

技術情報

直線軸のサーボモータに搭載されているロータリエンコーダ： 切削加工ワーク表面品質への影響

工作機械業界での数多くの領域、特に金型加工においては、厳しい公差管理と傷のない加工表面を持ったワークを作ることが目標となります。このようなことを、しかも可能な限り短い時間で達成することは、非常に大きな挑戦です。金型加工では、粗加工時には多量の切削加工を行い、その後続く仕上げ工程では高い表面品質に加工することが要求されます（図 1）。フライス加工された表面品質が高い場合のみ、例えば手作業による研磨といったコストのかかる後工程を回避することができます。

工作機械の機構に加えて、制御装置、使用される工具、駆動軸の計測技術といったものが高品位のフライス加工にとって極めて重要です。とりわけ、0.5 mm ~ 5 mm の範囲のうねり長さでワーク表面に転写された周期的な表面の傷は人間の目に見えるものなので、特に金型加工では厄介な現象となります。それ以外に考えられる誤差要因の中でも、その駆動軸に使用されているエンコーダの内挿誤差が主な原因となり得ます。最高精度のリニアエンコーダを使うことの他に、内挿誤差が極めて小さいロータリエンコーダを直線送り軸に使用することが、高いワーク表面品質を実現するために決定的に重要です。



目に見えるワーク表面の傷が発生する原因

内挿誤差とその影響

目立つワーク表面の傷

人間の目は、構造的な変化や、どんなに小さなワーク表面の傷も敏感に感知します。例えば、最大 500 万画素のモニターで、1 画素のドット抜けを瞬時に見つけます。人間の目は周期的な表面傷に対して、さらに敏感であるといえます。

特に金型加工では、周期的なワーク表面の傷が妨げとなり、高い費用をかけて再加工をすることになります。ワーク表面の傷は、部品表面上の陰影や光の揺らぎと比べてもよりはっきりと見えます。これらは、以下の例が原因であると考えられます。

- 機械振動による機械加工プロセスへの妨げ (I1 参照)
- 軸に使用しているエンコーダの内挿誤差 (I2 参照)

信号偏差による内挿誤差

一般的に最近の工作機械に搭載されているエンコーダでは、主に以下 2 つの成分から送り軸の位置を構成します。

- アブソリュート成分：電源投入直後の送り軸の位置情報について、限定的であり精度が高くないもの入手
- インクリメンタル成分：位相差が 90° の 2 個の正弦波 (A 相と B 相) を出力

必要な分解能を得るためには内挿分割の方法を用いて、周期的なアナログ信号 A 相と B 相をさらに細かく分割します。それらの 2 つの正弦波信号の出力が理想的な波形であり、お互いの位相差が正確に 90° にある限りは、この内挿分割処理による誤差はありません。これら正弦波の波形偏差は走査信号の各周期 (信号周期) 内で、同じ繰り返し性を持った誤差を発生させます。すなわち、これが内挿誤差と呼ばれています (図 2)。

内挿誤差の大きさを決定づける要因としては次のようなものがあります。

- 信号周期の大きさ
- 目盛の均質性と目盛パターンの正確さ
- 走査信号の光学フィルタ構造の品質
- 信号検出部の特性、そして
- その後のアナログ信号処理回路での信号安定性と動特性

内挿誤差の影響

金型加工業界では、ますます複雑な形状のワークが要求されています。5 軸加工では、すべての軸動作を組合せた動きが一般的です。複数の NC 制御軸での内挿補間により傾斜面またはカーブのある面を加工する際には、ワーク表面上の内挿誤差を直接見るができます。

これは、わずかに角度がついた傾斜面を加工する際には特に顕著に現れます。エンコーダ (例えば Z 方向) の内挿誤差は、傾斜したワーク平面上への投影として目で見えるようになります (図 3)。この傾きが原因となり、工具経路には信号周期の n 倍に拡大されたものが現れます。Z 方向の軸が 1 信号周期だけ動く間に、X 軸は n 回以上の信号周期分移動します。傾斜したワークの表面に、Z 軸エンコーダの信号周期の n 倍に対応したうねり波長を持った波状模様が現れます。一般的に、 $0.5 \text{ mm} \sim 5 \text{ mm}$ のうねり波長は人間の目には特に良く見えるものです。

