

リニアモータを用いた鍛金プレス成形に関する研究

長岡技術科学大学 工学部 機械系

助教 田中秀岳

(平成 21 年度一般研究開発助成 AF-2009028)

キーワード：CAD/CAM，鍛金，インクリメンタルフォーミング，リニアモータ

1. 緒言

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）であり，数々の成形技術開発[1]や研究[2]が進められている．

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作業が知られている（図1）．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のできる反面，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．



図1 鍛金

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[3]を進めている．

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て2軸の産業用ロボットに搭載した．

産業用ロボットは通常，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，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[4]も存在する．しかし，鍛金加工ではその加工対象面が逐次変形しているため，人の手による加工の場合，その経験に頼った技法であ

り、熟練工は工作物に対して様々な角度から適切な打撃を行っている。そのため、工作物の CAD データによる加工を行う際にもその点を留意する必要がある。

本報では、対象工作物を定義した CAD データから加工対象面の塑性変形に対応した工具経路を生成する鍛金加工用 CAM システムを開発した。そして得られた工具経路から、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実験を行い、有効性を確認したので報告する。

2. インクリメンタル鍛金加工

2・1 成形の基本原理解

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。

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、脂台を模した固定治具を製作した。加工を行う際、工作物である板材を支持枠に固定し、下にサポート材を充填する。これによりハンマによる局所的な衝撃力が素板に作用した時、粘塑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自動化の先行研究[2]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 モーター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プ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、ハンマの速度を調節することで破断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、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ーによる速度制御可能なハンマリングユニットを構築した。

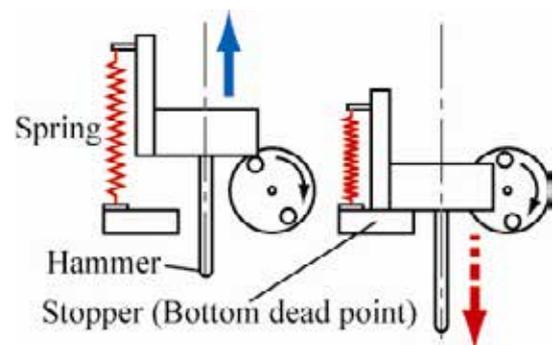


図2 電動ハンマリングユニットの原理

3. リニアモータ鍛金プレス成形装置

3・1 システム構成

システムの概略を図3に、製作したリニアモータ鍛金プレス成形装置を図4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に工具経路を生成する。また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, 位置決め精度は±0.02mmである。また鍛金加工を行う

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。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R1.0mmに仕上げた。

3・2 リニアサーボハンマリングユニット

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軸ロボットは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。

4 鍛金加工用CAM

4・1 Kodatuno

金沢大学のマンマシン研究室で開発されている“Kodatuno”(Kanazawa univ's Open Developed Alternative Trajectory Utility Nucleus Object)[5][6]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、3次元形状を描画するためのAPIとして、OpenGL GLUTを使用している。さらに、GUI機能を追加するため、WideStudioを用いている。これらのインターフェースを用いることによっ

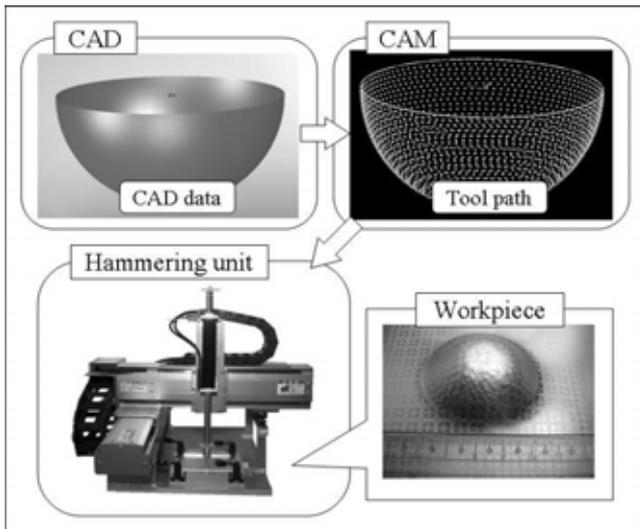


図3 システム構成

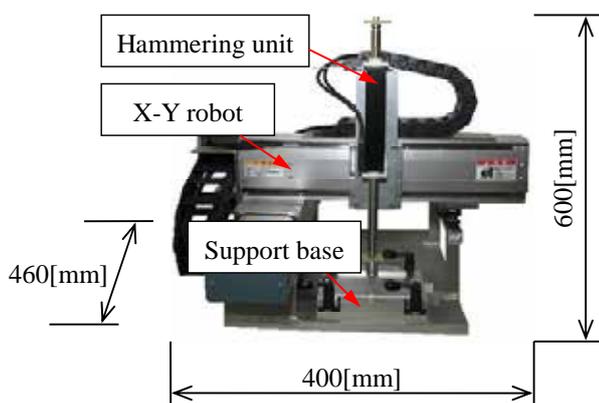
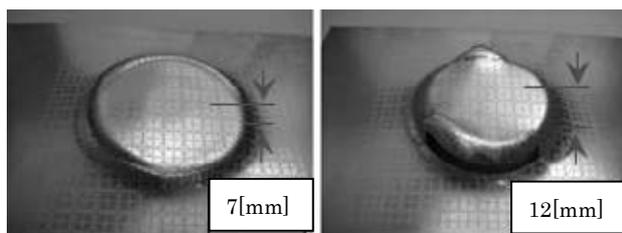


