

Head Mounted Display を用いた津波仮想体感システムの開発

Development of Tsunami Virtual Reality System Using Head-Mounted Display

○田中伸厚, 茨城大・工, 茨城県日立市中成沢町 4-12-1, E-mail:nobuatsu.tanaka.07@vc.ibaraki.ac.jp
 斎藤史弥, 茨城大・工, 茨城県日立市中成沢町 4-12-1, E-mail: 15nm421n@vc.ibaraki.ac.jp
 北嶋和心, 茨城大・工, 茨城県日立市中成沢町 4-12-1, E-mail: 12t1025r@vc.ibaraki.ac.jp
 Nobuatsu Tanaka, Ibaraki University, 4-12-1 Naka-narusawa, Hitachi, Ibaraki 316-8511
 Fumiya Saito, Ibaraki University, 4-12-1 Naka-narusawa, Hitachi, Ibaraki 316-8511
 Masami Kitajima, Ibaraki University, 4-12-1 Naka-narusawa, Hitachi, Ibaraki 316-8511

Recently, especially after the Tohoku earthquake (March 11, 2011), we are getting much aware of tsunami disaster. In the case of tsunami, it is important for us to judge the risk and run away from it as soon as possible. For improving the judgment, we need actual trainings, but we cannot get training in a real tsunami unlike earthquake (earthquake can be experienced in an earthquake simulation vehicle). For training as many people as possible, especially children and old persons, we have been developing a portable tsunami virtual reality (VR) system using three key technologies of the head-mounted display (HMD), the laptop computer and the particle-based simulation. We correctly reproduce the tsunami behavior using a particle-based CFD method (SPH) for the purpose of giving tsunami's correct knowledge to trainees. By using the simulated results, we compactly-realized the 3D virtual reality of tsunami using Oculus Rift, one of the recent HMDs, with a small laptop computer.

1. 緒言

東日本大震災の犠牲者の大部分は津波が原因であり、このような犠牲者を防ぐには津波に対する経験や正しい知識を持つことが不可欠である。津波を体験できれば最善であるが、実際の津波を体験することはできない。そのため仮想現実(バーチャルリアリティ: VR)を用いた津波体験システムがいくつか提案されている[1-4]。しかし、これらでは津波の挙動を解析していなかったり、簡易的なモデルで評価しているものが多い。津波に対する経験や正しい知識を身につけるには、津波のスピードやスケール、挙動などの特徴を正確に理解することであり、津波挙動が不正確だと間違った知識を植え付けてしまう。そうした簡易モデルが使われる理由は、津波の挙動は自由表面を伴う流れ問題であり、それをコンピュータで評価する数値流体力学(CFD)に非常に計算コストや時間がかかるためである。本研究ではその問題を解決するため、柔軟性に優れた粒子法(SPH)とコストパフォーマンスに優れたGPU(Graphic Processing Unit)を用いた並列処理技術により、高速で高精度な津波のシミュレーションを実現する。

一方、津波災害の対象となるのは多くの場合、地方の海岸沿いの集落である。地方では自動車は人々の生活の足であり、津波襲来時に自動車を運転中であつたり、自動車により避難をする状況も十分考えられる。また、駐車中の自動車が流され、避難行動に影響を与える可能性もある。そのため、本研究では自動車(などの大型漂流物)を含む津波災害のシミュレーションを行う。自動車運転時の津波体験システムとしては板宮らによるもの[4]があるが、これは自動車操作に対する浸水の影響に注目したもので、流体の挙動を解析しておらず、津波の恐怖などを体験することを目的としたものではない。

一方、可視化部分に関して、上記の先行研究[1-4]では、プロジェクタや大型スクリーンを用いた大型システムが多い。そのため移動が難しく設置スペースが制約される。我々は近年特に注目の集まっているヘッドマウントディスプレイ(HMD)とノート型 PC を用いることにより、可搬性に優れ、かつ、三次元で迫力のある体験が可能なシステムの構築を目指す。可搬性を高めるのは、なるべく多くの人(特に、災害に弱い子供や老人)に体験してもらうためである。VR には高い計算処理能力が必要であるが、最近高性能で安価な GPU (Graphics Processing Unit)が登場し、VR が 1 枚の GPU

