

# 基于模型的水下目标三维视觉信息复原\*

杨忠根 乔景禄 赵昶冰 栾晓明

(哈尔滨工程大学电子工程系 哈尔滨 150001)

**摘要** 水下目标三维视觉信息复原是水下智能机器人(AUV)感知环境信息、进行自主作业的关键技术。本文介绍了一种基于模型的复原方法,即通过检测目标边缘拟合轮廓,根据模型知识复原三维信息。该方法已经成功地引导 AUV 进行了水下自主避障、自主剪缆、自主投掷等智能作业。

**关键词** 三维视觉,水下智能机器人,视觉导引,目标识别,图象处理\*

## 1 引言

目前,西方各工业国家和我国都正在大力研制用于海洋开发的水下智能机器人(AUV)。AUV 智能的关键是水下实时三维视觉<sup>[1]</sup>。从机器人视觉研究的发展与现状可看出,它经历了由陆基向水下发展的过程。现在陆基视觉已经得到了相当广泛的研究与开发,无论是理论上还是实践上,陆基视觉都远比水下视觉成熟;由于实现水下光视觉存在更大的困难,例如,水中复杂的吸收效应和散射效应等等,使得水下光视觉实际上仍处于起步阶段。许多在陆基视觉中的成熟技术,或不适于水下或不能简单地移植到水下。因此,水下三维视觉的研究必须考虑水下环境和水下成像特点。

三维形状复原是机器人视觉的关键技术,也是最难实现的技术。这是因为三维物体的二维成象是一个多对一的透视投影过程,使得其逆过程,即从三维物体的二维视图复原其三维形状并确定其在空间的位姿是个一对多的病态过程<sup>[2]</sup>。只有依据各种约束条件和合理假设,充分利用可达的先验知识,才能正则化此最优求解问题。

在各种三维复原技术中,尽管有一些新思想、新观点、新技术正在不断地被研究开发出来,SHAPE

FROM X 仍是目前研究和用得最广泛的技术(即使在陆基视觉中)<sup>[3]</sup>。在水下视觉实验中发现,由于水面光和水下照明光共同造成的水下照明的严重不均匀性使得 SHAPE FROM SHADING 不适合水下。水下物体通常是足够光滑的,而且往往具有各种对称性,如旋转对称性,从而使得基于点匹配的立体(STEREO)技术在实现左右两视图之间的点匹配变得十分困难。由于感兴趣的水下物体经常是人造物体(例如石油管道、水下潜器、鱼水雷等),它们一般不呈现纹理特性,而且即使有纹理特性的水下物体(如鱼),也往往由于水下恶劣的成像条件使得其纹理特征被掩埋在图象噪声中。这样在水下也难以应用 SHAPE FROM TEXTURE 技术。在水下使用 SHAPE FROM MOTION 技术的一个困难是光流不易正确估计,因为陆基视觉中用于估计光流的亮度不变性约束在水下必须进行修正;另一个困难是该技术只适合于小运动情况,即相邻时刻的两幅图象的视点和观看姿态的变化应当足够小;而在水下由于观看距离、AUV 运动速度和图象采样周期等因素使得此条件经常被违反。最后,由于光在水下传输过程中与传输介质所形成的“系统卷积”,使得水介质对图象造成的散焦效应已相当明显,这样应用 SHAPE FROM DEFOCUSING 技术也不太现实。从上述分析可知,在水下三维视觉中 SHAPE

FROM CONTOUR 技术即使不是唯一的选择,至少也是最易鲁棒实现的 SHAPE FROM X 技术。

因为本方法是根据透视投影原理从三维物体的二维视图复原其三维形状,所以必须首先解决水下摄像机标定问题,有关内容在节 2 介绍。节 3 分析水下图象并讨论目标三维形状复原技术方案。节 4 讨论复原原理和算法。节 5 分析实验结果并给出本文的总结。

