

文章编号:1006-2467(2008)04-0574-05

自动多投影仪非线性几何校正与图像边缘融合方法

王胜正^{1,2}, 杨杰¹

(1. 上海交通大学 图像处理与模式识别研究所, 上海 200240;

2. 上海海事大学 商船学院, 上海 200135)

摘要: 为了解决多投影仪拼接系统中的几何变形与图像融合问题, 提出了一种新的自动非线性几何校正和图像边缘融合方法. 首先定义了屏幕空间与投影仪之间的几何关系和计算方法; 然后用智能相机摄取屏幕上的激光点阵与标准网格投影图像, 根据摄取的图像特征计算屏幕空间与投影仪之间的投影变换矩阵, 由投影变换矩阵计算得到投影图像的双3次几何变形曲面, 从而可以反算得到曲面的控制点, 实现对投影图像的非线性几何变形; 最后给出图像边缘亮度融合算法. 实验结果表明, 所提出的方法适用于多投影仪拼接的实时仿真系统.

关键词: 自动几何校正; 多投影仪; 图像边缘融合; 虚拟现实

中图分类号: TP 391

文献标识码: A

Auto-Nonlinear Geometry Calibration and Edge Blending of Multi-Projector Display System

WANG Sheng-zheng^{1,2}, YANG Jie¹

(1. Institute of Image Processing & Pattern Recognition, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China; 2. Merchant Marine College, Shanghai Maritime University, Shanghai 200135, China)

Abstract: In order to solve the problems of geometric warp and overlapping in a multi-projector display system, a new approach for auto-geometric calibration and edge-blending was presented. First, the homography between screen and projector is defined in this work. Secondly, the intelligent camera is used to obtain the feature points of screen that is defined by laser array and the regular grids that are projected by projectors. The transformation matrices between screen and projector are calculated by the feature extraction of images from the camera. The control points of surface are computed by the bi-cubic surface transformation function that is inferred according to transformation matrices, which implements the non-linear geometric calibration of projected images. Finally, the edge-blending function is presented. The experimental results illustrate the feasibility of the proposed method.

Key words: auto geometric calibration; multi-projector; image edge-blending; virtual reality

对大多数可视化系统需要利用多台投影仪拼接在一起, 显示一个逻辑上一致的全景图像, 这种解决

方案有两个关键问题需要解决. 其一, 透视投影图像投影在弧形幕或球幕上, 图像会发生几何变形, 因此

收稿日期: 2007-04-12

基金项目: 国家自然科学基金(60675023), 上海市重点学科建设(T0603), 上海市教委基金(05FZ12)资助项目

作者简介: 王胜正(1976-), 男, 湖南双峰人, 博士生, 讲师, 主要研究方向为图像处理、计算机图形学、虚拟现实.

杨杰(联系人), 男, 教授, 博士生导师, 电话(Tel.): 021-34204033; E-mail: jieyang@sjtu.edu.cn.

必须对投影图像进行几何变形校正;其二,多个投影仪投影图像拼接在一起,图像之间要么有一个缝隙,要么有一条2倍亮度的重叠区,这两种情况都会严重影响显示效果.因此,必须把拼缝处的图像融合,使重叠部分的图像色彩尽可能一致.

以往对图像几何校正与图像融合的解决方法是购买昂贵的投影仪或者图像融合机(如3D Perception),对于前者,这些投影仪通常有内嵌光学融合镜头和几何校正芯片,后者即把多台投影仪输出的视频图像输入融合机,通过融合机的几何校正和融合后分别输出到投影仪,但这些方法不仅昂贵,而且维护相当困难,都必须手动调节,只有专业人员才能使用.近年来,出现了很多自动几何校正与边缘融合方法.例如:Raskar等^[1-4]对投影仪的校正做了大量工作,并且成功地利用双照相机定位方法进行几何校正,但该方法需要对双相机进行校准,故对于小型系统比较适合,对于大型环幕,安装配置难度大;Ashdown等^[5]研究了基于投影仪-相机的平面投影幕的自动几何校正方法;Okatani等^[6,7]对基于投影仪-相机的自动校正方法做了很深入的研究,提出并证明了平面投影幕与相机以及平面投影幕与投影仪对应的透视几何关系;Baar等^[8]利用二次曲面变换方法对投影图像进行几何变形;Song等^[9]提出一系列非参数几何校正的理论方法;黄永锋等^[10]推导了2D与3D空间中变换的几何关系;Li和Bourke等^[11,12]分别对光学边缘融合和软边缘融合进行了讨论与回顾.

