

「人に愛されるロボットデザイン」を具体化する自由形状・内骨格ロボット構築手法

代表研究者

山内 翔

北見工業大学 地域未来デザイン工学科 助教

1 概要

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。一方で、「ゆるキャラ」に代表されるマスコットキャラクターは広く万人に愛される存在として利用されている。こうしたマスコットキャラクターに見られるデザイン上の特徴は分析されているが、そのデザインは従来のロボット設計手法では実現困難なデザインである場合が多い。

そこで本研究では申請者がこれまで開発した、3D プリンタを活用した自由な形状のロボット設計を実現するロボット構築法を基盤として、従来手法では困難であったマスコットキャラクター的デザインの「人に愛される」ロボットの構築手法を実現する。特に本研究ではこれまで問題であった内外骨格の分離、及び構造的弱点部分の強化法を新たに実装し、実験を行いその効果を確認した。またこれらのロボットの自動設計を行うための最適化計算に関して改良を行った。加えて、本研究におけるロボットの構築手法全体に渡るソフトウェア群をソフトウェアライブラリとして公開するための準備も進め、実装を行った。

2 はじめに

コミュニケーションロボットや介護ロボットといった [1, 2, 3] , 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 [4, 5] . その容姿によって人から得られる反応が異なり [6, 7] , 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 [8] , 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 [9] .

一方で「ゆるキャラ」など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 [10] . 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いくつも分析されており、その特徴はベビースキーマやネオテニー（幼形成熟）といった性質をもつことが知られている [11] . これらは、動物の幼児期・若年期に見られる特徴、例えば、頭が身体に比べて大きい、目は大きく顔の中央よりやや下に位置する、四肢は太く短い、といったものである。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 [12] . また、本来関わりのない2つの要素の組み合わせや特定のモチーフの利用など、意外性を追求するため突飛な形状を有し、人の気を引くデザインを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、その特徴から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 [13] , 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 [14] .

そのため、マスコットキャラクター的デザインのロボットを実際に構築するには、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、十分な性能を発揮するためのロボット設計が従来手法では困難な場合がある。

よって、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つつ、ロボット設計上の問題を解決するという2つの相反する要素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、一口にマスコットキャラクターといっても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設計方法ではなく、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。普遍的、統一的な設計方法を構築することにより、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である。

そのため、自由な形状のロボットを自動設計するための、内部をダイヤモンド結晶構造を参考にした構造で均一に埋めるロボット構築法について考案し、実現した[15]。本研究ではこの手法のさらなる改良を行った。

まず本研究での手法では、外形モデルを利用して内外骨格分離を行うが、その際に 3D モデルに対するミンコフスキー和を利用する必要があった。しかし、ミンコフスキー和はモデルの頂点数の増加に従い計算量が指数関数的に増大するため、あまり複雑な形状に対応できなかった。そこでボクセル化を利用した近似計算を実装し、外形モデルの頂点数に関わらず内外骨格の分離を可能にした。

また、本研究の手法ではロボットの外形モデルから内骨格・外骨格を分離し、内骨格内を一定の結晶構造パターンで埋める。その際、ブール演算によって内骨格モデルと交差する部分以外は除去される。この除去の工程において、内骨格を表すモデル形状のみに従って除去を行うため、結晶構造がどの程度維持されているかについては考慮されておらず、周囲に十分な結晶構造が形成されていない、強度的に問題がある箇所が発生する可能性があった。結晶構造においては、その構造が均一であることから周囲にどの程度同一の結晶構造が接続されているかで解析的な強度計算を行わなくとも構造的な強弱を判定できると考えられる。そこで、本研究では結晶構造の接続関係に着目した効率的な構造の強度判定手法を構築する。またその際構造的な弱点と判定された箇所は周囲の構造との接続関係が少ないと考えられるため、より小さく密集したダイヤモンド結晶構造をその箇所に追加し、構造的弱点箇所を自動的に補強する手法を構築した。

また本手法ではロボット設計の工程を大幅に簡略化できることから、ロボットの設計をアクチュエータ・センサなどのコンポーネントの 3 次元位置をいくつかの指標を満たしながら決定する最適化問題として捉えることができる。この性質を利用したロボットの自動設計に向け、最適化計算の並列計算を行う PC クラスタを構築した。加えて、対象に合わせた細かな最適化指標設計が容易になるよう改良を行い、利用可能とした。

