



技術情報

工作機械における省エネルギーの考察

多くの産業分野において、省エネルギーの検討が多く行われてきました。工作機械は多くのモータと付属機器で構成されており、これらは加工中にエネルギー消費が急激に変化します。例えば、主軸のスピンドルモータと冷却装置は、高速で材料を削り取る荒加工中では定格出力付近で稼働しますが、仕上げ加工中ではその消費電力量は大きく減少します。工作機械を構成する各機器類と生産性および品質の間には、極めて密接な相互依存関係があります。生産工程中の詳細な試験から各構成機器類の消費電力量まで、省エネルギーの可能性を評価し、その達成方法を決定することが可能です。

生産財産業の様々な場面において、省エネルギーが重要な製品特性になってきました。材料搬送用に使用されるギアモータは、ここ数年、省エネルギー機器に分類されています。工作機械を使用する製造現場では省エネルギー推進に向けて多くの試みを行っています。エネルギー節約の可能性は、工作機械のベースロードに関係し、これは非生産工程においてもエネルギー消費を必要とします。実質、工作機械の付属機器がベースロードを決定します。付属機器において高効率モータを使用する他に、適切なエネルギー管理を行うことによりベースロード低減に関する多くの可能性を見出すことができます。エネルギー管理を用いて非生産工程での機械制御を行うことによりエネルギー消費を具体的になくすことが可能です。

セットアップ作業中における各種作業支援により、省エネルギーを進めることができます。理由は、これらが非生産工程を短縮し、ベースロードの影響を低減するためです。当然、スクラップ発生により、1良品あたりの消費エネルギーが増大します。それゆえ、最初の部品から始まる精度によって製造することは、工作機械の省エネルギーに関して決定的な要因になります。バランスのとれた温度の振る舞いと正確な位置測定技術により設計された工作機械は、省エネルギーの面ではっきりとした強みを持ちます。



フライス加工中に必要なエネルギー

フライス加工工程の必要電力は以下の消費グループに分類することができます。

- 冷却潤滑剤処理
- 圧縮空気生成
- 各付属機器への電力供給
- 主軸用スピンドルモータや送り軸用モータの CNC 制御

以上の各グループには、比例計算によって得られた照明、換気、空調用のエネルギーがそれぞれ加わります。フライス加工に必要なエネルギーは、フライス加工機の大きさや加工作業により大きく異なります。

今回の例では、大きさ 150 mm x 50 mm x 25 mm のアルミニウム製ハウジングを加工エリア 850 mm x 700 mm x 500 mm のマシンングセンタによってフライス加工しています。上述のグループの平均消費電力量を合計した値は、荒加工で 13 kW、仕上げ加工で 7.4 kW です。荒加工と仕上げ加工中の電力量バランスから、個々の消費グループ間のエネルギーの配分に関して、より詳細な情報を得ることができます。

冷却潤滑剤の処理（ポンプ、温度管理など）は、フライス加工機の外部で行います。荒加工で必要とする平均電力量は 5.1 kW です。仕上げ加工で必要とする平均電力量は 1.5 kW まで減少します。準備工程では、ほとんど電力を消費しません。ドライ加工の場合、エネルギーと資源の使用効率を高めるといった優れた可能性があります。しかし、多くのフライス加工の場面では、冷却潤滑剤を用いないと、スクラップ発生率が増えてしまい、平均消費電力量が増大することにつながります。

圧縮空気の平均消費電力量は、準備、荒加工、そして仕上げ加工の段階において、わずかに変化しません。その平均値は約 1.3 kW です。主軸への潤滑油充填、工具交換、ワーク清掃に圧縮空気を必要とします。また、主軸、工具計測、リニアエンコーダのエアパーズ用にも少量ながら必要とします。

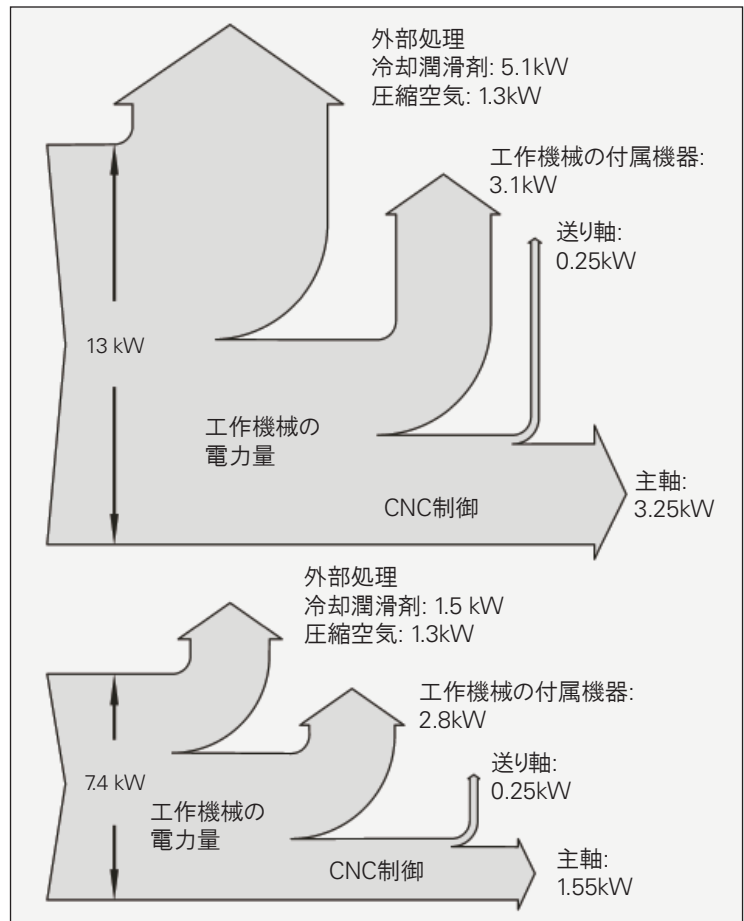
工作機械では、主軸スピンドルモータと送り軸モータの CNC 制御のほかに、多くの付属機器（パレット交換、冷却機器、油圧機器、自動化機器）でも電気を消費します。付属機器の消費電力量は、準備、荒加工、仕上げ加工といった各工程間において、わずか 600 W しか変化しません。

