

平成22年 6月 1日現在

研究種目：若手研究(B)
 研究期間：2008～2009
 課題番号：20700379
 研究課題名（和文） 高齢者転倒挙動を考慮した大腿骨頸部骨折メカニズム解明と骨折予防の検討
 研究課題名（英文） Evaluation of the mechanism of hip fracture and fracture prevention taking account
 研究代表者
 山本 創太 (YAMAMOTO SOTA)
 芝浦工業大学・工学部・准教授
 研究者番号：80293653

研究成果の概要（和文）：本研究では、高齢者の寝たきりの原因となる、転倒による大腿骨頸部骨折のメカニズム解明と、その予防の検討を目的とした。高齢者の歩行、転倒を再現可能なマルチボディ/有限要素ハイブリッドモデルを構築した。これにより、歩行中の意識喪失、滑り、つまずき、踏み外しによる転倒解析を行い、骨折の危険性を高める転び方を検討した。さらに、回避動作による骨折危険性低減効果を検討するため、手つきを考慮した解析を行い、その効果を定量的に評価した。

研究成果の概要（英文）：The aim of this study is to elucidate the mechanism of hip fracture, which is one of the cause of bedridden, and discuss its prevention. A multibody/finite element hybrid model was constructed to reconstruct the body motion during walking and fall of elderly. Using this model, fall simulations by faint, slip, trip and step down during walking were conducted and factors increasing risks of hip fracture were evaluated. Then simulations taking account of the arm movement were conducted and evaluate the effectiveness of protective action for fracture prevention quantitatively.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	2,100,000	630,000	2,730,000
2009年度	1,200,000	360,000	1,560,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：人間医工学 ・ 医用生体工学・生体材料学

キーワード：バイオメカニクス、大腿骨頸部骨折、高齢者、転倒

1. 研究開始当初の背景

大腿骨頸部骨折は特に高齢者の転倒時に頻発しており、その患者発生数は2030年には年間約20万人に達するとも予測されている。大腿骨頸部が骨折することにより、起立

は困難となり、寝たきりの直接的原因となる。さらに患者の多数を占める高齢者では骨折治癒が困難であり、股関節置換術も患者負担が非常に大きい。したがって大腿骨頸部骨折の予防は高齢者医療の最重要課題の一つで

ある．そのため大腿骨頸部骨折予防研究への要請が高かったが，高齢女性の転倒事故の撮影や再現実験はできないため，高齢女性の体格や関節，組織の力学的特性，転倒する寸前の歩行の様子，転倒時の全身挙動を再現し，かつ転倒時の大腿骨頸部応力解析による骨折予測を可能とするシミュレーションモデルが必要とされた．このとき複雑な力学環境下での大腿骨頸部の高精度な骨折基準が必要となる．しかし，実際の高齢者の転倒時の全身挙動と骨折発生の因果関係を検討した研究には，前例がなかった．

2. 研究の目的

上記背景を受け，本研究は，高齢者転倒時の全身挙動を考慮した大腿骨頸部骨折の危険性を予測する転倒骨折予測シミュレーションモデルの開発と，転倒骨折メカニズムと予防の検討を行うことを目的とした．

3. 研究の方法

(1)人体の全身挙動の再現に有効である，自動車衝突安全解析等に広く用いられているマルチボディモデルにより日本人高齢女性歩行者モデルを構築．

(2)高齢者の歩行を再現し，さらに生活環境を考慮した転倒解析を実施．

(3)大腿骨頸部骨折予測のため，マルチボディモデルの一部に有限要素モデルを組み込んだ高齢女性ハイブリッドモデルを構築．

(4)転倒時の全身挙動を考慮した大腿骨頸部骨折予測シミュレーションにより高齢者転倒骨折のメカニズムを検討．

(5)つまずき転倒時の手つき動作を再現し，防犯行動による骨折予防効果を検討．

4. 研究成果

(1)日本人高齢女性歩行者マルチボディモデルの構築

転倒挙動解析モデルは，成人男性歩行者のマルチボディモデルをベースに構築した．このとき，マルチボディ解析にはMADYMO V6.2 (TNO-Automotive)を用いた．MADYMOに搭載されたマルチボディ作製機能GEBODを用いてマルチボディモデルを生成し，各関節の巨視的な曲げモーメント-関節角度特性をYangによる歩行者の関節特性，すなわち歩行者傷害解析用白人平均成人男性（身長 175cm，体重 75kg）の特性に基づき与えた．

