

文章编号: 1000-0615(2018)06-0996-10

DOI: 10.11964/jfc.20170510831

基于成像声呐的鱼类三维空间分布

荆丹翔, 韩军*, 王杰英, 王晓丁, 徐志伟

(浙江大学海洋学院, 海洋传感与网络研究所, 浙江舟山 316021)

摘要: 针对海洋牧场中鱼群的三维空间分布问题, 本研究提出一种利用成像声呐进行位置计算的方法。将成像声呐固定在船舷外侧的水下, 并保证波束发射方向和声呐移动方向一致, 通过走航的方式采集水下鱼群信息。首先对采集的原始数据进行图像处理, 包括图像构建、背景去除、目标提取等, 然后利用基于交互式多模型联合概率数据关联算法对水下目标进行关联处理, 得到同一个目标在声呐水平视场中不同帧图像中的对应关系, 在此基础上根据连续两帧图像中目标位置关系计算目标的空间坐标, 最后结合关联算法获得多目标在三维空间中的运动轨迹以及深度分布情况。研究表明, 本方法可以有效获取鱼群在水下的三维运动轨迹及其分布情况, 这将为鱼类行为分析以及海洋牧场的资源评估提供技术支持。

关键词: 海洋牧场; 空间分布; 成像声呐; 图像处理; 目标关联

中图分类号: S 932

文献标志码: A

早在20世纪初, 回声测距法就被用于水下冰山的定位^[1]。到20世纪50年代初, 量化的水声试验得到大量开展^[2-3]。随着数字电路技术的发展, 20世纪70年代产生了用于水下鱼群探测的分裂波束式回波探测器。然而当时的鱼探仪虽然探测覆盖范围大, 但回波信号投影形成的声学图像精度很低, 大部分的鱼探仪在水平方向的波束宽度大于 5° (-3 dB时), 对目标在距离上的测量存在很大误差, 同时由于脉冲长度的限制也导致鱼探仪对目标的投影存在很大偏差^[4]。20世纪80年代引入的标准球测量技术对回波积分器的校准使得鱼探仪测量精度获得很大提升^[5]。到了20世纪90年代, 商业鱼探仪开始广泛用于海洋牧场中的渔业资源评估, 科学家们利用回波计数与回波积分法对海洋牧场及人工鱼礁附近的鱼群密度和分布特性进行研究^[6-9]。

虽然相较于传统的基于捕捞进行的渔业资源评估, 利用鱼探仪可以更便捷、更准确地获得鱼群数量估计与分布特性, 但鱼探仪难以实现对个体目标的连续观测与跟踪, 而个体目标

在海洋牧场中的运动、摄食、生殖、呼吸等行为以及群落分布情况是海洋牧场建设中的重要研究课题^[10-11]。早期的研究主要是通过对实验室中个体目标进行观测来实现, 随着电子技术的发展, 水下摄像机被用于渔场中的鱼类观测与数量估计^[12]。水下摄像机可以通过影像形式记录水中鱼体的运动情况, 但对于昏暗或浑浊的水下情况则显得有心无力。成像声呐作为一款高分辨率的多波束声呐, 既可以克服光学摄像头在昏暗水下工作的困难, 又可以实现传统鱼探仪不具备的水下目标成像的功能^[13], 因此本研究提出一种利用成像声呐对鱼群进行动态观测, 并对鱼类的三维空间分布进行研究的方法。

1 材料与方法

1.1 实验材料

本研究采用的成像声呐是一种利用声学透镜发射独立波束的多波束系统——双频识别声呐。传统的多波束系统采用了延时阵列或者数

收稿日期: 2017-05-05 修回日期: 2017-10-31

资助项目: 浙江省自然科学基金(LY17C190007); 钱江人才计划项目(2013R10023)

通信作者: 韩军, E-mail: 11325026@zju.edu.cn

字波束形成技术进行信号的收发, 从而完成信息获取, 而双频识别声呐通过加入声学透镜使系统运行功耗大大降低。双频识别声呐(dual-frequency identification sonar)简称DIDSON, 最早是由华盛顿大学应用物理实验室为美国“空间与海上战争系统中心”研发的设备, 是一款运用“声学透镜”的成像声呐系统, 它可以在昏暗或浑浊水域中生成几乎等同光学影像质量的高清晰图像^[14], 因此经常被用于水下鱼群的观测、计数等活动^[15-18]。它由3块透镜和换能器阵列组成, 其中3块透镜分别为平凹透镜、平凸透镜和双凹透镜, 并由聚甲基戊烯材料制成, 其内部填充3MFC-70氟化液。换能器阵列由96个排列成直线型的独立阵元组成^[19]。通过声呐波束与声学透镜的配合工作形成完美的声学影像是系统工作的关键点, 其工作原理如图1所示。

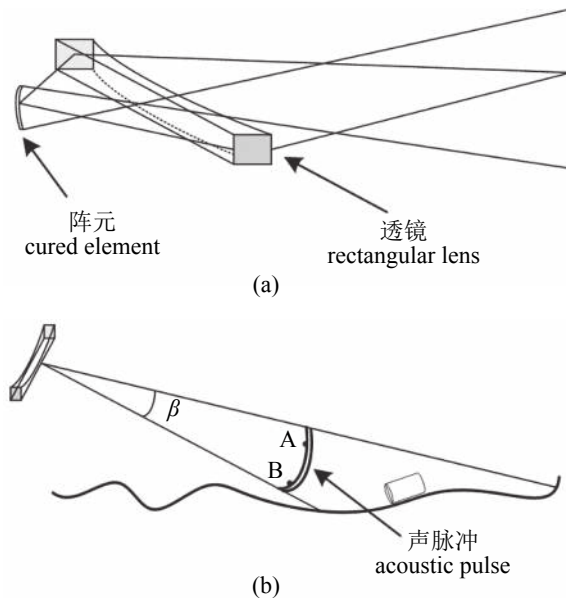


图1 双频识别声呐成像原理

(a)线性聚焦透镜; (b)声线探测模型; β 是垂直视角; A、B是同一声束中距离相等的两点

Fig. 1 Imaging principle of DIDSON

(a) line focus lens; (b) the sound pulse detection model; β is the angle of vertical field-of-view; A and B are the points at the same range in the same beam

