

특 집 : 자동차 제조에서의 용접기술 동향

오프라인 프로그래밍을 이용한 자동차 용접로봇의 정밀티칭

박현성 · 이상원 · 이창연 · 신현일

Precision Teaching Technology for Car Body Welding Robot using Off-line Programming

Hyunsung Park, Sang-Won Lee, Chang-Yeon Lee, and Hyun-Il Shin

1. 서 언

1.1 연구목적

다양한 욕구와 취향을 가진 전세계 고객의 욕구를 충족시키고자 자동차 메이커들은 많은 종류의 자동차를 보다 빠른 시간에 시장에 내놓고자 노력하고 있다. 따라서 새로운 자동차의 시장 출시기간 단축을 위하여 각 부문에 걸쳐 여러가지 방법을 개발하고 있다.

최근 컴퓨터 및 IT기술의 발전에 따라 제품의 3D 설계 및 설계정보 실시간 공유 등 효과적이고 효율적인 제품 정보의 생산과 공유를 통해 신차의 개발 기간 및 비용을 절감하려는 시도는 많은 효과를 가져온 것이 사실이다. 반면 실제 제품의 생산 준비를 담당하는 생산 기술 부문에서의 이러한 노력은 같은 기간 동안에 상대적으로 발전을 해오지 못하고 있었으나, 최근 2~3년전부터 적용이 시작되어 공정 시뮬레이션을 중심으로 라인의 구상, 공법의 구상, 설비의 구상상의 오류 등 설비의 설치 이전에 미리 확인해보는 정도에서 그 효과를 보고 있다. 특히 차체 용접부문은 전체 로봇에 대하여 시뮬레이션을 적용하여 오프라인 상에 모델링 된 공정 상에서 많은 오류를 수정, 그 효과를 보고 있다. 나아가 현장에서의 실질적인 생산준비 기간의 단축을 위한 로봇티칭시간의 단축을 목표로 하여 로봇의 작업 프로그램을 오프라인의 컴퓨터상에서 미리 작성하고, 현장의 로봇으로 다운로드하여 현장에서의 티칭시간을 단축하려 하고 있다.

생산 준비기간 단축의 중요성은 신제품을 보다 빠른 시간안에 개발하여 고객들의 수요에 재빠르게 대응하는 것이라는 것은 주지의 사실이다. 또한 신차의 차체생산 준비기간 중 로봇티칭시간 단축의 중요성은 현재 차를 양산하고 있는 라인이건 아니건 현장에서의 시간 소요가 결국 메이커의 매출 손실로 연결된다는 것이다.

따라서 본 보고에서는 컴퓨터를 사용한 오프라인에서

의 작업을 통하여 인라인에서의 티칭에 의한 소요시간을 최소화하여 차체생산 준비기간을 단축하는 기술에 대해 소개하고자 한다.

2. 오프라인 프로그래밍

2.1 공정 시뮬레이션

차체의 생산준비과정은 각 라인과 공정의 구상을 담당한 차체생산기술 엔지니어에 의해 이루어지게 되며 그 과정을 간략히 보면 아래 Fig. 1과 같이 이루어진다.

과거에는 이와 같은 업무수행이 주로 각 담당 엔지니어의 판단과 경험에 의해 2D상의 도면으로 수행이 되었다. 이로 인해 담당자의 판단오류, 검증방법의 한계, 실수에 의한 검토누락 등으로 해당 단계의 문제점이 발견되지 않고 로봇티칭 단계에서 발생이 되어 현장수정이 발생, 시간 소요가 발생하였으며, 특히 담당 엔지니어들의 공수가 집중적으로 투입이 되었다.

이러한 문제점들을 해결하기 위해서 별도의 장소에 가설(假設)을 하기도 하지만 가설은 모든 설비가 제작

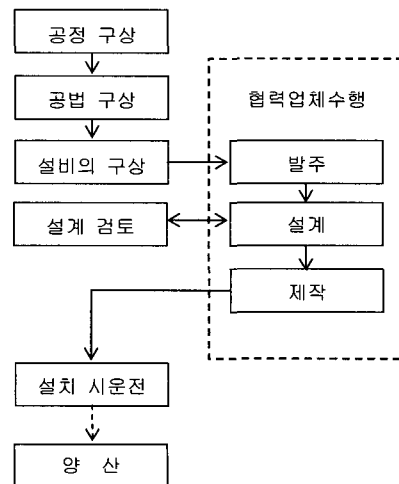


Fig. 1 차체생산준비 단계

이 끝난 후이나 가능하며 또한 신설 라인에만 가능하여 방법에 한계가 있다. 이러한 점에서 볼 때, 각 단계별로 컴퓨터상에서 수행되는 시뮬레이션이 단계별로 발생할 수 있는 오류를 설비의 제작전에, 최소한 인라인에 설치되기 이전에 발췌하여 수정할 수 있는 최선의 방법이라 하겠다.

