

DOI: 10.7652/xjtuxb201702010

快速的线结构光条纹骨架剪枝算法

龙洋, 胡改玲, 蒙雁琦, 温琳鹏, 王军平

(西安交通大学机械工程学院, 710049, 西安)

摘要: 针对线结构光条纹骨架存在分枝导致条纹中心不平滑的问题, 在数学形态学提取骨架的基础上, 提出了一种基于端点跟踪的快速线结构光条纹骨架剪枝算法。该算法采用沿分枝方向跟踪识别并去除分枝端点的方式来剔除骨架分枝, 不需要建立复杂的跟踪规则来判断剪枝方向, 并且不需要设置固定的跟踪阈值, 其跟踪长度由分枝长度决定, 从而提高了剪枝效率。实验结果表明: 该算法的剪枝时间与骨架分枝的总长度呈线性关系; 与传统的剪枝算法相比, 该算法的剪枝速度提高了 3~7 倍, 能够有效地去除骨架分枝, 保留骨架主干。该算法实现了光顺、单向连通的线结构光条纹骨架的快速剪枝, 提高了三维测量的精度与速度。

关键词: 线结构光条纹; 骨架; 分枝; 端点跟踪; 剪枝

中图分类号: TN911.73 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2017)02-0060-06

A Fast Pruning Algorithm for the Skeleton of Linear Structured Light Stripes

LONG Yang, HU Gailing, MENG Yanqi, WEN Linpeng, WANG Junping

(School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: A fast pruning algorithm based on endpoints tracing is proposed to solve the problem that the branches of the linear structured light stripe skeleton lead to the un-smoothness of the stripe center. The algorithm is based on the skeleton extraction in mathematical morphology, and the pruning theory and the realization process are given. The algorithm removes branches of the skeleton by recognizing and removing endpoints along branch directions without establishing a tracing rule to judge branch directions. The tracing length is determined by the branch length instead of a given fixed threshold, thus the pruning efficiency is improved. Experimental results show that there is a linear relationship between the pruning time of the algorithm and the total length of branches. Comparison with the traditional pruning algorithm shows that the pruning speed of the proposed algorithm is improved by three to seven times, and that the algorithm cuts down branches effectively and retains the skeleton trunk. This algorithm realizes the fast pruning of the fairing and unidirectionalby connected skeletons, and improves the speed and accuracy of the 3D measurement.

Keywords: linear structured light stripe; skeleton; branch; endpoints tracing; pruning

在线结构光测量技术中, 由被测物体高度调制后的变形条纹是实现三维测量的主要信息源, 然而条纹宽度通常都大于 1 个像素, 因此准确获取条纹

中心是测量的关键任务之一^[1-3]。为了提高条纹中心的提取精度, 需要以条纹骨架像素点为初始条纹中心点来计算条纹法线方向^[4-6]。目前, 数学形态学

收稿日期: 2016-07-24。 作者简介: 龙洋(1990—), 女, 硕士生; 王军平(通信作者), 男, 教授, 硕士生导师。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11072183)。

网络出版时间: 2016-12-05

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20161205.1204.002.html>

骨架提取方法^[7]应用较广泛,理论上该方法得到的骨架能反映线结构光条纹的真实走向且具有单向连通性,但是由于线结构光条纹中灰度分布不均匀、边缘像素不平滑,使得提取后的骨架存在破坏其单向连通性的分枝、毛刺等,进而影响条纹中心的提取精度,因此为了保证骨架的单向连通性,必须对提取后的骨架进行剪枝处理^[8]。

传统的剪枝算法通过编码查表的方式去除长度小于设定阈值的分枝,但是只能用于去除普通分枝,不能去除复杂分枝,并且会将部分骨架主干当作分枝去除^[9-10]。在此基础上,王婉心等通过将交叉点及其内圈像素点的灰度值设置为零来分割骨架,标记各骨架段并将满足分枝判定条件的骨架段去除^[11]。赵珊等先找到交叉点,然后以交叉点为断点将骨架分割为多段曲线,并将长度小于给定阈值的曲线视为分枝去除^[12]。Shen等采用迭代的方式确定骨架剪枝顺序,去掉权重最小的末端枝,将剪枝问题转换为骨架重建形状误差最小的问题^[13]。Fatima等从交叉点出发沿分枝方向顺时针移动窗口,如果在移动过程中找到了端点,则去除窗口移动路径上的像素点^[14]。

