

AI 开创的新地震学研究

■ 国立研究开发法人 产业技术综合研究所地质调查综合中心 内出崇彦

地震数值预测研究和传统方法评估试点项目

地震监测站网评估试点项目

人工智能地震监测分析系统完善与应用

地震危险区精细调查和地震现场综合科学考察试点项目

预报员访学试点项目

地震信息专题图试点

地震重点监视防御区公共服务试点

AI 开创的新地震学研究*

■ 国立研究开发法人 产业技术综合研究所地质调查综合中心 内出崇彦

有望在各个领域带来创新的人工智能(AI)也进入了地震学研究中。那么究竟是如何让AI改变地震研究和地震防灾?作为其中的一部分内容,我们现在正努力推进——估算大量的微小地震震源机制解的研究,以此了解在日本全国地下的应力作用。

前言

近几年来我们在不同的场所经常听到人工智能(AI)这个词。这个词意的理解可能因人而异。例如,计算机自动识别图像中所包含的人和动物等,以及众所周知从人的说话声音中识别语言的处理。AI也被用来读取史料草图字。所有这些都是从复杂的数据中获取必要的信息。

AI中主要使用的技术被称为机器学习。一般常用的数据分析中其处理方法是事先决定的,而在机器学习中数据处理方法本身会自动调整,使之符合实际数据的特点。这种调整称为学习,用于学习的数据称为“学习数据”。

作为机器学习的一种,有一种模型被称为神经网络(图1)。这是在生物神经元联系方式的启发下提出的。使用由多层组成的神经网络模型的机器学习被称为深度学习。多层神经网络具有能够很好表现复杂数据特征的性质。因此,深度学习可以进行识别和分类方面的复杂处理。

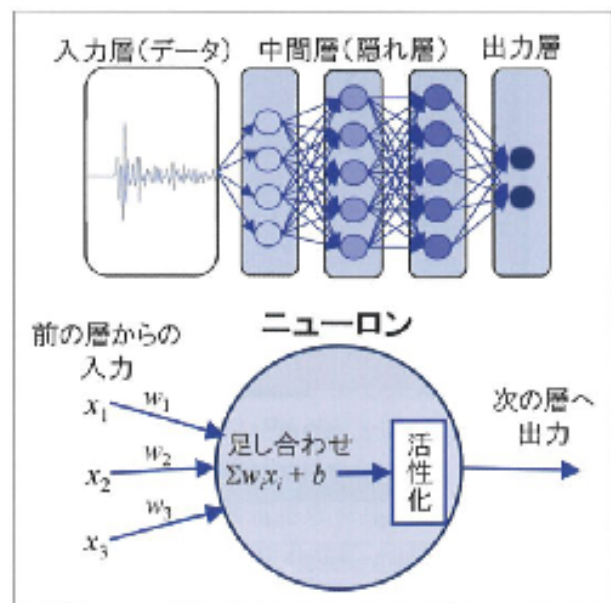


图1 神经网络的例子。上图所示,神经元成层排列,各层之间有连接。每个神经元如下图所示将权重 w_i 乘以从上一层输入的 x_i ,加上偏数 b ,进行被称为“活用化”处理,并将其传递给下一层。作为活用的例子,正的时候就直接输出,负的时候就输出0。这里, w_i 和 b 会根据资料自动调整,这个叫做深度学习。

深度学习对地震学的应用

地震学中也开始使用深度学习。地震数据是测量各时刻地面摇晃速度和加速度的数值排列,因此容易引入深度学习。期待深度学习灵活应用的情况之一

* 支撑新时代防震减灾事业现代化建设试点任务之三“人工智能地震监测分析系统完善与应用”成果,本文出自 Seismological Society of Japan-NAIFURU No. 122 August, 2020, 由金红林副研究员翻译。

是，在地震发生时从地震波形数据中能读取 P 波和 S 波到时的自动化处理。在人的眼中，即使能够读取 P 波和 S 波的到时，但由于噪音和地震波形的复杂性，很难完成对应所有这些波形的自动化处理系统。虽然多年来一直在研究自动检测方法，但其结果仍然被认为是比人工检测的可靠性差。除此之外，在其他方面也探讨深度学习的应用。其中，已有很多对地震波特征（如普通地震，低频地震和噪声）进行分类的研究。在应急地震速报中，也开始考虑在计算中引入深度学习实现地震的快速定位和震级的确定。也有研究试图通过震级和震源距离等参数来更好地估计地面的震度大小。此外，还有一些研究旨在预测余震的发生。

深度学习对微小地震震源机制解估算的应用

我们的研究小组为评估地震危险性和研究地震断层破裂模型，调查了日本列岛内部作用的力（应力），并将其总结为数据库（地壳应力场数据库：<https://gbank.gsj.jp/crstress/>）。也汇总了全球应力图 World Stress Map(世界应力地图：<http://www.world-stress-map.org/>)。应力的空间分布是地震和构造研究中备受关注的研究课题之一。了解应力的线索之一就是大量发生的微小地震的震源机制解。地震是由断层的错动产生的，而震源机制解是表示断层面方向和断层错动方向。如果某个方向的断层面发生向某一方向错动的微小地震，则认为存在与其对应方向的应力。到目前为止，利用气象厅和防灾科学技术研究所日常分析和积累的震源机制解，估算了日本列岛的应力方向。但是，这样的震源机制解的日常分析仅限于震级 $M3$ 级以上的地震，有很多的空白区域地震不存在。为了填补这样的空白区域，需要更小震级的震源机制解。与防灾科学技术研究所的 F-net MT 提供的震源机制解的地震数量相比，发生的微小地震数量约 100 倍多，即在 F-net MT 解的空白区域也有很多微小地震分布。(图 2)

