

# 基于数字化 X 射线摄影图像的运动目标三维轨迹测量

胡 婷<sup>1,2</sup> 雷 宏<sup>1</sup>

<sup>1</sup>中国科学院电子学研究所航天微波遥感系统部, 北京 100190

<sup>2</sup>中国科学院大学, 北京 100049

**摘要** 提出了一种基于单 X 射线源成像获取运动目标三维轨迹的方法。通过对采集的直接数字化摄影图像序列进行目标检测、立体匹配和三维重建, 实现运动目标三维轨迹测量。与多视角成像方法相比, 设备简单且测量精度相当。通过仿真验证了算法的有效性和稳定性。经对轨迹测量结果误差分析表明, 测量误差与探测器分辨率和目标尺寸有关。

**关键词** 测量; 运动检测; 三维轨迹测量; 旋转单视角; X 射线

中图分类号 TP391 文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201636.0412008

## Three-Dimensional Trajectory Measurement of Moving Target Based on Digital Radiography Images

Hu Ting<sup>1,2</sup> Lei Hong<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Space Microwave Remote Sensing System, Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

<sup>2</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** A method to obtain three-dimensional (3D) trajectory of moving target through single X-ray source imaging is presented. 3D trajectories of moving objects are obtained through target detection, stereo matching and 3D reconstruction based on the digital radiography image array collected. Compared with common approach of multi-view imaging, this method has advantages of simple device and equivalent accuracy. Simulation shows the validity and stability of the proposed method. The error analysis of 3D trajectory measuring result is also given. It turns out that the measuring error is related to the detector resolution and target size.

**Key words** measurement; motion detection; three-dimensional trajectory measurement; rotational single-view; X-ray

**OCIS codes** 120.4630; 330.4150; 330.1400; 340.7440

## 1 引 言

目前工业计算机断层扫描(CT)设备通常使用单 X 射线源对静止物体进行 CT 成像。而采用双 X 射线源成像重建运动物体三维位置则源于流体力学、空气动力学中对流场速度场测量的需求。通常流体被视为连续介质, 普通光学成像设备无法区分其中单个流体质点。因此, 流场测速常用方法是, 在待测流体中加入示踪颗粒(一般为粒子、气泡或分子标识物), 对示踪颗粒运动进行跟踪, 然后采用插值技术获取流场速度场。示踪颗粒需要具有良好的流动跟随性, 可以表征流体运动, 同时光学特性满足成像要求。由于 X 射线沿直线传播且具有强穿透性<sup>[1]</sup>, 通常在不透明液体和多相流等光学设备使用受限情况下进行流场测速。2001 年, Seeger 等<sup>[2]</sup>采用两套正交放置的 X 射线成像设备, 在甘油和空气两相流中加入金属示踪颗粒, 实现其中液相

收稿日期: 2015-09-29; 收到修改稿日期: 2015-11-25

作者简介: 胡 婷(1992—), 女, 硕士研究生, 主要从事目标检测跟踪方面的研究。E-mail: huting13@mails.ucas.ac.cn

导师简介: 雷 宏(1963—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事电磁场与微波技术、信号处理理论与技术方面的研究。

E-mail: hlei@mail.ie.ac.cn

三维流场测量。2005年, Lee等<sup>[3]</sup>将双X射线源成像方式应用到微小尺度, 测量气液两相流中直径为10~60 μm的微气泡的尺寸和速度。同时提出基于衍射的直接数字化X射线摄影(DR)图像边缘增强方法以及如何对成像系统内目标和探测器之间的距离进行优化。2007年, Morgan等<sup>[4]</sup>跟踪震动机床内单示踪颗粒, 以对颗粒物震动过程中的巴西坚果效应机制进行可视化研究。该应用将双X射线源成像从流场速度场测量延伸到固态物质运动机理研究。2007年, Shimada等<sup>[5]</sup>在模拟固体推进燃料浆中植入铅球作为示踪颗粒, 对火箭发动机注浆过程进行成像。2009年, Drake等<sup>[6]</sup>在由直径为500~600 μm的玻璃珠构成的流化床中, 跟踪直径约9 mm的示踪颗粒运动情况, 为流化床内流体动力学研究提供实验数据。综上所述, 目前运动物体三维轨迹跟踪都是采用双X射线源成像方式。

