

매니플레이터의 궤적 제어를 이용한 레이저 부분 절단 시스템의 유연한 자동화에 관한 연구

A Study on Flexible Automation of a Laser Semicutting System using the Path Control of Manipulator

김 승 우, 조 영 완, 박 민 용
(Seung Woo Kim, Young Wan Cho and Mignon Park)

Abstract : This paper proposes an automatic microshaping technology using laser and applies it to implementation of semicutting control system of the panel inside which a car air bag is equipped. Since it is impossible to project laser directly onto the desired working point of a target panel due to fixedness of laser generator, we reflect the generated laser, using reflection mirrors and focusing lenses, to project onto the desired working point. Also, in order to conduct an uniform semicutting control with constant width and depth, we control the end-effector of manipulator, which grasp the laser reflection mirror, to track working path with constant speed and orientation. The validity and effectiveness of the proposed methods are checked through experiments tracking a path formatted with straight lines and arcs.

Keywords : microshaping technology, path tracking, laser and reflection mirror

I. 서론

현대 산업에서 빠질 수 없는 역할을 수행하고 있는 레이저는 과학적 기술의 결정체로서 많은 응용이 발전되어 있는데 금속을 재료로 하는 레이저 미세 가공(laser microshaping)과 레이저 침식(laser ablation)에 대한 응용이 주요 연구 방향이 되고 있다[1][2]. 레이저 미세 가공에 대한 연구는 절삭, 홀 드릴링 등과 같이 가공에 중점을 둔 분야에 응용하는 기술적 연구가 이루어져 왔고, 레이저 침식 분야의 연구에서는 화학적 과정 연구와 대상체로부터 나오는 물질연구, 플라즈마 연구, 기본적인 물성 연구 등의 접근을 추구하고 있다. 특히 레이저를 이용한 물질 가공은 레이저의 여러 가지 장점을 활용할 수 있어 앞으로 산업 현장에서의 많은 응용이 요구되는 분야로 이 작업의 자동화가 절실히 요구된다고 하겠다. 본 논문에서는 주로 금속 재료에 대한 가공에 치중되어 왔던 레이저 응용 기술을 폴리머에 대해 실험한 결과를 바탕으로 하여 폴리머의 부분 절단을 위한 자동화 시스템을 구축하여 매우 정밀하고 정교한 가공이 필요한 자동차 조수석 에어백 장착용 대시보드의 가공에 적용한다.

에어백 작동시 발생할 수 있는 위험을 줄이기 위하여 에어백 장착 부위는 물리적으로 구분되어야 하는데 가공 방법에 따라 가시방법과 비가시방법으로 나뉘어진다. 도어형태로 장착 부위를 구분 짓는 가시 방법은 대시보드 전체 모양의 유연한 설계의 어려움, 에어백 존재의 상기로 인한 불필요한 두려움 인식, 제조 과정 상의 어려움 등의 문제점이 있어 비가시방법으로 기술적 발전이 이루어져 가고 있는데 기존의 비가시방법은 고주파를 패널 가공면에 압착하여 가공 경로를 따라 이동하며 가공

하는 접촉식 가공으로 가시방법에서 발생하는 문제는 해결하였으나 고주파 발생 장치와 가공과정에서 습기에 약한 특성, 제조 및 설계의 어려움, 가공 결과 저장밀도 등의 문제는 여전히 남아 있다[6][7].

본 논문에서는 레이저를 이용하여 비가시형으로 에어백을 장착하고 대시보드의 전체 모양을 자유로이 설계할 수 있으며 제조공정이 비접촉식이므로 제조 기술상에도 큰 장점을 갖고 있는 새로운 에어백 장착용 대시보드의 가공 기술을 제안한다. 이러한 제조 기술에서는 빠른 속도를 가지고 있는 레이저 빔이 원하는 궤적을 일정 속도로 추종하도록 제어할 수 있어야 된다. 그러므로 본 논문에서는 원하는 궤적의 정확한 지점에 일정량의 레이저를 투사하기 위하여 레이저 빔 반사용 거울 시스템을 장착하고 있는 매니플레이터의 엔드-이펙터(end-effector)를 일정 자세로 유지하면서 정속으로 작업 궤적을 추종하는 제어를 실현한다. 매니플레이터는 반사용 거울과 초점렌즈가 동기하여 움직이도록 설계한 레이저 빔 위치 이동용 미러 시스템과 기구적으로 인터페이스되어 있고, 매니플레이터의 핸드가 정속과 특정 자세로 정밀하게 궤적 제어되므로 레이저 빔에 의하여 폴리머가 원하는 궤적을 따라 특정 깊이까지 부분 절단되어지도록 하였다.

본 논문의 2장에서는 레이저와 반사거울에 의한 폴리머 부분절단 시스템의 동작 원리에 대한 설명을 기술하고, 3장에서는 레이저 빔의 위치 이동 및 전달 기구인 반사용 거울 시스템을 장착한 매니플레이터가 정속 궤적 제어하는 알고리즘에 대하여 설명하며, 4장에서는 매니플레이터의 정속 궤적 제어를 이용하여 구현한 폴리머의 부분 절단 자동화 시스템을 자동차의 에어백 장착용 대시보드의 부분절단 가공에 적용함으로써 본 논문에서 설계한 자동화 시스템에 의한 폴리머의 부분절단 가공 작업의 생산성, 정밀성, 효율성을 고찰하고 자동화 시스템

접수일자 : 1998. 2. 19., 수정완료 : 1998. 8. 4.

