

自走式ガントリー溶接ロボットの動作経路最適化システムの開発

Development of Optimization Technology in Motion Path Planning for Mobile Gantry Type Welding Robots

勘定 義弘 KANJO Yoshihiro JFE エンジニアリング 技術統括部統括室 副部長
阿瀬 始 ASE Hajime JFE エレテック 第一事業部 エンジニアリング本部 部長・工博

要旨

複数台溶接ロボットの協調作業におけるロボット相互干渉の問題に対して、ロボットが相互干渉しないような作業経路の最適化の手法を考案した。ロボットに与えられた溶接作業をいくつかの作業領域グループに分けて実施することとし、作業領域分割を実施した後、個々の作業領域内でのロボットの経路最適化を実施する方式を採用した。この作業領域分割にはグラフ理論に基づいた手法を適用し、領域ごとの経路最適化には遺伝アルゴリズムを適用した。簡易ワークモデルを利用した検証において、15%程度の作業時間短縮が可能であるとの結果が得られた。

Abstract:

Systematic handling of multi-robot motion has been improved in heavy industries. However, welding path optimization is still one of remained subjects. Our research is focused on the path planning of mobile gantry-type welding robot system. Task group assignment is processed with graph theory approach and genetic algorithm searches the optimized solution successively. Over 15% reduction of total motion time is attained on a trial test.

1. はじめに

造船や橋梁に代表される大型鋼構造物の溶接において、高密度に配置されたロボット群による省スペースでの作業は、工程リードタイムの短縮に効果があることより、近年、マルチロボット構成による溶接システムが実用化されてきた。しかしながら、このような溶接システムでは、作業経路の選び方によっては、相互のロボットが干渉してしまうため、いずれかのロボットを一時的に待機させるような干渉回避の制御システムが組み込まれている。この待機による一時停止はロスタイムとなることから、著者らは、造船パネル部材を対象とした10台のロボットによる溶接作業経路最適化の手法を、すでに提案した¹⁾。本研究では、その発展形態のひとつとして、動作範囲を大幅に拡大させるために自走式ガントリー方式を採用した溶接ロボットシステムにおける作業経路の最適化に取り組んだ。

2. 自走式ガントリー溶接ロボット構成と作業要領

2.1 自走式ガントリー溶接ロボット構成

Fig. 1 は、橋梁パネル部材の溶接作業用に想定した自走式ガントリー溶接ロボットをコンピュータ上にモデル化したものである。ロボットシステムとしてのメカ構成は、2

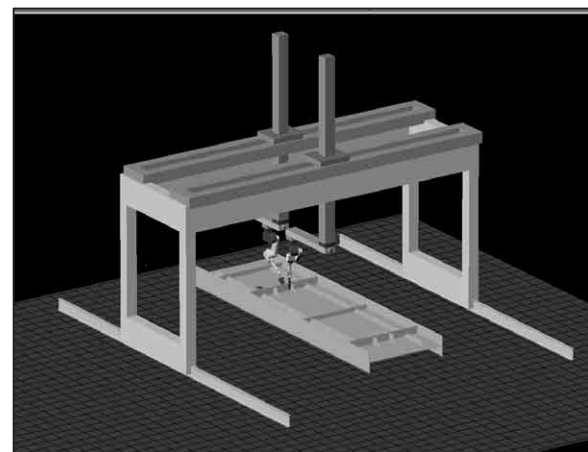


Fig. 1 Mobile gantry welding robot system

台の6軸多関節型ロボットが天吊り姿勢でXYZ方向に動作するスライド機構にマウントされており、各スライド軸は組み合わせられた形式で門型ガントリー上に配置されている。さらに、この門型ガントリーが長く伸びたレール上を移動するという機構である。今回の研究では、幅5m、長さ40mの溶接作業領域に、このような自走式ガントリーが2式配置されている場合を想定している。

2.2 対象パネル部材と溶接作業要領

対象となるパネル部材は、基本的に長方形をしており溶接領域内に複数のパネル部材が配置される。ロボットによる作業は、パネル部材上に取り付けられる複数の補強部材の溶接作業であり、ガントリーに吊り下げられた2台のロボットにより補強部材を挟み込むようにして実施される(以下、ツイン溶接)。しかし、補強部材の交差する箇所などで、個々のロボットがそれぞれ単独に作業をしなければならない場合がある(以下、シングル溶接)ことから、作業経路の決定が複雑なものとなっている。さらに、溶接作業は、ガントリー走行方向に分割された作業領域にガントリーが移動後、XYZ方向に動作するスライド機構とロボットとの協調動作により、作業領域内にある溶接作業を実施し、完了後、ガントリーが次の作業領域に移動するという形態で実施される。

