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
—精密メカトロニクスと精密計測に関するアンケート調査—*

Survey of Questionnaire on Ultra-precision Positioning

大岩孝彰** 勝木雅英***
Takaaki OIWA and Masahide KATSUKI

Key words

ultra-precision positioning, questionnaire survey, positioning accuracy, positioning resolution, positioning device specification, actuator, guide way, positioning control theory

1. はじめに

超精密位置決め技術は、半導体製造装置に代表される精密機械技術を支える基盤技術の一つである。そして、アクチュエータ、運動伝達要素、案内要素、センサなどの計測技術、制御技術および外乱抑制技術などの幅広い機械・電子技術の集大成であり、各々の技術の進歩なくしては達成が不可能な統合的な技術でもある。特に精密・正確な位置決めだけではなく高速化つまり単位時間当たりの処理能力（スループット）向上への要求が厳しくなっている。

「超精密位置決め専門委員会」（豊橋技術科学大学佐藤海二委員長）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、そして現時点と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)~10)}、2018年10月の調査¹¹⁾が第9回目となる。

ここで報告する内容は、この第9回目に実施した内容を中心に超精密位置決め技術の最近の動向を調査した結果である。半導体製造装置分野を例に挙げれば、第1回目の1986年時点の半導体メモリ素子（DRAM）の集積規模は1 Mbit、線幅1.2 μm 程度が量産されていたが、現在では8 Gbit、線幅17 nm程度であり、約30年間で著しい精度向上がなされている。

アンケートの実施内容や整理方法については、経時変遷を見る上からでもできる限り前回までのものを踏襲し、過去のデータもできるだけ併記するようにした。アンケート依頼先についても基本的に前回と同様に、本専門委員会委員と前回回答者の方々のほか、生産自動化専門委員会、半導体製造装置や工作機械関連協会会員、位置決め技術関連講習会や学術講演会出席の方々にお願いした。今回は前回

2014年とほぼ同数の123通の回答を頂いたが、それらの内訳は企業約87%、大学・高専など約11.4%、その他約1.6%であり、前回の調査時と比較して企業回答者が約9%増え、大学等は約7%減っている。また2010年の調査までは依頼時に「超精密位置決めアンケート」と題してきたが、アンケートの趣旨が理解し易いように前回から新たに副題として「精密メカトロニクスと精密計測に関するアンケート調査」を加えている。

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指定せず、“現時点において一言で「精密位置決め」あるいは「超精密位置決め」といった場合、どの程度のグレードをイメージしますか”という質問である。回答の平均値の変遷を図1に示す。1986年から1994年までは両者とも一桁程度グレードが上がり、その後2006年まで徐々にグレードが下がった。それ以降はどちらも非常に緩やかにグレードが上がっており、多くの人は1 μm を「精密」、10 nmを「超精密」と捉えていることがわかる。分布を見ると回答はそれぞれ0.1~10 μm および1~100 nmの範囲に8割以上の回答が集中している。また2010年以降、「超精密」は1 nmであるとする回答者の割合も増えている。これは後の章で述べるように、サブナノメートルの分解能を持つセンサが現実

図1 精密／超精密位置決め精度の認識変遷

*原稿受付 令和2年7月16日

**正会員 静岡大学工学部（静岡県浜松市中区城北3-5-1）

***正会員 芝浦機械株式会社 工作機械カンパニー技術部（静岡県沼津市大岡2068-3）

図2 精密／超精密位置決め精度と分解能の限界値の変遷

のものとなってきたためと思われる。回答者が想定している対象装置（図3）と関連付けて見ると、測定機、機械要素、半導体製造装置、超精密加工機および工作機械分野でのグレードの高さが目立った。

図2は現在と近未来における位置決め精度と分解能の到達限界である。2010年の調査と比較して2014年と2018年の調査では分布がやや左に移動している。現時点では精度は1 nm～100 nm、分解能は0.1～10 nmが限界であるとする回答者が多いが、近未来では精度は0.1 nm、分解能は10 pmに達すると約3割の回答者が予測している。以上の回答結果は、図1と同様に位置計測用センサの高性能化が深く関係していると推察される。

