

光学透视式头盔显示器标定的退化影响

顾光珍 周雅 李玉 刘越 王涌天

(北京理工大学信息科学技术学院光电工程系, 北京 100081)

摘要 为了成功地应用增强现实, 需要有观察仪器的准确投影信息, 这就要求对所使用的光学透视式头盔显示器进行标定。针对实验室的光学透视式增强现实系统的组成特点, 选定了虚拟摄像机(头盔显示器与人眼的结合)的标定算法。根据对投影矩阵的退化点结构的影响, 改进了选取标定的对应点个数和用户头部的运动轨迹。实验结果表明, 标定效果明显改善, 成功率也有明显提高。

关键词 增强现实 光学透视式头盔显示器 显示器标定 退化点结构

中图分类号: TP391.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-8961(2006)08-1171-04

On Degeneracy of Optical See-Through HMD Calibration

GU Guang-zhen, ZHOU Ya, LI Yu, LIU Yue, WANG Yong-tian

(Department of Opto-electronic Engineering, Scientific and Technological Information Research Group,
Beijing Institute of Technology, Beijing 100081)

Abstract For a successful augmented reality application, precise projection information of the viewing device is required, which has to calibrate the optical see-through head-mounted display in use. Based on our system, this paper selects the calibration algorithm of the virtual camera which models the combination of HMD and user's eye. According to the influence of degenerate point configurations of projection matrix, the number of calibration correspondences and the track of user's head are improved. Experiments reveal that the calibration effect is meliorated distinctly and the success rate is increased greatly.

Keywords augmented reality, optical see-through HMD, display calibration, degenerate point configurations

1 引言

增强现实(简称AR)是一种以计算机产生的附加信息来增强用户视野中的真实世界的技术^[1]。典型的AR系统使用透视式头盔显示器(see-through head-mounted display, HMD)在用户的视野里合成真实环境和虚拟物体。

显示器标定指的是显示在HMD中的虚拟图像和真实世界的对准。它的目的是预测虚拟物体显示在HMD上的投影变换, 从而使虚拟物体能显示在HMD的正确位置上, 保证在真实空间的正确注册。

AR中有两种最重要的HMD: 光学透视式HMD

和视频透视式HMD。使用光学透视式HMD, 用户可直接看到周围的真实环境, 还可看到计算机产生的增强图像或信息。由于能直接分析合成图像, 使用视频式HMD的增强现实系统相对容易标定(只需要标定摄像机)。而光学式HMD由于来自真实场景的图像直接成像于用户视网膜之上, 因此光学HMD的标定需要用户在线标定, 这种人机交互过程是高度依赖于用户的, 所以光学式HMD的标定是阻碍其实际应用的技术难点。

光学透视式HMD的标定是增强现实的一个重要研究领域。Tuceryan和Navab描述了一种光学HMD的标定法——单点活动排列法(SPAAM)^[2]。Hua等人提出了一种快速简单的头盔投影显示器

基金项目: 国家自然科学基金项目(60373058, 60475008); 国家基础研究发展计划(973计划)(2002CB312104)

收稿日期: 2005-07-11; 改回日期: 2005-09-20

第一作者简介: 顾光珍(1981~), 女, 北京理工大学信息科学技术学院光学工程专业硕士研究生。研究方向为增强现实与计算机视觉。E-mail: guguangzhen@bit.edu.cn

(HMPD)的脱机标定方法^[3]。Tang 等人进行了 4 种不同的标定:简单 SPAAM、深度 SPAAM、立体 SPAAM 以及铁笔标记标定 (Stylus-mark calibration),并通过比较它们的精度等来对它们进行评价^[4]。

以上方法各有优缺点:有些标定精度较高的系统过于复杂;有些标定方法简单的精度不高。综合各方面指标,针对实验室光学透视式 AR 系统的组成特点,选定了光学 HMD 的标定算法;根据普遍存在的求解投影矩阵的退化问题的影响,改进了标定方法。

2 光学透视式 AR 系统的标定

2.1 系统组成

典型的光学透视式增强现实系统通常包括光学透视式头盔显示器、图像工作站以及跟踪设备。本文使用的光学透视式增强现实标定实验系统中,头盔显示器使用的是 Sony Glasstron A55 光学透视式 HMD。基于视觉的跟踪摄像机采用 Micro Compact 的针孔彩色 CCD 摄像机,型号为 KPC-S20CP1,如图 1 所示。

