

令和 5 年 6 月 9 日現在

機関番号：13301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04224

研究課題名(和文) 外骨格生物の形態に基づくバイオンニックデザイン手法の開発とその応用

研究課題名(英文) Development of bionic design method based on exoskeleton form and its application

研究代表者

坂本 二郎 (Sakamoto, Jiro)

金沢大学・設計製造技術研究所・教授

研究者番号：20205769

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、外骨格を持つ生物に着目し、外骨格形態に基づいて機械の筐体や板殻構造の設計を創出する方法の開発を目的とした。そのため、外骨格構造の力学的最適性について検討し、その特徴を反映した機械構造設計手法を開発して、機械構造に応用しその有効性を検証した。具体的には、甲殻類等の外骨格を対象にCT画像から力学解析モデルを作成してその最適性を分析した。また、様々な外骨格モデルの形態合成比率を設計変数として軽量化と強度向上を目的とした最適化の手法を開発し、グリップ構造の設計に応用して有効性を検討した。部品組立が前提の従来の機械設計とは異なる生物的連続体による独創的な機械設計手法を確立した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で提案した多種多様な外骨格モデルを合成して設計する方法は、単純に1つの生物を模倣するのとは異なり、目的的に最適なデザインの創出が可能で、従来の研究と比較して独自性と創造性に優れ、学術的意義は高い。2016から2018年度の科研費基盤(C)(一般)の研究では、様々な動物の骨形状を機械構造の軽量高強度化を目的とする最適設計に応用しその有効性を確認した。さらに本研究では、様々な動物の外骨格形状を応用した最適設計手法を確立した。骨と外骨格の両方の形状を応用した最適設計の手法が得られたことで適用範囲が広がり、機械や建設、建築などの様々な分野への構造設計にも応用される可能性から社会的意義も高い。

研究成果の概要(英文)：In this study, we focused on exoskeletal creatures and aimed to develop a method to create the design of machine housing and shell structure based on exoskeleton form. Therefore, (1) we examined the mechanical optimality of the exoskeleton structure, (2) developed a structure design method that reflects its characteristics, and (3) applied it to the mechanical structure and verified its effectiveness. Specifically, we created a mechanical analysis model from CT images for exoskeletons such as crustaceans and analyzed their optimality. In addition, we developed an optimization method for the purpose of reducing weight and improving strength with the morphological synthesis ratio of various exoskeleton models as design variables, and applied it to the design of the grip structure to examine the effectiveness. We have established an original mechanical design method using biological continuums that is different from conventional mechanical design, which is premised on parts assembly.

研究分野：バイオメカニクス, 設計工学, 計算力学

キーワード：生体力学 バイオ材料力学 最適設計 計算力学 バイオミメティクス 外骨格 データベース

1. 研究開始当初の背景

優れた最適性を有する生物のデザインが、機械の構造・部材への応用を期待されつつも成功しないのは、そのスケールや負荷条件の違いにより直接的な模倣が困難なためとである。それ以外にも、機械分野の設計技術者がアクセスできる生物の設計図(形状や寸法データ等)が存在しないことや、生物を模した複雑構造の製造が切削や変形加工などの従来の製造技術では困難といった問題点がある(図1)。これらの問題を解決するため、申請者は設計技術者がアクセスできて所望の生物の三次元モデルを得られる生物形態データベースの構築と、サイズに依存せず生物形状のデザインが活用できる最適設計の手法を提案し開発してきた。現在までに、動物の骨を対象にCT画像撮影を行い、25種類の動物における約200個の骨から形態データを取得して骨形態のデータベースを構築した[1]。データベースと最適設計手法を用いて、軽量かつ衝撃吸収特性に優れた杖の設計と試作を行い、この方法の有効性を確認している[2]。しかし、実際にこの方法を様々な機械構造・部材の設計に応用しようとすると、骨のデータだけでは軸状や梁状の構造には適用できても、より複雑な管体や容器等の板殻構造に対して適用が不可能で、機械設計用の生物形態データベースとしても極めて不十分である。

