非球面光学素子の超平滑研磨技術に関する研究 (第2報)*

——修正研磨における滞留時間の計算方法——

根岸真人** 安藤 学** 瀧本雅文** 出口明信*** 中村宣夫***

Studies on Super-Smooth Polishing (2nd Report)
—Deconvolution Algorithm for Corrective Polishing—

Mahito NEGISHI, Manabu ANDO, Masahumi TAKIMOTO, Akinobu DEGUCHI and Nobuo NAKAMURA

For the purpose of fabricating free-form optical elements to an accuracy of 80 nmPV, the CSSP (Canon Super-Smooth Polisher) has been developed. This device finishes workpieces by alternately repeating contour measuring and corrective polishing. The tactics of corrective polishing are based on the tool's dwell-time control. In such a system, total processing time closely depends on the performance of a dwell-time calculation called deconvolution. A new deconvolution algorithm has been proposed, by which less residual error and shorter calculation time than the conventional algorithm, based on a simulation of polishing, is possible. This method is based on an analysis of spatial frequency domain. Therefore, by using an FFT (Fast Fourier Transformation) it can greatly reduce the calculation time. In this case, however, it tends to give unstable dwell-times because the unit removal function has limited frequency response. To address this difficulty, two methods have been devised. The first one is based on a low-pass filter technique, and the second is based on optimizing a functional. By comparing these methods to the simulation method, their performances are checked in the fields of residual error, predicted processing time and calculation time. An areal calculation shows that the new method can achieve a 1/4.3 smaller residual error, a 4 % longer but much smoother dwell-time distribution, and 1/45 shorter calculation time.

Key words: corrective polishing, computer-controlled polishing, dwell-time control, convolution model, deconvolution, Fast Fourier Transformation, aspherical optics, residual error, calculation time, algorithm

2. 滞留時間の計算方法

1. 緒 言

紫外線、X線といった短波長光を対象にしたリソグラフィ、望遠鏡、顕微鏡などの応用研究が進んでいるが、その際使用される光学素子の性能が研究の成否を左右する重要なポイントとなっている。そこで、形状精度80 nmPV、表面粗さ0.2 nmRMS (Rq)、の加工精度を最大φ500 × 200 mm、最大傾斜35°の自由形状に対して達成することを目的とし、超平滑研磨装置CSSP (Canon Super Smooth Polisher)を開発した¹⁾²⁾。この装置は形状測定と修正研磨を交互に繰り返して目標形状に仕上げる装置である。この修正研磨方法はコンピュータの発展をベースに1970年代から米国を中心に研究開発が進み、望遠鏡の主鏡³⁾、セグメントミラー⁴⁾、X線斜入射光学系ミラー⁵⁾の加工に応用され、国内での開発も進んでいる⁶⁾⁷⁾。これら装置の形状修正戦略は、単位時間あたり一定の除去形状が得られる研磨ヘッドをワーク表面上で速度を変化させながら走査する方法であり、滞留時間制御と呼ばれている。滞留時間分布の良し悪しは総加工時間、加工コストに影響する。そこで、短い加工時間で形状修正能力の高い滞留時間の計算方法が求められている。特に最近、プラズマエッチング⁸⁾など新しい加工法の研究が進展しており、除去量の精密な制御が可能になってきたことから、この計算方法の重要性が高まっている。本論文は新しい滞留時間分布の計算方法を提案し、評価する。

2. 1 コンボリューションモデル

研磨除去に関してプレストンの仮説から導かれるコンボリューションモデルが提案されている³⁾。図1にこの原理と記号の説明を示す。ここで、単位除去形状は研磨ヘッドを単位時間回転した時に得られる除去形状で、研磨実験によって求める。このモデルを数式で表現すると、積分領域を研磨領域Aとして、

$$h(x,y) = \iint_A g(u,v)f(u-x,v-y)dudv \quad (1)$$

修正研磨はこの除去形状を、ワーク形状と設計形状との差、すなわち誤差形状に近づけることによって進展する。

$$d(x,y) = h(x,y) + e(x,y) \quad (2)$$

ここでd(x,y)は誤差形状、すなわち目標除去形状で、形状測定装置で測定する。e(x,y)は修正できずに残る残差形状である。

Fig. 1 Convolution model for corrective polishing based on dwell-time control which is widely used for large optics fabrications

