

## 基于单摄像机视频的鱼类三维自动跟踪方法初探

徐盼麟<sup>1</sup>, 韩军<sup>1,2\*</sup>, 童剑锋<sup>1</sup>

(1. 上海海洋大学海洋科学学院, 上海 201306; 2. 东京大学生产技术研究所, 东京 153-8505)

**摘要:** 为提高鱼类行为学数据的提取效率, 实验提出了一种基于单摄像机的鱼类三维观测方法, 将防水镜面安装在实验用鱼缸上方, 模拟一台由上向下拍摄的摄像机, 实现了单摄像机三维成像。同时运用多目标跟踪的 IMMJPDA(interacting multiple model joint probabilistic data association)算法, 实现了鱼类运动的三维实时自动跟踪, 并通过摄像机倾斜矫正和摄像机标定提高了测量精度。通过对6条红鼻剪刀鱼的跟踪, 实验结果显示: 本方法可正确区分、提取和跟踪鱼群个体以及它们的镜像, 自动输出鱼的三维坐标、实时速度、方向等参数, 并生成完整的鱼类行为三维轨迹图。

**关键词:** 鱼类跟踪; 鱼类行动; 三维自动跟踪

**中图分类号:** Q 958.12; S 917.4

**文献标志码:** A

鱼类行为与鱼类洄游路线、提高捕捞效率、保护渔业资源等的研究密切相关。鱼类行为的研究需要大量鱼类应激反应、集群、洄游等实测数据, 且这些数据的获取还是一个费时的过程。在实验室中, 鱼类行为一般都以视频形式记录<sup>[1]</sup>, 如何从视频中提取鱼类行为数据一直是鱼类行为研究的重要课题。鱼类行为数据的重点是鱼的三维坐标、游泳速度等, 传统提取方法是手动测算法, 耗时低效。鱼类三维坐标测算, 通常用双摄像机从不同角度同时拍摄来实现, 并要求两台摄像机完全同步拍摄, 因此, 需要专门的二路监控摄像设备, 成本较高<sup>[2-6]</sup>。

Viscido 等<sup>[7]</sup>将两台摄像机分别安置在水箱正上方和正前方, 用来记录鱼在 XY 坐标面及 XZ 坐标面的游动, 利用 NIH Image 处理软件提取鱼的二维坐标, 在 Matlab 平台下开发 Tracker 三维程序来读取鱼的二维坐标并算出三维坐标。该方法虽然实现了自动输出鱼的三维坐标, 但是依然需要使用双摄像机系统。Pereira 等<sup>[8]</sup>利用在水箱侧面放置一块角度为 45°的防水镜面, 提出一种单摄像机结合防水镜面来计算水箱内鱼的三维坐标的方法。赵媛<sup>[9]</sup>通

过在水箱上安装一面可以调节角度的防水镜面进行单摄像机的鱼类行为三维观测研究。这些方法虽然简化了鱼类行为观测设备, 但都没有实现鱼类的自动化跟踪。

Bojilov 等<sup>[10]</sup>在雷达目标跟踪上有机地将交互式多模型算法<sup>[11]</sup>(interacting multiple model algorithm, IMM)和联合概率数据关联方法<sup>[12]</sup>(joint probabilistic data association, JPDA)相结合, 提出一种新的多机动目标跟踪技术, 简称 IMMJPDA 算法。本研究利用镜面成像实现了基于单摄像机的鱼类三维观测, 应用 IMMJPDA 算法实现水箱内鱼的跟踪, 提出一种基于单摄像机视频的鱼类三维自动跟踪方法。

### 1 材料与方法

#### 1.1 实验材料

选取6条红鼻剪刀鱼为供试鱼, 饲养于平视俯瞰效果水箱(100 cm×50 cm×50 cm)。水箱内水位高为水箱高度的 2/3, 内壁贴有白色不透明纸膜。水箱上方安装了一面可调节角度的防水镜面, 拍摄

