

# 三维物体视觉测量重构中解决遮挡问题的方法研究

何炳蔚<sup>1,2</sup> 林东艺<sup>1</sup> 陈志鹏<sup>1</sup> 丁 辉<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 福州大学机械工程及自动化学院, 福建 福州 350108  
<sup>2</sup> 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** 利用视觉技术自动获取未知物体三维模型的过程中,如何有效解决视觉遮挡问题是研究的难点。因此,提出一种能够合理解决视觉遮挡的视觉规划新方法,该方法将物体重建过程分成 360°侧面重建和上表面重建两个步骤。侧面重建中,首先预测出遮挡部分的轮廓模型,结合可视空间确定出消除遮挡的视点位置。当物体侧面信息获取完整后,通过分析物体上表面边界点的可视性,将视觉系统能够获得最大上表面信息的空间位置定义为最优翻转视点。针对上表面重建过程中的遮挡问题,提出以遮挡边界连线的法矢为依据,确定解决遮挡问题的规划方案。最后通过三维实体模型的重构实验,验证所提方法的可行性。

**关键词** 机器视觉;计算机视觉;三维重构;视觉规划;遮挡

**中图分类号** TP391 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.0708001

## Research of Eliminating Occlusion in Visual Construction of Three-Dimensional Objects

He Bingwei<sup>1,2</sup> Lin Dongyi<sup>1</sup> Chen Zhipeng<sup>1</sup> Ding Hui<sup>1</sup>

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

**Abstract** How to solve the occlusion problem effectively is a difficult subject during the progress of acquiring unknown object's three-dimensional (3D) digital model. So a new view planning which can cope with occlusion correctly is proposed. The reconstruction progress is divided into two steps: 360° side surface reconstruction and upper surface reconstruction. Firstly, the contour predictable model of the occlusion is acquired and the position coping with the occlusion information is obtained with the visible region. Secondly, after the completion of side surface reconstruction, the visible criterion of the boundaries of the upper surface of the object is predicted and the best turnover angle of the vision system is defined where the vision system can acquire the maximal information of the upper surface. And then, the normal vector of the line connecting the occlusion boundary points is calculated, based on which a planning scheme to solve the occlusion is proposed. Finally, the experimental result of reconstructing the 3D real model shows that the method is feasible in practical implementation.

**Key words** machine vision; computer vision; three-dimensional reconstruction; view planning; occlusion

**OCIS codes** 330.5000; 330.4060; 330.7310; 280.0280

## 1 引 言

由于基于计算机视觉的三维主动测量具有较高

的精度和可靠性,故在物体的测量和重建中得到广泛的应用<sup>[1~4]</sup>。而在此过程中,采用视觉规划技术

收稿日期:2011-01-28; 收到修改稿日期:2011-03-10

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(XSJ RC2007207)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:mebwhe@fzu.edu.cn

自动规划出视觉传感器的下一视点位置有助于进一步提升重建的效率及自动化程度。

Connolly<sup>[5]</sup>提出了“下一最优视点(NBV)”的概念。Tarbox等<sup>[6]</sup>基于IVIS测量系统提出了多种规划方法以适应各种物体的测量。其中基于掠射角阈值的规划策略可保证整个规划过程有较高的效率,同时还提出了可测性矩阵概念。Scott<sup>[7]</sup>在此基础上提出改进后的可测性矩阵作为传感器规划的算法,这使规划效率更高,规划结果更精确。何炳蔚等<sup>[8]</sup>提出基于单目视觉系统可视空间的未知三维物体重建方法,通过构建系统极限可视表面来进行下一最优视点规划。Yuan<sup>[9]</sup>和Pito<sup>[10]</sup>分别提出的矢量链法和位置空间法也是比较具有代表性的规划方法,但只给出了传感器的方向参数。Paul等<sup>[11]</sup>针对室外大型复杂场景的自动重建规划分作两步:首先,根据场景的部分平面信息,在二维平面内给定合适的视点,利用机器人手臂上的传感器获取场景的三维信息;其次,通过不断更新场景的三维信息,利用基于体素占用的方法确定下一最优视点。

但是上述传感器规划方法中均未能解决获取三维模型过程中的遮挡问题。Banta等<sup>[12]</sup>在视点规划过程中,将所有视点都限制在直径比物体尺寸大的视觉球面上,分析初始视点下物体边缘的光量强度,选取最大者与视觉球的中心连线作为下一视点,而针对遮挡问题,采用遮挡面的中心法线作为摄像机的方向参数。但这种方法针对存在多处遮挡面的物体规划时,效率大大降低。Farshidi等<sup>[13]</sup>针对在物体测量过程中存在的遮挡问题,利用两个相互垂直且不在同一平面的传感器实现消除遮挡的目的。首先,利用递归贝叶斯定理逐步获取物体的信息;其次,利用一种新的概率模型法以消除遮挡。但这种方法需事先知道遮挡的位置。

本文针对在获取物体数字化模型过程中存在的视觉遮挡问题,通过构建五自由度线激光单目视觉系统的可视空间及相应的数学模型,提出利用此可视空间来有效解决视觉遮挡问题的视觉规划新方法,并结合实验分析了该方法的可行性。

## 2 五自由度视觉测量系统及可视空间模型

### 2.1 五自由度三维扫描仪设备简介

所用的视觉测量系统如图1所示,其中视觉系统是由线激光发生器和 CCD 摄像机构成的,可分别沿

$x$  和  $z$  方向做平移运动(行程分别为  $-400 \sim 400$  mm 和  $0 \sim 400$  mm),沿  $z$  方向的每次移动量为 50 mm (即为激光发生器的扫描高度),工作台除了可以沿  $y$  方向来回平移外(行程  $0 \sim 300$  mm),还可绕  $z$  轴做  $360^\circ$  旋转运动以及绕  $x$  轴做  $180^\circ$  翻转运动。

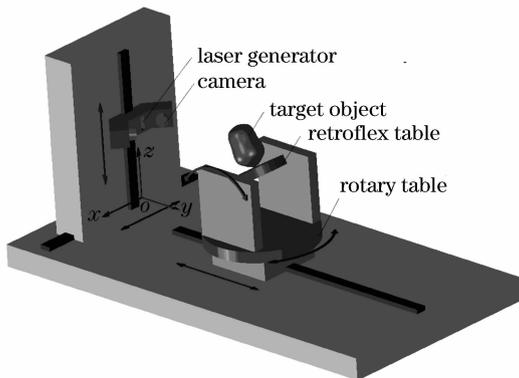


图1 五自由度视觉测量系统简图

Fig.1 Sketch of the five-freedom vision system

### 2.2 五自由度视觉系统的可视空间模型

该系统的可视空间由两部分组成:1) 绕  $z$  轴旋转方向上的可视空间;2) 绕  $x$  轴翻转方向上的可视空间。

其中第一部分可视空间由有效测量深度及左右极限面构成<sup>[8]</sup>,如图2所示。有效测量范围为  $[P_{\min}, P_{\max}]$ ,对应的深度值为  $L_2 = 122$  mm,最近的测量深度为 64 mm(图2中的  $L_1$ )。

