

基于计算机视觉的头足类角质颚特征 研究 II：形态学参数测量*

贺芊菡¹ 孙翁杰² 刘必林^{1, 3, 4, 5, 6①} 孔祥洪^{1, 4} 林龙山⁷

(1. 上海海洋大学海洋科学学院 上海 201306; 2. 上海海洋大学信息学院 上海 201306; 3. 大洋渔业资源可持续开发教育部重点实验室 上海 201306; 4. 国家远洋渔业工程技术研究中心 上海海洋大学 上海 201306; 5. 农业农村部大洋渔业开发重点实验室 上海 201306; 6. 农业农村部大洋渔业资源环境科学观测实验站 上海 201306; 7. 自然资源部第三海洋研究所 厦门 361005)

摘要 角质颚形态被广泛应用于头足类种类鉴定与种群判别, 基于游标卡尺的手动径向测量是获取角质颚形态参数最常用的方法。本文提出一种利用计算机视觉提取角质颚形态参数的方法, 首先通过 MATLAB 编程提取角质颚特征点及空间坐标, 然后计算特征点间的空间距离, 最后将提取的角质颚形态学参数值与手动径向测量的结果进行比较。研究结果表明: 利用两种方法对每个头足类角质颚样本进行十次重复测定所得形态学参数的算术平均值接近, 除形态学参数上脊突长之外, 计算机视觉所测的数据平均绝对误差和平均相对误差都小于手动测量数据的平均绝对误差和平均相对误差, 说明计算机视觉所测量结果准确, 更加逼近真值; 分析标准差和离散系数可知, 计算机视觉重复多次提取每个样本的角质颚形态学参数的结果离散程度更低, 测量值更加聚集于真实值附近, 精密度更高。计算机视觉不仅为头足类角质颚参数测量提供了一种快速、准确方法, 同时还将大幅促进角质颚形态学参数在头足类种群判别与种类鉴定等领域的广泛应用。

关键词 角质颚; 形态参数; 计算机视觉; 手动测量

中图分类号 Q954; Q959.216; TP399 **doi:** 10.11693/hyhz20200300075

头足类角质颚形态结构稳定、耐腐蚀、储藏信息丰富(刘必林等, 2009), 广泛用于种群判别、种类鉴定、摄食生态等方面研究(刘必林等, 2015, 2016; Liu *et al.*, 2019; 林静远等, 2020)。基于游标卡尺的手动径向测量法是获取角质颚形态参数的传统方法(方舟等, 2014; 陈楠桦等, 2018), 而利用计算机视觉进行角质颚形态参数测定是一种新方法, 具有准确、快捷方便的特性。为了避免人为测量造成的误差, 提高研究耳石日轮的准确性, 国外已有学者研究开发了耳石日轮自动识别和分析程序(Fowler, 1989; Rypel, 2008), 但是对于角质颚的相关研究在国内外却鲜有报道。文

章根据角质颚三视图获取的角质颚特征点及空间坐标系从计算机视觉角度估算角质颚形态学参数, 并与传统的方法进行比较, 以评估基于计算机视觉测量角质形态的准确性、优越性, 为头足类角质颚参数的测量提供新方法。

1 材料与方法

1.1 材料

实验样本为 2019 年 1—2 月在印度洋海域进行渔业资源调查时所获得的 10 尾个体大小相近的鳶乌贼 *Sthenoteuthis oualaniensis*, 采集海域为 61°02'E—61°35'E,

* 国家重点研发计划, 2019YFD0901404 号; 国家自然科学基金面上项目, NSFC41876141 号; 全球变化与海气相互作用专项, GASI-01-EIND-YD01aut/02aut 号; 上海市“浦江人才”计划项目, 18PJ1404100 号; 上海市高校特聘教授“东方学者”岗位计划项目, 0810000243 号; 上海市科技创新行动计划, 19DZ1207502 号。贺芊菡, 硕士研究生, E-mail: 695799075@qq.com