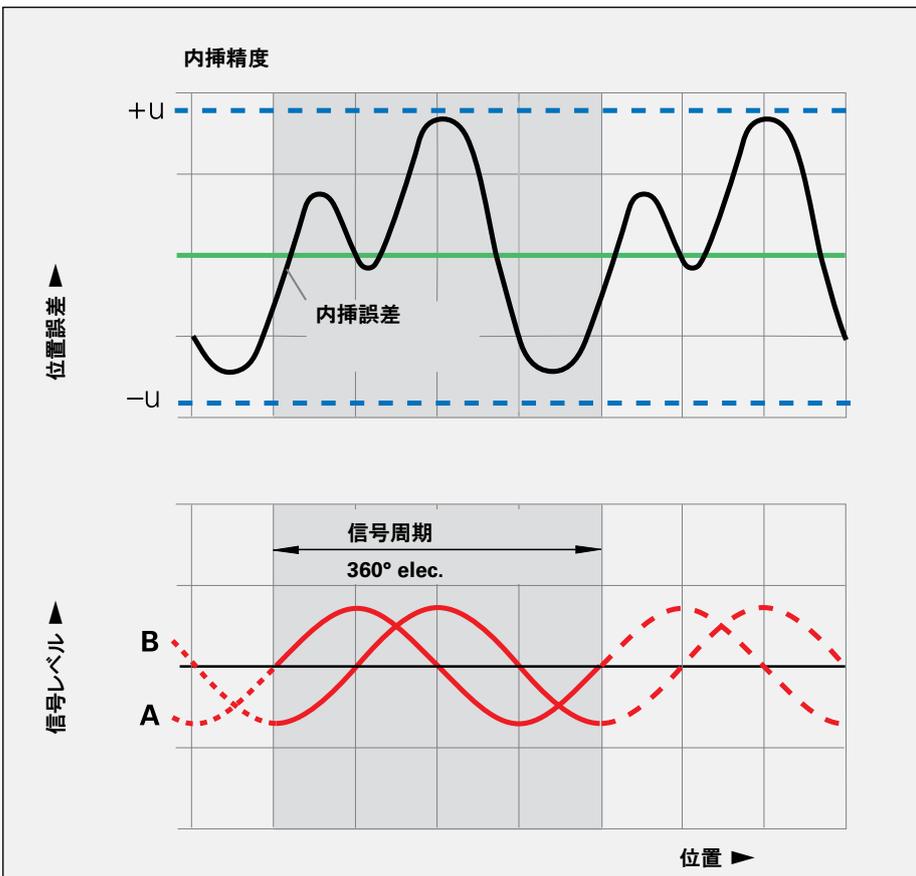


図 2:1 信号周期内の位置誤差(内挿誤差)