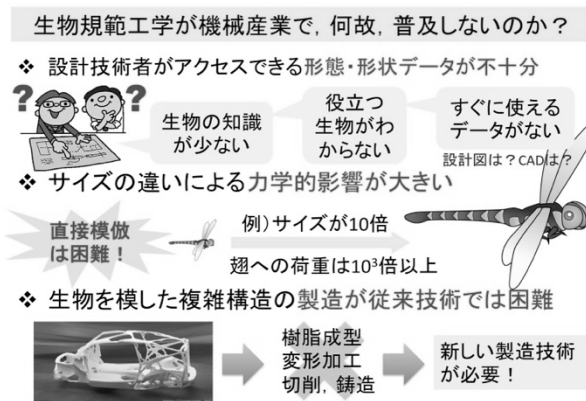


図1 機械産業分野における生物規範工学の問題点

2. 研究の目的

本研究では、外骨格を持つ生物に注目し、外骨格形態に基づいて機械の管体や板殻構造の設計を創出する方法を開発する(図2)。外骨格は外敵からの防御だけでなく、飛翔や運動の支持など力学的に重要な役割を担っている。多様な力学的環境下で適応進化したと考えられる外骨格生物であるが、その外骨格形態を機械構造や構造部材の設計に応用する研究開発は希である。本研究では、生物の外骨格構造がその環境に対して力学的な最適性を持つことを明らかにし、その最適性を活用して機械構造や構造部材の革新的設計の可能性を示す。研究目的は以下の三つである。

- ① 複数種の外骨格生物において、外骨格構造の力学的な最適性を明らかにする。
 - ② 外骨格の力学的最適性を反映した機械設計を実現できる設計手法を開発する。
 - ③ 開発した手法を具体的な機械構造や構造部材の設計に応用して、その有効性を検証する。
- 外骨格形態に基づく機械設計の手法が確立できれば、機械製品において独創的かつ革新的なデザインの創出が期待できる。

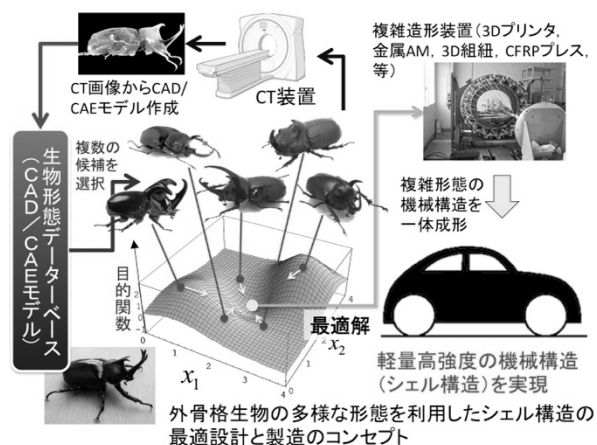


図2 本研究で提案する外骨格形態に基づいた機械構造の最適設計手法の概念図

3. 研究の方法

本研究では (a) 甲虫類の角や顎及び(b) カニのハサミを研究対象の外骨格構造として取り上げた。これらは体重に対する最大発揮力の比率が高く、特にカニの最大発揮力比率は生物界最大で、ヒトが 10 程度なのに対しカニでは 100 を越える[3]。上記(a) (b)を研究対象とし以下の方法で研究を行う。

- ① 力学的な最適性の分析： 対象となる外骨格を入手してCT画像の撮影を行い、その画像に基づき力学解析用の三次元有限要素モデルを作成する。これに仮定した境界条件を与えて有限要素解析を行い、外骨格の強度や応力分布もしくはその変動等を求め、力学的な最適性を分析する。得られたデータは生物形態データベースに追加する。
- ② 外骨格の特性を反映した設計手法の開発： ①で作成した多様な外骨格モデルに対し、それらを合成して新たな形状が生成できるように、各モデルの有限要素メッシュを同一パターンに統一する処理(メッシュマッチング)を施す。メッシュマッチングには非剛体レジストレーション

ンの方法を利用した。メッシュマッピングされた各モデルの合成比率を設計変数として取り扱い、ベシスベクトル法を用いて外骨格形状に基づく最適設計を行う。

③ 機械構造・構造部材設計への応用： 上記①で得られた解析モデルと②で開発した設計手法を用い、実用的な機械構造や構造部材の設計に応用する。(a)甲虫類の角・顎は軽量高強度なフックや梁構造の設計に、(b)カニのハサミは軽量高強度なグリップ構造の設計に応用できる。得られた機械構造や構造部材に対しては、力学的な観点からそのデザインの有効性を検討する。

