

重建小凸多面物体面形的新方法

孟繁锋, 屈桢深, 曾庆双, 李 莉

(哈尔滨工业大学 空间控制与惯性技术中心, 哈尔滨 150001)

(mengfanfeng@sohu.com)

摘 要:为实现小凸多面物体面形快速重建,提出了基于投影轮廓的新方法。首先处理被测小凸多面物体各平行旋转角度下纵投影轮廓图像,得到对应轮廓序列集及横截面切片投影长度曲线集,然后由该曲线集得到所有疑似被测物体表平面的索引,将该索引对照各轮廓序列进行筛选,最后经计算得到被测物体的各表平面参数,完成面形重建。实验表明,该方法能够精确恢复被测小凸多面物体面形,与现有方法相比具有设备精简、速度快等特点,适用于针对小凸多面体工件的工程应用。

关键词:投影轮廓;投影长度曲线;面形重建;小凸多面体

中图分类号: TP391.41 **文献标志码:** A

New shape reconstruction method for little convex polyhedrons

MENG Fan-feng, QU Zhen-shen, ZENG Qing-shuang, LI Li

(Space Control and Inertia Technology Research Center, Harbin Institute of Technology, Harbin Heilongjiang 150001, China)

Abstract: A projective silhouette based method was proposed to reconstruct the shape of little convex polyhedron. First, the vertical section projective silhouette images of little convex polyhedrons taken in every parallel rotary angle were processed, and the corresponding set of silhouette sequences and the set of cross section projective length curves were acquired. Next, the index of all the potential surface planes of measured object was gotten from the curves set, then these planes were filtered by comparing with every silhouette sequence, and the parameters of all real planes were obtained by computing. Finally, the shape of little convex polyhedron was reconstructed. Experimental results show that the proposed method can achieve the shape reconstruction of little convex polyhedron accurately. Compared with other methods, it has such advantages as condensed device and fast process speed, and fits for the engineering applications aiming at the little convex polyhedron workpieces.

Key words: projective silhouette; projective length curve; shape reconstruction; little convex polyhedron

0 引言

从现场图像获取物体面形在物体表面重建、医学可视化等非接触测量方面有着广泛的应用。现有方法可归纳为两类:1)基于透射扫描的方法,主要用于医学领域,如 CT 技术、核磁共振技术等^[1-2];2)基于目标图像的方法,可细分为基于单目图像的方法、基于双目像对的方法及基于图像序列的方法。基于单目或双目图像的方法是长期以来的研究热点,包括结构光方法^[3]、从明暗恢复方法^[4]以及立体视觉方法^[5]等。这些方法局限于只能完成单个视角方向上三维面形的测量。近年来,基于图像序列的方法逐渐得到重视,借助图像序列所含充足信息,此类方法可以得到更加精确的 360°面型数据。如邓宝松等提出了基于序列定标图像的欧氏重建算法,实现了空间点的精确重建^[6],刘钢等利用手持相机拍摄的图像序列生成被测目标的可见外壳,从而完成三维重建^[7]。总体来说,上述各类方法普遍存在着计算复杂、现场设置复杂、需要相对昂贵的设备及速度较慢等不足。

工程中,有些应用需要在相对简单、低成本的工艺环境下快速重建被测小凸多面物体适当精度的面形。考虑到上述方法的局限,本文提出一种针对小凸多面物体的基于投影轮廓序列的面形重建新方法。与普适性强的基于投影轮廓的可见

外壳技术^[8]相比,该方法利用了被测凸表面由若干平面构成的特点,由于原理不同,避免了耗时的繁冗计算,在设备及现场设置上极大简化,更适于工程上快速、批量应用。本文摄像机采用通用算法标定,详细算法请参阅文献[9-10]。

1 图像预处理

为便于算法处理及提高精度,首先利用高斯平滑滤波器对包含各种噪声的图像进行滤波,再对滤波后的灰度图像进行二值化处理,其中二值阈值为对原图像进行自动直方图分析的结果。

经过均一化处理,得到图像轮廓点矩阵为:

$$S = \{S(x_i, y_j) \mid i = 1 \sim M, j = 1 \sim N\} \quad (1)$$

其中, $S(x_i, y_j) = \begin{cases} 1, & S(x_i, y_j) \in \text{轮廓} \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$ 。

