



シーケンスペア表現を用いた ロボットセル生産システムのレイアウト最適設計法*

泉井一浩** 村雲泰*** 末光一成*** 西脇眞二** 野田哲男† 永谷達也†

Layout Design Optimization Method for Robotic Cellular Manufacturing Systems Using Sequence-pair Representation

Kazuhiro IZUI, Yutaka MURAKUMO, Issei SUEMITSU, Shinji NISHIWAKI, Akio NODA and Tatsuya NAGATANI

Robotic cellular manufacturing systems are a new type of manufacturing system in which one or more flexible robots carry out a large number of assembly operations that would be performed by people in conventional cellular manufacturing systems. The conceptual design stage, when the assembly system layout details are decided, is especially important during the development of effective robot cellular manufacturing systems, since fundamental performances of the system under consideration are determined at this stage. Since development of a decision-support system for the conceptual design of robot cellular manufacturing systems would streamline decision making, this paper proposes a layout design optimization method for robot cellular manufacturing systems. First, the design criteria for robot cellular manufacturing system layout designs are clarified, and objective functions are formulated. Next, layout design candidates are represented using a sequence-pair scheme to avoid interference between assembly system components, and the use of dummy components is proposed to represent layout areas where components are sparse. A multiobjective genetic algorithm is then used to obtain Pareto optimal solutions for the layout optimization problems. Finally, several numerical examples are shown to illustrate the effectiveness and usefulness of the proposed method.

Key words: robotic cell, assembly layout, design engineering, design optimization, genetic algorithm, sequence-pair representation

1. 緒 言

ロボットセル生産システムは、従来のセル生産システムで人間の作業者が担当していた複数の工程を、フレキシブルな動作が可能なロボットに担わせる新しい生産システムである。この生産システムは、従来のセル生産システムと同様に、マテリアルフローの短縮や在庫の圧縮という特長を受け継ぎつつ、ロボットの自動運転によって運用コストを削減することができるという利点を併せ持っている。しかしながら、ロボットセル生産システムでは、複雑な挙動特性を持つロボットに技能的な作業を行わせることから、その設計や教示といったシステムの立ち上げに長大な時間を要するのが現状である。

このロボットセル生産システムの立ち上げのための重要なプロセスの1つとして、ロボットや組立テーブル、部品供給棚等の機器の位置を決定するレイアウト設計がある。レイアウト設計は、ロボットの動作計画等を決定する詳細設計や教示作業の上流段階にあり、レイアウト設計段階における決定は、これらの詳細設計や教示のプロセスに大きな影響を与える。つまり、レイアウト設計における意思決定プロセスを充実させることができれば、詳細設計や教示作業における手戻りの防止により生産システムの設計に要する時間を大幅に短縮するだけでなく、生産システムの効率性と信頼性を大きく向上させることができると期待できる。

以上のような背景から、ロボットセル生産システムのレイアウト設計に、最適化手法を導入する方法が試みられている¹⁾²⁾。しかし、これらの方法では、機器を配置する座標を設計変数と

するため、複数の機器の重なり合いを回避する明示的な制約条件の設定が必要となり、解空間の大域的な探索を阻害する原因となっている。

レイアウトの最適化は、生産システムのレイアウト設計³⁾⁴⁾だけでなく、集積回路設計のパッキング問題⁵⁾でも多くの研究が行われており、上述の問題を回避する方法が提案されている。例えば、Kleinhansら⁶⁾、DunlopとKernighan⁷⁾は、機器の重なり合いを回避した解を得るために、まず、複数の機器の重なりを許容した解を求めた後、重なりを除去する手続きを行っている。しかし、これらの方法では重なりを除去する手続きにおける解の悪化、及び計算時間の増大を招く。その他にも、各機器の配置領域の分割方法を木の構造によって表現する方法⁸⁾⁹⁾があるが、表現可能なレイアウト案が限定されるという問題がある。

一方で、機器の重なり合いを必ず回避しながら、多様な機器配置を表現可能な方法として、シーケンスペア¹⁰⁾を用いる方法がある。この表現法を用いればレイアウト最適化を非常に効率的に実行でき、パッキング問題に対してその有用性が確認されている¹¹⁾¹²⁾。しかしながら、パッキング問題では、パッキング面積を最小化することが非常に重要な課題であるのに対し、ロボットセル生産システムのレイアウト設計では、配置空間内に適切な隙間を設定しなければならないという問題があり、シーケンスペアによる表現法をそのまま導入することができない。そこで本研究では、この課題を克服した、ロボットセル生産システムのための新しいレイアウト最適設計法を提案する。

