

文章编号: 0258-7025(2010)06-1618-08

线激光三维测量仪中视觉传感器规划方法研究

何炳蔚^{1,2} 周小龙¹

(¹ 福州大学机械工程及自动化学院, 福建 福州 350108
² 天津大学精密测试技术及仪器国家重点实验室, 天津 300072)

摘要 未知三维物体模型自动重建是机器视觉领域中经典研究课题之一, 目前被广泛应用于工业检测、机器人定位与导航、逆向工程和文物修复等方面。首先确定出单目线激光视觉测量系统的可视区域, 由此获得未知模型极限可视表面。通过将两者相结合, 提出面向未知三维模型自动重建的新方法。依据初始视点下所获模型表面信息, 构造未知空间的极限面模型。然后以极限面来预测未知对象的最大表面延拓信息, 结合系统可视区域确定下一视点的可视性判据, 给出预测曲面的可视旋转和平移区间, 并将可视区内能获取最大曲面面积的位置定为一个最优视点的位置。通过对实体模型的自动重构, 验证了方法的可行性及有效性。

关键词 机器视觉; 三维重建; 极限面; 视点规划; 下一最优视点

中图分类号 TP391.4 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20103706.1618

Research of Sensor Planning Method in Line Laser Three-Dimensional Measurement System

He Bingwei^{1,2} Zhou Xiaolong¹

(¹ College of Mechanical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou, Fujian 350108, China
² State Key Laboratory of Precision Measuring Technology and Instruments, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract Automatic reconstruction of unknown three-dimensional (3D) objects is one of the classical research in machine vision, which is widely used in industrial inspection, robot localization and navigation, reverse engineering, and cultural relic restoration etc. A new approach of reconstructing unknown 3D models automatically is proposed. The new algorithm incorporates the visual region of the monocular laser-vision system with the limit visual surface of unknown model and selects the suitability of viewpoints as the NBV on scanning coverage. The limit visual surface is modeled by the known surface data obtained from initial view and is used to predict the maximal unknown object surface information. Then the next view visibility is determined, correspondingly the visual rotation angle and translation zones are obtained. And the position which can obtain the maximal visual surface area in the visibility zone is selected as the next best view position. The experimental results show that the method is effective in practical implementation.

Key words machine vision; three-dimension reconstruction; limit surface; view planning; next best view

1 引 言

基于机器视觉的主动三维视觉传感测量技术, 由于其精度和可靠性较高而广泛应用于三维测量和重建。由视觉系统获取物体三维坐标数据, 重构三

维场景与物体的三维模型, 从而确定物体在三维空间中的形状、大小、位置和方向。近年来, 国内已有众多研究者^[1,2]提出基于机器视觉的三维测量和重建技术。而在三维重建过程中, 如何自动高效地对

收稿日期: 2009-07-22; 收到修改稿日期: 2009-09-18

基金项目: 国家自然科学基金(50605007)、天津大学精密测试技术及仪器国家重点实验室开放基金和福建省高校新世纪优秀人才支持计划(XSJRC2007-07)资助课题。

作者简介: 何炳蔚(1973—), 男, 博士, 副教授, 主要从事机器视觉、逆向工程和快速原型等方面的研究。

E-mail: mebwe@fzu.edu.cn

视觉传感器进行规划,是三维物体自动重建的关键技术之一。传感器规划(或视点规划)的主要任务是设法理解和量化观察目标与传感器之间的关系,并决定出传感器在下一个最优视点(NBV)的空间位置和方向参数,从而以最少的视点获得物体表面三维信息^[3~9]。目前已有众多研究者提出了多种 NBV 算法,例如 Sablatnig 等^[4]提出自边界重建形状的下一视点规划方法,通过比较当前图像和已获图像之间的差异程度来确定下一视点的位置,但由于规划进程所需视点位置过多,该方法需要大量的计算时间和空间。Tarbox^[5]提出基于计算可测性矩阵,并结合掠射角和不可视部分进行视点规划。Scott 等^[6]则在计算可测性矩阵的基础上增加了逐步递增进程以及传感器测量误差约束,最近 Scott^[7]又提出基于改进的可测性矩阵规划算法,有效改善了系统的计算效率。Larsson 等^[8]提出通过建立视觉系统的扫描窗模型,使系统可沿着物体表面三维曲线路径进行自动规划的方法,然而该方法并没有给定扫描平面的拟合精度,且对于尺寸较小物体规划效果并不理想。Li 等^[9]提出了信息熵与 B 样条曲面重构方法相结合的视点规划新方法,但该方法不适合于具有复杂表面的模型,特别是对于存在孔洞表面的模型。

本文针对所用线激光测量设备,通过确定视觉系统的合理可视区域,提出一种面向未知三维物体模型的自动测量和重建新方法,并分析了方法的可行性。

2 视觉系统可视区域及其极限可视表面

2.1 三维激光扫描仪简介

利用三维激光扫描仪(设备工作简图如图 1 所示)对三维物体模型进行测量。其中视觉系统由线激光发生器和 CCD 摄像机组成,可沿 x 方向做往复平移运动,而工作台可绕工作台中心做 360° 的旋转