图1-a是由一个换能器阵元与一个声学透镜组成的线性聚焦模式示意图^[20], 穿过声学透镜的声束在水平方向可以聚焦成一点, 即为很狭窄的波束, 代表波束指向性很强, 96个阵元一起发射波束形成的视场角度为 $\alpha=29^\circ$, 同时声束在垂

直方向将会有一定的视角范围 $\beta=14^\circ$ (图1-b)。当声呐与被探测目标所在平面有一个倾角时, 将形成类似图1-b的声脉冲, 换能器接收回波信号, 回波信号强度会随着目标距离、大小、时延等不同因素而改变。

当96个换能器阵元形成一个阵列同时工作时(图2-a), 接收到的回波信号可以组成一幅声学影像图, 在波束探测范围内的物体也将呈现在声学影像图上(图2-b)。但成像声呐存在一个不足, 当2个完全相同的目标处在同一阵元发射的波束中, 且位于同一距离处, 接收到的回波信号将完全相同, 不能分辨出二者的高度信息, 因此无法确认它们在水下的空间位置, 如图1-b中点A和点B位于同一阵元发射波束范围中, 且距离相等, 则接收的回波信号无法分辨这两点。

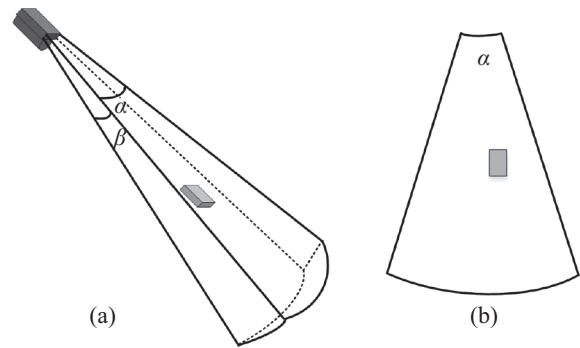


图2 双频识别声呐工作示意图

(a)发射波束图, α 是水平视角, β 是垂直视角; (b)回波图

Fig. 2 Working diagram of DIDSON

(a) transmitting beams, α is the angle of horizontal field-of-view, β is the angle of vertical field-of-view; (b) echogram

依据成像声呐只能获取目标在波束范围中距离与方位角的特点, 本研究提出利用2个时刻下的距离、方位角信息对同一个目标进行空间定位的方法, 从而获知水下多目标的分布情况。实验中DIDSON布置示意图如图3所示, 将DIDSON固定于船体右后舷, 置于水面下40 cm处, 镜头成 45° 向下, 假设小船沿着Y轴移动, 波束发射方向和小船移动方向共面, 且呈 45° 向下, DIDSON与DGPS的数据接入笔记本, 设置小船的移动速度为2 kn, 实验地点为上海滴水湖。本研究中, DIDSON的具体参数如表1所示。

1.2 图像处理

成像声呐采集的每帧数据由96个波束获得,

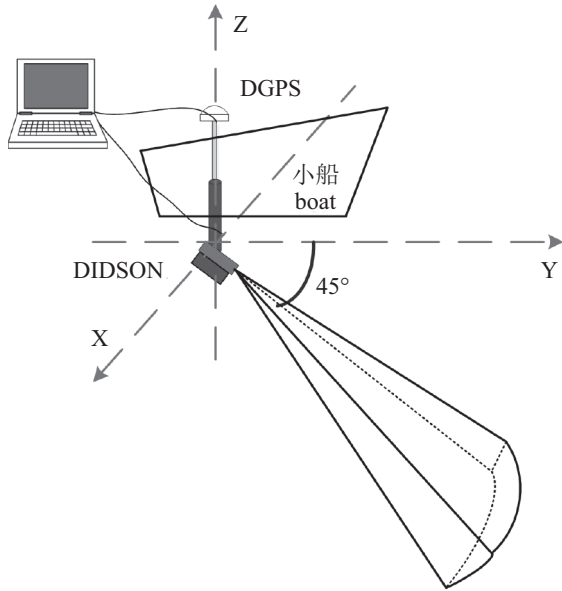


图3 DIDSON布置示意图

Fig. 3 Placement schematic illustration of DIDSON

表1 DIDSON参数

Tab. 1 Parameters of DIDSON

参数 parameters	数值 values	参数 parameters	数值 values
发射频率/MHz operating frequency	1.8	接收增益/dB receive gain	20
波束个数/个 number of beams	96	最大测距/m detection range	12
波束宽度/(°) beam width	0.3	倾斜角/(°) pitch	45
采样点/个 sampling number	512	帧率/(s ⁻¹) frame rate	13
采样频率/kHz sampling frequency	37.3	功率/W power consumption	30
空气中重/kg weight in air	7.5	水中重/kg weight in water	0.7

每个波束包含512个采样点，每帧数据可以组成一幅声学图像。通过直角坐标系与极坐标系转换关系以及插值公式，可以将96×512的二维数据转换成图2-b所示的扇环形图像，即通过图像构建还原成实际的声呐探测图。

