実践論文

設備再配置問題のための確率的探索の実験的検討

Experimental Research of Probabilistic Search for Facility Rearrangement Problem

鈴木　淳[*1]
Atsushi Suzuki

Email: asuzuki@dokkyo.ac.jp

本稿では、複数設備生産システムにおける予算制約付き設備再配置問題のための進化的探索法について述べられている。この問題では、需要減少を考慮して設備の稼働あるいは休止と休止設備における生産の移転先設備が決定される。問題モデル中の設備の稼働／休止を確率的に探索するための新たなヒューリスティクスを複数考案し、数値実験で探索効果を比較検証したところ、先行研究よりも良い結果が得られたので本稿で報告する。混合整数計画モデルで表現された定式化中の各設備の稼働／休止を表すバイナリ変数に対し、解の更新履歴に基づいて計算された変数値 1 の出現確率を用いた探索法が有効であった。ただし、問題のデータ特性によって探索効果が異なることも認められた。

In this paper, evolutionary search methods for a budget-constrained facility rearrangement problem in multi-facility production systems are described. In this problem, the operation or suspension of the facilities and the facility to which the production is shifted in the suspended facility are determined in consideration of the decrease in demand. New heuristics have been developed for probabilistic search of condition of the operating or suspending of facilities in the problem model. As a result of numerical experiments, better search efficiency than previous studies can be obtained, which is reported in this paper. A search method for the binary variable representing the operating / suspending of each facility in the formulation represented as the mixed integer programming model is effective by using the probability of the variable value is 1 calculated based on the update history of the best rearrangement alternative. However, it was also recognized that the search effect differs depending on the data characteristics of the problem.

*1：獨協大学情報学研究所主任研究員

1. はじめに

複数設備生産システムにおいて、需要減少を考慮して設備の稼働／休止と休止設備における生産の移転先設備を決定する予算制約付き設備再配置問題[(1)]に対して、進化的解法が複数提案されてきた。設備の稼働／休止の決定について、バイナリ変数を確率的に探索する新たなヒューリスティクスを考案し、数値実験で探索効果を検証したところ、先行研究よりも良い結果が得られたので本稿で報告する。

2. 問題設定と定式化

2.1 問題設定

今期、ある製品を n 基の設備で生産している。次期の設備運用予算が今期より下げられることとなったが、予算制約を満足しつつ、需要が復調した場合のために生産能力はできる限り温存して、いずれかの設備の休止を決定したい。休止した設備で行われていた生産は、継続する設備のいずれかに移転する。ただし、生産を移転するとき、生産効率が低下する場合もある。また移転先の設備の生産能力を超えて生産を移転できない。再配置案での稼働設備での生産量の合計は大きいほど良いが、同じ生産量であれば費用はより小さい方が好ましい。

以上から、この問題は複数ある設備の各設備の継続と休止、および休止設備での生産の移転先設備を決定するべき問題となる。代替案の評価基準である目的関数は、第1に再配置後の全体の生産量の最大化であり、第2に全体の運用コストの最小化である。

2.2 定式化

このような問題に対し、設備再配置問題としてのモデル化が提案されており[(1)]、次のような定式化がなされている[(2)]。

$$\max_{\mathbf{Y}} \quad F(\cdot)=\sum_{j=1}^{n} p_j x_j \tag{1}$$

$$\min_{\mathbf{Y}} C(\cdot)=\sum_{j=1}^{n}(c_j x_j+v_j p_j),\text{if } F(\cdot)\ge F^* \tag{2}$$

subject to

$$\sum_{j=1}^{n}(c_j x_j+v_j p_j)\le C_{\max} \tag{3}$$

$$p_j=\begin{cases} s_j, \text{ if } s_j\le u_j \\ u_j, \text{ if } s_j>u_j \end{cases}, j=1,\ldots,n \tag{4}$$

