

文章编号 1004-924X(2023)14-2040-12

CAD 立体模型多源匹配的 ICF 靶位姿测量

陈赵杰¹, 周 洋², 宋 薇^{1*}

(1. 上海大学 机电工程与自动化学院, 上海 宝山 200444;

2. 中国科学院 上海光学精密机械研究所 高功率激光物理联合实验室, 上海 嘉定 201800)

摘要: 本文提出一种基于 CAD 立体模型匹配的位姿测量方法, 用于解决高功率激光装置中微小靶的高精度定位问题。该方法利用 CAD 文件信息构建靶的立体模型, 将立体模型与 3-CCD 多源图像进行关联匹配, 避免了传统定位方法中将多源图像单独处理产生的误差叠加问题。本文基于模型探索点的 Chamfer 距离转换定义靶的匹配度函数, 用于评估模型与靶的匹配程度, 并利用遗传算法 (GA) 对该函数进行寻优求解得到靶的测量位姿。针对 GA 容易陷入局部最优值问题, 提出一种基于分层的自适应遗传算法 (HAGA) 提高算法的搜索精度和效率。为提升复杂工程的系统调试效率, 本文利用 OpenGL 图形库搭建仿真系统, 实现靶的仿真成像、离线算法调试等功能。仿真系统避免了系统中安装误差、加工误差以及相机环境光等诸多因素的干扰, 能够更方便的对算法进行调试和验证, 提高工程效率; 实验还搭建了 3-CCD 定位测量平台用于对不同靶型准直状态的定位调整。测量结果显示靶的平移定位误差小于 $3.5\ \mu\text{m}$, 角度误差小于 0.07° , 其误差小于实际测量系统的误差要求, 验证了测量算法在实际工程中应用的可行性。

关键词: 高功率激光装置; CAD 模型; 靶定位; 遗传算法; OpenGL 仿真

中图分类号: TP391.4; TP249 **文献标识码:** A **doi:** 10.37188/OPE.20233114.2040

CAD stereo model multi-source matching for ICF target pose measurement

CHEN ZhaoJie¹, ZHOU Yang², SONG Wei^{1*}

(1. School of Mechatronic Engineering and Automation, Shanghai University,
Shanghai 200444, China;

2. Joint Laboratory of High Power Laser and Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

* Corresponding author, E-mail: song_wei@shu.edu.cn

Abstract: This study proposes a CAD stereo model matching-based positional measurement method to solve the high-precision positioning problem of tiny targets in high-power laser devices. The proposed method uses CAD file information to construct a stereo model of the target and correlate it with 3-CCD multi-source images for matching, avoiding the error superposition problem arising from the separate processing of multi-source images in traditional positioning methods. In this study, we defined the matching degree function of the target based on the Chamfer distance conversion of the model exploration point, which was used to evaluate the matching degree of the model and target. A genetic algorithm (GA) was

收稿日期: 2023-01-02; 修订日期: 2023-02-01.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 61105029)

used to find the optimal solution of the function to obtain the measured poses of the target. To address the problem of the GA being susceptible to a local optimum, a hierarchical adaptive genetic algorithm (HAGA) was developed to improve the search accuracy and efficiency of the algorithm. To improve the system debugging efficiency of complex engineering, this study used the OpenGL graphics library to build a simulation system to realize the functions of target simulation imaging and offline algorithm debugging. The simulation system avoids the interference of various factors, such as installation error, processing error, and camera ambient light in the system, and can debug and verify the algorithm conveniently as well as improve the engineering efficiency. An experiment was performed using a 3-CCD positioning measurement platform for the positioning adjustment of different target collimation states. The measurement results showed that the target translation and positioning error was less than $3.5\text{ }\mu\text{m}$, and the angle error was less than 0.07° , which is less than the error requirement of the actual measurement system. This verifies the feasibility of the measurement algorithm in actual engineering applications.

Key words: high power laser device; CAD model; target positioning; genetic algorithm; OpenGL simulation

1 引 言

激光惯性约束聚变(Inertial Confinement Fusion, ICF)技术是解决能源短缺问题的一种有效途径,在该实验中,需要将高功率激光装置中的多路激光同时引导在目标靶位置上,从而产生高能能量^[1]。系统对靶定位的精度要求较高,同时为适应不同的实验需求,需要对形状结构不同的多类型靶进行位姿全方位测量,并将其调整为目标的准直姿态。

目前 ICF 系统中最常见的靶定位测量方法是成像观测法^[2],其对靶位姿测量原理是依靠多路 CCD 相机系统的成像技术对靶姿态进行在线测量。国内外许多学者针对这一系统提出了多种姿态测量方法。冯博^[3]等提出基于图像拼接的方法,用于对 ICF 终端光学元件的高精度测量。该方法包含图像配准和图像融合两个部分,可有效地提高元件检测精度和效率。文中还与 SIFT (Scale Invariant Feature Transform) 算法进行对比,结果表明其测量精度优于 SIFT 算法,为后续靶定位测量提供了新思路。冯斌^[4]等提出了一种基于改进 SIFT 算子的方法,通过建立靶离线图像库,采集基准与靶标准位置特征信息等,实现了离线采集,在线匹配定位的功能。张鹏程^[5]等从视觉控制算法角度出发,提出了基于图像雅克比矩阵的多目显微视觉信息融合技术,用于解决靶精确定位问题。该方法通过控制器使目标靶

当前位姿逐渐收敛于期望位姿,其精度相较于传统图像方法有较大的提升。国外学者中,E. tekke^[6]等为美国国家点火装置(National Ignition Facility, NIF)提出了利用 CAD 模型进行靶位姿检测的方案,该方案利用一种基于 CAD 模型的可视化操作控制系统对靶进行位姿调整,操作者可以直观地观察到画面中模型的运动变化,并将其调整到目标位置。除此之外,E. compain^[7]等利用靶的三维信息,在没有模拟靶的情况下,计算实际靶边缘与模型图像之间的距离关系来调整位姿,能够更好适应大体积异性靶的姿态测量,但系统存在无法获取靶图像细节,只能得到轮廓边缘的问题,限制了测量精度。

上述靶定位方法中大多数方法都是基于传统的图像处理方法,通过对视觉系统采集到的靶图像进行特征点、特征形状的提取,计算得出靶或其特征点在空间中的姿态值。这种方法依赖于图像处理算法的精度和速度,并且对于不同的实验靶需要进行不同的特征点提取处理和计算,对于系统中不同的靶型适应性较差。为了在保证靶定位精度的前提下能够方便快速地针对不同靶型进行定位测量,本文提出一种基于靶 CAD 模型的位姿测量方法。该方法利用待测靶的三维 CAD 模型,在模型边缘轮廓线上等间隔采样得到轮廓点,然后将其投影到三个正交相机系统的成像平面上从而得到模板探索点,并与三个相机采集到的图片轮廓线对应,并由此建立探