4. 研究成果

(1) 力学的な最適性の分析

μ CTによりノコギリクワガタのオスの頭部を撮影し、そのCT画像から大顎形状のCADモデルを作成した。それを基にして有限要素解析ソフトウェアMSC.Marcを用い、長さ300mmの片持ち曲りばり構造のモデルを作成した(図3)。比較のため同等の長さと同体積を持つ単純形状のパイプモデルを作成し、両者に対し同じ荷重条件下で力学解析を行い単純なパイプモデルとクワガタ大顎モデルとの違いを検討した。各モデルにおける引張主応力分布を図4に示す。双方とも曲率の最も大きい部分に最も大きな引張主応力が発生しており、クワガタ大顎モデルにおける最大値は、パイプモデルの最大値の約40%であった。下向きの荷重条件での応力分布について、パイプモデルでは高い応力が狭い範囲に集中しているのに対し、クワガタ大顎モデルではそれよりも低い応力が広範囲に分布していることから、クワガタ大顎の形状がより力を分散させ易く曲げ荷重に対して適していると考えられる。

カニのハサミについては、異なる特徴を持つ二種類のカニのハサミに対し形状と強度の関係を調べ力学的適応について検討した。アカテガニは陸生でハサミ先端を用いて様々なモノを把持し、ズワイガニは深海生でハサミは比較的柔らかいものを把持する。 μ CTで撮影した画像から両者の有限要素モデルを作成し、同等な荷重条件となるようスケールリングして解析を行った(図5)。引張主応力の最大値を比較すると、シェル板厚を同じにした場合はアカテガニの方が応力は低くなった。アカテガニのハサミは、比較的軽くて強い形状を有し、陸生の様々な用途に適応している可能性が示唆された。

(2) 外骨格の特性を反映した設計手法の開発

以下では、カニのハサミ形状を用いた最適設計手法について説明する。最適形状を探索するためベシスベクトル法(BV法)による形状合成を行った。BV法では基本形状を \mathbf{v}_0 とし重み係数 x_i ($i=1\sim N$)により重みづけされた他の形状 \mathbf{v}_i を次式で合成して新形状 \mathbf{v} を創成する。

$$\mathbf{v} = \mathbf{v}_0 + \sum_{i=1}^N x_i (\mathbf{v}_i - \mathbf{v}_0) \quad (1)$$

ここで、 N は使用する形状の数である。有限要素モデルにBV法を適用する場合、合成する全てのモデルの要素分割と節点番号の対応を同じにする必要がある。そこで点群の非剛体レジストレーションを利用した。基本となる固定点群データと移動点群データの位置合わせを行うことで、固定点群モデルと同じ形状の移動点群モデルを作成する。このような非剛体レジストレーションを行うことで、異なる形状のカニのハサミに対し有限要素モデルのメッシュパターンを同化(メッシュマッピング)しBV法でそれらの形状を合成する。カニのハサミの指節において、

