

一种基于平面模板的虚实配准算法

顾耀林 毛 健

(江南大学信息工程学院, 无锡 214036)

摘 要 虚实配准是增强现实的关键技术。因为有运算量小实时性强的特点, 利用平面模板进行虚实配准被广泛使用。本文算法利用平面模板进行虚实配准中的单应性映射关系, 建立从平面模板坐标系到摄像机坐标系 3 维空间坐标转换和从摄像机坐标系到投影平面的 3 维-2 维空间坐标转换, 既减小了运算量, 又解决了人工定标的问题。在实现虚实配准的基础上, 进一步探讨了配准的优化问题, 对关键的单应性矩阵进行优化筛选, 提高虚实配准的强劲性, 实现部分标志点被遮挡情况下的虚实配准。实验结果证明, 本文算法成功实现了虚实配准, 并在抗遮挡性上有强劲的表现。

关键词 虚实配准 增强现实 单应性映射 标志点

中图分类号: TD672 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-8961(2006)08-1175-05

Pattern-Based Algorithm for Registration of Virtual and Real Objects

GU Yao-lin, MAO Jian

(School of Information Engineering, Southern Yangtze University, Wuxi 214036)

Abstract Registration of virtual and real objects is a crucial technology for augmented reality. Because pattern-based algorithm has less operation cost, the method has been used widely in augmented reality. Homography is a mapping relation existing in the pattern-based registration. It has been employed to build the 3D transformation from pattern coordinate to camera coordinate and the 3D-2D transformation from camera coordinate to project coordinate in this paper. As a simple proportional relation, homography cuts back the operation cost. Moreover, it solves the problem of manual calibration. After elaborating the registration course, registration optimization has been further discussed in the paper. The best homography will be selected from several computed results in order to enhance the robustness of registration. The optimization ensures that registration succeeds with partial mark points occluded.

Keywords registration, augmented reality, homography, mark point

1 引 言

虚实配准是增强现实的关键技术。配准过程确定虚拟物体在不同坐标空间中的映射关系, 并将其实时显示在图像的正确位置, 实现增强现实。

早期的增强现实系统依靠各种传感器(如磁性、机械和惯性传感器)定位摄像机, 配准图像。由于这些方法的精度和较多的使用限制条件不能满足增强现实的需要, 计算机图形学和计算机视觉技术被引入虚实配准过程^[1,2]。基于视觉的配准方法通

过分析摄像图像序列中的已知模板或自然特征进行配准。因为有运算量小实时性强的特点, 利用模板进行虚实配准被广泛使用。例如 ARToolkit 采用二值化图像^[3], 快速跟踪黑白方块合成的模板定位, 条件是需要人工事先严格定标, 用定标后的参数来建立成像模型。James 在类似的模板基础上提出全局仿射坐标系的算法^[4], 摆脱欧氏空间下的严格定标过程。但是这两种方法在计算成像模型时, 需要首先检测到模板中所有的标志点, 因而, 系统在标志点出现任何遮挡的情况下都无法实施, 影响系统的通用性。Jose 和 Rajeev 将模板固定为条形组方

收稿日期: 2005-02-24; 改回日期: 2005-09-29

第一作者简介: 顾耀林(1948 ~), 男, 教授。主要研究方向是计算机图形学、虚拟现实与增强现实。E-mail: yaolin@xd990.com

块,并加以颜色辅助定位,可以在支持部分遮挡点的同时提高检测速度,简化定位计算。可是这种方法仍然需要人工定标,并且由于模板色块的使用,特征检测易受光照、摄像机性能的干扰,造成图像跳动,性能不够稳定。

上述这些方法都忽略了平面成像的重要特点。如图 1 所示,多个不同角度的视平面切割交于同一视点的多条视线,不同视平面与同一视线的交点在图像上成对应关系,其几何意义可以被描述为当 $(ad \neq bc)$ 时, $x \rightarrow [(ax + b)/(cx + d)]$,这就是平面单应性关系。这种关系正好适用于描述下述情况视频中各帧图像的关系:

- (1) 摄像机只存在旋转运动;
- (2) 摄像机摄取对象为平面景物。

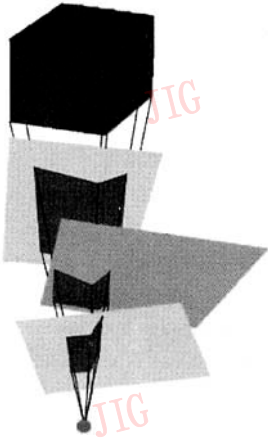


图 1 平面成像单应性关系
Fig. 1 Homography

本文算法正是利用了平面模板进行虚实配准中的单应性关系解决了上述方法中存在的问题。

2 算法原理及理论推导

2.1 算法原理

虚实配准的目标是使观察者实时得到的是虚拟物体与真实场景无缝结合的图像。基于平面模板的虚实配准方法,采用 3 个坐标系(平面模板坐标系、摄像机坐标系和投影平面坐标系)来描述虚拟物体、平面模板、真实空间、摄像机和观察者之间的联系。如图 2 所示,真实空间坐标基于模板坐标系建立,虚拟物体对准模板,投影图像平面坐标系的法向与观察者视线重合。从摄像机坐标系的视点中心

