

이 논문은 1998 년도 과학기술부·한국과학재단 지정 지역협력연구센터인 전북대학교 메카트로닉스연구센터의 연구비 지원에 의해 연구되었음.

유전 알고리즘을 이용한 로봇 아크 용접작업

김동원*, 김경윤**

Robot Arc Welding Task Sequencing using Genetic Algorithms

Dong-Won Kim*, Kyoung-Yun Kim**

ABSTRACT

This paper addresses a welding task sequencing for robot arc welding process planning. Although welding task sequencing is an essential step in the welding process planning, it has not been considered through a systematic approach, but it depends rather on empirical knowledge. Thus, an effective task sequencing for robot arc welding is required. Welding operations can be classified by the number of weldlines, layers, and welding robots. Genetic algorithms are applied to tackle those welding task sequencing problems. A genetic algorithm for traveling salesman problem (TSP) is utilized to determine welding task sequencing for a *MultiWeldline-SingleLayer* problem. Further, welding task sequencing for *MultiWeldline-MultiLayer* welding is investigated and appropriate genetic algorithms are introduced. A random key genetic algorithm is also proposed to solve multi-robot welding sequencing: *MultiWeldline with multi robots*. Finally, the genetic algorithms are implemented for the welding task sequencing of three dimensional weld plate assemblies. Robot welding operations conforming to the algorithms are simulated in graphic detail using a robot simulation software IGRIP.

Key Words : welding task sequencing(작업순서 결정), robot arc welding(로봇 아크 용접), genetic algorithms(유전 알고리즘), MultiWeldline-MultiLayer welding (다용접선-다층용접), MultiWeldline welding with multi robot(복수로봇 다용접선 용접)

1. 서론

산업용 로봇의 범용에 따라 로봇 프로그래밍을 자동화 하려는 노력이 계속되고 있다. 용접 로봇은 인간에게 유해한 환경하에 유용하게 사용되고 있으며, 용접 로봇의 효율적 활용을 위한 많은 연구가 이루어지고 있다. 용접 로봇 프로그래밍은 많은 시간과, 용접 로봇과 용접 작업에 대한 전문성이 필요한 작업이다. 용접 로봇의 효율적 활용을 위한 방법으로, 오프-라인 프로그래밍이 활발

히 연구되고 있다^(1,2). 그러나 다른 분야의 작업에 비해 아크 용접 작업을 위한 로봇 오프-라인 프로그래밍 시스템의 적용사례는 극히 미약하다. 그 원인으로는 로봇/포지셔너 동작 계획 (robot and positioner motion planning), 충돌회피 경로 계획 (collision avoidance), 용접작업 순서지정 (welding task sequencing), CAD 정보 공유 (CAD data interfacing), 용접선 추적 (weld seam tracking) 그리고 로봇과 로봇 작업장의 보정 (calibration) 등으로 이루어 지는, 매우 복잡한 공정 계획과 비정형화

* 전북대학교 기계공학부, 전북대학교 메카트로닉스연구센터
** 전북대학교 대학원 산업공학과

된 용접작업의 특성에서 찾을 수 있다.

용접작업 순서지정은 로봇 오프-라인 프로그래밍을 위한 필수적인 선결 조건이다. 그러나 제조 현장에서는, 몇 가지 휴리스틱 알고리즘⁽³⁾이 소개되었음에도 불구하고, 용접 전문가의 경험과 지식에 전적으로 의존하여 용접 작업순서를 결정하고 있다. 따라서 본 논문에서는 로봇 용접의 생산성과 품질을 동시에 고려한 용접작업 순서지정을 제시 하였다.

Table 1 에서 볼 수 있듯이, 대부분의 작업 순서지정에 대한 연구는 조립 로봇과 조립 생산 라인에 집중되어있으며, 용접작업 순서지정을 위해서는 매우 미약한 연구가 이루어 졌다. Rubinovitz⁽¹⁾는 조합최적화 문제(combinatorial problem)로 잘 알려진 외판원 문제(traveling salesman problem: TSP) 알고리즘을 이용하여 용접작업 순서지정 문제를 해결하였으나, NP-hard 인 외판원 문제의 특성상 매우 높은 시간 복잡성(computational complexity)을 갖는다. 또한 용접작업에 필수적인 다층용접, 열에 의한 용접물의 변형, 그리고 복수로봇이 사용되는 경우 등을 고려하지 않았다. Kim⁽³⁾은 용접작업 순서의 특성을 소개하였고, 용접판의 휨 현상을 고려한 몇 가지 휴리스틱 알고리즘을 제시하였다. 그러나 다층용접과 두 대 이상의 로봇이 사용되는 용접작업 등에 대한 연구는 수행되지 않았다. 본 연구에서 활용하는 유전 알고리즘을 용접작업 순서지정에 적용한 연구는 거의 보고된 바 없다. 이에 본 논문에서는 용접의 생산성과 품질을 향상시키기 위한 기준들을 제시하고, 적절한 계산 속도와 효율성을 갖도록 용접작업 순서지정 문제에 유전 알고리즘을 적용하였다.

Table 1 Existing researches for sequencing

Research Topics	Authors	Remarks
기계적 조립 작업 순서지정	Fazio and Whitley ⁽⁴⁾ Hoffman ⁽⁵⁾ Homem and Sanderson ⁽⁶⁾ Latombe et al. ⁽⁷⁾	경로 계획 알고리즘 개발
로봇 조립작업 순서지정	Milner ⁽⁸⁾ Park and Asada ⁽⁹⁾	시뮬레이티드 어닐링을 사용한 로봇 조립작업 순서지정
조립생산라인 순서지정	Okamura and Yamashina ⁽¹⁰⁾ Bard et al. ⁽¹¹⁾	혼합 모뎀 조립생산라인 순서지정
용접작업 순서지정	Rubinovitz and Wusk ⁽¹²⁾ Kim ⁽³⁾	용접작업 순서지정을 위해 TSP 활용 용접작업 순서지정을 위한 기준 제시

2. 로봇 아크 용접작업 순서지정

2.1 용접작업의 분류

용접작업은, Table 2 와 같이, 용접선과 용접층의 수에 따라 네 가지 종류로 분류할 수 있다. 단일 용접선(SingleWeldline)에 대해서는 특별한 작업 순서지정이 필요하지 않으나, 다층용접(SingleWeldline-MultiLayer)인 경우, 용접판 휨 현상을 방지하기 위해, 각 층마다 냉각시간을 고려하여 한 용접선을 용접하여야 한다. Fig. 1 은 6 개의 용접 층을 갖는 용접물을 보여준다. 다층용접은 일반적으로 후판 용접의 견고성을 증가 시키기 위해 널리 사용된다. 두 개 이상의 용접선을 갖는 용접물은 각각의 용접 층을 고려하여, 용접작업 순서가 결정되어야 하는 것이다.

