



(19)中華民國智慧財產局

(12)發明說明書公告本 (11)證書號數：TW I776848 B

(45)公告日：中華民國 111 (2022) 年 09 月 11 日

(21)申請案號：107103790

(22)申請日：中華民國 107 (2018) 年 02 月 02 日

(51)Int. Cl. : G06T11/00 (2006.01) G06T7/586 (2017.01)

(30)優先權：2017/02/03 歐盟 17382047.3

(71)申請人：西班牙商沃普責任有限公司 (西班牙) WOOPTIX S.L. (ES)
西班牙(72)發明人：費爾南德斯瓦爾迪亞 胡安 FERNANDEZ VALDIVIA, JUAN JOSE (ES)；特魯希
略塞維亞 胡安 TRUJILLO SEVILLA, JUAN MANUEL (ES)；戈梅茲卡德納斯
奧斯卡 GOMEZ CARDENES, OSCAR (ES)

(74)代理人：許世正

(56)參考文獻：

期刊 Marcos A. Van Dam et al., "Wave-front sensing from defocused images by use of wave-front slopes", APPLIED OPTICS VOL.41 NO.26 September 2002 pages 5497~5502

期刊 Saloni Pal et al., "Practical application of the geometric wavefront sensor for adaptive optics" 2016 International Conference on Image and Vision Computing New Zealand (IVCNZ) 1 November 2016 pages 1-5

審查人員：高健忠

申請專利範圍項數：13 項 圖式數：3 共 28 頁

(54)名稱

用於獲得電磁場的波前的層析分佈的方法和光學系統

(57)摘要

本發明涉及一種用於光學系統 (100) 中光的波前 (104) 的二維重建的方法，包含：測量不同光學平面 (101、102) 具有光程差。特別地，這種方法適用於用圖像探測器探測電磁場波前的層析分佈。任何標準的二維相機。測量在不同光學平面 (101、102) 具有一光程差的至少二圖像中光強度的分佈函數。特別地，這種方法適用於用圖像偵測器 (例如任何標準的二維相機) 探測電磁場波前的層析分佈。

The invention relates to a method for the two-dimensional reconstruction of wave fronts (104) of light for use in an optical system (100) comprising: measuring the distribution function of the light intensity in at least two images at different optical planes (101, 102) having an optical path difference. In particular this method is suitable for probing the tomographical distribution of wave fronts of electromagnetic fields with an image detector, e.g. any standard two-dimensional camera.

指定代表圖：

100

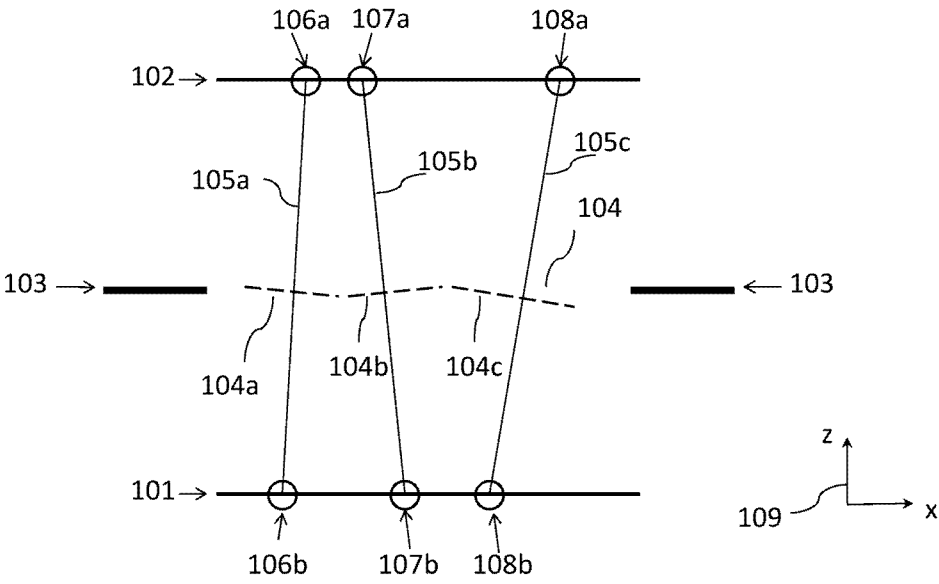


圖 1

符號簡單說明：

100 . . . 光學系統

101、102、

103 . . . 光學平面

104 . . . 波前

104a、104b、

104c . . . 波前斜率

105a、105b、

105c . . . 直線

106a、106b、107a、

107b、108a、

108b . . . 光子

109 . . . 方向



I776848

【發明摘要】

【中文發明名稱】 用於獲得電磁場的波前的層析分佈的方法和光學系統

【英文發明名稱】 METHOD AND OPTICAL SYSTEM FOR ACQUIRING THE TOMOGRAPHICAL DISTRIBUTION OF WAVE FRONTS OF ELECTROMAGNETIC FIELDS

【中文】

本發明涉及一種用於光學系統（100）中光的波前（104）的二維重建的方法，包含：測量不同光學平面（101、102）具有光程差。特別地，這種方法適用於用圖像探測器探測電磁場波前的層析分佈。任何標準的二維相機。測量在不同光學平面（101、102）具有一光程差的至少二圖像中光強度的分佈函數。特別地，這種方法適用於用圖像偵測器(例如任何標準的二維相機)探測電磁場波前的層析分佈。

【英文】

The invention relates to a method for the two-dimensional reconstruction of wave fronts (104) of light for use in an optical system (100) comprising: measuring the distribution function of the light intensity in at least two images at different optical planes (101, 102) having an optical path difference. In particular this method is suitable for probing the tomographical distribution of wave fronts of electromagnetic fields with an image detector, e.g. any standard two-dimensional camera.

【指定代表圖】 圖1。

【代表圖之符號簡單說明】

100 光學系統

101、102、103 光學平面

104 波前

104a、104b、104c 波前斜率

105a、105b、105c 直線

106a、106b、107a、107b、108a、108b 光子

109 方向

【特徵化學式】

無

【發明說明書】

【中文發明名稱】 用於獲得電磁場的波前的層析分佈的方法和光學系統

【英文發明名稱】 METHOD AND OPTICAL SYSTEM FOR ACQUIRING THE TOMOGRAPHICAL DISTRIBUTION OF WAVE FRONTS OF ELECTROMAGNETIC FIELDS

【技術領域】

【0001】 本發明涉及如申請專利範圍第 1 項的前言部分所述類型的方法、申請專利範圍第 10 項的前言部分中所述的電腦系統、申請專利範圍第 12 項的前言部分中所述的存儲媒體、以及如申請專利範圍第 13 項的前言部分所述的光學系統。

【先前技術】

【0002】 當電磁波通過不均勻介質時，其波前相對於原來的形狀會產生扭曲或變形。波前扭曲會導致光學系統中出現像差，從而降低光學系統的表現。

【0003】 舉例來說，在地面用望遠鏡進行天文成像時，由於與動蕩的地球大氣的相互作用以及與光學元件(例如望遠鏡的鏡頭或鏡子)的相互作用，來自遠處的天文觀測目標的光波前會變形，從而導致圖像質量下降。

