様式 C-19

科学研究費補助金研究成果報告書

平成 21 年　3 月 31 日現在

研究種目：基盤研究（C）
研究期間：2007～2008
課題番号：19510152
研究課題名（和文）再構成可能生産システムにおけるダイナミック設備レイアウト法の開発

研究課題名（英文）Dynamic Facility Layout Method in Reconfigurable Manufacturing Systems

研究代表者
平林　直樹（HIRABAYASHI NAOKI）
大阪府立大学・工学研究科・講師
研究者番号　80199091

研究成果の概要：近年の生産システムは，不確実な需要に対応するために，月単位でシステム構成を変化させる極めて柔軟なケースも存在するようになった．本研究では，このような生産システムに対して，計画対象期間における設備間搬送コストと配置位置変更コストの総和を最小化するための設備レイアウト法を開発した．本手法は，生物の進化を模倣した最適化法である進化戦略に基づくものであり，良好な設備レイアウトを効率的に求めることが出来る．

交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合　計
２００７年度	1,000,000	300,000	1,300,000
２００８年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
年度			
総　計	1,500,000	450,000	1,950,000

研究分野：複合新領域
科研費の分科・細目：社会・安全システム科学・ 社会システム工学・安全システム
キーワード：システム工学，生産工学，設備レイアウト

１．研究開始当初の背景

需要構造の著しい変化に対応するために，セル型に代表される柔軟な生産システムが導入されている．このような製造現場では，ライン編成や作業設計を含めた大規模レイアウトの基本的なコンセプトは比較的長期間維持されるが，その間，基本コンセプトは踏襲しつつも短期的な小規模レイアウト変更が頻繁に行われている．これらは，技術的な加工条件変更による工程の追加や削除，品目および処理時間の変更などによるラインバランスの変化などの必然的な種々の理由により多々発生し，需要に応じて月単位で生産システムの構成を変化させる極めて柔軟なケースも存在するようになった．短期的な小規模レイアウト変更を実践している現場では，直面している次の計画期間のみを対象とした意思決定がなされており，当該期や需要情報が既に得られている次々期以降との関連が考慮されていない場合が多いため，レイアウト変更費用などに無駄が生じ，有効な設備レイアウトが求められていない場合が存在する．

２．研究の目的

本研究では，以上に示したような再構成可

能生産システムにおける設備レイアウト法を開発する．従来のレイアウト法に関する一般的な研究では，効率的に解を得るために，レイアウト問題を単位正方格子に基づく組合せ最適化問題として定式化する場合が多い．しかし，本研究のように，設備台数の増減を伴いかつ連続する期の設備配置位置の差異を議論する場合には，レイアウト問題本来の実数平面上への配置を考えなければ詳細なレイアウト案はもとより実行可能解をも得られない場合が生じる．本研究では，レイアウト決定に際して，進化型計算の一手法であり，実数型の決定変数を扱うことのできる進化戦略を用いることにより，実数平面上への設備の配置位置を効率的に求める手法を開発する．

３．研究の方法

従来の動的な設備レイアウトに関する研究では，計画期間の期首で与えられる搬送量の情報に従い各期のレイアウトを一意に決定しており，製造環境の変化への対応は考慮されていなかった．しかし，現場では，上述のように短期的な小規模レイアウト変更が繰り返されている．本研究では，計画対象期間に対して，各設備間の「距離×搬送量」で構成される搬送コストとレイアウト変更コストのトレードオフを考慮したマスターレイアウトを生成し，これを製造環境の変化ならびに新規生産情報に応じて逐次更新することにより，生産システムの再構成を考慮したレイアウト案を決定する．生産システムの再構成時には，設備台数の増減を含めた部分的な設備変更が伴う．部分的なレイアウト変更の際には，複雑に入り組んだ既存設備の配置位置を考慮した上で，新規設備や入れ替え設備の配置位置を決定しなければならず，高精度の解を得るためには，新規のレイアウト立案に比べ，より詳細な解探索が要求される．本研究では，実数型の決定変数を扱うことのできる進化戦略を用いたマスターレイアウト決定法および設備更新時の部分的なレイアウト決定法を開発する．

