

文章编号: 1000-0615(2017)10-1631-07

DOI: 10.11964/jfc.20160310321

## 运用多视图几何原理重建鱼类游泳三维轨迹

田超<sup>1,2</sup>, 黄志勇<sup>1,2\*</sup>, 熊彪<sup>1,2</sup>, 占静<sup>1,2</sup>, 石小涛<sup>3</sup>, 林晨宇<sup>3</sup>

(1. 三峡大学计算机与信息学院, 湖北宜昌 443002;

2. 三峡大学湖北省农田环境监测工程技术研究中心, 湖北宜昌 443002;

3. 三峡大学湖北宜昌三峡库区生态环境教育部工程研究中心, 湖北宜昌 443002)

**摘要:** 鱼类行为学数据是水质污染监测的主要依据, 也是鱼类自身健康状况的反应, 提取鱼类行为学数据对水质监测研究至关重要。为了获取鱼类行为学数据, 实验提出了一种运用多视图几何原理研究鱼类轨迹跟踪重建的方法, 实验中用3个摄像头分别从正面、侧面、俯视面3个方向监控水箱中鱼的游动, 通过前景跟踪法在3个摄像头中分别得到一条二维轨迹, 再利用多视图几何融合, 计算出鱼类在水箱中游动的三维轨迹, 从而可以重建鱼类的游动轨迹。实验重建了单条鱼在水箱中游动的三维轨迹, 计算出了鱼类的位置信息和实时速度。研究表明, 重建轨迹与鱼的真实轨迹虽然存在0.88~2.88 s的延迟, 但结果吻合度较高。

**关键词:** 鱼类; 视频跟踪; 前景跟踪法; 多视图几何技术; 三维轨迹重建

**中图分类号:** S 917.4

**文献标志码:** A

随着社会的发展, 水质环境污染监测越来越受到人们的重视。在水质环境监测领域, 研究者们提出了许多新的方法, 其中, 生物监测技术是利用生物评价技术和方法对水体环境中某一生物系统的质量和状况进行测定<sup>[1]</sup>。水生生物的行为变化既是生物适应环境的表现, 也是污染物对生物损害的反应, 通过观察水生生物行为的非正常变化, 可以推断水质污染的程度<sup>[2]</sup>。鱼类是最常见水生生物, 容易获取, 且鱼类的游动行为包含了鱼类自身的健康状况以及水质环境等重要信息。例如, 当鱼处于病态时, 它的流速变慢; 当水中的溶解氧稀缺时, 鱼会往水面上方游动; 当感染寄生虫时, 鱼会表现出跳跃行为等<sup>[3-4]</sup>。提取鱼类的行为学数据, 是分析鱼类健康状况和水质环境的前提条件。为了更精确地提取鱼类行为学数据, 实验采用了视频跟踪法和多视图几何技术重建鱼在水中游动的三维轨迹。在20世纪90年代, 国内外就开始了鱼类三维轨迹重建的研究, 至今已有许多的方

法。1994年, Pereira等<sup>[5]</sup>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。该方法利用在水箱侧面放置一块角度为45°的防水镜面, 达到等效于另一台水平摄像机拍摄的效果。使用这种方法, 防水镜中得到的是摄像头这一视角的倒影, 并不是另一个视角, 重建的轨迹偏差较大, 不能真实地反应出鱼类行为。2004年, Viscido等<sup>[6]</sup>利用安装在水箱正上方和正前方的两台摄像机来记录鱼在XY坐标面及XZ坐标面的游动, 其采用平板法进行摄像机标定, 利用NIH Image软件提取鱼的图像坐标, 基于时间平均成像法进行背景去除, 获取二维数据坐标, 并保存为一个文本文件。然后利用二维坐标计算生成三维坐标。这一方法在水箱后表面贴坐标纸, 当鱼靠近水箱前壁时, 视角与坐标纸之间有一个比较大的偏差, 这样得到的三维空间坐标也不准确。2012年, 徐盼麟等<sup>[7]</sup>使用基于单摄像机视频的鱼类三维自动跟踪方法与Pereira等<sup>[5]</sup>使用的方法相同, 自然也存在一

收稿日期: 2016-03-22 修回日期: 2016-09-16

资助项目: 国家自然科学基金(61272237)