【0004】 然而，光學系統在其他技術領域的表現，例如攝影、醫學影像(如組織或顯微鏡的斷層掃描)，會因為波前與非均勻介質的相互作用而受到沿光路徑發生的波前扭曲的不利影響。

【0005】 為了校正這種波前變形或像差並重建波前的初始形狀，尤其是使用自適應光學系統，其旨在通過所謂的波前感測器來測量波前變形或像差。

【0006】 這種波前感測器的典型例子包含 Shack-Hartmann 感測器、金字塔形感測器(pyramidal sensors)、剪切干涉測量(shearing interferometry)和曲率感測器(curvature sensors)。

【0007】 已知的波前感測器的缺點在於它們在技術上是複雜的，例如，它們包含多個如鏡頭的光學元件。此外，藉由這些波前感測器產生的數據進行解析以重建初始的波前是需要高密集計算和具挑戰性的。

【發明內容】

【0008】 因此，本發明的目的是提供用於光學系統中的波前重建的改進的裝置。具體而言，例如，本發明的目的是簡化和加速波前扭曲的測量，特別是加速對波前斜率的估計，以及促進和加速初始波前的重建，即重建初始的波前形狀。

【0009】 根據本發明，此目的可通過根據申請專利範圍第 1 項的方法、申請專利範圍第 10 項的電腦系統、申請專利範圍第 12 項的存儲介質以及申請專利範圍第 13 項的光學系統來實現。

【0010】 有利的實施例和進一步的發展是附屬項的標的。

【0011】 用於光學系統的波前、光波前的二維重建的示例性方法可以包含以下步驟中的一者、部分或全部：

【0012】 在具有光程差的不同光學平面上的至少二個圖像中，測量光強度的分佈函數(distribution function)，例如光強度的二維分佈函數；

【0013】 該測量的步驟包含在各平面內的不同角度範圍內確定各平面中的光強度的多個一維累積分佈函數(cumulative distribution function)；

【0014】 將所確定的不同光學平面的一維累積分佈函數進行匹配，以便於在一平面(例如位於所述不同的光學平面之間的中間平面)中導出二維波前斜率估計值；以及

【0015】 將該些二維波前斜率估計積分，以重建位於該些不同光學平面之間的該平面中的波前的二維形狀。

【圖式簡單說明】

【0016】

圖 1 是示例性的光學系統。

圖 2 是射線偏移測量精度的示例性圖。

圖 3 是示例性的波前相位層析成像配置圖。

【實施方式】

【0017】 參考下面的結合圖式詳細描述的實施例，本發明的優點和特徵以及獲得它們的方式將變得顯而易見。然而，本發明不限於下文揭示的實施例，並且可以以許多不同的形式實施。另外，提供這些示例性實施例，使得本發明將徹底和完整的揭示，並且將向本領域技術人員充分傳達該範圍。本發明的範圍應由申請專利範圍界定。

【0018】 示例性的光學系統或光學採集系統由此可以包含數位相機，例如常見的二維相機、望遠鏡、顯微鏡、積分顯示器等成像系統。

【0019】 尤其是，在光學系統的不同光學平面上拍攝的圖像可以被例如感光耦合元件（charge-coupled device，CCD）擷取。

【0020】 於此測量圖像中光強度的分佈函數的術語，例如，圖像中光強度的二維分佈函數，根據圖像的光學平面的已知特徵，還可以理解為確定光強度的分佈函數，例如，光強度的二維分佈函數。例如，如果光學系統的瞳孔具有足夠的特徵，例如通過光瞳函數，光瞳平面上光強度的分佈函數可由光學系統的參數直接確定。

【0021】 此外，由於在這樣的示例性情況下，光瞳平面圖像與通過的波前面無關地保持相同，所以瞳孔圖像（即光瞳平面中的光強度的分佈函數）只需要確定或評估一次即可。

【0022】 此外，所確定的不同光學平面的一維累積分佈函數的匹配，例如可通過使用沿著直線或沿著軸(如，橫座標，距離函數的值相同)測量確定的一維累積分佈函數之間的距離的度量或距離函數對不同光學平面的一維累積分佈函數的成對匹配來執行。

【0023】 應注意的是，在此假定波前（即電磁波前沿）或光子的傳播遵循幾何光學的法則，即假設傳播方向垂直於波前。為了完整性，注意到波前可以由具有相同相位的一組波點來定義，即波前或波前形狀可以由相位圖(phase map)來描述，例如二維相圖。

【0024】 此外，假定傳播波前的光強度的分佈函數可以由概率密度函數(probability density function, PDF)表示光子到達的概率。進一步假定，波前傳播節省了通量(flux)，即指一維 PDF 曲線下的總面積保持不變。

【0025】 需要進一步指出的是，波前重建的光學平面可以位於沿著光學系統的光路上的任何位置。換句話說，其中波前將被重建的光學平面不需要與任何特定的光學平面重合，例如，光學系統的孔徑平面或光瞳平面。

【0026】 具體地說，例如可以設想，在具有光程差的不同光學平面上拍攝的圖像，即可測量光強度的分佈函數的圖像可以位於光學系統的孔徑或光瞳平面之前或之後，使得波前將被重建的光學平面也可以位於光學系統的孔徑或光瞳平面之前或之後。

【0027】 也可能的是，在不同的光學平面上拍攝的具有光程差的圖像，即其中光強度的分佈函數被測量的圖像也可以位於相對於可能的光圈面或光瞳平面的不同距離處。

【0028】 上面描述的方法提供了更有效和更快的方法以估計二維波前斜率以及從來自波前感測器或例如具有光程差的圖像對的數據導出的所述二維波前斜率估計來恢復波前的二維初始形狀。特別地，所提出的方法可以更有效地恢復波前的初始形狀或波前的初始相位，其中波前變化或光強度變化發生在二維(即沿著不同的方向)中。

【0029】 另外，根據本發明，例如可以實現在 xy 平面中拍攝的具有光程差的光路(例如，沿著 z 軸)上的波前解析度，可以達到幾皮米 pm(picometer)。

【0030】 與已知技術相比，除了其他之外，需要涉及多個光學元件的複雜的波前感測器設計，並且還需要困難和繁瑣的集成技術和波前參數化，例如，

使用 Zernike 多項式(Zernike polynomials)或 Radon 轉換(Radon transformations)，相對於可以計算要恢復的波前的速度，這裡介紹的方法省去了這樣的計算密集型技術和參數化，從而顯著地促進了波前的重建。換句話說，該方法克服了現有技術的問題，可精確地二維波前重建需要計算資源密集和復雜的波前參數化和轉換。

【0031】 由於其計算效率的提高，該方法適於實際應用，例如在自適應光學系統中控制反饋迴路。

【0032】 此外，減少計算負擔使得該方法可在普通的中央處理器單元（CPU）或圖形處理器單元（GPU）等可以在智慧型手機、數位相機、平板電腦、筆記型電腦、桌上型電腦和其他普通電子設備中找到的普通電子元件上實現。

【0033】 這裡描述的方法的另一個有利效果在於，因為不需要額外的光學元件來測量或感測波前，例如在用波前感測器(如 Shack-Hartmann 感測器或金字塔式感測器)進行波前感測的情況下，不需要額外的空間或時間調製被添加到作為測量的波前。

