视觉引导激光跟踪测量系统的 Cayley 变换校准方法

王亚丽[1],魏振忠[2],张广军[2],邵明伟[2]

(1. 天津理工大学 中环信息学院 电子信息工程系,天津 300380;
2. 北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院 精密光机电一体化教育部重点实验室,北京 100191)

摘　要:对于一台激光跟踪仪对多个测量点进行测量的问题,提出了一种视觉引导激光跟踪测量方法。摄像机固定于激光跟踪仪顶部,随之旋转对测量范围内激光跟踪仪反射器进行定位,引导激光跟踪仪激光投射到反射器上。标定摄像机与激光跟踪仪相对姿态,用平面圆孔靶标。激光跟踪仪和摄像机同时测量圆孔靶标,将两个坐标系下对应三维点数组进行均值化处理,变为两个坐标系下对应的向量组,向量组之间的转换关系,即激光跟踪仪与摄像机之间的旋转矩阵。再根据两坐标系下对应的任一点的三维坐标,求解两坐标系的平移矢量。此标定算法把对两个坐标系之间的旋转矩阵的求解,通过 Cayley 变换,转换为对与转换矩阵相对应的三维向量的求解,求解过程简单稳定。实验结果表明,靶标摆放 50 次,测量误差小于 1 mm。把校准结果应用到实际测量中,激光跟踪仪可快速准确地将激光束投射到反射球中。此方法操作简单,稳定性强,具有很高的实用价值。

关键词:视觉导引;　激光跟踪仪;　Cayley 变换;　校准

中图分类号:TP391.41　　**文献标志码**:A　　**DOI**:10.3788/IRLA201645.0517001

Calibration method for visual-guided laser tracker measurement system based on the Cayley transformation

Wang Yali[1], Wei Zhenzhong[2], Zhang Guangjun[2], Shao Mingwei[2]

(1. Department of Electronic and Information, Zhonghuan Information College, Tianjin University of Technology, Tianjin 300380, China;
2. Key Laboratory of Precision Opto-mechatronics Technology, Ministry of Education, School of Instrument Science and Optoelectronics Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: As for using just one laser tracker to measure several points, a new method of visual-guided laser tracking was presented. A camera was set on the top of the laser tracker, and rotates around the laser tracker′s Z axis. When measuring, the camera rotated a single revolution with the laser tracker, and captured the positions of all the laser interferometers. The coordinates of the positions in the camera frame can be converted to the laser tracker frame, and then the laser designator projected a laser sheet to the laser interferometers. A planar round hole target was used, and the center of the holes were measured simultaneously by the camera and the laser tracker. The corresponding coordinates in the two frames

收稿日期:2015-09-21;　**修订日期**:2015-10-12

基金项目:国家自然科学基金(61340054);北京市自然科学基金(3142012)

作者简介:王亚丽(1980-),女,讲师,博士,主要从事光电测量及机器人视觉测量方面的研究。Email:wangyali_buaa@163.com

which were processed using mean method becomes the corresponding vectors in the two frames. The translation of the two group vectors is the rotation matrix of the two frames. Using Cayley transformation, the rotation matrix of the two frames can be calculated, and then the whole relationship between the two frames can be obtained by using any two corresponding coordinates. The advances of the algorithm are the solving process is simple and the results are stable. Simulation is shown that, when the number of the target placing is more than 50, the influence of the image noise is stable, and the measuring error is less than 1 mm. The proposed method is simple, has strong stability, and has very high practical value.

Key words: visual-guided; laser tracker; Cayley transformation; calibration

0 引 言

在航空制造领域，国外公司大量采用先进的测量与定位技术，装配工作效率和质量达到很高的水平,已从传统专用的固定工装发展到适用多种类型、小批量、高效先进的柔性装配阶段。发展大空间尺寸测量及跟踪、定位技术是解决航空总装工艺、装配方案等问题的基础。通过采用 IGPS、激光跟踪仪等先进的测量、定位技术,可在技术起点上提高国内航空装配技术水平,缩小与国外先进水平的差距,提升我国航空制造的柔性装配制造水平[1]。参考文献[2]比较了激光跟踪仪测量系统、三维激光扫描测量系统、数字照相测量系统以及室内 GPS 系统在飞机装配中的应用，得出激光跟踪测量系统较其他系统有着许多优势,如高精度的大尺寸测量、自动跟踪、实时测量、携带方便、可单台工作、转站无需定标等。

