

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.03.012

基于激光测距的三坐标联动割胶装置设计与试验

张春龙 李德程 张顺路 税勇 谭豫之 李伟
(中国农业大学工学院, 北京 100083)

摘要:为实现橡胶树自动化割胶,针对目前人工割胶劳动强度大、技术要求高、作业效率低等问题,设计了基于激光测距的三坐标联动割胶装置。自动化割胶装置由三坐标平台、振动割刀及激光测距传感器组成,其工作方式以人工割线及已割面作为参考,通过激光测距实现非接触式橡胶树干已割面仿形,从而保证割胶深度与人工割胶一致。通过控制三坐标平台联动,实现割刀按激光测定的空间曲线路径运动,割刀作直线往复动作切割树皮;通过矩形运动路径,实现参考割线起始点位置及倾斜度检测,在此基础上设计了沿割线倾斜方向对已割区域进行激光测距的运动路径,实现已割面深度信息的离散采集,整合参考割线位置信息和已割面深度信息,规划出新的切割路径;进行了深度信息激光测量点数优化,当目标路径沿割胶运动坐标系中 X 方向长度为80 mm时,进刀深度信息测量点数为17比较合理。采用单轴定位精度为 ± 0.05 mm的三坐标平台、测量精度为0.07 mm的激光测距传感器进行了割胶试验,并通过割胶深度和耗皮量评价实际割胶效果。试验结果表明,在耗皮量设定为1.0 mm、连续进行15次割胶操作的情况下,割胶深度控制良好,未出现伤树现象,耗皮量控制误差为5%,满足割胶要求。

关键词: 橡胶树; 割胶装置; 三坐标联动; 激光测距

中图分类号: S225.93 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2019)03-0121-07

Design and Test of Three-coordinate Linkage Natural Rubber Tapping Device Based on Laser Ranging

ZHANG Chunlong LI Decheng ZHANG Shunlu SHUI Yong TAN Yuzhi LI Wei
(College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: As manual rubber tapping is a labor-intensive work with high technical requirement and low work efficiency, it is important to realize automatic rubber tapping. A three-coordinate linkage rubber tapping device was designed and tested, and a motion path planning method based on short tapping cut was proposed. The tapping device was composed of three main modules, which were three-coordinate platform (positioning accuracy of single axis was ± 0.05 mm), a vibrating cutter and a laser ranging sensor (measurement accuracy was 0.07 mm). In order to control cutting depth, laser ranging was used to measure the distance between the knifepoint of vibrating cutter and the reference surface curved by skilled tapper. Based on the measurement, a spatial path was planned for three-coordinate platform simultaneously. During rubber tapping, vibrating knife cut off the bark of rubber tree continuously through the path by controlling three-coordinate platform. Therefore, the motion path planning method of the tapping device could be summarized as: detecting the start point and inclination of short tapping cut through a rectangle motion path; measuring the cutting depth through a discrete motion path; planning cutting path fused the information of tapping cut and cutting depth. Furthermore, the number of control points to approximate the short tapping cut was optimized. In the X direction of the tapping motion coordinate system, the length of short tapping cut was intercepted as 80 mm, and the reasonable number of control points was calculated as 17. Moreover, the tapping device was tested on real rubber tree trunk, and the working performance was evaluated by measuring cutting depth and bark consumption. Test results showed that the cutting depth was well controlled with no damage on rubber tree and the error of bark consumption was about 5%, which could meet the requirements of natural rubber tapping requirement.

Key words: rubber tree; rubber tapping device; three-coordinate linkage; laser ranging

0 引言

天然橡胶是一种不可或缺的工业原料和战略物资^[1],对橡胶树进行割胶操作是获取天然橡胶最主要的手段^[2]。割胶是生产橡胶的中心环节和关键技术环节,对劳动者的体能和技术要求较高,其劳动投入约占整个天然橡胶生产的 70%^[3]。近年来,劳动力成本迅速增长,天然橡胶价格持续低迷,加之割胶工作环境差,导致国内胶工短缺与老龄化现象严重,胶园弃管、弃割面积增大,天然橡胶供需矛盾进一步加剧^[4]。因此,实现自动化割胶对我国乃至世界天然橡胶产业具有重要意义。

20 世纪 70、80 年代,美国和马来西亚都对机械化割胶进行过研究,并分别研制了样机进行田间试验,但因当时社会需求不强以及相关技术不成熟而未能推广使用^[5-8]。近年来,世界各植胶区均投入大量人力物力研发自动化割胶设备。按其工作形式主要分为便携式电动割胶刀^[9-10]和固定式自动割胶机^[11-12]两种,需要同时对割胶路径、割胶深度、耗皮量进行控制^[13]。便携式割胶刀利于胶工手持操作,一台机器可针对多棵橡胶树作业,以电机代替人力能够提高割胶效率,但割胶时胶工的参与度依然很高。固定式割胶机需固定在橡胶树上,自动化程度高,结构复杂,维护成本也高,接触式仿形容易出现卡顿和伤树现象。

