

基于机器视觉轮廓提取的平滑处理算法*

李建鑫¹,陈 鸿²,王晋祺¹

(1.中北大学 仪器与电子学院,山西 太原 030051;2.上海无线电设备研究所,上海 201109)

摘要:在利用机器视觉提取眼镜镜片轮廓过程中会有环境干扰光造成误差,影响轮廓的光顺与精度。为了修复此误差,提出了一种新的拟合算法:先寻找特征剔除受环境干扰光影响的轮廓部分,然后对被剔除的部分进行基于三次B样条曲线的保形插值。实验结果表明,经过该平滑拟合算法的处理,基于机器视觉的轮廓提取系统提取的标准圆轮廓数据的最小二乘圆拟合的均方差减少了80%~90%,圆度误差减少了70%~80%,说明该拟合算法能显著提高系统提取的轮廓数据的光顺与精度。

关键词:平滑处理;曲线拟合;B样条曲线;保形插值;特征提取

中图分类号: TP301.6

文献标识码: A

DOI:10.16157/j.issn.0258-7998.200689

中文引用格式: 李建鑫,陈鸿,王晋祺. 基于机器视觉轮廓提取的平滑处理算法[J].电子技术应用,2021,47(4):116-120,131.

英文引用格式: Li Jianxin, Chen Hong, Wang Jinqi. A smoothing algorithm based on machine vision contour extraction[J]. Application of Electronic Technique, 2021, 47(4): 116-120, 131.

A smoothing algorithm based on machine vision contour extraction

Li Jianxin¹, Chen Hong², Wang Jinqi¹

(1.School of Instrument and Electronics , North University of China , Taiyuan 030051 , China ;

2.Shanghai Radio Equipment Research Institute , Shanghai 201109 , China)

Abstract: In the process of extracting the outline date of eyeglass lens by machine vision, ambient light interference causes errors and affects the smoothness and accuracy of the outline. To solve the error, a new fitting algorithm is proposed. Firstly, it removes the contour part disturbed by ambient light. Then, it performs shape-preserving interpolation based on cubic B-spline curve for the removed part. The experimental results show that after processing by the fitting algorithm, the least squares circle fitting mean square deviation of the standard circle contour data extracted by the machine vision-based contour extraction system is reduced by 80% to 90%, and the roundness error is reduced by 70% to 80%, indicating that the fitting algorithm significantly improves the smoothness and accuracy of the contour data extracted by the system.

Key words: smooth processing; curve fitting; B-spline curve; shape preserving interpolation; feature extraction

0 引言

近年来,基于机器视觉的眼镜镜片轮廓提取系统因其优良的效率与成本而被市场快速推广^[1]。然而在利用机器视觉提取镜片轮廓过程中,会有难以避免的环境干扰光造成误差,严重影响提取的镜片轮廓数据的光顺与精度。

B样条曲线拟合的定义一般是指:给定一组已知的数据点,要求寻找一条B样条曲线逼近或通过这些数据点^[2]。对B样条曲线拟合问题的研究在高精加工领域有着非常重要的地位,有诸多学者取得了大量卓有成效的成果^[3-4]。目前最小二乘法使用最普遍的B样条曲线拟合方法,目标是极小化各个数据点与所拟合的B样条曲线上对应点的距离平方和^[2]。然而由环境干扰光造成

的误差总是集中分布,且偏差的方向总是向内,不适合使用最小二乘法进行拟合。

本文针对环境干扰光造成的镜片轮廓上的误差进行了特征分析,并结合镜片轮廓为凸曲线的特征,给出了专门适用的基于三次B样条曲线拟合的方法:首先依据一定的特征剔除受环境干扰光影响产生误差的轮廓段;然后使用基于三次B样条曲线的保形插值算法对被剔除的轮廓部分进行插补。最后通过实验实现了对该算法提高数据精度效果的量化分析,验证了该算法对环境干扰光造成的误差有着显著的修复效果。

1 环境干扰光造成的误差特征分析

基于机器视觉的眼镜镜片轮廓提取系统可简化为图1所示的投影模型,A面是一个平行光源,B是待提取轮廓的物体,C面是感光器件。当平行光由A面射向

* 基金项目:国家自然科学基金面上项目(61573323)

