

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2006088

基于 Y 型 CCD 的室内运动目标定位方法*

郑雪¹, 杨庆华¹, 屠晓伟¹, 王闯¹, 夏国清²

(1. 上海大学机电工程与自动化学院 上海 200444; 2. 上海飞机制造有限公司 上海 201324)

摘要:室内定位技术在智能体自主导航方面具有广阔的应用前景。为了获取运动目标在悬浮状态下的位置与姿态角,设计了一种新型的 Y 型光学室内定位传感器(YPS),其由 3 个线性电荷耦合器件(CCD)和 3 个柱面透镜组合成 Y 型结构。根据固定在运动目标上的 YPS 可作为接收端且可运动的特点,在其可测视域范围内通过依次采集 3 个可见点光源在 YPS 上的像坐标,建立空间点光源的三维重建模型和基于 Y 型定位传感器上合作点的四元数位姿解算算法,即可解算出运动目标的三维坐标和姿态角。通过仿真与实验,分析了不同参数对位姿误差的影响,并在柱面透镜线性度较好的中心部位,验证了新 Y 型定位传感器可实现准确的单点定位的方法,其三维坐标的误差不大于 3 mm,并可以确定室内运动目标基于全局坐标系的位置与姿态信息。

关键词: Y 形室内定位传感器; 线性 CCD; 重建模型; 姿态解算

中图分类号: TP274 TH39 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.20

Location method of indoor moving target based on Y-configuration CCD

Zheng Xue¹, Yang Qinghua¹, Tu Xiaowei¹, Wang Chuang¹, Xia Guoqing²

(1. School of Mechatronic Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 200444, China;

2. Shanghai Aircraft Manufacturing Corporation Ltd, Shanghai 201324, China)

Abstract: The indoor positioning technology has broad application prospects in autonomous navigation of agents. To obtain the position and attitude angle of the moving target in the suspended state, a novel Y-configuration optical indoor positioning sensor (YPS) is designed. It consists of three linear charge-coupled device (CCD) and three cylindrical lenses. According to the movable and the receiving terminal characteristics of YPS fixed on the moving target, a three-dimensional reconstruction model of spatial point light sources and a quaternion pose calculation algorithm based on cooperative points on YPS are established. When the image coordinates of three visible point light sources are collected in turn. Then, the coordinates and attitude angle of the moving target can be solved when the moving target is within the measurable view field of YPS. Simulation and experiment analyze the influence of different parameters on YPS. In the center of cylinder lens with good linearity, it is verified that the new YPS can achieve accurate single point positioning. The error of point coordinate is not larger than 3 mm. The pose information of indoor moving target can be determined.

Keywords: Y-configuration indoor positioning sensor; linear charge-coupled device (CCD); reconstruction model; pose calculation

0 引言

室内智能体自主导航规划一直都是研究的热点,其前提是获取运动物体的位姿信息。因此,空间物体的定位与姿态测量技术研究极为重要,其主要技术有蓝牙、射频、惯导系统以及计算机视觉等定位方法^[1-2]。

对于精确的无线局域网(wireless local area network, WLAN)定位,有基于信号强度测量、三角测量和指纹识别的方法。Ramsey 等^[3]研究了使用低功耗蓝牙设备作为信标的室内定位技术,其使用指纹比对算法来完成定位,取得了较好的定位精度。室内超宽带定位系统的一个关键要素是测距,主要取决于到达时间(time of arrival, TOA)估计。TOA 估计存在一些关键的挑战,如

电子干扰、密集多径等问题^[4-5]。基于惯性传感器,一种分布式个人定位系统在惯性测量单元(inertial measurement unit, IMU)中计算步长和航向估计并发送到服务器^[6],在服务器端使用基于粒子滤波的地图匹配来估计位置,但这会导致较长的操作时间,不利于紧急情况的室内状态更新。

在室内光学定位技术领域,文献[7-8]研究了一种基于差分光传感器的室内光学定位技术。该方法基于差分光传感器在室内固定光信标环境下估计的到达角信息得到定位信息。近些年基于光学摄像机通信的室内可见光实时定位系统是一个研究热点^[9],该系统通过发光二极管光源传输开关键控格式的坐标数据,并用智能手机摄像机采集。由于动态因素的干扰,视觉定位系统的性能有所下降。为了解决此问题,文献[10]提出了一种新颖的稀疏运动去除模型,可减少检测输入帧的不确定性。由于单目视觉无法得到目标物体的深度信息^[11],难以估计三维位置信息,而双目视觉则可利用2个相对位置固定的摄像机来获取载体的三维位姿估计信息,通过卡尔曼滤波得到稳定的位姿估计^[12]。另外,基于光电系统的测量技术,通过电荷耦合器件(charge-coupled device, CCD)可结合光学测量用于重建空间点云的坐标^[13-14]。艾莉莉等^[15]提出了借助线阵 CCD 重构空间点云的三维坐标来实现空间物体姿态测量,该系统侧重对被测物体上点合作目标的研究。基于文献[13-15]的研究,为了得到更精确的位姿信息,基于 Rodrigues 参数的姿态解算和改进的正交迭代算法都可提高位姿解算的精度^[16-17]。由于多线阵 CCD 定位系统存在通信延迟问题,因此面向室内定位的分布式融合算法也有巨大的研究意义^[18]。

为实现运动目标的位置与姿态可同时测量目的,本文设计了一种新的运动目标定位方法,无论运动目标处于水平还是翻转状态,都可同时解算出三维位置和姿态。本文主要有3个创新点:第一,设计了一种 Y 形定位传感器(Y-configuration positioning sensor, YPS),它由三个一维成像单元(one dimensional imaging unit, ODIU)组合成 Y 形空间结构,一维成像单元由柱面透镜和线性 CCD 组成,作为接收端且可以运动与翻转,将其固定安装在运动目标表面上,其传感器本体坐标系即为机体坐标系,易于表示运动目标的旋转姿态角;第二,特殊结构下的本体坐标系使得标定 Y 型定位传感器的内部参数减少,重建模型得到简化,并设计基于 Y 形定位传感器上合作点的四元数位姿解算算法;第三,与文献[15]相比,不需要多组不同方位的相机,即可同时解算运动目标的三维坐标和姿态角。