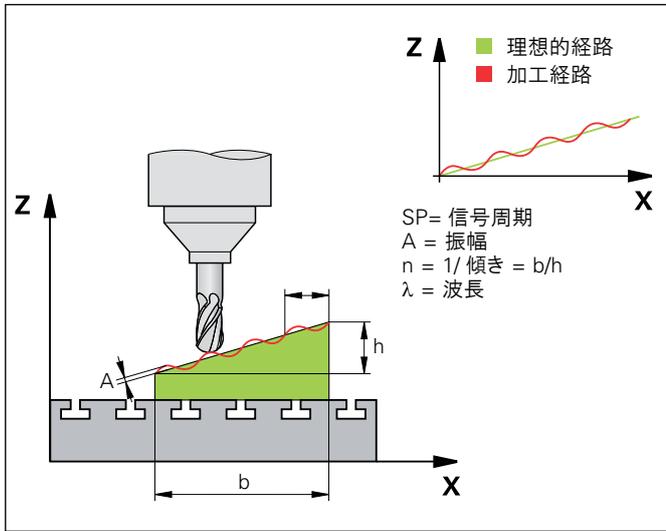


図 3: 傾斜での内挿誤差

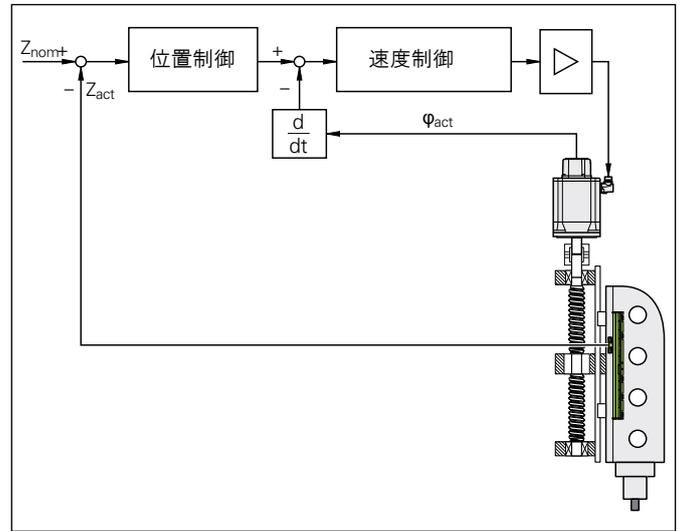


図 4: 送り軸のシステム略図

送り軸での位置と速度の測定

図 4 は、サーボモータ、ボールねじ、主軸、および軸の計測技術によって構成されたサーボ制御の送り軸の基本設計を示しています。スピンドル軸の位置はリニアエンコーダによって計測され、実際の位置の値としてその軸の位置制御ループに戻されます。ロータリエンコーダは、第 2 の位置の値を計測するエンコーダとして送り軸のサーボモータに搭載され、モータ回転軸の角度測定に用いられます。このロータリエンコーダからの信号は実際の速度を決定するために使用されています。

参考資料 [2] には内挿誤差の振幅が $\pm 200 \text{ nm}$ のリニアエンコーダによる加工試験結果が示されており、ワーク表面の傷があるために内挿誤差が見てわかるようになっています。比較のためにハイデンハインのリニアエンコーダ LC 100 が使用されており、内挿誤差が $\pm 100 \text{ nm}$ よりも極めて小さいため、ワーク表面のうねりを見ることはできません。

以下に概略を示す試験で使用した工作機械は、ハイデンハイン製のリニアエンコーダ LC 483 を全直線軸で使用しています。これらのリニアエンコーダの内挿誤差も $\pm 100 \text{ nm}$ より極めて小さく、目に見える表面うねりがないことが期待されます。この原理は、以下の観測と、ワーク平面上の表面の傷についてロータリエンコーダの内挿誤差が与える影響についての説明が基礎となっています。

一般的なロータリエンコーダの内挿誤差は 1 信号周期内のショートレンジの角度誤差に対応します。必要としている加工ワークの形状精度と表面精度を実現するためには、通常は高い形状精度を持った工作機械を使用します。機械剛性が高く、またバックラッシュのない送り軸については、ロータリエンコーダの内挿誤差はボールねじの運動によって直線誤差に変換されます。これは特定のロータリエンコーダの内挿誤差の大きさから、そして以下で指定しているその他条件下で、表面の傷を予想できるということを意味します。

スケール上を移動する周期的な繰り返し誤差を持つエンコーダヘッドが、送り速度を増加させて行くと、繰り返し誤差の周波数が高くなります。それゆえ、内挿誤差の周波数は送り速度に依存します。位置制御ループと速度制御ループ内のカットオフ周波数（周波数帯域幅）が異なるため、送り速度に応じた工具先端点の角度変化に対してのエンコーダ内挿誤差が目立つようになります。送り速度が低い（内挿誤差の周波数が低い）場合、ロータリエンコーダの内挿誤差は位置制御装置によって修正されます。仮にロータリエンコーダの内挿誤差が位置制御ループのカットオフ周波数を超えている場合（高い送り速度）には、修正を行うことができません。工具先端点における内挿誤差が大きく現れることが予測されます。

