

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第5909451号
(P5909451)

(45) 発行日 平成28年4月26日(2016.4.26)

(24) 登録日 平成28年4月1日(2016.4.1)

(51) Int.Cl.			F I		
G05D	3/12	(2006.01)	G05D	3/12	Y
H01L	21/027	(2006.01)	H01L	21/30	516B
G03F	7/20	(2006.01)	G03F	7/20	521
H01L	21/68	(2006.01)	H01L	21/68	K

請求項の数 31 (全 43 頁)

(21) 出願番号	特願2012-554703 (P2012-554703)	(73) 特許権者	504137912 国立大学法人 東京大学 東京都文京区本郷七丁目3番1号
(86) (22) 出願日	平成24年1月27日(2012.1.27)	(73) 特許権者	000004112 株式会社ニコン 東京都港区港南二丁目15番3号
(86) 国際出願番号	PCT/JP2012/000548	(74) 代理人	100102901 弁理士 立石 篤司
(87) 国際公開番号	W02012/102060	(72) 発明者	藤本 博志 東京都文京区本郷七丁目3番1号 国立大 学法人東京大学内
(87) 国際公開日	平成24年8月2日(2012.8.2)	(72) 発明者	佐伯 和明 東京都千代田区有楽町一丁目12番1号 株式会社ニコン内
審査請求日	平成26年4月17日(2014.4.17)		
(31) 優先権主張番号	特願2011-17265 (P2011-17265)		
(32) 優先日	平成23年1月28日(2011.1.28)		
(33) 優先権主張国	日本国(JP)		

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 駆動システム及び駆動方法、露光装置及び露光方法、並びに駆動システム設計方法

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

操作量を与えて制御対象を駆動する駆動システムであって、
前記制御対象の第1部分の第1計測点の位置に関連する第1制御量を計測する第1計測器と、
前記制御対象の第2部分の第2計測点の位置に関連する第2制御量を計測する第2計測器と、
前記第1計測器の計測結果と、前記第2計測器の計測結果と、目標値とを用いた制御演算によって前記操作量を求め、該操作量を前記制御対象の操作点に与える制御部と、を備え、
前記制御対象の前記操作点から前記第1計測点までを剛体としたときに現れる共振時の振動モードにおいて、前記第1部分の共振時の振動モードと前記第2部分の共振時の振動モードとは逆相の関係にあり、
前記制御部は、
前記第1制御量と前記目標値との偏差を用いて第1の量を求める第1の制御器と、前記第2制御量と前記目標値との偏差を用いて第2の量を求める第2の制御器と、前記第1及び第2の量の和を算出し、該和を前記操作量として前記制御対象に与える加算器とを含み、
前記目標値が入力され、前記第1制御量及び前記第2制御量のラプラス変換 X_1 , X_2 と前記第1、第2制御器のそれぞれに対応する伝達関数 C_1 , C_2 とを用いてラプラス変

換形 $U(X_1, X_2) = C_1 X_1 + C_2 X_2$ で表現される演算式に従って前記操作量 $U(X_1, X_2)$ を求める閉ループ制御系を、前記制御対象と共に構成し、

前記伝達関数 C_1, C_2 は、前記第 1 及び第 2 部分に対応する伝達関数 P_1, P_2 のそれぞれに含まれる共振モードに対応する極が伝達関数 $C_1 P_1 + C_2 P_2$ において相殺されるように決定されている駆動システム。

【請求項 2】

前記第 1 制御量は、前記第 1 部分の位置に関連する少なくとも 1 種類の物理量を含み、
前記第 2 制御量は、前記第 2 部分の位置に関連する少なくとも 1 種類の物理量を含む請求項 1 に記載の駆動システム。

【請求項 3】

前記伝達関数 P_1, P_2 の具体形は、前記第 1 及び第 2 部分の運動をばねにより連結された 2 つの剛体の運動として表現する力学模型を用いて与えられる請求項 1 又は 2 に記載の駆動システム。

【請求項 4】

前記伝達関数 P_1, P_2 は、前記操作量と前記第 1 及び第 2 制御量のラプラス変換 (U, X_1, X_2) を用いて $P_1 = X_1 / U, P_2 = X_2 / U$ と定義され、

前記力学模型に含まれる各種パラメータは、前記操作量に対する前記第 1 及び第 2 制御量の実測結果を、前記定義式 $P_1 = X_1 / U, P_2 = X_2 / U$ に適用することにより求められる前記伝達関数 P_1, P_2 の周波数応答特性を、前記伝達関数 P_1, P_2 の具体形が再現するように決定されている請求項 3 に記載の駆動システム。

【請求項 5】

前記伝達関数 P_1, P_2 は、剛体モード及び前記共振モードの特性をそれぞれ表現する関数 D_P, D_R を用いて分数式 $P_1 = N_{P1} / D_P D_R, P_2 = N_{P2} / D_P D_R$ により表され、

前記伝達関数 C_1, C_2 は、分数式 $C_1 = N_{C1} / D_C, C_2 = N_{C2} / D_C$ により表され、

前記伝達関数 C_1, C_2 の分母部分 D_C は、 $D_C D_P +$ (は任意の解析関数) が任意の安定な極を有するように決定されている請求項 1 ~ 4 のいずれか一項に記載の駆動システム。

【請求項 6】

前記伝達関数 C_1, C_2 の分子部分 N_{C1}, N_{C2} は、前記閉ループ制御系の伝達関数の特性方程式 $A_{CL} = D_C D_P D_R + N_{C1} N_{P1} + N_{C2} N_{P2}$ が $A_{CL} = (D_C D_P +) D_R$ を満たすように、前記任意の解析関数 及び前記剛体モードに係るパラメータのみにより与えられる定数 a, b を用いて $N_{C1} = a, N_{C2} = b$ と決定されている請求項 5 に記載の駆動システム。

【請求項 7】

前記制御対象は、並進方向に駆動され、

前記第 1 及び第 2 制御量は、前記第 1 及び第 2 部分のそれぞれの前記並進方向に関する位置に関連する物理量の少なくとも 1 つを含む請求項 1 ~ 6 のいずれか一項に記載の駆動システム。

【請求項 8】

前記制御対象は、回転方向に駆動され、

前記第 1 及び第 2 制御量は、前記第 1 及び第 2 部分のそれぞれの前記回転方向に関する位置に関連する物理量の少なくとも 1 つを含む請求項 1 ~ 6 のいずれか一項に記載の駆動システム。

【請求項 9】

前記制御対象の前記第 1 及び第 2 部分は、それぞれ、並進及び回転方向に駆動され、前記第 1 制御量は、前記第 1 部分の前記並進方向に関する位置に関連する物理量の少なくとも 1 つを含み、

前記第 2 制御量は、前記第 2 部分の前記回転方向に関する位置に関連する物理量の少な

10

20

30

40

50

くとも1つを含む請求項1～6のいずれか一項に記載の駆動システム。

【請求項10】

エネルギービームで物体を露光して前記物体上にパターンを形成する露光装置であって、前記物体を保持して所定面上を移動する移動体を前記制御対象とする請求項1～9のいずれか一項に記載の駆動システムを備える露光装置。

【請求項11】

前記移動体は、前記所定面上を移動する第1移動体と、該第1移動体上で前記物体を保持して移動する第2移動体とを有し、

前記制御対象の前記第1及び第2部分は、それぞれ、前記第1及び第2移動体に含まれる請求項10に記載の露光装置。

10

【請求項12】

前記移動体は、前記物体を保持して所定面上を移動する第1移動体と、該第1移動体の一部を構成するナット部とともに送りねじ機構を構成するねじ部を含む第2移動体とを有し、

前記制御対象の前記第1及び第2部分は、それぞれ、前記第1及び第2移動体に含まれる請求項10又は11に記載の露光装置。

【請求項13】

エネルギービームによりマスクを介して物体を露光する露光装置であって、

前記マスクを保持して移動する移動体を前記制御対象とする請求項1～9のいずれか一項に記載の駆動システムを備える露光装置。

20

【請求項14】

操作量を与えて制御対象を駆動する駆動方法であって、

前記制御対象の第1部分の位置に関連する第1制御量を計測することと、

前記制御対象の第2部分の位置に関連する第2制御量を計測することと、

前記第1制御量の計測結果と前記第2制御量の計測結果と目標値とを用いた制御演算を行なって操作量を求め、該操作量を前記制御対象に与えて前記制御対象を駆動することと、を含み、

前記第2制御量の計測に先だって、前記制御対象の前記操作点から前記第1計測点までを剛体としたときに現れる共振時の振動モードにおいて、前記第1部分の共振時の振動モードと、前記第2部分の共振時の振動モードとが逆相の関係になるように前記第2部分の位置を設定しておき、

30

前記駆動することでは、

前記第1及び第2制御量のラプラス変換 X_1 、 X_2 と、前記第1制御量と前記目標値との偏差を用いた第1の量及び前記第2制御量と前記目標値との偏差を用いた第2の量を求めるための制御演算にそれぞれ対応する伝達関数 C_1 、 C_2 と用いてラプラス変換形 $U(X_1, X_2) = C_1 X_1 + C_2 X_2$ により与えられる演算式に従って前記操作量 $U(X_1, X_2)$ を求め、

前記伝達関数 C_1 、 C_2 は、前記第1及び第2部分に対応する伝達関数 P_1 、 P_2 のそれぞれに含まれる前記共振モードに対応する極が伝達関数 $C_1 P_1 + C_2 P_2$ において相殺されるように決定される駆動方法。

40

【請求項15】

前記第1制御量は前記第1部分の位置に関連する少なくとも1種類の物理量であり、前記第2制御量は前記第2部分の位置に関連する少なくとも1種類の物理量である請求項14に記載の駆動方法。

【請求項16】

前記伝達関数 P_1 、 P_2 の具体形は、前記第1及び第2部分の運動をばねにより連結された2つの剛体の運動として表現する力学模型を用いて与えられる請求項14又は15に記載の駆動方法。

【請求項17】

前記伝達関数 P_1 、 P_2 は、前記操作量と前記第1及び第2制御量のラプラス変換 $(U$

50

、 X_1 、 X_2)を用いて $P_1 = X_1 / U$ 、 $P_2 = X_2 / U$ と定義され、

前記力学模型に含まれる各種パラメータは、前記操作量に対する前記第1及び第2制御量の実測結果を、前記定義式 $P_1 = X_1 / U$ 、 $P_2 = X_2 / U$ に適用することにより求められる前記伝達関数 P_1 、 P_2 の周波数応答特性を、前記伝達関数 P_1 、 P_2 の具体形が再現するように決定される請求項16に記載の駆動方法。

【請求項18】

前記伝達関数 P_1 、 P_2 は、前記剛体モード及び前記共振モードの特性をそれぞれ表現する関数 D_P 、 D_R を用いて分数式 $P_1 = N_{P1} / D_P D_R$ 、 $P_2 = N_{P2} / D_P D_R$ により表され、

前記伝達関数 C_1 、 C_2 は、分数式 $C_1 = N_{C1} / D_C$ 、 $C_2 = N_{C2} / D_C$ により表され、

前記伝達関数 C_1 、 C_2 の分母部分 D_C は、 $D_C D_P +$ (は任意の解析関数)が任意の安定な極を有するように決定されている請求項14～17のいずれか一項に記載の駆動方法。

【請求項19】

前記伝達関数 C_1 、 C_2 の分子部分 N_{C1} 、 N_{C2} は、前記閉ループ制御系の伝達関数の特性方程式 $A_{CL} = D_C D_P D_R + N_{C1} N_{P1} + N_{C2} N_{P2}$ が $A_{CL} = (D_C D_P +) D_R$ を満たすように、前記任意の解析関数及び前記剛体モードに係るパラメータのみにより与えられる定数 a 、 b を用いて $N_{C1} = a$ 、 $N_{C2} = b$ と決定されている請求項18に記載の駆動方法。

【請求項20】

前記計測することでは、前記第1及び第2制御量として、前記第1及び第2部分のそれぞれの並進方向に関する位置に関連する物理量の少なくとも1つを計測し、

前記駆動することでは、前記制御対象を、前記並進方向に駆動する請求項14～19のいずれか一項に記載の駆動方法。

【請求項21】

前記計測することでは、前記第1及び第2制御量は、前記第1及び第2部分のそれぞれの回転方向に関する位置に関連する物理量の少なくとも1つを計測し、

前記駆動することでは、前記制御対象を、前記回転方向に駆動する請求項14～19のいずれか一項に記載の駆動方法。

【請求項22】

前記計測することでは、前記第1制御量として前記第1部分の並進方向に関する位置に関連する物理量の少なくとも1つを、前記第2制御量として、前記第2部分の回転方向に関する位置に関連する物理量の少なくとも1つを、それぞれ計測し、

前記駆動することでは、前記制御対象の前記第1及び第2部分を、それぞれ、前記並進及び前記回転方向に駆動する請求項14～19のいずれか一項に記載の駆動方法。

【請求項23】

エネルギービームで物体を露光して前記物体上にパターンを形成する露光方法であって、請求項14～22のいずれか一項に記載の駆動方法により、前記物体を保持して所定面上を移動する移動体を、前記制御対象として、駆動することを含む露光方法。

【請求項24】

前記所定面上を移動する第1移動体と、該第1移動体上で前記物体を保持して移動する第2移動体とを有する前記移動体が、前記制御対象とされ、

前記移動体の駆動に際して、前記第1移動体の位置に関連する第1制御量、及び前記剛体モードに対し前記第1移動体と逆相の共振モードを示す前記第2移動体の位置に関連する第2制御量が、計測される請求項23に記載の露光方法。

【請求項25】

前記物体を保持して所定面上を移動する第1移動体と、該第1移動体の一部を構成するナット部とともに送りねじ機構を構成するねじ部を含む第2移動体とを有する前記移動体が、前記制御対象とされ、

10

20

30

40

50

前記移動体の駆動に際して、前記第 1 移動体の位置に関連する第 1 制御量、及び前記剛体モードに対し前記第 1 移動体と逆相の共振モードを示す前記第 2 移動体の位置に関連する第 2 制御量が、計測される請求項 23 又は 24 に記載の露光方法。

【請求項 26】

エネルギービームによりマスクを介して物体を露光する露光方法であって、

請求項 14 ~ 22 のいずれか一項に記載の駆動方法により、前記マスクを保持して移動する移動体を前記制御対象として駆動することを含む露光方法。

【請求項 27】

制御対象を駆動する駆動システムを設計する駆動システム設計方法であって、

剛体モードに対する振動モードが互いに逆相となる前記制御対象の第 1 部分及び第 2 部分に、それぞれの位置に関連する第 1 制御量及び第 2 制御量を計測する第 1 及び第 2 計測器を設置することと、

前記第 1 計測器の計測結果と、前記第 2 計測器の計測結果と、目標値とを用いて制御演算を行なって操作量を求め、該操作量を前記制御対象に与える制御部を用意することと、含み、

前記制御部は、前記制御対象に与える操作量を求めるための演算式を、前記第 1 及び第 2 制御量のラプラス変換 X_1 、 X_2 と、前記第 1 及び第 2 制御量のそれぞれと目標値との偏差を用いてそれぞれ第 1 及び第 2 の量を求めるための制御演算にそれぞれ対応する伝達関数 C_1 、 C_2 と用いてラプラス変換形 $U(X_1, X_2) = C_1 X_1 + C_2 X_2$ により与え、前記伝達関数 C_1 、 C_2 を、前記第 1 及び第 2 部分に対応する伝達関数 P_1 、 P_2 のそれぞれに含まれる共振モードに対応する極が伝達関数 $C_1 P_1 + C_2 P_2$ において相殺されるように決定する駆動システム設計方法。

【請求項 28】

前記決定することでは、前記伝達関数 P_1 、 P_2 の具体形を、前記第 1 及び第 2 部分の運動をばねにより連結された 2 つの剛体の運動として表現する力学模型を用いて与える請求項 27 に記載の駆動システム設計方法。

【請求項 29】

前記伝達関数 P_1 、 P_2 は、前記操作量と前記第 1 及び第 2 制御量のラプラス変換 (U 、 X_1 、 X_2) を用いて $P_1 = X_1 / U$ 、 $P_2 = X_2 / U$ と定義され、

前記力学模型に含まれる各種パラメータを、前記操作量に対する前記第 1 及び第 2 制御量を計測し、該計測結果を前記定義式 $P_1 = X_1 / U$ 、 $P_2 = X_2 / U$ に適用することにより求められる前記伝達関数 P_1 、 P_2 の周波数応答特性を、前記伝達関数 P_1 、 P_2 の具体形が再現するように、決定する、請求項 28 に記載の駆動システム設計方法。

【請求項 30】

前記伝達関数 P_1 、 P_2 は、前記剛体モード及び前記共振モードの特性をそれぞれ表現する関数 D_P 、 D_R を用いて分数式 $P_1 = N_{P1} / D_P D_R$ 、 $P_2 = N_{P2} / D_P D_R$ により表され、

前記伝達関数 C_1 、 C_2 は、分数式 $C_1 = N_{C1} / D_C$ 、 $C_2 = N_{C2} / D_C$ により表され、

前記決定することでは、前記伝達関数 C_1 、 C_2 の分母部分 D_C を、 $D_C D_P +$ (は任意の解析関数) が任意の安定な極を有するように決定する請求項 27 ~ 29 のいずれか一項に記載の駆動システム設計方法。

【請求項 31】

前記決定することでは、前記伝達関数 C_1 、 C_2 の分子部分 N_{C1} 、 N_{C2} を、前記閉ループ制御系の伝達関数の特性方程式 $A_{CL} = D_C D_P D_R + N_{C1} N_{P1} + N_{C2} N_{P2}$ が $A_{CL} = (D_C D_P +) D_R$ を満たすように、前記任意の解析関数 及び前記剛体モードに係るパラメータのみにより与えられる定数 a 、 b を用いて $N_{C1} = a$ 、 $N_{C2} = b$ と決定する請求項 30 に記載の駆動システム設計方法。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、駆動システム及び駆動方法、露光装置及び露光方法、並びに駆動システム設計方法に係り、特に、操作量を与えて制御対象を駆動する駆動システム及び駆動方法、前記駆動システムを備える露光装置及び前記駆動方法を用いる露光方法、並びに前記駆動システムを設計する駆動システム設計方法に関する。

【背景技術】

【0002】

液晶表示素子、半導体素子等の電子デバイス（マイクロデバイス）を製造するリソグラフィ工程では、主として、ステップ・アンド・リピート方式の投影露光装置（いわゆるステッパ）、ステップ・アンド・スキャン方式の投影露光装置（いわゆるスキヤニング・ステッパ（スキヤナとも呼ばれる））などが用いられている。液晶表示素子用の露光装置（液晶露光装置）に対しては、基板の大型化に伴い、スキヤナなどの走査型投影露光装置が主流となっている。

10

【0003】

電子デバイス（マイクロデバイス）は、基板（ガラスプレート、ウエハ等）上に複数層のパターンを重ねて形成することによって製造される。このため、露光装置には、マスクのパターンを基板上の各ショット領域に既に形成されたパターンに正確に重ね合わせて転写すること、すなわち高い重ね合わせ精度が要求される。

