

技術情報

位置測定が5軸加工の精度に及ぼす影響

工作機械の生産性と精度は競合上重要な観点です。5軸加工により生産性の向上を見込むことができます。多くの場合、5軸加工では3軸加工より切削率を高めることが可能です。例えば、再設定に要する時間を短縮したり、一度のセットアップで複数の操作加工をすることによって、生産時間を大幅に短縮することができます。ワーク形状の複雑さが増していく場合には、5軸加工は、欠くことのできない機械加工プロセスになりつつあります。

5軸加工では長尺軸であることが求められるため、工作機械は加工エリア全体にわたって高い精度が要求されます。さらに、5軸加工機では2つの回転軸がワークの加工精度に大きな影響を及ぼします。回転軸だけでなく、ほとんどの場合直線軸も動かし、ワーク表面に対する切削工具の方向を変化させる必要があります。このことが、ワーク表面の微小範囲内で、多い時は5軸方向にて、目で確認できる大きさの傷模様を発生させる原因となります。

それゆえ5軸加工では、精度の限界が影響を及ぼします。送り駆動等に影響を及ぼす精度誤差、例えば、ボールねじピッチ、伝達誤差、反転誤差、熱変位などが、たちまちスクラップ品の生産に至ってしまいます。直線軸と回転軸の位置決め精度は、5軸加工工作機械の性能を大きく左右します。

今では、5軸加工は金属加工の多くの分野でなくてはならないものになっています。一度のセットアップで完璧にワークを機械にかけることができるという明らかな経済的利点、つまり、一つの部品製造工程を大幅に短縮することができるのです。同時に、部品の加工精度を大きく向上することが可能です。

さらに、回転軸を追加することにより、金型の穴などの複雑なワーク外形も加工しやすくなります。回転軸の追加は、さらに高い切削率が得られるよう、びびりの起きにくい短い工具を使用します。

同時5軸加工により、複雑な輪郭形状でも、刃先での切削速度を狭い範囲内で一定にすることができます。このおかげで表面加工の品質を大きく向上することができます。そのうえ、同時5軸加工を行わないと自由曲面のフライス加工時に生産性の高い工具（例えば、トロイドカッター）を使用することは不可能です。



5 軸加工の応用範囲

航空宇宙産業向け部品

航空宇宙産業では、軽量かつ高強度が重要になります。“航空輸送”機材の重量を最小化する方法として、一体式構造が確立されました。つまり全く一つの部材から、複雑な構造をした複数の部品が生産されるのです。切削率は95%にまで達します。この高い“バイ・トゥ・フライ率 (buy-to-fly rate)”は部材原材料の高コストにつながります。

構造部品の範疇では、5軸加工によって部品の強度を落とすことなく軽量化することができます。まず、コンピュータによるトポロジー最適化を行い、部品形状を各負荷に対応させます。結果として、機械的負荷が最も高くなる箇所に材料を集中します。その他の領域では、材料は明らかに減少します。例えば、肉厚の変化により機器内の負荷分散を簡単に行うことができます。高さがあるほど肉厚は薄くなります。このワーク形状は5軸ポケット加工による簡単な方法で実現が可能です。

5軸加工は長い間、ジェットエンジン部品の加工の標準となっています。高い効率性を求めることで全ジェットエンジン部品の流動特性の改善を継続して行います。生じた部品形状はきわめて複雑なため、同時5軸フライス加工でしか製造できません。

自動車製造業における5軸加工

自動車製造における板金やプラスチック加工では無数の金型が必要となります。板金成形の金型は最長6mとなり、さらに非常に高精度の±0.02mmで加工する必要があります。こうすることによって、金型の上部和下部とが正確な隙間幅で動作することができます。さらに、成形工具が高耐用性であることを保証するため、全ての機能表面で非常に高品質な状態が求められます。



工具の輪郭を製造する際には、機械は高表面品質の必要条件を満たすため、切削経路間の距離を極めて小さい状態に保たなければなりません。これは自動的にNCプログラムの実行時間を延ばします。成形工具に求められる精度とは、工作機械にとって手強い挑戦です。つまり、大型部品を加工する際の長時間にわたるプログラム実行中に高精度を出すためには、機械構造と送り駆動の高い熱安定性が必要となるのです。

5軸加工は、成形工具の一層深く湾曲した輪郭を容易に利用できるという点で、加工時間短縮に新たな展望をもたらします。加えて、トロイドカッターやアールカッターなどの特殊工具は切削経路において極めて広いピッチを許容するものとして使用されるため、プログラム実行時間を短縮します。

医療技術分野における5軸加工

医療技術の分野においては、特殊検査や特殊療法に対応する装置において高い需要があります。医療技術における5軸加工は医療処置をより一層正確にし、患者の後遺症を軽減することができるのです。そのような医療装置は多くの場合大変複雑な形状が特徴で、よってフライス盤における部品の5軸加工が医療技術分野業界を引きつけます。