① 通信作者: 刘必林, 博士生导师, 教授, E-mail: bl-liu@shou.edu.cn

收稿日期: 2020-03-15, 收修改稿日期: 2020-06-26

17°04'N—17°18'N。样本经冷冻保存后带回实验室提取角质颚并进行形态学测定。

1.2 角质颚的手动测量

利用游标卡尺对角质颚 *wwwwww* 形态参数进行手动测量(方舟等, 2014)(图 1): 上头盖长(upper hood length, UHL)、上脊突长(upper crest length, UCL)、上喙长(upper rostrum length, URL)、上翼长(upper wing length, UWL)、上侧壁长(upper lateral wall length, ULWL); 以及下头盖长(lower hood length, LHL)、下脊突长(lower crest length, LCL)、下喙长(lower rostrum length, LRL)、下翼长(lower wing length, LWL)、下侧壁长(lower lateral wall length, LLWL)。游标卡尺的精度为 0.02 mm。每个角质颚样本分别重复测量十次进行分析。

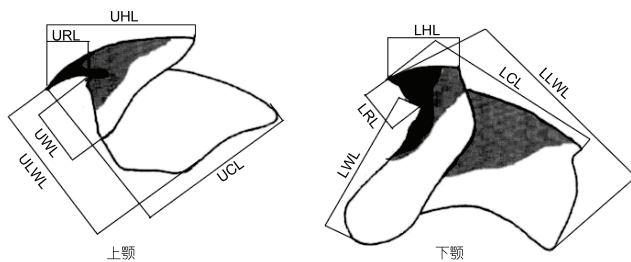


图 1 角质颚径向测量示意图

Fig.1 Radial measurement diagram of the beak

注: 引自方舟等(2014)

1.3 角质颚计算机视觉测量

(1) 利用自制拍摄装置对每个角质颚进行三视图获取, 对所得三视图进行轮廓的提取, 分别得到上、下颚三视图的边缘轮廓图。

(2) 根据得到的边缘轮廓图提取上、下颚的特征点(薛延学等, 2004), 获取上、下颚各 10 个特征点位置及其空间坐标。

(3) 依据空间坐标计算空间距离(徐阳, 2019), 获取角质颚各形态学参数, 计算机精度与像素精度和亚像素有关, 本文计算机精度为 0.001 mm。

(4) 每个角质颚样本调整位置和角度拍摄十组不同三视图重复步骤(2)、(3)。

(5) 十个角质颚样本重复以上步骤。

以上步骤均通过 MATLAB 软件编程完成。

1.4 数据分析

(1) 异常值检验。采用格拉布斯检验对以上两种方法得到的每个角质颚样本形态学参数进行正态分布异常值检验, 剔除异常值, 其计算公式如下(潘仁瑾, 1996):

$$T = \frac{|x_i - \bar{x}|}{S}, \quad (1)$$

式中, x_i 是每个样品每次测定值, $\bar{x}$ 是每个样本十次测定值的算术平均值, S 为样本标准差, 显著水平为 0.05。

(2) 准确度计算。利用绝对误差 e 和相对误差 e_r 比较两种方法测量值的准确度, 计算公式如下(钱政等, 2008):

$$e = |x_i - \bar{x}|, \quad (2)$$

$$e_r = \frac{e}{\bar{x}} \times 100\%, \quad (3)$$

式中, x_i 是各样品每次测定值, $\bar{x}$ 是每个样本十次测定值的算术平均值。

为了方便比较两种方法的测量结果, 本研究采取平均绝对误差 $\bar{e}$ 和平均相对误差 $\bar{e}_r$ 进行分析, 计算公式如下:

$$\bar{e} = \frac{e_1 + e_2 + \dots + e_{10}}{10}, \quad (4)$$

$$\bar{e}_r = \frac{e_{r1} + e_{r2} + \dots + e_{r10}}{10}, \quad (5)$$

式中, $e_1, e_2, \dots, e_{10}$ 表示每个样本每次测量结果的绝对误差, $e_{r1}, e_{r2}, \dots, e_{r10}$ 表示每个样本每次测量结果的相对误差。

绝对误差是反映测量值偏离真值的大小, 误差单位和测量值单位相同, 绝对误差越小表明测量值偏离真值越少, 准确度越高(黄红珍, 2003)。而相对误差更能反映测量的可信程度, 表明测量值与准确值的逼近程度, 代表绝对误差在真值中所占的百分率, 本研究中采用相对误差为 5% 的标准进行评价, 相对误差越小则代表测量值偏离真值越少, 准确度越高(孙炳全, 1998)。

