

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.01.010

# 果实采摘中果梗激光切割分析与实验\*

刘继展<sup>1</sup> 徐秀琼<sup>1</sup> 李萍萍<sup>2</sup>

(1. 江苏大学现代农业装备与技术教育部重点实验室, 镇江 212013; 2. 南京林业大学森林资源与环境学院, 南京 210037)

**摘要:** 为探讨机器人果实采摘中应用激光进行果梗切断的可行性,以黄瓜果梗为对象,利用基于30 W 光纤耦合半导体激光器构建的果梗切割实验平台,分别进行了激光穿透时间与果梗直径、激光束功率、离焦量、入射角的关系实验和果梗激光切割速度实验。实验发现,激光焦斑热功率密度 $0.75 \text{ W/mm}^2$ 即可实现果梗的穿透和切割,且对果梗直径变化、焦斑定位与入射角度误差具有良好的适应性。但半导体激光器在垂直照射、零离焦量、光输出功率14.94 W 条件下的最短切割时间达到23.73~28.13 s,应通过选择更高光束质量的光纤激光器等实现快速气化切割以满足实际作业的需要。

**关键词:** 黄瓜 果梗 采摘机器人 激光切割

**中图分类号:** TP242 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2014)01-0059-06

## 引言

任何果实的机器人采摘都以果、梗的分离为基础,并配以其他辅助动作而实现,果、梗分离技术一直是采摘机器人装备开发的重点。迄今所见的果、梗分离方式可归为腕部动作、机械剪切和热切割等。腕部动作通过夹持果实或果梗并施以腕部的弯、扭、拉等动作实现果与梗的分离,机械剪切则通过刀具剪断或切断果梗,以该两类方式为基础,国内外开发了型式各异的采摘末端装置<sup>[1-5]</sup>。但是,由于采摘机器人作业环境的高度非结构化,果实分布、果梗方位与尺寸呈现高度差异性和随机性,造成上述装置和方式的有效采摘成功率和末端装置的轻便性等与实际应用要求均存在相当大的距离。国内外研究者从未停止对果、梗分离方式的探索, Van Henten 和张凯良分别在其末端装置中应用电极和电热丝等热切割方式进行黄瓜、草莓的采摘<sup>[6-7]</sup>,但其适应性仍受到较大限制。

与上述方式相比,激光切割技术最大的特点在于通过高能激光束的聚焦实现对象的非接触式切割,近年来在金属和非金属无机材料加工中得到了广泛应用,在木材等有机材料的切割上也显示出了独特优势<sup>[8-10]</sup>。将激光应用于果梗的切割可以有效避免接触式切割所受到的空间限制和非结构化环境的影响,并有望摆脱目前所有果、梗分离装置必须针对特定果蔬品种和栽培模式而进行特殊设计的现

状,提供通用的果、梗分离装置和方法,促进采摘机器人技术的成熟和应用推广。

激光切割在农业及食品加工领域应用前景十分广阔,但目前仅见 Ferraz 等<sup>[11]</sup>对土豆的激光切割、肖红伟等<sup>[12]</sup>对板栗的激光划口方面开展了探索性研究。与上述应用相比,果梗的激光切割具有极大的特殊性,对其切割性能的实验及机理研究尚属空白。本文旨在以实验和理论分析结合,对果梗激光切割的可行性、特殊性、适应性和效率等进行分析和探讨,指出果梗激光切割技术开发的前景和未来研究重点。

