

基于结构光和极线约束的三维重建*

郑顺义, 胡华亮, 徐轩

(武汉大学 遥感信息工程学院, 湖北 武汉 430079)

摘要: 结构光可以简单、快速并且精确地对被测物体进行三维信息提取, 从而得到三维数据点云。而在结构光三维信息获取系统中, 条纹的准确检测是影响系统精度的关键因素之一。为了改善这一问题, 先利用格雷码对图像条纹进行粗定位, 再结合相位码准确地对图像条纹进行细定位并利用极线约束把图像匹配过程中的二维搜索降为一维搜索。结构光条纹和极线的交点就是图像的匹配点, 对匹配点空间前方交会即可得到物体的三维点云。反复试验表明, 该方法能取得较好的效果。

关键词: 结构光; 格雷码; 相位码; 极线约束

中图分类号: TP751

文献标识码: A

A method of 3D reconstruction based on structured light and epipolar constraint

ZHENG Shun Yi, HU Hua Liang, XU Xuan

(School of Remote Sensing and Information Engineering, Wuhan University, Wuhan 430079, China)

Abstract: The structured light can be used in extracting the 3D information for obtaining the three-dimensional points from object to be measured, and this method is simple, fast and accurate. However, the key factor of this process is how to inspect the stripes very accurately. To improve the accuracy, this paper firstly locates the stripes of the structured light roughly by use of the Gray code images, and then locates the stripes of the structured light accurately by utilizing the shift code images. Finally turns the two dimensions search into one dimension search in the images match by imposing the epipolar constraint, so the cross points of the stripes of structured light and the epipolars are the match points, finally do space intersection to the match points and obtain the three-dimensional points. We obtain the better effect by the method, which is proved by experiments repeatedly.

Key words: structured light; Gray code; shift code; epipolar constraint

随着科学技术的发展, 三维数据的获取变得越来越迫切。在三维获取的过程中, 结构光系统具有实现简单、成本低、速度快、非接触测量等优点, 所以基于结构光的三维测量与目标重建已经成为计算机视觉的主要方向之一, 在工业、影视、军事和医疗等领域都有着广泛的应用。

本文实现的原型系统的基本框架是基于结构光进行重建, 投影一组结构光到三维场景中, 通过分析不同编码结构光在物体上的投影变化来提取物体的三维形状。这种方法的主要优势是针对物体的不同材质和纹理都能够自动、比较精确地获取其三维信息。

1 系统的组成

测量系统硬件如图1所示。

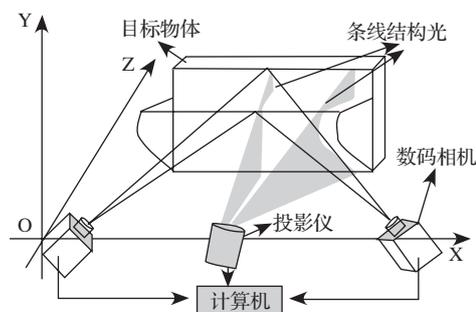


图1 三维测量系统组成

投影机投射一组经过计算机编码的扇形多线结构光到物体表面上形成多个光条纹, 结构光条纹受到物体表面形状的调制而产生了变形^[1], 变形的程度反映了物体表面形

*基金项目: 国家863 项目(2006AA12Z136)

图形图像及多媒体

Image Processing and Multimedia Technology

状变化的程度，因此，变形的条纹包含了物体表面形状的三维信息。用摄像机拍摄变形条纹的图像，经过计算机处理，即可得到物体的三维信息。

条纹的最小宽度取决于计算机的显示分辨力，条纹的数量根据目标空间分辨力的要求确定。条纹数量越多，得到物体三维信息就越多越细，物体形状重构就更加准确。然而，信息的不断增加也会使计算复杂，耗时变长，同时对摄像机的质量要求也变高。在不考虑其他技术的条件下，条纹可以按照最小一个像素的间隔调节，这样就得到了可以调节的数字化的多条纹结构光。投影仪按次序向被测物体投射一组格雷码和一组相位码，然后2个摄像机同时拍摄图像，再交程序处理计算被测物体的三维坐标，所有过程都由计算机控制完成。