４．研究成果

本研究では，進化戦略を用いた設備レイアウトに関して主に以下の成果を得た．設備レイアウト問題への進化戦略の適用に関する研究は数少なく，実数平面上への効率的な設備配置を検討する際には，これらの成果は有用なデータとなるものと考えられる．以下に，(1)再結合操作の影響 (マスターレイアウト決定法および部分的なレイアウト決定法)，(2)最適解に対する解の精度，(3)決定変数間の相関の影響についてそれぞれ示す．

(1) 再結合操作の影響

我々の研究グループでは，進化戦略(ES)による設備レイアウト法と遺伝的アルゴリズム(GA)による手法を比較し，前者の有効性を検証している．しかし，そこでは進化戦略のオペレータに主操作の突然変異のみが用いられており，再結合操作の影響は考慮されていなかった．ここでは，突然変異および再結合の両オペレータからなる進化戦略による設備レイアウト法を提案し，その有効性を検証した．

① レイアウト問題

対象としたレイアウト問題は，以下に示す２つの問題である．

問題 P1 は，レイアウト変更に要するコストと搬送コストとのトレードオフを考慮し，計画期間全般にわたる総コスト最小化を評価基準として各期のレイアウトを動的に決定するものである．本問題は，マスターレイアウトの決定問題であり，その目的関数は以下のようになる．

$$\text{P1}\quad \min \sum_{t=1}^{T}\sum_{i=1}^{M}\sum_{j=1}^{M} F_{ijt} D_{ijt} + \sum_{t=1}^{T-1}\sum_{i=1}^{M} C_0 \delta_{it(t+1)} \qquad (1)$$

M: 設備台数
T: 計画期間
F_{ijt} : t 期における設備 i と j の間の搬送量
D_{ijt} : t 期における設備 i と j の間の直交距離
$\delta_{it(t+1)}$ ：設備 i の配置位置が連続する期で異なる場合に 1，その他は 0 となる 0-1 変数
C_0: 設備当りレイアウト変更コスト

問題 P2 は，全設備のレイアウトを変更するのではなく，引き続いて利用する設備の配置は変更せず，新規設備や入れ替え設備の配置位置のみを決定するものである．この場合，既存設備に起因する制約を考慮しなければならないため，P2 は前期との関係を考慮したダイナミックな問題の一種と考えられる．本問題は，設備更新時の部分的なレイアウト決定問題であり，その目的関数は以下のようになる．

$$\text{P2}\quad \min \sum_{i=1}^{M-Q-1}\sum_{j=i+1}^{M-Q} F_{ij} D_{ij} + \sum_{i=1}^{M-Q}\sum_{k=M-Q+1}^{M} F_{ik}\, fd_{ik} \qquad (2)$$

Q: 固定(現有)設備台数
F_{ij}: 設備 i と j の間の搬送量
D_{ij}: 設備 i と j の間の直交距離
fd_{ik}: 設備 i と固定設備 k の間の直交距離
($1 \le i \le M-Q$，$M-Q+1 \le k \le M$)

②進化戦略による解法

問題 P1 に対しては，式(1)の目的関数へ各設備の重複配置面積に着目したペナルティー項を追加し，感度向上のために 0－1 変数 $\delta_{it(t+1)}$ に基づく配置変更コストの項を改良した以下の評価関数による ES を適用した．

$$\min \sum_{t=1}^{T}\sum_{i=1}^{M}\sum_{j=1}^{M} F_{ijt} D_{ijt} + w\sum_{t=1}^{T}\sum_{i=1}^{M-1}\sum_{j=i+1}^{M} K_{ijt}$$

$$+\sum_{t=1}^{T-1}\sum_{i=1}^{M}\left\{\alpha\left(\left|x_{it}-x_{i(t+1)}\right|+\left|y_{it}-y_{i(t+1)}\right|\right)^2+C_0\delta_{it(t+1)}\right\}$$

K_{ijt} : t 期における設備 i と設備 j の重複面積
(x_{it}, y_{it}) : t 期における設備 i の重心座標
α: レイアウト変更に関するパラメータ
w: ペナルティー

また，問題 P2 に対しては，式(2)の目的関数へ P1 の場合と同様に，各設備の重複配置面積 K_{ij} に着目したペナルティー項を追加した以下の評価関数による ES を適用した.

