

(19) 世界知的所有権機関
国際事務局(43) 国際公開日
2005 年 9 月 15 日 (15.09.2005)

PCT

(10) 国際公開番号
WO 2005/085671 A1

- (51) 国際特許分類: F16F 15/027
- (21) 国際出願番号: PCT/JP2005/003735
- (22) 国際出願日: 2005 年 3 月 4 日 (04.03.2005)
- (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2004-064636 2004 年 3 月 8 日 (08.03.2004) JP
- (71) 出願人(米国を除く全ての指定国について): 株式会社ニコン (NIKON CORPORATION) [JP/JP]; 〒1008331 東京都千代田区丸の内三丁目 2 番 3 号 Tokyo (JP).
- (72) 発明者; および
- (75) 発明者/出願人(米国についてのみ): 高橋 正人 (TAKAHASHI, Masato) [JP/JP]; 〒1008331 東京都千代田区丸

の内三丁目 2 番 3 号 株式会社ニコン内 Tokyo (JP). 道正 智則 (DOSHO, Tomonori) [JP/JP]; 〒1008331 東京都千代田区丸の内三丁目 2 番 3 号 株式会社ニコン内 Tokyo (JP). 涌井 伸二 (WAKUI, Shinji) [JP/JP]; 〒1008331 東京都千代田区丸の内三丁目 2 番 3 号 株式会社ニコン内 Tokyo (JP).

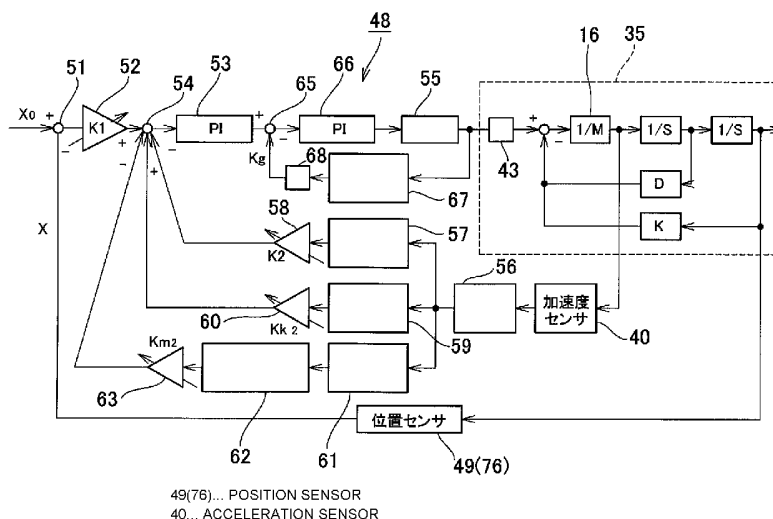
(74) 代理人: 大森 聡 (OMORI, Satoshi); 〒2140014 神奈川県川崎市多摩区登戸 2 0 7 5 番 2-5 0 1 大森特許事務所 Kanagawa (JP).

(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, JP, KE, KG, KP, KR, KZ, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LV, MA, MD, MG, MK, MN, MW, MX, MZ, NA,

/ 続葉有 /

(54) Title: VIBRATION ISOLATOR, EXPOSURE APPARATUS, AND VIBRATION ISOLATING METHOD

(54) 発明の名称: 防振装置、露光装置、及び防振方法



(57) Abstract: An active vibration isolator having an improved vibration isolation performance. The vibration isolator has an air damper (43) supporting a structure and a drive section for controlling the internal pressure of the air damper and further has a position sensor (49) for measuring the position of the structure, a subtractor (51) for generating difference information on the difference between the target position of the structure and the measured position, a variable amplifier (52) for controlling the drive section according to the difference information, variable amplifiers (58, 60, 63) for feed-backing the information for controlling the natural frequency of the system including the air damper (43) and the structure to the drive section by using the integration characteristic of the air damper (43), and an amplifier (68) for feed-backing the internal information on the air damper (43) to the drive section.

(57) 要約: 除振性能が向上した能動型の防振装置である。構造物を支持するエアダンパ(43)とその内圧を制御する駆動部とを有する防振装置において、その構造物の位置を計測する位置センサ(49)と、その構造物の目標位置と実測位置との差分情報を生成する減算器(51)と、その差分情報に基づいてその駆動部を制御する可変増幅器

/ 続葉有 /



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, 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。

(52) と、エアダンパ (43) の積分特性を用いてエアダンパ (43) とその構造物とを含む系の固有振動数を制御するための情報をその駆動部にフィードバックする可変増幅器 (58, 60, 63) と、エアダンパ (43) の内圧情報をその駆動部にフィードバックする増幅器 (68) とを有する。

明 細 書

防振装置、露光装置、及び防振方法

技術分野

- [0001] 本発明は、構造物を支持する際に振動を抑制するために使用される防振技術に関し、例えば半導体デバイスや液晶ディスプレイ等の各種デバイスを製造する際に使用される露光装置等を支持するために使用して好適なものである。さらに本発明は、その防振技術を用いる露光技術に関する。また、本願は2004年3月8日に出願された特願2004-064636号に対し優先権を主張し、その内容をここに援用する。

背景技術

- [0002] 例えば半導体デバイスの製造工程の一つであるリソグラフィ工程においては、マスクとしてのレチクル(又はフォトマスク等)に形成されているパターンを基板としてのフォトリソが塗布されたウエハ(又はガラスプレート等)上に転写露光するために、露光装置が使用されている。露光装置としては、ステッパ等の一括露光型(静止露光型)の投影露光装置やスキャニングステッパ等の走査露光型の投影露光装置(走査型露光装置)などが使用されている。
- [0003] 露光装置において、レチクルステージやウエハステージの位置決め精度や重ね合わせ精度等の露光精度を向上するためには、振動の影響をできるだけ排除する必要がある。しかしながら、上記の各ステージが移動するときには、その加速時の反力が床に伝わって床が大きく振動することがある。また、露光装置が設置されているデバイス製造工場内の周囲の関連機器の稼働時にも様々な力によって床が振動するため、床は恒常的に或る程度は振動している。そこで、その床の振動が露光装置に伝わって、露光精度が低下するのを防止するため、従来より露光装置と床(設置面)との間には防振台が配置されている。
- [0004] 従来の防振台としては、内部の圧力がほぼ一定に維持されるように空気が供給されるエアダンパでステージ等を支持する機構が広く用いられている。また、ステージ等に配置した加速度センサで検出される振動を抑制するアクチュエータをエアダンパに組み合わせて用いる能動型の防振装置も使用されるようになって来ている。さら

に防振性能を向上するために、そのアクチュエータに情報をフィードバックするセンサの種類を増加させるとともに、エアダンパにおいても、ステージに設けた運動センサの検出結果を用いて圧力を制御するようにした能動型の防振装置も提案されている(例えば、特許文献1参照)。

特許文献1:特開2002-175122号公報

[0005] 最近、半導体デバイス等のパターンが一層微細化しており、それに伴って必要な露光精度も高くなっているため、露光装置においては振動の影響をさらに抑制する必要がある。そのためには、能動型の防振装置においも、床の振動が露光装置に伝わる割合である除振率を広い周波数域で低くして、除振性能を高める必要がある。

また、パターンの微細化とともに、スループットを高めることも求められているため、走査型露光装置においては、ステージの走査速度は次第に高速化している。しかしながら、ステージの走査速度を高めると、加減速時の反力による振動が大きくなり、この振動が防振装置を介して床に伝わると、その床の振動が再び露光装置に悪影響を与えることになる。そのため、能動型の防振装置においては、ステージ側でセンサによって検出される振動をできるだけ効率的に抑制して、除振性能を高める必要がある。

発明の開示

[0006] 本発明は斯かる点に鑑み、除振性能が向上した能動型の防振技術を提供することを第1の目的とする。

また、本発明は、除振性能を高めることによって、露光精度又はスループットを向上できる露光技術を提供することを第2の目的とする。

[0007] 本発明による第1の防振装置は、内部に気体が供給されて設置面上に構造物を支持する気体ダンパと、その気体ダンパ内の気体の圧力を制御する駆動部とを有する防振装置において、その構造物の位置情報を計測する第1センサと、その構造物の目標位置の情報からその第1センサで計測されるその構造物の位置情報を減算して差分情報を生成する第1フィードバック部と、その第1フィードバック部のその差分情報に基づいてその駆動部の駆動情報を生成する駆動量制御部と、その気体ダンパの積分特性を用いて、その気体ダンパとその構造物とを含む系の固有振動数を制

御するための情報をその駆動部にフィードバックする特性制御部とを有するものである。

[0008] 斯かる本発明によれば、その第1フィードバック部によって、その構造物の位置は能動的に目標位置付近に維持される。さらに、駆動部から気体ダンパ内部の気体の圧力(内圧)までの特性がほぼ積分特性であることを利用して、例えば固有振動数を下げないように、その気体ダンパの粘性摩擦係数(D)、気体ダンパのばね定数(K)、及びその構造物の質量(M)のうちの少なくとも一つの情報をフィードバックによって制御する。これによって、第1の防振装置の除振率が改善されるため、除振性能が向上する。

[0009] 本発明において、一例としてその特性制御部は、その気体ダンパの粘性摩擦係数に対応する情報、その気体ダンパのばね定数に対応する情報、及びその構造物の質量に対応する情報のうちの少なくとも一つをその駆動部にフィードバックするものである。この場合、その構造物の加速度を α として、その気体ダンパの積分特性を無視すると、その気体ダンパの粘性摩擦係数(D)は、その加速度 α の積分(速度)に比例する抵抗力の係数を表し、その気体ダンパのばね定数(K)は、その加速度 α の2階積分(位置)に比例する抵抗力の係数を表し、その構造物の質量(M)は、その加速度 α に比例する抵抗力(慣性)の係数を表す。従って、その駆動部からその気体ダンパの内圧までの積分特性を考慮すると、その構造物の加速度 α に所定ゲインを乗じた量のフィードバックによってその粘性抵抗係数(D)を制御でき、その加速度 α の積分に所定ゲインを乗じた量のフィードバックによってそのばね定数(K)を制御でき、その加速度 α の微分に所定ゲインを乗じた量のフィードバックによってその質量(M)を見かけ上で制御することができる。

[0010] また、別の例として、その特性制御部は、その構造物の加速度情報を計測する第2センサと、その第2センサで計測される加速度情報に所定係数を乗じて得られるその気体ダンパの粘性摩擦係数に対応する情報をその駆動部にフィードバックする第2フィードバック部と、その第2センサで計測される加速度情報を実質的に積分した情報に所定係数を乗じて得られるその気体ダンパのばね定数に対応する情報をその駆動部にフィードバックする第3フィードバック部と、その第2センサで計測される加速

度情報を実質的に微分した情報に所定係数を乗じて得られるその構造物の質量に対応する情報をその駆動部にフィードバックする第4フィードバック部とを有するものである。

- [0011] この場合そのフィードバックによって、例えばその粘性抵抗係数(D)を $(D + \Delta D)$ と大きくして、そのばね定数(K)を $(K - \Delta K)$ と小さくして、その質量(M)を $(M + \Delta M)$ と大きくすると、その固有振動数が低下して、高周波数域での除振率が改善される。

本発明において、その気体ダンパ内のその気体の圧力変動のうちの低周波数成分に対応する情報をその駆動部にフィードバックする第5フィードバック部をさらに有することができる。本発明における気体ダンパの積分特性は、所定の折点周波数 f_c 以下の低周波数域では小さくなる。そこで、低周波数域では、その気体ダンパ内の圧力をフィードバックすることによって、その気体ダンパによってほぼ全周波数域で積分特性が得られるようにする。この結果、全体としての除振率がさらに改善されて、除振性能が向上する。

- [0012] また、一例として、その第1センサは、加速度センサと、この加速度センサで計測される加速度を2回積分する積分器とを含むものである。この場合には、加速度センサによって位置センサを兼用できる。

また、一例として、その設置面とその構造物との間にその気体ダンパと並列に、その構造物の変位に応じて電磁力で付勢力を与える電磁ダンパを配置してもよい。電磁ダンパは応答速度が気体ダンパよりも高いため、特に高周波数域での除振率をさらに改善できる。

- [0013] 次に、本発明の第2の防振装置は、設置面上に構造物を支持するダンパと、そのダンパの付勢力を制御する駆動部とを有する防振装置において、その構造物の位置情報を計測する第1センサと、その構造物の加速度情報を計測する第2センサと、その第1センサで計測される位置情報の低周波数成分と、その第2センサで計測される加速度情報を2回積分して得られる位置情報の高周波数成分とを加算してその構造物の位置情報を求める合成部と、その構造物の目標位置の情報からその合成部で求められるその構造物の位置情報を減算して差分情報を生成するフィードバック部と、そのフィードバック部のその差分情報に基づいてその駆動部の駆動情報を生成す

る駆動量制御部とを有するものである。

[0014] 本発明によれば、そのフィードバック部によって、その構造物の位置は能動的に目標位置付近に維持される。第1センサの計測値を2回積分して得られる構造物の位置情報(慣性系の空間位置)に基づいて構造物を位置決めすることができるとともに、第1センサの低周波域における位置情報に基づいて設置面と構造物との相対位置決めを行うことができる。

[0015] 本発明において、一例としてその位置情報の低周波数成分を求める際のカットオフ周波数と、その位置情報の高周波数成分を求める際のカットオフ周波数とは実質的に等しい。これによって、その合成部で求められる位置情報は、広い周波数域で高精度になる。

また、一例として、そのダンパは、内部に気体が供給される気体ダンパである。この場合、その気体ダンパの積分特性を用いて、その気体ダンパとその構造物とを含む系の固有振動数を制御するように、その気体ダンパの粘性摩擦係数、その気体ダンパのばね定数、及びその構造物の質量に対応する情報をそれぞれその駆動部にフィードバックする特性制御部をさらに有することができる。これによって、例えば固有振動数を下げることができるため、特に高周波数域での除振率を改善できる。

[0016] また、別の例として、そのダンパは、電磁力で付勢力を発生する電磁ダンパである。この場合には、高い追従速度で振動を抑制できる。

さらに、気体ダンパと電磁ダンパとを併用してもよく、これによって、広い周波数域で除振率を改善できる。

次に、本発明の第3の防振装置は、内部に気体が供給されて設置面上に構造物を支持する気体ダンパと、その気体ダンパ内の気体の圧力を制御する駆動部とを有する防振装置において、その構造物の位置情報を計測する第1センサと、その構造物の目標位置の情報からその第1センサで計測されるその構造物の位置情報を減算して差分情報を生成するフィードバック部と、そのフィードバック部のその差分情報に基づいてその駆動部の駆動情報を生成する駆動量制御部と、そのフィードバック部のその差分情報をその構造物の位置情報にフィードフォワードする補償部とを有するものである。

[0017] 本発明によれば、その補償部はその気体ダンパに対して並列補償器として作用するため、その駆動量制御部のゲインを増しても、安定な状態が維持できる。従って、その構造物の目標位置と実際の位置との差分が減少して、除振性能が向上する。

また、本発明の第4の防振装置は、内部に気体が供給されて設置面上に構造物を支持する気体ダンパと、その気体ダンパ内の気体の圧力を制御する駆動部とを有する防振装置において、その構造物の位置情報を計測する第1センサと、その構造物の目標位置の情報からその第1センサで計測されるその構造物の位置情報を減算して差分情報を生成するフィードバック部と、そのフィードバック部のその差分情報に基づいてその駆動部の駆動情報を生成する駆動量制御部と、その駆動量制御部の駆動情報をその差分情報にフィードバックする補償部とを有するものである。