2 摄像机标定板

标定采用平面式标定板，由 21×21 个实心圆组成的图案，圆心半径为1.5 mm，相邻圆心距离为20 mm，如图2所示。共能提取圆心441个，虽然会受光线的影响，点不能完全被提取出来，但所获得点对于标定是足够的。本文采用DLT^[2,3]算法求得粗解，然后用光束平法得到摄像机的精确解。标定板中采用圆点作为提取标志点，有利于得到亚像素点，能很好地提高标定的精度。

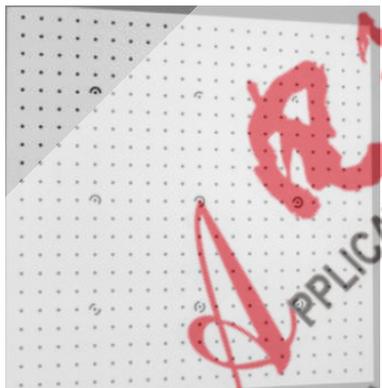


图2 摄像机标定板

3 结构光编码、解码及相位求解

3.1 格雷码的求取

依次向被测物体投射如图3所示格雷码图像^[4-7]，共投8幅格雷图像，每投影一次就把空间细化为原来的2倍，所以一共把空间分成了 $2^8=256$ 块，每一块都有4个像素，这样能表示1024个像素宽的范围。

对2个摄像机分别拍摄的相片进行图像分割并进行二值化。对每个摄像机而言，都有8幅格雷码图像，对图像同一个位置，都有8个二进制数，把这8个二进制数按投影的先后次序排列成1个二进制数，再把这个二进制数转换为1个十进制数，对图像中每一个位置进行同样的操作，如果把该数当成一个图像的灰度值，就能生成一个格雷码图像，2个摄像机就能得到2个格雷码图像，这2个图像将是图

像匹配的基础。

在生成格雷码图像过程中，最困难的是区分边界问题，对于对比度较低的图像，黑白条纹间灰度值差别不大，难以用一般的阈值分割方法进行划分，但是每个像素点在黑条纹投影下的灰度值与白条纹投影下的灰度值差别较大，完全可以根据一系列的投影光栅图对单一像素点进行阈值分割。开始采用取某一像素点在一系列图案中的最大灰度值和最小灰度值的均值作为阈值，将每幅图中当前位置的像素根据这一个阈值进行分割，从生成的格雷码图像可以看到明显的黑白条纹，但效果仍不是十分理想，某些位置的黑白条纹有所粘连。



图3 格雷码图像

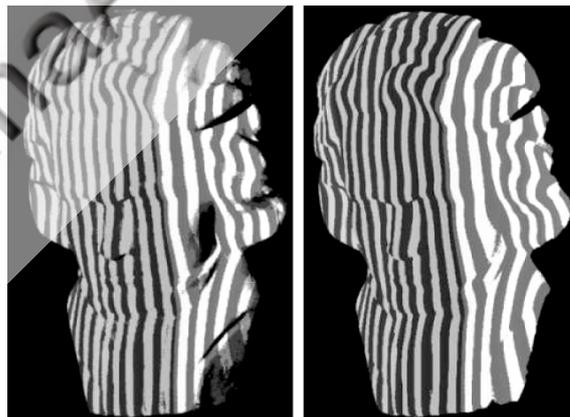


图4 2种不同方法的效果比较图

因此引入逐步逼近和迭代的方法^[8]。对于某一位置的像素点在一系列投影图像中同一位置的灰度值存在一个最佳阈值 $T(x, y)$ ，首先根据某种规则得到图像的一个阈值 $t_0(x, y)$ ，然后不断地修正 $t_0(x, y)$ ，直到它无限趋近于 $T(x, y)$ 。对于某一位置 (x, y) 的像素点的阈值分割具体步骤如下：

- (1) 遍历所有投影图案，找出 (x, y) 位置像素点在不同投影格雷码图像中的最大灰度值和最小灰度值，记为 $G(x, y)_{\max}$ 和 $G(x, y)_{\min}$ ，令初始阈值 $t_0(x, y) = [G(x, y)_{\max} + G(x, y)_{\min}] / 2$ ；
- (2) 根据阈值 $t_0(x, y)$ 将 (x, y) 位置的像素区分为黑、白条纹，分别求出不同投影光下的平均灰度值 $G_B(x, y)$ 和

