

特集 インライン画像計測を用いた高精度加工システム*

High-precision Grinding System Using a Machine Vision Control Unit

山本 崇 大島道博 横山良雄 宮城俊夫
 Takashi YAMAMOTO Michihiro OSHIMA Yoshio YOKOYAMA Toshio MIYAGI

This paper describes a new grinding system that incorporates a measurement unit to enable autonomous high-precision grinding control. The valve seat diameter, which is the dimension of the intersection of two cones with a small angular difference, is difficult to measure with a high degree of accuracy using any of the conventional technologies. For the new grinding system to overcome this difficulty, we developed a seat diameter measurement unit based on the new idea of incorporating an image processing system. The developed unit provides five times greater measurement accuracy than the conventional technology. In addition to this unit, the new grinding system contains a grinding unit that can process two different cones to a high precision without unloading the workpiece, and uses a different control algorithm for each grinding fluctuation factor. Together these features have realized a new grinding system that has a degree of precision three times that of conventional systems.

Key words : High-precision, Machine vision, Grinding system, On the machine measurement

1. 緒言

ディーゼルエンジンのNO_x・黒煙排出抑制には、高圧環境・微量噴射時における正確な弁開閉応答を得ることが必要であり、このためにはバルブシート径の高精度化が不可欠である。本論文で扱うバルブシートはバルブニードルの先端に形成されるもので、わずかな角度差を持つ2円錐面の交線である。このためシート径の加工誤差は2円錐面の各々の加工誤差を加算したものとなり加工誤差を抑えるのが困難である上、円錐面上の交線寸法であることから高精度な計測が難しく、従来の加工システムではシート径をより高精度に加工することが困難であった。

この問題を解決するため本論文では計測ユニットを内蔵し自動的に高精度を維持する加工システムを提案する。計測ユニットとして新たに視覚装置を用いた新発想による計測装置を開発し採用した。本計測ユニットに加え2円錐面のワンチャック加工による加工ユニットの高精度化、変動要因に応じた加工制御アルゴリズムを組み合わせた加工システムを構築することで、従来比3倍の加工精度をもつ高精度研削システムを実現した。

2. 現状加工システム

加工対象部位をFig. 1に示す。対象のシート径は機能上鋭利なエッジを必要とするため、二つの円錐面を別々の工程で研削加工している。加工結果は作業者が

汎用の計測装置（投影機など）を用いてオフラインで抜き取り計測し、結果によって補正を実施している。この加工システムによって得られる加工精度レベルをFig. 2に示す。Fig. 2に示すようにシート径寸法変動の要因としては①加工ばらつき（二工程での加工誤差が累積して変動）、②傾向変化（熱影響、砥石の切れ味等が経時的に変化）、③群間変動（研削砥石の加工能力を再生する作業であるドレッシング後に不連続に変化）が存在する。また計測は抜き取りのオフライン計測を用いており、シート径寸法変化を把握しきれないため正確な加工制御がなされず、シート径の更なる高精度化には限界がある。

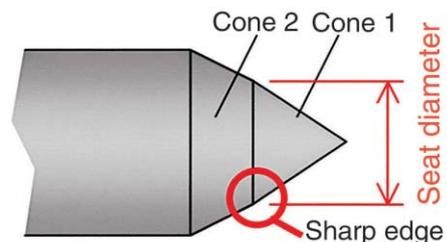


Fig. 1 Valve seat

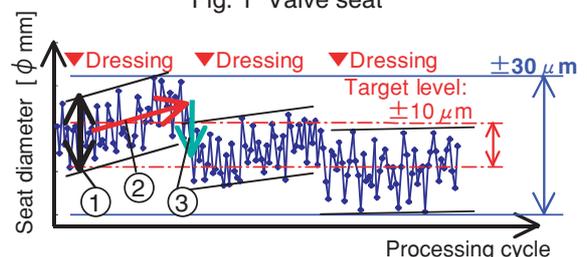


Fig. 2 Seat diameter using conventional system

*2004年1月15日 原稿受理

3. 開発加工システム

3.1 加工システム概要

今回開発したシステムのコンセプトをFig. 3に示す。本システムは加工ユニットと計測ユニットを機内に搭載し、加工寸法の変動を加工直後の計測データから把握し狙い値とのズレをフィードバック補正する加工アルゴリズムによって両ユニット間を結合するもので、自律的に高精度を維持する知能化された高精度加工システムを目指すものである。以下本システムの構成要素である加工ユニット、計測ユニット、制御アルゴリズムについて解説する。

