研究

形状記憶効果によるマイクロマニピュレータ*

本 間 大** 三 輪 敬 之** 井 口 信 洋**

Micro Manipulators Applied
Shape Memory EffectDai HONMA, Yoshiyuki MIWA
and Nobuhiro IGUCHI

This paper describes two different prototype micro manipulators which operate on the basis of the Shape Memory Effect (SME). One manipulator called "Skeleton-muscle type" is composed of aluminum pipe skeletons, bias springs and thin wire actuators of Ti-Ni shape memory alloy (50-50 at%) which contract and relax like a muscle and has 5 degrees of freedom, of which structure is suitable for a large size manipulator. The other called "Soft-body type" has simple soft and small body 20 mm in its length, made of Ti-Ni wire and silicone rubber coat for a bias spring, being capable of

microminaturizing, which has 2 degrees of freedom. These manipulators are driven by pulse width electric heating of Ti-Ni alloy and program controlled using a microcomputer system. It was found in the performance tests that the "Skeleton-muscle type" performs 1 reciprocating arm motion in 3.2 seconds and the "Soft-body type" in 17 seconds under normal condition. Both the voltage (concerning current) and duty ratio of the heating pulse increase with increasing the manipulated force, speed and variable, however they decrease as the load is increased. The "Skeleton-muscle type" repeats more than 10⁴ stable movements at a temperature within A_f point of Ti-Ni alloy.

Key words: shape memory effect, manipulator, Ti-Ni alloy actuator, pulse heating, performance test, repeated motion, A_f point.

1. 緒 言

金属合金の形状記憶効果(以下 SME と略す)を利用すると従来の機械機器の構造, 機構を大幅に簡単化かつ小型軽量化できるため, 最近その応用開発研究が, 多方面にわたって注目されている¹⁾²⁾. しかし, それら応用例のほとんどは数十°Cの加熱により記憶している元の形態に 100% 復元させて用いる自立展開組立方式か, ばねなどと組み合わせて変形状態と記憶状態の二つの形態間をオン・オフ的に動作させる方式のいずれかであって, SME の発現を積極的にコントロールし, それにより所定の運動動作を得るインテリジェントな機械機器の開発例は数少ない. したがって, SME により動くロボットの設計, 開発に関する研究はほとんど見あたらない.

一方, 筆者らは先に, 形状記憶合金(以下 SM 合金と略す)が熱→機械的エネルギー変換機能素子であるとみなし, Ti-Ni (約 50-50) 合金をパルス通電加熱した時の静的および動的な入出力特性を調べるとともに³⁾⁴⁾, その入出力制御システムを考案し, マイコン制御の SME デジタルサーボアクチュエータを開発試作した⁵⁾⁶⁾.

本研究では, いままでの研究成果を基に, 生物の運動

機構のようにメカニカルな駆動部品をほとんど持たず, 材料と情報伝達系のみから成るようなロボットの開発を試みた. すなわち, 筆者らは生物を手本にして, それぞれの構造, 機構が異なる 2 種類の SME マイクロマニピュレータを開発した. 一つは, 軟体動物のように, 人工筋としての SME アクチュエータ自身が上肢構造部材を相兼ねるものであり, もう一つは, 脊椎動物のように機能部と構造要素を分化して, SM 合金は人工筋的アクチュエータとしてのみ用いるものである. ここでは便宜上前者を軟体形マニピュレータ, 後者を骨格筋形マニピュレータと呼ぶことにし, 以下にそれぞれの動作原理, 構造, 制御方式, および二, 三の動作性能試験結果について示す.

2. SME マイクロマニピュレータの原理と構造

2.1 SME マニピュレータ開発上の留意点

SME を応用したロボットは, 当然その性格上従来のそれと異なった構造設計を行う必要があり, SME や SM 合金の力学的特性や他の諸性質をふまえ, 特徴をいかした形ばかりではなく, SME を利用したために, はじめて可能となる構造も検討すべきと考えられる. 以下に SME マニピュレータを開発する上で, 筆者らが考慮した点をいくつか示す.

- ① SM 合金の発揮し得る出力は, SM 合金の体積(重量)と加えられた変形ひずみ量に依存すると考えら

* 原稿受付 昭和 58 年 4 月 4 日. 昭和 57 年度精機学会秋季大会学術講演会(昭和 57 年 10 月 20 日)にて発表.

