

一种增强现实系统的三维注册方法

周雅 闫达远 王涌天 常红 徐彤

(北京理工大学光电工程系, 北京 100081)

摘要 三维注册技术是增强现实系统研究的一个重要方面. 现有的增强现实技术三维注册方法都是用平面标志来作为定位基准的, 且系统构造较复杂, 图象处理所需计算量较大, 还会因此引入误差. 该文提出了一种使用立体标志物的基于视觉的三维注册方法. 该方法只需要一个彩色 CCD 摄像机就可以完成三维环境注册, 并且不需要进行复杂的图象处理运算. 这种新方法能够有效简化注册系统和算法, 并且能消除使用多个传感器的配合误差.

关键词 增强现实 三维环境注册 立体标志物

中图分类号: TP391.9 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2000)05-0430-04

A Registration Method in Augmented Reality

ZHOU Ya, YAN Da-yuan, WANG Yong-tian, CHANG Hong, XU Tong

(Optical Engineering Department, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081)

Abstract Augmented reality (AR) is a technology in which a user's view of the real world is enhanced or augmented with additional information generated from a computer model. One of the key issues in the implementation of augmented reality is the registration problem. Synthetically, vision-based registration can offer superior solutions. In several existing registration methods, 2-D objects or pictures are used as positioning fiducials, and at least two cameras and/or separate tracking subsystems are needed. In this paper, a new registration method is proposed which uses a solid fiducial and a single color CCD camera. The new method significantly simplifies the registration system and algorithm, and coordination errors are eliminated. The algorithm requires little computation and can be easily realized in real time without latency.

Keywords Augmented reality, Registration, Solid fiducial

0 前言

增强现实(AR)是一个相对来说较新的研究领域, 是一种利用计算机对使用者所看到的真实世界产生的附加信息进行景象增强或扩张的技术. Azuma 是这样定义增强现实的: 虚实结合, 实时交互, 三维注册^[1]. 增强现实系统是利用附加的图形或文字信息, 对周围真实世界的场景动态地进行增强. 在增强现实的环境中, 使用者可以在看到周围真实环境的同时, 看到计算机产生的增强信息. 这种增强的信息可以是在真实环境中与真实环境共存的虚拟物体, 也可以是关于存在的真实物体的非几何信息.

由于增强现实在虚拟现实与真实世界之间的沟壑上架起了一座桥梁. 因此, 增强现实的应用潜力是相当巨大的. 例如, 可以利用叠加在周围环境上的图形信息和文字信息, 以指导操作者对设备进行操作、维护或是修理, 而不需要操作者去查阅手册, 甚至不需要操作者具有工作经验; 既可以利用增强现实系统的虚实结合技术进行辅助教学, 同时增进学生的理性认识和感性认识; 也可以使用增强现实系统进行高度专业化训练等等.

实现增强现实的一个方法是使用光学透射头盔显示器(optical see-through HMD). 使用者可以透过放置在眼前的半透、半反的光学合成器看到外部真实环境的景物, 同时也可以看到光学合成器反射

的由头盔内部显示器上计算机生成的图象. 当转动和移动头部的时候, 眼睛所看到的视野随之变动, 同时计算机产生的增强信息也应该随之做相应的变化. 因此, 增强现实系统必须能够实时地检测出回路中人的头部位置和指向, 以便能够根据这些信息实时确定所要添加的虚拟信息在真实空间坐标中的映射位置, 并将这些信息实时显示在图象的正确位置. 这就是三维环境注册系统所要完成的任务. 因此三维环境注册技术一直是计算机应用研究的重要方面, 也是主要的难点.

在目前已经开发出来或正在开发的典型增强现实系统中, 主要使用的三维注册方法有以下几种:

(1) 基于认知的三维环境注册方法 即在系统中通过一个头部跟踪器, 确定使用者头部的方向和位置, 另外几个三维跟踪器安附在几个关键部件上, 使系统可以分别对它们的位置和状态进行监控. 但系统需事先了解各部件之间关系, 根据不同跟踪器的信息, 确定部件的状态, 从而作出相应的增强信息添加^[2]. 这种方法存在的主要问题是, 系统的延迟和由于跟踪器之间配合误差造成的对位置精度的影响.