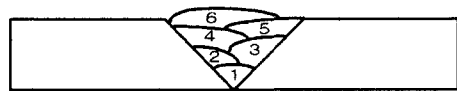


Fig. 1 A weldment composed of six layers

Table 2 Four types of robot welding operations⁽³⁾

	Single-Layer	Multi-Layer
Single-Weldline	SingleWeldline-SingleLayer	SingleWeldline-MultiLayer
Multi-Weldline	MultiWeldline-SingleLayer	MultiWeldline-MultiLayer

최근 용접을 효과적으로 수행하고, 생산성을 증가 시키기 위해 두 대 이상의 로봇이 현장에서 많이 사용된다. 따라서, 용접작업에 사용되는 로봇의 수에 따라 용접작업을 구분할 수 있다. 여기서는 두대 이상의 로봇이 사용되는 용접 작업을 *MultiWeldline with multi robots* 이라 부른다. 이러한 용접작업 순서지정은 단순히 용접 순서의 결정 뿐만 아니라, 용접물과 로봇 간의 충돌, 그리고 로봇과 로봇간의 충돌 문제도 함께 고려되어야 하는 복잡한 문제이다.

2.2 용접작업 순서지정의 특성

용접작업 순서지정에 있어 용접 생산성 뿐만

아니라 용접 품질은 중요한 고려 사항이다. 용접 생산성과 품질은 서로 상호 대립적 관계에 있으며, 이를 적절히 절충 시킨 용접작업 순서지정이 필요하다. 용접 시 발생하는 고열은 용접물의 물리적 특성을 변화 시켜 용접물의 변형을 가져온다. Fig. 2 는 대표적인 용접물의 휨 현상(distortion)들을 보여 준다. 현재까지 용접물의 휨 현상을 예측하고 방지하려는 많은 연구가 진행되어 왔으며, 적절한 용접작업 순서지정과 냉각시간 부여는 용접물의 휨 현상을 사전에 방지할 수 있는 중요한 방법이다⁽¹²⁾. Fig. 3 은 용접 시 발생하는 열영향부(Heat-affected zone)를 보여준다. 용접선의 양 끝점에서 용접시간이 가장 오래 걸리기 때문에 열영향부는 일반적으로 Fig. 3 과 같은 등고선 모양을 갖게 된다. 만일 어떤 용접선의 열영향부 안에 있는 용접선이 곧바로 용접 된다면, 용접에서 발생하는 열은 용접물에 더욱 심각한 영향을 끼치게 된다. 이에 본 논문에서는 열영향부의 영향을 최소화하기 위해서, 후보 용접선으로 직전에 용접한 용접선으로부터 일정거리 떨어진 용접선들 중 하나를 선택하고, 바로 이웃한 용접선은 즉시 선택하지 못하도록 하는 방법을 사용하였다.

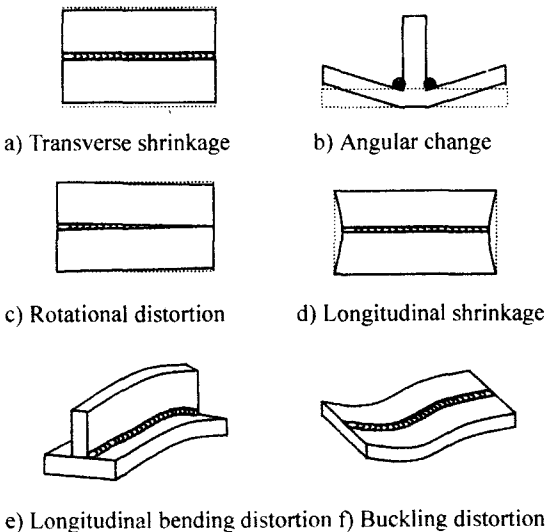


Fig. 2 Various types of weld distortion⁽¹²⁾

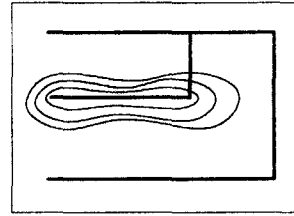


Fig. 3 Heat-affected zone around a weld seam

3. TSP 를 위한 유전 알고리즘

유전학, 생물의 진화 그리고 적자생존의 원칙 등의 자연 법칙에 기인한, 유전 알고리즘은 새로운 계산 모델의 하나로 활발히 연구되고 있다. Holland(1975)에 의해 처음 이 알고리즘의 적용 가능성이 소개된 이래, Goldberg(1989) 그리고 Liepins 와 Hilliard 등 많은 연구자들에 의해 연구, 발전되고 있다.

Fig. 4 는 초기 모집단(initial population), 적응도 평가(evaluation), 선별(selection), 그리고 유전연산자의 적용을 통한 모집단 생성(reproduction)으로 이어지는, 일반적인 유전 알고리즘의 단계를 보여준다.

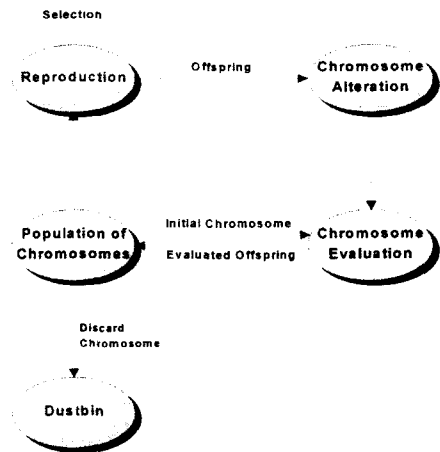


Fig.4 Typical processes of genetic algorithms

용접작업 순서지정을 위해 활용할 수 있는, TSP 는 유전 알고리즘의 한 적용분야로 널리 연구된다. TSP 에 일반적인 유전 알고리즘의 유전자 표