索点与轮廓之间的匹配度函数衡量图像中的靶姿态是否与模型一致。最后利用加入分层的自适应遗传算法(Hierarchical Adaptive Genetic Algorithm, HAGA)求解匹配度函数的最优值,其结果就是待测靶在空间中的所求姿态值。

本文使用靶的CAD模型与多幅图像中的目标进行关联匹配,实现了多视角图像之间匹配误差的相互制约,可以避免多幅图像匹配时产生的误差叠加;同时通过将CAD模型映射在不同图像的中心位置处比较,可以补偿多相机系统外参标定误差对精度的影响。除此之外,对于不同的靶型只需要提供其对应的CAD文件数据即可实现位姿测量,不需对不同的靶型采集图像特征信息,因此提高了系统的通用性与便捷性。

2 位姿测量基本原理

2.1 基于3-CCD正交监测的靶位姿测量方法概述

本文基于高功率物理实验装置中的靶姿态校准系统,设计并搭建了一套3-CCD靶位姿测量装置,其结构简图如图1所示。

该装置由三个正交的CCD相机组成,由于实验所用靶均为微型靶(直径约为300 μm),因此由相机搭载显微镜头构成显微视觉系统进行观测。上下方相机的光轴处于同轴状态,且位于竖直方向,两个相机均采用正投光源,侧方的相机光轴与竖直光轴垂直交于一点,采用背投光源,且该点位置默认为靶室的中心,系统中的每个光

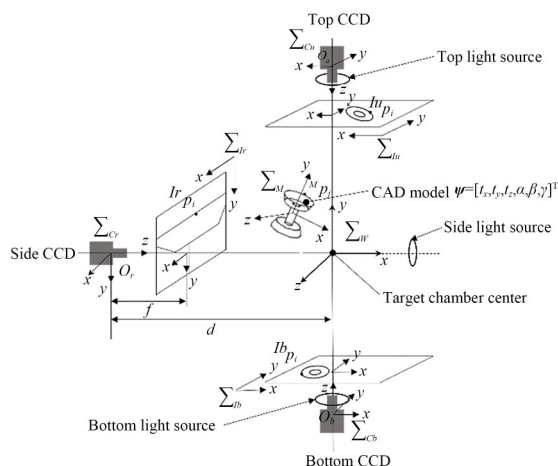


图1 3-CCD靶位姿测量装置结构示意图

Fig. 1 Structure of 3-CCD target pose measuring device

源均能独立控制,避免光源之间的干扰^[8]。待测靶固接于多轴送靶机构末端,由送靶机构送入靶室中,经成像系统测量求得靶的精确位置和姿态。为便于描述不同坐标系之间的坐标转换关系,本文定义世界坐标系(靶室原点坐标系)为 Σ_w ,模型坐标系 Σ_M ,相机坐标系 Σ_{Cu} , Σ_{Cr} , Σ_{Cb} 以及图像坐标系 Σ_{lu} , Σ_{lr} , Σ_{lb} 。

本文所提出的靶的位姿测量方法分为三个部分(如图2所示):基于CAD文件构建模型,基于匹配度函数评估模型,以及模型优化求解。基于CAD文件构建模型阶段是利用靶的CAD模型文件,将储存好的三角形线段数据经过计算处理,提取出模型探索点的过程。基于匹配度函数阶段则是设计匹配度函数,使其用于评估模型探索点与相机获取的图像轮廓的匹配程度。最后

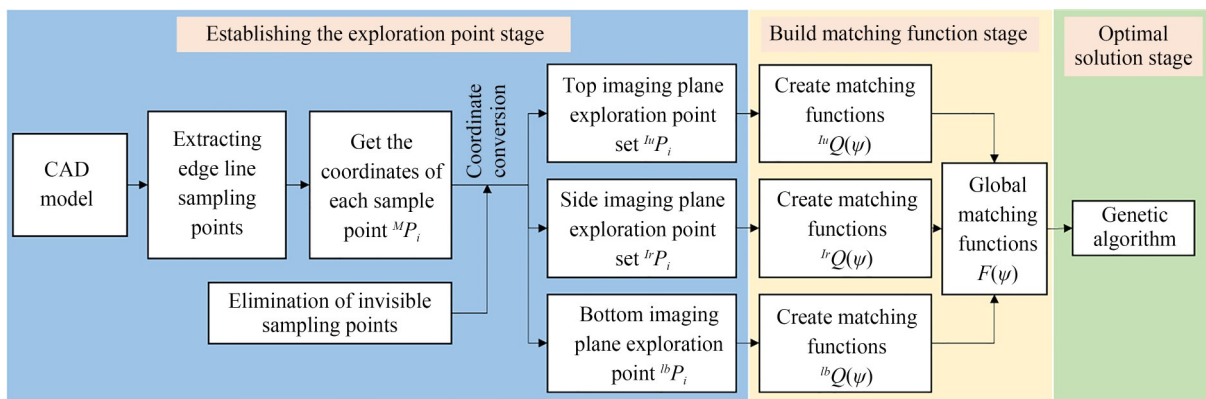


图2 基于CAD模型多源匹配的位姿测量方法流程

Fig. 2 Flowchart of CAD model based multi-source matching for positional measurement method

的模型优化求解阶段是利用遗传算法优化模型得到匹配度函数的全局最优值,即靶的位姿测量值。

2.2 基于 CAD 文件构建模型

相对于球靶,柱腔靶具有位置和姿态空间多维测量的需求,更具通用性。因此以柱腔靶为例,说明基于 CAD 文件构建模型的过程。

文中所用待测靶的 CAD 文件以 STL 格式保存,该文件格式可以将模型的表面细分成大量的三角形网格,并将每个三角网格的顶点坐标保存在文件中,这样就可以用一系列封闭的三角形网格描述模型形状^[9]。对于同一个模型,从不同的方位观察该模型时,会形成不同的边缘和轮廓线,故需要判断哪些轮廓线是模型处于该方位时视觉“可见”的,在其上的采样点将用于后续的模型匹配,故将其采集得到探索点集。

从三角形网格文件到模型探索点集的建立可以分为以下几个步骤:

(1) 将 STL 文件中的三角形顶点坐标数据读取。

(2) 将得到的三角形坐标数据构建顶点列表,用三个顶点列表序号表示一个三角形,创建三角形索引表,形成以三角形构建的模型轮廓,见图 3(a)。

(3) 将提取到三角形索引表转换为线段表示,其中线段可以分为两类:普通线段和切边线段,切边线段是在所处观察位置下,观察到模型最边缘处的线段^[10]。当模型在世界坐标系下处于某一个姿态时,其相对相机的姿态同时可以确定,因此可以判断出边是否属于切边线段,并将非边缘线段消除,见图 3(b)。

(4) 采用 OpenGL 深度测试方法消除不可见的边缘线,其原理是 OpenGL 渲染物体时采用深度缓冲区存储每个像素点的深度信息,然后用待渲染点的像素的深度值和当前缓冲区中的值进行比较,如果大于当前缓冲区中的值就将该像素信息丢弃,最后将不可见线段消除。然后在剩余边缘线上进行等间距采样得到采样点集,见图 3(c)。该图中,处于该视角下的一些轮廓边缘被消除,并在可见边缘线段上得到采样点。

(5) 将采样点集经过一系列投影变换形成成

像面上的模型探索点集。

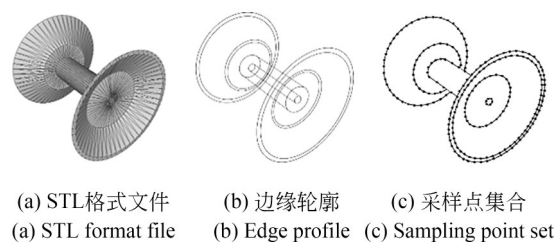


图 3 STL 格式文件变换流程

Fig. 3 STL format file conversion process

假设该模型的采样点集上有任意一点在坐标系 $\sum_M$ 表示为 $^M p_i$, 则模型中所有的边缘轮廓线离散采样点集合可表示为:

$$U = \{^M p_i, 0 < i < N\}, \quad (1)$$

式中: N 为靶 CAD 模型边缘轮廓线采样点的个数。

由模型坐标系和世界坐标系之间的关系可知,模型上任意点 $^M p_i$ 在坐标系 $\sum_w$ 中可表示为:

$$^w p_i = {}^w T_M \cdot {}^M p_i, \quad (2)$$

其中: ${}^w T_M$ 表示模型坐标系与世界坐标系的转换矩阵。定义模型坐标系在世界坐标系下的表示为 $\psi = [t_x, t_y, t_z, \alpha, \beta, \gamma]^T$, 则 ${}^w T_M$ 为变量 ψ 的函数,同时 ψ 也是靶在世界坐标系中的姿态值,即待测量值。根据 CCD 相机的成像原理,可以求得任意一点 $^M p_i$ 在相机坐标系下的表示 $^{cu} p_i$:

$$^{cu} p_i = {}^{cu} T_w \cdot {}^w p_i = {}^{cu} T_w \cdot {}^w T_M(\psi) \cdot {}^M p_i, \quad (3)$$

其中: $^{cu} p_i$ 为模型边缘轮廓上任意一点在 $\sum_{cu}$ 坐标系的表示, ${}^{cu} T_w$ 为顶部相机的外参矩阵(以顶部相机为例,其余相机相同)。

定义相机的内参矩阵为:

$$K = f \begin{bmatrix} dx & 0 & u_0 \\ 0 & dy & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

其中: f 为 CCD 相机的焦距, dx 为 x 方向 1 mm 内的像素个数, dy 为 y 方向 1 mm 内的像素个数, u_0 和 v_0 分别是光轴通过相平面的实际位置,单位是像素。点 $^M p_i$ 最终成像到图像坐标系 $\sum_{lu}$ 下可用式(5)表示:

$$^{lu} p_i = K \cdot {}^{cu} p_i(\psi) = K \cdot {}^{cu} T_w \cdot {}^w T_M(\psi) \cdot {}^M p_i, \quad (5)$$

式(5)中相机的内外参数矩阵可认为是经过标定后的常量值,且 wT_M 是关于变量 ψ 的函数,因此可将其简化为:

$${}^u p_i = f_u(\psi, {}^M p_i), \quad (6)$$

式(6)表示了在CAD模型上的任意边缘轮廓上采样点转换为成像平面上的像素点的映射关系,且转换的像素点位置是由模型在 $\sum_w$ 坐标系下位姿 ψ 和点 ${}^M p_i$ 所决定的。

经过上述投影变化过程,在不同相机坐标系下可以得到不同位姿的模板探索点集合。

2.3 基于匹配度函数评估模型

由公式(6)可以得到模型坐标系下点变换为图像坐标系下点的映射关系。前文所定义的模型中所有边缘轮廓离散采样点集 U 经过变换可得到在图像坐标系下的模型探索点集 ${}^u U$,假设探索点集中每个点 ${}^u p_i$ 和采集图像的轮廓像素点之间的最近距离为 d_i ,则可用式(7)表示探索点集与图像轮廓匹配程度的好坏:

$$f(\psi) = \sum_i^N d_i / N, \quad (7)$$

式中: N 为探索点的个数。

当式(7)的值为最小值0时表示模型的位姿与图像中的靶的位姿是完全匹配的,即此时的 ψ 就是所求的靶的位姿测量值。因此,对靶的位姿测量问题就转换成求匹配度函数式(7)的最小值问题。式(7)所示为顶部CCD图像中的匹配情况,另外两个CCD与此相同,故定义新的函数同时描述三个相机所采集图像与模型边缘的匹配程度:

$$F(\psi) = (f_u(\psi) + f_r(\psi) + f_b(\psi)) / 3, \quad (8)$$

该式表明系统中多幅图像可建立一个统一的函数关系来表示空间中CAD模型与靶的匹配程度,各图像的误差相互制约从而抑制误差的叠加^[11]。

但由于式(8)需要确定图像中的边缘点与模型探索点的一一对应关系,再计算二者间的距离,存在困难。因此,本文采用Chamfer距离转换的方法进行匹配^[12]。将一幅表示目标轮廓的二值图像转化为灰度图像,用灰度值表示原始二值图像中相对应像素点距其最近边缘轮廓的距离。利用上述方法即可将模型中每个探索点距图像轮廓的最近距离求出。

