(12) 特許協力条約に基づいて公開された国際出願

(19) 世界知的所有権機関
国際事務局

(43) 国際公開日
2023年3月2日(02.03.2023)

WIPO | PCT

(10) 国際公開番号
WO 2023/027104 A1

(51) 国際特許分類:
G02F 1/01 (2006.01) *G02B 5/18* (2006.01)

(21) 国際出願番号： PCT/JP2022/031870

(22) 国際出願日： 2022年8月24日(24.08.2022)

(25) 国際出願の言語： 日本語

(26) 国際公開の言語： 日本語

(30) 優先権データ：
特願 2021-137394 2021年8月25日(25.08.2021) JP

(71) 出願人: 国立大学法人電気通信大学 (THE UNIVERSITY OF ELECTRO-COMMUNICATIONS) [JP/JP]; 〒1828585 東京都調布市調布ケ丘一丁目５番地１ Tokyo (JP).

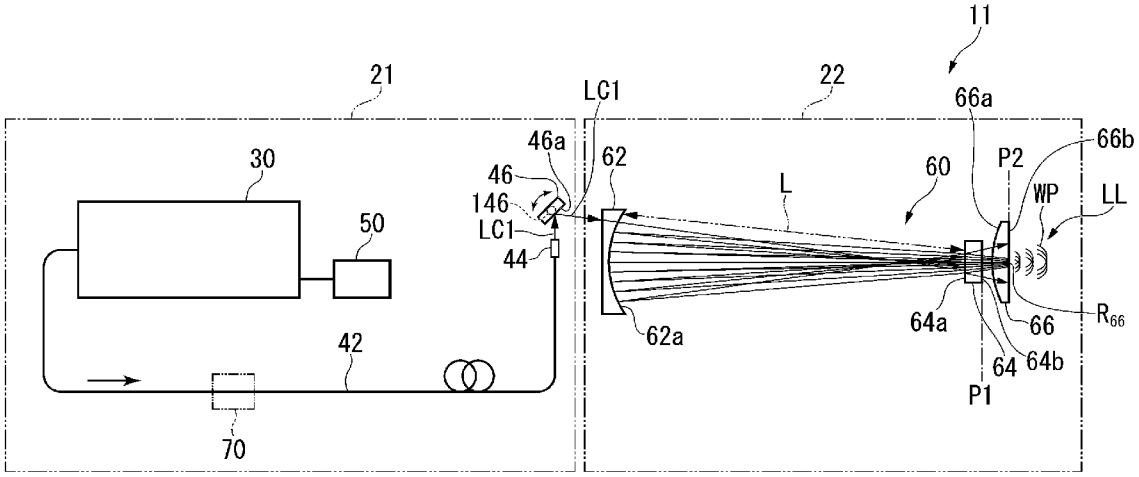
(72) 発明者: 加藤 峰士 (KATO Takashi); 〒1828585 東京都調布市調布ケ丘一丁目５番地１ 国立大学法人電気通信大学内 Tokyo (JP). 美濃島 薫 (MINOSHIMA Kaoru); 〒1828585 東京都調布市調布ケ丘一丁目５番地１ 国立大学法人電気通信大学内 Tokyo (JP).

(74) 代理人: 田▲崎▼ 聡, 外 (TAZAKI Akira et al.); 〒1006620 東京都千代田区丸の内一丁目９番２号 Tokyo (JP).

(81) 指定国(表示のない限り、全ての種類の国内保護が可能): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CV, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IQ, IR, IS, IT, JM, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD,

(54) **Title:** WAVEFRONT CONTROL DEVICE AND ADAPTIVE OPTICS DEVICE

(54) 発明の名称： 波面制御装置及び補償光学装置



(57) **Abstract:** A wavefront control device to which the present invention is applied is provided with: an optical frequency comb generation unit that emits an optical frequency comb having a plurality of optical pulses disposed in numerical order on a time axis; and a wavefront synthesis unit that distributes the plurality of optical pulses of the optical frequency comb incident from the optical frequency comb generation unit to positions different from each other according to the relative phases thereof with respect to the first optical pulse on a plane crossing the traveling direction of the optical frequency comb, and generates a synthesized wavefront of the optical pulses emitted from the positions different from each other. The optical frequency comb generation unit is provided with a phase control unit that controls the repetition frequency and offset frequency of the optical frequency comb.

WO 2023/027104 A1

[続葉有]

SE, SG, SK, SL, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, WS, ZA, ZM, ZW.

(84) 指定国(表示のない限り、全ての種類の広域保護が可能): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), ユーラシア (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), ヨーロッパ (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

添付公開書類:

一 国際調査報告(条約第21条(3))

(57) 要約:本発明を適用した波面制御装置は、時間軸上で番号順に配置された複数の光パルスを有する光周波数コムを出射する光周波数コム生成部と、前記光周波数コム生成部から入射する前記光周波数コムの前記複数の光パルスの各々を前記光周波数コムの進行方向に交差する面で1番目の前記光パルスに対する相対的な位相に応じて互いに異なる位置に分配し、前記互いに異なる位置から出射する前記光パルス同士の合成波面を生成する波面合成部と、を備える。前記光周波数コム生成部は、前記光周波数コムの繰り返し周波数とオフセット周波数とを制御する位相制御部を備える。

明　細　書

発明の名称 ： 波面制御装置及び補償光学装置

技術分野

[0001] 本発明は、波面制御装置及び補償光学装置に関する。本願は、２０２１年８月２５日に、日本に出願された特願２０２１－１３７３９４号に基づき優先権を主張し、その内容をここに援用する。

背景技術

[0002] 従来、被計測物体の形状測定や断層像の取得、構造解析等が行われる際に、補償光学によって撮影像が補正及び回復される。被計測物体から取得された直接像は、環境や空間のゆらぎの影響を受けて歪んだ像になる。この歪んだ像が波面制御によって補正されることによって撮像カメラ等の受光器の撮像面に高いコントラストで結像する鮮明な像が得られる。補償光学を用いた測定では、取得された波面の形状や状態を計測する波面計測と、計測された波面に関する情報に基づいて波面を制御する波面制御が行われる。

[0003] 波面計測を行う技術として、例えばレンズアレイを備えたシャックハルトマン波面センサ（Ｓｈａｃｋ－Ｈａｒｔｍａｎｎ　ｗａｖｅｆｒｏｎｔ　ｓｅｎｓｏｒ）を用いる方法、入射する光の光軸に対して交差する反射面の向きを調整可能な可変ミラーを用いる方法、或いは空間位相変調器（ｓｐａｔｉａｌ　ｌｉｇｈｔ　ｍｏｄｕｌａｔｏｒ；ＳＬＭ）によって入射する波面の位相を直接変調する方法が知られている。前述の各方法に基づく測定技術は確立されているが、波面計測の応答速度は数１０Ｈｚオーダーであり、波面制御の応答速度は数１０ｋＨｚオーダーである。そのため、従来よりも高速に波面計測及び波面制御を行う方法が検討されていた。

[0004] 波面計測及び波面制御の高速化を図るためのアプローチとして、フェーズドアレイが挙げられる。フェーズドアレイアンテナは、アレイ状に配置された複数のアンテナと位相制御された電磁波によって実現され、電磁波として電波を用いた気象レーダーや超音波診断機に用いられている。フェーズドア

レイアンテナを用いることによって、複数のアンテナから個別に制御された位相を有する電磁波が射出されるので、波面計測と波面制御とを同時に行うことができる。近年、電磁波として光を用いる光フェーズドアレイは、ＬｉＤＡＲ（ｌｉｇｈｔ ｄｅｔｅｃｔｉｏｎ ａｎｄ ｒａｎｇｉｎｇ）、プロジェクター及び生体蛍光計測への応用が期待されている。

[0005] 例えば、特許文献１及び非特許文献１，２には、光フェーズドアレイの一例として導波路型の光集積回路デバイスが開示されている。これらの光集積回路デバイスでは、平面光波回路等に形成された入力導波路からアンテナと同数に分岐された複数の分岐導波路の各々に位相調整部が設けられている。位相調整部で位相制御された光波は、複数の分岐導波路の各々の出射端部（アンテナ）から出射される。

先行技術文献

特許文献

[0006] 特許文献1：日本国特開２０２０－１１２５８２号公報

非特許文献

[0007] 非特許文献1：Ｍ．Ｃ．Ｓｈｉｎ，ｅｔ ａｌ．，“Ｃｈｉｐ－ｓｃａｌｅ ｂｌｕｅ ｌｉｇｈｔ ｐｈａｓｅｄ ａｒｒａｙ”，Ｏｐｔｉｃｓ Ｌｅｔｔｅｒｓ，Ｖｏｌ．４５，Ｎｏ．７，ｐｐ．１９３４－１９３７（２０２０）．

非特許文献2：Ｈ．Ａｂｅｄｉａｓｌ，ｅｔ ａｌ．，“Ｍｏｎｏｌｉｔｈｉｃ ｏｐｔｉｃａｌ ｐｈａｓｅｄ ａｒｒａｙ ｔｒａｎｓｃｅｉｖｅｒ ｉｎ ａ ｓｔａｎｄａｒｄ ＳＯＩ ＣＭＯＳ ｐｒｏｃｅｓｓ”，Ｏｐｔｉｃａｌ Ｅｘｐｒｅｓｓ，Ｖｏｌ．２３，Ｎｏ．５，ｐｐ．６５０９－６５１９（２０１５）．

発明の概要

発明が解決しようとする課題

[0008] 従来の光フェーズドアレイは、上述の特許文献１及び非特許文献１，２で

例示したように導波路型の光集積回路デバイスで構成されている。しかしながら、導波路型の光集積回路デバイスでは、分岐導波路と同数の位相調整部、すなわち光フェーズドアレイのアンテナ数と同数の位相調整部の各々を個別に制御する必要がある。アンテナ数の増大に伴い、複数の位相調整部及びこれらの各々に接続される位相制御装置等が占めるスペースが増大する。アンテナ数の２倍程度のパラメータを互いに独立に制御及び校正する必要があり、アンテナ数の増大に伴い、複数のアンテナの制御及び各アンテナのパラメータの校正が煩雑になる。導波路型の光集積回路デバイスにおける導波路での光波の伝搬特性の低下を抑えるためには、実質的に単色光を使わざるを得ない。前述のように、従来の導波路型の光フェーズドアレイによって波面計測及び波面制御を行う対象の光波を広帯域化し、高速に制御するためには、集積回路及び制御装置の大型化と、制御パラメータの増大が不可避である。このことから、従来の導波路型の光フェーズドアレイの実用性は低かった。

[0009] 本発明は、アンテナ数の増加に依らず簡便な制御によって高速に波面制御を行い、且つ制御対象の光波の広帯域化を実現可能な波面制御装置及び補償光学装置を提供する。

課題を解決するための手段

[0010] 本実施形態に係る波面制御装置は、時間軸上で番号順に配置された複数の光パルスを有する光周波数コムを出射する光周波数コム生成部と、前記光周波数コム生成部から入射する前記光周波数コムの前記複数の光パルスの各々を前記光周波数コムの進行方向に交差する面で１番目の前記光パルスに対する相対的な位相に応じて互いに異なる位置に分配し、前記互いに異なる位置から出射する前記光パルス同士の合成波面を生成する波面合成部と、を備える。前記光周波数コム生成部は、前記光周波数コムの繰り返し周波数とオフセット周波数とを制御する位相制御部を備える。

[0011] 本実施形態に係る波面制御装置では、前記波面合成部は、互いに対向配置された一対のミラーを有する共振器構造を備えてもよい。前記一対のミラー

のうち一方のミラーの反射面は、入射する前記光周波数コムの一部を反射し、且つ残部の少なくとも一部を透過してもよい。前記一対のミラーを１往復した前記光パルス同士の合成波面を考慮した場合には、前記一対のミラーの反射面間距離Ｌは、（１）式で表される。

[0012] [数1]

$$L = L_{rep}/2 = c/2f_{rep} \quad \cdots (1)$$

[0013] 上述の（１）式におけるL_{rep}は前記光周波数コムのパルス間距離を表し、ｃは光速を表し、f_{rep}は前記光周波数コムの繰り返し周波数を表す。

[0014] 本実施形態に係る波面制御装置は、前記一対のミラーのうち少なくとも一方のミラーに入射する前記光周波数コムの入射角度を調節する調節機構を備えてもよい。前記一対のミラーが用いられた場合には、少なくとも一方のミラーに入射する角度が変化し、合成波面が制御されてもよい。

[0015] 本実施形態に係る波面制御装置では、前記光周波数コム生成部は、前記光周波数コムの波長を変換する波長変換部を備えてもよい。前記光パルス同士の合成波面は１往復したパルスではなく、任意の回数往復したパルス間の干渉を用いて合成波面が構成されてもよい。

[0016] 本実施形態に係る波面制御装置は、前記合成波面を有する光波の強度情報を前記位相制御部にフィードバックするフィードバック機構を備えてもよい。

[0017] 本実施形態に係る波面制御装置において、前記位相制御部は、前記繰り返し周波数と前記オフセット周波数との比率を所定値に設定してもよい。

また、本実施形態に係る波面制御装置は、前記光周波数コム生成部から出射された前記複数の光パルスのうちの一部の光パルスを前記波面合成部に向けて出射する強度変調器を備えてもよい。

[0018] 本実施形態に係る補償光学装置は、前記波面制御装置と、イメージング光学系と、を備える。前記イメージング光学系は、前記波面制御装置の前記波面合成部から出射されて前記合成波面を有する光波を被計測物体に照射可能

に構成され、前記被計測物体から反射又は透過した光波を受光可能に構成されている。

発明の効果

[0019] 本発明に係る波面制御装置及び補償光学装置によれば、アンテナ数の増加に依らず簡便な制御によって高速に波面制御を行い、且つ制御対象の光波の広帯域化を実現することができる。

図面の簡単な説明

[0020] [図1]本発明に係る第１実施形態の波面制御装置の概略図である。

[図2]光周波数コムの時間軸上の電場分布（上段）及び周波数軸上の強度分布（下段）の模式図である。

[図3]図１に示す波面制御装置が備える波面合成部の原理を説明するための模式図である。

[図4]図１に示す波面制御装置が備える波面合成部での波面合成の様子を説明するための模式図である。

[図5]本発明に係る第２実施形態の波面計測システムの概略図である。

[図6]図５に示す波面計測システムの２次元波面分布の例を示す模式図である。

[図7]本発明に係る第２実施形態の波面制御装置の概略図である。

[図8]図７に示す波面制御装置の所定の面で分配された複数の光パルスの位相分布の例を示す模式図である。

[図9]本発明に係る波面制御装置の第１変形例の概略図である。

[図10]本発明に係る波面制御装置の第２変形例の概略図である。

[図11]本発明に係る波面制御装置の第３変形例の概略図である。

[図12]本発明に係る波面制御装置の第３変形例において波面合成部での波面合成の様子を説明するための模式図である。

発明を実施するための形態

[0021] 以下、本発明に係る波面制御装置及び補償光学装置の実施形態について、図面を参照して説明する。

[0022] ［第１実施形態］

図１に示すように、本発明に係る第１実施形態の波面制御装置１１は、光周波数コム生成部２１と、波面合成部２２と、を備える。光周波数コム生成部２１は、光周波数コム（以下、光コムという場合がある）ＬＣ１を生成し、生成した光周波数コムＬＣ１を波面合成部２２に向けて出射する。光周波数コム生成部２１は、少なくとも光周波数コム発生器３０と、位相制御部５０と、を備え、光ファイバ４２と、ファイバコリメータ４４と、平面鏡４６と、をさらに備える。

