

中图法分类号: TP301 文献标志码: A 文章编号: 1006-8961(2011)04-0680-06

论文索引信息: 李扬, 孙超, 张明敏, 张文杰, 潘志庚. 跟踪与匹配并行的增强现实注册方法[J]. 中国图象图形学报, 2011, 16(4): 680-685

跟踪与匹配并行的增强现实注册方法

李扬¹⁾, 孙超¹⁾, 张明敏¹⁾, 张文杰²⁾, 潘志庚¹⁾

¹⁾(浙江大学 CAD/CG 国家重点实验室, 杭州 310058) ²⁾(英特尔亚太研发有限公司, 上海 200241)

摘要: 提出一种基于自然特征的增强现实并行注册方法。基于双核 CPU 双通道的注册策略, 一个线程利用 KLT 算法进行跟踪注册, 另一个线程使用 Surf 特征匹配算法进行宽基线注册校正。延迟单应阵概念的提出, 解决了特征跟踪与匹配的线程同步问题。同时, 提出特征关键帧的思想, 提高了并行注册的准确性与稳定性。实验结果表明, 该方法在实时的情况下, 有效地解决了基于特征跟踪方法的误差累积问题, 是一种准确、稳定、有效的自然特征注册方法。

关键词: 增强现实; 并行注册; 线程同步

Parallel tracking and matching for natural feature based AR registration

Li Yang¹⁾, Sun Chao¹⁾, Zhang Mingmin¹⁾, Zhang Wenjie²⁾, Pan Zhigeng¹⁾

¹⁾(CAD&CG State Key Lab., Zhejiang University, Hangzhou 310058 China)

²⁾(Intel Asia-Pacific Research & Development Ltd, Shanghai 200241 China)

Abstract: A robust natural feature based parallel registration method is proposed. The method uses two threads for registration on a dual-core computer, one thread using KLT for tracking, while the other using Surf to reset the accumulated-errors. Delayed-homography is proposed to solve the problem of thread Synchronization. At the same time, the idea of key-frame, which is defined in this paper, increased the accuracy and stability of the registration. The experiment result proved that the multi-thread method solved the problem of accumulated-errors, and it is a robust feature based real-time registration method.

Keywords: augmented reality; parallel registration; thread synchronization

0 引言

增强现实(AR)通过图形学和视觉技术,将虚拟的信息融合到真实世界中,真实的环境和虚拟的物体实时地叠加到同一个空间。Azuma 将其定义为虚实结合、实时交互、3 维注册^[1]。为了达到增强现实虚实无缝融合,3 维注册起着重要的作用,这也是

近十年来增强现实研究领域最大的热点之一。在增强现实 3 维注册研究中,基于特征的注册研究占主要部分^[2]。

基于特征的注册方法是通过在 2 维图像特征点与 3 维场景特征点之间建立一一对应关系,求解摄像机位姿。现有基于特征的注册技术可以分为两类:基于特殊标识的注册与基于自然特征的注册。基于特殊标识的注册方法最具代表性的是由日本广

收稿日期:2010-09-03;修回日期:2010-10-13

基金项目: Intel 高校合作项目(120110007); 国家高技术研究发展计划(863)项目(2009AA062704); 中国捷克合作项目(2010-39-8); 国家科技部世博专项(2009BAK43B07)。

第一作者简介: 李扬(1986—),男。浙江大学计算机应用专业硕士研究生,主要研究领域为增强现实,基于视觉的人机交互,物理仿真等。E-mail: liyanguestc@163.com。

