

長寿医療研究開発費 2020年度 総括研究報告

介護ロボット利用時における外力による障害リスクのコンピュータシミュレーション (20-29)

主任研究者 根本 哲也 国立長寿医療研究センター健康長寿支援ロボットセンター室長

研究要旨

従来のロボット安全技術は人体との接触がない環境下、あるいは低速・低負荷下での作業に限定されていた。しかしながら、介護ロボットなどの生活支援機器は人体と接触した作業を前提としているものが多く、体重と釣合する力のほかに姿勢を制御するために高外力下となりやすい。このようなことから介護ロボットの設計においては許容される外力の評価が必要となるが、痛みからの推定や内出血による観察を指標とする試みが行われている。また、皮膚などの材料特性については時間依存性を考慮せず単純化した評価のものも見受けられる。

現在までに研究者らは生体情報をパラメータとして材料モデルを製作したコンピュータシミュレーションを用いて、国立長寿医療研究センター病院で骨強度評価に関する先進医療を実施し、転倒骨折予防への基礎データの提供を行うとともに、新たなインプラント技術開発における安全性評価を実施してきた。また、褥瘡発症のクライテリアを力学評価から明らかにするために皮膚組織および骨組織を模擬したモデルによる、介護動作などによる外力が皮膚組織の応力・ひずみ分布におよぼす影響の解明を実験から明らかにしてきた。さらに介護作業時の外力の方向や力の大きさ、時間的な変化を推定するためには人体形状計測が重要であり、既存機器では計測できない歩行や体力に対応したデバイス開発を行い、高齢化に伴う現象の影響などを調べた。

そこで本研究では、現在までに得られた知見を元にコンピュータシミュレーションを介護ロボットの障害リスクなどの安全性評価に有効となるような材料テーブル開発を行うとともに、簡便に使用できるユーザビリティの高いシミュレーションモデルを身長や体重といった特徴に調製可能なシミュレーションモデルをデザインするための解析構造の構築を行った。また、必要な皮膚組織や骨組織の形状や材料状態、外力による影響について、コンピュータシミュレーション上で有効な材料提示方法を明らかにすることで、介護ロボットの抱きかかえ時のリスク評価を行うとともに、転倒時のエネルギーを軽減するプロテクタなどの装着機器の評価に資するものとなると期待される。このことから皮膚組織および骨組織を模擬したモデルによる力学的負荷が皮膚組織の応力・ひずみ分布におよぼす影響の解明を実験および有限要素解析を行った。

主任研究者

根本 哲也 国立長寿医療研究センター健康長寿支援ロボットセンター 室長

分担研究者

伊藤 安海 国立山梨大学大学院総合研究部工学域機械工学系 教授

A. 研究目的

介護ロボットの介護作業時の人体に加わる外力などの力学条件から、コンピュータシミュレーション上で損傷リスクを評価するためのシステム構築と、簡単な介護作業時における損傷評価として、接触時の皮膚の変形と転倒転落による大腿骨近位部骨折の再現性、および考慮される緩衝材料評価などの有効性評価を行い、実環境とシミュレーションの乖離を少なくすることや使用時の安全性向上を検討するために実環境での動作測定・評価を簡便にシミュレーションできる手法の開発が期待される。

B. 研究方法

本開発は有限要素解析コンピュータシミュレーションの構築とシミュレーションモデルへの境界条件設定方法の検討において、生体情報をシミュレーションモデルに条件導入を行うためのソルバーの構築を行い、皮膚の外力応答における有限要素解析モデルの作成および力学的負荷下における応力・ひずみ評価を行うとともに、外力を実際に加えた皮膚モデルを用いた表面変位分布計測から表面変位分布計測結果を有限要素解析に逆解析的に適用することの検討を行った。また、シミュレーションで必要とされるパラメータをもとに、測定点・測定項目の検討を行い、実環境で測定と装置の精度の評価や改良を行うとともにシミュレーションへのフィードバックを繰り返すことでシミュレーションの精度向上を目指す。

(倫理面への配慮)