内挿誤差に影響する要因

送り速度と位置制御 / 速度制御の周波数帯域幅

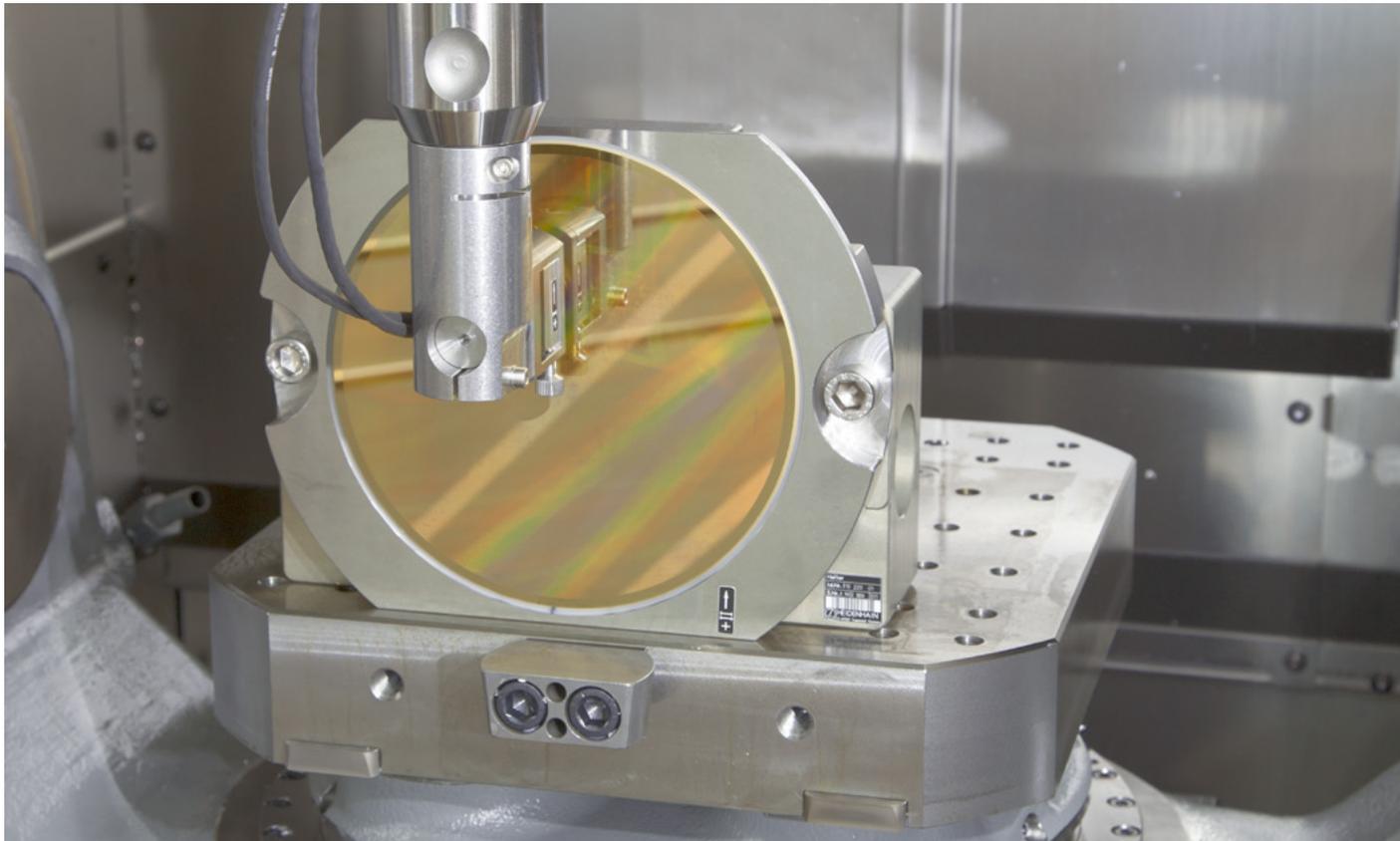


図 5: グリッドエンコーダ KGM 181 による測定試験セットアップ

グリッドエンコーダによる試験セットアップ

加工工程による影響と工具先端点の動作の影響を切り分けることを可能とするために、機械加工の前にハイデンハインのグリッドエンコーダ KGM 181 を用いて、輪郭運動偏差を測定します。グリッドエンコーダにより、送り軸 2 軸から構成される平面内において工具先端点と加工テーブルとの間の輪郭運動誤差を非接触にて測定することが可能となります。図 5 は試験セットアップを示しています。この試験はハイエンドの金型加工機で実施しました。

