(19)日本国特許庁(JP)　(12)特　許　公　報(B2)　(11)特許番号
特許第5986927号
(P5986927)
(45)発行日　平成28年9月6日(2016.9.6)　(24)登録日　平成28年8月12日(2016.8.12)

(51)Int.Cl.　F I
H01S 3/136 (2006.01)　H01S 3/136

請求項の数 10　(全 17 頁)

(21)出願番号	特願2012-539934 (P2012-539934)
(86)(22)出願日	平成22年11月4日 (2010.11.4)
(65)公表番号	特表2013-511842 (P2013-511842A)
(43)公表日	平成25年4月4日 (2013.4.4)
(86)国際出願番号	PCT/US2010/055372
(87)国際公開番号	WO2011/062772
(87)国際公開日	平成23年5月26日 (2011.5.26)
審査請求日	平成25年11月5日 (2013.11.5)
(31)優先権主張番号	12/620,967
(32)優先日	平成21年11月18日 (2009.11.18)
(33)優先権主張国	米国(US)

(73)特許権者　513192029
サイマー　リミテッド　ライアビリティ　カンパニー
アメリカ合衆国　カリフォルニア州　９２１２７　サン　ディエゴ　ソーンミント　コート　１７０７５
(74)代理人　100079108
弁理士　稲葉　良幸
(74)代理人　100109346
弁理士　大貫　敏史
(74)代理人　100117189
弁理士　江口　昭彦
(74)代理人　100134120
弁理士　内藤　和彦

最終頁に続く

(54)【発明の名称】最新レーザ波長制御

(57)【特許請求の範囲】
【請求項１】
レーザ波長制御の方法であって、
前記レーザシステム内の主発振器チャンバの出力波長測定値を周期的に受信する段階と、
前記出力波長測定値の周期的な受信よりも頻繁にレーザシステム内のプリズムの位置の予測を周期的に行う段階と、
前記出力波長測定値が前記予測の周期内で受信されなかった場合に、前記プリズムの前記予測位置を使用して前記プリズムに対する制御電圧を制御コンピュータにおいて計算する段階と、
前記出力波長測定値が前記予測の周期内で受信された場合に、前記出力波長測定値を使用して前記プリズムの前記予測位置を更新し、該プリズムの該更新予測位置を使用して該プリズムに対する制御電圧を前記制御コンピュータにおいて計算する段階と、
前記計算制御電圧を前記制御コンピュータから前記プリズムを位置決めするための電子機器に出力する段階と、
を含む、方法。
【請求項２】
前記プリズムの前記位置の前記予測を行う段階は、前記プリズムの移動のモデルを使用するものであり、前記モデルは、前記プリズムの物理的移動及び前記レーザシステム内の外乱に基づくものである、請求項１に記載の方法。

【請求項３】
前記プリズムの前記位置の前記予測を行う段階は、前記プリズムの移動のモデルを使用するものであり、前記モデルは、その積分形式では、
【数１】
$$x(t+T) = e^{AT}x(t) + \int_0^T e^{A\tau} Bu(T-\tau)\,d\tau$$
であり、ここで、
ｘ（ｔ＋Ｔ）は初期状態ｘ（ｔ）よりＴ秒先んじた予測状態、e^{AT}は線形システムの標準な状態遷移行列、Ｂは標準入力行列、ｕは変換器信号の値、τはダミー変数、である、請求項１に記載の方法。
【請求項４】
前記出力波長測定値を使用して前記プリズムの前記予測位置を更新する段階は、以下の式：
【数２】
$$x(k \mid k) = (I - L_k C_k)x(k \mid k-1) + L_k y(k)$$
を使用し、ここで、
ｋは、レーザ発射イベントを示しており、
Ｉは、ｎ行ｎ列の恒等行列であり、ｎは状態ベクトルｘの要素数であり、
L_kは、新しいデータを信頼すること及び前の予測を信じることの間の妥協点を捕捉する利得行列であり、
C_kは、予測状態から予測出力への標準的マッピングであり、
ｘ（ｋ／ｋ）は、指標ｋでの最新データが与えられて更新された予測であり、
ｘ（ｋ／ｋ－１）は、前のレーザ発射イベントｋ－１からのデータが与えられてレーザ発射指標ｋでの状態の「古い」予測である、請求項１に記載の方法。
【請求項５】
レーザ波長制御の方法であって、
レーザシステム内の主発振器チャンバの出力波長測定値を周期的に受信する段階と、
前記出力波長測定値の周期的な受信よりも頻繁に前記レーザシステム内のプリズムの位置の予測を周期的に行う段階と、
前記出力波長測定値が前記予測の周期内で受信されなかった場合に、前記プリズムの前記予測位置を使用して該プリズムに対する制御電圧を制御コンピュータにおいて計算する段階と、
前記出力波長測定値が前記予測の周期内で受信された場合において、前記レーザが前記出力波長測定値を受信してから再び発射した場合に、前記出力波長測定値を使用して前のプリズム位置予測を更新し、前記更新された前のプリズム位置予測に基づいてプリズム位置予測の新しい予測を行い、かつ前記新しいプリズム位置予測を使用して前記プリズムに対する前記制御電圧を前記制御コンピュータにおいて計算する一方、前記レーザが前記出力波長測定値を受信してから再び発射しなかった場合に、前記出力波長測定値を使用して前記プリズムの前記予測位置を更新し、かつ前記更新プリズム位置予測を使用して前記プリズムに対する前記制御電圧を前記制御コンピュータにおいて計算する段階と、
前記計算制御電圧を前記制御コンピュータから前記プリズムを位置決めするための電子機器に出力する段階と、
を含む、方法。
【請求項６】
前記プリズムの前記位置の前記予測を行う段階は、前記プリズムの移動のモデルを使用するものであり、前記モデルは、前記プリズムの物理的移動及び前記レーザシステム内の外乱に基づくものである、請求項５に記載の方法。
【請求項７】
プリズムコントローラ方法であって、
プリズムによって制御された主発振器チャンバの出力波長測定値を周期的に受信する段階と、

プリズム移動モデルを使用して前記出力波長測定値の周期的な受信よりも頻繁に前記プリズムの位置を周期的に予測する段階と、
前記出力波長測定値が前記予測の周期内で受信されなかった場合に、前記プリズムの前記予測位置を使用して前記プリズムに対する制御電圧を計算する段階と、
前記出力波長測定値が前記予測の周期内で受信された場合に、前記出力波長測定値を使用して前記プリズムの前記予測位置を更新し、かつ前記プリズムの該更新予測位置を使用して該プリズムに対する制御電圧を計算する段階と、
前記計算制御電圧を、前記プリズムを位置決めするための電子機器に出力する段階と、を含む、方法。

【請求項８】
前記プリズムの前記位置の前記予測を行う段階は、前記プリズムの移動のモデルを使用するものであり、前記モデルは、前記プリズムの物理的移動及びレーザシステム内の外乱に基づくものである、請求項７に記載の方法。

