

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 22 日現在

機関番号：12301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420167

研究課題名(和文) 披介護者・介護者に安心安全な介護用機械アームの生体の動特性と反応を利用した開発

研究課題名(英文) Development of an arm for care machines using dynamic behaviors and reactions of living bodies to realize safety for caregivers and care receivers

研究代表者

山口 誉夫 (YAMAGUCHI, TAKAO)

群馬大学・大学院理工学府・教授

研究者番号：90323328

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：生体に接する介護用機械の衝撃応答を解析し、安心安全な介護用機械のアームの材料、動特性の検討を行った。有限要素法に非線形複素ばね要素を非線形複素接触力要素として拡張して用い、指で運動する物体を止める動作について解析した。力と変形の関係で部分的に変形が力よりも進む現象(予見した動作やあわてた動作で出現)を、偶数次の非線形ばね定数の虚数部の値をチューニングすることで、計算できる可能性を示した。さらに剣道で用いる竹刀をヒントにして、介護用機械を模擬したアームの衝撃吸収性能向上を検討した。断面を分割し、ゆるく束ねた炭素繊維強化樹脂(CFRP)のアームでは、良好な衝撃緩和効果が得られた。

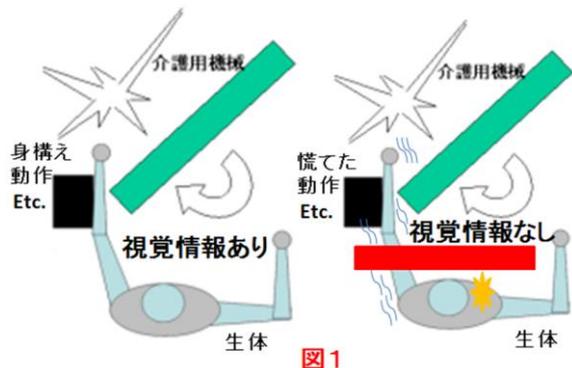
研究成果の概要(英文)：We investigated materials and dynamic properties for an arm in the care machines to realize safety by analyzing impact responses of the arm contacted to living bodies. We extended our nonlinear complex spring elements in FEM as nonlinear complex contact force element. Using this method, we computed motions to stop a moving object by a human finger when the block collides to the finger with his reaction. By adjusting the even terms in the imaginary parts of the nonlinear complex spring constants, we can simulate the phenomena that deformations proceed faster than the force locally in the relation between deformation and force which appear with precaution or small panic. Further, we tried to improve the performance in impact absorption for the simplified arms of care machines by referring to the bamboo swords which are used in Kendo. We obtained excellent performance in impact absorption effects by using the CFRP arms which cross sections are divided and their parts are bundled loosely.

研究分野：機械力学

キーワード：機械力学 衝撃吸収 緩衝材 安全 介護機械 有限要素法 粘弾性 減衰

1. 研究開始当初の背景

将来、機械の介護への利用が期待されている。子供、老人、病人などの弱者が、これらの介護用機械とランダムなタイミングで接触する機会が増えると考えられる。特に一般家庭への介護機械やロボットが普及する可能性を考えると、これらの機械には柔らかい生体との接触を現在以上に考慮した設計が望まれる。



2. 研究の目的

接触による衝撃を軽減するために機械の構成部材を柔軟材料（高分子材など）にすることが考えられる。柔軟材料や生体と機械との連成を考慮した動的設計が必要となる。さらに図1のように人体は視覚情報の有無、意識する場合としない場合で、あわてた動作や予見して身構え筋肉を緊張させる動作などが出現し衝突挙動が変化する。

過去の我々の検討から、高分子材や生体は、条件によって非線形復元力特性、非線形減衰特性を有する特徴がある。家庭内等での想定外の利用条件での安全性や介護機器と生体の長時間接触による患者あるいは介護担当者の負担軽減を目指す場合に、これらの特徴を十分に把握して考慮し、利用した設計が重要となっていくと考えている。介護用の機械は、一般には弾性体あるいは粘弾性体となるので、弾性体・粘弾性体と非線形減衰要素と非線形ばね要素が連成する動的問題の解明が重要となる。

