

# 平面靶标测头中心的两步法标定

郑兴纯, 赵敏, 冯少华

西安理工大学机械与精密仪器工程学院, 陕西 西安 710048

**摘要** 针对手持靶标视觉坐标测量的广泛应用, 提出一种平面靶标测头中心现场两步标定的方法。通过两组不同位姿的靶标图像建立靶标坐标系与摄像机坐标系之间的转换关系, 利用第一组靶标平行于成像面不同倾角的图像信息, 根据位置不变原理建立目标优化函数, 通过 Levenberg-Marquardt 算法求解出靶标坐标系下测头中心在  $x$ 、 $y$  方向最优化的修正值; 再依据第二组靶标相对于摄像机成像面不同倾角的图像信息求解出测头中心在  $z$  方向的误差。通过仿真和实验验证了方法的正确性, 实验结果表明, 测头中心坐标在  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向的重复性精度分别达到 0.077, 0.035, 0.140 mm, 有效地解决了手持平面靶标测头中心现场标定的难题。

**关键词** 测量; 测头中心标定; 平面靶标; 坐标修正; Levenberg-Marquardt 算法

中图分类号 TH741; TP391

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.011201

## Two-Step Calibration of Probe Tip Center of Planar Target

Zheng Xingchun, Zhao Min, Feng Shaohua

*School of Mechanical and Precision Instrument Engineering, Xi'an University of Technology,  
Xi'an, Shaanxi 710048, China*

**Abstract** Aiming at the wide application of the visual coordinate measurement of the handheld target, an on-site two-step calibration method for the probe tip center of the planar target is proposed. The conversion relationship between the target coordinate system and the camera coordinate system is established by two sets of target images in different positions. Based on the position invariant principle, the object optimal function is established according to the image information of the first set target parallel to imaging plane with different angles. The Levenberg-Marquardt algorithm is employed to solve the optimal corrected value of the probe tip center along  $x$  and  $y$  directions in target coordinate. The error of the probe tip center along  $z$  direction is solved by using the image information of the second set target relative to the imaging plane of the camera with different angles. The correctness of the method is verified by simulation and experiment. The experiment results show that the repeatability accuracy of the probe tip center coordinates in  $x$ ,  $y$  and  $z$  direction can reach 0.077 mm, 0.035 mm and 0.140 mm, respectively, which can effectively solve the problem of on-site calibration of the probe tip center of the handheld planar target.

**Key words** measurement; probe tip center calibration; planar target; coordinate correction; Levenberg-Marquardt algorithm

**OCIS codes** 120.0280; 150.1488; 100.2000; 150.1135

## 1 引言

基于手持靶标的视觉坐标测量系统因具有体积小、重量轻、便携等优点而得到广泛的研究与应用<sup>[1-4]</sup>。该系统使用具有一系列特征靶点且各靶点

位置关系已知的手持靶标, 通过其前端的可拆卸测头接触被测目标表面, 摄像机对靶标上点亮的靶点进行成像, 分析靶点与测头的位置关系求解出接触点的三维坐标, 实现接触和非接触测量的结合。为实现高精度的三维坐标测量, 必须对手持靶标视觉

收稿日期: 2017-08-01; 收到修改稿日期: 2017-08-11

基金项目: 国家自然科学基金(51405382)

作者简介: 郑兴纯(1991—), 男, 硕士研究生, 主要从事图像处理及视觉测量方面的研究。E-mail: xautzxc@126.com

导师简介: 赵敏(1975—), 女, 博士, 副教授, 主要从事视觉测量及坐标测量方面的研究。

E-mail: zhaomin1973@xaut.edu.cn(通信联系人)

坐标测量系统的关键参数进行标定<sup>[5-7]</sup>。对于已有机械加工精度保证的手持靶标,其各靶点的相对位置关系在测量过程中不会改变,可通过离线方式,并借助特殊的测量设备来获取这些参数<sup>[8]</sup>。但是为了满足现场不同的测量环境以及保护测头的要求,对于测头的拆卸和更换是不可避免的。即使是使用同一测头,由于安装力度的不同,也无法保证其位置不变。因此,如何快速精确地对测头中心进行现场标定是亟待解决的问题。

