レーザ干渉法による機械部品の表面形状精度測定における
位相差の自動的連続化処理方法*方 素 平^{*1}, 久 保 愛 三^{*2}
藤 尾 博 重^{*2}, 齊 藤 義 昭^{*3}Automatic Concatenation of Phase Differences for Interferometry
Measurement of Form Deviation of Machine Part SurfaceSuping FANG^{*5}, Aizoh KUBO,
Hiroshige FUJIO and Yoshiaki SAITOH^{*5} Ritsumeikan University, Dept. of Mechanical Engineering, Nojihigashi 1-1-1, Kusatsu, Shiga, 525-8577 Japan

Phase difference between the object beam reflected from the target surfaces and the reference beam can be calculated from the brightness data of the interference fringe pattern by phase shifting method. The relative phase difference of a target surface relative to the reference one can also be obtained, but it is discontinuous since amplitude is multi-folded within the region from $-\pi$ to $+\pi$. The concatenation to get the continuous relative phase difference corresponding to the form deviation between two surfaces is therefore necessary. But it is not easy to concatenate the discontinuous phase difference data into the continuous one, especially when the density of interference fringe is thick and noises are largely contained in the image. When a manual concatenating procedure is used to realize the continuous pattern, the amount of processing times for it is tremendous. In this report, a new automatic method for concatenating phase differences is reported, and taking gear tooth flanks for a sample of target surface, the result of automatical concatenation of relative phase differences corresponding to the form deviation of tooth flank of cylindrical involute gears is shown.

Key Words: Optical Measurement, Phase Difference, Phase Concatenation, Image Processing, Laser Interferometry, Form Deviation, Gear

1. 緒 言

斜入射式のレーザ干渉法により歯車歯面のようなより粗い機械部品の表面形状精度を非接触で測定することが可能であることを, これまでの研究によって明らかにした^{(1)~(5)}. この測定法では, 干渉じまの輝度画像から物体光と参照光の位相差を求めるため, 位相シフト法を用いて参照光の位相を調節して, 同一の被測定面に対して複数枚の干渉じま像をとる. しかし, この複数枚の干渉じま像から算出された位相差データは $-\pi$ から $+\pi$ までの値をもつ不連続なものであり, この不連続な位相差データにより求められた基準面に対する被測定面の相対位相差データも同様に不連続なものとなる⁽¹⁾. 基準面に対する被測定面の形状偏差に対応する連続的な相対位相差を得るには, この不連続な位相差データに対する連続化処理, すなわち, いわゆる

る位相差の接続処理を行うことが不可欠である. これまではオペレータの判断により操作を行うマニュアル接続法を用いて対話的にそれを接続していたが⁽²⁾, この方法は過大な処理時間を要し, また, 人為的な影響を受けやすいなどの欠点をもつため, 干渉じま像の画像処理を全自動的に行うことは不可能になる. このような問題点を解決するには, マニュアル接続法以上に良好な結果を生み出す自動接続法の開発が必要であるが, 本論文で取扱わねばならないような三次元曲面の不連続データを良好に自動接続できる一般的方法は見当たらない.

そこで, 本報では, 不連続な位相差データをコンピュータにより全自動的に接続するいわゆる位相差の自動接続法を提案し, この自動接続法の原理について報告した上で, おもにモジュール $m_n=2.5$ mm, 圧力角 $\alpha_0=20^\circ$, 歯数 $Z=50$, 歯幅 $b=20$ mm の標準インボリュート円筒平歯車歯面を測定対象面として, この自動接続法の正しさを検証するとともにその優れた点を紹介する.

* 原稿受付 1999年6月10日.

^{*1} 正員, 立命館大学理工学部(☎525-8577 草津市野路東1-1-1).^{*2} 正員, 京都大学工学部(☎606-8501 京都市左京区吉田本町).^{*3} 大阪精密機械(株)(☎577-0032 東大阪市御厨730-2).

