

機関番号：12601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2013

課題番号：24760059

研究課題名(和文) レベルセットに基づく大変形 FSI 解析手法による自己接触を伴うエアバッグ展開の予測

研究課題名(英文) Folded airbag deployment analysis using large-deformation fluid-structure coupling method based on level sets

研究代表者

橋本 学 (Gaku, Hashimoto)

東京大学・新領域創成科学研究科・助教

研究者番号：00455362

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,100,000 円、(間接経費) 330,000 円

研究成果の概要(和文)：本研究では、folded airbag deploymentを予測するため、レベルセットに基づくLagrangian-Eulerian流体構造連成解析手法に接触モデルを適用した。構造の接触が生じると、レベルセットの関数値零の等値面が消失し、接触した構造の表面状で非物理的な流入・流出が生じる。そこで、界面での運動学的条件を満足する境界条件の与え方に物理量の不連続性を導入した。結果として、自己接触を伴いエアバッグが展開する様子を確認し、並列計算機上での計算性能を示した。

研究成果の概要(英文)：In this study, we applied a contact model to a Lagrangian-Eulerian fluid-structure coupling method based on level sets in order to simulate folded airbag deployment. In the case of self-contact, a zero isosurface of the level set function disappears at the interface on the Eulerian fluid mesh. To avoid unphysical inflow/outflow on the contact surface and satisfy the kinematic condition, we introduced discontinuity of physical quantity into the interface treatment method. As a result, we confirmed that the airbag inflates with self-contact and showed the algorithmic performance on parallel computers.

研究分野：計算科学

科研費の分科・細目：計算科学・計算力学

キーワード：シミュレーション工学 流体力学 流体 構造工学・地震工学 計算物理

1. 研究開始当初の背景

流体と構造が相互作用する問題は FSI (Fluid-Structure Interaction) 問題と呼ばれ、機械工学・航空宇宙工学・土木工学・バイオエンジニアリングなどの多くの分野で存在する。流体の流れは構造を変形させる一方で、構造の移動・変形はその周囲の流れに影響を及ぼすために、その現象は複雑である。

構造が大変形する FSI 問題 (大変形 FSI 問題) は、従来の移動メッシュを用いるアプローチでは解析が難しい問題である。構造の変形がそれほど大きくない FSI 解析では、構造の変位を計算するメッシュとして、物体と共に移動する Lagrangian メッシュを用いることが多い。一方、流体の速度を計算するメッシュとして、構造の運動に従って移動する ALE (Arbitrary Lagrangian-Eulerian) 移動メッシュが用いられる。しかし、ALE メッシュを大変形 FSI 問題に適用すると、メッシュの歪みが精度の悪化や計算の破綻を引き起こす。

自動車のエアバッグ展開は、大変形 FSI 問題の一つである。自動車が衝撃を受けると、エアバッグの内部に高圧・高密度の空気が急速に流入し、エアバッグはしわ (wrinkle) を形成しながら膨らんでいく。

エアバッグはサイドエアバッグも含めて製品化されていて、LS-DYNA, PAM-CRASH, MADYMO などの汎用ソフトによる解析がなされている。従来のエアバッグ展開のシミュレーションでは、乗員が既に十分に展開されたエアバッグと接触することが仮定される。そのため、UPM (Uniform Pressure Method) というエアバッグ内での一様な圧力の仮定がよく行われてきた。しかし、エアバッグに接近した状態 OoP (Out-of-Position) にある乗員の保護には、展開中のエアバッグの高精度な予測が必要とされる。近年では、UPM に代わり、計算流体力学によってエアバッグ内部の圧力分布を予測するモデルが汎用ソフトに導入されてきている。そこで、自己接触を伴う大変形 FSI 問題を高精度に解析することができるロバストな計算手法を開発していくことは、重要な研究課題の一つであるといえる。

2. 研究の目的

本研究では、固定した流体メッシュ上のレベルセットを利用して、構造の自己接触を伴う大変形 FSI 解析手法を開発し、折り畳まれた状態からのエアバッグ展開の 3 次元解析を行う。そして、実験データ (エアバッグの鉛直方向変位の時刻歴、展開するエアバッグの形状の画像データなど) と比較して、構造の自己接触を伴う大変形 FSI 問題に対する本手法の有効性を示す。

3. 研究の方法

平成 23 年度までの研究において、折り畳まれていない状態からのエアバッグ展開

(unfolded airbag deployment) を解析するための 3 次元大変形 FSI 解析用プログラムを開発してきた。

レベルセットに基づく大変形 FSI 解析手法に自己接触を導入する方法を提案し、折り畳まれた状態からのエアバッグ展開 (folded airbag deployment) を解析するための 3 次元大変形 FSI 解析用プログラムを開発する。計算に必要な流体メッシュの要素数は数百万、構造メッシュの要素数は数千程度を考えている。計算時間・記憶容量の点から、並列計算機を使用する。計算機として、東京大学情報基盤センターの FX10 スーパーコンピュータシステム (SPARC64IXfx 1.848GHz, 16 コア/ノード) および東京大学奥田研究室の TC (Intel(R) Xeon (R) X5550 2.66GHz, 8 コア/ノード) を利用する。

folded airbag deployment の計算結果と実験データの比較を行う。そして、エアバッグの折りたたみ方法がエアバッグの変形過程にどのような影響を与えるのか検討する。エアバッグの折り畳み方をパラメトリックに変化させ、データベースを作成する。

