

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2016.03.02

视觉测量中动态编码点的设计与检测

李晓东, 刘巍, 杨帆, 张洋, 高鹏, 贾振元

(大连理工大学 机械工程学院, 辽宁 大连 116024)

摘要: 针对机器视觉动态测量中编码点的使用需求, 提出了一种基于频率编码的动态编码点。在测量过程中, 动态编码点按照固定的频率闪烁, 将编码点的闪烁频率作为编码信息。动态编码点由静态定位区与动态编码区组成, 其中, 静态定位区用于对动态编码点特征圆的识别与定位, 编码点的编码信息储存在动态编码区中。根据动态编码点的结构, 设计了编码点的检测与解码算法, 实现了动态编码点的快速检测。编码点提取实验结果表明, 动态编码点编码方案简便稳定, 便于布置, 易于检测和识别, 满足设计要求。

关键词: 机器视觉; 动态测量; 编码点; 图像处理; 特征提取

中图分类号: TB853.1

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795 (2016) 03-0005-05

Design and Recognition of Dynamic Encoded Targets for Vision Measurement

LI Xiaodong, LIU Wei, YANG Fan, ZHANG Yang, GAO Peng, JIA Zhenyuan

(College of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: A dynamic encoded target based on stroboscopic information is proposed for meeting the demand of coded targets in the dynamic measurement of machine vision. The dynamic encoded targets flicker according to the fixed frequency in the measurement. The flicker frequency of targets are used to encode information. The dynamic encoded targets consist of static location features and dynamic coding features. The static location features is used to recognize the position of dynamic encoded targets. The coded information is stored in the dynamic coded features. The detection and decoding algorithm of dynamic encoded targets are designed based on the dynamic coding structure to realize rapid recognition of targets. The experimental results of the extraction of dynamic encoded targets show that the proposed targets with dynamic coding information can be steadily extracted and they are easy to arrange and identify. Thus, the dynamic encoded targets can satisfy the requirements of dynamic visual measurement.

Key words: machine vision; dynamic measurement; encoded targets; image processing; feature extraction

0 引言

在双目立体视觉测量中, 为实现被测特征从二维图像平面到三维空间的快速重建, 需要利用编码点来匹配两台相机采集到的图像, 建立同一特征在左右两幅图像中的对应关系^[1-2]。此外, 针对一些尺寸较大的零件, 需要通过多视数据拼接的方法来实现整体测量, 在多视数据拼接的过程中, 利用编码点的自动检测和

匹配, 可以方便快速地建立局部坐标系与全局坐标系的坐标转换关系^[3-4]。因此, 编码点在视觉测量中应用广泛, 在特征的自动化快速匹配与重建中起到了至关重要的作用。目前常用的编码点主要为二维平面编码点, 平面编码点可直接粘贴于被测物体的表面, 在测量时, 利用相机采集编码点上特征的形状和位置, 对照编码表获取特征不同的排列方式所代表的信息, 实现对编码点的识别。

近年来, 随着对机器视觉法测量速度与测量精度的要求不断提高, 基于双目视觉的动态扫描测量法应用越来越广泛^[5-6]。测量过程中, 利用具有高速采集功能的工业相机, 拍摄投射在被测零件表面的扫描光条等特征, 通过匹配重建, 实现对零件的快速高精度三维测量^[7]。在动态测量中, 同样需要用到编码标记点^[8], 然而, 目前常用的平面编码点存在以下问题: 首先, 由于普通编码点采用粘贴的布置方式, 每次测量前都需要繁

收稿日期: 2016-04-01; 修回日期: 2016-04-15

基金项目: 国家重点基础研究发展计划 (973 计划) (2014CB046504); 国家自然科学基金资助项目 (51227004); 国家自然科学基金资助项目 (51375075)

作者简介: 李晓东 (1991-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为大视场测量技术, 数据拼接及图像处理; 刘巍 (1979-), 男, 内蒙古赤峰人, 教授, 博士, 博士研究生导师, 主要研究方向为精密测量、精密控制、微执行器、微机器人等。

