解 説

精密測定機の設計に関する幾つかの考察*

P. A. McKEOWN**

抄訳・広瀬藤司***

1. は し が き

製造工業での検査工程は品質管理の重要な機能であり、その目的は突発的な不良品の発生を防ぐことにある。検査能率を高めるには次のことが必要である。

- (1) 測定のスปีドと精度の向上。
- (2) 結果を記録するスปีドの向上。
- (3) 結果の分析、判定、処理のスปีドアップ。

複雑な部品の検査には測定スปีドの早い座標測定機が現在広く使用されている。また次のような品質管理の機能の実行には CNC 計測センタが適当である。

- (1) NC 工作機械の精度の確保。
- (2) マシニングセンタから作られる最初の部品の検査。
- (3) 多量生産部品に対して安定した精度でできる機能の確保。
- (4) 編集された制御テープで安定した機能の抽出監視。

部品の寸法精度に極めて正確な判定を下すためには、CNC 計測センタは部品を作る NC 工作機械の 5 倍、できれば 10 倍の立体的精度が必要である。

2. 測定機の精度の定義

現時点で単軸又は多軸機械の精度を分かりやすい方法で定義できる国家あるいは国際規格はない。一般に精度は非常に簡明な表示方法が求められている。

- (1) 変位精度の定義： 測定軸上の全移動量内の任意 2 点間の最大誤差
- (2) 平面的精度の定義： 一定の測定面積における任意 2 点間の最大誤差。誤差領域は円で表される。
- (3) 立体的精度の定義： 一定の体積の測定空間における任意 2 点間の最大誤差。誤差領域は球で表される。

3. 高精度機械の構造設計に関する考察

3.1 理想的な構造

基礎が動いても影響されないような堅牢さが必要である。3 本の調整足で支持し、その各々の足に機械質量の 1/3 ずつを支持していなくてはならない。その構造は、① 高い寸法安定度、② 弾性や熱に対する大きな剛性を示さなければならない。

3.2 高い構造上の幾何学的精度

キャリジを動かすとどんな機械でも無視できないたわみを生じる。高精度の機械ではこれがアップのオフセット誤差の原因となるから、何らかの方法で補正する必要がある。構造上のたわみに対して幾何学的な補正を行って高い変位精度や立体的精度を得るための設計上の原則を表 1 に示す。

原則 A の中ではキャリジが一直線上を動くように、案内面に補正の彎曲を与えることが試行錯誤的又はコンピュータ解析で行われる。後者の方法は以下の 4 項で概

表 1

	原 理	説 明
A	長期の寸法安定性をもった構造体に高精度の案内面や幾何学的構造を組込む。	慣習上安定化した鋳鉄の使用、手作業によるきざげとラッピングの技術が不可欠。現在では特に高精度の機械に使用する。
B	キャリジの動きの直線性(時には直角性)を最終組立調整時に案内面をゆがめて達成する。	現在いくつかの座標測定機に使用されている。A よりコストは低いが低精度。応力のかかった構造部材の長期の安定性に疑問がある。
C	動きの直線性を組込んだ真直度基準器との照合で自動的に案内面のはりをゆがめることで達成する。	SIP のジグボラに開発された、MIT/Moore のルーリングエンジンに利用。中程度のコストで極めて高い精度が得られる。
D	中程度の幾何学的構造と高い繰返し精度。高い立体的精度で校正されたデータを蓄積しコンピュータでフィードバックして達成するように構造体を設計、製作する。	小形及び中形のデジタルコンピュータのリアルタイム使用のコスト低下がこの原理の CNC 測定機への応用を興味あるものにした。1960 年代スベリランド社により先駆開発された。
E	不正確な構造であるが、精密な真直度と直角度の照合装置を持っている。立体的な測定範囲内のすべての点ですべての運動を監視するエラーセンサを使用して誤差修正がオンラインのコンピュータで行われる。	大形のコンピュータが必要とされるため高価である。米国 IBM 社により三次元測定機で実験的に研究が行われたが中止となった模様。

* 原稿受付 昭和 53 年 7 月 6 日。Some Aspects of the Design of High Precision Measuring Machines (第 23 回 CIRP 総会—1973 年 8 月 26 日～9 月 1 日、ユーゴスラビアにて発表)の要約。

** 精密工学に関する Cranfield チーム(Cranfield Institute of Technology, 英国)

*** 正 会 員 (株)三豊製作所(川崎市高津区坂戸 165)

図1 英国国防省の品質保証理事会の依頼で C. U. P. E. が設計した大形ゲージ測定機

述するが、費用のかかる手作業を大幅に減らすことができる。

4. 補正用彎曲予測のためのコンピュータによる構造解析

C. U. P. E. (精密工学のためのクランフィールドチーム) は英国国防省の品質保証理事会の依頼で、大きな受入れ用ゲージを検査するための機械の設計を完了し、製作中である。この機械の測定範囲は $3962\text{ mm} \times 1980\text{ mm} \times 762\text{ mm}$ で、その立体的精度は 0.05 mm である。図1はその完成予想図である。この機械は座標測定に関する英国の参照用機械になることであろう。補正用彎曲の解析技術はこの機械の設計、製作に非常に有効であった。