김승우 : 순천향대학교 제어계측공학과

조영완, 박민용 : 연세대학교 전자공학과

의 최적성과 궤적 제어의 성능을 관찰한다.

II. 레이저에 의한 폴리머의 부분 절단 자동화 시스템

1. 에어백 장착용 대시보드의 가공 기술

날로 경쟁이 치열해지고 있는 자동차 산업에서 특히 안전 기술의 하나인 에어백 기술에 각 자동차 회사가 기술적인 역점을 두고 있다. 이런 상황에서 최근 고급 자동차에는 조수석에도 에어백을 장착하고 있는데 그때 에어백을 내장하는 대시보드에서 에어백이 장착되는 위치의 전면패널을 물리적으로 구분시켜야 한다. 전면패널의 에어백 장착 부위를 구분시키지 않을 경우 에어백이 동작할 때 폴리머로 만들어진 대시보드의 전면을 뚫고 튀어나오는 과정에서 폴리머 파편들이 함께 튀어나오므로 조수석의 승객에게 치명적인 위험을 주게 된다. 따라서 이러한 위험을 줄이기 위하여 에어백이 조수석에 장착된 승용차에는 그림 1의 (a)와 같이 에어백이 위치한 부분만 도어 형태로 설계하는 방법을 사용하고 있는데 이러한 설계는 에어백이 동작할 경우에 위험을 초래하는 파편을 없애는데는 성공하였지만 대시보드 전체 모양의 유연한 설계를 방해하며 조수석의 승객에게 에어백의 존재를 상기시켜 주므로 사고에 대한 불필요한 두려움을 줄 뿐만 아니라 제조 과정에서도 많은 불편함과 어려움이 있다.

이와 같은 문제점 때문에 가시방법(visibility-type method)은 그림 1의 (b)와 같은 비가시방법(invisibility-type method)으로 발전해 가는 추세에 있다. 에어백 장착용 패널 가공의 최근 기술은 외부에서 에어백 장착을 느낄 수 없는 주변 패널과의 일체형 패널로서 디자인이 자유로운 장점을 갖고 있다. 벤츠사에서 개발한 조수석 에어백 장착 패널의 가공 기술은 고주파를 이용하는 방식인데 고주파 발생기의 톨 팁(tool tip)을 패널 가공면에 압착하여 사각형의 경로를 따라 이동함으로써 고주파가 패널면에 충돌하면서 생기는 열에 의하여 패널에 사각형 경로를 따라 홈을 내어 주는 접촉식 비가시방법이다[7]. 이것은 에어백이 동작할 때 파편 없이 에어백이 내장된 위치를 중심으로 일종의 홈으로 형성된 폐곡면인 사각형 형태의 패널이 먼저 열리고 에어백이 튀어나오도록 하게 하는 방식이다. 고주파 열에 의한 패널 부분절단 가공에서는 정상시에 발생하는 진동이나 외압에는 견딜 수 있는 강도를 유지할 수 있게 하고 에어백이 동작할 때는 미리 절단한 외곽선에 의해서 형성된 폐곡면이 파편 없이 열릴 수 있도록 부분절단의 깊이를 적절히 조절하는, 즉 고주파의 세기와 압착시 압력을 제어하는 기술과 경로를 정확히 추종하는 제어 기술이 필요하다. 그러나 고주파 열에 의한 패널면의 부분절단 방식은 우선 고주파 발생 장치의 설계가 까다롭고 고주파에 의해 가공된 홈의 폭이 비교적 넓고 정밀도가 떨어지며 고주파 발생 장치 및 고주파에 의한 가공 과정이 습기에 약한 특성을 가지고 있어서 제조상의 어려움도 있다. 따라서 본 논문에서는 고주파 방식의 문제점을 해결할 수 있는 레이저를 이용하여 비접촉식으로 패널을 부분 절단하는

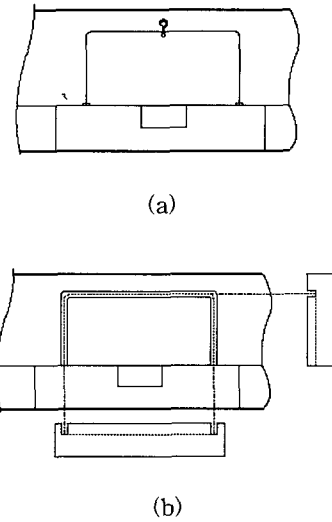


그림 1. 에어백 장착 패널 (a) 가시 방법 (b) 비가시 방법.

Fig. 1. Airbag mounting panel (a) Visibility-type (b) Invisibility-type.

방법과 이를 자동화하기 위한 정속도 궤적 추종 제어 시스템을 제안한다.

