

基于去离群点策略提高目标位姿测量精度

赵汝进^{1,2} 张启衡¹ 左颢睿^{1,2} 徐 勇^{1,2}

(¹ 中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209; ² 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要 针对在单目视觉目标位姿测量过程中,特征点提取出现离群点的情况,提出一种基于去除离群点策略的位姿测量方法(ORPE)。建立了以特征点误差极大极小为原则的最优化目标函数,通过确定特征点最大观测误差值边界,判定并去除离群点,由此可消除离群点误差对位姿测量的影响。仿真实验使用 ORPE 对 $1\text{ m}\times 1\text{ m}\times 1\text{ m}$ 的立方体目标进行位姿测量,验证了算法的正确性;使用 ORPE 测量 Boeing 飞机模型的位姿,平均姿态角误差 2.07° , 平均位移误差 1.6% 。通过和最小二乘测姿法(LSPE)结果对比分析可得 ORPE 法误差小于 LSPE 法误差。表明 ORPE 能有效去除离群点,同时提高位姿测量精度。

关键词 机器视觉; 位姿; 单目视觉; 离群点; N 点透视

中图分类号 TP39 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20092909.2463

A Method of Improving the Measuring Accuracy of the Pose of Targets Based on Outliers-Removal

Zhao Rujin^{1,2} Zhang Qiheng¹ Zuo Haorui^{1,2} Xu Yong^{1,2}

(¹ Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China)

² Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China

Abstract Based on the circumstance that the outliers appear sometimes when the pose of target is measured by mono-vision method, a new method is presented for estimating the pose (position & attitude) based on outliers-removal (ORPE). The optimization function is established based on the principle of max-min error. Then the outliers can be detected and removed through eliminating frontier of maximum error. Furthermore the impact of outliers' error on the accuracy of pose estimation can be eliminated. The pose of $1\text{ m}\times 1\text{ m}\times 1\text{ m}$ cube target is measured by ORPE, which proves the validity of the algorithm. The pose of Boeing plane model is measured by ORPE. As a result, the average attitude error is 2.07° , and the average position error is 1.6% . Comparatively, the average error of ORPE is less than the one of the least-square pose estimation (LSPE) method. Consequently, it's demonstrated that ORPE can do outliers-removal effectively, and improve the accuracy of pose estimation simultaneously.

Key words machine vision; pose; mono-vision; outlier; perspective-N-points

1 引 言

空间目标三维位姿参数是反映目标运动状态的重要参数。而单目视觉位姿测量技术具有结构简单,非接触等特点,因此广泛应用于航天器对接,机器人导航,视觉跟踪等领域^[1~8]。由 Fishler 等提出的 N 点透视(PNP)在单目姿态解算方面的重要价值引起人们广泛研究^[6,9~11],它是根据目标上 N 个

特征点在目标坐标系下的三维坐标和对应点在图像坐标系下的二维坐标,求解目标相对于相机的位置与姿态参数。在此基础之上,Lowe 和 Araujo 等先后提出了基于误差平方和最小的位姿求解方法^[10,11],即最小二乘位姿测量法(LSPE)。然而,LSPE 只有在特征点观测误差满足相互独立,并遵循零均值,同方差的正态分布时,才能获得最优解。

收稿日期: 2008-11-28; 收到修改稿日期: 2008-12-16

基金项目: 国家 863 计划高新技术预研课题(2003AA823050)资助项目。

作者简介: 赵汝进(1982—),男,博士研究生,主要从事信号处理与计算机视觉方面的研究。E-mail: zrj0515@163.com

导师简介: 张启衡(1950—),男,研究员,博士生导师,主要从事光电探测,目标识别与跟踪方面的研究。

E-mail: qh Zhang@ioe.ac.cn

在现实测量过程中,特征点误差却远非高斯分布,尤其当某些离群特征点观测误差远大于其他特征点观测误差时,LSPE 结果无疑将受重大影响。文献[12]将误差的极大极小(MM)最优化方法引入了摄影测量领域,然而却未考虑离群点的去除方法。在此基础上,文献[13]研究了基于 MM 的目标位置、姿态两步解算方法,并设想利用 MM 去除离群特征点,但未提出去除离群点的具体策略,也没有对去离群点效果进行实验验证。