で実現できるようになった。さらにノート型 PC 向けの高性能な GPU も発売されノート型 PC での VR も可能である。同時に、VR の実現に必要な可視化装置としてはコンパクトな HMD を利用する。最近の HMD は、ヘッドトラッキング機能(頭の動きに応じて視野も変化)を備えることにより被験者周辺 360 度を仮想空間にできる。本提案は、そのようなノート型 PC と HMD を用いたコンパクトなシステムとすることにより、どのような場所にも設置可能で、実在する町並みの中で津波を実スケールで体験ができる点に特徴がある。

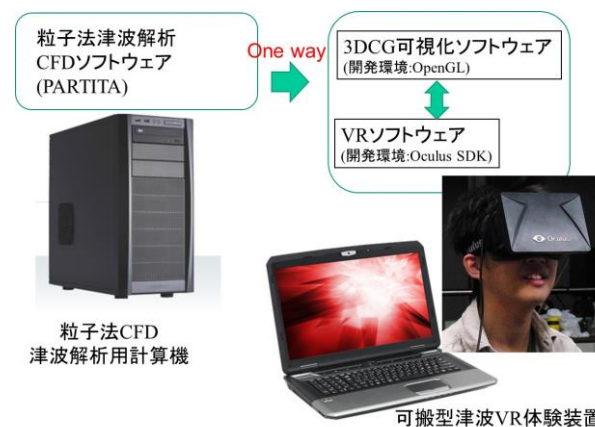


Fig. 1 Tsunami VR system based on HMD, SPH and laptop computer.

2. 津波仮想体感システムの概要

本津波仮想体感システムは大きく分けて、SPH 法による津波挙動の解析部分と HMD を用いた VR 体験装置より構成される。

2.1 SPH 法による津波挙動の解析

従来のオイリアン型の流体解析手法は、体系をメッシュに区切り流体を解析する手法であった。しかし、メッシュ生成が困難な自由液面のある流体の大変形問題などには適さず、津波のシミュレーションには向いていない。一方、SPH 法は、流体を粒子の集団として表現する手法ある。また、メッシュを必要としないため大変形問題などに適しており、漂流物・浮遊物を含む津波のシミュレーションに向いている。

SPH 法を用いた流体の支配方程式は以下で与えられる。

$$m_i \frac{\partial \mathbf{v}_i}{\partial t} = \mathbf{F}_i^p + \mathbf{F}_i^v + \mathbf{F}_i^g + \mathbf{F}_i^s \quad (1)$$

ここで \mathbf{v} は速度, m は粒子質量, P は圧力, ρ は密度, μ は粘性係数, \mathbf{f} は重力等の外力, \mathbf{r} は粒子間距離である。また, 添え字 i は粒子番号を表す。右辺第 1 項は圧力効果、第 2 項は粘性効果、第 3 項は重力効果、第 4 項は浮遊物から受ける力を表し、それぞれ以下の式で表される。

$$\mathbf{F}_i^p = -\sum_j m_i m_j \left(\frac{P_i}{\rho_i^2} + \frac{P_j}{\rho_j^2} \right) \nabla W(\mathbf{r}_{ij}, h)$$

$$\mathbf{F}_i^v = \sum_j m_i m_j \frac{\mu}{\rho_i \rho_j} \mathbf{v}_{ij} \nabla^2 W(\mathbf{r}_{ij}, h)$$

$$\mathbf{F}_i^g = -m_i \mathbf{g}, \quad \mathbf{F}_i^s = \sum_k \mathbf{f}_{i,k}$$

ここで W はカーネル関数であり, j は流体粒子, k は浮遊物の粒子のインデックスである。ベクトル量の添え字 ij は, $\mathbf{r}_{ij} = \mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i$ を表す。 $\mathbf{f}_{i,k}$ は流体粒子 i と浮遊物粒子 k の相互作用であり、以下の式で評価する。

$$\mathbf{f}_{i,k} = -m_i m_k \left\{ \frac{P_i}{\rho_i^2} + \frac{P_k}{\rho_k^2} \right\} \nabla W(\mathbf{r}_{ik}, h) \quad (2)$$

