

[19] 中华人民共和国国家知识产权局

[51] Int. Cl.
G01B 11/25 (2006.01)



[12] 发明专利申请公布说明书

[21] 申请号 200910000946.7

[43] 公开日 2009 年 7 月 8 日

[11] 公开号 CN 101476881A

[22] 申请日 2009.1.23

[21] 申请号 200910000946.7

[71] 申请人 清华大学

地址 100084 北京市 100084 信箱 82 分箱清
华大学专利办公室

[72] 发明人 张文增 吴 舰 陈 强 都 东
孙振国

[74] 专利代理机构 北京鸿元知识产权代理有限公司

代理人 邸更岩

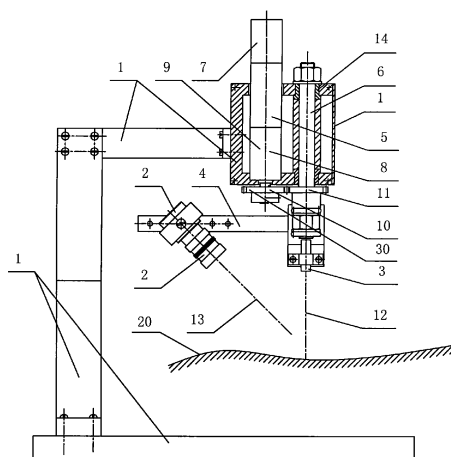
权利要求书 2 页 说明书 12 页 附图 5 页

[54] 发明名称

一字激光立旋式三维形貌测量装置及其方法

[57] 摘要

一字激光立旋式三维形貌测量装置及其方法，属于计算机视觉测量技术领域。该装置包括基座、摄像机、一字线激光器、电机、旋转轴、角度测量元件、驱动电路、转换电路和控制器。摄像机、一字线激光器固接于旋转轴，旋转轴的中心线位于一字线激光器的激光平面上，旋转轴中心线与镜头光心形成的观察平面与激光平面的夹角为 $80^\circ \sim 100^\circ$ ，旋转轴中心线与镜头光轴之间的夹角为 $40^\circ \sim 50^\circ$ 。该装置能够检测出各种方向的边缘信息，实现高精度物体表面三维形貌的测量，避免了传统方法让物体旋转带来的不便，结构简单、成本低、测量精度高，适用于各种尺寸物体的表面检测。



1、一字激光立旋式三维形貌测量装置，其特征在于：包括基座（1）、摄像机（2）、一字线激光器（3）、电机（5）、传动机构（30）、旋转轴（6）、连接件（4）、角度测量元件（7）、转换电路、电机驱动电路和控制器；所述的电机固接于基座上，所述的旋转轴套设于基座中，所述的电机的输出轴通过传动机构与旋转轴相连，所述的摄像机、一字线激光器和旋转轴三者通过连接件固接在一起；角度测量元件设置在电机输出轴、传动机构的输出轴或旋转轴上；所说的一字线激光器发出的激光所在平面称为激光平面，所述的旋转轴的中心线在该激光平面上；所述的摄像机通过图像采集卡或 USB 接口与控制器相连，所述的电机通过电机驱动电路与控制器相连，所述的角速度测量元件通过转换电路与控制器相连；所述的旋转轴的中心线与摄像机的镜头光心形成的观察平面与激光平面之间的夹角在 $30^{\circ}\sim 150^{\circ}$ 之间；所述的旋转轴的中心线与摄像机的镜头光轴之间的夹角在 $30^{\circ}\sim 60^{\circ}$ 之间；所述的一字线激光器投射到所测物体表面的激光条纹在摄像机的观察范围内。

2、根据权利要求书 1 所述的一字激光立旋式三维形貌测量装置，其特征在于：所述的角速度测量元件采用角度检测器、角位移传感器、电位器、编码器或光码盘。

3、根据权利要求书 1 所述的一字激光立旋式三维形貌测量装置，其特征在于：所述的控制器采用计算机、单片机、DSP 或微控制器。

4、根据权利要求书 1 所述的一字激光立旋式三维形貌测量装置，其特征在于：所述的传动机构采用齿轮传动机构、齿轮齿条传动机构、带轮传动机构、链轮传动机构、腱绳传动机构、丝杆螺母传动机构、连杆传动机构、蜗轮蜗杆传动机构、凸轮传动机构或棘轮传动机构中一种或几种的组合。

5、根据权利要求书 1 所述的一字激光立旋式三维形貌测量装置，其特征在于：所述的摄像机采用 CCD 摄像机或 CMOS 摄像机。

6、根据权利要求书 1 所述的一字激光立旋式三维形貌测量装置，其特征在于：所述的旋转轴的中心线与摄像机的镜头光心形成的观察平面与激光平面之间的夹角在 $65^{\circ}\sim 115^{\circ}$ 之间；所述的旋转轴的中心线与摄像机的镜头光轴之间的夹角在 $40^{\circ}\sim 50^{\circ}$ 之间。

7、一种使用如权利要求书 1 所述装置的一字激光立旋式三维形貌测量方法，其特征在于，包括以下步骤：

（a）建立图像坐标系、像靶面坐标系、摄像机坐标系、基座坐标系和激光器坐标系；

（b）通过标定实验，得到图像坐标系、像靶面坐标系、摄像机坐标系、基座坐标系和激光器坐标系之间的坐标变换关系；

（c）所说的一字线激光器发出的激光所在平面称为激光平面，通过标定实验得到所述的激光平面在激光器坐标系下的平面方程，坐标转换得到所述的激光平面在摄像机坐标系下的

平面方程;

(d) 电机驱动旋转轴转动到某角度位置;

(e) 通过角度测量元件测得该角度值; 一字线激光器发出一字线状激光到所测物体表面形成一道条纹, 摄像机拍摄得到含有该条纹的物体表面图像;

(f) 通过图像处理得到图像上条纹点 j 的图像坐标系下的坐标; 坐标转换得到 j 点的像靶面坐标系下的坐标; 坐标转换得到 j 点与所对应物点 i 确定的成像直线在摄像机坐标系下的直线方程, 结合 (c) 步骤得到的激光平面方程, 得到成像直线与激光平面的交点 i 在摄像机坐标系下的坐标; 坐标转换得到 i 点在激光器坐标系下的坐标, 坐标转换得到 i 点在基座坐标系下的坐标;

(g) 重复 (f) 步骤, 得到物体表面上处于该激光条纹的所有点在基座坐标系 $\{B\}$ 下的坐标;

(h) 电机驱动旋转轴转动到其他角度位置, 重复 (e)、(f)、(g) 步骤, 得到摄像机所观察到并能被激光条纹投射到的物体表面所有点在基座坐标系下的坐标值, 完成测量。

一字激光立旋式三维形貌测量装置及其方法

技术领域

本发明涉及一种物体三维形貌的测量装置及方法，特别涉及一种一字激光立旋式三维形貌测量装置及其方法，本发明属于计算机视觉测量技术领域。

背景技术

物体的三维形貌测量技术非常重要。在制造或维修过程中对一些具有不规则曲面的产品，尤其是一些不方便接触测量或不容易直接人工测量的产品，需要进行三维形貌测量。一字线激光器配合摄像机实现的形貌测量装置不仅具有快速、精确、高分辨力、抗干扰性好等优点，而且该类传感器结构简单、经济、易于实现，在实际中已有应用。

传统的线结构光测量装置多数为直线移动扫描式，即一字线激光器放置在直线运动机构上进行 X 轴一维平移，使得一字线状激光条纹（即“光刀”）沿着垂直于该条纹的方向移动，称为平行扫描，以此来实现对物体全部上表面的测量。该方法所实现的平行扫描测量方式存在严重不足：方向固定的条纹对于接近于该方向的边缘信息测量精度差，随着所测边缘与激光条纹之间夹角的减小，测量精度逐渐恶化，对于平行于条纹方向的台阶型边缘几乎不能检测到。例如，一种多光刀准全场非接触三维轮廓测量仪，如中国实用新型专利 CN2463784，包括多光刀激光器、摄像机和平移运动装置，由于该装置的一字线状激光条纹虽然可以一维平移但是方向始终是固定的，导致接近该条纹方向的边缘线测量精度差。

