

自主车辆视觉系统的摄像机动态自标定算法

马琳, 郑南宁, 李青, 程洪

(西安交通大学电子与信息工程学院, 710049, 西安)

摘要: 为了解决自主车辆视觉传感器在姿态变化后摄像机旋转外参数的在线自标定问题, 提出了一种利用道路图像消失点相对不变量的摄像机旋转外参数的动态自标定算法. 它首先从汽车采集到的道路视频序列中实时分析道路消失点, 然后依据中心极限定理并使用相应的统计量, 动态地估计主消失点与消失线参数, 最后利用小孔成像模型下的消失线与消失点方程, 解析地求得对应于当前统计特征的摄像机外部参数动态解. 实验结果表明, 在摄像机进行姿态调整后, 实验系统使用本算法可在不超过 90 帧有效图像样本的基础上, 能对摄像机旋转外参数进行精确标定, 使旋转外参数的绝对误差值收敛于 0.001 rad 的误差带之内.

关键词: 摄像机; 自标定; 消失点; 视觉传感器; 自主车辆

中图分类号: TP391 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253 987X(2005)10 1072 05

Dynamic Approach of Camera Auto-Calibration for Vision System on Autonomous Vehicle

Ma Lin, Zheng Nanning, Li Qing, Cheng Hong

(School of Electronics and Information Engineering, Xi an Jiaotong University, Xi an 710049, China)

Abstract: A dynamic auto-calibration approach using relevant invariant of vanishing points in the road image was presented in order to solve the on-line auto-calibration problem of extrinsic camera rotation parameters after the autonomous vehicle changes the pose of the vision sensors. Firstly the vanishing point was analyzed in real time from the road video sequence collected by the car, then the main vanishing point and vanishing line were dynamically estimated according to the central limit theorem and using the corresponding statistic, and finally the dynamic solution that corresponds to camera extrinsic parameters of the current statistical characteristics was obtained by analytically solving the vanishing point and line equations with the pinhole imaging model. The experiment shows that after adjusting the pose of the camera, this algorithm can precisely calibrate the extrinsic rotation parameters within ninety frames and the absolute error of extrinsic rotation parameters is less than 0.001 rad.

Keywords: camera; self-calibration; vanishing point; vision sensor; autonomous vehicle

摄像机标定是计算机视觉系统实现三维重构的重要步骤, 受到了学者们的广泛关注. 同时, 主动视觉系统因具有高度灵活和注意力集中的特点, 受到许多自主车辆研究组的青睐^[1-4]. 主动视觉系统在应用于自主车辆时遇到的主要问题之一是, 视觉传感器在调整视野后, 其外参数如何快速标定、更新.

传统标定方法^[5,6]适用于特定场景或特定运动情形, 它对场景任意、摄像机运动未知的一般情形是无能为力的. 近年来已研究出几种典型方法, 以弥补传统方法的不足^[7-12], 但却遇到了难以求解 Krupper 方程的问题.

实际上, 由于使用了定焦镜头的自主车辆主动

视觉问题,其摄像机内参数一次标定后不再变化,所以只需要考虑外参数的快速标定.Wang^[13] 依此思路提出了一种快速标定方法,但该方法必须使用预设标定点,不便于应用.

另有一些方法考虑用道路消失点来标定摄像机外参数^[14-16],但它们要求提供特定的场地条件,Todd^[17] 使用车流统计量分析消失点进行摄像机标定,但是该方法依赖于摄像机位置信息,所以只能适用于监控场合.

涉及自主车辆主动视觉系统旋转问题的参数主要是刚体转动的 3 个欧拉角,即侧倾角、俯仰角和旋转角^[18,19].据此,本文提出了一种动态自标定算法,该算法在主动视觉系统姿态调整过程结束后,通过实时估计道路消失点和地平线消失线,可快速地解出摄像机旋转参数.

1 摄像机标定算法

1.1 摄像机模型

小孔成像模型(后投影模型)^[18] 下的车体坐标系像平面坐标系的几何关系如图 1 所示.车体坐标系 $OXYZ$ 的 Y 轴为车体运动方向,摄像机坐标系 $oxyz$ 的原点在镜头中心.地面上任意点的车体坐标 $[X, Y, 0]^T$ 的图像坐标为 $[c, r]^T$ ^[19],无失真像平面 xy 平行于 xy 平面,原点 o 位于 $[0, 0, -f]$ 之处.

