



島根大学学術情報リポジトリ

S W A N

Shimane University Web Archives of kNowledge

Title

位相シフトデジタルホログラフィーを用いた管内表面形状計測
における円錐鏡の軸ずれによる誤差の補正

Author(s)

足立 徹, 横田 正幸

Journal

光学 40 (12), 641 - 648 , 2011-12

Published

2011

URL

<https://annex.jsap.or.jp/photonics/kogaku/public/40-12-kenkyuronbun.pdf>

この論文は出版社版ではありません。
引用の際には出版社版をご確認のうえご利用ください。

位相シフトデジタルホログラフィーを用いた管内表面形状計測における円錐鏡の軸ずれによる誤差の補正

足立 徹・横田 正幸

島根大学総合理工学部電子制御システム工学科〒690-8504 島根県松江市西川津町1060

Compensation of measurement error due to the positional misalignment of the cone-shaped mirror in the measurement of an inner surface profile of a pipe by phase-shifting digital holography

Toru ADACHI and Masayuki YOKOTA

Department of Electronic and Control Systems Engineering, Faculty of Science and Engineering, Shimane University, 1060 Nishikawatsu-cho, Matsue 690-8504, Japan

synopsis

Phase-shifting digital holography is applied to a surface profilometry of an inner surface of a pipe. For the surface contouring of the inner wall, two wavelength method using an injection-current induced wavelength change of a laser diode is used. To illuminate the inner wall of the pipe, a cone-shaped mirror is set inside the pipe. A compensation method using a calculated optical path length in the experimental alignment is used to evaluate the inner shape of the pipe. The effectiveness of the compensation method has been experimentally investigated by shifting the cone-shaped mirror from the center of the pipe. To demonstrate an inspection of the pipe inner wall, the proposed method has been applied to detection of two seals pasted on the inner wall. Three-dimensional profile of the seals on the inner wall of the pipe can be evaluated using a simple image processing.

Key words: inner surface profile, phase-shifting, digital holography, two wavelength method, optical path length

和文要旨

位相シフトデジタルホログラフィーを管内表面の3次元形状計測に適用した。管内壁面の等高線形成には、半導体レーザーへの注入電流の変化に伴う波長変化を利用する二波長法を用いた。なお、管内壁面の照明には円錐鏡を使用した。そして、実験配置において計算された光路長を用いる補正方法を使用して、管の内面形状を測定した。また、円錐鏡を管の中心からずらすことにより、補正方法の有効性を実験的に調べた。そして管内壁面の評価を行うため、管内壁面に貼った2つのシールの検出に提案手法を適用し、簡単な画像処理によりシールの3次元形状を計測した。

1. はじめに

現在、各種プラントにおける配管や半導体製造用の高純度ガス配管等の細管が機械設備などに数多く用いられているが、これらの配管は経年劣化により腐食、減肉、傷、割れ等の欠陥が生じる¹⁻³⁾。このような欠陥が生じると機器の破損や重大な事故を招く可能性があるため、定期的な検査や保守が必要であり、そのための管内の表面形状計測や欠陥検出が不可欠である。従来の検査では工業用内視鏡や管内カメラが用いられてきたが、劣化状態の判断に熟練を要する、定量的な評価ができないといった問題がある¹⁾。これ以外の欠陥検出には磁気を用いた探傷センサー⁴⁾や超音波探傷センサー⁵⁾が研究されており、直径数 mm 程度の貫通孔の検出⁴⁾や深さ数 mm 程度の凹凸や溝の検出⁵⁾が実現されている。ただし、欠陥部の可視化にはセンサー部分の2次元的な走査が必要になる。

他の方法としては、リング状のレーザー光を投影する光切断法によるもの⁶⁻⁹⁾や光位置センサー(PSD)を用いた三角測量法によるもの^{1,2,10,11)}が提案されており、これらの方法では管内形状をワイヤーフレーム表示することが可能である。しかしどちらの方法も管内へカメラやセンサーを挿入する必要があり、細管への適用は困難である。また測定時には、レーザー光のリングまたは点を管内面に投影して長手方向に走査させるため測定時間を要し、鏡面への適用性や管内部の状態を直視確認できないという欠点もある。

我々はこのような現状を鑑み、管内表面の形状測定に位相シフトデジタルホログラフィーを用いる手法について研究を行ってきた。この方法では、0次光、共役像が除去できるため¹²⁾、物体照明光の垂直入射が可能となり影は生じない。また、管内壁面の照明および反射光取得用に円錐鏡だけを管内に挿入するため、撮像素子の管内挿入が不要で、ホログラム再生像から管内の可視化もできる¹³⁾。

そこで本研究では、物体への垂直入射を可能にするために同軸配置による記録が可能な位相シフトデジタルホログラフィーに二波長法¹⁴⁻¹⁹⁾を導入し、円筒内表面形状計測を行った¹³⁾。光源に二つの異なる波長を用いて測定レンジの拡大を図る二波長法は、以前から位相シフト干渉計等^{14,15)}に用いられており、近年ではデジタルホログラフィーにも適用されてい

る¹⁶⁻¹⁹⁾。当初は軸外し記録による形状計測^{16,17)}が主だったが、位相シフト法の導入¹²⁾により同軸記録と二波長法の組合せによる形状計測も増えている^{18,19)}。軸外し記録に比べて位相シフト法では、各波長に対して最低3枚のホログラムを記録する必要があるが、0次光や共役像を除去することが可能なため、実像の再生のみに画素を用いることが可能になる。これにより横方向の分解能の向上も見込まれる。本研究では、小型で簡便に波長変化が実現できることから、半導体レーザーの注入電流を変化させることによるモードホップを用いて二波長を得た。

これまでの研究で、管と円錐鏡の中心位置ずれがある場合に測定結果に歪みが生じることや、円錐鏡のずれ量に対応した光路長分布を計算して測定結果から差し引くことで、この影響が補正できることがわかっている¹³⁾。今回は円錐鏡を管中心から既知量だけずらすことで、二波長法で得られる管内表面形状分布に生じる影響を詳しく調べた。また、既知のずれ量に対して光路長計算を行い、補正方法についてより詳細な検討を行った。そして、管内に付着した異物等の検出を想定して管内表面の2箇所厚みの異なるシールを貼り、得られた表面形状を画像変換処理により展開することでシールの3次元形状を計測した。

2. 基本原理

2.1 ホログラム記録と像再生

Fig. 1に実験光学系を示す。光源のレーザー光をビームスプリッターにより参照光と物体光に分け、参照光をピエゾ鏡に入射させる。ピエゾステージを稼動し参照光の位相を $\pi/2$ ラジアンで3回変化させる。円錐鏡により反射してきた物体光と参照光の干渉縞をホログラムとしてCCD (Charge coupled device) カメラにより記録する。このとき、CCD表面の座標を (x, y) として参照光と物体光、それぞれの複素振幅を

$$U_R(x, y) = A_R \exp\{i\phi_R(x, y)\}, \quad (1)$$

および

$$U_O(x, y) = A_O(x, y) \exp\{i\phi_O(x, y)\}, \quad (2)$$

とすると，記録されるホログラム強度は，参照光の位相シフト量を δ として次式で与えられる
12, 18)

$$\begin{aligned} I(x, y; \delta) &= |U_R(x, y)\exp(i\delta) + U_O(x, y)|^2 \\ &= |U_R|^2 + |U_O|^2 + U_O U_R^* \exp(-i\delta) + U_O^* U_R \exp(i\delta) . \end{aligned} \quad (3)$$

4ステップの位相シフト法により，CCD面上における物体光の複素振幅は(3)式を用いて

$$U_O(x, y) = \frac{1}{4U_R^*(x, y)} \left[I(x, y; 0) - I(x, y; \pi) + i \left\{ I\left(x, y; \frac{\pi}{2}\right) - I\left(x, y; \frac{3\pi}{2}\right) \right\} \right], \quad (4)$$

となる¹²⁾．(4)式の内フレネル回折積分を計算することにより，CCD面から距離 Z の平面上における再生像の複素振幅分布 $U_I(X, Y, Z)$ が得られる²⁰⁾

$$U_I(X, Y, Z) = \iint U_O(x, y) \exp\left\{ i k \frac{(X-x)^2 + (Y-y)^2}{2Z} \right\} dx dy . \quad (5)$$

ここで， $k = 2\pi/\lambda$ は波数である．ここでは，式(5)をフーリエ変換とみなすフーリエ変換法により像再生を行った．この場合，CCDの画素数を $N \times N$ ，横及び縦方向の画素ピッチを P_x, P_y とすると，再生像のサンプル間隔は $(\lambda Z/NP_x, \lambda Z/NP_y)$ となる．

