

# 基于编码点阵结构光的苹果果梗/花萼在线识别\*

张 驰<sup>1,2</sup> 陈立平<sup>1,2</sup> 黄文倩<sup>1,2</sup> 郭志明<sup>1</sup> 王庆艳<sup>1,2</sup>

(1. 北京农业智能装备技术研究中心, 北京 100097; 2. 国家农业智能装备工程技术研究中心, 北京 100097)

**摘要:** 为解决苹果机器视觉自动分级时果梗/花萼识别的难题, 提出一种基于位置变化的点阵结构光编码方法, 并用于苹果果梗/花萼的在线检测。通过分析投射在物体和参考平面上光斑的成像规律, 提出将光斑的位置变化作为编码基元; 在二元域中, 利用编码基元生成 M 阵列, 将其作为近红外点阵结构光的编码模式; 通过分析匹配后的差值矩阵, 识别果梗/花萼的位置。在线实验结果表明: 该方法可以有效地实现果梗/花萼的在线识别, 在满足实时性要求前提下, 平均识别正确率可达到 93.17%。

**关键词:** 苹果 自动分级 果梗/花萼辨识 点阵结构光 编码模式 近红外图像

**中图分类号:** TP391.42 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)07-0001-09

## On-line Identification of Apple Stem-end/Calyx Based on Coded Spot-array Structured Light

Zhang Chi<sup>1,2</sup> Chen Liping<sup>1,2</sup> Huang Wenqian<sup>1,2</sup> Guo Zhiming<sup>1</sup> Wang Qingyan<sup>1,2</sup>

(1. Beijing Research Center of Intelligent Equipment for Agriculture, Beijing 100097, China

2. National Research Center of Intelligent Equipment for Agriculture, Beijing 100097, China)

**Abstract:** Automatic detection of apple defects using a computer vision system is difficult due to the similarity between stem-end/calyx and true defects. Identification of stem-end/calyx is always a challenging project in automatic apple grading. This paper presents an encoding method based on position change for spot-array structured light, and the proposed method was used in distinguishing defects from stem-end/calyx of apple images in real time. By analyzing imaging process of the spots projected onto the object surface and reference plane, the position change of spot was chosen as coded primitive. Over the field of two elements, the M-array was generated by using the primitives, and was used as the coded pattern of near-infrared(NIR) spot-array structured light. Analysis of difference matrix made it possible to identify the location of stem-end/calyx regions after matching. The on-line experimental results demonstrated that the proposed method could realize the detection of stem-end/calyx efficiently, and achieve an average of 93.17% recognition accuracy with real-time performance. The results indicated that the proposed method was effective in identification of apple stem-end/calyx.

**Key words:** Apple Automatic sorting Stem-end/calyx identification Spot-array structured light Coded pattern Near-infrared image

### 引言

基于机器视觉的苹果自动分级生产线可以根据

苹果的缺陷、果径、果形以及着色率指标将苹果分为若干个等级, 从而实现从自然生长的农产品向标准化工业品的转化。苹果的果径、果形及着色率的自

收稿日期: 2014-09-23 修回日期: 2014-10-23

\* 国家自然科学基金资助项目(31301236)

作者简介: 张驰, 助理研究员, 博士, 主要从事基于机器视觉的农产品无损检测研究, E-mail: zhangchi@nercita.org.cn

通讯作者: 陈立平, 研究员, 主要从事农业信息技术与智能装备研究, E-mail: chenliping@iea.ac.cn

动化检测技术已经比较成熟并已应用于实际生产中。由于苹果图像中缺陷区域与果梗/花萼区域具有相似的灰度特征,导致在苹果自动分级过程中很难正确区分果梗/花萼与缺陷,这使得苹果果梗/花萼的正确识别成为苹果缺陷检测的前提与基础。如何准确快速地识别苹果果梗/花萼一直是果品分级领域未能有效解决的难题,同时也是研究人员最感兴趣的问题之一。

国内外学者提出了不同的识别方法。Troop 等<sup>[1]</sup>提出了一种特殊的机械传输装置,使苹果在传输过程中,其果梗/花萼不在相机的视场内。但该方法无法保证所有苹果在传输过程中,果梗/花萼都在相机视场之外。Zou 等<sup>[2]</sup>设计了3相机检测系统,通过逻辑判别的方法检测苹果的表面缺陷,由于没有进行果梗/花萼的识别,因此该方法无法指出缺陷的具体位置及面积大小。Crowe 等<sup>[3]</sup>利用一组近红外条纹结构光检测果梗/花萼的位置,由于未采用有效的结构光编码方法,识别正确率并不高。Zhu 等<sup>[4-5]</sup>通过 Shape from Shading 方法获取苹果表面三维信息,从而实现果梗/花萼的识别。但这种方法易受光照变化的影响,且该方法的第一类错误率较高。文献[6-10]通过先提取特征,再利用分类器判别的方法区分果梗/花萼与缺陷。但这类方法由于依赖于图像的尺寸,无法满足实时性的要求;另一方面对于不同品种的苹果,每次都要选择样本进行训练。彭彦昆等<sup>[11]</sup>通过分析连续采集的9幅图像来识别水果的表面缺陷。Cheng 等<sup>[12]</sup>提出同时使用近红外和中红外相机检测苹果的果梗/花萼区域。在这些检测方法中,文献[12]提出的方法得到领域内学者最为广泛的认可,但这种方法中使用的中红外相机造价昂贵,使得该方法的应用受到限制,无法在水果自动化分级设备中广泛应用。因此,研究可用于实际生产的果梗/花萼识别方法具有重要意义。

针对已有检测方法的不足,本文提出一种基于点阵近红外结构光的果梗/花萼在线识别方法。该方法将近红外光斑的位置偏移作为M阵列的编码基元,生成M阵列编码模式;设计近红外结构光光学系统,依据编码模式投射点阵结构光;将苹果表面结构光光斑与编码模式进行匹配,根据匹配后的差值矩阵,识别出苹果图像中果梗/花萼的位置。