## 1 果梗激光切割原理及其特殊性

### 1.1 果梗激光切割的原理

激光切割利用激光束能量的高度集中性,通过聚焦投射到对象表面时,被吸收并瞬时产生高温,发生不同效应而导致材料的移除,从而实现对对象的切割。与工业材料不同,生物组织的激光切割中存在光致热、热传导和组织响应的相继发生过程<sup>[13]</sup>,并由于激光波长、焦斑能量密度、照射时间、组织特性等的差异而产生不同的温度响应<sup>[14]</sup>,从而可能导致碳化、烧蚀、气化、热效应以及光蚀除、光致击穿等非热效应<sup>[11, 14-17]</sup>。激光光斑中心处的温升可近似表示为<sup>[16]</sup>

$$T = \frac{2 \times 10^3 A \rho_0}{\lambda} \sqrt{\frac{at}{\pi}} \quad (1)$$

收稿日期: 2013-01-16 修回日期: 2013-02-06

\* 国家自然科学基金资助项目(50905076)和江苏高校优势学科建设工程资助项目(PAPD)

作者简介: 刘继展,副研究员,博士,主要从事农业机器人研究,E-mail: liujizhan@163.com

式中  $T$ ——激光光斑中心处的温升, K  
 $A$ ——物料对激光的吸收率, %  
 $\rho_0$ ——焦斑热功率密度,  $W/mm^2$   
 $\lambda$ ——物料的导热系数,  $W/(m \cdot K)$   
 $a$ ——物料的热扩散率,  $mm^2/s$   
 $t$ ——照射时间, s

果梗激光切割装置由激光发生控制单元和安装于末端执行器上部的透镜切割系统组成,如图1所示,末端执行器夹持果实后,借助感知系统的辅助定位准确确定果梗的空间位置,直流电动机带动聚焦镜转动,使光束焦斑扫过果梗将之切断<sup>[18]</sup>。

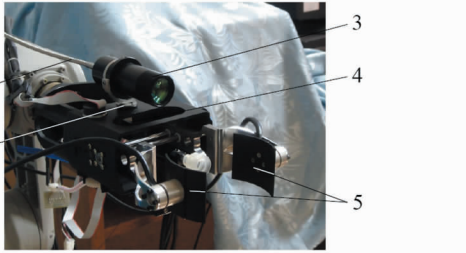


图1 采摘机器人末端执行器及其果梗激光切割装置  
 Fig.1 Laser cutting device on robotic harvesting end-effector  
 1. 透镜支撑转动机构 2. 光纤 3. 聚焦镜 4. 直流电动机  
 5. 手指

## 1.2 果梗激光切割的特殊性

果梗的组织构造复杂(图2),由外部韧皮部、初生皮层和内皮包裹,内部又含有木质部、内生韧皮部和髓等不同组织。果梗材质决定了其光-热响应参数具有特殊性,从而导致其与工业材料的激光切割效果的明显差异。

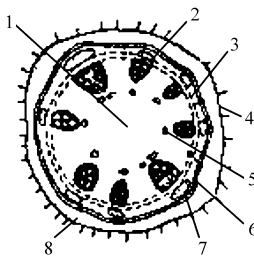


图2 番茄果梗的内部结构<sup>[19]</sup>

Fig.2 Internal structure of tomato peduncle

1. 髓 2. 木质部 3. 形成层 4. 外生韧皮部 5. 内生韧皮部  
 6. 内鞘 7. 内皮 8. 初生皮层

理论上,激光应用于果梗的切割将具有明显优势:

(1)干木材导热系数在  $0.1 \sim 0.2 W/(m \cdot K)$  左右,水的导热系数则为  $0.6 W/(m \cdot K)$ ,而金属材料的导热系数通常在  $40 \sim 400 W/(m \cdot K)$ ,由式(1)可以推断,鲜果梗充分利用激光能量使切口温度迅速上升的能力远远强于金属材料。但生长期中植株上鲜果梗的含水率高,如黄瓜果梗的平均含水率达到

