

# 基于序列轮廓线的凸面目标全自动重构方法

周朗明<sup>1,2</sup> 张小虎<sup>1,2</sup> 关棒磊<sup>1,2</sup>

**摘要** 凸面目标在成像时会表现尺寸较小、纹理稀疏或缺乏、透光、反光等特点. 在对其进行三维重构时, 传统的立体视觉匹配、主动视觉扫描 (激光或结构光) 等重构方法无法提供良好的解决方案. 针对此类目标的重构难题, 本文提出一种基于序列轮廓线的全自动重构方法. 该方法首先采集目标的序列轮廓影像, 然后提取高精度的轮廓线, 再利用多个视角的轮廓线对初始外包体进行空间切割得到目标的初始三维模型, 接着根据角度和面积约束对初始三维模型中的面进行合并, 最后利用合并后的面重新对外包体进行精细切割得到目标的精确三维刻面模型. 通过对凸面目标 (注射器针头, 直径约为 3 mm) 的重构实验证明, 利用本文的方法重构得到的模型角度误差小于  $0.7^\circ$ , 执行时间小于 15 s, 重构过程无需人工干预, 能有效解决凸面目标的三维重构及视觉测量难题.

**关键词** 计算机视觉, 序列轮廓线, 空间切割, 凸面目标, 轮廓重构, 视觉测量

**引用格式** 周朗明, 张小虎, 关棒磊. 基于序列轮廓线的凸面目标全自动重构方法. 自动化学报, 2015, 41(4): 725–734

**DOI** 10.16383/j.aas.2015.c140369

## An Automatic Reconstruction Method of Convex Object Based on Sequence Contours

ZHOU Lang-Ming<sup>1,2</sup> ZHANG Xiao-Hu<sup>1,2</sup> GUAN Bang-Lei<sup>1,2</sup>

**Abstract** There is a small size, lack of or less texture, transparent and reflective phenomenon on the images of convex objects. So the traditional reconstruction methods such as stereo-vision matching and active vision scanning such as laser or structure light cannot be used for such objects. In this paper, a reconstruction method based on multi-contours for miniature convex object is proposed. Firstly, multi-view silhouette images are captured, then the accurate contours are extracted; secondly coarse mesh is generated by space carving of multi-contours, and thirdly, the fragmented polygons are merged according to angle and area constraints; at last, the accurate mesh is generated by space carving of multi-polygons of the coarse mesh. The reconstruction experiments of regular and convex objects (syringe needle, diameter is about 3 mm) proved that the angular error is less than  $0.7^\circ$  and the time cost is less than 15 seconds and the total process is without manual intervention. This method can solve the problem of reconstruction and vision measurement of convex objects effectively.

**Key words** Computer vision, sequence contours, space carving, convex object, SFS, vision measurement

**Citation** Zhou Lang-Ming, Zhang Xiao-Hu, Guan Bang-Lei. An automatic reconstruction method of convex object based on sequence contours. *Acta Automatica Sinica*, 2015, 41(4): 725–734

在医学、电子及工艺品领域, 存在着很多具有规则外形的零配件如注射器针头、棱镜、螺丝等, 这些物件的共同特征是尺寸较小 (1 mm ~ 10 mm) 并且经过了机械切割的过程, 因此在外形上呈现为规则

的多边形, 并且无凹面的形貌. 本文将此类目标统称为凸面目标, 这些目标在成像时会表现出小尺寸、纹理稀疏或缺乏、透光、反光的特点. 在对其进行三维重构时, 采用常规的立体视觉匹配方法或主动视觉中的激光、结构光扫描方法时会存在很大的局限. 主要体现在: 立体视觉匹配方法需要提取同名点特征, 而凸面目标特征较为单一, 多为线和面特征, 其影像中很难有足够的同名点特征来确保匹配的精度. 主动视觉的激光扫描和结构光方法要求目标表面不反光、不透光, 并且面积要比较大确保激光或结构光能扫描到, 对细长形状或尺寸太小的目标来说, 三维重构效果很差或无法扫描到三维点云数据.

在计算机视觉领域, 对无法适用立体匹配和距离感知方法的目标重构任务, 存在着一种由序列轮廓影像进行空间切割生成表面形状的三维重构方法,

收稿日期 2014-06-03 录用日期 2014-11-15  
Manuscript received June 3, 2014; accepted November 15, 2014  
国家自然科学基金 (11272347), 国家重大科学仪器设备开发专项 (2013YQ140517) 资助

Supported by National Natural Science Foundation of China (11272347), and National Key Scientific Instrument and Equipment Development Project (2013YQ140517)

本文责任编辑 贾云得

Recommended by Associate Editor JIA Yun-De

1. 国防科学技术大学航天科学与工程学院 长沙 410073 2. 湖南省图像测量与视觉导航重点实验室 长沙 410073

1. College of Aerospace Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073 2. Hunan Provincial Key Laboratory of Image Measurement and Vision Navigation, Changsha 410073

称为空间雕刻方法<sup>[1]</sup>, 该方法旨在逼近图像对象的可视外壳<sup>[2]</sup>, 为目标物体提供粗糙的初始模型<sup>[3]</sup>. 空间雕刻方法的一般流程为: 首先建立目标物体的外包体, 然后将该外包体细分为多个体素, 然后采集不同视角目标物体的轮廓图像, 通过图像处理提取轮廓信息, 然后将体素所在的空间点反投到相片上, 利用轮廓的约束剔除非目标点所在的体素<sup>[4]</sup>, 最后将剩余的体素集合利用 Marching Cube 算法<sup>[5]</sup> 生成表达目标物体表面形状的点云模型. 本文中的凸面目标由多边形刻面组成, 无凹集部分, 从轮廓方法的重构理论上讲, 空间雕刻方法可以恢复凸面目标的三维形状. 空间雕刻方法的优点在于设备简单、成本低、算法直观稳健, 仅需要单个相机和一套转盘系统即可, 并且不受目标表面反光、透光、纹理缺乏的限制, 其缺点在于效率较低和模型精度有限, 很多研究者对常规空间雕刻方法进行了改进, 如用空间雕刻得到的模型作为初始模型, 然后结合颜色信息<sup>[6-8]</sup> 或立体图像匹配<sup>[9-12]</sup> 等多种方法对初始模型进行精细化, 在效率的提升方面, 有研究者提出利用 GPU (Graphic processor unit) 技术<sup>[13-14]</sup> 或贡献权重方法<sup>[15]</sup> 对重构过程进行优化加速. 但无论是常规的空间雕刻方法还是改进的空间雕刻方法, 应用于凸面目标的精确三维模型重构时仍然存在较大的局限, 主要体现在: 1) 常规空间雕刻方法生成的三维模型精细程度不够, 并且仅仅是利用点或三角网来表达目标物体, 无法恢复各多边形刻面的形状; 2) 改进的空间雕刻方法要求利用序列影像间的颜色或灰度信息, 但是凸面物体由于纹理稀疏或缺乏、反光、透光, 难以得到颜色或灰度信息; 3) 利用加速优化的空间雕刻方法虽然效率有提高, 但是得到的模型精度仍然无法到达精密测量的要求.

