

肖淑媛, 何伟, 卢伟. 基于电阻层析成像技术和 ResNet 的萝卜根系表型无损检测方法研究 [J]. 华南农业大学学报, 2023, 44(1): 102-109.  
XIAO Shuyuan, HE Wei, LU Wei. Nondestructive detection of radish root phenotype based on electrical resistance tomography and ResNet[J]. Journal of South China Agricultural University, 2023, 44(1): 102-109.

# 基于电阻层析成像技术和 ResNet 的萝卜根系表型无损检测方法研究

肖淑媛<sup>1</sup>, 何伟<sup>1</sup>, 卢伟<sup>2</sup>

(1 南京农业大学 工学院, 江苏 南京 210031; 2 南京农业大学 人工智能学院, 江苏 南京 210031)

**摘要:**【目的】针对现有根系表型检测方法存在价格昂贵、需要专人操作以及无法对根系表型进行原位无损检测等问题, 提出一种基于电阻层析成像技术 (Electrical resistance tomography, ERT) 和深度残差神经网络 (Deep residual network, ResNet) 的萝卜根系表型无损检测方法。【方法】首先, 利用 COMSOL 软件对萝卜-琼脂场域不同情况的 ERT 正问题进行仿真分析, 并获得大量边界电压数据; 然后, 基于 ResNet 对萝卜-琼脂场域的内部电导率分布与边界电压之间的非线性映射关系建立模型, 对萝卜-琼脂场域进行图像重建; 最后, 基于 ERT 研制一套萝卜根系表型检测装置, 并进行试验验证。【结果】基于 ERT 和 ResNet 的萝卜根系表型检测方法能够实现萝卜根系表型的可持续无损检测, 试验装置操作简单、成本低, 图像重建相对误差小于 5%。【结论】基于 ERT 的萝卜根系表型检测方法可以实现对萝卜根系表型的无损检测; 结合 ResNet 算法, 成像精度较高。该方法可有效应用于萝卜根系表型的检测。

**关键词:** 电阻层析成像技术; 萝卜根系; ResNet; 无损检测

中图分类号: TP391

文献标志码: A

文章编号: 1001-411X(2023)01-0102-08

## Nondestructive detection of radish root phenotype based on electrical resistance tomography and ResNet

XIAO Shuyuan<sup>1</sup>, HE Wei<sup>1</sup>, LU Wei<sup>2</sup>

(1 College of Engineering, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210031, China; 2 College of Artificial Intelligence, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210031, China)

**Abstract:** 【Objective】In view of the problems that the existing experimental equipment for root phenotype detection is expensive, requires special personnel to operate, and cannot perform rapid in situ non-destructive detection of root phenotypes, this paper proposes a non-destructive detection method for radish root phenotype based on electrical resistance tomography (ERT) and deep residual network (ResNet). 【Method】Firstly, the ERT positive problem of the radish-agar field for different cases was performed by COMSOL, and a large amount of boundary voltage data was obtained. Secondly, the nonlinear mapping relationship between the internal conductivity distribution and the boundary voltage inside the radish-agar field was modeled based on ResNet, and image of radish-agar field were reconstructed. Finally, a set of radish root phenotype detection device was developed based on ERT, and the experimental verification was carried out. 【Result】The radish root phenotype detection method based on ERT and ResNet could achieve sustainable nondestructive detection

收稿日期: 2022-05-23 网络首发时间: 2022-10-27 09:22:44

首发网址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1110.S.20221026.1531.002.html>

作者简介: 肖淑媛, 硕士研究生, 主要从事作物根系表型研究, E-mail: [18851762803@163.com](mailto:18851762803@163.com); 通信作者: 卢伟, 副教授, 博士, 主要从事智能机器人与无损检测技术研究, E-mail: [njaurobot@njau.edu.cn](mailto:njaurobot@njau.edu.cn)

基金项目: 江苏省自然科学基金 (BK20181315)

of radish root phenotype, and the experimental setup was simple to operate and low cost, while the relative error of image reconstruction was less than 5%. 【Conclusion】 The method of radish root phenotype detection based on ERT can achieve nondestructive detection of radish root phenotype with high imaging accuracy combining with ResNet algorithm. This method can be effectively used for the detection of radish root phenotypes.

**Key words:** Electrical resistance tomography; Radish root system; ResNet; Nondestructive detection

萝卜在全国各地均有种植,具有较高的产量和较强的适应性,在我国是仅次于大白菜和马铃薯的第三大蔬菜,生长周期短且一年四季均可种植<sup>[1]</sup>。萝卜的可食用部位是其膨大的根系,由于根生长在土壤中,而土壤的不透明性使萝卜根原位观测和直接测量的难度较大<sup>[2]</sup>。根的大小、形状会因为品种、生长环境以及栽培条件的不同而存在很大差异<sup>[3]</sup>。因此,进行萝卜根系表型原位无损检测研究对农业育种以及基因组学的发展具有极为重要的科研价值和社会经济效益<sup>[4]</sup>。

根系表型的传统检测方法包括挖掘法、土钻法和剖面法等,采样费时费力,对植株造成严重破坏,且不可持续动态观测。因此,无损检测成为研究者关注的重点。李燕丽等<sup>[5]</sup>将微根管法与图像处理技术相结合,对根系进行定点可持续观测,获取到了小麦根系生长的相关参数。Zhao 等<sup>[6]</sup>通过 X 射线计算机层析成像技术对玉米根系进行原位检测,建立了玉米根系三维几何模型,具有较高精度,但其产生的辐射会在一定程度上影响植物根系的生长。Pflugfelder 等<sup>[7-8]</sup>采用核磁共振成像技术对大麦和小麦根系表型进行分析,获得较为清晰的影像,最小可检测根直径为 400~500  $\mu\text{m}$ ,但核磁共振设备价格昂贵,不能得到广泛应用。为降低成本,徐汇等<sup>[9]</sup>基于探地雷达对果树的根系进行检测,准确地检测出果树根系的分布状况,得到三维分布和不同深度的密度图,但探测分辨率较低,分辨直径小于 2 mm 的细根存在困难。可见,现有的一些对植物根系进行原位检测的方法通常存在实验装置价格高昂、涉及核素或强磁场、操作复杂等问题。

