「超」技術の展望*

下河辺 明**

The Present Situation and Trends of Ultra-Technology / Akira SHIMOKOHBE

Key words: nanometer, nanotechnology, precision measurement, precision machining, positioning, mechanism and control

1. はじめに

21世紀に向けて、多くの分野で「超」のつく技術の研究や、製品の開発が盛んである。本学会の関連分野でいえば、超精密、超微細は日常のこととなった。超高真空、超クリーンなどの環境関連、製品や物では、超純水、超微粒子など、本特集号に関係のあるものから、超高層ビル、超LSIなどさまざまである。また最近では、若者たちの間で「超つかれた」「超おいしい」などの使用法も流行っているようである。

さて、接頭語「超」の定義とはなんであろうか。英語では、Ultraprecision (超精密), Ultrasonic (超音波) のように Ultra を用いる場合もあれば、Superconductivity (超電導) のように Super を用いる場合がある。超音速のように明確な物理的境界を越えた状態に付けられている場合もあるが、境界がきわめてあいまいな場合もある。また、一つの超技術はまた別の超技術に支えられている例も多い。例えば半導体における超微細加工は、超クリーン技術や、超精密位置決め技術なくしては成立しない。

筆者は、我々の分野における「超」とは、基本的に

は現在の水準を越えている技術、製品に付けられていると考えている。したがって、例えば長さ、寸法、位置などでいえば、必ずしもナノメータを議論の単位としなくても、その技術が現時点での水準を抜きこんでいれば超技術であるというのが、筆者の考えである。

ところで、現状の超技術、特に超精密といわれる技術について概観すれば、多くの問題を含みつつもすでに、原子一つの大きさレベルでの加工、測定が可能になっていることはよく知られている。つまり、超精密は極限の領域に到達しつつあるともいえる。その意味からいえば、これからの我々が考えなければならない一つの方向は、これらの超技術をより現実的なものとする、また他の方向は、新しい超には何があるかを考えることではないだろうか。このような観点から以下に、筆者の専門の範囲である精密計測、精密機構という範囲ではあるが、超の付く技術のこれからについて考えてみたい。

2. 精密と微細の狭間

1970年代に、谷口により総合的加工精度として1 nm 程度が必要な製品を作るための統合的な生産技術として、ナノテクノロジーが提唱されてからすでに久しい。加工精度とは偏り誤差(正確さ)とばらつき誤差(標準偏差)の和として定義されている¹⁾。ところで、一般的にはこの正確さは、対象物の大きさ、あるいは対象領域の広さにより異なると思われる。当然大きい対象、広い領域で、小さい偏り誤差を実現することは困難であろう。このことで、小さい対象、狭い領域で、小さい偏りを実現することが容易であるというつもりではないが、相対的な正確さ、相対的な総合精

* 原稿受付 平成4年11月18日

** 正会員 東京工業大学精密工学研究所(横浜市緑区長津田町4259)

1972年東京工業大学大学院博士課程中退、同年東工大精密工学研究所助手、同助教授、工学部教授を経て、1992年より精密工学研究所教授。研究分野：精密機構の動特性と制御、寸法・形状の精密計測、機械要素の設計・製作など。工学博士

図1 総合精度と対象の大きさ

度を考えることは重要である。

図1は、現状で精密、超精密と考えられる製品、あるいは技術を、対象物の寸法と総合精度に関連させて図示したものである。この図で、走査型トンネル顕微鏡 (STM) や原子間力顕微鏡 (AFM) などによる測定では、微細な領域の凹凸を $0.1 \sim 0.01 \text{ nm}$ の分解能で測定したり、STM 探針への印加電圧の制御により、原子1個を単位とする加工が可能となっている。しかし、測定、加工の領域は狭く、相対精度としては、 $1 \times 10^{-3} \sim 1 \times 10^{-4}$ 程度が限界である。ある程度の大きさを持つ領域の加工、測定としては、ダイヤモンド切削機械による加工などがあげられよう。一般的には相対精度は $1 \times 10^{-6} \sim 1 \times 10^{-7}$ 程度である。