(3) 精密度计算。利用标准差 S 和离散系数 $C.V$ 比较两种方法测量值的精密度, 计算公式如下(成正维, 2004; 王超, 2010):

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (i=1, 2, 3, \dots), \quad (6)$$

$$CV = \frac{S}{\bar{x}} \times 100\%, \quad (7)$$

式中, x_i 为各样品的每次测量值, n 为样本容量, $\bar{x}$ 为每个样本十次测量结果的算术平均值, S 为样本标准差。

标准差反映测量值的离散程度, 与测量值单位相同, 标准差越小, 表示数据越聚集于真实值附近, 精密度越高, 反之标准差越大则表示数据越分散, 精

密度越小; 离散系数越大, 离散程度越大, 表明数据的平均数代表性差, 即数据远离平均值, 精密度较低; 反之则表示离散程度越小, 数据的平均数代表性高, 精密度较高(马立富, 2005)。

2 结果

2.1 格拉布斯检验

格拉布斯检验结果表明, 手动测量与计算机视觉测量的 7 号角质颌样本数据 $T_{UHL, UCL} > T_{表}$, 故而判断 7 号角质颌样本数据属于异常数据, 将其剔除(表 1, 表 2)。

2.2 角质颌形态学参数

将每个样本分别进行了十次手动测量和计算机视觉测量的角质颌形态学参数数据的算术平均值进行列表, 结果如表 3、表 4 所示。

将十个样本所测数据都进行平均绝对误差、平

均相对误差、标准差以及离散系数的计算, 将 1 号样本作为案例列出行平均绝对误差、平均相对误差、标准差以离散系数的计算结果如表 5 所示, 进行分析。

比较分析显示, 除了形态学参数 UCL 之外, 其余形态学参数的平均绝对误差和平均相对误差均为计算机视觉测量结果小于手动测量结果(图 2, 图 3), 且分析平均相对误差可知手动测量与计算机视觉测量结果均小于 5%(图 3), 因此测量结果均准确可靠, 但计算机视觉测量的角质颌形态学参数结果偏离真值的程度更小, 准确度更高。

比较分析显示, 除了形态学参数 UCL 之外, 其余形态学参数的标准差和离散系数均为计算机视觉测量结果小于手动测量结果(图 4, 图 5), 表明计算机视觉测量的角质颌形态学参数的结果离散程度更小, 测量结果更加聚集于真实值附近, 精密度更高。

表 1 手动测量角质颌形态学参数进行格拉布斯检验结果
Tab.1 The results of the Grubbs test for manually measuring morphological parameters of beak

序号	UHL	UCL	URL	ULWL	UWL	LHL	LCL	LRL	LLWL	LWL
1	0.12	0.34	1.85	2.26	0.15	0.08	0.44	0.03	0.06	1.18
2	0.19	0.30	0.06	1.46	0.46	1.21	0.87	0.85	0.01	0.90
3	0.13	0.91	0.87	0.34	0.23	0.64	0.62	1.18	0.90	0.35
4	0.28	0.04	0.84	0.04	0.79	0.18	0.48	0.78	0.66	0.15
5	0.97	1.02	0.63	0.72	0.76	0.44	1.05	0.77	1.92	1.15
6	0.82	0.40	0.26	0.30	0.67	0.25	0.23	0.85	0.68	0.02
7	2.44	2.36	1.42	0.92	1.88	1.64	2.20	1.95	1.76	1.96
8	1.04	0.90	0.82	0.33	1.39	1.11	0.92	0.89	0.11	0.35
9	0.33	0.46	0.61	0.04	0.28	1.46	0.72	0.42	0.36	0.66
10	0.22	0.32	0.72	0.03	1.21	0.83	0.12	0.34	0.53	0.92

表 2 计算机视觉测量角质颌形态学参数进行格拉布斯检验结果
Tab.2 The results of the Grubbs test for measuring the parameters of beak by computer vision