琐的布点过程,降低了测量效率;其次,由于平面编码点采用回光材料制作,需要均匀的补光才能得到较好的采集效果,动态测量过程中,相机采集帧频高,若补光不均匀或曝光时间较短,会产生明暗不均的情况,解码效果不理想,易造成误匹配;最后,由于普通平面编码点本身存在制造误差,若被测物表面不平整,编码点粘贴后产生变形,增大测量误差。

针对二维平面编码点在视觉动态测量中存在的问题,根据编码点的设计需求,本文在普通圆形标记点的基础上,增加时间维度的信息,提出了一种基于频率编码的动态编码点,对编码点的结构进行设计,并对动态编码点的检测与识别方法进行了研究,通过实验,验证了动态编码方案的可行性。

1 动态编码点的设计

在进行编码点设计时,需要考虑两方面的内容:首先,编码点应易于定位和识别,在采集到的图像中,可以将编码点快速地从背景中分离出来。为此,需要对编码点的形状和布置方式进行选择。为保证编码点能够更好地适应零件表面并与测量背景具备较高的对比度,本文选择圆形特征点作为编码点的提取特征,并利用投影仪投影的布点方式。在投影区域内,将编码点设置为白色,背景部分设置为黑色。通过投影编码点,可以保证编码点的灰度值在左右两个相机中都比较均匀,提高识别精度。此外,圆形特征在图像中易于识别,圆形标记点本身的形状信息也可为后续图像处理提供约束。

其次,编码点需要携带固定不变的编码信息。根据动态测量的原理,对圆形特征点在时间维度上进行结构设计,动态编码点的结构如图1所示。动态编码点的结构分为两部分,分别为静态定位区和动态编码区。在静态定位区,编码点保持常亮的状态,即投影出的圆形特征点区域为白色,以便于视觉测量系统对所有编码点的位置进行定位。定位结束后,动态编码点进入动态编码区,编码点开始按照一定的频率 f_f 闪烁,即圆形特征点在白色与黑色之间循环变化,输出编码信息。

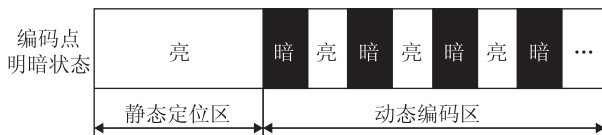


图1 动态编码点结构

在双目视觉动态测量中,双目相机是以高帧频进行连续采集的。为保证动态编码点提取的稳定性,在设计动态编码点时,必须结合双目相机的动态采集能力。动态采集过程中,相机的触发过程如图2所示。目前,工业相机的触发方式大多数为脉冲信号上升沿触发,设相机采集帧频为 f_c ,单帧图像采集周期为 T_c ,相机曝光时间为 T_e ,总测量时间为 T_m 。

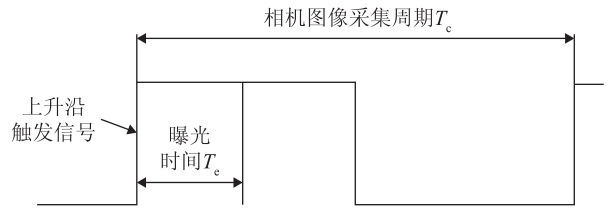


图2 工业相机触发过程

根据上述相机的触发过程和动态采集特性,基于采样定理,圆形动态编码点的闪烁频率 f_f 需满足:

$$f_f = \left\{ f \mid \frac{1}{T_m} < f < f_c, \frac{f_c}{f} \in N \right\} \quad (1)$$

