

文章编号: 0253-2239(2010)02-0405-06

立体显示系统的消畸变研究

黄涛 朱秋东 郝群 王涌天

(北京理工大学光电工程系, 北京 100081)

摘要 许多场合需要精确观看与真实景物相似的立体影像, 立体拍摄和再现系统应无畸变。提出的再现立体影像垂轴放大率概念, 其具有与拍摄相机的垂轴放大率互补的特性。由此根据再现立体像的垂轴放大率与轴向放大率应相等这一消畸变的基本要求推导了立体拍摄和再现系统的消畸变条件。提出了消畸变系统的设计方法和设计流程, 计算并通过验算证明了设计方法的正确性。该方法设计流程简单合理, 设计的立体拍摄和再现系统, 在正面观看时可在很大的纵深范围内得到消畸变立体影像。

关键词 信息光学; 立体显示; 立体影像拍摄; 自由立体显示; 消畸变

中图分类号 TN873 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20103002.0405

Study on Distortion Elimination in Stereoscopic Display Systems

Huang Tao Zhu Qiudong Hao Qun Wang Yongtian

(Department of Optoelectronic Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract Stereoscopic images need to be observed accurately in many applications, where image distortions are not allowed in the stereoscopic camera and display systems. The concept of vertically axial magnification of the reproduction stereo image is presented, which may have complementary characteristics to the paraxial magnification of the camera. Therefore, according to the basic requirement that the paraxial magnification of reproduction image should be equal to the axial magnification, the eliminating distortions conditions of camera and display system are derived. A design method and flow program for the stereoscopic camera and display systems is proposed. Design examples are given and the design method is proved correct with checking computations. The design method and flow program are exact and simple. Using the design method, stereo image without distortions can be in a much large depth range for front viewing.

Key words information optics; stereoscopic display; stereoscopic photographing of camera; autostereoscopic display; distortion elimination

1 引 言

立体显示技术能够提供比平面显示技术更直观、更自然的交流模式, 近年来受到了国内外的广泛关注^[1~6]。视差型立体显示通过眼镜或者光栅等使观察者左右眼看到同一景物不同视角的图像, 再经过大脑融合产生立体感觉。这种技术相对简单, 也较为成熟, 目前已有大量的商业应用。图像一般是计算机合成或者采用两台或多台摄像机从不同的视

角拍摄同一景物获得。在遥感遥测^[7]、机器人视觉、手术导航和立体观测^[8]等应用领域都需要观看者看到的立体影像与真实场景一样^[9,10], 即由立体显示器看到的立体影像没有畸变, 从而对所观测的物体做出准确的形状与位置判断。然而视频立体显示系统所显示的立体影像一般都有畸变, 观察者所看到的立体影像缺少真实感, 不能充分利用立体显示的空间深度信息。以往的文献中对立体显示系统中的

收稿日期: 2009-02-10; 收到修改稿日期: 2009-04-07

基金项目: 国家 863 计划(2006AA02Z4E5)、教育部长江学者和创新团队发展计划(IRT0606)资助课题。

作者简介: 黄涛(1978—), 男, 博士研究生, 主要从事立体视觉和真三维显示技术等方面的研究。

E-mail: htbit@126.com

导师简介: 朱秋东(1959—), 男, 副教授, 主要从事光学测量、立体视觉和真三维显示技术等方面的研究。

E-mail: zqd@bit.edu.cn

畸变进行了大量的研究和分析^[11~15]。文献[11]中研究了立体显示系统畸变产生的两大主要根源——放大率和垂直视差,分析了垂直视差对立体显示效果的影响,并且分析了垂轴放大率和轴向放大率不一致引起的显示畸变。文献[12]中讨论了立体视频系统畸变的原因、特点和对观察效果的影响,对图像畸变进行了软件仿真,分析了不同系统参数对图像畸变的影响。文献[13]中研究了立体显示系统中的深度分辨率和有舒适感的视觉区域范围,并提出了基本设计方法。文献[14]中建立了双 CCD 立体视觉系统的数学模型。但都没有提出一种有效的方法来消除畸变。本文对立体影像的拍摄和显示等阶段的垂轴放大率进行了深入研究,提出了一种简单有效的消畸变理论和方法。

