

令和 3 年 6 月 16 日現在

機関番号：10106

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2020

課題番号：19K20367

研究課題名（和文）「人に愛されるロボット」を具現化する3Dプリンタによるロボット構築手法

研究課題名（英文）Automatic robot construction method using 3D printer for adorable robot making

研究代表者

山内 翔（Yamauchi, Sho）

北見工業大学・工学部・助教

研究者番号：60781200

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 1,700,000円

研究成果の概要（和文）：これまでは結晶構造化内骨格を作る場合、ブール演算を用いて特定の領域を結晶構造パターンで置き換える方法をとっていたため、結晶構造同士の結合が十分に形成されている場合は問題ないが、外形形状によっては細い部分など、十分に結合関係が成立していない結晶構造ができる場合があった。こうした場合に対処するため、単純なパターンによる置き換えではなく、一旦グラフ構造として表現し、その結合関係から構造的弱点を事前に判定し、構造的弱点部分はより小さな構造で密な結晶構造を構成する手法を構築した。また、ロボットのモジュール配置の最適化計算における適応度関数の指標を任意に追加可能とした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

マスコットキャラクター的なロボットのデザインは、人の気を引くための奇抜さや利用対象者の趣向の差などから非常に多岐に渡ると考えられる。そのためその設計方法はデザインひとつひとつに対する場当たりのものではなく、デザインに依らず普遍的に用いることができるものが望ましい。そのような普遍的・統一的なロボットの設計方法を構築することができれば、ロボットの設計という問題を計算機でも記述できるようになるため、場当たりの人手の設計よりも優れた、計算機によるロボット設計の自動化・高速化が期待でき、将来的な需要の増大に対しても対応可能となる。

研究成果の概要（英文）：Previously, a crystal structured endoskeleton was created based on the method replacing specific regions by a crystal structure pattern using bool operation. In these case, it is sufficiently rigid when each structure units are connected enough. However, it is too weak when connections between structure units are not constructed enough according to the shape of an original input model. To solve this problem, new method was constructed assuming crystal structured endoskeleton as a graph structure and evaluate structural weak positions based on the connectivity preliminary. A crystal structured endoskeleton is reinforced based on this evaluation. Also, arbitrary and multiple criteria could be introduced to the fitness function of this automatic robot construction software.

研究分野：自律ロボット

キーワード：ロボット 3Dプリンタ 自動設計 最適化

1. 研究開始当初の背景

コミュニケーションロボットや介護ロボットといった、人と密接に関わるロボットにおいてはその容姿が重要になる。その容姿によって人から得られる反応が異なり、そのロボットの使われ方や継続的な利用期間に影響を及ぼすため、効果的な利用を促すような好感を持たれるデザインを優先して設計することが望ましい。

一方で「ゆるキャラ」に代表されるように、広く万人に愛される存在としてのマスコットキャラクターが企業や自治体のブランディングやプロモーションに多く用いられている。このようなマスコットキャラクターの利用は特に日本で顕著に見られる。こうしたマスコットキャラクターのデザイン上の特徴はこれまで多く分析されており、その特徴はベビースキーマやネオテニー（幼形成熟）といった性質を持つことが知られている。マスコットキャラクターのデザインではそうしたベビースキーマやネオテニー的特徴をより強調したものが多く用いられている。また無関係な2つの要素を組み合わせたり特定のモチーフを利用するなど、意外性を追求するために突飛な形状を有し人の気を引くデザインにしている場合もある。

こうしたマスコットキャラクターに見られるデザインは、運動性能を向上させるためのデザインや特定の目的を達成するためのデザインとは異なり、生物の模倣や運動性能をもとに考えられた従来のロボット設計とはその設計思想が根本的に異なる。そのため耐久性や運動性能の確保、及び奇抜な形状のロボットに対する行動設計の難しさなどから、従来手法では十分な性能を発揮するための設計ができず、マスコットキャラクター的デザインのロボットを実現することが困難な場合がある。

2. 研究の目的

こうした背景から、十分に社会的に利用可能な問題解決能力を有しつつ、人に広く愛されるマスコットキャラクター的性質を有するロボットを実現するには、こうしたデザインを維持しながらもロボットの設計上の問題を解決するという2つの相反する性質を両立させる必要がある。

