

彩色栅线动态三维测量中自适应相关匹配技术

韦争亮 钟约先 袁朝龙

(清华大学机械工程系 先进成形制造教育部重点实验室, 北京 100084)

摘要 彩色栅线结构光三维测量可仅靠左右摄像机单幅图像完成像素级相位匹配, 能够实现运动或者变形物体型面重构, 但其测量精度有待进一步提高。在依据相位进行粗匹配的基础上, 采用立体视觉数字相关技术在左右图像局部区域进行更细致的匹配。计算相关系数时, 依据彩色栅线各个周期的色彩变化特性自适应调整不同颜色通道的权重, 依据不同视点表面变形特性自适应调整左右相关窗口的尺寸。在极线方向上双线性插值进行亚像素匹配。实验结果证明自适应数字相关匹配技术在保证彩色栅线动态检测, 分辨率高优点的同时, 可有效改善测量精度至 0.1 mm, 扩大测量适用范围。

关键词 结构光; 动态三维测量; 彩色栅线; 自适应相关

中图分类号 O29; TB11 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20092904.0949

Matching Technique of Self-Adaptation Correlation in Dynamic Three-Dimensional Measurement by Color Grating

Wei Zhengliang Zhong Yuexian Yuan Chaolong

(Key Laboratory for Advanced Materials Processing Technology, Ministry of Education, Department of Mechanical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract Three-dimensional measurement of structured light of color grating can complete phase match of pixel between single image in left and right cameras. It can realize the reconstruction of surface of objects that move or deform, but the measurement accuracy needs to be improved. Based on the coarse match by phase, more accurate match can be achieved in local region by digital correlation technique of stereo vision between left and right images. As calculating the correlation coefficient, the weights in different color channels are self-adapted according to the color variety feature in different period of color grating and the dimension of correlation windows in left or right is self-adapted according to surface distortion feature from different view. The sub-pixel matching is achieved by bilinear interpolation along the direction of epipolar line. The experimental results prove that the matching technique of self-adaptation digital correlation can improve the accuracy of measurement effectively, and expand the range of application while maintaining the advantages of dynamic measurement and high resolution.

Key words structured light; dynamic three-dimensional measurement; color grating; self-adaptation correlation

1 引 言

实体三维数据测量广泛应用于反求工程、产品质量检测和安全控制、物体识别、医学、影视娱乐等领域。相比其它三维测量技术, 结构光三维测量将多个光平面同时投影到物体表面, 一次完成可见视区的数据测量, 具有非接触、效率高的优点。但由于

需投影多幅编码图像^[1,2]实现对不同光平面的编码, 无法实现运动或者变形过程中的物体型面测量。近年来, 对于动态三维测量的需求越来越多, 比如像高速在线检测, 零件加工变形分析, 仿生学研究, 人体检测等等。

国内外学者研究了多种结构光动态测量技术,

收稿日期: 2008-07-09; 收到修改稿日期: 2008-09-24

作者简介: 韦争亮(1982-), 男, 博士研究生, 主要从事三维无接触测量和反向工程等方面的研究。

E-mail: weizhengliang00@mails. tsinghua. edu. cn

钟约先(1947-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事三维无接触测量和材料加工工程等方面的研究。

E-mail: zhongyx@mail. tsinghua. edu. cn

常用的方法有借助系统组成构件之间特殊的空间几何约束关系^[3,4],利用信号调制融合多幅图像再解调^[5],或是用空域编码(伪随机序列编码, M-arrays 编码等)取代典型的时域编码(相移法, 二进制 grey 编码, n 等级灰度编码等)^[6],但普遍存在测量精度低,测量数据稀疏,分辨率较低的缺点。也有的系统通过改善系统硬件性能,实现图像投影和拍摄的高速循环近似实现动态测量^[7,8],但要求物体变化相对缓慢且不可避免引入误差。本文采用一种彩色栅线空域编码策略,能够仅靠单次投影实现物体表面三维重构,满足动态测量需求,且具有单像素分辨率。但依据彩色栅线空域解相进行的左右图像匹配在精度上仍存在较大的改进空间。在相位粗匹配的结果上,结合亚像素插值和立体视觉数字自适应相关技术在局部区域实现更精准的匹配,可完成较好精度的高分辨率动态测量。

