

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 6 月 1 日現在

機関番号：11201

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560122

研究課題名(和文) 3次元工具振動を利用した研磨システムのためのNCコードおよび制御プログラムの開発

研究課題名(英文) Development of NC code and a control program for a numerical control lapping system with three-dimensional tool oscillation

研究代表者

水野 雅裕 (Mizuno, Masahiro)

岩手大学・工学部・教授

研究者番号：40239249

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,200,000円

研究成果の概要(和文)：3次元工具振動を利用したNC研磨システムの実現のため、ハードウェアと制御プログラムの開発を行った。このシステムは、新しく開発した研磨用NCコードから、ツールパス、ツールパス上の各位置での被研磨面の法線ベクトル、工具の基本振動形態、被研磨面の法線方向の研磨力の大きさを読み取る。そして研磨中に工具移動方向ベクトルと被研磨面の法線ベクトルに合わせて3次元工具振動形態の方位を変化させることができるとともに、被研磨面に対して法線方向の研磨力の大きさを一定に制御しながら研磨を行うことができる。

研究成果の概要(英文)：Hardware and a control program have been developed for realization of a numerical control lapping system with three-dimensional tool oscillation. Prior to lapping, this system reads a toolpath, the normal vector at each location on the toolpath, a fundamental three-dimensional tool oscillation form and the size of normal lapping force component from a newly-developed NC cord. While lapping, it can change the orientation of the three-dimensional tool oscillation form according to the changes of the tool movement direction vector and the normal vector of the surface to be lapped. Moreover, it can keep the size of the normal lapping force component constant.

研究分野：精密加工

キーワード：金型研磨 3次元工具振動 NCコード ツールパス 研磨力制御

### 1. 研究開始当初の背景

極めて硬度の高い金型材料の形彫りや、回転工具では加工ができないような異形状金型の形彫りは、今なお放電加工に頼らざるを得ないのが現状である。一般に、放電加工によって得られる面は、熱影響層を有する梨地面である。熱影響層には引張り残留応力やマイクロクラックが存在し、それらは金型寿命を短くする原因となる。また、金型表面の粗いトポグラフィは、成型品の表面粗さを大きくすると同時に型離れ不良の原因となる。

放電加工で加工された小形金型の研磨には一般的にハンドラッピングが適用される。しかし、ハンドラッピングには高度な技能と膨大な作業時間が必要であり、金型製作におけるコスト低減と納期短縮の大きな障害となっている。こうした理由から放電加工面を高精度・高能率に自動で研磨するための技術開発が課題となっていた。

### 2. 研究の目的

2007年に、工具に様々な形態の3次元振動を与えることができる3次元工具振動システムの開発に着手し、2011にほぼ完成した。このシステムを用いれば、砥粒を多方向に移動させ、被研磨面に微細なクロスハッチを与えるような研磨が可能となる。例えば一定の楕円振動による研磨の場合、一方向の研磨条痕が被研磨面に形成され、異方性の強い表面トポグラフィとなるばかりでなく、粗さの改善効率を高めることができない。これに対し、砥粒を多方向に移動させるような振動を用いて研磨を行えば、異方性の小さな表面トポグラフィが創成されるとともに粗さの改善効率向上も期待できる。

この3次元工具振動システムによる研磨を実用化するためには、研磨システム全体をNC化し、任意の研磨対象に対応できるようにしなければならない。そこで本研究では3次元工具振動を利用した研磨システムをNC化するためのハードウェアと制御プログラムの開発を行うことを目的とした。

### 3. 研究の方法

#### (1) 3次元工具振動システムの改造

以前に開発した3次元工具振動システム(図1)は、工具振動形態を変える際に、一旦振動を停止させる必要があった。連続的に振動形態を変化させることができるよう、電気回路を変更する。そして4分割受光素子とレーザから構成される2次元振動形態測定システムを作製し、改造が適切に行われたかどうかを検証する。

