

## CAD 데이터를 이용한 용접용 로봇의 최적 교시

(Optimal Teaching for a Spot Welding Robot  
Using CAD Data)

李壽榮\*, 鄭明振\*, 卞增男\*

(Soo Yeong Yi, Myung Jin Chung, and Zeung Nam Bien)

## 요 약

한 대의 자동차에는 많은 용접자들이 분포하므로 각 로봇에 할당되는 용접점의 수가 커지는데, 전체 공정에서 용접 작업이 차지하는 시간을 줄이기 위해서 용접 순서를 적절하게 계획할 필요성이 있다. 본 논문에서는 점 용접용 로봇의 효과적인 교시를 위한 오프라인 프로그래밍 방법을 제안한다. 이는 용접 로봇과 작업 대상물과의 충돌을 고려하여, 충돌 회피를 보장하며 최단 거리를 갖는 용접 순서를 계획하는데에 고전적인 TSP 알고리즘을 변형하여 적용한 것으로서 자동차 용접 작업에 응용한다. 또한 작업을 계획하는데에 필요한 모델 데이터로 기존의 일반적인 CAD 시스템과 그의 데이터를 이용할 수 있도록 하므로써, 데이터 베이스의 구축을 한층 용이하고 또 정교하게 할 수 있도록 한다. 자동차 생산 공정의 한 예에 본 교시 방식을 적용하므로써, 이의 효율성을 보인다.

## Abstract

Since a number of welding points are distributed in an automobile part, the number of welding points allotted to each robot are large. So, there is an increasing need of an optimal sequence planning to minimize the total welding time. In this paper, an off-line programming scheme for effective teaching of a spot welding robot is presented. A collision free, optimal welding sequence planning is done through applying the modified Traveling Salesman Problem algorithm. Also, a data extraction method from an existing general CAD system is presented for reuse of the existing exact model data produced by a model designer and easy constructing the world model data base. The result shows that the proposed system could enhance the efficiency of a spot welding robot in automobile industry.

## I. 서 론

점 용접 작업은 사람에게 유해하고 또 반복적이기 때문에, 로봇트를 투입하므로써 큰 시간적, 경제적

이득을 얻을 수 있는 좋은 예가 된다.<sup>1)</sup> 현재의 자동차 생산 공정에 있어서는 작업에 투입되는 로봇트의 교시를 대부분 실제의 로봇트를 대상으로하는 온라인 방식에 의하여 하고 있는데, 이러한 방식에서는 사용자가 작업 대상물의 입체적 구조에 대해서 완전히 이해, 기억하고 있어야 하는 부담이 있고, 또 단지 사용자의 직관만에 의해 용접점의 순서를 정하기 때문에 작업 대상물에 용접점의 수가 많을 때, 빠

\*正會員, 韓國科學技術院 電氣 및 電子工學科  
(Dept. of Electrical Eng., KAIST)

接受日字: 1990年 4月 10

른 시간내에 전체 용접 작업을 마칠 수 있도록 하는 용접 순서의 시간 최적성을 기하기가 어려우며, 교시된 작업을 사전 검증하기 위해서 전체 공정 라인을 정지시켜야 하므로 교시 단계에서의 시간적, 경제적 손실도 커지게 된다.

몇가지 교시 방식 중의 하나인 오프라인 프로그래밍 기법은, 그것이 실제의 로봇을 대상으로 하지 않고, 작업장과 작업물의 공간적 구조에 대한 미리 구축된 자료와 작업에 대한 정확한 정의를 바탕으로 필요한 작업 명령을 자동적으로 생성해내는 방식이기 때문에 위에서 말한 온라인 교시 방식의 문제점을 해결해 줄 수 있을 것으로 기대된다.<sup>[2]</sup> 따라서 본 논문은 용접점과 용접 대상물의 공간적 구조에 대한 자료를 체계적으로 이용하므로써, 최적의 용접 순서를 생성해낼 수 있고, 또한 그래픽 애니메이션에 의해 교시 작업을 사전 검증해 볼 수 있게 하므로써 전체 공정 라인을 정지시킬 필요없이 그대로 로봇을 투입할 수 있게 하여, 로봇을 작업에 응용하는데 있어서의 생산성 향상의 효과를 극대화하는 교시 시스템의 구성을 목적으로 하고 있다. 특히 여기서는 오프라인 프로그래밍에 필요한 모델 데이터를 기존의 일반적인 CAD 시스템의 데이터로 부터 직접 추출해내는 방식을 제안하므로써 모델 데이터 베이스의 구축을 훨씬 쉽고 정교하게 할 수 있도록 한다.

II. 월드 모델의 구축

오프라인 프로그래밍 교시에 필요한 작업장과 작업 대상물의 모델을 구축하는 수단으로서, 기존하는 CAD 시스템과 그의 데이터 file를 이용할 수 있도록 하는 방법을 구성한다. 이런 방법에 의하면 기존의 CAD 모델 데이터를 재사용할 수 있으므로 프로그래머의 부담이 줄게되고, 오프라인 프로그래밍의 가장 큰 문제점인 모델링 오차를 줄일 수 있게 된다. 그러나 기존의 일반적인 CAD 시스템은 모델링을 위한 시스템이기 보다는, 단지 drawing을 위한 시스템이므로 그 CAD 시스템으로 만들어진 drawing file을 작업 교시에 필요한 모델 데이터로 직접 사용할 수는 없다.