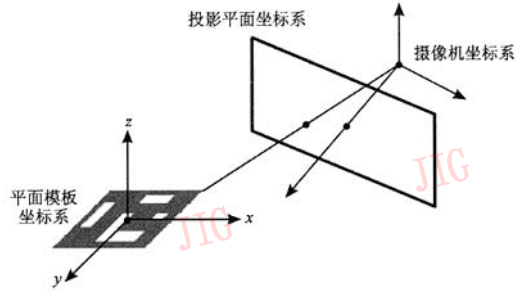


图 2 平面模板虚实整合坐标关系
Fig. 2 Coordinate system induced by a planar pattern

发出的射线,既视线,穿越投影平面和模板平面,使模板上的各点与其在投影平面上的像点形成单应性关系,通过这种简单的比例关系,可以快速求出虚拟物体成像过程中在不同坐标系之间的转换参数。

从 3 个坐标系统的关系可知,虚拟物体要在投影平面成像,需要以下步骤:

- (1) 从平面模板坐标系到摄像机坐标系进行 3 维空间坐标转换;
- (2) 从摄像机坐标系到投影平面的 3 维-2 维空间坐标转换。

经过这两个步骤,虚拟物体与真实场景结合后,投影在观察平面上,以 2 维图像的形式向观察者显示。

2.2 3 维空间坐标转换推导

假定已知任意点在平面模板坐标系中的坐标 (x, y, z) ,要测定该点在摄像机坐标系中的坐标 (x', y', z') ,有下列关系表达式成立

$$(x', y', z')^T = r(x, y, z)^T + t \tag{1}$$

其中, $r = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix}, t = (t_1 \quad t_2 \quad t_3)$

要得到摄像机坐标系下的坐标,就是要确定式(1)中的 r 和 t 。

依照针孔模型,首先假定平面模板坐标系与摄像机坐标系 XOY 平面重合,即 $z = z' = 0$ 。模板平面上的标志点都处在同一个平面上,它们对应的像点也必然处在同一个平面上,模板上的标志点 (x, y) 与它的像点 (x', y') 之间建立了一个单应性映射 h 。

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{bmatrix} = h \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \tag{2}$$

$$h = \begin{pmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} \\ h_{31} & h_{32} & h_{33} \end{pmatrix}$$

每一个标志点可确定如下两个线性等式

$$x'(h_{31}x + h_{32}y + h_{33}) = h_{11}x + h_{12}y + h_{13}$$

$$y'(h_{31}x + h_{32}y + h_{33}) = h_{21}x + h_{22}y + h_{23}$$

显然,由 4 个非线性相关的标志点,建成一个 8×9 的矩阵,可以解出 h 的 9 个参数。

但在 z 为 0 的条件下,由式(2)表示的转换关系只能支持 2 维虚拟景物在模板平面上的配准,所以,要想实现 3 维虚拟物体配准,还需要进一步用已经得到的 h 求出式(1)中的 r 和 t 。

h 作为简化的透视投影矩阵表示形式,可以被定义为

$$h = \begin{pmatrix} f_u r_{11} & f_u r_{12} & f_u t_1 \\ f_v r_{21} & f_v r_{22} & f_v t_2 \\ r_{31} & r_{32} & t_3 \end{pmatrix} \quad (3)$$

旋转矩阵 r 是正交规范化矩阵, $r^T r = I$ 一定成立,利用这一特性,可解得 f_u 和 f_v 。

$$f_u = \sqrt{\frac{h_{11}h_{12}(h_{21}^2 - h_{22}^2) - h_{21}h_{22}(h_{11}^2 - h_{12}^2)}{-h_{31}h_{32}(h_{21}^2 - h_{22}^2) - h_{21}h_{22}(h_{31}^2 - h_{32}^2)}}$$

$$f_v = \sqrt{\frac{h_{11}h_{12}(h_{21}^2 - h_{22}^2) - h_{21}h_{22}(h_{11}^2 - h_{12}^2)}{-h_{31}h_{32}(h_{11}^2 - h_{12}^2) - h_{11}h_{12}(h_{31}^2 - h_{32}^2)}}$$