根据每个探索点 ${}^u p_i$ 在Chamfer距离映射图上对应的灰度值,可将系统内每个相机采集到的图片与模型的匹配度函数定义为:

$${}^u Q(\psi) = \sum_i^n d_i({}^u p_i) / n, \quad (9)$$

$${}^r Q(\psi) = \sum_i^n d_i({}^r p_i) / n, \quad (10)$$

$${}^b Q(\psi) = \sum_i^n d_i({}^b p_i) / n, \quad (11)$$

其中: $d_i({}^u p_i)$ 表示每个探索点在顶部相机采集图像的Chamfer距离映射图上的灰度值, n 为映射在每个成像平面上探索点的个数,用探索点的灰度平均值来表示模型与该图像中目标靶的匹配程度(其余相机同理)。则定义整个系统的匹配度函数为:

$$F(\psi) = 1 - \frac{1}{255} \cdot \frac{{}^u Q(\psi) + {}^r Q(\psi) + {}^b Q(\psi)}{3}, \quad (12)$$

为了符合适应度值越高,匹配度越好的规律,在公式中加入图像灰度最大值255进行了归一化反转处理,则 $F(\psi)$ 的取值范围为 $0 \leq F(\psi) \leq 1$ 。

这里,为了验证式(12)是否能够有效衡量模型探索点和图像的匹配程度,将靶放置在世界坐标系的原点位置,即 $\psi = (0, 0, 0, 0, 0, 0)$ 。将CAD模型按照在坐标系 $\sum_w$ 下不同的姿态值设置,分别得到不同姿态下的探索点集合,计算其匹配度值在测量范围内的变化情况。

首先将模型姿态值全部置为0,单独考察位置 t_x, t_y, t_z 变换对匹配度值的影响。令 t_x, t_y, t_z 在区间 $[-10, 10] \mu\text{m}$ 的范围内变化,匹配函数 $F(\psi)$ 的分布如图4(a)~4(c)所示。再将模型所在的位置值全部置为0,单独考察姿态值变换对匹配度值的影响。由于腔靶是圆柱形物体,其围绕 y 轴旋转的角度 β 对于靶的姿态值无影响,故只需考虑其绕 x, z 轴旋转角度变换即可,令 $\beta = 0^\circ$,做出 $-2^\circ \leq \alpha, \gamma \leq 2^\circ$ 范围内的匹配度值分布图,如图4(d)所示。

从图4可以看出,当位置3个参数中设置任意1个为目标值0时,其余两个参数在范围内变化时均是越靠近目标值0处,匹配度值越高,表明匹配度函数在位置 $\psi = (0, 0, 0, 0, 0, 0)$ 处取得最大的匹配度值,此时模型探索点与图像匹配。同理,角度在范围内变化时,随着 α, γ 逐渐趋近于0,其匹配度函数值也越高,验证了匹配度函数的

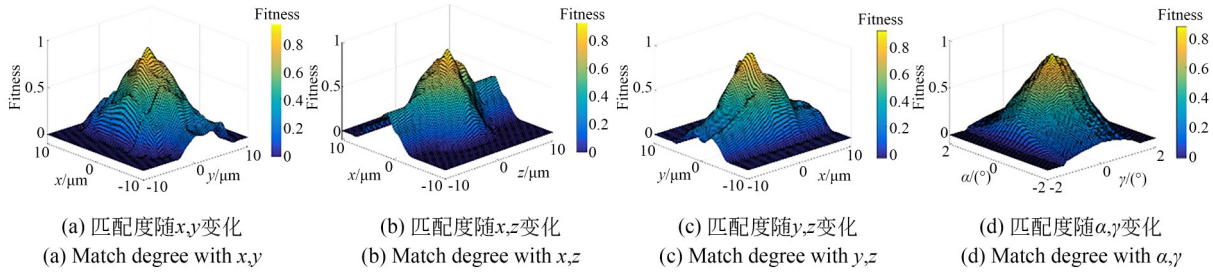


图 4 模型匹配度在不同自由度上的分布

Fig. 4 Distribution of model matching degree at different degrees of freedom

有效性。因此,靶的位姿测量问题可以转换成求匹配度函数的最大值优化问题。

3 基于分层的自适应遗传算法 (HAGA) 优化求解

遗传算法 (Genetic Algorithm, GA) 是一种常用的优化方法,其思想是依据自然界生物进化的方法来模拟求解函数的最优值^[13]。本文采用该算法来解决匹配度函数 $F(\psi)$ 的寻优问题,将模型在坐标系 $\sum_w$ 的不同位姿 ψ 设置为算法中不同个体的初始基因,采用二进制对模型位姿 $\psi_i^N = [t_x, t_y, t_z, \alpha, \beta, \gamma]^T$ 进行统一编码,其中 N 表示基因的代数, $i = 1, 2, \dots, p$, p 表示每一代基因的个体数量。在计算过程中算法通过交叉、变异等遗传操作获得优秀的基因个体,使得下一代个体更趋近于最优解。GA 算法对模型的优化过程如图 5 所示。

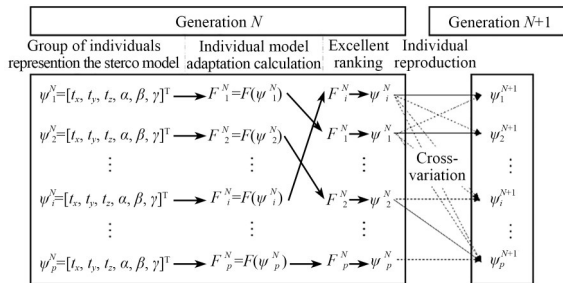


图 5 遗传算法进化过程演示

Fig. 5 Demonstration of GA evolution process

在传统的遗传算法中交叉概率 P_c 和变异概率 P_m 是固定值,如果 P_c 设置过大,种群会较快地产生新个体,但不利于保存适应度值较高的优秀

个体;反之如果 P_c 过小,会降低种群更新速度,导致搜索效率低下。如果 P_m 设置过大,那么 GA 算法就等同于随机搜索算法,体现不出进化的优势;如果 P_m 设置过小,导致种群中产生新个体的概率变小,不利于种群的更新,从而限于局部最优值^[14]。因此 GA 无论是在搜索效率还是精度上都具有较大的局限性。