현법과 유전 연산자를 직접 적용하는 데는 무리가 있다⁽¹³⁾. TSP의 유전자 표현에는, 지난 수년간 대표적으로 인접(adjacency) 표현법, 순차적(ordinal) 표현법 그리고 경로(path) 표현법 등이 제시되었다. 인접과 순차적 표현법은 스키마타(schemata) 분석과 기존 유전 연산자의 사용이 가능하다는 장점이 있으나, 별도의 해석 단계가 필요하다는 단점이 있다. 경로 표현법은 이 중 가장 자연스러운 방법으로, 경로를 직접 유전자로 사용하는 방법이다. 그러나, 이 표현법은 기존 유전 연산자의 직접 적용을 통한 비가능해의 생성을 방지할 수 없어, 특별한 유전 연산자가 필요하다. 이에 많은 유전 연산자가 제시되었으며, 대표적 연산자는 순서교차(order crossover: OX), 부분사상교차 (partially mapped crossover: PMX), 순환교차 (cycle crossover: CX), 그리고 인접인자재결합교차 (edge recombination crossover: ER)가 있다⁽¹⁴⁻¹⁷⁾. 인접인자재결합교차는 네 개의 연산자중 가장 많은 계산 시간을 필요로 하나, 각 노드들의 인접정보를 포함할 수 있어 연산 횟수에 상대적으로 가장 높은 수렴도를 갖는다⁽¹⁸⁾. Table 3은 네 가지 유전 연산자들의 특성과 장점을 보여준다. 경로표현에서 교차연산자를 이원 연산자(binary operator) 그리고 돌연변이 연산자를 일원 연산자(unary operator)라 부르기도 한다. 돌연변이 연산자는 유전 알고리즘의 탐색 능력을 강화 시키고, 국소해(local optima)에 빠지는 것을 방지하기 위하여 사용된다. 경로표현에서 사용되는 돌연변이 연산자는 교환(reciprocal exchange), 삽입(insertion), 역순(inversion), 전위(displacement) 등이 있다⁽¹³⁾

Table 3 Comparison of genetic operators in the path representation methods

유전 연산자	특 성	장 점
순서교차 ⁽¹⁴⁾	순서를 고려한 인자 값들의 복사	부모들의 상대적 순서를 보존함
부분사상교차 ⁽¹⁵⁾	사상부분에 해당하는 인자들의 사상 및 상호교환	인자들의 교환이 해의 개선에 영향을 미치는 경우에 효과적임
순환교차 ⁽¹⁶⁾	두 부모의 위치정보를 보존하는 유전 연산자	인자들의 위치정보가 의미를 갖는 경우에 효과적임
인접인자 재결합교차 ⁽¹⁷⁾	인접표를 이용한 유전 연산자	인접한 인자의 정보가 중요시되는 경우에 효과적임

4. 용접작업 순서지정을 위한 유전 알고리즘

용접작업 순서지정을 위한 유전 알고리즘의 적응도 평가를 위한 기준들과, 용접선, 용접 층 그리고 용접 로봇의 수를 기준으로 분류한 각 용접작업에 적합한 유전 알고리즘을 제시한다.

4.1 용접작업 순서지정을 위한 적응도 함수

서론에서 언급한 바와 같이, 용접작업 순서지정은 용접의 생산성 및 품질을 고려하여야 하는 문제이다. 본 연구에서는 용접작업의 생산성 및 품질 향상을 위한 네 가지 기준과 이를 이용한 적응도 함수를 제시한다. Fig. 5는 6개의 용접선을 갖는 간단한 용접물의 예를 보여주며, 이를 이용하여 각 기준들을 설명하기로 한다.

먼저, TCP(Tool Center Point) 이동거리 기준은 용접 로봇의 TCP의 유클리디안 이동거리(Euclidean distance)를 최소화하기 위한 기준이다. 유클리디안 이동거리란 한 용접선의 중심점에서 다른 용접선의 중심점까지의 거리를 말하는 바, 이 기준을 적응도 함수로 사용할 때에는 총 이동거리를 최소화 하여야 하는 TSP와 매우 유사하게 된다. 예를 들어, 용접작업 순서 *sequence1*: $W_1-W_3-W_2-W_4-W_5-W_6$ 은 이 적응도 함수를 만족시키는 한 좋은 해라고 할 수 있다.

그러나 *sequence1*은 용접 품질 측면에서는 그리 좋은 해라 할 수 없다. 다시 말해, 한 용접선을 용접한 후 바로 근접한 용접선을 용접하는 것은 용접물의 휨 현상을 악화시키는 결과를 가져온다. 따라서 적당히 떨어져 있는, 즉 열영향부 밖의 용접선 중 하나를 (i+1)번째 용접선으로 택하는 영역 기준(distance criterion)이 필요하다. 열영향부는 용접물의 물리적 특성과 용접 조건에 따라 달라진다. 만일 적절한 열영향부를 결정하지 못할 시에는 i번째 용접선을 용접한 후, 가장 멀리 떨어져 있는 용접선을 (i+1)번째 용접선으로 선택하는 것도 하나의 적응도 함수가 될 수 있다. 또한 열영향부 밖의 용접선 중 가장 가까운 용접선을 (i+1)번째 용접선으로 선택한다면, 이는 아래의 식 f_1 과 같이 TCP 이동거리 기준과 영역기준을 동시에 만족시키는 적응도 함수가 될 수 있다. 식 f_1 은 TCP 이동거리 기준과 영역기준을 조합한 식이다. 이는 열영향부 안에 있는 용접선에 페널티를 부여함으로써 다음 용접선으로 선택되지 못하게 하는 것이

다.

용접물의 휨 현상을 방지 하기 위한 또 다른 기준으로, 인접성 기준(adjacency criterion)이 있다. 이는 위상학적으로 바로 이웃한 용접선을 (i+1)번째 용접선으로 선택할 수 없게 하기 위함이다. 식 f_2 에서는 인접성 기준을 어기는, 다시 말하여, 서로 인접한 용접선을 연속으로 용접하지 못하도록 페널티(p_2)를 부여한다.

용접 로봇의 경제적 활용을 위해 용접로봇 활용 원칙(robot utilization principle)⁽¹⁹⁾을 로봇 동작 기준(robot motion criterion)으로 활용한다. 즉 로봇 동작은 용접작업 중 용접 로봇 관절들의 총 변화량을 최소화하도록 하는 것이다. 식 f_3 는 용접 로봇이 각 용접선으로 이동하는 데 소요되는 관절의 총변화량을 최소화하기 위한 로봇 동작 기준을 나타낸 식이다.

위에서 기술한 바와 같이, 본 논문에서 제시한 네 가지 기준을 조합하여 용접작업 순서지정을 위한 적응도 함수를 각각 만들어 낼 수 있다. 따라서, 이 세가지 식을 모두 합한 F 가 유전 알고리즘 적용을 위한 적응도 함수라고 할 수 있겠다. 그러나, 이는 다목적 유전 알고리즘을 별도로 구현하여야 하고, 서로 다른 단위의 조합식(heterogeneous equation)으로 구성되어 이를 적절히 절충하는데 어려움이 있다. 이에 본 논문에서는 각 적응도 함수들을 단계적으로 적용하도록 하였다. TCP 이동거리 기준과 영역 기준을 조합한 f_1 을 우선 적용하고, 로봇 관절 기준을 위한 f_3 , 인접성 기준의 f_2 를 차례로 적용함으로써, 다음 세대의 해(모집단)를 구하도록 한다. 한편, 최종해에서 제거하지 못한 인접 용접선들에 대해서는, 후처리 단계를 통해서 적절한 냉각시간을 부여하여 하도록 한다. 예를 들어, *sequence2:W₃-W₂-W₆-W₄-W₁-W₅*에서 (W_3, W_2)와 (W_4, W_1)는 각각 서로 인접한다. 따라서 용접선 W_3 를 용접한 후, 냉각시간동안 대기한 다음, W_2 를 용접하게 하는 것이다. 각각의 적응도 함수, f_1, f_2, f_3 를 정리해 보면 다음과 같다.