일반적으로 널리 사용되는 AutoCAD 시스템<sup>[4]</sup>은 자료 file의 readability, string에 의한 화층의 구별, 자유로운 3D 시선 방향의 설정등의 특징을 갖는데, 여기서는 이것의 data file을 다시 읽어서, 작업 계획에 필요한 월드 모델 데이터로 변환하는 방법을 구성한다.

1. 물체의 단위성

물체 모델링의 가장 기본이 되는 다각형은 CAD 시스템에서 몇 개의 선분 데이터로 구성되는데, CAD 시스템은 단지 drawing을 위한 시스템이므로 그 데이터 file은 사용자가 그림을 그리는 순서대로만 데이터를 저장하고 있어서, 어디서부터 어디까지의 선분 데이터가 한 면을 이루는지에 대한 정보를 갖지 않는다. 이러한 단위 개념의 부족은 이 보다 한 단계 높은 차원, 즉 몇 개의 다각형으로 단위 다면체를 이룰 때도 마찬가지이다. 그러므로 drawing file에서 선분 데이터를 읽을때, 그림 1과 같은 간단한 알고리즘을 통하여 무순서의 선분들로도 단위 다각형의 한계를 인식하는 방법을 구성한다. 즉 선분 데이터가 하나 읽혀질 때마다, 그것과 아직 완성되지 않은 임시 다각형들 간의 관계를 다음의 4가지 경우 중의 하나로 보고 임시 다각형을 성장시켜 가는 것이다.

다각형들로 다면체를 이루는 경우는 CAD 시스템의 drawing utility인 BLOCK 명령어로 사용자가 단위 다면체의 한계를 규정하도록 한다.

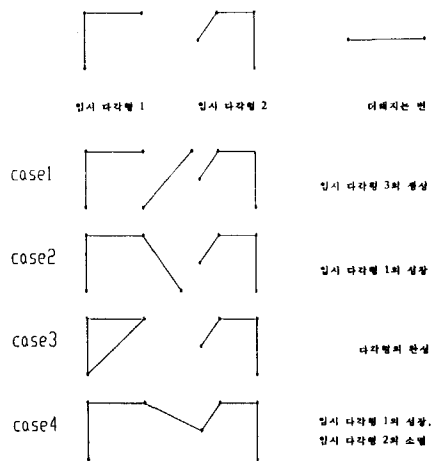


그림 1. 다각형의 단위성  
Fig. 1. Unity of polygons.

2. 단위 물체의 자기 좌표계 설정

물체의 자기 좌표계도 drawing을 하는 입장에서는 불필요한 정보이므로 CAD 시스템에는 그것을 설정하는 방법이 마련되어 있지 않다. 그러나 물체들 간의 상대 위치를 표현해야하는 planning 단계에서는 반

드시 필요한 정보이므로 그것을 설정하는 방법이 있어야 한다. 그러므로 여기서는 사용자가 물체를 모델링할 때, 빨간색의 3 DLINE으로 자기 좌표계의 X축을, 노란색의 3 DLINE으로 Y축이 놓일 방향을 표시하면, 데이터 file을 읽을 때 자료 구조에 다음과 같이 각 단위 물체의 좌표축을 설정한다.

$$Z = \text{red 3DLINE} \times \text{yellow 3 DLINE},$$

$$Y = Z \times \text{red 3 DLINE},$$

$$X = Y \times Z, (\times \text{는 벡터적})$$

좌표축이 설정되면 drawing에 의해 기준 좌표계에 대해서 표현되어 있던, 단위 물체를 구성하는 면들의 모든 좌표값을 그 물체의 자기 좌표계에 대해서 표현되도록 변환한다.

### 3. 물체간의 계층 관계 설정

단위화(BLOCK)된 물체들 간의 계층 관계는, 그 물체의 이름으로 설정한다. 즉 사용자가 각 물체를 모델링하고, 그것을 단위화할 때, 그 물체의 이름에 그것의 상위 물체의 이름을 부가함으로써 계층 구조 관계의 정보를 준다. 그리고 한 완성된 물체는 한 화층(layer)에다만 모델링하므로써, 그것을 LAYER의 이름으로 대표한다. 이렇게 사용자에게 주어 진 정보를 가지고, 데이터 file을 읽을 때 각 단위 물체들의 좌표축을 바로 상위의 단위 물체의 좌표축에 대해서 표현되도록 하므로써 그림 2와 같은 월드 모델의 자료 구조를 완성한다.

모델링 데이터를 구축할 때, 이렇게 사용자의 직접적인 개입을 필요로 하는 것은, 자기 좌표축이나 계층 관계 같은 정보들이 모델링이나 planning의 목적에 따라 변할 수 있는 성질의 것이기 때문이다.

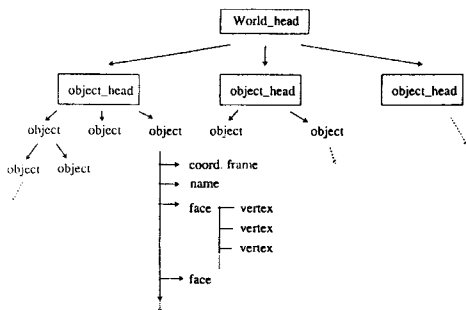


그림 2. 자료 구조  
Fig. 2. Data structure.

