



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 101762243 A

(43) 申请公布日 2010.06.30

(21) 申请号 201010033601.4

(22) 申请日 2010.01.04

(71) 申请人 北京航空航天大学

地址 100191 北京市海淀区学院路 37 号

(72) 发明人 周富强 李颖 蔡斐华

(51) Int. Cl.

G01B 11/24(2006.01)

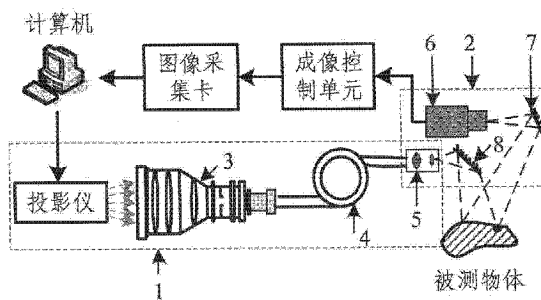
权利要求书 2 页 说明书 6 页 附图 2 页

(54) 发明名称

一种受限空间三维形貌结构光视觉测量方法

(57) 摘要

本发明属于测量技术领域,将提供一种受限空间三维形貌结构光视觉测量方法,使用小型结构光视觉测量系统进入受限空间进行三维形貌测量。本发明的小型结构光视觉测量系统由结构光投射器 1、结构光传感器 2、成像控制单元、图像采集卡和计算机组成。其中结构光投射器 1 由投影仪、远心成像镜头 3、光纤传像束 4 和投影镜头 5 组成;结构光传感器 2 由结构光投射器 1 的投影镜头 5 和内窥摄像机 6、平面反射镜 7 和平面反射镜 8 组成。本发明测量方法由计算机产生正弦结构光图案通过投影仪、远心成像镜头 3、光纤传像束 4 以及投影镜头 5 投射到被测物体表面,内窥摄像机 6 拍摄被调制的结构光条纹图像,根据测量模型,计算出被测物体表面的三维信息。本发明实现了结构光传感器的小型化,为实现受限空间三维形貌的离线、在线测量提供了一种有效技术手段。



1. 一种双面靶标,其特征在于,双面靶标为一平板,平板的两个平面 A 和 B 平行,A 面设置有矩阵排列的黑白棋盘方块,方块的数量为 4 ~ 25 个,方块的边长 1 ~ 5mm,精度为 0.01 ~ 0.05mm ;B 面是同样材质同样大小的白板 ;双面靶标的厚度为 2 ~ 10mm。

2. 一种受限空间三维形貌结构光视觉测量方法,使用小型结构光视觉测量系统进入受限空间进行三维形貌测量,所说的小型结构光视觉测量系统由结构光投射器 (1)、结构光传感器 (2)、成像控制单元、图像采集卡和计算机组成 ;结构光投射器 (1) 由投影仪、远心成像镜头 (3)、光纤传像束 (4) 和投影镜头 (5) 组成 ;结构光传感器 (2) 由结构光投射器 (1) 的投影镜头 (5) 和内窥摄像机 (6)、平面反射镜 (7) 和平面反射镜 (8) 组成 ;图像卡安装在计算内 ;成像控制单元为内窥摄像机 (6) 的驱动电路 ;由计算机编程生成的结构光图案通过数据传输线连接到投影仪进行投射 ;投影仪通过远心成像镜头 (3) 与光纤传像束 (4) 耦合,远心成像镜头 (3) 将从投影仪出射的结构光图案成像在光纤传像束 (4) 的入射端面上 ;光纤传像束 (4) 出射端的投影镜头 (5) 将结构光图案经过平面镜反射镜 (8) 投射在被测物体表面 ;内窥摄像机 (6) 通过平面反射镜 (7) 拍摄经被测物体调制的结构光条纹图像,由图像采集卡采集图像到计算机中,对采集图像进行处理,根据测量模型,计算得到物体表面的三维信息 ;其特征在于,测量过程分为标定阶段和测量阶段,进行一次标定后可连续测量,具体步骤是 :

2.1、标定阶段 :

2.1.1、将结构光传感器固定在多自由度云台上,屏蔽结构光投射器的投射图案 ;将如权利要求 1 所述的双面靶标放置于距离结构光传感器 20 ~ 100mm 的测量平台上,双面靶标的 A 面朝上,由内窥摄像机拍摄双面靶标的图像,称为摄像机标定图像 ;

