形貌视觉测量中立体拼接靶标的设计及应用*

李云雷[1,2],张 曦[1],屠大维[1]
(1. 上海大学机电工程与自动化学院 上海 200072; 2. 山东理工大学机械工程学院 淄博 255000)

摘 要:设计了一种正六棱柱形状的立体拼接靶标,以靶标侧面 6 个棋盘格的角点作为全局控制点。基于近景摄影测量技术,建立立体靶标的 6 个单元模型,通过计算模型内摄站间的相对位姿,推导出棋盘格角点在所属单元模型的局部坐标。以公共棋盘格为中介,确立相邻单元模型的坐标系转换关系。建立靶标的全局坐标系于 1 号棋盘格,推导该棋盘格平面与其像平面间的单应性矩阵,从而确立全局坐标系和 1 号棋盘格所处单元模型的坐标系的转换关系。依次递推实现全局坐标系和每个单元模型坐标系的转换,进而计算出全部靶标角点的全局坐标,再经光束平差算法获取精确值。以玻璃表面棋盘格的角点间距作为评价指标,拼接精度优于 0.15 mm/m。基于立体拼接靶标的拼接试验表明,实体模型表面 4 个子区域的局部点云可被精确地拼接成整体点云。与基于全局控制点和平面靶标的拼接方法相比,本方法亦具有更高的拼接精度。

关键词: 立体拼接靶标;形貌视觉测量;相对定向;单应性矩阵
中图分类号: TP391 TH741 **文献标识码**: A **国家标准学科分类代码**: 460.4035

Design and application of 3D target for stitching in shape vision measurement

Li Yunlei[1,2], Zhang Xi[1], Tu Dawei[1]
(*1. School of Mechatronic Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 200072, China;*
2. School of Mechanical Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255000, China)

Abstract: A three-dimensional (3D) target for point clouds stitching with regular hexagonal prism shape is designed, and the 6 chessboard corners on the six sides of the target are used as the global control points. Based on close-range photogrammetry, six element models of the 3D target are built. Through calculating the relative positions among camera stations in every model, the local coordinates of the chessboard corners in related model are derived. Taking common chessboard as the medium, the transformation relationship of coordinate systems for the neighboring element models is determined. The global coordinate system is built on chessboard number 1, and the homography matrix between the chessboard plane and its image plane is derived, so that the transformation relationship between global coordinate system and the local coordinate system of the element model, in which the chessboard number 1 is located, is determined. Then, the transformation relationship between the global coordinate system and the local coordinate system of each element model is derived one by one; and the global coordinates of all target corners are calculated. Afterwards, the SBA (sparse bundle adjustment) algorithm is used to obtain the accurate values. Taking the distances between the chessboard corners on glass surface as the evaluation index, the stitching precision is better than 0.15 mm/m. The stitching experiment based on the 3D target for stitching shows that the local point clouds of the four sub-area on the solid model surfaces can be precisely stitched into a whole point cloud. Compared with the stitching methods based on global control points and plane target, the proposed method has higher stitching precision.

Keywords: 3D target for point clouds stitching; shape vision measurement; relative orientation; homography matrix

收稿日期:2017-07 Received Date: 2017-07
* 基金项目:国家自然科学基金(41376169,61673252,51205243)项目资助

0 引 言

随着机械装备、汽车、造船、航空航天等产业的发展，对工业产品三维形貌测量的需求日益提高。形貌视觉测量作为一种先进的产品检测手段，具有非接触、测量速度快、自动化程度高和精度较高等优点，非常适合现代化先进制造业自动化程度的发展要求[1-3]。

对于大型或型面复杂物体的形貌测量，由于摄像机视场范围有限和被测物表面相互遮挡等因素，无法一次实现对被测物体的整体测量。因此需要将被测形貌划分为多个小区域，从不同角度分块测量，然后将所有局部的测量数据拼接，得到完整的物体形貌信息[4-6]。

实现局部三维点云数据之间的拼接，目前的技术方案已有多种。转台法[7-8]是将被测物体置于精密旋转平台上，每转过一个角度，视觉传感器对物体局部测量，最后将各个局部点云拼接到一起。该方法在转台机构精确标定的前提下，可以获得较高拼接精度，但大型精密转台价格昂贵，且测量效率低。基于最近点迭代算法(iterative closest point, ICP)及其改进方法[9-11]是将另一个点集中的最近点作为匹配点，计算获得使点对距离偏差最小的刚性变换，反复选取点进行迭代直至算法收敛。ICP 方法的计算过程复杂，需要选择合适的迭代初值，且只能得到局部最优解，实际使用中可靠性不高。粘贴标志点法[12-13]是实践中应用较广泛的方法，它通过粘贴在物体表面的编码标志点实现点云的定位，美国 V-STARS、德国 TRITOP 等工业摄影测量系统即是典型代表。该方法实现简单可靠，拼接精度高，但在被测物表面粘贴标志点的工作量大。基于全局控制点和平面拼接靶标的方法[5-6]，首先由经纬仪或全局控制点(如点状激光光源)建立全局坐标系，视觉测头对被测表面分区域测量，然后以平面标靶的坐标系为中介，将局部三维点云一次或多次转换到全局坐标系下。因平面靶标在物体之外，该方法对被测形貌自身特征无影响，但点云坐标在多次转换过程中会产生一定的累积误差。

基于以上分析，本文提出和设计了一种专用的立体拼接靶标，以靶标不同表面的全局控制点为中介，将各测量子区域统一到全局坐标系下，借助于摄影测量系统进行全局优化可消除坐标转换的累积误差。该方案操作简单、拼接精度高，特别适合测量具有回转或多面结构特征的物体形貌。

1 立体拼接靶标设计

1.1 靶标结构

如图 1 所示，所设计的立体拼接靶标为正六棱柱结构。靶标 6 个侧面布置相同的棋盘格，每个棋盘格 6 行 8 列，共含有 48 个角点，靶标中的所有角点作为全局控制点使用。每个棋盘格均作了序号标记，图 1 所示为棋盘格 1 和 2。立体靶标拼接精度的高低主要取决于角点三维坐标的准确性，本文采用近景摄影测量技术精确求解角点的三维坐标。