也有不采用 X 轴一维移动机构而采用一种水平轴旋转机构实现扫描的水平旋转扫描式装置。该装置以近似平行物体表面的直线为旋转轴转动来实现一字线状激光条纹的平行扫描，该装置仍然是一种与前述的直线移动扫描式测量方法相似的平行扫描方式，存在同样的不足：对于接近条纹方向的边缘信息会产生较大误差，甚至检测不出来。

一种回转式扫描测量仪，如中国发明专利 CN1308653，包括三维坐标运动装置、数控回转台和线结构光扫描测头，数控回转台安装于 X 轴和 Y 轴之上与 Z 轴倾斜一个角度，线结构光扫描测头安装于 Z 轴上，通过四轴运动实现三维扫描。该装置的不足之处在于：该装置必须将被测物体放置在数控回转台上，由数控回转台带动物体旋转，以此实现对物体表面不同角度方向的测量，这种测量方式不适合大尺寸物体的测量：一方面制造可以承受重载和大尺寸物体的数控回转台成本非常昂贵，吊装也不方便，另一方面，该装置不能放置到异型大尺寸物体内部去进行测量。

例如，某水电站水轮机叶片是 4 米宽、4 米长、几百毫米厚，在制造该叶片时为了用上述方法测量该叶片的表面形貌需要制造一个相应的巨大数控回转台，这是很不合适的；另外，在水轮机经过多年运行后需要重新测量该叶片表面形貌并开展相应的补焊维修作业，此时，

焊固在巨大转轮上的十几个叶片整体的体积非常庞大，完全不能采用上述方法进行测量，也不能将上述装置放置到叶片之间去进行叶片表面测量。

还有采用面结构光或光栅式激光条纹的测量装置，结构复杂，成本高。例如，一种便携式面结构光逆向测量系统（中国发明专利 CN1971205），包括 6 个旋转关节的机械臂，光栅扫描头和双目摄像机。该装置的不足之处在于：该装置采用光栅扫描头结构复杂，成本高；采用的多旋转关节的机械臂结构复杂、成本高，同时由于运动部件多，引入了较大测量误差，难以保证测量精度；采用的双目摄像机成本高。

发明内容

本发明的目的是为克服已有技术的不足之处，设计出一字激光立旋式三维形貌测量装置和相应的测量方法，该测量装置及方法能够实现物体表面三维形貌的测量，能检测出的各种方向的边缘信息，能够无盲区地扫描检测出所测物体表面，避免传统方法让物体旋转带来的诸多不便，结构简单、重量轻、成本低、测量精度高，既可以用作固定装置，也可安装在移动机器人上使用，适用于不同尺寸物体的表面检测。

本发明采用如下技术方案：

本发明所述的一字激光立旋式三维形貌测量装置，其特征在于：包括基座、摄像机、一字线激光器、电机、传动机构、旋转轴、连接件、角度测量元件、转换电路、电机驱动电路和控制器；所述的电机固接于基座上，所述的旋转轴套设于基座中，所述的电机的输出轴通过传动机构与旋转轴相连，所述的摄像机、一字线激光器和旋转轴三者通过连接件固接在一起；角度测量元件设置在电机输出轴、传动机构的输出轴或旋转轴上；所说的一字线激光器发出的激光所在平面称为激光平面，所述的旋转轴的中心线在该激光平面上；所述的摄像机通过图像采集卡或 USB 接口与控制器相连，所述的电机通过电机驱动电路与控制器相连，所述的角度测量元件通过转换电路与控制器相连；所述的旋转轴的中心线与摄像机的镜头光心形成的观察平面与激光平面之间的夹角在 $30^{\circ}\sim 150^{\circ}$ 之间；所述的旋转轴的中心线与摄像机的镜头光轴之间的夹角在 $30^{\circ}\sim 60^{\circ}$ 之间；所述的一字线激光器投射到所测物体表面的激光条纹在摄像机的观察范围内。

本发明所述的一字激光立旋式三维形貌测量装置，其特征在于：所述的角度测量元件采用角度检测器、角位移传感器、电位器、编码器或光码盘。

本发明所述的一字激光立旋式三维形貌测量装置，其特征在于：所述的控制器采用计算机、单片机、DSP 或微控制器。

本发明所述的一字激光立旋式三维形貌测量装置，其特征在于：所述的传动机构采用齿轮传动机构、齿轮齿条传动机构、带轮传动机构、链轮传动机构、腱绳传动机构、丝杆螺母传动机构、连杆传动机构、蜗轮蜗杆传动机构、凸轮传动机构或棘轮传动机构中一种或几种的组合。

本发明所述的一字激光立旋式三维形貌测量装置，其特征在于：所述的摄像机采用 CCD 摄像机或 CMOS 摄像机。

本发明所述的一字激光立旋式三维形貌测量装置，其特征在于：所述的旋转轴的中心线与摄像机的镜头光心形成的观察平面与激光平面之间的夹角在 $65^{\circ}\sim 115^{\circ}$ 之间；所述的旋转轴的中心线与摄像机的镜头光轴之间的夹角在 $40^{\circ}\sim 50^{\circ}$ 之间。

本发明所述的一字激光立旋式三维形貌测量方法，其特征在于，包括以下步骤：

(a) 建立图像坐标系、像靶面坐标系、摄像机坐标系、基座坐标系和激光器坐标系，并标定它们两两之间的坐标变换关系；

(b) 通过标定实验，得到图像坐标系、像靶面坐标系、摄像机坐标系、基座坐标系和激光器坐标系之间的坐标变换关系；

(c) 所说的一字线激光器发出的激光所在平面称为激光平面，通过标定实验得到所述的激光平面在激光器坐标系下的平面方程，坐标转换得到所述的激光平面在摄像机坐标系下的平面方程；

(d) 电机驱动旋转轴转动到某角度位置；

(e) 角度测量元件测得该角度值；一字线激光器发出一字线状激光到所测物体表面形成一道条纹，摄像机拍摄得到含有该条纹的物体表面图像；

(f) 图像处理得到图像上条纹点 j 的图像坐标系下的坐标；坐标转换得到 j 点的像靶面坐标系下的坐标；坐标转换得到 j 点与所对应物点 i 确定的成像直线在摄像机坐标系下的直线方程，结合 (c) 步骤得到的激光平面方程，得到成像直线与激光平面的交点 i 在摄像机坐标系下的坐标；坐标转换得到 i 点在激光器坐标系下的坐标，坐标转换得到 i 点在基座坐标系下的坐标；

(g) 重复 (f) 步骤，得到物体表面上处于该激光条纹的所有点在基座坐标系 $\{B\}$ 下的坐标；

(h) 电机驱动旋转轴转动到其他角度位置，重复 (e)、(f)、(g) 步骤，得到摄像机所观察到并能被激光条纹投射到的物体表面所有点在基座坐标系下的坐标值，完成测量。

本发明与现有技术相比，具有以下优点和突出性效果：

由于本发明装置投射的激光条纹是旋转扫描的，有效克服传统固定方向激光条纹方法的不足，能够检测出各种方向的边缘信息，实现高精度物体表面三维形貌的测量；由于摄像机与一字线激光器一同旋转，相对姿态始终保持为最佳姿态，从而保证了良好的测量精度；由于所述的旋转轴的中心线经过一字线状激光平面，保证了旋转轴转动一个周期，激光条纹将无盲区地扫过所测物体表面，同时也简化了标定和测量过程；由于本发明装置采用一字线激光器和摄像机组成的测量头旋转，避免了传统方法让物体旋转带来的诸多不便，适用于各种尺寸物体的表面检测。本发明装置结构简单、成本低、测量精度高，既可以用作固定装置，