2.2 고정도 다운로드 기술

지금까지의 만들어진 로봇의 작업용 프로그램을 현장의 로봇에 아무런 감각이 없이 바로 다운로드를 하여 로봇을 작업위치로 이동을 시킬 경우 로봇은 Fig. 2와 같이 오프라인의 컴퓨터상에서 우리가 티칭해주었던 그 위치가 현장에서는 정확히 구현되지 않는다.

그 이유는 로봇의 티칭작업이 이루어지는 컴퓨터상의 환경은 모든 구성요소가 설계된 도면 기준으로 이루어지기 때문에 공차와 오차가 없는 환경인데 반하여 현장에 설치되는 실물들은 제작오차, 설치오차, 장시간 사용에 의한 변형오차 등을 갖고 있기 때문이다. 따라서 이러한 오차들을 측정작업을 통해 확인하여 그 차이를 컴퓨터 상의 공정 구성 요소 각각에 캘리브레이션을 해주어야 현장에서 로봇의 툴(tool)이 정확한 위치에 도달하게 되는 것이다.

2.2.1 캘리브레이션을 위한 로봇 모델

차체공장에서 점 용접 로봇의 캘리브레이션을 위한 모델링을 하기 위해서는 몇 가지 고려해야 할 사항이 있다. 먼저 대부분의 로봇은 기본적으로 open loop이지만 closed loop 메카니즘이 부분적으로 사용되기도 한다. 따라서, 이 부분의 기구학적 모델링 및 에러 모델링을

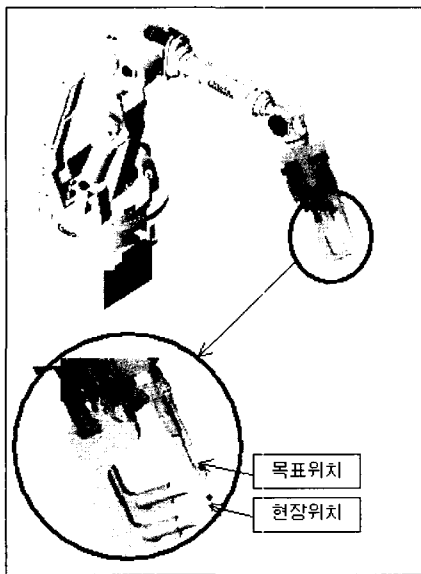


Fig. 2 오프라인과 실제와의 위치 불일치

기존의 open loop 기구학적 모델링 방법에 추가하여 고려하여야 한다. 둘째로는, 본 로봇은 매우 무거운 건(gun)을 손끝에 부착하고 있다. 이 때문에 각 관절 조인트에서의 축이 휘어질 가능성이 충분히 있다. 따라서 joint compliance를 고려, 이를 에러모델에 추가하는 것이 좀더 정확한 위치 정밀도를 확보하는 길이다.

2.2.2 캘리브레이션

로봇 OLP 시스템의 구현을 위해서는 작업 대상물과 로봇 시스템의 정확한 모델링이 요구가 되어진다. 실제 로봇 시스템의 정확한 수학적 모델링 및 모델 파라미터 값을 찾아내는 과정이 캘리브레이션이며, 이들 모델 파라미터 값들은 OLP를 위해 컴퓨터 상에서 로봇과 작업 대상물로 이루어진 작업 환경을 구성하는데 이용되어진다. 즉, 로봇의 티칭 위치 정밀도를 향상시키기 위한 제반 과정을 캘리브레이션이라 할 수 있다.

2.2.3 캘리브레이션의 과정

캘리브레이션은 다음과 같은 4 과정을 거친다.

