

基于三维重建技术构建冬虫夏草数字标本的方法学研究

康帅^{1*}, 陆郝凌², 蔡亮^{2*}, 石佳¹

(1. 中国食品药品检定研究院, 北京 100050; 2. 东南大学, 南京 210018)

摘要 目的:以冬虫夏草为例,探索一种成熟的三维重建技术,构建中药数字标本的方法学,为中药标本数字化以及性状鉴别的应用奠定基础。**方法:**依据课题组以及现有文献对冬虫夏草性状鉴别的研究成果,设计一种性状鉴别评价方法,并对三维重建关键技术因素(测量方法、重复性和重现性、合成计算、数字标本格式、校色)进行考察,建立冬虫夏草三维数字标本构建的方法,并通过对不同类型样本(不同产地、不同完整度、不同类型)进行三维重建,从而对该方法进行验证。**结果:**通过方法学研究,建立了三维重建技术在冬虫夏草数字标本构建的应用,并且通过该方法能够高精度地还原其实物样本的所有性状鉴别特征点。所有样本均能够重建其对应的三维数字标本。**结论:**计算机三维重建技术与该方法学结合,可以构建出冬虫夏草的三维数字标本,并且可以进行性状鉴别特征点还原的基本评价。

关键词:数字标本;冬虫夏草;三维重建;方法学;性状鉴别;中药鉴定

中图分类号:R 921.2

文献标识码:A

文章编号:1009-3656(2026)01-0058-11

doi:10.19778/j.chp.2026.01.009

Construction of digital specimens of *Cordyceps sinensis* using 3D reconstruction techniques

KANG Shuai^{1*}, LU Haoling², CAI Liang^{2*}, SHI Jia¹

(1. National Institutes for Food and Drug Control, BeiJing 100050, China;

2. Southeast University, Nanjing 210018, China)

Abstract Objective: This study aimed to investigate a mature three-dimensional reconstruction technique using *Cordyceps sinensis* as an example, to establish the methodology for creating digital specimens of traditional Chinese medicine. This can lay a solid the foundation for digitizing traditional Chinese medicine samples and identifying their characteristics. **Methods:** Based on the research results related to the characteristics identification of *Cordyceps sinensis* generated by the research team and survey of the existing literature, a characteristic identification evaluation method was designed. The key technical factors of three-dimensional reconstruction (measurement methods, repeatability and reproducibility, synthetic computation, digital specimen format, and color correction) were investigated. A methodology for constructing three-dimensional digital specimens of *Cordyceps sinensis* was established, and several types of samples (various origins, different completeness, diverse types) were subjected to three-dimensional reconstruction to validate this novel method. **Results:** Through this methodological research, the application of three-dimensional reconstruction technology in the construction of digital specimens of *Cordyceps sinensis* was elegantly established. This method can accurately reproduce all the characteristic identification features of the physical samples. All the samples could be reconstructed into their corresponding three-dimensional digital

共同第一作者简介:康帅,博士,副研究员;研究方向:中药鉴定与本草文献研究。E-mail:kangshuai@nifdc.org.cn

陆郝凌,硕士研究生,工程师。研究方向:中药数字化技术,计算机视觉技术。

*通信作者简介:蔡亮,博士,高级工程师,研究方向:计算机视觉技术。

specimens. **Conclusion:** Overall, combining computer-aided three-dimensional reconstruction technology and methodology developed by us can create three-dimensional digital specimens of *Cordyceps sinensis* and provide a fundamental assessment for restoring the characteristic identification features.

Key words: digital specimens; *Cordyceps sinensis*; three-dimensional reconstruction; methodology; characteristic identification; traditional Chinese medicine identification

冬虫夏草,为麦角科真菌冬虫夏草菌[*Cordyceps sinensis* (Berk.) Sacc.]寄生在蝙蝠蛾科昆虫幼虫上的子座和幼虫尸体的干燥复合体,具有补肺益肾,止血及化痰等功效^[1]。当代社会对医疗养生需求大,冬虫夏草使用量也在逐年递增,随着其经济价值提升,伪品也逐渐增多,造成的社会问题不容忽视。现有的冬虫夏草性状鉴别方法主要是专业技术人员依据《中国药典》(2020年版)对其形、色、气、味、表面特征等进行“辨证论质”与真伪鉴定^[2]。该方法的优点是不依赖现代设备、快捷、简便、高效,但也存在主观性、经验性等人为因素导致的鉴别缺陷^[3]。

针对传统性状鉴别方法存在的不足,本领域的专家学者应用新技术进行了不同的研究和探索。仿生识别技术,通过电子传感和信号传导识别中药的气、形、色、味^[4],如基于“形色”的性状电子检测技术(电子眼分析系统)、基于“气味”的性状电子检测技术(电子鼻技术)、基于“味道”的性状电子检测技术(电子舌)^[5]。虽然这些技术能够克服传统性状鉴别方法的缺点,但是缺乏气味、颜色、味道的量化依据、标准及相关的基础研究。图像处理技术,可通过计算机和人工智能运用图片识别中药外观特征^[6],能够避免依赖传统识别中需要经验丰富、主观性强的缺点,但是该方法对图片、光源、场景的依赖性较大,且最终是以图像作为依据进行识别^[7],容易受限于图片的二维平面,容易产生二维图片的信息不能满足三维现实空间结构需求的矛盾。DNA条形码技术,能够标准化的用较短的DNA序列进行快速准确的鉴定^[8],可作为中药的唯一识别“身份”,却无法应用于矿物类中药。

随着数字化的迅猛发展和数字标本的诞生,不仅可以无损采集,还能将实体标本的三维空间、表面纹理及色泽特征完美重现^[9],这无疑为中药性状鉴别提供了新的方向。计算机三维重建技术是指在计算机中还原并表示三维物体的一种方法,广泛应用于计算机视觉、计算机图形学、医学图像处理、虚拟现实等领域^[10-11]。本研究将以冬虫夏草为研究对象,尝试通过应用计算机三维重建技术构建其三维数字标本并进行方法学研究,以期能为中药鉴别和

