

文章编号 1004-924X(2019)01-0034-11

基于立体定向靶标的探针式多视场 三维视觉测量系统

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, 山东 淄博 255049)

摘要:针对含有遮挡区域、深孔及凹槽等特征的多面体或回转体物体,设计了一套基于立体定向靶标的探针式多视场三维视觉测量系统。首先,基于近景摄影测量技术建立立体定向靶标的 6 个单元模型,计算靶标各侧面角点在各自单元模型内的坐标,单元模型的链接和光束平差,获取全部角点的精确全局坐标,作为立体定向靶标的全局控制点。然后,设计了利用共面角点辅助定位的探针,仍基于近景摄影测量技术解算出角点和测头在探针坐标系中的精确坐标。最后,利用共面的棋盘格角点与其像平面之间的单应性矩阵,推导全局坐标系、探针坐标系各自与相机坐标系的位姿关系,进而求得探针测头的全局坐标。以量块(量棒)的标准长度作为评价指标,在 2 m×1.5 m 的视场范围内测量精度优于 0.1 mm。测量实验表明,多视场三维视觉测量系统用于测量具有回转体结构特征的水壶,能够获取水壶表面全部区域的点云数据。

关键词:三维视觉测量;立体定向靶标;探针;多视场;近景摄影测量;单应性矩阵

中图分类号:TP391;TH741 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20192701.0034

Probe-based multi-view field 3D vision measurement system based on three-dimensional orientation target

LI Yun-lei^{1,2}, ZHANG Xi^{1*}, TU Da-wei¹

- (1. School of Mechatronic Engineering and Automation,
Shanghai University, Shanghai 200072, China;

2. School of Mechanical Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255049, China)

* Corresponding author, E-mail: xizhang@shu.edu.cn

Abstract: To meet the shape measurement of a polyhedral or rotary body, whose surface includes shadowed areas, deep holes, or grooves, a probe Multi-View Field (MVF) 3D vision measurement system based on 3D orientation target was proposed. We introduce the structure and principle of the vision measurement system. First, based on close range photogrammetry, six element models of the orientation target were built and the local coordinates of the corners in each model were obtained. Based on the above results, stitching six element models and bundle adjustments were further used to calculate the precise global coordinates of all corners. Next, a probe with assistant locating coplanar

收稿日期:2018-08-06;修订日期:2018-10-08.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 41376169, No. 61673252, No. 51205243)

corners was designed and close range photogrammetry technology was used to compute the precise coordinates of the coplanar corners and probe head in the probe coordinate system. Finally, using the homography matrix between the coplanar chessboard corners and its image plane, the position and orientation between the global or probe coordinate system and camera were derived, respectively, by which the global coordinates of the probe head were determined. Taking the standard length of the gauge block and length bar as the evaluation index, accuracy better than 0.1 mm was achieved in a field of $2\text{ m} \times 1.5\text{ m}$. The real experiment to measure 3D data was performed on a kettle, whose shape has the characteristics of a rotating body, and the results demonstrate that the MVF 3D vision measurement system can acquire point clouds in all areas of the kettle surface.

Key words: 3D vision measurement; three-dimensional orientation target; probe; multi-view field; close range photogrammetry; homography matrix

1 引 言

目前,三维测量技术作为获取目标物体形貌、几何尺寸、位置姿态和运动轨迹等信息的有效手段,广泛应用于工业测量、装备制造、航空航天以及自动化控制等领域。该技术主要分为接触式和非接触式两类。接触式方法的典型代表是三坐标测量机,它通过控制精密三轴的机械运动,实现探头与被测物体表面接触点的三维坐标测量,测量精度高。该方法的主要缺点是装卡过程复杂、效率低、不可移动等^[1-2]。非接触式方法的典型代表包括激光跟踪仪、双电子经纬仪测量系统、室内GPS系统等测量设备^[3-6]。它们的优点是量程大、便携、可移动等,但这些设备测量效率低、价格昂贵,且不能直接对工件上的盲孔、凹槽以及遮挡区域等进行有效测量。

随着计算机视觉技术的发展,三维视觉测量作为一种全新的非接触测量技术,具有高效率、大量程、响应快、全自动等优点,广泛应用于工业测量领域。三维视觉测量包括主动式和被动式两种类型。主动式测量系统^[7-9]使用结构光照射被测物体,用摄像机获取物体图像,依据数学模型计算它的空间位置,如基于多频相移光栅扫描的三维光学点云测量。被动式测量系统则采用物体自身的纹理特征或人造特征,利用图像处理算法识别特征,从而获得物体关键点的空间位置,如通过粘贴人工标志点进行三维测量的近景摄影测量技术^[10-12]。然而,无论是主动式还是被动式三维视觉测量,其测量区域都存在局限性。例如,对于被测物体表面带有的深孔、凹槽或被自

身部件遮挡的狭窄区域,主动式方法投射的结构光无法覆盖,被动式方法亦不便在这些位置粘贴标志点。

光学探针(亦称光笔)式三维视觉测量是一种将单目或双目视觉与光学探针相结合的测量方法^[13-16]。测量时,自身空间坐标系固定的光学探针,可随被测物体表面的空间分布自由改变自身位姿,由高精度视觉测量装置测得探针测头对应接触点的三维坐标。探针测头能够有效探测深孔、凹槽以及遮挡部位等,故该方法既可与三维视觉测量技术融合,获得更加完整的点云数据,也可单独用于关键点的测量。但是,光学探针式三维视觉测量仍有不足之处,无论是国外产品如德国Gom公司的ATOS接触式探针系统、德国Aicon-Breuckmann公司的MoveInspect HR测量系统,还是文献^[13-16]中提到的测量模式,视觉测量装置(即单个或多个相机)均是位置固定。如果被测物体为多面体或回转体结构,受限于相机的视场范围和探针自身的尺寸,仍会有部分区域无法直接测量。现有测量系统虽然可借助多组转站点解决上述问题,但转站过程会产生累积误差,这不仅会降低测量精度,也增加了操作过程的复杂性。