図4 リニアモータ鍛金プレス成形装置外観

て、マルチプラットフォームな環境が確保されている。Kodatuno は、CAD の中間ファイルフォーマットである IGES データを読み込むことが可能である。IGES データから読み込まれた全ての要素は NURBS 曲線および NURBS 曲面により描画される。Kodatuno に含まれている NURBS 曲線および曲面に対する操作関数および演算関数を組み合わせることによって、CAM 開発者は各々の目的に合ったアプリケーションを構築することが可能である。

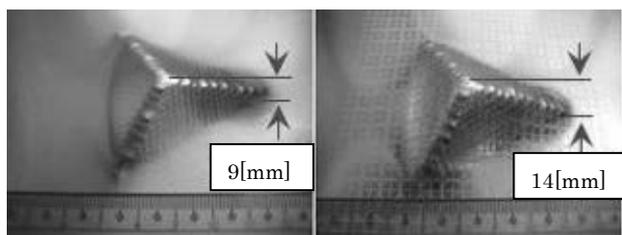
4・2 リニアモータ鍛金加工に対応した CAM

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。よって鍛金用 CAM では、工具経路の他に、より目標形状に近い加工を行うための各種パラメータを与える必要がある。工具経路、ハンマ速度および X-Y ロボット速度を CSV ファイルとして出力し、リニアサーボハンマリングシステムへ送ることで、任意



(a)Outward (b)Inward

図5 耐久実験結果



(a)ハンマ速度0.5[m/s] (b)ハンマ速度0.7[m/s]

図6 ハンマ速度による成形深さの違い

の形状への加工が可能となる。本研究において、鍛金成形装置用 CAM システムは、Kodatuno を基にして構築されている。

5. 成形実験

開発した装置の有用性を確認するため耐久実験、三角錐、四角錐、六角錐、部分球の成形実験および速度実験を行った。また本実験で使用した工作物は 150[mm]×110[mm]×0.5[mm]のアルミ板 (A1050)を用いた。

5・1 耐久実験

開発した装置を用いて工作物をハンマ速度 0.2[m/s]で 9000 回叩く耐久実験を行った。工具経路は中心から外側へ向かう経路との外側から中心へ向かう経路2つのパターンを用意して実験を行った。図5(a)に中心から外側へ叩いて成形した薄板を示し、図5(b)に外側から中心へ叩いて成形した薄板を示す。図5(a)の板は9000回全て叩くことができた。9000回叩くまでに費やした時間は約2時間半である。図5(b)の板は叩いた回数が3000回を過ぎたあたりから破断が確認できた。図5(a)の工作物の深さは7[mm]であることが確認でき、図5(b)の工作物の深さは12[mm]であることが確認できた。図5(a)、図5(b)の結果により開発した装置が充分動作し、工具経路により工作物の成形性が異なることを確認した。

5・2 速度変化実験

開発した装置が指定した速度で鍛金加工が可能であることを確認するために速度実験を行った。実験条件として加工する形状は三角錐とし、ハンマの速度は0.5[m/s]、0.7[m/s]の2種類を用いた。図6(a)に0.5[m/s]で加工した工作物を示し、図6(b)に0.7[m/s]で加工した工作物を示す。図6(a)の工作物の深さは9[mm]であることが確認でき、図6(b)の工作物の深さは14[mm]であることが確認できた。

5・3 三角錐、四角錐、六角錐、部分球の成形実験

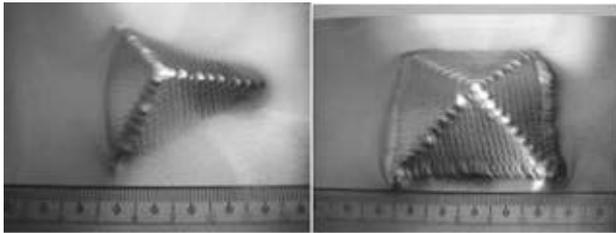
工作物形状が三角錐、四角錐、六角錐、部分球を成形する実験を行った。実験装置に三角錐、四角錐、六角錐、部分球に加工する動作プログラムを

与え鍛金加工を行った。図7に成形した工作物を示す。例えば、図7(d)の部分球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、部分球などの比較的単純な形状の加工が可能であることが確認できた。

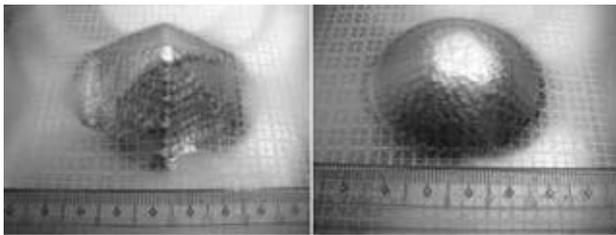
6. 結論

リニアサーボハンマリングシステムを開発し、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、速度を変化させた結果、成形深さの異なる工作物を得た。
3. 六角錐、部分球など比較的単純な形状を加工することができた。



(a) Three-sided pyramid (b) Four-sided pyramid



(c) Six-sided pyramid (d) Partial spherical shell

図7 様々な形状の成形結果

参考文献

- [1] 松原茂夫, 数値制御逐次成形法, 塑性と加工, vol. 35, no. 406(1994), 1258-1263.
- [2] 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), 1323-1329.
- [3] 田中秀岳ほか: 塑性変形型ラピッドプロトタイプングの開発研究 (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 C 編, 214
- [4] 浅川直紀ほか: 産業用ロボットによる面取り品質のコントロール: 安全性を重視した面取りの場合, 日本機械学会論文 C 編 68(673), 2811-2816
- [5] 熊坂拓也ほか: プラットフォームに依存しないオープン CAD カーネルの開発, 2010 年度精密工学会春季大会学術講演会後援論文集, B21, 2009
- [6] <http://www-mm.hm.t.kanazawa-u.ac.jp/research/kodatuno/>

謝辞

本研究は財団法人天田金属加工機械技術振興財団平成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。