[0018] 本発明によれば、その駆動量制御部とその補償部とからなる部分は、その気体ダンパに対して直列補償器として作用するため、その駆動量制御部のゲインを増しても、安定な状態が維持できる。従って、その構造物の目標位置と実際の位置との差分が減少して、除振性能が向上する。この構成では、その構造物の位置情報のみをその駆動量制御部にフィードバックできるため、その構造物の目標位置と実際の位置との差分が、上記の並列補償器を用いる場合に比べてさらに小さくなる。

[0019] この場合、一例として、その駆動量制御部とその補償部とを含む直列補償部の伝達関数は、ラプラス変換で用いる変数 s に関して分母及び分子がそれぞれ2次の関数で表される。気体ダンパを用いる場合、その力学モデルの等価回路は変数 s に関して2次の関数を分母とする関数を含む。従って、その気体ダンパの共振ピークをその直列補償部の分子多項式でほぼ打ち消すことができるため、共振ピークを高周波数域に移動することができ、その駆動量制御部のゲインを増したときの安定性が向上する。

[0020] また、一例として、その駆動量制御部とその補償部とを含む直列補償部は、その補償部がないときの共振ピークを高周波数側に移動するものである。これによってその駆動量制御部のゲインを増したときの安定性が向上する。

これらの場合に、さらにその直列制御部の直流ゲインを増加させてもよい。これによってその安定性が向上する。

[0021] 次に、本発明による露光装置は、第1ステージに保持された第1物体を露光ビームで照明し、その露光ビームでその第1物体を介して第2ステージに保持された第2物体を露光する露光装置において、その第1ステージ及びその第2ステージのうちの少なくとも一方を本発明のいずれかの防振装置を介して支持するものである。

本発明の防振装置を用いることで除振性能が向上するため、重ね合わせ精度等の露光精度が向上する。また、走査型露光装置の場合には、振動を低減した状態で走査速度を速くできるため、スループットを向上できる。

この場合、その第1物体のパターンの像をその第2物体上に投影する投影光学系と、その投影光学系とその第1ステージとを保持するコラム構造体とを備え、そのコラム構造体を本発明のいずれかの防振装置を介して支持してもよい。このように投影光学系と第1ステージとを一体的に支持することで、振動の影響をさらに低減できる。

[0022] また、その防振装置は、その第2ステージ又はそのコラム構造体を支持するためにそれぞれ3個以上用いてもよい。その防振装置を3個以上用いることで、その第2ステージ等を安定に支持できる。

次に、本発明による第1の防振方法は、内部に気体が供給されて設置面上に構造物を支持する気体ダンパ内の気体の圧力を制御する防振方法において、その構造物の位置情報を計測する工程と、その構造物の目標位置の情報からその工程で計測されたその構造物の位置情報を減算して差分情報を生成する工程と、その工程で生成されたその差分情報に基づいて、その気体ダンパの積分特性を用いて、その気体ダンパとその構造物とを含む系の固有振動数を制御するための情報をフィードバックして、その気体ダンパ内の気体の圧力を制御する工程とを有するものである。

[0023] 本発明によれば、その積分特性を用いて例えばその固有振動数を下げるように、その気体ダンパの粘性摩擦係数、気体ダンパのばね定数、及びその構造物の質量のうちの少なくとも一つの情報をフィードバックによって制御する。これによって、高周波数領域では除振率が改善されるため、除振性能が向上する。

また、本発明による第2の防振方法は、設置面上に構造物を支持するそのダンパの付勢力を制御する防振方法において、その構造物の位置情報及び加速度情報を計測する工程と、その工程で計測される位置情報の低周波数成分と、その工程で計測

される加速度情報を2回積分して得られる位置情報の高周波数成分とを加算してその構造物の位置情報を求める工程と、その構造物の目標位置の情報からその加算によって求められるその構造物の位置情報を減算して差分情報を生成する工程と、その工程で生成されるその差分情報に基づいてそのダンパを駆動する工程とを有するものである。

[0024] 本発明によれば、構造物の加速度情報を2回積分して得られる構造物の位置情報(慣性系の空間位置)に基づいて構造物を位置決めすることができるとともに、位置情報の低周波成分により設置面と構造物との相対位置決めを行うことができる。

また、本発明による第3の防振方法は、内部に気体が供給されて設置面上に構造物を支持する気体ダンパ内の気体の圧力を制御する防振方法において、その構造物の位置情報を計測する工程と、その構造物の目標位置の情報からその工程で計測されるその構造物の位置情報を減算して差分情報を生成する工程と、その工程で生成されたその差分情報をその構造物の位置情報にフィードフォワードして、その気体ダンパ内の気体の圧力を制御する工程とを有するものである。

本発明によれば、その差分情報をその構造物の位置情報にフィードフォワードすることによって、その気体ダンパを駆動する際のゲインを増しても、安定な状態が維持できる。従って、その構造物の目標位置と実際の位置との差分が減少して、除振性能が向上する。

[0025] 本発明の除振方法及び装置によれば、能動型で除振を行う場合の除振性能を向上できる。

また、本発明において、気体ダンパの積分特性を用いて、その気体ダンパと構造物とを含む系の固有振動数を制御するための情報をその駆動部にフィードバックする特性制御部を設けるか、又は第1センサで計測される位置情報の低周波数成分と、第2センサで計測される加速度情報を2回積分して得られる位置情報の高周波数成分とを加算して構造物の位置情報を求める合成部を用いる場合には、それぞれ固有振動数を低くできるか、又は構造物の位置情報を広い周波数域で高精度に計測できるため、能動型で除振を行う場合の除振性能を向上できる。

[0026] また、本発明において、フィードバック部の差分情報を構造物の位置情報にフィー

ドフォワードする補償部を設けるか、又は駆動量制御部の駆動情報を差分情報にフィードバックする補償部を設ける場合には、それぞれ並列補償器又は直列補償器を設けたことになるため、能動型で除振を行う場合の除振性能を向上できる。

図面の簡単な説明

- [0027] [図1]本発明の実施形態の投影露光装置の概略構成を示す図である。
- [図2]図1の投影露光装置を床上に設置した状態を示す一部を切り欠いた図である。
- [図3]図2中の一つの防振台35及びその制御系を示す図である。
- [図4]図3の防振台35の力学モデルを示す図である。
- [図5]図4の力学モデルの除振率の変化の一例を示す図である。
- [図6]本発明の第1の実施形態の防振台制御系48の第1の構成例を示すブロック図である。
- [図7]図6の防振台制御系48のイナータンス応答の一例を示す図である。
- [図8]その第1の実施形態の防振台制御系48の第2の構成例を示すブロック図である。
- [図9]図8の防振台制御系48のイナータンス応答の一例を示す図である。
- [図10]本発明の第2の実施形態の防振台の力学モデルを示す図である。
- [図11]その第2の実施形態で使用される合成センサの原理説明に用いる図である。
- [図12]図10の力学モデルの除振特性の一例を示す図である。
- [図13]本発明の第2の実施形態の防振台制御系の構成を示すブロック図である。
- [図14]本発明の第3の実施形態の防振台制御系の第1の構成例を示すブロック図である。
- [図15]その第3の実施形態の防振台制御系の第2の構成例を示すブロック図である。
- [図16]図15の防振台制御系を用いた場合の構造物の振動の変化を示す図である。

符号の説明

- [0028] 9…照明光学系、R…レチクル、PL…投影光学系、W…ウエハ、RST…レチクルステージ、WST…ウエハステージ、28…圧力センサ、32…ペDESTAL、35…防振台、36…第1コラム、CL…コラム構造体、40…加速度センサ、43…エアダンパ(気体ダンパ)、47…サーボバルブ(駆動部)、48…防振台制御系、49…位置センサ、50…

ボイスコイルモータ(電磁ダンパ)、51…減算器、52, 58, 60, 63…可変増幅器、59…擬似積分器、61…擬似微分器、68…増幅器、76…合成センサ、107…並列補償器、109…直列補償器

発明を実施するための最良の形態

[0029] [第1の実施形態]

以下、本発明の好ましい第1の実施形態につき図1〜図9を参照して説明する。本例は、スキャニングステッパよりなる走査露光型の投影露光装置(走査型露光装置)の除振を行う場合に本発明を適用したものである。

図1は、本例の投影露光装置を構成する各機能ユニットをブロック化して表した図であり、この図1において、投影露光装置を収納するチャンバーは省略されている。図1において、露光用の光源としてKrFエキシマレーザ(波長248nm)又はArFエキシマレーザ(波長193nm)よりなるレーザ光源1が使用されている。その露光用の光源としては、その他のF₂レーザ(波長157nm)のような発振段階で紫外域のレーザ光を放射するもの、固体レーザ光源(YAG又は半導体レーザ等)からの近赤外域のレーザ光を波長変換して得られる真空紫外域の高調波レーザ光を放射するもの、或いはこの種の露光装置でよく使われている水銀放電ランプ等も使用できる。

[0030] レーザ光源1からの露光ビームとしての露光用の照明光(露光光)ILは、レンズ系とフライアイレンズ系とで構成される均一化光学系2、ビームスプリッタ3、光量調整用の可変減光器4、ミラー5、及びリレーレンズ系6を介してレチクルブラインド機構7を均一な照度分布で照射する。レチクルブラインド7でスリット状又は矩形状に制限された照明光ILは、結像レンズ系8を介してマスクとしてのレチクルR上に照射され、レチクルR上にはレチクルブラインド7の開口の像が結像される。均一化光学系2、ビームスプリッタ3、光量調整用の可変減光器4、ミラー5、リレーレンズ系6、レチクルブラインド機構7、及び結像レンズ系8を含んで照明光学系9が構成されている。

[0031] レチクルRに形成された回路パターン領域のうち、照明光によって照射される部分の像は、両側テレセントリックで投影倍率 β が縮小倍率の投影光学系PLを介して基板(感応基板)としてのフォトレジストが塗布されたウエハW上に結像投影される。一例として、投影光学系PLの投影倍率 β は1/4、像側開口数NAは0.7、視野直径

は27〜30mm程度である。投影光学系PLは屈折系であるが、その他に反射屈折系等も使用できる。レチクルR及びウエハWはそれぞれ第1物体及び第2物体とみなすこともできる。以下、投影光学系PLの光軸AXに平行にZ軸を取り、Z軸に垂直な平面内で図1の紙面に平行な方向にX軸を、図1の紙面に垂直な方向にY軸を取って説明する。本例では、Y軸に沿った方向(Y方向)が、走査露光時のレチクルR及びウエハWの走査方向であり、レチクルR上の照明領域は、非走査方向であるX軸に沿った方向(X方向)に細長い形状である。

[0032] まず、投影光学系PLの物体面側に配置されるレチクルRは、走査露光時にレチクルベース(不図示)上をエアベアリングを介して少なくともY方向に定速移動するレチクルステージRST(第1ステージ)に保持されている。レチクルステージRSTの移動座標位置(X方向、Y方向の位置、及びZ軸の周りの回転角)は、レチクルステージRSTに固定された移動鏡Mrと、これに対向して配置されたレーザ干渉計システム10とで逐次計測され、その移動はリニアモータや微動アクチュエータ等で構成される駆動系11によって行われる。なお、移動鏡Mr、レーザ干渉計システム10は、実際には少なくともX方向に1軸及びY方向に2軸の3軸のレーザ干渉計を構成している。レーザ干渉計システム10の計測情報はステージ制御ユニット14に供給され、ステージ制御ユニット14はその計測情報及び装置全体の動作を統轄制御するコンピュータよりなる主制御系20からの制御情報(入力情報)に基づいて、駆動系11の動作を制御する。

[0033] 一方、投影光学系PLの像面側に配置されるウエハWは、不図示のウエハホルダを介してウエハステージWST(第2ステージ)上に保持され、ウエハステージWSTは、走査露光時に少なくともY方向に定速移動できるとともに、X方向及びY方向にステップ移動できるように、エアベアリングを介して不図示のウエハベース上に載置されている。また、ウエハステージWSTの移動座標位置(X方向、Y方向の位置、及びZ軸の周りの回転角)は、投影光学系PLの下部に固定された基準鏡Mfと、ウエハステージWSTに固定された移動鏡Mwと、これに対向して配置されたレーザ干渉計システム12とで逐次計測され、その移動はリニアモータ及びボイスコイルモータ(VCM)等のアクチュエータで構成される駆動系13によって行われる。なお、移動鏡Mw及びレ

レーザ干渉計システム12は、実際には少なくともX方向に1軸及びY方向に2軸の3軸のレーザ干渉計を構成している。また、レーザ干渉計システム12は、実際には更にX軸及びY軸の周りの回転角計測用の2軸のレーザ干渉計も備えている。レーザ干渉計システム12の計測情報はステージ制御ユニット14に供給され、ステージ制御ユニット14はその計測情報及び主制御系20からの制御情報(入力情報)に基づいて、駆動系13の動作を制御する。

[0034] また、ウェハステージWSTには、ウェハWのZ方向の位置(フォーカス位置)と、X軸及びY軸の周りの傾斜角を制御するZレベリング機構も備えられている。そして、投影光学系PLの下部側面に、ウェハWの表面の複数の計測点にスリット像を投影する投射光学系23Aと、その表面からの反射光を受光してそれらのスリット像の再結像された像の横ずれ量の情報を検出して、ステージ制御ユニット14に供給する受光光学系23Bとから構成される斜入射方式の多点のオートフォーカスセンサ(23A, 23B)が配置されている。ステージ制御ユニット14は、そのスリット像の横ずれ量の情報を用いてそれら複数の計測点における投影光学系PLの像面からのデフォーカス量を算出し、走査露光時にはこれらのデフォーカス量が所定の制御精度内に収まるように、オートフォーカス方式でウェハステージWST内のZレベリング機構を駆動する。なお、斜入射方式の多点オートフォーカスセンサの詳細な構成については、例えば特開平1-253603号公報に開示されている。

[0035] また、ステージ制御ユニット14は、レーザ干渉計システム10による計測情報に基づいて駆動系11を最適に制御するレチクル側のコントロール回路と、レーザ干渉計システム12による計測情報に基づいて駆動系13を最適に制御するウェハ側のコントロール回路とを含み、走査露光時にレチクルRとウェハWとを同期走査するときは、その両方のコントロール回路が各駆動系11, 13を協調制御する。また、主制御系20は、ステージ制御ユニット14内の各コントロール回路と相互にコマンドやパラメータをやり取りして、オペレータが指定したプログラムに従って最適な露光処理を実行する。そのために、オペレータと主制御系20とのインターフェイスを成す不図示の操作パネルユニット(入力デバイスと表示デバイスとを含む)が設けられている。

[0036] 更に、レーザ光源1がエキシマレーザ光源であるときは、主制御系20の制御のもと

にあるレーザ制御ユニット25が設けられ、この制御ユニット25は、レーザ光源1のパルス発振のモード(ワンパルスモード、バーストモード、待機モード等)を制御するとともに、放射されるパルスレーザ光の平均光量を調整するためにレーザ光源1の放電用高電圧を制御する。また、光量制御ユニット27は、ビームスプリッタ3で分割された一部の照明光を受光する光電検出器26(インテグレートセンサ)からの信号に基づいて、適正な露光量が得られるように可変減光器4を制御するとともに、パルス照明光の強度(光量)情報をレーザ制御ユニット25及び主制御系20に送る。