C 面时,待提取轮廓的物体 B 对平行光进行遮挡,在 C 面产生待提取物体的投影 B',由感光器件 C 对投影 B' 进行测量以提取轮廓^[5]。然而环境中存在不可避免的干扰光,如在图 1 中由 D 点发出的光,会在 B 的投影的轮廓上生成一个光斑 D'。

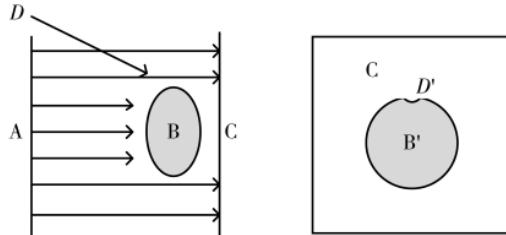


图 1 轮廓提取系统模型图

系统提取到的轮廓由有序的离散坐标点组成,现实中的眼镜镜片轮廓线为凸曲线,因此理想中提取到的轮廓应为由 n 个顶点构成的凸 n 边形。图 2 所示为利用机器视觉提取的眼镜镜片轮廓图,在轮廓上取一个区域 I,图 3 为图 2 中此区域的放大图。

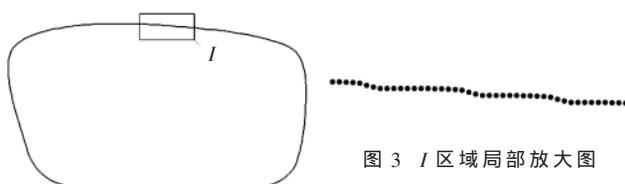


图 2 眼镜镜片轮廓图

在图 3 中可以明显观察出提取到的轮廓上有许多凹陷的部分,这正是因为如图 1 中的光斑 D' 的影响。将轮廓上凹陷的顶点称为轮廓的凹点,并把凹点作为环境干扰光所造成的误差的特征体现。

2 凹点的定义与检测方法

根据上述在几何上这样定义眼镜镜片轮廓上的凹点:在眼镜镜片的多边形轮廓上取一个顶点 B,在顶点 B 的顺时针方向取任意的顶点 A、在顶点 B 的逆时针方向取任意的顶点 C,当满足 $|\overrightarrow{AB}|+|\overrightarrow{BC}| \geq |\overrightarrow{AC}|$, $|\overrightarrow{BC}| < |\overrightarrow{AC}|$, $|\overrightarrow{BA}| < |\overrightarrow{AC}|$ 时,如果存在这样的顶点 A、顶点 C,使 \overrightarrow{AB} 在 \overrightarrow{AC} 的顺时针方向,则顶点 B 为此多边形轮廓的凹点。

对凹点的检测程序流程图如图 4 所示。

遍历轮廓上所有顶点后,找到轮廓上的所有凹点。这些凹点不仅本身就是误差,而且在后续的磨削加工中,这些凹点还会造成对其他顶点的过切,进一步恶化眼镜镜片轮廓的精度。因此本文采用首先剔除轮廓上检测出来的所有凹点,然后再对剔除凹点的部分进行插补的方案。剔除所有凹点后的轮廓顶点图如图 5 所示。

