

令和元年5月24日現在

機関番号：13301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K05972

研究課題名(和文) 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

研究課題名(英文) Development of bio-form database for bionic design of mechanical structure and its application

研究代表者

坂本 二郎 (SAKAMOTO, Jiro)

金沢大学・新学術創成研究機構・教授

研究者番号：20205769

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、機械技術者が新しい設計の発想を得るのに役立つ、生物の3次元形状データからなるデータベースを作成した。様々な動物の骨をCTスキャンして、25種の動物における約200点の骨の3次元形状データを作成した。機械構造の設計では、強度や剛性などの力学的な仕様を満足することが要求される。本研究ではデータベースから選んだ生物の3次元形状を単に設計者に示すだけでなく、複数の生物形状を合成して機械構造の力学的仕様に適した最適設計を得る手法も開発した。開発した手法を用いて、ムササビの尺骨(腕の骨)が衝撃荷重を緩和するのに優れた形状であることを示し、杖の最適設計に応用して手法の有効性を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

構造の設計を目的とした生物の3次元形状モデルのデータベースは、生物学の分野においても例が無く、新たな観点から生物に関するデータベースを構築した点で学術的価値は高い。生物に詳しくない機械分野の設計技術者であっても、データベースを通じ生物の3次元形状を視覚的に捉えることができ、設計ツールであるCADやCAEに読み込むことができる。そのため、機械設計において新しい設計アイデアを生み出す有効なツールとして普及することが期待できる。また、生物の3次元形状を合成して形状最適化する手法で、仕様に応じた設計もできるようになり、機械産業におけるバイオニックデザインの可能性を広げた社会的意義は大きい。

研究成果の概要(英文)：In this study, we created a database consisting of three-dimensional shape data of living things to help mechanical engineers to get new design idea. CT scans of bones of various animals were used to generate three-dimensional shape data of about 200 bones in 25 animals. In mechanical design, it is also required to satisfy mechanical specifications such as strength and stiffness. In this research, we not only provide the mechanical engineers the three-dimensional shape of the bone selected from the database, but also developed a method to synthesize multiple bone shapes and obtain an optimal design suitable for the mechanical specification of the structure. Using the developed method, it was shown that the ulna (arm's bone) of the flying squirrel was fine shape to absorb the impact load, and the effectiveness of the method was clarified by applying it to the optimal design of the cane.

研究分野：バイオメカニクス

キーワード：生体力学 バイオ材料力学 最適設計 計算力学 データベース

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

(1) 機械構造設計における生体模倣設計の課題 動物や植物、生態系から有効と思われる着想を得て、工学設計へ結びつける試みは古くから行われている。近年ではバイオミメティクス(生物模倣)やバイオインスピレーション(生物からの着想)への期待が高まっており、実際に、蓮の葉の撥水性から着想を得た防水剤や蛾の眼を模倣した無反射フィルム等の革新的な製品も生まれている。しかし、これらの成功例の多くは生物のマイクロ構造を模倣する材料開発技術が中心で、機械工学における構造設計等のマクロな視点から生物の優れたデザインが活かされた例は希である。生物は高い適応性と順応性、さらには外乱からの影響を受けにくいロバスト性を有しており、その生物のデザインが機械の構造設計への応用を期待されつつも未だ成功しないのは、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であった。

(2) 生物形態データベースの必要性 申請者の研究グループでは、長年、動植物の形態から革新的設計への着想を得るバイオニックデザインに関する研究を行ってきた。これら研究を進めるうちに、動物の筋骨格系を機械設計のアイデアとして活かすには、設計技術者の新しい発想を促進するための多種多様な生物の構造データを効果的に提示する仕組み(データベースの構築とそれに基づく設計提案システム)が必要との考えに至った。そのようなデータベースが実現すれば、生物に詳しくない設計技術者でも、動物の筋骨格系を機械設計のアイデアとして活かすことができる。類似のデータベースとして、京都大学霊長類研究所では所内で撮影したCT画像に基づく霊長類骨格の三次元モデルを研究用のデータベースとして公開している(<http://dmm.pri.kyoto-u.ac.jp/dmm/WebGallery/>)。しかし、構造の設計を目的とし、その強度等の力学的情報とも関連づけて構築された生物形態データベースは世界に例が無く、独創的かつ画期的なものと言える。

