

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 12 日現在

機関番号：12301

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560250

研究課題名(和文)介護者と被介護者にやさしい介護用機械アームの生体動特性を利用した開発

研究課題名(英文)Development of mechanical arms in nursing care equipments for caregivers and care receivers using dynamic properties of living bodies

研究代表者

山口 誉夫(YAMAGUCHI, Takao)

群馬大学・理工学研究院・教授

研究者番号：90323328

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円、(間接経費) 840,000円

研究成果の概要(和文)：高衝撃吸収性能を持つ介護用機械のアームを検討した。生体や介護機械用高分子材の衝撃特性を表現するために、非線形減衰、非線形復元力を考慮した複素ばねを提案し、その有限要素法の計算コードを開発した。アームの衝撃吸収性能の評価装置を作り、実験と数値解析から高衝撃吸収性能を有するアームを提案した。提案アームは分割された中空円形断面を有する心材を持ち、その表面に中空断面の発泡高分子緩衝材が装着される。小変形では、緩衝材のヒステリシスと緩衝材中空部の座屈で衝突エネルギーを吸収する。アームの分割された心材を適度にゆるく束ねる。その部品間の相対運動による接触摩擦で大変形時の衝撃を吸収する。

研究成果の概要(英文)：We investigated arms in nursing machine having high shock absorbing performances. We developed calculation programs to simulate the impact properties of the arm with shock absorbers. To compute the impact responses, we proposed nonlinear complex springs that takes into account nonlinear hysteresis and the nonlinear restoring force. These nonlinear complex springs are connected to structures modeled using finite elements. We developed an evaluation device of shock absorbing performances for the arms. From the experiments and numerical analysis, we proposed a new arm with a high shock absorbing performances. The proposed arm has a core with viscoelastic foam having a hollow cross section. Under small impact forces, this arm absorbs the shock by the hysteresis damping and a buckling of the foam. This arm having the divided core includes higher shock absorbing performance due to contact friction between the divide members under large impact forces.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・機械力学・制御

キーワード：機械力学・制御 衝撃吸収 緩衝材 安全 介護用機械 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。その際に子供、老人、病人などの弱者が、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。また、接触による衝撃を軽減するために機械の構成部材を柔らかい材料(高分子材)にすることも考えられる。柔らかい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。

過去の我々の検討から、柔らかい高分子材や生体は、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。

2. 研究の目的

研究開始当初の背景は、研究終了時でも大きな変化はなかった。目的は以下となる。

家庭への介護機械やロボットの普及の可能性から子供、老人、病人が介護用機械と接触する機会が増加しうる。安全のため今以上に生体との接触を考慮した設計が望まれる。さらに介護用機械の構成部材を衝撃軽減のために柔らかい材料にすることも考えられ柔らかい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。本研究では、介護者と被介護者に対して、より安心安全な介護用機械のアームの材料、動特性を実験、数値解析で明らかにする。

3. 研究の方法

柔らかい高分子材料や生体とロボットなどの移動機械との連成を考慮した動的設計が本研究の推進に重要になる。

(1) 衝撃特性の実験同定とモデル化

高分子や生体など非線形復元力と非線形減衰を含む要素の動特性の実験同定を研究分担者の藤井が提案した浮上質量法を用いて実施する。

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、小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。この浮上質量を緩衝材や生体に衝突させ衝撃吸収特性を計測する。浮上質量上に設置したコーナーキューブにレーザー光をあて衝撃応答の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。さらに小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。

このような計測法により非線形要素(生体や高分子)の動特性のパラメータを同定する。

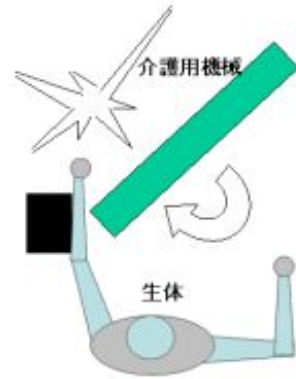


図1

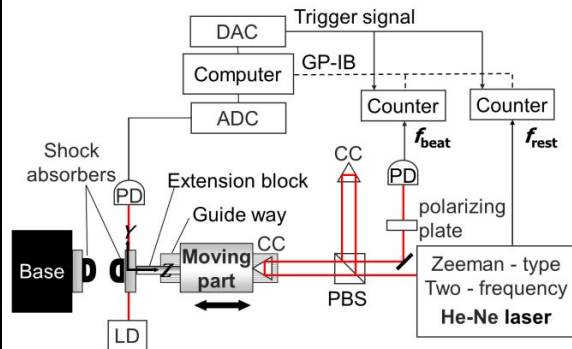


図2

(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、介護者と被介護者にやさしい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. 生体および高分子の要素 介護機械