三坐标结构控制简单,精度易于保证,在对自由曲面的测量与加工中均有广泛应用^[14-16]。本文通过结合三坐标结构和激光测距传感器,先对橡胶树已割面进行测量,在获取已割面进刀深度信息的基础上,规划割刀运动路径,通过三坐标联动实现自动化割胶。同时,针对研制的割胶装置样机进行试验验证。

1 整机结构与工作原理

1.1 割胶要求

割胶是指采用特制的工具从橡胶树树干割口处切割树皮使胶乳从割口处流出以获取橡胶的操作^[17]。割胶后形成一段近似圆柱螺旋线的割线,割线倾斜度即为螺旋升角。阳刀割胶时,其倾斜度为 25°~30°,阴刀割胶时,其倾斜度为 40°~45°。阳刀割胶后的橡胶树如图 1 所示。

割胶操作过程中需保证沿树干径向的割胶深度和沿树干轴向的树皮消耗量(简称耗皮量)2 个指标在合适范围内。割胶深度是指割胶时割去树皮的内切口与形成层的距离,常规割胶时为 1.2~1.8 mm,如图 2a 所示。耗皮量是指每割一刀切割树皮的厚

度,不同的割胶制度对应不同厚度,一般为 1.0~2.1 mm,如图 2b 所示。

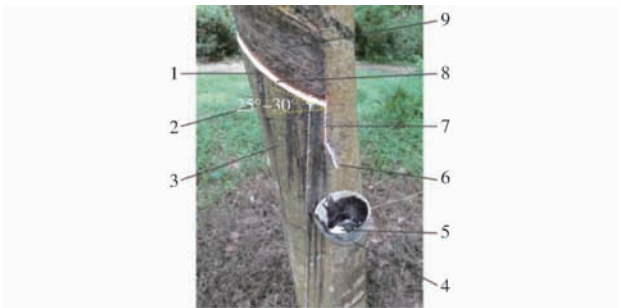


图 1 割胶后的橡胶树

Fig. 1 Rubber tree after tapping

1. 割线 2. 割线倾斜度 3. 待割面 4. 胶碗 5. 胶乳 6. 胶舌
7. 水线 8. 割口 9. 已割面

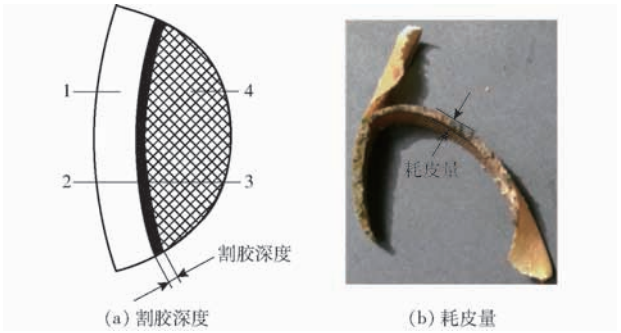


图 2 割胶深度与耗皮量

Fig. 2 Cutting depth and bark consumption

1. 割口 2. 内切口 3. 形成层 4. 木质部

1.2 整机结构

本文设计的割胶装置主要由三坐标平台、振动割刀及激光测距传感器组成,如图 3 所示。三坐标平台由 4 个直线模组搭建成龙门形式,并在各模组端点安装有限位开关,以设定各坐标轴原点。振动割刀通过安装板与 Y 轴丝杠滑块连接,激光测距传感器安装在安装板侧面。