【0034】 除其他外，所述確定前述確定各平面內不同角度範圍內各平面內的光強度的多個一維累積分佈函數，可以理解為確定各平面內的光強度在一定範圍的不同方向上的光強度的多個一維累積分佈函數，即在每個平面內的不同直線的範圍或至少一條直線上，其中所述直線各自具有可以由角度表示的斜率。

【0035】 換句話說，每個平面內的可能角度可以定義每個平面中的直線的斜率，沿著該平面可以確定每個平面中的光強度的一維累積分佈函數。

【0036】 用於確定每個平面中的光強度的多個一維累積分佈函數，限定每個平面中所述直線的斜率的每個平面內的不同角度的可能範圍可以例如在每個平面中包含至少兩個不同的角度，例如兩個正交角度(如 0° 和 90°)。

【0037】 也可能確定每個平面中的光強度的一維累積分佈函數所沿的角度或直線與波前或波前變化的主要方向或軸線相匹配。

【0038】 但是，可以想到的是，當假定波前變化僅在特定角度或特定方向上發生時，僅用於所述特定角度或特定方向的一維累積分佈函數被確定，以恢復初始波前形狀或波前相位。

【0039】 而且，上述示例性步驟可以提供執行電磁場的波前的三維分佈（即，體積分佈）的層析成像(tomography)的基礎，電磁場的波前的三維分佈例如波前沿光學系統的光軸的三維分佈，如，在一堆圖像上。換句話說，本文中呈現的方法允許例如允許從一疊或一系列重建的二維波前導出沿著光學系統的光軸的波前的三維分佈。具體而言，本文描述的方法與當前的波前層析成像方法相比，提供了計算更快且更有效的方式來執行所述電磁場波前的三維分佈的層析成像。

【0040】 在上述示例性方法步驟中，可以例如在光瞳平面(如出瞳平面、或光學系統的孔徑平面)中拍攝至少兩個圖像中的一個。

【0041】 在光瞳平面中拍攝圖像的可能的示例性步驟也可以被理解為基於光學系統的瞳孔的明確定義的表徵模型來表徵光瞳平面中的圖像。換句話說，至少兩個圖像中的一者可以是可通過理論模型和/或經驗模型充分表徵的圖像。換句話說，這樣的特徵化圖像可以被計算，並且不需要由照相機擷取或測量。

【0042】 如上所述，這具有以下優點：確定光瞳平面或孔徑平面中的多個一維累積分佈函數可以基於或來源於瞳孔或孔徑的充分定義的模型，即明確定義和/或充分表徵的光瞳函數或孔徑函數。

【0043】 進一步可能的是，至少一個圖像可能失焦，即在光學系統的散焦平面上。

【0044】 具體而言，可以想到的是一圖像被拍攝於焦內或焦前和一圖像被拍攝焦外或焦後，即一圖像在光學系統的焦平面之前及一圖像超出光學系統的焦平面。換句話說，至少兩個圖像都可被散焦(defocused)。

【0045】 所有拍攝的圖像都可能失焦，也就是說所有的圖像都可能會散焦。

【0046】 但是，也可能會聚焦來自不同光學平面的部分或全部圖像。

【0047】 此外，注意到，這裡描述的方法也可以應用於無焦光學系統 (afocal system)，即沒有焦點的光學系統。只需要在測量或確定的圖像之間存在光程差。

【0048】 可以使用測量或確定的圖像之間的任何光程差。例如，光學系統的分數(fraction)或總長度可以用作光程差。藉此光程差的大小或長度用可以被確定的波前斜率估計或波前形狀或波前相位，可以確定解析度。特別是增加光程差，即增加測量或確定的圖像之間的光學平面之間的距離，可以增加要恢復的波前的波前相位解析度或波前形狀解析度。

【0049】 電磁場波前的三維分佈(即體積分佈)，例如沿光學系統的光軸的波前的三維分佈。通過在具有光程差的不同光學平面上拍攝的圖像，可以提供導出這種相位或波前層析成像的基礎，並且其中例如所述圖像是由具有感光耦合元件 (CCD) 的圖像檢測器(例如，一個普通的二維數位相機)拍攝的。因此，所述圖像可以提供用於提供三維波前相位分佈的層析測量的基礎。

【0050】 換言之，例如可能的是，在不同的光學平面上拍攝多個圖像(例如兩個以上的圖像)，以在多個光學平面上重建出多個二維波前形狀。

【0051】 這有利地允許執行上述的相位或波前層析成像，以在保持圖像的二維解析度的同時，從不同的角度觀看成像的物體。

【0052】 可替換地或另外地，波前相位層析成像可以基於估計波前相位、或者估計波前斜率，不在所測量或確定的圖像的整個尺寸上，而是從估計波前相位或僅估計部分波前斜率或測量或確定的圖像的部分來執行。

【0053】 換句話說，可以從多個圖像(例如在不同的光學平面(如在光路位置上)上拍攝兩個以上的圖像)中導出示例性的三維波前相位分佈或層析成像，在探測三維波前相位分佈的多個光學平面上重建多維二維波前形狀，和/或可以從

針對給定的光學平面從測量或確定的圖像的不同部分或部分重建的多個二維波前，獲得示例性的三維波前相位分佈或層析成像。

【0054】 因此，圖像可以被分成多個部分，其中每個部分重建波前的二維形狀。更精確地說，二維波前或波前相位可以在一個平面(例如，位於測量或確定圖像的不同光學平面之間的部分之間的中間平面)的部分重建。

【0055】 由於從要觀察的物體的不同部分和/或不同深度發出或散射光或光線(或從不同物體發出或散射的光或光線)將以不同的角度或位置射中測量或確定的圖像的圖像平面，即可以在測量或確定的圖像的光學平面中的不同位置處形成圖像，測量或確定的圖像的不同區域可被映射回到待觀察的物體（或不同物體的部分）的不同部分或不同深度。

【0056】 換言之，通過計算或恢復用於測量或確定的圖像的不同區域或部分波前或波前相位，可以獲得待觀察物體的不同視角。

【0057】 換句話說，本文描述的方法可以應用於測量或確定的圖像的多個不同的部分或子部分，從不同部位或不同深度的待觀察物體或來自不同物體的部分恢復初始的波前。

【0058】 因此，這裡描述的方法可以包含以下步驟中的其中一者、部分或全部：

【0059】 在具有光程差的不同光學平面上的至少二個圖像中，測量光強度的分佈函數；

【0060】 其中該測量的步驟可以包含在每個截面內的不同角度範圍內確定光強度的多個一維累積分佈函數；

【0061】 將所確定的不同光學平面的不同截面的一維累積分佈函數進行匹配，以便於在一平面(例如位於所述不同的光學平面之間的中間平面)的截面上導出二維波前斜率估計值；以及

【0062】 將該些二維波前斜率估計積分，以重建位於該些不同光學平面之間的該平面的截面中的波前的二維形狀。

【0063】 對於假定賦予要觀察的物體的波前的多個測量或確定的圖像和可能的多個選擇的相幕(phase screen)的可能的示例性分佈，相當於該區域或其所代表的物體的部分內的相位變化，所述可能的相幕可以從所述多個部分或區域中恢復或確定的波前相位來計算，所述測量或確定的圖像可以被劃分成多個部分或區域。