以下では、まずレイアウト設計段階におけるロボットセル生産システムの設計要件を整理する。そして、レイアウト設計における生産性とタスク実行可能性の定量的な評価尺度としてロボットの動作時間と可操作性を導入し、定式化する。次に、シーケンスペア表現法をロボットセル生産システムのレイアウト

* 原稿受付 平成23年1月17日

** 正 会 員 京都大学大学院 (京都府京都市左京区吉田本町)

*** 京都大学大学院

† 三菱電機株式会社 (兵庫県尼崎市塚口本町 8-1-1)

最適設計に導入する方法を示す。このとき、配置空間内に適切な隙間を設定するためにダミー機器を導入したレイアウト表現法を提案する。さらに、本レイアウト問題の解法として遺伝的アルゴリズムを用いる方法を示し、最後に数値例により提案法の有効性を確認する。

2. レイアウト設計における評価特性

2.1 レイアウト設計問題

部品供給棚や組立テーブル等の機器の間を、1 台の冗長性を持たない n 自由度ロボットの先端効果器を移動させることにより、組立作業を実行するロボットセル生産システムのレイアウト設計を考える。ロボットセル生産システムのレイアウト設計問題は、パッキング問題と同様に、これら機器やロボットを平面上に配置する問題として考えることができる。

ロボットセル生産システムのレイアウトの設計では、定められたタスクをできるだけ短時間で実行できること、かつ、それらのタスクが実行可能であること、という 2 つの重要な要件を同時に満たす必要がある。つまり、これら、生産性とタスク実行可能性について迅速に評価しながら、ロボットや各機器を配置する位置を考える。

2.2 生産性

ロボットの作業時間は、組立作業に必要な時間と、ロボットをある姿勢から別の姿勢に変化させる移動動作に必要な時間に分けることができる。レイアウト設計の結果は、部品の移動に伴う後者の姿勢変化の時間に大きな影響を及ぼすため、レイアウト設計では、ロボットの姿勢変化動作の時間を評価して最小化することが求められる。

動作計画の定まっていないレイアウト設計段階でロボットの姿勢変化動作時間を、厳密に求めるのは非常に困難であるが、移動の始点と終点におけるロボットの姿勢から算出できるロボットの各関節角変化量からおおよその動作時間を見積もることができる。ここでは、各関節がその最大角速度で等速運動するとみなすことによって関節の動作時間を計算する。すなわち、 n 自由度ロボットについて、関節の番号を台座に近い側から順に $1, 2, \dots, n$ とつけたとき、第 i 番目の移動動作における第 k 関節の動作時間 T_k^i を、

$$T_k^i = \frac{|\bar{q}_k^i|}{\omega_k} \quad (1)$$

により評価する。ここで、 ω_k は第 k 関節の最大角速度であり、 $\bar{q}_k^i$ は第 i 番目の移動動作時の第 k 関節の角度変化量である。なお、通常、ロボットのすべての関節は同時に並行して稼働させることができるため、以下の式のように、すべての関節動作時間の最大値が、第 i 番目の移動動作と考えることができる。

$$T_i = \max_k \left[\frac{|\bar{q}_k^i|}{\omega_k} \right] \quad (2)$$

また、1 サイクルの作業の中の先端効果器の移動動作回数を h とすると、1 サイクルの移動動作時間の総計 T を、

$$T = \sum_{i=1}^h T_i \quad (3)$$

により評価する。

2.3 タスク実行可能性

上述の生産性の評価では、各機器での作業位置におけるロボットの姿勢が計算され、その姿勢情報に基づいて生産性が評価

される。しかしながら、ロボットの先端効果器が作業位置に届いても、ロボットが特異な姿勢となっている場合がある。特にロボットセル生産システムでは、ロボットに技能的な動作を要求するため、特異な姿勢に近い作業位置では実際にはタスクを実行できない恐れがある。したがって、ロボットが各作業位置においての特異な姿勢となることを避け高い操作性を確保することをレイアウト設計段階において検討しておくことが極めて重要である。

このようなロボットの操作性を評価する指標として可操作度¹³⁾がある。可操作度は、ロボットの各関節角度と先端効果器の位置および姿勢の関係から算出する指標であり、以下に評価法を示す。

j 番目の作業位置($j=1, 2, \dots, h$)における第 k 関節の角度を q_k^j とする。 q_k^j ($k=1, 2, \dots, n$) で構成される n 次元の関節変数ベクトル $\mathbf{q}^j$ を以下のように定義する。

$$\mathbf{q}^j = [q_1^j, q_2^j, \dots, q_n^j]^T \quad (j=1, 2, \dots, h) \quad (4)$$