2 立体影像拍摄、显示和观看时的垂轴放大率

实际物与再现立体像的尺寸通常不相同,垂轴放大率与轴向放大率的不一致产生了畸变,首先应研究再现立体像的垂轴放大率。显示立体影像可分为三个阶段:CCD 相机对实际物体拍摄得到视差图像;对视差图像编码并由屏幕显示;观看者在一定距离处观看再现立体影像。每个阶段都有各自的垂轴放大率,观看者实际感受到的立体影像的最终垂轴放大率应是各阶段垂轴放大率的乘积。

2.1 视差图像拍摄时的垂轴放大率

拍摄光路如图 1 所示,相机由透镜将距 L 处的高为 h 的物成像在像面处,像高为 h_c ,则在 L 较远时,光学系统的垂轴放大率 β_1 为

$$\beta_1 = \frac{h_c}{h} = \frac{f}{L}, \quad (1)$$

垂轴放大率随 L 增大而减小。

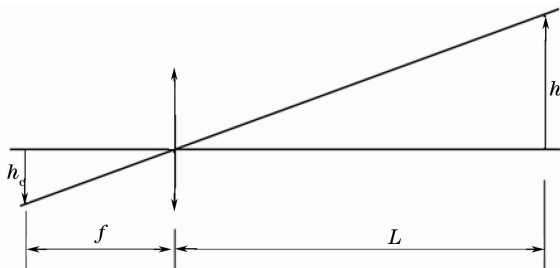


图 1 拍摄光路

Fig. 1 Shooting light path

2.2 屏幕显示垂轴放大率

CCD 相机得到的视差图像在屏幕上显示,图像的放大率 β_2 (也称作转换系数)

$$\beta_2 = \frac{W_s}{W_c}, \quad (2)$$

式中 W_s 为屏幕尺寸, W_c 为 CCD 尺寸。

2.3 再现垂轴放大率

这是本文提出的一个新概念,再现的立体像一般不在屏幕上,或在屏幕之前,或在屏幕之后。假设边长为 a 的正方形平面物,在拍摄相机像面处的尺寸为 a' ,在显示器上的正方形图像左右视差图四个角分别为 $A_l B_l C_l D_l$ 和 $A_r B_r C_r D_r$,边长 a'' ,在显示器上的左右视差图的视差为 P ,再现立体影像在 L' 处,再现影像的四个角为 A', B', C', D' ,边长 a''' 。

立体影像的再现过程如图 2 所示,图中 E 为两眼瞳距, S 为人眼到显示器的距离。立体影像点为左右视差图中对应点与左右眼连线的交点,如图中 LB_l 与 RB_r 的交点 B' 。由图中几何关系得出像距 L' 为

$$L' = \frac{SE}{E - P}. \quad (3)$$

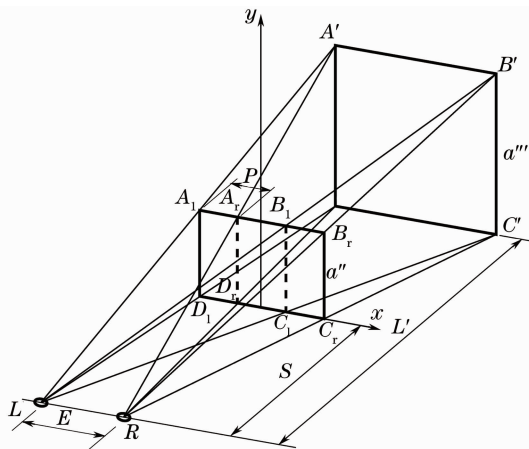


图 2 立体影像的观看与再现过程

Fig. 2 Course of observation and reproduction for stereo image

改变视差 P 可改变像距 L' , $P = 0$ (两正方形重合), 则再现像在显示器上;左视差图在左侧、右视差图在右侧时, $P > 0$, $L' > S$, 像在显示器后方;左视差图在右侧、右视差图在左时, P 为负, $L' < S$, 像在显示器前方。

立体影像 x 方向的放大率

$$\beta_{3x} = \frac{A'B'}{A_r B_r} = \frac{RB'}{RB_r} = \frac{L'}{S}, \quad (4)$$

立体影像 y 方向上的放大率

$$\beta_{3y} = \frac{B'C'}{B_r C_r} = \frac{RB'}{RB_r} = \frac{L'}{S}. \quad (5)$$