用構造を非線形の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)で支持する問題を考える。m番目の非線形ばねの復元力(方向)は、介護機械用構造との接合点 α_m ($m=1, 2, 3, \dots$)におけるばねの変位 $U_{\alpha mx}$ のべき級数で表現されるものとする。この時、節点 α_m における節点力 $R_{\alpha mx}$ は次式となる。

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

$\gamma_{1mx}, \gamma_{2mx}, \gamma_{3mx}$ は、m番目の非線形ばねの線形ばね定数および二次、三次の非線形ばね定数である。これらのばねには非線形ヒステリシス減衰を導入し、 $\gamma_{1mx} = \bar{\gamma}_{1mx}(1 + j\eta_{1mx})$,

$$\gamma_{2mx} = \bar{\gamma}_{2mx}(1 + j\eta_{2mx}), \gamma_{3mx} = \bar{\gamma}_{3mx}(1 + j\eta_{3mx}),$$

...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。

$\eta_{1mx} \sim \eta_{3mx}$ を等しくすると非線形復元力に対応するヒステリシスを導入することになる。

この R_{cmx} と節点 α_m における変位 U_{cmx} との関係マトリックスで表記すると次式を得る。

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

$$\{R_m\} = \{R_{cmx}, R_{amy}, R_{cmz}\}^T,$$

$$\{U_{sm}\} = \{U_{cmx}, U_{amy}, U_{cmz}\}^T,$$

$$\{\bar{d}_m\} = \{\gamma_{2mx} U_{cmx}^2 + \gamma_{3mx} U_{cmx}^3 + \dots, 0, 0\}^T,$$

$[\bar{\gamma}_{1mx}]$ 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、過去に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」を計算できる。

B 介護用機械構造の離散化方程式

介護用機械構造は三次元有限要素で分割する。微小変形を仮定し線形三次元有限要素を用いる。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部材には、弾性率を複素弾性率 $E^* = \bar{E}(1 + j\eta_b)$ (\bar{E} : 弾性率の実部, η_b : 構造物の材料損失係数) とする。その結果、対応する要素剛性行列は複素行列となる。

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 α_m ($m=1, 2, \dots$) の節点力に加え全系の離散化方程式(3)を得る。

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

ただし、 $\{u\}$ は全系の変位ベクトル、 $[M]$ は質量行列、 $[K^*]$ は複素剛性行列、 $\{f\}$ は節点力ベクトルである。 $\{\hat{d}\}$ は $\{\bar{d}_m\}$ をまとめ全系のサイズに変換し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、自由度が大きく直接計算すると膨大な時間が必要となる。そこで、式(3)に線形固有振動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。

$$\tilde{b}_{i,u} + \eta_{tot}^{(i)} \omega_0^{(i)} \tilde{b}_{i,t} + (\omega_0^{(i)})^2 \tilde{b}_i + \sum_j \sum_k \tilde{D}_{ijk} \tilde{b}_j \tilde{b}_k \tilde{b}_l$$

$$+ \sum_j \sum_k \sum_l \tilde{E}_{ijkl} \tilde{b}_j \tilde{b}_k \tilde{b}_l - P_i = 0 \text{---式(10)}$$

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。

この開発したコードを援用し、介護者と被介護者にやさしい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。

4. 研究成果

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ための検討を行った。平成23、24年度は、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表現するために、非線形減衰、非線形復元力を考慮した複素ばねを提案して、有限要素法に組み込み、計算プログラムを開発した。開発したプログラムで各種の緩衝材や生体の衝撃応答を計算した。