90%以上(图3),含水率越高将会使激光切割效果越差。

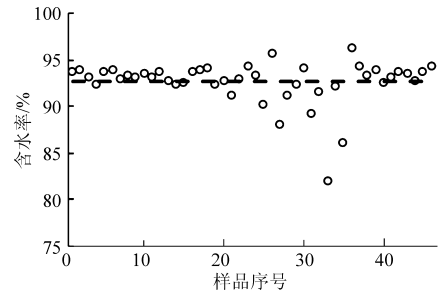


图3 生长期内鲜黄瓜果梗的含水率

Fig.3 Moisture content of fresh cucumber peduncle

(2)过强的镜面反射一直是影响金属板材激光切割效率的关键问题,金属材料表面对常用激光波长的反射率通常达到80%以上,导致目前激光加工设备功率多在kW级,甚至纯铜、纯铝等材料的激光加工至今仍是难题<sup>[20]</sup>。而大部分农业物料是由无数细小的内部界面组成,在光学上是各向异性的,当一束光照射到水果上时只有4%的入射能被镜面反射<sup>[21]</sup>,更为粗糙的果梗表面则能更加有效地吸收激光照射。

(3)除铅、铝等以外,多数金属材料的熔点都在  $1000^\circ C$  以上,如纯铁的熔点超过  $1500^\circ C$ ,气化点则达到  $2740^\circ C$ 。而木材的燃点通常为  $250 \sim 300^\circ C$ ,当温度超过约  $500^\circ C$  开始气化,可推知果梗产生热效应的响应温度远低于多数金属材料,有限的激光焦斑功率密度即可实现切割,有利于选择不同类型激光器并以较低功率实施果梗的激光切断作业。

同时,果梗的某些特性使其激光切割可能呈现特殊的规律:

(1)与工业加工中的大尺寸平板材对象不同,果梗表面为较小直径的近似柱面(图4)。目前激光照射的传热和温度场分析多基于半无限大表面的假设而得出<sup>[16,20,22-23]</sup>,而果梗的小作用面传热方式与温度场分布必然存在着很大的差异。同时,激光束聚焦在果梗的近似柱形表面时,如焦斑直径与果梗直径量级相近,则光束对果梗表面的入射角度差异将会显现(图4)。

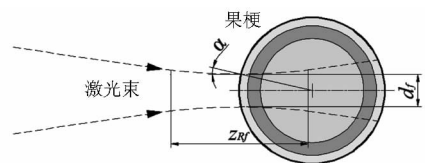


图4 激光束对果梗的照射示意图

Fig.4 Schematic diagram of pointing laser beam at peduncle

(2)果梗内部组织的多样性和非均匀性形成分层效应(图4),造成在果梗不同切割深度位置存在

激光照射效应和切割机理的差异性,从而可能使激光切割的效率、深度与切口质量等出现差异。

(3)由其不规则性和个体差异性所决定,任何针对农业物料的特性研究和装备开发都必须基于其统计学规律来完成。果梗个体的尺寸与特性差异对于激光切割的适应性提出了要求。

## 2 果梗激光穿透与切割实验

### 2.1 实验材料与设备

实验于2011年6月在江苏大学农业装备与技术实验室进行。为了实现精确的参数设定和测量,实验在如图5所示<sup>[24-25]</sup>实验平台上完成,激光系统采用吉泰GTDC0613T型光纤耦合半导体激光器(功率30W,中心波长980nm,阈值电流为0.55A)和大恒GCO-2901光纤输出聚焦镜组(倍率1:1,焦距49mm)。聚焦镜通过固定环安装于实验平台基座上,可通过松开紧定螺钉进行聚焦镜位置调整。实验中果梗粘贴于有机玻璃板上,两有机玻璃板固定于水平平动座上,平动座可由电动机通过螺旋传动驱动进行竖直移动,从而使焦斑扫过果梗实现切割。于江苏大学实验温室内手工采摘碧玉2号水果黄瓜鲜果梗并于当天完成实验。