本文提出了一种自动非线性几何校正和边缘融合方法,通过对屏幕上的激光点阵与计算机输出的标准网格进行计算机视觉匹配,获得屏幕与投影仪之间的三维几何变换关系.由该几何关系推算投影图像的双3次曲面变形图像,实现非线性几何校正;并用边缘融合函数,对计算机帧缓存中的图像实现边缘亮度融合.

1 投影幕与投影图像的几何关系

1.1 透视投影图像几何变形

在虚拟现实系统中,通常需要将3D图像通过设备投影在物理屏幕上,目前,常见的屏幕有屏幕墙、环形柱幕、球幕、球带等形状.当投影屏幕是弧形柱幕、球幕或球带时,图像会发生几何变形,如图1所示,在360°环形柱幕虚拟现实系统中,一系列投影仪分别将图像投射在不同的区域,计算机产生的均匀网格在投影幕上发生变形.因此,虚拟现实系统不是简单地把投影图像拼接在一块就行了,必须进

行几何校正,但是一般的投影仪无法实施几何校正.

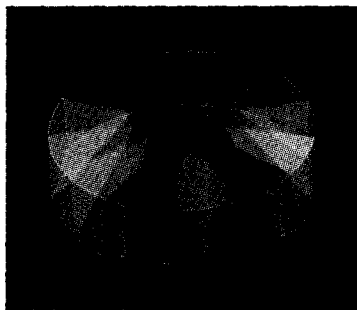


图1 360°弧形屏幕虚拟现实系统

Fig. 1 A virtual reality system of 360° cylindrical screen

1.2 投影仪与投影屏幕之间的几何关系计算方法

对投影仪产生的图像进行非线性几何校正之前,必须知道投影仪与显示屏幕之间对应的几何关系.本文利用空间激光点阵确定屏幕上空间点的精确位置,并使用相机获取图像,经图像处理和特征提取后得到相机成像平面与投影屏幕的几何关系.同样,通过投影仪输出规则的网格到屏幕上,得到相机成像平面与投影仪之间的几何关系,从而得到投影屏幕与投影仪之间的几何关系.

定义1 假设投影幕与相机之间是透视投影关系,则可利用透视投影方程得到投影幕上3D特征点 $[x\ y\ z]$ 到相机图像空间对应2D坐标 $[u\ v]$ 的 3×4 的透视投影矩阵 H_{sc} .即令 $n \equiv [uw\ vw\ w]^T$ 为相机图像空间对应点(w 为尺度因子), $m \equiv [x\ y\ z\ 1]^T$ 为投影幕空间对应点,则可得到透视投影方程

$$n \propto H_{sc} m \quad (1)$$

定义2 假设投影仪与相机之间是透视投影关系,则可利用透视投影方程得到投影仪上2D图像特征点 $[u'\ v']$ 到相机图像空间对应2D坐标 $[u\ v]$ 的 3×3 的透视投影矩阵 H_{pc} .即令 $n' \equiv [u'\ v'\ 1]^T$ 表示投影仪图像空间对应点, $n \equiv [uw\ vw\ w]^T$ 表示相机图像空间对应点,则可以得到投影仪到相机的透视投影方程为

$$n \propto H_{pc} n' \quad (2)$$

定义3 假设给定一个 4×3 的透视投影矩阵 H_{ps} ,则投影仪与屏幕之间的透视投影方程为

$$m \propto H_{ps} n' \quad (3)$$

利用定义1和2可以计算得到投影仪与投影屏幕之间的几何关系 H_{ps} .

