



加工点工作物変位を最小化する切削プロセスの設計*

小池雄介** 松原 厚*** 西脇眞二*** 泉井一浩*** 山路伊和夫***

Cutting Process Design for Minimizing Workpiece Displacement at Cutting Point

Yusuke KOIKE, Atsushi Matsubara, Shinji NISHIWAKI, Kazuhiro IZUI and Iwao YAMAJI

Vibrations of a tool or a workpiece in cutting shorten tool life and deteriorate a surface roughness. In this research, we propose a method to reduce vibrations of the workpiece at a cutting point. An algorithm that generates a cutting path to minimize workpiece displacements at a cutting point is developed. In this algorithm, the cutting path is generated with changing feed directions, tool posture and material removal process by considering workpiece compliance matrices and cutting force vectors. Feed directions and tool posture are changed to control the direction of the cutting force vector. Material removal process is changed to control the change of the workpiece compliance. FEM (Finite Element Method) is used to calculate workpiece compliance matrices. SVD (Singular Value Decomposition) is used to calculate the direction which has the lowest compliance in the workpiece compliance matrices. Minimum workpiece displacement at a cutting point is calculated from these calculated results. The algorithm is applied to the cutting path of end milling for a simple bar and the cutting path is compared with two conventional cutting paths by conducting a simulation and a cutting test. As a result, mean values of workpiece displacement were reduced by applying the algorithm.

Key words: cutting path, workpiece displacement, compliance, FEM, SVD, end mill

1. 緒 言

切削抵抗によって生じる工具や工作物の変位は、加工精度や工具寿命に影響を与える。工具-工作物間の変位が問題になる例として、びびり振動が研究されてきた^{1)~3)}。びびり振動には強制型と自励型があり、強制型では切削抵抗による工具系、工作物系の強制変位が問題となる。工具-工作物間の強制変位が、びびり振動として認知されるレベルでなくとも、工具切れ刃が工作物に切り込めない、また逆に切り込み過ぎるなどして、工具損傷を与える場合がある。多軸加工機の普及により、低剛性かつ複雑形状の工作物が増えており、この強制振動の問題が無視できなくなっている。特に、複合加工機では、丸棒等の均一な材料を最終形状まで切削するため、工作物の剛性が加工中に大きく変化するので、これを考慮した加工法が必要となる。

工作物の剛性を考慮した加工法の研究として、李らによる微細軸の旋削加工の研究がある⁴⁾。この研究では工具形状やアプローチ角を変更して背分力をなくすことで、微細軸の弾性変形が問題にならないようにしている。また、薄い立ち壁のエンドミル加工に関して、若岡による加工パスの工夫に関する報告がある⁵⁾。この方法を用いると、加工点の剛性をあまり低下させることなく加工を行うことができる。しかしながら、いずれの方法も考え方は加工現場で経験的に知られていたものであり、工作物の剛性を考慮して加工パスを生成するアルゴリズム自体の研究はなされていない。そこで、本研究では、工作物の剛性と切削抵抗の関係から工作物の変位を求め、これを低減する材料除去手順、工具の送り方向、工具姿勢を決定するアルゴリズムを提案する。

2. 工作物の加工点変位の最小化

2.1 コンセプト

切削加工のある段階において得られる工作物形状の加工点でのコンプライアンステンソルを K^{-1} とし、工作物剛性が十分高い状態での切削抵抗ベクトルを F とする。 F を工具座標系で定義すると切削抵抗と工作物の加工点変位 D との関係は、

$$D = K^{-1}RF \quad (1)$$

となる。ただし、 R は工具の送り方向・姿勢によって定義される回転行列である。従来、 D を抑制する方法として、 $K^{-1}R$ に応じて F の要素を小さくする方法がとられてきた。しかしながら、この方法では、工作物の剛性が低下すると切削条件（送り速度、切り込み量）も小さくなり、材料除去率が低下する。そこで、 K^{-1} と R の変更で D の大きさを抑制する方法を考える。具体的には、各切削段階での加工点および工具の送り方向と姿勢を変位が最小になるように選択し、加工パスを生成する。

