

文章编号:1001-2486(2004)03-0068-06

## 基于机械跟踪的虚拟演播室系统中摄像机校准和定位算法\*

鲁敏,匡纲要,郁文贤

(国防科技大学电子科学与工程学院,湖南长沙 410073)

**摘要:**摄像机校准和初始定位是基于机械跟踪的虚拟演播室系统的关键技术之一。分析了基于机械跟踪方式的虚拟演播室系统的结构特点和性能要求,提出了基于Tsai算法的虚拟演播室摄像机校准算法和基于主动配准的虚拟演播室摄像机初始定位算法。仿真和实际应用结果表明,算法操作简便,满足了虚拟演播室高精度定标的要求。

**关键词:**虚拟演播室;摄像机校准;摄像机定位;虚拟现实;机械跟踪

**中图分类号:**TN94 **文献标识码:**A

## Camera Calibration and Initial Alignment in Virtual Studio Based on Electromechanical Tracking

LU Min, KUANG Gang-yao, YU Wen-xian

(College of Electronic Science and Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** One of the key issues of the virtual studio based on the electromechanical tracking is camera calibration and initial alignment. This paper analyzes the structure and request of the virtual studio based on the electromechanical tracking, and proposes flexible methods to calibrate and align the camera in the virtual studio based on the electromechanical tracking. Both simulated experiments and the real data are used to verify the methods. The results demonstrate that the proposed methods is easy to manipulat and satisfy the needs of the virtual studio system.

**Key words:** virtual studio; camera calibration; camera alignment; virtual reality; electromechanical racking

虚拟演播室(Virtual Studio)技术<sup>[1]</sup>是虚拟现实技术在电视制作领域中的一项崭新应用。概括地说,虚拟演播室是指将摄像机在蓝背景前所拍摄的前景视频信号与计算机实时生成的三维虚拟场景,经过色键(Chroma Key)合成处理,形成全新的视觉效果,其中三维虚拟场景由计算机依据真实摄像机的运动参数实时生成,且必须保证前景和背景三维透视关系的完全一致。

摄像机参数机械跟踪方式是通过在摄像机镜头和云台上加装精确的运动参数编码器,获取摄像机的位置信息和运动参数。一般地,系统要求参数跟踪的角度定位精度和分辨率达到0.001度数量级,位移定位精度和分辨率达到0.01mm数量级。

摄像机的校准和初始定位<sup>[8]</sup>是基于机械跟踪的虚拟演播室系统中三维重建的关键一步,目的是要获取摄像机及镜头的光学与几何特性(称为内部参数),同时也用来估计摄像机相对于某个特定参照系的三维坐标及方向(称为外部参数,在初始定位中讨论)。具体地,虚拟演播室系统中摄像机校准的目的是获得变焦透镜组的焦距及镜头畸变等参数随镜头变焦和聚焦码盘刻度变化的非线性关系曲面,并相应地获得虚拟场景中虚拟摄像机的视角与真实摄像机变焦和聚焦变化的非线性关系曲面。虚拟摄像机初始定位的目的是为了获取真实摄像机的初始空间位置和方向信息,以保证单机位时虚拟和真实摄像机的透视匹配,进而保证多机位时不同摄像机之间的位置和视野的相对一致性。

本文根据基于机械跟踪方式的虚拟演播室系统的结构特点和性能要求,通过分析摄像机模型和传统摄像机定标算法,结合虚拟演播室应用背景,分别提出了基于Tsai算法的虚拟演播室摄像机校准算法和基于主动配准的虚拟演播室摄像机初始定位算法,并给出了算法的仿真和实际应用结果。