2. 레이저의 종류와 특성 및 폴리머 부분 절단의 원리

레이저(laser: Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation)는 활성매질의 종류에 따라 가스 레이저, 고체레이저 및 액체레이저로 분류할 수 있다. 가스레이저는 CO₂ 레이저, He-Ne 레이저, HF 레이저 등이 있고, 고체레이저에는 루비레이저와 Nd:YAG 레이저가 있으며 액체레이저는 유기염료를 사용한 레이저가 대표적이다. 또한 레이저는 활성매질의 밀도반전(population inversion)과 여기방출(stimulated emission)에 의해 밝기(brightness), 직진성(directionality), 단일 파장(monochromacity) 등의 특성을 갖는다. 레이저의 응용 분야로는 의학, 물질 합성, 물질 가공, 통신, 분광학, 신호처리 등이 있는데 물질가공 분야에 특히 고정밀도, 뛰어난 공간 분해능 및 신뢰도를 유지하면서 저렴한 비용과 높은 효율로 가공할 수 있다는 장점 때문에 레이저가 많이 사용된다[1].

이와 같은 레이저의 특성을 이용한 가공 분야의 대표적인 응용이 바로 미세 가공(microshaping)으로 물질절단과 홀 드릴링으로 구분될 수 있는데 본 논문에서는 자동차 내장재로 쓰이는 고분자 물질인 폴리머(polymer)에 절삭 깊이와 폭이 제한되는 부분 절단 가공에 응용한다. 고분자 물질에 강력한 전자기파가 입사하면 레이저가 조사하는 방법 (즉, 연속적인(continuous wave) 레이저 또는 펄스(pulse) 레이저), 재료의 열물성(photo-thermal properties), 재료의 두께, 재료의 밀도, 가공하고자 하는 재료의 깊이와 폭에 따라 레이저 파장과 펄스의 수, 펄스 폭이 달라져야 한다. 레이저의 펄스 폭이 짧으면 재료는 변형되지 않지만 절삭 표면이 매끈한 모양이 되지 않으며 펄스 폭이 길면 레이저 빔이 재료와 상호 작용하

는 시간이 상대적으로 길기 때문에 열에 의한 재질 변형이 일어날 가능성이 있다. 따라서 레이저는 $ms \sim \mu s$ 내에서 펄스폭을 조절할 수 있어야 하고, 이러한 레이저 기종으로 Nd:YAG나 혹은 CO₂ 레이저가 가능하다. Nd:YAG 레이저는 유지보수하는 비용이 저렴한 장점이 있으며 CO₂ 레이저는 비용이 저렴한 반면 Nd:YAG 레이저에 비해 유지보수 과정이 복잡하다는 단점이 있다.

그림 2는 재질 표면으로부터 레이저 빔의 초점 위치에 따른 재질의 절삭정도를 나타낸 것이다. 그림 2에서 보듯이 재질의 광열성질(photo-thermal properties)에 따라 가공된 모양은 다르지만 초점의 위치가 재질의 가공된 기하학적 모양에 큰 영향을 미친다는 사실을 알 수 있다[3].

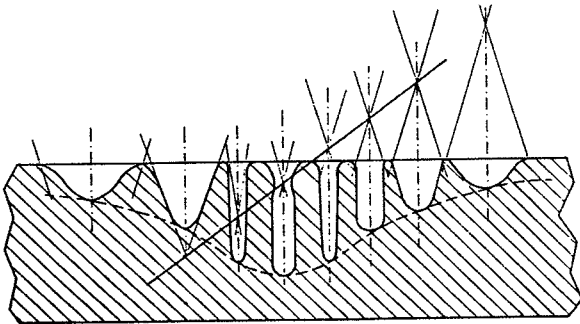


그림 2. 정 초점을 기준으로 대상체에 맺히는 초점 거리의 변화에 대한 크레이터 모양 .
Fig. 2. Variation of cutting shape with location of focus.

레이저 가공에 큰 영향을 미치는 또 다른 요인인 레이저의 세기(intensity)는 대상 표면에 정초점이 맺힐 때 (1)로 표현된다.

$$I = I_0 e^{-r/a_0^2} \tag{1}$$

여기서 r 은 가공 단면에 형성되는 크레이터(crater)의 크기를 나타내고 a_0 는 정초점에서의 빔의 반경을 나타내며 I_0 는 다음 (2)에 의해 결정된다.

$$I_0 = \frac{x}{t \times \pi a_0^2} \tag{2}$$

여기서 x (J)는 펄스당 레이저 에너지를 나타내고 t (ns)는 레이저의 펄스 폭을 나타낸다.

빔이 렌즈를 통과한 후 대상체의 표면에 맺히는 초점의 크기는 그림 3(a)와 같이 초점이 정확히 맺히는 W_2 부분을 중심으로 쌍곡선의 형태로 나타난다[4][5]. 초점 거리가 변화함에 따라 빔폭이 커지는데 전체 면적에 공급되는 레이저의 총 세기는 같지만 단위 면적에 공급되는 세기는 달라지게 되므로 단위 면적당 레이저의 세기는 감소하게 된다. 따라서 정초점에서는 최고의 세기를 나타내고 정초점에서 좌우로 초점의 위치가 변화하면서 단위 면적당 세기가 감소하게 되므로 일정한 초점 거리의 유지하는 작업 대상체의 크레이터의 모양 형성에 중요함을 알 수 있다.

