

基于三维重构的乌鳢整皮剥离系统设计与试验

翟晓东, 赵明岩^{*}, 蒋昕余, 林 敏, 王炜智, 黄章炜

(中国计量大学机电工程学院, 杭州 310018)

摘 要: 针对乌鳢脂肪层薄、皮肉分离难度大、手工剥取效率低且存在安全隐患等问题, 该研究设计了基于三维重构的乌鳢整皮自动剥离系统。针对其头部、鱼身、鱼尾截面变化剧烈, 表皮黏滑难以固定、臀鳍坚硬严重干扰剥皮作业等特点, 采集并分析其形态特征参数, 设计了装夹机构、切割机构、皮肉分离机构及剥皮终端。开发了视觉系统, 对待剥皮对象进行三维重建, 根据重建结果, 通过算法控制、规划各执行机构路径, 实现了乌鳢整皮快速、准确剥取。以单台乌鳢整皮剥离机的单尾鱼皮剥离时长、鱼皮剥取率、皮肉分离指数及鱼皮破损率为指标, 对样机性能进行分析。试验结果表明: 单尾鱼平均剥离时长为 183 s, 鱼皮剥取率均值为 94.6%, 皮肉分离指数均值为 9.93, 鱼皮破损率均值为 6.25%, 符合整皮剥离工艺要求。该研究结果可为鱼类整皮剥取自动化系统的研发与设计提供参考。

关键词: 设计; 试验; 鱼皮剥离机; 乌鳢; 三维重构

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202308242

中图分类号: TS254.3; TP391.41

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2024)-01-0100-12

翟晓东, 赵明岩, 蒋昕余, 等. 基于三维重构的乌鳢整皮剥离系统设计与试验[J]. 农业工程学报, 2024, 40(1): 100-111.

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202308242 <http://www.tcsae.org>

ZHAI Xiaodong, ZHAO Mingyan, JIANG Xinyu, et al. Design and experiment of the whole-skin peeling system of *Channa argus* based on three-dimensional reconstruction[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2024, 40(1): 100-111. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202308242 <http://www.tcsae.org>

0 引 言

随着中国取缔和打击非法野生动物市场及贸易、推进野生动物保护法的力度日益增大, 乌鳢(俗称黑鱼, *Channa argus*)鱼皮凭借花纹美观、韧性强、透气、防水、抗膨胀性强等优点, 成为短缺野生高档皮革原料的理想替代品^[1-3]。中国乌鳢年产量超过 50 万 t, 居世界第一位, 鱼皮产业具有广阔的市场前景。然而, 目前乌鳢剥皮全部采用人工手工作业, 存在效率低、鱼皮完整性差、具有安全隐患等问题, 限制了乌鳢深加工产业的发展^[4-6]。

在鱼类处理及加工装备方面, 国内外进行了广泛研究^[7-12]。陈庆余等^[13]采用感官评定法对典型海产小杂鱼去脏机械装置参数进行了优化; 朱国等^[14]通过建立鱼体有限元模型对剖鱼机的喂料方式及夹片结构进行了优化; 万鹏等^[15]基于鱼体形态特征及物理特性设计了鱼体输送装置, 并对利用机器视觉技术实现鱼体头尾及腹背定向排列输送的方法进行了研究; AZARMDEL 等^[16]利用图像处理算法和特征提取技术, 对鳟鱼的形状、纹理、颜色等特征进行分析和识别, 通过建立准确的鱼体形态参数分割模型使系统能够自动识别鳟鱼的朝向和最佳切割点, 实现了高效切割。由于欧美与亚洲国家的饮食习惯

存在较大差异, 尚未查到西方关于乌鳢养殖、消费及剥皮的相关研究文献。符诚癸^[17]设计了一种全自动剥鱼皮机, 为得到洁净鱼肉, 利用扯皮滚轴和压送料滚轴之间的转动速度差, 将鱼皮破碎并剔除, 此技术旨在去皮留肉, 将破裂的鱼皮剔除并丢弃; 詹青彪^[18]设计了一种操作简单的家用剥鱼皮机, 将鱼身固定后, 通过抽拉装有刀片的活动板将鱼皮剥下, 该技术目的是为了得到新鲜鱼肉而剔除不需要且已破损的鱼皮; 笙辉机械有限公司^[19]研发了 YP-50GS 型带压滚型自动去鱼皮机, 使用前需将鱼体切片处理, 滚筒旋转时, 刀片与鱼皮接触并将其剥离剔除, 只保留鱼肉。

由上述文献可知, 国内外鱼类加工设备以识别、定向、去头剔尾、除鳞去脏为主; 去皮装置并非为了获取作为皮革原料的完整鱼皮, 主要通过滚压、抽拉等方法, 将鱼皮碾碎、扯离并废弃, 保留鱼肉。目前未见以获取鱼皮作为皮革原料的自动化鱼类剥皮装置。

本文根据乌鳢形态特征及其整皮剥取工艺特点, 制作了由装夹机构、切割机构、皮肉分离机构及剥皮终端组成的乌鳢整皮剥离机; 搭建了视觉系统和以 STM32 单片机为核心的控制系统, 以期实现乌鳢整皮剥离机各机构之间的协同作业, 满足乌鳢整皮自动化、低损伤剥离需求; 以系统单尾鱼皮剥离时长、剥取率、皮肉分离指数、鱼皮破损率为评价指标对样机性能进行测试, 以期鱼类整皮自动化剥离系统的研究与设计提供参考。

1 乌鳢形态特征研究

乌鳢为淡水鱼类, 鱼体呈圆柱形, 鱼头近似圆筒形

收稿日期: 2023-08-31 修订日期: 2023-10-16

基金项目: 浙江省基础公益项目 (LGN22E050003)

作者简介: 翟晓东, 研究方向为现代农业装备与农业机器人。

Email: p22010854022@cjlu.edu.cn

※通信作者: 赵明岩, 教授, 研究方向为现代农业装备与农业机器人。

Email: zhaomingyan@cjlu.edu.cn

且较为坚硬，尾部较扁平，背缘腹缘较平直。由于乌鳢大小、体型不同，形态参数的采集极其重要，涉及后续各加工机构尺寸的确定。考虑到 2 龄后的乌鳢生长速度呈递减趋势，经济效益降低，因此本文选用 84 尾随机抽取的 2 龄左右乌鳢作为试验样本，对其体长、腹长、头长、体高、体厚、体质量进行测量，如图 1 所示。测量结果如表 1 所示。

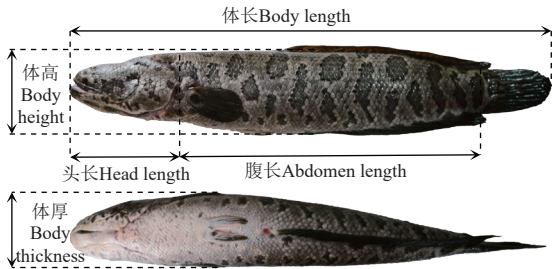


图 1 乌鳢形态特征示意图
Fig.1 Schematic diagram of the morphological characteristics of *Channa argus*

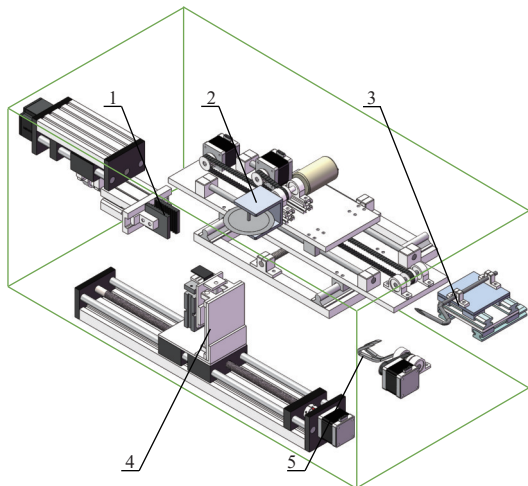
表 1 乌鳢形态特征测量结果

Table 1 Test results of the morphological characteristics of <i>Channa argus</i>			
项目 Item	最小值 Minimum value	最大值 Maximum value	平均值 Average value
体长 Body length/mm	353.0	432.8	386.4
腹长 Abdomen length/mm	247.4	318.8	276.7
头长 Head length/mm	82.5	109.6	90.8
体高 Body height/mm	54.8	72.7	64.4
体厚 Body thickness/mm	42.4	64.6	49.6
体质量 Weight/g	603.1	1 080.8	752.3

2 乌鳢整皮剥离装置结构

2.1 整机结构与工作原理

乌鳢整皮剥离装置如图 2 所示。整机主要由机架、工业相机、装夹机构、切割机构、皮肉分离机构和剥皮终端组成，整机结构及性能参数如表 2 所示。



1. 鱼尾装夹机构 2. 切割机构 3. 皮肉分离机构 4. 剥皮终端 5. 鱼头装夹机构
1. Fishtail clamping device 2. Cutting device 3. Skin and flesh separating device 4. Peeling device 5. Fish head clamping device