通讯作者: 张明敏, E-mail: zmm@cad.zju.edu.cn。

岛城市大学与美国华盛顿大学联合开发的增强现实系统二次开发工具—ARtoolkit^[3]和由加拿大国家研究院开发的 ARTag^[4]。基于特殊标识的注册方法具有快速、稳定、准确的特点,但是基于特殊标识的注册需要标识在场景中一直完整可见,影响了增强现实的应用范围,同时标识在场景中也带来了视觉污染。基于自然特征的 SFM 注册方法,由于其稳定性较差、时间代价高等原因,还没有在增强现实中得到广泛的应用。而很多增强现实应用表明,平面的自然特征标识已可以满足大部分应用需求^[5]。目前通常采用的策略是,在初始化阶段,使用宽基线匹配的方法注册世界坐标系(标识平面)与初始帧间的单应关系,在后续阶段利用自然特征跟踪方法注册相邻帧间的单应关系,充分利用了帧间的关系,提高了注册的速度以及稳定性。KLT(Kanade-Lucas-Tomasi)作为一种快速、准确的特征跟踪算法,被广泛应用于注册相邻帧间的单应矩阵,但是因为这类基于特征跟踪的方法通过迭代相邻两帧间的单应性矩阵来计算世界坐标系(标识平面)与当前帧间的单应关系,虽然它们能满足实时性要求,却引入了误差累积的缺陷,降低了系统的稳定性,使得系统在运行过程中误差不断增大,不能满足长时间的3维注册需要。Surf^[6]特征匹配算法是目前比较流行的宽基线特征点匹配算法之一,可以用来解决积累误差问题;但是由于 Surf 算法的计算复杂度较高,如果每帧都做 Surf 提取与匹配工作,很难应用在实时的增强现实场合中^[7]。针对上述矛盾,本文提出了基于光流法 KLT 和宽基线自然特征匹配(Surf)算法的并行注册算法,并给出了特征关键帧的概念;采用双通道的思想,利用 KLT 算法进行特征跟踪注册^[8], Surf 特征匹配算法则用于特征关键帧间的注册校正,清零积累误差。实验结果分析表明,本文提出的并行注册算法提高了增强现实注册的稳定性以及准确度。在不存在摄像头剧烈晃动的情况下,可以较好地完成增强现实的注册任务。

本文的主要贡献有两个方面:

1) 提出了一种新颖的基于双核 CPU 双通道的跟踪与匹配并行的增强现实注册方法,通过在两个线程分别执行自然特征跟踪与宽基线特征匹配算法,在保证实时的情况下,解决了基于帧间单应矩阵的增强现实注册方法的误差积累问题。

2) 在并行注册方法中,提出了特征关键帧的概念,进而以此为基础提出了基准特征关键帧、延迟单

应阵等概念,特征关键帧的思想提高了并行注册的准确性与稳定性,降低了并行注册过程中摄像机因为运动模糊或者特征点数量过少而产生的误差,延迟单应阵的提出解决了特征跟踪与匹配的线程同步问题。

1 基于单应矩阵的自然特征注册方法

在针孔相机成像模型下,齐次坐标表示的世界坐标系的点 $X_w = (x_w, y_w, z_w, 1)$ 与其在像平面上的投影 $X_i = (x_i, y_i, 1)$ 的关系可以用下式表达:

$$X_i = P_i X_w = \lambda K M \begin{pmatrix} R_1 & R_2 & R_3 & T \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} X_w \quad (1)$$

式中, λ 表示比例因子,矩阵 K 为摄像机的内部参数矩阵,本系统中 K 作为已知参数,矩阵 M 为模型视点矩阵,包括3个旋转分量(R_1, R_2, R_3)以及一个平移分量(T)。当 X_w 在标识平面上时 $Z_w = 0$, 式(1)可以转换为

$$\begin{pmatrix} x_i \\ y_i \\ 1 \end{pmatrix} = \lambda K \begin{pmatrix} R_1 & R_2 & R_3 & T \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_w \\ y_w \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} = \lambda K \begin{pmatrix} R_1 & R_2 & T \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_w \\ y_w \\ 1 \end{pmatrix} = H_w^i \begin{pmatrix} x_w \\ y_w \\ 1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