このように考えてみれば、きわめて荒い分類ではあるが、相対精度 $1 \times 10^{-3} \sim 1 \times 10^{-4}$ に一群があり、また $1 \times 10^{-6} \sim 1 \times 10^{-7}$ に他の一群があるといえる。一般的に超精密加工あるいは測定などという場合、これらの二つの群が混同されている場合があると思われる。一つは加工・測定の精度そのものは高いが、対象は小さく、領域はあまり広くないという場合であり、もう一つは加工・測定の全体スケールに対し、相対的な精度 (正確さ、ばらつき、分解能など) が高い、つまり相対的な加工・測定誤差が小さい場合である。筆者は前者の場合を超微細、後者を超精密と考えているのがいかがであらうか。

ところで、具体的な加工対象、測定対象が工業的に、あるいは社会的に実質的に意味を持つようにするには、前者の超微細領域を、相対精度という意味において、後者の領域に近づける必要もあるのではないかと思う。あるいは、後者の絶対精度を向上させ、微細の領域に近づけること、微細と精密を融合させること、と言い換えてもよい。原子スケール、 0.1 nm 程度の加工・測定といっても、範囲が 100 nm 四方程度では、応用範囲は極めて限られよう。このような技術

を合体させる方法論を今後検討する必要があると思われる。

3. 測ることの重要性

測定と超技術

昔から、測れないものは加工できないといわれてきた。逆に考えれば、誤差が測定できれば、その誤差が小さくなるように加工法を工夫できるということでもある。加工に限らず、すべての「超技術」において、目標が達成されたかどうかは、測定によって保証される。この意味で、測定法の開発は超技術の最重要課題であらう。

超精密変位測定の問題点

現状のナノメータオーダの変位測定は、主としてレーザ干渉計や静電容量型変位計に頼っている。しかし、問題はこれらによる測定が、どの程度信頼できるものであるかである。

市販の偏光ヘテロダイン方式レーザ干渉計の場合、数百 nm の波長を分割してナノメータオーダの分解能を得ていること、偏光光の混合があること²⁾、などの誤差要因を、どの程度まで考慮しての精度なのかは必ずしも明確ではない。また空気中での使用に際し、空気の流動や温度変化についての考察もないままに、ナノメータの精度を云々しているケースも多い。その意味で、X線干渉を用いたレーザ干渉計の校正³⁾がますます重要にならう。

静電容量型の変位計の場合、筆者の経験では、センサの出力に含まれるノイズはとてもナノメータの精度を議論できる値ではない。せいぜいが $5 \sim 10 \text{ nm}$ の分解能が限界であらう。図2は、静電容量型変位計の出力波形である。フィルタなし、および 10 Hz のローパスフィルタを通したもので、たしかにフィルタを用いれば、ナノメータ、サブナノメータの測定も十分可能のように思われる。しかし、このようにカットオフ周波数の極端に低いローパスフィルタの使用により、極めて低速の現象のみをナノメータ、サブナノメータの分解能でとらえているが、筆者はこのようなデータの意味、解釈には問題が多いと思っている。

これからの課題

このような観点からは、ある程度の高速度性を有し、ダイナミックレンジが広く、ナノメータ、サブナノメータの測定が可能なセンサの開発が急務であらう。先に述べたSTM、AFMなどの微細領域の寸法、形状測定を、相対分解能としても十分な大きさの領域に広げる努力も、今後ますます必要にならう。

なお、STMなどの原子レベルでの測定機器によ

図2 容量型変位計の出力信号

り、レーザ干渉計などをキャリブレーションする事態になると、長さ測定、寸法測定におけるトレーサビリティの確保についても今後考えていかねばならない。つまり、STM、AFM そのもののキャリブレーションとメートル標準へのトレーサビリティの確保という問題である。このような動きは、すでに走査型電子顕微鏡 (SEM) を対象に始まっており、サブミクロンマイクロパターンを、トレーサビリティを確保しつつ、ナノメータの総合精度で絶対測定するための測長装置の開発や⁴⁾、線幅標準の検計⁵⁾が進められている。

