

基于全站仪的大型三维形貌摄影测量方法

杨谢柳¹, 尹晨宇¹, 方素平^{2*}, 刘士明^{1**}

¹沈阳建筑大学机械工程学院, 辽宁 沈阳 110168;

²西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室, 陕西 西安 710049

摘要 以摄影测量为基础,旨在采用全站仪与普通数码相机相结合的方式,实现大型物体三维形状和颜色信息的高精度、快速、灵活获取。将普通数码相机刚性连接到全站仪的望远镜上搭建组合测量系统,借助全站仪的角度读数随时记录相机位姿;为了减弱窄视场相机标定中的参数耦合,先根据相机的物理特性直接标定相机主距参数;通过建立控制场确定其余相机的内参数及望远镜相对相机的位姿参数;借助两个公共标志点实现测站的任意转换,进而实现大型物体的三维形貌测量。实验表明,所提方法的长度测量相对误差不超过 $\pm 1/100$,角度误差不超过 $\pm 0.6^\circ$,目前能够实现中等精度的大型物体三维形貌测量。

关键词 机器视觉; 立体视觉; 大型物体; 三维测量; 全站仪; 摄影测量

中图分类号 TP391.7

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP57.101505

Three-Dimensional Measurement of Large-Scale Objects Using Photogrammetry Based on Total Station

Yang Xieliu¹, Yin Chenyu¹, Fang Suping^{2*}, Liu Shiming^{1**}

¹School of Mechanical Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, Liaoning 110168, China;

²State Key Laboratory of Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, Shaanxi 710049, China

Abstract Based on photogrammetry, this study aims to determine a highly accurate, efficient, and flexible approach for obtaining three-dimensional shape and color information of large-scale objects using a total station and a common digital camera. An ordinary digital camera was rigidly connected to the telescope of a total station to build a combined measurement system, and the camera's posture was recorded at all times using the angle reading of the total station. To weaken the parameter coupling while calibrating a camera with a narrow field of view, the principal distance parameter was first directly calibrated based on the physical characteristics of the camera. The other intrinsic parameters of the camera and pose parameters of the telescope associated with the camera were determined by establishing a control field. The station was freely transformed using two common points to achieve the three-dimensional measurement of large-scale objects. Experiments show that the relative error of the length achieved using this method does not exceed $\pm 1/100$, and the angle error does not exceed $\pm 0.6^\circ$, implying that this method can currently realize three-dimensional measurement of large-scale objects with medium accuracy.

Key words machine vision; stereo vision; large-scale objects; three-dimensional measurement; total station; photogrammetry

OCIS codes 150.1488; 150.6910; 330.1400

收稿日期: 2019-09-11; 修回日期: 2019-10-11; 录用日期: 2019-10-18

基金项目: 国家自然科学基金(61973224)、道路施工技术 with 装备教育部重点实验室开放基金(300102259506)、辽宁省自然科学基金(2019-ZD-0673, 2019-ZD-0655, 2019-KF-01-15)

* E-mail: spfang@mail.xjtu.edu.cn; ** E-mail: liushiming_1983@163.com

1 引言

三维形状测量在反求工程、精密机械制造和安全监测等领域有着广泛的应用需求^[1-6]。在要求保持真实性的文物保护和虚拟现实等领域^[7-12]，除三维形状数据外，还必须获取物体的颜色信息，即实现物体的三维“形貌”测量。

摄影测量是三维形貌测量的常用方法。按起源学科的不同，摄影测量法可分为立体视觉测量法和数字近景摄影测量法，两者的测量原理相同，只是方法途径略有差异，其中立体视觉测量法主要用于中小型物体，数字近景摄影测量法主要用于大型物体。数字近景摄影测量法由于其效率高和成本低等特点在大型物体三维形貌测量中得以广泛应用^[8,13-20]，但基于传统标定的数字近景摄影测量法，要求每幅图像都必须包含一定数量的控制点进行定向检查，户外作业量大且对于不可设人工标志点也无明显特征点的对象无法适用，基于自标定的数字近景摄影测量法，测量精度低，不能满足高精度数字化和变形测量等应用需求。将三维激光扫描仪与数码相机相结合也是目前最常用的大型物体三维形貌测量方法之一^[21-26]，但三维激光扫描仪过高的价格限制了其推广。

将姿态或位姿测量系统与摄影测量相结合的方式也得到了越来越广泛的关注。Gravel等研发了一套计算机辅助摄影测量系统，但该系统中的相机被安装在全站仪的水平横轴支架上，不能随望远镜垂直旋转，限制了其垂直方向的空间测量范围^[27]。张祖勋教授携其团队研发了一套摄影全站仪系统(PTSS)^[27-30]，获得了较高的测量精度，PTSS使用内参数已知的量测相机避开了内参数的标定，但量测相机价格昂贵。朱肇昆等^[31-32]将非量测摄像机分别与全站仪、经纬仪和普通二维旋转平台进行组合，搭建了多种结构的经纬像机摄像测量系统，其使用两台相机组成了不可整体搬移的双目形式的立体视觉测量结构，但该结构在经济性和灵活性方面并不适用于静态大型物体的360°范围角度测量。拓普康和徕卡等公司将数码相机与全站仪进行了整合推出了影像全站仪，但目前这种内置相机的图像质量无法达到专业相机水平，不可能完全依靠内置相机实现高精度三维形貌测量。

综上所述，现存方法各有局限性，探寻一种高精度、高效率 and 低成本的大型物体三维形貌测量方法仍十分迫切。鉴于摄影测量具有高精度、高效率 and 低成本的优势，本文提出了一种普通数码相机与全