3 基于 B 样条曲线的保形插值方法

3.1 B 样条曲线的数学表达式

一条 k 次 B 样条曲线可以用一条分段的有理多项

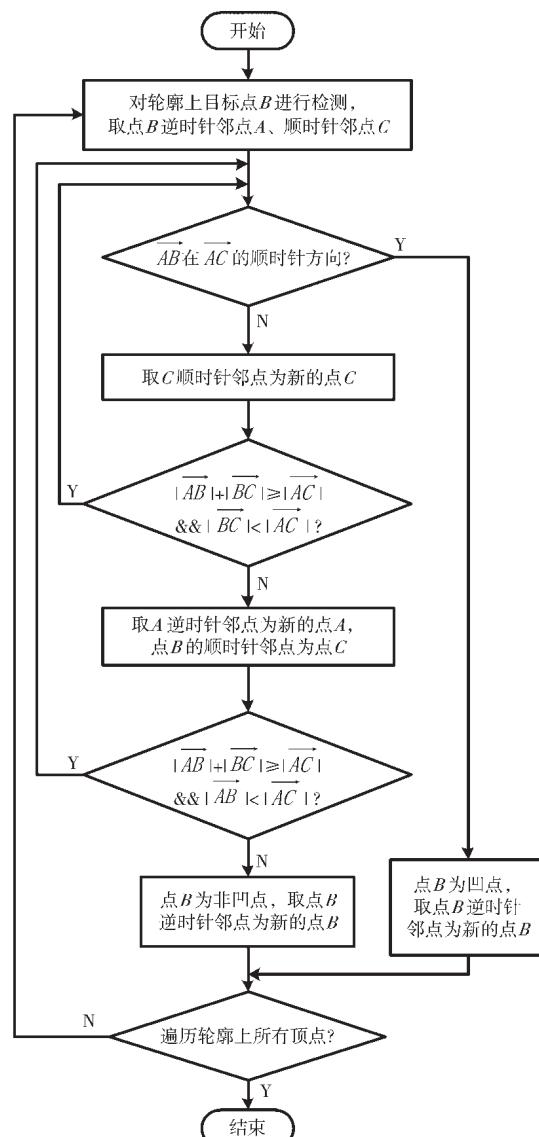


图 4 凹点检测流程图



图 5 剔除凹点后的轮廓图

式矢函数来表达^[6-7],其表达的公式为:

$$P(\mathbf{u}) = \sum_{i=0}^n d_i B_{i,k}(\mathbf{u}) \quad \mathbf{u} \in [\mathbf{u}_k, \mathbf{u}_{n+1}] \quad (1)$$

式中, $d_i (i=0, 1, 2, \dots, n)$ 为构造 B 样条曲线的 $n+1$ 个控制顶点; $B_{i,k}(\mathbf{u})$ 表示的是 k 次规范的 B 样条基函数,由节点矢量 $\mathbf{u} = [\mathbf{u}_0, \mathbf{u}_1, \mathbf{u}_2, \dots, \mathbf{u}_{i+k+1}]$ 根据 de Boor-Cox 递推公式定义:

$$\begin{cases} B_{i,0}(u) = \begin{cases} 1, & u \in [u_i, u_{i+1}] \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \\ B_{i,k}(u) = \frac{u-u_i}{u_{i+k}-u_i} B_{i,k-1}(u) + \frac{u_{i+k+1}-u}{u_{i+k+1}-u_{i+1}} B_{i+1,k-1}(u) \end{cases} \quad (2)$$

规定 $\frac{0}{0} = 0$

3.2 B 样条曲线的保形插值方法

众所周知 B 样条曲线不具有插值性, 待 B 样条曲线插值通过的点被称为型值点, 构造插值 B 样条曲线需要先用型值点求出控制点, 然后再用控制点生成 B 样条曲线^[8]。

常用的求控制点的方法有反算法^[9]和迭代算法^[10]。然而这两种算法运算量较大, 并且用这两种算法求出的控制点所构造的 B 样条曲线无法保证具有和型值点多边形相同的凹凸性。目前有针对基于权因子的 NURBS 保形插值曲线的研究^[11], 然而权因子的确定较为复杂, 运算量较大。综合考虑该算法的使用场景, 本文采用株洲工学院方達教授提出的保形 B 样条插值算法^[12]并针对应用场景进行了改进。

定理 1: 如果相邻的 3 个控制点 d_k, d_{k+1}, d_{k+2} 共线, 且 $d_{k+1} = (d_k + d_{k+2})/2$, 则三次均匀 B 样条曲线插值控制点 d_{k+1} ^[12-13]。

根据定理 1, 按如下过程求得控制点: 设需要插值的型值点为 $V_i (i=0, 1, 2, \dots, n)$, 型值点构成的多边形轮廓为 $(V_0, V_1, V_2, \dots, V_n)$, 如图 6 所示。

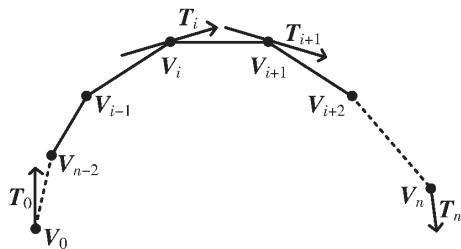


图 6 型值点多边形

定义三次 B 样条插值曲线 $P(u)$ 的端点切矢量为给定值 T_0, T_n 。在内部型值点 V_i 处的切矢量 T_i 为:

$$T_i = V_{i+1} - V_{i-1} \quad i=1, 2, 3, \dots, n-1 \quad (3)$$

则三次 B 样条插值曲线的控制点定义为:

$$\begin{cases} d_{3i} = V_i, & i=0, 1, 2, \dots, n \\ d_{3i-1} = V_i - \frac{\lambda_i T_i}{|T_i|}, & i=1, 2, 3, \dots, n \\ d_{3i+1} = V_i + \frac{\lambda_i T_i}{|T_i|}, & i=0, 1, 2, \dots, n-1 \end{cases} \quad (4)$$

