

文章编号: 0258-7025(2009)11-3035-04

一种新的惯性约束聚变用靶在线监测技术

冯 斌¹ 陈凤东² 李富全¹ 王礼全¹ 刘国栋²

(¹ 中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900;
² 哈尔滨工业大学光电测试技术与装备研究所, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要 为了实现惯性约束聚变(ICF)用靶的高精度定位,需要对靶的位姿进行监测。传统的视觉监测方法对照明、靶姿态等非常敏感,常需要人工参与判别。将尺度恒定特征变换(SIFT)算法引入到 ICF 靶监测领域,实现一种基于 SIFT 特征匹配的 ICF 用靶在线监测方法,实验表明采用该方法对靶位姿的监测精度可达到平移精度优于 $6\ \mu\text{m}$,转角精度优于 $0.5'$ 。

关键词 惯性约束聚变; 尺度恒定特征变换; 图像匹配; 亚像素; 靶定位

中图分类号 TP391.4 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20093611.3035

A Novel Inertial-Confinement-Fusion Targets Position On-Line Monitoring Method

Feng Bin¹ Chen Fengdong² Li Fuquan¹ Wang Liquan¹ Liu Guodong²

(¹ Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China
² Institute of Optoelectronic Measurement Technology and Equipment, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China)

Abstract A precise pose monitor is required for high precision target positioning in inertial-confinement-fusion (ICF) experiments. Conventional visual monitoring methods are sensitive to illumination and target pose and often need artificial judgment. This paper introduces scale invariant feature transform (SIFT) algorithm into ICF target monitoring domain and implements an on-line target monitoring method based on SIFT features matching. The experimental results of an on-line setting demonstrate that the translational and angle accuracy are better than $6\ \mu\text{m}$ and $0.5'$, respectively.

Key words inertial-confinement-fusion; scale invariant feature transform; image matching; sub-pixel; target positioning

1 引 言

在惯性约束聚变(ICF)打靶实验中,每打一发都要更换新靶,不仅甚多束激光需要与物理靶进行高精度束靶耦合,而且众多的物理诊断设备也需要精确准直,每次根据新靶来重新校准诊断设备是不现实的,只能通过靶的位姿监测和调整来使其保持在一个最有利于物理诊断和甚多束激光引导的位置上,因此靶定位就成为一个非常重要的关键技术,其精度直接影响到物理实验的结果。美国国家点火装置(NIF)要求靶定位精度优于 $10\ \mu\text{m}$,其靶定位系统采用基于数字散斑相关测量的靶定位方法^[1]。该系统靶监测单元是由 3 个正交的大数值孔径的显微

成像系统组成的,通过 CCD 对靶面成像,并用计算机对换靶前后的两幅图像进行相关处理,再结合步进电机来实现精确的靶定位。本文针对“神光 III”激光装置对靶定位的物理需求,提出一种基于尺度恒定特征变换(SIFT)^[2]算法的 ICF 用靶在线高精度末端监测方法,该方法采用反射式共轭传感器进行靶图像采集^[3],通过 SIFT 算法提取反馈信息,采用六自由度机器人作为末端靶位姿调整执行器^[4]实现高精度靶定位。由于 SIFT 算法匹配性好并具有亚像素定位精度,所以利用本方法提高了靶监测能力和精度,并且可以定量地监测靶的平移和转动,可以避免基于传统的空间坐标法靶定位过程中的误差积

收稿日期: 2009-03-31; 收到修改稿日期: 2009-06-15

基金项目: 国防预研基金(426020605)资助课题。

作者简介: 冯 斌(1976—),男,硕士,助理研究员,主要从事高功率固体激光技术方面的研究。

E-mail: fengbin_mail@tom.com

累及运动机构的回程差累积问题,在线实验结果证实了该方法的有效性,具有很好的应用价值。

2 基于 SIFT 的图像匹配技术

传统的通过干涉法^[5]、靶边缘信息^[6]和图像相关^[7,8]进行靶定位的方法,存在对照明、靶姿态非常敏感等不足,常需要人工参与判别。SIFT 算法可以大大降低上述干扰的影响,在提高靶定位精度方面具有优越性。

