

氏名	陸子男
生年月日	
本籍	中国
学位の種類	博士(工学)
学位記番号	博甲第443号
学位授与の日付	平成13年9月28日
学位授与の要件	課程博士(学位規則第4条第1項)
学位授与の題目	マイクロ切削加工システムの開発
論文審査委員(主査)	米山 猛(工学部・教授)
論文審査委員(副査)	北川 正義(工学部・教授) 上田 隆司(工学部・教授) 細川 晃(工学部・助教授) 浅川 直紀(工学部・講師)

学位論文要旨

Abstract ———As an application of cutting to the manufacturing for micro mechanical parts and as a trial on the development of the miniature machining system matching to the micro size of the work piece, a micro lathe turning system has been developed. By the improvement of spindle unit, the whirling of spindle rotation is kept under $0.6 \mu\text{m}$. Using the dimension measurement on the microscope monitor, variation of tolerance is controlled under $0.7 \mu\text{m}$ to the basic dimension $20 \mu\text{m}$. A work material 0.3mm in diameter is clamped and cut to minimum $6 \mu\text{m}$ in diameter with the rotation speed up to $15,000 \text{rpm}$. The whole size of the equipment is about 270mm which can be set under an optical microscope. A micro diamond single point tool has been applied on the cutting for various shapes, and the usefulness of such micro cutting tool for the various forms has been confirmed. Cutting force has been investigated using a three directional force sensor and the possibility of the reduction of resistant force to improve working accuracy and to apply for micro parts has been examined. Some 3-dimensional micro parts such as micro pins are well fabricated by this system.

Key Words: micro machining, lathe, manufacture, cutting force, 3-dimensional cutting

1. 緒言

近年3次元形状の微細加工に関する研究がさかんである。このうち従来の切削加工技術を微小な機械加工に適用する研究開発としては、超精密な工作機械を用いた加工のアプローチと、加工機械を微小化した加工のアプローチの二つがある。本論文では、加工機械の小型化をはかり、加工物のマイクロ化に対応して、顕微鏡で加工状況を観察しながら高精度な加工を行う小型の切削機械のシステムが必要だと考え、マイクロ旋削加工システムを開発した。これを用いて実験的評価を行い、さらに精度の向上および3次元微細加工への応用について検討している。

2. マイクロ旋削加工システム

まずマイクロ旋削加工システムに必要な機能と課題について検討する。加工物が微小化するのにもない、その直接観察が困難になり、顕微鏡観察が必要になる。また加工する工具も微小にしなければならない。さらに加工物を手でハンドリングすることが困難になり、ハンドリング装置が必要になる。これらを、微小な工作物の周りの小さな空間の中に集合させることが必要になってくる。このため、加工する機械のシステムも小型化し、加工作業とのマッチングをはかることが必要である。このような微細加工システムを実現するためには、次のような課題を克服することが必要である。

(1) 人間の操作との適合：加工機械のハンドリングが人間の手から離れていないかぎり、その機械装置を組み立てたり、操作するのは、人間であり、加工する部分は微小であっても人間が操作する部分は操作に適した大きさが必要である。

(2) 観察：加工状況・加工形状などを直接把握するためには、光学顕微鏡や電子顕微鏡で観察しながら加工するシステムとしたい。ハンドリングの容易さから、まずは光学顕微鏡で観察しながら加工するシステムを考える。

(3) 加工物のハンドリング：加工物の着脱や前後工程との接続を容易にしなければならない。既に時計産業等では、寸法の単位をmmではなく、 $10\mu\text{m}$ にした加工が行われているが、加工物をハンドリングする方法が問題であると言われている。

(4) 加工機械の精度：加工寸法が小さくなると、その寸法公差は非常に厳しくなる。例えば直径10mmの軸のはめあいf7の寸法公差は、 $15\mu\text{m}$ であるが、この寸法公差と呼び寸法との比0.0015を直径 $10\mu\text{m}$ の軸に適用すると、その寸法公差は、15nmとなる。従って同じような寸法精度を求めらばnmオーダの加工精度が必要となる。

(5) 工具の微細化：微細加工を実現するためには、工具自体も微細化する必要があり、微小工具を新たに開発しなければならない。

(6) 駆動源・信号源との接続：加工機械を小型化したといっても、駆動電源ユニット、信号処理、コントローラなどは別物である。つまり、加工機械のうち、加工物をつかみ加工する本体部分を分離して、小型化したものであり、この小型化した本体と周辺装置とを接続しなければならない。