* 原稿受付 平成7年7月6日

** 正会員 キヤノン(株) (東京都大田区下丸子3-30-2)

*** キヤノン(株)

修正研磨をおこなう際に必要なのは目標除去形状 d と単位除去形状 f から滞留時間分布 g を次の条件で計算することである。

- 1) 滞留時間が全領域で正
- 2) 残差を小さくする
- 3) 加工時間を少なくする
- 4) 加工装置に課せられる移動速度、最高加速度などの条件をゆるめるため滞留時間分布の変化の幅を少なくする

この計算操作はデコンボリューションと呼ばれている。この課題を除去のシミュレーション³⁾を用いたり、連立方程式に帰着して解く方法⁹⁾などが提案されてるが、いずれもデータ数の増加にともなって計算量が急増するため、実用上の困難がある。この論文では新しい方法を提案し、従来の方式と比較する。

2式はフーリエ変換によって次の簡単な式になる。

$$D(\omega_x, \omega_y) = G(\omega_x, \omega_y)F(\omega_x, \omega_y) + E(\omega_x, \omega_y) \quad (3)$$

ここで、例えば $D(\omega_x, \omega_y)$ は $d(x, y)$ をフーリエ変換したもので以下、 D などと略す。この式で、 $E = 0$ とおき、 $G = D/F$ を計算し、逆フーリエ変換して滞留時間 G を求める方法はうまくいかない。 $|F|$ が小さくなる所で解が発散的になるからである。そこで、次のように、この計算を安定化する。

2. 2 ローパスフィルタを用いる方法

フィルタの関数 $Q(\omega_x, \omega_y)$ を用い滞留時間を次式で計算する。

$$G = QD/F \quad (4)$$

この式から Q/F が全域で十分小さくなるように Q を選べば解が安定することが予想される。一般に F の周波数特性は広域で小さくなるので、 Q の特性としてはローパスフィルタが妥当である。また、式(3)、(4)から残差は

$$E = (1 - Q)D \quad (5)$$

よって、ローパスフィルタを採用した時、誤差形状 D の高い周波数成分が残差 E として残る懸念があるが、実際は研磨加工自体が高域の誤差形状を平滑化する作用がある。ピッチ研磨の場合、そのカットオフはおおよそ工具寸法の半分の周期である。解の安定性を考え、それよりもやや長いカットオフ周期を設定すると良好である。簡単なローパスフィルタ Q の例として

$$Q(\omega_x, \omega_y) = \begin{cases} 1: \omega_x^2 + \omega_y^2 \leq \omega_c^2 \\ 0: \omega_x^2 + \omega_y^2 > \omega_c^2 \end{cases} \quad (6)$$

ここで、 ω_c はローパスフィルタのカットオフ角周波数である。この方法は計算に含む周波数を明確に指定することができるが、次に示す方法より残差が大きい。

2. 3 汎関数を用いたフィルタの設計

フィルタ Q を実数関数 $a(\omega_x, \omega_y)$ 、 $b(\omega_x, \omega_y)$ を用い、

$$Q(\omega_x, \omega_y) = a(\omega_x, \omega_y) + b(\omega_x, \omega_y)j \quad (7)$$

と表す。ここで j は虚数単位。この節では次の汎関数 S を最小にする $a(\omega_x, \omega_y)$ 、 $b(\omega_x, \omega_y)$ を計算する。

$$S = \iint_A |c(x, y)|^2 dx dy + \alpha \iint_A |g(x, y)|^2 dx dy \quad (8)$$

第1項は残差、第2項は滞留時間分布の2乗パワーである。 α は重み係数で、小さいと残差を押さえ、大きいと滞留時間を押さえることを意味する。パーセバルの公式から、

$$\iint_A |c(x, y)|^2 dx dy = \iint_W |E(\omega_x, \omega_y)|^2 d\omega_x d\omega_y \quad (9)$$

$$\iint_A |g(x, y)|^2 dx dy = \iint_W |G(\omega_x, \omega_y)|^2 d\omega_x d\omega_y$$

