

組織化制御された小型ロボット群と狭所精密塑性加工への応用

静岡大学 工学部 精密工学科

助教授 青山尚之

(平成5年度奨励研究助成 AF-93038)

1. 研究の背景

従来の方法による機械システムの高精密化には、振動・温度変化等への対策に多額の費用がかかる割に大幅な精度向上は望めず、要求され続ける高精密化に対し達成可能な精度に限界が見え始めた。その問題点を機構の小型化・簡素化によって打破しようと試みられているが、“作業機器搭載の超小型ロボット”に関する研究である。機械の大きさが小さくなるほどその質量が小さくなるため共振周波数が高くなり振動の影響は小さくなる。温度変化による変形も相対的に小さくなる。これにより機械の動的な剛性を高くすることができる。また機械構造の小型化により機械構造に起因する“不確実性”を改善させ容易に精密作業を行うことができる。しかし、小型化された機械は容易に高精度化が達成される反面、作業範囲も狭くなる。STMなどが良い例である。そこで我々は小型化した機械に自走機能を持たせ広範囲にわたる精密作業を可能にした。これを我々は「小型自走機械」と呼ぶことにする。

小型自走機械は全長4~5cmの大きさで、前後のU字型の電磁石の4本の足先から磁力を発生し金属製の移動面ならば水平面に限らず垂直面や天井面であっても体を吸着して固定することができる。この前脚と後脚の間に入れた圧電素子を伸縮させて精密に脚を動かす。これにより小型自走機械はガイドラインなしに広範囲にわたる超精密な位置決め・精密な作業が可能であるという特徴をもつが、1機に1機能しか搭載することができず、1機では作業効率が悪いいため、作業の効率化を考えると機能の異なる多数のロボットを同時に稼働させる必要がでてきた。今日では、構造体製造技術としての塑性加工技術もマイクロ化が進んでいる。マイクロマシン研究の分野では構造体を“作り出す”という考え方が主流であり、部品を“組み立てる”という発想はあまり見られない。しかし、組み立てや接合という一見古い発想を導入できれば、より多用

な機能を機械に寄与でき、この分野の幅がさらに広がるはずである。このような点をふまえて微細な塑性加工に注目した。

実験では小型マグネットアクチュエータを最適な形で搭載する小型自走機械を設計・試作する。そして微細な加工痕を与えるためにはマグネットアクチュエータをどのように駆動すればよいか、また工具位置を精密に位置決めするにはどうしたらよいかについて検討する。実験では、ハンマを2軸で位置決めした加工例として意味のある形、すなわち文字を点描する。まずは先端径1mmのハンマを用いて実験を行った後、ハンマ先端径を5 μ mと微小化しさらに微細な加工を試みた。

2. 実験方法

試作したマイクロハンマ(先端径1mm)搭載の小型自走機械の概略図と写真を図1、2に示す。これは吸着用のU字型電磁石、推進用の積層型圧電素子とアルミフレームから構成される。サイズは全長51mm、全幅35mm、全高21~23mm、全重量は70gである。本体は前後のクランピング用のU字型電磁石、左右一對の推進用の積層型圧電素子とアルミフレームから構成され、各自走機械専用の作業機器を機体のどこか作業しやすい位置に搭載している。フレームは軽量かつ常磁性体であるアルミ合金を用いる。なお、バッテリーやコントロール信号の受信機等は搭載せず、電磁石駆動電流と圧電素子駆動電圧は外部からワイヤーで供給する。前後のU字型の電磁石の4本の足先から磁力を発生し金属製の移動面ならば水平面に限らず垂直面や天井面であっても体を吸着して固定することができる。この前脚と後脚の間に入れた圧電素子を伸縮させて精密に脚を動かす。圧電素子はホルダを介して板バネで予圧し、圧電素子の変位は板バネをてこの中心として拡大され脚に伝達される。圧電素子の伸縮と、電磁石の励起を同期させれば尺取虫のよう