またこうしたマスコットキャラクター的なロボットのデザインは、人の気を引くための奇抜さや利用対象者の趣向の差などから非常に多岐に渡ると考えられる。そのためその設計方法はデザインひとつひとつに対する場当たりのものではなく、デザインに依らず普遍的に用いることができるものが望ましい。そのような普遍的・統一的なロボットの設計方法を構築することができれば、ロボットの設計という問題を計算機でも記述できるようになるため、場当たりの人手の設計よりも優れた、計算機によるロボット設計の自動化・高速化が期待でき、将来的な需要の増大に対しても対応可能となる。

そこで本研究では、マスコットキャラクター的性質を具現化する統一的なロボット構築手法を開発し、「人に愛されるロボット」を実現する。

3. 研究の方法

(1) デザイン性の高い形状に対応するための強度の自動調整機能の追加

マスコットキャラクター的性質を具現化するにはその外形のデザインが重要となる。しかしデザイン性の高い形状の場合、強度面からロボット設計に適さないことがある。申請者らがこれまでに構築した手法では、内部構造を支える基本となる単位構造の大きさ、密度を変更することにより、その強度を部分的に任意の領域のみ変更することができる。これを利用し、従来の設計法では実現が困難なデザインにおいても強度を確保し、デザインを優先したロボット設計を可能とする。具体的には、以下のように進める。まずロボットの形状に対し特徴的な部位に分割する幾何演算を施し、対象となるロボットの形状モデルを分割する。次に、形状の変化が大きく、強度に問題が発生すると考えられる分割部位同士の接合部分の単位構造を変更し、強度を高める。さらに他の部位と比べ強度が不足すると考えられる細い形状をした部位、及びモジュールを配置するスペースの確保により空洞となる比率の高い部位を特定し、その周辺の単位構造を変更し強度を高める。これにより現在のロボット設計手法では実現しにくいデザインのロボットを、計算機による自動設計で実現できる。

(2) ロボットのモジュール配置時の最適化指標の追加

現在までに申請者らが構築した手法では、モジュール配置の際にロボットの形状と機能のみに着目した適応度関数を用いて進化計算による最適化を行っている。しかし実際のロボットでは他にも重量、コスト、消費電力といった様々な指標が重要であると考えられるため、そのような指標を追加する。こうした指標は互いにトレードオフとなっているため、指標が増えるに連れ、人手で最適なバランスを保つのは困難になる。そのため、最適化手法による設計が重要となる。これにより、ロボット自動設計の適用可能範囲を拡大する。

(3) 進化計算によるモジュール配置に対する最適化計算の高速化

現在までに申請者らが構築した手法では、ロボットのモジュール配置の最適化を進化計算手法を用いて行っている。しかし、ロボットに必要な機能及びモジュール数が増加するに従ってその計算量は膨大になる。そのためより複雑なロボット設計を可能にするためには、この最適化計算を高速化する必要がある。本手法では要求されているロボットの形状と機能に合わせて進化計算を行うが、現在の仕組みではロボットに要求されている条件が異なると、その度に最適化計算を初期状態から行う必要がある。これはロボットの形状と機能に対して、形状の類似性や機能の相関などの情報が最適化計算ごとに失われていることに由来する。そのためロボットの形状と機能に関する情報を蓄積し利用する機構が存在すれば、その情報を利用して最適化計算の初期状態をより解に近いものから開始させ、最適化計算の高速化が可能となる。

(4) マスコットキャラクター的デザインのロボット構築実験

マスコットキャラクターのデザインに関して得られている知見から、実際にデザインのサンプルを複数用意し、本手法でマスコットキャラクター的デザインのロボット構築を行う。この時、異なる形状と機能のロボットを構築可能であることを確認するとともに、形状の類似性や機能の相関などの情報が学習でき、設計が高速になっていく様子を確認する。

4. 研究成果

これまでは結晶構造化内骨格を作る場合、ブール演算を用いて特定の領域を結晶構造パターンで置き換える方法をとっていたため、結晶構造同士の結合が十分に形成されている場合は問題ないが、外形形状によっては細い部分など、十分に結合関係が成立していない結晶構造ができる場合があった。

こうした場合に対処するため、単純なパターンによる置き換えではなく、一旦グラフ構造として表現し、その結合関係から構造的弱点を事前に判定し、構造的弱点部分はより小さな構造で密な結晶構造を構成する手法を構築する。