2 彩色栅线结构光三维测量

结构光三维测量属于光学三角法测量,其从双目立体视觉技术发展而来。采用双摄像机单投影仪的测量系统结构,测量时通过投影装置将结构光编码图案投影到物体表面,形成一系列具有位置编码的特征光点或光平面。通过左右摄像机从不同视点观测物体表面,经过图像解码实现不同成像平面上物体表面特征点的匹配,结合摄像机标定^[9,10]结果,由双摄像机引出两条空间视线,求取视线交点即可实现对应点的三维重构。

彩色栅线空域编码图案,如图 1 所示,将彩色条纹与栅线相位相结合,能够在单幅图像中高效浓缩编码信息。数字栅线图在水平方向上亮度按照余弦规律变化,由于编码信息呈连续变化状态,因此理论上具有无限测量分辨率。但是栅线余弦周期特性使得编码不具有唯一性,无法依靠单幅图像实现有效完全解相。以三原色及其反色(红(255, 0, 0), 黄(255, 255, 0), 绿(0, 255, 0), 青(0, 255, 255), 蓝(0, 0, 255), 品红(255, 0, 255))彩色条纹构成 3 次伪随

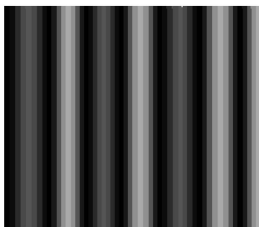


图 1 彩色栅线编码图案(局部)

Fig. 1 Coding pattern of color grating(local)

机序列^[11,12],每个条纹宽度为一个栅线周期,且相邻色彩不同,任意连续三个周期色彩排列具有唯一性。将序列的色彩信息融入栅线图,让每个余弦周期对应一种色彩,其亮度在该色彩对应的有效 RGB 通道中变化。

彩色栅线投影到物体表面受到物体形貌的调制而变形,在拍摄图像中呈现出一条条高亮度或是低亮度的边界曲线。跟踪亮度峰值点并进行分色处理^[13],提取出一条条连续高亮度边界曲线。依据 3 次伪随机序列的一维窗口特性,由每一条高亮度边界及其左右邻域的高亮边界色彩信息确定其对应的周期序列号。在提取出高亮度边界的基础上提取出低亮度边界。依据亮暗边界分布进行周期区域粗划分,完成图像周期解码。在划分的有效周期区域内部,对每一个像素点寻找其邻域的亮度峰值点和亮度谷值点,依据亮度关系通过反余弦变化求解出相主值并结合相应的周期序列号实现完全解相。依据双目摄像机之间的外极线几何约束,如图 2 所示,(在左图像的某一像素点,其在右图像上的匹配点必定位于某一直线上,相反亦成立),在沿着极线方向的一维搜索区域寻找左右图像相位插值最小的两点做为匹配点。

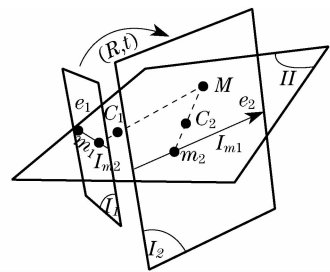


图 2 外极线几何

Fig. 2 Epipolar line geometry

周期解码依据的是投影光栅在图像中创造的高亮度峰值对应的色彩信息。亮度峰值是图像中保持得最鲜明的特征,因此具有较高可靠性。但在局部区域直接根据亮度关系求解相主值的方法在亮度完全按照余弦规律变化的情况下才能得到准确解,与实际情况存在一定误差,虽然能够保证一定精度,但仍有很大改进的空间。如果左右图像满足极线约束的两点间相位差值小于 1,则认为满足粗匹配条件。