準備工程での 2.5 kW の消費電力量のうち、付属機器が大部分を占めています。それゆえ、必要に応じて付属機器の機能を停止にすることにより、実際にエネルギー節約の可能性ががあります。

今回の実験によると、主軸のスピンドルモータや送り軸用モータと一緒に CNC 制御するには、全体の 27 % の電力を必要とします。どちらの加工工程でも、送り軸用モータの平均消費電力量は 250 W で、その多くは垂直 Z 軸の保持力により定まります。加速・ブレーキ過程では、短いピーク値がわずかに発生します。



フライス加工における必要電力の観察実験に用いたハウジング部品



ハウジング部品加工中に必要な平均電力量
上側:荒加工、下側:仕上げ加工

モータドライブのエネルギー効率

主軸と送り軸のモータは、工作機械の中心機器です。モータドライブの省エネルギーは、供給電力と消費電力の比、すなわち、モータ効率によって決まります。工作機械のモータドライブシステムは、電気エネルギーを機械動力に変換します。モータドライブシステムは、モータ用電源、モータドライブ、機械要素部品で構成されます。モータ効率に関するデータは、通常、定格電力値を参照します。他の定格値では、各機器の効率が著しく変化します。

フライス加工中の消費電力量

ここでは、主スピンダルと送り軸の消費電力量を項目別に示しています。

例 1: 正面フライスでの荒加工

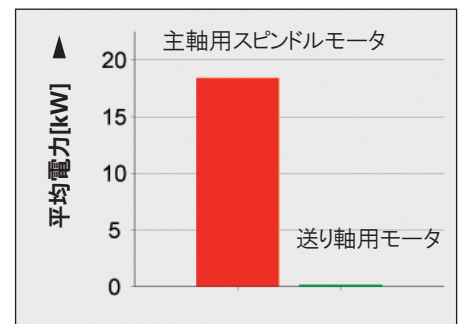
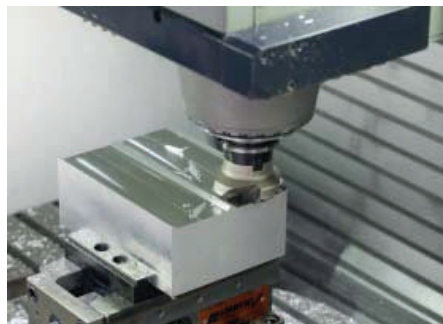
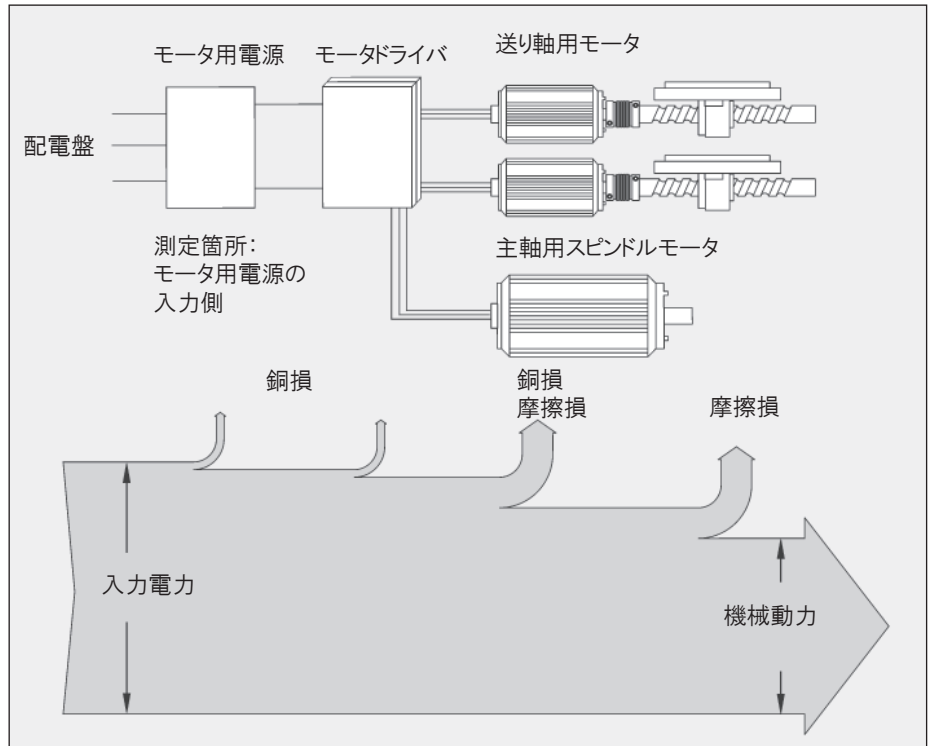
近軸の送り速度での正面フライスによる荒加工においては、送り軸モータの平均消費電力は 200W です。主スピンダルは定格出力である約 19kW に達します。

例 2: 穴・キャビティ加工

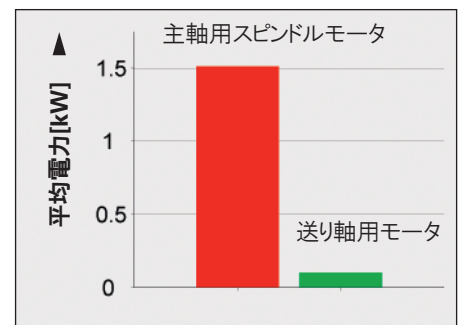
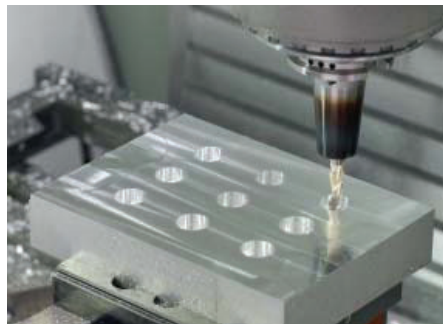
穴・キャビティ加工では、荒加工および仕上げ工程が必要です。ここで送り軸の平均電力量は 100W です。主スピンダルは 15kW の電力量を必要とします。