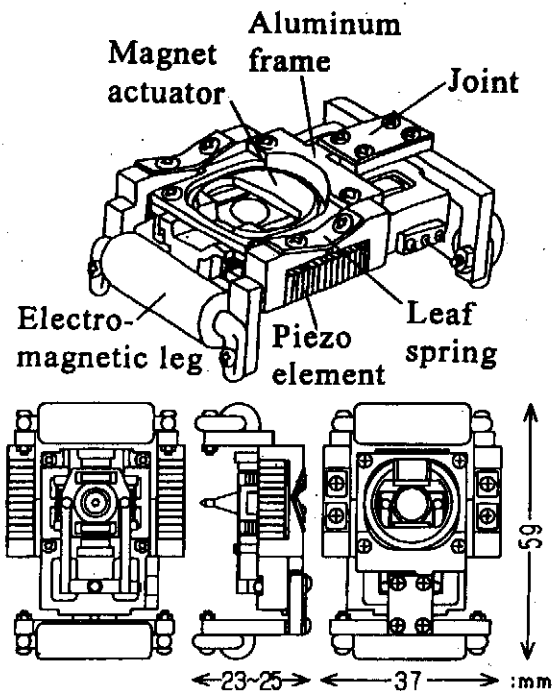


図1 マイクロハンマを搭載した小型自走機械

な動作で微小な歩幅で移動させることができる。具体的には次のように動作させる。

1. 後脚に電流を印加し固定する。このとき前脚には電流を与えず固定はしない。
2. 圧電素子に電圧を印加し伸長させる。
3. 前脚の位置が前方に進んだところで、前脚の電磁石に電流を流し固定する。
4. 後脚の固定を外す。
5. 圧電素子を収縮させる。
6. 後脚を固定する。

以上のサイクルを繰り返すことにより自走機械は尺取り虫の原理で精密に前進する。駆動周波数と歩幅を変えることで移動スピードを調整でき、さらに左右の圧電素子の振幅を変えることで旋回も可能である。機構の特徴として、前後のU字型の電磁石を板バネやベアリングワシャーで連結してねじれの自由度を持たせている。これにより4本の脚の接地を確保することができ、平面だけでなく自由曲面を移動することができる。これにより小型自走機械はガイドラインなしに広範囲にわたる超精密な位置決め・精密な作業が可能である。

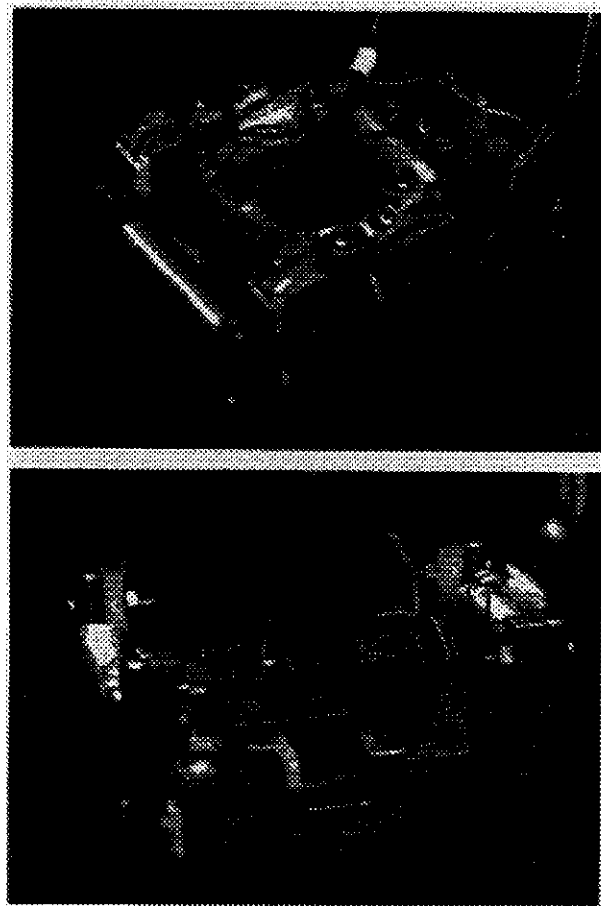


図2 小型自走機械の写真

マイクロハンマはマグネットアクチュエータに取り付け本体下面中央に下向きに搭載した。このハンマを下方向に打ちつけて加工を行う。図3にハンマが動く3方向を示す。マグネットアクチュエータは2軸駆動