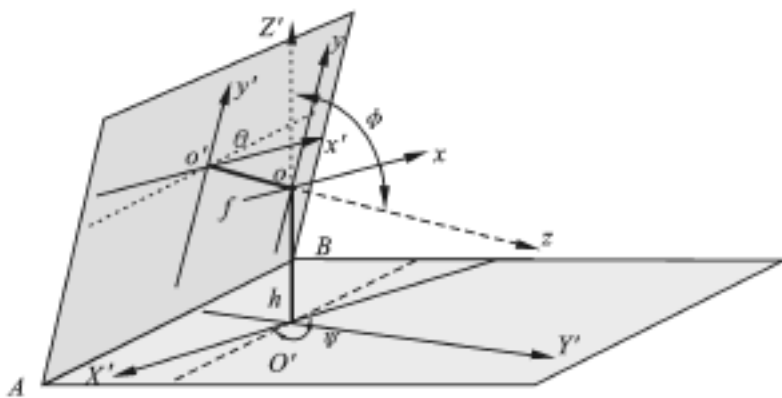


图 1 摄像机小孔成像模型(后投影模型)下的车体像平面几何关系

1.2 本征消失点与消失线方向的估计

道路切线一般不平行于摄像机平面,设它在图像平面上通过消失点 $\mathbf{w}_k = [c_k, r_k]^T$,且与 Y 轴的夹角为向量 $\mathbf{k} = [h_k, v_k]^T$,其中 h_k 和 v_k 分别为水平分量和垂直分量,均值为 $m_h = 0, m_v = 0$,方差为 $D_h = \sigma_h^2, D_v = \sigma_v^2$.

在满足道路平坦假设的前提下和车辆正常行驶的过程中, \mathbf{k} 主要受到如下 2 类独立随机干扰的影响:

(1) 路面局部凹凸引起车体在竖直方向出现小幅颠簸和振颤,主要作用在 v_k 上,影响 σ_v^2 ;

(2) 各种随机扰动引起的车体横向控制偏差,使车体水平摆动,主要作用在 h_k 上,影响 σ_h^2 .

一般 $\sigma_h^2 \ll \sigma_v^2$,为了便于分析,定义如下随机向量,即

$$\mathbf{n}_k = [n_{hk}, n_{vk}]^T = \frac{1}{n} \sum_{i=k}^{k+n-1} [h_i, v_i] \quad (1)$$

$$\mathbf{w}_k^n = [c_k^n, r_k^n] = \frac{1}{n} \sum_{i=k}^{k+n-1} [c_k, r_k] \quad (2)$$

过光心与 \mathbf{n}_k 同向的直线在数字图像上投影于局部平均消失点 \mathbf{w}_k^n .当摄像机俯仰角接近 $\pi/2$ 时, \mathbf{w}_k^n 与 \mathbf{n}_k 近似同分布.由 h_k 与 v_k 的正交性和独立性可知, n_{hk} 与 n_{vk} 正交且独立.近似地, c_k^n 与 r_k^n 正交且独立.根据中心极限定理,则有

$$f(\mathbf{w}_k^n) = \frac{1}{2\pi \sqrt{|\mathbf{B}|}} \exp\left\{-\frac{1}{2}(\mathbf{w}_k^n)^T \mathbf{B}^{-1} \mathbf{w}_k^n\right\} \quad (3)$$

其中

$$\mathbf{w}_k^n = \mathbf{w}_k - \mathbf{m}_v = \mathbf{w}_k - E(\mathbf{w}_k) \quad (4)$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \text{COV}(c_k^n, c_k^n) & \text{COV}(c_k^n, r_k^n) \\ \text{COV}(r_k^n, c_k^n) & \text{COV}(r_k^n, r_k^n) \end{bmatrix} \quad (5)$$

一般应用,取 $n = 30$ 就能达到足够的逼近精度^[20].因此, \mathbf{w}_k^n 在图像平面上的累积图近似为椭圆形云图,其长轴平行于地平线在数字图像中形成的消失线.

