

研究简报

# 一种基于最小二乘估计的 深度图像曲面拟合方法

李松涛<sup>1</sup> 张长水<sup>1</sup> 荣 钢<sup>1</sup> 边肇祺<sup>1</sup> Dongming Zhao<sup>2</sup>

<sup>1</sup>(清华大学自动化系智能技术与系统国家重点实验室 北京 100084)

<sup>2</sup>(Electrical and Computer Engineering, University of Michigan, U. S. A.)

**关键词** 深度图像, 曲面拟合, 最小二乘估计

**中图分类号** TP391.41

## 3-D RANGE IMAGE SURFACE DESCRIPTION VIA LEAST SQUARES SURFACE FITTING

LI Song-Tao<sup>1</sup> ZHANG Chang-Shui<sup>1</sup> RONG Gang<sup>1</sup>

BIAN Zhao-Qi<sup>1</sup> Dongming Zhao<sup>2</sup>

<sup>1</sup>(State Key Laboratory of Intelligent Technology and Systems,

Department of Automation, Tsinghua University, Beijing 100084)

<sup>2</sup>(Electrical and Computer Engineering, University of Michigan, U. S. A.)

**Key words** Range image, surface fitting, least squares

## 1 引言

深度图像数据直接反映了景物表面的三维几何信息,因而得到了计算机视觉研究人员的关注.在深度图像的三维表面分析中,包含有丰富几何形状信息的表面局部特征,如法向矢量,高斯曲率等,对于分析和描述三维表面特性非常重要.用模板法可以提取这些特征,但其抗噪声能力差<sup>[1]</sup>.曲面拟合是另一条思路.通过拟合三维表面再计算表面几何特征.文献[2,3]研究了两种方法拟合三维表面,抗噪声能力也不好.

一般来说,深度图像数据根据等角测距原理获得,因而不是等网格间距深度数据.美国 Perceptron 公司提供了一种深度数据:非等网格深度数据.对于原深度图像中的每一个像素 $(i, j, f(i, j))$ ,给出一个以图像中心为原点,以光轴为 Z 轴的空间直角坐标 $(x_{ij}, y_{ij}, z_{ij})$ <sup>[4]</sup>.本文利用这种数据给出一种基于最小二乘估计的曲面拟合方法.

## 2 基于最小二乘估计的曲面方程拟合及特征提取

假设三维表面的局部可以用二次曲面方程

$$f(x, y) = a_0x^2 + a_1y^2 + a_2xy + a_3x + a_4y + a_5 \quad (1)$$

很好地近似. 我们首先用深度图像数据中的点  $(x_{ij}, y_{ij}, z_{ij})$  及其邻域的  $N \times N$  个像素通过最小二乘方法拟合该点附近的三维表面<sup>[6]</sup>. 在得到的点  $(i, j, f(i, j))$  处的二次曲面方程的基础上, 计算其一阶, 二阶微分算子  $f_x, f_y, f_{xy}, f_{xx}, f_{yy}$ . 然后计算局部表面的法向矢量, 高斯曲率  $K$  及平均曲率  $H$

$$n = \frac{1}{\sqrt{f_x^2 + f_y^2 + 1}}(-f_x, -f_y, 1) \quad (2)$$

$$K = \frac{f_{xx}f_{yy} - f_{xy}^2}{(f_x^2 + f_y^2 + 1)^2} \quad (3)$$

$$H = \frac{(1 + f_y^2)f_{xx} + (1 + f_x^2)f_{yy} - 2f_xf_yf_{xy}}{2(f_x^2 + f_y^2 + 1)^{3/2}} \quad (4)$$

在分析三维表面时, 高斯曲率  $K$  及平均曲率  $H$  是两个重要的几何特征, 通过二者的组合, 可以得到局部表面的几何特征. 表 1 给出了两个曲率特征与不同的曲面类型的关系<sup>[5]</sup>.

