

CADに基づく不確実性を考慮したロボットによる組立作業計画

代表研究者 清川 拓哉 大阪大学 基礎工学研究科 助教

1 研究背景

産業界の多様なニーズに応えるために、将来の製造ロボットは、図 1 に示すような連続的で接触の多いロボットによる組立作業を機敏かつ無駄のない方法で習得する必要がある。組立作業を迅速に自動化する一つの方法は、製品の 3 次元 (3D) コンピュータ支援設計 (CAD) モデルを自動計画に利用することである。本研究では 3D CAD モデルに基づくロボットによる組立作業計画手法を構築することを目的としている。



(a) モーター (P2) の挿入 (b) カバー (P3) の挿入 (c) モーターカバー (P14) の挿入
図 1. 複雑な形状の物体に対する接触を伴う組立作業

組立順序の決定は、組合せ最適化問題として知られ、NP 困難な問題[1]に分類されるため、現実的な時間内に最適解を得るためのヒューリスティック探索アルゴリズムが使用される。複雑な製品のロボットによる組立作業では、必要な順序を決定する際にさまざまな側面を考慮することが重要である。通常、組立作業の成功は接触状態の遷移に依存している。近年、多くの研究者が接触の多い操作タスクに必要な順序の計画に取り組んできた[2]~[4]。しかし、これまでの研究では、物体配置姿勢、接触状態遷移、把持、アーム軌道など他の要素の計画を含む順序と動作計画を組み合わせた計画手法の構築は実現されていない。離散的なタスクの順序と連続的な動作の計画という異なる要素を含む Task and Motion Planning (TAMP) への多くのアプローチが従来から研究されてきたが、[5]で述べられているように、最適化と不確実性の考慮は従来の TAMP フレームワークを打破する上で重要である。多様な製品を扱う柔軟な製造には、不確実性を考慮した統一かつ複合的な指標に基づいて複数の要素を最適化する複合的な計画手法が不可欠である。

相反する目的を持つ多目的最適化問題に対処するために、本研究では接触・接続グラフに基づく染色体初期化 (CCGI) から開始する、NSGA-III (Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm III)[6]に着想を得た進化的多目的最適化 (EMO) アルゴリズムを採用する。清川ら[7]は、接触状態の遷移を考慮せずに、EMO をロボットによる分解順序計画問題に適用した。本研究では、実現可能性と安定性に関する拘束条件を利用し、不確実性、困難性、効率を評価する新しい目的関数を提案することで、EMO を本研究の問題設定に適用する。

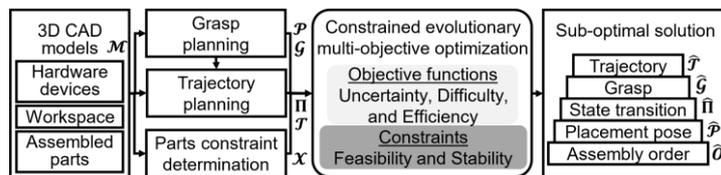


図 2. 提案するパイプラインの概要。3D CAD モデルが入力され、把持、状態遷移、部品間拘束を導出する。それらを用いて最適化で順序と動作を評価しながら、順序と動作の準最適解を得る。

ロボットのハードウェア、作業環境、および組立済みの物体の CAD モデルを使用し、ロボットによる組立動作の 3 次元幾何学シミュレーションと物理シミュレーションを実施する (図 2)。本研究では、不確実性を考慮した状態遷移プランナーである Contingent Contact-Exploring Rapidly-exploring Random Trees

(ConCERRT)[8]を組み込んでいる。ConCERRT は、サンプリングベースの計画手法であり、接触を伴うコンフィギュレーションと自由空間でのコンフィギュレーションを組み合わせた動作を探索する。自由空間の運動は不確実性を増加させるので、提案手法では不確実性を減少させる接触を伴う運動を積極的に含むように設計されている。最適化における不確実性に関する目的関数を設計するために、ConCERRT で確率的に生成されるロボットのツールコンフィギュレーションの分散を再利用することを提案した。

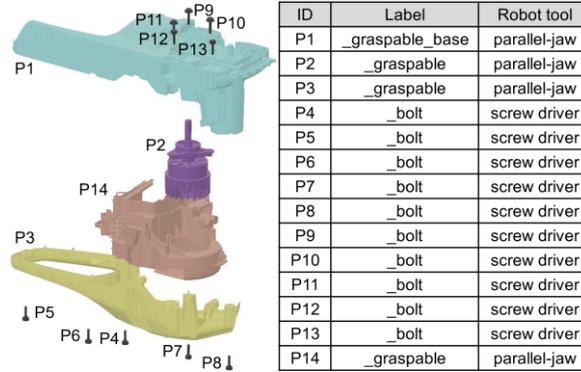


図 3. 対象物体のモデルの外観と各パーツへ付与されたラベル

シミュレーション実験の結果、提案した EMO は、図 3 に示す 14 個の部品を持つ複雑なチェーンソーモデルの組立計画を再現性良く生成することができ、制約条件を満たし、特に不確実性に関して目的関数の値を低くすることが示された。

2 組立順序と動作の最適化

Algorithm 1 CAD-Based Sequence and Motion Planning

Input: 3D CAD models of parts and environment M

Output: An assembly order of parts \hat{O} , task label \hat{L} , state transition $\hat{\Pi}$, grasp \hat{G} , arm trajectory \hat{T} , and object placement pose \hat{P}

