

果树三维外形轮廓的仿真与重建

李 松^{1,2}, 张建瓴², 可欣荣², 洪添胜²

(1 广州数控设备有限公司, 广东 广州 510156; 2 南方农业机械与装备
关键技术省部共建教育部重点实验室, 华南农业大学 工程学院, 广东 广州 510642)

摘要:根据检测到的果树二维图像,建立了果树三维外形轮廓和喷头定位曲面。利用拍摄到的1个或有限个二维图像,经坐标变换得到近似的果树外形轮廓,以及与果树外形轮廓相对应的喷头定位曲面。通过具体的仿真算例,表明对于比较对称的果树,由1幅图像就可得到其精确的外形轮廓,而由多幅图像建立果树外形轮廓的方法则适用于不对称的果树。

关键词:果树; 外形轮廓; 精确喷雾; 图像处理

中图分类号:S49

文献标识码:A

文章编号:1001-411X(2009)01-0094-05

Simulation and Reestablishment of the Fruit-Tree's Three-Dimensional Profile Surface

LI Song^{1,2}, ZHANG Jian-ling², KE Xin-rong², HONG Tian-sheng²

(1 GSCK CNC Equipment CO. LTD., Guangzhou, 510156, China; 2 Key Laboratory of Key
Technology on Agricultural Machine and Equipment, Ministry of Education,
College of Engineering, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

Abstract: The methods to establish the fruit-tree's three-dimensional profile surface and the optimum spraying location of nozzles were studied. The approximate profile surface equation of fruit-tree was obtained with one image and several images respectively. The corresponding location surface or location spaces of nozzles were also achieved, with the spraying distance between nozzles and fruit-tree surface being optimum or suboptimum. The simulation examples were given, and the results showed that the three-dimensional profile surface of symmetrical fruit-tree could be reestablished with one image, and the profile surface reestablishment method with several images should be used for the dissymmetrical fruit-tree.

Key words: fruit-tree; profile surface; precise spraying; image processing

传统的果树喷雾技术由于喷头与果树间喷雾距离的调节随意性很大,会造成雾滴在果树内不同区域的分布很不均匀^[1-2],特别是对于枝叶密集的作物和果树,农药超量使用等问题尤为严重^[3]。果树仿形喷雾技术是通过检测果树位置和形状,自动控制喷头组在理想的喷雾距离下进行作业以实现农药的精确喷施和提高农药施用效率的一种新方法^[4-6]。

在果树精确喷雾中往往需要根据果树或作物的不同对象随时调整喷头的位置及其他喷雾参数,实现变量喷施农药^[7-9]。大量的试验结果也表明,在喷雾作业中,喷头离果树或作物表面的距离(称为喷雾距离)是影响喷雾质量和喷雾效果的一个首要因素。因此要实现精确喷雾,就需要确定果树的位置形状和喷头位置等参数。目前在喷雾距离、果树形状检测

收稿日期:2007-10-19

作者简介:李 松(1981—),男,硕士;通讯作者:张建瓴(1965—),男,副教授,博士, E-mail: jingzhang@scau.edu.cn

基金项目:国家自然科学基金(30871450);华南农业大学校长基金(4500-K04122)

方面有超声波测距法^[5-6]、红外光电测距法^[10-11]、图像处理及使用激光传感器等方法。王万章等^[12]采用超声波传感器和 DGPS 对果树的径冠进行了检测。Meron 等^[13]采用高空摄影比例为 1:4 000, 分辨率为 100 mm 的果园全色照片模拟图像处理, 得到果园中果树的等高线图, 从而计算出果树位置和树冠体积等。使用激光传感器可测量计算果树区域密度、高度及树行体积, 由于果树区域密度和喷雾药液沉积存在很大的相关性^[14], Tumbo 等^[15]对采用激光传感器和超声波传感器检测的果树体积和人工测量的果树体积在不同大小和不同枝叶密度的橘子树上进行了对比试验。张富贵等^[16]则使用数据融合和图像处理技术对果树稀密程度进行了研究。也有学者等对超声波传感器在果树体积测量中树冠枝叶密度和拖拉机行驶速度对测量精度的影响进行研究^[17]。

以上各种检测方法在检测果树信息时总需要一定的时间, 离实时性要求还有一定的距离, 而仿形喷雾作业时, 需要一边进行果树位置及果树相关信息的检测, 一边控制喷头的动作。因此, 减少喷头的定位时间, 提高喷头的定位精度和适时控制能力是非常必要的, 特别是对仿形喷雾而言, 如果能预先提供一个和果树外形轮廓相对应的喷头定位曲面就显得非常有意义。沿该定位曲面控制喷头的动作无疑可以降低喷头定位时间, 提高实时控制能力和定位精度。本文利用开发设计的基于 DSP 的果树形态结构参数检测系统检测得到果树二维图像, 经过一定的坐标变换, 建立果树的三维外形轮廓曲面, 并以此作为基础建立喷头的定位曲面。

1 由单幅图像进行果树三维外形重建

果树树冠的形状取决于树种的分枝方式或人工修整后的特定形状。冠形一般包括尖塔形、圆锥形、圆柱形、窄卵形、卵形、广卵形、圆球形、伞形以及平顶形、扁球形、杯形等。这些形状基本上都是对称的旋转体, 因此如果知道了一个果树垂直截面的边沿坐标, 按照果树对称的中心轴进行旋转, 即可得到果树表面的近似外形曲面。

本文将检测系统得到的果树图像作为果树的一个垂直截面, 利用处理后的无背景的二值化图像, 确定果树图像每行两端点的坐标和顶点坐标, 这些坐标都可作为果树表面的点, 对这些点进行曲线拟合, 就可得出一个截面上果树的冠形轮廓。一般有如图 1 所示的 2 种情况。