2. 研究の目的

(1) 生物形態データベースの構築 動物の筋骨格系は、工業分野の設計者にとっては疎遠なものであり、それに設計の発想を求めることは希である。生物に疎遠な設計者に対してもわかりやすく、しかも創造力を喚起するような視覚効果を伴った生物形態データベースを構築することが、優れた設計ツールとして普及するための重要な課題である。また、様々な設計者の上流設計における発想の源となる生物形態を提示できるように、できるだけ多くの多種多様な生物の三次元形態をデータベースに準備する必要がある。本研究では、様々な動植物の資料を持つ自然史博物館や資料館の協力を仰ぎながら、CT画像に基づく三次元形態モデリング技術を駆使して、多数の動物の筋骨格データからなるデータベースを構築する。

(2) 生物形態を利用した構造の最適設計手法の開発 生物形態に基づく設計を実現するには、設計者が求める構造に対して素早く適切な生物形態データを提示できる手法が必要である。機械構造の設計においては、与えられた荷重や境界条件の下で所定の機能を満足することが設計仕様として与えられる。しかし、その仕様に適した生物形態を見つけ出すことは困難で、そのことが設計の応用への妨げとなっている。これを解決するため、本研究では生物形態を単にデータとして取り込むだけでなく、複数の生物形態データに基づき、それらの合成から機械構造の仕様に適した最適設計を得る手法を開発する。

3. 研究の方法

(1) 生物形態データベースの作成方法 CT画像に基づく三次元形態モデリング技術を駆使して、動物の骨形態モデルからなるデータベースを作成する方法について述べる。特に、①CTスキャンのデータに基づき、骨形態を忠実に反映した力学解析が可能なCT-有限要素モデルの作成と、②メッシュマッチング法(MM法)を用いてそれを単純化したMMモデルの作成方法について説明する。

①CT-有限要素モデル 骨モデルの作成に際し、様々な骨格標本を石川県立自然史資料館と白山自然保護センターから借り受けた。骨格標本を個々の骨に分解し、CTスキャンにより、その断層像を撮影した。CTスキャンには、全身用CTスキャナ「SOMATOM Emotion (SIEMENS)」と卓上型マイクロフォーカスX線CTシステム

「inspeXio SMX-90CT Plus (島津製作所)」を使用した。各骨に対しCTスキャンデータから骨強度評価用ソフトウェア「Mechanical Finder ((株)計算力学研究センター)」を用いて有限要素モデルを作成した。以下では、これをCT-有限要素モデル(CT-FEモデル)と呼ぶ。図1にCT-FEモデルの作成過程の一例を示す。

②MMモデル メッシュマッチング法(Mesh Matching Method: MM法)とは、形状データだけのモデルAに対し、有限要素モデルBのメッシュをその形状に一致させることで、Aの形状を持ちながらBと同じメッシュを持つモデルを作成する方法である。この場合のAを標的モデル、

An example of biological form modeling for bio-form database

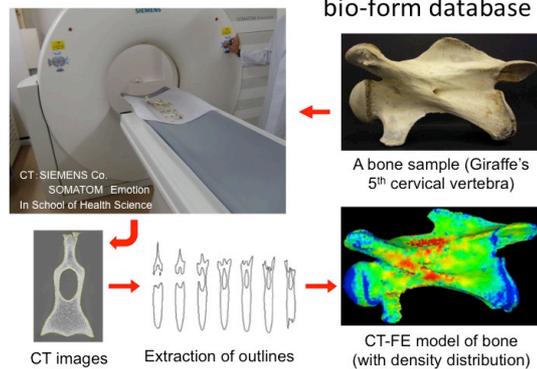


図1 骨からCT画像を取得してCT-有限要素モデルを作成する過程(キリン頸椎の例)

