計測・評価の軌跡*

ミクロンからナノへ、接触から非接触へ

三井公之**

A Track of Measurement and Evaluation Technology: Micron to Nano, Contact to Non-contact / Kimiyuki MITSUI

Key words: metrology, measurement, optical measuring methods, surface roughness, accuracy, machine tool

1. はじめに

計測・評価技術は工学のみならず科学の発展と深くかかわっており、今世紀における精密工学の長足の進歩を支えてきたものといえる。

機械的な計測技術は加工技術を支える最も基礎的なものであり、現在および未来においても変わることはないであろう。一方、光計測技術が加工のための評価技術として高度な発展を見たことが現在の科学技術の発展をうながしたものとさえいえる。1600年ころに発明されたといわれる光学顕微鏡にはじまり、光計測技術は長足の進歩を遂げ、特に近年においてはレーザー、高感度かつ多様な光検出素子等のオプトエレクトロニクス素子の実用化、画像処理技術の発展により種々の測定法の開発が進められた。

また、計算機がもたらした計測への影響は非常に大きなものがある。現在の計測技術は、大量の測定データの計算機による高速処理に支えられている部分が多い。レーザー応用計測の最も重要なものである光干渉計測でも、得られた干渉じまの解析には計算機による処理が必要となる。また仮想的な測定基準をソフトウェア的に構築することによる測定では計算機による処理が不可欠である。

1982年に走査型トンネル顕微鏡（STM）が発明され、原子像の観察が可能となったのに続き、走査型プローブ顕微鏡（SPM）が次々と開発され、0.1 nm レベルの分解能

が実現され、精密工学の新たな分野が開けてきている。

広範な分野にまたがる計測技術一般を俯瞰することとはもとより筆者の手に負えるところではないが、ここでは精密工学の重要な分野である加工技術と密接な関係にある計測・評価技術の発展の一端について述べてみたい。

2. 表面微細形状測定法

触針式粗さ計による評価が一般的ではあるが、工作物に傷をつけずに、非接触での測定が可能な光学式測定法の開発が試みられた。また、STMに代表される走査型プローブ顕微鏡が長足の進歩を遂げつつある。

1929年にシュマルツ（Schmaltz）により、触針光てこ式表面粗さ測定器が発明された。我が国においては1932～35年に、日本光学式仕上面検査器（触針光てこ式）、大越式、小坂式などの測定器が開発された。可動コイル形変換器を用いた表面粗さ測定器は、1933年にアボット（Abbott）が開発している¹⁾。

最近では複雑形状の部品測定の必要性から、粗さのほか形状、曲率半径、角度等を同時に評価できる表面形状・粗さ測定器が一般的なものとなっている。また、デジタル技術の使用により、広い測定範囲を高分解能でカバーすることが可能となり、複雑な形状に重畳した微細な表面粗さ成分や形状が解析可能な機能が強化されている。測定範囲が広いために、縦倍率レンジの切り換えが不要である。

光による粗さ測定法には、光切断法²⁾、干渉を利用した方法、光触針法、散乱光の強度分布による方法、回折現象による方法などが考案され、実用化されている。非接触測定であるために、測定対象に傷を付ける心配が無く、超精密加工の発展とともに、多くの研究成果が報告されている。

このように多彩な光応用計測技術の発展には、レーザーの

* 原稿受付 平成10年10月15日

** 正会員 慶應義塾大学理工学部（横浜市港北区日吉3-14-1）

1977年東京大学大学院工学系研究科産業機械工学専門課程（博士課程）修了，工学博士。
1977～1989年工業技術院機械技術研究所にて工作機械の精度評価の研究に従事。1989年より慶應義塾大学理工学部にて加工計測技術の研究を行っている。