また、 j 番目の作業位置における、3 次元空間の手先の位置および姿勢を表すベクトルを、

$$\mathbf{r}^j = [r_1^j, r_2^j, \dots, r_m^j]^T \quad (5)$$

とする。ここで、 m は手先位置および姿勢を表すベクトルの次元数である。なお、以下の議論では添字 j を省略する。

まず、 $\mathbf{r}$ と $\mathbf{q}$ の関係を考える。この関係はロボット機構の構造によって定まる。このとき、 $\mathbf{r}$ に対応する速度ベクトル $\mathbf{v}$ と $\mathbf{q}$ に対応する関節速度ベクトル $\dot{\mathbf{q}}$ との関係は、連鎖律により、

$$\mathbf{v} = \mathbf{J}(\mathbf{q})\dot{\mathbf{q}} \quad (6)$$

で表すことができる。ここで $\mathbf{J}(\mathbf{q})$ はヤコビ行列であり、

$$\mathbf{J}(\mathbf{q}) = \begin{bmatrix} \frac{\partial r_1}{\partial q_1} & \dots & \frac{\partial r_1}{\partial q_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial r_m}{\partial q_1} & \dots & \frac{\partial r_m}{\partial q_n} \end{bmatrix}$$

である。

ここで、ユークリッドノルム $\|\dot{\mathbf{q}}\| = (\dot{q}_1^2 + \dot{q}_2^2 + \dots + \dot{q}_n^2)^{1/2}$ が $\|\dot{\mathbf{q}}\| \leq 1$ を満足する $\dot{\mathbf{q}}$ を用いて実現し得る $\mathbf{v}$ の全てからなる集合を考える。これは m 次元ユークリッド空間内の楕円体となり、可操作性楕円体と呼ばれる。可操作性楕円体の体積 V は、以下のように表される。

$$V = c_m w \quad (7)$$

$$c_m = \begin{cases} \frac{(2\pi)^{\frac{m}{2}}}{2 \cdot 4 \cdot 6 \cdots (m-2) \cdot m} & \text{if } m: \text{偶数} \\ \frac{2(2\pi)^{\frac{m-1}{2}}}{1 \cdot 3 \cdot 5 \cdots (m-2) \cdot m} & \text{if } m: \text{奇数} \end{cases} \quad (8)$$

係数 c_m は m が与えられれば定数であり、 w は可操作度と呼ばれ、冗長性をもたないロボットの場合、以下の式で求めることができる。

$$w = |\det \mathbf{J}(\mathbf{q})| \quad (9)$$

つまり、可操作度 w が大きければ、その姿勢において大きな手先効果器の速度を出せるため、操作能力の評価に有用である。

ロボットセル生産システムでは、組立テーブルや部品供給棚

などの数多くの機器の位置において、ロボットの高い操作能力が必要である。そこで、再び作業位置についての添字 j を用いて、次式のように、各作業位置 ($j=1, 2, \dots, h$) における可操作度の重み付き総和によって総合的な可操作度指標 W を求める。

$$W = \sum_{j=1}^h a^j w^j \quad (10)$$

ここで、 w^j は j 番目の手先位置での可操作度であり、 a^j はその重みである。

以上のように、可操作度は、ロボットの各関節角度と手先効果器の位置の関係からという運動学的な情報のみで評価できる指標であり、複雑な動力学的な考慮を行う必要がないため、レイアウト設計段階での使用に適した指標であるといえる。

3. 機器配置の表現法

3.1 シーケンスペア

ロボットセル生産システムのレイアウト設計問題は、多様な大きさの機器を平面上に配置する問題となる。これを最適化手法により解くための最も直観的な方法は、各機器の座標を設計変数とし、局所探索法により最適解を求める方法である¹²⁾。しかし、機器座標を設計変数とすると、機器の重なり合いを回避するために多数の制約条件を設定する必要があり、この制約を満たしながら局所探索法によって、機器の並びの入れ替えを行うことは非常に困難である。

これに対して、機器間の重なりを自動的に回避することのできるレイアウトの表現方法として、シーケンスペア¹⁰⁾がある。シーケンスペアは、矩形の機器の相対位置関係を表す2つの順列 Γ_+ 、 Γ_- を用いてレイアウトを表現する方法である。すなわち、全ての機器が矩形であると仮定し、 Γ_+ 、 Γ_- の順列にそれぞれ1つずつ含まれる各機器番号の順により、機器の上下左右の相対位置関係を表現する。さらに、ここでは、機器を配置する際の縦横の向きを表現する変数 θ_l ($l=1, 2, \dots, L$) を導入する。ここで l は機器番号であり、 L は配置を考える機器の個数である。全ての機器が矩形であり、縦横の二通りの配置方法が考えられるので、($\theta_l = 0, 1$) により向きを表現する。

