

A Test of Root Imaging in Soil Based on CBCT

Changling Zhang¹, Xuecheng Zhou^{1, 2#}, Pianzhen Li¹, Hui Yan¹, Yihai Li¹

1. College of Engineering, South China Agricultural University, Guangzhou, 510642, China;

2. Key Laboratory of Key Technology on Agricultural Machine and Equipment, South China Agricultural University, Guangzhou, 510642, China

#Email: zxcem@scau.edu.cn

Abstract

In order to solve the technical problem of root imaging in larger-scale soil sample, a 160kV minifocus X-ray Cone-beam Computed Tomography (CBCT) was used in this paper to do a test for root imaging in six soil samples with the diameters of 210 mm and 120 mm. It is shown in the result that Using the CBCT system available is possible to implement plant root imaging in larger soil samples with over 200 mm diameter by the means of increasing tube voltage and current, effective filtering, system correction, artifact correction, corresponding parameter setting and improving reconstruction, and then the imaging quality of samples' slices is better while soil particle is smaller.

Keywords: Plant Root; Red Soil; Detection in Situ; Cone-Beam Computed Tomography; Imaging Test

土壤中植物根系的层析成像检测试验*

张常玲¹, 周学成^{1,2}, 李骈臻¹, 严慧¹, 李一海¹

1. 华南农业大学 工程学院, 广州 510642

2. 华南农业大学 南方农业机械与装备关键技术教育部重点实验室, 广州 510642

摘要: 针对植物根系难以在大尺寸土壤介质中实现有效成像的技术难题, 本文采用基于平板探测器的 160kV 小焦点锥束 CT 设备, 选用直径分别为 210mm 和 120mm 两种尺寸不同的 6 个土壤样品进行植物根系的原位成像检测试验, 以期找出影响其原位根系成像的主要因素和影响规律, 进而实现较大尺寸土壤样品中植物根系的层析成像。结果表明, 通过增加管电压、管电流水平, 采取适当滤波、几何校准、伪影校正和优化重建等改进措施, 采用现有 CBCT 成像检测系统能够实现 200mm 以上的大尺寸土壤介质中获取根系的原位断层图像; 且土壤颗粒越均匀、尺寸越小, 获得的原位根系层析成像质量越好。

关键词: 植物根系; 红壤土; 原位检测; CBCT; 成像试验

引言

根系是植物从土壤介质中获取水分、养分的重要器官, 其在土壤空间中的生长分布情况直接影响到植物吸收养分和水分的能力, 从而影响植物的生长及产量, 所以对植物根系在原位状态下的研究显得尤为重要。然而, 其特殊的生长环境及其复杂性的形态结构使得传统的根系测量工具和测量方法难以实现对植物根系进行原位、快速、无损的三维观测和准确分析。植物根系观测分析方法的落后已经成为制约根系形态学、根系生物学等相关领域深入进展的技术瓶颈^[1]。

随着计算机视觉和图像分析等相关技术的发展, 计算机层析成像技术为原位无损植物根系的研究提供了一个有效的方法, 近年来国内外在植物根系观测技术的研究上取得了重要进展。Tollner 等(1994)尝试了大豆等较细根系的 CT 成像研究, 对生长在沙质土柱(高 460mm、直径 150mm)内的原位根系进行了 CT 扫

