

文章编号: 0253-2239(2009)07-1872-05

现场条件下大空间三维精密定位原理与方法

郝继贵 郭磊 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 提出了一种在现场条件下实现十几米空间范围内点三维坐标精密测量方法,该方法同时解决了大尺寸物体表面三维形貌测量中单元数据拼接精度低的问题。在空间待测点处设置可视特征,称为全局控制点,利用近景摄影测量手段获取被测信息,通过高精度图像处理技术、全局控制点自动精确配准技术和基于光束交汇的光束平差技术,恢复全局控制点的三维信息。实验结果表明,该方法在使用普通数码像机的情况下实现相对测量精度 0.073%。且具有操作灵活自由、测量速度快、自动化程度高和测量精度高的优点。

关键词 光学测量; 大尺寸精密测量; 光束平差; 全局控制点; 自动精确配准

中图分类号 TN247 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20092907.1872

Principle and Implementation Method of Three-Dimensional Precision Positioning in Large Field Working Space

Zhu Jigui Guo Lei Ye Shenghua

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

Abstract A precise measurement method for three-dimensional coordinate of points' larger than ten meters in field working space is presented. And the problem that the mosaic precision of cell measuring data is very low in large three-dimensional free-form measurement is solved simultaneously. Measuring pictures of visual characters called global control points at determined points are taken by special metrical camera. After processing the pictures using high precision image processing technique, automatic matching technique of global control points and ray bundle adjustment technique, the three-dimensional coordinates of global control points are retrieved. Experimental results show that the method can attain relative accuracy about 0.073% by using common digital camera and can be accomplished flexibly, freely, rapidly and accurately.

Key words optical measurement; large-sized precise measurement; ray bundle adjustment; global control points; automatic accurate matching

1 引言

基于视觉图像传感结合激光扫描或光栅投影的测量方法(视觉扫描测头)^[1~3]是获取三维信息的高效、非接触方法。大型物体三维形貌测量的精度受两方面影响,视觉扫描测头测量的精度和三维数据拼接的精度,前者已经能够实现优于 0.05 mm 的单个测量精度,能够满足实际应用的要求,因此三维数据拼接的精度成为决定大尺寸物体三维形貌测量精度的关键因素^[4,5]。目前常见的拼接方法是基于相邻两幅图像交叠约束的序列拼接。但存在拼接误差的累计和传递问题,在测量大尺寸物体三维形貌时测量精度很低。与序列拼接方法相比,基于全局控制网的全局

映射拼接方法能够适用大尺寸物体三维形貌测量对精度的要求,其中它的定位精度是决定全局映射拼接方法拼接精度的关键因素,是高精度大尺寸物体三维形貌测量中一项十分重要的关键技术^[6,7]。

本文在讨论了全局控制点精密定位的基本原理的基础上,提出一种在现场条件下实现十几米空间范围内全局控制点精密定位的方法。

2 基本原理

2.1 光束交汇约束

全局控制点精密定位以空间光束交汇约束为基础。采用电荷耦合器件(CCD)摄像机作为传感器,

收稿日期: 2008-09-17; 收到修改稿日期: 2008-11-24

基金项目: 国家自然科学基金(50735003)资助课题。

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

在空间不同测站拍摄全局控制点的影像。传感器对全局控制点成像的光束交汇示意图如图 1 所示。

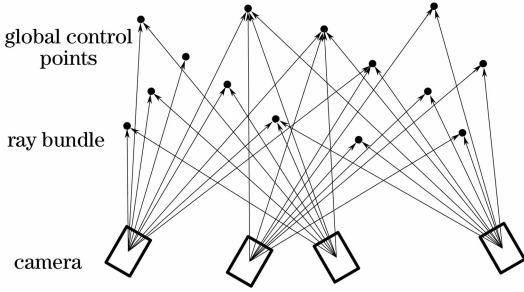


图 1 光束交汇示意图

Fig. 1 Intersection of ray bundle

不同测站下传感器对同一点的成像光束在空间必然相交于该点。在每个测站中,物点、像点和投影中心点满足共线条件^[8]:

$$\begin{aligned} x - x_0 + \Delta x &= \\ f \frac{r_1(X - X_S) + r_4(Y - Y_S) + r_7(Z - Z_S)}{r_3(X - X_S) + r_6(Y - Y_S) + r_9(Z - Z_S)}, \\ y - y_0 + \Delta y &= \\ f \frac{r_2(X - X_S) + r_5(Y - Y_S) + r_8(Z - Z_S)}{r_3(X - X_S) + r_6(Y - Y_S) + r_9(Z - Z_S)}, \end{aligned} \quad (1)$$