本研究は、介護機械の設計に役立てるように、生体あるいは介護機械用高分子材料の非線形領域まで考えた衝撃特性を実験で把握し、その特性を非線形減衰、非線形復元力を考慮した数値解析用のモデル化し有限要素法に組み込む。その際に視覚情報の有無、意識する場合としない場合の生体の復元力特性の変化を考慮した計算モデルを独自に提案し導入する。さらに介護用機械を模擬したアームと生体、高分子材の衝突評価装置を作成する。一連の実験解析、数値解析から介護

者と被介護者にやさしい介護用機械のアームの材料、動特性を明らかにする。

3. 研究の方法

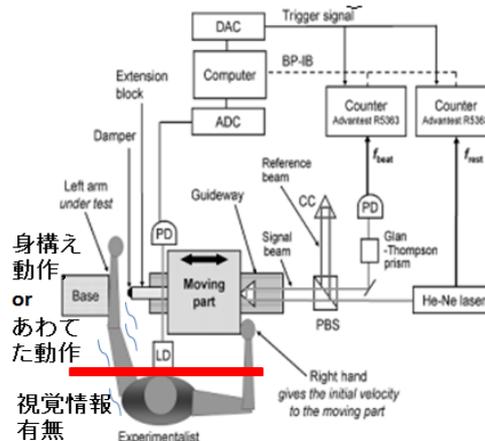


図2

介護用機械を模擬したアームと生体、高分子材の衝突評価装置を作成し、人間の視覚の有無や意識するかどうかを考慮した実験を行う。実験と数値解析から介護者と被介護者により安心、安全な介護用機械のアームの材料、動特性、作動計画を明らかにする。

(1) 衝撃特性の実験同定とモデル化

生体の動特性について人間の視覚の有無や意識するかどうかを考慮して、非線形復元力、非線形減衰の実験同定を行う。研究分担者の藤井が提案した浮上質量法を用いる。

図2に示すこの先進的な計測方法では光波干渉計を装着した小ブロックを空気膜で浮上させ、ガイドで直動させる。この時、ブロックとガイドの間の空気膜を精密にコントロールし、摩擦が極めて小さくなるようにする。ガイド上のコーナーキューブにレーザー光をあて運動速度を精密に求め、その微分と積分から加速度と変位を求める。ブロック質量と加速度から力を測定する。力と変位からヒステリシス特性を求める。

この計測法より生体と介護機械用高分子材料の組み合わせの動特性を、人間の視覚の有無や意識するかどうかを考慮してパラメータ同定をする。

(2) 衝撃特性の数値解析法

高分子や生体の非線形減衰、非線形復元力を伴う衝撃特性の数値解析法として、研究代表者により提案、定式化され開発されたコードを援用し、さらに人間の視覚の有無や意識するかどうかを考慮できるように拡張して、介護者と被介護者に、より安心安全な介護機械の動特性を明らかにし、介護機械のアーム

を開発する。

**A. 生体, 高分子の要素** 介護機械用構造を非線形ヒステリシス減衰を有する非線形ばね (生体および高分子) で支持する.  $m$  番目の非線形ばねの復元力は, 介護機械用構造との接合点  $\alpha_m$ , ( $m=1, 2, 3, \dots$ ) のばねの変位  $U_{cmx}$  のべき級数で表現する. 節点  $\alpha_m$  の節点力  $R_{cmx}$  は次式となる.

$$R_{cmx} = \gamma_{1mx} U_{cmx} + \gamma_{2mx} U_{cmx}^2 + \gamma_{3mx} U_{cmx}^3 + \dots \quad \text{---式(1)}$$