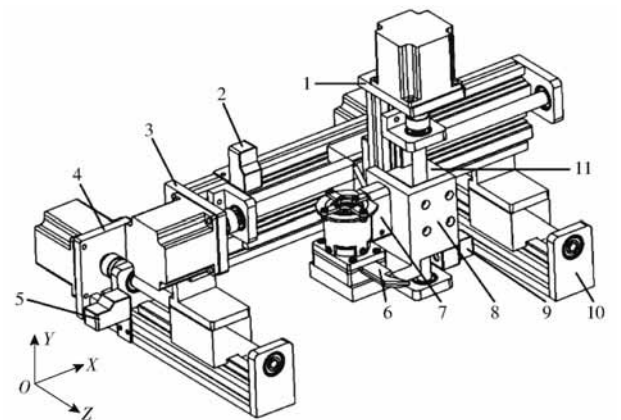


图 3 割胶装置结构图

Fig. 3 Structure diagram of rubber tapping device

1. Y 轴 2、5、9. X、Z、Y 限位开关 3. X 轴 4. Z₁ 轴 6. 振动割刀 7. 激光测距传感器 8. 安装板 10. Z₂ 轴 11. 丝杠滑块

设定割胶运动坐标系各轴与三坐标平台各轴平行且方向相同,振动割刀位于初始位置时(即各轴丝杠滑块位于限位开关处),刀尖为割胶运动坐标原点。

1.3 工作原理

参照人工割胶,自动化割胶需要实现两个基本功能:一是控制割刀(刀尖)沿不规则空间曲线运动,在对已割面仿形的基础上控制割胶深度和耗皮量,即控制割胶路径;二是在割刀运动过程中完成树皮的切割。本文设计的割胶装置在激光测距传感器获取进刀深度信息实现已割面仿形的基础上规划出割刀运动路径,再通过控制三坐标平台联动使割刀沿规划路径运动,实现控制割胶路径;通过振动割刀做直线往复切割动作实现树皮切割。

将刀尖做不规则空间曲线运动的路径定义为目标路径,当采用 1/2 树周割线长度割胶时,其形态近似一段圆柱螺旋曲线。近年来,随着乙烯利等刺激剂的使用,在提高割胶效率的同时,割线长度也呈缩短趋势^[18-19]。本文设计的割胶装置采用短割线制度,此时目标路径在割胶运动坐标系中的投影如图 4 所示。

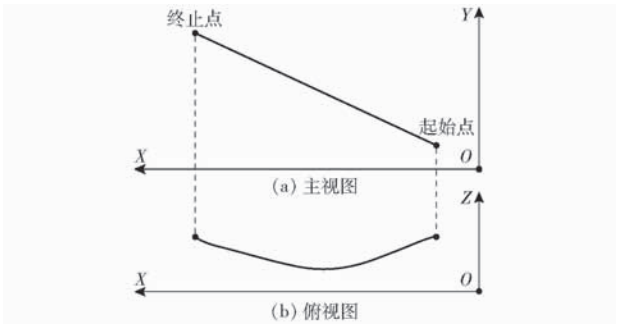


图 4 目标路径分析
Fig. 4 Analysis of target path

由图 4 可知,目标路径在 XOY 平面内的投影可近似为一条倾斜的线段,在 XOZ 平面内的投影为一条不规则的圆弧。因此,可将振动割刀的运动分解为 XOY 平面内的斜线运动和 XOZ 平面内的不规则圆弧曲线运动。

三坐标平台各直线模组均可由电机控制实现双向直线运动,通过合成 X 轴和 Y 轴运动可实现 XOY 平面内的斜线运动,合成 X 轴和 Z 轴运动可实现 XOZ 平面内的不规则圆弧曲线运动。因此,以 X 轴运动为基准的三轴联动可实现振动割刀的不规则空间曲线运动。

振动割刀切割树皮原理如图 5 所示。被切割之前,切屑通过径向结合面和轴向结合面与橡胶树联结,需要同时切割 2 个结合面才能将切屑从橡胶树分离。振动割刀主要工作件为上下相贴的上刀片和

下刀片,上刀片固定于割刀基座,下刀片通过电机带动偏心凸轮在其内框中转动而做直线往复动作。三坐标平台带动振动割刀沿目标路径运动时,上刀片轴向刃切割轴向结合面,下刀片径向刃切割径向结合面,从而完成树皮的切割。

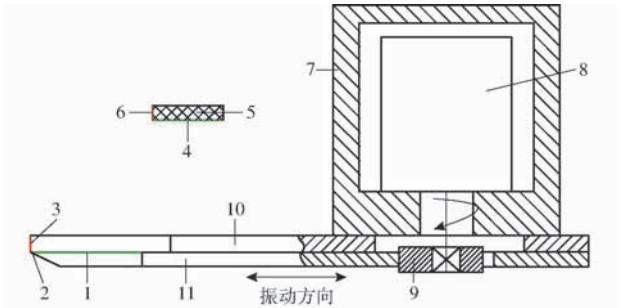


图 5 振动割刀切割原理图
Fig. 5 Cutting principle of vibrating knife

- 1. 径向刃 2. 刀尖 3. 轴向刃 4. 径向结合面 5. 切屑截面
- 6. 轴向结合面 7. 基座 8. 电机 9. 偏心凸轮 10. 上刀片
- 11. 下刀片

