

長ストロークと高精度位置決めを両立する連係微動* (連続ステップ位置決めへの適用)

田丸 雄摩^{*1}, 高藤 和樹^{*1}

Cooperated Positioning Control for Ultraprecision Positioning in Extended Stroke Path (Applied to Continuous Step Positioning)

Yuuma TAMARU^{*1} and Kazuki TAKAFUJI

^{*1} Dept. of Mechanical Engineering, Kyushu Institute of Technology
1-1 Sensui-Cho, Tobata-ku, Kitakyushu, Fukuoka, 804-8550 Japan

Cooperative positioning is a positioning technique in which long stroke paths and ultraprecision positioning are combined. These are achieved simultaneously in a single apparatus using extended displacement positioning (EDP) and reduced displacement positioning (RDP), respectively. In the present study, we developed a new control program for a 2-stage hinged cooperative positioning device. RDP is first carried out by a series of step motions of the fine positioning stage. The extended displacement stage is then moved using EDP by an amount equal to the total displacement achieved by RDP. Simultaneously, the fine positioning stage is returned to its initial position using RDP. Continuous step positioning then becomes possible by repeating these operations. The maximum stroke was 67.1 μm and a settling range of less than the EDP displacement resolution (27 nm) was achieved. Some positioning errors were found to occur due to switching between the two types of operation. However, these could be reduced by increasing the EDP control coefficient to improve synchronization, or by decreasing the number of positioning steps. In this way, the amount of overshoot and the settling time could be effectively controlled. Using this apparatus, it was shown that continuous positioning with 25 nm steps was possible.

Key Words : Ultraprecision Positioning, Machine Element, Actuator, Piezo-Element, Compatible Positioning Unit, Cooperated Positioning Control, Lever Mechanism, Elastic Hinge, Continuous Step Positioning

1. 緒 言

元来、観察を目的として開発、使用されてきたSPM(Scanning Probe Microscope)を計測や加工に試みる研究が報告されている。計測ではナノインデント⁽¹⁾や表面性状計測⁽²⁾に用いる例が報告されている。加工では近年、マイクロマシーニングと呼ばれる微細加工技術によって製作されるナノ、マイクロデバイスが大量に生産されるようになりSPM加工が本格的に注目されるようになってきた。

マイクロ切削は探針を試料に接触させ、試料を走査させることで溝加工を行うものである⁽³⁾⁻⁽⁵⁾。また、微細な立体形状の加工ではフォトリソグラフィー技術が有用である。ナノメートルレベルのパターン描画は電子ビーム露光を用いるが散乱などの影響でパターンが広がる近接効果が問題になる。そこでSPMの技術で描画するとナノパターンを比較的容易に形成できる⁽⁶⁾。これらの試料ステージは積層型ピエゾ素子(以下ピエゾ)を駆動源とするものが多用される。変位拡大機構を用いた微動ステージでは走査範囲の拡大は見込めるが微小な変位を得ることは難しい。またチューブ型やトライポッド型はピエゾの伸びがステージの送りとなるため高分解能の変位制御が可能だがストロークはピエゾ単体の出力変位に限られる。

マイクロ切削では走査ごとに加工条件を変化させて加工形状を調べる研究⁽⁷⁾がある。またフォトリソグラフィーでは広範にわたるパターン描画が必要である。したがってSPM等のマイクロ加工に用いるステージでは変位拡大

* 原稿受付 2011 年 1 月 25 日

^{*1} 正員,九州工業大学大学院工学研究院(〒804-8550 福岡県北九州市戸畑区仙水町 1-1)
E-mail: tamaru@mech.kyutech.ac.jp



機構で得られる十分なストロークと piezo 単体の特性を生かした高分解能の位置決めが要求される．そのため変位拡大機構と変位縮小機構を組み合わせることで長ストロークと高分解能位置決めをひとつの要素で達成する微動機構の開発は有用であると考えられる．また，加工では連続的な位置決め駆動も肝要である．

前報⁽⁸⁾でストロークの拡大と位置決めの高精度化の両立を連係微動で実現させる方法を示した．本研究では連係微動の制御手法を見直し，連係微動を用いた連続ステップ位置決めについて新たに提案する．

