

基于 NSCT 的立体影像匹配相似性测度计算

张 卡^{1,2,3} 盛业华^{1,2,3} 管忠诚⁴ 李 佳¹

1 南京师范大学虚拟地理环境教育部重点实验室,江苏 南京,210023

2 南京师范大学江苏省地理信息资源开发与利用协同创新中心,江苏 南京,210023

3 南京师范大学警用地理信息技术公安部重点实验室,江苏 南京,210023

4 青岛市市政工程设计研究院有限责任公司,山东 青岛,266101

摘 要:提出了一种新的基于非下采样 Contourlet 变换(NSCT)的加权相似性测度计算方法。首先对立体像对中的左右影像分别进行 NSCT 变换,以得到左右影像的不同尺度、不同方向的高频子带系数;然后利用影像的高频子带系数和 RGB 三个通道的灰度值,设计了目标窗口和搜索窗口的加权相似性测度计算模型;最后,利用标准立体影像数据,对相似性测度和归一化相关系数等已有测度进行了对比实验。结果表明,NSCT 的高频系数的引入增强了相似性测度的稳健性,提高了立体影像匹配的可靠性。

关键词:立体影像匹配;非下采样 Contourlet 变换;加权相似性测度;结构特征;匹配可靠性

中图分类号:P234.1;TP751 **文献标志码:**A

立体影像匹配的目的是根据一幅影像上的已知模式(点、线、面),从同一场景下拍摄的另一幅影像上寻找相对应的同名模式,是遥感影像配准、数字摄影测量、虚拟地理场景重建等领域的核心技术^[1-3]。相似性测度模型的设计与计算是立体影像匹配的首要任务,对匹配结果的可靠性具有重要的影响,即数字立体摄影测量中的同名点相似性测度计算问题。这也是本文的研究重点。

立体影像中的同名点相似性测度是指左影像上待匹配点的目标窗口和右影像上候选点的搜索窗口之间的相似程度,这是判断两个像点是否为同名像点的依据,可基于影像的灰度分布计算,也可基于影像的后处理特征计算。常用的灰度相似性测度有归一化互相关系数(normalized cross correlation, NCC)^[1]、截断绝对差(truncated absolute difference, TAD)^[4]、差平方和(sum of squared difference, SSD)^[5]、差绝对值和(sum of absolute difference, SAD)^[6]等。基于灰度的相似性测度在影像的信息贫乏区域的匹配成功率不高,因此,基于特征的相似性测度方法得到了重视,先对影像进行某种特征变换,如(scale invariant feature transform, SIFT)^[7]、小波变换^[8]、Contourlet 变换^[9]等,以构建匹配窗口的特征向

量,然后再计算特征向量间的 NCC、欧氏距离等度量值作为匹配测度。但是,以上这些相似性测度计算方法大都没有考虑匹配窗口内待匹配点(中心像素)与其邻域像素之间的异质性特征,窗口内各个像素在参与测度计算时被同等对待,这导致匹配测度在适应性和抗干扰性方面存在一定的问题。基于此,Yoon 等^[10-13]考虑到匹配窗口内的像素与中心像素之间的颜色和空间距离相似性,提出了多种加权匹配测度计算方法。然而,这几种加权测度的计算模型仅使用了像素间的颜色相似性和空间距离进行加权,并未考虑到权值计算中影像本身的结构特征;而且,在影像中的视差不连续处,像素间的空间距离远近不能有效地度量像素之间的异质性特征。因此,本文提出了一种基于非下采样 Contourlet 变换(Nonsampled Contourlet Transform, NSCT)的相似性测度计算方法。

1 基于 NSCT 的相似性测度计算原理

1.1 NSCT 基本原理

NSCT 是在 Contourlet 变换的基础上发展而

收稿日期:2013-07-23

项目来源:国家自然科学基金资助项目(40901200, 41171321, 41101377);国家科技支撑计划资助项目(2012BAH35B02);江苏省高校优势学科建设资助项目(164320H116);江苏省测绘科研资助项目(JSCHKY201011)。