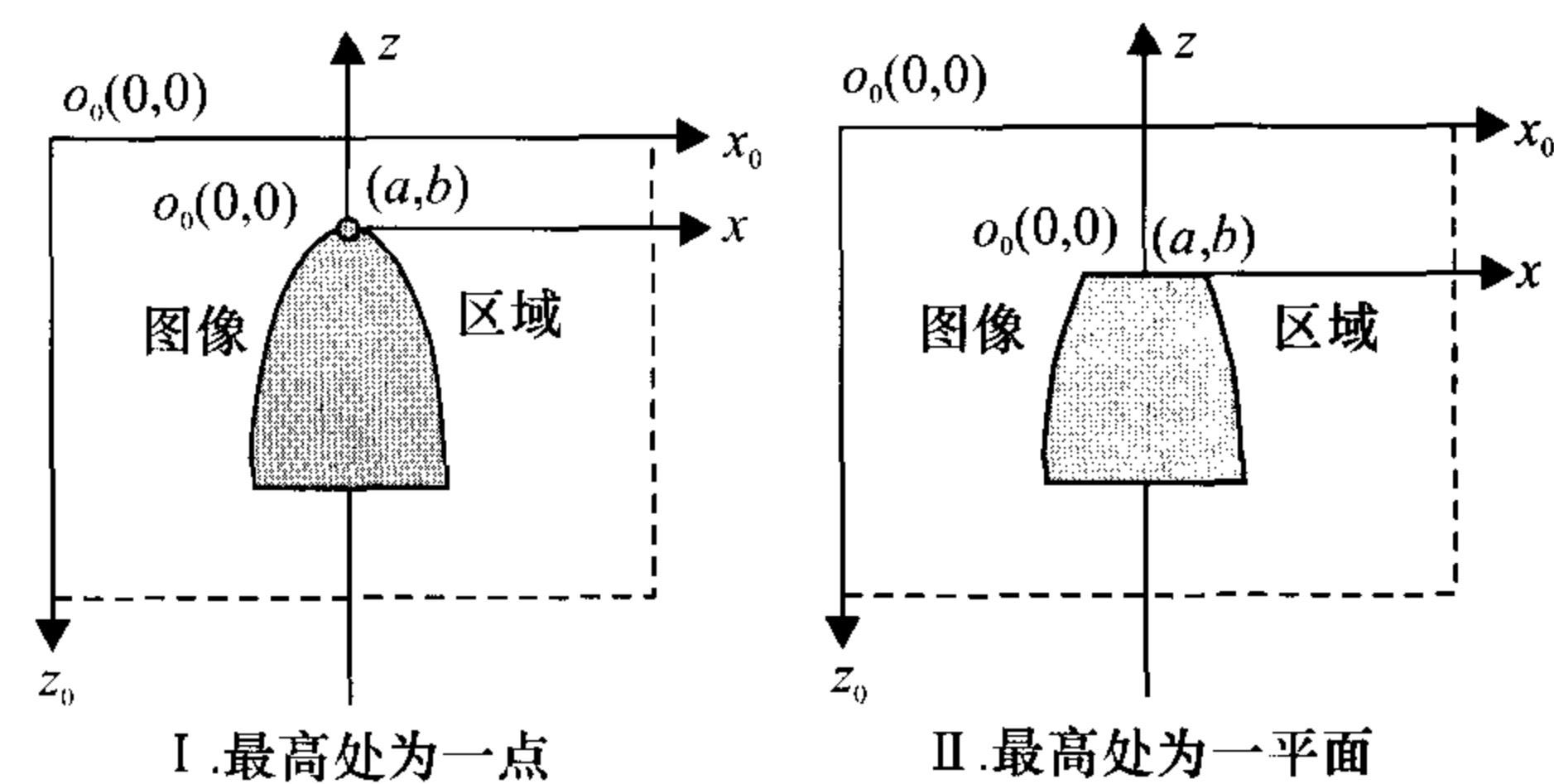


图 1 坐标变换示意图

Fig. 1 The coordinate transformation

1.1 坐标变换

系统采集处理得到的二值化图像各点坐标值是表示在平面坐标系 $o_0x_0z_0$ 中的(首先进行像素标定, 然后可计算出图像中各点的坐标值, 单位为 mm), 如图 1 所示。为了后续计算方便, 要进行适当的坐标变换。如果果树最高点坐标为一点 $o(a, b)$, 则新坐标系原点取为 $o(a, b)$, 如图 1-I 所示; 如果果树最高点为一平行线, 则取此线段的中点为 $o(a, b)$, 如图 1-II 所示。以 o 点为坐标原点, 建立新的平面坐标系 oxz , x 轴平行 x_0 轴且方向相同, z 轴平行于 z_0 轴且方向相反。则任一点在坐标系 $o_0x_0z_0$ 中的坐标 (x_0, z_0) 对应新坐标系 oxz 中坐标 (x, z) 的为:

$$\begin{aligned} x &= x_0 - a, \\ z &= -z_0 + b. \end{aligned} \quad (1)$$

式中, a 、 b 分别是坐标系 oxz 的原点在坐标系 $o_0x_0z_0$ 中的坐标值, 单位为 mm。

通过(1)式即可以把检测系统处理得到的果树图像边沿点的坐标, 从坐标系 $o_0x_0z_0$ 转化到 oxz 坐标系中。

1.2 果树三维外形重建

假设图 2 所示为一幅经过处理后的果树二值化图像, 检测系统从 oxz 坐标原点开始向下每隔 h 高度采集计算 1 次图像 2 个边沿的数据(h 为正值, 单位为 mm), 共采集到 $2k$ 个边沿坐标点。系统最初采集的这些点的坐标值是表示在坐标系 $o_0x_0z_0$ 中, 通过(1)式将这些坐标值表示在坐标系 oxz 中。以下计算如不加说明都是在坐标系 oxz 中进行。

在图 2 中, 从右边检测到果树图像边沿上的点记为: $a_i(x_i, z_i)$, $i = 0, 1, 2, 3, \dots, k-1$; 从左边检测到果树图像边沿上的点记为: $A_i(m_i, z_i)$, $i = 0, 1, 2, 3, \dots, k-1$ 。其中, x_i 、 m_i 分别为果树图像左、右边缘横坐标值, 单位为 mm; z_i 是果树图像左右边缘的纵坐标值, 单位为 mm; 且 $x_0 = m_0$, $z_i = -ih$, $i = 0, 1, 2, 3, \dots, k-1$ 。