本文研究开发了一种基于立体定向靶标的探针式多视场三维视觉测量系统。该系统中立体定向靶标能够 360° 确定相机的位姿,使得相机及探针均可在测量空间中自由移动。物体表面各个区域按自身的空间分布特征,被置于多个相机视场中进行测量,从而能够获得被测对象表面全部区域的三维坐标数据。该测量系统能有效兼顾操作的灵活性和测量精度。

2 测量原理

如图 1 所示,探针式多视场三维视觉测量系统主要由立体定向靶标、单台数码相机和探针组成,各组成单元均有独立的坐标系,依次为靶标坐标系(指定为全局坐标系) $O_w X_w Y_w Z_w$ 、相机坐标系 $O_c X_c Y_c Z_c$ 和探针坐标系 $O_p X_p Y_p Z_p$ 。立体定向靶标的 6 个侧面分布有全局控制点,可建立相机坐标系到全局坐标系的转换关系;探针上分布有共面的局部控制点,可建立探针坐标系到相机坐标系的转换关系,且已知探针测头在探针坐标系的三维坐标。

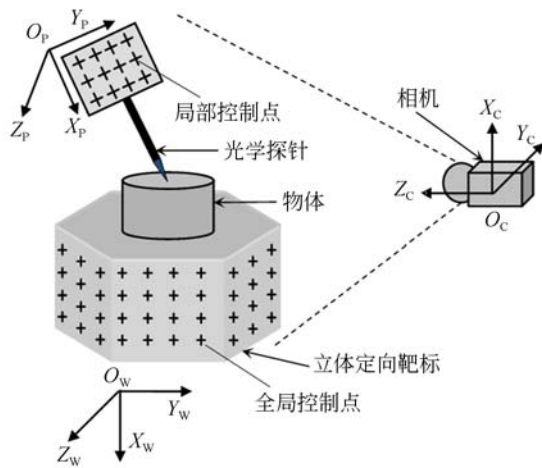


图 1 探针式多视场三维视觉测量系统模型

Fig. 1 Model of probe-based multi-view field 3D vision measurement system

测量系统的基本工作原理为:被测物体置于立体定向靶标的上方,测量过程中保持二者的相对位置固定。单台高分辨率数码相机选择首个拍摄位置,要保证在其视场内至少观测到立体定向靶标的一个侧面,探针在当前视场内自由移动,其测头探测能触及物体的各个部位,如光滑表面、深孔、凹槽和遮挡区域等。探针测头每接触一个点成像一次,图像内同时包含局部控制点和部分全局控制点,由此探针测头(即物体被测点)的三维坐标从探针坐标系转换至相机坐标系,再由相机坐标系转换至全局坐标系。数码相机继续选择其它拍摄位置,重复相同的操作过程,从多个视场获取物体表面所有区域的三维数据。由于视觉测量

系统中的立体定向靶标具有环形多面分布的全局控制点,使得相机在测量空间中实现了 360° 定向,因而探针式视觉测量系统操作更加灵活,测量范围也得到了有效的扩展。同时,每个接触点的全局三维坐标计算均经历两次坐标变换,从而保证了系统的测量精度。

本文基于近景摄影测量技术,研究设计测量系统中的立体定向靶标和光学探针,利用控制点平面与其像平面间的单应性矩阵,推导全局坐标系(或探针坐标系)与相机坐标系的转换关系,进而解算探针测头(接触点)的全局三维坐标。

2.1 立体定向靶标

立体定向靶标设计要保证数码相机从多个视场测量物体时,总能观测到靶标中的部分全局控制点,从而确立相机的位姿。为此,将立体定向靶标设计成正六棱柱结构,如图 2 所示。靶标的 6 个侧面布置相同的棋盘格,每个棋盘格都进行序号标记,图 2 所示为棋盘格 1 和 2,其它 4 个棋盘格序号依次排列。每个棋盘格内选取 48 个角点(6 行、8 列,即图中虚框内的角点),共计 288 个角点作为全局控制点。



图 2 立体定向靶标

Fig. 2 Three-dimensional orientation target

本文基于近景摄影测量技术求解角点的精确三维坐标。首先,手持已标定的相机在定向靶标的每个棱线位置自上而下依次拍摄三张图像,对应的三个摄站视为一个单元模型,共计 18 张图片,6 个单元模型,如图 3 所示。图中包含 18 个摄站和角点的三维点云。摄站 1、2 和 3 组成第一个单元模型,其它单元模型按三个摄站一组的顺序依次组合。每个单元模型视场内仅包含棱线左右侧的两个棋盘格,且均要按图 2 所示放置比例

尺。其次,计算角点在它所处单元模型内的局部坐标,并通过单元模型链接转换为近似的全局坐标。最后,利用光束平差算法获得角点全局坐标的精确值。

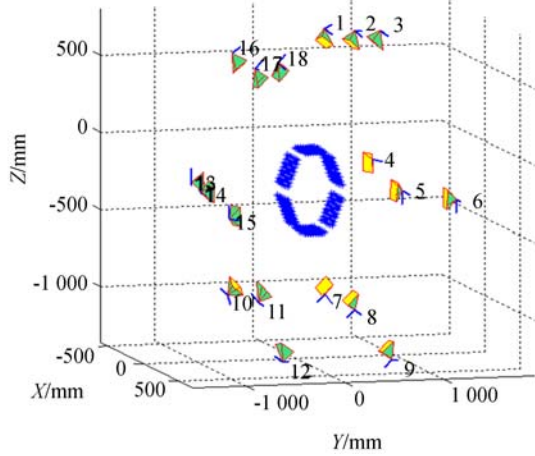


图 3 靶标角点坐标测量的摄站分布

Fig. 3 Distribution of camera stations around target in measurement of corner coordinates