(STEP 1) Kinematics Modeling

가능성 있는 모든 인자요인을 포함하여 로봇의 기구학적 관계를 표현하는 수학적 모델을 결정

(STEP 2) Pose Measurement

임의의 좌표에 대해 로봇 손끝의 위치를 측정

(STEP 3) Model Parameter Identification

모델 파라미터의 추정(optimization)

(STEP 4) Kinematic Compensation

캘리브레이션을 통해 얻은 결과로 좀 더 정확한 로봇 축값 들을 구함

첫 번째는 로봇의 모델링 및 모델 파라미터를 정의한다. closed loop을 갖는 로봇에 대한 수학적 모델을 정의하고 이를 통해 로봇의 캘리브레이션 된 기구학적 관계식을 구한다. 차체 점 용접을 위한 로봇은 자체 무게와 용접건의 무게가 몹시 커서 로봇과 용접건의 기하학적 오차 이외에 이들 하중에 의한 오차가 발생된다. 즉 joint compliance에 의한 로봇 손끝 위치 오차를 보정하기 위해서 각 축의 처짐을 로봇 축각(joint angle)의 함수로 구하고 이를 모델 파라미터에 추가하여야 한다. 두 번째는 측정 장비를 사용하여 여러 자세에서 로봇의 손끝 위치를 기준 위치에 대해 구한다. 이 때 구한 로봇 손끝위치 값의 정밀도가 캘리브레이션의 결과에 큰 영향을 미치게 되므로 레이저 트랙커(laser tracker)를 사용하여 정확한 위치 값을 얻었다. 세 번째는 측정값들을 이용하여 적절한 추정 알고리즘을 통해 정확한 모델 파라미터를 추정한다. 마지막으로 추정되어진 모델 파라미터를 이용하여 주어진 손끝 위치에 대한 정

확한 로봇 축각들을 구하는 것이다. 이것은 매우 비선형적 연립 관계식이므로, 이를 풀기위한 수학적 방법과 특이점(singularity) 해결을 위한 고려가 있어야 한다. 로봇 캘리브레이션 과정을 통해 절대 위치 정밀도를 향상시키기 위해서는 모델 파라미터가 실제 값과 오차가 최소가 되는 값을 찾아내야 한다. 이를 위해 로봇 손끝의 위치에 대한 정확한 측정값들이 기준 위치에 대해 필요하며, 레이저 트랙커를 사용하여 캘리브레이션 작업에 필요한 로봇 손끝 위치를 측정한다. 사전에 시뮬레이션을 통해 다양한 로봇의 자세에 대한 축각을 구해 놓고 이를 실제 로봇의 작업 프로그램으로 변환하여 로봇이 시뮬레이션된 자세를 취할 수 있도록 하고, 측정장비를 이용하여 각각의 자세에 대한 로봇 손끝 위치를 측정한다.

위치 측정을 하기 위해서는 로봇의 손 끝에 리플렉터(reflector)를 설치하고 레이저 트랙커를 통해 리플렉터의 위치를 구함으로써 로봇 손끝 위치를 알 수 있다. 그러나, 이와 같이 구한 로봇 손끝의 3차원 좌표값은 임의의 장소에 놓여진 레이저 트랙커를 기준으로 구해진 값으로서 현장 라인의 공정 좌표계와 아무 관계가 없다. 그러므로 로봇의 손끝 좌표를 공정상의 자동차 차체의 좌표계로 변경, 기준 좌표계를 설정하고자 리플렉터를 사용하여 지그의 기준점 세 곳을 측정한다.

측정 되어진 좌표값을 이용하여 지그 상의 차체 좌표계인 기준 좌표계 [W]를 설정하고, 레이저 트랙커를 기준으로 측정된 로봇 손끝의 좌표값을 차체 좌표계를 기준으로한 좌표값으로 변환시킨다. 이 과정은 측정 장비와 함께 제공되어지는 소프트웨어 모듈의 기능을 사용하여 간단히 수행할 수 있다.

이와 같은 캘리브레이션에서 하나의 자세에 대한 측정 값은 기준 좌표계에 대한 3차원 좌표 값으로 얻어지므로, 한 번의 측정으로 세 개의 식을 얻을 수 있다. 대상 로봇의 모델 파라미터 수가 총 53개이고, 이중 서