电阻层析成像技术 (Electrical resistance tomography, ERT) 是电学成像技术的一个分支,同样是一种非侵入式测量技术,它基于边界电压分布来重建敏感场域内电导率,通过测量边界电压获取投影数据,再通过图像重建算法解算出敏感场域内土壤与根系电导率分布状态<sup>[10]</sup>。由于其具有非侵入、无辐射、高速和低成本等优点,在工业与生物医学等领域具有广泛的应有前景<sup>[11-12]</sup>。目前,ERT 主要用于树木断层检测<sup>[13-14]</sup>及土壤含水量的检测<sup>[15-16]</sup>,运用在作物根系表型方面的研究较少。Weigand 等<sup>[17]</sup>

基于多频电阻抗断层成像等技术提出一种作物根系特征监测研究方法。Corona 等<sup>[18]</sup>使用电阻抗层析成像技术对油菜根系进行非侵入式研究,提出了一种低成本植物根系表型检测方法,可用于生长中油菜根系表型检测。上述研究均说明了电学层析成像技术在根系结构研究中的可行性。但由于土壤根系敏感场内部电导率分布不均匀,而且土壤与根系之间水分、无机离子之间的流动对系统稳定性存在影响,使得现有的图像重建算法存在抗噪声性能较差、计算量大、成像速度慢、重建图像分辨率较低等问题。近年来,随着计算机技术的发展,神经网络算法发展迅猛,在实现图像重建方面具有良好的应用前景。敏感场电压分布与作物根系之间存在明显的非线性,而通过神经网络算法能够建立黑箱模型实现输入输出的非线性拟合<sup>[19]</sup>。深度残差神经网络 (Deep residual network, ResNet) 作为神经网络算法的一种,能够加快网络收敛速度,且随着网络层级的增加,并不会出现训练精度和测试精度下降的现象<sup>[20]</sup>,因此,本文采用 ResNet 算法进行萝卜根系表型的图像重建。

本文拟对萝卜横截面直径的 ERT 进行正向仿真,求出边界电压,再结合 ResNet 进行萝卜根系横截面直径的反向建模,结合图像处理进一步获得萝卜三维分布情况,并进行试验验证。本文所提方法可以对萝卜生长状态进行原位无损监测,且设备简单、成本低,具有良好的应用前景。

### 1 材料与方 法

#### 1.1 萝卜电阻层析成像检测原理

敏感场域内不同研究对象具有不同的电导率,萝卜 ERT 检测的物理基础是通过检测琼脂与萝卜构成的敏感场域中的电导率分布,利用重构算法得到场域中萝卜的分布情况。萝卜 ERT 检测通过给萝卜-琼脂多相流施加激励来获得敏感场的响应电压,利用采集系统测得敏感场的边界电压,反推出敏感场域内琼脂与萝卜的电导率分布情况,进而得到琼脂中萝卜的生长状况与位置信息。

ERT 是根据敏感场域内部电导率分布与敏感

场域边界电压的对应关系建立数学模型。假设 ERT 为恒定电流场模型, 根据麦克斯韦方程以及似稳场假设, ERT 萝卜-琼脂场域可描述为:

$$\nabla J = 0,$$

(1)

$$J = \sigma E,$$

(2)

式中:  $\nabla$  为散度算子,  $J$  为萝卜-琼脂场域中的电流密度,  $\sigma$  为介质电导率,  $E$  为电场强度。

萝卜-琼脂场域中电场强度与电势分布 ( $\phi$ ) 的关系可表示为:

$$E = -\nabla\phi,$$

(3)

电势分布 ( $\phi$ ) 满足如下关系式:

$$\nabla(\sigma\nabla\phi) = 0,$$

(4)

$$\nabla\sigma\nabla\phi + \sigma\nabla^2\phi = 0,$$

(5)

萝卜-琼脂场域满足均匀、线性、各向同性条件, 则  $\sigma$  为常数, 即  $\nabla\sigma = 0$ , 所以式 (4) 可以化简为:

$$\nabla^2\phi = 0,$$

(6)

萝卜-琼脂 ERT 工作方式满足诺依曼 (Neumann) 边界条件, 则有:

$$\sigma\nabla\phi\mathbf{n}\Big|_S = \sigma\frac{\partial\phi}{\partial\mathbf{n}}\Big|_S = j,$$

(7)

式中:  $S$  为萝卜-琼脂所在场域;  $\mathbf{n}$  为萝卜-琼脂场域边界的单位法向量;  $j$  为边界电流密度。

1.2 萝卜根系电阻层析成像正问题

萝卜根系 ERT 正问题是已知萝卜-琼脂敏感场域内部电导率分布情况, 给敏感场域施加激励信号, 求解场域内的电势分布, 从而获得场域边界电压的过程<sup>[21]</sup>。有限元法是目前求解 ERT 正问题常用的方法, 不受待求解区域边界形状的限制。萝卜-琼脂场域 ERT 正问题求解主要过程如下。