2.2 二波長法による形状測定^{16,17,19)}

二波長法による物体の等高線の形成を考えるため，Fig. 2のように平面波が基準面 (ζ, η) に対して θ_s の角度で物体に入射する場合を考える．波長 λ_1 および λ_2 における波数ベクトルをそれぞれ k_{s1}, k_{s2} とする．参照光の位相をシフトさせて記録した4枚のホログラムから，それぞれの波長における物体面での複素振幅分布 $U_{11}(\zeta, \eta), U_{12}(\zeta, \eta)$ を求める．このとき，再生した物体光の波数ベクトルを k_{o1} 及び k_{o2} とすると位相差 $\Delta\phi(\zeta, \eta)$ は，

$$\begin{aligned} \Delta\phi(\zeta, \eta) &= \arg\{U_{11}(\zeta, \eta) U_{12}^*(\zeta, \eta)\} \\ &= (k_{s1z} - k_{s2z} + k_{o1z} - k_{o2z})h(\zeta, \eta) - (k_{s1\zeta} - k_{s2\zeta})\zeta, \end{aligned} \quad (6)$$

となる．上式において，最右辺の初項は基準面からの高さに比例して変化し，第二項は傾きを表すキャリアに相当する．このキャリアは垂直入射により除去できる．

波長を用いて式(6)を表すと,

$$\Delta\phi(\zeta, \eta) = 2(k_1 - k_2) h(\zeta, \eta) = 4\pi h(\zeta, \eta)/\Lambda, \quad (7)$$

となる^{18, 19)}. ここで, Λ は合成波長を表し, $\Lambda = 1/(1/\lambda_1 - 1/\lambda_2)$ である. 等高線の感度 Δh は $\Delta\phi = 2\pi$ に相当するので, $k_1 = 2\pi/\lambda_1, k_2 = 2\pi/\lambda_2$ とすると,

$$\Delta h = \Lambda/2 = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{2\Delta\lambda}, \quad (8)$$

となる. ここで, $\Delta\lambda = |\lambda_2 - \lambda_1|$ である.

3. 実験

Fig. 1に実験光学系を示す. 光源には出力30 mWの半導体レーザー (LD) を使用した. LDからの出射光はビームスプリッター (BS) により参照光と物体への照明光に分けた. 物体への照明光は, 測定するアルミニウム管 (長さ150 mm, 内径14.0 mm, 外径16.1 mm) 中に挿入された直径10.0 mm, 長さ15.0 mmの円錐鏡 (Edmund Optics TECHSPEC TSコーンミラー) で反射して管内表面に対して垂直に照射する.

一方, 参照光はPZT鏡 (Physik Instrumente P-753.12C) により $\pi/2$ ラジアンずつ3回位相シフトされ, それぞれ管内表面からの反射光 (物体光) と干渉し, ホログラムを形成する. そして4枚の位相シフトホログラムがCCDカメラ (SONY XC-66) で記録され, 画像データがPC内のフレームメモリ (CYBERTEK CT-3000A) に送られる. 使用したCCDはモノクロで 512×512 画素, 1画素の大きさ $12.92 \times 12.87 \mu\text{m}^2$, 8ビット階調であった.

二波長法を用いて管内表面の3次元形状を得るため, 光源の波長を変えて各波長に対して4枚のホログラムを記録した. 波長変化には光スペクトルアナライザの波長分解能 (0.1 nm) や二波長法により実現できる合成波長を考慮し, LDへの注入電流の変化によるモードホップを利用した. 実験で使用した二波長は $\lambda_1 = 658.40 \text{ nm}$, $\lambda_2 = \lambda_1 + \Delta\lambda = 658.86 \text{ nm}$ であり, この場合の等高線感度は式 (8) より $\Delta h = 0.472 \text{ mm}$ となった. このときLDへの注入電流は λ_1 の場合では72.0 mA, λ_2 の場合では73.5 mAであった. LDへの注入電流の変化でLD光の出力も変化する

が、形状計測には再生像の位相を用いるため計測結果への影響はないと考えられる。なお、波長変化を確認するため、光源の波長を光スペクトルアナライザ（OSA, ADVANTEST Q8344A）により確認しながら実験を行った。

4. 円錐鏡位置ずれとその補正

4.1 管と円錐鏡の中心位置がずれたときの影響

初めに円錐鏡の中心位置が管中心からずれた場合に測定結果に生じる影響を調べた。この場合、管の中心位置に合わせておいた円錐鏡（x, y方向のずれ量 $\Delta x = \Delta y = 0$ mm）をx軸に沿ってマイクロステージで移動させた場合について、二波長法により記録したホログラムから管内形状計測を行った。円錐鏡の移動はx軸方向にのみ行い（ $\Delta y = 0$ mm）、管の中心位置からのずれ量は $\Delta x = 0, 0.1, 0.3$ mmとした。なお、CCDの撮像面から管内壁面までの距離（ホログラムの記録距離）は364 mmであった。

それぞれの円錐鏡のずれ量 Δx において、二波長で記録したホログラムを用いて像再生を行った。この際、物体面における物体光の複素振幅を得るために、記録距離と等しい長さ364 mmを再生距離 Z として（5）式に代入して計算した。各波長の再生像間の位相差 $\Delta\phi$ から、式（7）により管内壁面の表面形状 $h_{\Delta x}(X, Y)$ を計算した結果をFig. 3に示す。なお、スペックルノイズ低減のため、それぞれの波長に対する再生像の複素振幅積 $U_1(X, Y) U_2^*(X, Y)$ に対して、移動平均処理を行った後に位相差を計算した^{19,21)}。スペックルノイズを十分に除去するために3×3画素の行列による移動平均処理を5回繰り返して計算した^{19,21)}。

Fig. 3の分布は、照明された管内の領域が円錐鏡により円形に変換、圧縮されたものを示している。従って、円錐鏡の中心部では管内表面の情報に対する圧縮率が高く、歪みが大きいため、中心の半径15画素（0.544 mm）の円形の部分を除去した。また、ずれ量 $\Delta x = 0.3$ mmの結果については位相の不連続が生じたため、位相接続処理を施した後に高さ分布を計算した。

Fig. 4に各円錐鏡ずれ量における高さ分布の中心（ $X = Y = 150$ pixels）を通る断面を示す。Fig. 4より、ずれ量 Δx の増加に伴って円錐鏡中心の両側における高さの差が大きくなり、その差が

$2\Delta x$ に相当することがわかる。これは実験光学系がマイケルソン干渉計となっており、物体光が往復光路となるため、結果的に円錐鏡のずれ量の2倍の光路差が生じることによる。従って、 $\Delta x = 0.3 \text{ mm}$ の場合には円錐鏡中心の両側における高さの差は 0.6 mm となり、この実験系における等高線感度 0.472 mm を超える。このために $\Delta x = 0.3 \text{ mm}$ の結果には位相の不連続が生じたと考えられる。測定結果において、位相の不連続が生じると位相接続処理が必要となり、計測におけるデータ処理が増える。また、ノイズが多い領域では位相接続処理が正しく行われなことがある²²⁾、正しい形状が得られないため、位相の不連続を生じさせないことが重要となる。そのためには、管と円錐鏡の中心位置ずれ量が等高線感度の1/2以下に収まるように円錐鏡位置を調整するか、または使用する二波長の波長差 $\Delta\lambda$ を小さくすることで、等高線感度を低くする必要がある。

4.2 光路長分布計算による補正

管と円錐鏡の中心位置をずらした場合に実験結果に生じた歪みの補正を試みた。円錐鏡を入射面側から見た場合の光路長分布を各位置ずれ量に対して計算し、この光路長分布を用いた補正法¹³⁾について検討した。これまでの研究で、実験値から、この光路長を差し引くことで補正が可能であることは確認できているが¹³⁾、より詳細に検討するために既知の円錐鏡ずれ量に対して光路長分布を計算し、補正の効果について定量的に調べた。

