

文章编号: 0253-2239(2010)12-3524-06

大型空间复杂曲面无干扰精密测量方法

郝继贵 郭 磊 林佳睿 邹 剑 叶声华

(天津大学精密测试技术及仪器国家重点实验室, 天津 300072)

摘要 针对范围在十几米至几十米、法向矢量变化大的复杂曲面测量问题,提出一种无干扰精密测量方法。通过光学投射的方法设置测量点和全局控制点,利用定向相机结合固定于测量相机上的定向靶标,解决测量相机初始位置姿态估计问题,进而利用光束平差优化方法解算被测点精确的空间三维坐标。克服了现有方法中必须在被测表面设置编码特征的局限,快速、有效且不会干扰被测曲面。实验表明:原理方法可靠,测量数据总体均方根误差为 0.07 mm,能够高精度、高效率地解决大型空间复杂曲面的无干扰精密测量问题。

关键词 光学测量;三维形貌精密测量;无干扰测量;大型空间曲面;定向相机;定向靶标

中图分类号 TN247 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103012.3524

Non-Intrusive Precise Measuring Method of Large Complex Surface

Zhu Jigui Guo Lei Lin Jiarui Zou Jian Ye Shenghua

(State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instruments,
Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract A non-intrusive precise measuring method for complex surface in size of tens of meters whose normal vector varies greatly is presented. Global control points and measured points are set by means of optical projection. Orientation camera and orientation target fixed on measuring camera are used to solve estimation problem of measuring camera's initial position and posture. Then the three-dimensional coordinates of measured points are retrieved based on ray bundle adjustment technique. It overcomes the limitation of existing methods that coding targets must be set on measured surface, so it can accomplish non-intrusive measurement. Experimental results show that the total root mean square (RMS) error is 0.07 mm, therefore, the principle of method is reasonable and can solve problems with high accuracy and efficiency.

Key words optical measurement; three-dimensional precision profilometry; non-intrusive measurement; super large surface; orientation camera; orientation target

1 引 言

大型空间复杂曲面是指范围在十几米到几十米之间,各局部法矢方向差异大的不规则曲面,这类被测对象的精密测量是航空、航天和船舶等大型设备设计和制造领域中常见且需迫切解决的问题^[1,2]。此类问题技术难度大,突出表现在两个方面:1)需要兼顾大测量范围和高测量精度两方面因素,在几十米的测量范围内实现亚毫米级的高精度测量;2)被测曲面的高度复杂性,传统测量手段无法实现高精

度、高效率的测量。

近年来发展了一种基于近景摄影测量的视觉测量方法,具有测量精度高和测量效率高、可任意拓展测量空间的优点,成为测量大型空间复杂曲面的主流方法之一^[3,4]。已经出现基于此方法的成熟应用系统,最典型的是美国 GSI 公司的 V-STARS 近景摄影测量系统,类似的产品还有德国 GOM 公司的 TRITOP 测量系统和德国 AICON 公司的 DPA 测量系统等^[5]。它们存在一个共同特点,测量时必须

收稿日期: 2010-04-16; 收到修改稿日期: 2010-07-25

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(50735003),国家自然科学基金(50705065),天津市自然科学基金(08JCYBJC10000)和博士点基金(20090032110048)资助课题。

作者简介: 郝继贵(1970—),男,教授,主要从事激光与光电测试方面的研究。E-mail: jigui@tju.edu.cn

在被测表面设置编码特征^[6],一定程度上干扰了被测形貌,更为重要的是:当被测表面无法设置或不允许设置任何物体特征时,上述方法失效。

本文发展了基于近景摄影测量的方法,提出利用定向相机结合固定于测量相机上的定向靶标实现测量相机初始位置姿态估计,进而获取被测点的空间三维坐标初值,然后利用光束平差的优化方法解算被测点的精确空间三维坐标。克服了现有方法中必须在被测表面设置编码特征的局限,能够快速、有效且无干扰地测量大型空间复杂曲面,特别适用于解决无法设置物理特征的大型空间复杂曲面三维形貌精密测量问题。

