



技術情報

工作機械の加工精度

工作機械の生産性と精度は競合上重要な観点である。しかしながら、急速に変化している工作機械の動作条件は生産性と精度の両方の向上に対して困難な状況になってきている。部品製造では、小さいバッチサイズが増えており、これを経済的にまた高精度に製造せねばならない。航空機産業においては、後工程の仕上げ加工は最高の精度で実行されねばならないのに対して、前工程の粗加工では最大の加工能力が必要とされている。高品質の金型のミーリングに対しては、粗加工で高い材料除去率が要求され、さらに仕上げ加工では高い表面の品質が得られなければならない。それと同時に、最小加工パス間隔でかつ許容される時間内で加工するために最大の輪郭加工速度が必要とされる。

大きく変化する動作条件を考慮すると、工作機械の熱に対する精度はその重要性が増してきている。特に、小さいバッチの製造では、頻繁に加工作業が変わり、定常温度状態に達することができない。それと同時に、利益性を求めるためには、最初の加工部品の精度が非常に重要になってくる。ドリル加工、粗加工、仕上げ加工間の頻繁な作業変更は工作機械の温度状態を不安定にする。粗加工においては、ミーリングの比率は80%以上に達する一方、仕上げ加工においては10%以下である。高加速度および高い送り速度の運転が増えつつあり、これらは直動機構のボールねじの加熱をもたらす。それゆえ送り駆動における位置測定は工作機械の熱の作用を安定化するための中心的役割を果たしている。本報告ではエンコーダメーカーからの一つのソリューションとして、高い加工精度を保つための技術的提案を行う。

工作機械の熱安定性

加工部品の熱による寸法偏差の発生を避ける解決策は、工作機械製造産業にとって、より重大になってきている。積極的な冷却、対称的に設計された機械構造および温度測定はすでに一般的な手段となっている。

温度ドリフトは主として送り軸のボールねじに起因している。ボールねじに沿った温度の分布は、送り速度と駆動力により敏感に変化する。リニアエンコーダを使用しない工作機械では、結果として生じる長さ変化(典型的には $100 \mu\text{m}/\text{m}$ 20分以内)は加工部品に重大な欠陥をもたらす。

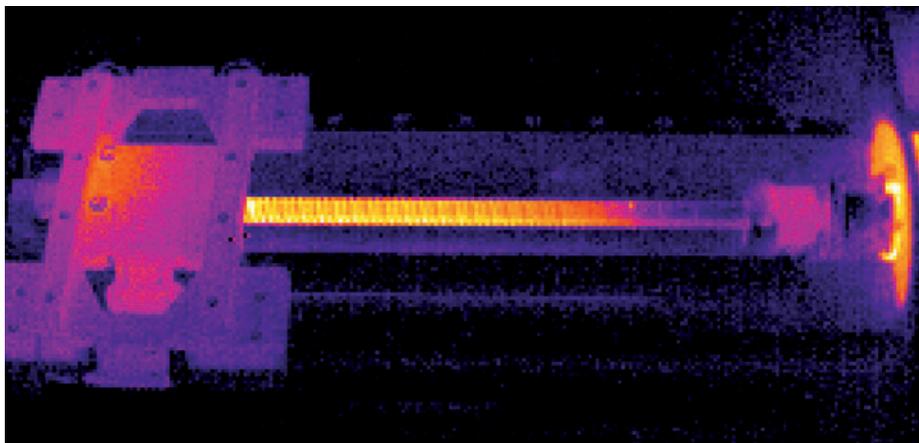


図1 平均送り速度10 m/minのマルチパスミーリング時のボールねじの加熱状況。サーモグラフ写真は25℃から40℃の温度分布を示している。

送り駆動における位置測定

NC 送り軸の位置は概ねボールねじとロータリエンコーダの組合せ、あるいはリニアエンコーダにより測定される。

もし、スライド位置が送りねじリードとロータリエンコーダにより決定される場合(図2-上)、ボールねじは2つの役割を果たさねばならない。すなわち駆動システムとして、大きな力を伝達しなければならない一方、測定装置として高精度な値とねじリードの再現性を要求される。ところが、位置制御ループはロータリエンコーダのみしか含んでいない(ボールねじから先の機械系を含んでいない)ので、摩擦や温度による駆動機構の変化は補正できない。これはセミクローズドループ動作と呼ばれている。この駆動の位置誤差は避けがたく、加工部品の品質に少なからぬ影響を及ぼす。

