はじめての

精密工学

精密・超精密位置決め技術の基礎

Foundation of Precision and Ultraprecision Positioning/Jiro OTSUKA

静岡理科大学 大塚二郎

1. はじめに

新幹線が駅にピタリと止まることは一種の「精密位置決め」といいでしょう。昨年「はやぶさ」という宇宙衛星が「イトカワ」という小惑星に着陸して、地球に戻ってきたことは一種の「超精密位置決め」でしょう。

精密工学で「位置決め」というと、一般的にまず図1(a)¹⁾のようなモータとボールねじを組み合わせるテーブル(ステージということもあり)を望む位置(目標位置)へ移動させることをいいます。これは一軸の例ですが、図1(b)¹⁾の場合は、XステージとYステージは、互いに90°移動方向が異なり、二次元で任意の動きができます。ここに示すのは、1980年代の半導体縮小露光装置の「ステッパ」と呼ばれるものです。自動車の生産工場や電子部品工場の生産ラインにはかなり多数の図1(a)の位置決め装置が使われています。図1(b)のようなXYステージ(テーブル)の上に垂直方向のZ軸を加えたり、回転

するロータリーテーブルをつけた産業用ロボットも位置決めの対象になります。

ところで、「精密位置決め」と「超精密位置決め」はどう違うのでしょうか。本学会の超精密位置決め専門委員会では、精密工学会会員の方々を対象に位置決めに関して4年ごとにアンケートを行っています。その中に「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にイメージしますか」という少々あいまいな質問があります。多くの人は、値として精度^{*1}とか分解能^{*2}をイメージして答えているようです。2006年、2010年のアンケート結果²⁾を見ると、「精密位置決め」は1 μm 付近、「超精密」は0.01 μm (10nm)付近に集中しています。筆者は両者の境界値は0.1 μm (100nm)ぐらいと考えています。

2. 位置決め方式

2.1 間欠位置決め方式(PTP方式)

ステージを位置決めするのに、図2のようにステージが点Aを出発して、その途中の経路と時間を問わないで点B(目標位置、指令位置 X_r)に停止させる方式を間欠方式またはPoint-to-Point方式といい、略してPTP方式と呼びます。

2.2 連続方式(CP方式)

PTP方式に対しステージが移動する最中の経路と時間を問うとき、これを「連続位置決め方式」とか「経路方式」とかいうて、英語のContinuous Pathを略して「CP方式」といいます。図1(b)の例や、工作機械のXYテーブルを用いて2次元のCP方式を実行することになります。

3. 位置決め誤差と位置決め分解能

「誤差^{*1}」と「分解能^{*2}」を混同している教員やエンジニアは非常に多いのが実情です。

まず位置決め誤差³⁾について説明します。ステージを移動させて図2のように、ステージを点Aから出発して目標位置の点Bで停止させたいのに、それより E_i だけ手前

(a) 一軸の最も一般的な位置決め装置¹⁾

(b) 旧型ステッパのXYステージ(1980年ごろ)¹⁾

図1 位置決め装置

*1 精度とは「誤差の小さい程度」(「日本機械工学便覧」による)。位置決め誤差については第3章を参照してください。

*2 分解能「出力に識別可能な変化を生じさせることのできる入力の変化量」(JIS Z8103)で、位置決めなら、出力としてのステージの位置Xの変化を読みとれる限界の値。

図2 位置決めのPTP方式

図3 位置決め誤差のヒストグラム

図4 回転機からリニアモータへの展開⁵⁾

の距離 X_i で停止したとしましょう。ここで、

$$E_i = X_i - X_r \quad (E_i \text{ も「位置決め誤差」です}) \quad (1)$$

同じ条件で点Aから点Bへの移動を n 回くり返したとき、 n 個の X_i が得られ、 X_i の頻度分布が図3のようになったとしましょう。

$$m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i \quad (\text{位置 } X_i \text{ の平均値}) \quad (2)$$

$$e = m - X_r \quad (\text{位置 } X_i \text{ の平均値 } m \text{ と目標位置 } X_r \text{ との差} \rightarrow \text{「かたより誤差」}) \quad (3)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - m)^2} \quad (X_i \text{ の標準偏差} \rightarrow \text{「ばらつき誤差」}) \quad (4)$$

上記の e を「かたより誤差」あるいは単に「かたより」、 X_i の標準偏差 σ を「ばらつき誤差」あるいは単に「ばらつき」ともいいます。これは計測用語と同様です。 3σ の値で「ばらつき」とすることもあります。

これらの誤差を小さくするには誤差の発生原因をつきとめる必要があります。熱や振動に起因するもの、メカニズムの問題、位置を計る変位センサの誤差に行きつくことが多いです。詳しいことは文献1)4)等を参照してください。

4. 構成

位置決め装置を構成する要素として、力を出すためのアクチュエータ、移動体であるテーブルやステージ、それを支える案内（ガイド）、アクチュエータに与える信号を制御するコントローラ等から成ります。

