

(43) 国際公開日
2006年8月3日 (03.08.2006)

PCT

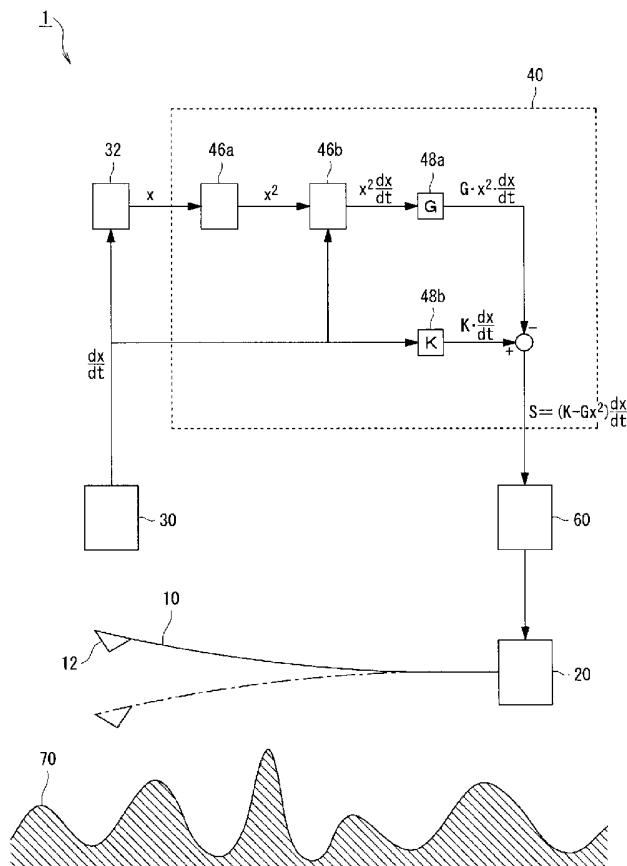
(10) 国際公開番号
WO 2006/080257 A1

- (51) 国際特許分類:
G01N 13/10 (2006.01) G01N 13/16 (2006.01)
- (21) 国際出願番号: PCT/JP2006/300872
- (22) 国際出願日: 2006年1月20日 (20.01.2006)
- (25) 国際出願の言語: 日本語
- (26) 国際公開の言語: 日本語
- (30) 優先権データ:
特願2005-018476 2005年1月26日 (26.01.2005) JP
- (71) 出願人 (米国を除く全ての指定国について): 独立行政法人産業技術総合研究所 (NATIONAL INSTITUTE OF ADVANCED INDUSTRIAL SCIENCE AND TECHNOLOGY) [JP/JP]; 〒1008921 東京都千代田区霞が関一丁目3番1号 Tokyo (JP). 国立大学法人筑波大学 (UNIVERSITY OF TSUKUBA) [JP/JP]; 〒3058577 茨城県つくば市天王台一丁目1番1 Ibaraki (JP).
- (72) 発明者; および
- (75) 発明者/出願人 (米国についてのみ): 黒田 雅治 (KURODA, Masaharu) [JP/JP]; 〒3058564 茨城県つくば市並木1丁目2番地1 独立行政法人産業技術総合研究所つくばセンター東事業所内 Ibaraki (JP). 藪野 浩司 (YABUNO, Hiroshi) [JP/JP]; 〒3058577 茨城県つくば市天王台一丁目1番1 国立大学法人筑波大学内 Ibaraki (JP).
- (74) 代理人: 森 哲也, 外(MORI, Tetsuya et al.); 〒1010032 東京都千代田区岩本町二丁目3番3号 友泉岩本町ビル8階 日栄国際特許事務所 Tokyo (JP).
- (81) 指定国 (表示のない限り、全ての種類の国内保護が可能): AE, AG, AL, AM, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, HR, HU, ID, IL, IN, IS, KE, KG, KM, KN, KP, KR, KZ, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LV, LY, MA, MD, MG, MK, MN, MW, MX,

[続葉有]

(54) Title: CANTILEVER CONTROL DEVICE

(54) 発明の名称: カンチレバー制御装置



(57) Abstract: A cantilever control device which, in an atomic force microscope, can prevent a cantilever self-excited oscillation from stopping and also prevent a cantilever probe from contacting an object of measurement. In an atomic force microscope, a cantilever control device (1) comprises a cantilever (10) having a probe (12), an actuator (20) for bringing the cantilever (10) into self-excited oscillation, an oscillation speed detector (30) for detecting a cantilever (10) oscillation speed, a displacement calculator (32) for calculating a cantilever (10) oscillation displacement, and a controller (40) for generating a signal for driving the actuator (20), wherein a feedback control signal S is equal to $(K - G \cdot x^2) \cdot dx/dt$; where x is a cantilever (10) oscillation displacement, dx/dt is a cantilever (10) oscillation speed, and K and G are both positive-value feedback gains.

(57) 要約: 原子間力顕微鏡において、カンチレバーの自励振動の停止を防止でき、カンチレバーの探針が測定対象物と接触することを防止できるカンチレバー制御装置の提供。原子間力顕微鏡において、探針12を有するカンチレバー10と、カンチレバー10を自励振動させるアクチュエータ20と、カンチレバー10の振動速度を検出する振動速度検出器30と、カンチレバー10の振動変位を算出する変位算出器32と、アクチュエータ20を駆動するための信号を生成する制御器40とから、カンチレバー制御装置1を構成し、フィードバック制御信号Sを $(K - G \cdot x^2) \cdot dx/dt$ とする。ただし、xはカンチレバー10の振動変位、 dx/dt はカンチレバー10の振動速度、K、Gはともに正值のフィードバックゲイン

である。



MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PG, PH, PL, PT, RO, RU, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, SY, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, YU, ZA, ZM, ZW.

OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

- (84) 指定国 (表示のない限り、全ての種類の広域保護が可能): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LS, MW, MZ, NA, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), ユーラシア (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), ヨーロッパ (AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, NL, PL, PT, RO, SE, SI, SK, TR),

添付公開書類:

— 国際調査報告書

2文字コード及び他の略語については、定期発行される各PCTガゼットの巻頭に掲載されている「コードと略語のガイダンスノート」を参照。

明 細 書

カンチレバー制御装置

技術分野

- [0001] 本発明は、原子間力顕微鏡において、カンチレバーの自励振動を非線形フィードバック制御するカンチレバー制御装置に関する。

背景技術

- [0002] 近年、サブナノメートルオーダーの精密測定がMEMSをはじめとする様々な分野で求められており、走査型プローブ顕微鏡がかかる精密観測に用いられている。走査型プローブ顕微鏡の典型例として原子間力顕微鏡が知られている。

原子間力顕微鏡は振動するカンチレバーを有し、カンチレバーの先端に探針が形成されている。探針は測定対象物との距離に応じて原子間力の影響を受け、この原子間力の影響によってカンチレバーの等価剛性が変化する。等価剛性の変化はカンチレバーの固有振動数の変化となって現れる。したがって、カンチレバーの固有振動数の変化を検出し、検出した固有振動数の変化から探針に働く原子間力の影響を算出すれば、探針と測定対象物との間の距離を測定できる。探針と測定対象物との間の距離の測定を測定対象物の表面上でスキニングすることにより、測定対象物の表面形状がサブナノメートルのオーダーで測定される。この表面形状の測定における分解能は、カンチレバーの固有振動数の変化の検出の容易性と正確性に依存している。

- [0003] 従来の原子間力顕微鏡では、カンチレバーを強制的に振動させる方法がとられていた。

カンチレバーの固有振動数の変化を検出する方法には次の2つの方法がある。第一の方法は、カンチレバーの共振振動数自体の変化を検出し、検出した共振振動数の変化から固有振動数の変化を算出する方法である。第二番目の方法は、所定の共振振動数に対する応答振幅の減少を検出し、検出した応答振幅の減少から固有振動数の変化を算出する方法である。

- [0004] これらの方法において、カンチレバーが置かれた環境(以下、カンチレバーが置か

れた環境のことを「測定環境」という。)のQ値が、固有振動数の変化の検出精度に影響を及ぼしている。Q値は主として測定環境の粘性減衰係数によって定まる。例えば、粘性減衰係数が極めて小さな真空中では、Q値が大きくなり、カンチレバーの共振ピークが尖鋭に現れ、共振振動数の変化を容易かつ正確に検出できる。逆に、粘性減衰係数が大きな液中では、Q値が小さくなり、カンチレバーを強制振動させてもその共振ピークが鮮明に現れず、共振振動数の変化を正確に検出することが困難である。

- [0005] かかる問題に対応するために、カンチレバーを自励振動させ、カンチレバーに装着された振動源であるアクチュエータを速度正帰還のフィードバック制御によって制御する技術が近年提唱されている(特許文献1参照)。この技術におけるフィードバック制御のブロック図を図6に示す。

