塑性変形型ラピッドプロトタイピングに関する研究* (リニアシャフトモータのハンマリング装置への適用)

田中 秀岳^{*1}, 近藤 祐太^{*2}, 中 宗一郎^{*3}, 浅川 直紀^{*4}

Study of a Forging Type Rapid Prototyping System (Servo Controlled Linear Shaft Motor Applied for Hammering System)

Hidetake TANAKA^{*1}, Yuta KONDO, Soichiro NAKA and Naoki ASAKAWA

^{*1} Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Nagaoka University of Technology
1603-1, Kamitomioka, Nagaoka, Niigata, 940-2188, Japan

This study deals with automation of metal hammering forming on the basis of CAD data by use of a linear motor. The metal hammering is one of traditional handicrafts. An objective shape is pulled into shape as integration of discrete deformations on each hammered part. In order to automate the metal hammering working that has been operated by human handwork conventionally, following approaches are adopted in the study. To improve these workings with numerical control, the tool path is generated on the basis of CAD data. To imitate skilled human worker's hammering, the hammering mechanism by using of a linear motor is developed. Linear motor can perform linear motion with smooth arbitrary acceleration and precise position control and hammer motion. Hammering motion of the liner motor is controlled by the internal model control method and optimal control method. From the experimental result, the developed system is realized to have enough ability to form various shape of workpieces and the linear motor hammering improve the formability of the system.

Key Words : CAD, CAM, Linear Motor, Incremental Hammering, Sheet Metal Forming, Rapid Prototyping

1. 序 論

現在, 板材のプレス加工は自動車の車体パネル等から, 身近な日用品に至るまで幅広い工業製品の製造に, 安価で大量に生産できる方法として広く利用されている. このプレス加工は一方で専用の金型やプレスに際し大きな加工圧力をもつ大型の工作設備が必要といった点から, 多品種少量生産や試作品の迅速成形⁽¹⁾には不向きであり, 現在も熟練工の手作業に頼っているのが現状である.

そこで近年注目されているのがインクリメンタルフォーミング (逐次成形加工)⁽²⁾であり, 数々の成形技術開発や研究が進められている^{(3)~(8)}. インクリメンタルフォーミングでは従来の板材のプレス成形加工法とは違い, 数値制御により単純な工具を薄板に局所的に接触させることで塑性変形を行っており, 以下のような特徴を有する.

- (1) 総型や専用の金型を必要としない.
- (2) 単純な形状の工具を用いて製品形状を創成するため, 多品種少量生産や試作品の迅速成形に向いている.
- (3) 汎用の NC 工作機械を流用できるため, 初期導入コストが比較的少なくて済む.

一方, 塑性加工には衝撃力を利用したハンマリング方式と呼ばれるものがあり, これは伝統的に工芸品の分野で見られる手作業による鍛金⁽⁹⁾が知られている. この方式では熟練技能を駆使して, フレキシビリティの高い形状を形づくることができるが反面, 職人芸的な要素が強いため, その技術の習得には長い年月を必要とする.

著者らはインクリメンタルフォーミングと同様に, ハンマリングによる逐次塑性変形を 3 軸の工作機械あるい

* 原稿受付 2011 年 11 月 29 日

^{*1} 正員, 長岡技術科学大学工学部機械系 (〒940-2188 新潟県長岡市上富岡町 1603-1)

^{*2} 正員, 長岡技術科学大学大学院機械創造工学専攻 (〒940-2188 新潟県長岡市上富岡町 1603-1)

^{*3} 長岡技術科学大学大学院機械創造工学専攻

^{*4} 金沢大学理工研究域機械工学系 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)

E-mail: htanaka@mech.nagaokaut.ac.jp

Table 1 Property of metal hammering

	Force	Thickness of blank control	Tool posture control	Freedom of forming
Metal hammering	Impulsive	Possible	Necessary	High
Incremental forming	Static	Difficult	Necessary	Middle
Die forming	Static	Possible	Unnecessary	Low