コンクリート路面を歩行中の転倒を解析対象とし，初期条件はマルチボディモデルに転倒直前の歩行姿勢と，歩行速度を与えて規

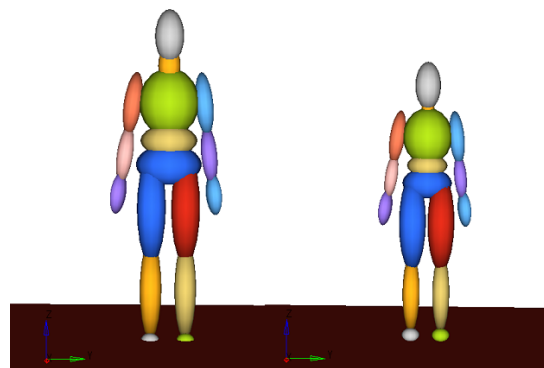
定した．ここで，モデルの歩調は成人男性ボランティア（身長を 180cm，体重を 72kg）の歩行画像に基づき再現した．歩行速度はSmeestersらの実験を参考に，1分あたりの歩数 (beat per minute) を 60 BPM，110 BPM，150 BPMとした．転倒要因は，Smeestersら⁽⁵⁾を参考に意識喪失，滑り，つまずき，踏み外しの4つを考慮した．構築した成人男性歩行者モデルを図1 (a)に示す．開発した成人男性歩行者モデルはSmeestersら転倒実験結果をよく再現できた．

次に，成人男性モデルをスケールリングすることにより，日本人高齢女性歩行者のマルチボディモデルを構築した．スケールリングは，日本人高齢女性の各セグメント寸法を参考に，下記の要領で行った．

例として，頭部のスケールリング方法を示す．頭部マルチボディの定義に必要なパラメータは，楕円体の各軸方向の半径，楕円体中心位置，重心位置，質量，ジョイント剛性，各軸回りの慣性モーメント，ジョイント座標の7つである．成人男性モデルの頭長を H_M ，日本人高齢女性の頭長を H_J とすると，日本人高齢女性頭部マルチボディの定義に必要なパラメータは，以下のスケールリングにより算出できる．

楕円半径	$R_J = (H_J / H_M) \times R_M$
楕円体中心位置	$x_J = (H_J / H_M) \times x_M$
重心位置	$x_{GJ} = (H_J / H_M) \times x_{GM}$
質量	$M_J = (H_J / H_M)^3 \times M_M$
ジョイント剛性	$T_J = (H_J / H_M)^3 \times T_M$
慣性モーメント	$J_J = (H_J / H_M)^3 \times J_M$
ジョイント座標	$x_J' = (N_J / N_M) \times x_M'$

ただし， N_M はMADYMOでの成人男性モデルの頸部の長さ， N_J は日本人高齢モデルの頸部の長さである．構築したマルチボディモデルを図1 (b)に示す．



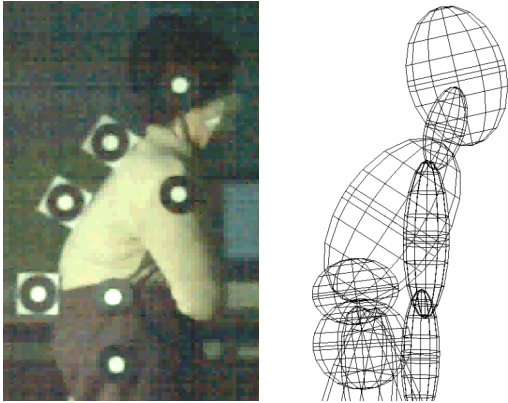
(a) 成人男性モデル (b) 高齢女性モデル
図1 マルチボディ歩行者モデル

(2)高齢女性歩行者の歩調，姿勢を再現した転倒解析

高齢女性歩行者の歩調と歩行中の姿勢を，ボランティアによる歩行計測結果に基づき

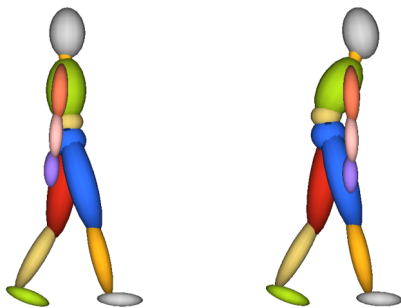
再現した。

歩調は、被験者の主観でゆっくり、通常、速い速度で歩いたときの側方画像から足関節、膝関節、股関節角度を同定し、モデル化した。歩行中の上体姿勢は、歩行周期、歩行速度によらずほぼ一定であったため、図2に示す5ヶ所のジョイント角度を画像から計測し、モデルに与えた。その際、上部のマルチボディの前面投影長さが図1(b)の上体部の長さに相当するよう、マルチボディのサイズを調整した。