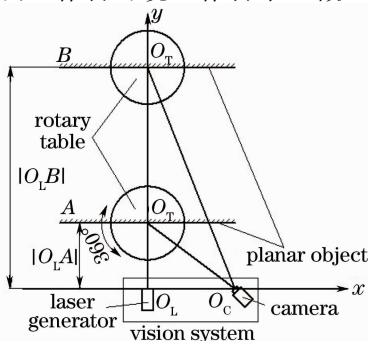


图 1 三维激光扫描仪工作简图

Fig. 1 Sketch of the laser vision system

运动,并可沿 y 方向来回平移。另外,视觉系统可沿垂直于 xy 的平面(z 方向)上下移动,每次移动量刚好为线激光的扫描高度。

2.2 视觉系统可视区域

2.2.1 有效测量深度

当物体与测量系统在某一距离时,利用视觉系统对该物体表面进行三维测量,同时完成表面数据拟合。如拟合精度在许可范围之内,则该距离被视为有效距离,否则视为无效距离。按照此方法,通过沿 y 方向移动工作台(如图 1 所示),很容易获得视觉系统的最近、最远测量距离(记为 $|O_L A|$, $|O_L B|$, 该位置被记为 P_{min} , P_{max}),有效测量深度为 $|O_L B| - |O_L A|$ 。为简化测量数据的拟合过程,此处采用平面物体。虽然该视觉系统中传感器结构参数已知,但是由于所提有效测量深度与物体表面拟合精度有关,因此只有通过实验才能确定两者之间的确切关系。

2.2.2 视觉系统可视极限角

视觉系统的遮挡情况分两种:1)物体对线激光的遮挡;2)物体对 CCD 摄像机的遮挡,确定可视角就是为了消除这两种遮挡。在测量范围内选取任一平面 P_{arb} ,使其绕工作台旋转中心 O_T 做旋转运动(如图 2),直至系统刚好可视物面上 O_T 处的点,由此可得到当前位置下物面法矢与线激光所在平面(简称激光平面)的左(右)可视极限角 $\theta_{il}(\theta_{ir})$,即若过 O_T 的法矢 $n_{il}(n_{ir})$ 在区域 $\theta_{il}(\theta_{ir})$ 内,则该平面可视。

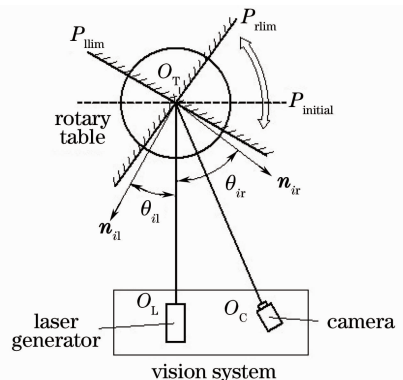


图 2 获取视觉系统可视极限角简图

Fig. 2 Acquiring the visual angle of the vision system

以上仅获得了固定位置的可视极限角,还需进一步确定视觉系统到物面距离与可视极限角的函数关系。首先让物面从 P_{min} 位置开始按步长 $|AB|/n$ 进行平移,每移动一次按图 2 所示方法获得该位置的可视极限角,由此可得 $n+1$ 个位置的左(右)可视极限角 $\theta_{il}(\theta_{ir})$ ($i = 0, 1, \dots, n$)。然后可拟合出可视极限角 θ 与视觉系统到物面距离 d 的关系

$$\theta = c_0 + c_1 d + c_2 d^2 = \sum_{k=0}^2 c_k d^k. \quad (1)$$

针对文中所用测量设备,平面拟合精度取 0.03 mm,按照上述方法通过实验得到如下数据:视觉系统极近测量距离为 $|O_L A| = 64$ mm,极远测量距离为 $|O_L B| = 186$ mm,即有效测量深度为 122 mm。 θ 与 d 的具体数据如图 3 所示,利用最小二乘法进行拟合,最终拟合结果为(单位为 rad)

$$\theta_{il} = \begin{cases} 0.0053d + 0.2731, & 64 \leq d \leq 160 \\ 1.12, & 160 < d \leq 186 \end{cases} \quad (2)$$

$$\theta_{ir} = \begin{cases} 0.0103d + 0.2278, & 64 \leq d \leq 116 \\ 1.42, & 116 < d \leq 186 \end{cases} \quad (3)$$

2.2.3 极限可视曲线与极限可视表面

已知初始视点下的任一边界投影点 $P_0(x_0, y_0)$,

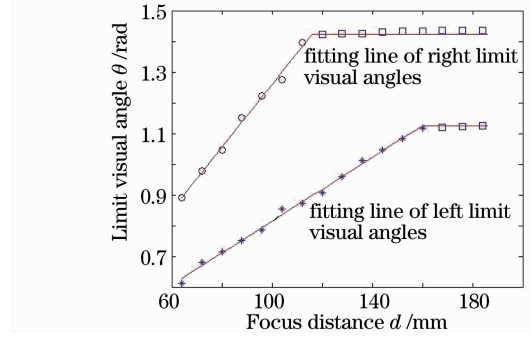
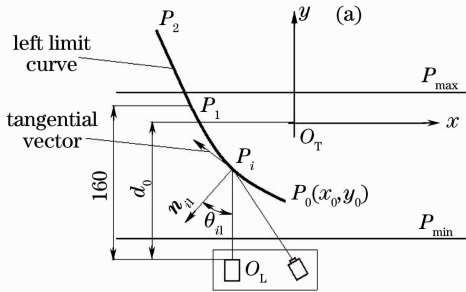


