

文章编号 1004-924X(2015)增-0534-06

虚拟试衣中的曲面配准

李晓捷^{1*}, 王小波¹, 宋丽梅²

(1. 天津工业大学 艺术与服装学院, 天津 300387;

2. 天津工业大学 电气工程与自动化学院, 天津 300387)

摘要:研究了三维光学测量法在人体测量及虚拟试衣曲面配准中的应用。利用双目视觉系统获得 1:1 的三维人体数据, 然后对原始三维人体数据进行数据处理, 获得精确人体模型, 最后使用已有的服装数据进行虚拟试衣。为了简化试衣方法, 将人体模型及服装模型视为刚体模型, 根据两模型的高斯曲率及平均曲率极值点改进算法获得人体和服装的关键特征点, 并将特征点对应集作为粗匹配矩阵。使用非线性最小距离优化算法—Levenberg-Marquardt 算法, 把模型关键特征点的最小距离作为误差参数, 从而得到特征对应点集的优化变换矩阵, 以减小实验配准误差。实验证明, Levenberg-Marquardt 优化算法对于曲面配准有效, 误差设为 10 mm 时, 迭代次数为 33 时收敛速度较好。该方法简单、有效、稳定, 对三维服装的计算机辅助设计、个性化虚拟试衣的发展具有一定的促进作用。

关键词:三维光学; 曲面配准; 虚拟试衣; 曲率; Levenberg-Marquardt(LM)算法

中图分类号:TP391.3 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20152313.0534

Curvature surface registration in virtual try-on garment

Li Xiao-jie^{1*}, Wang Xiao-bo¹, Song Li-mei²

(1. Institute of Art & Fashion, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300387, China;

2. College of Electrical Engineering and Automation,

Tianjin Polytechnic University, TianJin 300387, China)

* Corresponding author, E-mail: lixiaojie@tjpu.edu.cn

Abstract: This paper focuses on applications of 3D measurement to the human body measuring and curvature surface registration of virtual trying on garment. In which, the binocular vision was used to get 3D human body data of 1:1 scale; then the 3D human data were processed to obtain a precise human model; finally, the garment data were taken to implement the trying on garment. To simplify the try-on method, the human model and the garment model were treated as a rigid, and the extremum point of the Gaussian curvature and the mean curvature of the two models as a matrix of coarse matching. To reduce the registration error, nonlinear minimum distance optimization algorithm, Levenberg-Marquardt algorithm, was used, and the model of key feature points of minimum distance was taken as error parameters to obtain optimal transform matrix of corresponding feature point sets. Experimental results verify that Levenberg-Marquardt optimization algorithm for surface registration is effective, where the error setting is 10 mm and the iteration number is 33 times. It is a simple, effec-

收稿日期:2015-06-02;修订日期:2015-06-23.

基金项目:天津市高等学校科技发展计划基金资助项目(No. 20130324);国家自然科学基金面上项目(No. 61078041)

tive and stable fitting algorithm for promoting the research of 3D garment Compute Aided Design (CAD) and personalized virtual try-on.

Key words: 3D optics; surface registration; virtual try-on garment; curvature surface; Levenberg-Marquardt(LM) algorithm

1 引言

网络服装购物已经越来越受年轻人的欢迎,但是服装是个性化商品,尺码大小、面料等因素给网购服装带来了一定的风险。虚拟试衣能让购物者快速试穿不同衣服,直观地从不同角度展示服装的试穿效果,辅助用户在线快速购买衣服。因此近年来成为网络服装商店关注的热点,也成为服装计算机辅助设计(Computer Aided Design, CAD)领域的研究热点。