式中矩阵 H_w^i 为标识平面与图像平面间的单应性矩阵。在已知单应性矩阵 H_w^i 、比例因子 λ , 摄像机内部参数矩阵 K 的情况下,很容易求得 $\hat{R}_1, \hat{R}_2, \hat{T}$, 并根据正交性, $R_3 = R_1 \times R_2$ 。因为数据存在误差,本文使用下式来求取矩阵 M :

$$T = \frac{\hat{T}}{\|\hat{R}_2\|}, R_2 = \frac{\hat{R}_2}{\|\hat{R}_2\|}, \hat{R}_3 = \hat{R}_1 \times R_2, \\ R_3 = \frac{\hat{R}_3}{\|\hat{R}_3\|}, R_1 = R_2 \times R_3 \quad (3)$$

对于单应性矩阵 H_w^i , 通过迭代的方式求取^[8-9]。在初始帧情况下,通过 Surf 特征匹配结合 RANSAC 的方法可以求得 H_w^0 。在此假设 H_w^i 已知,定义矩阵 H_w^{i+1} 为第 i 帧图像平面与第 $i+1$ 帧图像平面间的单应性矩阵:

$$\begin{pmatrix} x_{i+1} \\ y_{i+1} \\ 1 \end{pmatrix} = H_w^{i+1} \begin{pmatrix} x_i \\ y_i \\ 1 \end{pmatrix} \quad (4)$$

由式(2)(4)可以推得:

$$\mathbf{H}_w^{i+1} = \mathbf{H}_i^{i+1} \mathbf{H}_w^i \quad (5)$$

由归纳法可知,在已知 \mathbf{H}_w^0 的条件下,通过特征点跟踪的方法求取 \mathbf{H}_i^{i+1} ,进而可以求得 \mathbf{H}_w^i ,并利用式(1)–(5),求出摄像机位姿 \mathbf{M} ,从而完成注册。

2 并行注册

由于特征跟踪注册方法具有误差累积的缺陷,而高质量的特征匹配算法计算复杂度过高,难以满足增强现实实时注册的需要。本文基于双通道的思想,利用 KLT 特征跟踪算法与 Surf 特征匹配算法进行并行注册,由 KLT 算法完成特征点跟踪以及自然特征点注册,而 Surf 算法用来误差校正,解决了基于光流法 KLT 与单应性矩阵注册的误差积累问题,提高了系统的稳定性以及注册准确度。

2.1 特征关键帧

对于用于 Surf 算法特征点匹配的图像,我们称之为特征关键帧,特征关键帧的选取对 3 维注册的稳定性与精确性具有非常大的影响。特征关键帧的质量,通过两个方法来衡量:

首先,需要保证特征关键帧中有足够数量的高质量特征点,对于高质量特征点的判断是:

$$h_i > H \quad (6)$$

式中 h_i 是由 Surf 特征提取^[6]得到的 hessian 值。根据我们的经验,阈值 H 的合理值为 1000。保证特征关键帧中至少有 100 个高质量特征点,这对降低 3 维注册误差有重要作用。

其次,因为在记录特征关键帧的同时,需要记录当前帧对应的单应矩阵 \mathbf{H}_w^i 。而 \mathbf{H}_w^i 的准确性直接影响到旋转、平移矩阵计算结果的好坏,由于摄像机运动过程中图像会变得模糊等原因,会导致 \mathbf{H}_w^i 有一定幅度的波动,我们希望选取摄像机相对稳定情况下的帧作为特征关键帧。对于 \mathbf{H}_w^i 的波动情况可以用以下值来判断

$$\begin{cases} \max \{ \text{dis}(\mathbf{T}_{i-2}, \mathbf{T}_{i-1}), \text{dis}(\mathbf{T}_{i-1}, \mathbf{T}_i), \text{dis}(\mathbf{T}_{i-2}, \mathbf{T}_i) \} \\ \max \{ \text{angle}(\mathbf{R}_{i-2}, \mathbf{R}_{i-1}), \text{angle}(\mathbf{R}_{i-1}, \mathbf{R}_i), \\ \text{angle}(\mathbf{R}_{i-2}, \mathbf{R}_i) \} \end{cases}$$