## 2 水下摄象机标定

由于视觉感知功能包括精确测量目标在三维空间中的位置和姿态,所以必须精密地标定水下摄像机的内征参数。值得注意的是水下摄像机的内征参数与所在水域的水质、密度、温度等因素有关,因此必须在所使用的水域中进行标定。另外,水密玻璃与摄像机头之间的空气介质进一步复杂了水下摄像机的成象机理,从而使得现有的非线性成象模型是否适合于水下摄像机有待于进一步研究。鉴于上述考虑我们开发了一个简单有效的水下摄像机标定技术,该技术有如下特点:

### 2.1 采用线性成象模型

即:

$$x = S_x(x_f - C_x) \text{ 和 } y = S_y(y_f - C_y) \quad (1)$$

其中  $(x, y)$  和  $(x_f, y_f)$  分别为三维点  $R$  在摄像机图象平面坐标系和计算机坐标系中的坐标;  $(S_x, S_y)$  为  $x$  方向和  $y$  方向上的从计算机坐标系到摄像机图象坐标系的尺度变换因子;  $(C_x, C_y)$  是摄像机图象下面坐标系中心在计算机坐标系的坐标。由透视投影关系和式(1)可知

$$R = Zr \quad R = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}, \quad r = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{bmatrix} s_c r_f,$$

$$S_c = \begin{bmatrix} S_x & 0 & -S_x C_x \\ 0 & S_y & -S_y C_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \text{ 和 } r_f = \begin{bmatrix} x_f \\ y_f \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

### 2.2 采用平面矩形网格标定板

通过在一平面上绘制黑白相间的正方形网格可得到图 1 所示标定板。这样,任一网格点  $R_i$  在标定板为中心的目标坐标系中可表示为

$$R_i - R_0 = k_{i1}(R_1 - R_0) + k_{i2}(R_2 - R_0) \quad (3)$$

其中,  $(k_{i1}, k_{i2})$  为此网格点在标定板坐标系中的坐

标,由于它是仿射不变的,因此它是先验已知的。把式(2)代入并注意到  $S_c$  是可逆的,我们有

$$t_i r_{fi} = k_{i1} t_1 r_{f1} + k_{i2} t_2 r_{f2} + k_{i0} r_{f0},$$

$$k_{i0} = 1 - k_{i1} - k_{i2} \quad (4)$$

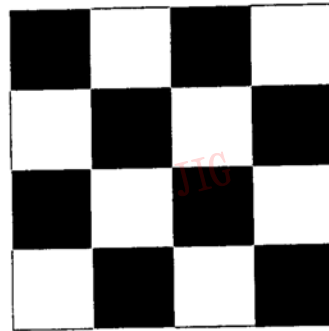


图 1 平面标定板

Fig. 1 A plane calibration plate

其中,  $t_i = z_i/z_0, i=1, 2, \dots, k-1$  为网格点  $R_i$  的相对深度,  $k$  为网格点数。由式(3)可知,对于  $k$  个网格点而言,我们有  $3(k-3)$  个关于  $(k-1)$  个相对深度未知数的线性方程。这样,当  $k \geq 4$  时,方程有解。

当相对深度确定后,由标定板坐标系的两坐标轴的正交归一性可得到下述两个方程:

$$(t_i r_{f1} - r_{f0})^T S_c^T S_c (t_2 r_{f2} - r_{f0}) = 0 \quad (5)$$

$$(t_1 r_{f1} + t_2 r_{f2} - 2r_{f0})^T S_c^T S_c (t_2 r_{f2} - t_1 r_{f1}) = 0 \quad (6)$$

对于平面板的  $m$  个互相独立的视图就可得到  $m$  个由上述二式表达的关于 4 个标定参数的方程。我们可使用最优化技术来标定水下摄像机的内征参数。

## 3 水下图象分析和复原方案

在水下成象过程中,由于光所经过的水体对光的吸收效应、散射效应和卷积效应<sup>[4]</sup>使得水下图象极不理想;不但有较严重的非均匀亮度和较低的信噪比,而且细节模糊,对比度差。此外,不均匀照明会造成目标图象的假细节,光线的入射方向与摄像机观看方向的不一致,造成了目标图象的自阴影,这样不但使轮廓线仅部分可见,而且还出现了假轮廓线。从水面入射水下的自然光的随机性增加了问题的困难。图版 I 图 2 示出了这样一个典型的水下图象实例。在这种情况下必须开发能鲁棒地提取目标真轮廓线的技术,才能正确地复原目标的三维信息。为此,我们首先针对水下成象特点对水下摄像机采集的图象进行正则化预处理,以便能在尽可能去除图象噪声的同时增强图象边缘。然后我们开发了一个适合并行图象处理硬件实现的边缘检测技术。该技

