

一种新的手提相机自定标方法

陈泽志 吴成柯

(西安电子科技大学, 综合业务网国家重点实验室, 西安 710071)

摘要 在计算机视觉中, 如何由非定标序列图象得到相机和景物的度量特性是相机自定标技术要解决的主要问题。一般相机定标方法是利用景物的已知三维点坐标或几何特性(如正交方向的灭点等)来确定相机的定标矩阵 K , 而相机自定标方法是直接根据图象和相机内外参数的约束来确定相机和景物的度量特性。相机定标对于计算机视觉的许多应用来说是非常重要的, 而在实际应用中, 由于定标过程往往是很复杂的, 因而, 在过去的几年中, 许多学者在相机自定标方面做了大量的工作, 其研究结果表明, 对于刚性景物来说, 相机自定标是可行的。为了使摄像机自定标更鲁棒、速度更快, 给出了一种新的基于线性模型的相机自定标方法, 该方法首先是利用三点透视投影图、灭点和向量正交的性质来得到一组非线性方程, 然后将其转换为线性方程组, 以避免求解过程中的累积误差, 最后高精度地求出了全部内参数 $\alpha_x, \alpha_y, u_0, v_0$ 。实验结果表明, 此方法是有效的。

关键词 近景摄影测量(420·2020) 自定标 线性模型摄像机 灭点 透视投影 内参 手提相机

中图法分类号: TP391.41 P232 **文献标识码**: A **文章编号**: 1006-8961(2003)03-0341-06

A New Self-calibration Method for Hand-held Camera

CHEN Ze-zhi, WU Cheng-ke

(National Key Laboratory of Integrated Services Networks, Xidian University, Xi'an 710071)

Abstract Self-calibration is the computation of metric properties of the cameras and the scene from a set of uncalibrated images. This is different from conventional calibration where the camera calibration matrix K is determined from the image of a known calibration grid or properties of the scene, such as vanishing point of orthogonal directions. Instead, in self-calibration the metric properties are determined directly from constraints on the internal or external parameters. Camera calibration is essential to many computer vision applications. In practice this often requires complicated calibration procedures to be carried out regularly. In the last few years a lot of work has been done on self-calibration. It has been shown that a metric calibration was possible based on the rigidity of the scene. Based on the pin-hole camera model, a new self-calibration method is presented in this paper. We can use the characteristic of 3-point perspective projective, vanish points and the orthogonal vector to get a set of equations and then all the intrinsic parameters $\alpha_x, \alpha_y, u_0, v_0$ can be solved with high accuracy. The feasibility of the approach is illustrated on synthetic images.

Keywords Self-calibration, Pin-hole camera model, Vanish point, Perspective projective, Intrinsic parameter, Hand-held camera

0 引言

相机自定标技术是计算机视觉的主要研究问题之一, 因为该问题是如何从二维序列图象恢复三维景物的欧氏(Euclidean)信息的关键。一般来说, 三

维计算机视觉系统应能从摄像机获取的图象信息出发来计算三维物体的位置、形状等几何信息, 并由此识别环境中的物体。图象上每一点的亮度反映了空间物体表面某一点反射光的强度, 而该点在图象上的位置则与空间物体表面相应点的几何位置有关, 但这些位置的相互关系需由摄像机成像几何模型决