** 正 会 員 早稲田大学理工学部(東京都新宿区大久保 3-4-1)

れる。回復可能なひずみ量には限界があり、体積を一定とした場合、均一な変形を与える方が、より大きな出力を発生する。したがって曲げ、ねじり等に比較し、引張変形での使用が有効と考えられる。

- ② 変形抵抗の少ない SM 合金の形状が優れており、細線、薄板等の形状が有利と思われる。
- ③ SME アクチュエータの運動は、往復運動であり、これをそのまま利用できる機構が、構造の簡単さや、動力の伝達効率の面から有利と考えられる。
- ④ SME アクチュエータは、熱により駆動されるため SM 合金の加熱冷却を均一に 効率よく行う工夫が必要である。特に空気等の媒体による加熱冷却では、表面積/体積比の大きな形状を考える必要がある。細線、薄板が有利と考えられる。
- ⑤ SM 合金の変態速度は 3 ms 以下と非常に速く、加熱法によっては数百 MPa の回復応力を瞬時発生可能である³⁾。また SME アクチュエータはメカニカルな部品をほとんど必要とせず、構造的には、パワーウェイト比のすぐれた設計が可能と考える。
- ⑥ SME アクチュエータは、極めて簡単な構造であり、一つの方向として、超小型化、メカニカル IC、センサ機構を含めた集積化等を意図した構造が考えられる。
- ⑦ SM 合金自体ゴムのように変形しやすい柔軟な材料であるから、柔らかな本体を持つ構造も考えられる。
- ⑧ SME アクチュエータは、その力学的特性や柔軟性、振幅減衰性等において、生体の筋肉的である。したがって生体の形態や構造が良い手本となり得る。

以上のような考えに基づき、筆者らはそれぞれ異なる 2 種の形式の SME マニピュレータを試作した。

2.2 骨格筋形マイクロマニピュレータ

図 1 に試作骨格筋形マイクロマニピュレータの概要を示す。本機は、アルミニウムパイプの骨格及びジュロン製の関節部を有し、収縮-弛緩動作による往復運動を行う生体筋肉的なアクチュエータとして、Ti-Ni SM 合金細線を用いた構造である。肘関節、肩関節および肩回転部において、 $\phi 0.2$ mm の Ti-Ni 細線は、関節部のアイドルプーリーを介して、それぞれの骨格材に圧着固定され、バイアススプリングによる張力で引張りの予ひずみを与えられた状態にある。①, ② の理由からこれらの部分では SM 合金に均一な変形を与えやすい引張方式とし、変形抵抗の小さい細線の状態で使用している。そして、これらは、Ti-Ni 線の加熱による収縮すなわち引張変形ひずみの回復プロセスが、屈伸あるいは回転運動に

Fig. 1 Skeleton-muscle type SME manipulator

変換されることにより動作する。この場合の動作角度 θ は、Ti-Ni 線の公称ひずみ ε_a にほぼ比例し、

$$\theta \doteq \frac{\varepsilon_a L}{r} \quad (1)$$

となる。ただし、 r はプーリー径で、試作機の場合 $r=2.5$ mm、 L は Ti-Ni 線の長さで、図中の a-b-c 間では、 $L=100$ mm である。手首及び指部は、バイアススプリングとコイル状を記憶した Ti-Ni 合金細線を組み合わせ、それぞれ回転と把握動作を得ており、マニピュレータ全体で 5 自由度の動作が可能となる。それぞれの Ti-Ni 細線の加熱は、後述のごとくパルス通電により制御される。冷却は自然放冷によるが、SM 合金を細線にして、表面積/体積比を大きくし、冷却効果を上げること、アルミニウムパイプの骨格材にヒートシンクを兼ねさせること、マルテンサイト変態の開始点（以後 M_s 点と略す）の高い Ti-Ni 合金を使用すること、バイアススプリング張力で応力を加えることにより、 M_s 点を上昇させることで、マニピュレータが動作を行う温度範囲において 20°C/s 程度の実用的な冷却速度を得ている。

骨格筋形マニピュレータは、⑧ に示すように、その構造において骨格および筋肉を有する生体の機構を手本としており、主として圧縮力を受け持つ骨格材と張力を受ける Ti-Ni 線およびスプリングからなる一種のトラス構造と考えられる。Ti-Ni 線アクチュエータは構造部材も兼ね、歯車等の複雑な動力伝達機構を必要とせず、構造的には、従来の電気モータ、油圧機器などを動力源としたマニピュレータに比べ、軽量小型化が可能と考えられる。また、Ti-Ni 線の変形量が、曲げやねじり等、他の変形と比較し、均一で大きく、高価な Ti-Ni 合金が少量でも比較的高出力が得やすいため、大型化する場合にも適した構造と考えられる。その動作においては、Ti-Ni SM 合金の超弾性および振動減衰性⁵⁾により適度な柔軟性を有し、突発的な負荷変動を緩衝して本体および被接