$\gamma_{1mx}, \gamma_{2mx}, \gamma_{3mx}$  は,  $m$  番目のばねの線形および二次, 三次の非線形ばね定数である. 非線形複素ばね定数を導入し,  $\gamma_{1mx} = \bar{\gamma}_{1mx}(1 + j\eta_{1mx})$ ,  $\gamma_{2mx} = \bar{\gamma}_{2mx}(1 + j\eta_{2mx})$ ,  $\gamma_{3mx} = \bar{\gamma}_{3mx}(1 + j\eta_{3mx}), \dots$  とする.  $\bar{\gamma}_{1mx} \sim \bar{\gamma}_{3mx}$  は  $\gamma_{1mx} \sim \gamma_{3mx}$  の実数部,  $j$  は虚数単位,  $\eta_{1mx} \sim \eta_{3mx}$  は, ばねの復元力の各次数に対応した材料損失係数である.  $\eta_{1mx} \sim \eta_{3mx}$  により非線形復元力が複素数となり非線形ヒステリシスが導入される.  $R_{cmx}$  と節点  $\alpha_m$  の変位  $U_{cmx}$  との関係は次式となる.

$$\{R_m\} = \{\bar{\gamma}_{1mx}\} \{U_{sm}\} + \{\bar{d}_m\} \quad \text{---式(2)}$$

$$\begin{aligned} \text{ここで, } \{R_m\} &= \{R_{cmx}, R_{cmz}, R_{cmz}\}^T, \\ \{U_{sm}\} &= \{U_{cmx}, U_{cmz}, U_{cmz}\}^T, \\ \{\bar{d}_m\} &= \{\gamma_{2mx} U_{cmx}^2 + \gamma_{3mx} U_{cmx}^3 + \dots, 0, 0\}^T, \end{aligned}$$

$\{\bar{\gamma}_{1mx}\}$  と  $\{\bar{d}_m\}$  はそれぞれ複素行列, 複素ベクトルとなる. このモデルを用いると, 生体の腕の衝撃応答実験で現れた「変形とともに減衰が大きくなる現象」を意識して力をいれた場合と弛緩させた場合の差異を計算できる. さらに非線形複素ばね要素の偶数次の非線形ばね定数の虚数部の値をチューニングし, 力と変形の関係で部分的に変形が力よりも進む現象 (予見した動作やあわてた動作で出現) を計算できる可能性がある. これを発展させ生体に接する介護機械の動特性の人間の視覚の有無や意識するかどうかを考慮した計算モデルを構築する.

### B 介護用機械構造の離散化方程式

介護用機械構造は有限要素で分割する. 微小変形を仮定した三次元要素を用いる. 例えば非適合モードを考慮した 8 節点 isoparametric solid 要素でモデル化する. 介護用機械構造の中で粘弾性体となっている

る部材には, 複素弾性率  $E^* = \bar{E}(1 + j\eta_b)$ , ( $\bar{E}$ :弾性率の実部,  $\eta_b$ :構造物の材料損失係数)を用い要素剛性行列を複素行列とする.

### C 介護用機械構造を生体および高分子に接続した系の離散化方程式

式(2)を介護用機械構造と生体および高分子の要素 (非線形ヒステリシス減衰を有する非線形ばね) の接合節点  $\alpha_m$ , ( $m=1, 2, 3, \dots$ ) の節点力に加え全系の離散化方程式(3)を得る.

$$[M]\{d^2u/dt^2\} + [K^*]\{u\} + \{\hat{d}\} = \{f\} \quad \text{---式(3)}$$

$\{u\}, [M], [K^*], \{f\}$  は変位ベクトル, 質量行列, 複素剛性行列, 節点力ベクトル,  $\{\hat{d}\}$  は  $\{\bar{d}_m\}$  をまとめた複素ベクトルである. 物理座標系で記述された運動方程式(3)は, 自由度が大きく計算すると膨大な時間が必要となる. 式(3)に線形固有モードに対応する基準座標を導入し自由度を縮小する.