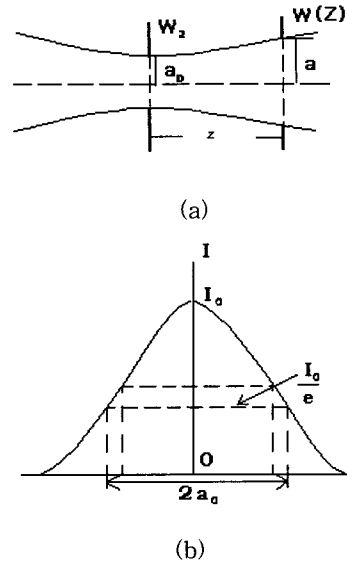


그림 3. 레이저 빔이 가우시안일 때 Intensity함수 (a) 초점이 맺힐 때의 빔의 모양 (b) 정초점에서의 레이저의 세기(intensity).
Fig. 3. Intensity function of gaussian laser beam (a) Shape of beam (b) Intensity of laser at exact focus.

3. 레이저와 반사용 거울을 이용한 부분 절단 시스템

그림 4는 레이저를 이용하여 작업 대상체에 미리 정해진 경로를 따라 일정한 폭과 깊이의 홈 가공을 하기 위한 시스템의 구성을 나타내고 있다. 레이저 발생 장치의 고정성으로 인하여 레이저를 작업 경로 위의 원하는 지점에 직접 투사하는 것이 불가능하므로 그림 4와 같이 반사거울과 초점 렌즈를 이용하여 작업 경로 상의 원하는 지점에 레이저가 투사되게 한다. 작업 대상체가 위치하여 투사된 레이저에 의해 실제 작업이 이루어지는 평면을 실제 작업 평면(actual workplane)이라 하고, 실제 작업 평면 상에 레이저를 투사하기 위한 반사거울이 이동하는 평면이 실제 작업 평면과 평행한 평면상에 위치하는데 이를 가상 작업 평면(virtual workplane)이라고

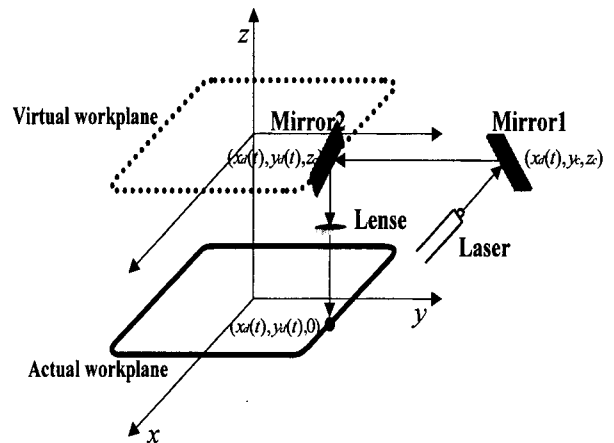


그림 4. 레이저 반사 시스템의 구성도.
Fig. 4. Configuration of laser reflection system.

한다. 레이저 발생 장치에서 발생된 레이저는 반사거울 1과 반사거울 2를 통하여 초점 렌즈에 투사되며 초점 렌즈를 통과한 레이저가 실제 작업 평면 위에서 정확히 초점이 맺힐 수 있도록 초점 렌즈의 위치가 정해진다.

원하는 가공을 하기 위해서는 레이저 초점의 위치가 작업 경로를 따라 일정 속도로 이동하여야 하는데 이를 위해서는 반사거울 1과 2가 동기화되어 이동하여야 한다. 그림 4에서 반사거울 1은 가상 작업 평면 위에서 x 축과 평행한 직선상에서 이동하게 되며 실제 작업 평면에서 원하는 작업 위치가 $(x(t), y(t), 0)$ 일 때, 작업 위치의 x 좌표와 일치하여야 하므로 $(x(t), y_c, z_c)$ 에 위치하게 된다. 여기서, y_c, z_c 는 상수이며, 레이저 발생 장치의 위치와 반사거울이 위치하는 가상 작업 평면이 형성되는 위치에 의해 각각 결정된다. 또한 반사거울 2는 반사거울 1을 통해 반사된 레이저를 실제 작업 평면에 반사하는 역할을 하게 되는데 반사거울 2의 위치는 원하는 작업 위치의 x, y 좌표와 일치하여야 하고 가상 작업 평면 위에 존재하므로 $(x(t), y(t), z_c)$ 가 된다. 즉, 작업 대상체가 위치하고 있는 실제 작업 평면 위에서 정확한 가공이 이루어지기 위해서는 그림 4에서 가상 작업 평면 위에서 레이저를 반사하는 거울의 위치가 정확히 제어되어야만 하는데 이를 위하여 매니플레이터의 엔드-이펙터가 반사거울을 잡고 거울의 위치와 자세를 제어한다. 이 때 반사거울 2의 궤적 제어를 담당하는 매니플레이터의 위치 제어가 D/S 컨버터(Digital-to-Synchro converter)와 연결되어 있고 반사거울 1의 x 축 방향 위치 제어를 담당하는 Linear Motion Product가 이와 직접 인터페이스되어 반사거울 1과 반사거울 2의 동기화를 이룰 수 있다.

