

文章编号: 0258-7025(2007)07-0977-06

基于参数域映射及 B 样条插值的三维重构方法

吴凤和, 张晓峰

(燕山大学机械工程学院, 河北 秦皇岛 066004)

摘要 利用单目 CCD 图像进行物体表面非接触测量的核心是基于单幅图像的三维重构技术, 常采用由阴影恢复形状(SFS)的方法实现三维重构。当图像分辨率较低时, 通过由阴影恢复形状的方法重构的三维表面模型其分辨力较差, 无法满足实际要求。为此提出了一种基于参数域映射及 B 样条插值的三维重构方法。采用 B 样条插值技术对图像进行放大处理, 通过像素的参数域映射减小图像的失真及高频信息的丢失, 根据放大后图像的灰度信息重构物体的三维表面模型。实验表明, 基于参数域映射及 B 样条技术的图像插值方法很好地保护了图像的细节, 利用该方法进行三维重构能够有效改善重构模型的分辨力和光顺性, 为提高三维表面非接触测量精度创造了条件。

关键词 图像处理; 三维重构; 参数域映射; B 样条; 分辨力

中图分类号 TP 391 **文献标识码** A

Three-Dimensional Reconstruction Method Based on Parameter Mapping and B-Spline Interpolation

WU Feng-he, ZHANG Xiao-feng

(College of Mechanical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004, China)

Abstract The key technology of single CCD image based non-contact measurement is three-dimensional (3D) reconstruction. The 3D surface model is usually obtained directly through shape from shading (SFS) method. But when the resolution of an input image is low, the resolution of the 3D surface model reconstructed by the above way would be poor and can not meet practical demand. To resolve this problem, an improved 3D reconstruction method is proposed. First, the B-spline interpolation method is used to improve the image resolution, and the parameter mapping method of pixels is applied to avoid the image distortion and high frequency missing; then the SFS method is adopted to reconstruct the amplified image according to the gray gradient of image. The experimental results demonstrate that the proposed method can conserve the detail of an image, and improve the resolution and smoothness of the reconstruction model effectively. It will help improve the precision of non-contact measurement based on single CCD image.

Key words image processing; three-dimensional reconstruction; parameter mapping; B-spline; resolution

1 引 言

由物体的二维灰度图像重建其三维模型的方法^[1~5](SFS)目前已成为计算机视觉领域中的研究热点。相对于三坐标测量机法、投影光栅法及工业 CT 扫描法等其他三维测量技术, 该方法具有不受光源限制、工作距离远、效率高、对环境要求低、便于现场操作等优点, 因而适合应用在工业测量、缺陷检

测及逆向工程等诸多领域^[6~9]。但现有的基于单目 CCD 图像的测量方法大都直接利用 SFS 方法实现物体表面的三维模型重构, 由于 SFS 方法重构的模型其分辨力主要取决于原图像的分辨率, 当图像分辨率较低时, 模型的分辨力较差, 因而很难满足三维测量及缺陷检测等应用的实际需要。

本文从工程测量的实际需求出发, 提出了一种

收稿日期: 2006-10-08; 收到修改稿日期: 2007-01-16

基金项目: 河北省教育厅自然科学基金(Z2005105)资助项目。

作者简介: 吴凤和(1968—), 男, 内蒙古人, 副教授, 博士, 研究方向为图形与图像处理, CAD/CAM 集成。

E-mail: risingwu2007@yahoo.com.cn

基于参数域映射及 B 样条插值技术的三维重构方法,即通过图像的 B 样条插值来改善模型的分辨力。

2 三维重构原理

图 1 是三维重构的原理图。首先,采用 B 样条方法对原图像进行插值处理,即对图像进行放大处理,以提高图像的分辨率,再利用 SFS 方法获取插值图像的三维形状信息,实现三维重构。