图 3 可视极限角实验数据点及其拟合直线
Fig. 3 Limit visual angles and its fitting lines

过 P_0 可作一条极限可视曲线(极限曲线),其由曲线段 $P_0 P_1$ 和直线段 $P_1 P_2$ 组成,由边界上多条极限曲线可构造出极限可视表面(极限面),如图 4 所示。

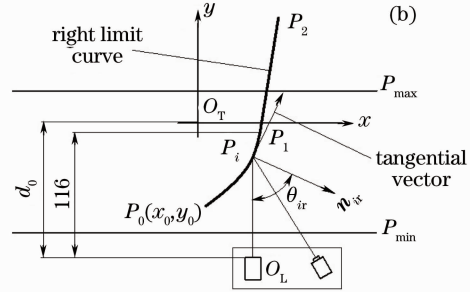


图 4 极限曲线拟合分析简图。(a)左极限曲线;(b)右极限曲线

Fig. 4 Fitting sketch of limit curves. (a) left limite curve; (b) right limit curve

以工作台旋转中心 O_T 建立工作坐标系,任意点 $P_i(x, y)$ 处存在极限可视角 $\theta_{il}(\theta_{ir})$,假设视觉系统到 O_T 的初始垂直距离为 d_0 ,则 $d = |O_L P_i| = d_0 + y$,对左极限曲线 $P_0 P_1 P_2$ [如图 4(a)],由图中几何关系可得

$\frac{\partial y}{\partial \theta_{il}} / \frac{\partial x}{\partial \theta_{il}} = -\tan \theta_{il}$,故结合(2)式有

$$\begin{cases} \frac{\partial x}{\partial \theta_{il}} = -188.7 \cot \theta_{il}, & \theta_{il} < 1.12 \\ \frac{\partial y}{\partial \theta_{il}} = -\tan(1.12) = -2.1, & \theta_{il} = 1.12 \end{cases} \quad (4)$$

因此可得未知空间的左极限曲线方程

$$\begin{cases} x = -188.7 \ln \left[\sin \left(\frac{y + d_0 + 51.5}{188.7} \right) \right] + C_1, & y_0 \leq y \leq 160 - d_0 \\ y = -2.1x + C_2, & y > 160 - d_0 \end{cases} \quad (5)$$

同理,获得未知空间的右极限曲线方程

$$\begin{cases} x = 97.1 \ln \left[\sin \left(\frac{y + d_0 + 22.1}{97.1} \right) \right] + C_3, & y_0 \leq y \leq 116 - d_0 \\ y = 6.7x + C_4, & y > 116 - d_0 \end{cases} \quad (6)$$

若 d_0 (系统自身可直接测定)和物体表面初始投影坐标 $P_0(x_0, y_0)$ 已知,左右极限曲线唯一确定,从而可由多条极限曲线构造出极限面。易知极限面将空间分割为两部分:可视部分和不可视部分。其中极限面外部的为可视部分,内部的为不可视部分。

3 视点规划方法

根据视觉系统的极限测量范围,拟合已获模型边界的极限面模型,从而预测出模型的最大未知区域信息,由此引导视觉系统在最优视点位置依次获得物体表面信息,最终完成未知对象的三维重建。

在初始视点 1 时, 获得物体表面信息投影如图 5 中粗实线 $A_1B_1C_1D_1$ 所示, 取边界扫描线上的点作为初始点, 即可拟合左右极限面 $D_1E_1F_1$ 和 $A_1G_1H_1$, 不可视区域如图中剖面部分, 因此可利用左右极限面来预测未知物体的最大表面延拓信息。在作 NBV 规划时, 下一视点的位置必须满足既能看到视点 1 的部分信息(为保证数据配准要求), 又需满足所消除的不可视区域面积最大。

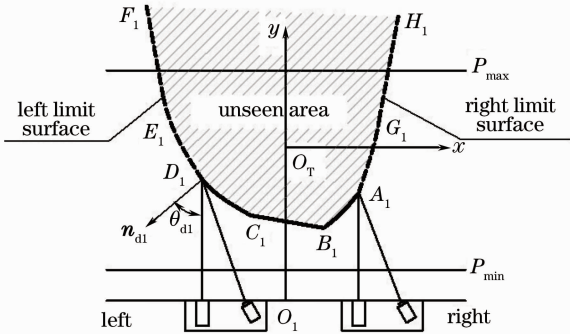


图 5 视点 1 下所获曲面以及未知曲面投影图

Fig. 5 Projection sketch of known and unknown surfaces

视点规划策略如下: 1) 根据初始视点下所获物体边界信息拟合出左(右)边界的极限面, 并以此预

测未知对象的曲面信息, 进而规划下一视点; 2) 给出下一视点可视性判据, 并确定使左(右)预测曲面在系统可视区域内可视的位置参数区间(旋转角度区间和平移区间); 3) 在上述参数区间内搜索能获取最大左(右)预测曲面面积的位置, 并将该位置定义为左(右)NBV 的参考位置; 4) 比较左右 NBV 参考位置下所获可视曲面面积大小, 将大者所在位置作为 NBV 的最终位置。