1 CCD 成像模型

以一维成像单元为例来阐述点光源三维坐标与像坐

标之间的关系,用于解算形 Y 型定位传感器内外方位元素,如图1所示。

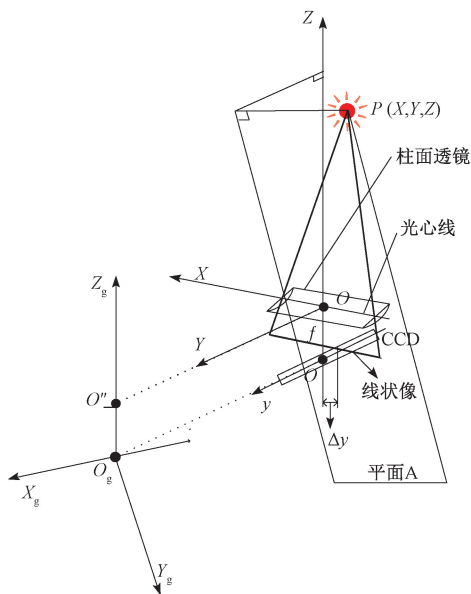


图1 一维成像单元

Fig. 1 The one dimensional imaging unit

一个光点 P 在柱面镜坐标系 $O-XYZ$ 的坐标为 (X, Y, Z) , 是空间中的一个物点。光点在其物距远大于透镜焦距时,在柱面透镜焦平面上形成一线状像,平行于柱面透镜的光心线。平面 A 是点与柱面透镜光心线所确定的平面,且 P 点的线状像在平面 A 上。 $O-X_g Y_g Z_g$ 为参考坐标系, y 轴表示一维像坐标。线状像与线阵 CCD 垂直相交于 y 轴上一点,即为像点坐标。设镜头没有畸变, f 为镜片焦距,可得投影模型^[15]为:

$$y = -f \cdot \frac{Y}{Z} + y_0 \quad (1)$$

由于机械误差,平行光束透过透镜后,和线性 CCD 相交的投影点不是恰好落在 CCD 的中心位置,而是会有一个很小的偏移量 y_0 ,故实际的像坐标大小应是 $y-y_0$ 。

2 定位算法模型

2.1 空间坐标重建模型

空间点光源通过柱面透镜会形成一条与线性 CCD 传感器垂直的直线,并得到直线在 CCD 上的像坐标,直线与透镜焦点以及点光源在同一平面内,因此3个成像单元会产生3个平面相交于一点,即可得到该点的三维空间坐标与其投影到 CCD 上的像坐标之间的关系。基于该理论进行建模,本文提出的设计是基于目标运动的情况下,仍可以采集到目标的外姿态元素和

三维坐标,因此要求本体坐标系 $E - O_g X_g Y_g Z_g$ (记为②)与柱面镜坐标系 $E - OX'Y'Z'$ (记为③)的转换模型保持不变,用来重建点光源在本体坐标系下的空间坐标,其中大地坐标系 $E - OXYZ$ (记为①),建立坐标

系如图2所示,使 Z_g 轴与 Z' 轴都垂直于柱面透镜的底平面。本体坐标系②原点 O_g 位于3个线性 CCD 的中轴延长线交点, O'' 是 O_2' 投影到 Z_g 的交点, O_g 到 O'' 的距离为镜片焦距 f 。

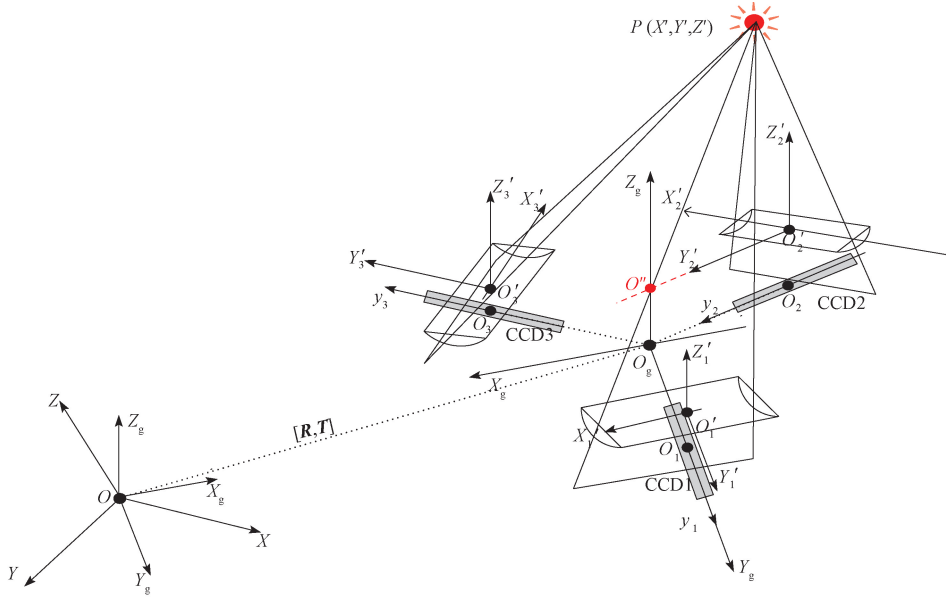


图2 三维重建模型

Fig. 2 The 3D reconstruction model

O_g 到 O'' 的距离为镜片焦距 f ,则本体坐标系②与柱面镜坐标系③的平移向量的 Z 轴分量 $Z_{g0} = -f$ 。理论上,由于本体坐标系②与柱面镜坐标系③的 XOY 平面平行,故两个坐标系之间只有 Z 轴旋转,因此本体坐标系②与柱面镜坐标系③的旋转和平移向量为:

$$R = \begin{bmatrix} R_1^T \\ R_2^T \\ R_3^T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & 0 \\ r_{21} & r_{22} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, T = \begin{bmatrix} X_{g0} \\ Y_{g0} \\ -f \end{bmatrix} \quad (2)$$