【0004】

高い重ね合わせ精度を達成するために、基板を保持して移動する基板ステージを精密に且つ安定して駆動する技術が必要となる。ここで、近年、基板ステージとして、走査露光時における基板の走査方向に移動するキャリッジと、該キャリッジの上に支持されて基板を保持して非走査方向に移動する基板テーブルと、を備えるガントリー・ステージが主に採用されている。ガントリー・ステージなどでは、基板ステージの高精度なかつ安定した駆動の障害要因となる共振が発生する。特に、近時においては、基板ステージの大型化に伴い、その共振周波数（固有振動数）が低くなっている。

20

【0005】

このような基板ステージの共振帯域を含む高帯域で且つ共振周波数の変動に対してもロバストな制御系を、ノッチフィルタを用いて構築するための理論的枠組みとして、H 制御理論を代表とするアドバンストロバスト制御理論を利用したステージ制御装置が知られている（例えば、特許文献1参照）。アドバンストロバスト制御理論では、センサを追加して制御対象を1入力多出力系とするが、追加するセンサの配置に制約はなく、また、ノミナルモデルのモデル化誤差に対しても安定なフィードバック制御器を設計することができる。しかし、一般的に、制御対象の構造、重み関数の次数等に応じて制御器の設計自由度が増えるため、フィードバック制御器の高帯域化とロバスト性とはトレードオフの関係になってしまう。

30

【先行技術文献】

【特許文献】

【0006】

【特許文献1】特開2002-73111号公報

40

【発明の開示】

【課題を解決するための手段】

【0007】

本発明の第1の態様によれば、操作量を与えて制御対象を駆動する駆動システムであって、前記制御対象の第1部分の第1計測点の位置に関連する第1制御量を計測する第1計測器と、前記制御対象の第2部分の第2計測点の位置に関連する第2制御量を計測する第2計測器と、前記第1計測器の計測結果と、前記第2計測器の計測結果と、目標値とを用いた制御演算によって前記操作量を求め、該操作量を前記制御対象の操作点に与える制御部と、を備え、前記制御対象の前記操作点から前記第1計測点までを剛体としたときに現

50

れる共振時の振動モードにおいて、前記第1部分の共振時の振動モードと前記第2部分の共振時の振動モードとは逆相の関係にあり、前記制御部は、前記第1制御量と前記目標値との偏差を用いて第1の量を求める第1の制御器と、前記第2制御量と前記目標値との偏差を用いて第2の量を求める第2の制御器と、前記第1及び第2の量の和を算出し、該和を前記操作量として前記制御対象に与える加算器とを含み、前記目標値が入力され、前記第1制御量及び前記第2制御量のラプラス変換 X_1 、 X_2 と前記第1、第2制御器のそれぞれに対応する伝達関数 C_1 、 C_2 とを用いてラプラス変換形 $U(X_1, X_2) = C_1 X_1 + C_2 X_2$ で表現される演算式に従って前記操作量 $U(X_1, X_2)$ を求める閉ループ制御系を、前記制御対象と共に構成し、前記伝達関数 C_1 、 C_2 は、前記第1及び第2部分に対応する伝達関数 P_1 、 P_2 のそれぞれに含まれる共振モードに対応する極が伝達関数 $C_1 P_1 + C_2 P_2$ において相殺されるように決定されている駆動システムが、提供される。

10

【0008】

ここで、位置に関連する制御量（第1又は第2制御量）とは、位置を微分して得られる速度、加速度などを制御量とする場合は勿論、位置そのものを制御量とする場合をも含む。本明細書では、位置に関連する物理量という用語も用いているが、この場合の物理量も、位置を微分して得られる速度、加速度等の量は勿論、位置そのものを含む。このように、本明細書では、位置又は位置を微分して得られる速度、加速度等の量の総称として、位置に関連する量（制御量又は物理量）という表現を用いている。

【0009】

これによれば、制御対象を精密に且つ安定して駆動することが可能となる。

20

【0010】

本発明の第2の態様によれば、エネルギービームで物体を露光して前記物体上にパターンを形成する露光装置であって、前記物体を保持して所定面上を移動する移動体を前記制御対象とする第1の態様の駆動システムを備える第1の露光装置が、提供される。

【0011】

これによれば、物体を保持する移動体を精密に且つ安定して駆動することが可能となり、ひいては物体に対する高精度な露光が可能になる。

【0012】

本発明の第3の態様によれば、エネルギービームによりマスクを介して物体を露光する露光装置であって、前記マスクを保持して移動する移動体を前記制御対象とする第1の態様の駆動システムを備える第2の露光装置が、提供される。

30

【0013】

これによれば、マスクを保持する移動体を精密に且つ安定して駆動することが可能となり、ひいては物体上にマスクのパターンを高精度に重ね合わせて転写することが可能になる。

【0014】

本発明の第4の態様によれば、操作量を与えて制御対象を駆動する駆動方法であって、前記制御対象の第1部分の位置に関連する第1制御量を計測することと、前記制御対象の第2部分の位置に関連する第2制御量を計測することと、前記第1制御量の計測結果と前記第2制御量の計測結果と目標値とを用いた制御演算を行なって操作量を求め、該操作量を前記制御対象に与えて前記制御対象を駆動することと、を含み、前記第2制御量の計測に先だて、前記制御対象の前記操作点から前記第1計測点までを剛体としたときに現れる共振時の振動モードにおいて、前記第1部分の共振時の振動モードと、前記第2部分の共振時の振動モードとが逆相の関係になるように前記第2部分の位置を設定しておき、前記駆動することでは、前記第1及び第2制御量のラプラス変換 X_1 、 X_2 と、前記第1制御量と前記目標値との偏差を用いた第1の量及び前記第2制御量と前記目標値との偏差を用いた第2の量を求めるための制御演算にそれぞれ対応する伝達関数 C_1 、 C_2 とを用いてラプラス変換形 $U(X_1, X_2) = C_1 X_1 + C_2 X_2$ により与えられる演算式に従って前記操作量 $U(X_1, X_2)$ を求め、前記伝達関数 C_1 、 C_2 は、前記第1及び第2部分

40

50

に対応する伝達関数 P_1 、 P_2 のそれぞれに含まれる前記共振モードに対応する極が伝達関数 $C_1 P_1 + C_2 P_2$ において相殺されるように決定される駆動方法が、提供される。

【0015】

これによれば、制御対象を精密に且つ安定して駆動することが可能となる。

【0016】

本発明の第5の態様によれば、エネルギービームで物体を露光して前記物体上にパターンを形成する露光方法であって、第4の態様の駆動方法により、前記物体を保持して所定面上を移動する移動体を、前記制御対象として、駆動することを含む第1の露光方法が、提供される。

【0017】

これによれば、物体を保持する移動体を精密に且つ安定して駆動することが可能となり、ひいては物体に対する高精度な露光が可能になる。

【0018】

本発明の第6の態様によれば、エネルギービームによりマスクを介して物体を露光する露光方法であって、第4の態様の駆動方法により、前記マスクを保持して移動する移動体を前記制御対象として駆動することを含む第2の露光方法が、提供される。

【0019】

これによれば、マスクを保持する移動体を精密に且つ安定して駆動することが可能となり、ひいては物体上にマスクのパターンを高精度に重ね合わせて転写することが可能になる。

【0020】

本発明の第7の態様によれば、制御対象を駆動する駆動システムを設計する駆動システム設計方法であって、剛体モードに対する振動モードが互いに逆相となる前記制御対象の第1部分及び第2部分に、それぞれの位置に関連する第1制御量及び第2制御量を計測する第1及び第2計測器を設置することと、前記第1計測器の計測結果と、前記第2計測器の計測結果と、目標値とを用いて制御演算を行なって操作量を求め、該操作量を前記制御対象に与える制御部を用意することと、含み、前記制御部は、前記制御対象に与える操作量を求めるための演算式を、前記第1及び第2制御量のラプラス変換 X_1 、 X_2 と、前記第1及び第2制御量のそれぞれと目標値との偏差を用いてそれぞれ第1及び第2の量を求めるための制御演算にそれぞれ対応する伝達関数 C_1 、 C_2 と用いてラプラス変換形 $U(X_1, X_2) = C_1 X_1 + C_2 X_2$ により与え、前記伝達関数 C_1 、 C_2 を、前記第1及び第2部分に対応する伝達関数 P_1 、 P_2 のそれぞれに含まれる共振モードに対応する極が伝達関数 $C_1 P_1 + C_2 P_2$ において相殺されるように決定する駆動システム設計方法が、提供される。

【0021】

これによれば、第1、第2計測器及び制御部を用いることにより、高帯域でロバストな駆動システムを設計することが可能となる。

【図面の簡単な説明】

【0022】

【図1】第1の実施形態に係る露光装置の構成を概略的に示す図である。

【図2】プレートステージを示す斜視図である。

【図3】露光装置のステージ制御に関連する構成を示すブロック図である。

【図4】1入力1出力系のフィードバック制御系におけるプレートステージの入出力応答を表現する伝達関数（振幅及び位相）の周波数応答特性を示すボード線図である。

【図5】図5（A）及び図5（B）は、それぞれ、第1の実施形態に係る1入力2出力系のフィードバック制御系におけるプレートステージのキャリッジ、及びプレートテーブルの入出力応答を表現する伝達関数の周波数応答特性を示すボード線図である。

【図6】第1の実施形態に係る1入力2出力系のフィードバック制御系を表すブロック図である。

【図7】図7（A）は、プレートステージの力学的運動（並進運動）を表現する力学模型

10

20

30

40

50

の一例を示す図、図7(B)は、図7(A)の力学模型に含まれる力学パラメータを示す表である。

【図8】図8(A)及び図8(B)は、1入力2出力系のフィードバック制御系における2つの制御器の伝達関数の周波数応答特性を示すボード線図である。

【図9】図9(A)～図9(C)は、それぞれ条件A～Cに対する、1入力2出力系(SIMO系)及び1入力1出力系(SISO系)のフィードバック制御系のそれぞれの閉ループ伝達関数の周波数応答特性を示すボード線図(シミュレーション結果)である。

【図10】図10(A)～図10(C)は、それぞれ条件A～Cに対する、1入力2出力系(SIMO系)及び1入力1出力系(SISO系)のフィードバック制御系のそれぞれの開ループ伝達関数の周波数応答特性を示すボード線図(シミュレーション結果)である。

10

【図11】図11(A)～図11(C)は、それぞれ条件A～Cに対する、1入力2出力系(SIMO系)及び1入力1出力系(SISO系)のフィードバック制御系のそれぞれに対するナイキスト線図である。

【図12】条件A～Cに対するゲイン余裕(G_m)と位相余裕(P_m)を示す表である。

【図13】図13(A)～図13(C)は、それぞれ条件A～Cに対する、1入力2出力系(SIMO系)及び1入力1出力系(SISO系)のフィードバック制御系のそれぞれの閉ループ伝達関数の周波数応答特性を示すボード線図(実験結果)である。

【図14】図14(A)～図14(C)は、それぞれ条件A～Cに対する、1入力2出力系(SIMO系)及び1入力1出力系(SISO系)のフィードバック制御系のそれぞれの開ループ伝達関数の周波数応答特性を示すボード線図(実験結果)である。

20

【図15】図15(A)～図15(C)は、それぞれ条件A～Cに対する、1入力2出力系(SIMO系)及び1入力1出力系(SISO系)のフィードバック制御系のそれぞれに対するナイキスト線図である。

【図16】図16(A)はプレートステージの駆動軌跡を示す図、図16(B)及び図16(C)はプレートステージの追従誤差の時間変化を示す図である。

【図17】第1の実施形態に係る1入力2出力系のフィードバック制御系の変形例を表すブロック図である。

【図18】図18(A)は、一般的な2慣性系の力学模型を表す図であり、図18(B)は、図18(A)の力学模型に含まれる力学パラメータを示す表である。

30

【図19】図19(A)及び図19(B)は、それぞれ、第2の実施形態に係る1入力2出力系のフィードバック制御系におけるプレートステージPSTのキャリッジ、及びプレートテーブルの入出力応答を表現する伝達関数の周波数応答特性を示すボード線図である。

【図20】図20(A)及び図20(B)は、それぞれ、第2の実施形態に係る1入力2出力系のフィードバック制御系における2つの制御器の伝達関数の周波数応答特性を示すボード線図である。

【図21】第2の実施形態に係る1入力2出力系(SIMO系)及び従来の1入力1出力系(SISO系)のフィードバック制御系のそれぞれに対する閉ループ伝達関数の周波数応答特性を示すボード線図(シミュレーション結果)である。

40

【図22】第2の実施形態に係る1入力2出力系(SIMO系)及び従来の1入力1出力系(SISO系)のフィードバック制御系のそれぞれに対する開ループ伝達関数の周波数応答特性を示すボード線図(シミュレーション結果)である。

【図23】第2の実施形態に係る1入力2出力系(SIMO系)及び従来の1入力1出力系(SISO系)のフィードバック制御系のそれぞれに対するナイキスト線図である。

【図24】ゲイン余裕(G_m)と位相余裕(P_m)を示す表である。

【図25】マスクステージの構成を示す平面図である。

【図26】第3の実施形態に係る1入力2出力系のフィードバック制御系を表すブロック図である。

【図27】図27(A)及び図27(B)は、第4の実施形態に係るボールねじ式のプレ

50

ートステージの構成を示す図である。

【図28】第4の実施形態に係る1入力2出力系のフィードバック制御系を表すブロック図である。

【図29】図29(A)及び図29(B)は、それぞれ、第4の実施形態に係るプレートステージの送りねじ(及び回転モータ)、及びプレートテーブルの入出力応答を表現する伝達関数の周波数応答特性を示すボード線図である。

【発明を実施するための最良の形態】

【0023】

《第1の実施形態》

以下、第1の実施形態について、図1～図17に基づいて説明する。

10

【0024】

図1には、フラットパネルディスプレイ、例えば液晶表示装置(液晶パネル)などの製造に用いられる第1の実施形態に係る露光装置110の構成が概略的に示されている。露光装置110は、液晶表示素子パターンが形成されたマスクMと、プレートステージPSTに保持されたガラスプレート(以下、「プレート」という)Pとを、投影光学系PLに対して所定の走査方向(ここでは、図1における紙面内左右方向であるX軸方向とする)に沿って例えば同一速度で同一方向に相対走査し、マスクMのパターンをプレートP上に転写するスキニング・ステッパ(スキナ)である。露光装置110は、照明系IOP、マスクMを保持するマスクステージMST、投影光学系PL、マスクステージMST及び投影光学系PLなどが搭載された不図示のボディ、プレートPをプレートホルダPHを介して保持するプレートステージPST、及びこれらの制御系等を備えている。制御系は、露光装置110の構成各部を統括制御する主制御装置(不図示)及びその配下のステージ制御装置50(図3等参照)によって主に構成される。以下においては、露光時にマスクMとプレートPとが投影光学系PLに対してそれぞれ相対走査される方向をX軸方向(X方向)とし、水平面内でこれに直交する方向をY軸方向(Y方向)、X軸及びY軸に直交する方向をZ軸方向(Z方向)とし、X軸、Y軸、及びZ軸回りの回転(傾斜)方向をそれぞれx、y、及びz方向として説明を行う。

20

【0025】

照明系IOPは、例えば米国特許第5,729,331号明細書などに開示される照明系と同様に構成されている。すなわち、照明系IOPは、マスクM上に千鳥状に配置された複数、例えば5つの照明領域のそれぞれを照明する複数、例えば5つの照明系を有し、各照明系は、図示しない光源(例えば、水銀ランプ)から射出された光を、図示しない反射鏡、ダイクロイックミラー、シャッター、波長選択フィルタ、各種レンズなどを介して、露光用照明光(照明光)ILとしてマスクMに照射する。照明光ILとしては、例えばi線(波長365nm)、g線(波長436nm)、h線(波長405nm)などの光(あるいは、上記i線、g線、h線の合成光)が用いられる。また、照明光ILの波長は、波長選択フィルタにより、例えば要求される解像度に応じて適宜切り替えることが可能になっている。

30

【0026】

マスクステージMSTには、回路パターンなどがそのパターン面(図1における下面)に形成されたマスクMが、例えば真空吸着(あるいは静電吸着)により固定されている。マスクステージMSTは、不図示のボディの一部である鏡筒定盤の上面に固定されたX軸方向に伸びる一対のマスクステージガイド(不図示)上に、不図示の気体静圧軸受(例えばエアベアリング)を介して非接触状態で支持(浮上支持)されている。マスクステージMSTは、例えばリニアモータを含むマスクステージ駆動系MSD(図1では不図示、図3参照)により、走査方向(X軸方向)に所定のストロークで駆動されるとともに、Y軸方向、及びz方向にそれぞれ適宜微小駆動される。マスクステージMSTのXY平面内の位置情報(z方向の回転情報を含む)は、マスク干渉計システム16により計測される。

40

【0027】

50

マスク干渉計システム 16 は、マスクステージ M S T の端部に固定された移動鏡 15 に測長ビームを照射し、移動鏡 15 からの反射光を受光することにより、マスクステージ M S T の位置を計測する。その計測結果はステージ制御装置 50 に供給され（図 3 参照）、ステージ制御装置 50 は、マスク干渉計システム 16 の計測結果に基づいて、マスクステージ駆動系 M S D を介してマスクステージ M S T を駆動する。なお、移動鏡に代えて、マスクステージの端面に鏡面加工を施して反射面（移動鏡の反射面に相当）を形成しても良い。また、マスク干渉計システム 16 に代えて、あるいはマスク干渉計システム 16 とともにエンコーダ（又は複数のエンコーダから構成されるエンコーダシステム）を用いても良い。

【 0 0 2 8 】

投影光学系 P L は、マスクステージ M S T の図 1 における下方において、不図示のボディの一部（鏡筒定盤）に支持されている。投影光学系 P L は、例えば米国特許第 5,729,331 号明細書に開示された投影光学系と同様に構成されている。すなわち、投影光学系 P L は、前述した複数の照明領域に対応して、マスク M のパターン像の投影領域が千鳥状に配置された複数、例えば 5 つの投影光学系（マルチレンズ投影光学系）を含み、Y 軸方向を長手方向とする長形状の単一のイメージフィールドを持つ投影光学系と同等に機能する。ここでは、3 つの投影光学系が Y 軸方向に所定間隔で配置され、残りの 2 つの投影光学系が、3 つの投影光学系から + X 側に離間して、Y 軸方向に所定間隔で配置されている。本実施形態では、複数（5 つ）の投影光学系のそれぞれとしては、例えば両側テレセントリックな等倍系で正立正像を形成するものが用いられている。また、以下では投影光学系 P L の千鳥状に配置された複数の投影領域をまとめて露光領域と呼ぶ。

【 0 0 2 9 】

照明系 I O P からの照明光 I L によってマスク M 上の照明領域が照明されると、投影光学系 P L の第 1 面（物体面）とパターン面とがほぼ一致して配置されるマスク M を通過した照明光 I L により、投影光学系 P L を介してその照明領域内のマスク M の回路パターンの投影像（部分正立像）が、投影光学系 P L の第 2 面（像面）側に配置される、表面にレジスト（感応剤）が塗布されたプレート P 上の照明領域に共役な照明光 I L の照射領域（露光領域）に形成される。そして、マスクステージ M S T とプレートステージ P S T（より正確には、後述のプレートテーブル P T B）との同期駆動によって、照明領域（照明光 I L）に対してマスク M を走査方向（X 軸方向）に相対移動させるとともに、露光領域（照明光 I L）に対してプレート P を走査方向（X 軸方向）に相対移動させることで、プレート P 上の 1 つのショット領域（区画領域）の走査露光が行われ、そのショット領域にマスク M のパターンが転写される。すなわち、本実施形態では照明系 I O P 及び投影光学系 P L によってプレート P 上にマスク M のパターンが生成され、照明光 I L によるプレート P 上の感応層（レジスト層）の露光によってプレート P 上にそのパターンが形成される。