## 1 苹果分级生产线

实验平台为自行研制的水果自动分级生产线,如图1所示。其中光箱内的图像采集系统由1台分辨率为1024像素×768像素的可见-近红外双CCD工业相机(型号为AD-080GE)、2套功率为72W

的条形复合光源(由可见光LED与波长为850nm的近红外LED组成)、近红外结构光投射器和工业控制计算机组成。AD-080GE型工业相机可以同时采集同一场景的可见光图像和近红外图像,通过其2个以太网接口将图像数据传送给计算机。条形复合光源带有亮度调节装置,可根据需要分别调节可见光光源与近红外光源的亮度。生产线选用黑色橡胶辊子,以利于苹果图像的背景分割。图像数据采集时,苹果在辊子上随机翻滚,通过触发信号控制相机同步采集视野内连续3个工位的彩色图像和近红外图像(图像分辨率均为660像素×220像素)。分级软件通过串口将分级结果发送给控制单元,控制单元控制电磁阀,在指定料斗卸料。

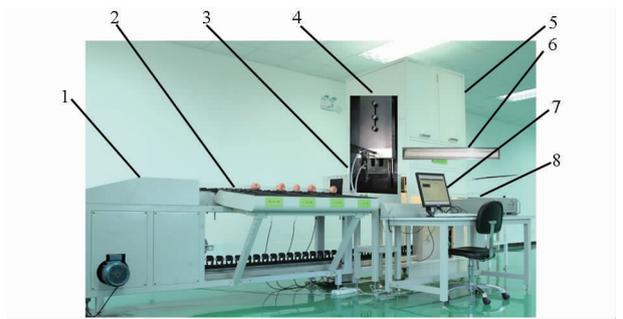


图1 基于机器视觉的水果分选生产线

Fig. 1 Product line for fruit sort based on machine vision

1. 分级生产线 2. 辊子 3. 双CCD工业相机 4. 近红外结构光投射器 5. 光箱 6. 复合LED光源 7. 分级软件 8. 工业控制计算机

近红外结构光投射器是果梗/花萼检测过程中的核心装置之一。为了保证在高速动态环境下能够投射出稳定的近红外编码点阵结构光,设计了结构光投射器的光学系统,其结构如图2所示。该投射器主要由投射器箱体、焦距为22mm的镜头、菲涅尔镜、PCB电路板(电路板上过孔按照编码模式排列)、聚光镜、反光镜、波长为850nm的近红外LED光源以及散热器组成。其中近红外LED光源的功率为60W,PCB电路板的过孔直径为0.38mm。850nm的LED光源发出的近红外光,穿过PCB板上按编码模式排列的过孔,通过镜头聚焦后投射在物体表面,形成近红外结构光光斑阵列,其中每个光

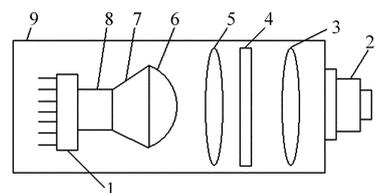


图2 近红外结构光投射器结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of NIR structured light projector

1. 散热器 2. 镜头 3、5. 菲涅尔镜 4. PCB电路板 6. 聚光镜 7. 反光镜 8. LED光源 9. 投射器箱体

斑的直径在 2.3 ~ 2.7 mm 范围内。

## 2 近红外点阵结构光编码方法

结构光三维视觉技术<sup>[13]</sup>是一种主动式光学测量技术,它通过三角法获得物体的深度信息。在基于结构光的三维测量过程中,编码方法<sup>[14-16]</sup>将直接影响到测量精度与测量效率。在苹果在线检测过程中,不仅要对果梗/花萼和缺陷进行检测,还要检测表面着色率。如果使用彩色结构光编码图像,一方面影响表面着色率的检测,另一方面会受到表面颜色的干扰。而近红外结构光可以避免这 2 个问题,因为近红外图像仅反映物体表面的性质,与表面颜色无关。图 3 为利用双 CCD 工业相机拍摄同一苹果获取的彩色图像和近红外图像。其中近红外图像中不存在可见光图像中的彩色纹理特征。因此,近红外图像不会受苹果表面颜色变化的影响,同时可见光图像中也不会出现近红外结构光。

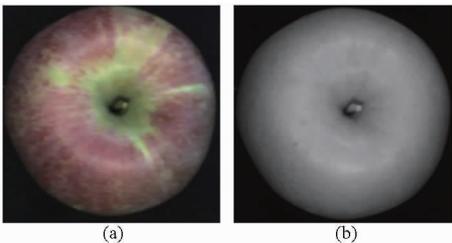


图 3 相机采集的彩色图像和近红外图像

Fig. 3 NIR image and color image captured by camera

(a) 彩色图像 (b) 近红外图像

近红外图像为灰度图像,无法利用颜色作为编码信息,同时普通投影设备无法投射出近红外编码图案,这使得在可见光波段常用的颜色、灰度变化以及特定图案这些常用的结构光编码手段无法直接用于近红外结构光。为克服利用近红外结构光进行编码的困难,提出一种不依赖于颜色、灰度变化以及图形符号的结构光编码基元。

### 2.1 编码基元的选取

对于一个待测类球形三维物体,投影在三维物体上点阵成像的几何结构关系,如图 4 所示。 $O_w X_w Y_w Z_w$  为世界坐标系,  $O_c X_c Y_c Z_c$  为相机坐标系,  $OXY$  为成像平面坐标系。点  $P$  和点  $C$  分别为投影装置与相机的物镜中心。 $PO_w$  为投影光轴,  $PR_1$ 、 $PR_2$  和  $PR_3$  为投影光线,每条投影光线与参考平面  $R$  的交点确定了每个投影光斑在参考平面上的位置。 $S_1$ 、 $S_2$  和  $S_3$  为投影光线与待测物体表面的交点,这些交点确定了每个投射光斑在类球形物体表面上的空间位置。 $CO_w$  为成像光轴,其与投影光轴  $PO_w$  夹角为  $\alpha$ 。参考平面  $R$  上的点  $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$  和曲面  $S$  上的点  $S_1$ 、 $S_2$ 、 $S_3$  的成像过程可以分为旋转变