さらにこれら一連のロボットの自動設計手法についてそのライブラリを一般公開することを目指し、API の整備を進め、公開に向け準備を行った。

3 これまでに構築した手法とその問題点

3-1 従来手法の問題点

これまでは与えられた外形モデルから内骨格・外骨格を分離し、内骨格をダイヤモンド結晶構造を模した構造を敷き詰めたパターンで置き換える手法を用いていた。これによりどのような形状であってもある程度結晶構造パターンが形成されていれば強度を確保することができ、なおかつ内部が疎である。そのため、一定以上の大きさの構造は内部に固定され、それ未満の大きさの物体は内部を自由に通過することができた。よってロボットの設計を、アクチュエータやセンサなどのコンポーネントの 3 次元位置の配置だけで行うことができるようにした。

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。この場合、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る。

また、外形モデルを利用して内外骨格分離を行うが、その際に 3D モデルに対するミンコフスキー和を利用する。しかし、ミンコフスキー和はモデルの頂点数の増加に従い計算量が指数関数的に増大する。3 次元多面体 A, B に対し、 $\oplus$ をミンコフスキー和とし $A \oplus B$ を計算する場合、その計算量は A, B 共に凸包である場合その計算量は $O(mn)$ であるが、凸包では無い場合 $O(m^3n^3)$ となることが知られている[16, 17]。このため、モデルが複雑になるにつれ外骨格の分離の計算量は急速に増大すると考えられる。

3-2 水溶性サポートの導入とその問題点

実際に 3D プリンタによる印刷を行う際には、内部に中空部分を一時的に支えるサポート部分が形成されるが、本手法の結晶構造化内骨格には中空部分が大量に存在するため、サポート部分の除去作業が膨大になる。そこで水溶性サポートを利用可能な 3D プリンタを導入し、これを迅速に実行できるようにする予定であった。しかし、水溶性サポートには現状様々な問題点がある。今回は 3D プリンタとして Ultimaker S5 を用

い、対応する水溶性サポートを利用した。

1)印刷スピードの低下

水溶性サポートは粘性が高いなど他の樹脂フィラメントに比べ扱いにくい性質で、通常の樹脂素材より 3D プリンタのエクストルーダの移動が低速に設定されている。そのため、水溶性サポートを導入すると、全体の印刷時間がかかなり増加する。単一の素材での印刷で 5 日かかるものが、8 日程度に増加する。一回の印刷があまりに長時間に及ぶ場合、失敗などのリスクが高まるため、大きな問題となる。

2)印刷するビルド空間が荒れる

水溶性サポートは粘性が高いため、細かな糸状の残留物を全体に撒き散らす傾向がある。少量であれば問題ないが、細かい造形物である場合これらが悪影響を及ぼし、本来の樹脂素材の印刷が荒れがちでムラができたり、着きが悪かったりといった問題が発生する。

3)フローセンサの偽陽性が高い

導入した 3D プリンタ Ultimaker S5 ではフィラメントが正常に供給されているかどうかをフローセンサで監視しており、供給に問題があると自動で停止する(この場合、供給の問題を解決すると印刷を再開できる)。しかし、水溶性サポートではこの誤動作が頻繁に起こり、問題が起きていないにもかかわらず停止することがあった。長時間の印刷においては運用者が場を離れて停止している時間が長いと、大幅な時間ロスとなる。

3-3 問題点の克服に向けて

これら問題点を克服するため 2 つの課題を解決する必要があった。まず複雑な形状の外形モデルに対応可能にするため、ミンコフスキー和を用いた内外骨格分割を何らかの形で簡単化、高速化する必要がある。ミンコフスキー和の計算には幾何演算ライブラリの libigl 及び OpenSCAD を利用しているが、モデルが複雑になると計算時間が膨大になり、計算自体も失敗するケースが頻出する。そのためモデルの複雑さ、具体的には頂点、面数に依らず内外骨格分離する手法が必要であるため、本研究においてボクセルを用いたアプローチによって解決を図った。また、本手法においては水溶性サポートが現在は実用的ではないこと、3D プリンタによる印刷時間が増大することによるプリントエラーの増加傾向などから、不必要な箇所へは過剰に結晶構造の柱を形成せず、効率的な骨格形成を行う必要がある。また、従来手法で問題であった骨格形成が不十分なモデル形状にも対応するため、単純なパターンによる置き換えではなく、グラフ構造による分析を行い、必要に応じて結晶構造を強化する手法を構築する必要がある。これについても本研究で高密度化骨格形成手法を構築し、解決を図った。