E-mail: fang@se.ritsume.ac.jp

2. 相対位相差データの特徴

本測定法では、コンパレータ式の測定原理を適用する。すなわち、被測定面と同形状を持ち、かつその形状精度がそれより高いもう一つの面を基準面 π とし、これと形状精度がより低い被測定面 ρ とをそれぞれ干渉測定機上での同一位置にセットし、同一測定条件の下で両者の干渉じま像を記録して、画像処理によって基準面に対する被測定面の形状偏差を求める(図1)。

この場合、位相シフト法により取り込んだ基準面と被測定面の各 N 枚(本研究では $N=10$)の干渉じまの輝度画像より、物体光の位相 $\theta_j(x, y)$ と参照光の位相 $\phi(x, y)$ の差 $\Delta\theta_j(x, y)$ を

$$\begin{aligned} \Delta\theta_j(x, y) &= \theta_j(x, y) - \phi(x, y) \\ &= -\tan^{-1} \frac{\sum_{i=0}^{N-1} I_{ji}(x, y, \Delta\phi_i) \sin \Delta\phi_i}{\sum_{i=0}^{N-1} I_{ji}(x, y, \Delta\phi_i) \cos \Delta\phi_i} \quad \dots\dots (1) \end{aligned}$$

により算出する⁽¹⁾。ここで、 $I_{ji}(x, y, \Delta\phi_i)$ は i 番目の干渉じま像の画素 (x, y) における輝度値、 $\Delta\phi_i = (2\pi/N) \cdot i$ は位相シフト装置による参照光の位相調量であり、 j は処理対象面を表し、かつ $j=1$ の場合は

Fig. 1 Principle of comparative measurement

(a) Reference tooth flank

(b) Tooth with straight lead error

Fig. 2 Discontinuous phase difference for tooth flank of involute spur gear

基準面、 $j=2$ は被測定面を表す。式(1)において逆正接関数 $\tan^{-1}$ を用いるため、算出された位相差 $\Delta\theta_j(x, y)$ は、 $-\pi$ から π までの値をもつ不連続なものとなる。

測定対象面とする上記のインボリュート円筒平歯車歯面の干渉じま像から、式(1)により算出された不連続の位相差曲面の一例を図2に示す。ここで、図2(a)の歯面はその形状がインボリュートヘリコイドに極めて近いように、すなわち歯面形状誤差がないように丁寧に研削した基準歯面のものであり、図2(b)はリード方向に直線的な形状誤差をもつように修整を施された歯面に対する測定結果である。

これらの不連続な位相差データを不連続のままに引き算することによって、基準面からの物体光の位相 $\theta_1(x, y)$ と被測定面からの物体光の位相 $\theta_2(x, y)$ の差、すなわち基準面に対する被測定面の相対位相差 $\Delta\theta(x, y)$ (混乱しない限り、以下にはそれを位相差とも呼ぶ)を求めることができる⁽¹⁾。

$$\begin{aligned} \Delta\theta(x, y) &= \theta_1(x, y) - \theta_2(x, y) \\ &= \Delta\theta_1(x, y) - \Delta\theta_2(x, y) \quad \dots\dots\dots (2) \end{aligned}$$

すなわち、図2に示した不連続の位相差曲面に対して式(2)を適用すると、図3(a)に示すような、基準歯面に対するリード誤差をもつ歯面の不連続な相対位相差 $\Delta\theta(x, y)$ が得られる。図3(b)は同様に得られた基準歯面に対するクラウニング歯面の不連続な相対位相差である。当然ながら、この相対位相差 $\Delta\theta(x, y)$ も $-\pi \sim \pi$ の値をもつ不連続なものである。基準面に対する被測定面の形状偏差を求めるためには、この不連続な相対位相差 $\Delta\theta(x, y)$ を形状偏差に対応する連

(a) Tooth with straight lead error

(b) Longitudinally Crowned tooth

Fig. 3 Discontinuous relative phase difference for test tooth flank to reference one of involute spur gear

Fig. 4 Binary image for discontinuous relative phase difference between test and reference tooth flank

Fig. 5 Concatenating result of relative phase difference (by manual method)