但是,目前针对提高剪枝速度的相关剪枝算法的研究还不够深入,为此本文提出了一种基于端点跟踪的快速剪枝算法,从分枝端点出发沿分枝方向跟踪并剔除分枝骨架点,充分利用了端点的特点,在有效去除线结构光条纹骨架分枝的同时显著地提高了剪枝效率。

1 端点跟踪算法原理

本文提出的剪枝算法基本思想为:沿分枝方向根据端点判断条件识别并去除分枝端点,可以通过骨架点8邻域内的交叉数和骨架点数来判断端点^[15]。

1.1 8邻域内交叉数和骨架点数

交叉数定义为骨架点8邻域内像素点灰度值的变化次数的一半,用 C_n 表示;骨架点数定义为骨架点8邻域内灰度值大于0的骨架点个数,用 S_n 表示。

$$\left. \begin{aligned} S_n(p_0) &= \sum_{i=1}^8 p_i \\ C_n(p_0) &= \frac{1}{2} \sum_{i=1}^8 |p_{i+1} - p_i| \quad (p_9 = p_1) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: p_0 为目标骨架点; p_i 为 p_0 的8邻域内的像素点,当 p_i 位于骨架上时,其灰度值设为1,否则设为0。

1.2 剪枝原理

端点跟踪剪枝算法主要分为两个阶段:跟踪进

行阶段和跟踪终止阶段。

跟踪进行阶段骨架如图1所示,主要包括连接点、交叉点、端点、分枝起点、孤立点等骨架点。这些骨架点满足如下条件:①连接点 $S_n=2$ 或3或4, $C_n=2$;②交叉点 $S_n=3$, $C_n=3$;③端点 $S_n=1$, $C_n=1$;④分枝起点 $S_n=3$ 或4, $C_n=2$;⑤孤立点 $S_n=0$, $C_n=0$ 。

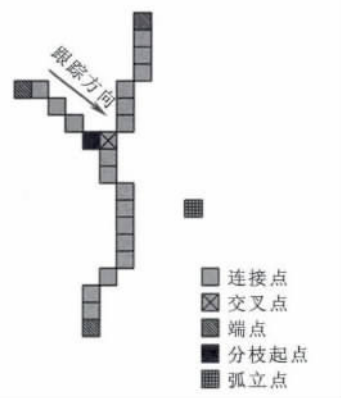


图1 跟踪进行阶段骨架示意图

对比这几个条件,可以从其他骨架点中快速地区分出端点,这样就可以沿分枝方向逐点判断并剔除满足条件③的分枝骨架点。当分枝上不存在满足条件③的骨架点时,说明分枝上只剩下分枝起点,进入跟踪终止阶段。

跟踪终止阶段骨架如图2所示。图2中分枝起点 S 是分枝的最后一个端点,同时也是分枝的起点。分枝起点 S 的8邻域内骨架点分布归纳为如图3所示的几种情况,其中白色和黑色分别表示灰度值为1和0的像素点。由图3可以总结得到跟踪终止阶段分枝起点的判断条件为:⑥ $S_n=2$ 或3, $C_n=1$ 。这样根据条件⑥就能将分枝上的最后一个点从其他几种骨架点中区分出来并去除。