对每帧声呐图都需要进行目标提取。为了更好地提取目标，需要去除图像中的背景。首先建立背景模型：

$$I = \bar{I} + \sigma \sin(\omega t) + k\zeta \quad (1)$$

式中 I 、 \bar{I} 、 σ 、 ω 、 t 、 ζ 分别代表图像中某个像素点的强度值、该像素点在连续若干帧图像中平均强度值、强度值变化幅度、强度值变化角频率、强度值变化时间及其噪声等级， k 是噪声等级系数，通常取1，因此当图像中像素点的强度值符合公式(2)时，即为背景：

$$I - \sigma - \zeta \leq I \leq I + \sigma + \zeta \quad (2)$$

\bar{I} 和 σ 通过下述公式进行更新：

$$\bar{I}' = \frac{(n-1)}{n} \bar{I} + \frac{1}{n} I \quad (3)$$

$$\sigma' = \frac{(n-1)}{n} \sigma + \frac{1}{n} \sqrt{2(I - \bar{I})^2} \quad (4)$$

式中 \bar{I}' 是 \bar{I} 更新后的值， σ' 是 σ 更新后的值， n 是正整数，根据图像背景的复杂程度取值。

对去除背景后的声呐图像进行目标提取，记录下目标在图像中有效像素点的位置 (x, y) 及其组成的有效区域 $S = \{(x, y)\}$ 。其中像素点位置所在的直角坐标系是以扇环对应的圆心为坐标原点、扇环的中轴线为Y轴建立的(图4)。

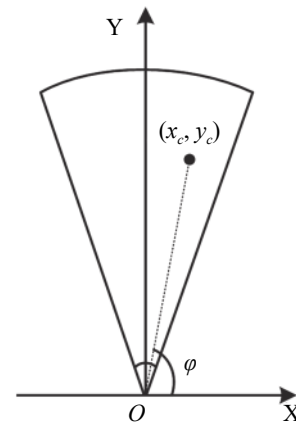


图4 水平视场对应的坐标系

Fig. 4 Coordinate system of horizontal field-of-view

为了便于目标的关联处理，必须确定一个坐标点作为目标的中心位置 (x_c, y_c) ：

$$\begin{cases} x_c = m_{1,0}/m_{0,0} \\ y_c = m_{0,1}/m_{0,0} \end{cases} \quad (5)$$

式中 $m_{u,v}(u, v \in \{0, 1\})$ ，可以通过下式获得：

$$m_{u,v} = \sum_x \sum_y x^u y^v I(x, y) \quad (6)$$

式中 $I(x, y)$ 是像素点 (x, y) 对应的强度值。

为了便于空间位置计算，将目标中心位置 (x_c, y_c) 转换到极坐标下： (r, φ) ，其中斜距 $r = \sqrt{x_c^2 + y_c^2}$ ，方位角 $\varphi = \cos^{-1}(x_c/r)$ 。

1.3 目标关联

由于水下目标运动的随机性，本研究采用交互式多模型(IMM)结合联合概率数据关联算法(JPDA)对不同帧图像中同一目标进行关联^[21-22]，

实现对目标的跟踪, 为三维空间坐标计算提供技术基础。建立的目标运动模型包括匀速模型、匀加速模型、布朗模型, 这3种模型之间的跳变规律服从转移概率已知的马尔科夫链^[23]。

假设在第 k 帧图像中, 即 k 时刻提取出 N 个目标 $\{T_i\}_{i=1}^N$, 每个目标对应一种运动模型 j ($j = 1, \dots, n, n = 3$), 则第 r 个目标的运动方程和量测方程:

$$\begin{cases} x_k = F_{k-1}^j x_{k-1} + G_{k-1}^j W_{k-1}^j \\ z_k = H_k^j x_k + G_{k-1}^j V_k^j \end{cases} \quad (7)$$

式中 x_k 、 z_k 是目标 r 在 k 时刻的状态向量和观测向量, F_{k-1}^j 、 G_{k-1}^j 是 $k-1$ 时刻的状态转移矩阵和输入矩阵, H_k^j 是量测矩阵, W_{k-1}^j 和 V_k^j 是互不相关的零均值高斯白噪声, 对应的协方差为 Q_{k-1}^j 和 R_k^j 。

目标关联的主要步骤: 首先根据 $k-1$ 时刻的状态量和运动方程得到估计量 $\hat{x}_{k|k-1}^j$ 及其对应的协方差矩阵, 接着计算当前观测量 i 和目标 r 关联且采用运动模型 j 时的关联概率 $\beta_i^{r,j}$, 结合卡尔曼增益和 $\hat{x}_{k|k-1}^j$ 对目标采用不同模型时的状态量 \hat{x}_k^j 进行更新, 然后依次更新似然函数和模型概率, 最后进行目标状态更新, 得到 k 时刻的目标状态量 \hat{x}_k 及其对应的目标协方差矩阵, 算法流程如图5所示。

1.4 空间位置计算

经过目标关联可以将不同时刻下2帧图像中的同一目标进行关联, 即 t_1 时刻下的目标位置 (r_1, φ_1) 和 t_2 时刻下的目标位置 (r_2, φ_2) 对应为同一目标。当 t_1 和 t_2 很接近时, 可以将水下目标近似为静止。假设成像声呐沿着 Y 轴移动, 并且以一定倾角向下沿着 Y 轴正方向发射波束, t_1 时刻声呐位于 O_1 , t_2 时刻声呐位于 O_2 , 点 $P(x, y, z)$ 是被测目标(图6)。为了便于计算, 以 O_1P 为体对角线建立长方体 $APBC - A_1P_1B_1O_1$ 。在立方体中, $|O_1P| = r_1$, $|O_2P| = r_2$, $\angle B_1O_1P_1 = \varphi_1$, $\angle B_2O_2P_1 = \varphi_2$, 其中 r_1 是目标在第一帧声呐图像中的斜距, r_2 是目标在第二帧声呐图像中的斜距, φ_1 是目标在第一帧声呐图像中的方位角, 同理 φ_2 是目标在第二帧声呐图像中的方位角。接着将斜距 O_1P 和 O_2P 投影至水平面 XOY 上(图7)。