针对目标特征点提取过程中出现离群点的情况,研究了以 MM 准则下的最优化函数,并提出一种基于去除离群点策略的位姿测量方法(ORPE)。与文献[13]中两步求解位置、姿态的方法不同,ORPE 同时求解目标位置、姿态,并研究了去离群点具体策略,利用最大误差边界消除了离群点误差对位姿测量的影响,从而达到提高测量精度的目的。仿真实验表明了方法的正确性和有效性。

2 坐标系定义及成像模型描述

在目标上固联原点为 o_t 的目标坐标系 $o_t x_t y_t z_t$,如图 1 所示。 p_{itch} , y_{aw} , r_{oll} 分别为目标绕三坐标轴的旋转角;以相机光心为原点建立相机坐标系 $o_c x_c y_c z_c$, $o_c z_c$ 与相机主光轴重合; $o_p uv$ 为二维图像坐标系, u , v 表示图像横坐标和纵坐标,且分别平行于 $o_c y_c$ 和 $o_c z_c$ 。图 1 中目标特征点 (Feature Point) 经过透视投影在像平面 (image plane) 成像,位姿测量就是根据特征点对应关系解算目标坐标系和相机坐标系之间的相对位移 \mathbf{T} 和姿态角 $\boldsymbol{\theta}$ 。其中 $\mathbf{T}=[t_1, t_2, t_3]^T$ 为平移向量表示目标在 x_c, y_c, z_c 3 个方向的空间位移, $\boldsymbol{\theta}=[p_{itch}, y_{aw}, r_{oll}]^T$ 为姿态角向量,表示目标绕三坐标轴的旋转角。

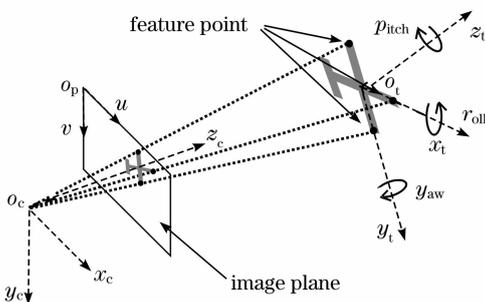


图 1 坐标系和目标位姿定义

Fig. 1 Definition of reference frame and object pose

已知目标特征点 p_i 在目标坐标系下坐标为 $\mathbf{C}_i^{ob}=[x_i, y_i, z_i]^T$,其中 $i=1, 2, \dots, n(n \geq 3)$ 。点 p_i 在

相机坐标系下坐标为 $\mathbf{C}_i^{cm}=[x'_i, y'_i, z'_i]^T$, \mathbf{C}_i^{ob} 和 \mathbf{C}_i^{cm} 变换关系为

$$\mathbf{C}_i^{cm} = \mathbf{R}(\boldsymbol{\theta}) \cdot \mathbf{C}_i^{ob} + \mathbf{T} \quad (1)$$

$\mathbf{R}(\boldsymbol{\theta})=[r_1^T, r_2^T, r_3^T]^T$ 为旋转矩阵。相机内参矩

$$\mathbf{K} = \begin{pmatrix} f_u & 0 & u_o \\ 0 & f_v & v_o \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, f_u, f_v \text{ 分别为图像 } u, v \text{ 方向}$$

的尺度因子(由相机焦距和像元尺寸决定), (u_o, v_o) 为图像中心坐标。相机坐标与图像坐标的变换关系为 $u_i - u_o = f_u \frac{x'_i}{z'_i}$, $v_i - v_o = f_v \frac{y'_i}{z'_i}$ 。则到 p_i 从目标坐标系投影到图像坐标系的共线性方程为

$$u_i = f_u \cdot \frac{\mathbf{r}_1^T \cdot \mathbf{C}_i^{ob} + t_1}{\mathbf{r}_3^T \cdot \mathbf{C}_i^{ob} + t_3} + u_o, \quad (2)$$

$$v_i = f_v \cdot \frac{\mathbf{r}_2^T \cdot \mathbf{C}_i^{ob} + t_2}{\mathbf{r}_3^T \cdot \mathbf{C}_i^{ob} + t_3} + v_o. \quad (3)$$

3 位姿解算

为求解目标平移向量 \mathbf{T} 和姿态 $\boldsymbol{\theta}$,基于像面特征点误差平方和最小原则构造目标函数,即 LSPE。

$$(\boldsymbol{\theta}, \mathbf{T}) = \arg \min \| f(\boldsymbol{\theta}, \mathbf{T}) \|^2 =$$

$$\arg \min \sum_{i=1}^n [(\tilde{u}_i - u_i)^2 + (\tilde{v}_i - v_i)^2] \quad (4)$$