表 1 高斯曲率及平均曲率与曲面类型的关系

	$K < 0$	$K = 0$	$K > 0$
$H < 0$	峰(peak)	脊(ridge)	鞍脊(saddle ridge)
$H = 0$	无	平面(flat)	极小点(minimum)
$H > 0$	凹底(pit)	谷(valley)	鞍谷(saddle valley)

### 3 曲面拟合精度分析

当三维表面过于复杂, 二次曲面方程只能在很小的局部对其近似. 在离散图像中, 该问题表现为拟合点的邻域  $N$  数值较大时, 对深度图像的某些区域无法较为准确地逼近. 特别是对图像的深度阶跃处, 二次曲面方程无法很好地对其近似.

图 1(a)和图 1(b)为圆柱面的光学图像和深度图像, 图像尺寸为  $322 \times 202$  像素, 我们对图中作标记处进行局部曲面拟合实验. 图 2 为圆柱中间点  $(156, 84)$  在  $N$  取不同值时的拟合结果. 受噪声的影响,  $N$  从 6 开始, 计算的特征才趋于稳定. 由于二次曲面方程能很好地逼近圆柱面, 因此, 实验结果与我们的分析一致. 图 1(c)和图 1(d)为羊头模具的光学图像和深度图像, 图像尺寸为  $224 \times 252$  像素, 图 3 为靠近眼角点  $(151, 104)$  处的局部曲面拟合结果. 计算的特征从 5 开始趋于稳定. 但随着邻域半径的进一步增加, 从半径为 9 开始, 平均曲率特征  $H$  由负变正, 即曲面特性由凸性转变为凹性, 并且拟合误差也进一步增大. 从深度图