分析凸面物体轮廓影像的成像特点, 轮廓由不同的线段组成, 单条线段表达了相机视线方向的某一可视刻面在当前帧影像中的投影, 若能获取到该刻面的所有轮廓线, 便可得到该刻面在空间中的多视角投影信息, 因此凸面目标的重构可以看做是一种空间多面体的切割过程<sup>[16-17]</sup>. 基于目标是凸面的先验知识, 本文提出一种新的基于序列轮廓线的空间雕刻重构方法, 首先采集目标的多视角影像序列, 然后提取目标轮廓影像的高精度闭合轮廓线, 接着利用序列的闭合轮廓线对初始外包体进行空间切割得到初始的凸包多面体, 然后根据凸包多面体中相邻多边形的面积比和角度对碎面进行合并, 最后基于合并后的面对外包体进行精细切割得到凸面物体的三维刻面模型. 相对于空间雕刻方法, 其优势在于: 1) 不是根据轮廓影像灰度的约束从外包体中剔除非目标的体素, 而是以轮廓线的方式切割外包体, 不需要划分、剔除、合并体素等操作, 重构效率较高;

2) 空间雕刻方法得到的点云模型还需要进行后处理才能得到以面和线为主的刻面模型, 本文的方法能直接恢复各个刻面形状、尺寸和角度信息, 更适合于凸面物体的三维重构和视觉测量.

## 1 轮廓(线)切割原理

在基于轮廓(线)的重构方法中认为背景光为测量系统中唯一的光源, 根据光的直线传播原理, 图像中的每一个灰度为亮色的点都是背景光在图像上的投影. 当测量物体不存在时, 得到的是一幅全亮的图像. 当放上测量物体后得到的图像中有一些暗色的区域, 这个区域是由物体遮挡背景光使一部分平行光不能进入镜头, 从而在像面上留下阴影区域. 图像的暗色区域代表的是测量的目标, 其形状反映了物体在平行于相机光轴方向上的外形轮廓信息, 将此图像称为轮廓图像. 对于图像中所有暗色像素的集合, 在空间中有一个椎体与之对应. 在一幅输入图像中, 从相机的中心出发, 通过各轮廓点的视线在后面形成一个锥形的体积, 物体轮廓与实物坐标系中的椎体相对应. 物体就包括在这个椎体内, 而且椎体每一条母线刚好与物体相切. 利用体交集的方法可以获得目标物体的外包体. 其过程如图 1 所示. 当有足够多的椎体进行相交, 便可得到物体的三维形状.

若设  $S_i$  为图像序列中第  $i$  张轮廓影像  $P_i$  为对应的相机投影矩阵,  $p$  为物方空间点, 设由相机中心和轮廓影像形成的直线集合构成的空间椎体为  $V_i$ , 其表达式为

$$V_i = \{l_i v = P_i^{-1} p, p \in S_i\} \quad (1)$$

定义物体的体空间为  $V$ , 被测物体三维形状由各个角度的空间椎体相交而成, 即

$$V = \cap V_i, i = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

以上即为空间雕刻的基本流程, 得到的体空间有多种表达方法<sup>[18-19]</sup>, 比较常用的基于八叉树数据结构的立方体集合<sup>[20]</sup> 表达方法, 位于 0 级的立方体是被测物体的最大外包立方体, 将该外包体细分为多个体素, 接下来采集不同视角目标物体的轮廓图像, 通过图像处理提取轮廓信息, 将空间点反投到相片上, 利用轮廓的约束剔除非目标点所在的体素<sup>[4, 21]</sup>, 最后将剩余的体素集合利用 Marching Cube 算法构建等值面生成表达目标物体的点或三角网模型<sup>[22]</sup>, 以小猪玩具的重构为例, 上述过程如图 2 所示.

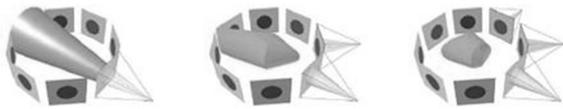


图 1 空间雕刻过程

Fig. 1 Space carving procedure

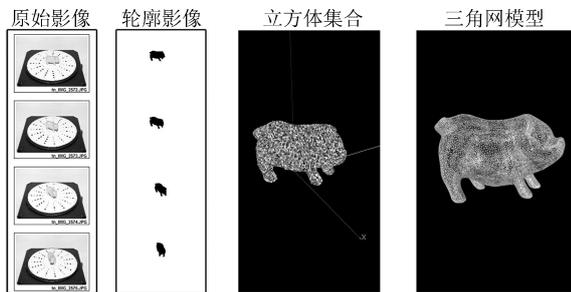


图 2 常规空间雕刻重构流程—小猪玩偶

Fig. 2 Regular space carving reconstruction procedure—  
a pig puppet

本文基于序列轮廓线的重构方法借鉴了以上的空间切割过程,但是用于剔除非目标区域的单元并不是像素点,而是轮廓线段.这主要是由凸面目标的外形特点决定的.凸面目标影像中的轮廓线段具有其特殊的几何意义,它是对目标物体的轮廓进行分割的形式之一<sup>[23]</sup>,能直观地表达空间点的可视与否<sup>[4]</sup>.对影像进行分割后得到目标(黑色)和背景(白色)的轮廓区域,如图 3(a)所示.对轮廓处理得到轮廓线,如图 3(b)所示.在空间雕刻方法中将空间点反投到影像上,若落在目标区域内则保留该点,否则剔除该点,本文的方法则是将轮廓线扩展到空间上,将落在轮廓线之外的空间区域切割掉.



图 3 轮廓影像及轮廓线定义

Fig. 3 The definition of silhouette image and contour

当序列轮廓线切割完毕后,按照式(1)和式(2)对空间锥体取交集得到目标的初始三维表面模型.特别地,针对本文的研究目标—凸面物体,还需对初始模型进行碎面合并等后处理以得到精确的三维刻面模型.本文方法的流程图如图 4 所示.

## 2 基于序列轮廓线的三维刻面重构

### 2.1 高精度闭合轮廓的提取

轮廓线提取的精度直接影响了目标物体的重构精度和测量精度.本文采取了一种结合基于线扩散

函数的精确单点定位方法<sup>[24]</sup>和基于分裂的最小距离误差线段逼近方法对目标物体进行高精度轮廓线提取<sup>[25]</sup>.其中,基于线扩散函数的精确单点定位方法用于对初始的轮廓点进行子像素的重定位,而基于分裂的最小距离误差线段逼近方法用于对轮廓点进行线段逼近得到初始的闭合轮廓直线,最后对构成初始轮廓直线的交点再次利用基于线扩散函数的精确单点定位方法进行重定位并更新轮廓直线<sup>[26]</sup>,得到高精度的目标轮廓直线.