式中 (x, y) 为像点在像平面的坐标, (x_0, y_0) 为像面中心, $(\Delta x, \Delta y)$ 为系统误差改正值, f 为相机等效焦距,

$$\mathbf{k} = \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & r_3 \\ r_4 & r_5 & r_6 \\ r_7 & r_8 & r_9 \end{bmatrix}$$

为相机坐标系相对于物方坐标系的旋转矩阵, (X, Y, Z) 为物点在物方坐标系下的坐标; (X_S, Y_S, Z_S) 为相机主点在物方坐标系下的坐标。同一点在不同测站中的共线条件方程必满足相交条件。将所有全局控制点在所有测站中的共线条件方程联立,组成方程组,将控制点在空间各测站中的图像坐标作为已知条件,应用光束平差优化技术可求解所有全局控制点的精确三维坐标。

在视觉测量中,由摄像机成像的精确模型可知,(1)式中的系统误差改正值 $(\Delta x, \Delta y)$ 为^[9]

$$\begin{cases} \Delta x = \bar{x}r^2k_1 + \bar{x}r^4k_2 + \bar{x}r^6k_3 + \\ (2\bar{x}^2 + r^2)P_1 + P_2x\bar{y} + \\ b_1\bar{x} + b_2\bar{y}, \\ \Delta y = \bar{y}r^2k_1 + \bar{y}r^4k_2 + \bar{y}r^6k_3 + \\ 2P_1\bar{x}\bar{y} + (2\bar{y}^2 + r^2)P, \end{cases} \quad (2)$$

式中 $r = \sqrt{\bar{x}^2 + \bar{y}^2}$, $\begin{cases} \bar{x} = x - x_0 \\ \bar{y} = y - y_0 \end{cases}$, k_1, k_2, k_3, P_1 ,

P_2, b_1, b_2 为相机模型参数。

2.2 光束平差

光束平差是指将全局控制点的空间三维坐标和摄像机的内参数、位置姿态作为未知数,整体地求解它们最优值的一种优化方法^[10]。

假设空间分布 n 个测量位置,每个测量位置下摄像机视场中有 $m_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 个全局控制点,针对某一测量位置 i ,将光束平差过程需要求解的未知数分为三类:

- 1) 摄像机外参数: $X_{Si}, Y_{Si}, Z_{Si}, \varphi_i, \omega_i, \kappa_i$;
- 2) 摄像机内参数: $f_i, C_{xi}, C_{yi}, k_{1i}, k_{2i}, k_{3i}, P_{1i}, P_{2i}, b_{1i}, b_{2i}$;
- 3) 全局控制点空间三维坐标: $X_j, Y_j, Z_j (j = 1, 2, \dots, m_i)$;