SIFT 算法是近年来计算视觉领域的最新成果,该算法受到广泛关注,在许多领域得到广泛应用^[9]。这主要是因为它具有以下特点:1)对图像旋转、尺度缩放、亮度变化具有不变性,对视角变化、仿射变换、噪声也保持很好的稳定性;2)SIFT 算法生成的图像特征的独特性好,信息量丰富,适用于在海量特征数据库中进行快速、准确的匹配;3)SIFT 特征点经过亚像素细分,具有很高的定位精度。

SIFT 特征是高维空间内的点特征,通过下面的提取过程得到:首先对输入图像 $I(x, y)$ 进行高斯卷积和高斯差分(DOG),构建图像尺度空间

$$\begin{cases} L(x, y, \sigma) = G(x, y, \sigma) * I(x, y) \\ D(x, y, \sigma) = L(x, y, k\sigma) - L(x, y, \sigma) \end{cases}, \quad (1)$$

其中 $G(x, y, \sigma) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp[-(x^2 + y^2)/2\sigma^2]$, σ 是尺度因子。

图像尺度空间构造过程如下:先对输入图像进行卷积运算,获得一组卷积图像称其为组,之后对这一组中相邻的卷积图像求差,获得差分图像;然后,将上一组卷积图像中的比例为原始图像 1/2 的图像缩小 2/3 作为初始图像,再采用上述的方式产生下一组卷积图像与差分图像。以此类推,可以获得多组高斯图像与高斯差分图像。

高斯差分图像中的局部极值点是候选特征点,采用 26 邻域法计算尺度空间的极值:即遍历所有尺

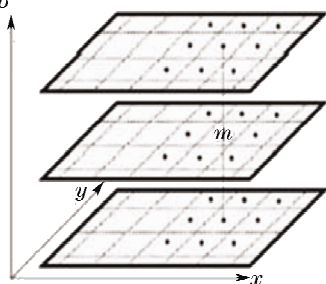


图 1 高斯差分图像的极值点

Fig. 1 Extreme in difference of Gaussian image

度下的高斯差分图像,找到所有 26 邻域极值点,其中 26 邻域由像素点所在图像的 8 个邻近点及上下邻近尺度图像中的 9 个邻近点组成,如图 1 所示。极值点被提取的条件是:其灰度值大于或小于其 26 个邻近点。

为了对局部极值点精确定位,用三维二次函数在该点处进行拟合,计算其插值位置,即对图像 $D(x, y, \sigma)$ 进行二次项泰勒展开

$$D(X) = D + \frac{\partial D^T}{\partial X} X + \frac{1}{2} X^T \frac{\partial^2 D}{\partial X^2} X, \quad (2)$$

其中 D 及其偏导是在该点上的取值, $X = (x, y, \sigma)^T$ 是相对于采样点的偏移量。求(2)式关于 X 的偏导并令其为零,得到特征点相对于采样点的精确偏移量

$$\hat{X} = -\frac{\partial^2 D^{-1}}{\partial X^2} \frac{\partial D}{\partial X}. \quad (3)$$

最后为了描述特征点,构建一个特征向量:即在高斯卷积图像中,计算以每一个特征点为中心的 16×16 窗口内的 256 个像素点的灰度梯度,如图 2(a)所示,每个点 $L(x, y)$ 的灰度梯度可以通过下式来计算

$$\begin{cases} u = L(x+1, y) - L(x-1, y) \\ v = L(x, y+1) - L(x, y-1) \\ m(x, y) = \sqrt{u^2 + v^2} \\ \theta(x, y) = \arctan\left(\frac{u}{v}\right) \end{cases}, \quad (4)$$

其中 m 是梯度向量模, θ 是梯度向量角。再将该窗口分为 16 个 4×4 个子窗口,在每个子窗口内把梯度向量高斯加权后累加到如图 2(b)所示的 8 个方向上,这样得到一个 $4 \times 4 \times 8 = 128$ 维的特征向量。