まず内骨格内部をモデルを規則的に並べたパターンで置換する手法から、グラフ構造として記述し、構造的弱点を分析した後にモデルとして構築する方式に変更する。

グラフ構築後はそのグラフ構造を分析し、構造的に弱いと考えられる部分を判定する。その判定された構造的弱点部分をサイズを1/2倍した構造で置き換え、構造を強化する。

従来手法では、構造物の強度解析を行う場合には有限要素法などが用いられている。

有限要素法における問題点としては

- (1) 膨大な計算量が必要となる。解析時間のほとんどが連立一次方程式を解くために割かれる
- (2) GPUによる分割計算に向かない
- (3) 適切なメッシュの設定を必要とする
- (4) 素材、構造などによってそれぞれに適切なモデルを与えなくてはならない

といったものが挙げられる。

本手法は有限要素法と主目的が異なり、対立する方法ではないが、本手法での強度解析を有限要素法で行うとすると膨大な計算量が必要になると予想される。また、細かい設計変更や素材の変更があった場合、その都度計算をし直す必要がある。従って、今回は結晶構造の均一性を利用した手法を新たに考えるものとする。

また本手法では均一な結晶構造の特性を利用して効率的な強度判定を行い、かつ自動的に補強する。本手法ではその際にグラフ構造として記述し分析を行うが、結晶構造同士の結びつきをグラフ構造で表し、解析する。その際各結晶構造をノード、接続関係をエッジとして表して解析し、接続関係が少ないノードに対し、周囲のノード、エッジの追加を行う。こうした類似の問題として連結度増大問題が挙げられる。

しかし、本手法で扱う対象は結晶構造の接続関係であり3次元的な位置も考慮する必要がある。従って連結度増大問題で扱うような、任意のノード間をつなぐエッジの追加は行うことができないため、別の手法を取る必要がある。

そこで骨格グラフと結晶構造グラフの導入を行った。結晶構造の詳細な形状を表すグラフを構築する。これを骨格グラフと呼ぶ。骨格グラフは無向グラフとし、各ノードは三次元位置を持つものとする。まず結晶構造の単位構造はダイヤモンド結晶構造を参考とし、図1のように定める。

この構造を並べて内骨格内を埋めるグラフを骨格グラフの初期状態とする。

次に結晶構造グラフを定める。結晶構造グラフは骨格グラフから構築され、結晶構造単位でどのような接続関係となっているかを見るグラフであり、構造的弱点の判定にはこちらを用いる。

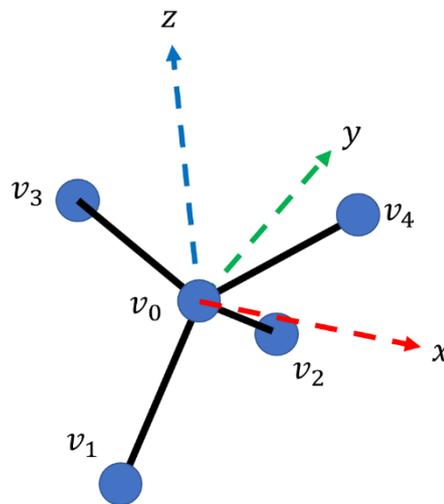


図1 結晶構造の模式図

強度を判定するときはノード単位ではなくどれだけ結晶構造が成立しているかを見る必要がある。そのため単純にノードの次数を見るのではなく、基準となるノード同士がどれだけ結びついているかを見る必要がある。本研究ではまず与えられた外形モデルに対して内外骨格の分離を行い、その内骨格モデルに対して骨格グラフを構築する。次に骨格グラフから結晶構造の接続関係を表した結晶構造グラフを抽出し、構造的弱点箇所の分析を行う。この分析に従って骨格グラフを再構築する。終了条件を満たすまでこの過程を繰り返し、最終的にできた骨格グラフの情報から結晶構造化内骨格モデルを構築する。

次に Cohesive Blocking を利用した構造的弱点の判定を行った。

Cohesive Blocking は社会的結束(Social Cohesion)を分析するための手法の一つとして構築され、点連結度(Vertex connectivity)を元にグラフを部分グラフによる階層的な構造として表現し、分析を行う。この階層構造をとる部分グラフは、あるグループから部分グラフを分割するために除去する必要がある最小のノード数によって決まる。