收稿日期: 2011-03-21

修回日期: 2011-10-12

资助项目: 上海市科委重点科技攻关项目(075905112); 上海海洋大学研究生基金(A-2501-09-0000-87161)

通讯作者: 韩军, E-mail: jhan@shou.edu.cn

时镜面倾斜角为 45°，相当于设置一台从上向下拍摄的虚拟摄像机。录制视频示意图如图 1 所示。拍摄所用摄像机为佳能数码相机 IXUS120 IS，其分辨率为 1280×1024 像素。水箱上方平行设置了 2 支长形日光灯，以确保光照均匀。

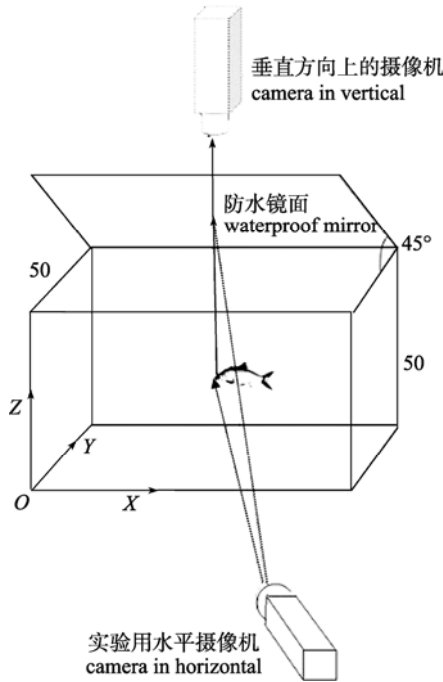


图 1 录制视频示意图  
Fig. 1 Video recording system

1.2 鱼类三维自动跟踪方法

鱼类三维自动跟踪系统由摄像机标定、背景去除、鱼二维形状位置提取、运动模型、鱼运动跟踪、轨迹联接和三维位置速度计算输出模块组成(图 2)。摄像机标定校正由镜头本身畸变引起的误差。视频图像去除背景后，分别提取鱼在前面(XZ)和镜面(XY)的二维位置，然后用IMMJPDA算法对其进行跟踪，最后输出鱼的三维位置和速度等信息。以下对鱼类三维自动跟踪方法的主要部分进行论述。

1.3 摄像机标定

摄像机镜头一般都有径向和切向畸变，为了提高图像测量精度，用 Matlab 标定工具箱对实验所用摄像机进行畸变校正。实验时为了减少水箱后面镜像因微小失焦引起的误差，将镜头聚焦于水箱前面，摄像机设在距水箱前 1.5 m 远处。标定后摄像机图像误差约为 0.1 像素。

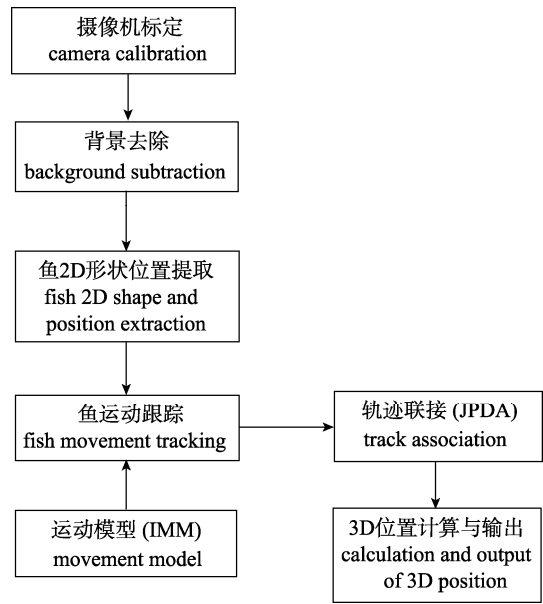


图 2 鱼类三维自动跟踪方法流程图  
Fig. 2 Flowchart for the automated 3D fish tracking method

1.4 背景去除

背景去除处理是为将鱼同水体、缸体等背景分离开来。常用的背景去除方法有背景差分法、帧间运动分析法和光流计算法。本研究采用帧间运动分析法，即利用鱼的运动性将处于静止状态的背景和鱼分离开来。当鱼长时间处于静止状态时，利用鱼的形态特征进行区分。此外，为了适应场景中光照等环境因素的变化，本研究以自适应方式对背景模型进行了动态更新。