### Ⅲ. 작업 계획

한 용접점에서의 용접 시간과 용접점 사이를 로봇이 이동하는 시간은 비슷한 범위의 값이므로, 로봇에 할당되는 용접점의 수가 많을수록 그 용접점들의 용접 순서는 전체 공정 시간에 큰 영향을 주게 된다. 그러므로 여기서는 전체 용접 순서를 적절히 계획하여 공정 시간을 최소화하는데 목적을 두고 작업을 계획하고자 한다. 이에 의한 작업 계획의 정의는 다음과 같다.

- 1) 각 용접점에서 용접기가 가져야할 방향(orientation)을 구한다.
- 2) 가능한한 전체 용접 시간을 줄여, 생산성을 높일 수 있도록 용접 순서를 계획한다.
- 3) 용접기가 작업 대상물과 충돌을 일으키지 않아야 한다.

1)에서 용접기가 가져야할 방향이라는 것은 현실적으로 용접기가 작업 대상물과의 간섭이 없이 놓일 수 있는 방향을 의미하게 된다. 그러므로 작업의 정의는 크게 충돌(간섭)의 감지, 회피 부분과 순서 계획 부분으로 이루어진다. 그런데 이를 좀 더 자세히 살펴보면, 로봇의 이동 경로에서 충돌이 감지되면 그것을 피하기 위하여 경로를 수정해야 하고, 이것은 곧 로봇 이동 시간의 연장을 가져와서 전체 공정 시간이 늘어나게 되므로, 공정 시간을 줄이기 위한 순서 계획과 충돌의 감지, 회피 계획은 서로 무관하지 않음을 알 수 있다. 그러므로 여기서는 두 부분이 결합된 형태의 최적의 충돌 회피 순서를 계획하려 한다.

먼저 문제를 단순화하기 위하여 다음의 몇가지를 가정한다.

- 1) 로봇의 이동 경로는 기준 직교 좌표계 상에서의 직선 경로로 한다. (straight line path planning)
- 2) 용접 로봇과 작업 대상물과의 충돌(간섭)은 로봇의 용접기 부위에서만 일어난다.

#### 1. 간섭의 감지 (interference detection)

기본적으로 용접 작업에서 일어날 수 있는 충돌 문제는

- 1) 용접기가 용접점 사이를 이동할 때,
- 2) 각 용접점에서 용접기가 용접 방향을 정할 때의 두가지 종류가 있는데, 이들은 다음과 같이 한 선분과 면 사이의 위치 관계를 조사하므로써 감지될 수 있다.

한 선분이 면에 대해서 놓일 수 있는 경우는 다음의 세가지 경우가 된다.<sup>5)</sup>(그림 3)

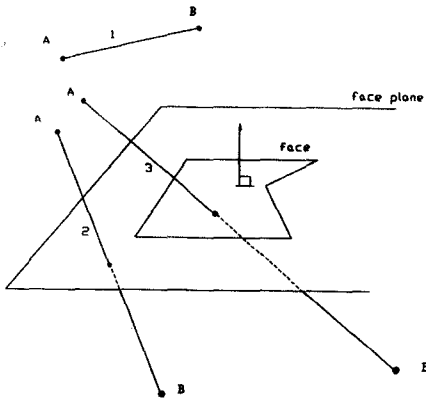


그림 3. 면과 변의 교차 여부 감지  
 Fig. 3. Interference detection between an edge and a face.

- 1) 선분을 이루는 두 끝점이 모두 면의 같은 쪽에 놓이는 경우,
- 2) 선분을 이루는 두 끝점이 면의 서로 다른 쪽에 놓이는데, 면을 포함하는 무한 평면(face plane)과 선분의 교점이 면의 외부에 놓이는 경우,
- 3) 선분을 이루는 두 끝점이 면의 서로 다른 쪽에 놓이는데, 교점이 면의 내부에 놓이는 경우이다.

1)과 2), 3)의 구별은 면 상의 한점에서 선분의 양 끝점으로 향하는 두 벡터의 스칼라적을 구하므로써 할 수 있고, 2)와 3)은 선분과 무한 평면과의 교점에서 무한평면상의 무한대 점에 직선을 그어서, 그것이 면의 각 변과 만나는 수를 세므로써 구별할 수 있는데 2)의 경우는 홀수번, 3)의 경우는 짝수번이 된다. 실제로 교차가 일어나는 경우는 3)인데, 2)의 경우도 교점에서 면의 각 변들에 이르는 최단 거리를 계산하므로써 필요한 만큼의 여유도를 가지고 교차가 있는 것으로 간주할 수 있다.

일반적으로 용접용 로봇이나 용접기는 작업 대상물에 비해서 상당히 크기 때문에, 용접점 사이를 이동할 때 용접기 부위에서만 충돌이 일어난다고 보면, 첫번째 형태의 충돌 문제는 용접기의 중심점이 이루는 제적을 한 선분으로 하여, 그것과 작업 대상물을 이루는 각 면들과의 교차 여부를 조사하므로써 감지할 수 있다. (그림 4)

두번째의 경우는, 각 용접점에 대해서 먼저 그 점을 포함하는 작업 대상물의 면을 찾은 후에, 몇가지 방향으로 용접기를 놓아 보고, 그 방향에서 그림 5와 같은 용접기 모델의 각 축을 이루는 선분이 작업 대상물의 면들과 교차하는 지를 조사하므로써 가능