定,该几何模型的参数就称为摄像机参数,且这些参数必须由试验与计算来确定,这种试验与计算的过程称为摄像机定标(calibration).摄像机模型是光学成像几何模型的简化,其最简单的模型为线模型,或称针孔模型(pin-hole model).通常摄像机定标一般都需要一个放在摄像机前的特制的定标参照物(reference object),才能由摄像机获取该物体的图象,并由此计算摄像机的内外参数,但其定标参照物上的每一个特征点,在制作时,相对于世界坐标系的位置应精确测定^[1~4].在某些场合,则由于摄像机的焦距要经常调节,摄像机的位置也会根据周围的环境而移动,因此需要在每次调节后,重新对摄像机的内外参数进行定标,但是,若每次定标都需要在摄像机前放置定标参照物,则由于其在许多情况下是很不方便的,甚至是不可能的(例如对远距离作业的机器人,或在危险、恶劣环境下的机器人等),因此近年来,一种不需要定标参照物的定标技术——摄像机自定标(self-calibration)技术,受到了人们很大的重视^[5~9].这种摄像机自定标技术不需要已知参照物,而仅利用摄像机在运动过程中的周围环境及图象之间的对应关系,即可对摄像机进行定标.在许多情况下,由于相机在自定标过程中,相机的内参数可以认为是不变的,且由于相机的运动(平移和旋转)是欧氏运动,而绝对二次曲线(the absolute conic)是欧氏不变量,因此 Faugeras 曾利用这一特性导出了 Kruppa 方程^[10],并通过求解 Kruppa 方程来求解相机的内参数.但由于该方程是含有 8 个变量的非线性方程,其在迭代过程中极易发散,因而所得结果不稳定,很难求出真实解.本文考虑到某些物体(如建筑物等)的一些共同特性,即它们都含有一些相互平行的直线(平面)和互相垂直的直线(平面)等,从而根据三点透视原理提出了一种新的摄像机自定标方法,该方法不需要定标参照物,而仅仅根据两幅输入图象的信息来求出三灭点的位置,就可求出摄像机的内部参数.实验结果表明,本文方法具有较好的鲁棒性.由于该方法为线性算法,因而速度快,这不仅为其他非线性算法(如文献[5]、[9]、[11])提供了可靠的初值,而且使它们的收敛速度大大提高.

1 基本原理

1.1 线性摄像机模型(针孔模型)

空间上任何一点 M 在图象上的成像位置可以

用针孔模型来近似表示,即任何点 M 在图象上的投影位置 m ,就是光心 O 与 M 点的连线 \overline{OM} 与图象平面的交点,这种关系也称为中心射影或透视投影.有如下关系:

$$\lambda m = PM \quad (1)$$

其中, P 是 3×4 投影矩阵, M 、 m 分别是用空间点及其投影点的齐次坐标表示的列向量, λ 是一个非零的比例因子.

1.2 基本定理

空间上两条平行线在成像平面上的投影一般是不平行的,若它们在图象上有一个交点,则将这个交点称为灭点(Vanish point).因为透视投影的灭点有无限多个,所以不同方向的平行线在投影面上就能形成不同的灭点,其中坐标轴方向的平行线在投影面上的灭点又称作主灭点.因为有 X 、 Y 和 Z 3 个坐标轴,所以主灭点最多有 3 个.透视投影是按主灭点的个数来分类的,即按投影面与坐标轴的夹角来分类,一般可分为一点透视、二点透视和三点透视,其中,一点透视有一个主灭点,即投影面与一个坐标轴正交,而与另外两个坐标轴平行;二点透视有 2 个主灭点,即投影面与两个坐标轴正交,而与另外一个坐标轴平行;三点透视有 3 个主灭点,即投影面与 3 个坐标轴都正交^[12].三点透视如图 1 所示.

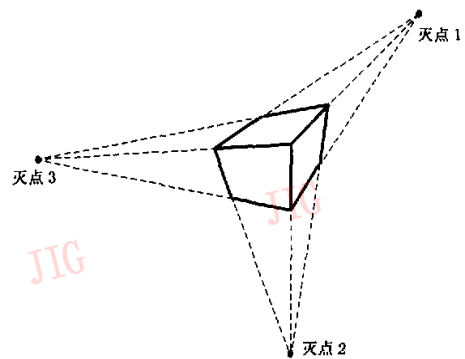


图 1 3点透视图

定理 在线性模型摄像机中,灭点和摄像机光心的连线与形成该灭点的空间平行线平行.

证明 由于灭点是同一族平行线透视投影图象的交点,而在投影空间,同一族平行线又是相交与无穷远点的一束直线,因此灭点就是无穷远点在投影平面上的投影点.如图 2 所示,设 $a \parallel b$, $a \cap b = A_\infty$, 由灭点的定义知, $\overline{O_c A_\infty}$ 必与投影平面交于点 V ,故 $\overline{O_c V} \parallel a \parallel b$.