3.1 下一视点可视性判据

当视点 1 下预测曲面(即极限面)确定后, 即可根据其来分析下一视点的可视性。由 2.2.3 节知, 预测曲面由曲面和平面组成, 此处以左预测曲面为例, 图 5 中 $D_1E_1F_1$, 其中 E_1 为分界点, 进行可视性分析。

1) 曲面 D_1E_1 可视性分析: 当视点 1 下曲面的投影在视点 2 位置时, 如图 6(a) 中 D_2E_2 所示, 过初始点 D_2 做此视点下的左极限面 $D_2E_2I_2L$, 如图 6(a) 中粗虚线部分所示, 由此给出结论, 若始末点 D_2 和 E_2 可视, 则曲面 D_2E_2 上各点均可视。图 6 为曲面可视性分析简图, 图 6(a) 初始点法矢在激光平面左边, 图 6(b) 初始点法矢在激光平面右边。证明如下:

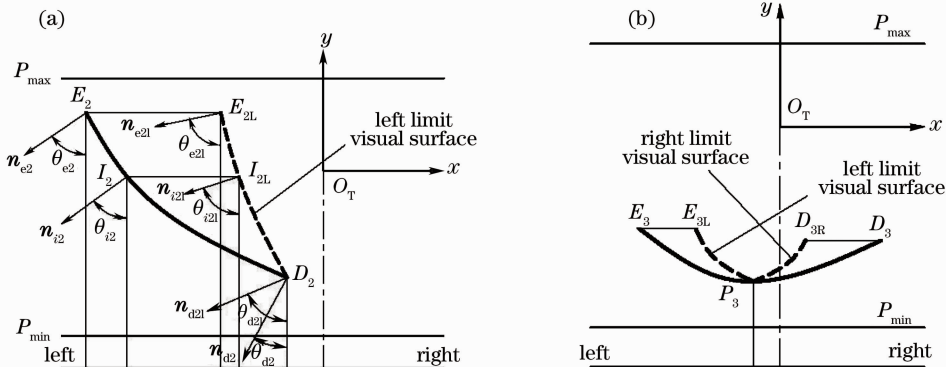


图 6 曲面可视性分析简图

Fig. 6 Visibility analysis of curve surface

假设曲面 D_2E_2 上存在点 I_2 不可视(左极限面上对应点为 I_{2L}), 即 $\theta_{i2} > \theta_{i21}$, 因点 D_2 可视(即 $\theta_{d2} \leq \theta_{d21}$), 则曲面 D_2E_2 和 D_2E_{2L} 上各点法矢与激光平面所成角的变化量分别为

$$\frac{\Delta\theta_2}{\Delta y} = \frac{\theta_{i2} - \theta_{d2}}{y_{i2} - y_{d2}}, \quad \frac{\Delta\theta_{21}}{\Delta y} = \frac{\theta_{i21} - \theta_{d21}}{y_{i2} - y_{d2}},$$

可知

$$\frac{\Delta\theta_2}{\Delta y} > \frac{\Delta\theta_{21}}{\Delta y},$$

又

$$\theta_{e2} = \theta_{e21} + \frac{\Delta\theta_2}{\Delta y} \cdot (y_{e2} - y_{i2}),$$

$$\theta_{e21} = \theta_{e21} + \frac{\Delta\theta_{21}}{\Delta y} \cdot (y_{e2} - y_{i2}),$$

因此 $\theta_{e2} > \theta_{e21}$, 即点 E_2 不可视, 与条件矛盾, 故上述结论成立。

若曲面的投影位置为图 6(b) 所示, 由于曲面的始末点 D_3 和 E_3 可视, 则在曲面 D_3E_3 上肯定存在点 P_3 , 其法矢与激光平面所成角为 0, 过 P_3 点分别做该视点下的左右极限面 P_3E_{3L} 和 P_3D_{3R} , 同理可知曲面 P_3E_3 和 P_3D_3 均可视, 故曲面 D_3E_3 可视, 上述结论同样成立。

2) 平面 E_1F_1 可视性分析: 因平面上各点法矢与激光平面所成角均相同, 又物面上各点的可视极

限角随着视觉系统到物面距离的增大而增大,由此可得结论:若平面上最靠近视觉系统的点可视,则在系统可视区域内的平面可视。

如图 7 所示,由(2)式可知,视点 1 下左平面 $E_1 F_1$ 法矢与激光平面所成角为 1.12 rad ,故下一视点平面的可视性与旋转角度 θ 有关。当 $\theta \leq 1.12 \text{ rad}$ 时,点 E_2 可视即可保证平面 $E_2 F_2$ 在系统可视区域内 $E_2 L_2$ 的可视,如图 7 中粗实线部分;而当 $\theta > 1.12 \text{ rad}$ 时,点 L_3 可视即可保证平面 $E_3 L_3$ 的可视,如图 7 中粗虚线部分。其中 L_2 和 L_3 为平面与系统极限测量位置的交点,称为极限点。