[0037] そして、図1において、レチクルRへの照明光ILの照射を開始して、レチクルRのパターンの一部の投影光学系PLを介した像をウエハW上の一つのショット領域に投影した状態で、レチクルステージRSTとウエハステージWSTとを投影光学系PLの投影倍率 β を速度比としてY方向に同期して移動(同期走査)する走査露光動作によって、そのショット領域にレチクルRのパターン像が転写される。その後、照明光ILの照射を停止して、ウエハステージWSTを介してウエハWをX方向、Y方向にステップ移動する動作と、上記の走査露光動作とを繰り返すことによって、ステップ・アンド・スキャン方式でウエハW上の全部のショット領域にレチクルRのパターン像が転写される。

[0038] この露光に際しては、予めレチクルRとウエハWとのアライメントを行っておく必要がある。そこで、図1の投影露光装置には、レチクルRを所定位置に設定するためのレチクルアライメント系(RA系)21と、ウエハW上のマークを検出するためのオフアクシス方式のアライメント系22とが設けられている。

次に、例えば半導体デバイスの製造工場内での本例の投影露光装置の設置状態の一例につき説明する。図2は、その投影露光装置の設置状態の一例を示し、この図2において、その製造工場の床FL上に例えばH型鋼よりなる複数(例えば4箇所以上)の支柱31を介して、投影露光装置を設置する際の基礎部材としての厚い平板状のペDESTAL32が設置され、ペDESTAL32上に投影露光装置を設置するための長方形の薄い平板状のベースプレート33が固定されている。

[0039] ベースプレート33上に3箇所又は4箇所の支持部材34及び能動型の防振台35(防振装置)を介して第1コラム36が載置され、第1コラム36の中央の開口部に投影光学系PLが保持されている。防振台35は、後述のようにエアダンパ(気体ダンパ)と、

ボイスコイルモータ等からなる電磁ダンパとを含み、第1コラム36に設置されている1組の加速度センサ40と1組の位置センサ(不図示)との検出情報に基づいてそのエアダンパ内の圧力及び電磁ダンパの推力を制御することで、第1コラム36(及びこれによって支持されている部材)の除振が能動的に行われている。この場合、そのエアダンパによって比較的low周波数域の除振が行われ、その電磁ダンパによって比較的high周波数域の除振が行われる。

[0040] 加速度センサ40としては、圧電素子(ピエゾ素子等)で発生する電圧を検出する圧電型の加速度センサや、例えば歪みの大きさに応じてCMOSコンバータの論理閾値電圧が変化することを利用する半導体式の加速度センサ等を使用できる。位置センサ(又は変位センサ)としては、例えば渦電流変位センサを使用できる。この渦電流変位センサは、例えば絶縁体に巻いたコイルに交流電流を加えておき、そのコイルを導電体からなる測定対象に近付けると、そのコイルによって作られた交流磁界によって導電体に渦電流が発生することを利用する。即ち、その渦電流による磁界は、そのコイルの電流による磁界と逆方向であり、これら2つの磁界が重なり合って、そのコイルに流れる電流の強さ及び位相が変化する。この変化は、測定対象がコイルに近いほど大きくなるので、そのコイルに流れる電流に応じた信号を検出することにより、測定対象の位置又は変位を非接触で検出することができる。この他の位置センサとして、静電容量がセンサの電極と測定対象との距離に反比例することを利用して、非接触で距離を検出する静電容量式非接触変位センサや、測定対象からの光ビームの位置をPSD(半導体式位置検出装置)を用いて検出するようにした光学式センサ等も使用できる。

[0041] また、第1コラム36の上部にレチクルベース37が固定され、レチクルベース37を覆うように第2コラム38が固定され、第2コラム38の中央部に図1の照明光学系9が収納された照明系サブチャンバ39が固定されている。この場合、図1のレーザ光源1は一例として図2のペDESTAL32の外側の床FL上に設置され、レーザ光源1から射出される照明光ILは、不図示のビーム送光系を介して照明光学系9に導かれる。そして、レチクルベース37上にレチクルRを保持するレチクルステージRSTが載置されている。図2において、第1コラム36、レチクルベース37、及び第2コラム38よりコラム構造

体CLが構成されている。コラム構造体CLは、ペDESTAL32の上面(設置面)上に複数の能動型の防振台35を介して支持された状態で、投影光学系PL、レチクルステージRST(第1ステージ)、及び照明光学系9を保持している。

[0042] 上述の1組の加速度センサ40は、例えばほぼXY平面内の同一直線上にない3箇所でZ方向の加速度を計測する3個のZ軸加速度センサと、Y方向に離れた2箇所でX方向の加速度を計測する2個のX軸加速度センサと、X方向に離れた2箇所でY方向の加速度を計測する2個のY軸加速度センサとから構成されている。その1組の加速度センサ40によって、コラム構造体CLのX方向、Y方向、Z方向の加速度と、X軸、Y軸、Z軸の周りの回転加速度 $[\text{rad}/\text{s}^2]$ とが計測される。同様に、上記の1組の位置センサ(不図示)によって、コラム構造体CLのX方向、Y方向、Z方向の位置と、X軸、Y軸、Z軸の周りの回転角とが計測される。これらの計測値に基づいて、複数の防振台35内のエアダンパ及び電磁ダンパは、それぞれコラム構造体CLの振動が小さく維持されるように、かつコラム構造体CLの傾斜角及びZ方向の高さが一定に維持されるように作用する。

[0043] また、ペDESTAL32上のベースプレート33上の複数の支持部材34及び能動型の防振台35で囲まれた領域上に、3個又は4個の能動型の防振台41を介してウエハベースWBが支持されている。ウエハベースWB上にはウエハWを保持するウエハステージWSTが移動自在に載置されている。防振台41は、防振台35と同様にエアダンパ及び電磁ダンパを備えており、防振台41がペDESTAL32の上面(設置面)にウエハステージWST(第2ステージ)を支持している。防振台41は、ウエハベースWB上の加速度センサ及び位置センサ(不図示)の計測情報に基づいて能動的にウエハベースWB及びウエハステージWSTの振動を抑制する。

[0044] 本例の防振台35及び41とこれらの制御系(後述)とがそれぞれ防振装置に対応している。防振台35及び41とこれらの制御系とを含むシステムは、それぞれ能動型振動分離システムであるAVIS(Active Vibration Isolation System)とも呼ぶことができる。なお、防振台35は、コラム構造体CLを介してレチクルステージRST及び投影光学系PLを支持しているとともに、走査露光時のレチクルステージRSTの走査速度はウエハステージWSTの走査速度に対して投影倍率 β の逆数倍(例えば4倍)速くなっ

ている。一方、防振台41はウエハベースWBを介してウエハステージWSTのみを支持しているため、コラム構造体CLの方がウエハベースWBよりも振動が発生し易くなっている。従って、防振台35の除振性能を防振台41の除振性能よりも高く設定することも可能である。この場合、一例として、防振台41においては、エアダンパは例えばウエハベースWBのZ方向の位置がほぼ一定になるように圧力を制御するだけでもよい。

[0045] なお、図2において、例えば投影光学系PLを保持する第1コラム36の底面にウエハベースWB及びウエハステージWSTを吊り下げるように支持してもよい。この場合には、複数の防振台35によってレチクルステージRST、投影光学系PL、及びウエハステージWSTが全て支持される。この際に、投影光学系PL及びウエハステージWSTを支持するコラムと、レチクルステージRSTを支持するコラムとを分離して、これらをそれぞれ防振台35と同様の防振台を介して支持してもよい。また、レチクルステージRST、投影光学系PL、及びウエハステージWSTを互いに独立に防振台35と同様の防振台を介して支持してもよい。

[0046] 上述のように、図2の能動型の防振台35及び41はほぼ同様に構成することができる。以下では、代表的に防振台35及びその制御系の構成、並びにその作用につき説明する。また、以下では、投影光学系PLの光軸AXに平行な方向であるZ方向の振動を抑制する機構について説明するが、これはX方向及びY方向の振動を抑制する機構、さらにはX軸、Y軸、Z軸の周りの回転方向の振動を抑制する機構にも同様に適用できる。

[0047] 図3は、図2中の1箇所の防振台35及びその制御系を示し、この図3において、ペDESTAL32上のベースプレート33上に支持部材34が設置され、支持部材34上に、底板42、エアダンパ43、及び上板44を介して第1コラム36が載置されている。エアダンパ43は、可撓性を有する中空の袋内に空気を圧力が制御できる状態で封入したものである。即ち、エアダンパ43(気体ダンパ)には、空気の流量を制御できるサーボバルブ47(駆動部)が装着された可撓性を有する配管46を介して、所定圧力以上で所定量以上の空気が蓄積されている空気源45が連結されている。空気源45としては、例えばエアコンプレッサと、このエアコンプレッサで加圧された空気が充填され

ているエアボンベとを組み合わせた装置などが使用できる。また、エアダンパ43の側面には、エアダンパ43内の空気の圧力の情報を計測するための圧力センサ28が設けられ、圧力センサ28の計測値(圧力に対応する信号)が防振台制御系48に供給されている。圧力センサ28としては、ダイヤフラムに歪みゲージを固定したセンサやシリコン基板の変形を利用するセンサ等が使用できる。

[0048] また、支持部材34と第1コラム36との間に、エアダンパ43と並列に電磁ダンパとしてのボイスコイルモータ50が設置されている。ボイスコイルモータ50は、支持部材34の上面に固定されて永久磁石がZ方向に所定ピッチで配列された固定子50bと、第1コラム36の底面に固定されてコイルが装着された可動子50aとから構成されている。また、第1コラム36に加速度センサ40及び位置センサ49が固定され、図3の例では加速度センサ40によって第1コラム36のZ方向への加速度の情報が計測され、位置センサ49によって支持部材34(又は床面)を基準とした第1コラム36のZ方向の相対的な位置、又はZ方向への相対的な変位の情報が計測されている。一例として、加速度センサ40は圧電型の加速度センサであり、位置センサ49は渦電流変位センサである。なお、加速度情報を検出するセンサとして速度センサを用いてもよい。この場合は、速度センサが検出した速度情報を一回微分して加速度情報とすればよい。

[0049] 図3の加速度センサ40は、エアダンパ43及びボイスコイルモータ50が設置されている位置における第1コラム36の加速度を計測するための一つのセンサを表している。加速度センサ40及び位置センサ49の計測値(加速度及び位置に対応する信号)は防振台制御系48に供給されている。防振台制御系48は、圧力センサ28、加速度センサ40、及び位置センサ49の計測値に基づいて、サーボバルブ47内を通過する空気の流量を制御することによって、第1コラム36のZ方向の位置が予め定められている目標位置になるようにエアダンパ43内の空気の圧力(内圧)を制御する。これと並行に防振台制御系48は、加速度センサ40及び位置センサ49の計測値に基づいて、ボイスコイルモータ50の可動子50aのコイルに流れる電流を制御することによって、第1コラム36のZ方向の位置が予め定められている目標位置になるようにボイスコイルモータ50によるZ方向への推力を制御する。

[0050] 次に、図3の防振台制御系48内でエアダンパ43の内圧を制御するための制御系

につき説明する。図4は、図3の防振台35内のエアダンパ43の力学モデルであり、この図4において、設置面15は図3のペデスタル32の表面に対応しており、構造物16は図3の第1コラム36に対応している。より正確には、構造物16には、第1コラム36とともに図2のレチクルベース37、レチクルステージRST、第2コラム38、照明系サブチャンバ39、照明光学系9、及び投影光学系PL等も含まれている。そして、構造物16中でエアダンパ43によって支持される部分の質量をM、エアダンパ43の粘性摩擦係数をD、ばね定数をKとする。このとき、質量Mは構造物16の加速度に応じた抵抗係数(慣性)の係数であり、粘性摩擦係数Dは構造物16の速度に応じた抵抗係数の係数であり、ばね定数Kは構造物16の位置に応じた抵抗係数の係数であるとみなすことができる。そして、設置面15がZ方向に x_0 だけ変位した場合の構造物16のZ方向への変位を x とすると、図4の力学モデルの除振率(x/x_0)は次のようになる。なお、変数 s はラプラス変換の変数であり、周波数を f (Hz)とすると、定常状態では $s=i2\pi f$ である。

[0051]

$$\frac{x}{x_0} = \frac{Ds + K}{Ms^2 + Ds + K} \dots\dots (1)$$

[0052] この場合、フィードバックによって見かけ上で質量M及び粘性摩擦係数Dを増加させて、ばね定数Kを減少させることで、そのエアダンパ43と構造物16を含む系の固有振動数を下げることができる。本例では、図3のサーボバルブ47を駆動するためのドライバからエアダンパ43の内圧までの特性がほぼ積分特性であることを利用して、フィードバックによって、 $M \rightarrow M + \Delta M$ 、 $D \rightarrow D + \Delta D$ 、 $K \rightarrow K - \Delta K$ とすると、除振率(x/x_0)は次のように変化する。

[0053]

$$\frac{x}{x_0} = \frac{Ds + K}{(M + \Delta M)s^2 + (D + \Delta D)s + (K - \Delta K)} \dots\dots (2)$$

[0054] 図5の点線の曲線51A及び実線の曲線51Bは、それぞれ(1)式及び(2)式の除振率を示し、図5において、横軸は周波数 f (Hz)、縦軸は除振率(dB)である。図5より分かるように、見かけ上で質量M及び粘性摩擦係数Dを増加させて、ばね定数Kを減少させることで、固有振動数が低域に移動するため、斜線を施した高周波数域の

除振率が改善される。なお、(1)式の曲線51Aの固有振動数は、より正確には $\{K/M - D^2/(2M^2)\}^{1/2} / (2\pi)$ であるため、粘性摩擦係数Dの増加によっても固有振動数は低下する。

- [0055] ただし、ばね定数Kを ΔK だけ小さくすると、図5の曲線51Bより分かるように低周波数域での除振率が悪化する。その低周波数域での除振率を改善するためには、ばね定数Kをほぼ固定して他の特性を制御するか、又は後述のようにさらにエアダンパ43の内圧のフィードバックを行えばよい。

図6は、エアダンパ43の積分特性を利用して、フィードバックによって見かけ上で質量M、粘性摩擦係数D、及びばね定数Kを制御することで固有振動数を下げるための図3の防振台制御系48の第1の構成例を示し、この図6において、ブロック化されている防振台35は図4の力学モデルの等価回路を表している。即ち、図6の防振台35内の構造物16に図3のエアダンパ43からの圧力(推力)が加わると、構造物16には $1/M$ に比例する加速度 α が生じる。そして、加速度 α を積分して得られる($1/s$ を乗じた)速度に粘性摩擦係数Dを乗じた抵抗力、及びその速度をさらに積分して得られる($1/s$ を乗じた)位置にばね定数Kを乗じた抵抗力がフィードバックされて、除振が行われる。この場合、構造物16の加速度情報が加速度センサ40(第2センサ)によって計測され、構造物16の位置情報が位置センサ49(第1センサ)によって計測されている。なお、加速度センサ40及び位置センサ49からは、一例として計測値に対応する電圧等のアナログ信号が出力される。