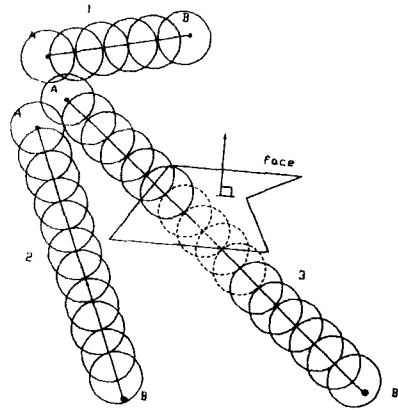


그림 4. 경로상의 충돌 여부 감지  
 Fig. 4. Collision detection on the straight line path

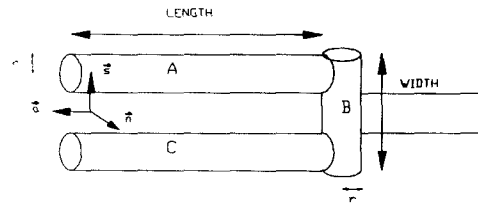


그림 5. 용접기의 모델  
 Fig. 5. Model of welding gun.

한 용접 방향을 찾을 수 있다.

이때 각 용접점을 포함하는 면을 찾는 것은 다음과 같은 방법에 의해 할 수 있다. 즉 용접점에서 작업 대상물을 이루는 모든 면에 수선을 내리고, 수선과 면과의 교점으로 부터 그 면을 포함하는 무한 평면에 반 무한 직선을 그어서, 그 직선이 면의 각 변과 교차하는 수가 홀수인 면이 용접점을 포함하는 것이 된다.

## 2. 경로의 구성 및 개선법

점 용접 작업에서 용접 순서를 계획하여 효율을 극대화하려는 것은, 오랫동안 여러 사람들의 연구 주제가 되어온 TSP(Traveling Salesman Problem)<sup>6)</sup>의 잘 일치한다. TSP는 고전적인 combinatorial optimization 문제의 대표적인 예로서, 직관적으로 보면 이것의 해는 있을 수 있는 모든 순서들을 철저히 탐색(exhaustive search)하여 그 중에서 거리가 최단인 되는 순서를 택하므로써 구할 수 있다. 그러나 이 방법은 비록 최적해를 주는 방법이지만 문제의 크기가 커짐에 따라 계산량이 폭발적으로 증가(computational explosion)하기 때문에 점 용접

작업 처럼 순서를 계획해야할 점의 수가 많은 경우에 적용하기에는 현실성이 없다. 따라서 문제의 크기가 클 경우에 그 해의 최적성과 계산 시간의 현실성 사이의 적절한 타협이 필요하다고 하겠다. 이런 맥락에서 많은 사람들에 의해 비록 최적(Global optimum)은 아니더라도 받아 들일 만한 국부 최적치(Local optimum)와 현실적인 계산 시간을 갖는 해를 구할 수 있는 알고리즘을 개발하려는 노력이 행해졌다. 그러한 노력은 크게 다음의 두 가지로 나누어질 수 있는데 그것은 해의 최적성에 중점을 둔 1)구조적인 방법(Constructive approach)과, 계산 시간의 현실성에 중점을 둔 2)발견적인 방법(Heuristic approach)이다.<sup>(6)</sup>

그러나 점 용접 작업에서는 그 용접점의 수가 상당히 많으므로 구조적인 방법으로는 계산 시간의 현실성을 얻기가 어렵고, 또 그 점들의 분포가 대체로 선(line) 상을 따른다는 규칙성을 띠고 있기 때문에 발견적인 방법이 더 적합하다고 하겠다. 그러므로 여기서는 먼저 기준점에서 가장 가까운 점을 연결해가는 방법(Nearest neighbor)으로 초기 경로를 구성하고<sup>(7)</sup>, Lin등이 제안한 Lbranch exchange 알고리즘<sup>(8)</sup>을 이용하여 그 초기 경로를 계속 개선해 나가는 발견적인 방법을 취한다. 그리고 계산 시간을 더 줄일 수 있게 하는 Grouping 방법을 제안하는데, 발견적인 방법은 초기 시작점이나 초기 경로에 의해서 얻어지는 해가 달라질 수 있기 때문에, 계산 시간을 줄일 수 있으면 더 많은 초기 조건에 대해서 해를 구해볼 수 있으므로 더 좋은 해를 구할 수 있게 된다.

Nearest neighbor에 의한 경로 구성법(tour construction procedure)은 임의의 한점을 경로의 시작점으로 해서 그로부터 가장 가까운 점을 찾아 연결

하고, 다시 그 점으로부터 나머지 점들 중에서 가장 가까운 점을 찾아 연결하는 과정을 반복하는 것이다. 그리고 마지막 점과 시작점을 연결하므로써 경로를 완성한다.

경로 개선법(tour improvement procedure)은 주어진 한 완성 경로를 가지고 그것을 어떤 기준에 따라 변형시켜서 더 좋은 경로를 찾고, 다시 그것을 초기 경로로하여 같은 과정을 반복해 보는 것이다. Lin 등은 전체적으로 닫힌 경로이어야 한다는 것과 개선이 있어야 한다는 조건을 만족시키도록 하면서, 처음의 주어진 완성 경로에 포함된 k개의 단위 경로와 포함되지 않은 k개의 단위 경로를 바꾸는 과정을 반복하는 Branch exchange 알고리즘을 제안한바 있다.