3.2 シーケンスペアによるレイアウト表現

最適化の過程では、レイアウトを評価するために、シーケンスペアにより表現されるレイアウトでの実際の機器の座標を求める必要がある。ここでは、例として、 $\Gamma_+ = \{cdebf a\}$ 、 $\Gamma_- = \{dfecab\}$ の場合を例にとり、その手続を示す。まず、2つの順列から、図1のような斜め格子による相対位置関係を求める。斜め格子状のそれぞれの線に、左上から右下に順に Γ_+ の機器名を割り当て、左下から右上に順に Γ_- の機器名を割り当てる。そして、同じ機器名の線が交差する点に機器を配置する。次に、

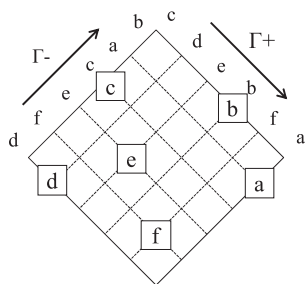


Fig. 1 Relative arrangement

図2のような制約グラフを描く。まず、図2(a)の水平制約グラフでは、始点 s を斜め格子の左に、終点 l を右におく。そして、各機器から見て、 Γ_+ 、 Γ_- の双方の順列において後方にある機器に対して矢印を引く。同様に、図2(a)の垂直制約グラフでは、始点 s を下、終点 l を上におき、各機器から見て Γ_+ で前方で、 Γ_- では後方にある機器に対して矢印を引く。

ここで、 θ_l によって定められる各機器の縦横の方向を考慮し、それぞれの点間の最長経路を求めることで、機器の縦横の座標を求めることができる。こうして求められた座標から図3のようなレイアウトが得られる。

このように、 Γ_+ 、 Γ_- 、 θ_l を用いてレイアウトを表現することで、最適化過程で機器の重なり合いを必ず回避することが可能であり、効率的に最適化を実行することができる。

3.3 機器間の間隔の表現

以上のシーケンスペアによるレイアウト表現の順列は、単に機器の相対位置を表しているだけであるため、機器と機器の間にとるべき空間の大きさを考慮していない。したがって、VLSI設計のように機器を詰め込む面積を最小にするようなパッキング問題に対して利用されている¹¹⁾¹²⁾。これに対して、本論文で対象とするロボットセル生産システムのレイアウト設計問題では、機器間の間隔を考慮したレイアウト設計を行う必要がある。これは、フレキシブルロボットでは、タスク実行可能性を満足するため、可操作性を確保することが重要であり、可操作度を向上させるには、ロボットからタスクの実行位置まで、適切な距離を確保する方がよい場合が多いためである。

そこで、本論文では、このような問題を克服する方法として、レイアウト最適化問題に矩形のダミー機器を導入し、ダミー機器によって機器間の間隔の大きさを表現することを提案する。すなわち、レイアウトを行う機器とダミー機器の配置を同時に考える。

この表現方法を用いてレイアウト最適化のプロセスが実行されると、機器の間に距離を保つ必要がある場所には、ダミー機器が配置されることになり、機器間の間隔を考慮したレイアウト

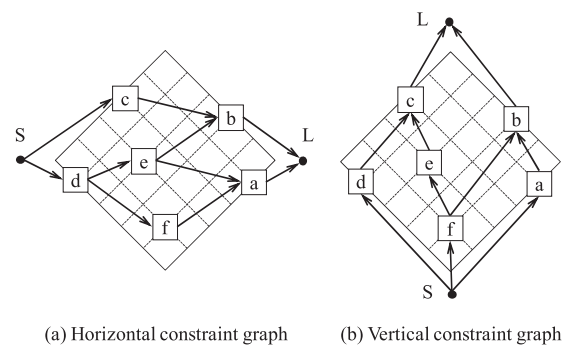


Fig. 2 Constraint graph

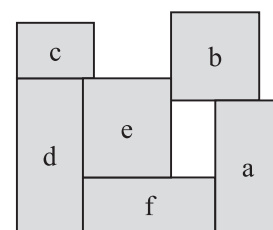


Fig. 3 Component layout

トの最適化を行うことができる。また、最適レイアウトには不要なダミー機器が設計変数として含まれた場合でも、必要な機器が配置される領域の外側にダミー機器が配置されたレイアウトが最適解として得られることが期待できる。言い換えると、ダミー機器を導入した場合でも、ダミー機器を用いなかった場合のレイアウトをすべて表現可能であると言える。

4. 最適化アルゴリズム

4.1 遺伝的アルゴリズム

本論文で対象とするレイアウト最適化問題は、機器の相対位置を表す順列と、機器の向きを表す0または1の整数を設計変数とする。そこで、これらのように順列や整数となる設計変数を扱うための最適化手法として、遺伝的アルゴリズムを用いる。以下では、本論文で用いる交叉、突然変異、選択の方法を示す。