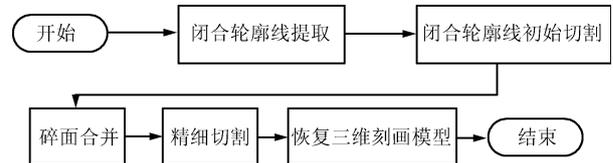


图 4 基于序列轮廓线的重构方法流程

Fig. 4 The procedure of reconstruction based on  
sequence contours

上述高精度闭合轮廓提取的流程如图 5 所示.首先利用二值分割、边缘检测、边缘细化、链码跟踪等常用的图像处理方法得到目标的初始轮廓.接着利用基于线扩散函数的精确单点定位方法对轮廓点进行子像素级的重定位,然后利用基于分裂的最小距离误差线段逼近方法对轮廓点进行线段逼近,从而得到被测目标的初始轮廓直线段,接着利用基于线扩散函数的单点定位算法对初始轮廓直线段进行重定位,最后对相邻轮廓直线段进行求交运算计算分割点,形成完整的闭合轮廓.

### 2.2 序列轮廓线的坐标转换

单帧的闭合轮廓线只能表达局部的形状信息,是目标的某个刻面在当前视角影像上的投影.若要恢复完整刻面的形状,需要从尽量多的视角采集刻面的轮廓线,本文中多视角的影像是通过旋转测量的方式获取.如图 6 所示,固定相机,利用旋转台采集多个视角的目标图像,处理后得到基于相片坐标系的序列轮廓线.为进行后续的切割处理,不同视角的轮廓线坐标需首先转换到统一的全局坐标系下.本文中的全局坐标系  $O-XYZ$  定义为:以旋转平台中心轴与旋转平台平面的交点为原点  $O$ ,以旋转平台中心轴为  $Z$  轴,以目标物体旋转角度为  $0^\circ$  时,从原点出发平行于相机主光轴的方向为  $Y$  轴,按照左手原则确定  $X$  轴.当旋转平台足够水平且旋转角度精度足够高时,可认为  $X$  轴与旋转平台所在平面保持平行.  $C_0, C_1, C_2, \dots, C_m$  表示相机光心位置,  $C_0$  为初始位置,  $\pi_0, \pi_1, \pi_2, \dots, \pi_m$  表示像平面,  $\alpha$  表示旋转台步进旋转的角度.  $P_0^k$  表示在像平面  $\pi_0$  上的轮廓线  $S_0$  上的第  $k$  个点.

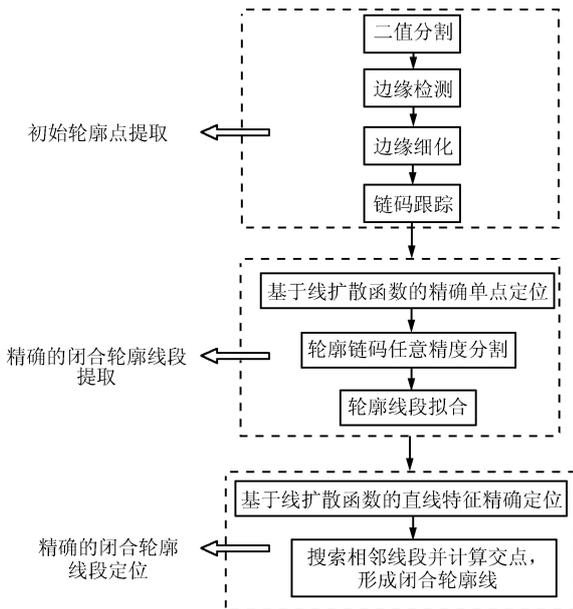


图 5 高精度闭合轮廓线提取流程  
Fig. 5 The procedure of high accuracy closed contour extraction

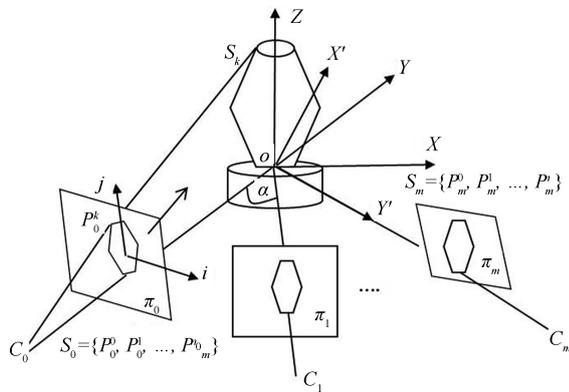


图 6 轮廓线全局坐标系定义  
Fig. 6 The definition of global coordinate of sequence contours

本节将讨论如何将  $P_0^k$  点从像平面坐标系转换到全局坐标系  $O - XYZ$  中. 设在初始位置处, 原点  $O$  在像平面  $\pi_0$  上的像素坐标为  $(i_0, j_0)$ , 首先将  $P_0^k$  的齐次坐标平移至以  $(i_0, j_0)$  为原点的坐标系中, 如下式

$$P_0^k = [i_k - i_0, j_k - i_0, 1] \quad (3)$$

接着将像平面坐标沿着  $Y$  轴投影到  $XZ$  平面上, 若令相机长宽方向上的像素大小分别记为  $\mu_x, \mu_y$  (该参数在相机标定阶段获取), 则此时  $P_0^k$  点在全局坐标系  $O - XYZ$  中的坐标可表达为

$$P_0^k = \left[ \frac{i_k - i_0}{\mu_x}, 0, \frac{j_k - i_0}{\mu_y} \right] \quad (4)$$

当采用远心镜头和平行光源实现平行投影时, 与相机光轴平行的光线上的物点都成像在相机靶面上的同一位置, 即在平行投影的约束下位于景深范围内相同尺寸的目标物体轮廓成像大小都一样<sup>[27]</sup>, 因此, 物方轮廓线沿着主光轴进行平移并不会改变轮廓线的几何意义, 基于此原则, 对图 6 中的第  $m$  幅像片来说, 以  $O$  为原点建立一个临时坐标系  $O - X'Y'Z'$ ,  $Y'$  轴为主光轴方向,  $X'$  轴利用右手定律确定, 基于平行投影的特点, 可将像方轮廓线沿  $Y'$  轴平移到  $O - X'Z'$  平面, 而轮廓线的大小并不会发生改变.

同理, 假设在第  $m$  幅相片的相片坐标系中, 轮廓线  $S_m$  中一点  $P_m^k$  的像方坐标为  $(i_mk, j_mk)$ , 原点  $O$  的坐标为  $(i_m0, j_m0)$ , 则该点由相片坐标转换到全局坐标系下的过程可总结如下:

1) 首先将轮廓线  $S_m$  中的点坐标纠正到以原点  $O$  沿主光轴平行投影到相片上的点为原点的坐标系中, 转换公式如式 (5) 所示.

