超精密位置決め専門委員会

超精密位置決めにおけるアンケート調査*

大岩孝彰** 勝木雅英***

Survey of Questionnaire on Ultra-precision Positioning/Takaaki OIWA and Masahide KATSUKI

Key words: ultra-precision positioning, questionnaire

1. はじめに

超精密位置決め技術は、近年注目されているナノテクノロジーを支える基盤技術の一つでもあるが、センサなどの計測技術、アクチュエータ、多種機械要素、案内要素および制御技術などの幅広い機械・電子技術の集大成であり、おのおのの進歩なくしては達成が不可能な統合的な技術である。「超精密位置決め専門委員会」（委員長：大塚二郎静岡理工科大学教授）の5つの小委員会の中に、アンケート小委員会がある。この委員会の役割は位置決め技術の現状と変遷、そして現時点および将来的に発生しうる具体的な問題点等について調査することにある。この「超精密位置決めアンケート」は1986年以来4年ごとに実施され¹⁾²⁾³⁾、昨年10月の調査が第5回目となる。

ここで報告する内容は、昨年10月実施の内容を中心に超精密位置決め技術の最近の動向を明らかにするものである。半導体製造装置分野を例に挙げれば、1986年時点の半導体メモリー素子（DRAM）の集積規模は1メガビット、線幅1.2 μm 程度が量産されていたが、ご存じのように現在では256メガビットで線幅0.13 μm であり、この16年で約1桁の精度向上がなされている。前々回のアンケート調査までは、精度に関する認識が徐々に進んでいたが、経済の長い停滞のためか前回ではやや頭打ちの傾向がみられた。今回はどうであろうか。

* 原稿受付 平成15年5月13日

** 正会員 静岡大学工学部（浜松市城北3-5-1）

*** 正会員 東芝機械株式会社精密機器事業部（沼津市大岡2068-1）

大岩 孝彰

1984年長岡技術科学大学大学院工学研究科創

造設計工学専攻修士課程修了、博士（工学）。

1990年長岡技術科学大学工学部機械系助手、

1994年静岡大学工学部機械工学助教授、現在に至る。研究分野：精密機構、精密計測、パラレルメカニズム。

勝木 雅英

1964年福井大学工学部卒。同年東芝機械（株）入社。主に大形工作機械、特にロール研削盤の開発設計製造に従事。1980年頃より超精密加工のための機械要素・加工機の開発に携わる。その間大形工作機械事業部、精密加工機事業部の事業部長を歴任。

アンケートの実施内容や整理方法については、時間変遷をみるうえからも不都合のないかぎり前回までの内容を踏襲し、特に今回の報告では過去のデータもできるだけ併記するように心がけた。アンケート送付先についても前回までと同様に、本専門委員会の委員全員と本学会の会員から任意抽出し、合計990名の方々にお願いした。結果、153名から回答をいただき、概略15%の回収率となった。その内訳は、メーカ58%、ユーザ6%、公共研究機関6%、大学等27%であり、以前のものとほぼ同等の比率となっている。

2. 位置決めグレードの認識

最初の設問は具体的な対象はあえて特定せず、「現時点において一言で「精密位置決め」・「超精密位置決め」といった場合どの程度の位置決めをイメージしますか」という質問である。結果を図1に示す。1986年から1994年までは一桁程度グレードが上がっているが、前回1998年の調査ではどちらも頭打ち、あるいはやや後退気味となり、今回の結果でもそれを踏襲するものとなった。この結果から大多数の人は0.1 μm ～1 μm を「精密」、10 nm程度を「超精密」と捉えていることがわかる。以上の設問は第1回目のアンケートから継続しているものであるが、あくまでもイメージを問うもので、条件設定や定義あるいは位置決め対象により値が異なるため回答に苦慮されている様子が感じられる。回答者の意見としては、「絶対値だけでなくダイナミックレンジで評価するべきである」、「位置決め精度だけではなく、姿勢誤差も含めたものが必要」、「時間的な安定性も重要」など設問のあいまいさに起因するものが多いが、センサなどの検出器の限界または環境・外乱対策の限界を理由に数値を挙げる回答も多かった。

図2は現在と近未来における位置決め精度の到達限界に対する回答結果である。現在は10 nm弱あたりが限界とする意見が多いが、将来は0.1～1 nmあたりに達するとの予想が多いことを示している。この精度達成に対する回答者の意見は①センサの重要性（5件）、②環境対策の必要性（4件）、あるいは③肯定的な意見（2件）などもあ

図1 精密/超精密位置決めグレードの認識変遷

図2 精密/超精密位置決め精度の限界の認識

るが、「0.1nm の位置決めに意味があるのか」というような④ 無意味論的な意見（9 件）も目立った。

3. 回答者が関心をもっている装置の詳細

次の設問は、回答者が最大の関心をもっている精密または超精密位置決め装置について記述していただくもので、143 名から回答をいただいた。装置の位置づけは①現在研究中（43 件）、②開発中（45 件）、③生産中（22 件）、④使用中（33 件）であり、これらの比率は前回とほぼ同じである。

