

基于引力搜索算法的激光位移传感器参数优化

张伟 陈文建 李武森

Parameter optimization of laser displacement sensor based on gravitational search algorithm

ZHANG Wei, CHEN Wenjian, LI Wusen

引用本文:

张伟, 陈文建, 李武森. 基于引力搜索算法的激光位移传感器参数优化[J]. 应用光学, 2024, 45(5): 1064–1071. DOI: 10.5768/JAO202445.0507002

ZHANG Wei, CHEN Wenjian, LI Wusen. Parameter optimization of laser displacement sensor based on gravitational search algorithm[J]. Journal of Applied Optics, 2024, 45(5): 1064–1071. DOI: 10.5768/JAO202445.0507002

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202445.0507002>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

自适应光学系统迭代控制算法超参数优化

Hyper-parameter optimization of iterative control algorithms for adaptive optical systems

应用光学. 2024, 45(1): 126–133 <https://doi.org/10.5768/JAO202445.0102007>

大量程激光位移传感器的成像系统设计

Design of imaging system for wide-range laser displacement sensor

应用光学. 2022, 43(3): 386–391 <https://doi.org/10.5768/JAO202243.0301002>

基于自准直原理的紧凑型激光位移传感器光学系统设计

Optical system design of compact laser displacement sensor based on auto-collimation principle

应用光学. 2023, 44(4): 720–725 <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0401003>

高精度激光告警参数提取算法

High-precision parameter extraction algorithm of laser alarm

应用光学. 2023, 44(6): 1258–1264 <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0610013>

基于后向散射法测量蒸汽湿度反演算法的优化

Optimization of steam humidity measurement inversion algorithm based on back angle scattering method

应用光学. 2019, 40(4): 612–619 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0402005>

基于高斯过程回归的线性激光束指向稳定优化

Optimization of linear laser beam pointing stability based on Gaussian process regression

应用光学. 2023, 44(6): 1265–1272 <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0610014>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2024) 05-1064-08

基于引力搜索算法的激光位移传感器参数优化

张 伟, 陈文建, 李武森

(南京理工大学 电子工程与光电技术学院, 江苏 南京 210094)

摘 要: 为了优化中等量程激光三角位移传感器性能及体积, 以 200 mm~500 mm 量程为例, 建立了数学模型实现结构参数优化。在传感器结构设计中, 采用平面反射镜对光路进行折叠, 以工作物距、透镜焦距、线阵探测器件位置以及反射镜位置为被优化量并定义了目标函数, 采用引力搜索算法 (gravitational search algorithm, GSA) 实现对位移传感器的结构优化。经过算法迭代, 相同宽度限制下所得优化后的结构参数与传统激光三角结构相比, 在 500 mm 处灵敏度提高 24.29%, 非线性误差由 11.40% 降低为 7.43%。结果表明, 此结构与优化算法对激光三角位移传感器性能与体积有较大的正向优化效果。

关键词: 光学测量; 激光三角法; 引力搜索算法; 线性度; 参数优化

中图分类号: TN247

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202445.0507002

Parameter optimization of laser displacement sensor based on gravitational search algorithm

ZHANG Wei, CHEN Wenjian, LI Wusen

(School of Electronic and Optical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: In order to optimize the performance and volume of the medium-range laser triangular displacement sensor, a mathematical model was established to optimize the structural parameters with the 200 mm~500 mm range as an example. In the structural design of the sensor, a plane mirror was used to fold the optical path, and the objective function was defined with the working object distance, lens focal length, linear array detector position and mirror position as the optimized parameters, gravitational search algorithm (GSA) was used to optimize the structure of the displacement sensor. After the algorithm iteration, compared with the traditional laser triangle structure with the same width limit, the sensitivity of the optimized structure was increased by 24.29% at 500 mm, and the nonlinear error was reduced from 11.40% to 7.43%. The results show that this structure and optimization algorithm have a positive effect on the performance and volume of the laser triangular displacement sensor.

Key words: optical measurement; laser triangulation; gravitational search algorithm; linearity; parameter optimization

引言

激光测量技术作为一种非接触式高精度测量技术, 在工业生产中具有非常重要的应用价值。激光三角测距技术^[1]是实现非接触式距离测量的

重要手段, 该方法可以快速给出目标的位移、厚度、振动、速度等丰富信息^[2-6], 具有测量速度快、精度高、抗干扰性能强、适用范围广等优点, 已广泛应用于工业领域。

收稿日期: 2023-10-07; 修回日期: 2024-03-01

基金项目: 国家自然科学基金 (U1531138)