国内航空制造大多还采用传统的固定工装方法进行装配。激光跟踪仪应用于柔性装配制造还处在研究或试用阶段[3-4]。对于大空间尺寸测量、跟踪及定位,多台激光跟踪仪成本太高,而单台激光跟踪仪无法实现多目标点的快速自动测量。视觉系统结合激光跟踪仪可以解决这个问题。视觉系统检测其视场范围内目标球的位置，通过视觉系统与激光跟踪仪系统的转换关系,引导激光投射到目标球中心,实现激光跟踪仪实时测量多个目标球。魏振忠等[5-6]提出基于平面的全局校准方法，通过同时测量平面方程在各自坐标系下的表达式，求解两测量工具之间的转换关系。此方法在测量平面及拟合平面时都易产生误差。而且激光跟踪仪目标球在背景中寻找困难,定位不准确。

为解决上述问题,自制平面圆孔靶标,提出基于 Cayley 变换的激光跟踪仪与视觉系统校准方法。使得视觉系统引导激光跟踪仪快速投射激光束至反射球中心,实现了多目标点的快速自动测量。

1 视觉引导激光跟踪测量系统标定原理

视觉系统与激光跟踪仪的校准是整个测量系统的关键。校准它们之间的关系,通常的方法是用激光跟踪仪和视觉系统同时测量空间中的标定点。进而求解两个坐标系的转换关系。激光跟踪仪只能通过反射球测量,而视觉系统不能直接测量到反射球中心。激光跟踪仪是一个球坐标测量系统,由一个极径和两个方位角来确定被测点在其坐标系下的空间坐标。以跟踪头回转中心作为坐标原点,建立测量坐标系,其测量原理如图 1 所示。记空间点 P 为被测点,跟踪仪通

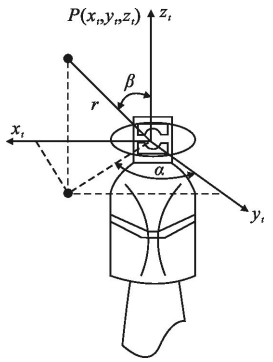

图 1 激光跟踪仪坐标系

Fig.1 Laser tracker coordinate

过激光干涉测距可测得点 P 的极径 r，利用两个角度编码器可分别测得水平方位角 α 和竖直方位角 β。通

过下式可确定被测点 P 的空间坐标(x_t, y_t, z_t)

$$\begin{cases} x_t = r\sin\beta\sin\alpha \\ y_t = r\sin\beta\cos\alpha \\ z_t = r\cos\beta \end{cases} \tag{1}$$

激光跟踪视觉导引测量数学模型如图 2 所示。测量系统以激光跟踪仪的目标反射球作为特征目标。平面圆孔靶标固定在测量空间内。分别将目标反射球放置在平面圆孔靶标的圆孔内。激光跟踪仪依次测量这些反射球中心的三维坐标。

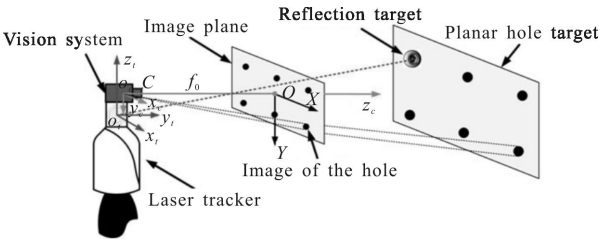

图 2 激光跟踪视觉导引测量数学模型

Fig.2 Mathematic model of vision guiding laser tracker measurement system

平面圆孔靶标位置不变，将激光跟踪仪的水平方位角调至零度。单目相机拍摄靶标平面得到靶标上圆孔图像。提取圆孔中心，通过已标定好的相机内参数[7]，以及单应矩阵，求解平面圆孔靶标上圆孔中心在相机坐标系下的三维坐标。通过这些三维坐标，求解其所在平面的法向量。计算反射球中心所在平面与平面圆孔靶标靶平面之间的距离，将相机测量的平面靶上圆孔中心的三维坐标，补偿到反射球中心所在平面，得到反射球中心在相机坐标系下的三维坐标。

2 基于 Cayley 变换的欧氏变换估计

Cayley 在反对称矩阵和旋转矩阵之间引入了一个变换，称为 Cayley 变换[8]。文中使用 Cayley 变换方法对激光跟踪仪与视觉系统的转换关系进行求解。