2.1.2、在测量平台上翻转如权利要求 1 所述的双面靶标,保证双面靶标的 B 面朝上 ;由结构光投射器投射黑白棋盘方块图案到双面靶标的 B 面上,黑白棋盘方块的数量为 4 ~ 160,方块的边长 50 ~ 300pixels,精度为 0.5pixel ;投影图案在投影仪像平面上的像素位置已知 ;由内窥摄像机拍摄双面靶标的图像,称为结构光投射器标定图像 ;

2.1.3、通过旋转和平移云台,改变结构光传感器的姿态和位置,重复步骤 2.1.1 和 2.1.2,分别拍摄 6 ~ 8 组摄像机标定图像和结构光投射器标定图像 ;

2.1.4、利用步骤 2.1.1 ~ 2.1.3 拍摄的摄像机标定图像标定摄像机参数 ;利用步骤 2.1.1 ~ 2.1.3 拍摄的结构光投射器标定图像标定结构光投射器参数 ;

2.2、测量阶段 :

2.2.1、利用结构光投射器依次投射一个周期的 4 幅纵向正弦结构光条纹图案到被测物体表面,相邻图像在投影仪像平面上对应像素的相位差值均为  $\pi/4$  ;由内窥摄像机依次拍摄被测物体的图像,称为一组纵向正弦结构光条纹图像 ;通过四步相移法计算初始纵向包裹相位图 ;

2.2.2、将纵向正弦结构光条纹图案的周期数增加 1,重复步骤 2.2.1 共 N-1 次,获得周期数为 1 ~ N 连续递增的 N 组纵向正弦结构光条纹图像,并分别求解得到 N 幅纵向包裹相位图,N 取值为 2 ~ 10 之间的整数 ;

2.2.3、利用时间相位展开法对被截断在  $[-\pi, \pi]$  的范围内的纵向包裹相位图进行展开,得到一幅纵向的展开相位图,范围为  $[-(N-1)\pi, (N-1)\pi]$  ;通过相位与投影仪像素坐标的线性对应关系,获得摄像机像平面上同名点在投影仪像平面上的横坐标,所说同名点

是指同一空间点在摄像机像平面上和投影仪像平面上相对应的像素点；

2.2.4、将结构光投射器的投射模式改为横向正线结构光，重复步骤 2.2.1 ~ 2.2.3，获得摄像机像平面上同名点在投影仪像平面上的纵坐标；

2.2.5、由步骤 2.1 标定得到的小型结构光视觉测量系统模型参数，利用摄像机像平面上的像素点和对应的投影仪像平面上的像素点计算得到空间点在世界坐标系下的三维坐标。

3. 如权利要求 2 所述的应用于受限空间的小型结构光传感器，其特征在于，结构光传感器 (2) 是集成了结构光投射器的投影镜头 (5) 和内窥摄像机 (6)；结构光投射和被测图像拍摄都采用镜像方式，由平面反射镜 (7) 获得的虚拟摄像机、平面反射镜 (8) 获得的虚拟投射镜头与被测物体组成三角位置关系。

## 一种受限空间三维形貌结构光视觉测量方法

### 技术领域

[0001] 本发明属于三维测量领域,涉及一种受限空间三维形貌结构光视觉测量方法。

### 背景技术

[0002] 三维物体表面形貌的测量,在机械制造领域又称为逆工程,在现代加工制造及实际作业生产中起着越来越重要的作用。随着三维物体表面形状的非接触检测技术在科研、医学诊断、工程设计、刑事侦查现场痕迹分析、自动在线检测、质量控制、机器人及许多生产过程中越来越广泛的应用,人们对三维形貌测量的要求也越来越高,其应用领域也在不断扩大。