角点三维坐标计算的具体步骤如下:

(1)单元模型内角点坐标的计算。以第一个单元模型为例,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 4 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 $o''-\bar{x}''\bar{y}''\bar{z}''$,其三个坐标轴分别与 $o'-x'y'z'$ 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 $\vec{o'o''}$ 对应摄站 1 到摄站 2 的平移矢量 $t = (bx \ by \ bz)$ 。

对棋盘格 1 或 2 上的任意角点 P ,令它在摄站 2 和 1 处拍摄图片上的像点分别为 $P'(x', y', z')$ 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:

$$\Delta = \begin{vmatrix} bx & x' & \bar{x}'' \\ by & y' & \bar{y}'' \\ bz & z' & \bar{z}'' \end{vmatrix} = 0. \quad (1)$$

对两图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:

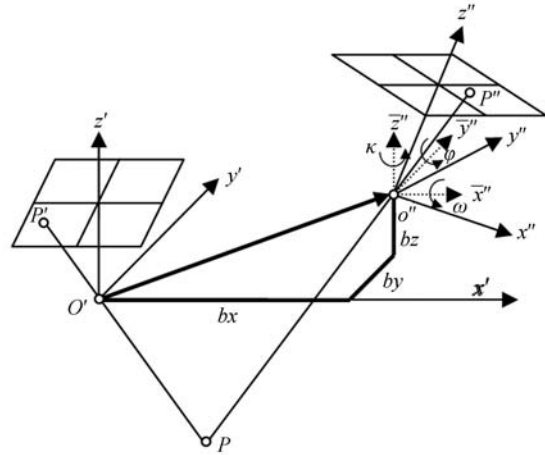


图 4 相对定向模型

Fig. 4 Relative orientation model

$$\begin{bmatrix} x'_i \\ y'_i \\ z'_i \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} 0 & -bz & by \\ bz & 0 & -bx \\ -by & bx & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x''_i \\ y''_i \\ z''_i \end{bmatrix} = 0, \quad (2)$$

$$[x'_i \ y'_i \ z'_i][\mathbf{T}]_{\times} \mathbf{R} \begin{bmatrix} x''_i \\ y''_i \\ z''_i \end{bmatrix} = 0. \quad (3)$$

式中: $[\mathbf{T}]_{\times}$ 是平移矢量 t 的 3 个分量 bx, by 和 bz 的组合, \mathbf{R} 则与欧拉角 ω, φ 和 κ 一一对应。令 $\mathbf{E} = [\mathbf{T}]_{\times} \mathbf{R}$, \mathbf{E} 为本质矩阵,它是反对称矩阵 $[\mathbf{T}]_{\times}$ 和旋转矩阵 \mathbf{R} 的乘积。考虑两张图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^[17]可以获得稳定的数值。

确定了本质矩阵 \mathbf{E} 之后,对它进行奇异值 (Single Value Decomposition, SVD) 分解:

$$\mathbf{E} = \mathbf{U}_E \mathbf{S}_E \mathbf{V}_E^T. \quad (4)$$

则旋转矩阵 \mathbf{R} 和平移矢量 t 分别为:

$$\mathbf{R} = \mathbf{U}_E \mathbf{W} \mathbf{V}_E^T \text{ 或 } \mathbf{R} = \mathbf{U}_E \mathbf{W}^T \mathbf{V}_E^T, \quad (5)$$

$$t = \alpha \mathbf{U}_E \mathbf{Z} \mathbf{U}_E^T \text{ 或 } t = \alpha \mathbf{U}_E \mathbf{Z}^T \mathbf{U}_E^T, \quad (6)$$

其中: α 为不等于零的任意常数; \mathbf{W} 和 \mathbf{Z} 分别为:

$$\mathbf{W} = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \mathbf{Z} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (7)$$

由此可见,这里共有 4 组解,参照 Hartley 提出的 Cheirality 约束条件确定 4 组解中的唯一正确解^[17]。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 \mathbf{R}_{12} 和 \mathbf{t}'_{12} ，依据摄影测量学中的前方交汇算法易于得到比例尺(图 1 所示)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：

$$\alpha = D/D' \quad (8)$$

将 α 代入式(6)，得到平移矢量的真值为：

$$\mathbf{t}_{12} = \alpha \mathbf{t}'_{12} \quad (9)$$

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 \mathbf{R}_{32} 和 \mathbf{t}_{32} 。从 $\mathbf{R}_{12}(\mathbf{t}_{12})$ 或 $\mathbf{R}_{32}(\mathbf{t}_{32})$ 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。

(2)单元模型的链接。链接实现两个目标：一是将立体定向靶标上所有角点的坐标统一到全局坐标系；二是确立全局坐标系与所有摄站坐标系的位姿关系。全局坐标系 $O_W X_W Y_W Z_W$ 建立在棋盘格 1 上，各单元模型坐标系为 $O_{e1} X_{e1} Y_{e1} Z_{e1}$ 至 $O_{e6} X_{e6} Y_{e6} Z_{e6}$ ，如图 5 所示。全局坐标系与单元模型 1 坐标系的位姿关系 \mathbf{R}_{We1} 和 \mathbf{t}_{We1} 求解方法将在 2.3 节中分析。这里首先推导单元模型 2(由摄站 4、5 和 6 组成)坐标系到单元模型 1 坐标系的位姿关系。如图 3 所示，摄站 2 和 5 位于立体定向靶标相邻的两个棱线处，故拍摄的两幅图片包含一个公共棋盘格(棋盘格 2)，沿用步骤(1)的方法可求得摄站 2 和 5 坐标系之间的旋转矩阵 \mathbf{R}_{e1e2} 和平移矢量 $\mathbf{t}_{X_{e1e2}}$ ，即单元模型 1 和 2 的位姿关系。依次类推，后续各相邻模型之间的位姿关系均可获得。按照 1→2→3→4→5→6 的递推顺序，再确立单元模型 1 与单元模型 2,3,4,5 和 6 的位姿关系。最后借助 \mathbf{R}_{We1} 和 \mathbf{t}_{We1} 建立全局坐标系与所有单元模型坐标系的位姿关系，进而将所有角点的局部坐标转换成全局坐标。同时，亦可确立全局坐标系与每个单元模型内其它两个摄站坐标系的位姿关系。