4.1 アクチュエータ

回転式電気モータ、リニアモータが現在の主力で、空気圧シリンダや、油圧式アクチュエータは、コンプレッサでの電気エネルギーの消費が無視できないので減少しつつあります。ある種の結晶に電圧を与えると、電圧の大小により数十 μm 以下ナノメートルレベルの微小変位する圧電素子も最近よく用いられます⁴⁾。

(1) 回転式電気モータ モータとボールねじの組合せ

が全位置決め装置の約半分を占めます。これは、コントローラと組み合わせてセットで売られています。モータは多くの方式がありますが、指令に従って回転するモータを「サーボモータ」と呼びます。1990年ごろまでは「直流モータ」がほとんどでしたが、ICを用いた電子回路の発達とともに今では「三相の交流モータ」がほとんどです。

(2) リニアモータ⁴⁾ 回転式モータを図4⁵⁾のように直線展開したのがリニアモータです。ボールねじと比較すると次のようになります⁶⁾。

長所：①高速が可能、②コンタミの問題がない、③ボールねじを用いた場合より、メカニズムが簡単になり、剛性^{*3}を大きくできる、④長距離移動が可能、⑤音が小さい等です。

短所：①リニアモータでは必ずステージの位置を検出する物差し（変位センサ）が必要ですから、その分高価になります。②図4で電機子と磁石の両者間に、水平方向の推力の他に、上下方向に3～5倍の引力が働くので、しっかりと両者を分離支持しなくてはなりません。③リニアモータの電機子側、そして磁石も熱をもつので、高精度位置決めを要求するところでは液冷しなければなりません。④外乱、例えば工作機械ならテーブルに働く切削力の影響を受けやすく、制御がむずかしくなりますが、これはメーカーが面倒みてくれます。

2004年ドイツの工作機械メーカーが突然リニアモータの使用をやめてボールねじにしたことがありました。筆者は次年ドイツのハノーバーのEMOショーという工作機械展示会に行き、ヨーロッパの工作機械メーカー34社にリニアモータについてたずねたところ、「リニアモータは高速化、高精度化にはすぐれるが、ボールねじより高価になり、冷却のための電気エネルギーが無視できない」という意見が大勢でした⁷⁾。ただし、ドイツのメーカーのうち、2社はリニアモータとボールねじを併用していました。ショートストロークの揺動運動するところや、長距離移動の所ではボールねじは苦手なのでリニアモータが使われています。

(3) ボールねじ

位置決めについて述べるに当たって、回転式モータと組み

*3 装置に何らかの力がかかったとき、弾性変位が小さいとき「剛性」が大きいといえます。

図5 ボールねじ

合わせて使うボールねじに触れないわけにはいきません。図5のように円弧溝のおねじとめねじのナットの間にボールを入れて回転するとボールが循環して、軽くねじ軸を回転させることができます。

ボールねじは、高速回転で騒音や微振動を出すのは大きな欠点です。ボールねじメーカーも頑張っているようですが、今ではリニアモータと互換の最高速2m/sのものも現れています。なお、すべりねじも相変わらずある種の位置決め装置には昔から使われています³⁾。

4.2 直線案内（リニアガイド）

ステージを支える直線案内のことを「リニアガイド」とか「リニアモーションガイド」ともいって、昔はすべり案内が主でしたが、今では図6⁸⁾のようなボールを循環させるリニアボールガイドが普及しています。超精密を必要とする機器の案内として数十気圧の油（静圧油）、数気圧での空気膜（静圧空気）の軸受・案内が用いられています。

4.3 コントローラ⁹⁾

ここ20年間で一番進歩したのはモータを制御するコントローラ（制御器）です。半導体の普及とともにアナログからデジタルとなり、DSP（Digital Signal Processor）の進歩とソフトのおかげで、各種演算が楽になり、そしてむずかしい制御も高速で扱えるようになりました。

5. 制 御 方 式

図1のモータとボールねじを組み合わせた位置決め装置を見ながら説明しましょう。

5.1 オープンループ制御

例えば図1(a)でパルスモータを使用すると、パルス数に比例したステージの変位が得られます。

5.2 セミクローズド制御

図7¹⁾はセミクローズド制御を示します。ねじの回転角を検出できるロータリエンコーダあるいはモータに付属のロータリエンコーダでそれをコントローラにフィードバックして指令値どおりモータを回転させるものです。工作機械によく用いられる制御方式です。この場合、ねじにリード（ピッチ）誤差があったり、熱膨張したりすると、正確なステージの位置決めは行うことはできません。

5.3 閉ループ（フルクローズド制御）

図8¹⁾は閉ループ制御の場合で、テーブル変位を絶えず変位センサで計測し、目標位置と違っていたらただちに修正するというフィードバック制御を適用します。この方式

図6 リニアボールガイド [THK(株)製「LMガイド（ボールリテーナ入り）」]⁸⁾

は図7と比べて高精度位置決めが可能になりますが、変位センサは測定分解能が小さいほど高価になるので、装置全体も大変高価になります。

以上の5.2節、5.3節ではほとんどが古典制御であるPID制御が用いられています。

6. 超精密位置決め装置

1章で筆者は「精密位置決め」と「超精密位置決め」の境界値は位置決め誤差や位置決め分解能にして0.1μm（=100nm）あたりであるといいました。位置決め誤差を0.1μm以下にするには次の3つが重要になってきます。