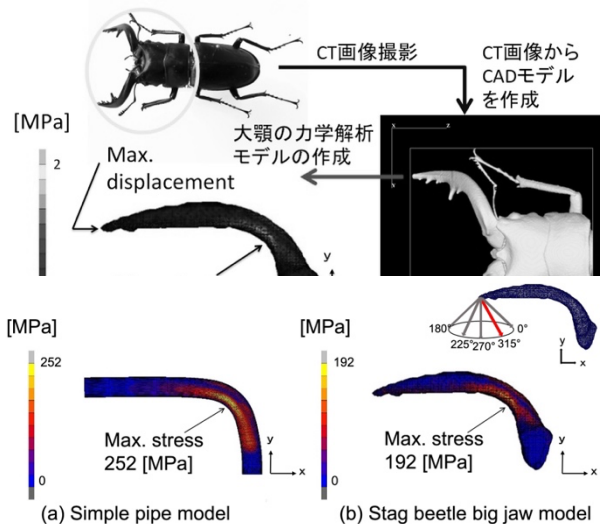


図4 先端に集中荷重を受ける片持ち曲りばり構造の応力分布の比較：(a)単純パイプモデル、(b)クワガタ大顎モデル

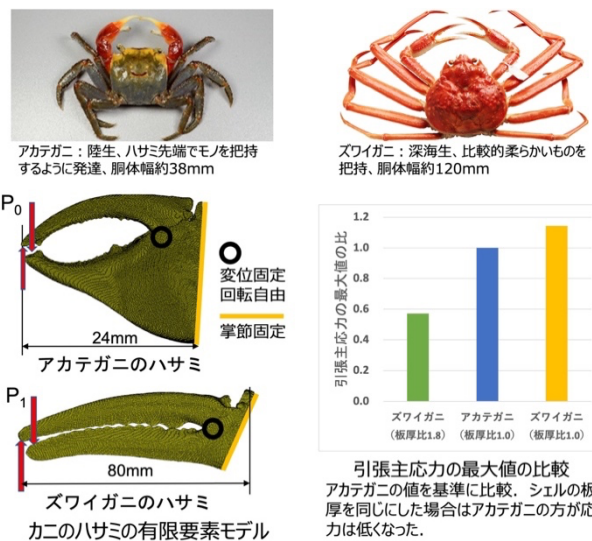


図5 アカテガニとズワイガニのハサミの有限要素モデルと応力解析の比較

アカテガニを固定点群モデル、ズワイガニを移動点群モデルとして非剛体レジストレーションによりメッシュマッチングした例を図6に示す。CTスキャンによってカニのハサミの外形を忠実に再現したCTモデルを点群データに変換する。レジストレーションを終えた点群モデルに、移動点群のCTモデルが持っていた有限要素を適応することで、BV法で用いる有限要素モデルを作成できる。なお、カニのハサミの長さは種類によって異なるためスケールリングにより長軸方向の長さを統一した。すべてのモデルは中空であり、材料特性もすべてのモデルでグリッパの作成に用いるCFRPの値に統一した。

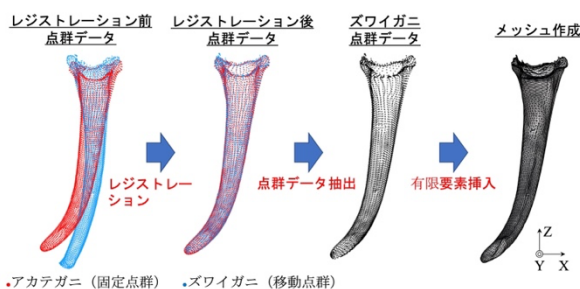


図6 非剛体レジストレーションを用いたメッシュマッチングの方法：アカテガニとズワイガニのハサミの指節モデルに適用した例。

$$v = v_0 + x_1(v_1 - v_0) + x_2(v_2 - v_0) \quad (0 \leq x_i \leq 1)$$

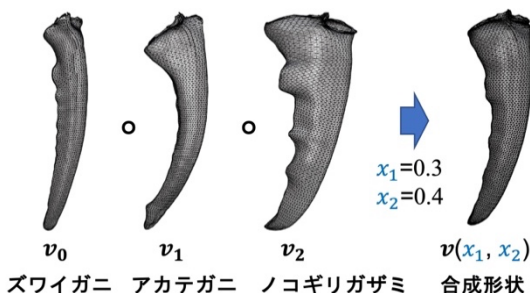


図7 カニのハサミ指節部の形状に基づきベシスベクトル法で作成した合形状のモデル。ズワイガニ、アカテガニ、ノコギリガザミ指節部の形状を用いて新規形状を合成した。

BV法を用いて3つの異なる形状のカニのハサミの指節モデルから、新しい合成モデルの形状を作成する例を図7に示す。ここでは、ズワイガニのものを基本形状 v_0 とし、アカテガニとノコギリガザミのものをそれぞれBV形状の v_1, v_2 とした。また、この場合はモデル形状を合成させる際の重み係数 x_1, x_2 が最適設計における設計変数となる。ズワイガニの指節は表面積が小さく比較的真っすぐな形状であるのに対し、アカテガニの指節は大きく湾曲した形状を持ち、ノコギリガザミの指節は表面積が大きく応力のばらつきが小さいといった特徴を持つ。BV法により新たに作られた指節モデルは、設計変数の大きさに応じて基本形状及びBV形状の特徴を反映した形状となる。ベースとなる基本形状やBV形状がそれぞれの力学環境に対して最適性を持つと仮定すると、それらを合成して作られる設計はその最適性を継承していると考えられ、最適化においてもより効率的に優れた解が得られることが期待できる。

