

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 17 日現在

機関番号：12401

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560124

研究課題名(和文) 難削材への微細深穴加工のための三次元低周波加振技術の開発

研究課題名(英文) Development of three dimensional low frequency vibrating system for micro deep drilling of heat resistant alloy

研究代表者

堀尾 健一郎 (HORIO, Kenichiro)

埼玉大学・理工学研究科・教授

研究者番号：60201761

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円

研究成果の概要(和文)：難削材料に対する穴径0.2mm以下、板厚穴径比20以上の微細深穴あけにおける、工具折損防止や工具長寿命化による高能率化さらには加工の高精度化を目的とし、加工対象物の低周波振動加振技術の開発を実施した。チャック上に固定された耐熱合金製噴射ノズルの表面に対して任意方向に低周波振動(数百Hz前後)を与える手法を開発した。

前後運動・楕円振動を加工対象物に付与する把持システムおよび制御手法の開発を行い、実際に微細穴加工を実施し有効性を検証した。実験結果では、切屑切断に最適な150Hzの低周波振動条件下で、長径10 μ m短径3 μ mの楕円振動を正確に付与し微細深穴加工を実現できた。

研究成果の概要(英文)：In the micro deep drilling process, for example, whose diameter is less than 0.2mm or the length diameter ratio is over 20, both high productivity and high preciseness are strongly needed. We conducted to develop a low-frequency vibration (several hundred Hz) excitation method for workpiece towards any optimal direction in order to minimize the tool breakage or to realize long tool life for the heat resistant alloy.

We developed a new fixing system which can hold the nozzle parts by 3-jaw chuck and apply controlled elliptical vibration generated by the spring system in arbitrary direction. In the verification results of the developed system, by the low-frequency vibration conditions of optimal 150 Hz to chip cutting, the elliptical vibration of the major axis 10 μ m and minor 3 μ m is accurately applied and it can achieve a fine deep-hole drilling on the nozzle shaped test piece.

研究分野：生産加工学

キーワード：微細深穴あけ技術 振動切削 3次元加振機能 把持機構

1. 研究開始当初の背景

ディーゼルエンジン等のエンジンノズルの加工においては、燃焼の高能率化の実現策として、ノズル穴の小径化が試みられており、径0.2mm以下、LD比2.0以上の微細穴加工が必要とされている。従来の研究では、ステライト耐熱合金等にこれらの穴加工を行う際に、ドリル軸方向に低周波振動(振幅10μm、周波数150Hz程度)を付与することによって切り屑の分断と断続切削を実現し、切削抵抗の軽減と切り屑の排出促進と工具の長寿命化を図ることが可能となることが明らかとなっており、製品製造への適用が強く望まれていた。

2. 研究の目的

エンジンノズルの加工においては、燃料噴射穴の方向が複数かつ多方向に存在するため、任意のドリル方向に対して正確にノズルを低周波加振する技術の開発が必要とされる。従来の実験では、これらの加振にはピエゾ素子を用いた一軸ステージが用いられてきたが、これは加振方向を変化させることが難しく、また質量100g近いノズルを十分な振幅(10μm以上)で加振することは困難であった。そこで本研究では、これらの問題を解決し、多軸工作機械に導入可能な新しい加工対象物把持機構を開発することを目的とした。

研究では、まず最初に十分な剛性を有し、かつ任意方向に振動を与えることのできる把持システムを開発する。次に、任意のドリル軸方向に対して正確な位相差つき楕円振動を付与する制御システムを開発を行う。任意の方向から微細穴加工を行う際に2つの発振源による振動に位相差を付与して直線に近い楕円運動を加工対象物に与え、切り屑の切断と排出を容易にすることを目指すことにした。

3. 研究の方法

研究では、まず2次元平面上で加工対象物に低周波振動を付加することのできるチャックシステムである、Fixing system for 2-dimensional vibration (FS2DV)の開発を行った。次に、位相差を付与可能なアクチュエータのコントローラ、および計測結果から各パラメータを自動チューニングするシステムを開発を行った。

