

令和元年6月14日現在

機関番号：15501

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2015～2018

課題番号：15K04757

研究課題名（和文）レベルセット法に基づくボクセル接触解析手法の開発 - 筋骨格系生体力学解析に向けて

研究課題名（英文）Development of contact analysis approach based on level set method for biomechanical simulation of musculoskeletal system

研究代表者

陳 献 (Chen, Xian)

山口大学・大学院創成科学研究科・教授

研究者番号：70313012

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,700,000円

研究成果の概要（和文）：本研究ではまずレベルセット法に基づく有限要素接触解析に関する基礎理論の構築と定式化を行い、ボクセル解析に基づく等価節点接触力及び接線剛性を導出したうえ、解析プログラムを開発した。また、レベルセット法に基づく接触解析手法を柔軟体と剛体の接触解析に拡張し、接触による拘束及び接触力を剛体運動方程式に導入することにより、柔軟体・剛体連成解析の定式化とプログラム開発を行った。生体力学シミュレーションにより開発した手法の有効性を検証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

生体力学シミュレーションでは、複雑な形状を持つ生体組織の解析モデル作成に莫大な時間と労力を要するため、医用画像の情報を直接用いた接触解析手法が注目される。また、筋骨格系では、筋肉の柔軟体と骨格の剛体との間の接触現象に対する効率的解析手法の開発は生体力学シミュレーションの課題となる。本研究で開発した手法により、高精度かつ高効率な筋骨格系生体力学シミュレーションを可能にし、筋骨格系疾患の病因解明や治療に貢献できる。

研究成果の概要（英文）：In this research, the formulation of finite element contact analysis based on the level set method was proposed. Furthermore, the contact analysis program was implemented after deriving the equivalent nodal contact force and tangent stiffness. In addition, by introducing the contact constraint and contact force into the dynamic equation of rigid body motion, the contact analysis method based on the level set method is extended to the analysis of contact problems between flexible and rigid bodies. The implementation based on the formulations was carried out for the coupled analysis. The effectiveness of the developed method was verified by biomechanics simulation.

研究分野：有限要素法

キーワード：生体力学 接触解析 筋骨格系

### 1. 研究開始当初の背景

人体筋骨格系における荷重伝達機能は関節間の接触によって実現され、また、筋肉間及び筋肉・骨格間の相互干渉（力学的相互作用）が筋骨格系の協調的運動に重要な役割を果たしているため、人体筋骨格系の精密なシミュレーションには各組織間の正確な接触状態（接触応力及び変形）を再現する必要がある。一方、有限要素解析による生体力学シミュレーションでは、形状が複雑な筋骨格系組織の解析メッシュ作成に多大な労力と時間を費やすことから、医用画像における組織の境界を追跡できるレベルセット法が注目されている。さらに、筋骨格系の剛体・柔軟体マルチボディー連成解析で問題となる筋肉間や筋肉・骨格間の相互干渉も新たな接触解析法を導入することによって解決できるため、高効率な筋骨格系解析の実現が期待できる。

### 2. 研究の目的

本研究ではレベルセット法を導入することにより、医療画像を基にした接触解析を可能とするロバストな接触解析手法を開発する。さらに新たな接触解析手法に基づく、筋肉間及び筋肉・骨格間の相互干渉を考慮した剛体・柔軟体マルチボディー連成解析手法の開発を行い、高精度・高効率な実用規模の筋骨格系シミュレーションを実現することにより、筋骨格系疾患の病因説明や治療に貢献する新たな筋骨格系生体力学シミュレーション手法の構築を目的とする。

