

論文

震源データからの断層面推定支援システムの開発†

安原 幸生*・坂本 尚久**・*****・江原 康生***
片尾 浩****・小山田 耕二*****

ABSTRACT Effective data visualization techniques are required in order to support efficient earthquake analysis. So far, earthquake analysis experts have only been able to imagine 3D structures from typical 2D expressions. However, we consider that experts would be able to understand 3D structures more accurately and efficiently by providing them with an intuitive and interactive 3D display system. We focused on immersive projection technology (IPT) systems, more specifically on the CAVE system, to develop an effective support system for earthquake data analysis. We also developed an IPT oriented bimanual input based control interface for the support system to enable intuitive user interaction with the 3D display. In addition, we implemented a support tool for estimating fault planes in the earthquake phenomenon using the Ordinary Kriging method.

1. 序論

近年、日本国内では東海地震や南海地震などの大型地震が近い将来発生するとの予測もあり、世間の地震防災への関心が高まっている。それに伴い、地震防災に向け、多くの研究機関が地震現象のメカニズム解明に積極的に取り組んでいる¹⁾。地震現象の解明には、大地震直後に得られる余震分布や地震波の速度データなどが用いられ、それらを解析することにより地震発生過程の定量的な予測や地震活動に関する様々な数値シミュレーションの信頼性の向上を図っている。プレートの沈み込み帯に位置し、地震が頻発する日本列島においては、地震データを計測し解析することは、安心・安全な社会基盤を構築する上で欠かすことの出来ない重要な役割を果たしている。

地震データの解析を円滑に進めるためには、データの可視化技術をはじめとする解析支援技術が必要不可欠である。例えば、震源データを可視化することにより、地震活動の異常が発見でき、また、地盤構造や活断層を推定することも可能である。しかし、多くの地震専門家は、代表的な2次元表現手法である震央分布図や断面図を用いて、そこから読み取れる3次元構造を独自に推定することによって解析を行っている。また、解析結果においてもその判定基準は専門家によって異なる場合も多く、最善の方法はいまだ確立されていないのが現状である。本研究では、直感的かつインタラクティブなデータ操作が可能な3次元表示環境を提供することにより、地震活動の3次元構造をより効率的かつ正確に把握するためのシステムを提案する。

本研究は、CAVE²⁾やCABIN³⁾といった没入型多面ディスプレイ技術(IPT)を利用した断層面推定支援システムの構築を目的とする。IPTを用いた高臨場3次元表示システムにより、観察者は震源データが分布する空間内に没入し、その3次元構造を直感的にとらえることができる。本システムでは、臨場感の高い3次元表示環境に加え、余震分布を基にした本震断層面の推定を支援する機能を提供する。地震は、プレートの沈み込みにとともに地殻に蓄えられたエネルギーの解放時に生じる断層周辺の破壊が原因であり、震源データの分布からおおよその断層形状を推測することができる。地震動の予測や防災などを行うにあたり、断層面の推定および解析は重要な役割を果たす。

Development of the Support System for Estimation of Fault Plane with Hypocenter Data. By Yukio Yasuhara (Graduate School of Engineering, Kyoto University), Naohisa Sakamoto (KGT Inc.), Yasuo Ebara (Academic Center for Computing Media Studies, Kyoto University), Hiroshi Katao (Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University) and Koji Koyamada (Center for The Promotion of Excellence in Higher Education, Kyoto University).