三维物体测量广泛应用于机械工程,医学研究,游戏动画及服装 CAD 领域。为了获得高精度的三维物体点云数据,曲学军等提出了激光扫描结合双目视觉的测量方法,利用精确提取的光纹中心线与极线约束准则来匹配对应点^[1]。刘晓利研究了利用 3 节点传感器测量大型三维物体,采用基于相位映射的结构光测量方法,制作了三维标靶标定求得相机径向、切向畸变系数,利用 ICP(Iterative Closet Point)方法配准数据,最后比对了测量数据与模型^[2]。王欣等人利用点云边界特征的改进 ICP 算法对初始点云进行配准,然后进行精确配准,并给出了提高速度和精度的实验数据^[3]。王道档等人研究了 Levenberg-Marquardt 算法在三维坐标测量方面的应用,利用二重迭代算法重构出点衍射源的三维坐标,从而提高了三维坐标精度^[4]。张松提出了一种多波长移相的数字条纹投影算法,可以扩大测量范围,并且可以测量不连续的物体^[5]。本课题组研究了基于 3 种频率的三维重建方法^[6],比已有的多波长数字投影方法测量速度快,测量精度高,适合应用于快速测量场合,并且在已有三维测量方法的研究基础上,构建了精准的三维人体模型,并应用于虚拟试衣中。

早期虚拟试衣技术采用质点弹簧系统方法,但是此种方法计算量大,碰撞检测与响应时间不稳定,不适合在线试衣。Mathieu 等人对比了隐式与显式积分,线性与非线性质点在 2D、3D 虚拟

织物动画中的仿真实现,从隐式积分中得到一种综合方法,首先计算出隐式积分,然后修正积分中的动力值,结合修正值实现碰撞与约束,利用非线性质点减化了碰撞约束条件,该文中提出的新的隐式积分算法简单、稳定,适用于虚拟实时系统,提高了动作实时的可视化^[7]。

本文研究了三维光学测量方法在人体测量及虚拟试衣曲面配准中的应用。首先介绍了人体及服装模型曲面顶点高斯曲率算法,将人体模型及服装模型看作刚体模型,根据两模型的高斯曲率及平均曲率极值点改进算法获得人体和服装关键特征点;然后介绍了基于 Levenberg-Marquard 优化算法的配准方法,把模型的关键特征点最小距离作为误差参数,从而得到特征对应点集的优化变换矩阵,以减小实验配准误差;最后根据实验数据分析了三维试衣效果。

2 人体模型与服装模型的配准算法

2.1 人体及服装模型曲面顶点高斯曲率算法

本文首先采用三维光学测量设备测得人体点云,然后进行曲面重建,利用获得的人体模型数据进行三维虚拟试衣。人体曲面三角网格模型如图 1 所示,服装三角网格模型如图 2 所示。



图 1 人体曲面模型图

Fig. 1 Body model



图 2 服装三角网格图

Fig. 2 Triangular grid graph of cloth

服装模型能否与人体模型配准精确,人体及服装关键点的提取是关键。设曲面 $f(x, y)$ 在某点处的两个主曲率分别为 k_1, k_2, k , 即为该点处的高斯曲率, $k = k_1 \times k_2$ 。假设已知曲面上 3 点 $A(x_1, y_1, z_1), B(x_2, y_2, z_2), C(x_3, y_3, z_3)$, 可确定球的球心坐标为 $D(x_0, y_0, z_0)$, 从而可以得到矢量 $\mathbf{u} = C - B = (u_1, u_2, u_3), \mathbf{v} = A - B = (v_1, v_2, v_3)$, 将矢量 \mathbf{u}, \mathbf{v} 坐标代入球体表达式 $x^2 + y^2 + z^2 = r^2$, 整理后得出:

$$\begin{cases} x_0 u_1 + y_0 u_2 + z_0 u_3 = \frac{\hat{u}B\mathbf{u}^2 - \hat{u}B\hat{u}^2}{2} \\ x_0 v_1 + y_0 v_2 + z_0 v_3 = \frac{\hat{u}A\mathbf{u}^2 - \hat{u}B\hat{u}^2}{2} \end{cases} \quad (1)$$

根据 B 点到球心的线段与 \mathbf{u}, \mathbf{v} 矢量共面则有:

$$\begin{vmatrix} u_1 & v_1 & x_0 - x_2 \\ u_2 & v_2 & y_0 - y_2 \\ u_3 & v_3 & z_0 - z_2 \end{vmatrix} = 0. \quad (2)$$

联合公式(1)、(2), 求得 D 的坐标, 则 B 点曲率半径单位矢量为:

$$\mathbf{k} = \frac{(x_0 - x_2, y_0 - y_2, z_0 - z_2)}{(x_0 - x_2)^2 + (y_0 - y_2)^2 + (z_0 - z_2)^2} \quad (3)$$