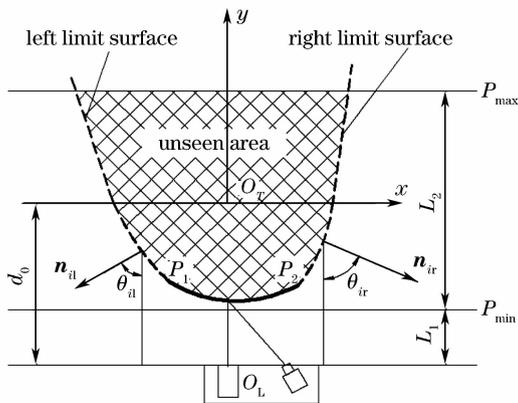


图2 绕  $z$  轴旋转方向的视觉系统可视空间

Fig.2 Visual region of the vision system about  $z$ -axis rotation

以  $P_1(P_2)$  为初始点的极限曲线方程为<sup>[8]</sup>(距离单位:mm)

$$\begin{cases} y = 0.0068(x + d_1)^2 - 0.5189(x + d_1) - 94.6093 & (y_1 \leq y \leq 0) \\ y = -2.1(x + d_1) - 180.2 & (y > 0) \end{cases}, \quad (1)$$

$$\begin{cases} y = 0.0620(x + d_2)^2 + 0.5488(x + d_2) - \\ 94.4452 & (y_2 \leq y \leq -44) \\ y = 6.7(x + d_2) - 207.7 & (y > -44) \end{cases}, \quad (2)$$

式中  $d_1, d_2$  为由极限曲线初始点唯一确定的参数。若物体表面初始投影坐标已知, 左右极限可视曲线唯一确定, 从而可由多条极限可视曲线构造出极限面。其中极限面外部的为可见部分, 内部的为不可见部分。

而确定绕  $x$  轴翻转方向上可视空间的确定过程为:

在测量范围内选取任一平面  $P_{arb}$ , 使其绕  $x$  轴做翻转运动 (如图 3 所示), 可获得平面的外法矢  $n_{in(m)}$  与  $z$  轴的极小翻转角  $\beta_{in}$  (极大翻转角  $\beta_{im}$ )。即若过  $O_T$  点的平面法矢  $n_i$  在区域  $[\beta_{in}, \beta_{im}]$  内, 则该平面可视, 该角度区域被称为固定位置下视觉系统可视的极限翻转角。

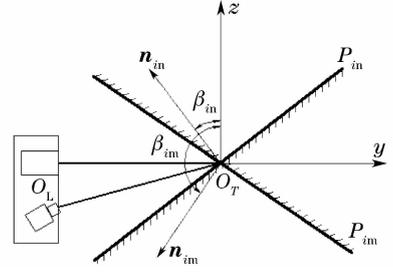


图 3 获取视觉系统的极小(大)翻转角

Fig. 3 Acquiring the minimal (maximum) visual angle of vision system

依据上述方法可确定出测量距离与极限翻转角的函数关系。具体实验结果如图 4 所示。

以工作台中心建立坐标系, 依据任意点  $T_i(y_{T_i}, z_{T_i})$  处均存在相应的极大(小)翻转角, 故利用最小二乘法拟合实验数据获得的方程为 (角度单位: rad, 距离单位: mm, 下同)

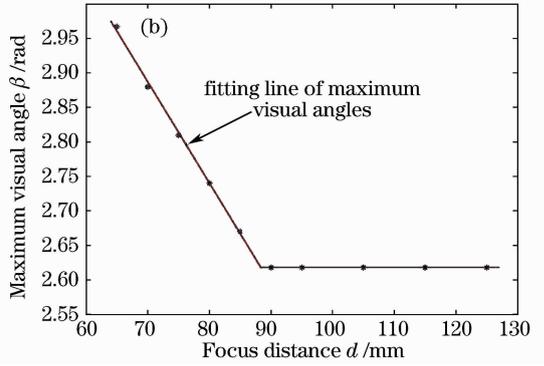
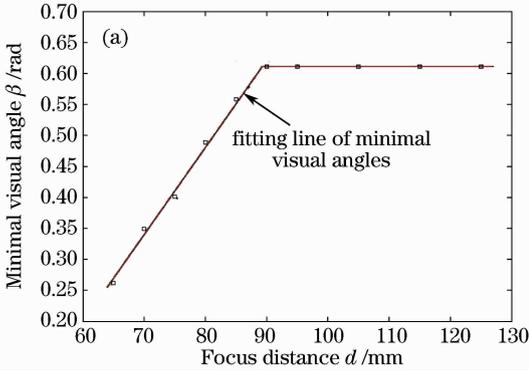


图 4 极小(大)翻转角实验数据点分布及拟合曲线

Fig. 4 Minimal (maximum) angles and its fitting lines

$$\beta_{in} = \begin{cases} 0.0141(d_0 + y_{T_i}) - 0.6448 & (y_{T_0} \leq y_{T_i} \leq 90 - d_0) \\ 0.6109 & (90 - d_0 \leq y_{T_i} \leq 186 - d_0) \end{cases}, \quad (3)$$

$$\beta_{im} = \begin{cases} -0.0147(d_0 + y_{T_i}) + 3.913 & (y_{T_0} \leq y_{T_i} \leq 88 - d_0) \\ 2.618 & (88 - d_0 \leq y_{T_i} \leq 186 - d_0) \end{cases}, \quad (4)$$

式中  $d_0$  为工作台中心到视觉系统中心的初始距离 (可由系统本身自动测定)。

依据 (3), (4) 式对应的曲线中的几何关系, 可将 (3), (4) 式转化为

$$\begin{cases} z = -70.922 \ln\{\cos[0.0141(y + d_0) - 0.6448]\} + c_1 & (y_{T_0} \leq y \leq 90 - d_0) \\ z = 0.7003y + c_2 & (90 - d_0 \leq y \leq 185 - d_0) \end{cases}, \quad (5)$$