1.5 鱼的二维位置计算

本研究以鱼的质心作为鱼的二维位置。实验时由于摄像机略微倾斜，导致拍取图像中水箱的形状发生了改变。变形前后比例关系示意如图 3，左、右分别为水箱变形前、后的形状图。为了校正图像变形，首先根据自由变形处理理论<sup>[13]</sup>计算出水箱四个顶点无变形时的图像坐标。其次，过图形内任一点 P 作一条线截上下边所得线段与其边长的比例相同，设比例值为 s，同理再过 P 点作一条线截左右边所得线段与其边长的比例为 t。设无变形图为矩形 ABCD，过 P 点的水平线段为 GH，可得 P 点分割线段 GH 的比例为 s : (1-s)。根据矢向量关系得：

$$\begin{aligned}
 P &= sGH + G = s[(C - D - B - A)t + \\
 &\quad (C - A)] + t(B - A) + A \tag{1} \\
 &= (C - D - B - A)st + (D - A)s + (B - A)t + A
 \end{aligned}$$

式中  $s, t$  的计算参见文献中[13]联立方程式的解法。由此得出水箱内鱼二维位置的矫正像素坐标, 同理得鱼镜像二维位置的矫正像素坐标。

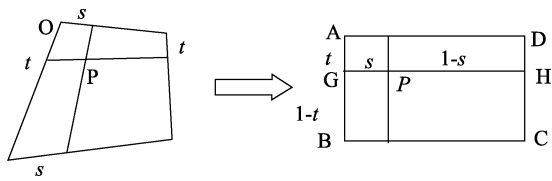


图 3 变形前后比例关系示意图

Fig. 3 Chart depicted the relation between original image and transferred one

1.6 鱼的运动跟踪

鱼的三维跟踪可分为三部分, 一是鱼运动估计模型的确定; 二是每一帧之间鱼的数据关联; 三是 Kalman 滤波<sup>[14-15]</sup>。由于鱼的运动复杂多变, 仅一种模型不足以描述, 因此使用多运动模型互交的 IMM 模型。本研究中应用了均速(CV)模型、均加速(CA)模型和布朗模型。这三种模型并行工作, 用模型的后验概率对滤波的输入、输出均进行加权计算, 使得算法中的在线模型尽可能接近鱼的实际运动状况。数据关联是为了把每一帧中同一条鱼的位置联系起来, 生成各自的运动轨迹。由于鱼的行动具有自由性、随机性, 存在重叠和交错的可能, 而 JPDA 算法对落入多个目标预测波门内的公共量测点的处理考虑了所有可能的各种联合概率事件, 故运用 JPDA 算法进行数据关联。

鱼的三维跟踪的流程示于图 4。经过摄像机标定, 背景去除和鱼二维位置计算之后, 将所得的鱼二维位置输入, 通过目标跟踪窗确定和窗内量测选定来定义鱼的初始信息, 再基于 JPDA 计算出所有鱼的量测值和每条鱼之间相互关联的概率, 随后通过 Kalman 滤波进行下一帧目标的预测和更新, 应用 IMM 模型进行并行计算, 再返回到 JPDA 算法中去, 这样就实现了鱼的跟踪的有效循环, 从而最后输出鱼的三维位置和速度。系统模型、测量模型和运动模型分别示于式(2)至式(6)。

系统模型:  $s_k = F^i s_{k-1} + w_{k-1}^i \quad i \in \{1, L, 3\}$  (2)

测量模型:  $z_k = Hs_k + v_k$  (3)

布朗模型:  $F^1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$  (4)

CV 模型:  $F^2 = \begin{bmatrix} 1 & T_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & T_s & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$  (5)

