

## 破片群测速过程点匹配算法研究\*

徐树茂 高俊钊 桑晓月 雷志勇

(西安工业大学电子信息工程学院 西安 710021)

**摘要:**为了解决接触式破片群速度测试方法中多目标匹配问题,在一致点漂移算法的基础上提出了广泛性点匹配算法。该算法首先将点集进行约简;然后利用约简后点集的重要性质,采用多重EM迭代策略求得全局最优解;最后,找到不同测试面中测得的点集一一对应关系。通过仿真分析并与其他算法进行对比,证明提出的算法能够更好的解决破片群测速问题。该算法解决了破片群测试模型中难以将各个破片速度匹配的问题,极大的提高了破片群速度测试精度。

**关键词:**破片群;一致点漂移算法;广泛性点匹配算法;鲁棒性

**中图分类号:** TN2    **文献标识码:** A    **国家标准学科分类代码:** 520.604

## Research on point matching algorithm in fragment group velocity measurement process

Xu Shumao Gao Junchai Sang Xiaoyue Lei Zhiyong

(School of Electronic Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710021, China)

**Abstract:** In order to solve the problem of multi-objective matching in the speed testing method of contact fragment, we proposed a wide point set matching algorithm based on the uniform point drift algorithm. Our algorithm first reduces the point set, and then the global optimal solution is obtained by using multiple EM iterative strategies and the important properties of the reduced points set. Finally, we can find the corresponding relationship of the point set measured in different test surface. Through the simulation analysis and comparison with other algorithms, it is proved that the algorithm proposed in this paper can solve the problem of burst speed. Our algorithm solves the problem that it is difficult to match the speed of each fragment in the fragment test model, which greatly improves the speed test accuracy of the chip group.

**Keywords:** fragment group; coherent point drift algorithm; global point matching algorithm; robustness

## 0 引言

破片群速度<sup>[1]</sup>是毁伤分析的重要参数,破片群测速技术在靶场测试领域、目标毁伤领域有着广泛的应用,对战斗部毁伤研究起到了提供毁伤元数据的重要作用,而对破片群测速过程中解决破片群数量多导致无法确定不同时刻破片相互对应关系,针对破片群匹配关系的求解成为破片群速度测试技术的关键一环。

对多目标匹配与配准,点集仿射变换<sup>[2]</sup>等变化后的点集与原始点集进行匹配对应,起到了相同来源、不同位置、不同时刻所得点集匹配的重要作用,目前清华大学徐文立教授提出了基于几何推理与凸壳变换的点模式匹配算法<sup>[3]</sup>,安徽大学沈玲提出了基于中位点的分层匹配算法<sup>[4]</sup>,安徽大学朱明采用构造图像内部点亲近矩阵的方

法<sup>[5]</sup>,通过比较点集亲近矩阵的有序特征向量来获得匹配关系。该方式在匹配完全一一对应的点集时,对简单仿射变换和噪声干扰都可以给出不错的结果。一致点漂移算法是一种鲁棒的基于高斯混合模型的点集匹配算法<sup>[6]</sup>。该算法适用于刚性和非刚性变换下多维点集的配准<sup>[7-10]</sup>。对噪声、出格点和缺失点具有鲁棒性。

然而,这些算法在分段速度点匹配中仍存在一些缺点,如一致点漂移算法,对噪声、出格点、缺失点具有不错的鲁棒性<sup>[11]</sup>,但此算法只能对狭小范围内的点进行精准匹配<sup>[12]</sup>,而破片群数量多<sup>[13]</sup>、分布广,且具有多维性,具有较为复杂<sup>[14]</sup>的仿射变换,对此,本论文对广泛性一致点漂移算法<sup>[15]</sup>进行研究,以解决破片群速度精准测试的问题。

## 1 破片群速度测试基本方法

测试系统由薄膜压力传感器传感器、瞬态信号记录装

收稿日期:2017-06

\* 基金项目:西安工业大学科研创新团队建设计划项目资助

置。薄膜压力传感器由400个5 cm×5 cm的薄膜压力传感器组成1 m×1 m的薄膜压力传感器测试面,两测试面相距1 m布置(注:下文称5 cm×5 cm的薄膜压力传感器为小靶面,1 m×1 m的测试面成为大靶面)。