1.2.1 本征消失点的估计 设 $\mathbf{P}_v = [c_v, r_v]^T$ 是 Y 轴在图像上的投影通过的消失点,称为本征消失点,也叫主消失点,可用 \mathbf{w}_k^n 的均值作为 \mathbf{P}_v 点坐标的估计,即

$$\hat{\mathbf{P}}_{vk} = [c_{vk}, r_{vk}] = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \mathbf{w}_i^n \cdot \mathbf{P}_v \quad (6)$$

1.2.2 消失线方向的估计 理想无倾斜角图像坐标系 s, t 如图 2 所示,以图像中心为原点,取 s 轴平

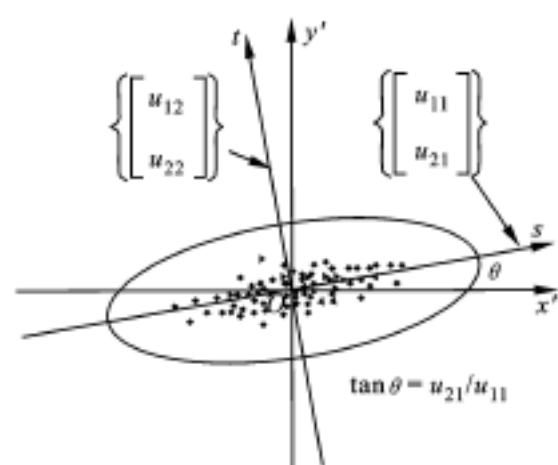


图 2 矩阵 \mathbf{B} 的奇异向量与消失线斜率的关系

行于消失线且与 x 轴的夹角为锐角, t 轴垂直于 s 轴且与 y 轴的夹角为锐角.

若摄像机的倾斜角为 θ , 当图像畸变很小时, 数字图像中消失线斜率即可近似为 $\tan \theta$.

由于 \mathbf{w}^n 二维累计图的长轴与消失线平行, 因此对 \mathbf{B} 进行奇异值分解, 得

$$\mathbf{B} = \mathbf{U} \mathbf{V}^T = \begin{bmatrix} u_{11} & u_{12} \\ u_{21} & u_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{11} & v_{12} \\ v_{21} & v_{22} \end{bmatrix} \quad (7)$$

进而有

$$\tan \theta = u_{21} / u_{11} \quad (8)$$

在实际应用中可近似估计出 $\tan \theta_k$, 以作为消失线在 k 时刻的斜率更新值, 即

$$\tan \theta_k = \frac{\sum_{i=1}^k [(r_i^n - r_{vk}) \text{sign}(c_i^n - c_{vk})]}{\sum_{i=1}^k |c_i^n - c_{vk}|} \quad (9)$$

1.3 旋转矩阵 \mathbf{R} 的确定

1.3.1 使用倾斜角的估计值 θ_k 校正图像坐标 根据式(9)的结果, 可将 $\hat{\mathbf{P}}_{vk}$ 的计算机数字图像坐标 (c_{vk}, r_{vk}) 转换为理想无倾斜角摄像机图像坐标, 即

$$\begin{bmatrix} s_{vk} \\ t_{vk} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_k & -\sin \theta_k \\ \sin \theta_k & \cos \theta_k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -c_{vk} + O_c \\ r_{vk} - O_r \end{bmatrix} \quad (10)$$

1.3.2 俯仰角 θ_k 的求解 如图 3 所示, 主消失点在 $s-t$ 平面上的位置与摄像机的俯仰角 θ_k 之间满足关系

$$\cot \theta_k = -\tan \theta_k = -t_{vk} / f \quad (11)$$

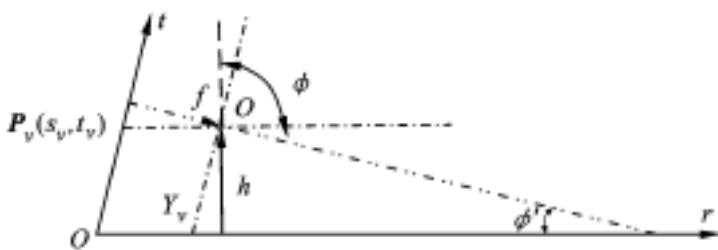


图 3 $\theta = -\theta/2$ 下的俯仰角 θ 的估计

1.3.3 旋转角 θ_k 的求解 假设图像平面与车体坐标系 Y 轴的夹角为 θ_k , 即摄像机的旋转角(如图 1 所示), 则主消失点 \mathbf{P}_v 与 $s-t$ 坐标系的空间位置关系如图 4 所示, 从而可得

$$\tan(\theta_k - \theta) = \frac{s_{vk}}{t_{vk}} = \frac{s_{vk}}{(f^2 + t_{vk}^2)^{1/2}} \quad (12)$$