1.3 图像非线性几何校正

非线性几何校正的目的是对2D投影图像进行变形,使观察者在屏幕上可观察到正常的透视投影图像^[12].通过几何校正后,帧缓存中的网格图像发生变形,而投影屏幕上的网格图像显示正常.因此,

对于需要几何校正的多投影仪拼接系统,首先根据1.2节的定义计算投影屏幕与投影仪间的几何对应关系,推算帧缓存中图像的每个网格节点的目标位置,图2所示为帧缓存中图像的原始网格与变形后网格的对应关系示意图。然后逆算得到网格曲面的控制点网格。下面是求解曲面控制点网格的方法。

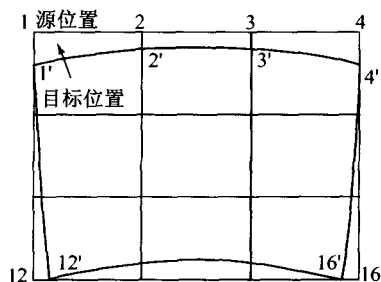


图2 原始图像与目标图像的网格点对应关系

Fig. 2 The relationship of regular grid and corrected grid

文献[8]中,利用2次曲面变换方法对投影图像进行几何变形,本文对投影图像进行双3次曲面高精度实时几何变形。常用的双3次曲面有Bezier曲面、B样条曲面、非均匀有理B样条(NURBS)曲面,根据各种双3次参数曲面的特性,考虑到视景图像的实时性和全局性要求,本文使用基于Bezier参数的双3次曲面对投影图像进行非线性几何校正。

对于Bezier曲面,设 p_{ij} ($i=0,1,\dots,m;j=0,1,\dots,n$)为 $(m+1)\times(m+1)$ 的曲面控制点阵, p_{ij} 表示点阵中第 $i+1$ 行、第 $j+1$ 列坐标位置向量, $p_{ij}=(x_{ij},y_{ij},z_{ij})$,则 $m\times n$ 次Bezier曲面定义为

$$S(u,w) = \sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n B_{i,m}(u) B_{j,n}(w) p_{ij} \quad (4)$$

$$u, w \in [0,1]$$

式中:

$$B_{i,m}(u) = C_m^i u^i (1-u)^{m-i}$$

$$B_{j,n}(w) = C_n^j w^j (1-w)^{n-j}$$

均为Bernstein基函数。当 $m=n=3$ 时,

$$S(u,w) = \sum_{i=0}^3 \sum_{j=0}^3 B_{i,3}(u) B_{j,3}(w) p_{ij} \quad (5)$$

$$u, w \in [0,1]$$

则

$$S(u,w) = [B_{0,3}(u) \ B_{1,3}(u) \ B_{2,3}(u) \ B_{3,3}(u)] \times$$

$$\begin{bmatrix} p_{00} & p_{01} & p_{02} & p_{03} \\ p_{10} & p_{11} & p_{12} & p_{13} \\ p_{20} & p_{21} & p_{22} & p_{23} \\ p_{30} & p_{31} & p_{32} & p_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B_{0,3}(w) \\ B_{1,3}(w) \\ B_{2,3}(w) \\ B_{3,3}(w) \end{bmatrix} \quad (6)$$

其矩阵可表示为

$$S(u,w) = B_u M P M^T B_w^T \quad (7)$$

式中: $B_u = [u^3 \ u^2 \ u \ 1]$, $B_w = [w^3 \ w^2 \ w \ 1]$

$$P = p_{ij} = \begin{bmatrix} p_{00} & p_{01} & p_{02} & p_{03} \\ p_{10} & p_{11} & p_{12} & p_{13} \\ p_{20} & p_{21} & p_{22} & p_{23} \\ p_{30} & p_{31} & p_{32} & p_{33} \end{bmatrix}$$

$$M = \begin{bmatrix} -1 & 3 & -3 & 1 \\ 3 & -6 & 3 & 0 \\ -3 & 3 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