换、平移变换和透视变换 3 个步骤。相应旋转矩阵

$$T_1 = \begin{bmatrix} \cos\alpha & 0 & \sin\alpha & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin\alpha & 0 & \cos\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

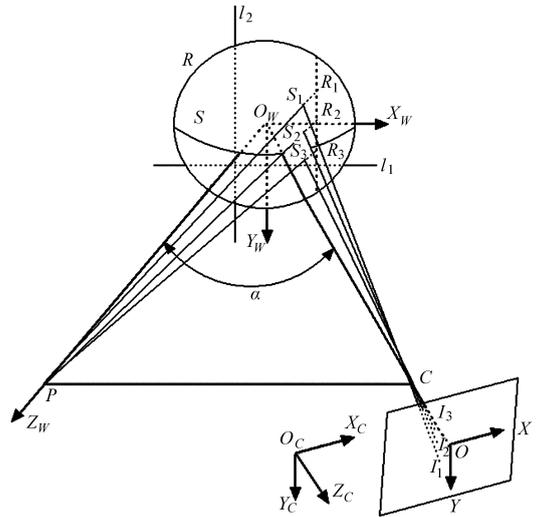


图 4 点阵结构光成像模型的几何结构关系图

Fig. 4 Geometric structure of spot-array structured light imaging model

平移矩阵为

$$T_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & L_c \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

透视变换矩阵为

$$T_3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1/f & 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中  $L_c$ ——相机物镜中心与世界坐标系中  $O_w$  点的距离

$f$ ——相机的焦距

空间坐标系中的点经过以上 3 个变换,在成像平面坐标系中成像,它的变换矩阵  $T$  可以表示为

$$T = T_3 T_2 T_1 \quad (4)$$

如果投影在参考平面上的点在世界坐标系下的齐次坐标为  $(x_0, y_0, z_0, 1)$ ,变换后在成像平面坐标系中的坐标为

$$\lambda \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \\ 1 \end{bmatrix} = T \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

其中  $z_0$  可被忽略,且参考平面  $R$  对应的  $z$  值为 0,则  $x_0$  和  $y_0$  分别为

$$\begin{cases} x_{i0} = \frac{x_0 f \cos \alpha}{L_c - x_0 \sin \alpha} \\ y_{i0} = \frac{y_0 f}{L_c - x_0 \sin \alpha} \end{cases} \quad (6)$$

如果投影在三维物体表面上的点在世界坐标系下的齐次坐标为  $(x_s, y_s, z_s, 1)$ , 变换后在成像平面坐标系中的坐标为

$$\lambda [x_l \ y_l \ z_l \ 1]^T = \mathbf{T} [x_s \ y_s \ z_s \ 1]^T \quad (7)$$

由于投影在三维物体表面上的点必在投影光线上, 则有

$$\begin{cases} \frac{z_s}{L_p} = \frac{x_0 - x_s}{x_0} \\ \frac{z_s}{L_p} = \frac{y_0 - y_s}{y_0} \end{cases} \quad (8)$$

式中  $L_p$ ——结构光投影装置的物镜中心与世界坐标系中  $O_w$  点的距离

根据式(7)、(8)可推导出点阵中的点在成像平面坐标系中  $X$  方向的坐标

$$x_l = \frac{L_p f (x_0 \cos \alpha + z_s \sin \alpha) - x_0 z_s f \cos \alpha}{L_c L_p + L_p z_s (\cos \alpha - x_0 \sin \alpha) + x_0 z_s \sin \alpha} \quad (9)$$

以及点阵中的点在成像平面坐标系中  $Y$  方向的坐标

$$y_l = \frac{(L_p - z_s) f y_0}{L_c L_p + L_p z_s (\cos \alpha - y_0 \sin \alpha) + y_0 z_s \sin \alpha} \quad (10)$$

通过结构光投射装置将点阵分别投射在参考平面和三维物体表面, 再通过工业相机获取 2 个点阵图像, 编码点阵中同一个点分别在物体表面和参考平面上所成的像构成了一个点对, 根据式(6)、(9)和(10)可以分别得到点对在成像平面坐标系  $X$  方向和  $Y$  方向上的位置变化为

$$\begin{cases} \delta_x = x_l - x_{l0} \\ \delta_y = y_l - y_{l0} \end{cases} \quad (11)$$

为确定结构光光斑在类球形物体表面的位置变化规律, 假设有结构光光斑均匀分布于参考平面  $R$  中的水平直线  $l_1$  上, 其中直线  $l_1$  的方程为  $y_w = 1$ , 通过对  $l_1$  上光斑在投射到物体表面前后位置变化的分析, 以确定光斑在  $Y_w$  方向上的变化规律; 同理, 假设有结构光光斑均匀分布于参考平面  $R$  中的垂直直线  $l_2$  上, 其中直线  $l_2$  的方程为  $x_w = -1$ , 通过对  $l_2$  上光斑在投射到物体表面前后位置变化的分析, 以确定光斑在  $X_w$  方向上的变化规律。图 4 所示测量系统在实际应用中, 由于只需对凹陷的果梗/花萼区域做定性分析, 而无需对凹陷的具体深度做定量分析, 所以无需对该测量系统进行标定。但为说明编码的基本原理, 通过相关的标定方法确定该三维测量系统相关参数, 并根据式(11)计算直线  $l_1$  上光