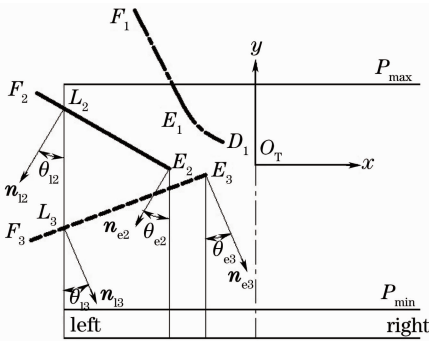


图 7 平面可视性分析简图

Fig. 7 Visibility analysis of plane

综上所述可知左预测曲面在下一视点的可视性与旋转角度 θ ,初始点 D_2 ,分界点 E_2 和极限点 L_2 的可视性有关,由此给出可视性判据为:

1) 当 $\theta \leq 1.12 \text{ rad}$ 时,初始点 D_2 和分界点 E_2 的可视即可保证预测曲面在系统有效测量区域内的可视。

2) 当 $\theta > 1.12 \text{ rad}$ 时,初始点 D_2 和极限点 L_2 的可视即可保证预测曲面在系统有效测量区域内的可视。

同理可得右预测曲面在下一视点的可视性判据。

3.2 下一视点预测曲面可视旋转平移区间

预测曲面在下一视点的可视性与工作台旋转角度 θ 和平移量 d 有关。以左侧规划为例,当工作台逆时针旋转 θ 至视点 2 后,视点 2 下点坐标 (x_2, y_2) 与视点 1 下点坐标 (x_1, y_1) 的对应关系为

$$\begin{pmatrix} x_2 \\ y_2 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \end{pmatrix}. \quad (7)$$

依据上述可视性判据,下一视点使预测曲面可视的旋转平移区间分析如下:

1) 当 $\theta \leq 1.12 \text{ rad}$ 时,如图 8(a),若初始点 D_2 可视(即 $\theta_{d2} \leq \theta_{d2limit}$, θ_{d2} 和 $\theta_{d2limit}$ 分别为视点 2 下过点 D_2 的法矢与激光平面所成角和点 D_2 的可视极限

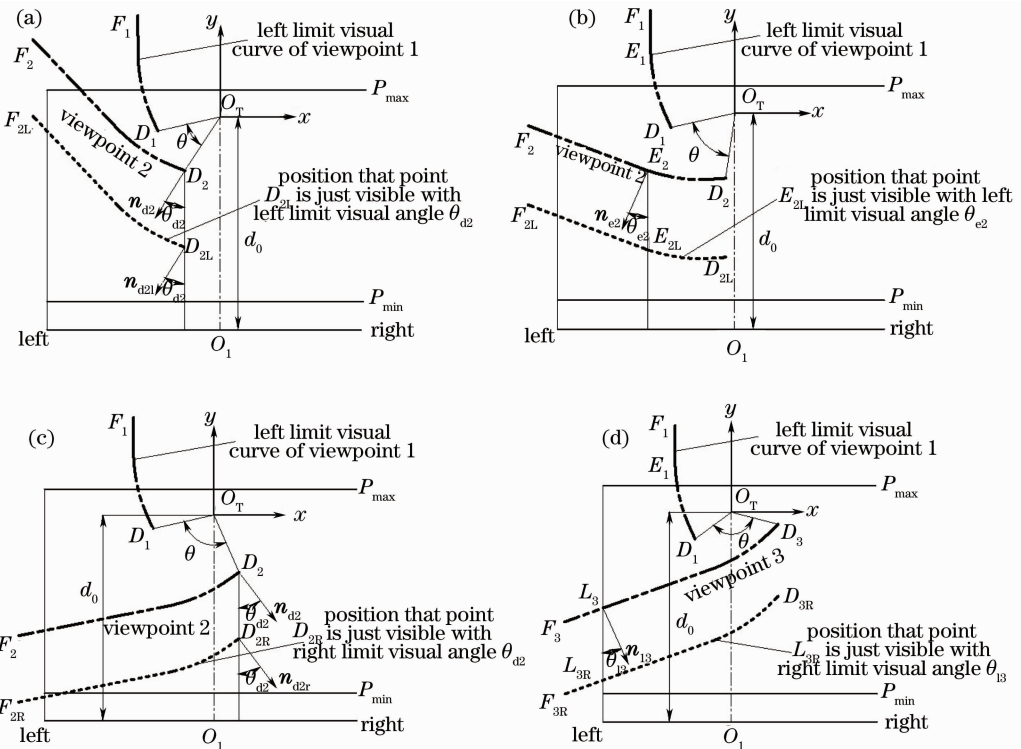


图 8 下一视点可视平移区间的确定

Fig. 8 Visual translation distance of the next viewpoint

角),则将预测曲面 D_2F_2 沿 $-y$ 方向平移至刚好可视初始点 D_{2L} 的位置 $D_{2L}F_{2L}$,因此当前条件下使初始点可视的平移量 d_d

$$y_{d21} - y_{d2} \leq d_d. \quad (8)$$

若初始点 D_2 不可视(即 $\theta_{d2} > \theta_{d2limit}$),则将 D_2F_2 沿 $+y$ 方向平移至刚好可视初始点的位置,则 d_d 满足