*基金资助: 受国家自然科学基金项目(31271609)和国家“863”计划专题课题(2008AA10Z221)的支持资助。

描, 每周 1 次, 共安排了将近 3 个月的连续扫描检测。结果发现, 仅能识别出三周以后的、接近土壤表面的大豆主根, 而之后所有的扫描检测再没能取得新的进展, 大豆主根以外的所有根系均不可见^[2]; Heeraman 等人(1997)采用高分辨率的高能工业 CT(ECT)设备对种植在沙壤土小土柱(高 100mm、直径 50mm)内的矮菜豆(bush bean)根系进行了成像试验^[3], 可以检测到最小根系直径为 0.35mm; Gregory 和 Jenneson 等人(2003)采用一种低能 X 射线微层析成像系统分别对麦苗和有才根系进行了三维成像实验研究^[4], 样品尺寸高 25mm, 直径为 25mm, 检测到了发芽 7 天后的麦苗和油菜根系, 并重建了根系的三维影像; Saoirse R. Tracy 等人(2010)采用 X-ray CT 获取了生长了 3 周的玉米图像, 并用 Avizo 软件提取根系的三维结构, 检测样品土柱直径 3cm^[5]; Saoirse R. Tracy 等人(2012)采用 X-ray μ -CT 技术对分别对发芽后 2 天, 5 天, 12 天的 小麦种子进行扫描, 扫描样本尺寸高 91mm, 直径为 29mm, 并用根系追踪软件 Root-Viz3D 对图像进行分析, 取得了根系结构的可视化^[6]; Stefan Mairhofer 等人(2013)用 X-ray 微 CT 对生长了 10 天的西红柿进行扫描, 样品介质为风干并过滤后颗粒小于 2mm 沙土和黏土(样品厚度小于 55mm), 并用 RooTrak 软件对获取的 CT 数据进行根系构型的可视化^[7]。国内对植物根系无损检测技术的研究探索从 2001 年开始。课题组也曾借助医用螺旋 CT 开展过植物根系的成像实验进行探索, 但未能得到理想的成像结果。两年后, 罗锡文等再次借助当时先进的德国西门子四排螺旋 CT, 经过连续近两个月实验研究, 终于利用计算机层析成像设备获得了较为理想的原位根系 CT 序列图像^[8]。

从近几年的研究进展可知, 植物根系的检测主要是针对生长初期的植物根系(培养介质多为沙土)进行成像, 而且由于受低能 X 线源, 检测系统与检测器大小的限制, 原位根系土柱样品尺寸比较小, 进而限制了根系的生长空间, 不利于研究植物根系后期生成情况。利用医用螺旋 CT 虽然可以检测较大的样品, 但医用 CT 的射线能量一般比较高, 在射线能量小于 30Gy 时, 不会影响植物的生长及土壤中的微生物量^[9], 较高能量是否会对影响植物生长还没有相关报道。这些都可以说是限制原位植物根系研究的因素。华南农业大学“植物根系三维数字化与可视化技术研究”课题组, 针对现有根系观测技术方法存在的问题, 在不影响植物生长的前提下, 利用 X 射线计算机层析成像技术(XCT)对较大土柱样品原位植物根系成像方法进行了研究和探索, 为后期植物根系几何形态及三维构型的研究奠定了基础。

1 成像系统

根系样品原位断层序列图像的采集是采用课题组的基于平板探测器的植物根系原位三维检测系统完成的。实验设备为 160KV 工业 CT 系统, 利用该系统对植物根系进行图像采集, 整个成像系统由 X 射线源、高压发生器、平板探测器、机械扫描系统、运动控制系统、安全防护系统和计算机图像采集系统等部件组成, 如图 1 所示:

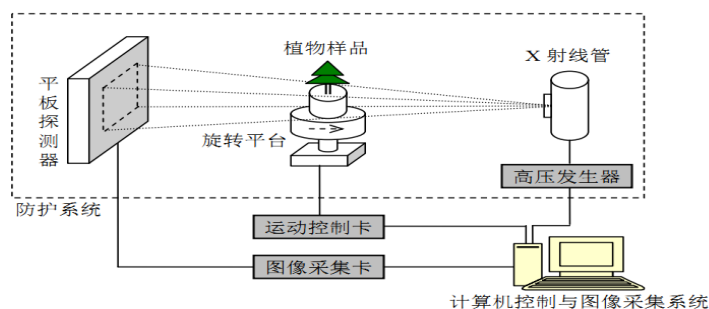


图 1 基于平板探测器的根系成像系统

由 X 射线管、高压发生器组成的射线源系统提供植物根系原位层析成像所需的 X 射线束, 根据射线在样品内的衰减情况实现以各点的衰减系数为表征的断层图像重建。平板探测器用来接收穿过样品的射线信号, 经放大和模数转换后送入计算机通过图像采集与重建实现图像重建。机械扫描系统实现成像检测时样品的旋转或平移运动以及射线源于样品、样品与探测器之间物理位置的调整。图形工作站通过计算机控制