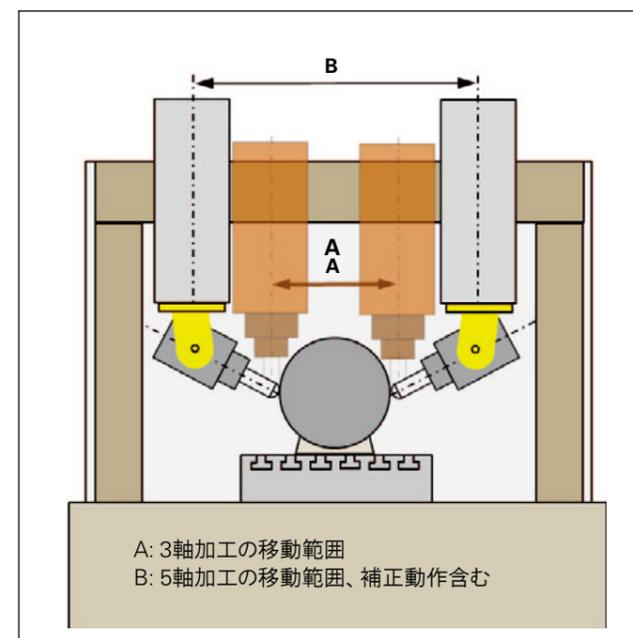
平均余命が延びたことにより、歯や関節移植の需要が増大します。今日、股関節部や膝関節の移植は多くの人によりよい生活をおくる機会を提供しています。その外形で、歯や関節移植というものは人体の特定接着面に対して、完全に適合していなければなりません。移植片はたいてい、フライス盤で製造されます。フライス加工は小さいバッチサイズのものでさえも製造可能だからです。移植片の複雑な成形のために、医療技術は5軸加工の応用分野として屈指の存在です。そのような精巧な部品を経済的に製造する際の必須条件として、正確で精密な送り駆動のための高精度位置測定機器があるのです。



位置測定の要件

3軸加工では、送り軸はワークの寸法と工具径を足した範囲内で動作します。3軸加工とは異なり、5軸加工では工具の傾きはワークの表面において調節することが可能です。工具先端点 (TCP) 値が変わらないのであれば、切削方向を変えるには通常直線軸上で追加動作が必要です。この補正動作は必然的に直線軸によって要求される移動範囲を広めます。増大する移動範囲ということは位置決め誤差の増加を意味するので、5軸加工機の送り軸はかなりの高精度と再現性を必要とします。

直線軸での補正動作はNCプログラムのX、Y、Z軸によって指令された工具中心での動作に上書きされます。この上書きのため、工具中心における軸の送り速度はプログラムされた値をはるかに超える可能性があります。送り速度の上昇は、モータの発熱およびボールねじの伝達と繰り返し運動の増加にいたります。測定方式により異なりますが、熱の発生により著しい位置誤差を引き起こす可能性があります。不良品の発生を防ぐために、運転時に送り軸の正確な位置測定を直接行うことが必要不可欠です。



直線軸での位置取得

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ます。軸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には（上図参照）、ボールねじは2つの役割を果たさねばなりません。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のです。しかしながら、位置制御ループにはロータリエンコーダしか含まれていません。これは摩耗や温度による駆動機構の変化は補正ができないためで、**Semi-Closed Loop** 運転と呼ばれています。この駆動の位置誤差は避けがたく、ワークの品質に少なからぬ影響を及ぼします。

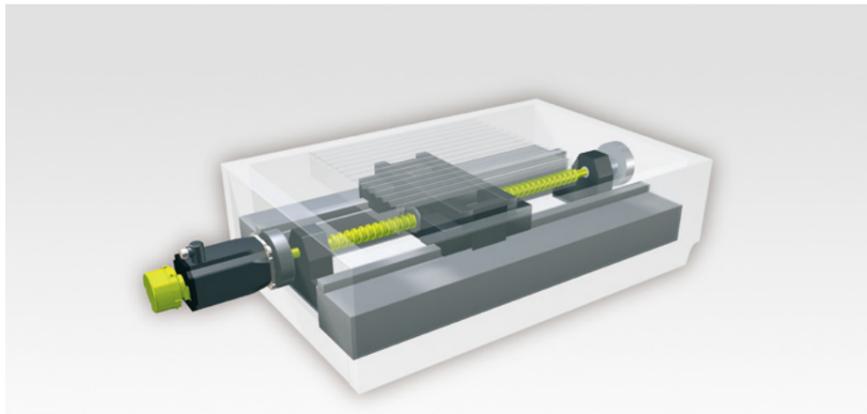
スライド位置の測定にリニアエンコーダが使用される場合（下図参照）、位置制御ループは送り機構全体を含みます。これが **Closed Loop** 運転と呼ばれるものです。この場合、機械の伝達要素の遊びや不正確さは位置測定の精度に影響を及ぼしません。つまり、測定精度はほぼリニアエンコーダの精度と取付け位置のみに依るのです。

アプリケーションの様々な条件が送り速度や送り分力の増加と相まって、ボールねじの熱的条件の一定の変化をもたらします。発熱箇所は繰り返し運動を行うボールねじ上で発達し、すべての位置の変化を変え、Semi-Closed Loopでの精度を決定的に落とします。