この手法を応用することにより結晶構造の単位構造一つを表すノード単位ではなく、特定のブロックがどれだけ分割されやすいかを表現・分析することができ、ロボットの骨格として分断されやすい部分を知ることができる。個々のノードの点連結度のみを見る場合にはブロック単位での強度の分析を行うことができないが、この手法を利用することでそのような場合にも対処できる。

本手法では結晶構造グラフに対して Cohesive Blocking を適用し、構造的弱点を特定する。その情報に従って骨格グラフを再構築する。

許容できる最小の Cohesion 値を定め、下記2つの手順によってその値を下回ったノードを構造的弱点とする。

(1) 最大 Cohesion 値による判定

各ノードが属するブロックのうち、最大の Cohesion 値を有するブロックの Cohesion 値を最大 Cohesion 値とし、この値により判定する。

(2) ブロック間のエッジの Cohesion 値による判定

その後、骨格グラフ上の結晶構造グラフが対応するノードと、そのノードに接続されているノードを構造的弱点ノードとする。

構造的弱点ノードを特定した後、結晶構造グラフ上の構造的弱点ノードが表す骨格グラフ上の基準ノードの領域を n 倍した領域を現在構成している結晶構造の $1/2$ サイズの構造で満たす。

この状態で再度 Cohesive Blocking を利用した構造的弱点判定を行い、以降この処理を繰り返す。結晶構造のサイズが予め定めた大きさ未満になった場合、または構造的弱点が存在しなくなった場合に処理を停止し、骨格グラフから結晶構造化内骨格モデルを構築する。

実際に高密度化強化法をサンプルモデルに適用した(図2)。図3で示すとおり、最大サイズの単位構造から始まり、構造的弱点部分を $1/2$ サイズの単位構造に置き換えている。4段階目では構造的弱点部分はモデル表層に限られ、骨格全体として破綻しないよう強度を確保できている。また許容される最大 Cohesion 値の最小値を4とした。この過程において構造的弱点ノードの該当する単位構造の体積がモデル全体に占める割合の推移を確認した。