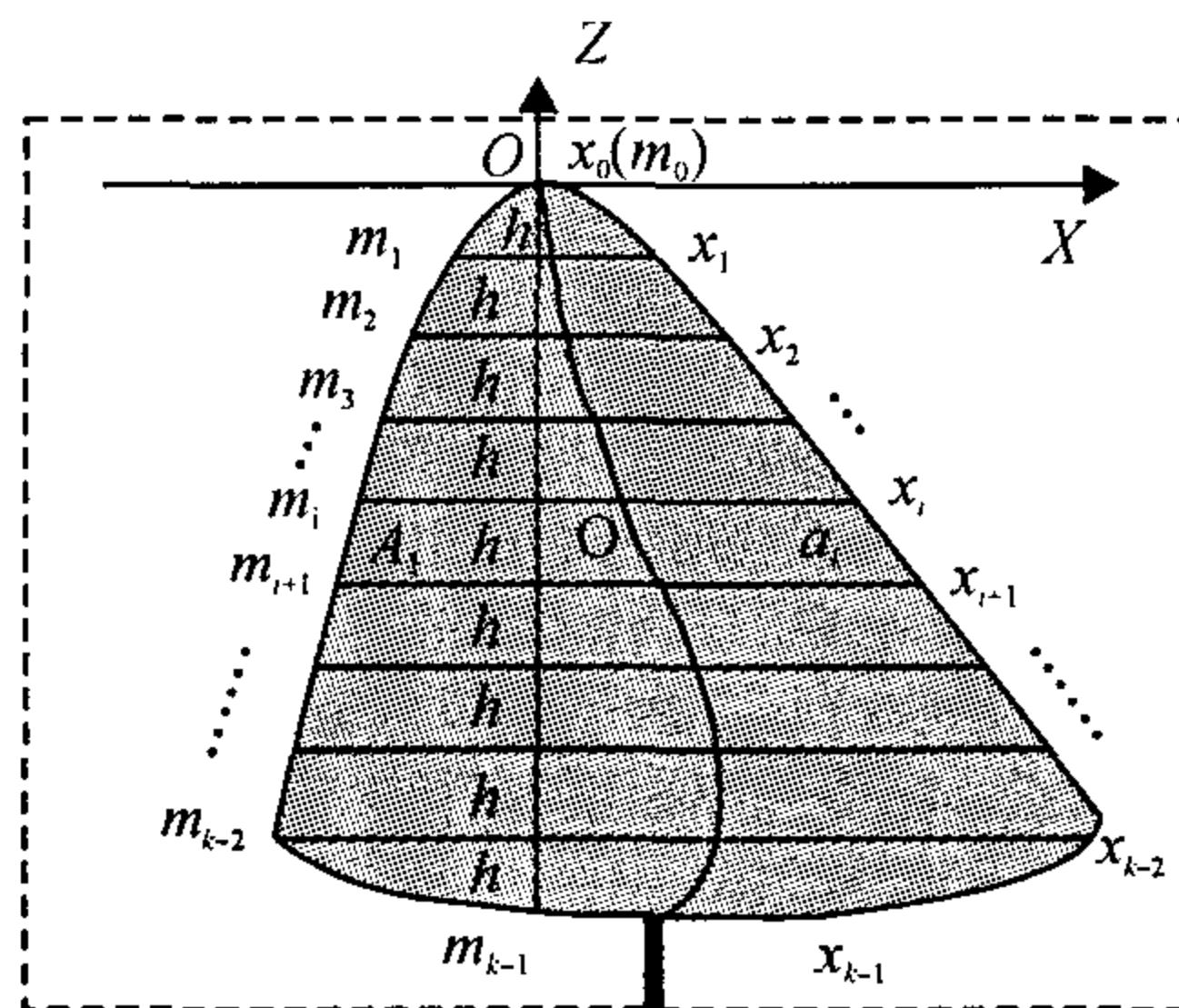


图2 一幅图像中果树树冠上的采集点

Fig. 2 The gather points in a tree image

对图像右边边沿,将两相邻采样点 a_i, a_{i+1} 用直线连接,则此线段上任意点的坐标为($x_{右}, z$):

$$x_{右} = -\frac{x_{i+1} - x_i}{h}(z + ih) + x_i = b_i z + d_i, \quad (2)$$

$$i = 0, 1, 2, \dots, k - 1.$$

式中: $b_i = -\frac{x_{i+1} - x_i}{h}$, $d_i = -\frac{x_{i+1} - x_i}{h}ih + x_i$,

$z_{i+1} \leq z \leq z_i$, 即 $-(i+1)h \leq z \leq -ih$.

同理对图像左边边沿点有:

$$x_{左} = -\frac{m_{i+1} - m_i}{h}(z + ih) + m_i = B_i z + D_i, \quad (3)$$

$$i = 0, 1, 2, \dots, k - 1.$$

其中: $B_i = -\frac{m_{i+1} - m_i}{h}$; $D_i = -\frac{m_{i+1} - m_i}{h}ih + m_i$.

将果树轮廓曲线上同一高度 z 的 2 点 A_i 和 a_i 用直线连接起来,其中点坐标为 $O_i(x_{中}, z)$,有

$$x_{中} = \frac{x_{右} + x_{左}}{2} = \frac{b_i + B_i}{2}z + \frac{d_i + D_i}{2}, \quad (4)$$

$$i = 0, 1, 2, \dots, k - 1.$$

建立三维右手坐标系 $OXYZ$,原点 O 与平面坐标系 oxz 原点重合, X 轴、 Z 轴分别与 x 轴、 z 轴重合. 将线段 $a_i A_i$ 绕其中点 O_i 点水平旋转,便得果树三维轮廓重建后分段曲面的数学方程:

$$x^2 + y^2 + Az^2 + Bxz + Cx + Dz + E = 0, \quad (5)$$

其中, $A = b_i B_i$, $B = -(b_i + B_i)$, $C = -(d_i + D_i)$, $D = b_i D_i + d_i B_i$; $E = d_i D_i$, $i = 0, 1, 2, 3, \dots, k - 1$.