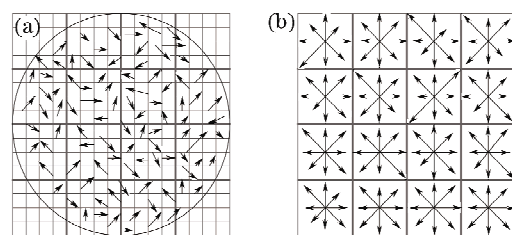


图 2 SIFT 特征描述器。(a)图像梯度;(b)特征点描述向量

Fig. 2 SIFT feature descriptor. (a) Gray gradient; (b) SIFT feature vector

这样图像点特征由一个向量描述,图像相关问题转化为向量匹配的问题。设 E 为一个 K 维空间采样点集合,如果 3 个相异点 $P, P', P'' \in E$ 且满足

$$\begin{cases} \forall P', |P - P'| \leq |P - P''| \\ |P - P'| = \sqrt{\sum_{i=1}^k (p_i - p'_i)^2}, \end{cases} \quad (5)$$

其中 p_i 为 P 的第 i 维元素, 则 P' 是 P 的最邻近点. 假设 P' 和 P'' 是 P 的最近邻和次近邻点, 定义匹配因子

$$\lambda = \frac{|P - P'|}{|P - P''|}, \quad (6)$$

如果 λ 小于设定阈值, 则 P' 是 P 的匹配点. λ 影响匹配的正确率和匹配点数量, λ 越小则两幅图像匹配点数量越少.

3 实验结果及分析

为了检验该方法的有效性, 在实际的反射式共轭传感器和六自由度机器人平台上, 进行与光栅传感器的比对实验: 驱动一个圆片靶, 步进平移, 每前进一

步, 采集一幅图像并记录一次光栅示值 (光栅标定精度: $0.5 \mu\text{m}$), 然后在相邻图像之间提取 SIFT 特征, 并进行匹配, 如图 3 所示, 其中圆代表平移前位置, 十字线代表转动后的位置. 根据获得靶的像素平移量, 计算出通过图像得到的平移量. 这个平移量与光栅得到的位移量进行比较, 结果如图 4 所示. 实验结果表明, 通过图像 SIFT 点特征检测的平移量与光栅检测的平移量, 两者的偏差绝对值小于 $5.5 \mu\text{m}$. 考虑到光栅的精度是 $0.5 \mu\text{m}$, 说明 SIFT 算法能以小于 $6 \mu\text{m}$ 的精度监测靶的相对运动.

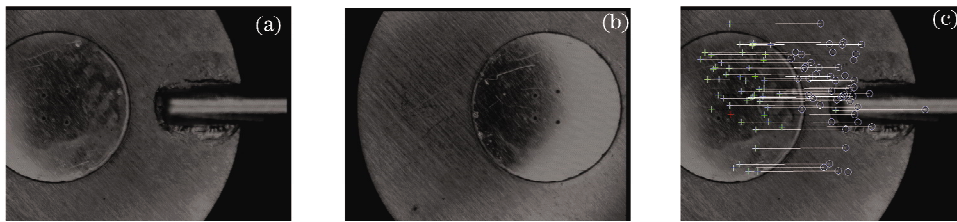


图 3 特征匹配结果. (a) 平移前; (b) 平移后; (c) 平移前/后的匹配点

Fig. 3 Feature matching result. (a) Before movement; (b) after movement; (c) the matched features between them

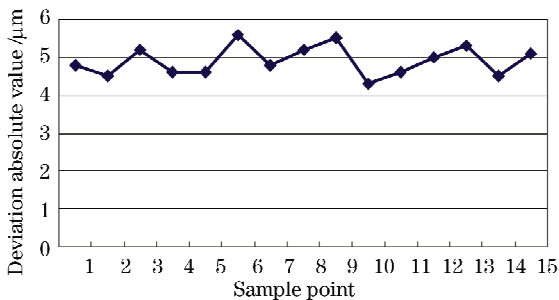


图 4 SIFT 点特征匹配与光栅检测比较

Fig. 4 Difference value between SIFT feature matching and the optical grating sensor