#### (2) 研磨用NCコードの提案と制御プログラムの開発

3次元工具振動を用いたNC研磨では、ツールパスや工具移動速度の他に、工具振動形態や研磨力の大きさなどを指定する必要がある。そこで、それらを指定する研磨用NC

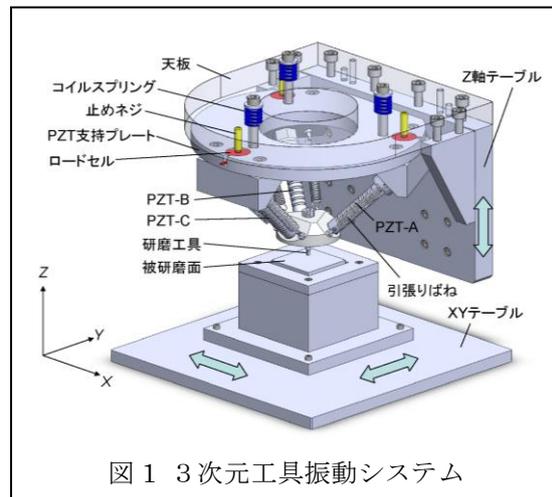


図1 3次元工具振動システム

コードを提案する。また、提案したNCコードを読み取って、その指令通りに動作する制御プログラムをVisual Basicを使って作成する。

### 4. 研究成果

#### (1) 3次元工具振動システムの改造

本システムでは、自動研磨プログラム実行前に、あらかじめ、研磨で使用する複数の3次元工具振動形態を設定し、それらに番号をつけて登録するようにした。登録する3次元工具振動形態は、被研磨面の法線ベクトルがZ軸正方向、工具移動方向がX軸正方向であるときの工具振動形態とした。これを基本工具振動形態と呼ぶことにする。実際の研磨においては、被研磨面は曲面であり、被研磨面の法線ベクトルは研磨位置によって異なる。また、工具移動方向もX軸正方向とは限らない。したがって、基本工具振動形態の方位を、被研磨面の法線ベクトルや工具移動方向に合わせて回転させる必要がある。工具に振動を与えるための波形信号を得るため、DA変換器に付属しているRING形式バッファメモリによる波形出力機能を用いている。以前はDA変換器から出力される3系統の波形信号をそのままアンプで増幅し、3個の積層型圧電アクチュエータ(以下、PZT)に与えていた。しかしながら、振動形態を変えるには、一旦工具振動を停止し、DA変換器のバッファメモリのデータを書き換え、その後で工具振動を再開する必要があった。工具振動を停止させることなく連続的に工具振動形態の向きを変えるために新しくアナログ演算回路を製作した。

使用したPZTには0~150Vの範囲の正電圧しか印加できない。そこでPZTに48Vの直流電圧を印加したときのPZTの長さとその中立長さとし、そのときのPZTの伸縮量がゼロであると考えた。PZTの伸縮量はPZTへの印加電圧にほぼ比例するので、3つのPZT(PZT-A, PZT-B, PZT-C)への印加電圧 $V_A, V_B, V_C$ とそれらの伸縮量 $\delta_A, \delta_B, \delta_C$ との間には近似的に次の関係式が成立する。

$$\begin{pmatrix} \delta_A \\ \delta_B \\ \delta_C \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} k_A(V_A - 48) \\ k_B(V_B - 48) \\ k_C(V_C - 48) \end{pmatrix} \quad (1)$$

ここで、 $k_A$ ,  $k_B$ ,  $k_C$ は各 PZT の特性から決定まる定数である。

また、以前の研究から、PZT の伸縮による工具先端の  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  方向の変位量( $D_X$ ,  $D_Y$ ,  $D_Z$ )と印加電圧  $V_A$ ,  $V_B$ ,  $V_C$ の間には次式の関係が成立することが明らかになっている。

$$\begin{pmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 48 \\ 48 \\ 48 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \frac{1}{k_A} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{k_B} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{k_C} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} -\frac{\sqrt{6}}{4} & -\frac{\sqrt{2}}{4} & -\frac{\sqrt{2}}{2} \\ \frac{\sqrt{6}}{4} & -\frac{\sqrt{2}}{4} & -\frac{\sqrt{2}}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{2}}{2k_C} & -\frac{\sqrt{2}}{2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} D_X \\ D_Y \\ D_Z \end{pmatrix} \quad (2)$$

