

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年3月31日現在

機関番号：32665

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2008～2011

課題番号：20560061

研究課題名（和文） 大規模接触問題の領域分割法による並列解析手法の開発

研究課題名（英文） Development of large-scale parallel analysis method for contact problem based on domain decomposition method

研究代表者

宮村 倫司 (MIYAMURA TOMOSHI)

日本大学・工学部・講師

研究者番号：30282594

研究成果の概要（和文）：

大規模な接触問題解析を実現するために、領域分割法に基づく並列解析手法を開発することが本研究の目的である。最初に、摩擦のない接触問題の解法として、Semismooth Newton 法の改良手法、内点法と Semismooth Newton 法の組み合わせ手法を提案した。次に、内点法や Semismooth Newton 法の反復の中に現れる等式制約条件付線形問題を多点拘束条件を考慮した BDD 法で解くためのアルゴリズムの開発について検討した。GPGPU 実装による高速化についてもプロトタイプコードを開発した。当初の研究計画には、摩擦のある大規模接触問題の解法の開発が含まれていたが、基礎的な検討にとどまり、研究期間内に実用的な手法を開発することはできなかった。

研究成果の概要（英文）：

A purpose of the present study is to develop parallel solution scheme for large-scale contact problems based on the domain decomposition method. First, simple solution schemes for frictionless contact problems of linear elastic bodies, which are discretized using the finite element method are proposed. A method is a variant of the semismooth Newton method. Another method is combined interior-point method and semismooth Newton method. Then, study on algorithms to solve linear problem with linear multipoint constraints in each iterative step of these methods using the balancing domain decomposition method is conducted. GPGPU implementation of basic contact search algorithms is also studied. Although development of solution schemes for large-scale frictional contact problem was planned in the proposal of the present study, only fundamental studies are conducted, and any practical scheme could not be developed in the research period.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	2,700,000	810,000	3,510,000
2009年度	500,000	150,000	650,000
2010年度	500,000	150,000	650,000
2011年度	400,000	120,000	520,000
総計	4,100,000	1,230,000	5,330,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎

キーワード：計算力学, 接触問題, 有限要素法, 領域分割法

1. 研究開始当初の背景

固体・構造の有限要素解析において接触問題の考慮は不可欠である。人工物や自然物を丸ごと解析しようとするれば、解析領域の形状は複雑であり、大規模なメッシュが必要となる。そのため、大規模接触問題解析に関する研究が必要である。

領域分割法は有限要素法による固体・構造大規模解析の並列化に適した解法である。準静的解析あるいは陰的な時間積分法に基づく動的解析における大規模連立一次方程式の解法として、コースグリッド修正を含む部分構造型の領域分割法である FETI 法、FETI-DP 法、BDD 法（バランシング領域分割法）等の方法が提案されている。申請者が参加する ADVENTURE プロジェクトでは、BDD 法をベースとした並列固体力学解析コードである ADVENTURE_Solid が開発されている。

接触問題は数学的には不等式制約条件付問題となり、その解法は数理計画法の分野において活発に研究されている。一方、申請者は BDD 法を多点拘束条件付問題（等式制約条件付問題）に対応できるように拡張し、ADVENTURE_Solid のプロトタイプ版へ実装した。これを不等式制約条件付問題に拡張できれば、大規模接触問題を次世代スーパーコンピュータ（ペタコン）を含む先端的並列計算機で解くことが可能となると考えた。

2. 研究の目的

本研究の目的（申請時）を以下に示す。

- (1) 内点法、Semismooth Newton 法およびその複合手法による摩擦のある接触問題の効率的解法を開発する。
- (2) バランシング領域分割法と(1)の手法を組み合わせるためのアルゴリズムを開発する。
- (3) 以上の手法を効率的に並列実装する。
- (4) 開発手法を西南日本全域の地殻構造の地震発生解析、アセンブリ構造解析、材料の微視的構造における接触問題解析へ応用する。

3. 研究の方法

申請時の研究計画および方法は以下の通りである。

3. 1 摩擦のない接触問題用 BDD 法の開発と並列実装

摩擦のない接触問題に対する内点法、Semismooth Newton 法、および、両者の組み合わせ、あるいは、改良手法のアルゴリズムと、等式制約条件（=多点拘束条件）付問題に対する BDD 法（以下、MPC 用 BDD 法）を統合化する手法を開発する。Semismooth Newton 法の反復の中で解く等式制約条件付問題には MPC 用 BDD 法をそのまま適用できる。内点