2 测量方法

本文方法是一种组合式测量方法。如图 1 所示,首先利用光学投射方式在被测表面设置全局控制点,采用多测站交汇式测量获得全局控制点的精确空间三维坐标,建立全局控制网;然后根据被测表面的特点划分若干测量子区域,通过光学投射方式设置测量点,测量各子区域的三维形貌,然后利用全

局控制点实现子区域拼接^[7],获取被测表面整体三维形貌。

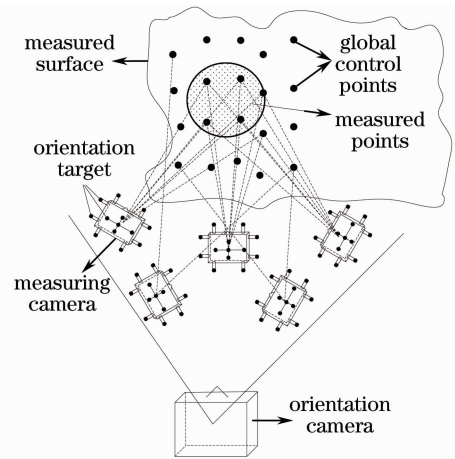


图 1 测量方法示意图

Fig. 1 Realization of measuring method

2.1 全局控制网构建

假设被测空间中设置 n 个全局控制点, m 个测站, 则测站 j ($j = 1, 2, \dots, m$) 下全局控制点 i ($i = 1, 2, \dots, n$) 满足以下所示的共线条件方程^[8]:

$$\begin{cases} x_i^{(j)} - x_0^{(j)} + \Delta x^{(j)} = f^{(j)} \frac{r_1^{(j)} [X_i - X_S^{(j)}] + r_4^{(j)} [Y_i - Y_S^{(j)}] + r_7^{(j)} [Z_i - Z_S^{(j)}]}{r_3^{(j)} [X_i - X_S^{(j)}] + r_6^{(j)} [Y_i - Y_S^{(j)}] + r_9^{(j)} [Z_i - Z_S^{(j)}]} \\ y_i^{(j)} - y_0^{(j)} + \Delta y^{(j)} = f^{(j)} \frac{r_2^{(j)} [X_i - X_S^{(j)}] + r_5^{(j)} [Y_i - Y_S^{(j)}] + r_8^{(j)} [Z_i - Z_S^{(j)}]}{r_3^{(j)} [X_i - X_S^{(j)}] + r_6^{(j)} [Y_i - Y_S^{(j)}] + r_9^{(j)} [Z_i - Z_S^{(j)}]} \end{cases}, \quad (1)$$

式中 $[x_i^{(j)}, y_i^{(j)}]$ 是全局控制点 i 在测站 j 下的图像坐标; $[x_0^{(j)}, y_0^{(j)}]$ 是测站 j 的主点位置; $[\Delta x^{(j)}, \Delta y^{(j)}]$ 是测站 j 的成像畸变误差修正值; $f^{(j)}$ 是测站 j 的有效焦距; $r_1^{(j)} \sim r_9^{(j)}$ 是测站 j 相对世界坐标系的旋转矩阵因子; $[X_S^{(j)}, Y_S^{(j)}, Z_S^{(j)}]$ 是测站 j 相对世界坐标系的平移矩阵因子; (X_i, Y_i, Z_i) 是全局控制点 i 在世界坐标系下的三维坐标。

同一全局控制点在不同测站下对应的成像光束在空间应当交汇于一点, 联立所有全局控制点在所有测站下的共线条件方程得到以下所示的超大规模非线性方程组:

$$\begin{cases} F^{(j)}(X_i, Y_i, Z_i) = 0 \\ (i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m) \end{cases}, \quad (2)$$