浮遊物の圧力などは境界条件より与え、流体の圧力は以下の擬似的な非圧縮性の状態方程式を用いる。

$$P_i = \frac{\rho_{i0} c_s^2}{\gamma} \left\{ \left(\frac{\rho_i}{\rho_{i0}} \right)^\gamma - 1 \right\} \quad (3)$$

ここで c_s は音速, ρ_{i0} は粒子 i に対応する物質の基準密度を示す。浮遊物の運動方程式は並進運動に関する式、

$$M \frac{\partial \mathbf{v}_G}{\partial t} = -M \mathbf{g} + \sum_k \mathbf{f}_k \quad (4)$$

および回転運動に関する式

$$\mathbf{I} \frac{\partial \boldsymbol{\omega}_G}{\partial t} = \sum_k \mathbf{r}_{Gk} \times \mathbf{f}_k \quad (5)$$

である。ここで M は浮遊物の質量, $\boldsymbol{\omega}$ は角速度, \mathbf{I} は慣性テンソル, 添え字 G は浮遊物の重心を示す。また、浮遊物粒子が流体から受ける力は、式(2)によって流体粒子 j が浮遊物粒子 k から受けた力の反作用として与える。すなわち、

$$\mathbf{f}_k = -\sum_j \mathbf{f}_{j,k} \quad (6)$$

とする。

2.2 粒子から流体の再構成と VR 化

上記 SPH 法の解析結果を VR 化するには、まず離散的な粒子を連続的な流体に再構成し、レンダリング処理を行って 3DCG 画像を作成する必要がある。その再構成のためにメタボール法とマーチングキューブ法を用いる[5]。メタボール法は、粒子(メタボール)の中心から遠方に向かうにつれ濃度の減少する濃度場を作り、一定の濃度値を持つ面によって等値面を作る方法である。この得られた等値面をマーチングキューブ法によりポリゴン化を行う。濃度場に直行格子を配置し、メタボール法で作られた等値面をセル毎にポリゴンを生成していく。レンダリングは計算時間も考慮してラスタライズ法を用い、OpenGL の固定機能シェーダを用いて実

現した。

次に、HMD を用いた三次元立体視を実現する。HMD は頭部に装着するディスプレイ装置であり、左右の目に独立した映像を見せることで三次元化しバーチャルリアリティを実現する。本研究では、HMD として Oculus VR 社の Oculus Rift (Development Kit 1: DK1)を用いている。Oculus Rift は広視野角、頭の動きに映像の表示が追従するヘッドトラッキングといった特徴を持つ VR に特化した HMD である。Oculus Rift で三次元立体視を実現するためには、ステレオレンダリングとヘッドトラッキング機能を追加する必要がある。ステレオレンダリングでは、左右の視差を考慮して左目用と右目用の映像をレンダリングにより作成する。一方、ヘッドトラッキング機能は、マウント部分に設置されたセンサー情報を Oculus SDK の関数を利用して得たクォータニオン情報に基づき、ビュー行列を回転行列変換することで、センサーから取得した回転角を映像に反映する。また、Oculus Rift では、マウント部に内蔵された凸レンズに合わせて画像を樽型に歪曲させることで視野の拡大を可能としている。そのため上述の手順で作成した 3D CG 画像を、画像中心を原点とする 2 次元極座標を用いて以下の変換を行う。

$$(r, \theta) \rightarrow (f(r)r, \theta)$$

ただし、 $f(r)=k_0+k_1r^2+k_2r^4+k_3r^6$ であり、 k_0, \dots, k_3 により歪曲の度合いを調整する。Oculus Rift では、この変換により 100 度以上の広い視野角 (通常の HMD の視野角は 45 度程度) を達成しており、高い没入感を達成できる。