综合以上分析可以得到端点的判断条件⑦: $C_n=1$ 。这样就可以通过简单的判断及剔除过程将分

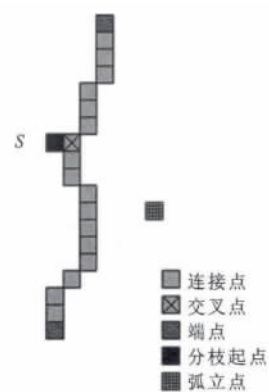


图2 跟踪终止阶段骨架示意图

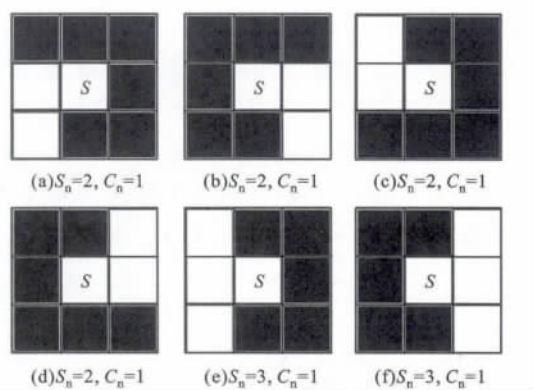


图3 分枝起点S的8邻域内骨架点分布

枝上的骨架点转换为端点来处理,而不需要建立复杂的跟踪条件,很大程度上提高了剪枝效率。本文提出的剪枝算法根据条件⑥设置跟踪终止条件,跟踪步长完全由分枝长度决定,与阈值固定的算法相比,提高了剪枝速度。

2 剪枝算法过程

基于以上剪枝原理,具体的剪枝算法步骤如下。

步骤1 闭环分枝开环处理。形态学骨架提取方法针对的是二值化图像,而二值化阈值的不同取值使得提取到的骨架中分枝种类不同,主要有以下几种:普通分枝,即分枝上只有一个端点;多重分枝,即分枝上有多个端点;闭环分枝,即分枝上的部分像素点形成了一个闭环,如图4a所示;孤立分枝,分枝上有两个或多个端点,且分枝上任一像素点在8邻域内与主干不连通。

可以通过端点判断条件直接去除普通分枝、多重分枝及孤立分枝。对于闭环分枝,由于在闭环处的骨架点不满足端点判断条件,因此在剪枝过程中首先采用形态学闭运算填充闭环区域,然后再次提取骨架将闭环分枝转换为普通分枝或多重分枝来进行剪枝处理,结果如图4b所示。

步骤2 找到所有初始端点。遍历骨架上的所有像素点,找到满足条件③的所有初始端点。

步骤3 跟踪判断并逐点去除分枝骨架点。从分枝

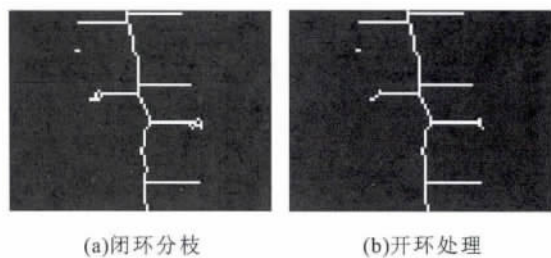


图4 闭环分枝开环处理

初始端点出发,跟踪并逐点判断端点在分枝上的连接点是否满足条件⑦: $C_n=1$,如果满足条件,则说明该连接点为端点,将其剔除;如果不满足,则设置跟踪的终止条件⑥ $S_n=2$ 或 $3, C_n=1$,去除该点后就停止跟踪。

步骤4 去除多重分枝。由于骨架中可能存在多重分枝,而一次跟踪判断的过程只能将一级分枝去掉,若要去掉所有分枝,则需要多次遍历骨架刷新初始端点数。如果初始端点数 $N>2$,说明骨架中还存在除主干起始端点之外的其他端点,重复步骤3,否则退出剪枝并输出结果。

步骤5 根据经验分枝长度通常不会超过30个像素,因此在剪枝过程中,判定长度大于或等于30个像素的分枝即为骨架主干。标记该分枝上的骨架点并将其灰度值设为255,恢复主干。

步骤6 根据条件⑤清除孤立点。

步骤7 输出结果,退出剪枝。

3 实验结果及分析

结合现有实验条件,用一维步进电机驱动载物平台在线激光器下对汽车模型车身上表面横向及纵向进行扫描,同时用相机采集线激光器投射在被测表面形成的变形条纹,其中横向扫描测量如图5所示。