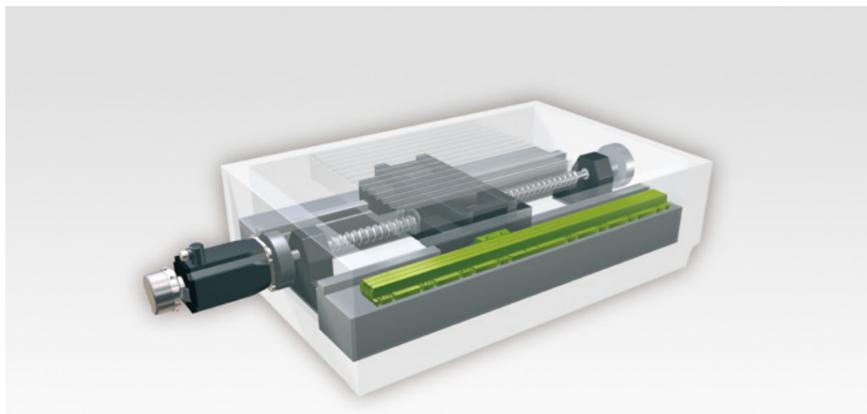
したがって、直線軸上の移動範囲全体における高い再現性と高精度は、Closed Loop 運転によってのみ、得ることができるのです。そしてその成果が、精密なワークと劇的に減少した廃棄率です。

繰り返し運動をおこなうボールねじの代替方法として、直線送り軸がリニアモータによって動かされます。この場合、機械軸の位置はスライド軸に取付けられたリニアエンコーダによって直接測定されます。非常に動的か

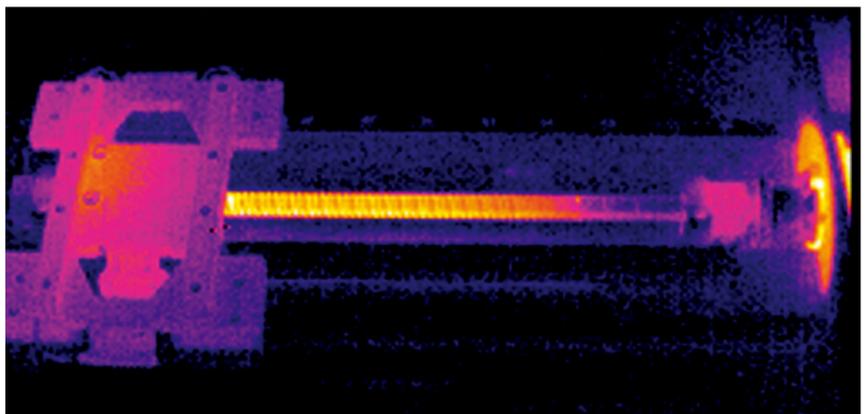
つ静かな動作で、リニアモータはすでに高分解能で高精度のリニアエンコーダに依存しています。このようなタイプのモータには、Closed Loop 運転の利点が制限なく応用されます。



Semi-Closed Loop: モータ内蔵のロータリエンコーダによる直線軸位置測定



Closed Loop: リニアエンコーダによる直線軸位置測定



ボールねじ加熱時のサーモグラフィ写真

回転軸での位置取得

直線軸での基本原理は回転軸にも応用されます。ここでは、位置決めはモータのロータリエンコーダまたは機械軸の高精度角度エンコーダで測定されます。

軸位置がモータ内蔵のロータリエンコーダで測定される場合もまた、**Semi-Closed Loop** と呼ばれます。これはギヤ機構の伝達誤差が閉じられた位置ループでは補正されないためです。

回転軸の機械的伝達誤差は下記要因で起こります。

- 歯車の偏心
- 遊び
- 摩擦および歯当たりや伝達軸ベアリングでの弾性変形

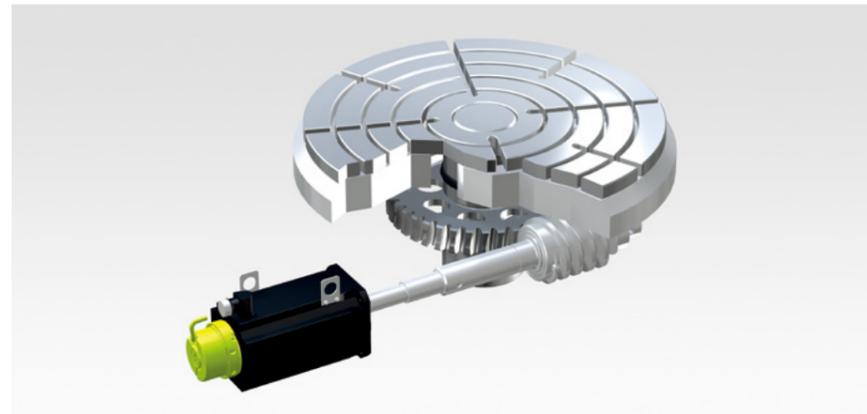
これに加えて、あらかじめ圧縮応力を与えられた伝達部は大抵の場合、回転軸を加熱する相当量の摩擦力で左右されます。したがって、機械的設計次第では位置誤差が生じるのです。