原子間力顕微鏡がカンチレバー10、変位検出器34、振動速度算出器36、増幅器48、アクチュエータ20を有している。

- [0006] カンチレバー10に振動源であるアクチュエータ20が接続されており、アクチュエータ20によりカンチレバー10を駆動してカンチレバー10が自励振動する構成となっている。カンチレバー10の先端下側には探針12が形成されている。

変位検出器34がカンチレバー10の振動変位 x を検出可能に構成されている。

振動速度算出器36は、微分器であり、変位検出器34から x を受信し、受信した x を微分し、 dx/dt をカンチレバー10の振動速度として算出可能に構成されている。

- [0007] 増幅器48は、振動速度算出器36から dx/dt を受信し、受信した dx/dt に正值である線形フィードバックゲイン K を乗じて、 $K \cdot dx/dt$ を算出し、算出した $K \cdot dx/dt$ をフィードバック制御信号 S_1 としてドライバ60に送信可能に構成されている。

ドライバ60は、増幅器48から受信するフィードバック制御信号 S_1 を増幅してアクチュエータ20に送信可能に構成されている。

- [0008] すなわち、生成されるフィードバック制御信号 S_1 は速度正帰還のフィードバック制御信号であり、次式(1)によって表される。

$$S_1 = K \cdot dx/dt \quad \cdots (1)$$

変位検出器34がカンチレバー10の振動変位 x を検出し、検出された x からフィード

バック制御信号 S_1 が生成され、このフィードバック制御信号 S_1 をドライバ60によって増幅してアクチュエータ20を駆動し、カンチレバー10が自励振動する。

- [0009] 式(1)に示されるように、フィードバック制御信号 S_1 は、カンチレバー10の振動速度 dx/dt の変化に対応して線形フィードバックゲイン K をもって線形に変化する。カンチレバー10の応答振幅 a は次式(2)の関数 g によって表される。

$$a = g(K) \quad \dots (2)$$

図7(i)に、式(2)によって表されるカンチレバー10の振幅特性の曲線 C を示す。図7(i)では、横軸に線形フィードバックゲイン K をとり、縦軸には応答振幅 a をとっている。

- [0010] 図7(i)に示されるように、線形フィードバックゲイン K が発振下限値 K_{LL1} 以下であると、応答振幅 a が0となり、カンチレバー10は自励振動しない。線形フィードバックゲイン K が発振下限値 K_{LL1} よりも大きければ、カンチレバー10が自励振動し、線形フィードバックゲイン K が増大するにつれて応答振幅 a も増大する。 $K_{LL1} < K$ の条件下、線形フィードバックゲイン K を発振下限値 K_{LL1} に近づけると、自励振動するカンチレバー10の応答振幅 a が小さくなる。

- [0011] 線形振動理論上、自励振動するカンチレバー10の発振振動数は固有振動数に等しい。しかし、非線形振動理論の分野においては、カンチレバー10の発振振幅が大きくなると、その発振振動数が固有振動数からずれるという事実が知られている。

また、カンチレバー10の応答振幅 a を小さく制限し、カンチレバー10の探針12と測定対象物70との接触を防止することが求められている。測定対象物70が生体関連試料のように損傷しやすいものである場合、測定対象物70に探針12が接触すると、探針12によって測定対象物70が損傷してしまうからである。したがって、応答振幅 a を一定の振幅上限値 a_{UL} 以下に制限しなければならない。ここで、振幅上限値 a_{UL} とは、測定対象物70と探針12との接触が防止される応答振幅 a の最大値である。図7(i)の振幅特性の曲線 C において、振幅上限値 a_{UL} に対応する線形フィードバックゲイン K の値 K_{UL1} がゲイン上限値となる。

- [0012] すなわち、 $K_{LL1} < K \leq K_{UL1}$ の条件を満足するような線形フィードバックゲイン K でアクチュエータ20を駆動し、カンチレバー10の自励振動を維持するとともに、応答振幅

aを振幅上限値 a_{UL} 以下に維持し、カンチレバー10の探針12と測定対象物70との接触を防止している。

特許文献1:特許第3229914号公報

発明の開示

[0013] しかしながら、カンチレバー10の振幅特性の曲線Cが、測定環境、測定対象物70又はカンチレバー10の特性等の変化によってシフトするという問題がある。振幅特性の曲線Cがシフトすると、発振下限値及びゲイン上限値が変化してしまう。

例えば、図7(ii)に示すように、振幅特性の曲線Cがシフトし、発振下限値が K_{LL1} から K_{LL2} に増大し、ゲイン上限値も K_{UL1} から K_{UL2} に増大してしまう場合、 $K_{LL1} < K \leq K_{UL1}$ の条件を満足するように線形フィードバックゲインKを設定しておいても、線形フィードバックゲインKが $K_{LL2} < K \leq K_{UL2}$ の条件を満足しないおそれがある。線形フィードバックゲインKが $K_{LL2} < K \leq K_{UL2}$ の条件を満足しなければ、カンチレバー10の自励振動が停止し、又は、カンチレバー10の探針12が測定対象物70と接触してしまう。特に、測定環境が液中である場合、自励振動の停止が生じやすい。

[0014] 本発明は、上記問題を解決するものであり、その目的とするところは、カンチレバーの自励振動の停止を防止するとともに、カンチレバーの探針が測定対象物と接触することを防止するカンチレバー制御装置を提供することである。

本発明は、その課題を解決するために以下のような構成をとる。請求項1の発明に係るカンチレバー制御装置は、測定対象物の表面形状を測定する原子間力顕微鏡において、先端に探針を有して振動するカンチレバーと、前記カンチレバーを自励振動させる振動源と、前記カンチレバーの振動速度及び振動変位を検出する振動速度変位検出手段と、前記カンチレバーの振動速度及び振動変位に基づいて前記振動源をフィードバック制御する制御手段と、を備え、前記制御手段によって生成されるフィードバック制御信号が、

$$S = \{K - G \cdot |x|^m \cdot (dx/dt)^{n-1}\} \cdot dx/dt \quad \cdots (3)$$

ただし、S:フィードバック制御信号

K: 正值であるフィードバックゲイン

G: 正值であるフィードバックゲイン

x :カンチレバーの振動変位

dx/dt :カンチレバーの振動速度

m :0以上の整数

n : $m+n \geq 2$ を満足する正の奇数

によって表される。

[0015] 式(3)を展開すると

$$S = K \cdot dx/dt - G \cdot |x|^m \cdot (dx/dt)^n \quad \dots (4)$$

となり、式(4)中の $K \cdot dx/dt$ がカンチレバーの先端の振動速度に対する線形成分の項となり、 $G \cdot |x|^m \cdot (dx/dt)^n$ がカンチレバーの先端の振動速度に対する非線形成分の項となる。

式(3)中の非線形フィードバックゲイン G の値を調節することによって、線形フィードバックゲイン K の変化割合に対する応答振幅 a の変化割合、すなわち、振幅特性の曲線の勾配を調節できる(図2を参照)。例えば、非線形フィードバックゲイン G の値が0に近づくと、振幅特性の曲線の勾配が大きくなり、非線形フィードバックゲイン G の値が大きくなると、振幅特性の曲線の勾配が小さくなる。振幅特性の曲線の勾配を変化させると、振幅上限値に対応する線形フィードバックゲイン K のゲイン上限値が変化し、線形フィードバックゲイン K として許容される値の範囲も変化する。非線形フィードバックゲイン G の値を調節して、振幅特性の曲線の勾配を小さくし、線形フィードバックゲイン K のゲイン上限値を大きくしておけば、線形フィードバックゲイン K の設定値として許容される範囲が広がる。したがって、非線形フィードバックゲイン G の値を適切に設定することで、振幅特性の曲線のシフトにかかわらず、常に線形フィードバックゲイン K の値を発振下限値とゲイン上限値との間の範囲に収めておくことができる。常に線形フィードバックゲイン K が発振下限値とゲイン上限値との間の範囲内に収めておくことにより、カンチレバーの自励振動の停止を防止でき、カンチレバーの探針が測定対象物と接触することも防止できる。

[0016] なお、式(3)において、 m は0以上の整数であればよく、 m を0、正の偶数又は正の奇数とすることができる。また、 n は $m+n \geq 2$ を満足する正の奇数であればよい。 m が2となり、かつ、 n が1となる場合、自励振動するカンチレバーはいわゆるファンデルポ

ール型の振動子となる。 m が2以外の0以上の整数となり、かつ、 n が1以上の $m+n \geq 2$ を満足する正の奇数である場合、自励振動するカンチレバーはファンデルポール型の振動子と同様の効果を奏する。