设摄像机坐标系为 O_c-$X_cY_cZ_c$，激光跟踪仪坐标系为 O_t-$X_tY_tZ_t$。空间中的任意一点 P 在摄像机坐标系中的三维坐标为 $P_c=(x_c, y_c, z_c)^{\mathrm{T}}$，在激光跟踪仪坐标系中的三维坐标为 $P_t=(x_t, y_t, z_t)^{\mathrm{T}}$。摄像机坐标系到激光跟踪仪坐标系的旋转矩阵为 R，平移向量为 T。则点 P 在摄像机和激光跟踪仪坐标下的坐标 P_c、P_t 满足关系式：

$$P_t = RP_c + T \tag{2}$$

假设相机坐标系与激光跟踪仪坐标系的三维点对应$\{P_{c1} \leftrightarrow P_{t1}, \cdots, P_{cN} \leftrightarrow P_{tN}\}$，将其进行零均值化处理，得到：

$$\begin{cases} P_c' = (P_{c1} - \overline{P}_c, \cdots, P_{cN} - \overline{P}_c) \\ P_t' = (P_{t1} - \overline{P}_t, \cdots, P_{tN} - \overline{P}_t) \end{cases} \tag{3}$$

其中，$(\overline{P}_c, \overline{P}_t) = \dfrac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(P_{ci}, P_{ti})$。

则上式可转化为：

$$\begin{cases} P_t' = RP_c' \\ T = \overline{P}_t - R\overline{P}_c \end{cases} \tag{4}$$

根据 Cayley 变换，令 $w \in R^3$ 为旋转矩阵的Cayley 表达，则有：

$$R = \frac{I - [w]_\times}{I + [w]_\times} \tag{5}$$

式中：$[w]_\times$为向量 w 定义的反对称矩阵。

求解旋转矩阵 R，只需求解三维向量 w。由公式(5)代入公式(4)的第一个等式，并展开可得：

$$(I + [w]_\times)P_t' = (I - [w]_\times)P_c' \tag{6}$$

即

$$[w]_\times(P_t' + P_c') = -(P_t' - P_c') \tag{7}$$

由向量乘积的性质及反对称矩阵的性质：

$$\begin{cases} w \times a = -a \times w \\ w \times a = [w]_\times a \end{cases} \tag{8}$$

可得：

$$[P_t' + P_c']_\times w = P_t' - P_c' \tag{9}$$

通过最小二乘法求解向量 w。

设向量 w 的最小二乘解为 w^*，则旋转矩阵和平移矩阵为：

$$\begin{cases} P_t' = \dfrac{I - [w^*]_\times}{I + [w^*]_\times} P_c' \\ T = \overline{P}_t - R\overline{P}_c \end{cases} \tag{10}$$

3 仿真与实验

3.1 算法仿真

激光跟踪仪在远距离的测量精度为±15 μm+6 μm/m，认为其测量没有误差。所以整个测量系统的误差来源是视觉系统。为验证基于 Cayley 变换的校准方法的性能，对算法进行仿真。通过对图像增加高斯噪声，来考察图像噪声水平对测量精度的影响。

假设相机的内部参数 A，相机与激光跟踪仪转换关系 。世界坐标系建立在平面圆孔靶标的左上角第一个圆孔中心，世界坐标系下有间距相等的三行三列的 9 个目标点 $P_{wi}=(x_{wi},y_{wi},z_{wi})^{\mathrm{T}},(i=1,2,\cdots,9)$。

随机产生 100 组模为(0~0.5)之间的三维向量，通过 Cayley 表达，得到 100 组旋转矩阵，其旋转角度在(−0.5~0.5) rad 之间。再随机生成 100 组 X，Y 方向在(−75~75)mm 之间，Z 方向在(−900~1 500)mm 之间的三维平移向量。100 组旋转矩阵与平移矩阵组合成 100 组相机外参数。上述参数取值范围保证目标点在相机的视场范围内。

由目标点在世界坐标系下的三维坐标和相机外参数，得到 100 组目标点在相机坐标系下的三维坐标 $P_{cij}=(x_{cij},y_{cij},z_{cij})^{\mathrm{T}},(i=1,2,\cdots,100,j=1,\cdots,9)$。通过相机与激光跟踪仪转换关系 RT，得到其在激光跟踪仪坐标系下的三维坐标 $P_{tij}=(x_{tij},y_{tij},z_{tij})^{\mathrm{T}},(i=1,2,\cdots,100),(j=1,\cdots,9)$。由目标点在世界坐标系下的三维坐标，相机外参数，相机内参数，得到 100 组 9 个目标点图像坐标 $p_{cij}=(x_{cij},y_{cij})^{\mathrm{T}},(i=1,2,\cdots,100,j=1,\cdots,9)$。