为得到图像中轮廓边缘信息,对处理后的二值图像 S 进行轮廓跟踪及提取,取得边缘轮廓点向量序列:

$$U = (u_1, \dots, u_k, \dots, u_L) \quad (2)$$

其中: L 为轮廓周长, $u_k = (x_i, y_j)$, $1 < i < M, 1 < j < N$, 且为轮廓边缘。因凸多面物体轮廓为凸多边形,可以通过提取轮廓边缘上的角点实现对边缘的快速拟合。考虑到可靠性、快速性要求,对向量序列 U 使用递归迭代端点拟和算法进行

收稿日期:2008-09-25;修回日期:2008-11-19。 基金项目:国家 863 计划项目(2004AA742209)。

作者简介:孟繁锋(1976-),男,黑龙江哈尔滨人,博士研究生,主要研究方向:图像处理、视觉控制; 屈桢深(1973-),男,黑龙江哈尔滨人,副教授,主要研究方向:计算机视觉、智能机器人、空间控制; 曾庆双(1964-),男,吉林扶余人,教授,博士生导师,主要研究方向:惯性技术、运动控制、智能控制与智能系统; 李莉(1979-),女,山东威海人,博士研究生,主要研究方向:图像处理、计算机视觉、运动估计。

角点提取,求得 T 个角点的特征角点序列:

$$\text{Corner} = (r_1, \dots, r_k, \dots, r_T) \quad (3)$$

其中, $r_k = (x_i, y_j)$, $1 < i < M, 1 < j < N$, 且为角点。

2 数据分析

为便于分析,设转台顺时针旋转一周摄像机拍摄 360 帧,即一帧为一度。又设目标最大高度为 H ,则高度集为:

$$\text{High} = \{h_i = \text{base} + i \mid i = 1, \dots, H\} \quad (4)$$

其中, base 为目标底边在成像平面坐标系上的坐标。

2.1 凸多面物体的纵投影面分析

定义被测凸多面物体的纵投影面为某采样时刻其在平行背景光照射下,投影到摄像机成像平面上形成的暗轮廓。算法只利用投影平面上中线 $x = c_i$ 右侧 X 轴正向信息,其中 c_i 为第 i 帧投影图像中轮廓横向中心 X 坐标值。经预处理及角点检测,可得到一个 $x = c_i$ 右侧的特征角点序列:

$$\text{Corner}_i = (r_1, \dots, r_k, \dots, r_T) \quad (5)$$

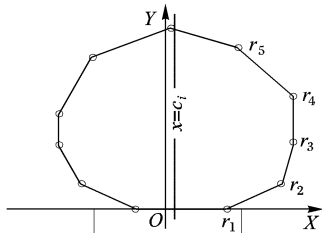
进一步整理,得到第 i 帧的角点标记向量:

$$v_i = (c_1, \dots, c_k, \dots, c_H) \quad (6)$$

其中, $c_k = \begin{cases} x_{c_k}, & C_k \text{ 是角点} \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$, x_{c_k} 为 c_k 点的 X 坐标值。图 1 为

纵投影轮廓及角点位置示意。采样完毕后,可得到被测凸多面物体纵投影面角点标记向量集:

$$C = \{v_1, \dots, v_i, \dots, v_{360}\} \quad (7)$$



影特征向量, b_j 为第 j 帧时该横截面在与其正交的成像平面上正向投影的特征表示, 且有:

$$b_j = \begin{cases} -1, & \text{第 } j \text{ 帧时是局部极小值} \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$

2.3 投影轮廓的综合分析

设参考坐标系为第 0 帧时刻(旋转角为 0°)的坐标系 $O-XYZ$, 其原点位于测量转台面中心点, 且 XOZ 平面平行于测量转台平面。在前述对凸多面物体横截面数据的分析中, 注意到凸多边形横截面经过角度 ε 校正后, 其某条边与投影轴正交所隐含表达的信息是: 此边所在的被测凸多面物体的表平面在此旋转角度下与投影成像平面正交。因此通过投影曲线的各局部极小值, 可以得到对应凸多边形横截面的各条边与投影轴正交时刻被测凸多面物体所对应的旋转角度(即该时刻采集图像的帧序数), 定义为各条边对应表平面在坐标系 $O-XYZ$ 中的方位角 θ 。设多面体表平面正交于成像平面时其投影为线段 \overline{AB} , 方位角 θ 时当前表平面相对 XOZ 平面的倾角 γ 可以通过投影线段 \overline{AB} 在 XOZ 平面坐标系上的斜率求得, 而该表平面与坐标原点 O 的距离 d (单位为 mm) 可由计算对应图像帧内对应轮廓边缘线段到坐标系原点的像素距离, 然后乘以相应比例因子获得。