結論

CNC 全体の電力量のうち、送り軸の占める部分は小さく、これ以上の省エネルギーはあまり望めません。一方、スピンドルモータの選択が消費エネルギーに大きな影響を与えます。スピンドルモータを定格電力値よりも、かなり低い値で操作する場合、エネルギー収支に対するマイナス面の影響により、モータドライブ固有の損失が比例して増加します。主軸が金属材料の最大切削量を制限する場合、フライス加工時間は当然長くなります。結果、付属機器が生成するベースロードにより、エネルギー効率が悪くなります。例えば、非同期モータの代わりに同期モータを使用するなど、スピンドルモータの効率を検討することによって、フライス加工工程でのより省エネルギー設計の可能性もあります。



正面フライスでの荒加工におけるモータドライブの平均消費電力
正面フライス: D=60 mm、回転速度: 4100 rpm、切込み深さ: 4mm



穴・キャビティ加工におけるモータドライブの平均消費電力
穴・キャビティの大きさ: D=20 mm、エンドミル: D=10 mm、側面許容公差: 5mm、切込み深さ: 2x5mm、回転速度: 16000 rpm

モータ用電源の回生効率

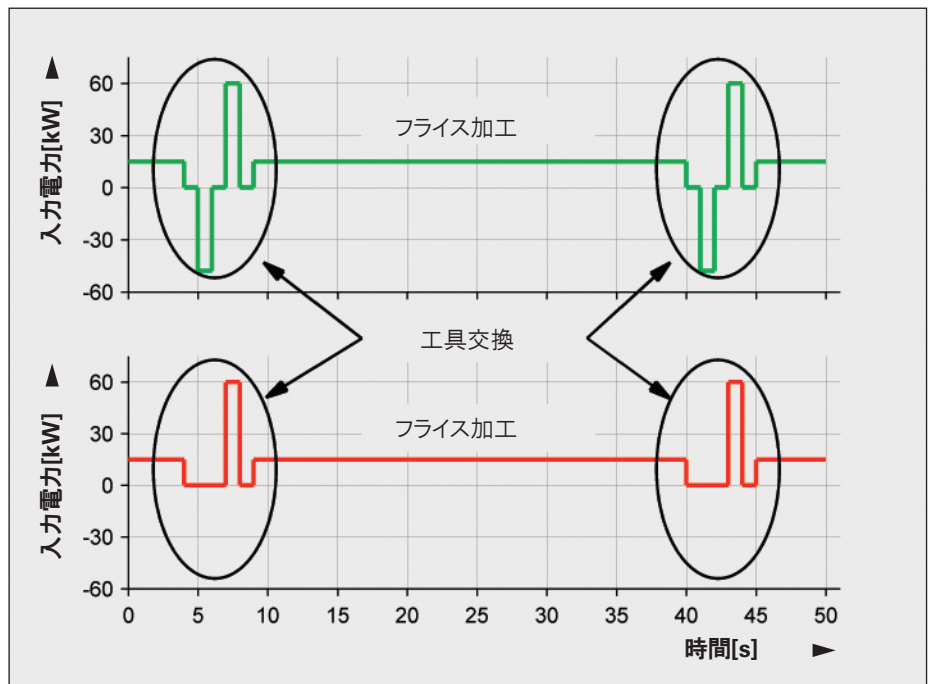
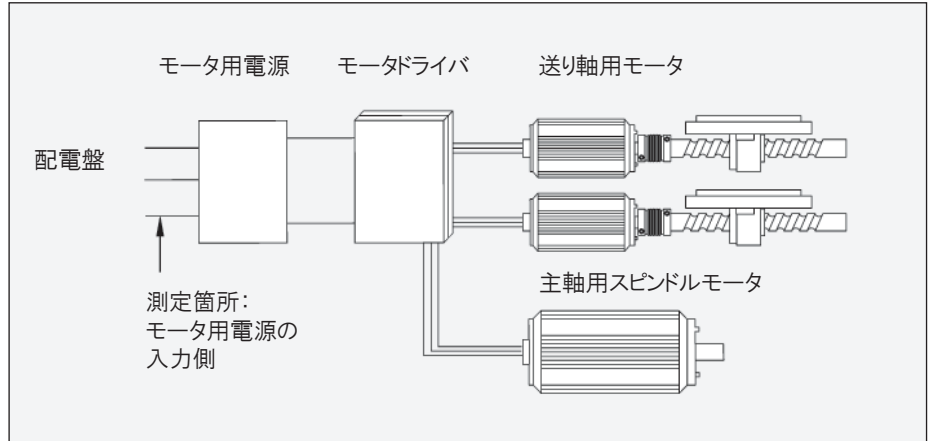
モータドライブの加速過程は、引換えに必ずブレーキ過程を必要とします。慣性により発生するモータの回転エネルギーは、そのほとんどが電気エネルギーに再変換されます。

NC 制御装置のモータ用電源には、回生ブレーキの"あり"および"なし"の選択ができるものもあります。回生なしの場合、ブレーキ中の運動エネルギーを抵抗によって熱に変換します。回生ありの場合、電気エネルギーに変換して配電盤に戻します。

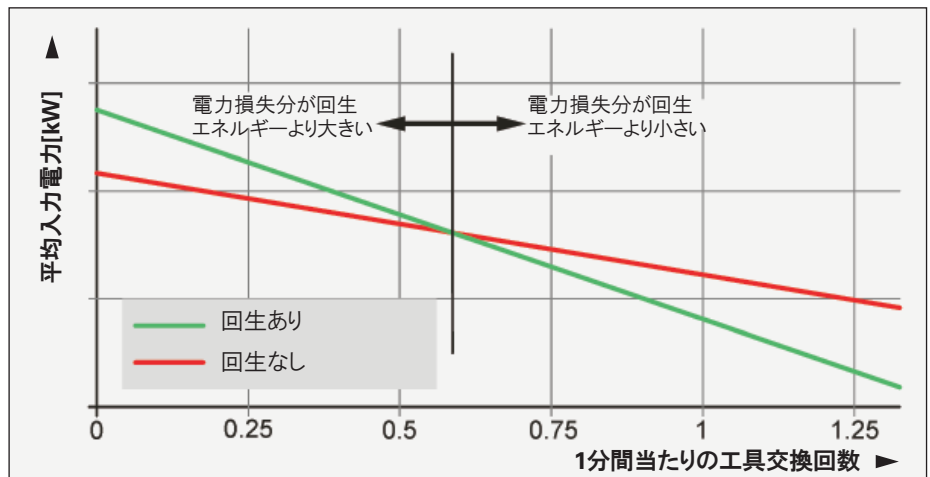
しかし、回生に必要な経路と平滑に必要な機器は、モータドライブが電力を使用しない場合でさえも損失を起こします。電力損失は、回生電力が発生していない場合もわずかに増えます。回生機能搭載電源は、電力損失を補償する以上の回生エネルギーを得られる場合、回生機能のない電源よりも効率的に稼働します。それゆえ、回生の"あり"もしくは"なし"も、機械にどのような運転を求めるかにより決定されます。