例えば生体および高分子要素の非線形集中ばね定数を三次まで考慮した場合は次式となる.

$$\begin{aligned} \ddot{b}_{i,t} + \eta_{tot}^{(i)} \omega_0^{(i)} \dot{b}_{i,t} + (\omega_0^{(i)})^2 b_{i,t} + \sum_j \sum_k \tilde{D}_{ijk} \tilde{b}_j \tilde{b}_k \\ + \sum_j \sum_k \sum_l \tilde{E}_{ijkl} \tilde{b}_j \tilde{b}_k \tilde{b}_l + \dots - P_i = 0 \quad \text{---式(10)} \end{aligned}$$

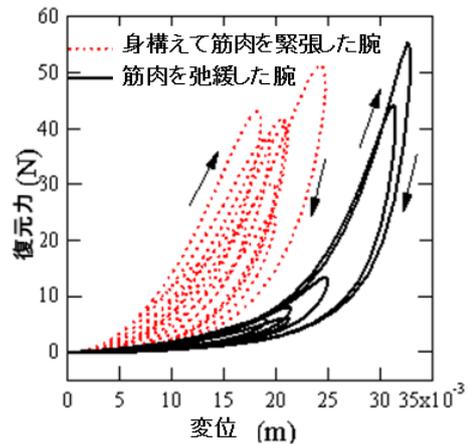


図3

コンマの後の  $t$  は時間についての微分である.  $\tilde{D}_{ijk}$  および  $\tilde{E}_{ijkl}$  は二次と三次の非線形復元力項で

ある.  $\tilde{D}_{ijk}$  と  $\tilde{E}_{ijkl}$  には二次と三次の非線形復元力項に対応した次数の非線形減衰も含まれており, 材料損失係数, 非線形ばね定数と固有ベクトルの成分の関数となる.  $P_i$  は外力

項である。このコードを発展させ介護者と被介護者に安全な動特性を求め介護機械のアームを開発する。

図1のような視覚有無や意識するかどうかを考慮した介護用機械を模擬したアームと生体、高分子材の衝突評価装置を作成する。実験、数値解析をまとめ介護者と被介護者により安心安全な介護用機械のアームの材料、動特性を明確にする。

#### 4. 研究成果

生体の腕にブロックが接触した場合の非線形復元力、非線形減衰特性を計測した。意識して身構えて腕に力をいれた場合と弛緩

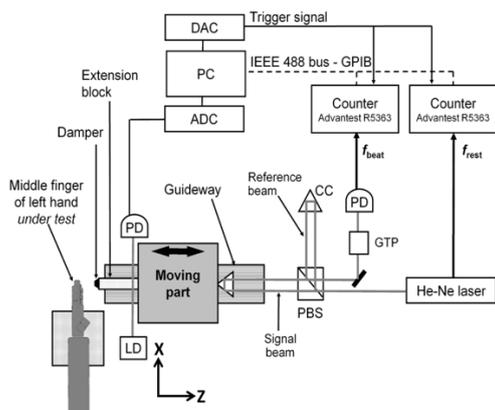


図4

させた場合の差異を図3のように求めた。さらに視覚有無や意識するかどうかの影響を明らかにするために指で運動する物体を止める動作について解析した。図4は Levitation Mass Method を用いた実験装置の模式図である。図中の剛なブロックはガイド