$(\tilde{u}_i, \tilde{v}_i)$ 为 p_i 图像坐标的观测值。传统位姿测量中,LSPE 长期以来占据重要地位。然而提取特征点出现离群点时,LSPE 解算结果远非最优解。由此基于 MM 原则构造出了一种去除离群点策略来提高位姿测量精度。建立 MM 最优化函数

$$(\boldsymbol{\theta}, \mathbf{T}) = \arg \min \{ \max_{1 \leq i \leq n} [f_i(\boldsymbol{\theta}, \mathbf{T})] \} =$$

$$\arg \min \{ \max_{1 \leq i \leq n} [(\tilde{u}_i - u_i)^2 + (\tilde{v}_i - v_i)^2] \} \quad (5)$$

利用极大熵法构造 $\max_{1 \leq i \leq n} [f_i(\boldsymbol{\theta}, \mathbf{T})]$ 的光滑近似函数

$$f_q(\boldsymbol{\theta}, \mathbf{T}) = \frac{1}{q} \ln \sum_{i=1}^n e^{f_i(\boldsymbol{\theta}, \mathbf{T})}, \text{ 则有}$$

$$(\boldsymbol{\theta}, \mathbf{T}) = \arg \min [f_q(\boldsymbol{\theta}, \mathbf{T})] \quad (6)$$

当 q 充分大时,根据 Jaynes 极大熵原理^[14]易得出(5)式与(6)式等价。 $f_q(\boldsymbol{\theta}, \mathbf{T})$ 不仅保持了原函数的特性,且将原问题转化为易于求解的可微优化问题。(6)式具体解算过程可参见文献[14, 15]。

根据(5)式估计目标位姿时,离群点的误差明显大于其他特征点误差,所以离群点 p_m 应始终位于最大误差值边界上,即

$$(\tilde{u}_m - u_m)^2 + (\tilde{v}_m - v_m)^2 = \max_{1 \leq i \leq n} [f_i(\boldsymbol{\theta}, \mathbf{T})] \quad (7)$$

最大值边界体现了观测坐标和测量坐标相背离的最大程度。离群点的去除将导致 MM 目标函数极值剧烈下降,反之非离群点去除只会引起函数极值小幅减少。则基于 MM 原则的 ORPE 法为:

1) 利用特征点观测坐标 $(\tilde{u}_i, \tilde{v}_i)$ $i=1, 2 \dots n$ ($n \geq 3$) 以及(5)式和(6)式求解次优 (θ', T') , 由(2)式和(3)式解算测量坐标 (u_i, v_i) , (7)式得到对应具有最大观测误差的特征点 p_m ;

2) 计算
$$\lambda = \frac{\min_{1 \leq i \leq n} \{\max [f_i(\theta', T')]\}}{\min_{1 \leq i \leq n, i \neq m} \{\max [f_i(\theta', T')]\}} = \lambda;$$

3) 若 $\lambda \geq \rho$ (ρ 为预设离群点判定阈值), 判定 p_m 为离群点, 并去除 p_m , 设 $i \neq m$, 返回第 1 步继续检测离群点。反之判定 p_m 不为离群点, 转向第 4 步;

4) 去除离群点后特征点坐标代入(6)式解算最优目标位姿 (θ, T) 。

4 实验与讨论

为了验证算法的正确性和有效性, 仿真实验利用 matlab 平台对 ORPE 进行数学仿真; 利用 Carnegie Mellon 大学开发的三维视景仿真软件 Alice 建立相机成像模型, 并生成 Boeing707 飞机模型在各种位姿下投影图像; 运用 ORPE 和 LSPE 测量 Boeing 位姿, 对结果进行对比分析。

数学仿真中选取目标为 $1 \text{ m} \times 1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ 的立方体, 设定其 8 个顶点为目标特征点。设置虚拟相机焦距为 0.3 m , 像元尺寸为 $20 \mu\text{m} \times 20 \mu\text{m}$, 像面分辨率为 $512 \text{ pixel} \times 512 \text{ pixel}$, 目标成像距离为 $50 \sim 150 \text{ m}$ 。相机对 100 种随机位姿的目标做投影