2) 然后根据远心镜头平行投影的特点, 将轮廓线坐标沿着主光轴投影到  $O - X'Z'$  平面, 并将像素坐标变换为带物方单位的坐标, 如式 (6) 所示.

3) 此时, 临时坐标系  $O - X'Y'Z'$  同全局坐标系  $O - XYZ$  之间存在一个由转台运动带来的旋转变换关系, 旋转角度为  $m\alpha$ , 通过旋转变换即可将轮廓线坐标变换到全局坐标系  $O - XYZ$  中, 如式 (7) 所示.

联合式 (5)~(7), 设点  $P_m^k$  的全局坐标为  $P_m^{k'}$ , 则两者之间存在如式 (8) 所示的转换关系. 按照式 (8) 可将所有序列影像的二维相片坐标转换到全局坐标系  $O - XYZ$  下. 值得说明的是, 以下转换后得到的相片坐标同真实的物理坐标只相差一个比例系数 (即上文中提到的  $\mu_x, \mu_y$ ).

$$\begin{bmatrix} i_{mk} & j_{mk} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ -i_{m0} & -j_{m0} & 1 \end{bmatrix} = [i_{mk} - i_{m0} \quad j_{mk} - j_{m0} \quad 1] \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} i_{mk} - i_{m0} & j_{mk} - j_{m0} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{1}{\mu_x} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{\mu_y} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{(i_{mk} - i_{m0})}{\mu_x} & 0 & \frac{(j_{mk} - j_{m0})}{\mu_y} \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\begin{bmatrix} \frac{(i_{mk} - i_{m0})}{\mu_x} & 0 & \frac{(j_{mk} - j_{m0})}{\mu_y} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(-m\alpha) & \sin(-m\alpha) & 0 \\ -\sin(-m\alpha) & \cos(-m\alpha) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{(i_{mk} - i_{m0}) \cos(-m\alpha)}{\mu_x} \\ \frac{(i_{mk} - i_{m0}) \sin(-m\alpha)}{\mu_x} \\ \frac{(j_{mk} - j_{m0})}{\mu_y} \end{bmatrix}^T \quad (7)$$

$$P_m^{k'} = P_m^k M \quad (8)$$

其中,

$$M = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ -i_{m0} & -j_{m0} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{1}{\mu_x} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{\mu_y} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(-m\alpha) & \sin(-m\alpha) & 0 \\ -\sin(-m\alpha) & \cos(-m\alpha) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

### 2.3 序列轮廓线初始切割

首先定义一个包含目标物体的最大外包体, 通过序列的轮廓线依次切割外包体得到目标物体的初始模型. 本节以下部分将说明初始切割的实现过程.

利用式 (8) 将序列的轮廓线转换到全局坐标系中, 此时认为每幅轮廓线都纠正到与初始相机位置平行投影的状态. 如图 7 所示, 设初始外包体为  $V_{init}$ , 将该初始外包体设为立方体, 当前轮廓线为  $S_m$ ,  $C_0$  为相机中心位置, 平行于当前相片摄影的主光轴方向 (在平行投影的状态下, 主光轴方向即为当前轮廓线平面的法线方向), 作轮廓线的平行线, 将形成一个多棱柱, 多棱柱与初始外包体相切, 便形成一个多面体  $V_m$ . 将空间切割过程沿相机视线方向投影到平面上, 如图 8 所示, 考察轮廓线  $S_m$  的一条边  $P_m^k P_m^{k+1}$ , 设多棱柱  $V_m$  的面  $\pi$  与多面体  $V_{init}$  的其中一个多边形  $F_i$  相交于点  $f', f''$ .

在图 8 中,  $O_{S_m}$  为当前轮廓线  $S_m$  的中心,  $f_i^0 \sim f_i^5$  为六边形  $F_i$  的顶点,  $f', f''$  为轮廓线切割的交点. 显然, 当且仅当  $f' \neq f''$  并且  $f', f''$  均位于多面形线段边内而不是其反向延长线的时候, 轮廓线的边  $P_m^k P_m^{k+1}$  所在的面与多边形  $F_i$  才构成切割关系. 轮廓线切割的关键即求出有效的交点  $f', f''$  并更新切割后的多边形  $F_i$ , 设以上关键点的坐标为:  $O_{S_m}(x_o, y_o, z_o)$ ,  $P_m^k(x_k, y_k, z_k)$ ,  $P_m^{k+1}(x_{k+1}, y_{k+1}, z_{k+1})$ ,  $f'(x_1, y_1, z_1)$ ,  $f''(x_2, y_2, z_2)$

在以上的关键点中,  $P_m^k, P_m^{k+1}$  可利用式 (8) 将轮廓线的节点相片坐标转换为全局坐标得到,  $O_{S_m}$  可由轮廓线  $S_m$  上所有节点重心化求出,  $f_i^0 \sim f_i^5$  的坐标可从外包体中取出, 则多边形  $F_i$  的更新可总结为以下步骤:

1) 首先计算  $f', f''$  所在直线  $l_{f'f''}$  的方程, 该直线是面  $\pi$  与多边形  $F_i$  的交线, 设  $F_i$  的面方程如

下:

$$F_i: a_{F_i}x + b_{F_i}y + c_{F_i}z + d_{F_i} = 0 \quad (9)$$

在平行投影的约束条件下, 轮廓线  $S_m$  所在的平面与主光轴垂直, 即平面  $\pi$  与轮廓线  $S_m$  所在的平面垂直. 又  $O_{S_m}, P_m^k, P_m^{k+1}$  与  $S_m$  共面, 过  $O_{S_m}$  向线段  $P_m^k P_m^{k+1}$  作垂线, 连接  $O_{S_m}$  与垂足, 根据  $O_{S_m}, P_m^k, P_m^{k+1}$  三点坐标不难算出由垂足指向  $O_{S_m}$  的方向向量  $\mathbf{v}_1(x_v^1, y_v^1, z_v^1)$ .  $\mathbf{v}_1$  与平面  $\pi$  的法向方向向量共线, 若设平面  $\pi$  的方程为

$$\pi: a_\pi x + b_\pi y + c_\pi z + d_\pi = 0 \quad (10)$$

根据以上的说明以及点  $P_m^k, P_m^{k+1}$  共面的约束, 不难求得平面  $\pi$  的参数如下:

$$\begin{cases} a_\pi = -\frac{x_{v1}}{\sqrt{x_{v1}^2 + y_{v1}^2 + z_{v1}^2}} \\ b_\pi = -\frac{y_{v1}}{\sqrt{x_{v1}^2 + y_{v1}^2 + z_{v1}^2}} \\ c_\pi = -\frac{z_{v1}}{\sqrt{x_{v1}^2 + y_{v1}^2 + z_{v1}^2}} \\ d_\pi = -a_\pi x_k - b_\pi y_k - c_\pi z_k \end{cases} \quad (11)$$

联立式 (9) 和式 (11), 得到直线  $l_{f'f''}$  的方程为

$$l_{f'f''} = \begin{cases} a_{F_i}x + b_{F_i}y + c_{F_i}z + d_{F_i} = 0 \\ a_\pi x + b_\pi y + c_\pi z + d_\pi = 0 \end{cases} \quad (12)$$

2) 分割点  $f', f''$  的求解, 直线  $l_{f'f''}$  方程已知, 多边形  $F_i$  各顶点坐标已知, 根据平面几何的知识, 不难求出  $f', f''$  的坐标.

