

利用角形几何特征和计算机视觉技术 确定岩羊年龄的新方法

苏梦雨^{1 2} 张同作³ 连新明³ 苏建平³ 都玉蓉^{1 2*}

(1 青海师范大学生命科学院, 西宁 810008) (2 青海省青藏高原药用动植物资源重点实验室, 西宁 810008)

(3 中国科学院西北高原生物研究所, 青海省动物生态基因组学重点实验室, 西宁 810001)

摘要: 确定野生动物活体年龄是动物种群生态学研究的一项重要基础工作, 然而, 迄今为止, 没有一种传统方法能高效精准地完成这项任务。岩羊角形态复杂且终身生长, 其角形随年龄增长和观察角度变化极大。野外条件下, 高效获取岩羊个体年龄信息的唯一方法就是拍摄其角的清晰照片。本研究旨在提出一种利用角形几何特征和计算机视觉技术确定野生岩羊活体年龄的新方法, 其原理和操作如下: 首先建立覆盖全部年龄段 (1.5 ~ 15.5 岁) 的已知年龄羊角实体标本的 3D 模型 (左、右角各 22 个); 再在 R 程序控制下使其在 3D 空间中旋转, 每旋转 1° 输出一张角形图片; 最后计算每张角形输出图片与待定年龄角照片的形状相似性, 找出相似性最高的角形图片对应的 3D 模型, 该 3D 模型的年龄即为待定年龄羊角的实际年龄。30 张已知年龄羊角照片的实验验证结果表明, 上述年龄鉴定方法能高效地获得精准结果 (准确率达 100%)。

关键词: 岩羊; 年龄鉴定; 3D 数字模型; R 编程; 计算机视觉

中图分类号: Q14

文献标识码: A

文章编号: 1000-1050 (2019) 03-0234-08

A new method for determining the age of blue sheep using horn geometric characteristics and computer vision techniques

SU Mengyu^{1 2}, ZHANG Tongzuo³, LIAN Xinming³, SU Jianping³, DU Yurong^{1 2*}

(1 School of Life and Geography Science, Qinghai Normal University, Xining 810008, China)

(2 Key Laboratory of Medicinal Plant and Animal Resources the Qinghai-Tibetan Plateau in Qinghai Province, Xining 810008, China)

(3 Qinghai Provincial Key Laboratory of Animal Ecological Genomics, Northwest Institute of Plateau Biology, Chinese Academy of Sciences, Xining 810001, China)

Abstract: Studies on the population ecology, behaviour and social structure of ungulates often require accurate measurements of the age of individuals. However, to date there is no simple noncontact method of determining the ages of individuals. The horns of ungulates are structurally complex, and grow and change shape as animals age. If 3D models of the horns of individuals of known ages are built, the ages of other individuals can be estimated from photographs of their horns by comparison with the reference models. This paper describes a new age-determining method for blue sheep (*Pseudois nayaur*) using horn geometric characteristics and computer vision techniques. The procedure consists of three stages: (1) creating 3D reference images based on the horns of individuals of known age (22 individuals, two horns per individual; age range 1.5 to 15.5 years); (2) creating new 3D images of the horns of target individuals, which are then rotated on a computer using an in-house R script to obtain images at stepwise intervals of 1°; and finally, (3) by calculating the similarity between the new and the reference horn images. A final image with the highest similarity to the reference images is generated, and used to determine the actual age of the target individual. Of the 30 photographs used to evaluate our new method the age of the target individual in every picture was correctly determined. Our new method has potential use for studies of all wild/feral sheep and probably also other ungulate species.

Key words: Wild blue sheep (*Pseudois nayaur*); Age determining; 3D model; R programming; computer vision

基金项目: 国家重点研发计划 (2017YFC0506405); 青海省青藏高原药用动植物资源重点实验室建设专项 (2017-ZJ-Y13); 青海省重点研发与转化计划 (2019-SF-150)