上式を用い、式(8)を書きなおすと、

$$S = \iint_W \left\{ ((a-1)^2 + b^2) |F|^2 + \alpha (a^2 + b^2) \right\} |D/F|^2 d\omega_x d\omega_y \quad (10)$$

上式、積分内の関数を $s(a(\omega_x, \omega_y), b(\omega_x, \omega_y), \omega_x, \omega_y)$ と表す。

汎関数 S を停留にするには変分原理より

$$\frac{\partial S}{\partial a} = \frac{\partial S}{\partial b} = 0 \quad (11)$$

これを計算すると、次式を得る。

$$a(\omega_x, \omega_y) = \frac{|F(\omega_x, \omega_y)|^2}{\alpha + |F(\omega_x, \omega_y)|^2} \quad (12)$$

$$b(\omega_x, \omega_y) = 0$$

実用上、重み係数は単位除去形状によらず一定に定めたいので、重み係数 α を無次元化し、 $\beta = \alpha/|F(0,0)|^2$ とおきなおす。結局

$$Q(\omega_x, \omega_y) = \frac{|F(\omega_x, \omega_y)|^2}{\beta |F(0,0)|^2 + |F(\omega_x, \omega_y)|^2} \quad (13)$$

後述するように β の値は0.1付近で良好な結果を与える。

2. 4 目標除去形状の外周の処理

前述した単位除去形状の周波数特性から推測できるように、目標除去形状が急激に変化する場所に残差が大きくなる。しかし次に示す理由で目標除去形状の周辺部分は必ず不連続になる。

a) ワークの有効径外の形状測定データは存在しない。

b) 有限区間のフーリエ変換を用いるためデータは必ず周期的であり、そのつなぎ目で不連続になる。

そこで、目標除去形状の外周部分をなめらかに外挿する必要がある。外挿曲面に、次の重調和方程式を満たすものを用いた。

$$\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} = 0 \quad (14)$$

目標除去形状が x, y 格子状に配列された離散的な点での高さ $w_{i,j}$ として与えられるとする。上式を差分法で解くため中央差分式を用いて漸化式にすると、

$$\bar{w}_{i,j} = (-w_{i-2,j} + 4w_{i-1,j} + 4w_{i+1,j} - w_{i+2,j} - w_{i,j-2} + 4w_{i,j-1} + 4w_{i,j+1} - w_{i,j+2})/12 \quad (15)$$

ここで、左辺 $\bar{w}_{i,j}$ は新しく計算された形状で、すべての点で上記計算が終了した後、 $w_{i,j}$ にコピーし、収束するまで再び上式に戻る。しかし、この方法はフォン・ノイマンの安定条件を満たさないので発散する。そこで、計算を安定化させるため変数 λ を用い、次式を用いて変数を更新する。

$$w_{i,j} = \lambda \bar{w}_{i,j} + (1-\lambda)w_{i,j} \quad (16)$$

この差分式の安定条件を計算すると $0 < \lambda < 0.75$ である。 λ は大きい方が収束が早いので $\lambda = 0.74$ などとする。

2. 5 繰返し

以上述べてきた方法で計算した残差を再び目標除去形状と見なし、繰返し計算することによって結果を改善できる場合がある。繰返し数を添字で表し、式(4)、(5)を書き換えると

$$G_n = Q_n D_n / F \quad (17)$$

$$D_{n+1} = E_n = (1 - Q_n) D_n \quad (18)$$

フィルタは各計算で同じ $Q_n = Q_0$ とすると

$$D_n = (1 - Q_0)^n D_0 \quad (19)$$

すなわち、フィルタ Q を次のように計算することに対応する。

$$Q = - \sum_{i=1}^n \frac{n!}{i!(n-i)!} (-Q_0)^i \quad (20)$$

2. 6 デコンボリューションアルゴリズム

しかしながら、以上述べた方法は滞留時間の符号を考慮していないので場所によって負になる場合がある。この場合に対し、

a) g に定数を加え、全加工領域で $g(x, y) \geq 0$ とする。この

Fig. 2 Flow chart of the newly developed deconvolution algorithm using FFT calculations