式中, $\mathbf{T}_i, \mathbf{R}_i$ 分别为 \mathbf{H}_w^i 所对应的平移向量、旋转向量。

2.2 基准特征关键帧

在前 2.1 节我们给出了评价一帧图像是否可以

作为特征关键帧的标准。在系统开始运行时,由 KLT 特征跟踪线程作为自然特征 3 维注册方法对每一帧计算 \mathbf{H}_w^i , Surf 特征匹配线程对当前捕获帧进行检测,当获得一帧满足特征关键帧的数据(第 k 帧),即对特征关键帧进行初始化:

$$\begin{aligned} \mathbf{H}_w^0 &= \mathbf{H}_w^k \\ c &= \hat{c} - k \\ \mathbf{F}[0] &= \mathbf{F}[k] \\ \mathbf{H}_w^c &= \mathbf{H}_w^c \end{aligned} \quad (7)$$

式中, c 为当前帧的新索引, $\mathbf{F}[0]$ 为初始化的特征关键帧,本文称其为基准特征关键帧。在场景不是特别单一、初始摄像机不剧烈移动的情况下,在开始前几帧中就可以对特征关键帧进行初始化。基准特征关键帧与平面标识间的单应矩阵记为 \mathbf{H}_w^0 。

2.3 延迟单应阵

当 Surf 特征匹配线程检测到了一帧特征关键帧 $\mathbf{F}[k]$,并计算出了 $\mathbf{F}[k]$ 与基准特征关键帧 $\mathbf{F}[0]$ 间的单应矩阵 \mathbf{H}_0^k 时,当前帧 c 已经不再是 $\mathbf{F}[k]$,而需要用来注册的是 \mathbf{H}_w^c ,即 Surf 特征匹配线程的结果有一定的延迟性,在这里定义矩阵

$$\mathbf{H}_k^c = \mathbf{H}_{c-1}^c \cdots \mathbf{H}_{k+2}^{k+3} \mathbf{H}_{k+1}^{k+2} \mathbf{H}_k^{k+1} \quad (8)$$

为延迟单应阵,记为 \mathbf{H}_k^c 。矩阵 \mathbf{H}_k^c 为第 k 帧图像与当前帧图像平面间的单应性矩阵。延迟单应阵概念的提出,是为了解决特征跟踪与匹配的线程同步问题。

2.4 误差校正

在特征关键帧被初始化以后,通过 KLT 特征跟踪线程计算相邻帧之间的单应矩阵 \mathbf{H}_i^{i+1} ,并通过 Surf 特征匹配线程对当前捕获帧进行检测,当获得一帧满足特征关键帧的数据(第 k 帧)时,计算 $\mathbf{F}[k]$ 与基准特征关键帧 $\mathbf{F}[0]$ 间的单应矩阵 \mathbf{H}_0^k ,并利用 \mathbf{H}_0^k 以及延迟单应阵 \mathbf{H}_k^c 对 \mathbf{H}_w^c 进行误差校正,求得新的 \mathbf{H}_w^c 。

$$\mathbf{H}_w^c = \mathbf{H}_k^c \mathbf{H}_0^k \mathbf{H}_w^0 \quad (9)$$

另外,特征关键帧与基准特征关键帧进行特征点匹配时,如果出现匹配对小于 20 的情况,选取新的一帧特征关键帧作为基准特征关键帧,对基准特征关键帧进行更新。

2.5 KLT 跟踪策略

KLT 算法是一种快速的特征点跟踪方法,在迭代次数较少的情况下,精度可以满足一般实时增强现实的需要。通过并行的注册算法,解决了 KLT 算法

进行自然特征注册的误差累积问题。但是 KLT 算法不能对特征点数量进行保持,所以特征点的数量会逐渐减少,而特征点的减少会影响单应矩阵求解的准确性。通过对特征点数量进行判断,当特征点数量低于一给定阈值(本文取 20)时,对 KLT 的特征点进行更新。为了使得特征点更新时,不引入新的误差,同样使用特征关键帧作为更新条件,使得特征点的更新更加平滑,降低特征点更新时带来的误差。