此结构的设计有利于提高测试精度,解决了以前接触式测量方法只能获取速度最快破片速度的弊端,为破片群速度测试提供了可靠保障。

薄膜压力传感器两侧没有压力差时,电极两端的电压始终保持在0 V,当破片与薄膜压力传感器发生碰撞后,在碰撞区域发生去极化现象,从而激发出一个瞬时电流脉冲信号,通过信号采集电路对脉冲信号进行调制和采样,如图1所示。脉冲信号持续时间即破片从开始接触靶面到彻底离开靶面的时间,以起爆时刻开始计时,根据脉冲起始时刻为节点,记录所有脉冲起始时刻值,根据小靶面拼接结构,可以区分不同小靶面破片过靶时刻,所得破片飞行时间如图2所示。

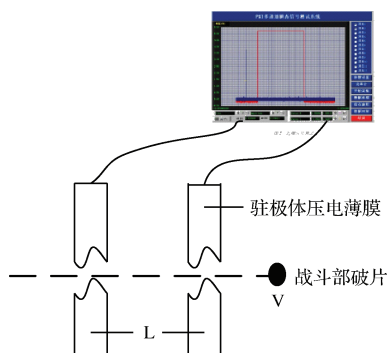


图1 双靶面薄膜压力传感器破片速度测试原理图

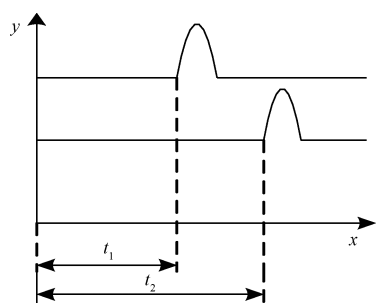


图2 破片飞行时间提取

根据两靶面所得破片飞行时间以及靶面间距,即可求得破片飞行速度。

$$v = L / (t_2 - t_1) \quad (1)$$

但由于破片飞散具有一定角度,经过两靶面的位置可能相差较大,因此如此计算可能引入误差,因此,可以通过读取两靶面上破片穿孔位置,求得破片在两靶面间的飞行距离 S,即根据式(2)即可求得准确的破片飞行速度,而不受破片斜入式影响测速精度。

$$v = S / (t_2 - t_1) \quad (2)$$

## 2 破片群匹配算法

在薄膜压力传感器测速模型上可以看到破片群的飞散特性是多维的、随机的,很难精确地获得各个破片的相应速度,因此需要建立在测试模型基础上,对每一破片速度进行匹配分析。

破片群由破片战斗部爆炸产生,因此破片群由同一点向四周飞散而出,如图3所示,经过一定距离的两个测试面时则按照破片散射特性,必然使距离较远的测试面所得点集是较近测试面点集的放大。加上测试面布置误差使两测试面所得点集具有一定的旋转、平移变换,因此如此情况中点集匹配过程为典型的仿射变换下的点集匹配。由于仿射变换空间维数较高,从而导致全局最优匹配点集较为复杂。因此本文首先将点集进行约简变换,将仿射变换问题约简为仅有旋转的刚体变换问题。

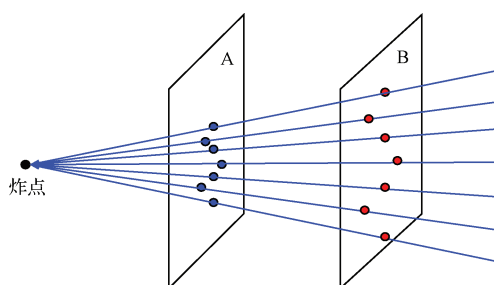


图3 破片群飞散特性

设二维的模板点集为:  $P = \{(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_M, y_M)\}$ , 而相应的目标点集为:  $Q = \{(x'_1, y'_1), (x'_2, y'_2), \dots, (x'_N, y'_N)\}$ , 其中 M 为模板点集大小, N 为目标点集大小。定义高斯混合模型的概率密度函数为:

$$p(y) = \sum_{m=1}^M P(m) p(y/m) \quad (3)$$

式中:

$$p(y/m) = \frac{1}{(2\pi\sigma^2)^{d/2}} \exp\left(-\frac{\|y - x_m\|^2}{2\sigma^2}\right) \quad (4)$$