【0064】 假設，例如要被觀察的物體或目標介質至少部分透明，則所述物體或目標介質可被建模為沿著光軸(例如， z 軸)分佈的一組離散相幕，並且其中所述一組階段螢幕可以基於測量或確定的圖像(可以被分割成多個部分或區域)，來計算或恢復一組相幕。

【0065】 這裡，相幕尤其可以通過複數表達式 $e^{-j\phi}$ 來建模，其中 ϕ 是給定相幕的二維相位圖，而 j 是虛數。

【0066】 當例如波前(即電磁場 U)通過相幕時，所得的場或波前將具有 $U * e^{-j\phi}$ 的形狀或形式。

【0067】 從計算的觀點來看，可以用矩陣模擬相幕，其中不同的矩陣元素代表不同的相變值。如前所述，至少部分透明的物體或目標體積可接著建模為一組或一堆的相幕。

【0068】 通過將測量或確定的圖像分成多個部分或區域，所述多個部分或區域可以例如被理解為以特定角度捕捉至少部分透明的物體或目標體積的投影(或線積分)。

【0069】 因此，測量或確定的圖像的特定部分或區域，可以對應於在特定角度相幕的投影(或線積分)。

【0070】 換句話說，測量或確定的圖像可以分成多個部分或區域，這些部分或區域可以反映特定角度的相幕的假設分佈的投影或線積分。

【0071】 從這些投影到所測量或確定的圖像的多個部分或區域上，可以定義至少一個方程式系統，由此可以確定相幕的所述矩陣元素的未知值。

【0072】 例如並且為了簡單起見，相幕由具有代表不同相位變化值的元素 x_1 、 x_2 、 x_3 、 x_4 的以下示例性矩陣表示：

【0073】
$$\begin{pmatrix} x_1 & x_2 \\ x_3 & x_4 \end{pmatrix}$$

【0074】 該矩陣的以下兩個投影，例如 0° 和 90° ；

【0075】 $\begin{pmatrix} a \\ b \end{pmatrix}$ 和 (c, d) ； a 、 b 、 c 、 d 表示投影的相位變化值，且其中例

如由測量或確定的圖像的兩個不同部分或區域獲得的所述投影，可以製定以下方程式或方程式系統。

【0076】 對於 0 度的投影：

【0077】
$$x_1 + x_2 = a$$

【0078】
$$x_3 + x_4 = b$$

【0079】 對於 90 度的投影：

【0080】
$$x_1 + x_3 = c$$

【0081】
$$x_2 + x_4 = d$$

【0082】 因此，從這四個方程可以確定未知值 x_1 、 x_2 、 x_3 、 x_4 。這個例子可以擴展到更多的矩陣大小或尺寸。

【0083】 換句話說，通過恢復相幕來解決所述方程式系統，可以執行要被觀察的物體或目標體積的相位層析成像。

【0084】 還值得注意的是，一旦波前(即位於所述不同光學平面之間的波前)被恢復，所述恢復的波前可以根據瑞利-索末菲繞射(Rayleigh-Sommerfeld)的原理傳播。

【0085】 由此可以模擬未被擷取的光學平面中的光強度，光學系統只需拍攝兩個圖像即可作為光場相機和相位層析感測器。

【0086】 如上所述，該方法可以用電腦執行，即電腦系統可以包含至少一個處理器單元，該處理器單元被配置成執行如本文所述的用於波前的二維重建的方法。

【0087】 所述至少一個處理器單元可以是例如常見的中央處理器單元（CPU）或圖形處理器單元（GPU）。

【0088】 由於該方法涉及圖像(例如可以擷取、存儲和處理作為基於像素的圖像)，圖形處理器單元（GPU）可以特別適合於執行該方法。然而，最後但並非最不重要的是，由於這裡描述的方法比當前已知的技術計算更有效率，所以它也可以容易地在普通的中央處理器單元（CPU）上執行。

【0089】 例如這裡介紹的方法的計算時間可以是 ms 級或更小。具體而言，例如，對於 256×256 像素的示例性圖像尺寸，已經獲得具有 1.14 毫秒的 GPU 的計算時間，以及對於 140×140 的示例性圖像尺寸，具有 0.73 毫秒的 GPU 的計算時間。

【0090】 這裡描述的方法可以在電腦可讀指令中執行，可讀指令可以存儲在一個或多個電腦可讀存儲介質上或者在另一個電腦可讀數據文件中。

【0091】 圖像構成了本文所述的光學平面中波前的二維重建的基礎，並且圖像可選地還可以提供波前的三維分佈(即體積分佈)的層析成像，可以例如由圖像檢測器(如包含光學系統的感光耦合元件（CCD）的照相機和/或包含照相機的專用波前感測器)擷取，照相機例如一個普通的二維數位相機。

【0092】 換句話說，示例性的光學系統可以包含至少一個圖像檢測器和/或至少一個波前感測器，並且光學系統可以被配置為在波前重建和/或層析成像中，基於來自至少一個圖像檢測器的數據和/或基於來自至少一個波前感測器的數據，執行如本文所述的波前的三維分佈(即體積分佈)。

【0093】 特別地，可以設想的是，可能的波前感測器可以是曲率感測器，和/或其中包含光學採集系統(例如包含感光耦合元件（CCD）的照相機)的波前感測器，感光耦合元件（CCD）的照相機例如一個普通的二維數位相機。

【0094】 以下，使用示例性框架給出光學系統的光學平面中拍攝的圖像的光強度或光強度分佈的分佈函數(例如二維分佈函數)的測量或估計的示例。

【0095】 令 $f(x, y)$ 是代表光強度二維分佈的二維概率密度函數，例如在如通過感光耦合元件 (CCD) 擷取的 xy 平面中的圖像上的光強度的二維分佈，其中圖像具有例如 $N \times M$ 的解析度，其中 M 、 N 是大於 1 的整數，即其中圖像具有 $N \times M$ 像素的尺寸。

【0096】 令 V 是作用於 $f(x, y)$ 的轉換，且其中轉換 V 被定義為：

【0097】 $V(p, t)[f(x, y)] = CDF(f(x, t - px))$

【0098】 其中，CDF 表示 f 沿著斜率 p 和截距 t 的直線的累積分佈函數。

【0099】 通過以下角度 α 代替斜率 p ，即

【0100】 $p = \tan(\alpha)$

【0101】 該轉換 V 可以表示為：

【0102】 $V(\alpha, t)[f(x, y)] = CDF(f(x, t - x \tan(\alpha)))$

【0103】 另外，對於相同的 x 值，我們可以用 $D(x)[a, b]$ 表示距離度量或者距離函數 D 來表示兩條曲線 a 和 b 在 x 軸上的距離。這裡，兩條曲線 a 和 b 可以被理解為沿著如上定義的用於 V 轉換的圖像的線(即具有斜率或角度和截距的線)的累積分佈函數 CDF。