(2) 基于数字图象分析的三维环境注册方法 该方法是首先使用系统中安装在头盔上的两台摄像机同时对外界环境进行拍摄, 再利用数字图象处理的方法识别外界环境中的一些特征景物或已知标志, 以便从图象视差中获得跟踪信息, 从而判定使用者头部在环境空间坐标中所在的位置和方向^[3]. 这种系统采用光学跟踪方法, 因而不再需要单独的跟踪子系统, 整个系统结构简单, 而且通用性强. 但是图象处理需要大量运算, 常常会造成相当大的延迟.

(3) 基于视觉(Vision-based)的三维环境注册方法 该方法首先将一些特殊的标志点放置在真实物体上, 然后用计算机视觉的方法实时识别出这些标志点, 并计算使用者头部相对于这一物体的位置和方向, 再据此确定虚拟物体所应该放置的位置和方向^[4]. 这种方法具有较好的综合性能, 尤其适用于光学透射式头盔显示器.

现有的几种基于视觉的三维注册方法都是用平面标志来作为定位基准的, 因此必须使用两个以上的摄像机, 计算机则依靠不同摄像机输出图象信号的差别来判别使用者的头部方位, 但系统的安装和算法都比较复杂. 那么, 如果使用立体的标志物, 是不是可以解决这个问题呢? 从这个想法出发, 笔者提出了一种使用立体标志物的基于视觉的三维注册方法.

1 使用立体标志物的三维环境注册

使用一个边长已知的正方体(也可以使用三根正交的不同颜色的等长杆)作为标志物, 首先将该正方体的一个顶点用来表示空间坐标系的原点, 然后将从这一顶点延伸出去的两条棱用高饱和度的涂料漆成不同的颜色(比如红、绿、蓝), 分别表征空间坐标系的 3 个正交坐标轴. 在头盔显示器上安装一个确定焦距的彩色 CCD 摄像机, 该摄像机的光轴代表着使用者的视线方向. 当佩戴头盔显示器的使用者处于某一空间位置时, 安装在使用者头部的摄像机就从该处以某一角度和距离拍摄到这 3 个空间坐标轴. 在摄像机输出的视频信号输入计算机后, 计算机就从所拍摄到的图象中提取出表征 3 个坐标轴的部分图象. 该提取出的图象应该是从不同角度和距离处拍摄到的三条交于一个点的直线图象, 该提取出来的三条直线的长短和比例都是不一样的, 根据这些参数可以确定摄像机在标志物所表征的空间坐标系中的位置和方向. 若将使用者移动和改变视点时, 摄像机拍摄的图象输入计算机, 计算机则可以根据图象实时地确定头盔显示器位置和方向, 以便对使用者进行定位跟踪. 同时, 计算机可以根据图象中坐标系所在的位置和角度确定虚拟物体或信息所应该放置的位置和方向. 这样就可以实现三维环境注册.

已知空间坐标系 xyz , 其 3 轴分别与 OX , OY , OZ 所在直线重合, 并且已知 $OX = OY = OZ = a$. 如图 1 所示, OX 、 OY 和 OZ 是立体标志物的 3 条彩色棱, 分别对应着空间坐标系的 3 个坐标轴. 某一时刻, 处于此空间坐标系中的摄像机, 以某一角度拍摄到这 3 条轴线的图象. 显然, 摄像机像面上的 3 条直线其实是该三轴在物空间垂直于摄像机光轴的物面上投影的像. 如果不考虑摄像机镜头的畸变, 根据物

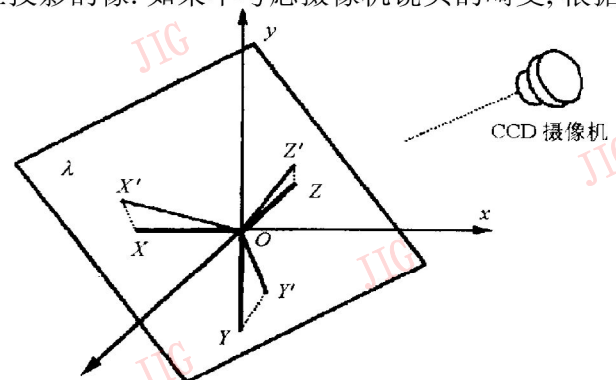


图 1 空间坐标系在物平面上的投影

像相似的原理,像面上3条直线 $O''X''$ 、 $O''Y''$ 、 $O''Z''$ 长短比例和相互之间的夹角与物面上 OX' 、 OY' 、 OZ' 的比例和夹角是相等的。