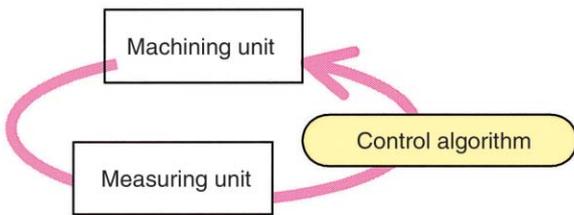


Fig. 3 Concept of new grinding system

3.2 高精度加工ユニット

加工対象のシート径は2テーパ面の交点である。このため、シート径は、片方のテーパ加工面位置のみでは決まらず、2テーパ加工面の位置が、相対的にどう動くかによって決まる。

2テーパ加工面のばらつきがシート径に与える影響をみると、Fig. 4 (a) に示したように2テーパ面が互いに逆方向に動いたときにシート径の変動が最大となる。逆に言えば、Fig. 4 (b) のようにテーパ面が同方向へ動くならば、シート径の変動を比較的小さく抑えることができる。つまりテーパ面の

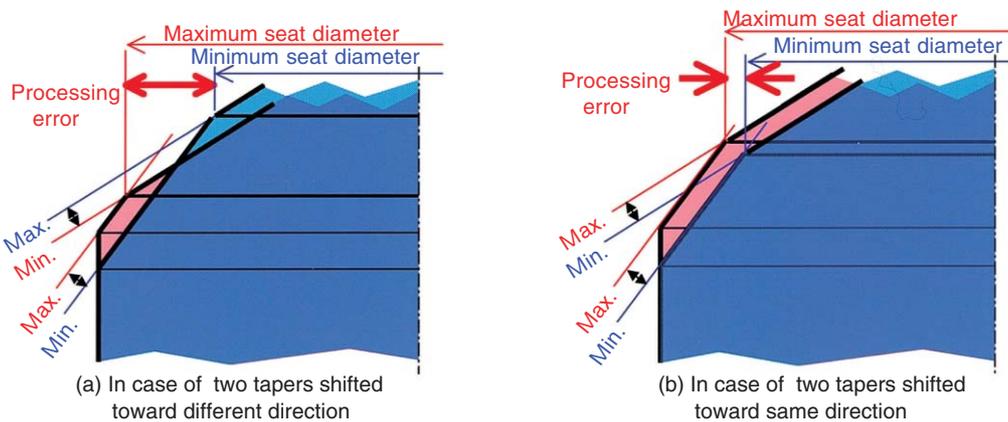


Fig. 4 Processing error

相対位置の変化を抑えることがポイントとなる。

従来のシート径加工工程は、Fig. 5に示すように二つの加工設備により各々のテーパ面を加工していたため二つのテーパ面の加工位置には関連性がなく相対位置のばらつきが大きく、その結果、シート径がばらつく原因となっている。テーパ面の相対位置を抑えるためだけなら、加工工具である砥石を総形成形し押付け加工することが考えられるが、この方法ではシート径のエッジ部がシャープエッジとならずシート径の機能である弁シール性が得られず採用できない。そこで従来の加工工程のように加工を2回に分けつつテーパ面の相対位置の変化を抑える工夫が必要となる。