2.2 加工パス生成アルゴリズム

工作物の加工点変位を最小化するために考案した加工パス（以下、加工点変位最小化パスとよぶ）の生成アルゴリズムを説明する。図1に加工点変位最小化パスを生成するフローを示す。工作物の最終形状から初期形状に向かって材料を付与しながら、加工点および工具送り方向の選択を行い、加工点変位を計算する。このとき切削抵抗ベクトルの向きは加工点変位が最小になるように設定する。よって、材料除去手順と計算手順は逆となる。ただし簡単のために、同一加工条件下の工具座標系において切削抵抗ベクトルと工具の送り方向との関係が一定であるとする。また、入力する切削抵抗ベクトルとして切削抵抗の各分力の平均値を用いる。したがって、切削抵抗ベクトルと工具の送り方向、工具姿勢の関係は事前に求めておく必要がある。

図2に考案した加工点変位最小化パス生成アルゴリズム

* 原稿受付 平成22年4月13日

** 学生会員 京都大学大学院（京都府京都市左京区吉田本町）

*** 正会員 京都大学大学院

のフローチャートを、以下にその説明を示す。

工作物の初期形状、最終形状、最終形状の支持条件、切削抵抗ベクトルを入力値として (Step 1)、材料が分布する空間を有限要素法の要素に分割する。そして、現在の工作物が分布している領域の要素を計算に用いる。

現在の工作物形状の表面に分布している材料付与候補要素を全て求める (Step 2)。全ての材料付与候補要素から選択した 1 要素に仮に材料を付与し、有限要素法を用いて全体剛性行列 (工作物の構造全体の剛性行列) を計算する。