Fig. 2 Soft-body type SME manipulator

触物の損傷も回避しやすい。さらに各動作は、Ti-Ni線の加熱冷却のみで行われるため、動作音や電気的ノイズがほとんどなく、潤滑油も不要のため、清潔であるなどの特徴がある。

2.3 軟体形マイクロマニピュレータ

軟体形マイクロマニピュレータは、図2のようにバイアススプリングと絶縁材の機能を果たすシリコンゴム中に、 $\phi 0.2$ mmのTi-Ni線を埋め込んだSMEアクチュエータの柔軟さと単純さによってはじめて可能となる構造である。マイクロスポット溶接で、すべり止め用のピンが取り付けられたTi-Ni線は、あらかじめ 700°C 、 2.0 sの形状記憶処理により図2(a)のcに示すような形状を記憶させる。次に室温で反対方向の曲げ及び引張りの複合変形の予ひずみを与え、必要箇所で導線と溶接した後、図2(b)の腕部断面に示すように偏心してシリコンゴムに埋め込まれる。ここで引張変形を与えるのは、①で示したように均一で大きな予ひずみをTi-Niに与え出力を向上させるためであり、加熱収縮動作は、軸方向の圧縮変形をおさえるために断面の中心に埋め込まれた導線により、本体の曲げ動作に変換される。図2(a)の軟体形マニピュレータは、1—2間、3—2間を通电することで、それぞれ指部による把握動作と腕部の屈折動作を行い、1本のTi-Ni線を部分的に加熱することで、2自由度の動作を行う。軟体形マニピュレータは、その構造上シリコンゴム被覆によって、Ti-Ni線の冷却が妨げられるが、Ti-Ni線を偏心させゴム層を薄くすること、④で示すようにTi-Niの細線を用いたり、突起等により表面積/体積比を大きくすること、シリコンゴムに熱伝導を向上させる物質を混入すること、全体を小さく

Fig. 3 Current pulse and motion of SME manipulator

くすることなどにより、ある程度改善できる。また表面を親水性の多孔質等にして、気化熱で冷却を行う方法も有効である。水中での動作では、冷却の問題はほとんどない。

以上のように、軟体形マニピュレータの特徴は、Ti-Ni線が、アクチュエータとしての機能部材のみならず構造部材をも兼ねるため、軟体動物のような軟らかい動作が可能であるほか、極めて構造が簡単で超マイクロ化も可能である。本研究で試作したマニピュレータの最小のものは、全長20 mm、指部3 mmである。

2.4 SME マイクロマニピュレータの制御

試作SMEマニピュレータの動作は、いずれも初期変形を与えたSM合金と、バイアススプリングを組み合わせたモデルとして考えられる。すなわちTi-Ni合金は、低温のマルテンサイト相の変形に要する力に対し、SMEにより高温の母相が示す回復力が数倍大きいため、加熱されたTi-Ni合金は、バイアススプリングに逆らって変形を回復し、冷却すればバイアススプリングにより再び変形を受ける。マニピュレータ各部のTi-Ni合金は、パルス通电により、加熱時の入熱量を変化させ、SMEの出現状態を制御することで任意の動作状態を得る。通电パルスは、図3(a)に示すような電圧5 V、周波数50 Hzの矩形波で、デューティ比および通电パルス数を制御することにより、それぞれ所定の操作速度と操作量を得る。たとえば、骨格筋形マニピュレータの肘関節を一定の角度動作させ、その位置で停止する場合、Ti-Ni合金に図3(a)に示す通电パルスを加える。すなわち、パルス P_1 で関節部は動作し、 P_2 でその位置を保持する。関節部の操作速度(角速度)と操作量は、それぞれ P_1 のデューティ比 D および数 n に依存して大きくなる。 P_2 は、Ti-Ni合金がバイアススプリングや外力に対して、その位置を保持するための通电パルスで、主に放冷される熱量を補償するために与える。したがって、周囲温度や外力により、 P_2 の適切なパルス幅が決めると考えら

Fig. 4 Program controller of SME manipulator

Fig. 6 Motion of Soft-body type manipulator

Fig. 5 Motion of Skeleton-muscle type manipulator

れるが、それらの条件が安定していれば、図3(b)の動作角度-時間線図に示すように、同図(a)のパルスをシーケンス的に与えるだけで、短時間の位置保持は可能であり、再現性も良好である。しかし、より正確な制御を行うには、関節部にポテンショメータ等の位置検出器を取り付けたサーボ機構や、先に報告したM_s-母相変態進行に伴う物性変化を位置検出に利用したSMEサーボ機構⁵⁾⁶⁾を使用することにより、P₁, P₂を自動的に決定する。