变换, 成像点坐标受高斯随机噪声干扰, 误差均方差 (S. D.) 为 $0 \sim 4 \text{ pixel}$ 。实际测量中, 阈值 ρ 应该和实际离群点坐标误差相匹配, 才能够有效去除离群点, 离群点误差较大时, ρ 也应随之设置较大。而 ρ 设置过大易造成离群点漏判, ρ 设置过小则易将非离群点误判为离群点。实验中假设离群点坐标误差大于等于 15 pixel , 与之对应设置 $\rho = 10$ 。采用 LSPE 和 ORPE 测量不同噪声和离群点条件下目标姿态角和平移向量误差平均值。其中姿态角误差 θ_{error} 为目标 $p_{\text{pitch}}, y_{\text{aw}}, r_{\text{roll}}$ 3 旋转角误差的均方根值, 单位为 $(^\circ)$ 。平移向量误差 T_{error} 为相对误差, 即空间 x, y, z , 3 个方向位移误差与目标成像距离的比值的均方根, 单位为 $\%$ 。

如图 2 为当 8 个成像点中出现 1 个离群点时, 不同噪声情况下位姿测量结果。在噪声均方差较小时, ORPE 精度明显优于 LSPE, 表明 ORPE 有效消除了离群点误差对位姿测量影响。最终 ORPE 结果 $\theta_{\text{error}} \leq 2^\circ, T_{\text{error}} \leq 0.6\%$, 在不同噪声条件下具有较高位姿测量精度。

成像点坐标噪声均方差固定为 2 pixel , 随着离群点数量不同位姿测量结果如图 3 所示。随着离群点数量增大, LSPE 受离群点影响越发严重, 误差随之增大; 而 ORPE 测量误差并没有随着离群点增多而显著增大, 进一步说明 ORPE 有效去除了离群点, 从而提高了位姿测量精度。最终 ORPE 结果 $\theta_{\text{error}} \leq 1.3^\circ, T_{\text{error}} \leq 0.9\%$, 表明随着离群点数量增大, ORPE 亦具有较高位姿测量精度。

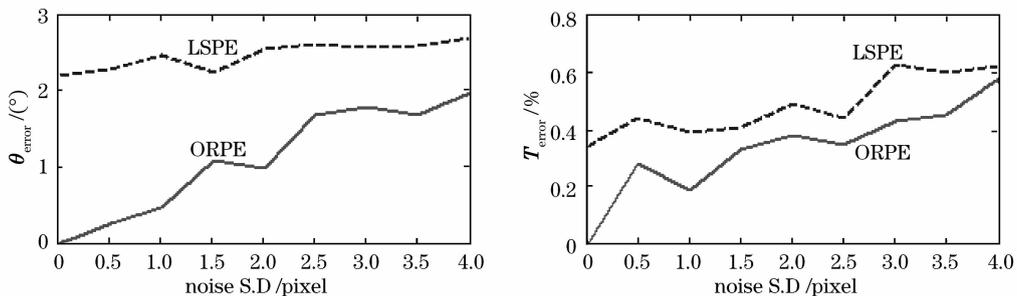


图 2 各种噪声条件下位姿测量结果

Fig. 2 Results of pose estimation of object with different noise

利用 Alice 生成 Boeing707 模型在各种位姿下投影图像。选定飞机各个特征部位(机翼, 机头), 如图 4(a)中方框所示。并提取特征点 $\tilde{p}_1 \sim \tilde{p}_5$, 针对机头部位, 图 4(f)中, 十字标示为机头部位附近的角点, 取靠近窗口中心的角点为特征点 \tilde{p}_5 (圆圈标示); 针对机翼特征部位, 图 4(b)~(e)中, 利用

Hough 变换检测边缘直线, 提取机翼边缘符合直线特征的像素点, 拟合直线交点即为特征点 $\tilde{p}_1 \sim \tilde{p}_4$ (圆圈标示)。由图 4(a), (d)可以看出, 由于直线检测错误造成 \tilde{p}_3 和特征点真实位置 p_3 之间存在较大误差, 即 \tilde{p}_3 为离群点。

