切削による潜像加工の実現に向けた取り組み

山本　通[1]・安藤　開[2]

[1]機械工学科，[2]佐伯市役所

500円硬貨の偽造防止にも使われる潜像加工は，遊戯用コインの偽造防止対策としても検討されており，企業のロゴマーク等の高級感が必要なものや顧客の注意を惹くものへの活用も期待される．しかし，切削で潜像加工を行ったという研究はほとんど無い．その理由の一つに，その実現の難しさがあると考えられる．例えば，市販のCAMには潜像加工を行うための機能はなく，NCデータを作成するのは容易ではない．また潜像加工では，微細加工が必須となるため，高い知識や技能が必要であることが想定される．そこで，本研究では，5軸マシニングセンタ(以下，5軸MCという)を使って潜像加工を実現するためのシステムの開発を行い，実際に加工サンプルを製作することで，切削による潜像加工に必要な設備，手順や課題を明らかにした．その後，一般的な3軸マシニングセンタ(以下，3軸MCという)でも潜像加工が実現できるシステムの開発を行い，その有効性と課題について検証した．

キーワード：潜像加工，マシニングセンタ，切削，CAM，微細加工

１．緒言

高度な微細加工技術の一つとして，500円硬貨の偽造防止にも使われる潜像加工がある．潜像加工は遊戯用コインの偽造防止対策[1)]としても検討されており，企業のロゴマーク等の高級感が必要なものや顧客の注意を惹くものへの活用も期待される．500円硬貨の製造工程は公表されていないが，その生産数を考えると切削加工で直彫りをしている可能性は低く，コイニングのように金型を使った塑性加工の可能性が高い．一方，潜像に関して，印刷物等では多数の研究[2,3,4)]が報告されているのに対して，潜像加工を切削加工で行ったという研究は皆無である．

切削で潜像加工が行われない理由の一つに，その実現の難しさがあると考えられる．例えば，市販のCAMには潜像加工を行うための機能はなく，NCデータを作成するのは容易ではない．また潜像加工は微細加工であり，加工機や工具の精度管理に高い知識や技能が必要で，コスト的に合わないと判断される場合もあると考えられる．一方，もし切削で潜像加工が容易に行うことができれば，高度な技術やコストが問題となる金型が必要なくなり，コストや工期を大幅に短縮して多品種少量生産に対応可能となる．

そこで，本研究では，最初に5軸MCを使って潜像加工を実現するためのシステムの開発を行い，切削による潜像加工の可能性について確認する．具体的には，画像データを入力するだけで潜像加工用NCデータを出力する潜像加工用CAMの開発を最初に行う．その後，開発したCAMを使用して，実際に加工サンプルを製作し，切削による潜像加工を実現するために必要な設備，工具や加工条件を明らかにする．その後，一般的な3軸マシニングセンタでも潜像加工が実現できるシステムの開発も行い，その有効性を確認するとともに5軸MCを使った場合との比較を行い，それぞれの特徴と課題について検証する．

２．5軸MCを想定した潜像加工用CAMの開発

(1) 潜像加工用CAMの概要

本研究では，任意のビットマップ(以下，bmpと言う)化した画像データを取込み，それを立体化してNCデータを出力するCAMを開発し，それを潜像加工用CAMと呼ぶ．bmpは，Windowsにおける標準的な画像の保存形式のことで，画像から各ピクセルの色や濃淡を容易に取り出すことが可能であるためbmp形式の画像データを使用する．本研究ではデジタルカメラ等から得たjpgファイル等を最初に画像編集ソフトによりグレースケール化する．ここでグレースケール化には複数の手法があるが，本研究ではAdobe Photoshop10に準備されているグレースケール変換(設定はデフォルト値)を使用して8ビットのbmpファイルを作成し，開発したツールで取り込む．次に取り込んだ画像の横方向(X方向)もしくは縦方向(Y方向)のいわゆる走査線形式のNCデータを出力する仕様で，切削工具としてボールエンドミルもしくは刃先が尖った特殊エンドミル等を想定している．