与图像采集系统实现对样品扫描过程的控制、参数调整、图像重建、显示、处理、测量等程序操作。整个系统采用立式几何结构，射线源和探测器位置固定，待测根系样品放置在旋转平台上，具有很好的空间位置稳定性，非常适合于植物根系这类静态物体的成像扫描，有利于提高其成像质量。

射线源采用瑞士 COMET 公司的 MXR-160HP/11 型 X 光机，有大小焦点两种工作模式，其中大焦点模式下焦斑尺寸为 1mm，最大功率为 1800W；小焦点模式下焦斑尺寸为 0.4mm，最大功率为 800W，实验采用大焦点模式，射线辐射角为 $40^{\circ} \times 30^{\circ}$ 。X 光机的电压、电流、焦点大小可根据不同检测物体进行设置以适用于 CT 系统扫描检测。平板探测器采用了美国 VARIAN 公司的 PaxScan2520V，它是一种新型非晶硅面阵探测器，总像素数为 1536×1920 ，像素大小为 $127 \mu\text{m} \times 127 \mu\text{m}$ ，有效检测面积 $25\text{cm} \times 20\text{cm}$ ，提高了检测速度；动态范围 $>2000:1(66\text{dB})$ ，A/D 转换为 14bit，帧数模式为 10fps(1*1)和 30fps(2*2)两种。

2 材料与方法

2.1 根系样品

本次试验测试，共准备了 2 种生长在不同容器尺寸、不同颗粒组成的本地红壤中的 6 个植物根系样品。两种容器规格分别为 120 mm 和 210 mm 内径的塑料花盆，生长介质均为本地红壤土，植物样本均为大叶榕。210mm 花盆中培养介质为直接采自大田的原样土壤。120mm 容器尺寸的根系样品共有 5 个，其中的土壤介质是采用标准细筛筛选过的均质土壤，土壤颗粒大小共有 5 个等级，分别为小于 0.28mm、0.28~0.45mm、0.45~0.6mm、0.6~0.9mm 和 0.9mm 以上。120mm 尺寸的 5 个根系样品主要用于测试土壤颗粒大小对成像质量和效果的影响，因此这 5 个根系样品所用的成像扫描和重建方案是完全相同的。

2.2 扫描方法

根系样品断层成像的采集过程包括设备自检、预热、预扫描、扫描、投影数据获取和计算机层析成像等几个阶段。其中主要的技术参数涉及射线源电压、管电流、SOD(Source-Object-Distance)和 SDD(Source-Detector-Distance)等扫描参数，投影方法和滤波方法，以及重建方法、空间解析度、密度分辨率等重建参数。

2.2.1 采集方案

120mm 土壤根系样品的采集参数：SDD 为 1205mm，SOD 为 410mm，管电压 80kV，管电流 3.4mA，探测器积分时间 500ms，投影区域大小 1136×1880 ，连续扫描投影幅数 800 幅。

210mm 土壤根系样品的采集参数：SOD 为 945mm，SDD 为 1205mm，管电压 153.98kV，管电流 3.7mA，探测器积分时间 500ms，投影区域大小 1100×1420 ，连续扫描投影幅数 800 幅。

2.2.2 滤波措施

CT 射线管产生的 X 射线不是单色源，而是具有一定频谱宽度的 X 线源，即 X 线光子能量不一，吸收系数随 X 线能量的增大而减小，连续能谱的 X 射线穿过被检测物体后，低能量射线易被吸收，高能量射线较易穿过，在射线传播过程中，平均能量会变高，射线逐渐变硬，称之为射束硬化效应。射束硬化会使所获得的 CT 图像中出现伪影。而由于土壤密度较大，需要穿透的射线的能量要高，为了减轻射束硬化现象并防止平板探测器饱和，就在射线源出口处放置滤波片，滤除能谱的低能部分，使尽量多的高能射线通过^[10]，在一定程度上调制 X 射线的能量范围，获得预硬化射线。