[0023] 光周波数コム発生器３０は、１つの光周波数コムＬＣ１を発生させ、出射端部から出射する。図２に示すように、光周波数コムＬＣ１は、時間軸すなわち図２の上段の横軸に複数の光パルスＬＰ$_1$，ＬＰ$_2$，・・・，ＬＰ$_n$，ＬＰ$_{n+1}$，・・・が互いに間隔をあけて配置された光パルス列である。ｎは、任意の自然数であり、光パルスの時間軸上の番号を表す。以下では、複数の光パルスＬＰ$_1$，ＬＰ$_2$，・・・，ＬＰ$_n$，ＬＰ$_{n+1}$，・・・をまとめて複数の光パルスＬＰｎと記載する場合がある。光周波数コムＬＣ１は、時間軸上で番号順に配置された複数の光パルスＬＰｎを有する。複数の光パルスＬＰｎは、周波数軸上の縦モードの情報を有する。光パルスＬＰｎの各々は、所定の周波数分布を有する。光パルスＬＰｎの各々の周波数は、時間軸上で連続的に変化する。

[0024] 複数の光パルスＬＰｎは、一定の繰り返し時間Ｔ$_{rep}$で発振している。図２の上段に示された時間軸上の光周波数コムＬＣ１をフーリエ変換し、周波数軸上で観測した場合には、図２の下段に示すように、互いに間隔をあけて並んだ多数の周波数モードが観測される。つまり、光周波数コムＬＣ１は、周波数軸すなわち図２の下段の横軸に互いに間隔をあけて配置された複数の周波数モードＦＭ$_1$，ＦＭ$_2$，・・・，ＦＭ$_m$，ＦＭ$_{m+1}$，・・・を有する。ｍは、任意の自然数であり、スペクトルの周波数軸上の番号を表す。以下では、複数の周波数モードＦＭ$_1$，ＦＭ$_2$，・・・，ＦＭ$_m$，ＦＭ$_{m+1}$，・・・をまとめて複数の周波数モードＦＭｍと記載する場合がある。周波数軸上で互いに

隣り合う周波数モードＦＭ$_m$，ＦＭ$_{m+1}$の中心同士の間隔は、繰り返し周波数ｆ$_{rep}$である。繰り返し時間Ｔ$_{rep}$は、（２）式で表される。

[0025] [数2]

$$T_{rep} = 1/f_{rep} \quad \cdots (2)$$

[0026] 複数の光パルスＬＰｎの各々は、光源の共振器等の内部で伝搬する多くの縦モードの重ね合わせから構成されている。光パルス列である光周波数コムＬＣ１は、縦モードの重ね合わせの波である搬送波（又はキャリアとも呼ばれる）と、その包絡線（又はエンベロップとも呼ばれる）を構成する波束によって構成されている。搬送波の速度と波束の速度は互いに異なるため、時間の経過に伴い、位相差が生じる。時間軸上で所定の繰り返し時間Ｔ$_{rep}$ごとに繰り返し発せられる光パルス列では、時間軸上で互いに隣り合う光パルスＬＰ$_n$，ＬＰ$_{n+1}$の間に、（３）式で表される位相差Δφ$_{n+1}$が生じる。

[0027] [数3]

$$\Delta\phi_{n+1} = \phi_{n+1} - \phi_n \quad \cdots (3)$$

[0028] 光周波数コムＬＣ１のスペクトル分布において、周波数モードＦＭ$_m$を繰り返し周波数ｆ$_{rep}$の間隔で仮想的に周波数の０（零）まで延伸したときの余りの周波数は、オフセット周波数ｆ$_{ceo}$、又はキャリア・エンベロップ・オフセット（ｃａｒｒｉｅｒ　ｅｎｖｅｌｏｐｅ　ｏｆｆｓｅｔ：　ＣＥＯ）と呼ばれる。光周波数コムＬＣ１のオフセット時間Ｔ$_{ceo}$は、（４）式で表される。

[0029] [数4]

$$T_{ceo} = 1/f_{ceo} \quad \cdots (4)$$

[0030] 時間軸上で所定の繰り返し時間Ｔ$_{rep}$ごとに光パルスが繰り返し発せられる光パルス列では、位相のずれすなわち位相差Δφ$_{n+1}$の周期は、オフセット時間Ｔ$_{ceo}$で一周期する。光周波数コムＬＣ１のｎ番目の周波数モードの中心周波数ｆ$_n$は、繰り返し周波数ｆ$_{rep}$とオフセット周波数ｆ$_{ceo}$とを用いて（５

）式のように表される。

[0031] [数5]

$$f_n = n \times f_{rep} + f_{ceo} \quad \cdots (5)$$

[0032] 光周波数コムＬＣ１におけるＭＨｚ～ＧＨｚオーダーの繰り返し周波数ｆ$_{rep}$とオフセット周波数ｆ$_{ceo}$とを制御することによって、複数の光パルスＬＰｎの位相関係を自在に設定及び制御することができる。繰り返し周波数ｆ$_{rep}$とオフセット周波数ｆ$_{ceo}$は、原子時計のレベルの精度で安定し、高い精度で各々の所定値に正確にロックされる。

[0033] 光周波数コム発生器３０は、光コムを出射可能、且つ出射される光コムの繰り返し周波数ｆ$_{rep}$及びオフセット周波数ｆ$_{ceo}$の各々を後述するように独立に制御可能に構成されている。光周波数コム発生器３０の構成は、前述のように光コムを出射可能及び制御可能であれば、適宜変更されてもよい。図示していないが、光周波数コム発生器３０は、例えばエルビウム（Ｅｒ）添加ファイバと偏波コントローラーと遅延制御器とを備えたモード同期ファイバーレーザー（ｍｏｄｅ－ｌｏｃｋｅｄ　ｌａｓｅｒ　ｄｉｏｄｅ；ＭＬＬＤ）の共振器によって構成されている。光周波数コム発生器３０は、例えばガラス基板上に石英からなるアド／ドロップ用の直線導波路と直線導波路間に接続されたリング導波路によって構成されてもよい。光周波数コム発生器３０は、シリコン（Ｓｉ）基板上に窒化ケイ素からなるリング型共振器によって構成されてもよい。光周波数コム発生器３０は、Ｓｉ基板上の突出部の先端にフランジ部が設けられたトロイダル微小共振器によって構成されてもよい。光周波数コム発生器３０は、結晶からなる共振器によって構成されてもよい。

[0034] 図１に示すように、位相制御部５０は、光周波数コム発生器３０に接続され、光周波数コム発生器３０から出射される光周波数コムＬＣ１の繰り返し周波数ｆ$_{rep}$とオフセット周波数ｆ$_{ceo}$とを制御する。位相制御部５０は、例えば光周波数コム発生器３０が備えるファンクションジェネレータ（図示略）に接続されている。ファンクションジェネレータは、光周波数コム発生器

３０において光周波数コムＬＣ１を生成する共振器に高周波信号を供給し、光周波数コムＬＣ１の繰り返し周波数f_{rep}及びオフセット周波数f_{ceo}に直接作用する。位相制御部５０は、ファンクションジェネレータの高周波信号の出力を操作するために設けられ、例えばファンクションジェネレータに接続されているコンピュータである。位相制御部５０による繰り返し周波数f_{rep}及びオフセット周波数f_{ceo}の制御の詳細については、後述する。

[0035] 図１に示すように、光ファイバ４２の入射側の端部は、光周波数コム発生器３０に接続されている。ファイバコリメータ４４は、光ファイバ４２の出射側の端部に接続されている。ファイバコリメータ４４は、光ファイバ４２を伝搬する光周波数コムＬＣ１をコリメートし、平面鏡４６の反射面４６ａに向けて出射する。平面鏡４６は、反射面４６ａに入射する光周波数コムＬＣ１を波面合成部２２に向けて反射する。平面鏡４６には、反射面４６ａを回転可能な調節機構１４６が設けられている。調節機構１４６は、例えば反射面４６ａの平面視中央部を通って鉛直方向に延在する回転軸と回転軸を回転させるモーターとを有する回転ステージである。調節機構１４６によって反射面４６ａが矢印方向に回転されると、反射面４６ａから波面合成部２２に向けて出射される光周波数コムＬＣ１の角度が変わる。

[0036] 波面合成部２２は、入射する光周波数コムＬＣ１に含まれる複数の光パルスＬＰｎを、光周波数コムＬＣ１の進行方向の位置Ｐ１（すなわち、光周波数コムＬＣ１の光路上の位置であり、平面鏡４６の出射面４６ｂの位置）において各々の光パルスＬＰ$_n$の位相ϕ_nに応じた互いに異なる位置に分配する。互いに異なる位置ＰＯ$_n$に分配された光パルスＬＰ$_n$の位相ϕ_nが互いに干渉することによって、所定の波面が構成される。光パルスＬＰ$_n$の位相ϕ_nは、光位周波数コムの繰り返し周波数f_{rep}とオフセット周波数f_{ceo}との比率によって制御される。このことは、縦モードである周波数を用いて、横モードである波面を操作することができることを意味する。時間軸上での複数の光パルスＬＰｎの位相ϕ_nの関係は、位置Ｐ１において複数の光パルスＬＰｎの各々が照射される位置の関係に変換される。所定の位置Ｐ１で互いに異なる

位置に分配された複数の光パルスＬＰｎは、位置Ｐ１よりも出射側で波面合成され、合成波面ＷＰを形成する。

[0037] 波面合成部２２は、例えばマルチパスキャビティ（ｍｕｌｔｉｐａｓｓ ｃａｖｉｔｙ；ＭＰＣ）を構成するＭＰＣ光学系６０によって構成されている。ＭＰＣ光学系６０は、凹面鏡６２と、平面鏡６４と、を備える。凹面鏡６２は、光周波数コム生成部２１の平面鏡４６によって反射された光周波数コムＬＣ１が直接入射し得る位置に配置されている。凹面鏡６２は、平面鏡４６の反射面４６ａよりも光周波数コムＬＣ１の進行方向の前方に配置されている。平面鏡６４は、波面合成部２２に入射して凹面鏡６２を通過する光周波数コムＬＣ１の進行方向の凹面鏡６２よりも前方に配置されている。平凸レンズ６６は、波面合成部２２に入射して凹面鏡６２を通過する光周波数コムＬＣ１の進行方向の平面鏡６４よりも前方に配置されている。

[0038] 凹面鏡６２は、入射する光周波数コムＬＣ１の略全部を鏡面反射する反射面６２ａを有する。平面鏡６４は、入射する光周波数コムＬＣ１の一部を鏡面反射して残部の少なくとも一部を透過する反射面６４ａを有する。反射面６４ａは、光周波数コムＬＣ１の進行方向（すなわち、光軸上）で反射面６２ａと対向している。ＭＰＣ光学系６０では、凹面鏡６２と平面鏡６４は、共振器を構成している。凹面鏡６２、平面鏡６４及び平凸レンズ６６の各々は、光周波数コムＬＣ１を透過可能な素材で形成され、例えば石英又は光学ガラスによって形成されている。反射面６２ａ，６４ａの各々は、上述の透過特性を現すように光周波数コムＬＣ１の波長等を考慮して誘電体多層膜或いは金属蒸着膜等で形成されている。

[0039] 凹面鏡６２の反射面６２ａと平面鏡６４の反射面６４ａとの反射面間距離Ｌは、（６）式及び（７）式のように表される。

[0040] [数6]

$$L = L_{rep}/2 \quad \cdots (6)$$

$$L_{rep} = c/f_{rep} \quad \cdots (7)$$

[0041] （７）式において、ｃは光速を表し、L_{rep}は光周波数コムＬＣ１のパルス間距離を表す。図３に示すように、ＭＰＣ光学系６０に入射した光周波数コムＬＣ１は、最初に凹面鏡６２を透過し、平面鏡６４の反射面６４ａに向かって往路方向Ｄ１に進行する。光周波数コムＬＣ１では時系列で光パルスLP_nの後に繰り返し時間T_{rep}をあけて光パルスLP_{n+1}が続いている。そのため、反射面６４ａには先に光パルスLP_nが入射し、繰り返し時間T_{rep}の経過後に光パルスLP_{n+1}が入射する。反射面６４ａに入射した光周波数コムＬＣ１の一部の光周波数コムＬＣ１１は、鏡面反射され、往路方向Ｄ１とは逆向きの成分を有する復路方向Ｄ２に進行する。反射面６４ａに入射した光周波数コムＬＣ１の残部の少なくとも一部の光周波数コムＬＣ１２は、平面鏡６４を透過する。

[0042] 光周波数コムＬＣ１１は、凹面鏡６２の反射面６４ａによって鏡面反射され、光周波数コムＬＣ２として再度、往路方向Ｄ１に進行し、平面鏡６４の反射面６４ａに入射する。反射面６４ａに入射した光周波数コムＬＣ２の一部の光周波数コムＬＣ２１は、鏡面反射されて再び、復路方向Ｄ２に進行する。反射面６４ａに入射した光周波数コムＬＣ２の残部の少なくとも一部の光周波数コムＬＣ２２は、平面鏡６４を透過する。光周波数コムＬＣ２１は、凹面鏡６２の反射面６２ａによって鏡面反射され、光周波数コムＬＣ３（図示略）として再び、往路方向Ｄ１に進行し、平面鏡６４の反射面６４ａに入射する。光周波数コムＬＣｋは、光周波数コムＬＣ１，ＬＣ２と同様に、平面鏡６４の反射面６４ａで光周波数コムＬＣｋ１と光周波数コムＬＣｋ２とに分岐される。ｋは、３以上の自然数を表す。ｋが増大するに従って、光周波数コムＬＣｋの光量は減少する。ＭＰＣ光学系６０では、光周波数コムＬＣｋの光量が略なくなるまで、上述のように光周波数コムＬＣｋから光周波数コムＬＣｋ１，ＬＣｋ２への分岐が繰り返される。

[0043] 図４に示すように、平面鏡６４の反射面６４ａとは反対側の出射面６４ｂは、光周波数コムＬＣ１の進行方向（光軸）及び共振器の中心軸ＡＸに交差する面であり、光周波数コムＬＣ１の進行方向の所定の位置Ｐ１に配置され

ている。凹面鏡６２及び平面鏡６４の各中心に、中心軸ＡＸが通っている。複数の光周波数コムＬＣｐ２は、出射面６４ｂの互いに異なる位置に入射し、出射面６４ｂを透過し、図４では省略されている平凸レンズ６６に入射する。ｐは、自然数を表す。複数の光周波数コムＬＣｐ２の各々は、出射面６４ｂにおいて中心軸ＡＸを中心とする周方向に沿って位相ϕ_nに対応し且つ互いに異なる位置から出射される。

[0044] 図３に示すように、例えば、ある時刻において位置Ｐ１よりも光周波数コムＬＣ１の進行方向の前方の位置Ｐ２には、少なくとも光周波数コムＬＣ１２の光パルスＬＰ$_{n+1}$と光周波数コムＬ２２の光パルスＬＰ$_n$とが同時に到着し得る。位置Ｐ２では、複数の光パルスＬＰｎが各々の位相ϕ_nに応じて互いに異なる位置に分配されている。図４に示すように、平面鏡６４の出射面６４ｂでは、複数の光パルスＬＰｎが中心軸ＡＸを中心とする周方向に沿って位相ϕ_nに対応し且つ互いに異なる位置ＰＯ$_n$で分配されている。凹面鏡６２の反射面６２ａによる集光機能によって、複数の光パルスＬＰｎが分配される際の中心軸ＡＸを中心とする環状分布の半径は、平面鏡６４の出射面６４ｂにおいて最も短い。