分别给图像坐标加入均值为 0，标准差为 $\sigma=(0.1\sim1.5)$的高斯分布噪声。通过单应矩阵求解这些图像点在相机坐标系下的对应三维坐标，即有噪声的相机坐标系下目标点的三维坐标 $P_{cij}^{\mathrm{err}}=(x_{cij}^{\mathrm{err}},y_{cij}^{\mathrm{err}},z_{cij}^{\mathrm{err}})^{\mathrm{T}}$，$(i=1,2,\cdots,100,j=1,\cdots,9)$。对有噪声的相机坐标系下目标点的三维坐标 P_{cij}^{err} 及激光跟踪仪坐标系下的三维坐标 P_{tij} 应用 Cayley 变换，求解相机及激光跟踪仪两坐标系之间的旋转矩阵 R^* 及平移矩阵 T^*。为提高准确率，上述仿真过程循环 100 次，求出 100 个 RT^* 的仿真结果。

对试验靶标摆放次数对标定的影响进行分析，分别取上述数据的前(10,20,…,100)组分别进行求解。

为了验证校准结果，如上述操作随机产生 50 组相机坐标系下的三维坐标 $P_{cij}^{\mathrm{test}}=(x_{cij}^{\mathrm{test}},y_{cij}^{\mathrm{test}},z_{cij}^{\mathrm{test}})^{\mathrm{T}},(i=1,20,\cdots,50),(j=1,\cdots,9)$及激光跟踪仪坐标系下的三维坐标 $P_{tij}^{\mathrm{test}}=(x_{tij}^{\mathrm{test}},y_{tij}^{\mathrm{test}},z_{tij}^{\mathrm{test}})^{\mathrm{T}},(i=1,20,\cdots,50),(j=1,\cdots,9)$分别对校准出的 RT^* 的仿真结果进行验证，利用下式

$$\mathrm{err}=\sum_{i=1}^{50}\sum_{j=1}^{9}\sum_{k=1}^{100}\mathrm{dis}(P_{tijk}^{\mathrm{test}}-R_k^*P_{cijk}^{\mathrm{test}}T_k^*)/(50*9*100) \quad (11)$$

得到测量误差如图 3 所示，当摆放大于 50 次时，测量结果趋于稳定。

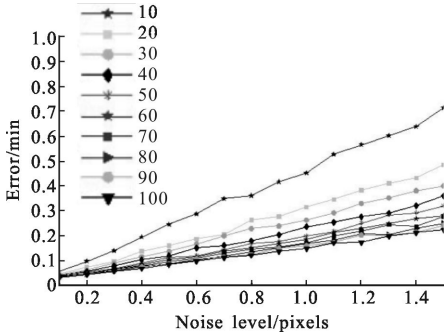

图 3 测试点在不同噪声下的误差

Fig.3 Error curves for the testing positions under different noise levels

3.2 实 验

实验系统由激光跟踪仪、单目相机、平面方格靶标及平面圆孔靶标组成。如图 4 所示视觉引导激光跟踪标定系统，单目相机固定在激光跟踪仪上，平面靶标用于标定单目相机内参。平面圆孔靶标用于标定激光跟踪仪与相机之间的转换关系。

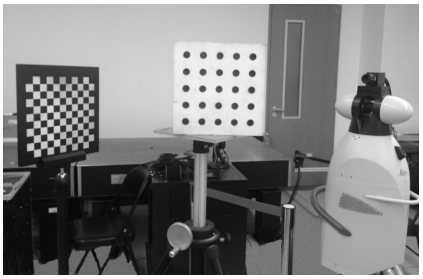

图 4 视觉引导激光跟踪标定系统

Fig.4 Vision guiding laser tracker calibration system

首先利用张正友的基于平面方格靶标方法[9]，标定相机内参。在激光跟踪仪与相机的公共测量空间内，摆放平面圆孔靶标 50 次。每次摆放完平面圆孔靶标后，控制激光跟踪仪水平转角在零度，用相机拍摄靶标图像，并用激光跟踪仪依次测量放置在圆孔上反射球的中心坐标。把相机坐标系下的目标点映射在激光跟踪仪测量反射球中心所在的平面上。由此得到相机坐标系下和激光跟踪仪坐标系下对应的三维点。表 1 为实验设备技术参数。