もし、スライド位置の測定にリニアエンコーダが使用される場合(図2-下)、位置制御ループは送り機構全体を含む。それゆえ、これはフルクローズドループ動作と呼ばれており、機械の伝達要素の遊びや不正確さは位置測定の精度に影響を及ぼさない。測定精度はほぼリニアエンコーダの精度と取付け位置のみに依存する。

この基本的な考え方は、リニア軸と回転軸の両方に適用されており、回転軸ではモータ軸に速度原則機構を介して結合したロータリエンコーダあるいは機械軸に取付けた高精度な角度エンコーダ(ここでは、精度が数秒以下の高精度なロータリエンコーダを角度エンコーダと称している)により位置を測定する。角度エンコーダを用いた場合、極めて高精度でかつ高い再現性が得られる。

セミクローズドループ運転に対する付加的対策

ボールねじや機械周辺のパーツ類の加熱を防ぐ目的で、冷却油を循環させるためにボールねじ軸芯に貫通穴を設けるケースがある。セミクローズ運転の場合、位置精度はボールねじの熱膨張に影響され、従って冷却液の温度に依存する。温度がわずかに1K上昇しただけで長さ1mの移動範囲で10 μ mの位置決め誤差が発生する。しかしながら、一般の冷却システムでは、1Kを十分下回る温度ばらつき以内に制限するのは大変困難である。セミクローズドループ駆動において、ボールねじの熱膨張は、時には制御モデルを用いて近似される。