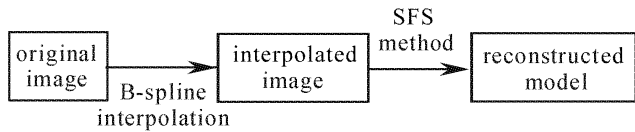


图 1 三维重构原理

Fig. 1 Principle of 3D reconstruction

为保证三维重构质量,在进行图像插值前,应根据图像的具体情况先对图像进行预处理^[10],以滤除噪声,排除干扰。

3 基于参数域映射的图像 B 样条插值

图像插值就是根据图像的已有像素信息获得相邻像素之间的灰度信息,提高图像分辨率的过程^[11~13]。常用的图像插值方法如最近邻法、双线性插值法、双三次插值法等算法,插值后的图像经常会出现马赛克或高频丢失的现象。为保证重构质量,设计了一种基于像素参数域映射的图像 B 样条插值方法。

3.1 B 样条理论

B 样条曲面的数学描述为

$$p(u, v) = \sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n d_{i,j} N_{i,k}(u) N_{j,l}(v), \quad (1)$$

式中 (u, v) 为曲面上点的位置参数, $u_k \leq u \leq u_{m+1}$, $v_k \leq v \leq v_{n+1}$, $d_{i,j}$ 为 B 样条曲面的控制网格顶点; $N_{i,k}(u)$ ($i = 0, 1, \dots, m$) 与 $N_{j,l}(v)$ ($j = 0, 1, \dots, n$) 分别为 B 样条基函数,其中 k, l 为沿 u, v 参数方向的次数,可通过 de Boor-Cox 递推公式得到,即

$$\begin{cases} N_{i,0}(u) = \begin{cases} 1, & \text{若 } u_i \leq u < u_{i+1} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \\ N_{i,k}(u) = \frac{u - u_i}{u_{i+k} - u_i} N_{i,k-1}(u) + \frac{u_{i+k+1} - u}{u_{i+k+1} - u_{i+1}} N_{i+1,k-1}(u) \\ \text{规定 } \frac{0}{0} = 0 \end{cases} \quad (2)$$

3.2 灰度图像的插值

一幅灰度数字图像可用 $(r + 1) \times (s + 1)$ 矩阵表示

$$\begin{bmatrix} p_{0,0} & p_{0,1} & \cdots & p_{0,s-1} & p_{0,s} \\ p_{1,0} & p_{1,1} & \cdots & p_{1,s-1} & p_{1,s} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ p_{r-1,0} & p_{r-1,1} & \cdots & p_{r-1,s-1} & p_{r-1,s} \\ p_{r,0} & p_{r,1} & \cdots & p_{r,s-1} & p_{r,s} \end{bmatrix},$$

式中 $p_{i,j}$ ($i = 0, 1, \dots, r - 1, r; j = 0, 1, \dots, s - 1, s$) 表示第 i 行、第 j 列的灰度值。

一幅灰度图像可以看作三维空间中的一个 B 样条曲面,图像的像素坐标作为曲面的 x, y 方向,图像的灰度值作为曲面的 z 方向,这样,就可以通过曲面的插值提高图像的分辨率。

欲唯一地确定插值于 $(r + 1) \times (s + 1)$ 个点 $p_{i,j}$ ($i = 0, 1, \dots, r - 1, r; j = 0, 1, \dots, s - 1, s$) 的参数插值曲面,必须先给数据点 $p_{i,j}$ 赋予相应的参数值 $(\tilde{u}_i, \tilde{v}_j)$,即对数据点进行参数化处理。为如实反映数据点的分布情况,保证插值曲面的光顺性,采用平均规范积累弦长参数化方法。

u 向参数积累弦长参数化为

$$\begin{cases} u_{0,j} = 0 \\ u_{i,j} = u_{i-1,j} + |\Delta_1 p_{i-1,j}|, \quad i = 1, 2, \dots, r \end{cases}, \quad (3)$$