$$\min \sum_{i=1}^{M-Q-1}\sum_{j=i+1}^{M-Q}F_{ij}D_{ij}+\sum_{i=1}^{M-Q}\sum_{k=M-Q+1}^{M}F_{ik}fd_{ik}+w\sum_{i=1}^{M-1}\sum_{j=i+1}^{M}K_{ij}$$

③再結合操作

再結合操作 $\boldsymbol{r}$ を以下に示す.

$$\boldsymbol{r}(\boldsymbol{P})=\boldsymbol{a}'=(\boldsymbol{z}',\boldsymbol{\sigma}') \quad (3)$$

$$z_i'=\begin{cases} z_{S,i}, & \text{if } 0\le e\le g_1 \text{ (NR)};\\ z_{S,i} \text{ or } z_{V,i}, & \text{if } g_1<e\le g_2 \text{ (DR)};\\ (z_{S,i}+z_{V,i})/2, & \text{otherwise (IR)},\end{cases}$$

$$\sigma_i'=\begin{cases} \sigma_{S,i}, & \text{if } 0\le e\le h_1 \text{ (NR)};\\ \sigma_{S,i} \text{ or } \sigma_{V,i}, & \text{if } h_1<e\le h_2 \text{ (DR)};\\ (\sigma_{S,i}+\sigma_{V,i})/2, & \text{otherwise (IR)},\end{cases}$$

ただし，$\boldsymbol{a}$: 個体，$\boldsymbol{P}$: 個体集団，$\boldsymbol{r}$: 再結合操作，$\boldsymbol{z}$: 決定変数ベクトル，$\boldsymbol{S}, \boldsymbol{V}$: 再結合操作時に選択される親個体，$z_{S,i}$, $z_{V,i}$: 親 S, V の決定変数の第 i 要素，$\boldsymbol{\sigma}$: ステップサイズベクトル，$\boldsymbol{\sigma}_{S,i}$, $\boldsymbol{\sigma}_{V,i}$: 親 S, V のステップサイズの第 i 要素，e : [0, 1] 一様乱数.

ここで，NR(No Recombination)，DR(Discrete 〃) および IR (Intermediate 〃)のいずれの操作を採用するかは，パラメーターg_1, g_2, h_1 および h_2 ($0\le g_1\le g_2\le 1, 0\le h_1\le h_2\le 1$) によってコントロールされる．本研究では，NR, DR および IR の各操作の選択確率が表 1 のようになる 16 通りのパターンを設定した.

表１　再結合操作のパターン

パターン	σ			z		
	NR	DR	IR	NR	DR	IR
a	1/3	1/3	1/3	1/3	1/3	1/3
b	1/3	1/3	1/3	3/5	1/5	1/5
c	1/3	1/3	1/3	1/5	3/5	1/5
d	1/3	1/3	1/3	1/5	1/5	3/5
e	3/5	1/5	1/5	1/3	1/3	1/3
f	3/5	1/5	1/5	3/5	1/5	1/5
g	3/5	1/5	1/5	1/5	3/5	1/5
h	3/5	1/5	1/5	1/5	1/5	3/5
i	1/5	3/5	1/5	1/3	1/3	1/3
j	1/5	3/5	1/5	3/5	1/5	1/5
k	1/5	3/5	1/5	1/5	3/5	1/5
l	1/5	3/5	1/5	1/5	1/5	3/5
m	1/5	1/5	3/5	1/3	1/3	1/3
n	1/5	1/5	3/5	3/5	1/5	1/5
o	1/5	1/5	3/5	1/5	3/5	1/5
p	1/5	1/5	3/5	1/5	1/5	3/5

表２　目的関数の平均値

パターン	問題 P2	問題 P1
再結合無	29983	84418
j	29366	77919
k	29498	78135
c	29515	78993
a	29522	79498
b	29528	79663
g	29548	
e	29615	
f	29668	
i	29699	
d	29717	
l	29735	
h	29887	

④数値実験

各設備の形状は正方形，各設備の一辺の長さが[2, 16], 各設備間の搬送量が[1, 50]の一様分布にそれぞれ従い，全設備台数 M = 12，固定設備の台数 Q = 2 の条件の下で，問題 P2 に対する数値実験を行った．表２の P2 の列は，各パターンに対する問題 P2 の目的関数の平均値 (試行 50 回) を求めたものであり，上から値の良い順となっている．これより，a 〜 l の 12 パターンの場合には，再結合無しの場合よりも優れた結果が得られることがわかる．なお，表からは割愛したが，$\boldsymbol{\sigma}$ に対する *IR* の値が，3/5 である m，n，o および p の 4 パターンでは，再結合無しの場合よりも目的関数の値が悪かった．これより，再結合操作においては，$\boldsymbol{\sigma}$ に対する IR の選択確率を NR, DR の値よりも大きくしない方が賢明といえる.