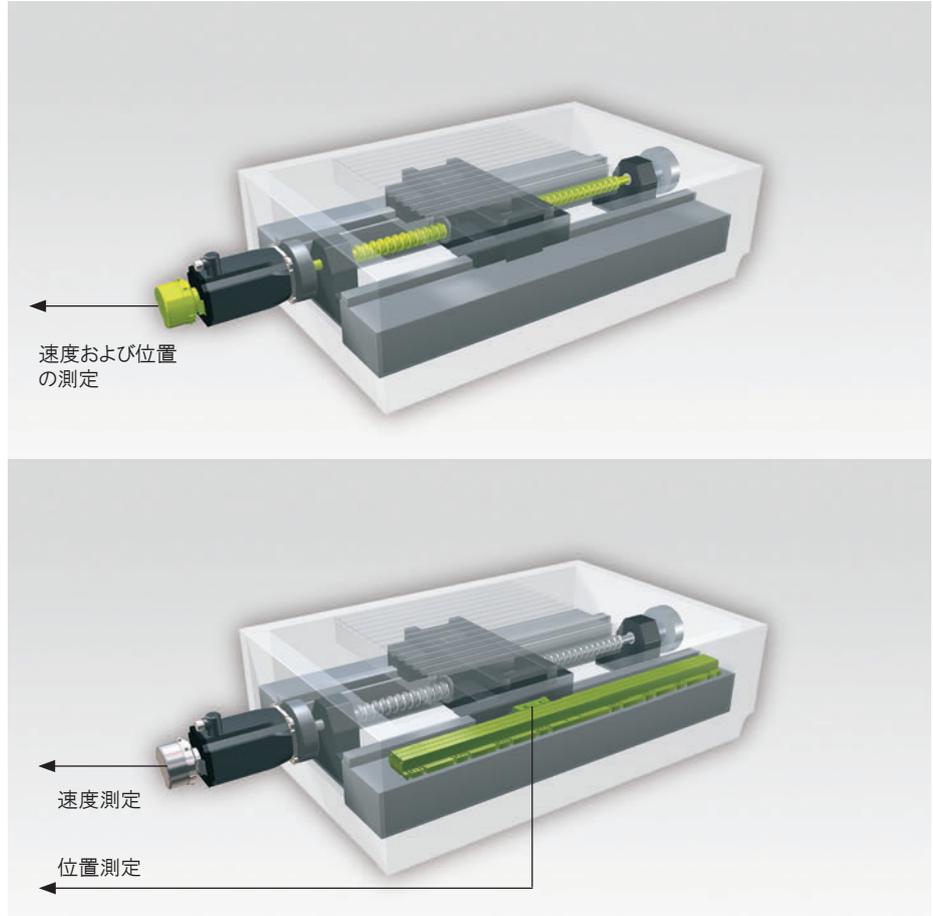


図2 セミクローズドループモード(上)およびフルクローズドループモード(下)による位置フィードバック制御

しかし、温度の特性は運転中に測定するのが難しく、また例えば、循環ボール・ナットの摩擦、送り速度、切削力、使用されている移動区間等々による多くの要因に影響され、この制御モデルが適用される場合でも、無視できない50 μ m/mの誤差が発生し得る。ボールねじは駆動機構の剛性を高めるためしばしば両端を固定軸受けにより支持される。

しかし、非常に高剛性に設計された軸受けであっても局所的な熱の発生による膨張は防ぐことはできない。発生する力は相当な大きさになり、もっとも剛性の高い軸受け構成部分をも

変化させ、さらに機械幾何特性を歪ませる。機械応力はまた駆動系の摩擦の挙動を変化させ、機械の輪郭精度に悪い影響を与える。

これらの制約により、上記の付加対策により得られる駆動精度はリニアエンコーダを用いたフルクローズドループ運転並みの精度には達し得ない。そしてなお、セミクローズドループ運転の付加対策では摩擦による軸受与圧の変化や駆動機構の弾性変化の影響を補正することはできない。

部品加工における駆動精度の影響

機械製造業では、小さな部品を少量生産する要求が著しく増えてきているので、最初に加工する部品の精度が製造業の利益にとって非常に重要になる。工作機械は小さなバッチサイズを高精度生産するという現実に直面している。頻繁な加工素材のセッティング、ドリル加工、粗加工、仕上げ加工などの変更により、機械の熱的狀態が絶えず変化する。

仕上げ加工では 0.5 m/min から 1 m/min の送り速度が使用されるのに対し、一般的な粗加工の送り速度は 3 m/min から 4 m/min の範囲である。また、工具交換時の早送り運動は、平均送り速度をかなり増加させる。ドリル加工やリーマ加工時の速度はそれほど速くなく、ボールねじの温度上昇にはほとんど影響しない。大幅に送り速度が変化することにより、個々の工程で、ボールねじに沿って温度分布が変化する。したがって、セミクローズドループ運転では、たとえ、ある一つの加工工程で、完璧な加工がされたとしても、ボールねじ機構にかかる負荷が変化すると加工部品としての精度を損なわせてしまう。それゆえ、小さな部品の高精度加工にはリニアエンコーダ付のフルクローズドループ運転の工作機械が必要とされる。

1本の素材から複数の部品を加工する例

この例では、長さ 500 mm のアルミ素材は工作機械により、最初にドリル加工された後リーマ加工される。この 2 つの加工作業では送り速度は中程度で、従ってボールねじの熱発生は無視できる程度である。次の製造工程では、送り速度を大きく上昇させて輪郭部がミーリングされる。その結果ボールねじ機構に多量の発熱がもたらされる。(図 3)