由于 OX 、 OY 、 OZ 等长且正交,因此 XOY 、 YOZ 、 XOZ 分别构成腰长为 a 的等腰直角三角形,并且它们在物面上的投影也应该是三角形。现以 ΔXOY 为例,说明本文的算法(如图2所示)。

图2所示为等腰直角 ΔXOY 及其在物平面上的投影 $\Delta X'OY'$ 。图中 γ 是 XOY 平面与物平面之间的夹角, θ 是 OX 与两平面交线段夹角。设 $OX = OY = a$,因此 $XY = r = \sqrt{2}a$ 。用 x' 、 y' 和 r' 分别表示物平面 λ 上的投影长,则它们之间的比例可以通过测量CCD像面上 OX 、 OY 、 OZ 的像来求得。可以写作

$$x' : y' : r' = m : n : l \quad (1)$$

参看图2,通过简单的几何推导有

$$a^2 \cos^2 \theta + a^2 \sin^2 \theta \cos^2 \gamma = x'^2 \quad (2)$$

$$a^2 \sin^2 \theta + a^2 \cos^2 \theta \cos^2 \gamma = y'^2 \quad (3)$$

$$2a^2 - (a \sin \theta \sin \gamma - a \cos \theta \cos \gamma)^2 = r'^2 \quad (4)$$

用方程(4)去除方程(2)和(3),得到

$$\frac{\cos^2 \theta + \sin^2 \theta \cos^2 \gamma}{2 - (\sin \theta \sin \gamma - \cos \theta \cos \gamma)^2} = \frac{m^2}{l^2} \quad (5)$$

$$\frac{\sin^2 \theta + \cos^2 \theta \cos^2 \gamma}{2 - (\sin \theta \sin \gamma - \cos \theta \cos \gamma)^2} = \frac{n^2}{l^2} \quad (6)$$

令 $t = \cos \theta$,方程(5)和(6)可以写成

$$At^4 + Bt^2 + C = 0 \quad (7)$$

其中

$$\begin{aligned} A &= 4(l^2 - m^2 - n^2)^2 + (m^2 - n^2)^2 \\ B &= -4(l^2 - m^2 - n^2)^2 + (m^2 - n^2)^2 \\ C &= (l^2 - m^2 - n^2)^2 \end{aligned} \quad (8)$$

方程(7)是关于 t^2 的二次方程。根据韦达定理,方程两个解的和等于1。这两个解对应着 θ 和它的补角 θ' (见图2)。由于 $OX = OY$,且与物平面夹角大的一边对应应在物平面上的投影较短,而 OX 和 OY 的像可以依靠不同颜色区别开,因此通过比较两个投影的长度,就可以选择出正确的 t^2 。

进一步化简方程有

$$\cos^2 \gamma = \frac{m^2 - t^2(m^2 + n^2)}{n^2 - t^2(m^2 + n^2)} \quad (9)$$

由于本文系统工作范围是空间坐标系的第一相限,有 $\gamma > 0$, $\cos \gamma$ 就可以唯一确定了。

众所周知,两个空间平面法线之间的夹角,就等于两个平面之间的二面角。 ΔXOY 所在平面的法线实际上就是 OZ 所在直线方向,即空间坐标系的 z 轴;而物平面 λ 的法线实际上就是摄像机的光轴。因此 α 就是摄像机光轴与空间坐标系 z 轴的夹角。同理,即可以求出摄像机光轴与空间坐标系 y 轴的夹角 β ,与 x 轴的夹角 γ 。

至此,已经知道了摄像机光轴在空间坐标系中的方向,由此可以求出 OX 、 OY 、 OZ 三轴在物平面上的投影

$$OX' = OX \cdot \cos \left| \frac{\pi}{2} - \gamma \right| = a \sin \gamma$$

$$OY' = OY \cdot \cos \left| \frac{\pi}{2} - \beta \right| = a \sin \beta$$

$$OZ' = OZ \cdot \cos \left| \frac{\pi}{2} - \alpha \right| = a \sin \alpha$$

如图3所示, C'' 为像面中心; C' 为成像光学系统中心; C 为 C' 在物空间的共轭点; O 为空间坐标系原点; O'' 为 O 点在像面上的位置。已知摄像机像面