第一作者:张卡,博士,副教授,主要从事数字摄影测量与图像处理等方面的研究。E-mail: zhangka81@126.com

成的新型图像多尺度几何分析工具^[9],其结构与Contourlet变换很相似,但NSCT在图像的分解和重构过程中取消了下采样环节,从而使得NSCT不仅具有多尺度性、良好的空域和频域局部特性和方向特性,还具有平移不变特性。NSCT最突出的特点是具有强大的各向异性,相比于小波变换的高频信息只有水平、垂直、对角线三个方向分量的信息,NSCT能够将高频信息分解为多个方向性分量的组合,此种结构使得NSCT具有良好的非线性逼近能力,它可以对任意含线性奇异的二维分段光滑函数进行近似地逼近。NSCT的基本过程为:先采用非采样塔式滤

波器组(nonsubsampled pyramid filter bank, NSPFB)获得图像的多尺度分解,然后再采用非采样方向滤波器组(nonsubsampled directional filter bank, NSDFB)对得到的各尺度带通子带图像进行方向分解,从而得到不同尺度、不同方向的高频子带图像。图像经过 J 级($J \geq 1$,为变换级数参数)NSCT分解变换后,可以得到一个低频近似图像和 $\sum_{i=1}^J 2^{d_i}$ 个方向高频子带图像(d_i 为各级变换中的高频分解的方向参数, 2^{d_i} 为各级变换中的高频方向子带图像的个数),而且它们的分辨率都和原图像相同。NSCT的分解示意图如图1所示。

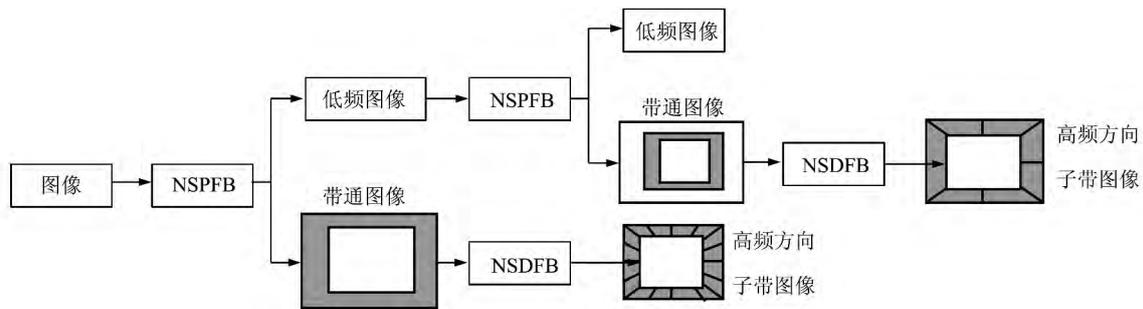


图1 NSCT的分解示意图

Fig. 1 Decomposition Sketch of NSCT

1.2 基于NSCT的加权相似性测度计算

对立体影像中的左影像 $f(x, y)$ 、右影像 $f'(x, y)$,分别进行 n 级多方向NSCT变换(每级的方向数为 $d_i, i=1, 2, \dots, n$),以得到左、右影像的 $m = \sum_{i=1}^n 2^{d_i}$ 个高频方向子带系数影像 $G_j(x, y), G'_j(x, y) (j=1, 2, \dots, m)$ 。此时,左影像或右影像中的任意一个像素 $p(x, y)$ 不仅可用 R, G, B 三个通道的灰度值组成颜色特征向量 $V_c(p) = (f_R(x, y), f_G(x, y), f_B(x, y))$,还可用 m 个高频方向的子带系数组成结构特征向量 $V_G(p) = (G_1(x, y), G_2(x, y), \dots, G_m(x, y))$ 。因此,在计算匹配测度的过程中,先根据格式塔理论的相似性和接近性原则^[13],用特征向量间的欧几里德距离和高斯函数来度量窗口中心像素 $p_c(x_c, y_c)$ 与其邻域像素 $p_k(x_k, y_k)$ 之间的颜色相似性 S_c 和结构接近性 P_G

$$\begin{cases} S_c = \exp\left(-\frac{\|V_c(p_k), V_c(p_c)\|}{\sigma_c}\right) \\ P_G = \exp\left(-\frac{\|V_G(p_k), V_G(p_c)\|}{\sigma_G}\right) \end{cases} \quad (1)$$