由于点 $P_1(x, y)$ 是 P 在水平面 XOY 上的投影, 因此图6中的 O_1P 和 O_2P 在面 XO_1Y 上的投影为 O_1P_1 和 O_2P_1 (图7)。

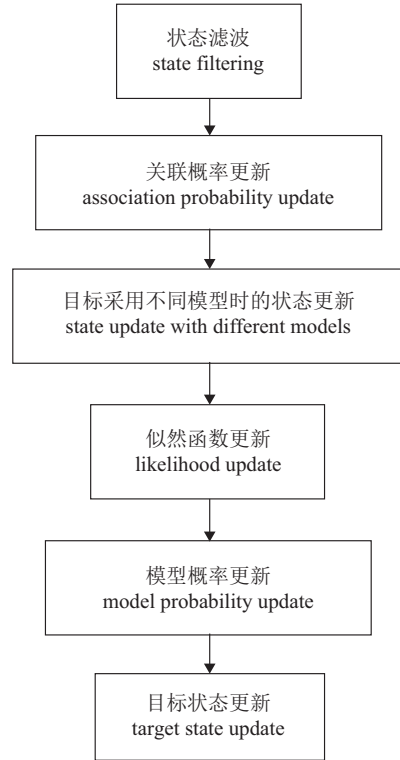


图5 IMM-JPDA算法流程图
Fig. 5 Flow chart of IMM-JPDA

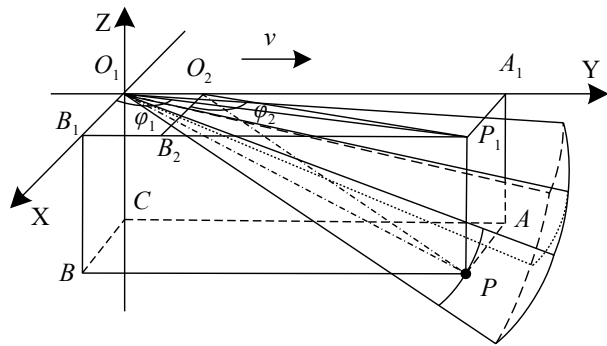


图6 目标在三维空间中的位置
Fig. 6 A target in 3D space

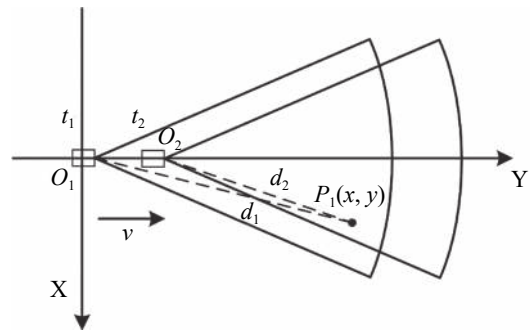


图7 目标在水平面上的影像图

Fig. 7 A target in the vertical field of view of the DIDSON

假设成像声呐沿着Y轴移动的距离为 δ ，即 $\delta = v \cdot \Delta t$ ，其中 $\Delta t = |t_2 - t_1|$ ， v 是成像声呐移动速度，则联立方程组：

$$\begin{cases} L_{O_1P_1} : y = \tan \varphi_1 \cdot x \\ L_{O_2P_1} : y = \tan \varphi_2 \cdot x + \delta \end{cases} \quad (8)$$

解上述方程组可以得到 P_1 点坐标：

$$\begin{cases} x = \delta / (\tan \varphi_1 - \tan \varphi_2) \\ y = \delta \cdot \tan \varphi_1 / (\tan \varphi_1 - \tan \varphi_2), \end{cases} \quad \text{因此 } P(x, y, z)$$

中 z 坐标为 $z = -\sqrt{r_1^2 - x^2 - y^2}$ 。

利用“目标关联”中的算法，提取出同一个目标出现在连续 n 帧图像中的坐标 $(r_1, \alpha_1), (r_2, \alpha_2), \dots, (r_n, \alpha_n)$ ；通过 (r_k, α_k) 与 (r_{k+1}, α_{k+1}) 计算 k 时刻的三维坐标 (x_k, y_k, z_k) ，其中 $k = 1, 2, \dots, n - 1$ ，连接这 $n-1$ 个坐标获得该目标在水下的三维轨迹。

2 结果

2.1 图像处理结果

对采集的每帧数据进行图像处理，主要包括将 96×512 的二维数据还原成扇形图、图像背景去除、目标提取。图8是经过图像还原后的扇形图，其中扇环两侧的数字代表测量范围，单位是m，图中的亮色区代表目标或者噪声，暗色区代表背景，结合目标形状可知图中一共有6条鱼。图9是经过背景去除后，得到的