工具交換の回数が消費エネルギーに影響します。例えば、15kWのフライス加工では、工具交換のために周期的に加工作業を停止します。スピンドルモータの起動時、ピーク値で約60kWの電力を必要とします。回生ありの場合、配電盤に48kWを戻しますが、回生なしの場合、運動エネルギーを熱に変換します。

金属切削時には大きな電力を必要とするため、フライス加工工程が工具交換のために停止する度に、平均入力電力が落ち込みます。回生機能搭載電源は、工具交換に要する時間が100sより短い時（1分間で0.6回の工具交換を行う）、より効率的に機能します。1分間あたりの工具交換数が多い処理では、回生機能搭載電源がより適しています。輪郭フライス削りなど、工具交換回数が少ない場合は、回生なしの電源の方が適しています。



モータ用電源の入力電力 上側:回生あり 下側:回生なし



電源効率の考察(回生ブレーキ機能搭載/非搭載)

使用しない付属機器の機能停止

2 台のマシニングセンタ (MC) と 3 つの加工ステーションを持つ生産ラインとの間にて消費電力を比較することによって、省エネルギーの可能性を示します。

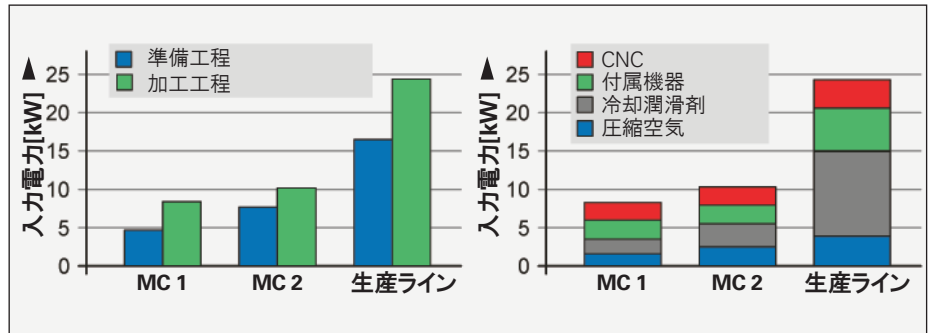
準備工程において、消費グループの中には、消費電力量が、わずかしか減少しないものもあるため、非生産工程をできるだけ短時間にする必要があります。より小さな生産バッチ用のマシニングセンタでは、使用していない付属機器の機能を停止することによって、消費電力を大きく削減することができます。この他に冷却潤滑剤の循環用に省エネルギー性のポンプを使用することにも、節約の可能性があります。

しかし、付属機器（油圧、スピンドルの冷却）、もしくは圧縮空気機器の機能を停止した場合、別の影響も起こります。

付属機器からの排熱や温度安定化機能を突然停止することにより、工作機械の骨組みが熱変位を起こした場合、スクラップ部品が発生し、製造工程におけるエネルギー収支を損ないます。それゆえ、選択して付属機器の機能を停止することにより、熱変位をあまり起こさずに工作機械の機能を最適化します。いずれにせよ、エネルギーの節約には、バランスを考えて慎重に計画を立てる必要があります。

CNC には、工作機械と周辺装置のエネルギーを集中管理する役割があります。

付属機器制御用の出力を持ち、生産工程での各イベントに関連した特別な PLC 機能のある制御装置もあります。



3種類の生産方法と必要な入力電力 左側:作業工程別 右側:消費グループ別

セットアップ作業の効率化による 非加工時間の短縮

工作機械は消費エネルギーのベースロードが比較的大きいため、非加工時間が加工工程の省エネルギーに重大な影響を及ぼします。部品 1 個に必要なエネルギーを削減するために、工具のセットアップなどの非加工時間を最小限にする必要があります。原則として、機械の生産性を上げることが最も効率的です。

セットアップ中の非加工時間

NC プログラムの各ブロック内には、最初に固定したワークで測定する必要のあるワークの基準データと関連する値を入力します。ワーク測定用タッチプローブにより、迅速かつ安全に基準データの測定が可能です。予め設定したタッチプローブの測定サイクルとタッチプローブと NC 制御装置間において遅延を発生しないインターフェースユニットを使用することにより、非加工時間をかなり短縮すると同時に加工精度を向上します。タッチプローブ TS シリーズと NC 制御装置のプローブ機能を組み合わせることによって基準データを自動的に設定できます。これにより、不良品発生の原因になる、セットアップ中の誤差を防ぐことが可能です。