4. 機構とその精度

対象物の支持・案内と位置決め

現在の超精密加工、測定を支える技術として、超精密な運動機構は不可欠である。特に重要な機構は、直線運動、回転運動の支持、案内機構、および位置決め機構である。物体の6運動自由度のうち、5自由度を正確に拘束し、残りの1自由度をフリーとする機構、あるいは物体を望みの位置に望みの姿勢で拘束する機構であると考えられる。このような機構は、いかに軽薄短小の製品であろうとも、製品を移動させ、停止させるためにはなくてはならない技術である。

数百 mm 以上の超精密な直線案内あるいは軸の回転角に制限をつけない回転機構の実現方法としては、従来型の機械加工精度だけに頼る方法と、次に述べる制御型の機構とする方法があろう。現状では、どちらの方法を採ろうとも、その精度は 10 nm 前後である。しかし、現在の先端的な加工、測定が原子レベルに

到達しようとしている現在、支持・案内機構の精度だけがまだ 1~10 nm レベルであるのは問題である。機構精度も原子レベルに達しつつあるとの報告もある。しかし、先にも述べたように、現状では使用されているセンサの精度については十分な確認が取れていないのが現状である。

制御型機構

アクティブな運動誤差補正を取り入れた制御型の機構 (図3) では、精度の向上とともに、外乱力に対する剛性を向上させることが可能である。制御の分解能は、静的には (低周波領域では) センサの分解能までに向上させることは容易であり、この意味で、先に述べたように、センサの精度に十分な注意が払われて然るべきである。

STM も一種の制御型機構であり、その成功要因の一つとして、圧電アクチュエータの高い駆動分解能が上げられている。しかし、これとても、トンネル電流のセンサ信号としての感度の高さによるところが大である。制御型機構では、センサの性能は決定的であることを忘れてはならない。

運動の基準

制御型の機構の問題は、運動誤差の測定にある。正しい運動誤差の測定には、正確な運動の基準が必要であるが、回転運動における真円、真球、直線運動における真直な基準は、いずれも実現困難である。

回転運動の場合は、誤差を持つ球または円筒を基準とし、運動の誤差とともに基準の誤差を測定することが行われるようになった⁶⁾⁷⁾。また、このようにして測定した基準誤差を、図3の方法で補正し、絶対回転運動精度を追求することも可能となっている。図4は筆者らの実験の一例で、図4(a)の基準部誤差およびそれによる運動誤差を、回転数 750 rpm で補正し、同図(b)のように、約 20 nm の絶対回転運動精度を実現している⁷⁾。

直線運動の場合にも、絶対的な直線基準の実現、あるいは基準のもつ誤差 (形状誤差) の測定法が種々試

図3 アクティブな運動誤差補正

図4 基準誤差の補正による絶対回転運動精度

されているが、短い範囲あるいはマイクロメータオーダーの精度ならばともかくとして、500 mm を越え、サブマイクロメータ以下の領域では、以下のような理由で、まだ問題は解決されていない。

直線の基準としての光ビームは、空気の流動や光源自体の熱的ゆらぎにより、常にその進行方向がゆらいでいる。直定規やオプティカルフラットを用いる場合、反転法が使われるが、反転前後の取付位置変化や取付けによる弾性変形の変動が問題となる。またセンサを複数使用する逐次2点法、逐次3点法は、センサを取り付ける移動台の姿勢変化や、センサの先端の不一致、センサゲインの不一致の影響を除去する方法が現状では示されていない。

超精密位置決め

位置決めに関しては、微細領域の位置決めをいかにより広領域まで拡張できるかの問題がある。送りねじだけでもナノメータ精度の超精密位置決めが可能という報告も示されているが⁹⁾⁹⁾、すべての場合が、単一の送り機構で済まされるということではないと思われる。

特に、ロボットのように対象の1自由度以上の位置、姿勢(回転)の制御を目的とする多自由度機構では、粗微動機構の必要性がますます高まると思われる¹⁰⁾。また、多自由度の微動機構では、対象の任意の方向への運動を精密に制御するためには、各自由度方向の動特性を等しくすることも重要である¹¹⁾。