【請求項９】
前記プリズムの前記位置の前記予測を行う段階は、前記プリズムの移動のモデルを使用するものであり、前記モデルは、その積分形式では、

【数３】

$$x(t+T) = e^{AT}x(t) + \int_0^T e^{A\tau} Bu(T-\tau)\, d\tau$$

であり、ここで、
ｘ（ｔ＋Ｔ）は初期状態ｘ（ｔ）よりＴ秒先んじた予測状態、e^{AT}は線形システムの標準な状態遷移行列、Ｂは標準入力行列、ｕは変換器信号の値、τはダミー変数、である、請求項７に記載の方法。

【請求項１０】
前記出力波長測定値を使用して前記プリズムの前記予測位置を更新する段階は、以下の式：

【数４】

$$x(k \mid k) = (I - L_k C_k)x(k \mid k-1) + L_k y(k)$$

を使用し、ここで、
ｋは、レーザ発射イベントを示しており、
Ｉは、ｎ行ｎ列の恒等行列であり、ｎは状態ベクトルｘの要素数であり、
L_kは、新しいデータを信頼すること及び前の予測を信じることの間の妥協点を捕捉する利得行列であり、
C_kは、予測状態から予測出力への標準的マッピングであり、
ｘ（ｋ／ｋ）は、指標ｋでの最新データが与えられて更新された予測であり、
ｘ（ｋ／ｋ－１）は、前のレーザ発射イベントｋ－１からのデータが与えられてレーザ発射指標ｋでの状態の「古い」予測である、請求項７に記載の方法。

【発明の詳細な説明】
【技術分野】
【０００１】
開示の主題は、半導体フォトリソグラフィ処理に使用することができるようなレーザ光制御の分野のものであり、より具体的には、レーザ光源の波長を制御する分野のものである。
【背景技術】
【０００２】
フォトリソグラフィは、半導体業界において一般的に用いられる処理である。最新のフォトリソグラフィは、典型的には、マスクを照明し、従って、シリコンウェーハ上のフォ

トレジスト材料を露光する超狭帯域光パルスを供給するためにレーザ光源を使用する。しかし、半導体デバイスパラメータの進歩により、使用するレーザ光源の性能特性に対する要求が増大している。精度及び作動速度の改善が益々必要とされている。

【０００３】

図１をここで参照すると、最新のフォトリソグラフィ処理に使用することができるレーザシステム１００のブロック図を見ることができる。レーザシステム１００内の光の供給源は、主発振器（ＭＯ）チャンバ１２０である。

【０００４】

公知のように、ＭＯチャンバ１２０が発射した時に、得られる光は、「線狭化モジュール（ＬＮＭ）」１１０に入り、そこで、それは、プリズム（実際にいくつかのプリズム）を通過してＬＮＭ１１０内の回折格子上に衝突する。これは、ＬＮＭ１１０内のプリズムの位置を変えるとレーザ光の波長が変わるという点で、光波長セレクタとして作用する。例えば、この変更後の波長のレーザ光は、ＭＯチャンバ１２０を再び通過して出力カプラ（ＯＣ）１３０に進み、次に、例えば、半導体ウェーハを処理して露光させることを担うステッパースキャナデバイス（図示せず）上に通される。

【０００５】

出力カプラ１３０は、レーザ光出力をＭＯチャンバ１２０から「線中心解析モジュール（ＬＡＭ）」１７０にも通す。ＬＡＭ１７０は、ＭＯチャンバ１２０からの光出力の波長を測定する波長サンプラである。レーザ光出力測定値は、次に、ＬＡＭ１７０から制御コンピュータ１６０に通される。

【０００６】

制御コンピュータ１６０は、光出力測定値を使用して、次のレーザ発射イベントに向けてＬＮＭ１１０内のプリズムを再位置決めして望ましいレーザ光出力波長を達成するためにどのような変更を行う必要があるかを判断する。ＬＮＭ１１０内のプリズムの位置は、ＬＮＭ１１０内のプリズムに接続した圧電子変換器（ＰＺＴ）１４０に印加される電圧により制御される。制御コンピュータ１６０は、従って、新しい望ましいプリズム位置を達成するためにどの電圧をＰＺＴ１４０に印加すべきかを判断する。

【０００７】

制御コンピュータ１６０は、ＬＮＭ１１０内のプリズムに行うべき望ましい電圧変更を示すデジタル信号をＰＺＴ駆動電子機器１５０に出力する。ＰＺＴ駆動電子機器は、制御コンピュータ１６０デジタル信号をアナログ電圧信号に変換するデジタル／アナログ変換器（ＤＡＣ）と、高周波電気ノイズを低減してアナログＤＡＣ電圧信号を増幅するアナログローパスフィルタとを含む。このアナログ電圧信号は、次に、ＰＺＴ駆動電子機器１５０からＰＺＴ１４０に通され、これは、ＬＮＭ１１０内のプリズムを再位置決めし、これは、次に、次のレーザ発射イベント時に出力カプラ１３０を通じてＭＯチャンバ１２０から出力される光の波長の変化を引き起こす。

【０００８】

この処理は、ステッパースキャナが、指定のパルス繰返し数、開始時間、及び波長でレーザシステムから光パルスの更に別のシーケンス又はバーストを要求する時に続行される。

【０００９】

フォトリソグラフィ処理が長年にわたって進歩したので、様々な問題が発生している。例えば、半導体特徴サイズの縮小は、望ましい焦点を維持するためにレーザ光源の望ましい波長の縮小をもたらしている。波長を縮小するには、出力レーザ光に更に大きい精度改善が必要である。

【００１０】

更に別の問題は、１６７から６００マイクロ秒まで変動するパルス周期により生じる。高いパルス繰返し数では、ＬＡＭ１７０が、測定を行ってそれを制御コンピュータ１６０に伝え、制御コンピュータ１６０が、ＬＮＭ１１０内のプリズムに対する新しい電圧値を計算してそれをＰＺＴ駆動電子機器１５０に伝え、ＰＺＴ駆動電子機器１５０が、それを

アナログ変換してフィルタリングし、それをＰＺＴ１４０に伝え、かつＰＺＴ１４０が、次のレーザ光パルスが発生する前にＭＯチャンバ１２０からの光の波長を変えるためにプリズム位置を変えるために利用可能な時間は殆どない。

【００１１】

図２をここで参照すると、上述のシーケンスのタイミング図を見ることができる。バースト内の一連のこのようなパルスからの２つのレーザ発射イベントが示されており、第１のものは、時間t_0で発生するように示され、第２のものは、時間t_3で発生するように示されている。時間t_0での第１のレーザ発射イベント後に、得られる出力波長は、ＬＡＭ１７０により測定される（図１を再び参照されたい）。出力波長を測定してそれを制御コンピュータ１６０に供給するＬＡＭ１７０処理の遅延は、時間t_0から時間t_1までのＬＡＭ遅延として図に示されている。新しい制御信号が次にＬＮＭ１１０内のプリズムに印加される時間は、時間t_2として示されている。時間t_1とt_2の間の遅延は、新しい電圧を計算し、その新しい電圧をＰＺＴ駆動電子機器１５０を通してＰＺＴ１４０まで伝播させて、レーザがt_3で反射する前にプリズムを再位置決めするのに制御コンピュータ１６０が掛かる時間である。