结合式(1)和(2)可得本体坐标系②与一维像坐标系的数学模型为:

$$L_1 X_g + L_2 Y_g + L_3 Z_g + L_4 = \left(1 + \frac{Z_g}{-f}\right) y_1 \quad (3)$$

其中模型系数 $L_1 \sim L_4$ 为:

$$\begin{cases} L_1 = \frac{y_0 r_{31} - f r_{21}}{Z_{g0}} = \frac{y_0 r_{31}}{-f} + r_{21} = r_{21} \\ L_2 = \frac{y_0 r_{32} - f r_{22}}{Z_{g0}} = \frac{y_0 r_{32}}{-f} + r_{22} = r_{22} \\ L_3 = \frac{y_0 r_{33} - f r_{23}}{Z_{g0}} = \frac{y_0 r_{33}}{-f} + r_{23} = \frac{y_0 r_{33}}{-f} = \frac{y_0}{-f} \\ L_4 = \frac{y_0 Z_{g0} - f Y_{g0}}{Z_{g0}} = Y_{g0} + y_0 \end{cases} \quad (4)$$

由式(4)可知,当已知4个空间点在本体坐标系下的坐标和其对应的像坐标时,通过最小二乘法可计算Y型传感器中一维成像单元的4个系数,同理本体坐标系②与其他两个一维像坐标系 $O_2 y_2$ 和 $O_3 y_3$ 的关系亦可得到,进而可求解Y型定位传感器的内外参数,这是固定参数,只需在使用Y型定位传感器前进行一次标定或者模拟仿真即可得到内外参数,为避免矩阵计算产生奇异值,在实验选取具有高度差的空间点光源。因此当构建3个一维成像单元即可重建点光源在本体坐标系下的空间坐标,重写式(3)得到空间重建模型,如式(5)所示。 $L_1^i, L_2^i, L_3^i, L_4^i$ 分别代表第 i 个一维成像单元的模型系数。 y_1, y_2, y_3 分别表示点光源在3个一维成像单元上的像坐标,因此可解算出点光源在本体坐标系下的坐标 (X_g, Y_g, Z_g) ,实现点光源重建,即单点定位。另外,文献[13]中利用七点重建模型对空间点光源重建大地坐标,本文基于七点重建模型,根据YPS特殊的结构特点设计文献中的大地坐标系通过平移放置于YPS传感器中心位置作为本体坐标系,因此也可利用七点重建模型解算出点光源在本体坐标系下的坐标信息。

$$\begin{bmatrix} L_1^1 & L_2^1 & L_3^1 + \frac{y_1}{f} \\ L_1^2 & L_2^2 & L_3^2 + \frac{y_2}{f} \\ L_1^3 & L_2^3 & L_3^3 + \frac{y_3}{f} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_g \\ Y_g \\ Z_g \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_1 - L_4^1 \\ y_2 - L_4^2 \\ y_3 - L_4^3 \end{bmatrix} \quad (5)$$

2.2 位姿转换模型

由欧拉定理可知空间刚体作定点转动时,刚体绕一欧拉轴旋转一角度,这个角度对应的圆弧可由一规范四元数表示,因此,提出基于Y型多线阵CCD的四元数位姿解算来描述空间刚体的定点旋转。在图3中的Y型定位传感器本体坐标系 $E - O_g X_g Y_g Z_g$ 上设线段 $M_0 M_1$ 、 $M_0 M_2$ 的方向矢量分别为 $\mathbf{n}_1$ 和 $\mathbf{n}_2$,初始位置在本体坐标系中的单位矢量分别为 $\mathbf{n}_1^g$ 和 $\mathbf{n}_2^g$ 。

$$\begin{cases} \mathbf{n}_1^g = [1 & 0 & 0] \\ \mathbf{n}_2^g = [1 & 0 & 0] \end{cases} \quad (6)$$

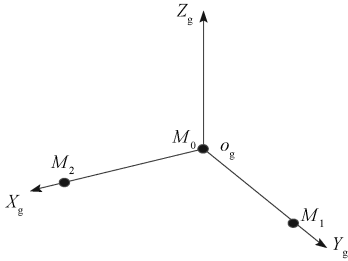


图3 矢量关系图

Fig. 3 Vector relationship

本体坐标系旋转后形成新的参考坐标系 $E - O_k X_k Y_k Z_k$, 矢量 $\mathbf{n}_1$ 和 $\mathbf{n}_2$ 在其上的单位矢量分别为 $\mathbf{n}_1^k$ 和 $\mathbf{n}_2^k$ 。

$$\mathbf{n}_1^k = [n_{11}^k \ n_{12}^k \ n_{13}^k] = \begin{bmatrix} \frac{x_1^n - x_0^n}{\|\mathbf{n}_1\|} & \frac{y_1^n - y_0^n}{\|\mathbf{n}_1\|} & \frac{z_1^n - z_0^n}{\|\mathbf{n}_1\|} \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\mathbf{n}_2^k = [n_{21}^k \ n_{22}^k \ n_{23}^k] = \begin{bmatrix} \frac{x_2^n - x_0^n}{\|\mathbf{n}_2\|} & \frac{y_2^n - y_0^n}{\|\mathbf{n}_2\|} & \frac{z_2^n - z_0^n}{\|\mathbf{n}_2\|} \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中: $(x_i^n, y_i^n, z_i^n, i = 1, 2, 3)$ 表示 M_i 在世界坐标系下的坐标; $\|\mathbf{n}_1\|$ 表示 $M_1 M_0$ 的模长; $\|\mathbf{n}_2\|$ 表示 $M_2 M_0$ 的模长。由式(7)和(8)可知,需获取 M_i 的世界坐标。根据刚体绕定点旋转不会改变矢量的长度,可知在旋转前后空间标识点(点光源)到 M_i 的矢量距离相同,因此有:

$$\begin{aligned} (x_{p_i}^g - x_{M_i}^g)^2 + (y_{p_i}^g - y_{M_i}^g)^2 + (z_{p_i}^g - z_{M_i}^g)^2 = \\ (x_{p_i}^n - x_{M_i}^n)^2 + (y_{p_i}^n - y_{M_i}^n)^2 + (z_{p_i}^n - z_{M_i}^n)^2 \end{aligned} \quad (9)$$

式中: $(x_{p_i}^g, y_{p_i}^g, z_{p_i}^g)$ 表示第 i 个标识点 P 的本体坐标,由Y型定位传感器重建模型得到; $(x_{M_i}^g, y_{M_i}^g, z_{M_i}^g)$ 表示第 i 个 M 点的本体坐标,选取 M 点即可得到; $(x_{p_i}^n, y_{p_i}^n, z_{p_i}^n)$ 表示第 i 个 P 点的世界坐标,由三坐标机械臂测量仪测量得到; $(x_{M_i}^n, y_{M_i}^n, z_{M_i}^n)$ 表示第 i 个 M 点的世界坐标,由3个标识点 P 构建3个等式(9)可解算出 M_i 在世界坐标系下的坐标,再代入式(7)和(8)中。空间目标作定点转动的旋转矩阵用 $\mathbf{R}$ 表示。

$$\mathbf{n}_i^k = \mathbf{R} \cdot \mathbf{n}_i^g \quad (10)$$

其中, $\mathbf{R}$ 为四元数所表示的旋转矩阵,则将式(6)~(8)代入式(10)得到四元数参数为:

$$\begin{cases} q_0 = \frac{\sqrt{(n_{12}^k + n_{21}^k)} + \sqrt{(n_{12}^k + n_{21}^k)^2 + (n_{11}^k - n_{22}^k)^2}}{2} \\ q_1 = \frac{n_{11}^k + n_{22}^k}{2\sqrt{(n_{12}^k - n_{21}^k)} + \sqrt{(n_{12}^k - n_{21}^k)^2 + (n_{11}^k + n_{22}^k)^2}} \\ q_2 = \frac{\sqrt{(n_{12}^k - n_{21}^k)} + \sqrt{(n_{12}^k - n_{21}^k)^2 + (n_{11}^k + n_{22}^k)^2}}{2} \\ q_3 = \frac{\sqrt{-(n_{12}^k + n_{21}^k)} + \sqrt{(n_{12}^k + n_{21}^k)^2 + (n_{11}^k - n_{22}^k)^2}}{2} \end{cases} \quad (11)$$

用四元数参数表示欧拉姿态角,这3个角即对应被测物体的偏航角、滚转角和俯仰角,具体见式(12)。

$$\begin{cases} \alpha = \arctan\left(\frac{2(q_0 q_3 - q_1 q_2)}{q_0^2 - q_1^2 + q_2^2 - q_3^2}\right) \\ \beta = \arctan(2(q_0 q_1 + q_2 q_3)) \\ \gamma = \arctan\left(\frac{2(q_0 q_2 - q_1 q_3)}{q_0^2 - q_1^2 - q_2^2 + q_3^2}\right) \end{cases} \quad (12)$$

两坐标系下同一点光源的空间坐标通过 $\mathbf{A} = \mathbf{R} \cdot \mathbf{B} + \mathbf{T}$ 可求出本体坐标系的原点在世界坐标系下的坐标, $\mathbf{A}$ 是空间点的世界坐标系, $\mathbf{B}$ 是空间点的本体坐标系。

2.3 定位系统设计

如图4所示,图中假设方形物体为运动目标,将YPS安装在运动物体上,运动目标的质心与本体坐标系的原点 O_g 重合。在室内天花板上均匀布置发光点依此点亮,发光点已用三坐标机械臂测量仪标定,根据定位模型,首先采集到4个点光源在Y型定位传感器的投影偏移量,根据空间点坐标重建方法解算出YPS的三维重建模型,在实验中只需进行一次。当物体运动到某个位置时,先根据重建模型计算出点光源在本体坐标系下的空间坐标,继而通过基于YPS上合作点的四元数位姿模型解算出运动物体的姿态角、全局坐标系与本体坐标系的旋转矩阵、本体坐标系的原点在全局坐标系下的坐标即与运动目标的位置信息。