CA 模型:  $F^2 = \begin{bmatrix} 1 & T_s & \frac{T_s}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 1 & \frac{T_s}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & T_s & \frac{T_s}{2} \\ 0 & 0 & 0 & 1 & \frac{T_s}{2} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$  (6)

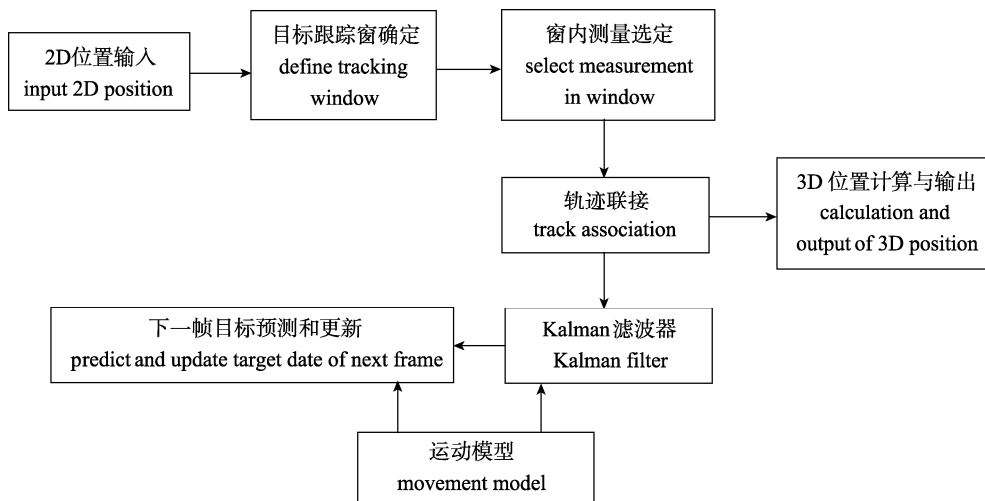


图 4 鱼的三维跟踪示意图

Fig. 4 Flowchart for 3D fish tracking

其中,  $s_k$  是鱼在第  $k$  帧的状态变量, 它包含了鱼的位置和速度。相对应的量测矢量  $z_k=(x_k, y_k)^T$  是鱼位置的量测值。  $T$  表示矢量或者矩阵转置。  $F^i$  是模型的状态跃迁矩阵,  $H$  是反映状态值和量测值之间关系的量测矩阵。  $w_{k-1}^i$  和  $v_k$  分别是过程中的状态噪声和量测噪声, 它们的协方差分别是  $Q$  和  $R$ 。  $T_s$  是测量之间的时间, 表示帧与帧之间的时间间隔。

预计阶段: 在  $k-1$  时刻的状态参数的基础上, 预计第  $k$  时刻的状态量  $\hat{s}_{k/k-1}$  和协方差  $P_{k/k-1}$ 。

$$\hat{s}_{k/k-1} = F^i \hat{s}_{k-1} \tag{7}$$

$$P_{k/k-1} = F^i P_{k-1} F^{iT} + Q \tag{8}$$

修正阶段: 在新获得的量测值  $z_k$  的基础上, 得出修正的估计值  $\hat{s}_k$  和协方差  $P_k$ 。

$$K_k = P_{k/k-1} H^T (H P_{k/k-1} H^T + R)^{-1} \tag{9}$$

$$\hat{s}_k = \hat{s}_{k/k-1} + K_k (z_k - H \hat{s}_{k/k-1}) \tag{10}$$

$$P_k = (I - K_k H) P_{k/k-1} \tag{11}$$

其中,  $K_k$  为卡尔曼增益。状态向量  $s_k$  和  $H$  定义如下:

$$s_k = (x_k, \dot{x}_k, \ddot{x}_k, y_k, \dot{y}_k, \ddot{y}_k)^T \tag{12}$$

$$H = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \tag{13}$$

噪声协方差  $Q, R$  和起始误差协方差矩阵  $P_0$  可以从期望值最大化算法<sup>[16]</sup>所得到的有序序列中估算出来。

## 2 结果

### 2.1 背景去除结果

背景去除前后的图例分别示于图 5 与图 6。其中 2' 为鱼 2 实体的镜像, 2'' 为水箱前面玻璃内鱼 2 的投影的镜像。图 6 中的红线是用等值线法提取所得鱼的轮廓。由此可见, 背景去除、鱼群提取的效果良好。