式中 $F^{(j)}(X_i, Y_i, Z_i)$ 表示测站 j 下全局控制点 i 对应的直线方程, 可由(1)式推得。

将方程组的参数分为三类:

- 1) 测站内参数: $x_0^{(j)}, y_0^{(j)}, \Delta x^{(j)}, \Delta y^{(j)}, f^{(j)}$;
- 2) 测站外参数: $r_1^{(j)} \sim r_9^{(j)}, X_S^{(j)}, Y_S^{(j)}, Z_S^{(j)}$;

3) 控制点参数: $x_i^{(j)}, y_i^{(j)}, X_i, Y_i, Z_i$ 。

对于每个参数均引入改正数, 采用平差优化方法^[9]求解它们的精确值。此方法需要合适的初值才能使非线性迭代过程收敛, 因此, 如何获取各参数初值十分重要:

1) 通过相机标定技术预先获得测站内参数的初值^[10,11]。

2) 利用测量相机初始定向技术求解空间各测站相对于世界坐标系的旋转矩阵和平移矩阵, 即测站外参数的初值;

3) 利用高精度图像处理技术提取全局控制点在各测站下对应像点的图像坐标, 在已知各测站间转换关系的前提下, 采用图像精确配准技术实现各像点的精确匹配, 进而求解各全局控制点在世界坐标系下的三维坐标, 即控制点参数的初值。

2.2 局部测量和拼接

将整个被测表面划分成若干子区域, 采用多站交汇方法测量子区域内测量点和全局控制点的精确

三维坐标[描述于某测量坐标系 $O_M^{(j)} - X_M^{(j)} Y_M^{(j)} Z_M^{(j)}$ 中]。以子区域内全局控制点间空间拓扑关系作为约束寻找它们在全局控制网中的同名匹配点,按下式所示求解测量坐标系 $O_M^{(j)} - X_M^{(j)} Y_M^{(j)} Z_M^{(j)}$ 与全局坐标系 $O_G - X_G Y_G Z_G$ 间转换关系 $R_{M-G}^{(j)}$ 和 $T_{M-G}^{(j)}$,将子区域三维形貌统一到全局坐标系中:

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} X_{Gj} \\ Y_{Gj} \\ Z_{Gj} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & r_3 \\ r_4 & r_5 & r_6 \\ r_7 & r_8 & r_9 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{Mj} \\ Y_{Mj} \\ Z_{Mj} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} t_1 \\ t_2 \\ t_3 \end{bmatrix} \\ (j = 1, 2, 3, \dots) \\ r_1^2 + r_4^2 + r_7^2 = 1 \\ r_2^2 + r_5^2 + r_8^2 = 1 \\ r_3^2 + r_6^2 + r_9^2 = 1 \\ r_1 r_2 + r_4 r_5 + r_7 r_8 = 0 \\ r_1 r_3 + r_4 r_6 + r_7 r_9 = 0 \\ r_2 r_3 + r_5 r_6 + r_8 r_9 = 0 \end{cases}, \quad (3)$$

式中 (X_{Gj}, Y_{Gj}, Z_{Gj}) 是全局控制坐标系下的坐标值; (X_{Mj}, Y_{Mj}, Z_{Mj}) 是测量坐标系下的坐标值; $r_1 \sim r_9$ 是 $R_{M-G}^{(j)}$ 的元素, $t_1 \sim t_3$ 是 $T_{M-G}^{(j)}$ 的元素。

