

Levy Flight を用いた ES による施設レイアウト問題の解法

趙 冬青^{†1} アランニヤ クラウス^{†2} 狩野 均^{†2}

施設レイアウト問題(FLP)とは与えられた施設内に目的関数を最小化するように設備、機械などの配置を決定する問題である。FLPの計算複雑さはNP困難であるため、各種の近似解法が適用されている。本研究はFLPの新たな解法としてLF(Levy Flight)に基づく進化戦略(ES)を提案する。LFを導入することによりESの探索性能の向上が期待できる。本論文では、代表的なベンチマーク問題を用いて、他の手法(GA、ACO、力学モデル)との比較実験により、提案手法の有効性を示す。

キーワード: 施設レイアウト問題, Levy Flight, 進化戦略

Solving Facility Layout Problems Using ES With Levy Flight

DONGQING ZHAO^{†1} CLAUDIUS ARANHA^{†2}
HITOSHI KANO^{†2}

This paper introduces a new way to solve the facility layout problem. The goal of the problem is to optimal facilities layout in manufacturing systems in a production facility, so that material-handling costs are minimized. In recent years, MIP(Mixed-Integer Programming) model with Meta-Heuristics is often used in this research. We solve this problem using ES with Levy Flight in order to obtain better solutions. Performance is compared with other methods. Experiments using benchmark problems with 7 to 35 departments show the effectiveness of the proposed method.

Keywords: Facility Layout Problems, Levy Flight, ES

1. はじめに

施設レイアウト問題(FLP:Facility Layout Problem) [4]とは、施設内に配置物(設備、機械、備品、家具、部署、職場など)を仕事の効率や作業時間が最適になるように配置する探索問題である。適切な配置は仕事の運営費を50%削減できるといわれており、古くからFLPに対する多くの研究が行われている。FLPの計算複雑さはNP困難であることが知られている。このため、問題を分類して近似解を求めるというアプローチが主流となっている。

本論文では、一つの長方形の施設内に面積が不揃いな長方形の配置物を運搬コストが最小になるように、配置する位置と縦横比(面積は固定)を決定する問題を対象とする(以下、単にFLPを記す)。この問題の解法としては、遺伝的アルゴリズム(GA) [5] [7] [9]、焼き鈍し法(SA) [11]、アントコロニー最適化法(ACO) [6] [8]などの近似解法が提案されている。

最近、膨大な探索空間の中でランダムに存在する解を効率的に探索する方法として、Levy Flight (LF) が注目され

ている。Levy Flightに基づく探索方法はRandom Walkに基づく探索よりも効果的であることが知られている [1] [12]。

本論文では、LFに基づく進化戦略(ES)を提案し、FLPに対して従来手法より有効であることを示す。ESは、組み合わせ最適化問題の近似解法として広く用いられているが [3]、LFと組み合わせた研究は見当たらない。ESは突然変異を主演算としているので、LFと組み合わせることにより探索性能の向上が期待される。

以下、2章ではFLPの定式化と従来研究について紹介し、3章では、提案する手法のアルゴリズムについて述べる。4章では、FLPのベンチマーク問題を対象として、本手法で求めた目的関数値と従来手法の文献上の値を比較し、本手法の有効性を確認する。

2. 研究分野の概要

2.1 施設レイアウト問題

本論文では、文献[10]を参照してFLPを以下のように定式化する。また、慣例に従って配置物のことを職場と記す。

$$\text{Minimize} \quad \sum_{i=1}^N \sum_{j>i}^N f_{ij} (d_{ij}^x + d_{ij}^y)$$

Subject to

^{†1} 筑波大学大学院システム情報工学研究科コンピュータサイエンス専攻
Department of Computer Science, Graduate School of Systems and Information
Engineering, University of Tsukuba