本研究で用いた形状最適化の方法について以下に述べる。一般的な制約なし多目的最適化問題は以下のように定式化される。

$$f_i(x_1, x_2, \dots, x_N) \rightarrow \min \quad (i=1, \dots, m) \quad (2)$$

ここで、 f_i は目的関数、 m はその数、 x_i は設計変数、 N はその数を表す。BV法を用いて形状最適化を行う場合は、設計変数としてベシスベクトルの重み係数を用いれば良い。その場合、目的関数 f_i は合形状モデルで得られる指標で、例えば構造設計問題では、応力や重量（もしくは体積）が目的関数となる。応力は合形状モデルに対し有限要素解析を行い求めることができる。応力と体積を多目的最適化の目的関数とする場合は、両者にトレードオフの関係があるため、最適解の探索はパレートフロントを求めることに帰着する。なお、本研究では逐次近似最適化により最適解を求める。逐次近似最適化は、段階的に応答曲面の精度を向上させていく手法で、少ない計算回数で高い精度の関数の応答曲面を得ることができる。

(3) 機械構造・構造部材設計への応用

カニのハサミ形状を応用した製品として産業用電動グリッパ先端の爪を考える。モデルの長さを100mmに統一し、グリッパがワークを把持する場面を想定した解析条件を設定した。解析条件を図8に示す。ハサミの筋付着部を完全固

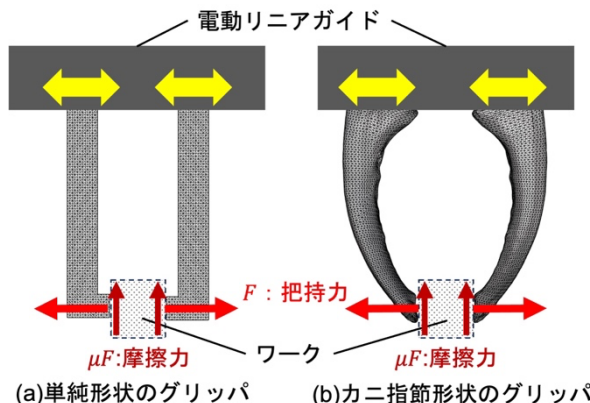


図8 カニのハサミの指節形状を応用したグリッパの設計問題：(a)比較のための単純形状のグリッパモデル、(b)カニ指節形状のグリッパモデル

定し、荷重条件としてハサミ先端に水平方向、垂直方向に荷重を与え、ハサミに生じる最大主応力を計算する。この最大主応力をもとに、ハサミに発生する応力のばらつき S を求める。 S は次式で表される。

$$S = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\sigma_i - \bar{\sigma})^2} \quad (3)$$

ここで、 n はハサミモデルの節点数であり、 σ_i は節点にかかる最大主応力、 $\bar{\sigma}$ は応力が発生した節点での標本平均である。このばらつきを小さくすることで特定部への応力集中を防ぐことができ、グリッパの強度を高めることが出来る。

図7に示したBV法の重み係数 x_1, x_2 を設計変数とし、目的関数はモデルの表面積と応力のばらつき S の2つとして、多目的最適化を行った。パレートフロントを図9に示す。すべてのパレート最適解で応力のばらつきは基本

形状であるズワイガニよりも小さくなり、表面積は最大であったノコギリガザミよりも小さくなった。3つの異なるカニのハサミモデルを合成することで、表面積と応力のばらつきを最小限に抑えられる新形状が得られ、提案された最適設計法の有効性が明らかになった。パレート最適解でのアカテガニとノコギリガザミのハサミモデルの重み係数(x_1, x_2)はそれぞれ0.65~0.75と0.36~0.46となっており、最適形状は特定のハサミモデルによって大きく影響されていないと考えられる。パレート最適解の内2つのモデル(opt1, opt2)を同表面積の先端で把持する一般的なグリッパモデルと比較した結果を図10に示す。いずれの最適モデルにおいても、グリッパモデルと比較して応力のばらつきが小さくなっていることが分かる。一般的なグリッパはワークを把持するとき、根元付近に大きな応力が発生するが、最適形状は湾曲部の変形で荷重を吸収し特定部への応力発生を軽減していると考えられる。これより、カニのハサミの形状を用いたハサミモデルは、一般的なグリッパモデルよりも応力のばらつきが軽減された優れた形状であることが明らかになった。