図1 実時間表面粗さ測定法の原理

図2 臨界角法の原理

出現が大きな影響を与えたものと言えよう。1960年にメイマンがルビーの結晶を用いて波長694.3 nmのレーザー発振に成功し、次いで61年にはジャバンらがヘリウムとネオンの混合気体を用いて632.8 nmのレーザー発振に成功した。レーザーは計測ばかりではなく、加工を始めとしてその応用分野は非常に広い。

レーザー計測の原理は、被計測物体との相互作用で、光の直進性、反射・屈折、吸収、散乱、偏光、干渉、回折などを利用するものであり、オプトエレクトロニクス技術、コンピュータ画像処理の発達と共に、精密工学分野に急速に浸透し、不可欠な技術となっている。

2.1 光触針法

図1に示すようにレーザー光などを対物レンズにより収光し、細く絞ったビームにより表面形状の測定を行う装置³⁾、測定系の改良により、研削面の粗さ測定への展開⁴⁾により、粗さの高速測定が実現された。この測定原理は、現在光学式変位計測法としても用いられている。

分解能を高めるためにレーザー干渉測長システムを適用した微細表面形状測定法⁵⁾に続き、図2に示す臨界角法⁶⁾や非点収差法⁷⁾が開発された。これらは、CDプレーヤの焦点誤差検出方式⁸⁾を粗さ測定に応用したもので、半導体レーザーや4分割型のフォトダイオードの量産化により実用化が可能となった。光触針法は測定感度が高く、装置が小型で低コストであり、高速な測定が可能であるが、測定範

図3 Mirau干渉計による表面粗さ測定原理

囲が数 μm と狭いため、対物レンズをボイスコイル等のアクチュエータで駆動する方式が開発された⁹⁾。また、焦点誤差検出方式も、フーコープリズムや1次元CCDを用いる方式が試みられ実用化されている。

2.2 干渉による測定法

光応用計測の中でも最も重要なものが干渉法であると言える。19世紀の初頭に、ヤングが光の干渉現象を発見した。その後、マイケルソンの干渉実験等種々の干渉実験が行われ、光が波としての性質を持つことが明らかにされた。光のコヒーレンス長が長いレーザーを使用することで、安定な干渉じまが得られ、その応用は、測長、形状測定、表面粗さ測定などの多岐にわたる。球面の曲率半径の測定や研磨面の検査にはニュートンリングによる干渉が用いられる。また、回折格子に光をあて、その反射光あるいは透過光により生ずる干渉は、精密な測長基準となるリニアエンコーダや真直度測定にも利用されている。

微細表面形状の測定における光干渉の利用により、2光束干渉や繰返し多重反射干渉法、干渉顕微鏡、FECO (Fringe of Equal Chromatic Order) 干渉法¹⁰⁾、ヘテロダイン干渉法¹¹⁾、位相変調干渉法¹²⁾ (フリンジスキヤン干渉法) 等多くの手法が開発された。

位相変調干渉法による測定系としては、図3に示すミロー干渉方式の粗さ測定システムが良く知られている¹³⁾。白色光源を用い、CCDセンサを受光素子としているので測定対象の機械的な走査なしに、二ない三次元的な測定が行える。精度は最高0.3 nm程度といわれる。また、この干渉計方式を応用し、対物レンズと測定面との間の振動の影響を受けることなく、測定が可能なオプティカルスキッド法の提案もなされている¹⁴⁾。

2.3 回折、散乱、SEM による測定方法

光の回折¹⁵⁾¹⁶⁾や散乱¹⁷⁾¹⁸⁾による手法では、断面曲線を直接求めることはできないが、粗さを三次元的にとらえ、最大高さや平均線中心粗さなどの粗さ表示値と対応させた測定が可能であること、測定表面のセットアップの誤差に対する許容値が大きいこと、振動の影響を受けにくいこと等の特長を有するものと考えられる。また、物体光と変調光の光学的フーリエ変換により得られる強度分布より位相を回復して表面形状を求めるための基礎的な手法が提案された¹⁹⁾。