4 ボクセル化を利用したミンコフスキー和の高速化による外骨格分離手法

これまでのミンコフスキー和を利用したから、外形モデルをボクセル化して内外骨格を分離する手法を構築した。

この方法では、次の手順で分離を行う。+,-,× をそれぞれブール和、ブール差、ブール積とする。

入力モデル A をボクセル化し、 V_A とする。

V_A のボクセル情報を元に表面のボクセルを特定、そのボクセルから外骨格の厚み r の距離内のボクセルを除去する。この処理を行った後の形状を $V_A(-r)$ とし、内骨格 $S_I(A) = V_A(-r)$ とする。外骨格 $S_E(A) = A - S_I(A)$ とする。ボクセル化の精度によっては、表面がボクセル上にがたつきが見られることが予想される。しかし、ボクセル表面のがたつきは内骨格表面、外骨格内側面に現れるものであり、外見上は見えなくなる。そのため、特に問題にならないと考えられる。ボクセル化についてはスキャンライン法を用いて実装した。またボクセル化する際、その計算量の多くをモデルの三角形とボクセルの重なり合いの判定が占める。こうした計算を高速化する手法も導入した[18]。この手法の実現により元のモデルが凸包ではなく、150 万ほど面数を持つ場合でも、短時間で内外骨格の分離が可能となった。



図1 ボクセル化によるミンコフスキー和の高速化を利用して作成されたロボットの実例

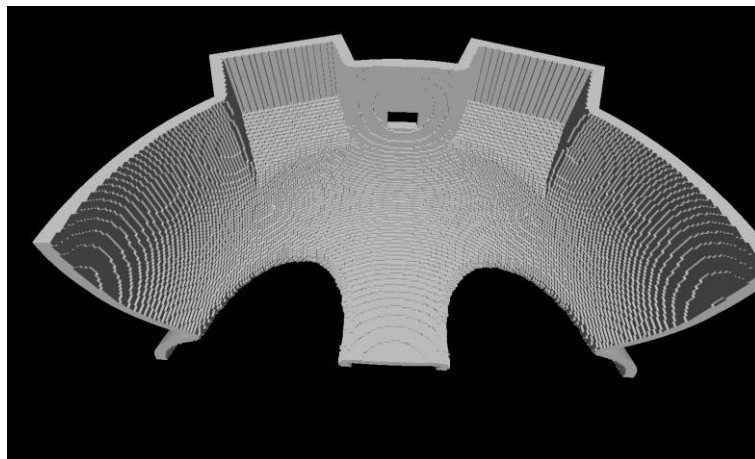


図2 ボクセル化を利用した外骨格分割

5 グラフ構造をベースとした骨格の高密度化強化法

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。

5-1 関連研究

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[19][20]

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[21][22]。

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。

5-2 骨格グラフと結晶構造グラフの導入

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、以下のように定める。

$$\begin{aligned} v_0 &= (x_0, y_0, z_0) \\ v_1 &= v_0 + (0, -\frac{\sqrt{2}}{2}l, -\frac{l}{2}) \\ v_2 &= v_0 + (0, \frac{\sqrt{2}}{2}l, -\frac{l}{2}) \\ v_3 &= v_0 + (-\frac{\sqrt{2}}{2}l, 0, \frac{l}{2}) \\ v_4 &= v_0 + (\frac{\sqrt{2}}{2}l, 0, -\frac{l}{2}) \end{aligned}$$

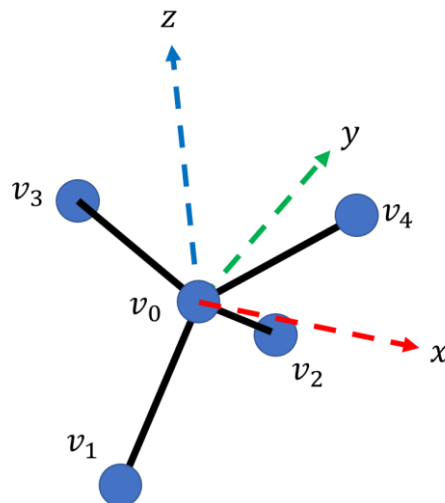


図3 結晶構造の模式図

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。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。