站仪的组合测量系统，并给出了一套系统参数标定方法，旨在利用单相机采用自由设站的方式实现大型物体三维形貌的摄影测量。

2 基本原理

2.1 全站仪与普通数码相机的组合测量系统

摄影测量法要求获取拍摄每幅重构图像时相机的位姿参数，而传统摄影测量的标定过程又过于烦琐，因此，设计了机械连接装置，将普通数码相机固连到全站仪的望远镜上，使其随望远镜一起进行水平和垂直旋转。这样，当相机与望远镜间的相对位姿参数确定后，单个测站上拍摄任意重构图像时的相机位姿参数可由望远镜的旋转角度直接计算得到。更换测站时，也只需利用全站仪的坐标测量功能确定不同测站间的位姿参数，实现测站的统一。将该组合测量装置先后放置在被测对象周围多个可任意选定的位置，从不同角度对被测对象进行拍摄，根据摄影测量原理便可实现被测对象的三维形貌测量。

2.2 组合系统的数学测量模型

建立全站仪坐标系、望远镜坐标系和相机坐标系，如图1所示。其中，全站仪坐标系中全站仪的竖轴为 z_s 轴，视准轴照准初始位置点时，横轴位置为 y_s 轴， x_s 轴由右手定则确定，由于全站仪具有电子整平及轴系倾斜误差补偿功能，因此可认为整平后全站仪坐标系为水平坐标系；望远镜坐标系与全站仪坐标系共原点，望远镜视准轴为 x_t 轴，横轴为 y_t 轴， z_t 轴由右手定则确定；相机坐标系的原点 o_c 位于相机等效中心处， z_c 轴与光轴方向一致， x_c 轴平行于相机图像传感器感光阵列的横边， y_c 轴由右手定则确定。理想情况下，安装相机后，望远镜坐标系与相机坐标系间的相对位姿关系即保持不变。

根据透视成像原理可建立单测站的物像关系为

$$\lambda \mathbf{m} = \mathbf{A} [\mathbf{R}_{ct} \mathbf{R}_{ts} (\mathbf{R}_{sw} \mathbf{X}_w + \mathbf{T}_{sw}) + \mathbf{T}_{ct}], \quad (1)$$

式中： λ 为非零标量； \mathbf{m} 为像点的无畸变齐次坐标； \mathbf{A} 为相机的内参数矩阵； \mathbf{X}_w 为物点的空间坐标； $\mathbf{R}_{ts} = \mathbf{R}(y, \gamma) \mathbf{R}(z, \alpha)$ 为全站仪坐标系相对望远镜坐标系的旋转矩阵，其中 α 和 γ 分别为望远镜的水平和垂直旋转角度，逆时针为正； \mathbf{R}_{ct} 和 \mathbf{T}_{ct} 分别为望远镜坐标系相对相机坐标系的旋转和平移矩阵，记 $\mathbf{R}_{ct} = \mathbf{R}(z, \theta) \mathbf{R}(y, \varphi) \mathbf{R}(x, \omega)$ ，其中 θ 、 φ 和 ω 为旋转角度， $\mathbf{T}_{ct} = [t_{ctx} \quad t_{cty} \quad t_{ctz}]^T$ ，其中 t_{ctx} 、 t_{cty} 和 t_{ctz} 分别为沿 x 、 y 和 z 方向的相对平移量； \mathbf{R}_{sw} 和 \mathbf{T}_{sw} 分别为物体坐标系相对全站仪坐标系的旋转和平移

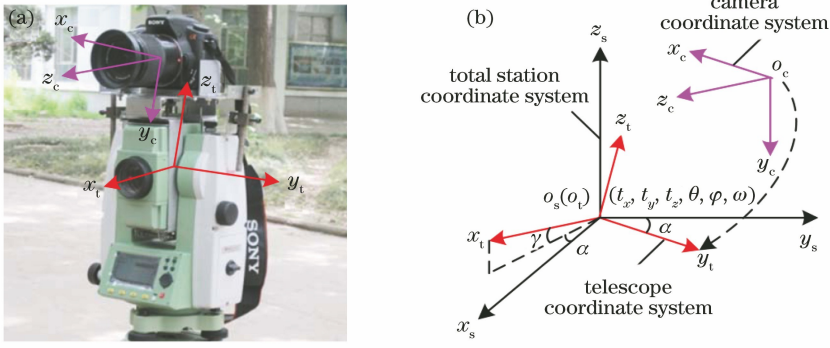


图 1 测量系统的坐标系。(a)相机坐标系与望远镜坐标系;(b)相机坐标系、望远镜坐标系及全站仪坐标系之间的关系
Fig. 1 Coordinate systems of measurement system. (a) Camera coordinate system and telescope coordinate system;
(b) relationship between camera coordinate system, telescope coordinate system, and total station coordinate system

矩阵,记 $\mathbf{R}_{sw} = \mathbf{R}(z, \psi)\mathbf{R}(y, \zeta)\mathbf{R}(x, \vartheta)$, 其中 ψ, ζ 和 ϑ 为旋转角度, $\mathbf{T}_{sw} = [t_{swx} \ t_{swy} \ t_{swz}]^T$ 。 $\mathbf{R}(z, a_z)$ 、 $\mathbf{R}(y, a_y)$ 和 $\mathbf{R}(x, a_x)$ 分别为绕 z, y 和 x 轴的旋转矩阵, 旋转角度分别为 a_z, a_y 和 a_x , 具体可表示为

$$\mathbf{R}(z, a_z) = \begin{bmatrix} \cos a_z & -\sin a_z & 0 \\ \sin a_z & \cos a_z & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$$\mathbf{R}(y, a_y) = \begin{bmatrix} \cos a_y & 0 & \sin a_y \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin a_y & 0 & \cos a_y \end{bmatrix}, \quad (3)$$

$$\mathbf{R}(x, a_x) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos a_x & -\sin a_x \\ 0 & \sin a_x & \cos a_x \end{bmatrix}。 \quad (4)$$