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【００１２】

ＬＡＭ１７０測定遅延は、それがＬＡＭ１７０処理時間及びＬＡＭ１７０から制御コンピュータ１６０までの送信時間に依存するという点でかなり固定されている。しかし、レーザ発射速度（t_0とt_2の間の時間）は、ステッパースキャナによって決まる。最終的に、レーザ発射速度の高速化に伴って、ＬＡＭ１７０測定遅延は、潜在的に、新しい制御信号が印加される前にその後のレーザ発射イベントが発生する場合があるような十分に長いものになる可能性がある。それが仮に発生した場合に、性能に及ぼす影響があると考えられ、その理由は、新しい制御信号が、次に、最新のレーザ発射イベントではなく、前のレーザ発射イベントからの測定値に基づくことになる（すなわち、１パルス遅れになる）と考えられるからである。従って、必要とされるものは、絶えず増大するレーザ発射速度と共に作動させることができる改良型レーザ制御である。レーザ制御の公知の手法に関する更に別の問題は、ＬＮＭ１１０内のプリズムを位置決めする方法を正確に判断することをより困難にするレーザシステム１１０内の様々な外乱である。従って、更に必要であるのは、レーザシステムに発生する様々な外乱に対処することができる改良型レーザ制御である。

【課題を解決するための手段】

【００１３】

プリズムを再位置決めする前にレーザ光測定値を受信することに依存することなくレーザの波長を制御するための最新のシステム及び方法をいくつかの具体的な実施形態を参照して本明細書に示して説明する。

【００１４】

一実施形態では、レーザ波長制御の方法は、第１の個別の間隔でレーザシステム内のプリズムの位置の予測を行う段階と、第２の通常の間隔が第１の通常の間隔よりも長い第２の個別の間隔で、レーザシステム内の主発振器チャンバの出力波長の測定値を受信する段階と、各第１の個別の間隔中に、出力波長測定値が第１の個別の間隔中に受信されなかった場合に、プリズムの予測位置を使用してプリズムに対する制御電圧を制御コンピュータにおいて計算する段階と、出力波長測定値が第１の個別の間隔中に受信された場合に、出力波長測定値を使用してプリズムの予測位置を更新し、プリズムの更新予測位置を使用してプリズムに対する制御電圧を制御コンピュータにおいて計算する段階と、計算制御電圧を制御コンピュータからプリズムを位置決めするための電子機器に出力する段階とを含む。

【００１５】

別の実施形態では、レーザ波長制御の方法は、第１の個別の間隔でレーザシステム内の

プリズムの位置の予測を行う段階と、第１の通常の間隔が第１の通常の間隔よりも長い第２の個別の間隔でレーザシステム内の主発振器チャンバの出力波長の測定値を受信する段階と、各第１の個別の間隔中に、出力波長測定値が第１の個別の間隔中に受信されなかった場合に、プリズムの予測位置を使用してプリズムに対する制御電圧を制御コンピュータにおいて計算する段階と、出力波長測定値が第１の個別の間隔中に受信された場合に、レーザが出力波長測定値を受信してから再び発射した場合に出力波長測定値を使用して前のプリズム位置予測を更新し、更新された前のプリズム位置予測に基づいてプリズム位置予測の新しい予測を行い、新しいプリズム位置予測を使用してプリズムに対する制御電圧を制御コンピュータにおいて計算する段階と、レーザが出力波長測定値を受信してから再び発射しなかった場合に出力波長測定値を使用してプリズムの予測位置を更新し、更新プリズム位置予測を使用してプリズムに対する制御電圧を制御コンピュータにおいて計算する段階と、計算制御電圧を制御コンピュータからプリズムを位置決めするための電子機器に出力する段階とを含む。

【００１６】

更に別の実施形態では、プリズムコントローラ方法は、プリズム移動モデルを使用してプリズムの位置を第１の個別の間隔で予測する段階と、第２の通常の間隔が第１の通常の間隔よりも長い第２の個別の間隔で、プリズムによって制御された主発振器チャンバの出力波長の測定値を受信する段階と、各第１の個別の間隔中に、出力波長測定が第１の個別の間隔中に受信されなかった場合に、プリズムの予測位置を使用してプリズムに対する制御電圧を計算する段階と、出力波長測定値が第１の個別の間隔中に受信された場合に、出力波長測定値を使用してプリズムの予測位置を更新し、プリズムの更新予測位置を使用してプリズムに対する制御電圧を計算する段階と、プリズムを位置決めするための電子機器に計算制御電圧を出力する段階とを含む。

【００１７】

様々な実施形態を以下の詳細説明及び付随する図面に開示する。

【図面の簡単な説明】

【００１８】

【図１】一実施形態に使用することができる例示的なレーザシステムのブロック図である。

【図２】従来技術のイベントのシーケンスを示すタイミング図である。

【図３】例示的な実施形態によるイベントのシーケンスを示すタイミング図である。

【図４】本発明の方法の一実施形態の流れ図である。

【図５】一実施形態によるその後の電圧更新イベントの前にレーザが再び発射することになるか否かの判断を示すタイミング図である。

【図６】一実施形態によるその後の電圧更新イベントに対する予測を行う段階を示すタイミング図である。

【図７】一実施形態による次のレーザ発射イベントに対する予測を行う段階を示すタイミング図である。

【図８】一実施形態による新しいレーザ光測定値で次の電圧更新イベントに対する予測を更新する段階を示すタイミング図である。

【図９】一実施形態により前のレーザ発射イベントに対する予測を更新し、前のレーザ発射イベントに対する更新された予測に基づいて次の電圧更新イベントに対する新しい予測を行う段階を示すタイミング図である。

【発明を実施するための形態】

【００１９】

提供するものは、半導体フォトリソグラフィに使用されるレーザの波長を制御する最新のシステム及び方法である。レーザシステムにおけるプリズムをどのように再位置決めすべきかを判断する前にレーザ光測定値を待つのではなく、この最新システム及び方法は、プリズムの運動特性及び公知の外乱挙動のモデルを使用して周期的にレーザシステムにおけるプリズムの次の位置を予測する。これらの予測の周期性は、予測間の間隔が典型的に

レーザ発射イベント間の間隔よりも短いように、レーザ発射イベントの周期性よりも典型的に迅速である。これは、プリズムを再位置決めする前にレーザ光測定値を受信することに対する従来技術の依存性を排除する。レーザ出力波長の測定値は、依然としてレーザ発射イベントが発生する時に得られ、プリズム位置予測を更新するか又は改善するのに使用される。更新の有無に関わらず、予測プリズム位置は、プリズム位置を制御するＰＺＴを駆動するのに使用される制御信号を計算するのに使用される。このようにして、予測が周期的に行われ、制御信号が周期的に計算され、プリズムが、相応に周期的に再位置決めされる。