^{†2} 筑波大学システム情報系情報工学科
Division of Information Engineering, Faculty of Engineering, Information and
Systems, University of Tsukuba

$$d_{ij}^x = |c_i^x - c_j^x| \quad (1)$$

$$d_{ij}^y = |c_i^y - c_j^y| \quad (2)$$

$$l_i^x \leq c_i^x \leq L^x - l_i^x \quad (3)$$

$$l_i^y \leq c_i^y \leq L^y - l_i^y \quad (4)$$

$$lb_i \leq 2l_i^x \leq ub_i \quad (5)$$

$$lb_i \leq 2l_i^y \leq ub_i \quad (6)$$

$$c_i^x + l_i^x \leq c_j^x - l_j^x \quad (7)$$

$$c_i^y + l_i^y \leq c_j^y - l_j^y \quad (8)$$

$$\alpha_i l_i^x + 4\bar{x} l_i^y \geq 2\alpha_i \bar{x} \quad (9)$$

f_{ij} : 職場 i, j 間の物流量

d_{ij}^x, d_{ij}^y : 職場 i, j 間の x, y 方向の距離

c_i^x, c_i^y : 職場 i の x, y 座標

l_i^x, l_i^y : 職場 i の長さと同幅の半分

lb_i : 職場 i の同幅と縦幅の下限

ub_i : 職場 i の同幅と縦幅の上限

\bar{x} : 職場の形状制約の外接点 (計算方法は、式(12)参照)

α_i : 職場の面積

θ_i : 職場の最長の辺と最短の辺の比率

L^x, L^y : 施設の同幅と長さ

N : 職場の数

H_{ij}, V_{ij} : 水平方向と垂直方向への職場 i, j 間の相対位置を示す変数

式(1)と(2)は職場間の距離、式(3)と(4)は職場を施設内に配置するための制約、式(5)と(6)は職場の長さと同幅は上限と下限の範囲を抑えるような制約である。ここで、上限 (ub_i) と下限 (lb_i) は、式(10)と(11)で計算する。

$$ub_i = \min\{\sqrt{\theta_i \alpha_i}, \max_s\{L^s\}\} \quad (10)$$

$$lb_i = \alpha_i / 4ub_i \quad (11)$$

式(7)と(8)は、各職場が重ならないための制約である [10]。また、式(9)は職場の面積を一定にするための制約である。ただし、職場の形状制約の外接点の数は式(12)で計算する。

$$\bar{x} = lb_i + \frac{r}{(\Delta-1)}(ub_i - lb_i) \quad \forall r = 0, 1, \dots, \Delta - 1 \text{ for } \Delta \geq 2 \quad (12)$$

従来研究[15]により、 $\Delta=20$ のとき、誤差は十分小さいことが示されている。

2.2 FLP の従来手法

大森ら[10]は、FLP における職場間の物流量の大きさをバネと見なし、「カオス挙動」を加えることで相対位置を効率的に求める新たなヒューリスティックを提案した。この方法は大規模な問題に対応でき、かつ職場の移動における局所解への収束を抑制した。また、制約を軽減することにより高速化を図った。

Komarudin ら[8]は、解の表現として木構造を用いた Ant System を FLP に適用した。木構造に従い、施設の空間を順番に分割し、職場を配置する。また、この手法を局所探索法とハイブリッド化することにより性能の向上を図っている。

レイアウト問題は、一般に問題の規模が大きく、探索空間が膨大である。GA は特に大域探索の性能が高いので GA を用いた手法が多く提案されている。Liu and Meller [10]は sequence-pair 表現を用いて混合整数計画法 (MIP) と GA をハイブリッド化した手法を提案し、大規模な問題に適用した。さらに、Asl ら[2]は、ES, PSO (Particle Swarm Optimization), GA の3つの手法の比較実験を行って、ES が PSO や GA より良い結果を得ることができることを示した。

