



# (12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 113324538 B

(45) 授权公告日 2022.10.21

(21) 申请号 202110501861.8	CN 106441151 A, 2017.02.22
(22) 申请日 2021.05.08	CN 104880178 A, 2015.09.02
(65) 同一申请的已公布的文献号 申请公布号 CN 113324538 A	CN 112229323 A, 2021.01.15
(43) 申请公布日 2021.08.31	CN 111965807 A, 2020.11.20
(73) 专利权人 中国科学院光电技术研究所 地址 610209 四川省成都市双流350信箱	US 2005213082 A1, 2005.09.29
(72) 发明人 赵汝进 朱自发 马跃博 颜坤 刘恩海 易晋辉 曾思康	CN 102063718 A, 2011.05.18
(74) 专利代理机构 北京科迪生专利代理有限责 任公司 11251 专利代理师 江亚平	CN 104111071 A, 2014.10.22
(51) Int. Cl.	US 2006290781 A1, 2006.12.28
G01C 21/00 (2006.01)	JP 6046852 B1, 2016.12.21
G01C 3/00 (2006.01)	CN 111210468 A, 2020.05.29
G01C 11/04 (2006.01)	CN 109448055 A, 2019.03.08
(56) 对比文件	CN 111199564 A, 2020.05.26
CN 111220126 A, 2020.06.02	CN 111815712 A, 2020.10.23
US 2013286375 A1, 2013.10.31	US 2008266541 A1, 2008.10.30
US 2013096873 A1, 2013.04.18	CN 103837084 A, 2014.06.04
CN 110178045 A, 2019.08.27	CN 111964694 A, 2020.11.20
	CN 111121722 A, 2020.05.08
	晁志超等. 单目摄像机-激光测距传感器位 姿测量系统.《光学学报》.2011, 第31卷(第3期), 第1-7页. (续)

审查员 伍焱垚

权利要求书2页 说明书5页 附图2页

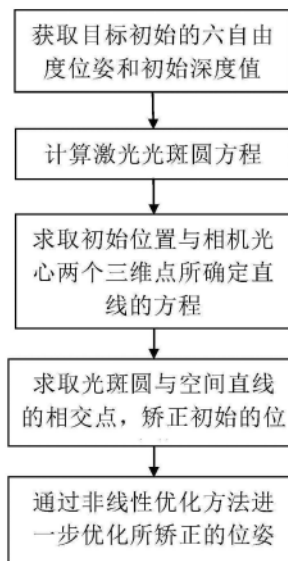
## (54) 发明名称

一种合作目标远距离高精度六自由度位姿测量方法

## (57) 摘要

本发明公开了一种合作目标远距离高精度六自由度位姿测量方法,包括如下步骤:(1)获取合作目标初始六自由度位姿和初始深度值;(2)计算激光光斑圆方程;(3)求取初始位置与相机光心两个三维空间点所确定空间直线的方程;(4)求取光斑圆与空间直线的交点,矫正初始位姿;(5)利用非线性优化方法对矫正结果进行进一步优化。该方法借助激光测距仪所提供的准确深度值来矫正单目视觉位姿测量视线方向上的较大误差,同时能够消除由激光测距仪激光光斑弥散而引入的干扰误差。

CN 113324538 B



[接上页]

**(56) 对比文件**

Johannes Graeter等.Lidar-Monocular Visual Odometry.《2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)》.2019,第7872-7879页.

张壮.基于主被动融合的非合作目标重建与位姿测量研究.《中国优秀博硕士学位论文全文数据库(博士) 基础科学辑》.2019,第A005-69页.

Langming Zhou等.Mono-camera based

calibration method for two-axes LRF measurement system.《SPIE》.2019,第1-7页.

冯春等.基于多传感器融合的航天器间位姿参数估计.《红外与激光工程》.2015,第1616-1622页.

Yi An等.Calibration of a 3D laser rangefinder and a camera based on optimization solution.《JOURNAL OF INDUSTRIAL AND MANAGEMENT OPTIMIZATION》.2021,第427-445页.