3. 最適化問題

3.1 最適化問題の定義

本問題は、溶接完了時間が最小となるように、ガントリーに対してはガントリーの移動タイミングと移動先の位置、ロボットに対しては、どの溶接線をどのロボットに作業させるか、正逆どちらの方向から溶接を開始するか、そして各ロボットが割り当てられた溶接線をどの順番で処理するかを決定する問題となる。制約条件は、ツイン溶接は同じガントリーの2台のロボットで同時に処理すること、ガントリーはそのガントリーのどちらのロボットも待機位置(Fig. 2における動作(1)の出発位置あるいは動作(6)の終了位置)にある時でないと移動できないことである。

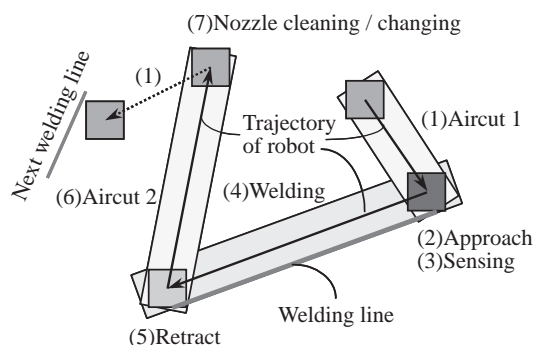


Fig.2 Robot actions in one welding operation

また、干渉はロボット相互およびガントリー相互の間で発生するが、干渉回避のために、先に動作を開始した方が優先され、もう一方は干渉状態が解消されるまで待たなければならないというルールを設けている。さらに、干渉回避のための待機処理が双方のロボットに発生してしまうデッドロックと呼ばれる状態も発生するが、その場合はオペレータの手動による復帰操作が必要になるので、デッドロックは回避されることが望まれる。

このような作業経路の最適化問題は、一方では溶接作業領域内でのワーク配置の最適化問題とも考えられるが、この問題は先の課題とし、本論文では作業領域内のワーク位置は与えられたものとする。

3.2 ロボット動作の詳細

Fig. 2は、ひとつの溶接作業におけるロボットの動作内容を平面的に示したものである。ひとつの溶接作業は、(1) Aircut 1, (2) Approach, (3) Sensing, (4) Welding, (5) Retract, (6) Aircut 2, (7) Nozzle cleaning/changing からなる7つの動作より構成されており、この動作が溶接線の数だけ繰り返される。

このような溶接の各動作において、図示したような動作領域が設定されるが、2台のロボットにおいて、この動作領域が重なった場合に干渉発生が予知され、いずれかのロボットが一時停止するようにしている。

また、Nozzle cleaning/changingの動作位置は2台のロボットで別々の位置に固定されており、Aircut 1, 2の移動時間が2台のロボットで異なる。一方、ツイン溶接時のApproach動作は、2台のロボットが揃った時点で開始されるように同期制御しているため、いずれかのロボットに待ち時間が発生する。このような同期は、ガントリー移動時にも発生し、2台のロボットが各々のAircut 1の開始位置にあるかAircut 2の終了位置にあるときでないと移動できない。

3.3 解法の全体構造

前述したように、本問題には、ガントリー相互とロボット相互間の干渉があり、それらが最適変数と複雑に関係するので、解くのが容易ではない。そこで、本論文においては、ガントリーに関する問題とロボットに関する問題とに切り分け、最初にガントリーに関する問題を解き、次にロボットに関する問題を解くというアプローチを採用した²⁾。溶接作業領域が長手方向に長く、2台のガントリーはその方向に移動するという性質を利用し、溶接作業領域を長手方向で2分割し、一方をガントリー1、もう一方をガントリー2に割り当てることによりガントリーの作業エリアを決定する。次に、各ガントリーの作業領域を後述の方法によってさらに細分割し、それらの分割領域を各ガントリーが左方向より順次移動することにする。そのようにす

ると、ガントリー間に干渉が発生することはなくなり、デッドロックも発生しない。

3.3 ガントリー作業領域の分割問題

(1) 作業領域決定問題

溶接作業領域を長手方向に2分割する時に、それぞれのガントリーの作業完了時間に差があると、全体としての完了時間はその遅い方になってしまうので、各ガントリーの作業領域内の溶接完了時間ができるだけ均等になるように領域を決定する。ここでは、両作業領域内の溶接作業時間の和ができるだけ等しくなるという条件で、作業領域を長手方向に2分割することにする。ただし、1本の溶接線は分割しないし、ツイン溶接はどちらかの領域に含めることとする。