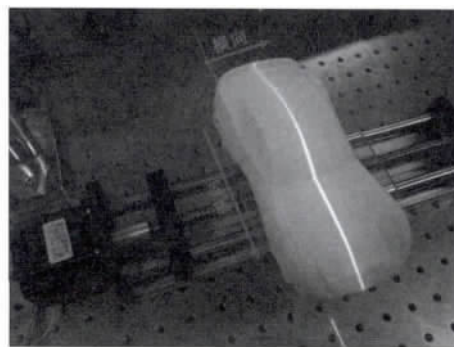


图5 汽车模型车身上表面横向测量

以采集到的横向条纹图像为例,首先获取条纹图像感兴趣区域,并用大津阈值法^[16]对其进行二值化处理,然后用Matlab中的集成函数bwmorph提取骨架,最后分别使用本文算法和传统算法对骨架进行剪枝处理。在对图像进行二值化处理时,如果二值化阈值 T_1 过大,条纹骨架主干可能会存在断线,因此为了对比两种算法的有效剪枝时间,将阈值 T_1 范围取为 $0\sim 0.7$,步长为 0.01 。阈值 T_1 的不同取值直接影响提取后的骨架分枝数以及分枝长度,从而使得骨架分枝总长度以及最长分枝长度有所不同。在实验过程中根据最长分枝长度设置传统算法

的阈值 T_2 ,这是传统算法剪枝效果最好、剪枝时间最少时的阈值。

分析两种算法的剪枝时间随二值化阈值 T_1 的变化,如图6所示,可见本文算法的剪枝时间明显小于传统算法。传统算法需要预先根据最长分枝长度设定一个固定阈值,然后在整幅图像中通过编码查表的方式去除分枝,而本文算法只需要判断分枝上的骨架点是否满足端点判断条件来进行剪枝处理,与传统算法相比,剪枝效率得到了提高。

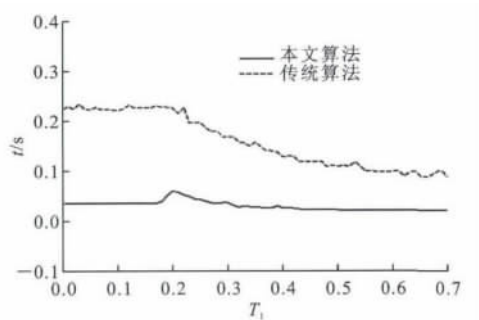


图6 剪枝时间随二值化阈值的变化

经过大量的实验发现,与传统算法相比,本文算法的剪枝速度提高了3~7倍。

分析本文算法及传统算法剪枝时间的变化规律,如图7、图8所示。可以看出,传统算法的剪枝时间随最长分枝长度的增加而增加,本文算法剪枝时间随分枝总长度的增加而增加。原因在于:在进行剪枝处理时,传统算法的计算量为单次搜索的计算量与阈值的乘积,其中单次搜索的计算量不变,因此传统算法的剪枝时间仅与设定的阈值 T_2 ,即最长分枝长度有关;本文算法从每条分枝的端点出发对骨架进行剪枝,其计算量为分枝骨架点的叠加即分枝总长度,因此本文算法的剪枝时间与分枝总长度有关。