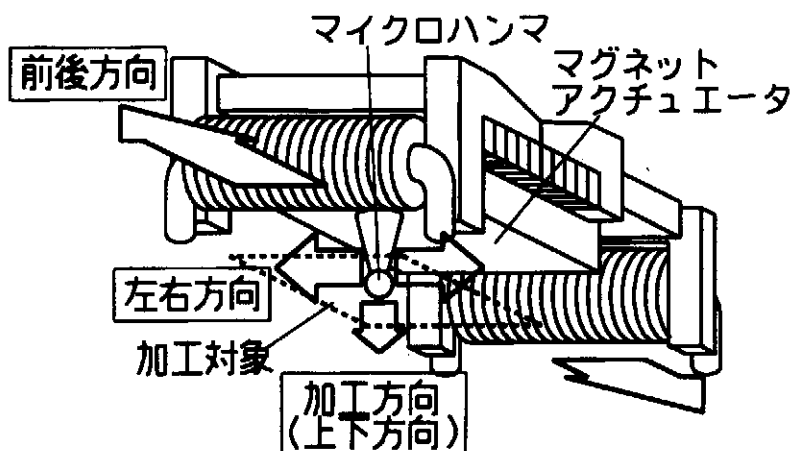


図3 マグネットアクチュエータの動作

機構で、自走機械に取り付けたときに、2軸のうちの上方向を加工に、左右方向をハンマの位置決め用にする。これと自走機械自身の移動による前後方向の精密位置決めを組み合わせるとハンマの2軸の位置決めが可能となる。自走機械は旋回ができるものの、左右の平行移動はできないため、この2軸の位置決めというのは自走機械にとっては従来にない新しい試みである。

＜加工動作・微細打ち込み加工＞

今回、マグネットアクチュエータを用いて微細打ち込み加工を行なうための工具として先端径の異なる2種類のハンマ（直径 $\phi 1\text{ mm}$ と $\phi 5\text{ }\mu\text{ m}$ ）を用意した。これらのハンマをマグネットアクチュエータに取り付ける。そしてこのマグネットアクチュエータにインパルス状の入力信号を与える。これにより加工対象面にボールが衝突し、塑性変形が発生し球形の窪みができる。これが加工原理である。

3. 実験結果

(1) ハンマを左右方向に走査することで加工痕をならべて文字を点描することを試みる1)。

＜加工手順＞

加工手順を「イ」という字を例にとって説明する。文字は左右方向の位置決め精度より 8×8 の点で描くことにする。自走機械を固定し、マグネットアクチュエータにより工具を左右方向に動かし適当な位置で加工する。次にコンピュータに接続されたD/Aボードより自走機械が1ステップだけ動く信号を入力し、1歩ずつ動いて前後の位置決めを行う。再び自走機械を固定し、マグネットアクチュエータにより工具を左右方向に動かし次の位置を加工する。これらを繰り返すことで微小な文字が描ける。

なお、前後の位置決めは、歩数および圧電素子印加電圧により自由にコントロールできる。また、自走機械が静止しているときは常に後脚に電流を流し移動面に固定している。

加工対象には、厚さ 1 mm のアルミニウムを金属磨きで研磨したものを用いる。加工痕は光学顕微鏡で観察し、大きさの評価は基準スケール（光学顕微鏡の倍率校正用スケール、 $1\text{ 目盛 }10\text{ }\mu\text{ m}$ ）と比較して行う。