中药标本数字化提供参考。

1 材料与方法

1.1 样品

冬虫夏草野生实物标本,产地为西藏;冬虫夏草人工繁育品实物标本,产地为湖北。所有冬虫夏草实物标本均经中国食品药品检定研究院鉴定为麦角科真菌冬虫夏草菌[*Cordyceps sinensis* (Berk.) Sacc.]寄生在蝙蝠蛾科昆虫幼虫上的子座和幼虫尸体的干燥复合体,并由其保存与提供。

1.2 设备

主要实验设备见表1。实验室环境搭建示意图见图1。

表1 主要实验设备表
Tab. 1 List of main experimental equipments

名称	型号	品牌	设备类型
单反相机	D850	Nikon	摄影器材
单反微距镜头	105MM	Nikon	摄影器材
单反相机	EOS 5DSR	CANON	摄影器材
单反微距镜头	100MM	CANON	摄影器材
柔光灯	Forza500	NANLITE	环境光源
图形显卡	RX 6950XT	AMD	电脑硬件
图形显卡	RTX A5000	NVIDIA	电脑硬件
智能转盘	MT320RUWSL40	COMXIM	标本载体
固定支架	R-3213X	SIRUI	相机配件
图像合成软件	HeliconFocusPro 7. 6. 6	heliconsoft	算法软件
模型合成软件	RealityCapture 1. 2	Epic Games	算法软件



图1 实验室环境搭建示意图

Fig. 1 Schematic diagram of laboratory environment construction

1.3 评价依据与评价方法

1.3.1 评价依据 在计算机图形学领域,对于三维重建模型几何信息准确度评价,Seitz 等提出了基于网格的准确度和完整度量,分别对局部结果精确度和整体覆盖度进行量化,以便尽可能地使三维模型更接近真实值^[12]。

在本研究中,考虑到跨多个学科应用研究,所以采用计算结果客观打分与中药专家主观打分两种方式结合,将数字标本局部结果精确度对应为鉴别特征点贴图清晰度,将整体覆盖度对应为模型完整性,尝试通过可视化评价对比实物标本的三维重建结果。

1.3.2 评价方法 参照《中国药典》(2020 年版)一部的冬虫夏草性状描述,以冬虫夏草(野生 01)作为研究对象,将数字标本的模型完整性和鉴别特征贴图清晰度作为目标值和判定依据,其中性状鉴别特征点如下,由虫体与从虫头部长出的真菌子座相连而成。虫体似蚕,长 3~5 cm,直径 0.3~0.8 cm;表面深黄色至黄棕色,有环纹 20~30 个,近头部的环纹较细;头部红棕色;足 8 对,中部 4 对较明显;质脆,易折断,断面略平坦,淡黄白色。子座细长圆柱形,长 4~7 cm,直径约 0.3 cm;表面深棕色至棕褐色,有细纵皱纹,上部稍膨大;质柔韧,断面类白色。气微腥,味微苦^[2]。三维重建技术的关键指标,主要为模型完整性和模型拓扑结构,其中模型拓扑结构主要对应数字标本的形状指标,模型完整性对应数字标本的颜色、纹理、质地等指标。

在三维重建过程中,重建的难点取决于实物标本的结构和颜色,以及环境光照和采集数据的影响^[13]。通过预实验和文献调研,实物标本结构越小、越复杂,重建难度越大;表面材质越反光、颜色越偏于纯白或者纯黑色,重建难度越大。尤其是在微距范围(0.01~20.00 cm)内,三维重建获得完美的模型完整性和鉴别点贴图清晰度均具有相当大的难度。微距场景下景深极浅,容易导致多景深图像序列的清晰区域判定误差,依赖于光学精密仪器的精度以及成像算法。

根据预实验的结果判断,三维重建之后的中药模型结构破损,则其结构上的贴图必然会产生破损,如果该贴图上有鉴别特征点,则该鉴别点贴图必然破损导致无法鉴别;反之,若鉴别点贴图不清晰,可能会存在两种情况,一种是模型完整,贴图破损,另一种是模型破损造成贴图不清晰。任何一种破损的情况出现,对中药鉴别的判定都是无法接受的。所以在评价方法中,将三维重建关键技术指标设置为出现缺陷即得 0 分,将模型完整性和贴图清晰度按照 30%:70% 的分值进行配比,再根据中药鉴定关键点数量以及重要程度,对具体的鉴别特征点贴图进行赋值,难度越大,分值越高,以便更加客观地获得最优的三维重建方法。

基于此,总分为 100 分,参照表 2 中的具体分值,将所有符合要求的鉴别特征点相加,计算达标率(%),公式为:达标率(%) = $\sum(\text{符合要求的鉴别特征点分值})/100 \times 100\%$ 。

表 2 冬虫夏草(野生 01)各鉴别特征点的分值

Tab. 2 Scores of *Cordyceps sinensis* (wild germplasm No. 01) identification characteristics

鉴别特征点	分值(分)	备注	评价说明
模型完整性 30 分	15	完整无破损 15 分	1 技术指标:模型拓扑和完整性检查出现缺陷,即得 0 分
子座模型	15	完整无破损 15 分	1.1 模型拓扑检查
子座贴图 20 分	15		非流行顶点
圆锥状的子座不孕部	15		孤立顶点
子座颗粒状子囊壳	5		非流行边
虫体贴图 50 分	2		孔洞 H
虫体表面黄棕色	2		1.2 模型完整性检查
黄棕色节钩状胸足(3 对)	3	每对 1 分	三角形未损坏
乳头状隆起的腹足(4 对)	4	每对 1 分	着色未损坏
扁平臀足(1 对)	1		纹理未损坏
腹节环纹(28 节)	14	每节 0.5 分	2 专业指标:技术指标合格后,进行中药专业性评价
背侧明显凸起的毛片(2 对)	10	每对 5 分	2.1 中药性状关键鉴别点重建验证结果(形状、颜色、纹理等)
三窄一宽的腹节环纹特点	1		
肉眼可见的椭圆形气门(15 个)	15	每个 1 分	

