

一种投影几何失真校正的硬件架构设计

任力飞¹, 谢 翔¹, 李国林²

(1 清华大学 微电子与纳电子学系, 北京 100084; 2 清华大学 电子工程系, 北京 100084)

摘 要: 针对投影式移动设备的投影图像几何失真问题, 提出了一种基于图像变形算法的投影图像几何失真校正的硬件架构, 并针对硬件实时性及功耗问题提出了解决方法. 本架构设计了基于奇偶存储机制的双行缓存, 实现了片外插值像素的并行获取, 降低读取延时; 基于数据复用原理设计了冗余消除单元, 有效避免片外像素的重复读取及功耗, 读取次数平均减少 61.5%, 减小读取功耗; 存储空间消耗仅为 11.9 kB. 本设计还引用了无除法的中点算法进行坐标的透视变换, 并设计了坐标变换查找表, 实现了像素的低复杂度片外和行缓存寻址.

关键词: 投影几何失真校正; 图像变形算法; 硬件架构; 缓存设计

中图分类号: TP31

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2015)11-0015-06

A Hardware Architecture Design for Projector Geometric Distortion Correction

REN Li-fei¹, XIE Xiang¹, LI Guo-lin²

(1 Institute of Microelectronics and Nanoelectronics, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2 Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: A hardware architecture is proposed to correct the projector geometric distortion for projective mobile devices. A double-line buffer is designed based on odd-even storage mechanism to realize parallel access of off-chip pixels. A redundancy elimination unit is designed based on data reuse to effectively avoid repetitive access of off-chip pixels, and the access is reduced by average 61.5%. The occupied storage size is only 11.9 kB. Furthermore, the division-free midpoint algorithm is adopted, combined with coordinates LUT, to realize low complexity off-chip and buffer addressing.

Key words: geometric distortion correction; image warping; hardware architecture; buffer design

1 引言

微型投影技术与多种传感技术相结合, 为智能移动设备提供了极强的移动性和便携性^[1].

然而, 在投影式移动设备随时随地的使用场景中, 由于投影模组和投影面随意的相对位置关系, 会产生投影图像几何失真的问题. 如图 1 所示, 投影镜头光轴与投影面偏离垂直, 从而使得投影画面偏离矩形. 为了在保持投影式移动设备移动性和便携性的前提下, 消除投影画面的几何失真问题, 需要一种低功耗、高实时性的硬件解决方案.

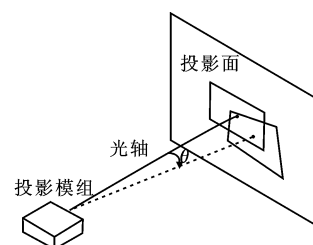


图 1 光轴与投影面偏离垂直产生几何失真

基于镜头移动机械装置的机械校正方法^[2], 通常应用在商业大型投影仪中. 通过机械装置手动调节镜头姿态, 改变光轴与投影面角度, 从而消除几何

收稿日期: 2015-01-26; 修回日期: 2015-03-18

基金项目: 国家自然科学基金(61373073)

失真,但由于其尺寸限制,难以应用在移动设备中.基于图像变形技术(Image Warping)的数字图像处理方法被更广泛采用^[3-4],即通过对原始投射图像进行几何形状的变换,生成一幅预失真图像,投射出去后可消除原来的几何失真,呈现矩形形状.

然而,图像变形技术中图像重采样的经典算法给硬件实现带来困难,给低功耗、高实时性的数字电路设计带来挑战.

为了解决上述问题,本文提出了一种基于图像变形算法的投影图像几何失真校正硬件架构.一方面,本架构采用了基于奇偶存储机制的双行缓存设计,实现了片外像素的并行获取;基于数据复用原理,设计了冗余消除单元,有效避免了片外像素的重复读取,因而大量节省片外读取功耗.另一方面,采用了无除法运算的中点算法实现了缓存数据的片外寻址,并设计了坐标变换查找表,代替了坐标透视变换的复杂矩阵运算,实现低复杂度的缓存寻址.