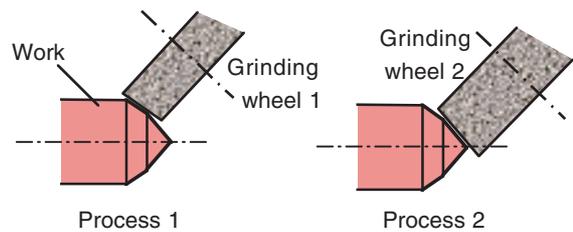


Fig. 5 Traditional grinding system

以上の点を踏まえ、ワークを保持したまま、砥石をシフトさせて二つの円錐面を順次加工する加工ユニットを開発した。この加工ユニットをFig. 6に示す。二つの円錐面を順次加工することでシートの機能であるシャープエッジを確保しながら、ワークのつかみ替え誤差の排除、熱変位の同期化や砥石切れ味劣化度合いの同期化により加工ばらつきの低減が期待できる。本ユニットの開発・適用によりFig. 2に示したばらつき要因のうち①加工ばらつきを50%低減できた。

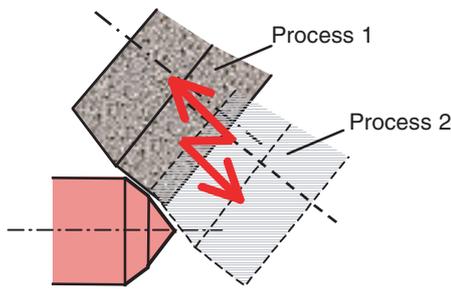


Fig. 6 Machining unit

3.3 高精度インライン計測ユニット

3.3.1 従来計測法と欠点

現在一般的に、長さや内外径といった1次元の量に対しては従来から機械的接触による測長装置（マイクロメータ）や隙間を流れるエア流量を利用した内外径計測装置（エアマイクロ）などが実用化され、サブミクロン（ $0.1\mu\text{m}$ ）台での高精度な計測が可能である。

しかしながら今回の計測対象であるコーンシート弁のシート径は、二つのテーパ面の交点であり3次元形状の寸法であるため、これらの計測装置を用いて計測することはできない。従来工程では、こうした3次元形状の寸法を計測するのに投影機を用いている（Fig. 7）。これは透過光の照明を用いてワーク形状をシルエット像として一度2次元の像へ変換・拡大し、その後拡大されたシルエット像から作業者が目視で測定ポイントを抽出し、このポイント間の寸法を計測するものである。

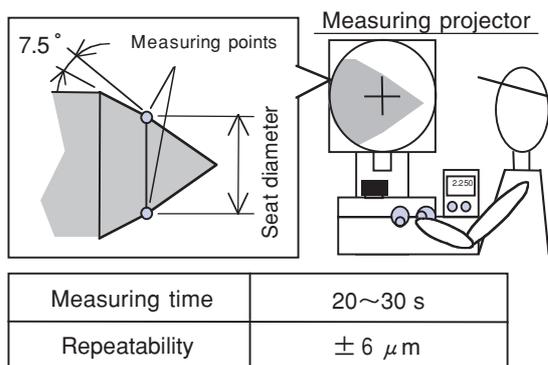


Fig. 7 Conventional measuring method

この手法では、3次元のワークを2次元の像へ変換するのに透過光照明によるシルエット像を用いているためシート径のエッジ部分を明瞭に判別しにくいことに加えて、角度差の無い2直線の交点を正確に目視で

抽出するのが困難であり、作業者による官能的判断のばらつきも含むこと、また1断面のみの計測であること等の要因から計測精度が悪く、計測誤差は約 $6\mu\text{m}$ （ 3σ ）程度であった。従来求められていた加工精度（ $\pm 30\mu\text{m}$ ）ではこの計測精度でもなんとか対応可能であったが今回加工精度3倍（ $\pm 10\mu\text{m}$ ）を目指すにあたっては計測誤差が大きく適用できない。

今回目指すシステムでは加工精度3倍に合わせ計測精度も従来比3倍以上（ $2\mu\text{m}$ 以下）を目標とした。また加工設備上に計測ユニットを搭載することから全自動で計測できること、悪計測環境でも計測精度を維持できることに留意して開発を行う。