1) 萝卜-琼脂场域剖分。将需要求解的萝卜-琼脂场域剖分为有限数目的单元, 将边值问题转化为变分问题。其能量函数为:

$$\begin{cases} F(\varphi) = \int_S \frac{1}{2}\sigma \left[ \left(\frac{\partial\varphi}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial\varphi}{\partial y}\right)^2 \right] dx dy = \min \\ \varphi|_{\partial S} = f(x,y) \end{cases}, \quad (8)$$

式中:  $F(\varphi)$  为萝卜-琼脂场域内的能量;  $\sigma$  为电导率;  $\partial$  为求偏导;  $\varphi$  为单元电位;  $f(x,y)$  为边界电位。

2) 线性插值。萝卜-琼脂场域为圆形域, 有限元划分后用线性插值多项式作为插值函数, 其插值函数 ( $\phi_e$ ) 为:

$$\phi_e(x,y) = \alpha + \beta x + \gamma y,$$

(9)

式中:  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  根据网格单元三节点三角形顶点坐标

和电位确定。

3) 变分求解:

$$[K][\varphi] = [I], \quad (10)$$

式中:  $[I]$  为对应边界条件,  $[K]$  为整体系数矩阵,  $[\varphi]$  为单元电位矩阵, 求解线性代数方程组, 便可得萝卜-琼脂场域内有限元节点电位。

1.3 萝卜根系电阻层析成像逆问题

萝卜根系 ERT 逆问题的求解是根据正问题求得萝卜-琼脂场域边界电压, 结合图像重建算法求得敏感场域内部萝卜的分布情况。利用 ResNet 求解萝卜根系 ERT 逆问题, 实质上是通过网络模型建立萝卜-琼脂场域内部电导率分布情况与场域边界电压之间的非线性映射关系<sup>[22]</sup>。

$$Y = F(X, J, w, b), \quad (11)$$

式中:  $Y$  为电导率分布序列;  $F$  为映射;  $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ , 表示边界电压序列,  $n$  表示边界电压数量;  $J$  表示边界电流激励条件;  $w$ 、 $b$  分别表示神经元之间连接的权重和偏置。

残差网络的基本构建块是残差单元, 残差单元由卷积层 (Conv)、批量处理归一化层 (BN) 和非线性激活函数层 (ReLU) 堆叠而成。图 1a 给出了 1 个残差单元, 残差网络框架如图 1b 所示。残差网络先将给定输入数据 1 次传入卷积层、非线性激活函数层及批量处理归一化层, 将处理结果送入多个残差单元, 然后经过批量处理归一化层和多个全链接层 (FC), 最后得到输出结果。

采用 ResNet 对基于 ERT 的萝卜-琼脂场域进行逆问题求解, ResNet 结构如图 2 所示。本文 ResNet 架构中采用了 17 个卷积层。网络结构由 1 个主要分支组成, 其中主要包含: 输入层的初始部分, 具有

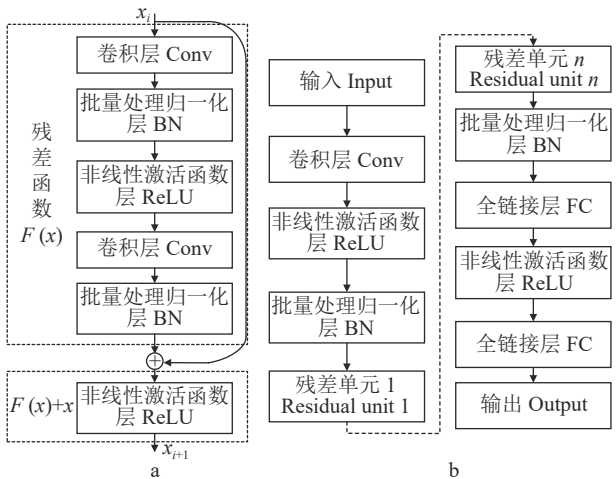


图 1 残差单元 (a) 和残差网络结构 (b)  
Fig. 1 Residual unit (a) and framework of residual network (b)

激活函数的第 1 卷积层; 4 个卷积块, 每个块包含 2 个卷积单元, 后面跟着 1 个附加层和激活函数; 最后一部分包括二维全局平均池化层、全连接层和回归输出层。每个卷积单元包含 2 个具有批量归一化的卷积层和 1 个激活函数。最后的架构中, 在卷积单

元周围添加了剩余连接。对于一些剩余的块, 使用跳跃层 (由卷积层和批量处理归一化组成) 在添加层之前调整特征维度。每个卷积块中使用批量处理归一化作为正则化算子。在完成网络架构后定义选择训练选项, 共进行 12 轮迭代, 最大迭代次数为 360 次。