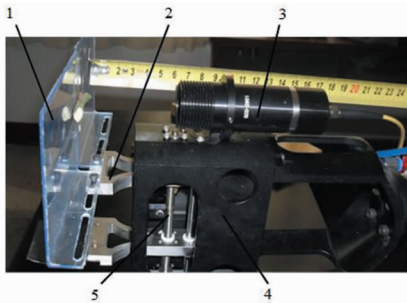


图5 果梗激光切割实验平台

Fig.5 Experimental platform of peduncle laser-cutting

1. 有机玻璃板 2. 平动座 3. 聚焦镜 4. 基座 5. 螺钉

### 2.2 实验方法

(1)测量记录各果梗直径,使聚焦镜与有机玻璃板平面保持垂直,按标准焦距调整聚焦镜与果梗表面距离,在激光器驱动电流1~12A范围内每隔0.5A进行20次穿透实验。

(2)使聚焦镜与有机玻璃板平面保持垂直,设定激光器驱动电流为6A,通过调整聚焦镜的轴向位置,在激光器离焦量(果梗表面偏离焦斑的距离)-7~7mm范围内每隔1mm进行20次穿透实验。

(3)设定激光器驱动电流为6A,标准焦距,通过调整有机玻璃板角度,在激光束入射角0~50°范围内每隔5°进行20次穿透实验。

(4)使聚焦镜与有机玻璃板平面保持垂直,设

定激光器驱动电流为6A,标准焦距,通过电动机转速设定,平动座移动速度从 $1.74 \times 10^{-2}$  mm/s开始每隔 $1.74 \times 10^{-2}$  mm/s进行20次果梗切割实验,直至移动速度增大至无法完成切断。

所有实验过程由Sony HDR-XR100E型数码摄像机实时记录,并通过逐帧播放(25帧/s)确定果梗穿透与切割时间。

## 3 结果与讨论

### 3.1 实验结果

#### 3.1.1 激光束功率与果梗穿透性能

在超过阈值电流后,半导体激光器的输出功率与驱动电流成正比,其关系为

$$P = 2.51(I - 0.55) + 1.26 \quad (2)$$

式中  $P$ ——激光输出功率,W

$I$ ——激光器驱动电流,A

实验过程中发现,当激光输出功率低于4.9W时,果梗不能被穿透。当激光输出功率超过4.9W后,随着激光束功率的增大,果梗穿透时间不断下降,且下降趋势随功率继续增大而变缓(图6)。

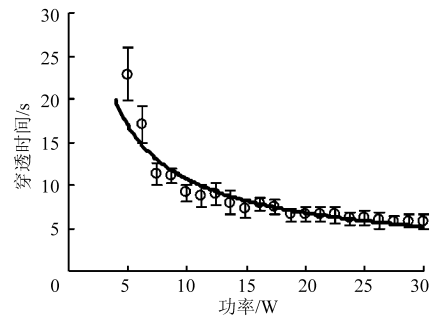


图6 穿透时间与激光输出功率关系

Fig.6 Drilling-through time vs laser power

#### 3.1.2 离焦量与果梗穿透性能

通常以激光束焦斑远离对象为正离焦,反之为负。实验中当离焦量超过2mm以后,果梗无法被穿透。离焦量在-7~2mm之间时,穿透时间与离焦量呈现二次函数关系,并在离焦量为-2mm时达到最短(图7)。