由此可知,在位置 i 下需要求解的未知数的个数为 $6 + 10 + 3m_i$ 。

由于摄像机的内参数在测量之前调整好,而在测量过程中不再改变,因此可认为摄像机的内参数是固定值。因此所有测站中需要解算的未知数的总数为

$$\sum_{i=1}^n (6 + 3m_i) + 10 = 6n + \sum_{i=1}^n 3m_i + 10. \quad (3)$$

由(3)式可知,在测量位置 i 下,每个控制点提供两个约束方程,即方程数为 $2m_i$,所有测量位置下的总

方程数为 $\sum_{i=1}^n 2m_i$ 。因此,理论上 m, n 满足

$$\sum_{i=1}^n 2m_i > 6n + \sum_{i=1}^n 3m_i + 10, \quad (4)$$

便可解算出精确的全局控制点空间三维坐标,同时也可解算出精确的摄像机内、外参数。

光束平差过程是一个迭代优化的过程,即存在观测值的改正数 (v_x, v_y) 和近似值的改正数 (d_x, d_y) ,它们之间的关系为

$$\begin{aligned} x + v_x &= x_0 - \Delta x + \\ f \frac{r_1(X - X_S) + r_4(Y - Y_S) + r_7(Z - Z_S)}{r_3(X - X_S) + r_6(Y - Y_S) + r_9(Z - Z_S)} + d_x, \\ y + v_y &= y_0 - \Delta y + \\ f \frac{r_2(X - X_S) + r_5(Y - Y_S) + r_8(Z - Z_S)}{r_3(X - X_S) + r_6(Y - Y_S) + r_9(Z - Z_S)} + d_y, \end{aligned} \quad (5)$$

式中 (d_x, d_y) 是像点坐标 (x, y) 对所有未知变量的全微分。

由所有测站下所有全局控制点确定的共线条件方程组成一个超大规模非线性方程组,通过求解该方程组的最优化问题,便可获得全局控制点精确的

空间三维坐标。

光束平差迭代过程的启动需要提供一个的迭代初值,且初值的选取要合适,要使解出的最优解是全局最优解。在全局控制点精密定位方法中,全局控制点的自动检测和精确配准过程正是寻找平差迭代初值的过程。

3 全局控制点的精密定位

由全局控制点精密定位的基本原理可知,需要每个全局控制点在各测站下的图像坐标作为已知参数,且需要找出合适的迭代初值,才能求解平差方程。因此,需精确提取各测站图像中全局控制点的定位中心和正确识别对应于同一物点的像点集来保证平差方程的正确求解。在完成这两个工作的前提下,可以利用双目视觉原理,解出粗略的两两测站间的姿态和全局控制点的三维坐标。然后将它们统一到世界坐标系下,便得到了平差迭代初值,结合全局控制点的图像坐标,便能够求解平差方程。

3.1 全局控制点的设计

为了实现非编码点的自动配准,需要全局控制点自身携带标识信息,即给全局控制点编码^[11]。但在实际测量中,需要的全局控制点数量很多,如果将全部全局控制点均设计成编码点,则需要的编码容量非常大。考虑到编码点识别的难易度,在增加编码容量的同时需要增大编码点的尺寸。尺寸过大的编码点粘贴过程中容易变形,影响定位精度,不会在三维形貌测量中遮挡被测信息。可见,编码点尺寸的限制,使编码点的容量达不到实际测量时的要求。因此需将全局控制点设计成非编码点和编码点两种,采用大量非编码点与少量编码点配合使用的方案。设计的非编码点与编码点的形状与尺寸如图 2 所示,其中编码点编码容量为 106,尺寸单位为 mm。

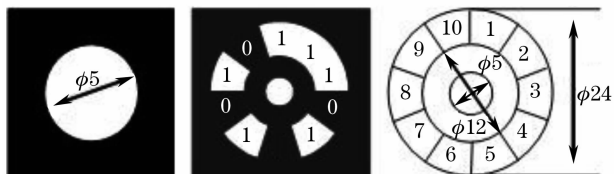


图 2 非编码点与编码点示意图

Fig. 2 Schematic of uncoded target point and coded target point

3.2 全局控制点的自动检测

全局控制点的自动检测包括两方面的工作:非编码点定位中心的精确提取,编码点编码值的正确识别。

3.2.1 定位中心的精确提取

定位中心的高精度提取涉及亚像素图像处理技术,是决定全局控制点定位精度的关键。质心法、基于灰度相关匹配法和基于边缘拟合法是三种有效的亚像素图像处理算法。其中质心法较其他方法具有算法直观、计算简单,对于图像特征的区域划分比较敏感的特点,其算法的实现如下式所示:

$$X_m = \frac{\sum_N X_i P_i}{\sum_N P_i}, \quad (6)$$

$$Y_m = \frac{\sum_N Y_i P_i}{\sum_N P_i},$$

式中 X_i, Y_i 为像素坐标, P_i 为像素灰度, N 为有效特征区域内的像素数。

在全局控制点精密定位中,全局控制点的形状和尺寸预先设计好,结合特定的场景控制手段,能够使待处理的图像特征具有很好的图像质量和图像预定模式。在这种情况下,采用质心法提取全局控制点的定位中心,不但简单直观,且能够得到很高的提取精度。