2.3 Levy Flight 採餌仮説

動物は変化する自然環境の中で、獲物の居場所をどうやって効率的に探しているのか、という疑問は古くから研究されてきた。獲物は、広い範囲にランダムかつまばらに分布している。また、獲物の居場所に関する捕食者の知識は曖昧である。このような状況下で、動物は自然淘汰の結果として LF による採餌行動を行っているため、LF の探索効率は最適である (LF 採餌仮説) と仮定する。LF では、探索空間における探索点の 1 ステップの移動は、式(13)の分布に従う [13]。ただし、 l は移動距離 (ステップ幅)、 u は範囲 $1 < u \leq 3$ の定数である。このようにすると、現在地の周辺は多数、遠方は少数回探索することになる。

$$P(l) \sim l^{-u} \quad (13)$$

3. 提案手法

3.1 コード化

図 1 に染色体の例を示す。職場番号を遺伝子とする。

| | | | | | | | | | |
|------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 職場番号 | 2 | 1 | 4 | 5 | 3 | 6 | 8 | 7 | 9 |
|------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|

図 1 染色体の例 (1~9 は職場番号)

この例では、職場 2,1,4,5,3,6,8,7,9 をこの順番で施設に配置することを意味する。図 2 に示した矢印の方向に従って

空いているスペースを探す。施設上には左上から右下に向けて施設内に収まるように職場の配置順に従って配置し、職場がはみ出した場合は下に配置する。

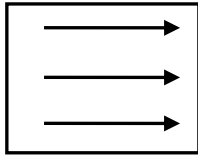


図2 施設内に職場を配置する方向

3.2 突然変異

本研究の染色体は重複を許さないため次の突然変異方法(two-exchange)を用いた(図3)。ランダムに1つの個体を選び、ランダムに選んだ2つの遺伝子座の遺伝子を交換する。

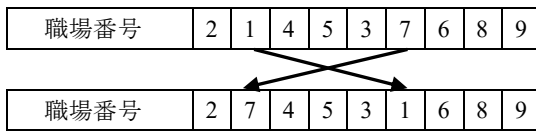


図3 突然変異の例

3.3 Levy Flight による解の更新方法

本論文では、式(13)の分布として、次の確率密度関数で定義される標準 Levy 分布を用いる (式(14)と図4)。移動距離 l はこの確率密度関数に従う乱数 (Levy 乱数[14]) として生成することになる。

$$P(l) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} l^{-\frac{3}{2}} e^{-\frac{1}{2l}} \quad (14)$$

LF に基づく手法は本来連続値問題を対象としているが、FLP の遺伝子は離散値をとるので、LF の確率密度関数をそのまま適用することはできない。そこで、本論文では個体間の距離を以下のように定義する。一つの個体 A に交換を m 回施して生成した個体を B とし、 m を A-B 間の距離と見なす。すなわち、交換の回数を探索空間上の移動距離とする。

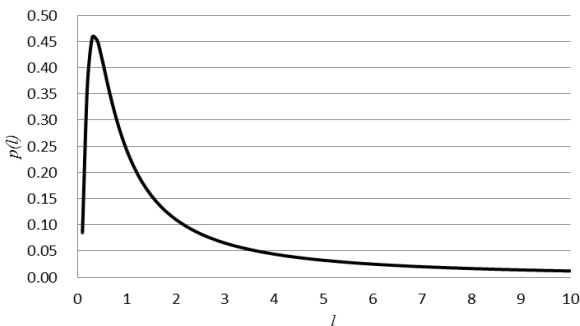


図4 Levy 乱数の分布

以上より、探索の1ステップにおける解の更新を次式の m を用いて行う。ただし、 L は染色体の長さ (職場数)、 l は l の整数部分を表わす。

$$m = \begin{cases} [l] + 1 & \text{if } l < \frac{L}{2} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (15)$$