B を参照モデルと呼ぶ。標的モデルは骨体表面の点群で表現され、参照モデルは汎用の有限要素ソフトウェアで使えることを前提とし要素分割された有限要素モデルとして与えられる。メッシュマッチング法では、参照モデルを剛体移動して標的モデルと向きや基準点を合わせ、対応する特徴点同士を一致させるように局所変形し、最後に座標変換により特徴点以外の大域的な表面形状を一致させる。メッシュマッチング法により、形状が異なる様々な骨に対し同位相のメッシュを持つ有限要素モデルを作ることができる。これによって、有限要素解析の計算効率化ができるだけでなく、次節で説明するベシスベクトル法を用いた形状合成と形状最適化が可能になる。

(2) 生物形態を利用した構造の最適設計手法 生物形態データベースに登録した骨の MM モデルを基に、機械構造の仕様に適した最適設計を得る手法について説明する。ここでは、①複数の MM モデルを合成して新たな形状のモデルを作成するベシスベクトル法と、②それを用いた形状最適化の方法について述べる。

①ベシスベクトル法による有限要素モデルの形状合成 ベシスベクトル法(以下 BV 法と呼ぶ)とは下記の式で表され、基本形状ベクトル B_0 と重み係数 x_i ($i=1\sim N$) によって重みづけされたベシスベクトル B_i を合成することで、新形状ベクトル B を創成する方法である。 N は形状合成に用いるベシスベクトルの数を示す。

$$B = B_0 + \sum_{i=1}^N x_i (B_i - B_0)$$

B_0, B_i, B は各有限要素モデルのすべての節点座標からなるベクトルである。すべてのモデルで同じメッシュを持つ MM モデルを用いれば、上式により形状合成が可能となる。重み係数 x_i を 0~1 の範囲で変えることにより、それらのモデルの形状から内挿される任意のモデル形状を得ることができる。図 2 に、データベースにある 6 つの骨の MM モデルから BV 法で新たな形状のモデルを作成し、はり構造の最適設計に適用する例を示す。ネコの尺骨が基本形状、他の 5 つの動物の長骨がベシスベクトルとなっている。

②形状最適化 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。

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

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 は合成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。応力は合成モデルに対し有限要素解析を実施して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、本研究では最適化手法として、目的関数を応答曲面で近似し、段階的に応答曲面の精度を向上させながら最小値を探索する逐次近似最適化の手法を用いた。

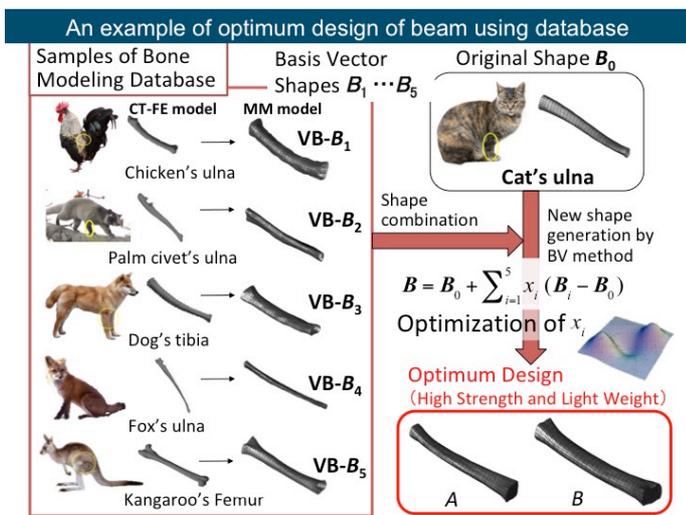


図 2 生物形態データベースから BV 法を用いてはり構造の形状最適化を行う例

4. 研究成果

(1) 生物形態データベースの構築

現在までに 25 種の動物における約 200 個の骨の 3 次元モデルデータを作成した。3 次元モデルデータを web ブラウザで閲覧できるように形式としてデータベースを構築した。図 3 に作成した生物形態データベースの web ブラウザ画面の一例を示す。データは動物種ごとにまとめられ、骨の名称等(図 3 右)をクリックすると骨の 3D 画像等(図 3 左)にアクセスできる。画面では寸法等の基本データ、画像、3D の動画、3D-PDF が閲覧できるようになっている。CAD ソフトや専用の