さらに、走査電子顕微鏡 (SEM) における反射電子信号を用いる微細形状測定法も報告されており²⁰⁾²¹⁾、表面粗さのみではなく、微細な部品の形状・寸法計測にも適用できる。

2.4 走査型プローブ顕微鏡による測定

1982 年に Binnig ら²²⁾が走査型トンネル顕微鏡 (STM) により原子像を観察して以来、1986 年には非導電性材料の測定が行える原子間力顕微鏡 (AFM) も開発された²³⁾。STM より派生し局所的な測定を行う測定法を走査型プローブ顕微鏡 (SPM) と呼ぶ。加工の分野では、原子像を観察する目的よりも表面粗さを測定する手法として、その大ストローク化²⁴⁾、原子レベルのリニアエンコーダへの応用²⁵⁾²⁶⁾、微小部品の形状・寸法測定への応用等が試みられている²⁷⁾。また、原子レベルの分解能を活かした AFM のマイクロ切削過程の観察への適用²⁸⁾、AFM による微細機械加工²⁹⁾、AFM による加工中の加工力の評価への適用についての研究が進められている³⁰⁾。

従来の光学顕微鏡では回折現象によりその分解能は波長の半分程度であるが、光の波長よりはるかに小さい微小開口を持つ光学プローブを試料表面に近づけ、エバネッセント光を用いて波長に制限されない高分解能の光学像を得る近視野走査光学顕微鏡 (SNOM) により、回折限界をはるかに超える高分解能が得られる³¹⁾ため、今後の発展と精密工学への応用が期待される。

3. 表面形状測定法

光学部品等の形状の測定法としては、干渉じまの観察による球面の曲率半径の測定や研磨面の仕上がり検査法をはじめとして、多くの計測手法が開発されている。フーコーテスト、ハルトマンテスト、ロンキーテスト等の幾何光学的測定法³²⁾、位相検出による非球面測定の研究が進められた³³⁾。一方、測定面の各位置での傾きを積分して面形状を求める手法の報告もある³⁴⁾。このような測定では傾きを測定する際にセンサを移動する機構の運動誤差が問題となるので、真直度とピッチング誤差を補正するアルゴリズムと測定面の傾きを求めるセンサシステムが提案されている³⁵⁾。また、非球面形状を含む光学部品用超精密三次元座標測定

器³⁶⁾では、プローブとして AFM を組み込んでいる。しかし、非球面形状や大型の超精密部品の形状評価は依然として困難な課題である。

4. 工作機械、測定機の精度評価法

工作機械や精密測定機器の運動精度評価法に関する研究は、主軸の回転精度評価、テーブルなどの直進運動に関する精度評価、NC 工作機械の円運動に関する評価に分けられる。

4.1 軸の回転精度の評価法

工作機械に対する要求精度が高度になるに伴い、主軸系の設計・製作に高度の技術が求められ、同時にその評価法が要請されるようになった。このために種々の測定法の研究が進められた。1964 年に発表された解説³⁷⁾には、光学式、電気容量やインダクタンス式の電氣的センサを使用した回転精度測定法が紹介されている。また、回転する軸に板ばねを接触させその外側に触針を当てる手法も紹介されている。光学式の測定法では、鏡の変位や傾きを光てこにより拡大し、印画紙にその軌跡を記録するものであった。

リサージュ図形による回転精度測定法が広く使用されてきた^{38)~40)}。リサージュ図形は軸心の真の運動とは異なったものとなるため、リサージュ図形から逆に軸心の運動を推定することは一般には困難である。

超精密加工技術についての研究開発が進められるにつれ、それまでの回転精度の測定が軸心の運動を求めるものであったのに対し、工作物の加工精度との関連において軸の運動誤差を測定しようとする考え方が提案され、そのための測定方法および回転精度の 3 要素であるアキシアルモーション、ラジアルモーション、アンギュラモーションの用語が示された⁴¹⁾。これにより、加工誤差に支配的な影響を与える方向 (センシティブ方向) の回転精度を評価する手法が一般的なものとなった⁴²⁾。図 4 はセンシティブ方向と回転精度の 3 要素を説明する図である⁴¹⁾。また、旋削加工における主軸回転誤差と真円度との関連についても研究された⁴³⁾。