もし、ミーリング加工機がセミクローズドモードで運転される場合、ボールねじの熱膨張により、ドリル加工部形状とミーリング部加工形状に偏差が生じる。ボールねじの一端がスラスト方向にほぼ自由に支持されている場合、最大 135 μm の偏差が測定された。フルクローズドループ運転においては、これらの誤差は完全に除去されている。(図 4)

イラストで示すサンプルでは、穴の位置と個々のミーリング加工面を横切る線の間の寸法は 12 mm で、その公差等級は IT8 を満たさねばならない。この場合許容される偏差は $\pm 13 \mu\text{m}$ である。フルクローズドループモードで加工された部品は十分この公差に入っているが、セミクローズドループモードの場合は偏差が 135 μm に達していることが測定され、この場合加工部品は要求公差 IT8 に対し、ようやく IT13 を満たす程度である。

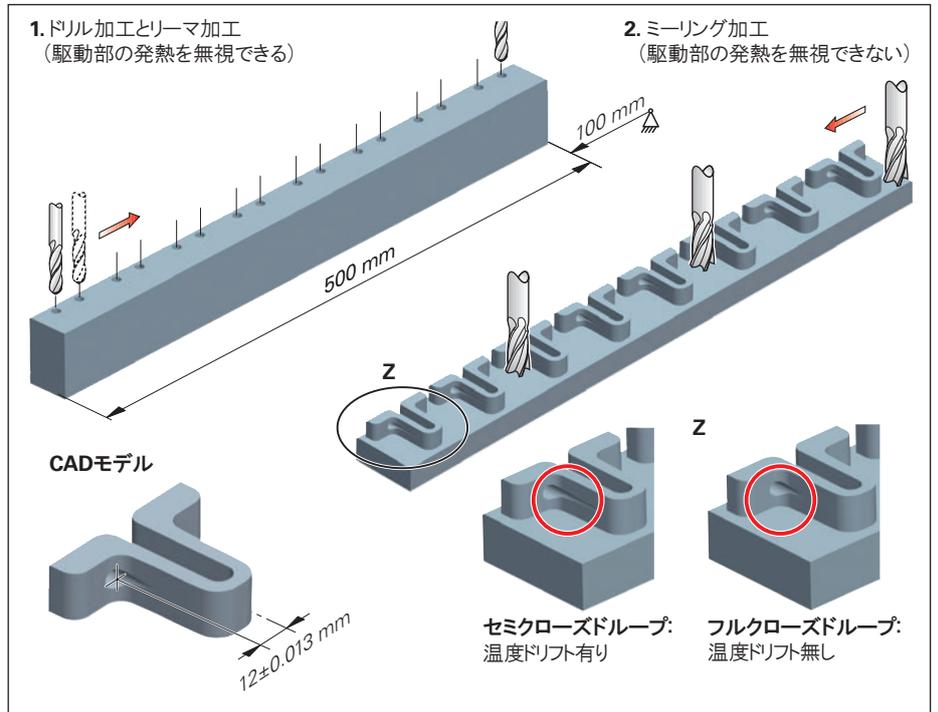


図 3 小型部品生産における駆動精度の影響
▲ = ボールねじ軸受け固定点

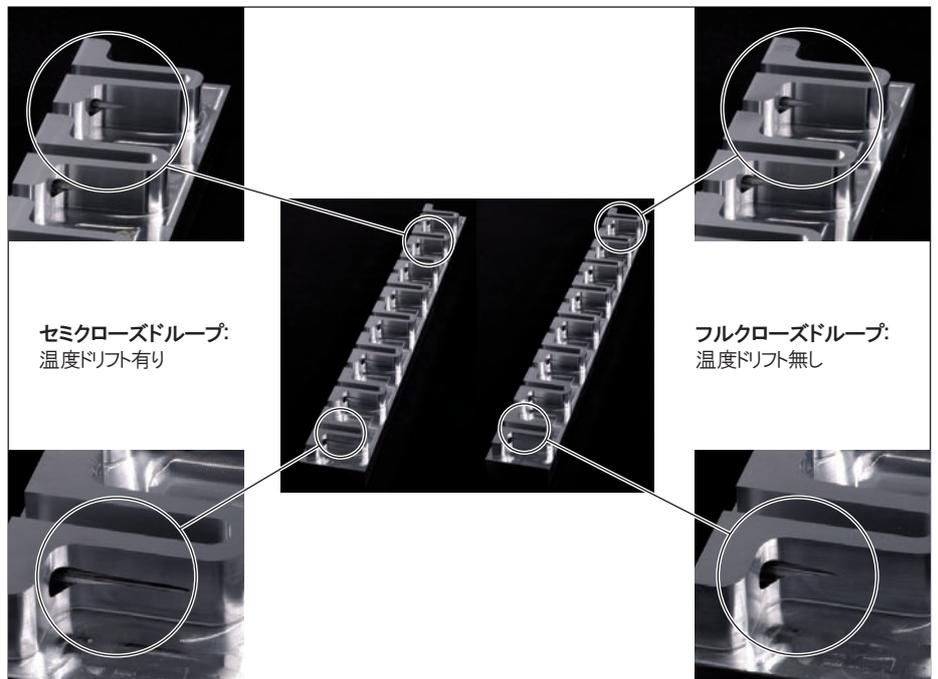


図 4 小型部品の連続生産における駆動精度の影響

航空機産業対応の高除去率加工の一体化部品

航空機産業では一体化部品を使うことは、材料の特性を最小の重量で最適化できる利点がある。典型的な一体化部品では、材料除去率は95%あるいはそれ以上である。今日の高効率の高速加工工作機械は加工工程において、高速送りかつ高速切削速度で使用されている。粗加工において部材を大量に除去する高い材料除去率は経済的に大変重要である。しかしながら、その時の送り速度や切削力は、ボールねじに多量の摩擦熱を発生させる。その上、摩擦損とその結果として生じるボールねじの温度による膨張は加工プロセス中に、たとえば粗加工と仕上げ加工の速度の違いによっても変化する。