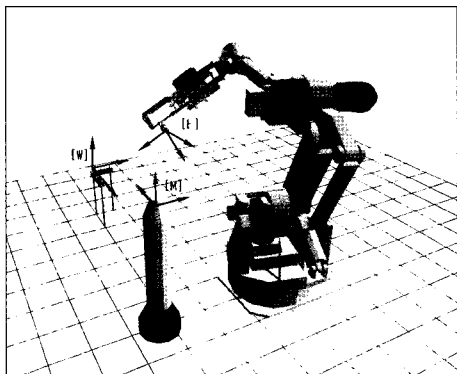


Fig. 3 로봇 손끝위치 측정

로 독립적인 파라미터의 개수는 29개이므로 25~30개의 위치에 대한 측정으로 이들 파라미터의 추정을 할 수 있다

캘리브레이션을 수행한 후에 새롭게 정의된 파라미터를 이용해 로봇 시스템을 시뮬레이션 상에 자동으로 생성되게 할 수 있다. 새롭게 정의되어진 파라미터를 이용하여 각 링크가 부착될 위치를 나타내주는 변환행렬 부분을 수정하여 캘리브레이션된 모델을 완성할 수 있다. 모든 링크 및 툴을 위와 같은 방법으로 새롭게 정의해서 캘리브레이션된 모델을 완성한다.

2.2.4 캘리브레이션의 결과

로봇의 위치 측정(N pose) 정보를 이용하여 캘리브레이션을 수행한 다음, 각 기구학적 모델(inverse kinematics)을 이용하여 임의의 80개의 위치로 로봇이 위치하도록 했을 경우의 위치 오차 측정 결과는 Table 1과 같다. 측정위치 오차의 평균은 약 0.9mm 이내이며, 최대오차도 약 2.0mm 이내로 만들 수 있다. 실제 한정된 작업범위내에서 위와 같은 캘리브레이션을 수행할 경우에는 최대오차 약 1.2mm 이내의 정확한 위치를 얻을 수 있었으며 그 결과 약간의 미세티칭 만으로 직접 용접에 적용할 수 있음을 알 수 있다.

2.3 사이클타임 시뮬레이션

현장에서의 수동티칭을 최소화하기 위한 또 하나의 필요 요소는 컴퓨터상의 시뮬레이션 되는 환경의 시간과 현장의 실제 시간과의 일치이다. 컴퓨터상의 시간이 실제시간과 일치하지 않을 경우 사이클타임을 달성하기 위하여 수차례의 반복티칭을 하여야 한다. 물론 그 시간오차가 심각할 경우 티칭수정 뿐만 아니라 로봇의 이동, 추가배치, 타점의 재분배 등의 공법 수정이 발생하여 일정지연이 불가피하게 된다.

현장과 컴퓨터간의 사이클타임의 일치를 98% 이상 확보하는 것을 목표로 사이클타임의 시뮬레이션을 수행하기 위해서는 공정의 시간 구성요소 분석, 각 구성요소의 시뮬레이션 방법 결정, 시뮬레이션에 시간요소를

Table 1 캘리브레이션 수행 후 기구학적 모델을 이용한 경우의 오차

구분	Joint Compliance 고려		Joint Compliance 미고려	
	RMS err	Max err	RMS err	Max err
N=20	0.9458	2.0434	0.8916	1.7912
N=30	0.8447	1.7170	0.8654	1.9310
N=40	0.8293	1.5936	0.8423	1.7357

제어반, 인터록반, 용접건 등으로부터 신호를 주고 받으면서 정해진 시간동안 대기하는데(Fig. 8) 이는 용접건의 용접과정과 용접후 개방을 완료하기까지 로봇의 이동을 방지하기 위한 안전장치의 역할을 하게된다.

D. 인터록 대기

한 공정에는 여러대의 로봇이 각기 다른 부위에 대한 용접작업을 수행하지만 서로 인접한 부위의 용접을 하거나 이동시 인접 로봇의 작업반경내 들어가는 경우가 발생한다. 이런 경우를 대비하여 각 로봇은 간섭구간에 진입할 경우 다른 로봇에게 진입을 못하도록 인터록 신호를 주게 되는데 후진입 로봇은 선진입한 로봇이 간섭구간을 빠져나올 때 까지 안전구역에서 대기하게 된다. 이러한 인터록에 의한 대기 시간은 시뮬레이션 프로그램에서 자동으로 계산이 된다.