作者简介: 苏梦雨 (1989-), 女, 硕士研究生, 主要从事动物生态学研究。

收稿日期: 2018-04-16; 修回日期: 2019-02-04

* 通讯作者, Corresponding author, E-mail: xndyr@163.com

在动物种群生态学研究, 确定动物年龄是一项非常重要的工作, 因为由此可以了解种群的年龄结构, 评估种群的健康程度, 制作种群生命表, 推测种群的发展趋势, 这对于濒危物种的保护和有害物种的管理都具有重大的指导意义。动物内、外部形态特征随年龄增长而改变, 这是确定动物年龄的基础。目前, 兽类年龄鉴定方法和应用方面已有较多研究。在小型兽方面, 张堰铭 (1999) 用头骨顶嵴间宽划分高原鼫鼠 (*Myospalax baileyi*) 种群年龄组, 研究捕杀对种群年龄结构和繁殖的影响; 刘志龙和孙儒泳 (1993) 根据胴体重、分布和繁殖状况划分布氏田鼠 (*Lasiopodomys brandtii*) 年龄组; 刘加坤等 (1993) 以眼睛晶体干重划分达乌尔黄鼠 (*Spermophilus dauricus*) 的年龄组, 研究其种群年龄结构; 杨赣源等 (1986) 以臼齿咀嚼面磨损程度划分灰旱獭 (*Marmota himalayana*) 年龄组。在大型兽方面, 胡锦涛 (1987) 依据粪便中竹叶残片咬节的长度特征鉴定大熊猫 (*Ailuropoda melanoleuca*) 年龄, 也有研究者使用角年轮环方法确定岩羊 (*Pseudois nayaur*) 年龄 (任军让和余玉群, 1990; 梁云媚和王小明, 2000; 杨忠庆等, 2007)。

由于年龄鉴定过程需要使用一系列专业技术, 因此对操作人员有较高要求, 如年轮法需要对标本进行磨制或采用其他制片技术; 胴体重测量需要解剖标本, 去除内脏器官; 眼睛晶体干重法需要经历分离晶体、烘干、称重等程序; 牙齿面磨损程度的观测需要必要的经验; 阴茎骨法也需要解剖标本进行分离等等。此外, 除年轮法可以给出动物绝对年龄外, 多数方法只能给出相对年龄, 即粗略的年龄分组。如果将粗略年龄分组数据用于长寿命的大型动物种群趋势预测, 则结果精度将大大下降, 失去意义。需要指出的是, 凡是用于种群年龄结构分析、生命表编制以及种群发展趋势预测的年龄数据都必须通过抽样取自种群中的活体, 否则必定导致不正确的结果 (Harirs and Metzgar, 1999; 侯万儒等, 2000)。迄今为止, 并未发现高效、准确、适用性好的野生动物活体年龄鉴定方法。

岩羊隶属于哺乳纲、牛科 (*Bovidae*), 是典型的大型山地偶蹄类物种和国家二级保护动物。成年雄性体型明显大于雌性。两性均有角, 其上表面有明显的嵴。雄性的角先向上生长, 再向两侧展开,

最后向后弯曲, 最长可达 80 cm; 雌性的角要短得多 (小于 20 cm), 看上去更直, 先向上生长, 再向两侧弯曲。岩羊角终身生长, 其形状随年龄增长而改变, 因此羊角形状含有丰富的年龄信息。目前, 3D 打印技术发展迅速, 相关的 3D 建模等技术也随之不断提高, 例如传统的 3D 建模需要对样本物体进行多个视图的绘制和后期完全由人工建立模型, 这种方法费时费力, 且模型容易失真。近年来, 以 Autodesk 公司开发的 Remake 软件为代表的 3D 建模工具对建模方式进行较大改进, 只需对建模的物体进行多角度的拍摄就可以建立精度较高的模型。相关技术也逐渐被用在考古领域中, 不但对文物、化石进行建模, 更用来对考古现场进行建模复原, 在研究中减少对文物和现场的破坏 (Bezzi et al., 2018)。在生态学研究方面, 可以看到有关组织利用 3D 建模技术研究珊瑚礁表面积的变化 (Lavy et al., 2015)。本文将依据角形随年龄增长和观察角度不同而改变的事实, 借用计算机 3D 建模、3D 数字模型操控以及计算机视觉 (computer vision) 形状识别技术 (吴绍根等, 2016), 建立一种全新的野外活体岩羊年龄鉴定方法, 为岩羊种群生态学和保护生物学研究提供技术支持。

1 研究方法

1.1 新方法的原理

任何一种鉴定动物年龄的方法都需要比较待鉴定年龄的样本与已知年龄的样本之间的相似程度, 从而确定未知样品对应动物的年龄。我们提出的野外活体岩羊年龄鉴定的新方法是通过比较野外活体岩羊角照片的形状与已知年龄岩羊角的形状之间的相似性, 进而确定野外活体岩羊个体的年龄, 要想达成此目的, 须开展以下几部分工作。