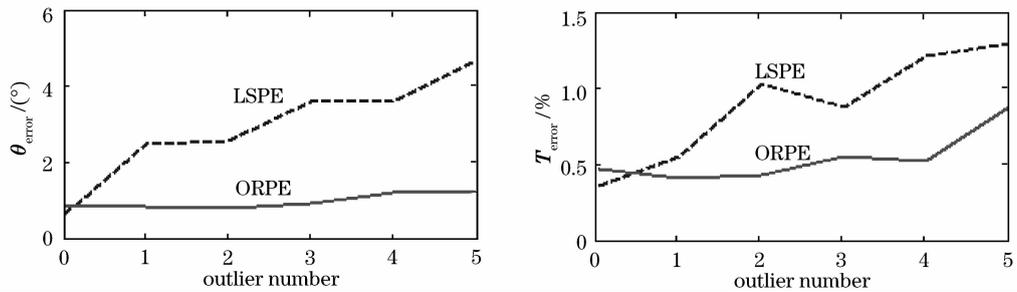
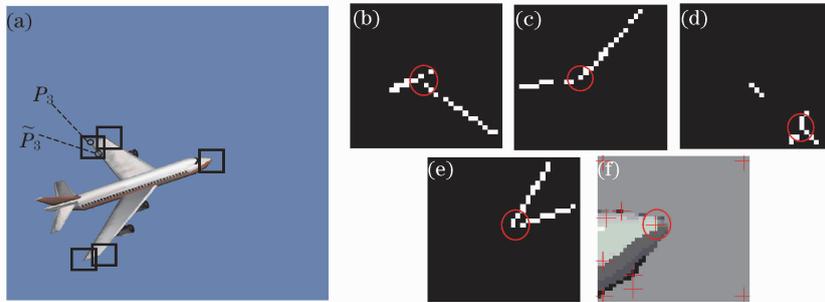


图3 离群点数量不同时位姿测量结果

Fig. 3 Results of pose estimation of object with different outlier numbers

图4 提取 Boeing 特征点 $\tilde{p}_1 \sim \tilde{p}_5$, (a)目标各特征部位, (b) \tilde{p}_1 , (c) \tilde{p}_2 , (d) \tilde{p}_3 , (e) \tilde{p}_4 , (f) \tilde{p}_5 Fig. 4 Detection of Boeing feature points $\tilde{p}_1 \sim \tilde{p}_5$, (a)feature parts of Boeing, (b) \tilde{p}_1 , (c) \tilde{p}_2 , (d) \tilde{p}_3 , (e) \tilde{p}_4 , (f) \tilde{p}_5

由于离群点 \tilde{p}_3 的影响最终的位姿测量精度,此时采用 LSPE 并不能获得最优位姿解,反而测量结果误差较大。而 ORPE 有效判定并去除离群点 \tilde{p}_3 ,消除了 \tilde{p}_3 误差对测量结果的影响,从而提高位姿解算精度。如表 1 所示,ORPE 法平均姿态角误差 2.07° ,平均位移误差 1.6% 。表 1 中 Boeing 在 $\theta = (30, -20, -15)^\circ$, $T = (7, 3, 1500)$ m 时,LSPE

和 ORPE 的 T_{error} 结果接近,这主要因为 ORPE 虽然能有效去除离群点 \tilde{p}_3 ,但是此时 Boeing 位姿测量结果不仅受到 \tilde{p}_3 的影响,还受到其他特征点检测误差的影响,所以在仅去除 \tilde{p}_3 的情况下 T_{error} 改善不明显。在今后的研究中,可进一步优化阈值 ρ 的设置,提高检测离群点的灵敏度,以期进一步去除其他具有较大误差特征点对位姿测量的影响。

表 1 Boeing 位姿测量结果

Table 1 Result of pose estimation of Boeing

Real pose		ORPE		LSPE	
$\theta / (^\circ)$	T / m	$\theta_{\text{error}} / (^\circ)$	$T_{\text{error}} / \%$	$\theta_{\text{error}} / (^\circ)$	$T_{\text{error}} / \%$
$[-20, 30, 40]$	$[-5, 5, 1300]$	1.68	0.5	2.07	1.7
$[-30, 50, 20]$	$[-8, 3, 1500]$	2.08	2.4	2.22	2.8
$[30, -20, -15]$	$[7, 3, 1500]$	2.30	1.3	3.25	1.4
$[20, 30, 30]$	$[5, 5, 1500]$	2.23	2.2	3.87	2.7

