微小モジュール歯車の歯形精度測定への 光切断法の応用（第1報）*

——明視野観察による測定方法の検討——

松岡浩仁** 賀勢晋司** 藤井裕之*** 伊東達也***

Application of Optical Cutting Method to Measurements of Tooth-Profile Error of
Minute Module Gears (1st Report)

— Examination of the Method by Means of Bright Field Observation —

Hirohito MATSUOKA, Shinji KASEI, Hiroyuki FUJII and Tatsuya ITOH

This paper introduces a new method to measure tooth profile error of minute module gears. In this method, regarding the surface of a gear as a sort of surface roughness, the optical cutting method is applied. Because the tooth depth of the gear here aimed to measure is very low, this method can be expected to be applied available. To ensure the ability of this method, a measuring apparatus which employs a CCD camera as an observing device was constructed. The optical cutting image of the tooth observed by the CCD camera is led to a computer and the tooth profile is presented with a fine line image processing. By comparing it with a calculated ideal profile, the tooth profile error can be obtained. Measurements for a gear with the module of 0.2 are carried out successfully, in which a resolution is estimated to be about $1.1 \mu\text{m}$ in Y direction and $1.6 \mu\text{m}$ in X direction and standard deviations of repeatedly measured values are about $3 \mu\text{m}$. Besides, some factors generating measurement errors are pointed out and discussed for developing this method better. As a consequence it becomes clear that the method has a good ability to measure total profile error of minute module gears.

Key words: minute module gear, tooth profile error, optical cutting method, bright field observation, CCD camera

1. 緒 言

歯車の歯形誤差は騒音、振動を引き起こすもととなり、それを組み込んだ機械等の最終的な性能に大きな影響を与える。そのため、様々な測定方法が考案され、実用に供されている。しかし、それらの多くは比較的大きなモジュールを持つ場合に有効となる接触式のものであり、今後ますます重要性を増すであろうと考えられる、微小なモジュールの歯車測定には適用できない。

比較的小さなモジュールの歯車に対しては、奥山らが光触針を用いた方法によりかなりの精度での測定を可能にしている^{1)~4)}。しかし、例えばハーモニックドライブ減速装置の歯車には、さらに小さなモジュールのものが用いられることが多く、そのような大きさのものの測定は困難を極める。

そのような観点から、著者らはこれまでCDプレーヤなどで用いられる光ピックアップを利用した測定装置を試作し、モジュールおよそ0.18の歯車の測定を試みた⁵⁾。その結果、ピッチ精度測定には有効であることが確かめられたものの、幾何学的な制限から、歯形精度の測定にまでは及ばなかった。そこで今回、表面粗さ測定に用いられる光切断法を応用した測定方法を考案した。そして、その可能性を確かめるために、光切断法表面粗さ測定器にならった測定装置を製作し、モジュール0.2の標準歯車の歯形精度測定を試みた。その測定装置は観測部にCCDカメラを配置し、その画像を、処理ボードを通してパソコンに取り込み、いくつかの処理を施して歯形を再現するものである。測定の結果、ばらつきは数 μm 程度であり、歯

形状測定への応用の可能性を確認できた。また、本方法は、ホブ盤等の歯切り装置におけるインライン測定にも応用できると考えられる。本報では、基本的な測定方法、測定装置そして測定結果について報告する。

2. 光切断法と歯車測定

光切断法は古くから表面粗さ測定に用いられてきた方法である⁶⁾。そのあらましを図1に示す。この方法は拡大率にもよるがおおよそ $1 \mu\text{m}$ 程度の測定精度を持ち、非接触で表面形状を観察することができる。観察可能な断面曲線が短くなるきらいがあるが、本測定で対象としている歯車の1歯当たりの大きさを考えると、その点は問題にはならない。

今回測定の対象としている歯車のモジュールは0.2であり、その歯丈はおおよそ0.5 mmと低い。本測定では、これを一種の表面粗さであると思なして光切断法を応用する。

図2に歯車測定への応用の概略を示す。測定系は光の帯を投射する投光系と反射光を観察する受光系とからなり、それぞれの光軸を含む面が歯車の中心軸を通り、かつ光の帯が歯筋に対