計算に対応する実験結果を、研究分担者の藤井が提案する浮上質量法で図2のような実験システムで計測し得た。その例として、図3の中空断面を持つ粘弾性発泡緩衝材にアルミ製ブロックを衝突させ応答を計算し動的な復元力特性を求めた結果を図4に示す。変形

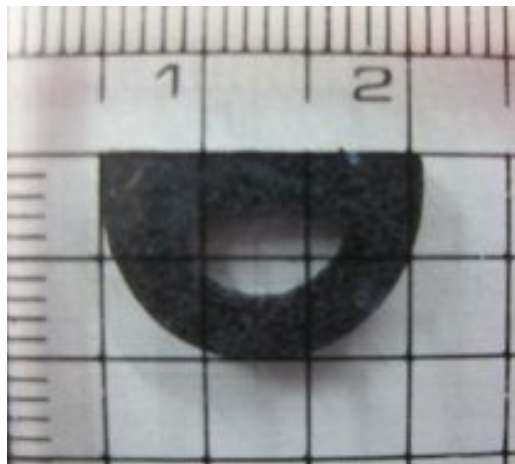


図3

の進行にともなう動的な復元力の変化は実験と計算で一致できた。この時の計算モデルを図5に示す。図4の縦軸は復元力、横軸は変位で、実線が実験値で破線が計算値である。赤色の線は浮上ブロックの初速度が小さい場合で、緑色の線は初速度が大きい場合である。この緩衝材は、発泡させた柔軟な高分子材料で作られており、そのヒステリシス減衰で衝撃を緩和する(図4の赤線)。さらに緩衝材の断面は中空となっており、衝撃荷重が大きい条件(図4の緑線)では、座屈して潰れ、

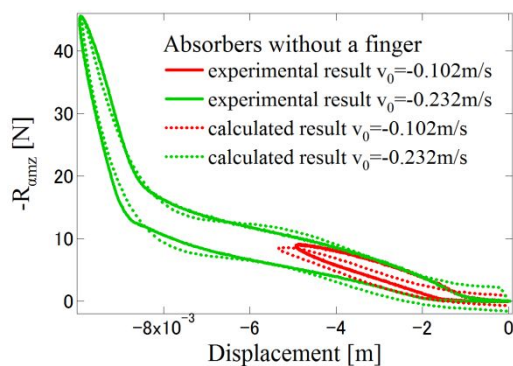


図 4

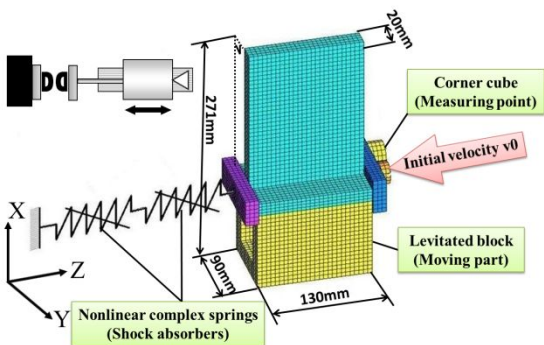


図 5

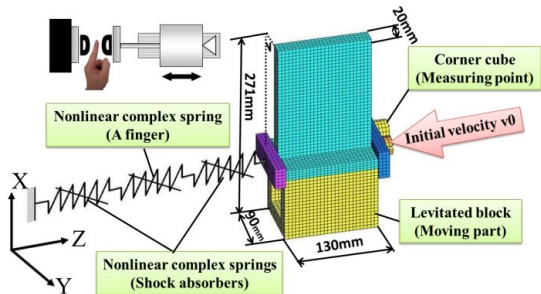


図 6

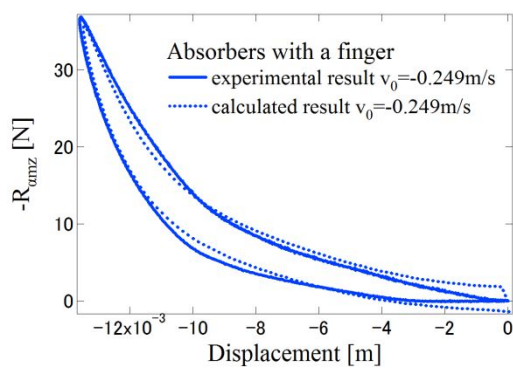


図 7

その時にエネルギーを吸収できる。ただし、中空部が潰れきると硬くなり衝撃の吸収性能が落ちる。この特性を、非線形ばね定数を複素数で表した非線形複素ばねで計算し表現できた。変形が増すとともに衝撃吸収が増え、