主軸系のさらなる高精度化に伴い、測定の際の基準となるマスタ球やリングの形状誤差が問題とされるようになり、軸の回転誤差とマスタ球の形状誤差を分離するため、反転法が開発された⁴⁴⁾。空気静圧軸受の回転精度を反転法により測定し、 3σ で $0.015\ \mu\text{m}$ 以上の精度で測定を行えることが報告されている⁴⁵⁾。一方、反転法では測定基準とセンサとを 180° 反転させ、2 回の測定を行う必要があるが、この作業を不要とする改良型反転法が開発されている⁴⁶⁾。

測定基準の誤差と軸の回転誤差を分離するもう一つの手法が図 5 に示す 3 点法である⁴⁷⁾⁴⁸⁾。これは 3 点法真円度測定手法⁴⁹⁾を適用したもので、基準球の形状誤差の補正が可能であり、より高精度の測定が実現できる。また、主軸

図4 回転誤差の3成分とセンシティブ方向

図5 3点法による回転精度測定原理

端に取り付けた被削材を基準の代わりに使用することができるため、セルフカットを行えば、被削材の取付け偏心成分に影響されることなく測定が行えること、加工中における測定⁵⁰⁾が容易に行えることなどの利点がある。さらに、センサを4本以上用いる多点法への展開を図り、3点法では拡大倍率の低下する次数成分をも精度良く測定するための研究も行われた⁵¹⁾。

4.2 直進運動に関する測定法

直進運動に関する精度は運動方向の位置の精度（位置決め精度）、運動方向に垂直な方向の位置に関する精度（真直度）および角度に関する3成分（ピッチ、ロール、ヨー）となる。

一般的に、テーブル運動の真直度などの測定には高精度の基準（直定規、ブロックゲージ、オプティカルフラット等）が使用されるが、測定長が長くなるに従い高精度の基準を得ることが困難になる。

真直度の測定にはオートコリメータがしばしば用いられ

る。一般には平面の傾きを正確に測定するための器具であるが、基準反射鏡をその足の間隔ずつ移動して真直度を測定する。高精度のオートコリメータの分解能は0.1秒程度である。また、水平面内での測定では電気式水準器（分解能0.2秒）が同様に利用される。

位置決め精度をはじめとして、真直度、ピッチング、ヨーイングなどの測定手法として、レーザ干渉測長システムが一般的なものとなった。精度検査に利用されているほか、超精密工作機械、三次元座標測定機などの制御用検出器として用いられている。現在のレーザ干渉計による測長では分解能1 nm以上が実現されている。

レーザ干渉計による真直度測定にはウォラストンプリズムを含む干渉計システムが使用される⁵²⁾。角度計測用の干渉計の構成には種々のものが考案されている⁵³⁾。レーザ干渉計を使用する角度測定のうち、ローリングの測定は困難であったが、二重光路干渉法の適用により実現されている⁵⁴⁾。また、位置決め測定の分解能を高めるため、コーナキューブプリズムの性質を利用した高感度化⁵⁵⁾や測定環境の影響を受けにくい差動型干渉計⁵⁶⁾についても報告されている。

また、レーザ光源と干渉計光学部分とを光ファイバにより結んで小型化を図った光ファイバ結合レーザ干渉測長システムも実用化された。

一方、レーザ光の直進性を利用した運動精度測定手法についても研究され、真直度2成分と角度成分4成分の同時測定可能なシステム⁵⁷⁾ならびに、圧電素子により、常に4分割フォトダイオードの中心にレーザビームをとらえる方式によるnmレベルの真直度測定⁵⁸⁾、ミラーシステムによりレーザ光の方向変化の影響を低減する光学系⁵⁹⁾について報告されている。