序号	UHL	UCL	URL	ULWL	UWL	LHL	LCL	LRL	LLWL	LWL
1	0.12	0.33	0.53	1.68	0.15	0.68	0.49	0.16	0.64	0.27
2	0.07	0.06	0.04	1.17	0.49	0.46	0.54	0.02	0.68	2.34
3	0.36	0.68	0.07	0.64	0.50	0.41	0.95	1.56	1.13	0.20
4	0.23	0.20	0.45	0.07	0.25	0.06	0.23	0.16	0.27	0.55
5	0.88	0.81	1.36	0.88	0.83	0.30	0.44	0.94	0.15	0.70
6	0.21	0.09	0.58	0.40	2.07	0.06	0.32	1.18	0.91	1.05
7	2.67	2.71	2.11	1.79	1.69	2.26	1.50	1.06	1.33	0.85
8	0.86	0.51	0.72	0.35	0.12	1.63	1.76	1.64	0.97	0.65
9	0.16	0.13	0.60	0.21	0.41	0.48	1.21	0.47	0.27	0.37
10	0.21	0.25	0.96	0.14	0.57	0.02	0.58	0.36	1.76	0.39

表 3 手动测量角质颚形态学参数算术平均值结果
Tab.3 The average results of morphological parameters of beak measured manually

参数(mm)	UHL	UCL	URL	ULWL	UWL	LHL	LCL	LRL	LLWL	LWL
1	19.70	25.28	9.61	26.81	6.53	5.85	12.71	6.73	17.00	12.74
2	19.53	23.57	7.21	12.63	6.05	4.87	10.91	6.02	16.85	9.74
3	19.68	22.00	5.95	16.67	6.23	6.48	11.25	5.76	14.02	10.53
4	20.68	24.50	5.98	17.78	5.79	6.08	12.76	7.33	18.86	10.81
5	17.66	21.70	6.27	15.32	5.81	5.53	10.67	6.09	10.88	9.38
6	18.02	23.32	6.77	16.84	6.94	5.70	11.78	7.38	14.69	11.08
7	17.50	22.02	6.01	16.71	5.32	4.95	10.85	5.99	17.15	10.53
8	20.79	25.58	6.29	18.11	6.19	7.19	13.09	7.04	17.92	11.99
9	20.53	25.23	8.09	17.82	7.36	5.20	11.93	6.43	18.47	9.70

注: 表中每个数据是每个样本经过十次测量所得的算术平均值

表 4 计算机视觉测量角质颚形态学参数算术平均值结果
Tab.4 The average results of morphological parameters of beak measured by computer vision

参数(mm)	UHL	UCL	URL	ULWL	UWL	LHL	LCL	LRL	LLWL	LWL
1	20.152	23.115	7.235	23.245	5.780	6.198	12.686	6.276	17.611	12.231
2	20.295	23.869	6.663	15.529	7.027	6.298	11.686	6.078	17.512	8.449
3	19.450	22.133	6.705	16.976	5.107	6.321	11.294	7.696	16.420	12.123
4	21.224	24.635	6.079	18.507	6.573	6.543	12.437	6.267	18.508	12.642
5	17.884	21.760	5.009	16.322	4.462	6.651	11.782	5.141	18.811	10.814
6	19.885	23.799	5.920	17.610	4.085	6.540	11.898	4.893	16.956	13.354
7	17.949	22.594	5.766	17.766	6.326	5.768	10.516	4.424	21.539	10.885
8	20.026	23.672	5.903	19.288	6.886	6.732	13.375	6.584	18.514	12.370
9	19.878	23.341	7.744	18.311	7.194	6.521	12.768	6.476	23.469	12.407

注: 表中每个数据是每个样本经过十次测量所得的算术平均值

表 5 1 号样本手动测量与计算机视觉测量形态学参数结果分析
Tab.5 Analysis of the results of manual measurement and computer vision measurement of morphological parameters of Sample 1

参数	手动测量数据				计算机视觉测量数据			
	平均绝对误差 (mm)	平均相对误差 (%)	标准差 (mm)	C.V. ₁ (%)	平均绝对误差 (mm)	平均相对误差 (%)	标准差 (mm)	C.V. ₂ (%)
UHL	0.34	1.64	0.44	2.09	0.262	1.291	0.329	1.621
UCL	0.27	1.08	0.34	1.39	0.355	1.482	0.448	1.871
URL	0.18	2.75	0.23	3.59	0.085	1.386	0.109	1.777
ULWL	0.44	2.57	0.63	3.71	0.324	1.693	0.379	1.979
UWL	0.17	2.80	0.24	4.09	0.106	1.847	0.139	2.419
LHL	0.18	3.39	0.22	4.12	0.100	1.807	0.127	2.300
LCL	0.43	2.43	0.53	2.97	0.111	2.377	0.156	0.855
LRL	0.21	3.75	0.27	4.75	0.078	1.508	0.114	2.199
LLWL	0.44	3.64	0.51	4.22	0.159	1.255	0.200	1.585
LWL	0.31	3.22	0.39	4.11	0.101	0.934	0.134	1.238