斑投射到物体表面后, 在成像坐标系  $Y$  方向上的位置变化, 其结果如图 5a 所示, 从图中可以看出, 光斑在  $Y$  方向上的相对位置变化较小。同理, 根据式(11)计算直线  $l_2$  上光斑投射到物体表面前后, 在成像坐标系  $X$  方向上的位置变化, 其结果如图 5b 所示, 从图中可以看出, 光斑在  $X$  方向的相对位置变化较大。在实际应用中, 在  $X$  方向上 2 个相邻的光斑, 它们在  $Y$  方向上的位置变化最大为 1 个像素, 而在果梗/花萼处  $Y$  方向上 2 个相邻的光斑, 它们在  $X$  方向上的位置变化可达到 10 个像素, 因此可以利用这种位置变化的差异进行编码, 从而克服在红外灰度图像中无法利用颜色和图形符号进行编码的缺点。

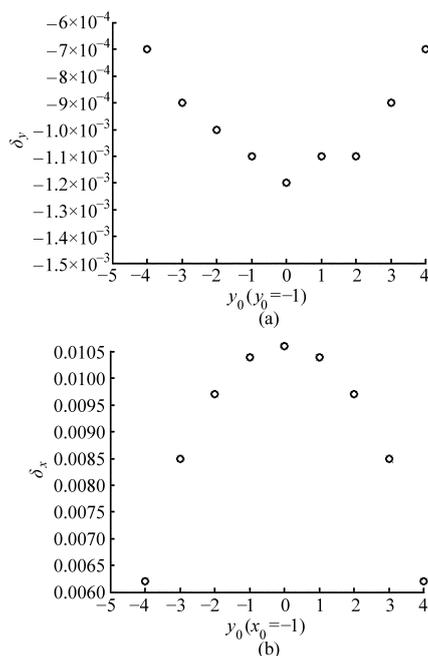


图 5 点对在成像坐标系  $X$  方向和  $Y$  方向上的变化

Fig. 5 Position's changes of point pairs along  $X$  axis and  $Y$  axis of imaging coordinate system

(a)  $Y$  方向上的变化 (b)  $X$  方向上的变化

根据以上分析, 考虑在变化较小的  $Y$  方向上利用点的相对位置变化进行编码。编码需要的 0 和 1 基元可以用点相对于虚拟网格线的位置变化来表示。为便于相机安装, 将成像平面坐标系旋转  $90^\circ$ , 以水平方向上光斑相对位置变化作为基元, 在图 6a 中, 点位于垂直虚拟网格线的右侧表示基元 0; 而在

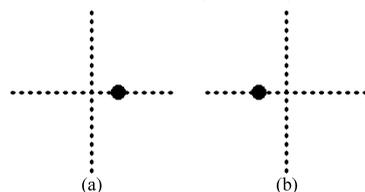


图 6 基元 0 和 1

Fig. 6 Primitives 0 and 1

(a) 基元 0 (b) 基元 1

图6b中,点位于垂直虚拟网格线的左侧表示基元1。利用以上基元进行编码,就能够生成二维编码阵列。要保证有效地解码,光斑相对于虚拟网格线的位移至少要小于2条相邻虚拟网格线间距的1/4,而在本研究的结构光光学系统中,光斑相对于虚拟网格线的位移为网格线间距的1/5。

## 2.2 基于2元8级M阵列的编码方法

在 $q$ 元 $n_1 \times n_2$ 的阵列 $B$ 中,任意一个窗口尺寸为 $k_1 \times k_2$ 的子阵列在阵列 $B$ 中仅出现一次,该阵列 $B$ 被称为M阵列。对于任意一个特定窗口尺寸的子阵列而言,其在M阵列中具有唯一性,这种唯一性被称为M阵列的窗口特性<sup>[17]</sup>。窗口特性决定了M阵列中的任意一个特定窗口尺寸的子阵列都与M阵列中的一个绝对位置相对应,因此M阵列被广泛用于结构光图案的编码。二维的M阵列可由一维的M序列生成,M阵列与M序列是伪随机编码的2种表现形式。下面给出由M序列生成M阵列的方法。

$q$ 元 $m$ 级M序列是一个周期为 $n = q^m - 1$ 的循环序列,序列中的每一个元素取自 $q$ 个基元,基元可以是不同的颜色及符号。当 $q = 2, m = 8$ 时的2元8级M序列对应的本原多项式为

$$h(x) = x^8 + x^4 + x^3 + x^2 \quad (12)$$

该本原多项式对应的8阶线性反馈移位寄存器反馈路径可以表示为

$$a_{i+8} = a_{i+4} + a_{i+3} + a_{i+2} \quad (13)$$

对任意一个组非全零的初始值 $a_0 \sim a_7$ ,根据模 $2 (q=2)$ 的运算规则,可以唯一地确定一个M序列。根据伪随机序列的窗口特性,一个宽度为 $8 (m=8)$ 的窗口沿着该序列移动的过程中,出现在窗口中的子序列都是唯一的。M阵列可用一个 $n = n_1 \times n_2$ 的二维伪随机矩阵表示,而该阵列可由一个含有素数个基元或素数的 $q$ 次幂个基元组成的M序列 $a_0, a_1, \dots, a_{n-1}$ 按照一定的规则生成,且满足

$$B = \begin{bmatrix} b_{0,0} & b_{0,1} & \cdots & b_{0,n_2-1} \\ b_{1,0} & b_{1,1} & \cdots & b_{1,n_2-1} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ b_{n_1-1,0} & b_{n_1-1,1} & \cdots & b_{n_1-1,n_2-1} \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$\text{其中} \begin{cases} a_0 = b_{0,0} \\ a_1 = b_{1,1} \\ a_2 = b_{2,2} \\ \vdots \\ a_i = b_{i,i} \end{cases} \begin{cases} n = q^m - 1 = q^{k_1 k_2 - 1} \\ n_1 = q^{k_1 - 1} \\ n_2 = n/n_1 \\ i \equiv i_1 \pmod{n_1} \quad (0 \leq i_1 < n_1) \\ i \equiv i_2 \pmod{n_2} \quad (0 \leq i_2 < n_2) \\ 0 \leq i < n = n_1 \times n_2 \end{cases}$$

