リンク法に基づく自動レイアウトプランニング*

野村 陽司^{*1}, 邵 忠^{*2}, 宮崎 茂次^{*3}

Automated Layout Planning Using Link Method

Youji NOMURA, Zhong SHAO and Shigeji MIYAZAKI

In conventional plant layout problems, the link method for seeking a sub-optimal solution has been proposed. However, because the link method includes ambiguous human considerations, it is difficult to construct a computer program for this method. Therefore, in this paper, we have proposed the layout planning approach using rules based on the link method to construct the relationship diagram by using a computer method. Furthermore, an algorithm for determining the arrangement of departments within the plant area has been constructed based on the obtained relationship diagram. Using the algorithm, a computer program has been written in C language and the computational results have been given. From the results, we can find the characteristics of the obtained solutions.

Key Words: Layout Planning, Link Method, Rule, Relationship Diagram, Degree-of-Closeness Requirement

1. 緒言

工場レイアウト問題は、組み合わせ最適化問題の中の難問の一つであり、レイアウトの対象となる職場の数が増加すると、大型コンピュータを用いても実的に最適解を求めるのは不可能である。そこで、レイアウト問題に対する従来の研究では、準最適解を求めるヒューリスティックな解法[1][2][3]が数多く提案されている。ヒューリスティック法は、人間の経験的、発見的知識によるもので、問題の探索空間を大幅に減少できる。しかし、ヒューリスティック法のルールが曖昧で、解を求める過程に人間の思考および判断による曖昧な部分が存在するため、コンピュータ処理のための実用的なアルゴリズムを構築しにくい面もある。

例えば、ヒューリスティックなレイアウト法として知られているCORELAP法[2]では、職場の配置場所の確定および職場形状の決定などのステップに曖昧な点が残っている。また、リンク法[3]では、職場を表す節点を置く場所の指定、枝の伸びる方向、リンク形状の形成などの処理が人間の判断によって行われる。

一方、この数年、専門家が持つ知識を利用する知識ベースによるエキスパートシステムに関する研究が数多く発表され、幾つかの工場レイアウトエキスパートシステム[4][5]が開発されている。このようなレイアウトシステムは、現場の設計者から、工場レイアウトに関する実務的な経験および専門的な知識を獲得し、知識ベースに整理して、コンピュータ・プログラム化するものである。しかし、多くの場合には、現場の設計者から実務的な経験および専門的な知識を明確に獲得して、ルール化することは非常に困難である。文献[4]の工場レイアウトエキスパートシステムでは、獲

* 原稿受付 1994年9月26日。

*¹ ダイキン工業(株) (〒530 大阪市北区中崎西2-4-12)。*² 正員, 岡山商工会議所 (〒700 岡山市厚生町3-1-15)。*³ 正員, 岡山大学工学部 (〒700 岡山市津島中3-1-1)。

得した専門家の知識は極くわずかであり、解決できるレイアウト問題も小規模であった。

最近では、知識ベースの代わりに事例ベース推論によるエキスパートシステム[6]の研究が注目されるようになった。その理由として、事例ベース推論は、専門家の思考パターンを素直に反映していることと、事例を集めるのは専門家の問題解決知識を集めるよりは簡単なことなどがあげられる。しかし、事例の探索、照会および修正といった具体的な技術が確立されていないため、現段階では、実用的なレイアウト問題に適用する例はまだ少ない[6][7][8]。

本研究では、ヒューリスティック法の一つであるリンク法³⁾に基づくルールによるコンピュータ自動レイアウト法を提案する。リンク法は、各職場を個別に取り扱うのではなく一対の職場からなる相互関連基本構造体を導入し、職場相互間の近接関係をより広く考慮に入れたレイアウト法である。しかし、リンク法のアルゴリズムには、人間の思考および判断による操作、すなわち、職場を表す節点を置く場所の指定、枝の伸びる方向、リンク形状の形成などが存在するため、コンピュータによる自動レイアウト処理が困難である。そこで、リンク法のアルゴリズムに含まれる人間の思考および判断による操作部分をルール化して、コンピュータを用いて相互関連ダイアグラムを自動的に作成する。また、得られた相互関連ダイアグラムに基づいて工場内職場の配置を行う。多くの数値実験および列挙法との比較によって提案法で得られる解の有効性を検討する。