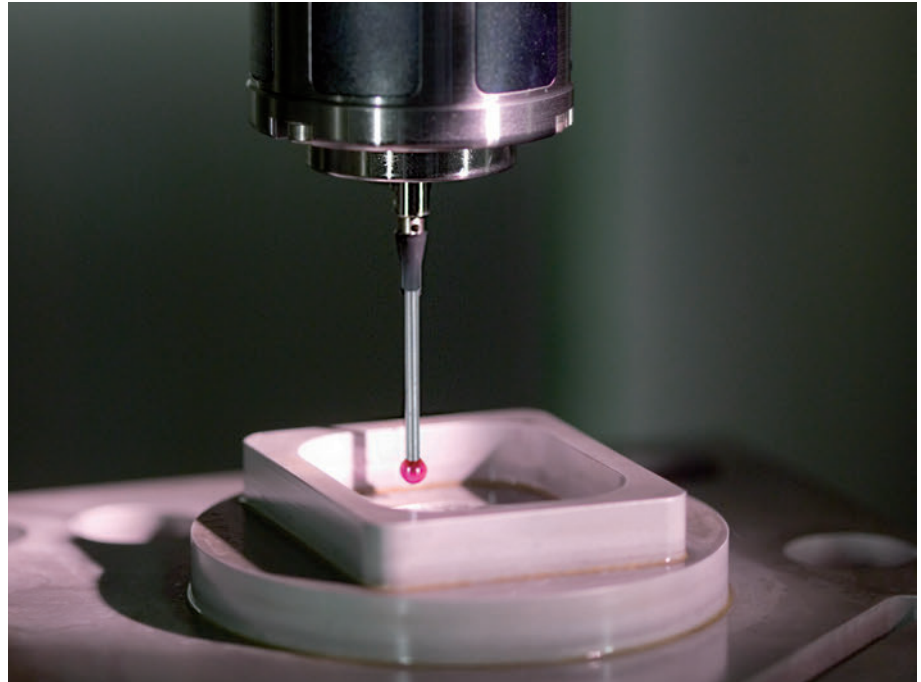
タッチプローブにより、非加工時間の短縮、製造品質の改善、スクラップ発生の防止、そして生産性の向上が可能です。これにより、製造品の 1 個あたりに必要なエネルギーを削減します。非加工時間の短縮を説明するのに 2 つの処理例を比較することで説明します。ここでは、ダイヤルゲージとハイデンハイン製のタッチプローブによる机上計測でのセットアップ時間を比較しています。ここで、工作機械の消費エネルギーのベースロードは 4kW です。

処理 1

- 加工前のワークを機械軸に平行にセット
- 加工面の 1 つの角を基準データとしてセット
- 加工前のワークの上面を工具軸の基準データとして設定

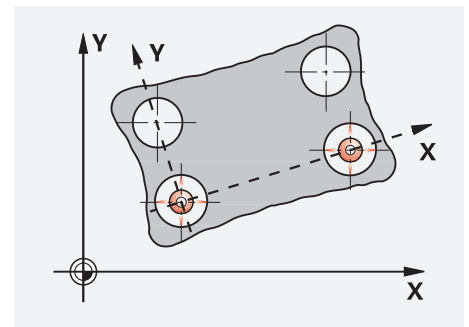
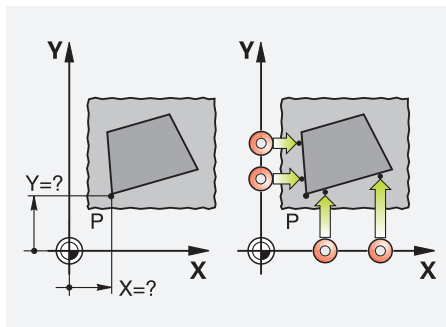
処理 2

- 2 つのザグリ穴の中心を使って、ワークを機械軸側に平行にセット
- その 1 つのザグリ穴の中心を基準としてセット
- 加工前のワークの上面を工具軸の基準データとして設定



処理 1

処理 2



時間短縮結果

ハイデンハインのタッチプローブ TS を使用することで、上記のセットアップに要した時間は、約 4 分 (72%) の短縮が可能となりました。

エネルギー節約結果

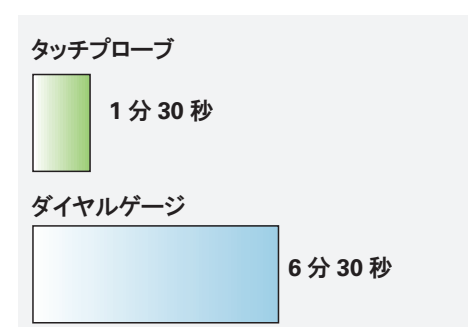
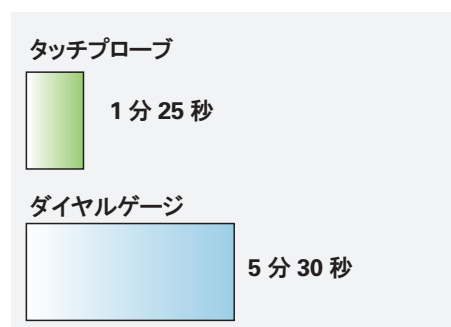
1 日で 10 回のセットアップ、稼働日 220 日とした場合、1 年に 580 kW のエネルギーを節約します。これは、EU のエネルギー効率クラス A++ の冷蔵庫 5 台分の年間消費エネルギーにおよそ相当します。

時間短縮結果

ハイデンハインのタッチプローブ TS を使用することで、上記のセットアップに要した時間は、約 5 分 (77%) の短縮が可能となりました。

エネルギー節約結果

1 日で 10 回のセットアップ、稼働日 220 日とした場合、1 年に 730 kW のエネルギーを節約します。これは、EU のエネルギー効率クラス A++ の冷蔵庫 6 台分の年間消費エネルギーにおよそ相当します。