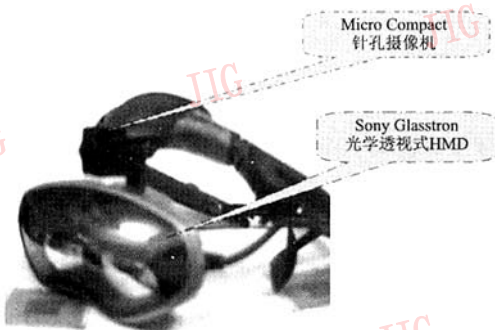


图 1 光学透视式 AR 实验系统

Fig. 1 Optical see-through AR experiment system

为了获得更高的跟踪精度,系统采用实验室成熟的基于彩色标志板的注册算法^[5]。只要摄像机采集到足够的标志点,其姿态就可计算出来。由于摄像机是被固定在头盔上的,用户戴上头盔后在标定过程中的头部姿态可以用摄像机的姿态来代替。

2.2 标定算法

佩戴光学透视式头盔显示器,用户看到的景象是人眼和 HMD 共同作用的结果。因此,将光学透

视式头盔显示器与人眼的结合定义成虚拟摄像机,来进行标定研究。图 2 是光学透视式 AR 系统标定的示意图。图中共有 3 个坐标系,摄像机的跟踪坐标系、标志板的世界坐标系以及光学头盔的虚拟坐标系。

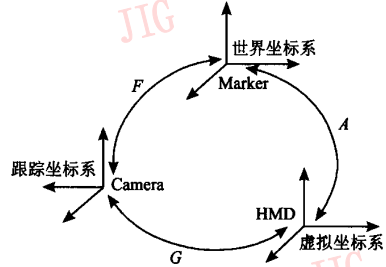


图 2 系统坐标示意图

Fig. 2 System coordinates

在 SPAAM 法的基础上,本系统采用摄像机取代电磁跟踪器来对用户头部进行跟踪。人眼与光学 HMD 的结合就像一个摄像机模型,从跟踪摄像机到虚拟摄像机的变换,包含了其投影特性和刚性变换。我们要标定的就是跟踪坐标系到虚拟坐标系的投影矩阵 G 。

在标定试验过程中,用户将计算机生成的虚拟十字光标对准世界坐标系的固定点(标志板的中心点),经过标定好的跟踪摄像机的刚性变换,在跟踪坐标系下的坐标为 $P = [x \ y \ z \ 1]^T$ 。再经过虚拟摄像机的投影变换,对应的图像点在虚拟摄像机坐标系下的齐次坐标为 $[u \ v \ 1]^T$,则有:

$$Z \begin{pmatrix} u \\ v \\ 1 \end{pmatrix} = G_{3 \times 4} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

其中, Z 为一不为零的比例因子, G 反映了跟踪坐标系到虚拟摄像机坐标系的投影变换关系,就是标定光学头盔显示器所要求的 3×4 投影矩阵。

用 g_1^T, g_2^T 和 g_3^T 分别表示 G 的 3 行,则有

$$\begin{cases} u = \frac{g_1 \cdot P}{g_3 \cdot P} \\ v = \frac{g_2 \cdot P}{g_3 \cdot P} \end{cases} \quad (2)$$

进一步可以得到

$$\begin{cases} (g_1 - u g_3) \cdot P = 0 \\ (g_2 - v g_3) \cdot P = 0 \end{cases} \quad (3)$$

根据式(1),可用跟踪点及其图像点来计算投影矩阵 G 。3×4 投影矩阵一共有 12 个需要预测的未知参数,由式(2),每一个标定点可以确定两个独立的约束方程,显然,6 个标定点可以产生 12 个方程,从而可以解出变换矩阵中的 12 个参数。但由于这些参数有一个比例因子,所以只有 11 个独立无关的变量,即参数矩阵的秩为 11。若需要对准的标定点数目 $n \geq 6$,则可以用齐次线性最小二乘法来计算。

所有 n 个点的约束可以写成一个 $2n$ 维的齐次线性方程组:

$$Mg = 0 \tag{4}$$

$$\text{其中, } M = \begin{pmatrix} P_1^T & 0^T & -u_1 P_1^T \\ 0^T & P_1^T & -v_1 P_1^T \\ \dots & \dots & \dots \\ P_n^T & 0^T & -u_n P_n^T \\ 0^T & P_n^T & -v_n P_n^T \end{pmatrix}, g = \begin{pmatrix} g_1 \\ g_2 \\ g_3 \end{pmatrix}$$