그림 5는 그림 4에서 레이저가 반사거울 2를 통과하여 작업 대상체에 초점이 맺히는 과정을 자세히 나타낸 것이다. 그림 5에서 공간필터(spatial filter)는 조리개로써 작업 대상체 위의 초점에서 레이저 빔은 가우스 분포를 이루고 물질을 가공하는 부분과 물질과 레이저 빔이 열변형을 일으키는 부분으로 나뉘지기 때문에 물질 가공만을 하기 위해 크기를 조절하기 위한 것이다. 또한, 렌즈 1과 렌즈 2는 조리개를 통과한 레이저의 빔폭을 조절

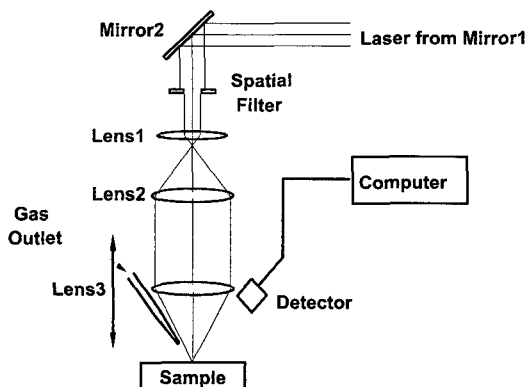


그림 5. 렌즈를 이용한 레이저의 초점 형성.
Fig. 5. Laser focusing system.

하기 위한 것이고 렌즈 3은 작업 대상체에 초점을 형성하기 위한 것으로 세 번째 렌즈에 의한 초점의 크기는 다음 (3)에 의해 결정된다.

$$W_2 = \frac{2\lambda}{\pi} \frac{f}{W_1} \tag{3}$$

이 때 W_2 는 초점의 크기, W_1 은 세 번째 렌즈에 들어오는 레이저 빔의 폭, λ 는 레이저의 파장, f 는 초점 거리를 각각 나타낸다. (3)에서 보듯이 그림 5의 세 번째 렌즈에 입사하는 레이저 빔의 크기 W_1 을 크게 할수록 재질 위의 초점크기 W_2 는 작아진다. 또한 정초점 전후에서의 빔폭 $W(Z)$ 의 변화는 그림 6에 나타난 바와 같고, (4)에 의해서 결정된다.

$$W(Z) = W_2 \left[1 + \left(\frac{\lambda Z}{\pi \left(\frac{W_2}{2} \right)^2} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \tag{4}$$

$$= \frac{2\lambda f}{\pi W_1} \left[1 + \left(\left(\frac{W_1}{f} \right)^2 \frac{\pi Z}{\lambda} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

여기서 Z 는 정초점 전후로 렌즈를 이동한 거리를 나타낸다.

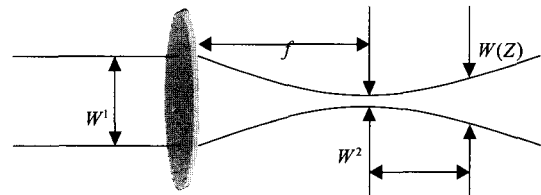


그림 6. 초점거리에 대한 빔폭의 변화.
Fig. 6. Variation of beam width with focusing distance.

III. 매니플레이터의 정속도 궤적 추종

작업 대상 패널에 레이저를 이용하여 일정한 궤적을 따라 홈을 내는 작업의 특성상 작업결과 나타나는 홈의 균일도(일정한 폭과 일정한 깊이)는 작업 성능도의 중요한 지표가 된다. 작업 성능의 중요한 지표가 되는 균일한 홈의 가공을 위해서는 가공면에 투사되는 레이저의 양이 작업 궤적 전반에 걸쳐 일정해야 한다. 이를 구현하기 위해서는 레이저를 반사하는 거울이 달려 있는 로봇 핸드에 원하는 작업 궤적을 따라 일정 속도로 움직이는 것이 필요하다. 따라서 레이저와 반사거울을 이용한 부분 절단 시스템의 자동화를 위해서는 로봇 매니플레이터의 엔드-이펙터가 사전에 미리 정해진 가공 궤적을 일정한 속도로 추종할 수 있도록 제어하여야 한다. 또한 레이저의 정확한 반사를 위하여 엔드-이펙터에 달려 있는 반사거울은 항상 일정 각도를 유지하여야 하는데 이는 매니플레이터의 엔드-이펙터가 항상 일정한 자세(orientation)를 유지해야함을 의미한다. 따라서 매니플레이터의 엔드-이펙터는 미리 정해진 궤적을 정속도와 일정 자세라는 제약 조건을 만족하면서 추종할 수 있어야 한다.