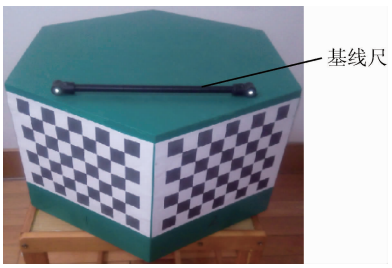


图 1 立体拼接靶标

Fig. 1 3D target for stitching

1.2 建立靶标角点测量的单元模型

手持已标定相机在立体靶标的每个对角线位置自上而下依次拍摄 3 张像片，对应的 3 个摄站视为一个局部单元模型，共计 6 个，如图 2 所示，其中摄站 1、2 和 3 组成第 1 个单元模型，其他模型按 3 个一组的顺序依次排列。为了得到所有角点的全局坐标，应首先计算其在单元模型中的坐标，然后再转换至立体拼接靶标的全局坐标系。

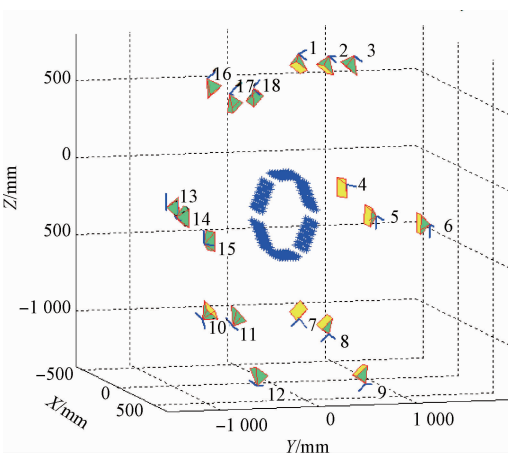


图 2 靶标的 6 个单元模型

Fig. 2 Six element models of the target

以第 1 个单元模型为例，计算位于该模型内棋盘格 1 和 2 所有角点的单元模型坐标。首先以摄站 2 处的相机坐标系作为单元模型的坐标系，然后分别求解摄站 1、3 与 2 的相对位姿。摄站 2 和 1 的相对定向模型如图 3 所示，摄站 2 处的相机坐标系记为 o'-$x'y'z'$，摄站 1 处的相

机坐标系记为 o''-$x''y''z''$,同时建立辅助坐标系 o''-$\bar{x}''\bar{y}''\bar{z}''$,其 3 个坐标轴分别与 o'-$x'y'z'$ 中对应的轴线平行。坐标系 o''-$x''y''z''$ 到 o''-$\bar{x}''\bar{y}''\bar{z}''$ 的欧拉角变换为 ω、φ 和 κ;基线矢量 $\overline{o'o''}$ 对应摄站 1 到摄站 2 的平移矢量 $\boldsymbol{t}=(bx\quad by\quad bz)$。

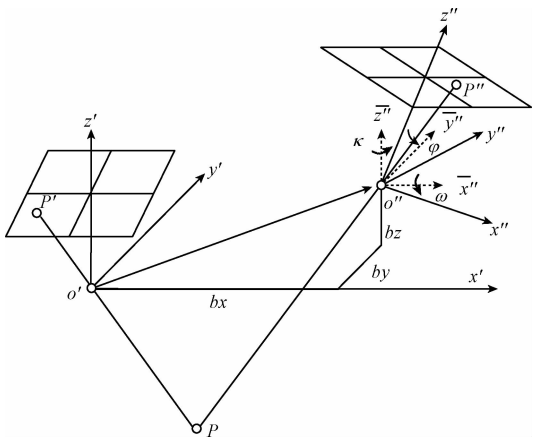


图 3　相对定向模型

Fig. 3　Relative orientation model

对棋盘格 1 或 2 上的任意角点 P,令其在摄站 2 和 1 处拍摄像片上的像点分别为 $P'(x',y',z')$ 和 $P''(x'',y'',z'')$,其中 P'' 在坐标系 o''-$\bar{x}''\bar{y}''\bar{z}''$ 的坐标为 $(\bar{x}'',\bar{y}'',\bar{z}'')$,由共面条件可得下式:

$$\boldsymbol{\Delta}=\begin{vmatrix} bx & x' & \bar{x}'' \\ by & y' & \bar{y}'' \\ bz & z' & \bar{z}'' \end{vmatrix}=0 \tag{1}$$

对两像片中的任意一对同名像点 $(x'_i,\ y'_i,\ z'_i)$ 和 $(x''_i,\ y''_i,\ z''_i)$,将式(1)中的行列式展开,可得:

$$[x'_i\ y'_i\ z'_i]\begin{bmatrix} 0 & -bz & by \\ bz & 0 & -bx \\ -by & bx & 0 \end{bmatrix}\cdot\begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix}\cdot\begin{bmatrix} x''_i \\ y''_i \\ z''_i \end{bmatrix}=0 \tag{2}$$

$$[x'_i\ y'_i\ z'_i][\boldsymbol{T}]_\times\boldsymbol{R}\begin{bmatrix} x''_i \\ y''_i \\ z''_i \end{bmatrix}=0 \tag{3}$$

式中:令 $\boldsymbol{E}=[\boldsymbol{T}]_\times\boldsymbol{R}$,$\boldsymbol{E}$ 称为本质矩阵,它是一个反对称矩阵 $[\boldsymbol{T}]_\times$ 和旋转矩阵 $\boldsymbol{R}$ 的乘积。$[\boldsymbol{T}]_\times$ 是平移矢量 $\boldsymbol{t}$ 的 3 个分量 bx、by 和 bz 的组合,$\boldsymbol{R}$ 则与欧拉角 ω、φ 和 κ 唯一对应。考虑到角点像素坐标的定位精度普遍达到亚像素级[14],且两张像片中提取的角点像素坐标均按相同的排列次序,匹配关系明确,不存在误匹配,故本质矩阵采用归一化 8 点算法[15]可以获得稳定的数值。