回転体を用いた案内の、転がり始めの微細領域に現れるばね特性をうまく使えば、サブナノメータの位置決めが可能となっている¹²⁾。また、摩擦駆動でも、ローラとスライダ間でのこの特性が、ナノメータ精度の超精密位置決めに関与しているとの報告もある¹³⁾。

このような特性を用いる位置決めは、大ストロークの領域でも可能と思われるが、まだ報告はない。大ストロークの場合、位置決めの目標位置の大きな変化により、転がり始めのばね特性が変化するのかどうかについては興味のあるところである。

高速化実現のために

機構制御の新しい展開としては、機械構造を制御することを前提として設計し、制御系を含めた機構全体の一体化設計の試みであろう¹⁴⁾。従来の精度の追求は、ややもすると高速性を無視してきたが、情報機器などにおける高速化は、精度と速度の両立を必要としている。しかし、高速化は必然的に軽量化と、それによる剛性低下を招き、機構のモード振動や制御系設計時には考慮できない極による振動増大を招く。このような状況への対処法が検討されているわけである。

高速性を重視することにより改めて問題になるのがセンサの応答性である。先に述べたように、制御型の機構において、制御ループ内では使用していないローパスフィルタを制御ループ外で使用し、見掛けの制御分解能を向上させる方法が用いられることがあるが、問題が多い。アクチュエータとしては、高速性、剛性などに優れた積層圧電アクチュエータは使い勝手もよく、多用されている。できれば、より動作範囲の広い圧電アクチュエータの開発が望まれる。

5. む す び

1970年代からのメカトロニクスの波は、機械、電気という二大技術が、コンピュータ、特にマイクロプロセッサの発達とともに、機械制御の高度化を目指しながら、情報という共通項を核に複合化したものである。複合化の過程で、エレクトロニクスの集積微細化はとどまるところを知らず、現在も続いているかのようにみえる。

ところで、メカニズムの集積微細化は軽薄短小の時代といわれて久しいにもかかわらず、遅々としている。マイクロメカニズムの最近の研究が、電子回路の集積化に対応するものとしての、機械の集積化を可能とするものであるならば、新しい超技術の誕生をそこに秘めていることを期待したい。

文 献

- 1) 谷口紀男：ナノテクノロジーの構築とその理念、精密工学会誌、56, 3 (1990) 427.
- 2) A. E. Roisenbluth and N. Bobroff: Optical Sources of Nonlinearity in Heterodyne Interferometers, Prec. Eng., 12, 1, (1990) 7.
- 3) M. Tanaka, K. Nakayama and K. Kuroda: Experiment on the Absolute Measurement of a Silicon Lattice

- Spacing at the NRLM, IEEE Trans. Instrum. Meas., IM-38, (1989) 206.
- 4) 初澤 毅, 豊田幸司, 谷村吉久: マイクロパターン絶対測長装置の開発, 計測自動制御学会論文集, 26, 9 (1990) 983.
 - 5) 初澤 毅, 土井琢磨, 谷村吉久: サブ μm 領域における線幅標準とその測定, 計測自動制御学会論文集, 28, 1 (1992) 3.
 - 6) 野村武彦, 金井 彰, 宮下正和: 静圧支持回転軸系の回転振れ自動補正機構——基準部誤差の測定と自動補正, 精密工学会誌, 55, 2 (1989) 400.
 - 7) オズワルド・ホリカワ, 佐藤海二, 下河辺 明: ジャーナル型アクティブエアベアリング (第2報)——形状特性および絶対回転運動精度の検討, 精密工学会誌, 58, 6 (1992) 1047.
 - 8) 金井宗統, 石原 直: セラミック製空気静圧送りねじの開発, 精密工学会誌, 56, 12 (1990) 2201.
 - 9) 川瀬佳洋, 大塚二郎, 深田茂生, 青木芳人, 飯田 昇: ねじ駆動による超精密位置決め (第2報)——比例ゲイン特性の改善によるナノメータ位置決め, 精密工学会誌, 57, 7 (1991) 1211.
 - 10) 葛 欣, 高野政晴, 佐々木 健: 二重駆動精密ロボットに関する研究, 精密工学会誌, 57, 5 (1991) 813.
 - 11) 辺見信彦, 吉永光伸, 佐藤海二, 下河辺 明: 6自由度微動機構の研究, 日本機械学会情報・知能・精密機器部門講演会論文集, No. 920-67 (1992) 97.
 - 12) 二見 茂, 古谷彰浩: ACリニアモータと転がり案内を用いたナノメータ位置決め (第1報)——システムの構成と粗微動制御, 精密工学会誌, 57, 3 (1991) 556.
 - 13) 高橋道郎, 大塚二郎: 摩擦駆動による精密位置決めの研究 (第6報)——高精度化と高速化, 精密工学会誌, 投稿中.
 - 14) 背戸一登, 梶原逸朗, 長松昭男, 森藤浩明: 制御性を考慮した構造最適化法による光サーボ系の設計 (第1, 2, 3報), 日本機械学会論文集, 55, 516 (1989) 2029.