Srinivas^[15]等人针对上述问题提出了自适应遗传算法 (Adaptive Genetic Algorithm, AGA),动态地改变 P_c 和 P_m ,以期得到较优结果。AGA 的交叉概率 P_c 和变异概率 P_m 计算方式如下:

$$P_c = \begin{cases} P_{cmax} - \frac{(P_{cmax} - P_{cmin})(f' - f_{avg})}{(f_{max} - f_{avg})}, & f' \geq f_{avg} \\ P_{cmax} & f' < f_{avg} \end{cases} \quad (13)$$

$$P_m = \begin{cases} P_{mmax} - \frac{(P_{mmax} - P_{mmin})(f' - f_{avg})}{(f_{max} - f_{avg})}, & f' \geq f_{avg} \\ P_{mmax} & f' < f_{avg} \end{cases} \quad (14)$$

其中: f_{max} 和 f_{avg} 分别是种群中最大匹配度值和平均匹配度值。 f 是参与变异的父代个体匹配度值, f' 是参与交叉的双亲中较大的匹配度值。且 $P_{cmax} > P_{cmin} \in (0, 1)$, $P_{mmax} > P_{mmin} \in (0, 1)$ 。

AGA 算法能够在一定程度上解决原始 GA 算法搜索精度不高和搜索效率低的问题,本文在此基础上进一步考虑基因位数对搜索效率的影响,提出一种基于分层的自适应遗传算法 (HAGA),实现由少位“粗”匹配到多位“精”匹配的自适应转换,提高算法的搜索精度和效率。

设置参数 T 为分层搜索阈值,当匹配度值小于 T 时,进行初级搜索,当匹配度值大于 T 时,进

行高级搜索。初级搜索的搜索范围定义为相机的视场范围,种群个体基因串位数较少,因此搜索速度较快,精度较低,用于算法快速收敛到目标个体附近。高级搜索范围在原基础上缩小,每个个体基因串位数增加到满足最小分辨率要求的数值,用于在目标群体附近进行高精度搜索目标值。通过这种分层搜索方式可以在保证精度的前提下,有效地降低算法搜索的耗时。表1是两种算法具体参数设置。

表1 不同算法参数设置

Tab.1 Algorithm Parameter Setting

参数	GA 算法	HAGA 算法
种群数量	100	100
迭代次数	200	200
交叉率	0.5	P_c
变异率	0.1	P_m
基因串位数	36	27→36
搜索范围	$\pm 300 \mu\text{m};$ $\pm 3^\circ$	$\pm 300 \rightarrow \pm 100 \mu\text{m};$ $\pm 3^\circ \rightarrow \pm 1^\circ$
分层阈值	—	$T=0.75$

分别做出腔靶和球靶的匹配度值迭代曲线图,如图6所示。

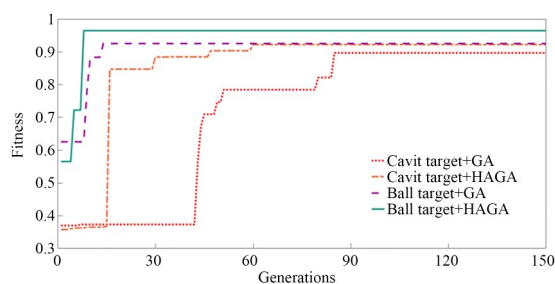


图6 两种算法匹配度值曲线

Fig. 6 Two algorithms matching degree value curve

图6中可以看出分层改进型遗传算法对于腔靶的优化过程有较大的提升。普通遗传算法在进化到40代时才出现了适应度值明显提升,并且随后又出现了较长的滞留期,直到代数接近100代时,优化结果才趋于收敛,改进的HAGA算法则能够利用动态改变交叉率和变异率以及自动分层搜索的方式实现快速收敛。相较于普通遗传算法,加入分层和自适应后的HAGA算法在

初级搜索后适应度值比原算法第一次收敛的适应度值更高,并且在高级搜索时适应度值还能逐步提高,最终达到收敛。球靶由于CAD模型简单,匹配环境相较于腔靶更为单一,模型姿态很容易收敛于真实姿态值,故两种算法均在进化到14代之前就达到收敛。

对腔靶分别采用GA、HAGA两种算法进行验证,并且将GA算法的基因位数分别设置为27和36位,做出其匹配度曲线,如图7所示。其中,GA1表示GA算法中基因位数设为27位,GA2表示GA算法中的基因位数设为36位。

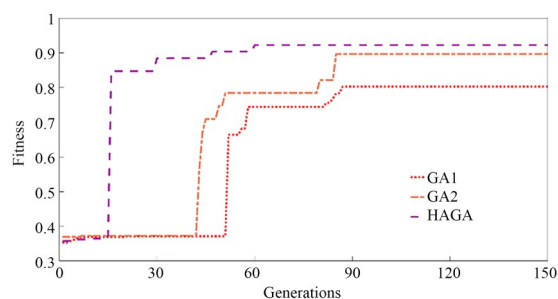


图7 GA、HAGA两种算法测量精度对比

Fig. 7 Comparison of measurement accuracy between GA and HAGA

图7中可以看出不同的基因位数对于位姿测量精度有明显的影响,当基因位数设置为36位时,其适应度值比位数为27的时候更高,此时位姿测量结果更为精确,但此时得到的结果为局部最优值,传统的遗传算法很难跳出局部最优,收敛到全局最优。HAGA算法由于交叉率和变异率跟随平均适应度值变化而变化,在搜索空间中实现了快速收敛,最终的适应度值比原GA算法适应度值更高,位姿更加准确。

4 测量实验与结果

4.1 基于OpenGL库的仿真系统搭建

为了验证本文所提出的测量方法的有效性,按照图1所示的位姿测量系统结构搭建了计算机模拟仿真系统。目前实验中用到次数最多的靶型为腔靶,故以腔靶为例说明仿真系统的构建。OpenGL库是计算机领域中用于渲染2D、3D矢量图形的跨平台应用程序编程接口,用于在虚拟环境下模拟真实场景^[16]。仿真系统的相

机成像系统模拟通过 OpenGL 库自带的坐标转换实现,物体经过视图变换、模型变换、投影变换、视口变换等步骤从立体模型转换为二维平面图像^[17]。

图 8 为仿真系统的操作界面图,通过该窗口可以实现腔靶的位姿调整、仿真成像以及位姿测量等功能,由于实际系统中需要光源为靶提供照明,所以在仿真系统中相同位置分别设置光源用以照明靶上下及侧面。图 8 中下方相机成像内圈呈现黑色是由于此刻只开启了上方相机的光源。