3. 解析手法の検証と解析結果の VR 化

3.1 浮遊物解析手法の検証

浮遊物解析手法の検証として、ポピュラーなベンチマーク問題であるダムブレイクによって生成した波の中における、四面体構造の浮遊物体 (ブイ) の挙動の解析を行った。この問題は過去に実験により浮遊物の挙動が実験的に測定されており[6]、比較はその実験を対象に行った。Fig. 2 に解析体系を示す。浮遊物の密度は実験に合わせて $673[\text{kg}/\text{m}^3]$ とした。また、粒子径 $D=0.01[\text{m}]$ 、影響半径 $h=2.02D[\text{m}]$ 、時間刻みは $\Delta t=1 \times 10^{-4}[\text{s}]$ である。

時刻 0.5[s]における結果を Fig.3 に示す。この時間は水柱崩壊直後であり、発生した波によりブイが x 方向に移動しながら回転する。Fig.4 および Fig.5 は、それぞれ x 方向の変位と z 軸周りの回転角を実験[6]と比較したものである。水柱崩壊で発生した波は、壁面で反射し何回か左右に移動するが、その中でブイは回転しながら移動しており、その挙動は実験とおおむね一致している。

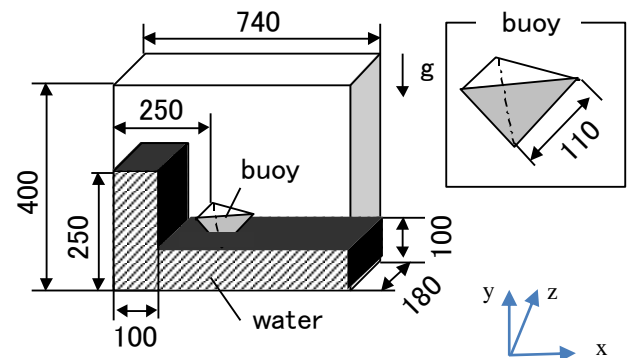


Fig. 2 Numerical analysis of tetrahedral buoy in water dam-break (unit in mm)

また、このような SPH 法による流体解析手法は並列処理に適しており、最近注目されている GPU を用いた高速化が可能である。Fig.6 に浮遊物を考慮しない通常のダンプレック問題を様々な GPU を使い、用いる粒子数を変えて計算を行った場合の高速化の結果を示す[7]。比較対象として通常の CPU として Intel Core2Duo (3GHz) の 1 プロセッサを使い、CPU に対する高速化率の図を Fig.4 に示す。粒子数が 10^4 以上であれば、GTX780 を用いることで CPU に対し 35 倍以上の高速化が達成できる。

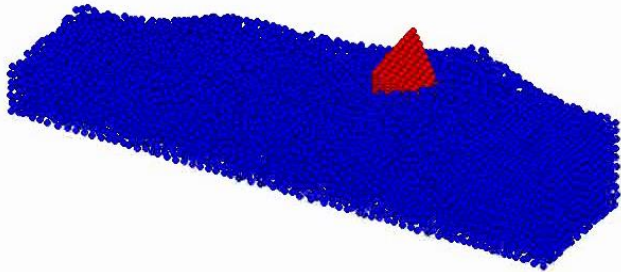


Fig.3 Numerical result of tetrahedral buoy behavior at t=0.5[s]