【0104】 函數 $D(x)[a, b]$ 可用於確定在不同光學平面上的兩個圖像之間的測量的光子到達位置、或光子射線位置、或測量的局部光線強度位置的空間位移，其中空間位移由波前像差引起並取決於波前像差。換句話說，通過將具有光程差的光學系統的兩個不同圖像中確定的光子射線位置、或測量的局部光強度進行比較，可以限制波前像差的出現，並且允許重建初始的波前形狀。

【0105】 此外，我們假設在示例性光學系統中，我們已經在具有光程差的不同光學平面上擷取了兩個圖像 I_1 、 I_2 ，即兩個不同的光強度分佈。

【0106】 為了簡單起見，我們進一步假定兩個圖像具有相同的解析度，並且例如具有 $M \times M$ 像素的尺寸。然而，這裡所描述的方法也適用於具有不同解

析度或不同尺寸的圖像。

【0107】 對於圖像 I_1 、 I_2 ，可以針對每個值 $t \in [-\tan(\alpha)M, M]$ 以及角度 α 的多個具體值來計算轉換 V 。

【0108】 另外，所有得到的曲線 $V(\alpha, t)$ 可以在 0 和 $M-1$ 之間標準化 (normalized)。

【0109】 因此，位於圖像 I_1 、 I_2 的不同光學平面之間的波前重建平面中的像素 (x, y) 的水平一階導數可以由下式給出：

$$\text{【0110】 } \delta_x(x, y) = \cos(\alpha) D(x) [V(\alpha, y)[I_1], V(\alpha, y)[I_2]]$$

【0111】 且位於圖像 I_1 、 I_2 的不同光學平面之間的波前重建平面中的像素 (x, y) 的垂直一階導數可以由下式給出：

$$\text{【0112】 } \delta_y(x, y) = \sin(\alpha) D(x) [V(\alpha, y)[I_1], V(\alpha, y)[I_2]]$$

【0113】 利用波前的斜率與光子的位移之間的幾何光學的線性關係，並利用所確定的一階導數與局部波前斜率(即在波前重建平面中的像素 (x, y) 處)的等價性，位於圖像 I_1 、 I_2 的不同光學平面之間的平面中重建的二維波前，可以通過沿著 x 和 y 對 $\delta_x(x, y)\delta_y(x, y)$ 進行積分來獲得。

【0114】 所述導出的波前斜率的積分通過估計 $\delta_x(x, y)\delta_y(x, y)$ 來重建位於所述不同光學平面之間的光學平面中的波前的二維形狀可以使用，例如快速傅立葉轉換 (fast Fourier transform, FFT) 演算法來執行，其例如包含以下步驟中的其中一者、部分或全部：

【0115】 進行傅里葉轉換 (δ_x, δ_y) 陣列到傅立葉 (u, v) 域

【0116】 將 δ_x 斜率的傅立葉轉換乘以 u ，並將 δ_y 斜率的傅立葉轉換乘以 v

【0117】 除了在原點處 (和/或在原點處放置零) 之外，將所獲得的陣列除以 $(u^2 + v^2)$

【0118】 計算傅立葉逆轉換以獲得重建波前的估計值

【0119】 但是，也可以應用其他集成方案。

【0120】 下圖舉例說明：

【0121】 圖 1 示出簡化的光學系統 100 的例子，其示出了簡化的一維情況下示例性光子 106a、106b、107a、107b、108a、108b 的位移與波前 104 的斜率(即局部斜率)之間的關係，其中所有的波前和強度變化僅在一個方向上發生，並且對於具有三個探測到的光子的示例性情況，例如，在具有光程差(如沿 z 軸有一個光程差)的每個光學平面 101、102 中擷取圖像。

【0122】 示例性光子 106a、106b、107a、107b、108a、108b 在它們各自的光學平面 101、102 中的分佈由此可以被解釋為表示光強度分佈，並且光學平面 101、102 可以被解釋為具有光程差的不同圖像。

【0123】 附圖標記 109 表示光學系統的示例性方向，其中 z 軸與光學系統 100 的光軸（未示出）相同或平行。

【0124】 假定光子 106a、106b、107a、107b、108a、108b 以圖像平面或光學平面 102 和 101 之間的直線 105a、105b、105c 行進，並且假設光子的傳播方向垂直於它們相應的局部波前，則光子沿 x 軸的位移由（局部）波前斜率乘以兩個光學平面 101、102 之間的距離給出。

【0125】 因此波前 104 的局部波前斜率 104a、104b、104c，通過分別將一個光學平面 101 的光子 106b、107b、108b 匹配到另一個光學平面 102 的光子 106a、107a、108a 上，可在光子位置之間的光學平面 103 處或在光學平面 102、101 之間的中途被估計或重建。

【0126】 其中測量光子分佈（即光強度分佈）的光學平面 102、101 可以位於沿光學系統 100 的光路的任何地方。因此，波前將被重建的光學平面 103 也可以位於沿著光學系統 100 的光路的任何地方。換句話說，將被重建的波前的光學平面 103 不需要與光學系統 100 的任何特定的光學平面(例如孔徑平面或光瞳平面)重合。

【0127】 如前所述，可以想到，在具有光程差的不同光學平面上拍攝的圖像，即光強度的分佈函數被測量的圖像，可以位於光學系統 100 的孔徑或光

瞳平面之前或之後，使得波前重建的光學平面 103 也可位於光學系統 100 的孔徑或光瞳平面之前或之後。

【0128】 因此，有可能在不同的光學平面上拍攝具有光程差的圖像，即其中光強度的分佈函數被測量的圖像可以位於相對於可能的光圈面或光瞳平面的不同距離處。

【0129】 上面描述的根據本發明的方法，現在也允許在更複雜的情況下恢復波前的形狀，其中波前和強度變化發生在二維和不同方向上。

【0130】 圖 2 示例性示出了測量射線位置偏移 202 的誤差 203 的誤差曲線 201 的曲線圖 200，即測量光線位置或空間位移的空間位移或偏移的誤差 203、或測量局部光強度位置的空間位移或偏移 202。

【0131】 如上所述，可以假定波前的斜率與垂直於波前傳播的光子或光子射線的空間位移之間的關係可以遵循線性關係。

【0132】 光線位置或局部光強位置的位移可以測量越好，初始的波前形狀或波前相位可以恢復越好。

【0133】 可以實現的波前解析度的估計可以由下式給出：

【0134】
$$\text{波前解析度} = \frac{p^2}{4d} [m]$$

【0135】 其中 d 表示在其上執行在此呈現的方法的兩個圖像之間的距離，即光程差，以 m 為單位， p 是物體空間中的像素尺寸。

【0136】 從上面的示例性估計可以進一步看出，可實現的波前解析度可以隨著光程差的增加而增加，這是因為較長的距離可以放大給定的光子射線角度(例如光子射線相對於光軸的傳播角度)的偏移或位移。

【0137】 在所示出的示例性情況下，小於 0.5 像素的位移或偏移的誤差相當小，例如小於 10%，這意味著，例如幾公分(cm)的光程差，可以獲得小至皮米(picometer)級的波前解析度。