レーザ干渉測長器と光学ストレートエッジを組み合わせ

図6 逐次2点法の測定原理

図7 マグネティックボールバーによる円運動測定原理

た真直度測定が行われたが、その際に問題となるのがストレートエッジの形状誤差である。このため、反転法により光学ストレートエッジの形状補正を行い真直度を評価している⁶⁰⁾。この測定では、測定基準の形状誤差が測定対象の機械の誤差を大幅に上回っており、ソフトウェア的に両者を分離して把握することの重要性が指摘されている。

測定対象の機械の精度が極めて高い場合や、測定対象が大型の機械である場合には高精度の測定基準を得ることが非常に困難となる。このため、図6に示す原理の測定法が開発された。被削材あるいはストレートエッジなどを対象として測定を行い、測定対象の形状誤差と工具台の運動誤差とを分けて測定することができる⁶¹⁾。この研究が基礎となってその後研究が進められ、運動精度だけではなく、部品の高精度形状評価へと発展した⁶²⁾⁶³⁾。測定時に変位計の調整が正しく行われないと誤差が生ずるために、変位計の調整誤差の除去手法についても研究が進められている⁶⁴⁾⁶⁵⁾。この測定手法は、機械の精度評価と測定基準の形状誤差を分離して把握できることから、工作機械上での外径測定への応用⁶⁶⁾をはじめとする形状測定にも利用されている。

一方、NC工作機械の発展に伴い、円弧補間精度やより複雑な工具軌跡の評価法についての研究が進められた。円運動測定法としては、ボールバーによる方法⁶⁷⁾⁶⁸⁾、基準バーと一次元変位計とによる方法⁶⁹⁾、基準円板と二次元変位計とによる方法⁷⁰⁾、ボールバーとレーザ干渉計を用いる方法⁷¹⁾、リンク機構による測定方法⁷²⁾⁷³⁾、二次元リニアスケールを使用した方法⁷⁴⁾等の報告がある。

図7に代表的な円運動測定法の構成を示す⁶⁷⁾。

現状での円運動測定法は、円運動測定の際の測定半径に制約があったり、測定範囲が狭いなどの問題点がある。また、円運動測定以外の項目の評価を行うことも困難である。このため高精度化と共に、一つの測定装置により位置決め精度や真直度等複数の精度試験項目に対応し得る測定法の開発が今後の課題と考えられる。

5. おわりに

以上、本稿では、表面形状と機械精度の評価手法という限られた分野についてまとめさせていただいた。表面の微細形状測定では既に原子レベルでの測定が可能となったし、機械精度の測定でも、 $0.01\mu\text{m}$ レベルの測定が実現されている評価項目もある。

仮想的な測定基準に関する研究など、我が国で発展してきたものも見られるが、計測に対する考え方の転換点となるような概念の提案や新しい計測機器の開発等は、海外において多く行われた。21世紀には生産技術大国の我が国から優れた基礎的な考え方が発信されることを期待したい。