也可安装在移动机器人上使用。

附图说明

图 1 是本发明提供的一字激光立旋式三维形貌测量装置的一种实施例（角度测量元件采用编码器）的主视图。

图 2 是图 1 所示实施例的侧视图。

图 3 是图 1 所示实施例的俯视图（未画出电机、旋转轴、编码器等部分零件）。

图 4 是图 1 所示实施例的俯视图。

图 5 是图 1 所示实施例位于初始位置时放置有标定平面 D 时的坐标系相互关系示意图。

图 6 是图 1 所示实施例位于 θ 角度位置时放置有标定平面 D 时的坐标系相互关系示意图（其中虚线为初始位置的一字线激光平面）。

图 7 是本发明提供的一字激光立旋式三维形貌测量装置的又一种实施例（角度测量元件采用电位器）的主视图。

图 8 是本发明所述的一字激光立旋式三维形貌测量装置的控制器与电机、摄像机和角度测量元件等的连接关系示意图。

图 9 是图 7 所示实施例的控制器与电机、摄像机和角度测量元件等的连接关系示意图，该实施例中，控制器采用计算机，角度测量元件采用电位器，转换电路采用带有 A/D 转换电路的数据采集卡。

图 10 是使用图 1 或图 7 所示实施例进行测量的方法步骤。

在图 1 至图 10 中：

- | | | |
|---------------------------------------|------------------------------------|-----------|
| 1—基座， | 2—摄像机， | 3—一字线激光器， |
| 4—连接件， | 5—电机， | 6—旋转轴， |
| 7—编码器， | 8—传动机构， | 9—减速器， |
| 10—第一齿轮， | 11—第二齿轮， | 14—轴承， |
| 16—摄像机的像靶面， | 17—一字线状激光， | |
| 20—所测物体的表面， | 30—传动机构， | 35—电位器 |
| S—激光平面， | D—标定平面， | H—观察平面， |
| L_1 —旋转轴的中心线， | O_c —摄像机的镜头光心， | |
| L_c —摄像机的镜头光轴， | | |
| β —观察平面 H 与激光平面 S 之间的夹角， | | |
| ϕ —旋转轴的中心线 L_1 与摄像机的镜头光轴之间的夹角， | | |
| {P}—图像坐标系， | (u, v)—图像坐标系下的坐标， | |
| {A}—像靶面坐标系， | ($^A x, ^A y$)—像靶面坐标系下的坐标， | |
| {C}—摄像机坐标系， | ($^C X, ^C Y, ^C Z$)—摄像机坐标系下的坐标， | |
| {B}—基座坐标系， | ($^B X, ^B Y, ^B Z$)—基座坐标系下的坐标， | |

{L}—激光器坐标系, $({}^LX_i, {}^LY_i, {}^LZ_i)$ —激光器坐标系下的坐标。

具体实施方式

下面结合附图及实施例进一步详细说明本发明具体结构、工作原理的内容。

本发明所述的一字激光立旋式三维形貌测量装置的一种实施例,如图1、图2、图3、图4所示,包括基座1、摄像机2、一字线激光器3、电机5、传动机构30、旋转轴6、连接件4、角度测量元件7、转换电路、电机驱动电路和控制器;所述的电机5固接于基座1上,所述的旋转轴6套设于基座1中,所述的电机5的输出轴通过传动机构30与旋转轴6相连,所述的摄像机2、一字线激光器3和旋转轴6三者通过连接件4固接在一起;角度测量元件7设置在电机5的输出轴、传动机构30的输出轴或旋转轴6上;所说的一字线激光器3发出的激光所在平面称为激光平面S,所述的旋转轴6的中心线 L_1 在该激光平面S上;所述的摄像机2通过图像采集卡与控制器相连,所述的电机5通过电机驱动电路与控制器相连,所述的角度测量元件7通过转换电路与控制器相连;所述的旋转轴6的中心线 L_1 与摄像机2的镜头光心 O_c 形成的观察平面H与激光平面S之间的夹角 β 为 $80\sim 100^\circ$;所述的旋转轴6的中心线 L_1 与摄像机2的镜头光轴 L_c 之间的夹角在 $40\sim 50^\circ$ 之间;所述的一字线激光器投射到所测物体表面的激光条纹在摄像机的观察范围内。

本发明所述的一字激光立旋式三维形貌测量装置的控制器与电机、摄像机和角度测量元件等的连接关系示意图如图8所示。

本发明所述的一字激光立旋式三维形貌测量装置,其特征在于:所述的角度测量元件采用角度检测器、角位移传感器、电位器或编码器。

本实施例中,所述的角度测量元件采用编码器。

本发明所述的一字激光立旋式三维形貌测量装置,其特征在于:所述的控制器采用计算机、单片机、DSP或微控制器。

本实施例中,所述的控制器采用工业控制计算机。

本发明所述的一字激光立旋式三维形貌测量装置,其特征在于:所述的传动机构为齿轮传动机构、齿轮齿条传动机构、带轮传动机构、链轮传动机构、腱绳传动机构、丝杆螺母传动机构、连杆传动机构、蜗轮蜗杆传动机构、凸轮传动机构或棘轮传动机构中一种或几种的组合。

本实施例中,所述的传动机构30采用齿轮传动机构,所述的传动机构30包括减速器9、第一齿轮10和第二齿轮11,所述的电机5的输出轴与减速器9的输入轴相连,减速器的第一齿轮10固接,第一齿轮10与第二齿轮11相互啮合形成齿轮传动关系,第二齿轮11套固在旋转轴6上。

本发明所述的一字激光立旋式三维形貌测量装置,其特征在于:所述的摄像机采用CCD摄像机或CMOS摄像机。

本实施例中,所述的摄像机2采用CCD摄像机。

本实施例中,所述的旋转轴6的中心线 L_1 与摄像机2的镜头光心 O_c 形成的观察平面H与激光平面S之间的夹角 β 为 $80\sim 100^\circ$;所述的旋转轴6的中心线 L_1 与摄像机2的镜头光轴 L_c 之间的夹角 ϕ 在 $40\sim 50^\circ$ 之间。

本实施例中,所述的一字线激光器3投射到所测物体表面的激光条纹距离摄像机2的镜头光心 O_c 超过6倍焦距。

本发明所述的一字激光立旋式三维形貌测量装置的另一种实施例,如图7所示,角度测量元件采用电位器。图8是图7所示实施例的控制器与电机、摄像机和角度测量元件等的连接关系示意图,该实施例中,控制器采用计算机,角度测量元件采用电位器,转换电路采用带有A/D转换电路的数据采集卡。

使用图1或图7所示实施例进行测量的方法,如图9所示,包括以下步骤:

(a) 建立图像坐标系{P}、像靶面坐标系{A}、摄像机坐标系{C}、基座坐标系{B}和激光器坐标系{L};

(b) 通过标定实验,得到图像坐标系{P}、像靶面坐标系{A}、摄像机坐标系{C}、基座坐标系{B}和激光器坐标系{L}之间的坐标变换关系;

(c) 所说的一字线激光器3发出的激光所在平面称为激光平面H,通过标定实验得到所述的激光平面H在激光器坐标系{L}下的平面方程,坐标转换得到所述的激光平面H在摄像机坐标系{C}下的平面方程;

(d) 电机5驱动旋转轴6转动到某角度位置(如 θ 角度位置);

(e) 通过角度测量元件7测得该角度值;一字线激光器3发出一字线状激光到所测物体表面形成一道条纹,摄像机2拍摄得到含有该条纹的物体表面图像;