(k opt)

다음 그림 7,8,9는 이런 방법을 100개의 임의의 점들에 대해서 적용했을 때 얻어지는 결과를 보여주는데, 계산시간의 문제 때문에 현실적으로 최적해(global optimum)를 구할 수 없으므로 비교할 수는 없지만, 경로에 포함된 단위 경로들이 서로 교차하지 않는 것으로 부터 받아 들일만한 해가 얻어졌다고 볼 수 있다.

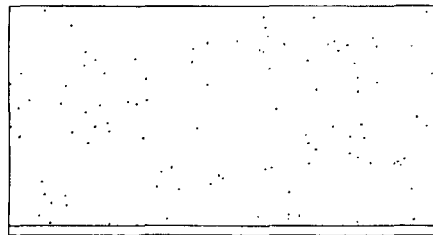


그림 7. 100개의 임의의 점  
Fig. 7. 100 random points.

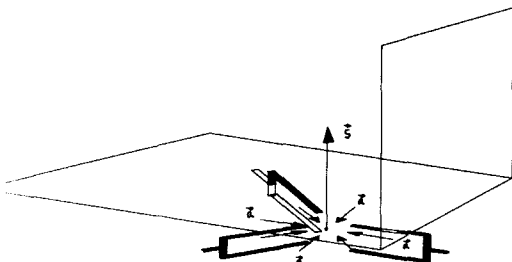


그림 6. 용접기와 작업 대상물간의 간섭  
Fig. 6. Interference detection between welding gun and workpiece.

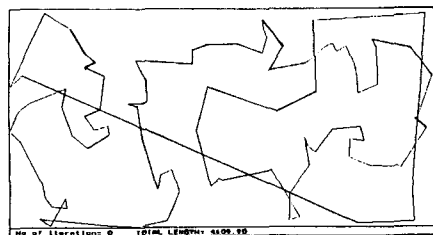


그림 8. Nearest neighbor 방법에 의한 순서 계획  
Fig. 8. Sequence planning through the nearest neighbor.

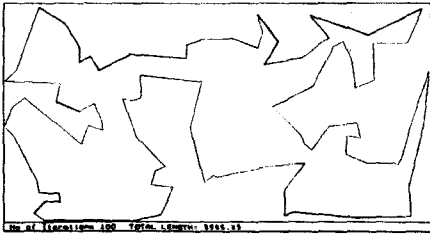


그림 9. Branch exchange 방법에 의한 순서 계획  
Fig. 9. Sequence planning through the branch exchange.

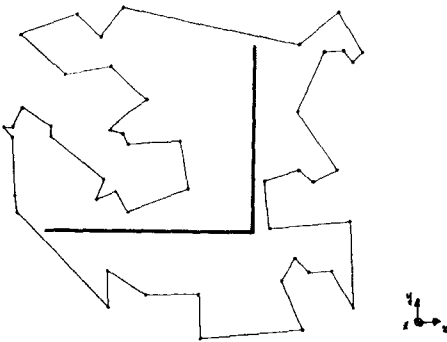


그림 10. 충돌 회피 순서 계획  
Fig. 10. Collision free sequence planning.

2. Grouping

위와 같은 순서 계획은 어떤 경우나 기준점에서, 가까운 한 점을 찾기 위한 과정이 반드시 필요하게 된다. 이를 위해서는 그 기준점으로 부터 다른 모든 점까지의 거리를 모두, 그리고 항상 계산해야 하는데, 이 과정이 전체 계산량의 대부분을 차지하게 된다. 그런데 결과적으로는 가능한한 짧은 단위 경로가 전체 순서 경로에 포함되도록 하는 경향 때문에, 한 점에서 먼 다른 점(물론 멀다는 것도 두 점간의 거리를 계산하고, 다른 것들과 비교한 후에야 알 수 있지만)까지의 거리를 매번 계산한다는 것은 결국은 포함되지도 않을 단위 경로의 길이를 계산하는 것이 되므로 큰 계산 시간적 손실이라 할 수 있다. 그러므로 미리 모든 점에서 그 점으로 부터 가까운 몇몇 점들을 그룹화 해놓고 경로를 구성할, 혹은 개선할 가까운 점을 찾을 때는 기준점의 그룹내에서만 탐색한다면 계산 시간을 훨씬 단축할 수 있을 것임을 알 수 있다.

그룹의 범위 또는 점들의 분포 형태에 따라 계산

시간의 개선 효과는 크게 달라지는데, 각 기준점의 그룹이 다른 점들을 모두 포함하도록 범위를 크게 하는 경우가 원래의 알고리즘과 일치한다. 이의 구체적인 개선 효과는 뒤의 시뮬레이션 결과에서 보인다.

3. 충돌 회피 순서 계획(collision free sequence planning)

로봇을 구동하는 것은 직교 좌표계상이 아니라 로봇의 조인트 공간상이므로, 두 용접점사이의 거리(cost)는 조인트 공간상에서의 조인트 값의 차이거나, 만일 두 점사이의 경로상에 작업 대상물과의 충돌이 있다면 그것을 충돌이 없도록 수정한 경로의 길이가 되어야 한다. 그러나 앞 절에서 충돌의 감지 문제와 계획의 용이성을 위해 두 점간의 로봇 이동 경로는 직선으로 가정했고, 또 가능한 모든 두 점의 조합( $nC_2$ )에 해당하는 단위 경로들에 대해 충돌이 감지되는 직선 경로를 충돌이 없도록 수정하는 것이나, 또 그 수정된 경로의 길이를 계산하는 것은, 기존의 충돌 경로 수정 알고리즘과 계산 시간의 문제를 고려해볼 때 현실적으로 어렵게 된다. 그런데 경로 개선 알고리즘은 주어진 경로에 포함된 단위 경로들 중에서 거리가 긴 것을 경로에 포함되지 않는 짧은 단위 경로로 대체하려는 경향이 있기 때문에, 충돌이 감지되는 단위 경로에 임의로 큰 가중치를 부가한다면 그 단위 경로는 자연스럽게 제외되어, 있을 수 있는 모든 단위 경로들에 대하여 충돌 회피를 위한 경로 수정을 하지 않고도 결과적인 완성 경로는 충돌이 없는 것이 될 수 있다.