$$\min F = \min (f_1 + f_2 + f_3)$$

$$f_1 = \sum_{i,j=1}^m \alpha_{ij} x_{ij} \quad \begin{cases} \alpha_{ij} = p_1, & x_{ij} \in h_i \\ \alpha_{ij} = 1, & x_{ij} \notin h_i \end{cases}$$

$$f_2 = \begin{cases} f & \alpha_{ij} = 1, f_2 = p_2 \\ 0/w & \alpha_{ij} = 0, f_2 = 0 \end{cases}$$

$$f_3 = \sum_{i,j=1}^m \sum_{k=1}^n \theta_{ijk}$$

$$x_{ij} = x_{ji}, i \neq j$$

$$x_{ij} > 0, \alpha_{ij} > 0, h_i \geq 0, p_1 \geq 0, p_2 \geq 0$$

m : 용접선의 수

n : 로봇관절의 수

i, j : 용접선 번호

k : 로봇관절의 번호

x_{ij} : 용접선 i 와 용접선 j 의 유클리디안거리

h_i : 용접선 i 의 열영향부

θ_{ijk} : 용접선 i 에서 용접선 j 까지 이동하기 위한 관절 k 의 변화량

p_1 : 용접선이 열영향부(h_i)안에 있을 때 부여하는 페널티

p_2 : 서로 인접한 용접선을 연속해서 용접할 때 부여하는 페널티

$A = [a_{ij}]$: 용접선들의 인접 행렬

4.2 다용접선-단층용접(MultiWeldline-SingleLayer)과 다용접선-다층용접(MultiWeldline-MultiLayer)

MultiWeldline-SingleLayer를 위한 용접작업 순서지정 문제는, n 개의 용접선이 주어졌을 때, 용접로봇이 위의 네 가지 기준을 만족하면서 각 용접선을 한번씩만 용접하는 작업 순서를 찾는 것이다. 따라서 이 문제는 기존의 TSP와 매우 유사하며 TSP를 위한 유전 알고리즘을 직접적으로 활용할 수 있다. 본 논문에서는 경로 표현법과 토너먼트 선별 그리고 유전 연산자로서 PMX, CX, OX, ER을 사용하였다.

MultiWeldline-SingleLayer 문제를 위한 유전 알고리즘은 다음에 소개된 바와 같다. 먼저, 용접물의 기하학적, 위상학적 정보는 파일 스트림을 통하여 얻어진다. 임의로 생성된 초기값(seed number)을 이용하여 용접순서들의 초기 모집단을 생성한다. 미리 결정된 적응도 함수를 이용하여 초기 모집단의 적응도를 평가한다. 분석된 모집단의 용접순서 중에서 토너먼트 방법을 이용하여 우성인 용접순서를 선별한다. 토너먼트 선별 방법⁽¹⁴⁾이란 일 정개의 유전자를 임의로 선택하여 그 중 우성인 유전자만을 선별하는 방법이다. 본 연구에서는 두 개의 용접순서를 선택하여 비교하였다. 그 다음, 새로운 용접순서를 생성하기 위한 유전 연산이 수행되며, 선별된 용접순서들은 이를 위해 활용된다.

본 연구에서는 경로 표현법을 위한 유전 연산자인 PMX, CX, OX, ER 중 하나를 사용자가 선택하여 유전 연산자로 사용할 수 있도록 하였다. 돌연변이 연산을 위해서는, 임의로 선택된 두 용접선을 상호 교환(reciprocal exchange)하는 방법⁽¹³⁾을 사용하였다. 유전 연산을 수행한 후, 새로이 생성된 용접순서들과 기존 모집단에서 선별되었던 용접순서들에 대한 적응도 평가가 수행되며, 이를 기준으로 우성 용접순서들이 다시 선별된다.

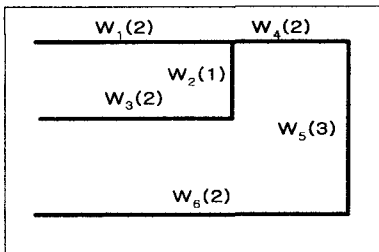


Fig. 5 An example of MultiWeldline-MultiLayer welding

유전 알고리즘은 결정적인 규칙 보다는 확률적인 방법으로 해를 탐색하는 추계적인 알고리즘이다. 그 동안 유전 알고리즘의 수렴을 예측하고 알고리즘을 종료 시키기 위한 연구가 계속 되어 왔다⁽²¹⁾. 널리 사용되는 종료 조건은 일정 기간동안 해가 개선되지 않을 때 알고리즘을 종료하는 방법과 일정 횟수 만큼 알고리즘을 수행하는 방법이 있다. 첫번째 방법은 해가 더 이상 개선되지 않을 때, 다시 말해, 아래의 식과 같이 목적함수의 개선치가 아주 작은 값(ϵ) 이하 일 때 연산을 종료하는 방법이다. 즉,

$$|f_n(x) - f_{n+1}(x)| < \epsilon$$

그러나 Vose 와 Liepins 는 이 방법에 대한 반론을 제시하였다⁽²²⁾. 이는 보다 좋은 해로 이동할 수 있는 확률을 감소시킬 수 있다는 것이다. 충분한 횟수동안 연산을 수행하는 것은 더 좋은 해로의 이동을 위한 확률을 증가시킬 수 있다. 그러나 경제적인 연산 횟수의 결정은 매우 어려운 문제이며 거의 대부분의 연구에서는 경험적 방법에 의하여 연산 횟수를 결정하였다⁽¹⁸⁾.

본 알고리즘들은 미리 정해진 모집단 생성 횟

수 동안 용접순서 선별과 모집단 생성, 그리고 적응도 평가를 반복하여 최종해를 찾는다. 이렇게 얻어진 최종 용접순서에 대하여, 본 알고리즘을 통해 제거하지 못한, 인접 용접선들 사이에 냉각 시간을 부여하기 위한 후처리(postprocessing)를 수행한다. 여기서는 인접기준과 용접물의 인접행렬을 이용하여 용접선들의 인접여부를 확인한다.