2 三维重建方法的考察

计算机三维重建是指对三维物体建立适合计算

机表示和处理的数学模型。

根据查找文献,早在 20 世纪 60 年代,电子显

显微镜领域开启三维重建探索, Crowther 等人首次实现病毒结构的三维重建, 1968 年 DeRosier 和 Klug 提出螺旋结构重建方法, 早期研究的核心思想是利用计算机图像处理技术, 从多角度二维图像中重建出三维结构模型, 从而克服二维投影的局限性, 实现对生物结构三维空间信息的精确解析, 为生物结构研究、药物研发等领域提供更强大的工具和更深入的理解^[14], 为后续技术发展奠定了基础。

2005 年, Brown 和 Lowe 提出基于特征点(如 SIFT)的早期三维重建方法, 通过点云数据再现物体结构, 该方法的核心思想是利用图像中的特征点来提取和匹配三维信息, 从而实现三维重建; 2006—2020 年期间, Snaveily、Agarwal 等团队逐步完善多视图立体视觉(MVS)算法, 实现从稀疏点云到稠密点云的转换, 并提升模型细节^[15]。同时期, 工程图重建技术引入基于正交投影的遮挡点恢复方法, 解决非标定图像序列重建难题^[16]。

随着人工智能技术的突破, 机器学习、深度学习与三维重建的结合也取得了较大的发展。

2014 年, Eigen 等人首次将卷积神经网络(CNN)应用于单目深度估计, 开启深度学习在三维重建中的应用; 2015 年, Eigen 和 Fergus 扩展 CNN 至多任务学习, 同时预测深度、法向量及语义分割; 2017 年, Crispell 和 Bazik 提出 Pix2Face, 基于改进 U-Net 实现高精度 3D 人脸重建; 2018 年, Yao 团队提出 MVSNet, 利用多视图一致性进行深度预测, 成为多视图立体视觉的里程碑; 2019 年, R-MVSNet 和 Point-MVSNet 通过循环神经网络(RNN)和点云优化, 显著提升重建效率与精度; 2020 年, NeRF(神经辐射场)技术革命性地通过隐式场表示三维场景, 支持高保真渲染, 衍生出 iNeRF、Deblur-NeRF 等改进模型, 同年, Vis-MVSNet 解决了严重遮挡场景的深度估计问题^[10]。

在应用层面, 2021~2022 年, AA-RMVSNet 结合 LSTM 优化代价体正则化, UniMVSNet 引入由粗到细的深度估计框架, 进一步推动算法实用化^[10]; 2023 年, 实时 3D 重建技术成熟, 如 FusionMLS 算法和 Holoportion 系统支持高动态范围场景的实时建模, 应用于医疗远程会诊等领域^[17]。2024 年, 无人机摄影测量与三维重建技术在城市更新、文化遗产保护等领域广泛应用, 结合深度学习实现大规模场景高效重建^[18]。

综上所述, 三维重建技术是一种构建和表达客

观世界的关键技术, 应用领域非常广泛。

按照三维重建技术原理分类, 主要有传统多视图几何方法和深度学习方法。前者主要分为几何的特征提取与匹配(SFM: Structure from Motion)和通过多视图融合(MVS: Multi-View Stereo), 后者主要分为基于神经网络的特征表示与学习, 端到端的三维重建等^[19]。按照不同的数据采集方式分类, 分为主动视觉法和被动视觉法。主动视觉方法主要包括激光扫描、结构光扫描、雷达扫描、摄影测量等, 被动视觉法主要包括单目视觉、双目视觉、多目视觉等^[19]。

根据本次实验的研究目标以及最终应用场景来考量方法学的设计。冬虫夏草的实体标本的长度通常在 7~12 cm 之间, 属于微距测量范围, 在不接触并且不能破坏样本的前提下, 需要方便采集数据并且学习成本低, 后期需要具有大面积复制推广和应用的价值。因此, 通过大量的预实验, 设计了初步的数字标本三维重建流程, 如图 2。

激光采集设备过于昂贵且不可一次性采集色彩与纹理信息, 需要二次采集进行映射, 误差很大; 结构光设备价格较贵, 微距物体合成失败率较高, 且纹理信息不够清晰。此次实验最终选择的关键设备是光学单反相机, 选用 Nikon D850 相机微距镜头 105 mm(可连续拍摄)、Canon EOS 5DSR 相机微距镜头 100 mm(不可连续拍摄)作为主要采集设备, 重点考察其用于冬虫夏草三维重建方法的稳定性。

前期数据集采用摄影测量, 摄影测量已经应用于生物标本的三维数字化^[20]。数据合成与处理, 主要采用传统视觉三维重建算法(SFM + MVS), 该数据处理流程主要包括多视角图像采集、特征提取与匹配、稀疏重建(SFM)、稠密重建(MVS)、结构重建与纹理生成。通过该方法流程, 对冬虫夏草多个样本行重复性实验, 用以测试其可行性以及稳定性。