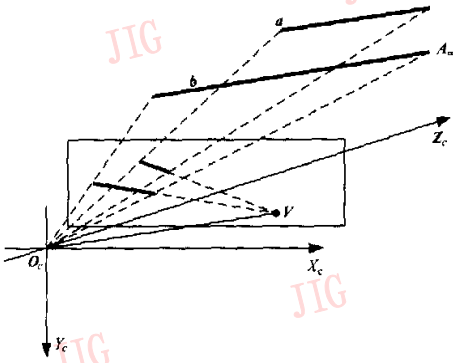


图 2 灭点和摄像机光心的连线与形成该灭点的空间平行线平行

2 摄像机自定标技术

设空间内有互相垂直的 3 组平行线,它们在图象上的灭点为 $V_i (i=1,2,3)$,则由上节的定理可知, $\overrightarrow{OV}_i (\overrightarrow{OV}_1, \overrightarrow{OV}_2, \overrightarrow{OV}_3)$ 互相垂直.若 V_i 在投影平面上的坐标为 (u_i, v_i) ,则在摄像机坐标系下的坐标为 $V_i = ((u_i - u_0)d_x, (v_i - v_0)d_y, f)^T$,其中, (u_0, v_0) 为摄像机光轴与图象平面的交点坐标,该点一般位于图象中心处,但由于摄像机制作的原因,也会有些偏离,因此一般情况下, $(u_0, v_0) \neq (0, 0)$; f 为焦距, d_x, d_y 为每一个像素在 x 轴与 y 轴方向上的物理尺寸,且 $\alpha_x = f/d_x, \alpha_y = f/d_y$,而 u_0, v_0 只与摄像机内部结构有关,这正是需要确定的摄像机内部参数.

由于 $\overrightarrow{OV}_i (i=1,2,3)$ 互相垂直,因此有下式成立:

$$(u_1 - u_0)(u_2 - u_0)d_x^2 + (v_1 - v_0)(v_2 - v_0)d_y^2 + f^2 = 0 \quad (2)$$

$$(u_1 - u_0)(u_3 - u_0)d_x^2 + (v_1 - v_0)(v_3 - v_0)d_y^2 + f^2 = 0 \quad (3)$$

$$(u_2 - u_0)(u_3 - u_0)d_x^2 + (v_2 - v_0)(v_3 - v_0)d_y^2 + f^2 = 0 \quad (4)$$

上述关系式可改写为

$$(u_1 - u_0)(u_2 - u_0) + \left(\frac{d_y}{d_x}\right)^2 (v_1 - v_0)(v_2 - v_0) + \left(\frac{f}{d_x}\right)^2 = 0 \quad (5)$$

$$(u_1 - u_0)(u_3 - u_0) + \left(\frac{d_y}{d_x}\right)^2 (v_1 - v_0)(v_3 - v_0) + \left(\frac{f}{d_x}\right)^2 = 0 \quad (6)$$

$$(u_2 - u_0)(u_3 - u_0) + \left(\frac{d_y}{d_x}\right)^2 (v_2 - v_0)(v_3 - v_0) + \left(\frac{f}{d_x}\right)^2 = 0 \quad (7)$$

记 $t_1 = \left(\frac{d_y}{d_x}\right)^2, t_2 = \left(\frac{f}{d_x}\right)^2$,并用式(5)分别减去式

(6)、式(7)得

$$(u_2 - u_3)u_0 + (v_2 - v_3)v_0 t_1 - v_1(v_2 - v_3)t_1 = u_1(u_2 - u_3) \quad (8)$$

$$(u_1 - u_3)u_0 + (v_1 - v_3)v_0 t_1 - v_2(v_1 - v_3)t_1 = u_2(u_1 - u_3) \quad (9)$$

由式(8)、式(9)可知,式中有 3 个未知数,而现在只有两个方程,一般情况下,由于解是不唯一的,因此,需将摄像机移动到一个新的位置 O' . 设在新的投影平面 I' 上,3 组平行线的灭点分别为 $V'_i (u'_i, v'_i) (i=1,2,3)$,其在摄像机坐标系下的坐标为 $V'_i = ((u'_i - u'_0)d_x, (v'_i - v'_0)d_y, f)^T$,因为 $\overrightarrow{O'_i V'_i}$ 分别与 3 组平行线平行,且所有 $\overrightarrow{O'_i V'_i} \parallel \overrightarrow{O'_i V'_j}$,所以 $\overrightarrow{O'_i V'_i} (i=1,2,3)$ 仍互相垂直,并有下列关系式

$$(u'_2 - u'_3)u'_0 + (v'_2 - v'_3)v'_0 t_1 - v'_1(v'_2 - v'_3)t_1 = u'_1(u'_2 - u'_3) \quad (10)$$

$$(u'_1 - u'_3)u'_0 + (v'_1 - v'_3)v'_0 t_1 - v'_2(v'_1 - v'_3)t_1 = u'_2(u'_1 - u'_3) \quad (11)$$

若将 $v_0 t_1$ 看成一个整体,则由式(8)~式(11)就可以线性地求出 u_0, v_0, t_1 . 将 u_0, v_0, t_1 代入式(5)、式(6)中的任意一式,即可求出 t_2 . 当序列图象长度超过 2 时,就可求最小二乘解,因为此时的求解结果鲁棒性更好.