通信作者: 黄志勇, E-mail: hzy@hzy.org.cn

样的问题。本实验提出了使用3个摄像头的跟踪方法即分别放置3个摄像头在水箱的正面、侧面及俯视面的适当位置, 并进行监控。具体对每一个摄像头的视频帧做目标跟踪, 得到目标在自身图片坐标系中的二维轨迹, 再根据多视图几何原理<sup>[8-10]</sup>对任意两个通道融合, 重建出鱼游动的三维轨迹。本方法没有严格苛刻的实验要求, 也不需要摄像头与水箱精确垂直, 还能够实时重建鱼的轨迹, 提取位置信息。

## 1 材料与方 法

### 1.1 实验材料

选取长度为4~7 cm、8~12 cm、13~18 cm 3种大小的实验鱼, 饲养于长宽高分别为120 cm、90 cm、60 cm的水箱。水箱中的水位约为水箱高度的5/6。在水箱的正面、侧面、俯视图适当位置分别安装一个摄像头, 并将摄像头通过交换机连接到电脑, 打开摄像头, 将水箱的8个顶点都调整至视频图像的内部。整个实验环境的搭建如下图1所示, 其中选取的摄像头为汉邦高科HB772S, 分辨率为1960×1280像素, 帧率25帧/s。

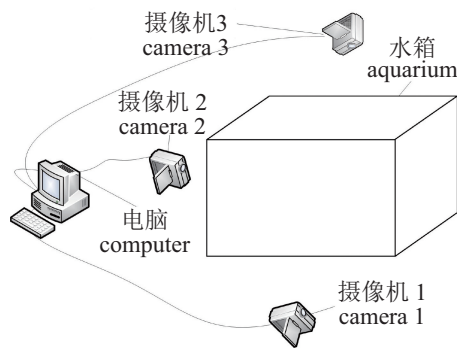


图1 视频录制装置

Fig. 1 Video recording devices

### 1.2 视频跟踪

**前景跟踪法** 前景跟踪法基于前景检测的结果, 用局部区域搜索方法来跟踪目标。Sobral等<sup>[11]</sup>对各种背景建模的前景检测方法作了详细的对比。根据鲁棒性、实时性以及准确度综合考虑, 本实验采用IVIBE前景检测法<sup>[12]</sup>, 根据二值化图像, 找出鱼的质心<sup>[13]</sup>, 就可以跟踪鱼的轨迹。二值化后图像中白色前景的像素值为1, 黑色背景的像素值为0。鱼的游动具有连续性, 相

邻两帧之间目标的距离很近, 利用鱼连续游动的特点, 以前一帧的状态为当前帧的起始位置, 在鱼可能存在的区域范围内, 对像素为1的坐标求平均值来跟踪目标。设 $k$ 为帧数,  $R$ 为搜索半径,  $P(x,y)$ 为在 $(x,y)$ 处的像素值。设第 $k$ 帧的坐标为 $(x_k,y_k)$ , 可以得到第 $k+1$ 帧的位置为 $(x_{k+1},y_{k+1})$ 。公式:

$$\left\{ \begin{aligned} x_{k+1} &= \frac{\sum_{\substack{ix=x_k-R \\ iy=y_k-R}}^{\substack{ix=x_k+R \\ iy=y_k+R}} ix \cdot P(ix, iy)}{\sum_{\substack{ix=x_k-R \\ iy=y_k-R}}^{\substack{ix=x_k+R \\ iy=y_k+R}} P(ix, iy)} \\ y_{k+1} &= \frac{\sum_{\substack{ix=x_k-R \\ iy=y_k-R}}^{\substack{ix=x_k+R \\ iy=y_k+R}} iy \cdot P(ix, iy)}{\sum_{\substack{ix=x_k-R \\ iy=y_k-R}}^{\substack{ix=x_k+R \\ iy=y_k+R}} P(ix, iy)} \end{aligned} \right. \quad (1)$$