【0138】 為了完整性，我們注意到，可以通過 $\tan^{-1}(p/d)$ 來估計最小可測

量角度或波前斜率或波前相位斜率，其中 d 表示在其上執行在此呈現的方法的兩個圖像之間的距離，即光程差， p 是圖像平面或圖像感測器的像素大小。

【0139】 圖 3 示出了具有光軸 315 的簡化的光學系統 300 的示例，示出了基於在具有光程差的不同光學平面或測量平面 316、317 處，對測量或確定的圖像 301、302 進行分割或劃分的用於波前相位層析成像的光學系統 300 的可能的示例性配置。

【0140】 此外，示例性的光學系統 300 包含選用的光學元件 304，例如能夠將從待觀察的示例性物體 307、308 傳播的光線或光線束 309、310 聚焦到示例性焦平面 303 上的透鏡。所述示例性物體 307、308 可以是位於距光軸 315 的不同距離處的兩個不同的物體（如圖所示），或者它們可以是單個物體的不同部分。

【0141】 如示例性所示，光線或光線束 309、310 可以在每個平面 309、310 上的不同分離位置處，即在測量或確定的圖像 301、303 的不同位置處，射中示例性光學平面 316、317。

【0142】 如上所述，測量或確定的圖像 301、303 可被分割或劃分或分隔成不同的部分或區域，其中區域或部分可以重疊或可以分開。例如圖像 301 可以被分割成兩個區域 311、314，並且圖像 303 可以被分割成兩個區域 312、313。

【0143】 其他分割方案也是可以想像的。這裡顯示的簡單分割只是說明性的。如示例所示，物體 307 的光線在光學平面 316 的區域 311 處射中圖像 301，並在光學平面 317 的區域 312 處射中圖像 302，而物體 308 的光線在光學平面 316 的區域 314 處射中圖像 302，並在光學平面 317 的區域 313 處射中圖像 302。

【0144】 在圖像 301、302 的整個尺寸或圖像感測器(例如感光耦合元件 (CCD))的整個尺寸上，無法應用這裡描述的用於波前或波前相位二維重建的方法，重建波前或波前相位的方法只能應用於其中每個圖像 301、302 或測量平面 316、317 或圖像感測器（未示出）被分成部分或區域上。

【0145】 換句話說，波前相位不是在整個圖像 301、302 上被恢復，而是

每個圖像 301、302 的每個部分或區域 311、314、312、313 的波前相位被恢復。

【0146】 更確切地說，位於相應圖像 301、302（即光學平面 316、317 之間）的部分或區域 311、314、312、313 之間的平面中的部分的波前形狀或波前相位可以被恢復。

【0147】 假設，例如至少部分透明的物體或目標介質體積 318，所述至少部分透明的物體或目標介質體積 318 可以被建模為一組不同的離散相幕 305、306，其中如上所述的相幕可以通過矩陣建模，其中不同的矩陣元素表示不同相位變化值，用於藉由不同地區的物體或目標介質體積，通過所述至少部分透明的物體或目標介質體積 318 的波前傳播的相位變化。

【0148】 通過將測量或確定的圖像 301、302 分成多個部分或區域 311、314、312、313，所述多個部分或區域可以例如被理解為擷取至少部分透明的物體或目標介質體積 318 的在特定角度的投影（或線積分）。

【0149】 因此，測量或確定的圖像 301、302 的特定部分或區域 311、314、312、313 可對應於特定角度的相幕 305、306 的投影（或線積分）。

【0150】 然後，如上所述，將測量或確定的圖像 301、302 劃分成多個部分或區域 311、314、312、313 可形成定義方程式系統的基礎，從中可以計算或恢復多個相幕 305、306。

【0151】 計算或恢復的相幕 305、306 的集合，然後可以尤其允許執行例如至少部分透明的物體或要觀察的目標介質體積 318 的波前相位層析成像，其用於在不同視角和/或不同深度下的物體的不同部分或不同的物體。

【0152】 以下是包含圖 1、圖 2 和圖 3 的三張表格，並且其中附圖標記標識以下部件：

【0153】 100：示例性光學系統

【0154】 101：在具有（第一）光強度分佈的（第一）光路位置處的示例性（第一）像平面或（第一）光學平面

【0155】 102：在具有（第二）光強度分佈的（第二）光路位置處的示例

性（第二）圖像平面或（第二）光學平面

【0156】 103：在所述第一和第二光學平面之間的示例性光學平面，其中波前將被重建，例如光學系統的光圈平面

【0157】 104：示例性的波前被重建

【0158】 104a：示例性局部波前段具有（第一）局部斜率

【0159】 104b：示例性局部波前段具有（第二）局部斜率

【0160】 104c：示例性局部波前段具有（第三）局部斜率

【0161】 105a：示例性光子傳播軌跡/光子傳播方向/局部波前傳播指南

【0162】 105b：示例性光子傳播軌跡/光子傳播方向/局部波前傳播指南

【0163】 105c：示例性光子傳播軌跡/光子傳播方向/局部波前傳播指南

【0164】 106a：示例性光子表示光學平面 102 中的局部光強度

【0165】 106b：示例性光子表示光學平面 101 中的局部光強度

【0166】 107a：示例性光子表示光學平面 102 中的局部光強度

【0167】 107b：示例性光子表示光學平面 101 中的局部光強度

【0168】 108a：示例性光子表示光學平面 102 中的局部光強度

【0169】 108b：示例性 光子表示光學平面 101 中的局部光強度

【0170】 109：示例性光學系統的方向，z 軸是相同的或平行於光學系統的光軸（未示出）

【0171】 200：示例性 射線偏移測量的誤差圖

【0172】 201：示例性誤差曲線

【0173】 202：示例性橫座標軸，例如 y 軸，例如 像素中的光線偏移

【0174】 203：示例性座標軸，例如 x 軸，例如 標準化尺度從 0 到 1 的射線偏移測量的誤差

【0175】 300：示例性 光學系統

【0176】 301：示例性（第一）光路位置處的（第一）圖像

- 【0177】 302：示例性（第二）光路位置處的（第二）圖像
- 【0178】 303：示例性可能的焦平面
- 【0179】 304：示例性光學系統的光學元件，例如透鏡
- 【0180】 305：示例性（第一）相幕
- 【0181】 306：示例性（第二）相幕
- 【0182】 307：示例性（第一）要觀察的物體
- 【0183】 308：示例性（第二）要觀察的物體
- 【0184】 309：示例性（第一）物體發出的光線（光線束）
- 【0185】 310：示例性（第二）物體發出的光線（光線束）
- 【0186】 311：示例性（第一）圖像 301 的（第一）部分或區域
- 【0187】 312：示例性（第二）圖像 302 的（第一）部分或區域
- 【0188】 313：示例性（第二）圖像 302 的（第二）部分或區域
- 【0189】 314：示例性（第一）圖像 301 的（第二）部分或區域
- 【0190】 315：示例性光軸
- 【0191】 316：示例性（第一）光學平面或（第一）測量平面
- 【0192】 317：示例性（第二）光學平面或（第二）測量平面
- 【0193】 318：示例性至少部分透明的目標（介質）量