(3)角点精确坐标的计算。在步骤(2)中，因为全局坐标系到各单元模型坐标系的位姿关系是逐次递推，角点全局坐标会产生较大的累计误差。本文采用稀疏光束平差法(Sparse Bundle Adjustment, SBA)^[18]来提高角点的坐标精度。SBA 算法需要的数据如下：相机的内参数、全局坐标系

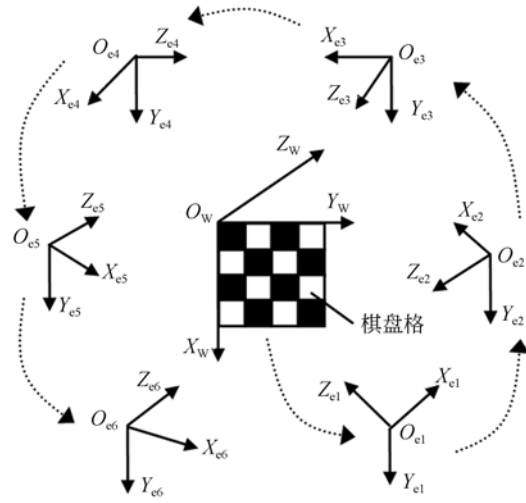


图 5 全局坐标系到单元模型坐标系的转换

Fig. 5 Transform from global coordinate to element model coordinate

下角点三维坐标的初值、摄站外参数的初值(即全局坐标系与各摄站坐标系的位姿关系)和角点在相应摄站图片的精确像素坐标。平差后获得的角点如图 3 中的点阵所示。

2.2 探针设计

所设计的探针结构如图 6 所示，精确打印的棋盘格贴于有机玻璃表面，单个小方格的尺寸为 28 mm×28 mm，方形虚框内的共面角点用于探

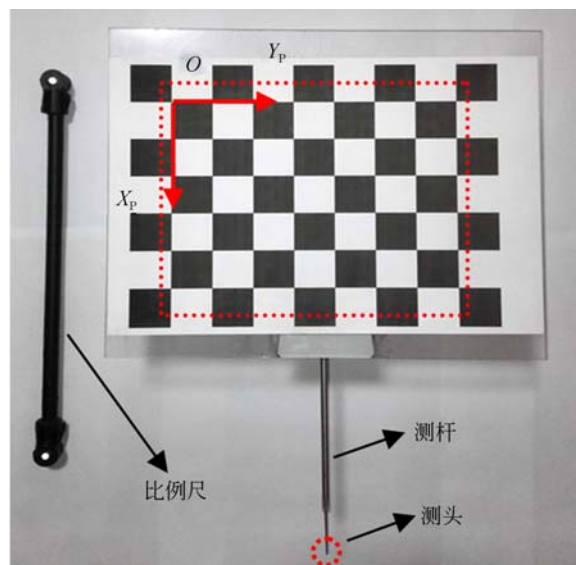


图 6 探针

Fig. 6 Probe

针定位,探针坐标系原点位于左上角的角点处。高强度长测杆末端携带尖点状金属测头,使探针具有良好的现场柔性,能有效探测遮挡区域、深孔以及凹槽等。

探针设计的关键是解算角点和测头在探针坐标系的精确三维坐标,这里仍沿用 2.1 节的近景摄影测量技术。如图 7 所示,5 个摄站从不同角度获得探针(包括比例尺)的图像,利用 Harris 角点检测算法(精度为 0.03 pixel)获得棋盘格角点和探针测头的精确像素坐标^[19]。以摄站 1 的坐标系作为参考坐标系,利用图 4 的相对定向模型计算其它 4 个摄站坐标系到摄站 1 坐标系的旋转矩阵 \mathbf{R} 和平移矢量 \mathbf{t} , 任选一组 \mathbf{R} 和 \mathbf{t} 求得角点和测头在参考坐标系的初始三维坐标,利用 SBA 获得精确解,最后乘以由比例尺计算的比例因子。此时,角点和测头的坐标仍处于参考坐标系,因此要利用 2.3 节方法转换至探针坐标系,转换后的坐标如图 7 中的点阵所示。

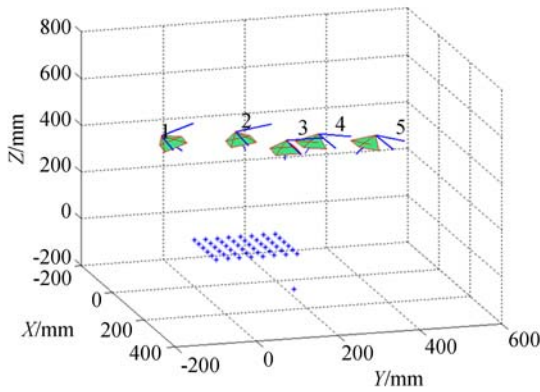


图 7 探针测头坐标测量的摄站分布

Fig. 7 Distribution of camera stations in measurement of probe head coordinates

2.3 探针测头全局坐标计算

探针测头与物体表面的接触点即为被测特征点,二者的全局坐标相同。设测头在探针坐标系和全局坐标系的坐标分别为 $\mathbf{H}_p = [X_p, Y_p, Z_p]^T$ 和 $\mathbf{H}_w = [X_w, Y_w, Z_w]^T$, 同时探针坐标系、全局坐标系到相机坐标系的位姿关系分别用 $\mathbf{R}_{pc}, \mathbf{t}_{pc}$ 和 $\mathbf{R}_{wc}, \mathbf{t}_{wc}$ 表示,则有:

$$\begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \end{bmatrix} = \mathbf{R}_{wc}^{-1} \mathbf{R}_{pc} \begin{bmatrix} X_p \\ Y_p \\ Z_p \end{bmatrix} - \mathbf{R}_{wc}^{-1} (\mathbf{t}_{pc} - \mathbf{t}_{wc}). \quad (10)$$