式中, $V_c(p_k), V_c(p_c)$ 分别是局部窗口影像中第 k 个像素和中心像素的颜色特征向量; $V_G(p_k), V_G(p_c)$ 分别是第 k 个像素和中心像素的结构特征向

量; $\| \cdot \|$ 表示两个向量之间的欧几里德距离; σ_c, σ_G 为高斯函数的参数(可根据需要赋值)。

基于式(1),窗口影像中的每个像素与中心像素之间的权值为 $w(p_k, p_c) = S_c \times P_G$ 。至此,对于左影像中以待匹配点 p_c 为中心的大小为 $N \times N$ 的目标窗口影像 W_t ,右影像中以搜索点 q_c 为中心的大小为 $N \times N$ 的搜索窗口影像 W_s ,利用目标窗口、搜索窗口中第 k 个像素的颜色特征向量 $V_c(p_k), V_c(q_k)$ 和结构特征向量 $V_G(p_k), V_G(q_k)$,先计算像素 k 和中心像素之间的权值 $w_t(p_k, p_c), w_s(q_k, q_c)$;然后在SAD相似度的基础上,按式(2)计算两个窗口中对应像素之间的差绝对值相似度 $\rho(p_k, q_k)$;最后,设计出如式(3)所示的基于NSCT结构特征和RGB颜色特征的加权匹配测度。

$$\rho(p_k, q_k) = \frac{1}{1 + \text{abs} |V_c(p_k), V_c(q_k)| + \text{abs} |V_G(p_k), V_G(q_k)|} \quad (2)$$

$$C(p_c, q_c) = \frac{\sum_{p_k \in W_t, q_k \in W_s} (w_t(p_k, p_c) \cdot w_s(q_k, q_c) \cdot \rho(p_k, q_k))}{\sum_{p_k \in W_t, q_k \in W_s} (w_t(p_k, p_c) \cdot w_s(q_k, q_c))} \quad (3)$$

2 实验结果

为了验证本文匹配方法的实际效果,在 Windows XP 环境下,采用 MATLAB 2007a 科学计算语言对本文算法进行了编程实现,并使用美国 Middlebury 大学开发的影像匹配方法在线测试评估平台^[5] (<http://vision.middlebury.edu/stereo/>)提供的 4 对标准立体影像(如图 2 所示,其中,上面一行为立体像对的左影像,下面一行为该像对的真实视差图;像对的名称从左往右依次为 Tsukuba、Venus、Teddy、Cones),进行如下两个实验:① NSCT 变换参数的尺度效应分析实验,以确定具有最优匹配准确度的 NSCT 最佳变换级数和方向数;② 不同相似性测度的匹配可靠性对比实验,以比较本文加权相似性测度与现有几个相似性测度的匹配结果的优劣。实验中,匹配窗口的尺寸均为 35 像素×35 像素, σ_c 、 σ_G 也都取匹配窗口的尺寸值,匹配准确度的定量衡量指标为测试平台给出的 Nonocc、All、Disc、Avg, Nonocc、All、Disc 分别表示匹配视差图结果中的非遮挡区域、像对重叠区域、视差不连续区域的错误匹配率,Avg 表示 4 对立体像对的总体平均错误匹配率(错误匹配率是指匹配视差图中的匹配视差与真实视差间较差大于 1 个像素的像素个数占图像总像素数的比率)。以上 4 个指标值越小,则说明匹配方法的匹配可靠性越高。