作者简介: 张伟 (1998—), 男, 硕士, 主要从事光电检测技术研究。E-mail: 164141421@qq.com

通信作者: 陈文建 (1965—), 男, 博士, 教授, 主要从事光学工程、光学系统设计研究。E-mail: chenwj@mail.njust.edu.cn

现阶段基于激光三角测量的位移传感器,大多用于量程较小的精密位移测量^[7-8]。由于激光三角测量的原理限制,想实现中近距离的大量程精确位移测量会不可避免地降低输入输出的线性度、增大横向体积,一些情况下量程两端的灵敏度甚至相差数十倍,线性误差严重。而目前激光三角法测距的结构优化对线性度的研究较少,大多仅针对灵敏度或宽度进行参数或结构优化,如在参数直接对比后选择性能更好的组合^[9-11];或对激光三角法的结构进行简化或改进,如在光路中添加分束镜^[12-13];亦或直接在透镜后方添加反射镜^[14],将像距部分进行折叠,但在中远距离及像距较小的结构中折叠效果有限。为了提高远距离准确性与仪器便携性,增加应用场景,需要合理设计激光三角测量器件的结构参数,在降低器件体积的同时保持优秀的灵敏度与线性度。

本文从理论上对激光三角法原理进行分析研究,分析了主要结构参数对器件性能的影响。同时,为提高激光三角测量的线性度及减小仪器尺寸,在接收光路中设置平面转像反射镜实现光路折叠,并利用引力搜索算法优化了系统结构参数,获得了更高的线性度,为激光三角位移传感器的性能优化提供了一种新的方案。

1 激光三角法原理

激光三角法分为直射式和斜射式两种,直射式激光三角法相比于斜射式具有结构紧凑、光斑均匀、计算简单等优点^[1],本文仅针对直射式激光三角法进行讨论。图1所示为直射式激光三角测距的基本原理图。透镜光轴与激光路径形成一定夹角,激光器发出的激光在物体表面形成光斑,经被测表面散射后被透镜成像在光电探测器件中,并且随着被测物面距离的变化,光斑在线阵光电探测器件中所成像的位置也发生变化,两者一一对应。因此传感器在经过标定后,输入输出特性被确定,通过线阵光电器件接受的像素信息就可以得到所测物面的距离,本系统的线阵光电探测器件选用线阵 CMOS(互补金属氧化物半导体)。

图1中, y 为被测距离; Δx 为像点在线阵 CMOS 上的位移,在图1中取左正右负; Δy 为被测面的位移,根据与传感器的距离取远正近负; a 为参考面的工作物距; b 为与 a 对应的工作像距; α 为激光与透镜光轴的夹角; β 为线阵 CMOS 与透镜光轴的夹

角,不宜小于 30° ,否则会降低线阵 CMOS 的接收性能,也会导致像斑的强度中心和形状中心偏移较大,从而影响光斑定位; d 为透镜光轴与线阵 CMOS 交点与其左边缘的距离。

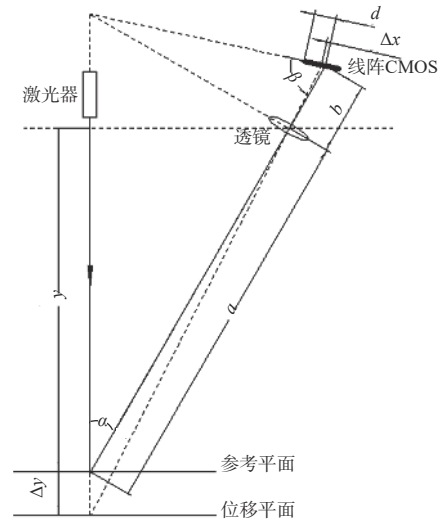


图1 直射式激光三角测距原理图

Fig.1 Schematic diagram of direct laser triangulation ranging

由透镜的成像原理可推出,要使每一个光斑都在线阵 CMOS 上呈清晰的像点,激光三角测量系统必须满足 Scheimpflug 条件^[1],即透镜主面、激光和线阵 CMOS 的延长线交于一点。由图1中的图像关系可得:

$$a \tan \alpha = b \tan \beta \quad (1)$$

根据结构关系及透镜成像原理,可得物面位移 Δy 与线阵 CMOS 上像斑位移 Δx 的关系:

$$\Delta y = \frac{a \Delta x \sin \beta}{b \sin \alpha - \Delta x \sin(\alpha + \beta)} \quad (2)$$

$$\Delta x = \frac{b \Delta y \sin \alpha}{a \sin \beta + \Delta y \sin(\alpha + \beta)} \quad (3)$$

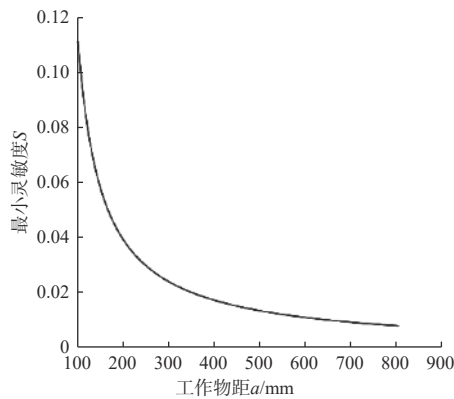
则该位移传感器在 Δy 位置的灵敏度为

$$S = \frac{\partial x}{\partial y} = \frac{ab \sin \alpha \sin \beta}{[a \sin \beta + \Delta y \sin(\alpha + \beta)]^2} \quad (4)$$