場合、加工時間が加えた定数に従って長くなってしまふ。

- b) $g(x, y)$ が負になる場所をゼロで置き換える。この場合、残差が負、すなわち過剰に除去される領域が広がるが、前述したパラメータ β または ω_c を適当に選んで影響を小さくできる。

前者は加工時間が非常に長くなるので、実用的観点から後者を選択した。図2に処理のフローチャートを示す。

まず、前データ処理として D と F を計算する。 D は目標除去形状の外周部分を外挿、フーリエ変換して得る。 F は研磨実験により求める。前述した方法で滞留時間分布を計算し、全域で負となる場所を0に置き換え、最後に残差形状を計算する。

なお、ここでも残差形状を再び目標除去形状と見なすことによって計算結果を改善できる。しかしこの場合式(20)が使えないため、繰返し数だけ計算時間がかかる。後述するように繰返し数2回が計算時間が短く、良好な結果を与える。

3. 除去のシミュレーションを用いた計算方法

比較のため、文献3、で提案されている方法を応用した計算方法を図3に示す。まず、微小時間 ΔT で除去する形状を1単位とし、あらかじめ計算する。工具をワーク面上で走査し、もし工具の重なる部分で目標除去形状がすべて正なら1単位の除去形状を差し引き滞留時間分布の対応する場所に ΔT を加える。この計算を収束するまで繰り返す。ここで、 ΔT は理想的な加工時間を T_0 、加工領域のデータ点数を M 、 N を定数として次の式で計算した。つまり、考慮する滞留時間の最小単位 ΔT を予想される平均滞留時間の $1/N$ とした。

$$T_0 = \frac{\iint_A d(x, y) dx dy}{\iint_A f(x, y) dx dy} \quad (21)$$

$$\Delta T = T_0 / (NM)$$

N が小さい方が計算時間が短いが残差が悪化する(次節参照)。

4. テストデータを用いた計算例

Fig. 3 Flow chart of the conventional deconvolution algorithm based on the simulation of polishing process

Fig. 4 Example of one-dimensional deconvolution (PV = Peak to valley, RMS = Root mean square)

Fig. 5 Residual errors of various calculation methods (Each graph is shifted for ease of comparison)

4. 1 1次元での計算

まず、図4に示す矩形形状をコサイン関数状の単位除去形状でデコンボリューションする場合を考える。データ点数は256点、残差などは次式で評価し、以後RMSと略す⁹⁾。

$$RMS = \left(\frac{1}{A} \iint_A (z(x, y) - \bar{z})^2 dx dy \right)^{1/2} \quad (22)$$

ここで、 $\bar{z}$ は平均値。図5、6に次の条件で計算した残差形状と滞留時間分布を示す。また、比較のためにそれぞれのグラフ

は上下方向にずらしてある。

- a) $\beta = 0.1$ ，繰返し数2．この繰返し数を選択したのは1の時に大きな定常偏差が残差に残るためである．繰返し数は計算時間に比例するため，2を選択し，本方式の標準的な設定とした．ステップ状に目標除去形状の変化する周辺部分で，残差，滞留時間が大きい．
- b) $\beta = 0.02$ ，繰返し数2． β を小さくすると残差のRMS値がやや向上する．しかし，周辺部分のうねりが，中央にむかってより広く影響している．滞留時間についてはもっと顕著で，周辺部分のオーバーシュートが大きく，その影響が内部まで深く入っており，a．に比べて悪い．
- c) $\beta = 0.1$ ，繰返し数8．繰返し数を増やすと β を小さくしたときと同様な効果がある．
- d) 式(6)のローパスフィルタを用いた方法．カットオフ周期は計算結果をみながら工具径の半分よりやや長い0.14とした．しかし，残差，滞留時間ともに周期的誤差があり，悪い．
- e) 従来例として，図3のシミュレーションを用いた方法．Nは10とした．残差は上記方法に比べて，周辺部分でプラス側に大きくなる特徴があり，中央部分でも周期的誤差がある．滞留時間は離散化されるため階段状であり，Nの値によっては鋭いピークをもつ．Nを40程度に大きくすれば改善するが計算時間が4倍増える．