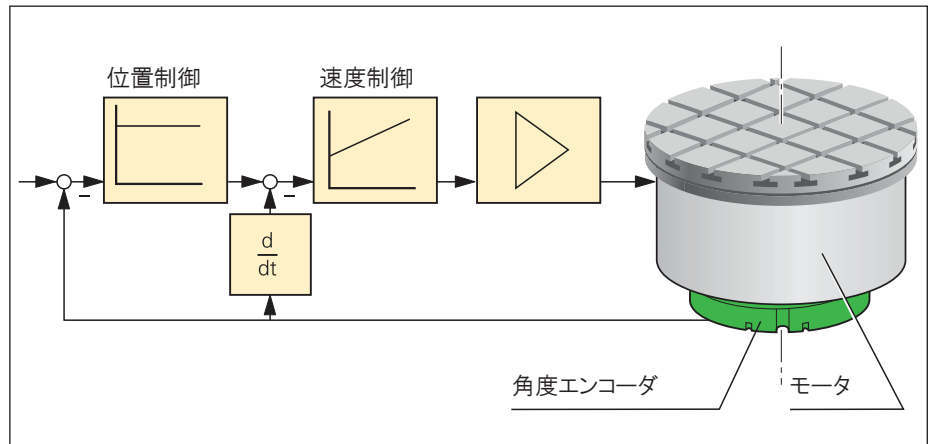
モータの省エネルギー制御と位置エンコーダ

スピンドルモータとDDモータの制御ループでは、フィードバック信号の小さな雑音でもモータ電流の大きな変動の原因になります。

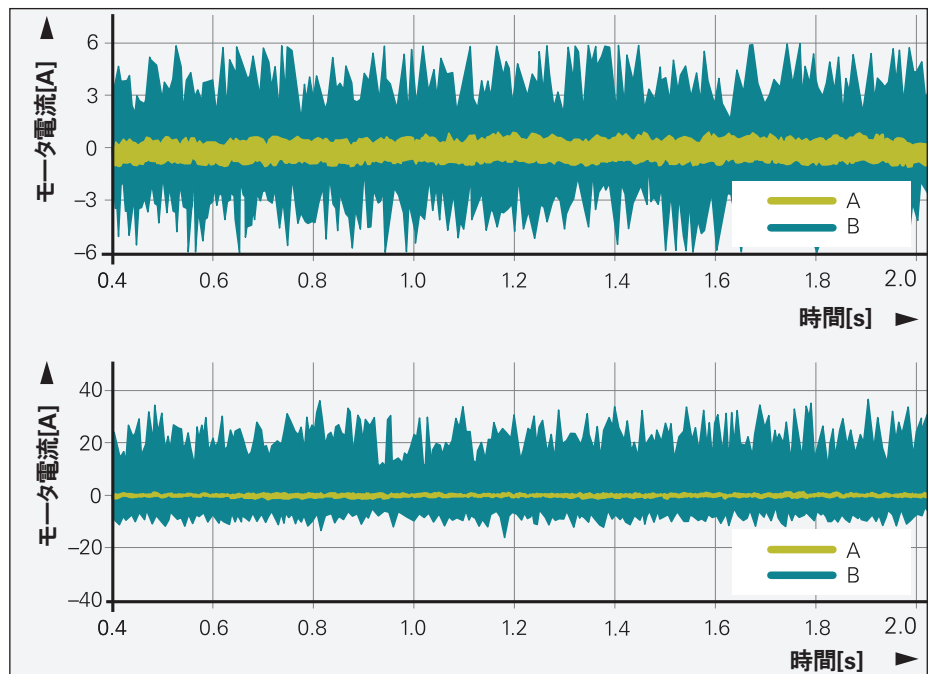
位置エンコーダの信号を内挿分割した場合、1信号周期内の短いレンジの偏差（内挿誤差）が含まれます。その値は、通常、信号周期の約0.5%です。内挿誤差の周波数が増えた場合、送り軸ドライブは誤差曲線に従うことができません。しかし、内挿誤差により余分な電流成分が生成されます。それゆえ、トルク一定の場合、消費電力量とモータ効率は悪化します。余分に必要となるエネルギーは熱に変換され、通常、モータの冷却システムを用いて放熱しなければなりません。当然、この冷却システムを稼働するのにも、エネルギーを消費します。

DDモータ搭載のロータリーテーブルにおいて、光学式エンコーダと磁気式組込み型エンコーダの比較試験により、位置信号の品質の高さの重要性を説明します。16 384 分割の角度エンコーダ RCN 226 は、目立たないほどわずかな雑音しかモータ電流に発生しません。そして、発熱もあまりありません。これと比べて、磁気走査方式の場合、信号分割数がかかなり粗くなり、同じ設定条件では、モータ電流に大きな雑音が発生します。例えば、約 30 min^{-1} のシャフト回転速度において、実効電流値は、光学式エンコーダの値より大きい 15 A です。当然、モータ内での発熱もより大きいものになります。

信号品質があまり高くないエンコーダでは、モータのエネルギー損失がより大きくなります。さらに、強制冷却するために余計に必要なエネルギーをエネルギー収支に含まなければなりません。モータの省エネルギーを向上するには、信号品質の高いエンコーダが必要不可欠です。



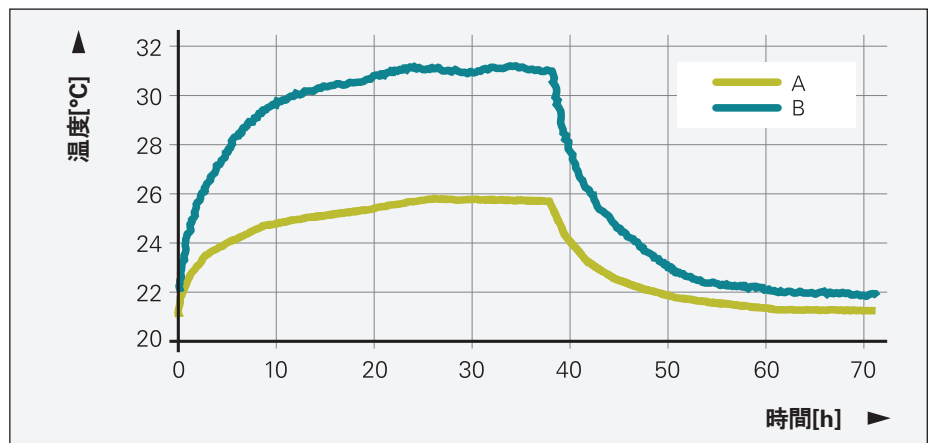
DDモータにおける制御ループ



エンコーダを搭載したDDモータのモータ電流

A:光学式エンコーダを使用した内挿誤差の小さい場合

B:磁気エンコーダを使用した内挿誤差の大きい場合



位置決めエンコーダの違いによるDDモータ温度の時間変化
(A:光学式、B:磁気式)

クローズドループ制御による スクラップ発生数の最小化

不良品は、製造工程での生産性を低下させ、製造部品 1 個あたりのエネルギーコストに大きく関与します。不良品が発生する主な原因は、ボールねじ駆動の送り軸での温度ドリフトです。

ボールねじ全体の温度分布は、送り速度と駆動力により急激に変化します。セミクローズドループ制御（例えば、リニアエンコーダなし、図 1 の上側）の工作機械では、結果として長さが変化し（通常、20 min 内で $100 \mu\text{m}/\text{m}$ ）、これはワークに大きな傷が発生する原因となります。