2.4 OLP의 평가 및 검증

2.4.1 평가기준

A. 위치정도의 기준

고정도 다운로드의 구현을 위해서는 오프라인에서 로봇 툴의 기준점 (TCP, Tool Center Point)이 현장의 로

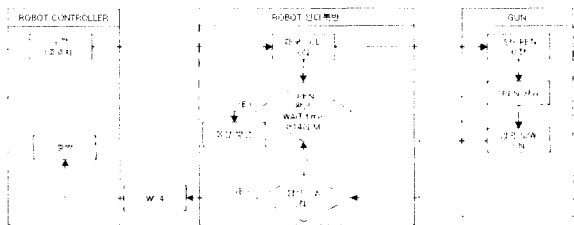


Fig. 7 2단 용접건의 동작신호 흐름

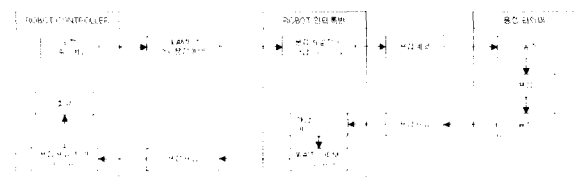


Fig. 8 용접점에서의 신호 흐름

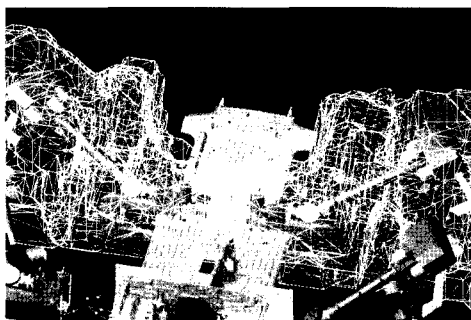


Fig. 9 인터록 발생 간섭구간

봇에 다운로드된 후의 위치오차가 1.5mm이내이어야 한다. 평가 방법은 아래와 같다.

$$X_{rms} = \sqrt{(Xo - Xh)^2 + (Yo - Yh)^2 + (Zo - Zh)^2} \leq 1.5mm \tag{1}$$

B. 경로 정도의 기준

고정도 다운로드를 구현하기 위해서는 로봇이 작업점과 작업점 사이를 이동하는 경로도 일치가 되어야 하며 그렇지 않을 경우에는 현장에서 로봇이 이동 중에 주위의 간섭물과 충돌을 할 수가 있다.

C. 시간정도의 기준

사이클타임의 정도는 오프라인과 현장의 로봇에서 동일한 프로그램을 실행시켜 실행시간을 측정하여 비교하며 그 정도는 98% 이상이어야 하며 이는 60초 공정을 기준으로하면 오차가 ±1.0초 이내이어야 함을 의미한다.

D. 소요시간의 기준

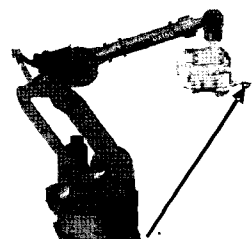
오프라인에서 작성된 로봇프로그램을 현장에 다운로드해서 로봇이 자동으로 작업이 가능할 때까지 한 대당 소요되는 시간을 평가한다. 평가기준은 아래와 같다.

$$\text{소요시간} = \text{측정} + \text{다운로드} + \text{티칭확인} + \text{기타시간}$$

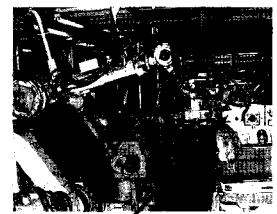
2.4.2 적용결과

우선 현장에서 로봇 1대, 1차종의 티칭에 평균적으로 소요된 시간을 보면 아래 Table 2와 같다.

위의 표에서처럼 현장에서 측정된 평균소요시간은 0.75시간 (45분)이 소요가 되었다. 여기서 주목할 것은 미세조정시간이 0.5시간 (30분)이 소요가 된 것인



Off-Line의 TCP좌표 측정 (Xo, Yo, Zo)



현장의 TCP좌표 측정 (Xh, Yh, Zh)

Fig. 10 위치정도 측정 데이터

Table 2 티칭 소요 평균시간

측정시간 (Hr)	미세티칭시간 (Hr)	총 소요시간 (Hr)	비고
0.25	0.50	0.75	실 소요시간
0.25	0.30	0.55	설변반영등 OLP외의 문제 제외시
-	0.30	0.30	측정시간 제외시

데 미세조정 시간이 발생하게 된 원인을 살펴보면 설계 변경이 미 반영된 제품을 사용하거나, 주변설비의 설치 오류로 간섭이 생긴다거나 3D도모델링의 오류, 티칭품질 미달 등이었다. 그 중 OLP외의 원인에 의한 미세조정 시간을 제외하면 미세 조정시간은 0.3시간(18분) 총 소요시간은0.55시간 (33분)이 소요되게 된 것이며, 특히 측정의 경우 작업이 없는 야간을 이용하여 실시가 되었으므로 설비 설치일정과 별개로 볼 때, 소요시간은 0.3시간(18분)이 된다. 여기에서 측정시간은 공사일정에는 영향이 없었지만 인라인에서 발생하는 작업이기 때문에 총 소요시간은 0.55시간(33분)으로 보는 것이 정확할 것이다.