試作マニピュレータは、いずれも多自由度であり、これらに所定の動作を行わせるには、各部のTi-Ni線をプログラム制御する必要がある。図4に、試作した小形プログラム動作制御装置の概要を示す。本機は、ボタン操作によるプレイバック機能とプログラム機能を持つマイクロコンピュータを利用したシーケンスコントローラと、外部入力の可能な複数個のパルスジェネレータとパ

ワーンプおよびSMEサーボアンプから成る。骨格筋形の肩や肘部など特に位置精度の必要な部分は、サーボアンプを用い、他の部分はパルスジェネレータと組み合わせたパワーアンプで駆動する。マニピュレータの動作プログラムは、初めに各部の操作順序と操作時間からなる動作パターンを入力した後、一連の動作を行わせながら、各部の操作速度と操作量を入力する方式である。

図5、図6にそれぞれ試作した骨格筋形及び軟体形マニピュレータの動作例を示す。

3. 動作性能試験

試作SMEマニピュレータの動作試験として、駆動用の矩形通電パルスのデューティ比 D 、

振幅 V (電圧)等を変化させ、Ti-Ni線を通電加熱した際の操作速度、操作量、操作力および繰返し動作に対する耐久性などを測定した。実験は、おもに骨格筋形マニピュレータの肘および肩関節部について行った。Ti-Ni線の外径および全長はそれぞれ $\phi 0.2$ mm, 200 mm, 重量0.042 g, 電気抵抗値は約4.5 Ω , M_s点およびA_f点(マルテンサイトから母相への逆変態の終了点)はそれぞれ60°C, 110°C, バイアススプリングによって40~80 MPaの負荷が加えられており、動作中の予ひずみは2~4%の間である。

図7は、肘関節部について、Ti-Ni線を室温(290 K)から通電加熱を行って一定角度回転させた後、自然冷却を行い、加熱動作前の休止状態(Ti-Ni線の初期変形状態)にもどした際の角度、温度-時間線図の一例である。動作開始直後は、徐々に角速度が増加し、その後はほぼ一定となる。通電加熱の終了後は、図7中 x_{off} に示す骨格

Fig. 7 Reciprocation motion of Skeleton-muscle type SME manipulator
 $V=5\text{ V}$, $D=0.5$

Fig. 8 Influence of duty ratio on motion of SME manipulator
 $V=5\text{ V}$

の慣性に起因すると思われるわずかなオーバーランが認められた。冷却に入ると徐々に速度が増加した後、ゆっくりと休止状態にもどる。図7の場合、通電加熱時間は1.0 sであり、1往復の動作に要した時間は約3.2 sである。また加熱冷却を通して温度とひずみの間には一義的な対応関係はなく、ヒステリシスが生じる。

図8は肩関節部において、パルス通電時のデューティ比 D を変化させ、入熱量を変えることによって、通電時の操作速度を制御可能であることを示すものである。印加電圧は5 Vであり、 $D=0.5$ の時、Ti-Ni 合金1 g 当たり約65 Wの入熱量となる。図8では、 D が大きいとそれに依存して操作速度が増し、バイアススプリングに抗して到達角も大きくなる。また D が0.1以下の小さな場合、Ti-Ni 線の温度が逆変態点に十分至らず、ほとんど動作しない。

図9は、 $D=0.4$ における5~9 V間のそれぞれの電圧についての同様な関係を調べた結果で、電圧が高くなると、角速度と最大到達角度は大きくなる。一方、動作角速度および最大到達角度に及ぼす負荷の影響を調べたのが図10である。大きな負荷ほど動作の開始が遅れ、それ以後の動作速度も小さい。したがって同じ通電時間では、無負荷状態のそれに比べ、到達距離も小さい。図11は、いくつかのデューティ比 D について負荷の大きさにより、最大到達角度が変化することを示したものである。 D が大きいと同じ操作角度では、大きなトルクが得

Fig. 9 Influence of pulse height on motion of SME manipulator
 $D=0.4$

Fig. 10 Influence of load motion of SME manipulator
 $V=5\text{ V}$, $D=0.8$

Fig. 11 Plots of maximum torque in each angle of shoulder joint

られ、同じ D の時は、動作角が小さな場合、すなわちTi-Ni 線の変形ひずみが大きな場合、大きなトルクが得られる。実線は、負荷を連続的に変化させた際の角度変化である。負荷の変化に対し角度が変化するが、これはマニピュレータのコンプライアンスを示すものと考えられる。このほか、最大握力は0.6 N、最大可搬重量は15 gであった。