は産業用ロボットと局所打撃変形を行う専用工具によって自動化する研究を進めている^{(10)~(12)}。先行研究においてはハンマの動きを自動化する電動のハンマリングユニットを開発し適用した。これは DC モータ駆動のカム機構によって連続的にハンマリング動作を行うものであった。しかし、ハンマリング速度は使用しているばね定数に依存するため、任意のハンマ速度を再現することが不可能であった。そのため、常に一定のハンマ速度で加工するため人間の腕による鍛金のように、ハンマを振り下ろす速度を調節しながらの加工ができなかった。

本研究では先行研究での電動ハンマリングユニットに代わるものとしてリニアシャフトモータに着目し、速度制御可能なリニアサーボハンマリングユニットを開発した。これを 2 軸直交型のロボットに搭載し、ハンマリングシステムを構築した。2 軸ロボットは通常、ティーチングプレイバックと呼ばれる教示によって動作するが、この方式では人間の手による複雑な動きを再現することは困難である。そこで近年では、工作物の CAD データから生成される加工対象面の情報をもとにロボット動作プログラムを生成し、面取り⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾、溶接などの加工を行い、ティーチングレス化を実現している研究も存在する。しかし面取り、溶接等と違い、鍛金加工ではその加工対象面が逐次変形しており、人の手による加工の場合、その経験に頼った技法により様々な角度から工具を動かして変形する工作物に対して適切な打撃を行っている。

本報では、人間に近いハンマリング動作を再現できるリニアサーボハンマリングシステムを構築した。また、CAD データに基づいて鍛金加工用 CAM システムを用いて生成した工具経路を用いて鍛金加工実験を行い、リニアモータを用いたハンマ速度制御可能な自動化鍛金加工システムの可能性を実証したので報告する。

2. インクリメンタル鍛金加工

2.1 成形の基本原則

ハンマリングによる鍛金加工は、時間的に離散化した局所変形の集積による逐次成形であり、加工力は衝撃力を利用する。そのためハンマリングによる逐次成形法は他のインクリメンタルフォーミング成形法等に比べ大きなフレキシビリティを有している。表 1 に示すように、鍛金加工は既存のプレス成形法に比べ、自由度の高い成形⁽⁸⁾が行える反面、ハンマのコントロールが重要である。

基本的な成形原理は手作業での鍛金加工と同じく、被加工材に汎用工具を用いて塑性変形を与え、目的の形状に成形する方法である。手作業での鍛金加工では主に金槌と当て金を用いて加工を行うのが普通であるが、この場合、固定された当て金に重ねる被加工材とハンマの両方を正確にコントロールしなければならないため、自動化を行うことは困難である。

本研究では伝統工芸に見られる鍛金や彫金の技法の一つである脂台（やにだい）を用いた打出しに着目し、脂台を模した固定ジグを製作した。加工を行う際、図 1 に示すように、工作物である板材を支持枠に固定し、条件によっては下にサポート材である粘弾性樹脂を充填する。ハンマによる局所的な衝撃力が素板に作用した時、粘弾性体であるサポート材が板の周辺部を支持し、フレキシブルな当て金として作用するため、局所的な変形を板に与えることができる。

2.2 ハンマリングの方法

インクリメンタル鍛金加工の自動化の先行研究⁽⁸⁾においては、工作物である素板に局所変形を与えるハンマリングの方法は静的な油圧力による方法であった。一方、著者らによる先行研究では電動ハンマリングユニットによる動的な打撃力による方法であったが、鍛金加工の自動化を行う上での単純化のため、図 2 に示すように、DC モータによって回転するカムがハンマを持ち上げ、カムが外れるとスプリングによる加速落下を行う機構であり、ハンマは下端のストッパによって静止する下死点を持った構造であった。工作物との位置関係により、変形量はハ