声呐图像，从图像中可以很容易获得目标的位置信息。

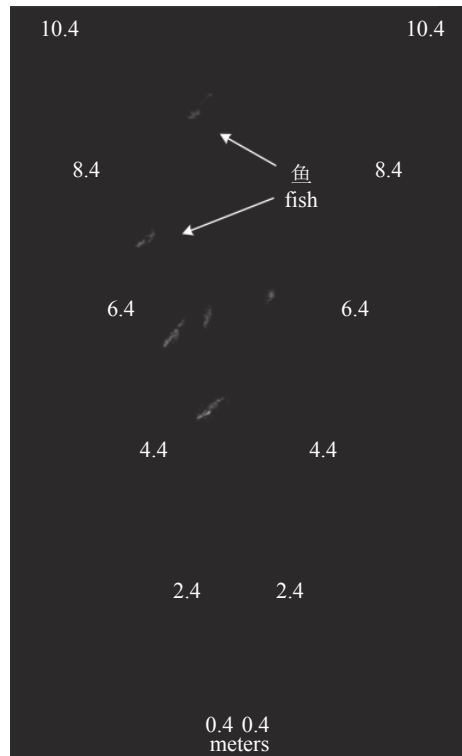


图9 背景去除后的图像

Fig. 9 The image after background elimination

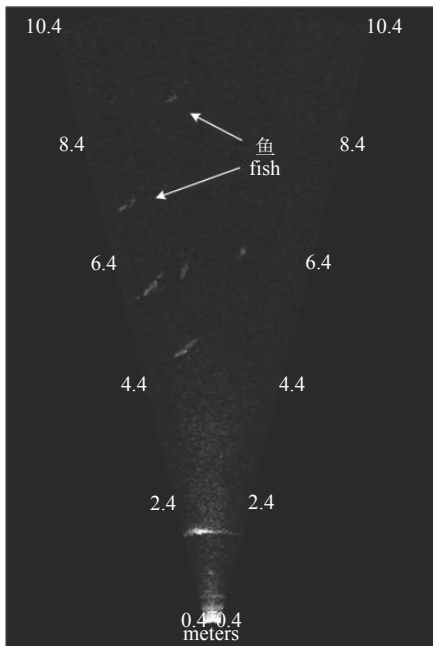


图8 DIDSON采集的声学图像

Fig. 8 Acoustic images obtained by DIDSON

2.2 目标轨迹及分布

选取10帧连续图像，依次利用相邻两帧图像中的关联目标位置计算对应的空间坐标，并将所有空间坐标相连组成运动轨迹。图10展示了3个目标的空间轨迹，由于这3个目标在10帧图像中出现的次数不相同，所以轨迹中的有效点数也不同。

不同目标在声呐视场中出现的时长各不相同，轨迹长度也不同，为了更好地描述鱼群分布情况，将每一个目标轨迹的平均深度值作为该目标的深度值。统计10 min内所有目标的深度信息，一共出现391条鱼，且大部分鱼的活动范围为水深3~5 m(图11)。

3 讨论

3.1 误差分析

为了评估空间位置计算的准确度，实验在消声水池中进行了验证。水池的尺寸长 \times 宽 \times 高为 $50 \text{ m} \times 15 \text{ m} \times 10 \text{ m}$ ，注入了8 m深的水；水池上有2架航车，每架航车上都有垂直升降挂钩，成

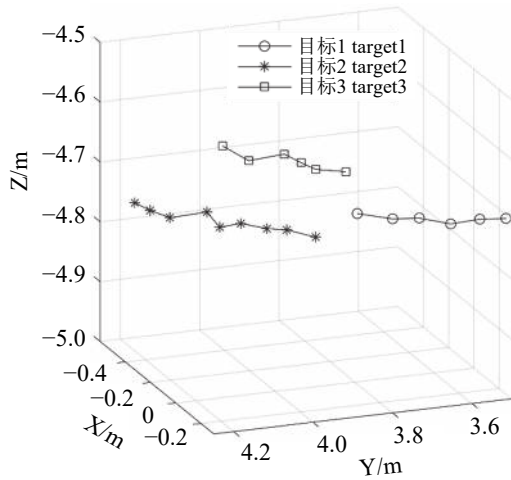


图 10 三维目标轨迹

Fig. 10 Target trajectories in 3D space

像声呐可以通过连接机构固定在垂直升降挂钩上并浸没水中(图12)。现以成像声呐入水点为坐标原点O、航车移动方向为Y轴、竖直向上为Z轴建立空间坐标系, 成像声呐波束发射方向沿着Y轴倾斜向下, 同时把一个圆柱形金属材质的物

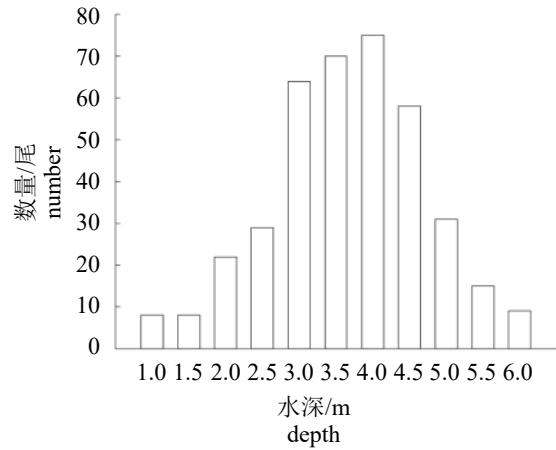


图 11 鱼群分布与水深的关系

Fig. 11 Fish distribution at different depth of water

体作为被测目标悬挂在另一架航车上且浸没水中。实验时, 通过移动航车来模拟小船在水面的走航。固定被测目标, 成像声呐朝着目标移动, 实时记录航车位移、声呐数据与时间信息, 通过数据后处理, 提取目标在声呐图像中的位置以及对应的航车位移, 利用本研究提出的空间



图 12 室内实验

Fig. 12 Indoor experiment

定位方法获取不同时刻下被测目标相对坐标原点的空间位置，并与实际位置比较，分析定位

算法的准确性。表2列举了4组不同时刻下理论计算结果与实际位置的对比。

表 2 理论结果与实际位置的对比

Tab. 2 Comparison between theoretical results and actual values

r_1/m	α_1/rad	d_1/mm	r_2/m	α_2/rad	d_2/mm	$x_{err}/\%$	$y_{err}/\%$	$z_{err}/\%$
9.296 0	1.419 6	20 049	9.307 4	1.418 7	20 101	5.7	6.3	2.8
9.276 3	1.419 3	20 128	8.527 6	1.404 7	20 889	7.1	7.0	6.8
9.205 5	1.419 2	20 180	8.496 1	1.405 3	20 915	6.4	5.7	4.6
9.015 3	1.414 9	20 364	8.547 1	1.405 1	20 863	7.8	7.5	6.5

