

简报

基于 B 样条的空间自由曲线三维重建¹⁾

肖轶军 丁明跃 彭嘉雄

(华中理工大学图像识别与人工智能研究所 武汉 430074)

(“图像信息处理与智能控制”国家教委开放实验室)

(E-mail: yjxiao@public.wuhan.cn gb.com)

关键词 立体视觉, 三维重建, 空间自由曲线, B 样条, 仿射相机模型.

B-SPLINE BASED 3D RECONSTRUCTION OF SPATIAL FREE-FORM CURVE

XIAO Yijun DING Mingyue PENG Jiexiong

(Inst. for Pattern Recognition & Artificial Intelligence, Huazhong Univ. Sci. Tech., Wuhan 430074)

(State Education Commission Laboratory for Image Processing and Intelligent Control)

Key words Stereo vision, 3D Reconstruction, Spatial free-form curve, B-spline, Affine camera model.

1 引言

立体视觉为物体的三维几何数据获取提供了一个强有力的手段. 现有的立体视觉方法主要采用点、直线段、二次曲线作为立体匹配和三维重建的基元, 由于这些基元不能够有效地表达自由曲线, 所以在应用于空间自由曲线的三维重建时, 很难取得良好的效果.

近年来, 一些学者提出了基于曲线的立体视觉 (curve-based stereo)^[1,2,5]. 他们直接用曲线作为基元进行匹配, 减小了误匹配的概率, 提高了算法的鲁棒性. 但是另一方面, 在曲线匹配好之后, 这些方法还要进行点匹配, 重建过程还是基于匹配好的对应点. 因此从本质上说, 这些方法还是基于点重建的方法.

本文提出了一种真正的以曲线作为基元的三维重建方法, 在仿射相机模型的假设下, 利用 B 样条曲线的仿射不变性来进行三维重建.

1) 该项目受国家自然科学基金(69775005)和国家教委跨世纪人才基金资助.

2 B 样条曲线的仿射不变性

透视不变性是三维重建基元的必要条件,例如直线的透视投影还是直线,二次曲线的透视投影仍然是二次曲线.在一些应用场合中,相机投影过程可简化为仿射投影,称为仿射相机模型.由于 B 样条曲线在仿射投影下是不变的,因此在仿射相机模型下可以作为三维重建的基元.下面我们给以证明.

仿射相机的投影矩阵形式为^[3]

$$P_A = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{13} & P_{14} \\ P_{21} & P_{22} & P_{23} & P_{24} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (1)$$

P_A 所代表的仿射投影变换在欧氏坐标下的表达形式为

$$\mathbf{x} = A\mathbf{X} + \mathbf{t}_A, \quad (2)$$

其中 $A = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{13} \\ P_{21} & P_{22} & P_{23} \end{bmatrix}$, $\mathbf{t}_A = \begin{bmatrix} P_{14} \\ P_{24} \end{bmatrix}$, $\mathbf{x} = (x, y)^T$ 为图像坐标, $\mathbf{X} = (X, Y, Z)^T$, 为空间点坐标.

可以证明, B 样条曲线在仿射投影下是不变的,即 B 样条曲线经过仿射投影变换后,其结果仍为 B 样条曲线,且控制点为原 B 样条曲线控制点的投影.我们首先考虑 B 样条曲线的参数方程,它可以写成如下的向量形式

$$\mathbf{c}(u) = \sum_{i=0}^n \mathbf{d}_i N_{i,k}(u), \quad (3)$$

其中 \mathbf{d}_i 为控制点坐标向量, $N_{i,k}(u)$, $i=0, 1, \dots, n$ 为定义在节点向量区间 $U = \{u_0, u_1, \dots, u_{n+k+1}\}$ 上的 k 次 B 样条基函数. B 样条基函数具有规范性,即 $\sum_i N_{i,k}(u) = 1$.

在以上对仿射相机模型和 B 样条曲线的分析基础上,可以得到以下定理.

定理 1. B 样条曲线是仿射不变的,即 B 样条曲线经过仿射投影变换后,其结果仍为 B 样条曲线,且控制点为原 B 样条曲线控制点的投影.