(2) 作業領域の分割数最小問題

前述したように、溶接作業は、XYZ方向に動作するスライド機構とロボットとの協調動作により実施されるが、ガントリーと同一方向にあるX軸スライドの想定長さは3.3mと短いため、溶接可能な作業領域は最大でも3.3mのピッチに分割しなければならない。この作業領域の細分割が次なる問題である。つまり、ガントリーの移動時には、同期制御に起因する待ち時間が発生する可能性が高いことより、ガントリーの移動回数を最小にするためのガントリー作業領域分割問題を、分割数最小化問題ととらえた。

定式化にあたり以下の記号を導入する。なお、座標系は溶接作業領域の長手方向をx軸、それに直交する方向をy軸とし、溶接作業領域の左下隅を原点とする2次元座標系とした。

δ_G : ガントリー幅 (= 3.3 (m))

L: 溶接線の番号の集合

$W_S(i) = (W_{S1}(i), W_{S2}(i))$: 溶接線iの開始位置

$W_E(i) = (W_{E1}(i), W_{E2}(i))$: 溶接線iの終了位置

$p(i)$: 溶接線iの溶接作業時間, $i \in L$

N_G : ガントリー1の作業領域分割個数

N_{G2} : ガントリー2が担当する最初の分割領域番号

$x_G(n)$: n番目の分割領域におけるガントリー停止位置, $n = 1, \dots, N_G$

(ガントリーの左端のx座標とする)

$M(n)$: n番目の分割領域に属する溶接線番号の集合, $n = 1, \dots, N_G$

ガントリー作業領域決定問題と分割数最小化問題は次のように定式化される。

・目的関数

(a) ガントリー作業領域数最小

$N_G \rightarrow \text{最小}$

(b) $M(1) \sim M(N_{G2} - 1)$ の溶接線作業量と $M(N_{G2}) \sim$

$M(N_G)$ の溶接線作業量の差最小

$$\left| \sum_{n=1}^{N_{G2}-1} \sum_{i \in M(i)} p(i) - \sum_{n=N_{G2}}^{N_G} \sum_{i \in M(i)} p(i) \right| \rightarrow \text{最小}$$

・制約条件

(a) 各溶接線はどれかのガントリー作業領域に属する。

溶接線iがn番目のガントリー作業領域に属する。

$$x_G(n) \leq w_1(i) \leq w_2(i) \leq x_G(n) + \delta_G$$

$$w_1(i) := \min(W_{S1}(i), W_{E1}(i))$$

$$w_2(i) := \max(W_{S1}(i), W_{E1}(i))$$

(b) 溶接線は分割されてはならない。

各溶接線iに対し、溶接線iが溶接可能であるためのガントリー位置の区間は

$$I(i) := [g_1(i), g_2(i)]$$

$$g_1(i) = \min(w_1(i), w_2(i) - \delta_G)$$

$$g_2(i) = w_1(i)$$

である。溶接線iを節点iに対応させ、区間I(i)とI(j)が共通部分を持つ時、

$$\text{i.e. } I(i) \cap I(j) \neq \emptyset$$

の時、節点iと節点jを枝で結ぶ。これにより生成される無向グラフを $G = (V, E)$ と表す。Vは節点の集合、Eは枝の集合である。

溶接線 i_1, i_2, \dots, i_n がn番目の分割領域に属するならば、これらの節点のうちどの2節点も枝で結ばれている。したがって、分割領域はグラフGのクリーク(どの2節点も枝で結ばれているような完全部分グラフ³⁾)に対応する。ただし、ここでは唯一つの節点からなる部分グラフもクリークと定義する。そうすると、本問題は、その数ができるだけ少なくなるような、グラフGの互いに素なクリーク被覆を求める問題に帰着される。

この問題は以下の手順で解くことができる。

ステップ0:

区間I(i)が小さい順になるように節点番号をソートする。

ただし、区間I(i)が区間I(j)より小さい時は

(1) $g_1(i) < g_1(j)$ あるいは

(2) $g_1(i) = g_1(j)$ ならば $g_2(i) < g_2(j)$

溶接線位置データからグラフGを作成する。

ステップ1:

分割箇所 N_D を求める。節点1~ $N_D - 1$ からなる部分グラフを G_1 、節点 $N_D \sim N_L$ からなる部分グラフを G_2 とする。

$n := 1, m := 1$

m を集合 $M(1)$ に入れる。

ステップ2:

節点 $m + 1$ がグラフ G_1 になければステップ4へ行く。節点 $m + 1$ がグラフ G_1 にある場合、

(1) 節点 $m + 1$ が現在の集合 $M(n)$ のどの節点とも枝でつながっているならば、節点 $m + 1$ を集合 $M(n)$

に入れる。

(2) そのようでないならば, $n := n + 1$ とする。節点 $m + 1$ を集合 $M(n)$ に入れる。

ステップ 3:

$m := m + 1$ としてステップ 2 へ戻る。

ステップ 4:

$n := n + 1, N_{G_2} = n, m := m + 1$

m を集合 $M(n)$ に入れる。

ステップ 5:

節点 $m + 1$ がグラフ G_2 になければステップ 7 へ行く。

節点 $m + 1$ がグラフ G_2 にある場合,

(1) 節点 $m + 1$ が現在の集合 $M(n)$ のどの節点とも枝でつながっているならば節点 $m + 1$ を集合 $M(n)$ に入れる。

(2) そのようでないならば, $n := n + 1$ とする。節点 $m + 1$ を集合 $M(n)$ に入れる。

ステップ 6:

$m := m + 1$ としてステップ 5 へ戻る。

ステップ 7:

$N_G = n$

グラフ G_1 の分割例を Fig. 3 に示す。

この例では 8 本の溶接線 (各ツイン溶接線は 1 本とみなす) があり, 互いに素なクリーク被覆としては,

- {1,2} ∪ {3,4,5} ∪ {6,7,8}
- {1,2} ∪ {3,4,5,6} ∪ {7,8}
- {1,2,3} ∪ {4,5} ∪ {6,7,8}
- {1,2,3} ∪ {4,5,6} ∪ {7,8}

の 4 とおりあるが, 本アルゴリズムでは番号の若い方から順番に極大クリークを選んでいくので, 4 番目のクリーク被覆, すなわち Fig. 3 の結果が得られる。

また, ガントリー作業領域とその分割例を Fig. 4 に示す。

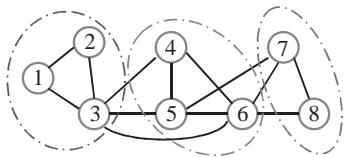


Fig. 3 Example of division of graph G_1

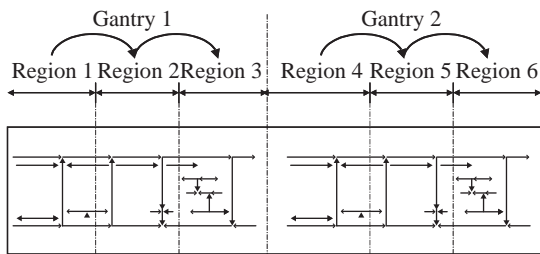


Fig. 4 Example of determined regions of each gantry

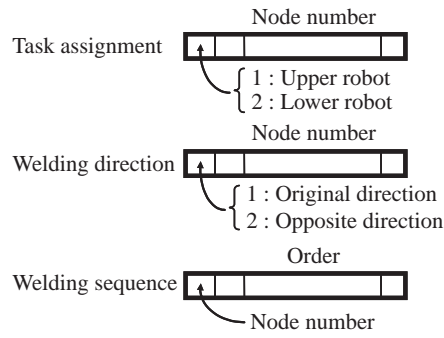


Fig. 5 Chromosome representation

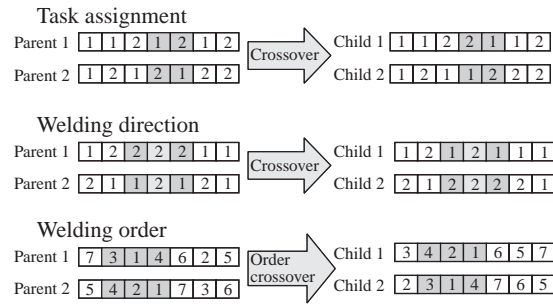


Fig. 6 Crossover operation

3.4 溶接完了時間最短化問題

溶接完了時間最短化には遺伝アルゴリズム (GA) を適用する。本問題では各溶接線を上下どちらのロボットが処理するか, 溶接線のどちらの端点から溶接を開始するか, 各分割領域の中での溶接順序が決定変数である。そこで, Fig. 5 に示す遺伝子表現で解を表す。溶接順序は分割領域ごと与える。