由式(14),如果令 $q = 2$ ,已生成的M序列 $a_0, a_1, \dots, a_{n-1}$ 的周期为 $n = 2^m - 1 = 2^{k_1 \times k_2} - 1$ ,其中 $k_1, k_2$ 称为M阵列的窗口参数,其中 $n_1 = 2^{k_1} - 1, n_2 = n/n_1$ ,且 $n_1$ 与 $n_2$ 互素。

将图6所示的2种位置变化作为M阵列的基元符号,令M阵列的窗口参数 $k_1 = 4, k_2 = 2$ ,按照上述生成算法生成2元8级M阵列,如图7所示,该图为近红外点阵结构光编码模式示意图。在实际应用中,图像背景颜色为黑色,黑色圆盘表示近红外光斑,由于采用单色光投影模式,因此不易受光照及苹果表面颜色变化的影响,提高了解码过程的鲁棒性。对于一个已知的M阵列,选定其中任意一个子阵列窗口,根据窗口具有的唯一性,都可以确定该子阵列窗口在M阵列中的位置,从而实现投射在物体表面的结构光图像与投射在参考平面上的编码图像的匹配。

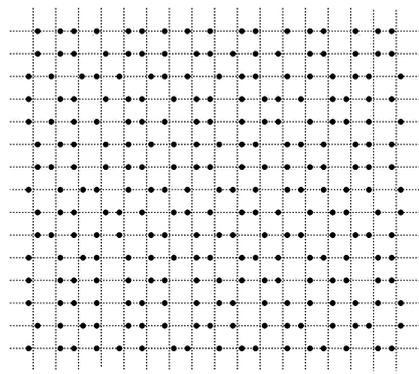


图7 15 × 17 M阵列编码模式

Fig. 7 15 × 17 M-array encoding pattern

M阵列中任意2个子窗口间汉明距离的增加,可以减小由于物体表面法线不连续造成的解码误差。计算图7所示M阵列编码模式中任意2个 $4 \times 2$ 子窗口的汉明距离,其结果如图8所示, $H(x)$ 表示任意2个子窗口的汉明距离为 $x$ 时的百分比。平均汉明距离为 $\bar{H}(x) = 4.03$ ,其中97%的汉明距离大于1,因此该种编码方法具有较强的抗干扰性。

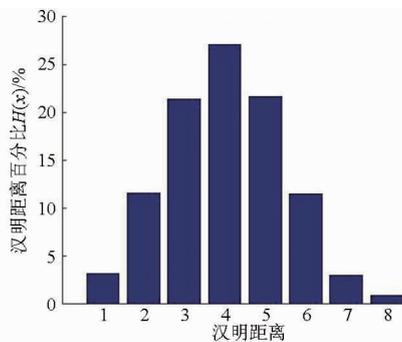


图8 汉明距离分布

Fig. 8 Hamming distance

### 3 苹果果梗/花萼检测方法

针对果梗/花萼为苹果表面凹陷区域这一特征,通过结构光投射器将近红外点阵结构光编码图案投射到苹果表面,使用工业相机拍摄投射后的编码图像,利用投射到苹果表面前后图像中点阵光斑的匹配关系,确定苹果图像中果梗/花萼区域的位置信息。在实际生产当中,需要在果品分选生产线在线运行的过程中识别果梗/花萼的位置,因此对检测方法的实时性提出了较高的要求。本方法将对整张苹果图像的分析,转换为通过对图像中若干离散结构光光斑的分析来识别果梗/花萼的位置,从而大大降低计算时间,满足实际生产中高速在线检测的要求。该方法的具体步骤如下:

(1) 计算投射在参考平面上的结构光光斑中心的坐标值。固定一个参考平面框架,将基于位置编码的近红外点阵结构光投射到参考平面上,利用工业相机获取投射在参考平面上的近红外点阵图像。将获取的图像进行阈值分割,去除背景,得到背景分割后的光斑图像。如果能够确定每个光斑中心的位置,就可以将光斑中心的位置作为光斑的位置,从而通过对结构光投射到苹果表面前后光斑中心位置变化的分析,检测苹果图像中的果梗/花萼区域。为了精确提取光斑中心的位置信息,对于图像中的每个光斑区域  $\psi_u (u = 1, 2, \dots, U)$ , 其中  $U$  为  $M$  阵列对应的结构光光斑总数,可以通过计算每个光斑区域一阶矩的方法,求取每个光斑的质心,将质心的位置作为光斑的中心。但为了提高计算速度,在满足精度要求的前提下,选取光斑区域  $\psi_u$  中灰度最大的像素点作为光斑中心位置,即  $g = \max_{\psi_u} f(i, j)$ , 其中  $f(i, j)$  为图像  $(i, j)$  点的灰度,  $g$  为光斑区域  $\psi_u$  中的最大灰度,其在图像中的位置  $(i, j)$  即为该光斑的中心位置  $(x_u, y_u)$ 。如果  $\psi_u$  中灰度为  $g$  的像素点不唯一,则在灰度为  $g$  的像素点中,选择在  $j$  值最小的条件下,  $i$  值最小的点作为光斑的中心,即

$$\begin{cases} y_u = \min(j) | g = f(i, j) \\ x_u = \min(i) | y_u \end{cases} \quad (15)$$

由近红外点阵投射器投射到参考平面上的光斑为  $15 \times 17$  的  $M$  阵列,通过上述方法求取点阵中每个光斑中心的位置  $(x_u, y_u)$ ,由所有光斑中心对应的  $x_u$  值组成的矩阵用  $R$  表示

$$R = \begin{bmatrix} x_1 & x_2 & \cdots & x_{n_2} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x_{n_2 \cdot (n_1 - 1)} & x_{n_2 \cdot (n_1 - 1) + 1} & \cdots & x_{n_1 \cdot n_2} \end{bmatrix} \quad (16)$$