$$d_d \leq 186 - d_0 - y_{d2}, \quad (9)$$

其中 186 为视觉系统到极远测量平面的距离, d_0 为系统到工作台旋转中心的初始垂直距离。结合(8),(9)式,可得使初始点可视的平移区间

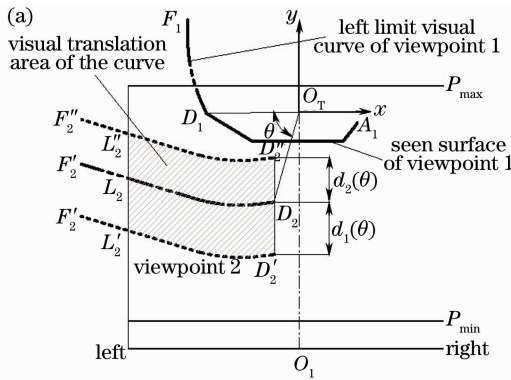
$$d_d \in [y_{d21} - y_{d2}, 186 - d_0 - y_{d2}], \quad (10)$$

同理可得使分界点 E_2 可视的平移区间[如图 8(b)所示]

$$d_e \in [y_{e21} - y_{e2}, 186 - d_0 - y_{e2}]. \quad (11)$$

2) 当 $\theta > 1.12$ rad 时,同理可得视点 2 下使初始点和 D_2 极限点 L_2 可视的平移区间[如图 8(c)(d)所示]

$$d_d \in [y_{d2r} - y_{d2}, 186 - d_0 - y_{d2}], \quad (12)$$



$$d_1 \in [y_{l3r} - y_{l3}, 186 - d_0 - y_{l3}]. \quad (13)$$

综上可得下一视点使预测曲面可视的有效旋转角度 $\theta \in [\theta_a, \theta_b]$ 以及固定旋转角度下使初始点可视的平移量 $d_d \in [d_{dmin}, d_{dmax}]$,使分界点(或极限点)可视的平移量 $d_e \in [d_{emin}, d_{emax}]$ (或 $d_1 \in [d_{lmin}, d_{lmax}]$),因此下一视点系统有效测量区域内预测曲面可视的平移区间为 $d \in [d_1(\theta), d_2(\theta)]$,其中 $d_1(\theta) = \max\{d_{dmin}, d_{emin}\}$, $d_2(\theta) = \min\{d_{dmax}, d_{emax}\}$ 。同理可得右侧规划下使预测曲面在下一视点可视的旋转平移区间。

3.3 下一最优视点

如前所述,下一视点位置可由旋转角度 $\theta[\theta_a, \theta_b]$ 和平移量 $d[d_1(\theta), d_2(\theta)]$ 来描述,因此可通过比较不同位置参数下所获可视曲面面积的大小来确定下一视点的位置。以左侧规划为例图 9 为下一最优视点位置规划简图,图 9(a)为极限点法矢在激光平面左端;图 9(b)为极限点法矢在激光平面右端。

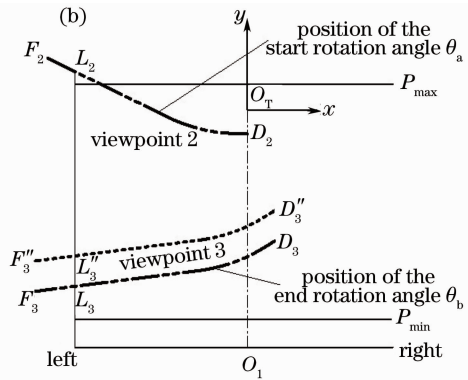


图 9 下一最优视点位置规划简图

Fig. 9 Planning sketch for NBV position

假设预测曲面 D_1F_1 旋转 θ 后至位置 D_2F_2 ,如图 9(a)中点化线所示,则当前视点下预测曲面的极限可视位置为:平移 $d_1(\theta)$ 至最近可视位置 $D'_2F'_2$,平移 $d_2(\theta)$ 至最远可视位置 $D''_2F''_2$,图中剖面部分即为可视平移区间。由图 9 可知,极限点 $L_i(-400, y_{li})$ 随着旋转角度的增大 y_{li} 逐渐变小,可根据判断点 L_i 的位置确定出左预测曲面的可视位置,并将能获得最大可视曲面面积的位置定义为 NBV 的参考位置。具体方法如下:

- 1) 若旋转 $\theta(\theta \geq \theta_a)$ 后过极限点 L_i 的法矢始终在激光平面左端,则点 L_i 的位置与最小可视旋转角度 θ_a 有关,如图 9(a)所示,此时最佳平移量取 $d = d_1(\theta)$ 可得当前条件下的最大可视曲面面积。
- 2) 若旋转 $\theta(\theta \leq \theta_b)$ 后过极限点 L_i 的法矢在激

光平面右端,则点 L_i 的位置与最大可视旋转角度 θ_b 有关,如图 9(b)所示,此时最佳平移量取 $d = d_2(\theta)$ 可得当前条件下的最大可视曲面面积。

