(a) に、GUI アプリケーションの操作画面を図 6(b) に示す。

フーリエ変換位相シフト法に係る複素解析や行列演算プログラムは、線形代数ライブラリの Eigen を用いて実装した。その他、本システムのプログラム開発環境¹²⁻¹⁵⁾ および構成機器の仕様を表 1、表 2 に示す。なお、今回試作した装置構成の場合、1 回の計測でスキャン可能な撮影範囲は 450mm×350mm 程度となる。

3.2 三次元形状計測条件

全高 40cm 程度の石膏像を三次元形状計測した様子を図 7 に示す。フーリエ変換位相シフト法における画像のサンプリング枚数を 6 枚 (位相 0 ~ 2π を 6 等分) とし、パターン投影範囲の領域分割数を、水平方向 128 (= 2⁷) 分割、垂直方向 32 (= 2⁵) 分割として、

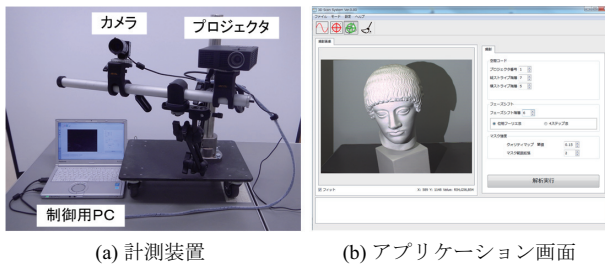


図 6 三次元スキャンシステム



図 7 石膏像の三次元形状復元

それぞれ位相分布を取得した。さらに、領域番号を確定するために相補パターン投影^{1,2)}を用いた空間コード化法による計測も併せて実施した。このとき、1 回の三次元形状計測で必要となる撮影枚数を表 3 に示す。

計測時間については、撮影条件や撮影画像の画素数によっても変わるが、開発した GUI アプリケーションを用いた場合、500 万画素の画像 40 枚の撮影時間が約 20 秒、三次元形状の復元演算処理時間が約 53 秒であった。

3.3 三次元形状復元結果

三次元形状復元処理により得られた石膏像の点群データを図 8(a) に示す。図 8(b) は点群データを部分的に拡大したものである。位相接続誤差の影響もなく、非常に滑らかな自由曲面形状が画素分解能に近い高密度な三次元形状データとして復元されている。

表 1 開発環境

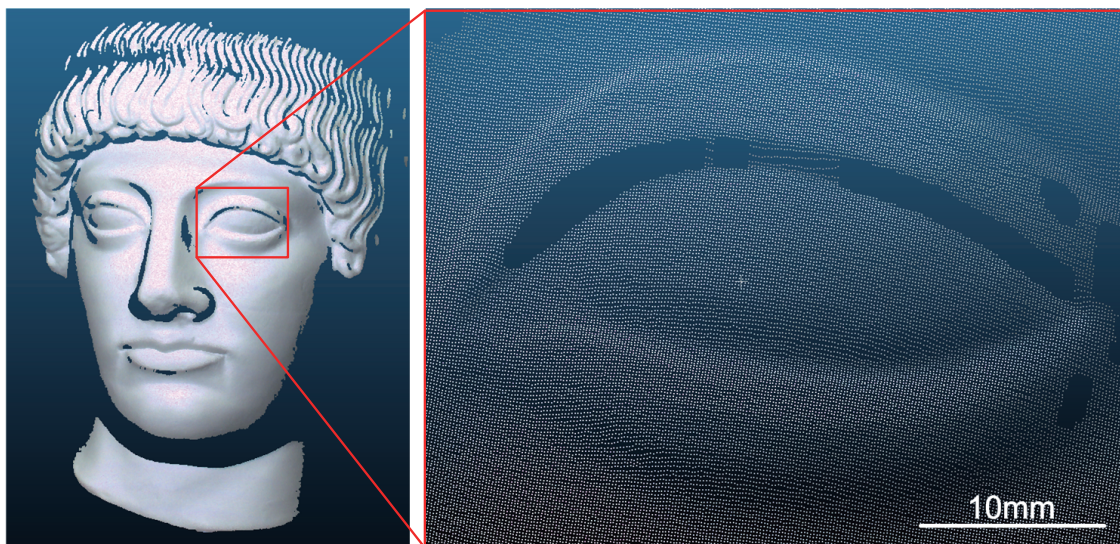
制御用パソコン	Panasonic Let's note CF-SX3 Microsoft Windows7 64bit
プログラミング言語	C++11
ライブラリ	Qt 4.8.6 Eigen 3.2.2 OpenCV 2.4.11 PointCloudLibrary 1.6.0