- [0017] また、振動速度変位検出手段は、カンチレバーと接触して設置される接触型のセンサによって構成でき、カンチレバーと接触せずに設置される非接触型のセンサによって構成しても良い。接触型のセンサとして、例えば、カンチレバーに設置されるピエゾ素子を挙げることができる。非接触型のセンサとして、例えば、レーザー光をカンチレバーに照射するレーザードップラー振動計を挙げることができる。

振動源はフィードバック制御信号に比例する大きさの力又は曲げモーメントをカンチレバーに印加可能に構成されているものであれば良い。振動源は、カンチレバーと接触して設置される接触型の振動源によって構成でき、カンチレバーと接触せずに設置される非接触型の振動源によって構成しても良い。

- [0018] 請求項2の発明に係るカンチレバー制御装置は、請求項1に記載のカンチレバー制御装置であって、前記 m が0以上の偶数である。

請求項2の発明によると、 m が0以上の偶数であるので、 $|x|^m$ が x^m と等しくなり、式(3)は次式(5)によって表される。

$$\begin{aligned} S &= \{K - G \cdot x^m \cdot (dx/dt)^{n-1}\} \cdot dx/dt \\ &= K \cdot dx/dt - G \cdot x^m \cdot (dx/dt)^n \quad \dots (5) \end{aligned}$$

ただし、 S :フィードバック制御信号

K : 正值であるフィードバックゲイン

G : 正值であるフィードバックゲイン

x : カンチレバーの振動変位

dx/dt : カンチレバーの振動速度

m : 0以上の偶数

n : $m+n \geq 2$ を満足する正の奇数

フィードバック制御信号が式(5)によって表されるので、 m が正の奇数をとる場合に比べてカンチレバーの運動方程式の解が簡便な式となる。したがって、適切な K 、 G の値の選定が容易化され、カンチレバーの自励振動の停止を防止でき、カンチレバ

一の探針が測定対象物と接触することも防止できる。

[0019] 請求項3の発明に係るカンチレバー制御装置は、請求項1に記載のカンチレバー制御装置であって、前記mが2であり、前記nが1である。

請求項3の発明によると、mが2であり、nが1であるので、式(3)は次式(6)によって表される。

$$S = (K - G \cdot x^2) \cdot dx/dt \quad \dots (6)$$

ただし、S:フィードバック制御信号

K: 正值であるフィードバックゲイン

G: 正值であるフィードバックゲイン

x: カンチレバーの振動変位

dx/dt: カンチレバーの振動速度

フィードバック制御信号が式(6)によって表されるので、自励振動するカンチレバーはファンデルポール型の振動子となる。mが0以上の整数であり2以外である場合、又は、nがm+n $\geq$ 2を満足する正の奇数であり1以外である場合に比べて、カンチレバーの運動方程式の解が簡便な式となる。したがって、適切なK、Gの値を一層容易に選定でき、カンチレバーの自励振動の停止を防止でき、カンチレバーの探針が測定対象物と接触することも防止できる。

[0020] 請求項4の発明に係るカンチレバー制御装置は、請求項1から請求項3のいずれか1項に記載のカンチレバー制御装置であって、前記振動速度変位検出手段が、前記カンチレバーの振動速度を検出する振動速度検出手段と、前記振動速度検出手段が検出した前記カンチレバーの振動速度に基づいて前記カンチレバーの振動変位を算出する変位算出手段と、を有する。

請求項4の発明によると、振動速度検出手段がカンチレバーの振動速度を検出し、変位算出手段がこの振動速度を積分等してカンチレバーの振動変位を算出する。そして、制御手段が、振動速度及び振動変位を用いてフィードバック制御信号を生成し、このフィードバック制御信号によって振動源を駆動する。

[0021] 請求項5の発明に係るカンチレバー制御装置は、請求項1から請求項3のいずれか1項に記載のカンチレバー制御装置であって、前記振動速度変位検出手段が、前記

カンチレバーの振動変位を検出する変位検出手段と、前記変位検出手段が検出した前記カンチレバーの振動変位に基づいて前記カンチレバーの振動速度を算出する振動速度算出手段と、を有する。

請求項5の発明によると、変位検出手段がカンチレバーの振動変位を検出し、振動速度算出手段がこの振動変位を微分等してカンチレバーの振動速度を算出する。そして、制御手段が、振動速度及び振動変位を用いてフィードバック制御信号を生成し、このフィードバック制御信号によって振動源を駆動する。

図面の簡単な説明

- [0022] [図1]第1の実施の形態に係るカンチレバー制御装置のブロック図である。
- [図2]第1の実施の形態に係るカンチレバー制御装置によって制御されるカンチレバーの振幅特性の説明図である。
- [図3]第2の実施の形態に係るカンチレバー制御装置のブロック図である。
- [図4]第3の実施の形態に係るカンチレバー制御装置のブロック図である。
- [図5]第4の実施の形態に係るカンチレバー制御装置のブロック図である。
- [図6]従来あるカンチレバーのフィードバック制御のブロック図である。
- [図7]従来あるカンチレバーのフィードバック制御におけるカンチレバーの振幅特性の説明図である。

符号の説明

- [0023] 1 カンチレバー制御装置
- 10 カンチレバー
- 12 探針
- 14 変位センサ
- 20 アクチュエータ
- 30 振動速度検出器
- 32 変位算出器
- 34 変位検出器
- 36 振動速度算出器
- 40 制御器

46a、46b 乗算器

48、48a、48b 増幅器

50 A/D変換器

52 CPU

54 D/A変換器

60 ドライバ

70 測定対象物

S 、 S_1 フィードバック制御信号

K 、 G フィードバックゲイン

x カンチレバーの振動変位

dx/dt カンチレバーの振動速度

C 、 D 振幅特性の曲線

a 応答振幅

a_{UL} 振幅上限値

K_{LL1} 、 K_{LL2} 発振限界値

K_{UL1} 、 K_{UL2} ゲイン上限値

発明を実施するための最良の形態

[0024] 本発明を実施するための第1の実施の形態を図1及び図2を参照しつつ説明する。

原子間力顕微鏡にカンチレバー制御装置1が装備されており、カンチレバー制御装置1は、カンチレバー10、アクチュエータ20、振動速度検出器30、変位算出器32、制御器40を有している。

カンチレバー10に振動源であるアクチュエータ20が接続されており、カンチレバー10の先端下側には探針12が形成されている。アクチュエータ20は、例えば、ピエゾ素子であり、アクチュエータ20が駆動してカンチレバー10が自励振動する構成となっている。

[0025] カンチレバー10の先端上方に振動速度検出器30が配置されている。振動速度検出器30は、例えば、レーザードップラー振動計であり、レーザードップラー振動計からレーザー光をカンチレバー10の先端に照射し、カンチレバー10の先端の振動速

度である dx/dt を検出し、検出した dx/dt を変位算出器32及び制御器40に送信可能に構成されている。

また、カンチレバー10は図示しない移動装置を有しており、移動装置によってカンチレバー10が測定対象物70の上方をスキャン可能に構成されている。

- [0026] 変位算出器32は、積分器であり、振動速度検出器30から dx/dt を受信し、受信した dx/dt を積分して、カンチレバー10の振動変位である x を算出し、算出した x を制御器40に送信可能に構成されている。

制御器40は、乗算器46a、46b、増幅器48a、48bを有する。

乗算器46aは、変位算出器32から x を受信し、受信した x を二乗して、 x^2 を算出可能に構成されている。

- [0027] 乗算器46bは、乗算器46aから x^2 を受信し、振動速度検出器30から dx/dt を受信し、受信した x^2 と dx/dt とを乗じて、 $x^2 \cdot dx/dt$ を算出可能に構成されている。

増幅器48aは、乗算器46bから $x^2 \cdot dx/dt$ を受信し、受信した $x^2 \cdot dx/dt$ に正値である非線形フィードバックゲイン G を乗じて、 $G \cdot x^2 \cdot dx/dt$ を算出可能に構成されている。

- [0028] 増幅器48bは、振動速度検出器30から dx/dt を受信し、受信した dx/dt に正値である線形フィードバックゲイン K を乗じて、 $K \cdot dx/dt$ を算出可能に構成されている。

そして、制御器40が、増幅器48bが算出した $K \cdot dx/dt$ から増幅器48aが算出した $G \cdot x^2 \cdot dx/dt$ を減じ、その結果得られた $(K - G \cdot x^2) dx/dt$ をフィードバック制御信号 S としてドライバ60に送信する構成となっている。すなわち、制御器40において生成されるフィードバック制御信号 S は前述の式(6)によって表される。

- [0029] ドライバ60は、例えば、ピエゾ素子駆動用ドライバであり、制御器40から受信するフィードバック制御信号 S を増幅してアクチュエータ20に送信し、アクチュエータ20を駆動させる構成となっている。