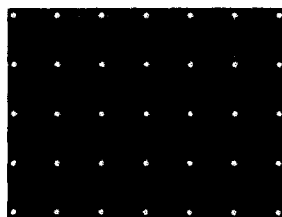
利用广义矩阵法求取控制点阵 P 。令 $Q=S(u,w)$, $U=[B_{i,3}(u)]$, $W=[B_{j,3}(w)]$,则式(5)可写成 $Q=UPW$,根据Bezier曲面的性质, U 和 W 为正定矩阵,故其逆存在。所以

$$P = U^{-1} Q V^{-1} \quad (8)$$

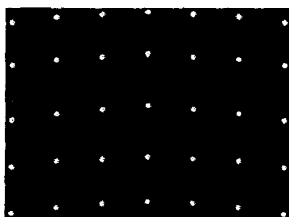
若考虑边界条件, U 、 W 不一定是方阵,则可用广义逆矩阵式求得

$$P = U W U^T (U W^T)^{-1} Q \quad (9)$$

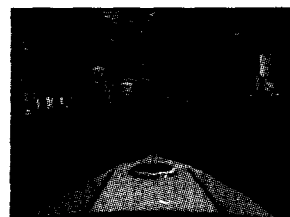
本文设计了基于双3次曲面算法的自动几何校正软件,水平方向选用7个控制点,垂直方向选用5个控制点,即每个通道(每台投影仪)分别由 7×5 个控制点控制曲面形状,如图3(a)所示。为了实现 7×5 的控制阵列,必须由4个 4×4 的双3次曲面合成。图3(b)所示为通过校正后的控制点网格位置图,图3(c)所示为校正后的帧缓存中的变形图像。



(a) 原始控制点网格



(b) 校正后的控制点网格



(c) 映射在校正后网格上的图像

图3 曲面控制点阵与投影图像映射图

Fig. 3 The control points of surface and image mapping

2 投影图像边缘融合

在沉浸式虚拟现实系统中,通常采用水平视角3通道(120°)以上的弧形柱幕,3通道是由3台独立的投影仪产生的场景拼接在一起,如图4所示.拼接处不可避免地会有接缝,要想得到沉浸的虚拟现实效果,必须将通道之间的拼缝融合为一体.本文给出了新的解决方法,在场景渲染时,直接对帧缓存中的图像进行实时亮度融合.

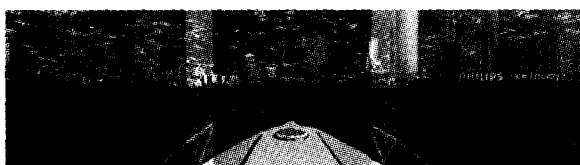


图4 多投影仪图像拼接效果图

Fig. 4 The overlapping multi-projector images

2.1 投影图像边缘叠加

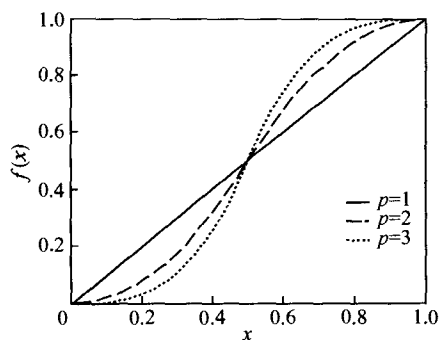
将相邻通道渲染的图像叠加一部分,通常叠加128像素以上.叠加像素数目可以不是 2^n (n 为自然数),但是考虑到融合技术是基于OpenGL和纹理映射方法对图像混合处理, 2^n 效率最高.因此,融合宽度通常采用 2^n (见图4中3个投影通道叠加的效果图,中间呈现非常明显的2条亮带).