注: 由于两种方法精度不同, 所以测量结果有效数字不同。C.V.₁表示手动测量的离散系数, C.V.₂表示计算机视觉测量的离散系数

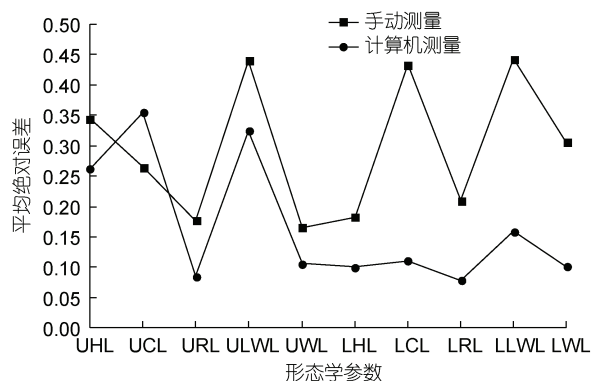


图2 手动测量与计算机视觉测量各特征值的平均绝对误差比较

Fig.2 Comparison of mean absolute error between manual measurement and computer vision measurement

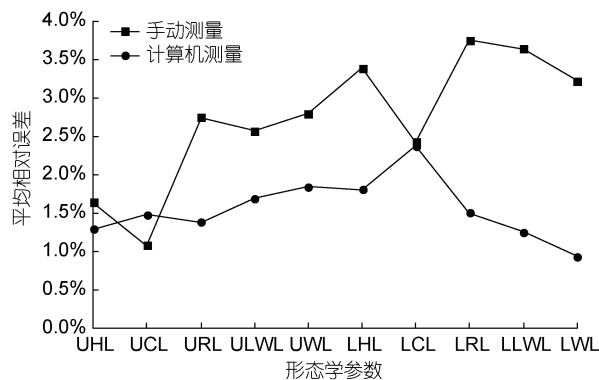


图3 手动测量与计算机视觉测量各特征值的平均相对误差

Fig.3 Comparison of average relative error between manual measurement and computer vision measurement

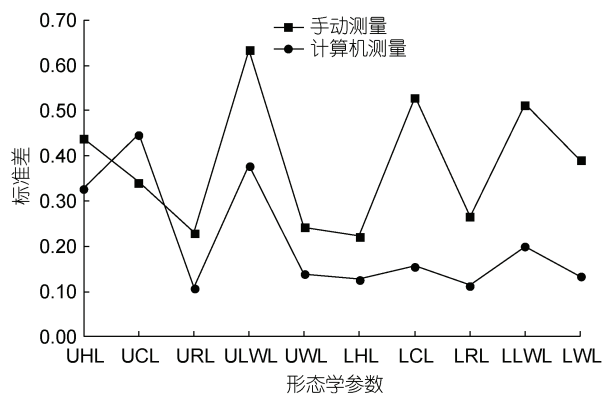


图4 手动测量与计算机视觉测量各特征值的标准差比较

Fig.4 Comparison of standard deviation between manual measurement and computer vision measurement

3 讨论

3.1 准确度分析

准确度是指观测值或估计值与真值的接近程度, 由于任何测定都不可避免的带有误差, 因此通过测

定不能获得真值, 只能获得近似真值, 当误差较小时, 多次平行测定的平均值接近于真值(贺仁睦, 2000)。本文也将每个样本进行十次测量的算术平均值作为近似真值进行分析, 通过分析两种方法对每个样本进行十次测量所得的形态学参数的算术平均值(表 3, 表 4)以及平均绝对误差和平均相对误差(表 5)可知, 两种测量方法的算术平均值相差较小, 两种方法的平均相对误差都小于 5%, 按照统计学的评价标准(周明昌, 2004), 两种方法的测量结果都是准确可靠的(张红川, 2012)。分析比较两组数据的平均绝对误差(表 5, 图 2)以及平均相对误差(表 5, 图 3)可知, 除形态学参数 UCL 外, 利用计算机视觉进行角质颌形态学参数的测量结果的平均绝对误差和平均相对误差更小, 计算机视觉测得的数据结果更加逼近真值, 偏离真值的程度更小, 准确度更高(曹毓等, 2011)。