(a) 高齢女性の姿勢 (b) マルチボディの姿勢
図2 高齢女性上体姿勢のマルチボディモデルによる再現

構築したマルチボディを図3(b)に示す。なお図3(a)は図1(b)のモデルの側面像である。高齢者は脊柱が湾曲していることが多く、重心位置が若年者と異なる。また、一般的な寸法測定方法では、高齢者の脊柱の湾曲は考慮されず前面投影長さによってしまうため、足が極端に長い非現実的なプロポーションになっていた。高齢者の側面像から姿勢データを得られたことにより、より実際に近い高齢女性歩行者モデルを構築することが出来た。



(a) 直立した上体姿勢 (b) 高齢者の上体姿勢
図3 上体姿勢を再現した高齢女性歩行者モデル

構築した高齢女性歩行者モデルにより、転倒挙動解析を行った。以下に高齢者特有の脊柱湾曲が転倒挙動に及ぼす影響を検討した

結果を示す。

前傾上体モデル、直立上体モデルとも、膝をついてから腰部を接地する、腰部を直接接地する、もしくは頭部や上体を接地する挙動のいずれかを示したが、発生頻度が異なる場合があった。発生頻度の違いを図4に示す。

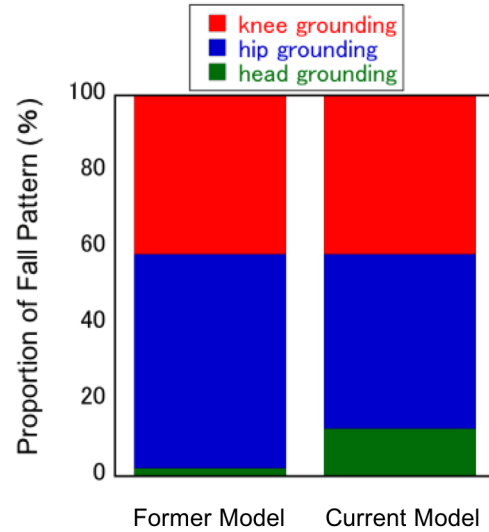
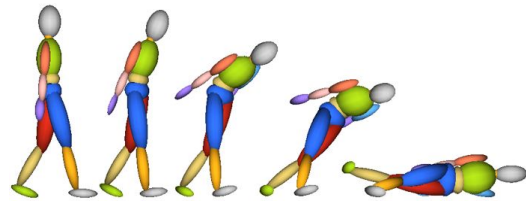


図4 上体姿勢変化による転倒パターン発生割合の違い

転倒要因による差異について検討したところ、意識喪失、つまずき、踏み外しではほとんどの場合で上半身直立時と前傾時の転倒挙動に違いが見られなかった。一例として図5に通常歩行速度で両足支持期に意識喪失した場合の転倒挙動を示す。意識喪失やつまずきでは直立上体モデル、前傾上体モデルとも腰部を側方から直接接地する転倒が多かった。これは意識喪失、つまずきでは直立上



(a) 直立上体モデル



(b) 前傾上体モデル

図5 意識喪失による転倒挙動の例

体モデル上半身が前方へ倒れこみながら転倒するため、転倒開始時の上半身の

響が小さかったと考えられる。また、踏み外しでは両モデルとも腰部を前方から直接接地した。これは前足の接地時に上体に強く慣性が働き前傾上体モデルでも転倒途中で上体が直立状態となるため転倒初期姿勢の上半身の前傾は転倒姿勢にはあまり影響を与えなかったと考えられる。

一方、脊柱湾曲を考慮したことで、滑りによる転倒において、脊柱湾曲モデルは直立モデルと同様に膝を接地してから腰部を接地する挙動を示したが、斜め前方に向かって上体が倒れる直立モデルと比較して前方より上体が倒れ、膝接地時の大腿部と地面との接地角度が小さくなった。一例として図6に通常歩行速度で両足支持期に滑った場合の転倒挙動を示す。直立モデルでは転倒開始時に重心が前足より後方にあるため、腰部が鉛直方向に沈み始めた時に前足が前方に滑った。一方、脊柱湾曲モデルでは転倒開始時に重心が前足設置位置の横に近いので、前足が横方向に滑った。