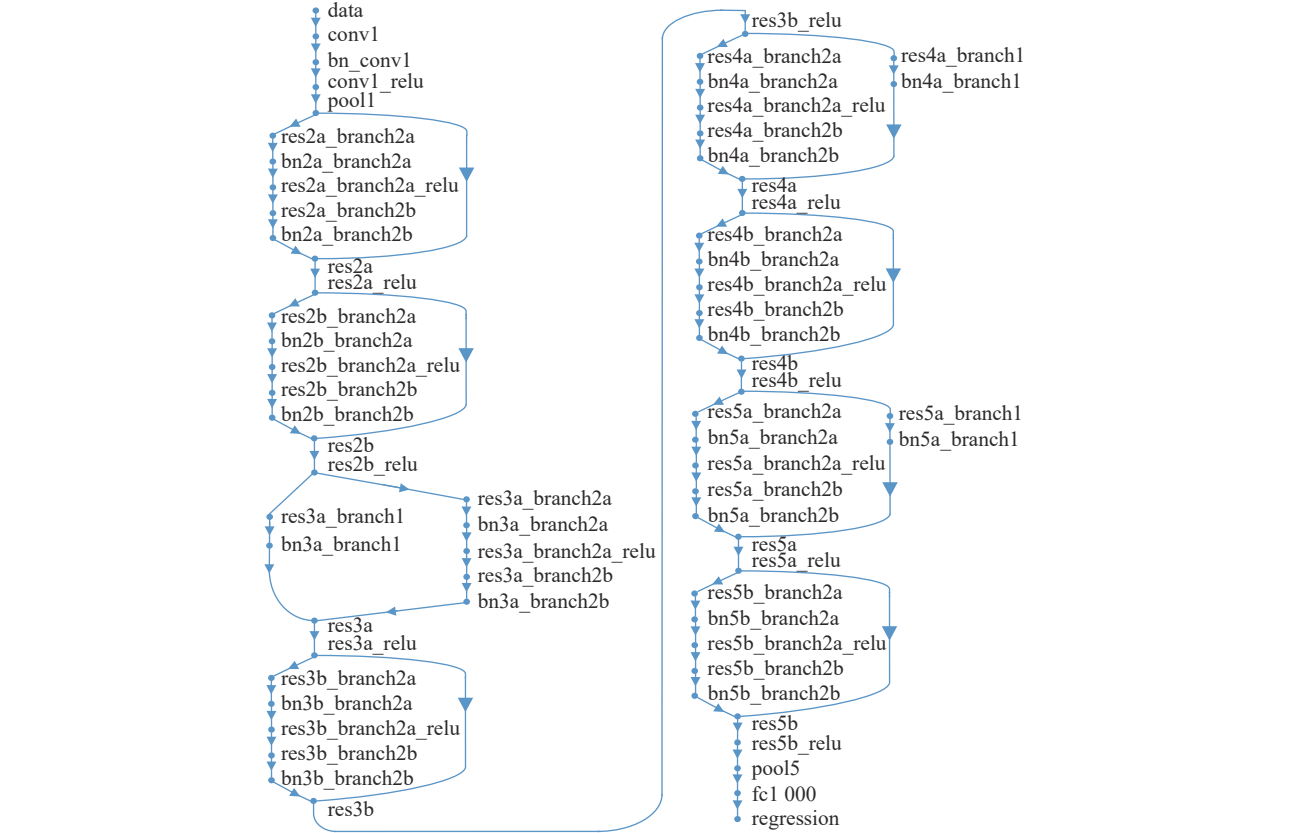


图 2 残差网络结构

Fig. 2 Structure diagram of residual network

在网络训练过程中, 初始学习率为 0.001, 每 5 个阶段学习率降低 20%, 为加快网络模型的收敛速度, 采用非线性激活函数。图 3 为残差网络训练过程图, 展示了损失函数随迭代次数的变化。经过

50 次迭代后均方根误差 (RMSE) 以及网络模型的损失值 (Loss) 趋于平缓, 最终在第 360 次时达到收敛。

1.4 试验材料

本试验选取不同大小、粗细均匀、无机械损伤、无病虫害的“春白二号”白萝卜为研究对象, 产自南京市。为控制萝卜生长环境的湿度与电导率等试验参数, 使用可供给萝卜生长所需营养的琼脂溶液进行试验研究, 便于试验中对萝卜进行直接观察。为配制与土壤电导率一致的琼脂溶液, 采用电极法测量土壤以及萝卜电导率, 选用康培斯生物强度为 1 400 g/cm<sup>2</sup> 的琼脂粉和史丹利农业集团有限公司家庭园艺肥, 按照琼脂粉: 家庭园艺肥: 水为 3 g: 1 g: 1 L 的比例配置。土壤电导率约 1.85 S/cm, 萝卜电导率约 0.45 S/cm。

萝卜培养钵选用直径 20 cm、深 20 cm、厚 3 mm 的亚克力板容器, 顶部放置厚 5 mm、内径 18 cm、外径 20 cm 的圆环, 并等间距打 16 个 7 mm 直径的孔, 用于插入测量电极。采用 AD9850 信号发生器

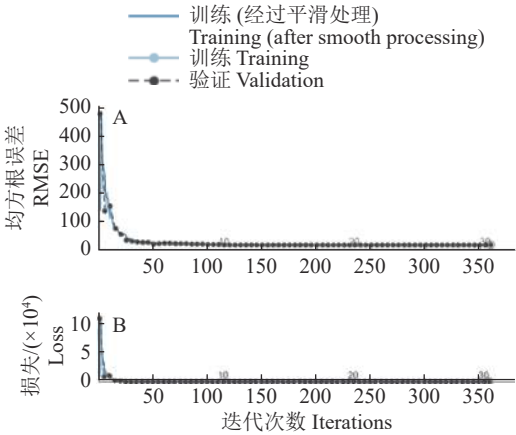


图 3 残差网络训练过程图

Fig. 3 Training process diagram of residual network



施加激励,电极采用均匀分布 8 个电极的 16 块电路板,对 16 块电路板进行 1~16 编号,将萝卜分成 8 层分别进行数据采集。通过 STM32f103zet6