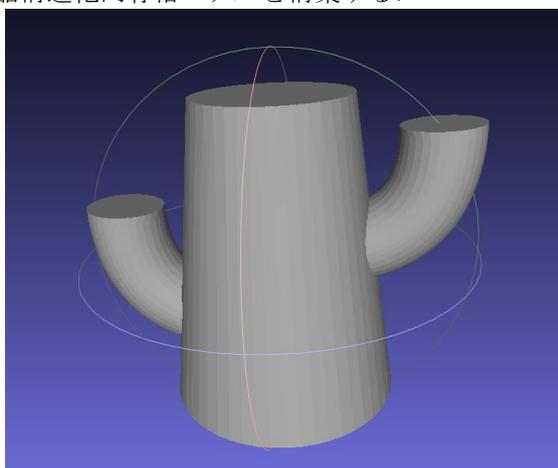


図 2 サンプルモデル

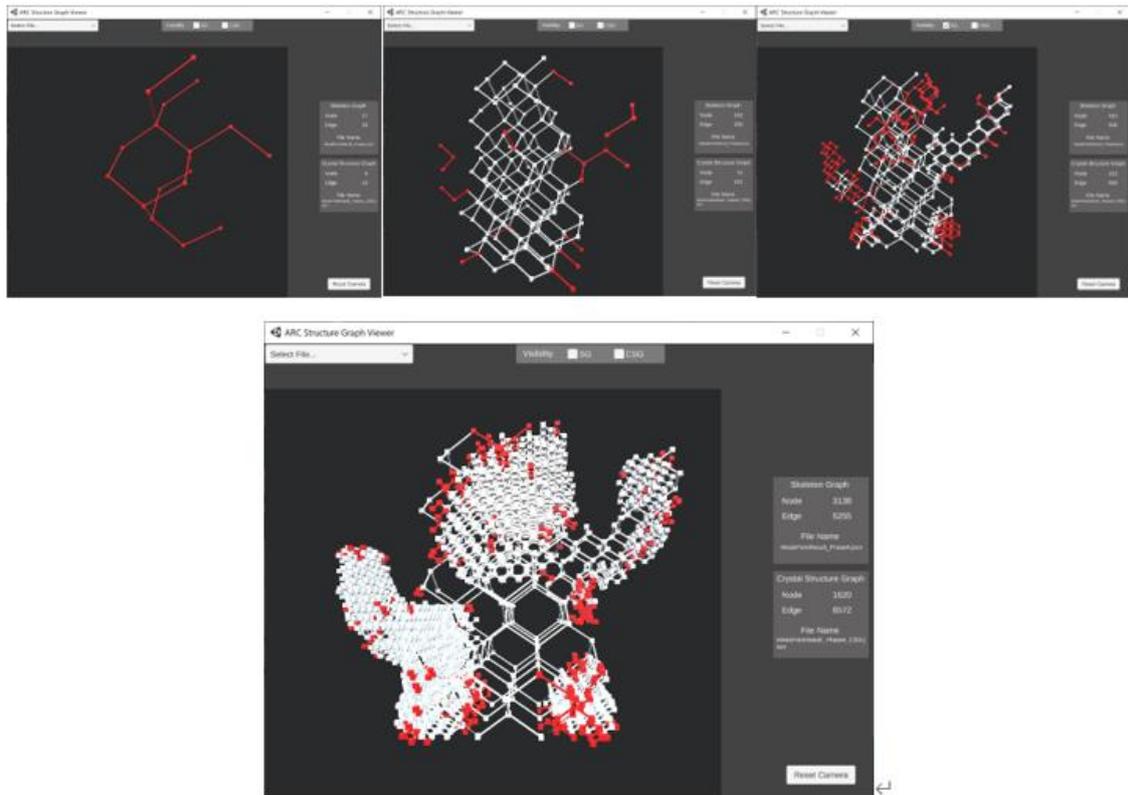


図 3 高密度化されていく結晶構造化内骨格，構造的弱点ノードは赤色で示されている

最終的には構造的弱点ノードの単位構造の体積がモデル全体の 5%以下となっていた。次に各段階ごとにノードの最大 Cohesion 値の分布をヒストグラムとして表し、段階が進むにつれ、各ノードの最大 Cohesion 値は増大しており、4 段階目では 95%以上のノードが最大 Cohesion 値 4 以上となっており、構造的弱点ノードではなくなっていることを確認した。

また、ロボットのモジュール配置を行う進化計算部分の拡張的な実装を行い、最適化指標を自由に追加可能にした。これにより、消費電力や重量バランスなどの新たな指標を追加した適応度関数をロボットに合わせて自由に設計でき、利用可能となった。これに伴い一般公開へ向けたライブラリ化と API の整備も行った。ソフトウェアは Python 及び C++で記述されている。遺伝的アルゴリズム部分は Python を用いて実装されており、高速化が必要な幾何演算部分は C++にてネイティブ実装されている。各アルゴリズムは一つのクラスとして個別に実装されており、新たに開発された手法を利用する場合でも、クラス単位での実装が容易であり、利用、発展しやすい形式になっている。新たな発展的なアルゴリズムの実装も特定の形式に従ったサブクラスを用意することで開発、利用、切り替えを容易に行うことができ、状況に合わせた利用やマイナーチェンジも可能である。自動設計部分の最適化計算においては、適応度を構成する指標の追加をすべてサブクラスとして用意することにより登録可能となり、用途に合わせた実装が容易となった。これまで用いてきた、内骨格モデルに対しコンポーネントが内包されているか、コンポーネントと外骨格との重複部分はないか、コンポーネント同士に重複部分はないかといった幾何計算を必要とする指標の他にも、重量バランスや消費電力といった様々な指標が実装可能となった。

コンポーネント配置の最適化計算には遺伝的アルゴリズムを利用する。この計算においては、コンポーネントが適切な位置にあるか、内骨格モデル内部に収まっているかなどの指標からなる適応度計算が重要となり、また計算時間の大半を占める。しかしこうした適応度計算は並列計算が容易であり、PC クラスタによる高速化に適している。そのため本研究では Apache Spark を利用したスタンドアロンモードでの PC クラスタを用意しており、テストプログラムによる動作テストを行っている。また、遺伝的アルゴリズムを利用した最適化計算に関しても、本研究で扱うロボットの自動設計に特化した形式での最適化計算実装を開始しており、近日中に実験を実施する予定である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1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 Yamauchi Sho, Suzuki Keiji	4. 巻 139
2. 論文標題 Robot Design Method Using 3D Printed Inner Crystal Structure	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEJ Transactions on Electronics, Information and Systems	6. 最初と最後の頁 1051 ~ 1058
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1541/ieejeiss.139.1051	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0件

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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
---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------