変位量( $D_X$ ,  $D_Y$ ,  $D_Z$ )を時間の関数( $D_X(t)$ ,  $D_Y(t)$ ,  $D_Z(t)$ )とし、これらを周期関数とすれば振動形態を意味する。振動形態の方位を  $X$  軸,  $Y$  軸,  $Z$  軸周りに、この順に  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  (単位は rad)回転させるために(2)式に回転行列を導入すると次式ようになる。

$$\begin{pmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 48 \\ 48 \\ 48 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \frac{1}{k_A} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{k_B} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{k_C} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} -\frac{\sqrt{6}}{4} & -\frac{\sqrt{2}}{4} & -\frac{\sqrt{2}}{2} \\ \frac{\sqrt{6}}{4} & -\frac{\sqrt{2}}{4} & -\frac{\sqrt{2}}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{2}}{2k_C} & -\frac{\sqrt{2}}{2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos\gamma & -\sin\gamma & 0 \\ \sin\gamma & \cos\gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos\beta & 0 & -\sin\beta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\beta & 0 & \cos\beta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos\alpha & -\sin\alpha & 0 \\ \sin\alpha & \cos\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} D_X(t) \\ D_Y(t) \\ D_Z(t) \end{pmatrix} \quad (3)$$

説明を容易にするため、(3)式を次式のように書き直す。

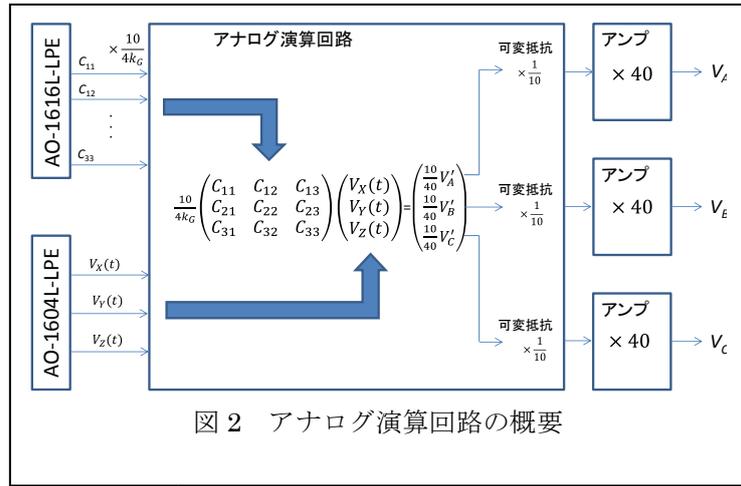


図2 アナログ演算回路の概要

$$\begin{pmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 48 \\ 48 \\ 48 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} D_X(t) \\ D_Y(t) \\ D_Z(t) \end{pmatrix} \\ = \begin{pmatrix} 48 \\ 48 \\ 48 \end{pmatrix} + \frac{1}{k_G} \begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} k_G D_X(t) \\ k_G D_Y(t) \\ k_G D_Z(t) \end{pmatrix} \\ = \begin{pmatrix} 48 \\ 48 \\ 48 \end{pmatrix} + \frac{1}{k_G} \begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_X(t) \\ V_Y(t) \\ V_Z(t) \end{pmatrix} \quad (4)$$

ここで、 $V_X(t)$ ,  $V_Y(t)$ ,  $V_Z(t)$ は DA 変換器からの出力波形電圧であり、 $k_G$ はこれらと工具先端の  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  方向の変位量( $D_X$ ,  $D_Y$ ,  $D_Z$ )を関連付ける係数である。

