

# 单目摄像机-激光测距传感器位姿测量系统

晁志超<sup>1</sup> 伏思华<sup>1</sup> 姜广文<sup>1</sup> 于起峰<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南长沙 410073)  
(<sup>2</sup>国防科学技术大学航天与材料工程学院, 湖南长沙 410073)

**摘要** 在单目视觉测量中,由于模型自身的限制,沿摄像机光轴方向上的位移测量精度一般远低于垂直光轴方向上的位移测量精度。首先,从数学模型上分析了单目视觉位姿测量在沿光轴方向上位移测量精度低的原因;然后,为了提高沿摄像机光轴方向上的位移测量精度,通过在沿摄像机光轴方向上加装一个高精度的激光测距传感器,设计了一种单目摄像机-激光测距传感器位姿测量系统,从而利用激光测距传感器的高精度测距数据提高系统在沿摄像机光轴方向上的位移测量精度;最后,分别对单目摄像机-激光测距传感器系统的测量原理、参数标定以及测量过程中的数据融合等方面进行了理论推导与实验研究,实验数据表明了系统方案的可行性和有效性。

**关键词** 光学测量;位姿测量;单目摄像机;激光测距传感器;数据融合

**中图分类号** TP242;TP391 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.0312001

## Mono Camera and Laser Rangefinding Sensor Position-Pose Measurement System

Chao Zhichao<sup>1</sup> Fu Sihua<sup>1</sup> Jiang Guangwen<sup>1</sup> Yu Qifeng<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Opto-Electronic Science and Engineering, National University of Defence Technology,  
Changsha, Hunan 410073, China

<sup>2</sup> College of Aerospace Engineering, National University of Defence Technology, Changsha, Hunan 410073, China

**Abstract** Precision of translation measurements along the camera's optical axis is generally much lower than that of which is perpendicular to the optical axis in monocular vision measurement due to the inherent limitation of the system. First of all, mathematical model is analyzed to explain the cause, then a high-precision laser rangefinding sensor (DLS) is installed near the camera to construct the Monocular Camera-DLS pose measurement system, which will improve the precision of translation measurements along the optical axis with DLS measurements; Finally, principle of the system's calibration and data fusion method are conducted. Experimental results show the feasibility and validity of the position-pose measurement system.

**Key words** optical measurement; position-pose measurement; monocular camera; laser rangefinding sensor; data fusion

**OCIS codes** 120.0280; 110.3925; 280.3400; 150.1135; 150.5670

## 1 引言

摄像测量具有精度高、非接触和成本低等优点,有着广阔的应用领域,根据测量过程中使用到的摄像机数目的不同一般可以分为单目测量方法和多目

测量方法。单目测量由于结构简单、测量灵活,仅使用一台摄像机即可测量出合作目标相对于摄像机的三维姿态数据和三维位移数据,得到了广泛的研究和应用<sup>[1~3]</sup>,尤其是在基于多像机接力传递的大型

收稿日期: 2010-07-02; 收到修改稿日期: 2010-09-15

基金项目: 国家自然科学基金(10727202)资助课题。

作者简介: 晁志超(1982—),男,博士研究生,主要从事多像机接力传递摄像测量、像机网络摄像测量等方面的研究。

E-mail: bigchao666@yahoo.com.cn

导师简介: 于起峰(1958—),男,中国科学院院士,博士生导师,主要从事视觉导航与精密光学测量等方面的研究。

E-mail: yuqifeng@vip.sina.com

结构体位姿变形摄像测量中,利用单目摄像机和合作目标之间的成像关系即可实现待测目标与基准坐标系之间的位姿参数传递<sup>[4~8]</sup>。然而,由于模型自身的限制,在单目测量中,沿摄像机光轴方向上的位移测量精度一般远远低于沿垂直于光轴方向上的位移测量精度。为了提高系统的整体性能,可以利用增加激光测距仪辅助测量的方法提高沿摄像机光轴方向上的位移测量精度。文献[9]提出了一种针对非合作目标的单目视觉-激光测距仪位姿测量算法,该算法利用尺寸未知空间矩形平面作为待测目标,因此主要应用于机器人对空间物体的跟踪、定位和抓取。然而,在大型结构体位姿变形测量的多像机接力传递摄像测量系统中,主要利用单目摄像机和空间合作目标实现位姿参数传递,因此本文通过在摄像机附近加装一个与之固联的高精度激光测距传感器(DLS),设计了一种基于空间合作目标的单目摄像机-激光测距传感器(Mono Camera-DLS)位姿测量系统,利用数据融合的方法将激光测距传感器的高精度测距数据与由像机测量得到的六维位姿数据进行融合,提高系统在沿摄像机光轴方向上的位移测量精度。