[0003] 在物体表面三维测量中,小尺寸和大尺寸的测量是当前研究的重点和热点,随着现代加工制造和生产作业的发展需要,小尺寸在线测量已逐渐受到国内外研究者的高度重视,如牙齿取模、发动机的微小零部件表面、集成 IC 芯片的综合几何参数、高速运转微型飞轮表面测量以及工作状态的小型机械零部件磨损测量等。这些构件一般尺寸较小,且有些零部件具有不可拆卸性。现代加工制造业需要将产品质量控制在生产加工阶段,目标是实现零废品制造,为此要求能够在生产加工过程中实现零部件的表面三维形貌在线测量。对于生产作业过程中的零部件,为了最大程度延长其使用寿命,需要及时了解零部件的表面磨损和动态变形,也要求能够实现零部件三维形貌的在线测量。范光照等人(范光照,李瑞君,一种基于光纤传像束的新型三维形貌测量装置,专利号 200520070076.8)研制出一种新型三维形貌测量装置,实现了远距离测量,但上述测量装置的探测头只能沿轴向展开,不能对垂直轴向的内表面进行测量,不能完全满足受限空间三维形貌测量要求。因此,研究小型物体表面三维在线测量,甚至能够深入测量现场的受限空间内,嵌入集成到加工制造系统中具有小型投射机构的三维测量设备已经成为现代加工制造业和生产作业的迫切要求。

### 发明内容

[0004] 本发明所要解决的技术问题是:提出一种受限空间三维形貌结构光视觉测量方法,研制一种能进入受限空间的结构光传感器,为受限空间三维形貌的在线测量提供一种有效技术手段。

[0005] 本发明的技术解决方案是:

[0006] 1、一种双面靶标,其特征在于,双面靶标为一平板,平板的两个平面 A 和 B 平行, A 面设置有矩阵排列的黑白棋盘方块,方块的数量为 4 ~ 25 个,方块的边长 1 ~ 5mm,精度为 0.01 ~ 0.05mm ;B 面是同样材质同样大小的白板 ;双面靶标的厚度为 2 ~ 10mm。

[0007] 2、一种受限空间三维形貌结构光视觉测量方法,使用小型结构光视觉测量系统进入受限空间进行三维形貌测量,所说的小型结构光视觉测量系统由结构光投射器 1、结构光传感器 2、成像控制单元、图像采集卡和计算机组成 ;结构光投射器 1 由投影仪、远心成像镜头 3、光纤传像束 4 和投影镜头 5 组成 ;结构光传感器 2 由结构光投射器 1 的投影镜头 5 和内窥摄像机 6、平面反射镜 7 和平面反射镜 8 组成 ;图像卡安装在计算内 ;成像控制单元为

内窥摄像机 6 的驱动电路；由计算机编程生成的结构光图案通过数据传输线连接到投影仪进行投射；投影仪通过远心成像镜头 3 与光纤传像束 4 耦合，远心成像镜头 3 将从投影仪出射的结构光图案成像在光纤传像束 4 的入射端面上；光纤传像束 4 出射端的投影镜头 5 将结构光图案经过平面镜反射镜 8 投射在被测物体表面；内窥摄像机 6 通过平面反射镜 7 拍摄经被测物体调制的结构光条纹图像，由图像采集卡采集图像到计算机中，对采集图像进行处理，根据测量模型，计算得到物体表面的三维信息；其特征在于，测量过程分为标定阶段和测量阶段，进行一次标定后可连续测量，具体步骤是：

[0008] 2.1、标定阶段：

[0009] 2.1.1、将结构光传感器固定在多自由度云台上，屏蔽结构光投射器的投射图案；将步骤 1 所述的双面靶标放置于距离结构光传感器 20 ~ 100mm 的测量平台上，双面靶标的 A 面朝上，由内窥摄像机拍摄双面靶标的图像，称为摄像机标定图像；

[0010] 2.1.2、在测量平台上翻转步骤 1 所述的双面靶标，保证双面靶标的 B 面朝上；由结构光投射器投射黑白棋盘方块图案到双面靶标的 B 面上，黑白棋盘方块的数量为 4 ~ 160，方块的边长 50 ~ 300pixels，精度为 0.5pixel；投影图案在投影仪像平面上的像素位置已知；由内窥摄像机拍摄双面靶标的图像，称为结构光投射器标定图像；

[0011] 2.1.3、通过旋转和平移云台，改变结构光传感器的姿态和位置，重复步骤 2.1.1 和 2.1.2，分别拍摄 6 ~ 8 组摄像机标定图像和结构光投射器标定图像；

[0012] 2.1.4、利用步骤 2.1.1 ~ 2.1.3 拍摄的摄像机标定图像标定摄像机参数；利用步骤 2.1.1 ~ 2.1.3 拍摄的结构光投射器标定图像标定结构光投射器参数；