* 京都大学大学院工学研究科

** 株式会社ケイ・ジー・ティー

*** 京都大学学術情報メディアセンター

**** 京都大学防災研究所

***** 京都大学高等教育研究開発推進センター

† 2007年6月29日受付 2007年10月1日再受付

本システムにおける断層面推定支援機能では、地球統計学の分野で用いられる空間補間法である通常クリギング法⁴⁾を利用し、震源分布データから推定される断層面上に震度分布をコンタ表示することが可能である。さらに、IPT 向けに新たに開発した両手入力式操作インタフェース⁵⁾を利用することで、データに対する直感的なインタラクティブ操作が可能である。震源データに没入し、インタラクティブ操作可能な観察環境を提供することにより、紙面や一般の2次元ディスプレイ上での可視化結果表示では発見することができなかった、新たな活断層や地盤構造の空間的な変化を発見するための強力なツールとなり得ると考える。

2. 関連研究

本章では、従来から用いられているいくつかの震源データ可視化手法について説明する。住友ら⁶⁾は地震の専門家間で利用されている代表的な可視化手法について、それぞれの利点、欠点を述べ、情報の定量化を目的として、表現の再検討、改良を試みている。住友らが述べる震央分布図、時空間分布図、積算曲線を図1に示す。(a)の震央分布図は、ある期間の全ての地震の震央を地図上に2次元投影した図である。活断層に沿う地震活動が確認でき、地理的な分布特徴が明瞭となる。(b)の時空間分布図は、震源位置を1次元空間に投影して分布を表現し、その時間的な変化を表現した図である。震源の空間的分布だけでなく、時間変化に沿った解析が可能である。(c)の積算曲線は、ある最小マグニチュード以上全ての地震の積算数を表した図である。これらの手法は3次元の情報を2次元や1次元化しているため、紙面や一般の2次元ディスプレイ上での表示および解析には向いているものの、3次元構造を推定する際の直感性に欠けている。

一方、3次元表示技術を利用した地震解析システムも提案されている。海渡ら⁷⁾は点群震源分布の表示手

法および時系列解析のためにCGを用いた3次元可視化システムを提案し、液晶シャッター式眼鏡による立体表示環境における視認性に関する実験などを行っている。我々の提案するシステムでは、海渡らが提案するシステムと同様にIPTを用いた立体表示が可能であり、さらに新しく開発したIPT向けのインタフェースを用いることで、インタラクティブな解析作業が可能である。また、本システムでは地震断層面の推定機能を実装している点で海渡らのシステムとは異なっている。

3. 断層面推定法

本システムでは、震源データの分布より断層面を推定するための支援機能を実装している。地震は、地殻に蓄えられた歪みの解放時に生じる断層周辺の破壊が原因となって発生する。そのため、余震の集中部は、おおよその本震断層の形状を示す。こうして把握された断層形状は、地震動の予測など、さまざまな形で地震防災に役立てられる。

従来から、地震の専門家は2次元で表現された震央分布図から3次元構造を想像し、断層面の推定を行ってきた。例として、図2(a)に鳥取県西部地震の震央分布図を示す。鳥取県西部地震の場合、本震断層はほぼ垂直な1つの面であり単純な構造であるため、2次元の震央分布図からでも推定が容易である。しかし、図2(b)に示す新潟県中越地震などのように、本震および大余震による複数の傾斜を持った断層面が重なりあっている場合には、2次元の震央分布図からだけでは正確な断層形状の把握が困難である。

本システムでは、IPTを用いてユーザが震源データ表示空間内へ没入することにより、震源分布の3次元構造を直感的にとらえることができる。さらに、地球統計学の分野で用いられている空間補間法の通常クリギング法を用いることにより、推定した断層面上で