式中  $n_1 = 15, n_2 = 17$ 。

(2) 计算投射在苹果表面的结构光光斑中心的坐标值。在苹果在线检测过程中,近红外点阵结构光投射到苹果表面,通过工业相机获取苹果图像,再对图像进行阈值分割,提取投射在苹果表面的光斑图像,利用步骤(1)中的方法求取每个光斑的中心位置  $(x_{u'}, y_{u'})$ ,  $u' = 1, 2, \dots, U'$ , 其中  $U'$  为苹果表面的光斑总数。对于每一行光斑,依据每个光斑中心位置坐标  $y_{u'}$ ,在垂直方向上确定每一列的光斑,距离相近的 2 列光斑中间存在一条垂直的虚拟网格线,这 2 列光斑构成图 7 所示的  $M$  阵列中的一列。

由苹果表面所有光斑中心对应的  $x_{u'}$  值组成的矩阵用  $S'$  表示

$$S' = \begin{bmatrix} x_1 & x_2 & \cdots & x_{n_2} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x_{n_2 \cdot (n_1 - 1)} & x_{n_2 \cdot (n_1 - 1) + 1} & \cdots & x_{n_1 \cdot n_2} \end{bmatrix} \quad (17)$$

式中,  $n_1'$  表示苹果表面光斑数在垂直方向的最大值,  $n_2'$  表示苹果表面光斑数在水平方向的最大值,  $S'_{ij}$  表示位于苹果表面第  $i$  行、第  $j$  列的光斑在垂直方向上的坐标,对于未投射到苹果表面的光斑,令其中心坐标值  $S'_{ij} = 0$ 。由于矩阵  $S'$  中每个坐标值对应的光斑在图 7 所示的  $M$  阵列中的位置未知,如果能够确定  $S'$  中每个坐标值对应的光斑在  $M$  阵列中的位置,即可对光斑投射在苹果表面前后的位置进行匹配,从而识别出苹果图像中果梗/花萼的位置。

(3) 计算投射在苹果表面结构光光斑在  $M$  阵列编码模式中的相应位置。为了确定矩阵  $S'$  中每个元素对应的光斑在  $M$  阵列中的位置,在  $S'$  中选择连续  $4 \times 2$  子阵列窗口,根据窗口的唯一性,求取该子阵列窗口的码字,然后搜索该窗口在图 7 所示  $M$  阵列中的位置,从而进一步确定  $S'$  中其他坐标值对应的光斑在  $M$  阵列中的位置。从计算结果可以看出,  $S'$  中每个坐标值对应的光斑相当于在  $M$  阵列垂直和水平方向上分别平移了  $\varepsilon_x$  和  $\varepsilon_y$  个位置。

用  $S$  表示苹果在线检测过程中,点阵结构光光斑中心在  $X$  方向上的坐标值组成的矩阵,由于未投射到苹果表面的光斑与最终的检测无关,所以令非  $S'$  矩阵范围内的光斑中心坐标值为零,则有

$$S_{ij} = \begin{cases} S'_{i - \varepsilon_x, j - \varepsilon_y} & (\text{光斑在 } B' \text{ 内}; 1 \leq i - \varepsilon_x \leq n_1', \\ & 1 \leq j - \varepsilon_y \leq n_2') \\ 0 & (\text{其他}) \end{cases} \quad (18)$$

式中  $S_{ij}$ ——位于结构光阵列第  $i$  行、第  $j$  列的光斑在  $X$  方向上的坐标值

$B'$ ——矩阵  $S'$  中所有元素对应的光斑在  $M$  阵列中构成的一个子阵列

(4) 识别苹果图像中的果梗/花萼区域。令矩阵  $S$  与矩阵  $R$  之间的差值矩阵为  $D$ 。计算  $D$  中各元素

$$D_{ij} = \begin{cases} S_{ij} - R_{ij} & (S_{ij} \neq 0) \\ 0 & (S_{ij} = 0) \end{cases} \quad (19)$$

式中,  $D_{ij}$  为位于编码结构光阵列第  $i$  行、第  $j$  列的光斑先后投射到参考平面和苹果表面, 光斑中心在垂直方向上的坐标之差。它用于分析点阵结构光投射在苹果表面前后, 光斑中心位置变化的情况。

苹果在线检测过程中, 苹果会随着辊子的滚动任意翻滚, 从而导致苹果的果梗/花萼区域可能会位于苹果图像中的任意位置。这里分 2 种情况进行讨论: ①果梗/花萼区域位于苹果图像相对靠近边缘的位置。②果梗/花萼区域位于苹果图像相对靠近中心的位置。对于第 1 种情况, 如果果梗/花萼位于苹果图像的边缘处, 则会导致苹果表面果梗/花萼处与非果梗/花萼处的深度信息发生明显的变化。判断差值矩阵  $D$  的每行元素中, 位于苹果边缘处相邻 2 个非零元素的差值  $e$  是否大于阈值  $T_{\text{edge}}$ , 如果大于阈值, 则认为果梗/花萼区域位于边缘, 将 2 个相邻光斑的位置标记为果梗/花萼区域, 阈值  $T_{\text{edge}}$  的数值通过实验获得。对于第 2 种情况, 计算差值矩阵  $D$  中每行非零元素的二阶差分  $\Delta_{D(i,j)}^2$ , 如果计算结果存在负值, 则认为相应位置存在凹陷的果梗/花萼区域。步骤(4)的算法流程图如图 9 所示。

上述为利用点阵近红外结构光在线检测苹果果梗/花萼的具体步骤。在实际检测过程中, 步骤(1) 仅需执行一次, 在获取点阵光斑在参考平面上的位置矩阵  $R$  后, 将  $R$  中的坐标值保存到文档中。之后每次在线检测之前, 打开该文档, 直接读取数据并给矩阵  $R$  赋值, 再执行步骤(2)~(4) 进行果梗/花萼区域的在线检测。