2.6 特征点剔除

由于噪声以及物体移动等原因,误匹配点总是存在。光流法与 Surf 算法具有不同特点:基于光流法对物体移动具有自适应性,但是容易有小幅移动,采用随机采样一致性的方法(阈值取 2)来提高单应性矩阵求解的准确度;Surf 算法具有较高匹配

精确度,但是受物体移动影响较大,所以采用极线约束^[10]结合勒温伯格-马阔特的方法,剔除移动的特征点。勒温伯格-马阔特方法可以在误匹配特征点低于 50% 时,准确地完成单应矩阵的求取。实验结果证明,对光流法与 Surf 算法采用不同的误匹配点剔除策略,对降低模型扭曲起到了较大的帮助。

3 实验结果与讨论

3.1 系统运行结果

图 1 为本文算法实现结果。在图 1(a)~(f)中分别为在不同视角、不同距离、一定幅度的光线变化情况下的实时注册结果,系统即使在标识部分不可见的情况下,也可以通过并行自然特征注册方法准确地实时地完成注册。

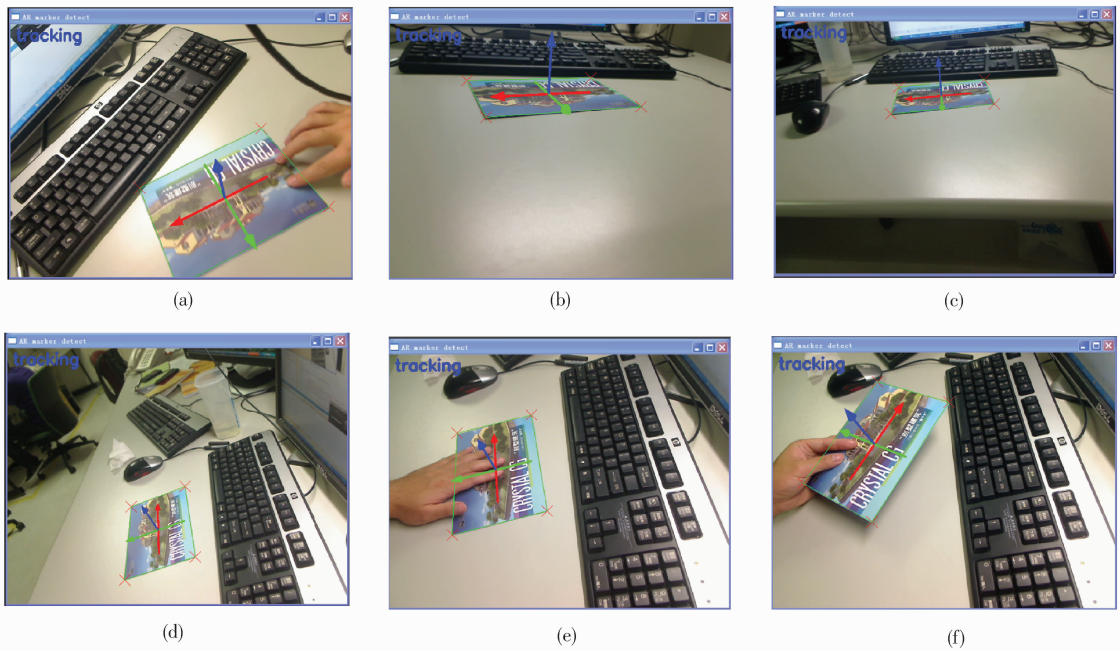


图 1 运行结果

Fig. 1 System results

3.2 注册误差分析

对同一段视频分别采用基于 KLT 的特征跟踪注册算法^[11]与本文提出的双线程并行注册方法进行基于自然特征的 3 维注册,并对 3 维注册结果的 6 个自由分量进行分析。本测试视频采用罗技 S7500 摄像头录制,长度为 2 438 帧,录制过程摄像头围绕标记中心做旋转运动。分析结果如图 2 所示。