Fig. 1 Hammering support base

ンマ下死点で制限されており，人間による鍛金加工の成形原理とは異なっていた．また，ハンマの速度はカムの寸法とスプリングのばね定数に依存し，常に一定の速度でのハンマリングであり，任意のハンマ速度に調整することは困難であった．

実際の人間による鍛金加工では，ハンマの動きは下死点に拘束されておらず，ハンマの持つ運動エネルギーはすべて工作物の変形に費やされる．作業者はハンマの下死点を制御できないが，ハンマの速度を微調整することによって，任意の変形量を工作物に与えることができ，工作物全体の変形の進行状態や局所的な変形状態を考慮し，破断を避けながら任意の形状に成形を行うことができる．

人間による鍛金加工の原理に立ち返ると，より成形性を向上させるためにはハンマ速度の制御が必要である．そこで，本研究では，往復運動を制御できるリニアモータに着目した．塑性加工分野ではヘラ絞りやスピニング加工においてサーボモータ⁽¹⁵⁾及びリニアモータ⁽¹⁶⁾による制御を行った報告もある．本研究では，リニアモータの速度制御に着目し，より人間による鍛金加工の原理に近い動作を行うためリニアシャフトモータを用いた速度制御可能なハンマリングユニットを構築した．

Fig. 2 Mechanical principle of electroactuation hammering unit

3. システム構成

システムの概略を図3に示す．任意の3次元CADシステム(本研究ではSolidWorks, ソリッドワークス・ジャパン(株))により工作物の形状定義を行い，中間ファイルフォーマットであるIGES形式で出力する．定義された3次元モデルは鍛金加工に対応させたCAMを用いてCADデータから加工対象形状の工具経路を生成する．生成された工具経路は動作プログラムとして2軸ロボットに転送すると同時に，リニアサーボハンマリングユニットを動作させる．使用した2軸ロボットは直交2軸X-Y産業用ロボット(FXYx, ヤマハ発動機(株))で，動作範囲100mm × 140mm，最高速度1.2m/s，位置決め精度±0.02mmである．

Fig. 3 System configuration

Fig. 4 Whole view of the system

速度制御可能なハンマリング動作を行う装置として、リニアシャフトモータを適用し、2軸ロボットに搭載した。システム外観を図4に示す。先行研究においては、3自由度の場合、直交3軸及び電動ハンマリングユニットの4つのアクチュエータで構成されていたが、本研究で開発したシステムは、直交2軸及びZ軸方向の位置決めを兼用しているリニアサーボハンマリングユニットの3つのアクチュエータで構成されている。ハンマの最大速度は約4m/sであり、打撃数は最大毎秒約2回まで可能である。ハンマには直径6mmの円筒形工具を用い、円筒のエッジは応力集中による破断を防ぐ目的で先端Rが1.0mmに仕上げられている。

リニアシャフトモータはモータドライバを介して駆動されるが、高速動作に対応させるため、モータの制御にはエンジニアリングワークステーション内蔵型のFPGAカウンタボード(PCI-7811R, 日本ナショナルインスツルメント(株))を用い、インクリメンタル動作で直接駆動した。2軸ロボットにドライバを介してエンジニアリングワークステーションからRS-232Cを用いて動作プログラムを転送した。また、2軸ロボットの動作とリニアサーボハンマリングユニットは同期して動作し、任意の位置に任意の速度でハンマリングによる打撃を与えることが可能である。

Fig. 5 Continuous hammering algorithm

4. リニアサーボハンマリングユニット

4.1 ハードウェア

ハンマリング速度を任意に制御するために、リニアシャフトモータを用いたリニアサーボハンマリングユニットを開発した。リニアシャフトモータ (SHD-165-395, 三木プーリ (株)) を用い、シャフト先端にハンマを取り付けた。可動部であるシャフト及びハンマの質量は 0.8kg, ハンマのストローク距離は 122mm, 繰り返し位置決め精度は $\pm 0.1\text{mm}$, 静的な最大推力は 117N である。装置自体はコイルである固定子が 2 軸ロボットに固定され、シャフト及びハンマは装置本体側と機械的な接触をしていないため、ハンマリングによる反動が装置本体に伝わらない構造となっている。