单片机和高精度 16 通道模拟多位复用器将电压信号通过串口传送至电脑进行信号采集。ERT 萝卜根系表型检测流程如图 4 所示。

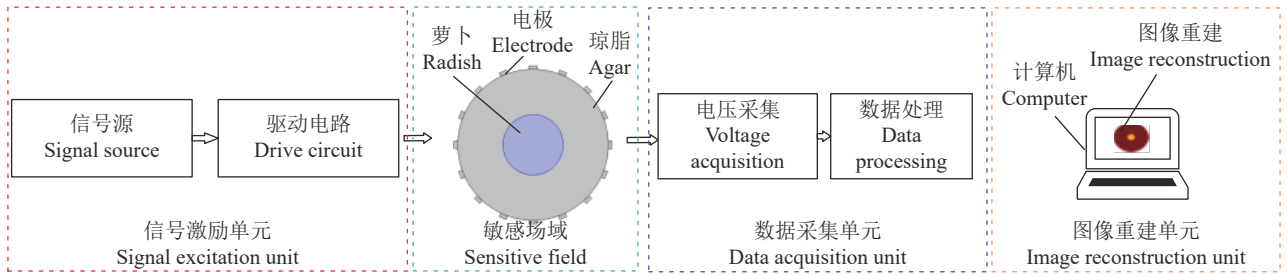


图 4 ERT 萝卜根系表型检测流程图

Fig. 4 Flow chart of radish root phenotype detection by ERT

1.5 萝卜根系表型检测试验

本文采用 16 电极 ERT 系统进行试验,对萝卜根系进行三维检测,试验装置共设 8 层电极阵列,每层 16 个电极,自下向上依次采集各层电压数据。萝卜根系表型检测实物如图 5 所示。

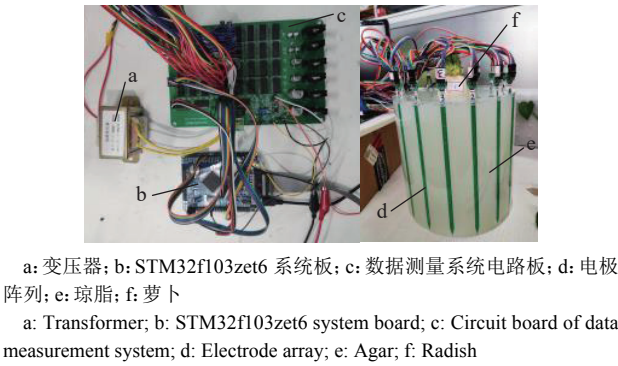


图 5 萝卜根系表型检测实物图

Fig. 5 Image of radish root phenotype detection by ERT

首先在容器中加入配制好的琼脂溶液,再将萝卜放入溶液中,待溶液完全凝固。ERT 系统采用相邻激励-相邻测量模式。由 AD9850 信号发生器产生激励信号,通过 16 选 1 模拟开关进行激励电极以及测量电极的选通。测量 16 组相邻电压数据后,由数据采集单元进行信号处理,并将信号转变为数字信号后送至计算机;然后切换到下一组相邻 2 个电极传感器上施加电流激励,并采集相邻电极上的电压。重复上述过程直到所有相邻 2 个电极传感器都充当了激励电极,收集到了所有的电压数据后,切换至下一层重复上述操作。

本文图像重建质量评价标准为萝卜直径的相对误差 (Relative image error, RIE),计算公式如式 (12)。

$$RIE = \frac{|d^* - d|}{d} \times 100\%, \tag{12}$$

式中:  $d^*$  为图像重建萝卜直径,  $d$  为 COMSOL 仿真萝卜直径。

2 结果与分析

2.1 仿真结果

2.1.1 萝卜根系电阻层析成像正问题仿真求解  
本文采用 COMSOL Multiphysics 5.5 软件对 ERT 正问题进行求解。采用相邻激励模式,对 2 个相邻的激励电极分别施加输入、输出电流,测量相邻电极之间电压差。分别对空场、单根、多根进行正问题建模,求解得到的电场线和电势分布图如图 6 所示。本文采用 16 电极的 ERT 系统,对 16 个电极进行编号,依次给相邻 2 个激励电极施加电压激励,同时测量各相邻电极之间的电压,在 1 次激励下可以获得 16 个电压,最终可获得 256 (16×16) 个电压。

对比空场与混合场的电流密度及电势分布图可知,当敏感场中为同一电导率时,电场线为圆弧状,电势分布均匀;当有 2 种及以上电导率时,电场线在电导率变化处发生弯曲,电导率大处偏角小,电势分布在电导率变化处表现出明显差异。

2.1.2 萝卜根系电阻层析成像逆问题仿真求解  
构建用于萝卜根系 ERT 的残差神经网络模型需要大量样本数据进行监督学习,本文利用 COMSOL 与 MATLAB 联合仿真对萝卜根系 ERT 正问题求解获得仿真数据集。每组样本包括 256 个边界电压与 16 384 (128×128) 个电导率分布值。为加快网络训练收敛速度,将边界电压进行归一化处理,使其映射到 [0, 1] 之间。针对萝卜-琼脂场域中的不同情况,分别对单根不同位置与双根不同位置的情况进行了仿真求解。图像重建结果如图 7 所示。

通过对大量萝卜进行直径测量,得出萝卜直径范围为 1~8 cm;因此在仿真研究中萝卜根系直径范围选择 1~8 cm。由表 1 可以发现,ResNet 算法可以对不同情况下的萝卜根系表型进行图像重建,且成像效果良好,能够有效地还原萝卜-琼脂场域中内