- [0056] 図6において、不図示の制御部から減算器51(第1フィードバック部)に構造物16のZ方向の目標位置 x_0 に対応する信号(通常は一定値)が入力され、位置センサ49で計測される構造物16のZ方向の位置 x に対応する信号が減算器51にフィードバックされており、減算器51はそれらの差分($x_0 - x$)に対応する信号をゲイン k_1 の可変増幅器52(駆動量制御部)を介してPI補償器53に供給する。PI補償器53は、入力された信号に所定係数を乗じて得られる第1信号と、その入力された信号を積分した信号に所定係数を乗じて得られる第2信号とを加算して得られる信号を加算器54に入力する。また、加速度センサ40で計測される加速度に対応する信号をDCカットフィルタ56に通して直流成分を除いた信号が、2次バターワースフィルタ57、擬似積

分器59、及び擬似微分器61に入力されている。2次バタワースフィルタ57は、2つの単同調増幅回路を縦続接続して得られる所定帯域で均一ゲインが得られるフィルタであり、擬似積分器59は、直流成分から低周波数成分をそのまま通して高周波数成分を積分する回路であり、擬似微分器61は、高周波のノイズ成分をそのまま通して低周波数成分を微分する回路である。なお、2次バタワースフィルタ57の代わりに通常のローパスフィルタを用いるか、又は2次バタワースフィルタ57を省略することも可能である。また、擬似積分器59の代わりに積分器を用いて、擬似微分器61の代わりに微分器を用いることも可能である。

[0057] また、2次バタワースフィルタ57の出力信号はゲイン k_2 の可変増幅器58(第2フィードバック部)を介して加算器54にフィードバックされ、擬似積分器59の出力信号はゲイン k_{ki} の可変増幅器60を介して加算器54にフィードバックされ、擬似微分器61の出力信号は2次バタワースフィルタ62、及びゲイン k_{mi} の可変増幅器63を介して加算器54にフィードバックされる。擬似積分器59及び可変増幅器60が第3フィードバック部に対応し、擬似微分器61及び可変増幅器63が第4フィードバック部に対応し、加算器54、加速度センサ40、及びDCカットフィルタ56から可変増幅器63までの部材が特性制御部に対応している。この場合も、2次バタワースフィルタ62の代わりに通常のローパスフィルタを用いてもよく、2次バタワースフィルタ62を省略することも可能である。加算器54は、PI補償器53及び可変増幅器58, 60, 63の出力信号を加算して得られる信号をドライバ55に入力する。ドライバ55は、入力された信号に基づいて図3のサーボバルブ47内の空気の流量を制御する。

[0058] なお、図6の防振台制御系48では図3のボイスコイルモータ50の制御系は省略されている。また、防振台制御系48はアナログ回路より構成されているが、例えば加速度センサ40及び位置センサ49の出力信号をデジタルデータに変換することによって、図6の防振台制御系48をデジタル回路、又はコンピュータのソフトウェア上で実現してもよい。これは以下の実施形態でも同様である。このようにデジタルデータとして処理する場合には、ドライバ55の出力データがアナログ信号に変換されて図3のサーボバルブ47に供給される。

[0059] 図6において、ドライバ55と構造物16との間には実際には積分特性を持つ図3の

エアダンパ43が配置されている。そのため、図6の加速度センサ40の出力信号(積分効果によって速度に対応する)に可変増幅器58でゲイン k_2 を乗じて得られる信号は、エアダンパ43の粘性摩擦係数 D に応じたフィードバック量(ΔD)に対応し、加速度センサ40の出力信号を擬似積分器59で積分した信号(積分効果によって位置に対応する)に可変増幅器60でゲイン k_{kl} を乗じて得られる信号は、エアダンパ43のばね係数 K に応じたフィードバック量(ΔK)に対応し、加速度センサ40の出力信号を擬似微分器61で微分した信号(積分効果によって加速度に対応する)に可変増幅器63でゲイン k_{ml} を乗じて得られる信号は、構造物16の質量 M に応じたフィードバック量(ΔM)に対応する。

[0060] この結果、本例の防振台制御系48では構造物16の位置情報とともに、粘性摩擦係数 D 、ばね定数 K 、及び質量 M の情報が4重にフィードバックされている。この場合、加算器54が使用されているため、フィードバックによって $D \rightarrow D + \Delta D$ 、 $K \rightarrow K - \Delta K$ 、 $M \rightarrow M + \Delta M$ とするためには、ゲイン k_2 を負の値、ゲイン k_{kl} を正の値、ゲイン k_{ml} を負の値とすればよい。

[0061] 図6の防振台制御系48においては、一例としてゲイン k_1 は0.25に、ゲイン k_2 は-3に、ゲイン k_{kl} を5に固定した。このときに、ゲイン k_{ml} を順次0、-10、-30、-45に設定したときの図6のイナータンス応答の計算結果をそれぞれ図7の曲線64A、64B、64C、64Dに示す。図7において、横軸は周波数 f [Hz]、縦軸はイナータンス(単位力で付勢した場合の加速度の量、即ち $1/\text{質量}$ に対応する量)のゲイン[dB]である。図7より、ゲイン k_{ml} を負の値で小さくするほど、固有振動数が低下して全体として除振率が改善されることが分かる。

[0062] 次に、図3のエアダンパ43の積分特性は、所定の折点周波数 f_c 以下の低周波数域では小さくなるため、実際には完全積分ではない。そこで、以下の第2の構成例では、低周波数域では、そのエアダンパ43内の圧力をフィードバックすることによって積分特性を作り出す。さらに、その前段に構造物16の質量 M を $(M + \Delta M)$ 、エアダンパ43の粘性摩擦係数 D を $(D + \Delta D)$ 、エアダンパ43のばね係数 K を $(K - \Delta K)$ とするフィードバック、及び位置のフィードバックをかけることによって、全体として5重にフィードバックをかけるものとする。

- [0063] 図8は、図3の防振台35中のエアダンパ43用の防振台制御系48内で5重にフィードバックをかける第2の構成例を示し、この図6に対応する部分に同一符号を付して示す図8において、防振台35のブロック図内にはエアダンパ43も示されている。図8において、減算器51(第1フィードバック部)は、構造物16の目標位置 x_0 と位置センサ49で計測される位置 x との差分($x_0 - x$)に対応する信号をゲイン k_1 の可変増幅器52(駆動量制御部)を介して加算器54に入力する。また、加速度センサ40で計測される加速度に対応する信号をDCカットフィルタ56に通して直流成分を除いた信号が、2次バタワースフィルタ57、擬似積分器59、及び擬似微分器61に入力されている。
- [0064] また、2次バタワースフィルタ57の出力信号は正のゲイン k_2 の可変増幅器58(第2フィードバック部)を介して加算器54にフィードバックされ、擬似積分器59の出力信号は負のゲイン k_{k2} の可変増幅器60(第3フィードバック部の出力部)を介して加算器54にフィードバックされ、擬似微分器61の出力信号は2次バタワースフィルタ62、及び正のゲイン k_{m2} の可変増幅器63(第4フィードバック部の出力部)を介して加算器54にフィードバックされる。加算器54は、可変増幅器52, 58, 60, 63の出力信号を加算して得られる信号をPI補償器53を介して減算器65に入力する。なお、図8の加算器54の位置は図6の回路とは異なっているため、図8のゲイン k_2 , k_{k2} , k_{m2} の符号は、図6の対応するゲインの符号とは異なっている。
- [0065] また、図3の圧力センサ28によって計測されているエアダンパ43の内圧に対応する信号が図8の2次バタワースフィルタ67及び正のゲイン k_g の増幅器68(第5フィードバック部)を介して減算器65に供給されている。ここでも、2次バタワースフィルタ67の代わりに、上記の折点周波数 f_c をカットオフ周波数とするローパスフィルタを使用してもよい。減算器65は、PI補償器53の出力から増幅器68の出力を差し引いて得られる信号をPI補償器66を介してドライバ55に入力する。PI補償器66は、PI補償器53と同様の比例及び積分制御を行う回路である。そして、ドライバ55は、入力された信号に基づいて図3のサーボバルブ47内の空気の流量を制御する。
- [0066] 図8の防振台制御系48においては、一例としてゲイン k_1 は0.05に、ゲイン k_2 は0.5に、圧力フィードバックのゲイン k_g は30に、ゲイン k_{k2} は-3.5に固定した。このとき

に、ゲイン k_{m1} を順次0、10、20、25に設定したときの図8のイナータンス応答の計算結果をそれぞれ図9の曲線69A、69B、69C、69Dに示す。図9において、横軸は周波数 f [Hz]、縦軸はイナータンスのゲイン[dB]である。図9より、圧力フィードバックを含む5重のフィードバックによって、図6の回路を用いる場合(図7)に比べて固有振動数を1.4Hz程度から1.3Hz程度までさらに低下させることができ、全体として除振率がさらに改善されることが分かる。

[0067] [第2の実施形態]

次に、本発明の第2の実施形態につき図10～図13を参照して説明する。本例も図2及び図3に示す投影露光装置の能動型の防振台35を用いるものとする。また、本例では、図3のエアダンパ43(気体ダンパ)のみならず、ボイスコイルモータ50(電磁ダンパ)を駆動する場合にも使用できる制御系について説明する。

[0068] 図10は、本例の防振台35の力学モデルを示し、この図10において、設置面15上にばね定数 K 及び粘性摩擦係数 D のダンパ(図3のエアダンパ43に対応する)を介して構造物16が支持されている。また、構造物16に対してアクチュエータ17(図3のエアダンパ43及びボイスコイルモータ50に対応する)によって Z 方向に推力 F が与えられている。この場合、設置面15の Z 方向の位置を x_f 、構造物16の Z 方向の位置を x_p とする。このとき、構造物16の加速度 dx_p^2/dt^2 が加速度センサ40によって計測され、設置面15に対する構造物16の相対的な位置 $x(=x_p - x_f)$ が位置センサ49によって計測されている。なお、加速度センサ40及び位置センサ49からは、それぞれ計測値に対応する電圧等の信号が出力されているものとする。

[0069] また、本例でも構造物16の Z 方向の位置 x が所定の目標値 x_0 になるように推力 F が制御されるが、構造物16の計測される位置としては、単に位置センサ49の計測値を用いるのではなく、加速度センサ40の計測値と位置センサ49の計測値とを処理して得られる位置 x_1 を用いる。即ち、位置センサ49から出力される位置に対応する信号がローパスフィルタ75を介して加算器74に供給され、加速度センサ40から出力される加速度に対応する信号が積分器71(伝達関数が $1/s$)、積分器72、及びハイパスフィルタ73を介して加算器74に供給されている。ハイパスフィルタ73としては、位置精度を高めるために2次のハイパスフィルタを用いることが望ましい。そして、加算器7

4において入力された2つの信号を加算して得られた信号が、構造物16の計測される位置 x_1 に対応する。加速度センサ40、積分器71、72、ハイパスフィルタ73、位置センサ49、ローパスフィルタ75、及び加算器74から、構造物16の加速度及び位置の情報から合成された位置 x_1 の情報を生成するための合成センサ76が構成されている。また、積分器71、72、ハイパスフィルタ73、ローパスフィルタ75、及び加算器74が合成部に対応している。

[0070] 本例の合成センサ76は、例えば上述の第1の実施形態における図8の5重にフィードバックを行う防振台制御系48中の位置センサ49の代わりに使用することができる。本例の合成センサ76を用いることによって、広い周波数域で高精度に構造物16を目標位置に維持することができる。

次に、本例の合成センサ76の計測原理につき図11の評価モデルを参照して説明する。図11は、制御対象及び合成センサの評価モデルを示すブロック図であり、この図11において、上部の制御対象35Aは図10の防振台35に対応し、下部の合成センサ76Aは図10の合成センサ76に対応している。その制御対象35Aの目標位置等の入力を $u(t)$ として、それに対する実際の位置等の出力を $y(t)$ とする。また、 $x(t)$ は制御対象の状態を表している。これに対して、 $y_s(t)$ は合成センサ76Aの出力であり、 $x_s(t)$ は合成センサ76Aの状態(状態推定値)を表す。

[0071] 図11の制御対象35Aにおいて、入力 $u(t)$ はゲインBの増幅器95を介して加算器96に入力され、加算器96には状態 $x(t)$ もゲインAの増幅器99を介して入力されている。そして、加算器96の出力($Ax(t) + Bu(t)$)を積分器97で積分した結果が状態 $x(t)$ となり、状態 $x(t)$ に増幅器98でゲインCを乗じて出力 $y(t)$ が得られている。その出力 $y(t)$ 及び合成センサ76Aの出力 $y_s(t)$ は減算器100に供給され、減算器100で求められた差分($=y(t) - y_s(t)$)がゲインLの増幅器101を介して合成センサ76Aの加算器96Aに入力されている。

[0072] そして、合成センサ76Aにおいて、入力 $u(t)$ がゲインBの増幅器95Aを介して加算器96Aに供給され、加算器96Aには状態 $x_s(t)$ もゲインAの増幅器99Aを介して供給されている。加算器96Aから出力される増幅器95A、99A、101の出力の和を積分器97Aで積分して得られる状態 $x_s(t)$ が、ゲインCの増幅器98Aを介して出力 y

s(t)として減算器100に入力されている。

[0073] 一般的に、線形時不変の制御対象35Aを状態空間表現すると、以下のようになる。

$$dx(t)/dt = Ax(t) + Bu(t)$$

$$y(t) = Cx(t) + Du(t) \quad \cdots (3-1)$$

(3-1)式において、直達項のないD=0の場合を考える。これに対して、合成センサ76Aを状態空間表現すると、以下のようになる。

$$[0074] \quad dx_s(t)/dt = (A-LC)x_s(t) + Bu(t) + Ly(t)$$

$$y_s(t) = Cx_s(t) \quad \cdots (3-2)$$

ここで、状態推定誤差を以下のように定義すると、(3-1)式及び(3-2)式から以下が成立する。

$$e(t) = x_s(t) - x(t)$$

$$de(t)/dt = (A-LC)e(t) \quad \cdots (3-3)$$

よって、(3-3)式より行列(A-LC)の固有値が任意に設定できるならば、時間tを大きくしたときに誤差e(t)は0に収束する。これは、(C, A)が可観測である場合に可能となる。

[0075] 上記の図11の合成センサ76Aを図10の加速度センサ40及び位置センサ49を用いて構成する場合に、(3-1)式を以下のように考える。

$$[0076] \quad \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} v(t) \\ p(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v(t) \\ p(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} u(t)$$

$$y(t) = \begin{bmatrix} 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v(t) \\ p(t) \end{bmatrix} \quad \cdots (3-4)$$