Fig. 5のような配置に対して、観測面 O' 内における光路長の分布を計算した。このとき管中心を原点 $O(0, 0)$ とした場合に、円錐鏡中心の座標を $(\Delta x, \Delta y)$ とした。観測面 O' 内の点 (m, n) を通った光線が円錐鏡面上で反射されて、管内壁を照らした場合の光路長 $L(m, n)$ は

$$L(m, n) = L_1(m, n) + L_2(m, n), \quad (9)$$

と表される。ここでは計算を簡単にするため、管内表面における散乱光や、光軸に対する管、円錐鏡の傾きは考慮していない。

円錐鏡中心のずれ量 $\Delta x = 0.1$ mmの場合に実験で得られた表面形状 $h_{0.1}(m, n)$ と比較するため、円錐鏡の中心を $(0.1, 0)$ とした場合の光路長分布 $L_{0.1}(m, n)$ を計算した。実験で得られた補正前の表面形状 $h_{0.1}(m, n)$ および光路長分布 $L_{0.1}(m, n)$ の3次元表示をFig. 6に示す。中心から半径15画素の円の部分は歪みが大きいため除去している。Fig. 6より、 $h_{0.1}(m, n)$ と $L_{0.1}(m, n)$ は高さの最大値は若干異なるがほぼ同じ形状であることがわかる。また、Fig. 7に示す補正前の表面形状 $h_{0.1}(m, n)$ と $L_{0.1}(m, n)$ の中心 ($X = Y = 150$ pixels) を通る断面図において、中心の両側における高さはほぼ同じである。これより補正後の表面形状 $h_{0.1}'(m, n) = h_{0.1}(m, n) - L_{0.1}(m, n)$ はFig. 8のように、補正前の表面形状に比べて中心の両側における高さの差が減少し、円錐鏡の中心位置をずらす前の分布に近い形状となったと考えられる。

円錐鏡のずれ量 $\Delta x = 0$ mmの場合に得られた形状 $h_0(m, n)$ と、補正前後の形状 $h_{0.1}(m, n)$, $h_{0.1}'(m, n)$ との比較を行い、補正の効果を調べた。4.1の実験では円錐鏡のずれ量 Δx のみを変えて管内壁面の同じ箇所を測定したため、補正が完全であれば $h_{0.1}'(m, n)$ は $h_0(m, n)$ と同じになるはずである。そのため、 $h_{0.1}'(m, n) - h_0(m, n)$ の計算結果 $\Delta h_{0.1}'(m, n)$ はFig. 9のようになり、補正を行わない場合 $\Delta h_{0.1}(m, n)$ に比べて残差が減少していることがわかる。このことを定量的に調べるため、 $\Delta h_{0.1}'(m, n)$ と $\Delta h_{0.1}(m, n)$ について、画像全体の 300×300 画素の範囲で残差の標準偏差を計算した。また、円錐鏡のずれ量 $\Delta x = 0.3$ mmの実験結果についても同様に補正前後の表面形状と $h_0(m, n)$ との比較を行った。それらの結果をTable 1に示す。補正後の標準偏差の値は、円錐鏡ずれ量 $\Delta x = 0.1$ mmについては 0.021 mm、 $\Delta x = 0.3$ mmについては 0.044 mmであり、0とはならなかった。これは実際の円錐鏡ずれ量が正確に $0.1, 0.3$ mmとなっていなかったことや、スペckルノイズの影響と考えられるが、どちらの円錐鏡ずれ量についても補正前に比べて標準偏差の値が $1/2$ 以下に減少しており、光路長分布による補正の効果が現れたと考えられる。

従って、実際の円錐鏡のずれ量に対応した光路長分布を計算し、実験結果の高さ分布から光路長分布を差し引くことで、管と円錐鏡の中心位置ずれの影響を補正できることが確認できた。

5. 管内壁面上の異物の検出

次に管内の凹凸や変形，異物の付着等の検出を考慮し，管を入射側から見て管内表面の上側にSeal 1（縦横 $1.76 \times 9.43 \text{ mm}^2$ ，厚さ 0.157 mm ），下側にSeal 2（同 $1.71 \times 9.32 \text{ mm}^2$ ， 0.078 mm ）の2種類のシールを貼り，これらの検出と3次元形状計測を試みた．シールの大きさは超音波探傷センサーや磁気探傷センサー等の分解能と同程度の大きさで，厚みは今回の二波長における合成波長の測定範囲内でなるべく薄いものとして 0.1 mm 程度とした．この程度の厚さの異物が検出できれば他の方法と比べても遜色がないと考えられる．シールは管の端から 5 mm の位置に円周方向に沿って貼った．

二波長により記録したホログラムの再生像から，管内壁面の表面形状を計算した結果をFig. 10に示す．この実験の場合の再生距離は 359 mm である．なお，中心から半径15画素（ 0.537 mm ）の円内は歪みが大きいため除去している．この実験は管と円錐鏡の中心位置を一致させて行ったため（ $\Delta x = \Delta y = 0 \text{ mm}$ ），前で述べた円錐鏡の位置ずれによる歪みの補正は行っていない．Fig. 10のカラーバーを参照すると，厚みの異なる2種類のシールが検出できていることがわかるが，長方形であるはずのシールの形状は，円錐鏡により変換されており歪んでいる．

このままでは管内表面の3次元形状が計測できないため，座標変換処理により管内面の展開図である長方形画像へと変換を試みた．変換処理はFig. 11に示すように，円形画像の中心からの距離 r_n とX軸からの角度 θ を用いて各画素値を抽出し，それを再配列することで行った．具体的には r_n を一定として θ の値を $\Delta\theta$ ずつ 0 から $(2\pi - \Delta\theta)$ まで変化させ，座標 $(r\cos\theta, r\sin\theta)$ にある画素値を抽出して再配列した．ここで $\Delta\theta$ は，円錐鏡の最外周部における円弧の長さが1画素ずつ変化するように決めた．すなわち，円錐鏡の中心から最外周部までの半径を r_m とすれば， $\Delta\theta = 1/r_m$ となる．以上のような一周分の画素値の抽出を， r_n を $\Delta r = 1$ ずつ増加させて円錐鏡の最外周部まで行うことで，長方形の画像への変換が可能となる．しかし変換後の表面形状は，管の内径を D_p ，円錐鏡の直径を D_m とすると横方向に対して $D_m/D_p = 10/14$ に圧縮されており，縦横比が実際の寸法とは異なっている．そのため，横方向へ1.4倍の拡大処理を行うことで，円錐鏡により照らされた管内側面の展開図を得た（Fig. 12）．なお，拡大により欠落した位置の画素値は線形補間により計算した．

Fig. 12より、長方形のシールの形状が見てとれ、座標変換処理により本来のシール形状が再現されていることが確認できる。これよりシールの3次元形状を求めた結果をTable 2に示す。ここで、縦横については各辺の2点の平均値を使用した。厚さは、シール面の内外で高さの平均値を計算し、それらの差より求めた。実測値は、縦横に関しては実験前に撮影した画像から、厚さに関してはマイクロメーターにより測定した。Table 2より、縦に比べ横については実測値との差が大きいことがわかる。これは縦横比を実際の寸法と合わせるために行った横方向への拡大処理により、シールのエッジ部分が不鮮明になったためと考えられる。またシールの厚さに関して生じた差については、シールを管内面に貼付した際に空隙ができたことや、スペックルノイズによる影響が考えられる。

6. まとめ

円錐鏡を使用した二波長位相シフトデジタルホログラフィーによる管内面の3次元形状計測法を提案した。そして管と円錐鏡の中心位置がずれた際に生じた歪みの補正が実験配置に対して計算した光路長分布を用いることで効果的に行えることが確認できた。

また、円錐鏡の使用により円形に変換された管内の表面形状に対し、座標変換処理を行うことで管内面の展開図を求め、管内表面に貼り付けたシールの3次元形状を得た。その結果、管の円周方向に対して比較的大きな誤差が生じたため、補間方法の検討など座標変換処理の高度化を図り、測定精度を向上させることが今後の課題として挙げられる。

今回は形状計測のために二波長を用いたが、より多くの波長を使用してホログラムを記録することで合成波長をさまざまに変えることができ、これにより測定感度を変化させることが可能となる。さらに、異なる波長域の光源を用いることで、管内に存在する異物の特定を分光計測により行うことも可能になると考えられる。