2 基于激光测距的割刀运动路径规划

割胶深度是割胶作业中最为关键的评价指标,而进刀深度信息测量精度直接决定了割胶装置对割胶深度的控制效果。激光测距技术在农业应用中具有非接触、高精度的优势^[20-23],其精度往往能够达到 0.1 mm 以上,完全满足割胶作业要求。为避免振动割刀工作时的高频振动对激光测距精度产生影响,本文采取先获取进刀深度信息,规划好割刀运动路径后,最后通过三坐标联动实现割胶动作。

割刀运动路径规划前,需由熟练胶工完成橡胶树开割作业并割胶至形成可参考的已割面。割刀运动路径规划分为 3 个阶段,分别是参考割线选取、深度信息测量和运动路径生成。

2.1 参考割线选取

由于割胶装置采用短割线方式割胶,因此需从人工割线中选取一段作为参照,选取的割线段即参考割线。目标路径的倾斜度及位置由参考割线决定,因此需确定参考割线的起始点(M)和终止点(N)在割胶运动坐标系 XOY 平面内的坐标,如图 6a 所示。

通过控制三坐标平台联动,使激光测距原点(初始位置为 P_0 ,坐标已知)按照图中绿色虚线所示路径运动,即 $P_0 \rightarrow B_0 \rightarrow B_1 \rightarrow B_2 \rightarrow B_3 \rightarrow P_0$,并持续获取测距原点到橡胶树表面相应点的距离。当照射在橡胶树表面的激光点经过 M 和 N 时,由于已割面和待割面在 Z 方向存在高度差 Δh ,因而测距模块测距值发生突变。利用测距值突变特性,可间接计算出 h_1 和 h_2 ,进而确定 M 和 N 在 XOY 平面内的坐标。

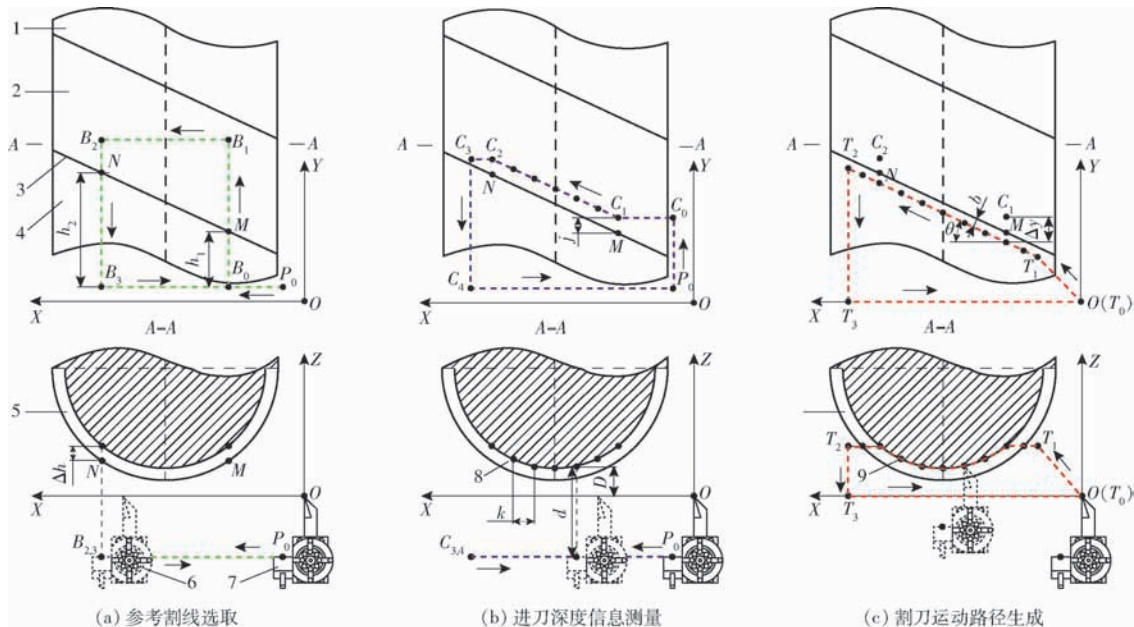


图 6 割刀运动路径规划
Fig. 6 Motion path planning of cutting knife

1. 橡胶树 2. 已割面 3. 割线 4. 待割面 5. 割口 6. 振动割刀 7. 激光测距传感器 8. 进刀深度信息测量点 9. 目标路径确定点

2.2 进刀深度信息激光测量

进刀深度信息的激光测量过程如图 6b 所示。通过控制三坐标平台联动,使激光测距原点按照图中蓝色虚线路径运动,即 $P_0 \rightarrow C_0 \rightarrow C_1 \rightarrow C_2 \rightarrow C_3 \rightarrow C_4 \rightarrow P_0$,其中 C_1 、 C_2 分别与 M 、 N 在 OY 方向的距离为 j (10 mm)。当照射在橡胶树表面的激光点经过 $C_1 \rightarrow C_2$ 段时,在 X 方向每间隔距离 k ,获取激光测距原点到进刀深度信息测量点之间的距离 d 。 d 减去刀尖到激光测距原点的距离即为进刀深度信息测量点在 Z 方向的坐标 D ,结合已确定的 X 、 Y 轴坐标值即得到测量点三维坐标。