图 2 乌鳢整皮剥离装置示意图

Fig.2 Schematic diagram of the whole-skin peeling device of *Channa argus*

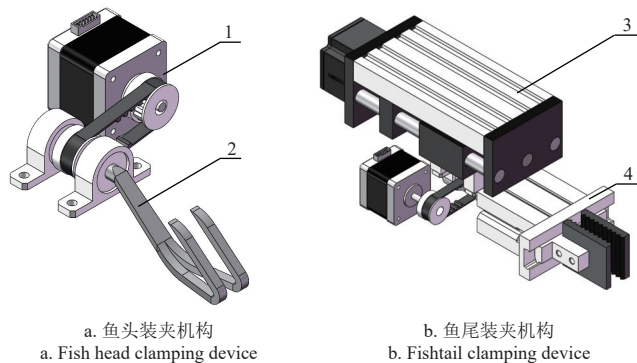
表 2 乌鳢整皮剥离装置主要技术参数
Table 2 Main technical parameters of the whole-skin peeling device of *Channa argus*

项目 Item	参数 Parameters
功耗 Power dissipation/W	500
电源电压 Supply voltage/V	220
整机尺寸 Overall dimensions/mm×mm×mm	1 200×750×750
加工尺寸 Processing size/mm	300~500

乌鳢整皮剥离装置作业时，鱼头装夹机构与鱼尾装夹机构将乌鳢固定以 4 r/min 的速度同步旋转 360°，每旋转 6°工业相机采集一张鱼身图像，共采集 60 张鱼身图像。视觉系统上位机基于所采集的鱼身图像对乌鳢进行三维重建并获取鱼身空间坐标；根据上述坐标，对切割装置、皮肉分离装置、剥皮终端的作业路径进行规划，依次对乌鳢进行腹部横切与颈部环切。切割结束后，皮肉分离装置运动至鱼颈环切部位，皮肉分离刀插入背部皮肉结合层（脂肪层），鱼身进行半周旋转的同时分离刀高频振荡，完成乌鳢颈部皮肉分离。最后剥皮终端机械手移动至皮肉分离处，夹持背部已完成分离的鱼皮，向鱼尾方向拉扯，将整张鱼皮剥离。

2.2 装夹机构

装夹机构包括鱼头装夹机构和鱼尾装夹机构，如图 3 所示。其中，鱼头装夹机构主要由鱼鳃钩、步进电机和传动组件组成，鱼尾装夹机构主要由平行气动夹爪、步进电机、传动组件、移动滑台组成。



1. 步进电机 2. 鱼鳃钩 3. 横向移动滑台 4. 平行气动夹爪
1. Stepping motor 2. Gill hook 3. Horizontal sliding table 4. Parallel pneumatic gripper

图 3 装夹机构
Fig.3 Clamping device

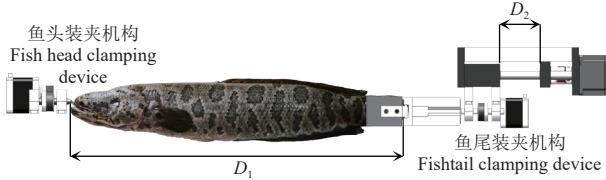
工作时，先将鱼鳃向外翻起，鱼鳃开合处对准鱼鳃钩后，再将乌鳢向鱼尾方向拉扯使其被鱼鳃钩完全钩住即可完成乌鳢头部的装夹。进行乌鳢尾部装夹时，首先根据待剥皮乌鳢实际体长，通过控制移动滑台横向运动调整鱼尾装夹机构的初始位置，使平行气动夹爪夹持部位与乌鳢尾鳍重合，气动夹爪闭合，完成乌鳢尾部装夹。将乌鳢头部及尾部装夹完毕后，步进电机带动传动组件可实现乌鳢 360°旋转，从而配合其他加工机构进行鱼皮剥离作业，装夹示意图如图 4 所示。

由于待剥取乌鳢体长不同，鱼头装夹机构与鱼尾装夹机构之间的初始距离 D_1 、鱼尾装夹机构移动滑台行程

D_2 的确定尤为重要, 共同决定了装夹机构可夹持鱼体体长的范围。为确保最小体长及最大体长的乌鳢可被装夹机构夹持, 则:

$$\begin{cases} D_1 \leq B_{\min} \\ D_1 + D_2 \geq B_{\max} \end{cases} \quad (1)$$

式中 B_{\min} 为鱼体长度最小值, mm; B_{\max} 为鱼体长度最大值, mm。



注: D_1 为鱼头装夹机构与鱼尾装夹机构之间的初始距离, mm; D_2 为横向移动滑台行程, mm。

Note: D_1 is the initial distance between the fish head clamping device and the fishtail clamping device, mm; D_2 is the travel distance of the horizontal sliding table, mm.

图 4 乌鳢装夹示意图

Fig.4 Diagram of *Channa argus* clamping

根据乌鳢形态特征测量结果中的体长数据, 乌鳢体长最小值 B_{\min} 为 353.0 mm, 体长最大值 B_{\max} 为 432.8 mm, 由式 (1) 并结合对安全距离的考虑, 装夹机构初始距离 D_1 设置为 300 mm, 移动滑台行程 D_2 设置为 200 mm, 装夹机构可夹持鱼体体长范围为 300~500 mm, 满足待剥皮乌鳢体长要求。

乌鳢装夹效果主要与鱼尾装夹机构中平行气动夹爪的夹持力有关, 直接决定了乌鳢整皮剥取的成功率。夹持力需要控制在合理范围内, 夹持力太小会导致作业时鱼身位置发生偏移甚至脱离。为保证鱼身固定牢固, 对乌鳢尾部进行受力分析。整皮剥取过程中, 除自身重力, 乌鳢尾部还会受到预紧力 (使乌鳢鱼体处于绷直状态, 鱼尾装夹机构作用于鱼尾的拉力) 的反作用力、切割压力、分离刀推力及剥皮机械手拉力的影响。由前期预紧力试验分析, 为达到理想预紧效果, 预紧力需达 25 N, 对气动夹爪夹持力确定的影响最大。平行气动夹爪的使用工况为二爪摩擦锁紧, 其受力关系如图 5 所示。

基于静力学原理, 由图 5 分析可知, 为使乌鳢整皮剥取过程中不发生鱼体位移或脱落现象, 乌鳢尾部受力需满足:

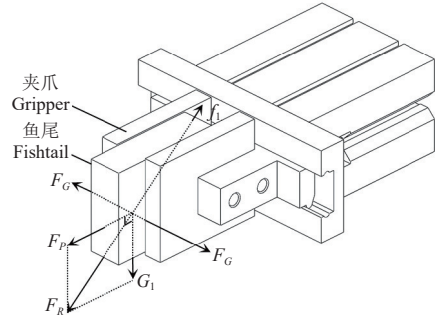
$$f_1 > F_R \quad (2)$$

其中:

$$\begin{cases} f_1 = 2\mu F_G \\ F_R = \sqrt{F_P^2 + G_1^2} \\ G_1 = 0.5m_{\max}g \end{cases} \quad (3)$$

式中 μ 为鱼尾在夹板表面的摩擦系数; f_1 为鱼尾表面与夹爪之间的摩擦力, N; F_P 为预紧力的反作用力, N; G_1 为鱼体尾部所受到的重力, N; F_R 为 F_P 与 G_1 的合力, N; F_G 为每个夹爪的夹持力, N; m_{\max} 为乌鳢质量最大

值, kg; g 为重力加速度, m/s^2 。



注: G_1 为鱼体尾部所受到的重力, N; f_1 为鱼尾表面与夹爪之间的摩擦力, N; F_G 为每个夹爪的夹持力, N; F_P 为预紧力的反作用力, N; F_R 为 F_P 与 G_1 的合力, N。

Note: G_1 is the gravitational force on the fish body, N; f_1 is the friction force between the fishtail and the gripper, N; F_G is the clamping force of each gripper, N; F_P is the reaction force of pre-tension force, N; F_R is the resultant force of F_P and G_1 , N.

图 5 平行气动夹爪对鱼尾的夹持力示意图

Fig.5 Force diagram of the parallel pneumatic gripper on fishtail

为保证整皮剥取的成功率, 结合式 (2)、(3) 及安全系数的考虑, 平行气动夹爪夹持力大小需满足:

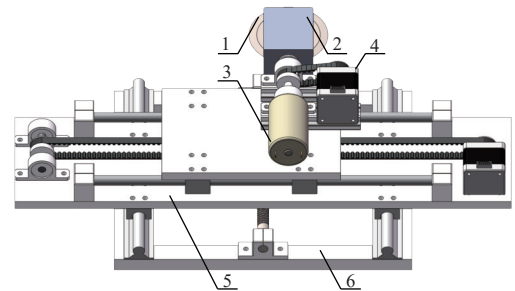
$$F_G \geq S_1 \frac{\sqrt{F_P^2 + (0.5m_{\max}g)^2}}{2\mu} \quad (4)$$

式中 S_1 为平行气动夹爪夹持力安全系数。

鱼尾装夹机构平行气动夹爪作业时具有低动态响应、静摩擦系数可控及气缸内压缩空气气压无波动等特点, 安全系数推荐值为 1.6^[20]; 由鱼体摩擦系数测量试验^[21]测得, 乌鳢鱼尾在一字纹夹板表面的摩擦系数约为 0.306; 重力加速度取 $9.8 m/s^2$ 。根据表 1 中的乌鳢体质量数据, 对式 (4) 进行计算, 鱼尾装夹机构平行气动夹爪作业时每个夹爪夹持力需达到 67 N。