文献[2]利用靶标标记点与测球球心之间的距离信息提出旋转轴求交法,借助两组图像信息通过奇异值分解(SVD)和最小二乘法求得球心坐标,整个算法过程分为三步,且测头中心坐标在  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向的稳定性为(0.178 mm, 0.188 mm, 0.221 mm),并不能很好地满足工业要求。文献[8]根据 10 点 3 列的立体靶标测量模型和位置不变原理,通过非线性方程组最小二乘解对目标函数进行优化求解,求得测头中心在靶标坐标系下的坐标,该方法可取得较高的坐标精度,可达(0.033 mm, 0.030 mm, 0.043 mm),但难以标定近似平面的靶标。当靶标相对于摄像机成像面以不同倾角进行测量时,平面靶标测头中心的  $z$  向误差对测量精度有影响,可以将文献[8]的方法改进为平面靶标标定方法,但无法直接区分测头中心轴向坐标变化及测量距离变化,即无法精确实现  $z$  向标定。

考虑到平面靶标视觉坐标测量的广泛研究与应用<sup>[9-15]</sup>,本文提出一种适用于平面靶标测头中心两步标定的方法。该方法基于平面点阵测头测量数学模型和位置不变原理,建立以测头中心为坐标原点的靶标坐标系。标定过程分为两步,其基本思想是通过两组不同姿态的靶标图像建立靶标坐标系和摄像机坐标系之间的转换关系,先标定出靶标坐标系下测头中心  $x$ 、 $y$  方向最优化的修正值,再利用靶标相对于成像面倾斜不同角度的图像信息求出  $z$  方向的误差值,进而利用单摄像机和平面靶标现场准确地标定测头中心。

## 2 测头中心标定方法

### 2.1 平面靶标视觉坐标测量原理

手持平面靶标视觉坐标测量系统主要由手持平面靶标、摄像机、计算机处理单元以及被测目标组成,平面靶标上至少有两个发光二极管(LED)靶点不在同一直线上,示意图如图 1 所示。 $O_c$  为摄像机光学中心,建立摄像机坐标系  $O_c-X_cY_cZ_c$ ,  $Z_c$  为

摄像机光轴所在的方向;并以测头中心点  $P$  为原点,建立靶标坐标系  $P-xyz$ ;图像像面坐标系  $O_1-UV$  是以像平面中心为原点,且与  $X_cO_cY_c$  平面两轴对应平行。测量时,靶标测头与被测物件的表面接触,摄像机获取靶标上点亮的靶点图像,传输到计算机上进行相关软件处理,便可得到测头中心在摄像机坐标下的坐标。已知量包括经过标定的摄像机内参数<sup>[5]</sup>、平面靶标上各靶点在靶标坐标系下的坐标,靶点的图像坐标可通过图像处理算法获得。

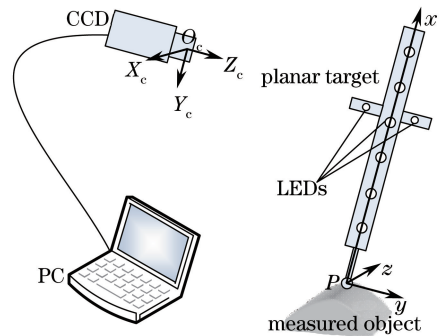


图 1 平面靶标视觉坐标测量系统

Fig. 1 Vision coordinate measurement system of planar target

### 2.2 标定模型及测头中心参数求解

如图 1 所示的测量系统,测头中心  $P$  即为靶标坐标系原点,将图 1 中的被测目标换为参考标准锥,将手持平面靶标测头固定于锥孔内,靶标靶点平面相对于摄像机成像面平行,以不同角度旋转靶标,由摄像机获取不同方位下的靶标图像。由于整个标定过程中摄像机和接触点位置都不变,因此尽管平面靶标的位姿不同,靶标测头在摄像机坐标系下的坐标固定不变,即位置不变原理。图 2 为所采用的平面靶标示意图,设靶标平行于摄像机成像面倾斜时的倾角(绕  $z$  轴旋转)为  $\gamma$ ,相对摄像机轴向倾斜时的倾角(绕  $y$  轴旋转)为  $\beta$ 。

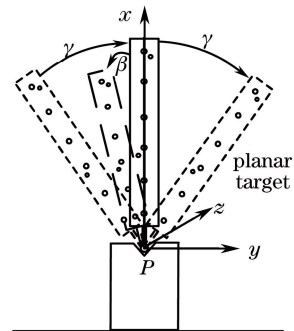


图 2 不同位姿的靶标示意图

Fig. 2 Diagram of target in different positions

对于每一位置  $\gamma$ 、 $\beta$  对应的图像  $k$ ,设各靶点在靶标坐标系下的坐标为  $(x_{ki}, y_{ki}, z_{ki})$  及其对应的经