各問題に対して，a 〜 l の 12 パターンに対する目的関数の最小値と再結合無しの場合の目的関数値の比を近似度として求めた. 50 問題に対する平均近似度は, 0.952 となり, 12 パターン中の最良値は, 再結合無しの場合に比べ，平均 4.8%，目的関数値を改善しうることがわかった．また，表２の P２に示す上位５つのパターン（j，k，c，a，b）に限定して最小値を求めた場合でも 4.2%の改善がみられることがわかった.

予備実験より，問題 P1 の上位５つのパターンは問題 P2 と同様であることがわかったため，パターンを j，k，c，a，b に限定して問題 P1 に対する実験を行った．P2 の場合から追加，変更した実験条件は，総設備台数 M = 10，設備の一辺の長さは[4, 20]の一様乱数，計画期間 T =3，レイアウト変更コスト C_0=2500 である. 問題 P1 の各パターンに対する目的関数の平均値（試行 15 回）を表２の P1 の列に記す．これより，j，k，c，a，b の 5 パターンの場合には，再結合無しの場合よりも優れた結果が得られることがわかる.

各問題に対して，j，k，c，a，b の 5 パターンに対する目的関数の最小値と再結合無しの場合の目的関数値の比を近似度として求めた．15 問題に対する平均近似度は，0.914 となり，5 パターン中の最良値は，再結合無しの場合から平均 8.6%，目的関数値を改善しうることがわかった．また，上位２つのパターン（j, k）に限定して最小値を求めた場合でも 8.3%の改善がみられることがわかった．

以上の２つのレイアウト法を組み合わせ，設備更新を伴う生産システムにおける簡便なレイアウト法を以下に提示する．まず，問題 P1 に対する手法により，期首のマスターレイアウトを決定する．設備の更新および入替えが発生した場合には，問題 P2 に対する手法により，既存設備の配置位置を考慮し，次期に対する候補レイアウト集合を生成する．なお，候補レイアウト集合の要素には，ES の解探索の過程で得られる上位 S 個の解を用いる．各候補レイアウトを新しい期首におけるレイアウトと仮定し，需要情報が既に得られている次々期以降の期間に対する S 個のレイアウト案を問題 P1 に対する手法を用いて生成する．得られたレイアウト案の中から，評価基準値が最良のレイアウトを更新後のマスターレイアウトとして採用する．以上の手順を繰り返し，レイアウト変更に要するコストと搬送コストとのトレードオフを考慮した上で，各期のレイアウトを逐次決定していく．

以上の手法は，実数平面への良好な設備レイアウトを進化型計算によって，効率的に求めることのできる他にみられない手法である．今後の展開として，解の精度と計算時間のトレードオフを考慮した上で，候補レイアウト集合の要素数 S の影響を分析する必要がある．

(2) 最適解に対する解の精度

進化戦略による設備レイアウト法のパフォーマンスに関して，GA などのメタ戦略による解法との比較を我々の研究グループが行っている．しかし，最適解に対する解の精度を検証した研究は存在しない．ここでは，進化戦略による設備レイアウト法の最適解に対する解の精度を検証した．

①レイアウトモデル

設備形状を正方形，各設備間の距離を設備の重心間の直交距離とする以下の問題を対象とした．

P3 $$\min \sum_{i=1}^{M}\sum_{j=1}^{M} F_{ij}D_{ij} \quad (4)$$

s.t. $$|x_i - x_j| - v_i - v_j \geq -\phi_{ij}\beta \quad (5)$$

$$|y_i - y_j| - v_i - v_j \geq -(1-\phi_{ij})\beta \quad (6)$$

$$D_{ij} = |x_i - x_j| + |y_i - y_j| \quad (7)$$

ただし，i=1, 2, … , $M-1$,　$j = i$+1, i+2, … , M.