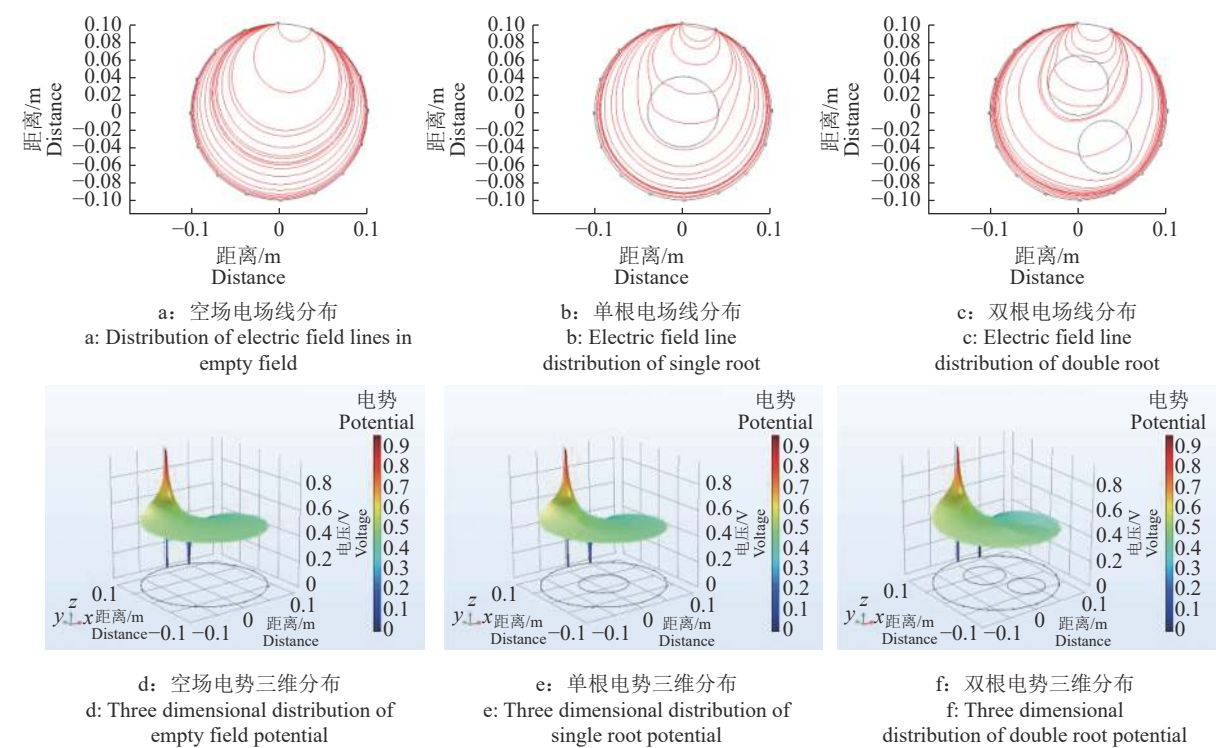


图 6 空场 (a、d) 及混合场 (b、c、e、f) 仿真  
Fig. 6 Empty field (a, d) and mixed field (b, c, e, f) simulation

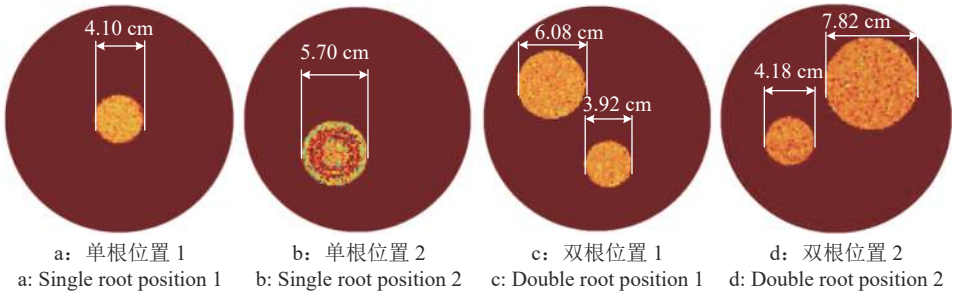


图 7 单根 (a、b) 及双根 (c、d) 不同位置仿真图像重建  
Fig. 7 Simulation image reconstruction of single root (a, b) and double root (c, d) at different positions

表 1 仿真图像重建相对误差

Table 1 Relative image error (RIE) of simulated image reconstruction

仿真直径/cm Simulation diameter	单根中心 Single root center		单根非中心 Single root non-center		双根 Double root	
	重建直径/cm Reconstruction diameter	相对误差/% RIE	重建直径/cm Reconstruction diameter	相对误差/% RIE	重建直径/cm Reconstruction diameter	相对误差/% RIE
1	0.86	14.00	0.84	16.00	0.88	12.00
2	2.06	3.00	1.92	4.00	1.92	4.00
3	3.14	4.67	3.11	3.67	3.07	2.33
4	3.90	2.50	3.84	4.00	3.88	3.00
5	4.84	3.20	4.86	2.80	5.14	2.80
6	5.78	3.67	6.19	3.17	6.12	2.00
7	7.30	4.29	7.16	2.29	6.77	3.29
8	7.80	2.50	7.82	2.25	7.82	2.25

部电导率分布情况。根据成像结果可以较清晰地观察到场域内萝卜的位置以及直径大小。不同情况下,当萝卜直径等于 1 cm 时,相对误差大于 10%,当直径大于 1 cm 时相对误差均在 5% 以内,成像效

果较好。  
**2.2 试验结果**  
利用萝卜根系表型检测系统对单个萝卜与 2 个萝卜的情况进行数据采集和图像重建。通过

16 选 1 多路模拟开关控制数据采集层的选择、信号激励电极和数据采集电极的选通,取最底层为第 1 层,自下而上进行数据采集,每层共获得 256 (16×16) 个边界电压,共 8 层数据。为减少数据采集所产生的误差,采集 5 组边界电压数据,取平均值作为边界电压代入图像重建算法中进行图像重建。分别将每一层边界电压带入训练好的 ResNet 中进行图像重建,获得每层萝卜根系表型情况,最后通过对各层二维图像叠加进行三维建模,获得萝卜

卜三维根系图。

完成整个系统电压数据采集后将萝卜取出,测量每层相应位置萝卜实际直径。为减小测量误差,用游标卡尺进行 5 次测量后取平均值,作为萝卜实际直径。与重建图像所得直径进行对比,根据式 (12) 计算各层萝卜重建结果的相对误差。