- 1: $\mathcal{I} \leftarrow \text{GeometricalAnalysis}(M)$
- 2: $\mathcal{X}^{ps} \leftarrow \text{PhysicalSimulation}(M)$
- 3: $\mathcal{X}^{rs}, \Pi, \mathcal{G}, \mathcal{T}, \mathcal{P} \leftarrow \text{RobotSimulation}(M)$
- 4: Set $T_{\max}^i, T_{\max}^g, P^{ga}$ with user inputs
- 5: SetPlanner($\mathcal{I}, \mathcal{X}^{ps}, \mathcal{X}^{rs}, \Pi, \mathcal{G}, \mathcal{T}, \mathcal{P}, P^{ga}$)
- 6: $\hat{O}, \hat{L}, \hat{\Pi}, \hat{G}, \hat{T}, \hat{P} \leftarrow \text{OptimizeParameters}()$
- 7: **return** $\hat{O}, \hat{L}, \hat{\Pi}, \hat{G}, \hat{T}, \hat{P}$

2-1 概要

Algorithm 1 は順序と動作計画アルゴリズムの概要を示す。順序は \mathbf{o}_k ($k = 1, \dots, N^p$) で表され、 N^p は部品の数である。最初の組立部品、最後の部品、および最適化された順序は、それぞれ \mathbf{o}_1 , \mathbf{o}_{N^p} , および $\hat{\mathbf{O}}$ で示される。このアルゴリズムは、 M で表される環境と組立済み物体（例えば、ロボットアーム、グリッパー、作業台）の 3 次元 CAD モデルを入力とする。

関数 GeometricalAnalysis() と関数 PhysicalSimulation() は、部品情報 \mathcal{I} と部品関係行列 \mathcal{X}^{ps} を提供する。特に、このシミュレーションでは、部品名に関連するラベルと、 \mathcal{I} で表される各部品の 6 次元ポーズが抽出される。さらに、このシミュレーションでは、非拘束 \mathcal{X}^{cf} 、拘束度 \mathcal{X}^{cs} 、および接触 \mathcal{X}^{ct} 行列が生成され、これらは総称して \mathcal{X}^{ps} と示される。続く処理である関数 RobotSimulation() では、ロボットの動作シミュレーションを行い、各部品の組立に対する動作関係行列 \mathcal{X}^{rs} 、不確実性を低減した状態遷移 Π 、実現可能な把持 \mathcal{G} 、アーム軌道 \mathcal{T} 、物体配置姿勢 \mathcal{P} を求める。次節では、これら二つのシミュレーションとその出力の詳細を説明する。

Algorithm 1 の 3 行目以降の処理は、いくつかの点を除いて [7] で定義された処理と同じであり、提案するアルゴリズムが解（順序）の不確実性の程度を評価する。制約条件の充足判定と目的関数の計算を最適化の進化ループ内で効率的に行うために、本研究で、最適化を開始する前に、幾何学的シミュレーションと物理シミュレーションを行い、評価に必要なデータセットを得ることを提案する。データセットには、実現可能

で安定な把持計画，不確実性を考慮した状態遷移，部品間の物理的な拘束関係に関する行列が含まれる．データセットは，対象部品，対象サブアセンブリ，物体配置位置姿勢の可能な限りの組み合わせに対して生成される．

2-2 CADに基づく解析とシミュレーション

本章では，部品ラベルの定義や3D CADモデルの解析など，シミュレーションと最適化ループの前に行われる前処理の概要を説明する．

(1) 3次元幾何学的解析

部品ラベルには，部品カテゴリとロボットのツールを結びつけるタスクラベルと，順序の最初に固定されたベース部品に割り当てられるベースラベルがある．タスクラベルは，screw, bolt, nut, plate, graspable など特定の部品に指定される．graspable ラベルは，screw, bolt, nut, plate 以外の，二指グリッパーで操作可能な部品に割り当てられる．CADモデルを解析するために，OpenCASCADEのPythonラッパーを提供するPythonOCCを使用する．このシミュレータでは，CADモデルを部品名と組立部品の6次元位置姿勢に変換する．

(2) 動力学シミュレーション

部品関係行列 \mathbf{X}^{ps} を得るために，物理シミュレーションを行う．特に，[3]で提案された物理ベースのシミュレータを用いて，二つの部品間の分解可能な方向を探索し，非拘束 \mathbf{X}^{cf} ，拘束度 \mathbf{X}^{cs} ，接触 \mathbf{X}^{ct} 行列を計算する．方向探索の結果，一つ以上の方向が見つければ，非拘束行列の要素は1で埋められ，そうでなければ0で埋められる．方向探索の結果，一つ以上の接触領域が見つければ，二つの部品間の接触の存在を表す接触行列の各要素は1に設定される．さらに，図4に示す分類に従って近似接触領域のカテゴリを特定することにより，拘束度行列の各要素は，分類された形状カテゴリに関連付けられた拘束度で満たされる．図4は，異なる拘束度を持つカテゴリ形状を示している．計算方法は[2]を参照してほしい．複数の接触領域が見つかった場合，最も高い拘束度が行列要素に格納される．

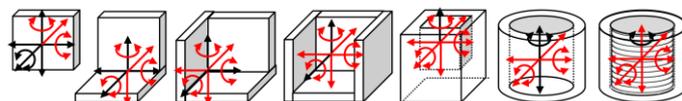


図4. 部品間の接触領域から定義される異なる拘束度をもつ形状の種類．

右側二つは中空円柱形状とねじ穴の形状である．左から拘束度は5, 8, 9, 10, 11, 8, 10である．

赤い矢印と黒い矢印はそれぞれ拘束方向と非拘束方向を示している．

(3) 接触を伴うロボット動作のシミュレーション

部品関係行列 \mathbf{X}^{ps} を得るために，接触状態遷移レベルでのロボット動作シミュレーションを行う．

Algorithm 2にConCERRTに基づく状態遷移計画アルゴリズムを示す．ConCERRTは不確実性を考慮した動作計画手法[8]であり，CERRT[10]よりもロボスを計画を得ることができる．本研究では，接触を伴う動作のシミュレーションのためにSDFに基づく衝突検出機能（図5）が実装されたIsaac Gymの機能[11]を用いたシミュレーション環境を作成した．