3 立体视觉数字相关技术

结构光测量的优势在于通过投影编码图案显著增强了物体表面的纹理信息,将传统的双目立体视觉被动式测量变为主动式测量。且立体视觉匹配时对于系

统结构有特殊要求,即两个摄像机坐标系仅存在水平方向上的平移,左右图像间的水平扫描线互相对应。如果采用自由系统结构测量需进行图像矫正。

国内外学者研究了大量在左右图像水平扫描线之间实现匹配的方法,主要分为窗口相关法、动态规划法、图切割法三大类^[14,15]。窗口相关法直接根据左右图像在一定尺寸窗口中的最佳相似性进行匹配。动态规划法为所有可能发生的匹配分配一个权值,匹配可能性越高,权值越小,建立匹配矩阵表,寻找权值总和最小路径,实现全局意义上的最优匹配。图切割方法综合考虑各种因素建立方向图数学模型,由最小图划分算法找到权值之和最小的切割曲线,也可实现全局最优匹配。

由于图切割算法计算复杂,虽然具有较高精度潜力,但时间消耗过度,不予考虑。动态规划目标在于实现全局意义上的最优匹配,由于彩色栅线图像解相已将匹配可能区域有效定位于局部微小区域,故无需采用动态规划从全局意义上匹配。采用窗口相关方法在相位粗匹配局部区域根据彩色栅线与物体本身相结合的纹理信息进一步实现精确匹配,有效避免了传统窗口相关方法在低纹理区域处理能力不足,搜索时间消耗高的缺点。

各类立体视觉匹配技术的关键是如何衡量不同图像像素之间的相似程度。采用以匹配点为中心,沿极线方向向左右各延伸 4 pixel,总长为 9 pixel 的一维窗口。像素之间的相似性按如下标准化协方差相关公式计算:

$$C(x_l^c, y_l^c) = \frac{\sum_{i=0}^8 [I_l^c(x_l^c, y_l^c) - I_{lm}^c][I_r^c(x_r^c, y_r^c) - I_{rm}^c]}{\sqrt{\sum_{i=0}^8 [I_l^c(x_l^c, y_l^c) - I_{lm}^c]^2 \sum_{i=0}^8 [I_r^c(x_r^c, y_r^c) - I_{rm}^c]^2}}, \quad (1)$$

其中 C 为相关系数,其值处于 $-1 \sim 1$ 之间。 I_l 表示左图像亮度, I_r 表示右图像亮度, $x_l^c, y_l^c, x_r^c, y_r^c$ 为像素坐标,上标 l 表示左图像, r 表示右图像,下标 i 表示相应窗口位置。式中上标 c 表示相应颜色通道,取值为 r, g, b 。下标 m 表示平均值。由于公式中包含了减去平均值操作,因此其相关系数主要反映不同窗口之间亮度分布特征的相似程度,而非亮度具体数值的相似度。除以相关窗口内亮度的平方和,将相关系数归一化至 $-1 \sim 1$ 的范围间,便于比较。当完全相关时为 1,完全不相关时为 0,完全相反时为 -1 。

4 自适应相关及亚像素匹配

彩色图像每个像素包含 RGB 三个分量,计算相关性需分别考虑各个颜色通道。由于不同周期对应不同色彩,其颜色通道变化的剧烈程度不同。为了获得更准确的相关系数,需自适应为各个不同颜色通道分配不同的权重。假设以右图像某一像素点为原始待匹配点,在左图像相位有效区域内沿极线方向寻找匹配点。在右图像计算原始点极线窗口内 R, G, B 三个颜色分量的动态范围 $R_{range}, G_{range}, B_{range}$ 。则总相关系数按如下公式计算:

$$C = \frac{(R_{range} C^r + G_{range} C^g + B_{range} C^b)}{R_{range} + G_{range} + B_{range}}. \quad (2)$$

投影至物体表面的栅线最终成像于摄像机,每个像素点的亮度由对应物体表面点所接受到的投影光亮度、环境光亮度、反射率、摄像机成像特征所共同决定。由于测量系统采用双摄像机从不同角度感知物体表面信息,物体表面在不同成像平面也会发生不同程度的变形。图 3 给出一简单示例,空间弧线成像于左摄像机时是伸展的,而成像于右摄像机时被压缩。当在测量自由型面时,甚至只是倾斜平面时左右图像的相关窗口对应的物体表面长度都会不等,这会影响匹配的准确率。