[0013] 2.2、测量阶段：

[0014] 2.2.1、利用结构光投射器依次投射一个周期的 4 幅纵向正弦结构光条纹图案到被测物体表面，相邻图像在投影仪像平面上对应像素的相位差值均为  $\pi/4$ ；由内窥摄像机依次拍摄被测物体的图像，称为一组纵向正弦结构光条纹图像；通过四步相移法计算初始纵向包裹相位图；

[0015] 2.2.2、将纵向正弦结构光条纹图案的周期数增加 1，重复步骤 2.2.1 共 N-1 次，获得周期数 1 ~ N 连续递增的 N 组纵向正弦结构光条纹图像，并分别求解得到 N 幅纵向包裹相位图，N 取值为 2 ~ 10 之间的整数；

[0016] 2.2.3、利用时间相位展开法对被截断在  $[-\pi, \pi]$  的范围内的纵向包裹相位图进行展开，得到一幅纵向的展开相位图，范围为  $[-(N-1)\pi, (N-1)\pi]$ ；通过相位与投影仪像素坐标的线性对应关系，获得摄像机像平面上同名点在投影仪像平面上的横坐标，所说同名点是指同一空间点在摄像机像平面上和投影仪像平面上相对应的像素点；

[0017] 2.2.4、将结构光投射器的投射模式改为横向正线结构光，重复步骤 2.2.1 ~ 2.2.3，获得摄像机像平面上同名点在投影仪像平面上的纵坐标；

[0018] 2.2.5、由步骤 2.1 标定得到的小型结构光视觉测量系统模型参数，利用摄像机像平面上的像素点和对应的投影仪像平面上的像素点计算得到空间点在世界坐标系下的三维坐标。

[0019] 3、如步骤 2 所述的应用于受限空间的小型结构光传感器，其特征在于，结构光传感器 2 是集成了结构光投射器的投影镜头 5 和内窥摄像机 6；结构光投射和被测图像拍摄都采用镜像方式，由平面反射镜 7 获得的虚拟摄像机、平面反射镜 8 获得的虚拟投射镜头与

被测物体组成三角位置关系。

[0020] 本发明的优点是：

[0021] 第一、结构光传感器中引入了平面反射镜转向结构，缩短了结构光投射器与摄像机之间的横向距离，实现了探测头的小型化；

[0022] 第二、结构光传感器采用平面镜改变了原始三角形测量光路，使得传感器可以测量平行于摄像机光轴的物体，即可以深入受限空间进行测量作业；

[0023] 第三、采用时间相位展开法展开包裹相位，相比于传统方法提高了测量的鲁棒性以及抗噪声能力；

[0024] 第四、建立了结构光投射器模型与摄像机模型，使得基于解相方式的结构光测量由传统的计算一维高度信息提升到恢复三维数据点云，为多视角三维数据拼接奠定了基础；

[0025] 第五、标定过程中所用双面靶标，只需要翻转一次即可实现对投影仪的标定，成本低，简单实用，适合现场标定；

[0026] 第六、测量系统结构简单，结构光传感器柔性好，且具有较高精度，适合受限空间的现场测量。

#### 附图说明

[0027] 图 1 是小型结构光视觉测量系统示意图。图 1 中，1 是结构光投射器，2 是结构光传感器，3 是远心成像镜头，4 是光纤传像束，5 是投影镜头，6 是内窥摄像机，7 是平面反射镜，8 是平面反射镜。