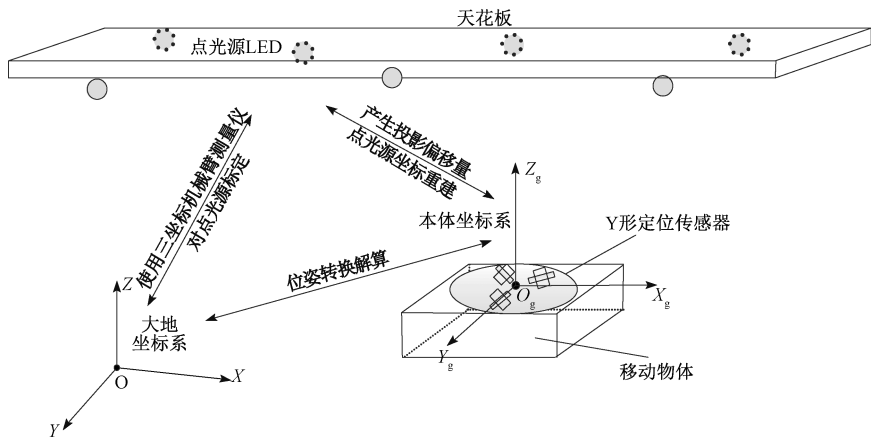


图4 定位系统设计
Fig. 4 Positioning system design

3 仿真与实验

3.1 Y形定位传感器的视域范围仿真

1) 从传感器出发确定空间可测视域范围

从传感器角度观测空间可测范围,即从每个传感器上的任一点出发,经过各自透镜的焦点得到3个平面束。每个平面束中可确定一个唯一平面,3个唯一平面的相交点即为传感器上此点对应的空间可测点光源。传感器长度为 l_1 ,传感器像素数为 M ,则传感器步长为 l_1/M ,步长越小,传感器上分布的点越多,确定的空间可测点就越多。设传感器长度为 $l_1=15\text{ mm}$,传感器内端距本体坐标系原点长度为 $l_2=10\text{ mm}$, $f=30\text{ mm}$, $M=20$,室内空间环境为 $X=[-2\ 000,2\ 000]\text{ mm}$, $Y=[-2\ 000,2\ 000]\text{ mm}$, $Z=[0,3\ 000]\text{ mm}$,建立可测范围的算法模型,得其可测范围如图5所示。

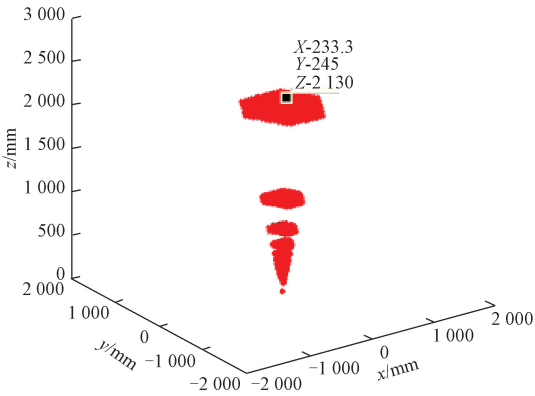


图5 从传感器出发确定空间可测范围
Fig. 5 Determination of the space measurable range from the sensor

2) 从空间点光源出发确定空间可测视域范围

从点光源出发观测空间可测范围,结合实际室内环境,一般在同一高度下均匀布置点光源,因此仿真从同一平面的点光源出发,经过透镜焦点来确定平面。设置 $l_1=15\text{ mm}$, $l_2=10\text{ mm}$, $f=30\text{ mm}$,仿真环境分别为 $X=[-2\ 000,2\ 000]\text{ mm}$, $Y=[-2\ 000,2\ 000]\text{ mm}$, $Z=[0,6\ 000]\text{ mm}$, X 和 Y 同时以步长为1进行循环取点,可测范围如图6所示。

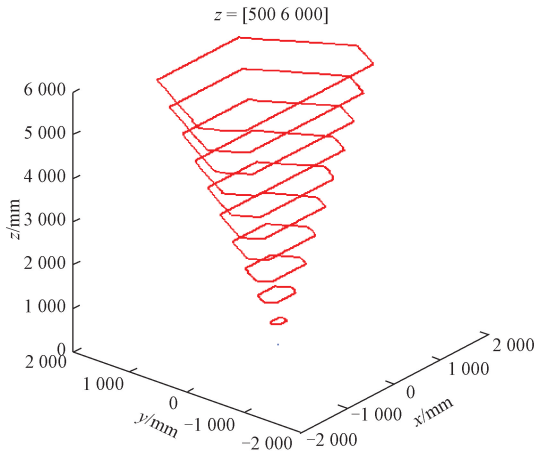


图6 从空间点光源出发确定空间可测范围
Fig. 6 Determination of the space measurable range from the space

由上述仿真图可知从空间点光源出发确定的测量范围是一层多边形平面,随着高度的递增,每一层平面的形状由一个点变为三角形再逐渐变为多边形,从两个方面仿真的空间可测范围的变化趋势相同,说明了仿真算法的正确性和可行性。经过仿真可知以下条件为不可测情况:(1)从传感器角度出发考虑,三个空间平面互相垂直相交,无公共相交点,为不可测情况;(2)从传感器角度

出发考虑,任意两平面平行,三平面无公共相交点,为不可测情况;(3) CCD 上感知的 3 组一维像坐标 $y_i(i = 1, 2, 3)$, 有两个以上像坐标在 CCD 中心位置和坐标原点之间,此点为不可测点。

3.2 Y 型传感定位方法的参数仿真

对重建模型在不同高度进行仿真,仿真过程保留像素偏移量小数点后 3 位,假设标识点 X 、 Y 坐标 (549, 239) 不变,根据重建模型在 Z 轴高度从 1 000 mm 到 8 000 mm 等间隔采样进行 230 次实验,图 7 所示为对应的重建误差。从重建模型算法可行性上分析,可知标识点高度在 4 000 mm 以内, X 、 Y 轴误差在 0.3 mm 以下, Z 轴误差在 2 mm 以下,比 X 、 Y 轴重建误差大。从高度对误差影响上分析,可观察到随高度增大,标识点高度造成重建误差呈增大趋势,在 4 000 mm 以上高度,对 Z 轴重建误差增大最为明显。