[0045] ＭＰＣ光学系６０はパッシブな光学系によって構成されているため、機械駆動の時間等が発生しない。ＭＰＣ光学系６０では、光周波数コムＬＣ１が凹面鏡６２と平面鏡６４との間で往復して平面鏡６４の反射面６４ａで分岐されるという光速での現象のみによって、複数の光パルスＬＰｎが平面鏡６４の出射面６４ｂ上で互いに異なる位置ＰＯ$_n$に略同時に分配される。詳細には、前述の光速での現象のみによって、平面鏡６４の出射面６４ｂ上の互いに異なる位置ＰＯ$_n$の各々を光パルスＬＰ$_n$が通るように、光周波数コムＬＣ１が出射面６４ｂに到達するタイミングがずれる。

[0046] 図４に示すように、平面鏡６４の出射面６４ｂからは、位相ϕ_1，ϕ_2，・・・，ϕ_n，ϕ_{n+1}，・・・を有する複数の光波ＬＷ$_1$，ＬＷ$_2$，・・・，ＬＷ$_n$，ＬＷ$_{n+1}$，・・・が同時に出射される。以下では、光波ＬＷ$_1$，ＬＷ$_2$，・・・，ＬＷ$_n$，・・・をまとめて光波ＬＷｎと記載する場合がある。位置ＰＯ

$_1$，ＰＯ$_2$，・・・，ＰＯ$_n$，・・・をまとめて、光波ＰＯｎと記載する場合がある。複数の光波ＬＷｎは、互いに干渉し、図１に示すように合成波面ＷＰを有する光波ＬＬを出射する。

[0047] 複数の光パルスＬＰｎが出射される位置ＰＯｎは、光周波数コムＬＣｐ２同士の位相差Δφ$_{n+1}$によって決まる。出射面６４ｂにおける光周波数コムＬＣｐ２の入射位置は、前述のように凹面鏡６２と平面鏡６４との間で多重反射する光周波数コムＬＣｐの進行方向が中心軸ＡＸに対してなす角度によって変化する。凹面鏡６２の反射面６２ａの曲率は、出射面６４ｂにおける光周波数コムＬＣｐ２の入射位置を考慮して設計されている。出射面６４ｂにおける光周波数コムＬＣｐ２の入射位置は、後述するように光周波数コムＬＣ１の光パルスＬＰｎの位相φ$_n$の関係によって設定及び制御されている。

[0048] ここで、パルス間位相差Δφ$_{n+1}$は、（３）式のように表される。

[0049] [数7]

$$\Delta\phi_{n+1}=\phi_{n+1}-\phi_n \quad \cdots (3)$$

[0050] パルス間位相差Δφ$_{n+1}$は、繰り返し周波数ｆ$_{rep}$及びオフセット周波数ｆ$_{ceo}$を完全に制御すれば、すべてのｎについて一定となり、定数の位相差Δφとなる。

[0051] 上述の波面制御装置１１では、複数の光波ＬＷ$_n$，ＬＷ$_{n+1}$の位相φ$_n$，φ$_{n+1}$について、（９）式が成り立つ。

[0052] [数8]

$$\Delta\phi_{n+1}=\phi_{n+1}-\phi_n=2\pi\frac{f_{ceo}}{f_{rep}} \quad \cdots (9)$$

[0053] （９）式からわかるように、光波ＬＷ$_n$，ＬＷ$_{n+1}$の位相差Δφ$_{n+1}$は、光周波数コムＬＣ１の繰り返し周波数ｆ$_{rep}$とオフセット周波数ｆ$_{ceo}$という２つのパラメータのみによって決まる。位相差Δφ$_{n+1}$は、（φ$_{n+1}$－φ$_n$）である。繰り返し周波数ｆ$_{rep}$及びオフセット周波数ｆ$_{ceo}$が完全に制御されれば、位相差Δφ$_{n+1}$は、ｎに依らず、一定である。（５）式及び（９）式に基

づき、繰り返し周波数f_{rep}とオフセット周波数f_{ceo}とを各々の所定値に制御することによって、光周波数コムＬＣ１の時間軸上で隣り合う光パルスＬＰ$_n$，ＬＰ$_{n+1}$同士の位相差Δφを制御することができる。位置Ｐ１に配置されている平面鏡６４の出射面６４ｂから、位相制御部５０によって繰り返し周波数f_{rep}とオフセット周波数f_{ceo}が制御された位相差Δφに依存する合成波面ＷＰを有する光波ＬＬが出射される。そのとき、合成波面ＷＰは、位相制御部５０によって繰り返し周波数f_{rep}とオフセット周波数f_{ceo}が制御された位相差Δφに依存する。ＭＰＣ光学系６０の平面鏡６４の出射面６４ｂから、複数の位相φ$_n$，φ$_{n+1}$，・・・を有する光波ＬＷ$_n$，ＬＷ$_{n+1}$，・・・が出射される。このことから、光波ＬＷｎの各々の出射点は、光アンテナの出射端や、光フェーズドアレイにおいて個々に位相変調された複数の光波の出射点として作用する。

[0054] 複数の光周波数コムＬＣｐ２は、平面鏡６４を透過し、平面鏡６４よりも複数の光周波数コムＬＣｐ２の進行方向の前方に配置されている平凸レンズ６６に入射する。平凸レンズ６６は、凸面６６ａと、平面６６ｂと、を有する。平凸レンズ６６は、平面鏡６４から出射される複数の光周波数コムＬＣｐ２の各々の光軸を調整し、ビームの拡がり方向を調整し、複数の光周波数コムＬＣｐ２を互いに干渉させるために補助的に配置されている。複数の光周波数コムＬＣｐ２が互いに干渉する場合には、平凸レンズ６６に替えてカメラレンズのような複合レンズが補助的に配置されてもよい。複数の光周波数コムＬＣｐ２を互いに干渉させるために光軸やビームの拡がり方向を調節する必要がない場合等には、平凸レンズ６６は、省略されてもよい。

[0055] 以上説明したように、第１実施形態の波面制御装置１１は、光周波数コム生成部２１と、波面合成部２２と、を備える。光周波数コム生成部２１は、時間軸上で番号順に配置された複数の光パルスＬＰｎを有する光周波数コムＬＣ１を出射する。光周波数コム生成部２１は、光周波数コムＬＣ１の繰り返し周波数f_{rep}とオフセット周波数f_{ceo}とを制御する位相制御部５０を備える。波面合成部２２は、光周波数コム生成部２１から入射する光周波数コ

ムＬＣ１の複数の光パルスＬＰｎの各々を平凸レンズ６６の平面６６ｂ（光周波数コムの進行方向に交差する面）で１番目の光パルスＬＰ$_1$（図２では省略）に対する相対的な位相ϕ_nに応じて互いに異なる位置ＰＯ$_n$に分配する。波面合成部２２は、互いに異なる位置から出射される光パルスＬＰ$_n$同士の合成波面ＷＰを生成する。

[0056] 第１実施形態の波面制御装置１１では、光周波数コム生成部２１において位相制御部５０で光周波数コムＬＣ１の２つのパラメータ；繰り返し周波数f_{rep}及びオフセット周波数f_{ceo}の各々を所定値に制御すれば、波面合成部２２に入射する前に時間軸上で番号順に並んでいた複数の光パルスＬＰｎを光速で平凸レンズ６６の平面６６ｂ、すなわち横モードに分配することができる。第１実施形態の波面制御装置１１では、複数の光パルスＬＰｎが分配された時点で、分配数に関係なく、各々の光パルスＬＰ$_n$が繰り返し周波数f_{rep}とオフセット周波数f_{ceo}のみによって制御された位相ϕ_nの情報を有する状態にすることができる。第１実施形態の波面制御装置１１では、平凸レンズ６６の平面６６ｂから、各々が位相ϕ_nを有する光パルスＬＰ$_n$同士が干渉してなる合成波面ＷＰを出射することができる。従来の波面制御の手法である導波路型の光フェーズドアレイや従来の電波フェーズドアレイでは、光波や電波の位相制御を行う数（すなわち、分配数）以上に光波や電波を分岐する、或いは複数の波源を用意して複数の光波及び電波の各々の位相を制御する。第１実施形態の波面制御装置１１では、導波路型の光フェーズドアレイや従来の電波フェーズドアレイとは全く異なり、１つの光周波数コムＬＣ１の２つの制御パラメータ；繰り返し周波数f_{rep}とオフセット周波数f_{ceo}のみを制御することによって、平凸レンズ６６の平面６６ｂに分配される光パルスＬＰ$_n$の位相ϕ_nを制御する。このことによって、光パルスＬＰ$_n$が分配される位置ＰＯ$_n$の各々を光アンテナとして作動させ、合成波面ＷＰを制御することができる。第１実施形態の波面制御装置１１では、従来の波面制御の手法のように、分配後の複数の光信号（すなわち、光パルスＬＰｎ）に対して個々に位相制御を行う必要がなく、複数の光信号の各々の位相制御を行う

ための位相制御部を配置する必要がない。第１実施形態の波面制御装置１１では、複数の位相制御部同士のキャリブレーションを行う必要がない。これらのことから、第１実施形態の波面制御装置１１によれば、アンテナ数の増加に依らず、繰り返し周波数f_{rep}とオフセット周波数f_{ceo}とを制御するという簡便な制御操作で高速に波面制御を行うことができる。第１実施形態の波面制御装置１１によれば、アンテナ数の増加に依らず、小型化を図ることができる。

[0057] 第１実施形態の波面制御装置１１では、光アンテナの光信号として１つの光周波数コムＬＣ１を用いる。光周波数コムＬＣ１は、図２の下段で例示したように、広帯域のスペクトル分布を有する。第１実施形態の波面制御装置１１では、光周波数コムＬＣ１のスペクトル分布を構成する複数の周波数モードＦＭ$_m$の各々の周波数f_m、すなわち繰り返し周波数f_{rep}とオフセット周波数f_{ceo}を高精度に制御することができる。第１実施形態の波面制御装置１１によれば、合成波面ＷＰを形成する複数の光パルスＬＰｎの位相ϕ_n（すなわち光アンテナの各々の位相ϕ_n）を位置Ｐ１で分配する前に、光周波数コム生成部２１で、繰り返し周波数f_{rep}及びオフセット周波数f_{ceo}を原子時計のレベルで高精度に制御することができる。第１実施形態の波面制御装置１１によれば、光周波数コムＬＣ１が複数の周波数モードＦＭ$_m$からなる広いスペクトル分布を有するため、制御対象の光波の広帯域化を容易に図ることができる。

[0058] 第１実施形態の波面制御装置１１では、光周波数コム生成部２１において光周波数コム発生器３０から射出された光周波数コムＬＣ１を波長変換することによって、制御対象の光波のさらなる広帯域化を容易に図ることができる。例えば、図１に示すように、光周波数コム生成部２１の光ファイバ４２の途中に波長変換部７０が配置されてもよい。波長変換部７０は、光周波数コム発生器３０に組み込まれていてもよく、ファイバコリメータ４４と平面鏡４６との間で光周波数コムＬＣ１が通過する領域に設けられてもよい。波長変換部７０は、例えばスペクトル分布が近赤外波長域に含まれる光周波数

コムＬＣ１が入射した際に、光周波数コムＬＣ１のスペクトル分布を近赤外波長域以外の可視波長域或いは紫外波長域等に変換可能な材料や結晶を備える。波長変換部７０の構成は、適宜変更されてもよい。但し、波長変換部７０から出射される光周波数コムＬＣ１における光パルスＬＰｎの各々の位相ϕ_nの関係性は保持されている。第１実施形態の波面制御装置１１では、波面変換部７０をさらに備えることによって、例えば深紫外波長域からテラヘルツ（ＴＨｚ）領域までの超短光パルスの波面制御及び補償光学を実現することができる。

[0059] 第１実施形態の波面制御装置１１では、波面合成部２２は、互いに対向配置された凹面鏡６２及び平面鏡６４（一対のミラー）を有するＭＰＣ光学系（共振器構造）６０を備える。凹面鏡６２の反射面６２ａは、入射する光周波数コムＬＣｐの略全部を鏡面反射する。平面鏡（一方のミラー）６４の反射面６４ａは、入射する光周波数コムＬＣｐの一部を反射し、残部の少なくとも一部を透過する。凹面鏡６２の反射面６２ａと平面鏡６４の反射面６４ａとの間の反射面間距離Ｌは、（１）式（すなわち、（６）式）で表され、光周波数コムＬＣ１の繰り返し周波数f_{rep}によって制御される。

[0060] 第１実施形態の波面制御装置１１によれば、パッシブな光学系であるＭＰＣ光学系６０に入射した光周波数コムＬＣ１を反射面６２ａ，６４ａの間で往復させ、反射面６４ａから同時刻及び進行方向での同じ位置で互いに光パルスＬＰｎの番号ｎがずれた光周波数コムＬＣｐ２を出射することができる。第１実施形態の波面制御装置１１では、機械駆動を行わずに、光周波数コムＬＣ１が有する複数の光パルスＬＰｎを平面鏡６４の出射面６４ｂ及び平凸レンズ６６の平面６６ｂで位相ϕ_nに応じて互いに異なる位置に分配することができる。

[0061] 第１実施形態の波面制御装置１１は、調節機構１４６を備える。調節機構１４６は、凹面鏡６２及び平面鏡６４（一対のミラー）のうち平面鏡６４（少なくとも一方のミラー）の反射面６４ａに入射する光周波数コムＬＣ１の入射角度を調節する。調節機構１４６を用いて平面鏡４６の反射面４６ａの

角度を調節することによって、平面鏡６４に入射する光周波数コムＬＣ１の角度を変化させ、合成波面ＷＰを制御することができる。

[0062] 第１実施形態の波面制御装置１１では、凹面鏡６２の反射面６２ａが平面鏡６４の平坦な反射面６４ａ及び平凸レンズ６６の平面６６ｂに対して凹曲面である。このことによって、光周波数コム生成部２１から出射された光周波数コムＬＣ１は、反射面６４ａに略直交するようにＭＰＣ光学系６０に入射する。第１実施形態の波面制御装置１１では、光周波数コムＬＣｐが凹面鏡６２と平面鏡６４との間で共振し、反射面６２ａから反射面６４ａに向かって集光する。第１実施形態の波面制御装置１１によれば、反射面６４ｂの集光領域R_{64}において複数の光パルスＬＰｎを、合成波面ＷＰが好適に形成される適度な間隔及び配置で分配することができる。

[0063] 第１実施形態の波面制御装置１１によれば、自由空間型のＭＰＣ光学系６０を用いることによって、複数の光パルスＬＰｎを平面鏡６４の出射面６４ｂで位相ϕ_nに応じて互いに異なる位置に分配することができる。

[0064] 第１実施形態の波面制御装置１１では、ＭＰＣ光学系６０の共振器長、すなわち反射面間距離Ｌは、光周波数コムＬＣ１の繰り返し周波数f_{rep}に依存している。例えば、励起波長が１５５０ｎｍ程度のエルビウム（Ｅｒ）添加ファイバ、励起波長が１０５０ｎｍ程度のイッテルビウム（Ｙｂ）添加ファイバ、或いは励起波長が２０００ｎｍ程度のツリウム（Ｔｍ）添加ファイバ等を備えたファイバーレーザーでは、生成される光周波数コムの繰り返し周波数f_{rep}は１０ＭＨｚ～１０００ＭＨｚ程度である。光周波数コム発生器３０として励起波長が近赤外波長域にある不純物添加ファイバを備えたファイバーレーザーを用いた場合には、ＭＰＣ光学系６０の反射面間距離Ｌは数１０ｃｍ～１ｍ程度である。光周波数コム発生器３０として例えば共振波長が１５５０ｎｍ程度のマイクロ共振器を用いた場合には、ＭＰＣ光学系６０の反射面間距離Ｌは１０ＧＨｚ～１００ＧＨｚ程度である。この場合では、ＭＰＣ光学系６０の反射面間距離Ｌを数ｃｍ～１０ｃｍ程度に抑えることができる。光周波数コム発生器３０として繰り返し周波数f_{rep}の高い光コム発生