**视频跟踪平滑处理** 尽管前景跟踪算法效果很好, 但结果中仍然存在帧丢失或者部分帧检测结果偏差较大的情况。为了减少丢失帧和较大检测偏差对结果产生的影响, 需要通过滤波去除检测得到的二维轨迹中的噪声干扰。为此设计了平滑去噪方法。设平滑窗口的宽度为 $W_1$ , 窗口中每一帧的权重:

$$\begin{aligned} Wight(i)_{(x_k,y_k)} &= \frac{2^{\lfloor \frac{W_1}{2} \rfloor - |k-i|}}{2(2^{\lfloor \frac{W_1-1}{2} \rfloor} - 1) + 2^{\lfloor \frac{W_1-1}{2} \rfloor}}, \\ k - \left\lfloor \frac{W_1}{2} \right\rfloor &\leq i \leq k + \left\lfloor \frac{W_1}{2} \right\rfloor \end{aligned} \quad (2)$$

对坐标 $(x_k,y_k)$ 平滑处理后得到 $(\bar{x}_k, \bar{y}_k)$ , 平滑处理公式如下:

$$\left\{ \begin{aligned} \bar{x}_k &= \sum_{i=k-\lfloor \frac{W_1}{2} \rfloor}^{k+\lfloor \frac{W_1}{2} \rfloor} [x_i \cdot Wight(i)_{(x_k,y_k)}] \\ \bar{y}_k &= \sum_{i=k-\lfloor \frac{W_1}{2} \rfloor}^{k+\lfloor \frac{W_1}{2} \rfloor} [y_i \cdot Wight(i)_{(x_k,y_k)}] \end{aligned} \right. \quad (3)$$

### 1.3 三维轨迹重建

**三维水箱标定** 鱼类三维轨迹重建近似于相机成像<sup>[14]</sup>的逆过程。使用Zhang<sup>[15]</sup>的棋盘

法, 可以得到相机的投影矩阵。利用多视图几何方法重建三维轨迹需要知道二维到三维的投影矩阵  $P_0, P_1, P_2$ , 以及3个相机在水箱坐标系中的坐标  $C_0, C_1, C_2$  通过水箱标定结合相机投影矩阵, 可以求出逆投影矩阵与相机坐标点。实验通过交互的方式, 在图片中标出实验水箱8个顶点的位置, 在3个摄像头中可以得到24个点, 足够求解投影矩阵  $P_0, P_1, P_2$ 。设  $V_i (i = 0, 1, 2)$  分别为3个摄像头所拍摄图片中交互出来的顶点坐标,  $x_i^k$  中  $k$  表示  $k$  号摄像头,  $i$  表示顶点序号。  $k=0$  为俯视摄像头,  $k=1$  为正面摄像头,  $k=2$  为侧面摄像头(图1)。

$$\begin{aligned}
 V_0 &= [x_1^0, y_1^0; x_2^0, y_2^0; x_3^0, y_3^0; x_4^0, y_4^0; \\
 &\quad x_5^0, y_5^0; x_6^0, y_6^0; x_7^0, y_7^0; x_8^0, y_8^0] \\
 V_1 &= [x_1^1, y_1^1; x_2^1, y_2^1; x_3^1, y_3^1; x_4^1, y_4^1; \\
 &\quad x_5^1, y_5^1; x_6^1, y_6^1; x_7^1, y_7^1; x_8^1, y_8^1] \\
 V_2 &= [x_1^2, y_1^2; x_2^2, y_2^2; x_3^2, y_3^2; x_4^2, y_4^2; \\
 &\quad x_5^2, y_5^2; x_6^2, y_6^2; x_7^2, y_7^2; x_8^2, y_8^2]
 \end{aligned} \tag{4}$$

水箱的长宽高为  $(L, W, H)$ 。设  $V$  是水箱的真实坐标, 以水箱中心点为原点, 长为  $x$  轴、宽为  $y$  轴、高为  $z$  轴, 可以得到水箱的真实坐标  $V$ :

$$\begin{aligned}
 V &= [-\frac{L}{2}, -\frac{W}{2}, -\frac{H}{2}; -\frac{L}{2}, -\frac{W}{2}, \frac{H}{2}; \\
 &\quad \frac{L}{2}, -\frac{W}{2}, \frac{H}{2}; \frac{L}{2}, -\frac{W}{2}, -\frac{H}{2}; \\
 &\quad -\frac{L}{2}, \frac{W}{2}, -\frac{H}{2}; -\frac{L}{2}, \frac{W}{2}, \frac{H}{2}; \\
 &\quad \frac{L}{2}, \frac{W}{2}, \frac{H}{2}; \frac{L}{2}, \frac{W}{2}, -\frac{H}{2}]
 \end{aligned} \tag{5}$$