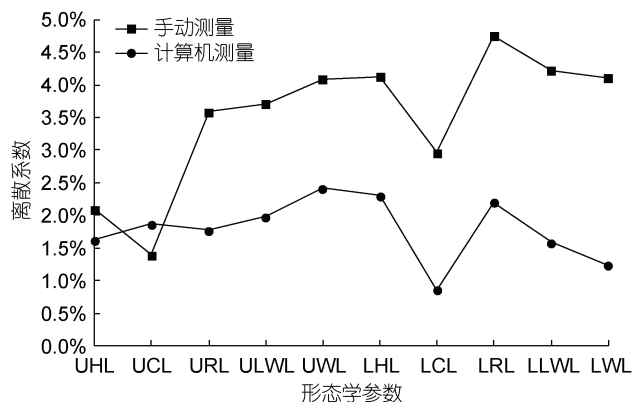


图5 手动测量与计算机视觉测量各特征值的离散系数比较

Fig.5 Comparison of discrete coefficients between manual measurement and computer vision measurement

综上所述, 基于计算机视觉和游标卡尺手动测量角质颌形态参数的方法都是准确可行的, 所获取的数据均准确可靠, 可供研究使用(朱朝晖等, 2006), 但是计算机视觉测量所得的角质颌形态学参数的结果偏离真值程度更小, 准确度更高。因此, 建议计算机视觉可以作为一种新的角质颌形态参数测量方法推广运用。

3.2 精密度分析

精密度是指在同一条件下进行测定, 多次重复测定值之间的彼此相符合的程度, 往往用标准差以及离散系数来量度。当数据的离散程度越大时, 数据越分散, 数据的标准差和离散系数越大, 精密度越小

(McHorney *et al.*, 1992)。分析两种方法测量结果的标准差(表 5, 图 4)以及离散系数(表 5, 图 5), 除形态学参数 UCL 外, 计算机视觉的测量结果的标准差和离散系数都更小, 表明计算机视觉进行多次重复测定所测的结果更加聚集在真实值附近, 离散程度更小, 精密度更高(赵恒等, 2003; 余少雄, 2016)。

综上所述, 利用计算机视觉进行角质颚形态参数的提取不仅准确可靠, 而且离散程度更小, 所测结果更加聚集于真实值附近, 精密度更高。因此, 将头足类角质颚形态学的研究与计算机视觉相结合不仅是将角质颚的研究变得自动化, 更是提供一种新的更为准确精密的研究方法。

3.3 误差分析

研究进行异常值检验时, 7 号样本的检验结果为异常数据进行了剔除, 其原因可能由于 7 号样品的头足类个体与其他样本个体之间差异较大, 导致角质颚样本出现差异(陈子越等, 2019), 故而角质颚形态学参数与其他样本不同。依据算术平均值分析可知, 两种方法所得结果的算术平均值从十分位上开始出现差异, 其原因是手动测量时存在人为误差, 无法准确测量到每一个特征点的位置, 因而使得所测结果与计算机标定各特征点计算的结果出现了差异。形态学参数 UCL 的平均绝对误差、平均相对误差、标准差和离散系数的计算机视觉测量结果大于手动径向测量结果可能有以下四种原因: (1) 畸变: 所有依靠光学成像的照相机都会产生一定程度的畸变(贾谊等, 2013)。已经畸变的图进行计算机视觉的测定会造成误差, 导致计算机视觉测量的准确度和精密度降低。(2) 透视: 由于成像时近大远小的原理, 且角质颚侧壁透明度较高等因素, 拍摄时角质颚的两侧边缘无法重合, 导致两侧边缘错开, 在进行计算机视觉测定时会产生误差。(3) 拍摄视角: 拍摄角质颚角度不同或者角质颚摆放出现偏差, 会导致获得的三视图错开, 从而产生误差, 降低计算机视觉拍摄的准确度和精密度。(4) 特征点位置: 由于角质颚侧壁透明度较高且拍摄时上脊突的特征点刚好与载物台面重合, 进行计算机视觉测定时无法区分映像和载物台面, 导致对于形态学参数 UCL 的提取出现偏差。