4. 研究成果

(1) FS2DV

① FS2DVの開発

FS2DVの基本構造を図1に示す。その特徴を以下に記す。

- ・加振方法としてボイスコイルアクチュエータとばねを組み合わせた方法を用いている
- ・パッシブ制御で2次元加振を実現する方策を採用している

- ・工作物保持機構として3つ爪チャックを用いている
- ・3つ爪チャックを保持するインターナルカラーと工作機械に固定するアウターカラーとの間にばね要素を持たせている
- ・カラー間の梁構造により鉛直方向の振動を可能にするようにしている
- ・インターナルカラーと3つ爪チャックの間に皿ばねを介することにより水平方向の振動を可能にするようにしている
- ・図2に示すように2つのボイスコイルアクチュエータを1つのドライバ回路で駆動し出力を抵抗分割で調整することにより任意の振幅比を実現する方式を採用した(当初)
- ・鉛直方向のばね定数については、梁形状ばね部材の形状及び個数を変えることにより調整可能にしている
- ・水平方向のばね定数については、皿ばねの個数及び相互の組み合わせ方法を変えることにより調整可能にしている

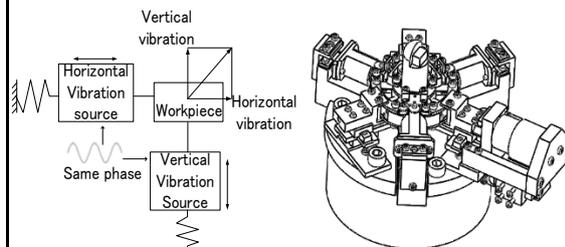


Fig.1 Outline of FS2DV

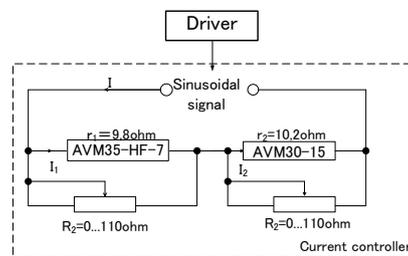


Fig.2 Control circuit for FS2DV

②剛性の確保

任意のばね定数で加振した場合に鉛直方向と水平方向の剛性が異なると、ドリル加工の際の切削力に起因するスラスト力により位置偏差が生じ加工位置精度を確保できなくなる怖れがある。本研究では、任意の周波数において鉛直・水平両方向の剛性が等しくなるようにばね定数を決定する手法を開発している。

③開発装置の特性評価

ディーゼルエンジンの燃料噴射ノズル形状を模した半球状のテストピースに対して、傾斜穴を想定して15°、45°、75°方向に加振した時の変位を鉛直・水平双方それぞれについてレーザ変位計を用いて計測した。加振周波数は150Hz、200Hz、250Hzについて調べた。それぞれの加振周波数に対

し、位置剛性を800kN/m、1200kN/m、1600kN/mで対応させた。加工により生じたスラスト力の影響を評価するために、加工点で加工方向に3N、7N、10Nで押しながら加振したときの変位特性を求めた。振動方向、周波数、加圧力のパラメータを変化させたいずれの条件においても、所望した方向に10μmの振幅での振動が生起していることを確認した。

振動波形のヒステリシスを評価し、位置ずれは1μm以下となり必要精度の6μmを満足していること、穴径拡大量は2.1~3.7μmで穴径200μmに対して十分小さいことを明らかにした。

④スラスト力変動の評価

FS2DVの保持部に動力計を配置し、ねじ式の加圧棒で試料傾斜面を押しながら、加振時の工作物変位と発生応力を計測し、スラスト力の時間偏差を評価している。偏差は最大0.4N程度であり、微細穴ドリル加工時に生じると想定されるスラスト力9N程度に較べ十分小さいことを明らかにした。