### 2.2 鱼的跟踪结果

用 IMMJPDA 算法跟踪 6 条供试鱼的运动轨迹例示于图 7, 不同颜色的线和数字分别表示 6 条不同鱼的运动轨迹。6 条鱼在鱼运动跟踪初期通过数字标记以区分, 在运动跟踪过程中使用 IMMJPDA 算法实现自动识别跟踪。将水箱前面和镜面画像内鱼二维跟踪所得的运动轨迹进行融合, 可计算得鱼的三维运动轨迹, 其跟踪实例示于图 8, 图中显示该鱼从水箱的底部经加减速泳往上层过程的位置和速度变化。此时间段鱼的速度示于图 9, 根据鱼的速度-帧数分布可以清楚地看出鱼的速度变

化。鱼的三维坐标的输出格式为 EXCEL 表格, 其中一条鱼的三维坐标输出结果示于图 10。第一列为帧数, 第二列至第四列分别为鱼在 x 轴、y 轴和 z 轴的坐标值。因此, 应用本自动跟踪方法, 可以高效地得到复数供试鱼的运动参数, 特别是三维位置、实时速度和方向等。



图 5 背景去除前的图像

对检测出来的鱼以数字标记并区分, 数字 1-6, 1'-6' 和 2'' 都为鱼的标号

Fig. 5 Original image before background subtraction number marks are put on detected fish to distinguish them which are 1 to 6, 1' to 6' and 2''

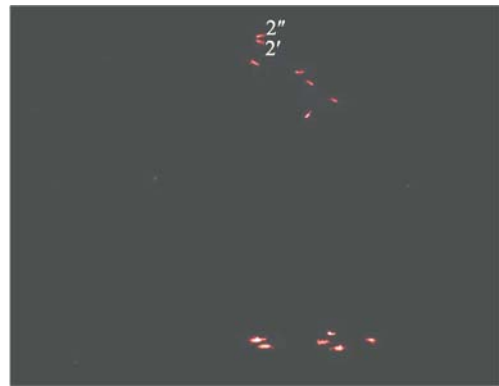


图 6 背景去除后的结果

2' 与 2'' 都为鱼的镜像

Fig. 6 The result after background subtraction fish 2' and fish 2'' are reflections