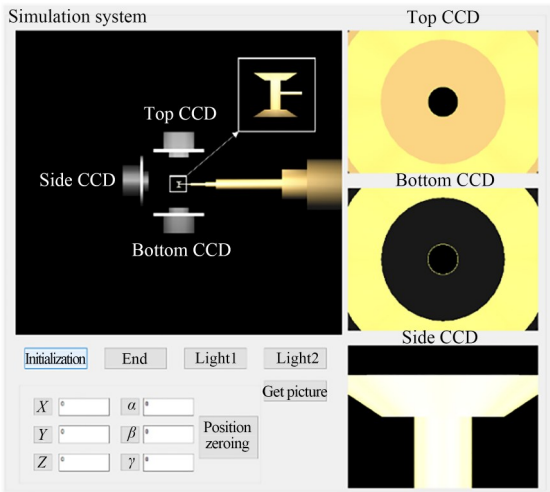


图 8 ICF 靶位姿调整仿真系统

Fig. 8 ICF target posture adjustment simulation system

4.2 靶位姿的仿真调试

利用上述 OpenGL 仿真系统对腔靶进行了位姿调试,以验证本文所提算法的可行性。

将按照真实尺寸(见图 9)绘制的腔靶仿真模型置于仿真系统中,由于腔靶属于旋转体,在建模时绕 y 轴旋转而成,所以在计算靶姿态值时可令绕 y 轴旋转的角度 $\beta=0^\circ$,不计入测量。设置靶在 $\sum w$ 下的位姿 $(t_x, t_y, t_z, a, \gamma)$ 为几组不同的值,测量结果见表 2。

根据表 2 数据,腔靶在不同方向上的平均平移误差量分别为 $\Delta t_x=2.31\text{ }\mu\text{m}$, $\Delta t_y=2.41\text{ }\mu\text{m}$, $\Delta t_z=2.44\text{ }\mu\text{m}$,在不同姿态角度上的平均误差为 $\Delta \alpha=0.04^\circ$, $\Delta \gamma=0.05^\circ$ 。在仿真系统中,不存在零件本身加工误差、真实系统的安装误差以及镜头参数误差对测量精度的影响,即误差来源于算

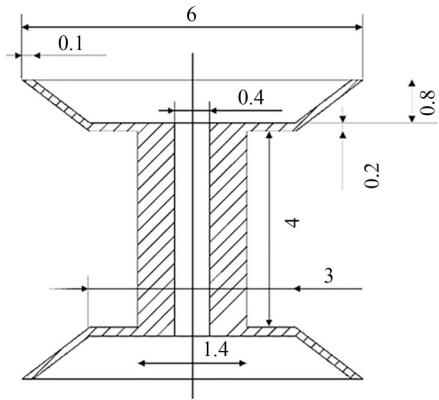


图 9 腔靶尺寸示意图(单位:mm)

Fig. 9 Diagram of cavity target size (unit: mm)

表 2 腔靶位姿测量结果						
Tab. 2 Cavity target pose measurement results						
实验次数		$t_x/\mu\text{m}$	$t_y/\mu\text{m}$	$t_z/\mu\text{m}$	$\alpha/(^\circ)$	$\gamma/(^\circ)$
1	真实	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	测量	1.67	2.33	1.98	-0.05	-0.07
2	真实	100.00	0.00	0.00	0.50	0.00
	测量	98.96	-3.25	2.14	0.53	0.04
3	真实	0.00	100.00	0.00	0.50	0.90
	测量	3.34	96.94	-2.50	0.46	0.96
4	真实	100.00	100.00	0.00	1.80	-1.50
	测量	102.19	103.32	-3.92	1.86	-1.55
5	真实	100.00	100.00	0.00	-1.80	1.60
	测量	96.68	100.09	1.67	-1.77	1.65

法中模型和图像匹配的过程。在模型匹配时精度会受限于图像的分辨率和由基因串位数决定的模型最小分辨率,所以存在测量误差。图像中一个像素所代表的实际物理尺寸为 $\Delta \lambda=4.73\text{ }\mu\text{m}$,在不同自由度上模型的平移最小分辨度为 $\Delta t_x=\Delta t_y=\Delta t_z=4.68\text{ }\mu\text{m}$ 。数据表明,腔靶在不同方向上的平均平移测量误差和最大平移测量误差均小于仿真图像的分辨率和模型的最小平移分辨度,满足系统的平移测量误差要求。

对于腔靶的角度测量误差,其同样受限于仿真图像的分辨率,仿真图像角度分辨率计算公式如下:

$$\Delta \theta = \arcsin(\Delta \lambda / d), \tag{15}$$

经过计算图像的角度分辨率 $\Delta \theta \approx 0.05^\circ$,在不同自由度上模型的旋转最小分辨度为 $\Delta \alpha=\Delta \gamma=0.0625^\circ$ 。腔靶在不同方向上的平均角度测量误

差和最大角度测量误差均接近于仿真图像的角度分辨率和模型最小角度分辨率,故满足系统的角度测量误差要求。

4.3 靶位姿调整实验

为了验证该方法在实际工程中的可行性,按照图 1 所示结构搭建了 3-CCD 靶定位测量实验平台,如图 10 所示。

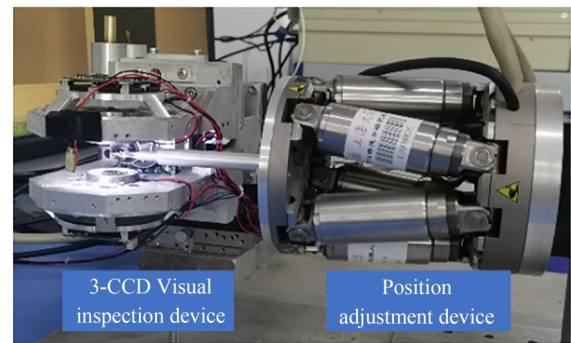


图 10 3-CCD 靶定位测量平台
Fig. 10 3-CCD Target positioning experimental platform

图 10 中左边的部分为视觉检测装置,该部分的 3 路正交相机型号为 WAT90H2,分辨率为 768×576 。每一路相机通过各自的图像采集卡控制其信号传输,完成图片和视频流的采集功能。右边为靶位姿调整装置,采用是六自由度并联机器人平台,通过将平台末端和靶固连,将其送入视觉检测装置中进行靶调整测量实验。

靶位姿调整实验目的是将靶的姿态调整到准直状态,测量平台采用了基于视觉反馈控制方法进行靶定位调整。由于靶移动是通过控制六自由度平台进行控制的,当视觉装置测量出其在 $\sum_w$ 坐标系下的位姿时,需要计算出靶的调整量 $\Delta\Omega$,如果直接按 $\Delta\Omega$ 进行调整,由于靶和平台末端存在长度为 L 的距离,会导致靶位置于目标位置不符。故需要通过几何关系计算出平台末端调整量 $\Delta\bar{\Omega}$,公式如下:

$$\Delta\bar{\Omega} = \begin{bmatrix} -t_x + L \sin \alpha \\ -t_y - L \sin \alpha \cos \gamma \\ -t_z + L(\cos \alpha - 1) \\ -\alpha \\ -\gamma \end{bmatrix}. \quad (16)$$