なお、振動速度検出器30が振動速度検出手段をなし、変位算出器32が変位算出手段をなし、振動速度検出器30と変位算出器32とが振動速度変位検出手段を構成し、制御器40が制御手段を構成している。また、カンチレバー制御装置1内で、送受

信される各データはアナログ信号である。

[0030] 本実施の形態は上記のように構成されており、次にその作用について説明する。

カンチレバー10の探針12を測定対象物70の上方に位置させて、測定対象物70の表面形状の測定を開始する。カンチレバー10の振動速度 dx/dt を振動速度検出器30が検出する。振動速度検出器30は、検出した dx/dt を変位算出器32、制御器40の乗算器46b、制御器40の増幅器48bに送信する。

変位算出器32が、振動速度検出器30から受信した dx/dt を積分し、カンチレバー10の振動変位である x を算出し、算出した x を制御器40の乗算器46aに送信する。

[0031] 乗算器46aが、変位算出器32から受信した x を二乗し、算出した x^2 を乗算器46bに送信する。

乗算器46bが、乗算器46aから受信した x^2 と、振動速度検出器30から受信した dx/dt とを乗じ、 $x^2 \cdot dx/dt$ を算出し、算出した $x^2 \cdot dx/dt$ を増幅器48aに送信する。

増幅器48aが、乗算器46bから受信した $x^2 \cdot dx/dt$ に非線形フィードバックゲイン G を乗じて $G \cdot x^2 \cdot dx/dt$ を算出する。

[0032] 増幅器48bが、振動速度検出器30から受信した dx/dt に線形フィードバックゲイン K を乗じて $K \cdot dx/dt$ を算出する。

そして、制御器40が、増幅器48bが算出した $K \cdot dx/dt$ から増幅器48aが算出した $G \cdot x^2 \cdot dx/dt$ を減じ、 $(K - G \cdot x^2) dx/dt$ を算出し、算出した $(K - G \cdot x^2) dx/dt$ をフィードバック制御信号 S としてドライバ60に送信する。

ドライバ60が、制御器40から受信したフィードバック制御信号 S を増幅してアクチュエータ20に送信する。

[0033] アクチュエータ20が、ドライバ60からの送信によって駆動し、カンチレバー10を振動させる。カンチレバー10は、フィードバック制御されて自励振動することとなる。

自励振動するカンチレバー10はファンデルポール型の振動子となっている。この特性を利用して、カンチレバー10をフィードバック制御している。前述の式(6)を展開すると

$$S = K \cdot dx/dt - G \cdot x^2 \cdot dx/dt \quad \cdots (7)$$

となり、式(7)中の $K \cdot dx/dt$ がカンチレバー10の振動速度 dx/dt に対する線形成分の項となり、 $G \cdot x^2 \cdot dx/dt$ がカンチレバー10の振動速度 dx/dt に対する非線形成分の項となる。非線形成分とカンチレバー10の自励振動力とがバランスすると、測定環境がQ値の小さな液中であっても、カンチレバー10の自励振動の停止が防止され、カンチレバー10の応答振幅 a が一定に維持される。

[0034] カンチレバー10の応答振幅 a は次式(8)の関数 g によって表される。

$$a = g(K, G) \quad \dots (8)$$

図2(i)及び(ii)にカンチレバー制御装置1によって制御されるカンチレバー10の振幅特性の曲線Dを示す。図2では、横軸に線形フィードバックゲイン K をとり、縦軸には応答振幅 a をとっている。図2(i)に示すように、非線形フィードバックゲイン G の値が変化すると、線形フィードバックゲイン K の変化割合に対する応答振幅 a の変化割合、すなわち、振幅特性の曲線Dの勾配が変化する。非線形フィードバックゲイン G の値が0に近づくと、振幅特性の曲線Dの勾配が大きくなり、振幅特性の曲線Dは前述した振幅特性の曲線Cに接近する。非線形フィードバックゲイン G の値が大きくなると、振幅特性の曲線Dの勾配が小さくなる。

[0035] 振幅特性の曲線Dの勾配の変化に伴って、振幅上限値 a_{UL} に対応する線形フィードバックゲイン K のゲイン上限値 K_{UL1} も変化する。同じ発振下限値 K_{LL1} を有する振幅特性の曲線Dにおいては、勾配が小さくなるとゲイン上限値 K_{UL1} が大きくなる。非線形フィードバックゲイン G の値を調節し、振幅特性の曲線Dの勾配を小さくし、線形フィードバックゲイン K のゲイン上限値 K_{UL1} を大きくすれば、発振下限値 K_{LL1} とゲイン上限値 K_{UL1} との間隔が拡大する。

[0036] 非線形フィードバックゲイン G の値を調節して、発振下限値とゲイン上限値との間隔を拡大しておけば、図2(ii)に示すように振幅特性の曲線Dがシフトし、発振下限値が K_{LL1} から K_{LL2} に変化し、ゲイン上限値が K_{UL1} から K_{UL2} に変化しても、常に発振下限値とゲイン上限値との間に収まる値を線形フィードバックゲイン K として設定できる。このように線形フィードバックゲイン K 及び非線形フィードバックゲイン G の各値を設定すれば、カンチレバー10の自励振動が停止することを防止でき、カンチレバー10の探針12が測定対象物70と接触することをも防止できる。したがって、測定対象物

70が液中におかれた生体関連試料であっても、測定対象物70を損傷することなくその表面形状を測定できる。

- [0037] 本発明を実施するための第2の実施の形態を図3を参照しつつ説明する。なお、第1の実施の形態と同様の構成については同じ符号を付する。

原子間力顕微鏡に装備されているカンチレバー制御装置1は、カンチレバー10、アクチュエータ20、変位検出器34、振動速度算出器36、制御器40を有している。

カンチレバー10にアクチュエータ20が接続されており、カンチレバー10の先端下側には探針12が形成されている。アクチュエータ20は、例えば、ピエゾ素子であり、アクチュエータ20が駆動してカンチレバー10が自励振動する構成となっている。カンチレバー10には例えばピエゾ素子が変位センサ14として装着されており、変位センサ14の出力としてカンチレバー10の撓み量が変位検出器34によって検出される構成となっている。

- [0038] 変位検出器34はチャージアンプ等のシグナルコンディショナである。変位検出器34が検出するカンチレバー10の撓み量はカンチレバー10の振動変位 x と等価であり、変位検出器34は、検出したカンチレバー10の振動変位 x を振動速度算出器36及び制御器40に送信可能に構成されている。

振動速度算出器36は、微分器であり、変位検出器34から x を受信し、受信した x を微分して、カンチレバー10の振動速度である dx/dt を算出し、算出した dx/dt を制御器40に送信可能に構成されている。

- [0039] 制御器40は、乗算器46a、46b、増幅器48a、48bを有する。

乗算器46aは、変位検出器34から x を受信し、受信した x を二乗して、 x^2 を算出可能に構成されている。

乗算器46bは、乗算器46aから x^2 を受信し、振動速度算出器36から dx/dt を受信し、受信した x^2 と dx/dt とを乗じて、 $x^2 \cdot dx/dt$ を算出可能に構成されている。

- [0040] 増幅器48aは、乗算器46bから $x^2 \cdot dx/dt$ を受信し、受信した $x^2 \cdot dx/dt$ に正值である非線形フィードバックゲイン G を乗じて、 $G \cdot x^2 \cdot dx/dt$ を算出可能に構成されている。

増幅器48bは、振動速度算出器36から dx/dt を受信し、受信した dx/dt に正值

である線形フィードバックゲイン K を乗じて、 $K \cdot dx/dt$ を算出可能に構成されている。

- [0041] そして、制御器40が、増幅器48bが算出した $K \cdot dx/dt$ から増幅器48aが算出した $G \cdot x^2 \cdot dx/dt$ を減じ、その結果得られた $(K - G \cdot x^2) dx/dt$ をフィードバック制御信号 S としてドライバ60に送信する構成となっている。

すなわち、制御器40によって生成されるフィードバック制御信号 S は前述の式(6)によって表される。

ドライバ60は、例えば、ピエゾ素子駆動用増幅器であり、制御器40から受信するフィードバック制御信号 S を増幅してアクチュエータ20に送信し、アクチュエータ20を駆動させる構成となっている。

- [0042] なお、変位検出器34が変位検出手段をなし、振動速度算出器36が振動速度算出手段をなし、変位検出器34と振動速度算出器36とが振動速度変位検出手段を構成し、制御器40が制御手段を構成している。また、カンチレバー制御装置1内で、送受信される各データはアナログ信号である。