内参数矩阵具体可表示为

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} a_u & s & u_0 \\ 0 & qa_u & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

式中: a_u 为相机的主距参数; s 为描述图像传感器像元阵列纵横两边不垂直度的参数; q 为像元的长宽比; (u_0, v_0) 为主点(光轴与图像传感器的交点)的图像坐标; (u, v) 为无畸变像点坐标。

假定在整个测量过程中, $\mathbf{A}, \mathbf{R}_{ct}$ 和 \mathbf{T}_{ct} 均保持不变。记同一个 \mathbf{X}_w 在左、右相邻测站上所成像的无畸变齐次坐标分别为 $\mathbf{m}_l = [u_l \ v_l \ 1]^T$ 和 $\mathbf{m}_r = [u_r \ v_r \ 1]^T$, 由(1)式可知 \mathbf{X}_w 满足

$$\begin{cases} \lambda_l \mathbf{m}_l = \mathbf{A}[\mathbf{R}_{ct} \mathbf{R}_{tsl}(\mathbf{R}_{slw} \mathbf{X}_w + \mathbf{T}_{slw}) + \mathbf{T}_{ct}] \\ \lambda_r \mathbf{m}_r = \mathbf{A}\{\mathbf{R}_{ct} \mathbf{R}_{tsr}[\mathbf{R}_{srl}(\mathbf{R}_{slw} \mathbf{X}_w + \mathbf{T}_{slw}) + \mathbf{T}_{srl}] + \mathbf{T}_{ct}\} \end{cases}, \quad (6)$$

式中: \mathbf{R}_{srl} 和 \mathbf{T}_{srl} 分别为两个全站仪坐标系间的旋转矩阵和平移矩阵, 由于全站仪坐标系为水平坐标系, 可记为 $\mathbf{R}_{srl} = \mathbf{R}(z, \beta)$, 其中 β 为绕 z 轴的旋转

角度, $\mathbf{T}_{srl} = [t_{srlx} \ t_{srly} \ t_{srlz}]^T$ 。

为了便于分析, 不失一般性, 取左相机坐标系为物体坐标系, 则(6)式可变为

$$\begin{cases} \lambda_l \mathbf{m}_l = \mathbf{A} \mathbf{X}_w \\ \lambda_r \mathbf{m}_r = \mathbf{A}\{\mathbf{R}_{ct} \mathbf{R}_{tsr}[\mathbf{R}_{srl} \mathbf{R}_{tsl}^{-1} \mathbf{R}_{ct}^{-1}(\mathbf{X}_w - \mathbf{T}_{ct}) + \mathbf{T}_{srl}] + \mathbf{T}_{ct}\} \end{cases}。 \quad (7)$$

实际上, 透视成像模型并不能完全描述真实的相机成像几何关系, 真实的像点往往会偏离上述透视成像所得的像点位置, 通常用镜头畸变来描述这两点的差异性, 常用的镜头畸变模型为

$$\begin{cases} u = u_d + (u_d - u_0)(k_1 r^2 + k_2 r^4) \\ v = v_d + (v_d - v_0)(k_1 r^2 + k_2 r^4) \end{cases}, \quad (8)$$

式中: (u_d, v_d) 为实际的像点坐标; $r^2 = (u_d - u_0)^2 +$

$(v_d - v_0)^2$; k_1 和 k_2 为畸变系数, 相机设置不变时, 畸变系数不变。为了方便后续描述, 将(8)式简记为 $\mathbf{m} = \mathbf{C}(\mathbf{m}_d, \mathbf{k})$, 其中 $\mathbf{k} = [k_1 \ k_2]$, $\mathbf{m} = [u \ v]$, $\mathbf{m}_d = [u_d \ v_d]$ 。

由(7)式和(8)式可以看到, 为获得 \mathbf{X}_w , 除了由全站仪的旋转角度可直接求得 \mathbf{R}_{tsr} 和 \mathbf{R}_{tsl} 外, 还必须确定 $\mathbf{A}, \mathbf{R}_{ct}, \mathbf{T}_{ct}, \mathbf{R}_{srl}$ 及镜头畸变参数 \mathbf{k} 。表 1 为需

要确定的所有系统参数,其中透视成像内参数、镜头畸变参数和望远镜相对相机的位姿参数被统称为单测站参数。

表1 组合测量系统中待确定的参数

Table 1 Parameters to be determined in the combined measurement system

Parameter description	Sign
Perspective imaging intrinsic parameter	a_u, u_0, q, v_0, s
Lens distortion parameter	k_1, k_2
Telescope's pose parameter relative to the camera	$\theta, \varphi, \omega, t_{ctx}, t_{cty}, t_{ctz}$
Pose parameter between different stations	$\beta, t_{srslx}, t_{srsly}, t_{srsz}$

2.3 参数标定方法

采用摄影测量法对大型物体进行三维形貌测量时,通常需进行远距离测量,为了提高空间分辨率必须采用长焦镜头,而长焦镜头必然会减小相机的视场角。在窄视场相机的全局优化标定中, a_u 往往与表

示物距的相机外参数高度耦合。为了提高标定精度,先采用了一种相机主距参数的单独标定方法^[33]确定主距参数,再采用精度较高且操作较为方便的自旋转标定方法确定其余单测站参数,最后利用两个公共标志点实现了测站间全站仪位姿参数的标定。

2.3.1 主距参数的标定方法

在 \mathbf{A} 中,不垂直度误差往往较小,此时假定 $s = 0$,此外纵横比 $q \approx 1$,这里取 $q = 1$ 。选取一标定板作为参考物体,记物体坐标系相对相机坐标系的旋转矩阵为

$$\mathbf{R} = [\mathbf{r}_1 \quad \mathbf{r}_2 \quad \mathbf{r}_3] = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix}, \quad (9)$$