【 0 0 3 0 】

プレートステージ P S T は、投影光学系 P L の下方（- Z 側）に配置されている。プレートステージ P S T は、X 軸方向（走査方向）に移動するキャリッジ 30 と、該キャリッジ 30 の上に支持されてプレート P を保持して Y 軸方向（非走査方向、クロススキャン方向）に移動するプレートテーブル P T B とを備えている。

【 0 0 3 1 】

図 2 には、プレートステージ P S T が、プレート干渉計システム 18（18 X、18 Y、18 X₁、18 X₂、図 3 参照）とともに、斜視図にて示されている。プレートテーブル P T B は、図 2 に示されるように、平面視矩形板状の部材から成り、その上面の中央にプレート P（図 2 では不図示、図 1 参照）を吸着保持するプレートホルダ P H が固定されている。プレートテーブル P T B は、複数、例えば 3 つの支持機構（不図示）を介して Y スライダ 32 Y 上に支持されている。各支持機構は、プレートテーブル P T B を支持するとともに、その支持点にてプレートテーブル P T B を Z 軸方向に駆動するアクチュエータ（例えばボイスコイルモータ等）を含む。3 つの支持機構により、プレートテーブル P T B は、Y スライダ 32 Y 上で、3 自由度方向（Z 軸、x、及び y の各方向）に微小駆

10

20

30

40

50

動される。

【0032】

Yスライダ32Yは、XZ断面が逆U字状の部材であり、エアベアリング（不図示）等を介して非接触で、Y軸方向に伸びるYビーム（Yガイド）34Yに上方から係合している。Yビーム34Yの内部には、例えば複数のコイルがY軸方向に所定間隔で配置され、Yスライダ32Yの内面側には、例えば複数の永久磁石が、配置されている。Yビーム34YとYスライダ32Yとによって、可動子であるYスライダ32YをY軸方向に駆動するムービングマグネット型のYリニアモータ36Yが構成されている。Yリニアモータ36Yによって、プレートテーブルPTBが、Yビーム34Yに沿ってY軸方向に駆動される。なお、Yリニアモータ36Yとしては、ムービングマグネット型に限らず、ムービングコイル型のリニアモータを用いることもできる。

10

【0033】

Yビーム34Yの長手方向の一端と他端の下面には、Xスライダ32X₁、32X₂が固定されている。Xスライダ32X₁、32X₂は、それぞれ、YZ断面が逆U字状の部材であり、Y軸方向に離間して配置され、かつX軸方向にそれぞれ延設された一对のXガイド34X₁、34X₂にエアベアリング（不図示）等を介して非接触で、上方から係合している。Xガイド34X₁、34X₂は、それぞれ、不図示の防振部材を介して（あるいは直接）床面F上に設置されている。

【0034】

Xガイド34X₁、34X₂のそれぞれの内部には、例えば複数のコイルがX軸方向に所定間隔で配置され、Xスライダ32X₁、32X₂の内面側には、それぞれ、複数の永久磁石が配置されている。Xガイド34X₁とXスライダ32X₁とによって、可動子であるXスライダ32X₁をX軸方向に駆動するムービングマグネット型のXリニアモータ36X₁が構成されている。同様に、Xガイド34X₂とXスライダ32X₂とによって、可動子であるXスライダ32X₂をX軸方向に駆動するムービングマグネット型のXリニアモータ36X₂が構成されている。

20

【0035】

ここで、一对のXスライダ32X₁、32X₂と、Yビーム34Yとを含んで、キャリッジ30（図1参照）が構成され、キャリッジ30が、一对のXリニアモータ36X₁、36X₂によって、X軸方向に駆動される。また、一对のXリニアモータ36X₁、36X₂が異なる推力（駆動力）を発生することで、一对のXリニアモータ36X₁、36X₂によって、キャリッジ30が、z方向に駆動されるようになっている。なお、Xリニアモータ36X₁、36X₂としては、ムービングマグネット型に限らず、ムービングコイル型のリニアモータを用いることもできる。

30

【0036】

本実施形態では、上述したYリニアモータ36Y、一对のXリニアモータ36X₁、36X₂、及び3つの支持機構（不図示）によって、プレートテーブルPTBを6自由度方向（X軸、Y軸、Z軸、x、y、zの各方向）に駆動するプレートステージ駆動系PSD（図3参照）が構成されている。プレートステージ駆動系PSD（の構成各部）は、ステージ制御装置50によって制御される（図3参照）。

40

【0037】

図2に戻り、プレートテーブルPTBの上面上には、-X端部及び+Y端部に、それぞれX軸に直交する反射面を有する移動鏡（平面ミラー）17X、Y軸に直交する反射面を有する移動鏡（平面ミラー）17Yが、固定されている。また、Xスライダ32X₁の上面上にはコーナーキューブ17X₁が、Xスライダ32X₂の上面上にはコーナーキューブ（不図示）が、それぞれ固定されている。

【0038】

プレートステージPSTの位置は、プレート干渉計システム18（図3参照）によって計測されている。プレート干渉計システム18は、図2に示される4つの干渉計18X、18Y、18X₁及び18X₂を含む。

50

【 0 0 3 9 】

干渉計 1 8 X は、プレートテーブル P T B に固定された移動鏡 1 7 X に X 軸に平行な少なくとも 3 本の測長ビームを照射し、それぞれの反射光を受光して、プレートテーブル P T B の X 軸方向、 z 方向、及び y 方向の位置を計測する。干渉計 1 8 Y は、プレートテーブル P T B に固定された移動鏡 1 7 Y に Y 軸に平行な少なくとも 2 本の測長ビームを照射し、それぞれの反射光を受光して、プレートテーブル P T B の Y 軸方向及び x 方向の位置を計測する。

【 0 0 4 0 】

干渉計 1 8 X₁ は、X スライダ 3 2 X₁ 上に固定されたコーナーキューブ 1 7 X₁ に X 軸に平行な測長ビームを照射し、その反射光を受光してキャリッジ 3 0 の X 軸方向の位置 (X 位置) を計測する。同様に、干渉計 1 8 X₂ は、X スライダ 3 2 X₂ 上に固定されたコーナーキューブ (不図示) に X 軸に平行な測長ビームを照射し、その反射光を受光してキャリッジ 3 0 の X 軸方向の位置 (X 位置) を計測する。

10

【 0 0 4 1 】

プレート干渉計システム 1 8 の各干渉計の計測結果は、ステージ制御装置 5 0 に供給される (図 3 参照) 。ステージ制御装置 5 0 は、プレート干渉計システム 1 8 の各干渉計の計測結果に基づいて、プレートステージ駆動系 P S D (より正確には、一对の X リニアモータ 3 6 X₁ , 3 6 X₂ 及び Y リニアモータ 3 6 Y) を介してプレートステージ P S T (プレートテーブル P T B) を X Y 平面内で駆動する。本実施形態では、プレートステージ P S T (プレートテーブル P T B) の X 軸方向の駆動に際して、後述するように、干渉計 1 8 X の計測結果と、干渉計 1 8 X₁ 及び 1 8 X₂ の少なくとも一方の計測結果とが用いられる。

20

【 0 0 4 2 】

なお、ステージ制御装置 5 0 は、露光時などに、不図示のフォーカス検出系の検出結果に基づいて、プレートステージ駆動系 P S D (より正確には、3 つの支持機構 (不図示)) を介してプレートテーブル P T B を Z 軸、 y 及び z の少なくとも 1 方向に微小駆動する。

【 0 0 4 3 】

図 3 には、露光装置 1 1 0 のステージ制御に関連する制御系の構成が示されている。図 3 の制御系は、例えばマイクロコンピュータなどを含むステージ制御装置 5 0 を中心として構成されている。

30

【 0 0 4 4 】

露光装置 1 1 0 では、予め行われたプレートのアライメント計測 (例えば、E G A 等) の結果に基づいて、以下の手順で、プレート P の複数のショット領域が露光される。すなわち、主制御装置 (不図示) の指示に応じて、ステージ制御装置 5 0 が、マスク干渉計システム 1 6 及びプレート干渉計システム 1 8 の計測結果を監視して、マスクステージ M S T とプレートステージ P S T とを、プレート P 上の 1 つのショット領域を露光するためのそれぞれの走査開始位置 (加速開始位置) に移動する。そして、ステージ M S T , P S T を X 軸方向に沿って同一方向に同期駆動する。これにより、前述のようにして、プレート P 上の 1 つのショット領域にマスク M のパターンが転写される。走査露光中、ステージ制御装置 5 0 は、例えば補正パラメータに従って、マスクステージ M S T とプレートステージ P S T の同期駆動 (相対位置及び相対速度) を微調整する。これにより、前工程レイヤに形成されたパターンに重なるように、マスク M のパターンの投影像が位置合わせされる。

40

【 0 0 4 5 】

1 つのショット領域に対する走査露光が終了すると、ステージ制御装置 5 0 が、プレートステージ P S T を、次のショット領域を露光するための走査開始位置 (加速開始位置) へ移動 (ステッピング) させる。そして、次のショット領域に対する走査露光を行う。このようにして、プレート P のショット領域間のステッピングとショット領域に対する走査露光とを繰り返すことにより、プレート P 上の全てのショット領域にマスク M のパター

50

ンが転写される。

【0046】

次に、プレートステージPSTを駆動する駆動システム（プレートステージPSTの駆動を制御する制御系）の設計について説明する。

【0047】

本実施形態では、並進方向、一例としてX軸方向にプレートステージPSTを駆動する駆動システムについて説明する。また、比較のため、従来技術についても、簡単に説明する。

【0048】

従来技術では、1入力1出力系（SISO系）のフィードバック制御系（閉ループ制御系）が構築される。この1入力1出力系（SISO系）のフィードバック制御系を、露光装置110に適用する場合を考える。この場合、干渉計18Xにより、制御対象であるプレートステージPST（プレートテーブルPTB）のX位置（制御量）が計測される。その計測結果Xは、ステージ制御装置50に供給される。ステージ制御装置50は、計測結果Xを用いて操作量U（Xリニアモータ36X₁、36X₂が発する駆動力F、又はXリニアモータ36X₁、36X₂のコイルに流す電流量I等）を求め、求められた操作量Uをプレートステージ駆動系PSDへ送る。プレートステージ駆動系PSDは、受信した操作量Uに従って、例えば、駆動力Fに等しい駆動力を発する、あるいは電流量Iに等しい量の電流をXリニアモータ36X₁、36X₂のコイルに流す。これにより、プレートステージPSTが駆動（制御）される。

【0049】

図4には、上述の1入力1出力系（SISO系）のフィードバック制御系におけるプレートステージPST（プレートテーブルPTB）の入出力応答（操作量Uに対する制御量Xの応答）を表現する伝達関数 $P (= X / U)$ の周波数応答特性を示すボード線図（振幅（ゲイン） $|P(s)|$ 及び位相 $\arg(P(s))$ ）、すなわちゲイン線図（上側の図）及び位相線図（下側の図）が示されている。ここで、 $s = j\omega = j2\pi f$ 、 $j = (-1)^{1/2}$ 、 f は周波数である。図中、実線は、例えば後述する力学模型に基づいて求められた理論結果を示し、一点鎖線は、実験結果（実験機を用いて測定された結果）を示す。実験では、操作量Uに対して制御量Xを測定し、その結果を定義式（ $P = X / U$ ）に適用することにより、伝達関数Pの周波数応答特性が求められている。

【0050】

伝達関数Pの周波数応答特性において、10数Hz付近に、共振モード（共振振舞い）が現れることが確認できる。伝達関数Pは、基本的な振舞いとして、周波数fの増加に対して、その振幅を単調に減少し、位相を一定に保つ。これらは、ゲイン線図及び位相線図において、それぞれ、右下がりの直線及び傾き零の直線を示す。そして、伝達関数Pは、共振振舞いとして、10数Hz付近において、振幅を急激に増加そして減少し、位相を急激に減少そして増加する。これらは、ゲイン線図及び位相線図において、それぞれ、連続する山と谷の形及び谷の形を示す。すなわち、伝達関数Pは、10数Hz付近において、剛体モードに対して逆相の共振モードを示す。

【0051】

上述の共振モード（共振振舞い）は、近年の露光装置の大型化により、より低周波数域に現れ、プレートステージPSTの駆動の精密なかつ安定した制御の大きな妨げになっている。なお、図4の周波数応答特性の実験結果において、高周波数域（数10Hz以上）において激しい振動振舞いが見られるが、ここでは特に問題としない。

【0052】

上述の共振モード（共振振舞い）を相殺し、プレートステージPSTの駆動を精密にかつ安定して制御するために、プレート干渉計システム18の干渉計18X（第1計測器）に加えて干渉計18X₁（第2計測器）を用いることにより、1入力2出力系（SIMO系）のフィードバック制御系を構築する。ここで、キャリッジ30のX位置は、干渉計18X₁、18X₂のいずれによっても計測することができ、両者の計測値の平均によって

も得られるが、ここでは、説明の便宜上、キャリッジ30のX位置を計測する第2計測器として、干渉計18X₁を用いるものとしている。

【0053】

この1入力2出力系(SIMO系)のフィードバック制御系では、干渉計18X₁, 18X₂により、それぞれ、プレートステージPST(制御対象)を構成するプレートテーブルPTB(制御対象の第1部分)及びキャリッジ30(制御対象の第2部分)のX位置(制御量)X₁, X₂が計測される。これらの計測結果(X₁, X₂)は、ステージ制御装置50に供給される。ステージ制御装置50は、計測結果(X₁, X₂)を用いて操作量U(駆動力F)を求め、求められた操作量Uをプレートステージ駆動系PSDへ送信する。プレートステージ駆動系PSD(Xリニアモータ36X₁, 36X₂)は、受信した操作量U(駆動力F)に従って、駆動力Fに等しい駆動力をキャリッジ30(第2部分)に加える。これにより、プレートステージPSTが駆動される。

10

【0054】

図5(A)には、キャリッジ30の入出力応答(操作量U(駆動力F)に対する制御量X₂)を表現する伝達関数P₂(=X₂/U)の周波数応答特性を示すボード線図、すなわちゲイン線図(上側の図)及び位相線図(下側の図)が示されている。また、図5(B)には、プレートテーブルPTBの入出力応答(操作量U(駆動力F)に対する制御量X₁)を表現する伝達関数P₁(=X₁/U)の周波数応答特性を示すボード線図、すなわちゲイン線図(上側の図)及び位相線図(下側の図)が示されている。

【0055】

プレートテーブルPTBに対する伝達関数P₁の周波数応答特性(図5(B))は、前述の周波数応答特性(図4)と同様の振舞いを示す。ただし、共振振舞い(共振モード)が現れる周波数域が、幾分高周波数側にシフトしている。これに対し、キャリッジ30に対する伝達関数P₂の周波数応答特性は、伝達関数P₁の周波数応答特性と相反する振舞い(逆相の共振モード)、すなわち剛体モードに対して同相の共振モードを示す。伝達関数P₂は、周波数fの増加に対して、その振幅を急激に減少そして増加し、位相を急激に増加そして減少する。これらは、図5(A)のゲイン線図及び位相線図において、それぞれ、連続する谷と山の形及び山の形を示している。

20

【0056】

また、1入力2出力系(SIMO系)の制御対象に対するフィードバック制御を用いた露光装置が、特開2006-203113号公報に記載されている。しかし、2つの出力を合成して1出力とし、1入力1出力系(SISO系)の制御対象に対して1つの制御器を設計する構成であるため、十分とは言えなかった。

30

【0057】

本第1の実施形態に係る露光装置110では、1入力2出力系(SIMO系)のフィードバック制御系を構築するにあたり、第1計測器(干渉計18X(移動鏡17X))が設置されたプレートステージPSTの第1部分(プレートテーブルPTB)が示す共振モードに対して逆相の共振モードを示すプレートステージPSTの第2部分(キャリッジ30(Xスライダ32X₁))に、第2計測器(干渉計18X₁(コーナーキューブ17X₁))を設置している。これにより、目的のフィードバック制御系の構築が可能となる。

40

【0058】

図6には、プレートステージPSTを駆動する駆動システムに対応する1入力2出力系(SIMO系)の閉ループ制御系(フィードバック制御系)を示すブロック図が示されている。この図6の閉ループ制御系に対応する駆動システムは、制御対象であるプレートステージPSTの第1部分(プレートテーブルPTB)のX位置(第1の制御量X₁)及び第2部分(キャリッジ30)のX位置(第2の制御量X₂)をそれぞれ計測するプレート干渉計システム18の干渉計18X₁, 18X₂と、プレートステージPSTを駆動するステージ制御装置50と、を含む。ステージ制御装置50は、目標値Rと第1、第2の制御量の計測結果(X₁, X₂)とに基づいて操作量Uを演算し、その結果をプレートステージ駆動系PSDに送信してプレートステージPSTを駆動することで、プレートステージ

50

P S Tの位置を制御する。このように、本実施形態では、ステージ制御装置50によるプレートステージP S Tの駆動は、プレートステージP S Tの位置の制御を伴うが、以下においては、単に駆動(ただし、必要に応じて駆動(位置制御))と表記する。

【0059】

ここで、目標値(目標軌道)、制御量、操作量等は、時間の関数として定義されるが、図6及びそれを用いた説明では、制御ブロック図の説明に際しての慣習に従い、それらのラプラス変換を用いて説明を行うものとする。また、後述する演算式 $U(R - X_1, R - X_2)$ についても、ラプラス変換形においてその定義を与えるものとする。また、以降においても、特に断らない限り、ラプラス変換(ラプラス変換形)を用いて説明するものとする。

10

【0060】

ステージ制御装置50は、目標生成部50₀と、2つの制御器50₁、50₂と、2つの減算器50₃、50₄と、加算器50₅と、を含む。なお、これら各部は、実際には、ステージ制御装置50を構成するマイクロコンピュータとソフトウェアによって実現されるが、ハードウェアによって構成しても勿論良い。

【0061】

目標生成部50₀は、プレートステージP S Tの目標値、ここでは目標位置(時々刻々変化する位置の目標値)Rを生成して、減算器50₃、50₄に供給する。

【0062】

一方の減算器50₃は、目標位置Rと干渉計18Xによって計測されるプレートテーブルP T B(伝達関数P₁)のX位置X₁(現在位置)との差、すなわち偏差(R - X₁)を算出し、制御器50₁(伝達関数C₁)に供給する。他方の減算器50₄は、目標位置Rと干渉計18X₁によって計測されるキャリッジ30(伝達関数P₂)のX位置X₂(現在位置)との差、すなわち偏差(R - X₂)を算出し、制御器50₂(伝達関数C₂)に供給する。ここで、X位置X₁、X₂は、それぞれ干渉計18X、18X₁によって計測されるが、図6では、図示が省略されている。以降の閉ループ制御系のブロック図においても同様に計測器は図示が省略される。