源を用いることによって、ＭＰＣ光学系６０及び波長制御装置１１の小型化を図ることができ、例えば手のひらに載せることができる大きさの波長制御装置を実現することができる。

[0065] ［第２実施形態］

図５に示すように、本発明に係る第２実施形態の補償光学装置１２は、第１実施形態の波面制御装置１１と、イメージング光学系１３と、を備える。以下、第２実施形態以降の説明において、第１実施形態の波面制御装置１１の構成と共通する構成には、第１実施形態の波面制御装置１１と同一の符号を付す。第２実施形態以降の説明において、第１実施形態の波面制御装置１１の説明と共通する内容については、その説明を省略する。

[0066] 図５では、波面制御装置１１のうち、波面合成部２２の平面鏡６４の出射面６４ｂのみの概略構成が図示されている。イメージング光学系１３は、出射面６４ｂから形成される光波ＬＬの進行方向Ｄ３の前方に配置されている。イメージング光学系１３は、ビームスプリッター１０２と、集光レンズ１０４，１０６と、撮像カメラ１１０と、を備える。補償光学装置１２では、撮像カメラ１１０を用いて波面計測するとともに、波面補償を達成した段階で被計測物体Ｓの明瞭な画像を撮影する。図５に例示した補償光学装置１２とは別の装置等で波面計測を行い、波面補償された画像を撮像カメラ１１０で撮影してもよい。

[0067] 補償光学装置１２では、出射面６４ｂからの光波ＬＬの進行方向Ｄ３の前方に計測対象の被計測物体Ｓが配置される。ビームスプリッター１０２と、集光レンズ１０４は、進行方向Ｄ３で平面鏡６４と被計測物体Ｓとの間に順次配置されている。集光レンズ１０４は、進行方向Ｄ３でビームスプリッター１０２と被計測物体Ｓとの間に配置されている。ビームスプリッター１０２は、出射面６４ｂから出射されて進行方向Ｄ３に沿って入射する光波ＬＬを透過する。集光レンズ１０４は、被計測物体Ｓの表面或いは内部の計測位置ＰＸよりも焦点距離だけ進行方向Ｄ３の後方に配置されている。

[0068] ビームスプリッター１０２は、反射面１０２ａを有する。反射面１０２ａ

は、進行方向Ｄ３から入射する光波ＬＬを透過する。反射面１０２ａは、進行方向Ｄ３と略平行且つ逆向きから入射する光波ＬＷを鏡面反射し、進行方向Ｄ３に交差する進行方向Ｄ４に向けて反射する。ビームスプリッター１０２よりも進行方向Ｄ４の前方に、集光レンズ１０６と撮像カメラ１１０が順次配置されている。

[0069] 補償光学装置１２では、平面鏡６４の出射面６４ｂから出射された光波ＬＬがビームスプリッター１０２を透過し、進行方向Ｄ３に沿って進行する。イメージング光学系１３における光波ＬＬの波面$ＷＰ_1$は、出射面６４ｂの光アンテナの各々から出射された複数の光パルスＬＰｎが合成されることによって生成された合成波面ＷＰと同じ波面$ＷＰ_0$が伝搬してイメージング光学系１３に到着した波面である。ビームスプリッター１０２を透過した光波ＬＬは、集光レンズ１０４によって計測位置ＰＸに集光する。計測位置ＰＸから反射される光波ＬＷには、光波ＬＬの情報と被計測物体Ｓの情報が含まれる。すなわち、光波ＬＷの波面$ＷＰ_2$は、波面$ＷＰ_1$に被計測物体Ｓの光学特性が作用することによって変化した波面である。波面$ＷＰ_1$が理想的な平面波である場合には、波面$ＷＰ_2$は被計測物体Ｓで散乱されて乱れた波面となり、撮像カメラ１１０には歪んだ像が撮影される。既知の波面が波面制御装置１１で生成され、反射像として波面$ＷＰ_2$が撮影されれば、被計測物体Ｓの光学特性を特定することができる。光学特性を補償するような波面$ＷＰ_1$が波面制御装置１１で生成されれば、物体光である波面$ＷＰ_2$は整えられ、撮像カメラ１１０で得られる被計測物体Ｓの像は明瞭になる。被計測物体Ｓから反射された光波ＬＷは、集光レンズ１０４に入射し、コリメートされ、進行方向Ｄ３と略平行且つ逆向きに進行する。光波ＬＷは、ビームスプリッター１０２に対して進行方向Ｄ３と略平行且つ逆向きに入射し、反射面１０２ａによって進行方向Ｄ４に鏡面反射される。反射面１０２ａで反射された光波ＬＷは、進行方向Ｄ４に沿って進行し、集光レンズ１０６によって集光され、撮像カメラ１１０で受光される。

[0070] 図５に示す補償光学装置１２では、例えば、被計測物体Ｓの光学特性が反

映された光波ＬＷの波面$ＷＰ_2$を進行方向Ｄ３と略平行且つ逆向きに進行する際に、進行方向Ｄ３に略直交し且つ略平坦な波面が得られるように、波面制御装置１１の位相制御部５０によって光周波数コムＬＣ１の繰り返し周波数$ｆ_{ｒｅｐ}$及びオフセット周波数$ｆ_{ｃｅｏ}$が制御される。

[0071] 以上説明した第２実施形態の補償光学装置１２は、第１実施形態の波面制御装置１１と、イメージング光学系１３と、を備える。イメージング光学系１３は、波面制御装置１１から出射された光波ＬＬを被計測物体Ｓに照射可能に構成され、且つ被計測物体Ｓから反射又は透過した光波ＬＷを受光可能に構成されている。第２実施形態の補償光学装置１２によれば、波面制御装置１１の位相制御部５０によって光周波数コムＬＣ１の２つの制御パラメータ；繰り返し周波数$ｆ_{ｒｅｐ}$及びオフセット周波数$ｆ_{ｃｅｏ}$のみを制御することによって、被計測物体Ｓに照射する光波ＬＬの波面$ＷＰ_1$を自在に制御することができる。第２実施形態の補償光学装置１２によれば、波面$ＷＰ_2$を自在に制御することができる。第２実施形態の補償光学装置１２では、イメージング光学系１３において受光した光波ＬＷから取得された情報と位相制御部５０を用いて制御した光周波数コムＬＣ１の繰り返し周波数$ｆ_{ｒｅｐ}$及びオフセット周波数$ｆ_{ｃｅｏ}$との関係に基づいて、計測位置ＰＸでの被計測物体Ｓの光学特性について計測することができる。

[0072] 第２実施形態の補償光学装置１２では、例えば被計測物体Ｓから反射又は透過（図５では反射）された光波ＬＷの波面$ＷＰ_2$が光軸に対して直交する平坦な波面となるように、波面制御装置１１の位相制御部５０によって光周波数コムＬＣ１の２つの制御パラメータ；繰り返し周波数$ｆ_{ｒｅｐ}$及びオフセット周波数$ｆ_{ｃｅｏ}$のみを制御することができる。このことによって、例えばイメージング光学系１３における空気揺らぎや熱等の影響によって、光波ＬＬの波面$ＷＰ_1$や光波ＬＷの波面$ＷＰ_2$に被計測物体Ｓの計測位置ＰＸでの光学特性との因果関係がない乱れが生じる場合がある。その場合には、波面$ＷＰ_2$を平坦化し、撮像カメラ１１０によって高いコントラストの画像や高精度な計測データを取得することができる。複数の光の位相ϕ_nは、光アンテナとして機

能する複数の位置ＰＯｎから出射され、波面WP_0を形成する。第２実施形態の補償光学装置１２によれば、従来のように複数の光の位相ϕ_nの各々を個別に制御する必要はない。第２実施形態の補償光学装置１２によれば、光波ＬＷの波面WP_2を補償することができる。

[0073] 第２実施形態の補償光学装置１２では、波面制御装置１１の光周波数コム生成部２１に波長変換部７０が設けられることによって、波長変換部７０の設置位置よりも前段での光周波数コムＬＣ１を波長変換することができる。このことによって、波長変換部７０の設置位置よりも前段での光周波数コムＬＣ１の波長によらず、例えば深紫外波長域からＴＨｚ領域までの超短パルスでの補償光学を実現することができる。第２実施形態の補償光学装置１２を用いた補償光学によって、例えば従来よりも高効率な直接蛍光計測の実現、或いは多光子吸収計測及び多光子顕微鏡への適用が可能である。

[0074] 第２実施形態の補償光学装置１２は、上述のように補償光学を実現する目的以外に、光波の横モード特性を評価する目的で用いることができる。図５に示す構成において、被計測物体Ｓに替えて不図示の光通信システムや光機能デバイス等を構成する複雑な光学系の光出射部が配置され、出射光が計測されてもよい。図５に示す構成において、出射光と波面制御装置１１が生成した波面とを干渉させてもよい。図６の上段に示すように、位置Ｐ１での平面鏡６４の出射面６４ｂから出射される光波ＬＬは、光軸に交差する２次元平面で、位相制御部５０によって繰り返し周波数f_{rep}とオフセット周波数f_{ceo}によって制御された位相ϕ_nに応じた波面分布を形成する。図６の下段にいくつかの２次元波面分布WD_1，WD_2，・・・，WD_n，・・・のパターン例が示されている、図６に示すように、位相制御部５０によって繰り返し周波数f_{rep}及びオフセット周波数f_{ceo}が制御され且つ変更されると、平面鏡６４の出射面６４ｂから出射される光波ＬＬの波面WP_0すなわち合成波面ＷＰの２次元波面分布が変わり、光波ＬＬの光強度が変化する。このことに基づいて、複雑な光学系の光出射部から反射又は透過した光波ＬＷの波面を補償せずにそのまま受光し、光波ＬＷの光強度を計測することによって、元々

の光波ＬＬが複雑な光学系でどのような作用を受けたのかということがわかる。そこから、光波ＬＷがどのような単純な波面の組み合わせで生成されたかということがわかり、複雑な光学系等の横モード特性を正確に評価することができる。２次元波面分布WD_1，WD_2，・・・，WD_nが順次生成され、複雑な光学系の出射部から出射した波面と順次干渉した場合には、干渉強度によって、各横モードがどの程度含まれているかということを判定することができる。

[0075] 第２実施形態の補償光学装置１２は、横モードを評価するための波面解析器或いは２次元分光器として好適に機能する。

[0076] ［第３実施形態］

図７に示すように、本発明に係る第３実施形態の波面制御装置１５では、第１実施形態の波面制御装置１１にフィードバック機構１５０が設けられている。フィードバック機構１５０は、ビームスプリッター１５２と、フォトダイオード（Ｐｈｏｔｏｄｉｏｄｅ；ＰＤ）１５４と、を備える。ビームスプリッター１５２は、波面合成部２２の平面鏡６４と平凸レンズ６６との間の光周波数コムＬＣｐ２が通過する領域に配置され、平面鏡６４と平凸レンズ６６との間の中心軸ＡＸ上に配置されている。ビームスプリッター１５２は、反射面１５２ａを有する。

[0077] 波面制御装置１５では、平面鏡６４の反射面６４ａを透過して出射面６４ｂから出射された光周波数コムＬＣｐ２は、ビームスプリッター１５２に入射する。ビームスプリッター１５２に入射した光周波数コムＬＣｐ２の一部は、反射面１５２ａによって、往路方向Ｄ１及び復路方向Ｄ２に略直交する進行方向Ｄ３に鏡面反射される。ビームスプリッター１５２に入射した光周波数コムＬＣｐ２の残部の少なくとも一部は、反射面１５２ａを透過し、平凸レンズ６６に入射する。平面鏡６４の出射面６４ｂでは、複数の光パルスＬＰｎが位相ϕ_nに応じて互いに異なる位置PO_nに分配されている。平面鏡６４の出射面６４ｂから、合成波面ＷＰを有する光波ＬＬが出射される。

[0078] フォトダイオード１５４は、ビームスプリッター１５２の反射面１５２ａ

によって進行方向Ｄ３に反射された光周波数コムＬＣｐ２を受光する。フォトダイオード１５４と光周波数コム生成部２１の位相制御部５０とは、電気的に有線又は無線で接続されている。フォトダイオード１５４は、受光した光周波数コムＬＣｐ２の光量に応じた電気信号を位相制御部５０にリアルタイムで出力する。

[0079] 図７には、波面制御装置１５の光周波数コム生成部２１の装置構成のうち、繰り返し周波数制御部１６１とオフセット周波数制御部１６２と、分周器１６５，１６６と、ミキサー１７０のみが図示されている。繰り返し周波数制御部１６１は、フィードバック機構１５０と位相制御部５０によって得られた電気信号を受信し、ＭＰＣ光学系６０の反射面間距離Ｌと同期して、光周波数コムＬＣ１の繰り返し周波数f_{rep}を制御する。オフセット周波数制御部１６２は、光周波数コムＬＣ１のオフセット周波数f_{ceo}を発生及び制御する。繰り返し周波数制御部１６１で制御された繰り返し周波数f_{rep}は、分周器１６５に入力され、（１／α）に分周する。オフセット周波数制御部１６２からの出力は、分周器１６６に入力され、（１／β）に分周する。分周器１６５，１６６からの出力は、ミキサー１７０に入力され、ミキサー１７０からオフセット周波数制御部１６２に再帰入力される。オフセット周波数制御部１６２は、再帰入力された信号に従い、オフセット周波数f_{ceo}を制御する。オフセット周波数制御部１６２は、ＭＰＣ光学系６０に対して安定するように繰り返し周波数f_{rep}を制御する。位相制御部５０が繰り返し周波数f_{rep}に対してオフセット周波数f_{ceo}を制御するよう動作すれば、（１０）式に従って繰り返し周波数f_{rep}とオフセット周波数f_{ceo}の周波数比を制御することができる。

[0080] [数9]

$$f_{rep}=\frac{\alpha}{\beta}f_{ceo} \qquad \cdots (10)$$

[0081] 波面制御装置１５の光周波数コム生成部２１から、（１０）式の関係を満たす光周波数コムＬＣ１が出射される。図８には、波面合成部２２の平面鏡

６４の出射面６４ｂ上に分配された複数の光パルスＬＰｎの位相分布が数値計算によって算出された結果が示されている。図８のＸ軸及びＹ軸は、出射面６４ｂが中心軸ＡＸに交差する位置を原点としたときに出射面６４ｂに含まれ、互いに直交する２つの方向を表す。図８の縦軸は、位相ϕ_nを表している。図８に示すように、出射面６４ｂには、中心軸ＡＸを中心とする周方向に沿って位相分布が形成されている。中心軸ＡＸを中心として形成された位相分布の複数の位相ϕ_nは、周方向で連続的に増減し、仮想的な傾斜面を形成している。光パルスＬＰｎから生成される光波ＬＬは、傾斜面に略直交する方向に出射される。

[0082] 位相制御部５０は、光周波数コムＬＣ１の繰り返し周波数f_{rep}及びオフセット周波数f_{ceo}を制御することによって、出射面６４ｂにおける複数の光パルスＬＰｎの位相分布を自在に且つ高速に制御することができる。位相制御部５０は、光周波数コムＬＣ１の少なくとも繰り返し周波数f_{rep}を制御し、（１０）式の比率パラメータ；（α／β）を制御することによって、複数の位相ϕ_nを一括して制御し、出射面６４ｂにおける複数の光パルスＬＰｎの位相分布の傾斜面及び光波ＬＬの出射方向を自在に且つ高精度に設定することができる。