ハンマリング速度の制御には PID 制御を用い、高速動作のために FPGA ボードを使用し、リニアシャフトモータから出力されるパルスのカウントし、モータの位置情報を得る。リニアサーボハンマリングユニットのシャフト - ハンマ系において、基礎実験として周波数応答実験を行い、各周波数毎のゲインと位相を測定することで、伝達関数を実験的に導出した。PID 制御パラメータ選定は目標速度に追従するパラメータを選び調整を行った。

図 5 に連続的にハンマリングを行うアルゴリズムを示す。リニアシャフトモータを用いてハンマの下死点を制

Fig. 6 Tool path modes

御する場合，目標の速度工作物に打撃を与える前に減速し，工作物に変形を与えることができない．また，下死点を制御せずに励磁した状態でハンマを工作物に衝突させることを繰り返すとコイル及びドライバが過熱し危険である．そこで，慣性ブレーキ回路を無効にし，ハンマが工作物に衝突すると同時に励磁を遮断するように，プログラムを作成した．最初に工作物へ向けてハンマが指定の速度に達するまで加速し，速度到達後は指定速度を維持する．ハンマが工作物へ衝突すると，ハンマと工作物間の電氣的な導通を検知し，リニアモータの励磁を切断する．ハンマが工作物に衝突し反作用でハンマが跳ね上がる加速度を検知すると励磁を再開し，初期位置にハンマを戻す．以上のような一連の流れを繰り返すことで連続ハンマリングを行う．

5. リニアモータ鍛金加工用 CAM システム

5.1 概要

Kodatuno(Kodatuno is Open Developed Alternative Trajectory Utility Nucleus Object)⁽¹⁷⁾はマルチプラットフォームなオープンソース CAM カーネルである．Kodatuno は開発言語として C/C++を用いており，CAD の中間ファイル・フォーマットである IGES(Initial Graphics Exchange Specification) データを読み込むことが可能である．

切削加工用 CAM において，生成されたパス上を工具が通過した場合，工具の包絡面が通過した箇所を全て除去するモデルである．しかし鍛金では，ハンマで加工した箇所が必ずしも想定した通りに変形するとは限らない．また，ハンマ速度が異なると，同一の工具経路を生成しても成形品の形状は大きく変化してしまう．従って鍛金用 CAM では，より定義形状に近い加工を行うため，工具経路生成時および動作プログラム生成において既存の切削用 CAM システムとは異なるアプローチを行った．

5.2 工具経路生成

図 6 に開発した鍛金 CAM において考慮すべき工具経路を示す．定義形状を X-Y 平面で見たとき，図 6(a)Inward モードは外周から中心へ向かって加工を行う経路であることを示す．図 6(b)Outward モードは中心から外周へ向かって加工を行う経路であることを示す．図 6(c)Scanning モードは定義形状の境界内を，端から特定の方向へ向かって加工を行う経路であることを示す．工具経路は，工具経路モードの選択，X-Y 平面上の加工対象点間距離 [mm]，Z 方向の等高線間隔 [mm] の 3 点を考慮し生成する．本研究で構築したリニアモータ鍛金加工装置は X-Y 方向が 2 自由度，Z 方向はリニアモータによるハンマ軸であり，Z 方向の位置決めは不可能であるが，等高面ごとの加工を想定しているため，生成される工具経路は指定した Z 方向の等高面ごとの X-Y 座標値の集合である．