3) 更新  $F_i$ , 根据第 2 节中所叙述的轮廓线的几何意义, 分割点  $f', f''$  将多边形区域分为背景和目标准两大类, 如图 8 中所示的处于阴影部分的顶点为目标准, 其余点为背景点. 目标准与背景点的区分规则如下: 过顶点  $f$  向直线  $l_{f'f''}$  作垂线, 连接垂足和顶点

$f$ , 得到向量  $\mathbf{v}_f$ . 若  $\mathbf{v}_f \cdot \mathbf{v}_1 \leq 0$ , 顶点  $f$  为背景顶点, 剔除; 若  $\mathbf{v}_f \cdot \mathbf{v}_1 > 0$ , 顶点  $f$  为目标顶点, 保留.

依照此原则, 在图 8 中, 顶点  $f_i^1$  需要剔除, 顶点  $f_i^5$  需要保留. 按照以上的规则判断  $F_i$  的所有顶点, 并将分割点  $f', f''$  加入到保留的目标顶点集合中, 重新连接顶点组成新的多边形  $F_i$ .

以上是轮廓线的一条边对外包体的一个面切割的过程. 设有  $n$  幅轮廓线, 第  $m$  幅轮廓线  $S_m$  的顶点个数为  $n_m$ ,  $S_m$  与外包体切割的结果为多面体  $V_m$ , 对序列轮廓线对应的多面体集合进行求交运算便得到目标物体的初始三维形状, 如下式:

$$V_{obj\_coarse} = \bigcap_{m=0}^{m < n} V_m \quad (13)$$

在实际操作中, 为了提高效率, 采用更新外包体的策略, 即设置一个当前多面体变量  $V_{cur}$ , 未切割前,  $V_{cur} = V_{init}$ , 开始切割时, 轮廓线  $S_m$  对多面体  $V_{cur}$  进行切割, 得到新的多面体  $V_{cur}$ , 切割完毕将当前多面体  $V_{cur}$  更新为  $V'_{cur}$ , 并进行下一次切割, 以此类推, 遍历所有轮廓线, 得到以空间凸多边形表示的目标物体的初始三维形状.

#### 2.4 碎面合并及面更新

设初始三维形状为  $V_{obj\_coarse}$ , 其表面由若干无规律的凸多边形构成, 这远不足以表达目标物体的三维形状. 为了得到更精细的三维刻面模型, 还需进行以下处理: 首先根据邻接面的面积比和角度差对碎面进行合并, 然后以合并后的面为单元, 对初始的外包体重新进行切割, 得到最终的目标物体精确三维模型, 同时还可恢复各刻面的形状.

碎面合并如图 9 所示, 设  $F_i, F_j$  为多面体  $V_{obj\_coarse}$  中相邻的两个面:

$$\begin{cases} F_i: a_i x + b_i y + c_i z + d_i = 0 \\ F_j: a_j x + b_j y + c_j z + d_j = 0 \end{cases} \quad (14)$$

设  $e_{ij}$  为面  $F_i, F_j$  的公共边, 公共边记录了如下的信息:  $Index(F_i)$ :  $F_i$  的索引;  $Index(F_j)$ :  $F_j$  的索引;  $Vertex1$ :  $B$ , 构成  $e_{ij}$  顶点 1;  $Vertex2$ :  $C$ , 构成  $e_{ij}$  顶点 2;  $Angle(F_i, F_j)$ : 平面  $F_i, F_j$  的夹角;  $AreaRatio(F_i, F_j)$ : 平面  $F_i, F_j$  的面积比.

若  $e_{ij} \rightarrow Angle_{ij}$  小于角度阈值  $\theta$ , 或  $e_{ij} \rightarrow AreaRatio(F_i, F_j)$  大于面积比阈值, 则将  $F_i, F_j$  合并, 并删掉一组公共点  $BC$  或  $B'C'$ , 保留两个面的余下点  $A, B, C, D, E, F, A', E', D'$ . 利用这些点进行最小二乘平面拟合, 得到新面  $F_{new}$ :

$$F_{new}: a_{new}x + b_{new}y + c_{new}z + d_{new} = 0 \quad (15)$$

$F_{new}$  的面积为  $F_i, F_j$  的面积之和, 将  $F_i$  的索

引赋给  $F_{new}$ . 并更新原来与  $F_i, F_j$  相邻的多边形的公共边信息, 以邻接边为执行对象, 按以上的步骤遍历  $V_{obj\_coarse}$  中的所有面, 合并符合条件的碎面. 注意以上的步骤对合并后的面重新计算表达方程, 但并不改变顶点的连接关系和坐标值, 所以并不需要更新  $e_{ij}$  中的顶点.

#### 2.5 基于合并面的精细切割

在碎面合并后, 以面为对象, 重新对初始的外包体进行面切割, 其过程如图 10 所示. 面切割后的外包体以公共边来管理, 记录相邻的面索引, 如图 10 中的边  $e_1, e_2, e_3$ , 此时多面体  $V_{obj\_coarse}$  中的面同外包体切割的问题就可以转化为面同公共边相交的问题. 以  $e_1$  为例, 它是外包体中的面  $F_i, F_j$  的公共边,  $V_{coarseobj}$  中的面  $\pi$  与  $e_1$  交于  $A$  点, 联立面  $F_i, F_j, \pi$  的方程来计算  $A$  点的坐标, 如下式:

$$\begin{cases} a_1 x + b_1 y + c_1 z = -d_1 \\ a_2 x + b_2 y + c_2 z = -d_2 \\ a_\pi x + b_\pi y + c_\pi z = -d_\pi \end{cases} \quad (16)$$

同理, 面  $\pi$  同  $e_2, e_3$  交于点  $B$  与  $C$ , 将交点  $A, B, C$  加入到外包体的顶点数组中. 然后连接外包体中的顶点与原点  $O$  来判断该顶点是否需要从外包体中删除, 以  $D$  点为例, 连接  $DO$ , 同平面交于  $E$  点, 若满足式 (17) 的条件, 则将  $D$  点删除, 否则保留  $D$  点.