アルゴリズムは最初に \mathbf{M} を入力し，状態遷移のセット Π を出力する． Π には，ピッキング，搬送，および組立の各タスクの状態遷移が含まれる．本研究では，ピッキングおよび組立タスクは，ロボットのツールの中心位置（TCP）がピッキング対象の部品と部品供給トレイを囲む3次元バウンディングボックス内にある動作区間と，TCPが組立対象のサブアセンブリと固定具を囲む3次元バウンディングボックス内にある動作区間として定義される．次に，関数Set0を使用して， $\gamma^p, \gamma^t, \gamma^a \in [0, 1]$ がユーザー入力に設定される．上付き文字 p, t, a は，それぞれピッキング，搬送，および組立の英語の頭文字を表す．パラメータは，計画手法が各タスクに対して自由空間または接触移動を試みる速度を表す． $\gamma = 0$ の場合，計画手法は自由空間のみを探索し，目標バイアスを持つRRT-Connect [12]のように動作する． $\gamma = 1$ の場合，計画手法は不確実性を減らすことのみを目的とする．0から1の間の値はトレードオフの目的のバランスをとる．

すべての部品 i について，関数BeliefGeneration0は，ピッキングおよび搬送タスクの初期および目標の

信念 b_0 と b_g を表す一連の信念 $b_0^p, b_g^p, b_0^t, b_g^t$ を生成する. b_0^a, b_g^a は, 組立タスクの信念の集合を示し, これには, すべての可能な物体配置の位置姿勢 k のすべての可能なサブアセンブリ j に対する信念 $b_0^a(j, k), b_g^a(j, k)$ がそれぞれ要素として含まれている. 後続の処理は, ConCERRT を使用したピッキングおよび搬送タスクの状態遷移計画と, 接触状態遷移ポリシー π^p および π^t の提供する. ConCERRT の詳細は, [8] を参照してほしい. さらに, 対象部品が組み立てられる対象サブアセンブリ j と部品配置位置姿勢 k のすべての組み合わせについて, ConCERRT による計画を適用して, 組立タスクの方策 $\pi^a(j, k)$ を取得する.

Algorithm 2 ConCERRT-Based State Transition Planning

Input: 3D CAD models of parts and environment M
Output: A set of state transition Π

- 1: Set $(\gamma^p, \gamma^t, \gamma^a)$ ▷ defaults is (0.95, 0, 0.95)
- 2: **while** $i < N^p$ **do**
- 3: $b_0^p, b_g^p, b_0^t, b_g^t, b_0^a, b_g^a \leftarrow \text{BeliefGeneration}(M, i)$
- 4: $\pi^p \leftarrow \text{ConCERRT}(b_0^p, b_g^p, \gamma^p)$ ▷ picking
- 5: $\pi^t \leftarrow \text{ConCERRT}(b_0^t, b_g^t, \gamma^t)$ ▷ transportation
- 6: **while** $j < N^a$ **do** ▷ every subassembly
- 7: **while** $k < N^f$ **do** ▷ every placement pose
- 8: $\pi^a(j, k) \leftarrow$
- 9: $\text{ConCERRT}(b_0^a(j, k), b_g^a(j, k), \gamma^a)$
- 10: ▷ assembly
- 11: $\Pi_i \leftarrow (\pi^p, \pi^t, \pi^a)$
- 12: **return** Π

2-3 制約付き多目的最適化

Algorithm 3 は, NSGA-III[6] に着想を得た MOGA を示し, 4 以上の目的を持つ多目的最適化問題で高い性能を示す[7]. 本研究で設計された 3 つの目的関数は, 3 次元 CAD モデルから抽出された情報から計算される. 本研究では, すべての目的関数を等しく評価し, 0 を最良評価値, 1 を最悪評価値とする最小化問題を考える.

Algorithm 3 NSGA-III-inspired MOGA

Input: $\mathcal{I}, \mathcal{X}^{ps}, \mathcal{X}^{rs}, \Pi, \mathcal{G}, \mathcal{T}, \mathcal{P}, T_{\max}^i, T_{\max}^g, P^{ga}$
Output: $\hat{\mathcal{O}}, \hat{\mathcal{L}}, \hat{\Pi}, \hat{\mathcal{G}}, \hat{\mathcal{T}}, \hat{\mathcal{P}}$