連続な相対位相差 $\delta\theta(x, y)$ に直す, いわゆる位相差の接続処理を行わなければならない。

3. 従来のマニュアル接続法の問題点

マニュアル接続法は不連続な位相差データを画像の形式でディスプレイ上に表示して, オペレータがそれを見ながら自己の主観的判断により位相差の接続操作を行う方法である。本研究の場合, このマニュアル接続操作は, 直接に図3に示した不連続な相対位相差データを対象として行うのではなく, それを二値化処理をすることによって得られた位相差の二値化画像(図4参照)上で行う⁽²⁾。

この接続法を図3に示す不連続な相対位相差に適用すると, 図5に示すような連続なもの $\delta\theta(x, y)$ が得られる。図4と5を比較して見ると, この平歯車歯面の相対位相差のようなしま密度のあまり高くない不連続な位相差データの接続に対しては, マニュアル接続法でそれを正しく接続することが可能であることがわかる。

この操作に際し, マニュアル接続処理を行う前に, フィルタで画像中のノイズを十分に除去する必要がある。ところが, ノイズや被測定面の例えば擦り傷などの表面品質の影響を受けて, 位相差の二値化画像におけるしまとしまの間に架橋箇所が存在していることもしばしばある。このときには, 自動的に走査される画素の連結領域は, 継いでしまった2本のしまを一つのしまとみなして, 以降の処理が不可能となるので, オペレータが自己の主観的判断により, マニュアル操作で邪魔となる架橋を切断する。また, フィルタで除去しきれない細かなノイズに対してもマニュアル操作で編集を行う必要がある。その結果,

(a) 接続結果は人為的影響を受ける

上記のマニュアル編集処理を行う箇所が不適切であれば, 指定された位相差の補正值はその辺りで間違ってくる可能性が存在する。また, ノイズでしまが切断された場合, どの領域とどの領域が同じ補正值をもつはずであるかを正しく判断することは極めて難しい。このとき, 補正值の指定が間違ってもしばしばある。結局, 図5に示したように, 画像の品質が悪い歯元の付近ではオペレータの判断が間違ったため, 接続終了後の位相差は一部の画素においてその周辺の画素よりおよそ 2π 分の差をもつ大きな段差として現れる。このように, マニュアル接続処理の結果は人為的な影響を受ける場合がしばしばある。特にしま密度が高く, 画像中のノイズが多い場合, その影響は深刻な問題となる可能性がある。

(b) 過大な処理時間がかかる。

マニュアル接続法による接続処理を行う場合, 処理

時間は主に被処理画像の品質(すなわち位相差の二値化画像のしま密度およびその中のノイズの多少), およびオペレータの熟練程度に依存する。実際, 本研究での平歯車歯面を対象とする場合, 1枚の画像を接続するには1時間以上もかかるのは普通である。

これらの問題点は干渉じま画像を高速で, 全自動的に処理することに対する障害となるものであり, それらをいかに解決・処理していくかが重要となる。

4. 位相差の自動接続法

本研究で提案する自動接続法は, 図3(a)に示すような不連続な位相差データから図5(a)のような連続な位相差曲面に至るまでのすべての操作を, 一切のマニュアル操作を含まず自動的に行うものである。

4・1 自動接続法の原理 本研究で用いる干渉測定機の場合, 測定対象面, すなわちモジュール $m_n = 2.5$, 歯数 $Z = 50$, 圧力角 $\alpha_0 = 20^\circ$, 歯幅 $b = 20$ mm のインボリュート平歯車の歯面に対して, その CCD イメージセンサ面における結像(歯面像)のサイズ($x \times y$)はおよそ 580×530 画素(1画素は $6.8 \times 6.8 \mu\text{m}$)である[図6(a)参照]。しかも, 斜入射式の測定法を用

Fig. 6 The size of tooth flank image and the actual size on tooth flank corresponding to one pixel

いるため, 画像が歯幅方向[図6(a)の左上から右下への方向]に縮んで変形して, 歯面像のサイズ(歯筋方向 $\times$ 歯幅方向)はおよそ 620×250 画素の細長い形となっている。