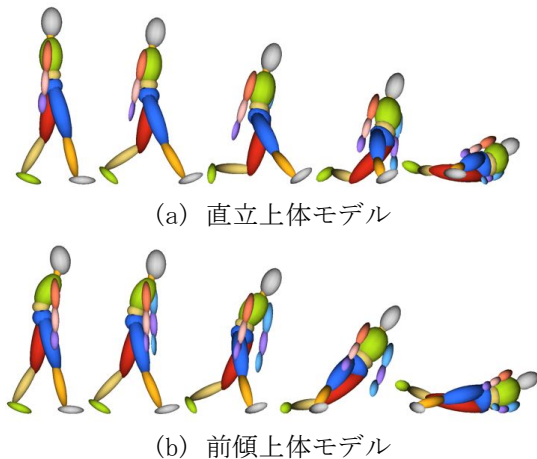


図6 滑りによる転倒挙動の例

また、脊柱湾曲モデルでは頭部が接地する転倒が比較的高い頻度でみられた。一例として図7に速い歩行速度で遊脚減速期に意識喪失した場合の転倒挙動を示す。転倒初期に重心が接地脚に対して前方にあるため、頭部からそのまま倒れ込んでいる。

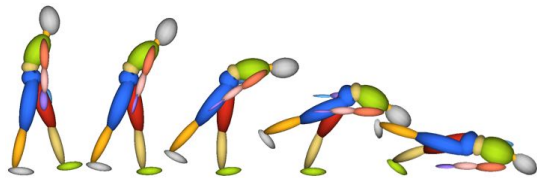


図7 頭部が接地する転倒挙動の例

(3)高齢女性歩行者マルチボディー-有限要素ハイブリッドモデルの構築

脊柱湾曲モデルの左腰部および大腿部マルチボディーに、高齢女性の平均的形状の大腿

骨および臼蓋、股関節部靭帯、臀部および大腿部筋・脂肪組織、皮膚をモデル化した有限要素モデルを接続し、高齢女性歩行者マルチボディー-有限要素ハイブリッドモデルとした。構築したモデル図8に示す。

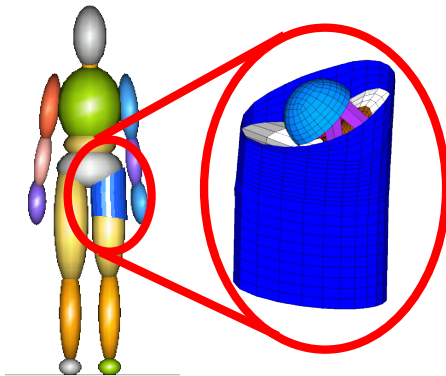


図8 マルチボディー-有限要素ハイブリッドモデル

また、軟組織の大部分を占める筋組織の力学特性の表現精度向上のための筋組織力学特性モデルの検討を行い、筋線維方向の変形、損傷特性の表現を可能とした。

(4)ハイブリッドモデルによる大腿骨頸部骨折予測シミュレーション

このモデルにより転倒骨折予測解析を行った結果を以下に示す。図9に膝をついた後に腰を接地する場合と腰を直接接地する場合における、接地の衝撃による骨折危険度を示す。骨折危険度は、骨密度に基づき決定される大腿骨頸部各部の骨強度により引張最大主応力、圧縮最大主応力、最大せん断応力を除いたものである。

