

线结构光视觉测量中的边缘效应及其补偿

周会成 陈吉红

华中科技大学

国家数控系统工程技术研究中心

黄声华 于克训

华中科技大学

电气与工程学院

摘要: 研究了线结构光测头测量中小尺寸零件的光带边缘效应问题. 分析表明, 当光带宽度大于一个像素时, 在被测零件的边缘部位就会产生测量误差, 即边缘效应误差. 通过研究边缘效应误差的成因和特点, 提出了采用分段平滑对光带边缘效应进行拟合修正的方法. 该方法通过分段、曲线段类型判别和拟合修正三个步骤对光带中心进行处理, 以补偿边缘效应引起的误差. 对实测数据的处理结果表明, 该方法是有效的.

关键词: 线结构光; 视觉测量; 边缘效应误差

中图分类号: TB96

文献标识码: A

文章编号: 1671-4512(2002)11-0050-03

影响激光三角法视觉测量精度的因素较多, 针对各种因素, 研究者们探索了通过提高激光三角法测量精度的各种方法^[1~5]. 文献[6]在研究中发现, 当采用线结构光测头测量零件时, 由于光带本身具有一定的宽度, 在零件的边缘、面与面之间的交界处(如图1所示, 图中 x 为像素行方向, y 为像素列方向), 会因为光带中心计算的方向性而出现几何上原理性的误差, 需要采用一定的措施进行补偿.

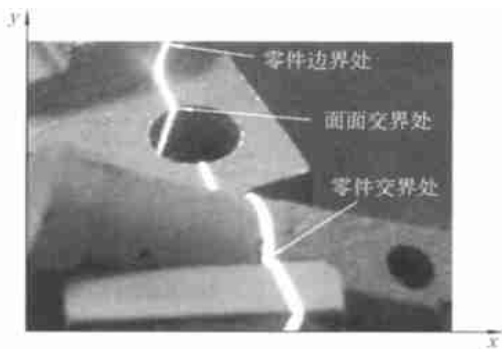


图1 产生边缘效应的典型部位

1 光带边缘效应成因

图2(a)是一片结构光投射到一个零件表面上的情形, 在零件边缘处, 光带的实际几何中心与理论中心出现偏离. 图2(b)对这种现象进行了分析. 设光带宽度为 δ , 被测零件的宽度为 w , 光带走向与零件纵向的夹角为 α . 亮带中心按行上像

素的灰度值分布计算, 则在被测零件的边缘附近,

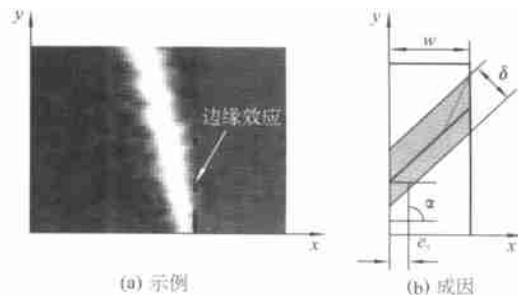


图2 边缘效应成因分析

计算亮带中心会偏离理论亮带中心. 最大偏差

$$e_x = \delta \cot \alpha / 4. \quad (1)$$

由式(1)看出, 只有当 $\alpha = 90^\circ$ 时, $e_x = 0$. 实际中 α 可以是任意角度, 因此这种因边缘效应而产生的误差难以避免, 需要采用一定的方法进行补偿.

2 补偿策略与算法

2.1 补偿策略分析

式(1)中光带宽度 δ 是可测的, 而 α 随着物体表面的形状以及零件与测头间的相对空间位置关系的变化而难以确定. 因此本文采用拟合修正的方法来对光带边缘效应进行补偿. 基本思路是: 对边缘处的光带中心, 通过邻近中间段的光带中心进行外插值修正, 其原理如图3所示. 图中的光带中心由一段直线和一段曲线组成, 实心点为光带中心上的点, 在直线段和曲线段的起始处将

收稿日期: 2002-05-24.

作者简介: 周会成(1973-), 男, 博士; 武汉, 华中科技大学国家数控系统工程技术研究中心(430074).

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(59575090).

产生边缘效应,中心点不能正确反映光带处的测点位置.为此对这两段光带中心分别按直线和曲线进行拟合,然后对边缘处的点进行插值修正.