\* 收稿日期:2003-11-19

作者简介:鲁敏(1977—),男,博士生。

## 1 基于 Tsai 算法的虚拟演播室摄像机校准算法

传统摄像机定标算法<sup>[5]</sup>一般可分为直接线性变换方法或者透视变换矩阵方法<sup>[4]</sup>。利用线性方法求解摄像机参数,其缺点是没有考虑镜头的非线性畸变、精度不高;非线性最优化方法<sup>[6]</sup>,该类算法精度高,但求解复杂,并且算法为了保证收敛,要求一定的初始值;两步算法<sup>[2,7]</sup>,利用线性模型求解出焦距及外部参数,将它们作为初始估计值,再利用非线性优化算法估计出有效焦距及畸变因子,尺度因子等参数,是一类计算简单且精度较高的算法。Tsai 算法<sup>[2]</sup>给出了假定只存在径向畸变条件下的摄像机定标算法,是一种典型的两步算法,下面给出基于 Tsai 算法的共面点摄像机校准算法。

### 1.1 基于 Tsai 算法的虚拟演播室摄像机校准算法

Tsai 两步算法<sup>[2,3]</sup>根据非线性摄像机模型和平行性约束,首先利用直接线性变换方法或者透视变换矩阵方法求解摄像机参数,再以求得的参数为初始值,考虑畸变因素,并利用最优化算法进一步提高定标精度。

实际虚拟演播室系统的摄像机校准中,由于投影中心与图像中心的偏移的影响较小,以及由 CCD 传感器与采集卡扫描频率不一致引起的尺度因子在单视共面校准实验中可以忽略。因此,我们在虚拟演播室系统的摄像机校准中,不考虑投影中心的偏移量和尺度因子。

基于 Tsai 算法的虚拟演播室系统摄像机校准算法流程如下:

- (1) 校准采用单视共面点,摄像机在特定位置拍摄标准校准板灰度图像(如图 1(a)),计算机通过采集卡输入图像;
- (2) 分别提取图像的水平边缘及垂直边缘(如图 1(b)),由最小二乘法拟合横向直线和纵向直线(如图 1(c)),根据直线求交得到直线的交叉点即为方格交点,提取校准点(方格交叉点)的图像坐标,并与其三维世界坐标对应;
- (3) 利用匹配的校准点二维图像坐标与三维世界坐标,求解线性方程组得到  $T_x, T_y, R$  和  $f, T_z$  的近似解;
- (4) 根据上面的解,用 Levenberg-Marquardt 进行非线性优化得到  $f, k_1, T_z$  的精确解;
- (5) 在短焦距处,对  $f/T_z$  进行处理,最后得到较为精确的焦距值。

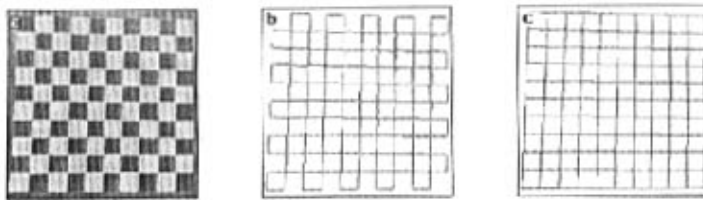


图 1 校准板 (a)灰度图像;(b)边缘提取;(c)直线拟合

Fig.1 Calibration plate (a)Gray image;(b)Edge detection;(c)Line fitting

### 1.2 摄像机校准结果分析

仿真实验结果表明,对于无噪声污染的理想数据,当畸变因子小于  $10^{-6}$ 时,直接根据线性方程组即可得到理想的结果,不须进行非线性优化,由此说明算法是精确的。但是,当畸变因子的数量级超过  $10^{-5}$ 时,若不进行非线性优化,则  $f$  和  $T_z$  的结果会出现较为明显的误差。在有噪声的情况下,噪声越严重,误差就越大。并且,即使畸变因子小于  $10^{-8}$ ,甚至无畸变,未经过非线性优化得到的  $f$  和  $T_z$  的结果的误差也很明显。而在实际应用中,图像噪声是不可避免甚至是严重的。由此可以看出,在涉及焦距的视觉系统的校准问题中,非线性优化是不可或缺的一步。