过畸变修正的图像像面坐标为 $(U_{ki}, V_{ki})$ 时,其中 $i=1,2,\dots,j$ , $j$ 为靶标上靶点的个数,则依据透视变换成像原理有:

$$\rho \cdot \begin{bmatrix} U_{ki} \\ V_{ki} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot [\mathbf{R}_k \quad \mathbf{T}_k] \cdot \begin{bmatrix} x_{ki} \\ y_{ki} \\ z_{ki} \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中 $f$ 为摄像机有效焦距, $\mathbf{T}_k$ 为两坐标系间的平移矩阵,其物理意义是靶标坐标系原点 $P$ 与摄像机坐标系原点 $O_C$ 之间的平移位置关系,则 $\mathbf{T}_k$ 即为测头中心在摄像机坐标系下的坐标。在平面靶标各靶点共面情况下,其 $z$ 向坐标 $z_{ki}$ 为0,设 $(T_{xk}, T_{yk}, T_{zk})^T$ 为平移矩阵 $\mathbf{T}_k$ 的展开形式, $r_{lk}$ ( $l=1\sim 9$ )为旋转矩阵 $\mathbf{R}_k$ 的分量,则(1)式可转化为:

$$\rho \cdot \begin{bmatrix} U_{ki} \\ V_{ki} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} fr_{1k} & fr_{2k} & fT_{xk} \\ fr_{4k} & fr_{5k} & fT_{yk} \\ r_{7k} & r_{8k} & T_{zk} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_{ki} \\ y_{ki} \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

变量代换得到未知量 $a_{lk}$ 的线性方程组为:

$$\frac{\rho}{T_{zk}} \cdot \begin{bmatrix} U_{ki} \\ V_{ki} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{1k} & a_{2k} & a_{3k} \\ a_{4k} & a_{5k} & a_{6k} \\ a_{7k} & a_{8k} & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_{ki} \\ y_{ki} \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

当 $2j \geq 8$ 时,则可解出未知量 $a_{lk}$ 的最小二乘解,再由 $\mathbf{R}_k$ 矩阵的正交约束性,可得:

$$\begin{cases} T_{zk} = f / \sqrt{a_{1k}^2 + a_{4k}^2 + (fa_{7k})^2} \\ T_{xk} = a_{3k} T_{zk} / f \\ T_{yk} = a_{6k} T_{zk} / f \end{cases}, \quad (4)$$

即对于图像 $k$ 可解出唯一的测头中心在摄像机坐标系下的坐标 $\mathbf{T}_k$ 。

### 2.3 标定的两步法

为了能够准确标定测头中心,先获取一组靶标绕 $z$ 轴旋转不同角度的图像,再获取一组绕 $y$ 轴旋转不同角度的靶标图像,通过相关图像处理和标定方法实现测头中心的标定。标定的两步法具体过程如下:

第一步:测头中心 $x$ 、 $y$ 方向的标定。

1) 标定过程中,摄像机固定,摄像机与靶标的相对距离一定,靶标靶点可以清晰成像。当倾角 $\beta$ 近似等于0时,通过多次改变倾角 $\gamma$ 的大小,即获取一组靶标平行于摄像机成像面的图像,并进行图像处理得到图像靶点中心坐标 $(U_{ki}, V_{ki})$ 。

2) 先假定测头中心不存在误差,根据(1)~(4)

式可得该组第 $k$ 幅图像对应的测头中心坐标的理论值 $(T_{xk}, T_{yk}, T_{zk})$ ,则取初始值 $X_0 = (0, 0, T_{x1}, T_{y1}, T_{z1})$ 。

3) 实际测头中心可能存在误差,设测头中心 $x$ 、 $y$ 方向在靶标坐标系下的修正值为 $(\Delta x, \Delta y)$ ,待求测头中心在摄像机坐标系下的坐标为 $(x_0, y_0, z_0)$ ,则各靶点在靶标坐标系下的坐标应修正为 $(x_{ki} + \Delta x, y_{ki} + \Delta y, 0)$ ,记 $X = (\Delta x, \Delta y, x_0, y_0, z_0)$ ,第 $k$ 幅图像求解的测头中心在摄像机坐标系下实际与理论位置的偏差为:

$$f_k(\Delta x, \Delta y, x_0, y_0, z_0) = \sqrt{(T_{xk} - x_0)^2 + (T_{yk} - y_0)^2 + (T_{zk} - z_0)^2}. \quad (5)$$