また“精密位置決め精度および分解能はどの程度まで必要になると思いますか”との問いでは、多くの人が0.1 nm～1 nm（全平均値0.71 nm）および1 pm～0.1 nm（全平均値0.076 nm）と回答した。これらの平均値を図2（b）および（d）に示した近未来の精度限界（平均値2.6 nm）および分解能の限界（平均値0.21 nm）と比較すると、将来はさらに高い精度や分解能が必要と予想していることがわかる。

3. 回答者が関心を持っている装置の詳細

次の設問は、回答者が最大の関心を持っている精密また

図3 対象装置の種類

は超精密位置決め装置について回答を求めたものである。装置の位置づけは①現在研究中 25%、②開発中 31%、③生産中 26%、④使用中 18%であった。前回は①研究中 37%、②開発中 31%、生産中 25%、④使用中 7%であり、研究が12%減少し、使用中が11%増加した。これは前々回から前回への推移と逆の傾向を示しているが、景気が比較的良好だったため、装置が研究段階から実用段階に推移したことや大学等や公的機関に所属する研究者の比率が減少していることに原因があると思われる。

図4 対象装置のメカニズム

3.1 関心を持っている装置の仕様

差し障りない範囲で装置について具体的に記述して頂いた結果を分類し図3に示す。2006年の調査より新たにフラットパネルディスプレイ (FPD) 関係を分類項目に加えている。今回の調査では測定機・計測機器, FDP, ロボットおよび工作機械の割合には変化が見られないが, 半導体検査・製造装置が増え, 機械要素技術, 超精密加工機の割合は低下した。これは近年の各業界の景気を背景に回答者の割合が増減したことによると思われる。

運動の形態を調べるため, 前々回より新たにメカニズムの種類について設問を加えた。結果を図4に示す。前回と比較して2自由度平面運動機構が増加し, 1自由度直線機構および3自由度直交座標形機構の割合が減少した。これは図3の対象装置の種類の割合と関係が深いと考えられる。

次に装置の主要仕様数値を回答して頂いた。位置決め範囲は100 mmから1 m未満の回答者が50%と半数を占める。1 m以上の回答割合は前々回21%, 前回16.5%であったが, 今回さらに約10%へ低下した。これは近年大形化していたFPDや機械要素技術の回答割合が減ったためと思われる。可動部の質量は今までと同様に1 kg未満から1000 kg以上までの広い範囲にわたっており, 図3で示したようにさまざまな装置を対象として回答しているためと推察できる。最大送り速度も1 mm/s未満から1 m/s以上まで広く分布している。特に1 m/s (60 m/min) 以上の回答が1998年以降増加し, 前回の調査では約30%に達したが今回は16%に留まった。

最大加速度も1990年から2002年に掛けて大幅な高加速度化が進んだが, 2006年以降では比較的变化は少ない。しかし1 G (9.8 m/s²) 以上の割合が前回の48%から今回は34%に低下, 0.1 G以上1 G未満の回答が32%から45%に増え最も多い回答となった。以上のように速度および加速度については近年低下している傾向があるが, その原因は現時点で特定困難なため, 次回以降の調査結果に注目したい。

さらに, 対象となる装置がアッペの原理に従っているかとの設問では, 1998年以来, 毎回「従っていない」が徐々に増加している状況が続いている (1998年: 45% → 2018年: 65%)。これは後述のように位置決め用センサとしてリニアスケールの採用が増えていることによると思

れる。アッペの原理に従っていない回答者の意見 (全34件) では①構造的・スペース的に難しい (19件), ②補正で対応 (5件) などが目についた。

3.2 位置決め精度

関心を持つ装置の位置決め分解能, 位置決め誤差の平均値 (偏り誤差) および再現性 (ばらつき誤差) について調査した。いずれも1 nm以下から1 μm以上の幅広い範囲に分布し特に目立ったピークが見られないが, 前回の調査以降明らかにグレードがやや低下している。また達成度については, 「達成」が34%, 「ほぼ達成した」が33%であり, 両者を合わせた割合は67%と過去最高となった。以上の結果は, 研究段階より実用段階の装置の回答が多くなり, 目標値がやや低く設定されているためと推察できる。