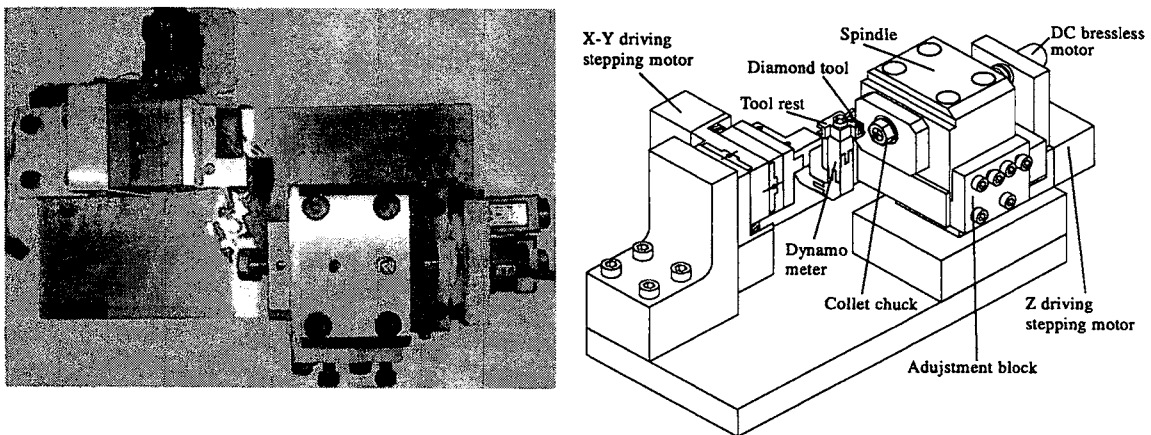


Fig.1 Schematic view of micro cutting system

3. マイクロ切削システムの構造

上記のような課題に答える試みの第一歩として、図2のようなマイクロ旋盤を試作した。旋削システムの全体を図3に示す。主軸台は一軸の駆動ステージ上に載っており、送りはこのステージの駆動で行われる。使用したステージの駆動の最小分解能は4nmである。切削バイトの位置は動かないため、顕微鏡プローブで観察する位置は動かない。主軸の回転速度はおよそ1万rpmである。ワーク直径が50 μ mのとき、主軸の回転速度を1万rpmにしてもその切削速度は、1.6m/minにしかならない。したがって切削速度を高速にするためには、ワーク直径が微小になると回転速度を非常に大きくしなければならず、高速切削を行うのは困難である。切削バイト（加工針）はバイトホルダーに固定し、三分力計を介して、二軸ステージに固定されている。

加工状況の観察は、チャック上部からの顕微鏡プローブ（800倍）と、ワーク端面側からの顕微鏡プローブ（250倍）による。チャック上部からは、切削の切り込みや送り、切屑の排出状況などを観察することができる。ワーク端面からのプローブからは、バイトの刃先先端の高さがワークの軸心と合っているかどうかを確認することができる。各構成要素は次のようになっている。

(1) 高精度主軸

小型な加工システムの加工の高精度化を図る基本として、旋削システムの回転主軸の高精度化を図った。設計・製作した主軸の構造を図2に示す。主軸の直径は10mmで、主軸を支える軸受に、セラミック製のアンギュラ玉軸受を採用した。軸受の間にはスプリングを挿入し、適度な与圧がはたらくように構成した。

高精度化を実現するため、主軸の回転精度に関わる寸法の幾何公差をすべて1 μ mに指定した。すなわち、主軸の真円度公差および円筒度公差、主軸両端の同軸度公差、軸受と接触する面の直角度公差・円周振れ回り公差、チャックコレット挿入テーパ部の同心度公差および円周振れ回り公差などをすべて1 μ mとした。ハウジングについても、主軸穴の真円度公差や円筒度公差、ハウジング底面との平行度公差を1 μ mとした。

一方、マイクロスコープによる加工状況観察を行うため、チャック部に顕微鏡プローブを近づけることが可能なように、フランジの上部をカットした。

加工材料の把持には、すべてAR8のチャックコレットを使用する。これにより直径0.3mmから5mmの物を把持することができる。

主軸を回転するモータには、ブラシレスDCモータを使用した。モータ軸と主軸との継手には、振れ回りを避けるため磁気フランジを介して非接触としたが、伝導力が不足したため、実際には、フランジの外周部をビニールで連結して、柔軟な継手とした。ブラシレスDCモータは発熱が大きいので、モータのハウジングは水冷とし、発熱の影響を抑えた。