在测量过程中,使用相机连续采集圆形编码点,得到图像序列。当图像中编码点亮时,设圆点灰度值为 g_1 ,将图像的编号用二进制数1表示;当编码点暗时,设灰度值为 g_0 ,将图像的编号用二进制数0表示。根据图像中编码点的明暗状态,将图像序列转化为一个二进制数的数列。由于编码点是按照固定的频率闪烁的,因此该二进制数序列为循环数列,设该数列为 $\{a_n\}$,即存在常数 K ,使得

$$a_{n+K} = a_n, n \in N \quad (2)$$

使式(2)成立的最小自然数 K 为数列 $\{a_n\}$ 的循环周期, K 可由式(3)求得,有

$$K = \frac{T_f}{T_c} = \frac{f_c}{f_f} \quad (3)$$

式中: T_f 为编码点闪烁的周期。

在视场内布置闪烁频率不同的动态编码点,则每个编码点均对应各自的循环周期。通过图像处理,计算每个编码点的循环周期 K_n ,根据 K_n 即可实现编码点的匹配,因此,可将 K_n 作为第 n 个编码点的编码值。针对采集帧频 $f_c = 10 \text{ Hz}$ 的双目采集系统,图3给出编码值 $K = 3$ 的编码点的编码方案示例。

在该编码方案中,编码点闪烁周期 $T_f = 0.3 \text{ s}$,相机单帧图像采集周期 $T_c = 0.1 \text{ s}$ 。采用该编码方案,由于相机触发脉冲信号与编码点编码区起始位置的相对

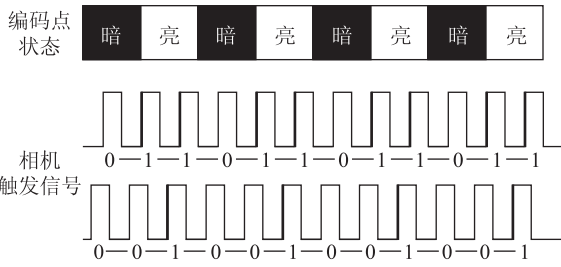


图3 编码点编码方案 (K = 3)

关系不固定, 因此通过图像采集和图像处理后, 同一个编码点可能对应两种不同的二进制数列, 分别为 {011011011011...} 和 {001001001001...}。虽然二进制数列不同, 但是这两个二进制数列的循环周期 K 均为 3, 即两个二进制数列对应着同一个编码点, 该编码点的编码值为“3”。因此, 相机触发信号与编码点闪烁周期之间的关系并不影响编码点与编码方案对应关系的唯一性, 不会产生误匹配的情况。

在动态测量过程中, 利用双目视觉测量系统采集动态编码点, 通过求解编码点所对应的循环周期, 实现编码点的识别, 从而实现同名编码点的自动匹配。

2 动态编码点的检测

为实现动态编码点的采集, 搭建双目视觉动态采集系统如图 4 所示。系统采用投影仪 (EPSON EB-C301MS, 亮度 3000 lm) 投影动态编码点, 并利用两台工业相机 (VC-12MC-M, 分辨率 3072×4096, 最高帧频 60 Hz) 获取编码点图像序列。

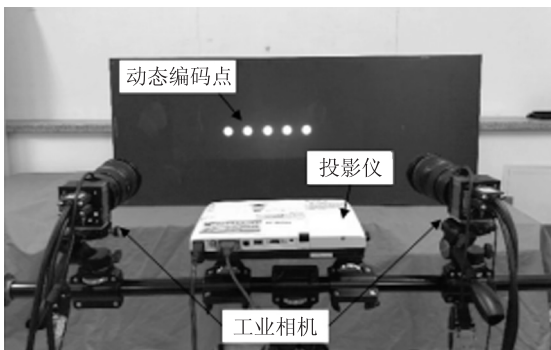


图4 双目视觉动态采集系统

在测量过程中, 利用相机图像采集卡向双目相机发出连续触发脉冲, 使两台工业相机以相同的帧频对动态编码点进行连续采集。

采集结束后, 左右相机分别得到一个包含动态编码点的图像序列。利用 Matlab 对图像序列进行处理, 实现编码点的检测识别, 动态编码点检测流程如图 5

所示。编码点检测时, 首先对采集得到的图像进行预处理, 滤除图像的噪声, 将动态编码点从背景中分离出来, 然后通过特征识别算法, 对两相机拍摄得到的编码点进行定位, 得到编码点中心的图像坐标。最后, 通过解码, 获得编码点的编码值, 根据编码值实现编码点的自动匹配。

