基于结构光扫描数据点的内表面重建方法

李 章 周富强 张广军

(北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院, 北京 100083)

摘 要: 提出基于结构光扫描获取的特征点重建物体内表面的方法. 结构光扫描获取原始数据精度较高,但是存在数据密度不均的问题. 通过剔除测量方向部分冗余数据点和插补扫描方向的稀疏数据,对原始三维数据密度进行适当调整,然后采用基于局部切平面簇的方法对调整后的数据点云进行表面重建. 在某一特征点的邻域构造对应于该点的局部切平面,通过局部切平面簇逼近原始表面,采用 Marching cubes 算法提取等值面,得到三维表面重建的初始网格,根据优化算法简化网格,并采用 Loop 细分法平滑网格,获得描述物体表面特征的重建表面. 该方法解决了由结构光扫描获取的不均匀原始数据点重建物体内表面的问题.

关 键 词: 结构光; 重建; 扫描; 内表面; 数据密度

中图分类号: TP 391.72

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2006)02-0199-05

Reconstruction of inner surface with data points acquired by structured light scanning

Li Zhang Zhou Fuqiang Zhang Guangjun

(School of Instrument Science and Opto-electronics Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: A method for reconstructing the inner surface with feature data points acquired by structured light scanning was proposed. Feature data points acquired by structured light scanning are accurate and the distribution density of those data points is nonuniform. Some redundancy points on the measuring direction were removed by sub-sampling and the new points on the scanning direction were added by interpolating. Then the primitive surface of the measured object was reconstructed using the local tangent plane methods with those of preprocessed data points. One local tangent plane for the neighborhood point set of a certain point was constructed and the primitive surface could be approximated by the tangent plane cluster. Based on extracting the isosurface through Marching cubes algorithm, the initial meshes were obtained and the meshes were optimized through an energy function. Then the smooth surface was obtained through Loop subdivision method. It shows that this method can be used for effectively implementing the reconstruction of the inner surface with the nonuniform data points acquiring by structured light scanning.

Key words: structured light; reconstruction; scanning; inner surface; density of data

快速原型/零件制造技术(RPM)是现代先进制造业的一种重要技术手段,即通过数字化测量设备获取物体表面的三维空间数据,利用逆向工程技术建立产品的三维模型,进而利用 CAM 系统完成产品的制造. 物体表面三维重建是 RPM 中的一个重要环节[1],主要解决物体表面三维数据的获取以及如何利用计算机生成曲面模型.

物体表面三维数据获取手段有多种,如坐标测量机、激光扫描测量设备等. 其中基于结构光原理的激光视觉技术具有大量程、非接触、速度快、精度适中、自动化程度和智能水平高、系统柔性好和适应性强等优点[2],成为获取物体表面的三维

收稿日期: 2004-12-21

作者简介: 李 章(1981-),男,河南信阳人,硕士生, pagen@126.com.

数据的一种重要手段,被广泛采用的主要方式有线结构光扫描[3]、光栅式结构光[4]以及网格结构光[5]等.

获取物体表面的三维数据后,就可以根据这些数据生成物体表面的曲面模. 目前有许多商用软件,如 Geomagic、Surfacer、Imageware 和 Copy-CAD 等逆向工程软件具有表面重建功能. 而这些软件要求物体表面三维数据基本均匀分布,即获取的表面原始数据密度在各个方向相差不大. 实际上,受到物理上的限制,由线结构光扫描获取或者光栅结构光直接获取的物体表面三维数据密度并不均匀. 沿光条分布(测量方向)的数据点密度稠密,存在大量的冗余数据. 光条之间或者垂直光条方向(扫描方向)的数据密度稀疏. 冗余数据的存在,将耗掉更多的计算资源,需要更多的计算时间,而稀疏数据又会影响到重建精度.

为了提高重建速度且具有合理的重建精度,在基于断层数据轮廓插补的方法基础上,对由结构光扫描获取的物体表面三维数据密度进行调整. 在光条方向剔除部分冗余点,在扫描方向作适当插补,获取较为均匀分布的物体表面三维数据. 采用基于局部切平面簇的方法重建出原始表面,通过网格优化和平滑得到最终简洁平滑的重建结果. 试验结果表明,由结构光视觉系统扫描获取的在两个方向数据密度严重不均的情况下,所提出的方法能够有效地重建出物体原始表面.