本实验采取质地均匀的铝片和铜片作为滤波片，采用厚度 3.5mm 铜片和总厚度为 10.5mm 铝片。

2.2.3 硬件校正

锥束 CT 几何结构要求满足两个条件^[11]：一，经过探测器中心点，并且垂直于探测器表面的直线要穿过

X 射线源的焦点。二，转台的旋转中心要平行于探测器平面，并且旋转中心轴在探测器上投影要与探测器的中心列重合。在实验中，在被检测样品中插一个金属条^[12]，根据成像时金属条的位置，通过计算机机械控制系统来调整样品，使检测样品处于平板探测器成像中心。

通过检测探测器的暗场计数标定和亮场、暗场的增益标定来抑制环状伪影，并对平板探测器进行偏移校正、增益校正、坏点校正。偏移校正保证在没有 X 光入射的情况下，像素中读出的数据为零。增益校正是先获取没有物体遮挡的 X 光入射时探测器中读取的图像，来计算增益系数，在有 X 光入射的物体图像之后，通过计算每个像素的增益系数进行统一，消除不同像素的增益系数不同带来的影响。坏点校正查找坏点/坏线并记录下来，另外再获取有 X 光入射的物体图像之后，根据坏点位置周围正常点的像素值进行加权，计算出坏点的位置所在的点的像素值，提供修复的数值。

2.3 重建方法

对采集到 800 幅断层序列图像数据先进行“取对数”、“滤波”等操作，再采用锥束大锥角重建方法进行重建，在不损失空间分辨率的情况下，选择大于投影宽度的尺寸，重建尺寸为 2048*2048；重建时采用 S-L 滤波器，虽然 R-L 滤波器函数形式简单、实用，用它重建图像，轮廓清楚，但是会产生吉伯斯现象，表现为明显的震荡效应，且在投影数据含有噪声时，重建质量也不够满意，而 S-L 滤波效果会更好。在重建过程并对环状伪影进行校正，提高 CT 图像质量，从而有利于对图像进行正确判读和量化分析。

2.4 测试方法

图像的空间分辨率表征了 CT 系统在足够信噪比条件下辨别物体空间几何细节特征的能力。空间分辨率的极限值取决于系统的设计、结构、数据量和采样方法。机械扫描系统的精度决定了投影路径的精确性，X 射线光学决定了可分辨的最小细节，投影数量和每个投影钟探测器的数目决定了重建矩阵的大小^[13]。160Kv 工业 CT 设备的空间分辨率有分辨率测试块测试可得。在转台上放置空间分辨率测试块如图 3，然后对试件进行 CT 扫描，管电压 70kV，管电流 2.5mA，探测器积分时间 200ms，1000 幅投影，SDD=1205mm，SOD=910mm，扫描时间为 200s，最后做 CT 重建，尺寸重建 2048×2048。断层图像如图 4。



图 2 空间分辨率测试块

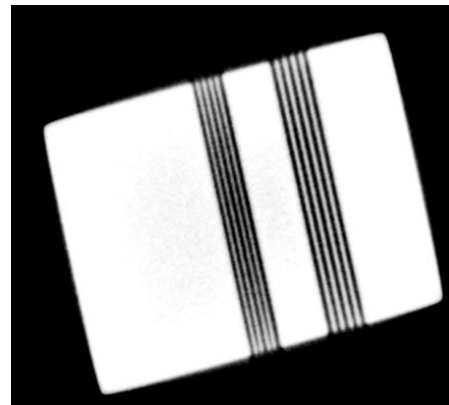


图 3 空间分辨率断层成像

通过标定，210mm 土壤根系样品 CT 重建后图像的像素尺寸为 0.055mm，而 120mm 样品重建后的像素尺寸为 0.023mm。在分辨率测试块断层图像中 2.5LP/mm 清晰可见。

3 结果与分析

采用优化后的成像方案进行试验表明，本次测试选用的 2 种共 6 个土壤根系样品均能获得清晰的 CT 断层图像。6 个试验样品共获得近 50000 张清晰的 CT 序列图像，总数据量达 100GB。图 5 是从中选取的 4 张有代表性的原位根系断层图像。