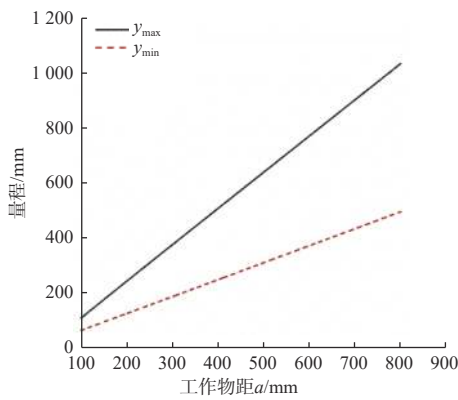
最远量程处的灵敏度为整个仪器的最小灵敏度,可用以表征整个仪器的性能。对于参数 $a=300 \text{ mm}$, $\alpha=\pi/6$, $f=25 \text{ mm}$ 且 $\Delta x=-4 \text{ mm} \sim 4 \text{ mm}$ 的激光三角位移传感器,当只改变 a 、 α 或 f 中的其中一种参数时,该参数与器件最大量程处的灵敏度 $S_{\min}$ 及量程 R 的关系如图2~图4所示。

由图2~图4可知,成像系统的工作物距 a 越小、夹角 α 和透镜焦距 f 越大,器件的最小灵敏度

$S_{\min}$ 越大, 测量范围越小。在激光三角系统中, 灵敏度主要取决于透镜成像的垂轴放大率 $\eta = \frac{b}{a}$ 与夹角 α ^[15]。根据透镜成像牛顿公式, a 减小及 f 增大都使得垂轴放大率 η 增大, x 相对 y 的移动会越明显; 角度 α 越大, 系统的探测范围越小, 灵敏度会越高, 但光斑的散射光强度会随之降低。因此, 为了取得较亮的光斑图像, 一般将 α 约束在 40° 以内。

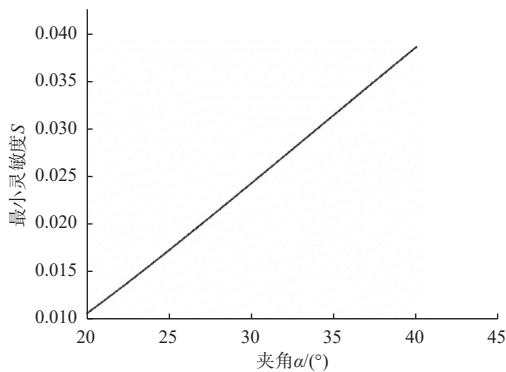


(a) 最小灵敏度 $S_{\min}$ 随工作物距 a 的变化

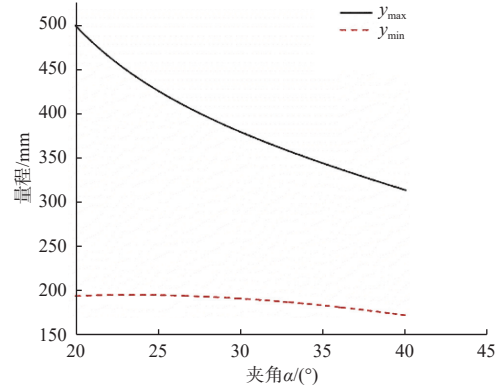


(b) 测量范围随工作物距 a 的变化

图2 参数 $\alpha=\pi/6, f=25$ mm 时对工作物距 a 的影响
Fig. 2 Influence of working distance a when $\alpha=\pi/6$ and $f=25$ mm

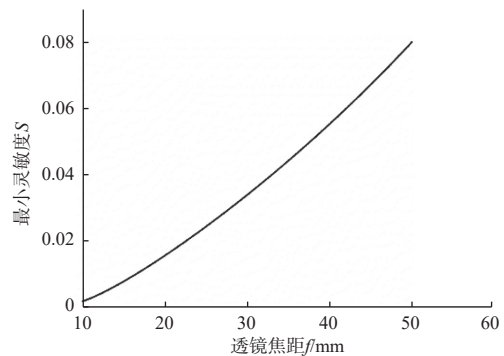


(a) 最小灵敏度 $S_{\min}$ 随夹角 α 的变化

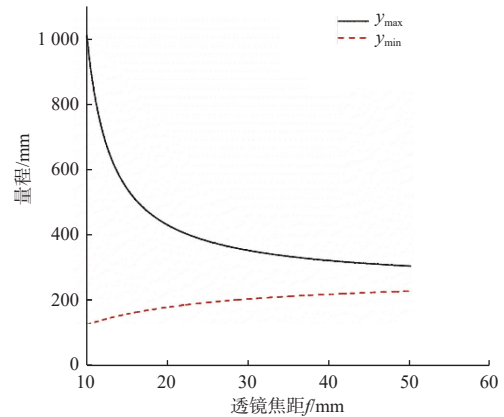


(b) 测量范围随夹角 α 的变化

图3 参数 $a=300$ mm, $f=25$ mm 时对夹角 α 的影响
Fig. 3 Influence of angle α when $a=300$ mm and $f=25$ mm