利用基于 Cayley 变换的校准方法，得到激光跟踪仪与相机坐标系的转换关系为：

$$R=\begin{bmatrix}1.0000 & 0.0021 & -0.0048\\ 0.0048 & 0.0095 & 0.9999\\ 0.0021 & -1.0000 & 0.0095\end{bmatrix}$$

$$T=[-0.6206\quad 34.2552\quad 100.3536]^{\mathrm{T}}$$

表 1 实验设备相关技术参数

Tab.1 Technical parameters of the experiment devices

Device Name	Type	Accuracy
Laser Tracker	Leica AT901-B	±15 μm+6 μm/m
Laser Tracker reflection sphere	RRR-1.5 in	-
Vision system	AVT 504B	1 600 pixel×1 200 pixel
Plane target	Target size: 250 mm×250 mm	0.05 mm
Flat round hole targets	Target size: 280 mm×280 mm	0.1 mm

3.3 精度评价实验

在激光跟踪仪与相机的公共测量空间内，摆放平面圆孔靶标 10 次。计算目标点坐标在相机坐标系下坐标与在激光跟踪仪坐标系下坐标。把相机坐标系下目标点坐标通过转换关系，转换到激光跟踪仪坐标系下，并与激光跟踪仪测量的结果进行比较，得到测量系统的绝对误差如表 2 所示。表中 Pos_i 表示第 i 个位置；P_i 表示第 i 个点。从表 2 可以看出，在位置 2、4、8、10 处，第 1、4、7 点处误差最大，3、6、9 处误差最小，这是因为，在这些位置处，平面圆孔靶标左侧远离相机，圆孔图像中心提取误差大；而右侧靠近相机，圆孔图像中心提取误差小。而 3、6、7 位置靶标摆放方向正好相反。

表 2 测量系统的绝对误差(单位：mm)

Tab.2 Absolute errors for the measurement system(Unit:mm)

	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6	S_7	S_8	S_9	Average
Pos_1	1.106	0.988	0.947	0.366	0.217	0.432	0.925	1.149	1.249	0.820
Pos_2	1.076	0.726	0.384	1.322	0.964	0.626	1.586	1.224	0.878	0.977
Pos_3	0.808	1.093	1.485	0.652	0.884	1.257	0.551	0.737	1.045	0.946
Pos_4	1.056	0.424	0.258	1.481	0.829	0.248	1.941	1.303	0.671	0.913
Pos_5	0.847	0.336	1.229	1.062	0.239	0.952	1.210	0.371	0.727	0.775
Pos_6	0.720	0.894	1.226	0.722	0.833	1.126	0.786	0.880	1.056	0.916
Pos_7	0.626	0.717	0.875	0.667	0.741	0.777	1.064	0.712	0.829	0.779
Pos_8	1.803	1.151	0.629	1.447	0.739	0.435	1.035	0.457	0.716	0.935
Pos_9	1.125	1.005	0.964	0.372	0.221	0.439	0.940	1.169	1.270	0.834
Pos_{10}	1.076	0.726	0.384	1.322	0.964	0.626	1.586	1.224	0.879	0.976

将相同的数据，分别采用直接线性变换(DLT)和直接奇异值分解(SVD)分解方法进行求解，得到平均误差分别为 1.932 9 mm、1.891 5 mm，而 Cayley 变换为 0.985 4 mm。这是因为 Cayley 变换在求解旋转矩阵方面，具有更多优点。

首先，Cayley 变换的逆为 Cayley 变换本身，它们具有相同的特征值，它们之间是一对一映射关系。其次，它直接提供了一个旋转矩阵，而不需要后续的校正步骤，计算简单，因此具有更高的估计精度。