図12は、骨格筋形マニピュレータの肘関節部について、各デューティ比ごとに形状記憶処理直後から 10^4 回まで各デューティ比 D について繰返し動作を行った際の最大動作角度の変化を測定した結果であり、通電時間は1 s、冷却時間は15 s、電圧は5 Vで実験を行った。

Fig. 12 Variation of motion range on repeated motion (Elbow joint)

Fig. 13 Reciprocating motion of Soft-body type SME manipulator

$D=0.6$ 以下の場合では、回数とともに動作範囲は増加した後安定する。特に $D=0.4$ については、 10^5 回まで繰返し動作試験を続けたが、Ti-Ni は破断しなかった。Ti-Ni 線は動作が安定するまで、引張りひずみで 0.5% 近く伸長した。 $D=0.7$ 以上では、回数とともに動作範囲が減少し、Ti-Ni 線の伸長が続く。本実験の場合、デューティ比 $D=0.6$ の最高温度は約 100°C であり、 A_f 点以下である。一方 $D=0.7$ では約 120°C であり、 A_f 点以上となる。したがって、マニピュレータの動作寿命を考慮すると、Ti-Ni の最高加熱温度は、 A_f 点が一つの目安になるものと考えられる。

一方、軟体形についても同様の性能試験を行ったが、形状が小さいことから正確な実験は困難であった。一例として、図 13 に腕部の変位 X と時間の関係を示す。Ti-Ni 合金への入熱量は約 65 W/g で、図 7 の場合と同じである。骨格筋形 M に比較すると動作速度がかなり小さく、大気中は 1 往復動作に約 17 s 間要する。また、軟体形マニピュレータの場合、腕部で $D=0.8$ 、 $V=5 \text{ V}$ 、 $T=0.1 \text{ s}$ の時、 $0.5 \text{ mN}\cdot\text{m}$ の最大トルクが得られ、最大握力は 0.3 N であった。

4. ま と め

本研究をまとめると以下になる。

- (1) Ti-Ni 記憶合金を用いたことにより、SME で動く骨格筋形ならびに軟体形の 2 種類のマニピュレータを開発試作した。
- (2) 試作 SME マニピュレータは、いずれもバイアススプリングと記憶合金の系で表され、パルス通電加熱で動作し、マイコンを利用したプログラム制御装置によりプログラム制御、プレイバック動作が可能である。
- (3) 動作試験結果において、SME マニピュレータは、通電パルスのデューティ比、電圧、周期により操作速度、操作量が変化し、外部からの負荷の影響も受けることが見いだされた。
- (4) 繰返し動作試験から、加熱温度が小さな場合 $10^4 \sim 10^5$ 以上の安定した動作が可能であり、動作寿命は Ti-Ni のマルテンサイト逆変態点と関係すると思われる。

最後に、本研究を報告するにあたり、大学院生の西村俊則君、卒論学生の千葉原崇、岸野昌樹両君の協力に謝意を表する。

文 献

- 1) C. M. Wayman (唯木次男訳): 形状記憶合金の応用, 日本金属学会会報, **19**, 5 (1980) 323.
- 2) 清水謙一ほか: 特集・形状記憶合金の可能性を探る, 工業材料, **31**, 1 (1983) 17.
- 3) D. Honma, K. Suenaga, Y. Miwa & N. Iguchi: Shape Memory Effect in Ti-Ni Alloy during Rapid Heating, 1982 Proc. 25th Japan Congr. on Materials Research, **1**, (1982).
- 4) 本間 大, 天木直司, 三輪敬之, 井口信洋: TiNi 記憶素子のパルス加熱による動的特性, 第 26 回材料研究連合講演会前刷集 (1982) 43.
- 5) 本間 大, 三輪敬之, 井口信洋: 形状記憶アクチュエータのマイコン制御, 日本機械学会講演論文集, No. 813-5 (1981.7) 82.
- 6) 本間 大, 玉川道洋, 三輪敬之, 井口信洋: 形状記憶アクチュエータによる力覚検出, 昭和 57 年度精機学会秋季大会学術講演会講演論文集 (1982) 916.
- 7) O. Mercier & K. Melton: Kinetics and Thermodynamics of the Shape-memory Effect in Martensitic Ni-Ti and (Ni_{1-x}Cu_x)Ti Alloys, J. Appl. Phys., **50**, 9, (1979).
- 8) J. Perkins (Ed.): Shape Memory Effects in Alloys, Plenum Press, New York, N. Y., (1975) 451.