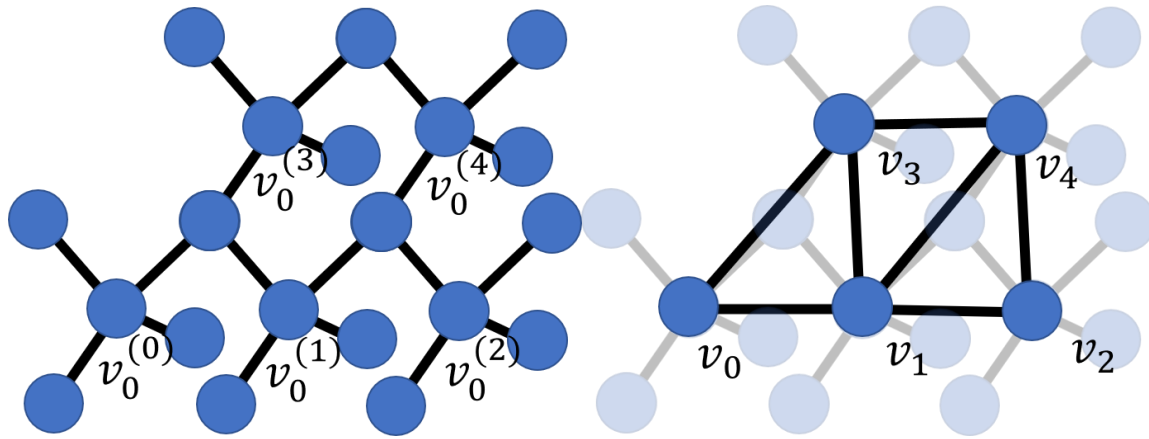


図4 骨格グラフ (左) と結晶構造グラフ (右)

5-3 Cohesive Blocking を利用した構造的弱点の判定

Cohesive Blocking[23]は社会的結束(Social Cohesion)[24]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

上図のように各ノードは $k = 5$ あるいは $k = 3$ のブロックに属しているがエッジ e_{AB} 、 e_{CD} 自体は $k = 2$ のブロックにある。このとき v_A, v_B, v_C, v_D を構造的弱点とする

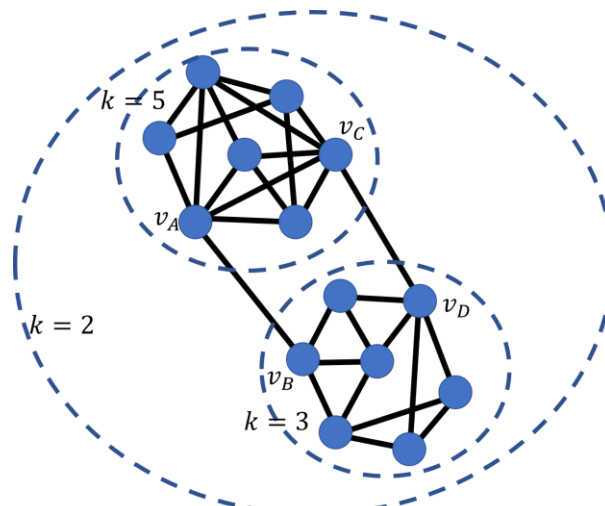


図5 構造的弱点となり得るブロック間のエッジ

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。

5-3 実験結果

実際に高密度化強化法をサンプルモデルに適用した（図6）。図7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。

