精密位置決め技術

首都大学東京大学院　理工学研究科
機械工学専攻　准教授
本田　智

マイクロピッチラックを用いた精密ステージ

現在、精密ステージとして多種多様なステージが研究・開発・市販されている。しかし、精密ステージを初めて使う技術者にとって、どれを選んで良いかわからない。精密ステージとは何か。その種類と分類についてまとめてみた。また、現在研究中のピッチが120ミクロンメートルのマイクロピッチラックとこれに噛み合うマイクロピッチ歯を尺取り虫方式で噛み合わせながら、ステージを60ミクロンメートルずつ、オープンループ制御で移動・位置決めする精密ステージについても紹介する。

精密ステージとは

特性・長所短所を明らかに

日本の製造業を支える高性能な製造機器の一つに「精密位置決め／送り装置」が挙げられる。この精密位置決め／送り装置は、工作機械や精密計測器に組み込まれ、また、最先端の半導体製造装置やバイオ工学機器などにも組み込まれている。そして、その位置決め精度はマイクロメートル数ナノメートル以下に達しようとしている。

しかし、これら超精密位置決め装置は、本体に剛性を持たせるために大型で重く、また、高精度な位置フィードバック制御を行うために高精度なレーザー測長器を取り付ける必要があるなど、装置が大がかりで高価なものになっている。さらに機械部品や電気駆動部品の非線系挙動に対応するため、複雑な制御システムを構成しなければならないなど、数多くの問題を抱えている。

さて、専門的な長所短所・問題点を述べる前に、精密ステージとは何か、どのような種類があり、どのように分類されるのか考えてみた。まず実験室にある精密ステージを調べてみると、数値制御（NC）フライス盤のXY送りテーブル、顕微鏡のXY試料テーブル、レーザー干渉計の光軸合わせのためのXYZαβθステージ、走査型電子顕微鏡（SEM）のチャンバー内の試料テーブルなどがあった。

これらのステージに共通するもの、その性能を評価する共通の尺度から解答を探してみると、「精密ステージとは①下板（ベース）と上板（ステージ）の間に、②上板の運動を拘束する軸受と③上板を移動させる駆動装置を取り付けたもので、④上板の現在位置から、指定した目標位置へ許容誤差範囲内で、指定した時刻に許容時間内に、⑤外乱による揺らぎを最小に抑えながら、移動させるもの」と私考している。

では、自動車のようにナビゲーションシステムを用いて目的地に到達する位置決めシステムは、下板は地球で、上板は座席、軸受は道路で、駆動装置はタイヤとエンジンである。しかし、これは一般にステージとは呼んでいない。精密ステージとは①数ミリメートル−数センチメートルの有限の大きさの下板に対して、上板が相対的へ移動するもので、②上板の運動を拘束する方法には滑り軸受や玉軸受、油空圧軸受など、数種類の軸受が開発されている。また③上板を移動させる駆動装置には、直流（DC）／交流（AC）／ステッピングモーターまたは手動で、台形ネジ／ボールネジ／ラック歯車のピニオンを回転させることで上板を動かすものや、油空圧シリンダーで動かすもの、圧電／磁歪素子の微小変位を弾性ヒンジで拡大して尺取り虫的に動かすもの、摩擦力の差を利用したインパクト駆動で動かすもの、トラクションドライブや超音波モーターで動かすもの、ステージの上板と下板がリニアモーターや静電モーターの固定子・回転子として動くもの、など数多くの駆動装置があり、④目標とする位置・時間とそれぞれの許容範囲の与え方についても、工作機械のステージのように上板に載せたブロックの端を一度加工し、そこを基準として目標位置を決めるものと、測定器のように、上板に載せたブロックの端から目標位置を決めるものがある。そして、それぞれの始点から任意の距離に目標位置を指定する場合と集積回路（IC）の回路線間幅などのように一定間隔の繰り返しで目標位置を指定する場合がある。また、目標位置をどこまで正確に実行するか（許容位置決めの範囲をいくらにするか）、現在位置から目標位置まで途中の位置を考慮しないPTP方式とするか、速度・加速度・軌跡まで指定するCP方式とするか、など多くの選択肢がある。⑤ステージが受ける外乱には、工作機械のように刃物から受ける切削力によって、また上板に載せた物体に作用する重力や上板が加減速するときの慣性力によって、また上板／下板が変形してしまう場合や、測定器のように物体に作用する外力が無視できるほど小さい場合がある。そのほかに軸受のガタやモーターの振動、熱変形がある。この外乱に対応するため、ステージの構造を強固に大型にしたり、上板の位置を精密に測定して複雑なフィードバック制御を行ったり、さまざまな外乱に対応するための多くの補償が行われている。