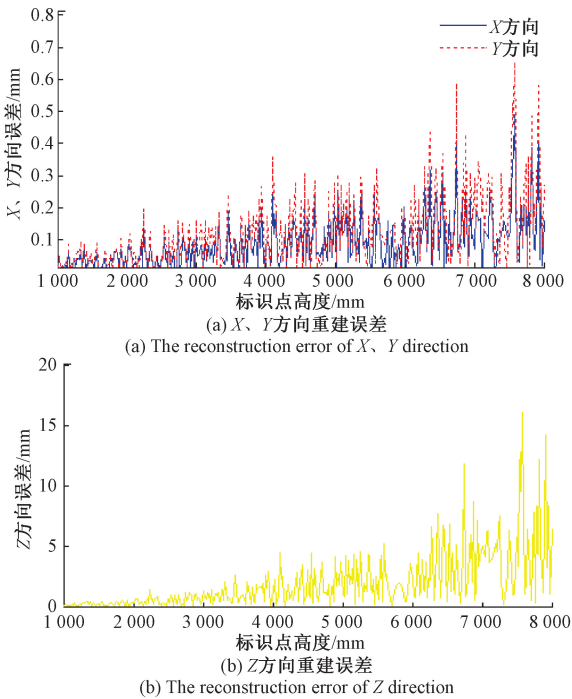


图 7 标识点高度与重构误差

Fig. 7 Height of identification point and reconstruction error

由于姿态角的解算对该定位方法的定位准确度有一定的影响,将具有服从正态分布误差的姿态角作为测量值, μ 表示测量系统的系统误差, σ^2 表示测量系统的随机误差大小。设定理论姿态角为 $\pi/3, \pi/4, \pi/6$, 利用理论姿态角和带误差的姿态角测量值解算定位坐标,其误差如图 8 所示,数据 1 是姿态角 (单位为弧度) 服从均值和方差为 $\mu = 0.01, \sigma^2 = 0.02$, 数据 2 为 $\mu = 0.01, \sigma^2 = 0.06$ 。从图 8 中可看出,姿态角测量的准确度对定位误差有较大影响,较小的姿态角测量误差会引起误差较大

的定位结果。在姿态角测量过程中会因为实际因素的限制,而存在不确定性的随机误差,随机误差越大造成的定位误差越大。

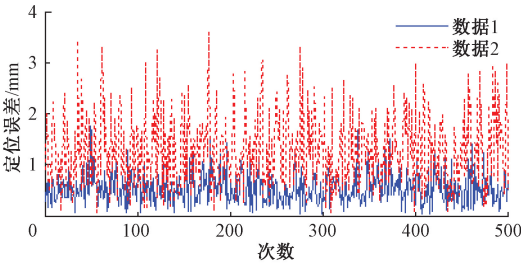


图 8 姿态角误差对定位结果的影响情况

Fig. 8 Influence of attitude angle error on positioning results

3.3 相机参数标定实验

为了验证本文算法模型的准确性和 Y 型定位传感器的定位性能,由于各种实际因素的影响,选择在室内模拟环境下进行,实验如图 9 所示。实验都满足以下前提条件:1) 实验均在本文设计制作的 Y 型定位传感器上进行,保持实验参数一致性;2) 实验采集的点集空间坐标基于大地坐标,且大地坐标在三坐标机械臂测量仪上;3) 使用高功率发光二极管 (light emitter diode, LED), 且使用 CCD 传感器 (型号 TCD1304) 最为敏感的波长为 560 nm 的绿色光源。实验参数如表 1 所示。

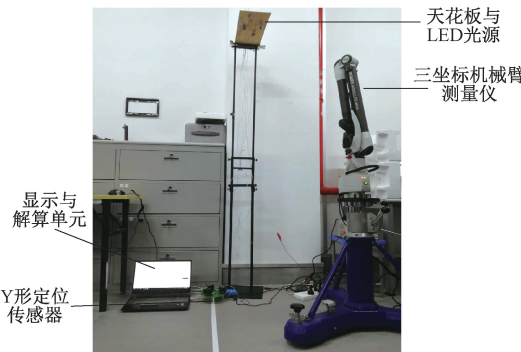


图 9 实验环境

Fig. 9 The experimental environment

表 1 实验参数

Table 1 Experimental parameters

参数		参数	
CCD 像素	3 496 pixel	l_1	29.1 mm
CCD 主频	0.8 MHz	l_2	40.85 mm
焦距	38 mm	环境	[0, 1 000] mm
			[0, 1 000] mm
			[0.2 000] mm

为验证本文算法的准确性和有效性,采用文献[13]中的点光源测量方法进行对比实验。实验部署 7 个 LED 点光源,它们的三维坐标值已通过高精度的三坐标机械臂测量仪测得。通过控制 LED 点光源顺序发光,每一个线性 CCD 记录点光源的像坐标,并把结果传送到计算机中。移动点光源支架重复上述过程 3 次,可获得 21 个点光源用于标定相机的内部物理系数,其中 10 个点光源作为测试点,用于评估三维坐标重建的精度。将获得的点光源理论值(三坐标机械臂测量仪测量)与 Y 型定位传感器测得的像坐标代入式(3)中,获得 Y 型定位传感器的 L 系数如表 2 所示。

表 2 L 系数
Table 2 L coefficient

参数	L_1	L_2	L_3	L_4
CCD1	0	0.99	-0.000 1	55.71
CCD2	0.877 6	0.505 8	-0.000 5	55.35
CCD3	0.870 8	-0.499 1	-0.000 3	55.30

文献[13]中的重建模型与本文不同,本文中 Y 型定位传感器本体坐标系如图 2 所示,由于 Y 型定位传感器的一维成像单元和本体坐标系之间特殊的建立关系,两

坐标系统 Z 轴旋转使得 Z 轴方向的向量变换不变。本文将文献[13]中的本体坐标系由三坐标机械臂测量仪内部的坐标系通过平移切换到 Y 型定位传感器上,因此其 XOY 平面不在于 Y 型定位传感器的表面上,与一维成像单元的柱面镜坐标系不是只绕 Z 轴旋转,会有 7 个 L 系数。将上述 L 系数代入式(3)可获得本文的重建模型,利用文献[13]的重建模型可获得 7 个参数重建模型。