参考被测凸多面物体横截面旋转投影特征向量集(式(11)), 定义横截面旋转投影特征矩阵为: $Q = \{b_{ij}\}$, $360 \times H$ 。参考被测凸多面物体纵投影面的角点标记向量集(式(7)), 定义角点标注矩阵为: $C = \{c_{ij}\}$, $360 \times H$ 。依照以下规则合并矩阵为 $A = \{d_{ij}\}$, $360 \times H$: 如果 $b_{ij} = -1$, 且 $c_{ij} > 0$, 则 $d_{ij} = c_{ji}$; 其他情况, $d_{ij} = b_{ij} + c_{ji}$ 。

于是, 矩阵 A 每一行描述一条边缘轮廓线, 每一列则描述一条横截面投影曲线。将被测凸多面物体的各个表平面在坐标系 $O-XYZ$ 上的特征数据, 包括表平面的方位角 θ 、在该方位角 θ 下表平面相对于 XOZ 平面的倾角 γ , 以及平面到坐标原点 O 的距离 d 等参数定义为三元组: $(\theta, \gamma, d)_{\pi-XYZ}$, 则在矩阵 A 中进行如下算法可求得被测凸多面物体各外表平面的三元组, 并建立表平面索引矩阵: $A' = \{id_{ij}\}$, $360 \times H$ 。

1) 将平面索引矩阵 A' 所有元素清零, 并从 d_{00} 开始从左至右、从上至下搜索矩阵 A ;

2) 当搜索到某个 $d_{ij} = -1$ 时, 分别找到同行左、右方向上与其相隔距离最近的大于零的 d_{ik} 与 d_{il} , 其中 $0 < k < j$, $j < l < H$;

3) 此时, 当前所求表平面的方位角为: $\theta = i$, 倾角为: $\gamma = (l - k) / (d_{il} - d_{ik})$, 平面到坐标原点 O 的距离则为 $d = (d_{ik} \sin \gamma + k \cos \gamma) \cdot fac$, 其中 fac 为成像平面像素距离与实际距离的比例因子, 可以通过摄像机焦距及成像平面到转台中心距离求得;

4) 将得到的三元组 $(\theta, \gamma, d)_{\pi-XYZ}$ 添加到链表 L 中, 并在 A' 中记录其在链表中的序号 $id_{ik} = l$;

5) 若未搜索到矩阵末尾, 则转 2) 继续进行搜索算法。

得到被测小凸多面物体的所有表平面数据, 包括三元组链表 L 以及对应的表平面索引矩阵 A' 之后, 可以实现被测凸多面物体的面形三维重建。

2.4 三维表平面的复原

通过平面三元组 $(\theta, \gamma, d)_{\pi-XYZ}$, 可得到对应平面法向量 $(\sin \gamma \cos \theta, \sin \gamma \sin \theta, \cos \gamma)$, 从而可以得到其平面方程式:

$$x \sin \gamma \cos \theta + y \sin \gamma \sin \theta + \cos \gamma - d = 0 \quad (12)$$

于是, 可以通过 A' 中各索引元素之间的行列关系, 组织相互关联的表平面进行相交运算, 进而获得交线信息, 据此实现该小凸多面物体的面形复原。

3 实验结果

利用 VC++ 编制了验证程序, 并对某锆石样品进行外形参数测量, 然后与标准数据进行比对, 以此验证算法的精度。系统配置为: CPU: P4-2.4B; 内存: 256 MB; 大恒图像采集卡 CG410; CCD 分辨率: 768×576 ; 背景光源: 高亮白光 LED 通过菲涅耳透镜形成平行光; 步进电机: 最大转速 $50^\circ/\text{s}$, 精度 0.2° 。

实验系统硬件部分的实拍照片如图 4 所示。被测小凸多面物体置于测量转台之上, 步进电机驱动转台旋转时, 摄像机持续采集平行背景光源照射下的被测物体轮廓影像, 采集的图像信号传至计算机系统接受算法处理。