Fig. 1 Optical cutting method

* 原稿受付 平成8年9月2日

** 正 会 員 信州大学工学部（長野市若里500）

*** 信州大学大学院

Fig. 2 Application to the measurements of tooth profile error

Fig. 3 Image of tooth cutting

して直角になるように配置する。このとき、投光系から投射された光は、歯形に沿って光の帯を生じ、その像を観察することにより歯形の輪郭を測定することができる。

ところで、光切断法は、被測定面への投光軸の入射角、そして投光軸と受光軸の相対的な角度関係とにより、観察される輪郭には違いが生じる。今回は入射角 45° 、投光系、受光系の相対的な角度 90° という、いわゆる明視野観察を用いることにする。そのため観察される輪郭は歯直角断面ではなく、歯車軸に対して 45° の角度をなす平面で切断したときに得られる輪郭を表す。その様子を図3に示す。このように、本測定方法では、測定位置が歯車軸に沿って歯先から歯もとにかけてわずかにずれることになる。しかしながら、目的の歯車の歯丈はせいぜい 0.5 mm 程度以下であり、その結果生じるずれも同程度と非常に小さく、形状測定としては差し支えないと考える。また、切断像はハッチングで示すように、見かけ上歯丈方向に約 $\sqrt{2}$ 倍されるが、CCDにより得た画像に対して、画素間隔を対応する長さで換算することにより歯形が再現される。

3. 歯形検出およびデータ処理方法

歯形の検出は、光切断像を受光系の対物レンズにより拡大し、CCDカメラ受光部へ投影することにより行う。このとき、受光部をスキャンし、歯先から歯底に向かって順次画像を取り込んでいく。取り込まれた画像を画像処理ボードの段階で2値化しコンピュータへ転送する。この場合、明視野観察を採用しているので、正反射光をもたらす歯先円部分と、乱反射光となる歯面部とはコントラストにかなりの差がでて、同じ条件で両者の像をとることは困難である。そこで、歯先部取込みの時は光量を絞る、歯面部取込みの時にはそれを最大にして、結果的にコントラストの差が少ないように調節する。また、2値化の際のしきい値も撮像箇所に応じて可変とし、歯形全体について調節可能とする。以上により得られた画像を基に細線化処理を行い、歯形を再現する。

Fig. 4 Measuring apparatus

Fig. 5 Calibration of measuring apparatus

なお、このような処理によっても、コントラスト差による影響を取り去ることは難しく、歯先隅肉部の映像を完全に検出することはできない。しかしながら、歯形誤差が問題となるのは両端部を除く部分であり、上述のような処理をきめ細かく行うことにより撮像不可能な領域を狭めることができる。

細線化処理は、歯先部と歯面部とに分けて行う。すなわち、歯先部については歯の高さ方向のスキャンによりその画像幅の中央部を求め、歯面部については歯厚方向のスキャンにより左右歯面それぞれの画像の中央部を求めるものとする。

4. 測定装置および測定方法

4.1 測定装置

図4に測定装置の概略を示す。本装置は、歯車全周にわたっての測定を可能にするための割出し用モータと同軸上に被測定歯車を設置する。投光系、受光系の両光学系はそれぞれの光軸のなす角が 90° となるように基板上に配置し、その全体をXYステージに取り付け、被測定歯面に対するアライメントがとれるようにしてある。光源にはタングステンランプを用いた。投光系のスリットには市販のエアスリットを流用している。そのスリットの幅は $200\text{ }\mu\text{m}$ 、長さは 3 mm で、5倍の対物レンズを通すことで、被測定歯面表面での光帯は幅 $40\text{ }\mu\text{m}$ 、長さ 0.6 mm となる。

用いたCCDカメラは撮像面サイズが1/3インチ、その画素数が水平 $768 \times$ 垂直 494 というものである。そして受光系の対物レンズも投光系同様5倍のものをを用いた。

図5にブロックゲージを用いた画面上1ドット当たりの対応量の校正方法を示す。この場合、ブロックゲージの厚さ変化に対応して、測定画面の光帯像は上下する。x軸方向の校正に当

Fig. 6 Results of calibration

Table 1 Main specifications of measured gear

Module	0.2
Reference circle diameter	38.0 mm
Tip circle diameter	38.369 mm
Root circle diameter	37.414 mm
Number of teeth	190