各記号の意味は以下のとおりである．

(x_i , y_i) = 設備 i の重心の座標

v_i = 設備 i の重心から各辺までの距離

$\phi_{ij} \in \{0,1\}$: ϕ_{ij} =1 のとき，設備 i と j は，x 軸方向干渉領域にあっても重複配置されないように，式(6)の制約が有効となる．ϕ_{ij} = 0 のときには，式(5)が有効になる．

$\beta = 2\max_{1\le i\le M} v_i$ より大きな任意の値

②突然変異操作と進化戦略による解法

突然変異操作 $\boldsymbol{m}$ を以下に示す．

$$\boldsymbol{m}(\boldsymbol{a}') = \boldsymbol{a}'' = (\boldsymbol{z}'', \boldsymbol{\sigma}'') \quad (8)$$

$$\boldsymbol{\sigma}'' = \boldsymbol{\sigma}' \cdot \exp \boldsymbol{N_0}(\Delta_\sigma)$$

$$\boldsymbol{z}'' = \boldsymbol{z}' + \boldsymbol{N_0}(\boldsymbol{\sigma}'')$$

$\boldsymbol{m}$：突然変異操作

Δ_σ ：ステップサイズ制御用パラメータ

$\boldsymbol{N_0}(\Delta_\sigma)$ ：期待値 0 標準偏差 Δ_σ の正規乱数ベクトル

ES における評価関数は, 各設備が重なって配置された場合に占める面積 K_{ij} に着目し, 式(4)に重複配置のペナルティ項を追加することにより，以下のように設定する．

$$\min \sum_{i=1}^{M}\sum_{j=1}^{M} F_{ij}D_{ij} + w\sum_{i=1}^{M-1}\sum_{j=i+1}^{M} K_{ij} \quad (9)$$

③数値実験

汎用ソルバーの ILOG-cplex による場合と進化戦略による場合の比較実験を行った．実験条件は，各設備の一辺の長さが[2, 16]の一様乱数，各設備間の搬送量が[1, 50]の一様乱数，全設備台数 M = 7, 10 である．

表３に，M = 7 の場合の cplex による最適解の値およびその際の計算時間（秒），進化戦略 ES による目的関数の最小値および計算時間（秒）ならびに最適解との近似度を示す．なお，ES による目的関数の最小値とは，各問題に対する表１の 16 パターンの施行結果の最小値を示す．表３より，設備台数が 7 台の場合には，再結合操作の 16 パターンのパラメータについて ES で解けば，近似度約１%の良好な解が，約 290 秒（18.1 秒×16 回）で

表３　実験結果（M = 7）

問題	cplex		ES		近似度
	目的関数値	時間	目的関数値	時間	
1	6607.5	4505	6615.3	18	1.001
2	7422.0	22069	7538.2	19	1.016
3	6812.0	5616	6902.0	18	1.013
4	7170.5	13878	7368.5	18	1.028
5	8570.0	25661	8570.0	18	1.000
6	7883.5	5461	7883.5	18	1.000
7	10337.5	9748	10528.5	18	1.018
8	7281.5	4444	7281.5	18	1.000
9	6770.5	16421	6863.3	18	1.014
10	7410.5	4616	7410.5	18	1.000
平均	7626.6	11241.8	7696.1	18.1	1.009

得られ，数理計画法による場合よりも大幅に計算時間を削減出来ることがわかる．
さらに，設備台数 M =10 の場合について，計算時間を２時間に制限した場合の 25 問題の近似解を cplex により求め，ES と比較した．その結果，ES によれば，平均計算時間 412.8 秒で，cplex による近似解と等しい解（平均近似度 0.999）が得られることがわかった．

進化戦略による設備レイアウト法の最適解に対する解の精度を検証した研究は他に存在せず，本研究で得られた結果は有用といえる．今後は，問題 P1 や問題 P2 について，数理計画法による場合に対する解の精度を検証する必要がある．