#### 4 实验结果与分析

为了验证检测方法的准确性, 以富士苹果为测试对象, 在图 1 所示果品分级自动化生产线上进行在线实验, 分选速度为 5 个/s。所有富士苹果均购于北京市农贸市场, 共计 300 个样本, 直径在 68 ~ 96 mm 范围内, 其中表面带有缺陷的苹果 35 个, 缺陷包括虫伤、刺伤和腐烂 3 种类型。系统检测软件由 C++ 语言编写, 工业控制计算机的 CPU 为英特尔双核 2.8 GHz, 内存为 2 GB。所有实验均为在线条件下完成, 并在线保存实验结果。

将 300 个苹果作为实验对象, 每个苹果进行两次在线检测实验, 共获得 600 个实验结果。实验结果可分为 3 类: 果梗/花萼区域位于苹果图像的边缘区域; 果梗/花萼位于苹果图像的中心区域; 以及苹果图像中不包含果梗/花萼。如图 10~12 所示。在

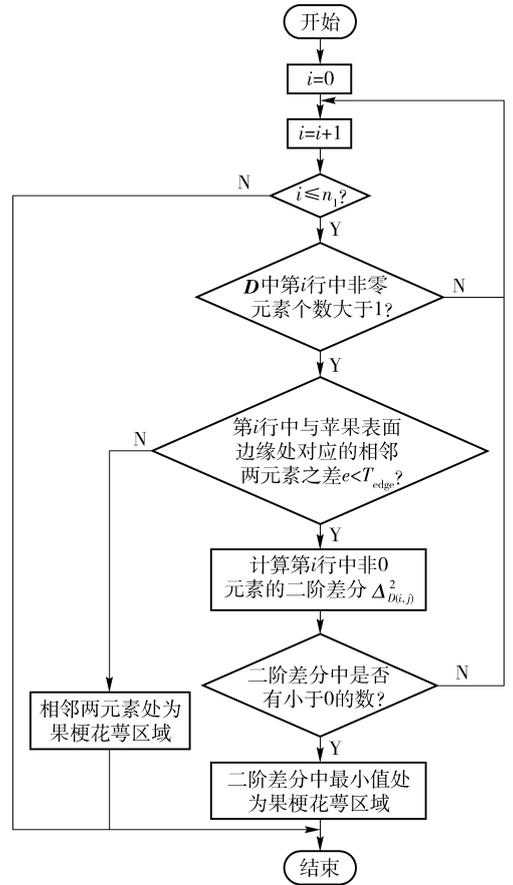


图 9 检测果梗/花萼区域算法流程图

Fig. 9 Flow chart of algorithm for stem-end/calyx detection

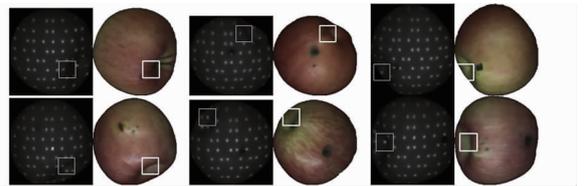


图 10 果梗/花萼位于苹果图像边缘区域的检测结果

Fig. 10 Detection results for stem-ends/calyxes

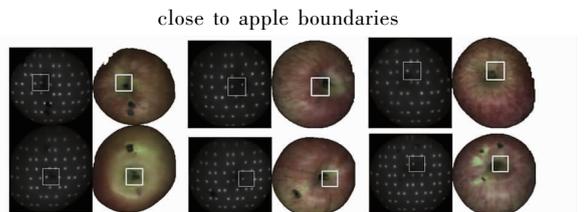


图 11 果梗/花萼位于苹果图像中心区域的检测结果

Fig. 11 Detection results for stem-ends/calyxes

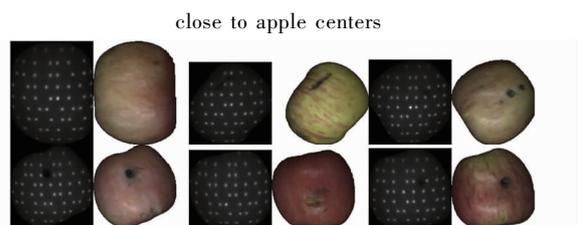


图 12 苹果图像中不包含果梗/花萼的检测结果

Fig. 12 Detection results for apples without stem-ends/calyxes

每个实验结果左侧近红外图像中,用白色方框标记识别出的果梗/花萼位置。为了更清楚地观察实验结果,在每个实验结果右侧可见光图像中的相应位置也用白色方框标记出果梗/花萼的位置。图 10 为果梗/花萼位于苹果图像边缘区域的实验结果,其结果表明在未拍摄到果梗/花萼中心区域的条件下,果梗/花萼仍能被正确地检测出来,同时缺陷区域未被误识别为果梗/花萼。图 11 为果梗/花萼位于苹果图像中心区域的实验结果,图 11 中与缺陷具有相似灰度特征的果梗/花萼被正确地识别出来。图 12 为图像中不包含果梗/花萼区域的实验结果,图中的缺陷并未被误检为果梗/花萼区域。

在实际应用中,图 10、11 中的白色标记方框不必一定位于果梗/花萼区域的中心位置,因为只要灰度较低的区域位于白色方框内,或者与白色方框相交,都可视为苹果的果梗/花萼区域,而苹果图像中其它灰度较低的区域即可被判断为缺陷区域。对于尺寸较大的苹果,其果梗/花萼区域也相对较大,所以采用最多标记 3 个满足条件的凹陷区域的方法,使得用于标记凹陷区域的白色方框尽可能地覆盖完整的果梗/花萼区域。

以完成的 600 次在线检测实验中采集的图像为样本,果梗/花萼出现在 468 幅苹果图像中,利用近红外点阵结构光识别苹果果梗/花萼的正确率为 92.95%,未出现果梗/花萼的苹果图像 132 幅,利用本文提出的方法,正确识别率为 93.94%。在线实验结果如表 1 所示。由表 1 可知本文提出的方法取得了较高的识别正确率,其平均识别正确率达到了 93.17%。误识别的主要原因有:①苹果腐烂严重,在表面形成凹陷,以致被错误识别为果梗/花萼区域。②对于果形畸形的苹果,也未能正确识别出果梗/花萼区域。针对第 2 种情况,可以在果梗/花萼