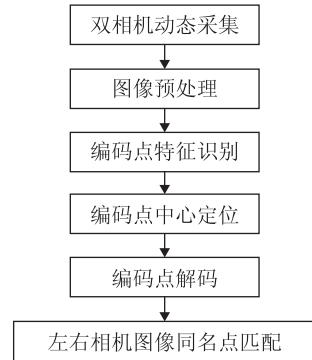


图5 动态编码点检测流程

2.1 图像预处理

视觉测量的任务之一就是识别图像中包含某些特征的区域。在相机采集到的图像中, 包含了丰富的信息, 然而其中有些信息是测量任务不关心的背景信息, 甚至还存在一些由于电子干扰而导致的图像噪声。为保证编码点的特征能够被识别出来, 需要在提取编码点之前对采集到的图像进行一定的预处理: 首先对原始图像进行滤波, 获得高质量的图像; 然后, 选取合适的阈值, 对图像进行二值化处理; 利用二值化后的图像, 对已滤波的图像上无用特征的轮廓进行提取并进行分割, 将背景区域滤除, 只保留感兴趣的区域。

2.2 动态编码点的识别定位

由于在测量过程中, 背景中存在一些亮度较高的无关特征, 仅仅通过图像预处理无法将这些杂散点滤除掉, 因此需要基于编码点特征圆的特征, 对图像进行处理, 滤除非目标信息, 从而保证编码点的精确提取。根据特征圆的形状信息和灰度信息, 分别采用面积准则、圆形度准则和灰度均匀准则对编码点进行识别。

1) 面积准则

由于投影在物体表面的编码点特征圆在被测物体表面所占的像素数可以提前标定, 因此可以利用编码点的面积作为约束, 对图像进行处理, 将面积不符合要求的特征区域剔除。面积准则为

$$N_p > N_l \quad (4)$$

式中: N_p 为特征区域所占像素数; N_l 为面积阈值, 可在测量前对编码点特征圆进行标定得出。

2) 圆度准则

由于动态编码点采用的是圆形特征点, 因此, 在采集到的图像中, 编码点应满足圆度准则:

$$e = \frac{4\pi S}{l^2} > e_t \quad (5)$$

式中: e 为特征区域的圆度; e_t 为圆度的阈值; S 为连通区域的面积; l 为连通区域的轮廓周长。圆度 e 的值在 0 到 1 的范围内, 对于正圆, $e=1$ 。若目标区域越接近正圆, 则其圆度值越接近 1。选取合适的阈值 e_t , 可以实现对编码点特征圆的筛选。

3) 灰度均匀性准则

由于编码点特征圆是由投影仪投影产生的, 其所在区域的灰度值分布相对非编码点区域要更加均匀, 因此采用灰度均匀性准则对图像中的所有连通区域进行判断。灰度判据可表示为

$$D_g = \frac{1}{n} \sum_{(i,j) \in S} (g(x_i, y_j) - \bar{g})^2 < D_t \quad (6)$$

式中: D_g 为目标区域的灰度方差; $g(x_i, y_j)$ 为像素坐标 (x_i, y_j) 处的灰度值; \bar{g} 为目标灰度值的平均值; D_t 为灰度阈值。

通过编码点识别, 可以有效滤除非目标连通区域, 最终得到图像中编码点所在的连通区域, 然后采用灰度重心法对编码点的中心进行准确的定位, 得到编码点中心坐标:

$$x_c = \frac{\sum_{i=0}^u \sum_{j=0}^v x_i g(x_i, y_j)}{\sum_{i=0}^u \sum_{j=0}^v g(x_i, y_j)}, \quad y_c = \frac{\sum_{i=0}^u \sum_{j=0}^v y_j g(x_i, y_j)}{\sum_{i=0}^u \sum_{j=0}^v g(x_i, y_j)} \quad (7)$$