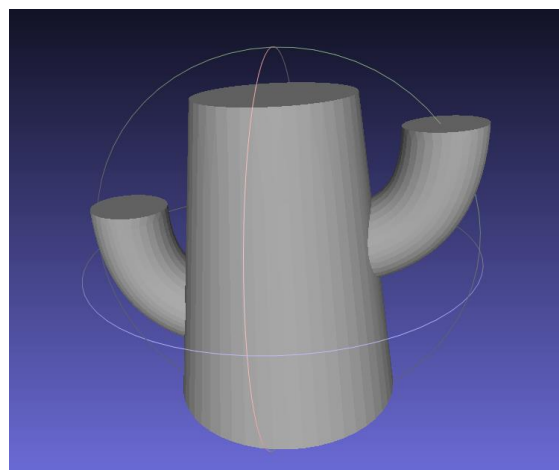


図6 サンプルモデル

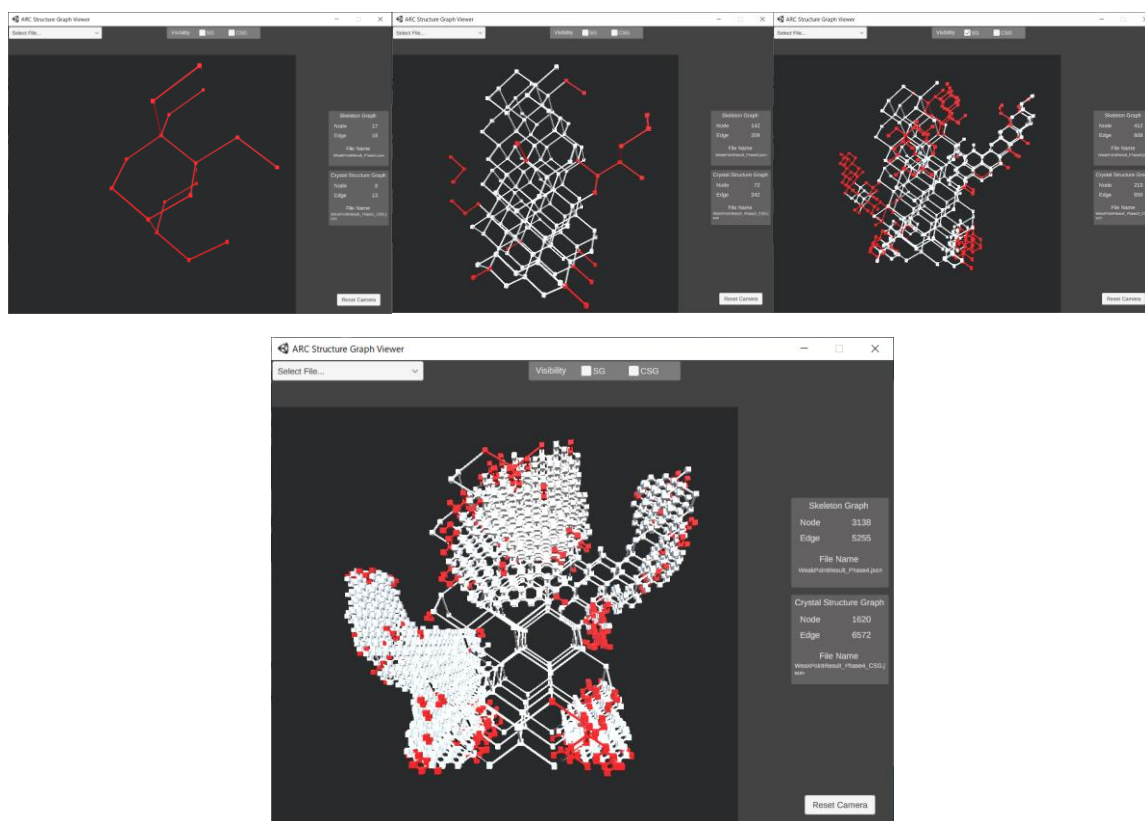


図7 高密度化されていく結晶構造化内骨格．構造的弱点ノードは赤色で示されている．

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図8に示す．横軸の置き換え回数に対し、縦軸の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が段階的に減少している．2段階目から3段階目で若干の増加が見られるのは、2段階目では一部構造が破綻していたのが3段階目では自動的に修正されているためである．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%以下となっている．次に図9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たものを示す．図9においては縦軸は全ノード数を1として正規化し、割合で表している．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．最終的に出力された結晶構造化内骨格モデルを図10に示す．