測定した平面は、工作機械の X 軸と Z 軸によって構成されています。Z 軸のサーボモータはボールねじのスピンドルに直接接続され、駆動系にはボールねじ以外のその他の伝達系部品が搭載されていません。ボールねじのピッチは $P = 20 \text{ mm}$ です。

機械の Z 軸は、実験での観測結果に関連しています。この試験のために Z 軸に搭載するロータリエンコーダを変更しています。取付け互換性があり、目盛線本数が 2048 本の、2 つのハイエンドのロータリエンコーダを使用しました。ロータリエンコーダ 1 の内挿誤差の大きさはロータリエンコーダ 2 の 3 倍以上です。

上述の通り、ロータリエンコーダの内挿誤差はボールねじを経由して直線誤差に変換されます。直線運動での信号周期は、ボールねじのピッチとエンコーダの目盛線本数で計算されます。

$$SP_{RElin} = \frac{P}{LC} = \frac{20 \text{ mm}}{2048} \approx 9.8 \mu\text{m} \text{ (数式 1)}$$

加工されるワークについては、グリッド測定時の移動経路 $b = 60 \text{ mm}$ 、 $h = 0.4 \text{ mm}$ と定義しています。これらのパラメータは、3 ページの図 3 に規定された計算式からのうねり波長の計算結果から得られますが、 SP_{RElin} と、 $\lambda = 0.5 \text{ mm} \sim 5 \text{ mm}$ の周期的な誤差による人間の目の感度について考慮されています。

このように内挿誤差が大きいことによって、 $9.8 \mu\text{m}$ の信号周期で $\lambda \approx 1.5 \text{ mm}$ の輪郭偏差を発生させます。

測定結果による相関性の確認

図 6 は、2 種類の輪郭速度をロータリエンコーダ 1 と共に使用した際の測定結果を示しています。一般的に低速 (500 mm/min) は、カッター径の小さい工具 (例、 $\varnothing 6 \text{ mm}$) でスチールを加工する時の速度で、高速 (4000 mm/min) は、アルミ加工に使用する速度です。

送り速度 4000 mm/min における運動誤差の軌跡には、Z 方向に波型の輪郭偏差が発生していることが見受けられます。この観測部分を拡大することにより、約 1.5 mm のうねり波長が確認できます。これは、Z 軸のサーボモータに搭載したロータリエンコーダの内挿誤差から予測されるうねり波長に対応しています。