本実施の形態は上記のように構成されており、次にその作用について説明する。

カンチレバー10の探針12を測定対象物70の上方に位置させて、測定対象物70の表面形状の測定を開始する。カンチレバー10の振動変位 x を変位センサ14を介して変位検出器34が検出する。変位検出器34は、検出した x を振動速度算出器36、制御器40の乗算器46aに送信する。

- [0043] 振動速度算出器36が、変位検出器34から受信した x を微分し、カンチレバー10の振動速度である dx/dt を算出し、算出した dx/dt を制御器40の乗算器46b及び増幅器48bに送信する。

乗算器46aが、変位検出器34から受信した x を二乗し、算出した x^2 を乗算器46bに送信する。

乗算器46bが、乗算器46aから受信した x^2 と、振動速度算出器36から受信した dx/dt とを乗じ、 $x^2 \cdot dx/dt$ を算出し、算出した $x^2 \cdot dx/dt$ を増幅器48aに送信する。

- [0044] 増幅器48aが、乗算器46bから受信した $x^2 \cdot dx/dt$ に非線形フィードバックゲイン G を乗じて $G \cdot x^2 \cdot dx/dt$ を算出する。

増幅器48bが、振動速度算出器36から受信した dx/dt に線形フィードバックゲイン K を乗じて $K \cdot dx/dt$ を算出する。

そして、制御器40が、増幅器48bが算出した $K \cdot dx/dt$ から増幅器48aが算出した $G \cdot x^2 \cdot dx/dt$ を減じ、 $(K - G \cdot x^2) dx/dt$ を算出し、算出した $(K - G \cdot x^2) dx/dt$ をフィードバック制御信号 S としてドライバ60に送信する。

[0045] ドライバ60が、制御器40から受信したフィードバック制御信号 S を増幅してアクチュエータ20に送信する。

アクチュエータ20が、ドライバ60からの送信によって駆動し、カンチレバー10を振動させる。カンチレバー10の応答振幅 a は前述の式(8)によって表される。カンチレバー10は、フィードバック制御されて自励振動することとなる。

他の作用は、第1の実施の形態と同様である。

[0046] 本発明を実施するための第3の実施の形態を図4を参照しつつ説明する。なお、第1の実施の形態と同様の構成については同じ符号を付する。

第1の実施の形態と同様に、原子間力顕微鏡に装備されているカンチレバー制御装置1は、カンチレバー10、アクチュエータ20、振動速度検出器30、変位算出器32、制御器40を有している。

カンチレバー制御装置1の構成は、制御器40の構成を除いて、第1の実施の形態と同様であり、振動速度検出手段をなす振動速度検出器30と変位算出手段をなす変位算出器32とが振動速度変位検出手段を構成し、制御器40が制御手段を構成している。変位算出器32は、振動速度検出器30から dx/dt をアナログデータとして受信し、受信した dx/dt を積分して、カンチレバー10の振動変位である x を算出可能に構成されている。

[0047] 制御器40は、A/D変換器50、CPU52、D/A変換器54を有する。

A/D変換器50は、変位算出器32から x をアナログデータとして受信し、振動速度検出器30から dx/dt をアナログデータとして受信し、受信した x 及び dx/dt をそれぞれ時系列のデジタルデータに変換可能に構成されている。

CPU52は、A/D変換器50から x 及び dx/dt をデジタルデータとして受信し、受信した x 及び dx/dt から $(K - G \cdot x^2) dx/dt$ を算出可能に構成されている。なお、第

1の実施の形態と同様に、Kは正值の線形フィードバックゲインであり、Gは正值の非線形フィードバックゲインである。

- [0048] D/A変換器54は、CPU52から $(K - G \cdot x^2) dx/dt$ をデジタルデータとして受信し、受信した $(K - G \cdot x^2) dx/dt$ をアナログデータのフィードバック制御信号Sに変換し、変換されたアナログデータのフィードバック制御信号Sをドライバ60に送信する構成となっている。

本実施の形態は上記のように構成されており、次にその作用について説明する。

CPU52における演算処理がデジタル化されているので、線形フィードバックゲインK及び非線形フィードバックゲインGの調整を柔軟かつ容易に行うことができる。

- [0049] 他の作用は、第1の実施の形態の作用と同様である。

本発明を実施するための第4の実施の形態を図5を参照しつつ説明する。なお、第2の実施の形態と同様の構成については同じ符号を付する。

第2の実施の形態と同様に、原子間力顕微鏡に装備されているカンチレバー制御装置1は、カンチレバー10、アクチュエータ20、変位検出器34、振動速度算出器36、制御器40を有している。

- [0050] カンチレバー制御装置1の構成は、制御器40の構成を除いて、第2の実施の形態と同様であり、変位検出手段をなす変位センサ14及び変位検出器34と振動速度算出手段をなす振動速度算出器36とが振動速度変位検出手段を構成し、制御器40が制御手段を構成している。振動速度算出器36は、変位検出器34からxをアナログデータとして受信し、受信したxを微分して、カンチレバー10の振動速度である dx/dt を算出可能に構成されている。

- [0051] 制御器40は、A/D変換器50、CPU52、D/A変換器54を有する。

A/D変換器50は、変位検出器34からxをアナログデータとして受信し、振動速度算出器36から dx/dt をアナログデータとして受信し、受信したx及び dx/dt をそれぞれ時系列のデジタルデータに変換可能に構成されている。

CPU52は、A/D変換器50からx及び dx/dt をデジタルデータとして受信し、受信したx及び dx/dt から $(K - G \cdot x^2) dx/dt$ を算出可能に構成されている。なお、第2の実施の形態と同様に、Kは正值の線形フィードバックゲインであり、Gは正值の非

線形フィードバック・BR>Qインである。

- [0052] D/A変換器54は、CPU52から $(K - G \cdot x^2) dx/dt$ をデジタルデータとして受信し、受信した $(K - G \cdot x^2) dx/dt$ をアナログデータのフィードバック制御信号Sに変換し、変換されたアナログデータのフィードバック制御信号Sをドライバ60に送信する構成となっている。

本実施の形態は上記のように構成されており、次にその作用について説明する。

CPU52における演算処理がデジタル化されているので、線形フィードバックゲインK及び非線形フィードバックゲインGの調整を柔軟かつ容易に行うことができる。

- [0053] 他の作用は、第2の実施の形態の作用と同様である。

なお、第3の実施の形態及び第4の実施の形態において、制御器40内で演算をデジタル化して行っているが、カンチレバー制御装置1全体における信号の送受信及び演算をデジタル化することも可能である。この場合、サンプリング定理からサンプリング周波数をカンチレバー10の固有振動数の2倍以上とする必要があり、工学上からはサンプリング周波数を5～10倍とすることが好ましい。

産業上の利用の可能性

- [0054] 本発明に係るカンチレバー制御装置によって、カンチレバーの自励振動の停止が防止されるとともに、カンチレバーの探針が測定対象物と接触することが防止される。