また, レーザビームは被測定歯面のピッチ線 PP' (図7参照)を通る歯面の法線平面 $FGHL$, または, それと平行な平面におよそ沿う方向から歯面を照射するため, レーザ光により照射された歯面の実効的な領域は, 被測定歯面をそのピッチ線 PP' を通る歯面の接平面へ投影した領域, すなわち図7中の $ABCD$ である。このとき, 標準インボリュート歯面である上記の歯面の全歯丈 $\overline{AE}$ を $h = 2.25m_n$ とすると, 歯すじ方向の実効的長さ $\overline{AB}$ は, 本実験に用いた諸元の歯車では

$$a = \frac{h}{\cos \alpha_0} = \frac{2.25m_n}{\cos 20^\circ} \approx 6 \text{ mm} \dots\dots\dots (3)$$

となり, 実効的領域のサイズ(歯筋方向 $\times$ 歯幅方向)は $a \times b \approx 6 \times 20$ mm である。干渉じま像における正方形と見なせる一つの画素がそれと対応する歯面上のサイズ(歯筋方向 $\times$ 歯幅方向)は

$$\left(\frac{6 \times 1000}{620}\right) \times \left(\frac{20 \times 1000}{250}\right) \approx 10 \times 80 \mu\text{m} \dots (4)$$

程度となっている[図6(b)参照]。すなわち, 干渉じま像における一つの画素により写っているのは, 被測定歯面上の約 $10 \times 80 \mu\text{m}$ 程度の細長い領域からの反射光である。この小さな領域の形状は被測定面の形状などによって若干異なる。

本研究で, 測定対象とするのは比較的高精度に仕上げられた歯車歯面である。かなり形状偏差の大きい被測定歯面についても, 隣合う二つの画素に写っている被測定面上で約 $80 \mu\text{m}$ の距離離れた二つの小さな領域の平均的高さの差は, それほど大きくないのが一般的である。隣接する二つの画素における位相差データの差の値が π 異なる条件は, 本研究で用いる測定機の

Fig. 7 Effective projected area of involute tooth flank for reflecting laser beam

場合、形状偏差に換算して約 $1.7\mu\text{m}$ に相当するが、本研究で対象とする被測定歯面の場合、被測定面上での約 $80\mu\text{m}$ の中心距離を離れた二つの小さな領域の平均の高さの差が $1.7\mu\text{m}$ と変化するような場合を取扱うことはない。したがって、位相差データは、任意の隣接している画素における位相差の差の値が π を超えない平滑な連続データであると考えてよい。

このことより、接続対象の不連続な位相差データに対して画素ごとにそれを順次スキャンし、任意の一つの画素における位相差データをその直前の画素での値と比較して、両者の差の値が π を超えたとそこには位相差の断層が存在すると判断する。そしてその箇所において、両者の差の大きさと正負により、その画素の位相差の値に 2π の整数倍を足し算または引き算し、両者の差の値が π を超えないようにすることにより、位相差の接続を行う。ここで、位相差曲面の断層と認められる箇所の直前の画素における位相差データがその直後の画素でのデータより大きければ足し算、逆に断層の直前の画素でのデータがその直後の画素でのデータより小さければ引き算、であると考えて、足し算であるか引き算であるかを判断する。

4.2 接続方法 上記に述べた、隣接データを逐次比較して不連続な箇所を順次接続処理する原理は、一次元の不連続なデータの接続処理に対して、直接適用することが可能であることは自明である。しかし、本研究での接続対象は二次元の画像であるため、その接続処理には若干の工夫が必要である。すなわち、二次元画像の接続処理に大原理を適用するため、位相差データのスキニング処理は画像の x と y 方向に分けて行う、次のような方法を提案する。

まず y 座標を固定して、 x 方向にスキャンし、

$$\Delta\theta_x(x, y) = \Delta\theta(x, y) + 2\pi \cdot n_x(x, y) \dots\dots\dots (5)$$