根据上述公式,利用 MATLAB 软件对图 3a 和 3c 所示的 2 幅果树图像分别进行了三维外形轮廓重建,拟合后的曲面分别如图 3b 和 3d 所示. 可以看出,对于比较对称的果树利用其单幅图像进行三维重建,可以得到比较符合实际的果树外形. 但当果树外形不对称时,得到的果树三维外形会有较大的误差.

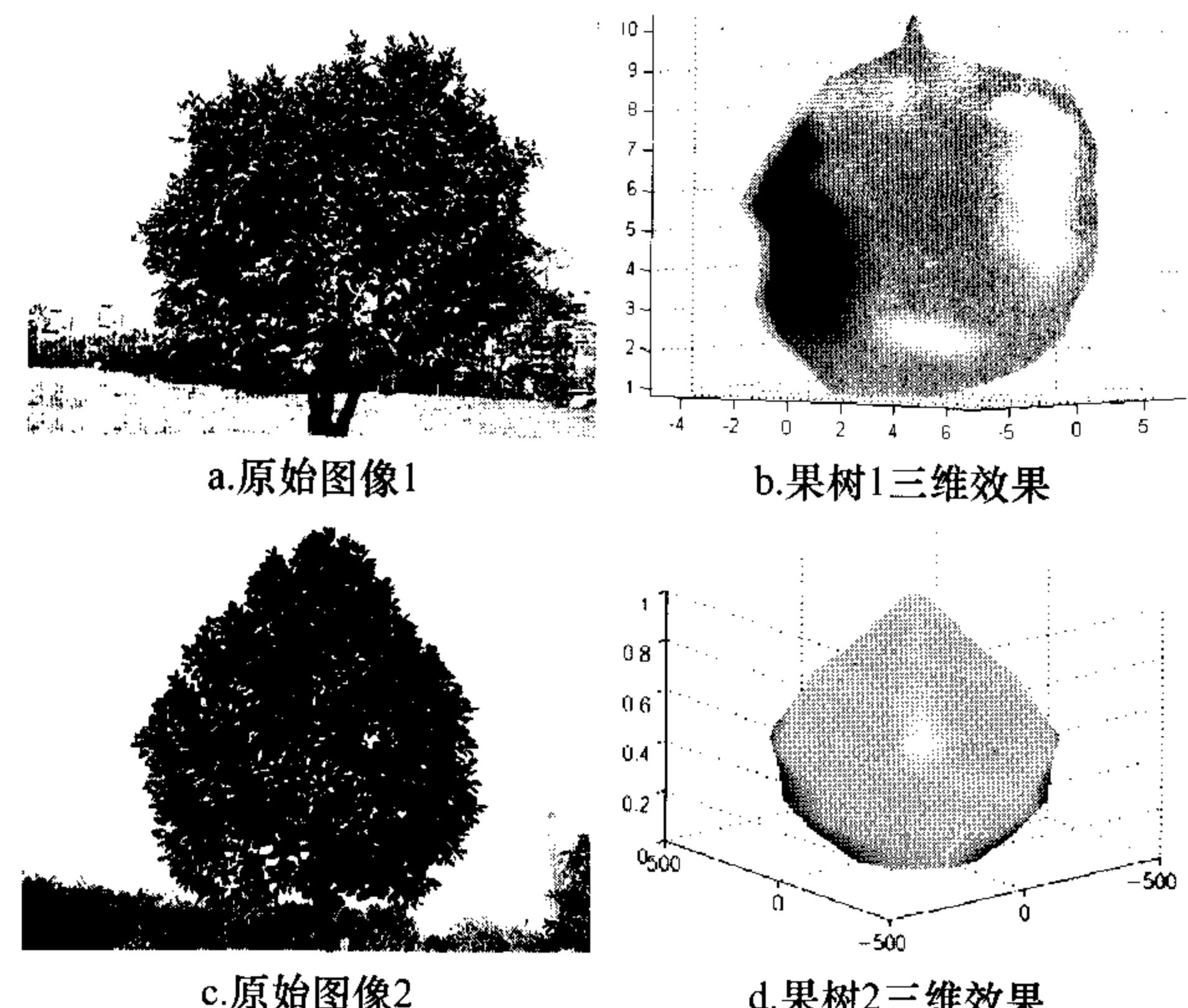


图3 根据单幅图像进行果树三维重建

Fig. 3 Three-dimensional profile surface reestablished with one image

2 由多幅图像进行果树三维外形重建

根据果树 1 个截面上的图像,可以得到此截面内果树外形轮廓的曲线轨迹,如果从不同角度进行拍摄,可得到多个截面上果树外形轮廓的曲线轨迹,将这些曲线按照合适的轴线,一定角度旋转拟合就可以得到果树的三维外形. 由此来推导果树外形轮廓曲面方程非常复杂,本文采用下面的方法.

首先假设对 1 棵果树从同一高度依次采集了 n 个图像,任 2 个相邻拍摄的图像之间的拍摄夹角为 $\theta_{j,j+1}$ ($j = 1, 2, \dots, n - 1$),如图 4 所示. 根据前面的推导,对第 j 幅图像,可以得到高度 z 处的果树轮廓 2 个边缘点 $a_j(x_{j右}, z)$ 和 $A_j(x_{j左}, z)$ 的坐标值,但这些坐标值是表示在该果树截面内的坐标系中的 $o_j x_j z_j$,即有

$$x_{j右} = b_{ji} \cdot z + d_{ji}, \quad (6)$$

$$x_{j左} = B_{ji} \cdot z + D_{ji}.$$

式中, $b_{ji} = -\frac{x_{j(j+1)} - x_{ji}}{h}$, $d_{ji} = -\frac{x_{j(j+1)} - x_{ji}}{h}ih + x_{ji}$,

$B_{ji} = -\frac{m_{j(i+1)} - m_{ji}}{h}$, $D_{ji} = -\frac{m_{j(i+1)} - m_{ji}}{h}ih + m_{ji}$, j 代表

图像拍摄序号 ($j = 1, 2, \dots, n$), i 代表每幅图像里数据采集点序号 ($i = 0, 1, 2, \dots, k - 1$).