3个摄像头的投影矩阵分别为  $P_0, P_1, P_2$ 。场景中任一三维场景点  $X_i$  与其二维像点  $p_i$  的投影关系:

$$p_i = P X_i \tag{6}$$

变形后可得公式:

$$\begin{bmatrix} 0^T & -X^T & y_i X^T \\ x_i^T & 0^T & -x_i X_i^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_0 \\ P_1 \\ P_2 \end{bmatrix} = 0 \tag{7}$$

3个摄像机在三维坐标中的位置分别为  $C_0, C_1, C_2$ 。结合(4)(5)(7), 利用奇异矩阵分解可以求出  $P_0, P_1, P_2$  和  $C_0, C_1, C_2$ 。

**多视图几何法重建轨迹** 对于真实三维点  $X_i$  在3个摄像头坐标系中的投影坐标分别为  $p_i^0, p_i^1, p_i^2$ ,  $p_i^0, p_i^1, p_i^2$  逆向投影的值分别为  $D_i^0, D_i^1, D_i^2$ 。根据公式(11), 将两边同时乘以投

影矩阵的逆矩阵。则有:

$$\begin{aligned}
 D_i^0 &= p_i^0 P_0^{-1} \\
 D_i^1 &= p_i^1 P_1^{-1} \\
 D_i^2 &= p_i^2 P_2^{-1}
 \end{aligned} \tag{8}$$

从二维像点逆向投影得到的  ${}^0D_i, {}^1D_i, {}^2D_i$  并不是三维点, 而是向量。因此, 需要找到以相机坐标位置  $C_0, C_1, C_2$  为原点, 以  $D_i^0, D_i^1, D_i^2$  为向量的3条射线。这3条射线的交点或者距离这3条射线最近的点就是真实点  $X_i$ 。利用最小二乘法拟合其中任意两条射线, 即可求解  $X_i$ 。

$$\begin{cases} a D_i^0 + (1 - a) C_0 = X_i \\ b D_i^1 + (1 - b) C_1 = X_i \end{cases} \tag{9}$$

**三维重建平滑处理** 在实际结果中, 以上的方法存在一些噪声干扰。为了消除基于上述方法产生的噪声干扰, 需要对得到的结果做平滑处理。设平滑降噪处理的窗口宽度为  $W_2$ , 当前帧为  $k$ , 平滑窗口中, 每一帧的权重:

$$\begin{aligned}
 Wight(i)_{(x_k, y_k, z_k)} &= \frac{2^{\lfloor \frac{W_2}{2} \rfloor - |k-i|}}{2(2^{\lfloor \frac{W_2-1}{2} \rfloor} - 1) + 2^{\lfloor \frac{W_2-1}{2} \rfloor}}, \\
 k - \left\lfloor \frac{W_2}{2} \right\rfloor &\leq i \leq k + \left\lfloor \frac{W_2}{2} \right\rfloor
 \end{aligned} \tag{10}$$

$X_i(x_k, y_k, z_k)$  经过平滑处理后, 得到  $\bar{X}_i(\bar{x}_k, \bar{y}_k, \bar{z}_k)$ , 公式:

$$\begin{aligned}
 \bar{x}_k &= \sum_{k-\lfloor \frac{W_2}{2} \rfloor}^{k+\lfloor \frac{W_2}{2} \rfloor} (x_i \bullet Wight(i)_{(x_k, y_k, z_k)}) \\
 \bar{y}_k &= \sum_{k-\lfloor \frac{W_2}{2} \rfloor}^{k+\lfloor \frac{W_2}{2} \rfloor} (y_i \bullet Wight(i)_{(x_k, y_k, z_k)}) \\
 \bar{z}_k &= \sum_{k-\lfloor \frac{W_2}{2} \rfloor}^{k+\lfloor \frac{W_2}{2} \rfloor} (z_i \bullet Wight(i)_{(x_k, y_k, z_k)})
 \end{aligned} \tag{11}$$

## 2 结果

### 2.1 视频跟踪结果

使用搭建的实验环境, 通过摄像头获取得到视频帧(图2-a)。由于原始视频帧存在较大的畸变<sup>[16]</sup>, 需要对每一帧做矫正处理。使用棋盘法<sup>[15]</sup>标定出摄像机内部参数, 结合内部参数进行反失真处理(图2-b)。利用VIBE前景检测的方法, 得到连续的二值图片帧, 再通过膨胀与腐蚀降