5 结 论

研究了一种 MM 原则下通过去除离群点来提高位姿测量精度的方法 ORPE。该方法在离群点出现情况下,能有效消除离群点误差对测量结果影响,弥补了传统 LSPE 法易受离群点误差影响的不足。仿真实验对 ORPE 正确性和有效性进行了验证,并和 LSPE 结果进行了比较和分析,当 Boeing 目标存在 1 个离群点时,ORPE 测量平均姿态角误差 2.07° ,平均位移误差 1.6% 。表明 ORPE 通过去除

离群点,有效提高了位姿测量精度。

参 考 文 献

- 1 Wang Xiangjun, Wang Yan, Li Zhi. Fast target recognition and tracking method based on characteristic corner [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, 27(2):360~364
王向军,王 研,李 智.基于特征角点的目标跟踪和快速识别算法研究[J]. *光学学报*, 2007, 27(2):360~364
- 2 Shen Yehu, Liu Jilin, Du Xin. Simultaneous three-dimensional environment reconstruction and localization based on monocular vision [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(5):907~914
沈晔湖,刘济林,杜 歆.单目视觉的同时三维场景构建和定位

- 算法[J]. 光学学报, 2008, **28**(5):907~914
- 3 Lei Yanzhang, Zhao Huijie, Jiang Hongzhi. A three-dimensional measurement method by combining binocular and monocular vision systems[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(7):1338~1342
- 雷彦章, 赵慧洁, 姜宏志. 一种单双目视觉系统结合的三维测量方法[J]. 光学学报, 2008, **28**(7):1338~1342
- 4 Li Junbao, Pan Jengshyang. A novel pose and illumination robust face recognition with a single training image per person algorithm [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2008, **6**(4):255~257
- 5 Lu Junyun, Li Qinhui, Jiang Hua. Measure method of the attitude of UAV based on the optical image[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, **37**(1):102~105
- 陆钧响, 李庆辉, 姜 华. 基于光测图像的无人机姿态测量方法[J]. 红外与激光工程, 2008, **37**(1):102~105
- 6 Wu Fuchao, Hu Zhanyi. A Note on the P5P problem with an uncalibrated camera[J]. *Chinese Journal of Computers*, 2001, **24**(11):1321~1326
- 吴福朝, 胡占义. 摄像机未标定的 P5P 问题研究[J]. 计算机学报, 2001, **24**(11):1321~1326
- 7 Yu Qifeng, Sun Xiangyi, Qiu Zhiqiang. Approach of determination of object's 3D pose from mono-view [J]. *Optical Technique*, 2002, **28**(1):77~82
- 于其峰, 孙祥一, 邱志强. 从单站光测图像确定空间目标三维姿态[J]. 光学技术, 2002, **28**(1):77~82
- 8 Wu Qingyang, Li Jingzhan, Su Xianyu *et al.*. An approach for calibrating rator position of three-dimensional measurement system for line-structure light [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(8):1224~1227
- 吴庆阳, 李景镇, 苏显渝 等. 线结构光三维测量系统中旋转轴的标定方法[J]. 中国激光, 2008, **35**(8):1224~1227
- 9 M. A. Fishler, R. C. Bolles. Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography [J]. *Communications of the ACM*, 1981, **24**(6):381~395
- 10 D. G. Lowe. Fitting parameterized three-dimensional models to images [J]. *IEEE Trans. On Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1991, **13**(5):441~450
- 11 H. Araujo, R. Carceroni, C. Brown. A fully projective formulation for Lowe's tracking algorithm[J]. *Technical Report 641, Univ. of Rochester*, 1996
- 12 R. I. Hartley, F. Schaffalitzky. L_{∞} minimization in geometric reconstruction problems [C]. *Conference of Computer Vision and Pattern Recognition*, 2004, **1**:504~509
- 13 X. Zhang. Pose estimation using L_{∞} [C]. *Image and Vision Computing New Zealand*, 2005
- 14 Templeman A B, L i Xingsi. A maximum entropy approach to constrained nonlinear programming [J]. *Opt. Eng.*, 1987, **12**:191~205
- 15 Tian Yixiang, Chen Huafu. An effective algorithm for nonlinear constraint max-min problems [J]. *Journal of University of Electronic Science and Technology of China*, 2001, **30**(3):316~319
- 田益祥, 陈华富. 非线性极大极小问题的一个有效算法[J]. 电子科技大学学报, 2001, **30**(3):316~319