由 α_x, α_y 与 f, d_x, d_y 的关系可知

$$\alpha_x = \frac{f}{d_x} = \sqrt{t_2} \quad \alpha_y = \frac{\sqrt{t_2}}{\sqrt{t_1}}$$

于是,就得到了全部摄像机的内部参数 $\alpha_x, \alpha_y, u_0, v_0$.

3 实验结果

3.1 模拟图象的实验结果

在本实验中,采用一组模拟三维空间点来验证本文算法的有效性.该模拟数据是由一个小房子和两个方块组成(如图 3 所示).设定模拟相机内参数为: $u_0 = 50, v_0 = 50, \alpha_x = 400, \alpha_y = 600$. 试验时,从 4 个不同的角度,拍摄了 4 幅图象(如图 4 所示).其中第 1 幅图象,其外参数为: $T_1 = (30, 40, 60)^T, R_1 = (\pi/15, \pi/10, \pi/5)$,其中, $\pi/15, \pi/10, \pi/5$ 分别为摄像机绕 X, Y, Z 轴旋转的角度;第 2 幅图象,其外参数为: $T_2 = (60, 40, 80)^T, R_2 = (\pi/15, -\pi/5, \pi/15)$;第 3 幅图象,其外参数为: $T_3 = (30, 45, 50)^T, R_3 = (\pi/10, 0, 0)$;第 4 幅图象,其外参数为: $T_4 = (60, 15, 80)^T, R_4 = (\pi/10, -\pi/15, \pi/10)$.

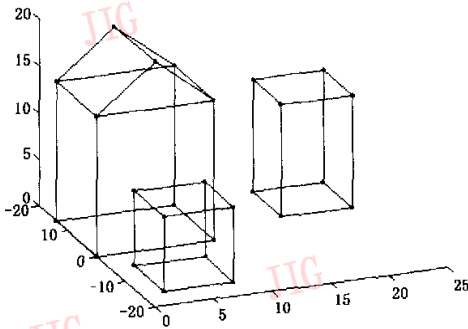


图 3 模拟三维景物

从这 4 幅图象中,任取两幅即可用本文提出的算法求得该摄像机的全部内参数.表 1 给出了 4 幅

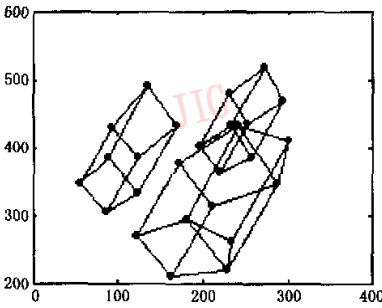
图象的灭点;表 2 给出了相机定标的结果,由表 2 可见,本文所给的方法是有效的.

表 1 4 幅图象的灭点

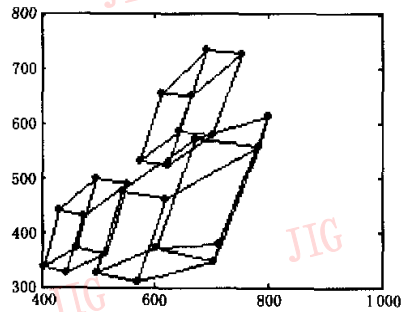
| 图象号 | 灭点坐标(x,y) | | |
|-----|------------------------|-----------------------|------------------|
| 1 | (23 861.18, 52 622.63) | (889.19, -805.58) | (-82.78, 177.53) |
| 2 | (-281.15, -2 264.96) | (-2 408.04, 996.65) | (136.92, 177.53) |
| 3 | (50, -1 796.61) | (0, 1 352.26) | (50, 244.95) |
| 4 | (-290.58, -1 445.21) | (-3 969.92, 2 351.03) | (139.40, 244.95) |