[0083] 第３実施形態の波面制御装置１５では、第１実施形態の波面制御装置１１と同様に、凹面鏡６２と平面鏡６４とを有するＭＰＣ光学系６０によって複数の光パルスＬＰｎが分配されるため、出射面６４ｂにおいて中心軸ＡＸを中心とする周方向に位相分布が形成される。位相制御部５０を用いて（α／β）を制御することによって、出射面６４ｂにおいて中心軸ＡＸを中心とする複数の光パルスＬＰｎの位相分布の半径を制御することができる。

[0084] 第３実施形態の波面制御装置１５は、フィードバック機構１５０を備える。フィードバック機構１５０は、波面合成部２２のＭＰＣ光学系６０の平面鏡６４と平凸レンズ６６との間で、平面鏡６４から出射され且つ出射面６４ｂで位相ϕ_nに応じて互いに異なる位置に分配された複数の光周波数コムＬＣｐ２の光パルス$ＬＰ_n$の強度情報を光周波数コム生成部２１の位相制御部５０

にフィードバックする。位相制御部５０は、受信した複数の光周波数コムＬＣｐ２の光パルスＬＰ$_n$の強度情報と予めわかっている光周波数コムＬＣ１の光パルスＬＰ$_n$の強度情報とを比較する。位相制御部５０を用いることによって、例えば空気揺らぎ等の環境変化による光周波数コムＬＣｐ２の光パルスＬＰ$_n$の位相分布の揺らぎや乱れが生じていないかということをリアルタイムに確認することができる。光周波数コムＬＣｐ２の光パルスＬＰ$_n$の位相分布に揺らぎや乱れがあると判定された際に、位相制御部５０を用いて光周波数コム生成部２１での光周波数コムＬＣ１の２つのパラメータ；繰り返し周波数f_{rep}とオフセット周波数f_{ceo}のみを制御することによって、位相分布の揺らぎや乱れを解消することができる。第３実施形態の波面制御装置１５によれば、ＭＰＣ光学系６０の共振器長に光周波数コムＬＣ１の繰り返し周波数f_{rep}を同期させ、光アンテナを安定化させることができる。

[0085] ＭＰＣ光学系６０を含めた種々の光アンテナの環境不安定性を光コムの繰り返し周波数f_{rep}とオフセット周波数f_{ceo}にフィードバックすることによって、環境に対する安定度を原子時計と同等にまで高め、非常にロバストな波面制御を実現することができる。

[0086] 第３実施形態の波面制御装置１５は、光波ＬＬの進行方向及び中心軸ＡＸに交差する面での集光点走査による超精密な３次元測量に適用され得る。第３実施形態の波面制御装置１５は、光波ＬＬの進行方向及び中心軸ＡＸに略平行な奥行き方向での絶対距離測定による超精密な３次元測量に適用され得る。例えば、第３実施形態の波面制御装置１５を用いて、球面を有する被計測物体Ｓの３次元スキャンを行い、球面までの最短距離を面計測によって算出することができる。その結果から、例えばシリコン球の形状計測によるアボガドロ定数を決定することができる。例えば、第３実施形態の波面制御装置１５を用いて集光点走査と同時に奥行き方向の計測を行うことによって、３次元ＬｉＤＡＲを実現することができる。

[0087] 第３実施形態の波面制御装置１５では、フィードバック機構１５０のビームスプリッター１５２は、ＭＰＣ光学系６０の平面鏡６４と平凸レンズ６６

との間に配置されている。ビームスプリッター１５２は、図７に二点鎖線で示すように、例えば平面鏡６４の反射面６４ａによって反射された光周波数コムＬＣｐが通過する領域に配置されてもよい。

[0088] 第３実施形態の波面制御装置１５では、凹面鏡６２と平面鏡６４とを有するＭＰＣ光学系６０が用いられるため、平面鏡６４の出射面６４ｂで複数の光パルスＬＰｎの位相成分が中心軸ＡＸを中心とする周方向で時間変化に対して周回変化している。周回変化を停めるためには、複数の光パルスＬＰｎの位相分布に対して、複数の光パルスＬＰｎの位相分布を反転させた反転分布を付与すればよい。

[0089] 以上、本発明の好ましい実施形態について詳述したが、本発明は特定の実施形態に限定されるものではない。特許請求の範囲内に記載された本発明の要旨の範囲内において、本発明の実施形態の種々の変形及び変更が可能である。第１実施形態から第３実施形態の内容は適宜組み合わせられる。例えば、第２実施形態の補償光学装置１２は、第１実施形態の波面制御装置１１に替えて第３実施形態の波面制御装置１５を備えてもよい。

[0090] 例えば、本発明に係る波面制御装置の波面合成部は、ＭＰＣ光学系以外のパッシブな光アンテナ構造を備えてもよい。本発明に係る波面制御装置の第１変形例及び第２変形例として、図９に示す波面制御装置１７及び図１０に示す波面制御装置１８が挙げられる。

[0091] 図９に示すように、波面制御装置１７の光周波数コム生成部２１は、光周波数コム発生器３０と、位相制御部５０と、光ファイバ４２と、光ファイバカプラ１８０と、を備える。波面制御装置１７の波面合成部２２は、波面制御装置１１，１５のＭＰＣ光学系６０に替えて、複数の出力導波路１８２を備える。光ファイバカプラ１８０の入射側の端部は、光ファイバ４２の出射側の端部に接続されている。光ファイバカプラ１８０の出射側の端部は、複数の出力導波路１８２の入射側の端部に接続されている。複数の出力導波路１８２は、光路長が互いに異なる出力導波路によって構成されている。出力導波路１８２同士の光路長差は、光周波数コムＬＣ１の時間軸上で互いに隣

り合う光パルスＬＰ$_n$，ＬＰ$_{n+1}$が出力導波路１８２を伝搬する際の光路長差に等しい。複数の出力導波路１８２の出射端が配置されている位置Ｐ１では、同時刻で互いに光パルスＬＰｎの番号がずれた光周波数コムＬＣ１が出射される。第１変形例の波面制御装置１７では、波面制御装置１１，１５と同様に、機械駆動を行わずに、光周波数コムＬＣ１が有する複数の光パルスＬＰｎを位相ϕ_nに応じて互いに異なる位置に設けられた複数の出力導波路１８２の出射側の端部に分配することができる。第１変形例の波面制御装置１７によれば、波面制御装置１１，１５と同様の効果を得ることができる。

[0092] 図１０に示すように、波面制御装置１８の光周波数コム生成部２１は、光周波数コム発生器３０と、位相制御部５０と、光ファイバ４２と、を備える。波面制御装置１８の波面合成部２２は、波面制御装置１１，１５のＭＰＣ光学系６０に替えて、アレイ導波路回折格子（ａｒｒａｙｅｄ－ｗａｖｅｇｕｉｄｅ　ｇｒａｔｉｎｇ；ＡＷＧ）１９０を備える。アレイ導波路回折格子１９０は、光ファイバ４２の出力側の端部に接続された入力導波路１９１と、入力側スラブ導波路１９２と、アレイ導波路群１９３と、出力側スラブ導波路１９４と、複数の出力導波路１９５と、を備える。光ファイバ４２から出射された光周波数コムＬＣ１は、入力導波路１９１を介して入力側スラブ導波路１９２で回折し、アレイ導波路群１９３に入射し、アレイ導波路群１９３の導波路毎に独立した光路で伝搬する。アレイ導波路群１９３の各々の導波路同士の光路長差は、光周波数コムＬＣ１の時間軸上で互いに隣り合う光パルスＬＰ$_n$，ＬＰ$_{n+1}$が出力導波路１８２を伝搬する際の光路長差に依存している。アレイ導波路群１９３から出射された光周波数コムＬＣ１は、出力側スラブ導波路１９４において多重干渉し、波長毎に互いに異なる出力導波路１９５の入射側の端部に集光する。複数の出力導波路１９５の出射側の端部が配置されている位置Ｐ１では、同時刻で互いに光パルスＬＰｎの番号ｎがずれた光周波数コムＬＣ１が出射される。第２変形例の波面制御装置１８では、波面制御装置１１，１５と同様に、機械駆動を行わずに、光周波数コムＬＣ１が有する複数の光パルスＬＰｎを位相ϕ_nに応じて互いに異なる

位置に設けられた複数の出力導波路１９５の出射端に分配することができる。第２変形例の波面制御装置１８によれば、波面制御装置１１，１５と同様の効果を得ることができる。

[0093] 本発明に係る波面制御装置の第３変形例として、図１１に示す波面制御装置８１が挙げられる。図１１に示すように、波面制御装置８１では、第３実施形態の波面制御装置１５に強度変調器（ｉｎｔｅｎｓｉｔｙ ｍｏｄｕｌａｔｏｒ；ＩＭ）１６０が設けられている。強度変調器１６０は、光周波数コム発生器３０とファイバコリメータ４４との間の光周波数コムＬＣ１の進路上に配置され、光周波数コム生成部２１の光ファイバ４２の途中に配置されている。強度変調器１６０は、光周波数コム発生器３０から出射された後に光ファイバ４２を介して入射する光周波数コムＬＣ１の複数の光パルスＬＰｎのうちの所定の光パルスを間引く。図１１では、一例として、強度変調器１６０によって光周波数コムＬＣ１の一部の光パルス$ＬＣ_{n+1}$～$ＬＣ_{n+8}$のうちの光パルス$ＬＣ_{n+3}$，$ＬＣ_{n+6}$，$ＬＣ_{n+7}$が間引かれている。強度変調器１６０によって光周波数コムＬＣ１の複数の光パルスＬＰｎのうちの所定の光パルスが間引かれると、図１２に示すように、波面合成部２２の出射面６４ｂでの光パルスの相対的な配置が変化する。強度変調器１６０によって光周波数コムＬＣ１の所定の光パルスが間引かれた場合には、平面鏡６４の出射面６４ｂに形成される位相分布は、図８を参照して説明した原理に基づき、所定の光パルスが間引かれていない光周波数コムＬＣ１によって形成される位相分布とは異なる。光周波数コムＬＣ１から生成される光波ＬＬは、出射面６４ｂに形成される位相分布の傾斜面に略直交する方向に出射される。強度変調器１６０によって光周波数コムＬＣ１の所定の光パルスが間引かれることによって、所定の光パルスが間引かれていない光周波数コムＬＣ１による光波ＬＬとは異なる新たな光波ＬＬが生成される。

[0094] 第３変形例の波面制御装置８１では、波面合成部２２における平凸レンズ６６の平面６６ｂから、光周波数コムＬＣ１の所定の光パルスが間引かれた後に残った複数の光パルスＬＰｎ同士が干渉してなる合成波面ＷＰが出射さ

れる。例えば図１１のように強度変調器１６０によって光パルスＬＣ$_{n+3}$，ＬＣ$_{n+6}$，ＬＣ$_{n+7}$が間引かれた場合には、平凸レンズ６６の平面６６ｂから、光パルスＬＣ$_{n+1}$，ＬＣ$_{n+2}$，ＬＣ$_{n+4}$，ＬＣ$_{n+5}$，ＬＣ$_{n+8}$が干渉して生成される合成波面ＷＰが出射される。光波ＬＬの波面ＷＰ$_0$すなわち合成波面ＷＰの２次元波面分布は、所定の光パルスが間引かれた後に残る光パルスに基づく。強度変調器１６０によって間引かれる所定の光パルスは、波面合成部２２から出力する合成波面ＷＰから算出されて適宜設定される。このことから、特定の横モードである合成波面ＷＰ及び２次元波面分布を得るために、強度変調器１６０は、入射する光周波数コムＬＣ１の複数の光パルスＬＰｎのうちの特定の横モードに応じた所定の光パルスを間引く。

[0095] 上述のように、第３変形例の波面制御装置８１は、光周波数コム生成部２１から出射された光周波数コムＬＣ１の複数の光パルスＬＣｎのうちの一部の光パルスを波面合成部２２に向けて出射する強度変調器１６０を備える。強度変調器１６０から出射される一部の光パルスは、波面合成部２２で生成される合成波面ＷＰの所望の横モードから逆算することによって求められる。第３変形例の波面制御装置８１によれば、制御の高い自由度を有する位相分布から高次の横モードを生成するとともに活用することができる。第３変形例の波面制御装置８１では、高次の横モードを発現する位相分布を算出し、強度変調器１６０を用いて位相分布を制御することができる。第３変形例の波面制御装置８１では、光アンテナとして機能する複数の位置ＰＯｎから出射される複数の位相ϕ_nの対応関係を適切に見出すことができる。また、間引いたパルス列が形成する合成波面ＷＰだけでなく、続いて形成する別の合成波面ＷＰと干渉させれば、より複雑な高次横モードを形成することができる。その場合には、図示していないが、平凸レンズ６６よりも合成波面ＷＰの進行方向の前方にＭＰＣ光学系６０と同じ共振器長を有する共振器を配置し、当該共振器を用いてパルススタッキングを行うことによって、前述のように複雑な高次横モードを形成することができる。ＭＰＣ光学系６０の前方に配置する共振器は、ＭＰＣ光学系６０のような空間光学系であってもよい

し、アレイ導波路群や多数のファイバを束ねたバンドルファイバ等で構成されてもよい。

符号の説明

[0096] １１，１５・・・波面制御装置

１２・・・補償光学装置

１３・・・イメージング光学系

２１・・・光周波数コム生成部

２２・・・波面合成部

請求の範囲

[請求項1] 時間軸上で番号順に配置された複数の光パルスを有する光周波数コムを出射する光周波数コム生成部と、

前記光周波数コム生成部から入射する前記光周波数コムの前記複数の光パルスの各々を前記光周波数コムの進行方向に交差する面で１番目の前記光パルスに対する相対的な位相に応じて互いに異なる位置に分配し、前記互いに異なる位置から出射する前記光パルス同士の合成波面を生成する波面合成部と、