(2) 画像の立体化

図1のフローチャートに示した手順で画像の立体化を行う．最初に読み込んだ画像の大きさを確認し，画像の左下がXY原点となる座標系を作る．例えば，画像がm×nピクセルの場合，図2(a)に示すように各ピクセルのアドレスを決める．なお図2(a)に示す格子が各ピクセルで，アドレス(1,1)から(1,m)に向かう方向がX軸のプラス方向，(1,1)から(n,1)に向かう方向をY軸のプラス方向とする．次に，あらかじめ設定した加工のためのパラメータを取得する．なお，パラメータとは表1に示すもので詳細は後述するが，表1に示す以外に，XもしくはY方向のどちらの走査線で加工するかと，白もしくは黒を高色にするかの選択も行う．

その後，選択された加工方向に沿ってそれぞれのピクセルの濃淡情報を，数値にて取得し，以下に示す式で，各ピクセルでのZ座標値Z_Tを導出する．

$$Z_T = (Z_H - Z_L)\,(St - N_C) / St + Z_L \quad (1)$$

$$Z_T = (Z_H - Z_L)\,N_C / St + Z_L \quad (2)$$

ただし，Z_Hは画像部加工パスのZ座標最高設定値，Z_LはZ座標最低設定値，Stはグレースケールの分解能，N_Cは各ピクセルから得た色情報と定義し，式(1)は白が高色の場合，式(2)は黒を高色にしたい場合に適用する．これを画像全体で繰り返し，NCデータとしてファイル出力する．例えば，図2(a)に示すアドレス(1,1)から(1,m)に向けて加工を行う場合のXZ断面でのNCデータの軌跡は図2(b)に示すようなイメージになる．

ここで，本加工では複雑な微細形状を同じZ位置付近で加工することが想定される．微小な動きを同じ位置で連続的に行う場合，工作機械Z軸のボールねじへの負荷が長時間に及ぶ加工も想定される[5]ため，任意ピックを加工後，Z軸を任意量大きく動かし(以下，大退避と言う)，ボールねじへの負担が少なくなるようなNCデータを出力できる機能も付加した．例えば，図3に示す加工パスは，上記の手順に沿って作成したX方向走査線加工のNCデータのイメージで，h1が通常時の退避高さ，h2が大退避の高さ，破線が切削送り，実線が早送りで工具が移動している様を示す．

(3) 微小山

潜像加工は，例えば図4に示すような土台となる形状を作り，その山と谷を結ぶ傾斜部に見せたいデザインを加工することで，見る角度によりそれぞれのデザインを見せる．本研究では，潜像部の土台となるこの形状を微小山，微小山側面にCAMに入力した画像の凹凸を加工することをデザイン部の加工と定義する．

図4に示すように先端角θ_1のエンドミルで加工すること

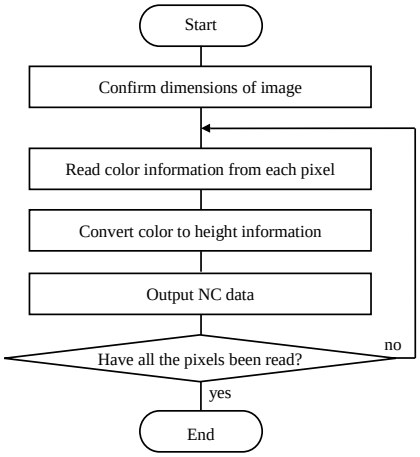


Fig. 1　Flow chart of the three-dimensional

Table 1　Machining parameters

Name	Symbol	Value
Retreat position 1	h_1	5 mm
Retreat position 2	h_2	100 mm
Maximum Z position	Z_H	0 mm
Minimum Z position	Z_L	0.1 mm
Pick feed	P	0.1 mm
Step size	St	255