2. 微動装置と計測，制御方法

図 1 に前報で提示した微動装置の概観，図 2 に構造の概略と計測，システムを示す．微動変位ははりをを用い，弾性ヒンジによってこの機構で取り出す．ベース 1，ベース 2 上に各々 PZT1，PZT2 を設置する．前者 z_1 の変位に対して z_1 の拡大変位，後者 z_2 の変位に対して z_2 の縮小変位が出力される．拡大微動と縮小微動が連係して動作（連係微動）するため出力変位は $z_1 + z_2$ となる．

z_1 ， z_2 はひずみ検出値から推定する方法をとるためヒンジ部にひずみゲージを貼り付け，各々静電容量型非接触変位計を用いて校正した．微動制御はひずみ検出によって行っている．表 1 に前報の試験で得られた微動特性を示す．

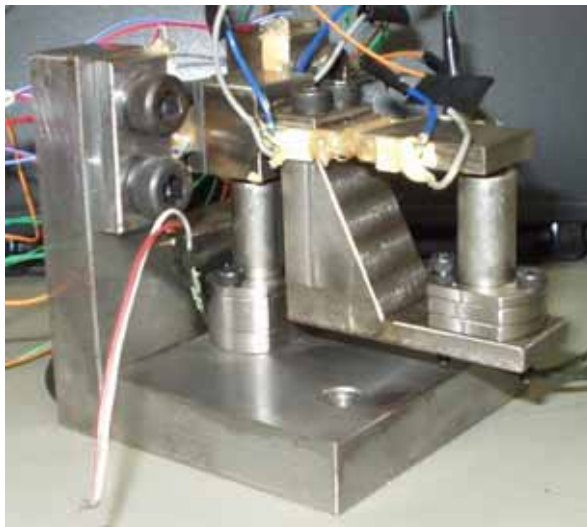


Fig.1 Schematic view of compatible positioning unit

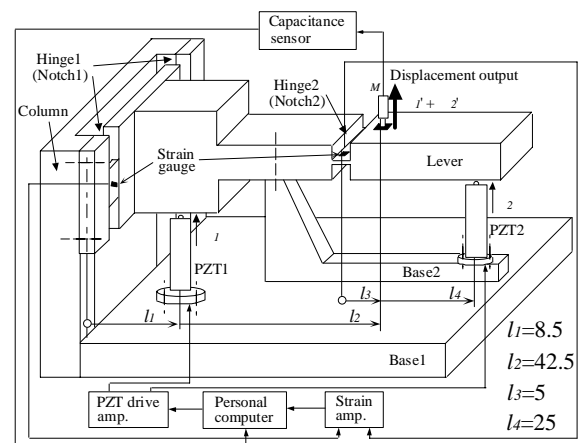


Fig.2 Compatible positioning unit for extension and reduction mechanism

Table1 Displacement characteristic

	PZT	Extension	Reduction
Maximum displacement (μm)	14.5	67.1	2.7
Extension ratio of displacement		4.63	0.19
Displacement resolution (nm)	6	27	1