[0028] 图 2 是双面靶标示意图。

[0029] 图 3 是结构光视觉传感器测量模型示意图。

#### 具体实施方式

[0030] 下面对本发明做进一步详细说明。本发明提出一种受限空间三维形貌结构光视觉测量方法，使用小型结构光视觉测量系统进入受限空间进行三维形貌测量，所说的小型结构光视觉测量系统的原理示意图如图 1 所示，测量系统由结构光投射器 1、结构光传感器 2、成像控制单元、图像采集卡和计算机组成；结构光投射器 1 由投影仪、远心成像镜头 3、光纤传像束 4 和投影镜头 5 组成；结构光传感器 2 由结构光投射器 1 的投影镜头 5 和内窥摄像机 6、平面反射镜 7 和平面反射镜 8 组成；图像卡安装在计算内；成像控制单元为内窥摄像机 6 的驱动电路；由计算机编程生成的结构光图案通过数据传输线连接到投影仪进行投射；投影仪通过远心成像镜头 3 与光纤传像束 4 耦合，远心成像镜头 3 将从投影仪出射的结构光图案成像在光纤传像束 4 的入射端面上；光纤传像束 4 出射端的投影镜头 5 将结构光图案经过平面镜反射镜 8 投射在被测物体表面；内窥摄像机 6 通过平面反射镜 7 拍摄经被测物体调制的结构光条纹图像，由图像采集卡采集图像到计算机中，对采集图像进行处理，根据测量模型，计算得到物体表面的三维信息。

[0031] 如图 1 所示，本发明所述的结构光传感器 2 是集成了结构光投射器 1 的投影镜头 5 和内窥摄像机 6，利用平面镜向结构缩短了投影镜头和摄像机的横向距离；结构光投射和被测图像拍摄都采用镜像方式，由平面反射镜 7 获得的虚拟摄像机、平面反射镜 8 获得的虚

拟投射镜头与被测物体组成三角位置关系,投射结构光通过一次反射投射到物体表面,并通过另一平面镜反射被摄像机接收。

[0032] 所说的靶标为一种双面靶标,如图 2 所示,其特征在于,双面靶标为一平板,平板的两个平面 A 和 B 平行,A 面设置有矩阵排列的黑白棋盘方块,方块的数量为 4 ~ 25 个,方块的边长 1 ~ 5mm,精度为 0.01 ~ 0.05mm ;B 面是同样材质同样大小的白板 ;双面靶标的厚度为 2 ~ 10mm。

[0033] 本发明所述测量方法是采用正弦结构光投射模式,结合相移测量算法、结构光标定方法,恢复被测物体表面三维形貌。

[0034] 首先介绍相移测量法。相移测量法分为四步相移与相位展开两个步骤 :

[0035] (1) 由计算机产生正弦结构光图案通过结构光投射器投射,由内窥摄像机采集图像,得到  $I_1, \dots, I_4$  四幅相移图像,四幅图像中相同像素位置的相位差值均为  $\alpha = \pi/4$ ,那么四幅图像各点的亮度可以表示为 :

$$[0036] \quad I_n(t) = I_r + I_0 + 2A_r A_0 \cos [\phi(t) + \phi_n]$$

$$[0037] \quad \left[ \phi_n = \frac{(n-1)\pi}{2}, n = 1, 2, 3, 4 \right] \quad [1]$$

[0038] 其中  $I_r$  和  $I_0$  是参考和被测物的灰度值,  $A_r$  和  $A_0$  是参考和被测物的光线强度。t 时间的相位图可以通过式 [2] 来获得 :

$$[0039] \quad \phi(t) = \tan^{-1} \left( \frac{\Delta I_{42}(t)}{\Delta I_{13}(t)} \right) \quad [2]$$

[0040] 其中

$$[0041] \quad \Delta I_{ij}(t) = I_i(t) - I_j(t) \quad [3]$$

[0042] (2) 利用时间相位展开法对被截断在  $[-\pi, \pi]$  的范围内的包裹相位展开,得到展开相位图,实现图像相位值与三维坐标的唯一对应关系。通过投射一系列周期随时间变化的正弦结构光条纹图案,拍摄到的结构光条纹图像可以认为是时间轴上的一个序列,记录时间轴的序列条纹图像构成三维的相位分布,分别对每一个像素点独立的沿时间轴展开,因此信噪比很低的图像边缘和部分区域不会影响到其他位置的数据。用  $\phi(m, n, t)$  来表示第 t 张相位图 ( $t = 0, 1, \dots, s$ ) 中 (m, n) 坐标点的相位,可以利用式 [4] 来直接求得  $\Delta \phi(t)$  :

$$[0043] \quad \Delta \phi(t) = \tan^{-1} \left[ \frac{\Delta I_{42}(t)\Delta I_{13}(t-1) - \Delta I_{13}(t)\Delta I_{42}(t-1)}{\Delta I_{13}(t)\Delta I_{13}(t-1) + \Delta I_{42}(t)\Delta I_{42}(t-1)} \right] \quad [4]$$