噪处理，增强目标区域效果(图3-a)。用公式(1)中算法处理，可以确定准确位置(图3-b)。在处理过

程中保存了当前帧前100帧的位置坐标，并显示在图像中(图4)。



图2 去失真前后比较

(a)摄像头捕获的原始帧, (b)去失真之后的视频帧

Fig. 2 Comparison of before and after distortion removal

(a)the original frame of camera, (b)the frame after removing distortion

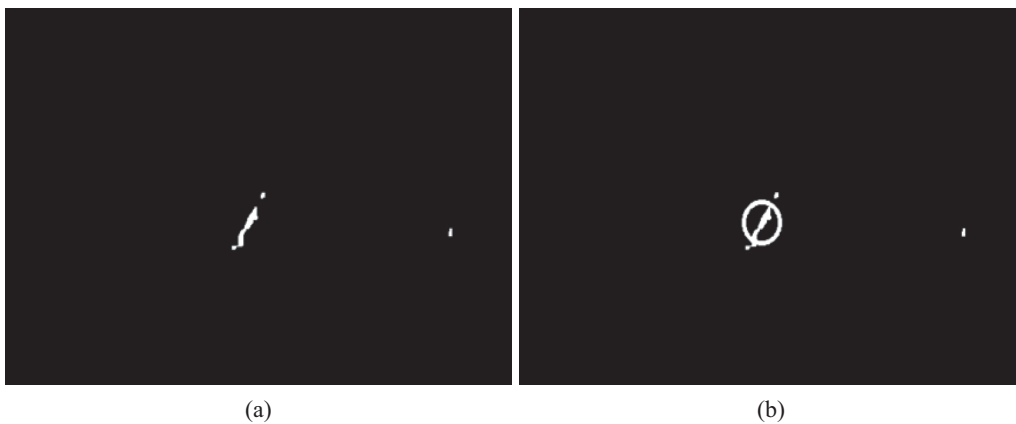


图3 目标跟踪过程

(a)VIBE检测结果得到的二值图, (b)前景跟踪算法跟踪结果

Fig. 3 Fish tracking process

(a) the result of VIBE, (b) the result of foreground tracking algorithm

### 2.2 三维空间标定过程

搭建好实验环境, 测量出水箱中水位的长宽高(L, W, H)=(120, 90, 50)cm。打开3个摄像头, 进行三维空间标定。其过程:

- ①依次选择正面、侧面及俯视面摄像机;
- ②选择前平面, 从左上角顶点开始, 顺时针依次交互出水体近相机平面上的4个顶点;
- ③选择后平面, 从左上角顶点开始, 顺时针依次交互出水体远相机平面上的4个顶点;
- ④重复②、③直到交互完3个摄像机中所有顶点后, 点击保存。

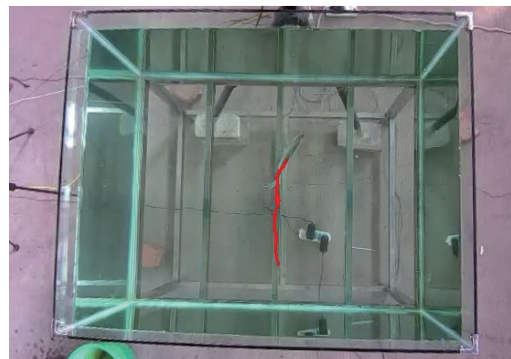


图4 视频跟踪效果

Fig. 4 Video tracking result

标定结果中, 红圈为水体近相机平面上的点, 绿圈为水体远相机平面上的点(图5)。在3个摄像头中交互出顶点后, 可以得到水体顶点在视频帧中的坐标, 表示为公式(4)。以水箱中心点为原点, 长为x轴, 宽为y轴, 高为z轴, 得公式(5)。结合公式(4)(5)即可得到摄像头到三维空间的映射矩阵 $[P_0 P_1 P_2]^T$ , 然后通过二维轨迹跟踪结果和映射矩阵逆向投影重建三维轨迹。