工技院, マイクロマシン研究推進

通産省工業技術院の主導で今年度からマイクロマシンについての共同研究開発を推進することになった。

これは1995年までの最初の4年間に基礎技術と要素技術の確立に力を注ぎ, 約20の企業や研究所をテーマごとのグループに組織する。

原子力発電所の検査・修理, 人体内の検査・治療システムなど具体的な応用については96年度以降に改めて共同研究グループを組織して取り組む。

研究委託企業は国内から約20社, 海外から3社 (研究機関) で, 機械技術研究所など国立の研究機関や大学もテーマに応じて参加する。

基礎技術はマイクロ理工学 (ミクロの世界の摩擦工学, 流体工学など) が国立研究機関, 加工技術 (ICプロセスやビーム加工技術) が日立製作所など3社, アセンブリー技術 (接合やマニピュレーション) がオリンパス光学工業などに分け, それぞれ研究を委託する。

また, 要素技術も同様に微小機能要素技術 (推進機械やセンサ) が安川電機など9社, エネルギー供給技術は三菱電機など3社にテーマを分けて進める。基礎技術, 要素技術を生かしてシステム化するための遠隔操作などの制御技術を研究するグループも選定した。

また, 海外から参加する米SRIインターナショナルに対しては人工筋肉の基礎研究, 豪メルボルン工科大学にはマイクロメカトロニクス, 米ISロボティクスには制御の基礎技術開発を委託する。

マイクロマシンはミリサイズあるいはミクロンサイズの微小な機械機構である。開発にあたっては通常の機械を単純に小型化する技術だけでなく, ミクロの世界特有の原理や特異な現象を解明しておく必要がある。例えば潤滑油がミクロの世界では正常に働くのか, 機械原理の基本になる摩擦は小型化することでどうなるかなど, ま

だ明確になっていない領域も多い。

工技院では現在, 知的所有権の事前確認作業を進めており, 秋以降, 研究を本格化する。各企業の研究と並行して, 月1回程度情報を交換しながらプロジェクトを推進する予定である。

研究分担は次のとおり。

マイクロマシンプロジェクトの研究開発分担

① 基礎技術

▽マイクロ理工学

機械技術研究所, 電子技術総合研究所, 東京大学, 名古屋大学など

▽加工技術

日本電装, 住友電気工業, 日立製作所

▽アセンブリー技術

オリンパス光学工業, 藤倉電線

▽材料技術

自主研究

② 要素技術

▽微小機能要素技術

安川電機, 東芝, 富士電機総合研究所, ファナック, オムロン, アイシン精機, セイコー電子工業, 三菱電線工業, 横河電機

▽エネルギー供給技術

三菱マテリアル, 三菱電機, 三洋電機

▽電子回路技術

自主研究

③ システム化技術

▽制御・ヒューマンインタフェース技術

川崎重工業, 三菱重工業, メイテック, 村田製作所 (服部 敏夫)