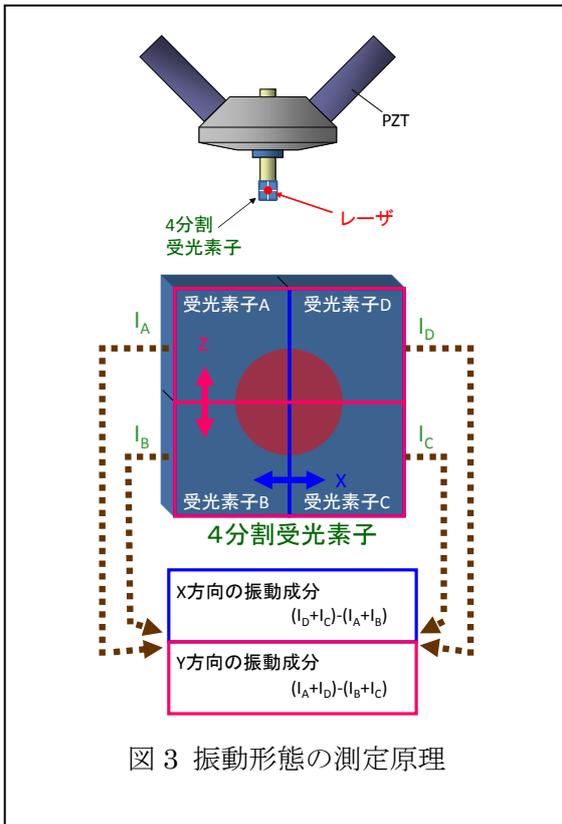
本研究では(4)式の第2項である次式に対応するアナログ演算回路を作製した。

$$\begin{pmatrix} V'_A \\ V'_B \\ V'_C \end{pmatrix} = \frac{1}{k_G} \begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_X(t) \\ V_Y(t) \\ V_Z(t) \end{pmatrix} \quad (5)$$

図2にアナログ演算回路の概要を示す。制御用パソコンには DA 変換器を2台搭載している。1つは16チャンネルの出力が可能な AO-1616L-LPE (コンテック社製)であり、これを用いて(5)式の

$$\frac{1}{k_G} \begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} \end{pmatrix}$$

の各項に対応する電圧をアナログ演算回路に出力する。もう一つは4チャンネルの出力が可能な AO-1604L-LPE (コンテック社製)であり、その波形電圧出力機能を用いて  $V_X(t)$ ,  $V_Y(t)$ ,  $V_Z(t)$ をアナログ演算回路に出力する。アナログ演算回路は(5)式のアナログ演算を行い、 $V_A$ ,  $V_B$ ,  $V_C$ を出力する。さらに48V



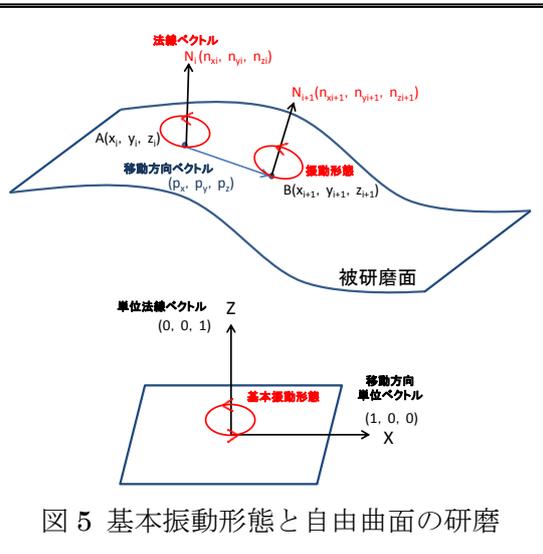
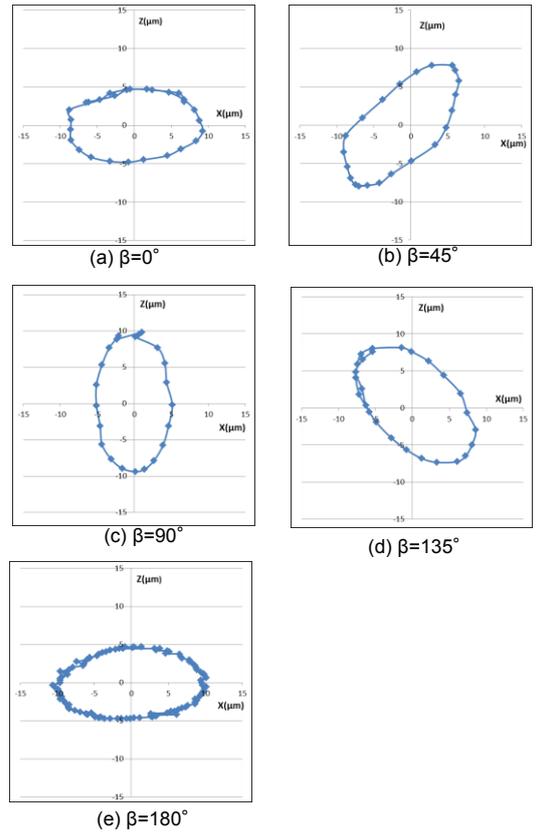
の直流電源を用いて 48V の電圧シフトを行った後に各 PZT に供給する。

