

文章编号:1007-2780(2010)02-0287-05

自由立体显示拍摄系统中摄像机空间自由度的确定

张 浩, 李大海*, 王琼华, 刘 曦
(四川大学 电子信息学院, 四川 成都 610065, E-mail: zhanghao821611@163.com)

摘 要: 自由立体显示器的立体显示效果与视差图的视差大小及性质密切相关, 而视差的大小是受获取视差图时相机的摆放方式影响的。文章提出利用双目相机标定技术求解左右摄像机中心的空间位置关系以及两个摄像机光轴的空间夹角, 并通过标定结果不断调节摄像机的位置, 从而使两个摄像机光轴达到近似平行, 此时获取的视差图就可以保证更好的立体显示效果。通过实验研究得到了两个相机空间夹角允许的变化范围。该研究结果可用于指导自由立体显示器拍摄系统的调节。

关 键 词: 自由立体显示; 视差; 摄像机标定; 图像获取

中图分类号: TN873⁺.93; TN911.74 **文献标识码:** A

Determination Method of Spatial Degrees of Freedom for Multi-Cameras in Shooting System of Autostereoscopic Display

ZHANG Hao, LI Da-hai, WANG Qiong-hua, LIU Xi
(School of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China, E-mail: zhanghao821611@163.com)

Abstract: In stereoscopic displays, the stereoscopic display effect is related to the parallax of stereo image pairs, and parallax is affected by cameras' layout when the parallax images are captured. In the paper, camera calibration technique for binocular stereo vision system and the spatial geometric relationship are used to determine the position relation between any two cameras. And then the calibration result is applied to adjust the spatial position of the two cameras continually in order to make the two optical axes parallel to each other approximately. As a result, the image pairs acquired can guarantee a better stereoscopic display effect. Finally, the allowable variation range of the spatial angle between the two cameras is yielded experimentally. The results can be used to conduct the adjustment for the photography system of autostereoscopic display.

Key words: autostereoscopic display; parallax; camera calibration; image acquisition

1 引 言

自由立体显示技术^[1]已经成为计算机视觉中一个非常引人注意的前沿科技,它真实地再现了场景的三维信息,显示具有立体感的图像。与传统的立体显示相比,自由立体显示不需要佩戴偏光眼镜,观察者可以同时从事其他事情,行动更加方便;但缺点是视区较窄,串扰比较严重,观看时

间过长容易产生视疲劳^[2]。自由立体显示主要由图像获取、图像校正以及图像显示等部分组成。图像获取是多个具有基本相同参数的相机按一定的空间排列方式放置,对同一场景进行拍摄,所获取的多幅图像称为立体显示的视差图。视差图的质量对立体显示的效果有很大影响,理想的视差图只存在水平视差,不存在垂直视差,但直接用相机获取的视差图很难达到理想程度。视差图的获取与相机结构和相机摆放方式密切相关,为了获得更好的视差图,相机放置时需尽量保持光轴平行^[3,4]。两个相机之间的位置关系可以通过双目摄像机标定得到,即得到左摄像机坐标系相对于右摄像机坐标系的旋转矩阵和平移向量。本文提出利用双目相机标定技术和空间几何关系来判断其中任意两个相机之间的位置关系,即求解左右摄像机中心的空间位置关系以及两个摄像机光轴的空间夹角,通过标定结果来不断调节摄像机的位置,使两个摄像机光轴近似平行,此时获取的视差图可以保证较好的立体显示效果。上述方法可推广到多个摄像机空间相对位置的确定。

2 两个摄像机坐标系之间的关系

图 1 为左摄像机坐标系 $O\text{-}XYZ$ 与右摄像机坐标系 $o\text{-}xyz$ 的示意图。

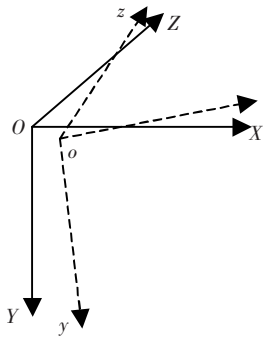


图 1 双目摄像机坐标系示意图

Fig. 1 Coordinate systems of binocular stereo camera

任意一点在两个摄像机坐标系中的坐标分别为 (A, B, C) 和 (a, b, c) ,由数学知识可以知道这两个坐标之间的变换关系为^[5]:

$$\begin{bmatrix} A \\ B \\ C \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} + T \tag{1}$$