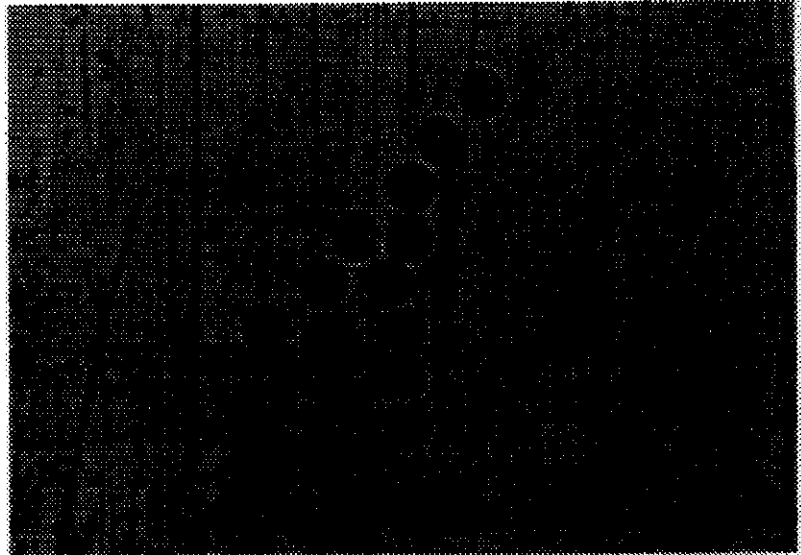


図4 500 $\mu\text{ m}$ 四方の微細加工結果

＜加工結果＞

図4に「イ」という文字を描かせた結果である。それぞれ、写真の横方向の位置決めをマグネットアクチュエータにより、縦方向の位置決めを自走機械の移動により行なった。左右は $77\text{ }\mu\text{ m}$ 間隔になるように、前後は1ステップ $26\text{ }\mu\text{ m}$ で3ステップ移動して $78\text{ }\mu\text{ m}$ 間隔になるようにし、点同士が重ならないように位置決めを行なった。したがって1文字の大きさは $630\text{ }\mu\text{ m}$ 四方に納まる大きさである。

＜考察＞

マグネットアクチュエータを搭載した自走機械を用いて、加工対象面に球形の塑性加工痕の集合により字を描かせる、という実験を行なった。加工結果から第1に各加工点の大きさは1つの字内ですべて同じ大きさに揃っていることが確認できる。すなわちマグネットアクチュエータは加工条件を変えない限り安定して同じ加工力を発生し、同じ加工ができるということが分かる。第2に点と点の横の間隔はばらついているのに対し、縦の間隔は揃っていることが確認できる。原因は以下の通りである。左右の位置決めは印加電流の大きさで行なっており、位置をフィードバックしていないため、結果のようにばらついてしまう。前後の位置決めは自走機械の移動で行なっており1ステップの移動量は安定している。今回前後は3ステップずつ移動させたのであるから結果のように一定の間隔が得られたのである。以上のように左右方向の位置決めに関する問題があったが、約 $600\text{ }\mu\text{ m}$ 四方に 8×8 の加工痕からなる文字を点描することに成功した。

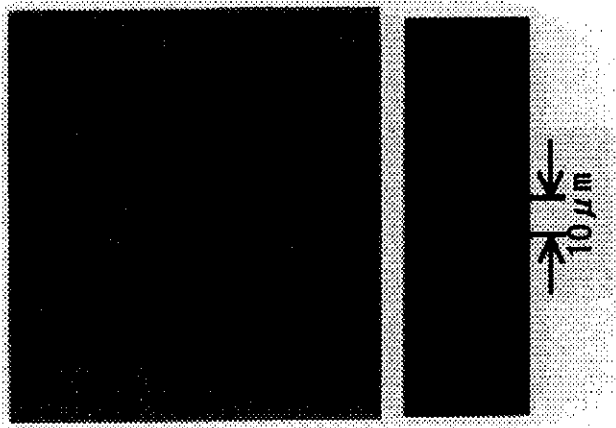


図5 50 μ m以内に描かれた微小文字

実験結果(2) 高精度化のために位置決め制御系を付加する2)。

<改良>

マグネットアクチュエータに予め超小型LEDと一次元位置検出用PSDを取り付け、これによってハンマの左右位置を検出し、フィードバック制御系を構成することで位置決め精度の向上を試みた。LEDはランプ直径2mmの超小型のもので、これはコイル部の左右回転軸付近に取り付けられているのでハンマが左右に動くとその角度を変える。LEDの光ビームはベース側に固定されたPSDの受光面に入射され、受光面上の光スポットの位置に応じて電流として取り出される。コンピュータに入力されたPSDの値の目標値はD/Aコンバータを通過してアナログ値に変換され、PSDの現在値と比較される。その偏差がPD回路・増幅回路を経て左右位置決めコイルに入力され、その偏差を打ち消す方向に駆動し、目標値にハンマに位置を制御する。

<加工結果>

図5は自走機械により先端径5 μ mのハンマを2軸で位置決めして加工点が縦横に隣接するように位置決めして「E」という文字を点描した結果である。加工対象は厚さ1mmのアルミニウムである。各加工痕の直径は7 μ mで、写真の横方向の位置決めをマグネットアクチュエータにより、縦方向を自走機械自身の移動により行った。直径7 μ mの加工痕が互いに隣接しているため、文字の大きさは縦49 μ m、幅は35 μ mである。