通过分析极限点的位置和可视旋转角度区间 $[\theta_a, \theta_b]$ 、可视平移区间 $[d_1(\theta), d_2(\theta)]$ 的关系,将左侧规划进程中能获得最大可视曲面面积 S_l 的位置定义为 NBV 的左参考位置。同理可得右侧规划下的 NBV 参考位置以及相应的最大可视曲面面积 S_r 。通过比较 S_l 和 S_r 的大小,取大者所在位置作为 NBV 的最终位置。

4 实 验

为验证算法的可行性,取一弥勒佛模型在线激光视觉测量系统上进行实验,利用本文算法对其进

行测量以及三维重建。任意摆放模型,获取初始视点下物体表面数据信息,如图 10(a)所示,作视点 1 下物体边界的左右极限面,如图 10(b),(c)所示,分

别求取左右规划时 NBV 的参考位置参数以及最大可视面积,如表 1 所示。

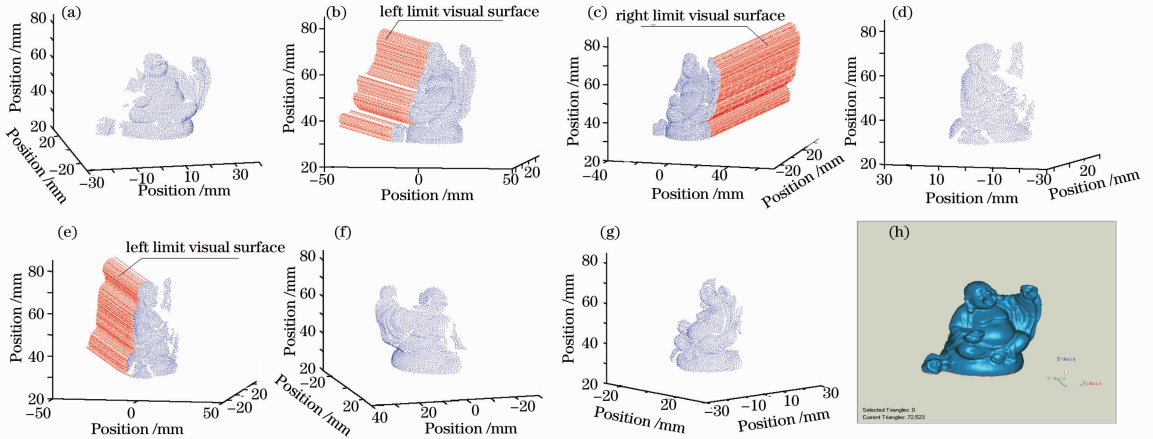


图 10 弥勒佛模型重建过程。(a)视点 1;(b)视点 1 下左极限面;(c)视点 1 下右极限面;(d)视点 2;(e)视点 2 下左极限面;(e)视点 3;(f)视点 4;(g)重建后模型

Fig. 10 Reconstruction process of Maitreya model. (a) view 1; (b) left limit surface of view 1; (c) right limit surface of view 1; (d) view 2; (e) left limit surface of view 2; (e) view 3; (f) view 4; (g) reconstructed model

表 1 视点 1 下规划所得 NBV 参考位置参数

Table 1 Parameters of NBV candidate position of viewpoint 1

Left planning of viewpoint 1	d_0/mm	θ_{l1}/rad	d_{l1}/mm	S_{l1}/mm^2
of viewpoint 1	160	1.52	43.2	1.97×10^4
Right planning of viewpoint 1	d_0/mm	θ_{r1}/rad	d_{r1}/mm	S_{r1}/mm^2
of viewpoint 1	160	1.66	50.4	1.92×10^4

因 $S_{l1} > S_{r1}$,故选取左规划参考位置作为 NBV 的最终位置,即下一视点的最佳位置参数为:旋转角度 $\theta = 1.52 \text{ rad}$,平移量 $d = 43.2 \text{ mm}$,此时可得视点 2,如图 10(d)所示。做视点 2 边界的左极限面,如图 10(e)所示,得视点 2 左规划的 NBV 参考位置参数(如表 2),比较视点 2 左规划参考位置下可视曲面面积和视点 1 右规划参考位置下可视曲面面积可知 $S_{l1} < S_{2l}$,故选取视点 2 左规划参考位置作为 NBV 的最终位置,即下一视点的最佳位置参数为 $\theta = 1.58 \text{ rad}$, $d = 45.6 \text{ mm}$,此时可得视点 3,如图 10(f)所示,同理可得视点 4,如图 10(g)所示,重建后的模型,如图 10(h)所示。

表 2 视点 2 下左规划所得 NBV 参考位置参数

Table 2 Parameters of NBV candidate position of viewpoint 2

Left planning of viewpoint 2	d_0/mm	θ_{2l}/rad	d_{2l}/mm	S_{2l}/mm^2
of viewpoint 2	160	1.58	45.6	1.98×10^4

5 结 论

针对未知三维物体模型自动测量和重建问题,提出与物体初始位置无关的新型视觉规划方法。该方法首先通过给定可视平面拟合精度确定单目线激光视觉测量系统的合理测量可视区域,然后在可视极限角的基础上定义了视觉系统的极限面,并利用极限面来预测未知模型的最大表面延拓信息。通过确定预测曲面在下一视点的可视区间,由此获取相应最大曲面面积的位置,并将此位置定为 NBV 的参考位置,最终通过比较左右 NBV 参考位置下所获可视面积大小,将大者所在位置定义为下一个最优视点的位置。通过对实体模型的三维重构,验证了所提方法的可行性和有效性。