本文借鉴工业CT对静止物体三维重建方式, 提出采用单X射线源对运动目标旋转成像的三维轨迹测量方法。其中每个成像角度上获得的X射线透射图像为DR图像, 通过对DR图像序列进行目标检测、立体匹配、三维重建, 可以获取运动目标三维运动轨迹。该方法同样可以用于前述流场速度场测量和固态物质运动跟踪等, 以揭示某些物理现象和生化反应的内在规律。与双X射线源成像相比, 该方法所需实验设备和系统操作更加简单易行, 大大降低了成像实验实施的难度。

## 2 三维轨迹测量方法

旋转单视角X射线成像系统设置如图1所示。运动目标为大小相同的均匀球体(为示踪颗粒), 其材质对X射线具有强衰减性, 在DR图像中表现为灰度值比周围像素的灰度值低。工业CT中通常将X射线源和面阵探测器的旋转等效为容器自转。因此, 成像过程中圆柱形容器在转台上绕自身中心轴匀速转动, X射线成像设备位置固定并以固定帧频对三维场景成像。旋转单视角成像三维轨迹测量方法包括目标检测, 立体匹配, 三维重建三个部分。首先对DR图像中的示踪颗粒定位和特征描述。然后找到相邻时刻空间中同一示踪颗粒的二维投影的对应关系, 也就是立体匹配。最后由示踪颗粒的二维投影重建出其三维位置, 获取颗粒三维运动轨迹。下面将对这三部分进行详细介绍。

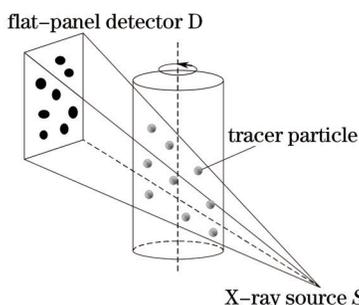


图1 旋转单视角X射线成像系统示意图

Fig.1 Schematic diagram of rotational single-view X-ray imaging system

### 2.1 目标检测

如图2(a)所示, 多个球状示踪颗粒在空间中随机分布。使用虚拟X射线源对三维场景透射成像, 得到一幅典型二值DR图像如图2(b)所示。可以看出, 颗粒二维投影是大小形状不一的椭圆。因此, 目标检测的具

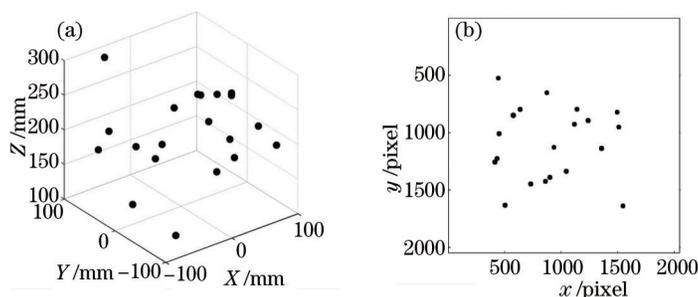


图2 (a) 颗粒空间分布; (b) 二值DR图像

Fig.2 (a) Spatial distribution of particles; (b) binarized DR image

体内容是二维位置定位和椭圆长短轴获取。颗粒定位算法的性能一般从四个方面进行评价<sup>[7]</sup>:是否达到次像素精度,数据处理速度快慢,处理颗粒之间相互遮挡的能力以及是否对噪声稳健。

模板匹配<sup>[8-9]</sup>是一种常用的定位方法,其原理是选择大小合适的模板对目标图像遍历求互相关运算,得到互相关系数的极大值位置,即为颗粒中心。该方法对颗粒中心定位可以达到次像素级别,但当图像中颗粒形状和大小差别较大时,需要选取多个模板才可以准确定位,处理速度较慢。如果二维图像中颗粒图像的强度分布函数已知,在每个目标处拟合该函数会得到很精确的定位结果。通常情况下该函数形式未知,一般假设颗粒灰度分布函数是二维高斯形式<sup>[10]</sup>为

$$I(x,y) = \frac{I_0}{2\pi\sigma_x\sigma_y} \exp\left\{-\frac{1}{2}\left[\left(\frac{x-x_c}{\sigma_x}\right)^2 + \left(\frac{y-y_c}{\sigma_y}\right)^2\right]\right\}, \quad (1)$$