实际虚拟演播室系统的摄像机校准中校准器材主要包括:校准板,为  $10 \times 10$  黑白方格相间的钢板,

其规格为 1000mm × 1000mm, 方格大小为 100mm × 100mm; 摄像机为 Sony DCX-D35P; 采集卡为 Matrox Meter II。

结果分析可知, 实际校准结果误差主要来自两个方面: 一是校准点图像坐标测量误差, 该误差是由于 CCD 摄像机得到的图像受噪声污染, 质量较差, 在二值化时引起方格缩小或膨胀, 导致提取边缘的位置不准确, 从而校准点的位置不准确; 以及由于摄像机镜头的畸变, 直线变为曲线, 因此所求的校准点的位置不准确。二是校准算法中超定线性方程组求解的不稳定性导致的误差。与仿真试验不同, 由实际图像处理得到的一组(通常大大超过 5 个点)校准点的图像坐标之间的互相制约关系, 使得图像坐标的细微变化就会导致线性超定方程组的解的剧烈变化。

实际校准结果还发现, 旋转矩阵  $R$  与  $T_x, T_y$  的计算结果很稳定, 标准差很小, 而焦距  $f$  与  $T_z$  的计算结果偏差较大, 尤其是在短焦距处, 校准点的图像坐标误差较大。但注意到  $f$  与  $T_z$  的偏离方向是一致的, 并且校准得到的  $f/T_z$  的值相对稳定, 标准差较小<sup>[9]</sup>。而在实际校准过程中摄像机位置固定, 即  $T_z$  值恒定, 因此可由  $f/T_z$  值导出更为精确的焦距  $f'$ :

$$f' = \bar{T}_z \times f/T_z \quad (1)$$

其中,  $\bar{T}_z$  为摄像机长焦距时所求得  $T_z$  的均值。实验证明改进后的校准结果偏差有较大改善(如表 1)。

表 1 实际摄像机校准结果(单位:mm)  
Tab.1 The results of camera calibration (mm)

$f$ 镜头标定	$f$	$T_z$	$T_z/f$	$f'$	$k_1$
9	11.338591	6404.368213	564.829262	9.367850	-3.088244e-003
20	20.149225	5310.540820	263.560549	20.142749	-9.300206e-004
40	40.489815	5401.001236	133.391600	40.263844	-6.281003e-004
80	84.990859	5336.919363	62.794040	80.747548	-3.017981e-004
162	164.722027	5418.487730	32.894736	162.640003	-4.365896e-004

## 2 基于主动配准的虚拟演播室摄像机初始定位算法

摄像机定标中, 如果忽略摄像机镜头的非线性畸变并且把透视变换矩阵中的元素作为未知数, 给定一组三维控制点和对应的图像点, 就可以利用线性方法求解透视变换矩阵中的各个元素<sup>[4]</sup>。这一类定标方法的优点是不需利用最优化方法来求解摄像机的参数, 从而运算速度快, 能够实现摄像机参数的实时计算。我们将线性模型摄像机定标方法应用于实际的虚拟演播室系统摄像机初始定位, 提出了基于主动配准的摄像机初始定位算法。

### 2.1 基于主动配准的虚拟演播室摄像机定位算法

线性模型摄像机定标过程是根据标定参照物中标定点的坐标系和图像坐标系的对应关系, 当已知标定点数大于 6 时, 用最小二乘法可求出变换矩阵; 再通过特定的矩阵分解, 可求出相应的所有摄像机内外参数。

实际应用中, 基于线性模型的摄像机定标存在以下不足:

(1) 没有考虑变量间的约束关系, 当数据存在误差时, 误差在各参数间的分配没有按它们之间的约束关系考虑, 因此, 用上述  $M$  矩阵分解的内外参数存在较大的误差;

(2) 利用参照物的已知标定定点来求解  $M$  矩阵, 必须在图像中用图像处理的方法提取这些标定定点, 在图像含有噪声的情况下, 图像边缘提取和直线求交时会引入较大的误差;

(3) 摄像机线性模型不能准确地描述摄像机的成像几何关系, 尤其在使用广角镜头时, 在远离图像中心处会有较大的非线性畸变, 定标过程中不考虑摄像机镜头的非线性畸变, 定标精度受到影响。