5.3 動作プログラム

生成した工具経路に対して，さらにハンマ速度 [m/s] 及び X-Y 方向移動速度 [mm/s] の 2 点の加工条件を付加し装置を動作させるプログラムを生成する．この内，成形性に関する加工条件はハンマ速度のみである．リニアモータを用いた鍛金加工は，先行研究と異なり，深さ方向は Z 軸の位置決めでは決定できず，ハンマリングによる打撃力によって深さが変化するため，現状ではハンマ速度は指定した形状の高さ及び等高面間隔に合うように経験的に決定せざるを得ない．最終的に動作プログラムは加工対象点毎に以下のデータを持つ．

1. 加工対象点の位置 (X,Y,Z)
2. ハンマ速度
3. X-Y 方向移動速度

6. 鍛金加工実験

6.1 単発ハンマ速度変化実験

構築したシステムを用いて実際に鍛金加工が可能かを検証するために、単発ハンマリング加工実験を行った。まず、ハンマ速度を十分に低速であり工作物に変形が確認される速度から、最大速度まで増加させ単発でのハンマ速度と工作物の成形深さの関係を実験により考察した。工作物は厚さ 0.5mm の A1050 板とし、粘弾性樹脂をサポート材として用いた場合とサポート材無しの 2 条件で実験を行った。ハンマ速度は素板に変形が確認できる最低限の速度である 0.6m/s から最大速度である 3.4m/s まで 0.2m/s ごとに増加させた。

単発加工実験の結果について、サポート材を用いた場合を図 7(a) に示し、サポート材無しの場合を図 7(b) に示す。図 7(a) 及び (b) 中の数値はハンマの速度 [m/s] である。単発ハンマリングによる成形深さはデプスゲージで測定した。測定した成形深さとハンマ速度との関係を図 8 に示す。サポート材を用いた場合の方が成形深さが深い傾向がある。また、サポート材が素板を支えるため、ハンマリングによる凹部の周辺への影響が低減されている。図 8 中の破線で示す放物線近似と比較すると、ハンマ速度 2.4m/s 以下では、成形深さはハンマ速度の 2 乗にほぼ比例している。それ以上の速度では、工作物の塑性変形の限界が近づいてきており、放物線近似より成形深さの増加傾向が鈍化し、最終的に 3.4m/s を超えたところで破断した。従って、厚さ 0.5mm の A1050 板の場合、任意の成形深さを得るための本システムでの実用ハンマ速度は 0.6m/s から 2.4m/s と判断した。

(a) With support material

(b) Without support material

Fig. 7 Workpieces appearance after one-shot hammering

Fig. 8 Relationship between hammering speed and depth of hammered part

6.2 工具経路モードの選定

先行研究⁽¹¹⁾の知見より、工具経路のモードが成形性に大きく影響を与えることが分かっている。本システムにおいて、より定義形状に近い成形の可能な工具経路のモードを実験によって検証した。

表2に実験条件を示す。CADでの定義形状は図9に示すような底辺40mm、高さ15mmの底面が正三角形となっている三角錐とした。工作物は厚さ0.5mmのA1050板とし、サポート材を用いた。工具経路のモードについて、Scanningモードは先行研究より、鍛金には適していないことが判明しているため、InwardモードとOutwardモードの2種とした。

実験結果を図10に示すように、明らかにOutwardモードでは定義形状と異なる形状となった。角錐や円錐といった比較的単純な形状はInwardモードが適していると判断し、以降はInwardモードで実験を行った。

6.3 ハンマ速度変化と成形深さの関係

次に、本システムを用いてハンマ速度を変化させて鍛金加工を行う実験を行った。定義形状は工具経路モード選定実験と同様の三角錐とし、CAMによって生成された同一の工具経路を使用しハンマ速度のみ5種類の変更を行った。加工時のハンマ速度は1条件につき開始から終了まで同じ値で加工を行った。工作物は厚さ0.5mmのA1050板とし、サポート材を用いた。実験条件を表3に示す。加工後の工作物の寸法比較については、水平方向はX-Yロボットの動きに追従しているため寸法は同一と判断し、高さ方向のみの変化を定盤上でハイトゲージを用いて測定した。