また、今回は管内面の狭い範囲しか測定していないため、今後は円錐鏡を走査して管内の広範囲にわたる測定を行うことが実用性向上のために必要となる。

文 献

- 1) 水沼守: “レーザビームセンサのパイプ検査への応用”, 精密工学会誌, **62** (1996) 363-367.
- 2) 水沼守, 小川茂樹, 桑野博喜: “レーザビーム走査法を用いた管路内面形状測定における欠陥検出の試み”, 精密工学会誌, **60** (1994) 1335-1339.
- 3) 水沼守, 小川茂樹, 西村力, 桑野博喜: “管内形状検査用レーザビーム走査型距離測定法”, 精密工学会誌, **57** (1991) 154-159.
- 4) 浜崎幸夫, 井出卓宏: “小口径管検査用小形磁気探傷センサ”, 精密工学会誌, **62** (1996) 359-362.
- 5) 高坪純治, 宮内秀和, 矢代茂樹, 王波, 津田浩, 遠山暢之: “超音波探傷技術の最前線 - レーザ利用の超音波伝播映像化技術-”, 可視化情報, **26** (2006) 29-34.
- 6) Wen W. Zhang and Bao H. Zhuang: “Non-contact laser inspection for the inner wall surface of a pipe,” *Meas. Sci. Technol.*, **9** (1998) 1380-1387.
- 7) O. Duran, K. Althoefer and L. D. Seneviratne: “Pipe Inspection Using a Laser-Based Transducer and Automated Analysis Techniques,” *IEEE/ASME Trans. on Mechatronics*, **8** (2003) 401-409.
- 8) T. Wakayama, T. Yoshizawa: “Simultaneous measurement of internal and external profiles using a ring beam device,” *Conference on two-and Three-Dimensional Methods for Inspection and Metrology VI* (SPIE San Diego, 2008) pp. 70660D-70660D6.
- 9) 田中秀樹, 長谷川尚哉: “携行可能な細管内面損傷測定装置の開発”, 広島市工業技術センター年報, **16** (2002) 59-63.
- 10) E. Wu, Y. Ke and B. Du: “Noncontact laser inspection based on a PSD for the inner surface of minidiameter pipes,” *IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement*, **58** (2009) 2169-2173.
- 11) M. Mizunuma, S. Ogawa and H. Kuwano: “Deformation detection on the pipe inner wall using a laser-beam scanning displacement sensor,” *Conference on Industrial Optical Sensing and Metrology: Applications and Integration* (SPIE Boston, 1993) pp. 98-105.
- 12) I. Yamaguchi and T. Zhang: “Phase-shifting digital holography,” *Opt. Lett.*, **22** (1997) 1268-1270.

- 13) M. Yokota and N. Ishitobi: "Estimation of inner surface profile of a tube by two-wavelength phase-shifting digital holography," *Opt. Rev.*, **17** (2010) 166-170.
- 14) Y. -Y. Cheng and J. C. Wyant, "Two-wavelength phase shifting interferometry," *Appl. Opt.*, **23** (1984) 4539-4543.
- 15) K. Creath, "Step height measurement using two-wavelength phase-shifting interferometry," *Appl. Opt.*, **26** (1987) 2810-2816.
- 16) J. Gass, A. Dakoff, and M. K. Kim, "Phase imaging without 2π ambiguity by multiwavelength digital holography," *Opt. Lett.*, **28** (2003) 1141-1143.
- 17) D. Parshall and M. K. Kim, "Digital holographic microscopy with dual-wavelength phase unwrapping," *Appl. Opt.*, **45** (2006) 451-459.
- 18) I. Yamaguchi, T. Ida and M. Yokota: "Measurements of surface shape and position by phase-shifting digital holography," *Strain*, **44** (2008) 349-356.
- 19) 井田登士, 山口一郎, 横田正幸: "二波長デジタルホログラフィーによる表面形状測定", *光学*, **35** (2006) 596-601.
- 20) C. Wagner, S. Seebacher, W. Osten, and W. Juptner: "Digital recording and numerical reconstruction of lensless Fourier holograms in optical metrology," *Appl. Opt.*, **38** (1999) 4812-4820.
- 21) I. Yamaguchi and M. Yokota: "Speckle noise suppression in measurement by phase-shifting digital holography," *Opt. Eng.*, **48** (2009) 085602.
- 22) F. Palacios, E. Goncalves, J. Ricardo, J. L. Valin: "Adaptive filter to improve the performance of phase-unwrapping in digital holography," *Opt. Commun.*, **238** (2004) 245-251.

Fig. 1 Experimental setup. LD, laser diode; CCD, charge coupled device; BS, beam splitter; OSA, optical spectrum analyzer; PC, personal computer.

Fig. 2 Principle of surface shape measurement by dual wavelength phase-shifting digital holography.

Fig. 3 Surface profile of an inner surface of the pipe: (a) $\Delta x = 0.0$ mm, (b) 0.1 mm and (c) 0.3 mm.

Fig. 4 Cross sections of height distribution $h_{\Delta x}(X, Y)$ at (a) $Y = 150$ and (b) $X = 150$ pixels in Fig. 3.

Fig. 5 Location of the cone shaped mirror inside the pipe and an optical path length $L(m, n)$ from the observation plane to the inner surface of the pipe.

Fig. 6 Three-dimensional map of (a) height distribution $h_{0.1}(m, n)$ and (b) calculated optical path length $L_{0.1}(m, n)$ for $\Delta x = 0.1$ mm.

Fig. 7 Cross sections of optical path length $L_{0.1}(m, n)$ and inner surface shape $h_{0.1}(m, n)$ at (a) $Y = 150$ and (b) $X = 150$ pixels in Fig. 6.

Fig. 8 Difference between calculated optical path length $L_{0.1}(m, n)$ and experimental height profile $h_{0.1}(m, n)$: (a) 2D display, (b) and (c) cross sections at $Y = 150$ and $X = 150$ pixels, respectively.

Fig. 9 Two-dimensional map for (a) $\Delta h_{0.1}(m, n) = h_{0.1}(m, n) - h_0(m, n)$ and (b) $\Delta h_{0.1}'(m, n) = h_{0.1}'(m, n) - h_0'(m, n)$, respectively.

Fig. 10 Height profile of the detected seals of different size pasted on the inner wall of the pipe.

Fig. 11 Transformation of the circular image into a rectangular one.

Fig. 12 Transformed surface shape of Fig. 10: (a) 2D display, (b), (c) cross sections at $X = 12, 34$ mm and $Y = 1, 3$ mm, respectively.

Table 1 Standard deviation σ of $\Delta h_{0.1}(m, n)$ and $\Delta h_{0.1}'(m, n)$.

Table 2 Size of Seal 1 and 2

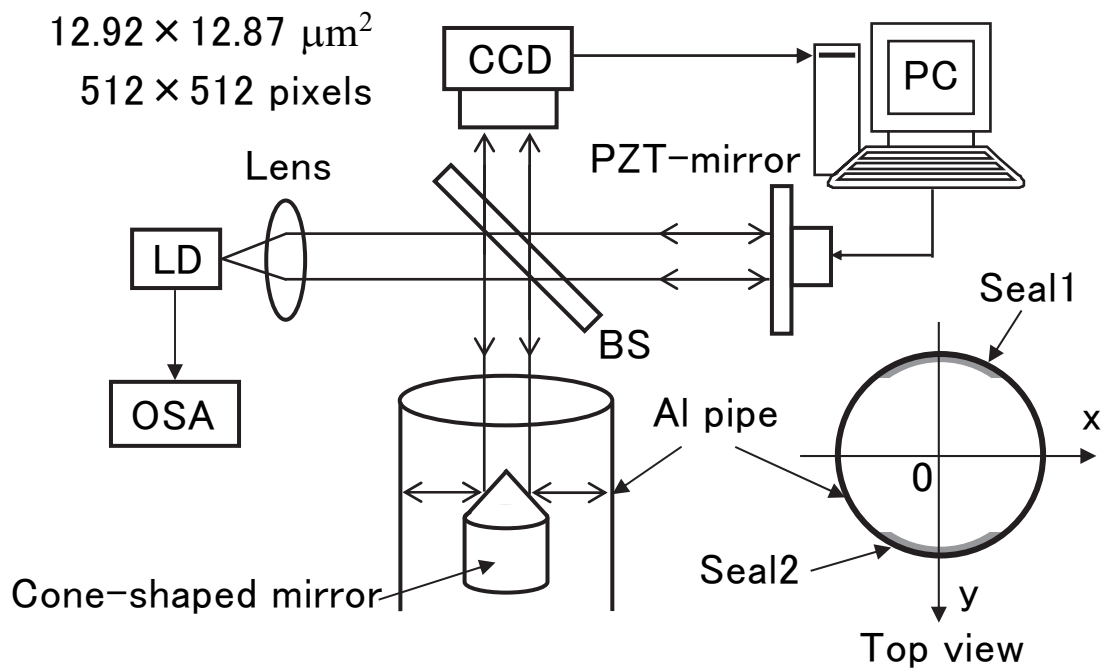


Fig. 1 Experimental setup. LD, laser diode; CCD, charge coupled device; BS, beam splitter; OSA, optical spectrum analyzer; PC, personal computer.