同理可得极大翻转角对应的曲线方程

$$\begin{cases} z = 68.0272 \ln\{\cos[-0.0147(y + d_0) + 3.913]\} + c_3 & (y_{T_0} \leq y \leq 88 - d_0) \\ z = -0.5773y + c_4 & (88 - d_0 \leq y \leq 185 - d_0) \end{cases}, \quad (6)$$

式中  $c_i (i = 1, 2, 3, 4)$  为常数, 由初始上边界点  $T_0(y_{T_0}, z_{T_0})$  唯一确定。

在  $d_0$  和  $T_0(y_{T_0}, z_{T_0})$  唯一确定的情况下, 视觉

系统的极限翻转曲线也是唯一确定的, 故依据多条翻转曲线则可构成相应的极限翻转曲面, 如图 5 所示。易知极限翻转曲面将空间分割为两部分: 翻转

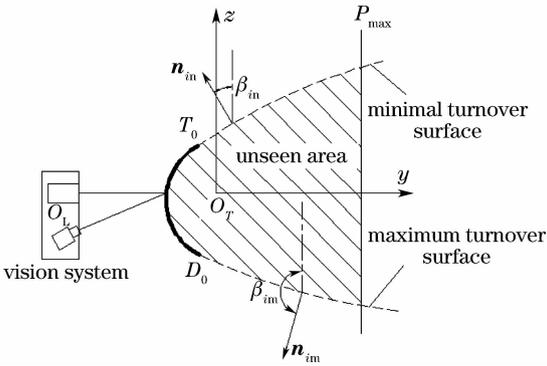


图 5 绕  $x$  轴翻转方向的视觉系统可视空间  
Fig. 5 Visual region of the vision system about  $x$ -axis rotation

曲面外部的可见部分和内部的不可见部分。

### 3 解决遮挡的两步视觉规划策略

为了保证整个三维重建的效率及最终所获数据的完整,将规划过程分为物体侧面  $360^\circ$ 重建规划和上表面信息重建规划两部分。其中在侧面重建规划中,主要考虑如何对遮挡部分的信息进行正确获取的方法研究。而对于无遮挡发生的重建规划可参见文献[8]。

#### 3.1 获取物体侧面信息的遮挡规划策略

首先依据已获取的遮挡边界信息,合理地预测遮挡部分的轮廓信息,然后结合视觉系统的可视空间,确定出能消除最大遮挡的视觉系统最佳空间位置,从而获取遮挡部分的信息。

##### 3.1.1 预测遮挡部分的轮廓信息

为简化计算模型,首先根据已获物体遮挡边界信息,取所有边界投影点的中心作为边界点(如图 6 中点  $A, B$  所示),从而可求得直线  $AB$  的斜率  $k_{AB}$ 。

在  $k_{AB} < 0$  的情况下,若点  $B$  在左极限曲面的外侧[图 6(a)],出现遮挡的原因是物体表面的外法矢

与激光平面的夹角大于视觉系统在该处的极限角,则遮挡部分的预测轮廓可以看成是由  $A$  点的左极限曲面和  $B$  点的右极限曲面组成,其投影如图 6(a) 中曲线  $ACB$  所示。若点  $B$  在左极限曲面的内侧[图 6(b)],此时在左极限曲面内部的部分物体信息应该是不可见的[即图 6(b)中  $BD$  部分],则造成遮挡的原因是此处被  $A$  点右侧物体本身所遮挡,故若以极限曲面作为预测轮廓是不合理的,为简化后续计算进程,直接定义平面  $AB$  作为遮挡部分的预测轮廓信息[图 6(b)]。在  $k_{AB} \geq 0$  情况下,造成遮挡的原因只可能是轮廓的外法矢与激光平面的夹角大于该处的极限角,故预测轮廓可以看作是由  $A$  点的左极限曲面和  $B$  点的右极限曲面组成,构建结果与图 6(a)类似。

##### 3.1.2 确定消除遮挡的视觉系统的最佳空间位置

以图 6(a)中的预测轮廓为例,通过计算视觉系统在绕  $z$  轴旋转方向上的可视空间与预测轮廓围成的可视部分的面积,将能获取最大可视面积的位置作为视觉系统消除遮挡的最优空间位置。

图 7(a)中,视点 1 下遮挡部分的预测轮廓为曲面  $ACB$ ,在工作台旋转  $\theta$ (假设工作台逆时针旋转角度为正,反之则为负)后,预测轮廓变为  $A_1C_1B_1$ ,且其均在极限曲面外侧,则整个预测轮廓均可视,同时,左右极限曲面的交点  $C'$  在视觉系统的测量范围内,则可视部分为  $A_1C_1B_1C'$ 。如  $C'$  超出系统最远测量位置  $P_{max}$ ,则可视部分为  $A_2C_2B_2EF$ ,如图 7(b)所示。当只有部分轮廓在极限曲面外侧时[如图 7(c)中  $A_3D_3$  和图 7(d)中  $B_4D_4$  所示],则可视部分分别为  $A_3D_3C'$  和  $B_4D_4C'$ 。