本システムによる鍛金加工後の工作物の写真及び頂点部の高さの測定結果を図11に示す。成形後の工作物はハンマ先端形状が直径6mm、R=1mmのため、角や隅部は鈍化しハンマの形状以下の曲率には成形できていない。最も低速であるハンマ速度が0.8m/sの場合は図11(a)に示すように頂点部の高さは約7.8mmとなり、最も高速であるハンマ速度が1.2m/sの場合は図11(e)に示すように約19.6mmとなり、ハンマ速度1.0m/sの時にCADでの定義形状の高さ15mmに近い14.9mmを得た(図11(c))。ハンマ速度の増加と共に張出高さが次第に変化していることを確認した。そのため、定義形状を達成するためには、CADデータに合わせた確かなハンマ速度の制御が必要である。また、ハンマ速度が増加するとハンマ1打撃分の変形量が大きくなるため工作物の表面は荒くなる傾向となった。

Table 2 Experimental conditions

Defined shape	Three sided pyramid
Workpiece Material	A1050
Support material	Viscoelasticity resin
Thickness	0.5mm
Cross feed	1mm
Hammering speed	1.0m/s
Tool path mode	Inward Outward

Table 3 Experimental conditions

Defined shape	Triangular pyramid				
Workpiece Material	A1050				
Support material	Viscoelasticity resin				
Thickness	0.5mm				
Cross feed	1mm				
Hammering speed	0.8m/s	0.9m/s	1.0m/s	1.1m/s	1.2m/s
Tool path mode	Inward

Fig. 9 Defined shape on CAD

(a) Inward mode

(b) Outward mode

Fig. 10 Difference of tool path modes

(a) Hammering speed = 0.8 [m/s]

(b) Hammering speed = 0.9 [m/s]

(c) Hammering speed = 1.0 [m/s]

(d) Hammering speed = 1.1 [m/s]

(e) Hammering speed = 1.2 [m/s]

Fig. 11 Relationship between hammering speed and workpiece maximum depth

Table 4 Experimental conditions

Defined shape	Four sided pyramid	Six sided pyramid
Workpiece Material	A1050	
Support material	Viscoelasticity resin	
Thickness	0.5mm	
Cross feed	1mm	
Hammering speed	1.0m/s	
Tool path mode	Inward

(a) Four sided pyramid

(b) Six sided pyramid

Fig. 12 More complex defined shape on CAD

6.4 より複雑な形状の成形性

単発ハンマ速度変化実験および速度の違いによる成形深さの違いの結果を基に、より複雑な形状における成形性を検証するために、図 12 に示すような四角錐、六角錐を成形する実験を行った。定義形状での深さは三角錐と同様に 15mm とし、ハンマ速度はハンマ速度変化による成形深さの検証実験より、三角錐において CAD 定義形状に近い深さを得られた 1.0m/s とした。実験条件を表 4 に示す。実験条件の内、送り速度と工具経路のモードはハンマ速度変化による成形深さの検証実験と同様とした。図 13 に成形した工作物を示す。図 13(b) の六角錐を完成させるまでに費やした時間は約 30 分である。加工結果より多角錐などのより複雑な形状の加工が可能であることが確認できた。しかし、深さに関しては定義形状より大きく異なっており、形状に応じて適切なハンマ速度を設定する必要があると言える。

7. 結 論

数値制御された鍛金プレス形成用リニアサーボハンマリングシステムと、リニアモータを用いた鍛金プレス成形に対応した CAM システムを開発して複数の単純形状の成形実験を行い以下の知見を得た。

1. リニアシャフトモータを用いて鍛金加工が可能であることを実証した。
2. 開発したリニアサーボハンマリングユニットは指定した速度で加工することができ、成形深さの制御が可能である。