2. レイアウト問題

2.1 前提条件

- (1) m 個の職場 M_i ($i=1, \dots, m$) が m 個の候補場所 N_j ($j=1, \dots, m$) のいずれかに配置される。
- (2) 各職場は同一面積の正方形の形状をもち、変更できないものとする。また、職場の面積の総和が工場建屋の面積に等しいものとする。
- (3) 工場建屋全体の形状は、 m 個の職場単位に分割可能な形状として与えられている。
- (4) 職場 M_i と M_j との近接性要求度 R_{ij} は与えられている（ただし、職場 M_i に対し、 $R_{ij} > 0$ となる職場 M_j の数が 2 以上であるものとする）。

2.2 記号

本研究では、以下の記号を用いる。

- M_i : 第 i 番目の職場 ($i=1, \dots, m$)
 m : 職場の総数

S_i : 第 i 番目の優先順位を持つ相互関連基本構造体 ($i=1, \dots, s$)

s : 相互関連基本構造体の総数

R_{ij} : 職場 M_i と M_j の近接性要求度
 (ただし、 $R_{ii} = 0$)

D_{ij} : 職場 M_i と M_j の距離

TR_i : 職場 M_i の近接性要求度の総和；

$$TR_i = \sum_j R_{ij} \quad (1)$$

G : レイアウト案の評価値；

$$G = \sum_i \sum_j D_{ij} R_{ij} \quad (2)$$

2.3 問題の定式化 ここでの問題は、次のように定式化される。

【問題】前提条件(1)～(4)のもとで、式(2)の G を最小にするように、各職場を工場建屋内に配置せよ。

3. 解法

3.1 提案法の概要 本研究の提案法は、大きく分けて相互関連ダイアグラム作成と職場配置の 2 つのステップから構成される。相互関連ダイアグラム作成のステップでは、リンク法のアルゴリズムに従い、入力した相互関連近接性要求度に基づいて探索順位付きの相互関連基本構造体を作って、リンクを生成することによって相互関連ダイアグラムを作成する。その中に、結合母体を置く場所および職場を表す節点を置く場所の指定、枝の伸びる方向、リンクの形状形成などの操作がルールによって行われる。職場配置のステップでは、上に得られた相互関連ダイアグラムに基づき、各職場を工場建屋内に配置する。

提案法のシステムは、C 言語でコンピュータ化される。数値例の各データは、乱数とキーボード入力の方から得られる。作成した相互関連ダイアグラムおよびレイアウト結果は出力される。

また、従来のリンク法では、相互関連ダイアグラムを正三角形の網状のグラフ上で作成しているが、本研究では、図1に示すような直交座標上で作成する。その理由は、職場の配置は格子状に行われるので、正三角形の網状のグラフ上で作成された相互関連ダイアグラムを用いると、ルール上で各職場の配置場所を確定させるにいくためである。

図1 X/Y座標

図2 相互関連基本構造体

ここで、職場を表す節点は、この直交座標の格子点上にのみ配置可能であり、節点 $M_i (x_i, y_i)$ と $M_j (x_j, y_j)$ 間の距離 D_{ij} は

$$D_{ij} = |x_i - x_j| + |y_i - y_j| \quad (3)$$

で表されるものとする。

3.2 リンク法の概要 ここでは、提案法のもととなる従来のリンク法⁹⁾について説明する。

リンク法では、各職場をグラフ上の節点（「●」マーク）で、職場間の近接関係を弧（「-」マーク）で表し、職場間の近接性要求度に基づいて作成した一対の節点からなる相互関連基本構造体（図2）を用いて、相互関連ダイアグラムを作成する。相互関連ダイアグラムの概念は、MutherのSLP法^[9]で初めて提案されたものであり、「物の流れ」と「アクティビティ相互関係」の分析に基づいて得られる職場相互間の位置関係を表すダイアグラムのことである。