将球靶放置于正交相机可视范围内的不同位置,通过本文方法对靶的位姿进行测量并控制

送靶机构进行调整。图 11 为经过调整后的结果图。表 3 记录了四组位于不同初始位置下的球靶调整数据。

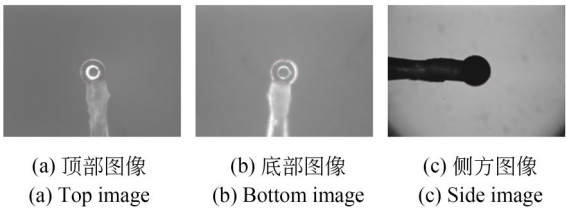


图 11 球靶位姿调整结果
Fig. 11 Ball target position adjustment results

表 3 球靶调整实验结果
Tab. 3 Experimental results of ball target adjustment(μm)

实验次数	调整次数	t_x	t_y	t_z
1	0	-104.2	-12.5	4.2
	1	-2.8	0.0	1.6
	2	-2.1	0.1	0.9
2	0	4.1	-158.3	-16.7
	1	1.7	-8.3	-4.1
	2	0.0	-3.4	1.6
3	0	-18.8	-2.1	-191.7
	1	-2.0	-1.7	-15.6
	2	-0.8	-1.5	1.8
4	0	-216.7	-225.1	-299.3
	1	-126.1	-151.2	-210.2
	2	-10.5	-8.3	-21.3
	3	-2.6	-1.2	-3.2

表 3 中每组实验调整次数为 0 表示球靶的初始放置位置,后面的数据是经过每次调整后的测量值。前 3 组实验初始偏差分别设置在三个不同坐标轴方向上,最后一组实验则在每个坐标轴方向上均有偏差。实验结果表明在单一方向上设置偏差,经过 2 次调整后均可以将靶调整在目标位置附近,且在每次调整时,该方向上的偏差不断减小,逐渐收敛于目标值。在多方向上设置偏差,经过 3 次调整后即可将靶调整到目标位置附近,且球靶的定位误差最大为 $3.2 \mu\text{m}$,在沿 x, y, z 轴方向上的平均定位误差分别为 $1.4 \mu\text{m}, 1.6 \mu\text{m}, 1.9 \mu\text{m}$ 。

同理将腔靶放置于正交相机可视范围内的不同位姿下,图 12 为腔靶调整结果,表 4 记录了三组位于不同初始位置和姿态下的腔靶调整数据。

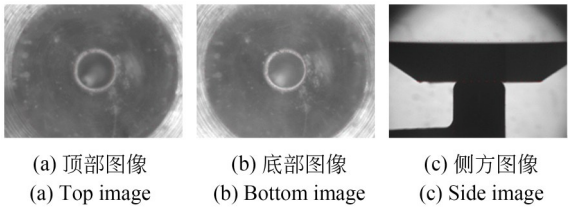


图 12 腔靶位姿调整结果
Fig. 12 Cavity target position adjustment results

表 4 腔靶调整实验结果						
Tab. 4 Experimental results of cavitytarget adjustment						
实验次数	调整次数	$t_x/\mu\text{m}$	$t_y/\mu\text{m}$	$t_z/\mu\text{m}$	$\alpha/(^{\circ})$	$\gamma/(^{\circ})$
1	0	-131.2	90.4	-45.1	1.22	-0.06
	1	21.3	-181.0	-9.2	0.17	-0.02
	2	2.7	-39.3	-1.2	-0.05	0.03
	3	0.9	-8.4	-0.9	-0.02	0.02
	4	-2.3	1.7	1.4	-0.03	0.02
2	0	79.3	-101.8	49.4	0.09	1.08
	1	12.4	-20.1	8.4	0.04	0.21
	2	3.4	-7.0	2.3	0.02	0.09
	3	2.0	-2.4	1.1	-0.02	0.04
	4	-1.5	-1.8	-3.2	-0.03	0.07
3	0	-99.2	-63.5	-76.1	1.12	0.91
	1	23.7	-171.2	-11.4	0.24	0.16
	2	4.9	-29.8	-3.9	0.07	0.05
	3	1.2	-7.3	-1.8	0.04	-0.02
	4	-2.3	-3.5	1.5	-0.04	0.05

表 4 的 3 组实验中腔靶的初始位姿均为随机放置,第 1 组实验角度偏差主要在绕 x 轴方向上,第二组实验角度偏差主要在绕 z 轴方向上,最后一组则在两个方向上同时设置了偏差。表中的每组实验分别记录了对应组别的调整过程,第 0 次表示待测靶的初始位姿,第 1 次表示经过一步

反馈控制策略调整后测量的位姿值,以此类推。在测量调整过程中,位置和姿态值同时进行调整,并逐渐向目标位姿值收敛,经过 4 次调整腔靶的定位误差基本满足腔靶的定位误差要求。在第 1 组和第 3 组实验中,沿 y 轴方向上的位置偏差出现了先增大后减小的趋势,其原因是在调整角度 α 时会引起靶在沿 y 轴方向上移动,此时沿 y 方向的调整量包含了原本的调整量和由角度变化引起的偏移量,随着角度偏差逐渐减小,其偏移量也会减小,直至接近目标值。

由表 4 可知,腔靶的位置最大定位误差 $3.5\ \mu\text{m}$,角度最大定位误差为 0.07° ,在沿 x,y,z 轴方向上的平均定位误差分别为 $2.0\ \mu\text{m},2.3\ \mu\text{m},2.0\ \mu\text{m}$,绕 x,z 轴的平均角度误差分别为 $0.03^{\circ},0.05^{\circ}$ 。腔靶在不同方向的平均定位误差均大于球靶,一是腔靶在位姿测量时本身存在的误差要大于球靶,二是由于腔靶在姿态调整中角度变化会影响位置的调整量,降低了腔靶的位置定位精度。实验数据表明,球靶和腔靶在经过至少 4 次测量调整后,其姿态满足准直状态,其定位误差小于 $3.5\ \mu\text{m}$,角度定位误差小于 0.07° 。