これらの装置について以下の項目について調査した。

- 測定機、計測機器 40件
- 機械要素技術 19
- 半導体検査・製造装置 24
- 組立調整装置・ロボット 7
- 超精密加工機 28
- 工作機械 27
- 情報機器関連技術 11
- その他 5

図3 関心のある位置決め装置の種類

3.1 関心をもっている装置の仕様

装置を差し障りない範囲で具体的に記述していただいた結果を分類し図3に示す。前回までの結果と比較すると測定機・計測機器が増加し、機械要素技術が減少している。これは、関心の装置が要素技術中心の研究段階から具体的な実用段階へと移行し、さらにその評価手段を想定していると推察できる。これは運動の形態を調べた結果（図4）において、直線運動だけでなく直線+回転など複合的な運動を行う形態が増えてきたことから裏づけられる。

図5は装置の主要仕様数値の分布である。位置決め範囲は前々回ぐらいいから1000 mm 前後に集約する傾向が続いており、100 mm 以下の需要は依然少ない。可動部の質量については1 kg 未満と100 kg 超で二極化の傾向が現れている。最大送り速度と加速度については回を追うごとに増加しており、特に加速度については1 G 以上が急増し、高能率位置決め必要性がうかがえる。

さらに、対象となる装置がアップの原理に従っているかを問う設問では、前回と比較して「従っていない」が増加している（45 %→56 %）。これは、すでに述べたように、位置決め軸数が増加したことや後述のようにリニアスケールの採用が増加したことによると思われる。アップの原理に従っていないグループの回答者の意見（全41 件）では、①構造的・スペース的に困難（17 件）、②現実的に無理（10 件）、③補正で対応（9 件）などが目についた。

3.2 位置決め精度

図6に関心をもつ装置の位置決め精度の集計結果を示す。位置決め分解能、位置決め誤差の平均値および再現性など全体的に前回までとの差は少ないが、やや精度が向上していること、また広い範囲に分布する傾向にある。達成度については、「達成」と「ほぼ達成」をあわせた回答は前は59 %であったが、今回は53 %へと減少しており、特に「達成」は21 %から11 %へ半減している。これは目標とする精度や仕様が厳しくなっていることに加え、室温変動や外乱に対するインフラ整備が伴っていない

図4 関心のある位置決め装置の形態

図5 対象装置の主要仕様の分布と変遷

いなどの問題があるようである。

3.3 使用している機器・要素

構成要素に関し、アクチュエータ、案内要素、運動伝達要素の採用状況結果を図7に示す。アクチュエータについては電動機と圧電・電歪で全体の93%を占めるが、そのうち今回は圧電・電歪が減少(22%→10%)し、リニアモータが増加(16%→25%)しているのが特徴である。電動機(100%とする)のうち、回転型のサーボモータ(AC:43%→36%, DC:17%→13%)やパルスモータ(14%→12%)の割合はやや減少し、リニアモータ(22%→30%)とVCM(3.5%→9%)が増加している。

案内要素の調査で増加しているのは、ころがり案内(34%→40%)と空気静圧案内(24%→27%)であった。これは市販の転がり案内の性能向上と空気静圧案内がより一般化されてきたためであろうか。特にリニアモータの回答者のうち、51%が空気静圧案内を用いている。また環境問題・省エネルギーおよびコストを意識して油静圧は減少している(12%→8%)。

送りねじなどの運動伝達要素については今回新たに「リニアモータ駆動のため不要」という項目を追加した。従来は「その他」として集計('98では24%)されていたと思われるが、今回の結果では、リニアモータの採用が多かったためか運動伝達要素を使わない装置が増えている(→32%)。

次に位置センサの種類とその分解能について集計した結果を図8に示す。前回まではレーザ干渉計が徐々に増加し、エンコーダとはほぼ同じ比率(それぞれ42%および41%)であったが、今回の集計ではレーザ干渉計24%に対しリニアスケールとロータリエンコーダをあわせて56%に達している。リニアスケールの採用は、実用性、外乱に対する安定性に加えその性能向上のためと推察できる。また位置センサの分解能は年々向上し、特に1nm以下のセンサを使用する割合が倍増している。

(a) 位置決め分解能

(b) 位置決め誤差の平均値 (偏り)

(c) 再現性 (ばらつき誤差)

図6 位置決め精度

(a) アクチュエータ

(b) 案内要素

(c) 運動伝達要素

図7 採用された主要要素の分布

3.4 制御系

前回の集計では、クローズドループが80%から65%程度に減少した(図9)。この理由として、ボールネジとサーボモータによるセミクローズドループの増加(10%→23%)が挙げられるが、今回の集計では、再びクローズドループが増加(70%)した。この理由はやはりリニアモータの採用が増えているためと推察できる。

制御理論については、古典制御理論が年々減少しており(1990:73%, '94:71%, '98:65%, 2002:60%), それに

対してこれ以外の現代制御が増加している。制御性向上のための問題点に関する意見では、①機械系諸特性の不足(24件)が最も多く、次に②制御周期の高速化(9件)、③ロバスト性不足(7件)、④センサの特性不足(6件)と続く。

