

## SAとPSOによるリンク機構のトポロジー最適化

## Topology Optimization of Linkage Mechanisms Using SA and PSO

田村 遼<sup>1)</sup>, 五反田 匠真<sup>1)</sup>, 長谷川 浩志<sup>1)</sup>

Ryo Tamura, Shoma Gotanda and Hiroshi Hasegawa

1) 芝浦工業大学 大学院理工学研究科 システム理工学専攻 (〒337-8570 埼玉県さいたま市見沼区深作307番地)

This study proposes a topological optimization of the link mechanism using Simulated Annealing (SA) and Particle Swarm Optimization (PSO): SA provides enhanced global exploration of the spring parameter updates, while PSO optimizes the node arrangements. By hybridizing these methods, the proposed method obtains stable generation and convergence to the global optimum. As a result, a link mechanism that minimizes the objective function is successfully generated.

**Key Words :** Topology Optimization, Link mechanism, SA, PSO, Multibody dynamics

## 1. 緒言

ロボットに代表される様々なプロダクトには幾何要素が組み合わせたリンク機構を有するものが多数存在する. ここでは, 最適なリンク機構を創発させるために, リンク機構のトポロジー最適化を取り扱う. リンク機構のトポロジー最適化では, 例えば, Kim[1]によるトポロジー最適化, 五反田ら[2]の一樣乱数をリンク機構のノード再配置に用いたトポロジー最適化がある.

本研究では, 五反田らの手法[2]にSA(Simulated Annealing)法を導入し, PSOによる平面リンク機構のノード再配置を同時に実施するトポロジー最適化について得られた知見を報告する.

## 2. 提案手法

## (1) 目的関数の設定

リンク機構のトポロジー最適化の目的関数は, 仮創生したリンク機構と設計者が設定した従動節の理想軌跡との誤差とする. また, 式(1)~式(3)に設計変数, 目的関数, 制約条件を示す.  $x_i$ は $x$ 座標,  $y_i$ は $y$ 座標,  $p_s^{ideal}$ は設計者が理想とする従動節の軌跡座標,  $p_s^{actual}$ は実際の従動節の軌跡座標,  $l$ ,  $h$ は設計領域の縦と横の寸法,  $s$ はステップ数をそれぞれ示す.

設計変数:

$$x_i = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}, y_i = \{y_1, y_2, \dots, y_n\} \quad (1)$$

目的関数:

$$F(s) = \frac{1}{t} \sqrt{\sum_{s=1}^t (p_s^{ideal} - p_s^{actual})^2} \rightarrow \min \quad (2)$$

制約条件:

$$0 \leq x_i \leq l, 0 \leq y_i \leq h \quad (3)$$

## (2) リンク機構創生アルゴリズム

## 1) 初期条件の設定およびリンク作成

図-1に示すように, 原動節, 従動節, 静止節, 入力荷重を設定する. 次に, 設計領域内にランダムにノードを作成し, ドロネー三角形分割により三角形メッシュを作成する. この三角形メッシュの稜線をリンクとし, ばね要素で構成する.

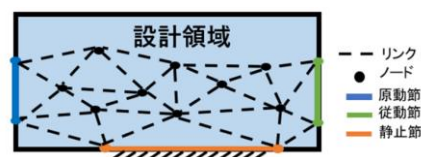


図-1 初期条件設定

## 2) リンクのばね定数更新[3]

マルチボディダイナミクスシミュレーションに基づき, 目的関数と各リンクにかかる力と温度からばね定数を順次更新する. 全 $m$ 本のリンクの更新を1周期とし,  $n+1$ 周期目の $i$ 番目のリンク $k_i^{n+1}$ の更新式を式(4)に示す. SA法に基づき, 平均0,分散1の正規分布に従うガウスノイズ $\zeta$ に温度 $T_n$ を乗じたものを加える.

$$k_i^{n+1} = k_i^n + c_i \{(k_{max} - k_{min})\alpha_i^p + \zeta T_n\} \quad (4)$$

ステップ数 $c_i$ は目的関数の勾配より求める. 目的関数が改良した場合は式(5)で示す. また, 悪化および変わらない場合は, ステップ数の値が小さくなるように設定している.  $N$ は再加熱回数,  $F_{max}^N$ は再加熱 $N$ 回目における目的関数の最大値とする.

$$c_i = c_0 - \frac{\Delta F(s)}{F_{max}^N} \quad (5)$$

式(6)における力の割合 $\alpha_i$ は、 $i$ 番目のリンクに対する現在のシミュレーション結果の力 $f_i^i$ を、前回( $i-1$ 番目のリンク更新時)の同リンクへの力 $f_i^{i-1}$ と比較して算出する。

$$\alpha_i = \begin{cases} \frac{f_i^i}{f_{\max}} & (f_i^i \geq f_i^{i-1}) \\ -\frac{f_{\max} - f_i^i}{f_{\max}} & (f_i^i < f_i^{i-1}) \end{cases} \quad (6)$$