检测之前,利用相关算法计算果形参数,将畸形果直接归为等外果,不予检测。对于一幅尺寸为 200 像素×200 像素的近红外苹果图像,利用本文算法检测该图像中果梗/花萼位置耗时为 0.9 ms,完全满足实时性的要求。在实际应用中,这种在线检测方法对检测光箱中的光源亮度、结构光投射器安装位置以及相机安装角度和位置没有严格的要求。检测之前无需挑选样本进行训练;在检测过程中,除对苹果图像进行去除背景的操作外,无需进行其它图像预处理操作。因此该方法在保证检测精度和实时性的前提下,又具有便于安装使用的优点。

表 1 实验统计结果

Tab. 1 Experimental statistics

样本类别	样本数	正确样本数	正确率/%
果梗/花萼出现在图像中	468	435	92.95
果梗/花萼未出现在图像中	132	124	93.94
总样本数	600	559	93.17

## 5 结论

(1) 提出了一种利用近红外点阵结构光的在线检测方法。该方法将光斑的相对位移作为编码基元,生成 M 阵列,使其成为一种单色光的编码模式,利用该编码模式,估计近红外苹果图像中果梗/花萼区域的位置。同时设计了近红外点阵结构光投射器的光学系统,并用较低成本予以实现。

(2) 在线实验结果表明,该方法能够充分利用点阵结构光的编码模式,有效地实现果梗/花萼的在线识别,平均识别正确率达到了 93.17%。与其它果梗/花萼检测方法相比较,本研究提出的识别方法在保证实时性的前提下,达到较高的识别正确率,同时又具有实施成本较低的特点,完全具备应用于实际生产的条件。

## 参 考 文 献

- 1 Throop J A, Aneshansley D J, Anger W C, et al. Quality evaluation of apples based on surface defects: development of an automated inspection system[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2005, 36(3): 281 - 290.
- 2 Zou Xiaobo, Zhao Jiewen, Li Yanxiao, et al. In-line detection of apple defects using three color cameras system[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2010, 70(1): 129 - 134.
- 3 Crowe T G, Delwiche M J. Real-time defect detection in fruit-Part II: An algorithm and performance of a prototype system[J]. *Transactions of the ASAE*, 1996, 39(6): 2309 - 2317.
- 4 Zhu Bin, Lu Jiang, Tao Yang. Three-dimensional shape enhanced transform for automatic apple stem-end/calyx identification[J]. *Optical Engineering*, 2007, 46(1): 17201.1 - 9.
- 5 Lu Jiang, Zhu Bin, Tao Yang, et al. 3D Surface reconstruction and analysis in automated apple stem-end/calyx identification[J]. *Transactions of the ASABE*, 2009, 52(5): 1775 - 1784.
- 6 Dong Zhang, Kirt L, Dah-Jye L, et al. Automated apple stem end and calyx detection using evolution-constructed features[J]. *Journal of Food Engineering*, 2013, 119(3): 411 - 418.
- 7 张保华, 黄文倩, 李江波, 等. 基于亮度校正和 AdaBoost 的苹果缺陷在线检测[J]. *农业机械学报*, 2014, 45(6): 221 - 226.

- Zhang Baohua, Huang Wenqian, Li jiangbo, et al. On-line identification of defect on apples using lightness correction and AdaBoost methods[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2014,45(6): 221 - 226. (in Chinese)
- 8 Unay D, Gosselin B. Stem and calyx recognition on 'Jonagold' apples by pattern recognition[J]. Journal of Food Engineering, 2007, 78(2): 597 - 605.
- 9 Leemans V, Destain M F. A real-time grading method of apples based on features extracted from defects[J]. Journal of Food Engineering,2004, 61(1): 83 - 89.
- 10 宋怡焕, 饶秀勤, 应义斌. 基于 DT-CWT 和 LS-SVM 的苹果果梗/花萼和缺陷识别[J]. 农业工程学报,2012,28(9): 114 - 118.  
Song Yihuan, Rao Xiuqin, Ying Yibin. Apple stem/calyx and defect discrimination using DT-CWT and LS-SVM [J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(9): 114 - 118. (in Chinese)
- 11 赵娟, 彭彦昆, Sagar D, 等. 基于机器视觉的苹果外观缺陷在线检测[J]. 农业机械学报,2013,44(1):260 - 263.  
Zhao Juan, Peng Yankun, Sagar D, et al. On-line detection of apple surface defect based on image processing method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2013,44(1): 260 - 263. (in Chinese)
- 12 Cheng Xuemei, Tao Yang, Chen Yuren, et al. NIR/MIR dual-sensor machine vision system for online apple stem-end/calyx recognition[J]. Transactions of the ASAE, 2003, 46(2): 551 - 558.
- 13 Salvi J, Fernandez S, Pribanic T, et al. A state of the art in structured light patterns for surface profilometry [J]. Pattern Recognition, 2010, 43(8): 2666 - 2680.
- 14 Zhan Song, Chung C K. Determining both surface position and orientation in structured light based sensing [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2010, 32(10): 1770 - 1780.
- 15 Fernandez S, Salvi J. A novel structured light method for one-shot dense reconstruction [C] // 2012 19th IEEE International Conference on Image Processing, 2012: 9 - 12.
- 16 Albitar C, Graebbling P, Doignon C. Robust structured light coding for 3D reconstruction [C] // IEEE International Conference on Computer Vision, 2007: 1 - 6.
- 17 MacWilliams F J, Sloane N J A. Pseudo-random sequences and arrays [J]. Proceedings of the IEEE, 1976, 64(12): 1715 - 1729.