将  $D$  点从外包体中剔除后, 接着更新公共边  $e_1, e_2, e_3$  的信息, 新增  $AB, BC, AC$  三条公共边到外包体中, 将更新后的外包体作为下一次切割的外包体. 遍历  $V_{obj\_coarse}$  中的所有面, 按照以上规则迭代切割外包体, 最终得到的外包体即为目标物体的精细切割结果  $V_{final}$ .

$$\begin{cases} \|\overrightarrow{ED}\| > 0 \\ \|\overrightarrow{EO}\| > 0 \\ \overrightarrow{ED} \cdot \overrightarrow{EO} < 0 \end{cases} \quad (17)$$

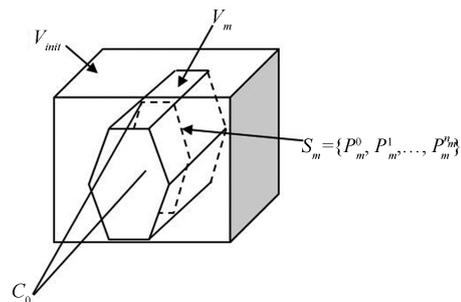


图 7 轮廓线全局坐标系定义  
Fig. 7 The definition of global coordinate of sequence contours

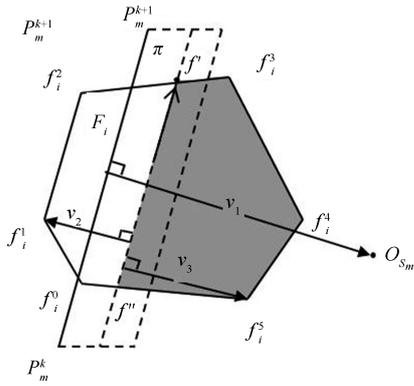


图 8 高精度闭合轮廓线提取流程  
Fig. 8 The procedure of high accuracy closed contour extraction

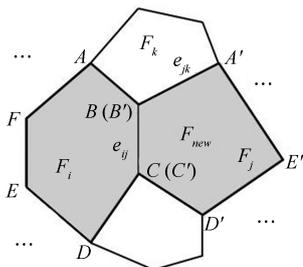


图 9 初始模型中的面合并  
Fig. 9 Merging surface of the coarse mesh

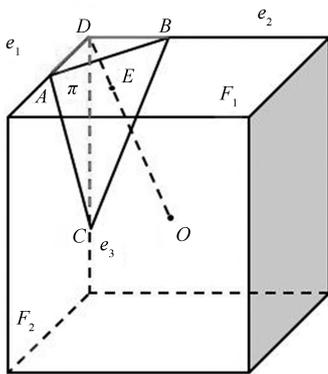


图 10 基于合并面的精细切割  
Fig. 10 Refinement cutting based on merged surfaces

### 3 实验结果

为了测试本文的重构算法, 我们设计了一套单相机的旋转平台设备 (如图 11 所示), 其主要的部件包括 CCD 相机、远心镜头、背光灯、旋转平台、抽气设备、通讯单片机等。其中相机型号为 DH-HV1351UM, 分辨率为  $1280 \times 1024$ , 芯片尺寸为  $1/1.8$  英寸, 镜头焦距为  $16\text{ mm}$ , 景深为  $10\text{ mm}$ , 旋转平台的精度为  $10''$ 。类似的单相机 + 旋转平台的设备广泛应用在利用序列影像重构三维模型的文章中<sup>[28-35]</sup>。背光灯能提供稳定的轮廓影像, 有助于轮

廓线影像的分割。抽气设备位于旋转平台下面, 用于防止目标物体和旋转平台之间的相对移动, 以保证目标物体只做绕平台旋转轴的旋转运动。通讯单片机作为上位机, 负责控制旋转平台和相机, 以保证相机采集时旋转平台已经转到了指定的位置。实际工作时, 首先设定好旋转角度和旋转次数, 由通讯单片机向旋转平台发送运动指令, 旋转到单步的角度, 便启动相机快门采集一帧影像, 并通知计算机软件对该帧影像进行处理, 处理完毕后, 通知单片机继续采集, 直到采集到预先设定的数目。

本文以注射器针头 (直径约为  $3\text{ mm}$ ) 为实验目标 (实物如图 12), 注射器针头的生产过程是将钢管拉直, 然后用机械切割的方式切三次形成针头部分, 其外形是典型的非凹的刻面, 并且在尖端有三个明显的刻面。在生产企业里, 面临着对针头产品进行视觉测量的任务, 其目的主要是剔除次品针头。次品针头分为三种类型: 一是针头倒装, 即装备过程中误将针尖和针管反装; 二是针头弯钩, 即制作针头过程中误操作, 致使针尖弯曲; 三是针头三个刻面的角度和尺寸同设计数据相差较大, 在刺入肌肉时会产生比正常针头更大的疼痛感, 甚至会刺伤肌肉。如果这些次品针头直接用于病人, 将危害病人的身体健康<sup>[36]</sup>。前两种情况通过常规的视觉测量方法还可以进行解决, 但是对于第三种情况就很难应付, 需要从三维数据上测量针头刻面。利用本文的方法可以首先重构出针头的三维刻面模型, 继而可以计算得到刻面角度和尺寸, 然后同标准产品的尺寸进行对比, 达到剔除次品的目的。

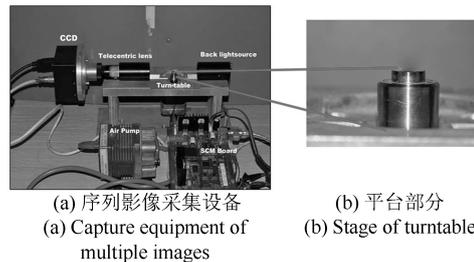


图 11 序列影像采集设备  
Fig. 11 Sequence image capture equipment



图 12 注射器针头实物  
Fig. 12 The picture of pinheads

将注射器针头放置在旋转平台上, 设定采集步进角度为  $1.8^\circ$ , 采集次数为  $100$  次。处理得到的注射器针头轮廓线影像如图 13 (a) 所示, 经过第 1 帧轮廓线初始切割后的凸多面体模型如图 13 (b) 所示,