## 2 单目视觉位姿测量精度分析

在基于单摄像机的单目位姿测量算法中<sup>[10~13]</sup>,文献[12]提出的正交迭代法是应用最广泛的方法之一。该方法计算速度快,精度高,稳健性好,尤其是其全局收敛性,使得在不能提供良好初值的情况下求解结果依然不错。目前,该方法作为性能最优的实时位姿估计算法得到了广泛的应用,并已经从基于点特征标志的位姿估计扩展到基于线特征标志或点线混合特征标志的位姿估计<sup>[14,15]</sup>,从单像机位姿估计扩展到多像机位姿估计<sup>[16]</sup>。

在单目视觉测量中,沿光轴方向上的离面位移测量精度一般远低于垂直于光轴方向上的面内位移测量精度。如图1所示,对于合作标志物AB,由于标志点图像坐标提取不精确使得其成像与A'B'相同,则面内位移测量误差为 $\Delta D = \Delta D_1 + \Delta D_2$ ,而由此引起的离面位移测量误差则为 $\Delta H$ ,离面位移测量误差一般比面内位移测量误差低 $\cot \theta = \Delta H / (\Delta D)$ 倍,其中 $\theta$ 是目标在摄像机视场中所占有效视场角的大小。一组典型的测量数据是:若设测量距离为10 m,待测目标人工合作标志块的大小为0.5 m时,则单目视觉算法对沿摄像机光轴方向的

位移测量精度要比垂直摄像机光轴方向上的位移测量精度要低20倍左右。

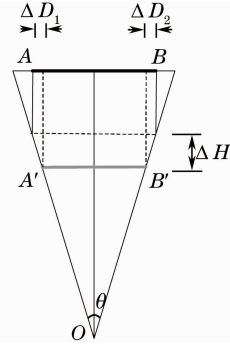


图1 单目位移测量精度分析

Fig. 1 Precision analysis of the monocular translation measurement

## 3 单目摄像机-激光测距传感器系统

### 3.1 单目摄像机-激光测距传感器系统的构成

将摄像机 Cam 与激光测距传感器 DLS 固连在一起,并使激光测距传感器测距方向与摄像机光轴方向基本一致,即构成了一个单目摄像机-激光测距传感器位姿测量系统,如图2所示。图中M为人工合作标志块,D为激光测距传感器的出光点,S为激光测距传感器激光束打在标志块M表面上的光斑点, $l = |DS|$ 为激光测距实际测量路径,三维向量 $(a, b, c)^T$ 为激光光束DS的方向向量, $O^W - X^W Y^W Z^W$ 为人工合作标志块M所在的物体坐标系, $O^C - X^C Y^C Z^C$ 为以摄像机光心 $O^C$ 为原点的摄像机坐标系。设出光点D在摄像机坐标系和物体坐标系下的坐标分别表示为 $(D_X^C, D_Y^C, D_Z^C)$ 和 $(D_X^W, D_Y^W, D_Z^W)$ ,光斑点S在摄像机坐标系和物体坐标系下的坐标分别表示为 $(S_X^C, S_Y^C, S_Z^C)$ 和 $(S_X^W, S_Y^W, S_Z^W)$ ,上标的C和W分别表示摄像机坐标系和物体坐标系。可见,DLS作为一维数据采集系统,如果要与由Cam测量得到的六维数据融合起来,需要对两者之间的空间关系进行标定,也就是标定出在摄像机坐标系下激光出光点D的坐标 $(D_X^C, D_Y^C, D_Z^C)$ 和激光光束l的方向 $(a, b, c)^T$ 。

标志块M所在的世界坐标系与摄像机坐标系之间的位姿关系可以通过单目视觉测量实时得到,设 $R^{W,C}, T^{W,C}$ 为由物体坐标系变换到摄像机坐标系的旋转矩阵和平移向量, $R^{C,W}, T^{C,W}$ 为由摄像机坐标系变换到物体坐标系的旋转矩阵和平移向量,则点D和点S在世界坐标系和摄像机坐标系中的坐标可以互相转换:

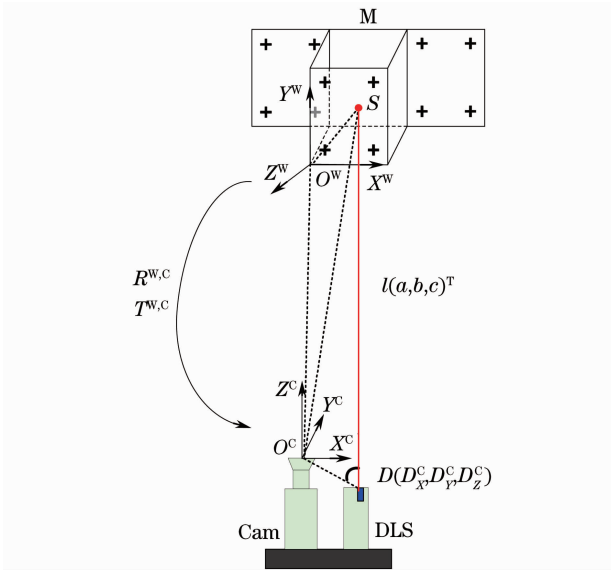


图2 单目摄像机-激光测距传感器位姿测量系统示意图

Fig.2 Sketch of the Mono Camera-DLS pose measurement system

$$D^W = R^{C,W} D^C + T^{C,W}, \quad (1)$$

$$S^C = R^{W,C} D^W + T^{W,C}. \quad (2)$$

且  $R^{W,C}, T^{W,C}$  与  $R^{C,W}, T^{C,W}$  之间存在如下变换关系：

$$\begin{cases} R^{C,W} = (R^{W,C})^{-1} \\ T^{C,W} = -(R^{W,C})^{-1} T^{W,C} \end{cases} \quad (3)$$

### 3.2 单目摄像机-激光测距传感器系统的标定

#### 3.2.1 激光光斑空间坐标的求取

由于激光测距传感器测量得到的距离是激光出光点  $D$  到激光光斑点  $S$  之间的距离  $l$ ，因此，要将此数据与像机测量得到的数据融合起来，需要实时计算光斑点  $S$  在标志块物体坐标系  $O^W - X^W Y^W Z^W$  中的空间坐标。激光光束照射在合作标志块的表面一般形成一个亮圆斑，可以利用重心法实时精确求得光斑点的图像坐标，如图3所示。为了能从光斑点  $S$  的像得到其在标志块物体坐标系中的坐标  $(S_X^W, S_Y^W, S_Z^W)$ ，要求标志块  $M$  的每个可能接收到激光光斑的表面都至少有4个已知空间坐标的人工合作标志点，简单起见，一般选择物体坐标系中的特殊表面来接收激光光斑，因此设计合作目标  $M$  的前后表面互相平行，以前表面为  $XY$  平面建立标志块物体坐标系，如图2所示，则当激光光束照在标志块  $M$  的前表面上时光斑点  $S$  在标志块物体坐标系中的  $Z$  坐标  $S_Z^W$  恒等于0，当激光光束照在标志块  $M$  的后表面时  $S_Z^W$  恒等于某一常数值，因此仅须求出  $S_X^W$  和  $S_Y^W$  即可。

设  $A_i (i=1, 2, 3, 4)$  为上述平面上的4个已知空间坐标的人工合作标志点，如图3所示，它们在物体坐标系中的空间坐标分别为  $(X_i, Y_i, 0)$ ， $i=1, 2,$

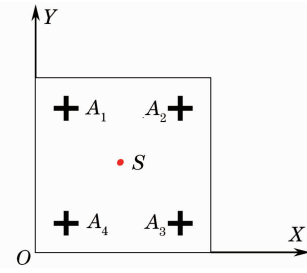


图3 求取激光光斑点空间坐标示意图

Fig.3 Sketch of the getting of the laser spot's coordinates

3, 4, 对应的像点坐标分别为  $(u_i, v_i)$ ， $i=1, 2, 3, 4$ ； $S$  为激光光斑点，其空间坐标  $(S_X^W, S_Y^W, 0)$  为待求量，对应的图像坐标为  $(u_S, v_S)$ 。平面上的点与其对应像点之间服从以下所示的投影变换关系：

$$\begin{cases} X = \frac{a_0 + a_1 u + a_2 v}{1 + c_1 u + c_2 v} \\ Y = \frac{b_0 + b_1 u + b_2 v}{1 + c_1 u + c_2 v} \end{cases}, \quad (4)$$

式中  $(X, Y)$  为点在平面上的坐标， $(u, v)$  为对应的像点坐标， $a_0, a_1, a_2, b_0, b_1, b_2, c_1$  和  $c_2$  为投影变换参数。由上式可以看出，平面的投影变换共有8个待定参数，因此，利用不在同一直线上的4个点即可确定变换关系。(4)式可改写为如下形式：

$$\begin{cases} a_0 + a_1 u + a_2 v - c_1 u X - c_2 v X = X \\ b_0 + b_1 u + b_2 v - c_1 u Y - c_2 v Y = Y \end{cases}. \quad (5)$$