证明. 一条 B 样条曲线的仿射投影可写成

$$A\mathbf{c}(u) + \mathbf{t}_A = \sum_i (A\mathbf{d}_i) N_{i,k}(u) + \mathbf{t}_A, \quad (4)$$

同时,这条 B 样条曲线的控制点的投影生成的新 B 样条曲线为

$$\sum_i (A\mathbf{d}_i + \mathbf{t}_A) N_{i,k}(u) = \sum_i (A\mathbf{d}_i) N_{i,k}(u) + \mathbf{t}_A \sum_i N_{i,k}(u).$$

根据 B 样条基函数的性质,有 $\sum_i N_{i,k}(u) = 1$, 因此得到

$$\sum_i (A\mathbf{d}_i + \mathbf{t}_A) N_{i,k}(u) = \sum_i (A\mathbf{d}_i) N_{i,k}(u) + \mathbf{t}_A. \quad (5)$$

由(4)式和(5)式,我们得到 $A\mathbf{c}(u) + \mathbf{t}_A = \sum_i (A\mathbf{d}_i + \mathbf{t}_A) N_{i,k}(u)$, 即定理 1 成立.

由本节分析可得到, B 样条曲线在仿射相机模型下,其投影仍为一条 B 样条曲线,且其控制点为原 B 样条曲线的控制点的投影.

3 空间 B 样条曲线重建方法

由第 2 节可知,在仿射相机模型下,空间 B 样条曲线的投影等于其控制点的投影作为控制点生成的曲线.这样我们可以从立体图像对中抽取图像 B 样条曲线,然后利用左右图像 B 样条曲线的控制点来重建空间 B 样条曲线的控制点,从而得到空间曲线的 B 样条表示.重建算法的具体步骤如下:

1) 进行图像预处理,提取图像边缘,并对边缘进行跟踪和标记.

2) 对图像边缘进行参数化,然后用最小二乘法进行 B 样条曲线拟合,得到图像 B 样条曲线的控制点^[4].

3) 根据三角测量原理,利用左右图像的对应控制点重建空间控制点.

4) 空间曲线生成.在计算出空间控制点以后,可以按照(3)式得到空间曲线任意一点的坐标.

4 实验结果

我们利用德国不伦瑞克工业大学机器人研究所提供的立体图像数据进行了实验.在实验中,物体骨架轮廓是由开曲线构成的,我们选用三次准均匀 B 样条曲线作为重建基元.图 1 为同一个相机在两个不同的视点拍摄的线状物体的图像(大小为 512×512 , 256 灰度级).

图 2 显示了图 1 的重建结果,白线显示了重建结果在二个视点下的反投影.对于较长的曲线(曲线 1)采用了 20 个控制点进行重建;对于较短的曲线(曲线 2)采用了 10 个控制点进行重建.从图中可看出,重建结果的投影相当接近于图像中的线状物体.