采用奇异值分解法(singular value decomposition)来解方程组式(4),就可以得到所需的投影矩阵,完成了对光学 HMD 的标定。

3 投影矩阵的退化影响及改进

在标定过程中,用户随机无规律的手工将虚拟光标和标志板的中心点对准,难免会有匹配不当的情况,因此对应点相关数据组成的投影矩阵可能偏离真值,从而解方程时可能出现退化问题^[6]。标定点的一些退化情况可能会引起标定的失败。在光学 HMD 的标定中,应该避免出现退化,所以研究方程组解的结构,以指导用户的活动来去除退化点对标定的成功与否有很重要的意义。

只考虑数据点的取值没有误差的理想情况,来探讨矩阵 M 的零空间,也就是满足 $Ml = 0$ 的所有 l 的解。

l 是满足上述约束的向量。令 $\alpha = (l_1 \quad l_2 \quad l_3 \quad l_4)^T, \beta = (l_5 \quad l_6 \quad l_7 \quad l_8)^T, \gamma = (l_9 \quad l_{10} \quad l_{11} \quad l_{12})^T$, 则有

$$0 = Ml = \begin{pmatrix} P_1^T & 0^T & -u_1 P_1^T \\ 0^T & P_1^T & -v_1 P_1^T \\ \dots & \dots & \dots \\ P_n^T & 0^T & -u_n P_n^T \\ 0^T & P_n^T & -v_n P_n^T \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \alpha \\ \beta \\ \gamma \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} P_1^T \alpha - u_1 P_1^T \gamma \\ P_1^T \beta - v_1 P_1^T \gamma \\ \dots \\ P_n^T \alpha - u_n P_n^T \gamma \\ P_n^T \beta - v_n P_n^T \gamma \end{pmatrix} \tag{5}$$

由式(2)和上式联合求解,并将分式改写整理后,可得

$$\begin{cases} P_i^T (\alpha g_3^T - g_1^T \gamma) P_i = 0 \\ P_i^T (\beta g_3^T - g_2^T \gamma) P_i = 0 \end{cases}, i = 1, \dots, n \tag{6}$$

显然,由 $\alpha = g_1, \beta = g_2, \gamma = g_3$ 组成了 l 的一组解,也就是说求出的向量组成了所需标定的投影矩阵。但是,除了所需的投影矩阵 G 中的元素是方程组的一组解外,还可能出现其他也满足方程的解,但又不是所需的正确解,造成标定的失败。以下是两种退化点结构。

(1)考虑标定的跟踪点 $P_i (i = 1, \dots, n)$ 都在一个平面 Π 上的情况,即存在一个 4 维向量 Π ,使得 $\Pi \cdot P = 0$ 。显然, (α, β, γ) 取 $(\Pi, 0, 0), (0, \Pi, 0), (0, 0, \Pi)$ 或它们的线性组合都是方程组 $Pl = 0$ 的解。

(2)对给定的非零向量 l ,满足式(6)的点处在这两个方程确定的二次曲面的交线上。进一步的研究可证明这两个二次曲面的交线是一条直线和一条过原点的三次曲线。当 $P_i (i = 1, \dots, n)$ 满足这个交线的方程时,也是方程组 $Pl = 0$ 的解。

根据投影矩阵退化情况的影响,对标定方法做出以下改进。

(1)标定的对应点个数的选取

三次曲线可由二次曲面上的 6 个点完全确定,因此 7 个随机选取的点一般不会在该曲线上。由于原点也是该曲线上的一个点,故只要取 $n \geq 6$ 就可以保证系数矩阵的秩为 11,且投影矩阵有唯一解。另外, n 个对应点的系数矩阵 $M_{2n \times 12}$ 的 SVD 分解后方程组的解是在最小二乘意义下的最优解。当对应点个数增加时,不会影响解的精度。

原则上 $n \geq 6$ 即可求解出投影矩阵,但实际操作中很难避免有些点会造成退化。所以应多选取一些点来保证(SPAAM 法中就用了 12 个对应点,Hua 在每个姿态中用了 48 个对应点)。综合各方面的因素,标定的对应点个数由原来的 9 个点(3×3)增加为 15 个点(3×5)。

(2)用户的头部运动轨迹

多次的实验发现,标定的成功与否与用户的头部位置有很大的关系。根据退化研究,可以明确地提出——用户头部要避免在同一位置或小范围内进行标定。否则容易使某些点造成共面,从而引起退化。