其中, λ_i 是可调节参数。根据定理 1, 以 $d_i (i=0, 1, 2, \dots, 3n)$ 为控制顶点的准均匀三次 B 样条曲线插值所有的型值点 $V_i (i=0, 1, 2, \dots, n)$ 。

已知眼镜镜片轮廓线是凸曲线, 因此需要保证生成的插值三次 B 样条曲线也是凸的, 根据 B 样条曲线的保凸的特性, 当控制多边形 $(d_0, d_1, d_2, \dots, d_{3n})$ 为凸多边形

时, 即可保证由此控制多边形生成的 B 样条曲线为凸曲线。本文给出要使控制多边形 $(d_0, d_1, d_2, \dots, d_{3n})$ 为凸多边形对 λ_i 的要求。

如图 7 所示, 由型值点 V_{i-2}, V_{i-1} 构造矢量 $\overrightarrow{V_{i-2}V_{i-1}}$, 由型值点 V_{i+1}, V_{i+2} 构造矢量 $\overrightarrow{V_{i+1}V_{i+2}}$ 。型值点 V_i 的切矢 T_i 所在的直线与 $\overrightarrow{V_{i-2}V_{i-1}}$ 所在的直线交于点 R_{i0} , 型值点 V_i 的切矢 T_i 所在的直线与 $\overrightarrow{V_{i+1}V_{i+2}}$ 所在的直线交于点 R_{i1} 。其中 $i=1$ 时将端点 V_0 处的切矢量 T_0 作为 $\overrightarrow{V_{-1}V_0}$; $i=n-1$ 时将端点 V_n 处的切矢量 T_n 作为 $\overrightarrow{V_nV_{n+1}}$; $i=0$ 不存在点 R_{i0} ; $i=n$ 不存在点 R_{i1} 。

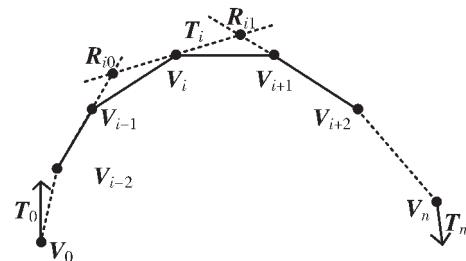


图 7 保形条件说明

为了使插值曲线保凸, 即以 $d_i (i=0, 1, 2, \dots, 3n)$ 为顶点的控制多边形 $(d_0, d_1, d_2, \dots, d_{3n})$ 为凸多边形, λ_i 需要满足条件:

$$\begin{cases} 0 < \lambda_i \leq \min \{ |\overrightarrow{R_{i0}V_i}|, |\overrightarrow{V_iR_{i1}}| \}, & i=0, 1, 2, \dots, n-1 \\ 0 < \lambda_i \leq |\overrightarrow{V_iR_{i1}}|, & i=0 \\ 0 < \lambda_i \leq |\overrightarrow{R_{i0}V_i}|, & i=n \end{cases} \quad (5)$$