リニアエンコーダを使用した場合（図 1、下側）、ボールねじの温度上昇（図 2）が精度に影響を及ぼしません。

これは、駆動軸の機械的な誤差を位置制御ループで測定し、その後補正を行う、クローズドループ制御での運転の時に言えます。

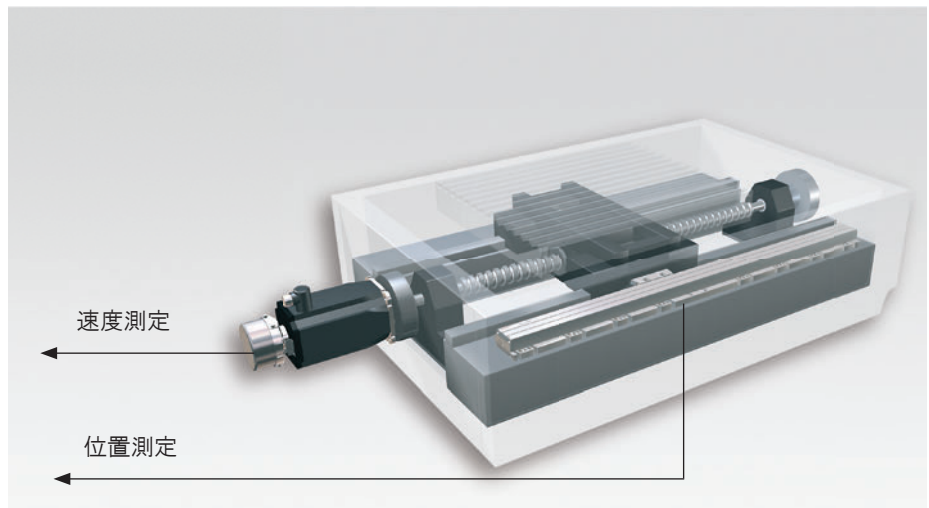
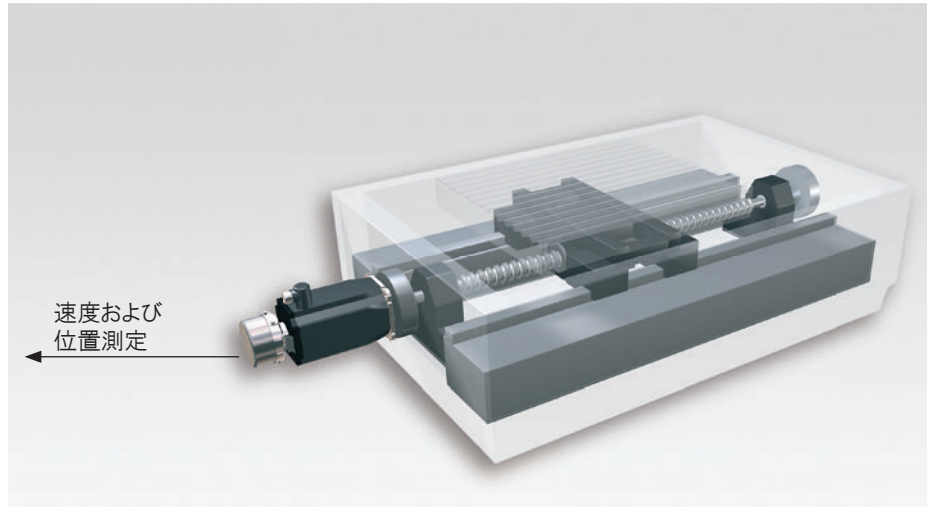


図1

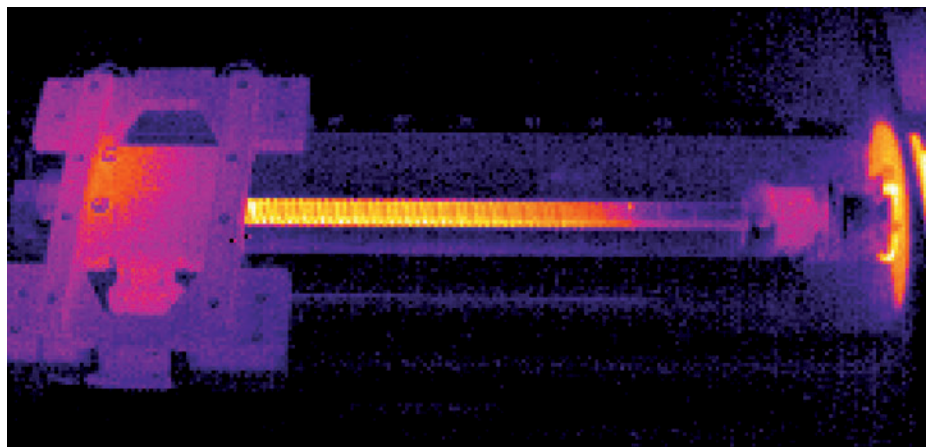


図2

例：尾翼レバーカップリングの加工例

小さなバッチ生産における実行可能な精度を評価するために、レバーカップリングを同じワーク材料から2回加工して製造しています。2回目の加工作業は、単に1回目の加工開始位置から10mm下がったところから行っています。1回目と2回目の加工作業間に、工具をワークから上空に離れたところで空運転サイクルを20回行います。セミクローズドループ制御では、2回目のワークの輪郭は、1回目の輪郭と較べてずれが生じており、端の部分で観察できます。セミクローズドループ制御では、このずれの大きさは44 μm です。リニアエンコーダを用いたクローズドループ制御では、端の部分はこのような結果になりません。このようにして、最初の部品からの繰り返し再現精度が保証されます。



クローズドループ制御での省エネルギー

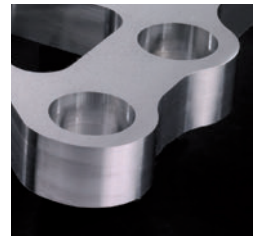
今回の例では、レバーカップリング 22 式を加工するのに2時間かかります。間隔 350mm で2個の穴あけを行う場合、許容公差 IT7 ($\pm 28 \mu\text{m}$) で加工する必要があります。セミクローズドループ制御で22式の良品を製造するには、確実に許容公差 IT7 に従うように、最初に NC プログラムを周期的に25分間動かす必要があります。暖気運転中の消費エネルギーは、フライス加工中の約10%です。

結果として、セミクローズドループ制御で良品1個を製造する場合のエネルギー損失は、リニアエンコーダを用いたクローズドループ制御で22式の部品を製造する場合より、19%高くなります。