2 基于图像变形算法的几何失真校正

本节内容描述了如何基于图像变形算法^[5],实现对投影图像的几何失真校正.算法分为建立几何映射关系和图像重采样两个步骤.

2.1 建立几何映射关系

为了能够在已知投影面图像内容(即矩形的原始图像)的情况下,利用图像重采样算法生成投影模组需要投射的预失真图像,需要预先获得投影面和投影模组图像平面之间的几何映射关系,即三维观察^[6]概念中的透视投影关系,如图2所示.

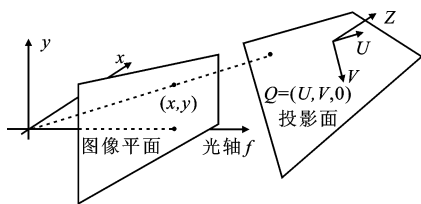


图2 投影图像坐标与投影面坐标透视投影关系图

投影面的三维齐次坐标 $(U, V, Z, 1)^T$ 和投影图像平面的二维齐次坐标 $(x, y, 1)^T$ 符合透视变换关系,如式(1)所示,其中, M 为投影镜头内参数, R 和 t 分别为图像坐标系和投影面坐标系之间的旋转和平移矩阵, w 为比例系数;

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = w \cdot M \cdot \begin{bmatrix} R & t \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U \\ V \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中投影面图像可认为是 $Z = 0$ 的特殊情况,因而投影面图像坐标 $(U, V, 1)^T$ 和投影模组图像坐标 $(x, y, 1)^T$,即一对匹配点坐标,可用单应性矩阵乘法表示二者之间的数量关系,如式(2)所示:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = w \cdot M \cdot \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & t \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U \\ V \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式(2)可简化为式(3):

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = w \cdot H \cdot \begin{bmatrix} U \\ V \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

单应性矩阵 H 即表征了几何映射关系,它需要至少四对匹配点坐标通过单应性估计获取.

本算法中匹配点坐标基于投影仪摄像头系统获取.首先,通过投影模组投影棋盘格图像,摄像头拍摄投影棋盘格并进行角点检测,从而得到投影模组和摄像头之间的匹配角点坐标;其次,通过结构光三角测量算法^[7],可计算得到投影面角点坐标,并对其进行从投影模组光心坐标系到投影面坐标系的转换;最终与投影模组图像的角点坐标,构成用于单应性估计的匹配点坐标对.

2.2 图像重采样

算法示意图如图3,操作步骤如下所示.

(1)坐标遍历:逐个遍历预失真图像上的每个像素点坐标,以期为其填充像素值.

(2)透视变换:基于先前获得的几何映射关系,即式(3)中的 H ,对坐标进行几何变换.

原始图像坐标为 (u, v) ,预失真坐标为 (x, y) ,由如式(4)所示的单应性矩阵乘法关系表示:

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = w \cdot \begin{bmatrix} H_{11} & H_{12} & H_{13} \\ H_{21} & H_{22} & H_{23} \\ H_{31} & H_{32} & H_{33} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

则坐标 (u, v) 可由 (x, y) 表示如下:

$$\begin{aligned} u &= \frac{H_{11} \cdot x + H_{12} \cdot y + H_{13}}{H_{31} \cdot x + H_{32} \cdot y + H_{33}} \\ v &= \frac{H_{21} \cdot x + H_{22} \cdot y + H_{23}}{H_{31} \cdot x + H_{32} \cdot y + H_{33}} \end{aligned} \quad (5)$$

之所以采取从预失真图像坐标变换到原始图像坐标的逆映射方向,是因为在正映射情况下,将产生有些预失真图像上的点无法被填充到的空洞问题,以及有些点被重复填充的问题.

(3)双线性插值:几何变换后的坐标是小数坐标,需用周围四个整数坐标对应像素进行双线性插值.