3.4 单点定位实验

三维坐标重建的误差评价函数由式(13)表示。

$$e = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (q_i - p_i)^2}$$

(13)

式中: q_i 是第 i 个点重建后的坐标; p_i 是三坐标机械臂测量仪测得的坐标; N 是待测点个数。表 3 列出了 10 个测试点三维坐标的真实值和误差值,还列出了所有测试点的误差值和方差。

由于柱面透镜中心部位线性度较好,两端线性度较差,为避免镜头非线性影响,实验设计点光源在镜头中心圆形范围内移动较小距离,从实际数据可见,能够得到点光源重建误差不大于 3 mm,各轴分量均方差不大于 1 mm。

从表 3 中可知,其中 Z 方向的精度略差,主要是因为本测量系统的 Y 型定位传感器是由线阵 CCD 和柱面镜

表 3 单点定位误差
Table 3 The single point positioning error

理论			本文算法			理论			文献[13]算法		
X	Y	Z	ΔX	ΔY	ΔZ	X	Y	Z	ΔX	ΔY	ΔZ
-275.9	421.8	1 932.9	0.9	1.5	2.5	-349.5	174.4	1 955.8	1.2	2.1	3.6
-294.0	317.2	1 964.6	1.2	1.4	2.3	-223.1	219.9	1 932.1	1.1	0.9	3.1
-608.8	50.05	1 926.7	2.3	2.1	3.7	-322.2	228.6	1 927.9	0.8	1.2	2.5
-750.0	62.4	1 956.5	1.2	0.9	1.7	-307.6	101.3	1 964.7	1.0	1.1	1.5
335.5	828.8	1 931.4	0.5	0.3	0.6	-389.1	115.0	1 956.5	1.5	1.8	2.2
-168.9	547.0	1 965.6	1.3	0.7	2.3	-153.1	177.5	1 931.9	0.5	0.6	0.6
-422.0	832.1	1 926.9	0.9	0.8	1.9	-232.7	235.6	1 927.3	1.8	1.2	1.8
-181.9	753.6	1 963.1	1.2	1.6	3.5	-288.9	121.0	1 963.9	1.9	2.2	2.4
-59.0	210.6	1 931.6	0.8	0.7	1.3	-124.2	179.5	1 955.3	1.1	0.9	1.5
238.9	431.3	1 931.3	1.9	1.8	2.8	-203.1	209.9	1 964.1	0.7	1.1	1.2
平均误差			1.2	1.2	2.3	平均误差			1.2	1.3	2.0
均方误差			0.5	0.6	1.0	均方误差			0.5	0.5	0.9

组合而成,沿垂直于柱面镜中轴线方向产生的运动更容易被线阵 CCD 精确测量,因此,沿 Z 轴运动方向的分量在系统中的测量精度较其他两个方向差一些。由均方误差的分析可知,单点定位的误差总体分布不超过 1 mm,基本上满足工程测量精度需求。与文献[13]相

比,本文算法特殊的坐标系结构可减少系数的同时,对点光源重建模型并无太大影响,同样可以实现文献中所提出的点光源重建。本文侧重于验证基于 Y 型定位传感器的定位方法,后期会着重对所提算法的准确性进行优化,提高其定位精度。

3.5 定位实验

由于镜头中心线性度较好,两端线性度较差,为避免镜头非线性影响,实验设计Y型定位传感器移动较小距离,实验基于可测范围仿真结论,在视域范围内,在地面布置物体移动的位置点,Y型定位传感器安装于运动物体上,设置的位置点即为运动物体的位置,在每一个位置采集3个可测点光源的CCD像素值,并上传至计算机解算定位位置。定位结果如图10所示。

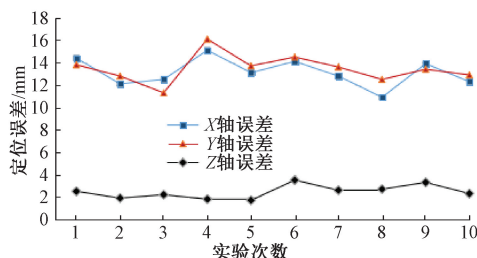


图10 定位误差

Fig. 10 The positioning error

由于物体在地面上移动,故主要存在的是 XOY 平面绕 Z 轴旋转的姿态变化,因此物体运动对 Z 轴的定位误差较小,基本是由于重建误差模型造成。 X 、 Y 轴定位误差较大,误差均值为13 mm。一方面是由于移动过程中 L 参数的不稳定导致重建模型误差变大,从而在位姿解算模型中导致累积误差增大;另一方面是由于柱面透镜非线性的影响导致采集的CCD像素值有偏差,从而使点光源重建坐标与理论坐标的误差增大。由于实验模拟在点光源处于镜头中心较小圆形范围内的情况下,运动物体移动较小距离,定位过程因受镜头非线性影响较小而误差较小。但实际中,镜头非线性对定位精度影响较大。

4 结 论

本文设计了一种新型的Y型光学室内定位传感器(YPS),通过新Y型定位传感器与本体坐标系之间建立点光源重建模型和基于四元数的位姿解算算法的结合,可同时解算运动目标在全局坐标系下的坐标和姿态角。通过仿真与实验,对Y型定位传感器的视域范围和不同参数对位姿误差的影响进行了分析,验证了算法的可行性和准确性。但仍存在许多改善的方面,未来的工作有两点:1)本文工作虽实现了基于嵌入式控制平台的新Y型定位传感实物原型机,但仍存在同步速率较慢以及柱面透镜非线性的影响,后续应进一步完善新Y型定位传感器实物;2)由于定位系统存在中间参数对定位结果的影响,需结合滤波估计算法对传感器进行数据融合估计来提高其定位精度和鲁棒性。