### 3. 研究の方法

#### (1) レベルセット法に基づく接触解析

まずレベルセット法を用いて、医用画像から組織境界までの距離関数  $\phi$  の場を求める。距離関数は物体内では  $\phi < 0$ 、境界では  $\phi = 0$  と定義される。接触していない状態では、接触体が被接触体の外部にあるため  $\phi > 0$  となる。従って、接触における幾何学的拘束条件は  $\phi \leq 0$  として与えられる。一方、接触表面における外向き単位法線ベクトルは距離関数の勾配から求められる。すなわち、 $\mathbf{n} = \nabla \phi$  となる。接触要素内の任意点における距離関数は節点における距離関数による内挿によって求められる。このメリットとして、煩雑な距離計算が不要になるのみならず、変形に伴う距離関数場の更新でも、節点の距離関数を行えば、空間任意点の距離関数が容易に得られる利点がある。さらに、現配置における距離関数を基準配置における距離関数によって近似することにより、距離関数の計算量を大幅に減らせることができる。解析の精度を保証するため、変形の度合いによって基準配置の更新を行う。これらの手法を基に、接触における等価節点接触力及び接線剛性を導く。

#### (2) 柔軟体・剛体接触解析

柔軟体の解析では有限要素法を用いるが、剛体に対する機構解析では慣性力及び拘束力、一般化力を考慮したオイラー-ラグランジュ運動方程式と境界条件を表す拘束方程式によって定式化が行われ、拘束による反力、一般化力及び一般化変位を求める。従来の機構解析では剛体の形状を表現する必要はないが、柔軟体との接触を考慮する際、剛体の表面が位置する場所を知る必要があるため、本研究では剛体に対してもメッシュを作成した。柔軟体・剛体の連成解析では、剛体から柔軟体への情報となる剛体表面の節点から柔軟体への距離関数を求めるため、あらかじめ柔軟体と剛体を含む空間を格子化し、格子の節点における距離関数を求めておく。これにより、変形に伴う剛体表面節点の空間における位置を把握すれば、格子節点の距離関数から内挿することにより、効率的に剛体表面節点の距離関数を求めることができる。一方、柔軟体における有限要素法接触解析によって得られる等価節点接触力から、剛体表面の節点に作用する力に変換し、これらの力による剛体への力とモーメントは一般化力としてオイラー-ラグランジュ運動方程式に代入し、機構解析を行う。

### 4. 研究成果

#### (1) 接触解析手法の検証

本研究で提案した接触解析手法を検証するため、図1に示す Hertz 問題の解析を行い、従来法の結果と比較した。

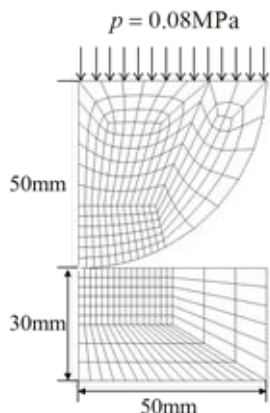


Fig. 1 Hertz contact problem

Tab.1 Material properties

	Young's Modulus (MPa)	Poisson's ratio
Case 1	Cylinder 50	0.3
	Plate 0.5	
Case 2	Cylinder 0.5	0.3
	Plate 0.5	

物性の設定は表 1 に示す。Case 1 では上部の円柱に比べて下部プレートが十分硬いため、プレートの変形が小さくなり、現配置と基準配置における距離関数の差が無視できる程度となる。接触圧力の分布を示す図 2 では本手法と従来法の結果がよく一致していることが分かる。一方、Case 2 ではプレートは円柱と同等の硬さを持つため、図 3 に示すようにプレートの変形が大きくなっている。これにより現配置の距離関数は基準配置の距離関数より著しく変化し、これによる誤差も大きくなる。このような現象はレベルセット法の場合でも起こり、距離関数を更新する必要性が指摘されている。そこで、解析の進行に連れて、距離関数を更新することにより、解析の誤差が解消され、従来法と一致する結果が得られた。