즉 이때, 두 점간의 거리는

$$\text{cost}(p_i, p_j) = |p_i - p_j| = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 + (z_i - z_j)^2}$$

충돌이 없는 단위 직선 경로에 대해서, 또는

$$= \text{Maximum distance of workcell} + |p_i - p_j|$$

충돌이 감지된 단위 직선 경로에 대해서

로 한다. 그림 10은 이런 수정 TSP 알고리즘을 간단한 충돌 문제에 적용한 결과이다. 가운데의 굵은 선은 지면 방향으로 솟은 장애물이고, 점들은 같은 높이를 갖는 평면상에 모두 놓여져 있는데, 순서 계획의 결과는 따로 경로를 수정하지 않고도 위의 수정 TSP 방식에 의하여 전체적으로 충돌이 없는 경로가 될 수 있음을 볼 수 있다.

4. 국부 충돌

위의 충돌 회피 순서 계획의 결과에 다음과 같은

문제점이 남는다. 즉, 아래 그림 11과 같은 용접점 분포의 경우에는 그 직선 경로에 대해서 채택된 충돌 감지 알고리즘에 의하면 충돌이 감지되지 않지만, 실제로는 충돌이 발생하게 된다.

이러한 문제를 해결하기 위해 다음과 같은 방법을 이용한다.

용접기의 중심축 a-a'의 A, B점에서의 위치가 이루는 면과 A, B점을 포함하는 작업 대상물의 각 변이 간섭을 일으키는지를 조사한다. 만일 간섭이 감지될 경우, 두점에서 설정된 용접기 방향으로 용접기의 길이 만큼 물러난 직선 경로를 용접기가 움직이도록 한다. (그림 12)

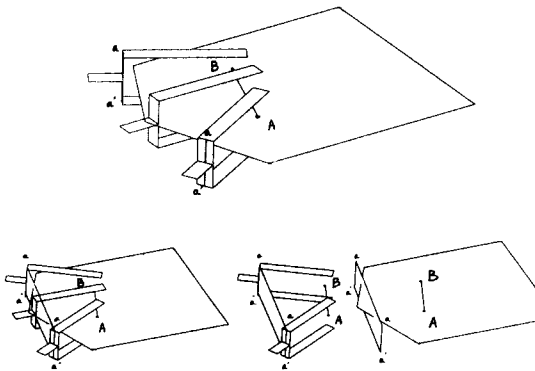


그림 11. 국부 충돌  
Fig. 11. Local collision.

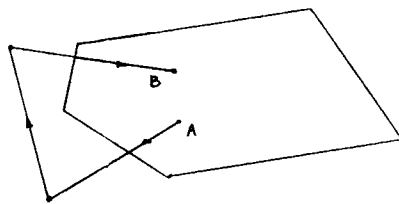


그림 12. 국부 충돌의 해결  
Fig. 12. Solution for a local collision.

#### IV. 시뮬레이션을 통한 검증

##### 1. 그래픽 시뮬레이터

온라인 교시 방식에서는 실제의 로봇과 작업 환

경을 대상으로 하므로, 로봇에게 작업을 교시하고 교시된 작업을 검증하기 위해 전체 공정 작업이 일시적으로 정지되어야 하는 문제점이 있었다. 그러므로 계획된 작업을 실제의 로봇에 직접 교시하여 검증하지 않고, 컴퓨터의 그래픽 기능을 이용하여 메모리내에 구축된 로봇과 작업 환경의 모델을 통하여 검증하게 하는 것이 그래픽 시뮬레이터의 목적이다. 본 논문에서 구성한 그래픽 시뮬레이터는 다음과 같은 몇가지의 3차원 그래픽 기능을 갖는다.

- 1) Double buffering에 의한 그래픽 애니메이션
- 2) 시각 이동 (Viewing transformation)<sup>9)</sup>
- 3) 확대 / 축소 (Zoom)
- 4) 평행 이동 (Pan)

##### 2. 시뮬레이션 및 분석

본 교시 시스템의 적용 예로서 자동차 생산 라인의 drawing 데이터 file과 자동차에 분포하는 용접점들을 이용한다.

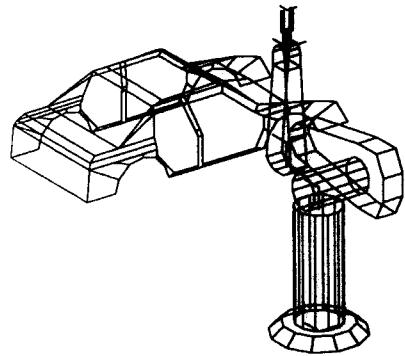


그림 13. 작업장의 모델  
Fig. 13. Solid model of the work space.

그림 13은 AutoCAD로 자동차(작업 대상물)와 로봇을 모델링한 것이다.