3.2.2 编码值的自动识别

编码值的自动识别基于 Blob 分析算法实现。Blob 分析算法是能够提取图像中像素连通区域的一种算法,能获得图像中前景连通区域的位置、周长、面积等基本信息。

如图 3 所示,利用 Blob 算法获得编码点中心定位圆的面积 S 和编码弧段面积 S_c ,通过 S_c 与 S 相比得到比值 θ ,将 θ 与预先设计好的编码段面积与定位中心面积的比值 θ_0 比较,便可判断出各编码段所占 1 的位数;另外可以计算相邻两个编码段之间的空白段对应的圆心角 α ,同样地将 α 与预先设计值 α_0 比较,能够判断出非编码段所占的 0 的位数。判断出所有编码段所占 1 的位数和彼此之间的空位所占 0 的位数,便获得了整个编码点的编码值。

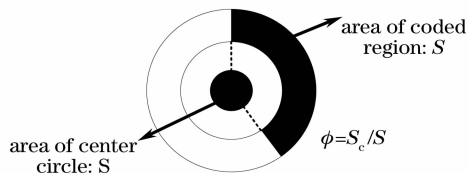


图 3 编码值识别

Fig. 3 Identification of coding value

在实际测量时,由于摄像机光轴与被测物表面法线存在很大的夹角,导致全局控制点的图像产生较大变形,如图 4 所示。

由图 4 可见,图像特征的信息与预先设计好的值产生较大变化,导致编码点编码值的识别具有很

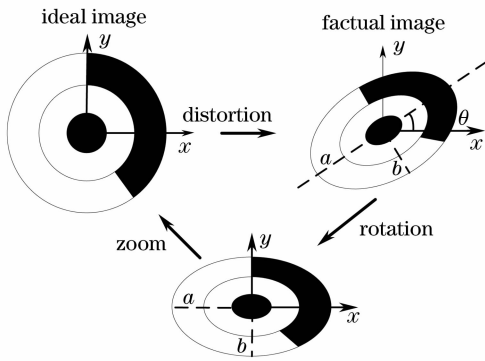


图4 编码点变形

Fig. 4 Distortion of coding points

大的错误识别率。因此采用椭圆拟合技术来解决,在变形后的椭圆圆周上取三点的图像坐标,利用牛顿法求解出椭圆参数 a, b 和 θ :

$$\frac{[(x-x_0)\cos\theta-(y-y_0)\sin\theta]^2}{a^2} + \frac{[(x-x_0)\sin\theta-(y-y_0)\cos\theta]^2}{b^2} = 1, \quad (7)$$

式中 a 为长轴, b 为短轴, θ 表示长轴与像面坐标系 x 轴的夹角; (x, y) 为椭圆圆周点的坐标, (x_0, y_0) 为椭圆中心坐标。

如图4所示,在获得椭圆参数 a, b 和 θ 后,利用图像旋转和图像缩放操作将实拍图像向理想图像方向还原。实验中编码点局部区域图像校正的结果如图5所示,经过校正后,编码点图像质量得到了很大改善,大大提高了编码点的正确识别率。

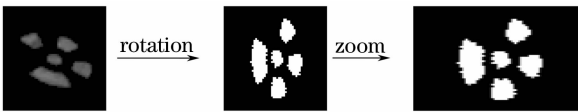


图5 编码点图像校正结果

Fig. 5 Calibration result of coded points

3.2 非编码点自动精确配准

在全球控制点定位中心精确提取的基础上,需要实现非编码点完全正确配准^[12]。错误的匹配点集会导致平差方程混乱,影响全局控制点三维坐标的解算精度,严重的会导致平差过程不收敛,得不到解算结果。因此,实现非编码点的精确配准是全球控制点精确定位的关键环节。