なお、本稿をまとめるに当たり多くの文献を参考にさせていただいたことを記し、感謝申し上げる次第である。

参考文献

- 1) 世界大百科事典，日立デジタル平凡社，(1998)。
- 2) 中村常郎，和田 尚：高倍率光切断法について，精密機械，XXII, 2 (1956) 60。
- 3) 三井公之，佐藤壽芳：表面あらさの実時間測定装置の開発（第1報），日本機械学会論文集，44, 377 (1978) 321。
- 4) 服部光郎ほか：研削仕上げ面あらさ・真円度インプロセス測定装置の試作，機械技術研究所報，35, 6 (1981) 303。
- 5) 谷村吉久，豊田幸司：レーザ干渉計を応用した非接触微細形状測定装置，精密機械，50, 10 (1984) 1617。
- 6) 小沢則光ほか：非接触光学式微細形状測定ヘッド (HIPOSS-1)——超精密測定技術の研究，精密工学会誌，52, 12 (1986) 2080。
- 7) 三井公之ほか：高感度非接触粗さ計の開発，精密工学会誌，53, 2 (1987) 328。
- 8) G. Bouwhuis and J. J. M. Braat: Video Disk Player Optics, Appl. Opt., 17, 13, (1978) 1993。
- 9) 鎌田 治ほか：対物レンズ振動式光触針に関する研究，日本機械学会論文集 (C編)，58, 554 (1992) 3123。
- 10) J. M. Benett: Measurement of the rms Roughness, Autocovariance Function and Other Statistical Properties of Optical Surfaces Using a FECO Scanning Interferometer, Appl. Opt., 15, 11, (1976) 2705。
- 11) G. E. Sommargren: Optical Heterodyne Profilometry, Appl. Opt., 20, 4, (1981) 610。
- 12) 谷田貝豊彦：応用光学，丸善，(1998) 131。