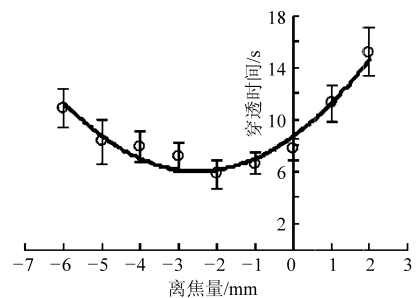


图7 穿透时间与离焦量关系

Fig.7 Drilling-through time vs defocusing distance

### 3.1.3 入射角与果梗穿透性能

当激光束垂直入射果梗时,穿透时间最短,并随着入射角的增大而明显增加,当入射角超过 $20^\circ$ 后无法穿透果梗(图8)。

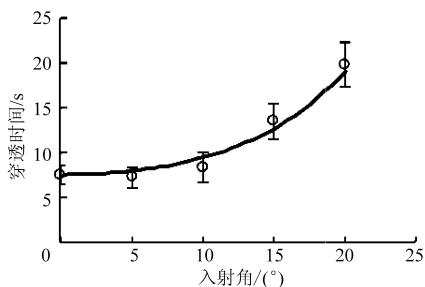


图8 穿透时间与入射角关系

Fig. 8 Drilling-through time vs incident angle

### 3.1.4 果梗直径与激光穿透/切割性能

黄瓜果梗直径在 $2.53 \sim 5.05$  mm之间,标准偏差 $0.47$  mm。激光穿透果梗所需时间与果梗直径成正比(图9)。

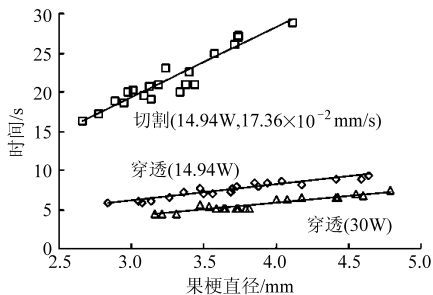


图9 激光穿透、切割时间与果梗直径关系

Fig. 9 Drilling-through & cutting-off time vs peduncle diameter

激光功率为 $14.94$  W时,当激光束切割速度超过 $17.36 \times 10^{-2}$  mm/s后,将无法切断果梗(图10)。



图10 未切断果梗的切口效果

Fig. 10 Kerf of a peduncle failed to be cut off

1. 切口 2. 果梗

## 3.2 分析与讨论

### 3.2.1 切割能力

激光焦斑的热功率密度计算式为

$$\rho_0 = 4k_d k_f k_a P / (\pi d_f^2) \quad (3)$$

式中  $k_d$ ——激光束传输效率系数,激光束由光纤接入聚焦镜,进而入射到果梗表面,传输损失极小, $k_d$ 取为 $0.98$

$k_f$ ——聚焦镜透光率,据产品样本取为 $0.97$

$k_a$ ——果梗对激光能量的吸收率,据植物材料光谱反射率特征,果梗对于 $980$  nm波长光束的反射率为 $44\%$  [2,26],其透光率接近零,故 $k_a$ 取为 $0.56$

$d_f$ ——焦斑直径,mm

利用 CCD 方法测量得本激光系统在 $49$  mm 焦距位置形成最小直径 $2.10$  mm 的圆形光斑(图11),据式(3)及已知参数,则在垂直照射和零离焦量条件下,焦斑热功率密度 $0.75$  W/mm<sup>2</sup>即可实现黄瓜果梗的穿透和切割,而金属材料激光加工所需焦斑热功率密度通常达到 $10^4 \sim 10^7$  W/mm<sup>2</sup>。实验证实果梗激光切割对能量集中度的要求极低,应归因于果梗表面对激光的高吸收率和低导热性使焦斑能量被充分利用,在果梗较低的热效应响应温度下易于产生切割。



图11 激光焦斑测量

Fig. 11 Measurement of laser focusing spot

### 3.2.2 规律的特殊性

实验发现,果梗穿透切割速度与各因素间的关系相对于金属板材加工体现出一定的差异性:

(1)激光穿透时间与果梗直径成正比关系,而金属板材的激光钻孔或切割中已广泛证实,随着厚度增加,钻孔或切割所用时间增加的速率明显加快 [27~28]。该差异应与果梗小直径柱面形状有关,果梗直径越大,光束在果梗表面的投射面积以及光束边界对果梗表面的入射角会有所减小(图4),从而使穿透时间-直径间非线性关系得到改善而接近线性。

(2)由图9可以得出,穿透和切割作用时间均与果梗直径成正比,同一功率下切割时间为穿透时间的 $3 \sim 4$ 倍。切割速度由保证不同直径果梗均能切透的时间所限定,而果梗直径又进而决定了一定速度完成切割的时间耗用,二者产生叠加效应使切割/穿透时间比随直径的增加而增大。这一规律既反映出其与面板材切割不同的形状/任务特征,又与个体差异对象处理的高置信度原则有关。