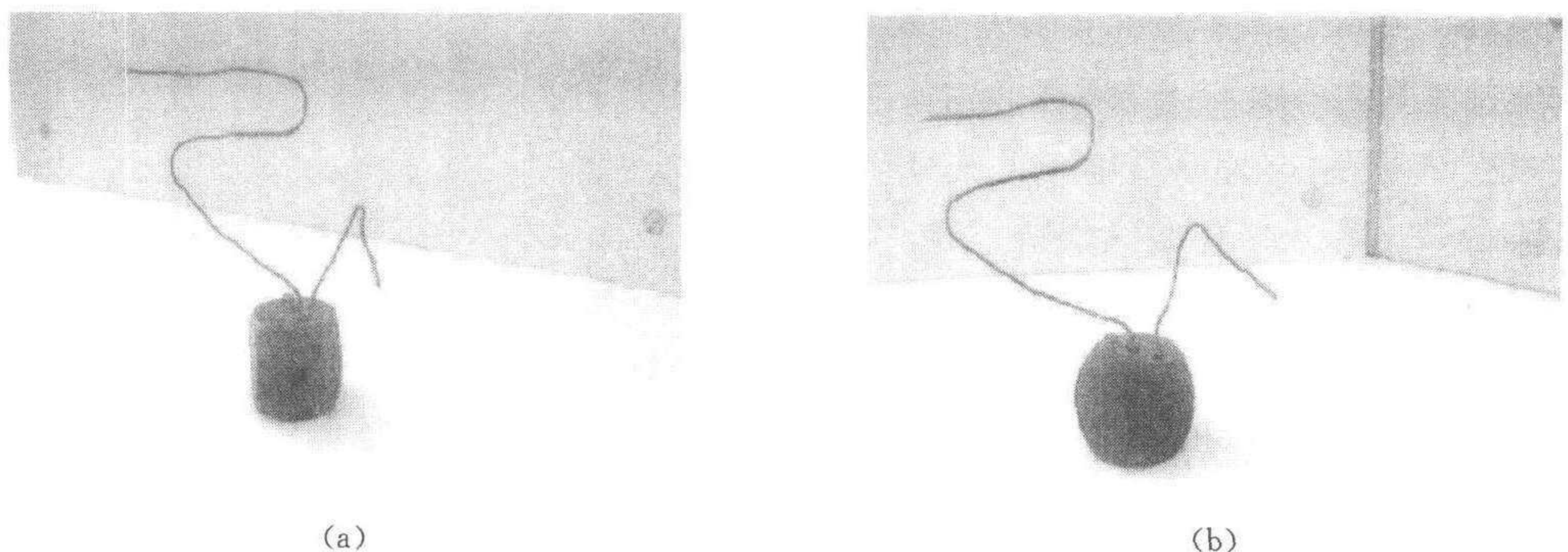


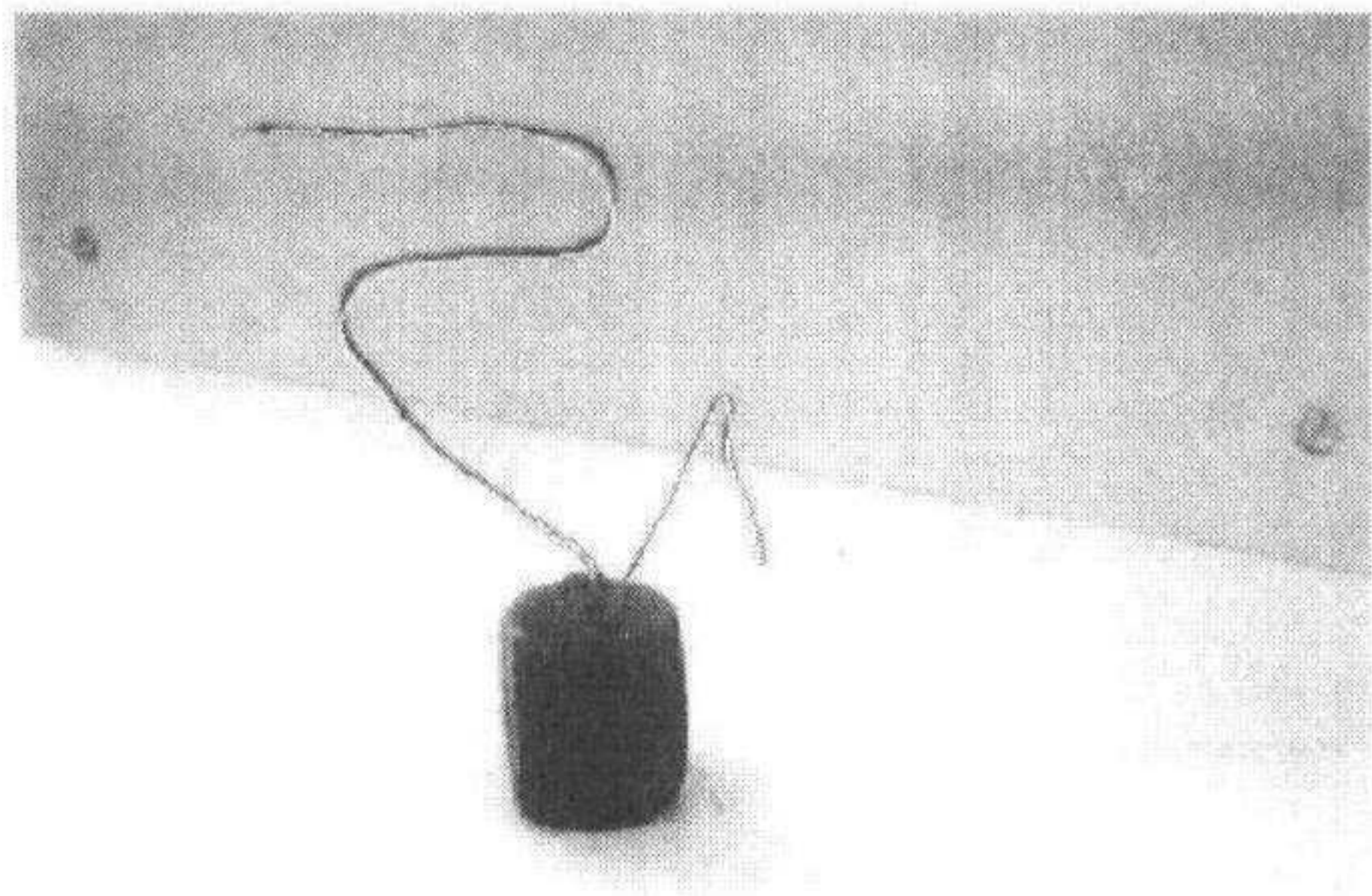
图 1 立体图像对

为了定量衡量重建的误差,我们计算了反投影的曲线同原始数字轮廓的平均最近点距离.