规定, $\Delta_1 p_{i,j}$ 和 $\Delta_2 p_{i,j}$ 分别为矢量 $p_{i,j}$ 的第一下标和第二下标的一阶向前差分,即

$$\Delta_1 p_{i,j} = p_{i+1,j} - p_{i,j}, \quad \Delta_2 p_{i,j} = p_{i,j+1} - p_{i,j}。$$

由于上述数据点的积累弦长参数化是非规范的,为便于统一和比较,必须对式(3)的参数化结果作归一化处理,即

$$\tilde{u}_{i,j} = u_{i,j} / u_{r,j}, \quad j = 0, 1, 2, \dots, s \quad (4)$$

则公共的 u 向参数为

$$\tilde{u}_i = \frac{1}{r+1} \sum_{j=0}^s \tilde{u}_{i,j}, \quad (5)$$

同理,亦可得到公共的 v 向参数 \tilde{v}_j 。这样,就得到了与像素点 $p_{i,j}$ 对应的一对参数 $(\tilde{u}_i, \tilde{v}_j)$ 。

对于三次 B 样条,取 4 重节点端点固支条件,得到 B 样条曲面 u, v 向的节点矢量 U 和 V

$$U = [0, 0, 0, 0, \tilde{u}_1, \dots, \tilde{u}_m, 1, 1, 1, 1], \quad (m = r + 2)$$

$$V = [0, 0, 0, 0, \tilde{v}_1, \dots, \tilde{v}_n, 1, 1, 1, 1], \quad (n = s + 2)$$

三次 B 样条曲面的定义域为

$$u \in [u_3, u_{m+1}] = [0, 1], \quad v \in [v_3, v_{n+1}] = [0, 1]。$$

利用张量积曲面的性质,将方程(1)改写为

$$p(u, v) = \sum_{i=0}^m \left[\sum_{j=0}^n d_{ij} N_{j,3}(v) \right] N_{i,3}(u) = \sum_{i=0}^m c_i(v) N_{i,3}(u), \quad (6)$$

式中 $c_i(v)$ 为 B 样条曲面的控制曲线, 这样, 就将曲面反算问题化解为一系列曲线的反算问题。

在弧长参数化情况下, 切矢具有单位模长, 为便于实现样条曲线在端部的光滑性, 采用单位切矢及扭矢作为边界条件, 即

$$\begin{cases} \dot{p}_{v,i,0} = \frac{\Delta_2 p_{i,0}}{|\Delta_2 p_{i,0}|}, & \dot{p}_{v,i,s} = \frac{\Delta_2 p_{i,s-1}}{|\Delta_2 p_{i,s-1}|} \\ \dot{p}_{u,0,j} = \frac{\Delta_1 p_{0,j}}{|\Delta_1 p_{0,j}|}, & \dot{p}_{u,r,j} = \frac{\Delta_1 p_{r-1,j}}{|\Delta_1 p_{r-1,j}|} \end{cases} \quad (7)$$

曲面四角点的单位扭矢为

$$\begin{cases} \ddot{p}_{u,v,0,0} = \frac{\dot{p}_{v,1,0} - \dot{p}_{v,0,0}}{|\dot{p}_{v,1,0} - \dot{p}_{v,0,0}|}, \\ \ddot{p}_{u,v,r,0} = \frac{\dot{p}_{v,r,0} - \dot{p}_{v,r-1,0}}{|\dot{p}_{v,r,0} - \dot{p}_{v,r-1,0}|}, \\ \ddot{p}_{u,v,0,s} = \frac{\dot{p}_{v,1,s} - \dot{p}_{v,0,s}}{|\dot{p}_{v,1,s} - \dot{p}_{v,0,s}|}, \\ \ddot{p}_{u,v,r,s} = \frac{\dot{p}_{v,r,s} - \dot{p}_{v,r-1,s}}{|\dot{p}_{v,r,s} - \dot{p}_{v,r-1,s}|} \end{cases} \quad (8)$$