由(4)式和(5)式得出

$$\beta_{3x} = \beta_{3y} = \beta_3 = \frac{L'}{S}, \quad (6)$$

(6)式说明 x 方向和 y 方向的放大率相同,即再现立体影像仍然是一个正方形,其边长 a''' ,则有

$$a''' = \beta_3 a'' = \beta_1 \beta_2 \beta_3 a = \frac{f}{L} \frac{W_s}{W_c} \beta_3 a = \frac{f W_s L'}{L W_c S} a. \quad (7)$$

由(7)式,当再现立体像在屏幕上时, $L' = S$, $\beta_3 = 1$,则 $a''' = a''$;像在屏幕里时,则 $\beta_3 > 1$, $a''' > a''$;像在屏幕外时, $\beta_3 < 1$, $a''' < a''$ 。当观看距离一定时,放大率与像距的变化呈线性关系,像的尺寸与像距的关系为近小远大。在自行研制的自由立体显示器上进行了实验验证。实验所用 LCD 显示器尺寸 19 inch (48.26 cm),观看距离 2 m。左、右视差图来自同一幅图像,将这两幅相同的图像相对平移产生视差。由于在视差型立体显示中立体感是通过人脑对左右眼看到的视差图融合后产生的,既无法直接用相机拍摄到立体图像,也无法在缺少分光元件的平面上直接显示立体图像,因此本文中仅用文字描述实验现象。平移量为零时,再现像在屏幕上。将左眼视差图向左移时,再现像为一平面影像,像在屏幕以里,像尺寸大于屏幕上的图像。逐渐向左移动,像远离观看者,最远可到无限远,尺寸逐渐变大。反之,

左视差图向右移动,则像在屏幕之外,且尺寸小于屏幕上的图像,增大向右移动距离,像向观看者移动,最近可凸出屏幕 1 m,尺寸逐渐变小,极限情况可缩小 1/2。实验结果与文献[16]中论述的一致。

正是由于拍摄和再现的垂轴放大率具有一定的互补性,有可能实现等垂轴放大率再现立体影像。总的立体影像放大率为三个阶段的垂轴放大率乘积,即

$$\beta = \beta_1 \beta_2 \beta_3. \quad (8)$$

3 消畸变条件

再现立体影像的尺寸相对实际物或放大或缩小,并不一定相等。无畸变应是再现像与实际物的长、宽、高比例相同。也就是再现像的垂轴放大率和轴向放大率应相同,且各像距处的垂轴放大率相同,参照图 3 应有

$$\frac{h'_1}{h_1} = \frac{h'_2}{h_2} = \frac{d'}{d} = \beta, \quad (9)$$

式中 d'/d 表示轴向放大率,而 h'_1/h_1 和 h'_2/h_2 则表示各像距处的垂轴放大率。

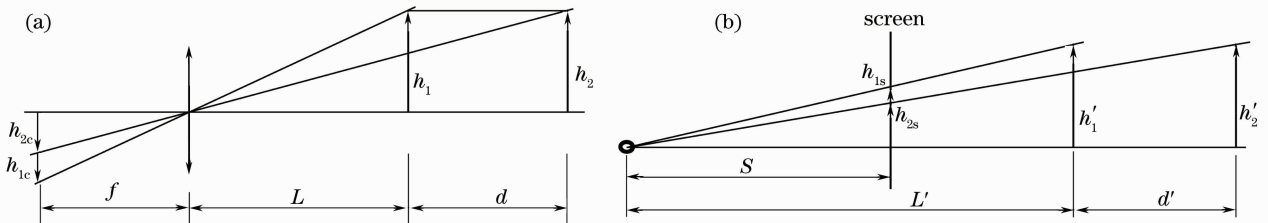


图 3 立体影像的拍摄(a)与再现光路(b)