建立以该组所有靶标图像对应的测头中心在摄像机坐标系下的坐标误差平方和为最小的目标函数:

$$g(X) = \min \left[ \sum_{k=1}^N (f_k)^2 \right]. \quad (6)$$

以 $X_0$ 作为 $X$ 的优化初值,采用Levenberg-Marquardt优化算法解出 $X$ ,即靶标坐标系下测头中心最优化的修正值 $(\Delta x, \Delta y)$ 和在摄像机坐标系下的测头中心坐标 $(x_0, y_0, z_0)$ 。

4) 依据所提方法原理,得到修正值 $(\Delta x, \Delta y)$ 后,则各靶点在靶标坐标系下坐标修正为 $(x_{ki} + \Delta x, y_{ki} + \Delta y, 0)$ ,可按照(2)~(4)式求出该组每幅图像对应的摄像机坐标系下实际测头中心坐标 $(T'_x, T'_y, T'_z)$ 。根据位置不变原理,坐标数据应具有较好的一致性,因此以该组测头中心坐标数据的稳定性来衡量所提方法的精度。

第二步:测头中心 $z$ 方向的标定。

1) 在第一步的标定系统环境基础上,令倾角 $\gamma$ 近似等于0,通过多次改变倾角 $\beta$ 的大小,得到一组靶标相对成像面的图像,并进行图像处理得到图像靶点中心坐标 $(U_{ki}, V_{ki})$ 。

2) 由第一步可知此时各靶点在靶标坐标系下的坐标对应修正为 $(x_{ki} + \Delta x, y_{ki} + \Delta y, 0)$ ,代入(2)~(4)式求出该组每幅图像对应的摄像机坐标系下实际测头中心坐标 $(T''_x, T''_y, T''_z)$ 。当测头中心 $z$ 方向不存在误差时,则该组数据应具有较好的一致性。

3) 若测头中心 $z$ 方向存在误差 $\Delta z$ ,依据所建立的坐标系关系,随着倾角 $\beta$ 的改变, $\Delta z$ 将会影响测头中心在摄像机坐标系下的坐标 $T''_y$ ,即:

$$T''_y = \Delta z \cdot \sin \beta. \quad (7)$$

利用不同倾角下坐标 $T''_y$ 的偏差便可得到 $z$ 方

向的误差值  $\Delta z$ , 即:

$$\Delta z = (T''_{y1} - T''_{y2}) / (\sin \beta_1 - \sin \beta_2), \quad (8)$$

最终可以得到标定后靶标坐标系下的测头中心坐标。

### 3 标定方法的仿真验证

为了验证所提方法的可行性, 在 2.3 节标定两步法的基础上利用 Matlab 对其进行仿真分析, 仿真验证采用的摄像机参数和靶点参数与标定实际实验的参数基本一致。设接触点  $P$  在摄像机坐标系下的坐标为平移矩阵  $T = (0, 150, 1500)$ , 通过设置不同  $\beta, \gamma$  (靶标竖直时  $\gamma = \beta = 0$ ), 得到摄像机相对于靶标的空间姿态, 即旋转矩阵  $R$ , 利用透视变换成像原理求出像面坐标系下靶点的理想图像坐标, 详细

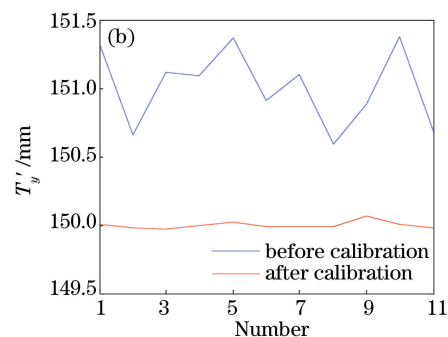
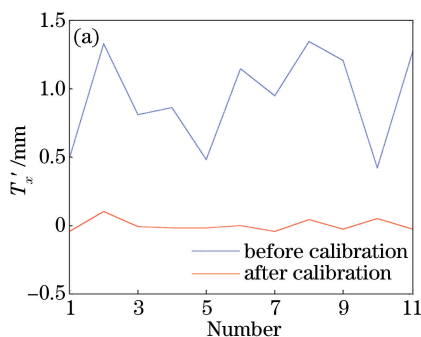