4.2 交叉

シーケンスペアを表現する順列 Γ_+ 、 Γ_- 、および、向き θ_i のための交叉方法として、配置依存部分交換交叉 (Placement-based Partially Exchanging Crossover, 以下 PPEX)¹⁴⁾を用いる。PPEXでは、まずランダムに機器1つを選び、その機器を中心に窓枠領域を作成する。ここで窓枠領域とは、シーケンスペアで定義される各機器の相対位置関係を表す斜め格子上の連続した矩形の部分領域を表す。この部分領域に含まれた機器を交叉対象の機器とし、そのシーケンスペアを交叉相手の個体の機器の順に変更する。また、機器の縦横の向きについても同様に、相手の個体の向きに変更する。

例として、図4に示された窓枠領域が生成された際のPPEXの操作を述べる。図4において灰色で塗りつぶされた領域が今回生成された窓枠領域である。図5に、この例でPPEXを適用させたときの遺伝子の操作を示す。ここでは、親1のc, d, e, fの4つの機器が窓領域に含まれており、親1の Γ_+ 、 Γ_- 中のc, d, e, fの順と、 θ_i 中のc, d, e, fに対応する値が、同世代の他の個体である親2の Γ_+ 、 Γ_- 、 θ_i のものに置き換わり、新しい個体である子1が生成されていることが分かる。このとき、交叉対象とならなかった機器a, bの順序と向きについては、親1の遺伝子がそのまま子1に引き継がれる。

4.3 突然変異

突然変異では、まず、それぞれの機器に対して、設定した突然変異確率の下で、突然変異を行うかどうか決める。突然変異を行うと決まれば、ランダムにもう一つの機器を選び出し、順列 Γ_+ 、 Γ_- における位置を入れ替える。同時に、縦横の向き θ_i を変化させる。

4.4 選択

本レイアウト最適設計問題は、手先効果器の移動時間の最小化と、可操作度の最大化を同時に目指す多目的最適化問題であ

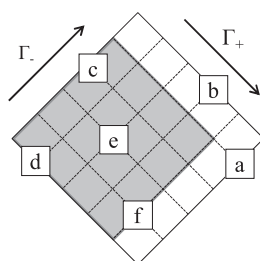


Fig. 4 PPEX window

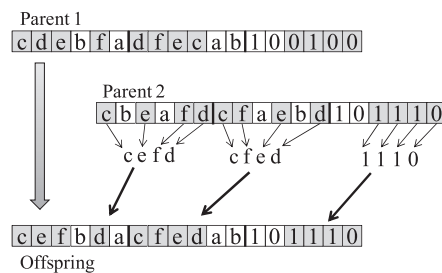


Fig. 5 PPEX operation

る。通常の1目的最適化手法を用いると、これら2つの目的関数の重要度を設定するか、一方を制約条件として規定する必要がある。しかし、レイアウト設計で、そのような重要度の設定や、制約条件の決定を行うことは非常に困難である。そこで、選択手法として、NSGA-II¹⁵⁾を用い、2つの目的関数の非劣解集合を導出し、設計者がトレードオフ関係の検討を行うことを可能にする。

NSGA-IIの基本的な考え方は、解の優劣の比較に基づいて非劣解の保存を行いながら、目的関数空間での混雑度により、非劣解の選別を行うというものである。つまり、非劣解の中でも、混雑度の低い個体を優先的に次世代に残すことで、探索がまだ十分でない領域の解を重点的に探索することができる。このことにより、広い設計空間上を満遍なく探索し、広範囲に分布した非劣解集合を導くことができる。

5. 数 値 例

5.1 設計条件の設定

提案するレイアウト最適化法をいくつかの数値例に適用し、有効性を確認する。以下の数値例では、組立ロボットとして、図6に示す三菱電機株式会社製RV-6SQの諸元を用いた。また、表1にレイアウトを決定する機器の番号、サイズ、往復回数を示す。ここでは、0番がロボットの台座を示しており、さらに、1番が組立テーブル、2番から8番までの機器が部品供給棚である。そして、ロボットの手先が、組立テーブルを起点にして、2番から8番までのそれぞれの部品供給棚に部品を取りに指定の回数だけ往復し、それぞれの部品供給棚の位置で部品をつかむ作業と、組立テーブルの位置で部品を組み付ける作業を行うことを想定している。GAのパラメータは、個体数を80、世代数を10000、PPEXにおける交叉率を0.8、突然変異確率は $1/2L$ とし、その最適化を5回繰り返して非劣解集合を得た。なお、 L はダミー機器を含めた機器の個数である。これらの値は、本数