この写真から、全ての加工痕が同じ大

きさであり加工動作は安定して同じ動作ができること、直径が7 μ mになったにもかかわらず加工痕は互いに隣接するようにきれいに位置決めされていることが分かる。

図6に先端径1mmのハンマを用いて「E」の字を描いた結果と、先端径5 μ mのハンマを用いて「E」の字を描いた結果を同倍率でならべた図を示す。左が先端径1mmのハンマを使用したもの、右が先端径5 μ mのハンマを使用したものである。この図より、1点の大きさが直径80 μ mから7 μ mまでの範囲で微細な加工が可能であることが分かる。

4. まとめ

超小型のハンマを搭載した小型自走機械を設計・試作し、これによる微細打ち込み加工を試みた。ハンマはマグネットアクチュエータで2軸方向に位置決めされ、先端径1mmのハンマを使用して、これをアルミの加工対象に打ちつける加工を試みた。その結果、最大で直径200 μ mまでの凹球面の加工痕を与えることが可能であった。自走機械を前後に移動させながら左右にハンマを走査することでアルミの加工対象に加工痕の集合からなる文字を点描する実験を行ったところ、左右方向の位置決め精度に若干問題があったものの600 μ m四方に8 \times 8の点からなる文字を描くことに成功した。

次にこの自走機械に先端径5 μ mのハンマを取り付け、左右方向の位置決め精度を改善し、加工の超微細化、高精度化を図った。これにより直径10 μ m以下

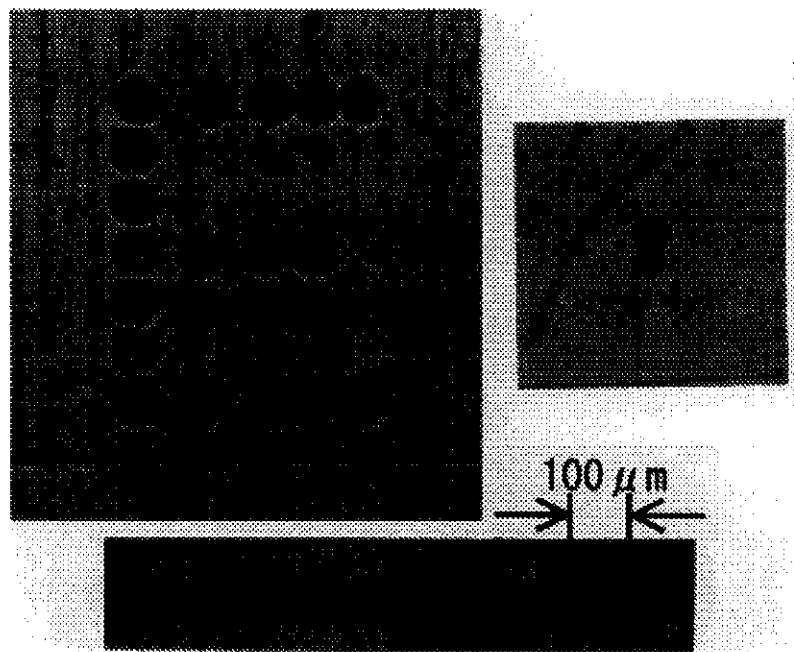


図6 50 μ m-500 μ m内での加工結果

の超微細な加工痕を与えることが可能であり、左右方向の位置決めにフィードバック制御系を付加したことにより位置決め精度は大幅に向上した。上記と同様の文字を点描する実験を行ったところ50 μ m四方に8 \times 8の点からなる文字を描くことに成功した。

今後の課題と方針として、従来の生産システムに組み込むことを前提とした自動加工システムを構築することが挙げられる。すなわちオペレータはキーボードに命令を入力するだけで、自走機械が命令された作業、例えば(○,□)の座標の作業地点に行って△という字を描けというような作業を自動で行ってくれるようなシステムである。

謝辞

本研究は平成5年度天田金属加工機械技術振興財団の助成によるものであり、深く感謝を意を表します。

参考文献

- 1) 青山ほか；小型自走機械群による超精密生産機械システム(第10報) マイクロハンマの搭載と塑性的微細衝撃加工、1994年度精密工学会秋季大会学術講演会論文集、p.607/608.
- 2) 青山ほか；小型自走機械群による超精密生産機械システム(第13報) 塑性的微細衝撃加工の高精度化、1995年度精密工学会春季大会学術講演会論文集、p.599/600.