图形图像及多媒体 Image Processing and Multimedia Technology

$G_w(x, y)$;

(3) 求出 (x, y) 位置像素新阈值 $t(x, y)=[G_B(x, y)+G_w(x, y)]/2$

(4) 若 $t(x, y)=t_0(x, y)$, 或者迭代次数大于 100 时, 则令 $t(x, y)=t_0(x, y)$, 否则令 $t(x, y)=t_0(x, y)$, 并且转到步骤 (2) 循环计算。

这样处理后, 得到的格雷码图像黑白条纹就很明显, 如图4 所示。前者是一般阈值处理效果, 后者是本方法的处理效果。通过比较知道, 在细节方面后者效果较好, 更能满足后面图像匹配的需求。在试验中, 先去除背景再进行相应的操作, 这样有利于提高精确与下面的图像匹配处理速度。

3.2 相位码的求取

通常采用 4 步相移法, 即将投射的相移图案在与其垂直的方向上依次平移 1/4 周期^[9], 针对本测量系统, 采取 4 幅相移图案的投射顺序 1 如图 5 所示。图中的曲线变化表示了 4 幅相移图案灰度值的变化情况, 相位的求取过程是将某图像采样点在 4 幅强度图像中对应的灰度值 I_1 、 I_2 、 I_3 、 I_4 代人相位式 (1), 求取该采样点的相位 φ , 根据强度图像中对应灰度值的变化规律和反正切函数性质可知, φ 在 $(\pi, -\pi)$ 之间周期变化。

$$\varphi(x, y) = \arctan \frac{I_4 - I_2}{I_1 - I_3}, -\pi \leq \varphi \leq \pi \quad (1)$$

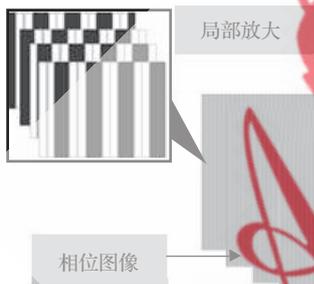


图5 相位码图像

利用格雷码图像就把图像垂直方向(近似垂直)确定是哪条黑白条纹, 但每条黑白条纹中包含不是单一像素的条纹, 在很多论文中通常采用对图像进行细化的方法, 这样, 虽然能较高精度地区别是属于哪条条纹, 但也因此丢失了很多可以利用的信息, 而利用相位码图像能较好地解决这个问题, 能检测出格雷码条纹中的具体位置。

4 极线的求解

如图6 表示一个立体模型相对定向后的示意图^[10,11], 图中 m_1 , m_2 表示模型 M 在左右 2 个相机上的成像, S_1m_1 , S_2m_2 表示一对同名光线, 它们与空间基线 S_1S_2 共面, 这个平面可以用 3 个矢量 R_1 、 R_2 、 B 的混合积表示, 即

$$B \cdot (R_1 \times R_2) = 0$$

上式改用坐标的形式表示, 则有:

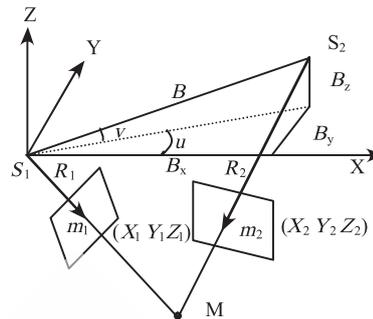


图6 共面条件

$$F = \begin{vmatrix} B_x & B_y & B_z \\ X_1 & Y_1 & Z_1 \\ X_2 & Y_2 & Z_2 \end{vmatrix} = 0 \quad (2)$$

其中,

$$\begin{bmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \end{bmatrix} = R_{左} \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ -f \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} X_2 \\ Y_2 \\ Z_2 \end{bmatrix} = R_{右} \begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ -f \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\text{设: } R_{左} = \begin{bmatrix} a_1 & a_2 & a_3 \\ b_1 & b_2 & b_3 \\ c_1 & c_2 & c_3 \end{bmatrix} \quad \text{和} \quad R_{右} = \begin{bmatrix} a'_1 & a'_2 & a'_3 \\ b'_1 & b'_2 & b'_3 \\ c'_1 & c'_2 & c'_3 \end{bmatrix} \quad (4)$$