### 3.2.3 适应性

如图4所示,焦深是激光束保持能量集中度的轴向范围 [29]



$$z_{Rf} = 8K_f F^2 \quad (4)$$

式中  $z_{Rf}$ ——焦深, mm

$K_f$ ——光束参数积, mm·rad

$F$ ——聚焦镜焦距, 据产品样本  $F = 2$

激光束的焦深与焦斑直径的关系为<sup>[30]</sup>

$$K_f = \frac{d_f^2}{2z_{Rf}} \quad (5)$$

将式(5)代入式(4), 根据已知参数可得该激光系统的焦深为 8.4 mm。实验显示激光切割对果梗直径、焦斑定位精度和入射角度具有良好的适应性, 表明在果梗较低的热效应响应条件下, 激光束的焦深能够很好满足果梗切割的需要。

作为激光光束质量的评价指标, 特定激光系统的光束参数积  $K_f$  为定值, 因而据式(5), 焦深和焦斑直径互相影响。半导体激光器可以通过准直和调整焦距等方式继续减小焦斑直径, 但焦深将会相应减小, 从而对其适应性造成不利影响。

### 3.2.4 切割速度

在垂直照射和零离焦量条件下, 以光输出功率 30 W 完成果梗穿透的时间为 3.36 ~ 7.44 s, 以光输出功率 14.94 W 完成果梗切割的最短时间为 23.73 ~ 28.13 s。尽管据图 7 通过采用最佳负离焦量可以将切割效率提高 30% 以上, 但距离实际作业所需效率仍有相当大的距离。

实验发现, 由半导体激光器的光束质量所决定, 同样焦深条件下其焦斑直径远大于应用广泛的 CO<sub>2</sub>、Nd:YAG 等激光器, 造成焦斑热功率密度过低, 通过燃烧效应实现果梗切割(图 12)。

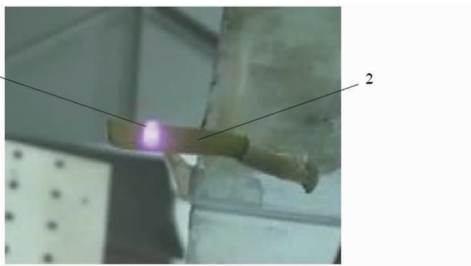


图 12 果梗激光切割的燃烧效应

Fig. 12 Burning effect of peduncle laser-cutting

1. 燃烧火焰 2. 果梗

在燃烧效应下, 果梗首先被干燥再燃烧, 鲜果梗 90% 以上的高含水率大大降低了切割的效率。生物组织的激光切割实验已经证实, 当焦斑热功率密度达到一定水平后将产生气化效应, 即内部组织的沸腾, 蒸汽冲破细胞壁, 使组织分裂并带走碎屑而完成切割<sup>[11, 14-15]</sup>。根据果蔬机器人采摘的作业灵活性需要, 如选择采用较高光束质量的光纤传导 Nd:YAG 激光器甚至更高光束质量的新型光纤激光器, 可在保持理想焦深的同时, 有效提高焦斑热功率密度  $10^2 \sim 10^3$  倍, 从而实现快速气化切割。

## 4 结论

(1) 果梗具有导热系数低、反射率低、热效应响应温度低等突出优势, 对激光束能量集中度的要求极低, 焦斑热功率密度  $0.75 \text{ W/mm}^2$  即可实现黄瓜果梗的非接触穿透和切割, 且对果梗直径变化、焦斑定位与入射角度误差具有良好的适应性, 各类低功率激光系统均易提供果梗激光切割所需的光斑直径和焦深。该结论充分证明了应用激光实现果梗切割的技术可行性和特殊优势, 亦为激光切割在各类植物材料中的应用提供了依据。