确定了本质矩阵 $\boldsymbol{E}$ 之后,再对其进行奇异值(singular value decomposition, SVD)分解得:

$$\boldsymbol{E}=\boldsymbol{U}_{\mathrm{E}}\boldsymbol{S}_{\mathrm{E}}\boldsymbol{V}_{\mathrm{E}}^{\mathrm{T}} \tag{4}$$

则旋转矩阵 $\boldsymbol{R}$ 和平移矢量 $\boldsymbol{t}$ 的值为:

$$\boldsymbol{R}=\boldsymbol{U}_{\mathrm{E}}\boldsymbol{W}\boldsymbol{V}_{\mathrm{E}}^{\mathrm{T}}\ \text{或}\ \boldsymbol{R}=\boldsymbol{U}_{\mathrm{E}}\boldsymbol{W}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{V}_{\mathrm{E}}^{\mathrm{T}} \tag{5}$$

$$\boldsymbol{t}=\alpha\boldsymbol{U}_{\mathrm{E}}\boldsymbol{Z}\boldsymbol{U}_{\mathrm{E}}^{\mathrm{T}}\ \text{或}\ \boldsymbol{t}=\alpha\boldsymbol{U}_{\mathrm{E}}\boldsymbol{Z}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{U}_{\mathrm{E}}^{\mathrm{T}} \tag{6}$$

式中:α 为不等于零的任意常数。$\boldsymbol{W}$ 和 $\boldsymbol{Z}$ 分别为:

$$\boldsymbol{W}=\begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}\quad \boldsymbol{Z}=\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \tag{7}$$

由此可见,这里共有 4 组解,参照 Hartley 提出的 Cheirality 约束条件确定四组解中的唯一正确解[16]。同时,还应确定式(6)中的平移矢量系数 α。假设计算得到摄站 1 到摄站 2 的相对位姿关系为 $\boldsymbol{R}_{12}$ 和 $\boldsymbol{t}'_{12}$,依据摄影测量学中的前方交汇算法易于得到基线尺(见图 1)的两个标志点在单元模型坐标系 o'-$x'y'z'$ 中的三维坐标,进而计算出两点间距 D',是真实距离的 $1/\alpha$ 倍。令基线尺的真实距离为 D,则有:

$$\alpha=D/D' \tag{8}$$

将 α 代入式(6),得到平移矢量的真值为:

$$\boldsymbol{t}_{12}=\alpha\boldsymbol{t}'_{12} \tag{9}$$

依据相同方法,可以计算出摄站 3 到摄站 2 的相对位姿关系 $\boldsymbol{R}_{32}$ 和 $\boldsymbol{t}_{32}$。从 $\boldsymbol{R}_{12}(\boldsymbol{t}_{12})$ 或 $\boldsymbol{R}_{32}(\boldsymbol{t}_{32})$ 任选一组,采用前方交汇算法得到棋盘格 1 和 2 上所有角点的单元模型坐标。

1.3　单元模型连接

表 1 所示为棋盘格在单元模型的分布情况,任意相邻两个单元模型间均有公共棋盘格,例如单元模型 1 和 2 均能观测到棋盘格 2。组成单元模型的摄站也列于表中,均将中间摄站处的相机坐标系视为单元模型坐标系。

表 1　棋盘格在 6 个单元模型的分布

Table 1　Chessboard distribution in six element models

单元模型编号	摄站组合	观测的棋盘格
1	摄站 1、2、3	棋盘格 1、2
2	摄站 4、5、6	棋盘格 2、3
3	摄站 7、8、9	棋盘格 3、4
4	摄站 10、11、12	棋盘格 4、5
5	摄站 13、14、15	棋盘格 5、6
6	摄站 16、17、18	棋盘格 6、1

单元模型连接目标是确立立体拼接靶标全局坐标系和6个单元模型坐标系的转换关系。如图4所示,将立体拼接靶标的全局坐标系 O_w-$X_wY_wZ_w$ 建立在棋盘格1处,6个单元模型的坐标系从 O_{e1}-$X_{e1}Y_{e1}Z_{e1}$ 到 O_{e6}-$X_{e6}Y_{e6}Z_{e6}$ 逆时针分布。

相邻两个单元模型之间的坐标转换关系求解以单元模型1和2为例说明。设二者的相对位姿为 $\boldsymbol{R}_{e2e1}$ 和 $\boldsymbol{t}_{e2e1}$,单元模型1对应摄站2的相机坐标系,单元模型2对应摄站5的相机坐标系,摄站2和5均可观测到棋盘格2,沿用1.2节的相对定向方法即可求得 $\boldsymbol{R}_{e2e1}$ 和 $\boldsymbol{t}_{e2e1}$。全局坐标系到各单元模型坐标系的转换关系按两个递推链进行:全局坐标系→模型1→模型2→模型3和全局坐标系→模型6→模型5→模型4,如图4所示。

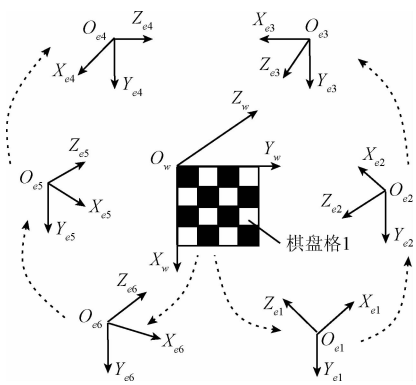


图4 全局坐标系到单元模型坐标系的转换

Fig. 4 Transformation from global coordinate system to element model coordinate system

将立体拼接靶标6个侧面的棋盘格视为独立的局部靶标平面,全局坐标系 O_w-$X_wY_wZ_w$ 到单元模型坐标系 O_{e1}-$X_{e1}Y_{e1}Z_{e1}$、O_{e6}-$X_{e6}Y_{e6}Z_{e6}$ 的转换,是利用局部靶标平面(此处为棋盘格1)与其像平面间的单应性矩阵实现。该操作也可视为摄站2和摄站17的绝对定向,步骤如下。