1.1.1 建立实体角 3D 数字模型

由于岩羊角不是一个规则的立体结构, 在野外状态下拍摄到的清晰照片只能提供特定角度未知年龄动物角形状相关信息。当拍摄角度发生变化时, 即使是同一只角也会产生很大的形状变化。因此, 为了模拟野外条件下的不同拍摄角度, 我们必须对已知年龄动物的实体角建立 3D 数字模型, 并且对此 3D 数字模型进行操作, 使其在空间三维坐标系中随意旋转 (步长为 1°), 每旋转到一个特定的角度就输出一张角的形状图片。这样, 未知年龄岩

羊角的照片与 3D 数字模型输出的角图片进行一一对比, 计算它们之间的形状相似性, 找出相似性最大图片所对应的已知年龄角的 3D 数字模型即可实现未知年龄角对应个体的年龄鉴定。

1.1.2 3D 数字模型旋转控制

根据野外观察, 动物由于姿态的变更, 活动时与观察者(相机)之间的相对位置以及为了避免重复搜索, 3D 数字模型应该在下列范围内旋转, 即: 绕 X 轴(从左到右水平方向) -90° 到 90° , 绕 Z 轴(垂直向上方向) 0° 到 360° , 绕 Y 轴(从前到后方向) -70° 到 70° 。

1.1.3 图像数据处理

3D 数字模型输出的角图片要经二值化处理, 即角的部分像素值取 1, 背景部分像素值取 0, 并在此基础上提取边界点坐标, 建立相应的多边形。同样, 野外拍摄的角照片经过抠像处理之后也要进行二值化处理, 并将其边界点坐标提取出来建立未知年龄角的形状所对应的多边形。

1.1.4 相似性计算

在数学分枝拓扑学中判断两个几何形状之间的相似性可采用 Hausdorff 距离法(曹京京, 2013), 此法对形状改变很敏感, 在当今人工智能(AI)分枝计算机视觉研究领域被广泛应用, 因此我们也采用此方法计算相似性。

Hausdorff 距离(Huttenlocher *et al.*, 1993)是一种定义于两个点集上的最大-最小距离, 它主要用于测量两个点集的相似程度。给定两个有限点集 $A = \{a_1, a_2, a_3, \dots, a_p\}$ 和 $B = \{b_1, b_2, b_3, \dots, b_q\}$, 则它们之间的 Hausdorff 距离为:

$$H(A, B) = \max\{h(A, B), h(B, A)\}$$

式中, $h(A, B)$ 为点集 A 到点集 B 的单向 Hausdorff 距离, $h(B, A)$ 为点集 B 到点集 A 的单向 Hausdorff 距离, 分别定义如下:

$$h(A, B) = \max_{a \in A} \min_{b \in B} \|a - b\|$$

$$h(B, A) = \max_{b \in B} \min_{a \in A} \|b - a\|$$

式中, $\|\cdot\|$ 为定义在点集合上的某种距离范数, 通常采用 L2 范数, 即欧氏距离。若设定一个点到有限点集合的距离为该点与这个点集中所有点的距离之最小值, 则 $h(A, B)$ 为点集 A 中的所有点到点集 B 的距离中的最大值。同理, $h(B, A)$ 为点集 B 中的所有点到点集 A 的距离最大值。Hausdorff 距离的值域为 ≥ 0 , 该值越小, 两个几何