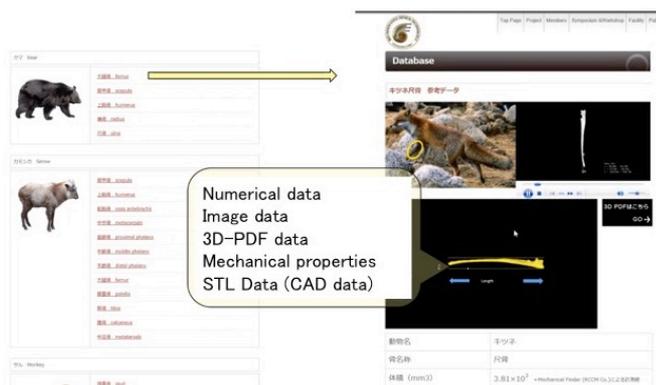


図 3 生物形態データベースにおける骨データを web ブラウザで閲覧した例。

有限要素解析ソフト (MSC. Marc 等) があれば, STL データや有限要素モデルのデータも閲覧や操作が可能である。

脊椎動物の骨のデータだけではなく, 昆虫や甲殻類の外骨格についても, そのサイズに応じ医療用 CT もしくは μ CT 装置を用いて CT 画像を取得し, それらの画像から 3 次元モデルを構築した。これまでに, 3 種の外骨格生物において 19 点の外骨格部分の 3 次元モデルデータを作成し, データベースの多様性の拡大と充実を図っている。

(2) 骨モデルの力学解析 本研究で開発したデータベースには有限要素モデルのデータがあり, それを用いて力学解析できる点が強項である。データベースで登録した骨の形状が優れた構造特性を持つのかどうかを確認するため, 形状の特徴がそれぞれ異なるムササビ, キツネ, ネコの尺骨を取り上げ, それらの衝突解析を行った。有限要素モデルはいずれも外形に沿ったシェル要素からなる MM モデルとし, 後述する杖の最適設計への利用を想定して, 複雑な関節部先端を削除し, 長さを 70mm, シェル厚さを 1mm に統一した。図 4 に各モデルの要素分割図を示す。これらの尺骨モデルが, 鉛直方向 (z 方向) に初速度 0.1m/sec で床面に衝突した場合を想定した解析を行い, 上端部における鉛直方向の圧縮応力の平均値 σ_{bv} を評価した。各尺骨モデルにおける σ_{bv} の時間履歴を図 5 に示す。各尺骨モデルと体積及びシェル厚さが等しい円筒モデルでの解析結果も比較のため示す。ムササビとキツネでは, 円筒モデルと比較して尺骨モデルの方が低い値で推移しているのがわかる。この計算から, 動物によってはその尺骨形状が, 衝突によって発生する応力を緩和する効果を持ち, 衝突負荷に対してより適していることが示唆された。特に, その効果はムササビの尺骨モデルにおいて顕著であった。このことから, 尺骨形状は衝撃を受ける棒もしくは, はりの形状設計に応用できると考えられる。