送り駆動装置がセミクローズドループモード(リニアエンコーダ無し)で運転される場合、短時間加工サイクルでの少量生産においても加工部品ごとに寸法が異なってくる。

熱膨張により、指定された加工公差を実現できない可能性がある。熱膨張はフルクローズドループ運転により完全に補正できるので、これらの要因による誤差は、リニアエンコーダの使用により防ぐことができる。

尾翼レバーの加工例

図5は、350 mmの距離にある両端の2つの穴の公差がIT7である必要がある結合レバーの加工結果を示している。セミクローズドループモードで、許容精度を達成するには、駆動機構部の熱の影響を確認するために、一体化部品の同じ素材部分を2度加工して評価する必要がある。

今回の例では、2度目の加工は、1度目との間に工具を加工部に接触させず20回の空運転サイクルを実行後、Z軸を10 mm下げて加工した。

セミクローズドループ運転では、図6のへりの部分に示されるように、2度目の加工の輪郭と1度目の加工の輪郭に偏差が発生する。ボールねじの固定軸受けから遠いところで加工するほど、ボールねじの熱膨張はより顕著になる。寸法350 mmの公差IT7は $\pm 28 \mu\text{m}$ に対応するが、セミクローズドループモードでの2度目の加工はこの要求を満たせず、 $44 \mu\text{m}$ であった。リニアエンコーダを用いたフルクローズドループモードでは、へりの部分に偏差は生じていない。

フルクローズドループ運転では $10 \mu\text{m}$ の偏差が発生したが、これは熱による機械の幾何特性のひずみが原因である。しかし、指定された2つの穴間寸法はIT5に改善することができた。従って、再現精度は最初の部品から保証することが可能となる。