1. 一种合作目标远距离高精度六自由度位姿测量方法,其特征在于,包括如下步骤:

步骤(1)、获取合作目标图像,根据PnP算法解算合作目标初始位姿 $T_i = [R_i | t_i]$ ,其中, $R$ 表示姿态信息, $t$ 表示位移信息,下标 $i$ 代表这是初始结果;所述步骤(1)的具体过程为:

步骤(11)、利用相机成像获取合作目标图像,然后基于灰度重心法提取合作目标特征成像中心点亚像素坐标 $p_i^c (i=1,2,3,4)$ ,并进行2D-3D点的匹配;

步骤(12)、基于PnP算法,利用步骤(11)中的4对2D-3D匹配点进行位姿解算,得到合作目标的初始位姿 $T_i = [R_i | t_i]$ ;

步骤(2)、利用激光测距仪测量准确深度信息 $D_a$ ;

步骤(3)、利用步骤(2)中的准确深度信息 $D_a$ 矫正步骤(1)中的初始位姿 $T_i = [R_i | t_i]$ ,获取矫正后的位姿 $T_a = [R_a | t_a]$ ,其中,下标 $a$ 代表这是矫正后的结果;

所述步骤(3)的具体过程为:

步骤(31)、在相机坐标系中,通过相机所测初始位置坐标 $t_i = [t_x^i \ t_y^i \ t_z^i]^T$ 与相机光心坐标系原点 $0 = [0 \ 0 \ 0]^T$ 可以确定一条直线 $L_{OT}$ ,其方程为 $\frac{x}{l} = \frac{y}{m} = \frac{z}{n}$ ;其中,上标 $i$ 代表这是初始结果, $\{l, m, n\}$ 表示直线的参数;

步骤(32)、激光测距仪坐标系与相机光心坐标系的转换关系已事先标定,可以用一个空间三维点和一个空间方向向量表示:

$$0_{L0} = [x_L, y_L, z_L]^T$$

$$n_{L0} = [n_{xL}, n_{yL}, n_{zL}]^T$$

其中, $x_L, y_L, z_L$ 分别为激光测距仪坐标系原点在相机坐标系 $X, Y, Z$ 方向的坐标值, $n_{xL}, n_{yL}, n_{zL}$ 为相机坐标系转到激光测距仪坐标系的欧拉旋转角;

假设激光光斑弥散成了一个半径为 $r$ 的圆,已知激光光线在相机坐标系下的表示以及激光测距仪的所测的距离值,求出激光光斑面中心点坐标 $P = [x_r, y_r, z_r]^T$ ,进而通过以上条件求解出弥散圆的方程:

$$\begin{cases} (x - x_r)^2 + (y - y_r)^2 + (z - z_r)^2 = r^2 \\ (x - x_r, y - y_r, z - z_r) * [n_{xL}, n_{yL}, n_{zL}]^T = 0 \\ (x_r - x_L)^2 + (y_r - y_L)^2 + (z_r - z_L)^2 = D_a^2 \end{cases}$$

其中, $x, y, z$ 分别表示空间圆上点在相机坐标系 $X, Y, Z$ 方向的坐标值;

步骤(33)、求步骤(31)中确定的直线 $L_{OT}$ 与步骤(32)中所确定的圆面的交点,所得的相交点即为矫正后的合作目标位置 $t_a = [t_x^a \ t_y^a \ t_z^a]^T$ ,用 $t_a$ 更新 $T_i = [R_i | t_i]$ 中的位移分量,得到初步矫正后的位姿 $T_a = [R_a | t_a]$ ;

步骤(4)、利用非线性优化方法对通过步骤(3)中得到的矫正后的位姿 $T_a = [R_a | t_a]$ 进行进一步优化,具体优化模型为:

$$\underset{R_a, t_a^a}{\text{minimize}} = \sum_{i=1}^4 \|p_i^c - \text{pro}(P_i^T)\|_2 + \lambda \|t_z^a - t_z^i\|_2$$

其中, $p_i^c$ 为图片上2D成像点, $\text{pro}(P_i^T)$ 表示空间合作目标上特征点的重投影函数, $\lambda$ 是权重因子,设为5, $t_z^a$ 表示矫正后的 $Z$ 方向位移值, $t_z^i$ 表示初始的 $Z$ 方向位移值,最小化上式,将得