当已知平面上  $n (n \geq 4)$  个点的图像和对应的平面坐标时，即可列出如下所示的线性方程，从而实时求解出该平面的投影变换参数  $a_0, a_1, a_2, b_0, b_1, b_2, c_1, c_2$ ：

$$\begin{bmatrix} 1 & u_1 & v_1 & 0 & 0 & 0 & -u_1 X_1 & -v_1 X_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & u_1 & v_1 & -u_1 Y_1 & -v_1 Y_1 \\ 1 & u_2 & v_2 & 0 & 0 & 0 & -u_2 X_2 & -v_2 X_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & u_2 & v_2 & -u_2 Y_2 & -v_2 Y_2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & u_n & v_n & 0 & 0 & 0 & -u_n X_n & -v_n X_n \\ 0 & 0 & 0 & 1 & u_n & v_n & -u_n Y_n & -v_n Y_n \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ b_0 \\ b_1 \\ b_2 \\ c_1 \\ c_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ X_2 \\ Y_2 \\ \vdots \\ X_n \\ Y_n \end{bmatrix}. \quad (6)$$

然后将激光光斑点  $S$  的像点坐标  $(u_S, v_S)$  代入 (4) 式即可得到激光光斑点  $S$  在标志块物体坐标系下的坐标。

### 3.2.2 激光出光点在摄像机坐标系下空间位置的标定

在利用单目摄像机-激光测距传感器进行位姿测量前,需要对系统中的激光出光点  $D$  在摄像机坐标系下的坐标  $(D_X^C, D_Y^C, D_Z^C)$  进行标定。

首先,高精度的标定摄像机<sup>[17]</sup>,然后,通过多次调整系统的姿态,先后使标志块  $M$  上的激光光斑点  $S_i (i=1,2,3,\dots,n)$  分布在标志块的不同部位(要求所有的  $S_i$  不在同一条直线上),利用激光测距数据和像机测量数据,就可以标定出上述所需的系统参数。由图 2 所述几何关系有

$$l_i^2 = (D_X^C - S_X^C)^2 + (D_Y^C - S_Y^C)^2 + (D_Z^C - S_Z^C)^2, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (7)$$

式中  $(S_X^C, S_Y^C, S_Z^C)$  为第  $i$  次测量时的激光光斑点在摄像机坐标系下的坐标,可以由其在世界坐标系下的坐标  $(S_X^W, S_Y^W, S_Z^W)$  经坐标变换得到。上式右边是关于待标定参数  $D_X^C, D_Y^C, D_Z^C$  的函数,记为  $f_i(D_X^C, D_Y^C, D_Z^C)$ , 则有

$$F_i(D_X^C, D_Y^C, D_Z^C) = l_i^2, \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (8)$$

理论上,进行  $n$  次测量即可得到  $n$  个式所示方程成立,而未知数的个数为 3,因此只要  $n(n \geq 3)$  次测量就可以解出最小二乘意义下的  $X^D, Y^D, Z^D$  的值。但是,由于式是非线性方程,解析形式的求解较为困难,因此可采用迭代的算法求解。

首先,利用直尺大致测量出激光测距传感器出光点  $D$  在以镜头光心为原点的摄像机坐标系下的粗略坐标  $(D_X^C|_0, D_Y^C|_0, D_Z^C|_0)$  作为迭代测量初值;然后,将(8)式在第  $k$  次迭代值处进行一阶泰勒展开,如下式所示:

$$\frac{\partial f_i}{\partial D_X^C} \Big|_K \delta D_X^C + \frac{\partial f_i}{\partial D_Y^C} \Big|_K \delta D_Y^C + \frac{\partial f_i}{\partial D_Z^C} \Big|_K \delta D_Z^C = l_i^2 - f_i(D_X^C|_K, D_Y^C|_K, D_Z^C|_K), \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (9)$$

$n(n \geq 3)$  次测量得到的  $n$  个等式写为矩阵形式有

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial D_X^C} \Big|_K & \frac{\partial f_1}{\partial D_Y^C} \Big|_K & \frac{\partial f_1}{\partial D_Z^C} \Big|_K \\ \frac{\partial f_2}{\partial D_X^C} \Big|_K & \frac{\partial f_2}{\partial D_Y^C} \Big|_K & \frac{\partial f_2}{\partial D_Z^C} \Big|_K \\ \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial f_n}{\partial D_X^C} \Big|_K & \frac{\partial f_n}{\partial D_Y^C} \Big|_K & \frac{\partial f_n}{\partial D_Z^C} \Big|_K \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta D_X^C \\ \delta D_Y^C \\ \delta D_Z^C \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} l_1^2 - f_1(D_X^C|_K, D_Y^C|_K, D_Z^C|_K) \\ l_2^2 - f_2(D_X^C|_K, D_Y^C|_K, D_Z^C|_K) \\ \dots \\ l_n^2 - f_n(D_X^C|_K, D_Y^C|_K, D_Z^C|_K) \end{bmatrix}. \quad (10)$$