【００２０】

本明細書に説明する最新レーザ制御システム及び方法は、「高速離散／低速離散フィルタ」と考えることができる。プリズム位置の予測が出力波長測定値を待つことなく行われるので、予測は、レーザ発射繰返し数及び得られる出力波長測定値（いわゆる「低速離散」）よりも頻繁に（いわゆる「高速離散」）行うことができる。その結果、プリズムは、レーザ発射イベントよりも頻繁に発生する可能性がある個別の時点に再位置決めすることができる。更に、予測が行われる時のレーザ発射イベントが発生する時からのこの分離は、プリズム制御を更新する頻度が、レーザ出力波長を測定するのにかかる時間によってもはや制限されないことを意味する（２つの図の「ＬＡＭ遅延」）。これはまた、レーザ測定及び得られるレーザ制御信号印加よりも１パルス遅れであることによる性能劣化を低減することを意味する。

【００２１】

図３をここで参照すると、上述のシーケンスのタイミング図を見ることができる。周期的レーザ発射イベントは、時間t_0及びt_4で発生するように示されており、波長測定データは、時間t_2で利用可能になるように示されている。更に、より頻繁に発生しているのは、$T_{コントローラ}$として示されたプリズム制御信号間の間隔で時間t_1、t_3、t_5、及びt_6に示すように印加された新しいプリズム制御信号である。これらのプリズム制御信号は、制御信号印加の各サイクル中に行われている新しいプリズム予測の結果である。更に、これらのプリズム予測は、波長測定データが利用可能になるのを待つことなく行われる。しかし、上述のように、新しい波長測定データが利用可能である時に、それは、プリズム位置予測を更新するのに使用される。図示のように、新しい制御信号が印加される頻度は、レーザ発射イベントの頻度よりも迅速に発生する。これらの作動の詳細、変形、及び代替に対しては、本明細書の他の箇所で更に説明する。

【００２２】

図１を再び参照して、本発明の装置の一実施形態を説明する際にレーザシステム１００のブロック図を使用する。

【００２３】

制御コンピュータ１６０は、本明細書の他の箇所でより完全に説明するように、レーザシステム１００内のプリズムの移動のモデルを使用してＬＮＭ１１０内のプリズム位置の周期的な予測を行う。制御コンピュータ１６０は、周期的なプリズム位置予測を使用して、ＬＮＭ１１０内でプリズムに印加すべき望ましい電圧を示すデジタル制御信号をＰＺＴ駆動電子機器１５０に周期的に出力する。ＰＺＴ駆動電子機器１５０ＤＡＣは、アナログ電圧信号に制御コンピュータ１６０デジタル信号を変換し、ＰＣＴ駆動電子機器１５０アナログローパスフィルタは、高周波電気ノイズを低減してアナログＤＡＣ電圧信号を増幅する。このアナログ電圧信号は、次に、ＰＺＴ駆動電子機器１５０からＰＺＴ１４０に通され、これは、新しい制御信号の印加である。この電圧更新イベントによりＬＮＭ１１０内のプリズムが再位置決めされ、それによって次のレーザ発射イベント時に出力カプラ１３０を通じてＭＯチャンバ１２０からの光出力の波長の変化が生じる。

【００２４】

上述のように、レーザシステム１００内の光の供給源は、主発振器（ＭＯ）チャンバ１２０である。ＭＯチャンバ１２０がレーザを発射した時に、得られる光は、「線狭化モジュール（ＬＮＭ）」１１０に入り、次に、プリズム（実際には本明細書の他の箇所でより

完全に説明するように複数のプリズム）を通って光波長セレクタとして作用するＬＮＭ１１０内の回折格子に衝突する。変更後の波長レーザ光は、再びＭＯチャンバ１２０を通過して出力カプラ１３０に進み、出力カプラ１３０は、レーザ光出力をＭＯチャンバ１２０から「線中心解析モジュール（ＬＡＭ）」１７０まで通過させる。ＬＡＭ１７０は、レーザ光の波長を測定して制御コンピュータ１６０まで測定値を通過させる。制御コンピュータ１６０がＬＡＭ１７０からレーザ光出力測定値を受信すると、制御コンピュータ１６０は、本明細書の他の箇所でより完全に説明するように測定値を使用して予測プリズム位置を更新する。

【００２５】

この処理は、例えば、図３に示すように、その後のプリズム制御信号印加／電圧信号更新サイクルに向けて周期的に繰り返される。更に、図３において時間t_2で発生するような万一新しい波長測定値が利用可能になった場合に、制御コンピュータ１６０は、この新たに受信した測定データを使用して予測プリズム位置を更新する。

【００２６】

上述のように、制御コンピュータ１６０は、レーザシステム１００内のプリズムの移動のモデルを使用してＬＮＭ１１０内のプリズム位置の周期的な予測を行う。プリズムの移動のモデルは、プリズムの物理的移動の様々な特性の知識に基づくものであり、このモデルは、レーザシステム１００内のプリズムの振動作用及びレーザシステム１００内の外乱を考慮する。好ましい実施形態では、使用されるモデルは、その積分形式で以下の通りである。

$$(A) \qquad x(t+T) = e^{AT}x(t) + \int_0^T e^{A\tau} Bu(T-\tau)\, d\tau$$

ここで、ｘ（ｔ＋Ｔ）は、初期状態ｘ（ｔ）よりＴ秒先んじた予測状態であり、e^{AT}は、線形システムの標準な状態遷移行列であり、Ｂは、標準入力行列である。

【００２７】

すなわち、上述の式（Ａ）は、過去のイベントの状態又は予測に基づいて将来のイベントの予測を行う。例えば、図３を再度参照すると、式（Ａ）を用いて、時間t_5に対する前に行った予測に基づいて時間t_6に対するプリズム位置予測を行うことができ、この場合、式（Ａ）においてＴ＝t_6－t_5である。初期予測に対して初期条件が仮定されることに注意されたい（例えば、レーザ起動時に、初期条件は、所定の定数であり、一連のレーザパルスの開始時に、初期条件は、前のレーザパルスシーケンスの終了時からの最後の状態に設定値変更のようなあらゆるバースト間作動を加えたものである）。

【００２８】

上述の式は、レーザシステム１００内の波長の外乱を考慮していることも理解すべきである。例えば、バースト遷移及び定常状態外乱は、不要なレーザ光波長変動の原因になる。バースト遷移の開始は、典型的には、測定波長に見られ、これは、レーザチャンバ音響効果の関数でありかつ更に問題を複雑化するレーザ発射速度と共に変化することが公知である衝撃波によって引き起こされると考えられている。これらのバースト遷移の開始は、ランダムウォーク過程としてモデル化される。定常状態外乱は、波長信号において正弦曲線として出現し、かつそのようにモデル化される。これらの正弦曲線の定常状態外乱は、レーザシステム１００において他の震動源の中でもとりわけファンによって引き起こされると考えられている。レーザシステム１００内で識別されるこれらの外乱及びあらゆる他のものは、全て、プリズム位置予測に使用されるモデルにおいて考慮することができる。