对于靶在传感器监测空间内的平面转动, 通过 SIFT 也可以精确监测. 图 5(a) 是平面靶相对转动图像及其匹配结果. 只需要 2 个匹配点就能够计算平面转角及转动中心的位置, 如图 5(b) 所示, 其中 s_1 和 s_2 是转动前的点, d_1 和 d_2 是转动后的点, 其连线的中

垂线交点即是转动中心, 由于 s_1 和 s_2 及 d_1 和 d_2 的坐标已知, 可以通过简单的解析法计算 θ 角, 即平面转角, 平面转角检测精度由匹配点的匹配精确决定.

上述采用的是平面靶, 在实际物理实验中, 更多的是打柱腔靶, 该类靶具有 6 个自由度, 其三维转动不能通过一个 CCD 反解出来, 通常需要上中下 3 路满足共轭成像关系的 CCD 联合监测, 才能反解出来. 共轭式传感器设计成 3 个正交的成像平面的原因之一, 也正是希望通过 3 个二维平面反解该类靶. 当靶绕某一条轴转动时, 相应的 SIFT 特征会产生有规律的运动, 通过上中下 CCD 信息融合, 可监测靶的空间姿态. 图 6 是靶沿着中心轴回转 $1'$ 时的图像及上下 CCD 图像转动前后的匹配结果. 其匹配点对的像素坐标 (部分点) 如表 1 所示.

表 1 CCD 图像匹配点

Table 1 Matched points of the CCD image

CCD position	Turn before	Turn after
Upper CCD	(263.086, 407.099)	(261.621, 375.851)
	(358.948, 56.752)	(357.79297, 25.453)
	(402.735, 69.863)	(401.65625, 38.531)
Lower CCD	(372.637, 55.128)	(371.476, 86.027)
	(298.551, 100.395)	(299.265, 130.953)
	(458.291, 169.854)	(457.968, 200.988)

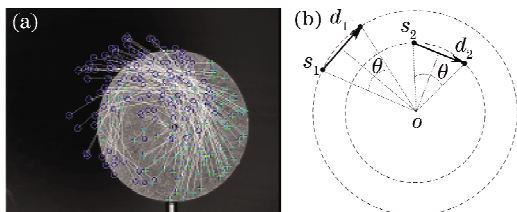


图 5 平面转动匹配结果(a)及转角计算方法(b)

Fig. 5 Matching result of planar turning (a) and the method to compute the turned angle(b)

图 6 和表 1 中匹配点的位置变化方向,反映了靶体的转动方向。根据上下 CCD 信息,测量各向俯仰角方法如图 7 所示。

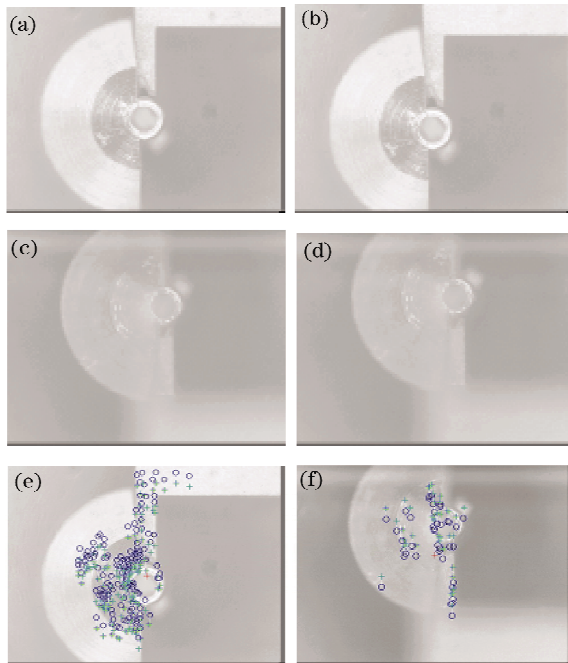


图 6 靶绕轴转动 $1'$ 时的图像和匹配结果。(a),(b)上 CCD 转动前/后图像;(c),(d)下 CCD 转动前/后图像;(e),(f)上/下 CCD 转动前/后匹配结果