图 2 标准立体影像及其真实视差图

Fig.2 Standard Stereo Images and True Disparity Maps

1) NSCT 变换参数的尺度效应分析实验

此实验的目的是确定 NSCT 的最佳变换级数和方向参数,以使本文中基于 NSCT 的加权相似性测度能取得最优的匹配可靠性。首先,进行 NSCT 的最佳方向参数实验:在保持变换级数固定的情况下(1 级变换),方向数参数分别取 1、2、3、4,将各个方向参数下的匹配视差图像提交到在线测试平台,根据不同方向参数下的匹配错误率指标,确定具有最低匹配错误率的方向参数。然后,进行 NSCT 的最佳变换级数实验:在保持每级的方向参数都是所确定的最佳方向参数的情况下,变换级数分别取 1、2、3、4,将各个变换级数下的匹配视差图像提交到在线测试平台,根据不同变换级数下的匹配错误率指标,确定具有最低匹配错误率的变换级数。在此实验中,NSCT 的变换级数和方向参数都只取了有限的几个值,这主要是因为太大的变换参数会使得 NSCT 分解的高频系数图像的个数呈指数级增加,反而会降低立体影像匹配的运行效率。NSCT 尺度效应实验所得到的错误匹配率与尺度参数之间的统计数据见表 1,将最低平均错误匹配率的所在行加粗显示。从表 1 的实验结果可以看出,当 NSCT 的方向参数取 3,即高频系数图像个数为 8 个时,4 个立体像对的平均错误匹配率在此取值情况下最小;在每级的方向参数都取 3 的情况下,当变换级数为 2,即进行二级 NSCT 分解时,4 个立体像对的平均错误匹配率指标最小。因此,NSCT 的最佳变换参数为:变换级数取 2,方向参数取 3。

2) 不同相似性测度的对比实验

此实验的目的是将本文 NSCT 加权相似性测度(变换级数和方向参数分别为 2 和 3)和现有的 8 个相似性测度进行比较,以验证本文相似性测度的匹配可靠性。参与比较的其他 8 个相似性测度分别为 NCC 测度^[1](采用 R、G、B 三个通道

表 1 NSCT 变换参数尺度效应实验的错误匹配率统计结果

Tab.1 Statistical Result of Matching Error Rate in Scale Effect Experiment for Transform Parameters of NSCT

NSCT 参数	Tsukuba			Venus			Teddy			Cones			Avg	
	Nonocc	All	Disc	Nonocc	All	Disc	Nonocc	All	Disc	Nonocc	All	Disc		
方向	1	4.28	5.82	11.0	2.06	3.56	8.16	13.3	22.0	23.8	10.1	19.8	17.8	11.8
	2	4.25	5.76	11.6	1.72	3.23	8.07	12.3	21.1	22.9	7.36	17.3	14.9	10.9
	3	3.83	5.32	11.9	1.36	2.89	8.37	11.5	20.5	22.6	5.68	15.8	12.8	10.2
	4	4.28	5.76	12.9	2.3	3.84	14.1	11.6	20.5	24.5	5.29	15.4	12.5	11.1
比例	1	3.83	5.32	11.9	1.36	2.89	8.37	11.5	20.5	22.6	5.68	15.8	12.8	10.2
	2	3.19	4.68	12	1.31	2.85	10.7	10.9	19.9	22.9	4.99	15.1	12.3	10.1
	3	3.57	5.18	15.1	2.39	3.94	22.6	11.5	20.5	22.6	5.61	15.8	14.6	11.9
	4	4.92	6.77	20	4.99	6.51	34.9	12.1	21.0	27.1	7.39	17.5	18.3	15.1

的 NCC 平均值作为最终的 NCC 测度)、SAD 测度^[6]、SIFT 测度^[7]、SIFT-Color 综合测度、基于相位的 PhaseDiff 测度^[8]、DGBGrid 加权测度^[11]、BioPsyASW 加权测度^[12] 和 LCDM + Adapt 加权测度^[13]。将不同相似性测度对 4 对标准立体像对生成的匹配视差图提交给在线测试平台,得到不同相似性测度的错误匹配率统计结果,见表 2,将各个指标中的最小值加粗显示。从实验结果可以看出,对于 4 对标准立体影像,本文加权测度所生成的视差图(图 3)在定量评价指标上具有最小的总体平均错误匹配率。另外,从每一对立体影像的匹配结果来看,本文方法的错误匹配率指标基本上都较小。相比于传统的基于灰