图形相似度越高, 当两个几何图形轮廓线完全重合时, 其值为零。

上述依据岩羊角形状鉴定活体岩羊年龄新方法的原理见图 1。

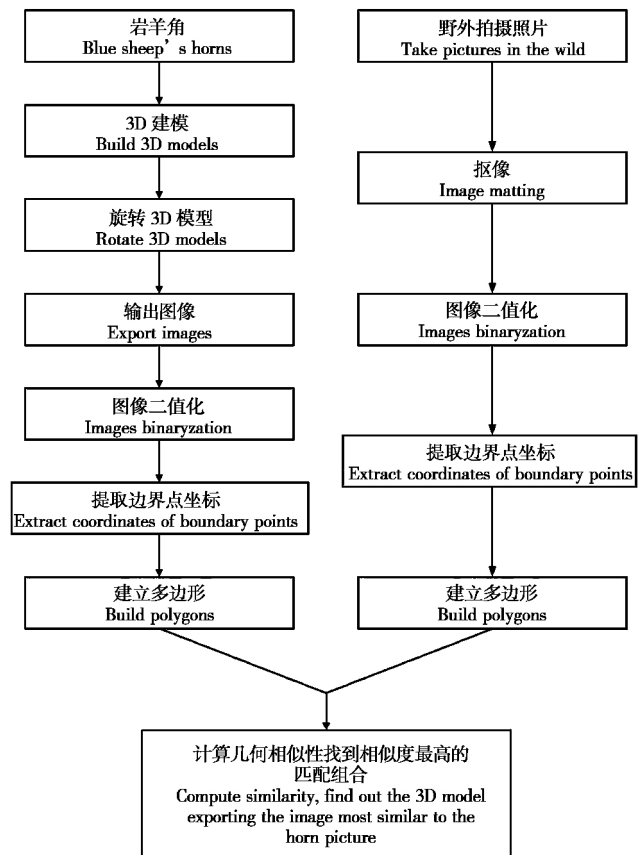


图 1 依据岩羊角形状鉴定活体岩羊年龄新方法的原理框图
Fig. 1 Diagram shows the principle of the new method for determining age of wild blue sheep

1.2 材料和方法

1.2.1 实体岩羊角年龄鉴定

本研究所用实体岩羊头骨标本共计 22 个, 全部来源于雄性个体, 其中 7 个采自野外自然死亡个体, 15 个为中国科学院西北高原生物研究所馆藏标本。所有样本均来源于青海地区, 属于川西亚种(Smith 和解焱, 2009)。它们均外观良好, 无明显损伤, 包含左、右两只角和完整的头骨。角的年龄鉴定依文献(程晓福等, 2014)方法进行, 即角尖第一节代表 1.5 岁, 其余每个分节代表一岁。这 22 个标本对应的年龄为 1.5 ~ 15.5 岁, 它们将用于下述已知年龄岩羊角 3D 数字模型的建立。

1.2.2 建模图像数据采集

每次选取上述 22 个岩羊头骨标本之一, 记录其

标本编号后,使用宽布带将其固定于一个特制基座上,并使其保持正常岩羊站立时平视前方的角度。将基座和样本置于一个电动旋转圆台上,使岩羊角的空间中心与旋转圆台的中心置于同一垂直线上,以保证岩羊角与旋转圆台同轴旋转,电动旋转圆台转速为每周 90 s。拍摄时采用的摄像机应具有大景深和强的跟焦能力,以每秒 20 帧、4K 模式进行的拍摄。选择 4 个拍摄角度(图 2)以获取羊角表面完整信息,即:平视,将摄像机镜头与羊角标本垂直高度中线置于同一水平面上,启动转盘,拍摄完整一周;仰视,镜头呈仰视状态,仰视角度保持在 30°至 45°之间;俯视,镜头呈俯视状态,俯视角度保持在 30°至 45°之间;顶视,将摄像机置于标本上方,调节好高度,拍摄 10 余张照片备用。

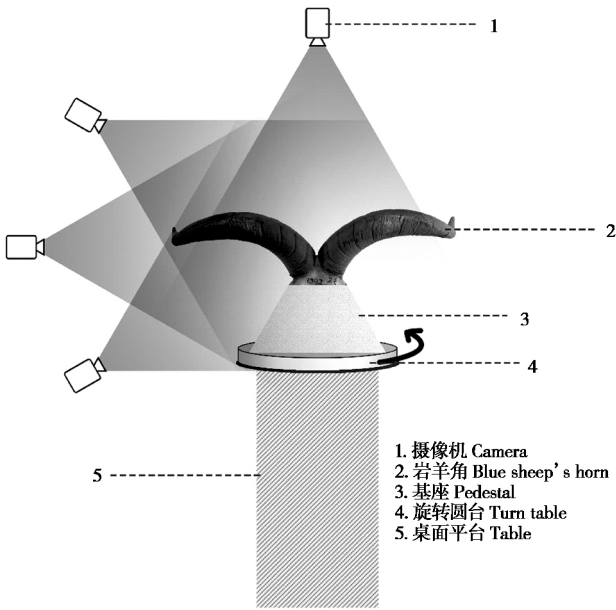


图 2 岩羊角 3D 建模图像数据采集示意图

Fig. 2 Diagram shows data collection of blue sheep horn images for 3D model building