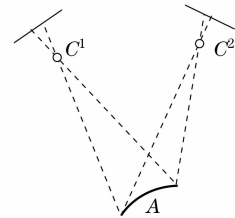


图 3 左右摄像机成像示意图

Fig. 3 Imaging sketch in left and right cameras

由于图像解码进行了图像周期区域划分,可根据左右对应周期或是半周期的长度比例自适应调整相关窗口的尺寸。实际操作中,对于左窗口内的每一个位置都会根据其所在周期长度与右窗口对应位置所在周期长度的比值进行收缩或展长。窗口长度为 9,假设 9 个位置的位置标号为 $-4 \sim 4$ 。其中 0 对应着匹配点位置。以右窗口为匹配原始模版,其长度无需调整。每两个连续位置间在 x 方向相差 1 pixel, y 方向上的变化具体根据其对应极线而定。在左图像中,其窗口相应 x 位置按下列公式计算, y 同样视具体对应极线而定:

$$\begin{cases} x_0 = x_0^{\text{original}}, \\ x_i = x_{i-1} + \frac{p_{l1}}{p_{r1}}, i = 1, 2, 3, 4 \\ x_i = x_{i+1} - \frac{p_{li}}{p_{ri}}, i = -1, -2, -3, -4 \end{cases} \quad (3)$$

其中 p_{li} 为相应的窗口位置在左图像所处周期的长度, p_{ri} 为相应的窗口位置在右图像所处周期的长度。 x_0^{original} 为左图像窗口的中心原始位置。

成像经过空间采样和亮度量化, 每个像素的位置和亮度值都为整数。沿着极线方向经过自适应尺寸调整的一维窗口, 其每个位置坐标已为非整数坐标, 需通过周围区域双线性插值确定对应点的色彩信息。在选择最佳匹配点时, 每两个候选匹配点之间的距离为 1 pixel, 为了获取更准确的匹配, 在原始的两个候选点之间按照线性插值插补新点, 比如按 0.5 间隔插补 1 个点, 或是按 0.25 间隔插补 3 个点等, 按照前述方法计算其窗口相关性, 在亚像素坐标上选择具有最大相关系数的点作为最佳匹配点。

5 实验结果

搭建系统采用的 CCD 摄像机型号为 DH-HV1303UC, 分辨率为 1280 pixel \times 1024 pixel。视频投影仪 Proxima Ultralight x540, 分辨率采用 1024 pixel \times 768 pixel。彩色栅线图案共包含 123 个周期, 每个周期 8 pixel, 尺寸为 984 pixel \times 768 pixel。

5.1 平面测量精度验证

将彩色栅线投影到一具有良好均匀反射特性平面度极高的 400 mm \times 300 mm 白色平面上进行测量。利用最小二乘拟合平面距离误差的平均值作为精度衡量的标准。三维测量分两种重构方式: 空域

解相重构, 局域立体视觉匹配重构。立体视觉匹配分为像素, 直接亚像素、窗口尺寸自适应亚像素三种方法。其中立体视觉亚像素技术在单个像素长度上插值三个点, 形成 0.25 pixel 的分辨率。平面拟合误差如表 1 所示。 e_{\max} , e_{\min} , e_{ave} 分别为距离误差的最大值, 最小值和平均值, 单位为 mm。图 4(a) 给出了窗口尺寸自适应亚像素三维测量结果, 图 4(b) 为相应的平面拟合误差距离分布。从实验结果可以看出, 像素匹配时空域解相匹配拟合误差为 0.246 mm, 局部立体视觉匹配误差为 0.194 mm, 精度得到一定改善。立体视觉匹配的亚像素插值起到了显著的改善效果, 拟合误差由 0.194 降至 0.113。而由于平面对光栅的调制变形小, 左右摄像机的成像差异低, 因此窗口尺寸自适应技术的引入虽然也在一定程度上改善了测量精度, 但效果并不明显。