图 3 测头中心标定前与修正后坐标  $T'_x$  和  $T'_y$  的仿真结果。(a)  $T'_x$ ; (b)  $T'_y$

Fig. 3 Simulation results of coordinate  $T'_x$  and  $T'_y$  of probe tip center before and after calibration. (a)  $T'_x$ ; (b)  $T'_y$

使用文献[8]扩展到平面靶标情形的方法对测头中心进行 20 次仿真标定, 可得每组图像对应的测头中心  $x, y, z$  方向的修正值变化结果如图 4 所示, 修正值  $\Delta x$  和  $\Delta y$  皆在 1 mm 附近较小波动, 对于测头中心  $z$  方向则不能得到正确的修正值, 因此本研究提出了两步法标定。

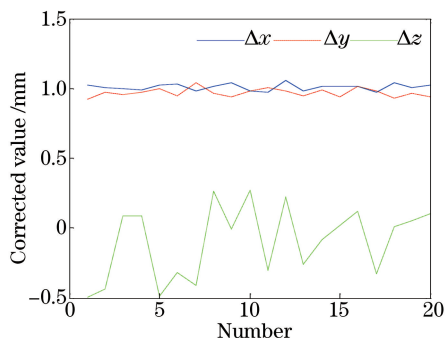


图 4 测头中心修正值  $\Delta x, \Delta y$  和  $\Delta z$  的仿真结果

Fig. 4 Simulation results of corrected value  $\Delta x, \Delta y$  and  $\Delta z$  of probe tip center

设倾角  $\beta$  为 0, 给倾角  $\beta$  增加符合正态分布的随机噪声, 噪声标准差为  $2^\circ$ , 按所提方法第一步对测头中心进行 20 次仿真标定, 可得第一步中每组图

推导可参考文献[5]。考虑图像处理误差, 给理想图像坐标增加符合正态分布的随机噪声, 噪声标准差为  $\sigma_1 = 0.05$  pixel, 得到含噪声的图像坐标  $(U_{ki}, V_{ki})$ 。假设靶标坐标系下测头中心  $x, y, z$  方向存在误差且  $(\Delta x, \Delta y, \Delta z) = (1 \text{ mm}, 1 \text{ mm}, -1 \text{ mm})$ 。

靶标以不同方位测量同一点, 设置倾角  $\gamma$  在  $0^\circ \sim 40^\circ$  范围内随机变化, 由仿真可得在摄像机坐标系下测头中心坐标多次测量的结果。图 3 为测头中心标定前与修正后坐标的仿真结果。若测头中心未标定, 靶标不同方向的坐标测量结果一致性差; 若测头中心已修正, 靶标不同方向的坐标测量结果一致性好, 其  $x, y, z$  方向的标准差分别为 0.044, 0.026, 0.122 mm, 充分说明了测头中心标定的必要性。

像对应的测头中心  $x, y$  方向的修正值变化结果如图 5 所示, 修正值  $\Delta x$  和  $\Delta y$  也在 1 mm 附近较小波动, 标准差分别为 0.033, 0.030 mm, 证明第一步中优化方法的可行性。

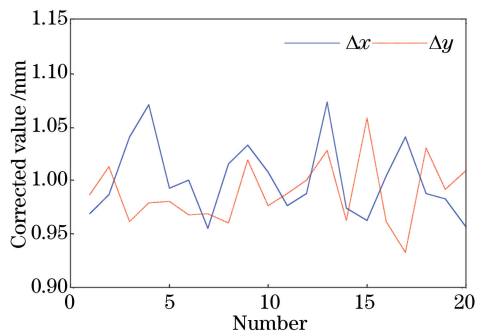


图 5 测头中心修正值  $\Delta x$  和  $\Delta y$  的仿真结果

Fig. 5 Simulation results of corrected values  $\Delta x$  and  $\Delta y$  of probe tip center

再进行第二步的标定仿真。当倾角  $\beta$  从  $0^\circ$  到  $30^\circ$  变化时, 给靶标各倾角增加符合正态分布的随机噪声, 噪声标准差为  $2^\circ$ , 运行仿真程序可得测头中心在摄像机坐标系下的坐标  $T''_y$  与倾角  $\beta$  的关系如图 6 所示。结合 (8) 式可知  $\Delta z = (149.540 -$

150.020)/(\sin 30^\circ - \sin 0^\circ) = -0.960 \text{ mm}, 即靶标相对于摄像机成像面倾斜 30^\circ 对测头中心  $z$  方向进行标定, 可求得  $z$  方向的误差为 -0.960 mm, 与假设的测头中心存在的误差吻合, 证明该方法的可行性。