3. 連係微動の原理

今回，本装置で連続ステップ位置決めを実現するために新たな連係微動を提案する．図 3 に連係微動の原理を示す．以下に各微動過程を説明する．

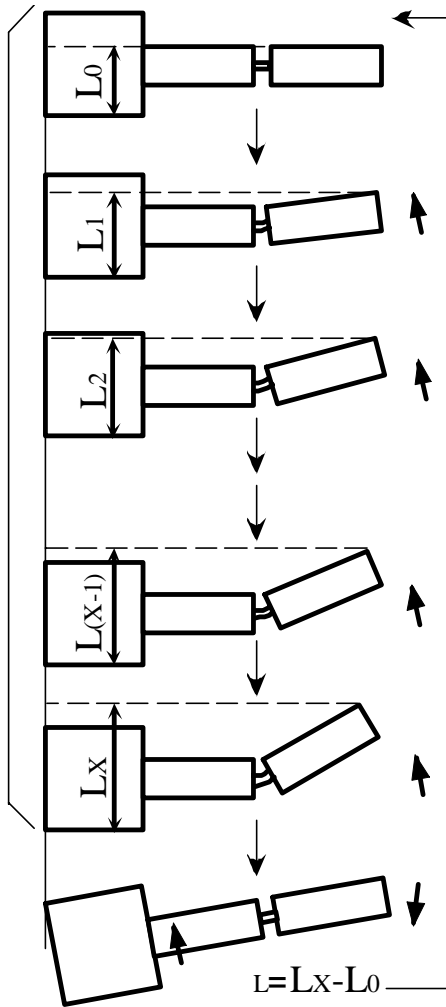
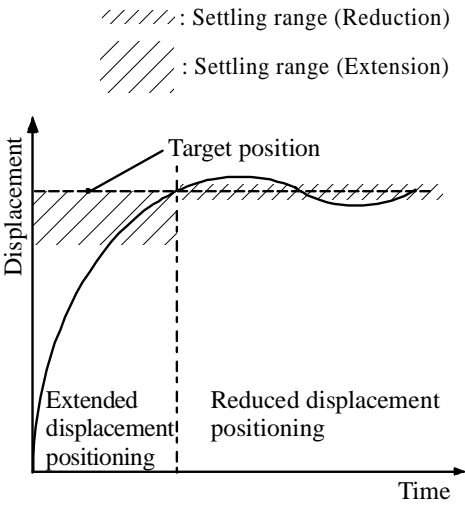
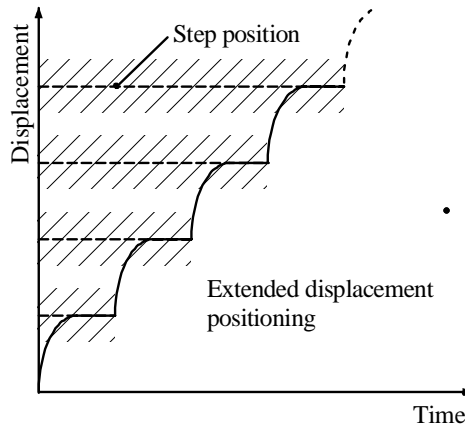


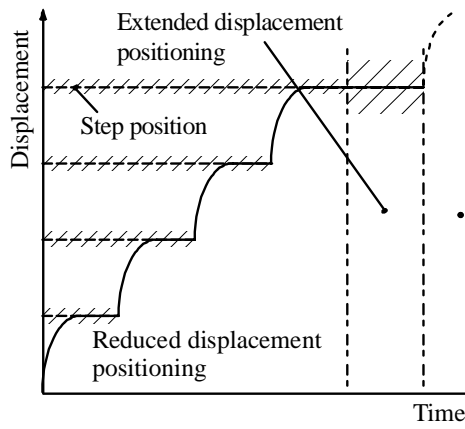
Fig.3 Continuous positioning by cooperated control



(a) Single target positioning by cooperated control



(b) Continuous positioning by unity control



(c) Continuous positioning by cooperated control

Fig.4 Comparing of positioning control

拡大微動は停止させたまま、縮小微動のみを階段状に変位させる．

(L_0 L_1 L_2 ... L_{x-1} L_x)

拡大微動で の変位分($L_x - L_0$)変位させる．

同時に縮小微動を初期変位(L_0)にもどす．

～ の動作を繰り返すことにより連続ステップ位置決めが可能になる．

4. 位置決めの比較

図 4 は位置決めの各手法について微動制御時の挙動と動作設定を模式的に示す．(a)は前報で提案した連係微動による位置決めである．拡大微動から縮小微動に切替えて位置決めを行う．最終的な位置決めを縮小微動で制御することで高精度な位置決めを可能にしている．この手法は 1 か所のみ目標位置を設定した位置決めである．

連続ステップ位置決めは複数の目標位置を設定し、階段状に位置決めを行う．(b)は変位拡大機構のみを用いた場合の拡大微動（単独微動）での位置決めを表す．ステップ変位を定め、各目標位置に対して整定範囲を設定する．整定範囲は拡大微動の変位分解能以上をとり、本装置では 27nm 以上の範囲となる．(c)は今回提案する連係微動による連続ステップ位置決めを表す．各ステップの位置決めは縮小微動で行わせるため整定範囲は縮小微動の変位分解能である 1nm まで設定できる．縮小微動から拡大微動への切替え時のみ拡大微動の変位分解能(27nm)以上の整定範囲を設ける．