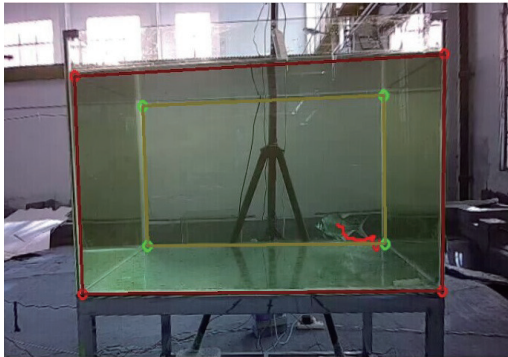


图5 三维空间标定

Fig. 5 The calibration of three-dimensional space

### 2.3 三维重建过程及结果

本实验开发了鱼类轨迹跟踪系统, 同时读取视频帧, 对视频帧做跟踪处理, 显示在前3个通道中。前3个通道依次对应于侧面、正面、俯视面(图6)。使用前景跟踪法实现单通道内鱼的轨迹跟踪。三维空间标定可以计算出投影矩阵 $[P_0 P_1 P_2]^T$ , 结合公式(8)(9)(10)(11), 重建三维轨迹(图6-d)。整体分析发现, 鱼在这段时间内, 先从A处下降到B处, 随后上升至C, 再下降至D, 接着游向远处点E。为了便于观察, 只保留最近250帧的轨迹, 由于重建过程有延迟, 因此, 通道4中A点之前有一段轨迹, 而D至E处轨迹还未重建出来。

### 3 讨论

本实验对基于3个摄像头跟踪重建鱼类三维运动轨迹的方法进行了探索和验证。原理上重建鱼类轨迹只需要2个摄像头, 为了验证结论, 使用前2个摄像头的二维视频跟踪结果重建了三