2.2 边缘融合算法

将叠加部分图像的每个像素都乘上一个融合函数^[12],即

$$f(x) = \begin{cases} 0.5(2x)^p & 0 \leq x < 0.5 \\ 1 - 0.5[2(1-x)]^p & 0.5 \leq x \leq 1 \end{cases} \quad (10)$$

式中: x 为像素列在叠加区的相对位置; p 为影响因子,函数曲线如图5(a)所示.例如:右侧通道图像从左到右每列像素值乘上对应融合函数值,左侧通道图像从左到右乘融合函数 $1-f(x)$,图5(b)所示为乘上融合函数后得到的图像.



(a) 融合函数曲线



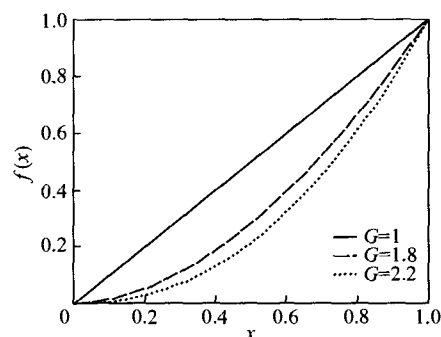
(b) 投影图像乘上融合函数后生成的图像

图5 边缘融合函数曲线与融合结果

Fig. 5 The blending function and image blending result

2.3 伽玛校正

如图5(b)所示,通过乘上融合函数后的图像并不完好,中间会出现2条灰带,导致这种现象的原因是叠加区的图像仅仅增加像素值,没有对图像输出亮度进行改变.因此,为了融合完整,必须将叠加区的像素映射成亮度的函数,即显示器的伽玛函数,如果 G 表示伽玛函数,则输出亮度就是像素值的 G 次幂.图6(a)所示为伽玛函数曲线图,图6(b)所示为通过伽玛校正后的图像.



(a) 伽玛函数曲线



(b) 伽玛校正后的图像

图6 伽玛校正

Fig. 6 The Gamma calibration

2.4 融合函数的优化

为了进一步控制叠加区图像的亮度,对式(10)进行修正,得到更加全面的边缘融合函数,即

$$f(x) = \begin{cases} a(2x)^p & 0 \leq x < 0.5 \\ 1 - (1-a)[2(1-x)]^p & 0.5 \leq x \leq 1 \end{cases} \quad (11)$$

式中, a 为亮度调节系数, $a \in [0, 1]$.当 $a > 0.5$ 时,则混合区的中心变亮;当 $a < 0.5$ 时,则混合区的中心变暗.图7(a)、(b)所示分别表示 a 取不同值时,得到的融合函数曲线图.经过融合函数优化后,最终可以得到较好的融合图像,如图7(c)所示.