建立固定右手坐标系 $OXYZ$,如图 4 所示. 原点 O 、 X 轴、 Z 轴分别与第 1 幅图像的原点 o_1 、 x_1 轴、 z_1 轴重合. 点 $a_j(x_{j右}, z)$ 和 $A_j(x_{j左}, z)$ 的坐标值转换到坐标系 $OXYZ$ 中分别记为 $a_j(x_{j右}, y_{j右}, z)$ 和 $A_j(x_{j左}, y_{j左}, z)$, 则

$$x_{j右} = \cos \theta_j \cdot x_{j右}, \quad y_{j右} = \sin \theta_j \cdot x_{j右}. \quad (7)$$

$$x_{j\text{左}} = \cos\beta_j \cdot x_{j\text{右}}, \quad y_{j\text{左}} = \sin\beta_j \cdot x_{j\text{右}}. \quad (8)$$

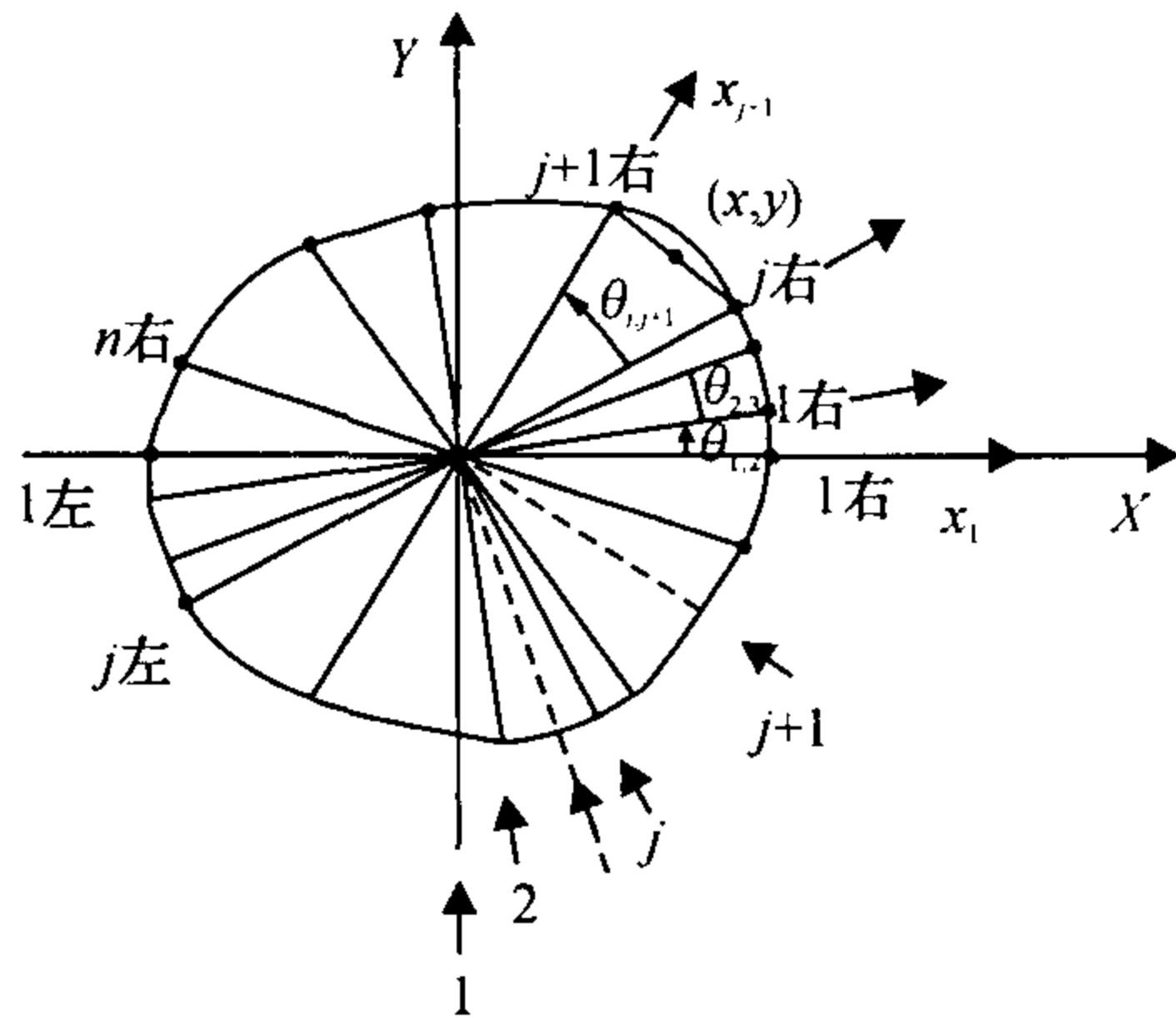


图4 根据多幅图像进行三维重建

Fig. 4 To establish the 3-dimensional surface with several images

式中: $\theta_j = \sum_{l=1}^{j-1} \theta_{l,l+1}$, 单位为 rad; $\beta_j = \pi + \theta_j$; $j = 1, 2, \dots, n$.