设 B_x, B_y, B_z 是第二个摄像机相对于第一个摄像机在 X、Y、Z 轴上的位移, 则有:

$$\begin{cases} B_x = X_{s2} - X_{s1} \\ B_y = Y_{s2} - Y_{s1} \\ B_z = Z_{s2} - Z_{s1} \end{cases} \quad (5)$$

对式(2)展开有:

$$B_x Y_1 Z_2 + B_y X_2 Z_1 + B_z X_1 Y_2 - B_x Y_2 Z_1 - B_y X_1 Z_2 - B_z X_2 Y_1 = 0 \quad (6)$$

其中,

$$\begin{bmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 x_1 + a_2 y_1 - a_3 f_1 \\ b_1 x_1 + b_2 y_1 - b_3 f_1 \\ c_1 x_1 + c_2 y_1 - c_3 f_1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} X_2 \\ Y_2 \\ Z_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a'_1 x_2 + a'_2 y_2 - a'_3 f_2 \\ b'_1 x_2 + b'_2 y_2 - b'_3 f_2 \\ c'_1 x_2 + c'_2 y_2 - c'_3 f_2 \end{bmatrix}$$

$$\text{令} \begin{bmatrix} A \\ B \\ C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_y Z_1 - B_z Y_1 \\ B_z X_1 - B_x Z_1 \\ B_x Y_1 - B_y X_1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

则式(6)变为: $AX_2 + BY_2 + CZ_2 = 0$

不妨设左右图像分别为:

$$y = k_{左}x + b_{左} \quad \text{和} \quad y = k_{右}x + b_{右} \quad (8)$$

根据式(4)、式(5)、式(7)、式(8)得:

$$\begin{cases} k_{\text{左}} = -\frac{Aa_1 + Bb_1 + Cc_1}{Aa_2 + Bb_2 + Cc_2} \\ b_{\text{左}} = \frac{Aa_3 + Bb_3 + Cc_3}{Aa_2 + Bb_2 + Cc_2} f_1 \\ k_{\text{右}} = -\frac{Aa'_1 + Bb'_1 + Cc'_1}{Aa'_2 + Bb'_2 + Cc'_2} \\ b_{\text{右}} = \frac{Aa'_3 + Bb'_3 + Cc'_3}{Aa'_2 + Bb'_2 + Cc'_2} f_2 \end{cases}$$

5 图像匹配和三维云点的获取

对生成的格雷码图像而言,垂直方向(近似垂直)由格雷码和相位码确定其位置,对水平方向(近似水平)由极线确定其位置,它们的交点就是对应的匹配点^[12],如图7所示。

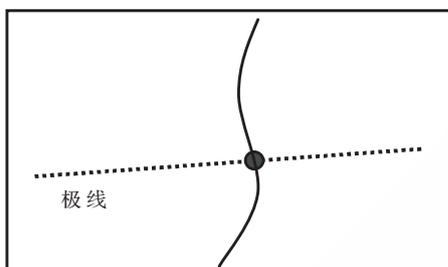


图7 结构光与极线的交点

利用点投影系数的空间前方交会方法,得到空间三维点坐标。由图6 共面方程可知,模型点相对于左方投影中心为原点的模型坐标为:

$$\begin{cases} NX_1 = B_x + N'X_2 \\ NY_1 = B_y + N'Y_2 \\ NZ_1 = B_z + N'Z_2 \end{cases} \quad (9)$$

由式(9)求得投影系数:

$$\begin{cases} N = \frac{B_x Z_2 - B_z X_2}{X_1 Z_2 - Z_1 X_2} \\ N' = \frac{B_x Z_1 - B_z X_1}{X_1 Z_2 - Z_1 X_2} \end{cases} \quad (10)$$

由式(5)、式(10)得任意一点的空间三维坐标为:

$$\begin{cases} X = X_{s1} + NX_1 \\ Y = Y_{s1} + NY_1 \\ Z = Z_{s1} + NZ_1 \end{cases}$$

6 试验结果

6.1 标定

试验用2个大恒图像产品DH-HV1303UM,该数字摄像机具有高分辨率、高精度、高清晰度、低噪声等优点。摄像机的图像传感器和镜头的物理参数分别为:图像最大有效分辨率为1280×1024,晶片尺寸为5.2(H)μm×5.2(V)μm,镜头焦距 $f=12$ mm。