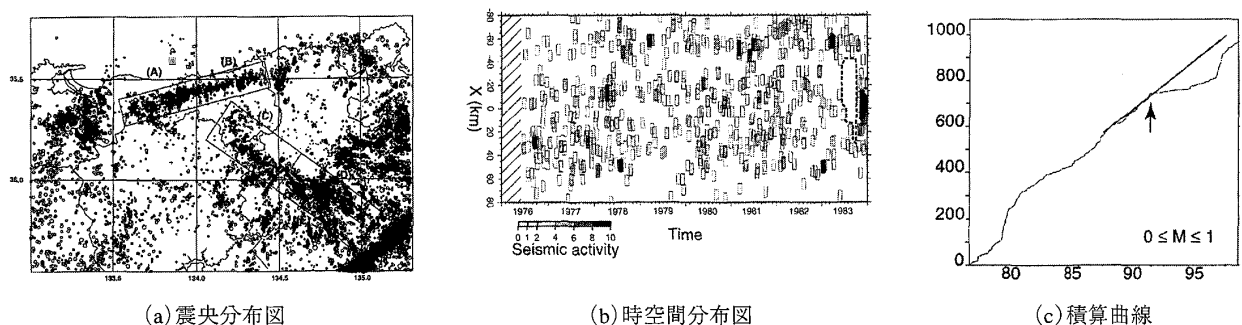


図1 地震データの代表的な可視化手法⁶⁾

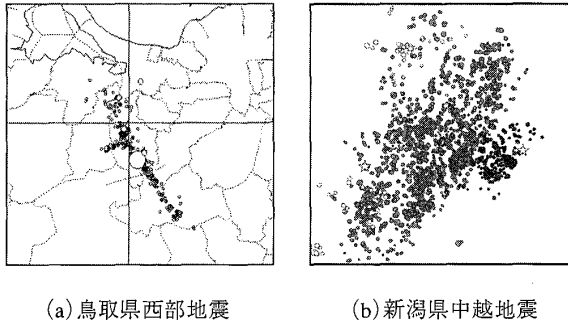


図2 震央分布図の例

の震度分布をコンタ図として表示することを可能にしている。

3.1 震源データの3次元表示

本研究で扱う震源データには個々の地震の発震時刻・緯度・経度・深度・マグニチュードなどが記載されている。本システムでは個々の地震を3次元空間中に球として表現する。緯度・経度・深度から3次元空間中の表示位置を決定する。また、マグニチュードの大きさにより球の大きさ、色を決定する。表示例として、図3に新潟県中越地震の震源データを2次元ディスプレイ上に表示した様子を示す。

データは長期間にわたり測定したものであり、全期間のデータを同時に表示すると、大量の球が過度に密集し、特徴的な変化を見落とす可能性がある。そのため、本システムでは、ユーザは、図4に示すウェアラブルコンピュータのGUIにより、表示したいデータの絞り込みが可能となる。左側のウィンドウはファイルから読み込んだ全期間のデータを、横軸を時間、縦軸をマグニチュードとして表しており、ユーザはスライダを用いて興味ある部分を指定することができる。左側のウィンドウで指定した部分は、右側のウィンドウで拡大表示され、ユーザは区切り線を追加することができ、指定した部分をさらに複数のフレームに分割することができる。分割したフレームを連続表示することでアニメーション表示も可能である。

3.2 通常クリギング法

クリギング法は地球統計学の中心的手法であり、空間現象を連続空間確率場でモデル化し、規則的もしくは震源データのような不規則位置で観測されたデータから、任意の位置での確率場の値を予測する手法である。その中で通常クリギング法は本質的定常性をもつ確立場に対する最良線形不偏予測である。確立場 Z が本質的定常性をもつとは、次の性質を満たすことである。

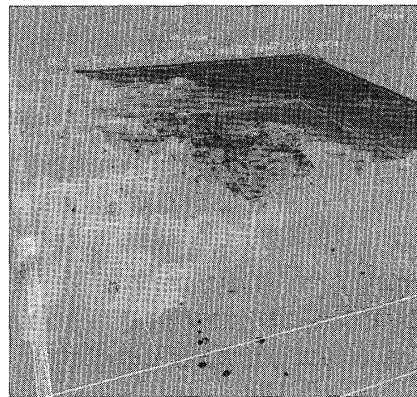


図3 2次元ディスプレイ上での表示例(新潟県中越地震)