通常情况下被测范围远远大于全局控制点投影器的单次投射范围,利用相邻两区域公共的测量点,按(3)式实现全局控制点区域的拼接,最终实现被测表面整体三维形貌的融合。

2.3 整体优化

整体数据融合后,根据平差数学模型对全部测量点、全局控制点和测站建立平差方程组,进行整体优化,求解被测表面整体形貌的精确值。

3 初始定向问题

上述讨论表明:测量相机初始定向技术是此方法非常重要的关键技术之一,是三维数据融合和平差优化实现的前提和基础。

在测量相机上设计如图 2 所示的定向靶标,预先标定好测量相机坐标系与定向靶标坐标系间的转

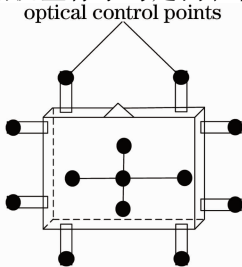


图 2 定向靶标

Fig. 2 Orientation target

换关系。利用辅助的定向相机采集定向靶标的图像,通过定向靶标上光点在图像中的位置和它们在三维空间中的精确距离解算定向靶标的位置姿态,进而获得测量相机在每个测站下的位置姿态。

3.1 定向靶标与测量相机的标定

测量相机上定向靶标的标定包括两部分:1)定向靶标上各控制点间三维位置关系的精确标定;2)定向靶标坐标系与测量相机坐标系间转换关系的标定。具体实现过程中,可以将两部分内容统一起来:求解定向靶标上控制点在测量相机坐标系下真实的精确空间三维坐标。

采用移动视觉测量方法结合大型空间精密控制场实现定向靶标上控制点在测量相机坐标系下精确空间三维坐标的标定,具体实现方法是:

1)在大型空间内布置多个光学控制点,辅以编码标志^[12],构成大型精密控制场,建立控制场坐标系 $O_G - X_G Y_G Z_G$,如图 3 所示。

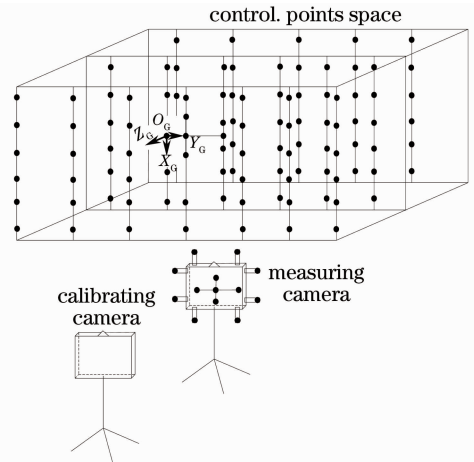


图 3 定向靶标与测量相机的标定

Fig. 3 Calibration of orientation target and

measuring camera

2)将固定好定向靶标的测量相机放于控制场前方的测量空间内,采用另一标定相机,利用基于移动视觉的大型空间三维精密定位方法^[13]测量定向靶标上控制点在控制场坐标系 $O_G - X_G Y_G Z_G$ 内的三维坐标。

3)利用测量相机,以当前位置作为第一测站,采用同样方法测量控制场,获得控制场坐标系 $O_G - X_G Y_G Z_G$ 与测站 1 下测量相机坐标系 $O_C - X_C Y_C Z_C$ 的转换关系 R_{GC} 和 T_{GC} 。

4)利用定向靶标上控制点在 $O_G - X_G Y_G Z_G$ 下三维坐标和 R_{GC}, T_{GC} ,求解控制点在 $O_C - X_C Y_C Z_C$ 下的精确三维坐标。

3.2 单次成像实现测量相机初始定向

已知定向靶标上光学控制点间精确空间距离,利用定向相机单次成像,即可求解光学控制点在定向相机坐标系下的空间三维坐标^[14]。具体数学模型如下式所述:

$$\begin{cases} X_i = \frac{x_i - C_x + \Delta x_i}{f} \cdot Z_i \\ Y_i = \frac{y_i - C_y + \Delta y_i}{f} \cdot Z_i \\ (X_i - X_j)^2 + (Y_i - Y_j)^2 + (Z_i - Z_j)^2 = d_{ij}^2 \\ i, j = 1, 2, \dots, n; i \neq j; \end{cases}, \quad (4)$$