次に, 遺伝子操作を説明する。交叉は Fig. 6 のように行う。タスク割り当てに対しては, 二つの親から二点交叉により二つの子を生成する。ただし, ツイン溶接に対しては固定であり, 交叉対象よりはらず。溶接線方向に対しては, 二つの親から二点交叉により二つの子を生成する。ただし, ツイン溶接のうち方向固定のものに対しては交叉対象からはらず。溶接線順序に対しては, 二つの親から順序交叉により二つの子を生成する。

突然変異は, タスク割り当てと溶接線方向に対しては, 選ばれた個体の 1 ヶ所のビット反転, 溶接線順序に対しては 選ばれた個体の部分遺伝子列の移動である。

4. 事例と考察

Fig. 7 に示すようなワークを作業領域内に二つ配置 (Fig. 4) したときの例に対する結果を示す。主な入力データを次に示す。

作業領域 : 5 m × 16 m

対象ワーク : 2 m × 7 m

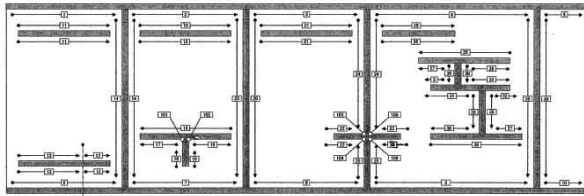


Fig. 7 Workpiece and welding lines used in case study

Table 1 Division of gantry working regions

Gantry number	Divided region number	Number of nodes	Gantry position
1	1	16	5.8
	2	22	8.8
	3	7	9.9
2	4	16	18.8
	5	22	21.8
	6	7	22.9

溶接線：106本／ワーク

ツイン溶接の組：16／ワーク

この問題に対するガントリー分割領域とその中の節点数、ガントリー位置は **Table 1** のとおりである。

GAによる溶接完了時間最小化の結果の一例を **Fig. 8** に示す。グラフは200世代まで計算したときの目的関数の値とデッドロック回数の値の世代ごとの推移を示したものである。デッドロック回数は4世代目でゼロになっており、これ以後の目的関数の値は溶接完了時間である。4世代目の目的関数値は8133で200世代目は6943であるので、その分だけでも15%の改善である。

6. おわりに

マルチロボットが吊り下げられているガントリー自体が移動するという新しい型式のマルチロボット溶接システムの最適化問題を論じた。問題の解法は二段階とし、まず、グラフ理論に基づいた手法を適用した作業領域グループ分割を行い、次に、個々の作業領域内でのロボットの経路最

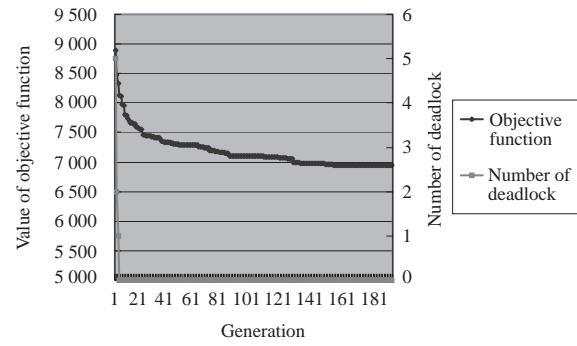


Fig. 8 Searching process of solution

適化を遺伝アルゴリズムにより求めるという方式であった。本方式は簡便なため、比較的容易に近似解を得ることができるのが特長である。今後の、さらなる取り組みとしては、ガントリーに関する問題とロボットに関する問題とを同時に解くことによる改善が期待される。また、異なる形式のパネル部材への適用拡大として、ガントリー領域からはみ出すような長尺溶接線の処理を含めた経路最適化の考察⁴⁾も行っている。

参考文献

- 1) Kanjo, Y.; Ase, H. Path optimization in multi-robot CAD/CAM welding system. Inter. Symp. on Scheduling 2002. p. 79-82.
- 2) Kanjo, Y.; Ase, H. Motion path optimization in mobile gantry-type welding system. Inter. Symp. on Scheduling 2004. p. 17-21.
- 3) Harary, F. Graph theory. Addison-Wesley. 1969.
- 4) 勘定義弘, 阿瀬始. ガントリー型溶接システムにおける最適化. スケジューリングシンポジウム'2004. p. 105-110.



勘定 義弘



阿瀬 始