$$s_j=\sum_{i=1}^{n} q_i r_{ij} y_{ij}+q_j x_j, j=1,\ldots,n \tag{5}$$

$$x_i=1-\sum_{j=1}^{n} y_{ij}, \quad i=1,\ldots,n \tag{6}$$

$$x_i\in\{0,1\}, \quad i=1,\ldots,n \tag{7}$$

$$y_{ij}\in\{0,1\}, \quad i,j=1,\ldots,n, i\ne j \tag{8}$$

$$y_{ij}=0, \quad \text{if } i=j; i,j=1,\ldots,n, i\ne j \tag{9}$$

$$\mathbf{Y}=\begin{pmatrix} y_{11} & y_{12} & \cdots & y_{1n} \\ y_{21} & y_{22} & \cdots & y_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y_{n1} & y_{n2} & \cdots & y_{nn} \end{pmatrix} \tag{10}$$

ただし、n：設備数、c_j：設備 j の固定費、v_j：設備 j の変動費、 p_j：再配置後の設備 $_j$ の生産量、q_j：再配置前の設備 j の生産量、r_{ij}：設備 i での生産が設備 j へ移転されたときの生産効率減少率（$0\le r_{ij}\le 1$）をそれぞれ表す。 x_j は1のとき設備 j の継続、0のとき休止を表すバイナリ変数であり、y_{ij} は1のとき設備 i から設備 j への生産移転あり、0のとき生産移転なしを表すバイナリ変数である。 $C_{\max}$ はコスト上限値、u_j は設備 j の生産能力上限として与えられる。 $F(\cdot)$ は再配置案 $\mathbf{Y}$ の生産能力、$C(\cdot)$ は同じくコスト、F^* は探索中のその時点における $F(\cdot)$ の最良値を表す。

再配置前のコスト C_{init} に対するコスト上限 の比をコスト低減率 R_c で表すものとし、それらの関係は（11）（12）式で表される。

$$Rc=C_{\max}/C_{\text{init}} \tag{11}$$

$$C_{\text{init}}=\sum_{j=1}^{n}(c_j+q_j v_j) \tag{12}$$

次にこの問題の解法について説明する。

3. 解　　法

3.1 解法の流れ

本稿での解法は共通して図1のような流れをとる。設備の稼働／休止を表す変数 $x_1,\cdots, x_n$ にある基準で0または1の値を与え、その値に従う休止設備における生産の移転先設備 $\mathbf{Y}$ をランダムに探索するという操作を計算時間の範囲内で繰り返し、最良値を記録しておくものである。

3.2 確率的探索

本稿では、$x_1,\cdots, x_n$ の探索について、各 x_i（$i=1,\cdots, n$）に対し、確率 ρ（または ρ_i）で1を与え、それ以外は0を与える操作をとった。本稿では ρ（ρ_i）について次の3つの方法を比較した。

図 1　解法の概略図

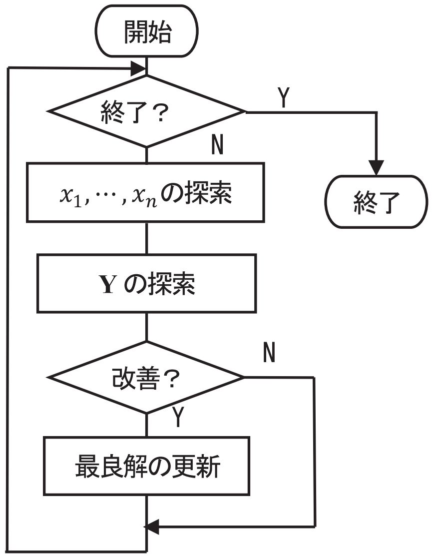

表 1　例題データセット P0

j	u_j	q_j	c_j	v_j
1	200	100	600	7
2	200	100	600	8
3	200	100	601	7
4	200	100	601	8
5	200	100	602	7
6	200	100	602	8
7	200	100	603	7
8	200	100	603	8
9	200	100	604	7
10	200	100	604	8
11	200	100	605	7
12	200	100	605	8
13	200	100	606	7
14	200	100	606	8
15	200	100	607	7
16	200	100	607	8
17	200	100	608	7
18	200	100	608	8
19	200	100	609	7
20	200	100	609	8