简单求解式(9)~式(12), 便可得到待标定的旋转外参数, 进而可方便地获得摄像机的旋转变换

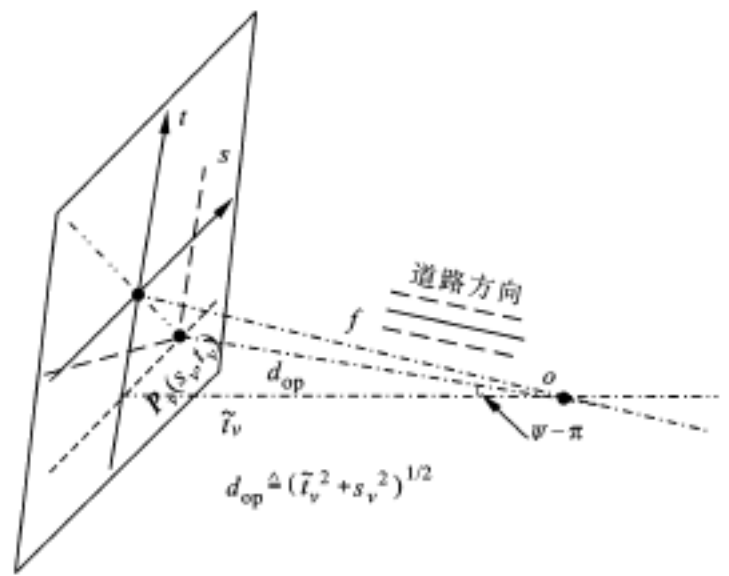


图 4 旋转角 θ 的估计

矩阵 \mathbf{R} 及其逆矩阵 \mathbf{R}^{-1} , 详见文献[18, 19].

1.4 运算复杂度分析

本文算法主要分为 2 个阶段: 首先使用实时道路检测结果统计估计道路消失点与消失线, 然后解析求解旋转变换矩阵 \mathbf{R} 和 \mathbf{R}^{-1} . 由于本文算法对道路检测结果的精度要求不是很高, 所以能满足现有大部分实时检测的要求. 本文算法第 2 步的解析求解过程相对于图像计算任务, 其时间复杂度可忽略不计, 所以本文方法完全可以满足实时性要求.

2 实验与结果分析

为验证本文方法的有效性, 采用西安交通大学的“思源一号”无人车在西安市环城高速公路上以 20 帧/s 的帧速率采集图像序列, 并在同样的条件下与文献[21]中的三线标定法进行对比.

摄像机的内部参数使用南加利福尼亚大学开发的标定工具箱进行标定^[22]. 图 5 为本算法标定过程中的旋转参数向量轨迹.

图 6 为本算法对一系列典型样本数据的收敛曲线, 结果显示, 在第 34 帧动态误差可进入满意的误差带 ($< 7\%$). 随着道路样本数量的不断增加, 到第 85 帧时参数轨迹收敛于理想的误差限内 ($<$