計測を自動化するにあたっては従来、人が行っていた測定ポイントの抽出を自動的に行う必要がある。このような用途には一般的に視覚装置が用いられる。視覚装置は近年高機能化・廉価化が進んでおり、組み付け工程の位置決めや欠品異品チェック、傷・鑄込み巣などの外観検査への応用例が報告されている。しかしながら今回目標としているように、視覚装置を加工機中にインライン計測ユニットとして組み入れ、加工ユニットと連携して高精度化を狙うような用途には適用されていない。これは視覚装置を用いた計測器が一般的な計測装置にくらべ測定精度が低いこと、また加工機中でのインライン計測であるため、測定ワークのばらつき、ワークへの加工油付着などの計測値変動要因を含んだ状態での計測となり精度維持が困難であるためと考えられる。しかし視覚装置は30万点（ 640×480 ）もの画素データを瞬時に取り込み、豊富な演算機能を用いて複雑な処理が可能であるなどの特性を備えていることから、測定方法やその後の処理方法を工夫することにより高精度な計測が可能であると考えた。

そこで、加工機内で使用可能な計測ユニットの実現を目指し、視覚装置を用いた高精度計測手法と、インライン計測における計測誤差要因についての検討を進める。

3.3.2 新計測手法の検討

従来の投影機を用いた計測法では、透過光の照明によるシルエット像の生成の後、作業者による計測ポイントの抽出を前提としていたため、Fig. 8 (a) に示すような側面方向からの計測アプローチであった。この手法では1組の測定ポイントしか得られない。

今回の計測法では、視覚装置の特性である多点計測ポイントの同時取り込みが可能である点を生かすため、Fig. 8 (b) に示すように計測アプローチを従来

の側面方向から正面方向へと変更した。正面から観察することで対象であるシート径は全周にわたって観察可能となり、一度の観察で計測ポイントを同時に多数取り込むことができる。

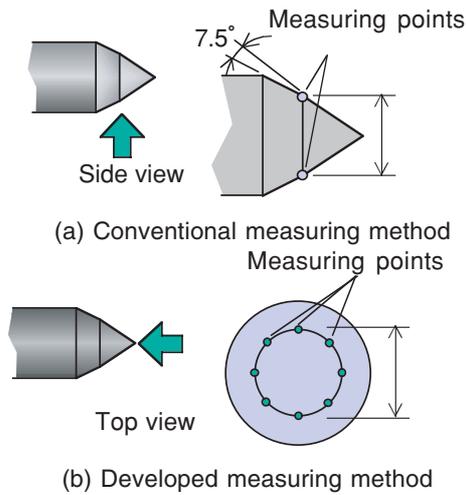


Fig. 8 Measuring method

ただし従来と同じ透過光照明を用いたのでは、計測ポイントはワーク自身の影になり判別することができない。そこでFig. 9に示すように照明方法を透過光照明法からリング照明を用いた反射光照明法へと変更した。この照明方法は、シート径を構成する一つのテーパ面で正反射となるようリング照明を設置するもので、正面から観察すれば正反射となるテーパ面は明るく、もう一方のテーパ面は暗く観察されるため、計測対象のシート径はHi-コントラストなエッジとして容易に抽出できる。

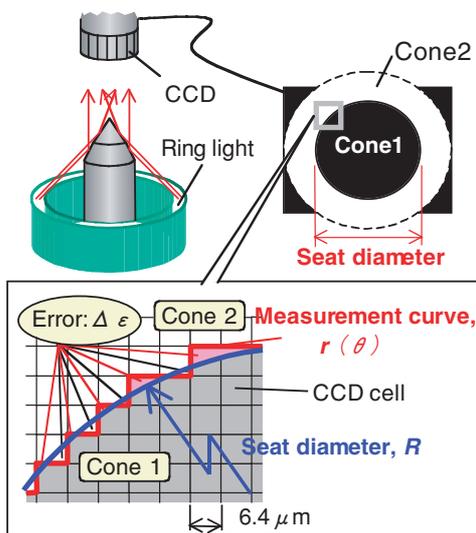


Fig. 9 Measuring unit

今回の計測アプローチと照明方法を用いることにより、従来の側面方向からの透過光照明法に比べて計測ポイントの多点同時取り込みと計測ポイント抽出の容易化を実現した。

ただし得られた画像は画素毎に二値化されるのでエッジは滑らかとならず凹凸がある。視覚装置により得られた計測ポイント曲線をシート径の中心を原点とした極座標上の曲線 $r(\theta)$ とすると、求めるシート半径 R との誤差面積 $d\epsilon$ は式 (1) であらわされる。