【符號說明】

【0194】

100光學系統

101、102、103光學平面

104波前

104a、104b、104c波前斜率

105a、105b、105c直線

106a、106b、107a、107b、108a、108b光子

109方向

200曲線圖

201誤差曲線

202偏移

203誤差

300光學系統

301、302、303圖像

焦平面303

304光學元件

305、306相幕

307物體

308物體

309、310光線或光線束

311、314、312、313部分或區域

315光軸

316、317光學平面或測量平面

318目標介質體積

【發明申請專利範圍】

【第 1 項】一種用於一光學系統中的光波前的二維重建方法，包含：

在具有一光程差的多個不同光學平面上的至少二圖像中測量一光強度的一分佈函數，包含：

確定各該不同光學平面內該光強度的多個一維累積分佈函數；

匹配確定的該些不同光學平面的該些一維累積分佈函數以得到一光學平面中的多個二維波前斜率估計，該光學平面位於所述不同光學平面之間的一中間平面，其中根據位於不同光學平面內的該些一維累積分佈函數其中二者在正交於該光學系統的光軸之方向上的距離得到該些二維波前斜率估計其中一者；以及

將該些二維波前斜率估計積分，以重建位於該些不同光學平面之間的該光學平面中的一波前的一二維形狀；

其中，該些不同光學平面沿該光學系統的光軸排列，且該至少二圖像之間的距離定義出該光程差。

【第 2 項】如請求項 1 所述之方法，其中該至少二圖像中的其中一者是通過理論模型和/或經驗模型充分表徵的被計算圖像。

【第 3 項】如請求項 1 所述之方法，其中該至少二圖像中的其中一者被拍攝在該光學系統的一光瞳平面中。

【第 4 項】如請求項 1 所述之方法，其中一該圖像位於焦點內和另一該圖像位於焦點外。

【第 5 項】如請求項 1 所述之方法，其中在該些不同的光學平面上拍攝多個圖像以在該些不同的光學平面上重建多個二維波前形狀。

【第 6 項】如請求項 1 其中任一項所述之方法，其中該些圖像被分成多個部分，且其中各該部分重建該波前的該二維形狀。

【第 7 項】如請求項 1 其中任一項所述之方法，其中恢復的該波前根據瑞利-索末菲(Rayleigh-Sommerfeld)繞射進行傳播。

【第 8 項】一種包含至少一處理器單元的電腦系統，該處理器單元用以執行根據如請求項 1-7 中任一項所述的用於光波前的二維重建方法。

【第 9 項】如請求項 8 所述之電腦系統，其中該至少一該處理器單元是圖形處理器單元(graphical processing unit，GPU)。

【第 10 項】如請求項 8 所述之電腦系統，包含一或多個其中存儲有多個指令的電腦可讀存儲介質，該些指令在由一個或多個處理器執行時指導該至少一處理器執行根據請求項 1 所述的方法。

【第 11 項】一種光學系統，包含至少一圖像檢測器，其中該光學系統用以基於來自至少一該圖像檢測器且包含該些不同光學平面上拍攝之圖像的一數據執行根據前述請求項 1 中所述的用於光波前的二維重建方法和/或以

執行基於來自至少一圖像檢測器的該數據的多個波前的一三維分佈的一層析成像。

【第 12 項】如請求項 11 所述之光學系統，更包含至少一波前感測器，其中該光學系統更用以基於來自至少一該波前感測器且包含波前曲率的一數據在一波前重建處執行根據前述請求項 1 的方法和/或用以基於來自至少一該波前感測器的該數據，執行多個波前的一三維分佈的一層析成像。

【第 13 項】如請求項 12 所述之光學系統，其中該波前感測器是一曲率感測器和/或其中該波前感測器包含一光學採集系統。

【發明圖式】

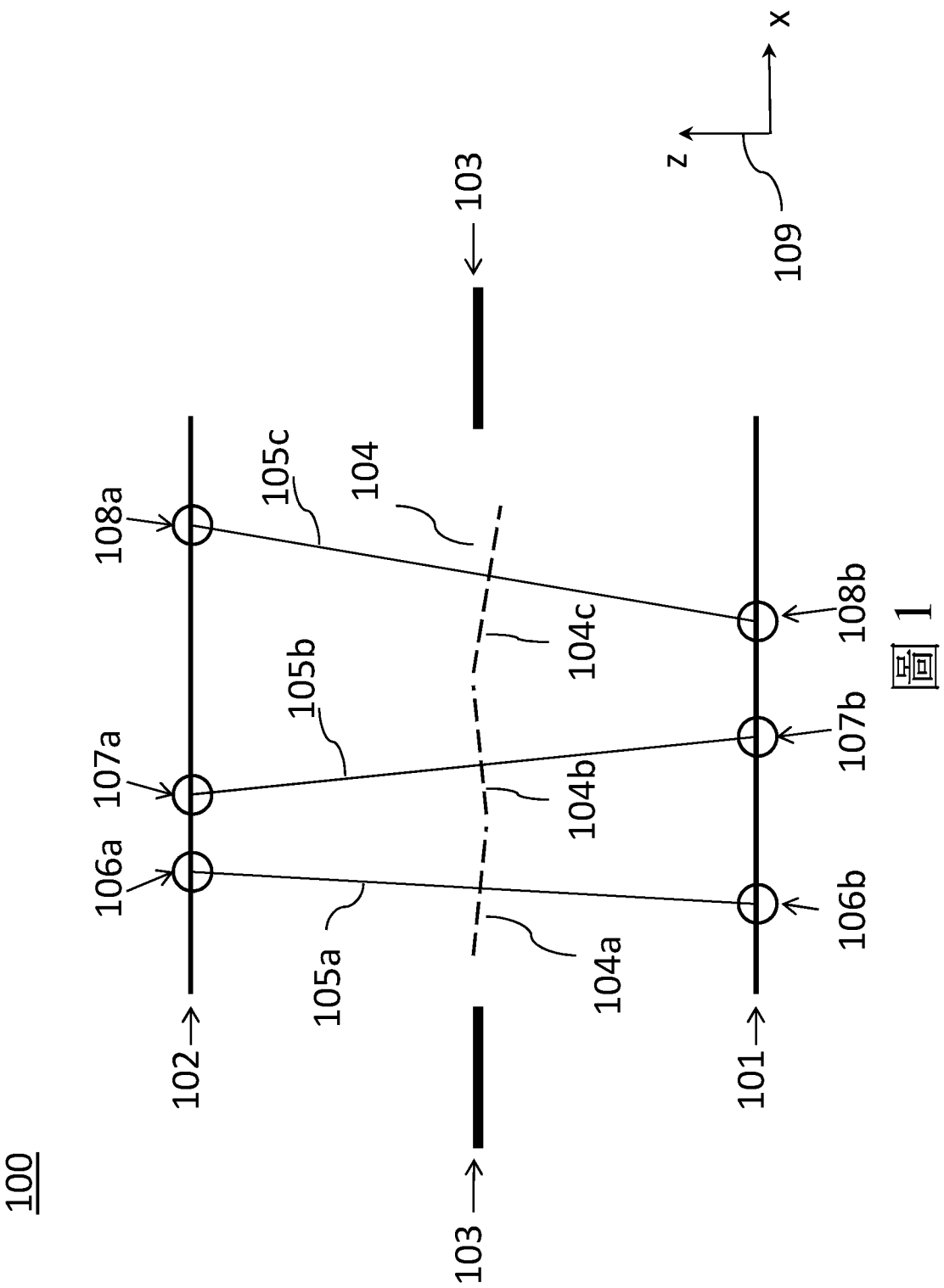
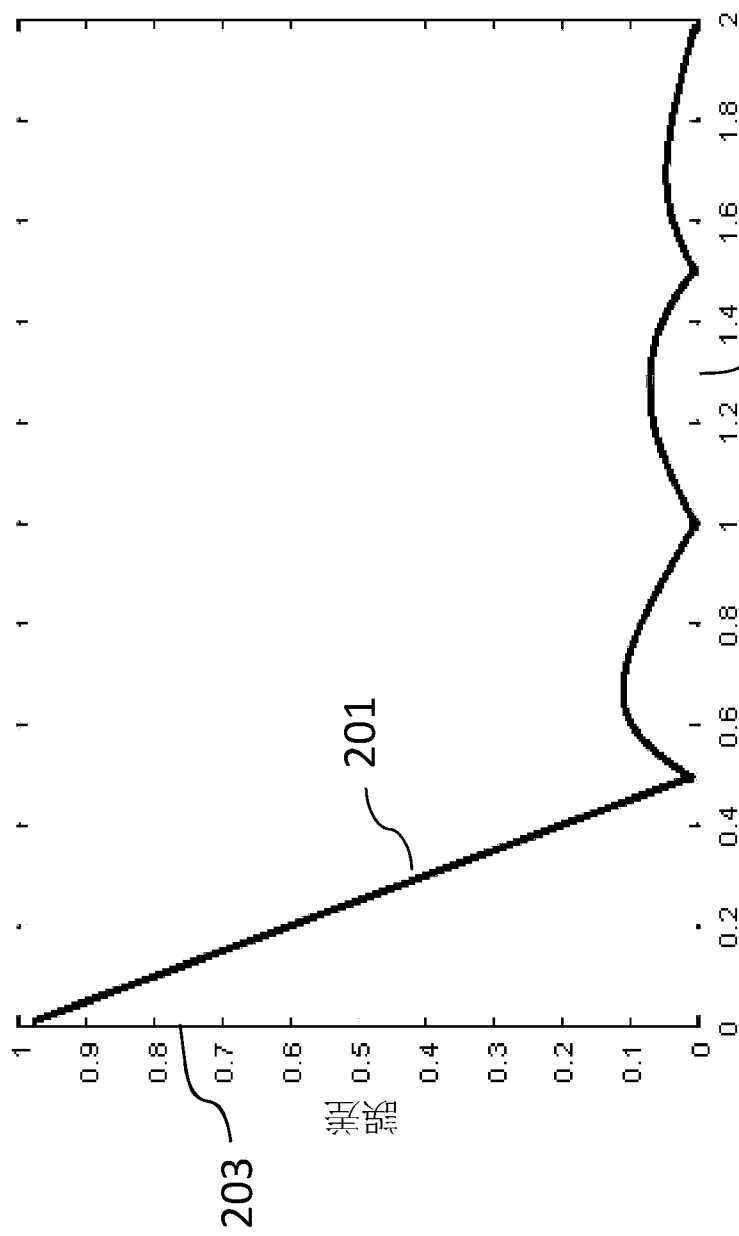