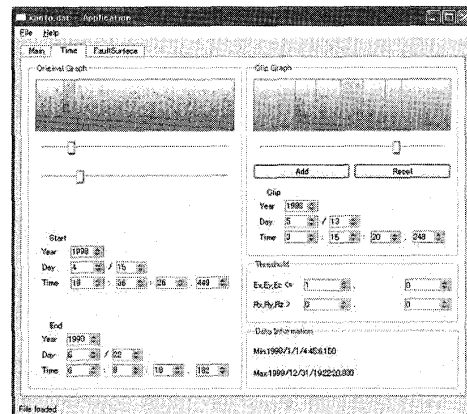


図4 表示データ指定 GUI

任意の位置 $s_1, s_2 \in D$ について、

$$E \{ Z(s_1) - Z(s_2) \} = 0 \quad (1)$$

$$\text{Var} \{ Z(s_1) - Z(s_2) \} = 2\gamma(s_1 - s_2) \quad (2)$$

ここで、相対位置のみに依存する 2γ をバリオグラム、また、 γ そのものをセミバリオグラムとよぶ。実測データに対し、既存のモデルを当てはめることでセミバリオグラムのパラメータを推定する。

推定したセミバリオグラムを利用し、通常クリギングによる空間予測を行う。線形予測量は、適当な重み $\omega = [\omega_1, \dots, \omega_n]'$ を用いて、

$$\hat{z}(s_0) = \sum_{i=1}^n \omega_i Z(s_i) = \omega' Z \quad (3)$$

「最良」の意味は平均2乗予測誤差の最小性と解釈される。

$$\sigma^2(s_0) = E \{ |\hat{Z}(s_0) - Z(s_0)|^2 \} = -\omega' \Gamma \omega + 2\omega' \gamma_0 \quad (4)$$

ここで $\gamma_0 = [\gamma(s_1 - s_0), \dots, \gamma(s_n - s_0)]'$, $\Gamma = \{\gamma(s_i - s_j)\}_{ij}$ とおいた。予測量の重み ω は、簡単な連立方程式を解くことにより、

$$\omega = \Gamma^{-1} \gamma_0 + \left(\frac{1 - \Gamma^{-1} \gamma_0}{\Gamma^{-1} 1} \right) \Gamma^{-1} 1 \quad (5)$$

として計算される。

3.3 断層面推定手順

3.3.1 断層面推定対象の震源選択

始めにユーザが断層面上に分布していると考えられる震源を選択する。選択は2次元ディスプレイ上に表示される震源分布の3次元表示に対して行う。3.2節に説明した方法で、観察したい時間帯を選択した上で、ペンタッチで領域を囲むことにより断層面推定に使用する震源データを選択する(図5)。

3.3.2 セミバリオグラムモデルの推定

クリギングによる空間予測の前処理として、選択した震源データからセミバリオグラムを推定する。セミバリオグラムの推定手順を以下に示す。

1. ヒストグラム(横軸:マグニチュード)から外れ値

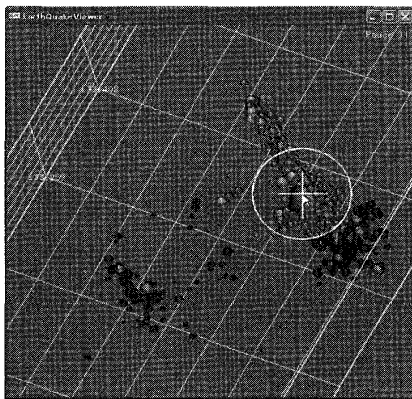


図5 震源データの指定

を除去する(図6(a))。

2. バリオグラム雲(横軸:点間距離, 縦軸:点間マグニチュード差)から外れ値を除去する(図6(b))。
3. バリオグラム雲から分割数を指定することで経験セミバリオグラムを決定する(図6(c))。
4. 経験セミバリオグラムに基づいて、セミバリオグラムのモデル選択とパラメータ推定を行う。