Fig. 3 Shooting light path (a) and reproduction light path (b) of stereo image

由(1)式,物在透镜像面高度 h_{1c} , h_{2c} 分别为

$$h_{1c} = \frac{f}{L} h_1,$$

$$h_{2c} = \frac{f}{L+d} h_2.$$

由(2)式,在屏幕上视差图像高 h_{1s} , h_{2s} 分别为

$$h_{1s} = \beta_2 h_{1c} = \frac{\beta_2 f h_1}{L},$$

$$h_{2s} = \beta_2 h_{2c} = \frac{\beta_2 f h_2}{L+d}.$$

再现像的高度 h'_1 , h'_2 分别为

$$h'_1 = \frac{\beta_2 f h_1 L'}{L S} = \beta h_1, \quad (10)$$

$$h'_2 = \frac{\beta_2 f h_2 (L' + d')}{(L + d) S} = \beta h_2, \quad (11)$$

根据(9)~(11)式中垂轴放大率 β 应相同,所以有

$$\frac{\beta_2 f L'}{L S} = \frac{\beta_2 f (L' + d')}{S (L + d)}. \quad (12)$$

对上式进行整理并由(9)式可得到

$$\frac{L'}{L} = \frac{L' + d'}{L + d} = \beta, \quad (13)$$

(13)式表明消畸变条件可扩展为像物距之比等于垂轴放大率。

由(9),(10)式可得,(10)式中 $\beta_2 f/S = 1$, 即

$$S = \beta_2 f. \quad (14)$$

(14)式为由垂轴放大率得出的消畸变条件之一,适合平行或会聚拍摄情况。

4 拍摄显示消畸变参数

由(9)和(13)式消畸变条件,再现像的轴向放大率应等于垂轴放大率,为方便推导,只讨论轴上点的

轴向放大率。拍摄光路如图 4(a), 两相机光轴相交于 C 点, C 点距离拍摄位置 L_0 , 两相机间隔为 t , 相机与对称轴线夹角 α , 当 $\alpha = 0$ 时为平行拍摄情况。两相机对称轴上物点 A , 物距 L , 相对相机光轴夹角为 θ 。相机光轴与像面的交点 O 点作为像面坐标原点, A 点在像面上的位置为 x_c , x_c 在像面坐标原点之上为正而之下为负。

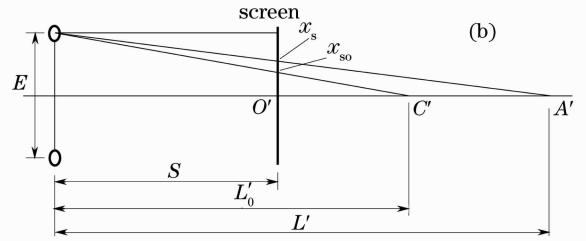
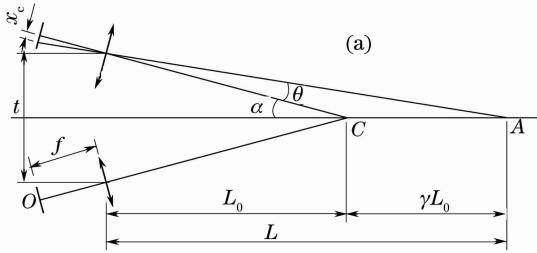


图 4 会聚拍摄(a)和再现光路(b)

Fig. 4 Convergence shooting light path (a) and reproduction light path (b) of stereo image

再现光路如图 4(b), 双眼的瞳距为 E , 观察者到屏幕的距离为 S , 立体影像的位置为 L' , 以屏幕与双眼中线交点 O' 为屏幕坐标系原点。把拍摄相机光轴交点 C 当作轴上物点, 由相机拍摄的双视差图相对 O' 在屏幕上对称显示。相机像面上 O 点在显示屏上的位置为 x_{so} , 其像点 C' 在 L'_0 处。改变 x_{so} 的位置, 则再现立体影像的深度 L' 也相应改变。

$$x_{so} = \frac{E(L'_0 - S)}{2L'_0}, \quad (17)$$

A' 点为拍摄相机对称轴上物点 A 的再现像点, 其在屏幕上的对应坐标为 x_s , x_s 在屏幕坐标原点之上为正而之下为负, 且由于相机拍摄像面上的图像与屏幕上显示的图像之间是倒像关系, 则有

$$x_s = x_{so} - \beta_2 x_c, \quad (18)$$

由图 4(b) 几何关系和(17)和(18)式得到

$$L' = \frac{ES}{E - 2x_s} = \frac{ES}{E - 2x_{so} + 2\beta_2 x_c} = \frac{L'_0 ES}{ES + 2\beta_2 L'_0 x_c}. \quad (19)$$

