深層学習と地震シミュレーションによる地震震源決定手法の開発

課題責任者
杉山 大祐　　海洋研究開発機構 付加価値情報創生部門 地球情報科学技術センター

著者
杉山 大祐*1, 　坪井　誠司*1
*1 海洋研究開発機構 付加価値情報創生部門 地球情報科学技術センター

キーワード：機械学習, 地震震源決定, 地震波形シミュレーション, スペクトル要素法

1. 研究開始時の背景

地震の震源を決定するための従来の手法は、P 波や S 波などの地震波形に関連する到着時間を使用する線形最小二乗法に基づいている[1-2]。この手法は、地球の 1 次元の内部構造を使用することが一般的であるため、3 次元の構造に拡張するためには波線追跡などの数値的手法を導入する必要がある。また、地震があまり発生しない場所や、稀にしか起こらない大規模な地震などの場合に対応することが困難であるという問題があった。この問題に対して我々は数値計算された理論的な地震波形と機械学習を組み合わせて地震震源決定に対する新しい手法を提案している[3]。本手法を発展させるため、機械学習モデルによる震源決定の精度の向上を目指すとともに、震源メカニズム決定手法の有効性および GPU における計算時間の妥当性を確認する。

2. 機械学習による震源決定の課題

昨年度は、リアルタイムのマグニチュードと震源位置の推定のために提案されている深層学習アプローチにおいて、事象の少ない、大きなマグニチュードのイベントを過小評価してしまう課題を解決するために、大きなマグニチュードの地震について理論的な仮想地震を事前に計算し、学習に用いることを考えた。本研究では、これを発展させ、地震の震源情報と共に震源メカニズム推定と地下構造推定を行うための、感度カーネルの計算が、GPU を用いることによりどのように改善されるかを明らかにすることを目標とする。

3. アジョイント法と感度カーネル

本研究では、スペクトル要素法を使用して現実的な地球モデルの理論的な地震波形を計算するプログラムパッケージ SPECFEM3D_GLOBE[4-8]を使用して、Earth Simulator 4（ES4）により教師データの生成を試みた。数値地震記象は日本列島規模の領域を 4×4、すなわちスペクトル要素メッシュの 16 スライスを生成して計算した。各スライスは、ES4 の GPU ノードの単一 GPU に割り当てられ、320×320 格子点に細分され、約 14 秒以上の精度で数値地震記象を生成した。SPECFEM3D コードは CUDA 用に最適化されており、HiNet の観測点に対し、サンプリング間隔 0.03 秒で 1 分間の記録 3 成分を 16GPU の flat MPI により約 3 分間の計算時間で計算することが出来た。

スペクトル要素法による理論地震波形の計算においては、地震震源メカニズムおよび地下内部構造を推定するための感度カーネルをアジョイント法により計算することができる。まず、理論波形と観測波形の残差を定義する。

$$\chi(m) = \sum_{s=1}^{N} \sum_{r=1}^{M} \int_0^T \frac{1}{2} \left\| u(x_r, x_s; t) - d(x_r, x_s; t) \right\|^2 dt \quad (1)$$

d は観測点 $\mathbf{x}_r$ (r=1, …, M) における観測波形で、地震震源 $\mathbf{x}_s$ (s=1, …, N)により励起されたとする. **u** はその観測点における理論波形である。理論波形と観測波形の残差を反復により最小にするために (1) 式のモデルパラメタに関する偏微分; $\partial\chi(m)/\partial m$ を計算する。時間領域で波形の偏微分をすべての震源と観測点の組み合わせに対して計算することは現在のスパコンをもってしても計算量が大きすぎるが、Tromp et al. (2005)[9]と Tromp et al. (2008)[10]は アジョイント法により観測点から時間を逆向きに計算することで計算量を削減できることを示した。残差の偏微分は:

$$\delta\chi(m) = \sum_{s=1}^{N} \sum_{r=1}^{M} \int_0^T [u(x_r, x_s; t) - d(x_r, x_s; t)] \cdot \delta u(x_r, x_s; t) dt \qquad (2)$$

と書ける。ここでδuは変位の一次ボルン近似による摂動である。式 (2) は;

$$\delta\chi(m) = -\sum_{s=1}^{N} \int_V \left[K_\rho(x, x_s)\delta\ln\rho(x) + K_\lambda(x, x_s)\delta\ln\lambda(x) + K_\mu(x, x_s)\delta\ln\mu(x)\right] d^3x$$