度的 NCC 测度和基于 SIFT 特征的测度,本文方法的错误匹配率要降低 2 倍以上。由此可见,本文的加权测度能很好地顾及匹配窗口内邻域像素之间的异质性特征,并通过赋予每个像素不同的权值来决定它们对最终相似性测度计算的贡献,从而提高了匹配结果的可靠性。



图 3 本文 NSCT 匹配测度所生成的标准立体像对的视差图

Fig. 3 Disparity Maps Generated by Proposed NSCT Similarity Measure for Standard Stereo Images

表 2 不同相似性测度对比实验的错误匹配率统计结果

Tab. 2 Statistical Result of Matching Error Rate in Comparison Experiment for Different Similarity Measures

相似性测度	Tsukuba			Venus			Teddy			Cones			Avg
	Nonocc	All	Disc	Nonocc	All	Disc	Nonocc	All	Disc	Nonocc	All	Disc	
NSCT	3.19	4.68	12	1.31	2.85	10.7	10.9	19.9	22.9	4.99	15.1	12.3	10.1
NCC	15.1	16.6	46.9	8.95	10.4	42	28.6	35.9	52.3	23.4	31.6	43.5	29.6
SIFT	12.7	14.6	44.6	17.9	19.2	44.6	25.9	33.5	49.6	16.8	25.9	40	28.8
SIFT-Color	11.3	13.2	44.2	10.5	12	41.9	23.4	31.2	49.2	16.1	25.2	37.8	26.3
SAD	4.87	5.89	22.9	2.50	3.22	18.3	18.2	18.7	37.2	24.2	27.9	42.1	18.8
PhaseDiff	4.89	7.11	16.3	8.34	9.76	26.0	20.0	28.0	29.0	19.8	28.5	27.5	18.8
DGBGrid	5.90	7.26	21.0	1.35	1.91	11.2	10.5	17.2	22.2	5.34	11.9	14.9	10.9
BioPsyASW	3.62	5.52	14.6	3.15	4.20	20.4	11.5	18.2	23.2	4.93	13.0	11.7	11.2
LCDM+Adapt	5.98	7.84	22.2	14.5	15.4	35.9	20.8	27.3	38.3	8.90	17.2	20.0	19.5

3 结 语

本文针对立体影像匹配中相似性测度的稳健计算需求,采用 NSCT 这一新型的图像多尺度几何分析工具,提出了一种基于 NSCT 的加权相似性测度计算方法。使用国际上公认的影像匹配在线测试评估平台提供的标准立体影像,对本文算法进行了实验检验和在线测试,并将本文方法和现有一些方法进行了对比实验,实验结果验证了本文方法的有效性,错误匹配率明显降低。另外,本文还对 NSCT 尺度参数在立体影像匹配中的尺度效应问题进行了实验分析,得到了具有最优匹配结果的 NSCT 最佳变换参数。但是,由于本文算法是在 MATLAB 平台上编程实现的,受限于 MATLAB 编译效率,运行效率并不高。不过,由于本文主要目的是定量比较不同匹配测度的匹配结果的可靠性,因此并未对各种匹配测度的计算效率进行定量对比。

参 考 文 献

- [1] Yang H C, Zhang S B, Wang Y B. Robust and Precise Registration of Oblique Images Based on Scale-invariant Feature Transformation Algorithm [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2012, 9(4):783-787
- [2] Ji Song, Fan Dazhao, Zhang Yongsheng, et al. MVLL Multi-image Matching Model and Its Application in ADS40 Linear Array Images [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2009, 34(1):28-31 (纪松,范大昭,张永生,等.多视匹配 MVLL 算法及其在 ADS40 线阵影像中的运用 [J]. *武汉大学学报·信息科学版*, 2009, 34(1):28-31)
- [3] Snavely N, Seitz S M, Szeliski R. Modeling the World from Internet Photo Collections [J]. *International Journal of Computer Vision*, 2008, 80(2): 189-210
- [4] Yang Q, Wang L, Ahuja N. A Constant-space Belief Propagation Algorithm for Stereo Matching [C]. *IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, San Francisco, A-