1)角点三维坐标的转换。在后续的拼接试验部分,利用靶标6个侧面的棋盘格定向同样采用该方法,虽然棋盘格1处角点的 Z 坐标为0(如图4所示),但其他五个棋盘格角点的 Z 坐标均不为0。考虑到问题的一般性,仍作如下讨论。

设局部靶标平面角点个数为 n,任意角点的三维坐标为 $\boldsymbol{M}_i = [X_i, Y_i, Z_i]^{\mathrm{T}}(i = 1,2\cdots n)$。为求得单应性矩阵,首先将 $\boldsymbol{M}_i$ 转换为 Z 坐标为0的点,即 $\boldsymbol{M}_{0i} = [X_{0i}, Y_{0i}, 0]^{\mathrm{T}}$。二者的转换关系表示为:

$$\boldsymbol{M}_{0i} = \boldsymbol{R}_t M_i + \boldsymbol{t}_t \tag{10}$$

式中:$\boldsymbol{R}_t$ 为3×3的旋转矩阵,$\boldsymbol{t}_t$ 为3×1的平移矢量。$\boldsymbol{R}_t$ 和 $\boldsymbol{t}_t$ 表示全局世界坐标系到 $Z = 0$ 的世界坐标系的转换关系,如图5所示。其中,O_o-$X_oY_oZ_o$ 为 $Z = 0$ 的世界坐标系。

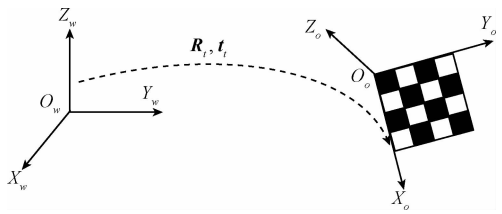


图5 全局坐标系到 $Z=0$ 坐标系的转换

Fig. 5 Transformation from global coordinate system to the coordinate system with $Z=0$

$\boldsymbol{R}_t$ 和 $\boldsymbol{t}_t$ 的求解方法如下:

构造矢量 $\tilde{\boldsymbol{X}} = ((X_1 - \bar{X}), (X_2 - \bar{X}), \cdots, (X_i - \bar{X}), \cdots, (X_n - \bar{X}))$,其中 $\bar{X} = (\sum_{i=1}^{n} X_i)/n$。同理可依次构造出矢量 $\tilde{\boldsymbol{Y}}$、$\tilde{\boldsymbol{Z}}$,其表达式中对应的均值分别为 $\bar{\boldsymbol{Y}}$ 和 $\bar{Z}$。令3个矢量组成新的矩阵 $\boldsymbol{F} = [\tilde{\boldsymbol{X}}; \tilde{\boldsymbol{Y}}; \tilde{\boldsymbol{Z}}]$,则 $\boldsymbol{F}$ 为 $n \times 3$ 矩阵。构造矩阵 $\boldsymbol{F}'' = \boldsymbol{F}\boldsymbol{F}^{\mathrm{T}}$,再对其进行SVD分解,得:

$$\boldsymbol{F}'' = \boldsymbol{U}_{\mathrm{F}}\boldsymbol{S}_{\mathrm{F}}\boldsymbol{V}_{\mathrm{F}}^{\mathrm{T}} \tag{11}$$

依据式(11),可得旋转矩阵 $\boldsymbol{R}_t = \boldsymbol{V}_{\mathrm{F}}^{\mathrm{T}}$,平移矢量 $\boldsymbol{t}_t = -\boldsymbol{R}_t \cdot [\bar{X} \quad \bar{Y} \quad \bar{Z}]^{\mathrm{T}}$。

2)角点像素坐标的转换。设靶标平面上任意角点 $\boldsymbol{M}_i$ 在对应像平面上的像素坐标为 $\boldsymbol{m}_i = [u_i, v_i]^{\mathrm{T}}(i = 1, 2, \cdots, n)$。假设像素坐标 $\boldsymbol{m}_i$ 已做了畸变矫正,令相机的内参数矩阵为:

$$\boldsymbol{K} = \begin{bmatrix} f_x & s & u_0 \\ 0 & f_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{12}$$

式中:f_x、f_y 为相机焦距,s 为代表相机实际成像平面 X、Y 轴夹角的倾斜系数,u_0、v_0 为相机镜头光心在像平面投影点的像素坐标。

建立以镜头光心为原点的相机坐标系,且其 X、Y 轴与像素坐标系对应轴线平行。将像素坐标为 $\boldsymbol{m}_i = [u_i, v_i]^{\mathrm{T}}$ 的像平面角点转换至相机坐标系,并以焦距为单位作归一化处理。设转换后的归一化坐标为 $\tilde{\boldsymbol{m}}'_i = [u'_i, v'_i, 1]^{\mathrm{T}}$,结合式(12)得:

$$\begin{cases} u'_i = (u_i - u_0)/f_x - s \cdot v'_i \\ v'_i = (v_i - v_0)/f_y \end{cases} \tag{13}$$

3)构建单应性矩阵。令角点在 $Z = 0$ 的世界坐标系的齐次坐标为 $\tilde{\boldsymbol{M}}_{0i} = [X_{0i}, Y_{0i}, 0, 1]^{\mathrm{T}}$,则有:

$$\lambda \tilde{\boldsymbol{m}}'_i = [\boldsymbol{R} \quad \boldsymbol{t}]\tilde{\boldsymbol{M}}_{0i} \tag{14}$$