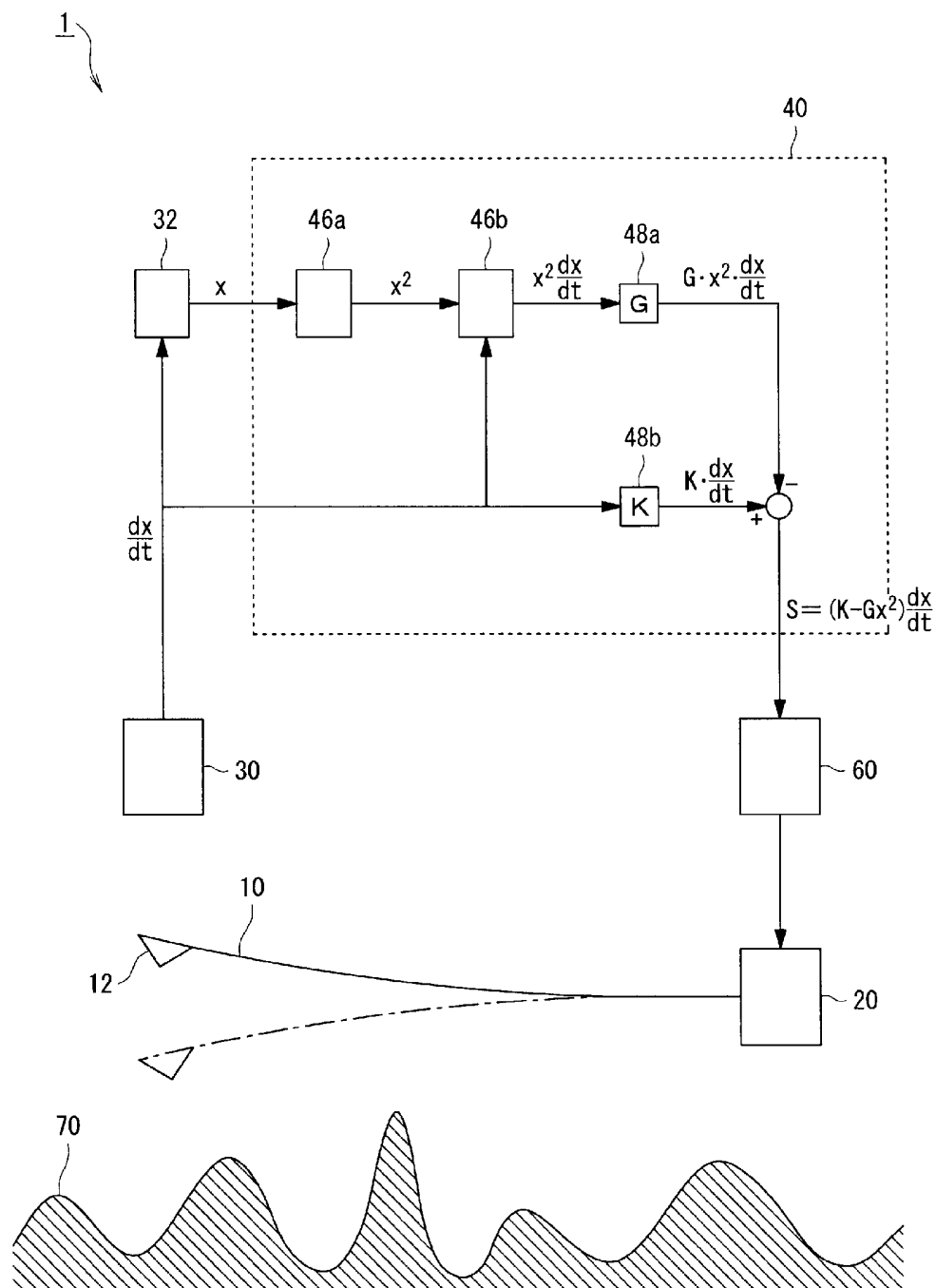
請求の範囲

- [1] 測定対象物の表面形状を測定する原子間力顕微鏡において、
 先端に探針を有して振動するカンチレバーと、
 前記カンチレバーを自励振動させる振動源と、
 前記カンチレバーの振動速度及び振動変位を検出する振動速度変位検出手段と、
 、
 前記カンチレバーの振動速度及び振動変位に基づいて前記振動源をフィードバック制御する制御手段と、を備え、
 前記制御手段によって生成されるフィードバック制御信号が、

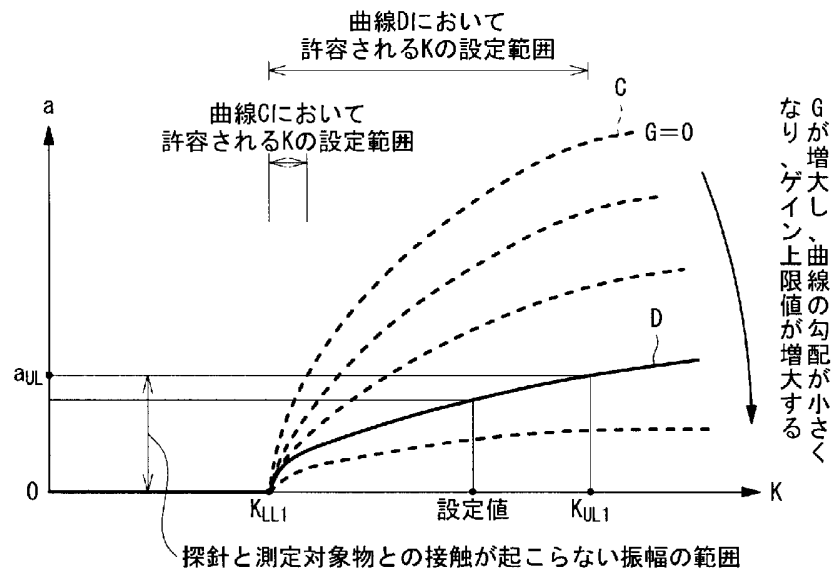
$$S = \{K - G \cdot |x|^m \cdot (dx/dt)^{n-1}\} \cdot dx/dt$$
 ただし、S:フィードバック制御信号
 K: 正值であるフィードバックゲイン
 G: 正值であるフィードバックゲイン
 x: カンチレバーの振動変位
 dx/dt: カンチレバーの振動速度
 m: 0以上の整数
 n: $m+n \geq 2$ を満足する正の奇数
 によって表されることを特徴とするカンチレバー制御装置。
- [2] 前記mが0以上の偶数であることを特徴とする請求項1に記載のカンチレバー制御装置。
- [3] 前記mが2であり、前記nが1であることを特徴とする請求項1に記載のカンチレバー制御装置。
- [4] 前記振動速度変位検出手段が、前記カンチレバーの振動速度を検出する振動速度検出手段と、前記振動速度検出手段が検出した前記カンチレバーの振動速度に基づいて前記カンチレバーの振動変位を算出する変位算出手段と、を有することを特徴とする請求項1から請求項3のいずれか1項に記載のカンチレバー制御装置。
- [5] 前記振動速度変位検出手段が、前記カンチレバーの振動変位を検出する変位検出手段と、前記変位検出手段が検出した前記カンチレバーの振動変位に基づいて

前記カンチレバーの振動速度を算出する振動速度算出手段と、を有することを特徴とする請求項1から請求項3のいずれか1項に記載のカンチレバー制御装置。

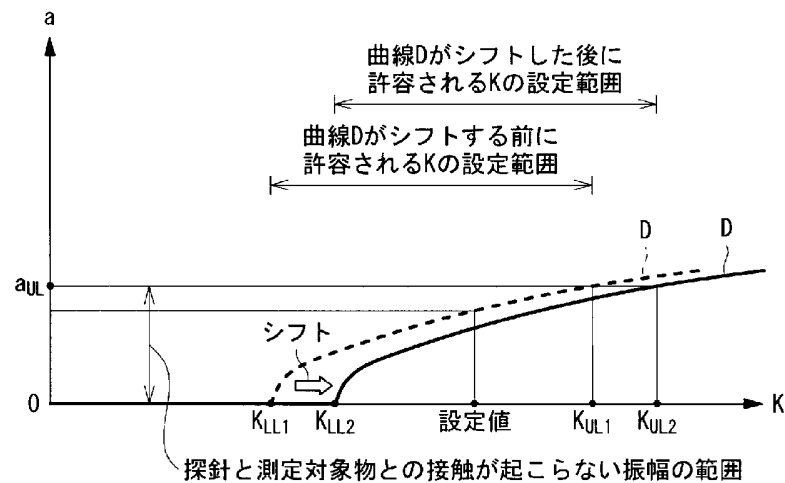
[図1]



[図2]

