ドリル先端部形状の計算機援用検査*

—— 遺伝的アルゴリズムと傾斜法を併用する形状パラメータ推定 ——

黒田孝春** 加藤秀雄*** 中村良平†
土屋義博†† 佐久間 到†† ラクスマンハズラ†

Computer Aided Inspection of Drill Point Geometry

—Estimation of Geometrical Parameters by Using Genetic Algorithm and Gradient Method—

Takaharu KURODA, Hideo KATO, Ryohei NAKAMURA, Yoshihiro TSUCHIYA, Itaru SAKUMA and Lakshman HAZRA

This paper deals with a new evaluation method of conically ground drill point geometry, aiming to develop a computer aided inspection system of it. In the proposed method, five geometrical parameters for the evaluation are derived from the kinematic relationship between the drill point and the grinding wheel when regrinding. The parameters are determined by mathematical model matching with the measured coordinates of many points on the flank surface. Various matching methods such as gradient methods and Genetic Algorithm are examined by numerical simulation. The results show that the combined method of Steepest Gradient Method and Genetic Algorithm is suitable for this matching from the viewpoints of calculation speed and accuracy.

Key words : drill point geometry, grinding cone, nonlinear parameter estimation, steepest gradient method, genetic algorithm, computer aided inspection

1. 結 言

摩耗したドリルはドリル研削盤で先端部逃げ面が再研削され、再使用されるが、研削時のドリル突出し量等を厳密に一定にすることができないため、先端部形状は必ずしも同じにはならない。また、研削時の調整項目や研削条件と生成される逃げ面との関係は、最も広く用いられている円すい研削法の場合でさえ、明確にされているとは言えない。このようにドリル先端部形状の精密な管理がなおざりにされてきた背景には、ドリル研削盤の種類が多岐にわたっていることと共にドリル加工が荒加工として位置付けられていたことがある。しかし、多くの研究^{1)~4)}において指摘されてきたように、先端部形状は切削性能を大きく左右する因子であり、生産現場における先端部形状管理の重要性は決して低くはない。

さて、先端部形状の管理のためには、その簡便かつ十分な精度の測定法が不可欠であるが、現状の多くは簡単なゲージや工具顕微鏡などで切れ刃の非対称の度合を測定しているに過ぎない⁵⁾⁶⁾。また、Ramamoorthyらは画像処理を用いてチゼル角や逃げ角などを測定する簡便な装置を開発しているが⁷⁾、実際の逃げ角は切れ刃の位置によって多様に変化する⁸⁾、先端部形状の精密な評価システムとは言えない。一方、先端部形状がその生成過程に基づく数式モデルで表わされるなら、そのパラメータは形状管理のための合理的な指標になり得る。そして、津枝らおよびGallowayは正円すい研削されたドリル先端部形状を四つのパラメータからなる数式モデルで表現しており⁹⁾¹⁰⁾、Tsaiらは実際のドリルに対してそれらのパラメータの推定を試みている¹¹⁾。しかし、ドリル研削盤が研削時に生成する円すい面とドリルとの相対的位置関係には

五つの自由度が存在し、先端部形状を正確に表わすには五つのパラメータが必要である。また、パラメータ数の増加はそれらの推定を困難にすると考えられる。

そこで本研究では、正円すい研削されたドリル先端部形状の簡便かつ高精度なCAI (Computer Aided Inspection) システムの実現を目標とし、新たに五つの形状パラメータを定め、実測した座標データへの曲面適合によりそれらの値を推定する方法について検討する。パラメータ推定の方法としては、収束性と推定精度の点から最大傾斜法¹²⁾、遺伝的アルゴリズム¹³⁾¹⁴⁾などについて比較検討する。