수동티칭으로 작업을 할 때 소요되었던 시간을 살펴 보면 로봇이 작업하는 작업량 즉 용접 타점수에 따라 달라지지만 사이클타임이 60 ~ 90초 정도의 라인에서는 타점 마킹시간을 포함하면 1대당 4~5시간이 소요가 된다. 이는 물론 티칭을 하면서 아무런 문제가 발생하지 않았을 경우 순수하게 티칭에만 소요되는 시간이다. 따라서 이러한 OLP 정밀티칭을 통하면 수동티칭시의 소요시간에 비해 약 88% 이상의 많은 시간을 단축할 수 있다.

3. 결 언

지금까지 살펴본 바와 같이 차체생산 준비기간에 있어서 가장 문제가 되는 공정으로 작용하였던 로봇 티칭 시간을 컴퓨터를 사용한 오프라인에서의 작업을 통해서 획기적으로 단축을 할 수 있으며, 이 단축시간으로 인한 전체 차체생산 준비기간 중 설비설치 및 시운전에 소요되는 일정을 절감할 수 있음을 알 수 있었다. 또한 이 절감시간은 적용되는 로봇의 대수가 많으면 많을 수록 그 효과가 커진다. 특히 지금과 같이 한 개의 차체

생산라인에서 여러 가지 차종을 생산 하고 개발하는 경우, 양산 중에 주말 및 휴일을 이용해 설치 및 티칭을 수행하여야 하는데 이와 같이 짧고 비연속적인 시간에 정해진 일정을 지키며 티칭을 완료하기 위해서는 위와 같은 티칭 시간의 절감은 반드시 필요 하다고 판단이 된다.

OLP정밀티칭은 단순히 로봇티칭시간의 단축을 의미 하는 것이 아니다. 이는 차체 생산준비 기간 중에 행하여지는 많은 엔지니어링 행위들, 즉 공정을 구상하고, 공법을 만들고 설비를 구상과 설계를 하고 설치하는 일련의 행위의 신뢰성과 수준의 향상을 말하는 것이고, 이를 현장에 적용하는 기술적 효율을 의미하는 것이며 이를 통한 개발기간 단축을 의미하는 것이다. 앞으로는 이와 같은 OLP 정밀티칭 기술이 차체공장에 더욱 확대되어 적용되리라 예상된다.

참 고 문 헌

1. R.P. Paul: Robot Manipulator, Mathematics, Programming and Control, The MIT Press, Cambridge, (1981)
2. J. Craig : Introduction to Robot Mechanics and Control, Addison Wesley, (1986)
3. J.H. Borm, and C.H. Menq : Statistical Measure and Characterization of Robot Errors, IEEE International Conference on Robotics and Automation, (1988)
4. 범진환: 아크 용접 로봇의 오프라인 프로그램응용을 위한 효과적인 캘리브레이션 방법 연구, 한국정밀공학회지, 제13권, (1996)
5. H. Zhuang, and Z.S. Roth : A Linear Solution to The Kinematics Parameter Identification of Robot Calibration, IEEE International Conference on Robotics and Automation, (1993)
6. J.J. Caenen, and J.C. Angue : Identification of Geometric and Non-geometric Parameters of Robot, Proceedings of 1990 IEEE International Conference on Robotics and Automation, (1995)
7. 이상철, 김대원 : RRS개념을 이용한FARA OLP시스템구현, 명지대학교 산업기술연구소 논문집, 제19권, (2000)



· 박현성(朴賢星)
 · 1969년생
 · 기아자동차 차체생기팀
 · 용접자동화 및 레이저용접
 · e-mail : hpark21@kia.co.kr



· 이창연(李昌淵)
 · 1970년생
 · 기아자동차 차체생기팀
 · 차체 e-DM
 · e-mail : lomina@hitel.net



· 이상원(李相元)
 · 1970년생
 · 기아자동차 차체생기팀
 · 차체 e-DM
 · e-mail : leewon7@kia.co.kr



· 신현일(申鉉逸)
 · 1958년생
 · 기아자동차 차체생기팀
 · 저항용접 및 자동화
 · e-mail : shinyunil@kia.co.kr