本研究は世界医師会「ヘルシンキ宣言」および「人を対象とする医学系研究に関する倫理指針」を遵守し、患者の尊厳と人権の尊重、個人情報の保護については十分配慮して行った。臨床研究は実施しないが、研究結果の公表の際には個人の特長ができる情報は含まないように配慮し、個人情報の保護に努めた。さらに本研究の調査により知りえた情報は第三者に漏洩しないよう努めた。

C. 研究結果

有限要素解析コンピュータシミュレーション (MECHANICAL FINDER Extended Edition, 株式会社計算力学研究センター) において、生体情報をシミュレーションモデルに条件導入を行うためのソルバーの構築を行い、三次元 CAD データを基準として、医療用 CT データ等との連続性を検討した。大変形解析と動解析が幾何学的非線形 (大変形) の有

無や材料非線形（ひび，塑性）の有無，あるいは動解析か静解析について考慮することにより，材料非線形における破壊のメカニズムを再現できることを確認した．幾何学非線形を使用した場合には発散解となり，シミュレーションが成立しないことが多く，比較的安定した解がえられないことがわかった．

有限要素解析モデルの作成および力学的負荷下における応力・ひずみ評価を行うとともに，外力を実際に加えた皮膚モデルを用いた表面変位分布計測を比較した．供試材は Fig. 1 に示す生後まもないブタ尻尾の骨を使用する．ブタ尻尾は切断後，冷凍状態で保管されたものを流水解凍し用いた．また，骨折実験の際，材料試験機で圧縮する部分の軟組織を Fig. 2 に示すように医療用メスで取り除いた．ブタ尻尾を X 線 CT 装置（METROTOM800:Carl Zeiss）を用いて撮影し，断面データを得た．本研究は定量的に骨密度を測定するため，密度の基準となる骨塩量定量ファントム（MicroCT-HA D32:QRM）と共に骨を CT スキャン撮影する手法（QCT 法）を取った．骨折実験を再現するため，取得した断面データからブタ尻尾の根本から第三骨の 3D モデルを作成し，骨下部を拘束，上部に Fig. 3 に示す負荷領域の荷重を与えた．3D モデルの作成条件を Table 1 に示す．作成した 3D モデルに対し，Fig. 4 に示す骨折実験の再現をした荷重範囲で，6 つのモデルに対して非線形骨折予測解析を行った．シミュレーションの結果，破壊されたソリッド数と加えられた荷重の関係を Fig. 4 に示す．この解析では，Fig. 4 に示すように破壊されたソリッド数が急激に増加する荷重を骨折荷重と定義した．この定義に従うと 6 つのモデルの解析結果は，最小骨折荷重が 102N，最大骨折荷重が 196N，平均骨折荷重が 151N となった．



Fig. 1 Newborn porcine tail



Fig. 2 Newborn porcine tail without soft tissue

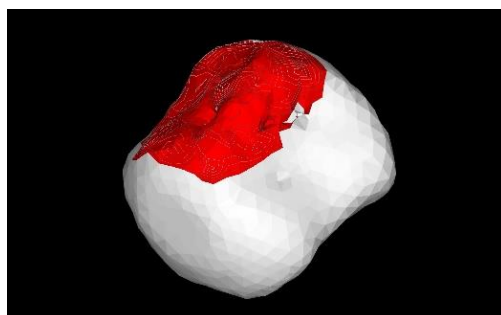


Fig. 3 Load area

Table 1 Model conditions

Mesh size [mm]	1
Number of elements	1824
ROI volume ratio [%]	100.0
Young's module	Kayak (1998)
Poisson ratio	0.4
Critical stress	0.8
Yield criterion	Drucker - Prager
Crushing strain[μ]	10000