【００２９】

上述しかつ本明細書の他の箇所でより完全に説明するように、プリズム位置予測は、次に、新しいレーザ光測定値を受信した時に更新される。プリズム位置予測の更新は、以下の式を通じて行われる（Ｂ）。

$$x(k \mid k) = (I - L_k C_k)x(k \mid k-1) + L_k y(k)$$

上述の方程式において、

・ｋは、レーザ発射イベントを示している。
・Ｉは、適切なサイズの恒等行列である（ｎ行ｘｎ列、ここで、ｎは状態ベクトルｘの要素数である）。
・L_kは、「新しいデータを信頼すること及び前の予測を信じること」の間の妥協点を捕捉する利得行列である。
・C_kは、予測状態から予測出力への標準的マッピング、例えば、ｙ＝Ｃｘである。
・ｘ（ｋ／ｋ）は、指標ｋでの最新データが与えられて更新された予測である。
・ｘ（ｋ／ｋ－１）は、前のレーザ発射イベントｋ－１からのデータが与えられてレーザ発射指標ｋでの状態の「古い」予測である。

【００３０】
上述の式（Ｂ）は、従って、本明細書の他の箇所でより完全に説明するように前に行われた予測を更新する。

【００３１】
図４をここで参照すると、本発明の方法の一実施形態の流れ図を見ることができる。図では、本方法は、３つの部分に論理的に分割されることが分るが、説明する機能性は、代替構成で実施することができることは理解されるものとする。測定値更新部分４０１は、新しいレーザ光測定値を受信した時に行われる更新処理のためのものである。計算制御部分４０２は、プリズム位置予測を使用して新しい制御信号を計算する際に行われる作動に関連している。時間更新部分４０３は、主として、その後の電圧更新イベントに対する予測を行うために生じる作動に関連している。これらの各々を一実施形態の関連でここでより詳細に以下に説明する。

【００３２】
例えば、図１の制御コンピュータ１６０上で実行される処理は、処理が例えば制御コンピュータ１６０内のタイマにより周期的に開始される時に測定値更新部分４０１において始まる。

【００３３】
新しい波長測定値が判断ブロック４０５において利用可能でない場合に、処理は、測定値更新部分４０１を出て計算制御部分４０２に入る。計算制御部分４０２において、前に行われた次のプリズム位置予測を段階４３０で使用してＬＮＭ１１０における粗い波長プリズムに関する値を計算する。公知のように、ＬＮＭ１１０の典型的な構成は、１つよりも多いプリズムを含み、１つのプリズムは、ＰＺＴをその中域電圧の近くに保つために使用される粗い波長プリズムであり、別のプリズムは、精密波長制御に使用される本明細書で一般的に言及するプリズムである。図４には図示していないが、粗い波長制御プリズムに対する新しい値は、制御コンピュータ１６０から適切な駆動電子機器に出力される。

【００３４】
段階４３５で、前に行った次のプリズム位置予測を使用して、デルタＰＺＴ電圧を計算する。ＰＺＴ電圧のデルタ又は変化は、以下の式により計算する。

(C)　　$\Delta u(m\tau c) = -Kx(m\tau c)$

・ｍは、制御イベント（すなわち、電圧更新イベント）を示す。
・τｃは、コントローラサンプル期間であり、従って、ｘ（ｍτｃ）を（到来）電圧更新時の状態にする。
・Ｋは、制御エネルギ及び波長性能の加重和を最小にするために計算される状態フィードバック行列である。

【００３５】
次に、段階４４０でΔＰＺＴ電圧を使用して新しいＰＺＴ制御信号を計算する。新しいＰＺＴ制御信号は、以下の式により計算する。

(D)　　$V(m\tau c) = V((m-1)\tau c) + \Delta u(m\tau c)$

・Ｖ（（ｍ－１）τｃ）は、前の更新からのＰＺＴ制御信号である。
・Δｕ（ｍτｃ）は、方程式（Ｃ）の出力である。
・Ｖ（ｍτｃ）は、新しいＰＺＴ制御信号である。

前後関係が明確な時には、Ｖ（ｍτｃ）のような信号は、簡潔さを期すためにＶｍとして示すことになることに注意されたい。

【００３６】

図４には図示していないが、ＰＺＴ制御信号は、次に、例えば、プリズムに印加されるように図１のＰＺＴ駆動電子機器１５０に出力される。

【００３７】

処理は、計算制御部分４０２を出て、次に段階４４５で図５を参照して説明するようにその後の電圧更新イベント（プリズムへの新しい制御信号のその後の印加）前にレーザが再び発射することになるか否かを判断する時間更新部分４０３に入ることによって継続される。

【００３８】

図５で分るように、V_{m-1}、V_m、及びV_{m+1}として図に示す新しい制御信号が周期的に印加されることになる。しかし、現在の処理は、時間C_mであるように示されており、レーザがその後の電圧更新イベントの前に発射することになる考慮すべき２つの可能なシナリオが存在する。

【００３９】

これらの２つのシナリオを説明する前に、処理のこの時点、すなわち、C_mでは、その後の電圧更新イベントは、新しい制御信号V_mの印加である次の電圧更新イベントではなく、新しい制御信号V_{m+1}の印加であることは理解されるものとする。次の電圧更新イベントとその後の電圧更新イベントの間のこの区別は、単に、周期的な処理がそのサイクルのどこにあるかの関数である。同様に、その後の電圧更新イベントは、次のサイクルの次の電圧更新イベントになる。

【００４０】

上述のように、時点C_mでは、レーザが次の電圧更新イベントの前に発射することになる２つのシナリオがある。第１のシナリオは、ＭＯチャンバ１２０が再びレーザを発射するために図の時点T_{k+1}に示すようにレーザシステムがステッパースキャナシステムからトリガ信号を既に受信していた時である。この受信したトリガ信号は、次に、既知のレーザトリガ遅延（すなわち、スキャナトリガ信号とその後の発光の間の既知の遅延）と共に使用して、図ではLF_{k+1}として示す得られるレーザ発射イベントのタイミングを推定し、レーザ発射イベントがその後の電圧更新イベントV_{m+1}の前に発生することになるか否か（この実施例ではそうなっている）を判断することができる。

【００４１】

第２のシナリオは、現在の時間C_m後である図中のその後の時点T'_{k+1}で受信されるトリガによって示すようにレーザシステムがステッパースキャナシステムからトリガ信号をまだ受信していない時である。まだトリガ信号を受信していないので、処理は、代わりに、１つ又はそれよりも多くの前に受信した周期的トリガ信号及び既知のトリガ遅延に基づいて、図中でLF'_{k+1}として示すレーザ発射イベントを推定する。処理は、次に、この推定レーザ発射イベントLF'_{k+1}がその後の電圧更新イベントV_{m+1}の前に発生することになるか否か（この実施例ではそうなっている）を判断する。