2.3 动态编码点的解码

得到编码点特征圆的中心 (x_c, y_c) 后, 即可对编码点进行解码。根据图 1 可知, 编码点由静态定位区和动态编码区组成的。因此, 先要对动态编码起始位置进行准确判断。由于编码点从静态定位区过渡到动态编码区时, 编码点特征圆的灰度会发生明显的变化, 因此, 可以将图像序列前后两帧图像中特征圆的灰度差作为编码起始位置的判断依据。为简化图像处理过程, 提高图像处理速度, 可以直接用特征圆圆心 (x_c, y_c) 所在像素格的灰度值代替特征圆的灰度值, 灰度差判据可表示为

$$g_n(x_c, y_c) - g_{n-1}(x_c, y_c) \geq g_t \quad (8)$$

式中: $g_n(x_c, y_c)$, $g_{n-1}(x_c, y_c)$ 分别为图像序列第 n 张和第 $n-1$ 张图片中特征圆圆心 (x_c, y_c) 所在像素格

的灰度值; g_t 为灰度阈值。

图像采集过程中, 由于存在环境光, 图像背景的灰度值并不为 0, 因此, g_t 的取值并不是固定的, 而是跟周围环境亮度有关, 可以通过在采集编码点前对背景的灰度值进行测量来选取合适的 g_t 。

得到编码起始位置后, 即可对后续的编码区进行解码。在进行编码点特征圆灰度判断时, 同样是采用编码点中心的灰度值代表其整体灰度, 根据第一章可知, 编码点亮时的灰度值为 g_1 , 编码点暗时的灰度值 $g_0 = g_t$ 。对编码图像序列内每帧图像中编码点中心的灰度进行判断, 得到循环数列 $\{a_n\}$, 数列中的每一项满足:

$$\begin{cases} a_i = 0, & g_i - g_0 < |\sigma| \\ a_i = 1, & g_i - g_1 < |\sigma| \end{cases} (i \in N) \quad (9)$$

式中: σ 为保证算法稳定性所采用的误差项。当图像灰度值受环境光的影响产生微小变化时, 不会影响到图像序列灰度值的判断。

数列 $\{a_n\}$ 的循环数 K 即为所采集到的动态编码点的编码值。

3 动态编码点提取实验

实验过程中, 设置工业相机的帧频 $f_c = 10$ Hz, 单次采集周期 $T_c = 0.1$ s, 曝光时间 $T_e = 20$ ms, 投影编码点的位置如图 4 中所示, 从左至右五个动态编码点的频闪周期分别为 0.2, 0.3, 0.4, 0.6, 0.8 s, 对应的编码值 K_n 分别为 2, 3, 4, 6, 8。

利用两台工业相机分别对动态编码点进行连续动态采集, 获得编码点的图像序列, 选取左相机采集到的连续六帧图像如图 6 所示。根据第 2 章中提出的编码点识别与检测方法, 对动态编码点进行检测, 分别得到左右相机拍摄到的编码点阵的定位与解码结果如表 1 和表 2 所示。

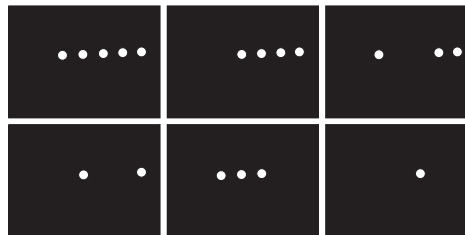


图 6 编码点图像序列

由表 1 和表 2 编码点的提取结果可以看出, 所有编码点均可以准确地定位并识别, 编码点的编码值与其理论设计值完全相符, 编码点识别率为 100%。

表1 左相机采集到的动态编码点

序号	编码点中心坐标	编码数列	K
1	(1182.19, 1060.70)	{1,0,1,0,1,0...}	2
2	(1621.17, 1065.09)	{1,1,0,1,1,0...}	3
3	(2055.77, 1069.45)	{1,1,0,0,1,1,0,0...}	4
4	(2453.56, 1073.67)	{1,1,1,0,0,0,1,1,1,0,0,0...}	6
5	(2837.32, 1077.52)	{1,1,1,1,0,0,0,0,1,1,1,1,0,0,0,0...}	8