针对上述不足, 在基于机械跟踪的虚拟演播室系统摄像机初始定位中, 结合摄像机机械跟踪方式的

特点,我们提出基于主动配准的摄像机初始定位算法。

虚拟演播室中,摄像机初始定位的目的是为了获取真实摄像机的初始空间位置和方向信息,保证单机位情况下虚拟摄像机与真实摄像机的方位相对一致性以及多机位时不同摄像机之间的方位和视野的相对一致性。根据机械跟踪方式的特点,虚拟摄像机的视角参数由摄像机镜头传感器参数及上一节中获取的变换曲面可直接获知,且摄像机绕  $Z$  轴的自转角为常数 0,因此,实际我们所求解的参数包括摄像机空间位置  $(X_w, Y_w, Z_w)$  和方位角  $(\theta, \varphi)$ ,其中,  $\theta$  和  $\varphi$  分别是摄像机绕  $X$  轴和  $Y$  轴旋转角度。基于主动配准的定位算法,利用蓝箱背板上的共面标定参照点(其空间位置通过测量为已知),将摄像机的图像中心(忽略摄像机镜头光心偏移量)与标定点主动配准,克服摄像机的非线性畸变的影响,根据所获取的摄像机云台传感器参数和摄像机线性模型,得到摄像机的初始空间位置和方向参数(外部参数)。具体实现流程如下:

(1) 摄像机初始位置固定后,将摄像机图像中心点对准蓝箱背板上的第一个标定点(一般,摄像机镜头提供光心参考点),记录当前摄像机横摇和俯仰传感器初始刻度。注意:因为传感器码盘刻度一般是相对值,这一刻度不能反映摄像机的当前方向参数。

(2) 转动摄像机对准下一个标定点,记录当前摄像机横摇和俯仰传感器刻度,与第一步获取的传感器初始刻度求差值,即为摄像机相对于第一标定点的水平和垂直旋转角。

(3) 重复第二步,获取下一组摄像机水平和垂直旋转角。

(4) 根据多组旋转角,求解摄像机的位置参数和对应第一个标定点的方向参数。

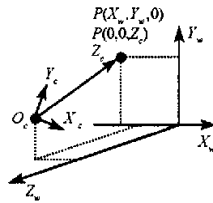


图 2 摄像机定位坐标系

Fig.2 The coordinates system of camera initial alignment

如图 2,  $P$  点为标定点,其世界系坐标为  $(X_w, Y_w, 0)$  已知,摄像机在世界坐标系  $(X_w, Y_w, Z_w)$  中的位置坐标为未知参数,待求解。其视线方向指向标定点  $P$ ,不考虑投影中心的偏移量,如 1.2 节中所述,摄像机非线性畸变在视平面中心位置附近较小,因而此处计算可以忽略,并且此时标定点图像坐标与摄像机焦距无关,即恒有  $X_c = 0, Y_c = 0$ 。考虑从世界坐标系到摄像机坐标系的变换,变换的基本步骤是:坐标系平移原点到  $(X_w, Y_w, Z_w)$ ,然后根据摄像机云台结构和传感器的关系,分别绕  $Y$  轴和  $X$  轴旋转角度  $\varphi$  和  $\theta$ ,最后  $Z$  轴反向。其变换表示为:

$$\begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{bmatrix} = S_z \cdot R_x \cdot R_y \cdot T \cdot \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中,  $T$  是平移变换矩阵,  $R_y$  是绕  $Y$  轴旋转矩阵,  $R_x$  是绕  $X$  轴旋转矩阵,  $S_z$  是  $Z$  轴反向变换矩阵。代入  $P$  点已知坐标值  $X_c = 0, Y_c = 0, Z_w = 0$ ,对第  $i$  组标定点展开可得:

$$\begin{cases} (X_i - X) \cos(\varphi_0 + \Delta\varphi_i) - Z \sin(\varphi_0 + \Delta\varphi_i) = 0 \\ (Y_i - Y) \cos(\theta_0 + \Delta\theta_i) + [(X_i - X) \sin(\varphi_0 + \Delta\varphi_i) + Z \cos(\varphi_0 + \Delta\varphi_i)] \sin(\theta_0 + \Delta\theta_i) = 0 \\ (Y_i - Y) \sin(\theta_0 + \Delta\theta_i) - [(X_i - X) \sin(\varphi_0 + \Delta\varphi_i) + Z \cos(\varphi_0 + \Delta\varphi_i)] \cos(\theta_0 + \Delta\theta_i) = -Z_i \end{cases} \quad (3)$$

其中,标定点世界坐标系坐标  $(X_i, Y_i)$  及其对应旋转角差值  $(\Delta\theta_i, \Delta\varphi_i)$  已知,摄像机参数  $(X, Y, Z, \theta_0, \varphi_0)$  未知,待求解。

分析可得:在约束条件  $\cos(\varphi + \Delta\varphi_i) \neq 0$  的前提下,当标定点点数  $i \geq 3$  时,方程有惟一解。这就是我们所提出的三点定位算法。

该算法通过将摄像机光学中心与标定点主动配准的方式,避免了摄像机畸变特性及内部参数的影响,且不需要进行图像识别,克服了图像噪声和图像识别误差的影响,并在算法过程中使用独立参数变量,避免矩阵分解过程的参数互约束关系,可以精确获取真实摄像机的初始位置和方向参数,保证单机位的匹配和多机位的虚拟摄像机间视野对位。

## 2.2 仿真实验及实际应用结果

仿真实验采用 3Dmax 建模,获取标定点及摄像机空间方位信息,其中,摄像机空间位置坐标为  $(-37.134, 15.151, 187.423)$ ,标定点空间坐标及对应的摄像机旋转角数值如表 2。

表 2 标定点空间坐标及对应摄像机旋转角

Tab.2 Coordinates and rotation angles of the alignment points

标定点	$X_i$	$Y_i$	$\theta_i$ (度)	$\phi_i$ (度)	$\Delta\theta_i$ (度)	$\Delta\phi_i$ (度)
$P_0$	-40	80	-19.084	-0.876	0	0
$P_1$	-30	70	-16.301	2.180	2.783	3.056
$P_2$	-10	60	-13.323	8.238	5.761	9.114
$P_3$	20	40	-7.228	16.953	11.856	17.829
$P_4$	30	20	-1.395	19.707	17.689	20.583

非线性方程组使用 Gauss-Newton 方法求解,求解结果如表 3。

表 3 摄像机定位结果

Tab.3 The results of camera initial alignment

	$X$	$Y$	$Z$	$\theta_0$ (度)	$\varphi_0$ (度)	最大位移偏差	最大角度偏差(度)
1*	-37.1433	15.1816	187.4246	-19.0752	-0.8734		
2*	-37.1315	15.1669	187.4238	-19.0845	-0.8815	0.2622	0.0219
3*	-37.1350	15.1970	187.4274	-19.0708	-0.8759		
4*	-37.1642	15.1257	187.4164	-19.0964	-0.8719	0.2234	0.0186
5*	-37.1496	15.1880	187.4226	-19.0737	-0.8715		
6*	-37.1540	15.1968	187.4189	-19.0764	-0.8754	0.2883	0.0242

其中,1\*、3\*、5\* 分别为取 5 个、4 个、3 个标定点直接求解的结果;2\*、4\*、6\* 分别为取 5 个、4 个、3 个标定点,并考虑到摄像机对准标定点的过程中存在人为测量误差,对旋转角加上均值为 0,偏差为 0.01° 的测量噪声后的求解结果。由实验结果可以看出算法定位精度,其角度偏差约为 0.02°,位移相对偏差约为 2%,满足了虚拟演播室定位的要求,且一般定位过程中采用 4 个标定点。