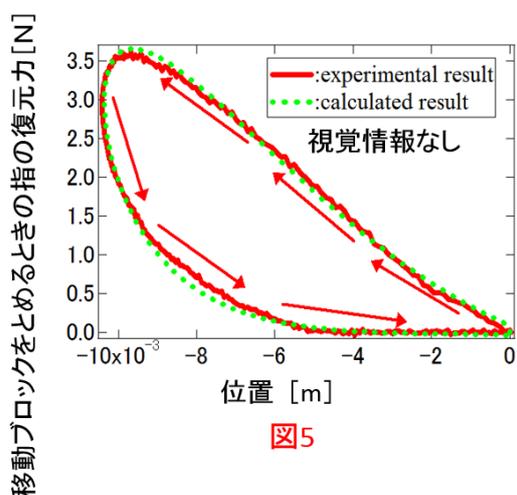


図5

に沿ってz方向のみの並進運動が可能となっている。ブロックとガイドの間には膜厚

8  $\mu\text{m}$ の空気によって圧力が管理され、ブロックは浮上している。これにより、低摩擦に浮上ブロックの移動を可能としている。浮上ブロックをz方向に初期位置 $z_0$ から押し出し、初速 $v_0$ を与え運動させる。その運動している浮上ブロックを、被験者が両目を開けており視覚的情報が有る場合と被験者が両目を閉じており視覚的情報が無い場合それぞれにおいて、手指で受け止め静止させる動作を行う。その結果、減衰を伴う運動が発生する。浮上ブロックに設置したコーナークューブに他の固定部よりレーザー光をあてる。光波干渉計を用いてドップラー効果によりブロックの運動速度を計測する。求められた速度から積分により位置を、微分により加速度を求める。加速度とブロック質量を乗じて慣性力を求める。慣性力の符号を変えて復元力 $R_{\text{calc}}$ を得る。この復元力と位置の関係からヒステリシス曲線を求める。図5および図6の実線は移動物体をとめる時の指の復元力のヒステリシス曲線の実験結果である。復元力のヒステリシス曲線は、各実験条件により、曲線の特徴に大きな違いが見られる。ま

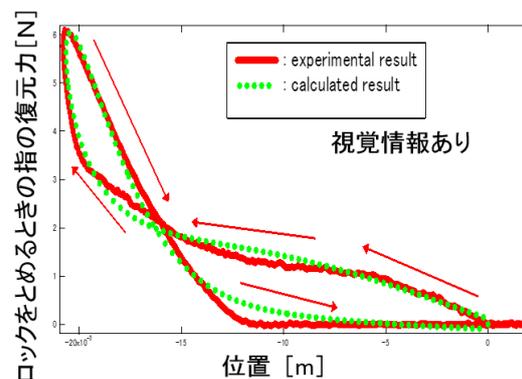


図6

ず、視覚的情報が有る場合（図5の実線）では、浮上ブロックを指で受け止め静止させる過程が非線形のヒステリシスを伴った非線形のばね特性として現れている。このとき、浮上ブロックが指に接触するタイミングを判断して受け止め、浮上ブロックの運動を効率よく減衰させることができる。ヒステリシスによる膨らみの面積は減衰されたエネルギー

ギー量を表している。次に、視覚的情報が無い場合（図6の実線）では、途中でヒステリシス曲線がねじれていることが分かる。また、最大の変形量は視覚的情報が有る時に比べて大きいことも分かる。これは、被験者はあわてた動作として指を動かしてしまうため、浮上ブロックの運動を効率よく減衰できず、複雑な挙動が現れたためだと考えられる。ねじれる前のヒステリシスによる膨らみの面積がエネルギー損失を表すのに対し、ねじれた後のヒステリシスによる膨らみの面積は外部から与えられたエネルギー量を示して

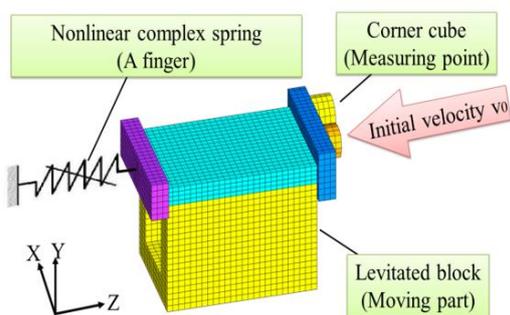


図7

いる。つまり、図5の結果においては、後者の面積の方が大きいため、指で浮上ブロックを受け止めたことにより減衰されたエネルギーの損失量よりも、被験者のあわてた動作により新たに浮上ブロックに加えられたエネルギー量の方が大きいことを示している。

この実験結果をシミュレートする計算モデルを図7に示す。浮上ブロックは三次元有限要素で弾性体としてモデル化してある。指は非線形ヒステリシスを有する非線形復元力でモデル化してある。これより指の弾性変形、衝撃吸収、生体反応を考慮した計算を行った。力と変形の関係で部分的に変形が力よりも進む現象(予見した動作やあわてた動作