(2) 半导体激光器受到自身光束质量限制, 通过燃烧效应实现果梗切割, 在垂直照射、零离焦量、激光输出功率 14.94 W 条件下完成单次黄瓜果梗切割的最短时间为 23.73 ~ 28.13 s, 切割速度难以满足实际作业的需要。选择更高光束质量的光纤激光器等, 可提高焦斑热功率密度  $10^2 \sim 10^3$  倍从而实现快速气化切割, 达到实际应用的效率要求。拟通过进一步实验完成对上述结论的验证。

(3) 果梗的小直径近似柱面形状、内部组织的多样性和个体差异性而造成其激光切割表现出极大的特殊性, 现有半无限大加热微分方程等激光与材料相互作用模型无法适用和表述其切割作用机制和规律。应将果梗激光切割机理及建模作为该方向研究的重点课题, 为果梗激光切割技术的优化和在机器人收获中的结合应用提供理论支持。

## 参 考 文 献

- 1 Bulanon D M, Kataoka T. A fruit detection system and an end effector for robotic harvesting of fuji apples[J]. Agricultural Engineering International: CIGR Journal, 2010, 12(1): 203 ~ 210.
- 2 Kondo N, Ting K C. Robotics for plant production[J]. Artificial Intelligence Review, 1998, 12(1 ~ 3): 227 ~ 243.
- 3 张凯良, 杨丽, 王粮局, 等. 高架草莓采摘机器人设计与试验[J]. 农业机械学报, 2012, 43(9): 165 ~ 172. Zhang Kailiang, Yang Li, Wang Liangju, et al. Design and experiment of elevated substrate culture strawberry picking robot[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(9): 165 ~ 172. (in Chinese)
- 4 Lee B, Rosa U. Development of a canopy volume reduction technique for easy assessment and harvesting of valencia citrus fruits[J]. Transactions of the ASABE, 2006, 49(6): 1 695 ~ 1 703.
- 5 Arima S, Kondo N, Nakamura H. Development of robotic system for cucumber harvesting[J]. JARQ: Japan Agricultural Research