たっては、CCDカメラをその光軸まわりに90°回転させて行う。この場合も幾何学的に $\sqrt{2}$ 倍されるので処理の段階で考慮する必要がある。図6は50 μm ごとの厚さ変化に対応する画素数についての校正結果である。これによると、入射角45°、明視野観察における画面x, y軸方向の1画素あたりの対応量はそれぞれ1.56 μm および1.12 μm であり、以下の測定における分解能をそれぞれ1.6 μm 、1.1 μm とする。ここで、x軸は円周方向、y軸は歯丈方向となる。

なお、今回の測定ではマスタギアとして市販されているものを対象とし、その形状を基準とした誤差により本測定方法の評価を行うものとする。測定に用いた歯車の諸元を表1に示す。

4.2 測定方法

歯形像取得は、測定軸上に被測定歯車をセットし、画像取込み用プログラムを実行する。これにより測定画面上に、測定位置を示すための、被測定歯車の諸元を用いて計算した歯形の輪郭線が表示されるので、CCDカメラにより得られている光切断像がそれに重なるように位置決めを行う。続いて歯形画像取込みを行う。このとき、上述の通り、歯先部分の検出時には光量を絞り、歯面部分の検出時に光量を最大にする。光量調整の自動化も可能であるが、現段階では手動により微細な調整を行う。また、歯面部分の取込み時にも、歯先近く、中央部、歯底近くの3部分に分け、2値化する際のしきい値を自動的に調整する。このようにして、歯形に沿った幅を持つ帯の像が取り込まれる。この帯を、その中心を基準に細線化する。

歯形の誤差評価では、歯先円部を基準とする。すなわち、歯形検出により得られた細線化画像の歯先円部に、被測定歯車の諸元から計算で求めた歯形の歯先が重なるように座標変換し、歯丈方向の各座標位置での理想歯形からのずれを求める。

測定に当たっては、1歯についての繰返し測定と任意に選んだ複数枚についての測定の2通りを行い、測定に関する総合的な評価を行う。

Fig. 7 Observed image and its fine line

5. 測定結果および考察

5.1 測定結果

原画像とその細線化処理結果例を図7に示す。左右歯面について歯先部近傍で途切れた部分はあるが、そのほかは一樣に撮像できていることがわかる。また、細線処理後のデータによると、歯面部分に特に異常と思われるような乱れはなく、撮像そのものは良好に行われていることがわかる。

今回の測定では、受光系の拡大率とCCD面サイズの関係から、歯形を歯先から歯底まで同時に撮像することはできなかった。現在のシステムでは今回測定に用いた歯形の大きさが限界である。これより大きな歯形の測定を行うためには、入射角を小さくするか、受光部の対物レンズの倍率を下げる必要がある。逆に、さらに小さなモジュールの歯車に対しては光学的なゆがみを考慮する必要はあるものの、拡大率を上げることで対応可能である。

任意の歯形についての誤差測定結果の例を図8(a)~(d)に示す。それぞれ歯車円周をほぼ4等分した位置に対応する。同図(e)に示すように、測定された歯形の歯先部(T_M)に、計算により求めた理想歯形の歯先部(T_C)が重なるように座標変換を施したとき、横軸に歯先から50画素の点Aを基点として画面上5画素単位による歯底方向への位置をとり、それぞれの点における理想歯形からの偏差量(e_l および e_r)を縦軸にとっている。理想歯形は、撮像された歯形の細線化処理を施す度に、その歯先部の中心点を基準に計算している。なお、偏差については左右両歯面部についてそれぞれ歯形が太る方向を正としている。直線で示しているのは偏差の大まかな傾向をつかむために最小自乗法により近似した結果である。それぞれ、実線と白丸が左歯面に、破線と黒丸が右歯面に対応する。この結果、被測定歯車に対して、共通した特徴を示しながら最大でおよそ7 μm 程度の偏差があることが分かる。ここで、直線の傾きに注目すると、この4か所の平均は左歯面が0.018、右歯面は-0.020となる。その他10歯ごとにとった18か所の測定結果によっても傾きの平均値はそれぞれ0.017、-0.020であり、横軸に関してはほぼ対称的な結果が得られていることから、この傾き成分は、歯形の誤差よりもむしろ測定装置のアライメント、特にCCDカメラ撮像面の光軸回りの傾きに起因するものと考えられる。以上のことから、この直線を基準として測定結果の散らばり具合を評価するならば、それはおよそ $\pm 3\mu\text{m}$ 程度となる。