一个点 x 到一个点集 $E_i = \{e_i; i=1, 2, \dots, g\}$ 的最近点距离定义如下:

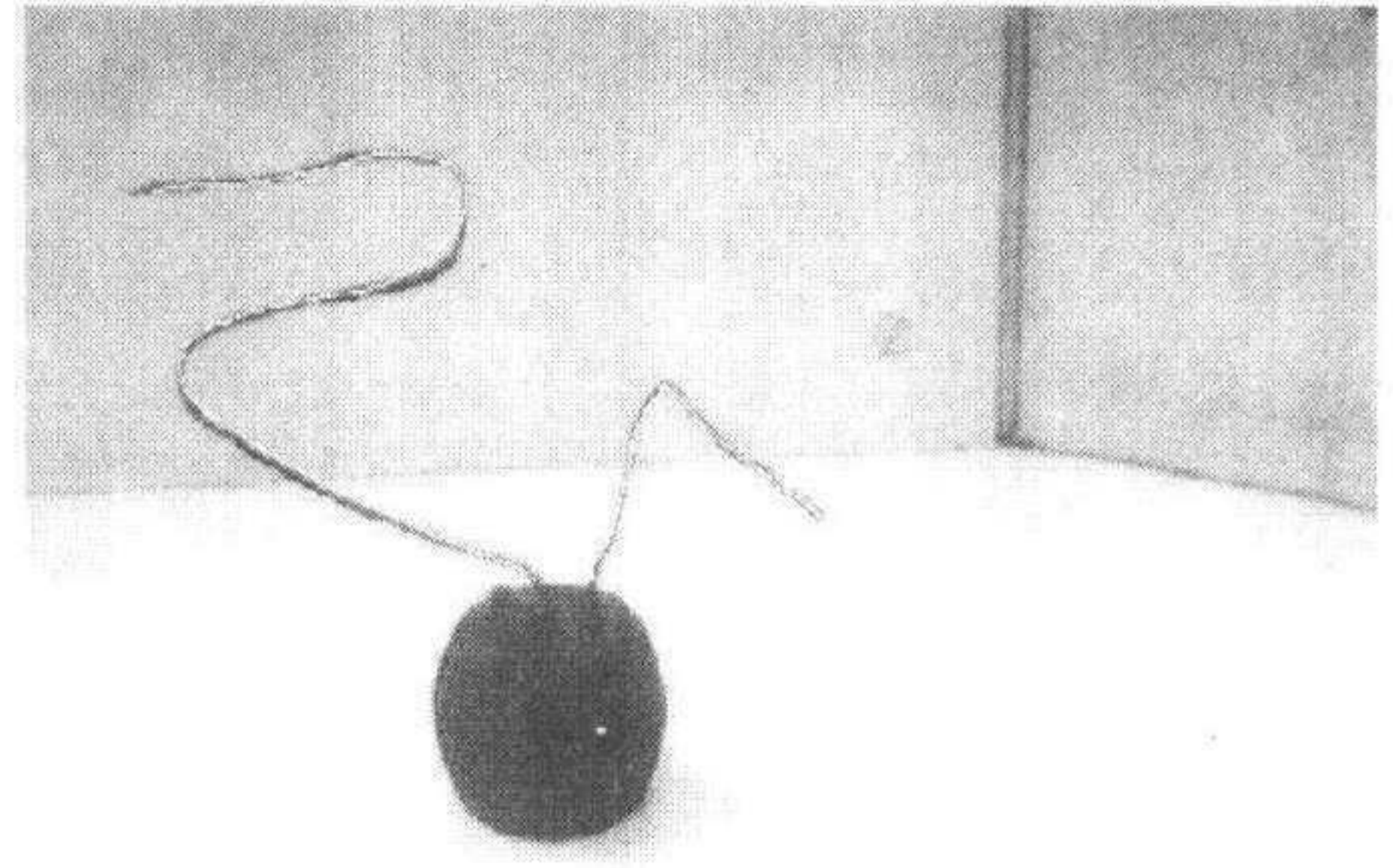
$$d(x, E) = \min_{i \in \{1, 2, \dots, g\}} d(x, e_i), \quad (6)$$