- 1: SetPlanner($\mathcal{I}, \mathcal{X}^{ps}, \mathcal{X}^{rs}, \Pi, \mathcal{G}, \mathcal{T}, \mathcal{P}, P^{ga}$)
- 2: Initialize the counters of t^i and t^g to 1
- 3: **while** $t^i < T_{\max}^i$ **do**
- 4: $G^1 = \text{ChromosomeInitialization}()$
- 5: **while** true **do**
- 6: Initialize the elements of $E^{G^{t^g}}$ to 1
- 7: $C^{G^{t^g}} \leftarrow \text{ConstraintCheck}(G^{t^g})$
- 8: **if** All elements of $C^{G^{t^g}}$ are Available **then**
- 9: $E^{G^{t^g}} \leftarrow \text{FitnessCalculation}(G^{t^g})$
- 10: $G^{best} \leftarrow \text{BestSolutionExtraction}(G^{t^g}, E^{G^{t^g}})$
- 11: **if** $T_{\max}^g < t^g$ **then**
- 12: **break**
- 13: $\tilde{G}^{t^g}, E^{\tilde{G}^{t^g}} \leftarrow$
- 14: $\text{NonDominatedSorting}(G^{t^g}, E^{G^{t^g}})$
- 15: $\text{NichingWithReferenceLine}(\tilde{G}^{t^g}, E^{\tilde{G}^{t^g}})$
- 16: $G^{t^g+1} \leftarrow \text{NextGenerationCreation}(\tilde{G}^{t^g}, E^{\tilde{G}^{t^g}})$
- 17: $G^{t^g+1} \leftarrow \text{GeneticOperation}(G^{t^g+1})$
- 18: $t^g \leftarrow t^g + 1$
- 19: $t^i \leftarrow t^i + 1$
- 20: $\hat{\mathcal{O}} \leftarrow G^{best}$
- 21: $\hat{\mathcal{L}} \leftarrow \text{LabelExtraction}(\hat{\mathcal{O}})$
- 22: $\hat{\Pi}, \hat{\mathcal{G}}, \hat{\mathcal{T}}, \hat{\mathcal{P}} \leftarrow \text{OperationParameterExtraction}(\hat{\mathcal{O}})$
- 23: **return** $\hat{\mathcal{O}}, \hat{\mathcal{L}}, \hat{\Pi}, \hat{\mathcal{G}}, \hat{\mathcal{T}}, \hat{\mathcal{P}}$

(1) 実現可能性と安定性の制約条件

順序が実行不可能または不安定な場合、組立作業は人間でもロボットでも実行できない。逆に、順序がすべての制約（利用可能）を満たしている場合、制約を満たす順序のみが他の目的関数に基づき評価される。

順序の実現可能性は、順序と動作の実現可能性の両方を確認することによって決定される。非拘束行列 \mathbf{X}^{cf} に関する指定された条件を充足する場合、順序は順序実行可能と見なされる。

$$\sum_{k=2}^{N^p} \left(\prod_{i=1}^{k-1} X^{cf}(P_{O_i}, P_{O_k}) > 0 ? 1 : 0 \right) = N^p - 1. \quad (1)$$

順序を完了するために必要なすべての組立に対して、一つも衝突がなく 逆運動学の解が存在するロボットのツールコンフィギュレーションと軌道が見つかった場合、順序は動作可能と見なされる。したがって、動作可能性行列 \mathbf{X}_i^{mf} ($i = 1, \dots, N^p$)に関する次の条件が満たされている場合、対象順序は動作可能と判断される。

$$\sum_{k=2}^{N^p} \left(\prod_{i=1}^{k-1} \sum_{j=1}^{N_{pok}^m} X_{pok}^{mf}(\mathcal{M}_j^{pok}, P_{O_i}) > 0 ? 1 : 0 \right) = N^p, \quad (2)$$

ここで、 $X_{pok}^{mf}(\mathcal{M}_j^{pok}, P_{O_i})$ は、 pok は P_{O_k} を表すとき、 i 番目の部品 P_{O_i} と、対象の k 番目の部品 P_{O_k} に対する j 番目の実行可能な動作セット \mathcal{M}_j^{pok} との間の動作実現可能性行列を表す。実行可能な動作セット \mathcal{M}_j^i は、実行可能な接触 C_j^i 、実行可能な軌道 T_j^i 、および実行可能な物体配置 P_j^i で構成される。各部品に対して生成される実行可能な動作の数は、 N_i^m ($i = 1, \dots, N^p$)で表される。

安定性の評価には、2つの異なる基準の評価が含まれる。最初の基準は、対象部品の組立後に残った部品が作業空間内で静的な状態で安定した姿勢を維持できるかどうか（静的安定条件）である。2番目の基準は、すべての部品が相互接続されているかどうかを判断することである（接続条件）。静的安定条件は、最適な3次元造形[13]やヒューマノイドロボットのバランス制御[14]の分野で確立された方法を使用して簡単に評価できる。部品のさまざまな位置姿勢を保持するための柔軟な固定具が利用できる場合は、静的安定条件は常に満たされるため無視できる。この問題に対処するための解決策として、位置姿勢変更可能な治具を使用する。接続条件は、シミュレーションで検出された接触点に基づいて決定する。次の条件が満たされている場合、順序は安定している。

$$\sum_{k=2}^{N^p} \left(\sum_{j=1}^{k-1} X^{ct}(P_{O_i}, P_{O_k}) \neq 0 ? 1 : 0 \right) = N^p - 1. \quad (3)$$

\mathbf{X}^{ct} は接触行列を表す。ここで、値1は \mathbf{X}^{cs} に0以外の値が存在することを示す。

(2) 不確実性の目的関数

目的関数の一つは、接触状態遷移を含む軌道の不確実性に関するものである。不確実性は、生成された状態遷移が通過するすべての信念におけるロボットのツールコンフィギュレーションの分散に基づいて計算される。方策 π の不確実性スコア $US(\pi)$ ($N^c > 0$ の場合)は次のように計算される。

$$US(\pi) := \sum_{i=0}^{N^b} \gamma \left(d_{\Sigma}(b_i) + \sum_{b'_i \in Sib(b_i)} d_{\Sigma}(b'_i) \right) + (1 - \gamma) d_{\mu}(b_i), \quad (4)$$