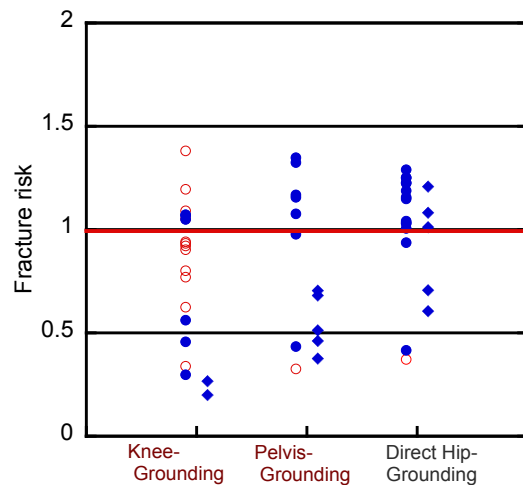


図9 転倒パターンごとの骨折危険度

膝をついた場合に、図中白抜きマーカで示した引張による骨折が予測されたケースがあった他は、骨折発生が予測されたケースの

多くでは最大せん断応力による骨折が生じていた。また、外側骨折は腰を直接接地する場合のみ生じた。

また、骨折予測解析結果の骨折発生頻度に、上岡らによる事例研究を参考にイベントの発生率を補正した結果、転倒による骨折発生率は53.2%であった。上岡らの調査結果では、全転倒者に対する骨折者の割合は43.8%であり、シミュレーション結果は約10%高く骨折発生を見積もっていた。本シミュレーションでは転倒回避動作を考慮していないため、この差を生じたものと考えられる。

(5) 防御行動による骨折予防効果

転倒時の典型的な防御行動として手つきの動作を考慮した検討を行った。この行動は発生頻度が高く、腕の動作として再現が可能である。

高齢者の運動機能と骨折危険性の関係を調べるため、従来の研究で定義されてきた12パターンをつまづき転倒における防御行動の効果を検討した。転倒方向に肩関節を90°回転させ、腕を地面に接地させる防御行動をモデル化した。

防御行動を忠実に再現するにあたり、接地直前までと接地後に分けてモデル化を行った。接地直前までのつき手を前に出す動作を、高齢者の応答遅れ、動作時間を考慮し、防御行動を行う腕関節の角度-時間関係を与えてモデル化した。高齢者の応答遅れは藤原らが行った実験結果より、高齢者の光刺激による手指屈曲の反応時間を使用して0.25sとした。腕の動作速度はRoosらが測定したつまづき回復時における腕の質量中心速度を与えた。接地後は筋緊張状態の高齢者の腕関節トルク-関節角関係を定義し転倒による衝撃を受け止めるようモデル化した。肩関節と肘関節の剛性はShklarら、Poussonら、DeGoedeらの文献を参考にした。

マルチボディモデルの転倒挙動は、膝もしくは大腿部接地後腰部を接地する挙動、腰部を直接接地する挙動に分けられた。従来モデルと防御行動モデルの挙動を比較したところ、図10のように従来モデルで腰部を直接

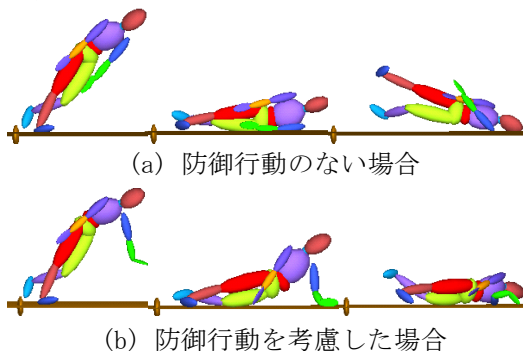
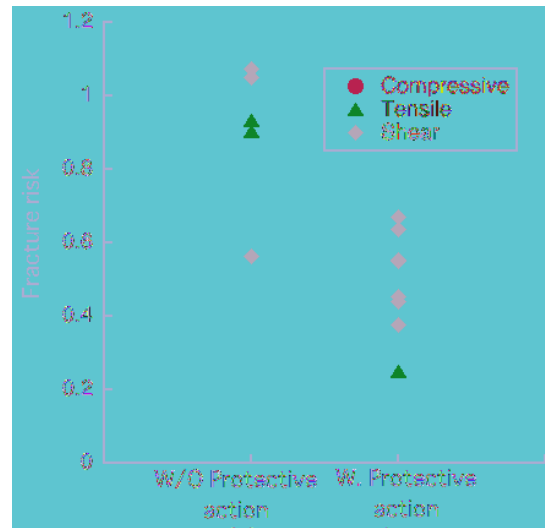


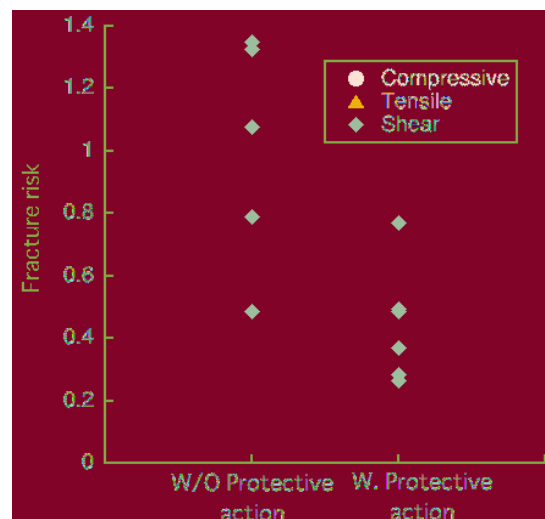
図10 防御行動の有無による転倒挙動の違い

接地する挙動が防御行動を行うことで膝から接地する挙動に変化するものが3例存在した。これは腕が先に接地することで腰部が弓なりに屈曲したためだと考えられる。また側方へ転倒する挙動が前方に転倒する挙動に変化したものが2例存在した。体が側方に旋回する前に腕を接地したことが原因だと考えられる。