利用上述分析可以计算出不同情况下的可视部分面积,从而可以确定出视觉系统消除遮挡的最佳空间位置。

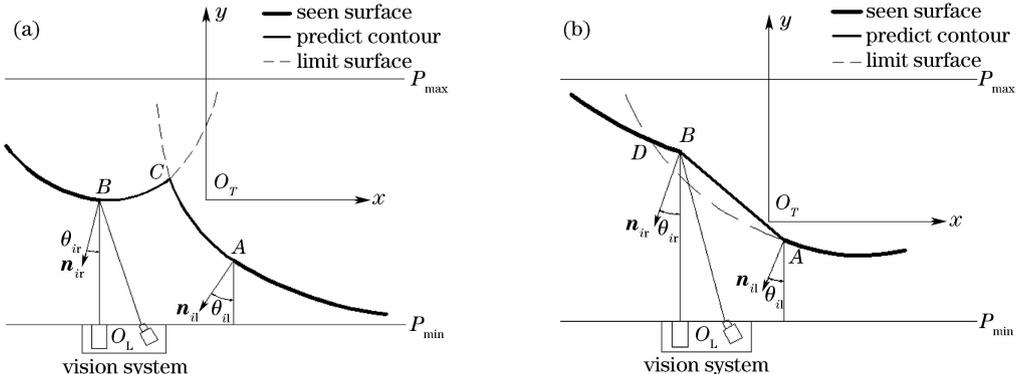


图 6 遮挡部分的预测轮廓模型  
Fig. 6 Predict contour of occlusion

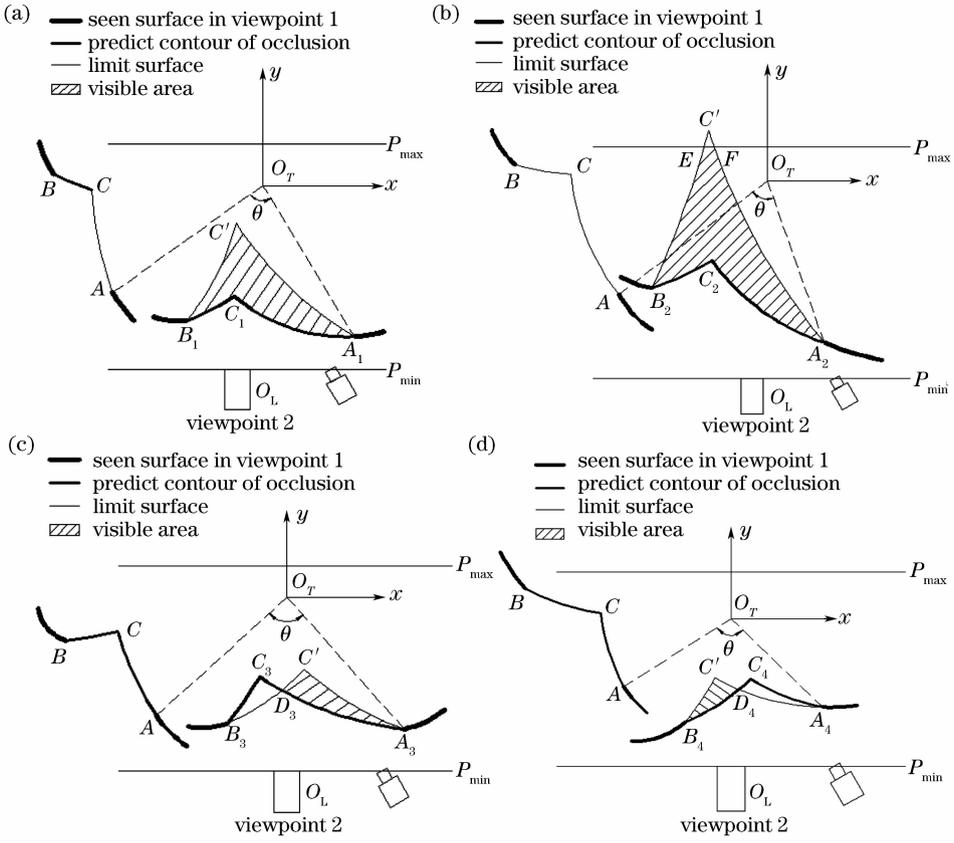


图 7 确定视觉系统消除遮挡的最佳空间位置

Fig. 7 Visibility analysis of predicted contour and corresponding visible area

### 3.2 获取侧面信息的规划自终止依据

依据遮挡规划策略可保证每个视点下获取的物体信息是完整的,但如何保证视觉系统能够自动停止规划也是研究的重点。因此提出,计算出每个视点下边界点(除去与上个视点重合部分的边界投影的中心点)与工作台中心  $O_T$  的夹角  $\alpha_i$ ,并验证所有夹角之和是否大于  $2\pi$ ,若满足,停止当前规划;否则,继续正常的下一视点规划。

如图 8 所示,在初始视点下,视觉系统获得的物

体表面信息投影为  $A_1B_1$ ,其边界点  $A_1, B_1$  与  $O_T$  组成的边界夹角为  $\alpha_1$ ,另外,边界线(边界点与  $O_T$  之间的连线) $A_1O_T, B_1O_T$  与激光平面的夹角为  $\lambda_{1L}, \lambda_{1R}$ ,同理可获得视点 2 下左右边界线  $A_2O_T, B_2O_T$  与激光平面的夹角为  $\lambda_{2L}, \lambda_{2R}$ 。由此可算出视点 2 下的边界夹角  $\alpha_2$

$$\alpha_2 = \begin{cases} \lambda_{2R} - \lambda_{1R} & (\theta_1 > 0) \\ \lambda_{2L} - \lambda_{1L} & (\theta_1 < 0) \end{cases}, \quad (7)$$

式中  $\theta_1$  为视点 1 下规划出的下一最优视点的角度参

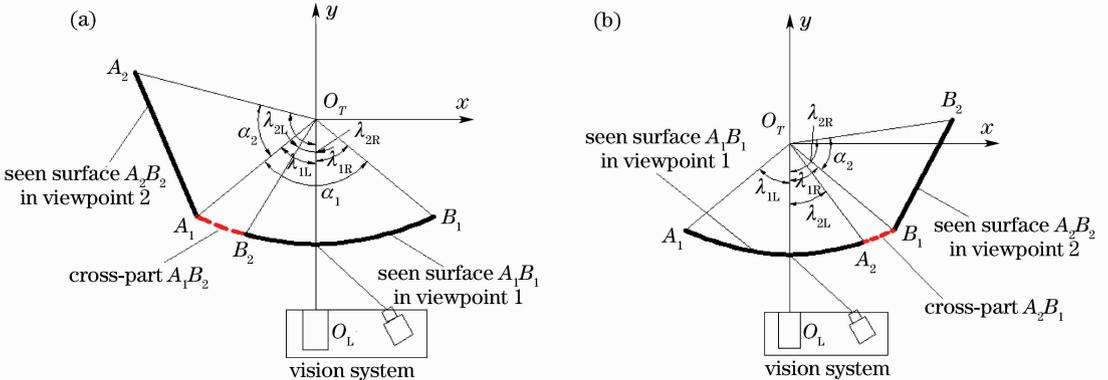


图 8 视觉规划自终止分析简图。(a)  $\theta_1 < 0$ ; (b)  $\theta_1 > 0$

Fig. 8 Sketch for the analysis of self-terminating. (a)  $\theta_1 < 0$ ; (b)  $\theta_1 > 0$

数(逆时针为正,顺时针为负),如图 8 所示。

同理可计算出其余视点下的边界夹角  $\alpha_i$ ,若所有边界夹角的和满足

$$\sum_{i=1}^n \alpha_i \geq 2\pi, \quad (8)$$

则认为视觉系统已获取物体所有的侧面信息,停止当前规划;反之继续规划下一最优视点,直至满足上述条件。

### 3.3 获取物体上表面信息的规划策略

#### 3.3.1 正常的视觉规划策略

首先依据极小翻转曲面构建出物体的上表面曲面模型,通过分析曲面模型边界点  $T_0$  的可视性,计算出工作台的翻转角度范围,然后在此角度范围内计算视觉系统能够获得的上表面曲面模型的最大面积,取对应的工作台位置参数作为下一翻转视点。