【００４２】

処理は、この時点で、２つの可能なシナリオの下でレーザがその後の電圧更新イベントV_{m+1}の前に発射することになるか否かを判断している。

【００４３】

図４を再び参照すると、判断ブロック４４５の結果が、レーザはその後の電圧更新イベントの前に発射しないことである場合に、段階４５５で、その後の電圧更新イベントに対するプリズム位置予測が行われる。

【００４４】

段階４５５で行うようなその後の電圧更新イベントに対するプリズム位置予測を行う段階に対して、ここで図６を参照して以下に説明する。以前と同様に、処理は、現在、時間C_mにある。行われる予測は、その後の電圧更新イベントV_{m+1}に対するものであり、図中

で矢印によって示すように、この予測は、V_mとして示す次の電圧更新イベントに対する前に行った予測に基づくものである。好ましい実施形態では、その後の電圧更新イベントに対する予測は、本明細書の他の箇所に説明する式（Ａ）を使用して行われる。

【００４５】

図４を再び参照すると、処理は、次に、時間更新部分４０３において１サイクルの作動を終える。

【００４６】

この時点でその後の電圧更新イベントに対する予測が行われたので、新しい測定値が利用可能と判断し、次に、段階４３０、４３５、及び４４０で新しい制御信号を計算するという判断ブロック４０５のシーケンス、及びレーザは更に別のその後の電圧更新イベントの前に発射しないと判断する判断ブロック４４５と共に、全ては、図３のタイミング図に示すように個別の時点でのプリズムの周期的な予測及び再位置決めをもたらすことは理解されるものとする。

【００４７】

判断ブロック４４５に再び戻って、その代わりにレーザがその後の電圧更新イベントの前に発射することになると判断された場合に、段階４５０で、次の電圧更新イベントに対するプリズム位置予測が行われる。

【００４８】

段階４５０で行われたような次の電圧更新イベントに対するプリズム位置予測を行う段階に関して、ここで図７を参照して説明する。以前と同様に、処理は、現在、時間C_mにある。更に、この実施例では、図５を参照して上述したように、レーザは、次の電圧制御更新V_mの後であり、かつその後の電圧制御更新V_{m+1}の前であるLF_{k+1}で発射することになることがこの時点で既知である。処理は、この時点で、図中の予測矢印によって示すように、電圧更新イベントV_mに対する前に行った予測に基づいてLF_{k+1}でレーザ発射イベントに対するプリズム位置予測を行う。好ましい実施形態では、LF_{k+1}でのレーザ発射イベントに対するこの予測は、本明細書の他の箇所に説明する式（Ａ）を使用して行われる。

【００４９】

図４を再び参照すると、処理は、次に、上述のようにその後の電圧更新イベントに対するプリズム位置予測が行われる段階４５５に進む。かつ前と同様に、処理は、次に、時間更新部分４０３において１サイクルの作動を終える。

【００５０】

判断ブロック４０５と測定値更新部分４０１内の周期的に開始される処理の開始とを再び参照すると、その代わりに新しいレーザ出力測定値が受信されており、従って、利用可能である場合に、処理は、以下に更に説明するように、新しい測定値を使用して前の予測及び／又は新しい予測に１つ又はそれよりも多くの更新を行うことによって測定値更新部分４０１内で継続される。

【００５１】

判断ブロック４１０において、最後に新しいレーザ出力測定値が受信された時からレーザが再び発射されていないと判断された場合に、処理は、次の電圧更新イベントに対する予測を新しい測定値で更新する段階４２０に進む。

【００５２】

段階４２０で行うような新しい測定値で次の電圧更新イベントに対する予測を更新する段階に関して、ここで図８を参照して以下に説明する。以前と同様に、処理は、現在、時間C_mにあり、この時点で、その後の電圧制御イベントV_{m+1}（図示せず）に対する予測を行う前にレーザ発射イベントLF_kに対するレーザ出力測定値が利用可能となっている。処理は、次の制御信号V_mが印加される前の残りの時間を使用して、新しく利用可能になったレーザ出力測定値を使用してその電圧更新イベントに対する前に行った予測を更新する。このようにして、レーザ発射イベントLF_kから新しく利用可能になったレーザ出力測定値を使用して、新しい制御信号印加V_mに対して前に行っていた予測を更新する。好

ましい実施形態では、次の電圧更新イベントに対する予測を更新する段階は、本明細書の他の箇所に説明する式（Ｂ）を使用して行われる。

【００５３】

再び図４を参照すると、この時点で、次の電圧更新イベントに対する前に行ったプリズム予測を更新しているので、処理は、上述のように、測定値更新部分４０１を出て、粗い波長プリズム信号などを計算すること４３０で始まる計算制御部分４０２に入ることによって継続される。しかし、この時点で、計算段階４３０、４３５、及び４４０は、次の電圧更新イベントに対する更新された予測を使用し、従って、新たに受信したレーザ出力波長測定データから恩典を受ける。

【００５４】

代替的に、測定値更新部分４０１の判断ブロック４１０を再び参照すると、最後に新しいレーザ出力測定値が受信された時からレーザが再び発射したと判断された場合に、処理は、前のレーザ発射イベントに対する予測を新しい測定値で更新する段階４１５に進み、更に、前のレーザ発射イベントに対する更新された予測に基づいて次の電圧更新イベントに対する新しい予測が行われることになる段階４２５に進み、この各々を更に以下に説明する。

【００５５】

段階４１５で行うような新しい測定値で前のレーザ発射イベントに対する予測を更新する段階に関して、ここで図９を参照して以下に説明する。以前と同様に、処理は、現在、時間C_mにあり、この時点で、レーザ発射イベントLF_kからのレーザ出力測定値が利用可能となっている。処理は、レーザ発射イベントLF_kからの新しいレーザ出力測定値を使用して、レーザ発射イベントLF_{k+1}に対する前に行った予測（前の処理サイクルにおいて本明細書の他の箇所に説明するように段階４５０で行われたような）を更新する。好ましい実施形態では、前のレーザ発射イベントに対する予測を更新する段階は、本明細書の他の箇所に説明する式（Ｂ）を使用して行われる。

【００５６】

段階４２０で行うような前のレーザ発射イベントに対する更新された予測に基づいて次の電圧更新イベントに対する新しい予測を行う段階に関しても、ここで図９を参照して以下に説明する。以前と同様に、処理は、現在、時間C_mにある。段階４１５からの前のレーザ発射イベントLF_{k+1}に対する更新された予測を使用して、印加される新しい制御信号V_mとしてかつ予測矢印によって示すように図に示す次の電圧更新イベントに対する予測が行われる。好ましい実施形態では、前のレーザ発射イベントに対する更新された予測に基づいて次の電圧更新イベントに対する新しい予測を行う段階は、本明細書の他の箇所に説明する式（Ａ）を使用して行われる。