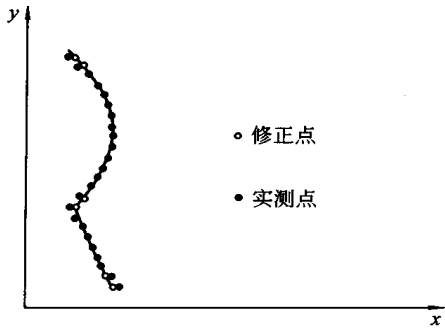


图 3 补偿原理

由于边缘效应发生在边界处,所以在补偿之前,要对光带中心上的边界点进行定位,即对光带中心进行分段.分段之后,对各段边缘部分的点进行拟合修正.参照对光带中心做平滑滤波的方法^[6],选择合适的滤波模板,按一定的窗口宽度自中间向两端扩散的方式逐点进行拟合修正.

测量时,激光平面与物体表面截交,形成一条一条的激光亮带,每一条亮带中心都由若干直线段和若干曲线段组成,如图 1 所示.拟合修正时,应该根据各段光带中心不同的几何属性选用不同的拟合函数进行插值.将光带中心点按直线拟合,计算拟合误差就可以判断出一段光带中心是直线还是曲线.如果是曲线,则用二项式插值;如果是直线,则用直线插值.

2.2 补偿算法

2.2.1 分段

光带中心在数学上可以表示为 $L = \bigcup_{i=1}^{480} C_i$, 其一阶差分分为 $L' = \bigcup_{i=1}^{480-1} (C_{i+1} - C_i)$.

最简单的分段方法是,以 L'_i 表示位置 i 处的光带中心差分,若 $|L'_i| > t$, 则 i 处为断点,其中 t 为分段的差分阈值.这种直接利用差分的方法对阈值很敏感,其分段的准确性与阈值的选择有很大关系.当阈值偏大时,会有欠分段的情况;当阈值偏小时,又会过分段.本文设计了改进的分段方法,该方法基于以下原理.

设光带中心的第 k 段 $S_k = \{[i, c(i)], i \in \{1, 2, \dots, n\}\}$ (n 为图像行数),若将 S_k 中的中心点按直线拟合,则可得到直线方程 $C_l = ai + b$.若将 S_k 中的中心点按二次多项式拟合,则可得到抛物线方程 $C_q = ai^2 + bi + c$.对 S_k 中的任何一点 $[i, c(i)]$,可得到其直线拟合值 $C_l(i)$ 和抛物线拟合值 $C_q(i)$, 直线拟合误差 $E_l(i) = C_l(i) -$

$c(i)$, 和抛物线拟合误差 $E_q(i) = C_q(i) - c(i)$.在光带中心被充分准确地分段的情况下, $E_l(i)$ 的绝对值总小于噪声幅度 A_n (可根据实验确定).据此,本研究的分段算法分为 4 步:

a. 预分段. 根据光带中心的差分进行预分段, 阈值 t 按不造成过分段的原则选取并去除碎段, 得到的段称为准段.

b. 求逼近曲线. 对每一个准段, 计算其各点的直线拟合误差和抛物线拟合误差以及该准段按直线拟合的误差均方根和按抛物线拟合的误差均方根, 均方根较小的一个做为该段的逼近曲线.

c. 细分. 求逼近曲线中的最大拟合误差 E_{\max} , 若 $E_{\max} > kA_n$ (k 为比例因子, 根据经验取 1~2 间的值比较合适), 则该段需要细分, 且该最大拟合误差所在的位置即是新的断点.

d. 重复步骤 b, 直到每一个准段的逼近曲线的最大拟合误差小于 kA_n 为止.

2.2.2 曲线类型判定

将分段后的各段光带中心按直线拟合, 得到直线方程 $C_l = ai + b$. 该段上的每一点的直线拟合值为 $C_l(i)$ 与原始值 $C(i)$ 的差记为 $e(i)$, 若取 $E = \left(\sum_{i=1}^n e^2(i) \right)^{1/2}$, n 为该段中心点数, 则判别准则为: 当 $E > k_l A_n$ 时, 该段光带中心为曲线, 否则为直线.

2.2.3 拟合修正

对任何一段光带中心 $C = \{c(i) | i = 1, 2, \dots, n\}$, 一共 n 个点. 设边缘长度为 m , 根据上述思路, 对于每一段的边缘点, 即对 $i < m$ 或 $i > n - m$ 的点, 采用拟合修正的方式进行补偿.

始端边缘点包括 $c(1), c(2), \dots, c(m - 2), c(m - 1)$, 终端边缘点包括 $c(n - m + 1), c(n - m + 2), \dots, c(n - 1), c(n)$.