其中 $d(\cdot, \cdot)$ 表示二点的欧氏距离.

我们对反投影的每条 B 样条曲线均匀采样 200 个点,并利用(6)式计算它们到原始数字轮廓的最近点距离,最后求出它们的平均最近点距离,结果见表 1.



(a)



(b)

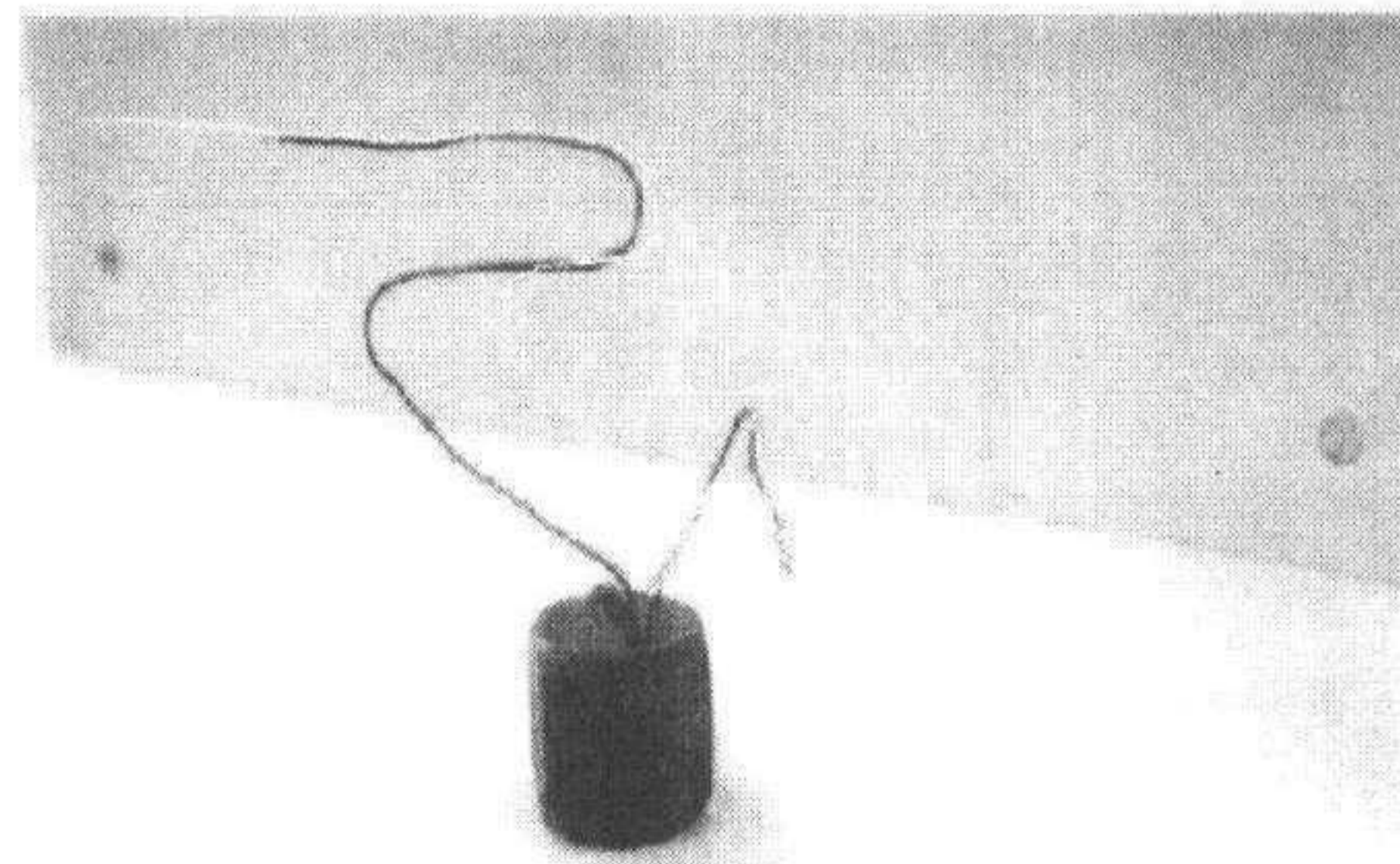
图 2 重建结果的反投影

从表 1 可以看出,曲线 1 的重建误差要大于曲线 2 的重建误差.其原因是相较于曲线 2,曲线 1 的尺寸更大,因此透视投影的仿射近似也就更不准确,重建结果的误差也随之增大.