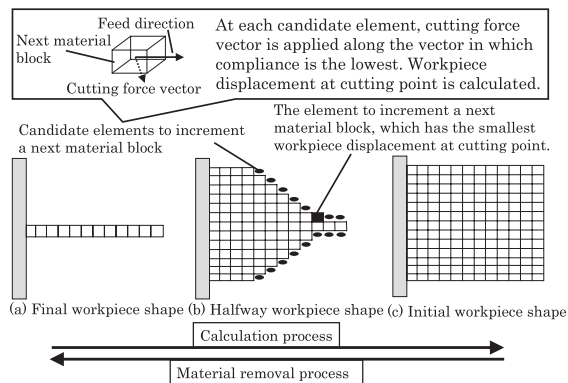


Fig.1 Schematic view of tool path generation algorithm

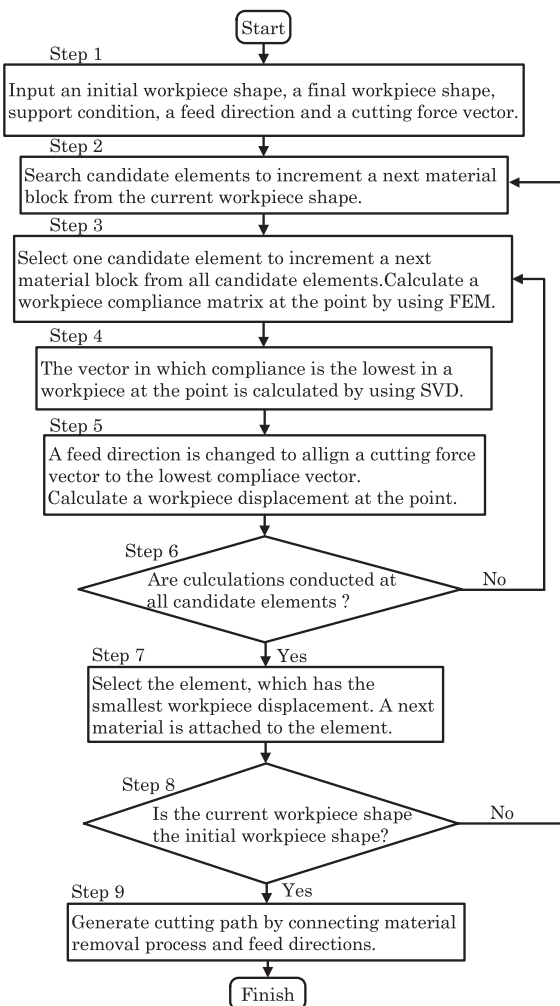


Fig.2 Flow chart of tool path generation algorithm

そして、その逆行列である全体コンプライアンス行列を求め、選択した材料付与候補要素の部分抜き出し、加工点コンプライアンス行列とする (Step 3)。加工点コンプライアンス行列に特異値分解を適用して固有ベクトルを求める。その固有ベクトルのうち長さの最も短いものを選択し、そのベクトルを最小コンプライアンスベクトルとする (Step 4)。よって、最小コンプライアンスベクトルは、選択した材料付与候補要素における最も剛性の高い方向を示す。求めた最小コンプライアンスベクトルの向きに切削抵抗ベクトルが向くように工具の送り方向や工具姿勢を決定し、加工点工作物変位の最小値を求める (Step 5)。ただし、工具干渉や工作機械の構造による制約条件を考慮する。

以上の加工点工作物変位の計算を、全ての材料付与候補要素において行う (Step 6)。そして、全ての材料付与候補要素における加工点工作物変位のなかから最小値を示す材料付与候補要素を選択し、その要素に材料を付与して新たな工作物形状とする (Step 7)。

以上の計算を工作物形状が初期形状になるまで繰り返す (Step 8)。計算結果として得られた材料除去手順と各加工点における工具の送り方向、工具姿勢を参考に加工点変位最小化パスを生成する (Step 9)。

3. 計算実験

考案したアルゴリズムを用いて加工点変位最小化パスを求め、従来の加工パスとの加工点工作物変位の比較をシミュレーションで行う。

3.1 計算条件

図 3 に工作物の初期形状(ブロック)と最終形状および支持条件を示す。複合加工機での加工を想定して、工作物は Z 軸周りに 180 度回転して位置決めできるものとする。最終形状は厚さ 2 mm の平板である。また、片持ち支持であるために、X、Y 方向の剛性が Z の位置で大きく変化する。工具としてエンドミル工具を用いる。図 4 に計算に用いた切削抵抗ベクトルを示す。本論文では、工具姿勢は図中の工作物座標系の X 軸と平行とし、工具の送り方向を YZ 平面内において変化させる。また、工作物の支持条件は加工中に変化しないものとする。有限要素法で用いる要素には六

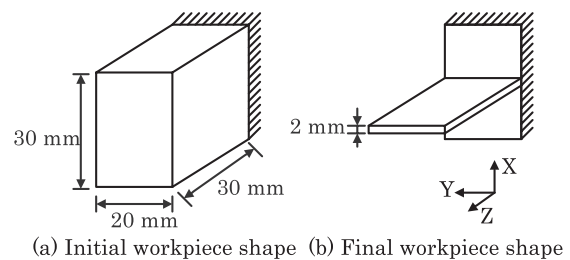


Fig.3 Workpiece shape

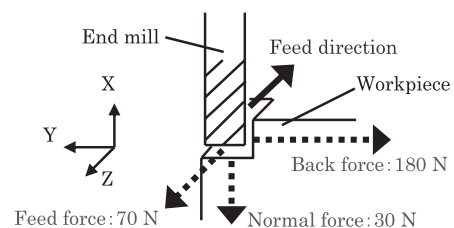


Fig.4 Relationship between feed direction and cutting force vector under high workpiece stiffness

面体要素を用い、要素サイズは加工条件を参考に X 方向 2 mm, Y 方向 20 mm, Z 方向 3 mm とした。

比較のために次の 2 つの加工パスにおける加工点工作物変位を計算した。これらを従来の加工パスとよぶこととする。図 5 に比較対象とする従来の加工パスと材料除去番号を示す。材料除去番号の順番に材料除去を行う。Z 方向パスでは工作物を X 方向に層状に分け、一様に薄くなるように加工を行う。Y 方向パスでは工作物の先端部から順番に板厚が 2 mm になるように加工を行う。