试验中,采用DLT标定方法,然后再用光束平差法提

表1 相机的内参数

参数	f	f _x		f _y		U ₀	
		k ₁	k ₂	P ₁	P ₂		
相机1	12.120 998	12.124 418	12.117 579	0.052 806	-0.150 934	-5.335 69e-5	-1.889 25e-5
相机2	12.221 173	12.220 031	12.222 315	0.015 494	-0.265 250	-5.685 38e-4	3.313 75e-4

表2 相机的外参数

参数	单位(位移mm,角度为经度)					
	T _x	T _y	T _z	φ	ω	κ
相机1	496.34884	242.65779	961.32815	-0.267060	-0.32405	3.139829
相机2	-12.71197	238.37680	970.42307	0.201191	-0.0169.4	-3.125302

高标定的精度,得到的结果如表1、表2。

6.2 基于极线约束和结构光的匹配

图8所示为左右二幅图像都是1280×1024大小的格雷码图像匹配结果,在加入相位码后,图像匹配速度从原来的58s左右提高到了17s左右,比原来的速度提高了很多,匹配得到了14379个点,能满足三维重建的需要。

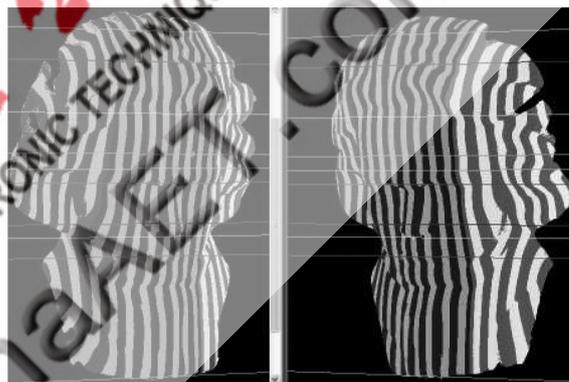


图8 左右图像匹配图

6.3 OpenGL 下的三维点云

根据图像匹配结果,利用点投影系数的空间前方交会方法,得到空间三维点云,如图9所示。

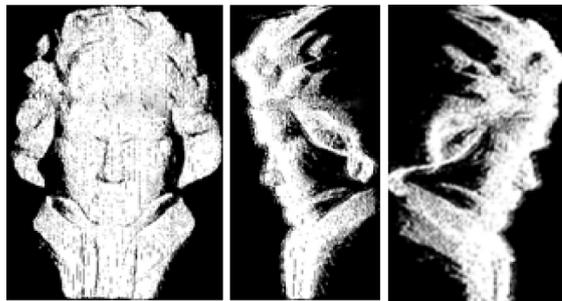
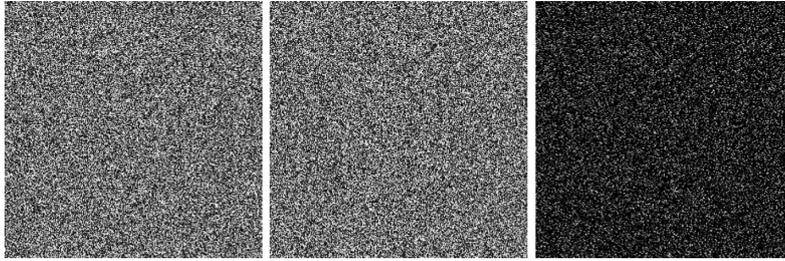


图9 三维重构图

图9中3幅图像分别是正面和左、右侧面观测到的效果。点云的数量比较多,能较好地反映三维物体的细节信息。

本文针对缺少纹理的物体的三维信息提取和重建出了结合格雷码和相位码检测条纹的关系,进行了图像匹配,最后利用点投影系数的空间前方交会方法得到物体的三

(下转第55页)



(a)加密图像1

(b)加密图像2

(c)差图像

图5 对明文的敏感度Ⅱ

0.4%，即基本上所有的像素点都不同。从它们的差图像(c)图中也可以看出，(a)图和(b)图是不同的。改进之后的加密方法，对明文十分敏感，即使明文只改变一个像素点，得到的密文也完全不同，所以，改进后的算法能够十分有效地抵御选择性明文攻击。