(f) 图像处理得到图像上条纹点j的图像坐标系{P}下的坐标(u_j, v_j);坐标转换得到j点的像靶面坐标系{A}下的坐标($^A x_j, ^A y_j$);坐标转换得到j点与所对应物点i确定的成像直线 L_i 在摄像机坐标系{C}下的直线方程,结合(c)步骤得到的激光平面方程,得到成像直线与激光平面的交点i在摄像机坐标系{C}下的坐标($^C X_i, ^C Y_i, ^C Z_i$),坐标转换得到i点在激光器坐标系{L}下的坐标($^L X_i, ^L Y_i, ^L Z_i$),坐标转换得到i点在基座坐标系{B}下的坐标($^B X_i, ^B Y_i, ^B Z_i$);

(g) 重复(f)步骤,得到物体表面上处于该激光条纹的所有点(根据精度要求,一定的间隔距离取一个点)在基座坐标系{B}下的坐标;

(h) 电机5驱动旋转轴6转动到其他角度位置,重复(e)、(f)、(g)步骤,得到摄像机所观察到并能被激光条纹投射到的物体表面所有点在基座坐标系下的坐标值,完成测量。

下面进一步详细介绍使用图1或图7所示实施例进行测量的方法。

(a) 按下面的方法建立图像坐标系{P}、像靶面坐标系{A}、摄像机坐标系{C}、基座坐标系{W}和激光器坐标系{L},坐标系示意图如图5和图6所示。

(a1) 建立图像坐标系{P}：在摄像机 2 拍摄的图像上定义一个与像靶面 16 固接的二维直角坐标系，称为图像坐标系{P}，其原点 O_p 为图像的左上角点，其 x 轴称为 u 轴，方向水平向右，其 y 轴称为 v 轴，方向垂直向下，坐标用(u, v)表示，u 和 v 分别是像素点在图像中的列数和行数，单位为像素。

(a2) 建立像靶面坐标系{A}：摄像机 2 的镜头光轴 L_c 与像靶面 16 的交点 O_a 点称为图像中心，以 O_a 为原点，以 u 轴正方向为 x_a 轴正方向，以 v 轴正方向为 y_a 轴正方向，建立一个与像靶面 16 固接的二维直角坐标系，称为像靶面坐标系{A}。

(a3) 建立摄像机坐标系{C}：以摄像机 2 的镜头光心 O_c 为原点，以摄像机的镜头光轴 L_c 为 Z_c 轴，以摄像机 2 观察前方为 Z_c 方向，以 x_b 轴正方向为 X_c 轴正方向，以 y_b 轴正方向为 Y_c 轴正方向，建立一个与摄像机 2 固接的三维直角坐标系，称为摄像机坐标系{C}。

(a4) 建立基座坐标系{B}：建立一个与基座 1 固接的三维直角坐标系，称为基座坐标系{B}，以旋转轴 6 的中心线 L_1 为 Z_b 轴，从所测物体表面 20 指向一字线激光器 3 的方向为 Z_b 轴正方向。

原点 O_b 、 X_b 和 Y_b 的确定方法为：如图 5 所示，放置一个平面 D 称为标定平面，激光打印等间距 d 的方形网格，放置在该标定平面 D 上，一字线激光器 3 投射的激光在该平面上形成了一字线状激光条纹 17；调节标定平面 D 使得当旋转轴 6 转动时从摄像机获得的图像中该一字线状激光条纹 17 在图像坐标系{P}下始终在同一位置，说明此时平面 D 已垂直于旋转轴 6 的中心线。

在该装置处于 0° 位置时，即角度测量元件 7 测得旋转轴 6 的旋转角度为 0° 时，以平面 D 与旋转轴 6 的交点为原点 O_b ，原点 O_b 就是旋转轴 6 转动时激光器在平面 D 上投射形成不同方向的激光条纹的交点，以一字线状激光在平面 D 上的条纹为 X_b 轴，取某一方向为正方向，用右手定则由 Z_b 和 X_b 确定 Y_b 轴。

(a5) 建立激光器坐标系{L}：激光器坐标系{L}固接于激光器；当该装置处于 0° 位置时，激光器坐标系{L}与基座坐标系{L}重合；当该装置位于 θ 角度位置时，即角度测量元件 7 测得旋转轴 6 的旋转角度为 θ 角度时，如图 6 所示，基座坐标系{B}绕其 Z_b 轴旋转一个 θ 角产生的新坐标系就是激光器坐标系{L}。

(b) 按下面的方法标定图像坐标系{P}、像靶面坐标系{A}、摄像机坐标系{C}、基座坐标系{B}和激光器坐标系{L}之间的坐标变换关系。

(b1) 图像坐标系{P}与像靶面坐标系{A}的关系为：

$$\begin{bmatrix} {}^A x_j \\ {}^A y_j \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_u & 0 & -u_0 \\ 0 & k_v & -v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_j \\ v_j \\ 1 \end{bmatrix} = K \begin{bmatrix} u_j \\ v_j \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (\text{公式 1})$$

式中， k_u 、 k_v 分别是像靶面 16 上一个像素的沿 u 轴和 v 轴方向的长度，单位为毫米， k_u 、 k_v

是由摄像机厂商提供的摄像机重要参数。 (u_0, v_0) 为摄像机2的镜头光轴 L_c 与像靶面16的交点 O_a 在图像坐标系 $\{P\}$ 中的坐标, (u_0, v_0) 可以通过图像中心标定实验得到。综合起来, 矩阵 K 代表图像坐标系 $\{P\}$ 相对于像靶面坐标系 $\{A\}$ 的齐次坐标变换矩阵, K 是由摄像机内参数标定实验事先确定的固定值, $(^Ax_i, ^Ay_j)$ 代表某点 i 对应的摄像机像靶面16上像点 j 在像靶面坐标系 $\{A\}$ 的坐标, (u_j, v_j) 代表点 j 在图像坐标系 $\{P\}$ 的坐标。

(b2) 像靶面坐标系 $\{A\}$ 与摄像机坐标系 $\{C\}$ 的关系为:

$${}^cZ_i \begin{bmatrix} ^Ax_j \\ ^Ay_j \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^cX_i \\ {}^cY_i \\ {}^cZ_i \\ 1 \end{bmatrix} = F \begin{bmatrix} {}^cX_i \\ {}^cY_i \\ {}^cZ_i \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (\text{公式 2})$$

式中, f 为摄像机2的镜头焦距, f 为已知的固定值, $({}^cX_i, {}^cY_i, {}^cZ_i)$ 代表某点 i 在摄像机坐标系 $\{C\}$ 的坐标;

(b3) 摄像机坐标系 $\{C\}$ 与激光器坐标系 $\{L\}$ 的关系为:

$$\begin{bmatrix} {}^cX_i \\ {}^cY_i \\ {}^cZ_i \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} & {}^cX_L \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} & {}^cY_L \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} & {}^cZ_L \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^LX_i \\ {}^LY_i \\ {}^LZ_i \\ 1 \end{bmatrix} = {}^cT_L \begin{bmatrix} {}^LX_i \\ {}^LY_i \\ {}^LZ_i \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (\text{公式 3})$$

或表达为:

$$\begin{bmatrix} {}^LX_i \\ {}^LY_i \\ {}^LZ_i \\ 1 \end{bmatrix} = {}^L T_C \begin{bmatrix} {}^cX_i \\ {}^cY_i \\ {}^cZ_i \\ 1 \end{bmatrix} = ({}^c T_L)^{-1} \begin{bmatrix} {}^cX_i \\ {}^cY_i \\ {}^cZ_i \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_{11} & t_{12} & t_{13} & t_{14} \\ t_{21} & t_{22} & t_{23} & t_{24} \\ t_{31} & t_{32} & t_{33} & t_{34} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^cX_i \\ {}^cY_i \\ {}^cZ_i \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (\text{公式 4})$$