根据(13)式, 由(14), (16)和(19)式得到

在 α, θ 较小的情况下, 有

$$\theta = \frac{t/2}{L} - \frac{t/2}{L_0} = \frac{t}{2} \left(\frac{1}{L} - \frac{1}{L_0} \right),$$

$$x_c = \theta f = \frac{1}{2} t f \left(\frac{1}{L} - \frac{1}{L_0} \right), \quad (15)$$

$$L = \frac{L_0 t f}{t f + 2L_0 x_c}. \quad (16)$$

$$\frac{L'}{L} = \frac{L'_0 ES / (ES + 2\beta_2 L'_0 x_c)}{L_0 t f / (t f + 2L_0 x_c)} = \frac{1}{L/L'_0 - (t/E)(L/L_0 - 1)} = \beta. \quad (20)$$

当 L'_0 和 L_0 趋于无限大时, 为平行拍摄显示, 此时两相机的光轴平行, 两眼的光轴也平行, 如图 5 所示。则(15), (17)和(20)式可写为

$$x_c = \frac{t f}{2L}, \quad (21)$$

$$x_{so} = E/2, \quad (22)$$

$$L'/L = E/t = \beta. \quad (23)$$

因此, 在平行拍摄时, 消畸变的垂轴放大率为观察者双眼瞳距和相机间距之比, 视差图的平移量为瞳距的一半。(22)和(23)式为平行拍摄时的消畸变参数。会聚拍摄时轴向放大率随物距 L 变化, 一般不是常数。若把相机光轴交点 C 当作轴上物点, 其再现像点 C' 的距离 L'_0 与 L_0 若为像物距关系, 也应满足(13)式, 则有

$$L'_0/L_0 = \beta, \quad (24)$$

设 $L = L_0 + \gamma L_0$ 并与(23)和(24)式一起代入(20)式, 则

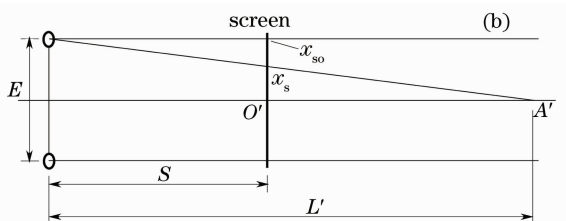
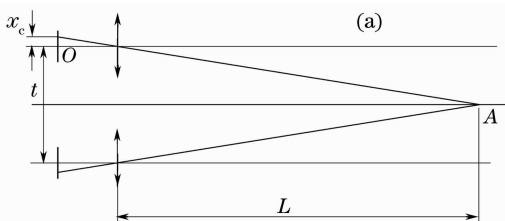


图 5 平行拍摄(a)和再现光路(b)

Fig. 5 Parallel shooting light path (a) and reproduction light path (b) of stereo image

$$\frac{L'}{L} = \frac{1}{L_0/L'_0 + \gamma L_0/L'_0 - \gamma/\beta} = \beta. \quad (25)$$

由(25)式可知,只需满足(24)式,则平行拍摄的消畸变参数即可用于会聚拍摄。在显示时应通过平移视差图,使 L'_0 和 L_0 满足(24)式,视差图 O' 点坐标 x_{so} 为

$$x_{so} = E(L'_0 - S)/(2\beta L_0). \quad (26)$$

按(26)式平移视差图后,即可满足(24)式,从而得到消畸变的再现立体影像。

将平行和会聚两种拍摄再现情况下的消畸变参数计算公式整理列如表 1 所示。

表 1 消畸变参数计算公式

Table 1 Calculation formulas of eliminating distortions

	Parallel camera and display configuration	Convergence camera and display configuration
Paraxial magnification of display	$\beta_2 = W_s/W_c$	$\beta_2 = W_s/W_c$
Focal length	$f = S/\beta_2$	$f = S/\beta_2$
Distance between two cameras	$t = E/\beta$	$t = E/\beta$
Image distance of the intersection point of two camera's optical axes	∞	$L'_0 = \beta L_0$
Translational amount of two parallax images	$x_{so} = E/2$	$x_{so} = E(L'_0 - S)/2\beta L_0$