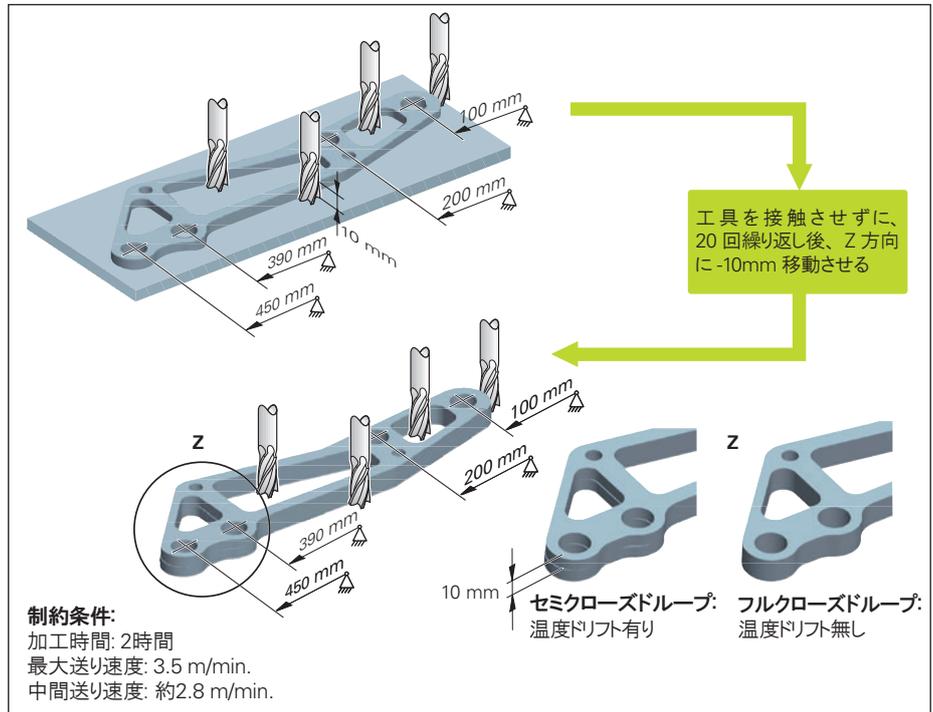


図5 結合レバーの製作
△ = ボールねじ軸受け固定点



図6 結合レバー:同じ形状を2度加工した例

金型製作における効果

射出成形やダイカスト用の金型の製作は、時に非常に微細な構造で極めて滑らかな仕上面を必要とするため、非常に時間を要する仕事である。今日の多くの金型はコストと時間を考慮して、直接ミーリングにより加工されており、直径 0.12 mm クラスの小径エンドミルの使用が増加している。以上のように、ミーリングによる金型製作では、高度な寸法精度が要求されるのが特徴であるが、さらに、高硬度材への対応を含め、加工時間を短縮するための速い送り速度が要求される。

代表的な金型の加工時間は 10 分から数日に渡っている。また、高速加工においても、寸法精度が犠牲にはならない。さらに、複雑な部品の再加工時に、それまで費やした時間を無駄にしないためには、最初の加工パスと最後の加工パスが同一でなければならない。送り軸のボールねじの熱は実質上 NC プログラムで指定される各軸の速度特性に依存し、ボールねじ上で 150 $\mu\text{m}/\text{m}$ の変化をもたらす。

これらの条件では、セミクロード運転で寸法精度を保証するのは不可能である。ボールねじの代表的な発熱により、わずか 150 mm 長さの金型の端面に 20 μm を超える偏差が発生する。ボールねじの膨張は金型の半数に再加工による不具合修正ができなくなるような影響をもたらす。