Semi-Closed Loop では、回転軸の伝達誤差は大幅な位置誤差をもたらし、そして繰り返し精度を著しく落とします。回転軸での誤差はワークの幾何学的配置に伝送され、そして不良品数を大いに増加させてしまいます。

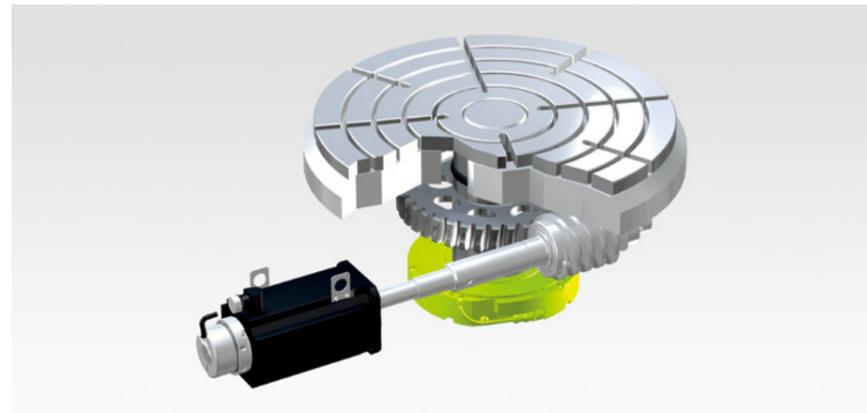
回転軸の位置決め精度と繰り返し精度は、高精度の**角度エンコーダ**を使用することによって断然高めることが可能です。なぜなら軸の位置は、もはやモータ上ではなくむしろ直接装置の回転軸において測定されるからです。これは **Closed Loop** 運転と呼ばれます。回転軸伝達誤差は、ここでは位置決め精度に何ら影響を与えません。長時間にわたって軸上の一定位置まで移動しうる回転軸の精度もまた、著しく上がります。結果として、最小限のスクラップで経済的な製造加工が実現します。

DD モータにより直接動作する回転軸は、特別な役を担っています。DD モータにより、伝達機構を追加せずに非常に大きなトルクを可能にします。

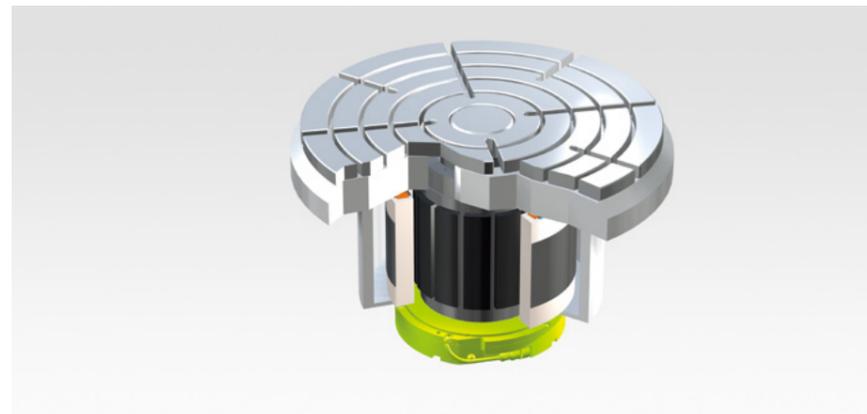
DD モータを使用した回転軸には、必ず高分解能の角度エンコーダが必要です。それらは常に Closed Loop で運転します。



Semi-Closed Loop: モータ内蔵のロータリエンコーダによる位置測定
駆動機構での誤差は検知されない



Closed Loop: 機械軸の角度エンコーダによる位置測定。
駆動機構での誤差が補正されている



DDモータ: DDモータを搭載した回転軸 Closed Loopでの運転

加工例

高精度同時5軸加工

サッカーボール（テルスター）

1970年と1974年のFIFAワールドカップのサッカーボールはテルスターにちなんでいます。テルスターとは世界初の非軍事通信放送衛星であり、NASAとAT&T社が1963年に打ち上げました。テルスターボールは20枚の白い六角形と12枚の黒い五角形の片が縫い合わされてできています。

ここでは、このボールを5軸加工機で切削されるワークモデルとして取り上げます。完成品は5軸加工機の加工精度を証明する試作品として使われています。

テルスターワークは、予めくろで作られた未加工材に3段階の切削加工を施して製作されます。

- 垂直加工パスと傾斜カッターによる五角形の3軸加工
- 水平加工パスと傾斜カッターによる六角形の3軸加工
- 溝の5軸加工

機械加工時間は2時間以上に及びますが、テルスターワークの完璧な外観は五角形と六角形の中の“溝”が一貫して卓越した精度で切削されることによってのみ、実現可能なのです。



1970年および1974年ワールドカップボール(テルスター)の5軸加工

テルスターワークにおける5軸加工の加工順序



五角形の切削:
3軸、傾斜カッター
 下向き削り
 機械加工時間: 22分
 送り速度: 6 m/min
 カッター: $\varnothing = 16$ mm
 行間隔: 1.5 mm
 傾斜角度: 40°