3.4 アルゴリズム

本論文では、FLP の目的関数を適応度 *fitness* とする。提案手法のアルゴリズムを図5に示す。新しい配置(表現型)の生成においては、まず、各職場の縦横比をランダム (面積は保存) に設定しておいて 3.1 節に示した方法で配置を行う。このとき、施設の縦横の20%のはみ出しは許容する。つぎに、2.1 節に示した制約条件を満たすように、LP (Linear Programming) を用いて各職場の位置と縦横比を再計算 (最適化) する。このとき、職場が施設内に完全に収まらない場合は、その個体に式 (16) で示すペナルティを付加する。

$$fitness_new_{ij} = fitness_{ij} \times c \quad (16)$$

ただし、 c は予備実験で決めた定数とする。

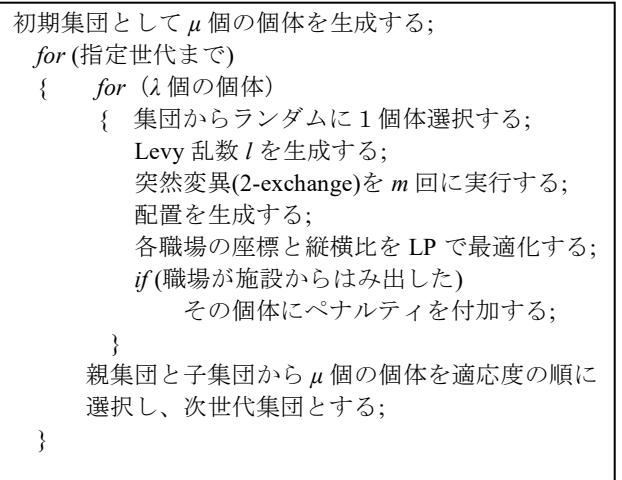


図5 提案手法のアルゴリズム

4. 評価実験

4.1 実験方法

提案する手法の有効性を確認するため、2.2 節に示した従来手法ならびに通常の ES との比較実験を行った。ここで通常の ES とは、提案手法の Levy Flight の部分を単純な突然変異に置き換えたものである (以下単に ES と記す)。表1に各問題の性質を示す。ES のパラメータは、予備実験により次のように設定した。 $\mu=200$ 、 $\lambda=50$ 、世代数=1000、 $c=100$ 。ES の突然変異の回数については、4.2 節で述べる。

表 1 FLP ベンチマーク問題

| 問題 | 職場の数 | FD(%) | AU(%) |
|------|------|-------|-------|
| O7 | 7 | 47.62 | 97.48 |
| O8 | 8 | 53.57 | 99.98 |
| O9 | 9 | 41.67 | 100 |
| Ba12 | 12 | 89.39 | 88.33 |
| Ba14 | 14 | 62.64 | 96.83 |
| AB20 | 20 | 67.74 | 100 |
| SC30 | 30 | 11.49 | 80 |
| SC35 | 35 | 9.08 | 90 |

FD:フロー密度 AU:面積利用率

また、提案手法の突然変異の回数 m は式(15)で計算する。

以下に示す「最良値」は、最終世代における集団中の最良適応度のことである。また、以降の実験結果は、乱数のシードを変えて 30 回実験を行ったときの平均値を示す。

4.2 ES における突然変異の回数

通常の ES について、探索性能と突然変異の回数の関係を調べる。表 2 は、Ba12、AB20、SC30 に対して、突然変異を実行する回数を変えたときの最良値を示している。下線を付けた値は、その問題に対する最適値である。表 2 から、各問題によって最適な突然変異の回数が異なることがわかる。以下の実験では、平均値が最も小さい「2 回」を採用する。

4.3 提案手法の性能評価

4.3.1 実験結果

職場数が 7~35 の問題に対して、従来手法 (GA、ACO、力学モデル)、ES、提案手法を適用した結果を表 3 に示す。ES と提案手法については、括弧内に標準偏差を示す。また、従来手法は文献の値である (文献には標準偏差は記されていない)。表 3 から次のことがわかる。

- ES は、比較的小規模の問題 (O8、O9、Ba12) に対して最も良い結果が得られた。また、Ba14 と AB20 についても従来手法より改善した。
- 提案手法は、O7 ならびに規模の大きい題 (Ba14、AB20、SC30、SC35) に対して、最も良い結果が得られた。