<MultiWeldline-SingleLayer 문제를 위한 유전 알고리즘>

```

inputFile(GEOMETRIC_DATA_OF_WELDMENT);
inputFile(TOPOLOGICAL_DATA_OF_WELDMENT);

t=0;
initialize(seed_number);
evaluation(FITNESS_FUNCTION);
while(!terminationCondition()) {
    t=t+1;
    selection(SELECTION_STRATEGY);
    crossover(prob_of_crossover);
    mutation(prob_of_mutation);
    evaluation(FITNESS_FUNCTION);
}
postprocess(final_sequence); // evaluate a final
// welding sequence by adjacency criterion
    
```

MultiWeldline-MultiLayer 문제는 두 가지 경우로 나누어 생각할 수 있으며, Fig. 5 의 용접물을 가지고 각각의 경우를 설명한다. 괄호 안의 숫자는 용접층의 수를 나타낸다.

첫번째 경우는 단계 별(Stage by stage) 용접을 말한다. 이는 n 개의 용접층을 갖는 용접선들을 모두 용접한 후, n+1 개 이상의 용접층을 갖는 용접선들을 용접하고, 모든 용접선을 다 용접할 때까지 이를 반복하는 경우를 말한다. 이를 위해 아래에 소개된 코드와 같이 최대 용접층의 수만큼 MultiWeldline-SingleLayer 를 위한 유전 알고리즘을 반복하면 된다. 이때 이전 단계에서 마지막으로 선택된 용접순서는 다음 단계의 첫번째 용접선으로 선택되어서는 안된다. 이는 어떤 용접선을 용접한 후, 그 용접선을 연이어 용접할 때 용접물의 황현상이 악화될 수 있기 때문이다. 본 논문에서는 일정한 페널티를 해당 용접순서에 부여함으로써 우성 용접순서로 선별되지 못하게 하였다.

<MultiWeldline-MultiLayer 문제를 위한 유전 알고리즘>

```

for(i=0; i<= max_weldlayer; i++) {
t=0;
initialize(seed_number, i);
// initialize and select weldlines with weldlayer greater than l
evaluation(FITNESS_FUNCTION);
// evaluate by four criterion and endow with penalty
// weldlines with the final weldline being as the first
// weldline in the previous stage
while(!terminationCondition()) {
t=t+1;
selection(SELECTION_STRATEGY);
crossover(prob_of_crossover);
mutation(prob_of_mutation);
evaluation(FITNESS_FUNCTION);
}
}
postprocess(final_sequence);
// evaluate a final welding sequence by adjacency criterion
    
```

Fig. 5의 예에서 용접 토치는 적어도 한 번은 모든 용접선들을 방문해야 한다. 따라서 첫번째 단계(Stage I)는 {W₁, W₂, W₃, W₄, W₅, W₆}가 된다. 이 Stage I은 6개의 용접선을 갖는 MultiWeldline-SingleLayer 문제이다. 이에 MultiWeldline-SingleLayer를 위한 유전 알고리즘을 직접 적용할 수 있다. 두 번째 단계(Stage II)는 두 개 이상의 용접층을 갖는 용접선들의 집합임으로 {W₁, W₃, W₄, W₅, W₆}가 선택되며, Stage II 역시 별도의 MultiWeldline-SingleLayer 문제로 생각할 수 있다. 마찬가지로 Stage III는 {W₅}가 된다.

두 번째 경우는 여러 개의 용접층을 가진 용접선을 하나의 용접선으로 생각하는 경우이다. 이는 용접 토치가 한 용접선을 방문한 후, 용접층 수 만큼 해당 용접선을 연속적으로 용접하는 경우이다. 연속된 용접 사이에는 적절한 냉각시간이 부여되어야 한다. 따라서 이 경우는 용접물이 6개의 용접선을 갖는 MultiWeldline-SingleLayer 문제로 단순화 시킬 수 있다.

4.3 복수로봇 다용접선 용접(MultiWeldline with multi Robots)의 경우

두 대 이상의 용접 로봇이 사용되는 MultiWeldline with multi Robots 문제도 두 가지 경우로 분류하여 유전 알고리즘을 적용한다. 첫번째,

용접선들이 각각의 로봇에 배분되는 경우를 말한다. 예를 들어, 14개의 용접선을 갖는 용접물을 두 대의 로봇이 용접하는 경우를 생각해 보자. 로봇 1에 1에서 6번 용접선을 할당하고 로봇 2에 7에서 14번 용접선을 할당한다면, 우리는 용접선들을 group I과 group II로 나누어 염색체를 구성할 수 있다. 이는 하나의 염색체가 두 개의 용접작업 순서를 나타냄을 의미하며, 각각의 용접선군을 위해 한 대의 로봇을 위한 유전 알고리즘을 독립적으로 적용할 수 있다. 그러나 두 대 이상의 로봇이 사용되는 경우, 로봇간의 충돌이 반드시 고려되어야 한다. 이는 용접작업 순서지정에서 충돌이 가능한 영역에 있는 용접선들에 대한 제약이 있어야 함을 의미한다. 첫번째 경우에는, 작업 순서지정 이전에 로봇간의 충돌가능 영역을 찾아내고 이를 고려하여 각 로봇에 용접선을 할당한다. 이를 통하여 각 용접 로봇을 위한 순서지정이 독립적으로 이루어 질 수 있다.

두 번째는 두 대 이상의 용접로봇이 상호 조화로운 방법(coordinated motion)으로 용접물을 용접하는 경우를 말한다. 다시 말해, 한 용접선을 어떤 로봇이 용접하고, 다음 용접선을 어떤 로봇이 용접하는 경우를 말한다. 역시 이 경우에도 용접 로봇간의 충돌을 신중하게 고려하여야 한다. 로봇간의 충돌을 피하기 위한 한 방법으로, 충돌이 가능한 영역 안에 존재하는 용접선들에 대하여 페널티를 부과하는 제약식을 추가함으로써 로봇들이 이 용접선들에 접근하지 못하게 할 수 있다. 이와 같은 방법은 향후 연구에서 검토, 반영될 것이다. 지금까지 제시한 유전 알고리즘을 적용하여 용접 로봇 지정과 용접 순서의 지정을 동시에 수행하는 데는 한계가 있다. 따라서, 본 논문에서는 임의요소 유전 알고리즘(Random Key Genetic Algorithms)⁽²⁰⁾을 활용하였다. 임의요소 표현법은 난수를 유전자 표현에 활용한 것으로, Shaefer가 1988년에 처음 이 표현법을 제시한 후, 복잡한 조립 및 유연 생산 시스템 등을 표현하는데 사용되어 왔다. 이 표현법은 각각의 대립유전자(allele)를 정수부와, 난수로 표현되는 소수부로 표현한다. 이 표현법은 기존의 유전 연산자인 일점 교차나 이점 교차를 직접 적용할 수 있다는 장점이 있다. 두 번째 경우에 적용된 임의 요소 유전 알고리즘을 예를 들어 설명하면 다음과 같다.

예를 들어, 세대의 로봇이 5개의 용접선을 용

접하는 경우의 작업순서가 다음과 같이 표현되었다고 생각해 보자. 각각의 염색체 좌(locus)는 용접선의 번호를 나타내며, 대립유전자의 정수부는 로봇의 번호를 나타낸다.