3次元自由形状面のミーリング例

以下の例は Watzmann - ドイツアルプスの伝説的な山 - のプロファイルの金型加工を示している。500mm 長の加工部品は直径 12 mm のボールエンドミルを用い、最高 4.5 m/min の送り速度で、X 軸の登り方向にアップカットミーリングサイクル加工されている。この輪郭加工は Z 方向切り込みおよび Y 方向ピックフィードは共に 0.2 mm で、およそ 60 分を要している。頻繁な加減速を伴う 4.5 m/min の高速送りは、ボールねじに熱を発生させ、セミクロード運転において 130 μm の直線偏差 (X 方向偏差) をもたらしている。この金型部品の直線偏差を視覚化するのは難しいので、加工部品の中央から加工を始め、一旦手前に戻ってから中央部に向かって残りの半分を加工した。すなわち、加工開始点と加工終了点が隣り合うようにすることで、温度ドリフトを明確に示している。

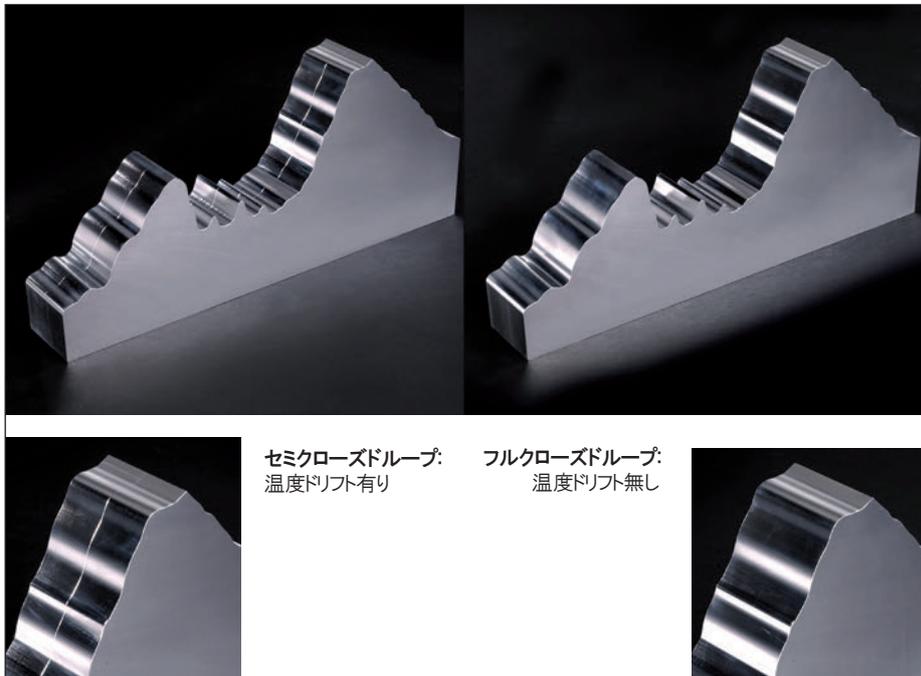


図 7 自由形状面を持つWatzmann形状

加工部品の位置がボールねじ固定軸受けから遠ければ遠いほど、温度ドリフトは大きくなる。

金型製造における高度な要求を満たすためには、高精度なリニアエンコーダによりボールねじの伸びを補正することが必要となる。図 7 は、フルクロードドループモードで加工された良好な仕上げ面を持つ高精度な加工部品をセミクロードドループモードと比較して示している。

まとめ

製造要求を十分に満たすには工作機械に高い温度安定性が要求され、機械精度は大きく変わる負荷条件でも維持されねばならない。つまり、送り軸は大きく変化する送り速度や切削力においても全移動範囲にわたり、要求精度を満たさねばならない。直動軸のボールねじの熱膨張は送り速度と負荷に依存し、精度に悪い影響を与える。ロータリエンコーダとボールねじのリードによってスライド位置が決定される場合、20 分の加工作業で、100 μm あるいはそれ以上の位置誤差が発生する。この制御法が用いられる場合、基本的な駆動誤差は補正することができない。この制御は送り駆動のセミクロードドループ運転と呼ばれている。