連係微動による連続ステップ位置決めは単独微動の場合と比較して微動の切替えを除いて縮小微動で位置決めが行われることで拡大微動での最大ストロークを確保しつつ、より高精度の位置決め性能が期待される．なお、以降に記述する連係微動は特にことわりがない限り(c)の手法によって得られた結果を示す．

5. 連続ステップ位置決め特性

連係微動による連続ステップ位置決め特性を調べた．微動装置は除振台上に設置し、恒温環境下で試験を行った．縮小微動の各ステップおよび、切替え時における拡大微動の位置決めは $\dot{y} + \dot{z}$ をフィードバックする PI 制御を用いている．制御係数は拡大微動、縮小微動ともに限界感度法により求めた値を目安に決定し、その値を 1 倍とする．なお、すべての試験において縮小微動は係数 1 倍で固定している．

5・1 制御係数の違いによる特性

図 5 は縮小微動のステップ変位、ステップ数を各々 300nm、5 ステップに設定して位置決めを行った結果である．すなわち、拡大微動は縮小微動が 1.5 μm 変位することに位置決めを行う．縮小微動の整定範囲は拡大微動の最小変位分解能である 27nm を下回る $\pm 5\text{nm}$ 、拡大微動の整定範囲は $\pm 40\text{nm}$ とした．

(a)は拡大微動の制御係数 1 倍の結果である．連係微動による連続ステップ位置決めの様子が観察できる．微動が 0 秒から始まっていないのは初期位置のずれを補正した後微動が開始するためである．なお、ピエゾはそれ自身非常に高速の応答性能を有するが微動制御に用いた PC の能力の制約を受けるためフィードバックの間隔は約 17msec となっている．(b)は(a)の一部を拡大して示している．縮小微動が確実に階段状の位置決めを繰り返していることが読み取れる．ところで縮小微動から拡大微動に切替わる動作で微動に振れが発生している．*1 は拡大微動によるオーバーシュートである．より大きい振れとして*2 が認められる．これは縮小微動が初期変位に戻る動作と拡大微動が立ち上がる動作が完全に同期しないことで起こる微動の干渉である．双方の動作を同期させることで干渉を生じさせないようにできるが、完全に同期させることは難しい．本図から縮小微動の戻りに対して拡大微動の立ち上がりが遅れていると推察できる．そこで連係微動において特徴的な挙動である微動の干渉に焦点を当てその低減を試みた．拡大微動の立ち上げを速めることで縮小微動の戻りと拡大微動の立ち上がりの同調性が高まる．拡大微動の制御係数を増すことで簡便的に拡大微動の立ち上げ速度を上げることができる．

(c)、(d)は拡大微動の制御係数を各々 1.2 倍、1.5 倍に設定した結果である．(a)と比較すると係数を増やすことで干渉を表す下側に伸びるラインが短くなっていることが分かる．係数 1 倍に対して 1.2 倍、1.5 倍はそれぞれ干渉が 0.64 倍、0.62 倍になった．あわせてオーバーシュートと拡大微動の整定時間も調べた．制御係数を増すと必然的にオーバーシュートは大きくなる．表 2 にそれらの結果を示す．以上より拡大微動の制御係数を大きくすることは干渉低減の一手段として有効であることを確認できた．