Fig. 13 More complex shaped workpieces after hammering

3. 速度を変化させた結果，加工後の工作物の最大深さはハンマ速度が速いほど深い傾向を得た．
4. 三角錐，四角錐，六角錐等の複雑な形状を加工する場合には，形状に合わせた最適なハンマ速度が必要である．

謝 辞

本研究は財団法人天田財団 平成 21 年度研究助成 (AF-2009028) により遂行された．関係諸氏に謝意を表する．

文 献

- (1) 中川威雄, "薄板プレス成形における最近の試作・少量生産用型技術", 塑性と加工, Vol.38, No.433 (1997), pp. 122-117.
- (2) 日本塑性加工学会編, わかりやすいプレス加工, (2000), pp. 93, 日刊工業新聞社.
- (3) 浅尾宏, "ダイレスフォーミングにおけるインクリメンタルフォーミングの位置付け", 塑性と加工, Vol.35, No.406 (1994), pp. 1278-1285.
- (4) 松原茂夫, "数値制御逐次成形法", 塑性と加工, Vol.35, No.406 (1994), pp. 1258-1263.
- (5) 松原茂夫, "半球頭工具による薄板の逐次逆張出し成形-数値制御成形システムの研究 II-", 塑性と加工, Vol.35, No.406 (1994), pp. 1311-1316.
- (6) 松原茂夫, "薄板の逆張出しインクリメンタルフォーミング", 塑性と加工, Vol.42, No.489 (2001), pp. 991-995.
- (7) 松原正基, 田中繁一, 中村保, "弾性工具を用いた逐次プレス成形法による薄板の曲面成形", 日本機械学会論文集 C 編, Vol.60, No.573, (1994), pp. 349-356.
- (8) 長谷部忠司, 島進, "ハンマリングによるフレキシブル成形法に関する研究", 塑性と加工, Vol.35, No.406 (1994), pp. 1323-1329.
- (9) 会田富康, 鋳金・彫金・鍛金, (1975), pp. 8, 理工学社.
- (10) H. Tanaka, N. Asakawa, M. Hirao, "Development of a Forging Type Rapid Prototyping; Automation of Metal Hammering Working", *Journal of Robotics and Mechatronics (JRM)*, Vol.17, No.5, (2005), pp. 523-528.
- (11) 田中秀岳, 浅川直紀, 平尾政利, "塑性変形型ラピッドプロトタイピングの開発研究 -CAD データに基づいた鍛金加工の成形特性-", 日本機械学会論文集 C 編, Vol.71, No.711, (2005), pp. 3360-3366.
- (12) H. Tanaka, N. Asakawa and M. Hirao, "Forming Type Rapid Prototyping Development -Error Compensation with Shape Measurement-", *International Journal of Automation Technology*, Vol.2, No.6, (2008), pp. 462-467.
- (13) 浅川直紀, 瀬戸敬, 平尾政利, 竹内芳美, "産業用ロボットによる面取り品質のコントロール -安全性を考慮した面取りの場合-", 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 68, No.673, (2002), pp. 295-300.
- (14) 浅川直紀, 菊池栄治, 平尾政利, 竹内芳美, "CAD データに基づく産業用ロボット用実時間経路計画法 -工具形態を考慮した面取り加工用工具経路の生成-", 日本機械学会論文集 C 編, Vol.68, No.676, (2002), pp. 292-297.
- (15) 荒井裕彦, "ロボットによるへら絞り -ものづくりとロボット技術-", 精密工学会誌, Vol.72, No.1, (2006), pp. 41-45.
- (16) 荒井裕彦, "リニアモータを用いた力制御スピニング加工機", 日本ロボット学会誌, Vol.26, No.1 (2008), pp. 49-56.
- (17) 浅川直紀, "Kodatuno", 金沢大学 理工研究域 機械工学系 マンマシン研究室, <http://www-mm.hm.t.kanazawa-u.ac.jp/research/kodatuno/>, (参照日 2011 年 11 月 29 日).