利用对极几何约束实现图像对间同名点^[13]的匹配是一种简单有效的手段^[14],对极几何关系为

$$\mathbf{m}'^T \mathbf{F} \mathbf{m} = 0, \quad (8)$$

式中 \mathbf{m} 和 \mathbf{m}' 为像点的齐次坐标, \mathbf{F} 为一个 3×3 的奇异矩阵,称为基本矩阵。

首先利用图像对中出现的公共编码点实现两测

站的粗定向,求解基本矩阵 \mathbf{F} ,然后利用(8)式寻找图像对中的匹配点集。

由于利用测站粗定向求解出的基本矩阵 \mathbf{F} 不精确,利用(8)式获得的匹配结果存在较多误匹配。采用三幅图像二次配准技术提高非编码点的正确匹配率,实现非编码点的精确配准。实验中非编码点的配准结果如表1所示。

表1 匹配结果

Table 1 Results of registration

Total points: 58	Epipolar geometric	Three images
Correct registration points	27	57
Correct registration rate /%	46.55	98.28

4 实验

实验中使用的摄像机为 Kodak dcsp14n, Nikon24mm 镜头,结合 SIGMA EM-140DG 微距闪光灯进行拍摄场景的光照控制,被测物为汽车白车身前盖覆盖件,为约 $1.3 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ 的自由曲面。

由于被测物为白色金属,反光现象明显。在测量之前需要在被测物表面均匀喷上显影粉,使背景在图像中具有较低且均匀的灰度分布,然后将非编码点散乱且均匀地粘贴在被测物表面,将编码点均匀穿插在非编码点之间。

实验中采用全局控制点之间的距离评价测量精度。以电子经纬仪 T1800(测量范围大于 $10 \text{ m} \times 10 \text{ m} \times 10 \text{ m}$,测量精度高于 0.03 mm/m)的测量结果作为全局控制点三维坐标的真值。相关结果如表2所示,其中 D 为经纬仪所测的真值之间的距离, D' 为精密定位方法测量值之间的距离,偏差 Δ 为测量距离 D' 与真值距离 D 的差值, δ 为偏差 Δ 与真值距离 D 的比值。

表2的数据表明,本文提出的全局控制点精密定位方法可实现相对测量精度 0.073% 。

表2 距离偏差对比

Table 2 Comparison of distance deviation

	D/mm	D'/mm	Δ/mm	$\delta/\%$
D_{1-2}	243.7525	243.7699	0.0174	0.0071
D_{2-3}	201.0442	200.8973	-0.1469	-0.0731
D_{3-4}	199.8344	199.7971	-0.0373	-0.0187
D_{4-5}	297.3139	297.5306	0.2167	0.0729
D_{5-6}	913.5351	913.7973	0.2622	0.0287
D_{6-7}	206.0019	206.0017	-0.0002	-0.0001
D_{7-8}	196.7355	196.6661	-0.0694	-0.0353

(续表)

	D / mm	D' / mm	Δ / mm	$\delta / \%$
D_{8-9}	221.8304	221.9143	0.0839	0.0378
D_{9-10}	202.5694	202.5771	0.0077	0.0038
D_{10-11}	185.2392	185.1240	-0.1152	-0.0622
D_{11-12}	1053.5737	1053.6458	0.0721	0.0068
D_{12-13}	230.5466	230.5581	0.0115	0.0050
D_{13-14}	367.1583	367.2152	0.0569	0.0155
D_{14-15}	206.3534	206.4861	0.1327	0.0643
D_{15-16}	744.2273	744.4396	0.2123	0.0285
D_{16-17}	225.6486	225.5986	-0.0500	-0.0222
D_{17-18}	217.0688	217.1841	0.1153	0.0531
D_{18-19}	200.7610	200.8649	0.1039	0.0518
D_{19-20}	356.3666	356.4181	0.0515	0.0145
D_{20-1}	1045.3919	1045.4636	0.0717	0.0069

5 结 论

提出了一种实现大尺寸空间内控制点精密定位的方法,并进行了大量实验。实验结果表明,本文提出的全局控制点精密定位的方法方案合理、原理正确、精度高,能够从根本上解决大尺寸物体三维形貌测量中单元数据的拼接精度问题。