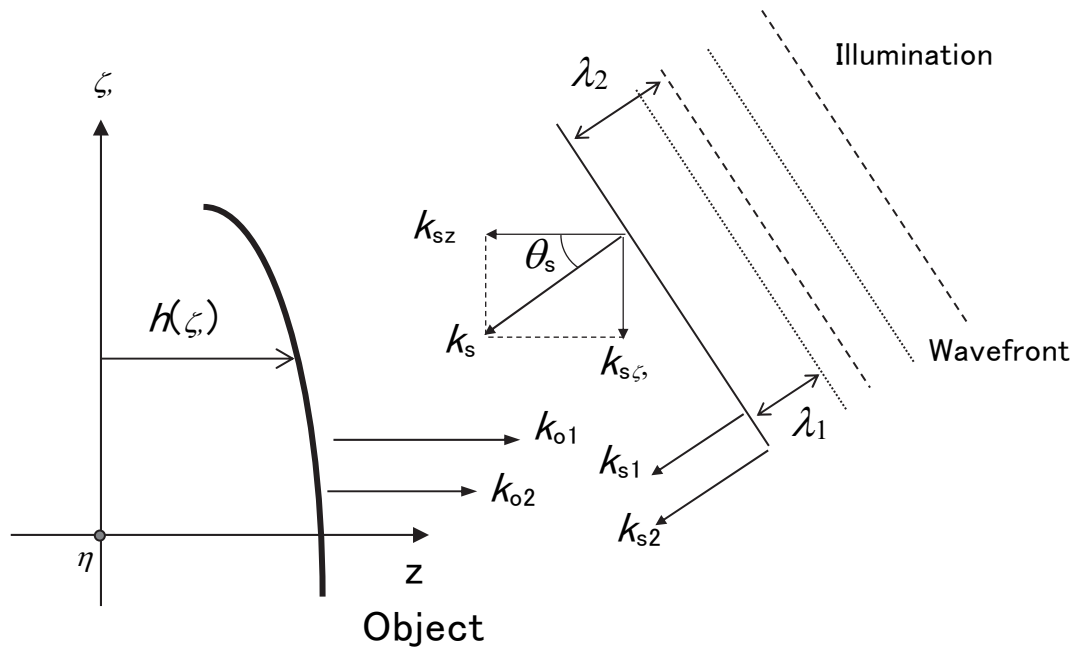


Fig. 2 Principle of surface shape measurement by dual wavelength phase-shifting digital holography.

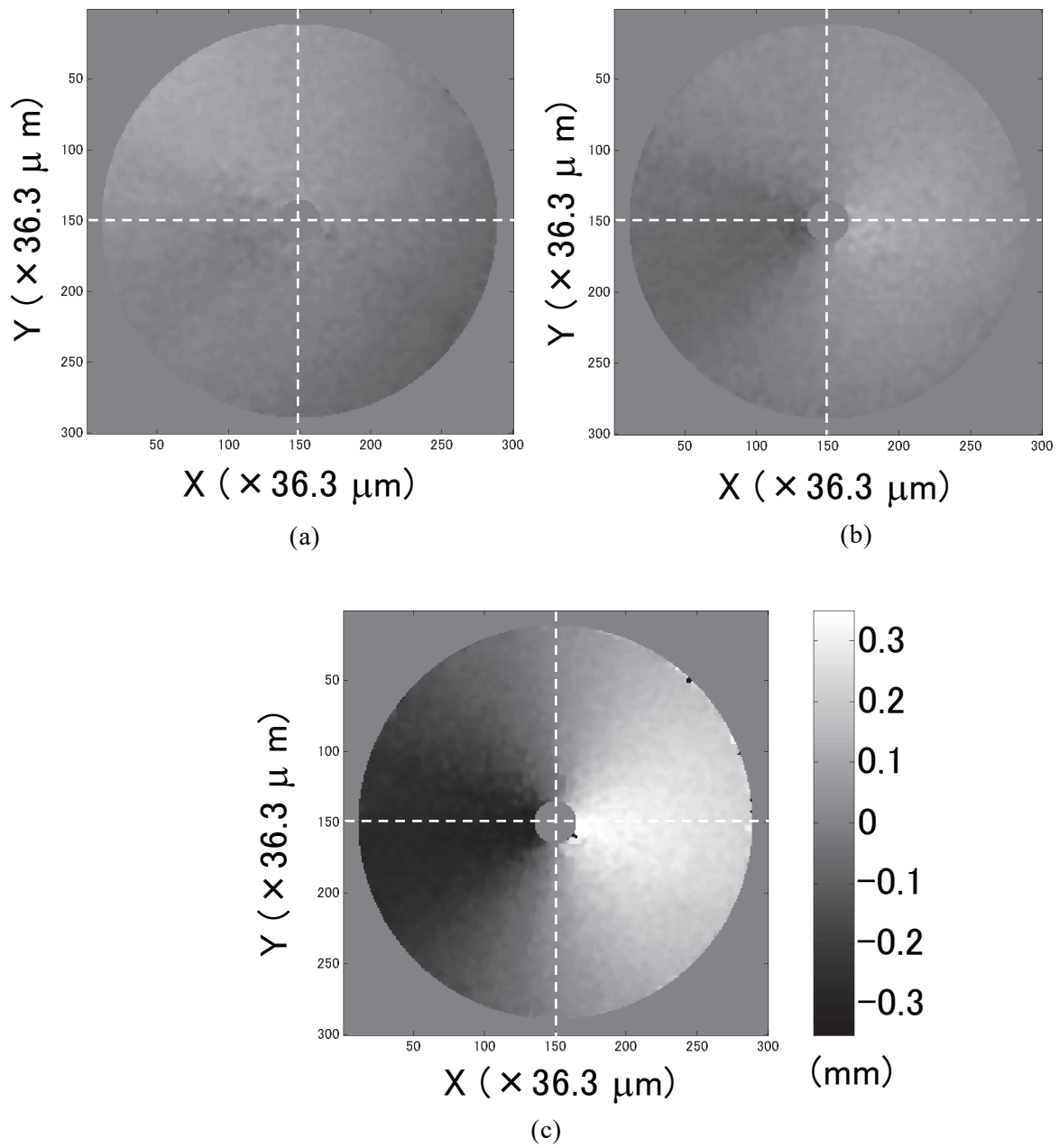


Fig. 3 Surface profile of an inner surface of the pipe: (a) $\Delta x = 0.0$ mm, (b) 0.1 mm and (c) 0.3 mm.

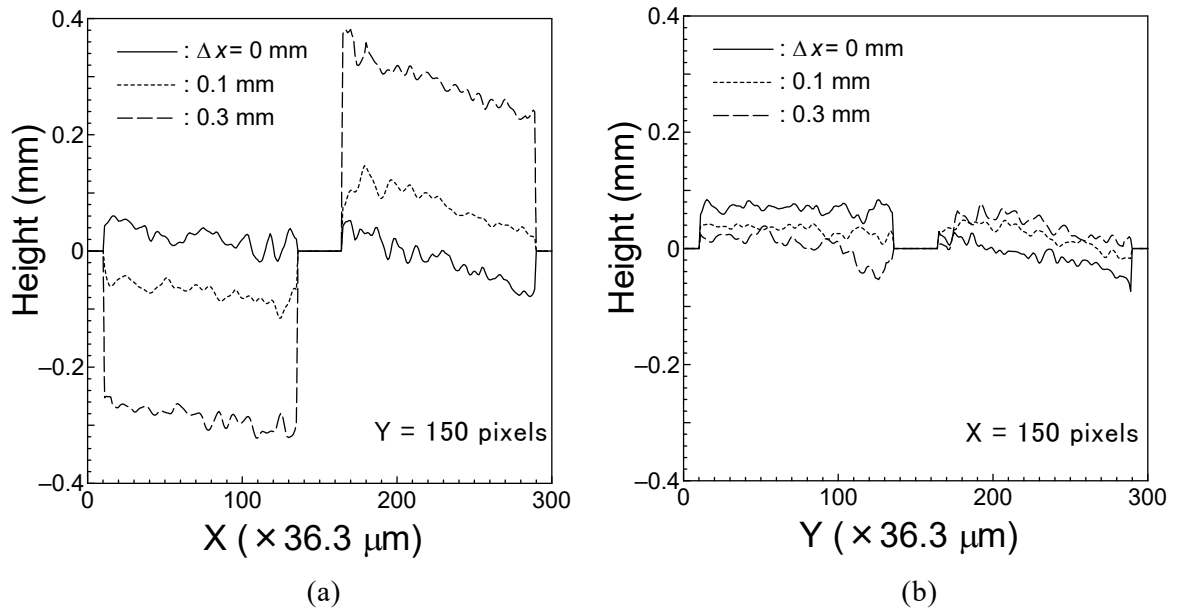


Fig. 4 Cross sections of height distribution $h_{\Delta x}(X, Y)$ at (a) $Y = 150$ and (b) $X = 150$ pixels in Fig. 3.