式(10)表明,求解探针测头全局坐标 \mathbf{H}_w 的关键是确立各坐标系之间的位姿关系。如图 1 所示,测量任意特征点时,均要求相机视场包含探针表面棋盘格和立体定向靶标一个完整侧面(含一个棋盘格),因而探针坐标系(或全局坐标系)到相机坐标系的位姿关系可利用控制点(角点)平面与其像平面间的单应性矩阵求解。以计算 \mathbf{R}_{wc} 和 \mathbf{t}_{wc} 为例,考虑到靶标每个侧面的棋盘格角点虽共面,但其 Z 坐标不为零,推导步骤如下:

(1)角点空间三维坐标的转换。设棋盘格平面角点个数为 n , 任意角点的空间三维坐标为 $\mathbf{M}_i = [X_i, Y_i, Z_i]^T (i=1, 2, \dots, n)$ 。为求得单应性矩阵,首先将 \mathbf{M}_i 转换为 Z 坐标为零的点,即 $\mathbf{M}_{0i} = [X_{0i}, Y_{0i}, 0]^T$ 。二者的转换关系表示为:

$$\mathbf{M}_{0i} = \mathbf{R}_i \mathbf{M}_i + \mathbf{t}_i, \quad (11)$$

式中: \mathbf{R}_i 为 3×3 的旋转矩阵, \mathbf{t}_i 为 3×1 的平移矢量。 \mathbf{R}_i 和 \mathbf{t}_i 表示全局坐标系到 $Z=0$ 的世界坐标系的转换关系。求解时先构造矢量:

$$\begin{aligned} \tilde{\mathbf{X}} = & ((X_1 - \bar{X}), (X_2 - \bar{X}), \dots, (X_i - \bar{X})), \\ & \dots, (X_n - \bar{X})), \end{aligned}$$

其中 $\bar{X} = (\sum_{i=1}^n X_i) / n$ 。

同理可依次构造出矢量 $\tilde{\mathbf{Y}}, \tilde{\mathbf{Z}}$, 其表达式中对应的均值分别为 \bar{Y} 和 \bar{Z} 。令 3 个矢量组成新的矩阵 $\mathbf{F} = [\tilde{\mathbf{X}}; \tilde{\mathbf{Y}}; \tilde{\mathbf{Z}}]$, 则 \mathbf{F} 为 $n \times 3$ 矩阵。构造矩阵 $\mathbf{F}'' = \mathbf{F} \mathbf{F}^T$, 再对其进行 SVD 分解,得:

$$\mathbf{F}'' = \mathbf{U}_F \mathbf{S}_F \mathbf{V}_F^T. \quad (12)$$

依据式(12),可得旋转矩阵 $\mathbf{R}_i = \mathbf{V}_F^T$, 平移矢量 $\mathbf{t}_i = -\mathbf{R}_i \times [\bar{X} \ \bar{Y} \ \bar{Z}]^T$ 。

(2)角点像素坐标的转换。设棋盘格平面上任意角点 M_i 在对应像平面上的像素坐标为 $\mathbf{m}_i = [u_i, v_i]^T (i=1, 2, \dots, n)$ 。假设像素坐标 \mathbf{m}_i 已进行了畸变校正,令相机的内参数矩阵为:

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} f_x & s & u_0 \\ 0 & f_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (13)$$

其中: 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 $\mathbf{m}_i = [u_i, v_i]^T$ 的像平面角点转换至相机坐标系, 并以焦距为单位做归一化处理。设转换后的归一化坐标为 $\mathbf{m}_i = [u_i, v_i]^T$ 的像平面角点转换至相机坐标系, 并以焦距为单位进行归一化处理。设转换后的归一化坐标为 $\tilde{\mathbf{m}}'_i = [u'_i, v'_i, 1]^T$, 结合式(13)得:

$$\begin{cases} u'_i = (u_i - u_0)/f_x - s \times v'_i \\ v'_i = (v_i - v_0)/f_y \end{cases} \quad (14)$$

(3) 构建单应性矩阵。令 M_{0i} 的齐次坐标为 $\tilde{\mathbf{M}}_{0i} = [X_{0i}, Y_{0i}, 0, 1]^T$, 则有:

$$\lambda \tilde{\mathbf{m}}'_i = [\tilde{\mathbf{R}}_{WC} \quad \tilde{\mathbf{t}}_{WC}] \tilde{\mathbf{M}}_{0i}, \quad (15)$$

其中: λ 为非零常数比例因子, $\tilde{\mathbf{R}}_{WC}$ 为 3×3 的旋转矩阵, $\tilde{\mathbf{t}}_{WC}$ 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 $\tilde{\mathbf{R}}_{WC}$ 的第 i 列元素由 \mathbf{r}_i 表示, 则式(15)变为:

$$\lambda \begin{bmatrix} u'_i \\ v'_i \\ 1 \end{bmatrix} = [\mathbf{r}_1 \quad \mathbf{r}_2 \quad \mathbf{r}_3 \quad \tilde{\mathbf{T}}_{WC}] \begin{bmatrix} X_{0i} \\ Y_{0i} \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = [\mathbf{r}_1 \quad \mathbf{r}_2 \quad \tilde{\mathbf{T}}_{WC}] \begin{bmatrix} X_{0i} \\ Y_{0i} \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (16)$$