表 2 相机定标的结果

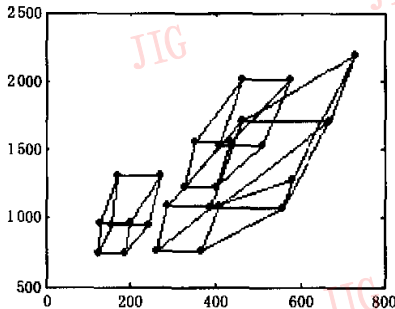
| 定标参数 | 图象对号 | | | | | |
|------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 1,2 | 1,3 | 1,4 | 2,3 | 2,4 | 3,4 |
| u_0 | 50.12 | 51.47 | 48.77 | 46.72 | 52.46 | 49.87 |
| v_0 | 49.38 | 50.34 | 51.23 | 53.87 | 51.66 | 51.44 |
| α_s | 396.13 | 432.78 | 397.50 | 395.48 | 452.37 | 347.89 |
| α_y | 594.43 | 649.44 | 569.45 | 593.39 | 537.16 | 638.43 |



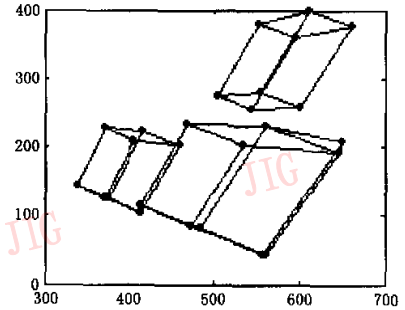
(a) 图象 1



(b) 图象 2



(c) 图象 3



(d) 图象 4

图 4 模拟景物的 4 幅二维图象(横坐标和纵坐标分别代表图象的长和宽,单位为像素)

3.2 真实图象的实验结果

图 5 给出了用手提相机所获得的真实图象,图 6 给出了由原始图象所得到的边缘信息,当找出所有分别沿 3 个方向的所有平行线后,即得到 3 个线性方程组,再分别用 SVD(奇异值分解)方法求得最优解,即为 3 个方向的灭点坐标.以此三灭点作为输入数据,即可求得内参数矩阵为:

$$K_1 = \begin{bmatrix} 110.6393 & 0 & 0.0057 \\ 0 & 110.6393 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$K_2 = \begin{bmatrix} 110.3765 & 0 & 0.0003 \\ 0 & 110.3765 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

用此内参数进行图象三维欧氏重建,其三维点在图

5(a)中的重投影余差如图 7 所示,由图 7 可见,重投影余差均值为 2.2014 个像素,标准方差为 0.3261,

这就说明用本文方法获得的内参数对于真实图象的重建是有效的。



图 5 真实图象对



图 6 原始图象的边缘信息

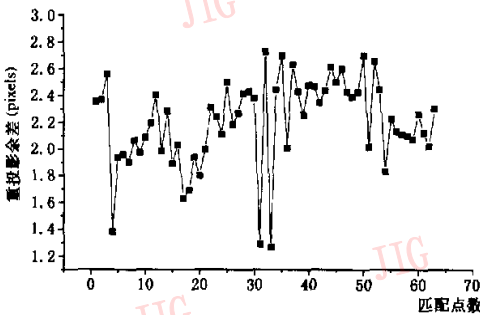


图 7 重投影余差

4 结 论

本文给出了基于线性模型的摄像机自定标方法,用该方法可以不必在摄像机前放定标参照物,而只需由机器人或主动视觉控制系统控制摄像机平台作一次非平移运动,即可由正交条件得到的方程组,

进而解出全部摄像机内部参数,与文献[2]的算法相比,该定标方法大大减少了相机的运动次数,由于该方法的计算过程简单,减少了累积误差,因而提高了计算精度.大量的实验结果表明,本文所给的方法是有效的。

参 考 文 献

- 1 Faugeras O. Three-dimensional computer vision: A geometric viewpoint [M]. Cambridge, Massachusetts, USA: The MIT Press, 1993.
- 2 马颂德,张正友著. 计算机视觉--计算理论与算法基础[M]. 北京: 科学出版社, 1998.
- 3 沈沛意,王伟,吴成柯. 基于汇聚立体视觉的图像校正算法[J]. 西安电子科技大学学报, 1999, 26(3): 320~323.
- 4 沈沛意,王伟,吴成柯. 计算机视觉中的几何不变性及其应用[J]. 西安电子科技大学学报, 1998, 25(4): 490~494.
- 5 Pollefeys M, Koch R, Vergauwen M *et al.* Metric 3D surface reconstruction from uncalibrated image sequences[A]. In: Proc. SMILE Workshop (Post-ECCV'98) [C], LNCS1506, Berlin: Springer-Verlag, 1998: 138~153.