(a) 最小灵敏度 $S_{\min}$ 随焦距 f 的变化



(b) 测量范围随焦距 f 的变化

图4 参数 $a=300$ mm, $\alpha=\pi/6$ 时对焦距 f 的影响
Fig. 4 Influence of focal length f when $a=300$ mm and $\alpha=\pi/6$

线性度也是传感器静态特性的重要指标之一, 表示传感器输入输出曲线与理想直线的符合程度, 良好的线性度可以使器件输出分析更加方便, 从而提高测量的精确度^[16]。对于激光三角位移传感器来说, 若近距离处与远距离处灵敏度的倍数差异过大, 那么后续光斑定位等步骤也会造成相应倍数的误差, 这对传感器远距离测量精度的影

响是不可忽视的。激光三角位移传感器的线性度主要与夹角 α 有关,假设在极端条件下激光完全与透镜光轴垂直,即 $\alpha=90^\circ$,则在理想成像条件下垂轴放大率恒定,输入输出完全呈直线关系,此时灵敏度 S 等于垂轴放大率 η 。随着夹角 α 减小,近轴与量程两端的成像放大率差异增大,特别对于量程较大的测量条件,器件量程最远与最近处在透镜平面的物距差异较大,线性度也因此急剧劣化,所以激光三角的夹角一般不小于 20° 且多用于量程较小的测量环境。对于确定的量程与线阵传感器器件成像宽度,灵敏度 S 对线阵探测元件的成像长度 x 积分总和是一定的。因此,最小灵敏度 $S_{\min}$ 较大的结构,在总量程内的灵敏度分布更平均,线性度更佳。

2 改进结构分析

如图5所示,在透镜与被测面中间某一位置放置一块平面反射镜以折叠光路,使反光镜、透镜、线阵 CMOS 及激光器排列在同一横向范围内,可进一步提高器件内部空间的利用率,减小器件体积。设反射镜与透镜的距离为 c ,由图像分析可知, c 的取值越大,对器件宽度的减小越明显;同时 c 的存在也会使测量距离 y 被折叠,从而使测量距离比未折叠前缩短 $c \cos \alpha$,器件量程的近端与远端的物距均增长 $c \cos^2 \alpha$ 。由透镜成像原理可得两端灵敏度差异会减小,但为了保持量程范围不变,需相应增大透镜焦距。

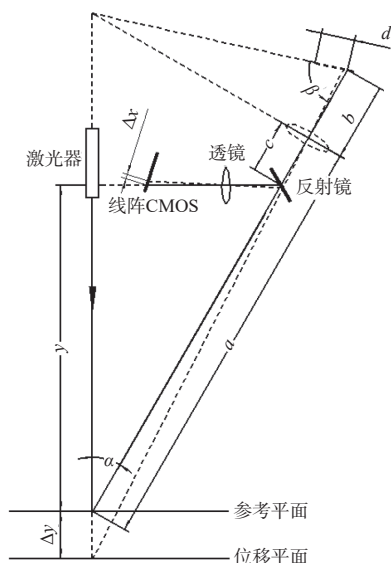


图5 放置平面反射镜后的器件结构图

Fig. 5 Device structure diagram after placing planar mirror

选用线阵 CMOS 的可成像区域长度为 8 mm , 则 Δx 的范围为 $(d-8, d)$, 整个系统的其他参数都可由 a 、 α 、 c 、 f 、 d 来确定,由透镜成像的牛顿公式可得:

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f} \quad (5)$$

参考平面距离为

$$y = (a - c) \cos \alpha \quad (6)$$

器件宽度 w 为

$$w = (a - c) \sin \alpha \quad (7)$$

反射镜距线阵 CMOS 的距离为 $(b+c)$, 因此得到条件:

$$b + c \leq (a - c) \sin \alpha \quad (8)$$

器件的最大量程和最小量程分别为

$$y_{\max} = y + \Delta y_{\max} = y + \frac{ad \sin \beta}{b \sin \alpha - d \sin(\alpha + \beta)} \quad (9)$$

$$y_{\min} = y + \Delta y_{\min} = y + \frac{a(d-8) \sin \beta}{b \sin \alpha - (d-8) \sin(\alpha + \beta)} \quad (10)$$

夹角 α 对线性度的影响最大^[15],但夹角过大会降低接收的散射光强度并增大反射镜长度而凸出仪器,因此直接取 $\alpha=40^\circ$ 。以 a 、 c 、 d 、 f 为优化量并合理设定取值范围,联立式(1)~式(10)后建立约束条件:

$$\begin{cases} 100 \leq a \leq 800 \\ 0 \leq c \leq \frac{a \sin \alpha - b}{1 + \sin \alpha} \\ -2 \leq d \leq 10 \\ 6 \leq f \leq 50 \\ \alpha = 40^\circ \\ y_{\max} \geq 500 \\ y_{\min} \leq 200 \\ (a - c) \sin \alpha \leq 200 \end{cases} \quad (11)$$