从上式即可得到  $(D_X^C|_k, D_Y^C|_k, D_Z^C|_k)$  的修正向量  $(\delta D_X^C, \delta D_Y^C, \delta D_Z^C)$ , 从而得到

$$\begin{cases} (D_X^C)_{k+1} = (D_X^C)_k + \delta D_X^C \\ (D_Y^C)_{k+1} = (D_Y^C)_k + \delta D_Y^C \\ (D_Z^C)_{k+1} = (D_Z^C)_k + \delta D_Z^C \end{cases} \quad (k = 0, 1, 2, \dots) \quad (11)$$

如此反复迭代,直至精度满足一定的要求即可终止迭代,从而得到激光出光点  $D$  在摄像机坐标系下的三维空间坐标。

### 3.2.3 激光光束在摄像机坐标系下空间方向的标定

标定出激光出光点  $D$  在摄像机坐标系下的坐标  $(D_X^C, D_Y^C, D_Z^C)$  后,还需要对激光光束  $DS$  在摄像机坐标系下的单位方向向量  $(a, b, c)^T$  进行标定。如果能同时得到摄像机坐标系下的激光出光点  $D$  和激光光斑点  $S$  的空间坐标,那么很容易得到激光光束在摄像机坐标系下的单位方向向量  $(a, b, c)^T$  为

$$\begin{cases} a = \frac{S_X^C - D_X^C}{\sqrt{(S_X^C - D_X^C)^2 + (S_Y^C - D_Y^C)^2 + (S_Z^C - D_Z^C)^2}} \\ b = \frac{S_Y^C - D_Y^C}{\sqrt{(S_X^C - D_X^C)^2 + (S_Y^C - D_Y^C)^2 + (S_Z^C - D_Z^C)^2}} \\ c = \frac{S_Z^C - D_Z^C}{\sqrt{(S_X^C - D_X^C)^2 + (S_Y^C - D_Y^C)^2 + (S_Z^C - D_Z^C)^2}} \end{cases} \quad (12)$$

式中  $(D_X^C, D_Y^C, D_Z^C)$  为激光出光点  $D$  在摄像机坐标系下的空间坐标,可由上节所述方法标定得到,而光斑点  $S$  在摄像机坐标系中的空间坐标  $(S_X^C, S_Y^C, S_Z^C)$  可由其在标志块物体坐标系中的空间坐标  $(S_X^W, S_Y^W, S_Z^W)$  和由像机测量的位姿数据  $\mathbf{R}^{W,C}, \mathbf{T}^{W,C}$  得到。

### 3.3 单目摄像机-激光测距传感器系统的测量

从图 2 中可以看出,在  $\Delta O^C DS$  中,  $O^C$  为摄像机坐标系的坐标原点,激光出光点  $D$  的坐标  $(D_X^C, D_Y^C, D_Z^C)$  和激光光束  $DS$  的单位方向向量  $(A, B, C)^T$  已由上述标定过程给出,设  $DO^C$  的单位方向向量为  $(P, Q, R)^T$ , 则

$$\begin{cases} p = \frac{-D_X^C}{\sqrt{(D_X^C)^2 + (D_Y^C)^2 + (D_Z^C)^2}} \\ q = \frac{-D_Y^C}{\sqrt{(D_X^C)^2 + (D_Y^C)^2 + (D_Z^C)^2}} \\ r = \frac{-D_Z^C}{\sqrt{(D_X^C)^2 + (D_Y^C)^2 + (D_Z^C)^2}} \end{cases}, \quad (13)$$

设  $\angle O^C DS$  的大小为  $\theta$ , 则

$$\cos \theta = (a, b, c) \cdot \begin{bmatrix} p \\ a \\ r \end{bmatrix} = \frac{-aD_X^C - bD_Y^C - cD_Z^C}{\sqrt{(D_X^C)^2 + (D_Y^C)^2 + (D_Z^C)^2}}, \quad (14)$$

由三角形余弦定理有

$$\begin{aligned} |O^C S|^2 &= |O^C D|^2 + \\ |DS|^2 - 2|O^C D| \cdot |DS| \cos \theta. \end{aligned} \quad (15)$$

将(14)式代入(15)式, 可得激光光斑点  $S$  与摄像机坐标系原点  $O^C$  之间的距离为

$$|O^C S| = \sqrt{(D_X^C)^2 + (D_Y^C)^2 + (D_Z^C)^2 + L^2 + 2l(aD_X^C + bD_Y^C + cD_Z^C)}. \quad (16)$$

在摄像机坐标系中, 激光光斑点  $S$  到摄像机坐标系原点  $O^C$  的距离为

$$|O^C S| = \sqrt{(S_X^C)^2 + (S_Y^C)^2 + (S_Z^C)^2}, \quad (17)$$

式中激光光斑点  $S$  在摄像机坐标系中的空间坐标  $(S_X^C, S_Y^C, S_Z^C)$  可由  $(S_X^W, S_Y^W, S_Z^W)$  变换得到。