2.3 切割机构

进行剥皮操作前需对乌鳢进行预切割处理 (腹部横切与颈部环切), 以消除鱼头及鱼鳍对整皮剥取的影响。为降低切割时对鱼皮产生的损伤, 设计了一种旋转式切割机构^[22], 主要由切割刀片、刀架、直流有刷电机、横向移动 (与鱼体长度方向平行) 滑台、纵向移动 (与鱼体长度方向垂直) 滑台组成, 如图 6 所示。



1. 切割刀片 2. 刀架 3. 直流有刷电机 4. 步进电机 5. 横向移动滑台 6. 纵向移动滑台

1. Cutting disc 2. Cutting disc rest 3. DC brush motor 4. Stepping motor 5. Horizontal sliding table 6. Longitudinal sliding table

图 6 切割机构

Fig.6 Cutting device

由于待剥离乌鳢腹长各异，需确定切割机构横向移动范围。为确保切割机构可对不同腹长的乌鳢进行腹部横切，则：

$$D_3 \geq A_{\max} \quad (5)$$

式中 D_3 为切割机构横向移动滑台行程，mm； A_{\max} 为乌鳢腹长最大值，mm。

依据表 1 中乌鳢腹长数据，结合式 (5) 及安全距离的考虑，横向移动滑台行程设定为 400 mm，满足切割作业要求。

腹部横切及颈部环切时，切割刀片需纵向移动以贴合乌鳢腹缘及颈部轮廓，避免出现鱼皮未完全切开、切口处存在粘连的现象。因此纵向移动滑台行程的确定与乌鳢腹缘轮廓、颈部轮廓及体高极差有关。由于乌鳢颈部轮廓不同位置外径差异及腹缘轮廓曲率较小，纵向移动滑台行程的要求可近似为大于乌鳢体高极差的一半。依据表 1 中乌鳢体高数据并从安全距离及避免各机构之间发生干涉的角度考虑，纵向移动滑台行程设定为 200 mm，满足切割作业要求。

根据乌鳢整皮剥离系统切割刀具工作参数优化试验所得结果，选用的切割刀片（材料为 9SiCr 钢）工作参数为：刀片直径 80.00 mm、刀片厚度 1.20 mm、刀片转速 3 000.00 r/min^[23]。

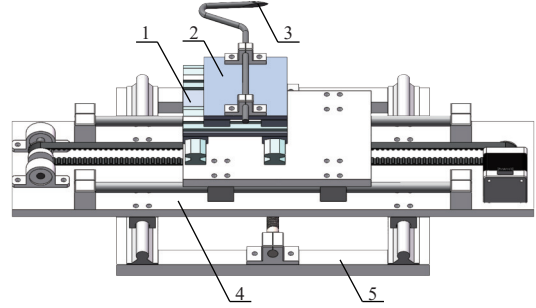
进行切割作业时，直流有刷电机驱动切割刀片高速旋转，横向移动滑台与纵向移动滑台根据上位机所规划的切割路径进行移动，对乌鳢进行腹部横切后，步进电机带动刀架转向组件顺时针旋转 90°后再对乌鳢进行颈部环切。切割作业前将胸鳍剪断，以消除其对颈部环切的影响；由于乌鳢臀鳍较为坚硬，需分别在鱼腹（泄殖孔）两侧 5 mm 处各进行腹部横切割一次，避开臀鳍，降低其对切割效果的影响。

2.4 皮肉分离机构

切割作业完成后需对乌鳢颈部上方进行皮肉分离操作，以便于剥皮终端机械手对鱼皮进行夹持。在皮肉分离作业流程中，皮肉分离刀动力组件的好坏对皮肉分离效果有着重要影响。为保证皮肉分离作业的顺畅进行，本文根据需求设计了以滑台气缸为主要传动部件的气缸式皮肉分离机构，其主要由横向移动滑台、纵向移动滑台、横置滑台气缸、纵置滑台气缸及皮肉异形分离刀组成，其结构如图 7 所示。

为防止异形分离刀与切割装置产生干涉，非工作状态时纵置滑台气缸处于缩回状态，纵置滑台气缸行程设置为 20 mm，缩回状态时异形分离刀刀头位于切割刀片顶端后方 10 mm 处，伸出状态时异形分离刀刀头处于切割刀片顶端前方 10 mm 处，满足作业要求。

进行皮肉分离作业时，纵置滑台气缸带动皮肉分离刀弹出；移动滑台根据上位机所规划的路径带动异形分离刀及其动力组件运行至待皮肉分离部位，并从颈部环切切口处伸入；随后鱼身进行半周旋转的同时，横置滑台气缸带动异形分离刀进行高频往复运动将皮肉分离。



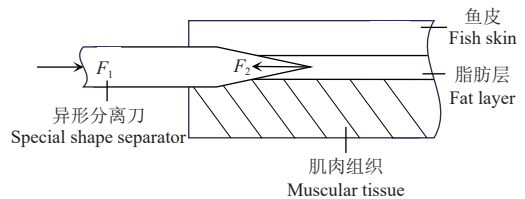
1. 纵置滑台气缸 2. 横置滑台气缸 3. 异形分离刀 4. 横向移动滑台 5. 纵向移动滑台
1. Longitudinal cylinder slide 2. Horizontal cylinder slide 3. Special shape separator 4. Horizontal sliding table 5. Longitudinal sliding table

图 7 皮肉分离机构

Fig.7 Skin and flesh separating device

由于涉及后续剥皮作业，选用不同参数组合的异形分离刀对乌鳢皮肉分离作业质量有显著影响，直接决定了后续整皮剥取的效果。本研究设计了乌鳢整皮剥离系统异形分离刀工作参数优化试验，试验过程中，首先分别以皮肉分离处的分离质量、损伤程度作为感官评分标准，结合异形分离刀宽度、分离刀厚度、分离刀振荡频率、分离刀振幅等因素进行单因素试验，根据单因素试验结果再选取对皮肉分离效果有较大影响的因素（异形分离刀宽度、分离刀厚度、分离刀振荡频率）进行 $L_9(3^4)$ 正交试验，对正交试验结果进行分析得出皮肉分离效果较优的异形分离刀参数组合为：异形分离刀宽度 7.00 mm、分离刀厚度 2.00 mm、振荡频率 4.0 Hz、振幅 20.00 mm。

皮肉分离过程中，横置滑台气缸提供作用于异形分离刀的推力，异形分离刀刀头对皮肉连接处（脂肪层）施加压力的同时，通过刀头的尖锐边缘将脂肪组织断开，由于脂肪纤维具有一定的抗剪性，这会对分离刀的刺入施加阻力。为确定横置滑台气缸推力，对刺入过程中的异形分离刀进行受力分析，如图 8 所示。



注： F_1 为横置滑台气缸作用于异形分离刀的推力，N； F_2 为异形分离刀刺入脂肪层所受到的阻力，N。

Note: F_1 is the thrust exerted by the horizontal cylinder slide on the special shape separator, N; F_2 is the resistance of the special shape separator while puncturing the fat layer.

图 8 异形分离刀受力示意图

Fig.8 Force diagram of the special shape separator

基于受力平衡原理，由图 8 分析可知，为保证分离作业流畅进行，横置滑台气缸推力需满足：

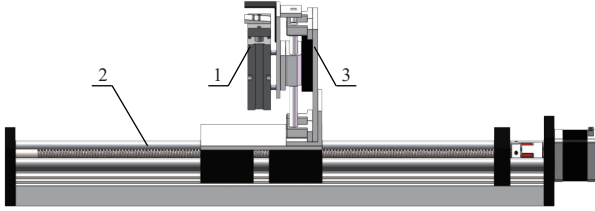
$$F_1 > F_2 \quad (6)$$

使用电子压力传感器对皮肉分离刀单次刺入脂肪层过程中所受到的阻力进行测量，其最大值为 11.4 N，结

合式 (6) 可知, 皮肉分离作业时横置滑台气缸推力需大于 11.4 N。

2.5 剥皮终端

剥皮终端由剥皮机械手 (鱼皮夹紧动作由气缸与特制机械机构配合作业完成)、横向移动滑台、竖向移动滑台构成, 其结构如图 9 所示。



1. 剥皮机械手 2. 横向移动滑台 3. 竖向移动滑台
1. Peeling manipulator 2. Horizontal sliding table 3. Vertical sliding table

图 9 剥皮终端
Fig.9 Peeling device

进行剥皮操作时横向移动滑台及竖向移动滑台可实现剥皮机械手的水平移动及升降, 移动滑台根据上位机所规划的路径带动剥皮机械手移动至皮肉分离切口处并将已分离的鱼皮夹住, 夹紧鱼皮的机械手在横向移动滑台的带动下向鱼尾方向拉扯即可将整张乌鳢皮剥下。

为保证剥皮终端可将不同体长乌鳢的鱼皮完整剥离, 其横向移动滑台行程需大于 2 倍待剥皮乌鳢腹长最大值。依据表 1 中乌鳢腹长数据并结合对安全距离的考虑, 横向移动滑台行程设定为 700 mm; 竖向移动滑台行程的确定与乌鳢背缘轮廓及体高极差有关, 由于乌鳢背缘轮廓较平直, 如图 1 所示, 因此竖向移动滑台行程可近似为大于乌鳢体高极差的一半, 依据表 1 中乌鳢体高数据并结合对安全距离的考虑, 竖向移动滑台行程设定为 100 mm, 满足剥皮作业需求。