5 消畸变立体显示系统设计

选定 LCD 屏幕 32 inch(81.28 cm),对角线长度 800 mm,CCD 相机对角线长度 8 mm,则 $\beta_2 = 100$,观看距离与屏幕尺寸之间应满足一定的比例关系,通常 $S/W_s = 2 \sim 8$,这里观看距离选为 4 倍屏幕长度 $S = 3200$ mm。CCD 相机焦距 $f = S/\beta_2 = 32$ mm。根据观察需要,观察者对再现立体像的尺寸与被拍摄物体的原始尺寸之间的比例关系有一个基本期望,由此可以确定总的垂轴放大率 β 。人眼瞳距可取 $E = 65$ mm。为了验算本文中提出的设计方法,对已确定的上述系统参数,利用(18),(19),(21)和(22)式反向计算出再现像距 L' ,利用(1)式计算出拍摄垂轴放大率 β_1 ,由(6)式计算出再现垂轴放大率 β_3 。

表 2 $\beta = 2$ 消畸变系统参数

Table 2 Parameters of eliminating distortions system

when $\beta = 2$

L	L'	β_1	β_3	$\beta_1 \times \beta_2 \times \beta_3$	L'/L
1000	2000	0.032	0.625	2	2
1500	3000	0.021	0.938	2	2
2000	4000	0.016	1.250	2	2
2500	5000	0.013	1.563	2	2
3000	6000	0.011	1.875	2	2
4000	8000	0.008	2.500	2	2

若总垂轴放大率 $\beta = 2$,则 CCD 相机间隔 $t = 32.5$ mm,平行拍摄时不同物距的垂轴放大率和轴向放大率如表 2 所示。总垂轴放大率 $\beta = 4$, $t = 16.25$ mm,平行拍摄时消畸变各项参数如表 3 所示。

由表 2 和表 3 中的计算结果 $\beta = \beta_1 \times \beta_2 \times \beta_3 = L'/L$ 可知,按本文方法计算的平行拍摄消畸变系统参数,在很长的物距范围内拍摄再现的立体影像都能满足总垂轴放大率等于轴向放大率的消畸变条件,可实现无畸变拍摄再现立体影像。对于会聚拍摄再现方式,除平行方式系统参数之外,还需选定相机光轴交点 L_0 ,计算视差图平移量 x_{so} ,几种情况的计算结果如表 4 所示。

表 3 $\beta = 4$ 消畸系统参数

Table 3 Parameters of eliminating distortions system

when $\beta = 4$

L	L'	β_1	β_3	$\beta_1 \times \beta_2 \times \beta_3$	L'/L
1000	4000	0.032	1.250	4	4
1500	6000	0.021	1.875	4	4
2000	8000	0.016	2.500	4	4
2500	10000	0.013	3.125	4	4
3000	12000	0.011	3.750	4	4
4000	16000	0.008	5.000	4	4

表 4 视差图平移量

Table 4 Translational amount of two parallax images

	L_0	1000	1500	2000	2500	3000	4000
$\beta = 2$	x_{so}	-19.500	-2.167	6.500	11.700	15.167	19.500
	L'_0	2000	3000	4000	5000	6000	8000
$\beta = 4$	x_{so}	6.500	15.167	19.500	22.100	23.833	26.000
	L'_0	4000	6000	8000	10000	12000	16000

6 结 论

根据发现的再现立体影像垂轴放大率具有与拍摄相机的垂轴放大率相反的性质,使消除再现立体影像的畸变成为可能。根据提出的消畸变条件推导出了消畸变立体影像拍摄再现系统系数关系式,提出了消畸变拍摄再现系统的设计方法和设计流程并计算了实例,通过验算证明设计方法正确,设计流程简便、合理。用提出的消畸变设计方法,在正面观看时可在很大的纵深范围内得到消畸变立体影像。若侧面斜向观看,视场过大仍将会出现畸变和场曲等失真。