下面给出保凸插值的程序框图, 如图 8 所示。

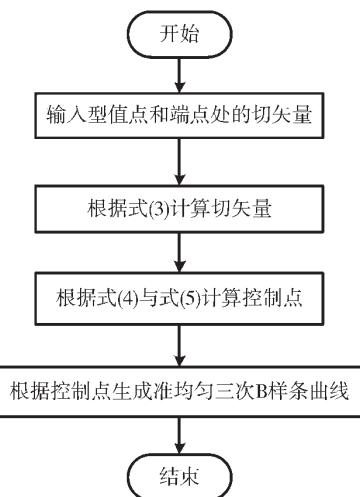


图 8 保形插值的程序框图

3.3 眼镜镜片轮廓的保形插值

虽然图 5 所示轮廓的顶点中已经不存在凹点, 但是相邻顶点之间的间隔很不均匀, 有的间隔过大, 严重损

失精度,且无法进行后续的磨削加工。为此,本文基于上述的B样条曲线对去除凹点后的轮廓部分进行插补处理。

图5显示去除凹点后的轮廓总是被去除大量连续的顶点,这是因为轮廓上的凹点数量比较多,且总是集中出现。把这样凹点连续出现的轮廓段称为凹点段。如果两段凹点段之间的间隔只有一个顶点,就把这两个凹点段作为同一段来处理。将轮廓上的局部放大图3所显示的轮廓上的凹点进行标记,结果如图9所示,在图9中凹点段(B, …, C)、凹点段(C, …, D)、凹点段(D, …, E)作为同一凹点段(B, …, E)进行处理。



图9 凹点段示意图

对凹点段(B, …, E)的保凸插值:将点B、点C、点D、点E作为型值点,将 \overrightarrow{AB} 、 \overrightarrow{EF} 作为端点切矢量,按照图8所示流程生成插值曲线。结果如图10所示。



图10 凹点段插补示意图

对图5中的整个轮廓去除凹点部分进行保凸插值并对插值曲线进行等步长离散化,结果如图11所示,在轮廓上消除了所有凹陷的部分,且因为由三次B样条曲线进行插补,所以光顺度较好,对环境干扰光造成的误差有明显的修复效果。

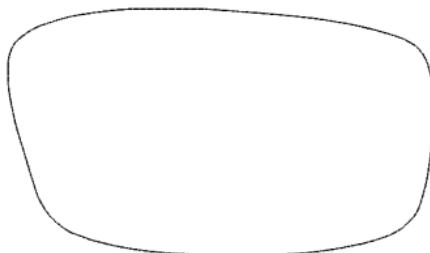


图11 修复误差后的轮廓图

4 设计实验定量分析算法的效果

现实中的眼镜镜片轮廓线通常都是比较复杂的曲线,难以得知其准确的轮廓数据,不便于对本文提出的平滑处理算法提高数据精度的有效性进行量化分析。为此本文设计了以下的实验:

(1) 使用基于机器视觉的眼镜镜片轮廓提取系统提取标准圆形镜片的轮廓,提取到的轮廓如图12所示。

(2) 用本文提出的平滑处理拟合算法对环境干扰光造成的误差进行修复处理,效果图如图13所示。

(3) 分别将平滑处理前和平滑处理后的轮廓数据用

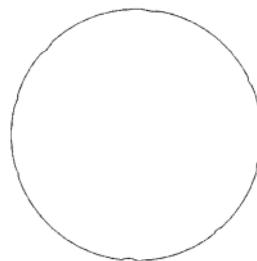


图12 提取到的圆的轮廓图

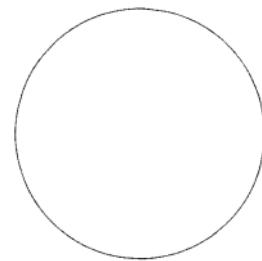


图13 修复误差后的圆的轮廓图

最小二乘法拟合圆,最小二乘法是一种最常见的数学优化方法,通过最小化误差的平方和找到与所提取到的轮廓数据最吻合的圆的参数方程^[14]。

设最小二乘圆的参数方程为:

$$(x-x_c)^2+(y-y_c)^2=R^2 \quad (6)$$

式中,(x_c, y_c)表示的是拟合出来的圆心坐标,R表示的是拟合出来的圆的半径。最小化误差的平方和建立的模型为:

$$F=\min \sum_{i=0}^n (\sqrt{(x_i-x_c)^2+(y_i-y_c)^2}-R)^2 \quad (7)$$

式中,(x_i, y_i)表示的是提取的轮廓上的离散坐标点。对该模型的求解属于非线性最小二乘法问题^[15],计算复杂,运算量较大。本文先将非线性最小二乘问题转换为线性问题^[16-17],方法如下。令误差项变为:

$$e_i=(x_i-x_c)^2+(y_i-y_c)^2-R^2 \quad (8)$$

令 $a=-2x_c$, $b=-2y_c$, $c=x_c^2+y_c^2-R^2$,由式(8)建立的线性模型为:

$$K(a, b, c)=\min \sum e_i^2=\min \sum (x_i^2+y_i^2+ax_i+by_i+c)^2 \quad (9)$$

为对此模型求解,参考文献[16]、[17],设中间变量:

$$\left\{ \begin{array}{l} L=N\sum x_i^2-\sum x_i \sum x_i \\ M=N\sum x_i y_i-\sum x_i \sum y_i \\ O=N\sum x_i^3+N\sum x_i y_i^2-\sum (x_i^2+y_i^2) \sum x_i \\ P=N\sum y_i^2-\sum y_i \sum y_i \\ Q=N\sum y_i^3+N\sum x_i^2 y_i-\sum (x_i^2+y_i^2) \sum y_i \end{array} \right. \quad (10)$$