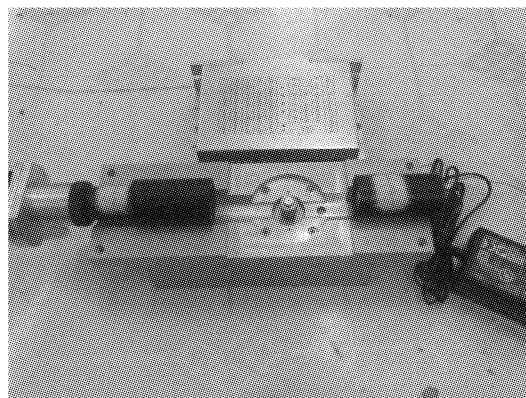


图 4 硬件系统

实测某帧投影轮廓图像如图 5(a) 所示, 图 5(b) 为由数据结果重建的被测样品面形。

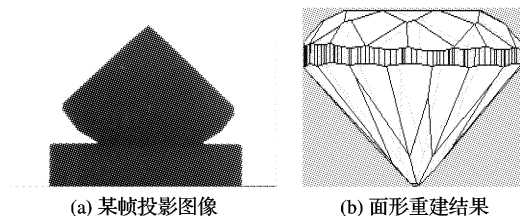


图 5 实验图像

对样品的冠高、全深、直径等特征数据的测量结果如表 1 所示。测量长度精度达到了 $\pm 0.02 \text{ mm}$, 测量角度精度达到了 $\pm 0.2^\circ$ 。在帧率 25 fps 情况下, 视频采集被测锆石样品 360° 投影轮廓图像时间为 14.4 s, 后期数据处理及面形重建时间平均为 4.3 s, 总耗时平均值为 18.7 s, 可以满足批量处理的需要。

表 1 处理数据结果与标准结果对比表

数据项	本文结果	标准结果
diameter	16.49 mm	16.48 mm
total depth	10.26 mm	10.26 mm
table size	10.4 mm	10.38 mm
crown angle	42.3°	42.2°
crown height	2.75 mm	2.75 mm
pavilion angle	40.23°	40.2°
pavilion depth	6.88 mm	6.88 mm
culet size	0.14 mm	0.15 mm
average girdle	0.64 mm	—



图 8 QR 码符号信息和译码结果

3 实验与分析

根据此算法并利用 Altera 公司的 DE2 开发板,结合 NIOS 嵌入式处理器,我们做出了完整的二维条码识别系统,系统频率为 80 MHz,采样分辨率为 320×240 ,使用普通 CCD 摄像头进行图像采集。识别系统通过三次分别对 50 个不同强弱光源下的条码进行了识别,分别用 Otsu 算法、本文二值化算法进行了比较,如图 9 所示。

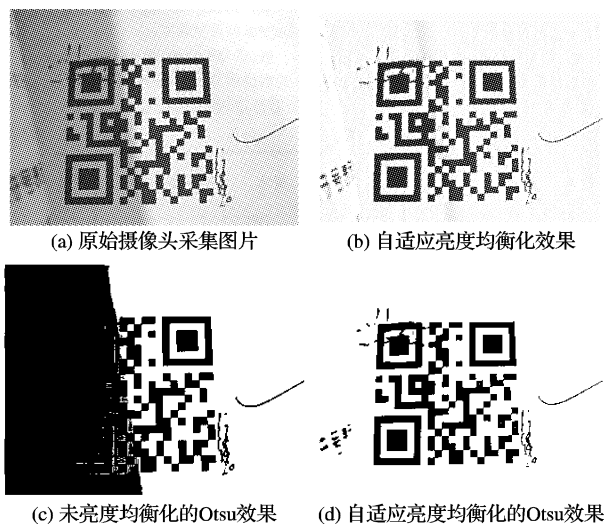


图 9 实验结果

在传统识别算法中,边缘提取、Hough变换、图像旋转、双线性插值等算法都含有大量的浮点运算,对于采集的 320×240 图片,每进行一次图像处理都要进行 $n \times 76800$ 次浮点运算,在嵌入式中将耗费大量的时间。而本文提出的算法中只有少量处理中用到浮点运算,在提高系统速度的同时,更利于我们利用 FPGA 对算法进行硬件化,从而进一步提升系统性能。