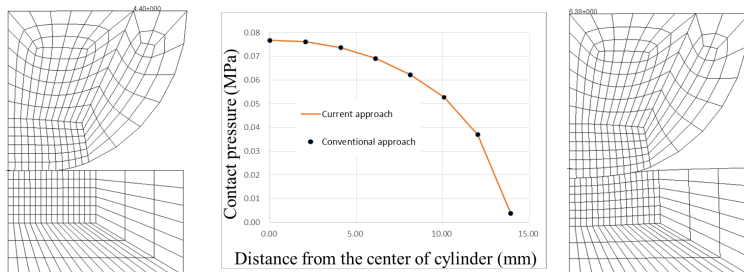


Fig. 2 Results of case 1

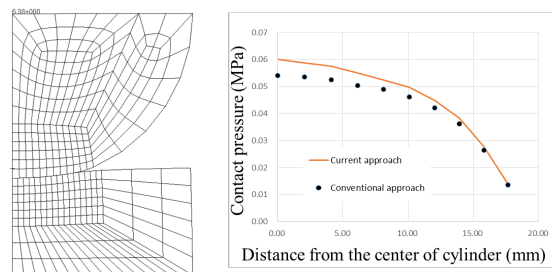


Fig. 3 Results of case 2

## ( 2 ) 寛骨臼骨切り術シミュレーション

先天性疾患である臼蓋形成不全とは臼蓋の形状が不完全なために、大腿骨頭が寛骨臼からはみ出した状態のことである。臼蓋形成不全によって股関節軟骨に異常な応力集中が生じることが、変形性股関節症へと発展する主な原因とされている。臼蓋形成不全や変形性股関節症に対する手術療法の一種として、寛骨臼を大腿骨頭を覆うように回転させ応力分布を改善させる、寛骨臼回転骨切り術 (PAO:periacetabular osteotomy) が広く使われ、寛骨臼の最適な回転角を求めるための計算機シミュレーションが行われている。医用画像では股関節内の軟骨を分別できないため、異なる軟骨層のモデル化が提案されているが、本研究では開発した手法を用いて、軟骨層の接触圧力の予測に対する異なる軟骨モデル化方法の影響を調べた。寛骨臼と骨頭との境界面の仮定によって、軟骨層の主なモデル化手法として以下の方法が提案されている：( 1 ) 寛骨臼と骨頭との境界面を球面と仮定する球面モデル；( 2 ) 寛骨臼軟骨下骨と骨頭軟骨下骨と等距離の面を境界面と仮定する等距離モデル；( 3 ) 寛骨臼と骨頭の軟骨層の厚みが均等であると仮定する厚み一定モデル。これらのモデルに基づく接触解析を行った結果を図 4、図 5 に示す。

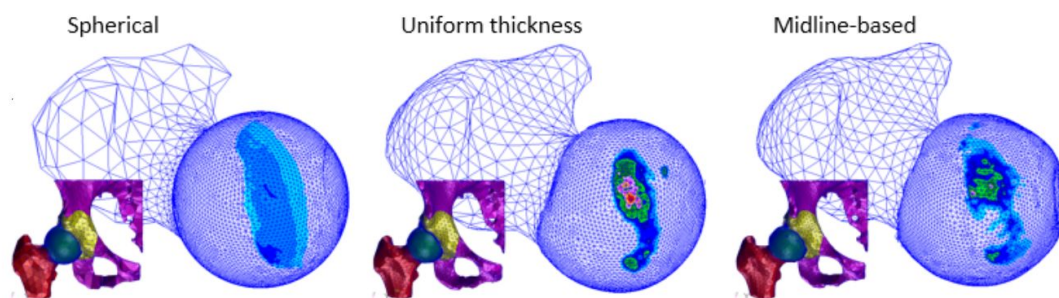


Fig.4 Contact stress distribution before PAO

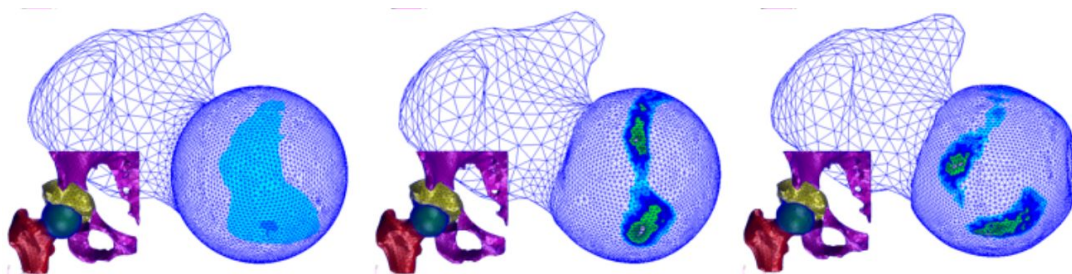


Fig.5 Contact stress distribution after PAO

術前の接触応力分布を示す図 4 では、球面モデルでは滑らかな接触応力分布となっているが、厚み一定モデルでは応力集中が見られ、等距離モデルでは接触応力分布は不連続となる。術後の接触応力分布を示す図 5 では、臼蓋の回転に伴い、各モデルにおける接触応力はともに低減