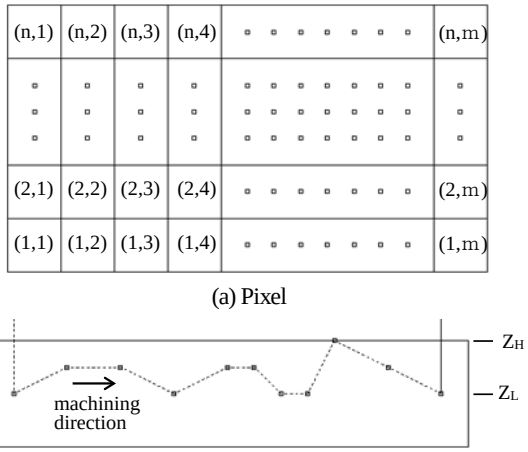


Fig. 2　Three-dimensional method

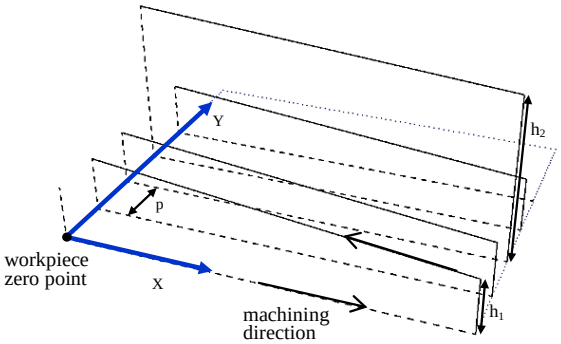


Fig. 3　Machining path

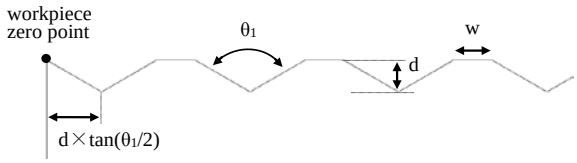


Fig. 4　Design of the trapezoid micro-mountain

で微小山が形成され，図5に示すように先端角θ_2のエンドミルで微小山側面にデザイン部を加工することで，意図した見せ方ができると考えた．今回の実験では，市販品の工具形状を考慮して，表2に示す各パラメータの数値を採用した．なお，本稿では2つのデザインを見せることを優先したためw＝0としてフラット部を形成せずに微小山の加工を行ったが，今後，フラット部に3つ目のデザインを加工することも検討している．

(4) 5軸MC向け潜像加工部のNCデータ出力

潜像加工部は，工具もしくはワークを傾けて微小山の側面にデザインの加工を行う．ここで微小山のデザイン部を加工するために，本研究では5軸MCを使用する．なお，開発した潜像加工用CAMでは，プロトタイプ版として図6に示すテーブル旋回形5軸マシニングセンタを使用することを想定してNC出力を行い，次章以降の実験は全て図6に示す5軸MCを用いて実験を行っている．

ここで，潜像加工部の加工は，最初にワークを傾けずに先端角θ_1のエンドミルで微小山の加工を行う．次に図5に示すように回転軸によりワークを角度θ_3傾けて先端角θ_2のエンドミルでデザイン部を加工する．θ_3は以下の式(3)より求める．

$$\theta_3 = 90 - \theta_1/2 \qquad (3)$$

潜像加工用NCデータは図7に示すように，最初にワーク原点からSL/2離れた微小山側面の中心を加工する．ここでSLは式(4)で表現できる．

$$SL = d/\cos(\theta_1/2) \qquad (4)$$

また次に続くXとZ位置に関する基本座標XnとZnは，以下の式(3)と(4)により計算する．

$$Xn = SL/2 + 3(n-1)SL/2 \qquad (5)$$

$$Zn = 2d(n-1)\sin(\theta 1/2) \qquad (6)$$

これを全ての微小山側面に対して適用し，式(1)もしくは式(2)を適用して潜像加工用NCデータを出力する．ただし，nは原点に近い位置から微小山に割り当てた番号である．

以上のようにNCデータを出力するCAMの起動画面を図8に示す．多くのパラメータがあり複雑に見えるが，基本的には各パラメータはデフォルトのままで，任意画像を読込み，作成ボタンを押すだけで，潜像加工用NCデータを作成できる．

Table 2　Micro-mountain parameters

Name	Symbol	Value
End mill tip angle 1	θ_1	120 °
End mill tip angle 2	θ_2	60 °
Groove depth	d	0.133 mm
Length of flat part	w	0 mm