表 1 平面拟合误差

Table 1 Error of plane fitting

	e_{\max}	e_{\min}	e_{ave}
Space phase demodulation reconstruction	2.671	1.197×10^{-6}	0.246
Stereo vision matching pixel reconstruction	2.352	7.828×10^{-7}	0.194
Sub-pixel	2.231	2.707×10^{-6}	0.113
Self-adaptation of window dimensions in sub-pixel	2.134	2.534×10^{-6}	0.0928

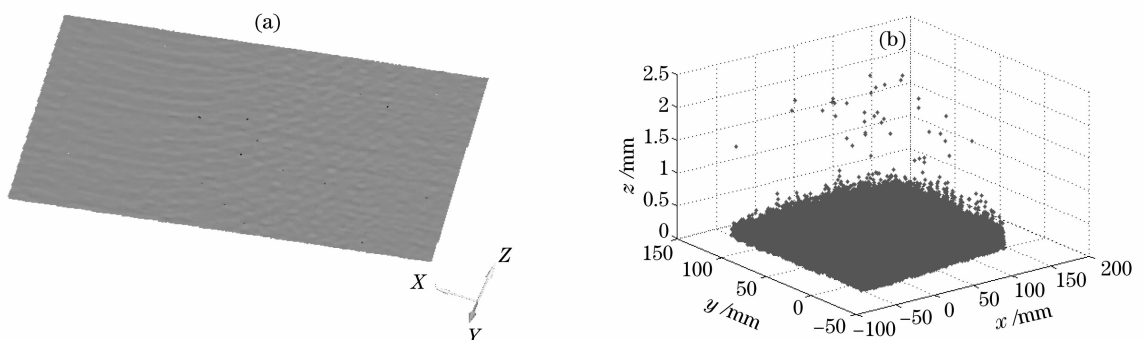


图 4 高精度平面三维测量。(a) 平面三维测量显示; (b) 平面拟合误差分布

Fig. 4 Plane 3D measurement in high accuracy. (a) display of plane 3D measurement; (b) error distribution of plane fitting

5.2 自由型面三维测量实例

以一白色兔子石膏雕像测量为例, 图 5(a) 为其中左摄像机的原始彩色栅线投影图像。图 5(b) 为高亮度边界提取及分色结果。图 5(c) 为周期区域划分后在局部区域解相的最终相位分布图。图 5(d) 为由空域解相重构点云建造的三角网格模型。图 5(e) 和 (f) 为立体视觉匹配三维测量数据的三角

网格重构模型(网格模型进行了孔洞修补, 噪声去除和光照渲染)。其中图 5(e) 为直接立体视觉亚像素匹配重构得到的三维模型, 图 5(f) 为加入自适应技术立体视觉亚像素匹配得到的三维模型。