3.2 計算結果

図 6 に考案したアルゴリズムを用いて生成した加工点変位最小化パスの工具の送り方向を、図 7 に材料除去手順を示す。図 6 より、各加工点における工具の送り方向は YZ 平面において Y 軸に対して約 21 度傾いていることがわかる。このとき切削抵抗ベクトルは片持ち梁の軸方向に向いており、片持ち梁において最も剛性の高い方向に向いている。図 7 より、工作物の材料除去が先端部から、つまり剛性の低い部分から行われることがわかる。また、加工点変位最小化パスの計算時間は約 53 分であった。

図 8 に各加工パスにおける加工点工作物変位の計算結果を示す。加工プロセス全体において、従来の加工パスよりも加工点変位最小化パスの加工点工作物変位が小さいことがわかる。また、加工点変位最小化パスでは加工点工作物変位の変化が緩やかになっていることがわかる。

図 9 に各加工パスにおける最小コンプライアンスベクト

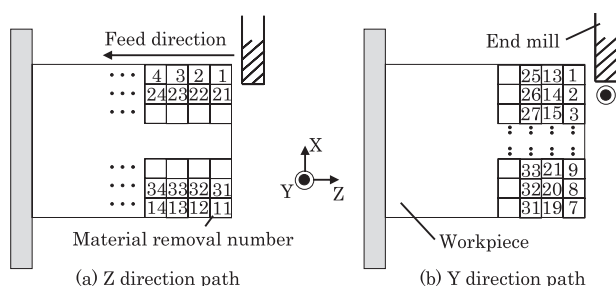


Fig.5 Conventional cutting path

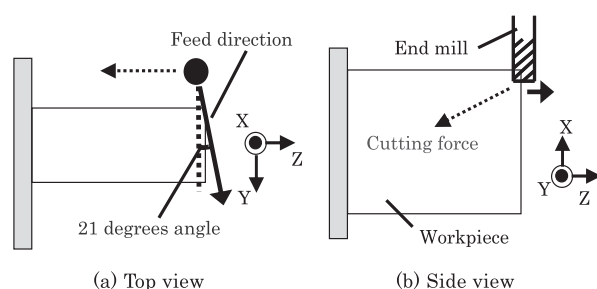


Fig.6 Feed direction on path for minimizing cutting point displacement

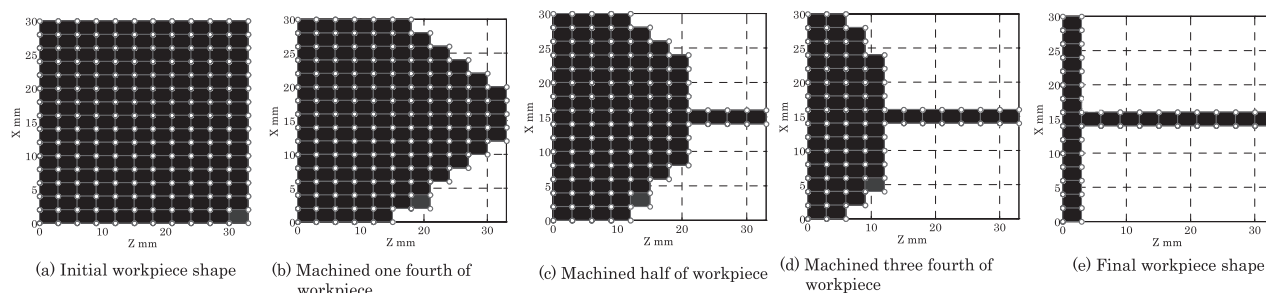


Fig.7 Material removal process of path for minimizing cutting point displacement

ルの長さを示す。同図より、Y 方向パスと加工点変位最小化パスでは最小コンプライアンスベクトルの長さがほぼ同じである。よって、Y 方向パスと加工点変位最小化パスの加工点工作物変位の差は、送り方向の変更、すなわち切削抵抗ベクトルの向きの変更によるものである。