平移向量 $\mathbf{T} = [T_x \quad T_y \quad T_z]^T$ 。不失一般性,设标定板平面满足 $Z_w = 0$,则标定板上任意一点 \mathbf{X}_w 所对应的 \mathbf{m} 满足 $\mathbf{m} = \mathbf{H}\mathbf{X}_w$,其中标准化单应矩阵 \mathbf{H} 为

$$\mathbf{H} = \frac{1}{T_z} \mathbf{A} [\mathbf{r}_1 \quad \mathbf{r}_2 \quad \mathbf{T}] = \frac{1}{T_z} \begin{bmatrix} r_{11}a_u + r_{31}u_0 & r_{12}a_u + r_{32}u_0 & a_uT_x + T_zu_0 \\ qr_{21}a_u + r_{31}v_0 & qr_{22}a_u + r_{32}v_0 & qa_uT_y + T_zv_0 \\ r_{31} & r_{32} & T_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_1 & h_2 & h_3 \\ h_4 & h_5 & h_6 \\ h_7 & h_8 & 1 \end{bmatrix}. \quad (10)$$

当 $h_7^2 + h_8^2 \neq 0$ 时,由(10)式可得

$$\begin{cases} h_1h_8 - h_2h_7 = -a_ur_{23}/T_z^2 \\ h_4h_8 - h_5h_7 = qa_ur_{13}/T_z^2 \end{cases}. \quad (11)$$

由于 $r_{13}^2 + r_{23}^2 = r_{31}^2 + r_{32}^2 = T_z^2(h_7^2 + h_8^2)$,由(11)式可得

$$\frac{a_u}{T_z} = \sqrt{[(h_1h_8 - h_2h_7)^2 + (h_4h_8 - h_5h_7)^2/q^2]/(h_7^2 + h_8^2)}. \quad (12)$$

当 $h_7^2 + h_8^2 = 0$ (即 $r_{31} = r_{32} = 0$) 时,由(10)式可得

$$\begin{cases} h_1 - h_2 = a_u(r_{11} - r_{12})/T_z \\ h_4 - h_5 = qa_u(r_{21} - r_{22})/T_z \end{cases}. \quad (13)$$

由于此时 $r_{11}^2 + r_{12}^2 = r_{21}^2 + r_{22}^2 = 1$ 且 $r_{11}r_{12} + r_{21}r_{22} = 0$,由(13)式可得

$$\frac{a_u}{T_z} = \sqrt{[(h_1 - h_2)^2 + (h_4 - h_5)^2/q^2]}/2}. \quad (14)$$

记(12)式和(14)式的等号右侧为 M ,则(12)式和(14)式可简写为

$$a_u = MT_z. \quad (15)$$

由(15)式可以看到, M 即代表了相机成像系统的物像放大倍率,由标定板的物像对应关系求得 \mathbf{H}

后,便可计算 M 。在透视成像模型中,参数 T_z 为标定板原点沿光轴方向偏离相机等效中心(相机坐标系的原点)的距离,即物距。若 T_z 已知,由(15)式便可直接求得 a_u 。

普通相机成像系统一般可等效为厚透镜成像系统,厚透镜成像如图2所示。设标定板原点位于相机成像系统的对焦平面上,由高斯成像公式, T_z 满足

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{L_p} + \frac{1}{T_z} = \frac{1}{L_w - d - T_z} + \frac{1}{T_z}, \quad (16)$$

式中: f 为相机镜头的等效焦距; d 为厚透镜成像系统中物方主平面与像方主平面间的距离; L_p 为像方主平面与真实相机图像传感器间的距离,即像距; L_w 为标定板原点与真实相机图像传感器的距离,即物像距离。

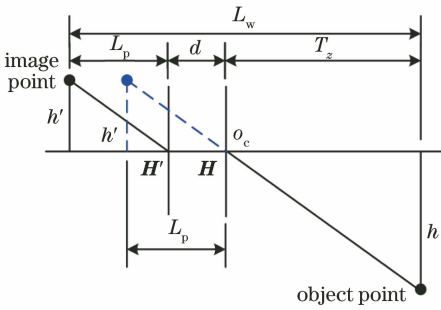


图 2 厚透镜成像示意图

Fig. 2 Schematic of thick lens imaging

根据相机镜头的光学特性,借助焦距仪和节点仪等^[34-36]可精确测得 f 和 d , 实验是在 GXY-08A 光具座上测量了相机镜头的 f 和 d 。

假定标定板原点 o_w 位于相机光轴上,并且光轴与图像传感器的交点位于图像传感器的中心 o_d , 如图 3 所示,物像距离为

$$L_w = \sqrt{L^2 - s_{oo_t}^2} - s_{oo_d}, \quad (17)$$

式中: L 为全站仪中心(全站仪坐标系的原点)与标定板原点间的距离; s_{oo_d} 和 s_{oo_t} 分别为全站仪中心与图像传感器中心之间沿光轴方向和垂直于光轴方向的距离。由全站仪直接测量 L , 使用丁字尺和直角三角板等工具,根据全站仪上的中心标记和相机上的 CCD 位置标记等信息,测量与估计 s_{oo_d} 和 s_{oo_t} , 根据(17)式便可求得 L_w 。

将 f 、 d 和 L_w 代入(16)式即可得到 T_z , 结合(15)式便可求得 a_u 。

2.3.2 主距外单测站参数的标定方法

建立一个较大范围的二维或三维控制场,使用全站仪测得各控制点的坐标 \mathbf{X}_w , 如图 4 所示。在多个测站拍摄控制场图像并保证较大的交会角度 η , 在至