5 结 论

本文提出了一种基于 CAD 立体模型匹配的方法解决高功率激光装置中的靶定位问题。该方法避开传统方法中通过图像特征点或特征线来计算位姿的方式,将 CAD 模型与多源图像进行关联匹配并构建其匹配函数,利用 GA 算法求解其最优位姿。针对 GA 存在求解精度低,收敛速度慢的问题,提出了 HAGA 算法提高算法的搜索精度和效率。为了能够在不考虑系统安装误差和其它干扰因素的影响下验证算法的测量效果,建立基于 OpenGL 库的仿真系统对靶的位姿测量算法进行调试,验证了该测量方法的可行性。最后实验搭建了 3-CCD 靶位姿测量平台对靶进行定位调整实验,实验表明定位精度小于 $3.5\ \mu\text{m}$,角度误差小于 0.07° ,满足真实系统误差要求,验证了所提方法在实际工程中的可行性。

参考文献:

- [1] 王巧巧. 大国重器: 激光惯性约束聚变[J]. 现代物理知识, 2019, 31(3): 41-49.
WANG Q Q. A great power-laser inertial confinement fusion[J]. *Modern Physics*, 2019, 31(3): 41-49. (in Chinese)
- [2] 林炜恒, 朱健强, 任磊. 高功率激光装置中的靶定位及束靶耦合技术研究进展[J]. 中国激光, 2020, 47(4): 0400001.
LIN W H, ZHU J Q, REN L. Research progress of target positioning and beam-target coupling technology in high power laser devices[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(4): 0400001. (in Chinese)
- [3] 冯博, 陈凤东, 张建隆, 等. 基于图像拼接的惯性约束聚变终端光学元件在线检测[J]. 光学精密工程, 2014, 22(3): 555-561.
FENG B, CHEN F D, ZHANG J L, *et al.* Online inspection of final optics based on image mosaic for ICF system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(3): 555-561. (in Chinese)
- [4] 冯斌. ICF 激光驱动器束靶耦合瞄准定位研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
FENG B. *Research on Laser Alignment and Target Positioning of ICF Laser Driver*[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016. (in Chinese)
- [5] 张鹏程. 基于视觉的靶精密定位与多光束引导技术研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2014.
ZHANG P C. *Research on Target Precise Positioning and Multi-Beam Guidance Technology Based on Vision*[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2014. (in Chinese)
- [6] TEKLE EA, WILSON EF, PAIK TS, *et al.* CAD model and visual assisted control system for NIF target area positioners[J]. *office of scientific & technical information technical reports*, 2007.
- [7] COMPAIN E, MAQUET P, KUNC T, *et al.* Very high stability systems: LMJ target alignment system and MTG imager test setup[C]. *SPIE Optical Systems Design. Proc SPIE 9626, Optical Systems Design 2015: Optical Design and Engineering VI, Jena, Germany*. 2015, 9626: 543-555.
- [8] 毕列, 张娟, 杨毅, 等. 基于形变检测的弱微零件过盈装配控制[J]. 光学精密工程, 2021, 29(10): 2421-2431.
BI L, ZHANG J, YANG Y, *et al.* Interference fit control for weak micro-parts based on deformation detection[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2021, 29(10): 2421-2431. (in Chinese)
- [9] 戴现令, 申焱, 曹荣祥, 等. 基于三角剖分和轮廓分析的船舶焊缝特征识别[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(28): 12491-12498.
DAI X L, SHEN Y, CAO R X, *et al.* Feature recognition of ship welding seam based on triangulation and contour analysis [J]. *Science Technology and Engineering*, 2022, 22(28): 12491-12498. (in Chinese)
- [10] KONISHI Y, HANZAWA Y, KAWADE M, *et al.* Fast 6D Pose Estimation from a Monocular Image Using Hierarchical Pose Trees[M]. *Computer Vision - ECCV 2016*. Cham: Springer International Publishing, 2016: 398-413.
- [11] 宋薇, 刘勖, 章亚男, 等. 高功率激光装置中靶的进化式位姿检测[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(1): 215-223.
SONG W, LIU X, ZHANG Y N, *et al.* Evolutionary target pose measurement in high power laser device[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2015, 36(1): 215-223. (in Chinese)
- [12] SARI D M, PUTRANTI V WEKA. 3D object pose estimation using chamfer matching and flexible CAD file base[J]. *International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology*, 2020, 10(2): 461.
- [13] 杨从锐, 钱谦, 王锋, 等. 改进的自适应遗传算法在函数优化中的应用[J]. 计算机应用研究, 2018, 35(4): 1042-1045.
YANG C R, QIAN Q, WANG F, *et al.* Application of improved adaptive genetic algorithm in function optimization [J]. *Application Research of Computers*, 2018, 35(4): 1042-1045. (in Chinese)
- [14] 张伟, 韩宗旺, 程祥, 等. 基于机器视觉零件轴线直线度误差测量的研究[J]. 光学精密工程, 2021, 29(9): 2168-2177.
ZHANG W, HAN Z W, CHENG X, *et al.* Research on straightness error measurement of part axis based on machine vision [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2021, 29(9): 2168-2177. (in Chinese)
- [15] SINGH R, MIRIYALA SS, GIRI L, *et al.* Identification of unstructured model for subtilin production through *Bacillus subtilis* using hybrid genetic algorithm [J]. *Process Biochemistry*, 2017, 60: 1-12.
- [16] 赵辉, 王晓玲. 计算机图形学: OpenGL 三维渲染

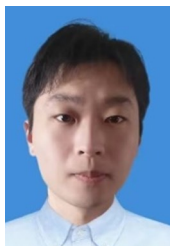
[M]. 北京: 海洋出版社, 2016.

ZHAO H, WANG X L. *Computer Graphics OpenGL Programming* [M]. Beijing: Ocean Press, 2016. (in Chinese)

[17] LI H, CHEN H Y. Implementation of a high-per-

formance multi-threaded media player module for a cross-platform game engine based on OpenGL [C]. *International Workshop of Advanced Manufacturing and Automation*. Springer, Singapore, 2022.

作者简介:



陈赵杰(1997—),男,山西晋中人,硕士研究生,2020年于东北石油大学获得学士学位,主要从事机器视觉、精密测量、机器人等方面的研究。E-mail: czj20722064@163.com

通讯作者:



宋 薇(1981—),女,辽宁铁岭人,博士,副研究员,分别于2006年、2009年在日本福井大学获得硕士、博士学位,主要从事机器视觉及精密测量方面的研究。E-mail:song_wei@shu.edu.cn