4. 加工実験

2章で提案した加工パス生成アルゴリズムを実加工に適用し、加工中に生じる工作物変位を従来の加工パスと比較することで、その効果を検証する。

4.1 加工点変位最小化加工パスの生成

図 11 に、工作物の初期形状と最終形状を示す。後述する工作物変位の測定のために、本実験の工作物形状は 3 章で用いた工作物形状とは異なっている。まず、支持形態を含めて工作物の静剛性が高い条件で対象材料の加工実験を行い、加工対象の加工実験を行うのに十分な工具寿命をもつ切削条件と切削抵抗ベクトルを求めた。表 1 に加工条件を、図 4

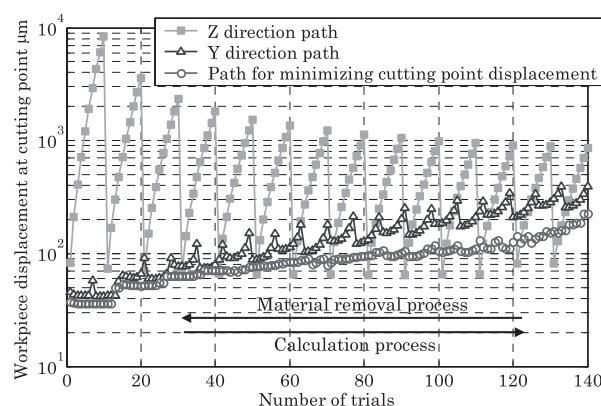


Fig.8 Comparison of workpiece displacements at cutting point

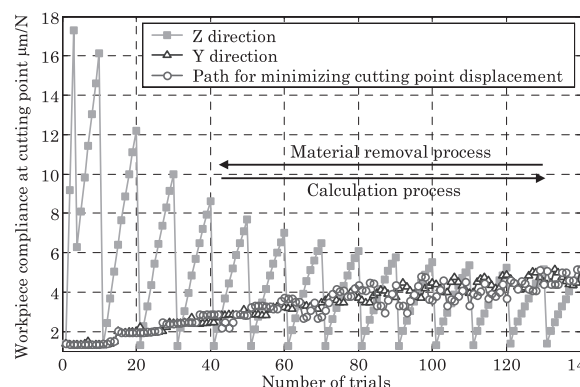


Fig.9 Comparison of workpiece compliance at cutting point

に得られた切削抵抗ベクトルを示す。

加工パス計算に際しては、3章の計算例と同様に、工具姿勢は固定で送り方向のみを変化させる。要素のサイズも同様に加工条件を参考に決定した。その結果、材料の除去過程は図7と同様であり、工具の送り方向も図6と同様YZ平面においてY軸に対して約21度傾く結果となった。

4.2 実験方法

図12に加工実験に用いる実験装置を示す。実験機には複合加工機を用いた。工作物は旋削主軸に3つ爪チャックで固定する。加工パスとして、加工点変位最小化パス、Y方向パス、Z方向パスを用いる。

加工中の工作物変位を評価するために、2つの渦電流式変位センサを用いY方向とX方向の工作物変位を測定した。工具の送り方向をYZ平面内で変更したため、切削抵抗のX軸方向の大きさは変わらない。よって、Y軸方向の工作物変位の比較により切削抵抗ベクトルの向きと材料除去手順の変更による影響がわかり、X軸方向の工作物変位の比較により材料除去手順の変更による影響がわかる。渦電流式変位センサは加工機のワークハンドリング装置に取り付け、工作物の自由端から5mmの位置での工作物変位を測定する。この変位は加工点工作物変位の測定値とはならないが、加工パスによる変位の違いは比較できると考えられる。セ