2.1 三维重建方法的流程

根据图 2 流程以及冬虫夏草(野生样本 02)的预实验总结, 流程具体操作见表 3。

2.1.1 应用 Nikon D850 105 mm 相机采集方法

参照 2.1 项进行实验, 其中【采集】相机参数设置为: 感光度 ISO320, 快门 1/160s, 光圈 F13, 拍摄模式为焦距变化拍摄模式(自动连续拍摄设定张数后自动停止, 到下一张的拍摄时间为 0", 拍摄步长为 1), 转盘固定以 11.25°/次转动速率(32 次/段)进行转动, 每次转动后, 每段初始位置手动对焦, 并连续拍摄 150 张。

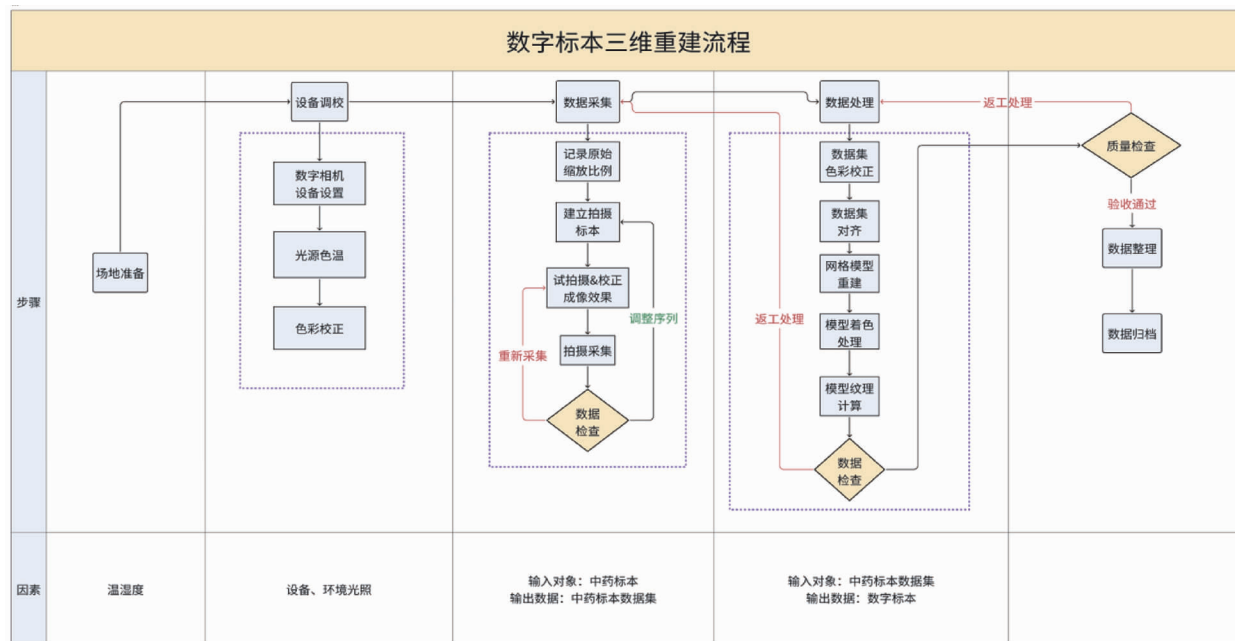


图2 数字标本三维重建流程图

Fig. 2 Flowchart for 3D reconstruction of digital specimens

表3 冬虫夏草三维重建方法操作流程表

Tab. 3 Operation process of 3D reconstruction method for *Cordyceps sinensis*

步骤	名称	步骤说明	主要操作
1	制样	实验环境准备参考图1,样品准备	开启3台柔光灯进行三点式布光,功率均设为100%。在均匀的光照条件下,将样品垂直固定于转盘中心台上,保持冬虫夏草样本整体竖直。
2	采集	针对样品进行摄影测量	使用三脚架固定相机,进行参数设置,逐段拍摄,最后拍摄色卡,记录。
3	合成	处理扫描照片集	将冬虫夏草照片文件夹导入 Helicon Focus 7.6.6 软件中,堆叠照片,形成堆叠照片集(参考附录A),再使用 Reality Capture 1.2 软件,对齐照片,生成网格,生成纹理,最后导出,获得冬虫夏草的三维重建解析模型(参考附录B)。
4	修复	获得数字标本	应用 Maya、ZBrush、RizomUV、Virtual Spaces、PhotoShop (PS) 等软件对获取的三维解析模型进行协同修复,去掉模型中辅助工具,获得冬虫夏草三维数字标本模型。
5	制作	导入可视化引擎	将上述修复后的冬虫夏草三维数字标本模型文件导入到 Unreal Engine 4 中,进行格式的转换,生成可查看的模型文件,得到冬虫夏草三维数字标本。
6	评价	按照[1.3 评价依据和方法]进行评价	逐项对比,进行评价,得到结果

注:【采集】步骤中,根据冬虫夏草的性状特点,将冬虫夏草分为4段(A.子座 B.子座与虫体交接处及虫体胸足 C.虫体胸足与腹足交接处及腹足 D.虫体腹足与臀足交接处及臀足末端),采用固定相机、样本随转盘转动的方式进行分段拍摄,从子座不孕部开始拍摄,至臀足末端拍摄完成为止(A→B→C→D)。

Note: In the [Collection] step, based on the morphological characteristics of *Cordyceps sinensis*, the fungus is divided into four sections (A. stroma B. junction between stroma and insect body as well as thoracic legs C. junction between thoracic legs and abdominal legs as well as abdominal legs D. junction between abdominal legs and pygidial legs as well as the end of pygidial legs). Segmented imaging is conducted using a fixed camera while the sample rotates on a turntable, starting from the sterile portion of the stroma and concluding at the end of the pygidial legs (A→B→C→D).