また，滞留時間の単位は式(1)より単位面積あたりの時間であるが，ここではデータの刻み幅， Δx あたりの時間とした．

図7は種々の方法で得られた滞留時間と残差のRMS値をプロットしたものである．①は本論文で提案する汎関数を用いた方法．繰返し数を増やしてもほとんどこの線に重なる．②はローパスフィルタによる方法で，やや残差が大きい．③は図3に示したシミュレーションによる方法である．また，図5，6で用いた計算条件はa～eの記号でマークした．シミュレーション方式の残差形状はかなり悪く，Nを大きくしてもRMS値は改善しないが，前述したように滞留時間分布の階段状のうねりは改善する．結局，aよりも良い残差を与える計算条件もあるが，滞留時間のRMS値が急激に大きくなり，残差についても周期の短いうねりが大きくなる傾向がある．

4. 2 2次元での計算

図8に示す目標除去形状をコサイン関数状の単位除去形状でデコンボリューションする場合を考える．データ点数は，256×256点とした．図9，10に提案する新しい方法（ $\beta = 0.1$ ，繰返し数2回）と，シミュレーションを用いた方法（N=10）の計算結果を示す．残差，滞留時間は図8(c)の形状をデコンボリューションした後，直径 $\phi 1.6$ の内部で評価した．また，先ほどと同様，滞留時間の単位はデータの刻み面積 $\Delta x \Delta y$ あたりの時間とした．この場合，残差を無視すると，

$$\text{Average}(g(x,y)) = \frac{\text{Average}(d(x,y))}{\text{Volume}(f(x,y))} \Delta x \Delta y \quad (23)$$

すなわち，滞留時間分布の平均は目標除去形状の平均を単位除去形状の体積で割り，単位面積を掛けたものに等しい．

図11は種々の方法で得られた滞留時間と残差のRMS値をプロットしたものである．1次元の計算結果である図7と比較すると，2次元領域の計算であるにもかかわらず，同じ傾向を示す．すなわち，本論文で提案する汎関数を用いた方法①はローパスフィルタによる方法②より，やや残差が小さい．シミュレーションによる方法③は残差，滞留時間ともに悪く，Nを大きくしても残差のRMS値は改善しない．

Fig. 6 Dwell-time distributions of various calculation methods (a—e conditions are the same as in Fig. 5)

Fig. 7 Residual error and dwell-time distribution chart

Fig. 8 Example of two-dimensional deconvolution (PV = Peak to valley, RMS = Root mean square)

Fig. 9 Residual errors calculated by two methods

Fig. 10 Dwell-time distributions calculated by two methods

Fig. 11 Residual error and dwell-time chart

Table 1 Comparison of deconvolution algorithms

Conditions of calculation results of a) and b) are shown in Fig. 9 and 10.	Dwell - time distribution		Residual error RMS	Calculation time s
	Total time	RMS x 10 ⁻⁴		
New method $\beta = 0.1$ Iteration = 2 ^{a)}	67.6	5.53	0.0055	60.9
$\beta = 0.02$ Iteration = 2	68.1	5.66	0.0035	62.1
$\beta = 0.1$ Iteration = 8	68.2	5.67	0.0035	237.5
Low - Pass Filter Method $\omega_c = 2\pi/0.12$	68.2	5.63	0.0047	63.2
Simulation Method N = 10 ^{b)}	64.6	6.26	0.0238	2754
N = 40	64.7	6.26	0.0235	9900

a: New method ($\beta=0.1$, Iteration=2) b: Conventional method (N=10)