1. 정속도 추적을 위한 위치 명령치

로봇 핸드에 미리 정해진 속도 $v(t)$ 로 추종해야 할

$x-y$ 평면 위의 궤적이 다음 (5)과 같이 기지의 함수로 주어져 있다고 하자.

$$h(x, y) = 0 \tag{5}$$

이 때, 평면 위의 궤적을 이동하는 물체의 속도는 다음 (6)로 표현된다.

$$v_x(t)^2 + v_y(t)^2 = v(t)^2 \tag{6}$$

여기서 $v_x = \frac{dx}{dt} = \frac{df}{dt}$, $v_y = \frac{dy}{dt} = \frac{dg}{dt}$,

$$x = f(t), y = g(t)$$

따라서 원하는 속도 $v(t)$ 로 궤적을 추종하기 위한 시간에 대한 위치 명령치를 구하는 것은 (5)과 (6)를 만족하는 매개 변수로 나타내어진 미분 가능한 함수 $x = f(t)$, $y = g(t)$ 를 구하는 것이 되는데 이는 다음과 같은 비선형 미분 방정식의 해를 구하는 문제로 귀결된다.

$$f'(t)^2 + g'(t)^2 = v(t)^2 \tag{7}$$

$$h(f(t), g(t)) = 0 \tag{8}$$

본 논문에서 로봇 매니플레이터의 엔드-이펙터가 추종해야 할 작업은 그림 7과 같이 직선과 원호(1/4원)로 구성되어 있으며 이러한 작업 궤적을 따라 정속도 궤적 추종을 하기 위한 엔드-이펙터의 위치 명령은 부록 A와 부록 B에 유도되어 있다.

그림 7에서 주어진 작업 경로를 $p(t_0)$ 의 위치에서 시작하여 반시계 방향으로 작업한다고 하면 시간에 대한 작업 위치 $p(t)$ 의 명령치는 (A-5), (A-6), (B-8), 식 (B-9)에 의하여 다음과 같이 주어진다.

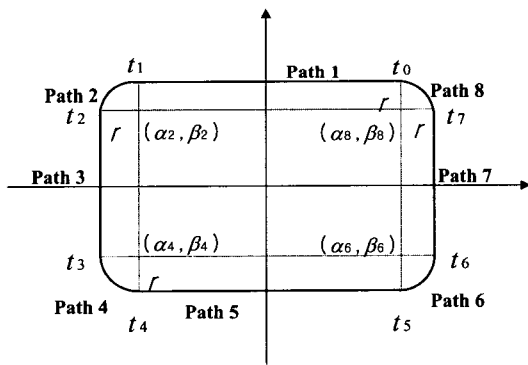


그림 7. 작업경로.
Fig. 7. Working path.

path 1 : $f(t) = -v_c(t-t_0) + f(t_0)$, $g(t) = \frac{m}{2}$

path 5 : $f(t) = +v_c(t-t_4) + f(t_4)$, $g(t) = -\frac{m}{2}$

path 3 : $f(t) = -\frac{l}{2}$, $g(t) = -v_c(t-t_2) + g(t_2)$

path 7 : $f(t) = \frac{l}{2}$, $g(t) = +v_c(t-t_6) + g(t_6)$

path 2, 4, 6, 8 :

$$f(t) = r \cos \left\{ \frac{v_c}{r} (t-t_{2i-1}) + \frac{\pi}{2} i \right\} + \alpha_{2i}$$

$$g(t) = r \sin \left\{ \frac{v_c}{r} (t-t_{2i-1}) + \frac{\pi}{2} i \right\} + \beta_{2i}$$

for $i = 1, 2, 3, 4$

여기서 l, m 은 각각 x, y 축과 평행하게 놓여진 직선 경로의 위치를 나타낸다.

2. 엔드-이펙터의 일정 자세 유지를 위한 명령치

6축 매니플레이터의 명령치 설정을 위해서는 3-1절에서 설정된 위치 명령 p 외에 매니플레이터의 자세(방향)에 대한 명령이 주어져야 한다. 작업공간상의 평면에 위치해 있는 작업 대상체 위로의 원하는 지점에 레이저를 정확히 반사하기 위하여 엔드-이펙터에 달려 있는 반사 거울은 항상 일정 각도를 유지하여야 하는데 이는 매니플레이터의 엔드-이펙터가 항상 일정한 자세(orientation)를 유지해야함을 의미한다. 매니플레이터의 엔드-이펙터의 자세는 방향을 나타내는 세 벡터 n, o, a 로 나타낼 수 있다.

그림 4와 그림 8에서 알 수 있듯이 레이저는 작업 공간(workspace)에서 실제 작업 평면과 평행한 가상 작업 평면 상에서 y 축과 평행한 방향으로 투사되고 있기 때문에 이를 실제 작업 평면에 수직으로 반사하기 위해서는 반사용 거울의 평면은 x 축과 평행하고 y, z 축과 각각 45° 의 각을 이루어야 한다. 따라서 벡터 a 는 $(0, \frac{1}{\sqrt{2}}, -\frac{1}{\sqrt{2}})$ 으로 설정되고 벡터 o 는 그림에서 거울이 위치한 평면에서의 회전을 의미하므로 거울 평면에 존재하도록 임의로 설정할 수 있으나 본 논문에서는 다음과 같은 설정치 $o = (0, \frac{1}{\sqrt{2}}, \frac{1}{\sqrt{2}})$ 를 사용한다. 두 벡터 a, o 로부터 이에 직교하는 벡터 n 은 $n = o \times a$ 이므로 $n = (1, 0, 0)$ 로 설정된다.