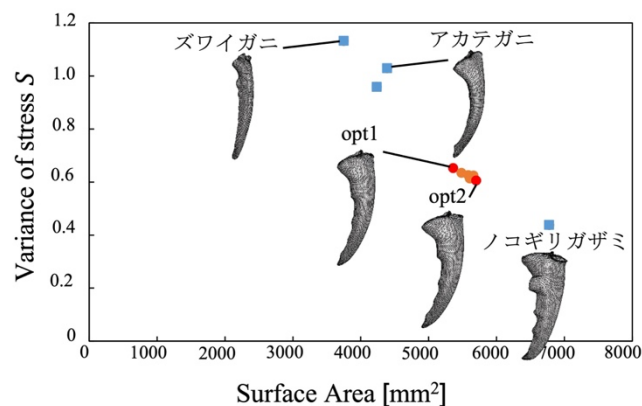


図9 カニのハサミ形状を利用したグリッパ構造の多目的最適化問題の目的空間における各種の設計とパレート最適設計(opt1~opt2)の位置。

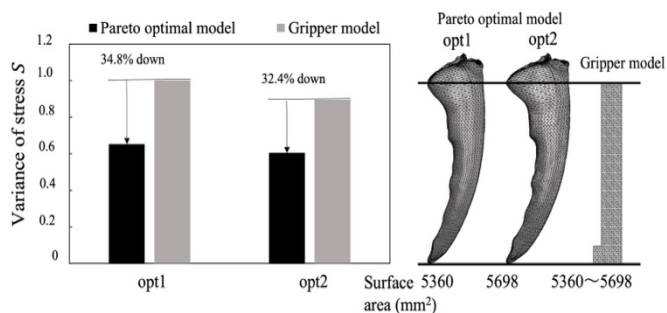


図10 同等な表面積(体積)を持つ単純な形状のグリッパモデルとパレート最適設計のグリッパモデル(opt1,opt2)との目的関数(応力のばらつき)の比較

(4) 研究成果のまとめ

- ① 外骨格生物であるノコギリクワガタとカニにおいて外骨格構造である大顎とハサミの力学的な最適性を検討し、それぞれ力学的環境に適した最適性が示唆された。
- ② CTを用いた有限要素モデリング、非剛体レジストレーションによるメッシュマッチング、及びベースベクトル法による形状合成を用いて、外骨格の力学的最適性を反映した設計手法が得られた。
- ③ 開発した手法を産業用グリッパの設計に応用して、その有効性を明らかにした。本研究で開発した、外骨格形態に基づく機械設計の手法を用いれば、機械製品において外骨格生物の力学的最適性を活かした独創的かつ革新的なデザインの創出が期待できる。

参考文献

- [1] 坂本二郎(代表), 科学研究費基盤研究(C)(一般), 機械構造のバイオニックデザインのための生物形態データベース構築とその応用, 2016~2018年度。
- [2] SAKAMOTO, J., CHIHARA, T., et al, J. Biomech. Sci. Engineering, 10. 1299/jbse. 20-00402, 2020.
- [3] OKA, S., et al, Research Article, PLOS ONE, 2016.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 CHIHARA Takanori, SEKINE Kohei, TANAKA Takahiro, SAKAMOTO Jiro, KAWANO Kenji, KAWAGOE Takashi	4. 巻 87
2. 論文標題 An experimental and simulation-based evaluation of the effect of seat angle on muscle load for perching	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Transactions of the JSME (in Japanese)	6. 最初と最後の頁 21-00094
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1299/transjsme.21-00094	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 SAKAMOTO Jiro, CHIHARA Takanori, AZUMA Tomonari, KINARI Toshiyasu, KITAYAMA Satoshi, KIMIZU Mitsugu, HASEBE Hiroyuki, MORI Daisuke	4. 巻 16
2. 論文標題 Bioinspired cane design and production using braiding technology	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Biomechanical Science and Engineering	6. 最初と最後の頁 20-00402
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1299/jbse.20-00402	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 ITO Makoto, ENDO Kaoru, SAKAMOTO Jiro	4. 巻 87
2. 論文標題 Proposal of a computational modelling method of curved origami structures based on finite element analysis models with truss elements for creases modelling	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Transactions of the JSME (in Japanese)	6. 最初と最後の頁 20-00417
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1299/transjsme.20-00417	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計10件（うち招待講演 0件／うち国際学会 3件）