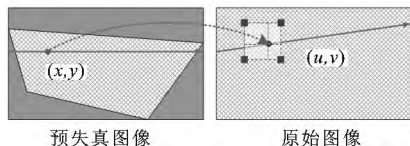


图 3 图像重采样计算预失真图像

如图 3 所示,经几何变换后得到的原始图像上的坐标为 (u, v) ,一般为小数结果,则失真遍历点 (x, y) 的像素值 I 为 (u, v) 周围四个整数坐标像素点的插值结果:

$$I = I_{o1} + I_{o2} + I_{o3} + I_{o4} \quad (6)$$

式中,相加各项为像素加权值; $[u]$ 和 $[v]$ 为 u 和 v 的整数部分, u' 和 v' 为其小数部分.

$$\begin{aligned}
I_{o1} &= I_o([u], [v]) \cdot (1 - u') \cdot (1 - v'), \\
I_{o2} &= I_o([u] + 1, [v]) \cdot u' \cdot (1 - v'), \\
I_{o3} &= I_o([u], [v] + 1) \cdot (1 - u') \cdot v', \\
I_{o4} &= I_o([u] + 1, [v] + 1) \cdot u' \cdot v' \quad (7)
\end{aligned}$$

采用双线性插值是计算量和精确度折衷的结果。

3 硬件架构设计

图4所示为本文提出的几何失真校正硬件架构,该硬件架构实现了预失真图像的图像重采样算法,完成了从接收原始图像数据,到失真校正运算,再到向投影模组输出预失真图像的过程。

3.1 整体架构设计

系统的硬件架构由输入及输出存储模块、运算模块、投影模组和控制模块构成,其中运算模块和控制模块设计为片上专用集成电路,存储模块采用片外 SRAM 实现。此外,片上还存储有由软件实现几何映射建立算法所获得的校正参数,即式(4)中的 9 个矩阵元素。

系统的运行过程:输入存储模块接收输入的原始图像数据,运算模块读取原始图像数据进行图像变形处理,将生成的预失真图像数据存储入输出存储模块,投影模组读取预失真图像并向投影面投射.

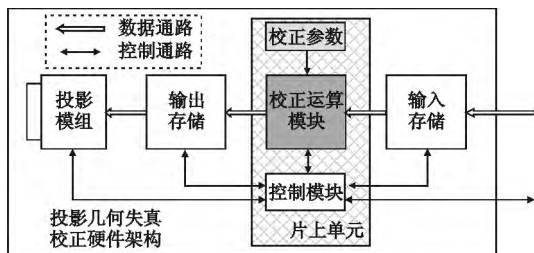


图 4 几何失真校正硬件架构

3.2 校正运算模块设计

运算模块主要实现原始图像变形处理,生成预失真图像。但是变形处理中图像重采样算法的硬件实现存在以下几个问题。一方面,由于采用双线性插值算法,每计算一个像素点值,需要顺次读取片外存储模块中四个像素点值,从而带来大的延时,降低像素输出吞吐率。此外原始图像中每个像素可被重复读取多至四次,存在冗余读取的问题,导致大的片外读取功耗。另一方面,坐标的透视变换矩阵运算如式(5),含有乘法及除法,由此带来大的运算延时及功耗。因此,运算模块的设计需要解决算法的硬件实现所带来的功耗和实时性的问题。

本文设计的校正运算模块如图 5 所示.