表2中， (r_1, α_1) 和 (r_2, α_2) 是被测目标相对于成像声呐的位置，其中 r_1, r_2 是斜距， α_1, α_2 是方位角，单位是弧度； d_1, d_2 是航车相对于起点的位移，单位是mm； x_{err} 是x坐标的理论值相对于实际值的偏差，计算公式为 $x_{err} = |(x_{cal} - x_{real}) / x_{real}|$ ，其中 x_{cal} 和 x_{real} 分别代表理论值与实际值，同理 $y_{err} = |(y_{cal} - y_{real}) / y_{real}|$ ， $z_{err} = |(z_{cal} - z_{real}) / z_{real}|$ 。通过对比，发现理论值与实际位置在X、Y、Z轴的误差都小于10%。

对于实验室中理论值与实际值偏差产生的原因主要包括以下几方面：(1)航车在运动过程中由于导轨不平滑产生振动，带动了固定在垂直升降挂钩上的声呐振动，因此目标在声呐图像中的位置存在些许不确定性；(2)仪器固定误差，成像声呐固定在航车挂钩上时，偏航角不完全为 0° ，即波束发射方向没有与航车移动方向完全一致，其次声呐的横滚角不完全为 0° ，即成像声呐相对于水平面存在夹角。

3.2 其他运动模式对空间定位的影响

在实际的渔业资源评估中，成像声呐除了平行于走航方向的布置模式，还常用垂直于走航方向的模式布置(图13)。成像声呐的移动方向沿着X轴正方向，波束发射方向沿着Y轴倾斜向下，且 t_1 时刻声呐位于 O_1 ， t_2 时刻声呐位于 O_2 ，对应的目标位置分别为 (r_1, α_1) 、 (r_2, α_2) ，因此被测目标 $P(x, y, z)$ 在面 XO_1Y 的投影点 $P_1(x, y)$ 的坐标计算公式：

$$\begin{cases} y = \tan \varphi_1 \cdot x \\ y = \tan \varphi_2 \cdot (x - \delta) \end{cases} \quad (9)$$

计算获得目标位置：

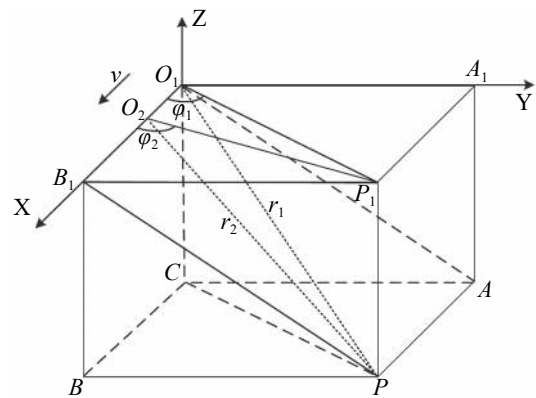


图 13 声呐波束发射方向与移动方向垂直

Fig. 13 The moving direction of sonar is perpendicular to the direction of beam launching

$$\begin{cases} x = \delta \cdot \tan \varphi_2 / (\tan \varphi_2 - \tan \varphi_1) \\ y = \delta \cdot \tan \varphi_1 \cdot \tan \varphi_2 / (\tan \varphi_2 - \tan \varphi_1) \\ z = -\sqrt{r_1^2 - x^2 - y^2} \end{cases} \quad (10)$$

在实际环境中，被测目标并不是静止的，即使在连续两帧图像极短的时间间隔中，目标依然会有微小的位置改变，因此需要分别对目标在不同速度、不同运动方向下的计算误差进行分析。假设声呐按照图13的模式布置，目标在 t_1 时刻时的坐标为 $P_1(x_1, y_1, z_1)$ ，在 t_2 时刻时的坐标为 $P_2(x_2, y_2, z_2)$ ，取它们的平均值作为 $t_1 \sim t_2$ 时间内的真实位置 $P_{real}(x_{real}, y_{real}, z_{real})$ ，即

$$\begin{cases} x_{real} = (x_1 + x_2) / 2 \\ y_{real} = (y_1 + y_2) / 2 \\ z_{real} = (z_1 + z_2) / 2 \end{cases}$$

通过公式(10)计算获得的位置为 $P_{cal}(x_{cal}, y_{cal}, z_{cal})$ ，定义误差：

$$d_{err} = |P_{cal} - P_{real}| / \left(\frac{r_1 + r_2}{2} \right) \times 100\% \quad (11)$$

式中 $|P_{cal} - P_{real}|$ 表示计算获得的位置与真实位置

之间的距离。

给定初始参数 $P_1(x_1, y_1, z_1) = P_1(8.0, 1.5, -3)$, $\delta=0.1$, 进行系统仿真, 图14显示了不同因素对