到一个更加精确的位姿 $T'_a = [R'_a | t'_a]$ 。

## 一种合作目标远距离高精度六自由度位姿测量方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及基于多传感器融合的位姿测量的技术领域,具体涉及一种合作目标远距离高精度六自由度位姿测量方法。

### 背景技术

[0002] 目标高精度六自由度位姿测量有助于实现精确高效的机器操作,因此在自主机器人、精密加工和航天器对接等领域得到了广泛应用。单目视觉是一种非接触式的六自由度姿态测量方法,具有硬件复杂度低、精度高、测量范围广等优点,是目前最常用的六自由度姿态测量方法之一。然而,由于模型自身的限制,沿相机光轴的测量精度通常要比其他两个方向的测量精度低很多,根据赵连军等人《单目三点位置测量精度分析》(参见《光学精密工程》,2014年22卷(5)),沿相机光轴的测量精度只有其他两个方向的二十分之一。

[0003] 根据晁志超等人的《单目摄像机-激光测距传感器位姿测量系统》(参见《光学学报》,2011年31卷(3)85-91页),利用了激光测距仪所提供的深度值直接替换了单目视觉位姿测量结果中视线方向的位移值,没有考虑激光光斑弥散所带来的误差,因此它的矫正效果有限,只能达到毫米级精度。

### 发明内容

[0004] 本发明针对现有单目视觉测量中沿相机光轴方向的测量误差大的问题,提供了一种合作目标远距离高精度六自由度位姿测量方法,其是一种基于多传感器融合的解决方法。该方法可以利用激光测距仪得到的准确深度信息来矫正相机测得的初始位姿,同时能够消除因激光光斑弥散而引入的测量误差。本方法建立了光斑弥散圆,确定了初始测量位置与相机光心点所在直线,之后将两个传感器的融合问题转换成了求取一个空间圆面和一条空间直线的交点的几何问题。求取的交点即为矫正后的测量位姿,校正后,沿视线方向的位移测量精度高于其他两个方向。

[0005] 本发明采用的技术方案如下:一种合作目标远距离高精度六自由度位姿测量方法,包括如下步骤:

[0006] 步骤(1)、获取合作目标图像,根据PnP算法解算合作目标初始位姿 $T_i = [R_i | t_i]$ ,其中,R表示姿态信息,t表示位移信息,下标i代表这是初始结果;

[0007] 所述步骤(1)的具体过程为:

[0008] 步骤(11)、利用相机成像获取合作目标图像,然后基于灰度重心法提取合作目标特征成像中心点亚像素坐标 $p_i^c (i=1,2,3,4)$ ,并进行合作目标上的3D合作特征点 $P_i^T (i=1,2,3,4)$ 与对应的图片上的2D成像点 $p_i^c (i=1,2,3,4)$ 的匹配;

[0009] 步骤(12)、基于PnP算法,利用步骤(11)中的4对2D-3D匹配点进行位姿解算,得到合作目标坐标系相对于相机光心坐标系的位姿转换关系 $T_i = [R_i | t_i]$ 。

[0010] 步骤(2)、利用激光测距仪测量准确深度信息 $D_a$ 。

[0011] 步骤(3)、利用步骤(2)中的准确深度信息 $D_a$ 矫正步骤(1)中的初始位姿 $T_i = [R_i |$

$t_i$ ], 获取矫正后的位姿  $T_a = [R_a | t_a]$ , 其中, 下标a代表这是矫正后的结果;

[0012] 所述步骤(3)的具体过程为:

[0013] 步骤(31)、在相机坐标系中, 通过相机所测初始位置坐标  $t_i = [t_x^i \ t_y^i \ t_z^i]^T$  与相机光心坐标系原点  $0 = [0 \ 0 \ 0]^T$  可以确定一条直线  $L_{0T}$ , 其方程为  $\frac{x}{l} = \frac{y}{m} = \frac{z}{n}$ 。其中, 上标i代表这是初始结果,  $\{l, m, n\}$  表示直线的参数;