座屈により、さらに一段と衝撃吸収が増え、潰れた後に衝撃吸収が減少する特性が、提案する計算モデル、計算法、計算プログラムで表現できることがわかった。さらに座屈と非線形ヒステリシスを有する異なる種類の粘弾性構造について、衝撃応答の実験と数値計算を実施しモデル化、計算方法、計算コードの検証ができた。

なお、図2の2つの中空の粘弾性緩衝材の間にやわらかい指を入れると（計算モデル：図6）、図4の大きな入力条件での中空部が潰れ切った後の急峻な傾き（復元力 - 変位曲線の傾き）が、図6（実験結果と計算結果）のように減少し、変形が進んだ場合のヒステリシスが增大した。すなわち衝撃が緩和された。逆に間に硬い鋼製のパイプを挿入すると傾きがより急峻になり衝撃が増えた。

以上から、中空発泡粘弾性材を用いると軽衝突では、粘弾性体のヒステリシス効果と中空部の座屈により、エネルギー吸収できるが、中空部が潰れ切るまで入力が大きくなると、急激に衝撃が大きくなることがわかった。介護アームの表面保護材として、このような粘弾性中空緩衝材の適用を考えると、大きな入力に対しては、更なる検討が必要であることがわかった。具体的には介護アームの本体（心材）そのものの衝撃吸収特性の改善が必要と

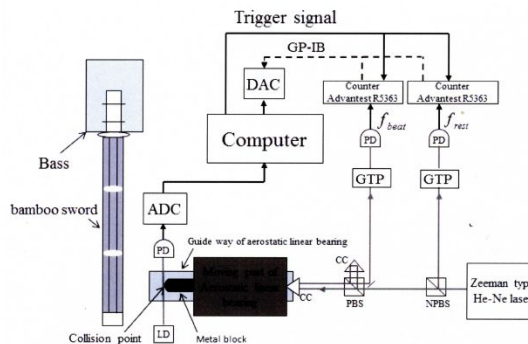


図 8

考えられる。

平成25年度は、それまでに得られた結果を吟味し、介護用機械を模擬したアームの衝突吸収性能の評価装置（図8）を作成した。試験体であるアームを片持ちで専用治具に固定し、浮上ブロックを衝突させる。運動する浮上ブロックに設置したコーナーキューブにレーザー光を照射し、光波干渉計を形成する。これよりドップラー効果を利用して、ブロックの運動速度を求め、積分して変位を算出する。さらに速度を微分して加速度を求め、浮上ブロックの質量を乗じることで力を計測する。力の時間変化や力 - 変位曲線から衝撃吸収特性を求める装置である。

その解析から高い衝撃吸収性能を有するアームを考案する。

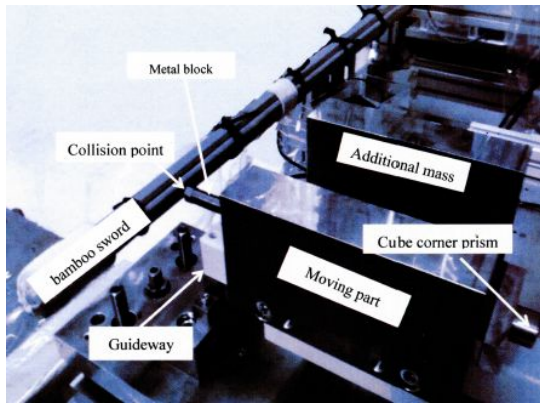


図 9

この装置を用いて、課題として残ったより大きな入力条件でも衝撃が吸収できるようなアームの心材の衝撃特性を検討した。

平成 23 年度，24 年度までの検討から，アームの心材を，柔軟にすれば衝撃吸収しやすくなることが容易にわかる（図 4 と図 6 の比較）。しかし，柔軟にしすぎると介護アームが構造として成立しなくなる。構造として成立し，衝撃吸収が可能なアームを考える。サーベイス剣道の竹刀に着目した。