从最终重构的光照渲染三角网格模型可以看出, 利用彩色栅线投影并结合本文提出的立体匹配技术, 能够实现单次拍摄自由型面物体的准确重建。

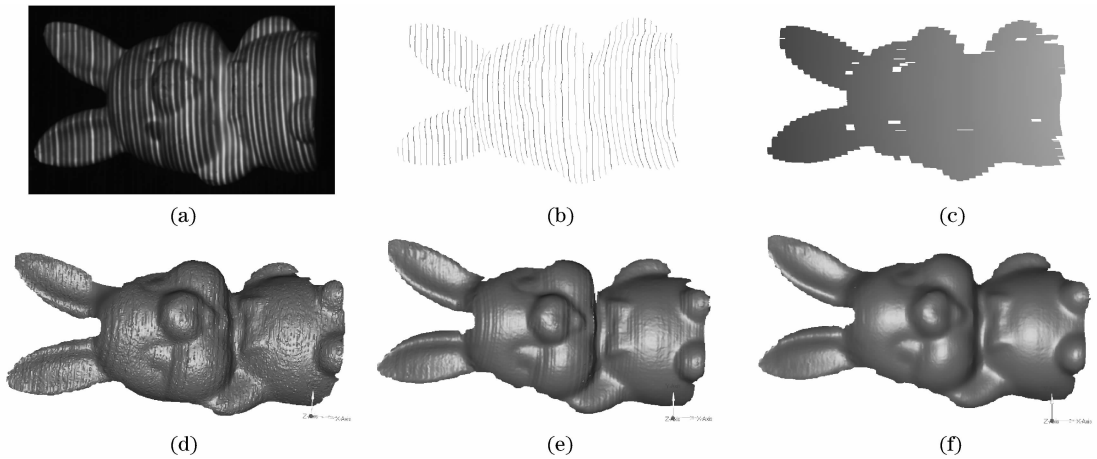


图5 兔子石膏像三维重构实例。(a) 彩色栅线投影图;(b) 高亮边界提取及分色;(c) 相位分布图;(d) 空域解相三维模型;(e) 直接立体视觉匹配三维模型;(f) 自适应立体视觉匹配三维模型

Fig. 5 3D reconstruction example of rabbit plaster model. (a) Projection image of color grating;(b) tracing of boundary in high intensity and color determination;(c) phase distribution;(d) 3D model by space phase demodulation;(e) 3D model by direct stereo vision match;(f) 3D model by self-adaptation stereo vision match

且对比图5(d)、(e)和(f)的三维模型显示效果,可直观感受到在相位匹配的基础上于局部区域进行立体视觉相关匹配,可有效改善匹配精度。而直接相关匹配在被测表面仍存在一道道类似山脊的起伏,干扰了表面细节特征的重现,自适应相关技术在测量自由曲面时显示出其优势,能够有效改善被测物体表面光滑度,获得更精准的三维重构结果。

动态三维测量速率图像分辨率 1280 pixel ×

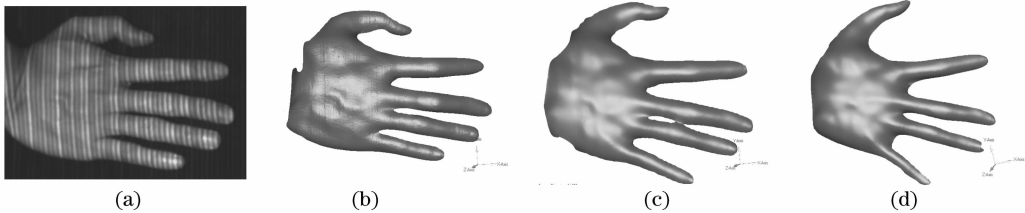


图6 人手张开测量实例。(a) 彩色栅线投影图;(b) 三维网格重构(时刻1);(c) 三维网格重构(时刻2);(d) 三维网格重构(时刻3)

Fig. 6 Measurement of opening process of human hand. (a) Projection of color grating;(b) reconstruction of 3D mesh(moment 1); (c) reconstruction of 3D mesh(moment 2); (d) reconstruction of 3D mesh(moment 3)

从人手的形貌变化实例可见,彩色栅线立体视觉自适应相关匹配技术对于物体表面本身的色彩纹理具有一定的免疫能力。这主要因为在局部立体视觉精确匹配阶段,物体本身丰富的色彩纹理不仅不会起干扰作用,反而会提供更有效的信息辅助匹配,扩大了测量的适用范围。但如果物体本身的纹理信息过于丰富,势必使得周期解码和基于局部亮度关系的相位粗定位成为不可能,建议实际测量时在物体表面喷涂白色反射率增强剂,获得均匀单一的反射特性。

1024 pixel 时为 10 帧/秒,640 pixel × 512 pixel 为 25 帧/秒,320 pixel × 256 pixel 为 40 帧/秒。单次拍摄曝光时间为 0.015 s。图 6 为一人体手掌张开的变形过程动态测量实例。图 6(a) 为零时刻彩色栅线投影图,图 6(b)、(c)、(d) 为取其中 3 个时刻(连续两个时刻时间间隔为 0.8 秒)的测量数据三维网格模型重建效果图。

6 结 论

彩色栅线结构光三维测量满足单幅图案编码唯一性,可实现动态测量,且具有单像素分辨率。图像解码后可依据空域解相结果实现左右图像对应点匹配,完成三维重构。但相位匹配的测量精度仍有待进一步提高。在依据相位实现粗匹配的情况下,通过双目立体视觉窗口数字相关技术在左右图像局部区域实现更精确的匹配。通过自适应技术给多个颜色通道分配权重及调节左右相关窗口尺寸,并结合