表 2　例題データセット P1

j	u_j	q_j	c_j	v_j
1	200	100	1000	7
2	200	100	1010	7
3	200	100	1020	7
4	200	100	1030	7
5	200	100	1040	7
6	200	100	1000	8
7	200	100	1010	8
8	200	100	1020	8
9	200	100	1030	8
10	200	100	1040	8
11	150	75	601	10
12	150	75	602	10
13	150	75	603	10
14	150	75	604	10
15	150	75	605	10
16	150	75	601	12
17	150	75	602	12
18	150	75	603	12
19	150	75	604	12
20	150	75	605	12

PS1: $\rho = \alpha R_C$

PS2: $\rho_i = \sum_{k=1}^{N_u} x_{ik} / N_u$。 ただし $\rho_i = 1$ のときは $\rho_i = 0.9$ に、$\rho_i = 0$ のときは $\rho_i = 0.1$ にする。

PS3: $\rho = \sum_{k=1}^{N_u} \sum_{i=1}^{n} x_{ik} / N_u / n$。ただし $\rho = 1$ のときは $\rho = 0.9$ に、 $\rho = 0$ のときは $\rho = 0.1$ にする。

ここで、N_u は最良解の更新回数、x_{ik} は k 回目の更新での x_i の値である。α はパラメータで 0.75 を経験的に与えた。なお **Y** の探索は従来法と同様に行った。

PS1 はコスト低減率 R_c に基づいて $x_i = 1$ を与える単純な考え方であるが、予備実験の結果、係数 $\alpha = 0.75$ とする方が良い解が得られた。

PS2 は現行解（探索中のその時点における最良解）履歴での x_i の平均値を改善（解の更新）の都度、求めておいた値である。すなわち、ρ_i は各 x_i が個別に 1 になった確率を表している。

PS3 は PS2 と違って x_i 個別にではなく $x_1, \cdots, x_n$ での 1 の出現を通算して平均を求めた値である。すなわち、ρ は x_i が総合的に 1 になった確率を表している。

4.　数値実験

4.1　例題データと計算環境

数値実験として、20 設備の例題データに対し上述の確率的探索を実装したプログラムで解いて比較を行った。例題は、P0（先行研究 [3] でのデータセット DS4）と、本稿で新たに作成したデータセット P1 を用いた。表 1 に P0 を、表 2 に P1 をそれぞれ示す。P0 は、20 設備で u_j と q_j がそれぞれ同じ値であり、c_j と v_j が 1 ずつ異なる値という特徴である。P1 は、u_j と q_j は同じ設備が 10 ずつあり、c_j が 1 異なる値と、v_j が 1 または 2 異なる値という特徴を持たせた。P1 は、設備 1 から 10 は新しい設備で容量は大きく固定費も高く変動費は低い設備グループで、設備 11 から 20 は古い設備で容量は小さく固定費は低いが変動費は高い設備グループというシナリオとして、このような値を設定した。

探索で、ある解から近傍解へ遷移して最終的に最

適解へ到達するプロセスにおいて、目的関数の改善が連続すればより良い解に到達し易くなる可能性が高くなるが、目的関数の改善が続かない場合はより良い解に到達することが難しくなると考えられる。この観点から比較すると、P0はP1よりも目的関数の改善が続き易いと見られる。言い換えれば、P1の方が最適解に到達することが難しい問題とも言える。この問題の難しさの違いに対して、どの探索法が効果を発揮するのかを検証することが、このデータセットを用いた本稿の目的である。比較対象は先行研究(3)でのGT1（本稿ではGATS）とSAとした。

数値実験は、R_c = 0.95, 0.9, 0.8, 0.7, 0.6, 0.5の場合について各5回計算を行った。1回あたり計算時間をP0で600秒、P1で1200秒とした。計算機環境は、プロセッサー Core i7-8700 3.2GHz 3.19GHz、RAM 8GB、OS Windows 10、コンパイラ GCC++ 64bit版8.1.0である。