2. 逃げ面の形状パラメータ

図1に研削時のドリル先端部と研削砥石の幾何学的関係を示す。まず、チゼル刃の中央を原点とし、ドリル軸をZ軸とする直交座標系XYZを定め、ドリル座標系とする。また、砥石とドリルの相対運動により砥石作業面が作る研削円すい面について、その頂点を原点、研削円すい軸をz軸とする直交座標系xyzを定め、研削円すい座標系とする。これらの二つの座標系は図中に示すように、三つの平行移動成分 aD, eD, pD と二つの回転移動成分 δ, ζ によ

Fig.1 Geometrical relationship between drill and grinding wheel when regrinding

* 原稿受付 平成8年7月19日

** 正 会 員 木更津工業高等専門学校 (木更津市清見台東2-11-1)

*** 正 会 員 千葉大学工学部 (千葉市稲毛区弥生町1-33)

† 学生会員 千葉大学大学院

†† 藤田製作所 (茂原市本納2730)

Fig.2 Shape of performance index f around its minimum

り関係づけられる。ここに D はドリル径であり、 a, e, p は無次元量である。また、 p は先端角 α と他の移動成分によって表現できる量である。ドリル座標系における逃げ面上の任意の点の座標値を(X, Y, Z)とすれば、次式により研削円すい座標系での座標値(x, y, z)に変換される。

$$\begin{pmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \delta & -\sin \delta & 0 \\ 0 & \sin \delta & \cos \delta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -aD \\ 0 & 1 & 0 & -eD \\ 0 & 0 & 1 & -pD \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \\ 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$p = (-k_2 - \sqrt{k_2^2 - k_1 k_3}) / k_1 \quad (2)$$

$$k_1 = \sin^2 \delta - \cos^2 \delta \cdot \tan^2(\alpha/2 - \delta) \quad (3)$$

$$k_2 = -e \cos \delta \sin \delta \{1 + \tan^2(\alpha/2 - \delta)\} \quad (4)$$

$$k_3 = a^2 + e^2 \{ \cos^2 \delta - \sin^2 \delta \cdot \tan^2(\alpha/2 - \delta) \} \quad (5)$$

また、研削円すい面は研削円すい座標系で次式により表される。

$$x^2 + y^2 = z^2 \cdot \tan^2(\alpha/2 - \delta) \quad (6)$$

したがって、式(1)~(6)から、円すい研削された逃げ面は D が既知であれば、ドリル座標系と五つのパラメータ $a, e, \delta, \zeta, \alpha$ により表現できる。逆に、もしドリル座標系で測定した逃げ面上の多数の点の座標値に研削円すい面を適合させることができれば、上記の五つのパラメータにより逃げ面形状を評価できることになる。これらのパラメータの値は、逃げ面上の n 個の点の座標値を(X_i, Y_i, Z_i), $i=1, \dots, n$ で表し、研削円すい面との適合誤差を z 方向に評価することになると、次式で与えられる適合誤差の二乗和(以下、評価指数 f と呼ぶ)を最小化することによって定まる。

$$f(a, e, \zeta, \delta, \alpha) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(z_i - \frac{\sqrt{X_i^2 + Y_i^2}}{\tan(\alpha/2 - \delta)} \right)^2 \quad (7)$$

3. パラメータ推定の方法

3.1 評価指数の形状と傾斜法によるパラメータ推定

上記の非線形最適化問題は解析的に解くことは困難であり、数値計算を行うことになる。その方法としては、共役傾斜法や最大傾斜法などのパラメータ空間での評価指数の傾斜を利用する方法、およびシンプレックス法などの傾斜を利用しない直接探索法が知られている。本研究の問題に適した最適化法を選択するために、まず、パラメータの値が既知である逃げ面上の点群の座標値を用意し、パラメータの真値のまわりでの評価指数の変化を調べた。その例を図2に3次元表示と等高線表示により示す。この場合のドリル径 D は32mm、パラメータの真値は $a=0.01, e=0.05, \zeta=5^\circ, \delta=20^\circ, \alpha=118^\circ$ であり、 a と e または e と ζ を変化させた場合の評価指数 f の変化を示す。用いた逃げ面上の点はほぼ等間隔に分布する50個の点群である。図2(a)を見ると、 f が最小となる点、すなわち真値の点を含む窪みの外に別の窪みが存在し、 f はローカルミニマムをもつ複雑な形になっていると考えられる。また、窪みがパラメータ軸に対して斜めの細長い谷を形成しており、パラメータが相互に干渉することを示している。(b)の場合も同様である。他のパラメータ間においても同様な傾向が多く見られたことから、本問題の場合、パラメータの初期値によっては傾斜法で真値に到達できない恐れがある。