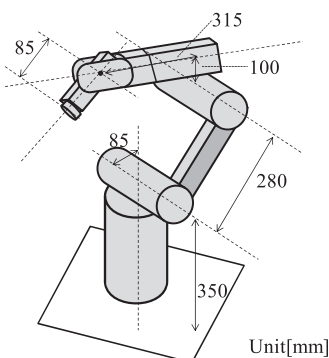
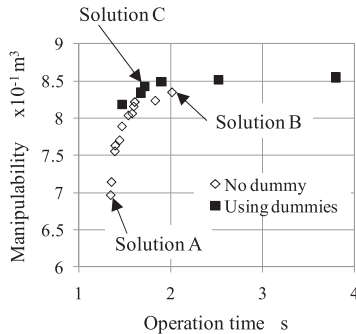
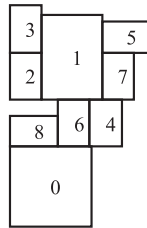
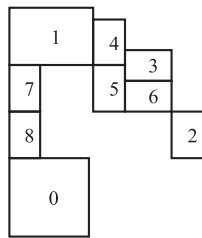


Fig. 6 Assembly robot configurations

Table 1 Cellular manufacturing system components

Machine ID (Machine name)	Size (Height, Width) mm	Number of Operations
0 (Robot)	(255, 255)	-
1 (Assembly Table)	(270, 188)	10
2 (Parts box 1)	(150, 100)	2
3 (Parts box 2)	(150, 100)	2
4 (Parts box 3)	(150, 100)	2
5 (Parts box 4)	(150, 100)	1
6 (Parts box 5)	(150, 100)	1
7 (Parts box 6)	(150, 100)	1
8 (Parts box 7)	(150, 100)	1

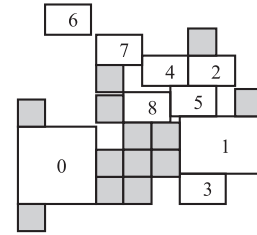
**Fig. 7** Comparison of obtained non-dominated solutions**Fig. 8** Layout of solution A**Fig. 9** Layout of solution B

値例の計算を行う前に予備的な検討を行い、安定的に良い解を得ることが出来る条件を調査して定めた。

5.2 ダミー機器の有効性

まず、ダミー機器を用いずに 0 番から 8 番の機器のみを対象とした配置最適問題に遺伝的アルゴリズムを適用した場合と、これら 9 つの機器に加えて一辺 90mm の正方形のダミー機器を 13 個用いて最適配置問題を解いた場合について、得られた非劣解集合を図 7 に示す。また、図 7 中、点 A, B, C の解のレイアウトをそれぞれ、図 8、図 9、図 10 に示す。図中の矩形が各機器を表しており、矩形中の数字が表 1 で示されている機器番号を示している。また、図 10 で灰色の正方形がダミー機器を表している。

図 7 から、作業時間と可操作度の 2 つの目的関数間のトレードオフ関係が明確に分かる。つまり、作業時間の短いレイアウト

**Fig. 10** Layout of solution C

トは可操作度が低く、可操作度を向上させると作業時間が長くなる。この計算結果では、ダミー機器を用いない場合に 12 個の非劣解が、ダミー機器を用いた場合には 6 個の非劣解が得られた。そして、ダミー機器を用いた場合に可操作度の面で良好な特性が得られ、ダミー機器を用いなかった場合の解を優越した解が多数得られていることがわかる。この結果から、ダミー機器を導入することの有効性が確認できる。

ダミー機器を用いなかった場合に得られた 12 個の非劣解の中でも、解 A は、最も関節の動作時間の値が優れている。この解のレイアウトを図 8 に示すように、組立テーブルである機器 1 の周囲を中心にテーブルがレイアウトされ、テーブルと機器間の往復作業のための動作時間が短くなっている。

また、解 B は、ダミー機器を用いずに得られたパレート解の中で最も可操作度の値が優れている解であるが、動作時間が最も劣っている。この解のレイアウトを図 9 に示す。図 9 からわかるように、組立テーブルと多くの部品供給棚が、ロボットの台座より離れた位置にレイアウトされている。これは、ロボットの台座と機器の距離を適切に離すことで、ロボットの操作性を高めるためである。

これらの解では機器間が重なっておらず、かつ、妥当な解となっており、シーケンスペアを用いた最適化手法が十分に機能することがわかる。しかしながら、ダミー機器が存在しないため、解 A では機器 4 および 6, 8 がロボットの台座に近く、解 B では機器 7 と機器 8 がロボットの台座に近い位置に配置され、可操作性が低い。