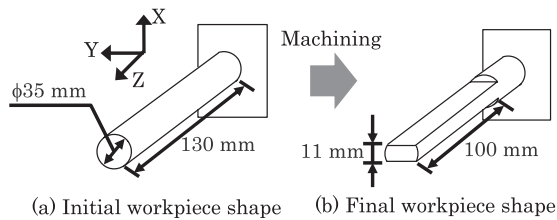


Fig.11 Workpiece shape

Table 1 Machining conditions		
Tool	Material	Micro-grained carbide
	Coating	(Al, Ti)N
	Diameter mm	10
	Corner radius mm	2
	Number of teeth	4
Workpiece material		Co-Cr-Mo alloy
Cutting speed m/min		47.1
Spindle speed min ⁻¹		1500
Axial depth of cut mm		2.0
Radial depth of cut mm		3.0
Feed per tooth mm/tooth		0.06
Tool extension mm		30
Coolant		Oilmist
Milling direction		Down milling

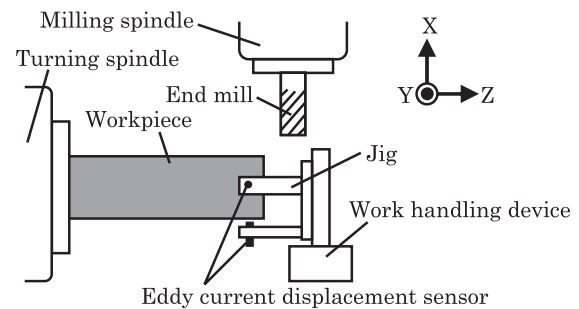


Fig.12 Experimental setup of cutting test

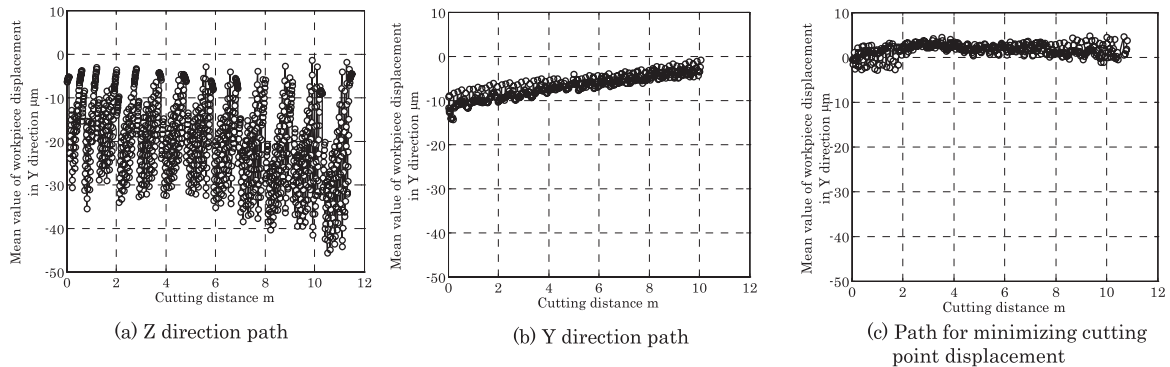


Fig.13 Comparison of mean values of workpiece displacement in Y direction on each cutting path