联立式(6)~(8)可得到定义双三次 B 样条插值曲面的全部控制顶点 $d_{i,j} (i = 0, 1, \dots, m; j = 0, 1, \dots, n)$, 从而确定一个双三次 B 样条曲面。

图像曲面具有如下特点: 1) 图像曲面一般存在高频区; 2) 图像曲面的像素排列较规则, 每行(列)在同一条直线上, 且行(列)上相邻两点的距离相等。

在进行 B 样条插值时, 为避免图像轮廓细节丢失, 必须有效地保护图像中的高频信息。为此, 设计了基于像素参数域映射的重采样算法, 其步骤如下:

1) 根据图像的插值倍数(放大倍数)计算图像的像素数, 并为新图像分配像素; 2) 对图像的每行(列)像素进行参数化; 3) 将参数映射到 B 样条参数域。

以图 2 所示的一维情况(取图像的一部分)为例对其原理加以说明。图 2(a)中实曲线是由 n 个像素插值得到的 B 样条曲线, 虚折线为 B 样条参数线。由式(3)~(5)可知参数线的特点为: 参数值随节点个数的增加而增加, 参数值与 B 样条曲线上的点一一对应, 参数线的值域为 $[0, 1]$ 。

设原图像的像素数为 n , 图像插值倍数为 $M (M \in +R)$, 则插值后新图像的像素数为 $m = \lceil n \times M + 0.5 \rceil$ (为确保图像的个数为整数, m 为四舍五入后的值)。插值后图像像素排列情况如图 2(b) 所示(定义 $j_{-i} = j - i, j_i = j + i$)。

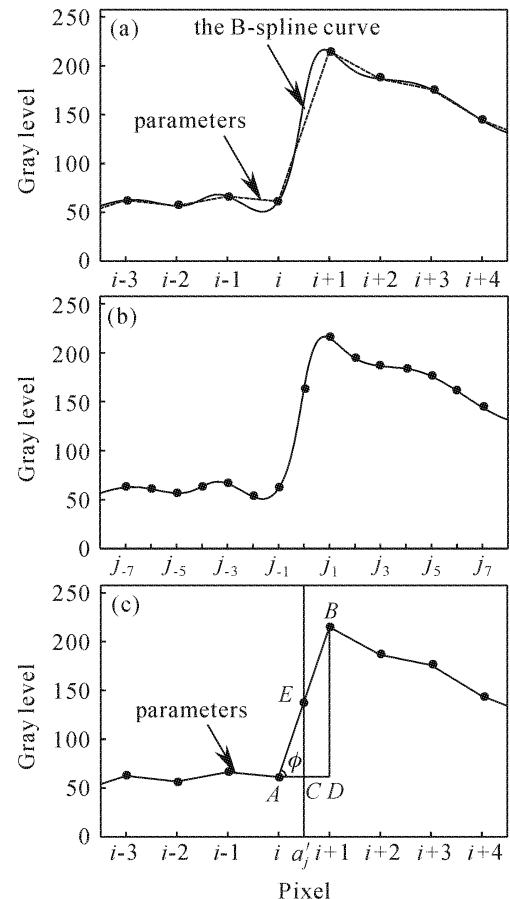


图 2 一维图像的像素参数域映射原理图
Fig.2 Principle of pixels parameter mapping for one-dimensional image

图 2(c)为参数映射原理图。取图 2(b)中某一点 $j (j = 1, 2, \dots, m-1)$, 则该插值像素点在原像素空间的投影坐标为

$$a'_j = \frac{j}{m-1} \times (n-1), \quad (9)$$

该点必位于原两像素之间或落在原某像素上, 即 $i \leq a'_j < i+1$ 。

在图 2(c)中, A 点的像素坐标值为 i , 对应的参数值为 u_i , B 点的像素坐标值为 $i+1$, 对应的参数值为 u_{i+1} , E 点为插值点。根据三角形相似关系有 $\cos \phi = \frac{AD}{AB} = \frac{AC}{AE}$, 即 $AE = \frac{AC \times AB}{AD}$, 由此可得插值点 E 所对应的参数 \tilde{u}_j

$$\tilde{u}_j = \tilde{u}_E = u_i + (a'_j - i) \frac{u_{i+1} - u_i}{(i+1) - i}, \quad (10)$$