选择存在闭环分枝的骨架作为剪枝对象,分别用本文算法和传统算法对其进行剪枝处理,剪枝效果如图9所示。对比两种算法的剪枝效果可以看

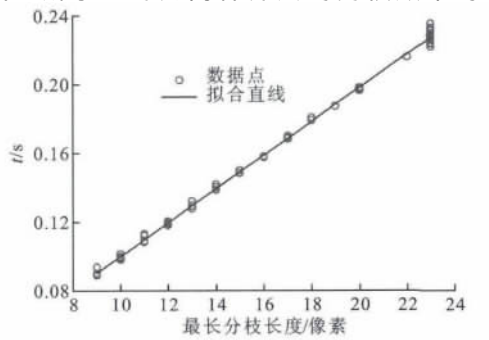


图7 传统算法剪枝时间随最长分枝长度的变化

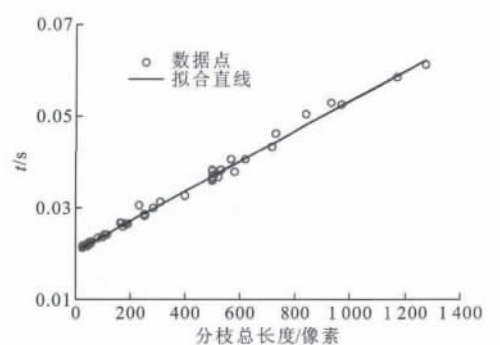


图8 本文算法剪枝时间随分枝总长度的变化
出,传统算法不能处理闭环分枝,也不能识别骨架主干的起始点,将主干的一部分当作分枝剔除;本文算法在去掉普通分枝的同时结合形态学闭运算有效地去除了图中的闭环分枝,在剪枝过程中很好地保留了主干,得到了一条光顺、具有单向连通性、能反映条纹真实走向的骨架。

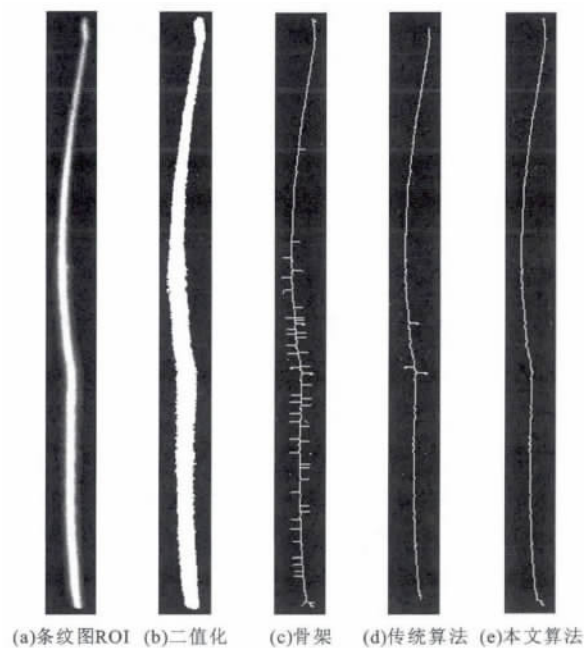


图9 2种算法的剪枝效果对比

应用本文算法对采集到的条纹图像的骨架进行剪枝处理,并经过条纹中心提取、立体匹配及三维重建等过程,得到了汽车模型车身上表面横向及纵向三维点云图,分别如图10、图11所示,可以看出应用本文算法能够实现高精度的三维曲面快速测量。

4 结 论

本文针对线结构光条纹骨架提出了一种基于端点跟踪的快速剪枝算法,该算法根据端点的特点快速地去掉条纹骨架中的分枝。通过大量的实验分析,可知本文算法具有如下优点:剪枝时间短,与传

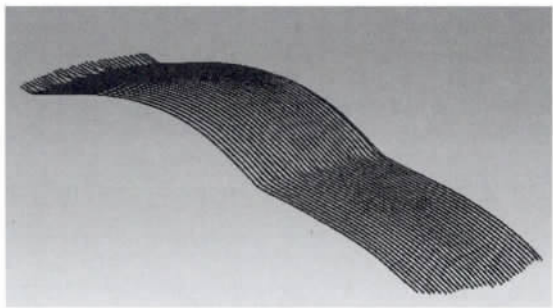


图10 汽车横向点云图

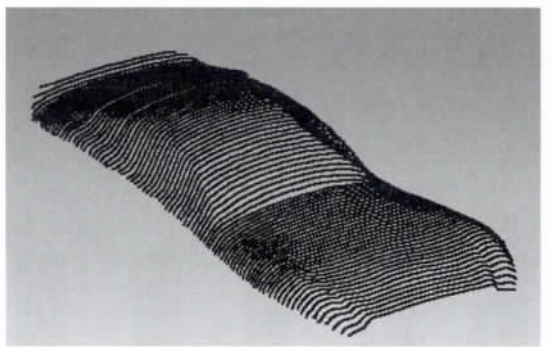


图11 汽车纵向点云图

统算法相比,本文算法的剪枝速度提高了3~7倍;可彻底去除分枝,剪枝后的骨架不存在分枝。本文算法能很好地保留主干,得到光顺、具有单向连通性的骨架,满足条纹中心提取过程中对骨架的要求,大大提高了线结构光三维测量的速度和精度。