1 数据密度的调整

基于结构光的激光视觉内表面扫描测量,在测量方向可以获得稠密数据,在扫描方向数据比较稀疏,设数据点在测量方向的间隔为 d_m 和扫描方向的间隔为 d_s. 图 1 为基于线结构光扫描获取的物体内表面三维数据,其中 $d_m/d_s \geqslant 10$. 数据冗余会增加运算量,稀疏数据会影响重建精度,且重建算法要求数据密度基本均匀. 因此对扫描数据进行测量方向冗余数据点的剔除和扫描方向的插补.

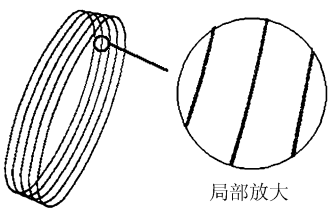


图 1 结构光扫描数据在 2 个方向的不均匀分布

1.1 数据坐标系的调整

结构光视觉系统三维测量坐标系一般建立在摄像机或被测物体上,为方便数据处理,首先将测量坐标系 $Oxyz$ 旋转到 $O'x'y'z'$(称为重构坐标系),使得 Oz'轴平行于扫描方向,如图 2 所示.

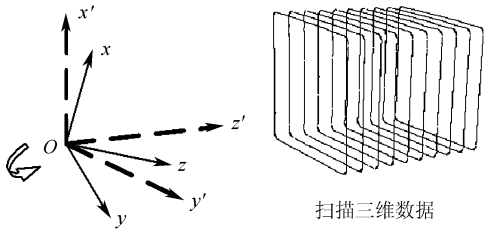


图 2 坐标系的调整

由于扫描线之间是平行关系,因此每个扫描线所在的平面的法向矢量是相同的,设其单位法向矢量为 $\boldsymbol{n}=(n_1 \quad n_2 \quad n_3)^{\mathrm{T}}$,调整后坐标系的 Oz' 轴方向矢量为 $\boldsymbol{z}'=(0 \quad 0 \quad 1)^{\mathrm{T}}$,则将矢量 $\boldsymbol{n}$ 和 $\boldsymbol{z}'$ 对准的旋转轴为:$\boldsymbol{a}=(\boldsymbol{n}\times\boldsymbol{z}')/(\|\boldsymbol{n}\times\boldsymbol{z}'\|)$,旋转角度为 $\varphi=\arccos(\boldsymbol{n}\cdot\boldsymbol{z}')$. 因此 $Oxyz$ 到 $O'x'y'z'$的变换矩阵为

$$\boldsymbol{R}=\boldsymbol{a}\boldsymbol{a}^{\mathrm{T}}+\cos\varphi(\boldsymbol{I}-\boldsymbol{a}\boldsymbol{a}^{\mathrm{T}})+\sin\varphi(\boldsymbol{I}_{\times}\boldsymbol{a}) \quad (1)$$

式中,$\boldsymbol{I}$ 为 3 阶单位正交矩阵;$\boldsymbol{I}_{\times}\boldsymbol{a}$ 为矢量 $\boldsymbol{a}$ 定义的反对称矩阵.

$$\boldsymbol{I}_{\times}\boldsymbol{a}=\begin{bmatrix} 0 & -a_3 & a_2 \\ a_3 & 0 & -a_1 \\ -a_2 & a_1 & 0 \end{bmatrix}$$

设 $\boldsymbol{p}=(x,y,z)^{\mathrm{T}}$ 为测量坐标系下的任意点的坐标矢量,$\boldsymbol{p}'=(x',y',z')^{\mathrm{T}}$ 为其对应的重构坐标系下的坐标矢量,则有

$$\boldsymbol{p}'=\boldsymbol{R}\boldsymbol{p} \quad (2)$$

1.2 测量方向冗余点的剔除

在测量方向同一扫描线上,根据相邻点连线的方向变化来决定数据点的取舍,同时还要考虑扫描线的连续性及数据点分布的均匀性,因此在决定第 k 条扫描线上任意点 p_i 是否可以剔除时考虑以下三个条件:

1) 根据数据点的离散性,用 p_i 处的 2 阶差分来衡量该点的方向变化,计算 $p_i(x'_i,y'_i,z'_k)$ 处的 2 阶差分,即

$$\left.\frac{\Delta^2 y'}{\Delta x'^2}\right|_{p_i}=\frac{y'_{i+1}-2y'_i+y'_{i-1}}{(x'_{i+1}-x'_i)(x'_i-x'_{i-1})} \quad (3)$$