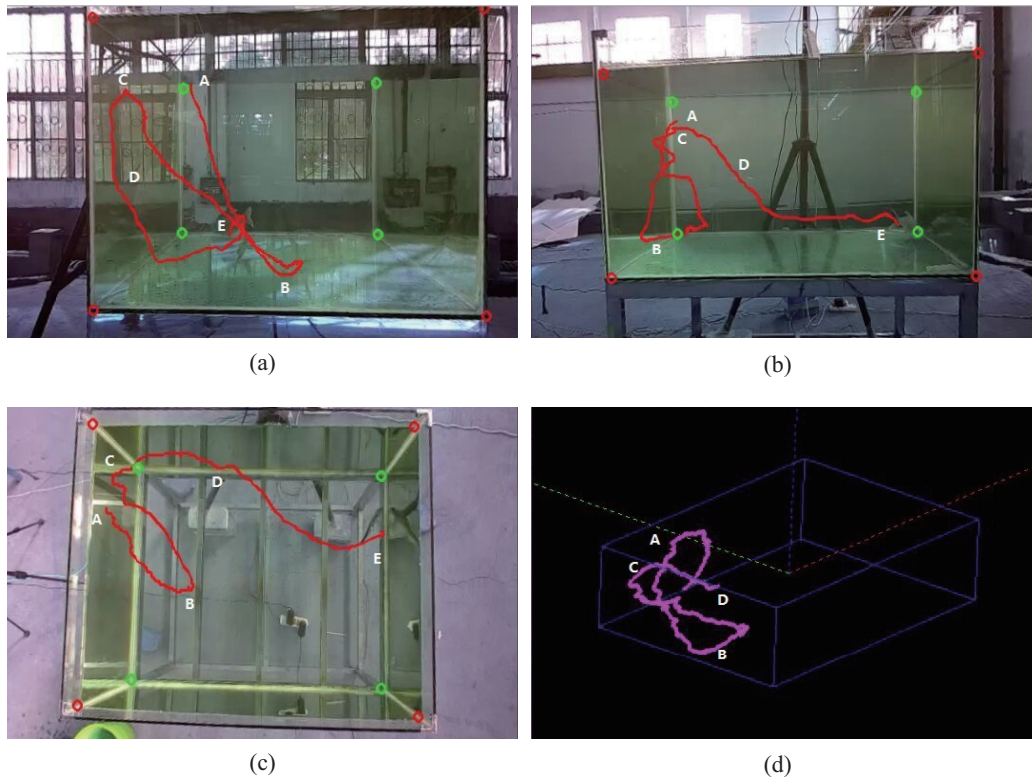


图6 跟踪与重建结果

(a) 通道1, (b) 通道2, (c) 通道3, (d) 通道4

Fig. 6 Tracking and rebuilding result

(a) channel 1, (b) channel 2, (c) channel 3, (d) channel 4

维轨迹,然后将重建的三维轨迹的视角切换至第3个摄像头的视角。实验中,重建结果除了有一定的延迟,鱼的游动轨迹与真实轨迹基本吻合,在录制的视频中有良好的体现。

与Viscido等<sup>[6]</sup>和Pereira等<sup>[5]</sup>的方法相比,本实验没有环境搭建的精细要求,也不需要摄像头与水箱平面的精确垂直,只需要保持水箱在摄像头的视野范围内即可。实验环境搭建更为容易,也避免了环境搭建带来的实验误差。本实验的方法实时重建鱼的轨迹,能够快速获得鱼的位置信息,与Viscido等<sup>[6]</sup>的方法不同,不需要2次处理。本实验的跟踪与重建方法,已经计算出了鱼在每一帧中的位置,可以进一步提取游动速度、方向等信息。将位置信息导出后,使用matlab求出的瞬时速度(图7),实时重建轨迹能够帮助研究者更加直观的研究鱼类行为,可以进一步用于鱼类和水质污染估计的研究。

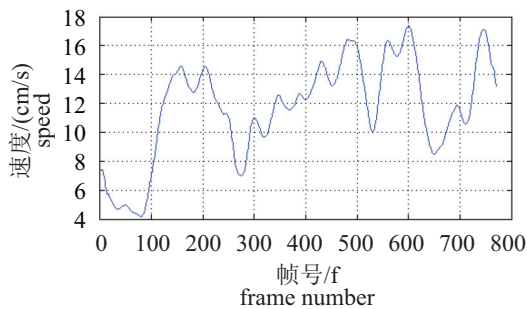


图7 水箱中鱼的游动速度

Fig. 7 The speed of fish

获取视频帧时,尽量避免镜面反射,减少鱼在水箱壁的倒影干扰。前景跟踪法将运动的物体看作跟踪目标,静止的物体看作背景。在实验中,还应尽量避免有运动的背景。前景跟踪法得到的视频跟踪结果需要做平滑处理。实验中设置视频跟踪平滑处理窗口宽度为 $W_1=11$ ,三维重建平滑窗口宽度为 $W_2=11$ ,同时对前3个通道的轨迹做同步处理,设置了50帧的缓冲区。当缓冲区用完时,延迟了72帧;没有用缓冲时,延迟22帧,所以重建的三维轨迹有0.88~2.88 s的延迟。由于延迟,图6前三个通道中DE段轨迹,在通道4中还未重建出来,而通道4中A点之前却还有一段未消失的轨迹。综上所述,本实验重建鱼轨迹的方法具有实时性,实验环境搭建要求低,对水箱中鱼的跟踪及轨迹重建具有较好

的效果。可以帮助研究者快速分析鱼类行为,用于监测水质污染及鱼类健康状况的研究。

#### 参考文献:

- [1] 王春香,李媛媛,徐顺清.生物监测及其在环境监测中的应用[J].生态毒理学报,2010,5(5):628-638.  
Wang C X, Li Y Y, Xu S Q. Biological monitoring and its application in environmental monitoring[J]. Journal of Ecotoxicology, 2010, 5(5): 628-638(in Chinese).
- [2] 黄东龙,周勤.水体突发性重金属污染胁迫下斑马鱼的行为反应分析[J].环境监测管理与技术,2011,23(4):27-31.  
Huang D L, Zhou Q. Behavior response analysis of zebrafish *Danio rerio* under sudden heavy metal stress[J]. The Administration and Technique of Environmental Monitoring, 2011, 23(4): 27-31(in Chinese).
- [3] 范良忠,刘鹰,余心杰,等.基于计算机视觉技术的运动鱼检测算法[J].农业工程学报,2011,27(7):226-230.  
Fan L Z, Liu Y, Yu X J, et al. Fish motion detecting algorithms based on computer vision technologies[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(7): 226-230(in Chinese).
- [4] 徐建瑜,刘鹰,崔绍荣,等.计算机视觉技术在鱼类应激状态监测中应用研究[J].渔业现代化,2008,35(3):15-18.  
Xu J Y, Liu Y, Cui S R, et al. Research progress in the application of computer-vision to monitor the stress state of fish[J]. Fishery Modernization, 2008, 35(3): 15-18(in Chinese).
- [5] Pereira P, Oliveira R F. A simple method using a single video camera to determine the three-dimensional position of a fish[J]. Behavior Research Methods, Instruments, & Computers, 2010, 26(4): 443-446.
- [6] Viscido S V, Parrish 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.
- [7] 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).
- [8] Pollefeys M. Multiple view geometry[J]. Encyclopedia of Biometrics, 2000, 2(9-10): 181-186.
- [9] Hartley R, Zisserman A. Multiple view geometry in