大腿部 FE 複合モデルを用いて大腿骨頸部に負荷する応力を解析し、骨折危険度を求めたところ、防御のないモデルに対して防御行動モデルの値はほとんどの場合で減少し、増加した場合でも増加幅はわずかで新たに骨折と判断されることはなかった。図11および12に膝、大腿部を接地後、腰部を接地する転倒、腰部を直接接地する転倒における最大骨折危険度の比較をそれぞれ示す。結果から骨折と判断される転倒は従来モデルで8例存在したが防御行動モデルでは腰部を直接接地する転倒挙動において2例存在した。



(a) 膝接地時



(b) 腰部接地時

図11 膝をつく転倒パターンにおける防御行動が骨折危険度に及ぼす影響

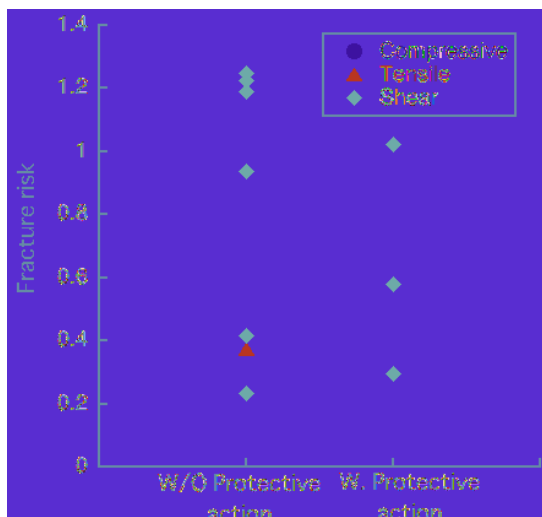


図1.2 腰部を直接接地する転倒パターンにおける防御行動が骨折危険度に及ぼす影響

また平均応力、平均骨折危険度の t 検定を行ったところ、膝もしくは大腿部から接地する転倒では有意な差が確認されたが ($p > 0.05$)、腰部を直接接地する転倒では有意な差が確認されなかった ($p < 0.05$)。

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)

① Ito, D., Tanaka, E., Yamamoto, S., A Novel Constitutive Model of Skeletal Muscle Taking into account Anisotropic Damage, Journal of Mechanical Behavior of Biomedical Materials, 査読有り, Vol. 3, 2010, pp. 85-93.

[学会発表] (計 5 件)

① 山本創太, 高齢歩行者転倒のモデル化と傷害予測, 日本機械学会機械力学・計測制御部門講演会, 2009年8月8日, 北海道大学.

② 山本創太, MADYMO を用いた高齢歩行者転倒骨折解析, 日本計算工学会第 14 回計算工学講演会, 2009年5月12日, 東京大学生産技術研究所.

③ 成田一也, 日本人高齢女性の上半身姿勢を考慮したマルチボディ転倒シミュレーション, 日本機械学会第 21 回バイオエンジニアリング講演会, 2009年1月23日, 札幌コンベンションセンター.

④ 成田一也, 日本人高齢女性の上半身姿勢を考慮したマルチボディ転倒シミュレーション,

ン, 日本機械学会 第 19 回バイオフィロントニア講演会, 2008年9月25日, 首都大学東京.

⑤ 山本創太, 高齢者の歩行速度を考慮した転倒による大腿骨頸部骨折の計算バイオメカニクスの検討, 日本機械学会 2008 年度年次大会, 2008年8月4日, 横浜国立大学.

[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:

出願年月日:

国内外の別:

○取得状況 (計 0 件)

名称:

発明者:

権利者:

種類:

番号:

取得年月日:

国内外の別:

[その他]

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

山本 創太 (YAMAMOTO SOTA)

芝浦工業大学・工学部・准教授

研究者番号: 80293653