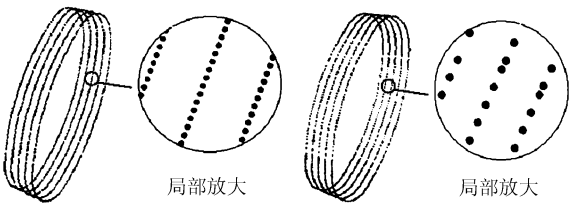
若该点的 2 阶差分小于给定的差分阈值,则该点列入可删除的集合之中;

2) 若同一扫描线内 p_i 的下一个点 p_{i+1}或前一个点 p_{i-1}是不可剔除的,则 p_i 也不能剔除;

3) 若 p_i 与 p_{i-1}的距离大于给定的距离阈值,则 p_i 不能剔除.

按照上述规则可以得到可删除的点集,根据数据密度的需要从中均匀剔除部分冗余点即可.

采用上述方法对图 1 的扫描数据进行处理,数据量由 5 035 个点减少到图 3a 所示的 2 741 个点,再降低采样密度,得到图 3b 所示的 1 546 个点.



a　2 741 个数据点　　b　1 546 个数据点

图 3　测量方向冗余数据的剔出

1.3　扫描方向的插补

为调整扫描方向的数据密度,采用基于连续断层图像轮廓点的插补方法[6]对内表面测量数据在扫描方向插值. 首先进行轮廓点的配对,然后通过这些配对的点进行插补.

假定待插补的两条扫描线中点数较多的为源目标扫描线,另一条为目标扫描线,如图 4 所示,分别用 $\boldsymbol{L}_s$ 和 $\boldsymbol{L}_o$ 表示.

$$\boldsymbol{L}_s = \{p_i, 0 \leqslant i \leqslant n_s\} \tag{4}$$

$$\boldsymbol{L}_o = \{q_j, 0 \leqslant j \leqslant n_o\} \tag{5}$$

其中,$n_s \geqslant n_o$ 在点的位置关系基础上按照升序对每条扫描线上的点进行排序. 把 $\boldsymbol{L}_s$ 上每一点与 $\boldsymbol{L}_o$ 上的点配对时,可以一对一,可以多对一,但不能一对多或是交叉配对. 配对遵循以下步骤:①选取 $\boldsymbol{L}_s$ 任一点作为起点记为 p_0,寻找 $\boldsymbol{L}_o$ 中与 $\boldsymbol{P}_0$ 距离最近点记为 q_0 与 p_0 匹配;②计算 $\boldsymbol{L}_o$ 和 $\boldsymbol{L}_s$ 的点数之比 $k_L = n_2/n_1$;③依次把 $\boldsymbol{L}_s$ 上剩下的点 $p_1, p_2, \cdots, p_{n_s-1}$ 和 $\boldsymbol{L}_o$ 上剩余的点 $q_1, q_2, \cdots, q_{n_o-1}$ 配对. p_1 与 $\boldsymbol{L}_o$ 上第 int(k_L)(对 k_L 取整)个点配对,p_2 与 $\boldsymbol{L}_o$ 上第 int($2k_L$)个点配对,依此类推. 经过坐标系的变换,源扫描线 $\boldsymbol{L}_s$ 将位于平面 $z' = z'_m$ 上,目标扫描线 $\boldsymbol{L}_o$ 将位于平面 $z' = z'_n$ 上. 设 $\boldsymbol{L}_s$ 上点 $p_i(x'_i, y'_i, z'_m)$ 和 $\boldsymbol{L}_o$ 上点 $q_j(x'_j, y'_j, z'_n)$ 匹配,如图 4. 那么位于面 $z' = z'_m$ 和 $z' = z'_n$ 之间的平面 $z' = z'_k$ 上,对应于 p_i 和 q_j 的中间轮廓点 s 的坐标值 $\{x, y, z_k\}$ 可通过线性插值求得.