其中, R 和 T 分别为左摄像机坐标系相对于右摄像机坐标系的旋转矩阵和平移向量。旋转矩阵 R 的表达式为:

$$R = \begin{bmatrix} a_1 & a_2 & a_3 \\ b_1 & b_2 & b_3 \\ c_1 & c_2 & c_3 \end{bmatrix}$$

矩阵元素 $a_i, b_i, c_i (i=1, 2, 3)$ 称为方向余弦; a_1, a_2, a_3 是图 1 中轴 X 与轴 x, y, z 间夹角的余弦; b_1, b_2, b_3 是轴 Y 与轴 x, y, z 间夹角的余弦; c_1, c_2, c_3 是轴 Z 与轴 x, y, z 间夹角的余弦。由于 R 是正交矩阵,所以 9 个方向余弦中只含有 3 个独立参数,这 3 个参数可以是一个空间直角坐标系按 3 个空间轴向顺次旋转至另一空间直角坐标系的 3 个旋转角。

左右两个摄像机坐标系的关系可以认为是两个坐标系重合时为起始位置,如图 2 所示,其中一个顺次绕主轴 Y 旋转 φ 角,再绕副轴 X_φ 旋转 ω 角,最后绕第三轴 Z_φ 旋转 κ 角后得到的。每次旋转都保持一个轴不变,因此,每次的坐标变换都属于平面坐标变换,可把空间直角坐标系的坐标变换分解成 3 次平面坐标变换,利用平面坐标变换公式完成空间坐标变换。旋转矩阵中的矩阵元素可以用 φ, ω, κ 表示为:

$$\begin{aligned} a_1 &= \cos\varphi\cos\kappa - \sin\varphi\sin\omega\sin\kappa \\ a_2 &= -\cos\varphi\sin\kappa - \sin\varphi\sin\omega\cos\kappa \\ a_3 &= -\sin\varphi\cos\omega \\ b_1 &= \cos\omega\sin\kappa \\ b_2 &= \cos\omega\cos\kappa \\ b_3 &= -\sin\omega \\ c_1 &= \sin\varphi\cos\kappa + \cos\varphi\sin\omega\sin\kappa \\ c_2 &= -\sin\varphi\sin\kappa + \cos\varphi\sin\omega\cos\kappa \\ c_3 &= \cos\varphi\cos\omega \end{aligned} \tag{2}$$

则可以推出:

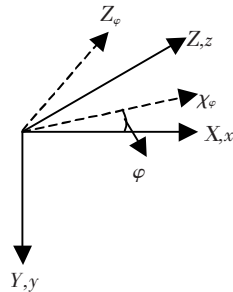


图 2 摄像机坐标系旋转示意图

Fig. 2 Schematic for rotation of camera coordinate system

$$\begin{aligned}\varphi &= \arcsin \frac{-a_3}{\sqrt{1-b_3^2}} \\ \omega &= \arcsin(-b_3) \\ \kappa &= \arcsin \frac{b_1}{\sqrt{1-b_3^2}}\end{aligned}\quad (3)$$

求出 φ, ω, κ 3 个角, 就可以按照要求来调节两个摄像机之间的位置。由式(3)可以看出, 求解旋转矩阵 $\mathbf{R}$ 中的元素是求解 φ, ω, κ 的基础, 因此, 本文拟先通过双目摄像机标定技术得到旋转矩阵 $\mathbf{R}$ 以及平移向量 $\mathbf{T}$ 。