[0077] ここで、v(t)は図10の構造物16の速度、p(t)は構造物16の実際の位置、u(t)は加速度センサ40の出力、y(t)は位置センサ49の出力とする。また、図11のフィードバックゲインを $L = \begin{bmatrix} l_1 & l_2 \end{bmatrix}^T$ とする。さらに、(3-2)式をラプラス変換すると、以下の結果を得る。なお、 $x_s(t)$ 、 $u(t)$ 、 $y(t)$ のラプラス変換をそれぞれ $X_s(s)$ 、 $U(s)$ 、 $Y(s)$ とする。

$$[0078] \quad X_s(s) = (sI - A + LC)^{-1} (BU(s) + LY(s)) \quad \cdots (3-5)$$

(3-5)式に行列を代入して計算すると以下のようになる。なお、 $v_s(t)$ 及び $p_s(t)$ は

それぞれ構造物16の速度 $v(t)$ 及び位置 $p(t)$ の推定値である。

[0079]

$$\begin{bmatrix} \dot{v}(t) \\ p(t) \end{bmatrix} = \frac{1}{s^2 + l_2 s + l_1} \begin{bmatrix} s + l_2 \\ 1 \end{bmatrix} u(t) + \frac{1}{s^2 + l_2 s + l_1} \begin{bmatrix} l_1 s \\ l_2 s + l_1 \end{bmatrix} y(t) \dots\dots (3-6)$$

$$\therefore p(t) = \frac{1}{s^2 + l_2 s + l_1} u(t) + \frac{l_2 s + l_1}{s^2 + l_2 s + l_1} y(t) \dots\dots (3-7)$$

[0080] (3-7)式の第1項は、以下のように変形することにより、物理的な意味が理解できる

。

[0081]

$$\frac{1}{s^2 + l_2 s + l_1} = \frac{s}{s + f_1} \cdot \frac{s}{s + f_2} \cdot \frac{1}{s} \cdot \frac{1}{s} \dots\dots (3-8)$$

[0082] (3-8)式より、(3-7)式の第1項は2つのハイパスフィルタ(HPF)と2つの積分器とから構成されていると考えることができる。(3-8)式の周波数 f_1, f_2 はその2つのハイパスフィルタのカットオフ周波数を表しており、これを決定すると(3-8)式よりフィードバックゲイン l_1, l_2 が決定される。このとき、加速度センサ40の信号を2回積分することにより構造物16の位置が算出され、その位置をさらに2次のハイパスフィルタを通して低周波数成分がカットされる。(3-7)式の第2項はローパスフィルタであるため、位置センサ49の信号の高周波数域がカットされる。これらの2つの信号の和が図10の構造物16の位置推定値となる。従って、図10の合成センサ76によって、構造物16の位置が高精度に推定できることが理解できる。

[0083] この場合、図10のハイパスフィルタ73のカットオフ周波数とローパスフィルタ75のカットオフ周波数とは等しいことが望ましい。これによって、合成センサ76を用いて広い周波数域で構造物16の位置を高精度に計測できる。合成センサ76は、加速度センサ40で構造物16の慣性系の空間位置を検出するとともに、位置センサ49により低周波域での床FLと構造物16との相対位置を計測することができる。このため、合成センサ76の出力値に基づいてエアマウント43の内圧を制御することにより、慣性系の空間位置における構造物16の位置決めと、低周波域での床FLと構造物16との相対位置決めとを行うことができる。

[0084] また、図10における構造物16に対する除振率は、図4と同様に(1)式で表すことができる。(1)式の除振率を計算した結果を図12に示す。図12において、横軸は周波

数 f (Hz)であり、縦軸はゲイン(dB)及び位相(deg)である。(1)式の除振性能を向上させるために、第1の方法として、(1)式の分子の特性を変えずに分母の各要素(質量 M 、粘性摩擦係数 D 、ばね定数 K)を大きくするように図10の推力 F を加えればよい。これは、図10の構造物16の加速度 dx^2/dt^2 、速度 dx/dt 、及び位置 x をフィードバックすることで実現できる。

- [0085] 同様に、第2の方法として、(1)式分母の特性を変化させることなく、分子の各要素(D , K)を小さくするように推力 F を加えてもよい。これを実現するためには、図10の設置面15の速度及び位置の情報を計測してフィードバックすればよい。

また、第3の方法として、(1)式分母及び分子中のばね係数 K (図3のエアダンパ43の剛性)を小さくすることにより、見かけ上のエアダンパ43の共振周波数を低くすることが可能である。そこで、図10において、そのように推力 F を加えることで、除振性能を向上させることができる。以下、図10の防振台35に対する合成センサ76を用いた制御系の構成例を図13を参照して説明する。

- [0086] 図13は、図10の防振台35の制御系を示し、この図13において、防振台35の位置及び加速度の情報がそれぞれ位置センサ49及び加速度センサ40で計測されている。そして、図10と同様に、位置センサ49の出力をローパスフィルタ75を通して得られる信号と、加速度センサ40の出力を2つの積分器71, 72及びハイパスフィルタ73を通して得られる信号とを加算器74で合成することで、構造物16の位置 x_1 に対応する信号が生成されている。即ち、図13の制御系には図10の合成センサ76が組み込まれている。

- [0087] 図13において、構造物16の目標位置 x_0 に対応する信号と、構造物16の合成された位置 x_1 に対応する信号とが減算器51(フィードバック部)に入力されており、減算器51はそれらの差分($x_0 - x_1$)に対応する信号をPI補償器77(駆動量制御部)に供給する。PI補償器77は、比例制御及び積分制御を行って得られる出力を減算器78に入力する。なお、PI補償器77はローパスフィルタを含んでもよい。減算器78には、加速度センサ40の出力を、積分器とハイパスフィルタとを縦続接続してなる積分器93に通して得られる信号も入力されている。減算器78は、PI補償器77の出力から積分器93の出力を減算して得られる信号を2次バターワースフィルタ79を介して加減算

器80に入力する。なお、所定帯域でほぼ平坦なゲインを持つ2次バタワースフィルタ79の代わりに、PI補償器77と同様のPI補償器、増幅器、又はローパスフィルタを使用することもできる。

[0088] 加減算器80には、位置センサ49の出力をローパスフィルタ83及びゲインGp1の増幅器に通して得られる信号も入力されている。さらに、加速度センサ40の出力を、2つの積分器とハイパスフィルタとからなる積分器91とゲインGk1の増幅器92とを通して得られる信号が加算器90に入力され、加速度センサ40の出力を、ノッチフィルタ86、ローパスフィルタ87、ハイパスフィルタ88、及びゲインGm1の増幅器89に通して得られる信号も加算器90に入力されている。加算器90は増幅器89及び92の出力を加算して得られる信号を加減算器80に入力する。加減算器80では、増幅器84の出力と2次バタワースフィルタ79の出力との和から加算器90の出力を減算して得られる信号を加算器81に入力する。

[0089] 本例の防振台35は図2に示すように走査型露光装置のレチクルステージRSTを支持するコラム構造体CLを支持するものであり、走査露光時のレチクルステージRSTの移動開始時及び停止直前には、レチクルステージRSTの加速度と逆向きの反力(カウンタフォース)によってコラム構造体CLは振動する恐れがある。そこで、図13の制御系中には、そのレチクルステージRSTの予測される反力に対応する信号を生成するスキャンカウンタ85が配置され、スキャンカウンタ85で生成される反力に対応する信号が加算器81に供給されている。加算器81は、加減算器80の出力とスキャンカウンタ85の出力とを加算した信号を所定ゲインのドライバ82に入力する。ドライバ82は、加算器81の出力に応じた推力Fが得られるように、図10中の防振台35のアクチュエータ17(ここでは図3のボイスコイルモータ50)を駆動する。なお、ボイスコイルモータ50の駆動と並行して、エアダンパ43の内圧を制御してもよい。

[0090] 本例において、位置フィードバック用の減算器51において目標位置 x_0 と比較される信号は、図10の合成センサ76によって得られた構造物16の位置 x_1 である。従って、広い周波数域に亘って構造物16の実際の位置を高精度に計測しているため、除振率を改善することができ除振性能が向上する。また、図13の制御系では、加速度センサ40の出力である加速度の情報(増幅器89の出力)、その加速度を2回積分

した位置の情報(増幅器92の出力)、及びその加速度を積分した速度の情報(積分器93の出力)がフィードバックされているため、(1)式の分子の特性を変えずに分母の各要素(質量M、粘性摩擦係数D、ばね定数K)を大きくするように図10の推力Fが制御される。従って、除振率がさらに改善される。また、スキャンカウンタ85を設けて、レチクルステージRSTの反力の影響を相殺するようにフィードフォワードによって推力Fを制御しているため、走査露光時の除振性能がさらに改善されている。

[0091] [第3の実施形態]

次に、本発明の第3の実施形態につき図14～図16を参照して説明する。本例も図2及び図3に示す投影露光装置の能動型の防振台35を用いるものとする。また、本例では、図3のエアダンパ43(気体ダンパ)を理想積分器とみなして、エアダンパ43の内圧を制御する制御系について説明する。

[0092] 図14は、本例の第1の制御系のブロック図を示し、この図14において、エアダンパ43は積分ゲインが A_{air} の積分器(伝達関数が A_{air}/s)として表されている。また、図14の制御対象102は、エアダンパ43の力学モデル(図4の力学モデルに対応する)から得られる伝達関数を持っている。制御対象102内の伝達関数の係数 m , c , k はそれぞれ構造物16(図4参照)の質量、エアダンパ43の粘性摩擦係数、及びエアダンパ43のばね定数を表している。従って、エアダンパ43及び制御対象102から構成される防振台103が、図3の防振台35からボイスコイルモータ50を除いた部分に対応している。また、制御対象102の出力である構造物16の位置 x_1 は、例えば図3の位置センサ49で計測される位置を表している。なお、その位置 x_1 は、図10の合成センサ76によって計測される位置でもよい。

[0093] 図14において、構造物の目標位置 x_0 に対応する信号と、構造物の計測された位置 x_1 から得られる位置 y に対応する信号とが減算器104(フィードバック部)に入力されており、減算器104はそれらの差分($x_0 - y$)に対応する信号をゲイン K_p の増幅器105(駆動量制御部)に供給する。そして、増幅器105の出力によってエアダンパ43の駆動部としてのサーボバルブ47(図3参照)内の空気の流量を制御することによって、位置の差分($x_0 - y$)が0になるようにエアダンパ43の内圧が制御される。

[0094] この際に、増幅器105の出力が並列補償器107を介して加算器106にフィードフォ

ワードされている。並列補償器107は、防振台103に対して並列に配置された伝達関数 $G(s)$ のフィルタであり、その伝達関数 $G(s)$ は増幅器105の出力を安定化するように設定される。図14の並列補償器107は、「並列フィードフォワード補償器」とも呼ぶことができる。加算器106には構造物の計測された位置 x_1 の信号も入力されており、加算器106で位置 x_1 の信号と並列補償器107の出力とを加算した位置 y の信号が減算器104にフィードバックされている。

- [0095] 図14の制御系によれば、増幅器105のゲイン K_p を増加させることによって、目標位置 x_0 に対する構造物の計測される位置 x_1 の誤差を小さくすることができ、除振性能が向上する。この際に、並列補償器107が設けられているため、増幅器105のゲイン K_p を増加させても、その出力が不安定状態になることが防止される。

次に、図14の制御系を等価的に変換して、直列補償器を持つように構成した制御系につき図15を参照して説明する。

- [0096] 図15は、本例の第2の制御系のブロック図を示し、この図14に対応する部分に同一符号を付して示す図15において、制御対象102の出力である図4の構造物16の位置 x_1 は、例えば図3の位置センサ49又は図10の合成センサ76によって計測される。

図15において、構造物の目標位置 x_0 に対応する信号と、構造物の計測された位置 x_1 とが減算器104(フィードバック部)に入力されており、減算器104はそれらの差分 $(x_0 - x_1)$ に対応する信号が減算器108に入力する。減算器108の出力がゲイン K_p の増幅器105(駆動量制御部)に入力され、増幅器105の出力は、伝達関数 $G(s)$ の並列補償器107を介して減算器108にフィードバックされており、減算器108は、減算器104の出力から並列補償器107の出力を減算して得られる信号を増幅器105に入力している。そして、増幅器105の出力によってエアダンパ43の駆動部としてのサーボバルブ47(図3参照)内の空気の流量を制御することによって、位置の差分 $(x_0 - x_1)$ が0になるようにエアダンパ43の内圧が制御される。

- [0097] この図15の制御系は図14の制御系を等価的に変換したものである。そして、図15において、減算器108、増幅器105、及び並列補償器107からなる回路は、伝達関数 $C(s)$ の直列補償器109という一つの制御器とみなすことができる。その伝達関数

C(s)は次式となる。

[0098]

$$C(s) = K_p \cdot \frac{\left(s^2 + \frac{c}{m}s + \frac{k}{m}\right)}{s^2 + \left(\frac{c}{m} + \frac{K_p A_{air} T_o^2}{m}\right)s + \left(\frac{k}{m} + \frac{2K_p A_{air} \zeta_o T_o}{m}\right)} \dots\dots (3)$$

[0099] この(3)式において、係数 T_o 及び ζ_o は分子と分母との相違に応じて定められる。本発明者が(3)式の伝達関数C(s)について数値例を用いて計算した結果、図15の制御対象102の共振ピークを伝達関数C(s)の分子多項式によって打ち消すことによって、全体としての共振ピークが高周波帯域に移動することが分かった。しかしながら、直列補償器109の付加によって直流ゲインも減少してしまう。そこで、直列補償器109の直流ゲインを回復させるものとする。

[0100] その直列補償器109の設計例を示すために、(3)式の伝達関数C(s)を次のようにまとめる。

[0101]

$$K_p \cdot \frac{s^2 + 2\zeta_n \omega_n s + \omega_n^2}{s^2 + 2\zeta_d \omega_d s + \omega_d^2} \dots\dots (4)$$

[0102] ここで、分子多項式の ω_n は固有角周波数、 ζ_n はダンピング係数であり、これらは制御対象の特性を示すパラメータである。分母多項式の ω_d は分子多項式の ω_n より大きく設計する必要がある。同様に、分母多項式の ω_d 及び ζ_d を含む s^1 項の係数も、分子多項式のそれより大きく設定する必要がある。つまり、分子多項式は、制御対象のパラメータ同定から設定され、分母多項式の各係数は設計者が定めるパラメータとなる。以上より、(4)式の伝達関数が次式となるように直列補償器109を設計した。

[0103]

$$\frac{s^2 + 2.27635407s + 171.4691787}{s^2 + 15.07964474s + 631.6546817} \dots\dots (5)$$

[0104] 直列補償器109はアナログ回路でもよいが、例えばDSP(デジタルシグナルプロセッサ)を用いたデジタル制御で実現してもよい。

さらに、(5)式に $s=0$ を代入すると、次のようになる。

$$20\log 0.27146 = -11.33[\text{dB}] \quad \dots(6)$$

そのため、直流ゲインを $0[\text{dB}]$ まで回復させるためには、次のようになる。

[0105] $1/0.27146 = 3.68 \quad \dots(7)$

そこで、図15において、直列補償器109の伝達関数 $C(s)$ を(5)式のように設定するとともに、直列補償器109の入力側に直列にゲインが3.68の増幅器を付加した。

図16は、図15の直列補償器109の作用を示す実験結果を示し、図16において横軸は時間 $t[\text{s}]$ であり、縦軸は図15の制御対象102に関して計測される位置を図3の位置センサ49の検出信号(電圧) $[\text{V}]$ で表したものである。図16において、期間 $T1$ は図15の直列補償器109を外して(短絡させて)発振が生じている期間を示し、期間 $T2$ は直列補償器109及び増幅器を動作させて発振が抑制された期間を示している。これによって、直列補償器109によって発振が抑制されて、安定に除振を行うことができることが分かる。また、図15の制御系では、図14の制御系に比べて制御対象102の位置 x_1 の情報が直接に減算器104にフィードバックされているため、制御対象102をより高精度に目標位置に制御することができる。

