Precise Control of Shape Memory Microstage

形状記憶微動ステージの高精度化

Tsuneo Teshima, Kouyuu Abe, Yasubumi Furuya,
Minoru Matsumoto and C.M. Wayman*

Faculty of Engineering, TOHOKU UNIVERSITY
Aramaki-Aoba, Sendai, 980 Japan
Tel.022-222-1800, Fax.022-268-3688

*University of Illinois

(Received 7, November 1991 Accepted 4, December 1991)

ABSTRACT

The actuator of Shape Memory Alloy coil with bias spring was developed and its precision was investigated. This device was operated by electrical heating on the Pulse Width Modulation method using computer in order to make high precision of position control. The position was measured by electric micrometer. This was made under the concept of the stage which was used in semiconductor production lines and so on for the reason of the cleanness of this actuator.

Key Words: Shape Memory Alloy, Micro Stage, Precision Stage, SMA Actuator

1. 緒言

形状記憶合金 (Shape Memory Alloy : SMA) はその応用例が多数報告されているが、中でもSMAの示す形状記憶効果 (Shape Memory Effect : SME) を直接の力として利用するSMA アクチュエータには特に期待が寄せられている。¹

SMA アクチュエータの特徴は第1に小型化である。駆動部分が合金単体でできていて動作機構が単純であるため、原理的には、いくらでも小さなアクチュエータが作れる。また、小型化するほど単位体積あたりの表面積は大きくなるので冷却効果が良くなり応答性も向上する。第2の特徴は温度以外の環境条件に左右されないことにある。Ni-Ti合金は特に耐食性が良いので、水中や腐食性の強い液体中でも用いられる。第3には動作環境のクリーンさがあげられる。合金自体が変形して駆動動作をするので摺動部分がなく、潤滑の問題を直接持たないアクチュエータをSMAでは実現できる。²

SMAの示す形状回復動作は、基本的には1方向と呼ばれ、形状を記憶させた合金を低温で変形した後、加熱すると元の形に戻るが、これを再び低温にしても変形はしない。そこで一般的にはバネを使ったバイアス法等を用いて2方向の回復動作を実現している。また加熱方法としては、動作制御の簡便さから通電したときの自己発熱を利用した通電加熱型が利用されている。

本研究では、SMA アクチュエータのクリーンさを生かし半導体製造ライン等で用いられるステージを想定して、その位置制御をより高精度化することを目的とし、バイアスバネ法によるパルス幅変調 (Pulse Width Modulation : PWM) 方式により通電加熱をするバイアスバネ法のSMA アクチュエータを作製し、その精度について調べた。

2. 実験装置・実験方法

(1) 試料

試料は、古河電工 (株) 製のSMA コイルばねを用いた。

<仕様> $d = 0.5\text{mm}$, $D = 5.5\text{mm}$

密着コイルばね

材質: Ni-Ti, A_f 点: 336.9K

(2) 実験装置

実験装置の概略図をFig. 1に示す。

ステージはステージ台にリニアベアリングを用いて中板を取り付け、片側にSMA コイルばね、もう片側にバイアスバネを2本ずつ取り付け、左右から引っ張る構造にした。位置の検出には電気マイクロメータを用いステージ台に固定して測定した。

電気マイクロメータのアナログ出力 (-2 ~ +2V) をA-Dコンバータを介してコンピュータに入力してそれに応じたデューティ比をコンピュータが計算し、パルスを出力しSMAコ

Fig.1 Block diagram of control system of SME stage.

ばねを加熱、冷却するプログラムを作成した。プログラムの流れを Fig. 2 に示す。

このソフトウェアコントローラの特徴を Fig. 3 に示す。

図で、デューティ比が1になっていないのはコンピュータが計算している時間はパルスの初めに含まれるためである。また比較実験装置として、以前にステージ制御のために作製されたハードウェアのコントローラを用いた。これは電気マイクロメータからのアナログ入力に比例したデューティ比のパルス出力する装置である。ハードウェアコントローラの特徴を Fig. 4 に示す。

(3) アクチュエータの性能

Figure 5 は本研究で用いたステージにおけるバイスばねとSMA コイルばねの力関係の図式である。

Fig.2 Flow chart of the developed software control program.

Fig.3 Characteristics of the software controller.

縦軸は両者のコイルにかかる荷重、横軸は変位量をそれぞれ示す。バイスばねとSMA コイルばねは、一方が伸びれば一方は縮むので、バネ定数に相当する両コイルの曲線の傾きは逆になる。

室温時で両者はC₁点で平衡する。SMAコイルばねは39mm、バイスばねは21mmたわんでいる。高温時(100℃)では両者はC₃点で平衡となり、SMAコイルばねは31.5mm、バイスばねは28.5mmたわんでいる。

動作ストロークは高温時と低温時の差7.5mmとなる。負荷のない場合、取り出せる最大出力はC₁点とC₃点の差で約53gfになる。

Fig.4 Characteristics of the hardware controller.