式中, $({}^LX_i, {}^LY_i, {}^LZ_i)$ 代表 i 点在激光器坐标系 $\{L\}$ 的坐标, $({}^cX_L, {}^cY_L, {}^cZ_L)$ 代表激光器坐标系 $\{L\}$ 的原点 O_L 在摄像机坐标系 $\{C\}$ 的坐标。

式中, 矩阵 $\begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} \end{bmatrix}$ 代表激光器坐标系 $\{L\}$ 相对于摄像机坐标系 $\{C\}$ 的姿态变换矩阵,

cT_L 代表激光器坐标系 $\{L\}$ 相对于摄像机坐标系 $\{C\}$ 的齐次坐标变换矩阵, cT_L 是由摄像机外参数标定实验事先确定的固定值, ${}^L T_C$ 是 cT_L 的逆矩阵, 可以计算得到。

(b4) 基座坐标系 $\{W\}$ 和激光器坐标系 $\{L\}$ 的关系为:

$$\begin{bmatrix} {}^BX_i \\ {}^BY_i \\ {}^BZ_i \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^LX_i \\ {}^LY_i \\ {}^LZ_i \\ 1 \end{bmatrix} = {}^B T_L \begin{bmatrix} {}^LX_i \\ {}^LY_i \\ {}^LZ_i \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (\text{公式 5})$$

式中, $({}^BX_i, {}^BY_i, {}^BZ_i)$ 代表 i 点在激光器坐标系 $\{B\}$ 的坐标;

(c) 激光平面 S 在激光器坐标系 {L} 中的方程为: $y_L = 0$, 再结合公式 4, 可以推导得到激光平面 S 在摄像机坐标系 {C} 中的方程为:

$$t_{21}x_c + t_{22}y_c + t_{23}z_c + t_{24} = 0, \quad (\text{公式 6})$$

(d) 电机 5 驱动旋转轴 6 转动到 θ 角度位置, 如图 6 所示。

(e) 通过角度测量元件 7 测得该角度值; 一字线激光器 3 发出一字线状激光到所测物体表面形成一道条纹, 摄像机 2 拍摄得到含有该条纹的物体表面图像。

(f) 图像处理得到图像上条纹点 j 的图像坐标系 {P} 下的坐标 (u_j, v_j) ; 坐标转换得到 j 点的像靶面坐标系 {A} 下的坐标 $(^A x_j, ^A y_j)$; 坐标转换得到 j 点与所对应物点 i 确定的成像直线 L_i 在摄像机坐标系 {C} 下的直线方程, 结合 (c) 步骤得到的激光平面方程, 得到成像直线与激光平面的交点 i 在摄像机坐标系 {C} 下的坐标 $(^C X_i, ^C Y_i, ^C Z_i)$, 坐标转换得到 i 点在激光器坐标系 {L} 下的坐标 $(^L X_i, ^L Y_i, ^L Z_i)$, 坐标转换得到 i 点在基座坐标系 {B} 下的坐标 $(^B X_i, ^B Y_i, ^B Z_i)$ 。

具体过程为:

记条纹上某点为 i, 其对应于图像上的 j 点, 通过图像处理得到 j 点的图像坐标系 {P} 下的坐标 (u_j, v_j) ;

将 (u_j, v_j) 代入公式 1 得到 j 点的像靶面坐标系 {A} 下的坐标 $(^A x_j, ^A y_j)$;

将 $(^A x_j, ^A y_j)$ 代入公式 2, 并联合公式 6, 得到 i 点在摄像机坐标系 {C} 下的坐标 $(^C X_i, ^C Y_i, ^C Z_i)$:

$$\begin{bmatrix} ^C X_i \\ ^C Y_i \\ ^C Z_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} ^A x_j \\ ^A y_j \\ f \end{bmatrix} \frac{-t_{24}}{t_{21} ^A x_j + t_{22} ^A y_j + t_{23} f}; \quad (\text{公式 7})$$

将 $(^C X_i, ^C Y_i, ^C Z_i)$ 代入公式 4, 解得 i 点在一字线激光器坐标系 {L} 下的坐标 $(^L X_i, ^L Y_i, ^L Z_i)$;

将 $(^L X_i, ^L Y_i, ^L Z_i)$ 代入公式 5, 解得 i 点在基座坐标系 {B} 下的坐标 $(^B X_i, ^B Y_i, ^B Z_i)$ 。

由此得到物体表面上处于该激光条纹的任意点 i 在基座坐标系 {B} 下的坐标 $(^B X_i, ^B Y_i, ^B Z_i)$ 。

(g) 重复 (f) 步骤, 得到物体表面上处于该激光条纹的所有点 (根据精度要求, 一定的间隔距离取一个点) 在基座坐标系 {B} 下的坐标;

(h) 电机 5 驱动旋转轴 6 转动到其他角度位置, 重复 (e)、(f)、(g) 步骤, 得到摄像机所观察到并能被激光条纹投射到的物体表面所有点在基座坐标系下的坐标值, 完成测量。

本实施例中, 摄像机坐标系 {C} 与激光器坐标系 {L} 的关系 ${}^C T_L$ 的标定实验, 称为摄像机外参数标定实验, 该实验方法为公知技术, 有多种具体方法。下面结合本实施例的使用介绍一种较为常用的摄像机外参数标定实验方法。

如图 6 所示, 放置标定平面 D, 在其上有等间距 d 的方形网格, 一字线激光器 3 投射的激光在该平面上形成了一字线状激光条纹 17; 调节平面使得当旋转轴 6 转动时从摄像机获得的图像中该一字线状激光条纹 17 在图像坐标系下始终为同一位置, 说明此时平面 D 已垂直于旋转轴 6 的中心线。在该装置处于 0° 位置时, 此时基座坐标系 {B} 与激光器坐标系 {L} 重

合。此时，标定摄像机坐标系{C}与激光器坐标系{L}（此时即基座坐标系{B}）的关系。

方形网格上的网格交点在激光器坐标系{L}下的坐标值为已知：因为该平面上任意点*i*的^LZ坐标为0，激光条纹处于^LX轴，^LX轴的方向已知，原点O_L（初始位置与O_b重合）和在该条纹上位置已知，原点O_L就是旋转轴6转动时激光器在平面D上投射形成不同方向的激光条纹的交点。

利用平面D上的网格交点作为观察的特征点。

设某网格交点*i*在{L}的齐次坐标为^LP_{*i*}=[^LX_{*i*} ^LY_{*i*} ^LZ_{*i*} 1]^T，在{C}下的齐次坐标为^CP_{*i*}=[^CX_{*i*} ^CY_{*i*} ^CZ_{*i*} 1]^T。{C}与{L}的关系如公式3所示。

Q ^LZ_{*i*}=0，公式3变为：

$$\begin{cases} {}^C X_i = R_{11} {}^L X_i + R_{12} {}^L Y_i + {}^C X_L \\ {}^C Y_i = R_{21} {}^L X_i + R_{22} {}^L Y_i + {}^C Y_L \\ {}^C Z_i = R_{31} {}^L X_i + R_{32} {}^L Y_i + {}^C Z_L \end{cases} \quad (\text{公式 8})$$

由公式2得

$$\begin{cases} {}^C X_i = \frac{{}^A x_i}{f} {}^C Z_i \\ {}^C Y_i = \frac{{}^A y_i}{f} {}^C Z_i \end{cases} \quad (\text{公式 9})$$