参考文献:

- [1] TIAN Qingguo, ZHANG Xiangyu, MA Qian, et al. Utilizing polygon segmentation technique to extract and optimize light stripe centerline in line-structured laser 3D scanner [J]. *Pattern Recognition*, 2016, 55(2): 100-113.
- [2] 崔希君, 杨川, 刘保华, 等. 线性结构光心的自适应迭代提取法 [J]. *西安交通大学学报*, 2007, 41(1): 73-76.
CUI Xijun, YANG Chuan, LIU Baohua, et al. Self adaptive iterative method of extracting center of linear structured light stripe [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2007, 41(1): 73-76.
- [3] 张维光, 赵宏. 线结构光多传感器三维测量系统误差校正方法 [J]. *西安交通大学学报*, 2011, 45(6): 75-80.
ZHANG Weiguang, ZHAO Hong. Error correction method for three-dimensional measurement system with multi-sensor and linear-structure light [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2011, 45(6): 75-80.
- [4] 贾倩倩, 王伯雄, 罗秀芝. 光切法形貌测量中光条中心的亚像素提取 [J]. *光学精密工程*, 2010, 18(2): 390-396.
JIA Qianqian, WANG Boxiong, LUO Xiuzhi. Extraction of central positions of light stripe in sub-pixel in 3D surface measurement based on light sectioning method [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, 18(2): 390-396.
- [5] 李凤娇, 李小菁, 刘震. 基于多尺度分析的激光光条中心点坐标提取方法 [J]. *光学学报*, 2014, 34(11): 103-108.
LI Fengjiao, LI Xiaojing, LIU Zhen. A multi-scale based method for extracting coordinates of laser light stripe centers [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(11): 103-108.
- [6] 熊会元, 宗志坚, 陈承鹤. 线结构光条纹中心的全分辨率精确提取 [J]. *光学精密工程*, 2009, 17(5): 1057-1062.
XIONG Huiyuan, ZONG Zhijian, CHEN Chenghe. Accurately extracting full resolution centers of structured light stripe [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, 17(5): 1057-1062.
- [7] 张铮, 徐超, 任淑霞, 等. 数字图像处理与机器视觉: Visual C++与Matlab实现 [M]. 2版. 北京: 人民邮电出版社, 2014: 382-383.
- [8] 吴庆阳, 苏显渝, 宋芳. 线结构光图像骨架的剪枝算法 [J]. *四川大学学报(工程科学版)*, 2006, 38(5): 148-151.
WU Qingyang, SU Xianyu, SONG Fang. A pruning algorithm for the skeleton of line-structure-light pattern [J]. *Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)*, 2006, 38(5): 148-151.
- [9] YU Haipeng, LIU Yixing, LIU Zhenbo. Auto detection of wood texture orientation by Radon transform [J]. *Journal of Forestry Research*, 2005, 16(1): 1-4.
- [10] 俞凯, 吴江琴, 庄越挺. 基于骨架相似性的书法字检索 [J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2009, 21(6): 746-751.
YU Kai, WU Jiangqin, ZHUANG Yueting. Calligraphic characters retrieval based on skeleton similarity [J]. *Journal of Computer-Aided Design and Computer Graphics*, 2009, 21(6): 746-751.
- [11] 王婉心, 贾立锋. 骨架提取中的毛刺去除方法 [J]. *广东工业大学学报*, 2014, 31(4): 90-94.
WANG Wanxin, JIA Lifeng. The method of removing burrs in skeleton extraction [J]. *Journal of Guangdong University of Technology*, 2014, 31(4): 90-94.

(下转第78页)

ca, 2003 31(S1): 2031-2034.

- [13] LÜ X, BI G, WAN C, et al. Lv's distribution: principle, implementation, properties, and performance [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2011, 59(8): 3576-3591.

- [14] 苏军海, 李亚超, 邢孟道, 等. 采用 Radon 模糊变换的宽带雷达多目标检测方法 [J]. 西安交通大学学报, 2009, 43(4): 85-89.