그리고 그림 14는 이로 부터 추출한 월드 모델의 자료 구조이다. 자료 구조에는 각 단위 물체에 그려진 자기 좌표축이 수치적으로 표현되어 포함되며, 주어진 계층 관계의 정보에 따라 각 단위 물체의 좌표축이 상대적으로 표현된다.

그림 15는 모델링된 자동차에 주어진 용접점의 분포를 보여 준다. 각 점들은 3차원의 좌표값을 가지며, 두 점간의 거리는 그들간의 기하학적 거리이던지, 혹은 두 점간의 직선상에 작업 대상물과의 간섭

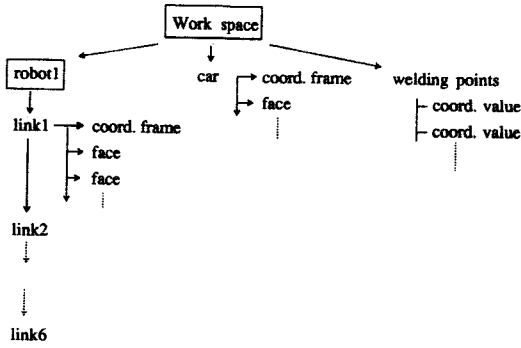


그림 14. 작업장의 자료 구조  
Fig. 14. Data structure of the work space.

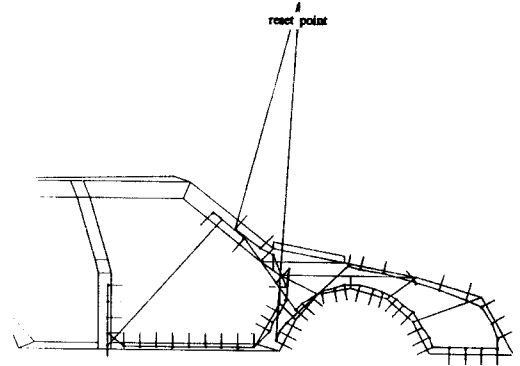


그림 16. Nearest neighbor 방법을 적용했을 때의 순서 계획 : 총 경로 길이=3585.57  
Fig. 16. Sequence planning through the nearest neighbor : total length=3585.57.

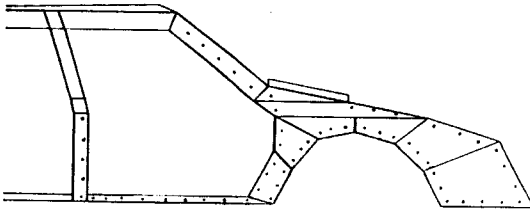


그림 15. 주어진 용접점의 분포  
Fig. 15. Welding points distribution.

이 있을 경우는 가중치가 부가된 거리가 된다.  
그림 16은 주어진 용접점들의 분포에 대해서 Nearest neighbor 방법을 적용하여 순서를 계획한 결과이다. 여기서 두 용접점 사이의 직선은 용접기의 직선 궤적이고, 각 용접점에서 외부로 향하는 직선들은 용접 방향을 의미한다.

그림 17는 Nearest neighbor에 의하여 얻은 초기 경로에 대해 Branch exchange 방법을 적용하여 얻은 계획 경로를 보여준다. 그림 16의 경우에 비해서 대략 16% 정도의 경로 비용 절감 효과를 보여 주는데, 일반적으로 온라인 교시, 즉 사용자의 직관만에 의한 경로 계획이 대체로 Nearest neighbor의 결과 정도에 국한된다고 볼 때, Branch exchange를 적용한 오프라인 방식의 결과가 16% 정도 더 효율적이라고 할 수 있다.

그림 18은 주어진 용접점의 분포에 대해서 순서를 계획할 때, Grouping 방법을 적용한 경우와, 적용하지 않은 경우의 계산 시간 차이를 보여준다. 그룹의 범위는 한 기준점이 대략 10개 정도의 다른 점을 포

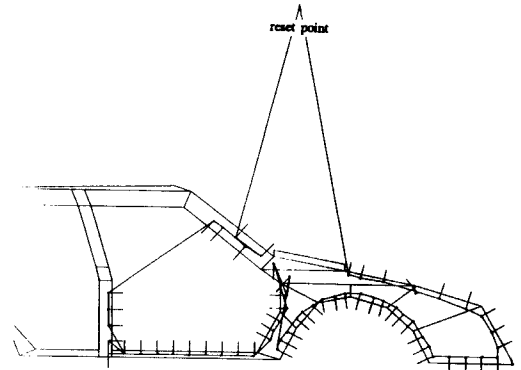
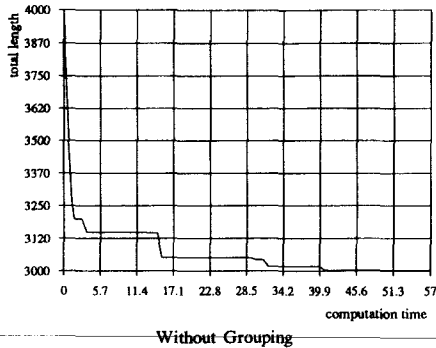


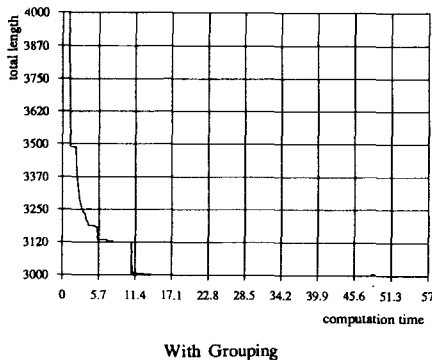
그림 17. Branch exchange 방법을 적용한 순서 계획 : 총 경로 길이=3004.16  
Fig. 17. Sequence planning through the branch exchange : total length=3004.16.