术能以较高的边缘正确检测率来确定真边缘点的位置、方向乃至曲率的亚像素边缘坐标,其细节可参看文献[5-7]。方向和曲率信息的加入不但能在提取曲线时使随机 Hough 变换(RHT)的最小子集的维数减小到原先的 1/3,而且能在 RHT 时有效地剔除非法最小子集和删除出格点。在此基础上我们开发了曲线的鲁棒、精确和实时提取技术<sup>[8]</sup>。进一步推广了文献[9,10]提出的算法。

为此,我们首先依据边缘点的位置、方向和曲率信息,使用 RHT 来分类和识别曲线,并粗估曲线参数;然后根据边缘点到粗糙提取的曲线的距离范数,来精选属于该曲线的内点并删除那些不属于它的出格点;最后根据精选出的内点的位置、方向和曲率信息,使用线性最小二乘技术或本征值一本征矢量分解技术,精确估计该曲线的参数

实际上,我们对图象中的所有曲线的提取是由

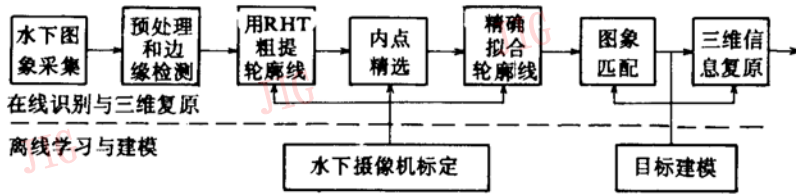


图 3 水下目标三维视觉信息复原方案

Fig. 3 The realization scheme for restoring the 3D vision information of underwater targets

图 3 示出了本文的实时水下三维视觉信息复原方法的方框图,其中,虚线以下部分为离线学习部分,虚线以上部分为在线识别与三维复原部分。

从轮廓线复原形状属于基于模型的三维视觉技术。这种技术要对每个感兴趣的物体进行离线学习,即分析组成每个感兴趣物体的几何个数、每个几何体的类型及其模型表面参数、几何体之间的空间关系等等。所有这些和一切可利用的先验知识及约束条件构成了我们的模型库和知识库。上述模型知识都不难通过离线分析和研究感兴趣物体的样本图象获得。尤其当这些物体是由多面体和二次曲面组装成的人造物体或物体的体元可近似为多面体和二次曲面时,基于模型地从轮廓线参数复原实体的三维形状与位姿将是方便而精确的。后面将以典型例子加以说明。

#### 4 水下目标三维信息复原方法

本方法的关键是曲线提取和参数拟合。曲线提取的任务是从边缘点集确定图象中存在哪些曲线和这些曲线的类型及参数是什么。这样,我们必须首先确定哪些点构成了属于同一条曲线的边缘点子集,在此过程中应能有效地删除混杂于此子集中的出格点(outlier);然后由精选出的内点(inlier)集合来拟合该曲线的由所识别出的类型所定义模型参数。可见,曲线提取包括了边缘聚类、曲线分类与识别、出格点删除、和曲线拟合等过程。

简入繁地进行的,即首先提取所有的直线并从边缘点集中删除属于这些直线的边缘点,然后从剩下的边缘点集提取所有的二次曲线并再从边缘点集中删除属于这些二次曲的边缘点,……直到剩下的边缘点集已不包含任何有意义的曲线为止。