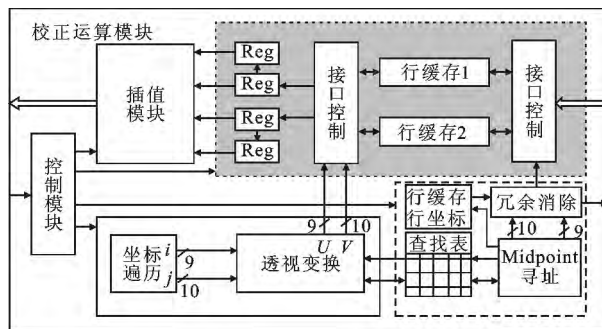


图 5 校正运算模块

3.2.1 双行缓存设计

为实现片外四点像素的并行获取,现有研究中主要有以下三种解决方案。(1)片外设置多块单口RAM的方法^[8]多在图像桶形失真校正的硬件实现中采用,该方法通过同时对多块RAM中的图像数据进行寻址来达到多个像素并行读取的目的,但是成本过高,数据冗余。(2)也可采用一块多口片外RAM来实现并行读取,但是此类RAM一般属于专用产品,造价昂贵。(3)直接提高片外读取频率的方法不仅会导致高的读取功耗,而且会带来时钟同步的问题。本文通过设计基于奇偶存储与读取机制的片上双行缓存,并通过数据的寄存和移位保留,实现了所需四个像素点值的并行读取。

如图 6(a) 所示, 在预失真图像中遍历一行像素, 由于双线性插值算法, 对应原始图像中倾斜的两行像素, 因此本文设计了两个行缓存: 预失真图像每遍历一行之前, 将原始图像中所需两行提前缓存。

如图 7 所示为原始图像上遍历的前后两坐标点位置的 3 种情况,绝大多数满足第一种情况.本设计中,每遍历一个点,只从行缓存中读取 (u, v) 右侧两个整数坐标像素,即分别将从两个行缓存各寻址读取一个像

素;而上一次遍历所读取的两个像素点值,将通过寄存器移位保留.因此当前遍历点插值所需要的四个像素点值为从双行缓存读取的两个值,以及上一遍历点移位保留的两个值.而此操作将会对第二三种情况带来一定误差,但可通过修正插值核的方法^[9]改善.

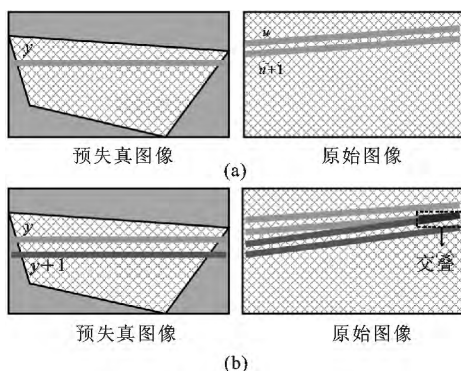


图6 遍历轨迹交叠示意图

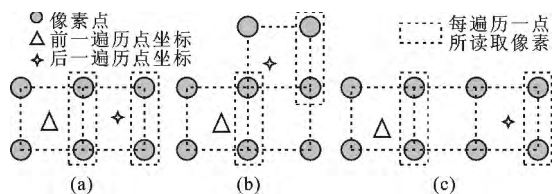


图7 原始图像相邻遍历点坐标位置情况图

3.2.2 冗余消除

如图6(b)所示,预失真图像上相邻的两遍历行,各自在原始图像上对应的两行,存在不同程度交叠.失真角度越大,预失真图像下采样程度越小,交叠程度越大.产生交叠的是当前遍历行对应的原始图像中的第一行和前一遍历行对应的原始图像中的第二行,交叠部分即会被重复读取的部分.

本文设计了冗余消除模块,在片外寻址之前进行了判断:如果寻址像素还未读入行缓存,则从片外读取;如果寻址像素已在行缓存中,则不再读取.

本设计中在行缓存的同时,还存储了所缓存像素的行坐标,供在更新行缓存时,判断哪些位置存在交叠.但此时,需从第二个行缓存读取交叠位置像素到第一个行缓存中,会与寄存器取值造成冲突.

为了解决这个问题,本文设计了双行缓存的奇偶存储机制.当预失真遍历行为奇数行,其对应原始图像的两行将分别存入第一行和第二行缓存;当预失真遍历行为偶数行,其对应原始图像的两行将分别存入第二行和第一行缓存.则存储时,交叠位置像素已存在于当前缓存,无需从另一个缓存读取.

3.2.3 中点算法寻址

将原始图像像素值缓存,需要寻址读取.而如式

(5)所示的直接通过坐标的透视变换算法计算会涉及大量乘法和除法,资源及功耗成本过高,所以通过没有除法,完全由加法实现的中点算法^[10-11]实现.