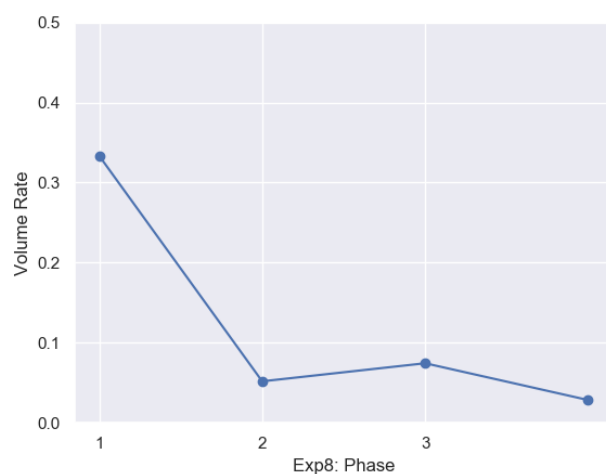


図 8 高密度化の繰り返しによる構造的弱点領域の減少

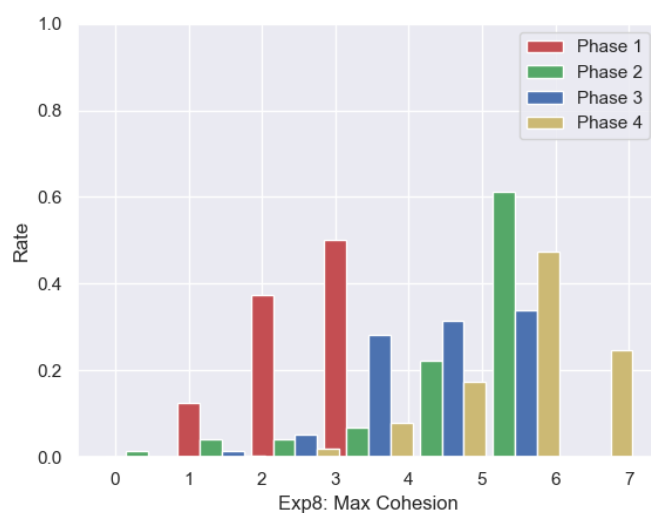


図 9 段階毎の最大 Cohesion 値の分布

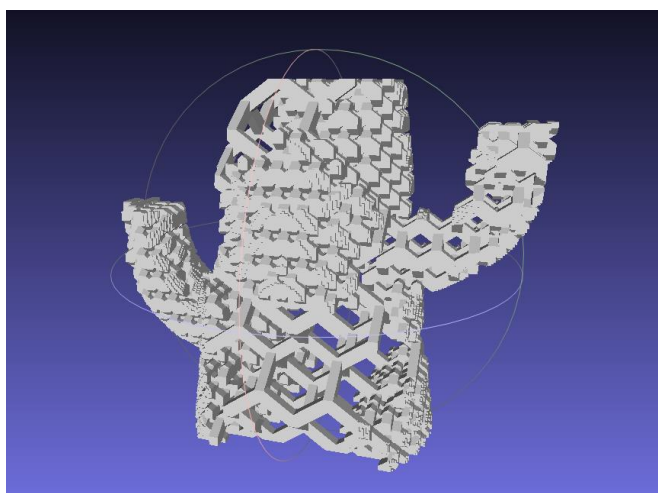


図 10 テストモデルに対して最終的に出力された結晶構造化内骨格

6 今後の展開

6-1 並列計算によるコンポーネント配置の最適化計算の高速化実装

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ーンモードでの 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、実験を実施する予定である。