参考文献

- [1] YU L J, LIU Y L, CHI T H, et al. An iBeacon-based indoor and outdoor positioning system for the fire emergency command [C]. Forum on Cooperative Positioning and Service (CPGPS), 2017: 326-329.
- [2] 李昂, 付敬奇, 沈华明, 等. 基于模糊聚类 and 猫群算法的室内定位算法[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(1): 185-194.
- [3] LI ANG, FU J Q, SHEN H M, et al. Indoor positioning algorithm based on fuzzy clustering and cat swarm optimization. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(1): 185-194.
- [4] RAMSEY F, ROBERT H. Location fingerprinting with bluetooth low energy beacons [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2015, 33(11): 2418-2428.
- [5] WEI S, RAMESH A, PHILIP V O, et al. Non-coherent ToA estimation for UWB multipath channels using max-eigenvalue detection [C]. IEEE International Conference on Communications (ICC), 2012: 4509-4514.
- [6] ZHENDONG Y, XU J, ZHUTIAN Y, et al. WUB-IP: A high-precision UWB positioning scheme for indoor multiuser applications [J]. IEEE Systems Journal, 2019, 13(1): 279-288.
- [7] ARTO P, HELENA L, MARTTI K, et al. Distributed indoor positioning system with inertial measurements and map matching [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2014, 63(11): 2682-2695.
- [8] YANG S H, JEONG E M, HAN S K. Indoor positioning based on received optical power difference by angle of arrival [J]. Electronics Letters, 2014, 50(1): 49-51.
- [9] AHMED A, XIAN J, RICHARD K, et al. Wireless indoor optical positioning with a differential photosensor [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2012, 14(12): 1027-1029.
- [10] LI Y, GHASSEMLOOY Z, MEMBER S, et al. A VLC smartphone camera based indoor positioning system [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2018, 30(13): 1171-1174.
- [11] CHENG J, WHANG C, MAX Q. -H. M. Robust visual localization in dynamic environments based on sparse motion removal [J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2020, 17(2): 658-669.
- [12] 燕必希, 朱立夫, 董明利, 等. 卡尔曼滤波单目相机运动目标定位研究 [J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(8): 220-229.
- [13] YAN B X, ZHU L F, DONG M L, et al. Research on Kalman filtering in moving target location with monocular

- camera[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(8): 220-229.
- [12] 于永军, 徐锦法, 张梁, 等. 惯导/双目视觉位姿估计算法研究[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(10): 2170-2176.
YU Y J, XU J F, ZHANG L, et al. Research on SINS/binocular vision integrated position and attitude estimation algorithm[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35(10): 2170-2176.
- [13] 吴剑, 王广志, 丁海曙, 等. 三维测量系统中线性CCD相机的直接线性变换[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2004, 44(6): 860-863.
WU J, WANG G ZH, DING H SH, et al. Direct linear transformation of linear charge-coupled device cameras in a 3-D measurement system[J]. Journal of Tsinghua University (Science & Technology), 2004, 44(6): 860-863.
- [14] 秦志军, 王广志, 骆文博, 等. 基于线阵CCD的大视场高精度三维实时定位系统[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2002(增刊1): 39-42, 48.
QIN ZH J, WANG G ZH, LUO W B, et al. Light-spot positioning system with large viewing field and high precision[J]. Journal of Tsinghua University (Science & Technology), 2002(Suppl. 1): 39-42, 48.
- [15] 艾莉莉, 袁峰, 丁振良. 应用线阵CCD的空间目标外姿态测量系统[J]. 光学精密工程, 2008, 16(1): 161-165.
AI L L, YUAN F, DING ZH L. A exterior attitude measurement system for spatial object based on linear CCD[J]. Optics and Precision Engineering, 2008, 16(1): 161-165.
- [16] 李晶, 袁峰, 丁振良. 基于Rodrigues参数的多线阵CCD外姿态测量系统的姿态解算[J]. 光学精密工程, 2012, 20(4): 858-863.
LI J, YUAN F, DING ZH L. Attitude calculation of multi-linear CCD exterior attitude measurement system based on Rodrigues parameter[J]. Optics and Precision Engineering, 2012, 20(4): 858-863.
- [17] 王艳, 袁峰, 姜宏, 等. 基于三线阵CCD空间目标的高精度位姿解算[J]. 光学学报, 2018, 38(5): 207-215.
WANG Y, YUAN F, JIANG H, et al. High precision pose calculation of space target based on three linear array CCD[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(5): 207-215.
- [18] 刘莉, 杨傲雷, 屠晓伟, 等. 面向空间定位系统的分布式融合估计[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(5): 1054-1060.
LIU L, YANG AO L, TU X W, et al. Distributed fusion estimation for spatial localization system[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(5): 1054-1060.

作者简介

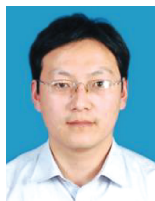


郑雪, 2017年于西安科技大学获得学士学位, 现为上海大学硕士研究生, 主要研究方向为室内定位技术、多智能体路径规划。

E-mail: bobomine0000@163.com

Zheng Xue received her B. Sc. degree from Xi'an University Science and Technology in

2017. She is currently a M. Sc. student at Shanghai University. Her main research interests include indoor location technology and multi-agents path planning.



杨庆华(通信作者), 分别在2005年和2008年于山东理工大学获得学士学位和硕士学位, 2012年于北京航空航天大学获得博士学位, 现为上海大学副教授, 主要研究方向为传感器设计与开发、航空地面检测与集成测试、工业测控系统开发。

E-mail: yangqinghua@shu.edu.cn

Yang Qinghua (Corresponding author) received his B. Sc. degree and M. Sc. degree both from Shandong University of Technology in 2005 and 2008, and received his Ph. D. degree from Beihang University in 2012. He is currently an associate professor at Shanghai University. His main research interests include sensor design and development, aviation ground detection and integration testing, industrial measurement and control system development.