3.3 使用している機器・要素

採用されている主要な機械要素の調査結果を図5に示す。図5(a)のアクチュエータについてはリニアモータを含む電動機および圧電・電歪で全体で93%を占める。2010年までは回転形モータ (AC・DCサーボモータ+パルスモータ) が減少 (2002年: 51% → 2010年: 43%) したが, 前回と今回の調査では46~47%と再び増加している。またリニアモータの割合は前回まで増加 (2002年: 25% → 2014: 36%) していたが, 今回の調査では38%と微増に留まった。これはそれぞれのアクチュエータの特性の違いが理解され, リニアモータ化がほぼ浸透したためかと思われる。

案内要素の使用比率では図5(b)のように, ころがり案内が徐々に増加 (2002年: 40% → 2010年: 44%) していたが, 前回調査では58%, 今回は69%へ急激に増加した。これは市販のリニアガイドの経済性や使いやすさに加え, 近年剛性や運動精度などの性能が一段と向上しているためと思われる。これに対して静圧空気案内の割合は6.5%と過去最低となった。すべり案内は2002年以降徐々に減少している (2002年: 16% → 2018年: 10.5%)。これは摩擦係数が大きく精密位置決めに不利なほか, 発塵や環境汚染などを意識していると推察される。リニアモータの回答者のうち, 2002年と2006年では約半数 (51%) が空気静圧案内を用いていたが2010年以降徐々に減少し, 今回は9%と激減した。その代わりにころがり案内は著しく増加している (2002年: 25% → 2018年: 72%)。また回転形モータ+ボールねじを使っている回答者が転がり案内を使用している割合も2002年の61%から徐々に増加し, 今回の調査では85%を占める。

送りねじなどの運動伝達要素については, 「ダイレクトドライブのため不要」という回答が2006年の46%をピークに2018年は38%へと徐々に比率が低下している。送りねじは1994年の53%から2006年に30%まで減少したが, 2010年と2014年は33%, 今回は36%と増加に転じている。以上のことからリニアモータの普及が一段落し, 用途に応じて送りねじとの棲み分けが行われているものと思われる。

図5 採用された主要要素の変遷

図6 位置センサの変遷

次に位置決め用センサの種類とその分解能について集計した結果を図6に示す。2006年の調査からリニア・ロータリエンコーダをさらにインクリメンタル式とアブソリュート式に分けて設問・集計した(図6(a))。1998年の調査ではレーザ干渉計とエンコーダがほぼ同じ比率(それぞれ42%および41%)であったが、それ以降はレーザ干渉計が減少し、エンコーダが増えている。今回の調査ではレーザ干渉計11%およびエンコーダ81%とさらに差が開いた。エンコーダではインクリメンタル式リニアエンコーダの比率が高い(全体の38%, エンコーダの46%)が、近

年ではアブソリュート式エンコーダも徐々に増加している。例えばアブソリュート式リニアエンコーダは2006年に16%だったが今回27%であり、アブソリュート式ロータリエンコーダも2006年の5%から今回は13%まで増えている。エンコーダの適用は、レーザ干渉計に比べ実用性や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(図6(b))は年々向上し、特に1nm以下のセンサの割合は2010年の調査では36%に達したが、前回と今回の調査では25~26%に留まっている。これは3.2節で述べたように、装置の位置決め

精度や分解能の目標グレードが近年頭打ちであることと関連があると推察できる。

3.4 制御系

フィードバック制御方法については、2006 年以降ではオープンループの比率はほぼ 10% で変化が無い。しかしクローズドループの割合が 75% から 67% に徐々に減少したのに対し、セミクローズドループが 14% から 19% へ増加している。後者が増えた理由として、エンコーダ付きパルスモータの普及があると思われる。これは図 5 (a) におけるパルスモータの比率が倍増した (2006 年: 6.0% → 2018 年: 12%) ことから裏付けられる。