在高度坐标 z 处, 在第 j 幅图像的右边 $(x_{j\text{右}}, y_{j\text{右}})$ 点和第 $j+1$ 幅图像的右边 $(x_{(j+1)\text{右}}, y_{(j+1)\text{右}})$ 点之间进行插值, 可以用线性插值, 也可以用非线性插值, 非线性插值可以得到较高的精度但需要给定一些合适的中间约束点. 本文利用线性插值方法得到:

$$y = px + q, \quad (9)$$

式中, $p = \frac{y_{(j+1)\text{右}} - y_{j\text{右}}}{x_{(j+1)\text{右}} - x_{j\text{右}}}$, $q = y_{j\text{右}} - \frac{y_{(j+1)\text{右}} - y_{j\text{右}}}{x_{(j+1)\text{右}} - x_{j\text{右}}} x_{j\text{右}}$, $\min\{x_{j\text{右}}, x_{(j+1)\text{右}}\} \leq x \leq \max\{x_{j\text{右}}, x_{(j+1)\text{右}}\}$, $\min\{y_{j\text{右}}, y_{(j+1)\text{右}}\} \leq y \leq \max\{y_{j\text{右}}, y_{(j+1)\text{右}}\}$, $j = 1, 2, 3, \dots, n-1$.

同理, 对第 j 幅图像的左边 $(x_{j\text{左}}, y_{j\text{左}})$ 点和第 $j+1$ 幅图像的左边 $(x_{(j+1)\text{左}}, y_{(j+1)\text{左}})$ 点之间进行线性插值, 可得

$$y = p_1 x + q_1, \quad (10)$$

式中, $p_1 = \frac{y_{(j+1)\text{左}} - y_{j\text{左}}}{x_{(j+1)\text{左}} - x_{j\text{左}}}$, $q_1 = y_{j\text{左}} - \frac{y_{(j+1)\text{左}} - y_{j\text{左}}}{x_{(j+1)\text{左}} - x_{j\text{左}}} x_{j\text{左}}$, $\min\{x_{j\text{左}}, x_{(j+1)\text{左}}\} \leq x \leq \max\{x_{j\text{左}}, x_{(j+1)\text{左}}\}$, $\min\{y_{j\text{左}}, y_{(j+1)\text{左}}\} \leq y \leq \max\{y_{j\text{左}}, y_{(j+1)\text{左}}\}$, $j = 1, 2, 3, \dots, n-1$.

对第 n 幅图像的右边 $(x_{n\text{右}}, y_{n\text{右}})$ 点和第 1 幅图像的左边 $(x_{1\text{左}}, y_{1\text{左}})$ 点之间进行线性插值, 可得:

$$y = p_2 x + q_2, \quad (11)$$

式中, $p_2 = \frac{y_{1\text{左}} - y_{n\text{右}}}{x_{1\text{左}} - x_{n\text{右}}}$, $q_2 = y_{1\text{左}} - \frac{y_{1\text{左}} - y_{n\text{右}}}{x_{1\text{左}} - x_{n\text{右}}} x_{1\text{左}}$, $\min\{x_{n\text{右}}, x_{1\text{左}}\} \leq x \leq \max\{x_{n\text{右}}, x_{1\text{左}}\}$, $\min\{y_{n\text{右}}, y_{1\text{左}}\} \leq y \leq \max\{y_{n\text{右}}, y_{1\text{左}}\}$.

对第 n 幅图像的左边 $(x_{n\text{左}}, y_{n\text{左}})$ 点和第 1 幅图像的右边 $(x_{1\text{右}}, y_{1\text{右}})$ 点之间进行线性插值, 可得:

$$y = p_3 x + q_3, \quad (12)$$

式中, $p_3 = \frac{y_{1\text{右}} - y_{n\text{左}}}{x_{1\text{右}} - x_{n\text{左}}}$, $q_3 = y_{1\text{右}} = \frac{y_{1\text{右}} - y_{n\text{左}}}{x_{1\text{右}} - x_{n\text{左}}} x_{1\text{右}}$, $\min\{x_{n\text{左}}, x_{1\text{右}}\} \leq x \leq \max\{x_{n\text{左}}, x_{1\text{右}}\}$, $\min\{y_{n\text{左}}, y_{1\text{右}}\} \leq y \leq \max\{y_{n\text{左}}, y_{1\text{右}}\}$.

当 z 为变量时, 则方程(9)、(10)、(11)和(12)为由 n 幅图像建立的近似的果树三维外形轮廓分段曲面方程.

本文对图 5a 和 5c 所示的 2 棵果树沿同一方向每隔 15° 依次采集 1 幅图像, 分别检测出 12 幅图像的边缘轮廓点. 然后根据上述公式, 利用 MATLAB 软件对它们分别进行三维外形轮廓重建, 拟合后的曲面分别如图 5b 和 5d 所示. 可以看出, 利用多幅图像进行果树轮廓三维重建, 对于不对称的果树也可以得到比较符合实际的果树外轮廓曲面, 且图像越多越精确.