剥皮机械手压紧力的产生依靠于气缸活塞杆作用于下夹片的推力。压紧力需要控制在合理范围内, 压紧力太小则在剥取作业时无法夹紧鱼皮, 导致剥取失败; 压紧力过大会在剥取过程中造成鱼皮夹持部位损伤, 降低剥离后的鱼皮质量。为确定合适的压紧力范围, 在不考虑鱼皮自身重力影响的情况下 (鱼皮质量较小), 对剥皮作业时的鱼皮夹持部位受力情况进行分析^[24], 如图 10 所示。

由图 10 分析可知, 为使鱼皮剥取过程中不发生鱼皮脱离现象, 鱼皮受力需满足:

$$f_2 > F_3 \quad (7)$$

其中:

$$\begin{cases} f_2 = \mu_2 (F_t + F_4) \\ F_4 = F_t \end{cases} \quad (8)$$

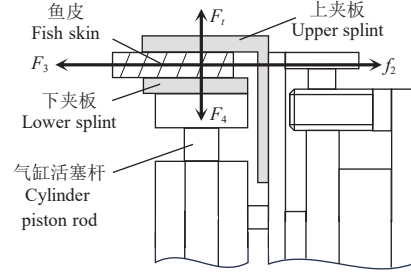
式中 f_2 为鱼皮与上下夹板之间的摩擦力, N; F_3 为剥皮时鱼皮所受到的阻力, N; μ_2 为鱼皮在夹板表面的摩擦系数; F_t 为气缸活塞杆作用于鱼皮的推力, N; F_4 为上夹板对鱼皮的反作用力。

为保证剥取成功率, 结合式 (7)、(8) 及安全系

数的考虑, 气缸活塞杆推力下限计算式为:

$$F_t = S_2 \frac{F_3}{2\mu_2} \quad (9)$$

式中 S_2 为剥皮机械手气缸活塞杆推力安全系数。



注: F_t 为气缸活塞杆作用于鱼皮的推力, N; F_4 为上夹板对鱼皮的反作用力, N; F_3 为剥皮时鱼皮所受到的阻力, N; f_2 为鱼皮与上下夹板之间的摩擦力, N。

Note: F_t is the thrust exerted by the cylinder piston rod on the fish skin, N; F_4 is the reaction force of the upper splint on fish skin, N; F_3 is the resistance of the fish skin during the peeling process, N; f_2 is the friction force between the fish skin and the upper splint and lower splint, N.

图 10 剥皮过程中鱼皮受力示意图

Fig.10 Force diagram of the fish skin during the peeling process

剥皮机械手作业时具有低动态响应、静摩擦系数可控及气缸内压缩空气气压无波动等特点, 安全系数推荐值为 1.6; 经滑动摩擦试验, 乌鳢鱼皮在一字纹夹板表面的摩擦系数约为 0.476; 剥皮作业时鱼皮所受到的阻力主要来自皮下脂肪与肌肉之间的黏附力及结缔组织之间的连接力, 使用拉力传感器对剥皮作业过程中的阻力进行测量, 其最大值为 42.5 N, 结合式 (9) 可知, 气缸推力下限为 76.5 N; 为获取推力值上限, 调节不同活塞杆推力值对鱼皮进行夹持试验, 当推力值为 85 N 时, 鱼皮被夹持部位出现明显挤压伤, 推力增大, 挤压伤程度随之增强。

3 视觉系统设计

3.1 视觉系统构成及工作流程

视觉系统主要由工业相机、LED 灯带、上位机组成, 如图 11 所示。所使用工业相机型号为 MV-CA060-10GC 有效像素为 3 072×2 048, 最大帧率 17fps, 俯视 45°对乌鳢样本进行拍摄。为减少环境光及阴影对图像采集的干扰^[25], 选用条状白光 LED 灯带作为视觉系统光源, 经预试验处理, 选用两条功率为 9.6 W 的 LED 灯带, 并置于工业相机左右两侧各 100 mm 位置时, 可使图像采集区域达到理想的光学环境, 所采集的图像曝光统一且无阴影。上位机硬件为 Intel Core i5-12400F 2.3 GHz, 内存 16 GB, 为提高图像处理和三维重建的速度, 获取更好的乌鳢三维点云模型, 采用 NVIDIA GeForce RTX 3 070 GPU 加速运算进程。上位机运行环境为 Windows 10(64 位) 操作系统, 使用 PyCharm2019 版本, Python3.7 版本。

视觉系统的工作流程为: 作业时, LED 灯带点亮, 工业相机对乌鳢周身图像进行采集并通过 USB 串口传输给上位机, 上位机基于双边滤波算法对图像进行预处理,

加强边缘特征的同时去除图像中的噪声,根据运动结构算法(structure from motion, SFM)获得物体 3D 结构及相机外参,采用尺度不变特征变换算法(scale-invariant feature transform, SIFT)对图像中特征点的局部特征进行提取,利用光束平差法(bundle adjustment, BA)对获取的相机外参及三维坐标点进行优化,得到稀疏的点云模型,通过集群多视角立体视觉算法(cluster multi-view stereo, CMVS)和基于面片的多视角立体视觉算法(patch-based multi-view stereo, PMVS)对点云进行加密处理,最后调节八叉树算法深度以控制细节精度并进行泊松表面重建^[26]。依据乌鳢三维重建模型对特征部位进行目标检测及定位并对各机构运动路径进行规划,最后将各机构运动路径参数上传至控制系统。

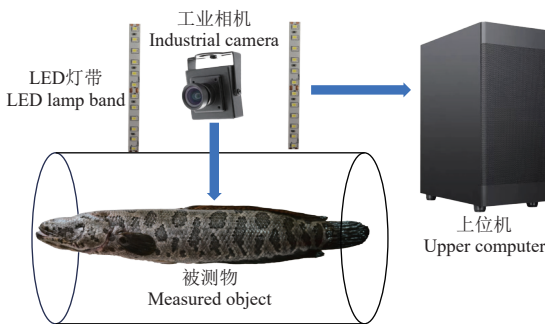


图 11 视觉系统总体构成

Fig.11 Overall composition of visual system

3.2 乌鳢整皮剥离装置作业路径规划

不同乌鳢形态参数各异且鱼身存在胸鳍、臀鳍等,鱼鳍与鱼体紧密相连,对乌鳢的整皮剥取有负面影响。因此,在剥皮作业前有必要对各机构作业路径进行规划。对乌鳢形态特征进行分析后可知,乌鳢整皮剥离装置作业路径的规划主要与胸鳍与泄殖孔的位置有关。本研究基于 YOLOv5s^[27] 确定乌鳢胸鳍位置,并对颈部环切、皮肉分离及剥皮路径进行规划;通过感兴趣区域(region of interest, ROI)确定乌鳢泄殖孔位置^[28],并对腹部横切路径进行规划。

3.2.1 乌鳢胸鳍位置确定及路径轨迹规划

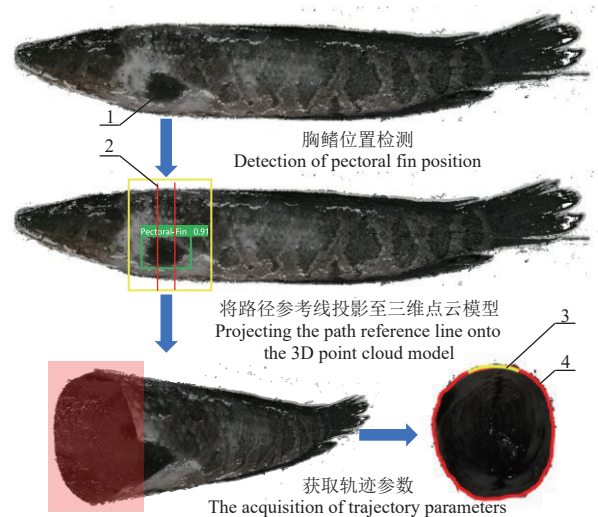
视觉系统需要应用算法模型对乌鳢胸鳍位置进行检测,被检测鱼体图像场景较为简单,容易实现实时检测。YOLOv5s 是目标检测领域中广泛使用的深度学习算法,在准确性、速度及目标定位精度方面表现优秀,且在预试验中满足检测任务的性能要求,因此本研究基于 YOLOv5s 算法对乌鳢胸鳍位置进行检测,并依据检测结果对颈部环切、皮肉分离及剥皮路径进行规划。

1) 为构建乌鳢胸鳍图像数据集,以 250 条乌鳢为样本,采取头朝左尾朝右的状态进行左侧胸鳍图像采集,获得 250 张初始图像。为丰富数据集并提高检测模型泛化能力,对 250 张图像进行顺时针 90° 旋转 3 次,随机角度旋转 1 次,数据集图像扩充至 1250 张。随机抽取 2 组各 250 张图像分别进行曝光增强、高斯噪声处理,数据集图像扩充至 1750 张,使用 Labellmg 进行标注并