- 13) J. C. Wyant et al.: Development of a Three Dimensional Noncontact Digital Optical Profiler, Trans. ASME, J. Tribol., 108, (1986) 1.
- 14) 安達正明ほか：上下振動の影響を受けない高精度粗さ測定法(第1報)——オブティカルスキッド法の提案, 精密工学会誌, 56, 1 (1990) 140.
- 15) 深谷次助, 佐々木 彰：スリット開口のFraunhofer回折による旋削面粗さ測定, 精密機械, 51, 4 (1985) 835.
- 16) 三好隆志, 宮腰貴宏, 斎藤勝政：Fraunhofer回折による超精密ダイヤモンド旋削面の粗さ測定, 精密工学会誌, 53, 5 (1987) 736.
- 17) 神垣恵治, 橋本 洋：レーザ散乱計による超精密加工表面の性状評価, 精密工学会誌, 51, 4 (1985) 668.
- 18) 酒井 泉, 沢辺雅二：光学的反射方式による表面粗さ測定の研究, 精密機械, 48, 11 (1982) 1478.
- 19) 三好隆志ほか：光逆散乱位相法による微細加工形状計測に関する研究——周期微細溝形状の位相回復, 精密工学会誌, 62, 7 (1996) 958.
- 20) 佐藤壽芳, 大堀真敏：走査電子顕微鏡(SEM)による表面粗さ測定の研究(デジタル方式による), 日本機械学会論文集(C編), 51, 469 (1985) 2381.
- 21) 杉森 博ほか：プラスチックの走査電子顕微鏡(SEM)による形状測定の試み, 日本機械学会論文集(C編), 57, 542 (1991) 3309.
- 22) G. Binnig: Surface Studies by Scanning Microscopy, Phys. Rev. Lett., 49, 1, (1982) 57.
- 23) G. Binnig et al.: Atomic Force Microscope, Phys. Rev. Lett., 56, 9, (1986) 930.
- 24) 津田展宏ほか：大ストロークSTM, 精密工学会誌, 55, 1 (1989) 146.
- 25) H. Kawakatsu and T. Higuchi: Design of a Positioning Table Using a Crystalline Lattice and Surface Topography as a Reference Index, SEISAN-KENKYU, 40, (1988) 45.
- 26) 明田川正人, 高田孝次, 高橋秀昭：結晶格子を基準とする微小長さ測定(第2報), 精密工学会誌, 63, 8 (1997) 1091.
- 27) 白石利治, 三井公之：マイクロ部品用形状測定装置の開発——装置の構成ならびに測定結果, 精密工学会誌, 64, 9 (1998) 1395.
- 28) 傳 恵南, 真鍋圭司, 上田完次：原子間力顕微鏡の走査機能を利用したマイクロ切削過程の連続観察, 精密工学会誌, 63, 12 (1997) 1752.
- 29) 三宅正二郎ほか：原子間力顕微鏡によるマイカのナノメートルスケールの機械加工, 精密工学会誌, 63, 3 (1997) 426.
- 30) 佐々木 源ほか：原子間力顕微鏡一体型加工評価装置の開発(第2報, 微細加工中の水平分力測定), 砥粒加工学会誌, 42, 8 (1998) 322.
- 31) 森田清三：走査型プローブ顕微鏡のすべて, 工業調査会, (1992).
- 32) 小林 昭監修：超精密生産技術体系(第3巻), フジ・テクノシステム, (1995) 169.
- 33) A. Ono: Aspherical Mirror Testing with an Area Detector Array, Appl. Opt., 26, 10, (1987) 1998.
- 34) A. Franks: Nanometric Surface Metrology at the National Physical Laboratory, Nanotechnology, 2, (1991) 11.
- 35) 清野 慧, 高 偉, 鎌田 治：鏡面形状のオン・マシン測定に関する研究——測定原理及びセンサの基本性能, 精密工学会誌, 58, 2 (1992) 247.
- 36) 吉住恵一, 久保圭司：原子間力プローブ搭載超高精度三次元測定機, National Tech. Report, 39, 5 (1993) 116.
- 37) 工作機械の主軸回転精度分科会：工作機械の主軸回転精度測定法, 日本機械学会誌, 67, 548 (1964) 1374.
- 38) 竹中規雄ほか：工作機械の電気的心ぶれ測定装置, 精密機械, 32, 6 (1966) 414.
- 39) 本田富士雄：工作機械の主軸回転精度, 精密機械, 32, 1 (1966) 59.
- 40) 鈴木 弘：新しい回転精度測定法, トヨタ技報, 19, 2 (1978) 21.
- 41) J. Bryan, R. Clouser and E. Holland: Spindle Accuracy, Amer. Machinist, Dec. 4, (1967) 149.
- 42) 垣野義昭ほか：軸の回転精度に関する研究(第1報)——工具回転型の半径方向回転精度の新しい測定法, 精密工学会誌, 43, 6 (1977) 720.
- 43) 沢辺雅二：旋盤主軸回転誤差の工作物真円度への寄与, 精密機械, 46, 5 (1980) 576.
- 44) R. R. Donaldson: A Simple Method for Spindle Error from Test Ball Roundness Error, Ann. CIRP, 21, 1, (1972) 125.
- 45) 宇田 豊, 河野嗣男：主軸の回転精度測定の高精度化に関する研究(反転法を用いた測定), 東京都立科学技術大学研究報告, 第6号, (1992) 11.
- 46) オズワルド・ホリカワ, 佐藤海二, 下河辺 明：改良形反転法による真円度および絶対回転精度の評価, 精密工学会誌, 57, 12 (1991) 2231.
- 47) 三井公之：精度診断技術の研究(3点式主軸回転精度測定装置の開発), 日本機械学会論文集(C編), 48, 425 (1982) 115.