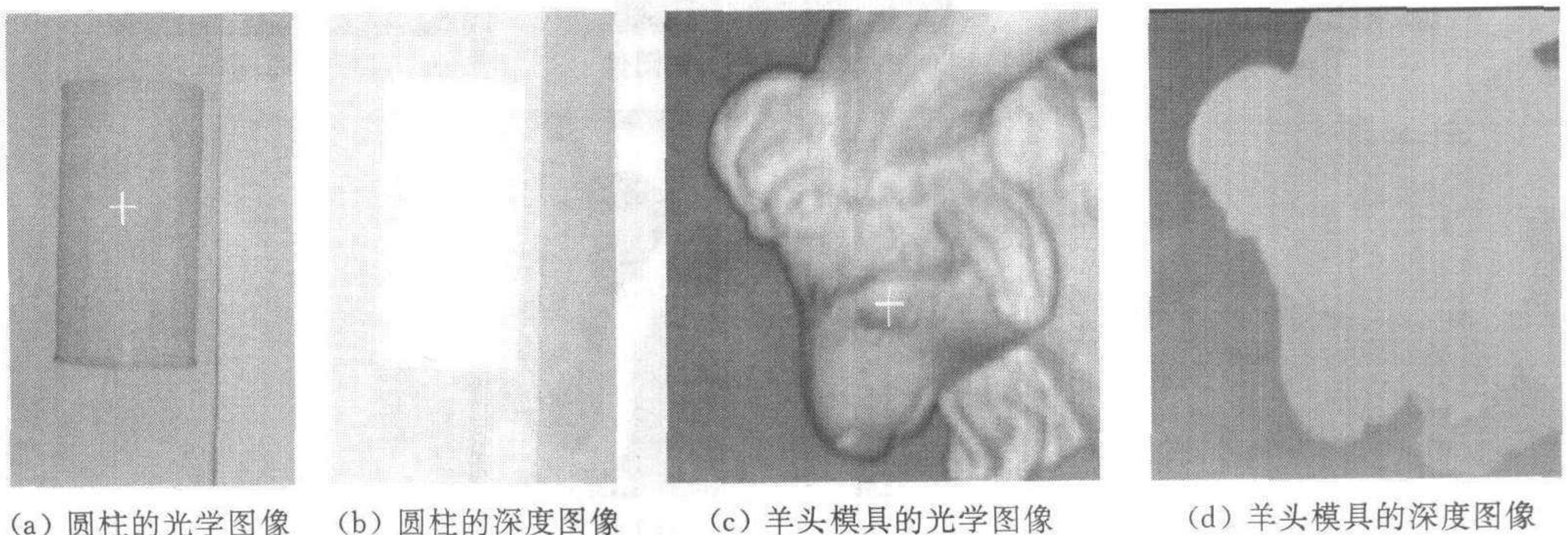


图 1 光学图像与其对应的深度图像数据

像中可知,由于局部表面的几何特性随邻域范围的加大而发生变化,由此导致了上述拟合结果.