##### 1) 确定物体上表面的曲面模型

如图 9 所示,已获得的物体侧面信息投影为图中的粗实线  $A_1B_1T_0$ ,其中  $T_0$  为物体的上边界点。以  $T_0$  为初始点,即可构建出相应的极小翻转曲面  $T_0T_1T_2$ (图 9 中虚线部分),以  $T_0T_1T_2$  来预测物体在上表面未知区域内的最大表面延拓信息,另外还可获得其在边界点  $T_0$  处的初始翻转角  $\beta_0$ 。

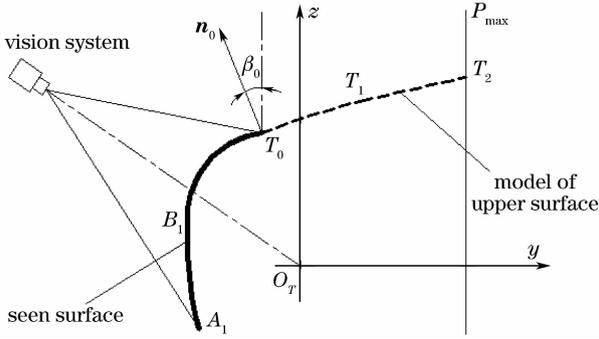


图 9 物体上表面的曲面模型

Fig.9 Model of upper surface

##### 2) 确定视觉系统的翻转角度范围

由已获得的侧面数据可得上边界点  $T_0$  的初始坐标  $(y_{T_0}, z_{T_0})$ ,在逆时针翻转  $\beta$  后,其坐标转变为  $(y_{T_0'}, z_{T_0'})$

$$\begin{cases} y_{T_0'} = y_{T_0} \cos \beta - z_{T_0} \sin \beta \\ z_{T_0'} = y_{T_0} \sin \beta + z_{T_0} \cos \beta \end{cases}, \quad (9)$$

将其代入(3)式可得  $T_0'$  处的极小翻转角

$$\beta_{T_0'n} = \begin{cases} 0.0141(d_0 + y_{T_0'}) - 0.6448 & (65 - d_0 \leq y_{T_0'} \leq 90 - d_0), \\ 0.6109 & (90 - d_0 \leq y_{T_0'} \leq 186 - d_0) \end{cases}, \quad (10)$$

而上表面曲面模型在  $T_0'$  处的外法矢与  $z$  轴的夹角为

$$\beta_{T_0'} = \beta_0 + \beta, \quad (11)$$

故  $T_0'$  可视的条件为  $\beta_{T_0'} \geq \beta_{T_0'n}$ ,可得

$$\begin{cases} \beta \geq 0.0141(d_0 + y_{T_0'}) - 0.6448 - \beta_0 & (65 - d_0 \leq y_{T_0'} \leq 90 - d_0) \\ \beta \geq 0.6109 - \beta_0 & (90 - d_0 \leq y_{T_0'} \leq 186 - d_0) \end{cases}. \quad (12)$$

同理依据(4)式可得工作台能够翻转的最大角度,从而可确定在上边界点  $T_0$  可视情况下,工作台翻转角度的范围:  $\beta \in [\beta_{T_{\min}}, \beta_{T_{\max}}]$ 。

##### 3) 确定下一翻转视点位置

依据给出的工作台翻转范围,确定出上表面曲面模型在可视范围内的可平移范围,然后计算在此范围内视觉系统能够获得的最大上表面信息,取对应的工作台位置参数作为下一最优翻转视点位置。

由(3)式可知物体上表面曲面模型中平面部分  $T_1T_2$  的初始翻转角为  $0.6109 \text{ rad}$ ,当平面  $T_1T_2$  的外法矢与  $z$  轴的夹角  $\beta_p < \pi/2$  时[如图 10(a)所示],曲面模型沿  $y$  轴负方向移动,会使测量范围内曲面模型的信息量增大[如图 10(a)中曲面模型由  $T_0'T_1'T_2'$  变为  $T_0''T_1''T_2''$ ],同理若  $\beta_p > \pi/2$ [图 10(b)],曲面模型沿  $y$  轴正向移动时,其信息量的增加如图 10(b)所示。故可得

当  $\beta_{T_{\min}} \leq \beta \leq 0.9599[(\pi/2) - 0.6109]$  时,  $T_0$  点可平移的最大距离为:  $d_T = y_{T_0} - y_{p_{\min}}$  [如图 10(a)所示]。

设曲线  $T_0T_1T_2$  上任意点的坐标为  $t(y_t, z_t)$ ,对应于曲线  $T_0''T_1''T_2''$  上的坐标为  $t''(y_t'', z_t'')$ ,将其代入(3)式,可得  $t''$  点处的极小翻转角为

$$\beta_{T_0'n} = \begin{cases} 0.0141(d_0 + y_t'') - 0.6448 & (y_{T_0} \leq y_t'' \leq 90 - d_0) \\ 0.6109 & (90 - d_0 \leq y_t'' \leq 186 - d_0) \end{cases}, \quad (13)$$

另外,依据(11)式可得曲面模型在  $t''$  点的外法矢与  $z$  轴的夹角

$$\beta_{t''} = \begin{cases} 0.0141(d_0 + y_t'') - 0.6448 + \beta & (y_{T_0} \leq y_t'' \leq 90 - d_0) \\ 0.6109 + \beta & (90 - d_0 \leq y_t'' \leq 186 - d_0) \end{cases}, \quad (14)$$

由  $\beta_{t''} = \beta_{T_0'n}$  可计算出平面可视与不可视的临界点  $t''$  的坐标  $(y_t'', z_t'')$ 。