- Quarterly, 1996, 30(4): 233 ~ 238.
- 6 Van Henten EJ, Hemming J, Van Tuijl B, et al. An autonomous robot for harvesting cucumbers in greenhouses[J]. *Autonomous Robots*, 2002, 13(3): 241 ~ 258.
  - 7 张凯良, 杨丽, 张铁中. 草莓收获机器人末端执行器的设计[J]. *农机化研究*, 2009(4): 54 ~ 56, 60.  
Zhang Kailiang, Yang Li, Zhang Tiezhong. Design of an end-effector for strawberry harvesting robot[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2009(4): 54 ~ 56, 60. (in Chinese)
  - 8 Hernandez-Castaneda J C, Sezer H K, Li L. Dual gas jet-assisted fiber laser blind cutting of dry pine wood by statistical modeling [J]. *The International Journal of Advanced Manufacture Technology*, 2010, 50(1~4): 195 ~ 206.
  - 9 Barcikowski S, Koch G, Odermatt J. Characterisation and modification of the heat affected zone during laser material processing of wood and wood composites[J]. *Holz Als Roh Und Werkstoff*, 2006, 64(2): 94 ~ 103.
  - 10 Yusoff N, Ismail S R, Mamat A, et al. Selected Malaysian wood CO<sub>2</sub>-laser cutting parameters and cut quality[J]. *American Journal of Applied Sciences*, 2008, 5(8): 990 ~ 996.
  - 11 Ferraz A C, Mittal G S, Bilanski W K, et al. Mathematical modeling of laser based potato cutting and peeling[J]. *BioSystems*, 2007, 90(3): 602 ~ 613.
  - 12 肖红伟, 林海, 高振江, 等. 板栗激光划口机设计[J]. *农业机械学报*, 2010, 41(11): 138 ~ 141.  
Xiao Hongwei, Lin Hai, Gao Zhenjiang, et al. Design of chestnut shell-cutting machine using laser[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2010, 41(11): 138 ~ 141. (in Chinese)
  - 13 Dua R, Chakraborty S. A novel modeling and simulation technique of photo-thermal interactions between lasers and living biological tissues undergoing multiple changes in phase[J]. *Computers in Biology and Medicine*, 2005, 35(5): 447 ~ 462.
  - 14 刘普合, 刘国刚. 激光生物学作用机制[M]. 北京: 科学出版社, 1989.
  - 15 Niemz M H. 激光与生物组织的相互作用-原理及应用[M]. 张镇西, 等, 译. 北京: 科学出版社, 2005.
  - 16 路建, 倪晓武, 贺安之. 激光与材料相互作用物理学[M]. 北京: 机械工业出版社, 1996.
  - 17 王康孙. 眼科激光新技术[M]. 北京: 人民军医出版社, 2002.
  - 18 Liu J Z, Li Z G, Li P P, et al. Design of a laser stem-cutting device for harvesting robot[C]//IEEE International Conference on Automation and Logistics, 2008: 2 370 ~ 2 374.
  - 19 斋藤隆, 片岡節男. 番茄生理基础[M]. 王海庭, 等, 译. 上海: 上海科学技术出版社, 1981.
  - 20 郑启光. 激光先进制造技术[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2002.
  - 21 周祖镠. 农业物料学[M]. 北京: 农业出版社, 1994.
  - 22 陈庆华. 激光与材料相互作用及热场模拟[M]. 昆明: 云南科技出版社, 2001.
  - 23 王家金. 激光加工技术[M]. 北京: 中国计量出版社, 1992.
  - 24 Liu J Z, Hu Y, Xu X Q, et al. Feasibility and influencing factors of laser cutting of tomato peduncles for robotic harvesting[J]. *African Journal of Biotechnology*, 2011, 10(69): 15 552 ~ 15 563.
  - 25 徐秀琼. 采摘机器人果梗激光切割技术研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2011.  
Xu Xiuqiong. Study on the laser cutting technology of peduncles for harvesting robot[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2011. (in Chinese)
  - 26 Subrata IDM, Fujiura T, Yamada H, et al. 3-D vision sensor for cherry tomato harvesting robot[J]. *JARQ: Japan Agricultural Research Quarterly*, 1997, 31(4): 257 ~ 264.
  - 27 Basiev T T, Gavrilov A V, Osiko V V, et al. Laser drilling of superdeep micron holes in various materials with a programmable control of laser radiation parameters[J]. *Quantum Electronics*, 2007, 37(1): 99 ~ 102.
  - 28 邵丹, 胡兵, 郑启光. 激光先进制造技术与设备集成[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
  - 29 左铁钏. 制造用激光光束质量、传输质量与聚焦质量[M]. 北京: 科学出版社, 2008.

## Analysis and Experiment on Laser Cutting of Fruit Peduncles

Liu Jizhan<sup>1</sup> Xu Xiuqiong<sup>1</sup> Li Pingping<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of Modern Agricultural Equipment and Technology, Ministry of Education, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China 2. College of Forest Resources and Environment, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China)

**Abstract:** With the aim to verify the feasibility of cutting peduncles with laser beam in harvesting robot, several laser drilling and cutting experiments of cucumber peduncles were conducted with a 30 W fiber-coupled semiconductor laser in view of different factors. It was found that the laser focusing spot with heat power density of only 0.75 W/mm<sup>2</sup> could drill through a cucumber peduncle, and a successful drilling could be achieved even if diameter of peduncles, defocusing distance, or incident angle of laser beam changed within a large range. However, 23.73 ~ 28.13 s was necessary to cut a cucumber peduncle when pointing a 14.94 W semiconductor laser beam vertically without any defocus at the peduncle surface. It is not an ideal vaporizing but a burning process to cut peduncles attributed to the much worse beam quality of semiconductor laser, and it is believed that a Nd:YAG or fiber laser can achieve high speed cutting of peduncles, which can supply 10<sup>2</sup> ~ 10<sup>3</sup> times higher heat power density of focusing spot.

**Key words:** Cucumber Peduncle Harvesting robot Laser cutting