以 4:1 的比例随机划分为训练集(1400 张)与测试集(350 张)。

2) 使用随机梯度下降法(stochastic gradient descent, SGD)对检测模型进行训练,以精确率(Precision)、召回率(Recall)、平均精度值(mAP)作为模型性能的评价指标。训练过程中初始化学率(learning rate)设置为 0.01,初始动量(momentum)设置为 0.937,批次大小(batch size)设置为 8,迭代轮次(epoch)设置为 250。经训练,模型最终的精确率为 99.38%,召回率为 99.14%,平均精度值为 99.45%,可准确输出检测框线位置,满足乌鳢胸鳍位置检测要求。

3) 使用分割线将检测框进行竖向三等分,选取靠近鱼头的分割线为路径参考线并将其投影至乌鳢三维模型中,获取 n 个与路径参考线 X 轴坐标相同的点并组成坐标集合,通过计算匹配代价获取完整的鱼颈环切、皮肉分离及剥皮路径轨迹参数。乌鳢胸鳍位置检测及路径轨迹规划如图 12 所示。



1. 胸鳍 2. 路径参考线 3. 皮肉分离及剥皮路径起始位置 4. 颈部环切路径
1. Pectoral fin 2. Path reference line 3. The initial position of the skin and flesh separating and peeling path 4. The path of circular neck cutting

图 12 胸鳍位置检测及路径轨迹规划示意图

Fig.12 Diagram of pectoral fin position detection and path trajectory planning

3.2.2 乌鳢泄殖孔位置确定及路径轨迹规划

泄殖孔是定位鱼身位置的天然特征(泄殖孔为红色,且雌鱼、雄鱼均有泄殖孔)。为方便进行点云颜色对比,将乌鳢点云色彩空间由 RGB 转化为 HSV 后,对红色点云的饱和度进行增强,在 Open3D 中调用处理后的乌鳢三维点云模型,通过感兴趣 ROI 区域对不同颜色的点云进行分割,并提取出乌鳢腹部泄殖孔部位点云,使用 DBSCAN(density-based spatial clustering of applications with noise)密度聚类算法对不满足距离阈值和密度阈值的噪声点进行剔除。

为准确获得路径轨迹坐标参数需对提取出的泄殖孔点云簇中心空间坐标进行计算,设点云簇中的点云数量为 n 个,其空间坐标为 $(x_1, y_1, z_1), (x_2, y_2,$

$z_2), \dots, (x_n, y_n, z_n)$, 点云簇中心空间坐标计算式为:

$$\begin{cases} F_x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \\ F_y = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i \\ F_z = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n z_i \end{cases} \quad (10)$$

式中 F_x 、 F_y 、 F_z 分别为点云簇中心位置的 X 轴坐标、 Y 轴坐标及 Z 轴坐标; x_i 、 y_i 、 z_i 分别为点云簇中点云的 X 轴坐标、 Y 轴坐标及 Z 轴坐标。

依据乌鳢泄殖孔点云簇中心位置空间坐标参数, 确定其贯穿鱼身的中轴线为预切割线, 将此轴线上、下偏移 5 mm, 行成刀道。通过对刀道上点云集合的空间坐标进行提取, 获取完整的腹部横切路径轨迹参数。乌鳢泄殖孔位置确定及路径轨迹规划如图 13 所示。

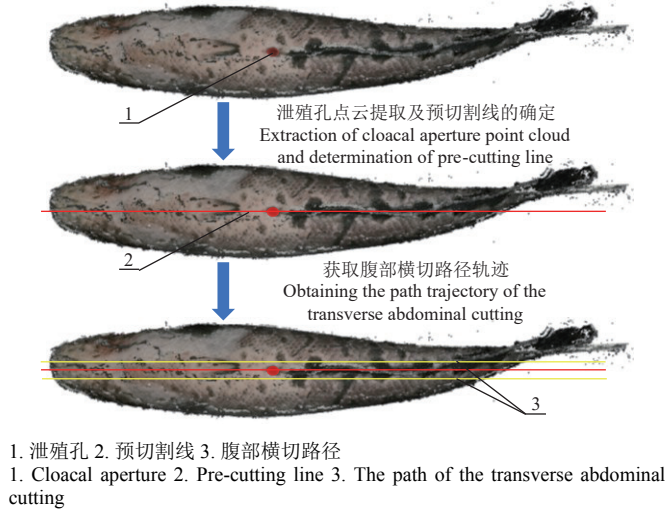


图 13 泄殖孔位置检测及路径轨迹规划示意图

Fig.13 Diagram of cloacal aperture position detection and path trajectory planning

3.3 乌鳢鱼皮面积计算

为评估样机性能及方便后续改进, 需对未进行剥皮的乌鳢鱼皮面积进行计算, 与实际剥取的鱼皮面积进行比较, 从而对鱼皮剥取率进行计算与分析。由于乌鳢鱼体为不规则几何体, 因此本研究基于获取的乌鳢三维点云模型对未进行剥皮的乌鳢鱼皮面积进行计算。

计算鱼皮面积前预先使用 Meshlab 软件中的点云选取及剔除功能, 删除对鱼皮面积计算有较大影响的点云 (鱼头、鱼尾、背鳍、臀鳍等)。对乌鳢三维模型进行三角网格化处理, 在点云集合中选取任意一点为基点寻找距离该点最近的两个子点形成初始三角形, 再以三角形的三条边为基准线继续向外拓展三角形, 直至所有点云都被包含于该乌鳢空间立体三角网模型中, 如图 14 所示。

三角网格化完成后, 将空间立体三角网平铺至坐标轴的 XOY 面。设三角网格空间立体坐标分别为 $a(x_a, y_a, z_a)$ 、 $b(x_b, y_b, z_b)$ 、 $c(x_c, y_c, z_c)$, 则三角形各边计算式为:



图 14 三角网模型构建过程

Fig.14 Triangulation model building process

$$\begin{cases} A = \sqrt{(x_a - x_b)^2 + (y_a - y_b)^2} \\ B = \sqrt{(x_a - x_c)^2 + (y_a - y_c)^2} \\ C = \sqrt{(x_b - x_c)^2 + (y_b - y_c)^2} \end{cases} \quad (11)$$

式中 A 、 B 、 C 为三角形边长, mm。

通过海伦公式计算三角形面积, 计算式为:

$$\begin{cases} S = \sqrt{P(P-A)(P-B)(P-C)} \\ P = \frac{1}{2}(A+B+C) \end{cases} \quad (12)$$

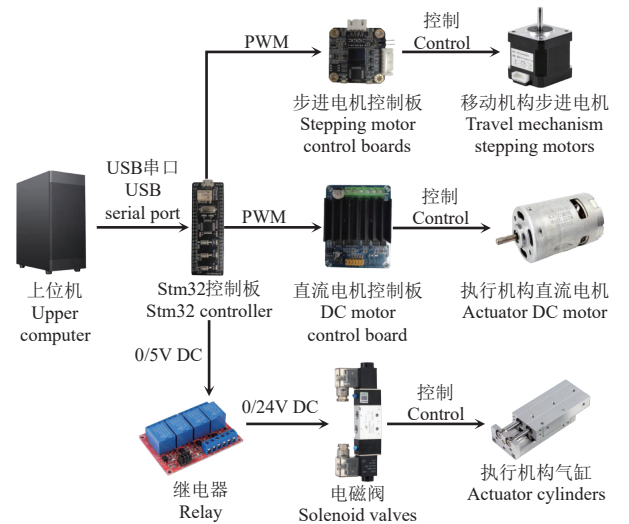
式中 P 为三角形周长值的一半, mm; S 为三角形面积, mm^2 。

最后通过对所有三角形面积进行累加得到乌鳢鱼皮面积。

4 控制系统设计

4.1 总体构成

乌鳢整皮剥离系统中包含运动机构, 如装夹装置步进电机组件、移动滑台步进电机组件; 执行机构, 如切割装置直流无刷电机组件、装夹装置夹爪气缸组件、皮肉分离装置滑台气缸组件、剥皮机械手双轴双杆气缸组件等。控制系统需对上述运动机构及执行机构进行精确控制, 高质量完成乌鳢整皮剥取作业。控制系统基于 STM32F103C8T6 单片机进行设计^[29], 控制程序采用 C 语言编写, 通过 Keil5 软件进行编译。控制原理图如图 15 所示。



注: 0/5V DC 为单片机控制继电器的低电平电压值; 0/24V DC 为电磁阀非工作状态与工作状态下的标准电压值。

Note: 0/5V DC is the magnitude of the low and high level voltage when the microcontroller controls the relay; 0/24V DC is the standard voltage magnitude of the solenoid valve in non-working state and working state.