即而得到

$$\lambda = \frac{1}{\sqrt{h_{11}^2/f_u^2 + h_{21}^2/f_v^2 + h_{31}^2}}$$

以上结果代入式(3), r 和 t 中所有的参数就可以被确定下来

$$\begin{aligned} r_{11} &= \lambda h_{11}/f_u & r_{12} &= \lambda h_{12}/f_u & r_{13} &= r_{21}r_{32} - r_{31}r_{22} \\ r_{21} &= \lambda h_{21}/f_v & r_{22} &= \lambda h_{22}/f_v & r_{23} &= r_{31}r_{12} - r_{11}r_{32} \\ r_{31} &= \lambda h_{31} & r_{32} &= \lambda h_{32} & r_{33} &= r_{11}r_{22} - r_{21}r_{12} \\ t_1 &= \lambda h_{13}/f_u & t_2 &= \lambda h_{23}/f_v & t_3 &= \lambda h_{33} \end{aligned}$$

这样,就完成了从平面模板坐标系到摄像机坐标系进行 3 维空间的转换。

2.3 3 维-2 维空间坐标转换推导

要将摄像机坐标系下的虚拟物体投影到平面坐标系中,转换关系如图 3 所示^[1]。摄像机坐标系下一点 (x', y', z') 在投影平面上的坐标为 (X, Y) , d 表示摄像机中心至显示器的距离,由相似原理,有

$$\frac{X}{d} = \frac{x'}{z'} \quad \frac{Y}{d} = \frac{y'}{z'}$$

由此可以得到

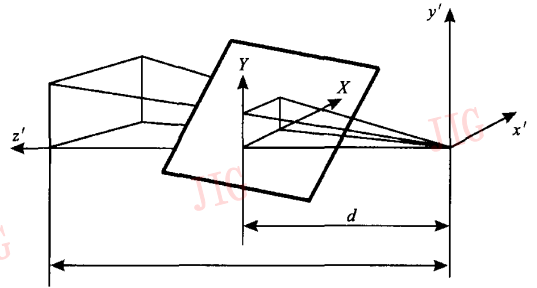


图 3 虚拟物体投影坐标变换

Fig. 3 Transformation between 3D object and 2D projection coordinate system

$$X = \frac{dx'}{z'} \quad Y = \frac{dy'}{z'}$$

这样,就完成了对虚拟物体的配准。

2.4 配准优化问题

从上述算法推导过程可以看出,要提高虚实配准的准确性,关键在于单应性 h 的确定。每 4 个非线性相关点组建的方程组可求出 1 个 h , 平面模板上可取的标志点数常常是大于 4 的,如何从多个 h 中选出最优的单应性矩阵值,用于虚拟物体与真实场景的配准,使配准结果能得以优化是个问题。

本文算法采用 RANSAC (random sample consensus) 方法来确定点 $m-m'$ 关联的最优单应性矩阵 $h^{[5]}$, 主要步骤为

- (1) 从多个检测到的标志点中随机抽取 4 个标志点组成一组;
- (2) 计算出该组对应的单应性映射矩阵;
- (3) 按照式(2)计算出该组中 4 个标志点 m_i 的 hm_i , 再求出 m'_i 与 hm_i 的差距 d_i ;
- (4) 将差距 d_i 与一设定的阈值 A 比较, 如 $d_i < A$, 则累计 n 值加 1, 如该组最后计算出的 $n \geq 3$, 保留该组中的 4 个标志点位置和对应的 h ;
- (5) 按上述步骤筛选其他标志点组;
- (6) 在被保留的标志点中再随机抽取 4 个标志点组成一组, 重复前面的步骤。可设置重复的次数, 使筛选终止, 得到符合条件的最优单应性映射关系。

算法描述如下:

```

MaxInliers = 0
For (n = 1 to nIterations)
    Choose random subset of four matches
    Calculate Homography
    Calculate how many of the other matches agree (inliers)
    
```

If (inliers > maxInliers)

BestHomography = thisHomography

Recalculate Best Homography from All Inliers

对标志点进行随机抽样的目的在于当部分标志点定位不准确或出现误匹配时,可以通过筛选的过程去处这些标志点,避免因这些标志点的使用影响虚拟物体的准确定位。同时,因为不固定取点,也不需要全部的标志点,当标志点有部分被遮挡时,不会影响算法的运行,确保虚实配准的稳定性。

为了提高配准的速度,动态配准中本文算法还利用当前帧筛选出的最优单应性矩阵预测下一帧的特征点位置。

3 实验结果与分析

在实验室环境中,应用上述算法进行虚实配准。

实验采用了高对比度的黑白两色平面模板来提高检测抗环境光照条件变化能力,模板中的白色标志块的边缘与平面模板坐标系中的坐标轴方向平行,可以快速获取坐标中心,标志点通过角点检测获取,共 22 个。