図3は、上記と同じ逃げ面上の点を用いて、二つの異なる初期値

Fig.3 Change of parameter α by steepest gradient method

Fig.4 Flow chart of genetic algorithm

から最大傾斜法により2000回のパラメータ修正を行ったときの α の変化を示す。この図から、 α が約 150° と真値から大幅にずれてしまう場合があり、上記の推測が裏付けられる。なお、この最大傾斜法では、傾斜を解析的に求めるのは困難なので差分を用いており、直線探索にはFibonacci法を用いている。また、Powellの共役傾斜法も行ったが結果はほぼ同様であり、真値に到達する場合は最大傾斜法の方がパラメータ修正回数が少なかった。

3.2 遺伝的アルゴリズムによるパラメータ推定

傾斜を用いない直接探索法は上記のような問題が生じにくいと考えられるが、シンプレックス法ではローカルミニマムからの脱出が傾斜法と同様に困難であった。そこで、広いパラメータ範囲から効率的にグローバルミニマムに到達することができることで近年注目されている遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithm, 以下ではGAと略記する) を試みることにした。

図4に用いたアルゴリズムを示す。すなわち、まず、各パラメータがとり得る範囲を予想し、パラメータ範囲として定める。つぎに、五つのパラメータを遺伝子とし、遺伝子がパラメータ範囲内で不規則に散らばる N 個の個体を乱数を用いて発生させる。なお、パラメータは実数値であるから実数型表現の遺伝子を用いている。つぎに、それらの個体に対する評価指数 $f_i, i=1, \dots, N$ を求め、適応度の低いものを淘汰する。適応度の評価には、評価指数があらかじめ定めたしきい値以下のものを淘汰するエリート保存方式を用いた。ただし、単純なエリート保存方式ではローカルミニマムに陥る恐れがあるので、突然変異率を高い値にする必要がある。また、実数型に適用しやすい交叉方法として、両親の平均値を子の値にするブレンド交叉を用いる。

さて、GAでは発生させる個体数や世代数は多いほど個体群全体

Fig.5 Relation between population and generation number in genetic algorithm

Fig.6 Change of parameter α by genetic algorithm Fig.7 Change of performance index f by genetic algorithm

の評価指数が小さくなり、適応度が高い、すなわち評価指数が小さい個体を得られる可能性があるが、計算時間は増大する。また、突然変異率もそれらに関係する。従って、推定精度と計算時間を勘案して個体数と突然変異率を決定する必要があるが、一般的な決定方法は導かれていないので、本報では以下のように数値実験的に決定した。

図2で用いたのと同じ逃げ面上の点群の座標値に対し、パラメータ範囲 $a=-1\sim1^\circ$, $e=-1\sim1^\circ$, $\zeta=-10\sim10^\circ$, $\delta=10\sim20^\circ$, $\alpha=110\sim120^\circ$ としてパラメータ推定したときの個体数と世代数の関係を図5に示す。すなわち、図の縦軸は個体群の平均評価指数 $f_{average}$ が 0.1, 0.03, 0.025 および 0.01 mm² に達するのに要する世代数を示し、それは横軸の個体数が増加するほど少なくなることがわかる。しかし、個体数が250以上では必要な世代数の減少効果はあまり見られない。逃げ面上の他の点群を用いた場合、あるいは他の真値の場合についてもほぼ同様な結果が得られた。このことから、本研究の場合、個体数は250が適当であると考えられる。突然変異率についても同様な検討を行い、10%が適当であることがわかった。