式中  $I(x,y)$  是图像  $(x,y)$  处像素灰度值,  $x_c, y_c$  为目标中心坐标,  $\sigma_x, \sigma_y$  分别为  $x$  轴和  $y$  轴方向像素灰度值的标准差,  $I_0$  表示灰度分布函数与标准二维高斯函数之间的系数。二维高斯拟合方法精确度很高,而且可以有效处理颗粒间遮挡问题,但运算量大,在颗粒灰度分布不符合高斯函数时定位不准确。

考虑到数据运算量以及立体匹配和三维重建的精度要求,将连通域质心作为目标中心位置<sup>[6]</sup>,得到二维 DR 图像中目标中心坐标  $(x_c, y_c)$  为

$$\begin{cases} x_c = \frac{\sum xI(x,y)}{\sum I(x,y)} \\ y_c = \frac{\sum yI(x,y)}{\sum I(x,y)} \end{cases}, \quad (2)$$

式中  $I(x,y)$  是图像  $(x,y)$  处像素灰度值。DR 图像中椭圆长短轴通过对连通域主成分分析(PCA)<sup>[11]</sup>得到。

## 2.2 立体匹配

如图 3 所示,双 X 射线源成像可以同时获取颗粒  $P$  不同视角二维投影位置  $P_1$  和  $P_2$ 。当空间中多个示踪颗粒存在时,需要将两个探测器上得到的所有投影一一匹配,此时可以通过最小化极线约束<sup>[12]</sup>、相似性约束<sup>[13-14]</sup>、顺序一致性约束等代价函数实现。在旋转单视角条件下,立体匹配的前提条件不满足,不能直接使用上述方法解决。

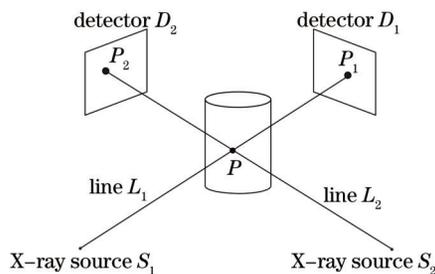


图 3 双 X 射线源成像原理图

Fig.3 Schematic diagram of double X-ray sources imaging

由于容器匀速转动,其在不同成像角度对颗粒二维投影位置影响具有一致性。因此,借鉴单视角成像中运动匹配方法,直接对相邻时刻图像中颗粒投影位置全局最近邻(GNN)匹配<sup>[15]</sup>。设  $t+1$  时刻第  $i$  个投影位置为  $p_{i+1}^i$ ,  $t$  时刻第  $j$  个投影位置为  $p_j^i$ ,  $p_j^i$  和  $p_{i+1}^i$  都是二维位置矢量,定义全局匹配代价函数为

$$C = \sum_i \sum_j \|p_{i+1}^i - p_j^i\|, \quad (3)$$

最优匹配可以通过最小化代价函数得到。

## 2.3 三维重建

根据成像几何关系,如果  $P_1$  和  $P_2$  是空间中同一颗粒在两个探测器上的投影位置,将  $P_1$  和  $P_2$  分别与 X 射

线源  $S_1$ 、 $S_2$  连接构成直线  $L_1$  和  $L_2$ ,  $L_1$  和  $L_2$  交点就是颗粒真实三维位置  $P$ , 如图 3 所示。由于成像设备噪声和目标检测误差的存在,  $L_1$  和  $L_2$  可能并不相交。因此, 计算机视觉中常用的三维重建方法是将  $L_1$  和  $L_2$  公垂线段中点作为颗粒三维位置<sup>[2]</sup>。

在旋转单视角情况下, 只能获得某一时刻颗粒单视角二维投影位置, 无法直接使用上述方法进行三维重建。从这个角度看, 颗粒损失了一维位置信息, 三维重建问题本身是病态的。将颗粒投影位置与形状信息相结合以减少三维重建的多义性。如图 4 所示, X 射线源  $S$  与投影中心位置  $P$  连接构成直线  $L$ , 由于颗粒大小不变, 当颗粒中心移动到直线  $L$  上不同位置时, 得到的二维投影椭圆形状不同。理论上, 在直线  $L$  上得到投影椭圆与实际目标检测结果一致的位置, 就是颗粒真实三维位置。由于面阵探测器分辨率受限以及目标检测结果误差的存在, 在直线  $L$  上可能不存在与实际检测结果完全一致的位置, 那么选择与实际最接近位置作为颗粒位置三维重建结果。