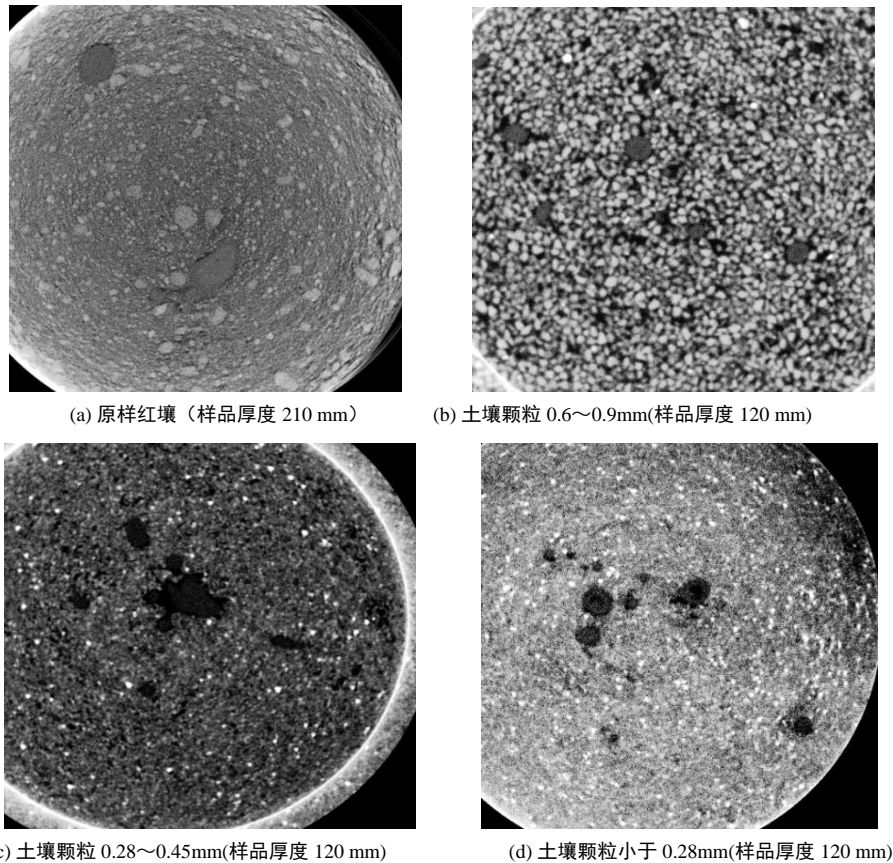


图 4 不同土壤断层成像 (红色标记处为检测到的根)

射线穿透物质时其强度的衰减与被检测物体的性质、厚度及射线光子的能量相关，衰减系数值随着射线能量的增加而减小，随物质原子序数的增大而增大，随物质密度的大而增大。这也说明了能量越高的射线穿透能力越强，而密度越大的物体越难穿透。由土壤根系成像可知，直接用 CT 检测生长在较大容器中的根系时，由于土壤吸收射线能力强，射线衰减比较严重，土壤颗粒及其他颗粒的影响，成像后很难分辨出根系图像。在本试验中，被测花盆内径达 210mm，射线要穿透的土壤厚度比较大，衰减比较严重，对土壤中植物根系的成像还是有一定的难度的。从图像中可以分辨出土壤中的根系，经标定其中采用红色边界标记的三个根系断层区域中最细的根系直径为 3mm。而对于土壤颗粒较小的土壤中根系则可以比较清晰的看出根系，且土壤颗粒越小根系成像质量越好，经标定可检测到的最细根系为 0.2mm。

4 结论

本文对内径为 120mm 和 210mm 花盆容器内土壤介质的植物根系成像进行了试验研究，结果表明，通过提高管电压、管电流水平，采取适当的滤波片组合方案和相应的校正措施，根据成像原理对系统相应几何参数进行合理的设置，并采用合适的重建方法，利用现有的 CBCT 成像设备是可以有效获取更大尺寸土壤中植物根系的断层图像的，且土壤颗粒越小，成像质量越好，为以后研究不同生长时期的植物根系构型检测提供了可行性。本次试验还发现，210mm 容器中植物根系的成像质量和效果还有进一步提高的可能，由于原样土壤中土壤颗粒较大且分布不均，还含有其他有机物颗粒，这些对射线的吸收影响都会很大，下一步课题组将采用 200mm 以上尺寸的容器对影响土壤中植物根系成像的其它相关因素做进一步研究探索。

REFERENCES

- [1] Xuecheng Zhou, Xiwen Luo. Advances in Non-destructive Measurement and 3D Visualization Methods for Plant Root Based on Machine Vision. Proceedings of the 2009 2nd International Conference on Biomedical Engineering and Informatics (BMEI09),

17-19 October 2009, Tianjin, China; VOL1:98–102.