目的関数が改善した場合、必ずばね定数更新を受け入れ、悪化した場合は温度に応じた確率で受け入れる。

### 3) トポロジー最適化

ばね定数値の低いリンクおよびそのリンクに付随するノードも除去する。リンク・ノードの除去条件を式(7)に示す。 $E$ はリンクを除去する割合とする。

$$k_i < (k_{\max} - k_{\min})E + k_{\min} \rightarrow \text{remove} \quad (7)$$

### 4) PSOを用いた再配置

目的関数が許容軌跡誤差を満たさない場合、1周期ごとにPSOによるノードの再配置を行う。式(9)の速度更新式において、 $n$ 周期目の $i$ 番目のリンクの両端ノードを $x_i^n, x_{i+1}^n$ とし、その $i$ 番目のリンク単体で最小な目的関数を得た際の両端の座標をパーソナルベスト $p_i, p_{i+1}$ とする。全体の中での最も良い目的関数値の座標をグローバルベスト $g_i$ とする。 $n+1$ 周期における座標 $x_i^{n+1}$ は式(8)~式(10)より示される。式(8)よりパラメータは温度の影響も考慮して設定した。 $r$ は $U[0,1]$ に従って生成される乱数項である。 $F_{ideal}$ は許容軌跡誤差値、 $F_{gbest}$ はグローバルベスト時における目的関数値である。

$$w_i = (w_{\max} - w_{\min}) \frac{T_n}{T_0} + w_{\min}, c_1 = w_{\min}, \quad (8)$$

$$c_2 = w_{\min} + \frac{F_{ideal}}{F_{gbest}}$$

$$v_i^{n+1} = w_i v_i^n + c_1 r_1 (p_i - x_i^n) + c_2 r_2 (g_i - x_i^n) \quad (9)$$

$$x_i^{n+1} = x_i^n + v_i^{n+1} \quad (10)$$

### 5) SAによる大域的探索

温度の更新は、周期終了時およびグローバルベストの更新時に行い、式(11)のアニーリングスケジュールに従って変化させる。しかし、局所解に陥った場合は、目的関数の変化を考慮し、式(12)より再加熱を行う。再加熱温度は回数とともに減衰し、最終的には温度は零に収束する。 $T_0$ は初期温度、 $T_n$ は $n$ 周回目における温度、 $\gamma, \delta$ は減衰係数とする。


$$T_{n+1} = \begin{cases} \gamma T_n & (\gamma \in (0,1)) \\ \frac{F_{gbest}^{new}}{F_{gbest}^{old}} T_n & (F_{gbest}^{new} < F_{gbest}^{old}) \end{cases} \quad (11)$$

$$T_{n+1} = \min \left( T_0 \frac{F^i(s)}{F_{\max}^N}, T_0 \delta^N \right) \delta \in (0,1) \quad (12)$$

## 3. 結果と考察

本提案の創成手法より、平面4節リンクの創成を試みた。表-1に初期条件を示す。試行回数ごとにおける目的関数と温度の関係を図-2に示す。左縦軸が目的関数、右縦軸が温度を表している。

表-1 初期条件

設計条件		ばね定数条件		目標のリンク機構
設計領域[mm]	縦 50	初期ばね定数 $k_0$	10000	四節リンク
	横 100	$k_{max}$	10000	
原動節[mm]	50	$k_{min}$	0.001	
従動節[mm]	50	ペナルティ係数 $p$	$e^{-\frac{T_n}{T_0}}$	
初期ノード数[個]	20	初期ステップ数 $c_0$	0.5	
ノード重量[Kg]	1	温度条件		
入力[N]	1000	初期温度 $T_0$	1000	
除去率 E	0.3	減衰係数 $\gamma, \delta$	0.8	
				$2500 = x_n^2 + y_n^2$

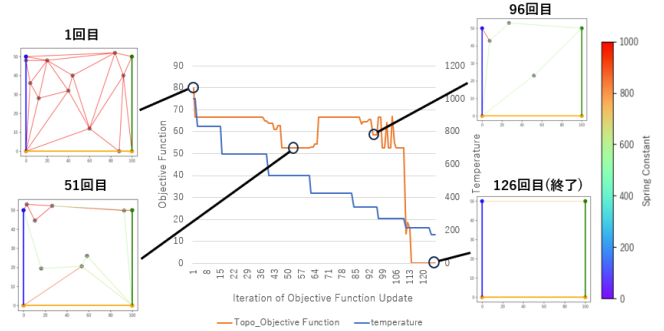


図-2 温度および目的関数に対するリンク構成の変化

図1の結果から、126回目の試行で4節平面リンクの創成が達成され、本手法の有効性が確認された。さらに、五反田らの手法[2]と比較して、より短時間で安定したリンク創成が可能であることが示された。

## 4. 今後の展望

ばね定数更新やステップ数の設定には課題があり、個別リンクの目的関数変化に基づく評価指標の導入が必要である。

### 参考文献

- [1] Kim, S.I. and Kim, Y.Y.: Topology Optimization of Planar Linkage Mechanisms, *Int. J. Numer. Meth. Engng*, Vol.98, pp.265-286, 2014.
- [2] 五反田匠真, 山口航宇輝, 長谷川浩志: MBDを用いたトポロジー最適化によるリンク機構創成, 日本機械学会2023年度次大会, 2023.
- [3] Ghandriz, T et al.: Structural Topology Optimization of Multibody Systems, *Multibody Syst Dyn*, Vol.39, pp.135-148, 2017.