图 2(a)~(f)分别为 x 、 y 、 z 轴的旋转分量以及

x 、 y 、 z 轴平移分量的误差分析,图中红色曲线为单独使用特征跟踪方法进行 3 维注册的结果,蓝色曲线为采用本文提出的并行注册方法进行注册的结果。从图中可以看出,在使用光流法进行注册的结果中 R_x 、 R_y 、 R_z 的误差是累积的,因而不断增大,其中 R_x 、 R_y 在 1 500 帧以后误差超过了 10°。而本文算法误差一直保持在一个比较低的水平上,误差角度在 3° 以下。对比于 T_x 、 T_y 、 T_z 的误差也具有类似于 R_x 、 R_y 、 R_z 误差的结果,在使用光流法(KLT)时,

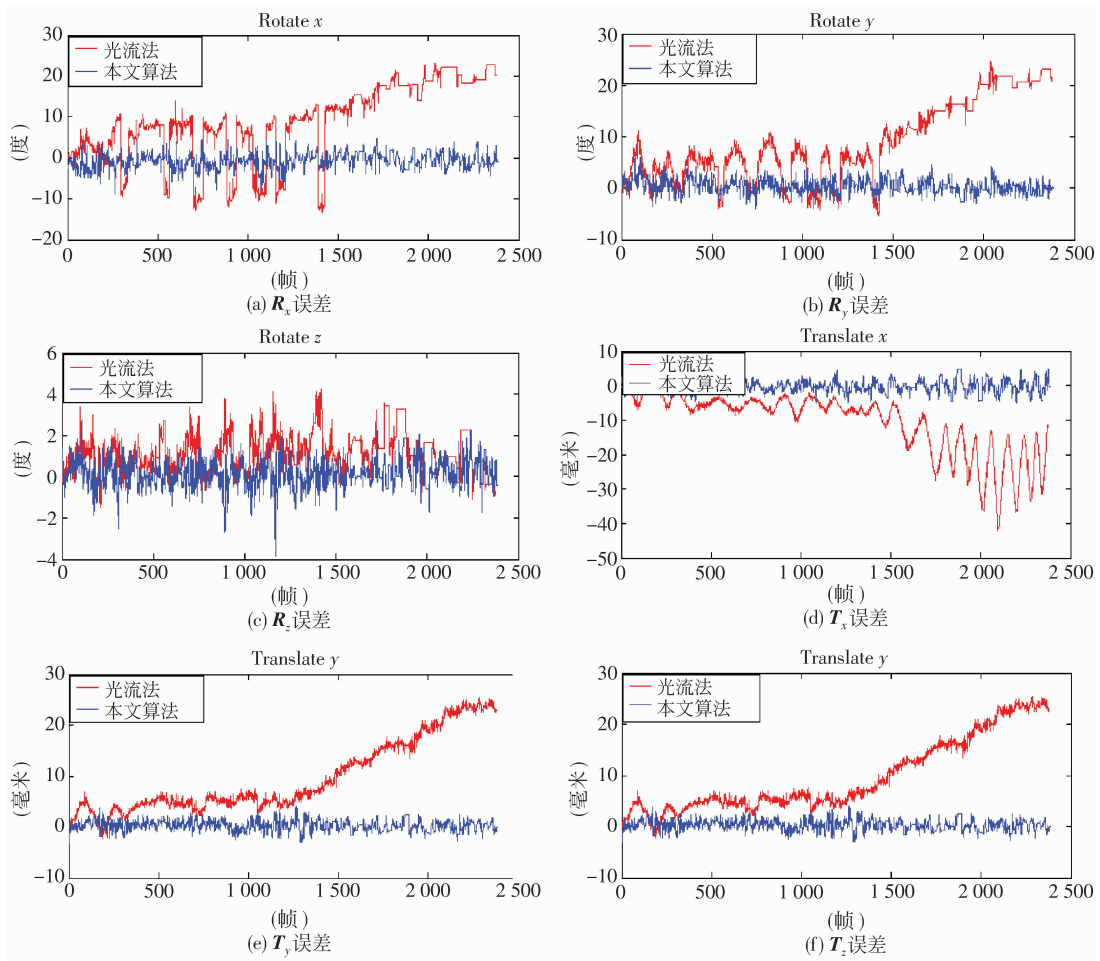


图 2 误差分析

Fig. 2 Error analysis

误差比较大,而且误差随时间在不断的累积。而本文提出的并行算法,降低了误差,并且解决了累积误差的问题,误差基本在 5 mm 以下。

通过对实验结果的分析,可以看出,本文方法在实时的情况下,降低了特征跟踪方法的误差,解决了误差累积缺陷,提高了系统的稳定性。

4 结 论

提出一种准确、稳定有效的增强现实注册算法,该方法采用跟踪与匹配并行的注册策略,较好地解决了基于自然特征跟踪注册方法的误差累积缺陷,提高了注册的稳定性以及准确度。本文算法的准确、稳定有效由下面几个方面保证:首先,特征关键帧以及基准特征关键帧的提出保证了特征匹配结果的准确性以及场景切换的稳定性;其次,延迟单应阵

的提出确保了双通道的同步性;最后,针对 KLT 跟踪与 Surf 匹配的各自特点,采用不同的奇异点剔除策略,进一步提高了系统的准确性与稳定性。

实验结果表明,本文提出的跟踪与匹配并行的注册策略较好地解决了误差累积的缺陷,系统即使在平面标识部分不可见的情况下,也可以准确实时地完成注册任务。

参考文献 (References)

- [1] Azuma R T. A survey of augmented reality [J]. Presence-Teleoperators and Virtual Environments, 1997, 6(4): 355-385.
- [2] Zhou F, Duh HBL, Billinghurst M. Trends in augmented reality tracking, interaction and display: a review of ten years of ISMAR [C]//Proceedings of 7th IEEE/ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality. Cambridge, UK: IEEE Computer Society, 2008: 193-202.

- [3] Kato H, Billinghurst M. Marker tracking and HMD calibration for a video-based augmented reality conferencing system [C] // Proceedings of 2nd IEEE and ACM International Workshop on Augmented Reality, Washington DC, USA: IEEE Computer Society, 1999:85-94.
- [4] Fiala M. ARTag: an improved marker system based on ARtoolkit [J]. National Research Council Publication NRC, 2004, 4(7): 166-174.