六角形の切削:
3軸、傾斜カッター
 下向き削り
 機械加工時間: 2時間17分
 送り速度: 6 m/min
 カッター: $\varnothing = 16$ mm
 行間隔: 0.2 mm
 傾斜角度: 40°



溝の切削:
5軸同時加工
 機械加工時間: 11分
 送り速度: 0.4 m/min
 カッター: $\varnothing = 25$ mm
 傾斜角度: 55°

交点において、さまざまな傾斜をもつカッターで切削された3つの溝がまさに交わっています。したがって交点は、カッターの工具先端点(TCP)が3つの異なる傾斜で寸分変わらず同じ地点に位置した場合にのみ、正確に加工することができます。

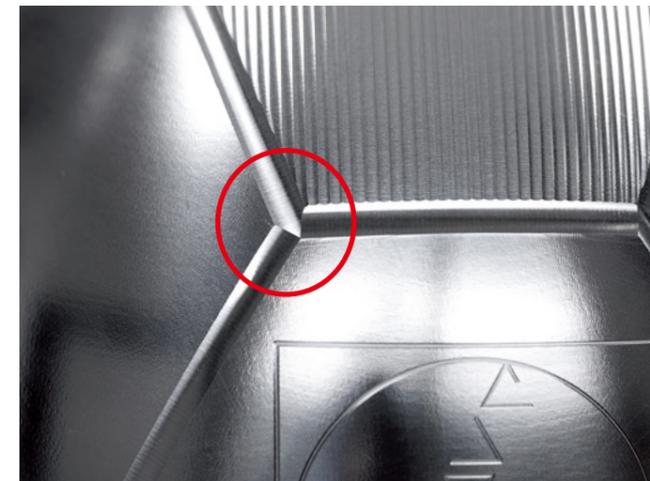
しかし、カッターの3つの傾斜角度は直線軸上で大きな補正動作を要求します。それぞれの溝で、交点のTCP位置において直線軸と回転軸に大きな位置誤差が生じています。

切削中、1軸以上の送り軸での位置誤差は交点で3つの溝を切削する際、必然的にTCP位置の一致を妨げます。すべての送り装置での高精度位置決めが、交点を含む溝の精密加工には必要不可欠です。

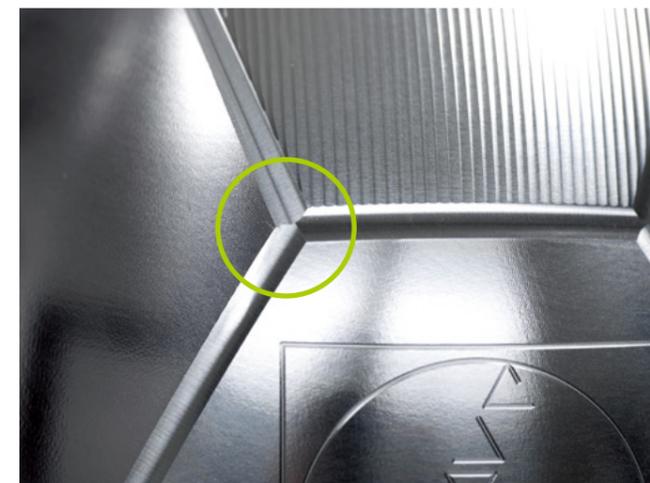
テルスターワークの精度という単純な目視評価のために、深さ0.15 mmの溝は直径25 mmのカッターで加工されています。これにより非常に平らな断面が得られ、よって溝の深さのどんなに小さな誤差(± 10 μm 以下)でさえも、溝幅の明らかなばらつきの原因となってしまうのです。

テルスターワークが工作機上でSemi-Closed Loopによって製作される場合、位置決め精度と繰り返し精度は、直線軸上で繰り返し運動をおこなうボールねじの伝達誤差と回転軸の伝達とに制約されてしまいます。結果として、テルスターワークの溝幅にゆらぎが生じます。交点は各々の溝と正確に一致することはできず、溝の中心に明らかな位置変化が起こるのです。

Closed Loopでは、送り軸が移動範囲全域にわたって非常に高精度の位置決めと繰り返し精度を実現します。これにより、切削方向の大きな変化や各加工段階において間隔が生じた場合でも、ワーク上の隣接する断面に高精度な加工を施すことができます。得られる精度は溝経路の交点で確認することができます。それぞれの交点はすべて隣接する3つの溝で構成されています。さらに、溝幅はワーク円周全体にわたって一定です。



Semi-Closed Loop: 駆動機構の影響が加工精度を損なわせている。溝の深さはまちまちで、交点は明らかに精度が低い。



Closed Loop: ハイデンハイン製の高精度リニアエンコーダおよび角度エンコーダによって、駆動機構における誤差が加工結果に影響を及ぼさない。溝は正確な深さで切削されており、交点はすべて精密に仕上がっている。

同時 5 軸平面加工

ポリゴン加工物

5 軸加工により機械加工時間を削減できる可能性が高まります。ポリゴン加工物の外側面はワーク 1 回転時に 5 軸同時平面加工で仕上げられます。ボールノーズカッターを用いた外側面の 3 軸加工と比べ、5 軸加工は加工時間を 30 % に短縮します。