ここで、 N^b と N^c はそれぞれ接触と自由空間の順序の信念の数と、順序に対して選択された接触状態の数を表す。 $N^c \leq 0$ の場合、 $US(\pi)$ は1として計算される。式(4)において、 $d_{\mu}(b)$ は各サンプルのロボットのツールコンフィギュレーションと信念におけるロボットのツールコンフィギュレーションの平均との間の空間距離を表し、 $d_{\Sigma}(b)$ は信念におけるロボットのツールコンフィギュレーションの共分散行列のトレースノルムを表す。用語の詳細は、[8]と[10]を参照してほしい。

式(4)を用いて不確実性に関する目的関数を以下のように定義する。

$$f_u := \left(\sum_{k=1}^{N^p} \sum_{T \in \{p, t, a\}} US(\pi^T) / US(\pi^T)_{\max} \right) / 3N^p, \quad (5)$$

ここで、 $US(\pi^T)_{\max}$ は、各タスク $T \in \{p, t, a\}$ における指定されたサブアセンブリと配置位置姿勢の最大不確実性スコアを表す。

(3) 難度の目的関数

様々な難度の定義[15]の中で、本研究では順序難度の一種である制約状態遷移難度[9]を使用する。これは次のように表現できる。

$$f_d := \begin{cases} H/12(N^p - 1) & \text{if } \mathbf{O} \text{ is available} \\ 1 & \text{otherwise} \end{cases}. \quad (6)$$

ここで、 H は各部品の組立に関連する拘束状態遷移の難度の最大レベルを表す。

$$H := \max_{k \in \{2, 3, \dots, N^p\}} \sum_{i=1}^{k-1} X^{cs}(P_{O_i}, P_{O_k}) < 12(N^p - 1). \quad (7)$$

$\sum_{i=1}^{k-1} X^{cs}(P_{O_i}, P_{O_k})$ は、 k 番目の部品 P_{O_k} とその組立部品 $P_{O_1}, P_{O_2}, \dots, P_{O_{k-1}}$ を表す。定義によれば、二つの部品間の最大拘束度は12であり、したがって、拘束度行列 X^{cs} の各要素は次のように計算される。

$$X^{cs}(P_i, P_k) := 12 - \sum_{j=1}^{12} X_j^{cf}(P_j, P_k) \in \{0, \dots, 11\}. \quad (8)$$

行列 X_j^{cf} ($j = 1, \dots, 12$)は非拘束行列を表す。

(4) 効率性の目的関数

タスクラベルは、タスクの変更回数と対象部品の質量中心間の距離を最小限に抑えることで、タスク順序の効率を最大化するために使用される。

$$f_d := \begin{cases} [N^{tc}/(N^p - 1) + D/(N^p \times D_{\max})]/2 & \text{if } \mathbf{O} \text{ is available} \\ 1 & \text{otherwise} \end{cases}. \quad (9)$$

タスク変更回数 N^{tc} は、各部品 $i = 1, \dots, N^p$ のタスクラベル T_{O_i} を分析することによって決定できる。

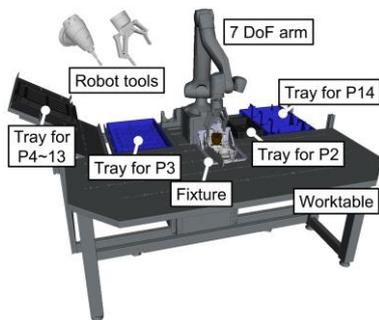
$$N^{tc} = \sum_{k=2}^{N^p} [(T_{O_k} = T_{O_{k-1}}) ? 1 : 0]. \quad (10)$$

総移動距離 D は、各部品間の距離 d_{P_i, P_j} を測定することによって決定できる。

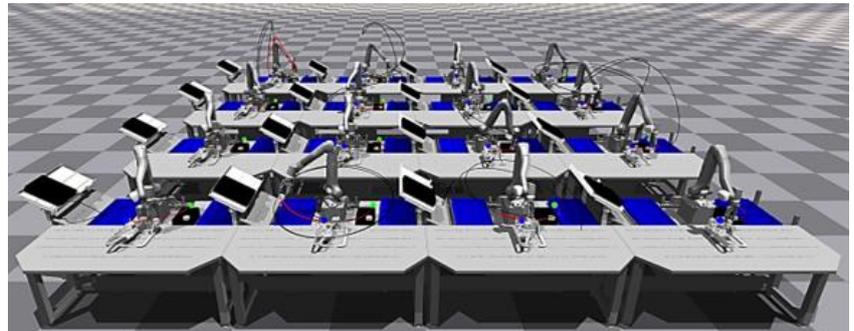
$$D = \sum_{k=2}^{N^p} d_{P_{O_k}, P_{O_{k-1}}}. \quad (11)$$

D_{\max} は、任意の二つの部品間の最大距離を表す。

3 評価



(a) 組立作業環境



(b) 計画シミュレーション環境

図 5. 実験システム。(a)と(b)は、本実験で用いた組立作業環境におけるハードウェア構成と IsaacGym を用いた並列シミュレーション環境を示す。

2-1 概要

実験では、シミュレーションと実世界のタスクにおける生成された順序の性能の観点から、提案手法の有

効性を検証するために設計した。シミュレーションでは、図 5 に示すような作業環境を構築した。DLR の 7 自由度アーム SARA[16]を使用した。このアームは、ツールチェンジャーを使用して、組立部品に応じて二指グリッパー (Robotiq 2F-140) と電動ドライバーを交換することができる。図 3 にチェンソーのモデルと部品 ID を示す。図 3 の右側には、14 の部品とその部品に使用するロボットのツールに関連するラベルが記載されている。図 5 に示すように、作業台には 4 種類の部品トレイがある。アームの左側にある黒と青のトレイは、それぞれ P2 と P14 を供給するためのものである。アーム右側の青と黒のトレイは、それぞれ P3 とボルト部品 (すなわち P4~P13) を供給するためのものである。トレイ治具は[17]で提案されているものを使用した。