1. 2. 3 建模图像数据提取与 3D 建模

将上述视频素材文件导入 Adobe Photoshop (2015 版),设定好相应参数,每条视频素材(每个标本的平视、仰视、俯视均为独立素材)间隔 40 帧提取 1 帧画面,得到 72 幅图像,一个标本共计 216 张图像,加上 10 余张顶视图像和部分细节图像,每个标本的总图像数控制在 250 张以内即可。将这些图像按顺序号命名,并输出为 JPEG 格式图像文件。这些就是建立一个样本 3D 数字模型所需的全部图像数据。将上述图像上传至提前建立好的 Autodesk A 360 云盘中,打开 Autodesk ReMake (2017 版)软件,根据教程操作设定参数,建立 3D 羊角模型。

1. 2. 4 下载模型并进行编辑

3D 数字模型在云端建立好后会发来提醒邮件,此时,再回到 Autodesk ReMake 软件界面,将建好的模型下载到本地硬盘。按照软件手册对模型进行编辑,以去除模型中羊角以外的无关内容,如头骨、固定支架、旋转圆台等,同时对模型个别位置的瑕疵进行修整。

在 Autodesk 3Ds Max (2017 版)软件中,打开编辑好的羊角 3D 模型,将其初始状态调整到岩羊正常站立、正面平视前方的角度,此即为模型基准面。

1. 2. 5 岩羊角照片图像处理

由于新方法依据羊角形状鉴定活体岩羊年龄,而野外拍摄的羊角照片除了羊角部分外还包括背景和岩羊身体其余部分,这些内容会干扰年龄鉴定,因此必须通过抠像技术予以去除。此外,抠像获得的羊角图像还需进行二值化处理(即将角的部分像素值设为 1,其余部分像素值设为零),以便进行后续分析。抠像和二值化处理(图 3)均在 Adobe Photoshop 软件中实现。



图 3 岩羊角形数据提取过程. a: 照片原图; b: 抠像图; c: 二值化图

Fig. 3 Shape extraction of blue sheep horn. a: original picture; b: image ultimatted; c: binary image

1.2.6 编程与优化

编程就是通过旋转羊角 3D 模型并在 m 个模型的 n 个状态空间中找到与未知年龄羊角形状相似度最高 (Hausdorff 距离最小) 的那张 3D 模型输出图像, 从而实现未知年龄羊角对应个体的年龄鉴定。该算法在 Win7、Win 8.1 和 MAC OSX 桌面环境下采用 R 3.3.1 编程 (Kabacoff, 2013) 实现。除基础函数外, 还需要调用 rgl 包 (见 <https://cran.r-project.org/web/packages/rgl/rgl.pdf>)、EBImage 包 (见 <https://www.bioconductor.org/Packages/release/bioc/manuals/EBImage/man/EBImage.pdf>) 和 rgeos 包 (见 <https://cran.r-project.org/web/packages/rgeos/rgeos.pdf>) 中的相关函数。

程序优化是指通过压缩搜索空间 (n 值)、调整程序结构、选择运行效率高的函数替代效率低的函数等方法, 以提高程序运行速度。

1.2.7 新方法鉴定岩羊年龄的准确性检验

任何一种年龄鉴定方法是否可用、好用都需要通过实验来验证其准确性和效率。凡是可用的方法必须能够给出高的鉴定准确率, 而好用的方法不仅鉴定准确率要高, 同时耗时也要少, 即鉴定方法效率也要高。我们随机选取 10 个岩羊角标本, 并对每个标本随机拍摄不同角度的 3 张照片 (图 4, 已经抠像和二值化处理), 以此验证本文年龄鉴定方法的准确性和程序运行效率。