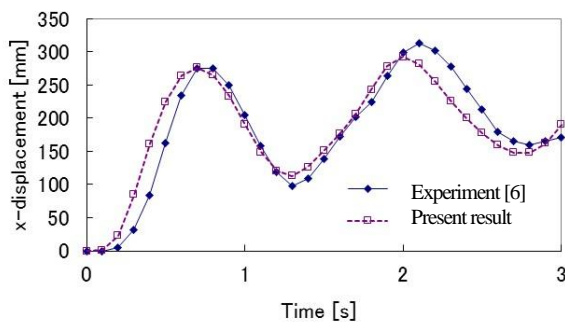


Fig. 4 Comparison of displacement of buoy with experiments

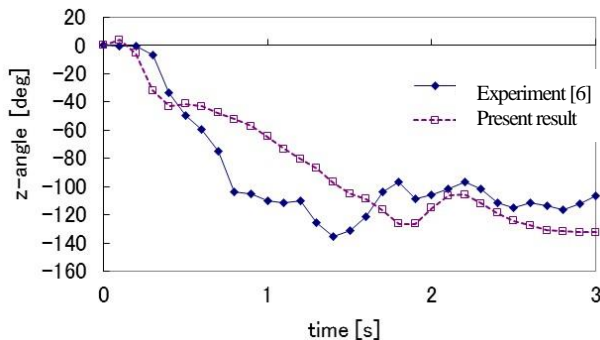


Fig. 5 Comparison of rotation angle around z of buoy with experiments

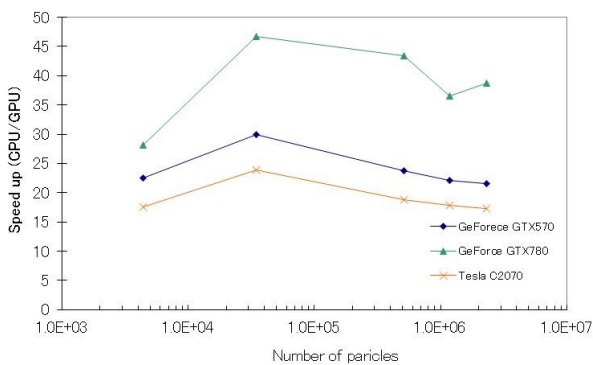


Fig. 6 Speed up by GPU in comparison with CPU of Core2Duo at 3GHz.

3.2 町並みにおける津波解析と VR 化

本システムの成立性を確認するため、Fig.7 に示す海岸沿いの町並み(50m×300m)を想定した解析を行い、結果の可視化を実施した。今回は試解析として海底の形状は模擬せず通常より高さの高い波を沖にセットし初期条件とした。街並みの中に一台の自動車を浮遊物として配置している。粒子イメージによる解析結果を Fig.8 に示す。津波 (流体) 部分の粒子数は 57,400 である。自動車を模擬した浮遊物が赤色の粒子であるが、粒子が大きいため自動車の詳細形状のモデル化まではできていない。この結果を上記の可視化アプローチを用いて VR 化を実施した。Fig.9 が VR 化前の 3D CG 画像である。今回はシステム成立性のチェックのための試解析であり、粒子数が少ないため流体表面に不自然な凹凸部分や、流体挙動に不自然な部分が確認された。また、レンダリングにラスタライズ法を用いているため、レイトレーシング法で得られるようなリアルスティックな映像とはなっていない。現時点では、ヘッドトラッキングなどの VR 処理にレイトレーシング法を用いてリアルタイムに処理できるほどの計算機能力が存在しないためである。Fig.10 に Oculus Rift 用の可視化画像を示す。マウント部のレンズを通さないと、このように魚眼レンズを通したような樽型の画像となる。Oculus Rift DK1 は開発者用キットの第 1 バージョンであり、解像度が低く画素数は少ないが (単眼あたり 640×800)、それでも頭の動きと映像に時間差が確認された。ヘッドトラッキングがスムーズでないと没入感が減り、ユーザーが画面酔いを起こす可能性がある。現時点の VR システムは GPU の利用が不十分であり、今後アルゴリズムを改善し GPU の有効活用を図る必要がある。