图 15 控制系统总体构成

Fig.15 Overall composition of control system

控制系统的工作流程为: 作业时, 主程序按照作业

顺序依次调用各步骤的子程序, 并基于视觉系统规划的路径给予运动路径参数, 主控制器通过 I/O 口向步进电机驱动器发送相应脉冲控制信号带动步进电机运转, 进而实现对各运动机构的控制, 相应机构按照规划的路径移动到指定位置后, 单片机调用特定功能的执行机构程序, 控制其协调作业。

4.2 运动机构控制

运动机构控制的对象包括装夹装置步进电机、切割装置和皮肉分离装置移动滑台步进电机、剥皮终端移动滑台步进电机。选用 57BYG250B-8 两相步进电机驱动运动机构进行运动。为避免运动机构运行过程中发生失步现象, 保证运行过程中的精准性, 运动机构的控制方式为闭环控制, 驱动器型号为 X57_V1.2X1, 采用基于磁性编码器的位置反馈式 PID 算法^[30-31], 该算法的离散化公式为:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \sum e(j) + K_d [e(t) - e(t-1)] \quad (13)$$

式中 $u(t)$ 为 PID 控制器的输出值; K_p 为比例增益; K_i 为积分系数; K_d 为微分时间常数; $e(t)$ 为设定位置值与目标位置值之差; $e(t-1)$ 为上一时刻设定位置值与目标位置值之差; $\sum e(j)$ 为所有时刻的位置误差累积和。

4.3 执行机构控制

4.3.1 装夹装置气缸夹爪控制

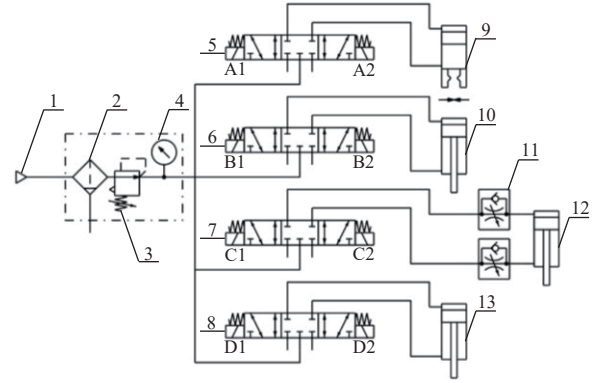
装夹装置选用平行气缸夹爪 (MHZ2-32D), 缸径为 32 mm, 开闭行程为 22 mm。参考其理论输出力表, 气压为 0.5 MPa 时, 其每个手指内径夹持力有效值为 193 N, 满足乌鳢夹持要求。

根据气动元件的控制要求, 对气路进行了设计^[32], 如图 16 所示。空气压缩机作为气源装置产生高压气体, 通过由 PU 管组成的气体通路传输至气动三联件中, 对高压气体进行过滤和除湿处理; 为满足气动执行元件的气压要求, 使用调压阀对气体压力进行调节, 经过调压的气体通过 Y 型五通接头被分为四路, 分别用于驱动夹爪气缸、横置滑台气缸、纵置滑台气缸和双轴双杆气缸。

装夹装置气缸夹爪设有独立的按键, 通过人工手动按下或释放按键向单片机 I/O 口输入高电平或低电平, 控制继电器吸合或释放, 进而控制电磁换向阀两个出气口的有序开启, 从而实现气缸活塞杆的推出和退回, 使气缸夹爪对乌鳢尾部进行夹持。

4.3.2 切割装置直流电机控制

切割装置中驱动切割刀片旋转的电机为直流有刷电机 (VT-775), 其额定电压为 12 V。电机驱动器选用型号为 DBH-01A 直流电机驱动模块, 其输出通道工作电流可达 30 A, 可承载所选电机最高转速下的工作电流 (4 A), 满足切割机构的驱动需求。驱动电机的转速决定了切割刀片的旋转速度, 直流电机驱动器通过接收单片机的脉冲宽度调制 (pulse width modulation, PWM) 信号实现对驱动电机的速度控制^[33]。由于通常情况下脉冲宽度占空比与电机转速呈非线性关系, 实际运作前需对脉冲宽度占空比与转速的关系进行标定。驱动器 PWM 占空比范围为 0%~98%, 标定时, 每 7 个百分点作为一个水平, 使用光电式转速计测量不同脉冲宽度占空比对应的实际电机转速, 标定结果如图 17 所示。



1. 气源 2. 过滤器 3. 调压阀 4. 气压计 5. 夹爪气缸电磁换向阀 6. 纵置滑台气缸电磁换向阀 7. 横置滑台气缸电磁换向阀 8. 双轴双杆气缸电磁换向阀 9. 夹爪气缸 10. 纵置滑台气缸 11. 节流阀 12. 横置滑台气缸 13. 双轴双杆气缸

注: A1 为夹爪气缸电磁换向阀左侧线圈; A2 为夹爪气缸电磁换向阀右侧线圈; B1 为纵置滑台气缸电磁换向阀左侧线圈; B2 为纵置滑台气缸电磁换向阀右侧线圈; C1 为横置滑台气缸电磁换向阀左侧线圈; C2 为横置滑台气缸电磁换向阀右侧线圈; D1 为双轴双杆气缸电磁换向阀左侧线圈; D2 为双轴双杆气缸电磁换向阀右侧线圈。

Note: A1 is the left coil of solenoid directional valve of gripper cylinder; A2 is the right coil of solenoid directional valve of gripper cylinder; B1 is the left coil of solenoid directional valve of horizontal slide cylinder; B2 is the right coil of solenoid directional valve of horizontal slide cylinder; C1 is the left coil of solenoid directional valve of longitudinal cylinder slide; C2 is the right coil of solenoid directional valve of longitudinal cylinder slide; D1 is the left coil of solenoid directional valve of double rod double shaft cylinder; D2 is the right coil of solenoid directional valve of double rod double shaft cylinder.

图 16 控制系统气路图

Fig.16 Gas diagram of control system

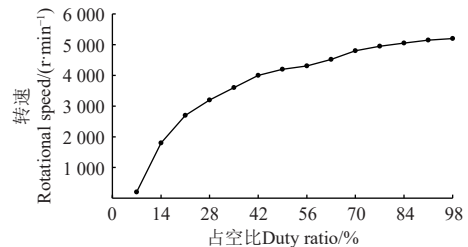


图 17 脉冲宽度占空比与转速关系曲线图

Fig.17 The relationship curve between duty ratio and rotational speed

4.3.3 皮肉分离装置滑台气缸控制

皮肉分离装置中的横置滑台气缸 (HLQ6-20S) 行程为 20 mm, 纵置滑台气缸 (HLQ6-20S) 行程为 20 mm, 参考其理论输出力表, 气压为 0.5 MPa 时, 其推力有效值为 20 N, 满足乌鳢皮肉分离要求。其气路设计如图 16 所示, 由于皮肉分离机构往复速度对皮肉分离质量有较大影响, 为便于对其进行控制, 在横置滑台气缸与电磁换向阀之间加装了单向速度控制阀, 通过调节气体流量从而控制气缸活塞的运动速度。作业时单片机调用皮肉分离执行机构控制程序, 将气源启动后进行下述控制过程: 首先 B1 通电, 纵置滑台气缸电磁换向阀实现左通, 纵置滑台气缸无杆腔气压增大, 活塞杆带动皮肉分离刀伸出, 避免作业时与切割机构发生撞击; 纵置滑台气缸伸出量达到安全距离后, 控制器循环输入信号启动, 横置

滑台气缸进入推进-复位循环作业状态, C1 通电, 横置滑台气缸电磁换向阀实现左通, 压缩气体进入无杆腔, 横置滑台气缸活塞杆带动皮肉分离刀向切口处推进, 对切口处皮肉进行分离, 达到给定进刀距离后, C2 通电, 横置滑台气缸电磁换向阀实现右通, 横置滑台气缸有杆腔气压增大, 横置滑台气缸活塞杆退回, 实现异形分离刀复位; 循环作业停止后, B2 通电, 纵置滑台气缸电磁换向阀实现右通, 纵置气缸有杆腔气压增大, 活塞杆快速退回, 皮肉分离执行机构复位。

4.3.4 剥皮机械手控制

剥皮机械手主要用于对鱼皮进行夹持并向鱼尾方向拉扯鱼, 剥皮机械手驱动气缸选用双轴双杆气缸 (TDA16-10), 行程为 10 mm, 参考其理论输出力表, 气压为 0.5 MPa 时, 其推力有效值为 201.1 N, 满足乌鳢整皮剥取要求。作业时单片机调用剥皮机械手控制程序, 将气源启动后进行下述控制过程: 首先 D1 通电, 双轴双杆气缸电磁换向阀实现左通, 双轴双杆气缸无杆腔气压增大, 活塞杆伸出将皮肉分离后的鱼皮夹紧; 待鱼皮完全被剥离后, D2 通电, 双轴双杆气缸电磁换向阀实现右通, 双轴双杆气缸有杆腔气压增大, 活塞杆复位退回, 剥皮机械手张开释放鱼皮。

5 样机性能试验

5.1 试验材料与方法

试验所使用的材料为 50 尾由杭州市农科院水科杂交培育的“杭鳢 1 号”乌鳢。在试验中, 选择的乌鳢鱼体长为 360~420 mm, 质量为 615~1 030 g, 表皮面积为 31 000~59 000 mm², 如图 18 所示。试验以单台乌鳢整皮剥离机的单尾鱼皮剥离时长、鱼皮剥取率、皮肉分离指数及鱼皮破损率为指标对样机性能进行分析。