Fig. 8 Tooth profile error

次に、図9に、1つの歯についての10回の繰返し測定の結果例を示す。横軸には歯先からの距離を、縦軸に測定された偏差の平均値を示している。また同時にそれぞれの位置での標準偏差に対応した幅を、平均値を中心にして示す。この場合も、歯形が太る方向を正としている。この結果、全体の傾向としては図8(a)～(d)について述べた傾きを持つ。そして標準偏差でみるとおよそ $3\mu\text{m}$ 程度であり、1画素あたりの対応量を考慮に入れると、十分に安定した結果が得られていることが分かる。

以上述べたように、マスタギアを対象とした測定実験から、撮像し、処理された歯形は最大で $\pm 3\mu\text{m}$ 程度の精度で被測定歯形を再現できるものと考えられる。

5.2 誤差要因

本測定法では光学系のアライメントの取り方を始め、いくつかの点が問題となる。具体的な誤差の解析は今後の課題であるが、次のような事項が上げられる。

(1) CCDカメラの光軸回りの傾き

この傾きにより、得られた像はCCDの中心について回転したものとなる(5.1節参照)。

(2) スリットと歯筋とのなす角度

Fig. 9 Repetitive measuring results

光の帯と歯筋の相対方向が直角から狂うと、左右の歯面部の像は互いに上下方向にずれて観察されることになる。

(3) 被測定歯車軸と光軸のずれ

(4) 被測定歯車の割出し誤差

このうち、(1)、(2)による誤差は、直接、歯先円画像の傾きとして現れる。また、(3)、(4)による誤差は、歯車の外径によりその与える影響の大きさは異なる。今回の測定に用いた歯車の場合、歯車表面に照射された光帯の長さに対して外周は十分に大きいため、(1)、(2)に比べその影響ははるかに小さい。

このように、装置のアライメントによる誤差は何らかの系統性を持つことが推察され、データの処理方法の工夫によって取り除くことが可能であると考えられる。

このほかに、無視できないものとして、細線化の問題が上げられる。不適切な細線化は数 μm の影響を及ぼす。まずハード的には光の帯の幅を狭くし、さらに適切なフォーカシングにより撮像された画像の線幅をできるだけ狭くすることが求められる。そしてソフト的には、現在単純に線幅の中心とおいっている細線化基準の詳細な検討をする必要がある。

精度向上のためには、基本的には装置全体のアライメントを完全なものにすることが重要である。しかし、それには限界もある。しかも、上述の誤差を分離することはきわめて困難であると思われる。そこで、あらかじめアライメントの狂いを検出しておいて補正を行うこと、また、各種の狂いによる影響を把握し、処理の段階で補正を行うなど、測定器としてのロバスト性を上げていくことが今後の課題となる。

また、明視野観察では、歯先部と歯面部のコントラストの差が大きく、光量およびしきい値調整が必要となり、測定そのものに煩雑さが残った。両者を自動的に調整することも一手法としてあるが、測定をより簡便に行うためには光学系の角度関係を検討する必要がある。

5.3 今後の展開

この測定方法は、従来の投影機による場合と異なり、歯車を軸から取り外すことなく簡単かつ効果的に、より高精度の測定ができると考えられる。また、測定対象は歯形精度のほか、測定位置の角度割出しを正確に行うことでピッチ精度測定が、そして回転に伴う歯先位置の上下の変化を検出することで歯車軸の振れを測定することが可能である。さらに、歯車軸に沿って歯車を動かしたときの画像を解析することで歯溝の振れの測定も可能になる。

また、本質的に、測定対象となる歯形の理論式を与えることで、インポリュートに限らず、各種の歯形の測定にも対応が可能である。

このような特徴から、本方法に基づく測定装置を歯切り盤に付属させれば微小モジュール歯車のインライン測定にも寄与で

きるのではないかと思う。

6. 結 言

本研究で得られた成果を以下にまとめる。

- (1) 光切断法を応用した、微小モジュール歯車の歯形精度測定方法を考案し、その測定装置を試作した。
- (2) 画像取得とその処理に工夫を加え、測定に必要な歯形細線化像を得ることができた。測定分解能は歯丈方向 $1.1 \mu\text{m}$ 、円周方向 $1.6 \mu\text{m}$ である。
- (3) モジュール 0.2 のマスタギアの測定実験により、繰返し測定における測定誤差の標準偏差は $3 \mu\text{m}$ 程度であることが確認された。
- (4) 測定の際、各種のアライメント不良により生じる誤差の除去方法について問題は残るものの、測定方法としてかなりの可能性を持つと考えられる。