制御コントローラは図 7 に示す通り、マイクロコンピュータ・DSP の利用が 42% で最も多かったが、シーケンサ (プログラマブルロジックコントローラ: PLC) の利用も増加している (1998 年: 8.7% → 2018 年: 20%)。これはシーケンサの機能が向上し周辺機器が充実してきているためと推察できる。また適用している制御理論については、1990 年の調査で 73% だった古典制御が 2002 年に 60% まで減少したが、その後増加に転じ今回の調査では 80% に達している。この理由として、PID 制御などの古典制御でも現代制御と同等の性能が得られること、理論がわかりやすく調整が容易であることなどが挙げられる。

4. 理想とする位置決め装置

本章では、横形直線運動で 10 nm の位置決め精度を達成するための装置仕様の提案を求めた。3 章までは実際に研究・開発している装置が対象であったが、ここでは回答者の位置決め装置の理想像と現実とのギャップを窺い知ることができる。ストロークは 3.1 節と同様に 100 mm ~ 1 m 未満の回答が多い (62%)。1 m 以上の回答は回ごとに増加していた (2002 年: 6.5% → 2014 年: 31%) が、今回は現実の装置と同様に 4.3% まで減少した。速度についても前回まで高速化の傾向が見られていた (1 m/s 以上の回答: 2006 年 24% → 2014 年 40%) が、今回は半分以下の 16% となった。これらの結果から回答者が現実と同等の仕様を持つ装置を想定して回答していることがわかる。

以上に対して、装置に用いる機械要素等については理想と現実との間に図 8 に示すような乖離が見られる。たとえば理想のアクチュエータは圧倒的にリニアモータが多く (図 8 (a)), 1998 年: 24% → 2018 年: 63% と増加の一途をたどっているが、現実の装置では 38% に留まっており回転形電動機が 46% と最も多く使われている (図 5 (a))。

案内要素については、過去の調査では空気静圧案内を使いたい回答者が多く (2006 年: 50% → 2014 年: 42%)、転がり案内 (2006 年: 22% → 2014 年 35%) を抑えていたが、徐々に比率が変化し、今回の調査ではそれぞれ 29% および 52% と逆転して転がり案内を使用したいと考える回答者が過半数となった。

現実の運動伝達要素では送りねじとダイレクトドライブ

図 7 制御コントローラの変遷

が二極化していたが (図 5 (c)), 理想の装置ではダイレクトドライブが 68% に達している (図 8 (c)). ねじ駆動は前回調査では理想の装置の回答中 18% にまで減少したが今回は 29% まで回復した。

位置決め用センサについても前回までは現実と理想の違いが見られ、リニアスケールよりレーザ応用 (干渉計) を使用したいという回答者が多い結果となっていたが、今回の調査では現実の装置と同様にリニアスケールを使用したい回答者が 70% を占めるようになった (図 8 (d)).

5. 位置決めに関する意見・提言

アンケートの最後に、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頂いた。主な意見を以下にまとめる。

①現状の精密技術に対する疑問・問題点: 最終的なキープポイントは外乱対策であるがハード・ソフト両面からの統一的手法の確立が望まれる。高分解能で外乱に強い測長機が欲しい、位置決め精度と同程度以上の繰り返し精度が欲しい、位置制御に加え力制御も組み込みたい、コントローラやドライバの選択肢が少ない、センサの内挿ノイズが大きい。

②精密技術の方向、研究動向: 精度に対する要求は飽和しており予防保全や異常検知に関する要望が増えている、位置決めだけではなく輪郭制御も必要、今後、要求精度はこれ以上高くないと予想する、扱い易い制御理論が必要、一方向繰り返し位置決め精度 (UPR) に関する影響因子の技術調査・研究が必要。