图 8 黄色区域表示萝卜所在区域,红色部分表示琼脂所在区域。由图 8 和表 2 可以发现,对不同情况萝卜根系进行试验研究与图像重建,可以很好

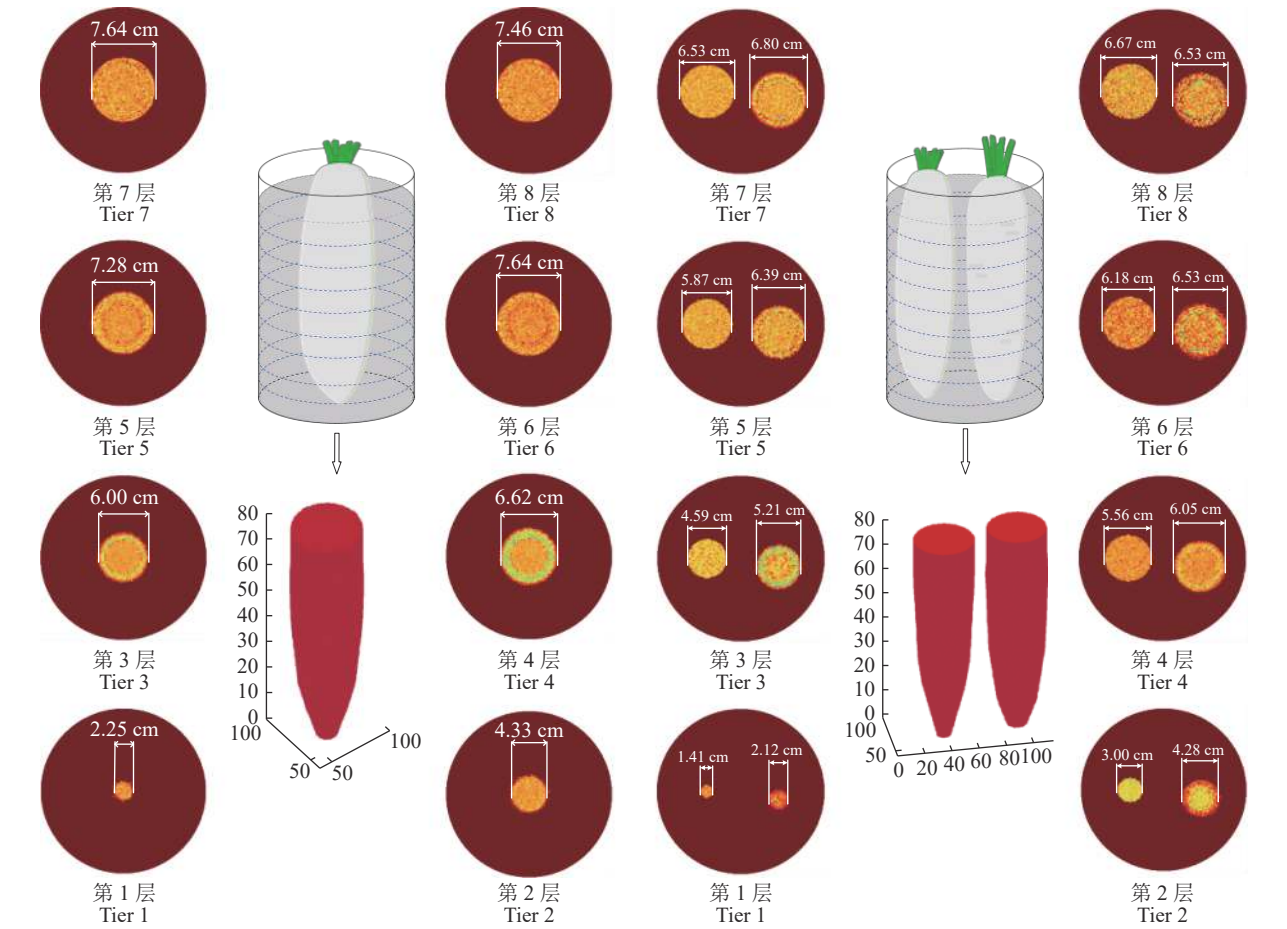


图 8 萝卜图像重建

Fig. 8 Reconstruction of radish image

表 2 萝卜图像重建相对误差

1个萝卜 One radish				2个萝卜 Two radishes			2个萝卜 Two radishes		
层	实测直径/cm	重建直径/cm	相对误差/%	实测直径1/cm	重建直径1/cm	相对误差	实测直径2/cm	重建直径2/cm	相对误差
Tier	Measured diameter	Reconstruction diameter	差/% RIE	Measured diameter1	Reconstruction diameter1	差/% RIE	Measured diameter2	Reconstruction diameter2	差/% RIE
1	2.18	2.25	3.49	1.47	1.41	3.75	2.05	2.12	3.21
2	4.51	4.33	4.12	2.89	3.00	3.73	4.45	4.28	3.69
3	6.23	6.00	3.91	4.44	4.59	3.52	5.41	5.21	3.77
4	6.85	6.62	3.30	5.44	5.56	2.24	6.22	6.05	2.70
5	7.50	7.28	2.91	5.96	5.87	1.48	6.51	6.36	2.33
6	7.80	7.64	2.13	6.03	6.18	2.55	6.69	6.53	2.39
7	7.90	7.64	3.34	6.36	6.53	2.80	6.90	6.80	1.48
8	7.71	7.46	3.27	6.55	6.67	1.80	6.84	6.53	4.53