20

【0063】

制御器50₁は、偏差(R - X₁)が零となるように、演算(制御演算)により中間量C₁(R - X₁)を算出し、加算器50₅に送出する。同様に、制御器50₂は、偏差(R - X₂)が零となるように、制御演算により中間量C₂(R - X₂)を算出し、加算器50₅に送出する。ここで、C₁、C₂は、それぞれ、制御器50₁、50₂の伝達関数である。伝達関数とは、入力信号r(t)と出力信号C(t)とのラプラス変換の比R(s)/C(s)、すなわちインパルス応答関数のラプラス変換関数である。

30

【0064】

加算器50₅は、制御器50₁、50₂の出力(中間量)を加算して操作量Uを求める。このように、ステージ制御装置50は、干渉計18X、18X₁の計測結果(X₁、X₂)と目標位置Rとに基づいて演算式 $U(R - X_1, R - X_2) = C_1(R - X_1) + C_2(R - X_2)$ で表される制御演算を行って操作量Uを求め、該操作量Uを制御対象であるプレートステージP S Tに与える。これにより、操作量Uに従ってプレートステージP S Tが駆動(位置制御)される。

40

【0065】

本実施形態では、制御器50₁、50₂を設計するために、すなわち伝達関数C₁、C₂を決定するために、簡素化された力学模型(剛体模型)を用いてプレートステージP S Tの力学的運動を表現する。ここでは、図7(A)に示されるように、プレートステージP S Tが、第1計測器(干渉計18X)が設置されたプレートテーブルP T B、及び第2計測器(干渉計18X₁)が設置されたキャリッジ30の2部分から構成されるものとする。そして、これらの部分のX軸方向の運動を、ばねにより連結された2つの剛体の運動、より詳細には、図7(A)に示されるように、プレートステージ駆動系P S D(Xリニアモータ36X₁、36X₂)に対応する駆動系から駆動力Fを与えられてX軸方向に並

50

進する剛体 C r (キャリッジ 3 0 に対応する) と、剛体 C r 上の回転中心 O にてばねを介して連結され、回転中心 O に関して (〇 方向に) 回転する剛体 T b (プレートテーブル P T B に対応する) との運動として表現する。

【 0 0 6 6 】

ここで、剛体 T b , C r の X 位置をそれぞれ X_1 , X_2 、質量をそれぞれ M_1 , M_2 、剛体 T b の (回転中心 O に関する) 慣性モーメントを J_1 、粘性 (剛体 C r の速度に比例する抵抗) を C 、剛体 T b と剛体 C r との間の減衰係数を μ 、ばね定数 (剛体 T b と剛体 C r との間のねじり剛性) を k 、剛体 T b の重心と回転中心 O との間の距離を L 、剛体 T b , C r のそれぞれの X 位置 (X_1 , X_2) 計測の基準位置間の Z 軸方向に関する離間距離を l 、無駄時間を τ_d とする。なお、図 7 (B) の表に、これらの力学パラメータの値が示されている。これらの値は、後述する式 (1 a) 及び式 (1 b) により表されるモデル式が、それぞれ、図 5 (A) 及び図 5 (B) に示される周波数応答特性 (の実験結果) を再現するように、最小自乗法等を用いて決定されたものである。

10

【 0 0 6 7 】

上述の剛体模型において、剛体 T b , C r の入出力応答 (駆動力 F に対する制御量 X_1 , X_2 の応答) を表す伝達関数 P_1 , P_2 は、ラプラス変換形において、次のように与えられる。

【 0 0 6 8 】

【 数 1 】

20

$$P_1(s) = \frac{X_1}{F} = \frac{b_{12}s^2 + b_{11}s + b_{10}}{a_4s^4 + a_3s^3 + a_2s^2 + a_1s} e^{-\tau_d s} \quad \dots(1a)$$

$$P_2(s) = \frac{X_2}{F} = \frac{b_{22}s^2 + b_{21}s + b_{20}}{a_4s^4 + a_3s^3 + a_2s^2 + a_1s} e^{-\tau_d s} \quad \dots(1b)$$

ただし、

$$a_4 = M_1 M_2 L^2 + (M_1 + M_2) J_1,$$

$$a_3 = (M_1 + M_2) \mu + (M_1 L^2 + J_1) C,$$

$$a_2 = (M_1 + M_2) k - (M_1 + M_2) M_1 g L + \mu C,$$

$$a_1 = (k - M_1 g L) C,$$

$$b_{12} = M_1 L^2 + J_1 - M_1 l l,$$

$$b_{22} = M_1 L^2 + J_1,$$

$$b_{11} = b_{21} = \mu,$$

$$b_{20} = b_{10} = k - M_1 g L.$$

30

【 0 0 6 9 】

上記の伝達関数 P_1 , P_2 を用いて、伝達関数 C_1 , C_2 を決定する。便宜のため、伝達関数 P_1 , P_2 , C_1 , C_2 を、分数式形 $P_1 = N_{P1} / D_P D_R$, $P_2 = N_{P2} / D_P D_R$, $C_1 = N_{C1} / D_C$, $C_2 = N_{C2} / D_C$ において表す。ここで、

$$N_{P1} = b_{12}s^2 + b_{11}s + b_{10} \quad \dots(2a)$$

$$N_{P2} = b_{22}s^2 + b_{21}s + b_{20} \quad \dots(2b)$$

$$D_P = s^2 + C / (M_1 + M_2) s \quad \dots(2c)$$

$$D_R = a_4 s^2 + (a_3 - a_4 C / (M_1 + M_2)) s + a_1 (M_1 + M_2) / C \quad \dots(2d)$$

)

である。この場合、フィードバック制御系 (図 6) に対する閉ループ伝達関数の特性方程式 A_{CL} は、 $1 + C_1 P_1 + C_2 P_2$ の分数式の分子部分により与えられる。すなわち、

50

$$A_{CL} = D_C D_P D_R + N_{C1} N_{P1} + N_{C2} N_{P2} \quad \dots (3)$$

特性方程式 A_{CL} において、任意の解析関数を用いて、次式(4)を満たすように N_{C1} , N_{C2} を決定する。

【0070】

$$N_{C1} N_{P1} + N_{C2} N_{P2} = D_R \quad \dots (4)$$

これにより、開ループ伝達関数 $C_1 P_1 + C_2 P_2 = D_C D_P / D_R$ が得られ、 P_1 , P_2 のそれぞれに含まれる共振振舞いを与える極(すなわち P_1 , P_2 のそれぞれが示す共振モード)が極零相殺される。さらに、特性方程式 A_{CL} が安定な極(本説明では便宜上、重根となるようにする)を有するように、すなわち次式(5)を満たすように、 D_C , を決定する。

【0071】

$$A_{CL} = (D_C D_P + \dots) D_R = (s + \dots)^n D_R \quad \dots (5)$$

【0072】

次に、伝達関数 C_1, C_2 ($N_{C1}, N_{C2}, D_C, \dots$) の具体形を決定する。 N_{C1}, N_{C2} が特異点(極)を有する D_R を含まないように、定数 a, b を用いて、 $N_{C1} = a, N_{C2} = b$ と与える。式(2a)~式(2d)及び式(4)より、 $a = M_1 L / l, b = M_1 + M_2 - a$ と定まる。ここで、定数 a, b は、質量 M_1, M_2 および距離 L, l のみに依存し、ばね定数 k 、減衰係数 μ 、粘性 C 等、プレートステージ PST の状態に応じて変化し得るパラメータに依存しないことに注目する。これは、閉ループ伝達関数において P_1, P_2 の共振モードが相殺され、剛体 Tb, Cr の質量 M_1, M_2 (すなわちプレートテーブル PTB 及びキャリッジ 30 の質量) および距離 L, l が変化しない限り、閉ループ伝達関数の振舞いは如何なるプレートステージ PST の状態の変化に対しても不変であることを意味する。

【0073】

残りの D_C , の決定において、幾らかの自由度が残る。そこで、制御器 $50_1, 50_2$ として、例えば PID 制御器を設計することとする。これにより、 $D_C = s^2 + b_1 s + b_2 s^2 + b_3 s + b_4$ が得られる。ただし、 $b_1 = 4 \dots - C / (M_1 + M_2), b_2 = 6 \dots^2 - C / (M_1 + M_2) b_1, b_3 = 4 \dots^3, b_4 = \dots^4$ である。

【0074】

なお、露光装置 110 において、干渉計 $18X, 18X_1$ によるプレートステージ PST の X 位置計測の基準位置、すなわち移動鏡 $17X$ とコーナーキューブ $17X_1$ の設置位置にオフセットがある。このオフセットを取り除くために、制御器 50_2 (伝達関数 C_2) にハイパスフィルタ(不図示)を接続して、低周波数帯域において制御量 X_2 をカットする。

【0075】

図8(A)及び図8(B)には、それぞれ、上で設計された1入力2出力系(SIMO系)のフィードバック制御系における制御器 $50_2, 50_1$ の伝達関数 C_2, C_1 の周波数応答特性を示すボード線図が示されている。図8(A)及び図8(B)のいずれにおいても、上側の図がゲイン線図、下側の図が位相線図である。ここで、伝達関数 C_1, C_2 に含まれる力学パラメータには、図7(B)に示されている値がそれぞれ代入されている。図8(B)には、比較例として、従来の1入力1出力系(SISO系)のフィードバック制御系(例えば特開 $2006-203113$ 号公報参照)における制御器(PID 型制御器とノッチフィルタの組み合わせ)の伝達関数の周波数応答特性(破線で表示)も示されている。ここでは、SISO系の制御器の周波数帯域を 5 Hz ($\omega_n = 10 \text{ rad/s}$)、SIMO系の制御器の周波数帯域を 20 Hz ($\omega_n = 40 \text{ rad/s}$)、ハイパスフィルタのカットオフ周波数を 1 Hz とした。

【0076】

従来のSISO系の制御器の伝達関数は、 30 Hz 付近において特異な振舞いを示すのに対し、SIMO系の制御器 $50_1, 50_2$ の伝達関数 C_1, C_2 は、いずれも全周波数帯域において特異な振る舞いは示していない。

10

20

30

40

50

【0077】

発明者らは、上で設計した制御器 50_1 、 50_2 （伝達関数 C_1 、 C_2 ）を用いて構築されるS I M O系のフィードバック制御系のパフォーマンスを、シミュレーションにより検証した。ここで、プレートステージP S Tの力学的運動（応答特性）は、前述の剛体模型（伝達関数 C_1 、 C_2 ）を用いて再現されている。シミュレーションでは、剛体模型（伝達関数 C_1 、 C_2 ）について3つの条件を適用する。条件Aとして、ノミナルモデル、すなわち全ての力学パラメータに対し図7（B）に与えられた値を、条件Bとして、ばね定数 k に対し図7（B）に与えられた値の0.5倍の値を、その他の力学パラメータに対し図7（B）に与えられた値を、条件Cとして、慣性モーメント J_1 に対し図7（B）に与えられた値の5倍の値を、その他の力学パラメータに対し図7（B）に与えられた値を、適用する。

10

【0078】

図9（A）～図9（C）には、それぞれ条件A～Cに対する、本実施形態のS I M O系のフィードバック制御系の感度関数（閉ループ伝達関数） S （及び $T = 1 - S$ ； T は相補感度関数）の周波数応答特性を示すゲイン線図が示されている。また、比較例として、前述のS I S O系のフィードバック制御系の感度関数 S （及び $T = 1 - S$ ； T は相補感度関数）の周波数応答特性を示すゲイン線図も示されている。ここで、先と同様に、S I S O系の制御器の周波数帯域を 5 Hz （ $\omega_n = 10\text{ rad/s}$ ）、S I M O系の制御器の周波数帯域を 20 Hz （ $\omega_n = 40\text{ rad/s}$ ）、ハイパスフィルタのカットオフ周波数を 1 Hz としている。

20

【0079】

図9（A）に示されるノミナルモデルに対する周波数応答特性では、従来のS I S O系のフィードバック制御系、本実施形態のS I M O系のフィードバック制御系ともに、特異な振る舞いはしていない。なお、S I M O系のフィードバック制御系についての周波数応答特性において、 30 Hz 付近に特異な振舞いが現れているが、これは、ハイパスフィルタに起因する振舞いであり、システム制御上、無視できる程度の微小な振舞いである。

【0080】

図9（B）及び図9（C）において、従来のS I S O系のフィードバック制御系に対する周波数応答特性は、図9（A）における周波数応答特性から大きく変化し、 30 Hz 付近において特異な振舞いを示している。これは、次のような理由による。

30

【0081】

すなわち、図9（A）の条件A（ノミナルモデル）に対しては、プレートステージP S Tの共振振舞い（共振モード）が現れる帯域がノッチフィルタの実効帯域に一致しているため、ノッチフィルタの作用により共振モードが抑制されていた。しかし、図9（B）の条件Bにおいてはばね定数 k の値を、図9（C）の条件Cにおいては慣性モーメント J_1 の値をずらしたことにより、プレートステージP S Tの状態がノミナルモデルから変化して、共振モードが現れる帯域がノッチフィルタの実効帯域から外れたため、ノッチフィルタが作用せず、共振モードが抑制されなかったからである。

【0082】

これに対し、図9（B）及び図9（C）における本実施形態のS I M O系のフィードバック制御系に対する周波数応答特性は、図9（A）におけるノミナルモデルに対する周波数応答特性からまったく変化していない。これは、前述の通り、制御器 50_1 、 50_2 の伝達関数 C_1 、 C_2 （定数 a 、 b ）が質量 M_1 、 M_2 および距離 L 、 l のみに依存し、ばね定数 k 等、プレートステージP S Tの状態に応じて変化し得るパラメータに依存しないからである。この結果は、本実施形態のS I M O系のフィードバック制御系は、如何なるプレートステージP S Tの状態の変化に対してもロバストであることを示唆している。

40

【0083】

なお、従来のS I S O系のフィードバック制御系に対して本実施形態のS I M O系のフィードバック制御系では、プレートステージP S Tを駆動する上で特に重要な低周波数帯域（ 10 Hz 以下）において、約 30 dB 、外乱抑圧特性が向上している。

50

【 0 0 8 4 】

図 1 0 (A) ~ 図 1 0 (C) には、それぞれ条件 A ~ C に対する、本実施形態の S I M O 系のフィードバック制御系と、従来の S I S O 系のフィードバック制御系（比較例）とのそれぞれの開ループ伝達関数の周波数応答特性を示すボード線図が示されている。図 1 0 (A) ~ 図 1 0 (C) のいずれにおいても、上側の図がゲイン線図、下側の図が位相線図である。従来の S I S O 系のフィードバック制御系に対する周波数応答特性は、30 Hz 付近において特異な振舞いを示しているのに対し、本実施形態の S I M O 系のフィードバック制御系に対する周波数応答特性は、全周波数帯域において特異な振舞いを示していない。

【 0 0 8 5 】

図 1 1 (A) ~ 図 1 1 (C) には、それぞれ条件 A ~ C に対する、本実施形態の S I M O 系のフィードバック制御系と、従来の S I S O 系のフィードバック制御系（比較例）とのそれぞれに対するナイキスト線図が示されている。従来の S I S O 系のフィードバック制御系では、ナイキスト軌跡は、ノミナルモデル（条件 A）に対してのみ、点 $(-1, 0)$ を囲まず、ナイキストの安定条件を満たすが、条件 B 及び C に対しては、点 $(-1, 0)$ を囲み、ナイキストの安定条件を満たさない。これに対し、本実施形態の S I M O 系のフィードバック制御系では、ナイキスト軌跡は、全ての条件 A ~ C について、点 $(-1, 0)$ を囲まず、ナイキストの安定条件を満たしている。

【 0 0 8 6 】

図 1 2 には、条件 A ~ C に対するゲイン余裕 (G m) と位相余裕 (P m) とが示されている。従来の S I S O 系のフィードバック制御系では、ノミナルモデル（条件 A）において、ゲイン余裕は 9 . 7 d B、位相余裕は 3 0 . 1 d e g である。条件 B 及び C に対しては、システムは不安定であり、ゲイン余裕と位相余裕は定義できない。これに対し、本実施形態の S I M O 系のフィードバック制御系では、条件 A ~ C ともに、ゲイン余裕は 1 7 . 8 d B、位相余裕は 3 5 . 7 d e g である。通常、高帯域化と安定余裕は、一方が改善されれば他方は改悪する関係にある。それにも関わらず、制御器の周波数帯域を 4 倍にしたにも関わらず、本実施形態の S I M O 系のフィードバック制御系では、従来の S I S O 系に対して、ゲイン余裕、位相余裕ともに劇的に改善されている。

【 0 0 8 7 】

発明者らは、露光装置 1 1 0 を模擬した実験機において、上で設計した制御器 $5 0_1$, $5 0_2$ (伝達関数 C_1 , C_2) を用いて 1 入力 2 出力系 (S I M O 系) のフィードバック制御系を構築し、そのパフォーマンスを実験により検証した。実験においても、先のシミュレーションと同様の 3 つの条件 A ~ C を採用した。

【 0 0 8 8 】

図 1 3 (A) ~ 図 1 3 (C) には、それぞれ条件 A ~ C に対する、本実施形態の 1 入力 2 出力系 (S I M O 系) のフィードバック制御系と、従来の 1 入力 1 出力系 (S I S O 系) のフィードバック制御系（比較例）とのそれぞれの感度関数 S の周波数応答特性を示すゲイン線図が示されている。ここで、先と同様に、S I S O 系の制御器の周波数帯域を 5 H z ($\omega_n = 1 0 \text{ rad/s}$)、S I M O 系の制御器の周波数帯域を 2 0 H z ($\omega_n = 4 0 \text{ rad/s}$)、ハイパスフィルタのカットオフ周波数を 1 H z としている。

【 0 0 8 9 】

従来の S I S O 系のフィードバック制御系に対する周波数応答特性は、図 1 3 (A) からわかるように条件 A (ノミナルモデル) では特異な振る舞いを示さないが、図 1 3 (B) 及び図 1 3 (C) に示されるように、条件 B 及び C においては 3 0 H z 付近において特異な振舞いを示す。これに対し、本実施形態の S I M O 系のフィードバック制御系に対する周波数応答特性は、いずれの条件においても、30 Hz 付近にハイパスフィルタに起因する無視できる程度の微小な特異振舞いを、高周波数帯域 (1 0 0 H z 以上) において高次共振モードに起因する微小な特異振舞いを、それぞれ示すが、これらを除いて、特に露光装置 1 1 0 において問題となる低周波数帯域においては問題となるような特異な振舞いを示していない。

10

20

30

40

50

【 0 0 9 0 】

図 1 4 (A) ~ 図 1 4 (C) には、それぞれ条件 A ~ C に対する、本実施形態の S I M O 系のフィードバック制御系と、従来の S I S O 系のフィードバック制御系（比較例）とのそれぞれに対する開ループ伝達関数の周波数応答特性を示すボード線図が示されている。図 1 4 (A) ~ 図 1 4 (C) のいずれにおいても、上側の図がゲイン線図、下側の図が位相線図である。従来の S I S O 系のフィードバック制御系に対する周波数応答特性は、30 Hz 付近において特異な振舞いを示している。これに対し、本実施形態の S I M O 系のフィードバック制御系に対する周波数応答特性は、いずれの条件においても、30 Hz 付近にハイパスフィルタに起因する無視できる程度の微小な特異振舞いを、高周波数帯域（100 Hz 以上）において高次共振モードに起因する微小な特異振舞いを、それぞれ示すが、これらを除いて、特に露光装置 1 1 0 において問題となる低周波数帯域において問題となるような特異な振舞いを示していない。