[0044] 最后通过 [5] 式计算第 s 幅相位展开图 :

$$[0045] \quad \phi(m, n, s) = \sum_{t=1}^s \Delta \phi(m, n, t) \quad [5]$$

[0046] 对小型结构光视觉测量系统建立双目视觉模型,该模型将结构光投射器看作倒置的摄像机,从而具有与摄像机相同的数学模型。如图 3 所示,设 P 是空间中的任意一点,其在全局坐标系  $O_w - x_w y_w z_w$  下的齐次坐标为  $M = (x_w, y_w, z_w, 1)^T$ 。p 是 P 在摄像机像平面上的成像点,其在图像坐标系  $O_u^c - x_u^c y_u^c$  下的齐次坐标为  $m_u^c = (x_u^c, y_u^c, 1)^T$ , q 是 P 在投影仪像平

面上的同名点,其在图像坐标系  $O_u^p-x_u^p y_u^p$  下的齐次坐标为  $\mathbf{m}_u^p = (x_u^p, y_u^p, 1)^T$ 。

[0047] 摄像机模型表示为:

$$[0048] \quad s\mathbf{m}_u^c = \mathbf{A}^c(\mathbf{R}^c|\mathbf{t}^c)\mathbf{M} \quad [6]$$

[0049] 其中  $s$  是任意不为零的比例因子。 $\mathbf{R}^c$  和  $\mathbf{t}^c$  是摄像机外部参数,分别表示世界坐标系到摄像机坐标系的旋转矩阵和平移向量。 $\mathbf{A}^c$  是摄像机内部参数,表示为:

$$[0050] \quad \mathbf{A}^c = \begin{pmatrix} f_x^c & 0 & u_0^c \\ 0 & f_y^c & v_0^c \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad [7]$$

[0051] 其中  $f_x^c$  和  $f_y^c$  分别是沿  $x$  轴和  $y$  轴方向的有效焦距,  $(u_0^c, v_0^c)$  是图像主点  $O_p$  的像素坐标。

[0052] 与摄像机模型类似,结构光投射器模型表示为:

$$[0053] \quad \rho\mathbf{m}_u^p = \mathbf{A}^p(\mathbf{R}^p|\mathbf{t}^p)\mathbf{M} \quad [8]$$

[0054] 其中  $\rho$  是任意不为零的比例因子。 $\mathbf{R}^p$  和  $\mathbf{t}^p$  是结构光投射器的外部参数,分别表示世界坐标系到结构光投射器坐标系的旋转矩阵和平移向量。 $\mathbf{A}^p$  是摄像机内部参数,表示为:

$$[0055] \quad \mathbf{A}^p = \begin{pmatrix} f_x^p & 0 & u_0^p \\ 0 & f_y^p & v_0^p \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad [9]$$

[0056] 本发明所述的受限空间三维形貌结构光视觉测量方法,其特征在于,测量过程分为标定阶段和测量阶段,进行一次标定后可连续测量,具体步骤是:

[0057] 1、标定阶段:

[0058] 1.1、将结构光传感器固定在多自由度云台上,屏蔽结构光投射器的投射图案;将双面靶标放置于距离结构光传感器 20 ~ 100mm 的测量平台上,双面靶标的 A 面朝上,由内窥摄像机拍摄双面靶标的图像,称为摄像机标定图像。

[0059] 1.2、在测量平台上翻转步骤 1 所述的双面靶标,保证双面靶标的 B 面朝上;由结构光投射器投射黑白棋盘方块图案到双面靶标的 B 面上,黑白棋盘方块的数量为 4 ~ 160,方块的边长 50 ~ 300pixels,精度为 0.5pixel;投影图案在投影仪像平面上的像素位置已知;由内窥摄像机拍摄双面靶标的图像,称为结构光投射器标定图像。

[0060] 1.3、通过旋转和平移云台,改变结构光传感器的姿态和位置,重复步骤 1.1 和 1.2,分别拍摄 6 ~ 8 组摄像机标定图像和结构光投射器标定图像。

[0061] 1.4、利用步骤 1.1 ~ 1.3 拍摄的摄像机标定图像标定摄像机参数;利用步骤 1.1 ~ 1.3 拍摄的结构光投射器标定图像标定结构光投射器参数。