具体的には、まず、職場間の近接性要求度（A, E, I, O, U, Xの6レベル）にそれぞれ対応する数値を与える。その数値に基づき、各職場について式(1)の TR_i を求める。そして、一対の職場間の近接性要求度（A～X）順に、2つの節点からなる相互関連基本構造体を作成する。この相互関連基本構造体を構成する2つの職場それぞれの TR_i の合計値（ $TR_i + TR_j$ ）が最大である相互関連基本構造体から優先順位を付ける。

図3 リンクと枝

次に、第1位の優先順位を持つ相互関連基本構造体 S_1 を結合母体として、優先順位の高い相互関連基本構造体から探索を行い、結合してリンクを生成する。ここで、リンクとは図3(a)に一例を示すような3つ以上の相互関連基本構造体の結合によって構成されている閉路グラフのことである。また、リンクを生成していない節点を枝（図3(b)参照）と呼び、リンクが生成されるまでその枝の先端節点のみが結合の対象節点（「○」マーク）になる。リンクが生成されると、結合母体上のすべての節点が結合の対象節点になる。このように相互関連基本構造体を結合し、リンクを生成することによって、相互関連ダイアグラムを作成する。また、得られた相互関連ダイアグラムに、職場の面積、工場建屋の形状等の制約を考慮して修正を加え、レイアウト案を得る。

3.3 ルールによる節点の位置決定 上に述べたように、リンク法のアルゴリズムは、データの入力、順位付き相互関連基本構造体の作成、枝の生成およびリンクの生成による相互関連ダイアグラムの作成の手順を示しているが、枝およびリンクを生成する際の節点を置く位置の決定、リンクの形状および枝の伸びる方向の限定については、明確なアルゴリズムが示されていない。そこで、リンク法の人間の思考および判断に頼る部分をコンピュータ処理するためのルールを構築する必要がある。

ルールは、(1) 基本ルール、(2) 枝生成ルール、(3) リンク生成ルールの3種類のルールで構成される。また、これらのルールは、基本ルールが最優先され、枝を生成する場合は、枝生成ルールに、リンクを生成する場合は、リンク生成ルールに従うものとする。さらに、各ルールは、その番号の小さいルールが優先されるものとする。以下に、各ルールの具体的な内容を説明する。

(1) 基本ルール（ルール1）

相互関連ダイアグラムを作成する際の基本的な考え方をルール化したもので、以下に示すルールがある。

[ルール1.1] 最初の結合母体すなわち相互関連基本構造体 $S_1 (= S_1)$ の場合、その2節点のうち、 TR_1 の大きい節点を直交座標 (図1) の原点 $(0, 0)$ に、 TR_1 の小さい節点を点 $(1, 0)$ に配置する。

[ルール1.2] リンクが一度生成されると、そのリンクを構成する節点間の結合関係を崩さない。

[ルール1.3] 相互関連基本構造体が結合されると、その相互関連基本構造体を構成する2節点間の距離 D_{ij} が最短となる位置を優先する。

(2) 枝生成ルール (ルール2)

相互関連基本構造体を結合し、枝が生成される場合に、節点の位置を決定するルールであり、以下に示すルールがある。

[ルール2.1] 節点 M_i, M_j 間の直交距離 D_{ij} が、 $D_{ij} \geq 2$ の場合は、ユークリッド距離 d_{ij} が最短となる位置を優先する。ここで、 d_{ij} は

$$d_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \quad (4)$$

で表されるものとする。

注： $D_{ij} \geq 2$ の場合、対角線上と X, Y 軸方向に同直交距離の位置が複数存在する。対角線上の位置を優先するために、式(4)を使う。式(3)の直交距離はレイアウトの評価距離とする。

[ルール2.2] 枝状の先端節点から相互関連基本構造体を枝状に結合し、 $D_{ij} < 2$ となる場合は、その枝の伸びている方向の位置を優先する。

[ルール2.3] 相互関連基本構造体を枝状に結合する場合は、 x 軸の正方向から反時計回り順の位置を優先する。

(3) リンク生成ルール (ルール3) 相互関連基本構造体を結合し、リンクが生成される場合に、リンクを構成する各節点の位置を決定するルールであり、以下に示すルールがある。