3 双目摄像机定标原理

在立体视觉系统中一般需要用两个摄像机, 它们之间的相对位置可通过定标测得。两个摄像机的几何关系如图 3 所示。

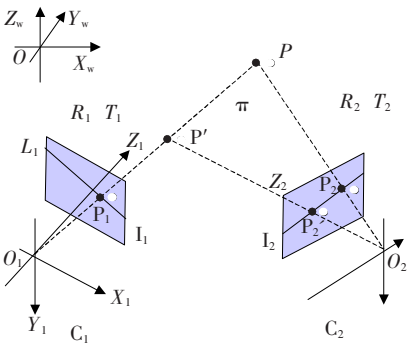


图 3 立体视觉中双摄像机的几何关系
Fig. 3 Geometrical relationship of binocular stereo camera in stereo vision

在标定中, 先用单摄像机定标方法^[6]分别得到两个摄像机各自的内外参数, 如果外参数分别用 R_1, T_1 与 R_2, T_2 表示, 其中 R_1, T_1 表示 C_1 摄像机与世界坐标系 $O-X_wY_wZ_w$ 的相对位置, R_2, T_2 表示 C_2 摄像机与世界坐标系 $O-X_wY_wZ_w$ 的相对位置。对任意一点 P , 如果它在世界坐标系、 C_1 坐标系与 C_2 坐标系下的非齐次坐标分别为 X_w, X_{c1}, X_{c2} , 则:

$$\begin{aligned}X_{c1} &= R_1 X_w + T_1 \\ X_{c2} &= R_2 X_w + T_2\end{aligned}\quad (4)$$

将式(4)中的 X_w 消去后得到:

$$X_{c1} = R_1 R_2^{-1} X_{c2} + T_1 - R_1 R_2^{-1} T_2 \quad (5)$$

因此, 两个摄像机之间的几何关系可用以下的 R 和 T 表示:

$$\begin{aligned}R &= R_1 R_2^{-1} \\ T &= T_1 - R_1 R_2^{-1} T_2\end{aligned}\quad (6)$$

如果对双摄像机分别定标, 得到 R_1, T_1 与 R_2, T_2 , 则双摄像机的相对几何位置就可以用公式(6)计算得到。

摄像机标定技术已经很成熟, 摄像机的内外参数可以直接利用标定工具箱(如 Institute of Robotics and Mechatronics 研发的 Camera Calibration Toolbox for Matlab 等)来进行标定, 进而得到所需要的数据。

4 3DSMAX 中模拟摄像机的标定

在 3DSMAX 中对左右相机进行设定, 相机位置设定如图 4 所示, 其中 Z 轴为相机的光轴方向, 设左相机中心的坐标为 $(0, 0, 0)$, 目标点的坐标为 $(0, 0, 200)$, 右相机中心的坐标为 $(50, 20, 10)$, 目标点的坐标为 $(20, 0, 200)$ 。那么根据几何知识可以计算得到:

$$\varphi = 8.97^\circ, \omega = -5.93^\circ, \kappa = 0^\circ$$

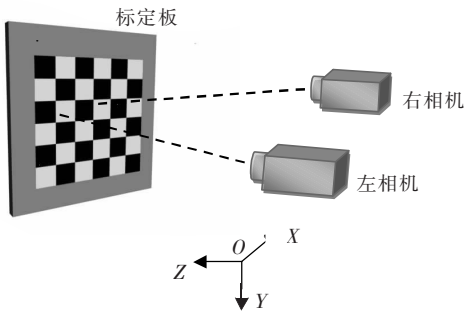


图 4 3DSMAX 中相机拍摄示意图
Fig. 4 Schematic for photography using binocular stereo camera in 3DSMAX

在 3DSMAX 中, 两个相机分别对标定板(棋盘格)从不同的角度渲染(即拍摄)若干张图片, 利用标定工具箱对这组图片进行标定, 最后得到标定结果为:

$$\begin{aligned}R &= \begin{bmatrix} 0.9877 & 0.0161 & -0.1556 \\ 0.0000 & 0.9947 & 0.1029 \\ 0.1564 & -0.1017 & 0.9824 \end{bmatrix} \\ T &= [49.9980 \quad 20.0059 \quad 10.1224]\end{aligned}$$