Fig.5 Recovery Force vs. Displacement and Movable Distance, X , of SME Stage.

(4) 実験方法

ステージにバイスばね、SMA コイルを取り付け、室温で両者の平衡位置に電気マイクロメータのカートリッジヘッドを軽く中板に当たるように固定する。この時、電気マイクロメータの値は2.000mmであり、電気マイクロメータの0.000mm 点を目標値として動作するようプログラム上で目標値を設定した。

実験は、18V, 3A の電源を用いて行い、その時間-変位曲線はADコンバータから取り込んでコンピュータのCRT 上に表示し、記録した。

実験1：ハードウェアコントローラ（比例制御）による実験。

実験2：ソフトウェアコントローラ（比例制御）による実験。

実験3：ソフトウェアコントローラ（比例積分制御）による実験。

実験4：ファンによる空冷時のハードウェアコントローラによる実験。

実験5：空冷時のソフトウェアコントローラ（比例積分制御）による実験。

3. 実験結果

実験1～5の結果をそれぞれFig. 6～Fig. 10に示す。Figure 6 からハードウェアコントローラが高精度の制御を実現していることがわかる。一方、ソフトウェア

Fig.6 Linear control of stage position by hardware.

Fig.7 Linear control of stage position by software.

Fig.8 Linear integration control of stage by software.

Fig.9 Linear control of stage by hardware in forced air cooling.

Fig.10 Linear integration control of stage by software in forced air cooling.

ソフトウェアによる制御は、比例制御の場合、Fig. 7 のようにパラメータ K_p によってその特性が大きく変わることがわかる。 K_p の値を大きくすると、立ち上がり時間が短くなりオフセット値は小さくなるが、行き過ぎ量が大きくなり、外乱に弱い不安定なシステムとなる。実験2では $K_p = 0.8$ の時に比較的良好な結果がえられた。しかしハードウェアコントローラと比較するとオフセットが大きく、目的である高精度の位置制御は実現されていない。Figure 8では、積分要素を入れることで比例要素だけの場合よりも良好な結果が得られることがわかる。

$K_p = 1.0$, $K_i = 0.002$ の時もっとも良好な結果を得た。この場合には、ハードウェアコントローラとほぼ同じ応答を得た。実験4と5はファズSMAを空冷した際の応答であるが、Fig. 9とFig. 10を見ると、ハードウェアによる方に0.0035mm程度のオフセットが生じ、ソフトウェアによる方がより高精度の位置制御を実現している。

4. 考察

(1) 整定時の偏差について

実験2と実験4において整定時に定常偏差が残った。実験2も実験4もともに行っているのは比例制御であるから、これは当然の結果である。PWMにおいては、デューティ比を偏差に比例させるわけであるが、一般に行われる比例制御と違い、比例定数 K_p をいくら大きくとってもデューティ比は1以上にはなり得ない。実験に用いたプログラムでは比例制御を行うレンジを変えることで K_p を大きな値とした時にも、それと同様な制御を行い、さらに実験3や実験5のように積分動作を行って定常偏差を除くことができる。しかし、ハードウェアコントローラでは制御レンジが固定されているので K_p も固定されていることになり柔軟性に欠け、実験4のように環境条件が変わった場合には対応しきれない。

(2) 行き過ぎ量について

実験1と実験2の結果を比べると、同じ比例制御を行っているのにソフトウェアによる制御は行き過ぎ量がめだつ。これはパルス周期がハードウェアによる14.6msに比べ、ソフトでは136msと10倍近くも長いためであると考えられる。

5. 結言

この研究で作製したプログラムによるSMAアクチュエータの位置制御精度はかなり良い水準であるが、単に高精度という点ではすでにハードウェアのコントローラで実現されている。しかし、SMAを実際にアクチュエータとして制御することを考える時、SMAは外乱、特に温度の変化に対して非常に敏感であるため、柔軟性をもたせるといった意味でソフトウェアによる制御は不可欠である。今回は装置が簡便であるという理由でコンピュータのポートから直接パルスを出力させたが、より高速の応答を実現するためには、パルスの発生はハードウェアで行いそのデューティ比をコンピュータからの信号で変化させる方法を用いるのが良いと考える。

また、今回は位置の測定を電気マイクロメータで行ったが、SMAの電気抵抗値変化により位置の検出ができることも報告されている。

SMAはその耐久性など材料として問題点も多いが、それらの改善・解析が進めば、それ自体がセンサ機能を持った非常に簡略で、かつ高精度のアクチュエータとして利用できるであろう。

REFERENCES

- ¹K. Miwa and D. Honma, Bull.Jap.Inst.Metals, 24, 61(1985).
- ²T. Teshima, K. Abe, Y. Furuya, M. Matsumoto and C.M. Wayman, Proc.Symp.Jap.Inst.Metals, No.s2.25, 87(1991)

This paper was presented in the Intelligent Symposium at Tokai University, November 6, 7, 1991.