下面我们以直线和二次曲线的提取为例来简要地说明此曲线提取技术。

(1)如图 4 所示,设所欲提取的直线在图象坐标系中为

$$x\cos\theta + y\sin\theta = \rho \tag{7}$$

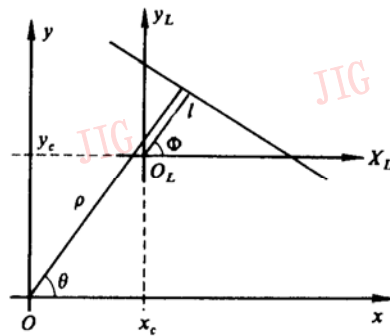


图 4 直线情况

Fig. 4 The Straight line case

它在所检测出的边缘象素 $(x_c, y_c)$ 为中心的局部坐标系中为

$$(x - x_c)\cos\varphi + (y - y_c)\sin\varphi = l \tag{8}$$

比较式(7)和式(8)易有

$$\theta = \varphi \text{ 和 } \rho = l + x_c\cos\varphi + y_c\sin\varphi \tag{9}$$

这样利用上述的象素边缘检测算法提供的边缘位置

和方向 $(x_c, y_c, l, \varphi)$ 及曲率信息(此时“无穷大”的曲率表明该边缘点是直线型的),就可得到直线型边缘点在 Hough 空间中的映射点 $(l + x_c \cos \varphi + y_c \sin \varphi, \varphi)$ ,这样利用直线型边缘点在 Hough 空间中的表决就可聚类出所有直线的粗估值,从而得到候选直线集合 $\{(\rho_j, \theta_j | j=1, 2, \dots, J)\}$ ,然后根据直线型边缘点到候选直线的距离

$$d_{ij} = |(x_i + l_i \cos \varphi_i) \cos \theta_j + (y_i + l_i \sin \varphi_i) \sin \theta_j - \rho_j| \quad (10)$$

和边缘方向来精选直线 $L_j$ 的内点,如果 $|\varphi_i - \theta_j| < T_\theta$ 并且 $d_{ij} < T_d$ ,则边缘点 $i$ 属于直线 $L_j$ 。最后,由精选出的内点集合 $\{i_j | i_j=1, 2, \dots, I_j\}$ ,根据

$$\begin{aligned} \theta_j &= \Phi_{i_j} \quad \text{和} \\ (x_{i_j} + l_{i_j} \cos \varphi_{i_j}) \cos \theta_j + (y_{i_j} + l_{i_j} \sin \varphi_{i_j}) \sin \theta_j &= \rho_j \end{aligned} \quad (11)$$

精确拟合直线 $L_j$ 的参数 $(\rho_j, \theta_j)$ 。

(2)又设欲提取的二次曲线为

$$x^2 + 2a_1xy + a_2y^2 + 2a_3x + 2a_4y + a_5 = 0 \quad (12)$$

则可以证明  $\frac{1}{y_{xx}}(y_x^2 + a_1x + a_3) - A^{\frac{1}{3}} = 0$  和

$$y_{xx}^{\frac{2}{3}}(y_x^2 + 2a_1y_x + a_2) + A^{\frac{1}{3}} = 0 \quad (13)$$

$$\text{其中, } A = \begin{vmatrix} a_2 & a_1 & a_4 \\ a_1 & 1 & a_3 \\ a_4 & a_3 & a_5 \end{vmatrix} \quad \text{和}$$

$$y_{xx} = r_c^{-1}(1 + y_x^2)^{\frac{1}{2}} \quad (14)$$

$r_c$ 为曲率, $y_x$ 和 $xy_{xx}$ 为 $y$ 关于 $x$ 的一阶和二阶导数。这样我们在随机采样两个曲线型边缘点时,它们的位置、方向和曲率信息提供了如式(12)式(13)所示的关于5个参数 $\{a_i^{(j)} | i=1, \dots, 5\}$ 的6个方程组成的系统,其中冗余的一个方程可用于判断此点是否能组成一合法的二次曲线。这可以此方程组系统的行列式是否为零作为判据:如此行列式不为零,则此点对为一不合法的最小子集,我们舍弃它,否则它为一合法的最小子集,我们可由其中的任意5个方程解出此点对在 Hough 空间中的映射点。这样,利用随机采样到的曲线型边缘点对在 Hough 空间的表决,就可聚类出所有的二次曲线的粗估值,从而得到候选二次曲线集合;然后根据边缘点满足二次曲线的程度来精选它的内点集合,即对一候选二次曲线的粗估参数而言,如边缘的位置、方向和曲率足够良好地满足式(12)式(13),则它属于此二次曲线;最后由精选出的内点集合根据式(12)和式(13)最小二乘地精确估计证实了的二次曲线的参数。