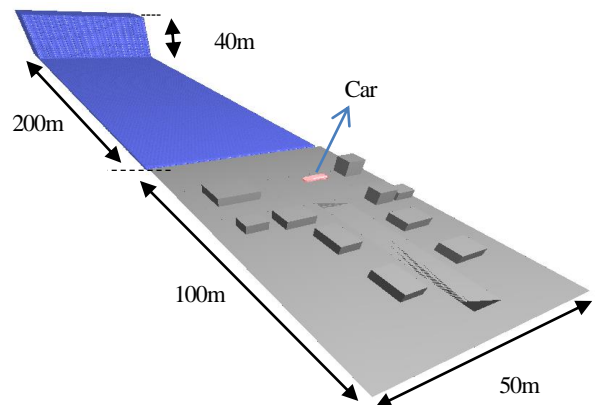


Fig. 7 Bayside street for simulation

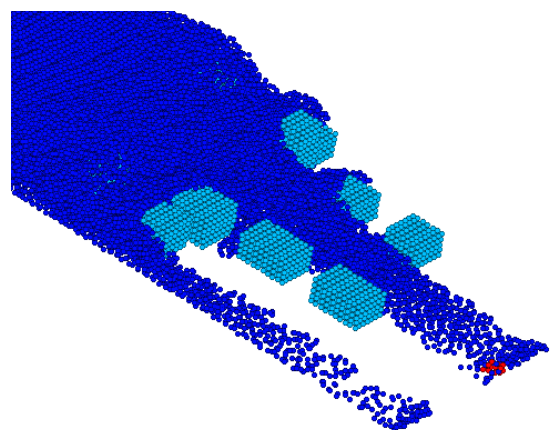


Fig. 8 Particle image of numerical results of tsunami attach (Red particles are the car engulfed by tsunami)

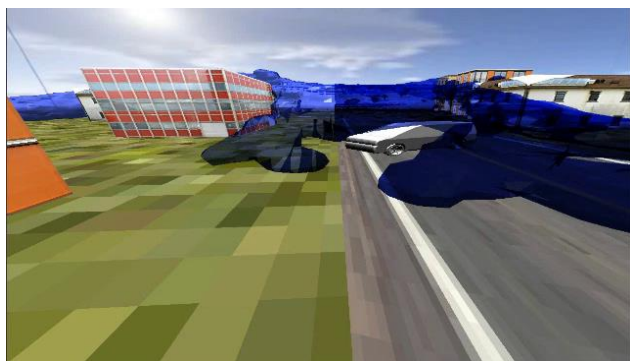


Fig. 9 3D-CG image of tsunami



Fig. 10 Virtual reality image of tsunami in Oculus Rift.

4. 結言

SPH 法に基づく浮遊物を含む津波の解析コードを開発した。また、その結果である粒子群から流体の再構築し、さらに Oculus Rift で三次元立体視する VR 化システムを開発した。流体解析コードに関しては、四面体ブイの挙動実験と計算を比較し妥当性を確認した。同時に GPU を用いることにより、十分な高速化が達成できることも分かった。その流体解析コードを用い、町並みにおける津波挙動の解析、および、解析結果の VR 化までを通して実施することによりシステムの実現性を確認した。今回は津波の粒子数が少ないことに起因すると考えられる問題点があったが、それらは今後粒子数を上げていくことで解決可能と考えている。また、VR 化に関連した処理を GPU に最適化を図ることでより現実感の高い映像を高速に処理できるシステムに改良していく。

参考文献

- [1] 田近,高田,樫山, VR 技術を用いた災害疑似体験システムの構築, 土木学会第 63 回年次学術講演会,pp.375-376(2008).
- [2] 安福, 高精度没入型ディスプレイによる災害避難の可視化, 図学研究, Vol.42, pp.57-60(2008)
- [3] 川辺,樫山,宮地,岩塚,古牧,西畑, 可聴化技術を用いた津波疑似体験システムの構築, 土木学会論文集, Vo.70,No.2, pp.235-242(2014).
- [4] 板宮,尾林,荒川,小塚, 大型ドライビングシミュレーターにおける津波道路冠水状況の再現と運転行動分析, 第 77 回情報処理学会, 1E-07(2015).
- [5] 乾, GPU 並列図形処理入門, 技術評論社(2014).
- [6] 勝田,田中,鈴木, ARtoolkit を用いた多自由度小型波力発電装置の挙動分析,第 20 回動力エネルギー技術シンポジウム, E222(2015).
- [7] 安嶋,GPGPU を用いた多自由度波力発電装置挙動の高速数値解析, 茨城大学大学院修士論文(2015).