2.3 割刀运动路径生成

割刀运动路径生成过程中,将已确定三维坐标的一系列进刀深度信息测量点沿 Y 轴向下平移距离 Δy ,计算式为

$$\Delta y = j + b / \cos \theta \tag{1}$$

其中 $j = 10 \text{ mm}$

式中 b ——耗皮量,mm

θ ——参考割线倾斜度, (°)

通过坐标变换,得到目标路径上一系列确定点,如图 6c 所示。以直线依次连接目标路径上确定点得到割刀运动规划路径,即红色虚线路径 $T_0 \rightarrow T_1 \rightarrow T_2 \rightarrow T_3 \rightarrow T_0$ 。

割胶装置割胶时,通过控制三坐标平台运动,使刀尖(初始位置为 T_0 ,与割胶运动坐标系原点 O 重合)按照规划路径运动,并在经过路径 $T_1 \rightarrow T_2$ 段时切割树皮,从而完成一次割胶操作。当割胶装置与橡胶树位置关系保持不变时,将本次割胶规划路径

$T_1 \rightarrow T_2$ 段向 Y 轴负方向平移距离 $\Delta y'$,计算式为

$$\Delta y' = b / \cos \theta \tag{2}$$

通过坐标变换后,可得到下一次割胶割刀运动路径。

3 深度信息激光测量点数优化

由于目标路径为曲线,依次连接目标路径确定点形成的折线(即规划路径)与目标路径之间存在进刀深度误差,误差取决于深度信息激光测量点数。随着测量点数的减少,进刀深度误差将会增大,难以达到割胶深度的精度要求;当测量点数增加时,进刀深度误差减小,但信息采集效率降低,割胶控制难度增加。因此,需对深度信息激光测量点数进行优化。

3.1 进刀深度误差分析

将橡胶树简化为标准圆柱体,在 XOZ 平面内,用直线替代目标路径相邻确定点间的圆弧,将在径向产生误差 e ,如图 7 所示。由图 7b 中几何关系可求得进刀深度误差为

$$e = r - \sqrt{r^2 - (l/2)^2} \tag{3}$$

式中 r ——橡胶树干截面半径,mm

l ——相邻确定点间弦长,mm

令 $e = f(r)$,并对 r 求导得

$$f'(r) = 1 - \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{l^2}{4r^2}}} < 0 \quad (l \in (0, 2r)) \tag{4}$$

由式(4)可知, $f'(r)$ 恒小于 0,且当 l 不变时,误差 e 随着 r 增大而减小。由于橡胶树干截面半径随树龄增加而增大,且橡胶树开割树围为 50 cm^[17],此

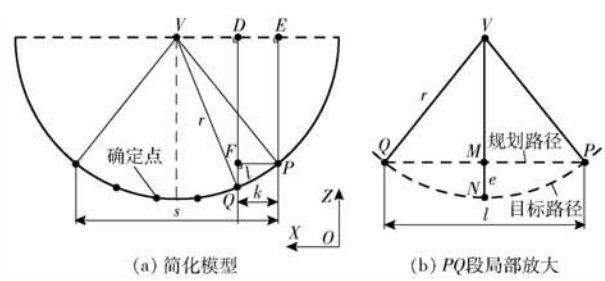


图7 进刀深度误差分析

Fig.7 Error analysis of cutting depth

时橡胶树半径处于最小值(约80 mm),对进刀深度误差影响最大。

同理,令 $e=f(l)$,并对 l 求得

$$f'(l) = \frac{1}{2\sqrt{\frac{4r^2}{l^2}-1}} > 0 \quad (l \in (0, 2r)) \quad (5)$$

由式(5)可知, $f'(l)$ 恒大于0,且当 r 不变时,误差 e 随着 l 增大而增大。

3.2 激光测量点数优化

当橡胶树干截面半径 r 和目标路径在 X 方向长度 s 不变时,深度信息激光测量点数直接决定 l ,而测量点数由相邻确定点在 X 方向间距 k 决定。

由前文深度信息采集过程可知,深度信息激光测量点在 X 方向等间距分布。因此,对目标路径整体而言,处于路径两端的相邻确定点间弦长最长,且此时弦长 l 随 k 增大而增大,如图7a所示。由几何关系可得

$$l^2 = \left[\sqrt{r^2 - \left(\frac{s}{2} - k\right)^2} - \sqrt{r^2 - \left(\frac{s}{2}\right)^2} \right]^2 + k^2 \quad (6)$$