次に、ES と提案手法について、収束するまでの探索回数 (目的関数を計算した回数) を表 4 に示す。表 4 から次のことがわかる。

- ES は、比較的小規模な問題 (O8、O9、Ba12) および AB20 に対して、収束するまでの探索回数は提案手法より少ない。
- 提案手法は、Ba14 および規模の大きい問題 (SC30、SC35) に対して、ES より探索回数が少ない。

表 2 突然変異の回数を変えたときの適応度の最良値

| 問題 | 1 回 | 2 回 | 3 回 | 4 回 | 5 回 |
|------|-------------|-------------|------|-------------|------|
| Ba12 | 6523 | 6080 | 6184 | <u>6031</u> | 6769 |
| AB20 | 4975 | <u>4795</u> | 5316 | 4988 | 5240 |
| SC30 | <u>3464</u> | 3849 | 4048 | 3722 | 3781 |
| 平均値 | 4987 | <u>4908</u> | 5183 | 4914 | 5263 |

4.3.2 結果の考察

実験結果から、ES は職場の数が少ない問題に対して有効であるが、提案手法は職場数 14 以上の問題に対して良い結果が得られることがわかった。

その理由は、探索中に ES は突然変異の回数を固定した (今回の実験では 2) ので、探索範囲が相対的に狭く、局所解に陥る可能性があると考えられる。図 6 は問題 SC30 の ES と提案手法で得られた最良値の進化グラフの一例を示している。図 6 から見ると、ES は 200 世代で進化を停止しているが、提案手法は解の更新を続けている。提案手法は図 4 で示すように、探索点の近傍だけではなく、遠方でも少数回探索する場合もあるので、局所最適解から脱出できる可能性が ES より高いと思われる。

次に比較的規模の大きい AB20 に対して、ES は提案手法より探索回数が少ない理由を考える。表 1 に示した各問題の性質から見ると、AB20 は他の問題に比べてフロー密度と面積利用率が大きく、探索が難しいことがわかる。このため、ES は早期に局所解に陥ってしまった可能性がある。

ES と提案手法の最良値

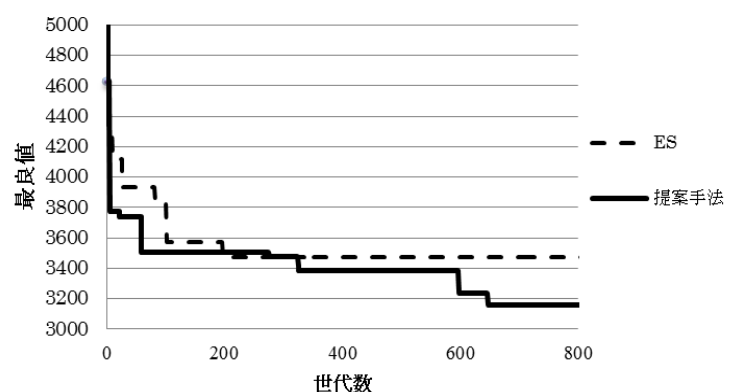


図 6 問題 SC30 の ES と提案手法進化過程での最良値

表3 従来手法と提案手法の最良値の比較

| 問題 | GA [Liu 07] | ACO [Komarudin 10] | 力学モデル [Ohmori 13] | ES | 提案手法 |
|------|----------------|-----------------------|----------------------|------------------|------------------|
| O7 | 132 | 132 | 227 | 126(3) | <u>125(3)</u> |
| O8 | 243 | 243 | 420 | <u>232(6)</u> | 254(3) |
| O9 | 239 | 236 | 372 | <u>214(10)</u> | 223(9) |
| Ba12 | 8702 | 8253 | - | <u>6080(402)</u> | 6389(578) |
| Ba14 | 4852 | 4793 | - | 3313(406) | <u>3232(356)</u> |
| AB20 | 5668 | 4973 | 5189 | 4795(509) | <u>4429(270)</u> |
| SC30 | 3707 | 3869 | 3106 | 3176(356) | <u>3102(261)</u> |
| SC35 | 3604 | 4132 | 3045 | 3849(471) | <u>2980(72)</u> |