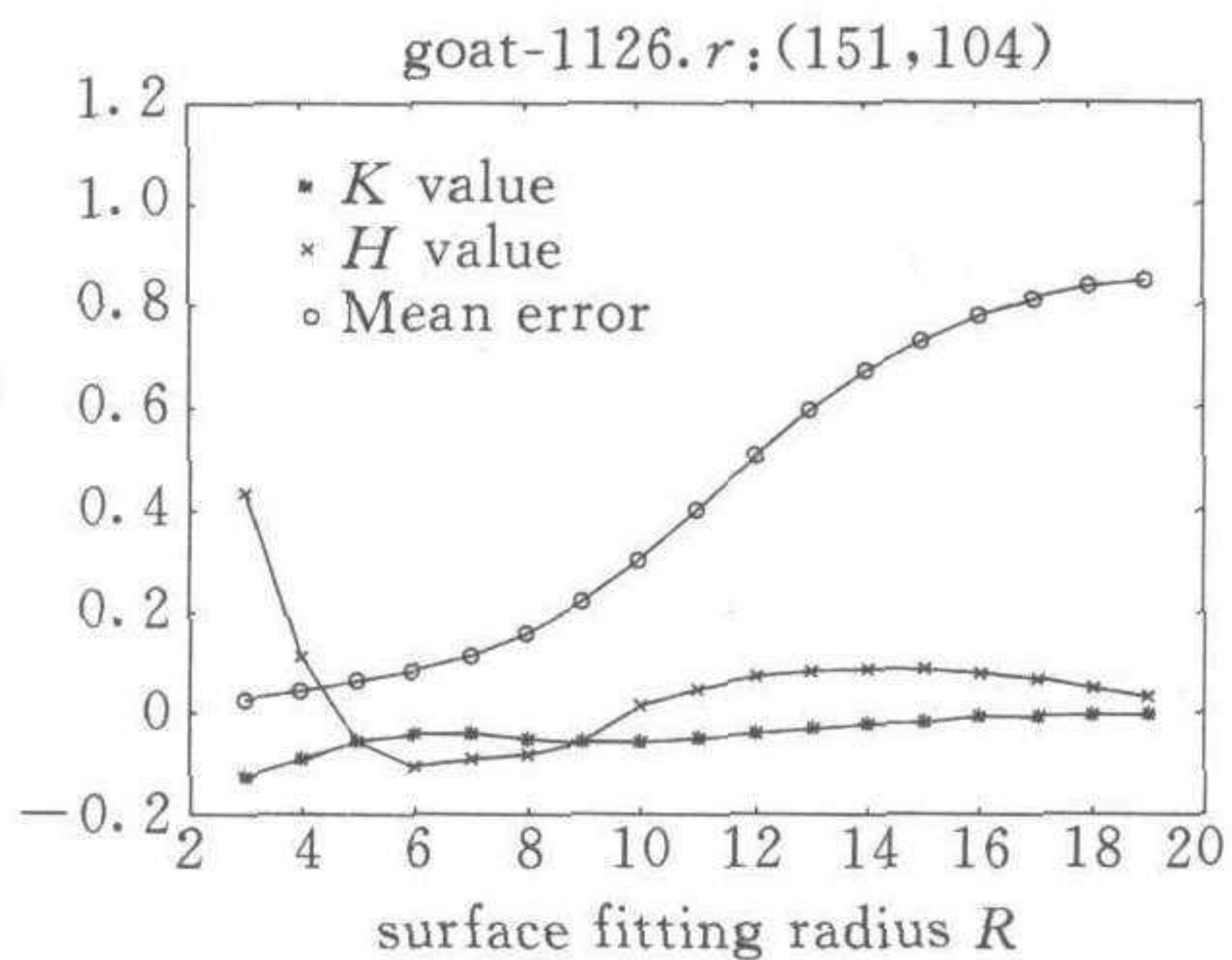