前述の点群とパラメータ範囲に対し、個体数250、突然変異率10%としてGAを適用したときの、パラメータ α と世代番号との関係を図6に、個体群の平均評価指数および最小評価指数と世代番号との関係を図7に示す。図6より、世代が進むと個体群の α の最大値と最小値が114°付近に収束していくことがわかる。この値は図2のような表示によりグローバルミニマムの範囲にあることが確認されている。また図7より、時々突然変異によりパラメータのばらつきが広がり、その後最小評価指数が急激に減少することがわかる。他のパラメータの場合も同様な傾向で変化しており、広いパラメータ範囲からグローバルミニマムに到達するのにGAが有効であることが確認された。しかし、評価指数が劇的に減少するのは10世代くらいまでであり、100世代以上では世代ごとの評価指数の変化が極めて小さい。さらに図6の場合、 α が真値から4°もずれて収束しており、GAで高い推定精度を得るのは容易ではないこともわかる。

3.3 遺伝的アルゴリズムと最大傾斜法の併用

図2からわかるように、一旦グローバルミニマムの近傍まで到達できれば、傾斜法の方が真値に到達するのは容易である。そこで、始め100世代までのGAを適用し、その最小評価指数を与える

Fig.9 Measuring points of actual drill point

パラメータを初期値として最大傾斜法に切り替える方法を試みた。なお、最大傾斜法における収束判定条件は①1回のパラメータ修正による評価指数の減少量が ϵ_s より小さくなった場合、②1回の修正によるパラメータ値の相対的变化が全パラメータに対して ϵ_g より小さくなった場合または③直線探索における刻み幅が ϵ_d より小さくなった場合のいずれかとした。

図8にこの方法による評価指数の変化を示す。横軸はGAの場合世代番号を示し、最大傾斜法の場合パラメータ修正回数を示す。図より、最大傾斜法に切り替えることにより評価指数が急速に減少することがわかる。表1に各パラメータの範囲、真値および収束判定条件を $\epsilon_s=0.000000001$, $\epsilon_g=0.00001$, $\epsilon_d=0.0000001$ としたときの最終的な推定値を示す。この計算の場合、収束判定条件は①を満たして終了した。パラメータの推定精度は収束判定条件に依存するから、真値との誤差について議論することはあまり意味はないが、表からこの誤差が他に比べて大きいように思われる。これは、パラメータ α が評価指数 f に対して感度が低いことに起因すると考えられる。

4. 測定例

本方法の有効性を確認するために、ドリル研削盤で先端部を再研削した実際のドリルの形状パラメータ推定を行った。用いたドリルはφ32のもので、ドリル座標系での逃げ面上の点の座標は三次元測定機（精度1μm）を用いて、図9に示す100点について測定した。設定したパラメータ範囲は前述のものと同じであり、GAで100世代まで計算した後、最大傾斜法で前述と同じ収束判定条件までパラメータ推定を行った。図10に世代番号またはパラメータ修正回数と評価指数の関係を示す。図8と比べると、形状誤差や測定誤差があるため最終的な評価指数 f は大きい。GAから最大傾斜法に切り替えることによって効率的に f が減少することがわかる。

図11に、最終的に得られたパラメータ値とそれらから算出した逃げ角の半径方向変化を示す。チゼル角は、先端部を構成する二つの逃げ面について推定したパラメータ値から算出することができ、118°20'で

Fig.8 Change of performance index f by genetic algorithm and steepest gradient method (Simulation)

Table 1 Comparison between initial and estimated values

Parameter	a	e	ζ	δ	α	f
Initial region	-1 - 1	-1 - 1	-10 - 10°	10 - 20°	100 - 120°	—
True value	0.01	0.05	5°	20°	118°	0
Estimated value	0.01131	0.05247	5.89°	20.03°	117.418°	$2.6 \times 10^{-6} \text{ mm}^2$

Fig.10 Change of performance index f by genetic algorithm and steepest gradient method (Actual drill)