式中 (x_i, y_i) 是定向靶标上第 i 控制点的图像坐标, (X_i, Y_i, Z_i) 是对应控制点在定向相机坐标系下的空间三维坐标, (C_x, C_y) 是相机主点位置, $(\Delta x_i, \Delta y_i)$ 是第 i 控制点图像畸变, d_{ij} 是第 i 控制点与 j 控制点间的距离; n 是成像的控制点数。

(4)式所示方程组是一个典型透视 n 点定位(PnP)问题,未知数 (X_i, Y_i, Z_i) 的总数为 $3n$,控制点图像坐标提供的方程数为 $2n$,控制点间距离提供的方程数为 C_n^2 ,约束方程总数为 $2n + C_n^2$,欲得到方程组的解,成像的控制点数量必须满足

$$2n + C_n^2 \geq 3n, \quad (5)$$

当 $n = 3$ 时,(5)式左右两边相等,求解控制点坐标存在多义性,无法实现初始定向;当 $n \geq 4$ 时,可以采用牛顿迭代法求解方程组的最优解。

控制点在测量相机坐标系下的三维坐标已知,结合控制点在定向相机所确定的全局坐标系下的三维坐标,求解测量相机各测站相对全局坐标系的位置姿态,作为测站外参数迭代初值。上述讨论表明:定向靶标控制点数量 n 必大于等于 4,满足求解两个坐标系间转换关系的要求^[15]。

4 实 验

全局控制点测量与局部测量原理方法相同,局部测量结果的拼接精度靠全局控制点的测量精度保证,全局控制点测量实验,能够验证利用定向相机结合定向靶标实现测量相机初始定向和平差优化算法是否正确,测量结果具有代表性。

采用 INCA3A 相机作为测量相机, Kodak dcspro14n 作为定向相机,在测量相机上用圆形定向反光标志(RRT)反射点设计定向靶标。由于实验空间有限,在 $3 \text{ m} \times 2.5 \text{ m} \times 2.5 \text{ m}$ 空间内设置 113 个全局控制点,测量全局控制点的三维坐标,将

结果与美国 GSI 公司的 V-STARS 摄影测量系统(相对测量精度 $1/120000$ 即 $0.01 \text{ mm}/1.2 \text{ m}$)的结果比对。

实验中,利用测量相机采集测量图像,同时定向相机采集定向图像,图像经过软件全自动处理,自动解算测量结果。整个过程耗时 10 min,测量速度快,效率高。

定向靶标上控制点在测量相机坐标系下三维坐标的标定结果如表 1 所示。

表 1 定向靶标标定结果

Table 1 Calibration result of orientation target

| | X | Y | Z |
|----|----------|----------|-----------|
| P1 | -89.5644 | 69.9359 | -116.8195 |
| P2 | -83.2115 | 12.7359 | -116.4795 |
| P3 | -78.8726 | -52.8385 | -116.5326 |
| P4 | -10.1440 | 73.5700 | -111.9764 |
| P5 | -5.9438 | 16.8189 | -111.6265 |
| P6 | 0.1518 | -44.0181 | -111.7134 |
| P7 | 56.7469 | 82.7999 | -107.8550 |
| P8 | 62.9852 | 20.1513 | -107.5437 |
| P9 | 68.0053 | -36.8910 | -107.7258 |

测量时,在每个测量位置下各测站初始位置姿态估计结果如下:

$$\mathbf{R}_1 = \begin{bmatrix} 0.0009 & -0.0177 & -0.9998 \\ -0.1031 & 0.9945 & -0.0177 \\ 0.9947 & 0.1031 & -0.0009 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{T}_1 = \begin{bmatrix} 2217.274 \\ -74.689 \\ -768.286 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{R}_2 = \begin{bmatrix} 0.1514 & -0.1211 & -0.9810 \\ -0.9862 & -0.0851 & -0.1417 \\ -0.0663 & 0.9890 & -0.1323 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{T}_2 = \begin{bmatrix} 2288.635 \\ 58.091 \\ -959.841 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{R}_3 = \begin{bmatrix} 0.0307 & 0.3479 & -0.9370 \\ -0.9858 & -0.1441 & -0.0858 \\ -0.1649 & 0.9264 & 0.3386 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{T}_3 = \begin{bmatrix} 2214.282 \\ 62.959 \\ -1546.313 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{R}_4 = \begin{bmatrix} 0.1546 & -0.2936 & -0.9433 \\ -0.9874 & -0.0774 & -0.1377 \\ -0.0326 & 0.9528 & -0.3019 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{T}_1 = \begin{bmatrix} 2211.793 \\ 32.179 \\ 170.910 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{R}_5 = \begin{bmatrix} -0.2231 & -0.0572 & -0.9731 \\ -0.1827 & 0.9830 & -0.0159 \\ 0.9575 & 0.1742 & -0.2297 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{T}_5 = \begin{bmatrix} 2194.817 \\ -102.769 \\ 329.192 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{R}_6 = \begin{bmatrix} 0.3959 & -0.1299 & -0.9090 \\ 0.0228 & 0.9910 & 0.1317 \\ -0.9180 & -0.0314 & 0.3954 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{T}_6 = \begin{bmatrix} 2274.509 \\ -65.667 \\ -1394.966 \end{bmatrix}$$

$\mathbf{R}_1 \sim \mathbf{R}_6, \mathbf{T}_1 \sim \mathbf{T}_6$ 表示测站 1~6 到全局坐标系的旋转矩阵和平移矩阵。

图 4 所示是 113 个全局控制点的最终优化结果与 V-STARS 测量结果间的三维距离误差。

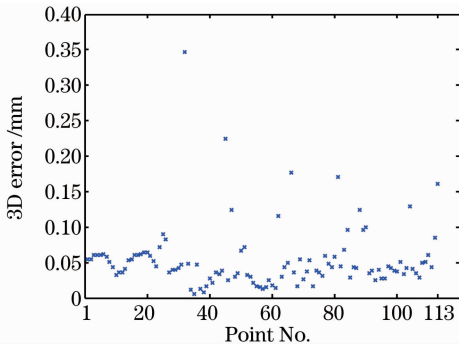


图 4 测量结果误差对比

Fig. 4 Error of measured result

测量结果表明: 113 个点的总体均方根误差 (RMS) 为 0.07 mm。

5 结 论

实验结果证明: 本文提出的大型空间复杂曲面无干扰精密测量方法原理正确, 方法合理, 利用定向相机结合定向靶标能够有效地解决测量相机的初始定向问题, 能够达到优于 0.1 mm 的测量精度。该方法具有能够自由选择测量相机姿态、任意拓展测量空间、无需在被测表面设置任何物理标识、测量效率高以及测量精度高的优点, 在解决航空航天和船舶制造等领域内大型复杂曲面无干扰精密测量问题方面具有相当大的潜力。