极线方向上的双线性亚像素插值,可进一步提高匹配精度。实验结果证明基于该种技术的结构光三维测量精度较好,分辨率高,能够仅靠投影单幅图像实现各类物体型面的动态三维测量。

参 考 文 献

- 1 Pan Wei, Zhao Yi, Ruan Xueyu. A new method for getting high precision phase in structural light measurement[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(5): 687~691
潘 伟, 赵 毅, 阮雪榆. 结构光测量中获取高精度相位的新方法[J]. *光学学报*, 2004, **24**(5): 687~691
- 2 Zhang Wuming, Zhong Yuexian, You Zhifu *et al.*. A phase unwrapping method based on structured light binary code[J]. *Optical Technology*, 2002, **28**(5): 404~406
张吴明, 钟约先, 由志福 等. 基于结构光编码的相展开方法[J]. *光学技术*, 2002, **28**(5): 404~406
- 3 Dipanda A, Woo S. Towards a real-time 3D shape reconstruction using a structured light system[J]. *Pattern Recognition*, 2005, **38**(10): 1632~1650
- 4 Young Mark, Beeson Erik, Davis James *et al.*. Viewpoint-coded structured light[C]. 2007 *IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. Minneapolis, United States, 2007: 4270317
- 5 Guan Chun, Hassebrook Laurence G, Lau Daniel L *et al.*. Composite pattern structured light projection for human computer interaction in space[C]. *Proc. SPIE. The International Society for Optical Engineering*. Orlando, FL, United States, 2005: 15~25
- 6 Salvi Joaquim, Pages Jordi, Batlle Joan. Pattern codification strategies in structured light systems[J]. *Pattern Recognition*, 2004, **37**(4): 827~849
- 7 Weise Thibaut, Leibe Bastian, Van Gool Luc. Fast 3D scanning with automatic motion compensation[C]. 2007 *IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. Minneapolis, United State, 2007: 4270316
- 8 Huang Peisen S, Zhang Chengping, Chiang Fu-Pen. High-speed 3-D shape measurement based on digital fringe projection[J]. *Opt. Eng.*, 2003, **42**(1): 163~168
- 9 Li Renju, Zhong Yuexian, You Zhifu *et al.*. Camera calibration in 3-D measurement systems [J]. *J. Tsinghua University (Science and Technology)*, 2002, **42**(4): 481~48
李仁举, 钟约先, 由志福 等. 三维测量系统中摄像机定标技术[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2002, **42**(4): 481~48
- 10 Tsai Roger Y. A versatile camera calibration techniaue for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses[J]. *IEEE J. Robotics and Automation*, 1987, **RA-3**(4): 323~344
- 11 Zhang Li, Curless Brian, Seitz Steven M. Rapid shape acquisition using color structured light and multi-pass dynamic programming [C]. *First International Symposium on 3D Data Processing Visualization and Transmission*. Padova, Italy, 2002: 24~36
- 12 Pages Jordi, Salvi Joaquim, Collewet Christophe, Forest Josep. Optimised de bruijn patterns for one-shot shape acquisition[J]. *Image and Vision Computing*, 2005, **23**(8): 707~720
- 13 Liu Weiyi, Wang Zhaoqi, Mu Guoguang, *et al.*. Color distinction and its application in color-coded grating profilometry [J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(4): 454~458
刘维一, 王肇圻, 母国光 等. 彩色编码投影光栅三维轮廓术中分色问题的研究[J]. *光学学报*, 2001, **21**(4): 454~458
- 14 Scharstein Daniel, Szeliski Richard. A taxonomy and evaluation of dense two-frame stereo correspondence algorithms [J]. *International Journal of Computer Vision*, 2002, **47**(1~3): 7~42
- 15 Forstmann S, Kanou Y, Jun Ohya, *et al.*. Real-time stereo by using dynamic programming[C]. *Proc. the 2004 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops*. Washington, USA, 2004: 29~36