在单目视觉位姿测量算法中, 由于  $t_X^{W,C}, t_Y^{W,C}$  的测量精度一般要远大于  $t_Z^{W,C}$  的测量精度, 因此可以将  $t_X^{W,C}, t_Y^{W,C}$  视为误差小量, 而仅对  $t_Z^{W,C}$  进行修正。由(16)和(17)式可将激光测距传感器测量得到的数据  $l$  与由像机测量得到的数据  $(t_X^{W,C}, t_Y^{W,C}, t_Z^{W,C})$  联系起来, 如下式所示:

$$\begin{aligned} (r_{31}^{W,C} S_X^W + r_{32}^{W,C} S_Y^W + r_{33}^{W,C} S_Z^W + t_Z^{W,C})^2 &= (D_X^C)^2 + (D_Y^C)^2 + (D_Z^C)^2 + l^2 + 2l(aD_X^C + bD_Y^C + cD_Z^C) - \\ (r_{11}^{W,C} S_X^W + r_{12}^{W,C} S_Y^W + r_{13}^{W,C} S_Z^W + t_X^{W,C})^2 &- (r_{21}^{W,C} S_X^W + r_{22}^{W,C} S_Y^W + r_{23}^{W,C} S_Z^W + t_Y^{W,C})^2. \end{aligned} \quad (18)$$

式中  $(S_X^W, S_Y^W, S_Z^W)$  为激光光斑点在标志坐标系中的空间坐标,  $r_{ij}^{W,C} (i, j = 1, 2, 3)$  为由标志坐标系变换到摄像机坐标系的旋转矩阵  $R^{W,C}$  的第  $i$  行  $j$  列元素,  $t_X^{W,C}, t_Y^{W,C}$  分别为标志坐标系变换到摄像机坐标系的  $X$  方向、 $Y$  方向平移向量, 它们均可以由单目视觉测量算法实时得到;  $l$  为激光测距传感器的测距数据;  $(D_X^C, D_Y^C, D_Z^C)$  为激光出光点在摄像机坐标系中的空间坐标,  $(a, b, c)^T$  为激光光线在摄像机坐标系中的单位方向向量, 均可在测量前事先标定得到, 因此可以得到由激光测距传感器修正后的  $t_Z^{W,C}$ 。

#### 4 单目摄像机-激光测距传感器系统的标定和测量实验

图 4 所示为单目摄像机-激光测距传感器位姿测量系统的实验装置图, 其中单目摄像机为 Point Grey 公司的 Grasshopper 数字摄像机, 最大分辨率为  $2448 \text{ pixel} \times 2048 \text{ pixel}$ , 最高采集帧频为  $15 \text{ frame/s}$ , 由于实时跟踪提取合作目标上的所有特征点坐标和进行数据处理, 实验中实际采集帧频约为  $6.0 \text{ frame/s}$ ; 镜头为 Nikon 的  $80 \sim 200 \text{ mm}$  变焦镜头; 激光测距传感器为 Dimetix 公司的 DLS-B15F 激光测距传感器, 最大测距  $200 \text{ m}$ , 最小测距  $0.2 \text{ m}$ , 测距精度  $1.5 \text{ mm}$ , 最大测量频率  $25 \text{ Hz}$ , 实验中实际测量距离约为  $28 \text{ m}$ , 实际测量频率与摄像机同步。

首先, 对 Cam-DLS 系统中摄像机坐标系下的激

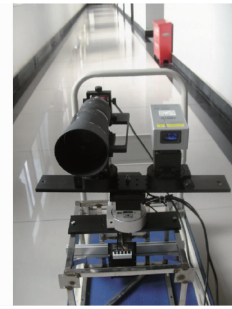


图 4 单目摄像机-激光测距传感器位姿测量系统

Fig. 4 Picture of the mono-ocular camera-DLS position-pose measurement system

光出光点坐标和激光光束的方向向量进行标定, 标定所用的合作目标及激光光斑在其上的成像如图 5 所示, 其中  $0 \sim 11$  号标志点为已知空间坐标的十字合作标志,  $12$  号标志为激光光斑点, 实验中均采用亚像素算法实时跟踪提取它们的图像坐标。标定过程中, 均连续采集  $100 \text{ frame}$  数据进行平均以提高精度, 对图 4 中装置的某次标定结果如下: 摄像机坐标系下激光出光点的空间坐标为  $(-162.3 \text{ mm}, 2.5 \text{ mm}, -5.6 \text{ mm})^T$ , 激光束的单位方向向量为  $(0.005517, 0.000034, 0.999985)^T$ 。