表 2 構成機器

使用機器	仕様	
プロジェクタ	型番	Optoma ML750
	光源	RGB LED
	最大輝度	700 [lm]
	解像度	1280 × 800 (WXGA)
カメラ	出力端子	HDMI
	型番	ImagingSource DFK72BUC02
	解像度	2592 × 1944 (500 万画素)
レンズ	出力端子	USB2.0
	型番	VS Technology SV-1214HF
	焦点距離	12 [mm]

表 3 三次元形状計測における撮影枚数

撮影内容		撮影枚数
空間コード化法 (相補パターン投影)	水平方向	7 × 2 [枚]
	垂直方向	5 × 2 [枚]
位相接続コード (相補パターン投影)	水平方向	1 × 2 [枚]
	垂直方向	1 × 2 [枚]
フーリエ変換位相シフト法	水平方向	6 [枚]
	垂直方向	6 [枚]
合計		40 [枚]



(a) 石膏像全体

(b) 点群データ拡大

図 8 三次元形状復元結果（点群データ）

4. 精度検証

4.1 検証方法

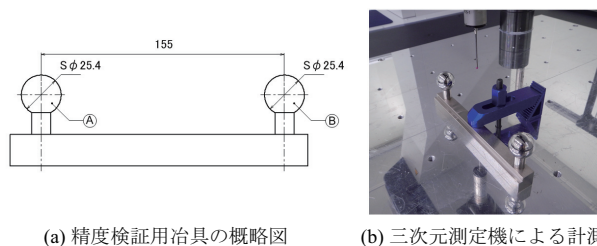
開発した三次元スキャンシステムの計測精度を確認するために、図 9(a) に示すような精度検証用具（ボールバー）をベアリング用の精密鋼球を用いて作製し、その鋼球の直径および球間距離を計測した。図 9(b) に示すように、同様の計測を接触式の三次元測定機（ミットヨ社製 LEGEX9106、平成 23 年度電源立地地域対策交付金）で実施し、その結果と本三次元スキャンシステムでの計測結果とを照合して計測精度を検証する。

4.2 計測条件

測定対象の鋼球は鏡面加工されており、投影光が反射して三次元スキャンシステムでの計測が困難であったので、図 10(a) に示すように光沢抑制用の白色粉末をスプレー塗布した状態で計測した。また、1 回の計測で得られる点群データはカメラで撮影された範囲内の部分的な形状データとなるため、図 10(b) に示すように点群データにフィッティングされた仮想的な球面を算出し、その球面の直径および中心座標を評価対象とした。その他、非接触三次元形状計測における撮影条件は、3.2 項で石膏像を撮影したものと同一条件とした。

4.3 計測結果

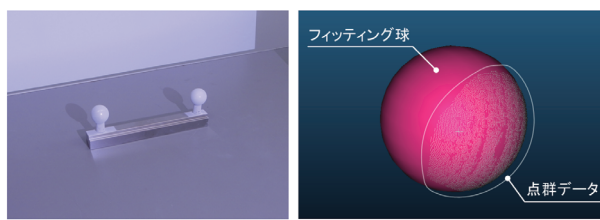
計測結果を表 4 に示す。接触式の三次元測定機で測定した結果を真値とした場合、鋼球の直径誤差が約 $-53\mu\text{m}$ 、球間距離の誤差が約 $109\mu\text{m}$ であった。塗布した白色粉末の影響や球面フィッティングの誤差など



(a) 精度検証用具の概略図

(b) 三次元測定機による計測

図 9 精度検証用具（ボールバー）



(a) 白色粉末を塗布した状態

(b) 球面フィッティング

図 10 三次元スキャンシステムによる計測

表 4 精度検証結果

	A 直径 [mm]	B 直径 [mm]	球間距離 [mm]
三次元測定機	25.4007	25.4053	155.2155
三次元スキャン (白色粉末塗布)	25.3594	25.3520	155.3249
誤差	-0.0413	-0.0533	0.1094