図 6:
内挿誤差が3倍大きい
ロータリエンコーダ1での
測定結果

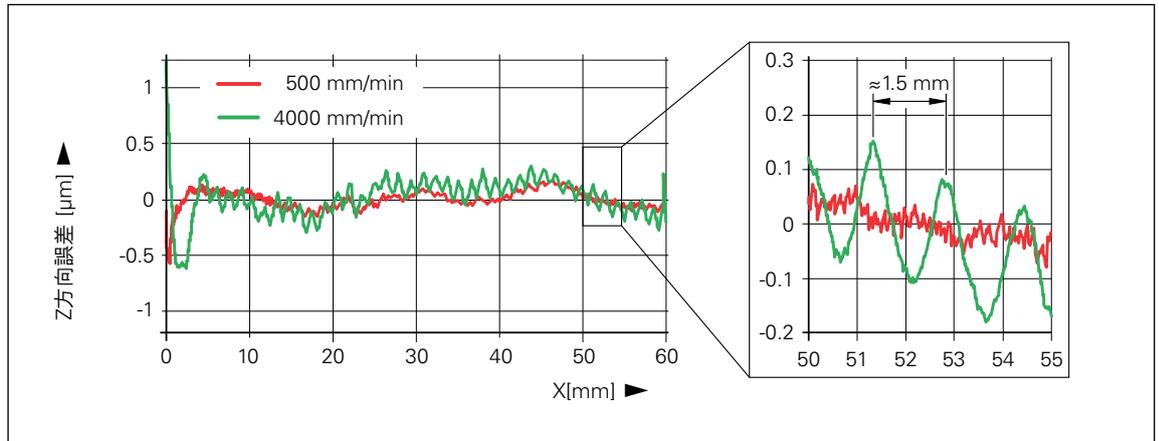
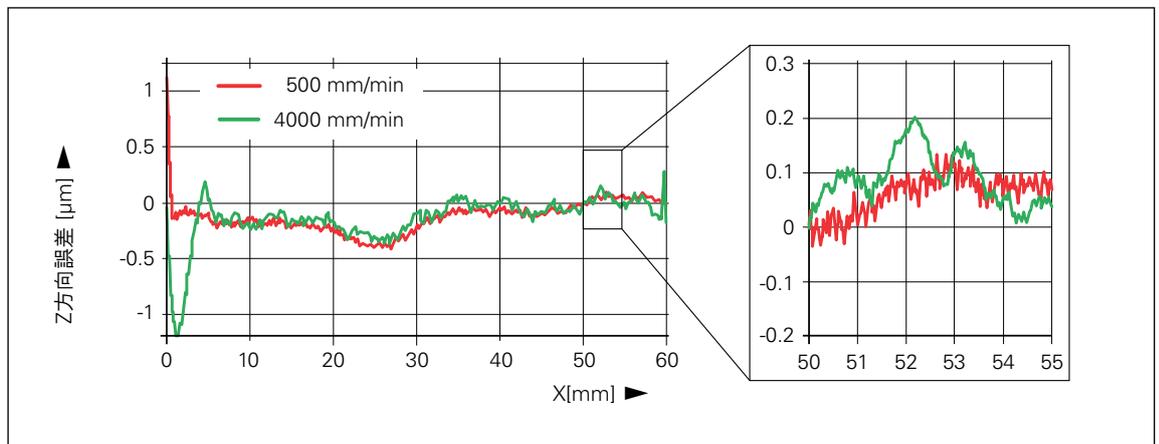


図 7:
ロータリエンコーダ2での
測定結果



上述のように、内挿誤差の周波数は送り速度に依存します。ロータリエンコーダの内挿誤差が工具先端で輪郭誤差を発生させるか、または修正されるか否かは、位置制御と速度制御の周波数帯域幅に依存して引き継がれます。数式 2 (Z 軸速度の計算) と数式 3 は、ロータリエンコーダが出力する信号の内挿誤差の信号周波数と Z 軸速度制御ループに戻されている信号周波数を決定するのに使用されます。

$$v_z = \sqrt{\frac{v_B^2}{1 + \left(\frac{b}{h}\right)^2}} = \sqrt{\frac{4000^2}{1 + \left(\frac{60}{0.4}\right)^2}} \left[\frac{\text{mm}}{\text{min}} \right]$$

$$= 26.7 \frac{\text{mm}}{\text{min}} \quad (\text{数式2})$$

$$f_{SP} = \frac{v_z}{SP_{RElin}} = \frac{26.7 \text{ mm/min}}{9.8 \mu\text{m}}$$

$$\approx 45 \text{ Hz} \quad (\text{数式3})$$

実際の斜面での 4000 mm/min の送り速度の場合、内挿誤差はロータリエンコーダ信号からの約 45 Hz に関係していることは明白です。スケールフィードバックとロータリエンコーダ信号の微分 (3 ページの図 4) の場合は、エンコーダの内挿誤差の周波数に影響を及ぼしません。したがって実際の速度信号にも内挿誤差の影響はありません。

速度制御装置で周波数帯域幅が 80 Hz よりも大きな場合は、このロータリエンコーダの内挿誤差の振動に追従します。Z 軸上に実装されている送り機構は、その場合には内挿誤差の周波数に追従して振動することになります。今回の場合、ロータリエンコーダの内挿誤差の周波数 45 Hz は、位置制御ループのカットオフ周波数 ($f_{PC} < 40 \text{ Hz}$) を超えています。内挿誤差の振幅が十分に大きい場合には、それに対応した工具先端での輪郭誤差を認めることができます。