参 考 文 献

- 1 Wang Baofeng, Li Guangyun, Li Zongchun *et al.*. Application of high accuracy digital photogrammetry technology in a 50-meter large antenna [J]. *Engineering of Surveying and Mapping*, 2007, **16**(1): 42~46
王保丰, 李广云, 李宗春等. 高精度数字摄影测量技术在 50 m 大型天线中的应用[J]. *测绘工程*, 2007, **16**(1): 42~46
- 2 Li Yuguang, Zhu Fuxiang. Digital stereo photogrammetry to acquire the DSM of vessel tank[J]. *J. Ship Design*, 2009, (1): 49~53
李光玉, 朱福祥. 获取舰船液舱数字表面模型的数字立体摄影测量方法[J]. *船舶设计通讯*, 2009, (1): 49~53
- 3 Ding Zhian, Zhang Liyan, Zheng Jiandong *et al.*. Measurement of 3D curve structures by using one hand-held digital camera[J]. *China Mechanical Engineering*, 2008, **19**(7): 819~822
丁志安, 张丽艳, 郑建冬等. 基于单数码相机三维曲线结构摄影测量[J]. *中国机械工程*, 2008, **19**(7): 819~822
- 4 Zhang Dehai, Liang Jin, Tang Zhengzong *et al.*. New measuring method of large size measurement based on close range photogrammetry and 3D optical measurement [J]. *China Mechanical Engineering*, 2009, **20**(7): 817~822
张德海, 梁晋, 唐正宗等. 基于近景摄影测量和三维光学测量的大幅面测量新方法[J]. *中国机械工程*, 2009, **20**(7): 817~822
- 5 Zhang Dehai, Liang Jin, Tang Zhengzong *et al.*. Exploitation and study of close range industry photogrammetry system based on large-scale complex surface products [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2009, **36**(5): 122~127
张德海, 梁晋, 唐正宗等. 大型复杂曲面产品近景工业摄影测量系统开发[J]. *光电工程*, 2009, **36**(5): 122~127
- 6 Huang Guiping. Study on the key technologies of digital close range industrial photogrammetry and application [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
- 7 Cheng Gang, Yao Yingxue. 3D datum mosaic method of multi-view and large scale based on optical coding [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008, **16**(7): 1309~1314
陈刚, 姚英学. 多视点大空间三维坐标数据归一化方法[J]. *光学精密工程*, 2008, **16**(7): 1309~1314
- 8 Feng Wenhao. Close Range Photogrammetry Measuring [M]. Wuhan: Wuhan University Publishing Company, 2004
冯文灏. 近景摄影测量[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2004
- 9 Qiu Zhiqiang, Liang Yonghui, Yu Qifeng. Three-dimensional structure reconstruction from image sequence based on affine approximation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(6): 1004~1010
邱志强, 梁永辉, 于起峰. 基于仿射近似从序列图像重建目标三维结构[J]. *光学学报*, 2007, **27**(6): 1004~1010
- 10 Sun Junhua, Liu Zhen, Zhang Guangjun *et al.*. Camera calibration based on flexible 3D target [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(12): 3433~3439
孙军华, 刘震, 张广军等. 基于柔性立体靶标的摄像机标定[J]. *光学学报*, 2009, **29**(12): 3433~3439
- 11 Huo Ju, Yang Wei, Yang Ming. A self-calibration technique based on the geometry property of the vanish point [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(2): 465~472
霍炬, 杨卫, 杨明. 基于消失点几何特性的摄像机自标定方法[J]. *光学学报*, 2010, **30**(2): 465~472
- 12 Ma Yangbiao, Zhong Yuexian, Zheng Ling *et al.*. Design and recognition of coded targets for 3-D registration [J]. *J. Tsinghua University of Science and Technology*, 2006, **46**(2): 169~171
马扬彪, 钟约先, 郑聆等. 三维数据拼接中编码标志点的设计与检测[J]. *清华大学学报*, 2006, **46**(2): 169~171

- 13 Zhu Jigui, Guo Lei, Ye Shenghua. Principle and implementation method of three-dimensional precision positioning in large field working space[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(7): 1872~1876
郝继贵, 郭磊, 叶声华. 现场条件下大空间三维精密定位原理与方法[J]. *光学学报*, 2009, **29**(7): 1872~1876
- 14 Zhu Jigui, Wang Dawei, Ren Tongque *et al.*. 3D surface mosaic technology based on single image[J]. *Chinese J. Mechanical Engineering*, 2007, **43**(6): 186~189
郝继贵, 王大为, 任同群等. 基于单次成像的三维形貌拼接技术[J]. *机械工程学报*, 2007, **43**(6): 186~189
- 15 Zhang Guangjun. Machine Vision[M]. Beijing: Science Press, 2005
张广军. 机器视觉[M]. 北京: 科学出版社, 2005