[0014] 步骤(32)、激光测距仪坐标系与相机光心坐标系的转换关系已事先标定, 可以用一个空间三维点和一个空间方向向量表示:

$$[0015] \quad O_{L0} = [x_L, y_L, z_L]^T$$

$$[0016] \quad n_{L0} = [n_{xL}, n_{yL}, n_{zL}]^T$$

[0017] 其中,  $x_L, y_L, z_L$  分别为激光测距仪坐标系原点位置在相机坐标系X, Y, Z方向的坐标值,  $n_{xL}, n_{yL}, n_{zL}$  从相机坐标系转到激光测距仪坐标系的欧拉旋转角。

[0018] 由于激光末端具有一定的弥散, 所以激光光斑不是一个精确的点, 而是有了一定的尺寸, 不失一般性, 我们假设激光光斑弥散成了一个半径为r的圆。由于我们已知激光测距仪坐标系在相机坐标系下的表示以及激光测距仪的所测的距离值, 因此可以求出激光光斑面中心点的坐标  $P = [x_r, y_r, z_r]^T$ , 进而通过以上条件求解出弥散圆的方程:

$$[0019] \quad \begin{cases} (x-x_r)^2 + (y-y_r)^2 + (z-z_r)^2 = r^2 \\ (x-x_r, y-y_r, z-z_r) * [n_{xL}, n_{yL}, n_{zL}]^T = 0 \\ (x_r-x_L)^2 + (y_r-y_L)^2 + (z_r-z_L)^2 = D_a^2 \end{cases}$$

[0020] 步骤(33)、求步骤(31)中确定的直线  $L_{0T}$  与本步骤(32)中所确定的圆面的交点, 所得的交点坐标即为矫正后的合作目标位置。联合方程如下所示:

$$[0021] \quad \begin{cases} (x-x_r)^2 + (y-y_r)^2 + (z-z_r)^2 = r^2 \\ (x-x_r, y-y_r, z-z_r) * [n_{xL}, n_{yL}, n_{zL}]^T = 0 \\ (x_r-x_L)^2 + (y_r-y_L)^2 + (z_r-z_L)^2 = D_a^2 \\ \frac{x}{l} = \frac{y}{m} = \frac{z}{n} \end{cases}$$

[0022] 解此方程将得到矫正后的合作目标位置坐标  $t_a = [t_x^a \ t_y^a \ t_z^a]^T$ , 其中, 上标a代表这是矫正后的结果; 用  $t_a$  更新  $T_i = [R_i | t_i]$  中的位移分量, 得到初步矫正后的位姿  $T_a = [R_a | t_a]$ 。

[0023] 步骤(4)、利用非线性优化方法对通过步骤(3)中得到的矫正后的位姿  $T_a = [R_a | t_a]$  进行进一步优化, 具体优化模型为:

$$[0024] \quad \underset{R_a, t_a}{\text{minimize}} = \sum_{i=1}^4 \|p_i^C - \text{pro}(P_i^T)\|_2 + \lambda \|t_z^a - t_z^i\|_2$$

[0025] 其中,  $p_i^C$  为图片上2D成像点,  $\text{pro}(P_i^T)$  表示空间合作目标上特征点的重投影函数,  $\lambda$  是权重因子, 一般设为5,  $t_z^a$  表示矫正后的Z方向位移值,  $t_z^i$  表示初始的Z方向位移值, 最小化上式, 将得到一个更加精确的位姿  $T'_a = [R'_a | t'_a]$ 。

[0026] 本发明与现有技术相比的优点在于:

[0027] (1) 本发明解决现有单目位姿测量方法中视线方向上误差较大的问题;

[0028] (2) 本发明消除了现有的相机与激光测距仪融合方法中因激光光斑弥散而引入的

误差；

[0029] (3) 本发明具有极高的精度，计算量小，稳定性高。

### 附图说明

[0030] 图1为本发明一种合作目标远距离高精度六自由度位姿测量方法具体流程图；

[0031] 图2为本发明的靶标坐标设计图；

[0032] 图3为本发明的合作目标特征在相机平面上的成像点；

[0033] 图4为本发明的融合方法示意图。

### 具体实施方式

[0034] 以下结合具体实施例对本发明作进一步详细描述。

[0035] 本发明一种合作目标远距离高精度六自由度位姿测量方法具体流程图如图1所示，设测试距离为10米。合作目标设计见图2，经三坐标仪标定后的六个LED的准确坐标如表1所示。