对该三维重建方法进一步分析, 如图 4(b) 所示。假设 X 射线源  $S$  与颗粒中心  $O$  距离为  $l$ , 与投影中心  $P$  距离为  $l'$ , 颗粒真实半径  $OM$  长度为  $r$ , 二维图像中真实投影椭圆半长轴  $PM'$  长度为  $r'$ 。由于半径  $r$  和半长轴  $r'$  远小于距离  $l$  和  $l'$ , 则  $SP \approx SM'$ ,  $SO \approx SM$ ,  $\Delta SOM \sim \Delta SPM'$ 。假设面阵探测器分辨率为  $d$ , 实际检测到投影椭圆半长轴长度  $r_0 \in [r' - d, r' + d]$ , 颗粒中心  $O$  三维重建位置与 X 射线源距离为  $l_0$ , 定义重建位置误差  $\Delta l = |l - l_0|$ , 不妨取  $r_0 = r' + d$ , 得到  $\Delta l$  具体表达式为

$$\Delta l = l - \frac{rl'}{r' + d} \quad (4)$$

因此, 在一个成像几何关系确定的系统中, 颗粒重建位置误差与颗粒真实半径  $r$  和分辨率  $d$  有关,  $r$  越大,  $d$  越小, 重建误差越小。

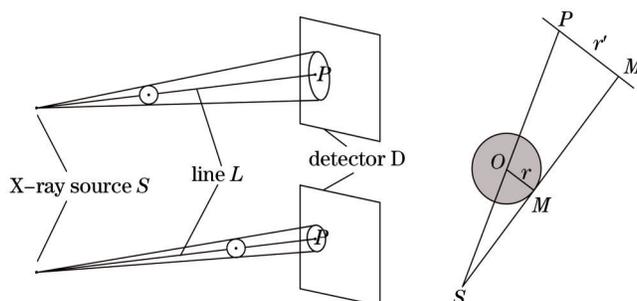


图 4 (a) 颗粒位置与投影形状关系; (b) 三维重建误差理论分析

Fig.4 (a) Projective shape as a function of particle location; (b) theoretical analysis of the error of the proposed 3D reconstruction method

### 3 仿真实验结果

采用现有常规的工业 CT 设备, 建立虚拟单 X 射线源成像系统: X 射线源与面阵探测器中心共线, 二者之间距离为 1533 mm; 面阵探测器到容器轴线距离为 420 mm, 尺寸大小为 409.6 mm × 409.6 mm, 分辨率为 0.1 mm, 成像频率为 15 Hz; 圆柱形容器直径为 110 mm, 转速为 6 r/min, 其底面圆心位于三维坐标系原点; 示踪颗粒直径为 5 mm。

#### 3.1 单示踪颗粒三维轨迹测量

首先采用本文所述方法对单示踪颗粒进行三维轨迹测量。示踪颗粒在测量时间段内运动轨迹如图 5(a) 所示。采用前述重建位置误差定义作为位置测量误差。从图 5(b) 可以看出, 尽管示踪颗粒运动速度随时间变化, 但测量误差变化与其运动速度无直接关系, 同时在测量时间内不存在明显误差累积现象。变化探测器分辨率, 得到颗粒不同时刻位置测量误差如图 5(c) 所示。可以看出, 测量误差与探测器分辨率近似成反比关系, 分辨率越高, 误差越小。固定探测器分辨率为 0.2 mm, 变化颗粒直径, 得到颗粒不同时刻位置测量误差, 如图 5(d) 所示。可以看出, 颗粒直径越小, 测量误差越大。