参 考 文 献

- Kang Hui, Yang Yingmin. Binocular stereoscopic holograms for three dimension display[J]. *Chinese J. Lasers*, 1987, **14**(11): 681~684
康 辉, 杨英民. 用于三维显示的双目体视全息图[J]. *中国激光*, 1987, **14**(11): 681~684
- Lin Yuanfang, Liu Xu, Liu Xiangdong *et al.*. Three-dimensional volumetric display system utilizing a rotating two-dimensional LED array[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(10): 1158~1162
林远芳, 刘 旭, 刘向东等. 基于旋转二维发光二极管阵列的体三维显示系统[J]. *光学学报*, 2003, **23**(10): 1158~1162
- Tian Jingdong, Peng Xiang. Approach for three-dimensional digital imaging via position-shift point array projection[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(10): 1319~1323
田劲东, 彭 翔. 位错点阵投影的三维数字成像[J]. *光学学报*, 2005, **25**(10): 1319~1323
- Zhang Nanyangsheng, Yang Kuntao. Three-dimensional measurement technology based on virtual grating of double frequency[J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(10): 1407~1411
张南洋生, 杨坤涛. 双屏虚拟光栅投影三维测量技术[J]. *中国激光*, 2006, **33**(10): 1407~1411
- Tian Jindong, Peng Xiang. Approach for three-dimensional imaging based on hybrid encoding[J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(2): 161~165
田劲东, 彭 翔. 一种复合编码的三维数字成像方法[J]. *中国激光*, 2006, **33**(2): 161~165
- Ding Yabin, Peng Xiang, Tian Jindong *et al.*. Pose estimation of multiple viewpoints for three-dimensional digital imaging system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(3): 451~456
丁雅斌, 彭 翔, 田劲东等. 一种三维数字成像系统的多视点姿态估计方法[J]. *光学学报*, 2007, **27**(3): 451~456
- Hu Jiasheng, Ling Wei, Huang Lianqing *et al.*. Stereo-imaging technology in remote sensing [J]. *Acta Optica Sinica*, 1997, **17**(2): 222~226
胡家升, 凌 伟, 黄廉卿等. 遥感中的立体成像技术[J]. *光学学报*, 1997, **17**(2): 222~226
- Xu Qiaoyu, Ye Dong, Che Rensheng. On-line calibration of stereo vision measurement system based on optical reference bar [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(1): 81~86
徐巧玉, 叶 东, 车仁生. 基于光学参考棒的立体视觉测量系统现场标定技术[J]. *光学学报*, 2008, **28**(1): 81~86
- Lei Yanzhang, Zhao Huijie, Jiang Hongzhi. A three-dimensional measurement method by combining binocular and monocular vision system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(7): 1338~1342
雷彦章, 赵慧洁, 姜宏志. 一种单双目视觉系统结合的三维测量方法[J]. *光学学报*, 2008, **28**(7): 1338~1342
- Gu Zheng, Su Xianyu. An algorithm based on adaptive support-weight and disparity adjustment for trinocular stereo-matching [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(4): 734~738
顾 征, 苏显渝. 三目自适应权值立体匹配和视差校准算法[J]. *光学学报*, 2008, **28**(4): 734~738
- A. M. Ariyaeeinia. Distortions in stereoscopic display [C]. *SPIE*, 1992, **1669**: 2~9
- A. Woods. Image distortions in stereoscopic video systems [C]. *SPIE*, 1993, **1915**: 36~48
- Li Bin, Zhuang Tiange. A new method for analysis and design of stereoscopic system [J]. *J. Data Acquisition & Processing*, 2000, **15**(4): 417~421
李 斌, 庄天戈. 一种新的立体视觉系统的分析与设计方法[J]. *数据采集与处理*, 2000, **15**(4): 417~421
- Zhu Xiaoming, Gao Zhiyun. Theoretic research on double CCD stereoscopic system [J]. *Optical Technique*, 2003, **29**(3): 298~300
朱效明, 高稚允. 双 CCD 立体视觉系统的理论研究[J]. *光学技术*, 2003, **29**(3): 298~300
- Zhao Renliang, Zhao Wuxiang, Wang Qionghua *et al.*. Research on stereo viewing zone in autostereoscopic display based on parallax barrier [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(5): 960~963
赵仁亮, 赵悟翔, 王琼华等. 狭缝光栅自由立体显示器立体可视区域的研究[J]. *光子学报*, 2008, **37**(5): 960~963
- Chen Qian, Zhu Qiudong. Study on binocular parallax autostereoscopic display [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2007, 31~33
陈 黔, 朱秋东. 视差栅型自由立体显示器的研制[D]. 北京: 北京理工大学, 2007, 31~33