将公式8中的^CZ_{*i*}，^CX_{*i*}，^CY_{*i*}代入（公式9）得

$$\begin{cases} R_{11} {}^L X_i + R_{12} {}^L Y_i + {}^C X_L = \frac{{}^A x_i}{f} (R_{31} {}^L X_i + R_{32} {}^L Y_i + {}^C Z_L) \\ R_{21} {}^L X_i + R_{22} {}^L Y_i + {}^C Y_L = \frac{{}^A y_i}{f} (R_{31} {}^L X_i + R_{32} {}^L Y_i + {}^C Z_L) \end{cases} \quad (\text{公式 10})$$

整理公式10得

$$\begin{cases} f {}^L X_i R_{11} + f {}^L Y_i R_{12} - {}^A x_i {}^L X_i R_{31} - {}^A x_i {}^L Y_i R_{32} + f {}^C X_L = {}^A x_i {}^C Z_L \\ f {}^L X_i R_{21} + f {}^L Y_i R_{22} - {}^A y_i {}^L X_i R_{31} - {}^A y_i {}^L Y_i R_{32} + f {}^C Y_L = {}^A y_i {}^C Z_L \end{cases} \quad (\text{公式 11})$$

将公式11式两边同除以^CZ_{*L*} (Q ^CZ_{*L*} ≠ 0)，得到

$$\begin{cases} \frac{f {}^L X_i R_{11}}{{}^C Z_L} + \frac{f {}^L Y_i R_{12}}{{}^C Z_L} - \frac{{}^A x_i {}^L X_i R_{31}}{{}^C Z_L} - \frac{{}^A x_i {}^L Y_i R_{32}}{{}^C Z_L} + \frac{f {}^C X_L}{{}^C Z_L} = {}^A x_i \\ \frac{f {}^L X_i R_{21}}{{}^C Z_L} + \frac{f {}^L Y_i R_{22}}{{}^C Z_L} - \frac{{}^A y_i {}^L X_i R_{31}}{{}^C Z_L} - \frac{{}^A y_i {}^L Y_i R_{32}}{{}^C Z_L} + \frac{f {}^C Y_L}{{}^C Z_L} = {}^A y_i \end{cases} \quad (\text{公式 12})$$

将公式12式写成矩阵形式：

$$A_i \overset{\curvearrowright}{M} = \overset{\curvearrowright}{b}_i \quad (\text{公式 13})$$

其中,

$$A_i = \begin{bmatrix} f^L X_i & f^L Y_i & 0 & 0 & -^A x_i^L X_i & -^A x_i^L Y_i & f & 0 \\ 0 & 0 & f^L X_i & f^L Y_i & -^A y_i^L X_i & -^A y_i^L Y_i & 0 & f \end{bmatrix}$$

$$\vec{M} = \left[\frac{R_{11}}{^c Z_L} \quad \frac{R_{12}}{^c Z_L} \quad \frac{R_{21}}{^c Z_L} \quad \frac{R_{22}}{^c Z_L} \quad \frac{R_{31}}{^c Z_L} \quad \frac{R_{32}}{^c Z_L} \quad \frac{^c X_L}{^c Z_L} \quad \frac{^c Y_L}{^c Z_L} \right]^T$$

$$\vec{b}_i = \begin{bmatrix} ^A x_i & ^A y_i \end{bmatrix}^T$$

从公式 13 中可以看出, 由于 $\vec{M}$ 有 8 个未知量, 所以至少需要 4 个点 (8 个方程), 才可解出 $\vec{M}$ 。

为了克服噪声影响, 引入冗余的特征点 (如采用远超过 4 个特征点) 以减小位置估计的误差, 并采用最小二乘法使误差平方最小。所以,

$$\vec{M} = (A^T A)^{-1} A^T \vec{b} \quad (\text{公式 14})$$

其中, $A = [A_1 \quad A_2 \quad \dots \quad A_n]^T$, $\vec{b} = \begin{bmatrix} \vec{b}_1 & \vec{b}_2 & \dots & \vec{b}_n \end{bmatrix}^T$, n 为特征点个数。

当 $\vec{M}$ 被计算出来后, 通过旋转矩阵 $^L R_C$ 的单位正交性质可以求解出 $^c Z_L$:

$$\begin{cases} R_{11}^2 + R_{21}^2 + R_{31}^2 = 1 \\ R_{12}^2 + R_{22}^2 + R_{32}^2 = 1 \end{cases} \quad (\text{公式 15})$$

由于 $^c Z_L \gg f > 0$,

$$^c Z_L = \frac{1}{\sqrt{\vec{M}_1^2 + \vec{M}_3^2 + \vec{M}_5^2}} \quad \text{或} \quad ^c Z_L = \frac{1}{\sqrt{\vec{M}_2^2 + \vec{M}_4^2 + \vec{M}_6^2}} \quad (\text{公式 16})$$

其中, $\vec{M}_i$ 是 $\vec{M}$ 的第 i 个元素。公式 15 中两个公式计算出来的 $^c Z_L$ 不一定相等, 所以取其平均值作为 $^c Z_L$ 值。得到 $^c Z_L$ 值后, 将 $^c Z_L$ 代入 $\vec{M}$ 的各元素中可以得到:

$$\begin{cases} R_{11} = ^c Z_L \vec{M}_1 \\ R_{12} = ^c Z_L \vec{M}_2 \\ R_{21} = ^c Z_L \vec{M}_3 \\ R_{22} = ^c Z_L \vec{M}_4 \\ R_{31} = ^c Z_L \vec{M}_5 \\ R_{32} = ^c Z_L \vec{M}_6 \\ ^c X_L = ^c Z_L \vec{M}_7 \\ ^c Y_L = ^c Z_L \vec{M}_8 \end{cases}, \quad (\text{公式 17})$$

再结合旋转矩阵 $^c R_L$ 的单位正交性质, 得到:

$$\begin{cases} R_{13} = \sqrt{1 - R_{11}^2 - R_{12}^2} \\ R_{23} = \sqrt{1 - R_{21}^2 - R_{22}^2} \\ R_{33} = \sqrt{1 - R_{31}^2 - R_{32}^2} \end{cases}, \quad (\text{公式 18})$$

用于标定实验的若干特征点（即平面 D 上的若干网格交点）均在 $O_L X_L Y_L$ 平面上。这些特征点的 $\{L\}$ 下坐标完全已知。它们经过摄像机成像的像点在 $\{A\}$ 下坐标完全已知。至此，利用公式 14、公式 15、公式 16 和公式 17 求解出了坐标系 $\{C\}$ 与 $\{L\}$ 的关系 ${}^C T_L$ ，完成标定过程。

由于本发明装置投射的激光条纹是旋转扫描的，有效克服传统固定方向激光条纹方法的不足，能够检测出各种方向的边缘信息，实现高精度物体表面三维形貌的测量；由于摄像机与一字线激光器一同旋转，相对姿态始终保持为最佳姿态，从而保证了良好的测量精度；由于所述的旋转轴的中心线经过一字线状激光平面，保证了旋转轴转动一个周期，激光条纹将无盲区地扫过所测物体表面，同时也简化了标定和测量过程；由于本发明装置采用一字线激光器和摄像机组成的测量头旋转，避免了传统方法让物体旋转带来的诸多不便，适用于各种尺寸物体的表面检测。本发明装置结构简单、成本低、测量精度高，既可以用作固定装置，也可安装在移动机器人上使用。