(2) マイクロ工具

微細加工を行うためには、工具も微小で、かつ強度の高いものでなくてはならない。旋削用

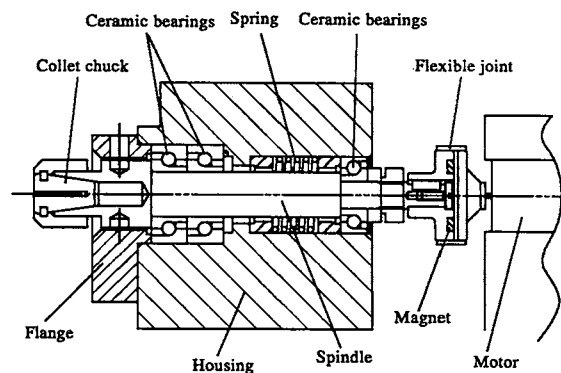


Fig.2 Structure of spindle



Fig.3 Diamond single point tool

のバイトとして、強度を有するのはダイヤモンドである。工作物が微小になると、このバイトの大きさも微小にする必要がある。そこで、一般に走査型トンネル顕微鏡などの探針用に用いられるダイヤモンド針を切削用のバイトとして利用した。この針は図3のように、先端角が約60度の三角錐形状をしており、この三角錐の一面が水平になるように針を傾けて固定し、切削バイトとして利用した。

(3) 加工プロセス

微小な加工物を所定の寸法に仕上げるためには、加工物の振れ回りが小さいことと、加工工具が主軸の回転中心から正確な位置を走査することが必要である。切削バイトの駆動ステージには、分解能4nmのステージを使用した。バイト刃先の磨耗やステージの繰り返し位置精度などの問題から、主軸回転中心の絶対位置を検出することは困難であったため、顕微鏡からのモニタ画面で寸法測定を行いながら、所定の寸法へと切り込みを進めるといったプロセスで加工を行った。

4. 加工精度の評価

主軸の回転振れ精度を評価するため、チャックに円筒試料を把持して振れを測定した。コレットチャックに把持した材料を直径0.7mmまで旋削した後、透過式レーザ寸法測定器（キーエンス製LS5500）および精密変位計（キーエンス製LC2420）を用いて測定を行った。

透過式レーザ測定では、回転振れ回り以外に試料の真円度が測定値に含まれる。真円度グラフを図4に示す。試料はおよそ楕円形で、真円度はおよそ $0.3\mu\text{m}$ となっている。実験値及び正弦関数で近似して求めた近似値を図5に示す。この図から、回転振れ回りの半径 r はおよそ $0.6\mu\text{m}$ であると考えられる。

一方反射式レーザ変位計によって回転中の振れを測定することを試みた。変位計を試料側面に向けて、試料側面までの距離の変化を測定する。測定を行った結果を図6に示す。この測定値には、試料の回転振れと試料の真円度の両方が含まれていると考えられる。振れ幅はおよそ $1.4\mu\text{m}$ となっている。この値は、透過式変位計で測定した回転振れの直径 $1.2\mu\text{m}$ と真円度 $0.3\mu\text{m}$ とを合わせた値 $1.5\mu\text{m}$ とよく一致している。