将式(9)代入式(10), 得

$$\tilde{u}_j = u_i + \left[\frac{j}{m-1} \times (n-1) - i \right] (u_{i+1} - u_i), \quad (11)$$

利用式(11)即可得到任一插值像素点的像素坐标在 B 样条曲线参数域中的映射 \tilde{u}_j , 再通过 B 样条曲

线的正运算即可求得该像素的灰度值。

依据上述原理可求得二维图像在 u, v 方向的参数值 $(\tilde{u}_i, \tilde{v}_j)$ ，从而实现图像的 B 样条插值。

通过像素的参数域映射能够有效防止插值图像像素按弦长均匀分布而导致的图像失真，同时尽可能地保护了图像的高频信息。

3.3 图像插值效果

为验证基于参数域映射及 B 样条技术的图像插值方法的有效性，以 Lenna 图像为例进行图像插值对比实验。实验结果如图 3 所示。

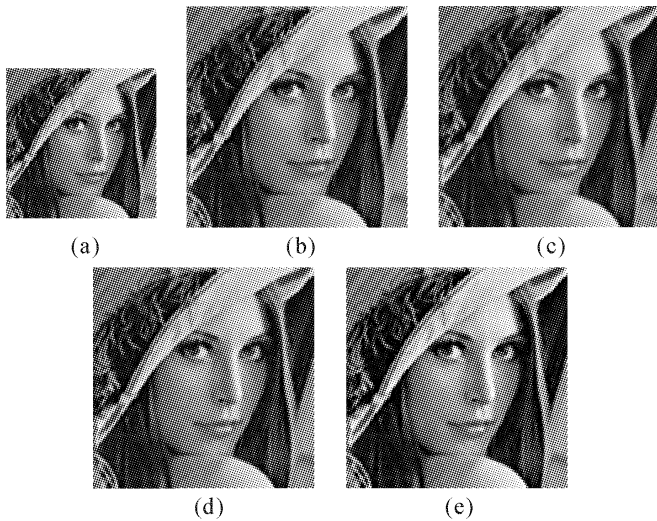


图 3 常用图像插值方法与本文方法比较
(a) 输入图像; (b) 最近邻插值; (c) 双线性插值;
(d) 双立方插值; (e) 本文方法

Fig. 3 Comparison between common image interpolation methods and ours
(a) input image; (b) nearest neighbor interpolation; (c) bilinear interpolation; (d) bicubic interpolation; (e) our method

通过对比可以看出，利用本文方法得到的图像既无图 3(b)最近邻插值的马赛克现象，对图像高频信息的保护也比图 3(c)和图 3(d)的方法好。

4 三维重构

如图 4 所示，对于表面反射均匀的漫反射体，在理想的成像条件下（光源为无穷远），根据朗伯（Lambert）光学定律，物体表面的反射光亮度仅与入射光源亮度及光的入射角（入射光线和表面法向矢量的夹角）有关，而与观察者的位置无关。即