5 つの送り軸が同時に動く高精度加工は、送り駆動の精度に厳しい要求を課します。位置測定の種類によって、付加的に必要とされた回転軸とチルト軸での誤差は加工物の品質に大きな制約をもたらす可能性があります。よって適切なエンコーダの選定と、そのエンコーダを制御ループに正しく組み込むことが非常に重要なのです。

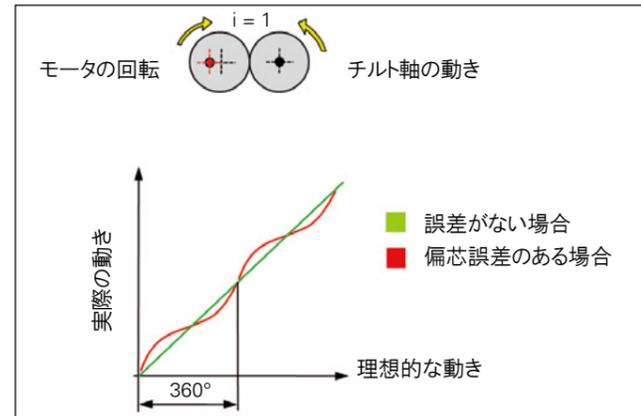
ポリゴン加工物の周縁部は、同時に B 軸が動きながら C 軸が 1 回転して加工されます。外側面の加工中、B 軸は 1° から 19° の範囲で、内外へのチルト動作を 5 回繰り返します。

ここでは加工物への位置測定の影響を調べるため、ワークは B 軸で Closed Loop と Semi-Closed Loop 別々に加工されます。その他の軸はすべて、常に Closed Loop で加工されます。

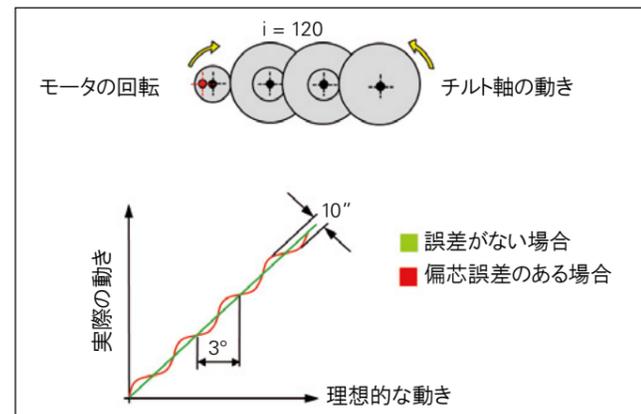
Semi-Closed Loop では、回転軸の機械的誤差は位置誤差を引き起こす可能性があり、結果として精度を落としてしまいます。チルト軸はたいてい多段ギヤを備えた駆動を持ちます。チルト軸が均一な動きをするためには、ギヤ部品はすべて高精度で加工され、正確に組立てられていなければなりません。ギヤのどんなに小さな偏芯誤差でも、チルト軸の回転速度において明らかなガタつきを起こしてしまうのです。

下図はギヤ噛み合わせ時の偏芯による影響を示しています。正確に組立てられたギヤによる伝達は、チルト軸に対する誤差なく駆動動作を伝えます。伝達ギヤが偏芯している場合、チルト軸の動きは正弦波波形の誤差を持ちます。

図に示されたポリゴン加工物は減速比 $i = 120$ のチルト軸搭載の加工機で製作されました。モータピニオンは直径 40 mm で、半径方向への芯ずれは ± 0.058 mm です。