一方で、図 10 に示した、ダミー機器を用いた最適化によって得られた解 C のレイアウトでは、機器 1 の組立テーブルや機器 2 から 8 の部品供給棚が、ロボットの台座から適当な距離を保って配置され、可操作度の面で有利な解となっていることがわかる。これは、ダミー機器を導入した効果であり、このことから、ダミー機器の必要性が確認できる。

5.3 ダミー機器の寸法設定の影響

次に、導入するダミー機器の寸法の変化による影響を考える。13 個の正方形のダミー機器の 1 辺の長さ a を、30mm, 90mm, 150mm に変化させ、それぞれのの場合に導かれた非劣解を図 11 に示す。

この図から、ダミー機器の 1 辺の長さを 90mm に設定した場合に比べて、30mm と設定すると可操作度の特性が大きく悪化することがわかる。また、150mm に設定した場合には、可操作度と動作時間の両面でバランスのとれた良い解が得られていない。このように、より優れた設計解を得るためには、ダミー機器の寸法を適切に設定する必要がある。しかし、適切な寸法を前もって予測することは難しい問題である。

そこで、表 2 のように多様な寸法を持つ 13 個の長方形のダミー機器を用いて、レイアウト最適化を行う。このとき得られた

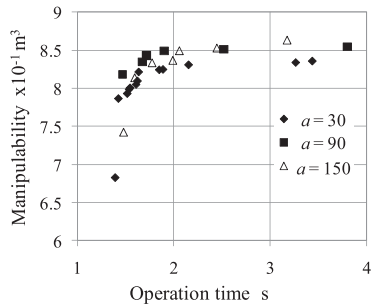


Fig. 11 Comparison of solutions for different dummy component sizes

Table 2 Dummy component sizes

Dymmy ID	Height mm	Width mm
9	60	70
10	70	80
11	80	90
12	100	110
13	120	130
14	60	70
15	70	80
16	80	90
17	100	110
18	60	70
19	70	80
20	80	90
21	100	110

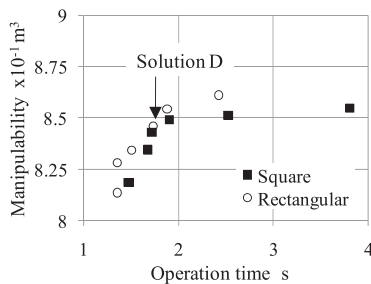


Fig. 12 Non-dominated solutions when using square and rectangular dummy components

非劣解集合と、同じ個数の一辺 90mm の正方形のダミー機器を用いた場合の非劣解集合の比較を図 12 に示す。

図 12 から、長方形のダミー機器を用いることで、非劣解集合が改善されていることがわかる。また図 13 に非劣解集合中の解 D のレイアウトを示す。この図から、多様な寸法をもつ長方形のダミー機器の中から適切なものが選ばれ、空間を表現している様子が確認できる。この結果から、適切なダミー機器の寸法が不明な場合でも、多様な寸法を持つ長方形のダミーを導入しておくことで、提案法の持つダミー機器の寸法設定に対する依存性を緩和できることを示している。

5.4 ダミー機器の個数の影響

最後に、ダミー機器の個数の影響を考える。長方形のダミー機器の個数 N_d を 5 個、および、25 個に変化させたときに得られた非劣解を、前節と同様の 13 個の場合と比較する。なお、ダミー機器が 5 個の場合は、表 2 のうち、機器番号が 9 番から 13 番のみを用いた。ダミー機器が 25 個の場合には、表 2 の 9 番から 20 番の機器を 2 個ずつと、21 番の機器を 1 個用いた。この時得られた非劣解を図 14 に示す。

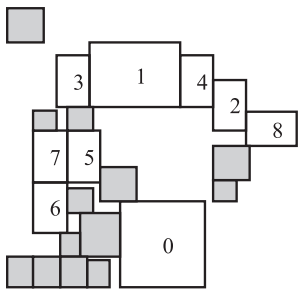


Fig. 13 Layout of solution D

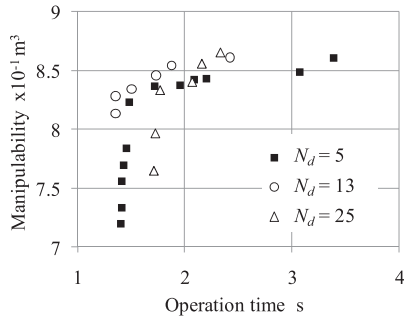


Fig. 14 Non-dominated solutions when different numbers of dummy components are used