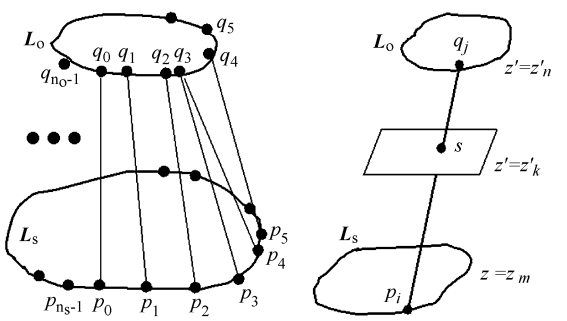


图 4　扫描方向轮廓点的匹配和插补

$$x' = x'_i - (x'_i - x'_j)(z'_n - z'_k)/(z'_n - z'_m) \tag{6}$$

$$y' = y'_i - (y'_i - y'_j)(z'_n - z'_k)/(z'_n - z'_m) \tag{7}$$

由式(6)和式(7)就可以计算出中间轮廓 $\boldsymbol{L}_k$ 上点 s 的坐标. 图 5 为插值的局部放大结果,黑线上的点表示插值前的数据点.

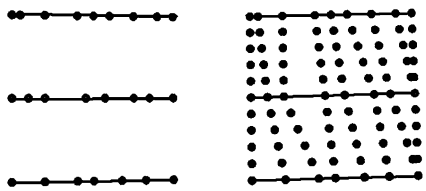


图 5　插值局部放大

图 1 所示的数据经过测量方向的剔除和扫描方向的插补之后得到如图 6 所示的点云,从图中可看出 $d_m/d_s \approx 1$,即调整后的数据点云密度基本均匀.

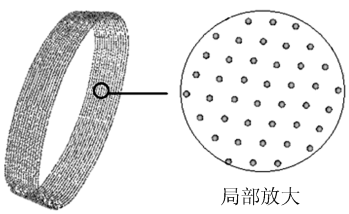


图 6　密度调整后的点云

2　三维数据点云的表面重建

设经过数据密度的调整之后,采用基于局部切平面簇的方法[7]重建出原始内表面. 重建过程主要分为三个阶段,如图 7 所示.



图 7　重建流程

2.1　网格的初始估计

设 $\boldsymbol{A} = \{a_1, a_2, \cdots, a_n\}$ 为经过密度调整之后的内表面数据点云,初步估计出表示物体内表面的网格 M_0. 定义数据点到原始曲面 U 的有向距离函数为 d_U,其零集表示了理想原始面,即

$$Z(d_U) = \{p \mid d_U(p) = 0\} \tag{8}$$

在 U 和 d_U 都未知的情况下,先由数据点估

算出 d_U 的近似 $\tilde{d}_U$,提取出其零集作为原始面 U 的近似,则式(8)为

$$Z(\tilde{d}_U)=\{p \mid \tilde{d}_U(p)=0\} \tag{9}$$

网格的初始估计包括三个步骤:①对应每个数据点 a_i 建立局部切平面 $T_p(a_i)$;②定义任意点到面 U 距离的估计函数 $\tilde{d}_U$;③用 Marching cubes 算法[8]提取出等值面作为原始面的一个近似估计(表示了原物体正确拓扑结构的网格模型).

为每个 a_i 构造一个 $T_p(a_i)$,作为曲面的局部线性近似. $T_p(a_i)$ 的中心点 o_i 和单位法向量 $\boldsymbol{n}_i$ 用 a_i 的一个邻域 $N(a_i)$ 内其他数据点来估计. 任意点 $p\in\boldsymbol{R}^3$ 到 $T_p(a_i)$ 的有向距离定义为

$$d_i(p)=\overrightarrow{po_i}\cdot\boldsymbol{n}_i \tag{10}$$

如图 8 所示,空间任意点 p 到面 U 的近似距离用它和跟它最近的局部切平面之间的距离来表示(即点 p 到这个切平面的中心距离最短)

$$\tilde{d}_U(p)=d_i(p) \tag{11}$$

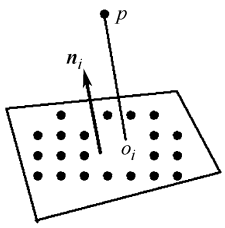


图 8 空间任意点到局部切平面的有向距离

由上式获得 $\tilde{d}_U(p)$ 后,采用 Marching cubes 算法提取等值面作为网格的初始估计. Marching cubes 算法是三维数据场等值面生成的经典算法. 关于 Marching cubes 算法细节这里不再详述.

图 6 所示的点云经过网格的初始估计可以得到一个比较粗略的网格模型 M_0,见图 9.