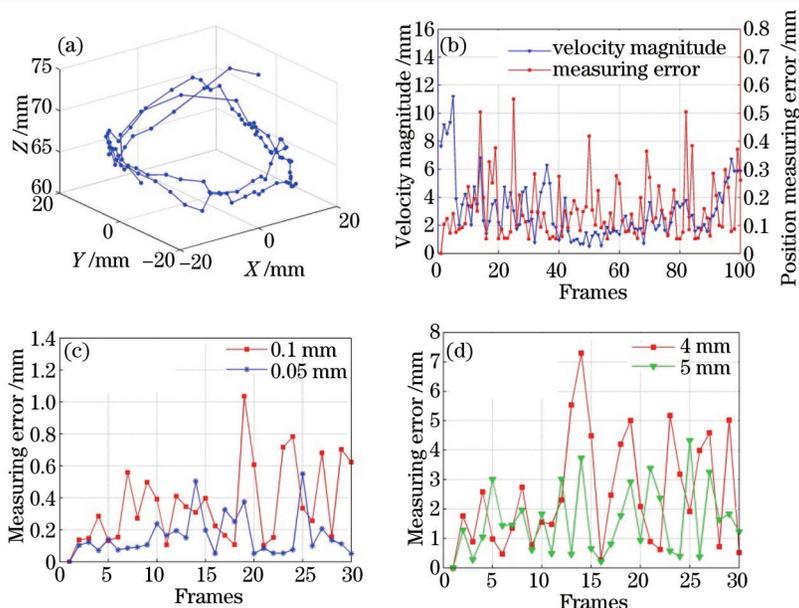


图5 (a) 运动目标的三维轨迹; (b) 运动速度大小与测量误差关系; (c) 不同分辨率时测量误差对比; (d) 不同粒径时测量误差对比  
 Fig.5 (a) 3D trajectory of moving target; (b) relationship between velocity magnitude and measuring error; (c) measuring errors as a function of time with different resolutions; (d) measuring errors as a function of time with different particle sizes

### 3.2 多示踪颗粒三维轨迹测量

实际上,当容器存在多个示踪颗粒时,颗粒轨迹之间可能发生交叉,造成轨迹跟踪困难。如图6(a)所示,三维空间中有7个示踪颗粒,每个颗粒在距容器轴线不同距离处运动,颗粒之间运动速度不同且存在轨迹交叉现象。由于某些颗粒运动速度较小,轨迹几乎重叠为一个点。变化探测器分辨率,得到所有示踪颗粒在30帧内最大测量误差,如图6(b)所示。可以看出,该方法在多示踪颗粒情况下仍旧可以完成三维轨迹测量,颗粒最大测量误差随着分辨率的降低而增大。

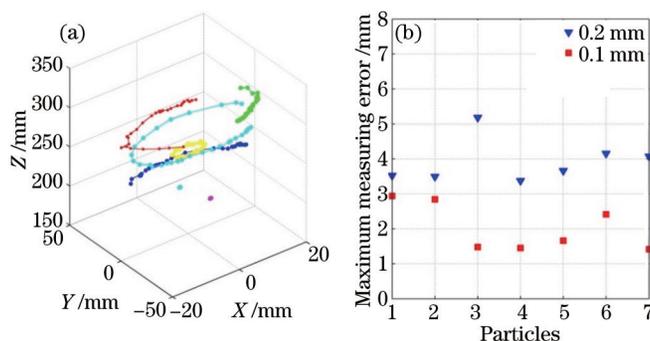


图6 (a) 多颗粒三维运动轨迹; (b) 不同颗粒在不同分辨率下最大测量误差  
 Fig.6 (a) 3D trajectories of tracer particles; (b) maximum measuring errors of different particles with different resolutions

## 4 分析与讨论

由于多示踪颗粒情况主要对立体匹配结果产生影响,一旦匹配正确,轨迹测量精度主要依赖于三维重建过程。固定分辨率为0.1 mm,将前述7个示踪颗粒30帧时间内运动距离与最大测量误差对比,如表1所示。可以看出,测量精度与轨迹长度、方向变化无关。这也与理论分析是一致的,因为本文方法不依赖于运动连续性假设,而依赖于成像几何关系和目标投影形状信息,目标投影形状描述越准确,测量精度越高。因此,可以通过提高面阵探测器分辨率,调整X射线源、目标和探测器之间的距离,增大目标直径等方式有效地提高轨迹测量精度。

表1 最大测量误差与轨迹长度关系

Table 1 Relationship between maximum measuring errors and trajectory lengths

Tagged particles	1	2	3	4	5	6	7
Trajectory length/mm	2.75	1.87	114.94	67.97	35.68	51.77	97.9
Maximum measuring error/mm	2.94	2.85	1.47	1.45	1.66	2.41	1.41