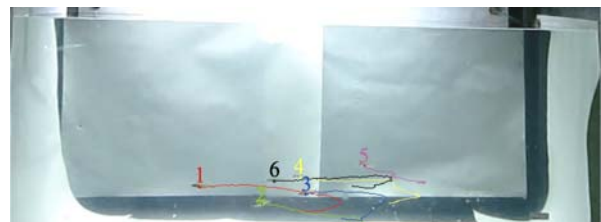


图 7 跟踪所得鱼的轨迹

Fig. 7 Fish track after automated tracking

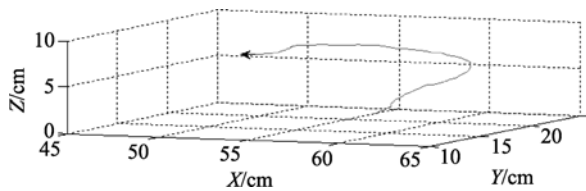


图 8 图 7 中鱼 3 的部分三维运动轨迹

Fig. 8 Part moving track of the third fish in Fig. 7

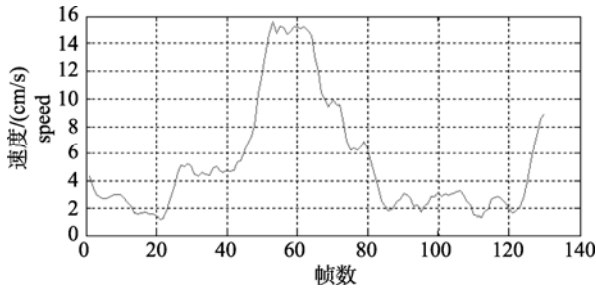


图 9 图 8 中鱼 3 的运动轨迹相对应的速度变化

Fig. 9 Speed of the third fish according to moving track in Fig. 8

帧数	X 轴	X 轴	Z 轴
247	59.4	14.6	2.13
248	59.6	14.6	2.13
249	59.6	14.6	2.30
250	59.6	14.6	2.30
251	59.8	14.6	2.46
252	59.8	14.6	2.46
253	59.8	14.6	2.46
254	59.8	14.6	2.62
255	59.8	14.6	2.62
256	60.0	14.6	2.62
257	60.2	14.6	2.79
258	60.2	14.6	2.79
259	60.2	14.6	2.95
260	60.4	14.5	2.95
261	60.4	14.5	2.95

图 10 鱼的三维坐标自动输出显示

Fig. 10 Display of automated fish 3D coordinates output

### 3 讨论

本研究对基于单摄像机视频的鱼类三维自动跟踪方法进行了初步探索和验证。该自动跟踪方法成功尝试将 IMMJPDA 算法应用到鱼类行为研究中。从图 7 至图 10 可以看出, IMMJPDA 算法能够正确区分供试鱼并分别进行有效追踪。鱼类三维自动跟踪方法可输出鱼的三维位置、运动轨迹、实时速度和方向等。利用这些数据可以很容易地计算出鱼与鱼之间的实时距离、夹角等, 为进一步研究鱼类群体结构的分布提供依据。

影响视频图像清晰度的关键因素之一为光线,

在视频录制时, 水箱内水位的高低对光线的影响比较明显。在同样的光线情况下, 拍摄时水位越高所得到的图像越暗, 且灯在水箱两侧受到的影响比灯在水箱正上方受到的影响要大。因此, 为了既保证鱼的自由游动, 又降低对光线的削弱, 应将水箱内水位高度调节在二分之一到三分之二之间。

在鱼的跟踪过程中, 有时因光线暗等原因会造成漏检, 通过放低检测阈值在其预测位置附近进行进一步搜索可提高目标检测率。

IMMJPDA 算法的计算量与鱼尾数的阶乘成正比, 在密集回波多目标环境下, 计算负荷呈指数规律增长。针对其计算量大的问题, 可以进一步采用最相邻法(Nearest Neighbor, NN)JPDA 相结合的算法加以解决。

感谢上海海洋大学海洋科学学院在经费和设备等方面的支持, 感谢赵媛、柳玲飞在实验时热心的帮助。

### 参考文献:

- [1] Breder C M Jr. Studies on the social groupings in fishes[J]. Bulletin of the American Museum of Natural History, 1959, 117: 397-481.
- [2] 李海晨, 冯玉强. 基于定性仿真的谈判模型研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2007, 39(12): 1945-1948.
- [3] 白方周, 方瑾题. 国外定性仿真应用评述[J]. 系统仿真学报, 1998, 10(4): 1-7.
- [4] 刘广峰. 定性仿真实验研究及其应用[J]. 福建电脑, 2008, 08(3): 1-2.
- [5] 郭齐胜, 董志明, 单家元. 系统仿真[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008: 210-260.
- [6] 白方周, 张雷. 定性仿真导论[M]. 北京: 中国科技大学出版社, 1998: 150-180.
- [7] Visdcido S V, Parris J K, Grunbaum D. Individual behavior and emergent properties of fish schools: a comparison of observation and theory[J]. Marine Ecology Progress Series, 2004, 273: 239-249.
- [8] Pereira P, Oliveira R F. A simple method using a single video camera to determine the three-dimensional position of a fish[J]. Behavioral Science, 1994, 26(4): 443-446.
- [9] 赵媛. 一种具有平视俯瞰效果的上盖式水族缸: 中华人民共和国: 200920074269.9[P]. 2010.6.16.
- [10] Bojilov L V, Alexiev K M, Konstantinova P D. An accelerated IMM JPDA algorithm for tracking multiple manoeuvring targets in clutter[J]. Lecture Notes in Computer Science, 2003, 2542:274-282.