同时可计算出曲面上该点的单位法矢 $\mathbf{n} = (\mathbf{u} \times \mathbf{v}) / |\mathbf{u} \times \mathbf{v}|$, 求解微分几何方程, 可得高斯曲率 K , 曲面的平均曲率 H 。借鉴洪梅^[8]张雨禾^[9]等的特征提取算法, 本文根据一般人体及服装对称的特点, 将人体及服装垂直中分, 只需要寻找一侧的特征点然后镜像即可。首先利用高斯曲率极值点作为一个初始点 P , 然后搜索 P 点的 k 域临近点, 将 $k+1$ 个点用最小二乘法进行局部二次曲面拟合记为, 以点 P 作为起始点搜索这个局部二次曲面上的高斯曲率极值点, 当在 $r_0(u, v)$ 上搜索到曲率极值点 C_1 时, 用点 C_1 的 k 近邻再拟合成一个二次曲面 $r_1(u, v)$, 并以点 C_1 作为起始点搜索这个局部二次曲面上的曲率极值点 C_2 , 然后再以点 C_2 为起始点搜索 k 近邻点拟合二次曲面, 依次类推, 直至搜索到整张曲面上的曲率极值点。所获得的人体点云和服装点云特征对应关键点集记为:

$$\{M_i\} = \begin{bmatrix} M_{x1} & M_{y1} & M_{z1} \\ M_{x2} & M_{y2} & M_{z2} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ M_{xn} & M_{yn} & M_{zn} \end{bmatrix}$$

$$\{B_i\} = \begin{bmatrix} B_{x1} & B_{y1} & B_{z1} \\ B_{x2} & B_{y2} & B_{z2} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ B_{xn} & B_{yn} & B_{zn} \end{bmatrix}. \quad (4)$$

左右侧肩部及胸部局部特征点提取结果 ($k=60$) 如图 3 所示。

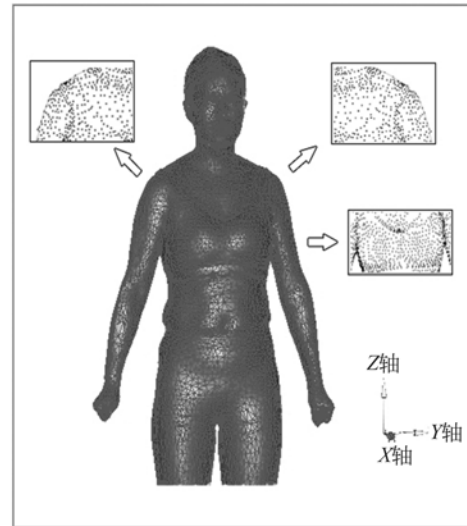


图 3 特征点图

Fig. 3 Feature point image

2.2 基于 Levenberg-Marquard 优化算法的配准方法

Levenberg-Marquard 算法是介于牛顿法与梯度下降法之间的一种非线性优化方法, 能有效处理冗余参数问题, 使代价函数陷入局部极小值的机会大大减小^[10]。它是使用很广泛的非线性最小二乘算法, 克服了牛顿法不能有效处理奇异和非正定矩阵及对初始点要求比较苛刻的缺点^[11]。

Levenberg-Marquard (LM) 算法的公式如下:

$$(\mathbf{J}^T \mathbf{J} + \mu \mathbf{I}) \Delta \mathbf{x} = -\mathbf{J}^T \mathbf{f}, \quad (5)$$

公式(5)中 f 为函数, $f: R^n \rightarrow R^m, m \geq n, f$ 连续二阶可偏导, \mathbf{J} 为 $f(x)$ 的 Jacobin 矩阵, 得:

$$\mathbf{J} = \mathbf{J}(x)_{x_j} = \frac{\partial f_i}{\partial x_j}(x), \mu \geq 0, \quad (6)$$

其中 μ 为约束系数, 当 μ 值为零时, 则变为高斯-牛顿法。当 μ 足够大时, 可以保证 $(\mathbf{J}^T \mathbf{J} + \mu \mathbf{I})^{-1} (-\mathbf{J}^T \mathbf{f})$ 是正定矩阵, 从而保证其可逆。LM 算法通过迭代过程对 μ 进行自适应调整, μ 逐渐减小