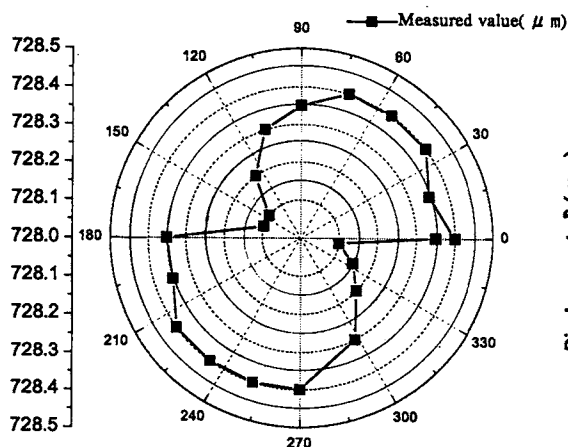


Fig.4 Cylindricity of workpiece after cutting

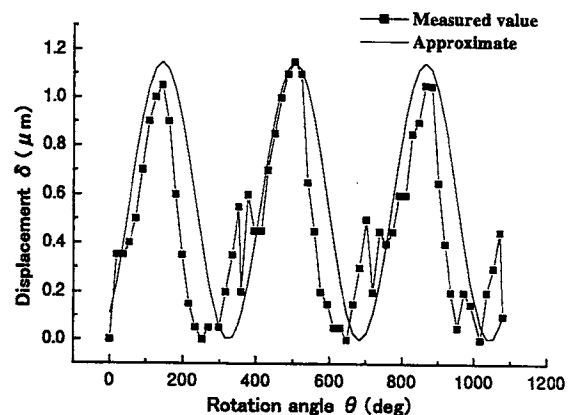


Fig.5 Whirling of rotation

本システムではマイクروسコープの画面で直径を計測しながら、所定の寸法に加工することを試みた。テスト試料として、直径100 μm 、50 μm 、20 μm の3箇所を持つ段付き棒を切削し、その加工誤差を評価することを図った。直径100 μm および直径50 μm の切削では観察モニタ上の倍率を500倍、直径20 μm の切削では倍率を800倍としてモニタ上で、試料直径を計測し、所定寸法までの切り込み量を決めて、最終寸法に仕上げた。同様の加工方法で8本の試料を切削し、切削後のそれぞれの試料を走査型電子顕微鏡で写真撮影して、直径寸法のばらつきを評価した。電子顕微鏡写真の例を図10に示す。測定結果を図7に示す。最大誤差は、直径100 μm で3 μm 、直径50 μm で1.5 μm 、直径20 μm で0.7 μm となっている。加工寸法差/基準寸法は、3/100である。

5. 加工例

5.1 微小径加工

外周切削により、直径6 μm まで加工した例を図8に示す。試料の材質は黄銅で、長さ33 μm 直径6 μm の部分を、表面も滑らかに加工している。

5.2 加工表面

送り速度約1 $\mu\text{m/s}$ 、切込1 μm で仕上げた加工表面を電子顕微鏡で観察したものを図9に示す。刃先による加工痕跡が見られるが、表面粗さ R_{max} は0.3 μm 以下に収まっていると考えられる。