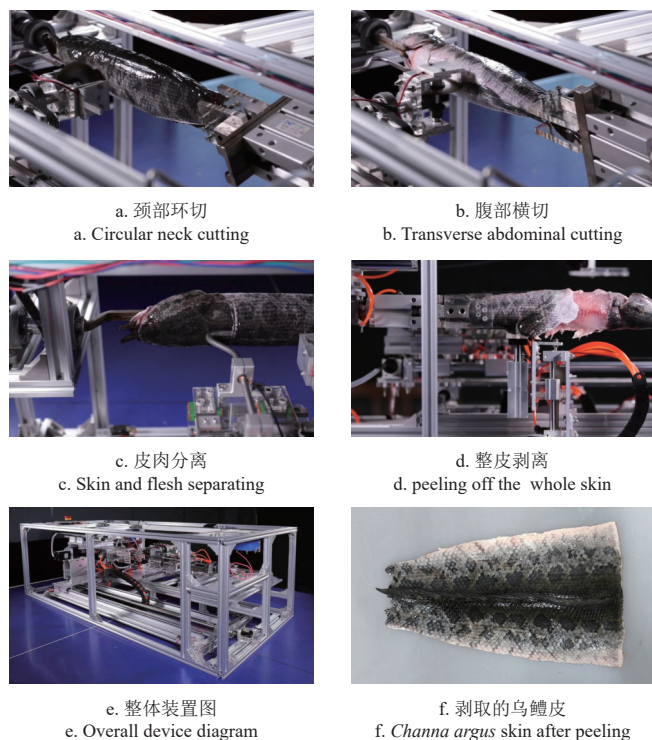


图 18 样机性能试验

Fig.18 Prototype performance test

5.2 指标计算

单尾鱼皮剥离时长: 从完成装夹开始, 经过视觉系统处理、切割机构作业、皮肉分离机构作业、剥皮终端作业, 直到乌鳢整皮被剥下的总时长。

鱼皮剥取率: 将机器剥离下来的乌鳢皮展平放在一张规则的图表纸上, 并绘制其轮廓, 鱼皮累积轮廓所包围的面积为剥离后鱼皮的实际值, 其与基于三维重建算法计算得到的乌鳢皮面积的比值为鱼皮剥取率, 其式为:

$$b = S_A / S_T \times 100\% \quad (14)$$

式中 b 为鱼皮剥取率, %; S_A 为剥离后鱼皮的实际面积, mm²; S_T 为基于三维重建算法计算得到的乌鳢皮面积, mm²。

皮肉分离指数: 剥离下的乌鳢皮残留的鱼肉较少或无残留的鱼肉, 皮肉分离指数高, 鱼皮剥取质量较高; 剥离下的乌鳢皮残留较多鱼肉, 皮肉分离指数低, 鱼皮剥取质量低。皮肉分离指数为:

$$d = 10 - 10Q_C / Q_S \quad (15)$$

式中 d 为皮肉分离指数; Q_C 为剥离下来的乌鳢皮残留的鱼肉质量, g; Q_S 为去除鱼皮后乌鳢的质量, g。

鱼皮破损率: 每组试验中剥离下来的鱼皮完整无破损, 边缘未出现撕裂现象的情况占比大, 鱼皮破损率低, 整皮剥取质量高; 剥离下来的鱼皮不完整、出现破损、边缘撕裂现象的情况占比大, 鱼皮破损率高, 整皮剥取质量低。鱼皮破损率为:

$$w = N_D / N_T \times 100\% \quad (16)$$

式中 w 为鱼皮破损率, %; N_D 为每组试验中鱼皮出现破损的数量; N_T 为每组试验中总体乌鳢样本的数量。

5.3 试验结果

试验结果如表 3 所示, 在乌鳢整皮剥离系统样机试验中, 单尾鱼皮剥离时长随鱼体大小不同而变化, 其结果在 172~195 s 之间波动, 平均值为 183 s, 剥取速度较快; 剥取后鱼皮剥取率范围为 93.10%~95.70%, 平均值为 94.60%, 剥取后鱼皮实际面积较大, 有效减少原料浪费; 皮肉分离指数范围为 9.91~9.98, 平均值可达 9.93, 剥取后鱼皮残留的鱼肉较少, 剥取效率较高; 鱼皮破损率范围为 5.00%~10.00%, 平均值仅为 6.25%, 每组试验中出现破损情况的鱼皮数量较少, 系统对不同体质乌鳢的适用范围较广, 可有效提高经济效益。

表 3 试验结果
Table 3 Test results

项目 Items	结果范围 Range of results	平均值 Average value
单尾鱼皮剥离时长 Duration of skin peeling for each fish/s	172~195	183
鱼皮剥取率 Fish skin peeling rate/%	93.10~95.70	94.60
皮肉分离指数 Skin and flesh separating index	9.91~9.98	9.93
鱼皮破损率 Breakage rate of fish skin/%	5.00~10.00	6.25

6 结 论

1) 自行设计了乌鳢整皮剥离机, 实现了乌鳢整皮自

动化剥离。分离机构可对脂肪层较薄的乌鳢进行皮肉分离作业; 切割装置可通过颈部环切、腹部横切, 解决臀鳍的干扰; 视觉系统则获取了乌鳢的形态特征参数, 算法上实现了一乌鳢一路径, 确保精准剥皮。

2) 以样机单尾鱼剥离时长、鱼皮剥取率、皮肉分离指数及鱼皮破损率为指标对样机性能进行分析。样机单尾鱼剥离时长平均值为 183 s, 剥取率平均值为 94.60%, 皮肉分离指数平均值为 9.93, 鱼皮破损率平均值为 6.25%。乌鳢整皮剥离系统可实现精准、快速、低损整皮剥离作业。

3) 试验过程中剥皮终端剥离速度、剥皮机械手夹持力、切割深度等参数的选取为经验值, 未考虑其对鱼皮剥取率、皮肉分离指数及鱼皮破损率的影响。为进一步提高乌鳢整皮剥离系统剥取效果及效率, 后续需结合乌鳢整皮剥离工艺对相关参数的选取进一步开展试验研究。

[参 考 文 献]

- [1] 谭颖. 赫哲族鱼皮服饰艺术发展研究[D]. 苏州: 苏州大学, 2013.
TAN Ying. The Research on the Artistic Development of Hoche Fishskin Dress Adornment[D]. Suzhou: Soochow University, 2013. (in Chinese with English abstract)
- [2] 王晓琳. 野生动物保护法修订: 筑牢织密维护公共卫生安全的法治防线[J]. 中国人大, 2020, 512(20): 47-49.
- [3] 魏世林, 刘镇华, 王学川, 等. 海水有鳞鱼皮制革工艺的初步研究[J]. 陕西科技大学学报, 1992, 23(4): 23-27.
WEI Shilin, LIU Zhenhua, WANG Xuechuan, et al. Study of the technology of leather manufacture for marine flaky fish skin[J]. Journal of Shaanxi University of Science & Technology, 1992, 23(4): 23-27. (in Chinese with English abstract)
- [4] 刘子飞, 孙慧武, 蒋宏斌, 等. 我国水产加工业发展现状、问题与对策[J]. 中国水产, 2017, (12): 36-39.
- [5] 欧阳杰, 沈建, 郑晓伟, 等. 水产品加工装备研究应用现状与发展趋势[J]. 渔业现代化, 2017, 44(5): 73-78.
OUYANG Jie, SHEN Jian, ZHENG Xiaowei, et al. Research and application status and development tendency of aquatic products processing equipment[J]. Fishery Modernization, 2017, 44(5): 73-78. (in Chinese with English abstract)
- [6] 周德庆, 杨念钦, 王珊珊. 我国水产品加工贸易现状与发展策略[J]. 肉类研究, 2018, 32(2): 71-76.
ZHOU Deqing, YANG Nianqin, WANG Shansha. Current situation and development strategy of aquatic products processing and trade in China[J]. Meat Research, 2018, 32(2): 71-76. (in Chinese with English abstract)
- [7] 程世俊, 宗力, 熊善柏, 等. 连续式淡水鱼弹簧刷去鳞机参数优化与试验[J]. 农业工程学报, 2012, 28(20): 88-94.
CHENG Shijun, ZONG Li, XIONG Shanbo, et al. Parameter optimization and test of continuous spring brush scaling machine for freshwater fish[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(20): 88-94. (in Chinese with English abstract)
- [8] 张超, 黄剑彬, 成芳. 罗非鱼初加工喂入量监测与运行参数在线控制[J]. 农业工程学报, 2021, 37(13): 46-54.
ZHANG Chao, HUANG Jianbin, CHENG Fang. Monitoring of feeding rate and online control of parameters in primary processing of Tilapia[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2021, 37(13): 46-54. (in Chinese with English abstract)
- [9] 胡晓亮, 陈庆余, 沈建. 竹筴鱼去脏加工用剖切刀具的优化试验[J]. 农业工程学报, 2014, 30(12): 270-277.
HU Xiaoliang, CHEN Qingyu, SHEN Jian. Optimization of slitting cutters used for gutting Trachurus japonicus[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2014, 30(12): 270-277. (in Chinese with English abstract)
- [10] AGEEV O V, DOWGIALLO A, STERCZYŃSKA M, et al. Experimental characterization and theoretical modeling of fracture and friction resistance forces during tuna cutting[J]. Journal of Food Engineering, 2021, 307: 110648.
- [11] FU J, HE Y, CHENG F. Intelligent cutting in fish processing: Efficient, high-quality, and safe production of fish products[J]. Food and Bioprocess Technology, 2023, 1-22.
- [12] AZARMDL H, MOHTASEBI S S, JAFARY A, et al. Design and simulation of a vision-based automatic trout fish-processing robot[J]. Applied Sciences, 2021, 11(12): 5602.
- [13] 陈庆余, 沈建, 欧阳杰, 等. 典型海产小杂鱼机械去脏试验[J]. 农业工程学报, 2013, 29(20): 278-285.
CHEN Qingyu, SHEN Jian, OUYANG Jie, et al. Experiment of mechanized gutting for typical small marine fish[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(20): 278-285. (in Chinese with English abstract)
- [14] 朱国, 谭鹤群. 鱼体在剖鱼机夹片中受力有限元分析[J]. 农业工程学报, 2008, 24(4): 44-48.
ZHU Guo, TAN Hequn. Finite element analysis of loaded silver carp in fish shearing machine clips[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2008, 24(4): 44-48. (in Chinese with English abstract)
- [15] 万鹏, 黄毓毅, 汪荣, 等. 基于机器视觉的鲈鱼鱼体定向排列输送装置设计与试验[J]. 农业工程学报, 2023, 39(14): 271-282.
WAN Peng, HUANG Yuyi, WANG Rong, et al. Design and experiments of the machine vision-based body orientation arrangement convey device for the *Scomber japonicus*[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2023, 39(14): 271-282. (in Chinese with English abstract)
- [16] AZARMDL H, MOHTASEBI S S, JAFARI A, et al. Developing an orientation and cutting point determination algorithm for a trout fish processing system using machine