3 算法优化过程

3.1 引力搜索算法 (GSA)

引力搜索算法^[17]是由伊朗的克曼大学教授 RASHEDI E 等学者提出的一种智能优化算法,该算法将搜索粒子看作一组在 n 维空间运行的物体,物体间通过万有引力相互作用吸引,适度值较大的粒子惯性质量越大,因此万有引力会促使物体们朝着质量最大的物体移动,从而逐渐逼近最优解。引力搜索算法具有较强的全局搜索能力与较快的收敛速度,很多学者也对其进行改进,进一步增强了其优化能力^[18-20]。

算法首先随机生成 N 个 n 维初始粒子, 设第 i 个粒子的坐标为 $X_i = \{x_i^1, x_i^2, \dots, x_i^m, \dots, x_i^n\}$, 其中 x_i^m 表示第 i 个粒子在第 m 维空间中的坐标。则在 t 时刻或第 t 次迭代时, 任意第 j 个粒子对第 i 个粒子在第 m 维的吸引力定义为

$$F_{ij}^m(t) = G(t) \frac{M_i(t)M_j(t)}{R_{ij}(t)+r} [x_j^m(t) - x_i^m(t)] \quad (12)$$

实验证明, 直接用欧氏距离 $R_{ij}(t)+r$ 代替原引力公式中的距离平方 $R_{ij}^2(t)$, 可以取得更好的效果^[17], 其中 r 为一个很小的常数, 防止分母为 0。 $G(t)$ 为 t 时刻的万有引力常数, 随宇宙年龄的增加而减少, 一般表示为 $G(t) = G_0 \exp(-kt/T)$ 。改变式中 k 的大小, 可调整算法的收敛速度, k 的值越大, 随着算法迭代 $G(t)$ 值减小的速度越慢。 $[x_j^m(t) - x_i^m(t)]$ 用来表征第 m 维度引力分量的比例大小。粒子质量 $M_i(t)$ 与粒子的适应度有关, 粒子适应度越大, 粒子质量就越大, 对其他粒子的吸引力就越强。粒子质量 $M_i(t)$ 的计算公式为

$$m_i(t) = \frac{f_i(t) - w(t)}{b(t) - w(t)} \quad (13)$$

$$M_i(t) = \frac{m_i(t)}{\sum_{k=1}^N m_k(t)} \quad (14)$$

式中: $f_i(t)$ 为 t 时刻第 i 个粒子的适应度, $b(t)$ 和 $w(t)$ 分别为 t 时刻所有粒子中最好和最差的适应度。根据式 (12)~式 (14) 得到每个粒子在各维度受其他粒子的合力, 以及牛顿第二定律加速度 $a_i = F_i/M_i$, 即可求得本次迭代的粒子加速度并更新粒子速度与位置。引力搜索算法的具体流程如图 6 所示, 在达到停止条件前循环迭代, 不断更新粒子信息, 直到达到停止迭代条件。

3.2 优化参数分析

以 a 、 c 、 d 、 f 为优化量, 分别对应于章节 3.1 中粒子的 x_i^1 、 x_i^2 、 x_i^3 、 x_i^4 这 4 个纬度坐标进行优化。此器件的优化目标是在限制器件宽度的情况下, 取得更好的线性度, 因此目标函数设定为最小值问题:

$$\min f(x) = \frac{S_{\max}}{S_{\min}}$$

式中: $S_{\max}$ 为式 (4) 中测量距离最近处的灵敏度; $S_{\min}$ 为测量距离最远处的灵敏度。根据章节 1 分析, 量程越大或宽度越小, 量程两端的灵敏度差距会越明显, 因此算法会将量程逐渐逼近 200 mm~500 mm, 宽度逼近 200 mm。根据引力搜索算法原理, 编写 python 算法程序, 设定章节 3.1 中初始引

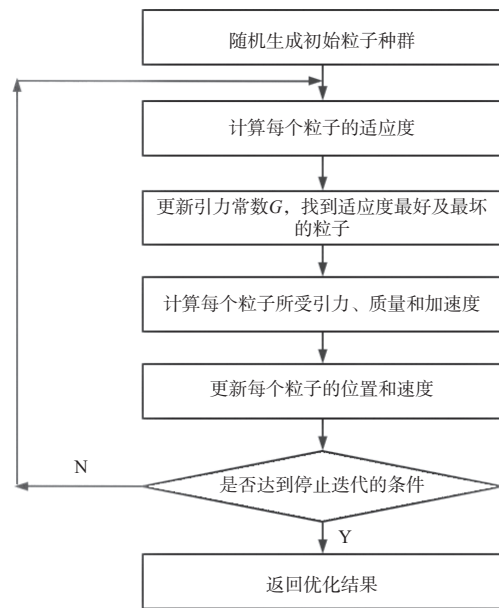


图 6 引力搜索算法流程图

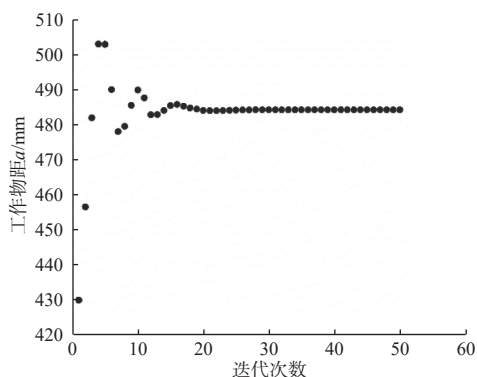
Fig. 6 Flow chart of gravitational search algorithm