[0106] なお、上述の実施形態の投影露光装置は、防振台35, 41を介してコラム構造体CL等を設置した後、複数のレンズから構成される照明光学系、投影光学系を露光装置本体に組み込み光学調整をして、多数の機械部品からなるレチクルステージやウエハステージを露光装置本体に取り付けて配線や配管を接続し、総合調整(電気調整、動作確認等)をすることにより製造することができる。なお、その露光装置の製造は温度及びクリーン度等が管理されたクリーンルームで行うことが望ましい。

[0107] また、上記の実施形態の投影露光装置を用いて半導体デバイスを製造する場合、この半導体デバイスは、デバイスの機能・性能設計を行うステップ、このステップに基づいてレチクルを製造するステップ、シリコン材料からウエハを形成するステップ、上記の実施形態の投影露光装置によりアライメントを行ってレチクルのパターンをウエハに露光するステップ、エッチング等の回路パターンを形成するステップ、デバイス組み立てステップ(ダイシング工程、ボンディング工程、パッケージ工程を含む)、及び検査ステップ等を経て製造される。

[0108] なお、本発明は、例えば国際公開(WO)第99/49504号などに開示される液浸型露光装置で能動的に防振を行う場合にも適用することができる。また、本発明は、波長数nm〜100nm程度の極端紫外光(EUV光)を露光ビームとして用いる投影露光装置、及び投影光学系を使用しないプロキシミティ方式やコンタクト方式の露光装置等で防振を行う際にも適用できる。

[0109] また、本発明は、半導体デバイス製造用の露光装置への適用に限定されることなく、例えば、角型のガラスプレートに形成される液晶表示素子、若しくはプラズマディスプレイ等のディスプレイ装置用の露光装置や、撮像素子(CCD等)、マイクロマシン、薄膜磁気ヘッド、及びDNAチップ等の各種デバイスを製造するための露光装置にも広く適用できる。更に、本発明は、各種デバイスのマスクパターンが形成されたマスク(フォトマスク、レチクル等)をフォトリソグラフィ工程を用いて製造する際の、露光工程(露光装置)にも適用することができる。

[0110] さらに本発明は、露光装置以外の機器、例えば欠陥検査装置、感光材料のコータ・デベロッパ等の防振を行う場合にも適用することができる。

なお、本発明は上述の実施形態に限定されず、本発明の要旨を逸脱しない範囲で種々の構成を取り得ることは勿論である。

産業上の利用可能性

[0111] 本発明を露光装置に適用した場合には、設置面に対する露光装置の除振性能を向上させることができるため、重ね合わせ精度等の露光精度を向上できる。また、走査型露光装置の場合には、振動を抑制した状態で走査速度を向上できるため、スループットを向上できる。

請求の範囲

- [1] 内部に気体が供給されて設置面上に構造物を支持する気体ダンパと、前記気体ダンパ内の気体の圧力を制御する駆動部とを有する防振装置において、
前記構造物の位置情報を計測する第1センサと、
前記構造物の目標位置の情報から前記第1センサで計測される前記構造物の位置情報を減算して差分情報を生成する第1フィードバック部と、
前記第1フィードバック部の前記差分情報に基づいて前記駆動部の駆動情報を生成する駆動量制御部と、
前記気体ダンパの積分特性を用いて、前記気体ダンパと前記構造物とを含む系の固有振動数を制御するための情報を前記駆動部にフィードバックする特性制御部とを有することを特徴とする防振装置。
- [2] 前記特性制御部は、前記気体ダンパの粘性摩擦係数に対応する情報、前記気体ダンパのばね定数に対応する情報、及び前記構造物の質量に対応する情報のうちの少なくとも一つを前記駆動部にフィードバックすることを特徴とする請求項1に記載の防振装置。
- [3] 前記特性制御部は、
前記構造物の加速度情報を計測する第2センサと、
前記第2センサで計測される加速度情報に所定係数を乗じて得られる前記気体ダンパの粘性摩擦係数に対応する情報を前記駆動部にフィードバックする第2フィードバック部と、
前記第2センサで計測される加速度情報を実質的に積分した情報に所定係数を乗じて得られる前記気体ダンパのばね定数に対応する情報を前記駆動部にフィードバックする第3フィードバック部と、
前記第2センサで計測される加速度情報を実質的に微分した情報に所定係数を乗じて得られる前記構造物の質量に対応する情報を前記駆動部にフィードバックする第4フィードバック部とを有することを特徴とする請求項1又は2に記載の防振装置。
- [4] 前記気体ダンパ内の前記気体の圧力変動のうちの低周波数成分に対応する情報を前記駆動部にフィードバックする第5フィードバック部をさらに有することを特徴とす

る請求項1から3のいずれか一項に記載の防振装置。

- [5] 前記第1センサは、加速度センサと、該加速度センサで計測される加速度情報を2回積分する積分器とを含むことを特徴とする請求項1から4のいずれか一項に記載の防振装置。
- [6] 前記設置面と前記構造物との間に前記気体ダンパと並列に、前記構造物の変位に応じて電磁力で付勢力を与える電磁ダンパを配置したことを特徴とする請求項1から5のいずれか一項に記載の防振装置。
- [7] 設置面上に構造物を支持するダンパと、前記ダンパの付勢力を制御する駆動部とを有する防振装置において、
前記構造物の位置情報を計測する第1センサと、
前記構造物の加速度情報を計測する第2センサと、
前記第1センサで計測される位置情報の低周波数成分と、前記第2センサで計測される加速度情報を2回積分して得られる位置情報の高周波数成分とを加算して前記構造物の位置情報を求める合成部と、
前記構造物の目標位置の情報から前記合成部で求められる前記構造物の位置情報を減算して差分情報を生成するフィードバック部と、
前記フィードバック部の前記差分情報に基づいて前記駆動部の駆動情報を生成する駆動量制御部とを有することを特徴とする防振装置。
- [8] 前記位置情報の低周波数成分を求める際のカットオフ周波数と、前記位置情報の高周波数成分を求める際のカットオフ周波数とは実質的に等しいことを特徴とする請求項7に記載の防振装置。
- [9] 前記ダンパは、内部に気体が供給される気体ダンパであることを特徴とする請求項7又は8に記載の防振装置。
- [10] 前記気体ダンパの積分特性を用いて、前記気体ダンパと前記構造物とを含む系の固有振動数を制御するように、前記気体ダンパの粘性摩擦係数、前記気体ダンパのばね定数、及び前記構造物の質量に対応する情報をそれぞれ前記駆動部にフィードバックする特性制御部をさらに有することを特徴とする請求項9に記載の防振装置。

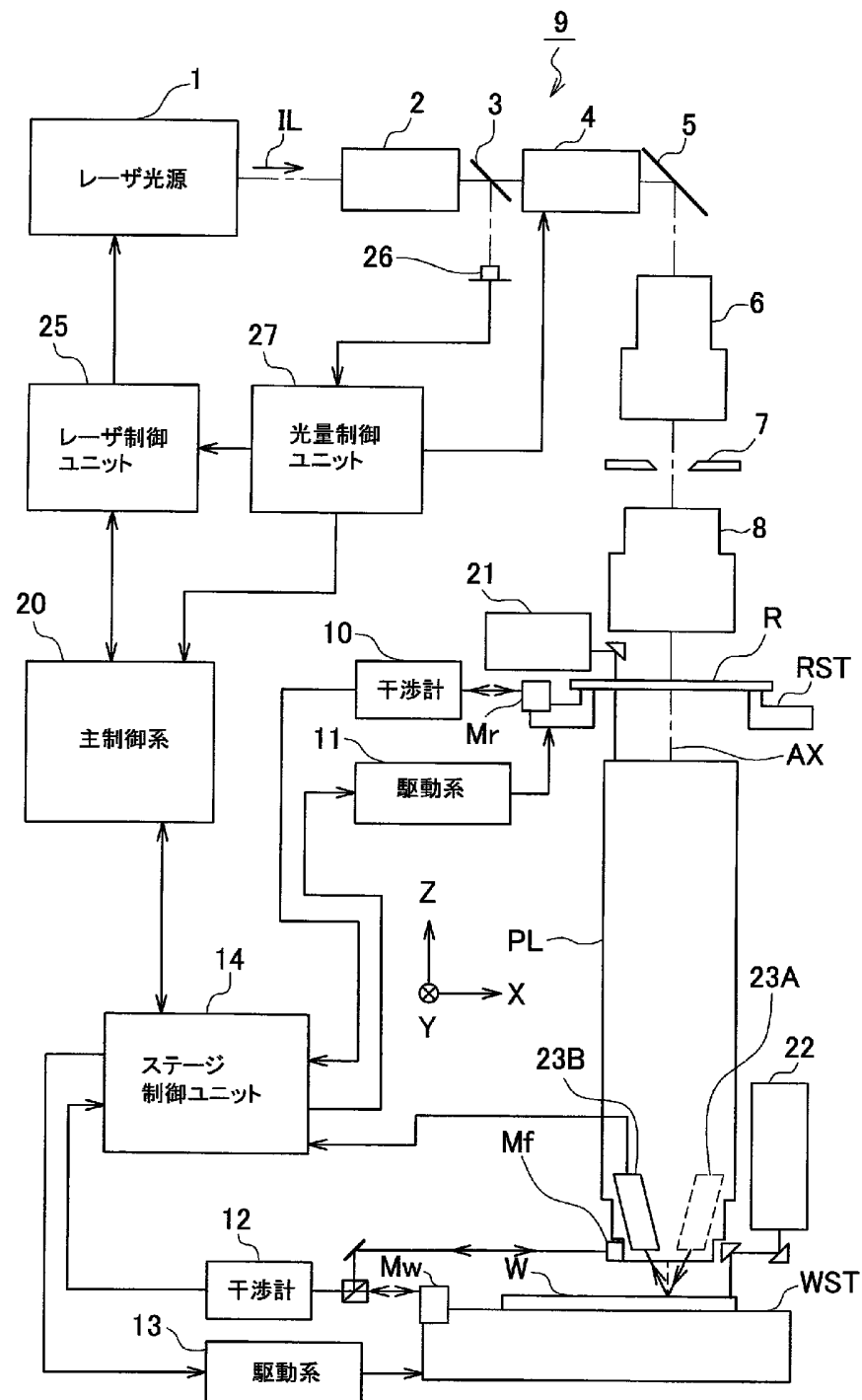
- [11] 前記ダンパは、電磁力で付勢力を発生する電磁ダンパであることを特徴とする請求項7又は8に記載の防振装置。
- [12] 内部に気体が供給されて設置面上に構造物を支持する気体ダンパと、前記気体ダンパ内の気体の圧力を制御する駆動部とを有する防振装置において、
前記構造物の位置情報を計測する第1センサと、
前記構造物の目標位置の情報から前記第1センサで計測される前記構造物の位置情報を減算して差分情報を生成するフィードバック部と、
前記フィードバック部の前記差分情報に基づいて前記駆動部の駆動情報を生成する駆動量制御部と、
前記フィードバック部の前記差分情報を前記構造物の位置情報にフィードフォワードする補償部とを有することを特徴とする防振装置。
- [13] 内部に気体が供給されて設置面上に構造物を支持する気体ダンパと、前記気体ダンパ内の気体の圧力を制御する駆動部とを有する防振装置において、
前記構造物の位置情報を計測する第1センサと、
前記構造物の目標位置の情報から前記第1センサで計測される前記構造物の位置情報を減算して差分情報を生成するフィードバック部と、
前記フィードバック部の前記差分情報に基づいて前記駆動部の駆動情報を生成する駆動量制御部と、
前記駆動量制御部の駆動情報を前記差分情報にフィードバックする補償部とを有することを特徴とする防振装置。
- [14] 前記駆動量制御部と前記補償部とを含む直列補償部の伝達関数は、ラプラス変換で用いる変数 s に関して分母及び分子がそれぞれ2次の関数で表されることを特徴とする請求項13に記載の防振装置。
- [15] 前記駆動量制御部と前記補償部とを含む直列補償部は、前記補償部がないときの共振ピークを高周波数側に移動することを特徴とする請求項12から14のいずれか一項に記載の防振装置。
- [16] 第1ステージに保持された第1物体を露光ビームで照明し、前記露光ビームで前記第1物体を介して第2ステージに保持された第2物体を露光する露光装置において、

前記第1ステージ及び前記第2ステージのうちの少なくとも一方を請求項1から15のいずれか一項に記載の防振装置を介して支持することを特徴とする露光装置。

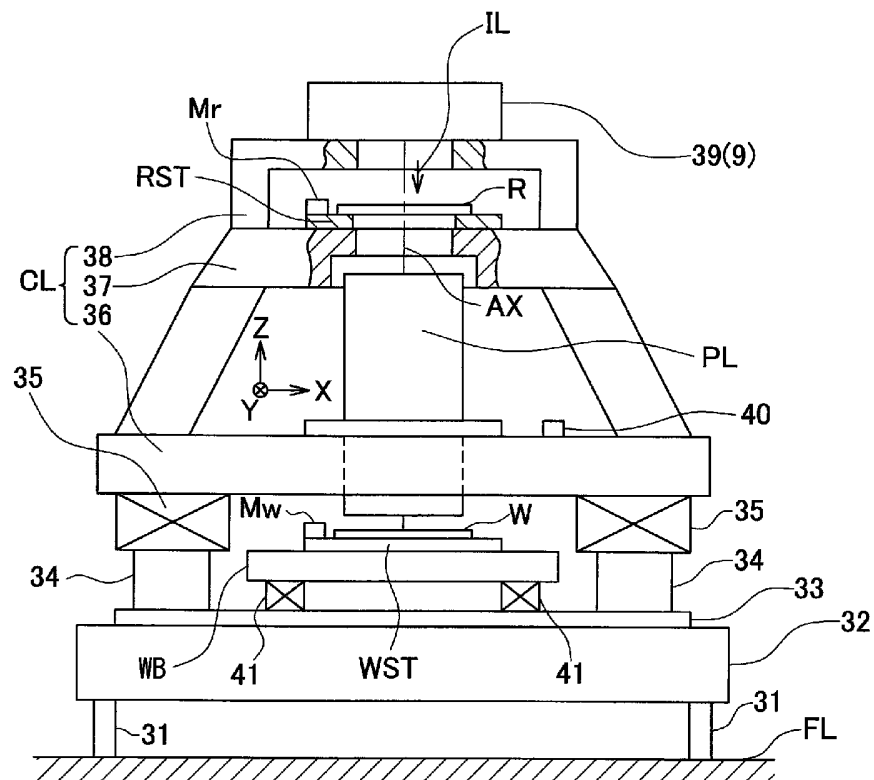
- [17] 前記第1物体のパターンの像を前記第2物体上に投影する投影光学系と、
前記投影光学系と前記第1ステージとを保持するコラム構造体とをさらに備え、
前記コラム構造体を請求項1から15のいずれか一項に記載の防振装置を介して支持することを特徴とする請求項16に記載の露光装置。
- [18] 前記防振装置は、前記第2ステージ又は前記コラム構造体を支持するためにそれぞれ3個以上用いられることを特徴とする請求項17に記載の露光装置。
- [19] 内部に気体が供給されて設置面上に構造物を支持する気体ダンパ内の気体の圧力を制御する防振方法において、
前記構造物の位置情報を計測する工程と、
前記構造物の目標位置の情報から前記工程で計測された前記構造物の位置情報を減算して差分情報を生成する工程と、
前記工程で生成された前記差分情報に基づいて、前記気体ダンパの積分特性を用いて、前記気体ダンパと前記構造物とを含む系の固有振動数を制御するための情報をフィードバックして、前記気体ダンパ内の気体の圧力を制御する工程とを有することを特徴とする防振方法。
- [20] 設置面上に構造物を支持する前記ダンパの付勢力を制御する防振方法において、
、
前記構造物の位置情報及び加速度情報を計測する工程と、
前記工程で計測される位置情報の低周波数成分と、前記工程で計測される加速度情報を2回積分して得られる位置情報の高周波数成分とを加算して前記構造物の位置情報を求める工程と、
前記構造物の目標位置の情報から前記加算によって求められる前記構造物の位置情報を減算して差分情報を生成する工程と、
前記工程で生成される前記差分情報に基づいて前記ダンパを駆動する工程とを有することを特徴とする防振方法。
- [21] 内部に気体が供給されて設置面上に構造物を支持する気体ダンパ内の気体の圧