$$d\epsilon = \frac{1}{2}(r+R)(r-R)d\theta \quad (1)$$

誤差面積 $d\epsilon$ を全周 ($0 \leq \theta < 2\pi$) に渡って積分した総誤差面積 $E=0$ となるようシート半径 R を選ぶと、このときの R は式 (2) で表せる。

$$R = \sqrt{S/\pi}, \left(S = \frac{1}{2} \int_0^{2\pi} r^2 d\theta \right) \quad (2)$$

式 (2) 中の S は計測ポイント曲線 $r(\theta)$ で囲まれる面積をあらわしている。つまり視覚装置で容易に計測可能なシート面面積を計測し式 (2) によってシート径を求めることで最も誤差の少ないシート径を得ることができる。

3.3.3 計測安定性向上の検討

加工機内の計測の特徴として、計測に適さない雰囲気中での計測であることや、加工後のワークを即座に計測する必要があることから、照明光の強度やワークに付着した加工油の影響により反射光の強度が変化し画像の明るさが変化することが考えられる。実際のワークを用い、完全に加工油を除去したドライ状態のものと、実際の使用条件を模擬し加工後に簡易的なエアブローで加工油を除去したセミドライ状態のものを本計測ユニットで観察した画像をFig. 10に示す。この結果から実際の使用状態であるセミドライ状態では反射率低下による画像平均明度の低減が観察され、さらに加工油の除去状態によりこの低減率にばらつきがあることが分かった。このような画像の明るさ変動に対してロバスト性を得る手法として、二値化しきい値を動的に決定する判別分析法が知られている。これは画素明度のヒストグラムを二つのクラスに分割する場合において、この二つのクラス分布を正規分布に従うと仮定し、クラス間分散とクラス内分散の比を最大にするしきい値を求めるものである。

この判別分析法を用い、実際の使用条件で変動する

と考えられる画像平均明度による影響を調べるために、照明照度を変化させて計測テストを行った。結果をFig. 11に示す。この結果をみると低照度領域と高照度領域の性格の異なる二つの領域に分かれていることが分かる。低照度領域では指示精度はよいが繰り返し精度が悪い。逆に、高照度領域では繰り返し精度はよいが指示精度が悪くさらにドライワーク・セミドライワークの計測値が乖離している。すなわち繰り返し精度・指示精度をともに満足する領域が存在せず、このままでは加工機内の計測ユニットとして用いることができない。