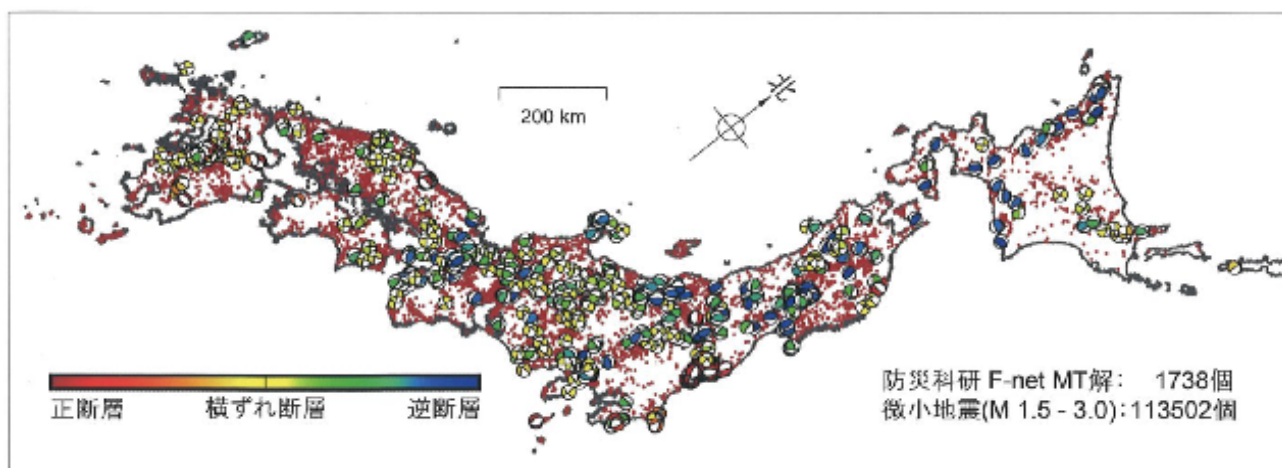


图 2 针对 2005 - 2019 年全国内陆深度 20 km 以内发生的地震，防灾科学技术研究所 F-net MT 解（沙滩球）和微小地震 ($M1.5-3.0$) (红点) 的分布比较。微小地震是 F-net MT 解得到的地震 (约 $M3.5$ 以上) 数量的 100 倍。红点从沙滩球溢出的地方，是通过分析微小地震才能推断出应力场的地区。

在微小地震的情况下，使用 P 波最初晃动是向上移动还是向下移动的“P 波初动极性”来推定“初动震源机制解”（图 3）。震源中断层的错动决定了 P 波的初动极性。相反，如果知道很多观测点的 P 波初动极性，就可以知道断层走向和错动方向。P 波初动极性的读取大多是依靠人工，需要很长时间。例如，在我的研究小组中，一个人一个月可计算处理约 100 个地震（分别为几十个观测点）的初动震源机制解的速度。因此，为了分析包括微小地震在内的大量地震事件，尝试通过深度学习实现读取的高速化。

利用气象厅读取的约 $M3$ 以上地震的 P 波初动极性的庞大记录和产业技术总合研究所读取的微小地震的 P 波初动极性的记录，让多层神经网络学习。目前使用它，自动读取日本全国的微小地震 P 波初动极性，确定震源机制解的研究。

今后，在这些研究成果的基础上，通过获得更细致的区域应力的特征，为地震预测方面作贡献，同时认识应力构造模型。

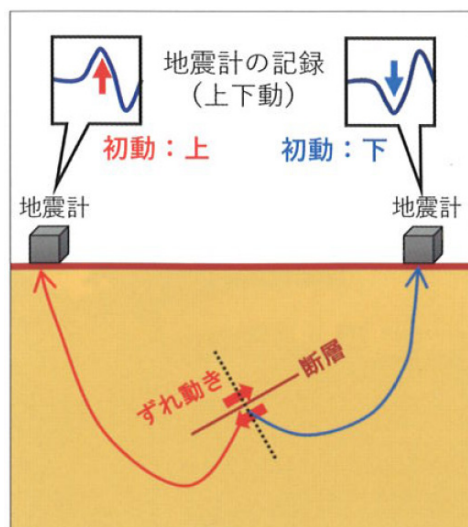


图 3 P 波初动极性与初动震源机制解的关系。连接震源和地震仪的细线表示地震波从地下断层位错（震源）到地震观测点的传波路径。震源机制解表示断层平面和断层位错方向。在断层破裂点，P 波初动极性为“压”（波形上下运动的向上）。

今后展望

我认为地震学还有可应用 AI 的研究课题，很多研究人员正一起寻找它。另一方面，使用 AI 的应用研究方面有一些东西需要注意。首先，AI 一般被认为是无所不能的，冷静地看清 AI 的能力是非常重要的。众所周知，AI 存在“黑匣子”问题，不可能说明获得结果的过程，这就很难提供与灾害直接相关的信息。对此，XAI（可解释的 AI）的研究正在进行中，也希望将其纳入地震学中。我希望尽可能地从地震波中获取可靠的信息，以便能够大量地提供地震研究和地震防灾的判断材料，从而为这些进步做出贡献。

加强科技创新支撑新时代防震减灾事业现代化建设
全国地震重点监视防御区公共服务

试点 工作通讯目录

预报员访问学者导师聘任管理办法
“解剖地震”计划“十四五”实施方案
AI 开创的新地震学研究

2021年第1期(总第22期)

2021年第2期(总第23期)

2021年第3期(总第24期)

编委会

王武星 王琳琳 田勤俭 汤毅 孙汉荣 吴忠良 李营 杨林章 张永仙 张晓东 邵志刚
赵翠萍 黄伟

编辑部:

中国地震局地震预测研究所科研管理部
E-mail:sycglb@ief.ac.cn