时就接近最小距离优化矩阵。权值调整与高斯-牛顿法类似,通过求解 Jacobian 二阶偏导矩阵,能快速收敛得到解,当 μ 逐渐增大时,权值调整与梯度下降法类似,进行全局搜索。

设 \mathbf{R} 是两点集间的 3×3 阶变换矩阵, $R_0 \sim R_3$ 为旋转量, R_4, R_5 为平移量, R_6, R_7 为水平垂直的变化量。 \mathbf{R} 矩阵确定后,人体及服装模型通过 \mathbf{R} 的变换可确定,公式如下:

$$\begin{bmatrix} B_x \\ B_y \\ B_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_0 & R_1 & R_4 \\ R_2 & R_3 & R_5 \\ R_6 & R_7 & R_8 \end{bmatrix}. \quad (7)$$

本系统中应用 LM 算法流程如图 4 所示。

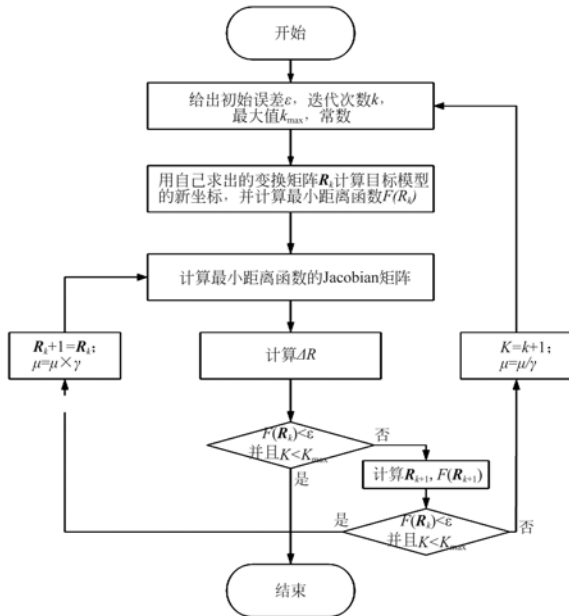


图 4 LM 算法流程图

Fig. 4 Flowchart of LM algorithm

此例中设定误差 ϵ 分别为 5 mm, 10 mm, 迭代次数 $K=1, K_{\max}=50, \mu=10^{-3}, r=10, F(\mathbf{R})$ 为两点之间的距离。

$$\begin{aligned} F(\mathbf{R}) &= \\ & \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n [(X_i - x_i)^2 + (Y_i - y_i)^2 + (Z_i - z_i)^2] \\ &= \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (f_i(\mathbf{R}))^2 = \frac{1}{2} \|\mathbf{f}(\mathbf{R})\|^2 = \\ & \frac{1}{2} \mathbf{f}(\mathbf{R})^T \mathbf{f}(\mathbf{R}). \end{aligned} \quad (8)$$

通过求解 Jacobian 矩阵的 8 个偏导数及增量正规方程,可得到 \mathbf{R} 矩阵为 $[R_0, R_1, R_2, R_3, R_4, R_5, R_6, R_7]^T$ 。 $\Delta \mathbf{R}$ 为 LM 算法形式,计算方

法如式(9)所示:

$$\Delta \mathbf{R} = -\mathbf{J}(\mathbf{R})^T \mathbf{F}(\mathbf{R}) [\mathbf{J}(\mathbf{R})^T \mathbf{J}(\mathbf{R}) + \mu \mathbf{I}]^{-1}. \quad (9)$$

3 实验数据分析

本文给出的初始误差分别为 5 mm 和 10 mm。实验证明,误差为 5 mm 时,LM 优化算法迭代次数为 42 次,收敛速度较快,接近线性收敛;当误差变为 10 mm 时,LM 优化算法的迭代次数为 33 次,收敛速度快,但与刚体初始变换矩阵相比,优化效果不太明显。图 5 为 LM 优化算法收敛过程曲线图。优化矩阵与初始矩阵实验数据见表 1。LM 优化算法局部配准图如图 6 所示。穿着效果图如图 7 所示。优化矩阵与初始矩阵对比数据见表 1。