2.1.2 应用 Canon EOS 5DSR 100 mm 相机采集方法 参照 2.1 项进行实验,其中【采集】相机参数设置为:感光度 ISO320,快门 1/160s,光圈 F13,拍摄模式为手动拍摄模式,转盘固定以 11.25°/次转动速率(32 次/段)进行转动,每次转动后,每段初始位置手动对焦,并连续拍摄 150 张。

2.2 结果

结果见图 3,表 4。由表 4 可知,Nikon D850

105 mm 相机采集方法达标率(100%)最高,模型最优。应用 Nikon D850 相机采集方法的达标率(100%)高于应用 Canon EOS 5DSR 100 mm 相机采集方法的达标率(80%),可见,采用单相机同一个角度连续拍摄多张照片的拍摄方式进而堆叠为一张照片的方法可获得高精度的图像,更适合类似冬虫夏草这种体积较小并且特征较多的中药标本的无损三维重建。

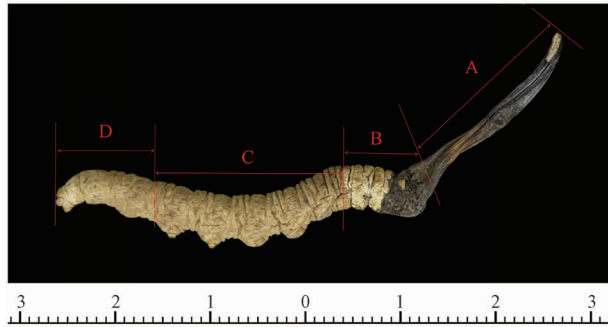




图3 冬虫夏草分段拍摄示意图

Fig. 3 Schematic diagram of segmented shooting of *Cordyceps sinensis*

表4 采集设备因素实验结果

Tab. 4 The results of the factor of capture photos equipments

采集设备及方法	结果	图示结果	得分/分	达标率/%
Nikon D850 相机采集方法	虫体和子座模型完整;各鉴别点贴图清晰,满足冬虫夏草的鉴别要求		100	100
Canon EOS 5DSR 相机采集方法	虫体模型完整,子座模型损坏;子座颗粒状子囊壳贴图受损,影响鉴别,其余贴图均清晰,满足鉴定要求		80	80

注:红圈内表示模型损坏。表7,8同。

Note: The red circle indicates model damage. Tables 7 and 8 are the same.

3 三维重建过程因素考察

在模型构建过程中,主要涉及图像采集与三维重建两个主要步骤。

图像采集步骤是指光学单反相机拍摄冬虫夏草获取图像的过程,相关因素包括拍摄密度,即与拍摄方式相关的参数,如拍摄数量、采用的拍摄方法,以及重复性,重现性等。

三维重建是指应用计算机将采集的数据集通过软件算法进行三维模型的构建^[13]。三维重建步骤即数据计算合成的过程,主要涉及计算机硬件和软件计算过程。计算机硬件,如 GPU 显卡,主要对三维重建解析运算过程产生影响。软件计算过程,包括校色和输出格式,校色是为了考察采集时光源对解析结果的影响,通过软件校色可以排除光的干扰;输出格式,是三维软件导出解析模型所保存的格式,

常见输出格式有 .obj 格式和 .fbx 格式,.obj 格式是 3D 模型文件的格式,.fbx 格式是一种支持所有主要的三维数据通用模型格式。因此,通过对三维重建过程的分析,初步确定了相关考察因素如下:测量方法(拍摄密度和拍摄方式)的重现性和重复性、计算机显卡因素、校色因素和模型输出格式。

3.1 拍摄密度因素考察实验

3.1.1 拍摄密度-转动次数因素实验方法 参照【2.1.1】进行实验,其中【采集】变量因素为拍摄方式。

表5 转动次数因素变量表

Tab. 5 Variable table of rotation frequency factors

变量因素	转动幅度	转动速率	拍摄数量
A	15°/次	16次/段	150张
B	11.25°/次	32次/段	150张
C	7.5°/次	48次/段	150张

3.1.2 拍摄密度-拍摄数量因素实验方法 参照【2.1.1】进行实验,其中【采集】变量因素为相机参数中拍摄数量,分别设置为100张、120张、150张和180张。

表6 拍摄数量因素变量表

Tab. 6 Variable table of number of shots taken

变量因素	转动幅度	转动速率	拍摄数量
A	11.25°/次	32次/段	100张
B	11.25°/次	32次/段	120张
C	11.25°/次	32次/段	150张
D	11.25°/次	32次/段	180张

3.2 重复性和重现性实验方法

选2名操作人员,操作人员A具有丰富的实践经验,操作人员B此前未接触过类似的实验,通过专业培训1周后,进行操作实验。

2名操作人员均参照【2.1.1】分别重复实验3次,分别记为A-1,A-2,A-3和B-1,B-2,B-3。

3.3 显卡因素实验方法

参照【2.1.1】进行实验,【制样】和【采集】完成后,在同一台电脑上分别更换 AMD RX 6950XT 显卡和 NVIDIA RTX A5000 显卡,分别进行【合成】、【修复】、【制作】获得2个三维重建数字标本模型,分别对其进行【评价】,并对比结果。

3.4 模型输出格式因素实验方法

参照【2.1.1】,其中【合成】方法获得的三维重

建解析模型,模型导出时,分别保存为 .obj 格式文件和 .fbx2 种格式文件,再分别进行【修复】和【制作】获得 2 个三维重建数字标本模型,分别对其【评价】,并对比结果。

3.5 校色因素实验方法




参照【2.1.1】,其中【合成】先将此初始数据导入 Helicon Focus 7.6.6 软件中,堆叠照片,形成冬虫夏草堆叠照片集,再使用 Reality Capture 1.2 软件,分成两组,一组对堆叠照片集进行校色,一组不校色,分别按照下列步骤:对齐照片,生成网格,生成纹理,最后导出,获得两组冬虫夏草的三维解析模型,一组是未校色的解析模型,另一组是校色的解析模型,再分别进行【修复】和【制作】获得 2 个三维重建数字标本模型,分别对其【评价】,并对比结果。