作製したアナログ演算回路によって振動形態の方位を自由に変えられるかどうかを確認するために、4 分割受光素子と半導体レーザーモジュールから構成される 2 次元振動形態測定システムを作製し、振動形態の測定を行った。測定原理を図 3 に示す。例えば、図のように 4 分割受光素子の受光面が ZX 平面に平行になるように工具取付け部に設置し、その中央にレーザーを照射する。4 分割受光素子の受光素子 A, B, C, D の出力電流の大きさをそれぞれ  $I_A, I_B, I_C, I_D$  としたとき、 $(I_A+I_B)-(I_C+I_D)$  から工具の X 方向の変位量を知ることができる。同様に  $(I_B+I_C)-(I_A+I_D)$  から工具の Z 方向の変位量を知ることができる。変位量に対応するこれらの電流信号を電流-電圧変換回路によって電圧信号に変換し、工具が振動しているときの電圧信号をデジタルストレージオシロスコープを使って記録した。そしてあらかじめ求めておいた較正関数を使って振動形態を算出した。測定結果の一例を図 4 に示す。この測定実験から、指令通りに振動形態が変化することが確認できた。

## (2) 研磨用 NC コードの提案と制御プログラムの開発

### ① 研磨用 NC コードの提案

図 5 のような自由曲面を研磨加工するために以下のような研磨用 NC コードを提案する。



...

G01 X X<sub>i</sub> Y Y<sub>i</sub> Z Z<sub>i</sub> Q Q<sub>i</sub> R R<sub>i</sub> S S<sub>i</sub> F F<sub>i</sub> L L<sub>i</sub> W W<sub>i</sub>  
G01 X X<sub>i+1</sub> Y Y<sub>i+1</sub> Z Z<sub>i+1</sub> Q Q<sub>i+1</sub> R R<sub>i+1</sub> S S<sub>i+1</sub>  
F F<sub>i+1</sub> L L<sub>i+1</sub> W W<sub>i+1</sub>  
...

ここで、アンダーラインが付された記号の部分には実際には数値が入る。X<sub>i</sub>, Y<sub>i</sub>, Z<sub>i</sub> はそれぞれツールパスを示す X, Y, Z 座標である。Q<sub>i</sub>, R<sub>i</sub>, S<sub>i</sub> はそれぞれ、点(X<sub>i</sub>, Y<sub>i</sub>, Z<sub>i</sub>) における被研磨面の単位法線ベクトルの X, Y, Z 方向成分である。F<sub>i</sub> は工具移動速度、

$\underline{L}_i$  は基本振動形態の登録番号である。  $\underline{W}_i$  は被研磨面に対して法線方向の研磨力成分である。

## ②制御プログラムの開発

前述したように、あらかじめいくつかの基本振動形態を設定し、それらに番号をつけて登録しておく。これは、1周期分の  $V_x(t)$ ,  $V_y(t)$ ,  $V_z(t)$  の離散データを計算して配列データとしてコンピュータに記憶させるという作業である。研磨加工時は、 $L \underline{L}_i$  のコマンドによって基本振動形態を呼び出し、被研磨面の単位法線ベクトル  $(n_x, n_y, n_z)$  (前出の  $\underline{Q}_i$ ,  $\underline{R}_i$ ,  $\underline{S}_i$  と同じ) や工具移動方向単位ベクトル  $(p_x, p_y, p_z)$  (工具移動方向ベクトルは  $\underline{X}_{i+1}-\underline{X}_i$ ,  $\underline{Y}_{i+1}-\underline{Y}_i$ ,  $\underline{Z}_{i+1}-\underline{Z}_i$  から求める) に合わせて基本振動形態の方位を回転させる。