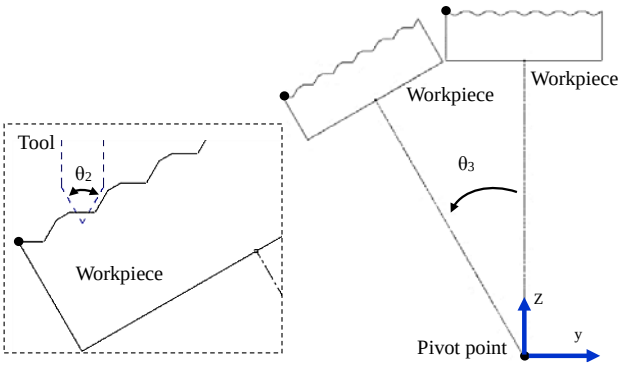


Fig. 5　Machining image by 5-axis machining center

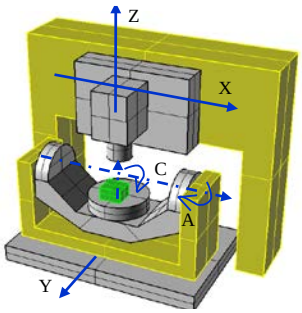


Fig. 6　Schematic of the five-axis machining center

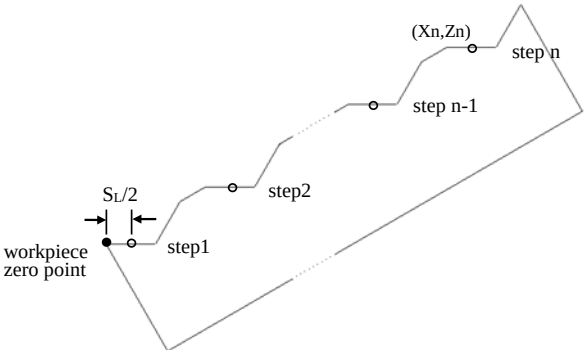


Fig. 7　Details of machining image

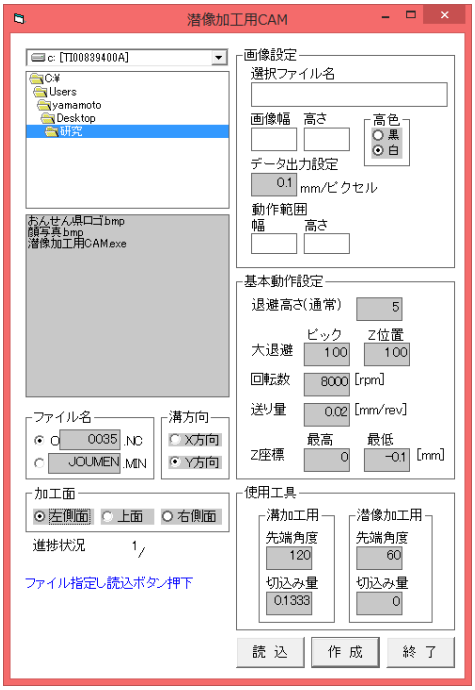


Fig. 8　Startup screen of CAM system for 5-axis machining

３．5軸MCによる潜像加工サンプルの製作

(1) 加工前の段取り

5軸MCでは, 回転中心を正確に測定しないと意図した加工が行われない可能性がある[6]．使用した工作機械には，タッチプローブと基準球が付属されていたため，これらを使用して，A軸中心（Y_{A0}，Z_{A0}）とC軸中心（X_{C0}，Y_{C0}）を求めた．

その後, A 軸と C 軸が 0°の位置でワーク左下端上面を原点に設定し，その原点を（X_{W0}，Y_{W0}，Z_{W0}）とし，C 軸回転角度をα，A 軸回転角度をβとした時の原点位置（X_{W1}，Y_{W1}，Z_{W1}）を式(7)により求め，加工時に使用した．

$$\begin{pmatrix} X_{w1} \\ Y_{w1} \\ Z_{w1} \end{pmatrix} = R_A(\beta)\left(\left(R_C(\alpha)\begin{pmatrix} X_{w0}-X_{C0} \\ Y_{w0}-Y_{C0} \\ Z_{w0} \end{pmatrix}+\begin{pmatrix} X_{C0} \\ Y_{C0} \\ 0 \end{pmatrix}\right)-\begin{pmatrix} 0 \\ Y_{A0} \\ Z_{A0} \end{pmatrix}\right)+\begin{pmatrix} 0 \\ Y_{A0} \\ Z_{A0} \end{pmatrix} \tag{7}$$