- 6 Devernay F, Faugeras O. From projective to Euclidean reconstruction[A]. In: Proc. of Conference on Computer Vision and Pattern Recognition[C]. San Francisco, CA, USA: IEEE Computer Society Press, 1996:264~269.
- 7 Heyden A, Berthilsson R. An iterative factorization method for projective structure and motion from image sequences[J]. Image and Vision Computing, 1999,17(13):981~991.
- 8 Beardsley P, Torr P, Zisserman A. 3D model acquisition from extended image sequences [A]. In: Proceedings of European Conference on Computer Vision-ECCV'96, Lecture Notes in Computer Science [C], Cambridge, UK: Springer-Verlag, 1996,1065;683~695.
- 9 Pollefeys M, Koch R, Van Gool L. Self-calibration and metric reconstruction in spite of varying and unknown internal camera parameters[A]. In: Proc. ICCV'98 (International Conference on Computer Vision)[C], Bombay, 1998;90~95.
- 10 Faugeras O, Luong Q T, Maybank S. Camera self-calibration, theory and experiments [A]. Computer Vision-ECCV'92, Lecture Notes in Computer Science 588 [C], SantaMargerita, Italy, Springer-Verlag, 1992;321~334.
- 11 Hartley R, Zisserman A. Multiple view geometry in computer vision. First published [M]. Cambridge University, UK: Cambridge University Press, 2000.
- 12 唐泽圣,周嘉玉,李新友编著. 计算机图形学基础[M]. 北京:清华大学出版社,1997.



陈泽志 1963年生,1994年获西北大学计算机辅助几何设计专业硕士学位,现为西安电子科技大学综合业务网国家重点实验室博士研究生,副教授.主要研究方向为计算机视觉、计算机图形学和图象处理.



吴成柯 1938年生,教授,博士生导师.主要研究方向为图形图象处理、视频编码和图象通信.

第12届中国多媒体学术会议(NCMT2003)

征 文 通 知

由中国计算机学会和中国图象图形学会联合召开的全国多媒体学术会议从1992年在北京第一次召开以来,已成功地举行了11届.第12届全国多媒体学术会议(NCMT2003)将于2003年9月18日~20日在风景秀丽的贵州省贵阳市召开.在会议期间将组织著名学者就宽带和无线网络、新型计算模式、流媒体等热点领域做大会特邀报告和进行广泛的学术讨论.

欢迎各位同行踊跃投稿,这次大会的内容将覆盖以下广泛的领域,但并不局限于这些内容.

多媒体信息处理和编码:多媒体信息处理和压缩、内容分析、基于内容的检索、数字水印、和信息安全

多媒体系统支持和网络技术:网络协议、无线网络、操作系统、中间件、服务器、服务质量保证(QoS)、数据库、传感器和执行元件、客户终端、流媒体技术

多媒体工具、应用系统:超媒体系统、用户接口、著作工具、多媒体人机交互和集成、多媒体教育系统、分布式多媒体系统和应用、虚拟空间的设计和应用、系统集成、计算机支持的协同工作

关于投稿的重要日期:投稿截至日期(以邮件寄出日期):2003年7月13日;录取通知:2003年7月27日前;正式稿件发出:2003年8月10日前

NCMT2003上的优秀论文将推荐到国内著名学术刊物发表,其中包括中国图象图形学报的多媒体技术专辑.

大会程序委员会主席:徐光祐(清华大学计算机系)

组织委员会主席:陈孝威(贵州大学计算机系)

投稿请寄:清华大学计算机系,北京,100084(投稿请同时寄打印稿和通过电子邮件发电子版文件)

联系人:孙兴华,清华大学计算机系,北京,100084

电话:010-62784141,010-62786910 **传真:**010-62771138 **电子邮件:**ncmt03@media.cs.tsinghua.edu.cn

有关会议的更详细的信息请访问:<http://media.cs.tsinghua.edu.cn/~ncmt03>