将式(6)代入式(3)可得

$$\left[\sqrt{r^2 - \left(\frac{s}{2} - k\right)^2} - \sqrt{r^2 - \left(\frac{s}{2}\right)^2} \right]^2 + k^2 = 8er - 4e^2 \quad (7)$$

三坐标联动割胶装置作业时,目标路径在 X 方向长度 s 设定为80 mm,为求取此时最大进刀深度误差,将橡胶树半径 r 设定为80 mm,由式(7)得到不同测量点数下的进刀深度误差 e ,见表1。

表1 不同激光测量点数下的进刀深度误差

Tab.1 Cutting depth errors in different numbers of detection

k/mm	测量点数/个	进刀深度误差 e/mm
40	3	2.73
20	5	0.73
10	9	0.19
5	17	0.05

由表1可知,当橡胶树干截面半径和目标路径

在 X 方向长度不变时,进刀深度误差随测量点数增加而减小。当激光测量点数为17时($k=5\text{ mm}$),进刀深度误差为0.05 mm,该误差与选用的三坐标平台单轴定位精度($\pm 0.05\text{ mm}$)及激光测距传感器测量精度(0.07 mm)处于同一水平。因此,当 $s=80\text{ mm}$ 时,进刀深度信息激光测量点数设为17比较合理。

4 试验

4.1 试验材料及设备

为验证基于激光测距的割胶装置实际割胶效果,采用如图8所示的装置进行割胶试验。割胶装置样机 X 、 Y 、 Z 轴有效行程分别为180、100、50 mm,单轴直线模组定位精度为 $\pm 0.05\text{ mm}$,激光测距传感器测量精度为0.07 mm。试验所用橡胶树截取于海南省儋州市橡胶林(试验时为树干截取后第4天),树干总高度1450 mm,树干截面直径约170 mm,切割树皮为原生皮。

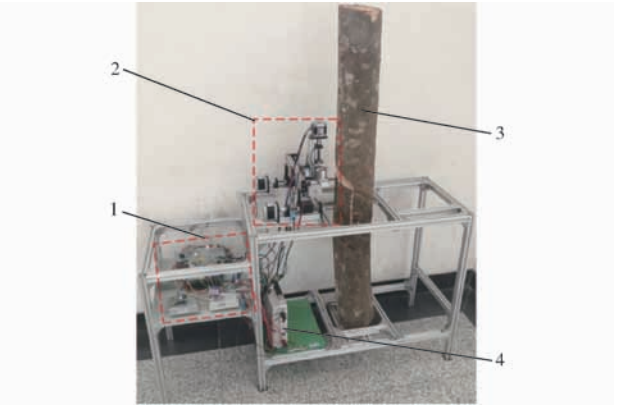


图8 试验装置

Fig.8 Experimental device

1. 控制系统 2. 割胶装置 3. 橡胶树 4. 电源

4.2 试验方法

试验时,采用阳刀割胶方法,设定人工割线倾斜度为 25° 。割刀运动路径规划过程中,目标路径在割胶运动坐标系 X 方向长度设为80 mm,深度信息测量点数设为17,耗皮量设为1.0 mm。连续进行了15次割胶操作,实际割胶效果如图9所示。

试验每执行5次割胶操作,测定相应割胶深度和实际耗皮量。割胶深度测量方法如图10所示,使用测皮器(割胶行业用于测量割胶深度的工具,测量精度为0.5 mm)沿着割线,每隔1 cm测量一次。耗皮量测量方法如图11所示,测量尺测量精度为0.5 mm(前端)。

4.3 试验结果分析

割胶深度测量结果如图12所示,前6个测量点割胶装置割胶深度与人工割胶深度基本一致,第7、

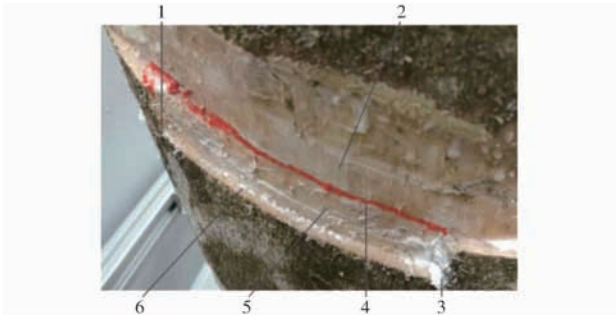


图9 试验效果

Fig.9 Experimental effect

1. 终止点 2. 人工已割面 3. 起始点 4. 分界线 5. 割胶装置已割面 6. 割口



图10 割胶深度测量

Fig.10 Measurement of cutting depths



图11 耗皮量测量

Fig.11 Measurement of bark consumption

8个测量点割胶装置割胶深度略大于人工割胶深度。总体而言,割胶装置割胶后形成的割胶深度基本控制在1.2~1.8 mm,超出部分小于0.5 mm(第7、8个点),未出现伤树现象,可以满足割胶要求。