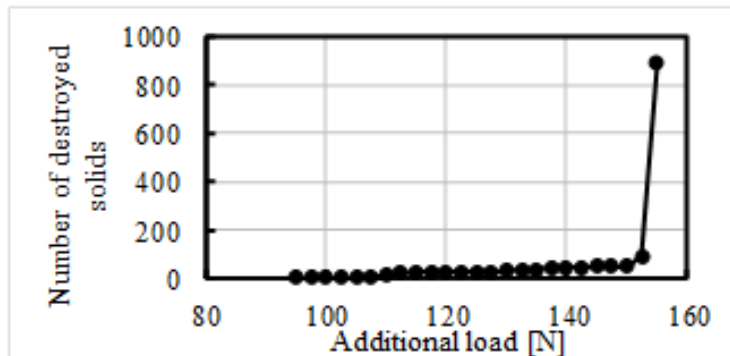


Fig. 4 Relationship between number of destroyed solids and additional load

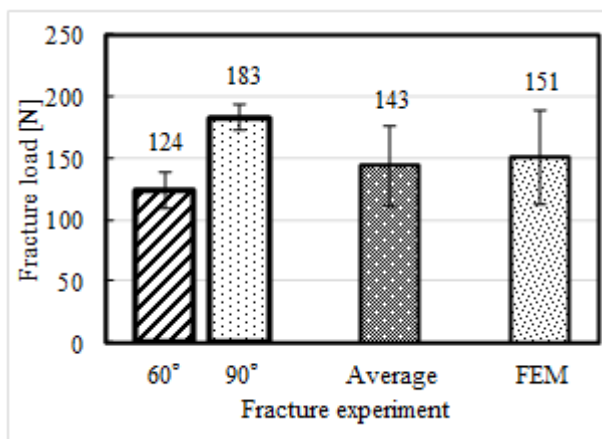


Fig. 5 Comparison of fracture loads of fracture experiment with FEM analysis

ブタ骨の骨折荷重を測定するために卓上型材料試験機 (MCT-2150, A&D Company, Limited) を用いる。幼齡ブタ尻尾の軟組織を取り除いた部分に対して荷重速度一定 (10mm/min) で荷重を加える実験を行う。圧縮冶具には先端角度が 30°, 60°, 90°の異なる 3 種類の冶具を用いた。幼齡ブタ尻尾の圧縮荷重と荷重負荷部の骨の変位の関係の一例 (先端角 60°の場合) をみると圧縮高さ約 3mm のところで極大点が存在し、荷重が急に減少している。また、この点付近で骨折音が発生したことから、この極大点を骨折した荷重とした。

D. 考察と結論

コンピュータシミュレーションを行う CPU などの構成については、反復法は比較的安定しない代わりに直接法よりもメモリを必要とせず、マルチコア環境では高速で解析が可能な代わりに多くのメモリを消費し、解析区間の設定により荷重ステップが決定されるため、本研究課題においては、シングルコアのメモリに過度な負担がかからない環境において行

った, 解析の一例として, 解析総時間を 0-1 秒として区間数 10, 区間内分割を 10 とすると, 0 秒で解析が開始して 1 秒で終了するまでを 100 個の区間数に分割して観察することができる. 実験値と比較するために, 静解析結果から得られた骨折荷重とソリッドまたはシェル要素が破壊された時点での荷重値を骨折荷重とすることにより, 骨折現象を定量評価することが可能となる. この方法により, 一般的にソリッドがはじめて破壊された時点での荷重を骨折荷重と定義でき, これより骨折荷重のより詳細な骨折開始荷重や降伏荷重を見積もることが可能になる. このことにより, 骨折荷重だけでなく破壊ソリッド数が急激に増加している時点での荷重値や逆に破壊がほとんど発生しなくなった時点での荷重値を観察することにより, 実験では得られない骨折過程を詳細に知ることができる. また, ソリッドの破壊は引張破壊と圧縮破壊に分けられるので, 破壊の形態をグラフ上で確認することも可能となることが確認された. これらの結果を踏まえ, ブタ骨折実験の結果 (Fig.5) と FEM 解析の骨折荷重 (Fig.4) を比較すると, 破壊荷重が同じオーダーにあることから皮膚の伝播を考慮した外力を条件としたシミュレーションとして使用可能であることがわかった.

従来のコンピュータシミュレーションでは, シミュレーションモデルの作成にかかる負担が大きく, さらにシミュレーション精度に依存するため, 骨折条件の推定などの探索に用いることができなかつた. 本研究の結果, 部位の標準モデルと可変パラメータにより, 簡便かつ正確にシミュレーションを行うことができる可能性を示せた.