- computer vision[J]. *Kybernetes*, 2003, 30(9/10): 1865-1872.
- [10] Gilbert P. Iterative methods for the three-dimensional reconstruction of an object from projections[J]. *Journal of Theoretical Biology*, 1972, 36(1): 105-117.
- [11] Sobral A, Vacavant A. A comprehensive review of background subtraction algorithms evaluated with synthetic and real videos[J]. *Computer Vision & Image Understanding*, 2014, 122: 4-21.
- [12] Barnich O, van Droogenbroeck M. ViBe: a universal background subtraction algorithm for video sequences[J]. *IEEE Transactions on Image Processing: A Publication of the IEEE Signal Processing Society*, 2011, 20(6): 1709-1724.
- [13] 宋克鸥, 黄凤岗, 兰晓亭. 二值图像目标质心快速跟踪算法[J]. *模式识别与人工智能*, 1998, 11: 161-168.  
Song K O, Huang F G, Lan X T. A fast algorithm for searching and tracking object centroids in binary images[J]. *Pattern Recognition and Artificial Intelligence*, 1998, 11: 161-168(in Chinese).
- [14] 刘松林, 哈长亮, 郝向阳, 等. 基于机器视觉的线阵 CCD 相机成像几何模型[J]. *测绘科学技术学报*, 2006, 23(387): 390.  
Liu S L, Ha C L, Hao X Y, *et al.* Line scanor camera's imaging model based in machine vision[J]. *Journal of Surveying Science and Technology*, 2006, 23(387): 390(in Chinese).
- [15] Zhang Z Y. A flexible new technique for camera calibration[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, 22(11): 1330-1334.
- [16] Campbell L, Bobick A. Correcting for radial lens distortion: a simple implementation[J]. *Mit Media Lab Perceptual Computing Sect*, 1995, 50(1): 67-71.

## Fish swimming 3D trajectory reconstruction based on multi-view geometry

TIAN Chao<sup>1,2</sup>, HUANG Zhiyong<sup>1,2\*</sup>, XIONG Biao<sup>1,2</sup>, ZHAN Jing<sup>1,2</sup>, SHI Xiaotao<sup>3</sup>, LIN Chenyu<sup>3</sup>

(1. *College of Computer and Information, China Three Gorges University, Yichang 443002, China;*

2. *Engineering Technology Research Center of Farmland Environmental Monitoring, China Three Gorges University, Yichang 443002, China;*

3. *Engineering Research Center of Eco-environment in Three Gorges Reservoir Region, China Three Gorges University, Yichang 443002, China)*

**Abstract:** Fish behavior data are quite important to water pollution monitoring and these kinds of data sets imply the fish healthy conditions. To acquire fish behavior data, we present a multiple-view based fish swimming 3D trajectory reconstruction technique. In this technique, we use three cameras to observe an aquarium from three different aspects and employ foreground detection and tracking methods to reconstruct 2D fish swimming trajectories from these three cameras. Based on the multiple-view 3D reconstruction theories, we fuse these three 2D fish swimming trajectories to achieve a 3D fish swimming trajectory. Experiments show that our method can accurately reconstruct the 3D swimming trajectory of a single fish in a cubic aquarium and get the real-time 3D position and the swimming speed of the fish. This method needs neither expensive experimental equipment nor strict installation requirement to make cameras vertically face the aquarium faces. However, it can acquire accurate 3D fish swimming trajectories in real-time.

**Key words:** fish; video track; foreground tracking algorithm; multiple view geometry technology; three-dimensional trajectory reconstruction

**Corresponding author:** HUANG Zhiyong. E-mail: hzy@hzy.org.cn

**Funding projects:** National Natural Science Foundation of China(61272237)