	Dry	Semi-dry	
Image			
Average of brightness	160	155	152

Fig. 10 Brightness of the work piece

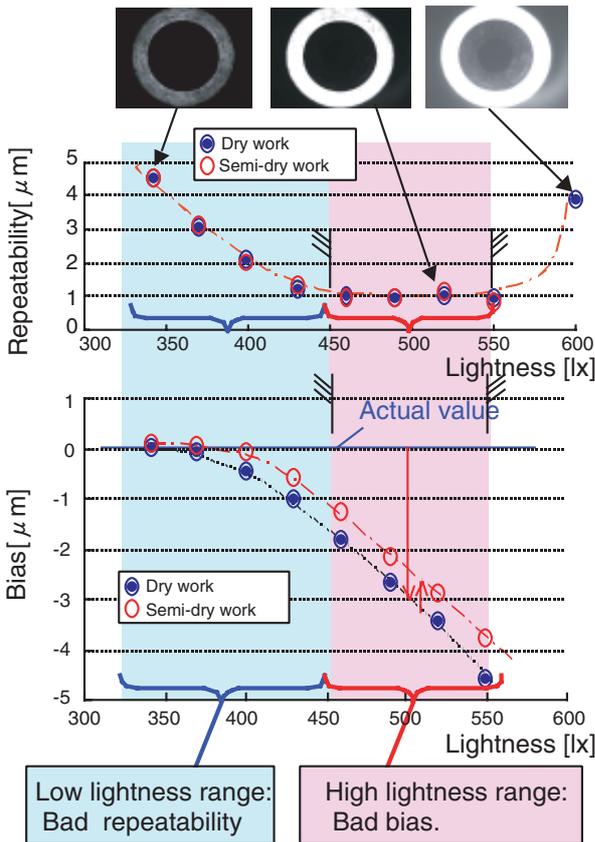


Fig. 11 Relationship between lightness and accuracy of measurement

この問題の原因について明度ヒストグラムより検討する。Fig. 12に明度ヒストグラムを示す。低照度領域のヒストグラム (Fig. 12 (a)) をみると画素明度の低い (暗い) 方にシート面1の分布があり画素明度の高い (明るい) 方にシート面2の分布があるのが分かる。これらはほぼ正規分布を示しており判別分析法で適正にしきい値が求められると考えられる。しかしながらシート面1・シート面2の両分布が重なる部分の頻度をみると最低でも400画素となっている。このためあるしきい値を判別分析法で設定した場合、この400画素分はまとめて白か黒 (シート面1かシート面2か) へ組み込まれるため、ここに誤差が発生すると考えられる。今回の計測では一画素が測定値へ与える影響は $0.02 \mu\text{m}$ であるため、400画素は $\pm 4 \mu\text{m}$ となり目標としている計測精度 $\pm 2 \mu\text{m}$ は達成できない。

一方で高照度領域のヒストグラム (Fig. 12 (b)) をみると照明照度を増すことでコントラストが増し分布の重なりが小さくなっていることが分かる。しかしながらコントラストが上がり全体的に明度分布が広がった結果、分布が256階調を超える部分にまで広がっている。CCD素子は256階調のダイナミックレンジしか持っておらず、256階調以上の分布はすべて256階調の明るさとして処理される (CCD素子の飽和現象)。このCCD素子の飽和現象が発生したためにシート面2の平均明度は若干低く (暗く) 判断されてしまい、判定されるしきい値は実際に望ましいしきい値よりも低い方へとシフトする。つまり二値化時に径が小さくなる方向へと誤差が出るものと考えられる。また飽和量は画像の平均明度によって増減するためしきい値のシフト量も画像の平均明度に影響されると考えられる。

これらの検討結果から高照度領域を使用し、さらに、照度変化やワークに付着した加工油の影響で飽和によりシフトしたしきい値を画像平均明度を用いて修正することで、高い繰り返し精度と径測定値変動の抑制が同時に実現できると考え、判別分析法を拡張したFig. 13に示す計測手順で計測を実施することとした。

これは判別分析法により算出したしきい値を画像平均明度で補正し、補正したしきい値で取得画像を二値化処理するものである。しきい値のシフト量は画像平均明度に対して下に凸の分布を示していることから補正関数として2次関数を選び、各係数は実ワークの計測結果から最小自乗法を用いて決定した。本手法で画像平均明度と指示精度の関係を調べた結果をFig. 14