式中:λ 为非零常数比例因子,$\boldsymbol{R}$ 为 3×3 的旋转矩阵,$\boldsymbol{t}$ 为 3×1 的平移矢量,表示 $Z=0$ 的世界坐标系到相机坐标系的转换关系。若旋转矩阵 $\boldsymbol{R}$ 的第 i 列元素由 $\boldsymbol{r}_i$ 表示,则式(14)变为:

$$\lambda\begin{bmatrix} u'_i \\ v'_i \\ 1 \end{bmatrix} = [\boldsymbol{r}_1 \quad \boldsymbol{r}_2 \quad \boldsymbol{r}_3 \quad \boldsymbol{t}]\begin{bmatrix} X_{0i} \\ Y_{0i} \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = [\boldsymbol{r}_1 \quad \boldsymbol{r}_2 \quad \boldsymbol{t}]\begin{bmatrix} X_{0i} \\ Y_{0i} \\ 1 \end{bmatrix} \tag{15}$$

令 $\boldsymbol{H}=[\boldsymbol{r}_1 \quad \boldsymbol{r}_2 \quad \boldsymbol{t}]=\begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} \\ h_{31} & h_{32} & h_{33} \end{bmatrix}$,则 $\boldsymbol{H}$ 为局部靶标平面与其像平面间的单应性矩阵,亦反映了 $Z=0$ 的世界坐标系到相机坐标系的转换关系。将 $\boldsymbol{H}$ 代入式(15),每一组对应点可列写出关于 $\boldsymbol{H}$ 的两个线性方程,即:

$$\begin{cases} u'_i(h_{31}X_{0i}+h_{32}Y_{0i}+h_{33}) = h_{11}X_{0i}+h_{12}Y_{0i}+h_{13} \\ v'_i(h_{31}X_{0i}+h_{32}Y_{0i}+h_{33}) = h_{21}X_{0i}+h_{22}Y_{0i}+h_{23} \end{cases} \tag{16}$$

n 组对应点构建 $2n$ 个线性方程,建立目标函数,采用 L-M(Levenberg-Marquardt)算法对目标函数进行非线性递归搜索,求取最小二乘解作为 $\boldsymbol{H}$ 的最佳近似解。

4)确定全局世界坐标系到相机坐标系的转换关系。将单应性矩阵 $\boldsymbol{H}$ 的第 i 列元素用 $\boldsymbol{h}_i$ 表示,则有:

$$\boldsymbol{H}=[\boldsymbol{h}_1 \quad \boldsymbol{h}_2 \quad \boldsymbol{h}_3] \tag{17}$$

仍沿用 $\boldsymbol{R}$ 和 $\boldsymbol{t}$ 表示 $Z=0$ 的世界坐标系到相机坐标系的旋转矩阵和平移矢量。单应性矩阵 $\boldsymbol{H}$ 仍需做进一步处理:

$$\begin{cases} \boldsymbol{r}_1 = \boldsymbol{h}_1/|\boldsymbol{h}_1| \\ \boldsymbol{r}_2 = (\boldsymbol{h}_2-(\boldsymbol{h}_1^{\mathrm{T}}\boldsymbol{h}_2)\cdot\boldsymbol{h}_1)/|\boldsymbol{h}_2-(\boldsymbol{h}_1^{\mathrm{T}}\boldsymbol{h}_2)\cdot\boldsymbol{h}_1| \\ \boldsymbol{r}_3 = \boldsymbol{r}_1\times\boldsymbol{r}_2 \\ \boldsymbol{t} = \boldsymbol{h}_3 \end{cases} \tag{18}$$

式中:"|·|"代表向量的模,"×"代表两个向量的叉积,由此得到 $\boldsymbol{R}$ 和 $\boldsymbol{t}$ 的精确解。

令全局世界坐标系到相机坐标系的旋转矩阵和平移矢量分别为 $\boldsymbol{R}_{we}$ 和 $\boldsymbol{t}_{we}$,任意角点在两个坐标系之间的转换可按先由全局世界坐标到 $Z=0$ 的世界坐标系($\boldsymbol{R}_t$ 和 $\boldsymbol{t}_t$),再到相机坐标系($\boldsymbol{R}$ 和 $\boldsymbol{t}$)的顺序实现。故有:

$$\begin{cases} \boldsymbol{R}_{we} = \boldsymbol{R}\boldsymbol{R}_t \\ \boldsymbol{t}_{we} = \boldsymbol{R}\boldsymbol{t}_t+\boldsymbol{t} \end{cases} \tag{19}$$

依照步骤 1)~4)的推导过程,可计算出全局坐标系到单元模型 1 和 6 坐标系的旋转矩阵和平移矢量,分别用 $\boldsymbol{R}_{we1}$、$\boldsymbol{t}_{we1}$(摄站 2 的位姿参数)和 $\boldsymbol{R}_{we6}$、$\boldsymbol{t}_{we6}$(摄站 17 的位姿参数)表示。

依据图 4 所示的两个递推链,全局坐标系到模型 3 坐标系的旋转矩阵和平移矢量为:

$$\begin{cases} \boldsymbol{R}_{we3} = \boldsymbol{R}_{e2e3}\boldsymbol{R}_{e1e2}\boldsymbol{R}_{we1} \\ \boldsymbol{t}_{we3} = \boldsymbol{R}_{e2e3}\boldsymbol{R}_{e1e2}\boldsymbol{t}_{we1}+\boldsymbol{R}_{e2e3}\boldsymbol{t}_{e1e2}+\boldsymbol{t}_{e2e3} \end{cases} \tag{20}$$

式中:$\boldsymbol{R}_{e1e2}$、$\boldsymbol{R}_{e2e3}$ 和 $\boldsymbol{t}_{e1e2}$、$\boldsymbol{t}_{e2e3}$ 分别是单元模型 1 和 2、2 和 3 的旋转矩阵和平移矢量。全局坐标系到其他模型坐标系的转换依此类推。