在鲁棒、精确和实时地提取图象中的所有真轮

廓线后,不难根据模型库和知识库提供的目标模型视图及其特征,进行实体图和模型图之间的匹配。对于以多面体和二次曲面体为体元的目标集合来说,这是不难做到的。根据匹配结果就可正确识别出感兴趣物体的类型,并在三维复原级调用相应的模型知识。下面我们以前述为圆的椭球为例说明此法。

可证:这样的椭球的表面方程为:

$$(R - R_0)^T A (R - R_0) = b^2 \quad (15)$$

其中 $A = I - (1 - k^2)l'l^T$ 和 $k = b/a$ , $R_0$ 为椭球中心, $l$ 为椭球主轴方向, $a, b$ 分别为椭球长短轴半径, $R$ 为椭球面上的三维点。

把式(2)代入并利用椭球轮廓线上的图象点的深度唯一性约束(即视线在轮廓线椭球面相切),则有

$$r^T B r = 0 \quad \text{其中,}$$

$$B = (R_0^T A R_0 - b^2)A - A R_0 (A R_0)^T \quad (16)$$

易由上式证明它表述了椭球轮廓线为椭圆。比较式(12)和式(16),不难由精估的椭圆参数复原椭球的三维视觉信息 $R_0$ 和 $l$ ,其中 $R_0$ 表明了椭球在三维空间的位置,而主轴方向 $l$ 表明了它在三维空间的姿态。应当指出的是,椭球的模型参数,即长短轴半径是先验已知的。

文献[11]从理论上分析了如何从单视图中的轮廓线复原目标的三维形状,但其分析过于理想化。一是不便于应用,二是它当目标形状较复杂时,单视图中的轮廓线还不能提供复原目标三维位姿的足够的信息,即当轮廓线参数的自由度小于目标形状参数的自由度时,就无法从单视图轮廓线确定目标的三维位姿。鉴于上述考虑,类似于椭球情况,我们对每个感兴趣的目标都建立了相应的三维位姿复原算法。这样做的好处是实现起来简单、有效和可靠,另外系统的可扩充性也较好。

## 5 实验结果

将上述方法集成在 AUV 中,在哈尔滨工程大学的大水池里进行了一系列实验,实验表明它已达到下述性能:(1)对于分辨率为 $512 \times 512 \times 8$ 比特图象,工作节拍为1幅/秒,从图象采集到完成目标识别与三维位姿确定所需时间 $< 0.8$ 秒。(2)在中等清晰水池中的观看距离:在自然光下,8米起能开始粗略定位,3.5米起可以不出差错、不遗漏地正确定位;在配有装于 AUV 上的水下照明时,10米起能开始以逐渐增加的正确率正确定位,5米起可以不

出差错、不遗漏地正确定位。(3)最大定位误差 $< 3.40\%$ ,平均误差 $< 1.47\%$ ;最大标准离差为 $2.00\%$ ,平均为 $1.17\%$ 。(4)可识别对象:似锚雷物体(球半径40厘米,链直径2.7厘米)、圆柱、平板、角反射体、球、椭球、立方体、三棱柱等人工水下物体。目标尺寸约在30—40厘米。(5)正确识别率几乎100%。

实验表明本方法的可靠性与鲁棒性均相当高。在各种照明条件下(包括无自然光),水中的大量气泡和浮游杂物以及自由游泳的大小不等的鱼,背景干扰物(往往为未撤除的其它人造物体),池壁与池底的背景图象等都未干扰系统的正常工作。另外,当部分可见(因目标较大程度地偏离屏幕中心或目标自遮挡效应等)及目标上的假轮廓线和干扰细节(如斑驳等)均未影响系统的正确识别与定位。