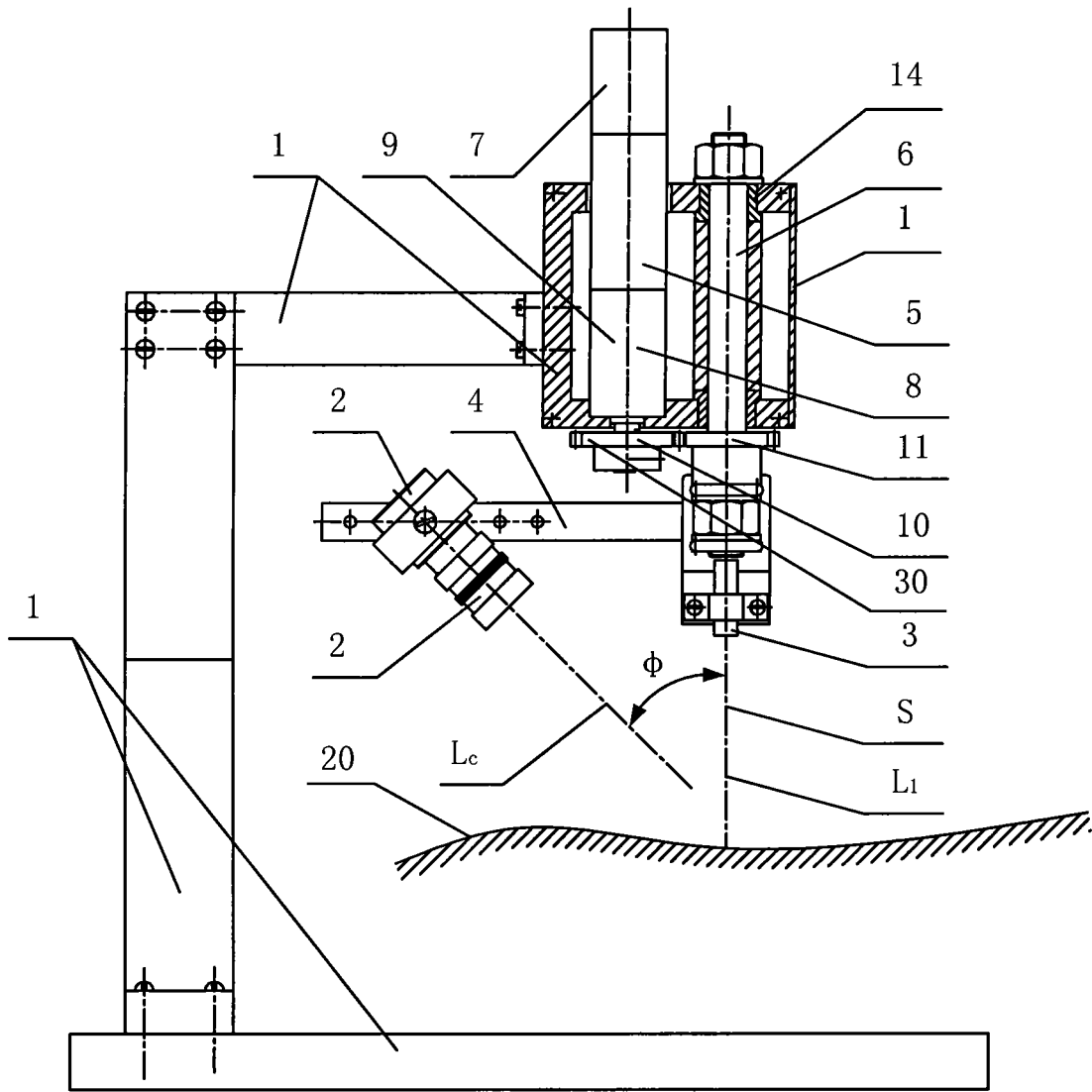


图 1

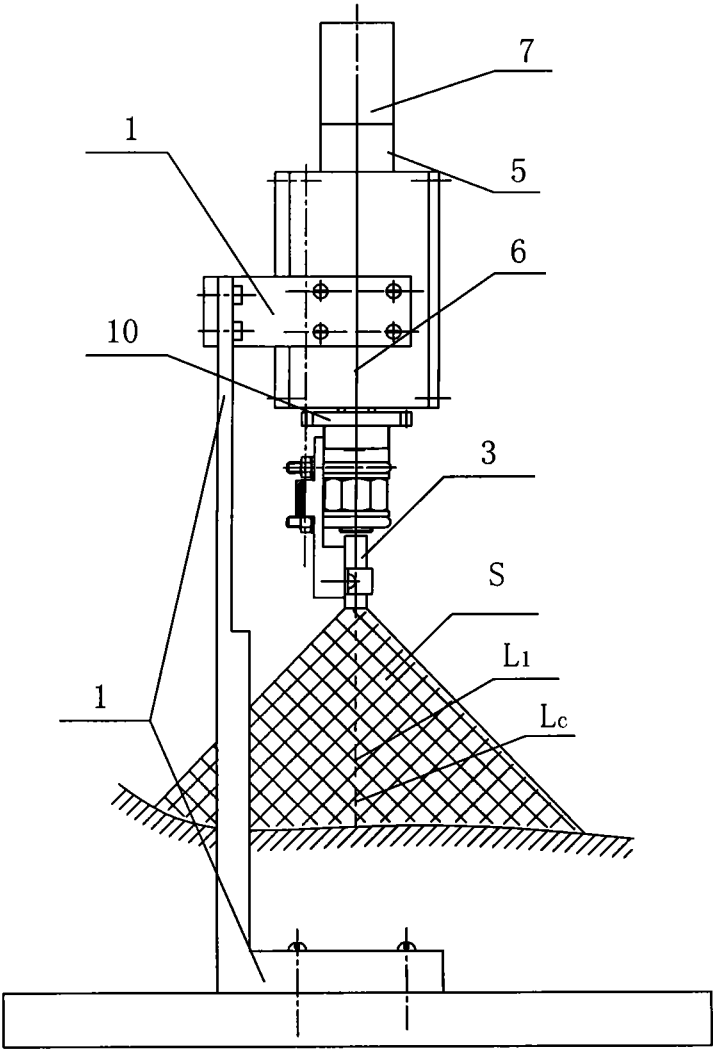


图 2

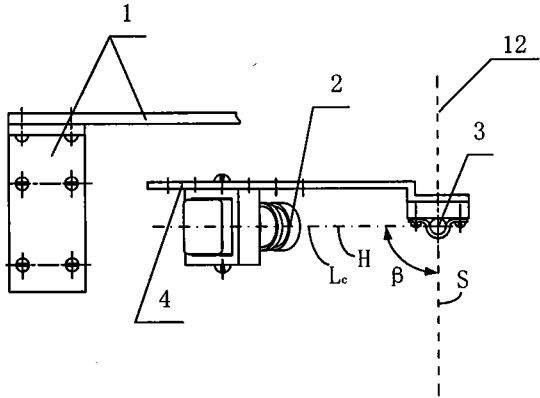


图 3

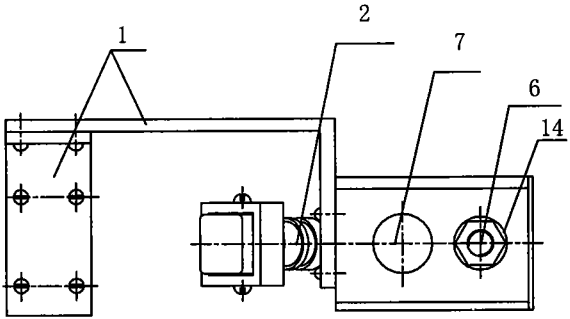


图 4