$String = \{2.46, 3.91, 1.33, 2.75, 2.51\}$

대립유전자의 소수부는 난수 발생을 통해 생성된 것으로 용접 작업순서를 나타낸다. 따라서, *String* 은 다음과 같은 작업 순서 정보를 가지고 있다. 용접선 3 은 가장 작은 난수를 가짐으로 가장 먼저 용접 되며, 정수부가 1 임으로 로봇 1 이 작업을 수행하게 된다. 그 다음으로 작은 소수부를 갖는 용접선 1 을 로봇 2 가 용접한다. 따라서 이 *String* 이 표현하는 작업순서는 다음과 같다.

3(on robot 1)-1(on robot 2)- 5(on robot 2)
- 4(on robot 2)- 2(on robot 3)

5. 적용 사례와 그래픽 시뮬레이션

로봇 아크 용접작업 순서지정을 위한 시스템이 SiliconGraphics Inc.의 Indigo 2 워크스테이션 환경에서 개발되었다. MIT 의 GAlib 를 활용하여 본 논문에서 제시한 유전 알고리즘들을 구현하였다. Deneb 의 오프-라인 프로그래밍 소프트웨어인 IGRIP 을 삼차원 용접판 구조물 설계를 위해 이용하였고, 기구학적 정보 획득과 그래픽 시뮬레이션을 수행하는데 활용하였다. 그래픽 사용자 인터페이스는 C++/Motif 환경에서 구현하였다.

Fig. 6 은 굴착기의 센터 프레임(center frame)을 보여주며, 본 유전 알고리즘들은 이 용접판 구조물에 적용되었다. Table 4 와 5 는 센터 프레임의 기하학적 정보와 인접 행렬을 보여준다

유전 알고리즘은 기본적으로 휴리스틱이며 최적해를 보장하지 못한다. 본 논문에서는 알고리즘 자체를 수회 반복 실행하여 그 중 가장 좋은 해를 선택함으로써 유전 알고리즘이 갖는 한계를 극복하려 하였다.

Fig. 7 은 본 용접작업 순서지정을 위한 사용자 인터페이스와 MultiWeldline-SingleLayer 를 위한 알고리즘의 예를 보여준다. 이 알고리즘은 TCP 이동거리 기준과 영역기준을 이용한 적용도 함수를 사용하였고, 모집단 생성 횟수는 500, 모집단의 크

기는 100, 교차와 돌연변이율은 각각 0.7, 0.3. 그리고 유전 연산자는 ER 을 사용하였다. 또한 알고리즘을 10 회 반복 실행하여 가장 좋은 해를 채택하였다. 사용자는 우측상단의 윈도우를 통하여 용접작업의 종류와 유전 알고리즘의 수행을 위해 필요한 변수들을 입력한다. 좌측에 있는 두개의 윈도우는 본 논문에서 제시한 유전 알고리즘이 수행되는 과정과 결과를 보여준다. 우측에 있는 그래프 모양의 윈도우들은 해의 수렴 정도를 사용자에게 대략적으로 보여준다. 우측 하단의 윈도우는, 알고리즘을 통해 얻어진 용접순서에 따른, 용접작업의 그래픽 시뮬레이션을 보여주며, IGRIP 을 이용하여 이를 구현하였다.

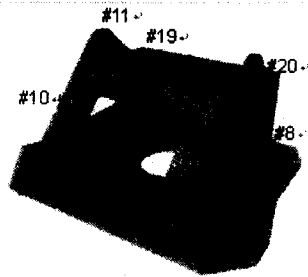


Fig. 6 Weldseams on the center frame of an excavator

Table 4 Geometric data of the center frame model

Weld seam number	Number of layers	Weld seam vertices(mm)					
		1	2	3	4	5	6
1	1	0	0	20	0	750	20
2	2	20	0	20	20	164	20
3	1	20	185	20	20	730	20
4	1	580	0	20	580	165	20
5	2	580	185	20	580	730	20
6	3	600	0	20	600	750	20
7	1	580	730	20	20	730	20
8	1	600	750	20	0	750	20
9	1	20	164	20	20	165	120
10	2	20	173	132	20	374	355
11	2	20	386	364	20	586	382
12	3	580	164	20	80	165	120
13	2	580	173	132	580	374	355
14	1	580	386	364	580	586	382
15	1	20	165	20	580	164	20
16	2	20	185	120	120	185	120
17	1	480	188	119	580	185	120
18	1	20	388	342	580	388	342
19	1	20	730	20	20	730	320
20	2	580	730	20	580	730	320

Table 5 Weldseam adjacency matrix for the center frame model

Weldline No	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
8	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
12	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	0	0
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0
15	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
18	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0
19	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