(3) 決定変数間の相関の影響

以上の進化戦略では，主なオペレータである突然変異操作を各決定変数に独立して適用している．最良な探索の方向は，探索空間の座標軸の向きに一致しているとは限らず，決定変数の間に相関がある場合，決定変数ごとに独立した突然変異を行うと，良好な個体を生成することができない．ここでは，決定変数間の相関を考慮した Correlated Mutation による進化戦略を設備レイアウト問題に適用した場合の影響を数値実験により検証した．

①Correlated Mutation による解法

Correlated Mutation では，式(8)とは異なり，新しい戦略パラメータである回転角 α_{ij} が導入され，以下のように定式化される．

$$\boldsymbol{m}(\boldsymbol{a}') = \boldsymbol{a}'' = (\boldsymbol{z}'', \boldsymbol{\sigma}'', \boldsymbol{\alpha}'')$$

$$\sigma_i'' = \sigma_i' \exp(\tau\psi + \delta\xi_i), \quad i = 1, \cdots, M$$

$$\alpha_{ij}'' = \alpha_{ij}' + \beta\lambda_{ij}, i = 1, \cdots, M-1, j = i+1, \cdots, M$$

$$\boldsymbol{z}'' = \boldsymbol{z}' + \boldsymbol{\zeta}$$

ただし，ψ , ξ_i, λ_{ij} は，正規乱数 $N(0,1)$, τ, δ, β は，コントロールパラメータ，$\boldsymbol{\zeta}$ は以下の確率密度関数を持つ M 次元正規乱数 $N_M(0, \boldsymbol{C})$である．

$$p(\boldsymbol{\zeta}) = \frac{1}{\sqrt{(2\pi)^M |\boldsymbol{C}|}} \exp\left(-\frac{1}{2}\boldsymbol{\zeta}^T \boldsymbol{C}^{-1} \boldsymbol{\zeta}\right)$$

再結合操作は，式(3)に α_{ij} を加え，同様の方法で適用した．また，ES における評価関数は，式(9)に等しい．

②数値実験

問題P3の全設備台数 $M = 7$ の場合について数値実験を行った．他の実験条件は，(2)の③に等しい．なお，再結合操作のパターンについては，表 1 と同様に，NR，DR および IR が等確率 1/3 で採用される場合，NR，DR および IR のいずれか 1 つが 3/5 の確率で採用され，残り 2 つがそれぞれ 1/5 の確率で採用される場合を設定し，これら 4 ケースを決定変数と標準偏差および回転角にそれぞれ適用した合計 64 パターンの再結合操作のパラメータを設定した．

25 問題による実験結果より，Correlated Mutation による場合の目的関数の値は，決定変数間の相関を考慮しない場合に比べ，最小値は 0.2%劣り，平均値は 3.4%優れていることがわかった．また，Correlated Mutation による場合の収束世代数は，決定変数間の相関を考慮しない場合の約 22%であり，効率的に解を得られることがわかった．

進化戦略による設備レイアウト法における Correlated Mutation の影響についての検証例は存在せず，本研究で得られた結果は有用といえる．今後は，問題 P1 や問題 P2 について，Correlated Mutation の影響を検証する必要がある．

５．主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔学会発表〕（計　3　件）

① 細雄樹，今井啓裕，<u>平林直樹</u>，<u>長沢啓行</u>，特急ジョブの影響を考慮したリアルタイムスケジューリング法，平成 19 年度日本経営工学会秋季研究大会, 2007 年 10 月 20 日，小樽市

② <u>N. Hirabayashi</u>，<u>H. Nagasawa</u>, Two-Phase Dynamic Facility Layout Method Using Evolution Strategies, 19th International Conference on Production Research，2007 年 7 月 31 日，Valparaiso, Chile

② 今井啓裕，<u>平林直樹</u>，<u>長沢啓行</u>，リアルタイムスケジューリングにおける選好解決定法, システム制御情報学会研究発表講演会，2007 年 5 月 21 日，京都市

６．研究組織

(1)研究代表者

平林　直樹（HIRABAYASHI　NAOKI）
大阪府立大学・工学研究科・講師
研究者番号：80199091

(2)研究分担者

長澤　啓行（NAGASAWA　HIROYUKI）
大阪府立大学・工学研究科・教授
研究者番号：30117999
森澤　和子（MORIZAWA　KAZUKO）
大阪府立大学・工学研究科・講師
研究者番号：60220050