由于破片群着靶坐标存在出格点和缺失点,增加均匀分布  $P(y/M+1) = 1/N$  作为目标点集相对于模板点集の出格点和缺失点的概率密度,并设  $\omega$  为该均匀分布的权重。对于上述所定义的高斯混合模型中所有的 M 个高斯分量 ( $m = 1, 2, \dots, M$ ), 均设其协方差为  $\sigma^2$ , 且设各个分量的混合概率  $P(m)$  均相同:  $P(m) = 1/M$ 。可以得到加权高斯混合模型概率密度函数:

$$p(y) = \omega \frac{1}{N} + (1 + \omega) \sum_{m=1}^M \frac{1}{M} p(y/m) \quad (5)$$

通过以上过程,待匹配的模板点集使用高斯混合模型的概率密度函数完成了拟合。由于式(5)所示的高斯混合模型概率密度函数中的各个高斯分量的质心代表了模板点集中的相应点,因此,假设待匹配点集之间满足仿射变换关系,在点集逐步趋近的过程中,由于点集之间各自对

应匹配点的逐步配准,这样反映点坐标位置误差大小的高斯混合模型中的协方差  $\sigma^2$  也会随之变化。因此,在点集匹配的完整过程中,需要求解的总的参数集设为:  $\Omega = (\phi, \sigma^2)$ , 而根据高斯混合模型概率密度函数参数估计原理,令含  $N$  个点的目标点集  $Y$  作为观测数据,则可以通过极大化观测数据  $Y$  的对数似然函数  $L(\Omega)$  来估计参数集  $\Omega$ :

$$L(\Omega) = \log\left(\prod_{n=1}^N p(y_n)\right) = \sum_{n=1}^N \log \sum_{m=1}^{M+1} P(m) p(y_n/m) \quad (6)$$

将模板点  $x_m$  与目标点  $y_n$  之间的匹配对应概率定义为给定目标点  $y_n$  的前提下,第  $m$  个高斯分量的后验概率:

$$P(m/y_n) = P(m) p(y_n/m) / p(y_n) \quad (7)$$

因此可定义模板点集与目标点集之间的匹配对应概率矩阵为:  $\mathbf{P} = [P(m/y_n)]_{M \times N}$ 。

设目标点集  $\mathbf{Y}$  为不完全数据,而匹配对应概率矩阵  $\mathbf{P}$  为缺失数据,两者组合为完全数据  $\mathbf{Z} = (\mathbf{Y}, \mathbf{P})$ 。基于上述不完全数据模型,由于一致点漂移算法采用高斯模型,而此模型对局部较为敏感,直接进行 E-M 算法很容易产生严重误差,本文算法增加了三角剖分过程,将点集以三角剖分的方式划分区域,分别对不同的三角剖分区域进行 E-M 迭代算法。设第  $i$  次迭代所估计的参数集为  $\Omega^{(i)}$ 。

1) E 步: 根据  $\Omega^{(i)}$ , 计算混合高斯分量的后验概率  $P^{(i)}(m/y_n)$ :

$$P^{(i)}(m/y_n) = \frac{\exp\left(-\frac{1}{2} \left\| \frac{y_n - T(x_m, \phi^{(i)})}{\sigma^{(i)}} \right\|^2\right)}{\sum_{k=1}^M \exp\left(-\frac{1}{2} \left\| \frac{y_n - T(x_k, \phi^{(i)})}{\sigma^{(i)}} \right\|^2\right) + (2\pi(\sigma^{(i)})^2)^{d/2} \frac{\omega}{1-\omega} \frac{M}{N}} \quad (8)$$