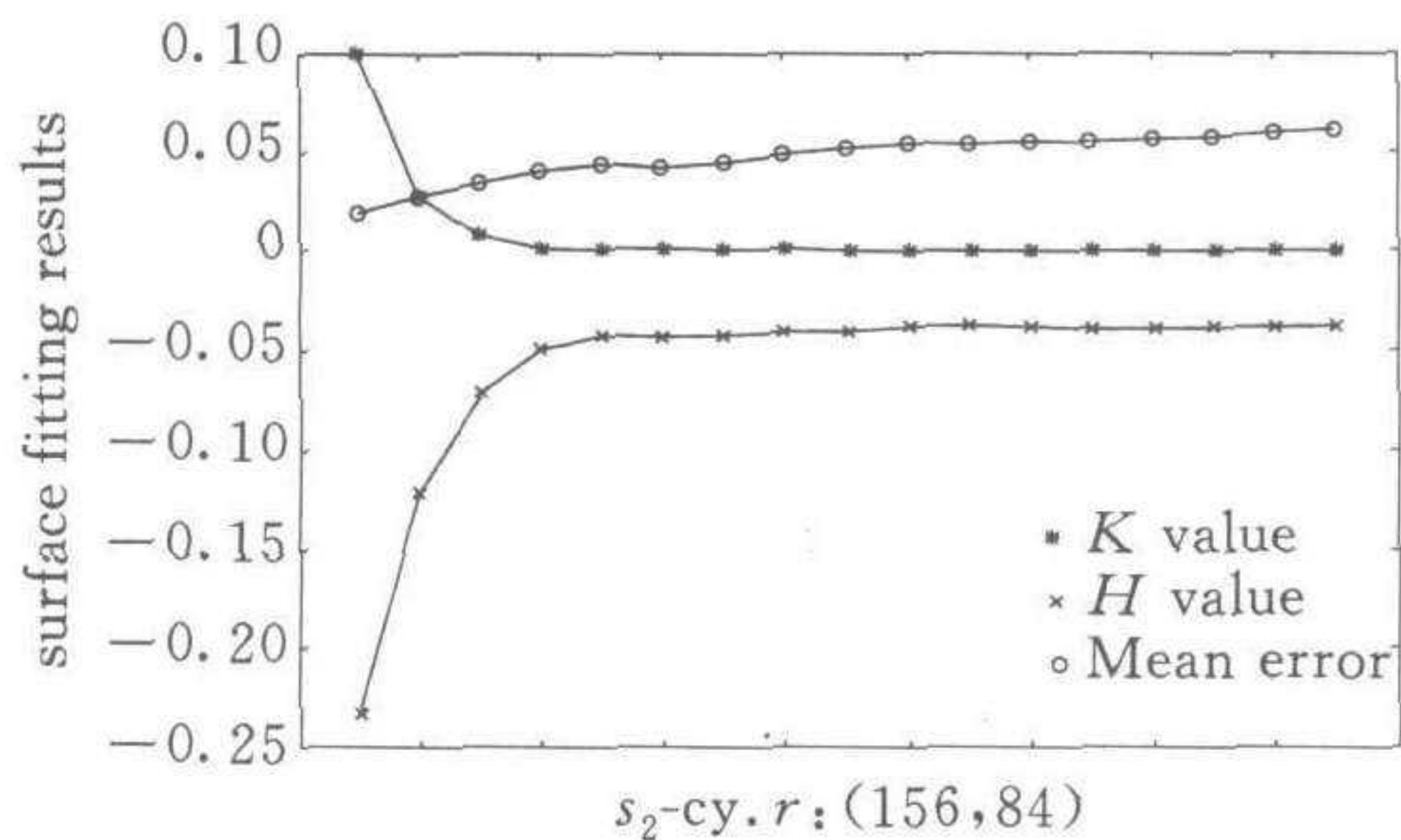