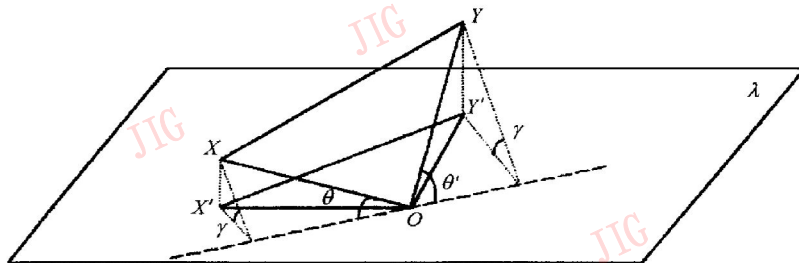


图2 坐标轴在物平面的投影示意图

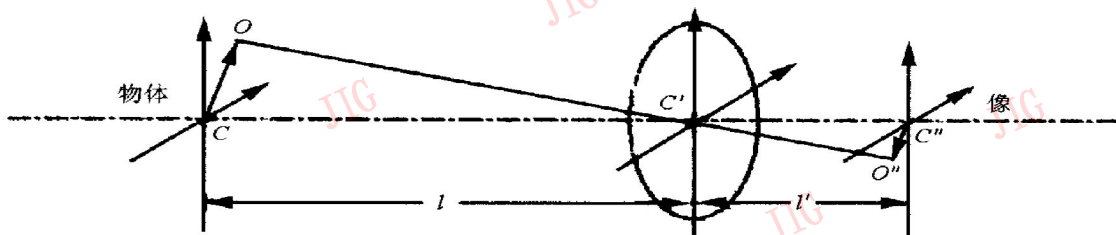


图3 摄像机光学系统成像关系

上 3 条投影直线像的大小 $O''X''$, $O''Y''$, $O''Z''$, 就可以根据摄像机光学系统成象关系求出摄像机(即图中 C' 点)在空间坐标系中的位置。

根据摄像机的空间方位以及空间坐标系在摄像机所摄图象中的对应位置, 就可以计算出需要放置在空间坐标系某位置处的虚拟物体或信息在图象中对应的位置, 从而实现虚拟物体在三维环境中的注册。

2 结 论

这种使用立体标志物的三维注册方法, 与基于数字图象处理的三维环境注册方法一样, 具有通用性较强和系统构造简单的优点, 且只需要一个彩色 CCD 摄像机就可以完成三维环境注册, 而不再需要其它的跟踪定位系统, 而且该方法既不存在摄像机和跟踪器之间的误差, 也不存在基于图象视差分析的三维注册方法中几台 CCD 摄像机之间的安装误差。另外, 由于我们采用的是高饱和度的彩色立体标志物, 且算法中只需要做简单的象素提取, 而不需要进行复杂的图象处理运算, 因此不会造成大的系统延迟。

参 考 文 献

- 1 R T Azuma. A survey of augmented reality. Presence: Teleoperators and Virtual Environments, 1997, 4: 355~ 385.
- 2 S Feiner, B MacIntyre, D Seligmann. Knowledge-based augmented reality. Communications of the ACM, 1993, 52~ 62.

- 3 P Milgram, S Zhai, D Drascic *et al.* Applications of augmented reality for human-robot communication. Proceedings of IROS'93: International Conference on Intelligent Robots and Systems, Yokohama Japan, 1993, 1467~ 1476.
- 4 U Neumann, Y Cho. A self-tracking augmented reality system. Proceedings of the ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology, 1996, 109~ 115.



周 雅 北京理工大学信息工程学院光电工程系博士研究生. 主要研究方向为增强现实技术系统及应用。

闫达远 北京理工大学信息工程学院光电工程系副教授. 主要研究方向为虚拟现实技术、辐射度学与光度学、辐射定标技术等。

王涌天 北京理工大学信息工程学院光电工程系教授, 博士生导师. 主要研究方向为虚拟现实技术、二元光学、光学设计等。

常 红 北京理工大学信息工程学院光电工程系博士研究生. 主要研究方向为虚拟现实数据手套技术。

徐 彤 北京理工大学信息工程学院光电工程系博士研究生. 主要研究方向为虚拟现实技术应用。