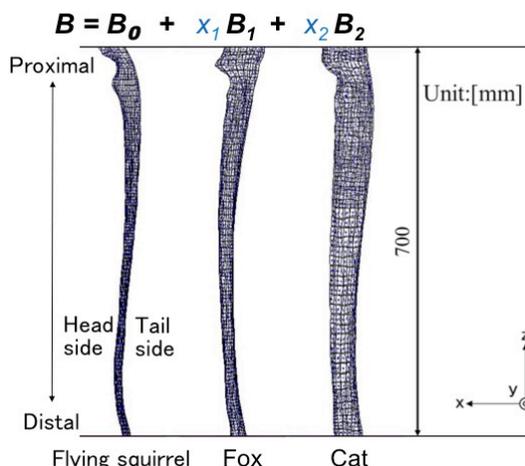


図 4 ムササビ, キツネ及びネコの尺骨の MM モデル

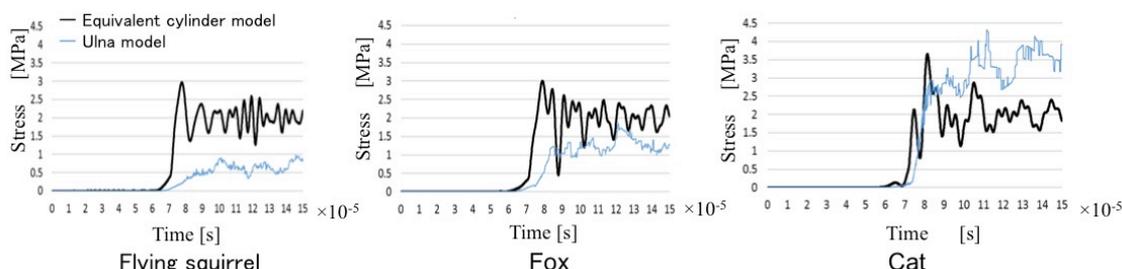


図 5 上端部における鉛直方向の圧縮応力の平均値 σ_{bv} の時間履歴. 左からムササビ, キツネ, ネコの尺骨モデル及び等体積の円筒モデルの結果を示す。

(3) 生物形態を利用した構造の最適設計の応用例

前節で示したように, 尺骨モデルは円筒モデルと比較して衝撃吸収性に優れた形状を持つ。そこで, 骨形状の特徴を持つ軽くて強度の高い杖の設計を目的とし, さらなる衝撃吸収性向上のために形状最適化を行うこととした。

①衝突解析の条件 杖が床に衝突する角度については, 垂直方向 (0°) だけでなく, より使用条件に近い斜め下方向 (45°) についても検討した。

図 6 にその初期条件を示す。初速度の値は, いずれも前節の条件と同じ 0.1m/sec とする。骨形状の特徴を持つ杖については, それを CFRP による組紐構造として試作することを想定し, 材料の機械的特性として, CFRP の弾性率や密度等を用いて解析した。

②最適化問題の定義 形状最適化では BV 法を用いるが, 図 4 に示すように, 基本形状をムササビの尺骨形状, ベーシスベクトルをキツネ及びネコの尺骨形状とした。それぞれの重み係数を x_1, x_2 とし, それらを設計変数とした。目的関数はモデルの体積と, 手元に伝わる応力を評価する応力評価関数とし, それぞれ f_1, f_2 で示す。応力評価関数 f_2 を下記の式で定義する。

$$f_2 = |\sigma_{bv}| / |\sigma_{FS}| + S_\sigma$$

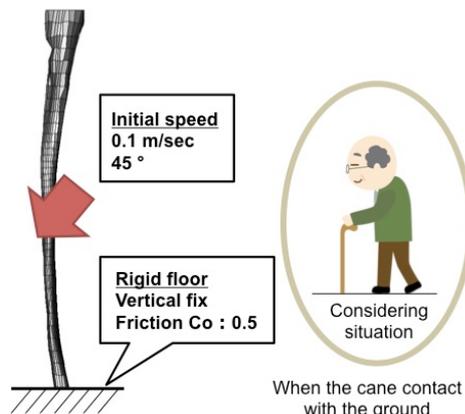


図 6 杖の形状最適化で考慮する衝撃負荷の初期条件

σ_{bv} は前節の解析でも用いた上端部における z 方向応力の平均値である。 σ_{FS} は基本形状のムササビ尺骨モデルでの上端部 z 方向応力の平均値で、これで σ_{bv} を除すことにより応力評価関数の第一項を無次元化している。 S_a は、上端部における z 方向応力の標準偏差である。この応力評価関数を最小化することで、手元に伝わる応力と、手元に発生するモーメントを最小化することとなる。以下では、衝突角度が 45° 、すなわち斜め下に向けて衝突する場合の最適化結果について示す。

③形状最適化の結果 最適化の結果、多目的最適化での4つのパレート最適解が得られた。二つの目的関数からなる目的関数空間においてプロットした最適解 (op1~op4) とその最適形状を図