を備え、

前記光周波数コム生成部は前記光周波数コムの繰り返し周波数とオフセット周波数とを制御する位相制御部を備える、

波面制御装置。

[請求項2] 前記波面合成部は、互いに対向配置された一対のミラーを有する共振器構造を備え、

前記一対のミラーのうち一方のミラーの反射面は入射する前記光周波数コムの一部を反射し、且つ残部の少なくとも一部を透過し、

前記一対のミラーの反射面間距離Ｌは以下の（１）式で表される、

請求項１に記載の波面制御装置。

[数1]

$$L = L_{rep}/2 = c/2f_{rep} \quad \cdots (1)$$

（１）式において、Ｌ$_{rep}$は前記光周波数コムのパルス間距離を表し、ｃは光速を表し、ｆ$_{rep}$は前記光周波数コムの繰り返し周波数を表す。

[請求項3] 前記一対のミラーのうち少なくとも一方のミラーに入射する前記光周波数コムの入射角度を調節する調節機構を備える、

請求項２に記載の波面制御装置。

[請求項4] 前記光周波数コム生成部は前記光周波数コムの波長を変換する波長

変換部を備える、

請求項１から３の何れか一項に記載の波面制御装置。

[請求項5] 前記合成波面を有する光波の強度情報を前記位相制御部にフィードバックするフィードバック機構を備える、

請求項１から４の何れか一項に記載の波面制御装置。

[請求項6] 前記位相制御部は前記繰り返し周波数と前記オフセット周波数との比率を所定値に設定する、

請求項１から５の何れか一項に記載の波面制御装置。

[請求項7] 前記光周波数コム生成部から出射された前記複数の光パルスのうちの一部の光パルスを前記波面合成部に向けて出射する強度変調器を備える、

請求項１から６の何れか一項に記載の波面制御装置。

[請求項8] 請求項１から７の何れか一項に記載の波面制御装置と、

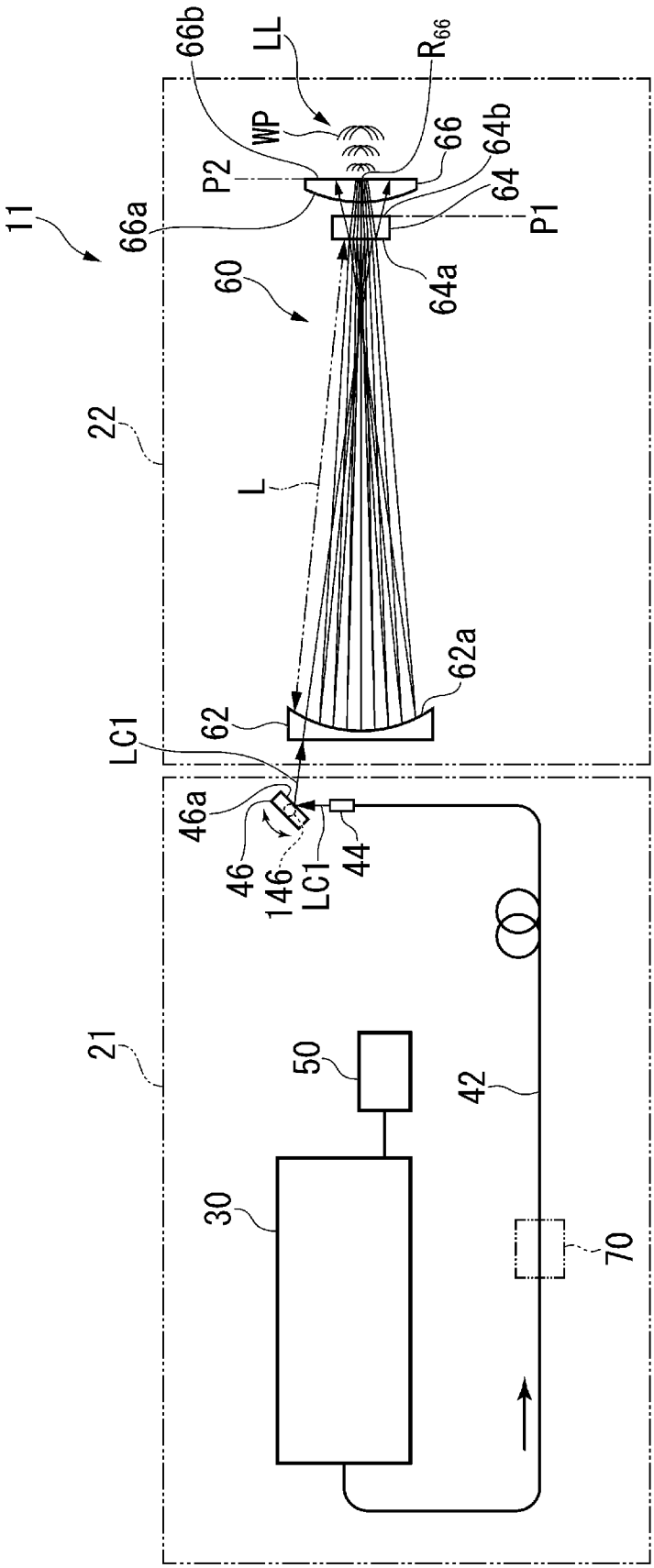
イメージング光学系と、

を備え、

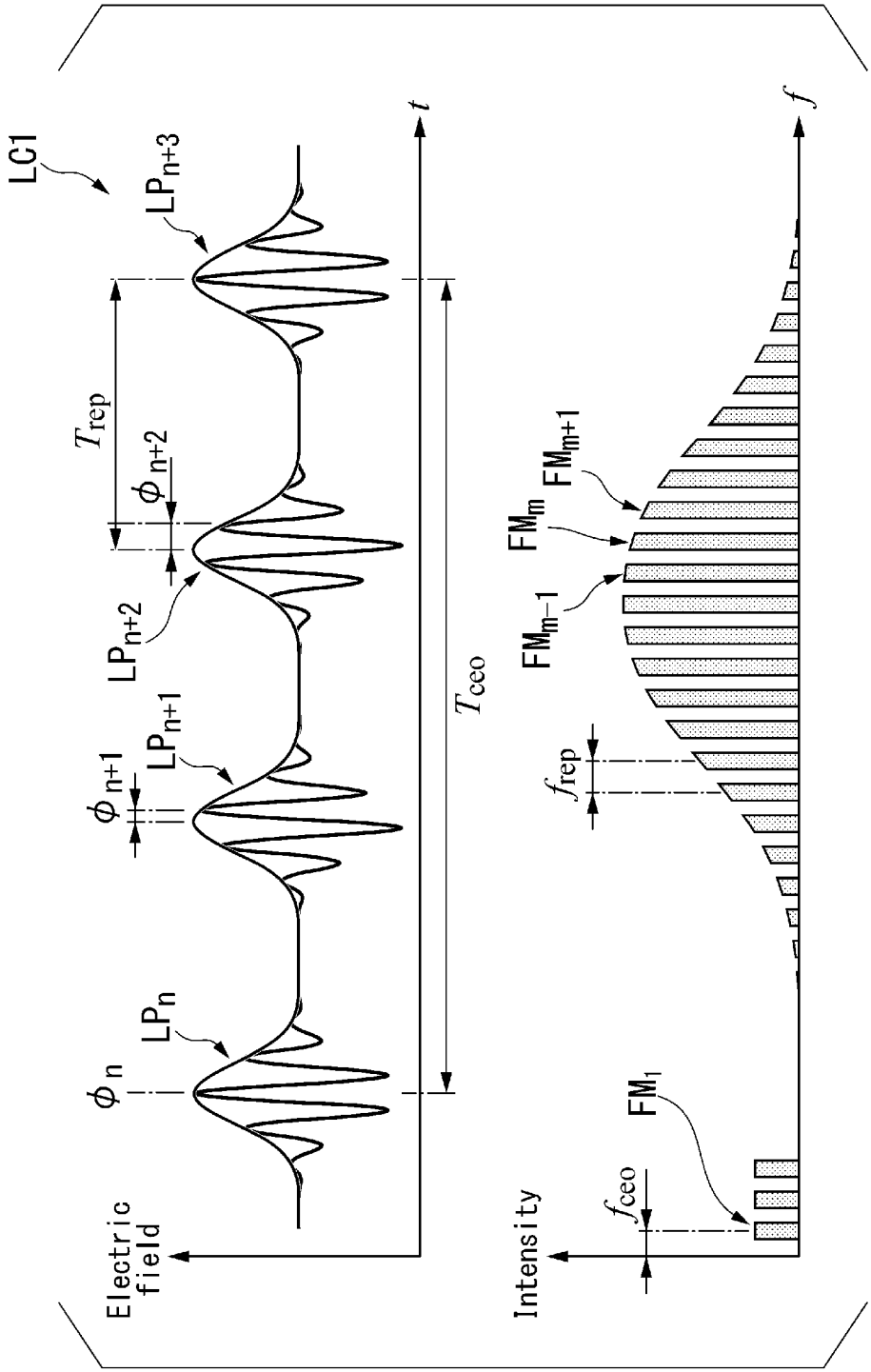
前記イメージング光学系は、前記波面制御装置の前記波面合成部から出射されて前記合成波面を有する光波を被計測物体に照射可能に構成され、且つ前記被計測物体から反射又は透過した光波を受光可能に構成されている、

補償光学装置。

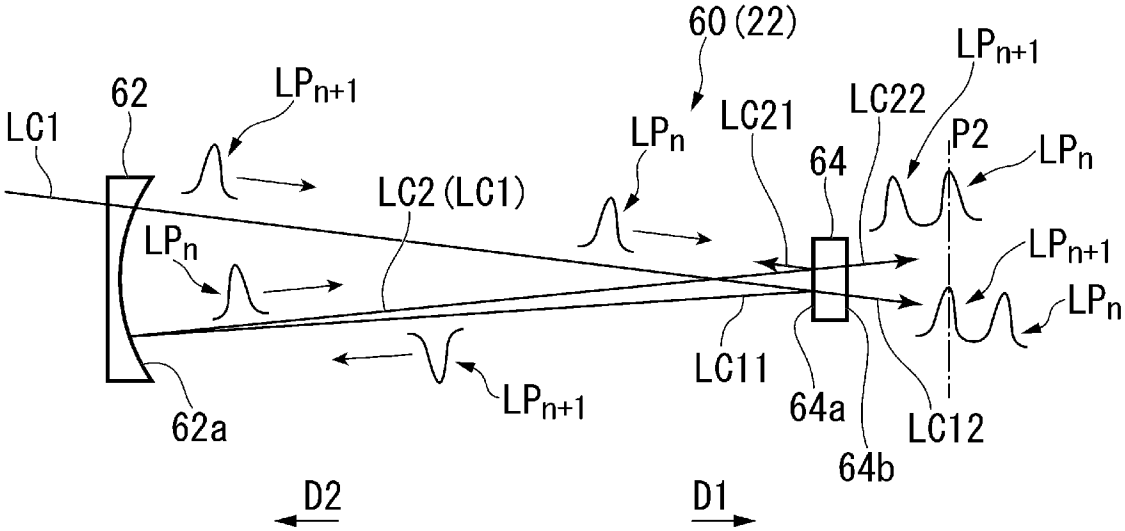
[図1]


66b
LL
R_{66}
WP
66
64b
P2
64
P1
11
66a
64a
60
22
L
62a
62
LC1
46a
46
146
LC1
44
21
50
42
30
70

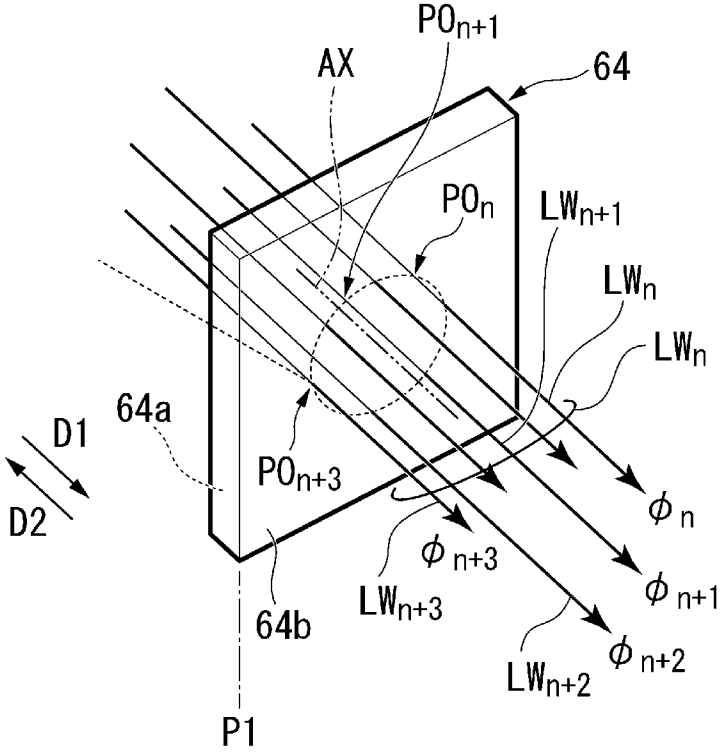
[図2]


LC1
LP$_{n+3}$
T_{rep}
ϕ_{n+2}
LP$_{n+2}$
LP$_{n+1}$
ϕ_{n+1}
LP$_n$
ϕ_n
T_{ceo}
Electric field
t
f
FM$_{m+1}$
FM$_m$
FM$_{m-1}$
f_{rep}
FM$_1$
f_{ceo}
Intensity

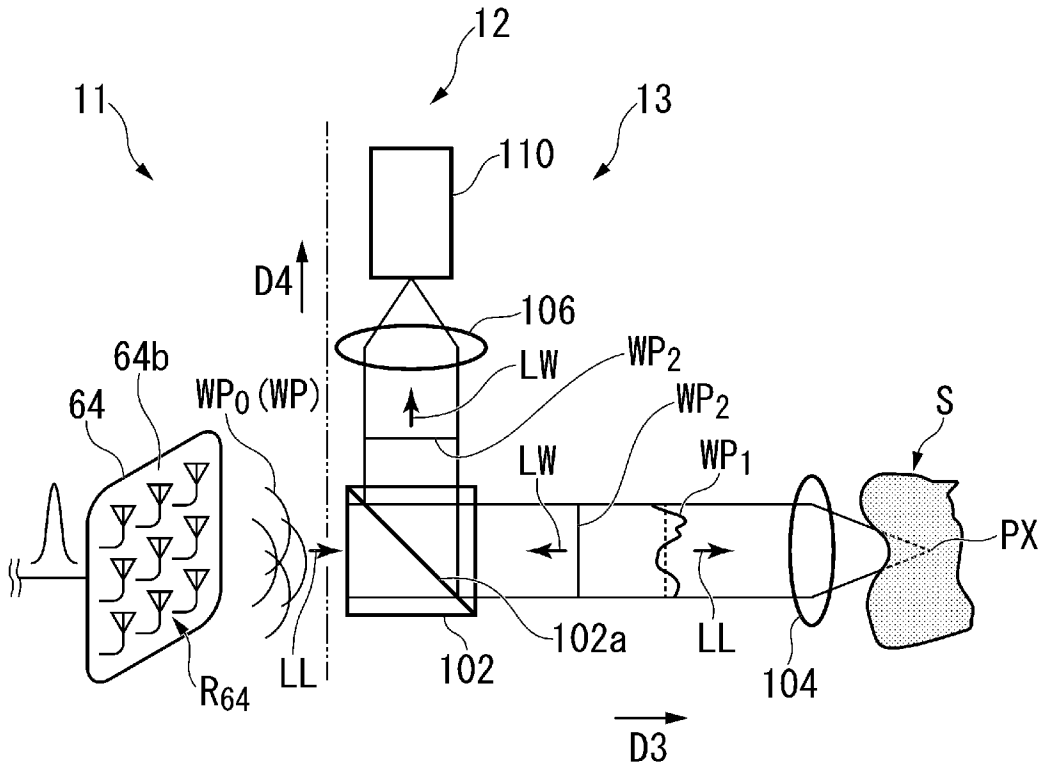
[図3]


60 (22)
LPn+1
62
LPn+1
LC1
LPn
LC21
LC22
P2
LPn
64
LC2 (LC1)
LPn
LPn+1
LPn
LC11
64a
LC12
LPn+1
62a
64b
D2
D1