设物体的上表面宽度为  $w$ (可由获得的物体侧

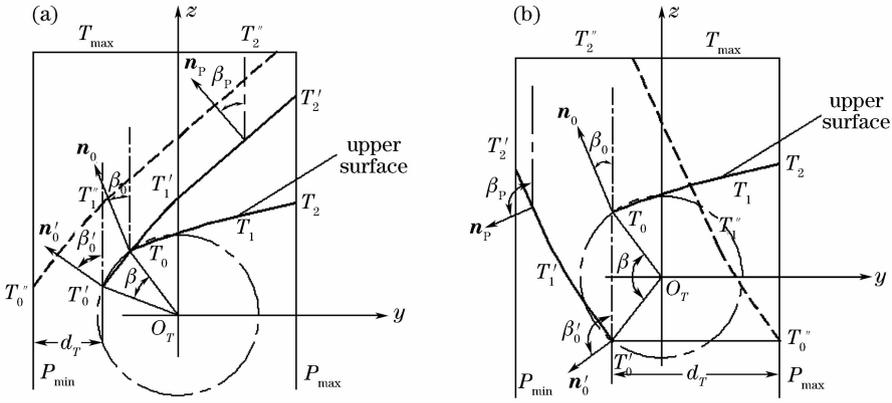

 图 10 下一翻转视点分析简图。(a)  $\beta_{r_{\min}} \leq \beta \leq 0.9599$ , (b)  $0.9599 < \beta \leq \beta_{r_{\max}}$ 

 Fig. 10 Sketch for planning NBV position. (a)  $\beta_{r_{\min}} \leq \beta \leq 0.9599$ , (b)  $0.9599 < \beta \leq \beta_{r_{\max}}$ 

面信息求得), 依据点  $t''$  与点  $T'_1$  和  $T'_2$  的关系可计算出视觉系统能够获得的曲面模型面积。

若  $y_t' \leq y_{T'_1}$ , 则可视部分为:  $T'_0 t''$ , 其面积与  $T_0 t$  相同, 故依据求取曲面面积的方法可求得

$$S_{T'_0 t''} = \omega \int_{y_{T'_0}}^{y_t'} \sqrt{1 + \{\tan[0.0141(y + d_0) - 0.6448]\}^2} dy. \quad (15)$$

同理可求得  $y_{T'_1} \leq y_t' \leq y_{T'_2}$  和  $y_t' > y_{T'_2}$  情况下, 可视部分的面积。其中  $(y_{T'_2}, z_{T'_2})$  为曲面模型  $T'_0 T'_1 T'_2$  与  $P_{\max}$  (或者  $T_{\max}$ ) 交点的坐标,  $T_{\max}$  为视觉系统的最高测量限 ( $T_{\max} = 400$  mm)。

依据上述算法可以计算出在  $\beta_{r_{\min}} \leq \beta \leq 0.9599$  范围内, 视觉系统所能获得的最大上表面面积  $S_{1\max}$ , 并选取对应的翻转参数  $(\beta_{1\max}, d_T)$  作为下一翻转视点的参考位置。同时对于  $0.9599 < \beta \leq \beta_{r_{\max}}$ , 亦可求得对应的最大上表面面积  $S_{2\max}$  及翻转参数  $(\beta_{2\max}, d_T)$ 。通过比较  $S_{1\max}$  和  $S_{2\max}$ , 选取较大者对应的翻转参数作为下一最优翻转视点的位置参数。

### 3.3.2 遮挡规划策略

对于新视点下存在的遮挡问题, 可理解成缺失部分的外法矢与  $z$  轴的夹角超出了视觉系统的可视翻转角范围。基于此提出: 首先依据遮挡边界的信息获得遮挡边界点 (取所有遮挡边界点在平面  $zO_T y$  内投影点的中心), 求取遮挡边界点连线的外法矢与  $z$  轴的夹角, 使其满足视觉系统的可视翻转范围, 从而确定出遮挡视点的位置参数。

如图 11 所示, 获得的遮挡边界点的坐标为:  $T_{oci}(y_{T_{oci}}, z_{T_{oci}})$ ,  $T_{oc(i+1)}[y_{T_{oc(i+1)}}, z_{T_{oc(i+1)}}]$ , 则两者连线  $T_{oci} T_{oc(i+1)}$  的外法矢为

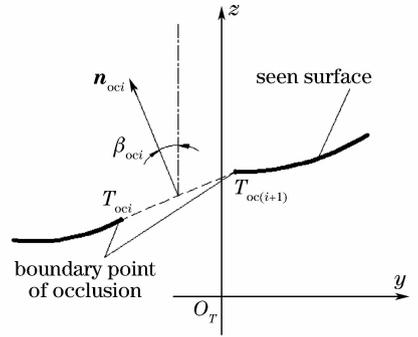


图 11 遮挡规划简图

Fig. 11 Sketch of occlusion planning

$$\mathbf{n}_{oci} = \begin{bmatrix} -\frac{z_{T_{oc(i+1)}} - z_{T_{oci}}}{y_{T_{oc(i+1)}} - y_{T_{oci}}}, 1 \end{bmatrix}, \quad (16)$$

则  $\mathbf{n}_{oci}$  与  $z$  轴的单位向量  $\mathbf{I}_z = (0, 1)$  的夹角  $\beta_{oci}$  为

$$\cos \beta_{oci} = \frac{\mathbf{n}_{oci} \cdot \mathbf{I}_z}{|\mathbf{n}_{oci}| \cdot |\mathbf{I}_z|}, \quad (17)$$

依据(3), (4) 式可求得保证该遮挡部分可视的工作台的翻转角度范围为

$$\beta_{T_{ocin}} - \beta_{oci} \leq \beta \leq \beta_{T_{ocim}} - \beta_{oci}, \quad (18)$$

为使视觉系统获得所有的遮挡部分, 选取各个遮挡位置处工作台需翻转角度的交集, 即工作台的翻转角度范围为

$$\beta \in [\max\{\beta_{T_{ocin}} - \beta_{oci}\}, \min\{\beta_{T_{ocim}} - \beta_{oci}\}]. \quad (19)$$

为保证获得遮挡部分的效率, 选取上述角度范围内最小值作为下一遮挡视点。

## 4 实验

为验证算法的可行性, 选取实物进行三维数字化实验, 实验过程及结果分析为:

实验 1: 实验模型是如图 12(a) 所示的杯子, 获得初始位置下的物体表面信息 [图 12(b)], 可知存

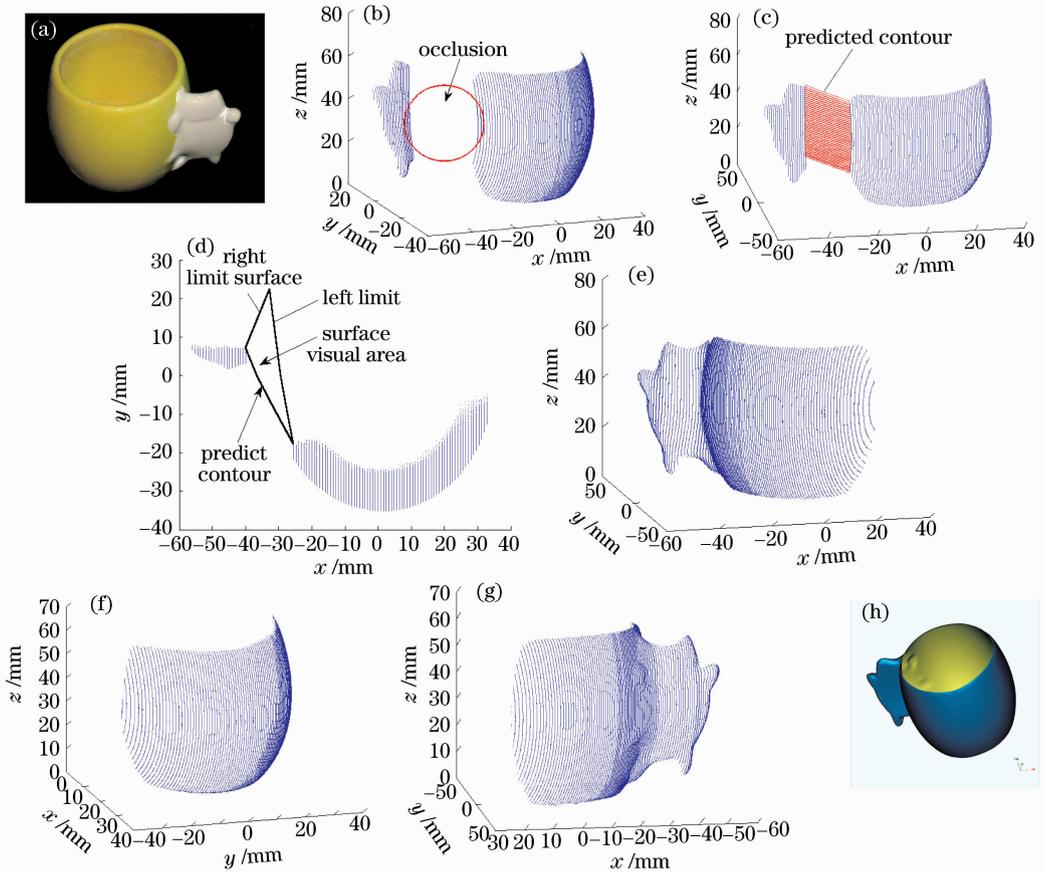


图 12 实验模型：杯子。(a) 杯子的实体模型；(b) 视点 1；(c) 遮挡部分的预测轮廓；(d) 遮挡规划；(e) 视点 2；(f) 视点 3；(g) 视点 4；(h) 重建后的杯子模型

Fig. 12 Test model: cup. (a) The model of cup; (b) viewpoint 1; (c) the predict contour; (d) occlusion planning; (e) viewpoint 2; (f) viewpoint 3; (g) viewpoint 4; (h) reconstructed model

在遮挡,构建出遮挡部分的轮廓模型[图 12(c)],进行遮挡规划[图 12(d)],可得系统最优空间位置及所获取的最大可视面积。

表 1 视点 1 下遮挡规划参数

Table 1 Parameters of occlusion planning under viewpoint 1

Parameter	Value
$S_{oc}/\text{mm}^2$	603.0519
$\theta_{oc}/\text{rad}$	0.6981

由表 1 可得,工作台逆时针旋转 0.6981 rad 后获得最大可视部分的面积为 603.0519  $\text{mm}^2$ ,故可获得遮挡部分信息如图 12(e) 所示,在此视点下继续正常的视觉规划获得物体信息如图 12(f), (g) 所示,最终重建出物体模型,如图 12(h) 所示。

实验 2: 实验模型如图 13(a) 所示,在初始位置下,获得物体的侧面信息如图 13(b)~(e) 所示,依据视点 4 的侧面信息构建出物体上表面的曲面模型如图 13(e) 所示。获得视觉系统的最佳翻转参数如表 2 所示。

表 2 视点 4 下视点规划所得下一视点位置参数  
Table 2 Parameters of NBV position of viewpoint 4

Parameter	Value
$\beta_T/\text{rad}$	1.309
$d_T/\text{mm}$	-32.9151
$S_{Tmax}/(10^4 \text{mm}^2)$	2.3985

由表 2 可知,视觉系统能够获得的最大上表面面积为  $2.3985 \times 10^4 \text{mm}^2$ ,下一最优翻转视点的位置参数为:  $\beta_T = 1.309 \text{ rad}$ ,  $d_T = -32.9151 \text{ mm}$ ,在该视点位置下获得的上表面信息如图 13(f) 所示,可知存在遮挡,进行遮挡规划[图 13(g)],可得表 3。

表 3 视点 5 下的遮挡规划参数

Table 3 Parameters of occlusion planning under viewpoint 5

Parameter	Value
$n_{oc1}$	(-0.26, 1)
$n_{oc2}$	(-0.25, 1)
$n_{oc3}$	(-0.78, 1)
$\beta_{oc}/\text{rad}$	0.27