6.1 変位センサ

5.3節で述べた閉ループ制御方式を採用しなくてはなりません。そして変位センサはまずそれ相当の小さい分解能をもち、ノイズも小さい必要があります。レーザ光型とリニアエンコーダ型がありますが、詳しいことは文献4)を参照して下さい。変位センサの取り付け位置も重要です。つまり、なるべくアップの原理³⁾に近づくように心がけて、アップ誤差が小さくなるようにすべきです。

アップの原理：ドイツ人の物理学者が立てた原理で、計測系では被測定物の測定すべき部分を物差しとして用いる変位センサの延長上に置く。加工系では被加工物の加工すべき部分を物差しとして用いる変位センサの延長上に置く。

図1(b)ではウエハ上の露光点が、変位測定のレーザ光延長上にあり、完全にアップの原理に従っていますが、工作機械や三次元測定機は無理ですから、それなりの対策が必要です。

6.2 メカニズム

位置決め装置をなるべく堅固につまり剛性高く造るべきです。剛性が小さいと振動が出やすく、精度も出ません。摺動面の平面度、X軸とY軸の直角度等を出すため、職人芸に頼らざるをえない部分が多くなります。

6.3 制御

通常はPID制御で十分ですが、同じPID制御でも種々のものがあります¹⁰⁾。アンケート調査によると、その他に各種インテリジェント制御がさまざまな位置決め装置の30%に用いられています²⁾。

6.4 半導体縮小露光装置

超精密位置決め装置のチャンピオンは図9¹¹⁾の半導体縮小露光装置です。図1(b)とは異なる方式のステージは加減速度3~5G、最高速度1m/s 以上にもなり位置決め精度は1nm 前後(ばらつき誤差)であり、考えられるありとあらゆる振動対策、熱対策がほどこされています。1台20トン20~50億円。ICを造るにはこれが何十台も必要です。

7. さ い ご に

高精度・高速の位置決め装置を造るには、振動や温度変化の小さい環境が必要なうえに、電気、材料、制御、ソフト等の十分な知識が必要です。電気系のノイズをとるには経験者にはかえません。一人でこれらを全部マスターすることはまず無理なので、それぞれの専門の人の協力をもとに行うことをおすすめします。

最後に、筆者が最近かかわった製品を紹介します。図10¹²⁾はボールねじのみで20~100mm にわたり分解能1nm を出すことのできる超精密位置決め装置で、産総研の長さ基準(長さクラブ)やSPring-8のX線集光装置、半導体検出装置等に用いられています。大変小型ですぐれたフィードバック用変位センサ¹³⁾を一度見ていただきたいものです。

参 考 文 献

1) 大塚二郎, 坂戸啓一郎: 精密位置決め機構設計, 工業調査会, (2003) 17-20, 69, 73, 151-183.

図10 1nm 分解能超精密位置決め装置¹²⁾¹³⁾
(www.sigma-tech.co.jp)

- 2) 大岩孝彰ほか: 精密工学会超精密位置決め専門委員会アンケート報告書, (2011) 1.
- 3) 大塚二郎: 超精密位置決め技術, 養賢堂, (2010) 7-9, 31-44, 71, 75, 104.
- 4) 実用精密位置決め技術事典編集委員会: 産業技術サービスセンター, (2008) 99, 196-199, 208.
- 5) 荏田充二: リニアモータにおける高性能技術, 精密工学会誌, **61**, 12 (1995) 347.
- 6) 精密工学会: 高速・高精度位置決めにはボールねじか, リニアモータか 2000年精密工学会シンポジウム, (2000).
- 7) 大塚二郎: EMO ショーにおけるリニアモータ vs ボールねじ報告, 精密工学会超精密位置決め専門委員会前刷集, No.2005-5 (2005) 1-12.
- 8) 寺町彰博監修: リニアシステムの理論, 日刊工業新聞社, (2001) 12.
- 9) 二見茂: 精密・超精密位置決めのためのコントローラ概論, 精密工学会超精密位置決め専門委員会前刷集 (I), (2006-01) 1-7.
- 10) 須田信英代表著: PID 制御, 朝倉書店, (1994).
- 11) 涌井伸二: ステップパにおける精密位置決めステージの現状と将来, 精密工学会, **67**, 2 (2001) 201-205.
- 12) 大塚二郎, 市川宗次, 増田富雄: ボールねじ新駆動方式による1nm 分解能の小型超精密位置決め装置, 2006年度精密工学会秋季大会論文集, (2009) 857-858.
- 13) 市川宗次: 最新のレーザ応用スケール, 光アライアンス, 2号 (1991) 26-29.