表1に計算条件の違いによる差を示す。残差の大きさをみるとaの条件より優れている場合もあるが滞留時間分布に周期的誤差(図6参照)が含まれており、結局、aの条件が安定して良好な結果を与えた。形状修正能力は、加工の前後で形状誤差のRMS値を比較して判断できる。加工前のRMS値は0.16(図8参照)なので、aの計算例では1回の加工によって3.44%に改善している。bの場合は14.9%で、約4.3倍悪い値である。また、bの計算時間はaの45倍かかっている。これはデータ点数Mの増加に対する計算量が、シミュレーション方式の場合、 M^4 に比例するのに対し、FFTを用いる新しい方法では $(M \log M)^2$ に比例するためである。従ってデータ点数が多いほど、この差はひらく。

一方、bの総加工時間はaに対して4%短い。しかし、実用的観点からはこの値はわずかな差と言える。

5. 結 論

- (1)新しいデコンボリューション方式を提案し、従来のシミュレーション方式と比較した結果、2次元の計算例で、形状修正率は4.3倍高く、滞留時間分布も滑らかで優れていた。計算時間も1/45と有利であった。
- (2)新しい方法において、 β を0.1、繰返し数を2とすると種々のデータに対して安定した解が得られる。
- (3)計算結果の評価に滞留時間と残差のRMS値をプロットする方法は、データに影響されずに傾向が把握でき、有効であった。しかし、うねりなど、実用上重要となる形の特徴は評価できず、課題を残した。

また、この計算は研磨実験により単位除去形状を測定する場合にも有用である。つまり、滞留時間を既知として単位除去形状を計算することも、同じ計算手順である。

謝 辞

本論文は、通商産業省工業技術院の産業科学技術研究開発制度に基づき実施された「超先端加工システムの研究開発」の一環として、新エネルギー・産業技術総合開発機構から超先端加工システム技術研究組合への委託事業によりまとめたものである。

参 考 文 献

- 1) M. Negishi, M. Ando, A. Deguchi, M. Takimoto, H. Narumi, N. Nakamura and H. Yamamoto: An On-Machine Coordinate Measuring System for the Canon Super Smooth Polisher, Proc. SICE '94, (1994) 941.
- 2) M. Ando, M. Negishi, M. Takimoto, A. Deguchi, N. Nakamura, M. Higomura and H. Yamamoto: Super-Smooth Surface Polishing on Aspherical Optics, SPIE, 1720, (1992) 22.
- 3) R. Aspden, R. McDonough and F. R. Nitchie, Jr.: Computer Assisted Optical Surfacing, Appl. Opt., 11, 12, (1972) 2739.
- 4) R.A.Jones: Optimization of Computer Controlled Polishing, Appl. Opt., 16, 1, (1977) 218.
- 5) K. Becker and K. Beckstette: M400 and P400 - A Pair of Machines for Computer-Controlled Fine Correction of Optical Surfaces, Ultraprecision in Manufacturing Engineering, Springer-Verlag, Berlin, (1988) 212.
- 6) 新宮克喜, 安平宣夫, 上川修治: 三次元局面光学部品の超精密加工技術, National Tech. Report, 39, 5, (1993) 508.
- 7) H. Suzuki, S. Koderu and H. Shimano: Development of Off-Axis Ellipsoidal Mirrors, Proc. 7th IPES, (1993) 801.
- 8) D. Bollinger, G. Gallatin, J. Samuels, G. Steinberg and C. Zarowin: Rapid Non-contact Optical Figuring of Aspheric Surfaces with Plasma Assisted Chemical Etching (PACE), SPIE, 1333, (1990) 44.
- 9) A.P.Bogdanov: Optimizing the Technological Process of Automated Grinding and Polishing of High-precision Large Optical Elements with a Small Tool, Soviet J. Opt. Technol., 52, 7, (1985) 409.