力常数 $G_0=20$, $r=1$, $k=10$, 迭代次数为 50 次, 初始随机粒子数为 200。

本模型中有较多不等式约束, 对于函数的不等式约束, 使用罚函数法在目标函数中添加障碍函数使约束问题转化为无约束问题。本文采用罚函数法中的内点障碍函数法, 该方法可在解空间边界筑起高墙, 粒子靠近边界时会使函数值陡然增大。基于此方法, 在程序中生成初始随机粒子时, 检测是否符合约束条件, 若不符合则重新生成。

3.3 优化结果

对迭代过程中的最佳粒子位置进行跟踪记录, 每次迭代后其各维度参数及目标函数结果如图 7 和图 8 所示, 各参数变量随着迭代次数的增加逐渐趋于稳定, 获得所需的最佳结构参数, 目标 $S_{\max}/S_{\min}$ 值随着迭代逐步降低, 表征该系统的线性度逐步提高。



(a) 工作物距 a 随迭代次数的变化

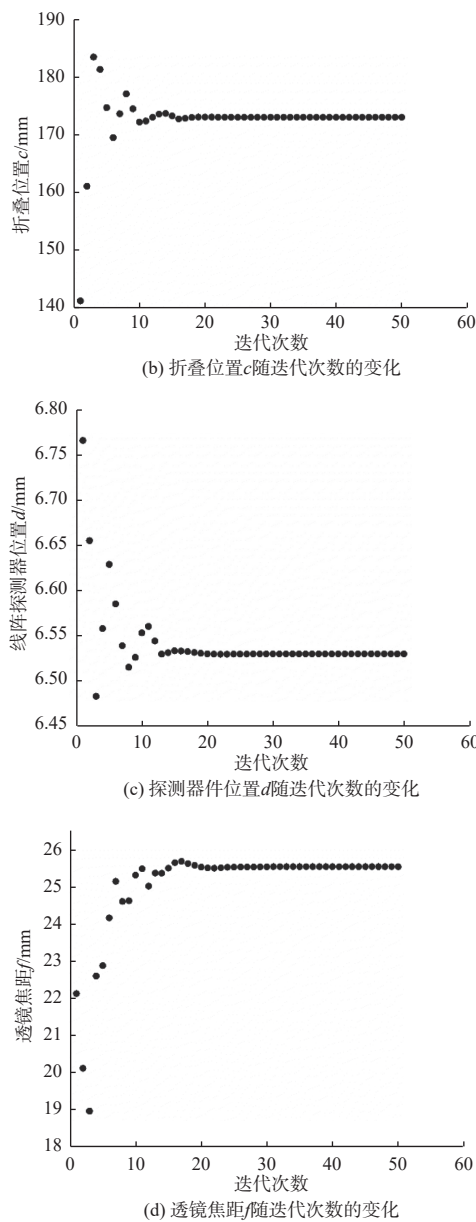


图 7 算法迭代过程

Fig. 7 Algorithm iteration procedure

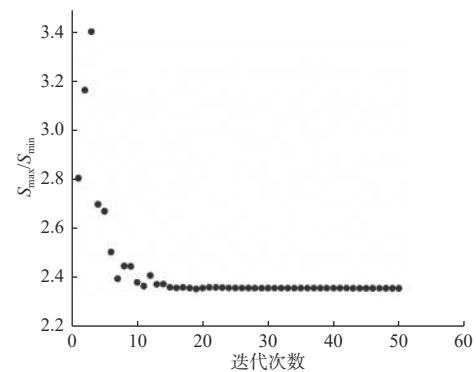


图 8 目标 $S_{\max}/S_{\min}$ 随迭代次数的变化

Fig. 8 Target $S_{\max}/S_{\min}$ changes with the number of iterations

参数优化结果如表 1 所示。

表 1 算法优化后的结构参数

Table 1 Structural parameters optimized by the algorithm

$S_{\max}/S_{\min}$	a/mm	$\alpha/(\text{^\circ})$	c/mm	d/mm	f/mm	w/mm	$S_{\max}$	$S_{\min}$
2.357	484.19	40	173.04	6.53	25.54	200	0.040 9	0.017 4

一般激光三角法直接采用经验及一定计算来选定参数。作为对比参照,同样利用经验法确定透镜焦距 $f=25\text{ mm}$, 光轴经过线阵 CMOS 中间即 $d=4\text{ mm}$, 则利用量程 $200\text{ mm}\sim 500\text{ mm}$, 宽度 $w=200\text{ mm}$ 这 3 个约束可计算得 a 、 α 、 c 值。未经过算法优化的结构参数如表 2 所示。