- merica, 2010
- [5] Scharstein D, Szeliski R. A Taxonomy and Evaluation of Dense Two-frame Stereo Correspondence Algorithms[J]. *International Journal of Computer Vision*, 2002, 47(1/2/3):7-42
- [6] Manap N A, Soraghan J J. Disparity Refinement Based on Depth Image Layers Separation for Stereo Matching Algorithms[J]. *Journal of Telecommunication, Electronic and Computer Engineering*, 2012, 4(1):51-64
- [7] Lowe D G. Distinctive Image Features from Scale-invariant Feature Transform [J]. *International Journal of Computer Vision*, 2004, 60(2):91-110
- [8] El-Etriby S, Al-Hamadi A, Michaelis B. Dense Depth Map Reconstruction by Phase Difference - based Algorithm Under Influence of Perspective Distortion [J]. *International Journal Machine Graphics and Vision*, 2006, 15 (3): 349-361
- [9] Cunha A L, Zhou J P, Do M N. The Nonsubsampled Contourlet Transform: Theory, Design, and Applications [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2006, 15(10):3 089-3 101
- [10] Yoon K J, Kweon I S. Adaptive Support-weight Approach for Correspondence Search [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2006, 28(4):650-656
- [11] Richardt C, Orr D, Davies I, et al. Real-time Spatiotemporal Stereo Matching Using the Dual-cross-bilateral Grid [J]. *Lecture Notes in Computer Science*, 2010, 6 313:510-523
- [12] Nalpantidis L, Gasteratos A. Biologically and Psychophysically Inspired Adaptive Support Weights Algorithm for Stereo Correspondence[J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2010, 58(5): 457-464
- [13] Nalpantidis L, Gasteratos A. Stereo Vision for Robotic Applications in the Presence of Non-ideal Lighting Conditions[J]. *Image and Vision Computing*, 2010, 28(6):940-951

NSCT Based Computation of Similarity Measure for Stereo Image Matching

ZHANG Ka^{1,2,3} SHENG Yehua^{1,2,3} GUAN Zhongcheng⁴ LI Jia¹

1 Key Laboratory of Virtual Geographic Environment, MOE, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China

2 Jiangsu Center for Collaborative Innovation in Geographical Information Resource Development and Application, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China

3 Key Laboratory of Police Geographic Information Technology Ministry of Public Security, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China

4 Qingdao Municipal Engineering Design & Research Institute Co. Ltd., Qingdao 266101, China

Abstract: A new weighted similarity measure based on nonsubsampled contourlet transform is proposed in this paper. In the new algorithm, high frequency sub-band parameters of left and right images in different scales and directions are firstly obtained by respectively carrying out NSCT to left and right images of stereopair. Secondly, according to high frequency sub-band parameters and gray levels in RGB channels of image, the computation model of weighted similarity measure between target window and searching window is designed. Lastly, utilizing standard stereo images, contrast experiments among proposed similarity measure and some known measures such as normalized correlation coefficient, etc.. Experimental results show that utilization of high frequency parameters of NSCT enhances the robustness of similarity measure and increases the reliability of stereo image matching.

Key words: stereo image matching; nonsubsampled Contourlet transform; weighted similarity measure; structure feature; matching reliability

First author: ZHANG Ka, PhD, associate professor, specializes in the methods of digital photogrammetry and image processing. E-mail: zhangka81@126.com

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China, Nos. 40901200, 41171321, 41101377; the National Science and Technology Support Project of China, No. 2012BAH35B02; the Priority Academic Program Development of Jiangsu Higher Education Institutions, No. 164320H116; Surveying and Mapping Research Foundation of Jiangsu Province, No. JSCHKY201011.