6-2 一般公開へ向けたライブラリ化と API の整備

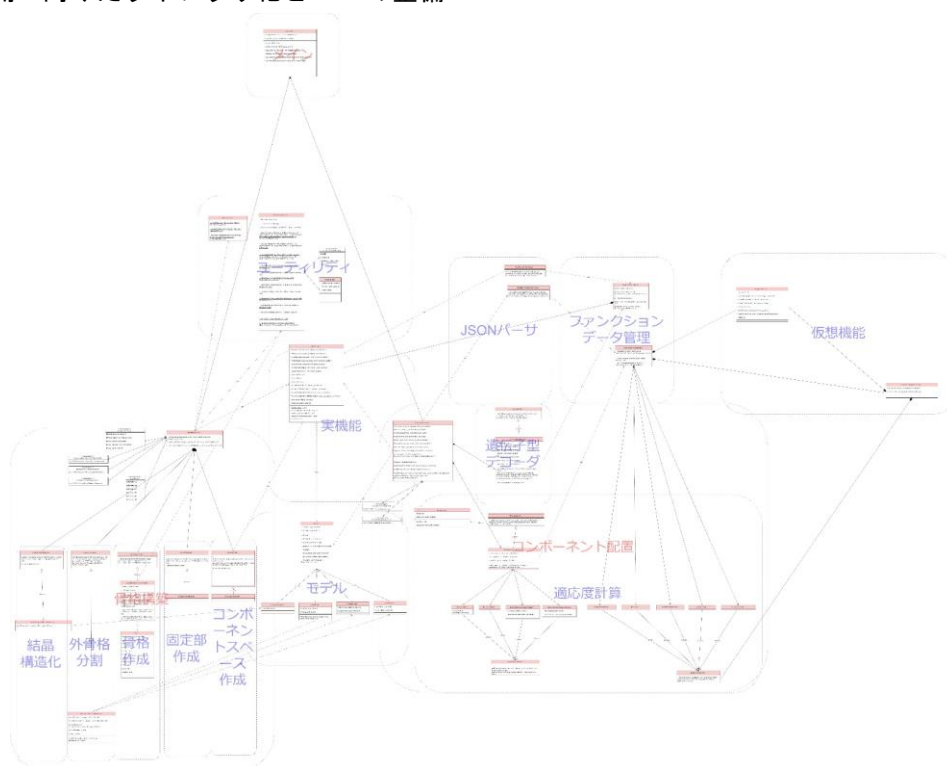


図 11 ライブラリクラス構成

自由な形状デザインを可能にするのロボット設計手法、及びその自動設計化に渡る本研究の手法全体のソフトウェア群を、一般公開へ向けたライブラリとして公開可能にするための API の整備を進めている。

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。

また、本手法ではロボットに実装するアクチュエータやセンサなどのコンポーネントを実際のパーツに合わせて予めデータとして登録しておく必要がある。これについて、現在まで JSON 形式にてデータの管理を行っている。こうした管理が煩雑になるため、管理ソフトウェアの作成も並行して行っている。このソフトウェアを使うことでコンポーネントの登録、削除等管理が容易になった。これに関しても合わせて公開への準備を進めている。