[ルール3.1] リンクを生成するために結合する節点間の距離 d_{ij} (式(4)) が、 $d_{ij} < 2$ である場合は、現時点の各節点の位置でリンクを生成する。

[ルール3.2] リンクを生成するために結合する節点間の距離 d_{ij} が、 $d_{ij} \geq 2$ である場合は、先端節点を結合する節点との距離 d_{ij} が最短となる位置に移動する。

[ルール3.3] リンクを生成するために移動した節点とその節点に既に枝状に結合されていた節点間の距離 d_{ij} が、 $d_{ij} \geq 2$ である場合は、既に結合されていた節点を移動した節点との距離 d_{ij} が最短となる位置に移動する。

[ルール3.4] 節点が結合または移動される場合、その節点と既に枝状に結合されていた節点との距離 d_{ij} が最短となる位置を優先する。

[ルール3.5] ルール3.2において、ルール3.4を用いても候補となる位置が複数存在する場合は、結合する節点に対し x 軸の正方向から反時計回り順の位置を優先する。

[ルール3.6] ルール3.3において、ルール3.4を用いても候補となる位置が複数存在する場合は、移動した節点に対し x 軸の正方向から反時計回り順の位置を優先する。

3.4 職場の工場建屋内への配置 ここでは、前節で得られた相互関連ダイアグラムに基づき、各職場を工場建屋内に配置する方法を提案する。この方法では、得られた相互関連ダイアグラムにおける各職場間の位置関係をできる限り崩さないようにすることを目的としており、その具体的なアルゴリズムは、次のように示される。

【職場配置アルゴリズム】

[Step1] 相互関連ダイアグラムを8方向(上下左右とその裏返し)から見て工場建屋と重ね、最大の職場数を含む場合を選択する。

[Step2] 全ての職場が工場建屋内に含まれていれば、Step6へ、そうでなければ、Step3へ。

[Step3] 工場建屋からはみ出した職場を相互関連ダイアグラムから取り除く。

[Step4] 取り除いた職場の中で TR_i が最大の職場を、配置の対象とし、工場建屋内の空いている場所の中で式(2)の評価値 G が最小となる場所に配置する。ここで、評価値 G は、現在、配置の対象となっている職場、および、既に配置が決定している職場の集合を対象に求めたものである。

[Step5] 全ての職場が工場建屋内に含まれていれば、Step6へ、そうでなければ、Step4へ。

[Step6] 配置を終了する。

3.5 提案法の全体アルゴリズム 以上に述べた提案法の全体アルゴリズムは次に示すとおりである。

次に、図9は、職場配置アルゴリズム[Step1]の結果であり、工場建屋からはみ出した職場を取り除き、TR_iの大きい順、すなわち、M₂、M₃の順にGが最小となるように配置する。その結果、最終的に図10のレイアウトが得られる。

4.2 数値実験および考察 ここでは、提案法による近似解の有効性を検討するために、完全列挙法で求めた最適解と最悪解を用い、

$$\text{近似率} = \frac{\text{最悪解} - \text{近似解}}{\text{最悪解} - \text{最適解}} \times 100 (\%) \quad (5)$$

で表される近似率を求めて、各種の問題に対する提案法による近似解を評価する。まず、前節の数値例に対する提案法による解の評価値、近似率および計算時間は、表1に示すようになる。

さらに、職場数m=5,6,7,8,9,10,11の場合について、職場間の近接性要求度(A~X)をランダムに与えた問題を各50問作成し、提案法と完全列挙法で解き、

0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	9	5	10	0	0	0
0	0	0	8	4	1	0	0	0
0	0	0	0	6	0	0	0	0
0	0	0	0	2	7	0	0	0
0	0	0	0	3	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0

図8 作成した相互関連ダイアグラム

9	8			
5	4	6	2	3
10	1		7	

図9 レイアウト初案

0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	9	8	3	0	0	0
0	0	0	5	4	6	0	0	0
0	0	0	10	1	2	7	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0

図10 最終レイアウト案

表1 数値例の評価値G

	proposed method	enumeration method		
		best	worst	mean
performance measure G	36.00	28.50	68.50	49.50
approximation ratio (%)	81.3	-		
CPU time (sec)	0.12	601.64		