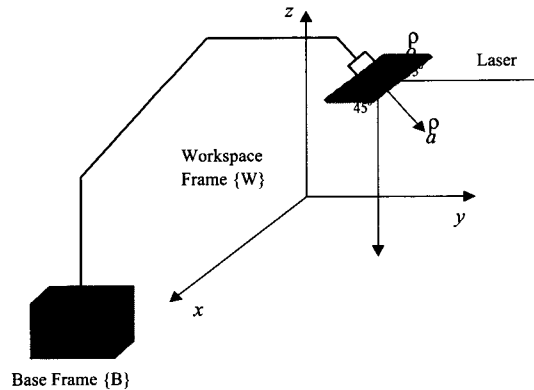


그림 8. 레이저의 수직 반사를 위한 반사거울의 방향.

Fig. 8. Orientation of reflection mirror.

3-1절에서 얻은 위치 명령 $p = (f(t), g(t), z_c)$ 와 3-2절에서 설정한 자세 명령 n, o, a 를 이용하여 매니플레이터의 T 행렬 T_6^0 는 베이스 프레임(base frame) {B}와 워크 스페이스 프레임(workspace frame) {W} 사이의 동차 변환 행렬 T_W^B 가 주어졌을 때 다음 (9)와 같이 구성된다.

$$T_6^0 = T_W^B \cdot T_6^W \tag{9}$$

여기서, $T_6^W = \begin{bmatrix} n & o & a & p \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$

IV. 실험 및 고찰

매니플레이터의 정속 궤적 제어를 이용하여 구현한 레이저 빔과 반사용 거울에 의한 폴리머 부분 절단 자동화 시스템의 구성도는 그림 9와 같다. 시스템 전체 관리와 제어를 담당하는 PC는 윈도우즈 환경으로 Nd:Yag 레이저의 발생 시작과 레이저 발생 주기의 제어, 작업대의 초기 위치 제어 및 매니플레이터의 정속도, 정자세 궤적 추종 제어를 담당한다. 작업대는 조수석 대시보드의 에어백 장착 위치에 부분 절단 가공을 하기 위한 폴리머 패널을 장착하여 정확한 초기 위치에서 레이저 가공을 시작할 수 있도록 하는데 그 목적이 있고, 이의 제어는 작업대의 초기 위치 제어가 담당한다. 그리고 레이저 빔 위치 제어 기구는 2장에서 설명한 반사용 거울과 초점 렌즈로 구성되어 작업대에 장착된 폴리머 패널면에 레이저 빔이 수직으로 투사될 수 있도록 레이저 빔의 반사 위치를 제어하여 주는 기능을 수행한다. 이 때 반사용 거울을 매니플레이터가 잡고 정속 궤적 제어를 수행함과 동시에 정자세 제어를 수행하게 된다. 이를 위하여 6축 매니플레이터를 필요로 하는데 본 실험에서는 DANDY 로봇(대우)을 사용하였으며 그 사양은 표 1에 주어진 바와 같다.

또한, 본 실험에서는 짧은 파장에서 높은 파워를 낼 수 있는 Nd:Yag 레이저를 사용하였으며, 여러 차례의

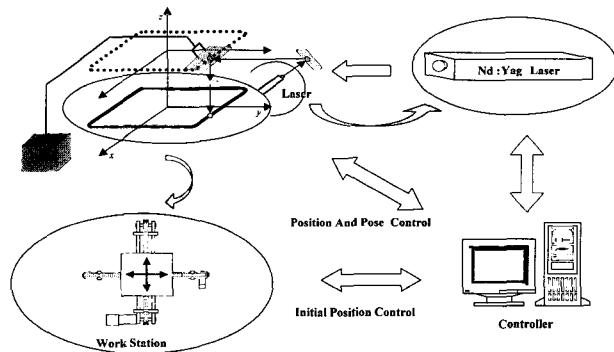


그림 9. 레이저를 이용한 폴리머 부분절단을 위한 시스템의 구성도.

Fig. 9. Configuration of laser semicutting system.

표 1. 대우 6축 로봇 DANDY의 기구적 사양.

Table 1. Mechanical specifications of DANDY.

Joint	Link 길이 a_i	Link의 비틀림 각 α_i	Link Offset d_i	Joint Angle θ_i	θ_i 의 동작 범위	감속 비 R	속도/가속도 rad/sec rad/sec ²
1	$a_1=60$	-90°	$d_1=400$	θ_1	$\pm 150^\circ$	141	2.23/8.3625
2	$a_2=350$	0°	0	$-90^\circ + \theta_2$	$-70^\circ \sim +120^\circ$	141	2.23/8.3625
3	$a_3=80$	-90°	0	θ_3	$-70^\circ \sim +60^\circ$	160	1.96/7.35
4	0	90°	$d_4=390$	θ_4	$\pm 150^\circ$	100	3.14/11.775
5	0	-90°	0	θ_5	$\pm 120^\circ$	120	2.61/9.7875
6	0	0°	0	θ_6	$\pm 360^\circ$	100	3.14/11.775