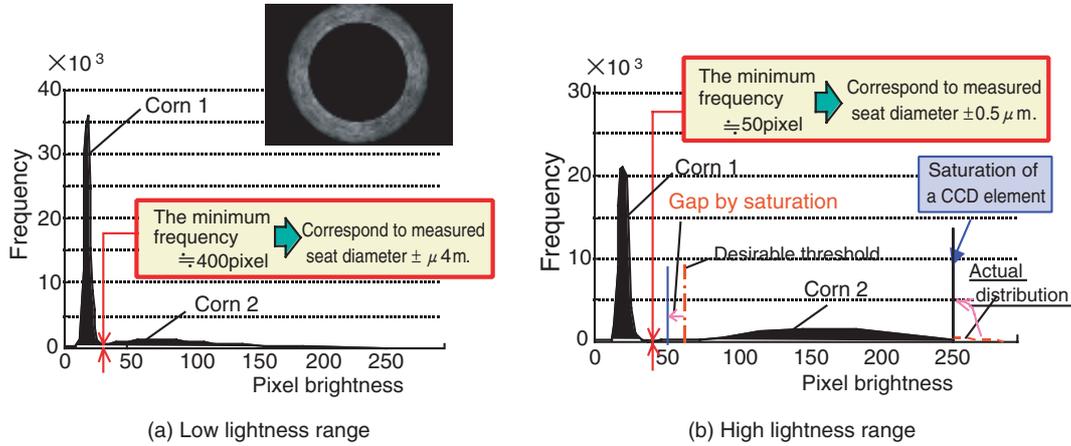


Fig. 12 Brightness histogram

に示す。補正前は画像平均明度に対して計測値が変化していたものが、2次関数によるしきい値補正を行うことで画像平均明度が変わっても一定の値が得られていることがわかる。これは計測時における照明照度変化や、ワークに加工油が残っていても高い指示精度が得られることを示している。

この結果より画像平均明度を用いて判別分析法によるしきい値を調整する手法を用いることが照明照度変動や加工油残りの影響を抑制するのに有用であることが確認できた。

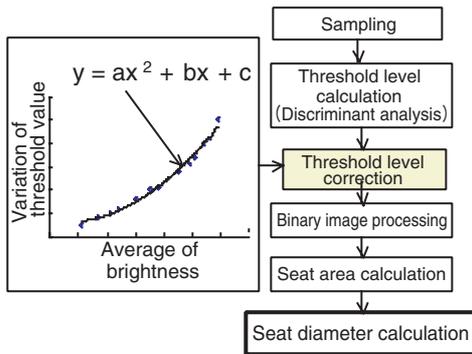


Fig. 13 Measurement procedure

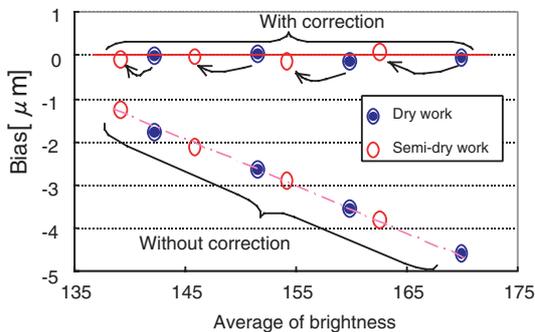


Fig. 14 Relationship between the average of brightness and measured seat diameter

3.3.4 開発計測装置の計測精度検証結果

今回開発した計測ユニットによる計測により、計測精度が $\pm 1.1 \mu$ (3σ)と従来比5倍以上の高精度計測がインラインで可能となった (Fig. 15)。

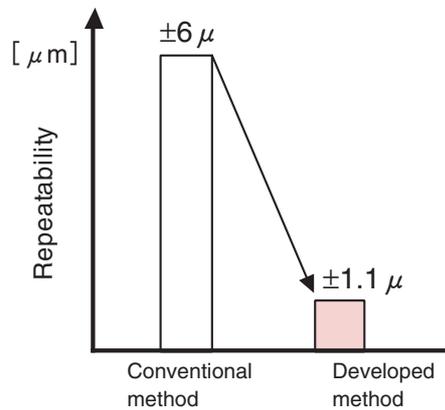


Fig. 15 Result

3.4 加工制御アルゴリズム

計測ユニットからのデータを用いてFig. 2の変化要因のうち②経時変化と③群間変動を抑制する制御アルゴリズムを検討する。

②経時変化は環境温度変化や砥石切れ味変化に起因すると思われる比較的長周期の変化である。このため得られた時系列データの長周期成分をデジタルフィルタによって抽出し目標値とのズレを補正するポストプロセス制御を適用した。デジタルフィルタとしては一般的なNC装置内でも実現できるよう3点の移動平均フィルタを採用した。