依据表 3 可获得物体的上表面信息,如图 13(h) 所示,最后重建出物体模型,如图 13(i) 所示。

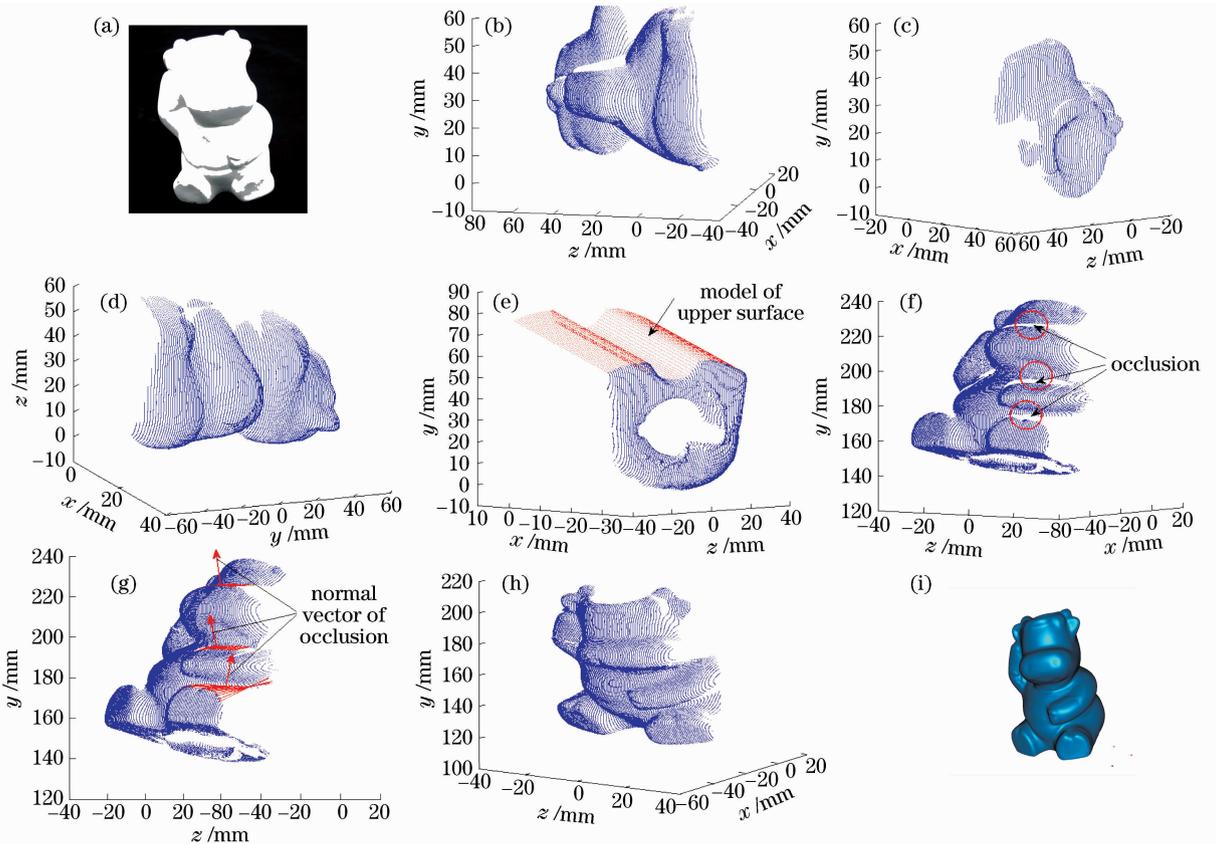


图 13 实验模型:牛模型。(a) 牛的实体模型;(b) 视点 1;(c) 视点 2;(d) 视点 3;(e) 视点 4 及物体上表面曲面模型, (f) 视点 5;(g) 遮挡部分的外法矢;(h) 视点 6;(i) 重建后模型

Fig. 13 Test model: cow. (a) The model of cow; (b) viewpoint 1; (c) viewpoint 2; (d) viewpoint 3; (e) viewpoint 4 and the model of upper surface; (f) viewpoint 5; (g) the normal vector of occlusion; (h) viewpoint 6; (i) reconstructed model

## 5 结 论

提出利用线激光单目视觉系统来获取未知物体的表面信息,并将物体的重建过程分两大步进行:第一步主要重建物体的侧面信息,重点保证各个视点下获取数据的完整,针对测量过程中的遮挡问题,提出首先确定遮挡部分的预测轮廓信息,然后结合视觉系统的可视空间确定出视觉系统的最佳空间位置;另外给出了获取侧面信息的规划自终止策略。第二步规划的目的是获取物体的上表面信息,首先依据极小翻转曲面预测出物体的上表面曲面模型,选取能够获得最大上表面面积的视觉系统位置作为下一最佳翻转视点。另外,针对该测量过程中的遮挡问题,以遮挡部分的外法矢作为遮挡部分的方向视点,以保证最终测量数据的完整。最后通过对三维实体模型的数字化实验,验证了所提出算法的可行性。

## 参 考 文 献

1 Xie Zexiao, Li Xuyong, Xin Shaohui *et al.*. Underwater line

structured-light self-scan three-dimension measuring technology [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(8):2010~2014

解则晓,李绪勇,辛少辉等. 水下线结构光自扫描三维测量技术 [J]. *中国激光*, 2010, **37**(8):2010~2014

2 Ye Jing, Zhou Changhe, Jia Wei. Miniaturized optical system for 3D measuring of pipe inner surface [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(8):2025~2028

叶晶,周常河,贾伟. 小型管道内壁三维成像测量系统 [J]. *中国激光*, 2010, **37**(8):2025~2028

3 He Yuhang, Cao Yiping, Zhai Aiping. A 3-D measurement method with orthogonal composite light based on fringe contrast and background calibration [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(11):3191~3196

何宇航,曹益平,翟爱平. 基于条纹对比度和背景光校准的正交复合光三维测量方法 [J]. *光学学报*, 2010, **30**(11):3191~3196

4 Sun Jian, Zhang Xiaohui, Ge Weilong *et al.*. Relation between imaging quality and gate-control signal of underwater range-gated imaging system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(8):2185~2190

孙健,张晓晖,葛卫龙等. 距离选通激光水下成像系统的门控信号对图像质量的影响 [J]. *光学学报*, 2009, **29**(8):2185~2190

5 C. I. Connolly. The determination of next best views [C]. *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*. *IEEE Robotics & Automation Society*, 1985, **2**:432~435

6 G. Tarbox, S. Gottschlich. Planning for complete sensor

- coverage in inspection [J]. *Comput. Vis. Image Understand*, 1995, **61**(1):84~111
- 7 W. R. Scott. Model-based view planning [J]. *Machine Vision and Applications*, 2009, **20**(1):47~69
- 8 He Bingwei, Zhou Xiaolong. Research of sensor planning method in line laser three-dimensional measurement system [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(6):1618~1625
- 何炳蔚,周小龙. 线激光三维测量仪中视觉传感器规划方法研究 [J]. *中国激光*, 2010, **37**(6):1618~1625
- 9 X. Yuan. A mechanism of automatic 3D objects modeling [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1995, **17**(3):307~311
- 10 R. Pito. A solution to the next best view problem for automated surface acquisition [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1999, **21**(10):1016~1030
- 11 S. B. Paul, K. A. Peter. View planning and automated data acquisition for three-dimensional modeling of complex sites [J]. *Journal of Field Robotics*, 2009, **26**(11-12):865~891
- 12 J. E. Banta, L. M. Wong, C. Dumont. A next-best-view system for autonomous 3-D object reconstruction [J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 2000, **30**(5):589~598
- 13 F. Farshidi, S. Sirouspour, T. Kirubarajan. Robust sequential view planning for object recognition using multiple cameras [J]. *Image and Vision Computing*, 2009, **27**(8):1072~1082