## 5 结 论

提出基于旋转单视角DR图像的运动目标三维轨迹测量方法,通过仿真实验验证了其有效性和稳定性。经对影响轨迹测量精度的因素进行分析表明,运动目标三维轨迹重建精度与探测器分辨率成正比,同时示踪颗粒尺寸越大精度越高,而与颗粒运动轨迹长度、方向变化无关。由于工业CT系统通常是定制的,该方法可以在不改变测试设备的条件下,满足一般的流场速度场测量。与双X射线源成像相比,该方法具有成本低、操作简单的优点,适用于石油、化工等行业流场速度场以及其他物理现象的可视化测量。

## 参 考 文 献

- 1 Xiao Tiqiao, Xie Honglan, Deng Biao, *et al.*. Progresses of X-ray imaging methodology and its applications at Shanghai synchrotron radiation facility[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(1): 0100001.  
肖体乔, 谢红兰, 邓彪, 等. 上海光源X射线成像及其应用研究进展[J]. *光学学报*, 2014, 34(1): 0100001.
- 2 Seeger A, Affeld K, Goubergrits L, *et al.*. X-ray-based assessment of the three-dimensional velocity of the liquid phase in a bubble column[J]. *Experiments in Fluids*, 2001, 31(2): 193-201.
- 3 Lee S J, Kim S. Simultaneous measurement of size and velocity of microbubbles moving in an opaque tube using an X-ray particle tracking velocimetry technique[J]. *Experiments in Fluids*, 2005, 39(3): 492-497.
- 4 Morgan T B, Heindel T J. Qualitative observations of dense particle motion in a vibration-excited granular bed[C]. *ASME 2007 International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, 2007, 7: 835-839.
- 5 Shimada T, Habu H, Seike Y, *et al.*. X-ray visualization measurement of slurry flow in solid propellant casting[J]. *Flow Measurement and Instrumentation*, 2007, 18(5): 235-240.
- 6 Drake J B, Tang L, Heindel T J. X-ray particle tracking velocimetry in fluidized beds[C]. *ASME 2009 Fluids Engineering Division Summer Meeting*, 2009, 1: 1733-1742.
- 7 Ouellette N T, Xu H, Bodenschatz E. A quantitative study of three-dimensional Lagrangian particle tracking algorithms[J]. *Experiments in Fluids*, 2006, 40(2): 301-313.
- 8 Guezennec Y G, Brodkey R S, Trigui N, *et al.*. Algorithms for fully automated three-dimensional particle tracking velocimetry[J]. *Experiments in Fluids*, 1994, 17(4): 209-219.
- 9 Zhao Aigang, Wang Hongli, Yang Xiaogang, *et al.*. An affine invariant method of forward looking infra-red target recognition[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(7): 071501.  
赵爱罡, 王宏力, 杨小冈, 等. 一种仿射不变的前视红外目标识别方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2015, 52(7): 071501.
- 10 Mann J, Ott S, Andersen J S. Experimental study of relative, turbulent diffusion[M]. Copenhagen: Technical University of Denmark, 1999.
- 11 Wu Yiquan, Zhou Yang, Long Yunlin. Small target detection in hyperspectral remote sensing image based on adaptive parameter SVM[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(9): 0928001.  
吴一全, 周杨, 龙云淋. 基于自适应参数支持向量机的高光谱遥感图像小目标检测[J]. *光学学报*, 2015, 35(9): 0928001.
- 12 Xie Zexiao, Lu Wenjuan. A binocular matching algorithm based on similar image geometric features[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(5): 0508002.  
解则晓, 陆文娟. 基于图像相似几何特征的双目匹配算法[J]. *中国激光*, 2014, 41(5): 0508002.
- 13 Liu Ye. Reconstruction and Tracking of 3D Target Swarms and Dynamic Surfaces[D]. Shanghai: Fudan University, 2013.  
刘焯. 三维目标群及动态表面的重建和跟踪[D]. 上海: 复旦大学, 2013.
- 14 Gong Wenbiao, Gu Guohua, Qian Weixian, *et al.*. Stereo matching algorithm based on image segmentation and adaptive support weight[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(s2): s210002.  
龚文彪, 顾国华, 钱惟贤, 等. 基于图像分割和自适应支撑权重的立体匹配算法[J]. *光学学报*, 2015, 35(s2): s210002.
- 15 Blackman S, House A. Design and analysis of modern tracking systems[M]. Boston: Artech House Radar Library, 1999.

栏目编辑: 何卓铭