圖 1

100

200



在像素中的偏移
圖 2

300

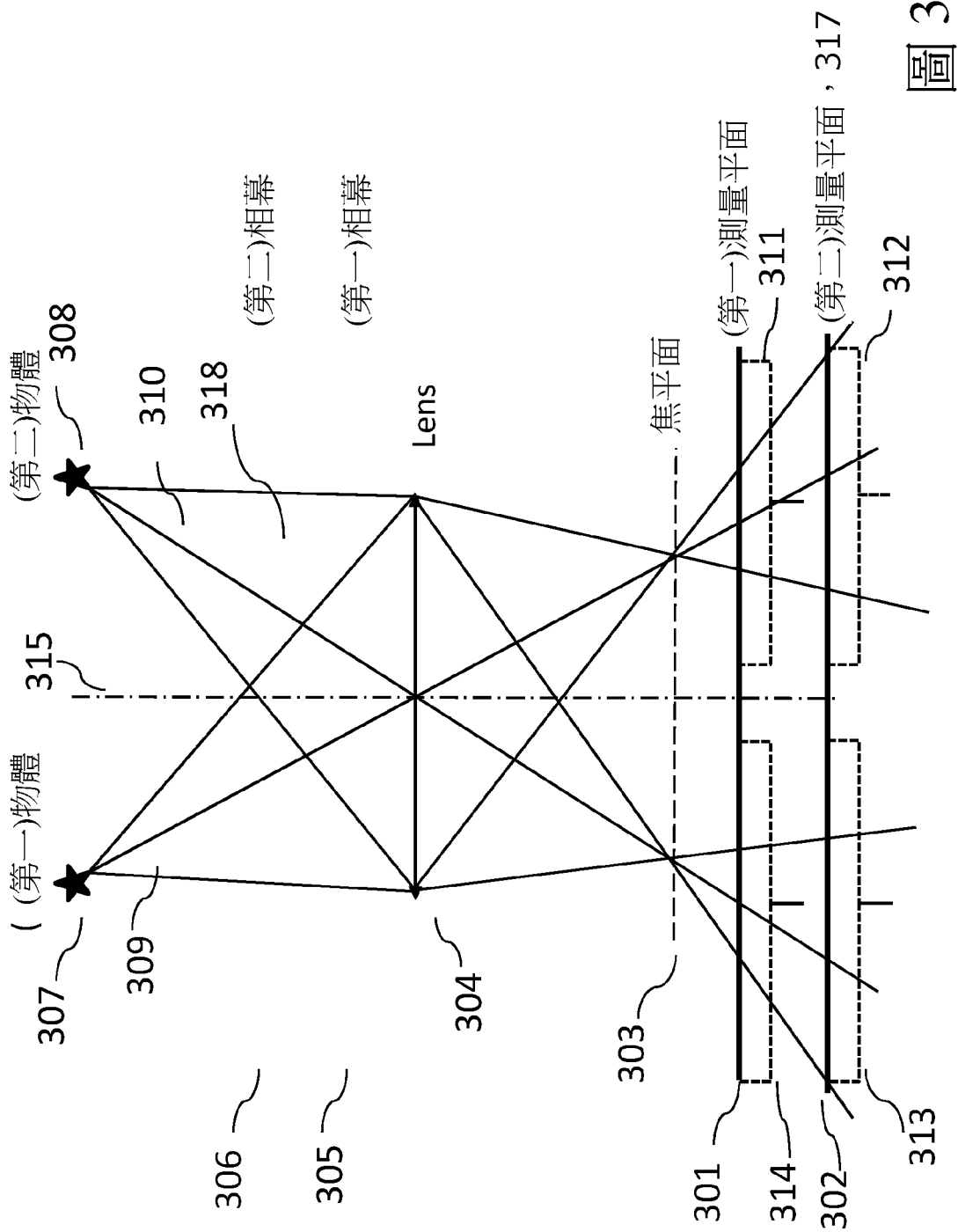


圖 3