(2)位相差付与システム

開発した位相差付与システムでは、2つのドライバを用いてアクチュエータの制御を独立させ、異なる位相で加工対象物を振動させる。このとき、2つのアクチュエータを制御する信号を非同期とするため、マイコンを用いたパルスジェネレータを開発し、FS2DVの振動状態に応じたパラメータの変更を可能とした。これらの機能を有する制御回路を図3に示す。このパルスジェネレータから出力される2つのパルスは1/16周期単位で位相の異なる矩形波の連なりとして設定することが可能となっている。

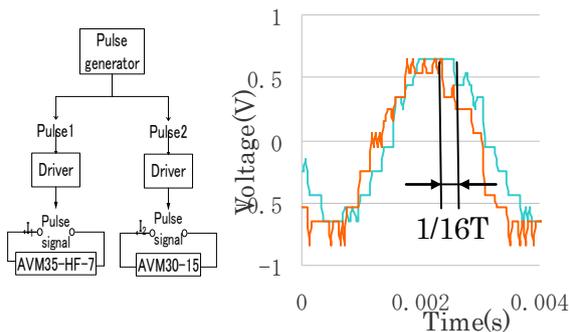


Fig.3 Developed control circuit for FS2DV

同位相で振動を与えた際の加工対象物の挙動と任意の位相差を付与した時の挙動の変化を図4および図5に示す。振動周波数は250Hz、付与する位相差は1/8周期とした。図4に示すように、位相差を与えない場合には2次元平面内で加工対象物は直線上を振動した。また、位相差を与えた場合には、図5のようにドリル軸方向に長軸を持つ楕円状に振動することが確認できた。

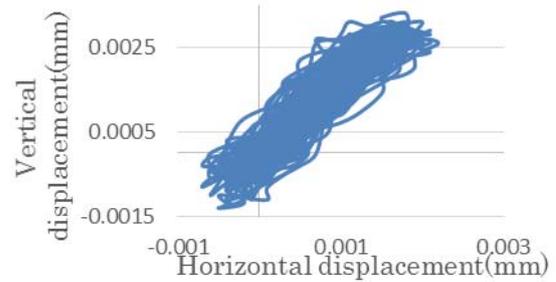


Fig.4 Behavior during the same phase

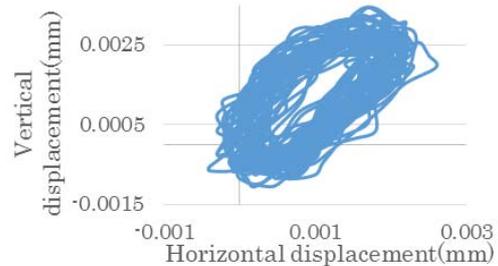


Fig.5 Case of 1/8 phase difference

(3)微細穴加工実験

位相差を付与したFS2DVによる2次元振動条件下での微細穴加工の実験を行った。実験条件を表1に示す。切削に用いる加工対象物の挙動は楕円の短径がドリル径の100分の1程度になるものを選択した(図6)。実験は傾斜テーブルのあるマシニングセンタを用いて、FS2DVを図7のように傾斜させて行った。

Table1 Experimental conditions

Work material	Brass
Drill diameter	0.3mm
Depth	4.5mm
Step amount	0.03mm
Frequency	150Hz
Phase difference	3/16T
Amplitude	10μm
Tilt	45°