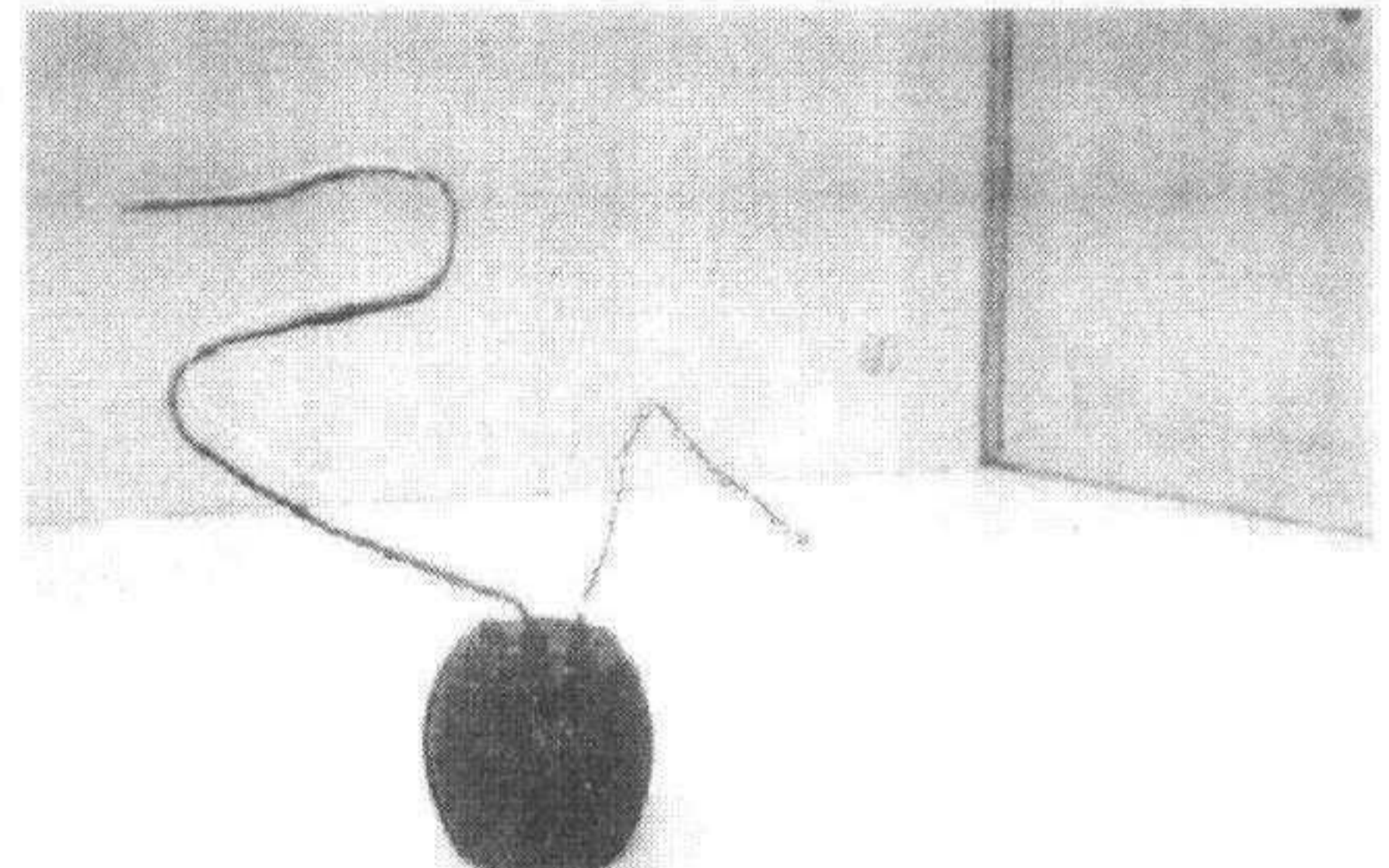
表 1 反投影到原始数字轮廓的平均最近点距离

	左视点	右视点
曲线 1	1.8782	1.7664
曲线 2	0.5769	0.4854

图 3 显示了文献[6]提出的基于分段二次曲线方法的重建结果的反投影.对比图 2 和图 3,可以看出,本文方法重建结果的精度比文献[6]方法的精度提高了很多.



(a)



(b)

图 3 文献[6]方法重建结果的反投影

5 结论

B 样条是计算机图形学和 CAD 中最受欢迎的几何建模方法.本文将这一有力工具应用到计算机视觉当中来,提出了一种利用 B 样条曲线作为基元的立体视觉方法,并将之应用到空间自由曲线的三维重建中.对比传统方法,本文方法在重建精度和算法复杂性上都有较大的改善,并能直接从灰度图中计算出空间自由曲线的 CAD 模型,省去了传统方法在重建后还需要进行的内插、逼近等后处理工作,使其应用更加方便.

本文方法的误差主要来自透视投影的仿射近似和数字曲线的 B 样条拟合.以后在这两方面,我们将继续开展研究,拟采用的方法是使用 NURBS 曲线作为三维重建的基元.由于 NURBS 曲线具有透视不变性,使用 NURBS 曲线基元的三维重建将更加准确.

参 考 文 献

- 1 Robert L, Faugeras O. Curve-based stereo; Figural continuity and curvature. In: Proceedings of International Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. IEEE, Hawaii, USA, 1991, 57~61
- 2 Schmid C, Zisserman A. The geometry and matching of curves in multiple views. In: Proceedings of European Conference on Computer Vision, June 1998
- 3 Aloimonos J. Perspective approximations. *Image and Vision Computing*, 1990, 8(3):179~192