4で用いるモデルには6つのモデル(ナゲット効果, 線形, 累乗, 球形, 指数, ガウシアンモデル)を実装した。用いるモデルはユーザが指定することができる。モデルのパラメータ推定における非線形最適化には、Brunell⁸⁾の提案する最適化アルゴリズムを用いる。

3.3.3 断層面の表示

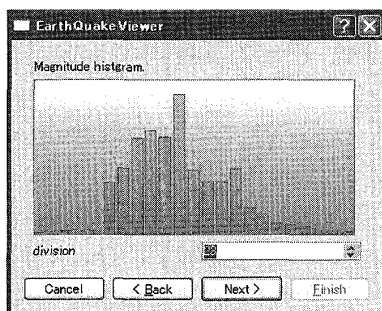
選択した震源データの3次元座標から断層面を推定する。本システムでは、選択された3次元座標から計算した回帰平面を断層面として採用する。3.2.2節で推定したセミバリオグラムモデルを利用し予測量の重みを計算し、選択した震源データのマグニチュードの大きさから通常クリギング法を用いて空間予測を行う。空間予測の結果を用いて断層面を構成する格子点での震度値を補間計算している。断層面推定支援機能を用いた様子を図7に示す。各断層面上で震度値がコンタ表示されていることがわかる。複数の断層面の空間的な位置関係とその断層面上の震度分布を同時に直感的に観察することができる。

4. システム構成

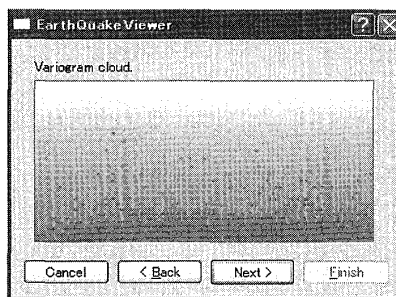
本章では、提案する地震データ解析支援システムの概要について説明する。

4.1 全体構成

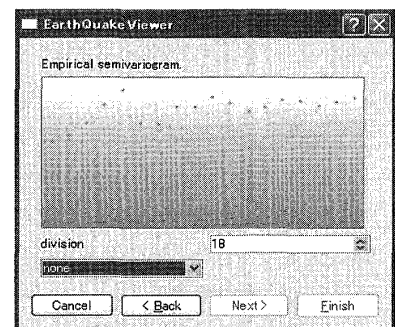
本システムのハードウェア構成を図8に示す。本システムはIPTと新たにIPT向けに開発した操作インタ