式中,N表示总点数。模型式(9)的解为:

$$\left\{ \begin{array}{l} a=\frac{QM-OP}{LP-M^2} \\ b=\frac{QL-OM}{M^2-LP} \\ c=-\frac{\sum (x_i^2+y_i^2)+a \sum x_i+b \sum y_i}{N} \end{array} \right. \quad (11)$$

根据式(11),最小二乘拟合圆的圆心(x_c, y_c)和半径R的估计值为:

$$\begin{cases} x_c = -\frac{a}{2} \\ y_c = -\frac{b}{2} \\ R = \frac{1}{2} \sqrt{a^2 + b^2 - 4c} \end{cases} \quad (12)$$

由最小二乘法拟合圆的参数和轮廓数据(x_i, y_i)求得轮廓数据的最小二乘拟合过程中的均方差为:

$$D = \frac{\sum_{i=0}^n (\sqrt{(x_i - x_c)^2 + (y_i - y_c)^2} - R)^2}{n} \quad (13)$$

最小二乘法拟合的圆的圆度误差 δ 为:

$$\begin{cases} R_{\max} = \max(\sqrt{(x_i - x_c)^2 + (y_i - y_c)^2}) \\ R_{\min} = \min(\sqrt{(x_i - x_c)^2 + (y_i - y_c)^2}) \\ \delta = R_{\max} - R_{\min} \end{cases} \quad (14)$$

本文的目的是对提出的平滑处理算法的效果进行量化分析,因此分别将平滑处理前和平滑处理后的轮廓数据用最小二乘法拟合圆的均方差与圆度误差进行比较。均方差与圆度误差越小,说明轮廓数据与圆的吻合程度越高,此轮廓的精确程度要更好^[18]。在不同的环境下多次实验,结果如表1所示。

表1 修复误差前后的轮廓数据拟合圆的对比

实验样图	平滑处理前/像素		平滑处理后/像素	
	均方差	圆度误差	均方差	圆度误差
样图 1	0.102	2.485	0.011	0.469
样图 2	0.132	3.018	0.013	0.546
样图 3	0.147	3.026	0.016	0.581
样图 4	0.156	2.556	0.014	0.502
样图 5	0.167	2.876	0.016	0.622
样图 6	0.164	2.316	0.015	0.513
样图 7	0.177	2.916	0.016	0.599

从表1可以看出,在使用本文的平滑处理算法对轮廓数据进行处理后,最小二乘法拟合圆的均方差减少了80%~90%,圆度误差减少了70%~80%,轮廓与标准圆的吻合程度显著提高,轮廓数据的精度显著增加。证明本文提出的平滑处理拟合算法对基于机器视觉的眼镜镜片轮廓提取系统有着良好的平滑去噪与误差修复效果,大幅度提高了系统提取的轮廓的光顺与精度。

5 结论

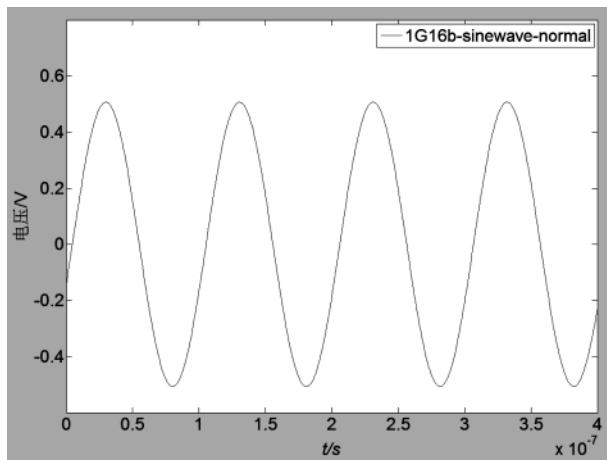
针对使用机器视觉提取轮廓过程中环境干扰光造成的误差,本文通过分析误差的特征,提出了一种全新的平滑拟合算法,并设计实验验证了该算法可以显著提高基于机器视觉的眼镜镜片轮廓提取系统的光顺与精度,且该算法运算高效、编程简单。该算法的应用场景存在一定的限制,适用于轮廓是凸曲线的场景,但是对于