(ロータリエンコーダ 1 による測定結果を参照)

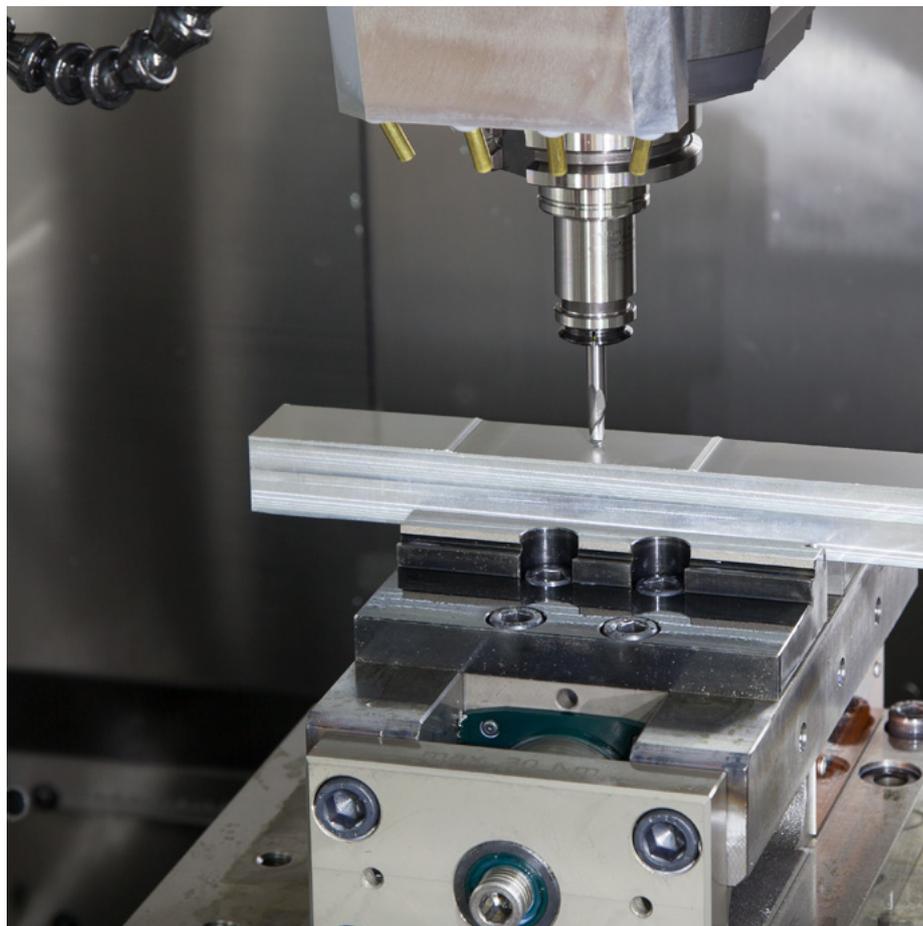
これとは別に他の条件は同じままで、Z 軸のサーボモータに搭載したロータリエンコーダ 2 による測定結果を図 7 に示しています。ロータリエンコーダ 2 の内挿誤差は 1/3 になるため、もはや高速送り、低速のグラフに重畳された波形が発生していません。Z 軸のサーボモータに搭載されたロータリエンコーダの内挿誤差はこの場合は非常に小さいので、工具先端点と加工テーブル間での周期的な輪郭誤差が検出できません。以下のフライス加工されたワークは、工具と加工ワーク間での相対運動 (例えば加工表面) についても同様のことが適用されることを示しています。

小さな内挿誤差により輪郭誤差を防ぐ ロータリエンコーダから始める加工表面品質

ワーク加工

加工表面品質への内挿誤差の影響を示すため、前に規定した傾斜面 $b = 60 \text{ mm}$ 、 $h = 0.4 \text{ mm}$ をロータリエンコーダ 1、またはロータリエンコーダ 2 を使って加工します。これらのワークは、その傾斜面を作成するために Y 軸方向への複数の加工経路とダウン方向のカットを適用します。Y 方向への加工線間隔と仕上げ代は、それぞれ 0.1 mm としています。図 8 は工作機械に設定した技術パラメータと加工状態を示しています。