Fig. 6 Matching results of target turning $1'$. (a), (b) Images of up CCD (before/after turning); (c), (d) images of down of down CCD (before/after turning); (e), (f) matching results (before/after turning)

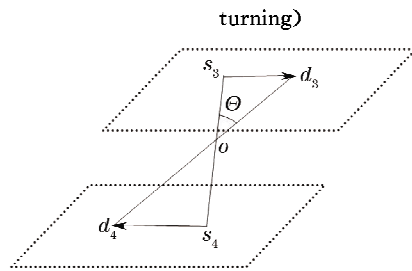


图 7 立体测角方法

Fig. 7 Method of stereo angle computing

靶体立体转动角 Θ 可根据简单的三角关系计算。在共轭传感器 $8.7 \mu\text{m}/\text{pixel}$ 的像素当量条件下,通过 SIFT 点匹配检测的转角与实际转角的差值优于 $0.5'$ 。

4 结 论

将 SIFT 算法引入到 ICF 靶监测领域,实现了一种基于 SIFT 特征匹配的靶在线监测方法。该方法采用反射式共轭传感器进行图像采集,通过 SIFT 算法提取反馈信息,指示六自由度机器人的末端执行器实现高精度靶定位。由于 SIFT 算法匹配性好并具有亚像素定位精度,提高了靶的监测能力和精度。在线实验结果证实了该方法的有效性。

参 考 文 献

- 1 LLE. The OMEGA target-positioning system[R]. Rochester: LLE, 1997. 145~159
- 2 D. G. Lowe. Distinctive image features from scale-invariant keypoints[J]. *International J. Computer Vision*, 2004, **60**(2): 91~110
- 3 Sun Lining, Liu Yanwu. ICF target positioning robot system[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2007, **19**(8): 1303~1307
孙立宁,刘彦武. ICF 靶支撑定位机器人系统研究[J]. *强激光与粒子束*, 2007, **19**(8): 1303~1307
- 4 Wu Huihan, Liu Guodong, Liu Bingguo. Study on location technique for ICF experiment targets [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2008, **29**(5): 774~777
吴慧兰,刘国栋,刘炳国. ICF 实验靶定位技术研究[J]. *半导体光电*, 2008, **29**(5): 774~777
- 5 Zheng Defeng, Wang Xiangzhao. Angular displacement measurement based on lateral shearing interferometer using plane-parallel plate[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(8): 1125~1129
郑德锋,王向朝. 一种基于平板横向剪切干涉的角位移测量方法[J]. *中国激光*, 2007, **34**(8): 1125~1129
- 6 Wang Haihong, Zeng Ni, Lu Wei *et al.*. Edge detection of laser imaging radar based on wavelet transform and mathematical morphology[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(6): 903~906
王海虹,曾妮,陆威等. 基于小波变换和数学形态学的激光成像雷达图像边缘检测[J]. *中国激光*, 2008, **35**(6): 903~906
- 7 Sun Wei, He Xiaoyuan, Quan Chenggen *et al.*. Three-dimensional rigid body displacement measurement based on digital image correlation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(5): 894~901
孙伟,何小元, C. Quan 等. 基于数字图像相关的三维刚体位移测量方法[J]. *光学学报*, 2008, **28**(5): 894~901
- 8 Dai Yaping, Huang Guanlong, Li Xuechun. Precision target positioning by digital speckle correlation measurement [J]. *Chinese J. Lasers*, 2000, **A27**(2): 135~139
戴亚平,黄关龙,李学春. 用相关测量技术实现精确靶定位技术研究[J]. *中国激光*, 2000, **A27**(2): 135~139
- 9 Zhang Ruijuan, Zhang Jianqi, Yang Cui *et al.*. Study on color image registration technique based on CSIFT [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(11): 2097~2103
张锐娟,张建奇,杨翠等. 基于 CSIFT 的彩色图像配准技术研究[J]. *光学学报*, 2008, **28**(11): 2097~2103