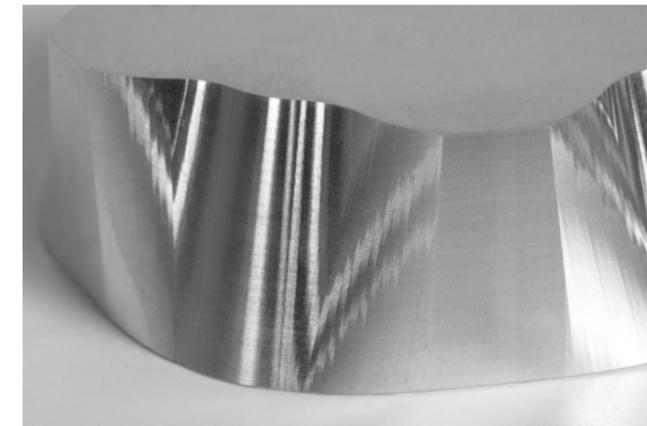
偏芯による回転軸の位置誤差 減速比 $i = 1$



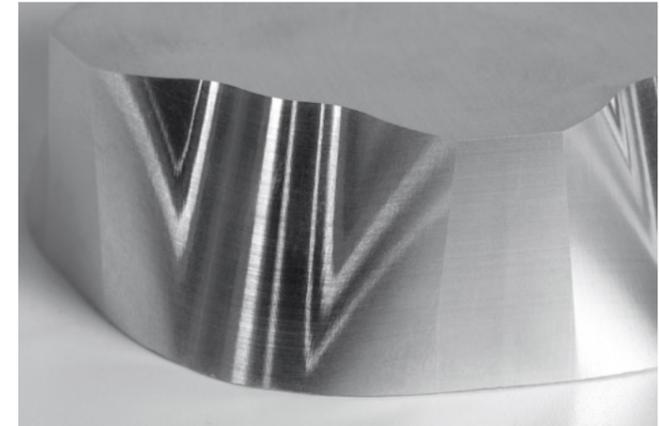
偏芯による回転軸の位置誤差 減速比 $i = 120$

チルト軸が Semi-Closed Loop で制御される場合、伝達装置によって生じた正弦波波形の位置誤差は制御装置では検知することができません。偏芯した小歯車を持つ駆動モータが 1 回転することによって、 $\pm 10''$ の範囲でチルト軸に運動誤差が生じます。チルト角に対して、 3° 毎に誤差が繰り返し発生します。

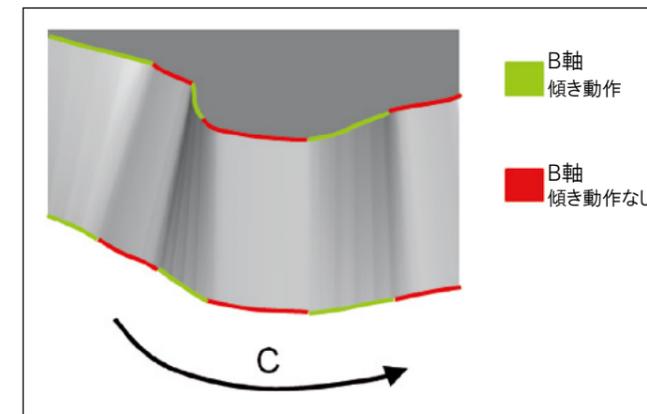
最初の実験では、ポリゴン加工物を Semi-Closed Loop 運転で加工します。ポリゴン加工物の外側面に発生した表面模様から見てとれるように、伝達装置によって位置誤差が発生していることが明らかです。結果として生じる形状偏差は ± 0.015 mm。伝達誤差はワーク上のチルト軸が動作する位置においてのみ確認できます。



Semi-Closed Loop: 加工ムラのあるポリゴン加工物



Closed Loop: 高精度表面加工のポリゴン加工物



平面加工および回転/チルト軸によるポリゴン加工物の切削

ワーク反転時における機械加工

回転軸位置決め精度の要求事項

角柱部品の側面はたいがい反転加工を施されます。この場合まず片面が、おそらくチルト軸を使用して加工されます。チルト軸は工具に対してワークを傾けさせます。そして次にワークは反対側を加工するため、ロータリテーブル上で180°回転させられます。

ワーク反転時における機械加工はロータリテーブルの位置決め精度に厳しい要求を課します。旋回動作では小さな角度誤差であっても、平行偏差に至ってしまうのです。ロータリテーブルの中心に固定された500mm辺長のワークにおいては、たった0.002°の位置誤差が表面垂直に0.01mmの誤差となります。

加工位置が駆動モータのシャフトで測定される際に(Semi-Closed Loop)、回転軸での位置誤差が起こります。これは、回転軸伝達での誤差(遊び、弾性、ギヤシャフトの半径方向へのずれなど)が位置制御に含まれず、補正されないためです。駆動メカ部の設計次第では、Semi-Closed Loop制御は旋回動作において±0.01°の位置誤差に至る可能性があります。