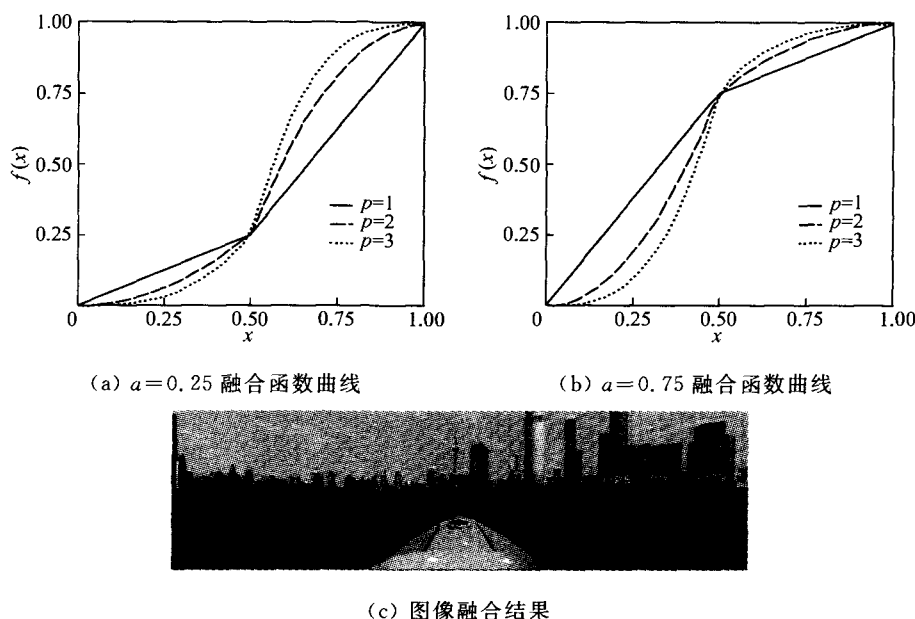


图7 融合图像优化

Fig. 7 The optimization of blending image

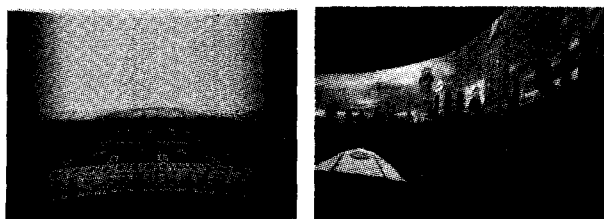
3 实验结果

本文介绍的算法适应于实时渲染的3D虚拟现实系统. 实验步骤为:

(1) 设定投影仪、相机以及投影屏幕位置, 利用本文的自动非线性几何校正算法计算双3次曲面的控制点阵, 对实时渲染的图像帧进行几何变形;

(2) 叠加区图像边缘融合.

图8(a)所示为某一个投影仪图像的几何变形与融合结果, 图8(b)所示为某虚拟现实系统的整体全景图. 通过实验, 针对当前的普通商用投影仪, 得到图像边缘融合参数的最优值区间: $a \in [0.45, 0.55]$, $p \in [1.8, 2.8]$, $G \in [1.8, 2, 2]$.



(a) 帧缓存图像 (b) 某虚拟现实系统全景图

图8 帧缓存图像与虚拟现实系统中的效果图

Fig. 8 The images in frame buffer and the virtual reality system

4 结语

随着虚拟现实技术与计算机图形学的快速发展, 利用多投影仪拼接解决超高分辨率显示系统问题已经成为一种趋势, 并且更多的投影仪拼接系统

都是弧形柱幕和球幕, 因此几何校正与边缘融合成了实现超高分辨率显示系统的关键技术之一. 本文结合工程实际需求, 对非线性几何校正和融合方法进行了理论上的分析, 并定义和计算了投影屏幕、投影仪与相机之间的几何关系, 实现了图像的非线性几何变形; 同时也解决了投影仪拼接处的边缘融合问题.

参考文献:

- [1] Raskar R, Brown M S, Yang R, *et al.* Multi-projector displays using camera-based registration [C]// **Proceedings of IEEE Visualization**. Los Alamitos: IEEE Computer Society, 1999: 161-168.
- [2] Raskar R. Immersive planar display using roughly aligned projector [C]// **Proceedings of IEEE Virtual Reality**. New Brunswick: IEEE Computer Society, 2000: 109-116.
- [3] Raskar R, Beardsley P. A self correcting projector [C]// **Proceedings of Computer Vision and Pattern Recognition**. Kauai, Hawaii: IEEE Computer Society, 2001: 626-631.
- [4] Raskar R, Baar R, Beardsley P, *et al.* iLamps: geometrically aware and selfconfiguring projectors [C]// **Proceedings of ACM SIGGRAPH**. San Diego, California: ACM Press, 2003: 809-818.
- [5] Ashdown M, Flagg M, Sukthankar R, *et al.* A flexible projector-camera system for multi-planar displays [C]// **Proceedings of Computer Vision and Pattern Recognition**. Washington DC: IEEE Computer Society, 2004: 165-172.