图版I图5示出了用本方法复原悬浮于水中的似锚雷体的球时的工作情况,可看到拟合后似锚雷球体边缘是准确的。图版I图6示出了本系统三维视觉感知悬浮于水中的角反射体后拟合的目标边缘的情况。图版I图7是感知圆柱体障碍物时拟合圆柱边缘的情况。图版I图8示出了感知放于水底的椭球时拟合的椭球边缘的情况。上述图象均用本方法复原的轮廓线叠加于感兴趣目标的灰度图象中,目标中心的三维位置示于其图的下部。这些典型例表明本方法圆满地完成了AUV实时执行智能使命时的视觉任务。

通过分析水下光学成像机理和我们感兴趣目标的特点,在众多“SHAPE FROM X”的方法中选择了容易在水下精确和实时实现的“SHAPE FROM CONTOUR”法。通过对每个感兴趣物体进行的高线学习与建模,建立了模型库和知识库,并成功地用于对感兴趣物体进行图象匹配、目标识别、形状复原和三维位姿确定。为了提高系统的可靠性和鲁棒性,

我们在系统中采用了最优水下图象预处理技术、ZOM亚象素边缘检测技术、粗精组合式的鲁棒、精确和实时提取曲线技术等,使得我们实现的实时水下三维视觉系统达到了较高的性能,在导引AUV在进行水下智能作业中获得成功。

### 参考文献

- [1] H. G. Nguyen, P. J. Heckman, Jr. and Pai, Real Time Pattern Recognition for Guidance of an Autonomous Undersea Submersible, Proc. of IEEE Conf. on Robotics and Automation, 1988, 1767—1770
- [2] D. H. 巴拉德, C. M. 布朗著, 计算机视觉, 北京科学出版社, 1987.
- [3] S. Negahdaripour, C. H. Yu and A. H. Shokollahi, Recovering Shape and Motion from Undersea Images, IEEE J. of Oceanic Eng. 15(3), 1990, 189—200
- [4] J. S. Jaffe, Computer Modeling and the Design of Optimal Underwater Imaging Satems, IEEE J. of Ocean Eng. 15(2), 1990: 101—111.
- [5] S. Ghosal and R. Mehrotra, Orthogonal Moment Operators for Subpixel Edge Detection, Pattern Recognition, 26(2), 1993, 295—306
- [6] Qiao Jinlu, Yang Zhonggen and Sun Shenghe, A New Method to Fast Extract the Dominant Points Directly from Gray-level Image, Chinese Journal of Electronics (电子学报海外版) 4(2), 1995, 45—53
- [7] Yang Zhonggen, Qiao Jinlu, Sun Shenghe and Zhao Changbing, Detecting Edge and Identifying Arcs in Image by Means of Orthogonal Moment Operators, ICMEI'95, Dec. 1995
- [8] Yang Zhonggen et. al., Robustly, Exactly and Real-timely Extracting Straight Lines and Conics from a Gray-level Image, ICNNSP'95, Dec. 1995
- [9] L. Xu and E. Oja, Random Hough Transform (RHT), Basic Mechanisms, Algorithms and Computational Complexities, CVGIP, IU 57(2), 1993, 131—154.
- [10] G. Roth and M. D. Levine, Extracting Geometric Primitives, CVGIP, IU 58(1), 1993, 1—22.
- [11] D. J. Kriegmen and J. Ponce, Recognizing and Positioning Curved 3-D Objects, IEEE Tr. on PAMI 12(12), 1990.



杨忠根 哈尔滨工程大学电子工程系副教授。主研究方向是图象处理、模式识别、计算机视觉和人工智能。已发表论文十多篇。

# Model-Based Restoration of 3-D Vision Information about Underwater Targets

Yang Zhonggen, Qiao Jinglu, Zhao Changbing, Luan Xiaoming

*(Dept. of Electronic Engineering, Harbin Engineering University 150001)*

**Abstract** The restoration of 3-D vision information about underwater targets is the key problem for an Autonomous Under water Vehical (AUV) to sense environmental information and perform autonomous tasks. This paper presents a model-based restoration method. This method makes the curve fitting based on the detected edge points of targets and restores the 3D information of targets using the model knowledge. The method has been employed, successfully, for the guidance of an AUV in its autonomous underwater operations.

**Keywords** 3-D vision, AUV, Vision Guidance, Object recognition, Image Processing