图 2 图1(a)中点(156,84)的局部曲面拟合结果      图 3 图1(c)中点(151,104)的局部曲面拟合结果

可以看出,拟合数据集的尺寸  $N$  直接影响了局部曲面拟合的结果. 因此我们提出了一种  $N$  的选择方法. 这是一个  $N$  逐渐增加的迭代拟合过程. 首先选择一个起始拟合尺寸, 考虑到真实图像中测量噪声的影响,  $N$  起始值为 5. 如果在连续的三次迭代中, 拟合误差均较小并且拟合特征没有明显变动, 则终止局部表面的拟合, 并以当前得到的拟合结果作为局部表面的几何特征. 否则, 如果拟合误差很大, 则视该局部表面为跳变边缘区, 并终止当前局部表面的拟合处理; 若拟合误差较小但拟合特征始终存在较大波动, 则认为该局部表面形状变化复杂.

### 4 实验结果与分析

图 4 是一个复杂表面的曲面分析实例, 其中, 图 4(a)是一个羊头雕塑的光学图像, 图 4(b)是其深度图像, 图 4(c)是图 4(b)的加光三维显示, 图 4(d)和图 4(e)分别是由曲面拟合

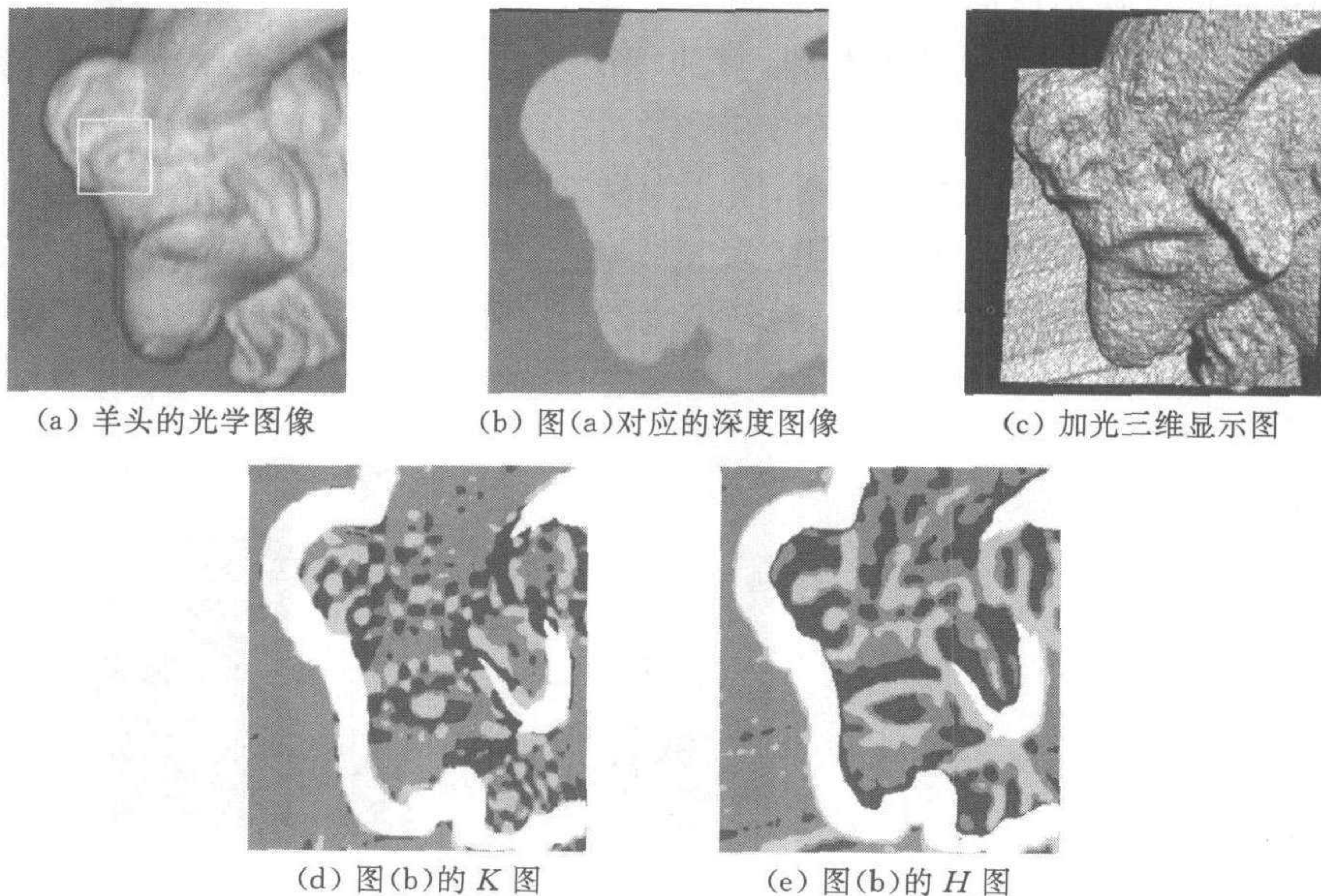


图 4 羊头表面的曲面拟合实例

得到的  $K, H$  图. 在  $K$  图和  $H$  图中, 利用由暗到亮的不同灰度分别代表曲率符号小于 0、等于 0 以及大于 0. 图中的高亮度部分, 是拟合误差较大的跳变区域. 根据  $K, H$  的符号以及表 1 中的对应关系, 可以获取局部区域的三维几何特性. 图 4(a) 中小矩形的中心区域是局部曲面分析的一个例子, 从光学图像中很难确定该区域的表面凹凸性, 而根据该中心区域的  $K, H$  均大于 0, 可知该区域为凹底曲面类型.

## 5 总结

本文给出的方法是深度图像处理中的一个关键步骤. 利用本文提取的局部几何特征, 可以做进一步的处理. 我们还对本文的方法做了大量实验<sup>[6]</sup>. 实验结果表明, 该方法是好的.

**致谢** 感谢美国 Perceptron 公司提供了实验所用的深度图像数据.

## 参 考 文 献

- 1 Besl P J, Jain R C. Three-dimensional object recognition. *Computing Survey*, 1985, 17(1):75~145
- 2 Jain R C, Jain A K. *Analysis and Interpretation of Range Images*. New York:Spring-Verlag, 1992
- 3 Suk M, Bhandarkar S. *Three-Dimensional Object Recognition from Range Images*. New York:Spring-Verlag, 1992
- 4 Zhao D, Li S, Deng J. 3-D processing of range image data for vision application in manufacturing. In: Proc. SPIE, Machine Vision Systems for Inspection and Metrology VII, Boston, 1998. 27~32
- 5 Arman F, Aggarwal J K. Model-based object recognition in dense-range image—a review. *ACM Computing Survey*, 1993, 25(1):5~43
- 6 李松涛. 深度图像处理方法的研究[学位论文]. 北京:清华大学, 1998

**李松涛** 1998 年在清华大学获博士学位, 现在美国 University of Michigan 从事图像处理、计算机视觉研究工作.

**张长水** 1986 年毕业于北京大学, 1992 年获清华大学博士学位, 现为清华大学教授. 研究领域为图像处理、模式识别、人工智能等.