轮廓上有较少拐点的情况,该算法也有一定的指导启发意义,可以通过对轮廓进行变形、分段等操作,构造出凸曲线,以适用该算法。

参考文献

- [1] 崔凌燕.基于机器视觉的眼镜镜片轮廓提取系统[D].太原:中北大学,2018.
- [2] 林子植,潘日晶.B样条曲线逼近的一种新方法[J].福建师范大学学报(自然科学版),2008(2):22~28.
- [3] PARK H. An error-bounded approximate method for representing planar curves in B-splines[J]. Computer Aided Geometric Design, 2004, 21(5): 479~497.
- [4] Li Weishi, Xu Shuhong, Zhao Gang, et al. Adaptive knot placement in B-spline curve approximation[J]. Computer-Aided Design, 2005, 37(8): 791~797.
- [5] 段晓健.基于线阵CCD的镜片轮廓测量[D].太原:中北大学,2013.
- [6] 秦文杰,张举勇.基于安德森加速的快速B样条拟合算法[J].图学学报,2020,41(2):246~253.
- [7] 田质广,孟宪尧,张慧芬.模糊B样条神经网络在变压器超高频局部放电模式识别中的应用[J].电子技术应用,2004,30(10):24~26.
- [8] 李小艳,陈绍平.改进差分进化算法求解B样条曲线曲面拟合问题[J].计算机应用与软件,2018,35(3):275~281,298.
- [9] 霍亚光,高扬,宋绪丁.不同参数化法对三次NURBS曲线拟合误差的影响[J].机电工程技术,2019,48(4):54~57,97.
- [10] 史利民,王仁宏.NURBS曲线曲面拟合数据点的迭代算法[J].数学研究与评论,2006(4):735~743.
- [11] 刘继圆.基于权因子的NURBS插值曲线的保凸性研究[D].武汉:武汉理工大学,2016.
- [12] 方達.保形三次B样条插值算法[J].株洲工学院学报,2003(5):5~7.
- [13] 李成贵,杨辉.一种基于保形B样条函数的非球曲面加工插补算法[J].国防制造技术,2011(4):42~44.
- [14] 黄力峰,汪伟,吴南星.基于最小二乘原理的圆拟合及误差评定算法研究[J].机械工程与自动化,2020(2):4~6.
- [15] Cao Binfang, Li Jianqi, Liu Chengfa, et al. Defect detection of nickel plated punched steel strip based on improved least square method[J]. Optik—International Journal for Light and Electron Optics, 2020, 206: 164331.
- [16] 郭晋伟,孟立新,李小明,等.基于最小二乘圆拟合法的三轴转台垂直度误差测试[J].中国测试,2020,46(4):123~129.
- [17] 田子林,陈家新.基于最小二乘法与霍夫变换的虹膜定位算法[J].电子技术应用,2019,45(2):75~79.
- [18] 郑宇,王强,秦娜,等.基于三次样条函数平面圆度误差检测方法研究[C].《工业建筑》2016年增刊I,2016:381~383.

(下转第131页)