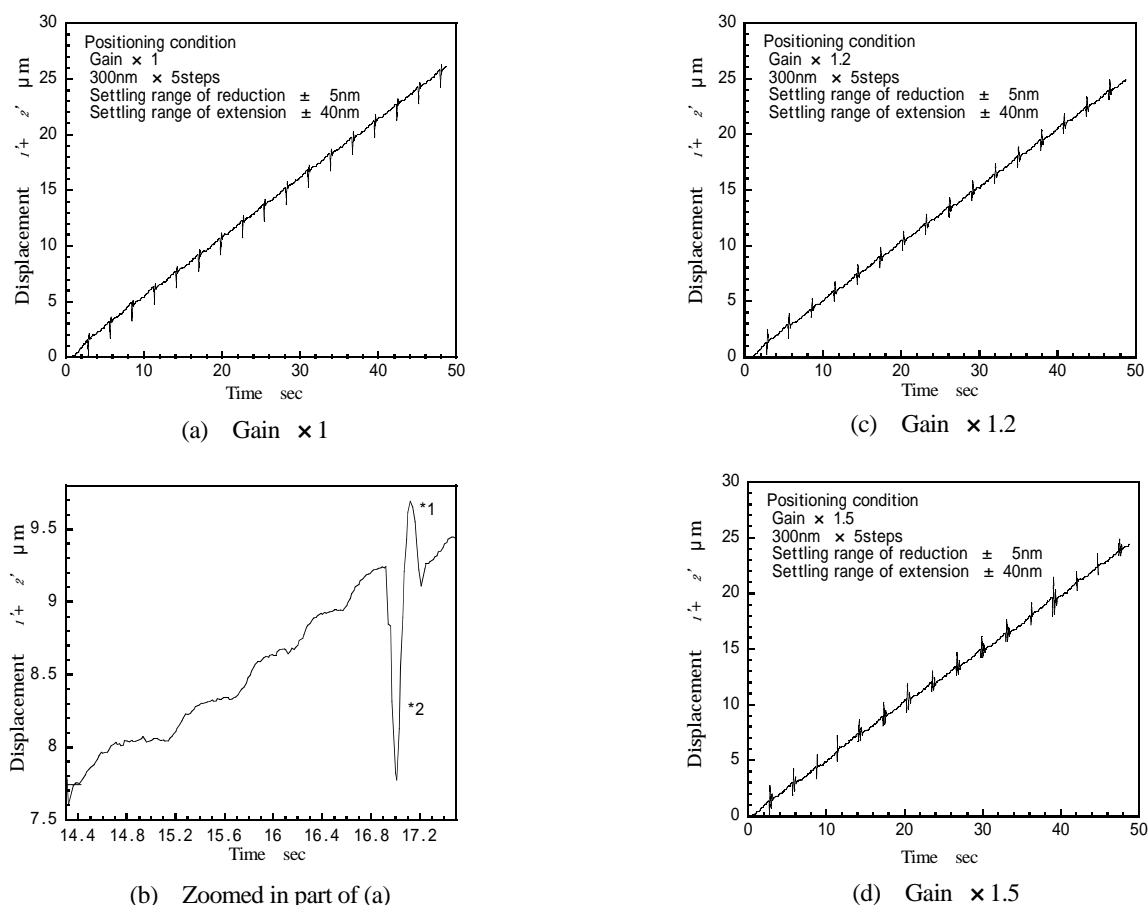


Fig.5 Continuous positioning by cooperated control (300nm x 5steps)

Table2 Comparison of settling condition
(Comparison by difference of gain)

	Gain x1	Gain x1.2	Gain x1.5
Interference	1	0.64	0.62
Over shoot	1	1.63	2.23
Settling time	1	1.41	1.56

5・2 縮小微動ステップ数減少による干渉低減

縮小微動のステップ数を減らすと拡大微動の位置決め変位を小さくすることができる．そこで位置決め変位縮小による干渉低減効果を調べた．図6は縮小微動ステップ300nmで縮小微動ステップと制御係数を各々(a):3ステップ,1倍,(b):2ステップ,1倍,(c):2ステップ,1.2倍に設定した結果である．いずれも干渉の低減が認められる．表3は図5(a)と比較した結果である．縮小微動を5ステップから2ステップにすると干渉が0.29倍になった．また,オーバーシュートが小さくなり,整定時間の短縮も認められた．2ステップの制御係数1.2倍は1倍と比較して大きな差異はなかった．

5・3 連係微動の有用性

連係微動によって高精度の連続ステップ位置決めが可能である．図7は縮小微動のステップ変位,ステップ数を各々25nm,5ステップに設定して連続ステップ位置決めを行わせた結果である．図8は図7の一部を拡大して示す．ステップ変位は拡大微動の変位分解能程度以下であるが階段状の位置決めを確認できる．