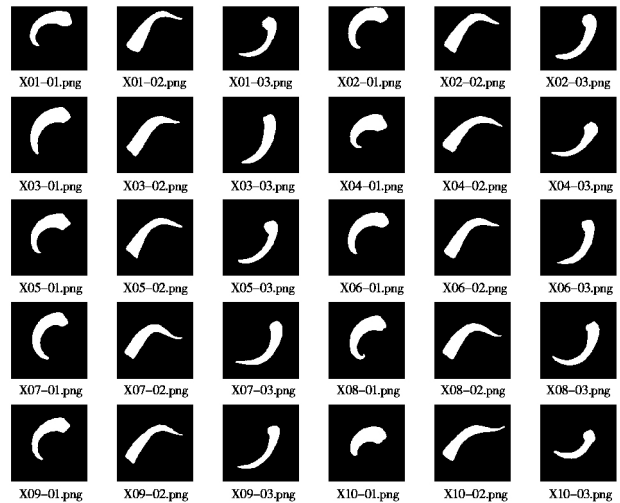


图 4 岩羊角二值化图片

Fig. 4 Binary images of blue sheep horns

2 结果

表 1 为图 4 中岩羊角照片数据信息及年龄鉴定结果。可以看出, 本文提出的年龄鉴定方法准确率达到 100%, 而且, 同样为 8 岁的两组羊角照片可以精准识别到各自对应的标本源, 这一鉴定精准性超出了我们的预期。鉴定 1 张羊角照片对应个体的年龄平均耗时 6.272 (3.745 ~ 7.858) min, 这是可以接受的时间代价。

表 1 岩羊角照片来源信息及其年龄鉴定结果

Table 1 Resource information and identification results of blue sheep horn's age

岩羊角照片信息 Information of horns			鉴定结果 Identification result		
照片名 Name of horn picture	标本号 Serial number of horn specimen	实际年龄 True age in year	角照片标本源 Original specimen of horn picture	年龄 Age in year	耗时 (min) Time spent in minutes
X01-01					7.157
X01-02	0005906	4.5	0005906	4.5	7.700
X01-03					3.991
X02-01					7.136
X02-02	0005910	8.0	0005910	8.0	7.582
X02-03					4.023
X03-01					7.270
X03-02	0005914	8.5	0005914	8.5	7.412
X03-03					4.123
X04-01					7.397
X04-02	0005918	4.0	0005918	4.0	7.858
X04-03					4.177

续表 1 Continued from table 1

岩羊角照片信息 Information of horns			鉴定结果 Identification result		
照片名 Name of horn picture	标本号 Serial number of horn specimen	实际年龄 True age in year	角照片标本源 Original specimen of horn picture	年龄 Age in year	耗时 (min) Time spent in minutes
X05-01					7.369
X05-02	0005921	5.0	0005921	5.0	7.682
X05-03					3.920
X06-01					7.289
X06-02	0005935	8.0	0005935	8.0	7.578
X06-03					4.022
X07-01					7.185
X07-02	0005940	10.0	0005940	10.0	7.563
X07-03					4.042
X08-01					7.059
X08-02	0005941	6.0	0005941	6.0	7.487
X08-03					4.045
X09-01					7.037
X09-02	0005943	7.0	0005943	7.0	7.841
X09-03					3.989
X10-01					6.775
X10-02	0005948	5.5	0005948	5.5	7.698
X10-03					3.745

3 讨论

3.1 决定年龄鉴定准确性和程序运行效率的关键因素

简单而言,就是相似性算法决定年龄鉴定准确性,程序优化决定运算效率。在计算机视觉形状识别研究领域,判断形状相似性的算法很多,但各有局限性(吴绍根等,2016)。最早,我们并不是通过计算羊角图形之间的 Hausdorff 距离来确定岩羊角的相似程度,而是先计算羊角图形各自的形状指数,即面积、周长、平均半径、半径标准差、最小半径、最大半径,这里半径特指从图形质心到图形边界各点的距离,然后再计算形状指数之间的欧氏距离,最后根据欧氏距离越小,两个图形相似度越高这一规则进行年龄鉴定。经大量实验和改进程序,形状指数法的鉴定准确率最高也只有 33%。显然,用形状指数法计算岩羊角形状相似性并进行年龄鉴定是失败的。经仔细分析发现,形状指数法对几何形状的变化不敏感是失败的关键原因。于是,我们试用对几何形状变化极为敏感的 Hausdorff 距离来计算岩羊角形的相似性,结果表明,该算法不仅具有极高的年龄鉴定准确率,而且还具有个

体识别的潜在能力。

程序优化涉及以下几点:其一,压缩搜索空间,避免全域空间搜索,大大减少搜索时间,提高程序运算效率。主要措施包括利用羊角照片中羊角相对于拍摄者的方位信息确定大致的搜索空间;经过反复实验,确定最佳搜索步长,设定搜索阈值并及时中断不必要的搜索。其二,利用 R 语言强大的矩阵运算能力,尽量以矩阵运算替代效率低的 for 循环。其三,选用运行效率高、输出效果好的同功函数。由于 R 程序是开源软件,出现同功函数的机会很大,但同工函数的输出效果和运行效率都有一定差异,甚至差异很大,因此,编程过程中需要通过实验选用输出效果好、运行效率高的同功函数。通过以上优化措施,我们将鉴定 1 张羊角照片年龄的耗时从至少 20 余小时缩减到平均 6.272 min,使得新方法具有实用价值。