- 4 Rogers D F, Fog N G. Constrained B-spline curve and surface fitting. *CAD*, 1989, 21(10):641~648
- 5 Brint A T, Brady M. Stereo matching of curves. *Image and Vision Computing*, 1990, 8(1):50~55
- 6 Ding M, Y Can. Quadratic matching based reconstruction of space curve. International Symposium on Multi-spectral Image. In: Proceedings of SPIE, Volume 3545, Wuhan, China, Oct. 1998, 62~65

肖轶军 男, 1972年生. 华中理工大学图像识别与人工智能研究所博士研究生. 现主要从事计算机视觉、计算机图形学和图像分析等方面的研究工作.

丁明跃 男, 1961年生. 华中理工大学图像识别与人工智能研究所副所长、教授、博士生导师. 1991年至1993年获德国洪堡基金在德国不伦瑞克工业大学机器人研究所从事博士后研究工作. 主要研究领域包括计算机视觉、路径规划、目标识别和跟踪等. 《电子学报》和《宇航学报》编委.

中国自动化学会继续工程教育计划表(部分)

序号	项目名称	时间	人数	班期	地点	联系人
1	模糊控制技术与仪表装置学习班	6月—7月	50	2	天津 山东	吴斌昌 上海市曹宝路103号 邮编:200233 电话:(021)62933919
2	推断控制与软测量技术应用学习班	9月—10月	50	2	上海	同上
3	先进控制策略和DCS选型及应用研讨班	7月—8月	60	2	福建 安徽	同上
4	可编程序控制器和变频调速器高级应用学习班	7月—8月	40	2	福建 安徽	同上
5	全功能调节阀、新颖调节阀的选择和应用培训班	3月 8月	30	2	广州 浙江	同上
6	智能流量计、液信计原理及应用学习班	8月	40	1	昆明	同上
7	工程设计基础知识研讨培训班	2季度 3季度	120	1	北京	朱蕴珍、冯治中 北京宣武区建工北里1 区3号楼1203 邮编:100053 电话:63558548