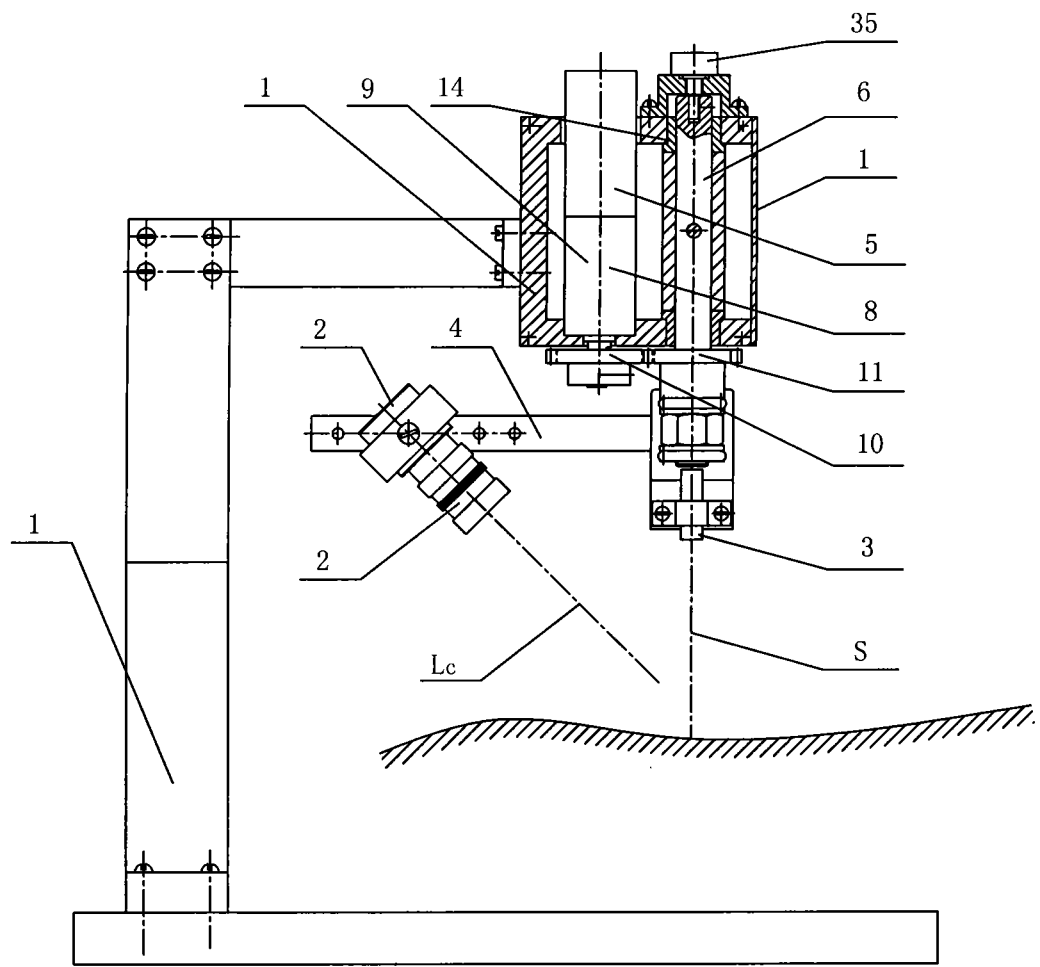


图 7

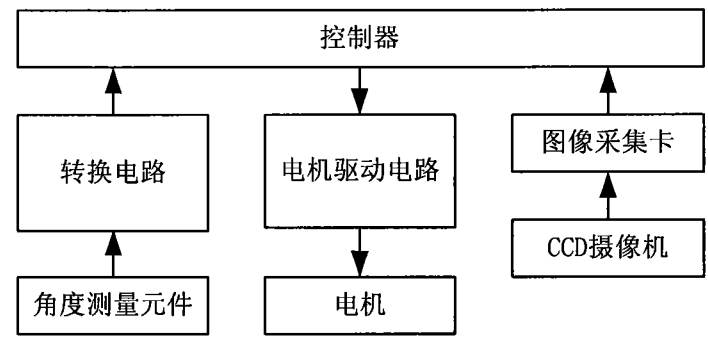


图 8

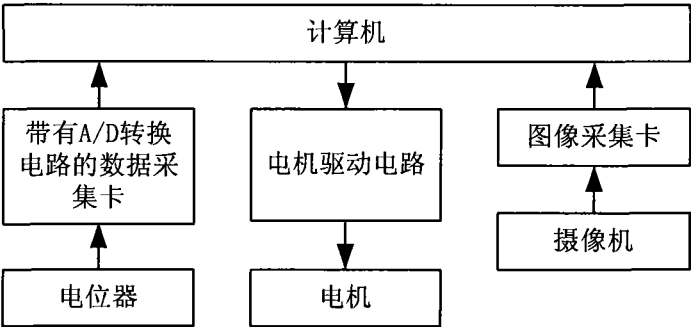


图 9

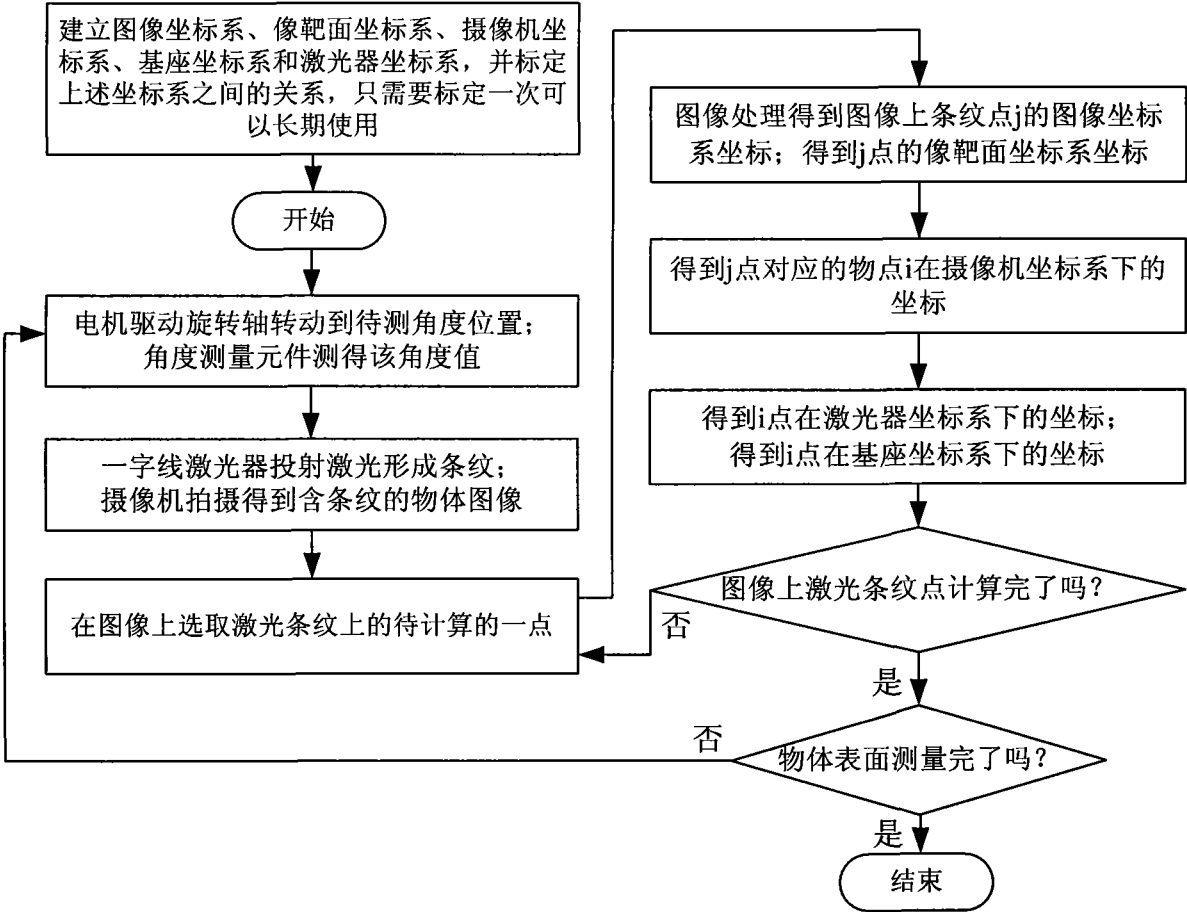


图 10