代替对预失真每个坐标 (x, y) 进行矩阵运算,中点算法利用前一点的计算结果,进行迭代的加减微调,对原始图像坐标 (u, v) 的准确值进行逼近.在实际中,每一个坐标计算最大迭代次数少于两次.

以 u 的逼近过程为例,认为逼近值 u_i 在准确值附近 ± 0.5 的误差之内,即满足以下不等式:

$$\frac{H_{11} \cdot x + H_{12} \cdot y + H_{13}}{H_{31} \cdot x + H_{32} \cdot y + H_{33}} - 0.5 < u_i \leq \frac{H_{11} \cdot x + H_{12} \cdot y + H_{13}}{H_{31} \cdot x + H_{32} \cdot y + H_{33}} + 0.5 \quad (8)$$

引入中间量:

$$d = 2 \cdot (H_{31} \cdot x + H_{32} \cdot y + H_{33}) \quad (9)$$

$$E = u \cdot d - (H_{31} + 2H_{11}) \cdot x - (H_{32} + 2H_{12}) \cdot y - (H_{33} + 2H_{13})$$

$$a = (2u - 1) \cdot H_{31} - 2H_{11}$$

$$b = (2u - 1) \cdot H_{32} - 2H_{12}$$

则不等式(8)变为

$$-d < E \leq 0 \quad (10)$$

算法流程如图8所示.首先预失真坐标 (x, y) 遍历,即对 x 或 y 进行 $+1$,此时需对中间量 E 和 d 进行更新:

当 $x = x + 1$ 时, $d = d + 2H_{32}$, $E = E + (2u - 1) \cdot H_{32} - 2H_{12}$;

当 $y = y + 1$ 时, $d = d + 2H_{31}$, $E = E + (2u - 1) \cdot H_{31} - 2H_{11}$.

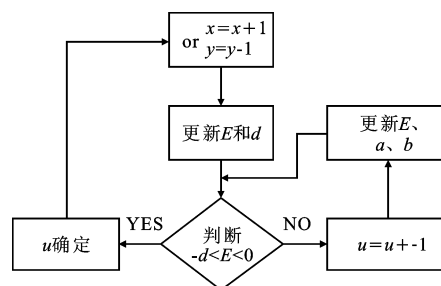


图8 中点算法流程图

然后,进行不等式(11)的判断.若不满足,根据判断情况,对逼近值 u_i 进行 ± 1 的迭代微调,并对中间量 E 和 d 进行更新:

当 $E \leq -d$ 时, $u = u + 1$, $E = E + d$, $a = a + 2H_{31}$, $b = b + 2H_{32}$;

当 $E > 0$ 时, $u = u - 1$, $E = E - d$, $a = a - 2H_{31}$, $b = b - 2H_{32}$.

直到不等式满足,即逼近值 u_i 满足误差,接着进行下一点遍历。

在对缓存进行取值时,依然需要寻址来获取用于插值运算的像素。本文通过设计查找表,将在缓存预存阶段中,寻址时生成的坐标变换结果存储下来,供寄存器取值寻址使用,因而节省了运算成本。

4 实验结果及分析

本文对提出的投影几何失真校正算法及硬件架构设计进行了仿真验证,基于 Verilog HDL 对硬件架构进行了实现,利用 Quartus II 工具进行了综合,并对硬件实现方案的功耗和存储资源消耗进行了分析比较。