$$I = I_{pd} \times \cos\theta, \quad (12)$$

式中 I 为界面反射光的光亮度； I_{pd} 为入射光线垂直入射时反射光的光亮度； θ 为入射光线与界面法线的夹角（即入射角）。

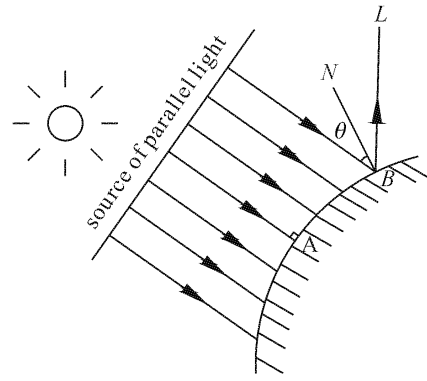


图 4 反射模型示意图

Fig. 4 Schematic diagram of reflection model

以摄像机坐标系为参考系，设物体所在平面为 xy 平面，光源在点 (x, y) 处的光强为 $I(x, y)$ 。若光源为平行光光源，则有 $I(x, y) = I_c$ 为常数。

设光源方向为 $\mathbf{n}_0 = (n_{01}, n_{02}, n_{03})$ ，物体表面法线方向为 $\mathbf{n} = (n_1, n_2, n_3)$ 。则

$$\cos\theta = \frac{n_{01}n_1 + n_{02}n_2 + n_{03}n_3}{\sqrt{n_{01}^2 + n_{02}^2 + n_{03}^2} \sqrt{n_1^2 + n_2^2 + n_3^2}}. \quad (13)$$

设曲面为物体表面高度 z 的显式方程，即曲面可以表示为 $z(x, y)$ ，其表面法向为 $\mathbf{n} = (p, q, -1)$ ，其中 $p = z_x = \frac{\partial z}{\partial x}$ ， $q = z_y = \frac{\partial z}{\partial y}$ 。光源方向 $\mathbf{n}_0 = (p_0, q_0, -1)$ ，模型表面反射率为 $\rho(x, y)$ （可设物体为均质，即反射率常数 $\rho(x, y) = \rho$ ），像素点 (x, y) 的灰度为 $E(x, y)$ ，则

$$E(x, y) = \rho \frac{(1 + p_0 p + q_0 q)}{\sqrt{1 + p_0^2 + q_0^2} \sqrt{1 + p^2 + q^2}}. \quad (14)$$

为解决方程(14)的病态特征，首先，假设所研究的对象为光滑表面物体，即认为物体表面高度函数是 C^2 （或至少是 C^1 ）连续的，物体表面方向 p 和 q 沿着物体表面的变化也是连续和平滑的；其次，考虑到实际图像中含有噪声等影响因素，由法向参数 p, q 计算出的图像灰度与实际灰度值存在误差，因而引入亮度约束；由于离散的图像表面方向 (z_x, z_y) 与连续的表面方向 (p, q) 之间存在误差，而引入梯度一致性约束。综合上述条件，可构造如下全局性最优化函数

$$\iint_{\Omega} \{ [E(x, y) - R(p, q)]^2 + \lambda(p_x^2 + p_y^2 + q_x^2 + q_y^2) + \mu[(z_x - p)^2 + (z_y - q)^2] \} d\Omega, \quad (15)$$

式中的第一项为光强误差项，即由法向参数 p, q 计算出的图像灰度与实际灰度值 $E(x, y)$ 之间的误差；第二项为表面光滑误差项；第三项是梯度一致性

误差; λ 和 μ 分别为表面光滑误差和梯度一致性误差的加权因子; (x, y) 为离散化的图像点坐标。

对式(15)求变分,可以得到优化函数极值存在的必要条件

$$\begin{cases} \lambda \nabla^2 p + \mu(z_x - p) + [E(x, y) - R(p, q)]R_p = 0 \\ \lambda \nabla^2 q + \mu(z_y - q) + [E(x, y) - R(p, q)]R_q = 0, \\ \nabla^2 z - p_x - q_y = 0 \end{cases} \quad (16)$$

式中 ∇^2 表示拉普拉斯算子, R_p, R_q 是函数 R 关于 p 和 q 的偏导数。

应用交错网格方法将 $p, q, z, p_x, q_y, z_x, z_y$ 及 ∇^2 算子离散化,可得到式(16)的离散形式方程组,再通过高斯-赛德(Gauss-Seidel)迭代方法,可同时求解得到物体表面梯度 p, q 和表面高度 z 的网格值。