(a) ヒストグラム

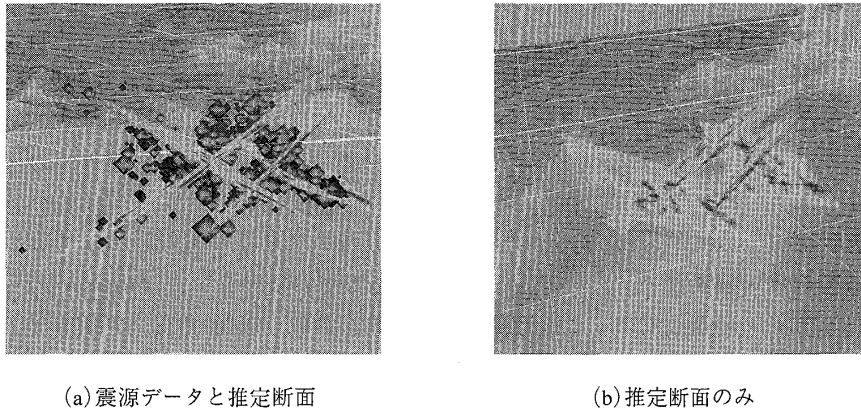


(b) バリオグラム雲



(c) 経験セミバリオグラム

図6 セミバリオグラム推定の流れ



(a) 震源データと推定断面

(b) 推定断面のみ

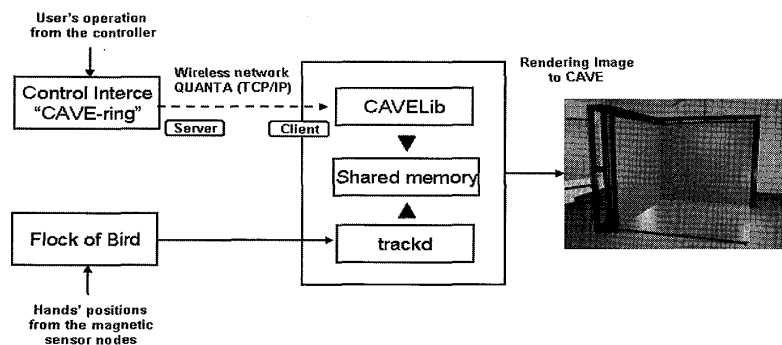
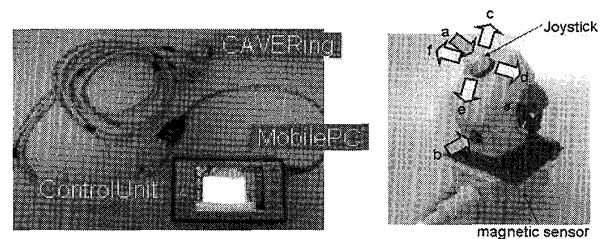
図7 断層面推定例(新潟県中越地震¹²⁾)

図8 提案システムの全体構成

フェース「CAVE-Ring」から構成される。本研究では、IPT アプリケーション開発のために CAVELib⁹⁾を、データ転送に通信ライブラリである QUANTA¹⁰⁾を用いている。

4.2 操作インタフェース

IPT 向けに新たに開発した操作インタフェースである CAVE-Ring について説明する。現在までに、CAVE や ImmersaDesk といった IPT 環境で、一般的に普及している操作インタフェースとして Wanda があげられる。Wanda は3つのボタンと1つのジョイスティックを持ち、ユーザは片方の手でそれら进行操作する。また、久木元ら¹¹⁾は、IPT を用いた可視化作業においてパラメータ変更や VR 空間への注釈付与を容易にするために、PDA (Personal Digital Assistance) を用いた操作インタフェースを提案している。上記の2つをはじめ、今までに提案されている IPT を対象とした操作インタフェースは片手で操作を行うものがほとんどであった。しかし、日常生活においては両手を用いた行動も多く、IPT を用いた3次元表示環境において現実感を損なわないためには、両手での操作が可能なインタフェース



(a) CAVE-Ring システム

(b) CAVE-Ring

図9 新しく開発したインタフェース「CAVE-Ring」

が必要となる。そこで、我々は、IPT 向けに両手入力式の操作インタフェース CAVE-Ring を開発した。

図9(a)に CAVE-Ring システムの全体図を示す。CAVE-Ring システムは2つのリング状の入力デバイスと1つの操作ユニット、1台のウェアラブルコンピュータから構成される。入力デバイスは1つのジョイスティックと1つのボタンから構成され、図9(b)に示すように操作する。操作内容は操作ユニットより検出され、その情報がウェアラブルコンピュータから無線 LAN を介して IPT システムへと転送される。また、ユー

ザの手の位置は磁気センサにより検出され、IPTに接続されたホストコンピュータ上のtrackdプログラムに転送される。以上の方法で、アプリケーション開発者はユーザの操作内容と手の位置をアプリケーション内から得ることが可能である。

実際にCAVE-Ringシステムを装着している様子を図10に示す。ユーザは両手の人差し指にリング状の入力デバイスを装着する。磁気センサによる手の位置の検出と、親指でのジョイスティックとボタンの操作により、IPT空間に映し出された映像に対してさまざまなインタラクティブ操作が可能である。また腕に装着したウェアラブルコンピュータはGUIとしての働きも有する。入力デバイスがリング状であるため、装着したままの状態でもウェアラブルコンピュータを専用のタッチペンを用いて操作することが可能である。両手操作時はウェアラブルコンピュータを腰に装着する。