のように、 x 方向の一次元の連続的な位相差データ $\Delta\theta_x(x, y)$ (以降は線連続位相差と呼ぶ) を求める。ここに、 $\Delta\theta(x, y)$ は、画素 (x, y) における接続対象の不連続な位相差であり、 x 方向に沿う位相差の補正值 $n_x(x, y)$ は

$$n_x(x, y) = \left[\frac{\Delta\theta_x(x-1, y) - \Delta\theta(x, y)}{2\pi} + 0.5 \right] \dots\dots\dots (6)$$

と算出する。ここで、 $[]$ は Gauss の記号である。

次に、 y 方向に沿うスキニングを行う。このとき、 x 方向と同じようにスキャンすると、一般に、連続な位相差曲面は得られない。その原因は、歯面像が傾いているため、画素列 x の値を固定して y 方向にスキャンすることにより決定した位相差の補正值は、

他の x の位置 (画素列) での補正值と一般的に異なってくることにある。この問題に対処するため、すでに x 方向に線連続となっている諸画素の位相差を一つのグループとして接続操作を行う。すなわち、 x 方向の一本一本の線連続位相差曲線の一つ一つの接続の対象として、それらの曲線と曲線の間での位相差の段差を検出することによって補正を行う。すなわち、式 (6) と全く同じように、画素 (x, y) における位相差に対して、それを y 方向に沿って連続となるようにする補正值 $n_y(x, y)$ は

$$n_y(x, y) = \left[\frac{\Delta\theta_{xy}(x, y-1) - \Delta\theta_x(x, y)}{2\pi} + 0.5 \right] \dots\dots\dots (7)$$

のように求める。ここに、 $\Delta\theta_x(x, y)$ は前回の補正によりできた x 方向の線連続位相差、 $\Delta\theta_{xy}(x, y-1)$ はそれをさらに y 方向の補正を行って得られる二次元的に連続な位相差 (以降は面連続位相差と呼ぶ) である。理想的には、隣接している 2 本の線連続位相差曲線上のすべての隣接点により算出された補正值 $n_y(x, y)$ (ここで、 x は変数) は同じ値となるはずであるが、実測データを処理対象とする場合にはしばしば異なる結果を得る。線と線の間での最も確からしい補正值を検出するため、本研究では、これらの補正值 $n_y(x, y)$ の平均値 $n_y(y)$

$$n_y(y) = \left[\frac{\sum_{x=1}^{m_y} n_y(x, y)}{m_y} + 0.5 \right] \dots\dots\dots (8)$$

を、2 本の線連続位相差曲線の間での補正值として採用する。ここで、 m_y は 2 本の線連続位相差曲線上の隣接点の組数である。式 (7) と (8) を用いることにより、面連続位相差 $\Delta\theta_{xy}(x, y)$ は

$$\Delta\theta_{xy}(x, y) = \Delta\theta_x(x, y) + 2\pi \cdot n_y(y) \dots\dots\dots (9)$$

と求められる。

さらに、このように算出された面連続位相差 $\Delta\theta_{xy}(x, y)$ の中で最小値を $\Delta\theta_{xymin}$ とすると、位相差の最小値が零である連続な位相差曲面

$$\delta\theta(x, y) = \Delta\theta_{xy}(x, y) - \Delta\theta_{xymin} \dots\dots\dots (10)$$

が得られる。

4.3 自動接続法による処理結果 上記の自動接続法による処理結果として、図 3(a) に示している不連続な位相差データに対して、式 (5) と (6) を適用した結果を図 8(a) に示す。図 8(a) において、位相差データは x 方向に沿っては、すでに線連続位相差となっているが、 y 方向にはまだ断層が残っていることが認められる。

図 8(b) に式 (7)、(8) と式 (9) による操作を図 8(a) にかけた結果を示す。この場合の位相差データ

(a) Phase difference converted from discontinuous to continuous curve along x axis

(b) Phase difference converted into a continuous curved surface

Fig.8 Result of automatic concatenating method after each stage

(a) Tooth with straight lead error

(b) Longitudinally Crowned tooth

Fig.9 Final result of relative phase difference by automatic concatenating method