实验结果如图 4 所示,图 4(a) ~ (c) 显示了本算法在一般情况下完成的虚实配准,图 4(b) 为 2 维虚拟景物配准,图 4(c) 为 3 维虚拟物体配准。图 4(d)、(e) 显示在有部分遮挡点情况下的虚实配准,结果表明本算法在模板上的标志点不能全部获取时,仍然能通过可利用点之间的单应性比例关系和模板的约束条件得到模板坐标系的方向和中心位置,确保虚实配准的成功。实验中,标志点可以被遮挡的比例是受到限制的,过分的遮挡将会导致配准失败,具体的比例随模板中标志点的数量和分布情况的不同而不同。

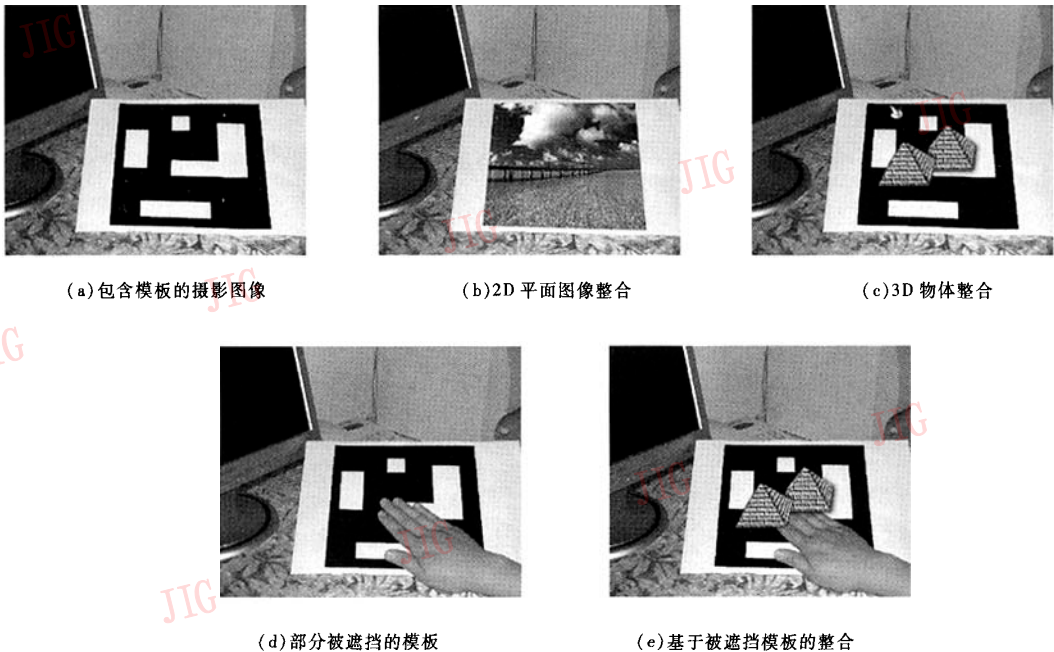


图 4 虚实整合实验结果

Fig. 4 Results of registration

利用平面成像的单应性特点,计算出虚拟物体在不同空间中的转换关系,避免了传统方法中人工定标的过程,同时保证模板上标志点被部分遮挡情况下算法仍能成功实施配准。在实现虚实配准的基础上,又进一步探讨了配准的优化问题,对关键的单应性矩阵进行优化筛选,并用于动态

配准的特征点定位预测,以增强配准的准确性和实时性。

在实际应用中,平面模板可以不用事先准备,标志点采用自然场景中处于同一平面上的特征点,或者是远景中可以被视为处于同一平面上的特征点均可。只是被选取的标志点在变化,标志点之间的关

联也就需要重新计算。

参考文献 (References)

- 1 SHI Qi, WANG Yong-tian, CHENG Jing. Vision-based algorithm for augmented reality registration [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2002, 7(7): 679 ~ 683. [施琦, 王涌天, 陈靖. 一种基于视觉的增强现实三维注册算法[J]. *中国图象图形学报 (A 版)*, 2002, 7(7): 679 ~ 683.]
- 2 MING De-lie, LIU Jian, TIAN Jin-wen. A study on the registration technology in augmented reality[J]. *Journal of Image and Graphics*, 2003, 8(5): 557 ~ 561. [明德烈, 柳健, 田金文. 增强现实中的虚
- 3 实注册技术研究[J]. *中国图象图形学报*, 2003, 8(5): 557 ~ 561.]
- 3 Wayne Piekarski, Bruce H. Thomas. Augmented reality user interfaces and techniques for outdoor modeling [A]. In: *ACM SIGGRAPH Symposium on interactive 3D Graphics* [C], California, USA, 2003; 228 ~ 230.
- 4 James R. Vallino. *Interactive Augmented Reality* [D]. Rochester, NY; University of Rochester, 1998.
- 5 Simon J D. Prince, Ke Xu, Adrian David Cheok. Augmented reality camera tracking with homographies [J]. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 2002, 22(4): 39 ~ 45.