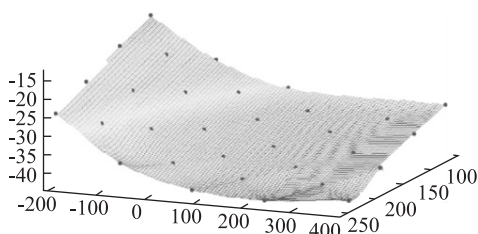
表2 右相机采集到的动态编码点

序号	编码点中心坐标	编码数列	K
1	(1732.84, 1021.20)	{1,0,1,0,1,0...}	2
2	(2128.72, 1006.92)	{1,1,0,1,1,0...}	3
3	(2554.11, 991.65)	{1,1,0,0,1,1,0,0...}	4
4	(2980.84, 976.63)	{1,1,1,0,0,0,1,1,1,0,0,0...}	6
5	(3428.09, 960.42)	{1,1,1,1,0,0,0,0,1,1,1,1,0,0,0,0...}	8

为进一步验证动态编码点的可靠性,利用双目动态测量系统对投影有动态编码点的航空复材零件进行三维重建。测量过程中,将动态编码点投影到零件表面,通过左右相机分别获取动态编码点的图像序列并对编码点解码,根据码值自动匹配左右相机采集到的编码点,从而实现动态编码点的高精度三维重建,利用重建出的测量点完成航空复材零件三维自由曲面的拟合,重建结果如图7所示。



(a) 零件表面的动态编码点



(b) 三维自由曲面拟合示意图

图7 基于动态编码点的航空复材零件三维重建

从图7中可以看出,零件表面32个动态编码点均实现了准确的自动匹配,并实现了点的自动三维重建。

针对曲率变化较小的零件,利用本文提出的动态编码点,可以实现编码点的快速精确匹配与三维重建。然而,当被测零件曲率变化较大时,投影点在零件表面会发生严重的变形,编码点的中心在左右相机采集到的图像中存在差别,影响编码点的三维重建精度。因此,本文所提出的动态编码点目前主要应用于曲率变化不大的零件测量,后续将进一步对编码点中心的提取方法进行优化,以增强动态编码点的适应性。

4 结论

根据工业相机连续采集的原理,本文设计了一种基于频率编码的动态编码点,并提出了动态编码点的识别与检测方法。动态编码点采用投影的方式进行布置,布置方法简单,并保证了编码点在连续采集过程中的高对比度与高可靠性。通过编码点识别实验与航空复材零件三维重建实验,验证了本文所提出的动态编码点的稳定性,识别率达到100%。此外,本文所提出的动态编码点易于定位,提取过程快捷,检测结果准确,满足了视觉动态测量中编码点的使用要求,为双目视觉动态测量中的快速匹配与大视场拼接提供了有力的保障。

参考文献

- [1] 宋丽梅,陈昌曼,陈卓,等.环状编码标记点的检测与识别[J].光学精密工程,2013(12):3239-3247.
- [2] 解则晓,高翔,朱瑞新.环状编码标记点的高效提取与鲁棒识别算法[J].光电子·激光,2015(03):559-566.
- [3] 戴相龙.三维非接触式测量中编码标志的研究与应用[D].西安:西安电子科技大学,2014.
- [4] 苏新勇.数字近景工业摄影测量中编码标志点识别与检测技术的研究[D].济南:山东理工大学,2014.
- [5] 周森,郭永彩,高潮.基于激光扫描的大尺寸圆锥体几何测量系统[J].中国激光,2014(5):217-226.
- [6] 董明利,许晓臣,王君,等.大尺寸动态视觉测量系统的并行加速[J].光学精密工程,2015(10):2909-2918.
- [7] ZHANG Yang, LIU Wei, LI Xiaodong, et al. Accuracy improvement in laser stripe extraction for large-scale triangulation scanning measurement system[J]. Optical Engineering, 2015, 54(10).
- [8] 刘建伟,梁晋,梁新合,等.大尺寸工业视觉测量系统[J].光学精密工程,2010,18(1):126-134.