# ipf: Wu Xinming, Dave Hale. 2016. 3D seismic image processing for faults. GEOPHYSICS, VOL. 81, NO. 2

引入了一种能描述相交断层连接关系的数据结构，相比断层面的网格描述，该数据结构更简单，便于计算机之间的交换，便于后续的断层的图像处理。

如图1，显示了重要的地质表面，我可以从3D地震成像自动提取得到。当提取一个断层面时，还想获得断层走向(fault strike)、倾角(dip)和滑动向量(slip vectors)，如图2。

有很多方法使用属性，诸如semblance, coherency, variance, gradient magnitude, fault likelihood (Hale, 2013b)，计算断层图像。

还有很多方法，基于计算的断层成像，提取断层面。诸如，Pedersen et al. (2003)给出蚂蚁追踪(ant-tracking)方法，首先提取了小的断层片段，然后合并，形成大的断层面。Gibson et al. (2005), Admasu et al. (2006), Kadlec et al. (2008)的方法都是由小的patches构建较大的断层面。Hale (2003b)使用断层可能性、走向和倾角的图像，构建断层面，与断层可能性图像的纹路(ridges)符合。

从提取的断层面，通过关联地震反射体或选取的断层面反面的horizon，计算断层滑动(fault slip)。例如，Borgos et al. (2003), Admasu (2008), Liang et al. (2010)。Hale (2013b)使用dynamic image warping方法。

如上所述，研发了很多方法来计算断层图像，提取断层面，计算断层滑动。但是，提取相交断层的问题，如图1所示，没有很好解决。如Hale (2013b)描述的方法，假设单幅地震图像仅有1个断层，因此提取的断层面不完整，在相交处有空洞。上述方法得到的不完成断层面用来计算断层滑动是有问题的，因为空洞附近难以确定需要关联哪个地震反射体。

Wu and Hale (2016)有2点贡献：（1）提取相交断层，获得没有空洞的完整断层面；（2）使用相连的数据结构表征断层面，比常用的三角形或四边形网格表征断层面更简单。这种相连的数据结构更便于计算断层滑动。

Wu and Hale (2016)的计算流程是：首先使用Hale (2013b)的方法计算断层可能性(fault likelihood)、dip和strikes的图像。每个图像仅在断层处有非零值，如图1a所示的断层可能性图像。然后，使用图1b的断层采样构建断层面，是连续的，如图1c，但实际上仅与断层采样的集合（图1b）连接。

## 断层图像

创建一个具有正断层、逆断层和相交断层的合成3D地震图像（图3），展示3D地震图像处理：（1）计算断层可能性、strike、dip的图像；（2）从thinned断层图像构建断层采样；（3）连接断层采样，形成断层面；（4）计算断层倾角及滑动向量。这些合成的图像包含2个相交的正断层F-A和F-B，一个逆断层F-C，以及一个更小的正断层F-D。

Wu and Hale (2016)使用Hale (2013b)的断层可能性方法（图4a），同时计算断层走向(图4b)和倾角(图4c)。断层可能性图像指示可能存在断层的位置，而走向和倾角图像指示他们的方向。。。。。。

如Hale (2013b)所述，这种扫描方法的显著缺点是处理相交断层。因为仅有一个断层可能性数值，对各图像采样，记录其对应的断层走向和倾角。。。。

我们不希望断层与断层可能性图像显著特征（图4a）一样厚。因此，仅在断层可能性的ridge上保留数值，其他位置设为0，获得thinned的断层可能性图像（图5a）。还仅对图5a中的非零值的采样保留走向和倾角，得到对应的thinned的断层走向（图5b）和倾角（图5c）图像。

能观察到断层F-A在相交区域内丢失断层可能性、走向和倾角（图5中的虚线白圈），因为上述的局限。我们还观察到在没有断层区域也出现了一些非零值，其原因是：。。。。，下面讨论满足非零采样（图5中的断层）的其他条件。

## 断层采样和断层面

断层采样

断层可能性(图5a)、Strike(图5b)、dip（图5c）的图像中的大部分采样都是0，我们能一次性显示3个图像，如图6a中显示的断层采样以及图7a更清晰的图像。各断层采样显示为颜色方块。各颜色方块表示断层可能性，而各方块的方向表示断层走向和倾角。断层采样仅在thinned断层可能性的位置上是nonzero的。因此，这些断层采样包含与图5中显示的thinned断层可能性完全一样的信息。

断层面

## 断层倾角滑动

Fault throws

Unfaulted images

## 一张真实的图像示例

图3~9显示的是合成的3D地震图像，展示了3D地震图像处理的步骤：

（1）

。。。

（5）

该图像处理方法适用于正断层、逆断层和相交断层。

真实的地震图像处理，使用Schoonebeek油田的3D地震勘探数据，如图10（图1显示的是更小的subset），有很多明显的断层，其中有很多相互相交。

1、使用基于semblance的过滤算法，突出局部平面不连续性，扫描所有可能的走向和倾角，计算断层可能性、走向和倾角的图像；

2、有断层采样保证这3个断层图像，展示为由走向和倾角调整方向的方块，着色为断层可能性（图10a）

3、方向性的断层采样连接，形成断层面，如图10b，很多断层相交，相交断层间的走向接近60°

4、这些断层面进一步用于计算断层倾角滑动。图11右上角显示fault throw

5、使用计算的断层倾角滑动向量，unfault地震图像，见图11b。在非断层图像中，所有图像切片上的地震反射比原图像切片（图11a）更连续。图11a中的有大幅滑动的断层显示为红色箭头；图11b中显示了footwall和hanging wall一侧明显移动到与反侧上的反射平行的方向。

## 参考文献

Hale, D., 2013a, Dynamic warping of seismic images: Geophysics, 78, no. 2, S105–S115.