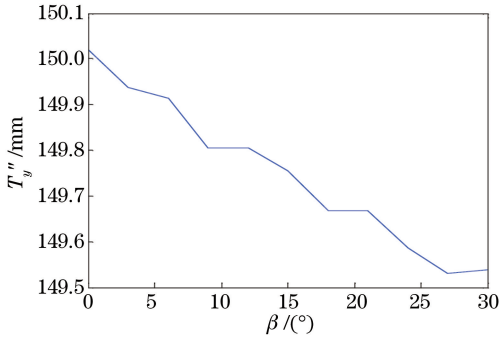


图6 测头中心坐标  $T_y''$  与靶标倾角  $\beta$  的关系  
Fig. 6 Relationship between coordinate  $T_y''$  of probe tip center and angle tilt  $\beta$  of target

#### 4 标定方法的实验验证

实验采用 JAI GO-5000M-USB 工业摄像机, 摄像机分辨率为 2560 pixel  $\times$  2048 pixel, 像元大小为 5  $\mu\text{m}$ , 摄像机标定后焦距为 52.5 mm。平面靶标安有 8 个亮度自适应的红外 LED, 其中有两个 LED 靶点不在同一直线上, 示意图参考图 2。将测头安

装在靶标上, 采用的测头的中心在摄像机坐标系下的坐标参考值为 (-20 mm, 0, -1 mm)。靶标坐标系下各靶点的坐标如表 1 所示, 记离测头中心最近的靶点为第一个位置。实验过程中摄像机位置固定不变, 其与靶标相对位置保持不变为 1900 mm, 测头标定系统示意图如图 1 所示。

表 1 靶标坐标系下各靶点坐标

Table 1 Coordinates of targets under target

coordinate system		mm							
Coordinate location		1	2	3	4	5	6	7	8
$x$		85	135	175	185	235	285	325	335
$y$		0	0	-5	0	0	0	5	0
$z$		0	0	0	0	0	0	0	0

实验在满足靶标靶点全部在视场内情况下, 取  $\gamma \in (-30^\circ, 30^\circ)$ ,  $\beta \in (0^\circ, 30^\circ)$ 。先使靶标在  $xPy$  平面内旋转,  $\beta$  近似为 0, 倾角  $\gamma$  从图像最左侧旋转 11 次到最右侧变化, 得到第一组的 11 幅图像; 再令  $\gamma$  近似为 0, 靶标在  $xPz$  平面内从  $\beta$  近似为 0 旋转 11 次到  $\beta$  近似为 30^\circ 的位置, 得到第二组的 11 幅图像, 对两组图像进行图像处理得到靶点中心图像坐标。借助第一组图像信息, 分别使用文献[8]扩展到平面靶标情形的改进方法和本研究所提方法对测头中心进行标定, 测头标定后坐标计算结果如表 2 所示。

表 2 第一组图像测头中心标定的结果

Table 2 Results of probe tip center calibration with the first set of images

mm

Image number $k$	Proposed method			Ref.[8]		
	$T'_x$	$T'_y$	$T'_z$	$T'_x$	$T'_y$	$T'_z$
1	-16.399	280.007	1931.306	-16.495	279.877	1931.014
2	-16.298	280.040	1931.864	-16.384	279.924	1931.567
3	-16.300	279.998	1931.627	-16.402	279.889	1931.327
4	-16.246	279.995	1931.548	-16.368	279.895	1931.247
5	-16.357	279.992	1931.567	-16.480	279.904	1931.265
6	-16.429	280.024	1932.023	-16.570	279.950	1931.717
7	-16.419	280.047	1931.301	-16.577	279.995	1931.000
8	-16.330	280.078	1931.769	-16.514	280.036	1931.463
9	-16.303	280.087	1931.853	-16.491	280.057	1931.545
10	-16.211	280.053	1932.106	-16.407	280.018	1931.797
11	-16.213	280.077	1932.156	-16.409	280.044	1931.846
Mean	-16.319	280.036	1931.738	-16.463	279.963	1931.435
Standard deviation	0.077	0.035	0.296	0.074	0.069	0.292