4.1 手法の応用と限界

1) この手法は弾性構造部材と分岐した片持ちはりの形態をした集合体の特性を予想するのに便利である。計算結果の精度は部材の特性評価の精度で決まるものである。

2) 合理的な特性評価がなされておれば、剛性と固有振動数は $\pm 10\%$ の精度で予測できる。

3) ダンピングの効果はこのプログラムにはないので完全なダイナミックな剛性の評価はできない。ただし6つの固有振動数に対する振動モードをプロットできるから、構造上の弱点を示す目安になる。

4.2 データの準備

1) 集中定数モデル: 解析の第1ステップは構造体

図2 構造体の集中定数モデル

を集中定数モデルで表すことである(図2)。

2) 構造体の数値的表現: 構造体の質量と剛性のデータをコンピュータに与えるために図3に示すように構造体を数個のエレメントに分割し、その各々について次の特性が計算される。

基準軸の方向、断面二次モーメント、弾性係数、ねじれ定数、剛性係数、断面積、密度、せん断定数

3) 計算の仕様: ベッド上5か所の位置にキャリジが移動した場合の各測定点の変位が全体の彎曲を予測するのに必要である。

4.3 コンピュータ出力

1) この手法は構造体のフレキシビリティの決定を基本としている。

2) 各エレメントは軸方向やねじれ方向のフレキシビ

図3 構造体の要素の分割

図4 門形はりのたわみと補正曲線

図5 ベッドのたわみと補正曲線

リティと同様に同じ二つの面内の曲げ方向とせん断方向のフレキシビリティをもっている。

3) 各々の座標軸に平行な測定点に働く力による各測定点のフレキシビリティは応力-エネルギー法で計算できる。これらは構造体全体に対してマトリクスで書かれる。

4) コンピュータの出力は2点間のフレキシビリティを6×6のマトリクス形式でプリントされる。これによって一つの点に加わる力によって生ずる各々の点の変位が計算できる。この手法は設計段階に使用するのに非常に適しており、最も有力な手段となり得る。

4.4 フレキシビリティ計算の応用

1) この特別の計算の結果、ベッド及び門形フレームの静的剛性はある程度予測される。しかし門形はりの水平方向のたわみはこれに直接作用する水平方向の力と同様に、ベッドのVみぞ案内面にかかる垂直方向の力に大きく影響されていることが分かった。

2) キャリジの色々な位置に対する案内面の変位は出力データおよび図4、図5から計算される。

3) 門形はりに適用される補正曲線は簡単にグラフから決定できるが、ベッドに適用される補正曲線は図5の曲線の補間によって求めなければならない。

4) 高精度の機械の構造を検討するのにこの方法を使

用すると明らかに次のような二つの利点がある。

- (1) 色々な設計案と比較する時や最良なものに近づけて行く場合の有益な助けとなる。
- (2) 重いキャリジが高い直線性の動きをすることを保証するために適切な補正曲線を予想できる。

4.5 効果——予想された性能と実際との比較

以上の手法で得られた補正曲線をベッドのV形案内面と門形はりの案内面に手作業でラップ加工が行われた結果、各軸の上下動、左右動、ローリングは目標値の約半分となった。

5. スケール誤差の補正

1) 変位精度は各種の高精度の検出器によって達成できる。C. U. P. E. の三次元測定機は1μm読みの光学格子がコスト、長期の

信頼性、精度の面でレーザ干渉計に優先して選定された。

2) X及びY軸に対しては平均の作業高と移動量の中央で最大精度が得られるようにカム調整機構が採用された。光学格子検出ヘッドはX軸に対して100μmの範囲内で平行に変位できるように平行ばねに取付けられている。

3) 平均作業高での変位精度曲線は小形のコンピュータに接続されたプロッタで自動的に描き出される。これは光学格子の誤差だけでなく、アップのオフセット誤差も補正するような調整カムの外形が描かれている。

4) 経験的にこの単純な機構—1865年ジュネーブのMarc Thuryによって直線目盛機用に開発されたねじ調整機構の延長であるが—により校正用レーザ干渉計の程度に近い変位精度が非常に低コストと高い信頼度で達成できることが分かった。

6. 結 論

多軸測定機で高い変位精度や立体的精度を達成するための設計、製作について幾つかの考察を行った。ここで述べた定義や技術は工作機械の開発に特に有効に利用できるものと思われる。