实际耗皮量测量结果见表2,15次割胶操作平均耗皮量为0.95 mm,耗皮量控制误差为5%。

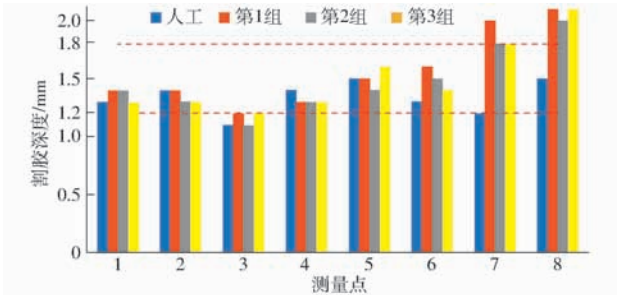


图12 割胶深度测量结果

Fig.12 Measurement results of cutting depths

表2 耗皮量测量结果

Tab.2 Measurement results of bark consumption

试验组号	割胶次数	总耗皮量/mm	平均耗皮量/mm
1	5	4.8	0.96
2	10	9.6	0.96
3	15	14.3	0.95

5 结论

(1)设计了基于激光测距的三坐标联动割胶装置。在人工割胶的基础上,选取一段割线及已割面作为参考,通过激光测距实现已割面非接触式测量仿形,通过控制三坐标平台联动实现割刀按激光测定的空间曲线路径运动,并通过割刀做直线往复动作切割树皮。

(2)提出了割刀运动路径规划方法,其中包括参考割线选取、深度信息激光测量和运动路径生成。并对深度信息激光测量点数进行了优化,当目标路径在割胶运动坐标系X方向长度为80 mm时,进刀深度信息测量点数设为17比较合理。

(3)采用单轴直线模组定位精度为±0.05 mm的三坐标平台、测量精度为0.07 mm的激光测距传感器进行了割胶试验。在设定耗皮量为1.0 mm时,连续进行15次割胶操作,割胶深度控制良好,未出现伤树现象,耗皮量控制误差为5%,可以满足割胶要求。

参 考 文 献

[1] 曾霞,郑服丛,黄茂芳,等.世界天然橡胶技术现状与展望[J].中国热带农业,2014(1):31-36.
ZENG Xia, ZHENG Fucong, HUANG Maofang, et al. Present situation and prospect of world natural rubber technology[J]. China Tropical Agriculture, 2014(1):31-36. (in Chinese)

[2] 闫喜强,廖宇兰.橡胶树割胶技术的探索[C]//第三届全国地方机械工程学会学术年会暨海峡两岸机械科技论坛,三亚,2013.
YAN Xiqiang, LIAO Yulan. Rubber tapping technology exploration[C]//National Institute of Mechanical Engineering Annual Academic Meeting, Sanya, 2013. (in Chinese)

[3] 杨文凤,黄学全,校现周.从割胶技术方面解决胶工短缺的探讨[J].中国热带农业,2015(5):7-10.
YANG Wenfeng, HUANG Xuequan, XIAO Xianzhou. Discussion on the solution of the shortage of rubber workers from the cutting technology[J]. China Tropical Agriculture, 2015(5):7-10. (in Chinese)

[4] 高宏华,黄云生,校现周,等.浅议机械化采割的紧迫性和可行性[J].中国热带农业,2015(4):10-13.