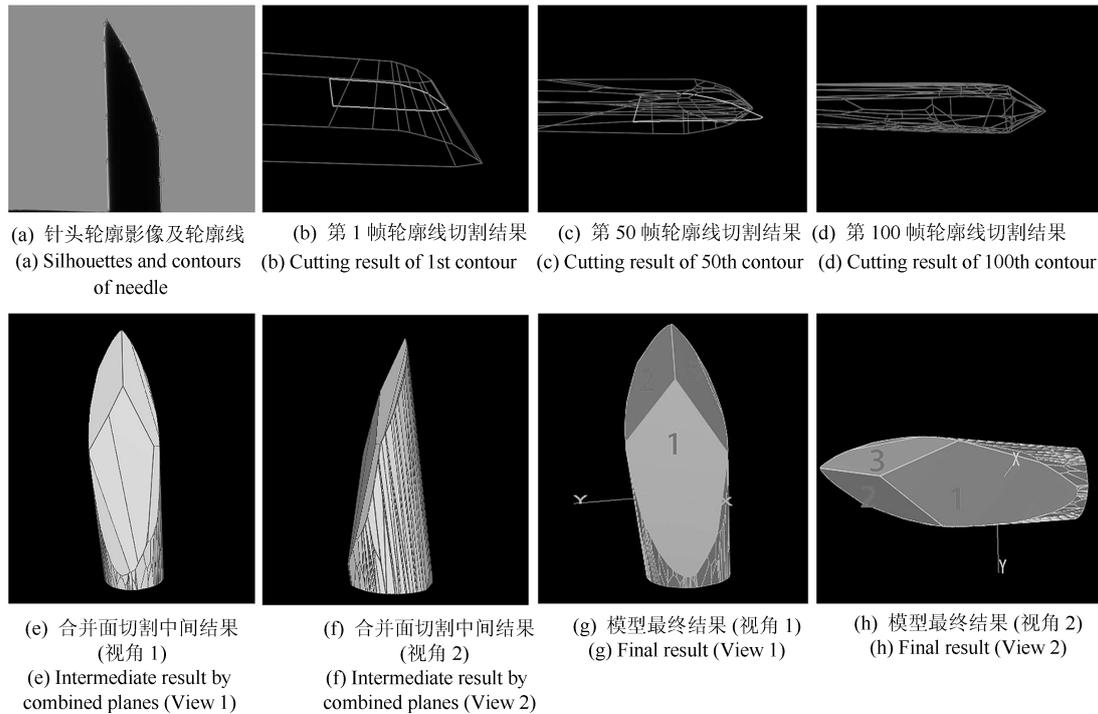


图 13 注射器针头三维重构过程

Fig. 13 3D reconstruction of the syringes pinhead

表 1 重构方法时间消耗 (s)

Table 1 Comparison of ME values and consuming time using several methods for the ping-pong image (s)

影像采集时间 + 闭合轮廓线提取时间	初始切割时间	精细切割时间	合计
11.450	0.750	0.350	12.55

表 2 刻面角度测量值与真实值误差

Table 2 Comparison of ME values and consuming time using several methods for uneven illumination document images

项目	刻面 1 角度 (°)	刻面 2 角度 (°)	刻面 3 角度 (°)
测量值	76.494	75.413	88.612
真值	76.000	76.000	88.000
偏差	0.494	0.587	0.612

其中亮色线为当前帧的轮廓线(下同),第 50 帧闭合轮廓线切割后的凸多面体模型如图 13(c) 所示,第 100 帧闭合轮廓线切割完毕后的模型如图 13(d) 所示,此时即得到了针头的初始三维模型.在该模型的基础上,设置合并角度阈值为  $0.5^\circ$ ,面积比阈值为 10.0,进行碎面合并后再次进行切割的中间结果如图 13(e) 和图 13(f) 所示,切割完毕后得到的精细模型如图 13(g) 和图 13(h) 所示,得到的三个刻面如图 13(g) 和图 13(h) 所示,分别标记为阿拉伯数字 1, 2, 3.

为考察重构方法的执行效率,将以上的重构流

程划分为影像采集、轮廓线提取、基于轮廓线的初始切割、基于面的精细切割四部分,分别统计单次重构中四个部分所耗费的时间,运行算法的计算机配置为:处理器双核 3.0 G,内存 2 G.其中,影像采集和闭合轮廓线提取可以采用多线程编程技术减少执行时间,在统计时视两者为同一流程.执行时间统计结果如表 1 所示,基于 100 帧序列轮廓线的针头重构时间可控制在 15 秒之内.

为考察三维重构模型的精确性,选择了一个数据已知的样品针头进行重建,并分别计算三个刻面的角度数据,同厂商提供的真实数据进行对比,统计参数的误差,结果如表 2 所示.其中刻面角度定义为刻面同水平面的夹角.从表 2 中看出,角度误差在  $0.7^\circ$  之内.

## 4 结论

本文针对纹理缺乏或稀疏、透光、反光的凸面物体的三维重构问题,提出了一种基于序列轮廓线的模型重构方法.首先采集目标物体的序列旋转影像,

接着对影像进行处理得到高精度的轮廓线, 然后利用轮廓线中的线段元素对初始外包体进行切割, 得到粗糙的多面体, 然后根据多面体上的碎面体积比和角度信息对碎面进行合并, 接着将合并后的面对外包体进行基于面的精细切割, 得到能准确表达刻面的三维模型. 以注射器针头 (直径约为 3 mm) 作为实验对象, 证明利用本文的重构算法可得到较为准确的三维模型 (角度误差小于  $0.7^\circ$ ), 效率较高 (小于 15 s), 可达到准实时测量的需求. 本文的方法可以推广到类似的凸面物体如宝石、螺丝、棱镜等物体的三维重构和测量应用中.