はすでに面連続的なものとなっているが、位相差の最小値が零ではないため、その曲面全体は値が零である平面より落ちていることが認められる。図9(a)は式(10)により、図8(b)の結果を零点補正したものである。

図9(b)は図3(b)に示したもう一つの不連続な位

Fig.10 A mistake example concatenated by automatic concatenating method

相差データに対して、同様の自動接続処理した結果を示したものである。図9と5を比較して見ると、自動接続法による接続結果はマニュアル接続法による接続結果とほぼ同様になっていることが認められ、本研究で開発した自動接続法のアルゴリズムの正しさを証明するものである。

4.4 自動接続法の特徴 上記の位相差自動接続法の特長をまとめればおもに次のようになる。

(a) 画像処理の能率が高い

マニュアルの位相差接続の場合には、処理時間が処理対象画像のしま密度や画像中のノイズなどの画像品質、およびオペレータの操作熟練程度などにより決まる。本研究の実験条件の1枚のインポリュート平歯車歯面の不連続な相対位相差画像に対して、マニュアル法による処理に普通には1時間以上も要していたが、同画像を自動接続法により Pentium II 400 MHz の PC で処理する場合、処理時間は1秒以内となり、著しい高能率化が達成される。

(b) 接続結果に人為的影響が入らない

接続処理にかかるすべての判断および操作はコンピュータに任せて行うため、接続に対する特別なテクニックの要求は一切なくなり、人為的誤差が起り得る場所はなくなった。

(c) 接続処理を全自動的に行うことが実現された。

しかし、本研究で開発した自動接続法は測定対象面が平滑な連続面でなければまだ適用することができない。また、測定対象面が平滑な連続面であっても、算出された相対位相差データをフィルタにより十分に平滑化処理をしていない場合にも、誤動作の可能性が存在する。図10は、図4(a)に示したフィルタ処理をしていない位相差データに対して、本自動接続法を適用した結果を示す。図10には位相差の断層がまだ残っている箇所が認められる。これは面形状が急激に変化する箇所が生じた、S/N比が1に近い大きなノイズにより引き起こされた接続ミスであると考えられる。図9のように自動接続処理がうまく行った場合には、算出

された相対位相差に対して 3×3 画素のメディアンフィルタ⁽⁶⁾処理を3回程度施した後、自動接続処理を行っていた。このことは、自動接続処理の前にメディアンフィルタ処理により、位相差データの断層付近にある個別的な画素がもっている零前後の中間的値が除去されることによって、このような誤動作はある程度に回避できることを示している。

4・5 自動接続法と新光学系との併用例 干渉しま像のしま密度が極めて高くなる場合、隣合う画素の位相差データの差が大きくなり、しまとしまの間の連続的領域がもっている画素数(サイズ)が極めて少なくなる。このとき、正しく参照できるデータが少なくなるため、上記のようにフィルタ処理をしても誤動作を起こす原因となるノイズを充分に取除けないことがある。

図11(a)はモジュール $m_n=2.5$ mm, 圧力角 $\alpha_0=20^\circ$, 歯数 $Z=25$, 歯幅 $b=20$ mm の標準インボリュート円筒平歯車の基準歯面の位相差データの二値化画像であり、図11(b)はこの基準歯面に対するリード誤差をもつ歯面の相対位相差の二値化画像である。歯数が25枚に減少しているため、歯面形状がかなり湾曲して、歯先や歯元部における画像のしま密度が判別で

きないほど高くなっている [図11(a)]。このため、算出された相対位相差 [図11(b)参照] の同領域ではノイズが多く入っている。このようなノイジーな画

(a) Tooth with straight lead error

(b) Longitudinally Crowned tooth

Fig. 12 Faulty concatenating result of relative phase difference by automatical concatenating method ($Z=25$)

(a) Phase difference for reference tooth flank

(b) Relative phase difference for tooth with straight lead error to reference one

Fig. 11 Binary image of phase difference and relative phase difference ($Z=25$)