(2) 5軸MCによる潜像加工

先端角120°のエンドミルで微小山を加工した後，加工機のA軸を－30°傾けて，先端角60°のエンドミルで微小山側面にデザイン部の加工を行う．画像は，図9(b)に示す大分県のPRに使われるおんせん県ロゴ(200×280ピクセル)と筆者の顔写真を採用した．なお，おんせん県ロゴの使用については，大分県より許可をいただいて使用している．表3に加工条件を図10に加工結果を示す．ここで図10(a)はワークを左斜め方向から撮影した写真で，図10(b)は同じワークを右斜め方向から撮影した写真である．撮影方向を変えると異なるデザインが写っており，切削による潜像加工が実現できていることが分かる．

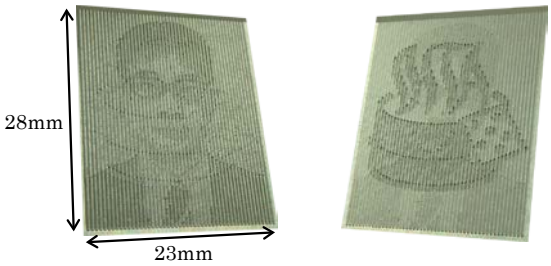
一方, 加工後の工具について観察すると, 先端角120°のエンドミルは摩耗や欠損などの問題は起こらないが，先端角60°のエンドミルは先端が弱く，図11(b)に示すような欠損が起きやすく，大きな課題である．なお図11(a)は，加工前の工具先端の写真である．

Table 3　Machining conditions of latent-image

	Micro mountain	Latent-image
Spindle speed	8000 min^{-1}	8000 min^{-1}
Feed rate	400 mm/min	160 mm/min
Pick feed	0.462 mm	0.400 mm
Cutting depth	0.133 mm	0.1 mm (Max)
Work material	A5052	
Tool	End mill of tip angle 120°	End mill of tip angle 60°

(a) Author’s photograph　　(b) Onsenken–Oita logo

Fig. 9　Picture images



(a) View from left　　(b) View from right

Fig. 10　Latent-image machining result by 5-axis machining center

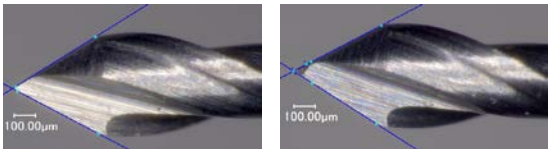
４．3軸MCを想定した潜像加工用CAMの開発

(1) 3軸MC向け潜像加工部のNCデータ出力

前章までは，5軸MCを使って切削による潜像加工を実現してきた．しかし，5軸MCの操作方法を習得するには時間が必要なことや回転中心の精度管理等で工数がかかるという課題がある．また，5軸MCを保有していない場合は実施が難しいという問題もある．そこで，本章では，一般的に使われる3軸MCで，潜像加工を実現できるCAMの開発を行い，その有効性や課題を確認する．図12に3軸MCでも潜像加工を行える手法を示す. 微小山は, 2章で示したものと同じで，画像の濃淡に応じてZ方向に式(1)もしくは(2)で求めた数値Z_T分切り込んでいたものを，微小山の最下点を基準に横方向(XY方向)に切り込むように変更した．以上のようにNCデータを出力するCAMの起動画面を図13に示す．5軸向け潜像加工用CAMと同様に，画像を読込んで作成ボタンを押すだけの容易な操作性となっている．