③群間変動は研削砥石の加工能力を再生する作業であるドレッシング後に、シート径が不連続に変化する

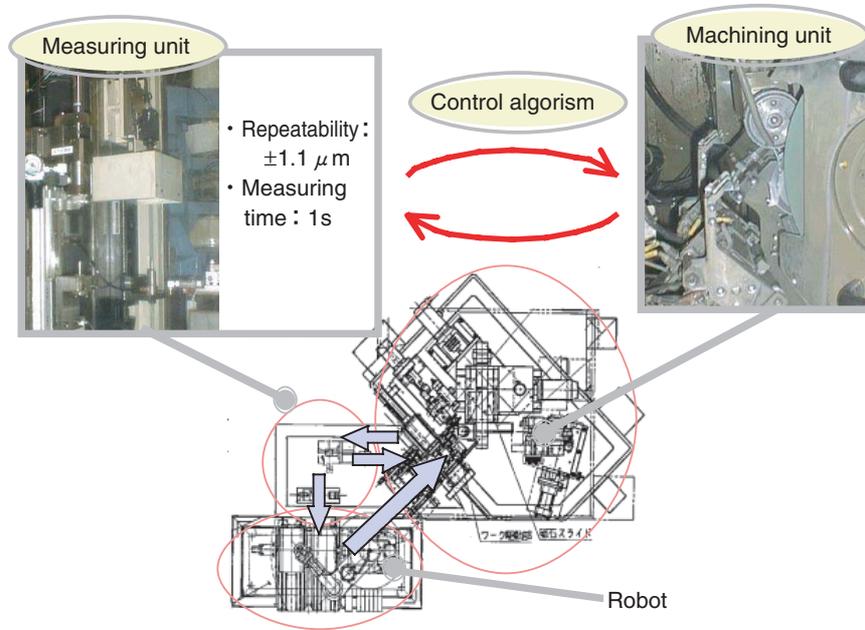


Fig. 16 Developed grinding system

ものである。ドレッシングは硬い砥石をダイヤモンドなどのドレッサで削る難加工であるため、ドレッサの切れ味や砥石密度、ドレス時の砥石径、ドレッサや砥石の表面性状により砥石成形寸法が変化し、ドレッシング後のシート径変化をあらかじめ予測するのは困難である。そこで、加工の途中に計測をはさみ砥石成形寸法を把握、最終的な加工寸法を予測して補正を加えることでドレッシング後の変動を抑制する擬似インプロセス制御を考案・採用した。

3.5 開発結果

Fig. 16に今回開発したシステムをFig. 17に本システムによる加工結果を示す。設備自身で自律的に精度を維持することで、Fig. 2に示した加工変動要因である①加工ばらつき、②傾向変化、③群間変動が抑制され、従来比3倍の加工精度である $\pm 10 \mu\text{m}$ が実現できた。

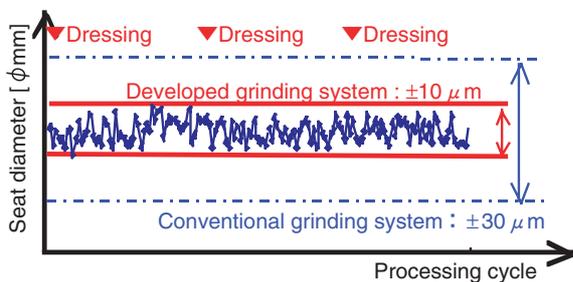


Fig. 17 Accuracy of seat diameter using developed grinding system

4. 結言

- (1) 従来計測法では高精度計測が困難であった二元錐面の交点径計測において、新発想による視覚装置を用いた計測ユニットを開発し、従来比5倍の計測精度を実現した。
- (2) 上記ユニットとシフト研削機構を有する加工ユニットを開発し、両ユニットを結びつける加工アルゴリズムを適用することで、自律的に高精度を維持する加工システムを構築し、加工精度を従来比3倍に向上した。
- (3) 開発システムは円錐シート形状をもつ他のバルブ製品群に対しても広く適用可能である。
- (4) 本加工システムは社内にて現在7台稼動中であり、現在までに1000万本以上の生産実績がある。また今後の増産に対応してさらに増設予定である。



<著 者>



山本 崇
(やまもと たかし)
生産技術部
生産システム開発に従事



大島 道博
(おおしま みちひろ)
生産技術部
生産システム開発に従事



横山 良雄
(よこやま よしお)
生産技術部
生産システム関連の画像計測技術開発
に従事



宮城 俊夫
(みやぎ としお)
ディーゼル噴射製造部
生産システム開発に従事