1.4　角点全局坐标的精确求解

采用文献[15]的稀疏集来调整(sparse bundle adjustment, SBA)算法精确求解靶标上所有角点的三维坐标。该算法需要的数据包括相机的内参数(已标定)、全局坐标系下角点三维坐标初值、摄站位姿参数(相机坐标系与全局坐标系之间的旋转矩阵和平移矢量)的初值和角点的像素坐标(已提取)。其中,角点在全局坐标系内的坐标初值依据图 4 的递推链推导。每个单元模型中,中间摄站的位姿结合 1.3 节容易获得,模型内另两个摄站到中间摄站的位姿关系借助公共棋盘格(参考 1.2 节)易于求解,进而推导出全局坐标系到另两个摄站对应相机坐标系的转换,最终确定所有摄站的位姿参数。平差后精确计算的角点如图 2 中的点阵所示。

2　拼接精度评价

如图 6 所示,评价对象为粘贴于玻璃表面的棋盘格,测量棋盘格角点的间距评价拼接精度。间距真实值采用摄影测量方法计算,高精度的基线尺确立比例因子,间距误差优于 0.01 mm。在棋盘格内选择两组角点 $a_1 \sim a_6$ 和 $b_1 \sim b_6$,相同序号的角点构成一个间距。

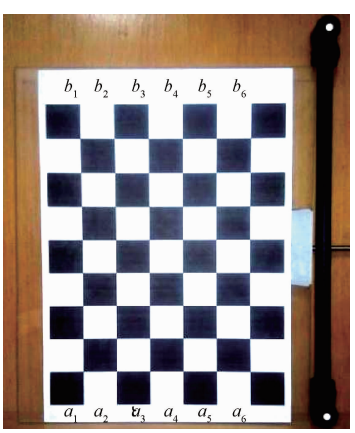


图 6　评价拼接精度的棋盘格

Fig. 6　The chessboard used for stitching precision evaluation

棋盘格置于立体拼接靶标上表面，中间部分遮挡。如图7(a)所示，单反相机(尼康 D3200，6 016×4 000 像素)从靶标前方 3 个视角对 a 组角点成像，每张像片保证至少含一个靶标侧面的图像。

(a) 测量a组角点的三视角图像
(a) The three view-angle images formeasuring the corners in group a

(b) 测量b组角点的三视角图像
(b) The three view-angle images formeasuring the corners in group b

图 7 a、b 两组角点的分区域测量

Fig. 7 Local area measurement of the corners in groups a and b

3 张像片对应 3 个摄站，利用 1.2 节中的绝对定向方法获得 3 个摄站的位姿参数。任选两个摄站，采用前方交汇算法计算 a 组角点在摄站坐标系的坐标，再转换至靶标的全局坐标系，SBA 平差获取精确解。依据图 7(b)，同理可得 b 组角点在全局坐标系的精确三维坐标。

表 2 所示为 6 组角点间距的拼接测量值、真实值及二者的误差。依据误差与真实值的绝对均值，可得立体靶标的拼接精度优于 0.15 mm/m。

表 2 角点间距的拼接误差

Table 2 Stitching error of the distance between corners

(mm)

角点间距序号	真实值	拼接测量值	误差
a_1b_1	197.046 5	197.074 9	-0.028 4
a_2b_2	197.035 4	197.010 1	0.025 3
a_3b_3	197.158 7	197.124 4	0.034 3
a_4b_4	197.333 9	197.356 4	-0.022 5
a_5b_5	197.280 2	197.249 0	0.031 2
a_6b_6	197.272 0	197.299 9	-0.027 9
绝对均值	197.187 8	197.185 8	0.028 3

3 拼接试验

如图 8 所示，被测对象为置于立体拼接靶标上的实体模型，主体尺寸 0.5 m×0.5 m×0.1 m，采用激光快速成型技术加工。模型正面为曲面形状(含 2 个凸形和 2 个凹形部分)，反面近似为平面。投影仪向模型表面投射密集的白色圆点阵列结构光，用于产生表面的测量特征点。拼接试验仅测量实体模型的正、反表面，每个表面又分为上下两部分，共计 4 个子区域。

图 8 实体模型的拼接试验现场

Fig. 8 The stitching experiment scene of the solid model

各子区域的测量过程相同，步骤如下。

1)投影仪向子区域投射点阵结构光。

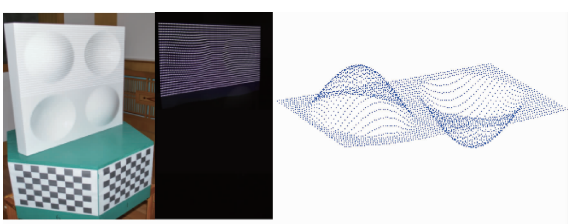
2)相机(尼康 D3200)固定于三角架上，在同一位置拍摄两次。第 1 次闪光拍摄，获得立体拼接靶标侧面的角点图像，用于定向；第二次禁光高速拍摄，获得清晰的点阵结构光图像，因此两次拍摄的像片对应相同的摄站参数。

3)更换若干位置，重复步骤 2)的操作，拍摄位置在子区域的可视空间内尽可能均匀分布。

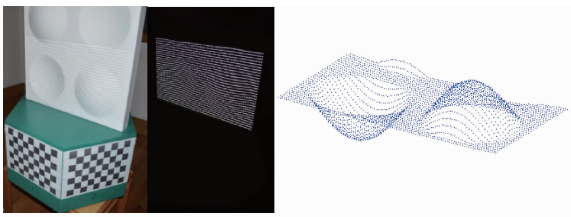
4)针对每个位置的投影点阵图像，精确提取圆心像素坐标，立体靶标获取摄站参数，SBA 平差计算每个圆心在全局坐标系的精确三维坐标，形成子区域的点云数据。

图 9 所示为在 4 个子区域各选一个位置，两次拍摄获得的像片和局部点云。图 10 所示为由 4 个子区域点云数据拼接的实体模型整体点云，因上下子区域存在部分重叠，正、反表面点云的中间区域密度明显增加。