함하도록 정하였다. 그림은 Nearest neighbor에 의해서 순서 계획이 된 순간 이후의 경로 개선 과정인데, 같은 총 경로 거리에 대해서 Grouping을 한 것의 계산 시간이 Grouping 방법을 적용하지 않았을 때의 1/5~1/6 정도임을 알 수 있다.  $t=0$  이후에 total length가 갑자기 크게 줄어드는 것은, 위와 같은 용접점의 분포는 Nearest neighbor만을 적용했을 때는 어쩔 수 없이 충돌이 있는 직선 단위 경로가 총 경로에 포함되게 되어, 그로 인한 큰 가중치가 total length에 나타났다가, 경로 개선 과정에 들어서면서 바로 충돌없는 단위 경로로 대체되었기 때문이다.





(a)



(b)

그림 18. 계산 시간의 비교  
Fig. 18. Comparison of computation time.

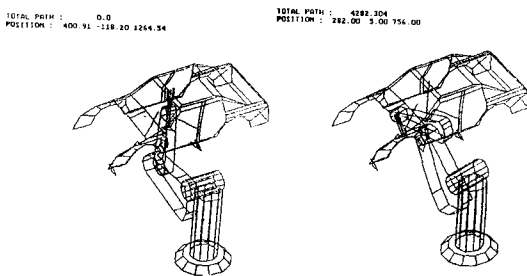


그림 19. 그래픽 시뮬레이터  
Fig. 19. Graphic simulator.

다음 그림 19는 위에서 계획된 작업을 검증하기 위한 그래픽 시뮬레이터의 화면이다.

V. 결 론

본 논문에서는 자동차 생산 공정의 용접 작업에

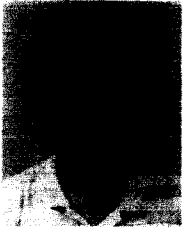
있어서 큰 문제점이었던 순서 계획에 초점을 맞추어, 자동차 용접 작업용 로봇의 교시를 위한 오프라인 프로그래밍 시스템을 구성하였다. 오프라인 프로그래밍 시스템을 이루기 위해서는 world modeler와, task planner, 그리고 그의 simulator가 필요하다. 월드 모델러를 위해서, 여기서는 기존의 자료 file들도 다시 사용할 수 있도록 범용 CAD system으로부터 데이터를 추출하는 방법을 제안하고 구성하였다.

Task planner는 점 용접 작업이라는 특수성에 비추어, 그의 순서 계획을 강조하므로써 최적의 로봇 작업 명령을 생성해 낼 수 있도록 구성하였으며, 특히 순서 계획시에 Grouping 방법을 적용함으로써 작업 계획에 드는 시간을 많이 줄일 수 있음을 보았다. 그리고, 계획된 작업을 검증하기 위한 수단으로서의 시뮬레이터를 그래픽 애니메이션화하므로써, 사용자가 실감있게 작업 과정을 확인해 볼 수 있도록 하였다. 시뮬레이션 결과는, 제안된 계획 방법은 용접용 로봇의 효율을 증가시켜 줄 수 있음을 보여 준다.

參 考 文 獻

- [1] M. Sciaky, *Robots In Spot Welding*, Handbook of Industrial Robotics, Wiley, 1985.
- [2] Y.F. Young, *Off-line programming of robots*, Handbook of Industrial Robotics, Wiley, 1985
- [3] J. Rubinovitz, "Task level off-line programming system for robotic arc welding-an overview," *Journal of Manufacturing Systems*, vol. 7 no. 4, 1988.
- [4] D. Raker, *INSIDE AutoCAD: A teaching guide*, New Rider Publishing, 1988.
- [5] J.W. Boyse, "Interference detection among solids and surfaces," *Communications of the ACM*, vol. 22, no. 1, Jan. 1979.
- [6] M. Bellmore, "The traveling salesman problem: A survey," *Operations research*, vol. 16, 1968.
- [7] B. Golden, "Approximate traveling salesman algorithms," *Operations research*, vol. 28, 1979.
- [8] S. Lin, B.W. Kernighan, "An effective heuristics algorithm for the traveling salesman problem," *Operations Research*, vol. 21, 1973.
- [9] J.D. Foley, A. Van Dam, *Fundamentals of Interactive Computer Graphics*, Addison-Wesley Publishing Company, 1984.

著 者 紹 介



李 壽 榮 (正會員)  
1964年 10月 2日生. 1988年 2月  
연세대학교 전자공학과 졸업. 1990  
年 2月 한국과학기술원 전기 및  
전자공학과 석사학위 취득. 1990  
年 3月~현재 한국과학기술원 전  
기 및 전자공학과 박사과정 재학

중. 주관심분야는 Robot Path Planning, FMS Sched-  
lduling 등임.

鄭 明 振 (正會員) 第26卷 第7號 參照  
현재 한국과학기술원 전기및  
전자공학과



卞 增 男 (正會員) 第27卷 第1號 參照  
현재 한국과학기술원 전기및  
전자공학과