通过上述方法就得到了反映物体表面三维形状信息的模型。

5 三维重构实验及结果分析

以一幅花瓶图像为例进行三维重构对比实验,结果如图 5 所示。图 5 中,(a)为输入的 $120 \text{ pixel} \times 120 \text{ pixel}$ 的原图像,(b)为直接利用 SFS 方法重构的模型(120 数据点 $\times 120$ 数据点),(c)为采用本文方法,先将原图像放大 3 倍后重构的模型(360 数据点 $\times 360$ 数据点)。

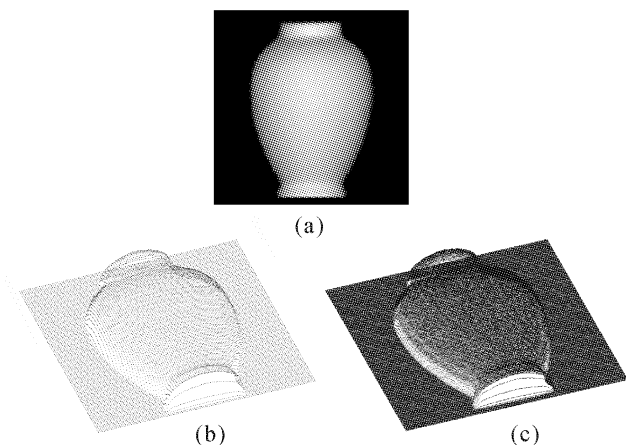


图 5 三维重构对比实验

Fig. 5 Contrast experiments of 3D reconstruction

设图像平面所代表的实际面积为 $120 \text{ mm} \times 120 \text{ mm}$,则图 5(b)的三维模型在 x, y 方向的分辨力为

$$\frac{120}{120-1} = 1.01 \text{ mm}$$

模型在 xy 平面的分辨力为

$$\frac{120 \times 120}{(120-1) \times (120-1)} = 1.02 \text{ mm}^2$$

而图 5(c)的三维模型在 x, y 方向和 xy 平面的分辨力分别为 0.33 mm 和 0.11 mm^2 。

重构模型在 $x(y)$ 方向的分辨力与图像插值倍数的关系如图 6 所示。

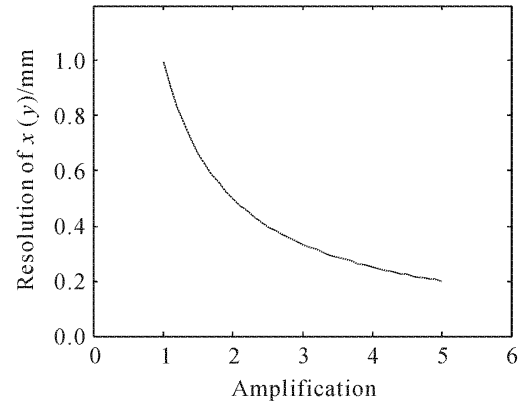


图 6 模型分辨力与图像放大倍数间的关系

Fig. 6 Relationship between model's resolution and image amplification

由图 5 和图 6 可以看出,利用插值后图像重构的模型,其分辨力得到了明显改善。

另外,由于图像插值过程中采用双向积累弦长参数化方法和像素的参数域映射方法能有效避免图像失真,因而使重构模型的光顺性较好。

实验是在奔腾(Pentium)4(1.1 G)计算机上运行的,图像放大倍数为 3 时,模型重构所需时间约为 2.1 s。随着图像放大倍数的增加,图像插值、三维获取和图像显示等操作的运算量都随之增加,导致处理效率降低,重构所需的时间也会增加,这是本文方法的主要缺点。在实际应用中,应综合考虑运行时间、模型分辨力和光顺性等因素,以确定合适的放大倍数,在保证重构效果的基础上,使处理效率最高。