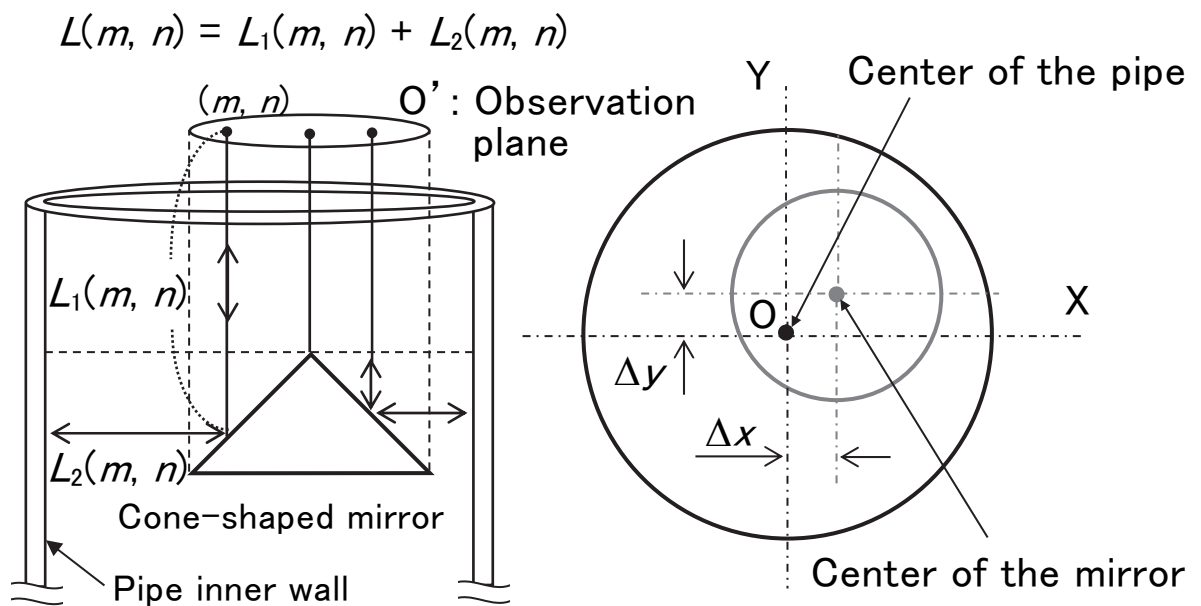


Fig. 5 Location of the cone shaped mirror inside the pipe and an optical path length $L(m, n)$ from the observation plane to the inner surface of the pipe.

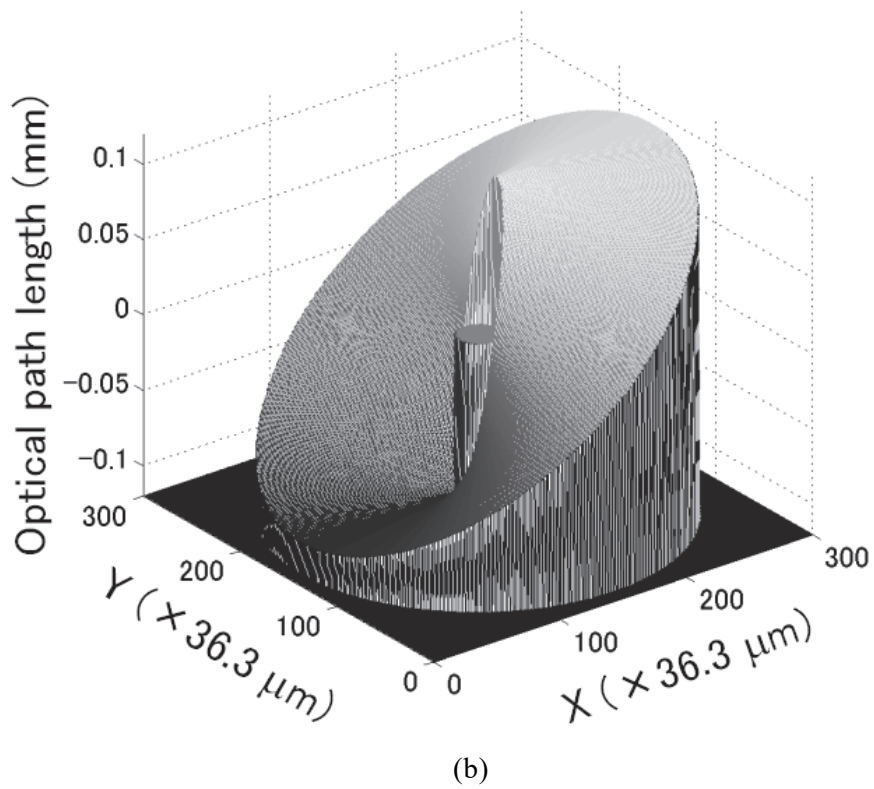
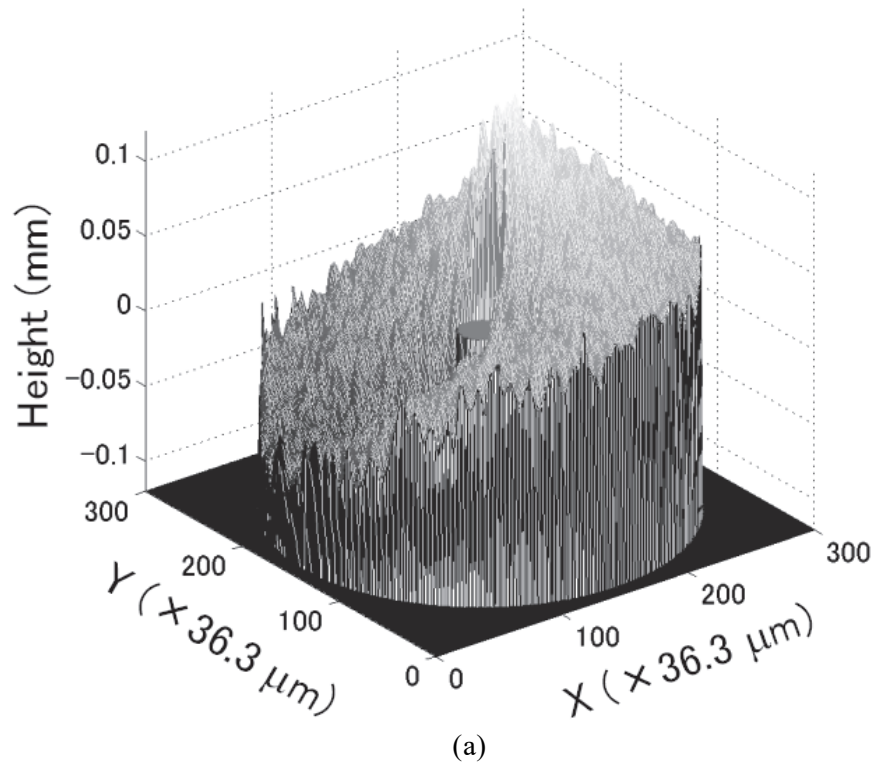


Fig. 6 Three-dimensional map of (a) height distribution $h_{0.1}(m, n)$ and (b) calculated optical path length $L_{0.1}(m, n)$ for $\Delta x = 0.1$ mm.

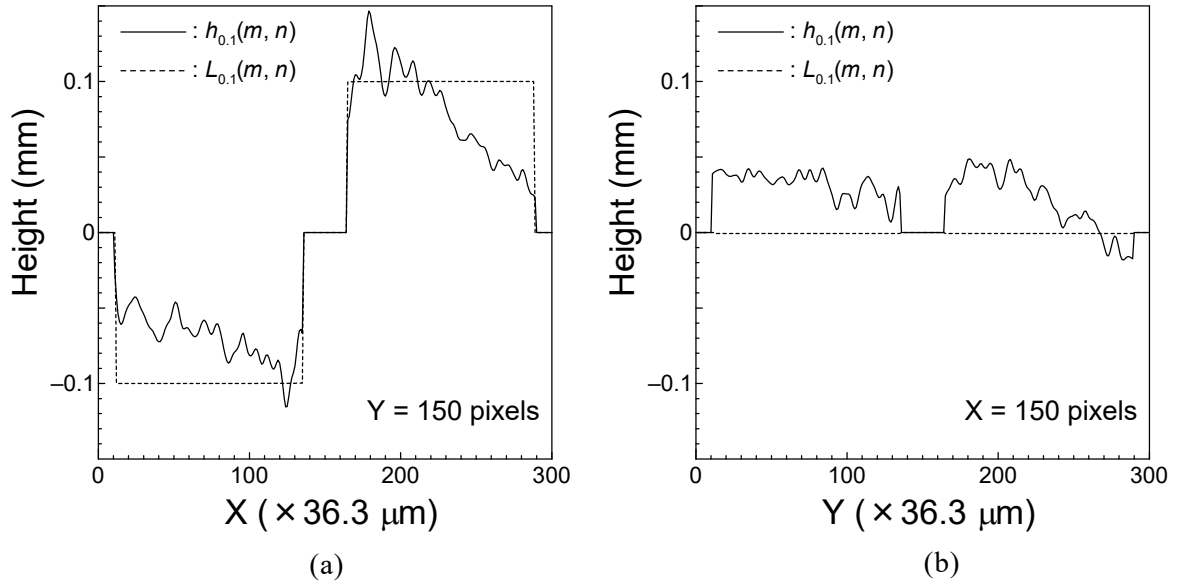


Fig. 7 Cross sections of optical path length $L_{0.1}(m, n)$ and inner surface shape $h_{0.1}(m, n)$ at (a) $Y = 150$ and (b) $X = 150$ pixels in Fig. 6.