3.6 结果

3.6.1 拍摄密度-转动次数因素 见表 7。

表 7 拍摄密度-转动次数因素实验结果

Tab. 7 The results of the factor of Photograph Density-the number of rotation

拍摄密度-转动次数	结果	图示结果	得分/分	达标率/%
A	虫体模型破损,子座模型破损;子座不孕部和子座颗粒状子囊壳贴图破损,影响冬虫夏草的鉴别		50	50
B	虫体和子座模型完整;各鉴别点贴图清晰,满足冬虫夏草的鉴别要求		100	100
C	虫体模型完整,子座模型破损;子座颗粒状子囊壳贴图受损,影响鉴别,其余贴图均清晰,满足鉴别要求		80	80


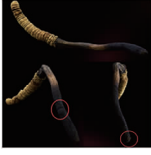


由表 7 可知,转动速率 11.25°/次,即转动次数 32 次/段,所得的冬虫夏草三维模型达标率最高,模型效果最优。因此,选用转动速率 11.25°/次(32 次/段)作为拍摄密度-转动次数因素的最优水平。

3.6.2 拍摄密度-堆叠数量因素 见表 8。

由表 8 可知,拍摄数量为 150 张和拍摄数量为 180 时,冬虫夏草模型完整度和各鉴别点贴图清晰

表 8 拍摄密度-拍摄数量因素实验结果

Tab. 8 The results of the factor of photograph density-the number of photograph

拍摄密度-拍摄数量	结果	图示结果	得分/分	达标率/%
A	虫体模型、子座模型均破损;子座不孕部和颗粒状子囊壳不满足鉴别要求		50	50
B	虫体和子座模型完整;子座不孕部和颗粒状子囊壳贴图影响鉴别		80	80
C	虫体和子座模型完整;各鉴别点贴图清晰,满足冬虫夏草的鉴别要求		100	100
D	虫体和子座模型完整;各鉴别点贴图清晰,满足冬虫夏草的鉴别要求		100	100

度得分达标率均为最优值 100%。考虑到成本问题,即每次拍摄 180 张耗费的时间成本和相机损耗成本会增加,因此,选择拍摄数量 150 张作为拍摄密度-拍摄数量因素的最佳参数。

3.6.3 重复性和重现性 见表 9。

由表 9 可知,操作人员 A 在相同的条件下应用同样的实验方法所做的 3 次实验,均能构建出冬虫夏草的三维模型,结果具有一致性,说明此方法具有可重复性;操作人员 B 通过专业的学习后,用相同的方法和同一实验材料,做了 3 次实验,也均能够构建出冬虫夏草的三维模型,说明此方法具有重现性。

3.6.4 显卡因素 见表 10。

由表 10 可知,应用 AMD RX 6950XT 显卡和应用 NVIDIA RTX A5000 显卡所进行的图形处理计算的模型结果一致,达标率均为 100%。

3.6.5 模型输出格式因素 见表 11。

由表 11 可知,模型输出为 .obj 格式与模型输出为 .fbx 格式的结果并无差异,模型与各鉴别点贴图均完整。因此,冬虫夏草三维重建模型不受这两种输出格式的影响。

3.6.6 校色因素 见表 12。

经过校色步骤和未经过校色步骤(未校色)的

表9 重复性和重现性因素实验结果

Tab. 9 The results of the factor of Repeatability and Reproducibility







重复性和重现性	结果	图示结果	得分/分	达标率/%
A-1	虫体和子座模型完整;各鉴别点贴图清晰,满足冬虫夏草的鉴定要求		100	100
A-2	虫体和子座模型完整;各鉴别点贴图清晰,满足冬虫夏草的鉴定要求		100	100
A-3	虫体和子座模型完整;各鉴别点贴图清晰,满足冬虫夏草的鉴定要求		100	100
B-1	虫体和子座模型完整;各鉴别点贴图清晰,满足冬虫夏草的鉴定要求		100	100
B-2	虫体和子座模型完整;各鉴别点贴图清晰,满足冬虫夏草的鉴定要求		100	100
B-3	虫体和子座模型完整;各鉴别点贴图清晰,满足冬虫夏草的鉴定要求		100	100

表10 显卡因素实验结果



Tab. 10 The results of the factor of graphics cards

显卡因素	结果	图示结果	得分/分	达标率/%
AMD RX 6950XT 显卡	虫体和子座模型完整;各鉴别点贴图清晰,满足冬虫夏草的鉴定要求		100	100
NVIDIA RTX A5000 显卡	虫体和子座模型完整;鉴别点贴图清晰,满足冬虫夏草的鉴定要求		100	100

冬虫夏草三维数字标本模型达标率均为100%,且二者的模型差异可忽略不计,说明本实验中模型完整性和贴图清晰度不受校色步骤的影响。校色所得

表11 模型输出格式因素实验结果

Tab. 11 The results of the factor of Model Output Format

模型输出格式	结果	图示结果	得分/分	达标率/%
.obj 格式	虫体和子座模型完整;鉴别点贴图清晰,满足冬虫夏草的鉴别要求		100	100
.fbx 格式	虫体和子座模型完整;各鉴别点贴图清晰,满足冬虫夏草的鉴别要求		100	100

的三维数字标本模型与未校色所得的模型有略微颜色差异,差异在虫体颜色为黄棕色的目测鉴别容忍范围之内,不影响鉴别,因此可忽略二者的颜色差异。从理论上而言,校色是为了排除光的干扰,而本实验通过使用3台柔光灯达到了拍摄环境光照强度的均匀性和光影稳定的目的,因此,本实验所搭建的光照拍摄环境不仅能满足实验的需要,而且还使得实验步骤中可以省去校色这一环节。