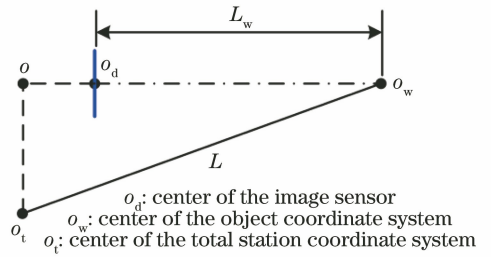


图 3 物像距离 L_w 的测量

Fig. 3 Measurement of object image distance L_w

少一个测站上旋转望远镜拍摄多幅控制场图像且保证较大的望远镜旋转角度改变量,记录拍摄各图像时望远镜的水平和垂直角度。根据(1)式可建立已知控制点 \mathbf{X}_w 与其无畸变像点 m 的对应关系。

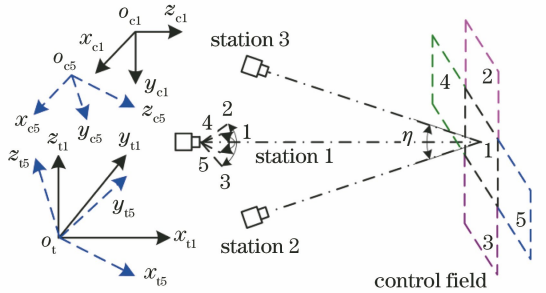


图 4 主距外单测站参数的标定

Fig. 4 Calibration of single station parameters outside main distance

认为整个测量过程中 \mathbf{A} 、 \mathbf{k} 、 \mathbf{R}_{ct} 和 \mathbf{T}_{ct} 均保持不变。每个测站上全站仪坐标系与物体坐标系间的 \mathbf{R}_{sw} 和 \mathbf{T}_{sw} 均未知,但同一测站上旋转拍摄的所有图像的 \mathbf{R}_{sw} 和 \mathbf{T}_{sw} 均相同。 \mathbf{R}_{ts} 可由拍摄每幅图像时望远镜的水平和垂直角度计算得到。对于不同的测站 (i)、图像 (j) 与控制点 (k), 将 m_d 记为 m_{dijk} , 如此便可建立目标函数为

$$F(\mathbf{x}) = \sum_i \sum_j \sum_k \| C(m_{dijk}, \mathbf{k}) - m(\mathbf{A}, \mathbf{R}_{ct}, \mathbf{T}_{ct}, \mathbf{R}_{swi}, \mathbf{T}_{swi}, \mathbf{R}_{tsij}, \mathbf{X}_{wk}) \|^2, \quad (18)$$

式中: m_{dijk} 为控制点在测站的实际像点坐标; $m(\mathbf{A}, \mathbf{R}_{ct}, \mathbf{T}_{ct}, \mathbf{R}_{swi}, \mathbf{T}_{swi}, \mathbf{R}_{tsij}, \mathbf{X}_{wk})$ 为控制点的无畸变像点坐标。

将由相机主距单独标定方法得到的 a_u 作为已知量代入(18)式,寻找使 $F(\mathbf{x})$ 最小的一组解,便可得到所有其余单测站参数。

2.3.3 测站间参数的标定方法

为了实现不同测站上全站仪坐标系间的转换,可在较为通透的地方设置若干标志点,确保在整个测量过程中标志点的中心位置不变,在各测站测量所有可视标志点的坐标。设两个测站有 n 个公共

标志点,可建立的目标函数为

$$F(\mathbf{x}) = \sum_{i'=1}^n \| \mathbf{R}_{srsli} \mathbf{X}_{sli'} + \mathbf{T}_{srsli} - \mathbf{X}_{sri'} \|^2, \quad (19)$$

式中: i' 为标志点编号; \mathbf{X}_{sli} 和 \mathbf{X}_{sri} 为同一个标志点在两个测站坐标系下的坐标。求解 $F(\mathbf{x})$ 最小化问题,由至少两个公共标志点便可确定两测站间的位姿参数 β 、 t_{srsli} 、 t_{srsly} 和 t_{srslz} 。

3 实验与讨论

利用所提组合测量系统及标定方法,对一大楼

平台侧墙进行测量。该侧墙面积约为 $16.0 \text{ m} \times 6.5 \text{ m}$, 使用索尼 $\alpha 200$ 相机和 DT75-300 f/4.5-5.6

镜头进行拍摄, 为了保证较高的物面分辨率将镜头焦距设置为 100 mm , 具体测量流程如图 5 所示。

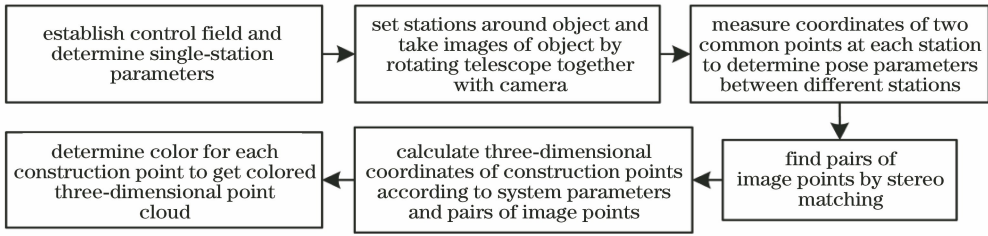


图 5 所提方法的三维形貌测量流程

Fig. 5 Three-dimensional shape measurement process of proposed method

为了确定单测站参数, 在面积约为 $11.0 \text{ m} \times 5.5 \text{ m}$ 的范围内布设 63 个控制点, 如图 6 所示, 使用全站仪测量各控制点的坐标。距离控制场约 15 m 处设置三个测站, 在各测站分别旋转拍摄三幅控制场图像, 光轴间的最大交会角度约为 60° 。取一