表 1 三次实验结果

方法	成功次数			平均识别时间/ms
	第一次	第二次	第三次	
传统识别算法	50	49	50	8360
本文识别算法	49	49	49	750
本文算法部分硬件化后	48	49	48	80

4 结语

本文对 QR 码的整个识读过程进行了研究,包括二值化、定位和译码,提出了一种浮点运算少、利于在嵌入式中运行的算法,并用 NIOS 嵌入式实现了整个系统。对传统算法和本文算法进行了实验比较,发现本文算法通过三次实验平均识别率达到了 98%,而且在运算速度上得到了大大提高,完全能满足嵌入式设备在社会应用中的需要。

参考文献:

- [1] 中国物品编码中心. GB/T 18284-2000 中华人民共和国国家标准快速响应矩阵码 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2000.
- [2] HSIA S-C, CHEN M-H, CHEN T-M. A cost-effective line-based light-balancing technique using adaptive processing [J]. Proceedings of IEEE Transactions on Image Processing, 2006, 19(5): 2719-2729.
- [3] 董强. QR 码识别技术及在手机中的应用 [D]. 青岛: 青岛大学, 2006.
- [4] 祁晓莉. 矩阵式二维条码的生成与解码技术的研究及应用 [D]. 重庆: 重庆大学通信学院, 2007.
- [5] 胡孝鹏, 董强. 基于图像处理的 QR 码识别 [J]. 航空计算技术, 2007, 37(2): 99-101.

(上接第 724 页)

4 结语

本文提出了一种重建小凸多面物体面形的新方法,该方法原理与普适性较强的基于投影轮廓的视觉外壳技术不同。首先,在采集小凸多面物体投影轮廓图像的同时,提取对应旋转角度的轮廓序列以及生成横截面切片投影长度曲线集,采集结束后,针对小凸多面体特点,由投影长度曲线集获得所有疑似的被测物体表面平面的信息,将该信息集合对照投影轮廓集进行筛选,进一步计算筛选结果得到被测小凸多面体的所有表面参数,实现面形快速重建。实验表明,本文方法在保证适当精度的前提下,能够快速重建被测小凸多面物体的面形,且设备精简,成本低,可用于工程环境下批量凸多面体微小工件的外形公差检测,及其特征尺寸的测量等应用。

本文叙述的方法仅利用了每帧轮廓图像的半幅,若利用全幅轮廓图像,预期会使轮廓图像采集时间减少一倍。另外,由文中可知投影长度曲线的精确度极大地影响重建精度,采样角度越细密,则生成的投影长度曲线越精确,重建精度就越高,但速度就越慢。因此,通过调整采样角度间隔能够协调速度与精度。

参考文献:

- [1] 韦巍, 王国荣, 姜立军. 医学 X 射线图像三维重建技术 [J]. 北京生物医学工程, 2004, 23(3): 236-238.
- [2] 金天弘, 刘振宅. 医学图像三维重建的研究 [J]. 医疗卫生装备, 2008, 29(2): 34-36.
- [3] 翟鸣. 基于结构光的三维数据测量方法研究 [D]. 合肥: 安徽大学电子工程与信息科学学院, 2005.
- [4] 徐东平, 张怵. 基于 SFS 方法的三维表面重建算法研究 [J]. 计算机与数字工程, 2008, 36(2): 7-9.
- [5] 李海军, 王洪丰, 沙焕滨. 平行双目视觉系统的三维重建研究 [J]. 自动化技术与应用, 2007, 26(6): 56-58.
- [6] 邓宝松, 高宇, 杨冰, 等. 序列图像中三维空间点的精确重建方法 [J]. 计算机工程, 2007, 33(11): 18-20.
- [7] 刘钢, 王章野, 彭群生. 自由拍摄视点下的可见外壳生成算法 [J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2004, 16(11): 1501-1504.
- [8] LAURENTINI A. The visual hull concept for silhouette-based image understanding [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1994, 16(2): 150-162.
- [9] 邱茂林, 马颂德, 李毅. 计算机视觉中摄像机定标综述 [J]. 自动化学报, 2000, 26(1): 43-55.
- [10] 周富强, 郝继贵, 杨学友, 等. CCD 摄像机快速标定技术 [J]. 光学精密工程, 2000, 8(1): 96-100.