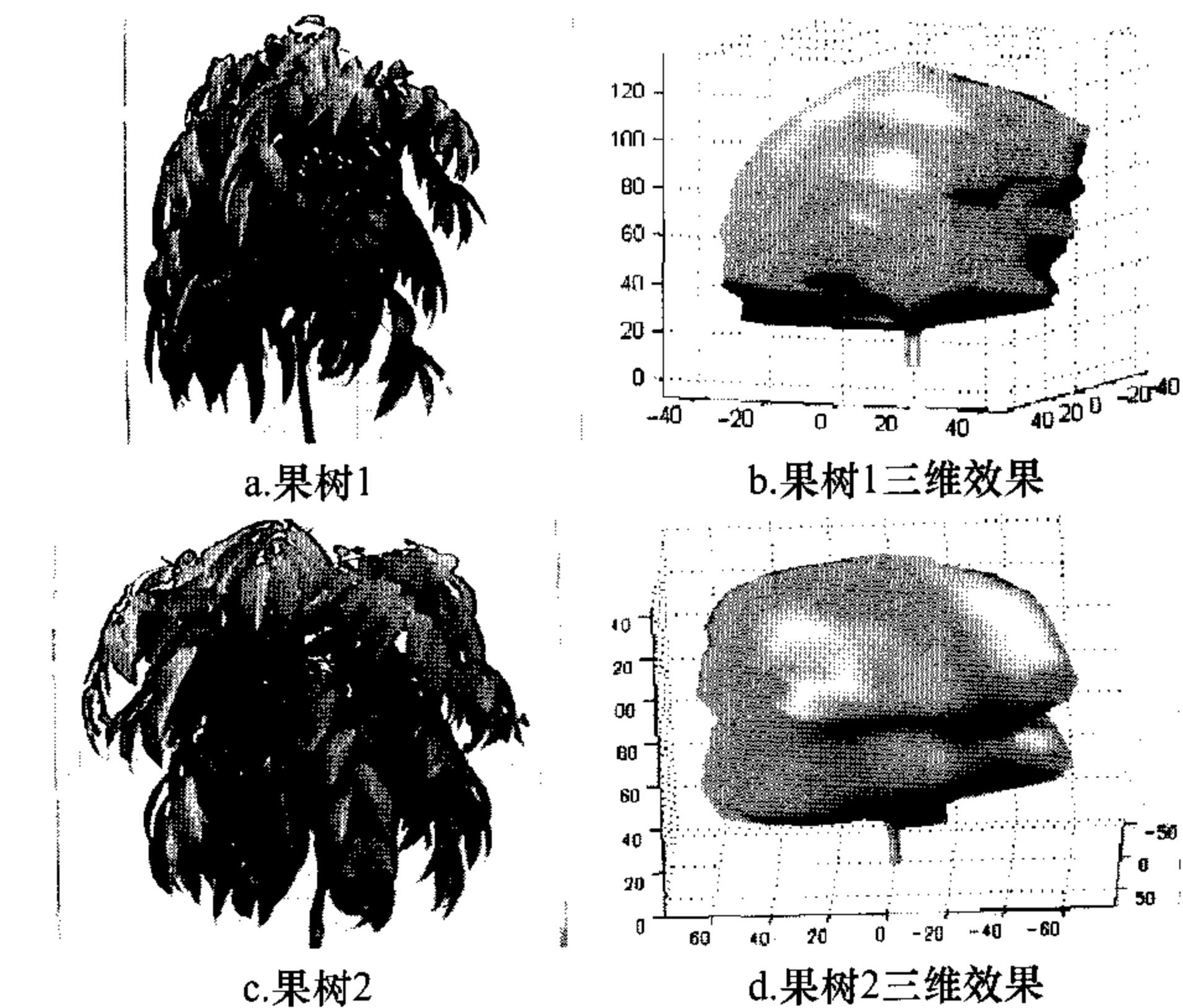


图5 依据12幅图像进行果树的三维重建

Fig. 5 Three-dimensional profile surface reestablished with several images

3 喷头的定位曲面

要得到喷头的定位曲面, 必须先得到果树的外形轮廓曲面. 图 6 为 1 棵果树仿形喷雾的示意图. 图中假设喷头始终垂直指向果树曲面, 则喷头所在曲面与果树轮廓曲面平行, 两曲面的距离为喷头到果树的喷雾距离, 设为固定值 a . 因为果树在一定的生长期, 大致的外部轮廓不会有太大的变化, 则根据建立的果树三维外形轮廓方程, 然后依据最佳的喷雾距离便可以方便得到喷头的定位曲面. 精确推导喷头的定位曲面是根据喷头总是垂直于果树的曲面且距离为 a . 这相当于求距离果树表面为 a 的一个果树外形轮廓曲面的外包络面的方程. 一种简单的方法是假设喷头到果树表面的水平距离为常数值

a ,即将图6中的 a 值看作是沿水平方向的.这种情况下,相当于将拍摄的每幅果树图像横截面的 x 轴坐标值增加,即从原来的 $x_{左}, x_{右}$ 分别变为 $x_{左}-a$ 和 $x_{右}+a$,然后再用前面提出的方法得到喷头的定位曲面.