借助第一组图像, 通过所提方法第一步可以求得测头中心  $x$ 、 $y$  方向的修正值  $\Delta x$  和  $\Delta y$  分别为 19.271, 0.234 mm, 进而求得摄像机坐标系下测头中心实际坐标如表 2 所示。由此可知靶标在  $xPy$  平面内倾斜不同角度  $\gamma$  所对应的图像所求出的实际测头中心坐标数据具有较好的稳定性, 在  $x$ 、 $y$  方向

的标准差分别可达  $\sigma_x = 0.077 \text{ mm}$ 、 $\sigma_y = 0.035 \text{ mm}$ , 本计算结果与文献[8]具有较好的一致性, 验证了所提标定方法具有的高精度特点。

借助第二组的图像信息, 求出每张图像对应摄像机坐标系下实际的测头中心坐标和倾角  $\beta$ , 图 7 为第二组图像不同角度对应的测头中心坐标  $T_y''$  的变化

图,与仿真图变化趋势一致。由(8)式可得  $\Delta z = (279.425 - 279.912) / [\sin 28.4^\circ - \sin(-1.6^\circ)] = -0.967$  mm,计算出的  $z$  方向误差与实际值吻合得较好。可实现测头中心  $z$  方向误差有效分辨的条件是不同位置的  $T_y''$  变化量大于  $T_y''$  随机波动量的 2

倍,故  $z$  方向的分辨率等于  $2\sigma_y$  除以最大角度差,即  $\Delta z_{\min} = 2\sigma_y / \sin(\Delta\beta)_{\max} = 2 \times 0.035 / \sin 30^\circ = 0.140$  mm,即所提方法可分辨出  $z$  方向存在 0.140 mm 误差以上的测头。利用(8)式并根据误差传递公式可知测头中心  $z$  方向的测量标准差为:

$$\sigma_z = \sqrt{\left(\frac{\partial \Delta z}{\partial \beta_1}\right)^2 \cdot \sigma_{\beta}^2 + \left(\frac{\partial \Delta z}{\partial \beta_2}\right)^2 \cdot \sigma_{\beta}^2 + \left(\frac{\partial \Delta z}{\partial T_{y_1}''}\right)^2 \cdot \sigma_y^2 + \left(\frac{\partial \Delta z}{\partial T_{y_2}''}\right)^2 \cdot \sigma_y^2}, \quad (9)$$

式中  $\sigma_{\beta}$  表示角度  $\beta$  的标准差。假设角度  $\beta$  的标准差为  $2^\circ$ ,代入已知数据可得  $\sigma_z \approx 0.140$  mm,即测头中心  $z$  方向的重复性精度为 0.140 mm。

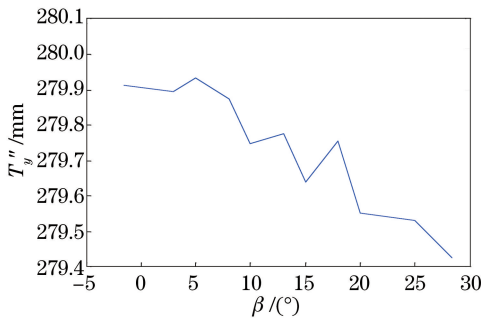


图 7 测头中心坐标  $T_y''$  的变化趋势

Fig. 7 Trend of coordinate  $T_y''$  of probe tip center

综上所述,标定后靶标坐标系下的测头中心坐标为  $(-19.271$  mm,  $-0.234$  mm,  $-0.967$  mm),在 1900 mm 成像距离和靶标相对成像面倾斜最大  $30^\circ$  的情况下,测头中心在  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向的重复性精度可达 0.077, 0.035, 0.140 mm,验证了所提标定方法的有效性和测头中心位置的准确性。理论上  $x$ 、 $y$  方向精度一致性较好,这里是因为实验系统采用的平面靶标宽度分布范围较小所以影响了  $x$  方向的精度。

## 5 结 论

提出了测头中心两步标定算法,该方法较为简便,适用于不同类型的平面靶标测头,不仅可以高精度地标定测头中心  $x$ 、 $y$  方向,而且可以利用靶标相对于摄像机成像面倾斜来标定测头中心  $z$  方向,现场测量仅需借助两组不同位姿的靶标图像信息即可实现测头中心的有效标定。实验结果表明,利用本方法,测头中心在  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向的重复性精度分别可达 0.077, 0.035, 0.140 mm,有效地解决了手持平面靶标测头中心现场标定的难题。

## 参 考 文 献

[1] Liu Z, Li X, Li F, *et al.* Fast and flexible movable

vision measurement for the surface of a large-sized object[J]. *Sensors*, 2015, 15(3): 4643-4657.