[0036] 表1六个LED的准确坐标

	$X$	$Y$	$Z$
[0037] $P_1^T$	89.656866	-90.0833404	5.808255
$P_2^T$	-90.243134	-89.4833404	6.108255
$P_3^T$	-89.543134	90.6166596	5.808255
$P_4^T$	90.456866	89.8166596	5.808255

[0038] 本发明具体步骤如下：

[0039] 步骤(1)、获取合作目标图像，根据PnP算法解算合作目标初始位姿 $T_i = [R_i | t_i]$ ，所述步骤(1)的具体过程为：

[0040] 步骤(11)、相机成像，然后基于灰度重心法提取合作目标特征成像中心点亚像素坐标 $p_i^C (i=1,2,\dots,4)$  (图3为某次实验中合作目标特征所成的像，表2为成像点的亚像素图像坐标)，并进行合作目标上的3D合作特征点 $P_i^T (i=1,2,3,4)$ 与对应的图片上2D成像点 $p_i^C (i=1,2,3,4)$ 的匹配；

[0041] 表2成像点的亚像素坐标

	$x$	$y$
[0042] $P_1^C$	2346.099805	1220.499157
$P_2^C$	677.168933	1215.179046
$P_3^C$	671.196956	2885.085893
$P_4^C$	2340.179022	2891.404030

[0043] 步骤(12)、基于PnP算法，利用步骤(11)中的4对2D-3D匹配点进行位姿解算，得到

合作目标坐标系相对于相机光心坐标系的位姿转换关系 $T_i = [R_i | t_i]$ 。表3为此次测量所得的初始位姿。

[0044] 表3测量所得的初始位姿

	参数	$R_x^i$	$R_y^i$	$R_z^i$
	数值 (°)	0.2092	-2.1100	0.4426
[0045]	参数	$t_x^i$	$t_y^i$	$t_z^i$
	数值 (mm)	-14.0786	-31.6568	9972.3824

[0046] 步骤(2)、利用激光测距仪测量准确深度信息 $D_a$ 。

[0047] 步骤(3)、利用步骤(2)中的准确深度信息 $D_a$ 矫正步骤(1)中的初始位姿 $T_i = [R_i | t_i]$ ,获取矫正后的准确位姿 $T_a = [R_a | t_a]$ ,所述步骤(3)的具体过程为:

[0048] 步骤(31)、在相机坐标系中,通过相机所测初始位置坐标 $t_i = [t_x^i \ t_y^i \ t_z^i]^T$ 与相机光心坐标系原点 $O = [0 \ 0 \ 0]^T$ 可以确定一条直线 $L_{O_i}$ ,其方程为 $\frac{x}{l} = \frac{y}{m} = \frac{z}{n}$ ;

[0049] 步骤(32)、激光测距仪坐标系与相机光心坐标系的转换关系已事先标定,可以用一个空间三维点和一个空间方向向量表示:

$$[0050] \quad O_{L_0} = [x_L, y_L, z_L]^T$$

$$[0051] \quad n_{L_0} = [n_{xL}, n_{yL}, n_{zL}]^T$$

[0052] 其中, $x_L, y_L, z_L$ 分别为激光测距仪坐标系原点位置在相机坐标系 $X, Y, Z$ 方向的坐标值, $n_{xL}, n_{yL}, n_{zL}$ 从相机坐标系转到激光测距仪坐标系的欧拉旋转角。

[0053] 由于激光末端具有一定的弥散,所以激光光斑不是一个精确的点,而是有了一定的尺寸,不失一般性,假设激光光斑弥散成了一个半径为 $r$ 的圆。由于已知测距仪坐标系在相机坐标系下的表示以及激光测距仪的所测的距离长度,因此可以求出激光光斑中心点的坐标 $P = (x_r, y_r, z_r)$ ,进而通过以上条件求解出弥散圆的方程:

$$[0054] \quad \begin{cases} (x-x_r)^2 + (y-y_r)^2 + (z-z_r)^2 = r^2 \\ (x-x_r, y-y_r, z-z_r) * [n_{xL}, n_{yL}, n_{zL}]^T = 0 \\ (x_r-x_L)^2 + (y_r-y_L)^2 + (z_r-z_L)^2 = D_a^2 \end{cases}$$