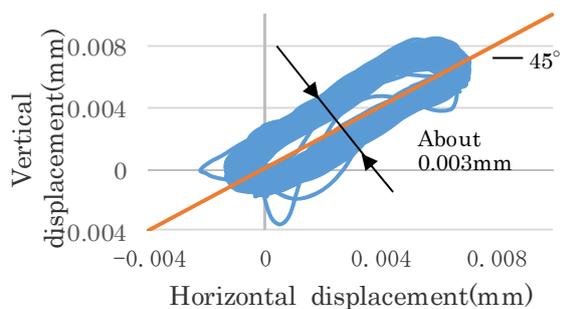


Fig.6 Vibration used for cutting

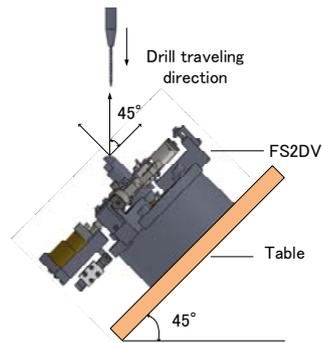


Fig.7 Experimental setup

図8は微細穴の貫通後の形状を示す。また、低周波振動を与えずに行った微細穴を図9に示す。これらの微細穴のエッジに対して楕円をフィッティングしてその楕円の短径と長径を求めたところ、位相差付与振動による微細穴の短径は約0.307mm、長径は約0.310mm、無振動時の短径は約0.331mm、長径は約0.337mmとなり、位相差付与振動条件での微細穴では形状精度及び寸法精度の向上が認められた。

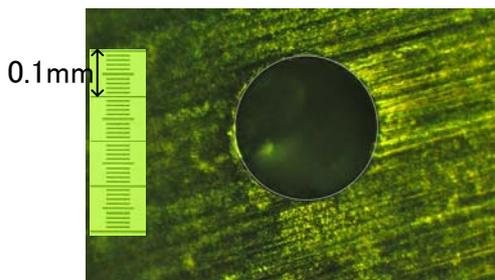


Fig.8 Hole shape with the phase difference vibration

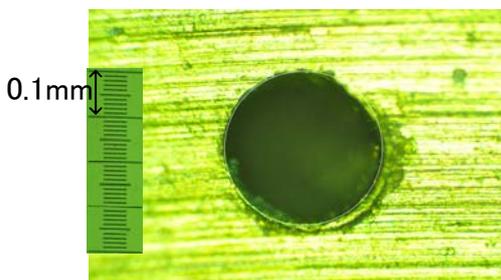


Fig.9 Hole shape without vibration

本研究により、任意方向に低周波（数100 Hz 前後）の直線振動及び楕円振動を与える手法を開発し、L/D比20以上、穴径0.2mm以下の微細深穴加工における工具折損防止・工具長寿命化及び加工時間の短縮を実現できることになり、微細深穴あけ技術の実用化に向けて大きな課題を解決した。実用的にも価値のある成果と言える。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 2 件)

- ① Ivan Burdukovskiy, Jun'ichi Kaneko, Kenichiro Horio, Development of Fixing System for 2-Axis Micro Deep Drilling Assisted by Low Frequency Vibration, Key Engineering Materials, 査読有、Vol. 625、2015、pp.149-154、DOI:10.4028/www.scientific.net/KEM.625.149
- ② Ivan Burdukovskiy, Jun'ichi Kaneko, Kenichiro Horio, Configuration Method of Fixing System with 2-Dimensionally Low-Frequency Vibration for Drilling to Decrease Influence from Unintended Displacement of Workpiece, Int. J. of Automation Technology, 査読有、Vol.9、No.2、2015、pp.161-169
<http://www.fujipress.jp/finder/xslt.php?mode=present&inputfile=IJATE00090020008.xml>

〔学会発表〕(計 1 件)

- ① Ivan Burdukovskiy, Jun'ichi Kaneko, Kenichiro Horio, Development of fixing system for 2-axis micro deep drilling assisted by low frequency vibration, ASPEN 5th International Conference of Asian Society for Precision Engineering and Nanotechnology、2013.11.13、Taipei (Taiwan)、pp.59-65

〔その他〕

ホームページ等

<http://kousaku.mech.saitama-u.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

堀尾 健一郎 (HORIO, Kenichiro)
 埼玉大学・大学院理工学研究科・教授
 研究者番号：60201761

(2) 研究分担者

金子 順一 (KANEKO, Jun'ichi)
 埼玉大学・大学院理工学研究科・准教授
 研究者番号：80375584