5.3 微小部品の製作

このシステムを用いてマイクロピンなどの微小部品の製作を試みた。最終的に図10のような部品を完成した。切断部に少々バリが残っているが、ほぼ設計通りのものであった。

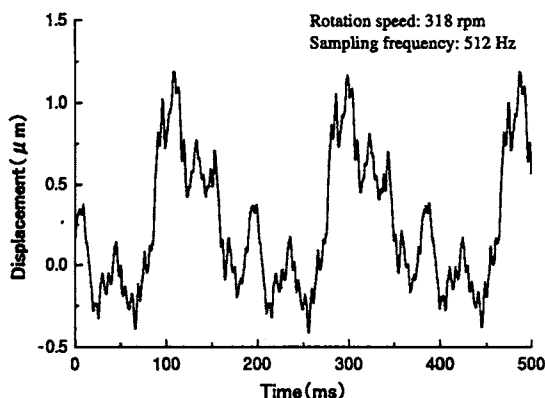


Fig.6 Rotation variation measured by laser displacement meter

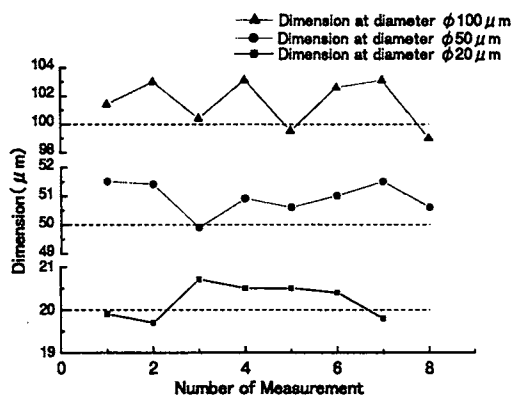


Fig.7 Measured diameter

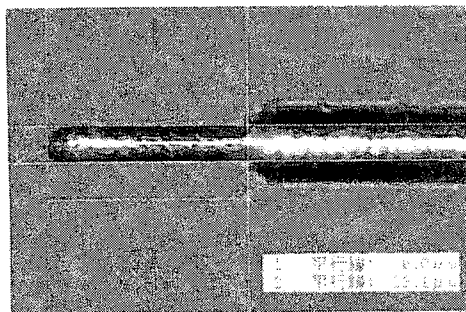


Fig.8 Minimum cutting size

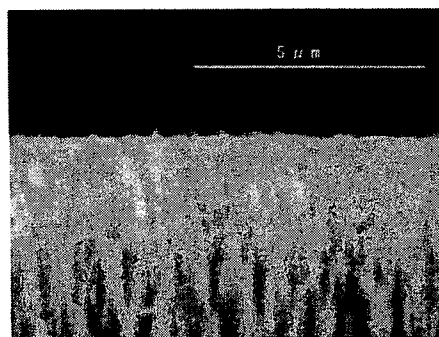


Fig.9 Surface asperity after cutting

さらにこのシステムを用いてマイクロリンクなどの3次元微小部品の製作を試みた。最終的に図11のような部品を完成した。

6. 結 言

直径寸法が $10\mu\text{m}$ から 3mm の加工物の切削加工を行う小型のマイクロ旋削システムの精度向上を図り、主軸の回転振れを $0.6\mu\text{m}$ にまで実現した。直径 0.7mm の加工試料の真円度は $0.3\mu\text{m}$ であった。光学顕微鏡モニタ観察による寸法測定を併用して加工することにより、直径 $20\mu\text{m}$ の試料直径を最大 $0.7\mu\text{m}$ の寸法差で加工することができた。

このような精度向上により、直径 $6\mu\text{m}$ の微小外周切削も可能となり、良好な仕上げ表面を得ることができた。この高精度主軸を用いることで微小なピンの製作も実現した。

本システムは制御装置と観察装置を除けば、卓上に載る幅 300mm 奥行き 200mm 、高さ 200mm 程度の装置であり、このような小型なシステムで微細加工を高精度で行うことができた。小型システムでの高精度加工の実現は、微細加工の進展をますます促進すると考える。

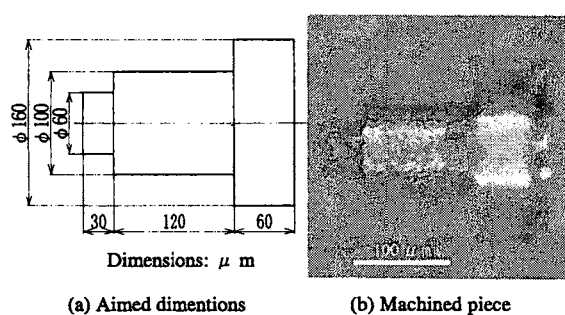


Fig.10 Machining of a micro pin

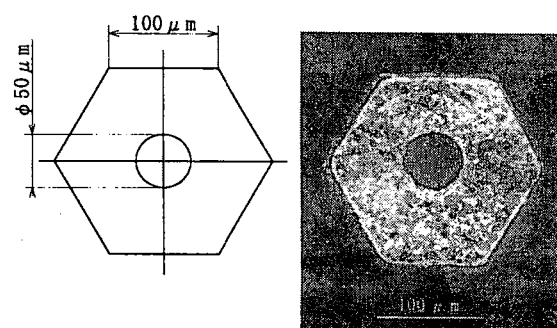


Fig.11 Example of micro parts

学位論文審査結果の要旨

平成13年8月2日に第1回学位論文審査委員会を開催し、8月8日に口頭発表ならびに第2回審査委員会を開催して、慎重に審議した結果、以下のとおり判定した。

本論文では、切削加工によるマイクロ加工の発展として、卓上型の小型な加工システムにおいても高精度にマイクロ切削を行うシステムを開発している。このシステムでは、セラミック軸受を用いた小型主軸により高い回転精度を実現している。切削バイトとしてダイヤモンド針を適用して、微細形状の加工と各種材料の切削を可能にしている。また小型な3分力計を製作して、マイクロ切削における切削抵抗を測定し、切削面積が $1\mu\text{m}^2$ 以下になると比切削抵抗が著しく増大することを明らかにしている。光学顕微鏡による観察と測定システムを併用して、直径 $10\mu\text{m}$ から $100\mu\text{m}$ の軸を真円度 $0.3\mu\text{m}$ で加工し、寸法公差も $1\mu\text{m}$ 以下にすることを実現している。その他各種の微小段付き軸部品の加工や微小ねじの加工を実現している。さらにこの加工システムを応用して、微小ドリルや微小エンドミルを用いた穴あけ・溝加工を行い、微小リンクの作成などの3次元加工も実現している。

このように、本論文は、従来は大型の超精密な工作機械を適用しなればできなかったようなマイクロ加工を小型な加工システムで実現し、その応用性を図っており、マイクロ加工システムの発展とマイクロ機械システムの生産、それらに関わる諸現象の解明に大きな貢献をしている。よって博士(工学)に値するものと判定した。