- 48) H. Shinno et al.: A New Method for Evaluating Error Motion of Ultra Precision Spindle, Ann. CIRP, 36, 1, (1987) 381.
- 49) 青木保雄, 大園成夫：3点法真円度測定法の一展開, 精密機械, 32, 12 (1966) 831.
- 50) 三井公之：精度診断技術の研究(工作機械の主軸回転精度と工作物の真円度の関連), 日本機械学会論文集(C編), 52, 473 (1986) 392.
- 51) G. X. Zhang et al.: A Multipoint Method for Spindle Error Motion Measurement, Ann. CIRP, 46, 1, (1997) 441.
- 52) R. A. Soref and D. H. McMahon: Optical Design of Wollaston-Prism Digital Light Deflectors, Appl. Opt., 5, 3, (1966) 425.
- 53) レーザ計測ハンドブック編集委員会編：レーザ計測ハンドブック, 丸善, (1993) 141.
- 54) 中藪俊博ほか：レーザ干渉法によるローリング測定システムの開発, 精密工学会誌, 61, 2 (1995) 253.
- 55) 谷村吉久：光路差増倍の差動型レーザ干渉計, 精密機械, 48, 12 (1982) 1573.
- 56) G. J. Siddall and R. R. Baldwin: Developments in Laser Interferometry for Position Sensing, Prec. Eng., 6, 4, (1984) 175.
- 57) 高田孝次：レーザビームを利用した直線運動精度の測定, 1984年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, (1984) 123.
- 58) N. Ikawa, S. Shimada and H. Morooka: Laser Beam as a Straight Datum and its Application to Straightness Measurement at Nanometer Level, Ann. CIRP, 37, 1, (1988) 523.
- 59) 宮下晃一ほか：レーザ光を利用した面内変位測定の研究(レーザ光の方向変化の影響を受けない測定方法と変位測定実験の結果), 日本機械学会論文集(C編), 58, 546 (1992) 450.
- 60) W. T. Estler: Calibration and Use of Optical Straightedges in the Metrology of Precision Machines, Opt. Eng., 24, 3, (1985) 372.
- 61) 戸沢幸一, 佐藤壽芳：工作機械の真直度と加工精度の関連に関する研究, 日本機械学会論文集(C編), 47, 419 (1981) 909.
- 62) Z. Ge and S. Kiyono: Measurement of 2-D Surface Profile and Motion Errors by Using Software Datum, JSME Int. J. C, 41, 2, (1998) 199.
- 63) T. R. Nyberg: Dynamic Macro Topography of Large Slowly Rotating Cylinders, Acta Polytechnica Scandinavica, Mechanical Engineering Series No. 108, (1993).
- 64) W. Gao et al.: Self-Zero-Adjustment of Probes in the Methods Constructing Software Datum for Large Profile Measurement, Int. J. JSPE, 30, 4, (1996) 337.
- 65) 高 偉, 清野 慧, 奥山栄樹：ソフトウェアデータによる形状の絶対測定, 精密工学会誌, 60, (1994) 554.
- 66) 島筒博章ほか：3点法による寸法・形状測定に関する研究(第1報)——工作機械上での大口径外径測定装置の開発, 精密工学会誌, 61, 3 (1995) 363.
- 67) J. B. Bryan: A Simple Method for Testing Measuring Machine and Machine Tools, Part 1, Principle and Applications, Prec. Eng., 4, 2, (1982) 61.
- 68) 垣野義昭ほか：NC工作機械の運動精度に関する研究(第1報)——DBB法による運動誤差の測定と評価, 精密工学会誌, 52, 7 (1986) 1193.
- 69) 堤 正臣, 酒井浩二, 金 貞淳：NC工作機械の円運動の新しい測定方法(標準化のための代替方法の開発), 日本機械学会論文集(C編), 58, 545 (1992) 271.
- 70) W. Knapp: Test of the Three-dimensional Uncertainty of Machine Tools and Measuring Machines and its Relation to the Machine Errors, Ann. CIRP, 32, 1, (1983) 459.
- 71) J. C. Ziegert and C. D. Mize: Design and Testing of a Laser Ball Bar for Rapid Machine Tool Metrology, Proc. ASPE Ann. Meeting, (1993) 86.
- 72) 丘 華, 大岡正典：リンク機構を用いるNC工作機械の運動精度測定法(第1報, 測定装置および測定実験), 日本機械学会論文集(C編), 62, 593 (1996) 320.
- 73) 姜 明錫, 長谷川 聡, 三井公之：リンク機構によるNC工作機械の円運動の測定方法(測定原理および実験結果), 日本機械学会論文集(C編), 62, 602 (1996) 4086.
- 74) 垣野義昭ほか：交差格子スケールを用いた超精密NC工作機械の運動精度の測定と加工誤差の改善, 精密工学会誌, 62, 11 (1996) 1612.