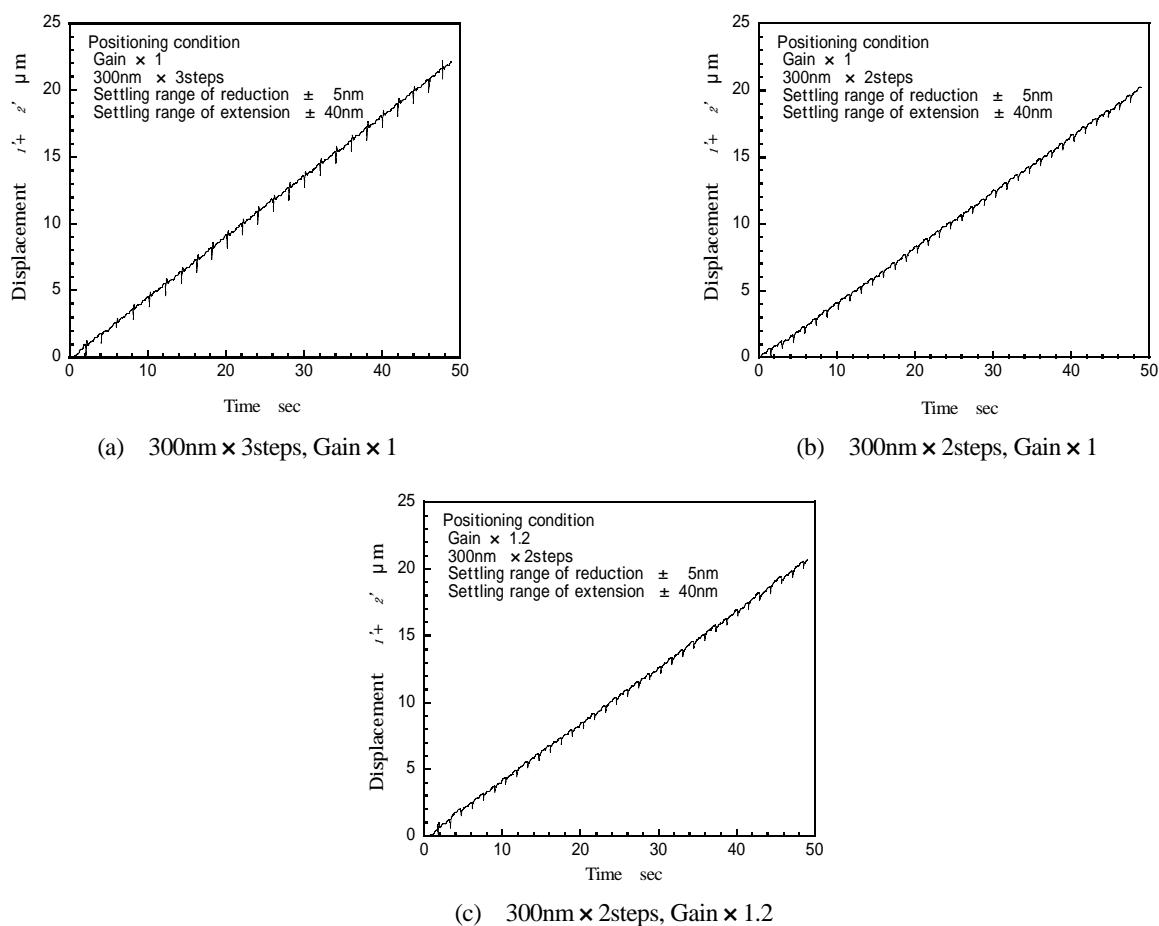


Fig.6 Continuous positioning by cooperated control
: Reduced displacement positioning in number of small steps

Table3 Comparison of settling condition
(Effect of a step number decrease)

	300nm \times 5steps Gain \times 1	300nm \times 3steps Gain \times 1	300nm \times 2steps Gain \times 1	300nm \times 2steps Gain \times 1.2
Interference	1	0.65	0.29	0.29
Over shoot	1	0.54	0.20	0.26
Settling time	1	0.93	0.39	0.38