表 2 未经过算法优化的结构参数

Table 2 Unoptimized structural parameters

$S_{\max}/S_{\min}$	a/mm	$\alpha/(\text{^\circ})$	c/mm	d/mm	f/mm	w/mm	$S_{\max}$	$S_{\min}$
2.769	500.44	32.61	129.33	4	25	200	0.044 4	0.016 0

而对于非折叠激光三角结构,在相同的 $200\text{ mm}\sim 500\text{ mm}$ 量程、宽度 200 mm 约束下采用引力搜索算法优化其结构,以 a 、 d 、 f 为优化量,计算非折叠结构的最佳参数,可优化得其参数如表 3 所示。

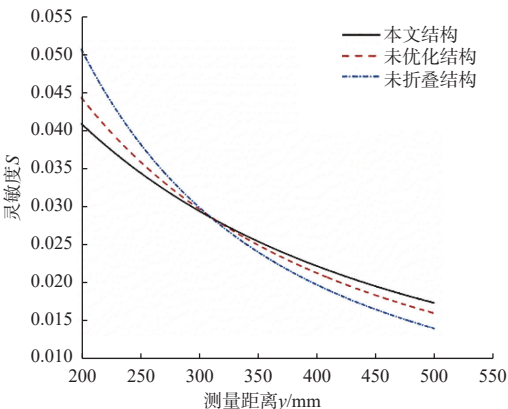
表 3 优化后的非折叠结构参数

Table 3 Optimized non-folding structure parameters

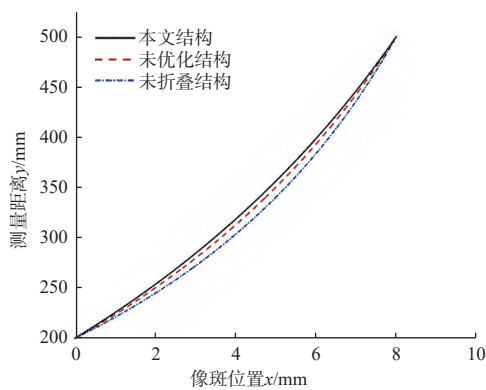
$S_{\max}/S_{\min}$	a/mm	$\alpha/(\text{^\circ})$	d/mm	f/mm	w/mm	$S_{\max}$	$S_{\min}$
3.62	291.12	40	6.91	18.74	200	0.050 7	0.014 0

3 种结构的灵敏度与输入输出曲线如图 9 所示。

由表 1~表 3 可知,在宽度相同的情况下都分别优化出最佳参数,本文参数结构与未优化的同结构相比, 500 mm 处的灵敏度提高了 8.75% ; 与非折叠结构相比, 500 mm 处的灵敏度提高了 24.29% 。由图 9 可见,本文优化结构的量程两端灵敏度差异较小,在量程范围内的灵敏度分布更加平均,输出更接近直线。采用最小二乘法对输入输出曲线进



(a) 测量距离 y 处的灵敏度 S



(b) 系统的输入输出曲线

图 9 3 种结构对比

Fig. 9 Comparison of three structures

行直线拟合, 本文优化结构的非线性误差为 7.43%, 均方误差为 9.56; 未优化参数结构的非线性误差为 8.90%, 均方误差为 11.34; 而非折叠结构的非线性误差为 11.40%, 均方误差为 14.27, 线性度较差。

4 结论

本文提出了一种提高激光三角测量线性度的优化方法。在改进结构中将所有器件摆放在同一横向直线上, 可以明显减少器件的横纵向宽度并提高线性度, 降低远距离测量的误差。比较结果表明, 相比于经验法与原非折叠结构, 此优化方法有更好的理论依据和优化效果, 对激光三角器件的体积与线性度具有多方面正向优化作用, 具有现实意义。

本文是对激光三角结构优化的一个环节, 所采用的优化算法同样适用于其他量程或器件选型的结构优化, 并可通过修改约束条件来匹配更多应用场景, 具有普适性。本结构也有一定不足, 所需反射镜的长度与反射镜与成像透镜距离成正比, 为使结构紧凑也需对反射镜的长度做出一定约束, 同时未来也将对算法的迭代速度等方面进行进一步改进。

参考文献:

- [1] DONGES A, NOLL R. Laser measurement technology: fundamentals and applications[M]. Berlin Heidelberg: Springer, 2015: 247-252.
- [2] 孙有春, 庞亚军, 白振旭, 等. 激光三角测量法应用技术[J]. 激光杂志, 2021, 42(4): 1-8.
SUN Youchun, PANG Yajun, BAI Zhenxu, et al. Application technology of laser triangulation[J]. Laser Journal, 2021, 42(4): 1-8.
- [3] CHEN W X, NI Z B, HU X H, et al. Research on pavement roughness based on the laser triangulation[J]. *Photonic Sensors*, 2016, 6(2): 177-180.
- [4] COSTA M F M. Optical triangulation-based microtopographic inspection of surfaces[J]. *Sensors*, 2012, 12(4): 4399-4420.
- [5] MORENO-OLIVA V, FLORES-DIAZ O, ROMÁN-HERNÁNDEZ E, et al. Vibration measurement using laser triangulation for applications in wind turbine blades[J]. *Symmetry*, 2021, 13(6): 1017-1031.
- [6] 南卓江, 陶卫, 赵辉. 激光三角测量技术的应用与前景[J]. 自动化仪表, 2019, 40(12): 1-5.
NAN Zhuojang, TAO Wei, ZHAO Hui. Application and prospect of laser triangulation technology[J]. *Process Automation Instrumentation*, 2019, 40(12): 1-5.
- [7] 秦阳阳, 王利霞, 朱正宇. 基于 CCD 的激光三角法测量 BLT 的性能研究[J]. 自动化应用, 2020(8): 54-56.
QIN Yangyang, WANG Lixia, ZHU Zhengyu. Study on the performance of laser triangulation measurement of BLT based on CCD[J]. *Automation Application*, 2020(8): 54-56.
- [8] 刘凯媚, 陶卫, 陈潇, 等. 可自适应位移变化的玻璃厚度激光三角测量方法[J]. 中国激光, 2020, 47(1): 147-154.
LIU Kaimei, TAO Wei, CHEN Xiao, et al. Laser triangulation method of glass thickness with adaptive displacement change[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(1): 147-154.
- [9] PAN W Q, ZHANG D W, LIANG C, et al. A high-precision laser displacement measurement system[C]//Applied Optics and Photonics China 2021. Beijing: SPIE, 2021: 120652F.
- [10] ADAMOV A A, BARANOV M S, KHRAMOV V N. Optimization of parameters in a modified laser triangulation method[C]//International Symposium on Optics and Biophotonics: Saratov Fall Meeting. Saratov: SPIE, 2019: 1106607.
- [11] 蔡逸, 刘常杰. 激光三角法测距传感器的参数优化[J]. 传感技术学报, 2017, 30(10): 1472-1477.
CAI Yi, LIU Changjie. Parameter optimization of laser triangulation ranging sensor[J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2017, 30(10): 1472-1477.
- [12] 张欣婷, 吴倩倩, 亢磊. 基于自准直原理的紧凑型激光位移传感器光学系统设计[J]. 应用光学, 2023, 44(4): 720-725.
ZHANG Xinting, WU Qianqian, KANG Lei. Design of

- optical system of compact laser displacement sensor based on autocollimation principle[J]. *Journal of Applied Optics*, 2023, 44(4): 720-725.
- [13] 张欣婷, 亢磊, 安志勇, 等. 改进型激光三角测头设计[J]. *红外与激光工程*, 2018, 47(10): 298-302.
ZHANG Xinting, KANG Lei, AN Zhiyong, et al. Design of improved laser triangulation probe[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(10): 298-302.
- [14] NAN Z J, TAO W, ZHAO H. Development of a small-size laser triangulation displacement sensor and temperature drift compensation method[J]. *Measurement Science & Technology*, 2021, 32(9): 095107-1-095107-9.
- [15] 白福忠, 张小艳, 刘珍, 等. 激光三角法中工作角对系统灵敏度的影响[J]. *应用光学*, 2017, 38(5): 826-830.
BAI Fuzhong, ZHANG Xiaoyan, LIU Zhen, et al. The influence of operating angle on system sensitivity in laser triangulation[J]. *Journal of Applied Optics*, 2017, 38(5): 826-830.
- [16] 徐科军. 传感器的线性度指标综述[J]. *电气电子教学学报*, 2016, 38(4): 70-71.
XU Kejun. Overview of linearity index of sensors[J]. *Journal of Electrical & Electronic Education*, 2016, 38(4): 70-71.
- [17] RASHEDI E, NEZAMABADI-POUR H, SARYAZDI S. GSA: a gravitational search algorithm[J]. *Information Sciences*, 2009, 179(13): 2232-2248.
- [18] 许文俊, 王锡淮, 肖健梅, 等. 基于改进自适应黑洞机制的引力搜索算法[J]. *计算机应用研究*, 2022, 39(10): 3046-3054.
XU Wenjun, WANG Xihuai, XIAO Jianmei, et al. Gravitational search algorithm based on improved adaptive black hole mechanism[J]. *Application Research of Computers*, 2022, 39(10): 3046-3054.
- [19] ALIREZANEJAD M, ENAYATIFAR R, MOTAMENI H, et al. GSA-LA: gravitational search algorithm based on learning automata[J]. *Journal of Experimental and Theoretical Artificial Intelligence*, 2021, 33(1): 109-125.
- [20] HU H, CUI X X, BAI Y P. Two kinds of classifications based on improved gravitational search algorithm and particle swarm optimization algorithm[J]. *Advances in Mathematical Physics*, 2017: 2131862-1-2131862-7.