SU Junhai, LI Yachao, XING Mengdao, et al. A wideband radar detection method for multi-target using radon ambiguity transform [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2009, 43(4): 85-89.

- [15] 战立晓, 汤子跃, 朱振波. 高机动小 RCS 目标长时间相参积累检测新方法 [J]. 系统工程与电子技术,

2013, 35(3): 511-516.

ZHAO Lixiao, TANG Ziyue, ZHU Zhenbo. Novel method of long term coherent integration detection for maneuvering small RCS targets [J]. Systems Engineering and Electronics, 2013, 35(3): 511-516.

- [16] 郑纪彬, 任爱锋, 苏涛, 等. 多分量 Chirp 信号相位参数的精确估计算法 [J]. 西安交通大学学报, 2013, 47(2): 69-74.

ZHENG Jibin, REN Aifeng, SU Tao, et al. An accurate estimation algorithm for phase parameters of multi-chirp signals [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2013, 47(2): 69-74.

(编辑 刘杨)

(上接第 12 页)

- [17] CORAS F, JAKAB L, CABELLOS-APARICIO A. CoreSim; a simulator for evaluating locator/ID separation protocol mapping systems [EB/OL]. [2016-07-25]. <http://119.90.25.29/people.ac.upc.edu/fcoras/publications/2009-fcoras-trilogy-Coresim.pdf>.

- [18] ZHANG L, AFANASYEV A, BURKE J, et al. Named data networking [J]. ACM Sigcomm Computer Communication Review, 2014, 44(3): 66-73.

- [19] FARINACCI D, FULLER V. An architectural introduction to the locator/ID separation protocol (LISP) [EB/OL]. (2015-04-02) [2016-07-26]. <https://datatracker.ietf.org/doc/rfc6830/>.

- [20] GEORGE F. ns-3 tutorial [EB/OL]. [2016-07-28]. <https://www.nsnam.org/docs/tutorial/html/>.

- [21] AURA T. Support for multiple hash algorithms in cryptographically generated addresses (CGAs) [EB/

OL]. (2015-10-24) [2016-07-26]. <https://datatracker.ietf.org/doc/rfc3972>.

- [22] HEER T. Host identity protocol certificates [EB/OL]. (2016-06-22) [2016-07-28]. <https://datatracker.ietf.org/doc/rfc7401/>.

- [23] CURBERA F, DUFTLER M, KHALAF R, et al. Unraveling the web services web: an introduction to SOAP, WSDL, and UDDI [J]. IEEE Internet Computing, 2002, 6(2): 86-93.

- [24] 史楠, 邱劲锋, 侯迪, 等. 一种敏捷服务组合方法模型的研究与设计 [J]. 西安交通大学学报, 2013, 47(2): 1-6.

SHI Yi, QIU Jinfeng, HOU Di, et al. Design of an agile service composition approach model [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2013, 47(2): 1-6.

(编辑 刘杨)

(上接第 64 页)

- [12] 赵珊, 王彪, 唐超颖. 基于链码表示的手臂静脉特征提取与匹配 [J]. 光学学报, 2016, 36(5): 1-12.

ZHAO Shan, WANG Biao, TANG Chaoying. Arm vein feature extraction and matching based on chain code [J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(5): 1-12.

- [13] SHEN Wei, BAI Xiang, YANG Xingwei, et al. Skeleton pruning as trade-off between skeleton simplicity and reconstruction error [J]. Science China Information Sciences, 2013, 56(4): 1-14.

- [14] FATIMA J, SYED A M, AKRAM M U. Feature point validation for improved retina recognition [C]// Proceedings of the 2013 IEEE Workshop on Biometric Measurements and Systems for Security and Medical

Applications. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2013: 13-16.

- [15] 刘文星, 王肇圻, 母国光. 纹线跟踪及其在细化指纹后处理中的应用 [J]. 光电子·激光, 2002, 13(2): 184-187.

LIU Wenxing, WANG Zhaoqi, MU Guoguang. Ridge tracing and application in post-processing of thinned fingerprints [J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2002, 13(2): 13-16.

- [16] OTSU N A. A threshold selection method from gray-level histograms [J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 1979, 9(1): 62-66.

(编辑 武红江)