配列の生成には、染色体数、クロスオーバー率、突然変異率、カットアンドペースト率、ブレイクアンドジョイン率など、[2]と同じパラメータを用いた。本手法では、反復回数を 500 回、試行回数を 1000 回とした。ロボットの動作を考案するために、[18]に記述されているように、可能な把持を生成するために対象物体の幾何学的形状に基づくアプローチを採用した把持計画手法を利用した。評価では、接触状態遷移を考慮した軌道計画手法である CERRT[10]と ConCERRT[8]の性能を、RRT[19], RRT-Connect[12], RRT*[20], RRT*-Connect[21]などのよく使われる計画手法と比較した。

2-2 最適化の性能

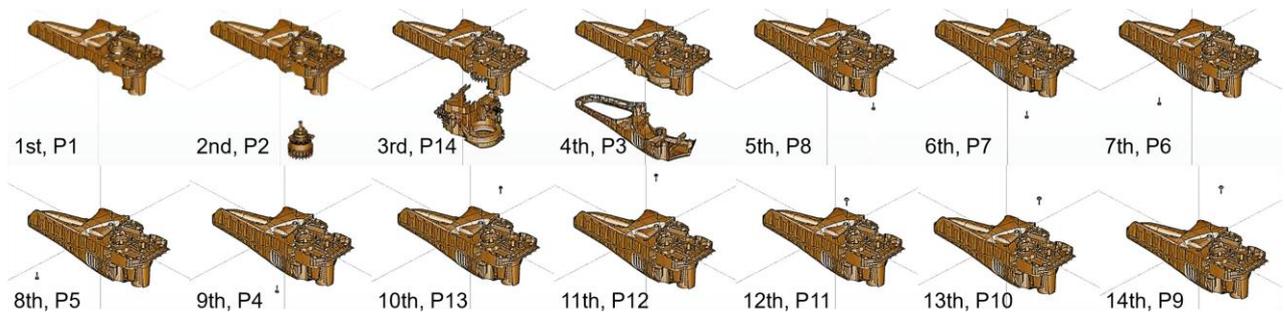


図 6. 最適化後に導出された組立順序

図 6 は、1000 回の最適化試行 (1 回の最適化で 500 回の進化更新) において、提案した目的関数によって計算された評価値が最も高い (計算値が最も低い) 最適解の順序を示す。全順序において部品間の干渉がないことがわかる。

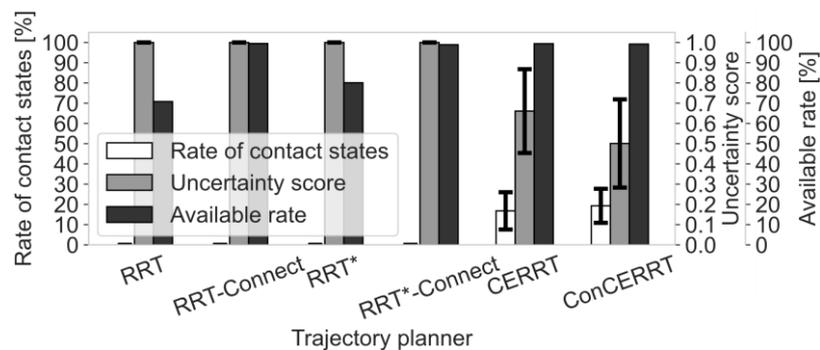


図 7. 500 世代更新の 1000 回の多目的最適化を実行後の結果。

グラフは生成結果における Available rate, 接触状態の割合と不確実性スコアの平均と標準偏差を示す。

図 7 に Available rate, 接触状態の割合と不確実性スコアの平均値 (バー) \pm 標準偏差 (エラーバー) と不確実性スコアを示す。CERRT と ConCERRT は接触運動も考慮するため探索空間が広いが、提案手法 (ConCERRT) では、シミュレーションのチェンソーの組立順序において、500 世代、1000 回の最適化後に得られた利用可能率は 99.2%であった。この Available rate は、NSGA-II[22]や多目的粒子群最適化[23]

で達成された Available rate（実験ではそれぞれ 69.6%，79.1%）を大きく上回る。

接触状態遷移を考慮した提案手法と接触状態遷移を考慮しない比較手法の不確実性の評価値を比較すると、提案手法が最も不確実性のスコアが低い（低いほど良い）。RRT に基づく手法では、接触状態遷移を考慮した計画を行わないため、接触の閾値が設定され、多少の接触が許容されても、接触状態はノードとして生成されない。そのため、式(5)を用いると、 $US(\pi) = 1$ と不確実性が高いと計算された。ConCERRT 法は分割された信念もチェックするため、CERRT 法に比べて不確実性が低くなるという利点がある。組立計画実験でも同様の傾向が確認できた。

2-3 動作計画結果

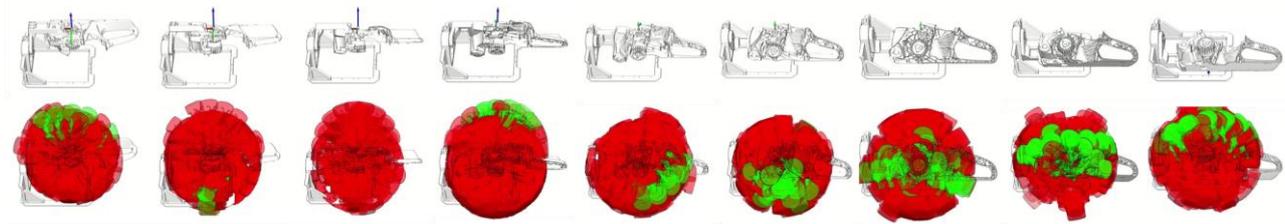


図 8. モーター（P2）の把持可能位置姿勢．挿入対象物体の治具による異なる配置姿勢に対する把持可能位置姿勢をツールで示しており、緑色が対象物体に非干渉、赤色が干渉するツールの位置姿勢を示す。