2.2 网格的优化

如图 9 所示,表面初始估计得到的网格虽然能正确反映原始内表面的拓扑结构,但大量的三角形面片造成的冗余信息浪费计算资源,而且不利于准确的几何建模. 因此在保证拓扑结构不变性和拟合精度的前提下,采用优化函数的方法优化网格模型,减少三角形面片的数目,在网格初始估计 M_0 以及原始点云 $\boldsymbol{A}$ 的基础上得到既简洁又更准确贴近于原始面 U 的网格 M.

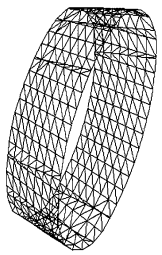


图 9 网格初始估计的结果

定义优化函数

$$E\{K,\boldsymbol{V}\}=E_{\mathrm{d}}(K,\boldsymbol{V})+E_{\mathrm{r}}(K)+E_{\mathrm{s}}(K,\boldsymbol{V})=\sum_{i=1}^{n}d^2(a_i,\gamma_v(|K|))+c_{\mathrm{r}}m+\sum_{\{i,k\}\in K}\zeta\|v_j-v_k\|^2 \tag{12}$$

式中,$\boldsymbol{V}=\{v_1,v_2,\cdots,v_m\}$,网格节点集;$K$ 为单纯复形,表明网格节点连接情况;$\gamma_v(|K|)$ 为网格表面;c_{r} 为网格的简洁性和精确性的平衡系数;m 为网格中的节点个数;ζ 为弹性常量.

优化函数中的 $E_{\mathrm{d}}(K,\boldsymbol{V})$ 表示所有数据点到网格距离平方之和,$E_{\mathrm{r}}(K)$ 与网格中的节点个数 m 成正比,$E_{\mathrm{s}}(K,\boldsymbol{V})$ 与网格中所有点两两距离的平方和成正比,用来约束前两项的优化结果. 系数 c_{r} 越大,网格越简洁,但网格的精确性会随之下降,ζ 决定了 $E_{\mathrm{s}}(K,\boldsymbol{V})$ 的约束能力. 文中优化网格时,系数 c_{r} 取 10^{-4},ζ 依次取 $10^{-2},10^{-3},10^{-4},10^{-8}$ 共 4 次调用优化过程的结果.

以网格初始估计结果 M_0 的节点集 $\boldsymbol{V}_0$ 和单纯复形 K_0 为初值,对 K 和 $\boldsymbol{V}$,即网格节点的位置以及节点之间的连接顺序进行优化处理. 优化过程分为固定 K 对 $\boldsymbol{V}$ 的连续优化过程和固定 $\boldsymbol{V}$ 对 K 的离散优化过程. 初始网格经过优化后在不改变原始拓扑结构的情况下,三角形面片数目大幅下降,如图 10 所示.

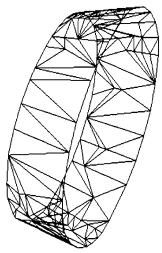


图 10 网格优化的结果

2.3 网格的平滑

优化之后得到的表面网格简洁性和精确性得到保障,但是比较粗糙(如图 10),因此采取平滑算法对优化后得到的网格进行进一步的处理. 这里使用适于三角形网格的 Loop 网格细分方法[7].

Loop 网格细分算法是一个逐步细分的过程,每一步的细分中把 1 个三角形分为 4 个小三角形. 把网格优化中得到的结果 M 作为初始控制网格,每一步细分过程可以描述为

$$M^r=(K^r,\boldsymbol{V}^r)\Rightarrow M^{r+1}=(K^{r+1},\boldsymbol{V}^{r+1})$$

即 $\boldsymbol{V}^{r+1}$ 中的节点是 $\boldsymbol{V}^r$ 中节点的组合.

细分之后新的网格中节点分为两类,节点和边点,前者是控制网格中的节点细分之后形成的新点,后者是控制网格中边对应的细分之后的新的节点. 这里用 v^r 代表 $\boldsymbol{V}^r$ 中一个节点,其相邻点为 $v_1^r,\cdots,v_n^r$. 用 v_i^{r+1} 作为 $\boldsymbol{V}^{r+1}$ 中对应于边 $v^r v_i^r$ 的一个边点,v^{r+1} 为 $\boldsymbol{V}^{r+1}$ 中对应于 $\boldsymbol{V}^r$ 的一个节点,如图 11 所示.