剣道では面，胴，小手，突き の 4 種類の打突を竹刀を用いて 2 名で競う。これらの打突部位には通常，防具を付けて競技をするが，練習や試合において，防具装着部からはずれて，防具のない所にあたってしまうことがよくある。試合中などは打突の手加減はしない条件となるが，竹刀による打突では，そのような条件でも大きな怪我をしない。この竹刀の安全性については，剣道の長い歴史の中で，幼児，学生，成人，社会人，高齢者，男女を問わず多くの競技者によって，証明されている。他方で，剣道は 0.1 秒の打突の速さの差で勝敗を決する競技と言われているので，竹刀は，その条件での正確な打突が要求される構造となっている。すなわち，構造と衝撃吸収特性が両立していると考えられる。

竹刀の構造を考える。通常の竹刀は，断面は円形で中空となる。通常の竹の棒と異なるのは，中空円形断面を 4 等分し 1/4 円弧断面を持つ 4 本の竹の棒部品としている点である。これらを適度にゆるく束ねている。

図 8 のように竹刀をアームの衝撃特性評価装置にとりつけ，衝撃吸収特性を調べた。この時に，竹の断面を分割することの衝撃吸収効果を明らかにするための実験を行った。通常の竹刀を，図 9 の写真のように長手方向の位置 6 か所を，黒いひもで強く束ねた。これより 4 本の竹の棒部品の相対運動を強く拘束した。衝撃応答の計測結果を図 10 に記載した。図の縦軸は衝撃力，横軸は時間である。図中，「bind」と記載された曲線は，拘束された竹刀の結果であり，「Not bind」と記載された曲線は，通常のゆるく束ねた竹刀の結果である。両者を比較すると，拘束された竹刀「bind」の衝撃力の最大値は，通常の

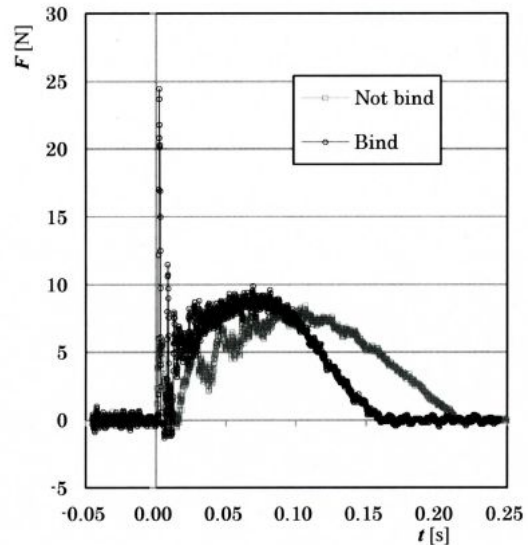


図 10

竹刀の最大値の約 3 倍大きいことがわかる。すなわち，竹刀の 4 本の棒部品を拘束して，相対運動を抑制すると，衝撃力が激増することがわかった。また，竹刀を分割することで，衝突時間が長くなっており，小さな力が長く作用することでエネルギーを吸収し，衝撃力の最大値を減らしている。竹を分割した通常の竹刀「Not bind」では，衝撃応答曲線中に，周期 0.02 秒程度の弾性波が観測されている。ビデオから棒部品間の相対運動が観察された。隣り合う棒部品は適度に接触しており，相対運動により摩擦が発生している。このように竹刀の 4 本の棒部品を適度にゆるく束ねると大きな衝撃が作用した場合に，棒部品間の相対運動による摩擦が発生し衝撃を吸



図 11

収できることがわかった。

以上の検討より，中空断面を持つ粘弾性発泡材を表面保護材とし，アーム心材を中空円形断面を分割した竹刀を模擬した介護用アーム（図 11 に例示）を提案する。

アームは中空円形断面を有する心材（円筒のアーム，材質は竹）を持ち，その表面に発泡させた柔軟な高分子材料で作られた中空断面を持つ緩衝材（表面保護材）を持たせる。変形が小さい場合は緩衝材のヒステリシス減衰で衝突エネルギーを熱エネルギーに変換し衝撃を緩和する。衝撃荷重がある程度大きい条件では，緩衝材中空部が座屈して潰れ