10

【 0 0 9 1 】

図 1 5 (A) ~ 図 1 5 (C) には、それぞれ条件 A ~ C に対する、本実施形態の S I M O 系のフィードバック制御系と、従来の S I S O 系のフィードバック制御系（比較例）とのそれぞれに対するナイキスト線図が示されている。従来の S I S O 系のフィードバック制御系に対し、ナイキスト軌跡は、ノミナルモデル（条件 A）に対してのみ、点（-1, 0）を囲まず、ナイキストの安定条件を満たすが、条件 B 及び C に対しては、点（-1, 0）を囲み、ナイキストの安定条件を満たさない。これに対し、本実施形態の S I M O 系のフィードバック制御系に対し、ナイキスト軌跡は、全ての条件 A ~ C について、点（-1, 0）を囲まず、ナイキストの安定条件を満たしている。

20

【 0 0 9 2 】

発明者らは、さらに、実験機において、図 1 6 (A) に示されるプレートステージ P S T の目標軌道（位置及び速度のそれぞれに関する目標値）のうち位置の目標値 R に対し、フィードバック制御系の追従性能を検証した。

【 0 0 9 3 】

図 1 6 (B) には、本実施形態の S I M O 系のフィードバック制御系と、従来の S I S O 系のフィードバック制御系（比較例）とのそれぞれにおけるプレートステージ P S T の追従誤差の時間変化が示されている。追従誤差は、特に、プレートステージ P S T の加減速時に大きくなる。図 1 6 (B) から明らかなように、従来の S I S O 系のフィードバック制御系に対し、本実施形態の S I M O 系のフィードバック制御系では、プレートステージ P S T の追従性能が劇的に改善されていることが分かる。図 1 6 (C) には、フィードバック制御にフィードフォワード制御を組み合わせた場合の追従誤差の時間変化が示されている。フィードフォワード制御を組み合わせることにより、さらに、追従性能が改善されることが分かる。

30

【 0 0 9 4 】

以上説明したように、本実施形態に係る露光装置 1 1 0 によると、プレートステージ P S T（制御対象）の位置（第 1 制御量） X_1 を計測する干渉計 1 8 X（第 1 計測器）が設置されたプレートテーブル P T B（制御対象の第 1 部分）が示す共振モードと逆相の剛体モードに対する共振モードを示すキャリッジ 3 0（制御対象の第 2 部分）に、プレートステージ P S T の位置（第 2 制御量） X_2 を計測する干渉計 1 8 X₁（第 2 計測器）が設置される。第 1 及び第 2 計測器を用いることにより、プレートステージ P S T を駆動する、高帯域でロバストな駆動システムを設計することが可能となる。

40

【 0 0 9 5 】

また、駆動システムの設計に際し、プレートステージ P S T の位置（第 1 及び第 2 制御量） X_1 、 X_2 の計測結果を用いて操作量を求めるための演算式 $U(X_1, X_2) = C_1 X_1 + C_2 X_2$ において、伝達関数 C_1 、 C_2 を、プレートステージ P S T の第 1 及び第 2 部分（プレートテーブル P T B 及びキャリッジ 3 0）の応答を表現する伝達関数 P_1 、 P_2 のそれぞれに含まれる共振モードに対応する極が開ループ伝達関数 $C_1 P_1 + C_2 P_2$ において相殺されるように決定する。さらに、伝達関数 P_1 、 P_2 の具体形を、第 1 及

50

び第 2 部分の運動をばねにより連結された 2 つの剛体の運動として表現する力学模型（剛体模型）を用いて与える。これにより、閉ループ伝達関数において P_1 、 P_2 の共振振舞い（共振モード）が相殺され（ P_1 の共振モードが P_2 の共振モードにより相殺され）、第 1 及び第 2 部分の質量（すなわちプレートテーブル P T B 及びキャリッジ 3 0 の質量）および距離 L_1 が変化しない限り、如何なる状態の変化に対してもロバストなプレートステージ P S T の駆動（位置制御）が可能な駆動システムを設計することが可能となる。

【 0 0 9 6 】

また、本実施形態に係る露光装置 1 1 0 によると、プレートステージ P S T の第 1 部分（プレートテーブル P T B）の第 1 制御量（位置）を計測するとともに、第 1 部分が示す共振モードと逆相の剛体モードに対する共振モードを示すプレートステージ P S T の第 2 部分（キャリッジ 3 0）の第 2 制御量（位置）を計測し、それらの計測結果と目標値とに基づいて制御演算を行って操作量を求め、得られた操作量をプレートステージ駆動系 P S D に与えることにより、プレートステージ P S T を駆動する。これにより、プレートステージ P S T を精密に且つ安定して駆動することが可能となる。

【 0 0 9 7 】

また、本実施形態に係る露光装置 1 1 0 は、上述のように設計されたプレートステージ P S T の駆動システムを備えるため、プレートステージ P S T を精密に且つ安定して駆動することが可能となり、露光精度、すなわち重ね合わせ精度の向上が可能となる。

【 0 0 9 8 】

なお、本実施形態では、制御対象であるプレートステージ P S T の制御量として位置を選択したが、これに代えて速度、加速度等、位置以外の位置に関連する物理量を制御量として選択しても良い。かかる場合、プレート干渉計システム 1 8（を構成する干渉計 1 8 X、1 8 Y、1 8 X₁）とは独立の速度計測器、加速度計測器等を設置し、それらを用いて速度、加速度等を計測することとする。あるいは、プレート干渉計システム 1 8 の計測値の 1 階差分又は 2 階差分演算により、速度、加速度を算出して用いても良い。

【 0 0 9 9 】

また、位置、速度、加速度等、位置に関連する物理量を複数組み合わせることでプレートステージ P S T の制御量とすることも可能である。図 1 7 には、本実施形態に係る 1 入力 2 出力系のフィードバック制御系の変形例のブロック図が示されている。この変形例のフィードバック制御系は、全体として速度制御ループを構成している。従って、目標生成部 5 0 が目標値として目標速度 V を生成し、制御対象であるプレートステージ P S T の制御量も速度となっている。プレート干渉計システム 1 8 を構成する第 1 計測器（干渉計 1 8 X）及び該第 1 計測器とは独立の第 1 速度計測器（不図示）によってプレートステージ P S T の第 1 部分（プレートテーブル P T B）の位置 X_1 及び速度 V_1 がそれぞれ計測され、これらの計測結果が混合部 5 2 に送られる。位置 X_1 の計測結果は、微分器 5 2 a を介して、混合器 5 2 b により速度 V_1 の計測結果と合成され、合成された結果はステージ制御装置 5 0 の減算器 5 0₃ にフィードバックされる。同様に、プレート干渉計システム 1 8 を構成する第 2 計測器（干渉計 1 8 X₁）及び第 2 計測器とは独立の第 2 速度計測器（不図示）によってプレートステージ P S T の第 2 部分（キャリッジ 3 0）の位置 X_2 及び速度 V_2 がそれぞれ計測され、それらの計測結果が混合部 5 2 に送られる。位置 X_2 の計測結果は、微分器 5 2 a を介して、混合器 5 2 b により速度 V_2 の計測結果と合成され、合成された結果はステージ制御装置 5 0 の減算器 5 0₄ にフィードバックされる。ここで、混合器 5 2 b は、一例として、同じカットオフ周波数を有するハイパスフィルタとローパスフィルタを含み、これらの 2 つのフィルタを用いて位置 X_1 、 X_2 及び速度 V_1 、 V_2 の一方の計測結果が通過するように構成されている。この混合式のフィードバック制御系により、プレートステージ P S T をさらに精密に且つ安定して駆動する（すなわち速度（及び位置）を制御する）ことが可能となる。

【 0 1 0 0 】

なお、上記実施形態では、X 軸方向についてプレートステージ P S T を駆動する場合について説明したが、Y 軸方向及び Z 軸方向についてプレートステージ P S T を駆動する場

10

20

30

40

50

合についても、同様にして、フィードバック制御系を設計することができ、同等の効果を
得ることができる。

【0101】

《第2の実施形態》

次に、第2の実施形態について、図6、図18～図24に基づいて説明する。ここで、
前述した第1の実施形態と同一の構成部分には同一の符号を用いるものとする。この第2
の実施形態に係る露光装置の構成等は、第1の実施形態と同様であるので装置構成等の説
明は省略する。ただし、本第2の実施形態では、回転（傾斜）方向（ x 方向、 y 方向
、及び z 方向）についてプレートステージPSTを駆動する駆動システムを取り扱うこと
とし、その設計等について説明する。ここでは、一例として、プレートステージPST
を、 z 方向に駆動する駆動システムについて説明する。

10

【0102】

露光装置110では、前述のごとく、Xリニアモータ $36X_1$ 、 $36X_2$ がそれぞれ発
生するX軸方向の駆動力（推力）を異ならせることでZ軸周りのトルクを発生させて、
キャリッジ30及びプレートテーブルPTBを z 方向に駆動する。

【0103】

また、プレートステージPSTの z 方向の位置（ヨーイング値、ヨー角）は、前述の
通り、プレート干渉計システム18の干渉計 $18X$ により計測される。すなわち、干渉計
 $18X$ によってプレートテーブルPTBの z 位置（ z_1 ）が計測される。また、プレ
ート干渉計システム18の干渉計 $18X_1$ 、 $18X_2$ のそれぞれによるキャリッジ30の
X位置の計測結果同士の差に基づいて、ステージ制御装置50は、キャリッジ30の z
位置（ z_2 ）を求めることができる。

20

【0104】

プレート干渉計システム18の干渉計 $18X$ 、 $18X_1$ 及び $18X_2$ を用いて、図6の
ブロック図で表される1入力2出力系（SIMO系）のフィードバック制御系を構築する
。なお、制御対象の第2部分であるキャリッジ30の z 位置（ z_2 ）を計測する第2
計測器は干渉計 $18X_1$ 、 $18X_2$ から構成されるが、以下では、説明の便宜上、第2計
測器を、干渉計 $18X_1$ と表記する。

【0105】

図6に示される、本第2の実施形態に係るフィードバック制御系では、干渉計 $18X$ 、
 $18X_1$ （第1及び第2計測器）により、それぞれ、プレートステージPST（制御対象）
のプレートテーブルPTB（第1部分）及びキャリッジ30（第2部分）の z 位置（
第1制御量 z_1 及び第2制御量 z_2 ）が計測される。

30

【0106】

第1及び第2制御量の計測結果（ z_1 、 z_2 ）は、ステージ制御装置50に供給さ
れる。ステージ制御装置50は、計測結果（ z_1 、 z_2 ）を用いて操作量 U （トルク
）を求め、求められた操作量 U をプレートステージPST（制御対象）を駆動するプレ
ートステージ駆動系PSDへ送信する。プレートステージ駆動系PSD（Xリニアモータ
 $36X_1$ 、 $36X_2$ ）は、受信した操作量 U （トルク）に従って、Xリニアモータ 36
 X_1 、 $36X_2$ が発生する駆動力（推力）を互いに異ならせることによりトルクに等し
いトルクをキャリッジ30（第2部分）に加える。これにより、プレートステージPST
が z 方向に関して駆動され、 z 方向の位置が制御される。このように、本第2の実施
形態においても、ステージ制御装置50によるプレートステージPSTの駆動は、プレ
ートステージPSTの位置の制御を伴うが、以下においては、単に駆動と表記する。

40

【0107】

ステージ制御装置50に含まれる目標生成部 50_0 は、プレートステージPSTの目標
値 R （この場合は z 位置（ヨー角）の目標値）を生成して、減算器 50_3 、 50_4 に供
給する。一方の減算器 50_3 は、目標値 R と干渉計 $18X$ によって計測されるプレートテ
ーブルPTBの z 位置 z_1 （現在位置）との差、すなわち偏差（ $R - z_1$ ）を算出
し、制御器 50_1 （伝達関数 C_1 ）に供給する。他方の減算器 50_4 は、目標値 R と干渉

50

計 18 X₁ によって計測されるキャリッジ 30 (伝達関数 P₂) の z 位置 z₂ (現在位置) との差、すなわち偏差 (R - z₂) を算出し、制御器 50₂ (伝達関数 C₂) に供給する。

【0108】

制御器 50₁ は、偏差 (R - z₁) が零となるように、演算 (制御演算) により中間量 C₁ (R - z₁) を算出し、加算器 50₅ に送出する。同様に、制御器 50₂ は、偏差 (R - z₂) が零となるように、制御演算により中間量 C₂ (R - z₂) を算出し、加算器 50₅ に送出する。

【0109】

加算器 50₅ は、制御器 50₁, 50₂ の出力 (中間量) を加算して操作量 U を求める。このように、ステージ制御装置 50 は、干渉計 18 X₁, 18 X₂ の計測結果 (z₁, z₂) と目標値 R とに基づいて演算式 $U (R - z_1, R - z_2) = C_1 (R - z_1) + C_2 (R - z_2)$ で表される制御演算を行って操作量 U を求め、該操作量 U を制御対象であるプレートステージ P S T に与える。これにより、操作量 U に従ってプレートステージ P S T が z 方向に駆動される。

【0110】

本実施形態では、制御器 50₁, 50₂ を設計する (伝達関数 C₁, C₂ を決定する) ために、簡素化された力学模型 (剛体模型) を用いてプレートステージ P S T の力学的運動を表現する。図 18 (A) は、一般的な 2 慣性系の力学模型を表す図である。ここで、プレートステージ P S T は、その 2 慣性系の一例であって、図 1 に示されるように、第 1 計測器 (干渉計 18 X) が設置されたプレートテーブル P T B、及び第 2 計測器 (干渉計 18 X₁) が設置されたキャリッジ 30 の 2 部分から構成されるものとする。そして、これらの部分の z 方向の運動 (回転) を、ばねにより連結された 2 つの剛体の回転運動、より詳細には、プレートステージ駆動系 P S D (X リニアモータ 36 X₁, 36 X₂) に対応する駆動系からトルク を与えられる剛体 L 2 (キャリッジ 30 に対応する) と、剛体 L 2 にばねを介して連結された剛体 L 1 (プレートテーブル P T B に対応する) と、の回転運動として表現する。

【0111】

ここで、剛体 L 1, L 2 の z 位置をそれぞれ z₁, z₂、慣性モーメントをそれぞれ J₁, J₂、ばね定数 k とする。なお、図 18 (B) の表に、これら力学パラメータの値 (実測値) が示されている。

【0112】

上述の剛体模型において、剛体 L 1, L 2 の入出力応答 (トルク に対する制御量 z₁, z₂ の応答) を表す伝達関数 P₁, P₂ は、ラプラス変換形において、次のように与えられる。

【0113】

【数 2】

$$P_1(s) = \frac{\theta z_1}{\tau} = \frac{1}{J_2 s^2} \frac{\frac{k}{J_1}}{s^2 + \frac{k}{J_1} \left(1 + \frac{J_1}{J_2}\right)} \dots (6a)$$

$$P_2(s) = \frac{\theta z_2}{\tau} = \frac{1}{J_2 s^2} \frac{s^2 + \frac{k}{J_1}}{s^2 + \frac{k}{J_1} \left(1 + \frac{J_1}{J_2}\right)} \dots (6b)$$

10

20

30

40

50

【 0 1 1 4 】

図 19 (A) 及び図 19 (B) には、それぞれ、伝達関数 P_2 , P_1 の周波数応答特性を示すボード線図が示されている。図 19 (A) 及び図 19 (B) のいずれにおいても、上側の図がゲイン線図、下側の図が位相線図である。2つの剛体 L_1 , L_2 の回転運動に係る伝達関数 P_1 , P_2 は、並進運動についての剛体模型 (図 7 (A)) における2つの剛体 C_r , T_b の並進運動に係る伝達関数 P_1 , P_2 (図 5 (A) 及び図 5 (B) 参照) とほぼ同様の振舞いを示す。伝達関数 P_1 は、基本的な振舞いとして、周波数 f の増加に対して、その振幅を単調に減少し、位相を一定に保つ。そして、伝達関数 P_1 は、共振モード (共振振舞い) として、60 数 Hz 付近において、振幅を急激に増加そして減少し、位相を急激に減少する。これらは、図 19 (B) のゲイン線図及び位相線図において、それぞれ、山形及びステップ形状を示す。一方、伝達関数 P_2 の周波数応答特性は、伝達関数 P_1 の周波数応答特性と相反する共振モード (共振振舞い) 、すなわち逆相の共振モードを示す。すなわち、伝達関数 P_2 は、基本的な振舞いとして、周波数 f の増加に対して、その振幅を単調に減少し、位相を一定に保つ。そして、伝達関数 P_2 は、60 数 Hz 付近において、その振幅を急激に減少そして増加し、位相を急激に増加そして減少する。これらは、図 19 (A) のゲイン線図及び位相線図において、それぞれ、連続する谷と山の形及びパルス形状を示している。

10

【 0 1 1 5 】

従って、剛体 L_1 (プレートテーブル P T B) に対する伝達関数 P_1 は、剛体モードと逆相の共振モードを示し、剛体 L_2 (キャリッジ 3 0) に対する伝達関数 P_2 は、剛体モードと同相の共振モードを示すことから、第 1 の実施形態と同様に、プレートテーブル P T B (伝達関数 P_1) の共振振舞いをキャリッジ 3 0 (伝達関数 P_2) の共振振舞いでもって相殺する 1 入力 2 出力系 (S I M O 系) のフィードバック制御系を構築することができる。

20

【 0 1 1 6 】

上記の伝達関数 P_1 , P_2 を用いて、伝達関数 C_1 , C_2 を決定する。便宜のため、伝達関数 P_1 , P_2 , C_1 , C_2 を、分数式形 $P_1 = N_{P1} / D_P D_R$, $P_2 = N_{P2} / D_P D_R$, $C_1 = N_{C1} / D_C$, $C_2 = N_{C2} / D_C$ において表す。ここで、

$$N_{P1} = k / J_1 \quad \dots (7a)$$

$$N_{P2} = s^2 + k / J_1 \quad \dots (7b)$$

$$D_P = J_2 s^2 \quad \dots (7c)$$

$$D_R = s^2 + (k / J_1) (1 + J_1 / J_2) \quad \dots (7d)$$

30

である。この場合、フィードバック制御系 (図 6) の閉ループ伝達関数の特性方程式 A_{CL} (式 (3)) において、任意の解析関数 を用いて、式 (4) を満たすように N_{C1} , N_{C2} を決定する。これにより、開ループ伝達関数 $C_1 P_1 + C_2 P_2 = / D_C D_P$ が得られ、 P_1 , P_2 のそれぞれに含まれる共振振舞いを与える極 (すなわち P_1 , P_2 のそれぞれが示す共振モード) が極零相殺される。さらに、特性方程式 A_{CL} が安定な極 (本説明では便宜上、重根となるようにする) を有するように、すなわち式 (5) を満たすように、 D_C , を決定する。