力を制御する防振方法において、
前記構造物の位置情報を計測する工程と、
前記構造物の目標位置の情報から前記工程で計測される前記構造物の位置情報を減算して差分情報を生成する工程と、
前記工程で生成された前記差分情報を前記構造物の位置情報にフィードフォワードして、前記気体ダンパ内の気体の圧力を制御する工程とを有することを特徴とする防振方法。

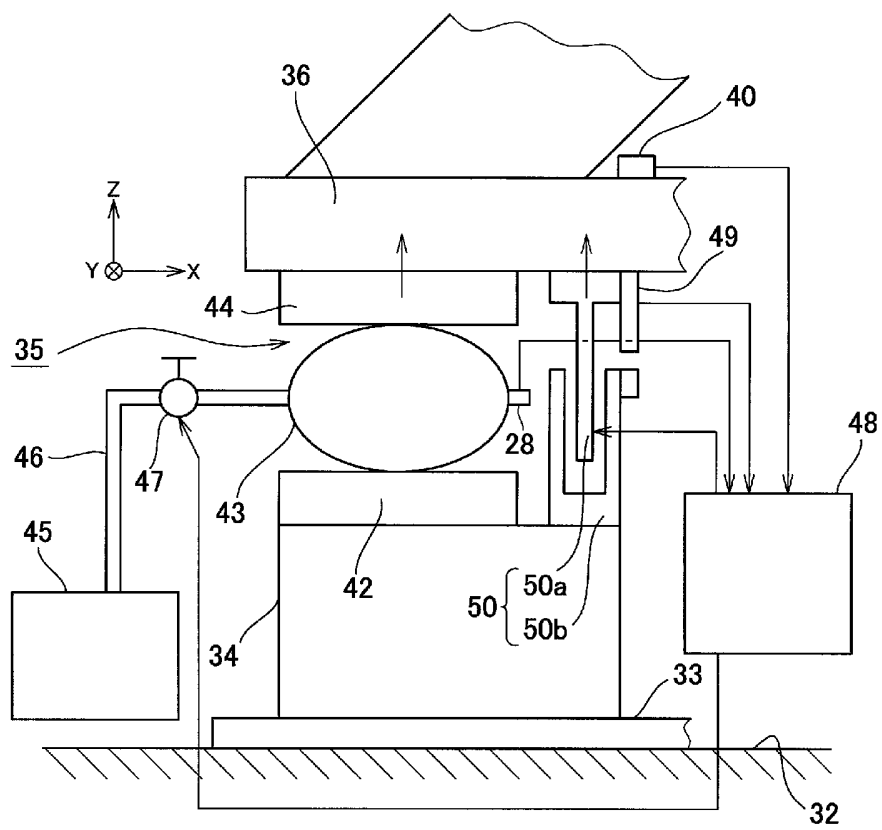
[図1]



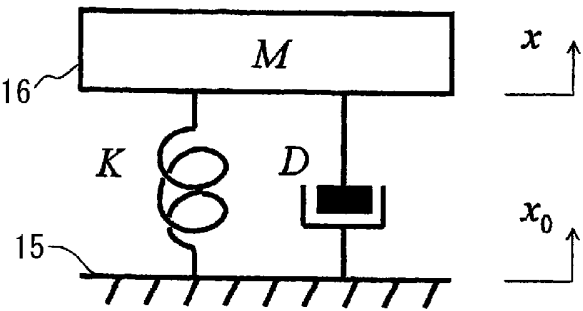
[図2]



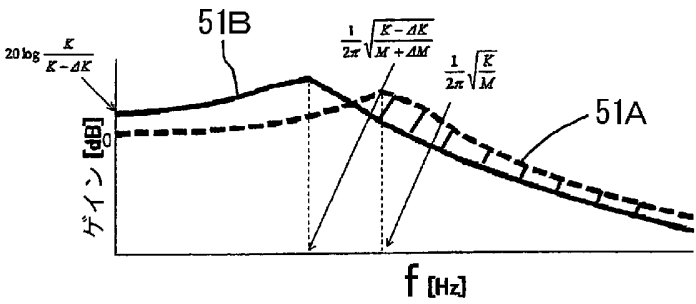
[図3]



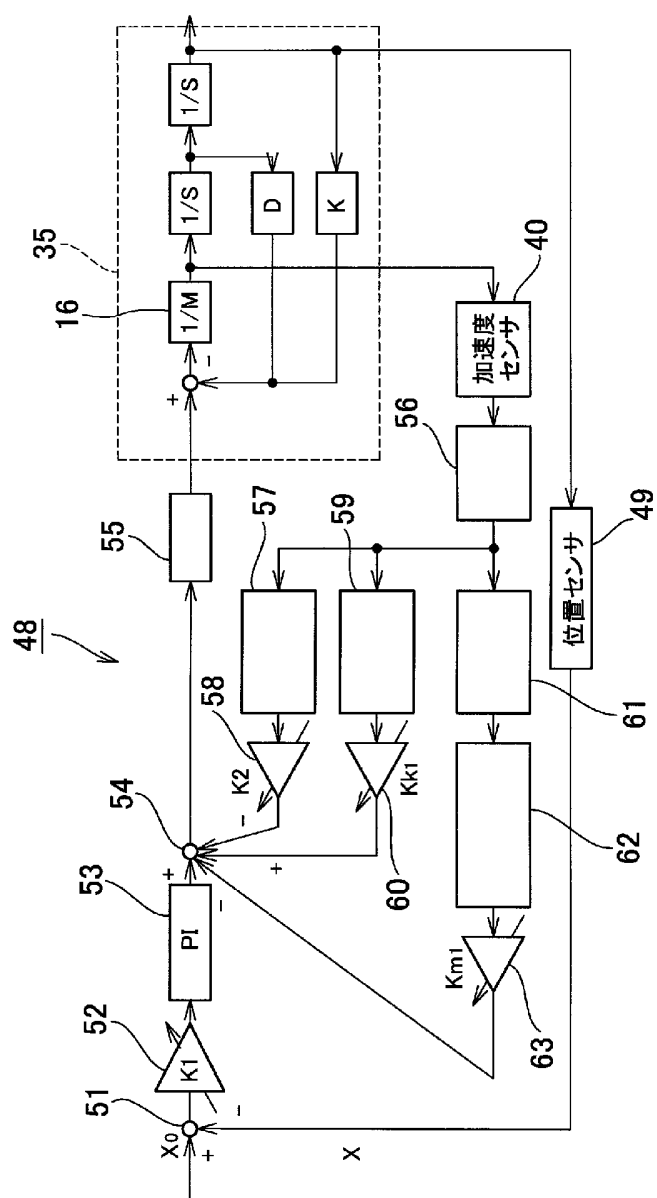
[図4]



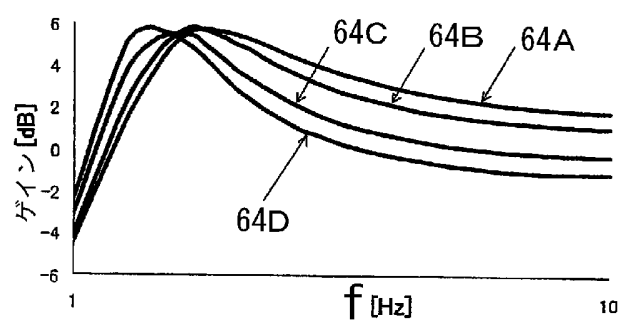
[図5]



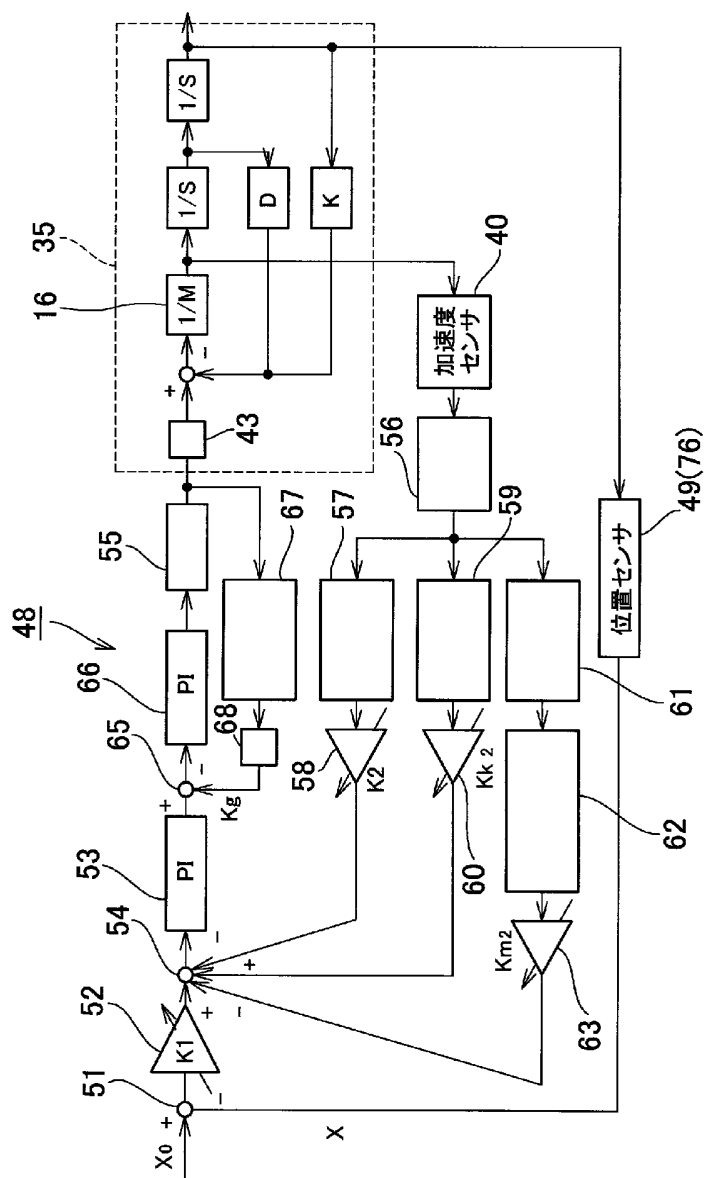
[図6]



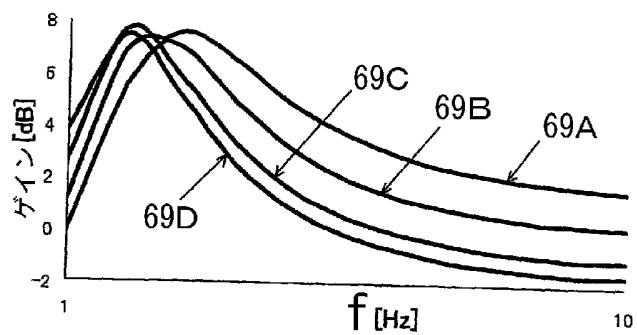
[図7]



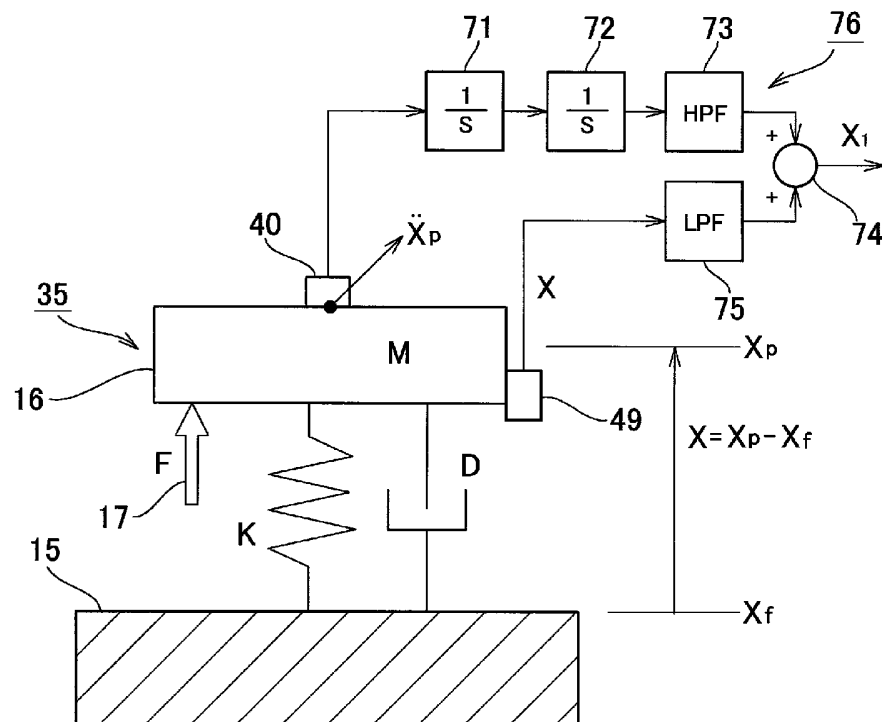
[図8]