図 14 からわかるように、ダミー機器の個数を多くすると、可操作度の高い解が得られている。しかしながら、動作時間が短くなる領域で良い解が得られていない。これは設計変数の個数が多くなり、問題の規模が大きくなりすぎること、同じ世代数では求解が困難となるためである。逆にダミー機器の個数を少なくすると動作時間が短い領域で良好な解が多く得られているが、可操作度の面で良い解が得られにくい。以上のことから、ダミー機器の個数はレイアウト最適化の結果に影響を及ぼすため慎重に定める必要があることがわかる。

6. 結 言

本論文では、シーケンスペア表現を用いた配置最適化手法を利用した新しいロボットセル生産システムのレイアウト設計法を提案した。以下に、本研究の成果をまとめる。

- 1) ロボットセル生産システムの概念設計段階でのレイアウト設計問題のために、生産性とタスク実効性に評価する指標として、動作時間と可操作性を目的関数として定式化を行った。
- 2) 最適化の手続き中に発生する機器間の重なり合いを自動的に回避する方法として、シーケンスペアによる機器レイアウトの表現法を用いた。また、ロボットセル生産システムでは、ロボットの操作性を確保する上で、機器間の距離を考慮しなければならないことから、ダミー機器を導入した最適化法を提案した。
- 3) 複数の目的関数間のトレードオフ関係を評価するために、多目的遺伝的アルゴリズムを用いた最適化を採用した。
- 4) 提案法をロボットセル生産システムのレイアウト最適化問題に適用し、その有効性を示した。また、数値計算例の結果に基づき、ダミー機器の寸法を設定するための指針を示した。

参 考 文 献

- 1) D. Barral, J. P. Perrin, E. Dombre, and A. Liegeois: Simulated Annealing Combined with a Constructive Algorithm for Optimising Assembly Workcell Layout, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **17**, 1, (2001) 593.
- 2) M. L. Tay, and B. K. A. Ngoi: Optimising Robot Workcell Layout, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **12**, 5, (1996), 377.
- 3) A. Drira, H. Pierreval, and S. H. Gabouj: Facility layout problems: A survey, *Annual Reviews in Control*, **31**, 2, (2007) 255.
- 4) M. Gen, L. Lin, and H. Zhang: Evolutionary techniques for optimization problems in integrated manufacturing system: State-of-the-art-survey, *Computers & Industrial Engineering*, **56**, 3, (2009) 779.
- 5) K. Shahookar and P. Mazumder: VLSI Cell Placement Techniques, *ACM computing surveys*, **23**, 2, (1991) 143.
- 6) J. M. Kleinmans, G. Sigl, F. M. Johannes, and K. J. Antreich: GORDIAN: VLSI Placement by Quadratic Programming and Slicing Optimization, *IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems*, **10**, 3, (1991) 356.
- 7) A. E. Dunlop, and B. W. Kernighan: A Procedure for Placement of Standard-cell VLSI Circuits, *IEEE Transactions on Computer-aided Design of Integrated Circuits and Systems*, **4**, 1, (1985) 92.
- 8) W. N. Dai, and E. S. Kuh: Simultaneous Floor Planning and Global Routing for Hierarchical Building-Block Layout, *IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems*, **6**, 5, (1987) 828.
- 9) T.-C. Chen and Y.-W. Chang: Modern Floorplanning Based on B*-Tree Fast Simulated Annealing, *IEEE Transactions on Computer-aided Design of Integrated Circuits Systems*, **25**, 4, (2006) 637.
- 10) H. Murata, K. Fujiyoshi, S. Nakatake, and Y. Kajitani: VLSI Module Placement Based on Rectangle-Packing by the Sequence-Pair, *IEEE Transactions on Computer-aided Design of Integrated Circuits and Systems*, **15**, 12, (1996) 1518.
- 11) A. Drakidis, R. J. Mack, and R. E. Massara: Packing-based VLSI Module Placement Using Genetic Algorithm with Sequence-pair Representation, *IEE Proceedings - Circuits, Devices & Systems*, **156**, 6, (2006) 545.
- 12) 小林正和, 鈴木佑哉, 東正毅: 概念設計支援のための機能構造とレイアウトの同時最適化, 精密工学会誌, **76**, 8, (2010) 966.
- 13) 吉川恒夫: ロボットアームの可操作度, 日本ロボット学会誌, **2**, 1, (1988) 63.
- 14) S. Nakaya, S. Wakababashi, and T. Koide: An Adaptive Genetic Algorithm with Sequence-Pair Representation of Solutions for VLSI Floorplanning, *IEICE Technical Report. Computer systems*, **99**, 481, (1999) 81.
- 15) K. Deb, A. Pratap, S. Agarwal, and T. Meyarivan: A Fast and Elitist Multiobjective Genetic Algorithm: NSGA-II, *IEEE Transaction Evolutionary Computation*, **6**, 2, (2002) 182.