基本振動形態を回転させるために、次の回転行列を決定する必要がある。

$$\begin{pmatrix} u_{11} & u_{12} & u_{13} \\ u_{21} & u_{22} & u_{23} \\ u_{31} & u_{32} & u_{33} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\gamma & -\sin\gamma & 0 \\ \sin\gamma & \cos\gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos\beta & 0 & -\sin\beta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\beta & 0 & \cos\beta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos\alpha & -\sin\alpha & 0 \\ \sin\alpha & \cos\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (6)$$

基本振動形態は、工具移動方向単位ベクトルが  $(1,0,0)$ 、被研磨面の単位法線ベクトルが  $(0,0,1)$  の場合の振動形態と定義しているの、工具移動方向単位ベクトルが  $(p_x, p_y, p_z)$  である場合には、次式が成立しなければならない。

$$\begin{pmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} u_{11} & u_{12} & u_{13} \\ u_{21} & u_{22} & u_{23} \\ u_{31} & u_{32} & u_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} u_{11} \\ u_{21} \\ u_{31} \end{pmatrix} \quad (7)$$

また、被研磨面の単位法線ベクトルが  $(n_x, n_y, n_z)$  である場合には、次式が成立しなければならない。

$$\begin{pmatrix} n_x \\ n_y \\ n_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} u_{11} & u_{12} & u_{13} \\ u_{21} & u_{22} & u_{23} \\ u_{31} & u_{32} & u_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} u_{13} \\ u_{23} \\ u_{33} \end{pmatrix} \quad (8)$$

さらに、ベクトル  $(0,1,0)$  は、回転行列(6)によって、 $(n_x, n_y, n_z)$  と  $(p_x, p_y, p_z)$  の両方に垂直な単位ベクトルに移されなければならないので次式が成立しなければならない。

$$\begin{pmatrix} n_y p_z - n_z p_y \\ n_z p_x - n_x p_z \\ n_x p_y - n_y p_x \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} u_{11} & u_{12} & u_{13} \\ u_{21} & u_{22} & u_{23} \\ u_{31} & u_{32} & u_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} u_{12} \\ u_{22} \\ u_{32} \end{pmatrix} \quad (9)$$

よって求める回転行列は

$$\begin{pmatrix} u_{11} & u_{12} & u_{13} \\ u_{21} & u_{22} & u_{23} \\ u_{31} & u_{32} & u_{33} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} p_x & n_y p_z - n_z p_y & n_x \\ p_y & n_z p_x - n_x p_z & n_y \\ p_z & n_x p_y - n_y p_x & n_z \end{pmatrix} \quad (10)$$

となる。

研磨加工では、被研磨面の法線方向の研磨力を一定に制御することが重要である。研磨力を制御するには所定のツールパスに対して修正を加える必要がある。そしてそれを比例制御で行うためにはツールパスの修正量  $(\Delta X, \Delta Y, \Delta Z)$  と研磨力の変化量  $(\Delta W_x, \Delta W_y, \Delta W_z)$  の関係を知っておく必要がある。本研究では工具先端をワークテーブルに固定し、ワークテーブルを様々な方向に微小移動させて研磨力の修正に必要なツールパス修正量の関数を求めた。研磨力の制御方法については現在も研究を継続中である。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表] (計3件)

- ① M.Mizuno, N.Sato, T.Iyama, N.Nishikawa, Lapping of EDM-processed V-Groove Array Using Three-dimensional Tool Motion, 2013.5.30, Maritim Hotel (Berlin)
- ② 佐藤統隆, 水野雅裕, 井山俊郎, 吉原信人, 西川尚宏, 3次元工具振動を利用した直線溝アレイの鏡面仕上げ, 2012.12.1, 山形大学 (山形)
- ③ 水野雅裕, 田中大介, 井山俊郎, 吉原信人, 西川尚宏, 3次元振動工具による放電加工面の研磨加工, 2012.10.27, 秋田県立大学 (秋田)

[その他]

ホームページ等

<http://www.mech.iwate-u.ac.jp/~iyama/>

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

水野 雅裕 (MIZUNO, Masahiro)

岩手大学・工学部・教授

研究者番号：40239249