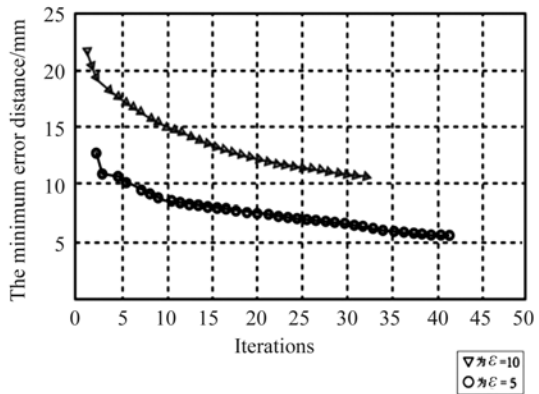


图 5 LM 优化算法收敛过程曲线图

Fig. 5 Convergence process of LM algorithm

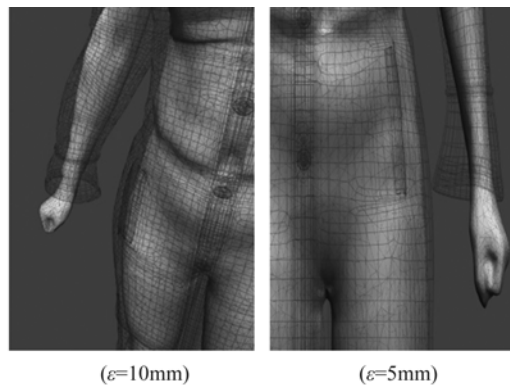


图 6 局部配准图

Fig. 6 Partial registration images

表 1 优化矩阵与初始矩阵实验数据表

Tab. 1 Experimental data of optimizing matrix and initial matrix

误差	优化后变换矩阵 \mathbf{R}	初始变换矩阵 \mathbf{R}	迭代次数
$\epsilon=5 \text{ mm}$	$\begin{bmatrix} 0.7861 & -0.2894 & 1.3264 \\ 0.3426 & 0.6822 & 2.4961 \\ -0.6672 & 0.2694 & 0.8235 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.8527 & -0.2796 & 1.7899 \\ 0.4251 & 0.6324 & 4.0235 \\ -0.6619 & 0.3283 & 0.8322 \end{bmatrix}$	42
$\epsilon=10 \text{ mm}$	$\begin{bmatrix} 0.9861 & -0.4283 & 1.5793 \\ 0.4216 & 0.7925 & 3.8152 \\ -0.7965 & 0.3893 & 0.8724 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.9869 & -0.4987 & 1.5127 \\ 0.4835 & 0.6843 & 3.8151 \\ -0.8216 & 0.4024 & 0.8711 \end{bmatrix}$	33

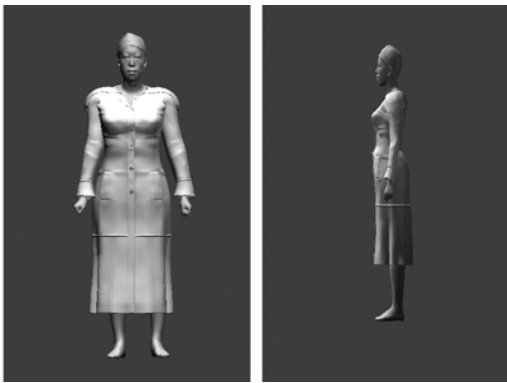


图 7 效果图

Fig. 7 Renderings

4 结 论

本文利用三维光学测量设备测量并建立了人体曲面,减化了人体曲面重建的数学算法处理过程。在获取人体及服装关键特征点时,系统采用

高斯曲率及平均曲率极值点改进算法能够较好地反映曲面的微分特性,首先筛选出高斯曲率极值点作为候选点,然后判定主曲率方向的极值点以搜索该点邻域其余主方向上的极值点。从而可以不用测量每个测量点的曲率值,故搜索效率非常高。将人体及服装模型作为刚体,在经过关键特征点匹配后得出的粗匹配转换矩阵,将这个粗匹配矩阵作为后续优化处理的参照,采用 Levenberg-Marquard 优化算法进行非线性最小距离优化。