- [5] Kim, K, Lepetit, V, Woo, W. Scalable real-time planar targets tracking for digilog books [J]. The Visual Computer, 2010, 26(11): 1145-1154.
- [6] Bay H, Tuytelaars T, Van Gool L. Speeded-up robust features (SURF) [J]. Computer Vision and Image Understanding, 2008, 110(3): 346-389.
- [7] Wagner D, Reitmayr G, Mulloni A, Drummond T, Schmalstieg D. Pose tracking from natural features on mobile phones [C] // Proceedings of 7th IEEE/ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality. Washington DC, USA: IEEE Computer Society, 2008:125-134.
- [8] Simon G, Fitzgibbon A W, Zisserman A. Markerless tracking using planar structures in the scene [C] // Proceedings of IEEE and ACM International Symposium on Augmented Reality 2000. Washington DC, USA: IEEE Computer Society, 2000:120-128.
- [9] Guan Tao, Li Lijun, Duan Liya, et al. A new registration method based on marker and interplane-homographies [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology, 2006, 34(010):55-57. [管涛, 李利军, 段利亚, 等. 基于标识与平面间单应性矩阵的虚实注册方法 [J]. 华中科技大学学报, 2006, 34(010):55-57.]
- [10] Zhang Guofeng, Qin Xueying, Dong Zilong. Camera tracking based on Structure and Motion Recovery for augmented video [J]. Chinese Journal of Computers, 2006, 29(012):2104-2111. [章国锋, 秦学英, 董子龙. 面向增强视频的基于结构和运动恢复的摄像机定标 [J]. 计算机学报, 2006, 29(012):2104-2111.]
- [11] Teng F, Liang X H, He Z Y. A Registration method based on nature feature with KLT Tracking algorithm for wearable computers [C] // Proceedings of CyberWorlds 2008. Hangzhou, China: IEEE Computer Society, 2008: 416-421.