上記の誤差はリニアエンコーダを使用することにより、完全に取り除かれる。リニアエンコーダを用いた送り装置はフルクロードドループモードで運転されるので、ボールねじに発生する位置誤差は位置制御ループにより補正される。ロータリ機械駆動要素もまた熱膨張の影響を受けるので、ロータリ軸に使用される角度エンコーダも同様な利点を提供することができる。以上のように、リニアおよび角度エンコーダは工作機械が大きく変化する運転条件においても加工部品精度を保証することができる。

工作機械用リニアエンコーダ

位置フィードバック用リニアエンコーダは工作機械の高精度位置決めにとって欠くことができません。これらのエンコーダは送り軸の実際の位置を検出しますので、機械の伝達要素は位置検出に影響を及ぼしません。ここでは、運動誤差および熱の影響あるいは他の力による偏差はリニアエンコーダにより検出され、位置制御ループにより考慮・補正されます。したがって、これにより下記の種々の誤差を除去することができます。

- ボールねじの温度特性による位置決め誤差
- 方向反転誤差
- 加工反力に基づく駆動機構の変形による誤差
- ボールねじのリード誤差による運動誤差

以上のように、リニアエンコーダは**高精度位置決め**と**高速加工**を必要とする工作機械にとって不可欠です。

数値制御工作機械用のハイデンハインエンコーダは多くの場所で使用されています。これらのエンコーダは送り軸がフルクローズドループ構成である機械や装置、例えばミーリング加工機、マシニングセンタ、中ぐり盤、旋盤およびグライディングセンタなどにとって理想的です。

これらのリニアエンコーダの優れたダイナミック特性 – 高い信頼の高速送りと高加速度性能 – はダイレクトドライブと同様に高応答の従来型送り機構への使用においても重要な役割を果たします。

	精度等級	信号周期	測定長	インターフェース	モデル
小型ハウジングタイプのシールドリニアエンコーダ					
アブソリュート	± 5 μm; ± 3 μm	–	2040 mmまで ¹⁾	EnDat 2.2	LC 415
インクリメンタル	± 5 μm; ± 3 μm	4 μm	1220 mmまで	〜 1 Vpp	LF 485
	± 5 μm; ± 3 μm	20 μm	2040 mmまで ¹⁾	〜 1 Vpp	LS 487
標準型ハウジングタイプのシールドリニアエンコーダ					
アブソリュート	± 5 μm; ± 3 μm	–	4240 mmまで	EnDat 2.2	LC 115
	± 5 μm	–	28 040 mmまで	EnDat 2.2	LC 211
インクリメンタル	± 3 μm; ± 2 μm	4 μm	3040 mmまで	〜 1 Vpp	LF 185
	± 5 μm; ± 3 μm	20 μm	3040 mmまで	〜 1 Vpp	LS 187
	± 5 μm	40 μm	30 040 mmまで	〜 1 Vpp	LB 382

¹⁾ 1240 mmを超える測定長はマウンティングスパーが必要



LC 415



LC 115



LC 211

参考情報

- カタログ: NC工作機械向けリニアエンコーダ
- 技術情報: 送り軸の精度

ハイデンハイン株式会社

<http://www.heidenhain.co.jp>

本社

〒102-0083
東京都千代田区麹町3-2
ヒューリック麹町ビル9F
☎ (03) 3234-7781
FAX (03) 3262-2539

名古屋営業所

〒460-0002
名古屋市中区丸の内3-23-20
HF桜通ビルディング10F
☎ (052) 959-4677
FAX (052) 962-1381

大阪営業所

〒532-0011
大阪府淀川区西中島6-1-1
新大阪プライムタワー16F
☎ (06) 6885-3501
FAX (06) 6885-3502

九州営業所

〒802-0005
北九州市小倉北区堺町1-2-16
十八銀行第一生命共同ビルディング6F
☎ (093) 511-6696
FAX (093) 551-1617