【００５７】

再び図４を参照すると、この時点で次の電圧更新イベントに対する新しい予測を行っているので、処理は、他の箇所で説明するように、測定値更新部分４０１を出て、粗い波長プリズム信号などの計算４３０で始まる計算制御部分４０２に入ることによって継続される。しかし、この時点で、計算段階４３０、４３５、及び４４０は、次の電圧更新イベントに対する新たに作成した予測を使用し、従って、新たに受信したレーザ出力波長測定データ及び新しいレーザ発射イベントの既知のタイミングからの恩典を受ける。

【００５８】

最後に、処理サイクルは、本明細書の他の箇所に説明するようなその後の電圧更新イベントに対する予測を行うために時間更新部分４０３において適切な作動を行うことによって終了する。

【００５９】

理解しやすいように、発生することになる様々なシナリオを反映する処理段階の様々な異なるシーケンスをここで精査する。

【００６０】

第１の可能なシーケンスにおいて、制御信号を計算及び出力してその後の電圧イベント

に対する予測を作成する。このシナリオは、新しいレーザ出力波長測定値がなく、かつレーザが次の電圧更新イベントの前に発射しない時に行われる。このシーケンスは、処理段階４３０、４３５、４４０、及び４５５を含む。

【００６１】

第２の可能なシーケンスにおいて、制御信号を計算及び出力し、次のレーザ発射イベントに関して予測を行い、その後の電圧イベントに対する予測を作成する。このシナリオは、新しいレーザ出力波長測定値がなく、かつレーザが次の電圧更新イベントの前に発射することになる時に行われる。このシーケンスは、処理段階４３０、４３５、４４０、４５０、及び４５５を含む。

【００６２】

第３の可能なシーケンスにおいて、次の電圧更新イベントに対する予測を更新し、その更新された次の電圧更新イベントに基づいて制御信号を計算してその後の電圧更新イベントに対する予測が行われる。このシナリオは、新しいレーザ出力波長測定値が利用可能になり、レーザが新しい測定値を最後に受信してから再び発射しておらず、かつレーザが次の電圧更新イベントの前に発射しない時に行われる。このシーケンスは、処理段階４２０、４３０、４３５、４４０、及び４５５を含む。

【００６３】

第４の可能なシーケンスにおいて、次の電圧更新イベントに対する予測を更新し、その更新された次の電圧更新イベントに基づいて制御信号を計算し、次のレーザ発射イベントに対する予測を行い、その後の電圧更新イベントに対する予測が行われる。このシナリオは、新しいレーザ出力波長測定値が利用可能になり、レーザが最後に新しい測定値を受信してから再び発射しておらず、かつレーザが次の電圧更新イベントの前に発射することになる時に行われる。このシーケンスは、処理段階４２０、４３０、４３５、４４０、４５０、及び４５５を含む。

【００６４】

第５の可能なシーケンスにおいて、前のレーザ発射イベントに対する予測を更新し、更新された前のレーザ発射イベントに基づいて次の電圧更新イベントに対する予測を行い、次の電圧更新イベントに対するその予測に基づいて制御信号を計算してその後の電圧更新イベントに対する予測が行われる。このシナリオは、新しいレーザ出力波長測定値は利用可能になり、レーザが最後に新しい測定値を受信してから再び発射されており、かつレーザが次の電圧更新イベントの前に発射されない時に行われる。このシーケンスは、処理段階４１５、４２５、４３０、４３５、４４０、及び４５５を含む。

【００６５】

第６の可能なシーケンスにおいて、前のレーザ発射イベントに対する予測を更新し、更新された前のレーザ発射イベントに基づいて次の電圧更新イベントに対する予測を行い、次の電圧更新イベントに対するその予測に基づいて制御信号を計算し、次のレーザ発射イベントに対する予測を行い、その後の電圧更新イベントに対する予測が行われる。このシナリオは、新しいレーザ出力波長測定値が利用可能になり、レーザが最後に新しい測定値を受信してから再び発射されており、かつレーザが次の電圧更新イベントの前に発射することになる時に行われる。このシーケンスは、処理段階４１５、４２５、４３０、４３５、４４０、４５０、及び４５５を含む。

【００６６】

本明細書に説明する実施形態は、本発明を例示するものである。本発明のこれらの実施形態を図を参照して説明する時に、説明する方法及び／又は特定の構造の様々な修正又は適応化が当業者に明らかになるであろう。本発明の教示に依存し、かつこれらの教示が当業技術を進歩させた全てのこのような修正、適応化、又は変形は、本発明の精神及び範囲にあると見なされる。本発明は、いかなる点においても例示する実施形態だけに制限されないことが理解されるので、説明及び図面は、従って、制限的な意味で考えるべきではない。

【００６７】

１つの可能な代替として、本明細書に説明する最新レーザ制御方法及び装置は、レーザ光の波長の制御に向けて本明細書に説明するのと同様の方式でレーザ光の帯域幅の制御に使用することができると考えられることは理解されるものとする。

【００６８】

本明細書に説明する本発明の精神及び意味の範囲で代替シーケンス及び数式を使用することができると考えられることも理解されるものとする。

【００６９】

同様に、制御コンピュータ１６０は、命令がそれ自体コンピュータ可読媒体から由来するか又はコンピュータ可読媒体上に常駐することができる上述の作動を実行するためのソフトウエア命令を実行するパーソナルコンピュータ、サーバ、又は他の処理システムを含むプロセッサ及びメモリを含むあらゆるコンピュータシステムとすることができることは理解されるものとする。代替的に、制御コンピュータ１６０は、ファームウエアの有無に関わらず、上述の作動を実行するように特に構成された特定用途向け集積回路（ＡＳＩＣ）又は他の配線接続デバイスのようなあらゆる専用ハードウエアとすることができる。