图 9 所示为在投影的不同失真角度情况下,基于原始图像所计算出的预失真图像。可见在不同失真角度下预失真图像可保持良好的质量。

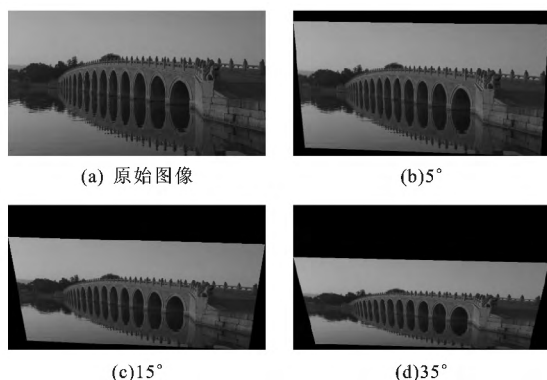


图 9 不同失真角度预失真图像

硬件系统中功耗的主要来源一方面是对片外存储器的读取。本文提出的双缓存及冗余读取消除方案能够有效消除片外像素的重复读取,因而降低读取功耗。如图 10 所示为冗余消除方案采用前后,原始图像中被重复读取的像素数的比较。采用冗余消除后,被重复读取 2 次 3 次及 4 次的像素数量极大减少,平均片外读取操作次数下降 61.5%。

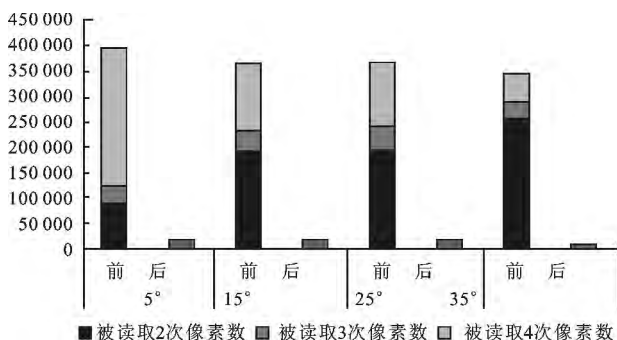


图 10 冗余消除前后对比图

另一方面,功耗来自于透视变换寻址中的复杂运算。如表 1 所示,本文采用的无除法中点算法代替了原来的透视矩阵运算,在运行阶段消除了乘法及除法。若图像分辨率为 $M \times N$,除了计算起始点和初始化中间量的极少次乘除法运算,只增加 $10 M \times N$ 次的加法,运算复杂度极大降低。

表 1 缓存寻址计算量比较

运算类型	透视变换算法	中点算法		
		运行	起始点	中间量
加法	$M \times N \times 2 \times 4$	$M \times N \times 2 \times 5$	2×4	18
乘法	$M \times N \times 2 \times 4$	0	2×4	10
除法	$M \times N \times 2 \times 2$	0	2×2	0

表 2 存储资源消耗比较

Chen's ^[8]		本文设计
映射算法	桶形失真映射	透视失真映射
插值算法	双线性插值	双线性插值
分辨率	1024 * 1024	1024 * 1024
图像类型	灰度	灰度
存储器类型	片外	片外 + 片上
占用空间	$4 * M * N * 1$ Byte	行缓存: $2 * N * 1$ Byte
		行坐标存储: $N * 9/8$ Byte
		查找表: $2 * N * (9 + 10) / 8$ Byte
		片外 RAM: $M * N * 1$ Byte
总计	4 MB	1 MB + 11.9 kB

与文献[8]比较,为了达到片外像素并行读取的目的,本文采用的设计占用存储空间极小,以 1024×1024 分辨率计算,与文献中额外多占用的 3 MB 片外存储空间相比,本文只多占用了片上的 11.9 kB 的存储空间。

5 结束语

本文提出了一种基于图像变形算法的投影图像几何失真校正的硬件架构。校正算法可以获得良好的投影图像校正质量。本硬件设计以较小的存储占用空间,在实现片外插值像素并行获取及降低读取延时的同时,通过冗余消除,片外读取次数减少 61.5%,减小了读取功耗;通过中点算法有效降低寻址计算复杂度,从而降低功耗。

参考文献:

- [1] Rukzio E, Holleis P, Gellersen H. Personal projectors for pervasive computing[J]. IEEE Pervasive Computing, 2011, 11(2): 30-37.