4 方法验证

4.1 验证方法



根据上述得到的参数进行方法验证,应用冬虫夏草野生品种(野生01、野生03、野生04、野生05)与冬虫夏草人工品种(人工01)进行方法验证,均参照【2.1.1】进行实验。

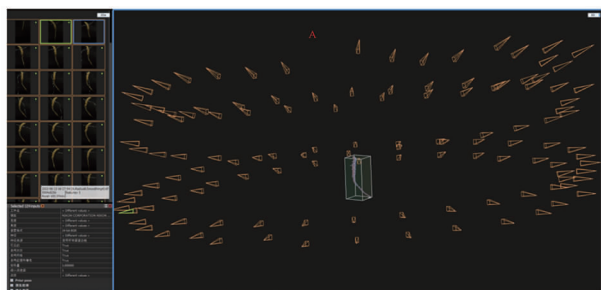
4.2 验证结果

生成冬虫夏草三维数字标本,冬虫夏草(野生01)过程性结果及其三维数字标本见图4,通过计算得知,模型完整和各鉴别点贴图清晰度总得分为100分,达标率为100%;冬虫夏草(野生03)三维数字标本见图5,冬虫夏草(野生04)三维数字标本见图6,冬虫夏草(野生05)三维数字标本见图7,冬虫夏草(人工01)三维数字标本见图8,上述三维数字标本均与其实物标本对照结果一致,达标率均为100%。

表 12 校色因素实验结果

Tab. 12 The results of the factor of Proofreading Colors

校色与未校色	结果	图示结果	得分/分	达标率/%
校色	虫体和子座模型完整;鉴别点贴图清晰,满足冬虫夏草的鉴别要求		100	100%
未校色	虫体和子座模型完整;鉴别点贴图清晰,满足冬虫夏草的鉴别要求		100	100%



A. 对齐照片 B. 生成网格 C. 生成纹理 D. 制作三维数字标本。

A. Aligning photos B. Generating grid C. Generating texture
D. Making 3D Digital Specimens.

图 4 冬虫夏草(野生 01)三维数字标本主要制作流程结果

Fig. 4 Results of *Cordyceps sinensis* 3D digital specimen

making process

5 结论

本实验设计的数字标本三维重建方法能够对冬虫夏草进行三维重建,获得其数字标本。而且,



图 5 冬虫夏草(野生 03)三维数字标本模型

Fig. 5 3D digital specimen of *Cordyceps sinensis*
(wild germplasm No. 03)



图 6 冬虫夏草(野生 04)三维数字标本模型

Fig. 6 3D digital specimen of *Cordyceps sinensis*
(wild germplasm No. 04)



图 7 冬虫夏草(野生 05)三维数字标本模型

Fig. 7 3D digital specimen of *Cordyceps sinensis*
(wild germplasm No. 05)

能够高精度地重现和还原冬虫夏草的颜色、纹理及胸足、腹足、臀足,气门、环纹、子座不孕部、毛片等鉴别点,与实物标本一致。并且将实验成果应用于中国食品药品检定研究院中药标本馆的数字标本平台项目中,见图 9,对中药研究以及科普起到了一定的作用。



图8 冬虫夏草(人工01)三维数字标本模型
Fig. 8 3D digital specimen of *Cordyceps sinensis*
(artificial germplasm No. 01)



图9 冬虫夏草数字标本应用
Fig. 9 Application of digital specimens of *Cordyceps sinensis*

6 讨论

计算机三维重建技术是通过计算机和软件对一系列二维图像进行数字化处理,以获得其三维场景或物体的过程^[21]。从领域角度,三维重建技术是图像处理的一个分支,是人工智能的重要组成部分,是虚拟现实的基础^[22]。该技术成本较低、真实感强、自动

化程度高^[23],但是此技术在中药领域应用仍较少,是一种比较新颖的方法。随着研究越发广泛与深入,评价标准会更加完善,适用性也会更高。

中药种植、加工生产、流通、监管、科研、教学等各领域在长期实践中,积累了大量的基原标本和中药标本。与自然资源标本相比,中药标本具有一定的特殊性。这些标本是中药注册、检验、标准制修订的重要依据,是科研、教学、科普的重要参照,是中药产业发展和质量控制的存档资料,也是中医药正本清源和持续发展的基础和根本^[24]。数字标本不仅仅是中药标本的数字化、照片和基本信息的采集,而且是通过数字化技术手段,从解剖、性状、组织、大分子化合物和小分子DNA序列等多维度挖掘实物标本与中药基原、生产、质量和应用等全链条相关的信息,通过可视化、智能化和网络化的技术手段实现数字资源的展示、共享与交流^[24,25]。

在中药鉴定角度,应用计算机三维重建技术获得的冬虫夏草三维数字标本,具有无损、精度高、重现性和还原性高的优点。针对某些破损样本可以进行修复,能够通过三维数字标本识别出冬虫夏草的各个鉴别点,还能多角度、自由地查看数字标本,不仅有利于标本的保藏、方便携带,同时作为数字化的样本具有更快捷的分享效率,为科研、监管、教学与传承提供了创新的技术手段,为中药材的中药鉴定提供一种新的思路。

在中药监管方向,利用卷积神经网络(CNN)对中药图像进行采集、建模、训练、应用。王甘红等开发了一种基于EfficientNetB0模型的人工智能模型,用于自动识别163种中药材,验证集上的准确率达到99.0%^[26]。同样,针对中药材图像识别中数据不足的问题,研究者们采用迁移学习和模型融合技术,提高模型的泛化能力,从而提高任务的识别准确率。刘伟等通过Xception和DenseNet模型融合,在60种类别上实现了较高的识别准确率^[27]。在三维重建技术中,深度学习技术被广泛应用于图像的特征提取和算法效率优化上,弥补了部分传统算法中的短板^[19]。在中药质量控制与分析方向,高光谱成像和注意力机制的深度学习模型可以预测药材产地和识别中药炮制阶段;利用深度学习进行中药活性成分的定性和定量分析,通过光谱和残差网络(ResNET)结合的方法,进一步提升了中药质量控制的效率^[28]。在中药研发领域,深度学习还被用于中药靶点预测和药效建模,TCM2Vec模型通过独立编码器提取中药药材的关系特征,并结合正态分布模拟多