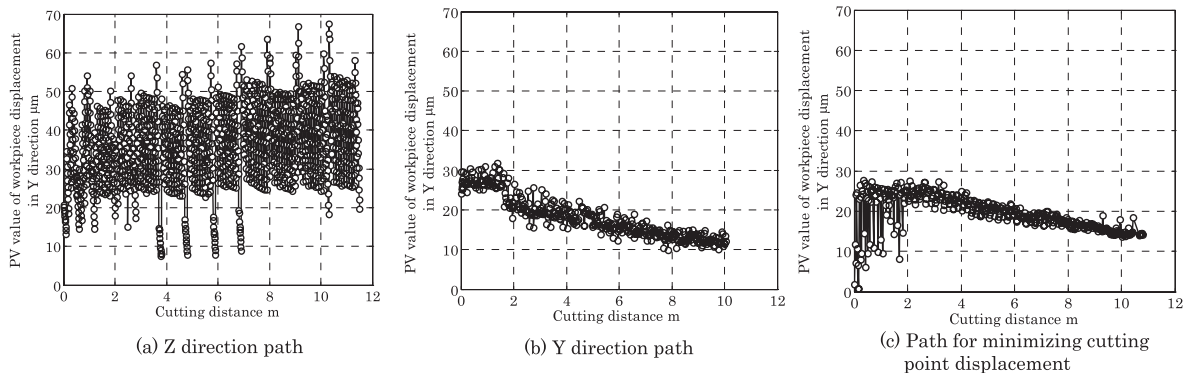


Fig.14 Comparison of PV values of workpiece displacement in Y direction on each cutting path

ンサ信号はデータロガーで記録し、そのサンプリング周波数を 6.25 kHz とした。エンドミル工具が工作物に十分切り込み、設定した加工条件で加工が行われているときのセンサの測定結果から工具 10 回転分（切削距離約 2 mm 相当）の区間を抜き出し、平均値と PV（Peak to Valley）値を計算した。この計算は、加工点変位最小化パス生成アルゴリズムの有限要素法において工作物形状を分割する各要素をエンドミルが通過することに行う。

旋盤主軸の 3 つ爪チャックの配置に伴う工作物の静剛性の X 方向成分の変化は、初期形状において $6 \pm 0.5 \text{ N}/\mu\text{m}$ 程度であったため、支持剛性の異方性による影響は無視できることを確認した。

4.3 実験結果

図 13、図 14 に渦電流式変位センサで測定した Y 方向の工作物変位の平均値と PV 値をそれぞれ示す。同様に、図 15、図 16 に X 方向の工作物変位の平均値と PV 値をそれぞれ示す。図 13 (c)、図 14 (c) の切削距離 2 m 以下において測定値のばらつきが大きい。これは、加工点変位最小化パスでは工具の送り方向が YZ 平面において Y 軸に対して約 21 度傾いていることで、半径方向切り込み量が 3 mm 以下となる区間があったためである。また、図 15 (b) (c)、図 16 (b) (c) において測定値のない部分がある。これは、渦電流式変位センサの治具と工作物の干渉により測定が行えなかったためである。

図 13、図 15 より、加工点変位最小化パスの工作物変位の平均値は、加工プロセス全体において最も小さい値を示していることがわかる。また図 16 より、X 方向の工作物変位の PV 値においても加工点変位最小化パスの結果が最も小さくなっていることがわかる。しかしながら、図 14 より、Y 方向の工作物変位の PV 値においては、切削距離 2 m までは加工点変位最小化パスの測定結果が最も小さいが、切削距離 2 m 以降では Y 方向パスの測定結果が最も小さいこ

とがわかる。この原因は、アルゴリズムに入力する切削抵抗ベクトルを平均値としたことである。つまり工作物変位の最大値を低減したい場合には、切削抵抗が最大となる方向を、最小コンプライアンスベクトルの向きにあわせる必要がある。また同様に、PV 値を低減するための切削抵抗ベクトルの方向も別に存在すると考えられる。よって、工作物変位の平均値、PV 値、最大値のどの値を低減するかという目的によって、入力する切削抵抗ベクトルを選択する必要がある。

5. 結 言

有限要素法と特異値分解を用いて、工作物からの材料除去手順と工作物に対する工具の送り方向、工具姿勢を変更して、加工点工作物変位が最小となる加工パスを生成するアルゴリズムを提案した。また、考案したアルゴリズムを用いて加工点変位最小化パスを生成し、計算実験と加工実験を行い、従来の加工パスとの比較を行った。その結果、加工点変位最小化パスを用いることで工作物変位の平均値を小さくすることができた。