本文基于对像素进行置乱、置换和扩散的思想，设计了一种快速、安全的图像加密算法。这个算法首先通过CAT映射对像素值进行了置乱，然后通过一种新的混合混沌系统对像素值进行了替换，而且还提出了一种新的方法增强了算法对抵御选择明文攻击的能力。通过各种测试和详细的效果分析，证明这个新的图像加密算法具有良好的实时性、安全性和易实施性，非常适合数据量大、实时性要求高的图像加密。

参考文献

[1] MATTEWS R. On the derivation of a 'chaotic' encryption

(上接第51页)

点云。经试验验证，该方法能够较好地提取三维信息和重建，从物体重建的视觉效果来看也是较好的。点云的数量也是非常多的。而且该方法具有实现简单、成本低、速度快、非接触测量数据空间分辨率高等优点。

参考文献

- [1] 孙军华, 魏振忠, 张广军. 一种高密度光栅结构光编码方法[J]. 光电工程, 2006, 33(7): 78~82.
- [2] 张永军, 张祖勋, 张剑清. 利用二维DLT及光束法平差进行数字摄像机标定[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2002, (6): 566.
- [3] 张祖勋, 苏国中, 郑顺义等. OpenGL 成像机理及其与摄影测量方位元素的相关分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2004, (7): 570.
- [4] 尹丽萍, 于晓洋, 吴海滨. 格雷码与相移结合的结构光三维测量技术研究[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2007, 5(12): 5-8.
- [5] L Hao, STRAUB, R, PRAUTZSCH, H. Structured light based reconstruction under local spatial coherence assumption[C]. 3rd International Symposium on 3D Data

- algorithm. Cryptologia. XIII(1), 1989(1): 29-42.
- [2] SHANNON C. E. Communication Theory of Secrecy Systems. Bell Syst. Techn. J. 1949, 28: 656-715.
- [3] FRIDRICH J. Secure image ciphering based on chaos[R]. Final report for AFRL. Rome New York USA, 1997.
- [4] CHEN G, MAO Y.B, CHUI C.K, A symmetric image encryption scheme based on 3D chaotic cat maps, Chaos, Solitons and Fractals. 2004, (21): 749-761.
- [5] LORENZ E.N, Deterministic non-period flow. J. Atoms. Sci. 1963, 20: 130-141.
- [6] MAY R.M. Simple mathematical models with very complicated dynamics. Nature. 1976, 261: 459-167.
- [7] FEIGENBAUM M.J. Quantitative universality for a class of nonlinear transformations. J. Stat. Phys. 1978, 19(1): 25-52
- [8] FORD J. Long-time prediction in dynamics. HORTON W.J. et al eds. John-wiley, 1983: 79-80.
- [9] CHEN AND G., YU X. Chaos control, theory and applications. Berlin, Germany: Springer-Verlag. 2003
- [10] MATSUMOTO T, CHUA L O, KOMURO M. 1985 IEEE Trans. CAS-1 32798.

(收稿日期: 2009-01-19)

- Processing, Visualization, and Transmission, 3DPVT 2006.
- [6] YANG, CHENG Rong Qian, SHENG Ya Zhu. Robust and accurate surface measurement using structured light[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement June 2008: 1275-1280
- [7] WEI Zhen Zhong, ZHOU Fu Qiang, ZHANG, Guan Ging. 3D coordinates measurement based on structured light sensor[J]. Sensors and Actuators, A: Physical. May 17 2005: 527-535
- [8] 李红岩. 基于空间二进制编码的阈值分割方法研究[J]. 计算机仿真, 2008, (07): 196-199.
- [9] 岳慧敏. 基于时间相位展开的三维轮廓测量研究[D]. 四川大学, 2005.
- [10] 马颂德, 张正友. 计算机视觉—计算理论与算法基础[M]. 北京: 科学出版社, 1998.
- [11] 张祖勋, 张剑清. 数字摄影测量学[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2001.
- [12] 程俊廷, 赵灿, 莫健华. 基于编码结构光和外极线约束的自由曲面三维轮廓术[J]. 计算机测量与控制, 2007, 15(1): 102-121

(收稿日期: 2009-01-12)