维特征,显著提高了中药方剂疗效预测的性能^[29]。

数字标本作为中药标本的数字化延伸,通过结合计算机视觉、人工智能、大数据及自动化技术,正在重构中药产业链的上下游协同模式,未来将会对中药产业链产生深远的影响。

参考文献

- [1] 康帅, 连超杰, 郑玉光, 等. 冬虫夏草人工繁育品的性状和显微鉴别研究[J]. 中国药学杂志, 2020, 55(15): 1248.
- [2] 中国药典. 2020年版. 一部[S]. 2020:119.
- [3] 许燕, 肖洪贺, 段双蕊, 等. 动物类中药鉴定技术研究进展[J]. 中国中医药现代远程教育, 2018, 16(17): 156.
- [4] 李梦, 杨璐璐. 仿生识别技术在中药鉴定中的应用[C]. 北京:中国商品学会会议论文集, 2015: 337.
- [5] 秦宇雯, 费程浩, 毛春芹, 等. 基于“性状-质量标志物-生物效应”的饮片质量整体识别研究思路[J]. 中草药, 2022, 53(5): 1294.
- [6] 孙明思, 李瑞婷, 赵莹. 基于图像处理技术的中药鉴定算法研究[J]. 数码世界, 2020, (11): 224.
- [7] 徐雅静, 俞捷, 余远盼. 人工智能在中药材及饮片鉴别领域的应用[J]. 中华中医药学刊, 2022, 40(8): 47.
- [8] 张彩云, 黄珊珊, 颜海飞. DNA条形码技术在中药鉴定中的应用进展[J]. 中草药, 2017, 48(11): 2306.
- [9] 杨良锋, 曹希平, 卢立伍, 等. 数字标本概念及其相关技术[C]. 北京:北京数字科普协会会议论文集, 2013: 90.
- [10] 李明阳, 陈伟, 王珊珊, 等. 视觉深度学习的三维重建方法综述[J]. 计算机科学与探索, 2023, 17(2): 279.
- [11] CHANG AX, FUNKHOUSER T, GUIBAS L, et al. ShapeNet: An information-rich 3D model repository[J]. Inst Electron, Inf Commun Eng Trans Sect E, 2015, 98(12): 1.
- [12] SEITZ S, CURLESS B, DIEBEL J, et al. A comparison and evaluation of multi-view stereo reconstruction algorithms[C]. Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'06), [S. l. : s. n.], 2006, 1: 519.
- [13] 刘卓昊. 大规模多视图三维重建计算与质量评价方法研究[D]. 杭州:浙江大学, 2020.
- [14] GRANO D A. Three-dimensional reconstruction in electron microscopy[D]. [S. l. :s. n.], 1979, Lawrence Berkeley National Laboratory.
- [15] SNABLEY N. Scene reconstruction and visualization from internet photo collections: A survey[J]. IPSJ Transactions on Computer Vision and Applications, 2011, 3: 44.
- [16] 龚洁晖, 张慧. 基于工程图的三维重建研究[J]. 软件学报, 2008, 19(7):1794.
- [17] ECK U, WECHNER M, PANKRATZ F. Real-Time 3D Reconstruction Pipeline for Room-Scale, Immersive, Medical Teleconsultation[J]. Appl Sci, 2023, 13: 10199.
- [18] 毛泊禹, 章为, 梁芷琦, 等. 无人机摄影测量与三维重建技术在建筑领域应用历程、原理与实例[J]. 华中建筑, 2024, 42(9): 53.
- [19] NIU Y, LIU L, HUANG F. Overview of image-based 3D reconstruction technology[J]. J Europ Opt Soc Rap Publ, 2024, 19:18.
- [20] WANG HL, WONG TH, CHAN YM. Photogrammetric reconstruction of 3D carpological collection in high resolution for plants authentication and species discovery[J]. PLoS ONE, 2022, 17(8):e0270199.
- [21] 刘兴盛, 李安虎, 邓兆军, 等. 单相机三维视觉成像技术研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(14):87.
- [22] 李子欣. 基于 Metashape 的机器人三维地面环境的重构[D]. 北京:北京交通大学, 2019.
- [23] 胡伟. 基于深度学习的单视图物体三维重建技术研究[D]. 北京:中国石油大学, 2020.
- [24] 康帅, 王淑红. 服务监管科学的中药民族药数字标本平台建设思路[J]. 中国食品药品监督, 2021, 212(9): 32.
- [25] 王淑红, 李君瑶. 传统中药标准的数字化新形态[J]. 中国药学杂志, 2024, 59(24): 2396.
- [26] 王国华, 张志华, 席明杰, 等. 基于卷积神经网络的中药自动识别人工智能模型构建及应用[J]. 中国全科医学, 2025, 28(9): 1128.
- [27] 刘伟, 邹伟红, 卢彦杰. 基于迁移学习和模型融合的中药材图像识别研究[J]. 湖南中医药大学学报, 2022, 42(5): 809.
- [28] KE Z, LIU M, LIU J. The application of artificial intelligence in the research and development of traditional Chinese medicine[J]. Int J Drug Discov Pharmacol, 2024, 3(1): 100001.
- [29] GAO W, CHENG N, XIN G. TCM2Vec: a detached feature extraction deep learning approach of traditional Chinese medicine for formula efficacy prediction[J]. Multimed Tools Appl, 2023, 82:26987.

(收稿日期:2025-03-09)