表4 ES と提案手法が収束するまでの探索回数(30 回平均)

| 問題 | 通常の ES(回) | 提案手法(回) |
|------|---------------------|----------------------|
| O7 | 55600(11600) | <u>52000(7800)</u> |
| O8 | <u>58800(9600)</u> | 62200(6600) |
| O9 | <u>60800(8800)</u> | 63000(4800) |
| Ba12 | <u>76400(37400)</u> | 83000(44600) |
| Ba14 | 79200(41200) | <u>76800(33600)</u> |
| AB20 | <u>86800(35600)</u> | 118800(47200) |
| SC30 | 107800(47200) | <u>104800(40400)</u> |
| SC35 | 116800(52800) | <u>99400(40800)</u> |

5. おわりに

本論文では FLP に対して新たな解法を提案した。職場数が 35 までのベンチマーク問題を実装し、GA、ACO、力学モデル、ES と比較し、提案手法は大規模な問題に有効であることを示した。

今後は、提案手法を実問題に適用することと対話型システムの開発を行う予定である。

謝辞 本研究は、JSPS 科研費 15K00296 の助成を受けたものである。

参考文献

- [1] Ahmed Fouad Ali :A Hybrid Gravitational Search with Levy Flight for Global Numerical Optimization, Information Sciences Letters Inf. Sci. Lett. 4, No. 2, 71-83 (2015)
- [2] Ali Derakhshan Asl : Unequal-area stochastic facility layout problems: solutions using improved covariance matrix adaptation evolution strategy, particle swarm optimisation, and genetic algorithm, International Journal of Production Research Volume 54, Issue 3, pp 799-823 (2016)
- [3] Hans georg Beyer:Evolution strategies A comprehensive introduction ,Natural Computing 1,pp 3-52 (2002)
- [4] Amine Drira, Henri Pierreval, Sonia Hajri Gabouj ,Facility layout

- problems: A survey, Annual Reviews in Control ,Vol.31, 255–267(2007)
- [5] José Fernando Gonçalves, Mauricio G.C.Resende:A biased random-key genetical gorithm for the unequal area facility layout problem, European Journal of Operational Research,pp 86-107(2015)
- [6] Jian Guan,Geng Lin:Hybridizing variable neighborhood search with ant colony optimization for solving the single row facility layout problem, European Journal of Operational Research 248,pp 899-909(2016)
- [7] Laura García Hernández, Juan M. Palomo Romero, Lorenzo Salas Morera, Antonio Arauzo Azofra, Henri Pierreval :A novel hybrid evolutionary approach for capturing decision maker knowledge into the unequal area facility layout problem, European Journal of Operational Research,pp 4697-4708(2015)
- [8] Komarudin, Kuan Yew Wong, Applying Ant System for solving Unequal Area Facility Layout Problems, European Journal of Operational Research 202 730–746(2010)
- [9] Qi Liu, Russell D.Meller: A sequence-pair representation and MIP-model-based heuristic for the facility layout problem with rectangular departments, IIE Transactions, Vol 39, 377–394(2007)
- [10] 大森,吉本:力学的モデルを用いた施設レイアウト問題の解法, 日本経営工学会論文誌 64, pp.145-156 (2013)
- [11] Tam,K,Y.:A Simulated Annealing Algorithm for Allocation Space To Manufacturing Cells,Int.J.Prod,Res.,Vol.30,pp.63-87(1992)
- [12] Viswanathan, Lévy flights and super diffusion in the context of biological encounters and random searches, Physics of Life Reviews 5 133–150 (2008)
- [13] G. M. Viswanathan, M. G. E. da Luz, H. E. Stanley, The Physics of Foraging, Cambridge University Press (2011)
- [14] 四辻哲章, 計算機シミュレーションのための確率分布乱数生成法, プレアデス出版, pp. 175-180, 2010.
- [15] Sherali, H.D., Fraticelli, B.M.P. and Meller, R.D. Enhanced model formulations for optimal facility layout. Operations Research, 51,629–644(2003)