[2] Fu S, Zhang L, Ye N, *et al.* A flexible approach to light pen calibration for a monocular-vision-based coordinate measuring system [J]. *Measurement Science and Technology*, 2014, 25(12): 125006.

[3] Chen Yang, Lin Jiarui, Gao Yang, *et al.* A hybrid of vision and inclination sensor method for estimating relative pose[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(12): 1212003.

陈洋, 林嘉睿, 高扬, 等. 视觉与倾角传感器组合相对位姿测量方法[J]. *光学学报*, 2015, 35(12): 1212003.

[4] Ma Guolu, Zeng Guoying. Research and uncertainty analysis of probe based on non-diffracting beam for measuring coordinates[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(5): 0512005.

马国鹭, 曾国英. 基于无衍射探针的空间坐标测量及其不确定度分析[J]. *光学学报*, 2015, 35(5): 0512005.

[5] Zhao Min, Zheng Xingchun, Huang QiuHong, *et al.* Camera calibration of a narrow field of view for deep space[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(9): 091502.

赵敏, 郑兴纯, 黄秋红, 等. 深度空间小视角摄像机标定[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(9): 091502.

[6] Su Jiandong, Qi Xiaohui, Duan Xiusheng. Plane pose measurement method based on monocular vision and the checkerboard target [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(8): 0815002.

苏建东, 齐晓慧, 段修生. 基于单目视觉和棋盘靶标的平面姿态测量方法[J]. *光学学报*, 2017, 37(8): 0815002.

[7] Huang Fengshan, Liu Shugui, Peng Kai, *et al.* Self calibration and simulation of the structure parameters in a light pen vision measurement system[J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2006, 17(6): 705-708.

- 黄风山, 刘书桂, 彭凯, 等. 光笔视觉测量系统结构参数的自标定与仿真[J]. 光电子·激光, 2006, 17(6): 705-708.
- [8] Liu S, Zhang H, Dong Y, *et al.* Portable light pen 3D vision coordinate measuring system-probe tip center calibration[J]. Measurement Science Review, 2013, 13(4): 194-199.
- [9] Xu Qiaoyu, Che Rensheng. Study of stereo vision coordinate measurement system based on optical probe[J]. Acta Optica Sinica, 2008, 28(11): 2181-2186.  
徐巧玉, 车仁生. 基于光学测棒的立体视觉坐标测量系统的研究[J]. 光学学报, 2008, 28(11): 2181-2186.
- [10] Yin Yingjie, Xu De, Zhang Zhengtao, *et al.* Plane measurement based on monocular vision[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2013, 27(4): 347-352.  
尹英杰, 徐德, 张正涛, 等. 基于单目视觉的平面测量[J]. 电子测量与仪器学报, 2013, 27(4): 347-352.
- [11] Feng Ping, Wei Zhenzhong. Light probe based large FOV 3D vision measurement system[J]. Optics & Precision Engineering, 2013, 21(9): 2217-2224.  
冯萍, 魏振忠. 光笔式大视场三维视觉测量系统[J]. 光学精密工程, 2013, 21(9): 2217-2224.
- [12] Xie Zexiao, Sun Honglei, Wang Xiaomin. Study of the two-light pen-camera type 3D-coordinate measuring system[J]. Optical Technique, 2012, 38(4): 459-464.  
解则晓, 孙洪磊, 王晓敏. 光笔式双摄像机三维坐标视觉测量系统[J]. 光学技术, 2012, 38(4): 459-464.
- [13] Zhang Yuanyuan, Zhang Liyan, Yang Bowen. Portable coordinate measurement system based on binocular stereo vision [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2010, 31(7): 1613-1619.  
张元元, 张丽艳, 杨博文. 基于双目立体视觉的无线柔性坐标测量系统[J]. 仪器仪表学报, 2010, 31(7): 1613-1619.
- [14] Yu Zhijing, Sun Dazhao, Tao Hongwei. Monocular vision measuring system based on coding measuring bar [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2014, 35(6): 1080-1083.  
于之靖, 孙大钊, 陶洪伟. 基于编码测棒的单目视觉测量系统[J]. 半导体光电, 2014, 35(6): 1080-1083.
- [15] Zhang R, Liu S, Wang S, *et al.* Stylus tip center position self-calibration based on invariable distances in light-pen systems[J]. Sensors, 2017, 17(1): 131.