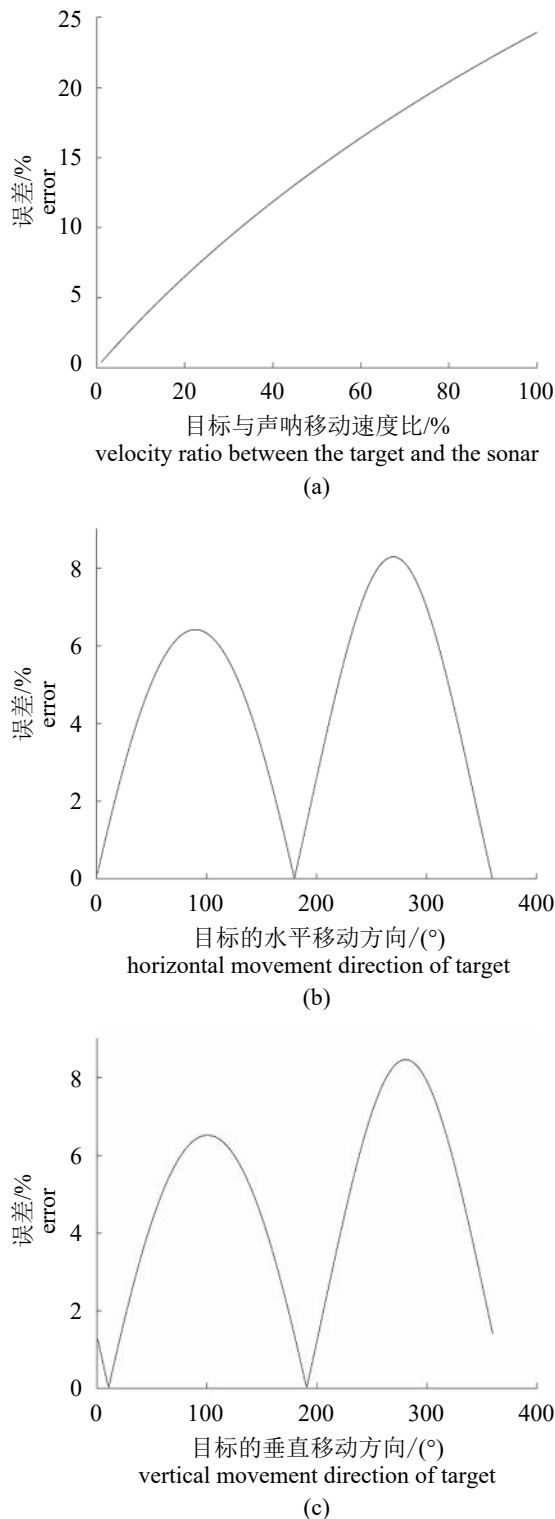


图14 不同因素对定位误差的影响

Fig. 14 The influence of different factors on positioning error

定位误差的影响。其中图14-a是目标运动方向固定, 运动速度与声呐移动速度之比对位置误差的影响; 图14-b是目标运动速度固定, 仅改变水平运动方向对位置误差的影响; 图14-c是目标运动速度固定, 仅在垂直面内改变运动方向对位置误差的影响。当被测目标相对声呐移动速度越大, 计算误差也越大; 而被测目标相对声呐的移动方向改变, 无论是在水平面还是垂直面内, 计算误差都控制在一定范围内, 且呈周期性变化。在实际环境中, 由于船只的晃动、鱼群受发动机噪声的干扰等问题, 位置误差可能更大。另外, 本研究采用基于交互式多模型联合概率数据关联算法对多目标进行关联, 当目标密集的时候, 存在运算量大、关联准确率低等问题, 后续研究中尚需对算法进行剪枝与优化。

本研究针对海洋牧场中的鱼群空间分布问题, 提出一种利用成像声呐采集水下数据, 通过声呐图像构建、背景去除、目标提取、目标关联、空间位置计算等步骤获得目标在水下的空间分布的方法。最后利用所得坐标绘制出了目标在水下的三维轨迹并对鱼群在水中所处深度进行了统计, 这将为鱼类行为分析以及海洋牧场的资源评估提供技术支持。

感谢浙江大学海洋学院实验设备部的刘鸣老师在试验场地协调和试验操作上给予的帮助, 感谢上海海洋大学沈蔚老师、张进老师在滴水湖试验中提供的帮助。

参考文献:

- [1] Wild J J, Reid J M. Application of echo-ranging techniques to the determination of structure of biological tissues[J]. Science, 1952, 115(2983): 226-230.
- [2] Cushing D H. Echo-surveys of fish[J]. ICES Journal of Marine Science, 1952, 18(1): 45-60.
- [3] Bazigos G P. The design of fisheries statistical surveys – inland waters[J]. FAO Fisheries Technical Papers, 1974, 133: 122.
- [4] Misund O A, Aglen A, Frønaes E. Mapping the shape, size, and density of fish schools by echo integration and a high-resolution sonar[J]. ICES Journal of Marine Science, 1995, 52(1): 11-20.
- [5] Bodholt H, Nes H, Solli H. A new echo-sounder system for fish abundance estimation and fishery