- [11] 李辉, 沈莹, 张安等. 交互式多模型目标跟踪的研究现状及发展趋势[J]. 火力与指挥控制, 2006, 31(11): 1-7.
- [12] 黄玲. 数据挖掘及融合技术研究与应用[D]. 西北工业大学, TP311.13, DOI:CNKI:CDMD: 2.2004.063618.
- [13] 森田 真司, 山澤 一誠, 寺沢 征彦等. 全方位画像センサを用いたネットワーク対応型遠隔監視システム[J]. 電子情報通信学会論文誌(D-II), 2005, J88-D-II: 864-875.
- [14] Kalman R E. A new approach to linear filtering and prediction problems[J]. Transaction of the ASME J. of Basic Engineering, 1960: 35-45.
- [15] Sorenson H W. Least-squares estimation: from Gauss to Kalman[J]. IEEE, 1970, 7(7): 63-68.
- [16] Bishop C M. Pattern recognition and machine learning[M]. Springer-Verlag, 2008: 359-556.

## Preliminary studies on an automated 3D fish tracking method based on a single video camera

XU Pan-lin<sup>1</sup>, HAN Jun<sup>1,2\*</sup>, TONG Jian-feng<sup>1</sup>

(1. College of Marine Sciences, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;

2. Institute of Industrial Science, University of Tokyo, Tokyo 153-8505, Japan)

**Abstract:** The study of fish behavior lays an important foundation for comprehending of fish migration routes, improving fishing efficiency and the protection of fishery resources. A large number of data are necessary in the study, such as stress response, cluster, migration and other measured data. However, getting these data is a time-consuming process. As fish behavior is often recorded in the form of video and a stereo camera recording system is popularly used for measurement and observation in the laboratory study, how to extract the data of fish behavior efficiently from the video has been a major problem in the study of fish behavior. By far fish 3D coordinate is usually calculated by hand, or by self made software which turns an importing fish 2D coordinate into a 3D one. In order to improve fish behavior data extraction efficiency, this paper presents an automated 3D fish tracking method based on a single video camera. A waterproof mirror was set above the experimental aquaria to simulate a camera shooting from the top, which provided a way to use a single camera for 3D imaging. We extract the data of fish behavior automatically by 3D fish tracking method which is divided into four parts: distortion calibration of single camera system, transfer formula between image coordinate to world coordinate, the automated tracking algorithm of fish movement and the automated output of fish behavior 2D and 3D data. Tests find out that while the distance between the camera and the aquaria is 1.5 m, the distortion calibration result shows the pixel error is much more acceptable which is about 0.1 pixels. As the camera tilted slightly during the experiment, the shape of the aquaria in the images changed. So based on the processing of Free-Form Deformation, the deformation of images is rectified during coordinate transform process. Then we implemented the algorithm of Interacting Multiple Model Joint Probabilistic Data Association (IMMJPDA) to automatically track fishes in 3D and output fish behavior data. The result of 6 *Hemigrammus rhodostomus* tracking experiment shows that: IMMJPDA algorithm can deal with the key issues during fish tracking system, which enables the method to extract individual fish from video images, construct their tracks, output 3D positions and speeds, and finally generate a complete 3D movement track drawing for fish behavior analysis. In a dense clutter situation JPDA requires a fairly large amount of computation to evaluate the joint probabilities. We combined Nearest Neighbor algorithm and JPDA algorithm to reduce the computational burden.

**Key words:** fish tracking; fish movement; automated 3D tracking

**Corresponding author:** HAN Jun. E-mail: jhan@shou.edu.cn