- [2] Masuda N. Projection lens shifting mechanism; U. S. Patent 6,547,402[P]. 2003-04-15.
- [3] Li B, Sezan I. Automatic keystone correction for smart projectors with embedded camera[C]// Image Processing, 2004. ICIP04. 2004 International Conference on. Singapore, IEEE, 2004(4): 2829-2832.
- [4] Li Z, Wong K H, Gong Y, et al. An effective method for movable projector keystone correction[J]. Multimedia, IEEE Transactions on, 2011, 13(1): 155-160.
- [5] Wolberg G. Digital image warping[M]. Los Alamitos; IEEE computer society press, 1990.
- [6] Hearn D, Baker M P. Computer graphics[M]. Upper Saddle River; Prentice Hall, 1997.
- [7] Lanman D, Taubin G. Build your own 3D scanner; optical triangulation for beginners[C]// ACM SIGGRAPH ASIA 2009 Courses. Seoul, ACM, 2009: 2.
- [8] Chen P Y, Huang C C, Shiau Y H, et al. A VLSI implementation of barrel distortion correction for wide-angle camera images[J]. Circuits and Systems II: Express Briefs, IEEE Transactions on, 2009, 56(1): 51-55.
- [9] Gribbon K T, Bailey D G. A novel approach to real-time bilinear interpolation[C]// Field-Programmable Technology, 2004 IEEE International Conference on. Singapore, IEEE, 2004: 126-131.
- [10] Barenbrug B, Peters F J, Van Overveld C. Algorithms for division free perspective correct rendering[C]// Proceedings of the ACM Siggraph/Eurographics workshop on Graphics hardware. Switzerland, ACM, 2000: 7-13.
- [11] Kim D, Kim L S. Area-efficient pixel rasterization and texture coordinate interpolation[J]. Computers & Graphics, 2008, 32(6): 669-681.

作者简介:

任力飞 男, (1989-), 硕士研究生, 研究方向为数字集成电路设计和图像处理. E-mail: 1003889037@qq. com.

谢翔 男, (1971-), 副研究员. 研究方向包括集成电路设计、图像处理、生物医学电子等.

李国林 男, (1970-), 副教授. 研究方向包括集成电路设计、互连分析以及 RFIC 设计.

(上接第 14 页)

- [3] Suliman A, Li R. New stereo video coding in redundant wavelet domain[C]// Visual Communications and Image Processing (VCIP). Tainan, 2011: 1-6
- [4] Shiping Zhu, Kamel Belloulata. A novel object based fractal stereo video CODEC[C]// IEEE International Conference on Image Processing, ICIP2005. Magazzini, 2005: 493-497.
- [5] Andreas Grunz, Daniel Memmert, Jurgen Perl. Tactical pattern recognition in soccer games by means of special self-organizing maps[J]. Human Movement Science, 2012, 31(2): 334-343.
- [6] Kathirvalavakumar T, Ponmalar E. Self-organizing map and wavelet based image compression[J]. International Journal of Machine Learning and Cybernetics, 2013, 4(4): 319-326.
- [7] Seiffert U, Michaelis B. Adaptive three-dimensional self-organizing map with two-dimensional input layer[C]// Intelligent Information Systems, Australian and New Zealand Conference. New Zealand, 1996.
- [8] 黎洪松. 一种新的自组织神经网络算法[J]. 北京师范大学学报: 自然科学版, 2005, 41(5): 496-498.
- [9] Xie S, Wang C, Cui C. Vector quantization image coding based on biorthogonal wavelet transform and improved SOFM[C]// Information Science and Technology (ICIST), 2013 International Conference on. China, Yangzhou, IEEE, 2013: 1629-1632.
- [10] Huilin Xiong, Swamy M N S, Ahmad M O. Competitive splitting for codebook initialization[J]. Signal Processing Letters, IEEE, 2004, 11(5): 474-477.
- [11] 李达, 黎洪松. 一种改进的立体图像编码算法[J]. 北京师范大学学报: 自然科学版, 2007, 43(1): 50-52.

作者简介:

覃远年 男, (1971-), 硕士, 高级实验师. 研究方向为信号处理与无线通信系统.

徐晓宁 (通讯作者) 男, (1987-), 硕士研究生. 研究方向为图像视频编解码. E-mail: vipxuxiaoning@126. com.