3.2 新方法的比较优势

以往确定动物年龄都采用一些常规方法,如测量体重、体长、牙齿磨损程度、骨骼或鳞片上的年轮、眼睛晶体重量、阴茎骨大小、骨密度等,常规方法都需要捕捉动物获取测量数据,对实验动物多少都会产生一定伤害。对于国家级保护动物,法规

不容许随意捕捉,即使获得捕捉许可,捕捉数量也十分有限,不能满足构建大样本的动物生命表研究。此外,常规方法在获取年龄鉴定基础数据的过程中往往耗时费力,效率不高。相比之下,本文提出的年龄鉴定新方法只需获取动物的清晰照片,不需要捕捉动物,由此带来的好处也非常明显:其一,可大大减少研究人员的野外工作强度,省时省力;其二,不会对动物造成明显伤害,符合动物保护理念;其三,可以避免动物捕捉相关法规的限制,开展一些常规方法不能开展的研究;其四,年龄鉴定结果更加精准。若辅以无人机携带高清5K相机拍摄动物照片,将照片数据用于年龄鉴定,则不仅可以拓展无人机动物影像数据的应用范围,而且还能极大地提高动物年龄鉴定的工作效率。

3.3 新方法适用范围

理论上,本文提出的新方法适用于角形随年龄不断变化的动物年龄鉴定(如岩羊、盘羊 *Ovis* sp.、野牦牛 *Bos mutus*、北山羊 *Capra sibirica* 等)。岩羊雌、雄都有角,但本论文中只用雄性角进行实验,是因为没有收集到足够多的雌性角标本。有些动物雄性有角,而雌性无角,对于此类动物,雄性个体可以使用本文方法进行鉴定年龄,当然这需要进行实验验证;而对无角的雌性个体,此法暂时不能应用。不过,从原理上讲,只要动物外部特定部位的形状随年龄显著变化且不随运动状态产生非刚性形变,本文鉴定年龄的方法都具有潜在的应用价值。因此我们下一步将此方法用于无角有蹄类动物头部形状与年龄关系的研究,若能验证头部形状与年龄之间存在紧密关系,则该方法的适用范围将明显扩大。此外,文中所涉计算机视觉形状识别技术具有广泛的适用性。

3.4 新方法的不足与展望

本次研究致力于探索一种鉴定岩羊年龄的新方法和实现过程,研究结果也初步确定了这种方法的可行性。然而,由于样本量和技术方面的一些客观因素限制,我们无法利用自建模样本之外的羊角进行模型的检验。按照我们的设想,对于样本库的建立,同一亚种同一龄的样本录入量可以设定在十个以上,取角形轮廓的平均距离,拟合出一组数据作为比对标准,从而提升实际应用的准确性。此外,可以建立一个网络数据库,在提供比对服务的同时,也可以接收样本上传,以此不断扩大数据库的

容量,进而提高本方法的准确性和实用性。

参考文献:

- Bezzi L, Bezzi A, Boscaro C, Feistmantl K, Gietl R, Naponiello G, Ottati F, de Guzman M. 2018. Commercial archaeology and 3D web technologies. *Journal of Field Archaeology*, **43** (supl.): 45–59.
- Cao J J. 2013. The calculation theory of Hausdorff distance and its application to the matching of 2D geometrical objects. Masteral Dissertation. Dalian: Dalian University of Technology. (in Chinese)
- Cheng X F, Yin X H, Xia G C, Yu Y C, Hou X L. 2014. Age structure of blue sheep populations. *Shaanxi Journal of Agricultural Sciences*, **60** (8): 40–42. (in Chinese)
- Harris R B, Metzgar L H. 1993. On some common errors in analysis of age-structured populations. *Acta Theriologica Sinica*, **13** (3): 217–222.
- Hou W R, Mi Z P, Hu J C, Kong L L, Zhou D J, Lan M J. 2000. Population age structure and life table of black bear. *Zoological Research*, **21** (2): 127–132. (in Chinese)
- Hu J C. 1987. A study on the age and population composition of the giant panda by judging droppings in the wild. *Acta Theriologica Sinica*, **7** (2): 81–84. (in Chinese)
- Huttenlocher D P, Klanderman G A, Rucklidge W J. 1993. Comparing images using the Hausdorff distance. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, **15** (9): 850–863.
- Kabacoff R I. 2015. R in Action: Data Analysis and Graphics with R. New York: Manning Publications.
- Lavy A, Eyal G, Neal B, Keren R, Loya Y, Ilan M. 2015. A quick, easy and non-intrusivemethod for underwater volume and surface area evaluation of benthic organisms by 3D computer modelling. *Methods in Ecology and Evolution*, **6** (5): 521–531.
- Liang Y M, Wang X M. 2000. A study of blue sheep population life table and its group structure of different seasons in Helan Mountain. *Acta Theriologica Sinica*, **20** (4): 258–262. (in Chinese)
- Liu J K, Wang T Z, Li J G, Shao M M, Zou B, Wang T L. 1993. Studies on the population age structure of ground squirrel. *Acta Theriologica Sinica*, **13** (4): 277–282. (in Chinese)
- Liu Z L, Sun R Y. 1993. Study on physiological age structure of Brandt's voles (*Microtus brandti*). *Acta Theriologica Sinica*, **13** (1): 50–60. (in Chinese)
- Ren J R, Yu Y Q. 1990. A study on the population structure and life table of blue sheep in Yushu and Golog, Qinghai Province. *Acta Theriologica Sinica*, **10** (3): 89–193. (in Chinese)
- Smith A, Xie Y. 2009. A Guide to the Mammals of China. Changsha: Hunan Education Publishing House. (in Chinese)
- Wu S G, Wang K, Lu L J, Liu Y Q. 2016. GCT transformation and similarity determination of geometry shapes. *Journal of Image and Graphics*, **21** (12): 1671–1684. (in Chinese)
- Yang G Y, Zhang Z J, Zhang L Y. 1986. The estimation of ages for gray marmots (*Marmota baibacina*). *Acta Theriologica Sinica*, **6** (2): 125–129. (in Chinese)

- Yang Z Q, Xie J R, Che W J. 2007. Analysis of horn growth of male *Pseudois nayaur szechuanensis* on Qilian Mountains. *Chinese Journal of Wildlife*, **28** (2): 20-21. (in Chinese)
- Zhang Y M. 1999. Effect of removal on age structure and reproduction of plateau zokor population in alpine meadow. *Acta Theriologica Sinica*, **19** (3): 204-211. (in Chinese)
- Smith A, 谢焱. 2009. 中国野外兽类手册. 长沙: 湖南教育出版社.
- 曹京京. 2013. Hausdorff 距离的计算原理及其在二维匹配中的应用. 大连: 大连理工大学硕士论文.
- 程晓福, 殷小慧, 夏固成, 余阳春, 侯小玲. 2014. 岩羊种群年龄结构分析. *陕西农业科学*, **60** (8): 40-42.
- 侯万儒, 米志平, 胡锦矗, 孔令禄, 周德俊, 兰民剑. 2000. 黑熊种群年龄结构和生命表初探. *动物学研究*, **21** (2): 127-132.
- 胡锦矗. 1987. 从野外大熊猫的粪便估计年龄及其种群年龄结构的研究. *兽类学报*, **7** (2): 81-84.
- 梁云媚, 王小明. 2000. 贺兰山岩羊的生命表和春夏季节社群结构的研究. *兽类学报*, **20** (4): 258-262.
- 刘加坤, 王廷正, 李金刚, 邵孟明, 邹波, 王庭林. 1993. 达乌尔黄鼠种群年龄结构的研究. *兽类学报*, **13** (4): 277-282.
- 刘志龙, 孙儒泳. 1993. 布氏田鼠种群生理年龄的研究. *兽类学报*, **13** (1): 50-60.
- 任军让, 余玉群. 1990. 青海省玉树、果洛州岩羊的种群结构及生命表初探. *兽类学报*, **10** (3): 189-193.
- 吴绍根, 王康, 路利军, 刘娅琴. 2016. GCT 变换及几何图形形状相似性判定. *中国图象图形学报*, **21** (12): 1671-1684.
- 杨贇源, 张志坚, 张兰英. 1986. 灰旱獭年龄鉴定的方法. *兽类学报*, **6** (2): 125-129.
- 杨忠庆, 谢建荣, 车文珺. 2007. 祁连山雄羊角生长解析. *野生动物杂志*, **28** (2): 20-21.
- 张堰铭. 1999. 捕杀对高原鼫鼠种群年龄结构及繁殖的影响. *兽类学报*, **19** (3): 204-211.