参 考 文 献

- 1) 栗田 肇：びびり振動が超硬バイトの寿命に及ぼす影響（第 1 報），精密機械，**31**，4，（1965），321。
- 2) 田中久隆，小幡文雄，足森雅己，松原十三生：ボールエンドミル加工の再生びびり振動に関する研究（第 1 報）－振動発生限界の理論解析－，精密工学会誌，**64**，7，（1998），1047。
- 3) 赤澤浩一，社本英二：低剛性工作物のボールエンドミル加工における再生型びびり振動に関する研究－切削送り方向周りの工具傾斜を考慮した解析モデルの構築－，精密工学会誌，**75**，8，（2009），984。
- 4) 取出 優，山田高三，荒木秀一郎，李 和樹：旋削加工による微細軸の創成に関する研究 第 2 報：微細軸加工用工具切れ刃形状の検討，砥粒加工学会誌，**52**，8，（2008），466。
- 5) 若岡俊介：剛性を考慮した切削加工法，日本機械学会第 4 回生産加工・工作機械部門講演会講演論文集，**2**，25，（2002），172。

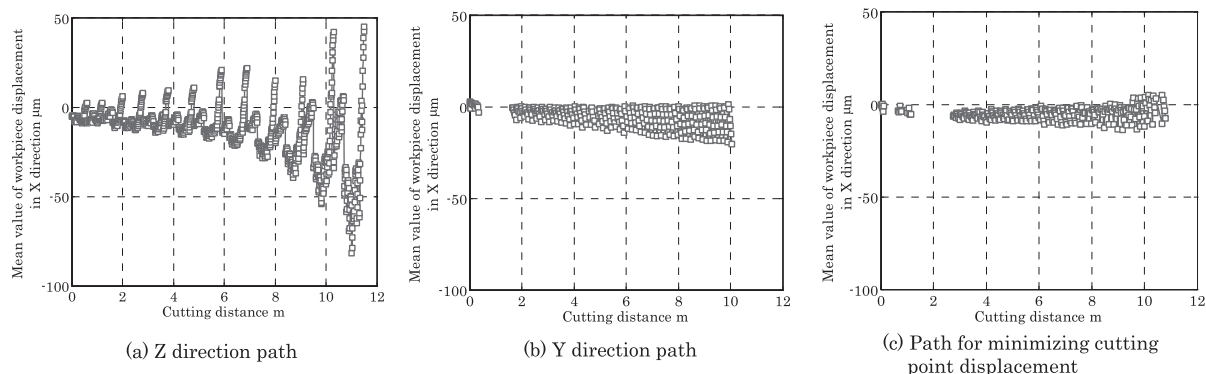


Fig.15 Comparison of mean values of workpiece displacement in X direction on each cutting path

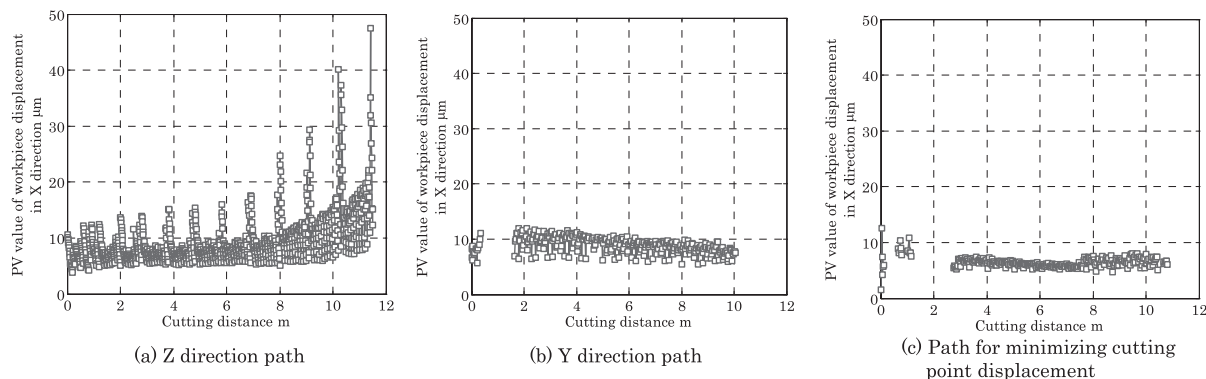


Fig.16 Comparison of PV values of workpiece displacement in X direction on each cutting path