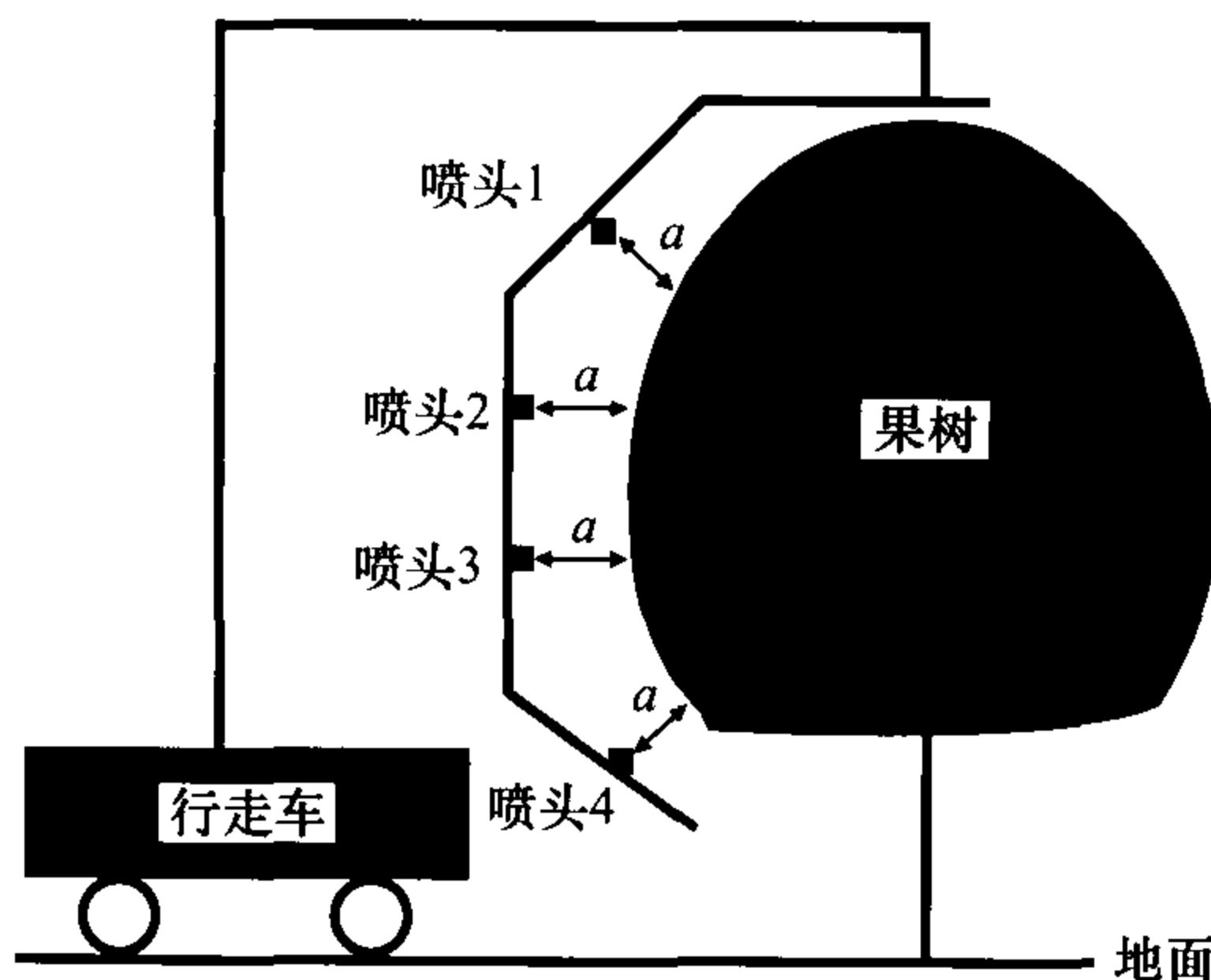


图6 喷雾喷头位置与果树表面关系示意图

Fig. 6 The fruit-tree's surface and the nozzles' positions

4 结论

在果树仿形喷雾时,如果能预先提供喷头的定位曲面无疑对于喷头的精确定位和适时控制是有利的.本文利用基于DSP的果树形态参数检测系统,对拍摄的单幅图像和多幅图像分别进行了果树的三维外形轮廓重建,依此可以得到喷头的精确定位曲面.

通过本文的研究发现,对于比较对称的果树,由1幅图像就可以得到精确的果树外形轮廓,而由多幅图像建立果树外形轮廓的方法适用于不对称的果树.

要精确建立果树的三维外形轮廓,需要从不同的角度拍摄大量的图像,且需要选择较好的拟合方法.本文在拍摄果树图像时是定焦距拍摄,如果不是定焦距拍摄时,每幅图像的像素所代表的实际距离就会变化,例如沿直线行走时对果树进行拍摄,这时需要多次的像素标定并进行拟合回归.本文建立果树外形轮廓时所用的图象个数较少,拟合方法为线性拟合,因此存在一定的误差.当然,也可以联合使用图象处理、超声波传感器、激光传感器和DGPS等手段来建立果树外形轮廓.通过建立果树的三维外形轮廓及喷头的定位曲面,并沿定位曲面对喷头进行控制,可以提高喷头的实时定位能力和定位精度,所以进行果树的三维外形轮廓重建具有一定的实际意义.

参考文献:

- [1] HOLOWNICK R, DORUCHWSKI G, GODYN A, et al. Variation of spray deposit and loss with air-jet directions applied in orchards [J]. *J Agric Eng Res*, 2000, 77: 129-136.
- [2] YANG C C, PRASHER S O, LANDRYA J A, et al. Development of a herbicide application map using artificial neural network and fuzzy logic [J]. *Agricultural Systems*, 2003, 76: 561-574.
- [3] 傅泽田,祁力均.国内外农药使用状况及解决农药超量使用问题的途径 [J]. *农业工程学报*, 1998, 14(2): 7-12.
- [4] 王贵恩. 果树仿形喷雾机理及其关键技术 [D]. 广州: 华南农业大学工程学院, 2003.
- [5] 王贵恩,洪添胜,李捷,等. 果树施药仿形喷雾的位置控制系统 [J]. *农业工程学报*, 2004, 20(3): 81-84.
- [6] 洪添胜,王贵恩,陈羽白,等. 果树施药仿行喷雾关键参数的模拟试验研究 [J]. *农业工程学报*, 2004, 20(4): 104-107.
- [7] 王万章,洪添胜,李捷,等. 果树农业精确喷雾技术 [J]. *农业工程学报*, 2004, 20(6): 98-101.
- [8] 傅泽田,祁力均,王俊红. 精准施药技术研究进展与对策 [J]. *农业机械学报*, 2007, 38(1): 189-192.
- [9] ZHENG J Q, ZHOU H P, XUN Y L, et al. Toward-target precision pesticide application and its system design [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2005, 21(11): 67-72.
- [10] MOLTO E, MARTIN B, GUTIERREZ A. Design and testing of an automatic machine for spraying at a constant distance from the tree canopy [J]. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 2000, 77(4): 379-384.
- [11] 孙宏祥. 红外光电探测器在静电对靶喷雾中的应用 [J]. *电子产品世界*, 2002(14): 34-35.
- [12] 王万章,洪添胜,陆永超,等. 基于超声波传感器和DGPS的果树径冠检测 [J]. *农业工程学报*, 2006, 22(8): 158-161.
- [13] MERON M, COHEN S, MELMAN G. Tree shape and volume measurement by light interception and aerial photogrammetry [J]. *Transactions of the ASAE*, 2000, 42(2): 475-481.
- [14] WALKATE P J, CROSS J V, RICHARDSON G M. Comparison of different spray volume deposition models using laser measurements of apple orchards [J]. *Biosystems Engineering*, 2002, 82(3): 253-267.
- [15] TUMBO S D, SALYANI M, WHITNEY J D. Investigation of laser, ultrasonic ranging sensors for measurements of citrus canopy volume [J]. *Applied Engineering in Agriculture*, 2002, 18(3): 367-372.
- [16] 张富贵,洪添胜,王万章,等. 数据融合技术在果树仿形喷雾中的应用 [J]. *农业工程学报*, 2006, 22(7): 119-122.
- [17] ZAMAN Q U, SALYANI M. Effects of foliage density and ground speed on ultrasonic measurement of citrus tree volume [J]. *Applied Engineering in Agriculture*, 2004, 20(2): 173-178.

【责任编辑 周志红】