式(16)中, 令:

$$\mathbf{H} = [\mathbf{r}_1 \quad \mathbf{r}_2 \quad \tilde{\mathbf{T}}_{WC}] = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} \\ h_{31} & h_{32} & h_{33} \end{bmatrix}.$$

则 \mathbf{H} 为棋盘格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 \mathbf{H} 代入式(16), 每个角点列写关于 \mathbf{H} 的两个线性方程:

$$\begin{cases} u'_i(h_{31}X_{0i} + h_{32}Y_{0i} + h_{33}) = h_{11}X_{0i} + h_{12}Y_{0i} + h_{13} \\ v'_i(h_{31}X_{0i} + h_{32}Y_{0i} + h_{33}) = h_{21}X_{0i} + h_{22}Y_{0i} + h_{23} \end{cases} \quad (17)$$

n 个角点构建 $2n$ 个线性方程, 建立目标函数, 采用 Levenberg-Marquardt (LM) 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 \mathbf{H} 的最佳近似解。

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

$$\mathbf{H} = [\mathbf{h}_1 \quad \mathbf{h}_2 \quad \mathbf{h}_3]. \quad (18)$$

仍沿用 $\tilde{\mathbf{R}}_{WC}$ 和 $\tilde{\mathbf{t}}_{WC}$ 表示 $Z=0$ 时世界坐标系到相机坐标系的旋转矩阵和平移矢量。进一步处理步骤(3)的单应性矩阵 \mathbf{H} , 得到 $\tilde{\mathbf{R}}_{WC}$ 和 $\tilde{\mathbf{t}}_{WC}$ 的精确解, 公式如下:

$$\begin{cases} \mathbf{r}_1 = \mathbf{h}_1 / \|\mathbf{h}_1\| \\ \mathbf{r}_2 = (\mathbf{h}_2 - (\mathbf{h}_1^T \mathbf{h}_2) \times \mathbf{h}_1) / \|\mathbf{h}_2 - (\mathbf{h}_1^T \mathbf{h}_2) \times \mathbf{h}_1\| \\ \mathbf{r}_3 = \mathbf{r}_1 \times \mathbf{r}_2 \\ \tilde{\mathbf{t}}_{WC} = \mathbf{h}_3 \end{cases} \quad (19)$$

则全局坐标系到相机坐标系的 \mathbf{R}_{WC} 和 \mathbf{t}_{WC} , 可按下式计算:

$$\begin{cases} \mathbf{R}_{WC} = \tilde{\mathbf{R}}_{WC} \mathbf{R}_t \\ \mathbf{t}_{WC} = \tilde{\mathbf{R}}_{WC} \mathbf{t}_t + \tilde{\mathbf{t}}_{WC} \end{cases} \quad (20)$$

同理, 依照上述推导过程, 利用探针棋盘格及其像平面可计算探针坐标系到相机坐标系的 \mathbf{R}_{PC} 和 \mathbf{t}_{PC} , 因探针棋盘格角点的 Z 坐标为零, 可省略步骤 1)。另外, 2.1 节中全局坐标系和单元模型 1 坐标系的位姿关系, 2.2 节中探针坐标系和参考坐标系的位姿关系, 均采用上述方法求解。

利用单应性矩阵推导全局(或探针)坐标系与相机坐标的位姿关系是一种快速高效的计算方法, 它要求全局(或局部)控制点具有共面特征, 且已知控制点在其所处坐标系的三维坐标。而文献提出的双相机探针测量方式, 要确立全局坐标系与探针坐标系的位姿关系, 首先要计算控制点在两个坐标系的点云数据, 再经过点云配准和 SVD 获得最终结果, 计算过程相对复杂。

3 实验

基于上文描述的测量原理, 自主开发了一套探针式多视场三维视觉测量系统, 软件平台为 MATLAB。系统硬件部分包括立体定向靶标、探

针和数码相机,其中相机选用尼康 D3200,幅面为 $6\ 016 \times 4\ 000$,镜头采用 27 mm 定焦镜头。

3.1 精度评价实验

三维视觉测量系统的精度评价方法主要有两种:一是绝对坐标法,测量点的绝对坐标已由高精度测量系统检定,系统的测量值与检定值对比;二是相对几何关系法,测量点之间的空间几何关系(如距离等)作为标准值。因探针测头在寻点一致性方面不易操作,本文采用方法二,利用高精度量块(量棒)作为测量标准。如图 8 所示,量块 A、C 和量棒 B 的标准长度依次为 200,80,100 mm,精度优于 $0.5\ \mu\text{m}$,工作端面的平面度误差小于 $0.25\ \mu\text{m}$ 。测量幅面约为 $2\ \text{m} \times 1.5\ \text{m}$,相机到立体定向靶标的距离约为 1 m。



图 8 精度评价用标准量块(量棒)

Fig. 8 Standard gauge-block and length-bar for accuracy estimation

表 1 精度评价的测量结果

Tab. 1 Measurement results of accuracy estimation

(mm)

类别	标准长度 d	测点个数 N (单个工作端面)	测量平均值 \tilde{d}	均值偏差 e	标准偏差 σ
A	200	50	200.119 3	0.089 3	0.062 3
B	100	30	100.073 6	0.063 6	0.046 8
C	80	50	80.065 8	0.055 8	0.029 7

表 1 是精度评价实验的测量结果,量块(量棒)的标准长度是指量块上工作端面中心到下工作端面的垂直距离,此处采用量块的标称长度。测量时,探针测头在每个工作端面均匀探测相同数目的测点,然后选取一个工作端面的测点集合拟合平面,计算另一工作端面所有测点到该拟合平面的距离 $d_i (i=1, 2, \dots, N)$,其中 N 为测点个数。表中的测量平均值 $\tilde{d} = \sum_{i=1}^N d_i / N$,均值偏差 $e = \tilde{d} - d$,标准偏差 $\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^N (d_i - d)^2 / N}$ 。