- [2] Tollner, E.W., Ramseur, E.L., Murphy, C. Techniques and Approaches for Documenting Plant Root Development with X-ray Computed Tomography [M]. In: Anderson, S.H., Hopmans, and J.W. (Eds.) Tomography of Soil–Water–Root Processes. Special Publication No.36. Soil Science Society of America, Madison, USA, 1994: 115–133
- [3] Heeraman D.A., Hopmans J.W., Clausnitzer, V. Three Dimensional Imaging of Plant Roots in Situ with X-ray Computed Tomography [J]. Plant Soil 1997.189:167–179.
- [4] Gregory PJ, Hutchison DJ, Read DB, et al. Non-invasive Imaging of Roots with High Resolution X-ray Micro-tomography [J]. Plant and Soil, 2003, 255:351–359.
- [5] Saoirse R. Tracy, Jeremy A. Roberts, Colin R. Black et al. The X-factor: Visualizing Undisturbed Root Architecture in Soils Using X-ray Computed Tomography [J]. Journal of Experimental Botany, Vol. 61, No. 2, pp. 311–313, 2010
- [6] Saoirse R. Tracy, Colin R. Black, Jeremy A. Roberts et al. Quantifying the Effect of Soil Compaction on Three Varieties of Wheat (*Triticum aestivum* L.) using X-ray Micro Computed Tomography(CT)[J]. Plant Soil (2012) 353:195–208
- [7] Stefan Mairhofer, Susan Zappala, Saoirse Tracy et al. Recovering Complete Plant Root System Architectures from Soil via X-ray μ -Computed Tomography [J]. Plant Methods, 2013, 9:8
- [8] Xiwen Luo, Xuecheng Zhou, Xiaolong Yan. “Visualization of Plant Root Morphology in Situ Based on X-ray CT Imaging Technology”, 2004 ASAE/CSAE Annual International Meeting, Paper No.043078.
- [9] Susan Zappala, Jonathan R Helliwell, Saoirse R. Tracy et al. Effects of X-ray Dose on Rhizosphere Studies Using X-Ray Computed Tomography [J]. PLoS One 8(6), 2013.
- [10] Jun Zhang, Lei Li, Feng Zhang, et al. Review of the Methods for Beam Hardening Correction in X-ray Computed Tomography[J]. CT Theory and Applications, 2013, 22(1): 195-204
- [11] Yu Li. Research on Cone Beam CT Image Correction [D]. Dalian University of Technology. 2012
- [12] S. J. Mooney, T. P. Pridmore, J. Helliwell, et al. Developing X-ray Computed Tomography to Non-invasively Image 3-D Root Systems Architecture in Soil [J]. Plant Soil (2012) 352:1–22
- [13] China National Standardization Management Committee. GB/T 29034-2012. Nondestructive Testing.-the Industrial Computer Tomography Guide[S]. China Standard Press, 2012

【作者简介】



¹ 张常玲（1990- ），女，汉，在读硕士生，研究方向为机器视觉与图像分析。
Email: changlinghh@163.com

² 周学成（1968- ），男，汉族，博士，教授，研究生导师，研究方向为农业无损检测技术，机器视觉与图像分析等。
Email: zxcem@scau.edu.cn

³ 李骈臻（1989- ），男，汉，在读硕士生，研究方向为机器视觉技术应用。Email: lipianzhen@163.com

⁴ 严 慧（1990- ），女，汉，在读硕士生，研究方向为农业XCT图像无损检测与分析。Email: 765090393@qq.com

⁵ 李一海（1989- ），男，汉，在读硕士生，研究方向为机器视觉与图像分析。Email: Liyihai2009@qq.com