1. 発表者名 鈴木 瞳, 江面篤志, 茅原崇徳, 坂本二郎
2. 発表標題 CFRP成形サイクルタイム短縮のための金型内水路のトポロジー最適化
3. 学会等名 日本設計工学会北陸支部 令和4年度 研究発表講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Ezura, A , Suzuki, H , Abe, S , Furumoto, T , Sakamoto, J
2. 発表標題 Overhang shape in metal addition manufacturing of molds with topology-optimized cooling channels
3. 学会等名 Asian Congress of Structural and Multidisciplinary Optimization (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Jiro Sakamoto, Takanori Chihara
2. 発表標題 A study on the shape of crab scissors and consideration of its mechanical adaptability
3. 学会等名 The 11th Asian-Pacific Conference on Biomechanics (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kyosuke Morita, Jiro Sakamoto, Takanori Chihara
2. 発表標題 A Study on the mechanical effect of ligaments not over joints in the giraffe cervical vertebrae
3. 学会等名 The 11th Asian-Pacific Conference on Biomechanics (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 竹内寛人, 坂本二郎, 茅原崇徳, 江面篤志
2. 発表標題 成長適応型トポロジー最適化の特徴を活かした最適設計手法の検討
3. 学会等名 日本設計工学会 2021年度秋季大会 研究発表講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 坂本二郎, 茅原崇徳
2. 発表標題 カニのハサミの形状とその力学的適応性に関する研究
3. 学会等名 日本機械学会 第33回バイオエンジニアリング講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 森田 恭輔, 三浦 桂, 坂本 二郎, 茅原 崇徳
2. 発表標題 キリン頸椎の「関節をまたがない」靭帯がもたらす力学的影響について
3. 学会等名 日本機械学会 第33回バイオエンジニアリング講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 森田恭輔, 三浦桂, 坂本二郎, 茅原崇徳
2. 発表標題 キリン頸椎における関節を跨がない靭帯の力学的効果の検討
3. 学会等名 日本機械学会 北陸信越支部 第50回学生員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 東智就, 坂本二郎, 茅原崇徳, 北山哲士, 喜成年泰
2. 発表標題 動物の骨形状を規範として設計した杖の衝撃力吸収性の評価
3. 学会等名 日本機械学会 第31回バイオフィロンティア講演会
4. 発表年 2020年～2021年

1. 発表者名 三浦桂, 坂本二郎, 北山哲士, 喜成年泰, 茅原崇徳
2. 発表標題 キリン頸部の筋付着位置が筋力に及ぼす影響について
3. 学会等名 日本機械学会 第31回バイオフィロントニア講演会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p><受賞等></p> <p>2021 Papers of the Year Award, Sakamoto J, Chihara T, Azuma T, Kinari T, Kitayama S, Kimizu M, Hasebe H, Mori D, Bioinspired cane design and production using braiding technology, Journal of Biomechanical Science and Engineering, 2022.7.</p> <p>日本設計工学会北陸支部 令和4年度 奨励賞, 鈴木 瞳, 江面篤志, 茅原崇徳, 坂本二郎, CFRP成形サイクルタイム短縮のための金型内水路のトポロジー最適化, 2022.6.25</p>

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	北山 哲士 (Kitayama Satoshi) (90339698)	金沢大学・設計製造技術研究所・教授 (13301)	
研究分担者	茅原 崇徳 (Chihara Takanori) (00582967)	金沢大学・フロンティア工学系・助教 (13301)	
研究分担者	伊藤 誠 (Ito Makoto) (30845160)	金沢大学・機械工学系・助教 (13301)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------