先に述べた高性能な精密位置決め／送り装置も、①−⑤の項目で整理分類すれば、そのステージの特性・長所短所を明らかにできるのではないかと考えている。

超極細、ピッチ40マイクロメートル

精密ステージ開発

図1、図2は著者が開発したマイクロピッチラックを用いた精密位置決めステージを示したもので、①ワイヤ放電加工で製作したピッチ120ミクロンメートル、長さ44ミリメートルのマイクロピッチラックを上板の下部に取り付け、これに噛み合うマイクロピッチ歯を弾性ヒンジに取り付けてある。②上板を平行な2本のリニアベアリングで支持し、③圧電素子の伸縮を弾性ヒンジで拡大し、圧電素子を順次伸縮させることでマイクロピッチ歯がマイクロピッチラックに尺取り虫方式で噛み合い、④ステージがマイクロピッチラックのピッチごとに移動・位置決めされる。⑤マイクロピッチラックとマイクロピッチ歯の多数の歯同士が噛み合うため、ラックのピッチ誤差が相殺され、上板の位置を測定することなく、オープンループ制御だけで、精密な位置決めを実現している。

このステージの研究は、現在、競輪とオートレースの振興法人であるJKAのRing！Ring！プロジェクトの研究補助を受け、線径が20ミクロンメートルの超極細ワイヤを用いたピッチ40ミクロンメートルのマイクロピッチラックとマイクロピッチ歯を製作している。そして、三角カム機構と変位縮小機構を複合させ、1台のステッピングモーターで三角カムを回転させることで尺取り虫駆動を実現し、上板を40ミクロンメートルずつ移動・位置決めできる小型コンパクトな精密ステージを開発している。

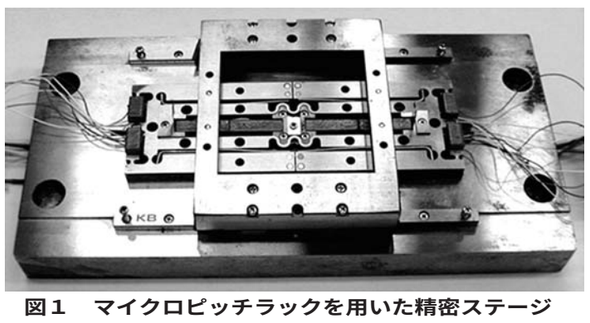
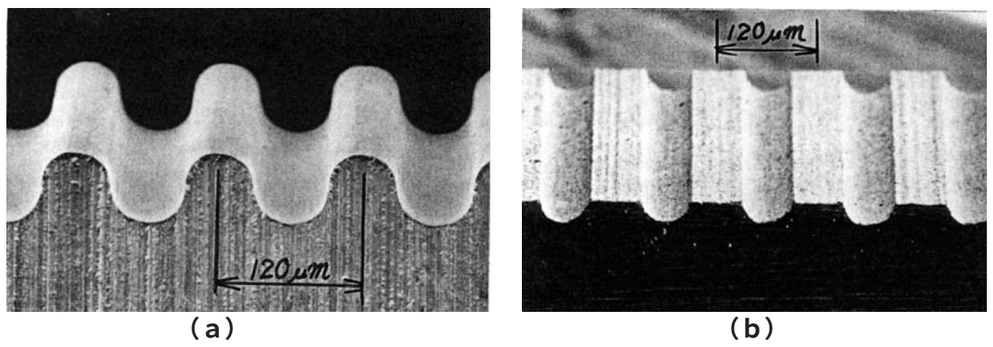


図1　マイクロピッチラックを用いた精密ステージ



（a）　（b）

図2（a）マイクロピッチラック（b）マイクロピッチ歯

工作機械産業