法の反復の中で解く等式制約条件付線形問題にはそのまま MPC 用 BDD 法を適用することができないため、その方法を開発する。

3. 2 GPU を搭載したクラスタ型並列計算機の作成

各ノードに GPGPU のための開発環境である CUDA によりプログラム可能な GPU を搭載したクラスタ型並列計算機を構築する。接触問題における衝突判定、ギャップの計算について GPGPU 実装を行う。

3. 3 摩擦のある接触問題に対する数理計画法アルゴリズムの構築

摩擦のある接触問題では、接触面における滑りの有無を決定する問題を解く必要がある。ここに、Semismooth Newton 法、内点法、および、これらの組み合わせ手法を適用することを検討する。また、これらの手法に現れる等式制約条件付線形問題に MPC 用 BDD 法を適用する方法について検討する。

3. 4 実用的な解析コードの実装

ADVENTURE_Solid をベースとして 3. 1 – 3. 3 において開発した手法を実装する。

3. 5 実用的な問題への適用

開発したプログラムを次のような接触問題に適用する。

- (1) 西南日本全域地殻構造の六面体メッシュによる地震発生過程解析
- (2) 機械部品をアセンブリした構造の解析
- (3) 材料の微視的構造における破壊面の接触問題解析。

4. 研究成果

以下の研究成果を得た。

4. 1 Semismooth Newton 法の改良

摩擦のない接触問題に適用する Semismooth Newton 法を改良した手法を提案した（論文 1）、学会発表 8）。

4. 2 内点法における線形問題への反復型解法の適用

内点法における線形問題の求解について研究した。バランシング領域分割法は、共役勾配法に対する前処理手法として定式化されているため、まず、内点法における線形問題に対して共役勾配法を適用することを試みた。内点法における線形問題は、ペナルティ法における線形問題と同様に非常に悪条件問題となる。制約前処理と呼ばれる手法を前処理として用いることにより、収束解が得られることがわかった（学会発表 9）。

4. 3 PC クラスタの構築

経費で購入したマルチコア PC サーバに Linux をインストールし、ネットワークで接続することで PC クラスタを構築した。また、並列計算用の開発環境、コンパイラをインストールした。更に、構築した PC クラスタに バランシング領域分割法のコードを移植し、性能が出ることを確認した。マルチコア CPU に対応できるように、OpenMP によるスパース行列、ベクトル積の並列計算について研究を行った。本クラスタは各ノードに GeForce GT220 を搭載しており、並列 GPGPU 計算も可能である。

4. 4 内点法と Semismooth Newton 法を組み合わせた解法の開発

接触問題の解法としてこれまでに開発してきた内点法と Semismooth Newton 法を組み合わせた手法を改良した。内点法により解の近傍を計算し、そこで Semismooth Newton 法に切り換えることで、少ない反復ステップで解を求めることができるようになった。様々な境界条件の下での解析が良好に行えることを示した。本手法は論文 5) により公表した。

4. 5 BDD 法による摩擦のない接触問題の解析コードの開発

本研究の目的のひとつは、次世代のスーパーコンピュータで大規模な接触問題解析を実現することであり、そのために、本研究で開発する解析コードのベースとなる BDD 法に基づく非線形有限要素解析コードである ADVENTURE_Solid の解析機能の汎用化を先に行うこととした (学会発表 6, 14, 17))。しかし、当初予定していた接触解析機能の実装作業が遅れている。マルチコア型 CPU への OpenMP, pthread による対応等の機能は完成した。以上の成果を日本機械学会計算力学講演会等において発表した。

4. 6 摩擦のある接触問題への対応

プロトタイプコードの開発を行い、スパースソルバーを用いたコードを完成させた。二つの直方体を滑らしたときの摩擦のある接触問題を例題としてコードのテストを進めている。

4. 7 建築構造における接触問題

実用的な接触問題として、建築構造における接触問題 (アセンブリ構造, 合成梁と柱の接触, 2 枚の ALC パネル外壁の接触等) についてメッシュ作成の手法を検討し、試解析の結果を検討した (論文 3), 学会発表 2-5, 7, 10, 13, 15, 16))。当初計画していた地殻構造, 機械のアセンブリ構造, 材料の破壊に関する問題の解析には着手できなかった。