6 结论

综合运用计算机视觉、图像处理及计算机辅助几何设计理论与技术,通过 B 样条插值和像素的参数域映射提高图像的分辨率,从而有效地改善了三维重构效果。应用实例表明,本文给出的方法简单易行,对三维重构质量的提高有借鉴意义,为进一步提高基于单目 CCD 图像的三维测量精度创造了条件。

参 考 文 献

- 1 Xu Dong, Xia Liangzheng, Yang Shizhou. Using curved surface approximation to reconstruct 3-D shape from shading [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(5):552~555
许 东,夏良正,杨世周. 利用曲面逼近进行三维形状恢复[J]. *光学学报*, 2002, **22**(5):552~555
- 2 Zhao Chuangxin, Xu Jinliang, Zhang Yongli *et al.*. Three-dimensional reconstruction of free-flying insect based on single camera [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(1):61~66
赵创新,徐进良,张永立 等. 基于单摄像机的昆虫自由飞行参量三维重构[J]. *光学学报*, 2006, **26**(1):61~66
- 3 D. Samaras, D. Metaxas. Incorporating illumination constraints in deformable models for shape from shading and light direction estimation [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2003, **25**(2):247~264
- 4 Tian Yingli, Ma Songde. Spherical light algorithm for shape from shading method [J]. *Acta Optica Sinica*, 1998, **18**(10):1336~1341
田英利,马颂德. 基于球扩展光源模型的物体三维形状的恢复[J]. *光学学报*, 1998, **18**(10):1336~1341
- 5 Hisashi Shimodaira. A shape-from-shading method of polyhedral objects using prior information [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2006, **28**(4):612~624
- 6 Liu Zhangwen, Gu Tianxiang. Three-dimensional measurement of object by using gray gradient of CCD image [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(11):1384~1388
刘章文,古天祥. 利用 CCD 图像的灰度梯度实现物体三维测量[J]. *光学学报*, 2003, **23**(11):1384~1388
- 7 Song Limei, Zhou Xinglin, Xu Kexin *et al.*. Three dimensional defect detection based on single measurement image [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(9):1195~1200
宋丽梅,周兴林,徐可欣 等. 基于单幅测量图像的三维缺陷检测技术[J]. *光学学报*, 2005, **25**(9):1195~1200
- 8 Wu Fenghe, Shi Fazhong. Research on a reverse engineering method for 3D surface using single image [C]. ICPMT'2004, 2004. 949~953
- 9 Zhu Jigui, Li Yanjun, Ye Shenghua *et al.*. Study on single camera simulating stereo vision measurement technology [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(7):943~948
郑继贵,李艳军,叶声华 等. 单摄像机虚拟立体视觉测量技术研究[J]. *光学学报*, 2005, **25**(7):943~948
- 10 Wu Fenghe. Research on the 3D reconstruction method based on single image data [D]. Beijing: Beihang University, 2006. 17~33
吴凤和. 基于单幅图像数据的三维重构方法研究[D]. 北京:北京航空航天大学, 2006. 17~33
- 11 Xie Meihua, Wang Zhengming. Image interpolation based on gradient [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2005, **10**(7):856~861
谢美华,王正明. 基于图像梯度信息的插值方法[J]. *中国图象图形学报*, 2005, **10**(7):856~861
- 12 Luo Liyan, Yang Xunnian. A subdivision approach to image interpolation [J]. *Journal of Computer Aided Design & Computer Graphic*, 2006, **18**(9):1311~1316
罗立彦,杨勋年. 基于细分的图像插值算法[J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2006, **18**(9):1311~1316
- 13 Zhuo Ning, Sun Huayan, Zhang Haijiang. A new approach for improvement of CCD imaging resolution [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(6):777~780
卓 宁,孙华燕,张海江. 一种新的提高 CCD 成像分辨率的方法[J]. *光学学报*, 2005, **25**(6):777~780