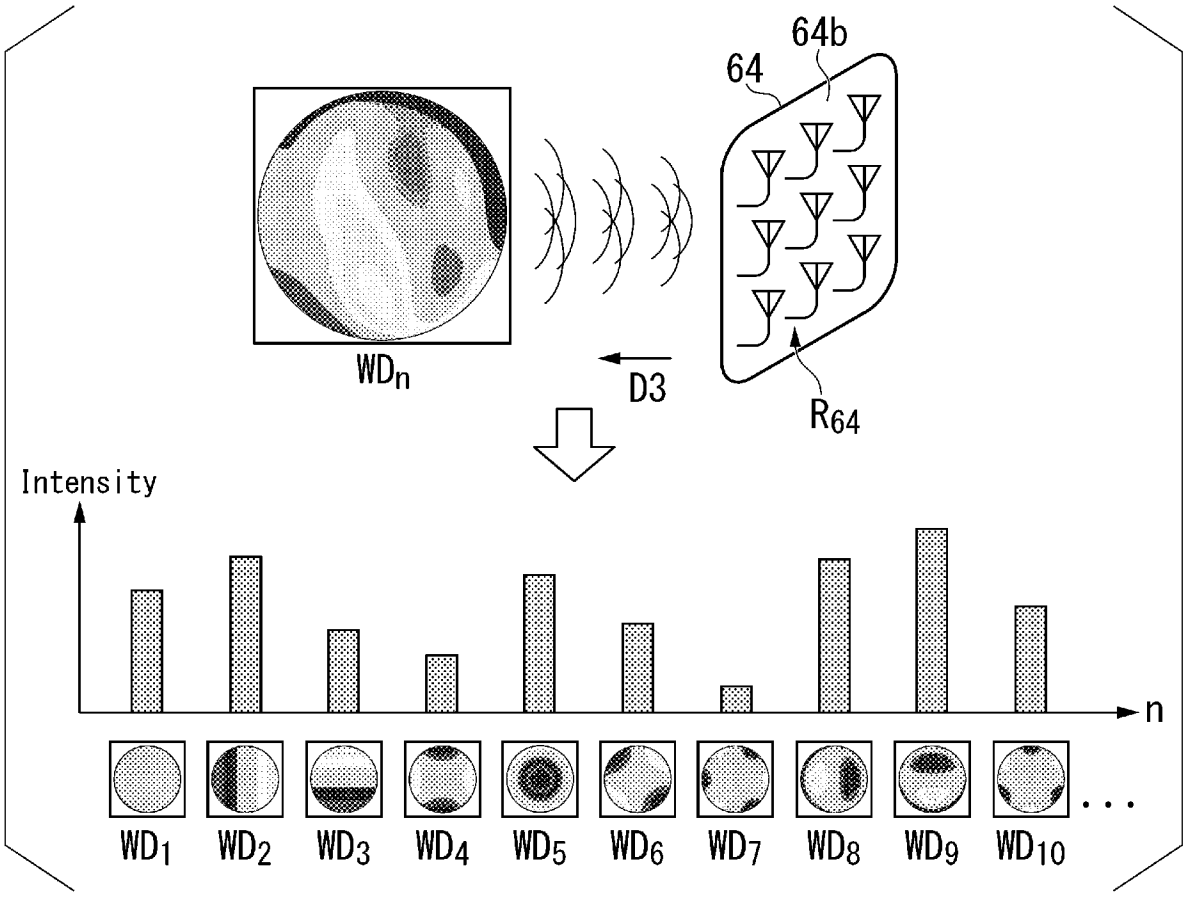
[図4]


POn+1
AX
64
POn
LWn+1
LWn
LWn
64a
D1
D2
POn+3
ϕn
ϕn+3
ϕn+1
LWn+3
64b
ϕn+2
LWn+2
P1

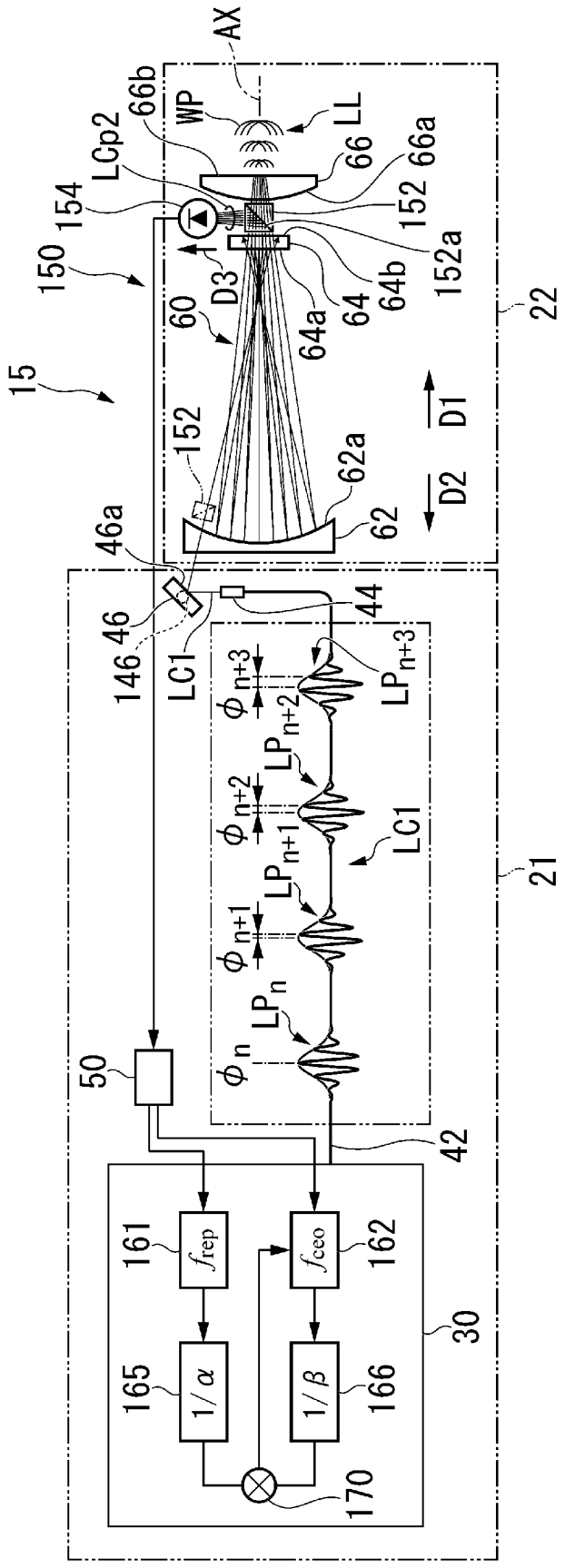
[図5]


12
11
13
110
D4
106
64b
64
WP0 (WP)
LW
WP2
WP2
S
LW
WP1
PX
102a
LL
LL
102
104
R64
D3

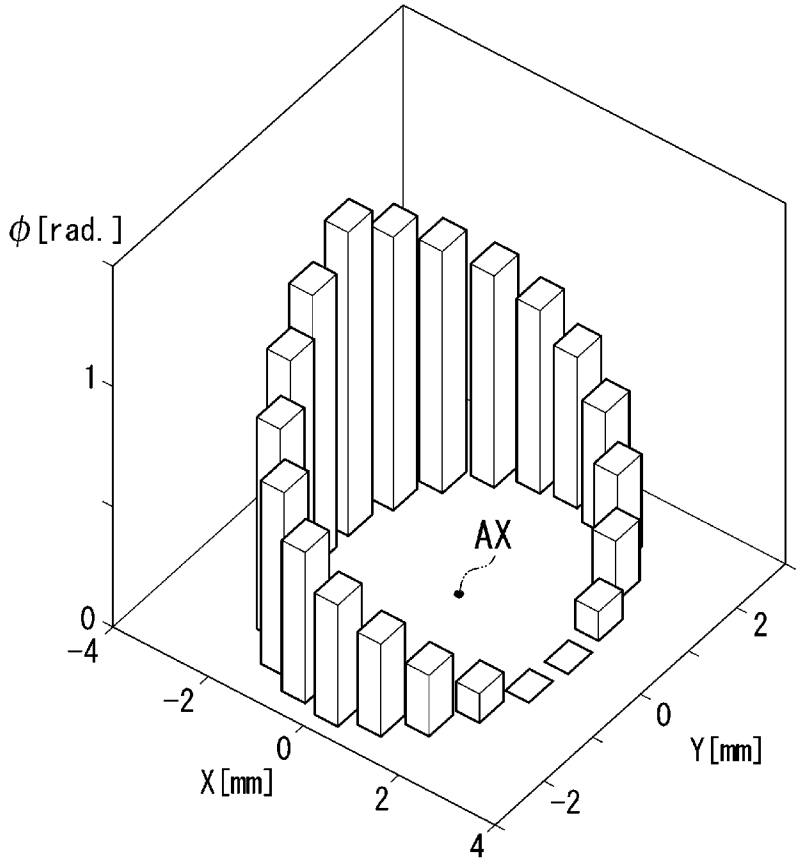
[図6]


64b
64
WDn
D3
R64
Intensity
n
WD1
WD2
WD3
WD4
WD5
WD6
WD7
WD8
WD9
WD10
...

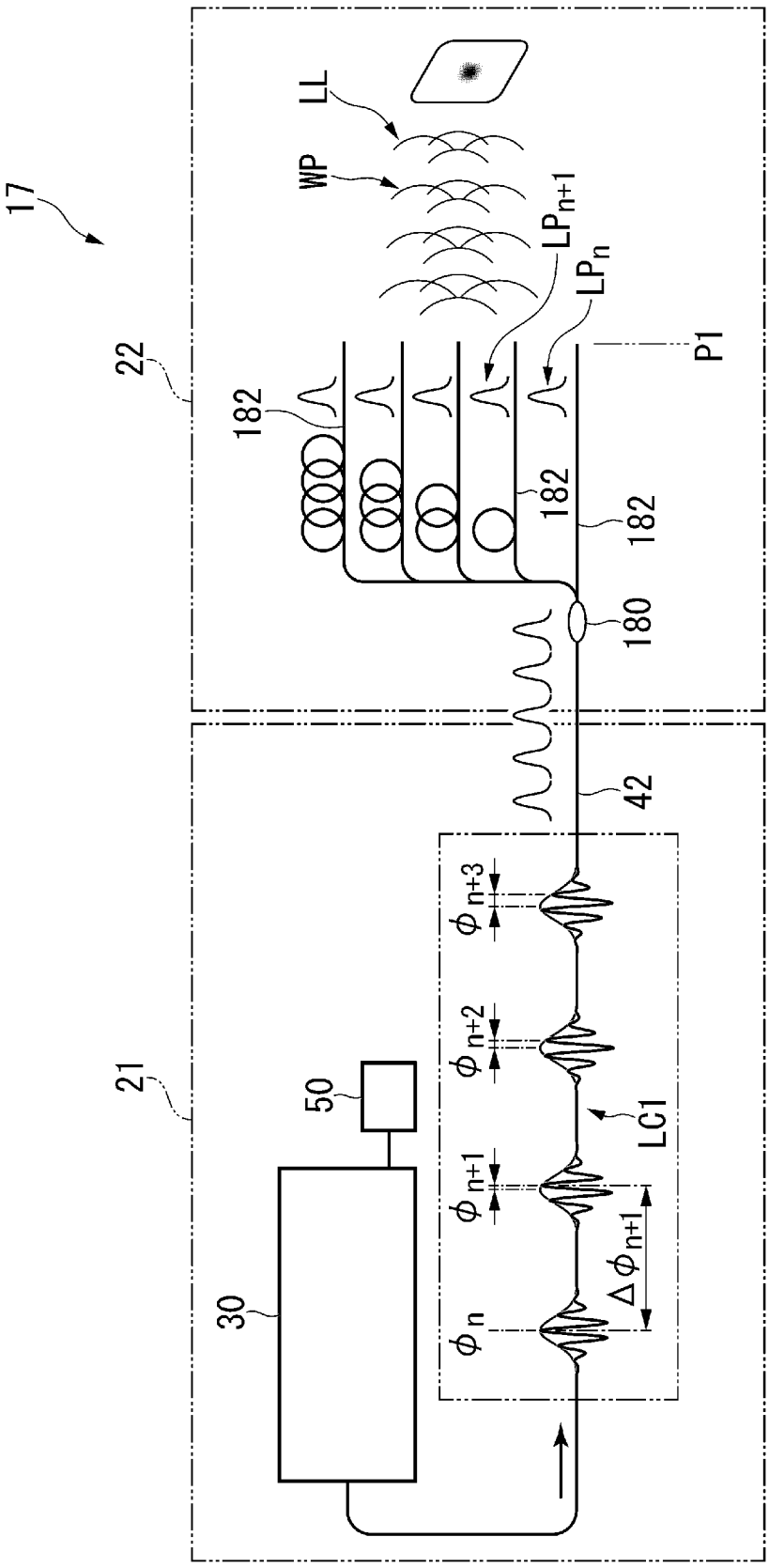
[図7]


AX
66b
WP
LL
LCp2
66
66a
154
152
152a
150
D3
64b
64a
64
60
22
15
152
62a
D1
D2
62
46a
46
44
146
LC1
LP_{n+3}
ϕ_{n+3}
LP_{n+2}
ϕ_{n+2}
LP_{n+1}
ϕ_{n+1}
LP_n
ϕ_n
21
50
42
161
f_{rep}
f_{ceo}
162
30
165
1/α
1/β
166
170

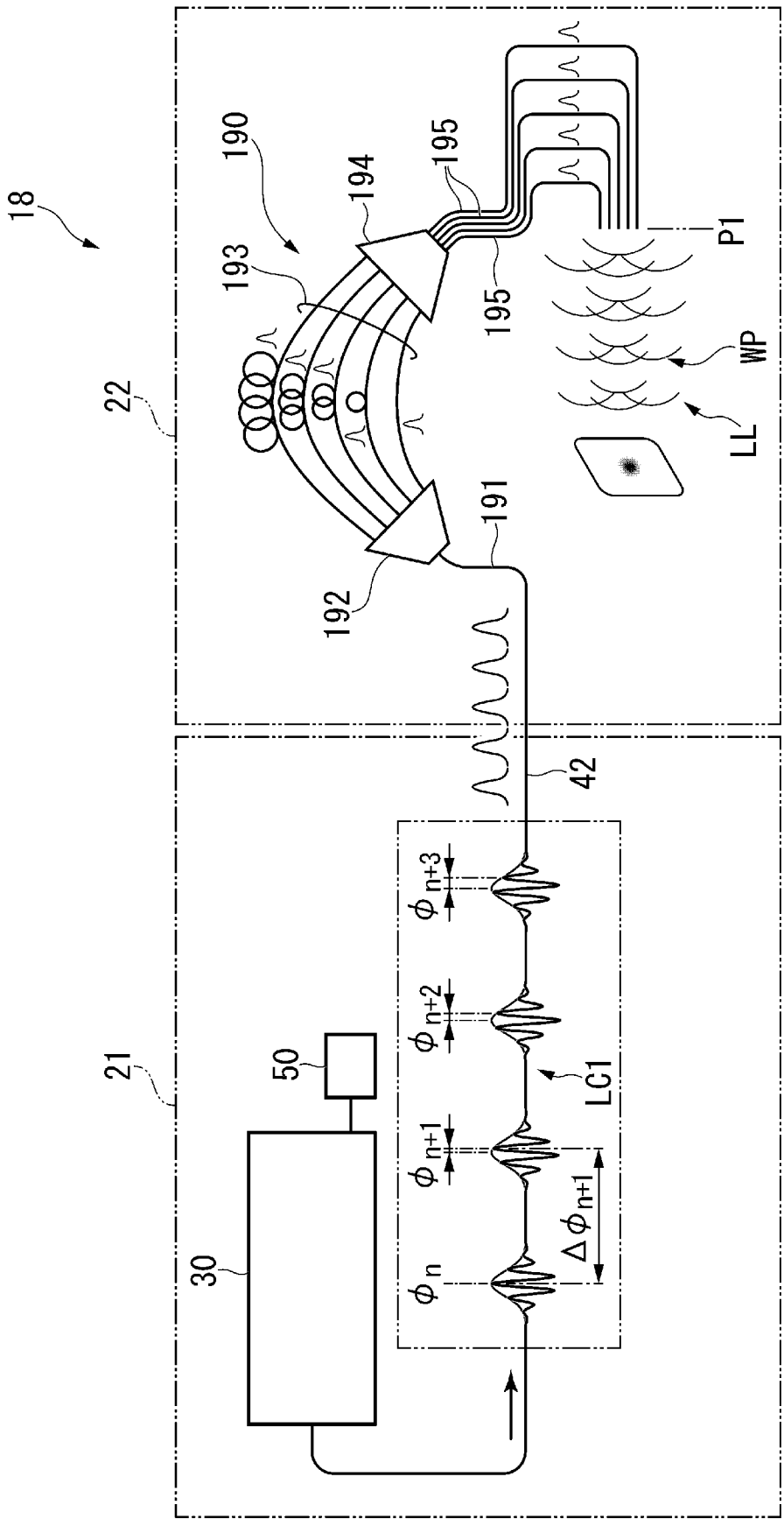
[図8]