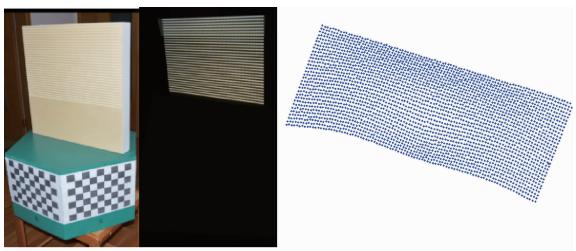
为验证本文提出的基于立体靶标的拼接方法(方法 A)与其他方法的拼接精度，在相同试验条件(投影点阵和被测实体模型相同)下，利用文献[5]中基于全局控制点和平面靶标的拼接方法(方法 B)，对图 9 中 4 个子区域的投影点阵进行拼接试验。



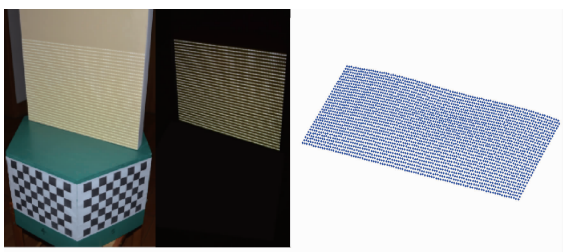
(a) 正面上部区域
(a) The upper area of the front surface



(b) 正面下部区域
(b) The lower area of the front surface



(c) 反面上部区域
(c) The upper area of the backsurface



(d) 反面下部区域
(d) The lower area of the backsurface

图 9　实体模型 4 个子区域的摄影像片和点云
Fig. 9　Photogrammetry images and point clouds of the four sub-areas of the solid model

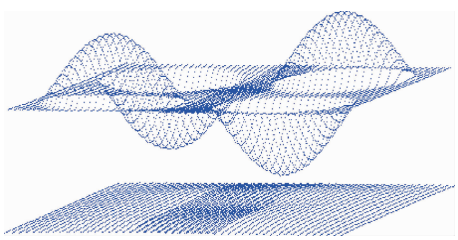


图 10　拼接后的实体模型整体点云
Fig. 10　Whole point cloud of the solid model after stitching

方法 B 的拼接过程如图 11 所示,双目视觉测头测量实体模型 4 个子区域内投影点阵的三维坐标,同时亦对平面靶标成像,拼接相机可同时观测平面靶标和全局控制点(至少 3 个),投影点阵的三维坐标可按以下顺序转换:视觉测头坐标系→平面靶标坐标系→拼接相机坐标系→全局坐标系。

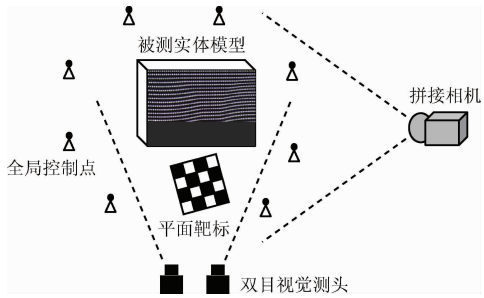
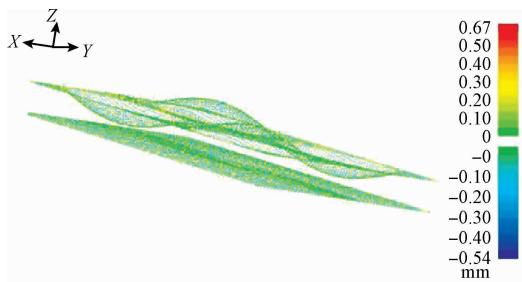
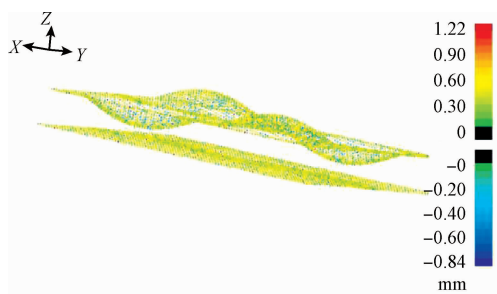


图 11　基于全局控制点和平面靶标的拼接模型
Fig. 11　The stitching model based on the global control points and plane target

两种拼接方法获取的点云分别与被测实体模型的标准点云数据进行对比,点云偏差的分布特点如图 12 所示,方法 B 的点云偏差分布范围明显大于方法 A。具体数据如表 3 所示,方法 A 对应点云偏差的分布范围在 −0.535 ~ +0.663 mm,而 B 的为 −0.837 ~ +1.216 mm,A 和 B 的点云偏差绝对值的平均值分别为 0.212 和0.612 mm,这充分表明本文提出的拼接方法具有更高的拼接精度。分析其原因,主要包括两点:1)方法 A 拍摄的像片数目多,对同一子区域的投影点阵可从多个角度拍摄多张像片,而方法 B 仅能获取两张像片;2)方法 A 的拼接过程简单,一次即可将各子区域的投影点阵统一到全局坐标系,而方法 B 则需要三次坐标转换,势必产生较大的累积误差。



(a) 方法A的点云偏差分布
(a) Point cloud deviation distribution diagramfor method A



(b) 方法B的点云偏差分布
(b) Point cloud deviation distribution diagramfor method B

图 12　两种方法的点云偏差对比
Fig. 12　Comparison of the point cloud deviations for methods A and B

表 3 方法 A 和 B 的点云偏差数据

Table 3 Point cloud deviation data for methods A and B

拼接方法	点云点数	取值范围	点云偏差/mm		
			最大值	平均值	标准偏差
A	12 045	负值	-0.535	-0.197	0.086
		绝对值	0.663	0.212	0.098
		正值	0.663	0.235	0.109
B	12 045	负值	-0.837	-0.383	0.212
		绝对值	1.216	0.612	0.237
		正值	1.216	0.627	0.246

4 结 论

本文设计了一种正六棱柱结构的立体拼接靶标,以靶标侧面的棋盘格角点作为全局控制点,实现被测物体形貌的拼接测量。建立了靶标的单元模型,并实现了全局坐标系与单元模型坐标系的转换,进而精确求解出全局控制点的三维坐标。以玻璃表面的棋盘格角点间距作为评价指标,拼接精度优于0.15 mm/m。拼接试验表明,基于立体靶标的拼接测量可精确获得实体模型的整体点云数据。同时,与基于全局控制点和平面靶标的拼接方法相比,本文方法亦具有更高的拼接精度。

参考文献

[1] 王宇,张旭,李晨,等. 基于光场成像的三维测量方法的研究[J]. 仪器仪表学报,2015,36(6):1311-1318.
WANG Y, ZHANG X, LI CH, et al. Study on the three-dimensional measurement technology based on light field imaging[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015,36(6):1311-1318.