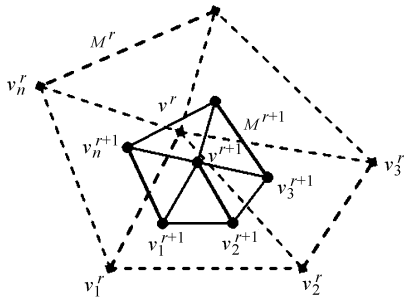


图 11　控制网格节点分类

v^{r+1} 和 v_i^{r+1} 可以根据下面的公式由 $\boldsymbol{V}^r$ 得到

$$v^{r+1} = \frac{\alpha(n)v^r + v_1^r + v_2^r + \cdots + v_n^r}{\alpha(n) + n} \tag{13}$$

$$v_i^{r+1} = \frac{3v^r + 3v_i^r + v_{i-1}^r + v_{i+1}^r}{8} \qquad i = 1,\cdots,n \tag{14}$$

式中　$\alpha(n) = n(1 - \beta(n))/\beta(n)$

$$\beta(n) = \frac{5}{8} - \frac{(3 + 2\cos(2\pi/n))^2}{64}$$

图 12 所示是由图 10 所示的优化网格经过 2 次 Loop 细分的结果.

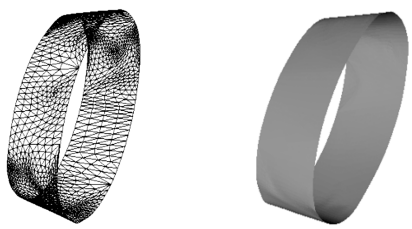


图 12　2 次 Loop 细分和平滑结果

3　算法对其它扫描数据的重建结果

上述处理流程同样适合于任意内表面扫描数据的重建,图 13 是方形内孔测量数据表面重建结果.

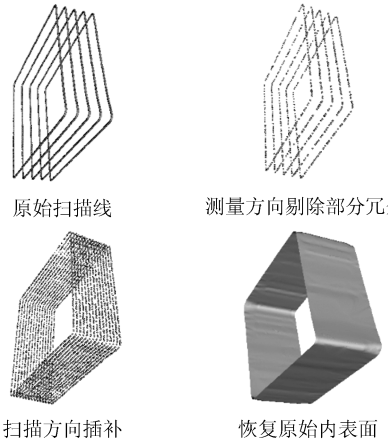


图 13　方形内孔的扫描数据重构结果

4　结 束 语

文中提出的方法对于基于结构光的内表面扫描数据的重建问题效果良好,能够解决实测量过程中的数据密度不均问题,并且通过优化处理可以在一定程度上达到简洁性和精确性的统一,细分则可以达到良好的视觉效果,使网格得到平滑.

参考文献 (References)

[1] 张　畅,张祥林,黄树槐. 快速造型技术中的反求工程[J]. 中国机械工程,1997, 8(5):60 ~ 63
Zhang Chang, Zhang Xianglin, Huang Shuhuai. Reverse engineering in RPM [J]. China Mechanical Engineering, 1997, 8(5): 60 ~ 63(in Chinese)

[2] 周富强,张广军,江洁. 线结构光视觉传感器的现场标定方法[J]. 机械工程学报,2004,40(6):169 ~ 173
Zhou Fuqiang, Zhang Guangjun, Jiang Jie. Field calibration method for line structured light vision sensor[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2004, 40(6): 169 ~ 173(in Chinese)

[3] Park J, DeSouza G, Kak A. Dual-beam structured-light scanning for 3-D object modeling[A]. In:Third International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling[C]. Quebec: Computer Society, 2001. 65 ~ 72

[4] Jalkio J A. Three dimensional inspection using multiple structured light[J]. Optical Engineering, 1985, 24(6): 966 ~ 974

[5] Guisser L, Paryrissat R, Castan S. PGSD: an accurate 3D vision system using a projected grid for surface descriptionsL[J]. Image and Vision Computing, 2000, 18: 463 ~ 491

[6] 张双腾,张太怡. 连续断层图象计算机三维重建轮廓点匹配插补算法的研究[J]. 重庆大学学报,1994, 17(2):1 ~ 5
Zhang Shuangteng, Zhang Taiyi. Study on computer 3D-reconstruction algrithm of the contour points matching interpolation for serial cross images[J]. Journal of Chongqiong University, 1994, 17(2): 1 ~ 5(in Chinese)

[7] Hugues Hoppe. Surface reconstruction from unorganized points [D]. Washington D. C:University of Washington,1994

[8] Lorensen William E, Cline Harvey E. Marching cubes: a high resolution 3D surface construction algorithm [J]. Computer Graphics, 1987, 21(4): 163