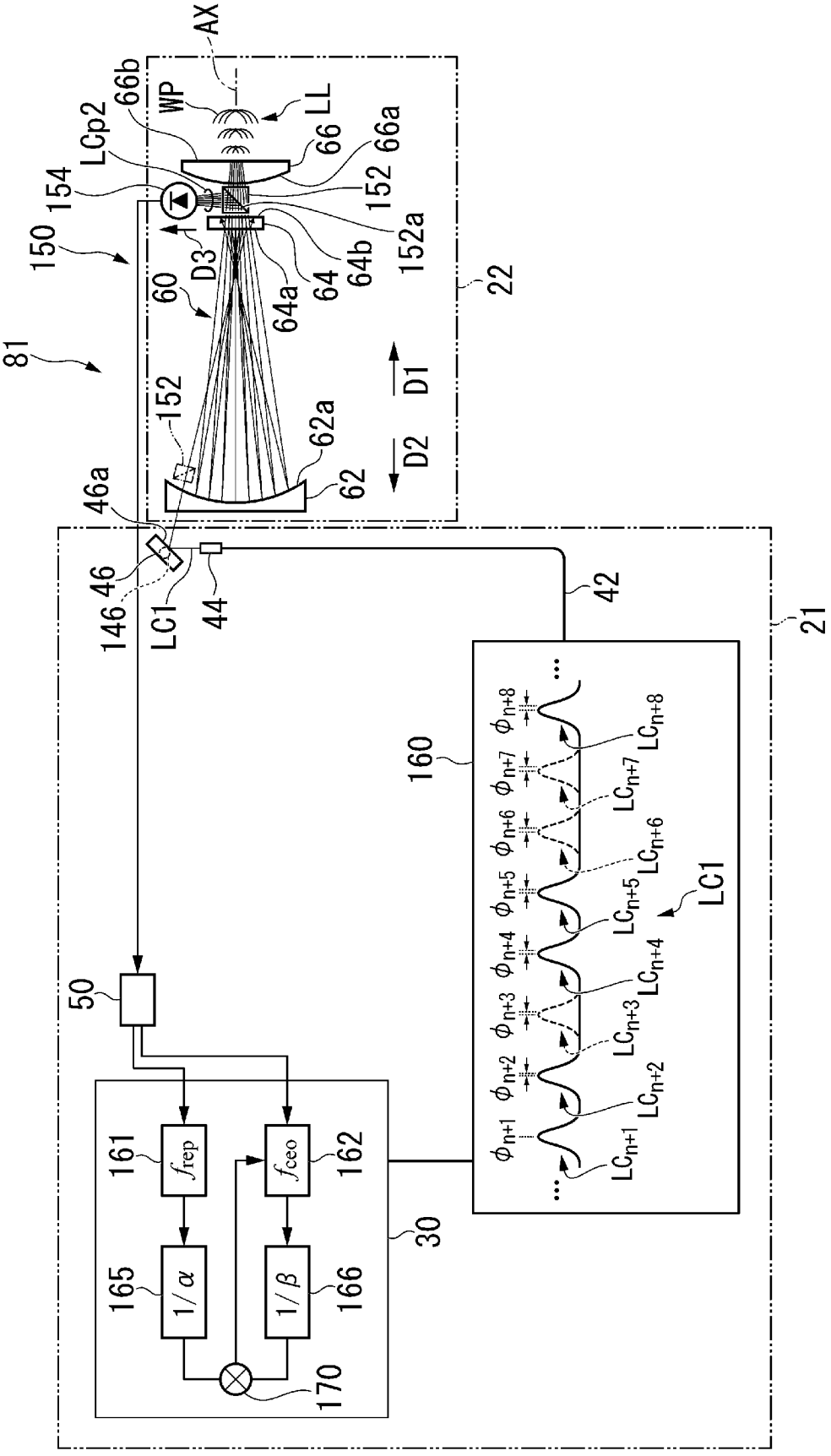
[図9]


17
22
21
LL
WP
LP_{n+1}
LP_n
P1
182
182
182
180
42
50
30
ϕ_{n+3}
ϕ_{n+2}
ϕ_{n+1}
ϕ_n
$\Delta\phi_{n+1}$
LC1

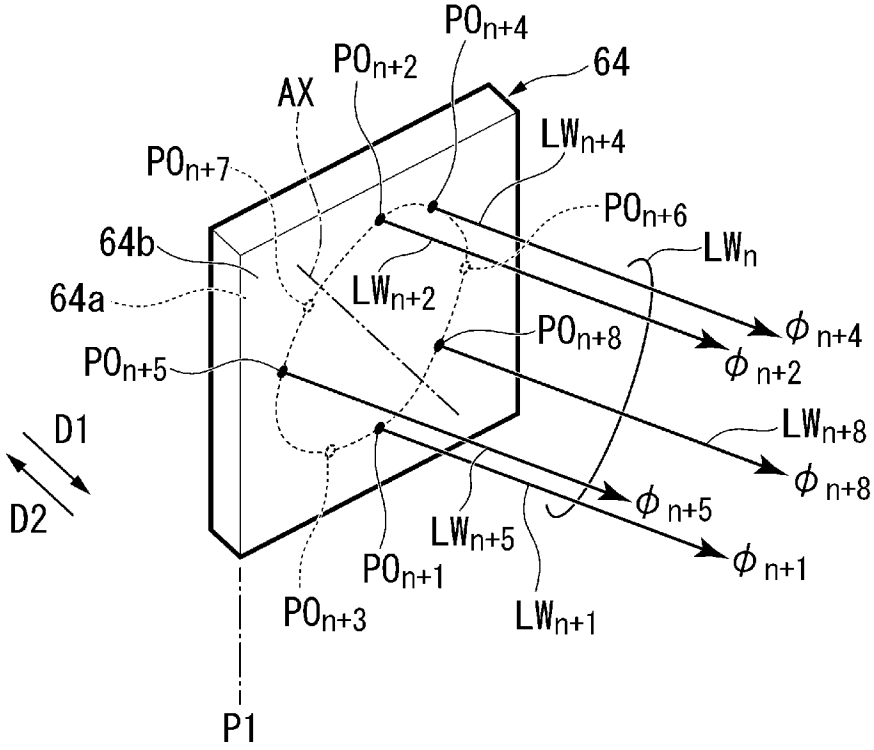
[図10]


18
22
21
190
193
194
195
195
191
192
P1
WP
LL
42
50
30
LC1
ϕ_{n+3}
ϕ_{n+2}
ϕ_{n+1}
ϕ_n
$\Delta\phi_{n+1}$

[図11]


AX
66b
WP
LL
LCp2
66
66a
154
152
150
D3
152a
60
64b
64
64a
22
81
152
D1
62a
D2
62
46a
46
42
146
LC1
44
21
160
50
161
162
30
165
166
170
LC1

[図12]


PO n+4
PO n+2
64
AX
LW n+4
PO n+7
PO n+6
LW n
64b
64a
LW n+2
PO n+8
φ n+4
φ n+2
PO n+5
LW n+8
φ n+8
D1
D2
φ n+5
LW n+5
φ n+1
PO n+1
PO n+3
LW n+1
P1

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/JP2022/031870

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

G02F 1/01(2006.01)i; ***G02B 5/18***(2006.01)i
FI: G02F1/01 F; G02B5/18

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

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

G02F1/00-1/125; G02B5/18; G01S17/00-17/95; G01B9/00-9/10

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

Published examined utility model applications of Japan 1922-1996
Published unexamined utility model applications of Japan 1971-2022
Registered utility model specifications of Japan 1996-2022
Published registered utility model applications of Japan 1994-2022

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

JSTPlus/JST7580 (JDreamIII); IEEE Xplore; SPIE Digital Library

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	US 9684076 B1 (FELDKHUN, D.) 20 June 2017 (2017-06-20) entire text, all drawings	1-8
A	US 2020/0081099 A1 (PURDUE RESEARCH FOUNDATION,THE BOARD OF TRUSTEES OF THE LELAND STANFORD JUNIOR UNIVERSITY) 12 March 2020 (2020-03-12) entire text, all drawings	1-8
A	CN 213957609 U (JINAN UNIVERSITY) 13 August 2021 (2021-08-13) entire text, all drawings	1-8
A	JP 2020-99048 A (THALES) 25 June 2020 (2020-06-25) entire text, all drawings	1-8
A	西山　明子、他, 光周波数コムを用いた高フィネス共振器分光によるＣＯ－Ａｒ気体の高感度分光計測, ２０１８年　第６５回応用物理学会春季学術講演会講演予稿集, March 2018, p. 03-548, entire text, all drawings entire text, all drawings, (NISHIYAMA, Akiko et al. Highly sensitive measurement of CO-Ar using cavity-enhanced optical frequency comb spectroscopy.), non-official translation (Lecture proceedings of the 65th JSAP Spring Meeting, 2018)	1-8

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

* Special categories of cited documents:
"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance
"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date
"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)
"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means
"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed
"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention
"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone
"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art
"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search	Date of mailing of the international search report
25 October 2022	**08 November 2022**
Name and mailing address of the ISA/JP **Japan Patent Office (ISA/JP)** **3-4-3 Kasumigaseki, Chiyoda-ku, Tokyo 100-8915** **Japan**	Authorized officer Telephone No.

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	加藤　峰士、他, 光コムの周波数制御による全光ヒルベルト変換を用いた瞬時高解像度３次元形状計測, ２０１８年　第７９回　応用物理学会秋季学術講演会講演予稿集, September 2018, p. 03-198, entire text, all drawings entire text, all drawings, (KATO, Takashi et al. One shot high resolution 3D imaging using a full optical Hilbert transform by control of optical frequency combs.) non-official translation (Lecture proceedings of the 79th JSAP Autumn Meeting, 2018)	1-8
A	TSUDA, T. et al. Implementation of imaging post amplifier on scan-less confocal dual-comb microscope. PROCEEDINGS OF SPIE. 21 April 2019, vol. 11140, pp. 1114001-174 to 1114001-176, entire text, all drawings entire text, all drawings	1-8
A	KATO, K. et al. One-shot three-dimensional imaging with a paired filter and chirped-frequency combs. CONFERENCE ON LASERS AND ELECTRO-OPTICS (CLEO). 13 May 2018, STh3L.6, pp. 1-2, entire text, all drawings entire text, all drawings	1-8

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.
PCT/JP2022/031870

Patent document cited in search report	Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)	Publication date (day/month/year)
US 9684076 B1	20 June 2017	(Family: none)	
US 2020/0081099 A1	12 March 2020	WO 2019/018035 A1	
CN 213957609 U	13 August 2021	(Family: none)	
JP 2020-99048 A	25 June 2020	US 2020/0195355 A1	
		EP 3672109 A1	
		FR 3090249 A1	
		CA 3065569 A1	

国際調査報告

国際出願番号
PCT/JP2022/031870

A. 発明の属する分野の分類（国際特許分類（ＩＰＣ））

G02F 1/01(2006.01)i; G02B 5/18(2006.01)i
FI: G02F1/01 F; G02B5/18

B. 調査を行った分野

調査を行った最小限資料（国際特許分類（ＩＰＣ））

G02F1/00-1/125; G02B5/18; G01S17/00-17/95; G01B9/00-9/10

最小限資料以外の資料で調査を行った分野に含まれるもの

日本国実用新案公報	１９２２－１９９６年
日本国公開実用新案公報	１９７１－２０２２年
日本国実用新案登録公報	１９９６－２０２２年
日本国登録実用新案公報	１９９４－２０２２年

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

JSTPlus/JST7580 (JDreamIII); IEEE Xplore; SPIE Digital Library

C. 関連すると認められる文献

引用文献のカテゴリー*	引用文献名　及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する請求項の番号
A	US 9684076 B1 (FELDKHUN, D) 20.06.2017 (2017-06-20) 全文、全図	1-8
A	US 2020/0081099 A1 (PURDUE RESEARCH FOUNDATION,THE BOARD OF TRUSTEES OF THE LELAND STANFORD JUNIOR UNIVERSITY) 12.03.2020 (2020-03-12) 全文、全図	1-8
A	CN 213957609 U (JINAN UNIVERSITY) 13.08.2021 (2021-08-13) 全文、全図	1-8
A	JP 2020-99048 A (タレス) 25.06.2020 (2020-06-25) 全文、全図	1-8
A	西山　明子、他，光周波数コムを用いた高フィネス共振器分光によるＣＯ－Ａｒ気体の高感度分光計測，２０１８年　第６５回応用物理学会春季学術講演会講演予稿集，2018.03，p. 03-548，全文、全図 全文、全図	1-8

☑ Ｃ欄の続きにも文献が列挙されている。

☑ パテントファミリーに関する別紙を参照。

* 引用文献のカテゴリー
“A” 特に関連のある文献ではなく、一般的技術水準を示すもの
“E” 国際出願日前の出願または特許であるが、国際出願日以後に公表されたもの
“L” 優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献（理由を付す）
“O” 口頭による開示、使用、展示等に言及する文献
“P” 国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願の日の後に公表された文献
“T” 国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と抵触するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの
“X” 特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの
“Y” 特に関連のある文献であって、当該文献と他の１以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの
“&” 同一パテントファミリー文献

国際調査を完了した日	国際調査報告の発送日
25.10.2022	08.11.2022

名称及びあて先
日本国特許庁(ISA/JP)
〒100-8915
日本国
東京都千代田区霞が関三丁目４番３号

権限のある職員（特許庁審査官）
林　祥恵 2L 4085

電話番号 03-3581-1101 内線 3295

C.　関連すると認められる文献

引用文献のカテゴリー*	引用文献名　及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する請求項の番号
A	加藤　峰士、他，光コムの周波数制御による全光ヒルベルト変換を用いた瞬時高解像度３次元形状計測，２０１８年　第７９回　応用物理学会秋季学術講演会講演予稿集，2018.09，p. 03-198，全文、全図 全文、全図	1-8
A	TSUDA, T. et al., "Implementation of imaging post amplifier on scan-less confocal dual-comb microscope", PROCEEDINGS OF SPIE, 2019.04.21, Vol. 11140, pp. 1114001-174 - 1114001-176, 全文、全図 全文、全図	1-8
A	KATO, K. et al., "One-shot three-dimensional imaging with a paired filter and chirped-frequency combs", CONFERENCE ON LASERS AND ELECTRO-OPTICS (CLEO), 2018.05.13, STh3L.6, pp. 1-2, 全文、全図 全文、全図	1-8

国際調査報告
パテントファミリーに関する情報

国際出願番号
PCT/JP2022/031870

引用文献	公表日	パテントファミリー文献	公表日
US 9684076 B1	20.06.2017	（ファミリーなし）	
US 2020/0081099 A1	12.03.2020	WO 2019/018035 A1	
CN 213957609 U	13.08.2021	（ファミリーなし）	
JP 2020-99048 A	25.06.2020	US 2020/0195355 A1	
		EP 3672109 A1	
		FR 3090249 A1	
		CA 3065569 A1	