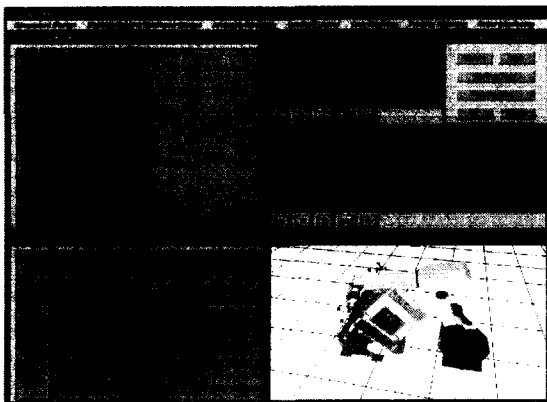
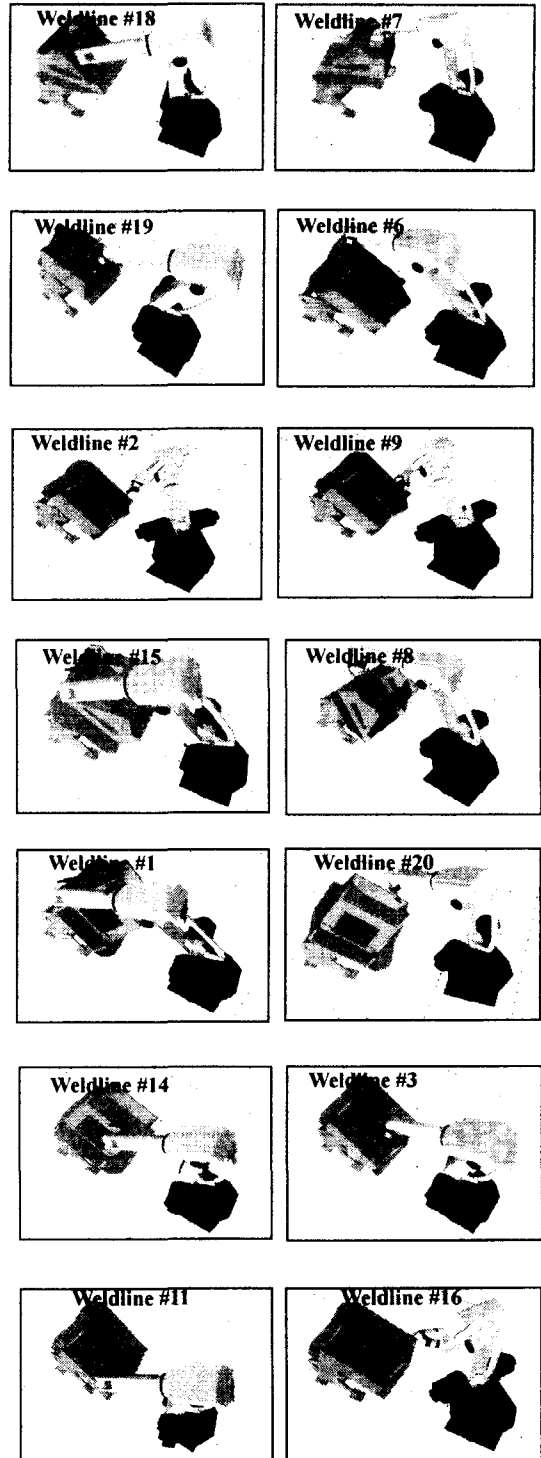
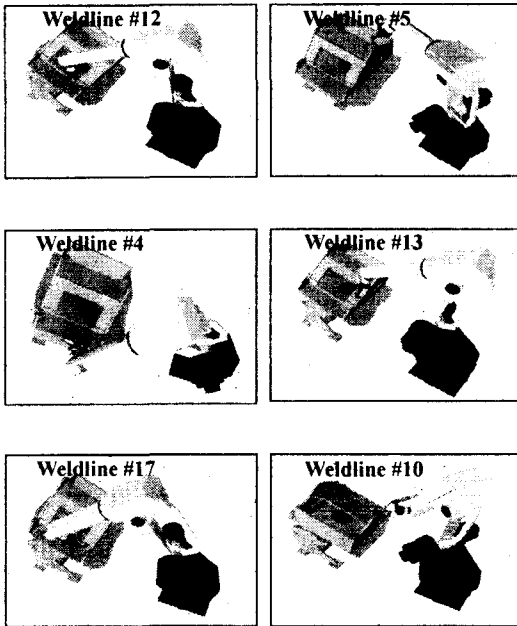


Fig. 7 Robot arc welding task sequencing for MultiWeldline-SingleLayer

Fig. 8 은 이 유전 알고리즘을 통해 얻은 최종 해 중 하나인 $W_Sequence$ 를 그래픽 워크스테이션 상에서 시뮬레이션한 결과이다. $W_Sequence$ 에서 용접선 7 과 19, 용접선 2 와 9, 용접선 9 와 15 그리고 용접선 13 과 17 은 서로 인접한다. 이에 본 알고리즘에서는 해당 용접선들 사이에 냉각시간을 부여한다.

$$W_Sequence = (18-7-19-6-2-9-15-8-1-20-14-3-11-16-12-5-4-13-17-10)$$





용접순서: 18-7-19-6-2-9-15-8-1-20-14-3-11-16-12-5-4-13-17-10

Fig. 8 A graphic simulation

Fig. 9는 MultiWeldline with multi robots 문제 중, 용접선들을 두 대의 용접 로봇에 할당하는 경우에 대한, 유전 알고리즘의 계산결과와 그래픽 시뮬레이션을 보여준다. 이 유전 알고리즘은, Fig. 7의 유전 알고리즘과 마찬가지로, TCP 이동거리 기준과 영역기준을 이용한 적응도 함수를 사용하였고, 모집단 생성 횟수는 500, 모집단의 크기는 100, 교차와 돌연변이율은 각각 0.7, 0.3, 그리고 유전 연산자는 ER을 사용하였다. 용접선 {1, 2, 3, 9, 10, 11, 15, 16, 18, 19}은 로봇 1에 할당되었으며, 용접선 {4, 5, 6, 7, 8, 12, 13, 14, 17, 20}은 로봇 2에 할당되었다. 이 알고리즘은 통해 생성된 로봇들의 작업 순서는 다음과 같이 결정되었다. 그러나 이러한 작업순서 지정은 로봇간의 충돌을 고려하지 않았으며, 충돌을 고려한 작업순서 지정은 향후에 연구될 것이다.

- 로봇 1: (2-16-18-10-19-9-3-15-1-11)
- 로봇 2: (17-12-8-5-20-14-8-4-7-13)

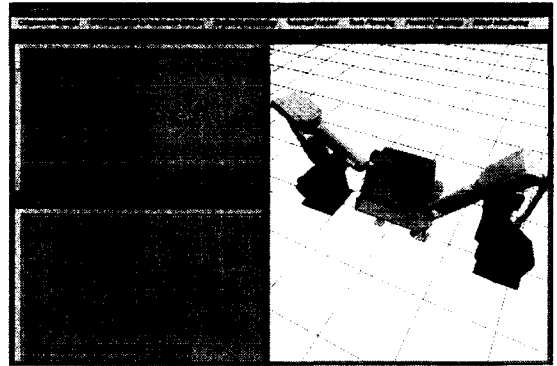


Fig. 9 Robot arc welding task sequencing with two robots

결론

본 논문에서는 로봇 아크 용접의 생산성과 품질을 목표로 하여, 유전 알고리즘 기반의 로봇 아크 용접작업 순서지정 방법을 제시하고, 이를 위한 용접 순서지정 시스템을 개발하였다. NP-complete로 알려진 용접작업 순서지정 문제를 효과적으로 해결하기 위해 메타 휴리스틱의 한 종류인 유전알고리즘을 활용하였다. 본 연구에서 개발된 유전 알고리즘들은 용접물의 기하학적, 위상학적 데이터베이스와 로봇의 기구학적 데이터베이스로부터 정보를 얻어 적절한 용접작업 순서를 찾는다. 본 논문에서는 생산성과 용접 품질을 향상시키기 위한 네 가지 기준을 제시하였다. TCP 이동거리 기준, 영역기준, 로봇 동작 기준이 각각 유전 알고리즘의 적합도 함수로 사용되었다. 유전 알고리즘이 최적해를 보장하지 못한다는 점을 고려하여, 인접기준을 후처리 단계에 적용하였다. 이는 인접한 용접선을 어쩔 수 없이 연속하여 용접하여야 하는 경우, 해당 용접선들 사이에 냉각시간을 부여하여 열에 의한 휨 현상을 최소화하기 위함이다. 본 논문에서는 용접작업을 용접선의 수, 용접층의 수, 그리고 사용되는 로봇의 수에 따라 분류하였다. 한번의 용접층만이 필요한 용접작업은 각 용접선을 한 번씩 만 방문하면 된다. 이는 TSP와 매우 유사하며, TSP를 위한 유전 알고리즘으로 이 문제를 표현하였다. 두 번 이상의 용접이 필요한 용접작업을 각 작업 특성에 따라 두 가지 경우로