面积为 $1150 \text{ mm} \times 830 \text{ mm}$ 的标定板, 置于距离中间测站反方向约为 15 m 处, 在中间测站拍摄标定板图像, 如图 7 所示。采用相机主距单独标定方法确定主距参数, 采用自旋转标定方法确定其余单测站参数, 标定结果如表 2 所示。



图 6 控制场

Fig. 6 Control field

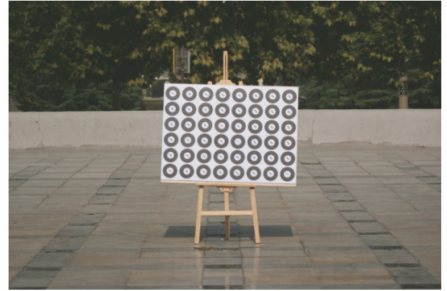


图 7 标定板图像

Fig. 7 Image of calibration board

表 2 单测站参数的标定结果

Table 2 Calibration results of single station parameters

Parameter	a_n / pixel	u_0 / pixel	q	v_0 / pixel	s / pixel	k_1	k_2
Result	16878	1925	1.0	1288	36	-8.5×10^{-10}	-2.2×10^{-17}
Parameter	θ / ($^\circ$)	φ / ($^\circ$)	ω / ($^\circ$)	t_{ctr} / mm	t_{cty} / mm	t_{ctz} / mm	
Result	188.5	-87.9	-99.1	-2.5	-257.9	-34.1	

为了确定测站间参数, 在各测站均可视的区域内架设两个圆棱镜作为公共标志点, 在各测站均测量棱镜中心的坐标, 计算得到各测站相对参考测站的位姿参数, 如表 3 所示。

表 3 测站间参数的标定结果

Table 3 Calibration results of parameters between stations

Inter-station parameters	β / ($^\circ$)	t_{srslx} / mm	t_{srslly} / mm	t_{srslz} / mm
$S_2 S_1$	-6.82	51.8	4061.3	-26.0
$S_3 S_1$	-13.76	95.2	7829.5	-17.9
$S_4 S_1$	-12.41	-1508.1	-3739.2	402.6
$S_5 S_1$	154.64	5326.6	5715.8	420.9

为了测量整个墙体, 将墙体沿高度方向分为上中下三层, 每层沿水平方向分为六个重叠区域, 距离

墙体约 15 m 处布设五个测站, 每个测站均旋转拍摄 18 幅被测对象图像并记录望远镜的旋转角度。借助 VisualSFM^[37-38] 软件得到匹配点对。由各幅重构图像的系统参数及匹配点对根据 (7) 式计算重构点的三维坐标, 同时在各组匹配图像中选择一幅图像作为基准图像, 将基准图像上的匹配点的 RGB 值赋予重构点。为此, 便可得到所有重构点的三维坐标及颜色值, 结果如图 8 所示。由图 8 可以看到, 不同图像及不同拍摄层间的几何接合完全没有痕迹, 重构结果的形状与实际被测对象基本相同, 证明了组合测量系统的可靠性。

为了验证全站仪与普通数码相机组合测量系统的测量精度, 在被测对象上布设八个编码目标, 如

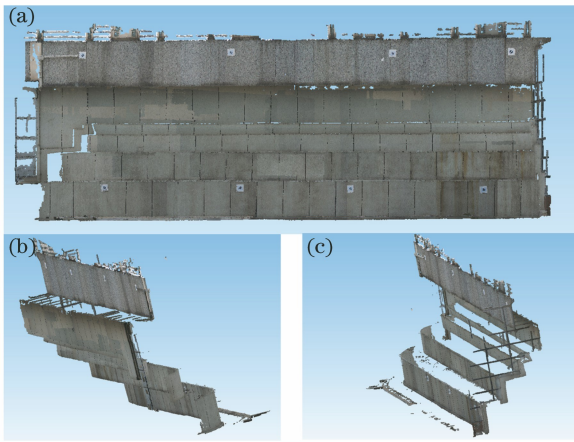


图 8 重构结果。(a)正面;(b)左侧;(c)右侧

Fig. 8 Reconstruction results. (a) Front; (b) left; (c) right

图 9 所示,根据(7)式得到其重构坐标,同时使用全站仪直接测量各编码目标的空间坐标。对所有编码

目标构成的 28 条线段的测量及重构长度进行比较,长度重构误差如图 10 所示。对所有编码目标构成的 56 个三角形各随机选取一内角进行计算,角度重构误差如图 11 所示。可以看到,长度绝对误差基本不超过 ± 60 mm,长度相对误差不超过 $\pm 1/100$,角度误差不超过 $\pm 0.6^\circ$ 。



图 9 在被测对象上用于精度检查的编码目标

Fig. 9 Coding targets used for accuracy check on the measured object

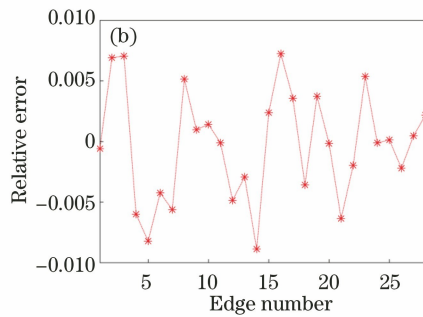
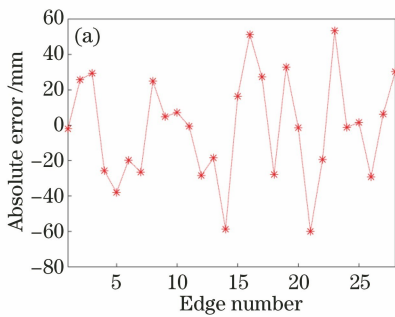