式中:  $T(x_m, \phi^{(i)})$  表示模板点集。进而求得辅助函数  $Q(\Omega, \Omega^{(i)})$ :

$$Q(\Omega, \Omega^{(i)}) = \exp[\log(p(\mathbf{Z}/\Omega))/Y, \Omega^{(i)}] = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^{M+1} P^{(i)}(m/y_n) \log(P^{(i+1)}(m) p^{(i+1)}(y_n/m)) = -\left(\frac{1}{2(\sigma^{(i)})^2}\right) \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M P^{(i)}[m/y_n] \|y_n - T(x_m, \phi^{(i)})\|^2 + \frac{N_P d}{2} \log(\sigma^{(i)})^2 \quad (9)$$

式中:  $N_P = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M P^{(i)}(m/y_n) \leq N$  ( $\omega = 0$  时  $N_P = N$ )。

2) M 步: 通过最大化辅助函数  $Q(\Omega, \Omega^{(i)})$  求解新的参数,即:

$$\Omega^{i+1} = \operatorname{argmax} Q(\Omega, \Omega^{(i)}) \quad (10)$$

如此获得两不同测试平面内破片着靶点对应关系,即可根据  $v = s/t$  求得各个破片速度匹配关系。

### 3 实验仿真与分析

为了验证算法对于破片群测试中的有效性,首先对具

有仿射变换的不同测试面的破片群坐标进行匹配,如图 4 所示。进行如下步骤进行匹配,即可得到结果,如图 5 所示,仿真结果表明广泛性点匹配算法效果明显,不存在出格点,缺失点的情况下匹配率为 100%。

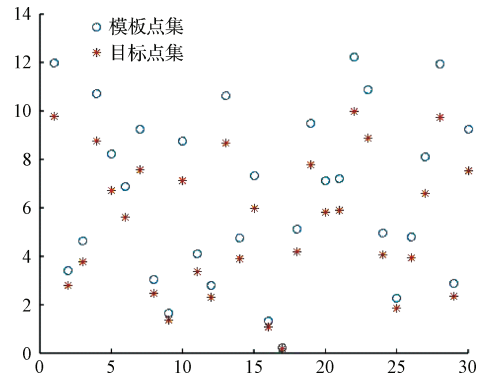


图 4 具有一定仿射变换的破片坐标位置图

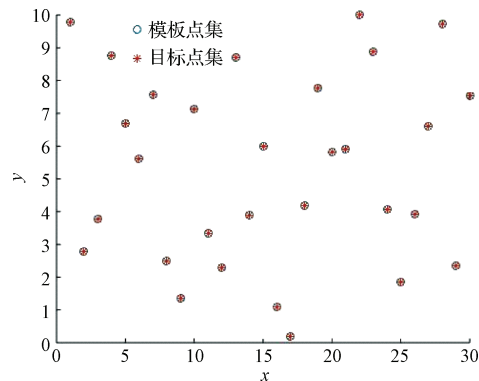


图 5 广泛性点匹配算法匹配结果

针对实际破片群速度测试过程中偶有杂物飞过测试面,在仿真中加入了出格点,并在不同出格点的情况下对算法匹配率的影响,如图 6 所示,以及不同噪声水平下对算法匹配率的影响,如图 7 所示。结果证明本论文所给算法比一致点漂移算法以及 ICP 算法鲁棒性更优,更适合对于破片群测试中进行应用。