[0055] 步骤(33)、求步骤(31)中确定的直线 $L_{O_i}$ 与步骤(32)中所确定的圆面的交点,所得的交点坐标即为矫正后的合作目标位置坐标。联合方程如下所示:

$$[0056] \quad \begin{cases} (x-x_r)^2 + (y-y_r)^2 + (z-z_r)^2 = r^2 \\ (x-x_r, y-y_r, z-z_r) * [n_{xL}, n_{yL}, n_{zL}]^T = 0 \\ (x_r-x_L)^2 + (y_r-y_L)^2 + (z_r-z_L)^2 = D_a^2 \\ \frac{x}{l} = \frac{y}{m} = \frac{z}{n} \end{cases}$$

[0057] 解此方程将得到矫正后的合作目标位置坐标 $t_a = [t_x^a \ t_y^a \ t_z^a]^T$ ,用 $t_a$ 更新 $T_i = [R_i | t_i]$ 中的位移分量,得到初步矫正后的位姿 $T_a = [R_a | t_a]$ 。表4为对此次测量值进行矫正所得的位姿。



[0058] 表4对测量值进行矫正所得的位姿

参数	$R_x^a$	$R_y^a$	$R_z^a$
数值 (°)	0.2084	-2.1231	0.4452
参数	$t_x^a$	$t_y^a$	$t_z^a$
数值 (mm)	-14.0861	-31.6412	9971.2457

[0060] 步骤(4)、利用非线性优化方法对通过步骤(3)中得到的矫正后的位姿 $T_a = [R_a | t_a]$ 进行进一步优化提升精度,具体优化模型为:

$$[0061] \quad \underset{R_a, t_a}{\text{minimize}} = \sum_{i=1}^4 \|p_i^C - \text{pro}(P_i^T)\|_2 + \lambda \|t_z^a - t_z^i\|_2$$

[0062] 最小化上式,将得到一个更加精确的位姿 $T'_a = [R'_a | t'_a]$ 。表5为对此次矫正结果进行进一步优化所得的位姿,利用AT460激光测距仪测量的位姿(可以视为真实值)以及此次的测量误差。

[0063] 表5对矫正结果进行进一步优化所得的位姿

试验项目	测量结果	
	R (°)	t(mm)
[0064] 测量值	(0.2082, -2.1231, -0.4453)	(-14.0872, -31.6410, 9971.2468)
真实值	(0.2070, -2.1241, -0.4473)	(-14.1073, -31.6275, 9971.2480)
误差	(0.0012, 0.0011, 0.0020)	(0.021, 0.0135, 0.0012)

[0065] 本发明未详述部分属于本技术领域的公知技术。以上所述仅为本发明的具体实例而已,并不用于以限制本发明,凡在本发明的精神和原则之内所作的任何修改、等同替换和改进等,均应包含在本发明的保护范围之内。