- GAO Honghua, HUANG Yunsheng, XIAO Xianzhou, et al. Urgency and feasibility of mechanized exploitation of rubber tree [J]. *China Tropical Agriculture*, 2015(4):10–13. (in Chinese)
- [5] SANDERS D W. Mechanized gum naval stores bark hack[J]. *Transactions of the ASAE*, 1974,17(5):874–881.
- [6] MCREYNOLDS R D, ROBERTS D R, PROVEAUX M T, et al. Rotary bark hack: 3986259[P]. 1976–10–19.
- [7] SHAW L N, MCREYNOLDS R D. Mechanization of gum naval stores production[J]. *Transactions of the ASAE*, 1985, 28(6):1766–1769.
- [8] ABRAHAM P D, DIN M S B. Development of mechanised tapping knife motoray mark II [C] // *International Rubber Conference*, Kuala Lumpur, 1986.
- [9] 郑勇, 张以山, 曹建华, 等. 4GXJ-I型电动胶刀采胶对割胶和产胶特性影响的研究[J]. *热带作物学报*, 2017, 38(9): 1725–1735.
- ZHENG Yong, ZHANG Yishan, CAO Jianhua, et al. The influence of the rubber tree tapped and latex production characteristics using type 4GXJ-I of portable cordless brushless tapping knife[J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2017, 38(9): 1725–1735. (in Chinese)
- [10] ARJUN R N, SOUMYA S J, VISHNU R S, et al. Semi automatic rubber tree tapping machine[C] // *International Conference on Robotics and Automation for Humanitarian Applications (RAHA)*, 2017:1–5.
- [11] 许振昆, 吴纪营, 张兴明. 一种割胶机及割胶方法: 105052675[P]. 2015–11–18.
- [12] MADHURAJ M N. Automated rubber tapping machine[D]. Belgaum: Visvesvaraya Technological University, 2017.
- [13] 汝绍锋, 李梓豪, 梁栋, 等. 天然橡胶树割胶技术的研究及进展[J]. *中国农机化学报*, 2018, 39(2):27–31.
- RU Shaofeng, LI Zihao, LIANG Dong, et al. Progress in the research of tapping technology of natural rubber tree[J]. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2018, 39(2):27–31. (in Chinese)
- [14] 吴福忠. 自由曲面三坐标加工等间距刀具路径规划[J]. *计算机集成制造系统*, 2007, 13(10):2064–2070.
- WU Fuzhong. Offset tool path planning for three-axis free form surface machining[J]. *Computer Integrated Manufacturing System*, 2007, 13(10):2064–2070. (in Chinese)
- [15] 何雪明, 李成刚, 胡于进, 等. 三坐标测量机测量路径的曲率连续自适应规划[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2007, 47(增刊2):1835–1839.
- HE Xueming, LI Chenggang, HU Yujin, et al. Continuous curvature adaptive planning of the measuring path for CMM[J]. *Journal of Tsinghua University (Science & Technology)*, 2007, 47(Supp.2):1835–1839. (in Chinese)
- [16] 翟力欣, 姬长英, 丁启朔, 等. 犁面前部土体表层位移场分布有限元分析[J]. *农业机械学报*, 2011, 42(10):45–50.
- ZHAI Lixin, JI Changying, DING Qishuo, et al. Analysis of distribution of displacement on soil surface in front of plow with FEM[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2011, 42(10):45–50. (in Chinese)
- [17] 橡胶树割胶技术规程 NY/T 1088—2006[S]. 北京:中国农业出版社, 2006.
- [18] 校现周, 罗世巧, 魏小弟. 橡胶树气刺割胶技术新进展[J]. *热带农业科学*, 2010, 30(8):68–70.
- XIAO Xianzhou, LUO Shiqiao, WEI Xiaodi. Advances of micro-cut tapping with Gas-stimulation in rubber trees[J]. *Chinese Journal of Tropical Agriculture*, 2010, 30(8): 68–70. (in Chinese)
- [19] 谢黎黎, 姜泽海, 黄志. 中国割胶制度的发展历程及解决胶工短缺建议[J]. *热带农业科学*, 2016, 36(11):15–19.
- XIE Lili, JIANG Zehai, HUANG Zhi. Development course of cubber tapping system in China and suggestions to solve the shortage of tapper[J]. *Chinese Journal of Tropical Agriculture*, 2016, 36(11): 15–19. (in Chinese)
- [20] FLANAGAN D C, HUANG C, NORTON L D, et al. Laser scanner for erosion plot measurements[J]. *Transactions of the ASAE*, 1995, 38(3):703–710.
- [21] 蔡祥, 孙宇瑞, 林剑辉, 等. 基于激光反射的土壤表面粗糙度测量装置设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2010, 41(1): 68–71.
- CAI Xiang, SUN Yurui, LIN Jianhui, et al. Design of a laser scanner for characterizing soil surface roughness[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2010, 41(1):68–71. (in Chinese)
- [22] 李建桥, 王洋, 党兆龙, 等. 松散地面上车辙表面的非接触式激光测量[J/OL]. *农业机械学报*, 2013, 44(7):264–268.
- LI Jianqiao, WANG Yang, DANG Zhaolong, et al. Non-contact laser measurement of rutting surface on loose ground[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2013, 44(7):264–268. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20130745&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.07.045. (in Chinese)
- [23] 程朋乐, 刘晋浩, 王典. 融合激光和机器视觉的立木胸径检测方法[J/OL]. *农业机械学报*, 2013, 44(11):271–275.
- CHENG Pengle, LIU Jinhao, WANG Dian. Measuring diameters at breast height using combination method of laser and machine vision[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2013, 44(11):271–275. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20131146&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.11.046. (in Chinese)