参 考 文 献

- Wu Di, Lü Naiguang, Ouyang Jing. A structured light three-dimensional measurement method based on unconstrained system configuration[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(3): 482~486
吴迪,吕乃光,欧阳京.基于无约束系统的结构光三维测量方法[J]. *光学学报*, 2008, **28**(3): 482~486
- Lei Yanzhang, Zhao Huijie, Jiang Hongzhi. A three-dimensional measurement method by combining binocular and monocular vision systems [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(7): 1338~1342
雷彦章,赵慧洁,姜宏志.一种双目视觉系统结合的三维测量方法[J]. *光学学报*, 2008, **28**(7): 1338~1342

3 Wang Xuyue, Tao Chunhua, Xu Weixing *et al.*. Scanning path planning for laser bending of metal tubes[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(11): 1813~1820
 王续跃, 陶春华, 许卫星 等. 金属管材激光弯曲成形的扫描路径规划[J]. *中国激光*, 2008, **35**(11): 1813~1820

4 R. Sablatnig, S. Tosovic, M. Kampel. Next view planning for shape from silhouette[C]. *Computer Vision (CVWW'03)*, Czech Pattern Recognition Society, 2003. 77~82

5 G. H. Tarbox. Planning for complete sensor coverage in inspection [J]. *Computer Vision and Image Understanding*, 1995, **61**(1): 84~111

6 W. R. Scott, G. Roth, J. F. Rivest. View planning for

automated three-dimensional object reconstruction and inspection [J]. *ACM Computer Surveys*, 2003, **35**(1): 64~96

7 W. R. Scott. Model-based view planning [J]. *Machine Vision and Applications*, 2009, **20**(1): 47~69

8 S. Larsson, J. A. P. Kjellander. Path planning for laser scanning with an industrial robot [J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2008, **56**(7): 615~624

9 Y. F. Li, Z. G. Liu. Information entropy-based viewpoint planning for 3-D object reconstruction [J]. *IEEE Trans. Robotics*, 2005, **21**(3): 324~337

高稳定性 0.6 mm 光纤耦合工业用 5 kW 级全固态激光器

全固态激光器具有体积小、重量轻、效率高、性能稳定、可靠性好、寿命长、光束质量好等优点,是激光器发展的一个重要方向。以全固态激光器为基础开发的高功率光纤耦合输出激光主要用于汽车焊接、船舶制造、大尺寸金属熔焊和航空航天高精尖零件加工等工业领域,目前我国加工制造业所使用的千瓦级光纤耦合输出高功率全固态激光器主要依靠进口,极大地阻碍了我国制造业的发展。

中国科学院理化技术研究所激光物理与技术研究中心于 2009 年 10 月完成了高稳定性 0.6 mm 光纤耦合输出 5 kW 级全固态激光器工业样机(图 1)的研制。激光系统采用主振荡+放大(MOPA)技术。Nd:YAG 激光振荡器采用大基模体积谐振腔设计、模式控制和热致双折射补偿技术等,使输出达千瓦以上;振荡级输出激光经光束整形后由多级 Nd:YAG 激光放大器放大,同时采用多种光束质量控制技术使输出激光满足光纤耦合及金属焊接所需的较高光束质量要求。整机按照模块化、产业化的要求设计,可以保证样机在工业应用环境中

运行的稳定性和可靠性。此外,利用已研制的千瓦级全固态激光器与相关单位合作,先后在上海宝钢、天津国能盘山电厂、武汉阳逻电厂、仪征化纤、大连衡得商用车有限公司和装甲兵学院等多家单位进行了应用。

2010 年 4 月 16 日该激光器累计运行数百小时后通过了 6 位专家测试,0.6mm 芯径(数值孔径为 0.2)光纤输出平均功率达 5.19 kW,连续稳定运行超过 8 h,功率稳定性小于 ±0.58%(图 2),光束质量为 19.8 mm·mrad,电光效率为 18.3%,光纤耦合效率超过 98%。

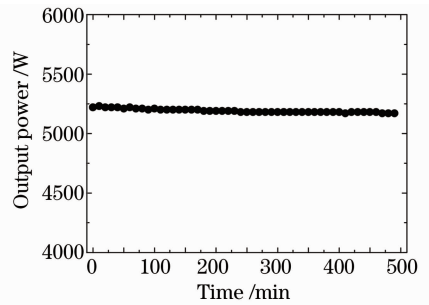


图 2 5 kW 全固态激光器功率稳定性曲线

Fig. 2 Output power stability of 5 kW solid-state laser



图 1 5 kW 全固态激光器照片

Fig. 1 Photo of the 5 kW solid-state laser

许家林 郭亚丁 高伟男 彭钦军 薄勇 许祖彦
 (中国科学院理化技术研究所激光物理与技术研究中心,
 中国科学院功能晶体与激光技术重点实验室,北京 100190)