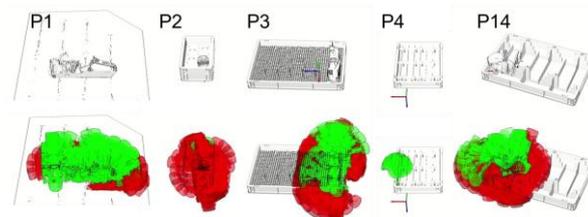
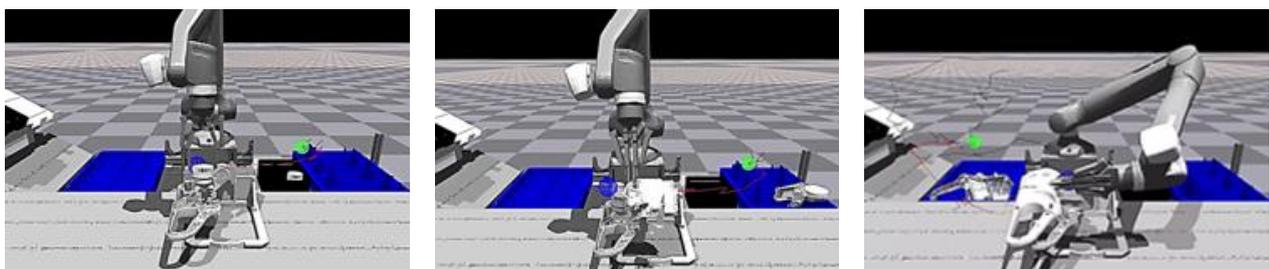


図 9. 各部品 of 把持および接触可能位置姿勢．各部品のピッキング前の配置物体に対するツールの位置姿勢を示しており、緑色が対象物体に非干渉、赤色が干渉するツールの位置姿勢を示す。

図 8 と図 9 は、ピッキングと組立タスクの把持計画結果である。緑色のツールは把持成功、赤色のツールは衝突による把持失敗を示す。把持可能なツールの中から、現在のツールの姿勢から最も近い把持を選択した。図 10 は、3 つのタスク順序に対する最適解の動作生成結果である。



(a) モーター（P2）の挿入 (b) モーターカバー（P14）の挿入 (c) カバー（P3）の挿入

図 10. 各部品の組立作業に対して生成された軌道．黒色の線が探索された手先位置を示しており、赤色が最終的に導出された手先位置の経路を示す。

モータの挿入（P2）については、モータの一方の接点がベース部のもう一方の接点と一致するようにモータをベース部上に移動させ、次に面が一致するようにモータを傾け、最後に穴が一致するように面に沿ってモータをスライドさせる。一方、比較方法では、RRT-Connect により生成された衝突の無い軌道を使用して穴に直接接近する。

モーターカバーの挿入 (P14) では、提案手法は、対象物体を作業台上に移動させ、対象物体と作業台を接触させた後、目標の接触状態を満たすようにスライドさせる。比較手法では、RRT-Connect に基づく衝突の無い軌道を用いて、位置が揃うように水平方向に直接アプローチする動作を生成する。

カバー挿入 (P3) の状態遷移も、モーターカバー挿入 (P14) の状態遷移と同じ順序で生成された。比較手法では、不確実性が高いだけでなく、難度も高い動作が生成される。したがって、不確実性に基づく接触状態遷移を考慮しないと、不確実性と難度の高い接触状態遷移が生成され、成功率が低下する。つまり、提案手法で生成した順序と動作計画を用いることで、組立作業の成功率を向上させることが可能となる。

4 まとめ

本研究では、多数の接触領域を持つ複雑な機械製品の不確実性を考慮した順序とロボット動作を計画するための多目的最適化問題を解くことを目的とした。これを達成するために、接触が多いロボット操作のための制約条件と目的関数を持つ NSGA-III に着想を得たアルゴリズムを使用した。また、本研究では、ConCERRT に基づく状態遷移計画に基づく不確実性に関する目的関数も組み込んだ。チェーンソーの組立計画を生成する実験を行った結果、提案手法は 99.2% の成功率で制約を満足する順序を生成することができ、ロボットによる組立作業に好ましい条件を全て満たすことが実証された。

図 5(b) に示す並列化されたシミュレーション環境では、シミュレーション時間が約 1 週間から 2 日に短縮された。今後、様々なシナリオでの処理時間を検証し、形状解析と最適化の効率を向上させる方法を検討する予定である。提案したフレームワークは、把持の不確実性と接触の安定性のため、現在のところ実システムで実行することはできない。今後の研究では、実世界で推定される把持の不確実性に基づいて、どのように動作計画を修正する必要があるのか、また、順序計画に基づいて、力制御ロボットのコンプライアンスをどのようにパラメータ化することができるのかを調査する予定である。