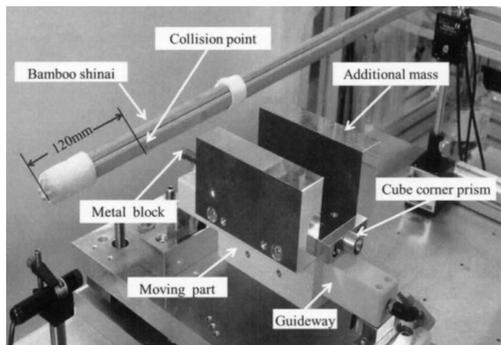


図8

で出現)を、偶数次の非線形ばね定数の虚数部の値をチューニングすることで、計算した。計算結果を図5および図6に破線で示す。変形の進行にともなう動的な接触力の変化、視覚情報の有無による変化は、実験と計算で一致できた。

さらに剣道で用いる竹刀をヒントにして、介護用機械を模擬したアームの衝撃吸収性能向上を検討した。ここでも図8のような浮上質量法を用いた評価装置を作成して、その

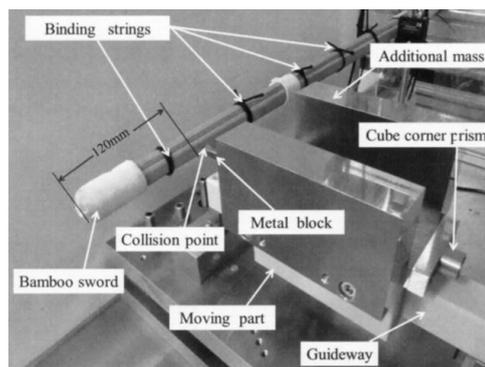


図9

解析から高い衝撃吸収性能を有するアームを新たに考案した。考案したアームは炭素繊維強化樹脂(CFRP)を竹刀のような構造にしたものである。すなわち中空円形断面を有する心材(円筒のアーム)を持つ。その心材の円形断面を4つに分割し、円筒のアームを長手方向に割っておく。長手方向に割った心材は円弧断面を持つ棒状の4本の部品アームから形成される。部品アームを適度にゆるく束ねる。

図10に提案するCFRP製アームの復元力(衝撃力)の時間変化の計測結果を示す。図中の青線が提案アームであり、分割された部品アームをゆるく束ねてある。比較のために図9のように部品アームを固く縛った条件でも試験を行った。図10中の赤線が固く縛った場合の復元力(衝撃力)の計測結果である。明らかに固く縛った条件の衝撃力の最大値は、ゆるく束ねた提案アームの最大値より大きいことがわかる。提案アームでは衝撃力が作用した場合に、個々の部品アームの弾性変形と部品アーム間の相対運動(部品アームが接触しながら断面の内部へ入り込む運動)による摩擦で衝撃を吸収する。