Fig.11 Relation between clearance angle and radial position (Actual drill)

あった。これらの値は工具顕微鏡等による測定結果とほぼ一致している。なお、プログラムはC言語で記述しており、変数はすべて倍精度とした。計算時間は、HP-9000/712-80 (OS:HP-UX9.01, Compiler:gcc2.4)を用いた場合、GAの計算が13分45秒、最大傾斜法の計算が1分15秒であった。また、PC (Pentium120MHz, OS: Windows95, Compiler: Turbo C++4.0)を用いた場合、GAの計算が3分49秒、最大傾斜法の計算が38秒であった。

5. 結 言

ドリル先端部形状CAIシステムの実現を目標とし、逃げ面座標データから曲面適合法により形状パラメータを推定する方法について検討した。その結果、得られた主な結論は以下のように要約される。

- (1) 円すい研削された逃げ面に対して、その形状生成過程を考慮することにより5個の形状パラメータを導いた。
- (2) 曲面適合の評価指数は形状パラメータに関して非線形で、複雑な形をしているため、パラメータの初期値が真値から大きく離れている場合、傾斜法での推定は難しい。
- (3) GAは広い初期値範囲から真値の近傍への接近に有効であ

るが、真値の近傍から真値への収束速度が遅い。

- (4) 本研究の評価指数に対しては、始めにGAを用い、その後、最大傾斜法を用いる曲面適合法が有効である。

おわりに、本研究の遂行に協力いただいた平成3年度卒業研究学生・野口貴宏君、平成4年度卒業研究学生・金子慎君、中国華北工学院・王凡講師に深甚なる謝意を表す。

参 考 文 献

- 1) 笠原和夫, 広田明彦, 神田芳文: 種々の切れ刃形状のドリルの切削抵抗と切りくず生成状態(第1報)―切れ刃形状の幾何解析と二, 三の予備的実験結果, 精密工学会誌, 60, 3 (1994) 372.
- 2) 笠原和夫, 広田明彦: ドリルの幾何学的相似性に基づいた切削抵抗の予測, 精密工学会誌, 55, 3 (1989) 545.
- 3) 窪田英毅: ドリル穴加工における穴生成機構の解析, 精密工学会誌, 53, 2 (1987) 275.
- 4) 鬼鞍宏猷, 佐久間敬三, 甲木昭雄: ドリルの振動特性―主切れ刃, チゼルエッジおよびマージンの作用, 精密工学会誌, 54, 9 (1988) 1691.
- 5) D. B. Dallas: Tool and Manufacturing Engineers Handbook, Third Ed., McGraw-Hill, New York, N.Y., (1976) 3-23.
- 6) 根岸克己: ドリル刃先の効果的な再研磨, 機械技術, 14, 10 (1966) 129.
- 7) B. Ramamoorthy and V. Radhakrishnan: Computer-aided Inspection of Cutting Tool Geometry, Prec. Eng., 14, 1, (1992) 28.
- 8) 精機学会編: 精密工作便覧, コロナ社, (1970) 297.
- 9) 津枝正介, 長谷川嘉雄: 振れ錐刃先諸角の解析―第1報正円錐面研磨の場合, 精密機械, 22, 7 (1956) 292.
- 10) D. F. Galloway: Some Experiments on the Influence of Various Factors on Drill Performance, Trans. ASME, J. Eng. Ind., 79, 2, (1957) 191.
- 11) W. D. Tsai and S. M. Wu: Measurement and Control of the Drill Point Grinding Process, Int. J. Mach. Tool Des. Res., 19, (1979) 109.
- 12) たとえば, M.J.Box, D.Davies and W.H.Swann: Non-linear Optimization Techniques, Imperial Chemical Industries Ltd., Edinburgh, Scotland (1969).
- 13) D. E. Goldberg: Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning, Addison Wesley, Reading, MA., (1989) 3-41.
- 14) 安居院 猛, 長尾智晴: ジェネティックアルゴリズム, 昭晃堂, (1995)