4. 8 GPGPU 対応

GPU を用いたバケット法に基づく接触判定アルゴリズムの改良に関する研究を行い、日本計算工学会等で発表した (学会発表 11, 12))。更に、ひとつの筐体に複数の GPU が搭載された環境においてスレッド並列化した CUDA プログラムにより GPU の並列計算が可能であることを示した (学会発表 18))。

4. 9 ADVENTURE_Solid の多点拘束条件機能の改良

MPC 用 BDD 法を実装した ADVENTURE_Solid により、多点拘束条件が数百万個付加された問題も解けるようにするために、射影の計算にスパースソルバー MUMPS を導入し、省メモリかつ高速に計算できるような実装方法を考案した。また、コースグリッドに付加される MPC のペナルティ項の計算部分を省メモリ化するためのアルゴリズムも開発した。

4. 10 まとめ

4 年間の研究成果をまとめた。達成されていない研究項目の今後の研究方針について検討し、「摩擦のある大規模接触問題解析コードの実装」を目指して、(1)摩擦のない超大規模接触問題が解ける実用的並列解析コードの開発と、(2)摩擦のある大規模問題の解法、という二つのテーマに分け、それぞれ基礎的なところから研究開発を進めることとした。

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 7 件 (内査読有: 計 6 件))

1) Tomoshi MIYAMURA, Yoshihiro KANNO and Makoto OHSAKI, “A practical variant of the semismooth Newton method for frictionless contact problems”, JSME, Journal of Computational Science and Technology, Vol. 3, No. 1, 54-65 (2009) (査読有)

2) 山下拓三, 熊谷知彦, 小河利行, 宮村倫司, 大崎純, 「マルチグリッド法と可変複合モデルを用いた強風を受けるシェル構造物の屋根形状最適化」, 日本建築学会構造系論文集, No. 636, 297-304 (2009年2月) (査読有)

3) Makoto OHSAKI, Tomoshi MIYAMURA, Masayoshi KOHIYAMA, Muneo HORI, Hirohisa NOGUUCHI, Hiroshi AKIBA, Koichi KAJIWARA, Tatsuhiko INE, “Finite element analysis for simulation of dynamic collapse behavior of highrise steel frames”, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 38, 635-654 (2009. 4. 25) (査読有)

4) Takuzo YAMASHITA, Tomohiko KUMAGAI,

Tomoshi MIYAMURA, Toshiyuki OGAWA and Makoto OHSAKI, "Application of the Multigrid Method to Finite Element Analysis of Fluid Flow Around Domes in Strong Wind", Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures (IASS), Vol. 50, No. 3 (n. 162), 181-191 (Dec. 2009) (査読有)

5) Tomoshi MIYAMURA, Yoshihiro KANNO and Makoto OHSAKI, "Combined Interior-Point Method and Semismooth Newton Method for Frictionless Contact Problems", International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol. 81, 701-727 (2010) (査読有)

6) Tomoshi MIYAMURA, Makoto OHSAKI, Masayuki KOHIYAMA, Daigoro ISOBE, Kunizo ONDA, Hiroshi AKIBA, Muneo HORI, Koich KAJIWARA and Tatsuhiko INE, "Large-Scale FE Analysis of Steel Building Frames Using E-Simulator", Progress in Nuclear Science and Technology, Atomic Energy Society of Japan, Vol. 2 (2011), pp. 651-656 (査読有)

7) 秋葉博, 橋詰和明, 宮村倫司, 「T2K と E-Simulator による高層ビルの大規模非線形耐震解析」, スーパーコンピューティングニュース, 東京大学情報基盤センター, Vol.13-3, 2011, pp. 66-78 (査読無)

[学会発表] (計45件)

1) Tomoshi MIYAMURA 他, Combination of Interior-Point Method and Semismooth Newton Method for Large-Scale Frictionless Contact Problems, ECCOMAS2008 (30 June - 4 July, 2008, Venice, Italy) (CD-ROM)

2) Hiroshi AKIBA, Makoto OHSAKI, Tomoshi MIYAMURA 他, Large Scale Parallel Structural Analysis System and Its Application to Nonlinear Seismic Analysis of High-Rise Building Frames, Proceedings of Chinese Congress of Theoretical and Applied Mechanics 2009, 280 (2009.8, Zhengzhou, China)