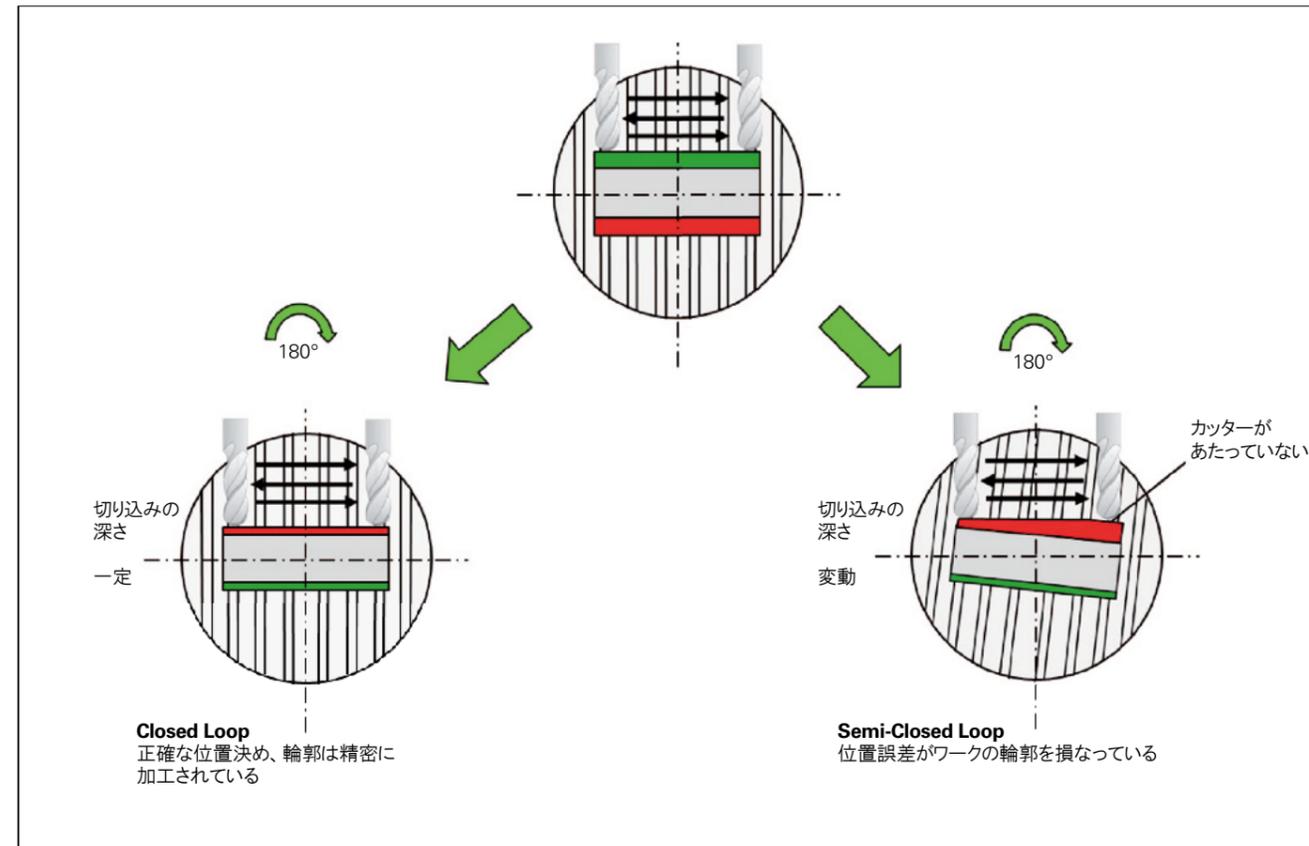
ロータリテーブルの精度は、ワークテーブルの動作を直接計測する精密な角度エンコーダを使用することによって、飛躍的に向上させることができます。ロータリテーブルのギヤでの伝達誤差は角度エンコーダで確認され、よって位置制御(Closed Loop)で補正されます。

Closed Loop 運転では、角度エンコーダの精度が旋回動作の精度を大きく左右します。光学方式の角度エンコーダはその位置誤差の値を可能な限り0.0003°以下にすることができます。

ワーク反転時の機械加工においてロータリテーブルにおける位置精度の影響を説明するため、直方体部品の側面に文字を刻みました。はじめに部品は5軸加工機上で、ワーク面が傾斜面に置かれた状態で検知されます。次に、文字が3軸でのボールノーズカッターにより下向きおよび上向き削りで削り出されます。文字の高さは0.025mmです。そして、部品はロータリテーブル上で180°回転します。これは反対側で同じ文字の高さで2文字目を削るためです。

まずワークはClosed Loop(ワークの☑参照)で加工されます。次に、2つ目のワークが同じ工作機でSemi-Closed Loop(ワークの□参照)で加工されます両者の違いはすぐに明らかになります。Closed Loop制御で高精度リニアエンコーダおよび角度エンコーダによって削られた文字が両面とも誤差なく加工されたのに対して、Semi-Closed Loopでは、加工誤差が認められます。

すなわち、Semi-Closed Loopで加工された部品の裏面は、左側では切削がより深く、一方右側では工具が空を切っているだけでした。Semi-Closed Loopにおける位置依存および方向依存の位置誤差は工作台とワークの傾斜を引き起こします。これは結果として、明らかに欠陥のある削り出しとワークの廃棄に至るのです。



Semi-Closed Loop: 駆動メカ部の影響(例、伝達誤差)が工作機の精度を損なうことがあり、それゆえ加工精度と表面品質が低下する。



Closed Loop: 駆動メカ部からの精度を制限する作用は加工仕上がりに影響しない。ハイデンハイン製の高精度角度エンコーダによって、ワークの緻密な輪郭と卓越した表面加工が実現。

エンコーダ

5軸加工は送り駆動の精度に特に厳しい要求を課します。これは移動範囲と軸のフィード値が3軸加工と比べて増えるためです。送り駆動での熱の発生と機械的伝達誤差は、送り駆動の位置測定を加工精度の決定的要因へと変えます。スクラップとコストは正しい位置決めをすることで最小になります。

よって、直線軸用のリニアエンコーダはもちろん回転軸およびチルト軸用の角度エンコーダが、高精度位置決めと高速加工が必須の工作機械には欠くことができません。

ハイデンハイン製リニアエンコーダおよび角度エンコーダは軸の動きを直接かつ即座に確立します。したがって機械の伝達要素は位置検出に影響を及ぼしません。運動誤差および熱の影響あるいは他の力による偏差は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。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。

直線軸において：

- 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

回転軸、チルト軸および回転軸において：

- 機械的伝達誤差
- 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



参考情報

- カタログ: NC工作機械向けリニアエンコーダ
- カタログ: ベアリング内蔵角度エンコーダ
- カタログ: ベアリングを内蔵しない角度エンコーダ

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