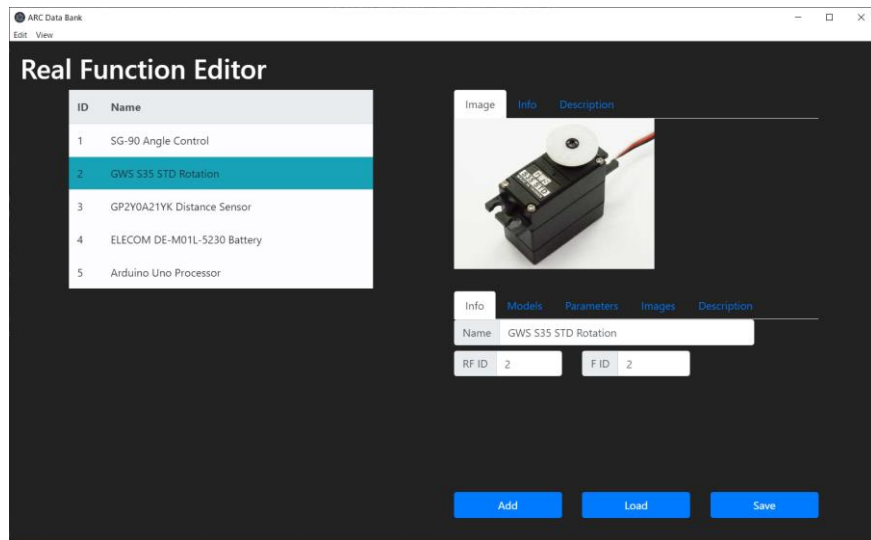


図 12 コンポーネントデータ管理ソフト

【参考文献】

- [1] 柴田崇徳, 和田一義, アザラシ型ロボット「パロ」によるロボット・セラピーの効果の臨床・実証実験について, 日本ロボット学会誌, Vol.29, No.3, pp.246-249, 2011.
- [2] 柴田崇徳, アザラシ型ロボット・パロと人との相互作用に関する研究, 日本ロボット学会誌, Vol.29, No.1, pp.31-34, 2011.
- [3] 浜田利満, 横山章光, 柴田崇徳, ロボット・セラピーの展開, 計測と制御, Vol.42, No.9, pp.756-762, 2003.
- [4] 佐藤知正, 中田 亨, 人と調和するペットロボットのための対人心理作用技術, 人工知能学会誌, Vol.16, No.3, pp.406-411, 2001.
- [5] 佐藤侑, 郭士傑, 稲田誠生, 向井利春, 介護支援ロボット RIBA-II の動作設計と評価実験, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.78, No.789, pp.1899-1912, 2012.
- [6] 神田崇行, 宮下敬宏, 長田 拓, 配川有, 石黒 浩, 人ロボット相互作用における人型ロボットの外見の影響, 日本ロボット学会誌, Vol.24, No.4, pp.497-505, 2006.
- [7] Wu, Y.H., Fassert, C., and Rigaud, A.S., Designing robots for the elderly: Appearance issue and beyond, Archives of gerontology and geriatrics, Vol.54, No.1, pp.121-126, 2012.
- [8] Broadbent, E., Stafford, R., and MacDonald, B., Acceptance of Healthcare Robots for the Older Population: Review and Future Directions, International journal of social robotics, Vol.1, No.4, pp.319-330, 2009.
- [9] Michaud, F., and Théberge-Turmel, C., Mobile robotic toys and autism, Socially Intelligent Agents,
- [10] Ito, S. and Yamashita, T., Applying rough set to analyze psychological effect of mascot character design. International Journal of Affective Engineering, Vol. 13, No. 3, pp. 159-165, 2014.
- [11] 山村高淑, ご当地キャラクターの背景にあるもの:”地元意識”のあり方と”幼稚さ”の意義について, 都市問題, Vol. 105, No. 8, pp. 18-22, 2014.

- [12] Jiyavorananda, S., Ishikawa, H., Sakai, S., Yamanaka, K., Yamanaka, T., and Masuda, T., Elucidation of factors predicting the impression of “yurusa” in Japanese yuru-kyara mascot characters. International Journal of Affective Engineering, Vol. 15, No. 3, pp. 231–238, 2016.
- [13] Hotogi, M., and Hagiwara, M., Analyses of local mascot characters and proposal of automatic character creation system using affective words. International Journal of Affective Engineering, Vol. 14, No. 4, pp. 299–307, 2015.
- [14] 永井由佳里, 3d プリンターが変えるものづくりのマインド, 日本ゴム協会誌, Vol. 87, No. 9, pp. 369–375, 2014.
- [15] 山内翔, 鈴木恵二, 結晶構造を参考にした内部構造と 3D プリンタによるモデル形状を優先したロボット設計, 電気学会論文誌 C, Vol. 139, No.9, pp.1051-1058, 2019.
- [16] Varadhan, G., and Manocha, D., Accurate Minkowski Sum Approximation of Polyhedral Models, Graphical Models, Vol. 4, No. 68, pp 343-355, 2006.
- [17] Li, W., and McMains, S., Voxelized Minkowski sum computation on the GPU with robust culling, Computer-Aided Design, Vol. 43, Issue 10, pp. 1270-1283, 2011.
- [18] Akenine-Möller, T., Fast 3D Triangle-Box Overlap Testing, Journal of graphics tools, Vol. 6, No. 1, pp. 29-33, 2001.
- [19] 和田健介, 中井正一, 関口徹, GPU を用いた有限要素法による地震波動伝播解析, 日本建築学会技術報告集, Vol. 19, No. 43, pp.1219-1224, 2013.
- [20] Dziekonski, A., Sypek, P., Lamecki, A., and Mrozowski, M., Generation of large finite-element matrices on multiple graphics processors, International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol. 94, No. 2, pp. 204-220, 2013.
- [21] Grötschel, M., Monma, C.L., and Stoer, M., Design of Survivable Networks, Handbooks in operations research and management science, Vol.7, pp.617-672, 1995.
- [22] Watanabe, T., and Nakamura, A., Edge-Connectivity Augmentation Problems, Journal of Computer and System Sciences, Vol. 35, No. 1, pp. 96-144, 1987.o. 1, pp. 96-144, 1987.
- [23] Moody, J., and White, Douglas R., Structural Cohesion and Embeddedness: A Hierarchical Concept of Social Groups, American Sociological Review, Vol. 68, No. 1, pp. 103-127, 2003.
- [24] 三島亜紀子, ソーシャルワークのグローバル定義における「社会的結束 (Social Cohesion)」に関する考察, ソーシャルワーク学会誌, Vol. 33, pp. 1-12, 2016.

〈発 表 資 料〉

題 名	掲載誌・学会名等	発表年月
結晶構造を参考にした内部構造と 3D プリンタによるモデル形状を優先したロボット設計	電気学会論文誌 C	2019/9/1