(2) 3軸MCによる潜像加工

開発した3軸MC向けの潜像加工用CAMに，前章で使用したおんせん県ロゴと筆者の顔写真を読込ませ，NCデー



(a) Before machining　　(b) After machining

Fig. 11　Cutting edge

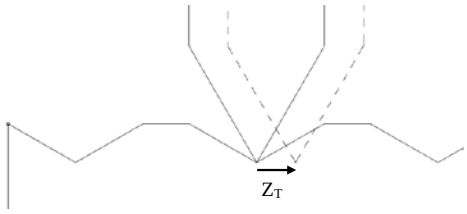


Fig. 12　Machining image by 3-axis machining center

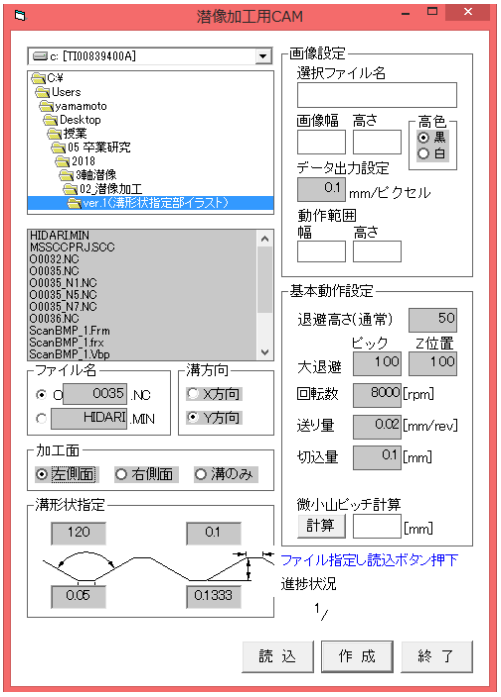
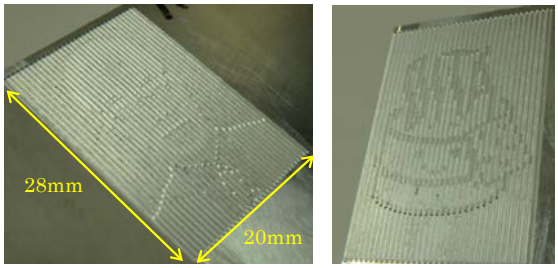


Fig. 13　Startup screen of CAM system for 3-axis machining



(a) View from left　　(b) View from right

Fig. 14　Latent-image machining result by 3-axis machining center

タを作成し，直進軸のみで加工を行った．工具は，微小山とデザイン部どちらも先端角120°のエンドミルを使用し，加工を行った．また，指定した最大切込みが行われても微小山が残るようにするため表2に示すwを0.1mmとし，表3に示す微小山のピックフィードを0.612mmに変更した以外は，5軸MCによる潜像加工と全く同じ加工条件を採用した．加工結果は図14に示す通りとなり，潜像を実現することができた．しかし，写真ではうまく表現できないが，目視では5軸MCによる加工サンプルのほうが，明らかに細かな濃淡を表現できているように見える．一方，今回3軸MCで行った潜像加工では，摩耗や欠損がほとんど起こらない先端角120°の工具一本で完結できた．作業者の視点としては，工具寿命について心配をすることなく，安心して加工が行える利点もあることが分かった．

５．結言

本研究で得られた結果を以下に示す．

１）本研究では，最初に回転軸を有する5軸MC向け潜像加工用CAMの開発を行った．開発したCAMは，画像を読込むだけで潜像加工用NCデータを作成できる容易な操作性が特徴である．

２）先端角120°のエンドミルで微小山を加工し，5軸MCでワークを傾けた後，先端角60°のエンドミルで微小山側面に潜像のデザインを加工することで，高品位な潜像を実現することができた．しかし先端角60°のエンドミルの工具先端が弱く欠けやすい問題があることが分かった．

３）5軸MCを保有していない場合でも切削による潜像加工を実現させるために，一般的な3軸MC向け潜像加工用CAMの開発も行い，実験によって開発の成功を確認した．

４）3軸MCで加工した潜像加工サンプルは，5軸MCで加工したものに比べて，目視では細かな濃淡が表現されていないように見え，高級感の面で劣るように見える．一方、摩耗や欠損がしにくい工具のみで潜像加工が実現でき，安定した加工が可能である．

参考文献

1) 神崎有子，箕造和章，宇津野祐司: 遊戯用コイン，特開 2009-189479 (2009)
2) 木内正人: セキュリティ・デザインの現状と将来，デザイン学研究, 53, 2, pp.39-48 (2006)
3) 堂面俊則，大籔博，松井寿充: 通貨機器における市場および技術動向，富士時報, 83, 5, pp.310-315 (2010)
4) 木内正人，木内進: 位相変調模様における可視画像領域の発見とその活用，日本印刷学会誌，48, 5, pp.41-50 (2011)
5) 白井健二: 広領域表面テクスチャ生成のための加工システムと微小変位装置の開発，科学研究費助成事業 研究成果報告書, (2014)
6) 山本通，堤正臣: 5軸マシニングセンタのテーブル回転軸中心線推定方法，精密工学会誌，77, 3, pp.301-305 (2011)

（2018.9.28受付）