然后, 利用本文所述算法对待测的合作目标进行位姿测量。图 6 所示为在走廊内对某静止目标采集的沿摄像机光轴方向的相对位移测量数据, 横坐标为图像采集帧数, 纵坐标为光轴方向的相对位移变化, 单位为毫米, 其中  $\Delta T_2 \text{ Cam}$  为仅用单目摄像机测量得到的沿光轴方向的相对位移测量值,

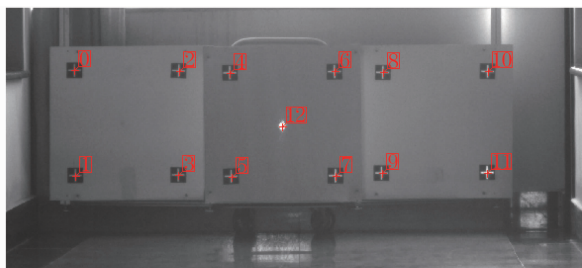


图 5 合作目标 M 和激光光斑点 S

Fig. 5 Picture of the cooperative target M and the laser spot S

$\Delta T_z^{\text{CamDLS}}$  为用激光测距传感器修正后的沿光轴方向的相对位移测量值。

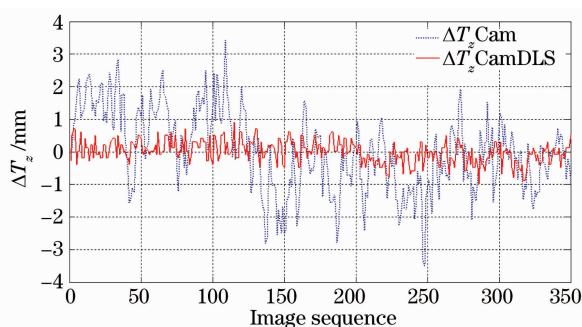


图 6 沿光轴方向的相对位移测量(室内)

Fig. 6 Relative translation measurements along the optical axis(indoor)

由图 6 可以看出,与仅利用单目摄像机对合作目标进行位姿测量相比,采用高精度激光测距传感器能显著提高单目摄像机在沿摄像机光轴方向上的位移测量精度,前者测量的标准差约为 1.4 mm,而后者测量的标准差约为 0.3 mm。

图 7 为室外实验的测量数据,待测目标与摄像机的距离与室内实验大致相等,  $\Delta T_z^{\text{Cam}}$ ,  $\Delta T_z^{\text{CamDLS}}$  的含义与图 6 相同,前者测量的标准差约为 13.3 mm,而后者测量的标准差约为 0.4 mm。可见,由于大气湍流的加大,仅利用单目

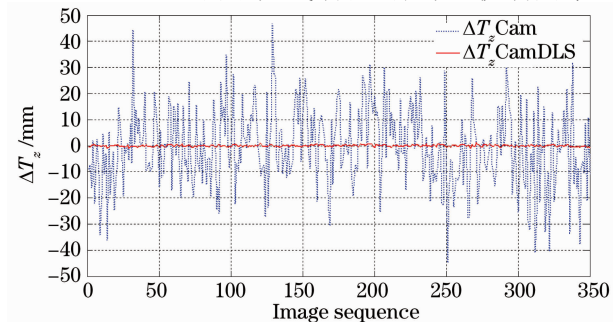


图 7 沿光轴方向的相对位移测量(室外)

Fig. 7 Relative translation measurements along the optical axis(outdoor)

视觉测量得到的沿摄像机光轴方向上的相对位移的测量精度大大降低,但利用高精度激光测距传感器辅助测量得到的沿光轴方向相对位移的测量精度基本保持不变。

## 5 结 论

针对单目视觉测量中沿摄像机光轴方向上的位移测量精度较差的问题,设计了一种利用高精度激光测距传感器辅助测量的单目摄像机-激光测距传感器位姿测量系统,该系统基于单目摄像机和空间合作目标位姿测量算法,通过在摄像机端加装一个与之固联的高精度的激光测距传感器,不仅可以大大提高系统在沿摄像机光轴方向上的位移测量精度,也可增强系统的稳健性;然后,对摄像机坐标系下激光测距传感器出光点的空间坐标和激光束方向等系统参数进行了分析和标定;最后,给出了利用激光测距数据实时修正单目摄像机在沿光轴方向上位移测量数据的数据融合方法,并分别进行了室内和室外实验验证。实验结果表明,利用高精度的激光测距传感器辅助测量能大大提高系统在沿光轴方向上的位移测量精度,从而解决单目视觉测量中在沿光轴方向上位移测量精度低的难题,进而提高多像机接力传递摄像测量系统、像机网络摄像系统等在大型结构体位姿变形测量中的位移测量精度。