继而根据式(3)可得到角度 φ, ω, κ 的值, 分别为 $9.04^\circ, -5.91^\circ, 0^\circ$ 。

从上面的数据可以看出, 利用标定得到的结果计算所得的 φ, ω, κ 数值与标准结果误差很小。因此, 可以利用双目标定技术先求解旋转矩阵 $\mathbf{R}$

以及平移向量 T ，再利用公式(3)计算 φ 、 ω 、 κ ，其精确度在 0.1 以下，可以满足使用要求。

5 视差对立体显示效果的影响

应用表明，视差图的视差(包括水平视差和垂直视差)大小对立体显示效果有明显的影 响。水平视差主要由两个相机中心在水平 X 轴上的距离以及 φ 角所决定，垂直视差主要由两个相机在 Y 轴上的距离以及 ω 和 κ 所决定。下面将分别介绍这些参数对视差的影响情况，并得出对其控制范围的要求。

5.1 水平视差对立体显示效果的影响

水平视差主要由相机间的距离和两个相机间的夹角 φ 所决定。由于大部分拍摄系统中相机间的距离是固定的，所以两个相机间的 φ 角的变化是改变水平视差的主要因素。

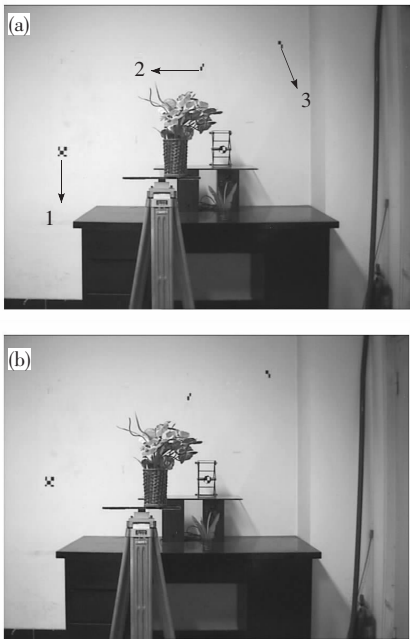


图 5 实拍场景左右视差图。(a) 左图；(b) 右图。
Fig. 5 Stereo image pairs captured in the experiment. (a) Image captured by the left camera; (b) Image captured by the right camera.

图 5 所示为左右相机拍摄的视差图，(a)图中 1、2、3 为 3 个标志点。在只改变左右相机间的夹角 φ 时，通过相机标定得到该角度的变化量与图像中这些标志点的 x 坐标的变化关系如表 1 所示。

表 1 $\Delta\varphi$ 对 ΔX 的关系
Table 1 Variation of ΔX with $\Delta\varphi$

$\Delta\varphi(^{\circ})$	ΔX_1 (像素)	ΔX_2 (像素)	ΔX_3 (像素)
0.110 1	0.99	0.93	0.97
0.127 0	1.03	1.00	0.99
0.123 8	0.98	0.95	1.00
0.112 7	1.06	1.02	0.97

其中 $\Delta\varphi$ 为左右相机在水平面上夹角的依次变化量， ΔX_1 、 ΔX_2 、 ΔX_3 分别表示特征点 1、2、3 在左图像上变化前后 x 坐标位置的改变量。实验研究表明，在左右视差图的垂直视差为零的前提下，改变水平视差的大小，分别合成，通过自由立体显示器观看立体效果，通过多次观察发现，当水平视差大于 5 个像素时图像就不能很好地融合，观察者会产生明显的不适。因此，在零视差面选定的情况下， φ 角的变化量不能大于 0.5° 。

5.2 垂直视差对立体显示效果的影响

在获取视差图的过程中，使立体图像对产生垂直视差的原因主要有 3 个：左右相机在 Y 方向上的高度差；两个相机之间的俯仰角 ω ；相机绕光轴方向的旋转角度 κ 。

在保证其他条件不变的情况下分别只改变左右相机在 Y 方向上的高度差、两个相机之间的俯仰角 ω 、相机绕光轴方向的旋转角度 κ ，研究它们的变化分别引起图中特征点 y 坐标的变化，其对应关系如表 2 所示。