【 0 1 1 7 】

次に、伝達関数 C_1 , C_2 (N_{C1} , N_{C2} , D_C ,) の具体形を決定する。第 1 の実施形態と同様に、 N_{C1} , N_{C2} が特異点 (極) を有する D_R を含まないように、定数 a , b を用いて、 $N_{C1} = a$, $N_{C2} = b$ と与える。式 (7 a) ~ 式 (7 d) 及び式 (4) より、 $a = J_1 / J_2$, $b = 1$ と定まる。ここで、定数 a , b は、慣性モーメント J_1 , J_2 のみに依存し、ばね定数 k 、すなわちプレートステージ P S T の状態に応じて変化し得るパラメータに依存しないことに注目する。残りの D_C , は、PID 型の制御器 50_1 , 50_2 を設計することで、 $D_C = s^2 + b_1 s$, $= b_2 s^2 + b_3 s + b_4$ と定まる。ただし、 $b_1 = 4 n$, $b_2 = 6 J_2 n^2$, $b_3 = 4 J_2 n^3$, $b_4 = J_2 n^4$ である。

40

【 0 1 1 8 】

50

図20(A)及び図20(B)には、それぞれ、上で設計された1入力2出力系(SIMO系)のフィードバック制御系における制御器50₂, 50₁の伝達関数C₂, C₁の周波数応答特性を示すボード線図が示されている。図20(A)及び図20(B)のいずれにおいても、上側の図がゲイン線図、下側の図が位相線図である。ここで、伝達関数C₁, C₂に含まれる力学パラメータには、図18(B)に示されている値がそれぞれ代入されている。図20(B)には、比較例として、従来の1入力1出力系(SISO系)のフィードバック制御系(例えば特開2006-203113号公報参照)における制御器(PID型制御器とノッチフィルタの組み合わせ)の伝達関数の周波数応答特性も表されている。ここで、SISO系の制御器の周波数帯域を5Hz($\omega_n = 10 \text{ rad/s}$)、SIMO系の制御器の周波数帯域を20Hz($\omega_n = 40 \text{ rad/s}$)とした。

10

【0119】

従来のSISO系の制御器の伝達関数は、60Hz付近において特異な振舞いを示すのに対し、SIMO系の制御器50₁, 50₂の伝達関数C₁, C₂は、いずれも全周波数帯域において特異な振舞いを示していない。

【0120】

発明者らは、上で設計した制御器50₁, 50₂(伝達関数C₁, C₂)を用いて構築される1入力2出力系(SIMO系)のフィードバック制御系のパフォーマンスを、シミュレーションにより検証した。ここで、プレートステージPSTの力学的運動(応答特性)は、前述の剛体模型(伝達関数P₁, P₂)を用いて再現されている。

【0121】

20

図21には、本実施形態のSIMO系のフィードバック制御系と、従来のSISO系のフィードバック制御系(比較例)とのそれぞれに対する感度関数S(及びT=1-S; Tは相補感度関数)の周波数応答特性を示すゲイン線図が示されている。いずれのフィードバック制御系においても、閉ループ伝達関数は、全周波数帯域において特異な振舞いを示していない。

【0122】

ただし、従来のSISO系のフィードバック制御系に対して本実施形態のSIMO系のフィードバック制御系では、プレートステージPSTを駆動する上で特に重要な低周波数帯域(10Hz以下)において、約30dB、外乱抑圧特性が向上している。

【0123】

30

図22には、本実施形態のSIMO系のフィードバック制御系と、従来のSISO系のフィードバック制御系(比較例)とのそれぞれに対する開ループ伝達関数の周波数応答特性を示すボード線図が示されている。図22において、上側の図がゲイン線図、下側の図が位相線図である。いずれのフィードバック制御系においても、開ループ伝達関数は、全周波数帯域において特異な振舞いを示していない。

【0124】

図23には、本実施形態のSIMO系のフィードバック制御系と、従来のSISO系のフィードバック制御系(比較例)とのそれぞれに対するナイキスト線図が示されている。いずれのフィードバック制御系についても、ナイキスト軌跡は点(-1, 0)を囲まず、ナイキストの安定条件を満たしている。

40

【0125】

図24には、ゲイン余裕(Gm)と位相余裕(Pm)とが示されている。従来のSISO系のフィードバック制御系に対し、ゲイン余裕は12.2dB、位相余裕は30.2degである。これに対し、本実施形態のSIMO系のフィードバック制御系に対し、ゲイン余裕は無限大、位相余裕は43.5degである。制御器の周波数帯域を4倍にしたにも関わらず、本実施形態のSIMO系のフィードバック制御系では、従来のSISO系に対して、ゲイン余裕、位相余裕ともに劇的に改善されている。

【0126】

以上説明したように、本第2の実施形態に係る露光装置によると、プレートステージPST(制御対象)の位置(第1制御量)z₁を計測する干渉計18X(第1計測器)が

50

設置されたプレートテーブル P T B (制御対象の第 1 部分) が示す共振モードと逆相の剛体モードに対する共振モードを示すキャリッジ 3 0 (制御対象の第 2 部分) に、プレートステージ P S T の位置 (第 2 制御量) z_2 を計測する干渉計 1 8 X₁ (第 2 計測器) が設置される。第 1 及び第 2 計測器を用いることにより、回転方向についてのプレートステージ P S T の駆動についても、第 1 の実施形態における並進方向についてのプレートステージ P S T の駆動と同様に、プレートステージ P S T を駆動 (z 位置を制御) する、高帯域でロバストな駆動システムを設計することが可能となる。

【 0 1 2 7 】

また、駆動システムの設計に当たり、プレートステージ P S T の位置 (第 1 及び第 2 制御量) z_1 , z_2 の計測結果を用いて操作量を求めるための演算式 $U(z_1, z_2) = C_1 z_1 + C_2 z_2$ において、伝達関数 C_1 , C_2 を、プレートステージ P S T の第 1 及び第 2 部分 (プレートテーブル P T B 及びキャリッジ 3 0) の応答を表現する伝達関数 P_1 , P_2 のそれぞれに含まれる共振モードに対応する極が開ループ伝達関数 $C_1 P_1 + C_2 P_2$ において相殺されるように決定する。さらに、伝達関数 P_1 , P_2 の具体形を、第 1 及び第 2 部分の運動をばねにより連結された 2 つの剛体の運動として表現する力学模型 (剛体模型) を用いて与える。これにより、閉ループ伝達関数において P_1 , P_2 の共振モード (共振振舞い) が相殺され (P_1 の共振モードが P_2 の共振モードにより相殺され)、第 1 及び第 2 部分の慣性モーメント (すなわちプレートテーブル P T B 及びキャリッジ 3 0 の慣性モーメント) が変化しない限り、如何なる状態の変化に対してもロバストなプレートステージ P S T の駆動システムを設計することが可能となる。

【 0 1 2 8 】

また、本第 2 の実施形態に係る露光装置によると、プレートステージ P S T の第 1 部分 (プレートテーブル P T B) の第 1 制御量 (z 方向の位置 (回転位置)) を計測するとともに、第 1 部分が示す共振モードと逆相の剛体モードに対する共振モードを示すプレートステージ P S T の第 2 部分 (キャリッジ 3 0) の第 2 制御量 (z 方向の位置 (回転位置)) を計測し、それらの計測結果と目標値とに基づいて制御演算を行って操作量を求め、得られた操作量をプレートステージ駆動系 P S D に与えることにより、プレートステージ P S T を駆動する。これにより、プレートステージ P S T を精密に且つ安定して駆動することが可能となる。

【 0 1 2 9 】

また、本第 2 の実施形態に係る露光装置は、上述のように設計されたプレートステージ P S T の駆動システムを備えるため、プレートステージ P S T を精密に且つ安定して駆動することが可能となり、露光精度、すなわち重ね合わせ精度の向上が可能となる。

【 0 1 3 0 】

なお、上記第 2 の実施形態では、制御対象であるプレートステージ P S T の制御量として回転位置を選択したが、これに代えて回転速度、回転加速度等、回転位置以外の回転位置に関連する物理量を制御量として選択しても良い。かかる場合、プレート干渉計システム 1 8 (を構成する干渉計 1 8 X, 1 8 Y, 1 8 X₁, 1 8 X₂) とは独立の回転速度計測器、回転加速度計測器等を設置し、それらを用いて回転速度、回転加速度等を計測することとする。あるいは、プレート干渉計システム 1 8 の計測値の 1 階差分又は 2 階差分演算により、回転速度、回転加速度を算出して用いても良い。

【 0 1 3 1 】

また、第 1 の実施形態に対する変形例 (図 1 7) と同様に、回転位置、回転速度、回転加速度等、回転位置に関連する物理量を複数組み合わせることでプレートステージ P S T の制御量とすることも可能である。

【 0 1 3 2 】

また、本実施形態では、 z 方向についてプレートステージ P S T を駆動する場合について説明したが、 x 方向及び y 方向についてプレートステージ P S T を駆動する場合についても、同様に、フィードバック制御系を設計することができ、同等の効果を得ることができる。

【 0 1 3 3 】

なお、上記第 1、第 2 の実施形態に係る露光装置では、剛体モードと逆相の共振モードを示すプレートテーブル P T B (プレートステージ P S T の第 1 部分) に第 1 計測器 (干渉計 1 8 X (移動鏡 1 7 X)) を設置し、剛体モードと同相の共振モードを示すキャリッジ 3 0 (プレートステージ P S T の第 2 部分) に第 2 計測器 (干渉計 1 8 X₁ (及び干渉計 1 8 X₂) (コーナーキューブ 1 7 X₁ (及び X₂))) を設置し、これら第 1 及び第 2 計測器を用いてフィードバック制御系を構築した。しかし、これに限らず、例えば、制御対象 (プレートステージ P S T) の剛体モードと同相の共振モードを示す位置 (部分) に配置されたセンサ (第 1 計測器) を使ったセミクロズド制御の場合などでは、制御対象の剛体モードと逆相の共振モードを示す位置 (部分) にセンサ (第 2 計測器) を (追加) 配置し、上記第 1、第 2 の実施形態と同様のフィードバック制御系を構築し、発生する負荷側の振動を、抑圧することとしても良い。

10

【 0 1 3 4 】

また、上記第 1、第 2 の実施形態では、プレートの走査方向に移動するキャリッジと該キャリッジ上に支持されてプレートを保持して非走査方向に移動するプレートテーブルとの 2 部分 (あるいは 3 部分以上) から構成されるガントリー型のプレートステージ P S T を制御対象として、該プレートステージ P S T を精密に且つ安定して駆動する駆動システムを構築したが、これに限らず、2 次元方向に移動する粗動ステージと該粗動ステージ上に支持されてプレート (基板) を保持して微小移動する微動ステージとの 2 部分 (あるいは 3 部分以上) を有する粗微動型の基板ステージに対しても、上記第 1、第 2 の実施形態と同様にして駆動システムを構築することが可能である。

20

【 0 1 3 5 】

《第 3 の実施形態》

次に、第 3 の実施形態について、図 2 5 及び図 2 6 に基づいて説明する。ここで、前述した第 1 の実施形態と同一若しくは同等の構成部分については、同一の符号を用いるとともに、その説明を簡略若しくは省略する。

【 0 1 3 6 】

本第 3 の実施形態では、前述の第 1、第 2 の実施形態と異なり、単一部分から成る移動ステージ、一例として露光装置 1 1 0 におけるマスクステージ M S T を制御対象とする駆動システムを構築する場合について説明する。

30

【 0 1 3 7 】

ここでは、一例として、走査方向 (X 軸方向) についてのマスクステージ M S T の駆動について説明する。

【 0 1 3 8 】

マスクステージ M S T は、図 2 5 に示されるように、マスクステージ本体 6 0 と、マスクステージ本体 6 0 の Y 軸方向の一側と他側に、支持部材 6 1 (+ Y 側の支持部材は不図示) をそれぞれ介して設けられた一対の可動子 6 2 A, 6 2 B と、を備えている。

【 0 1 3 9 】

マスクステージ本体 6 0 は、平面視 (上方から見て) 矩形の枠状部 6 0₀ と、枠状部 6 0₀ の + Y 側と - Y 側にそれぞれ一体的に設けられたスライダ部 6 0₁, 6 0₂ とを有している。一方のスライダ部 6 0₁ の + Y 端面には、Y 軸に垂直な反射面を有する平面ミラーから成る移動鏡 1 5 Y が固定されている。すなわち、スライダ部 6 0₁ は、ミラー支持部材を兼ねている。枠状部 6 0₀ のほぼ中央には、平面視矩形の凹部 6 0 a が形成され、凹部 6 0 a の内部底面の中央部には、照明光 I L が通る開口 (不図示) が形成されている。

40

【 0 1 4 0 】

枠状部 6 0₀ 上面の凹部 6 0 a の + Y 側と - Y 側に各 4 つのマスク保持機構 6 3 が設けられている。凹部 6 0 a 内に収容されたマスク M は、8 つのマスク保持機構 6 3 によって、± Y 端部が押さえつけられ、枠状部 6 0₀ に対して固定されている。

【 0 1 4 1 】

50

枠状部 60_0 の + Y 側端部及び - Y 側端部の中央には、それぞれコーナーキューブ $15X_1$, $15X_2$ が固定されている。また、スライダ部 60_1 , 60_2 のそれぞれのほぼ中央には、コーナーキューブ $15X_{12}$, $15X_{22}$ が、固定されている。

【0142】

スライダ部 60_1 , 60_2 は、前述の一对のマスキステージガイド（不図示）の上に、不図示の気体静圧軸受（例えばエアベアリング）を介して浮上支持されている。

【0143】

一对の可動子 $62A$, $62B$ は、それぞれ対応する固定子（不図示）と係合して、マスキステージ駆動系 MSD を構成する一对のリニアモータを構成する。一对のリニアモータにより、マスキステージ MST は走査方向（X 軸方向）に駆動されるとともに、非走査方向（Y 軸方向）に微小駆動される。

10

【0144】

マスキステージ MST の位置は、マスキ干渉計システム 16 （図3参照）により計測される。マスキ干渉計システム 16 は、図25に示されるように、干渉計 $16Y$, $16X_1$, $16X_2$, $16X_{12}$, $16X_{22}$ を有する。干渉計 $16Y$ は、マスキステージ MST に固定された移動鏡 $15Y$ に Y 軸に平行な測長ビームを照射し、その反射光を受光することで、マスキステージ MST の Y 位置を計測する。干渉計 $16X_1$, $16X_2$ は、枠状部 60_0 上のコーナーキューブ $15X_1$, $15X_2$ に測長ビームをそれぞれ照射し、それぞれの反射光を受光して、マスキステージ MST の枠状部 60_0 の X 位置を計測する。干渉計 $16X_{12}$, $16X_{22}$ は、スライダ部 60_1 , 60_2 上のコーナーキューブ $15X_{12}$, $15X_{22}$ に測長ビームをそれぞれ照射し、それぞれの反射光を受光して、マスキステージ MST のスライダ部 60_1 , 60_2 の X 位置を計測する。

20

【0145】

本第3の実施形態では、マスキ干渉計システム 16 を構成する干渉計 $16X_1$, $16X_2$, $16X_{12}$, $16X_{22}$ を用いて、図26のブロック図で表される1入力2出力系（SIMO系）のフィードバック制御系が構築される。フィードバック制御系の基本構成は、前述の第1及び第2実施形態におけるフィードバック制御系の基本構成と同様である。すなわち、干渉計 $16X_1$, $16X_2$ （第1計測器）により、マスキステージ MST （制御対象）の枠状部 60_0 （第1部分）の X 位置（第1制御量 X_1 ）が計測され、また干渉計 $16X_{12}$, $16X_{22}$ （第2計測器）によりマスキステージ MST （制御対象）の第2部分（スライダ部 60_1 , 60_2 と可動子 $62A$, $62B$ と移動鏡 $15Y$ ）の X 位置（第2制御量 X_2 ）が計測される。これらの計測結果（ X_1 , X_2 ）は、ステージ制御装置 50 に供給される。なお、干渉計 $16X_1$, $16X_2$ によりマスキステージ MST の X 位置を計測する場合、両干渉計 $16X_1$, $16X_2$ のいずれかの計測結果又は両計測結果の平均により、マスキステージ MST の X 位置（第1制御量 X_1 ）が得られるのであるが、本実施形態では、説明の便宜上、干渉計 $16X_1$, $16X_2$ （第1計測器）により第1制御量 X_1 が計測されるものとしている。同様の趣旨から、干渉計 $16X_{12}$, $16X_{22}$ （第2計測器）により第2制御量 X_2 が計測されるものとしている。また、マスキステージ MST （制御対象）の第2部分は、スライダ部 60_1 , 60_2 の他、可動子 $62A$, $62B$ 及び移動鏡 $15Y$ を含むが、以下では、適宜、スライダ部 60_1 , 60_2 が第2部分であるものとして説明する。

30

40

【0146】

ステージ制御装置 50 は、計測結果（ X_1 , X_2 ）を用いて操作量 U （駆動力 F ）を求め、求められた操作量 U をマスキステージ MST （制御対象）を駆動するマスキステージ駆動系 MSD へ送信する。マスキステージ駆動系 MSD は、受信した操作量 U （駆動力 F ）に従って、駆動力 F に等しい駆動力を一对のリニアモータの可動子 $62A$, $62B$ に加える。これにより、マスキステージ MST が X 軸方向に関して駆動される。

【0147】

図26において、ステージ制御装置 50 に含まれる目標生成部 50_0 は、マスキステージ MST の制御のための目標値、ここでは X 軸方向の目標位置（時々刻々変化する X 位置

50

の目標値)) Rを生成して、減算器50₃ , 50₄に供給する。

【0148】

一方の減算器50₃は、干渉計16X₁ , 16X₂によって計測されるマスクステージMST(制御対象)の枠状部60₀(伝達関数P₁)のX位置X₁(現在位置)と目標位置Rとの差、すなわち偏差(R - X₁)を算出し、制御器50₁(伝達関数C₁)に供給する。他方の減算器50₄は、干渉計16X₁₂ , 16X₂₂によって計測されるマスクステージMST(制御対象)のスライダ部60₁ , 60₂(伝達関数P₂)のX位置X₂(現在位置)と目標位置Rとの差、すなわち偏差(R - X₂)を算出し、制御器50₂(伝達関数C₂)に供給する。

【0149】

制御器50₁は、偏差(R - X₁)が零となるように、演算(制御演算)により中間量C₁(R - X₁)を算出し、加算器50₅に送出する。同様に、制御器50₂は、偏差(R - X₂)が零となるように、制御演算により中間量C₂(R - X₂)を算出し、加算器50₅に送出する。

【0150】

加算器50₅は、制御器50₁ , 50₂の出力(中間量)を加算して操作量Uを求める。このように、ステージ制御装置50は、第1及び第2計測器(干渉計16X₁ , 16X₂及び16X₁₂ , 16X₂₂)の計測結果(X₁ , X₂)と目標位置Rとに基づいて演算式U(R - X₁ , R - X₂) = C₁(R - X₁) + C₂(R - X₂)で表される制御演算を行って操作量Uを求め、該操作量Uを制御対象であるマスクステージMSTに与える。これにより、操作量Uに従ってマスクステージMSTがX軸方向に関して駆動される。