Hale, D., 2013b, Methods to compute fault images, extract fault surfaces,and estimate fault throws from 3D seismic images: Geophysics, 78(2): O33-O43.

Liang, L., D. Hale, and M. Maučec, 2010, Estimating fault displacements in seismic images: 80th Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstracts, 1357-1361.

Luo, S., and D. Hale, 2013, Unfaulting and unfolding 3D seismic images: Geophysics, 78(4): O45-O56.

断层识别的蚂蚁追踪方法

Pedersen, S. I., T. Randen, L. Sonneland, and Ø. Steen, 2002, Automatic fault extraction using artificial ants: 72nd Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstracts, 512-515.

Pedersen, S. I., T. Skov, A. Hetlelid, P. Fayemendy, T. Randen, and L. Sønneland, 2003, New paradigm of fault interpretation: 73rd Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstracts, 350-353.

# Xinming Wu, Zhihui Zhu. Methods to enhance seismic faults and construct fault surfaces. Computers & Geosciences 107 (2017) 37-48.

断层属性体对噪声和地层特征敏感，这些也是地震体中明显的不连续体。本文推荐了一种matched filtering方法，提高预计算的断层属性体，受到所有断层走向和倾角的方向控制，用于属性体输入，来找到对地震体中所有采样的最大过滤响应。记录这些最大过滤响应，获得增强的断层属性体，同时对应的走向和倾角。2D和3D 合成地震数据和实际数据的应用，都表明：成功提取多个相交的断层面，且完成没有空洞的断层面构建。

# mhe：Xinming Wu, Sergey Fomel. 2018. Least-squares horizons with local slopes and multigrid correlations

地震层位(horizon)

# osv：Wu, X., S. Fomel. 2018, Automatic fault interpretation with optimal surface voting: Geophysics, 83(5): O67-O82.

本文首先介绍使用动态编程算法（Hale, 2013a）picking最优路径(2D)和最优面(3D)的方法.

传统方法受噪声和地层特征影响很大。此外，断层属性图像内的断层特征通常难以连续跟踪。

最优面投票法的计算成本与seed points数目有关，与地震数据量无关，并行化计算效率很高（4核电脑上，超过1000个种子点，在1s内完成计算，得到对应的最优投票的面和最终的投票得分图）。

## 参考文献

Hale D., 2013a, Dynamic warping of seismic images: Geophysics, 78, no. 2, S105–S115

蚂蚁追踪算法

Pedersen, S. I., T. Randen, L. Sonneland, and Ø. Steen, 2002, Automatic fault extraction using artificial ants: 72nd Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstracts, 512–515.

Pedersen, S. I., T. Skov, A. Hetlelid, P. Fayemendy, T. Randen, and L. Sønneland, 2003, New paradigm of fault interpretation: 73rd Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstracts, 350–353.

# sbp：Xinming Wu, Sergey Fomel, Michael Hudec.2018. Fault salt bounary interpretation with optimal path picking

盐体边界解释

# sos: Wu Xinming, Zhenwei Guo. 2018. Detecting faults and channels while enhancing seismic structural and stratigraphic features. Interpretation, Vol. 7, No. 1

通常增强了地震反射，会模糊地震成像中的断层和渠道。SOS方法同时增强反射和地震图像中的断层。

使用相同的FED格式实施所有的方法，但使用不同的扩散张量场--定义扩散过程的光滑方向和光滑范围。

# Xinming Wu, et al. 2019. FaultSeg3D: Using synthetic data sets to train an end-to-end convolutional neural network for 3D seismic fault segmentation

地震属性对噪声和地层特征很敏感，这也对应着地震成像中的反射不连续。仅测量地震反射连续和不连续，不足以侦测断层(Hale, 2013)。

Wu and Fomel (2018)给出一种有效方法来提取根据最大断层属性的最优表面，使用这些最优表面投票，得到断层概率(fault likelihood)、strike和dip的增强断层图像。

卷积神经网络（CNN）广泛应用于诊断断层，基于逐像素的断层分类（断层或非断层）。Wu et al.(2018)使用基于CNN的逐像素的分类方法，不仅预测了断层概率，同时还计算了断层方向。

上述方法都需要选择一个局部窗口(window)或窗体(cube)，在每个图像像素上预测断层，计算量很大，特别是做3D断层诊断。

本文FaultSeg3D (Wu et al., 2019)使用端到端的二分图像分割做断层诊断，是基于简化的U-Net (Ronneberger et al., 2015)，实施3D二分断层分割。使用TITAN GPU，对大的地震数据体(450x1950x1200)在5分钟以内完成断层预测。

## 参考文献

Hale, D., 2013, Methods to compute fault images, extract fault surfaces, and estimate fault throws from 3D seismic images: Geophysics, 78, no. 2, O33–O43, doi: 10.1190/geo2012-0331.1.

Xinming Wu, et al. 2019. FaultSeg3D: Using synthetic data sets to train an end-to-end convolutional neural network for 3D seismic fault segmentation

Wu, X., Y. Shi, S. Fomel, and L. Liang, 2018, Convolutional neural networks for fault interpretation in seismic images: 88th Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstracts, 1946-1950.

# Wu Xinming, et al. 2019. FaultNet3D: Predicting Fault Probabilities, Strikes, and Dips With a Single Convolutional Neural Network. IEEE TRANSACTIONS ON GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING, 57(11)