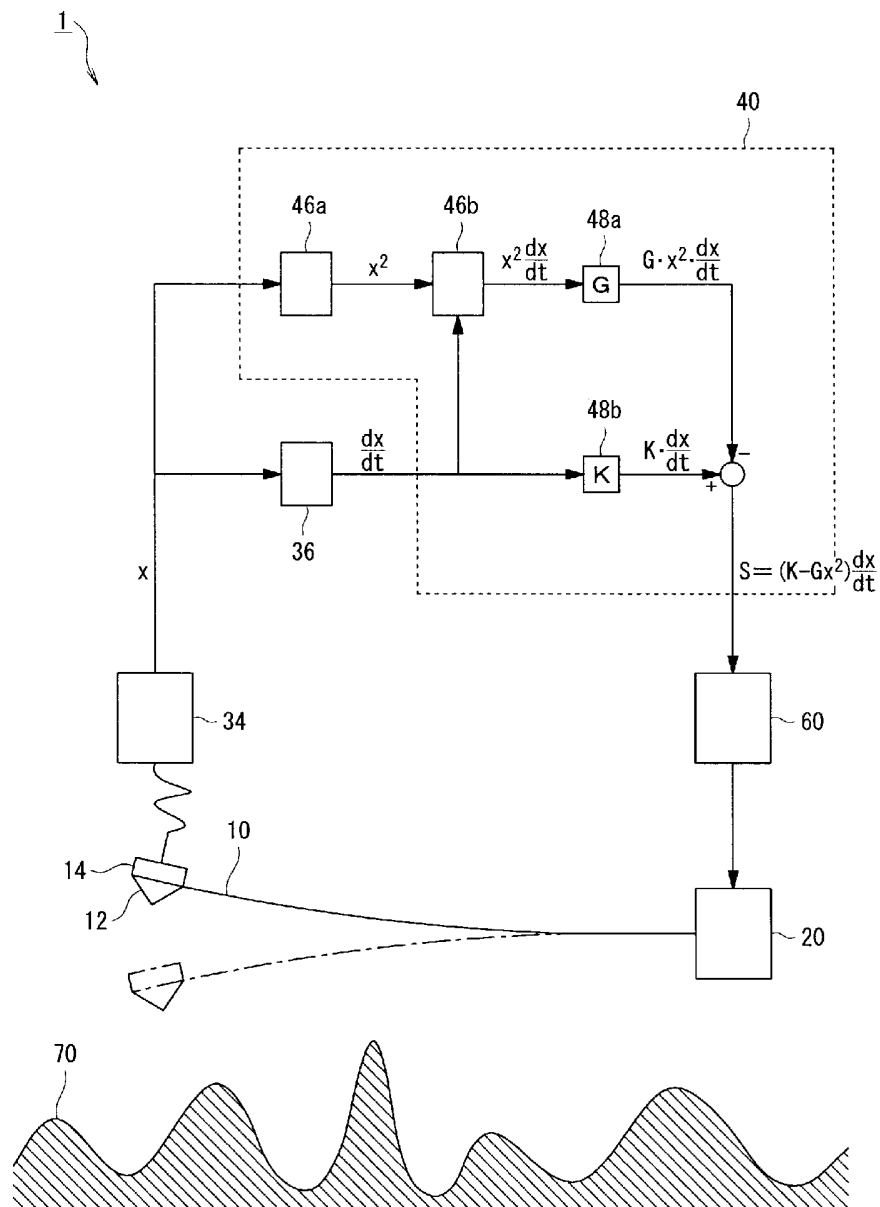


(i)

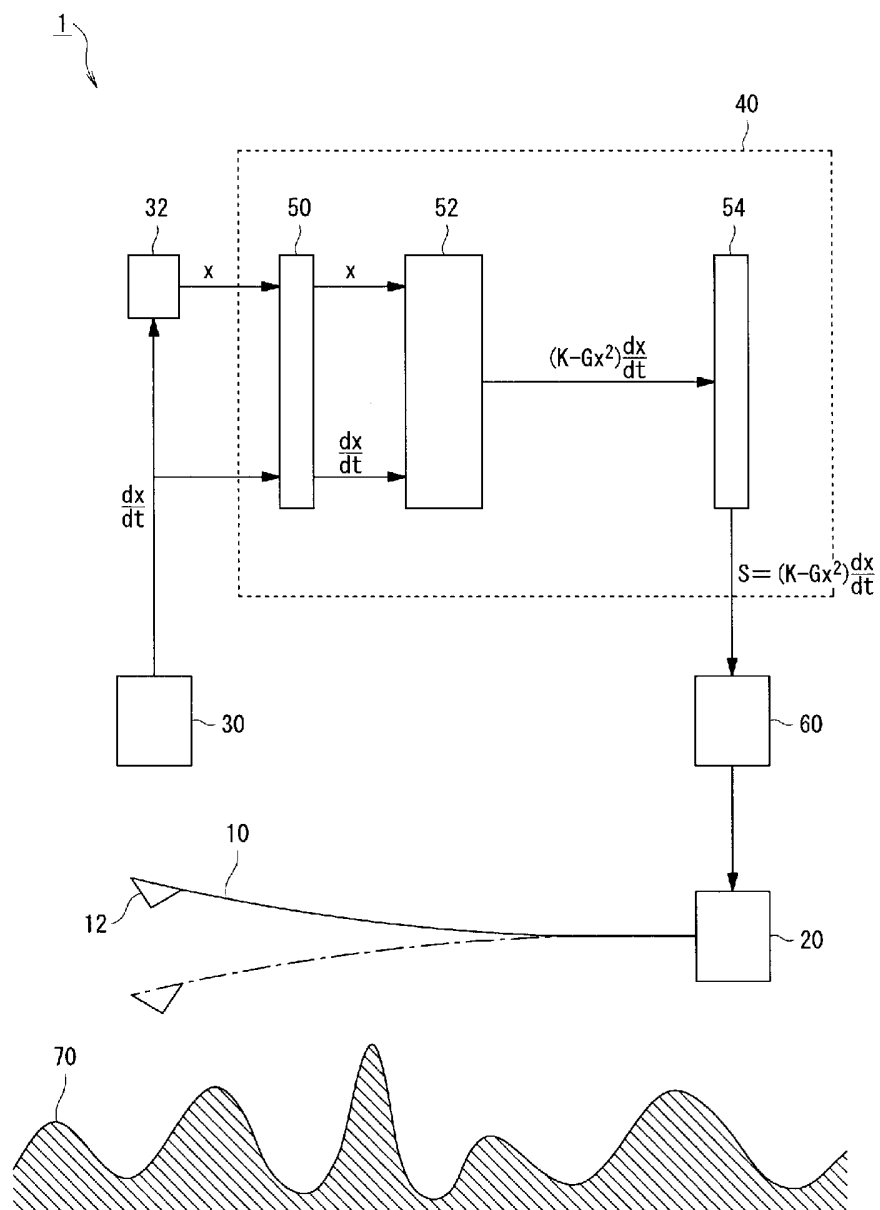


(ii)

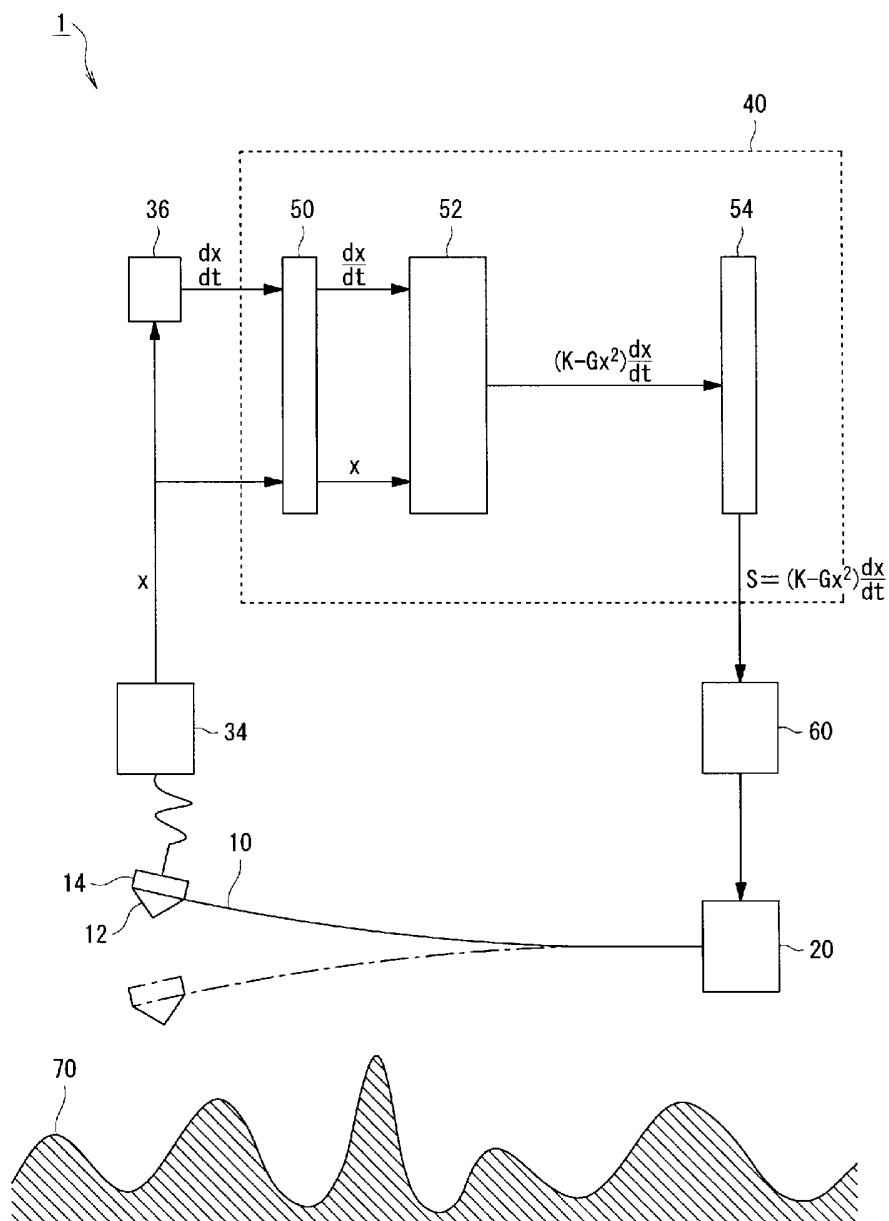
[図3]