4.2　計算結果

計算結果のうち、各R_c値の条件で10回計算した中での探索法ごとに最も良い結果のFとCの値を表3と表4に示す。表中、各R_cで比較した5つの探索法を通じての最良値に下線を引いている。

表3　例題P0の10回計算の最良結果

R_c		PS1	PS2	PS3	GATS	SA
0.95	F	1980.0	1980.0	1980.0	1980.0	1960.0
	C	25533.0	25533.0	25533.0	25541.0	23980.0
0.9	F	1960.0	1960.0	1960.0	1960.0	1960.0
	C	23980.0	23980.0	23980.0	24075.0	23980.0
0.8	F	1930.0	1930.0	1930.0	1930.0	1930.0
	C	21658.0	21658.0	21658.0	21658.0	21658.0
0.7	F	1820.0	1820.0	1820.0	1820.0	1820.0
	C	18880.0	18785.0	18785.0	18785.0	18785.0
0.6	F	1560.0	1560.0	1560.0	1560.0	1560.0
	C	15748.0	15748.0	15748.0	15748.0	15748.0
0.5	F	1300.0	1300.0	1300.0	1300.0	1300.0
	C	13321.0	13321.0	13321.0	13321.0	13321.0

下線：最良値

表4　例題P1の10回計算の最良結果

R_c		PS1	PS2	PS3	GATS	SA
0.95	F	1735.0	1735.0	1735.0	1735.0	1735.0
	C	29916.0	29916.0	29916.0	29916.0	29916.0
0.9	F	1725.0	1725.0	1725.0	1725.0	1725.0
	C	28706.0	28706.0	28706.0	28706.0	28706.0
0.8	F	1700.0	1700.0	1700.0	1700.0	1697.5
	C	25514.5	25513.5	25514.5	25513.5	25198.5
0.7	F	1665.0	1670.0	1667.5	1670.0	1670.0
	C	22068.0	22380.5	22218.0	22380.5	22380.5
0.6	F	1512.5	1512.5	1512.5	1512.5	1512.5
	C	19167.0	19106.0	19157.0	19106.0	19106.0
0.5	F	1265.0	1265.0	1265.0	1265.0	1265.0
	C	15971.0	15971.0	15973.0	15971.0	15971.0

下線：最良値

例題P0では表3にあるようにPS1、PS2、PS3の大きな違いは見られない。またGATSが他の方法に及ばない結果となっている。

例題P1では表4に見られるように探索法によって結果に違いが認められる。P0と違ってPS2がPS1とPS3より優れた結果となっていることと、GATSが良好な結果であることなどが特徴として挙げられる。

なお、表3のGATSとSAの計算結果は先行研究(3)のSAとの数値と同じではないが、これは計算機環境の違いによるものと考えられる。この点は今後検討されるべきであるが、今回は計算環境をPS1、PS2、PS3と同一にするため、この結果で比較を行うこととする。

5. 考　　察

数値実験の結果から、例題データと探索法の効果の違いについて考察する。実験では各10回計算を行っており、そのうち何回で最良値をもつ解（最良解）を見出すことができたかを比較する。表5にP0の、表6にP1の、それぞれの探索法と各R_c値での最良解発見回数を示した。各欄の濃淡は回数の多少によるグレースケールである。

表5　例題P0での最良解発見回数

R_c	PS1	PS2	PS3	GATS	SA
0.95	10	10	10	0	0
0.9	10	10	10	0	2
0.8	10	10	8	2	6
0.7	0	10	10	4	10
0.6	10	10	10	2	10
0.5	10	8	10	2	2
Total	50	58	58	10	30

表6　例題P1での最良解発見回数

R_c	PS1	PS2	PS3	GATS	SA
0.95	10	10	10	10	1
0.9	10	9	10	9	1
0.8	0	1	0	1	0
0.7	0	1	0	4	7
0.6	0	2	0	3	9
0.5	10	8	0	1	5
Total	30	31	20	28	23