エネルギーを吸収する。さらに荷重が大きい場合は緩衝材中空部が潰れ切り衝撃が増え、心材で衝撃を吸収する。具体的には心材の円形断面を分割（例えば4つに等分割）し、円筒のアームを長手方向に割った構造としておく。長手方向に割った心材は円弧断面を持つ複数（例えば4つ）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。大きな衝撃が作用した場合に、部品アーム間の相対運動による摩擦を発生させ衝撃を吸収する。

さらに過大な入力があると、竹が折れることで、安全性を維持する。

このような介護者と被介護者にやさしい介護用機械のアームを提案できた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 2 件)

山口 誉夫、藤井 雄作、福島 亨、富田 徳久、田北 啓洋、永井 健一、丸山 真一、Damping Response Analysis for a Structure Connected with a Nonlinear Complex Spring and Application for a Finger Protected by Absorbers under Impact Forces、Mechanical Systems and Signal Processing、査読有、Vol.42、2014、88-96

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0888327013004299>

山口 誉夫、黒沢 良夫、丸山 真一、飛田 航宏、平野 雄大、横内 和樹、木原 慶大、須永 鉄平、Nonlinear and Chaotic Motions for a Shock absorbing Structure Supported by Nonlinear Springs with Hysteresis Using Fast FEA、World Academy of Science, Engineering and Technology、査読有、Vol.7、2013、1319-1330

<http://waset.org/publications/16483/non-linear-and-chaotic-motions-for-a-shock-absorbing-structure-supported-by-non-linear-springs-with-hysteresis-using-fast-fea>

〔学会発表〕(計 7 件)

富田 徳久、山口 誉夫、太田 卓、永井 健一、丸山 真一、非線形複素ばねを接続した弾性構造の高速 FEM 衝撃応答解析、日本機械学会 Dynamics and Design Conference 2013、2013 年 8 月 27 日、九州産業大学（福岡県福岡市）

山口 誉夫、黒沢 良夫、丸山 真一、飛田 航宏、平野 雄大、横内 和樹、木原 慶大、須永 鉄平、Nonlinear and Chaotic Motions for a Shock absorbing Structure Supported by Nonlinear Springs with Hysteresis Using Fast FEA、International Conference on Electrical, Computer, Electronics and

Communication Engineering (ICECECE 2013)、2013 年 6 月 21 日、イスタンブール（トルコ）

太田 卓、山口 誉夫、ゴ・クアン・ミン・カイ、藤井 雄作、座屈と非線形ヒステリシスを伴う粘弾性構造の過渡応答の数値解析、日本機械学会 Dynamics and Design Conference 2012、2012 年 9 月 21 日、慶應義塾大学（神奈川県横浜市）

山口 誉夫、富田 徳久、藤井 雄作、福島 亨、田北 啓洋、直列非線形複素ばねを有する弾性体の FEM 応答解析（緩衝材で保護された生体の衝撃応答）、日本機械学会 Dynamics and Design Conference 2012、2012 年 9 月 21 日、慶應義塾大学（神奈川県横浜市）

山口 誉夫、藤井 雄作、ゴ・クアン・ミン・カイ、太田 卓、Transient Response Analysis of a Viscoelastic Structure Including Buckling Phenomena and Nonlinear Hysteresis Using FEM with a Complex Nonlinear Spring, The 5th International Conference from Scientific Computing to Computational Engineering、2012 年 7 月 4 日、アテネ（ギリシャ）

ゴ・クアン・ミン・カイ、山口 誉夫、藤井 雄作、福島 亨、永井 健一、丸山 真一、非線形複素ばねを有する構造の衝撃応答解析（緩衝材で保護された手指への応用）、日本機械学会 Dynamics and Design Conference 2011、2011 年 9 月 8 日、高知工科大学（高知県香美市）

山口 誉夫、藤井 雄作、福島 亨、永井 健一、丸山 真一、Damping Response Analysis for Structure Connected with a Nonlinear Complex Spring and Application for a Finger Protected by Absorbers under Impact Forces、6th International Conference Acoustical and Vibratory Surveillance Methods and Diagnostic Techniques (Surveillance 6)、2011 年 10 月 26 日、コンピエーニュ（フランス）

〔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