図 9 は加工面の写真を示しています。上の写真がロータリエンコーダ 1 を使用した場合です。このロータリエンコーダの内挿誤差によって発生した $\lambda \approx 1.5 \text{ mm}$ の波形は、わずか $0.1 \mu\text{m}$ ほどの小さな振幅にもかかわらず、好ましくない陰影を生成しています。これは、前にグリッドエンコーダにて測定し定義された輪郭誤差が、明らかにワークの表面品質の劣化につながっていることを意味しています。



技術的パラメータ

工具径(mm)	6
歯数	2
主軸回転数(rpm)	18000
送り速度(mm/min)	4000
工具材質	PCD
ワーク材質	アルミ

図 8:加工状況と技術的パラメータ

その他の条件は同じまま、Z軸サーボモータに搭載するロータリエンコーダを内挿誤差 1/3にしたロータリエンコーダ 2に変更することで、加工表面は大きく改善されます。

(図 9 の下側の写真)

ロータリエンコーダの内挿誤差が小さくなったことにより、それ以前には規則的に加工表面に現われていたうねり波形は、もはや見えなくなります。ハイデンハイン製ロータリエンコーダ ERN 1387 の内挿誤差は、ロータリエンコーダ 2 よりもさらに小さくなっています。この製品は、特にモータ駆動系システムの速度制御用に使用されています。

結論

高品質の加工表面を生成するためには内挿誤差が小さなエンコーダが必要です。内挿誤差は、異なる送り速度により工具とワーク間での輪郭誤差として現われるので、これは送り軸のリニアエンコーダだけでなく、サーボモータに搭載されたエンコーダにも関係しています。上記に概略説明した輪郭誤差を避けるために、工作機械の全ての送り軸には内挿誤差の小さな高品質な軸エンコーダが必要です。



図 9:フライス加工面:ロータリエンコーダ1を使用した加工面(上側) —内挿誤差は3倍大きい
ロータリエンコーダ2を使用した加工面(下側)

内挿誤差が極めて小さいロータリエンコーダ

ERN 1387

インクリメンタルロータリエンコーダ
(ベアリング内蔵、ステータカップリング付)



	インクリメンタル ERN 1387
インターフェース	〜 1 V _{PP} ¹⁾
目盛線本数/システム精度	2048/±20"
原点	1個
出力周波数 カットオフ周波数 -3 dB	- ≥ 210 kHz
磁極検出位置信号	〜 1 V _{PP} ¹⁾
信号幅	Z1トラック ²⁾
電源	DC 5 V ±0.25 V
シャフト	テーバシャフト 径 9.25 mm; テーバ 1:10
機械的許容回転数 n	≤ 15000 rpm
始動トルク	≤ 0.01 Nm (20 °Cにおいて)
ロータの慣性モーメント	2.6 · 10 ⁻⁶ kgm ²
ステータカップリングの 固有振動数	≥ 1800 kHz
シャフトの許容軸方向ずれ	±0.5 mm
振動 55 Hz ~ 2000 Hz 衝撃 6 ms	≤ 300 m/s ² ³⁾ (IEC 60068-2-6) ≤ 2000 m/s ² (IEC 60068-2-27)
最高使用温度	120 °C
保護等級 IEC 60 529	IP40 (取付け時)

¹⁾ 限定公差

信号振幅: 0.8 V_{PP} ~ 1.2 V_{PP}
非対称性: 0.05
振幅比率: 0.9 ~ 1.1
位相角: 90° ±5° elec.
S/N比 E、F: 100 mV

²⁾ 1回転あたり1サイン波および1コサイン波;

カタログハイデンハインエンコーダのインターフェースを参照してください。

³⁾ 上記の値は室温下での値です。

使用温度 100 °Cまでの場合: ≤ 300 m/s²
120 °Cまでの場合: ≤ 150 m/s²

参考情報

[1] Technical Information: *Dynamic Precision*

[2] 技術情報: ハイデンハインエンコーダによる
完璧な表面処理加工

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
大阪市淀川区西中島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