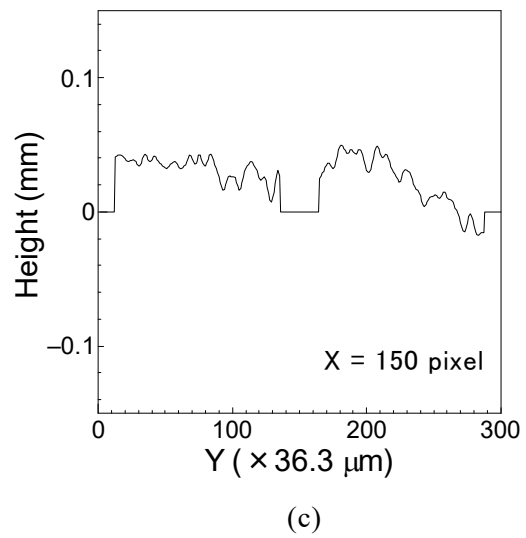
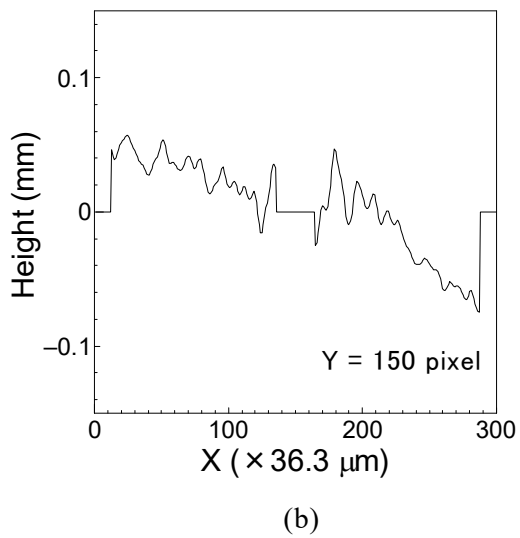
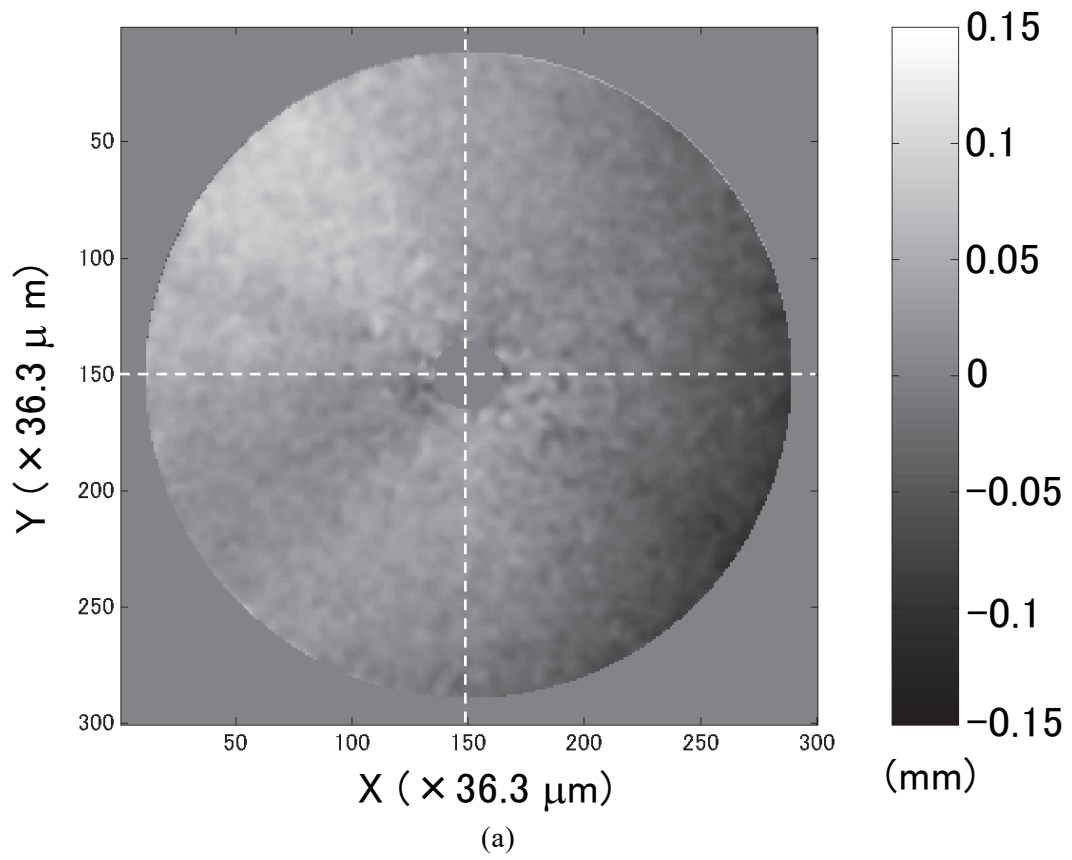


Fig. 8 Difference between calculated optical path length $L_{0.1}(m, n)$ and experimental height profile $h_{0.1}(m, n)$: (a) 2D display, (b) and (c) cross sections at $Y = 150$ and $X = 150$ pixels, respectively.

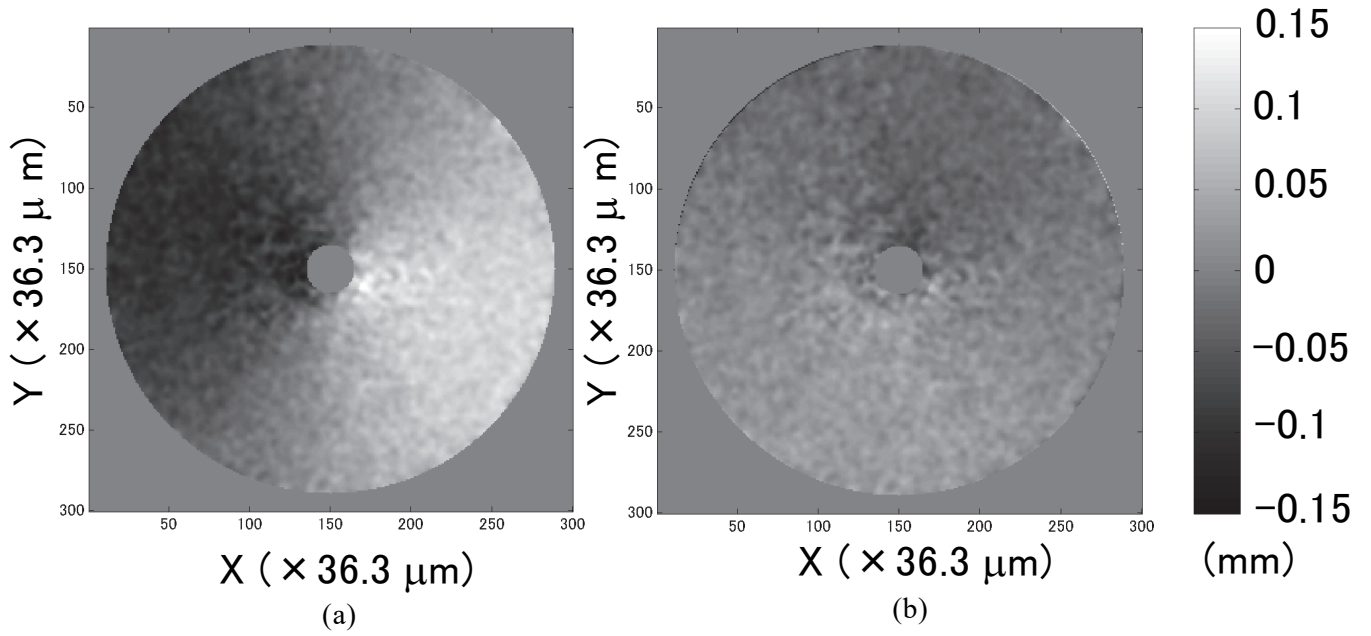


Fig. 9 Two-dimensional map for (a) $\Delta h_{0.1}(m, n) = h_{0.1}(m, n) - h_0(m, n)$ and (b) $\Delta h_{0.1}'(m, n) = h_{0.1}'(m, n) - h_0(m, n)$, respectively.