地获得萝卜的分布情况,且成像精度高。各层萝卜重建图像的相对误差较小,与仿真结果基本一致,其中单个萝卜各层检测相对误差均不高于 4.12%,2 个萝卜检测的相对误差均不高于 4.53%。结果证明基于 ERT 结合 ResNet 对萝卜-琼脂场域中不同情况萝卜根系表型进行无损检测,具有较好的检测效果,也说明对二维图像进行三维重建可以更加直观地对萝卜分布情况进行观察研究,对实现优势根性状筛选和培育具有重要意义。

3 结论

- 1) 现有根系表型检测方法的检测装置存在价格昂贵、涉及核素、需专人操作等问题,提出基于 ERT 的萝卜根系表型检测方法。该方法成像精度高、成本低,可以实现对萝卜表型的无损连续检测。
- 2) 针对传统 ERT 图像重建算法精度低、成像效果差的问题,结合 ResNet 建立萝卜-琼脂边界电压与内部电导率非线性映射。对单个萝卜和 2 个萝卜的情况分别进行仿真研究和试验研究。结果表明:采用 ResNet 算法进行萝卜表型图像重建,可以获得较高的成像质量,能够很好地重建出场域内萝卜和琼脂的分布情况,且相对误差小于 5%。
- 3) 该方法可以用于萝卜根系表型检测,在后续研究中可以进行不同作物根系的表型研究。

参考文献:

[1] 刘志芳. 白萝卜的开发价值及其栽培技术[J]. 种子科技, 2019, 37(11): 63-64.

[2] HE W, CHEN Y, YIN Z. Adaptive neural network control of an uncertain robot with full-state constraints[J]. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2016, 46(3): 620-629.

[3] 魏林, 梁志怀. 白萝卜肉质根开裂的主要原因及其防治方法[J]. 长江蔬菜, 2017(3): 48-49.

[4] HUDEK C, STURROCK C J, ATKINSON B S, et al. Root morphology and biomechanical characteristics of high altitude alpine plant species and their potential application in soil stabilization[J]. *Ecological Engineering*, 2017, 109: 228-239.

[5] 李燕丽, 王昌昆, 卢碧林, 等. 基于微根管技术的盐胁迫下小麦根系生长原位监测方法[J]. 土壤学报, 2021, 58(3): 599-609.

[6] ZHAO X, XING L, SHEN S, et al. Non-destructive 3D geometric modeling of maize root-stubble in-situ via X-ray computed tomography[J]. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 2020, 13(3): 174-179.

[7] PFLUGFELDER D, KOCHS J, KOLLER R, et al. The root system architecture of wheat establishing in soil is associated with varying elongation rates of seminal roots: Quantification using 4D magnetic resonance imaging[J].

*Journal of Experimental Botany*, 2022, 73(7): 2050-2060.

[8] PFLUGFELDER D, METZNER R, VAN DUSSCHOTEN D, et al. Non-invasive imaging of plant roots in different soils using magnetic resonance imaging (MRI)[J]. *Plant Methods*, 2017, 13: 102. doi: 10.1186/s13007-017-0252-9.

[9] 徐汇, 徐元元, 李光辉. 基于探地雷达的果树根系检测试验与分析[J]. 江苏农业科学, 2022, 50(2): 170-177.

[10] 颜华, 胡丽娟, 王伊凡, 等. 基于改进灵敏度矩阵的 ERT 图像重建[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(5): 241-248.

[11] LI F, TAN C, DONG F. Electrical resistance tomography image reconstruction with densely connected convolutional neural network[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2021, 70: 4500811. doi: 10.1109/TIM.2020.3013056.

[12] SONG Z, WEN J, WAN N, et al. An optimization algorithm H-GVSPM for electrical impedance tomography[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2022: 1-8. doi: 10.1109/JSEN.2022.3170838.

[13] 王兴龙, 王立海. 白桦模拟缺陷材的电阻层析成像规律探究[J]. 林业工程学报, 2016, 1(2): 106-111.

[14] 徐梓敬, 贾培, 吴楠, 等. GA-SVM 在木材缺陷识别中的应用[J]. 传感器与微系统, 2019, 38(9): 153-156.

[15] 段国秀, 贾小旭, 白晓, 等. 电阻率层析成像法在土壤水文学中的应用: 基于 CiteSpace 的计量分析[J]. 土壤通报, 2021, 52(6): 1447-1459.

[16] 盛丰, 文鼎, 熊玮玮, 等. 基于电阻率层析成像技术的农田土壤优先流原位动态监测[J]. 农业工程学报, 2021, 37(8): 117-124.

[17] WEIGAND M, KEMNA A. Multi-frequency electrical impedance tomography as a non-invasive tool to characterize and monitor crop root systems[J]. *Biogeosciences*, 2017, 14(4): 921-939.

[18] CORONA D D J, SOMMER S, ROLFE S A, et al. Electrical impedance tomography as a tool for phenotyping plant roots[J]. *Plant Methods*, 2019, 15: 49. doi: 10.1186/s13007-019-0438-4.

[19] 李峰, 谭超, 董峰. 全连接深度网络的电学层析成像算法[J]. 工程热物理学报, 2019, 40(7): 1526-1531.

[20] 许辰航, 陈继明, 刘伟楠, 等. 基于深度残差网络的 GIS 局部放电 PRPD 谱图模式识别[J]. 高电压技术, 2022, 48(3): 1113-1123.

[21] LI B, WANG J M, WANG Q, et al. An improved generalized finite element method for electrical resistance tomography forward model[J]. *Journal of Electrical Engineering & Technology*, 2019, 14(6): 2595-2606.

[22] 全卫国, 曾世超, 张立峰, 等. 基于深度残差神经网络的电阻层析成像及流型辨识方法[J]. 系统仿真学报, 2022, 34(9): 2028-2036.