图 10 长度重构误差。(a)长度绝对误差;(b)长度相对误差

Fig. 10 Length reconstruction error. (a) Absolute error in length; (b) relative error in length

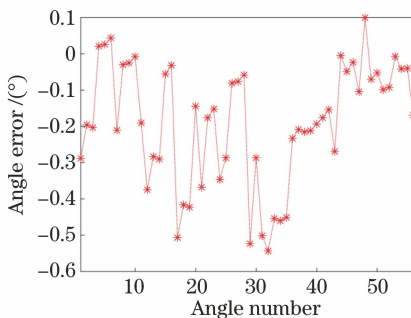


图 11 角度重构误差

Fig. 11 Angle reconstruction error

4 结 论

针对大型物体的三维形貌测量,提出了一套全站仪与普通数码相机的组合测量系统,在单次标定得到相机的内参数及望远镜相对相机的位姿参数后便可在单个测站任意旋转拍摄,更换测站时借助全站仪的坐标测量功能可快速实现测站间的转换,测

量效率高,设备成本低,测量方便灵活,其是一种非常有潜力的测量系统。针对该测量系统,将相机主距单独标定方法与自旋转标定方法相结合实现了单测站参数的标定,借助两个公共标志点实现了测站间参数的标定。实验验证了所提组合测量系统及所提标定方案的可行性,但实验显示所提测量系统目前仅能够实现中等精度的大型物体三维形貌测量,测量精度仍可提高。后续可从两个方面进行改善:1)考虑如何降低相机安装对全站仪测量精度的影响;2)使用所提相机主距单独标定方法确定主距参数,将其作为已知量参与其余单测站参数的求解,这将极大降低全局优化标定中参数的耦合,若能单独和准确地求解更多的系统参数,则有望进一步提高该测量系统的测量精度。

参 考 文 献

- [1] Várady T, Martin R R, Cox J. Reverse engineering

- of geometric models: an introduction[J]. Computer-Aided Design, 1997, 29(4): 255-268.
- [2] Brown G M. Overview of three-dimensional shape measurement using optical methods [J]. Optical Engineering, 2000, 39(1): 10-22.
- [3] Sansoni G, Trebeschi M, Docchio F. State-of-the-art and applications of 3D imaging sensors in industry, cultural heritage, medicine, and criminal investigation[J]. Sensors, 2009, 9(1): 568-601.
- [4] Abellán A, Vilaplana J M, Martínez J. Application of a long-range terrestrial laser scanner to a detailed rockfall study at vall de núria (eastern Pyrenees, Spain) [J]. Engineering Geology, 2006, 88(3/4): 136-148.
- [5] Yan J, Ye N, Li T C, et al. Research and implementation of industrial photogrammetry without coded points[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(10): 1015002.
严俊, 叶南, 李廷成, 等. 无编码点的工业摄影测量技术的研究及实现[J]. 光学学报, 2019, 39(10): 1015002.
- [6] Chen H, Zhang S J, Gao J, et al. Online three-dimensional measurement technology for steel wheel based on rotating scanning of multiple line-laser sensors[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(7): 0704006.
陈瀚, 张思瑾, 高见, 等. 基于多个线激光传感器旋转扫描的铸钢车轮在线三维测量技术[J]. 中国激光, 2019, 46(7): 0704006.
- [7] Levoy M, Ginsberg J, Shade J, et al. The digital Michelangelo project [C] // Proceedings of the 27th annual conference on Computer graphics and interactive techniques-SIGGRAPH '00, Not Known. New York: ACM Press, 2000: 131-144.
- [8] Yilmaz H M, Yakar M, Yildiz F. Documentation of historical caravansaries by digital close range photogrammetry [J]. Automation in Construction, 2008, 17(4): 489-498.
- [9] Yastikli N. Documentation of cultural heritage using digital photogrammetry and laser scanning [J]. Journal of Cultural Heritage, 2007, 8(4): 423-427.
- [10] Feng Q B, Xie F. Optical measurement techniques and applications [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2008.
冯其波, 谢芳, 张斌. 光学测量技术与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2008.
- [11] Koutsoudis A, Arnaoutoglou F, Chamzas C. On 3D reconstruction of the old city of Xanthi. A minimum budget approach to virtual touring based on photogrammetry [J]. Journal of Cultural Heritage, 2007, 8(1): 26-31.
- [12] Terauchi T, Oue Y, Fujimura K. A flexible 3D modeling system based on combining shape-from-silhouette with light-sectioning algorithm [C] // Fifth International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling (3DIM'05), Ottawa, ON, Canada. New York: IEEE, 2005: 196-203.
- [13] Jáuregui D V, White K R, Woodward C B, et al. Noncontact photogrammetric measurement of vertical bridge deflection [J]. Journal of Bridge Engineering, 2003, 8(4): 212-222.
- [14] Jiang R N, Jauregui D V. Development of a digital close-range photogrammetric bridge deflection measurement system [J]. Measurement, 2010, 43(10): 1431-1438.
- [15] Huang G P. Study on the key technologies of digital close range industrial photogrammetry and applications [D]. Tianjin: Tianjin University, 2005.
黄桂平. 数字近景工业摄影测量关键技术研究与应用 [D]. 天津: 天津大学, 2005.
- [16] Guo L. Study on principle and implementation method of 3D precision positioning in large field working space [D]. Tianjin: Tianjin University, 2008.
郭磊. 现场条件下大空间 3D 精密定位原理与方法研究 [D]. 天津: 天津大学, 2008.
- [17] Zhang Z X, Yang S C, Zhang J Q, et al. Multi-baseline digital close-range photogrammetry [J]. Geospatial Information, 2007, 5(1): 1-4.
张祖勋, 杨生春, 张剑清, 等. 多基线-数字近景摄影测量 [J]. 地理空间信息, 2007, 5(1): 1-4.
- [18] He X G, Wu J J, Gao H L. Application of Lensphoto photogrammetry system in Shuibuya spillway [J]. Yangtze River, 2007, 38(10): 28-29.
何秀国, 武吉军, 高何利. Lensphoto 摄影测量系统在水布垭溢洪道中的应用 [J]. 人民长江, 2007, 38(10): 28-29.
- [19] Zhang S L, Yin H X, Liu Q. Application analysis of a multi-baseline based digital close-range photogrammetry system [J]. Geomatics Technology and Equipment, 2009, 11(1): 27-30.
张胜利, 殷海霞, 刘强. 多基线数字近景摄影测量系统的应用分析 [J]. 测绘技术装备, 2009, 11(1): 27-30.
- [20] Wang J, Dong M L, Li W, et al. Photogrammetric method for large trough solar reflector [J]. Laser &