表5からはP0においてPS2、PS3の結果が優れている一方、従来法のGATSやSAでは最良解に至っていない場合が多いことがわかった。P0のようなデータの場合は、履歴を参照した確率的探索の

効果があるといえる。

表6からはP1においてPS2の結果が優れており、それに続いてPS1、GATSという結果になった。このP1のようなデータでは探索の難度がP0に比べて高く、局所最適に陥りやすくなる。特にR_c = 0.8, 0.7, 0.6の場合は、$x_i = 0$となる休止設備数と$x_i = 1$となる稼働設備数の関係から**Y**の探索において組み合わせ数が多くなり、R_c = 0.95, 0.9, 0.5と比べて最良解の発見が偶発的には難しくなると考えられる。

P0とP1とも、PS1での探索には最良解発見に不十分な場合があった。これは、PS2とPS3では確率ρが解更新履歴を反映して可変であるのに対し、PS1ではρが固定値であることが局所最適に陥る要因と考えられる。また、このことは、PS2とPS3においても履歴全てを参照するのではなく、最新の更新から何回か前までの更新に基づいて移動平均から確率ρを計算する方法の可能性が示唆される。

全体としてみると、第1目的関数であるF値については、どの方法でも良好な値に達している。しかしながら第2目的関数であるCについては、探索が不十分な結果になっている。このことから、今後は**Y**の探索においても何らかのヒューリスティクスを考える必要がある。ただし、**Y**の探索は$x_1, \cdots, x_n$の値によって探索領域が変わるので、0か1かの履歴による確率ρを単純に用いるだけは不十分で、**Y**の履歴の蓄積と検索の手順を考案するなど工夫が必要であろう。

なお、本稿では研究成果の速報的な公表を目的として、数値実験は10回計算での比較で行ったが、確率的な要素を含む場合、多数回試行による実験が本来は必要である。PS1、PS2、PS3においては、表5と表6で示されたように10回中10回とも同様な結果になるケースが多く、連続的に同じ解が得られる点から少ない回数でも解法の優位性がうかがえるが、本稿では暫定的な結論として留意いただきたい。

また、比較対象として、先行研究[3]のGATS法とSA法を取り上げたが、近年注目されている他の最適化手法とも比較をするべきでもある。しかしながら、本稿で対象としている問題は、優先順位付き2目的で変数$x_1, \cdots, x_n$と**Y**の関係があり、限られた時間では実装の工夫が困難であったため、本稿では先行研究[3]との比較に留まった。こちらについても現時点における研究進捗上の暫定的な成果として報告した。

6. おわりに

本稿では、複数設備生産システムにおける設備再配置問題のための確率的探索について、数値実験をつうじて検討した。実験の範囲内でいえることであるが、探索過程における最良解の更新履歴に基づく各設備の休止／稼働を表すバイナリ変数での1の出現確率を用いた確率的探索で有効な場合があることがわかった。しかしながら例題のデータ特性により効果に違いがあり、さらに検証が必要である。

今後の課題として、異なるデータ特性での探索効果の検証、出現確率計算への移動平均の適用の検討、生産移転先探索のための確率的探索法の考案、他の最適化法との比較、多数回試行による詳細な検討などが挙げられる。

謝辞

本研究の一部は、情報科学研究所研究助成によるものである。

参考文献

(1) 鈴木淳、山本久志、“需要変動を考慮した設備再配置問題と進化的解法”、日本設備管理学会誌、第22巻、第1号、pp21-27 (2010)

(2) 鈴木淳、山本久志、“設備再配置問題のためのSAによるアルゴリズムと近傍探索法”、平成27年度日本設備管理学会秋季研究発表大会論文集、pp85-88 (2015)

(3) 鈴木淳、“設備再配置問題のためのハイブリッドアルゴリズムとデータ特性に関する実験的検討”、情報学研究、第9号、pp22-31 (2020)

(4) 鈴木淳、“設備再配置問題のためのヒューリスティックサーチ解法の検討”、2020年度日本設備管理学会春季研究発表大会論文集、pp38-39 (2020)