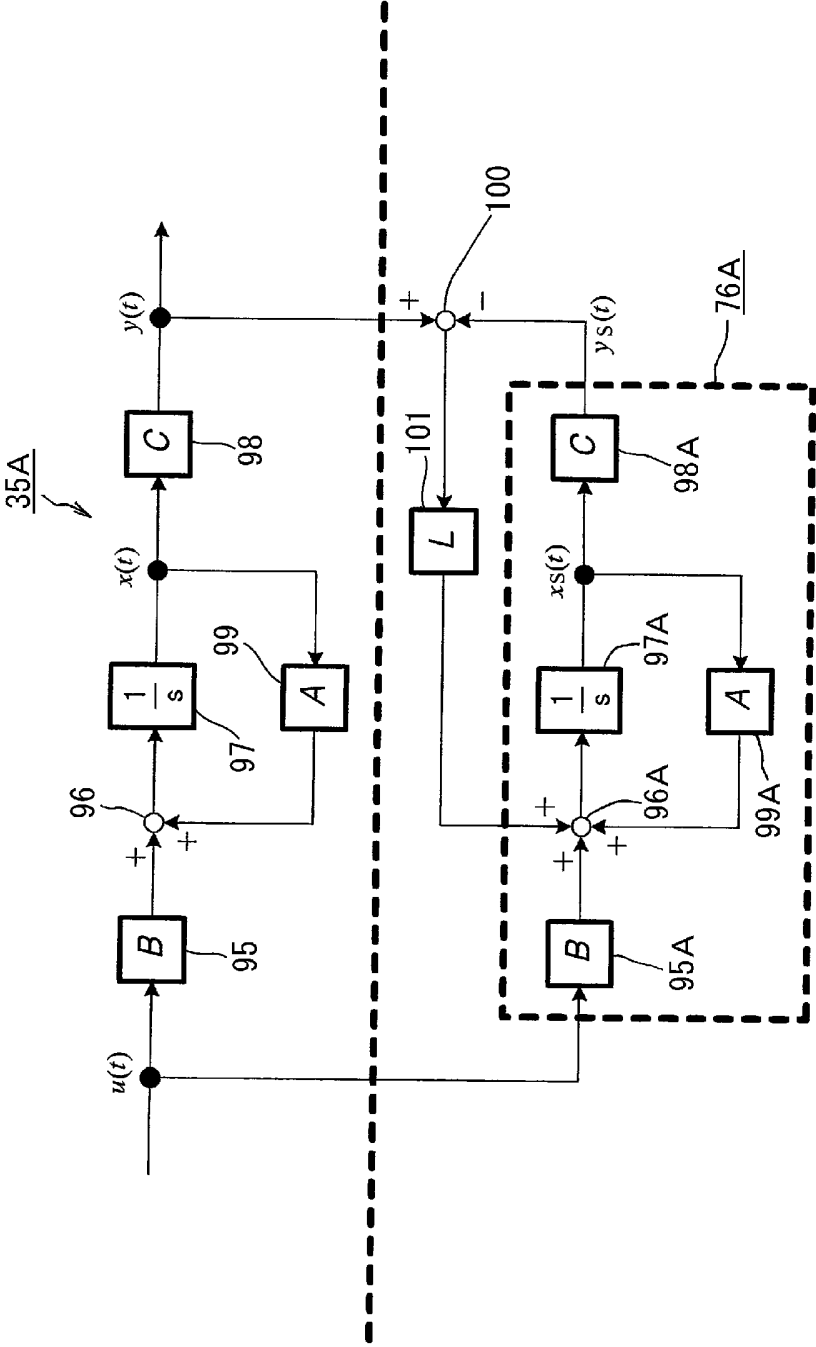
[図9]



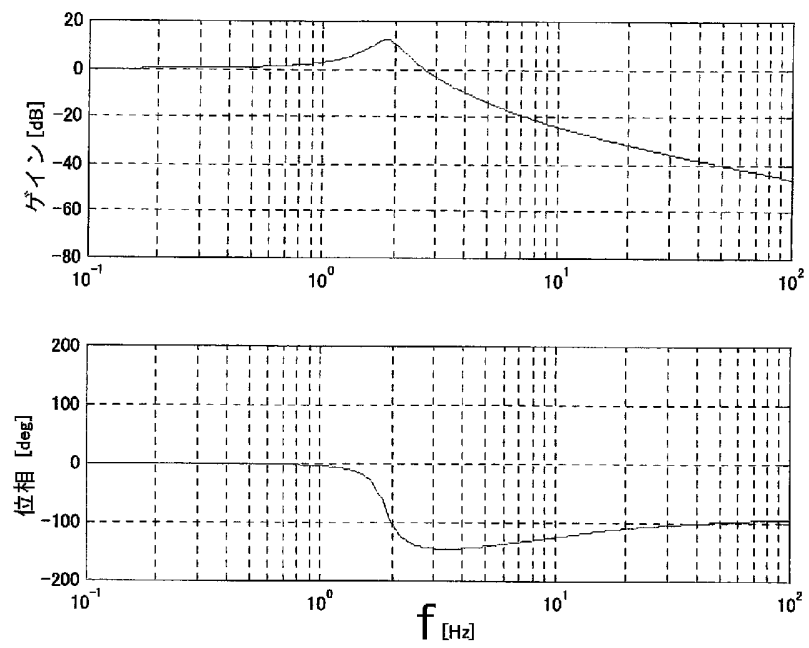
[図10]



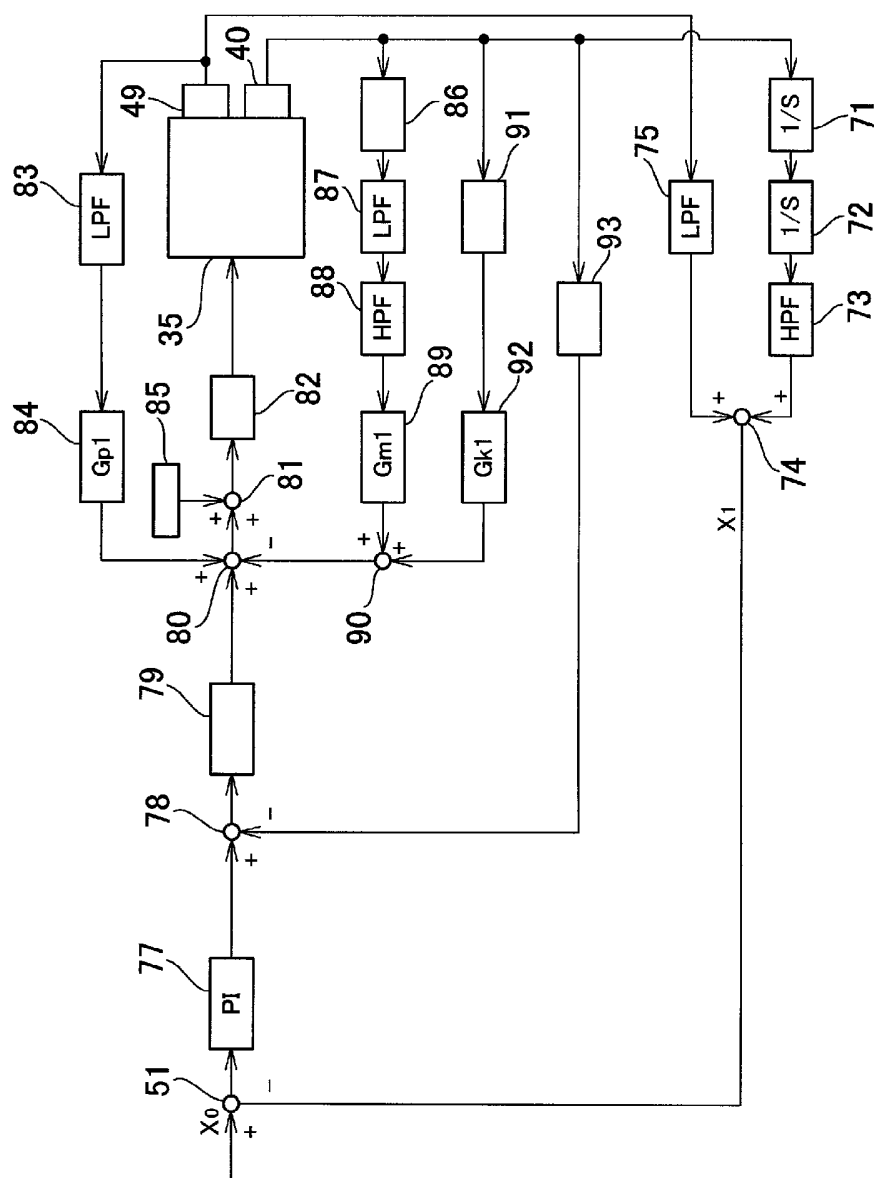
[図11]



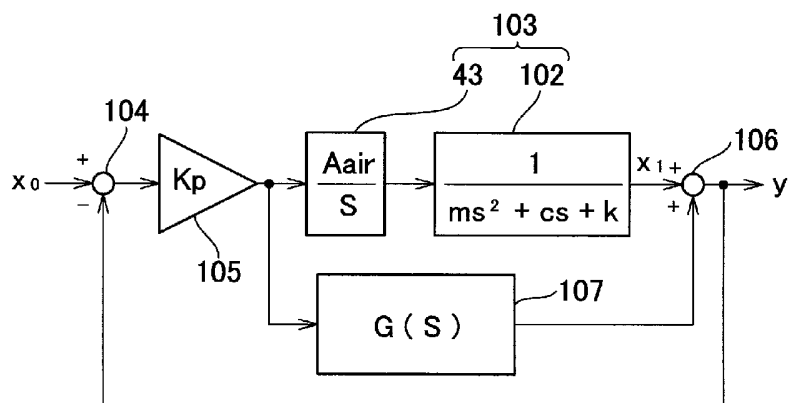
[図12]



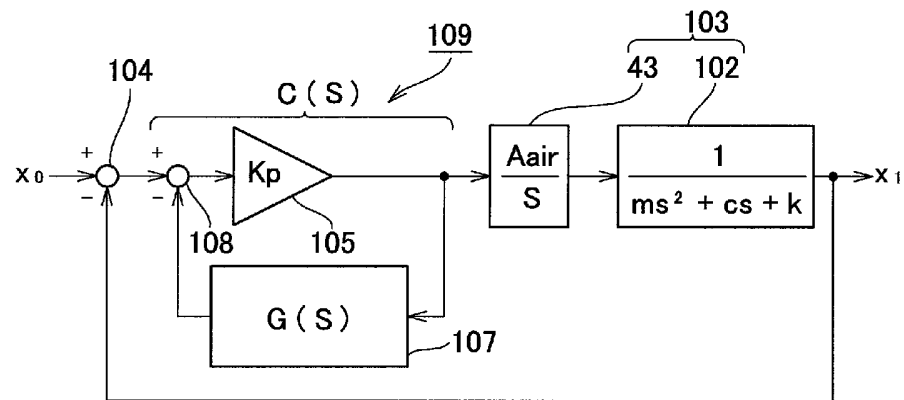
[図13]



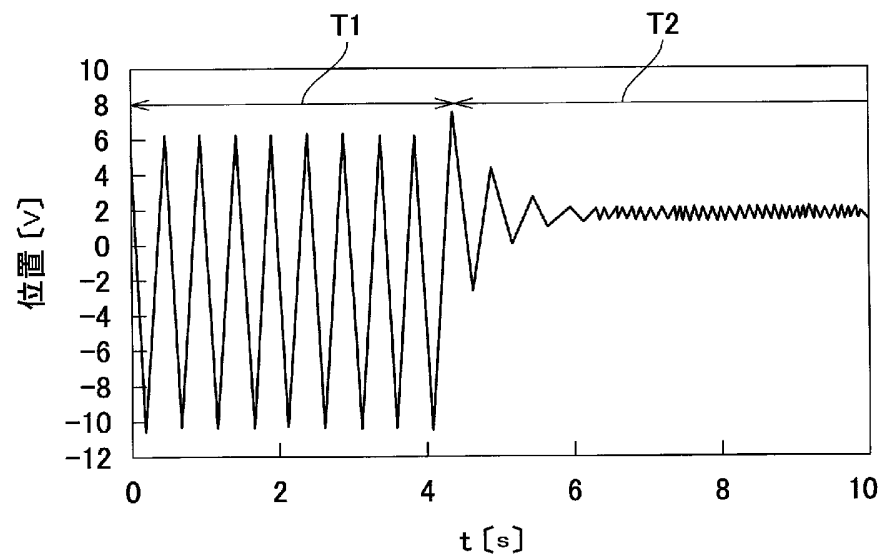
[図14]



[図15]



[図16]



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2005/003735

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER Int.Cl. ⁷ F16F15/027		
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) Int.Cl. ⁷ F16F9/00-54, 15/00-027		
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 1996-2005 Kokai Jitsuyo Shinan Koho 1971-2005 Toroku Jitsuyo Shinan Koho 1994-2005		
Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)		
C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	JP 2000-154843 A (Canon Inc.), 06 June, 2000 (06.06.00), Full text (Family: none)	1-4, 13, 14, 16-19
Y	JP 2001-140972 A (Canon Inc.), 22 May, 2001 (22.05.01), Full text (Family: none)	5-12, 20, 21
Y	JP 2002-175122 A (Nikon Corp.), 21 June, 2002 (21.06.02), Full text & US 6523695 B1 25 February, 2003 (25.02.03) & US 2003-0057619 A1 27 March, 2003 (27.03.03)	5-12, 20, 21
Y		6, 11
☒ 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 25 May, 2005 (25.05.05)		Date of mailing of the international search report 14 June, 2005 (14.06.05)
Name and mailing address of the ISA/ Japanese Patent Office		Authorized officer
Facsimile No.		Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2005/003735

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 2000-12435 A (Nikon Corp.), 14 January, 2000 (14.01.00), Full text (Family: none)	1-21
A	JP 2000-228343 A (Canon Inc.), 15 August, 2000 (15.08.00), Full text (Family: none)	1-21
A	JP 2000-274482 A (Canon Inc.), 03 October, 2000 (03.10.00), Full text & US 6286644 B1 11 September, 2001 (11.09.01)	1-21
A	JP 11-327657 A (Canon Inc.), 26 November, 1999 (26.11.99), Full text & US 6213443 B1 10 April, 2001 (10.04.01)	1-21
A	JP 2001-355669 A (Canon Inc.), 26 December, 2001 (26.12.01), Full text (Family: none)	1-21
A	JP 2001-90774 A (Canon Inc.), 26 December, 2001 (26.12.01), Full text (Family: none)	1-21
A	JP 11-315883 A (Canon Inc.), 16 November, 1999 (16.11.99), Full text & US 2002-0012108 A1 31 January, 2002 (31.01.02) & US 2003-0030779 A1 13 February, 2003 (13.02.03)	1-21

A. 発明の属する分野の分類 (国際特許分類 (IPC))

Int.Cl.⁷ F16F 15/027

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.⁷ F16F 9/00-54, 15/00-027

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	1971-2005年
日本国実用新案登録公報	1996-2005年
日本国登録実用新案公報	1994-2005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)

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
X	JP 2000-154843 A (キャノン株式会社) 2000.06.06, 全文 (ファミリー無し)	1-4, 13, 14, 16-19
Y		5-12, 20, 21
Y	JP 2001-140972 A (キャノン株式会社) 2001.05.22, 全文 (ファミリー無し)	5-12, 20, 21

☒ 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

25.05.2005

国際調査報告の発送日

14.6.2005

国際調査機関の名称及びあて先

日本国特許庁 (ISA/JP)
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)

藤本 信男

3W

8308

電話番号 03-3581-1101 内線 3368

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
Y	JP 2002-175122 A (株式会社ニコン) 2002.06.21, 全文 & US 6523695 B1 2003.02.25 & US 2003-0057619 A1 2003.03.27	6,11
A	JP 2000-12435 A (株式会社ニコン) 2000.01.14, 全文 (ファミリー無し)	1-21
A	JP 2000-228343 A (キャノン株式会社) 2000.08.15, 全文 (ファミリー無し)	1-21
A	JP 2000-274482 A (キャノン株式会社) 2000.10.03, 全文 & US 6286644 B1 2001.09.11	1-21
A	JP 11-327657 A (キャノン株式会社) 1999.11.26, 全文 & US 6213443 B1 2001.04.10	1-21
A	JP 2001-355669 A (キャノン株式会社) 2001.12.26, 全文 (ファミリー無し)	1-21
A	JP 2001-90774 A (キャノン株式会社) 2001.12.26, 全文 (ファミリー無し)	1-21
A	JP 11-315883 A (キャノン株式会社) 1999.11.16, 全文 & US 2002-0012108 A1 2002.01.31 & US 2003-0030779 A1 2003.02.13	1-21