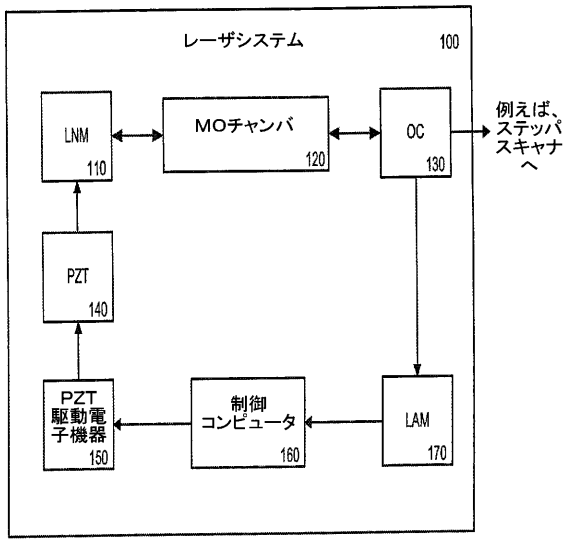
【符号の説明】

【００７０】

４０１　測定値更新部分
４０２　計算制御部分
４０３　時間更新部分
４３０　粗い波長プリズム信号などの計算段階
４４５　判断ブロック

【図１】

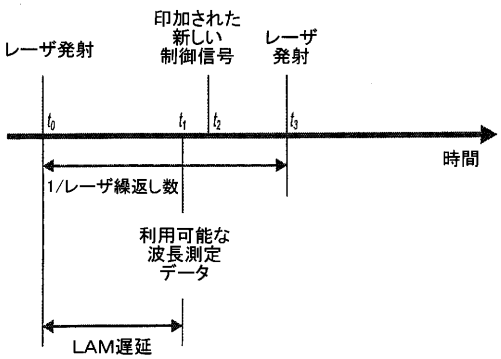
FIG. 1



【図２】

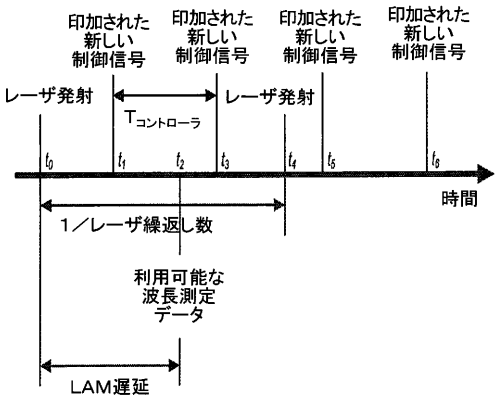
FIG. 2

（従来技術）



【図３】

FIG. 3



【図４】

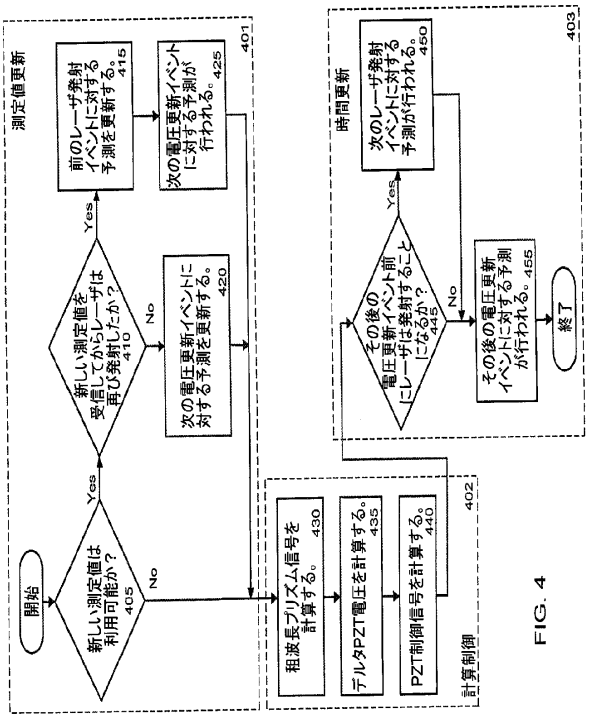
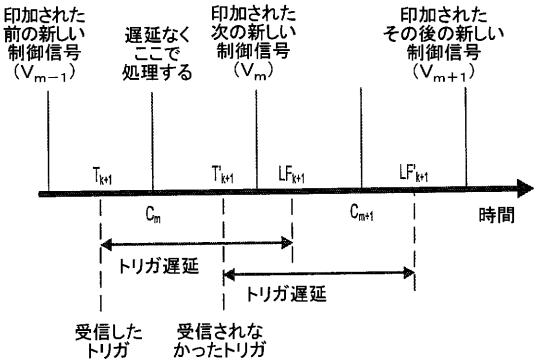


FIG. 4

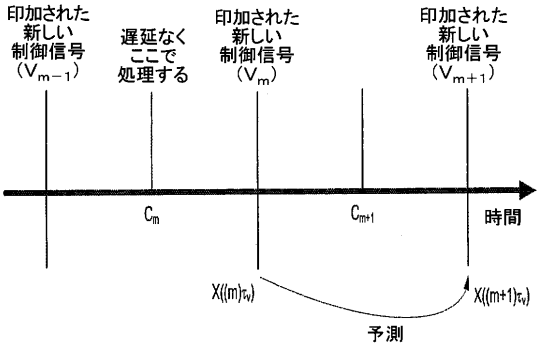
【図５】

FIG. 5



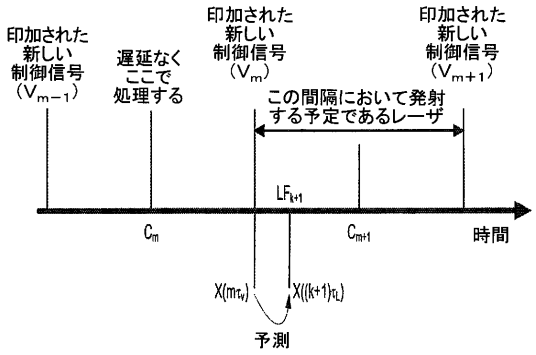
【図６】

FIG. 6



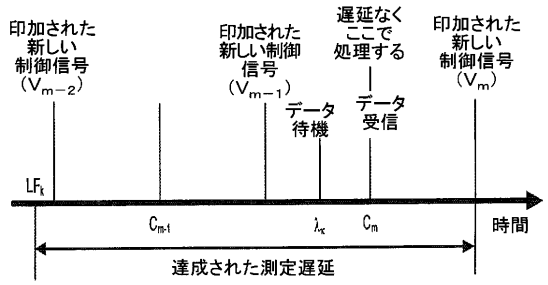
【図７】

FIG. 7



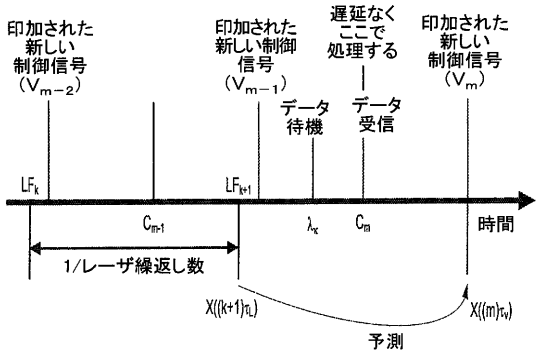
【図８】

FIG. 8



【図９】

FIG. 9



フロントページの続き

(72)発明者　リッグス　ダニエル　ジェイ
アメリカ合衆国　カリフォルニア州　９２１３１　サン　ディエゴ　カミニート　バンヨン　１０５３６
(72)発明者　ホーガン　オラフ
アメリカ合衆国　カリフォルニア州　９２１２８　サン　ディエゴ　アヴェニダ　アルカチョファ　１５６１７　＃シー

審査官　林　祥恵

(56)参考文献　特開２００１－１６８４４０（ＪＰ，Ａ）
特開２００２－１９８６０２（ＪＰ，Ａ）
特表２００４－５２６３３４（ＪＰ，Ａ）
特表２００９－５２７１２４（ＪＰ，Ａ）
特開２００８－０９８２８２（ＪＰ，Ａ）
特開２００８－１７１９６１（ＪＰ，Ａ）
特開平１１－００８４３１（ＪＰ，Ａ）

(58)調査した分野(Int.Cl.，ＤＢ名)
Ｈ０１Ｓ　　３／００－３／１３９