E. 健康危険情報

なし

F. 研究発表

1. 論文発表

- 1) Makiko Tanaka, Yoshiko Takahashi, Keiko Hasegawa, Yasumi Ito, Tetsuya Nemoto, Zenzo Isogai: The mechanism of persistent undermining of a sacral pressure ulcer: Experimental analyses using a deformable model and examination of skin mobility over different anatomical locations, Journal of Tissue Viability, 29(2020)130-134

2. 学会発表

- 1) 佐藤悠人, 伊藤安海, 山田隆一, 小幡光平, 上運天和輝, 鍵山善之, 根本哲也: In vivo での生体軟組織の粘弾性評価手法の開発, 日本機械学会関東学生会第 60 回学生員卒業研究発表講演会, 2021 年 3 月 10 日, オンライン開催
- 2) 功刀裕貴, 伊藤安海, 大倉園夏, 山田隆一, 鍵山善之, 根本哲也: 鈍器による打撃力測定における打撃姿勢や個人特性の影響の検討, 日本機械学会関東学生会第 60 回学

生員卒業研究発表講演会, 2021年3月10日, オンライン開催

- 3) 森藤悠, 伊藤安海, 徐琴, 上運天和輝, 山田隆一, 鍵山善之, 根本哲也: 脈波や心電のRRI解析による脳活性度および自律神経系活動リアルタイム測定手法の検討, 日本機械学会関東学生会第60回学生員卒業研究発表講演会, 2021年3月10日, オンライン開催
- 4) 高野弥之, 伊藤安海, 小田洸太郎, 大倉園夏, 山田隆一, 鍵山善之, 根本哲也, 波呂浩孝: FEM解析を活用した脊柱変形スクリュー挿入条件の検討, 日本機械学会関東学生会第60回学生員卒業研究発表講演会, 2021年3月10日 オンライン開催
- 5) 土屋駿丞, 伊藤安海, 徐琴, 上運天和輝, 森藤悠, 山田隆一, 鍵山善之, 田中勇樹, 田中佑治, 根本哲也: 高齢者の日常行動が運転能力へ及ぼす影響に関する検討, 自動車技術会関東支部2020年度学術研究講演会, 2021年3月11日, オンライン開催
- 6) 福岡達也, 鈴木勝也, 種田行男, 伊藤安海, 小井手一晴, 根本哲也, ボンドグラフによるジャンプ運動時の身体の動特性, シンポジウム: スポーツ工学・ヒューマンダイナミクス2020講演論文集, (2020), U00018
- 7) 小柳謙介, 坂井建宣, 磯貝善蔵, 伊藤安海, 根本哲也, 有限要素解析による褥瘡モデルを用いた座位姿勢時の応力状態に関する力学的研究, 日本実験力学学会講演論文集・分科会合同ワークショップ2020「実験力学における計測・データ処理の問題点・ノウハウ・工夫」, pp.2-3
- 8) 須永真愛, 伊藤安海, 山下拓也, 山田隆一, 鍵山善之, 根本哲也, 転倒骨折リスク低減に有効な積層床材の力学的設計・床下地材の動的粘弾性特性と緩衝性能の関係性調査, 日本実験力学学会講演論文集・分科会合同ワークショップ2020「実験力学における計測・データ処理の問題点・ノウハウ・工夫」, pp.4-8
- 9) 根本哲也, 小井手一晴, 坂井建宣, 山中真, 伊藤安海: 自動車の走行挙動における変動動摩擦力の影響, 日本法科学技術学会第26回学術集会, 2020年11月12・13日, オンライン開催
- 10) 大倉園夏, 伊藤安海, 功刀裕貴, 高野弥之, 鍵山善之, 山田隆一, 福岡達也, 根本哲也: 骨が受ける圧力分布を再現した動的外力による骨折リスク評価法の提案～実験による圧力分布の測定とFEM解析による骨折荷重の評価～, 日本法科学技術学会第26回学術集会, 2020年11月12・13日, オンライン開催

G. 知的財産権の出願・登録状況

なし