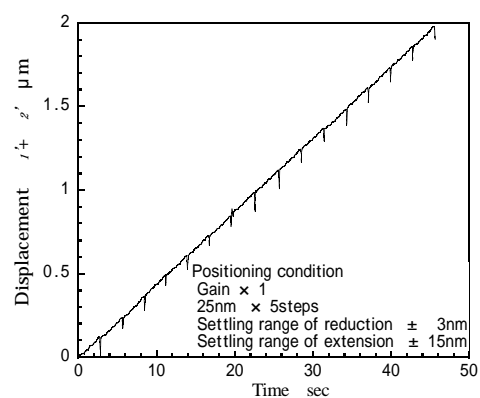


Fig.7 Continuous positioning by cooperated control
:25nm \times 5steps

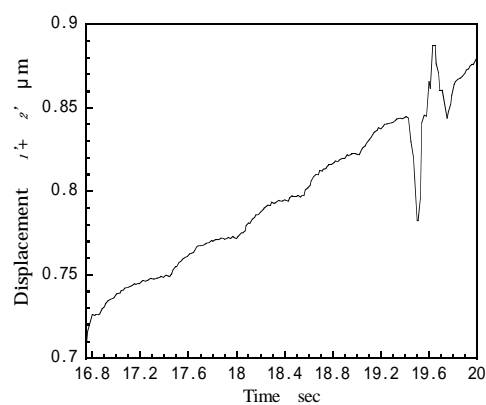


Fig.8 Zoomed in part of fig.7

6. 結 言

連係微動による連続ステップ位置決めを提案し、特性試験を行った。結言を以下にまとめる。

- (1) 連係微動の手法を用いることで縮小微動の高精度位置決めと拡大微動のストロークを両立する連続ステップ位置決めができることを確認した。
- (2) 連続ステップ位置決めにおいて縮小微動から拡大微動への切替え時に微動の干渉が発生した。干渉の原因を縮小微動の戻りに対する拡大微動の立ち上がりの遅れと推察し、拡大微動の制御係数を大きくしたところ干渉の低減を認めた。
- (3) 干渉低減は縮小微動のステップ数を少なくし、拡大微動変位を小さくすることでも可能である。また、オーバーシュートの抑制と整定時間の短縮に有効である。
- (4) 拡大微動の変位分解能程度以下である 25nm ステップで連続ステップ位置決めを行わせた。階段状の位置決めができていることを確認した。

文 献

- (1) Wei, G., Robert, H., John, A.P., John L., Don, A.L., “Construction and testing of a nanomachining instrument”, *Journal of the International Society for Precision Engineering and Nanotechnology*, 24(2000), pp.320-328.
- (2) Sato, N., Kobayashi, K., watanabe, S., Fujii, T., Horiuchi, T., Yamada H., Matsushige, K., “Dynamic-mode AFM using the piezoelectric cantilever: investigations of local optical and electrical properties”, *Applied Surface Science*, 188(2002), pp.425-429.
- (3) 上田完次, 平野智之, 傳恵南, 真鍋圭司, “走査型トンネル顕微鏡および分子動力学法によるグラファイトの原子レベル材料除去機構の考察”, 精密工学会誌, Vol.64, No.11(1998), pp.1653-1657.
- (4) 三宅正二郎, 石井正紀, 大竹利明, 津嶋尚武, “原子力間力顕微鏡によるマイカのナノメータスケールの機械加工”, 精密工学会誌, Vol.63, No.3(1997), pp.426-430.
- (5) 傳恵南, 真鍋圭司, 上田完次, “原子間力顕微鏡の走査機能を利用したマイクロ切削過程の連続観察”, 精密工学会誌, Vol.63, No.12(1997), pp.1752-1753.
- (6) 藤森正成, 石橋雅義, 加藤美登里, 平家誠嗣, 下村武史, 伊藤耕三, 橋詰富博, “SPM を用いた卓上微細加工装置とその応用”, 精密工学会誌, Vol.71, No.3(2005), pp.315-319.
- (7) 吉田浩也, 松室昭仁, 岩田博之, 高木誠, “SPM を用いた Si 単結晶のナノ加工と表面の構造変化”, 精密工学会誌, Vol.73, No.10(2007), pp.1149-1153.
- (8) 田丸雄摩, 高藤和樹, 清水浩貴, “長ストロークと高精度位置決めを両立する微動機構”, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.74, No.745(2008), pp.2294-2299.