- research[C]//ICES Council Meeting 1988.Copenhagen, Denmark: ICES, 1983.
- [6] Lee D J, Lee W W. Hydroacoustic investigations of demersal fisheries resources in the southeastern area of the Cheju Island, Korea-acoustical estimation of fish density and distribution[J]. Journal of the Korean society of Fisheries Technology, 1996, 32(3): 266-272.
- [7] 王靖, 张超, 王丹, 等. 清河水库鲢鳙鱼类资源声学评估——回波计数与回波积分法的比较[J]. 南方水产, 2010, 6(5): 50-55.
Wang J, Zhang C, Wang D, *et al.* Acoustic assessment of silver carp and bighead carp in Qinghe Reservoir: comparing echo-counting and echo-integrating methods[J]. South China Fisheries Science, 2010, 6(5): 50-55(in Chinese).
- [8] Lee J B, Oh T Y, Yeon I J, *et al.* Estimation of demersal fish biomass using hydroacoustic and catch data in the marine ranching area (MRA) of Jeju[J]. Journal of the Korean society of Fisheries Technology, 2012, 48(2): 128-136.
- [9] Wada M, Yasui S, Saville R, *et al.* The development of a remote fish finder system for set-net fishery[C]//2014 Oceans-St. John's. St. John's, NL, Canada: IEEE, 2014: 1-6.
- [10] Viscido S V, Parris J K, Grünbaum D. Individual behavior and emergent properties of fish schools: a comparison of observation and theory[J]. Marine Ecology Progress Series, 2004, 273: 239-249.
- [11] 冯春雷, 李志国, 黄洪亮, 等. 鱼类行为研究在捕捞中的应用[J]. 大连水产学院学报, 2009, 24(2): 166-170.
Feng C L, Li Z G, Huang H L, *et al.* Application of fish behavior research in fishing[J]. Journal of Dalian Fisheries University, 2009, 24(2): 166-170(in Chinese).
- [12] 徐盼麟, 韩军, 童剑锋. 基于单摄像机视频的鱼类三维自动跟踪方法初探[J]. 水产学报, 2012, 36(4): 623-628.
Xu P L, Han J, Tong J F. Preliminary studies on an automated 3D fish tracking method based on a single video camera[J]. Journal of Fisheries of China, 2012, 36(4): 623-628(in Chinese).
- [13] Jing D X, Han J, Wang X D, *et al.* A method to estimate the abundance of fish based on dual-frequency identification sonar (DIDSON) imaging[J]. Fisheries Science, 2017, 83(5): 685-697.
- [14] Belcher E, Hanot W, Burch J. Dual-frequency identification sonar (DIDSON)[C]//Proceedings of 2002 International Symposium on Underwater Technology. Tokyo, Japan: IEEE, 2002: 187-192.
- [15] Rakowitz G, Tušer M, Řiha M, *et al.* Use of high-frequency imaging sonar (DIDSON) to observe fish behaviour towards a surface trawl[J]. Fisheries Research, 2012, 123-124: 37-48.
- [16] Grote A B, Bailey M M, Zydlewski J D, *et al.* Multi-beam sonar (DIDSON) assessment of American shad (*Alosa sapidissima*) approaching a hydroelectric dam[J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 2014, 71(4): 545-558.
- [17] Price V E, Auster P J, Kracker L. Use of high-resolution DIDSON sonar to quantify attributes of predation at ecologically relevant space and time scales[J]. Marine Technology Society Journal, 2013, 47(1): 33-46.
- [18] Jing D X, Han J, Wang G Y, *et al.* Dense multiple-target tracking based on dual frequency identification sonar (DIDSON) image[C]//Proceedings of the OCEANS 2016-Shanghai. Shanghai, China: IEEE, 2016: 1-5.
- [19] Belcher E, Matsuyama B, Trimble G. Object identification with acoustic lenses[C]//MTS/IEEE Conference and Exhibition OCEANS. Honolulu, HI, USA: IEEE, 2001: 6-11.
- [20] Cho H, Gu J, Joe H, *et al.* Acoustic beam profile-based rapid underwater object detection for an imaging sonar[J]. Journal of Marine Science and Technology, 2015, 20(1): 180-197.
- [21] 郭睿利, 郭云飞, 张云龙, 等. 基于一种改进IMMJPDA算法的地面目标跟踪[J]. 信息与电子工程, 2012, 10(4): 406-411.
Guo R L, Guo Y F, Zhang Y L, *et al.* Ground target tracking based on an improved IMMJPDA algorithm[J]. Information and Electronic Engineering, 2012, 10(4): 406-411(in Chinese).
- [22] Chen B, Tugnait J K. Brief Tracking of multiple maneuvering targets in clutter using IMM/JPDA filtering and fixed-lag smoothing[J]. Automatica, 2001, 37(2): 239-249.
- [23] Blanchet J, Gallego G, Goyal V. A markov chain approximation to choice modeling[J]. Operations Research, 2016, 64(4): 886-905.

Three-dimensional distribution of fish using an imaging sonar

JING Danxiang, HAN Jun*, WANG Jieying, WANG Xiaoding, XU Zhiwei

(*Institute of Marine Information Engineering, Ocean College, Zhejiang University, Zhoushan 316021, China*)

Abstract: In order to obtain the three-dimensional (3D) distribution of fish in a marine ranching, a method using imaging sonar to calculate the 3D coordinates of fish is proposed in this paper. The imaging sonar used in this research is a Dual-frequency Identification sonar (DIDSON). It is a multi-beam sonar that uses acoustic lens to form individual beams. It constructs a high-definition two-dimensional image for target detection by transmitting ultrasonic beams underwater and receiving the echo signals. It sets a new standard for excellence in underwater vision in black and turbid waters due to obtaining near-video quality dynamic images for the identification of objects underwater. In addition, split-beam echo-sounders have also been used on some occasions to monitor the movements of fishes. Despite the improvements achieved in fish monitoring techniques, the interpretation and classification of the data collected by the traditional acoustic techniques are often challenging and require extensive experience and effort. The DIDSON bridges the gap between existing fisheries-assessment sonar and optical systems. In a DIDSON, 96 transducer elements constitute a linear array and each element both transmits and receives acoustic beams such that echo amplitude is determined by the intensity of the reflected signal. It can obtain the distance and azimuth of the target from sonar images, but it is unable to acquire the elevation of the target from the images. To overcome this difficulty and obtain the fish distribution, a new method is proposed. Firstly, the sonar is fixed on the outside of the ship's rail and submerged in the water to collect fish's information through the investigation on navigation. At the same time, the beam emission direction is on the same plane with the sonar's moving direction. After data collection, image processing is conducted, including image construction, background elimination and target extraction from horizontal field-of-view. Target association based on Interacting Multiple Model Joint Probabilistic Data Association Filtering (IMMJPDAF) is carried out to deal with the extracted targets, thus the relations of one target in different frame images can be obtained. The 3D target coordinates are acquired according to the spatial geometric relationship between the positions in two consecutive frame images. Finally, multiple target trajectories in 3D space and the depth distribution of targets are obtained through the correlation algorithm. The experiment was carried out in Dishui Lake which is located in Shanghai. Experimental results showed that the proposed method can effectively acquire the fish movement tracks in 3D space underwater and the distributions in depth. It also showed that most fish swam in the depth 3–5 meters. It will help to analyze the fish behavior and provide technical support for fishery resource assessment in a marine ranching.

Key words: marine ranching; spatial distribution; imaging sonar; image processing; target associations

Corresponding author: HAN Jun. E-mail: 11325026@zju.edu.cn

Funding projects: Natural Science Foundation of Zhejiang Province, China (LY17C190007); Grand-in-Aid of Qianjiang Talent Program (2013R10023)