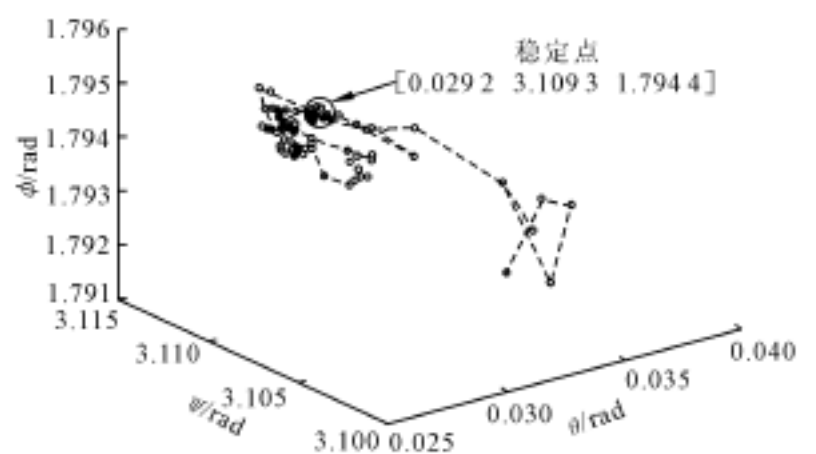


图 5 摄像机外参数依概率收敛于稳定点

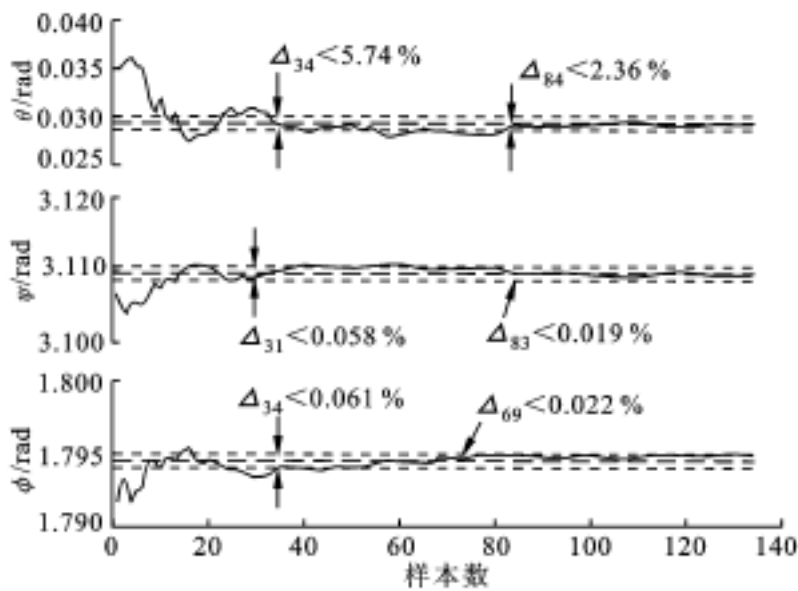


图 6 摄像机旋转外参数动态误差分析曲线

3%)。由于路况条件不同,所以收敛点的具体位置会略有变化。根据不同样本集的测试结果,一般情况下本算法可在第 90 帧的有效道路样本内获得满意的结果。

使用本文算法对一段实际宽度为 3.75 m 的车道进行检测,结果见表 1。该结果间接表明本文算法获得了非常满意的稳态标定结果。

表 2 内容是针对同一段实验图像序列分别使用本文方法与文献[21]的三线标定法,对摄像机外参数进行标定的结果对比,从中可以看出,本文结果与三线标定法获得的结果基本一致,而且本文方法对

表 1 车道宽度检测结果

帧数	75	80	85	90	95	100	105
20 m 处宽度/cm	375	375	375	371	368	375	379
60 m 处宽度/cm	375	379	383	364	364	379	383

表 2 本文方法与三线标定法对摄像机外参数标定的结果对比

	rad		
摄像机调整视角后第 34 帧以后的结果	0.029 2 ± 0.001 7	1.794 8 ± 0.001 8	3.109 3 ± 0.001 1
摄像机调整视角后第 85 帧以后的结果	0.029 2 ± 0.000 7	1.794 8 ± 0.000 6	3.109 3 ± 0.000 4
三线标定法人工标定结果 ^[22]	0.034 0	1.790 0	3.089 0
三线标定法自动处理结果 ^[22]	0.023 0	1.802 0	3.109 0

道路环境的依赖性比较小,同时还可获得更好的稳定性、精确性和实时动态特性。

3 结束语

本文提出了一种适用于自主车辆主动视觉传感器的旋转外参数自标定动态算法。它根据汽车在运动中采集到的结构化道路图像,实时地分析道路消失线特征,并依次动态地标定摄像机旋转外参数。实验结果表明,在摄像机进行姿态调整后,本文算法可在 90 帧有效图像样本的基础上对摄像机外参数进行精确标定。

参考文献:

- [1] Ankers A, Zelinsky A. A real-world vision system: mechanism, control, and vision processing [A]. Lecture Notes in Computer Science [C]. Berlin: Springer-Verlag, 2003. 223-235.
- [2] Kundur S R, Raviv D. A vision-based pragmatic strategy for autonomous navigation [J]. Pattern Recognition, 1998, 31(9): 1221-1239.
- [3] Kundur S R, Raviv D. Novel active vision-based visual threat cue for autonomous navigation tasks [J]. Computer Vision and Image Understanding, 1999, 73(2): 169-182.
- [4] Gregor R, Lützel M, Pellkofer M, et al. EMS-vision: a perceptual system for autonomous vehicles [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2002, 3(1): 48-59.
- [5] Hemayed E E. A survey of camera self-calibration [A]. IEEE Conference on Advanced Video and Signal Based Surveillance, Miami, USA, 2003.
- [6] Meng X Q, Hu Z Y. Recent progress in camera self-calibration [J]. Acta Automatica Sinica, 2003, 29(1): 110-124.
- [7] Faugeras O, Luong Q T, Maybank S. Camera self-calibration: theory and experiments [A]. Lecture notes in Computer Science [C]. Berlin: Springer-Verlag, 1992. 321-334.
- [8] Maybank S, Faugeras O. A theory of self calibration of a moving camera [J]. International Journal of Computer Vision, 1992, 8(2): 123-151.
- [9] Hartley R. Euclidean reconstruction and invariants from multiple images [J]. IEEE Trans on Pattern Anal and Mach Intell, 1994, 16(10): 1036-1041.
- [10] Hartley R I. Kruppa's equations derived from the fundamental matrix [J]. IEEE Trans on Pattern Anal and Mach Intell, 1997, 19(2): 133-135.

- [11] Lei C, Wu F C, Hu Z Y. Kruppa equations and camera self-calibration [J]. Acta Automatica Sinica, 2001, 27(5):621-630.
- [12] Ji Qiang, Dai Songtao. Self-calibration of a rotating camera with a translational offset [J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 2004, 20(1):1-14.
- [13] Wang Feiyue. A simple and analytical procedure for calibrating extrinsic camera parameters [J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 2004, 20(1):121-124.
- [14] Wang L L, Tsai W H. Camera calibration by vanishing lines for 3-D computer vision [J]. IEEE Trans Pattern Anal and Mach Intell, 1991, 13(4):370-376.
- [15] Bucher T. Measurement of distance and height in images based on easy attainable calibration parameters [A]. IEEE Intelligent Vehicles Symposium, Dearborn, USA, 2000.
- [16] Chen Zhaoxue, Shi Pengfei. Efficient method for camera calibration in traffic scene [J]. Electronics Letters, 2004, 40(6):368-369.
- [17] Schoepflin T N, Dailey D J. Dynamic camera calibration of roadside traffic management cameras for vehicle speed estimation [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2003, 4(2):90-98.
- [18] 郑南宁. 计算机视觉与模式识别 [M]. 北京:国防工业出版社, 1998.
- [19] 章毓晋. 图像工程(下册): 图像理解与计算机视觉与模式识别 [M]. 北京:清华大学出版社, 2000.
- [20] Papoulis A, Pillai S U. Probability, random variables and stochastic processes [M]. Beijing: The McGraw-Hill Companies Inc, 2002.
- [21] 李青, 郑南宁, 张雪涛. 用三线法标定车载摄像机的外部参数 [J]. 光电工程, 2004, 31(8):23-26.
- [22] Bouget J Y. Matlab camera calibration toolbox [EB/OL]. http://www.vision.caltech.edu/bouget/calib_dod/index.html, 2003-04-18/2004-08-22.

(编辑 苗 凌)

第 16 届气体放电及其应用国际会议消息

气体放电及其应用国际会议已在各个发达国家连续成功举办了 15 届。2006 年将由西安交通大学电力设备电气绝缘国家重点实验室主办的第十六届会议为首次在中国召开。

会议的目的是为气体放电及其应用领域的研究者及工业界人士提供一个就该领域共同关心的问题广泛深入交流的平台。此外,会议组委会将设立研究生论坛,为该领域的青年学者提供一次交流、锻炼和提高的机会,这也是该会议历史上的第一次。按照气体放电及其应用国际会议的惯例,会议以论文交流和口头报告的形式为主。会议主题为电弧、介质阻挡放电、击穿、等离子体及其应用,涉及的内容包括:电弧;介质阻挡放电;辉光与击穿;高压等离子体及其应用;低压等离子体及其应用;环境、医学及脉冲功率应用;光源;测试与诊断技术;基本过程及交叉领域;其他与气体放电有关的新兴领域。

会议根据以上主题,分会场组织不同的口头报告,并提供交流提问。同时,邀请 5 名左右在该领域的不同方向有突出贡献的知名学者做特邀报告,系统介绍他们的研究成果。另外根据接收到的论文分布情况,组织 3 场讨论会,为会议代表提供更直接、更好的交流方式。会议时间:2006 年 09 月 11 日~2006 年 09 月 15 日。会议地点:西安交通大学。会议主席:王建华教授。