분류하였고, 각각의 경우에 적합한 유전 알고리즘을 제시하고 구현하였다. 두 대 이상의 로봇이 사용되는 용접의 경우는 용접 로봇간의 충돌을 고려하여야 하는 매우 복잡한 문제이다. 이 문제에 사용되는 용접작업 원칙에 따라 두 가지 경우로 분류하였고 적합한 유전 알고리즘을 제시하였다. 특히, 두 대이상의 로봇이 조화로운 방법으로 용접하는 경우를 표현하기 위해 임의 요소 유전 알고리즘을 이용하였다. 용접작업 순서지정을 위한 유전 알고리즘과 시뮬레이션 어닐링, 타부 탐색법, 신경 회로망 등의 다른 방법과의 성능 비교는 추후 연구를 통해 계속 연구될 것이다.

본 논문에서는 포지셔너를 고정된 위치에 두고 복수의 로봇을 이용하여 용접작업을 수행하는 경우만을 다루었다. 포지셔너의 활용은 용접은 용접 생산성과 하향용접을 위해 필요하다. 포지셔너의 위치와 복수개의 로봇을 동시에 고려한 용접작업 순서지정은 포지셔너와 로봇의 기구학적 특성 등이 고려되어야 하는 복잡한 문제이다. 포지셔너를 활용한 용접작업 순서지정은 향후에 계속 연구될 것이다. 또한 용접 공정계획에서 용접작업 순서지정과 충돌회피 경로 계획은 상호 밀접하게 연관되어 있다. 로봇과 용접물, 로봇과 로봇간의 충돌은 용접작업 순서를 지정하는데 반드시 고려되어야 하며, 동시에 용접작업 순서는 충돌회피 경로 계획을 수행하는데 생성하는 데 중요한 요소인 것이다. 따라서 이러한 상호 연관된 문제를 동시에 고려한 연구가 필요하고 할 수 있다. 유전 알고리즘을 이러한 문제에 적용하기 위해서는, 목적함수와 해를 동시에 변화 시키며 상호 보완적으로 목적함수와 해를 개선시켜가는 동시 진화적 알고리즘(co-evolutionary algorithm)의 적용 등에 대한 검토가 있어야 할 것이다.

참고문헌

1. Rubinovitz, J. and Wysk, R. A., "Task level off-line programming system for robotic arc welding - an overview," J. of Manufacturing Systems, Vol. 7, No. 4, pp. 293-305, 1988.
2. Wong, T. N., and Hsu, S. C., "An off-line robot programming system with graphics simulation", Int. J. of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 6, 1991.
3. Kim, D. W., A feature based modeling system for the design of welded plate construction, unpublished Ph. D. dissertation. Hokkaido University, 1994.
4. Fazio, D., T. L. and Whitney, D. E., "Simplified generation of all mechanical assembly sequences," IEEE J. on Robotics and Automation, Vol. 3, No. 6, pp. 640-658, 1987.
5. Hoffman, R. L., "A common sense approach to assembly sequencing planning," Computer-Aided Mechanical Assembly Planning, Kluwer Academic Publishers, Boston, pp. 289-314, 1991.
6. Homem de Mello, L.S. and Sanderson, A. C., "A correct and complete algorithm for the generation of mechanical assembly sequences," IEEE Trans. on Robotics and Automation, Vol. 7, No. 2, 1991.
7. Latombe, J. C., Wilson, R. H. and Cazals, F., "Assembly sequencing with toleranced parts," CAD, Vol. 29, No. 2, pp. 159-179, 1997.
8. Milner, J. M., The assembly sequence selection problem - an application of Simulated Annealing. Master Thesis, MIT, 1991.
9. Park, J. H. and Asada, H., "Sequence optimization for high speed robotic assembly using Simulated Annealing," Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 3441-3446, 1994.
10. Okamura, K. and Yamashina, H., "A heuristic algorithm for the assembly line model-mix sequencing problem to minimize the risk of stopping the conveyer," Int. J. of Production Research, Vol. 17, No. 3, pp. 233-247, 1979.
11. Bard, J. F., Shtub, A. and Joshi, S. B., "Sequencing mixed-model assembly lines to level parts usage and minimize line length," Int. J. of Production Research, Vol. 32, No. 10, pp. 2431-2454, 1994.
12. Mashbuchi, K., Analysis of Welded Structures: Residual Stresses, Distortion, and their Consequence. Pergamon Press. pp. 112-327, 1980.
13. Michalewicz, Z., Genetic Algorithms + Data Structure = Evolution Programs, Springer-Verlag, New York, pp. 165-191, 1992.
14. Davis, L., (Ed.), Handbook of Genetic Algorithms. Van Nostrand Reinhold, New York, 1991.
15. Goldberg, D. E. and Lingle, R., "Alleles, Loci, and the TSP," Proc. of the 1st Int. Conf. on Genetic

- Algorithms, L.E.A., Hillsdale, HJ, pp. 154-159, 1985.
16. Oliver, I. M., Smith, D.J., and Holland, R.C., "A study of permutation crossover operators on the traveling salesman problem," Proc of the 2nd International Conference on Genetic Algorithms, L.E.A., Hillsdale, HJ, pp. 224-230, 1987.
 17. Whitley, D., Starkweather, T. and Fuquay, D.A.. "Scheduling problems and Traveling Salesman: The genetic edge recombination operator," Proc. of the 3rd International Conference on Genetic Algorithms, Morgan Kaufmann Publishers, Los Altos, CA, pp. 133-140, 1989.
 18. Starkwether, T., McDaniel, Mathias, K., Whitley, C. and Whitley, D., "A comparison of genetic sequencing operators," Proc of the 4rd International Conference on Genetic Algorithms, M.K.P., Los Altos, CA, pp. 69-76, 1991.
 19. Edan, Y., and Nof, S. Y., "Motion economy analysis for robotic kitting tasks." Int. J. of Production Research, Vol. 33, No. 5, pp. 1213-1227, 1995.
 20. Norman, B. A., The random keys Genetic Algorithm for complex scheduling problems, unpublished Ph. D. Dissertation, University of Michigan, Ann Arbor, 1995.
 21. Aytug, H., and Koehler, G. J., "Stopping Criteria for Finite Length Genetic Algorithms." INFORMS J. on Computing, Vol. 8, No. 2, pp. 183-191, 1996.
 22. Vose, M. D., and Liepins, G. E., "Punctuated Equilibria in Genetic Algorithms," Complex Systems, Vol. 5, No. 1, pp. 31-44, 1991.