③アンケートに対する要望・意見

分野・用途毎に求める精度と機械要素が異なるので仕分けが必要、それぞれの分野での常識が違うのがおもしろい、精密位置決めだけでなく、幅広く基礎技術をサーベイできると良い。

6. おわりに

2018 年秋に実施した第 9 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) 多

図8 理想とする位置決め装置の主要要素と現実

くの回答者は「精密」を $1\mu\text{m}$ 前後、そして「超精密」を 1nm から 10nm 程度のイメージで捉えている。2) 現時点での位置決め精度、分解能の限界はそれぞれ $1\text{nm}\sim 10\text{nm}$ および $0.1\text{nm}\sim 1\text{nm}$ 程度であるが、近い将来は 1nm および 0.1nm となる。3) 高速化および長ストローク化の傾向が頭打ちになっている。4) 回転形電動機とリニアモータがアクチュエータを二分している。5) 市販のリニアガイドに代表されるころがり案内の性能向上により、その採用が急激に増えた。6) 高分解能化が進んだ位置決め用センサでは実用性からエンコーダの採用が増えている。

超精密位置決め技術は、適用される装置の種類や要求仕様の変化、そして日々の技術革新によりますます高度化している。また、それに伴い新たな問題が顕在化する。特に高精度化と高速化に伴う振動や発熱が問題となっている。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が不可欠であり、本専門委員会の目的および存在理由もそこにあると思われる。

最後に、本アンケート調査にご協力頂いた回答者各位、設問や集計方法の検討をいただいた本専門委員会アンケート小委員会の、(株)ニコンノ瀬剛氏、東北大学高俣氏、豊橋技術科学大学佐藤海二氏、キヤサイトテクノロジー(株)佐藤光一氏、豊田工業大学古谷克司氏、集計に尽力頂いた豊田工業高等専門学校田中淑晴氏に心から感謝申し上げます。

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.
- 4) 大岩孝彰，勝木雅英：超精密位置決めにおけるアンケート調査，

精密工学会誌，**69**, 8 (2003) 1077.

- 5) 大岩孝彰，勝木雅英：超精密位置決めにおけるアンケート調査，精密工学会誌，**74**, 10 (2008) 1027.
- 6) T. Oiwa, M. Katsuki, M. Karita, W. Gao, S. Makinouchi, K. Sato and Y. Oohashi: Questionnaire Survey on Ultra-precision Positioning, Proceedings of The 4th International Conference on Positioning Technology ICPT2010, Busan, Korea, 2010, pp. 160-165.
- 7) T. Oiwa, M. Katsuki, M. Karita, W. Gao, S. Makinouchi, K. Sato and Y. Oohashi: Questionnaire Survey on Ultra-precision Positioning, The 11th International Conference of the European Society for Precision Engineering and Nanotechnology (euspen2011), Como, Italy, Vol. 2, (2011) 463-466.
- 8) T. Oiwa, M. Katsuki, M. Karita, W. Gao, S. Makinouchi, K. Sato and Y. Oohashi: Review; Questionnaire Survey on Ultra-precision Positioning, International Journal of Automation Technology, **5**, 6 (2011) 766-772.
- 9) 大岩孝彰，勝木雅英：超精密位置決めにおけるアンケート調査，精密工学会誌，**77**, 10 (2011) 912.
- 10) 大岩孝彰，勝木雅英：超精密位置決めにおけるアンケート調査—精密メカトロニクスと精密計測に関するアンケート調査，精密工学会誌，**81**, 10 (2015) 904.
- 11) 超精密位置決めアンケート報告書，精密工学会超精密位置決め専門委員会アンケート小委員会，(2019).

大岩孝彰

1984年長岡技術科学大学大学院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助手，1994年静岡大学工学部助教授を経て，2006年教授，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

芝浦機械（旧東芝機械）株式会社入社後，主にロール研削盤等大形工作機械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。その後大形工作機械事業部，精密加工機事業部 事業部長を経て，現工作機械カンパニー技術顧問。