3) Tomoshi Miyamura 他, Parallel FE-Analysis For Collapse Simulation of 4-Story Steel Building Frame, 7CUEE and 5ICEE, 887-892 (March 3-5, 2010, Tokyo Institute of Technology, Tokyo, Japan)

4) Tomoshi Miyamura 他, Large-Scale Parallel FE-Analysis for Simulation of Collapse Behavior of Steel Building Frames, WCCM / APCOM 2010 (July 19-23, 2010, Sydney, Australia)

5) Tomoshi Miyamura 他, Large-Scale FE-Analysis of Steel Building Frames Using E-Simulator, Joint International

Conference on Supercomputing in Nuclear Applications and Monte Carlo 2010 (SNA + MC2010), October 17-21, 2010 (Tokyo, Japan) (CD-ROM)

6) Tomoshi Miyamura 他, Development of ADVENTURE_Solid 2: Nonlinear Parallel Dynamic Structural Analysis Software Using the Balancing Domain Decomposition Method, The 11th U.S. National Congress on Computational Mechanics (USNCCM-11), Minneapolis, Minnesota, July 25-28, 2011 (CD-ROM), Paper No. 211733

7) 宮村倫司 他, 数値震動台の基盤となる並列有限要素解析コードによる超高層ビルの仮想震動実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集 B1, pp. 363-364 (2008年9月中国)

8) 宮村倫司 他, Semismooth Newton 法に基づく摩擦のない接触問題の実用的解法, 日本機械学会第21回計算力学講演会講演論文集, No. 08-33 (CD-ROM), No. 847 (2008年11月沖縄)

9) 牧野寛之, 宮村倫司 他, 摩擦のない接触問題に対する内点法における線形問題への制約前処理付 CG 法の適用, 日本機械学会第21回計算力学講演会講演論文集, No. 08-33 (CD-ROM), No. 848 (2008年11月沖縄)

10) 宮村倫司 他, ソリッド要素を用いた鋼構造4層骨組の高精度有限要素解析, 日本機械学会第22回計算力学講演会講演論文集, No. 09-21 (CD-ROM), No. 1808 (2009年10月金沢)

11) 吉田忠司, 宮村倫司 他, 粒子法による変形・衝突計算に基づく CG の GPGPU 実装, 日本機械学会第22回計算力学講演会講演論文集, No. 09-21 (CD-ROM), No. 514 (2009年10月金沢)

12) 宮村倫司 他, GPU に実装された DEM による固体・粉体シミュレーションに基づく CG アニメーション, 計算工学講演会論文集, Vol. 15, No. 1, pp. 159-160 (2010年福岡)

13) 宮村倫司 他, E-Simulator による鋼構造超高層骨組の仮想震動実験と骨組解析の比較, 日本建築学会大会学術講演梗概集 B1, pp. 291-292 (2010年9月北陸)

14) 宮村倫司 他, 非線形動解析に対応した ADVENTURE_Solid の開発, 日本機械学会第23回計算力学講演会講演論文集 (2010年9月北見), (CD-ROM)

15) 宮村倫司 他, 崩壊解析のための鋼構造骨組の高精度有限要素モデル, 計算工学講演会論文集, Vol. 16 (CD-ROM) (2011年5月柏)

16) 宮村倫司 他, E-Simulator による4層鋼構造骨組の仮想震動実験と骨組解析の比較, 日本建築学会大会学術講演梗概集 B1 (2011年8月東京), pp. 233-234

17) 宮村倫司 他, ADVENTURE_Solid 2.0 の開発と性能評価, 日本機械学会計算力学部門第

24 回計算力学講演会講演論文集 (2011 年 10 月岡山), No. 11-3 (CD-ROM), No. 412
18) 遠藤 駿, 宮村倫司, デュアル GPU グラフィックスボードを用いた粒子法の実装, 日本大学工学部学術研究報告会 (2011 年 12 月郡山)

他 27 件

[図書] (計 1 件)

Tomoshi MIYAMURA, “Chapter 7: Incorporation of multipoint constraints into domain decomposition methods”, in Substructuring Techniques and Domain Decomposition Methods, F. Magoulès (ed.), Saxe-Coburg Publications, Stirlingshire, UK, 171-202 (2010)

[その他]

ホームページ等

<http://cs.ce.nihon-u.ac.jp/~miyamura/papers.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

宮村 倫司 (日本大学工学部・講師)

研究者番号 : 30282594

(2) 研究分担者

該当なし

(3) 連携研究者

該当なし