(a) Phase difference for reference tooth flank

(b) Relative phase difference for tooth with straight lead error to reference one

Fig. 13 Binary image of phase difference and relative phase difference by new optical system of interferometer ($Z=25$)

(a) Tooth with straight lead error

(b) Longitudinally Crowned tooth

Fig. 14 Successful result of relative phase difference concatenated by automatical concatenating method ($Z=25$)

像に対して、上記と同じようにメディアンフィルタを4回もかけてから本自動接続法を適用した結果を図12(a)に示す。図12(b)は基準歯面に対するクラウニング歯面の相対位相差に対する接続結果である。図12により、位相差の接続が正しく実行されず、数箇所位相差の断層が残っていることが認められる。これはフィルタ処理の適用にも限界があることを示す。

これに対して、参照光側に調節レンズを入れて干渉じま像のしま密度を軽減する新光学系⁽⁴⁾を用いて、しま密度がより少ない干渉じま像を撮った。この新光学系による同歯車の基準歯面の位相差の二値化画像を図13(a)に示す。実験条件の関係で用いた調節レンズは実験に用いた歯面に対して最も適切なものではないが、図13(a)のしま密度が図11(a)よりだいぶ改良されたことが認められる。図13(b)はこの新光学系による基準歯面に対するリード誤差をもつ歯面の相対位相差の二値化画像であり、図11(b)に比較してノイズが大幅に減少したことがわかる。

このように最初からノイズが少ない画像に対して、

フィルタをかけずに直接自動接続法を適用した結果を図14(a)に示す。図14(b)は基準歯面に対するクラウニング歯面の相対位相差に対する接続結果である。図14によれば、図13(b)の中に矢印で示された画像周辺の領域を除き、接続結果が正しいことが認められる。すなわち、新光学系との併用により、新光学系で撮った画像を処理対象とする場合、本自動接続法は極めて有効である。また、画像周辺の識別は本議論とは無関係な問題である。

5. 結 論

レーザ干渉法により取り込んだ被測定面の干渉じま像より算出される不連続な相対位相差データを連続化する自動処理方法について検討をした。その結果として、マニュアル接続法による処理結果は、オペレータの主観的判断により左右され、かつ処理時間がかかる、全自動的処理には適用できないなどの欠点があった。被測定面が平滑な連続曲面であるという仮定の下で、画像上の任意の二つの画素における相対位相差データは π を越えない事実が存在することを明らかにし、不連続な位相差データをコンピュータによりスキャンし、不連続な箇所を検出して自動的にそれを補正するいわゆる位相差の自動接続法を提案した。本方法をインボリュート平歯車歯面の形状偏差の測定に適用することによって、その原理と接続方法の正しさを検証した。この自動接続法による処理結果は、従来のマニュアル接続法によるものとほぼ同じであるが、処理時間が大幅に短縮され、人為的な影響を受けないなどの優れた点をもっていることを明らかにした。

本論文を書くにあたり、立命館大学理工学部教授秋下貞夫博士より懇切な助言を賜った。ここに深甚なる謝意を表す。

文 献

- (1) 方素平・久保愛三・藤尾博重・尾山一文・斉藤義昭・鈴木充男, 機論, **61**-581, C(1995), 106.
- (2) 藤尾博重・久保愛三・方素平・尾山一文・谷田具豊彦・斉藤義昭・鈴木充男, 機論, **62**-598, C(1996), 2422.
- (3) 方素平・中居拓自・久保愛三・藤尾博重・斉藤義昭・鈴木充男, 機論, **64**-620, C(1998), 1421.
- (4) 方素平・藤尾博重・久保愛三・戸谷昌弘・鈴木良和・斉藤義昭・鈴木充男, 機論, **65**-631, C(1999), 1125.
- (5) S., Fang, A., Kubo, H., Fujio, K., Oyama, Y., Saitoh and M., Suzuki, *Proc. VDI Int. Conf. Gear*, 1230 (1996), 1111.
- (6) 長谷川純一・興水大和・中山晶・横井茂樹, 画像処理の基本技法, (1986), 139, 技術評論社.