(a) 时域波形

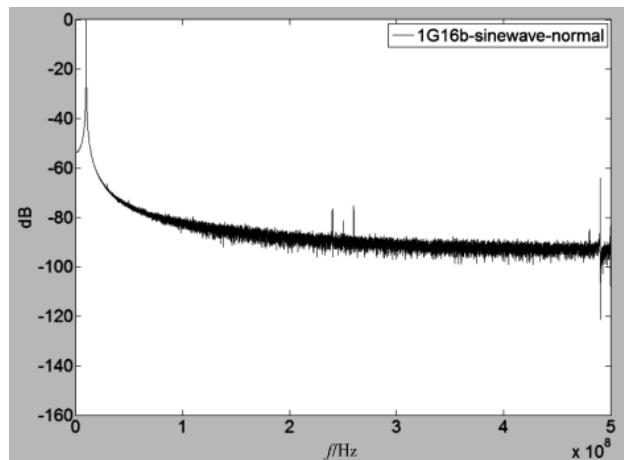


图 9 ADC 采集的正常的 10 MHz 正弦波波形

参考文献

- [1] 唐绍春.基于时间并行交替技术的超高速高精度波形数字化研究[D].合肥:中国科学技术大学, 2012.
 - [2] 邹剑雄.地下暗物质实验中的高速采样 ADC 模块的研究与设计[D].北京:中国科学院高能物理研究所, 2013.
 - [3] 刘鸣, 孙秀男, 梁昊.双通道 5GS/s 高速数据采集卡设计[J].计算机硬件, 2019, 38(6): 76–82.
 - [4] 周楠.5GSPS 高分辨率数据采集与处理关键技术研究[D].成都:电子技术大学, 2019.
 - [5] 杨扩军, 田书林, 蒋俊, 等.基于 TIADC 的 20 GS/s 高速数据采集系统[J].仪器仪表学报, 2014, 35(4): 841–849.
 - [6] 李海涛, 李斌康, 阮林波, 等.用于脉冲辐射场诊断的大动态范围数据采集系统研制[J].现代应用物理, 2019(4): 83–88.
 - [7] 文科, 朱正, 马敏舒.低成本 SerDes 在数据采集中的方案设计与应用[J].电子技术应用, 2020, 46(8): 94–97.
 - [8] 易志强, 韩宾, 江虹, 等.基于 FPGA 的多通道同步实时高速数据采集系统设计[J].电子技术应用, 2019, 45(6): 76–80.
 - [9] 王威, 张秋云, 江虹, 等.基于 FPGA 和 TCP/IP 的多路采集与切换系统设计与实现[J].电子技术应用, 2019, 45(6): 125–129.

- [10] 田皓文, 郭世旭, 朱锰琪, 等. 基于 FPGA 的通道数可调高精度采集系统模块化设计[J]. 电子技术应用, 2020, 46(2): 53–57.
 - [11] TI. ADC Dual-Channel, 16-Bit, 1.0-GSPS Analog-to-Digital Converter[Z]. 2019.
 - [12] Xilinx. JESD204 v6.1[Z]. 2015.
 - [13] TI. LMK0482x ultra low-noise JESD204B compliant clock jitter cleaner with dual loop PLLs[Z]. 2015.
 - [14] Guibord Matt. JESD204B multi-device synchronization: Breaking demands[J]. Analog Applications Journal, 2015(2): 15–22.
 - [15] BEAVERS I. JESD204B 转换器内确定性延迟解密[EB/OL].[2020-08-28]. <http://www.ADI.cn>.
 - [16] Del Jones. JESD204B 子类(第二部分): 子类 1 与子类 2 系统考虑因素[EB/OL].[2020-08-28]. <http://www.ADI.cn>.

作者简介

李海涛(1986-),男,硕士研究生,主要研究方向:高速数据采集等。

李斌康(1966-),男,研究员,主要研究方向:脉冲射线测量。

田耕(1979-),男,高级工程师,主要研究方向:核电子学。

(上接第 120 页)

(收稿日期:2020-07-09)

作者简介：

李建鑫(1996-),男,硕士,主要研究方向:机器视觉、计算机图形学。

陈鸿(1963-),通信作者,男,博士,教授,主要研究方向:测试技术与仪器、光电检测技术,E-mail:chenhong631@qq.com。

王晋祺(1992-),女,硕士,主要研究方向:嵌入式时间同步。

版权声明

经作者授权，本论文版权和信息网络传播权归属于《电子技术应用》杂志，凡未经本刊书面同意任何机构、组织和个人不得擅自复印、汇编、翻译和进行信息网络传播。未经本刊书面同意，禁止一切互联网论文资源平台非法上传、收录本论文。

截至目前，本论文已经授权被中国期刊全文数据库（CNKI）、万方数据知识服务平台、中文科技期刊数据库（维普网）、DOAJ、美国《乌利希期刊指南》、JST 日本科技技术振兴机构数据库等数据库全文收录。

对于违反上述禁止行为并违法使用本论文的机构、组织和个人，本刊将采取一切必要法律行动来维护正当权益。

特此声明！

《电子技术应用》编辑部

中国电子信息产业集团有限公司第六研究所