参 考 文 献

- Ding Wanshan, Liu Yan. Optical measurement of object's surface three-dimensional shape in water [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(1): 58~62
丁万山,刘 艳. 水中物体的光学三维形貌测量的研究[J]. *光学学报*, 2007, **27**(1): 58~62
- Wu Bin. Study on several key techniques of near-infrared spectroscopy analysis[D]. Tianjin: Tianjin University, 2002. 1~9
吴 斌. 大型物体三维形貌数字化测量关键技术研究[D]. 天津: 天津大学, 2002. 1~9
- Li Wansong, Su Likun, Su Xianyu. Phase-measuring profilometry in big scale measurement[J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(6): 792~796
李万松,苏礼坤,苏显渝. 相位检测面形术在大尺度三维面形测量中的应用[J]. *光学学报*, 2000, **20**(6): 792~796
- Ding Yabin, Peng Xiang, Tian Jindong et al.. Pose estimation of multiple viewpoints for three-dimensional digital imaging system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(3): 451~456
丁雅斌,彭 翔,田劲东等. 一种三维数字成像系统的多视点姿态估计方法[J]. *光学学报*, 2007, **27**(3): 451~456

- Ren Tongqun. The study on high-accuracy mosaic for large 3D free-form measurement [D]. Tianjin: Tianjin University, 2008. 12~13, 70~72
任同群. 大型 3D 形貌测量高精度拼接方法与技术研究[D]. 天津: 天津大学, 2008. 12~13, 70~72
- Deng Wenyi, Sang Xinzhu, Dong Mingli et al.. 3-D connection application in the large scale vision measurement [J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2002, **13**(11): 1145~1147
邓文怡,桑新柱,董明利等. 三维拼接在大尺寸视觉测量中的应用[J]. *光电子 • 激光*, 2002, **13**(11): 1145~1147
- Sun Gang, Li Mingzhe, Fu Wenzhi et al.. Image integration in measurement of 3D freedom surface [J]. *Transaction of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2005, **36**(3): 122~125
孙 刚,李明哲,付文智等. 三维自由曲面测量中的图像拼接[J]. *农业机械学报*, 2005, **36**(3): 122~125
- Wang Jun, Lü Naiguang, Deng Wenyi et al.. Application of various constraints in videogrammetry for the profile of gossamer inflatable spacecraft antenna [J]. *J. Beijing Institute of Machinery*, 2007, **22**(2): 13~16
王 君,吕乃光,邓文怡等. 多约束条件在薄膜充气天线面形测量中的应用[J]. *北京机械工业学院学报*, 2007, **22**(2): 13~16
- Zhu Jigui, Ye Shenghua. Industrial field visual inspection technique based on digital close range photogrammetry [J]. *Geospatial Information*, 2004, **2**(6): 11~14
郝继贵,叶声华. 工业现场近景数字摄影视觉精密测量[J]. *地理空间信息*, 2004, **2**(6): 11~14
- Feng Wanhao. Close Range Photogrammetry [M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2002. 11~14
冯文灏. 近景摄影测量[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2002. 124~125
- Ma Yangbiao, Zhong Yuexian, Zheng Ling et al.. Design and recognition of coded targets for 3-D registration [J]. *J. Qinghua University of Science and Technology*, 2006, **46**(2): 169~171
马扬彪,钟约先,郑 聆等. 三维火速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
- Liu Guixi, Liu Dongmei, Liu Fengpeng et al.. A robust image registration algorithm based on feature points matching [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(3): 454~461
刘贵喜,刘冬梅,刘凤鹏等. 一种稳健的特征点配准算法[J]. *光学学报*, 2008, **28**(3): 454~461
- Li Haibin, Zhang Qiang. A new stereo matching algorithm based on sub-line segment [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(5): 907~912
李海滨,张 强. 一种新的基于子线段的立体匹配算法[J]. *光学学报*, 2007, **27**(5): 907~912
- Yang Min, Shen Chunlin. Study on scene matching based on epipolar geometric constraint [J]. *J. Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2004, **36**(2): 235~239
杨 敏,沈春林. 基于对极几何约束的景象匹配研究[J]. *南京航空航天大学学报*, 2004, **36**(2): 235~239