图 3 是实际虚拟演播室系统摄像机平摇、俯仰及变焦状态下,前后景合成效果图,摄像机位置固定,每帧图片对应摄像机方向和水平视角分别为:a 图(平摇角度 13.786°,俯仰角度 89.493°,水平视角 39.598°);b 图(平摇角度 6.786°,俯仰角度 89.497°,水平视角 39.598°),为 a 图平摇的结果;c 图(平摇角度 6.743°,俯仰角度 82.873°,水平视角 39.598°),为 b 图俯仰的结果;d 图(平摇角度 6.743°,俯仰角度 82.873°,水平视角 30.957°),为 c 图变焦后的结果。从图中可看出,虚拟场景和真实场景的运动协调一致,克服了前后景“飘移”现象。

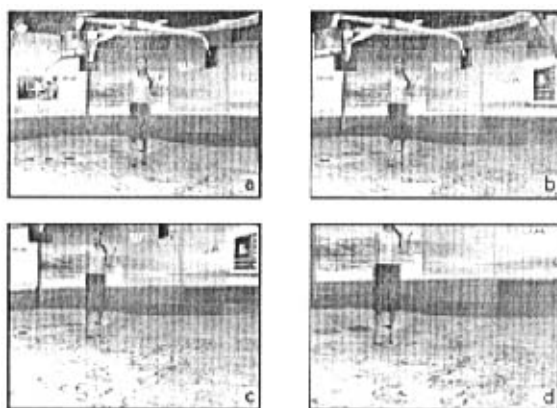


图3 实际虚拟演播室合成视频效果

Fig.3 Output video of the virtual studio

### 3 结论

摄像机校准和定位是基于机械跟踪的虚拟演播室的关键技术之一,是保证虚拟背景和真实前景协调运动的前提。本文提出的基于 Tsai 算法的摄像机校准算法很好地解决了真实摄像机和虚拟摄像机焦距和视角的精确匹配,保证了摄像机变焦及聚焦过程中图像前后景的运动协调一致;基于主动配准的摄像机定位算法避免了摄像机畸变因子的影响,简化了虚拟演播室操作流程,解决了多机位的视野对位问题。实际应用证明该算法快速、准确,很好地满足了基于机械跟踪的虚拟演播室系统的需要,并能推广到其它不同领域的虚拟仿真应用系统。

### 参考文献:

- [1] Gibbs S, et al. Virtual Studio: An Overview [J]. IEEE Multimedia, 1998, 1-3:18-35.
- [2] Tsai R Y. An Efficient and Accurate Camera Calibration Technique for 3D Machine Vision [J]. Proc. IEEE Conf. Computer Vision Pattern Recognition, 1986:364-374.
- [3] Tsai R Y. A Versatile Camera Calibration Technique for High-accuracy 3D Machine Vision Metrology Using Off-the-shelf TV Cameras and Lenses [J]. IEEE Journal of Robotics Automation, 1987, RA-3(4):324-334.
- [4] Abdel-Aziz Y I, Karara H M. Direct Linear Transformation into Object Space Coordinates in Close-range Photogrammetry [J]. Proc. Symposium on Close-range Photogrammetry, Urbana, Illinois, 1971:1-18.
- [5] Salvi J, et al. A Comparative Review of Camera Calibrating Methods with Accuracy Evaluation [J]. Pattern Recognition, 2002, 35:1617-1635.
- [6] Faig I W. Calibration of Close Range Photometric System: Mathematical Formulation [J]. Photogrammetric Eng. Remote Sensing, 1975, 41:1479-1486.
- [7] Wei G O, et al. Implicit and Explicit Camera Calibration: Theory and Experiment [J]. IEEE Trans. Pattern Recognition and Machine Intelligence, 1994, 16(5):469-480.
- [8] 马颂德, 张正友. 计算机视觉[M]. 北京: 科学出版社, 1998.
- [9] 宋海娜, 等. 虚拟环境中的彩色 CCD 摄像机校准[J]. 计算机工程与应用, 2002, (6):254-256.