[0062] 摄像机标定采用张正友基于平面二维靶标的标定方法进行标定,参见文章“一种新的柔性摄像机标定技术”[A flexible new technique for camera calibration],IEEE 期刊《模式分析及机器智能》,22(11),第 1330 ~ 1334 页,2000 年。[IEEETransactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence,22(11),2000]。结构光投射器标定方法与摄像机标定类似。

[0063] 2、测量阶段:

[0064] 2.1、利用结构光投射器依次投射一个周期的 4 幅纵向正弦结构光条纹图案到被



测物体表面,相邻图像在投影仪像平面上对应像素的相位差值均为  $\pi/4$ ;由内窥摄像机依次拍摄被测物体的图像,称为一组纵向正弦结构光条纹图像;通过四步相移法计算初始纵向包裹相位图。

[0065] 2.2、将纵向正弦结构光条纹图案的周期数增加 1,重复步骤 2.1 共  $N-1$  次,获得周期数  $1 \sim N$  连续递增的  $N$  组纵向正弦结构光条纹图像,并分别求解得到  $N$  幅纵向包裹相位图, $N$  取值为  $2 \sim 10$  之间的整数。

[0066] 2.3、利用时间相位展开法对被截断在  $[-\pi, \pi]$  的范围内的纵向包裹相位图进行展开,得到一幅纵向的展开相位图,范围为  $[-(N-1)\pi, (N-1)\pi]$ ;通过相位与投影仪像素坐标的线性对应关系,获得摄像机像平面上同名点在投影仪像平面上的横坐标,所说同名点是指同一空间点在摄像机像平面上和投影仪像平面上相对应的像素点。

[0067] 2.4、将结构光投射器的投射模式改为横向正线结构光,重复步骤 2.1  $\sim$  2.3,获得摄像机像平面上同名点在投影仪像平面上的纵坐标。

[0068] 2.5、利用步骤 2.1 标定得到的双面靶标与最后一个位置的摄像机的外部参数  $R^c$  与  $t^c$  和摄像机的内部参数  $A^c$ ,如图 3 所示,由式 [6] 求得摄像机像平面上像素点对应空间中的直线  $l^c$  的方程;利用双面靶标与最后一个位置的结构光投射器的外部参数  $R^p$  与  $t^p$  和结构光投射器的内部参数  $A^p$ ,由式 [8] 求得投影仪像平面上同名点对应空间中的直线  $l^p$  的方程;由两条直线方程,通过最小二乘方法获得空间点在世界坐标系下的三维坐标。

[0069] 实施例

[0070] 投影仪选用 Optoma 公司的 EP708,远心成像镜头选择大恒光电的 GC0-23 远心成像镜头系列。根据受限空间测量要求,内窥摄像机具有较小外形尺寸,分辨率高、响应快速等特点,因此选择杭州华芯数字技术有限公司生产的 HX-016HP10 型 1/6 英寸内窥摄像机,该摄像机的 CCD 前端截面尺寸控制在直径 15mm 的范围内,满足本测量系统小型化的要求。

[0071] 利用本发明中所述的标定方法,标定结构光投射器的参数如下:

$$[0072] \quad f_x^p = (88 \pm 2) \times 10^1 \text{pixel}, f_y^p = (120 \pm 7) \times 10^1 \text{pixel}$$

$$[0073] \quad u_0^p = (30 \pm 4) \times 10^1 \text{pixel}, v_0^p = (70 \pm 4) \times 10^1 \text{pixel}$$

[0074] 摄像机标定的参数:

$$[0075] \quad f_x^c = (117 \pm 4) \times 10^1 \text{pixel}, f_y^c = (116 \pm 4) \times 10^1 \text{pixel}$$

$$[0076] \quad u_0^c = (37 \pm 2) \times 10^1 \text{pixel}, v_0^c = (27 \pm 1) \times 10^1 \text{pixel}$$

[0077] 标定过程中结构光投射器最后一个位置下的外部参数:

$$[0078] \quad R^p = \begin{pmatrix} -0.004, 0.997, 0.072 \\ 0.988, -0.007, 0.156 \\ 0.156, 0.072, -0.985 \end{pmatrix}, t^p = \begin{pmatrix} -9.67 \\ -22.09 \\ 83.56 \end{pmatrix}$$