Table 1 Standard deviation σ for $\Delta h_{0.1}(m, n)$ and $\Delta h_{0.1}'(m, n)$.

Δx (mm)	σ (mm)	
	Before	After
0.10	0.058	0.021
0.30	0.183	0.044

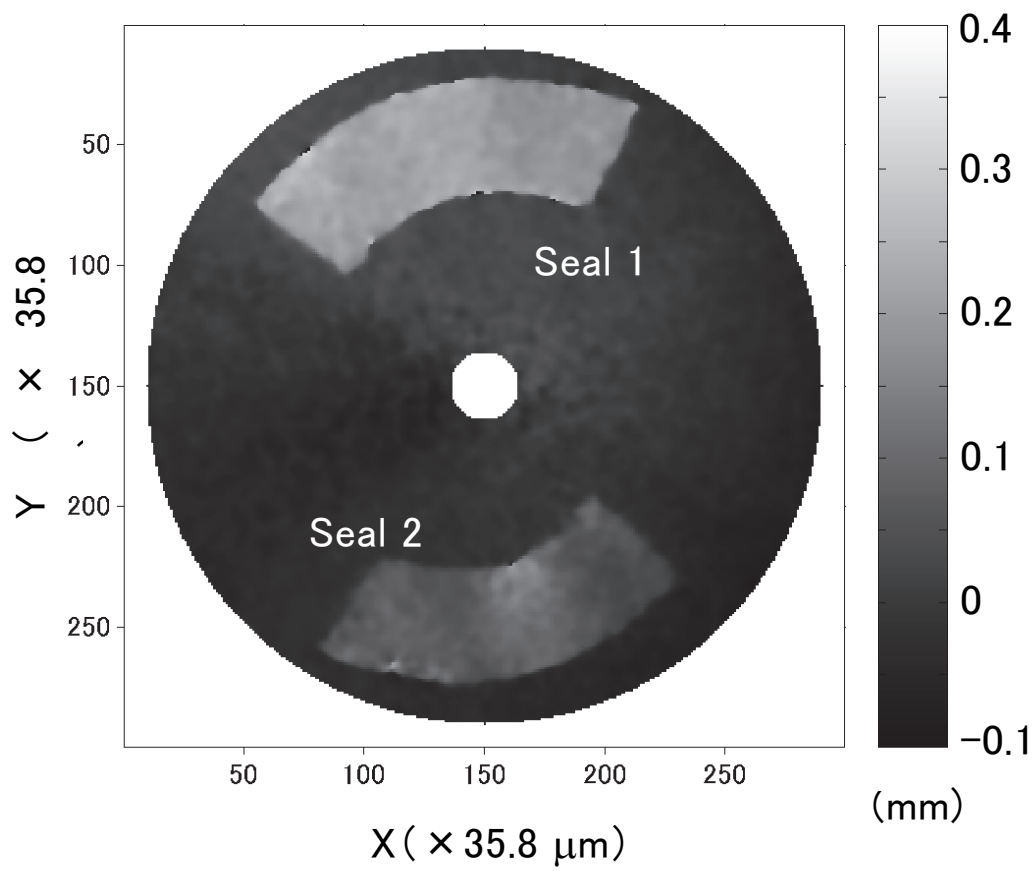


Fig. 10 Height profile of the detected seals of different size pasted on the inner wall of the pipe.

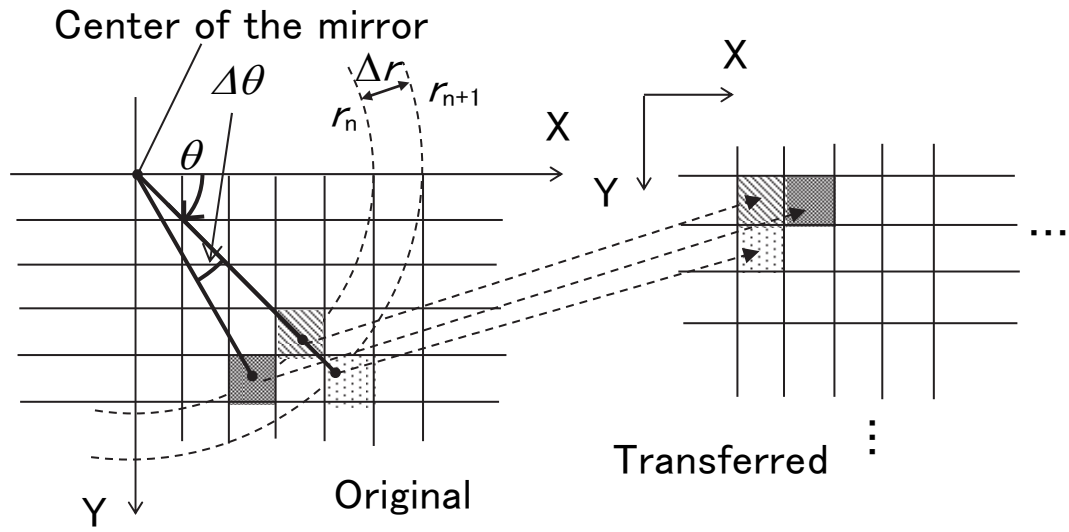
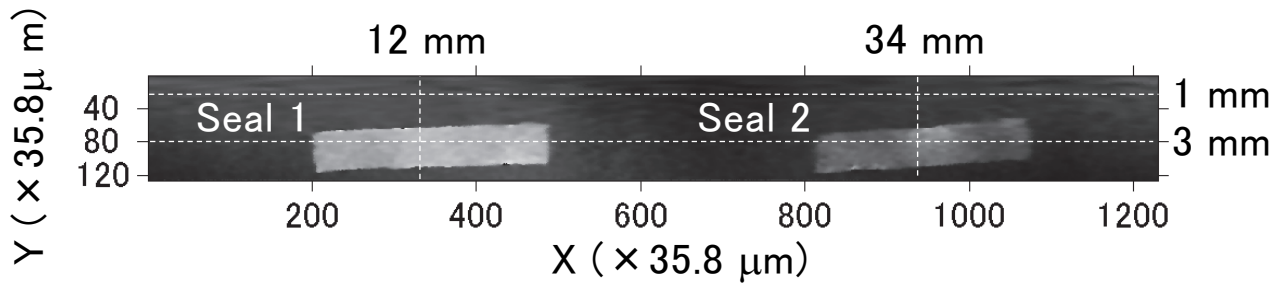
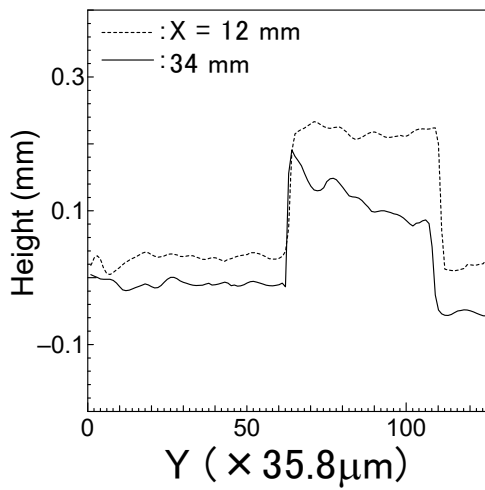


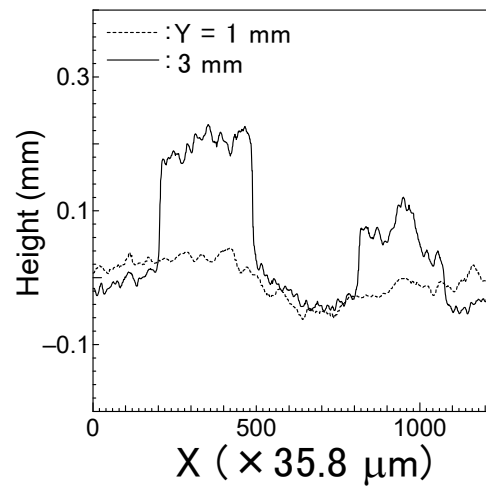
Fig. 11 Transformation of the circular image into a rectangular one.



(a)



(b)



(c)

Fig. 12 Transformed surface shape of Fig. 10: (a) 2D display, (b), (c) cross sections at $X = 12, 34 \text{ mm}$ and $Y = 1, 3 \text{ mm}$, respectively.

Table 2 Sizes of Seals 1 and 2

	Seal 1		Seal 2	
	Original	Evaluated	Original	Evaluated
Width (mm)	1.76	1.79	1.71	1.85
Length (mm)	9.43	10.16	9.32	9.53
Thickness (mm)	0.157	0.183	0.078	0.098