- vision[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2019, 162: 613-629.
- [17] 符诚葵. 全自动剥鱼皮机: CN202918943U[P]. 2013-05-08.
- [18] 詹青彪. 一种操作简单的家用剥鱼皮机: CN205585211U[P]. 2016-09-21.
- [19] 笙辉机械. 立式去鱼皮机/自动去鱼皮机(带压滚) YP-50GS[Z/OL]. <http://shh288.com/html/product/detail/560.html>, 2022-03-13
- [20] 吴晓明. 现代机械设计手册: 气压传动与控制设计(第2版)[M]. 北京: 化学工业出版社, 2020: 202-205.
- [21] 万鹏, 郭三琴, 杨俊, 等. 淡水鱼水平往复振动头尾定向输送方法[J]. 农业工程学报, 2021, 37(4): 40-48.
WAN Peng, GUO Sanqin, YANG Jun, et al. Horizontal reciprocating vibration method for head-to-tail directional transportation of fresh water fish[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2021, 37(4): 40-48. (in Chinese with English abstract)
- [22] 孔凡婷, 王德福, 石磊, 等. 圆盘切割式蓖麻采摘装置设计与试验[J]. 农业工程学报, 2021, 37(23): 1-9.
KONG Fanting, WANG Defu, SHI Lei, et al. Design and experiment of disc-cutting picking device of castor[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2021, 37(23): 1-9. (in Chinese with English abstract)
- [23] 赵明岩, 翟晓冻, 林敏. 黑鱼整皮剥离系统切割刀具工作参数优化与试验[J]. 农业工程学报, 2023, 39(5): 249-255.
ZHAO Mingyan, ZHAI Xiaodong, LIN Min. Optimization and test of the working parameters of the cutting disc for the whole-skin peeling system of snakehead[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2023, 39(5): 249-255. (in Chinese with English abstract)
- [24] 杨可桢. 机械设计基础(第7版)[M]. 北京: 高等教育出版社, 2020: 147-149.
- [25] WELLENS H L L, HOSKENS H, CLAES P, et al. Three-dimensional facial capture using a custom-built photogrammetry setup: Design, performance, and cost[J]. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 2020, 158(2): 1-22.
- [26] PHANG J T S, LIM K H, CHIONG R C W. A review of three dimensional reconstruction techniques[J]. *Multimedia Tools and Applications*, 2021, 80(12): 17879-17891.
- [27] 段洁利, 王昭锐, 邹湘军, 等. 采用改进 YOLOv5 的蕉穗识别及其底部果轴定位[J]. 农业工程学报, 2022, 38(19): 122-130.
DUAN Jieli, WANG Zhaorui, ZHOU Xiangjun, et al. Recognition of bananas to locate bottom fruit axis using improved YOLOv5[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2022, 38(19): 122-130. (in Chinese with English abstract)
- [28] ZHOU Z, YANG M, WANG C, et al. Roi-cloud: A key region extraction method for LiDAR odometry and localization[C]// 2020 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), Paris, France, IEEE, 2020, 3312-3318.
- [29] TERENCE S, PURUSHOTHAMAN G. Systematic review of Internet of Things in smart farming[J]. *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*, 2020, 31(6): e3958.
- [30] 茹珂. 两相混合步进电机伺服控制技术研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2018.
RU Ke. Research on Servo Control Technology of Two-phase Hybrid Stepping Motor[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2018. (in Chinese with English abstract)
- [31] 廖平, 韩伟伟. 基于 STM32 多步进电机驱动控制系统设计[J]. *仪表技术与传感器*, 2016(4): 71-73, 77.
LIAO Ping, HAN Weiwei. Design of drive control system of multiple stepper motors based on STM32[J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2016(4): 71-73, 77. (in Chinese with English abstract)
- [32] 郑华栋, 王宏, 张洲, 等. 苹果采摘机器人手部结构设计与分析[J]. 液压与气动, 2023, 47(7): 100-105.
ZHENG Huadong, WANG Hong, ZHANG Zhou, et al. Design and analysis of hand structure for apple picking robot[J]. *Chinese Hydraulics & Pneumatics*, 2023, 47(7): 100-105. (in Chinese with English abstract)
- [33] 何伟灼, 刘威, 姜锐, 等. 无人机点射式水稻播种装置控制系统设计与试验[J]. 农业工程学报, 2022, 38(18): 51-61.
HE Weizhuo, LIU Wei, JIANG Rui, et al. Control system design and experiments of UAV shot seeding device for rice[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2022, 38(18): 51-61. (in Chinese with English abstract)

Design and experiment of the whole-skin peeling system of *Channa argus* based on three-dimensional reconstruction

ZHAI Xiaodong, ZHAO Mingyan^{*}, JIANG Xinyu, LIN Min, WANG Weizhi, HUANG Zhangwei

(College of Mechanical and Electronical Engineering, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: *Channa argus* is one type of predatory fish in the family *Channidae* native to fresh waters in eastern China. The skin of *Channa argus* has been an ideal substitute for the shortage of wild high-grade leather raw materials, due to the beautiful pattern, strong toughness, excellent breathability, waterproof, and strong anti-expansion. Annual production of *Channa argus* skin has been more than 500 000 tons in the broad market of China. However, the manual peeling of *Channa argus* skin has been limited to the deep processing industry in large-scale production at present, leading to low efficiency, low integrity of fish skin, and security risks. Therefore, this study aims to design the automatic whole-skin peeling system of *Channa argus* using the 3D (Three-Dimensional) reconstruction. The morphological parameters were also collected, where the head, body and tail sections were changed dramatically. The sticky skin was then fixed for the peeling operation on the hard hip fin. The whole-skin peeling machine was designed, including clamping, cutting, skin and flesh separation, as well as peeling devices. The vision system was selected with the industrial camera, LED (light-emitting diode) lamp band and upper computer. The industrial camera was used to capture the images of *Channa argus*. The LED lamp band was to provide an ideal optical environment for image acquisition. The upper computer was also used to preprocess the images. 3D reconstruction of images was performed to identify and locate the pectoral fin position using YOLOv5s. The cloacal aperture position was then identified and located by ROI (region of interest). The operation path of each mechanism was finally realized, according to the 3D point cloud model. The control system was designed to accurately control the travel mechanisms and the actuators in the whole-skin peeling device. The position feedback PID (Proportion Integral Derivative) with magnetic encoder was used for the closed-loop control of the motion module, in order to avoid the out-of-step phenomenon during operation. In the actuators, the air path was designed to realize the precise control of the cylinder gripper, horizontal slide cylinder, longitudinal slide cylinder, and double rod double shaft cylinder, according to the control requirements of pneumatic components. The duty ratio of the PWM (pulse width modulation) signal was set to realize the control of a DC (direct current) motor speed, in order to calibrate the relationship between PWM duty ratio and rotational speed. The performance of the prototype was evaluated by the total system operation duration, fish skin removal rate, skin and flesh separation index and breakage rate of fish skin of the whole-skin peeling device. The test results showed that a high peeling speed was achieved in the machine. The total operation duration of the system varied with the size of the *Channa argus*, ranging from 172 to 195 s, with an average of 183 s. After peeling, the fish skin removal rate ranged from 93.10% to 95.70%, with an average value of 94.60%. There was a large actual area of *Channa argus* skin after stripping, which effectively reduced the waste of raw materials. The separation index of skin and meat ranged from 9.91 to 9.98, with an average value of 9.93. There was less fish left on the skin after stripping, indicating a higher stripping efficiency than before. The breakage rate of fish skin ranged from 5.00% to 10.00%, with an average of only 6.25%. The small number of damaged fish skin in each group fully met the requirements of whole-skin peeling technology. This finding can provide a strong reference for the development and design of the whole-skin peeling system of *Channa argus*.

Keywords: design; experiments; fish skin peeling device; *Channa argus*; 3D reconstruction