本インタフェースの利点は、リング形状の両手入力式のデバイスによる3次元表示への直感的なインタラクションと、2次元ディスプレイを用いたGUIによる3次元表示中では困難な操作を併用できるところに

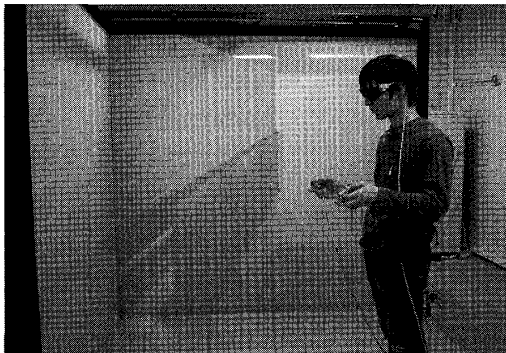


図10 CAVE-Ringシステムを装着した様子

ある。具体的な操作方法や機能については参考文献⁹⁾で述べている。地震解析支援システムにおいては、リング状の入力デバイスを利用し、ジョイスティックによる仮想空間内の移動や、ボタンを利用して推定断層面を選択し、両手の動きによってその微調整を行うことが可能である。特に本システムでは、立体的な空間内で、推定された断層面を両手で持ち、その断層面上の震度分布を見ることが可能な平面を移動させる感覚で、移動や回転を自由に行うことができる。また、2次元ディスプレイのGUIによって、データファイルの選択や震源データの部分的な指定などを行うことが可能である。

5. 実験

本システムを利用して、実際に過去のいくつかの震源データ¹²⁾の表示を行った。没入環境において実際に震源データの観察している様子を図11に示す。ユーザは、手に持つウェアラブルコンピュータを利用して表示する震源データをインタラクティブに選択することができ、ペンタッチで領域を直感的に選択することにより容易に断層面表示を行うことができる(図11(a))。さらに、震源データが表示されている空間中に没入し、CAVE-Ringを利用して断層面の移動などの操作を直感的に行う(図11(b))ことで、2次元ディスプレイ上での3次元表示だけでは観察することができないデータ内部まで観察ができ、臨場感の高い空間内において3次元的な震源データの解析をインタラクティブに行うことが可能である。

地震専門家による本システムの利用実験では、「震源分布の3次元的な位置が直感的で理解しやすい」「データに没入できるため入り組んだ断層面の構造が観察しやすい」などの評価を得た。

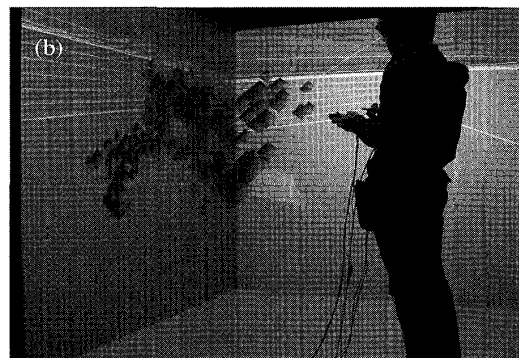


図11 提案システムを利用している様子。(a)ウェアラブルコンピュータを利用した震源データの選択。(b)CAVE-Ringを利用した両手操作による断層面の微調整。