【0151】

マスクステージMSTは、枠状部60₀によって構成される第1部分と、スライダ部60₁ , 60₂(及び可動子62A , 62B、並びに移動鏡15X)によって構成される第2部分との2部分が連結された複合ステージとみなすこともできる。このような複合ステージでは、連結部分の剛性不足によりステージ全体のねじれ(曲げ)が生じ、これにより、第1及び第2部分60₀ , 60₁ , 60₂の入出力応答、すなわち操作量U(駆動力F)に対する第1及び第2制御量X₁ , X₂の応答を表現する伝達関数P₁(= X₁ / U) , P₂(= X₂ / U)の周波数応答特性は、図5(A)及び図5(B)に示される周波数応答特性と同様に、互いに相反する振舞い(逆相の共振モード)を示す。

【0152】

そこで、第1及び第2の実施形態と同様に、制御器50₁ , 50₂を設計する(伝達関数C₁ , C₂を決定する)。ここで、図7(A)及び図18(A)に示される剛体模型と同様の模型を用いてマスクステージMSTの力学的運動を表現する。これにより、P₁ , P₂の共振モードが互いに相殺し、高帯域でロバストなマスクステージMSTの駆動(位置制御)が可能となる。

【0153】

本第3の実施形態に係るマスクステージMSTでは、干渉計16X₁ , 16X₂及び16X₁₂ , 16X₂₂による位置計測の基準位置(コーナーキューブ15X₁ , 15X₂及び15X₁₂ , 15X₂₂の設置位置)は、適宜、互いに逆相の共振モードを示すマスクステージMSTの部分に選択される。この場合、ロバスト性を考慮して、共振周波数が変わっても、共振比が一定になるような位置にセンサ(干渉計で用いるコーナーキューブ)を配置することが最も好ましい。かかる観点から、例えば、図25において、干渉計16X₁ , 16X₂(第1計測器)の基準位置(コーナーキューブ15X₁ , 15X₂の設置位置)に対し、コーナーキューブ15X₁₂ , 15X₂₂の設置位置(干渉計16X₁₂ , 16X₂₂(第2計測器)の基準位置)を、図25中に点線を用いて示される位置15X₁₀ , 15X₂₀に変更しても良い。

【0154】

以上説明したように、本第3の実施形態に係る露光装置によると、プレートステージPSTのように複数の部分(構成要素)から構成される複合ステージに限らず、マスクステ

10

20

30

40

50

ージMSTのように単一部分から構成される(剛性不足により複数部分から構成される複合ステージとみなすことのできる)移動ステージに対しても、前述の第1及び第2の実施形態と同様の駆動システムを構築することが可能であり、同等の効果を得ることができる。また、制御対象(マスクステージMST)の剛体モードと同相の共振モードを示す位置(部分)に配置されたセンサ(第1計測器)を使ったセミクロード制御の場合などでは、制御対象の剛体モードと逆相の共振モードを示す位置(部分)にセンサ(第2計測器)を(追加)配置し、上記と同様のSIMO系のフィードバック制御系を構築し、発生する負荷側の振動を抑圧することとしても良い。

【0155】

なお、上記第3の実施形態では、制御対象であるマスクステージMSTの制御量として位置を選択したが、これに代えて速度、加速度等、位置以外の位置に関連する物理量を制御量としても良い。かかる場合、マスク干渉計システム16とは独立の速度計測器、加速度計測器等を設置し、それらを用いて速度、加速度等を計測することとする。あるいは、プレート干渉計システム18の計測値の1階差分又は2階差分演算により、速度、加速度を算出して用いても良い。

10

【0156】

また、前述の第1の実施形態に対する変形例(図17)と同様に、位置、速度、加速度等、位置に関連する物理量を複数組み合わせることでマスクステージMSTの制御量とすることも可能である。

【0157】

また、上記第3の実施形態では、X軸方向に関してマスクステージMSTを駆動する場合について説明したが、Y軸方向及びZ軸方向に関してマスクステージMSTを駆動する場合についても、同様に、フィードバック制御系を設計(及び構築)することができる。

20

【0158】

また、前述の第2の実施形態と同様に、回転(傾斜)方向(x方向、y方向、及びz方向)に関してマスクステージMSTを駆動する場合についても、フィードバック制御系を設計(及び構築)することができる。

【0159】

《第4の実施形態》

次に、第4の実施形態について、図27～図29に基づいて説明する。

30

【0160】

本第4の実施形態では、プレートを保持するプレートテーブルと、プレートテーブルに設けられたナットに螺合された(組み合わせられた)送りねじをその軸周りに回転することによりプレートテーブルを走査方向に送る駆動部と、から構成される送りねじ式(例えばボールねじ式)のプレートステージを駆動対象として、駆動システムを構築する場合を取り上げるものとする。

【0161】

送りねじ式のプレートステージは、主に、静止型(ステップ・アンド・リピート方式)の投影露光装置において採用されている。静止型の露光装置の構成は周知であるので、以下では、プレートステージについてのみ説明することとし、その他の部分の構成等の説明は省略する。

40

【0162】

図27(A)及び図27(B)には、第4の実施形態に係る送りねじ式のプレートステージPST'の構成が示されている。プレートステージPST'は、プレートを保持するプレートテーブルPTB'と、プレートテーブルPTB'をX軸方向に駆動する駆動部PSD'と、を備えている。

【0163】

プレートテーブルPTB'上には、その中央にプレートを吸着保持するプレートホルダPHが固定されている。プレートテーブルPTB'の-X端面には、鏡面加工が施されて反射面76₁が形成されている。プレートテーブルPTB'の底面には、その中央にボー

50

ルネット（以下、ナットと略記する） 70_1 が固定されている。

【0164】

プレートテーブルPTB'は、その底面が、ナット 70_1 をY軸方向に挟んで床面F上に固定されたX軸方向に延びる一対のガイド 73_1 、 73_2 の上面と対向するように配置され、その一対のガイド 73_1 、 73_2 上に、不図示の気体静圧軸受（例えばエアベアリング）を介して非接触状態で支持（浮上支持）されている。

【0165】

駆動部PSD'は、ナット 70_1 とともにボールねじ 70 を構成するねじ軸 70_2 と、ねじ軸 70_2 をその軸周りに回転する回転モータ 71 と、を備えている。ねじ軸 70_2 は、所定長さの軸部と該軸部より大径で軸部の長手方向の両端部を除く部分に一体的にかつ同軸で設けられたねじ部とを有する。ねじ軸 70_2 は、ねじ部が多数のボール（不図示）を介してナット 70_1 に螺合（係合）されている。ねじ軸 70_2 の軸部の-X端部は床面F上に固定された軸受 72_3 に回転自在に支持され、+X端部は+X端面より-X側の位置が、床面F上に固定された別の軸受 72_2 に回転自在に支持されている。ねじ軸 70_2 の軸部の+X端は、軸用カップリング 72_1 を介して回転モータ 71 の軸に連結されている。回転モータ 71 の本体は、床面F上に配置されている。ここで、軸受 72_2 には、スラストベアリング（付図示）が設けられており、これにより、ねじ軸 70_2 に働くその軸方向（X軸方向）の力が吸収される。

【0166】

上述の構成のプレートステージPST'では、回転モータ 71 によりねじ軸 70_2 がその軸周り（X方向）に回転され、ボールねじ 70 によりねじ軸 70_2 の回転がナット 70_1 の並進に変換されることにより、プレートテーブルPTB'がX軸方向に駆動される。

【0167】

プレートテーブルPTB'のX位置は、干渉計 75_1 により計測される。干渉計 75_1 は、プレートテーブルPTB'の反射面 76_1 に測長ビームを照射し、その反射光を受光することで、プレートテーブルPTB'のX位置（X）を計測する。

【0168】

回転モータ 71 の回転（ x ）は、ロータリーエンコーダ（エンコーダ） 75_2 により計測される。エンコーダ 75_2 は、回転モータ 71 の回転軸に固定された回転スリット 76_2 を介して発光素子（不図示）からの光を受光する。これにより、回転モータ 71 の回転（ x ）が計測される。

【0169】

本第4の実施形態では、干渉計 75_1 及びエンコーダ 75_2 を用いて、図28のブロック図で表される1入力2出力系（SIMO系）のフィードバック制御系が構築される。このフィードバック制御系では、干渉計 75_1 （第1計測器）及びエンコーダ 75_2 （第2計測器）により、それぞれ、プレートステージPST'（制御対象）を構成するプレートテーブルPTB'のX位置（第1制御量X）及び回転モータ 71 の回転位置（第2制御量 x ）が計測される。これらの計測結果（X、 x ）は、ステージ制御装置50に供給される。ステージ制御装置50は、計測結果（X、 x ）を用いて操作量U（トルク）を求め、求められた操作量Uを駆動部PSD'へ送信する。駆動部PSD'は、受信した操作量U（トルク）に従って、トルクに等しいトルクを回転モータ 71 に発生させる。これにより、プレートテーブルPTB'が駆動される。

【0170】

図28において、ステージ制御装置50に含まれる目標生成部 50_0 は、プレートテーブルPTB'のX位置の目標値Rを生成して、減算器 50_3 、変換器 50_6 に供給する。

【0171】

減算器 50_3 は、干渉計 75_1 によって計測されるプレートステージPST'（制御対象）のプレートテーブルPTB'（伝達関数 P_1 ）のX位置X（現在位置）と目標位置Rとの差、すなわち偏差（ $R - X$ ）を算出し、制御器 50_1 （伝達関数 C_1 ）に供給する。

変換器 50₆ は、X 位置の目標値 R を該目標値 R に相当 (対応) する x 位置 (回転モータ 71 の回転位置) R に変換して、減算器 50₄ に供給する。他方の減算器 50₄ は、エンコーダ 75₂ によって計測されるプレートステージ P S T' (制御対象) の回転モータ 71 (伝達関数 P₂) の回転位置 x (現在位置) と x 位置 R との差、すなわち偏差 (R - x) を算出し、制御器 50₂ (伝達関数 C₂) に供給する。

【0172】

制御器 50₁ は、偏差 (R - X) が零となるように、演算 (制御演算) により中間量 C₁ (R - X) を算出し、加算器 50₅ に送出する。同様に、制御器 50₂ は、偏差 (R - x) が零となるように、制御演算により中間量 C₂ (R - x) を算出し、加算器 50₅ に送出する。

10

【0173】

加算器 50₅ は、制御器 50₁, 50₂ の出力 (中間量) を加算して操作量 U を求める。このように、ステージ制御装置 50 は、第 1 及び第 2 計測器 (干渉計 75₁ 及びエンコーダ 75₂) の計測結果 (X, x) と目標位置 (R, R) とに基づいて演算式 $U (R - X, R - x) = C_1 (R - X) + C_2 (R - x)$ で表される制御演算を行って操作量 U を求め、該操作量 U を制御対象であるプレートステージ P S T' に与える。これにより、操作量 U に従ってプレートステージ P S T' が駆動される。

【0174】

図 29 (A) 及び図 29 (B) には、それぞれ、回転モータ 71 及びプレートテーブル P T B' の入出力応答、すなわち操作量 U (トルク) に対する制御量 x, X の応答を表現する伝達関数 P₂ (= x / U), P₁ (= X / U) の周波数応答特性を示すボード線図が示されている。図 29 (A) 及び図 29 (B) のいずれにおいても、上側の図がゲイン線図、下側の図が位相線図である。伝達関数 P₂, P₁ は、並進運動に係る剛体模型 (図 7 (A) 参照) から導出される伝達関数 P₂, P₁ (図 5 (A) 及び図 5 (B)) 及び回転運動に係る剛体模型 (図 18 (A) 参照) から導出される伝達関数 P₂, P₁ (図 19 (A) 及び図 19 (B)) と、ほぼ同様の振舞いを示す。すなわち、伝達関数 P₁, P₂ は、互いに相反する振舞い (逆相の共振モード) を示す。(伝達関数 P₁ は剛体モードと逆相の共振モードを示し、伝達関数 P₂ は剛体モードと同相の共振モードを示す。)

20

【0175】

上述の伝達関数 P₁, P₂ の振舞いは、プレートテーブル P T B' と回転モータ 71 との連結部分 (ボールねじ 70 等) の剛性不足に起因すると考えられる。従って、プレートテーブル P T B' と回転モータ 71 との力学的運動を、図 7 (A) 及び図 18 (A) に示される剛体模型と同様に、ばねにより連結された 2 つの剛体の運動として表現することができる。

30

【0176】

従って、前述の第 1 ~ 第 3 の実施形態と同様に、図 7 (A) 又は図 18 (A) の剛体模型を適用して、制御器 50₁, 50₂ を設計する (伝達関数 C₁, C₂ を決定する) ことにより、伝達関数 P₁, P₂ の共振モードが互いに相殺し、高帯域でロバストなプレートテーブル P T B' (プレートステージ P S T') の駆動が可能となる。

40

【0177】

以上説明したように、本第 4 の実施形態によると、プレートテーブル P T B' の並進運動と回転モータ 71 の回転運動が結合した送りねじ式のプレートステージ P S T' を制御対象として、第 1 ~ 第 3 の実施形態と同様の駆動システムを構築することが可能であり、同等の効果を得ることができる。また、制御対象 (送りねじ式のプレートステージ) の剛体モードと同相の共振モードを示す位置 (部分) に配置されたセンサ (第 1 計測器) を使ったセミクローズド制御の場合などでは、制御対象の剛体モードと逆相の位置 (部分) にセンサ (第 2 計測器) を (追加) 配置し、上記と同様の S I M O 系のフィードバック制御系を構築し、発生する負荷側の振動を抑圧することとしても良い。

【0178】

50

なお、上記第4の実施形態では、プレートテーブルPTB'の制御量として位置を選択したが、これに代えて速度、加速度等、位置以外の位置に関連する物理量を制御量として選択しても良い。かかる場合、干渉計75₁とは独立の速度計測器、加速度計測器等を設置し、それらを用いて速度、加速度等を計測することとする。あるいは、プレート干渉計システム18の計測値の1階差分又は2階差分演算により、速度、加速度を算出して用いても良い。

【0179】

また、第1の実施形態に対する変形例(図17)と同様に、位置、速度、加速度等、位置に関連する物理量を複数組み合わせることでプレートテーブルPTB'の制御量とすることも可能である。

10

【0180】

なお、上記第4の実施形態では、回転モータ71の制御量として回転位置を選択したが、これに代えて回転速度、回転加速度等、回転位置以外の位置に係る物理量を制御量として選択しても良い。かかる場合、エンコーダ75₂とは独立の回転速度計測器、回転加速度計測器等を設置し、それらを用いて回転速度、回転加速度等を計測することとする。あるいは、エンコーダ75₂の計測値の1階差分又は2階差分演算により、回転速度、回転加速度を算出して用いても良い。

【0181】

また、第1の実施形態に対する変形例(図17)と同様に、回転位置、回転速度、回転加速度等、回転位置に関連する物理量を複数組み合わせることで回転モータ71の制御量とすることも可能である。

20

【0182】

なお、上記各実施形態では、露光装置におけるプレートステージPST及び/又はマスクステージMSTを制御対象として駆動システムを構築する場合について説明した。しかし、露光装置に限らず、精密且つ安定な駆動(位置又は速度等の制御)を要する装置、例えば工作装置における可動ステージ、ロボットアームのような搬送装置等に対しても、上記各実施形態の駆動システム(SIMO系)を適用することができる。

【0183】

また、計測器を追加する等して、主共振のみでなく、2次共振以上の高次共振に対しても同様に適用させることが可能である。

30

【0184】

なお、プレート干渉計システム18及びマスク干渉計システム16の構成は、上記第1、第2、第3の実施形態における構成に限らず、目的に応じて、適宜、さらに干渉計を追加した構成を採用することができる。また、プレート干渉計システム18に代えて、あるいはプレート干渉計システム18とともにエンコーダ(又は複数のエンコーダから構成されるエンコーダシステム)を用いても良い。また、マスク干渉計システム16に代えて、あるいはマスク干渉計システム16とともにエンコーダ(又は複数のエンコーダから構成されるエンコーダシステム)を用いても良い。

【0185】

なお、上記各実施形態に係る露光装置は、サイズ(長辺又は直径)が500mm以上の基板、例えば液晶表示素子などのフラットパネルディスプレイ(FPD)用の大型基板を露光する露光装置に対して適用することが特に有効である。

40

【0186】

また、上記各実施形態に係る露光装置において、照明光は、ArFエキシマレーザ光(波長193nm)、KrFエキシマレーザ光(波長248nm)などの紫外光や、F₂レーザ光(波長157nm)などの真空紫外光であっても良い。また、照明光としては、例えばDFB半導体レーザ又はファイバーレーザから発振される赤外域、又は可視域の単一波長レーザ光を、例えばエルビウム(又はエルビウムとイッテルビウムの両方)がドープされたファイバーアンプで増幅し、非線形光学結晶を用いて紫外光に波長変換した高調波を用いても良い。また、固体レーザ(波長:355nm、266nm)などを使用しても

50

良い。

【 0 1 8 7 】

また、上記実施形態では、投影光学系 P L が、複数本の光学系を備えたマルチレンズ方式の投影光学系である場合について説明したが、投影光学系の数はこれに限らず、1つ以上あれば良い。また、マルチレンズ方式の投影光学系に限らず、例えばオフナー型の大型ミラーを用いた投影光学系などであっても良い。また、上記実施形態では投影光学系 P L として、投影倍率が等倍系のものを用いる場合について説明したが、これに限らず、投影光学系は拡大系及び縮小系のいずれでも良い。

【 0 1 8 8 】

なお、上記各実施形態においては、光透過性のマスク基板上に所定の遮光パターン（又は位相パターン・減光パターン）を形成した光透過型マスクを用いたが、このマスクに代えて、例えば米国特許第 6, 778, 257 号明細書に開示されているように、露光すべきパターンの電子データに基づいて、透過パターン又は反射パターン、あるいは発光パターンを形成する電子マスク（可変成形マスク）、例えば、非発光型画像表示素子（空間光変調器とも呼ばれる）の一種である DMD（Digital Micro-mirror Device）を用いる可変成形マスクを用いても良い。

【 0 1 8 9 】

また、上記各実施形態（のステージ駆動システム）は、一括露光型又はスキャニング・ステッパなどの走査型露光装置、及びステッパなどの静止型露光装置のいずれにも適用することができる。また、ショット領域とショット領域とを合成するステップ・アンド・スティッチ方式の投影露光装置にも上記各実施形態は適用することができる。また、上記各実施形態は、投影光学系を用いない、プロキシミティ方式の露光装置にも適用することができるし、光学系と液体とを介して基板を露光する液浸型露光装置にも適用することができる。この他、上記各実施形態は、例えば米国特許第 6, 611, 316 号明細書などに開示されている、2つのパターンを、投影光学系を介して基板上で合成し、1回のスキャン露光によって基板上の1つのショット領域をほぼ同時に二重露光する露光装置などにも適用できる。