具体结合标定中虚拟光标的显示位置,对标定

的实际操作应该做到:在标定同一横排的点时,用户头部要有水平方向上的移动;在标定不同横排的点时,用户头部要有深度方向上(垂直于 HMD 的显示平面)的移动。

图 3 是一组改进前后用户头部的运动轨迹比较图。改进前,用户头部位置相对集中,变化较小,导致标定效果很不理想;改进后,用户头部运动变化范围相对较大,分布较为均匀,标定很成功。

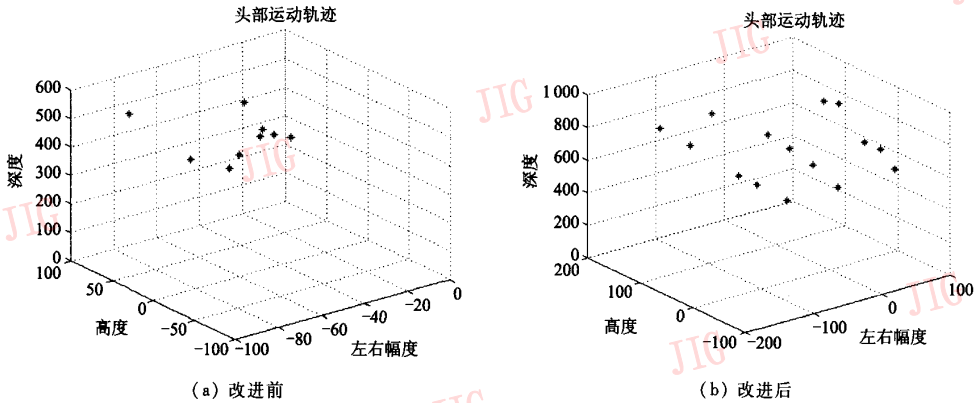


图 3 改进前后用户头部运动轨迹比较图

Fig. 3 Improvement comparison of the motion of user's head

标定结束后,将计算出的投影矩阵直接用于反投影,在 HMD 显示屏上 4 个色块中心点位置上叠加相关文字,定性观察投影点和真实点之间的重合程度来判断标定是否成功。对改进前后各做了 10 组标定来进行实验比较:改进前,有 3 组反投影后的文字在屏幕上乱飞,标定失败,有 4 组文字显示位置较为固定,但与色块中心点距离较大,只有 3 组重合程度较好;改进后,基本没有乱飞的情况,有 3 组重合程度不太高,其余的重合程度都很高。可以看出,将投影矩阵的退化研究应用到标定方法中后,标定效果明显改善了,标定的成功率大大提高了。

4 结论

为了成功地在增强现实中应用光学 HMD,必须先对其进行标定。本文在选定标定算法的基础上,分析了标定的投影矩阵的退化影响,改进了标定方法中对应点个数和用户头部运动轨迹。实验结果表明,改进后反投影的文字与真实标志色块中心点重合程度较高,标定的成功率大大提高了。

参考文献 (References)

- 1 Azuma R. A survey of augmented reality [J]. Presence: Teleoperators and Virtual Environments, 1997, 6(4): 355 ~ 385.
- 2 Tuceryan M, Navab N. Single point active alignment method (spaam) for optical see-through hmd calibration for AR[A]. In: International Symposium for Augmented Reality [C], Germany, Munich, 2000: 149 ~ 158.
- 3 Hua Hong, Gao Chun-yu, Ahuja Narendra. Calibration of a head-mounted projective display for augmented reality systems[A]. In: International Symposium on Mixed and Augmented Reality [C], Germany, Darmstadt, 2002: 176 ~ 185.
- 4 Tang A, Zhou J, Owen C. Evaluation of calibration methods for optical see-through head-mounted displays[A]. In: Proceedings of the Second IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality [C], Japan, Tokyo, 2003: 161 ~ 168.
- 5 Li Yu, Liu Yue, Wang Yong-tian. Study on registration method based on Gauss-Newton iteration algorithm for augmented reality system [A]. In: Proceedings of 4th International Conference on Virtual Reality and Its Applications in Industry [C], Tianjin, China, 2004: 300 ~ 305.
- 6 Forsyth David A, Ponce Jean. Computer Vision: A Modern Approach [M]. Englewood Cliffs, NJ, USA: Prentice Hall, 2002. [Forsyth David A, Ponce Jean 著. 计算机视觉:一种现代的方法(影印本) [M]. 北京:清华大学出版社,2004.]