今後は、本方法による歯形測定データの集積、測定精度の向上を図るとともに、ピッチ精度や歯溝の振れなど、他の項目への本方法の適用についても検討を進める。同時に、光学系の改良により、測定にかかわる煩雑さを無くし、測定時間の短縮化を図る。また、インライン測定への応用についても検討課題となる。

最後に、本研究について助言と便宜をいただいた長野県精密工業試験場丸山六男氏に感謝する。また、本測定装置を製作するに当たりご尽力いただいた信州大学工学部生産システム工学科実習工場堤信一技官ならびに傳田廣幸技官に感謝する。

参 考 文 献

- 1) 奥山栄樹, 清野 慧: 歯車形状の非接触迅速測定法, 機械の研究, 42, 12 (1990) 1318.
- 2) 奥山栄樹, 清野 慧, 鎌田 治: 歯車形状の非接触迅速測定法に関する研究 (第1報), 精密工学会誌, 56, 1 (1990) 152.
- 3) 奥山栄樹, 清野 慧, 守時 一: 歯車形状の非接触迅速測定法に関する研究 (第2報), 精密工学会誌, 59, 5 (1993) 761.
- 4) 奥山栄樹, 清野 慧, 守時 一: 歯車形状の非接触迅速測定法に関する研究 (第3報), 精密工学会誌, 59, 10 (1993) 1649.
- 5) 松岡浩仁, 賀勢晋司, 茨木義久: 微小モジュール歯車のピッチ精度測定 (光ビクアップ利用の試み), 設計工学会誌, 31, 2 (1996) 67.
- 6) 青木保雄: 精密測定 (2), コロナ社, (1990) 326.

オリンピックをはじめとする大きな競技大会では、数の多少はあるものの、ほぼ確実に何かしら新しい記録が生み出されます。今世紀中には破られないだろうといわれているような大記録があっさりと塗り替えられることもあります。人間の身体能力には限りがないのだろうか、というのはだれしもが抱く疑問ではないでしょうか。ダーウィンの意味での進化が人類の身体に10年や100年のオーダーで影響を与えることはとても考えられませんから、いずれ記録が漸近的に飽和することは当然予想されます。記録を見返したわけではありませんが、短距離走などはおそらく人類の限界的な記録にかなり近いものとなっていると考えられます。それでも、というかむしろそれがゆえに、わずか0.01秒の記録の更新にひとは熱狂し、選手はそのために全身全霊を傾けた練習を重ねることになります。

記録を生み出す要素として才能、努力、精神力、運などが考えられます。これらの要素の総合がわずかでもこれまでの記録保持者を上回ることにより新しい記録が生み出されるのでしょうか、この内

の選手の努力を支えるものとして、多くの種目で科学的なアプローチが採用されるようになっていきます。例えば「走る」というのは、人間にとっては単純な動作に思えますが、工学の観点からは人間の身体は極端に複雑で精緻な機械であり、これをどのように鍛えあげ、どのように動かすのがよいのかは、素人目にみても極めてチャレンジングな課題であることに気がつきます。テニスラケットやスキー板といった工学の対象としていかにも適当と思われる用具だけでなく、シューズやウェアといったものまで今や先端技術の産物です。用具だけでなく、トレーニングや運動技法、計時や判定などの技術にも興味もたれるところです。そして、それぞれの分野でわが国の技術が大きな寄与をしていることもよく知られています。

そこで、このようなスポーツと工学のかかわりがどのようなレベルに達しているのかにあらためて焦点をあてようというのが今回の特集「競技スポーツと精密工学」の趣旨です。特集を組むにあたって、(株)ニコンの河合氏には展望記事をお願いしただけでなく、企画の構成から執筆依頼まで全面的にお世話になりました。あらためてこの場を借りてお礼申し上げます。同時に、忙しい中解説を執筆頂いた方々にも深くお礼申し上げます。(復原研正)