3.5 位置決めを実施した際に生じた問題

ここでは、今まで挙げてきた以外の問題点を記述していただいた。整理すると、①機械要素・機械構造の特性不

図8 位置センサ

図9 制御方式

良(8件)と②センサ・制御系に関するもの(8件)が多い。①についての意見では、「ロストモーション、ピッチング、ヨーイングを完全に0にすることができない」、「位置決め精度向上のための機構系剛性向上、振動特性(共振特性)改善と高速位置決めのための軽量化のトレードオフ問題」など、②では「センサ、モータ駆動回路のノイズで完璧な制御モデルを構築できない」、「レーザー干渉計が環境変化に敏感すぎる点」などがあつた。

4. 理想とする位置決め装置

ここでは、前回のアンケートに引き続き横型直線運動で10nmの位置決め精度を達成するための装置の仕様を提案していただいた。3章の設問では実際に研究・開発しているものが対象であったが、ここでは回答者の位置決め装置の理想像をうかがい知ることができる。ストローク的には前設問と同様に100～1000mmとする回答が多い。アクチュエータは圧倒的にリニアモータが多く、前回の24%から49%に倍増している。案内要素は前回と同様に空気静圧案内が半数(50%)を占める。また運動伝達要素もダイレクトドライブが増加(29%→39%)し、ねじ駆動

(43%→36%)を追い越している。

また潤滑については、油脂等を使いたくないという考えが多いようで、「なし」が41%に達し、次が「エア」(23%)となる。位置検出センサはやはりレーザー応用センサが優勢(50%)であるが、リニアスケールも倍増している(16%→37%)。前回14%の回答者があつた静電容量型変位計に関して、今回は回答者はなかった。制御系では、NC/CNCが減少し(37%→14%)、PID制御および現代制御が増加している。PID制御の回答率は24%から56%へ倍増しており、半数以上の回答者がPID制御で十分であると考えているようである。外乱対策の方法では、振動対策44%、温度対策38%の二つが大勢を占めている。前回から温度対策は25%から38%に増加しているのに対し、制御系または機械系で外乱対策をするという回答は激減している(制御系16%→2%、機械系9%→2%)。

5. 位置決めに関する意見・提言

回答者に精密または超精密位置決めに関する意見および提言を自由に記述していただいた。

主な結果を以下にまとめる。

(1) 精密技術の方向、研究動向(15件)

超精密位置決め技術の発展は、機械技術者の新しい活躍の場をひらく；今後ストローク1mを超える大型ステージで、ステッパなみの位置決め精度(ナノオーダー)が必要；超精密領域における装置の評価方法、用語の定義等各者各様である。公の組織がイニシアティブをとって統一すべき；「位置決め」は古くて新しい、また永遠のテーマだと思う。

(2) アンケートに対する要望(11件)

計測機と加工機では精度や位置決めの内容が異なる；半導体のロードマップのように市場に対する開発スペックのターゲットを明確にしてほしい；超精密位置決め精度の評価は「位置決め精度/ストローク」で行うべき；設計論として体系化してほしい；精密位置決め技術の動向調査は新技術創出のための大切な仕事である。

(3) 現状の精密位置決めに対する疑問(6件)

超精密位置決めがこれ以上精度アップしたときのニーズが不明；性能・生産性対コスト比が現実の問題；加工機では位置決め精度よりも加工されたワーク、

部品の寸法精度，形状精度が重要。

6. お わ り に

2002 年秋に実施した第 5 回超精密位置決めアンケートの集計結果から次のようなことが明らかになった。

- (1) 精度認識や目標精度は頭打ちであるにもかかわらず，高速度化・高加速度化への要望が高まっており，それがリニアモータや静圧空気案内の採用増につながっていると考えられ，また回を追うごとにセンサ系の性能も著しく向上している。
- (2) 環境問題への意識の高まりからか，油圧機器の減少や潤滑剤への配慮を感じることができる。

超精密位置決め技術はそれを取り巻く環境や要求仕様の変化，そしておのこの要素技術の進歩により年々高度化していることは明らかである。そしてそれに伴い新たな問題点も発生する。わが国の産業が世界の中で生き残っていくためには，超精密位置決め技術のような基盤技術の確立

と飛躍は不可欠であり，本専門委員会の目的および存在理由もそこにあると考えられる。

最後に臨み，本アンケート調査にご協力いただいた回答者各位，設問や集計方法の検討をしていただいたアンケート小委員会の元沼津工業高等専門学校教授楠井直樹氏，長岡技術科学大学助手磯部浩巳氏，第一ゲージ製作所小林泉氏，ケーエスエス（株）大橋康二氏，集計にご尽力いただいた本委員会事務局岩佐礼子氏に心から感謝を申し上げる。

参 考 文 献

- 1) 井澤 實：精密および超精密位置決め技術の現状，精密工学会誌，**57**, 10 (1991) 1707.
- 2) 清水茂夫，坂戸啓一郎：アンケート調査に見る超精密位置決め技術に関する現状と期待，精密工学会誌，**61**, 12 (1995) 1650.
- 3) 白石昌武，楠井直樹：超精密位置決めにおける文献とアンケート調査，精密工学会誌，**65**, 6 (1999) 799.