*SUN SPARC station 2

表2 5~11職場の数値例の平均比率

m		5	6	7	8
approximation ratio (%)	max	100.0	100.0	90.8	91.6
	mean	69.5	70.9	68.4	67.0
m		9	10	11	
approximation ratio (%)	max	100.0	96.7	87.8	
	mean	69.3	68.8	69.0	

表3 平均計算時間(SUN SPARC station 2)

m	9	10	11
proposed method (sec)	0.12	0.14	0.12
enumeration method (sec)	5.0×10	6.0×10 ²	7.2×10 ³
m	15	20	
proposed method (sec)	0.23	0.25	
enumeration method (sec)	*2.2×10 ³	*4.0×10 ¹⁴	
m	25	30	
proposed method (sec)	0.41	0.72	
enumeration method (sec)	*2.6×10 ²¹	*4.4×10 ²⁸	

*推測値

近似率の最大値および平均値を求めた結果を表 2 に示す。この結果より、検討した範囲内では、近似率の平均値は70(%) 前後の値をとり、職場数によりそれ程変化していないと言える。

次に、職場数 $m = 9, 10, 11, 15, 20, 25, 30$ の場合について、提案法と完全列挙法で各10問ずつ問題を解き、SUN SPARC station 2 による計算時間を測定した。なお、15職場以上の問題は完全列挙法で時間的に計算が不可能なので、計算時間の推定値で表す。表3 にはそれぞれの計算時間の平均値および推定値を示している。この結果より、完全列挙法では職場数 m の増加に伴い m の階乗に比例して計算時間が増加するのに対し、提案法では職場数の増加に対する計算時間の増加は小さく、いずれの職場数の問題に対しても1秒以内で解けることが分かった。

5. 結 言

本研究では、リンク法に基づきコンピュータを用いて相互関連ダイアグラムを作成するためのルールを作った。さらに、得られた相互関連ダイアグラムに基づいて工場内職場の配置を行うレイアウト法を提案した。また、提案法をC言語を用いてコンピュータ・プログラム化し、数値例を解いた。その結果、検討した30職場以内の問題では、提案法により1秒以内の計算時間で約70(%) の平均近似率の解が得られた。

参 考 文 献

- 1) Buffa, E. S., Armour, G. C. and Vollman, T. E. : "Allocating Facilities with CRAFT" ; Harvard Bus. Rev., March-April, pp.136~156 (1964)
- 2) Lee, R. C. and Moore, J. M. : "CORELAP-COMputerized RELationship LAYOUT Planning" ; Jour. Ind. Engg., Vol.8, No.3, pp.195~200 (1967)
- 3) 邵 忠, 宮崎茂次, 太田 宏 : "リンク生成による相互関連ダイアグラム作成法(工場レイアウト設計に関する研究(第1報))" ; 日本経営工学会誌, Vol.43, No.4, pp.260~267 (1992)
- 4) Malakooti, B. and Tsurushima, A. : "An Expert System Using Priorities For Solving Multiple Criteria Facility Layout Problems" ; Int. J. Prod. Res., Vol.27, No.5, pp.793~808 (1989)
- 5) Edward L. Fisher and Shimon Y. Nof. : "FADES : Knowledge-base Facility Design" ; Annual International Industrial Engineering Conference Proceedings, Institute of Industrial Engineers, (1984)
- 6) 吉浦 裕 : "計算機室のレイアウト" ; 日本人工知能学会誌, Vol.7, No.4, pp.592~596 (1992)
- 7) 戸沢 義夫 : "特集「事例ベース推論」にあたって" ; 日本人工知能学会誌, Vol.7, No.4, pp.2 (1992)
- 8) 小林 重信 : "事例ベース推論の現状と展望" ; 日本人工知能学会誌, Vol.7, No.4, pp.3~10 (1992)
- 9) Muther, R. : "Systematic Layout Planning" ; Industrial Education Institute, (1961)
(日本語版) 十時昌訳 : "工場レイアウトの技術" ; 日本能率協会, (1971)