【 0 1 9 0 】

また、露光装置の用途としては、角型のガラスプレートに液晶表示素子パターンを転写する液晶用の露光装置に限定されることなく、例えば半導体製造用の露光装置、薄膜磁気ヘッド、マイクロマシン及び DNA チップなどを製造するための露光装置にも広く適用できる。また、半導体素子などのマイクロデバイスだけでなく、光露光装置、EUV 露光装置、X線露光装置、及び電子線露光装置などで使用されるマスク又はレチクルを製造するために、ガラス基板又はシリコンウエハなどに回路パターンを転写する露光装置にも上記各実施形態を適用できる。なお、露光対象となる物体はガラスプレートに限られるものでなく、例えばウエハ、セラミック基板、あるいはマスクブランクスなど、他の物体でも良い。

【 0 1 9 1 】

液晶表示素子（あるいは半導体素子）などの電子デバイスは、デバイスの機能・性能設計を行うステップ、この設計ステップに基づいたマスク（あるいはレチクル）を製作するステップ、ガラスプレート（あるいはウエハ）を製作するステップ、上述した各実施形態の露光装置、及びその露光方法によりマスク（レチクル）のパターンをガラスプレートに転写するリソグラフィステップ、露光されたガラスプレートを現像する現像ステップ、レジストが残存している部分以外の部分の露出部材をエッチングにより取り去るエッチングステップ、エッチングが済んで不要となったレジストを取り除くレジスト除去ステップ、デバイス組み立てステップ、検査ステップ等を経て製造される。この場合、リソグラフィステップで、上記実施形態の露光装置を用いて前述の露光方法が実行され、ガラスプレート上にデバイスパターンが形成されるので、高集積度のデバイスを生産性良く製造することができる。

【 0 1 9 2 】

10

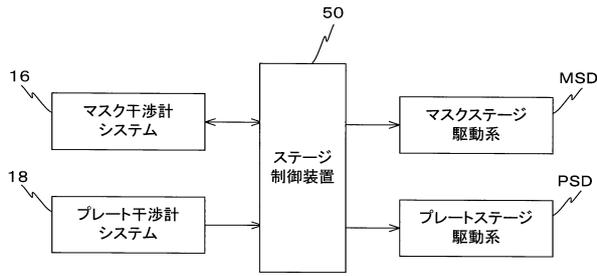
20

30

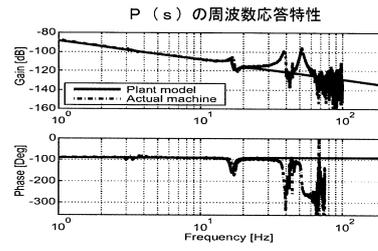
40

50

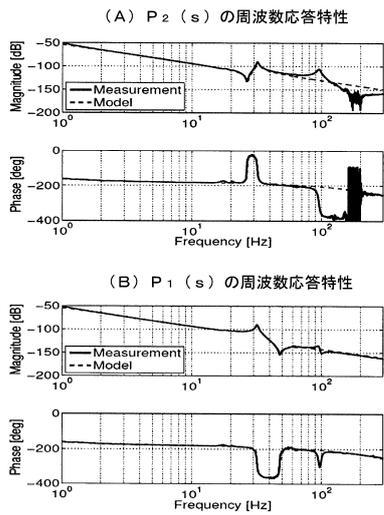
【図3】



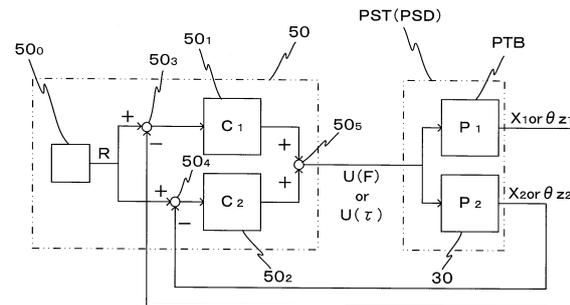
【図4】



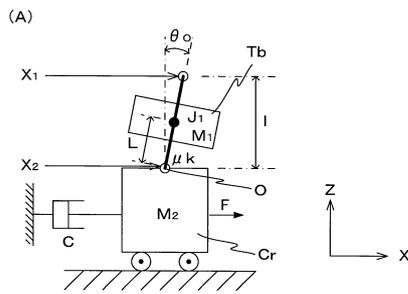
【図5】



【図6】



【 図 7 】

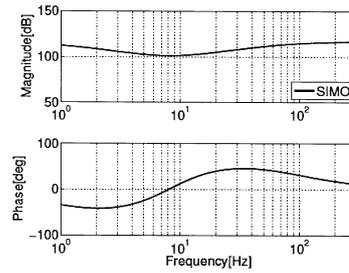


(B)

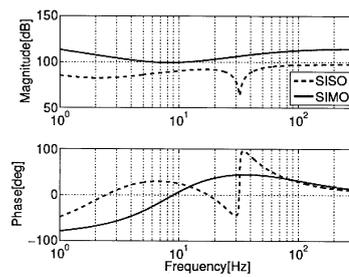
M_1	5.3 kg
M_2	7.7 kg
J_1	0.015 kgm ²
C	24 N/(m·s)
k	1700 Nm/rad
μ	0.20 Nm/(rad/s)
L	0.092 m
I	0.085 m
τ_d	6.0×10^{-4} s

【 図 8 】

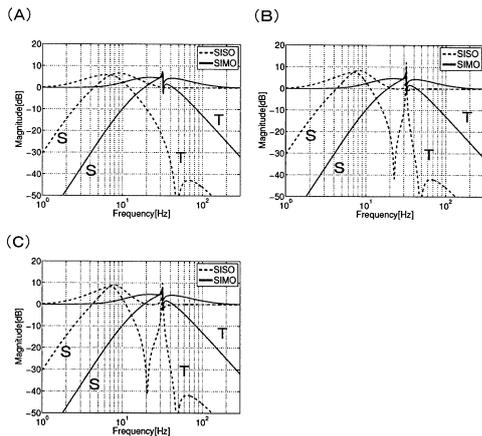
(A) $C_2(s)$ の周波数応答特性



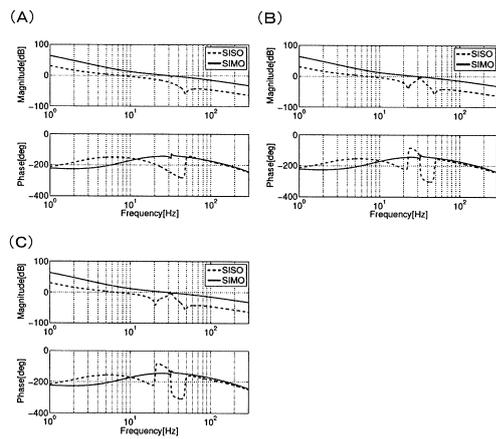
(B) $C_1(s)$ の周波数応答特性



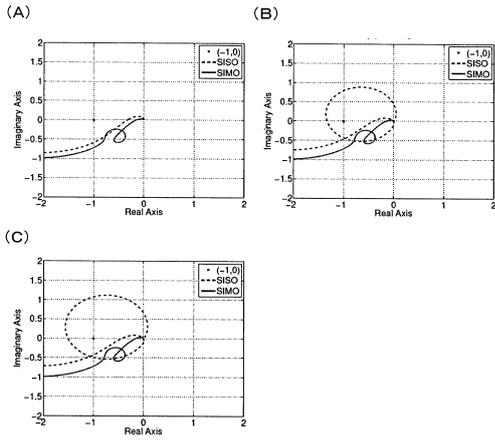
【 図 9 】



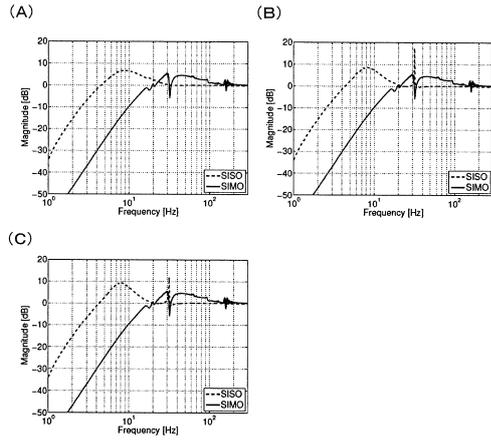
【 図 10 】



【 1 1 】



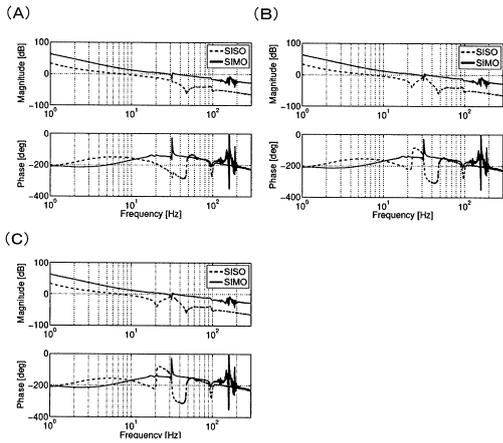
【 1 3 】



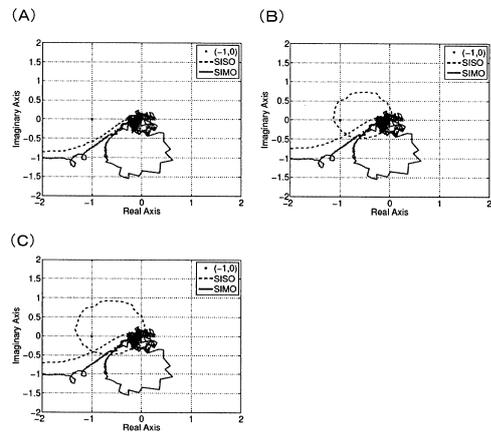
【 1 2 】

	SISO		SIMO	
	G_m [dB]	P_m [deg]	G_m [dB]	P_m [deg]
(A) Nominal	9.7	30.1	17.8	35.7
(B) 0.5k	Unstable	Unstable	17.8	35.7
(C) 5J ₁	Unstable	Unstable	17.8	35.7

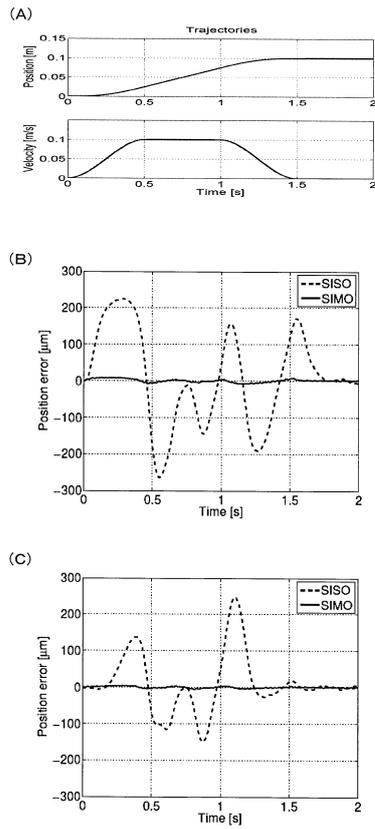
【 1 4 】



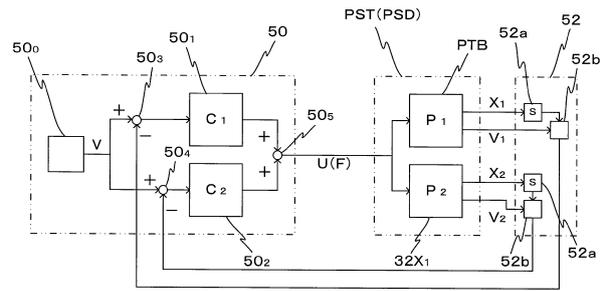
【 1 5 】



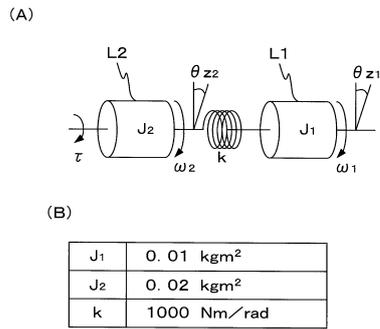
【図 16】



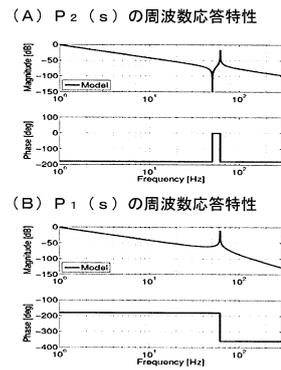
【図 17】



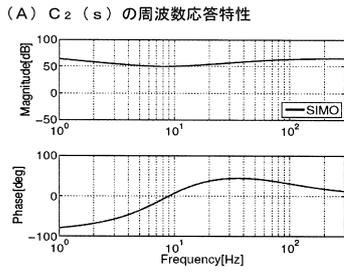
【図 18】



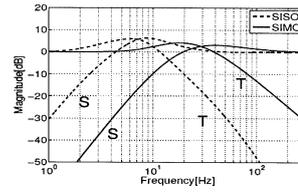
【図 19】



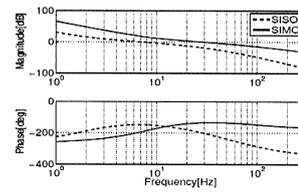
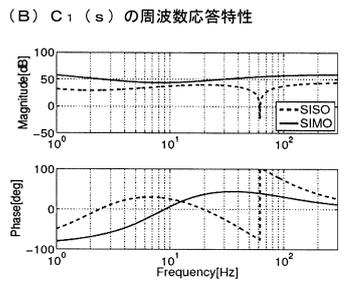
【 図 2 0 】



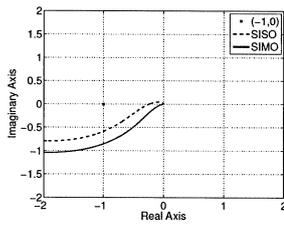
【 図 2 1 】



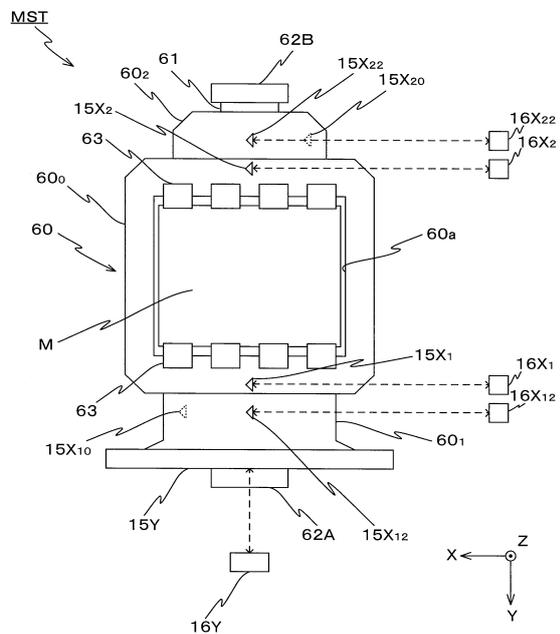
【 図 2 2 】



【 図 2 3 】



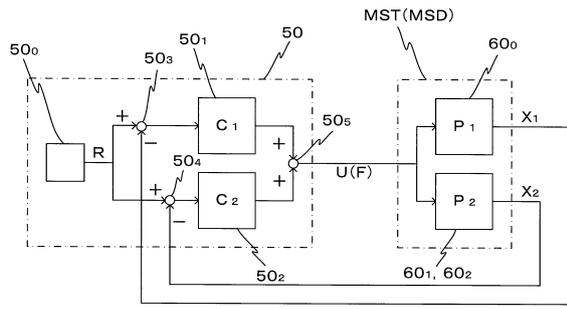
【 図 2 5 】



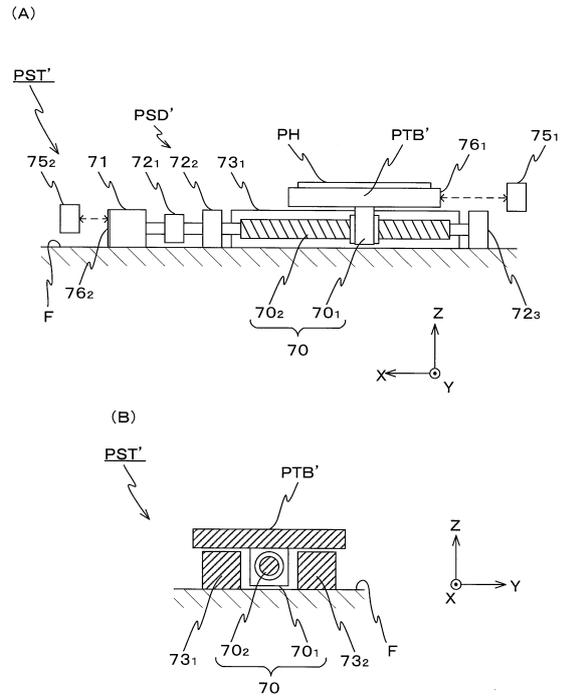
【 図 2 4 】

	SISO		SIMO	
	G_m [dB]	P_m [deg]	G_m [dB]	P_m [deg]
Nominal	12.2	30.2	Inf	43.5

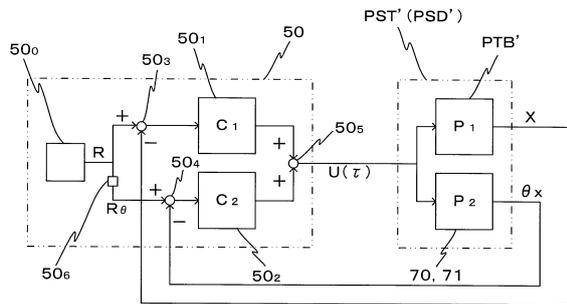
【図 26】



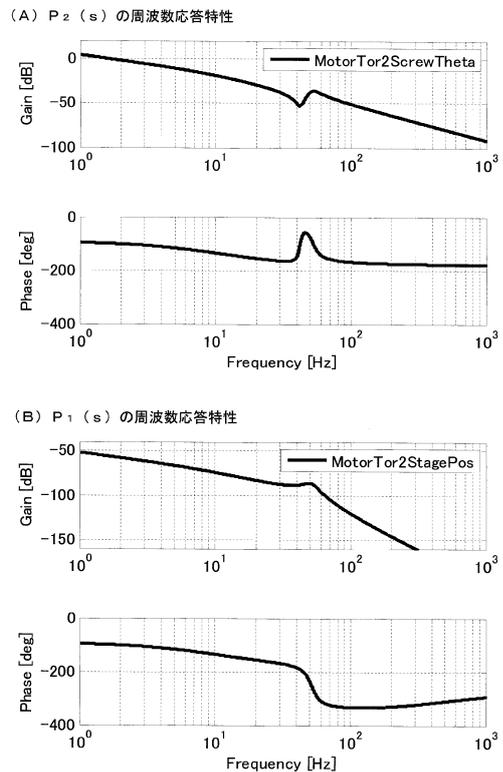
【図 27】



【図 28】



【図 29】



フロントページの続き

(72)発明者 坂田 晃一
東京都千代田区有楽町一丁目12番1号 株式会社ニコン内

審査官 青山 純

(56)参考文献 特開2009-159774(JP,A)
特開2006-335160(JP,A)
特開平05-066845(JP,A)
特開2001-076451(JP,A)
国際公開第2009/031654(WO,A1)
特開2004-354061(JP,A)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

G05D 3/00 - 3/20
H01L 21/30
G03F 7/20
H01L 21/68