综上所述, 计算机视觉测量角质颚形态学参数相较传统手动测量法准确度、精密度更高(王平等, 2003)。但是计算机视觉在进行角质颚形态学参数测

量时还存在一些问题, 需要改进编程算法, 使其更加准确精密。

4 结论

基于以上分析, 不难看出基于计算机视觉的角质颚形态学参数提取是一种全新的方法, 对于头足类角质颚的研究将更加趋向自动化与信息化, 提取角质颚形态学参数也会变得更加精确、更加科学(郭超, 2017; 帅晓华, 2019)。但是由于编程的不完全成熟, 考虑特征点的选取方面不够完善等, 会促使角质颚形态学参数测量过程中出现一些误差, 造成某些参数的精密度不够高, 离散程度偏大。因此, 在今后的研究中还需要进一步完善改进编程算法, 使得测量的角质颚形态学参数更为准确与精密。此外, 角质颚照片拍摄的清晰度对研究结果也会造成影响。因此, 在利用计算机视觉对角质颚形态学参数进行测量时, 往往还需要保证获得的角质颚图片达到一定的要求, 使得图片噪音较小, 以便准确的选定特征点。文章的研究表明了计算机视觉在头足类角质颚中研究前景可期, 期待未来会有越来越多的学者将计算机视觉与角质颚的研究相结合, 这不仅可以提高研究结果的准确性与精密性, 而且还可以大大缩短研究所需的时间。

参 考 文 献

- 马立富, 2005. 试析影响因子的精确性和模糊性. 淮北煤炭师范学院学报, 26(3): 73—75
- 王 平, 李吉芳, 于小平, 2003. 精密度、准确度、精确度的分析. 广西物理, 24(3): 37—38
- 王 超, 2010. 离散系数的一种改进方法. 统计与咨询, (3): 49—50
- 方 舟, 陈新军, 陆化杰等, 2014. 头足类角质颚研究进展 I——形态、结构与生长. 海洋渔业, 36(1): 78—89
- 帅晓华, 2019. 基于计算机视觉的茶叶色泽检测研究. 农机化研究, 41(6): 209—213
- 成正维, 2004. 一元线性问题中的实验标准差. 大学物理, 23(6): 35—36, 53
- 朱朝晖, 李 涛, 2006. 测向定位技术准确度及误差校正. 信息技术, 15(8): 89—90, 95
- 刘必林, 陈新军, 2009. 头足类角质颚的研究进展. 水产学报, 33(1): 157—164
- 刘必林, 陈新军, 方 舟等, 2015. 基于角质颚长度的头足类种类判别. 海洋与湖沼, 46(6): 1365—1372
- 刘必林, 林静远, 陈新军等, 2016. 西北太平洋柔鱼角质颚微结构及其生长纹周期性研究. 海洋与湖沼, 47(4): 821—827
- 孙炳全, 1998. 大学物理实验教学中不确定度的评定方法. 物理实验, 18(6): 26—27