[2] 刘今越,刘佳斌,郭志红,等. 一种基于面结构光的刀具三维测量系统[J]. 电子测量与仪器学报,2016,30(12):1884-1891.
LIU J Y, LIU J B, GUO ZH H, et al. A three-dimensional tool measurement system based on surface structured light[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2016,30(12):1884-1891.

[3] 易荣刚,李鹏,蒋晖. 投影测量技术在翼型表面摩擦力测量中的应用[J]. 电子测量技术,2016, 39(6):51-56.
YI R G, LI P, JIANG H. Application of projection measurement technique in the measurement of airfoil surface friction[J]. Electronic Measurement Technology, 2016,39(6):51-56.

[4] 孙军华,张广军,魏振忠. 大型自由曲面移动式三维视觉测量系统[J]. 仪器仪表学报,2006,27(12):1688-1691.
SUN J H, ZHANG G J, WEI ZH ZH. Mobile 3D vision measurement system for large-scale free form surface[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2006,27(12):1688-1691.

[5] 任同群,郝继贵,李艳军,等. 形貌测量中立体图像拼接的关键技术[J]. 机械工程学报,2008,44(5):137-141.
REN T Q, ZHU J G, LI Y J, et al. Key technology on stereo image mosaic of shape measurement[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2008, 44(5):137-141.

[6] 张广军,孙军华,魏振忠,等,基于单经纬仪的视觉测量三维数据拼接方法[J]. 仪器仪表学报,2007,28(3):441-445.
ZHANG G J, SUN J H, WEI ZH ZH, et al. 3D data registration method based on single theodolite in vision measurement [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument,2007,28(3):441-445.

[7] MCLVOR A. Nonlinear of a laser stripe profiler[J]. Optical Engineering, 2002,41(1):205-212.

[8] 龙玺,钟约先,李仁举,等. 结构光三维扫描测量的三维拼接技术[J]. 清华大学学报,2002,42(4):477-480.
LONG X, ZHONG Y X, LI R J, et al. 3-D surface integration in structured light 3-D scanning[J]. Journal of Tsinghua University, 2002,42(4):477-480.

[9] KIM D. A fast ICP algorithm for 3-D human body motion tracking[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2010, 17(4): 402-405.

[10] SHARP G C, MEMBER S. ICP registration using invariant features [J]. IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2002,24(1):90-102.

[11] 孙军华,谢萍,刘震,等. 基于分层块状全局搜索的三维点云自动配准[J]. 光学精密工程,2013,21(1):174-180.
SUN J H, XIE P, LIU ZH, et al. Automatic 3D point cloud registration based on hierarchical block global search[J]. Optical and Precision Engineering, 2013, 21(1):174-180.

[12] REICH C, RITTER R, THESING J. 3D shape measurement of complex objects by combining photogrammetry and fringe projector [J]. Optical Engineering, 2000,39(1):224-231.

[13] 刘建伟,梁晋,梁新合,等. 大尺寸工业视觉测量系

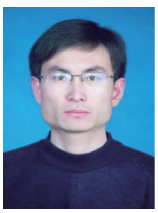
统[J]. 光学精密工程,2010,18(1):126-133.
LIU J W, LIANG J,LIANG X H, et al. Industrial vision measuring system for large dimension work-pieces[J]. Optical and Precision Engineering, 2010, 18 (1): 126-133.

[14] HARRIS C, STEPHENS M. A combined corner and edge detector[C]. Proceedings of the Fourth Alvey Vision Conference, 1998:147-151.

[15] LOURAKIS M I A, ARGYROS A A. SBA: A software package for generic sparse bundle adjustment[J]. ACM Transactions on Mathematical Software, 2009,36(1):2.

[16] HARTLEY R, ZISSERMAN A. Multiple view geometry in computer vision[M]. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press,2003.

作者简介



李云雷,分别在 2002 年和 2005 年于山东理工大学获得学士和硕士学位,现为上海大学在读博士研究生,主要研究方向为近景工业摄影测量和机器视觉。
E-mail:yunleili@163.com

Li Yunlei received his B. Sc. and M. Sc. degrees both from Shandong University of Technology in 2002 and 2005, respectively. Now he is a Ph. D. candidate in Shanghai University. His main research interest includes close range industrial photogrammetry and machine vision.

张曦(通讯作者),分别在 1999 年和 2002 年于中国矿业大学获得学士和硕士学位,2006 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、硕士生导师,主要研究方向为视觉检测技术。
E-mail: xizhang@shu.edu.cn

Zhang Xi (Corresponding author) received his B. Sc. and M. Sc. degrees both from China University of Mining and Technology in 1999 and 2002, respectively, received his Ph. D. degree from Beihang University in 2006. Now, he is an associate professor and master candidate supervisor in Shanghai University. His main research interest includes vision inspection technology.

屠大维,分别在 1987 年、1989 年和 1993 年于浙江大学获得学士、硕士和博士学位,现为上海大学教授、博士生导师,主要研究方向为机器视觉及伺服控制、光机电一体化、智能机械及仪器、人机智能系统。
E-mail:tdwshu@staff.shu.edu.cn

Tu Dawei received his B. Sc., M. Sc. and Ph. D. degrees all from Zhejiang University in 1987, 1989 and 1993, respectively. Now, he is a professor and Ph. D. supervisor in Shanghai University. His main research interest includes machine vision and servo-control, optical-electronic-machinery integration, intelligent mechanics and instrumentation, and human-machine intelligence system.