(下转第583页)

表2 真实场景图像的实验结果

Tab. 2 The experimental results of real scene image

通道	图像清晰度	1.jpg	2.jpg	3.jpg	4.jpg
R	DTCWT	1.000	0.396	0.325	0.321
	DWT	1.000	0.413	0.375	0.352
	W_1	1.000	0.912	0.892	0.875
	W_2	1.000	0.411	0.386	0.391
G	DTCWT	1.000	0.288	0.209	0.208
	DWT	1.000	0.325	0.305	0.242
	W_1	1.000	0.900	0.884	0.845
	W_2	1.000	0.318	0.256	0.258
B	DTCWT	1.000	0.353 6	0.311 4	0.300 5
	DWT	1.000	0.423 2	0.401 4	0.381 0
	W_1	1.000	0.906 1	0.892 4	0.886 5
	W_2	1.000	0.355 4	0.321 2	0.331 0

通过上述两个实验,比较表1与表2可以看出,DTCWT较DWT、 W_1 有更好的区分效果,比 W_2 评价结果稳定、可靠。

4 结 语

本文讨论了图像清晰度,提出了基于双树复数小波变换的判定准则。由于双树小波变换比二维DWT增加了平移不变性、多方向选择性,故对图像

细节信息表达更为精确,具有很好的细分效果,评价结果更为准确、可靠,为后续的降晰函数(Point Spread Function)辨识及图像复原工作提供了很好的依据。

参考文献:

- [1] Castleman K R. Digital image processing[M]. 北京:清华大学出版社,2003:387—388.
- [2] Kingsbury N G. Design of Q-shift complex wavelets for image processing using frequency domain energy minimization[C]// **Proc IEEE International Conference on Image Processing**. Cambridge:CUED,2003:1013—1016.
- [3] Kautsky J, Flusser J. A new wavelet-based measure of image focus[J]. **Pattern Recognition Letters**, 2003, 23: 1785—1794.
- [4] Kingsbury N G, Selesnick I W, Baraniuk R G. The dual-tree complex wavelet transform[J]. **IEEE Signal Processing Magazine**, 2005, 8(3):123—151.
- [5] Selesnick I W. The design of approximate Hilbert pairs of wavelet bases [J]. **IEEE on Trans Signal Processing**, 2002, 50:1141—1152.
- [6] Spaendonck R V, Baraniuk T B, Vetterli M. Orthogonal Hilbert transform filter banks and wavelets[C]// **Proc IEEE International Conference on Acoust Speech and Signal Processing**. Wellesley: Wellesley-Cambridge Press,2003:505—508.

(上接第578页)

- [6] Okatani T, Deguchi K. Autocalibration of a projector-camera system[J]. **IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence**, 2005, 27(12): 1845—1855.
- [7] Okatani T, Deguchi K. Autocalibration of an ad hoc construction of multi-projector displays[C]// **Proceedings of Computer Vision and Pattern Recognition Workshop**. Washington DC: IEEE Computer Society, 2006:4—11.
- [8] Baar J, Willwacher T, Rao S, *et al.* Seamless multi-projector display on curved screens[C]//**Proceedings of the Workshop on Virtual Environments**. Zurich, Switzerland: Elsevier Science, 2003:281—286.
- [9] Song P, Cham T J. A theory for photometric self-calibration of multiple overlapping projectors and cameras[C]//**Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition**. Washington DC: IEEE Computer Society, 2005: 97—104.
- [10] 黄永锋,李 杉,赵 军. 基于外标记点的2D/3D图像配准方法[J]. **上海交通大学学报**, 2006, 40(7): 1108—1111.
HUANG Yong-feng, LI Shan, ZHAO Jun. The registration of 2D/3D images based on external makers [J]. **Journal of Shanghai Jiaotong University**, 2006, 40(7):1108—1111.
- [11] Li K, Chen Y Q. Optical blending for multi-projector display wall systems[C]// **Proceedings of the 12th Lasers and Electro-Optics Society**. San Francisco: IEEE Computer Society, 1999:281—282.
- [12] Bourke P. Edge blending using commodity projectors [EB/OL]. (2004-04-08)[2007-04-10]. <http://local.wasp.uwa.edu.au>.