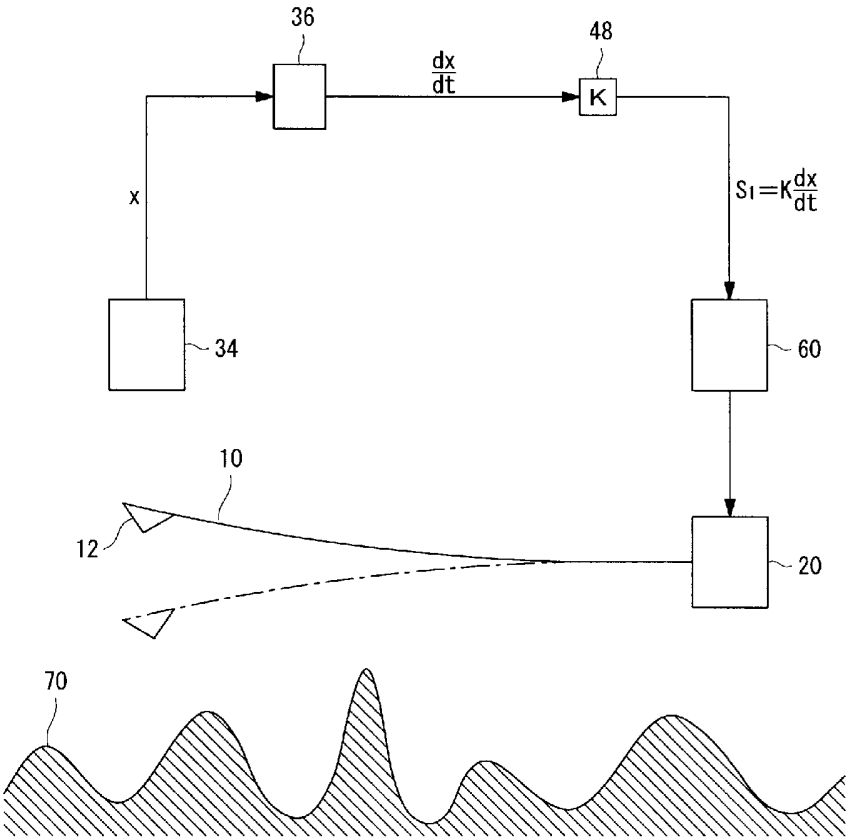
[図4]



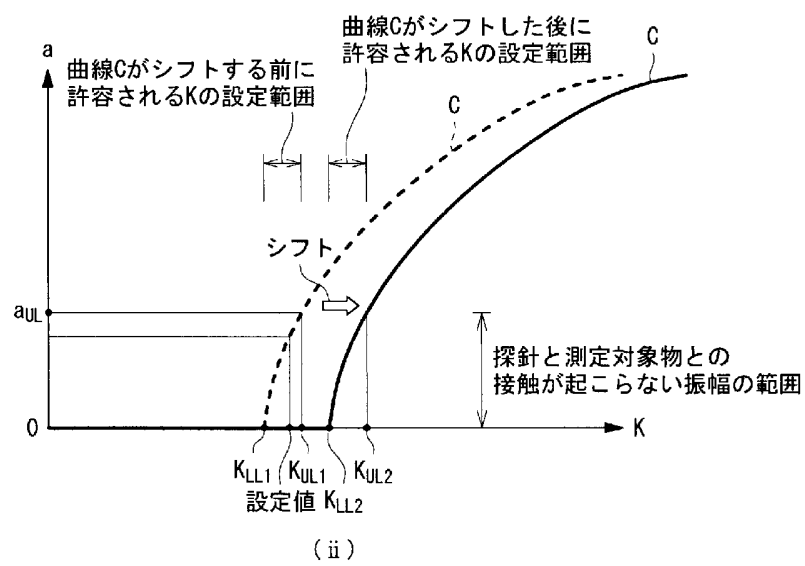
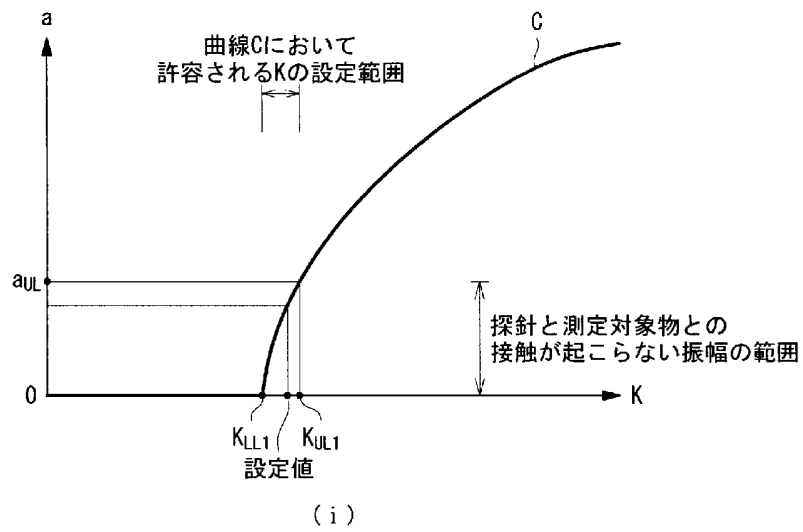
[図5]



[図6]



[図7]



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2006/300872

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

G01N13/10(2006.01) , **G01N13/16**(2006.01)

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

G01N13/10-13/24(2006.01)

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Jitsuyo Shinan Koho	1922-1996	Jitsuyo Shinan Toroku Koho	1996-2006
Kokai Jitsuyo Shinan Koho	1971-2006	Toroku Jitsuyo Shinan Koho	1994-2006

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

JSTPlus (JDream2)

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	JP 2004-156959 A (Olympus Corp.), 03 June, 2004 (03.06.04), Full text; Par. Nos. [0010] to [0017] (Family: none)	1-5
A	JP 2002-162334 A (JEOL Ltd.), 07 June, 2002 (07.06.02), Full text; all drawings (Family: none)	1-5
A	JP 11-160333 A (JEOL Ltd.), 18 June, 1999 (18.06.99), Par. No. [0014] & US 6281495 B1 & EP 924529 A1	1-5

☒ Further documents are listed in the continuation of Box C.
 ☐ See patent family annex.

* Special categories of cited documents:

"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date

"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search
12 April, 2006 (12.04.06)Date of mailing of the international search report
25 April, 2006 (25.04.06)Name and mailing address of the ISA/
Japanese Patent Office

Authorized officer

Facsimile No.

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2006/300872

C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	JP 2004-163392 A (Seiko Instruments Inc.), 10 June, 2004 (10.06.04), Full text; all drawings & US 2004/0093935 A1	1-5

A. 発明の属する分野の分類 (国際特許分類 (IPC))

Int.Cl. G01N13/10(2006.01), G01N13/16(2006.01)

B. 調査を行った分野

調査を行った最小限資料 (国際特許分類 (IPC))

Int.Cl. G01N13/10-13/24(2006.01)

最小限資料以外の資料で調査を行った分野に含まれるもの

日本国実用新案公報	1922-1996年
日本国公開実用新案公報	1971-2006年
日本国実用新案登録公報	1996-2006年
日本国登録実用新案公報	1994-2006年

国際調査で使用した電子データベース (データベースの名称、調査に使用した用語)

JSTPlus (JDream2)

C. 関連すると認められる文献

引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求の範囲の番号
1-5	JP 2004-156959 A (オリンパス株式会社) 2004.06.03, 全文、【図10】 - 【図17】 (ファミリーなし)	A
1-5	JP 2002-162334 A (日本電子株式会社) 2002.06.07, 全文、全図 (ファミリーなし)	A
1-5	JP 11-160333 A (日本電子株式会社) 1999.06.18, 【0014】 & US 6281495 B1 & EP 924529 A1	A

☒ C欄の続きにも文献が列挙されている。☐ パテントファミリーに関する別紙を参照。

* 引用文献のカテゴリー

「A」 特に関連のある文献ではなく、一般的技術水準を示すもの
「E」 国際出願日前の出願または特許であるが、国際出願日以後に公表されたもの
「L」 優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献 (理由を付す)
「O」 口頭による開示、使用、展示等に言及する文献
「P」 国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願

の日の後に公表された文献

「T」 国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と矛盾するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの

「X」 特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの

「Y」 特に関連のある文献であって、当該文献と他の1以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの

「&」 同一パテントファミリー文献

国際調査を完了した日

12.04.2006

国際調査報告の発送日

25.04.2006

国際調査機関の名称及びあて先

日本国特許庁 (ISA/J P)

郵便番号 100-8915

東京都千代田区霞が関三丁目4番3号

特許庁審査官 (権限のある職員)

2 J

3 2 1 0

野田 洋平

電話番号 03-3581-1101 内線 3252

C (続き) . 関連すると認められる文献		
引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求の範囲の番号
1-5	JP 2004-163392 A (セイコーインスツルメンツ株式会社) 2004.06.10, 全文、全図 & US 2004/0093935 A1	A