6. 結論

本論文では、IPTを用いた震源データからの断層面推定支援システムを開発した。IPTでは、近年の高精度化著しい2次元ディスプレイに対して、どうしても解像度が劣るものの、重なり合った断層面群の発見に対して有用であることが明らかになった。さらに、本システムでは、震源データの臨場感の高い3次元表示に加え、ウェアラブルコンピュータを利用した時空間的な震源データの選択が可能である。また、指定震源データから対話的速度での断層面推定が可能であり、通常クリギング法を利用して推定断層面上に震度分布を実時間でマッピングし表示することが可能である。さらに、CAVE-Ringシステムを利用することで、推定断層面の両端をつかみ、それを直感的に傾け移動することにより、自由な方向から観察することができ、臨場感の高い空間内において、3次元的な震源データの解析を対話的に行うことが可能となった。本システムを利用することにより、地震の予測・防災に重要な役割を果たす断層面の位置推定および震度分布をインタラクティブに解析することができ、安心・安全な社会基盤を構築するために必要な地震研究に役立てられることが期待できる。

今後の課題として、実装した断層面推定機能の有効性を定量的に評価する必要がある。また、現状では震源データから断層面を推定する際の点群の指定をウェアラブルコンピュータ(2次元ディスプレイ)上で行っているが、それ以外の方法として、3次元空間での直感的な指定手法の開発を考えている。さらに、地震現象の解析に用いられる震源データ以外の地震波速度構造などのデータも本システムで解析できるように実装する予定である。これらの機能を実装し、今後は、地震解析の専門家に本システムを実際に使用してもらい評価を行うことも予定している。

謝辞

震源データは地震予知研究センターの澁谷拓郎准教授の提供による。

参考文献

- 1) T. Shibutani et. al.: Aftershock distribution of the 2004 Mid Niigata prefecture Earthquake derived from a combined analysis of temporary online observations and permanent observations, *Earth Planets Space*, **57**, 545/549 (2005)
- 2) C. Cruz-Neira, D. J. Sandin, T. A. DeFanti, R. V. Kenyon and J. C. Hart: The CAVE: Audio Visual Experience Automatic Virtual Environment, *Communications of the ACM*, **35-6**, 65/72 (1992)
- 3) M. Hirose: CABIN - A MultiScreen Display for Computer Experiments : Proceedings of 2nd International Conference on Virtual Systems and Multimedia (VSMM'97), **78/83** (1997)
- 4) N. Cressie: *Statistics for Spatial Data*, John Wiley and Sons, New York (1993)
- 5) T. Yoshihisa, Y. Yasuhara, K. Koyamada and M. Tsukamoto: Design and Implementation for A Bimanual Input System on Virtual Environments, Proceedings of IEEE 20th International Workshop on Network-based Virtual reality and Tele-existence (INVITE'2006), **655/659** (2006)
- 6) N. Sumitomo, K. Watanabe, K. Matsumura, F. Takeuchi, T. Shibutani, S. Nakao and Y. Imada: Spatial and Temporal Features of Seismic Activity in Sanin Districts, Southwest Japan, *Annals of Disas. Prev. Res. Inst. Kyoto Univ.* No.42 B-1, **61/69** (1999)
- 7) M. Kaito, E. Watanabe, T. Naka, M. Yamada, M. Endo, S. Miyazaki and J. Hasegawa: A 3D Display System of Seismic-center Distribution for Earthquake Data Analysis : *The Journal of the Society for Art and Science*, **4-2**, 54/67 (2005)
- 8) R. M. Brunell: An automatic variogram fitting procedure using Cressie's criterion, *Proceedings of the Section on Statistics and Environment*, **135/137** (1993)
- 9) CAVELib: <http://www.vrco.com/CAVELib/OverviewCAVELib.html>
- 10) QUANTA: <http://www.evl.uic.edu/cavern/quanta/>
- 11) N. Kukimoto, Y. Furusho, J. Nonaka, K. Koyamada and M. Kanazawa: PDA-based Visualization Control and Annotation Interface for Virtual Environment, Proceedings of the 3rd IASTED International Conference on VIIP2003, **975/980** (2003)
- 12) T. Shibutani, et. al.: Aftershock distribution of the 2004 Mid Niigata Prefecture earthquake derived from a combined analysis of temporary online observations and permanent observations, *Earth Planets Space*, **57**, 545/549 (2005)