3.4 实际应用

图 5 为视觉引导激光跟踪测量系统应用于某型号飞机鸭翼与机身的对接过程。

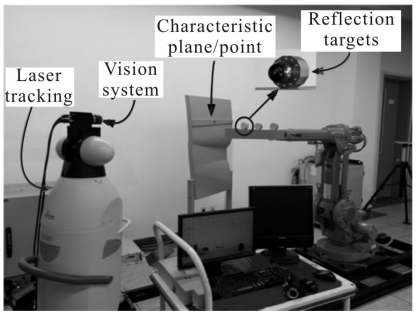

图 5 视觉引导激光跟踪仪测量系统

Fig.5 Vision guiding laser tracker measurement system

如图 5 所示，视觉系统(文中为单目相机)固定在激光跟踪仪顶部，随着激光跟踪仪绕其 Z 轴水平旋转。图中机身上被对接特征，如对接平面的法向

量,及对接圆孔的孔中心,可以通过激光跟踪仪进行测量。即机身姿态在激光跟踪仪坐标系下可求。

激光跟踪仪反射球固定在定制的安装件上,安装件固定在飞机模型的鸭翼上。反射球周围有发光二极管构成的亮点,其形成的圆周半径已知。相机拍摄发光二极管形成的圆环,根据其已知的半径,可以计算出其圆心在相机坐标系下的坐标。再通过圆环所在平面的法向量,及固定反射球的圆孔的半径,可以计算出反射球中心在相机坐标系下的坐标。经过视觉系统与激光跟踪仪校准后,可以得到反射球球心在激光跟踪仪坐标系下的坐标。控制激光跟踪仪激光束分别投射到所有反射球上,精确测量反射球球心位置,计算此时机翼姿态。

值得注意的是,当激光跟踪仪处于水平角零位,相机不能拍摄到反射球时,需要转动激光跟踪仪水平角 α。由相机坐标系下点坐标求解激光跟踪仪坐标系下坐标时,先把当前相机坐标系下的点坐标,转换到激光跟踪仪水平角在零点位置时的相机坐标系下。即当前位置的点坐标绕激光跟踪仪 Z 轴旋转 $-\alpha$ 激光跟踪仪水平角零点位置时的相机坐标系下,转换矩阵为 RT_{camera}。其中,w_1、w_2、w_3 为激光跟踪仪 Z 轴在相机坐标系下的向量,$V\theta=1-\cos(\theta)$,$C\theta=\cos(\theta)$,$S\theta=\sin(\theta)$,$\theta=-\alpha$。

$$RT_{\text{camera}}=\begin{bmatrix} w_1^2*V\theta+C\theta & w_1*w_2*V\theta-w_3*S\theta & w_1*w_3*V\theta+w_2*S\theta \\ w_1*w_2*V\theta+w_3*S\theta & w_2^2*V\theta+C\theta & w_2*w_3*V\theta-w_1*S\theta \\ w_1*w_3*V\theta-w_2*S\theta & w_2*w_3*V\theta+w_1*S\theta & w_3^2*V\theta+C\theta \end{bmatrix} \tag{12}$$

4 结 论

文中针对激光跟踪仪在大空间尺寸测量中成本高、自动化程度低等问题,提出激光跟踪仪与视觉系统相结合的方法,利用视觉系统引导激光跟踪仪实时快速自动测量多个目标点。基于 Cayley 变换的欧氏变换估计,快速稳定地求解出视觉系统与激光跟踪仪的转换关系,保证了测量系统的测量精度并提高了测量速度。视觉系统随激光跟踪仪旋转,保证视觉引导激光测量系统可以 360°测量。不足之处在于视觉系统不能随激光跟踪仪进行俯仰运动,所以确保测量的竖直跨度不能太大,测量之前要先确定测量系统的高度,保证反射球在视场范围内。

参考文献:

[1] Wang J, Guo J. Algorithm for detecting volumetric geometric accuracy of NC machine tool by laser tracker [J]. ***Chinese Journal of Mechanical Engineering***, 2013, 26(1): 166-175.

[2] Mei Zhongyi, Zhu Sanshan, Yang Peng. Digital measurement of aircraft digital flexible assembly [J]. ***Aeronautical Manufacturing Systems***, 2011, 17: 010. (in Chinese)

[3] Jiang Xi, Zhang Li, Wang Liang, et al. Application of digital measurement technology in aircraft fuselage flexible assembly [J]. ***Aeronautical Manufacturing Systems***, 2013 (1): 93-97. (in Chinese)

[4] Huang Yu. Tracker application during digital manufacturing of aircraft [J]. ***Aeronautical Manufacturing Systems***, 2011, 6: 006. (in Chinese)

[5] Wei Zhenzhong, Sun Wen, Zhang Guangjun, et al. Method for finding the 3D center positions of the target reflectors in laser tracking measurement system based on vision guiding [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2012, 41(4): 929-935. (in Chinese)

[6] Wei Zhenzhong, Sun Wen, Zhang Guangjun, et al. Global calibration method for laser-tracking measurement system based on vision guiding [J]. ***Chinese Journal of Scientific Instrument***, 2009, 30(11): 2262-2267. (in Chinese)

[7] Zhang Z Y. A flexible new technique for camera calibration [J]. ***IEEE Trans on Pattern Analysis and Machine Intelligence***, 2000, 22(11): 1330-1334.

[8] Wu Fuchao. Computer Vision: Cayley Transformation and Metric Reconstruction[M]. Beijing: Science Press, 2011. (in Chinese)