由表 1 数据可知,在 $2\ \text{m} \times 1.5\ \text{m}$ 的视场范围内,测量系统的测量精度优于 $0.1\ \text{mm}$,与现有的探针式三维视觉测量系统的精度相当。该系统的测量精度主要取决于以下因素:全局(或局部)控制点的三维坐标精度,其精度由光束平差算法保证;角点像素坐标的提取精度,Harris 角点检测算法可达到亚像素级;相机内参数的标定精度,大尺寸($1\ \text{m} \times 1\ \text{m}$)高精度的平面标定靶标使其反投影误差优于 $0.2\ \text{pixel}$ 。

3.2 测量实验

基于立体定向靶标的探针式多视场三维视觉测量系统在 $4\ \text{m} \times 2.5\ \text{m}$ 的视场范围内,对一把水壶的表面三维形貌进行测量实验,如图 9 所示。依据水壶的结构特点,将它分为壶体和手柄两部分分别测量。

图 9 为手柄部位测量现场,水壶固定于立体定向靶标之上,二者相对位置始终保持不变。相



图 9 水壶的视觉测量现场

Fig. 9 Vision measurement field of a kettle

机固定于三角架,首先置于手柄正前方,此时在相机视场范围内可观测到立体定向靶标表面的一个完整侧面。移动探针,使其表面棋盘格尽量正对相机,探针测头对手柄表面易于接触的区域逐点探测。依据本文第 2 节的测量原理精确计算,求得各接触点的全局三维坐标。

然后再向左(或向右)移动相机,变换至新的相机视场,对手柄的其他可接触区域依次测量。实际操作表明,手柄选取 3 个相机视场,壶体选取 6 个相机视场,即可实现水壶表面所有区域的三维形貌测量。

实验中共获得 2 540 个点,组成的整体点云如图 10 所示。图 10(b)和图 10(c)分别从正面和背面两个方向显示水壶的整体点云,水壶的表面区域全部可以探测,无任何盲区。图 11 为水壶手柄的局部点云,令点云数据在三维坐标空间逆时针依次旋转 90° ,从 4 个不同的角度显示点云全貌。图 11 表明,手柄受遮挡的背面,手柄与壶体的连接边缘等区域均可被探测。

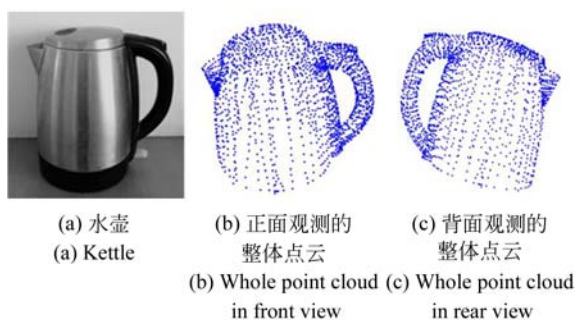


图 10 水壶表面的三维测量结果

Fig. 10 3D measurement result of a kettle

如果采用相机位置固定的探针式视觉测量系统,受探针和被测物体各自结构尺寸的限制,一般无法获得被测物体表面的全部点云。例如在图 9 所示的相机视场中,利用探针接触水壶手柄的内侧或壶体背对相机的部位时,探针上的棋盘格平面与镜头表面的夹角过大或棋盘格被壶体部分

遮挡,这会极大降低接触点的测量精度。而且,对于结构尺寸远大于探针本体的被测物体,势必因遮挡问题导致物体局部表面无法测量。

本文提出的探针式多视场三维视觉测量系统由于引入立体定向靶标定位相机的空间位姿,使得相机摆脱了传统探针式三维视觉测量系统的固定模式,能够在测量空间内 360° 自由移动,系统操作更加灵活,同时与探针相配合可以实现被测对象表面全部区域的三维测量。

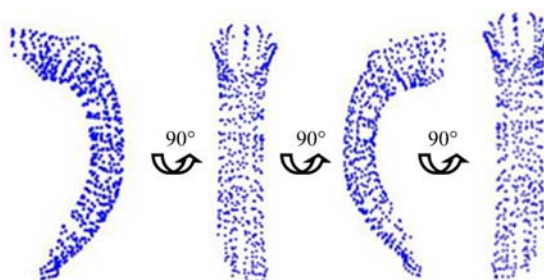


图 11 水壶手柄的点云

Fig. 11 Point cloud of kettle handle

4 结 论

本文设计了一套基于立体定向靶标的探针式多视场三维视觉测量系统。基于近景摄影测量理论,阐述了立体定向靶标全局控制点的计算步骤和探针的设计方法。重点分析了利用单应性矩阵推导全局(或探针)坐标系与相机坐标系位姿关系的计算过程。以量块(量棒)的标准长度作为评价指标,在 $2\text{ m} \times 1.5\text{ m}$ 的视场范围内,该系统的测量精度优于 0.1 mm 。利用该系统对一把水壶进行了三维测量。实验结果表明,该视觉测量系统能够有效探测包括遮挡部位在内的全部区域,获得水壶表面完整的点云数据。下一步研究的重点是视觉测量系统的自动化及数据处理效率的提高。

参考文献:

- [1] 张望先,仲思东,隋莉斌,等. 基于三坐标测量机的大尺寸非接触测量[J]. 武汉大学学报:工学版, 2004,37(5):112-115.