其中， ΔY 为左右相机在 Y 方向上距离的依次变化量； $\Delta\omega$ 为左相机相对右相机俯仰角度的依次变化量； $\Delta\kappa$ 为左相机绕光轴依次旋转的依次变

表 2 $\Delta Y(\text{MM})$ 、 $\Delta\omega(^{\circ})$ 、 $\Delta\kappa$ 对 Δy 的变化关系
Table 2 Variation of Δy with ΔY , $\Delta\omega$ and $\Delta\kappa$ respectively

自变量 \ 因变量		$\Delta Y(\text{mm})$				$\Delta\omega\ (^{\circ})$				$\Delta\kappa\ (^{\circ})$			
		2.19	2.55	2.51	2.34	0.092	0.092	0.084	0.087	0.315	0.200	0.450	0.464
Δy_1 (像素)		0.94	0.96	1.10	0.90	1.01	0.99	1.06	0.95	2.02	1.93	1.91	2.09
Δy_2 (像素)		1.04	0.94	1.00	0.96	0.99	1.00	0.99	1.05	0.00	-0.04	0.03	-0.01
Δy_3 (像素)		1.03	0.92	1.06	1.04	0.94	1.09	0.94	1.04	-1.02	-1.04	-0.92	-1.11

化量; Δy_1 、 Δy_2 、 Δy_3 分别表示标志点 1、2、3 在左图像上变化前后 y 坐标位置的改变量。可以看出,当相机在 Y 方向上改变距离 2.5 mm 左右时,相应图像上的特征点的坐标变化大约是一个像素;角 ω 变化 0.1° 左右引起图像上特征点垂直坐标变化大约为 1 个像素;在改变角 κ 时,光轴附近特征点的 y 坐标基本不变,离光轴越远变化越明显。

实验研究表明,在视差图水平视差保持在两个像素的前提下,改变视差图的垂直视差,通过自由立体显示器观看立体效果发现,当垂直视差达到 4 个像素时图像融合比较困难。那么在原来左右图像没有垂直视差的基础上,相机间的俯仰角允许变化的范围近似为 $-0.5\sim 0.5^\circ$,绕光轴旋转角的变化范围近似为 $-0.5\sim 0.5^\circ$,这就是相机调整过程中相机间的俯仰角 ω 及绕光轴旋转角 κ 的控制要求。

参 考 文 献:

- [1] 王元庆. 基于 LCD 的自由立体显示技术 [J]. 液晶与显示,2003,18(2):116-200.
- [2] May Paul. Reconfigurable 2-D/3-D display [J]. *Information Display*, 2003,(19):26-30.
- [3] 蒋峰,朱向冰. 液晶自由立体显示系统显示效果研究 [J]. 江西科学,2007,(1):57-61.
- [4] Ariyaeenia A M. Distortions in stereoscopic display [J]. *SPIE Stereoscopic Display and Applications III*,1992, 1669:2-9.
- [5] 金为铄,杨先宏,邵鸿潮,等. 摄影测量学 [M]. 武汉:武汉大学出版社,1996:38-42.
- [6] 刘传才. 图像理解与计算机视觉 [M]. 厦门:厦门大学出版社,2002:33-41.

6 结 论

自由立体显示器的立体显示效果与视差图的视差大小有关,而视差的大小与获取图像时相机的摆放方式密切相关。本文利用双目相机标定技术和空间几何关系来判断任意两个相机之间的位置关系,通过标定结果不断调节摄像机的位置,使两个相机光轴近似平行,在 3DSMAX 中对标定工具箱的使用进行了模拟,通过实验得到两个摄像机在不同的自由度上的调节范围,即在 X 方向上,零视差点选定的情况下, φ 角的变化范围近似为 $[-0.5^\circ, 0.5^\circ]$; Y 方向上,垂直视差为零时, ω 和 κ 角的变化范围均近似为 $[-0.5^\circ, 0.5^\circ]$ 。该方法对于多目摄像机空间相对位置的确定同样适用,对自由立体显示器拍摄系统的调节有一定的指导意义。