## References

- Wang C, Yang W M, Liao Q M. A space carving based reconstruction method using discrete viewing. In: Proceedings of the 7th International Conference on Image and Graphics. Qingdao, China: IEEE, 2013. 607–611
- Liu Guang-Shuai, Li Bai-Lin, He Chao-Ming. Convex optimization of continuous energy model in multiview 3D reconstruction. *Computer Engineering and Applications*, 2013, **49**(1): 19–22  
(刘光帅, 李柏林, 何朝明. 多视三维重构中连续能量模型的凸优化. *计算机工程与应用*, 2013, **49**(1): 19–22)
- Yemez Y, Sahillioglu Y. Shape from silhouette using topology-adaptive mesh deformation. *Pattern Recognition Letters*, 2009, **30**(13): 1198–1207
- Dyer C R. Volumetric scene reconstruction from multiple views. *Foundations of Image Understanding*, 2001, **628**: 469–489
- Lorensen W E, Cline H E. Marching cubes: a high resolution 3d surface reconstruction algorithm. *ACM Computer Graphics*, 1987, **21**(4): 163–169
- Seitz S M, Dyer C R. Photorealistic scene reconstruction by voxel coloring. *International Journal of Computer Vision*, 1999, **35**(2): 151–173
- Kutulakos K N, Seitz S M. A theory of shape by space carving. *International Journal of Computer Vision*, 2000, **38**(3): 1999–2218
- Rankin J R, Boyapati M. Visual hull construction from semi-transparent coloured silhouettes. *International Journal of Computer Graphics & Animation*, 2013, **3**(4): 57–63
- Hernandez Esteban C, Schmitt F. Multi-stereo 3D object reconstruction. In: Proceedings of the 1st International Symposium on 3D Data Processing Visualization and Transmission. Padova, Italy: IEEE, 2002. 159–166
- Mulayim A Y, Yilmaz U, Atalay V. Silhouette-based 3-D model reconstruction from multiple images. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 2003, **33**(4): 582–591
- Wu C L, Wilburn B, Matsushita Y, Theobalt C. High-quality shape from multi-view stereo and shading under general illumination. In: Proceedings of the 2011 Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops. Colorado, USA: IEEE, 2011. 969–976
- Cremers D, Kolev K. Multiview stereo and silhouette consistency via convex functionals over convex domains. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2011, **33**(6): 1161–1174
- Ladikos A, Benhimane S, Navab N. Efficient visual hull computation for real-time 3D reconstruction using CUDA. In: Proceedings of the 2008 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops. Anchorage, AK, USA: IEEE, 2008. 1–8
- Chang B, Woo S, Ihm I. GPU-based parallel construction of compact visual hull meshes. *The Visual Computer*, 2014, **30**(2): 201–211
- Huang C H, Lu D M, Diao C Y. Accelerated visual hulls of complex objects using contribution weights. In: Proceedings of the 7th International Conference on Image and Graphics. Qingdao, China: IEEE, 2013. 685–689
- Hours J H, Schorsch S, Jones C N. Parametric polytope reconstruction an application to crystal shape estimation. *IEEE Transactions on Image Process*, 2013, **30**(2): 201–211
- Franco J, Boyer E. Efficient polyhedral modeling from silhouettes. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2009, **31**(3): 414–427
- Matsumoto Y, Terasaki H, Sugimoto K, Arakawa T. A portable three-dimensional digitizer. In: Proceedings of the 1997 International Conference on Recent Advances in 3-D Digital Imaging and Modeling. Ottawa, Ont., Canada: IEEE, 1997. 197–204
- Niem W. Automatic reconstruction of 3D objects using a mobile camera. *Image and Vision Computing*, 1999, **17**(2): 125–134
- Schmitt F, Yemez Y. 3D color object reconstruction from 2D image sequences. In: Proceedings of the 1999 International Conference on Image Processing. Kobe, Japan: IEEE, 1999. 65–69
- Slabaugh G, Schafer R, Hans M. Image-based photo hulls. In: Proceedings of the 1st International Symposium on 3D Data Processing Visualization and Transmission. Padova, Italy: IEEE, 2002. 704–862
- Montani C, Scateni R, Scopigno R. Discretized marching cubes. In: Proceedings of the 1994 IEEE Conference on Visualization'94. Washington, D. C., USA: IEEE, 1994. 281–287
- Cheung K, Baker S, Kanade T. Shape-from-silhouette of articulated objects and its use for human body kinematics estimation and motion capture. *Computer Vision and Pattern Recognition*, 2003, **1**: 77–84
- Zhang Jian-Qing, Su Guo-Zhong, Zheng Shun-Yi, Zhong Liang. High accurate outline detection algorithm based on line diffusion function model. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2006, **31**(2): 95–104  
(张剑清, 苏国中, 郑顺义, 钟良. 基于线扩散函数的高精度轮廓特征提取算法. *武汉大学学报 (信息科学版)*, 2006, **31**(2): 95–104)
- Li Cai-Lin, Guo Bao-Yun, Li Chang. The high-accurate extraction of line features of object contour. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2011, **40**(1): 66–70  
(李彩林, 郭宝云, 李畅. 目标轮廓直线特征的高精度提取. *测绘学报*, 2011, **40**(1): 66–70)

- 26 Zheng S Y, Li C L, Su G Z, Zhang J Q. High-accurate line feature extraction algorithm based on line diffusion function model. In: Proceedings of the 2007 International Symposium on Multispectral Image Processing and Pattern Recognition. Wuhan, China: SPIE, 2007. 678–683
- 27 Xu Ying-Xin, Li Xing-Fei, Zhu Jia. Application of telecentric lens in rotary workpiece measurement system. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2010, **29**(1): 111–113 (徐颖欣, 李醒飞, 朱嘉. 远心镜头在回转体测量系统中的应用. *传感器与微系统*, 2010, **29**(1): 111–113)
- 28 Fremont V, Chellali R. Turntable-based 3D object reconstruction. In: Proceedings of the 2004 IEEE Conference on Cybernetics and Intelligent Systems. Singapore: IEEE, 2004. 1277–1282
- 29 Beardsley P A, Torr P H S, Zisserman A. 3D model acquisition from extended image sequences. In: Proceedings of the 4th European Conference on Computer Vision-ECCV'96. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 1996. 683–695
- 30 Fitzgibbon A W, Cross G, Zisserman A. Automatic 3D model construction for turn-table sequences. In: Proceedings of the 1998 the European Workshop on 3D Structure from Multiple Images of Large-Scale Environments. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 1998. 155–170
- 31 Eisert P, Steinbach E, Girod B. Automatic reconstruction of stationary 3-D objects from multiple uncalibrated camera views. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 2000, **10**(2): 261–277
- 32 Gardner R J, Paolo G, Thorsten T. Determining a rotation of a tetrahedron from a projection. *Discrete & Computational Geometry*, 2012, **48**(3): 749–765
- 33 Presles B, Debayle J, Pinoli J C. Size and shape estimation of 3-D convex objects from their 2-D projections: application to crystallization processes. *Journal of Microscopy*, 2012, **248**(2): 140–155
- 34 Lin T H, Chang H T, Hu S J. 3D reconstruction of intricate objects using planar cast shadows. In: Proceedings of the 2013 ACM SIGGRAPH 2013 Posters. New York, NY, USA: ACM, 2013. 78–88
- 35 Servin M, Garnica G, Estrada J C, Padilla J M. High-resolution low-noise 360-degree digital solid reconstruction

using phase-stepping profilometry. *Optics Express*, 2014, **22**(9): 10914–10922

- 36 Xiong Bang-Shu, Yu Liang, Ou Qiao-Feng, Du Jing. An image-based quality detection method of syringe needles. *Chinese Journal of Biomedical Engineering*, 2010, **29**(4): 627–631 (熊邦书, 余亮, 欧巧凤, 杜静. 注射器针头合格性图像检测方法. *中国生物医学工程学报*, 2010, **29**(4): 627–631)



**周朗明** 国防科学技术大学航天科学与工程学院博士后. 主要研究方向为数字摄影测量与计算机视觉. 本文通信作者. E-mail: zlm\_mj@126.com

(**ZHOU Lang-Ming** Postdoctor at the College of Aerospace Science and Engineering, National University of Defense Technology (NUDT). His research

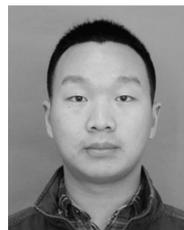
interest covers digital photogrammetry and computer vision. Corresponding author of this paper.)



**张小虎** 国防科学技术大学航天科学与工程学院研究员. 主要研究方向为摄影测量与计算机视觉. E-mail: zxh1302@hotmail.com

(**ZHANG Xiao-Hu** Professor at the College of Aerospace Science and Engineering, National University of Defense Technology (NUDT). His research

interest covers videometrics and computer vision.)



**关棒磊** 国防科学技术大学航天科学与工程学院博士研究生. 主要研究方向为位姿估计与计算机视觉. E-mail: banglei0909@126.com

(**GUAN Bang-Lei** Ph.D. candidate at the College of Aerospace Science and Engineering (NUDT). His research

interest covers pose and attitude estimation and computer vision.)