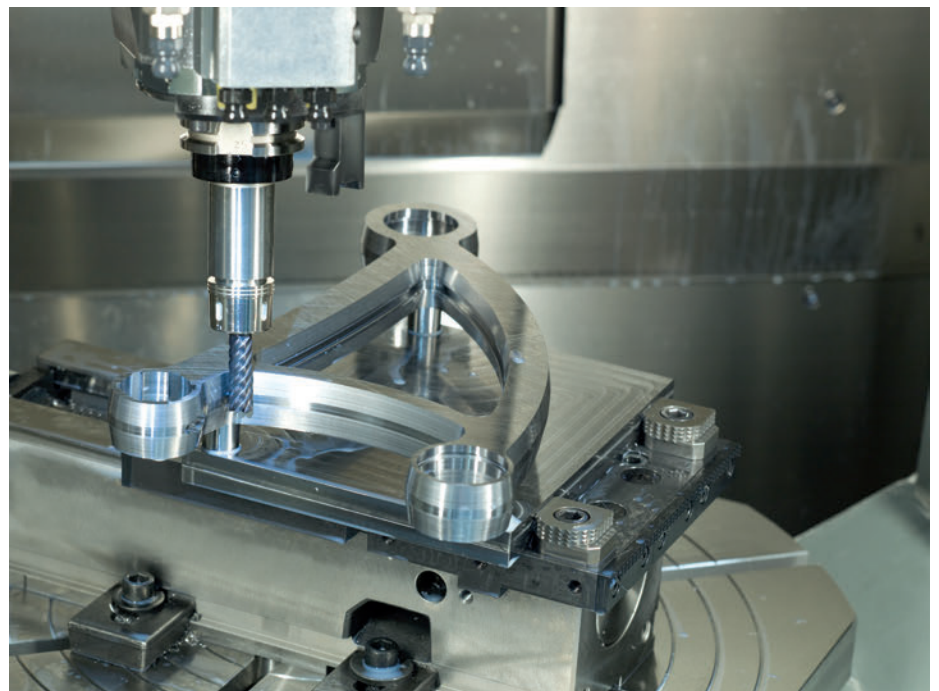
上述の暖気運転を行うセミクローズドループ制御のフライス加工機により50式の部品を製造する場合の電力量は、8kWのフライス加工で稼働220日として、660kWhのエネルギーを余計に必要とします。



Semi-Closed Loop:
温度ドリフト有り



Closed Loop:
温度ドリフトなし



結論

金属加工工程の解析から、NC 制御装置が送り軸とスピンドル用モータを制御する際の消費電力は、全体のわずか 25% から 30% であることがわかります。一方、エネルギー収支において支配的なのは工作機械の付属機器もしくは周辺装置になります。

省エネルギーに関しては、多くの可能性があります。工作機械単体での適切な機器の選択を行うことにより、かなりの節約が実行できます。NC 制御装置が回生電力機能を使用するかどうかは、フライス加工中の工具交換、もしくは旋盤加工中のワーク交換の回数によって決まります。回生エネルギーは工作機械周辺の装置で利用できます。

スピンドルモータの回転速度とトルクを工作機械の運転条件範囲内に厳密に適応させることにより省エネルギーを図ることが可能です。スピンドルに汎用性を求める場合、消費エネルギーを抑えるために性能を十分に発揮できな

い速度でスピンドルモータを回転させる必要があります。

位置エンコーダの選択が、スピンドルモータとトルクモータの効率に大きな影響を与えます。エンコーダの分解能と精度が不十分な場合、位置制御ループでの電流値が大きくなります。目盛線本数の多い位置エンコーダは、モータドライブに高い効率を求める場合には必須となります。

リニアエンコーダにより精度が向上し、加工結果の正確さと再現性をより優れたものすることを証明しました。これにより製造中の無駄、すなわち、良品 1 個あたりの消費エネルギーを削減することが可能です。

冷却潤滑剤処理、圧縮空気供給、油圧制御、そして温度制御用の機器に使用する電力量が、全体の電力量の多くを占めています。工作機械のポンプ用に効率的なモータが搭載

されている場合、工作機械単体における消費エネルギーの大部分を節約することができます。付属機器の機能を選択的に停止できる NC 制御装置を用いてエネルギー管理を行うことによって消費エネルギーを節約することも可能です。例えば、加工作業終了後、遅れてポンプ用モータを電源オフにすることも可能です。

製造工程自体でさえも、エネルギー節約の可能性が見出せません。比較的ベースロードの高い工作機械では、非加工時間の短縮が大変重要です。ハイデンハイン製タッチプローブを用いてセットアップを行うことにより非加工時間の短縮も可能です。

ハイデンハインは、金属加工の分野における何十年もの経験で得たノウハウが今回のテーマでもお客様のお役に立てると考えています。



参考資料

今回記載した内容および製品に関して、詳しい情報を各営業所にお問い合わせください。

以下のカタログおよび技術情報が、当社ホームページからダウンロード可能です。



カタログ
NC工作機械向け
リニアエンコーダ



カタログ
オープンタイプ
リニアエンコーダ



カタログ
工作機械用
タッチプローブ



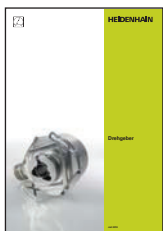
カタログ
ベアリング内蔵
角度エンコーダ



カタログ
高い信号品質の
アブソリュート
角度エンコーダ



カタログ
磁気式組込み型
エンコーダ



カタログ
ロータリエンコーダ



カタログ
サーボモータ用
エンコーダ



カタログ
ベアリングを内蔵しない
角度エンコーダ



技術情報
送り軸の精度



技術情報
工作機械の加工精度



技術情報
DDモータにおける
エンコーダへの要求仕様

ドクターヨハネスハイデンハイン社はリニアエンコーダ、角度エンコーダ、ロータリエンコーダ、長さゲージ、デジタル表示カウンタを開発・製造しています。

ハイデンハインはオートメーションシステムや工作機械メーカー、半導体製造、電子機器製造メーカーに製品を供給しています。

ハイデンハインは世界 50 ヶ国に営業販売・サービス拠点があります。セールスエンジニアとサービス技術者が、技術的情報とサービス対応にてお客様をサポートしています。



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
桜通MIDビル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