## 参 考 文 献

- Huang Guiping, Li Guangyun, Wang Baofeng *et al.*. Evolution for monocular vision measurement[J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2004, **25**(4): 314~317  
黄桂平,李广云,王保丰等.单目视觉测量技术研究[J].*计量学报*,2004,**25**(4):314~317
- Zhu Jigui, Li Yanjun, Ye Shenghua *et al.*. Study on single camera simulating stereo vision measurement technology[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(7): 943~948  
郑继贵,李艳军,叶声华等.单摄像机虚拟立体视觉测量技术研究[J].*光学学报*,2005,**25**(7):943~948
- Zhou Ping, Wang Congjun, Chen Xin. Monocular computer vision measurement system[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2005, **32**(12): 90~93  
周平,王从军,陈鑫.计算机单目视觉测量系统[J].*光电工程*,2005,**32**(12):90~93
- Yu Qifeng, Jiang Guangwen, Fu Sihua *et al.*. Broken-ray videometric method and system for measuring the three-dimensional position and pose of the non-intervisible object[C]. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2008, **37**(B5): 145~148
- Yu Qifeng, Jiang Guangwen, Chao Zhichao *et al.*. Deformation monitoring system of tunnel rocks with innovative broken-ray videometrics[C]. *SPIE*, 2008, **7375**: 73752C
- Yu Qifeng, Jiang Guangwen, Fu Sihua *et al.*. Measuring deformation of large vessels with innovative broken-ray

- videometrics [C]. In: The XXII International Congress of Theoretical and Applied Mechanics (ICTAM2008), Aug, 2008 Adelaide, Australia, 24~30
- 7 Yu Qifeng, Jiang Guangwen, Fu Sihua *et al.*. Fold-ray videometrics method for the deformation measurement of nonintervisible large structures[J]. *Appl. Opt.*, 2009, **48**(24): 4683~4687
- 8 Jiang Guangwen. Study on Pose Relay Videometrics Method by Camera-Series and Ship Deformations Measurement [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2010  
姜广文. 像机链位姿传递摄像测量方法及船体变形测量研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2010
- 9 Gao Xuehai, Xu Kejun, Zhang Han *et al.*. Position-pose measurement algorithm based on single camera and laser range-finder[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2007, **28**(8): 1479~1485  
高学海, 徐科军, 张瀚等. 基于单目视觉和激光测距仪的位姿测量算法[J]. 仪器仪表学报, 2007, **28**(8): 1479~1485
- 10 A. Ansar, K. Daniilidis. Linear pose estimation from points or lines[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2003, **25**(5): 578~589
- 11 Quan, L. Lan, Z. Linear N-point camera pose determination[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2006, **28**(12): 774~780
- 12 C. P. Lu, G. D. Hager, E. Mjolsness. Fast and globally convergent pose estimation from video images [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, **22**(6): 610~622
- 13 Jiang Guangwen, Chao Zhichao, Fu Sihua *et al.*. Study on deformation measurement of position and attitude based on monocular vision[J]. *Journal of Optoelectronics & Laser*, 2009, **20**(6): 775~778  
姜广文, 晁志超, 伏思华等. 基于单摄像机的物体位置和姿态变形测量研究[J]. 光电子·激光, 2009, **20**(6): 775~778
- 14 Zhang Zheng, Zhang Xiaohu, Fu Dan. Accurate and robust iterative pose estimation from line correspondences[J]. *Computer Applications*, 2008, **28**(2): 326~329  
张政, 张小虎, 傅丹. 一种高精度鲁棒的基于直线对应的位姿估计迭代算法[J]. 计算机应用, 2008, **28**(2): 326~329
- 15 Xu Yunxi, Jiang Yunliang, Chen Fang. An extended orthogonal iteration algorithm for pose estimation from point and line segment correspondences[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(11): 3129~3135  
许允喜, 蒋云良, 陈方. 基于点和直线段对应的扩展正交迭代位姿估计算法[J]. 光学学报, 2009, **29**(11): 3129~3135
- 16 Xu Yunxi, Jiang Yunliang, Chen Fang. Generalized orthogonal iterative algorithm for pose estimation of multiple camera systems [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(1): 72~77  
许允喜, 蒋云良, 陈方. 多摄像机系统位姿估计的广义正交迭代算法[J]. 光学学报, 2009, **29**(1): 72~77
- 17 Jiang Guangwen, Chao Zhichao, Fu Sihua *et al.*. High-accurate camera calibration technique based on controllable rotation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(5): 1308~1314  
姜广文, 晁志超, 伏思华等. 基于可控旋转的像机高精度标定技术[J]. 光学学报, 2010, **30**(5): 1308~1314