另外,本文提出采用两点距离平方和而不是梯度作为误差函数,可以有效简化 LM 优化算法中的误差函数形式,提高了算法精度。在设定实验误差后,迭代次数分别为 42 与 33 次,收敛速度快。经过实验证明,将 LM 优化算法运用在视作刚体模型的人体和服装模型配准优化中,可以快速实现曲面配准的优化,有效地实现了个性化虚拟试衣的过程。

参考文献:

- [1] 曲学军,张璐. 基于双目视觉的三维测量方法[J]. 计算机仿真, 2011, 28(2): 373-377.
QU X J, ZHANG L. 3D measurement method based on binocular vision technique[J]. *Computer Simulation*, 2011, 28(2): 373-377. (in Chinese)
- [2] 刘晓利,彭翔,殷永凯,等. 大尺寸薄壳物体表面的三维光学自动检测[J]. 光学学报, 2011, 31(3): 0312006.
LIU X L, PENG X, YIN Y K, et al.. 3D Auto-inspection for large thin-wall object[J]. *ACTA OPTICA SINICA*, 2011, 31(3): 0312006. (in Chinese)
- [3] 王欣,张明明,于晓,等. 应用改进迭代最近点方法的点云数据配准[J]. 光学精密工程, 2012, 20(9): 2068-2077.
WANG X, ZHANG M M, YU X, et al.. Point cloud registration based on improved iterative closest point method[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(9): 2068-2077. (in Chinese)
- [4] 王道档,王福民,陈茜茜,等. 基于 Levenberg-Marquardt 算法的点衍射三维坐标测量方法[J]. 光学学报, 2014, 34(8): 0812001.

- WANG D D, WANG F M, CHEN Q Q, *et al.*. Three-dimensional coordinate measurement with point-diffraction interferometer based on Levenberg-Marquardt algorithm [J]. *ACTA OPTICA SINICA*, 2014, 34(8): 0812001. (in Chinese)
- [5] ZHANG S. Digital multiple wavelength phase shifting algorithm[C]. *Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering*, 2009, 7432, 74320N-1-74320N-11.
- [6] SONG L M, DONG X X, XI J T, *et al.*. A new phase unwrapping algorithm based on three wavelength phase shift profilometry method[J]. *Optics & Laser Technology*, 2013(45): 319-329.
- [7] MEYER M, DEBUNNE G, OESBRUN M, *et al.*. Interactive. Interactive animation of cloth-like objects for virtual reality[J]. *Journal of Visualization and Computer Animation*, 2001, 12(1): 1-12.
- [8] 洪梅. 点云数据特征提取算法的改进[D]. 东华理工大学, 2013.
- HONG M. *Algorithm Improvement of Feature Extraction of Point Cloud Data*[D]. East China Institute of Technology, 2013. (in Chinese)
- [9] 张雨禾, 耿国华, 魏潇然. 散乱点云谷脊特征提取[J]. *光学精密工程*, 2015, 23(1): 310-318.
- ZHANG Y X, GENG G X, WEI X R. Valley-ridge feature extraction from point clouds[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(1): 310-318. (in Chinese)
- [10] LEVENBERG K. A method for the solution of certain non-linear problems in least squares[J]. *The Quarterly of Applied Mathematics*, 1944, 2: 164-168. (in Chinese)
- [11] 伏燕军, 杨坤涛, 邹文栋, 等. 基于 Levenberg-Marquardt 算法的图像拼接[J]. *激光杂志*, 2007, 28(5): 46-48.
- FU Y J, YANG K T, ZOU W D, *et al.*. Image mosaic based on levenberg-marquardt algorithm [J]. *LASER JOURNAL*, 2007, 28(5): 46-48. (in Chinese)

作者简介:



李晓捷(1979—),女,山东泰安人,硕士,讲师,2006年于天津工业大学获得硕士学位,主要从事图像处理,数字化服装的研究。Email: lixiaojie@tjpu.edu.cn



王小波(1989—),男,安徽合肥人,硕士,助教,2014年于天津工业大学获得硕士学位,主要从事服装 CAD/ERP,数字化服装的研究。E-mail: wangxiaobo@tjpu.edu.cn



宋丽梅(1976—),女,河北秦皇岛人,博士,教授,1999年、2001年、2004年于天津大学分别获得学士、硕士、博士学位,主要从事计算机视觉、三维光学测量、逆向工程和模式识别方面的研究。Email: lilymay1976@126.com