[0079] 标定过程中摄像机最后一个位置下的外部参数

$$[0080] \quad R^c = \begin{pmatrix} -0.106, 0.979, 0.172 \\ 0.983, -0.130, 0.131 \\ 0.151, 0.155, -0.976 \end{pmatrix}, t^c = \begin{pmatrix} -11.32 \\ -2.68 \\ 80.16 \end{pmatrix}$$

[0081] 将世界坐标系中的靶标特征点重投回图像平面,计算重投点与其真实的图像坐标间的 RMS 误差。摄像机标定重投 RMS 像素误差为  $[0.281 \text{ pixel}, 0.292 \text{ pixel}]$ ,结构光投射器重投 RMS 像素误差为  $[0.357 \text{ pixel}, 0.363 \text{ pixel}]$ 。

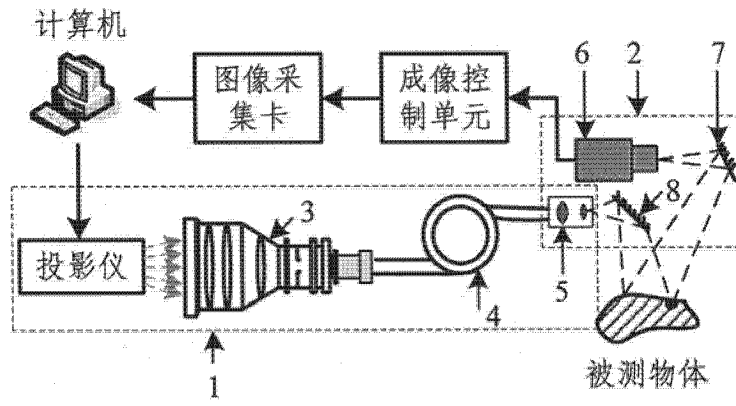


图 1

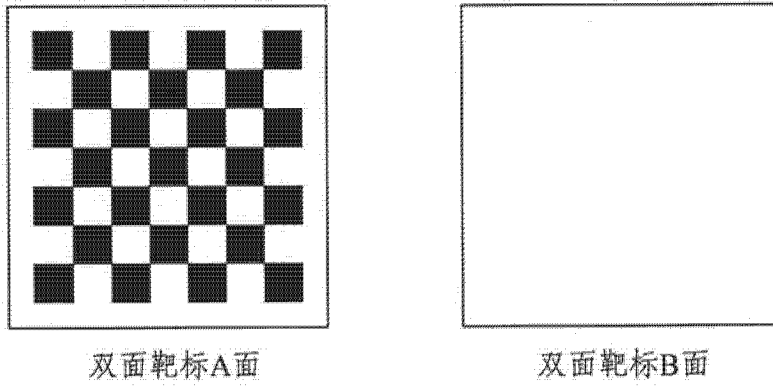


图 2

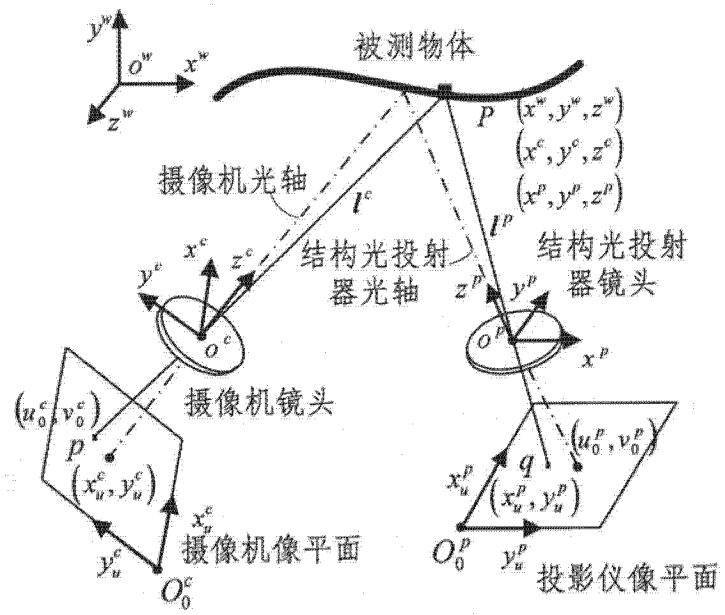


图 3