も考えられるため厳密な評価とは言えないが、球間距離の測定長 155mm に対し、測長誤差は 0.1% 以下に収まっており、比較的高い計測精度が確保できている。

5. おわりに

本年度は、分解能の高精細化・高精度化を実現するために、より高密度で実用的な計測データを取得する三次元スキャン技術について検討した。具体的には、空間コード化法で得られた領域同士の高い連続性を、位相分布の連結に利用することで位相接続の安定性を向上させた。また、フーリエ変換位相シフト法や三次元形状復元アルゴリズム等、三次元スキャンに係る機能を統合した GUI アプリケーションを開発し、測定対象の立体形状を画素分解能に近い高密度な三次元形状データとして復元できることを確認した。併せて、開発した三次元スキャンシステムの精度検証を行い、測長誤差 0.1% 程度という比較的高い計測精度が確保できていることを確認した。

一般的に、高精度な非接触計測装置は高額であり、安易に導入できるものではなく、非接触三次元計測技術の普及を妨げる要因の一つとなっている。本研究では、導入のしやすさや部品入手の容易性を考慮し、民生品を組み合わせた廉価な簡易型非接触三次元スキャンシステムを開発した。また、計測装置を構成する機器類は、USB や HDMI などの一般的なインターフェースでの接続を想定しており、使用用途に合わせたカスタマイズに柔軟に対応できるシステムとなっている。

今回取り組んだ技術開発により、汎用的に幅広く活用できる三次元スキャンの基盤技術を構築できた。今後は、開発したシステムを活用し、県内企業への非接触三次元計測技術の普及・導入に向けた試験・研究用途への応用展開について検討していきたい。

参考文献

- 1) 中野太郎, 田中徹, 福島章吾, 簡易型非接触三次元スキャン技術に関する研究 (第 2 報), 平成 27 年度佐賀県工業技術センター研究報告書, 2015, No.24, p.35-40.
- 2) 井口征士 他, 三次元画像計測, 株式会社昭晃堂, 1990, p.79-99.
- 3) J.H.Bruning, D.R.Herriott et al., Digital wave-front measuring interferometer for testing optical surfaces and lenses, Applied optics, 1974, 13(11), p.2693-2703.
- 4) K. Creath, V phase-measurement interferometry techniques, Progress in optics, 1988, 26, p.349-393.
- 5) 傳田壮志, 大橋健, 江島俊朗, 位相シフト法を用いた高速な 3 次元計測手法の提案, 電子情報通信学会技術研究報告, 1999, PRMU99-183, p.43-50.
- 6) 森本吉春 他, 光位相を用いた三次元形状計測, 情報処理学会研究報告コンピュータビジョンとイメージメディア, 2005, 147(18), p.139-146.
- 7) 藤垣元治, 光学的全視野計測における位相解析技術, システム制御情報学会誌, 2004, Vol.48, No.12, p.495-503.
- 8) Misuo Takeda, Hideki Ina, Seiji Kobayashi, Fourier-transform method of fringe-pattern analysis for computer-based topography and interferometry, J.Opt.Soc.Am., 1982, Vol.72, No.1, p.156-160.
- 9) Song Zhang, Shing-Tung Yau, Generic nonsinusoidal phase error correction for three-dimensional shape measurement using a digital video projector, APPLIED OPTICS, 2007, Vol.46, No.1, p.36-43.
- 10) 戸塚聡, 古川亮, 川崎洋, プロジェクタ・カメラシステムのレスポンス関数を用いた位相シフト法によるアクティブ・ステレオの精度向上, 画像の認識・理解シンポジウム, 2009, p.1594-1599.
- 11) Song Zhang, Xiaolin Li, Shing-Tung Yau, Multilevel quality-guided phase unwrapping algorithm for real-time three-dimensional shape reconstruction, APPLIED OPTICS, 2007, Vol.46, No.1, p.50-57.
- 12) Eigen, <http://eigen.tuxfamily.org/index.php>
- 13) The Qt Company, <http://qt-project.org/>
- 14) OpenCV, <http://opencv.org/>
- 15) Point Cloud Library, <http://pointclouds.org/>