- 余少雄, 2016. 实验室生化检测系统精密度评价. 国际检验医学杂志, 37(11): 1541—1542
- 张红川, 2012. 电能质量测量准确度影响因素分析及实验研究. 河北: 华北电力大学硕士学位论文, 8—10
- 陈子越, 陆化杰, 童玉和等, 2019. 个体差异对西沙群岛海域鸢乌贼角质颚外部形态变化的影响. 水产学报, 43(12): 2501—2510
- 陈楠桦, 梁仁杰, 白 义等, 2018. 基于几何形态测量学的四种滨螺形态差异与系统发生关系研究. 海洋与湖沼, 49(6): 1365—1374
- 林静远, 刘必林, 金 宵, 2020. 头足类角质颚的色素沉积机制. 水产学报, 44(5): 777—783
- 周明昌, 2004. 检测与计量. 北京: 化学工业出版社, 53
- 赵 恒, 杨万海, 2003. 模糊 K-Modes 聚类精确度分析. 计算机工程, 29(12): 27—28, 175
- 贺仁睦, 2000. 电力系统动态仿真准确度的探究. 电网技术, 24(12): 1—4
- 贾 谊, 许建辉, 2013. 平面定机拍摄中镜头畸变对动作技术分析结果的影响及修正. 河北体育学院学报, 27(2): 83—87, 92
- 钱 政, 王中宇, 刘桂礼, 2008. 测试误差分析与数据处理. 北京: 北京航空航天大学出版社, 46
- 徐 阳, 2019. 基于计算机视觉的桥梁结构局部损伤识别方法研究. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学博士学位论文, 9—11
- 郭 超, 2017. 柔性鱼体目标检测与跟踪技术研究. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学硕士学位论文, 7—9
- 黄红珍, 2003. 近似数简单运算的误差分析. 计量与测试技术, 30(1): 30—31
- 曹 毓, 冯 莹, 雷 兵等, 2011. 逆透视映射公式的误差分析及准确度验证. 光子学报, 40(12): 1833—1838
- 雷晓平, 2011. 浅谈可疑数据的取舍方法——格拉布斯法. 河南建材, 12(2): 163, 165
- 潘仁瑾, 1996. 单次测量值的检验采用格拉布斯准则检验论证. 宇航计测技术, 16(3): 12—14
- 薛延学, 张二虎, 吴学毅, 2004. 基于计算机视觉的印刷包装品缺陷检测系统. 包装工程, 25(5): 185—187
- Fowler A J, 1989. Description, interpretation and use of the microstructure of otoliths from juvenile butterflyfishes (Family Chaetodontidae). Marine Biology, 102(2): 167—181
- Liu B L, Jin Y, Chen X J *et al*, 2019. High individual variability in beak stable isotopes of jumbo squid off Peruvian Exclusive Economic Zone (EEZ) waters in the analysis of migratory and foraging ecology. Journal of Ocean University of China, 18(1): 232—238
- McHorney C A, Ware Jr J E, Rogers W *et al*, 1992. The validity and relative precision of MOS short-and long-form health status scales and Dartmouth COOP charts. Results from the medical outcomes study. Medical Care, 30(5 Suppl): MS253—MS265
- Rypel A L, 2008. An inexpensive image analysis system for fish otoliths. North American Journal of Fisheries Management, 28(1): 193—197

MORPHOLOGICAL STUDY OF CEPHALOPOD BEAK BASED ON COMPUTER VISION II : MORPHOLOGICAL PARAMETER MEASUREMENT

HE Qian-Han¹, SUN Weng-Jie², LIU Bi-Lin^{1, 3, 4, 5, 6}, KONG Xiang-Hong^{1, 4}, LIN Long-Shan⁷

(1. College of Marine Sciences, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 2. College of Information Technology, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 3. The Key Laboratory of Sustainable Exploitation of Oceanic Fisheries Resources, Ministry of Education, Shanghai 201306, China; 4. National Distant-water Fisheries Engineering Research Center, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 5. Key Laboratory of Oceanic Fisheries Exploration, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Shanghai 201306, China; 6. Scientific Observing and Experimental Station of Oceanic Fishery Resources, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Shanghai 201306, China; 7. Third Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Xiamen 361005, China)

Abstract The beak morphology is widely used in cephalopod species identification and population discrimination. Manual radial measurement based on vernier calipers is the most commonly used method to obtain beak morphology parameters. A method for extracting beak morphological parameters using computer vision was proposed. First, the beak feature points and spatial coordinates were extracted using MATLAB. Next, the spatial distance between the feature points was calculated. Finally, the values of extracted beak morphological parameter were compared with the measured result. The results indicate that the arithmetic mean values of the 10 measurements obtained by the two methods were very close. The average absolute error, average relative error, standard deviation, and dispersion coefficient of computer vision measurements were less than manual measurements results obtained, except for the morphological parameter of the upper crest length. The arithmetic mean of the morphological parameters obtained from 10 repeated measurements of each cephalopod beak sample using two methods was close, but the average absolute error and average relative error of the data measured by computer vision were less than the average absolute error of the manually measured data. In addition, the average relative error indicates that the measurement results of computer vision were accurate and closer to the true value. Analysis of the standard deviation and dispersion coefficient shows that computer vision could repeatedly extract the morphological parameters of the beak of each sample multiple times. It was more concentrated near the true value and the precision was greater. Computer vision not only provided a fast and accurate method for measuring the parameters of cephalopod beak, but also greatly promoted the widespread application of beak morphology parameterization in the fields of cephalopod population discrimination and species identification.

Key words beak; morphological parameters; computer vision; manual measurement