される一方、球面モデルでは滑らかな接触応力分布を保つが、厚み一定モデルと等距離モデルでは、臼蓋の回転により、寛骨臼軟骨下骨面と骨頭軟骨下骨面の曲率の相違が表面間の不適合性を生じ、接触応力の不連続性が顕著となる。寛骨臼骨切り術シミュレーションにおいては、骨臼軟骨下骨面と骨頭軟骨下骨面との適合性を考慮したうえで軟骨層のモデル化を決定する必要がある。

### (3) 連続体骨格筋モデルを導入した上腕運動シミュレーション

骨格筋は人体の大部分を占める筋肉であり、呼吸や運動といった生命活動を維持する上で重要な役割を担っている。近年、運動器疾患の病因解明や運動能力向上を目的とした筋骨格系シミュレーションが幅広い分野で活用されている。しかし、骨格筋構造の複雑さや、実験計測の難しさから、骨格筋の構成則モデルについて未だ活発な研究が行われている。Martins らが骨格筋力学実験から得られた骨格筋の興奮と力と伸張及び収縮速度との関係を 3 次元連続体理論に適用した骨格筋連続体構成則モデルを提案している。そこで、本研究では骨格筋の力学的特性を反映した横等方性超弾性体モデルに Martins らが提案した構成則を導入し、開発した接触解析手法と柔軟体・剛体連成解析手法を用いて、有限要素解析による 3 次元骨格系シミュレーション手法の開発を行った。図 6 は筋肉の収縮による上腕運動の一例を示す。



Fig. 6 Motion of upper arm by contraction of the biceps

## 5 . 主な発表論文等

### 〔雑誌論文〕(計 1 件)

1 . Fei Li, Hejuan Chen, Taro Mawatari, Yukihide Iwamoto, Fei Jiang, Xian Chen, Influence of modeling methods for cartilage layer on simulation of periacetabular osteotomy using finite element contact analysis, Journal of Mechanics in Medicine and Biology, Vol. 18, 1850018 ~ 1850018, 2018. DOI: 10.1142/S0219519418500185. ( 査読有 )

### 〔学会発表〕(計 3 件)

1 . 福田雄太, 陳献, 蒋飛, 大木順司, 連続体骨格筋モデルを導入した上腕運動シミュレーション, 日本機械学会 中国四国支部第 56 期総会・講演会, 2018, 徳島大学 ( 徳島市 ).  
 2 . 陳献, 蒋飛, 大木順司, 距離関数に基づく有限要素接触解析手法の開発, 日本機械学会第 30 回計算力学講演会, 2017, 近畿大学 東大阪キャンパス ( 東大阪市 ).  
 3 . Xian Chen, F. Jiang and J. Ohgi, A finite element contact analysis algorithm using distance functions, The 8th International Conference on Computational Methods, Gui Lin, China, 2017.

### 〔図書〕(計 0 件)

### 〔産業財産権〕

出願状況 ( 計 0 件 )

名称 :  
 発明者 :  
 権利者 :  
 種類 :  
 番号 :  
 出願年 :  
 国内外の別 :

取得状況 ( 計 0 件 )

名称 :  
 発明者 :  
 権利者 :  
 種類 :

番号：  
取得年：  
国内外の別：

〔その他〕  
ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1) 研究分担者

研究分担者氏名：

ローマ字氏名：

所属研究機関名：

部局名：

職名：

研究者番号（8桁）：

### (2) 研究協力者

研究協力者氏名：

ローマ字氏名：

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。