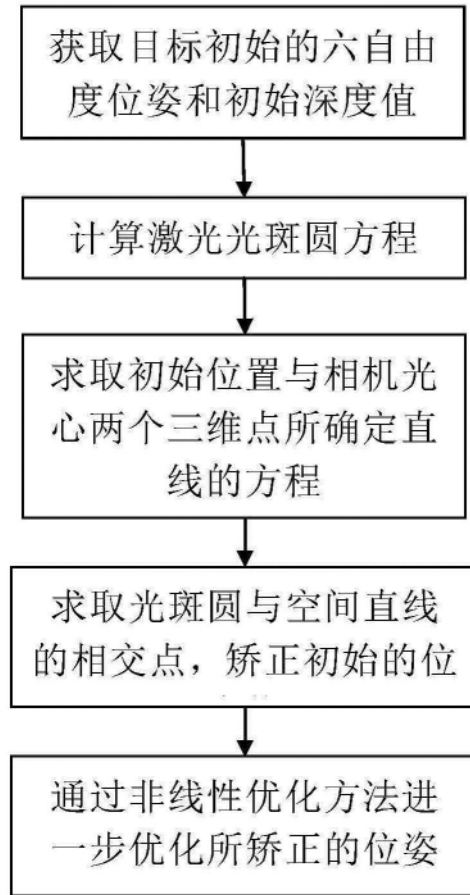


图1

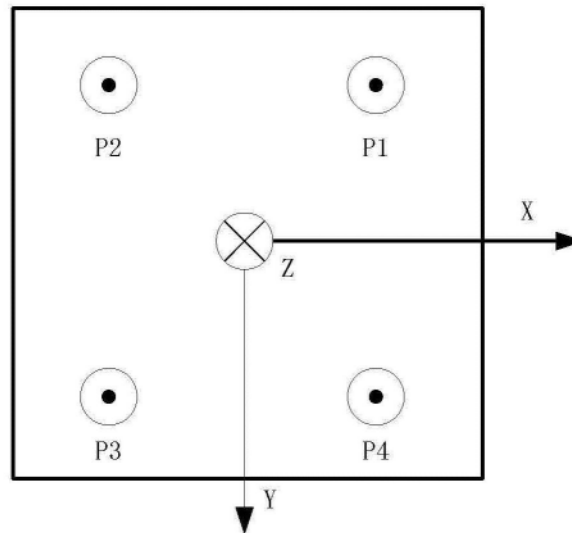


图2

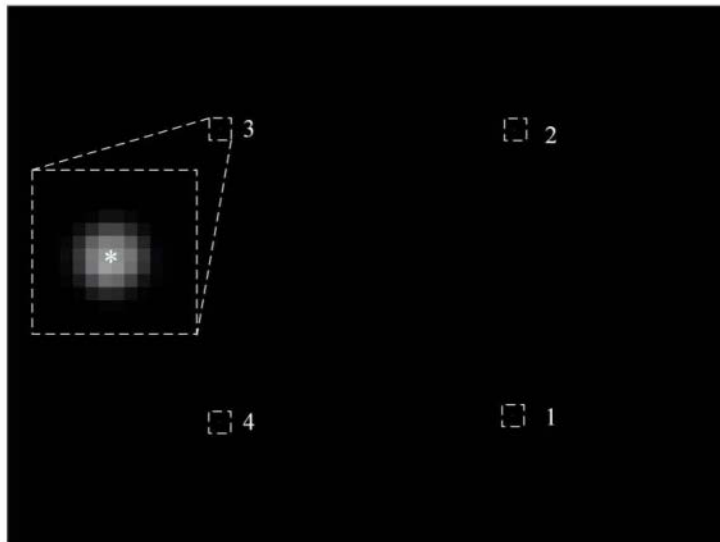


图3

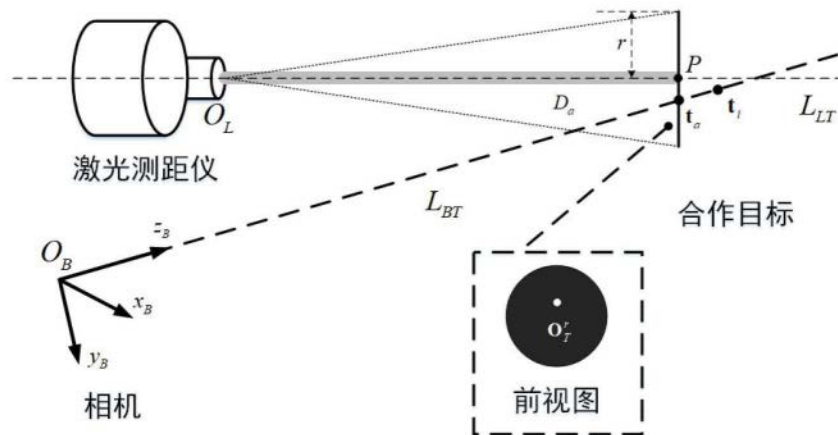


图4