【参考文献】

- [1] M. Goldwasser, J.-C. Latombe, and R. Motwani, “Complexity measures for assembly sequences,” in Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Autom. (ICRA), vol. 2, 1996, pp. 1851–1857.
- [2] T. Kiyokawa, J. Takamatsu, and T. Ogasawara, “Assembly sequences based on multiple criteria against products with deformable parts,” in Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Autom. (ICRA), 2021, pp. 975–981.
- [3] Y. Tian, J. Xu, Y. Li, J. Luo, S. Sueda, H. Li, K. D. Willis, and W. Matusik, “Assemble them all: Physics-based planning for generalizable assembly by disassembly,” ACM Trans. Graph., vol. 41, no. 6, 2022.
- [4] S. Dorn, N. Wolpert, and E. Schömer, “An assembly sequence planning framework for complex data using general Voronoi diagram,” in Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Autom. (ICRA), 2022, pp. 9896–9902.
- [5] C. Garrett, R. Chitnis, R. Holladay, B. Kim, T. Silver, L. Kaelbling, and T. Lozano-Pérez, “Integrated task and motion planning,” Ann. Rev. Control Robot. Auton. Syst., vol. 4, no. 1, pp. 265–293, 2021.
- [6] K. Deb and H. Jain, “An evolutionary many-objective optimization algorithm using reference-point-based nondominated sorting approach, part I: Solving problems with box constraints,” IEEE Trans. Evol. Comput., vol. 18, no. 4, pp. 577–601, 2014.
- [7] T. Kiyokawa, K. Harada, W. Wan, T. Ishikura, N. Miyaji, and G. Matsuda, “Many-objective-optimized semi-automated robotic disassembly sequences,” 2024.
- [8] E. Páll, A. Sieverling, and O. Brock, “Contingent contact-based motion planning,” in Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. Intell. Robots Syst. (IROS), 2018, pp. 6615–6621.
- [9] T. Yoshikawa, Y. Yokokohji, and Y. Yu, “Assembly planning operation strategies based on the degree of constraint,” in Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. Intell. Robots Syst. (IROS), 1991, pp. 682–687.
- [10] A. Sieverling, C. Eppner, F. Wolff, and O. Brock, “Interleaving motion in contact and in free space for planning under uncertainty,” in Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. Intell. Robots Syst. (IROS), 2017, pp. 4011–4073.

- [11] B. Tang, M. A. Lin, I. Akinola, A. Handa, G. S. Sukhatme, F. Ramos, D. Fox, and Y. N. and, “IndustReal: Transferring contact-rich assembly tasks from simulation to reality,” in Proc. Robot. Sci. Syst. (RSS), 2023.
- [12] J. Kuffner and S. LaValle, “RRT-Connect: An efficient approach to single-query path planning,” in Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Autom. (ICRA), 2000, pp. 995–1001.
- [13] R. Prévost, E. Whiting, S. Lefebvre, and O. Sorkine-Hornung, “Make it stand: Balancing shapes for 3D fabrication,” ACM Trans. Graph., vol. 32, no. 4, 2013.
- [14] K. Harada, S. Kajita, K. Kaneko, and H. Hirukawa, “ZMP analysis for arm/leg coordination,” in Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. Intell. Robots Syst. (IROS), vol. 1, 2003, pp. 75–81.
- [15] T. Kiyokawa, N. Shirakura, Z. Wang, N. Yamanobe, I. G. Ramirez-Alpizar, W. Wan, and K. Harada, “Difficulty and complexity definitions for assembly task allocation and assignment in human–robot collaborations: A review,” Robot. Comput. Integr. Manuf., vol. 84, p. 102598, 2023.
- [16] M. Iskandar, C. Ott, O. Eiberger, M. Keppler, A. Albu-Schäffer, and A. Dietrich, “Joint-level control of the DLR lightweight robot SARA,” in Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. Intell. Robots Syst. (IROS), 2020, pp. 8903–8910.
- [17] T. Bachmann, O. Eiberger, T. Eiband, F. Lay, P. Angsuratanawech, I. Rodriguez, P. Lehner, F. Stulp, and K. Nottensteiner, “Task-specific reconfiguration of variable workstations using automated planning of workcell layouts,” in Proc. Int. Symp. Robot., 2023, pp. 250–257.
- [18] W. Wan, K. Harada, and F. Kanehiro, “Planning grasps with suction cups and parallel grippers using superimposed segmentation of object meshes,” IEEE Trans. Robot., vol. 37, no. 1, pp. 166–184, 2021.
- [19] S. M. LaValle, “Rapidly-exploring random trees: a new tool for path planning,” Tech. Rep., Comput. Sci. Dept., Iowa State Univ., vol. 98-11, 1998.
- [20] S. Karaman and E. Frazzoli, “Sampling-based algorithms for optimal motion planning,” The Int. J. Robot. Res. (IJRR), vol. 30, no. 7, pp. 846–894, 2011.
- [21] S. Klemm, J. Oberländer, A. Hermann, A. Roennau, T. Schamm, J. M. Zollner, and R. Dillmann, “RRT*-Connect: Faster, asymptotically optimal motion planning,” in Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Biomim. (ROBIO), 2015, pp. 1670–1677.
- [22] K. Deb, A. Pratap, S. Agarwal, and T. Meyarivan, “A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II,” IEEE Trans. Evol. Comput., vol. 6, no. 2, pp. 182–197, 2002.
- [23] C. Coello, G. Toscano Pulido, and M. Lechuga, “Handling multiple objectives with particle swarm optimization,” IEEE Trans. Evol. Comput., vol. 8, pp. 256–279, 2004.

〈 発 表 資 料 〉

題 名	掲載誌・学会名等	発表年月
CAD-Informed Uncertainty-Aware Sequence and Motion Planning for Robotic Assembly	Proceedings of IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE)	2024年8月29日
CAD-Informed Uncertainty-Aware Robotic Assembly Sequences	Late Breaking Results Poster Session in IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)	2024年5月14日