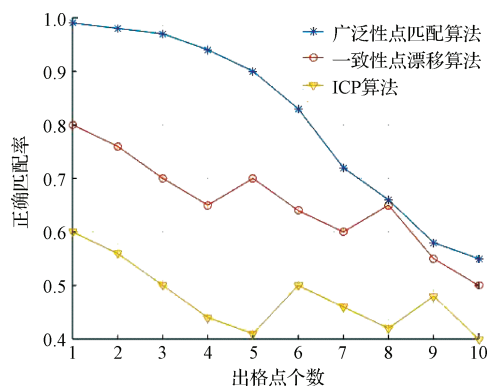


图 6 不同出格点对匹配率的影响

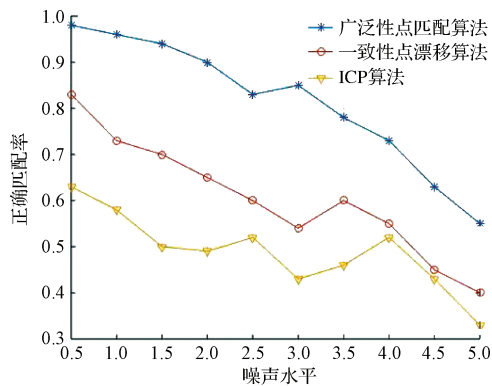


图7 不同噪声水平对匹配率的影响

#### 4 结论

通过广泛性点匹配算法可以有效对破片群在不同测试面着靶点坐标进行匹配,如此即可精准确认各个破片对应匹配关系,并到各个破片的精准对应速度,极大的提高了破片群速度测试精度。本算法的研究与在破片群速度测试中的应用,对破片群速度测试领域以及更多的多目标匹配问题有着重要的作用。仿真验证证明此算法有着优秀的匹配特性。

#### 参考文献

- [1] 王高,尹国鑫,李仰军,等.电阻网靶破片群速度测量方法[J].探测与控制学报,2011,33(3):47-50,55.
- [2] 张超.基于局部特征的图像配准算法及应用研究[D].北京:北京理工大学,2015.
- [3] 杨现辉,王惠南.ICP算法在3D点云配准中的应用研究[J].计算机仿真,2010,27(8):235-238.
- [4] TANG J, SHAO L, ZHEN X. Robust point pattern matching based on spectral context[J]. Pattern Recognition, 2014, 47(3):1469-1484.
- [5] 戴雪梅,郎朗,陈孟元.基于改进ORB的图像特征点匹配研究[J].电子测量与仪器学报,2016,30(2):233-240.
- [6] ZHU M, LIANG D, TANG J, et al. Point pattern matching algorithm based on q-spectrum of line graph[J]. Journal of South China University of Technology: Natural Science, 2011, 39(7): 102-108.

- [7] 周志勇,薛维琴,郑健,等.基于t分布混合模型的点集非刚性配准算法[J].光学精密工程,2013,21(9):2405-2420.
- [8] 赵键.点模式匹配算法研究[D].长沙:国防科学技术大学,2012.
- [9] VO B N, TRAN N Q, PHUNG D, et al. Model-based classification and novelty detection for point pattern data[C]. International Conference on Pattern Recognition, 2017:2622-2627.
- [10] DENG W, ZOU H, GUO F, et al. Point-pattern matching based on point pair local topology and probabilistic relaxation labeling [J]. Visual Computer, 2016:1-11.
- [11] 高晶,吴育峰,吴昆,等.基于角点检测的图像匹配算法[J].仪器仪表学报,2013,34(8):1717-1725.
- [12] LI L, SRINIVASAN S, ZHOU H, et al. Two-point or multiple-point statistics? A comparison between the ensemble Kalman filtering and the ensemble pattern matching inverse methods[J]. Advances in Water Resources, 2015(86):297-310.
- [13] LIU Y, ZHOU S. Detecting Point Pattern of Multiple Line Segments Using Hough Transformation [J]. IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing, 2015, 28(1):13-24.
- [14] 罗子安,毛征,孟灿,等.基于一致性特征点匹配的目标跟踪算法实现[J].国外电子测量技术,2016,35(9):45-49.
- [15] 罗廷金,张军,廉蒨,等.一致分支点漂移算法[J].计算机科学,2014,41(10):36-41.

#### 作者简介

徐树茂,1991年出生,硕士研究生,主要研究方向为靶场测试技术、光电检测及仪器仪表。

高俊钊,1971年出生,副教授,主要研究方向为计算机视觉与模式识别。

E-mail:1172049712@qq.com