Pareto-optimum designs minimizing volume or stress function

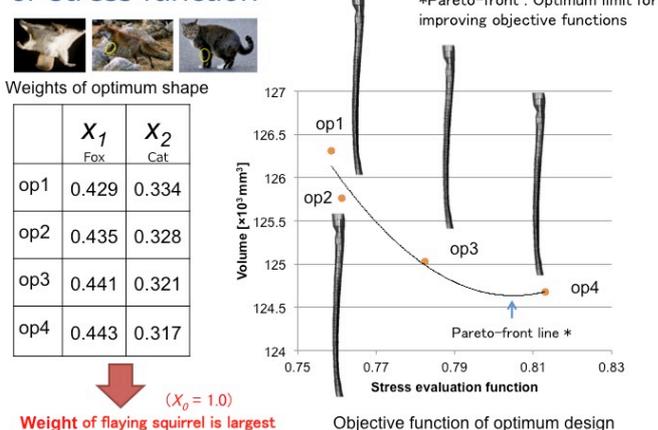


図7 杖の形状最適化より得られたパレート最適解. 左の表が最適解での設計変数値, 右のグラフが最適解での二つの目的関数空間を示している。

7に示す。図7には最適形状での設計変数の値もあわせて示す。op1が最も応力評価関数が小さい最適解, op4が最も体積が少ない最適解となっている。設計変数に関しては、 x_1 が0.42~0.44, x_2 が0.31~0.33といずれも0.5よりは小さな値で、基本形状であるムササビの尺骨形状をより強く反映した最適形状となっている。最適形状モデルと各尺骨モデルでの目的関数値の比較を図8に示す。体積に関しては、最適形状モデルとキツネ尺骨モデルは近い値となった。キツネ尺骨モデルを基準とした差はいずれも10%未満だった。応力評価関数に関しては、どの尺骨モデルよりも小さな値となった。基本形状であるムササビ尺骨モデルを基準として最適形状モデルとの差を表すと、約22~27%の差があり、形状最適化により衝撃吸収性が向上していると考えられる。以上のように、尺骨形状の合成により最適形状を探索した結果、既存の尺骨形状と近い体積を持ちながら衝撃吸収性に優れる形状を複数得ることができた。なお、 0° の衝突角度においても最適化を行ったが、設計変数は互いに近い値を示した。このことから、角度による最適解の違いは小さく、上記の最適解の有効性が高いことが示唆された。

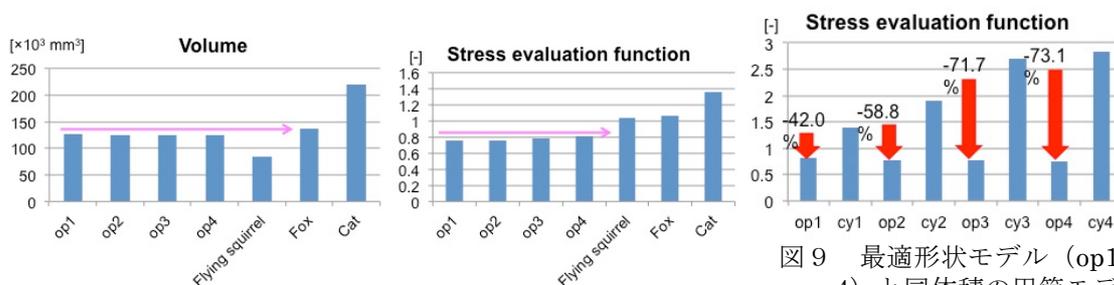


図8 最適形状モデル (op1~op4) と尺骨形状モデルにおける体積と応力評価関数の値の比較

図9 最適形状モデル (op1~op4) と同体積の円筒モデル (cy1~cy4) との応力評価関数値の比較

④体積が等しい円筒モデルとの比較 本手法で得られた最適形状モデルと円筒モデルの比較を行う。等体積の円筒モデルを作成し、衝突角度 45° の条件で解析した。モデル op1 と等体積の円筒モデルをモデル cy1 とし、以下同様にモデル cy2, cy3, cy4 とした。解析結果を図9に示す。最適形状モデルと円筒モデルの差は著しいものがあつた。円筒モデルを基準とし、最適形状モデルとの差を百分率で表すと、op1 から順に42%, 59%, 72%, 73%であつた。このことは、既存の杖形状で使われている円筒形状と比較し、今回得られた最適形状の杖において衝撃吸収性が大きく向上していることを示している。以上のことから、本研究で提案した生物形態データベースに基づく形状最適化手法の有効性が確認された。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計3件)

- ① 坂本 二郎, 小林佳介, 北山哲士, 清水信孝, 座屈解析に進化計算を適用した薄板軽量形鋼の断面寸法最適設計, 日本機械学会論文集, 査読有, Vol.83, No.854, 2017, pp.17-00212.
- ② Chihara, T., Seo, S., Sakamoto, J., Estimation of Optimal Handrail Position for

Elderly based on Digital Human Modeling Simulation, 人間工学, 査読有, Vol.53, Supplement 2, 2017, S640-S643.