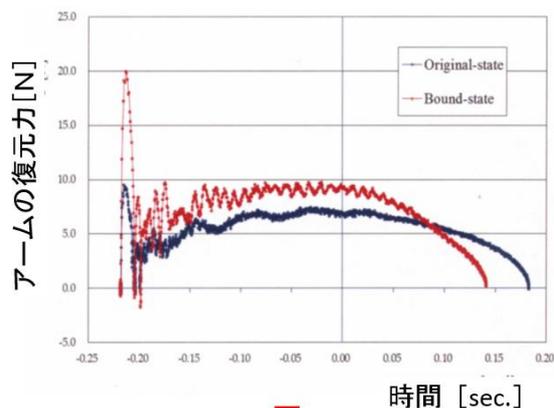


図10

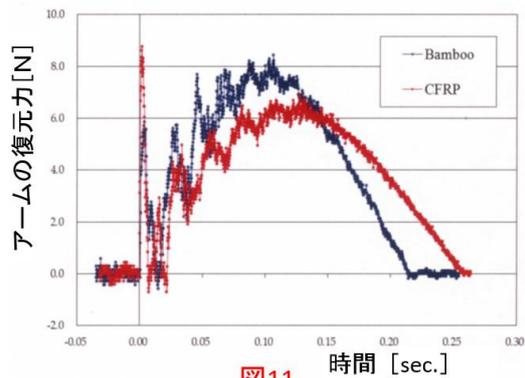


図11

図11は剣道で通常使われる竹製のアームの衝撃特性（青線）と、今回のCFRP製の衝撃特性（赤線）の時刻歴を計測したものである。竹製のアームは初期の衝撃力のピークは小さいが、後半で衝撃力が大きくなってしまふ。CFRP製のアームは、逆に初期の衝撃力のピークは大きい後半の衝撃力は小さい。衝撃の最大値としては両者で大きな差がない。素材としてCFRPを使用しても、竹製のものと同様に断面分割による大きな衝撃緩和効果が得られた。介護用アームには工業製品として安定した品質が求められるため、提案するCFRP製のアームが望ましい。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕（計 2 件）

- ① K. Kitabata, A. Takita, T. Yamaguchi, E. Carcasona, A. S. Budi and Y. Fujii, Impact Response Measurement of a Bamboo Sword “Shinai”, Journal of the Institute of Industrial Applications Engineers, 査読有、Vol. 4, No. 2, 2016、66-71  
[https://www2.ia-engineers.org/Journal\\_E/index.php/jiaae/article/view/95](https://www2.ia-engineers.org/Journal_E/index.php/jiaae/article/view/95)
- ② R. Kojima, K. Kitabata, D. H. Bin, A. Takita, T. Yamaguchi and Y. Fujii, Impact Response Measurement of Bamboo Shinai and CFRP Shinai, Key Engineering Materials, 査読有、Vol. 698, 2016、80-84

DOI

10.4028/www.scientific.net/KEM.698.80

<https://www.scientific.net/KEM.698.80>

〔学会発表〕（計 4 件）

- ① Yamaguchi, T., Fujii, Y., Takita, A., Maruyama, S., Nakazawa, N., Matsui, T., Tomita, N. and Igarashi, K., Biomechanical Transient Responses by FEA Using a Nonlinear Complex Restoring Force Element for Coupling Systems between Humans and Moving Objects under Impact Loads, 6th Annual International Mechanical Engineering Research Conference, 2016年1月22日、サンカルロス大学（フィリピン セブ市）
- ② Yamaguchi, T., Fujii, Y., Takita, A., Maruyama, S., Nakazawa, N., Matsui, T., Tomita, N. and Noto, T., Analysis of Biomechanical Properties of Human, 5th Annual International Mechanical Engineering Research Conference, 2015年1月13日、サンカルロス大学（フィリピン セブ市）
- ③ 能登達也、山口 誉夫、藤井雄作、丸山真一、田北啓洋、富田徳久、視覚的情報の有無による運動体の指での静止動作の非線形複素 FEM 解析, 日本機械学会 Dynamics and Design Conference 2014、2014年8月26日、上智大学（東京都千代田区）
- ④ 五十嵐航太、山口 誉夫、藤井雄作、富田徳久、田北啓洋、丸山真一、弾性体が手の平に衝突する問題の非線形複素ばねによる FEM 動的応答解析, 日本機械学会 Dynamics and Design Conference 2014、2014年8月26日、上智大学（東京都千代田区）

〔図書〕（計 0 件）

〔産業財産権〕

- 出願状況（計 0 件）
- 取得状況（計 0 件）

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

山口 誉夫 (YAMAGUCHI Takao)  
 群馬大学・大学院理工学研究科・教授  
 研究者番号：90323328

(2) 研究分担者

藤井 雄作 (FUJII Yusaku)  
 群馬大学・大学院理工学研究科・教授  
 研究者番号：80357904

(3) 研究分担者

小木津 武樹 (OGITSU Takeki)  
 群馬大学・大学院理工学研究科・助教  
 研究者番号：00621202