ZHANG W X, ZHONG S D, SUI L B, *et al.*. Non-contact measurement of big dimension object based on coordinate measuring machine [J]. *Journal of Wuhan University*, 2004, 37(5): 112-115. (in Chinese)

- [2] 杨洪涛. 坐标测量机误差建模与修正技术研究[D]. 合肥:合肥工业大学, 2007:1-4.
YANG H T. *Research on Error Model Building and Error Correcting Technique of Coordinate Measuring Machines* [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2007: 1-4. (in Chinese)
- [3] 甘霖, 李晓星. 激光跟踪仪现场测量精度检测[J]. 北京航空航天大学学报, 2009, 35(15): 612-614.
GAN L, LI X X. Site measuring accuracy testing of laser tracker[J]. *Journal of Beihang University*, 2009, 35(15): 612-614. (in Chinese)
- [4] 王为农, 苏永昌, 任国营. 激光跟踪仪的动态特性研究[J]. 计量学报, 2007(1): 34-37.
WANG W N, SU Y CH, REN G Y. A study on dynamic character of laser tracker [J]. *Journal of Beihang University Acta Metrologica Sinica*, 2007 (1): 34-37. (in Chinese)
- [5] 周虎, 郝继贵, 张滋黎, 等. 激光电子经纬仪动态跟踪引导系统的设计[J]. 光学精密工程, 2011, 19(11): 2671-2678.
ZHOU H, ZHU J G, ZHANG Z L, *et al.*. Design of dynamic tracking and guiding system for laser-electronic theodolite [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(11): 2671-2678. (in Chinese)
- [6] KAKNEN H, REITERER A. Videotheodolite measurement systems-state of the art [C]. IS-PRS, *Commission V Symposium, Dresden Germany*; CRC Press, 2006: 142-146.
- [7] 梁晋, 肖振中, 臧顺来, 等. 外差式多频相移技术的三维光学点云测量研究[J]. 锻压技术, 2008, 33(1): 143-147.
LIANG J, XIAO ZH ZH, ZANG SH L, *et al.*. Study on 3D optical points dense cloud measuring system based on heterodyne multiple frequency phase shift technology[J]. *Forging & Stamping Technology*, 2008, 33(1): 143-147. (in Chinese)
- [8] 丁超, 唐立伟, 曹立军, 等. 基于结构光的身管膛线高度差检测[J]. 光学精密工程, 2017, 25(4): 545-553.
DING CH, TANG L W, CAO L J, *et al.*. Height difference detection of barrel rifling based on structured light [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017, 25(4): 545-553. (in Chinese)
- [9] 王华, 邢春齐, 高金刚, 等. 点云频域配准的双目双结构光列车轮对检测[J]. 光学精密工程, 2017, 25(3): 616-624.
WANG H, XING CH Q, GAO J G, *et al.*. Detection of wheel-set size of rail vehicle using double 2D laser displacement sensors based on point cloud data registration in frequency domain[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017, 25(3): 616-624. (in Chinese)
- [10] ZHANG D. Exploitation of photogrammetry measurement system [J]. *Optical Engineering*, 2010, 49(3): 263-276.
- [11] 肖振中. 基于工业摄影和机器视觉的三维形貌与变形测量关键技术研究[D]. 西安: 西安交通大学, 2010.
XIAO ZH ZH. *Study on the Key Technologies of 3D Shape and Deformation Measurement Based on Industrial Photogrammetry and Computer Vision*[D]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 2010. (in Chinese)
- [12] LUHMANN T, ROBSON S, KYLE S, *et al.*. *Close Range Photogrammetry* [M]. Scotland: Whittles Publishing, 2006.
- [13] 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.
FENG P, WEI ZH ZH. Light probe based large FOV 3D vision measurement system[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(9): 2217-2224. (in Chinese)
- [14] 李磊刚, 梁晋, 唐正宗, 等. 用于工业三维点测量的接触式光学探针[J]. 光学精密工程, 2014, 22(6): 1477-1485.
LI L G, LIANG J, TANG ZH Z, *et al.*. Optical and contact probe for industrial measurement of 3-D points[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(6): 1477-1485. (in Chinese)
- [15] 富帅, 张丽艳, 叶南, 等. 面向大型工件现场测量的光笔式视觉测量系统[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(2): 430-438.
FU SH, ZHANG L Y, YE N, *et al.*. Light pen based on-site vision measurement system for large workpieces[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2015, 36(2): 430-438. (in Chinese)
- [16] 黄凤山, 钱惠芬. 光笔式单摄像机三维坐标视觉测量系统建模[J]. 光电子·激光, 2007, 18(1): 85-88.
HUANG F SH, QIAN H F. Model of light pen single camera 3D coordinate vision measurement [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2007, 18(1): 85-88. (in Chinese)
- [17] HARTLEY R, ZISSERMAN A. *Multiple View Geometry in Computer Vision*[M]. 2th ed.. Cambridge: Cambridge University Press, 2003.

- [18] LOURAKIS M I A, ARGYROS A A. SBA: A software package for generic sparse bundle adjustment [J]. *ACM Trans. Math. Softw.*, 2009, 36: 1-30.

作者简介:



李云雷(1978—),男,山东平原人,博士研究生,2002年、2005年于山东理工大学分别获得学士和硕士学位,主要从事近景工业摄影测量和机器视觉检测。E-mail: yunleili@163.com

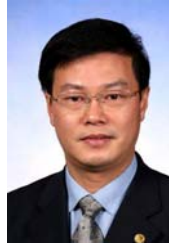
通讯作者:



张曦(1977—),男,江苏徐州人,博士,副教授,1999年、2002年于中国矿业大学分别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,主要从事机器视觉检测。E-mail: xizhang@shu.edu.cn

- [19] HARRIS C J. A combined corner and edge detector[J]. *Proc. Alvey Vision Conf.*, 1988, 1988(3):147-151.

导师简介:



屠大维(1965—),男,浙江诸暨人,教授,博士生导师,1987年、1989年和1993年于浙江大学分别获得学士、硕士和博士学位,主要从事机器视觉及伺服控制、智能机械及仪器设计、人机智能系统设计等。E-mail: tdwtu@staff.shu.edu.cn