と書くことができる。弾性定数に関する Fréchet derivatives は次式により定義できる:

$$K_\rho(x, x_s) = -\int_0^T \rho(x) u^\dagger(x, x_s; T-t) \cdot \partial_t^2 u(x, x_s; t) dt$$

$$K_\lambda(x, x_s) = -\int_0^T \lambda(x)\nabla \cdot u^\dagger(x, x_s; T-t)\nabla \cdot u(x, x_s; t)dt$$

$$K_\mu(x, x_s) = -2\int_0^T \mu(x)\nabla \cdot u^\dagger(x, x_s; T-t)\nabla \cdot u(x, x_s; t)dt$$

ここで

$$u^\dagger(x, x_s; t) = \int_0^{t'} \int_V G(x, x' : t'-t) \cdot f^\dagger(x', x_s; t)d^3x'dt$$

であり

$$f^\dagger(x, x_s; t) = \sum_{r=1}^M [u(x_r, x_s; T-t) - d(x_r, x_s; T-t)]\delta(x - x_r)$$

G はグリーンテンソルである。 この感度カーネルには多くの計算資源が必要であるが、Tromp et al., (2008)[10] と Peter et al (2011) [11]は、時間順向きの計算後に結果を保存しておき、それを用いた時間逆向きの計算と組み合わせることで計算量を削減できることを示している。地球シミュレータの GPU ノードを用いて、16GPU を MPI により並列化することで、メッシュサイズが NEX=320,で周期 14 秒の精度の計算が約 3 分間で終了し、時間逆向きの計算による感度カーネルの計算が約 39 分で終了することを確認した。

謝辞

理論地震記象は、地球シミュレータを使用して計算した。 利用した地震波形は、国立防災科学技術研究所の観測データを用いた。 計算には、Computational Infrastructure for Geodynamics (CIG; geodynamics.org) のオープンソースプログラムパッケージ SPECFEM3D を使用した。

文献

[1] Bolt, B. A., (1960) The revision of earthquake epicenters, focal depths and origin time using a high-speed computer, Geophys. J. Int. 3, 434-440.

[2] Bondár, I., and Storchak, D., (2011) Improved location procedures at the International Seismological Centre, Geophys. J. Int. 186, 1220-1244. DOI: 10.1111/j.1365-246X.2011.05107.x.

[3] Sugiyama, D., Tsuboi, S. & Yukutake, Y. Application of deep learning-based neural networks using theoretical seismograms as training data for locating earthquakes in the Hakone volcanic region, Japan. Earth Planets Space 73, 135 (2021). https://doi.org/10.1186/s40623-021-01461-w

[4] Komatitsch, D. and Tromp, J., (2002a) Spectral-element simulations of global seismic wave propagation–I. Validation, Geophys. J. Int. 149, 390-412..

[5] Komatitsch, D. and Tromp, J., (2002b) Spectral-element simulations of global seismic wave propagation–II. Three-dimensional models, oceans, rotation, and self-gravitation, Geophys. J. Int. 150, 303-318.

[6] Komatitsch, D., Tsuboi, S., and Tromp, J., (2005) The spectral-element in seismology, in Seismic Earth: Array analysis of broadband seismograms, Geophys. Monograph 157, 205.

[7] Tsuboi, S., Komatitsch, D., Ji, C., et al. (2003) Broadband modeling of the 2002 Denali fault earthquake on the Earth Simulator, Phys. Earth Planet. Inter. 139, 305-312.

[8] Tsuboi, S., Ando, K., Miyoshi, T., et al., (2016) A 1.8 trillion degrees of freedom, 1.24 petaflops global seismic wave simulation on the K computer. Int J. High Perform Comput Appl. 30, 411-422. DOI: 10.1177/1094342016632596

[9] Tromp, J., C. Tape, and Q. Liu. Seismic tomography, adjoint methods, time reversal and banana-doughnut kernels. Geophys. J. Int., 160(1), (2005), pp.195–216. doi: 10.1111/j.1365-246X.2004.02453.x.

[10] Tromp, J., D. Komatitsch, and Q. Liu. Spectral-element and adjoint methods in seismology. Communications in Computational Physics, 3(1), (2008), pp.1–32.

[11] Peter, D., D. Komatitsch, Y. Luo, R. Martin, N. Le Goff, E. Casarotti, P. Le Loher, F. Magnoni, Q. Liu, C. Blitz, T. Nissen-Meyer, P. Basini, and J. Tromp. Forward and adjoint simulations of seismic wave propagation on fully unstructured hexahedral meshes. Geophys. J. Int., 186(2), (2011), 721–739. doi: 10.1111/j.1365-246X.2011.05044.x.