4. 研究成果

・2012年度の研究成果

レベルセットに基づく大変形 FSI 解析手法に自己接触を導入する方法を提案し、folded airbag deployment を解析するための大変形 FSI 解析用プログラムを開発した。

構造の表面同士の接触判定条件および接触に伴う反力を Lagrange 未定乗数として構造ソルバーへ導入することによって、接触のモデリングを構造の変数を解くソルバーに容易に導入できる。しかし、構造の自己接触が生じると、レベルセットの関数値零の等値面が消失し、接触した構造の面上で非物理的な流入・流出が生じる。そのため、界面での運動学的条件を満足する境界条件の与え方 (Moving Least Squares 近似による外挿方法) に物理量の不連続性を考慮した。

流体コードにはノード間で MPI, ノード内で OpenMP を使ったハイブリッドな並列化を行った。また、構造の自由度は流体の自由度と比べて数桁小さいことを考慮して、構造コードにはノード間の並列は行わず、ノード内で OpenMP を使って並列化した。このとき、外挿式の計算および構造に作用する圧力の計算にもノード間で MPI を使う並列化を行う必要があった。これらは、流体変数の情報から MLS 近似や線形内挿を行う部分である。

・2013年度

並列計算のスピードアップ (加速率) を向上させるため、MPI/OpenMP によって構造コードとレベルセット生成のハイブリッドな並列計算について検討した。そして、大規模

並列計算環境での folded airbag deployment 解析および参照データ (鉛直方向のエアバッグの変位量, エアバッグの膨らむ様子の画像データ) との比較を進め, 計算結果の妥当性を検討した. さらに, エアバッグの折り畳み方をパラメトリックに変化させ, データベースを作成した.

データベースを充実させ, 展開するエアバッグの変形過程の正確な理解, より安全性が高いエアバッグの開発につなげることが今後の課題である.

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計1件)

・ 公刊論文 (査読有)

- (1) Gaku Hashimoto, Kenji Ono and Hiroshi Okuda, "Application of a fixed Eulerian mesh-based scheme based on the level set function generated by virtual nodes to large-deformation fluid-structure interaction," Interaction and Multiscale Mechanics, Vol.5, No.3, pp.287-318, 2012.

[学会発表](計9件)

・ 口頭発表 (国際会議)

- (1) Gaku Hashimoto and Hiroshi Okuda, "Airbag deployment analysis using monolithic coupling method based on level sets," APCOM & ISCM 2013, Singapore, December 11-14, 2013.
- (2) Ryosuke Watari, Gaku Hashimoto and Hiroshi Okuda, "Mesh coarsening method based on multi-point constraints for large deformation finite element analysis of almost incompressible hyperelastic material," JSST2013 International Conference on Simulation Technology, Chiyoda-ku, Tokyo, Japan, September 11-13, 2013.
- (3) Gaku Hashimoto and Hiroshi Okuda, "FSI analysis using monolithic coupling method based on level sets," USNCCM12, Raleigh, North Carolina, USA, July 22-25, 2013.
- (4) Gaku Hashimoto, Kenji Ono and Hiroshi Okuda, "FSI analysis of simple folded airbag deployment model using Lagrangian-Eulerian coupling method based on level set," KSME-JSME Joint Symposium on CM & CAE 2012, Kanazawa, Japan, September 12, 2012.

- (5) Kun Yang, Yoshitaka Saitoh, Hideki Kawai, Nobuyoshi Tsuzuki, Hiroshige Kikura and Gaku Hashimoto, "Numerical flow analysis of electromagnetic fluid using GSMAC Finite-Element Method," The 20th International Conference on Nuclear Engineering (ICONE20), Anaheim, California, USA, July 30-August 3, 2012.

- (6) Gaku Hashimoto, Kenji Ono and Hiroshi Okuda, "Examination of parallel computing of a Lagrangian-Eulerian coupling method based on level sets," WCCM10, Sao Paulo, Brazil, July 8-13, 2012.

・ 口頭発表 (国内会議)

- (7) 橋本 学・奥田 洋司, "レベルセットに基づく Monolithic Coupling Method による FSI 解析," 日本計算工学会 第18回計算工学講演会, 東京都目黒区 (東京大学生産技術研究所), 2013年6月19日-21日.

- (8) 巨理 良輔・橋本 学・奥田 洋司, "微圧縮超弾性体の並列有限要素解析 -物質界面近傍の有限要素のゆがみに関する検討-, " 日本学会会議 第62回理論応用力学講演会, 東京都目黒区 (東京工業大学大岡山キャンパス), 2013年3月6日-8日.

- (9) 橋本 学・小野 謙二・奥田 洋司, "レベルセットを用いた Lagrangian-Eulerian 連成手法による Folded Airbag Deployment の3次元解析," 日本計算工学会 第17回計算工学講演会, 京都府京都市 (京都教育文化センター), 2012年5月29日-31日.

[その他]

・ 成果発表のホームページ

- (1) http://www.multi.k.u-tokyo.ac.jp/personal_html/ghashimoto/index_report2.html

6. 研究組織

(1) 研究代表者

橋本 学 (HASHIMOTO GAKU)

東京大学・大学院新領域創成科学研究科・助教

研究者番号: 00455362

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者
なし