对始端边缘点, 从 $c(m - 1)$ 开始做拟合修正, 修正过程可以表达为

$$\begin{aligned} a_i &= F\{f, [c(i + 2w + 1), \\ &c(i + 2w), \dots, c(i + 1)]\}; \\ c_s(i) &= f(a_i, i), \end{aligned}$$

式中, $m > i \geq 1$, a 是系数向量, 当本段光带中心是直线段时, f 是直线函数, a 是直线表达式中的两个参数; 当本段中心是曲线段时, f 是二次函数, a 是二项式中的三个参数; a_i 表示以第 $i + 1$ 点到第 $i + 2w + 1$ 的 $2w + 1$ 个点按 f 拟合出的系数; $c_s(i)$ 表示 $c(i)$ 修正后的值.

对终端边缘点, 从 $c(n - m + 1)$ 开始做拟合修正, 修正过程可以表达为

$$\begin{aligned} a_i &= F\{f, [c(n-m-2w), \\ &c(n-m-2w+1), \dots, c(n)]\}, \\ c_s(i) &= f(a_i, i), \quad n-m+1 < m \leq n. \end{aligned}$$

3 实例

以图 2(a)中线结构光与一块平板所交的光带中心为例,对光带的边缘效应及上述补偿算法进行验证.光平面与平板的交线理论上是一段直线.但因边缘效应的存在,使得边缘部分的光带中心偏离了理论的光带中心,如图 4 所示.图中虚线是理论光带中心,实线是直接计算出的光带几何中心. n_x 为行向像素个数, n_y 为列向像素个数.

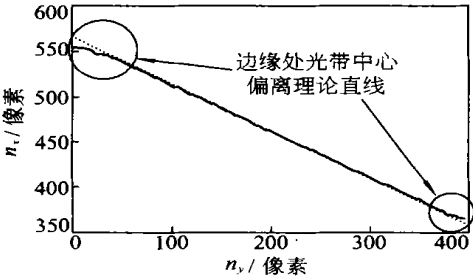


图 4 光带边缘效应的补偿

用上述补偿算法对光带中心做处理,为考察补偿结果,将该段光带中心两端各截掉一段,用中间的点做直线的最小二乘拟合得到一直线段,并以此直线为平板与光平面截交的理论直线,分别计算分段平滑补偿前和分段平滑补偿后的各点与理论直线上对应点的误差.由图 5 可看出,在分段拟合修正之前,该段光带中心两端处的误差明显比中间部分的大($e(i)$ 为光带中心误差).平滑之

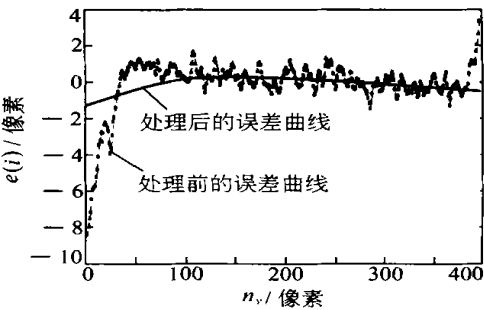


图 5 分段平滑处理前后的误差曲线

后,两端处的误差减小了,表明边缘效应得到了修正.

参 考 文 献

[1] 于起峰,孙祥一,权铁汉等.用标定和亚像素技术实现三维运动目标的高精度测量.宇航学报,1999,20(3):4~6

[2] Wang Juyang, Cohen P, Herniou M. Camera calibration with distortion models and accuracy evaluation. IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence, 1992, 14(10):965~980

[3] Tsai R Y. A versatile camera calibration technique for high accuracy 3D machine vision metrology using of the shelf TV cameras and lenses. IEEE J Robotics Autom, 1987(4):323~344

[4] 周利民,胡德洲,卢秉恒.激光扫描三角法测量精度因素的分析与研究.计量学报,1998,19(2):130~135

[5] 庄葆华,王少清,张吉华等.高精度激光三角法位移测量被测表面倾斜影响研究.计量技术,1996(2):1~4

[6] 周会成.线结构激光三维视觉检测系统及其关键技术研究.[博士学位论文].武汉:华中科技大学机械科学与工程学院,2001.

Edge effect of line-structured laser vision measurement and its compensation

Zhou Huicheng Chen Jihong Huang Shenghua Yu Kexun

Abstract: Analysis showed that when the laser stripe's width was bigger than one pixel, measurement error occurred at the edge of inspected parts. This kind of measurement error was called edge effect error in this paper. By studying the factors of this edge effect and its characteristic, a piece-wise smoothing method was presented to compensate the error caused by edge effect through processing the centroid of laser stripe in three steps: segmentation, curve segment identification and fitting with modification. The results showed that this method was effective and applicable.

Key words: line-structured laser; vision inspection; edge effect error

Zhou Huicheng Dr.; National Numerical Control Engineering Research Center, Huazhong Univ. of Sci. & Tech., Wuhan 430074, China.