- Optoelectronics Progress, 2018, 55(5): 051204.
- 王君, 董明利, 李巍, 等. 大型槽式太阳能反射镜面摄影测量方法[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(5): 051204.
- [21] Allen P K, Stamos I, Troccoli A, et al. 3D modeling of historic sites using range and image data[C]//2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No. 03CH37422), Taipei, Taiwan, China. New York: IEEE, 2003: 145-150.
- [22] Al-Kheder S, Al-Shawabkeh Y, Haala N. Developing a documentation system for desert palaces in Jordan using 3D laser scanning and digital photogrammetry [J]. Journal of Archaeological Science, 2009, 36(2): 537-546.
- [23] Ikeuchi K, Oishi T, Takamatsu J, et al. The great Buddha project: digitally archiving, restoring, and analyzing cultural heritage objects[J]. International Journal of Computer Vision, 2007, 75(1): 189-208.
- [24] Miyazaki D, Oishi T, Nishikawa T, et al. The great Buddha project: modeling cultural heritage through observation[M]//Ikeuchi K, Sato Y. Modeling from reality. The springer international series in engineering and computer science. Boston: Springer, 2001, 640: 181-193.
- [25] Deng F, Zhang Z X, Zhang J Q. 3D reconstruction of old architecture by laser scanner and digital camera [J]. Science of Surveying and Mapping, 2007, 32(2): 29-30.
- 邓非, 张祖勋, 张剑清. 利用激光扫描和数码相机进行古建筑三维重建研究[J]. 测绘科学, 2007, 32(2): 29-30.
- [26] Liu J. Research on 3D scenes modeling and 3D virtual display for cultural heritage sites [D]. Xi'an: Northwest University, 2009.
- 刘军. 文化遗址的三维场景建模及虚拟展示技术研究[D]. 西安: 西北大学, 2009.
- [27] Zhang Z X, Zhan Z Q, Zheng S Y, et al. Photo total station system: the integration of digital photogrammetry and total station [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2005(11): 1-5, 20.
- 张祖勋, 詹总谦, 郑顺义, 等. 摄影全站仪系统: 数字摄影测量与全站仪的集成[J]. 测绘通报, 2005(11): 1-5, 20.
- [28] Zhang Z, Zheng S, Zhan Z. Digital terrestrial photogrammetry with photo total station [C] // International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, July 12-23, 2004, Istanbul. [S.l.: s.n.], 2004: 232-236.
- [29] Zhan Z Q, Zhang Z X, Zhang J Q. An integrated photogrammetric system with metric digital camera and total station [C] // First International Multi-Symposiums on Computer and Computational Sciences (IMSCCS' 06), June 20-24, 2006, Hangzhou, Zhejiang, China. New York: IEEE, 2006: 747-752.
- [30] Zhang Z X. Integration of photogrammetry and engineering surveying: photo total station and digital camera[J]. Geospatial Information, 2004, 2(6): 1-4, 14.
- 张祖勋. 论摄影测量与工程测量的结合: 摄影全站仪+数码相机[J]. 地理空间信息, 2004, 2(6): 1-4, 14.
- [31] Zhu Z K, Yuan Y, Zhang X H. Theodolite-camera video metrics system based on total station [J]. Proceedings of SPIE, 2011, 8194: 81942R.
- [32] Zhu Z K. Research on theodolite-camera video metrics [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2010.
- 朱肇昆. 经纬像机摄像测量方法研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2010.
- [33] Fang S P, Yang X L, Li Y C, et al. Method for calibrate the principal distance of a narrow field-of-view camera [EB/OL]. (2014-06-03) [2019-10-11]. Science paper Online, 2014. <http://www.paper.edu.cn/releasepaper/content/201406-37>.
- 方素平, 杨谢柳, 李一超, 等. 一种适用于窄视场相机的主距参数标定方法 [EB/OL]. (2014-06-03) [2019-10-11]. 中国科技论文在线, 2014. <http://www.paper.edu.cn/releasepaper/content/201406-37>.
- [34] Malacara D. Optical shop testing[M]. 3rd ed. New Jersey: Wiley-Inter Science, 2007.
- [35] Sweet M S, Still G K. A versatile nodal slide[J]. Physics Education, 1980, 15(2): 106-107.
- [36] Morel S. Methods for measuring a lens focal length[EB/OL]. (2011-12-01) [2019-10-11]. <https://wp.optics.arizona.edu/optomech/tutorials-in-optomechanics/>.
- [37] Wu C C. VisualSFM: a visual structure from motion system[EB/OL]. [2019-10-11]. <http://ccwu.me/vsfm/index.html>.
- [38] Wu C C, Agarwal S, Curless B, et al. Multicore bundle adjustment [C] // CVPR 2011, June 20-25, 2011, Colorado Springs, CO, USA. New York: IEEE, 2011: 3057-3064.