- ③ 北山哲士, 機械学習と最適化の融合による薄板成形技術開発, シミュレーション, 査読無, Vol. 35, No. 4, 2016, pp. 228-232.

[学会発表] (計 12 件)

- ① Sakamoto, J., Bio-innovative design using bone shape and its application (Invited), KSME/JSME Joint Symposium in 2019 Annual Bioengineering Conference, Busan, Korea (2019. 4)
- ② 東智就, 坂本二郎, 茅原崇徳, 北山哲士, 喜成年泰, 衝撃特性を考慮した杖のバイオインベティブデザインについて, 日本機械学会 北陸信越学生会 第 48 回学生員卒業研究発表講演会, 富山市, (2019. 3)
- ③ 宮下大和, 坂本二郎, 茅原崇徳, スイング動作をするキリン頸部の筋骨格解析, 日本機械学会 第 31 回バイオエンジニアリング講演会, 郡山市, (2018. 12)
- ④ 宮川健吾, 坂本二郎, 北山哲士, 清水信孝, 進化計算による圧縮・曲げ荷重に対するリップ溝形鋼の断面寸法最適設計, 日本機械学会 第 13 回最適化シンポジウム 2018, 京都市, (2018. 10)
- ⑤ Kinari, T., Sakamoto, J., Kitayama, S., Maki, Y., Kawai, K., Suehiro, T., Kimizu, M., Mori, D., Hasebe, H., Bio-innovative design technology and manufacturing system for CFRP preform by braiding structure, International Symposium on Flexible Automation, Kanazawa, Japan (2018. 7)
- ⑥ Kinari T., Endriatno N., Kawai K., Suehiro T., Sakamoto J., Kitayama S., Bio innovative design and manufacture of CFRP preform by braiding technology, Extended Abstract of the 45th Textile Research Symposium, 38, Kyoto, Japan (2017. 9)
- ⑦ Sakamoto, J., Musculoskeletal Simulation for Clinical Biomechanics and Animal Science (Invited), KSME Bioengineering Division Spring Conference, Daejeon, Korea (2017. 4)
- ⑧ 宮下大和, 坂本二郎, 脊椎動物における筋骨格系モデルの作成とその応用に関する研究, 日本機械学会北陸信越支部学生会第 46 回学生員卒業研究発表講演会, 金沢 (2017. 3)
- ⑨ 寺尾康太郎, 坂本二郎, 自動散布植物の種子射出メカニズム検討のための力学解析について, 日本機械学会第 29 回バイオエンジニアリング講演会, 名古屋 (2017. 1)
- ⑩ 伊藤皓治, 坂本二郎, 北山哲士, 喜成年泰, 骨形状を用いたバイオインベティブデザイン技術の開発とその応用, 日本機械学会第 29 回バイオエンジニアリング講演会, 名古屋 (2017. 1)
- ⑪ 伊藤皓治, 坂本二郎, 喜成年泰, 北山哲士, バイオインベティブデザイン技術における生物骨形状モデリング手法について, 日本機械学会 第 27 回バイオフロンティア講演会, 札幌 (2016. 10)
- ⑫ 坂本二郎, 骨の力学解析ツールとしての有限要素法, 第 89 回日本整形外科学会学術総会 (招待講演), 横浜 (2016. 5)

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名：北山 哲士
ローマ字氏名：(KITAYAMA, satoshi)
所属研究機関名：金沢大学
部局名：理工研究域機械工学系
職名：教授
研究者番号 (8 桁)：90339698

(2) 研究協力者

研究協力者氏名：喜成 年泰
ローマ字氏名：(KINARI, toshiyasu)

(3) 研究協力者

研究協力者氏名：茅原 崇徳
ローマ字氏名：(CHIHARA, takanori)

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。