반복 실험을 거쳐서 얻은, 원하는 폭과 깊이의 가공에 적합한 최적의 레이저의 사양은 표 2에서 주어진 바와 같다. 표 2의 레이저 사양에서 매니플레이터의 정속 궤적 제어를 위해 사용할 일정 속도 값은 2 mm/sec이다. 레이저 펄스의 주파수는 10Hz로 폴리머 패널면의 추종 궤적(tracking path)에서 한 순간 점(Point)을 mm단위로 볼 때 mm당 필요한 펄스 수가 5개로 반복 실험 결과 확인되었으므로 매니플레이터가 반사거울 2를 잡고 정속 궤적 제어할 때의 정속도 값은 2mm/sec로 설정되었다. 또한 본 실험에서 실제 가공 실험한 궤적은 그림 7과 같이 직선과 원호(1/4원)로 구성되어 있는데 가로 폭이 260mm, 세로 폭이 180mm이며 회전 반경 r 은 30mm이다. 따라서 2mm/sec로 설정된 속도로 그림 7과 같은 궤적을 정속도 추적하기 위한 매니플레이터의 위치 명령은 각 추종 궤적 구간에 대해 표 3과 같이 구해진다.

표 3에서 얻은 위치 명령과 3-2절에서 얻은 자세 명령

표 2. 폴리머의 부분 절단에 사용한 레이저의 최적 사양.

Table 2. Optimal laser specification obtained from repeated experiments.

내용	사양	실험에서 사용된 레이저의 사양
파 장		353 nm
Power(Intensity)		$8.22 \times 10^{10} \text{W/cm}^2$
레이저 매체		Nd-Yag
주파수		10 Hz
추적 속도		2 mm/sec (5 PPS)

표 3. 정속 궤적 추종을 위한 위치 명령.

Table 3. Position command for constant speed tracking.

궤적 구간	정속도 궤적 추종을 위한 위치 명령값 $x = f(t), y = g(t)$	
	path1	$f(t) = -2(t-0) + 100, g(t) = 90$
path2	$f(t) = 30 \cos(-\frac{2}{30}(t-100) + 90) - 100$ $g(t) = 30 \sin(-\frac{2}{30}(t-100) + 90) + 60$	
path3	$f(t) = -130,$ $g(t) = -2\{t - (\frac{30}{4}\pi + 100)\} + 60$	
path4	$f(t) = 30 \cos[\frac{2}{30}\{t - (\frac{30}{4}\pi + 160)\} + 180] - 100$ $g(t) = 30 \sin[\frac{2}{30}\{t - (\frac{30}{4}\pi + 160)\} + 180] - 60$	
path5	$f(t) = 2\{t - (\frac{60}{4}\pi + 160)\} - 100, g(t) = -90$	
path6	$f(t) = 30 \cos[\frac{2}{30}\{t - (\frac{60}{4}\pi + 260)\} + 270] + 100$ $g(t) = 30 \sin[\frac{2}{30}\{t - (\frac{60}{4}\pi + 260)\} + 270] - 60$	
path7	$f(t) = 130, g(t) = 2\{t - (\frac{90}{4}\pi + 260)\} - 60$	
path8	$f(t) = 30 \cos[\frac{2}{30}\{t - (\frac{90}{4}\pi + 320)\} + 100]$ $g(t) = 30 \sin[\frac{2}{30}\{t - (\frac{90}{4}\pi + 320)\} + 60]$	

으로 구성된 행렬 T_6^0 로부터 역 기구학식(inverse kinematics)를 이용하여 구한 조인트 스페이스(joint space)에서의 명령치를 매니플레이터의 기계적 샘플링 주기에 맞게 샘플링하여 매니플레이터의 정속 궤적 제어를 위한 명령으로 사용한다.

에어백 장착용 대시보드의 부분 절단 작업을 위하여 매니플레이터를 이용한 유연한 자동화 시스템에 의하여 반복실험을 통해 얻은 최적의 레이저 사양 값을 적용하여 폴리머 패널상에 가공한 실험 결과는 그림 10에서 볼 수 있다. 실험 결과들은 실제 가공 결과물을 측정함으로써 가공 결과 샘플을 외형용 전자현미경인 SEM (Scanning Electron Microscope)을 이용하여 측정해서 얻은 데이터의 평균값을 나타내고 있다. 그림 10은 원하는 기준 가공 궤적(a)과 실제 가공된 궤적(b)을 비교한 것으로 최적화된 레이저 빔과 매니플레이터에 의한 궤적 제어의 정확성을 알 수 있다. 특히 직선이 교차되는 교차부분에서 형성된 라운딩 부분도 본 자동화에서의 매니플레이터가 정확히 추적하고 있음을 알 수 있다. 그림 11(a)는 시간에 대한 폴리머의 부분 절단 폭의 변화 상태를 나타내고 있으며, 그림 11(b)는 시간에 대한 폴리머의 부분절단의 깊이의 변화 상태를 나타내고 있다. 폴리머의 부분 절단 가공 결과에서 폭과 깊이는 작업 성능을

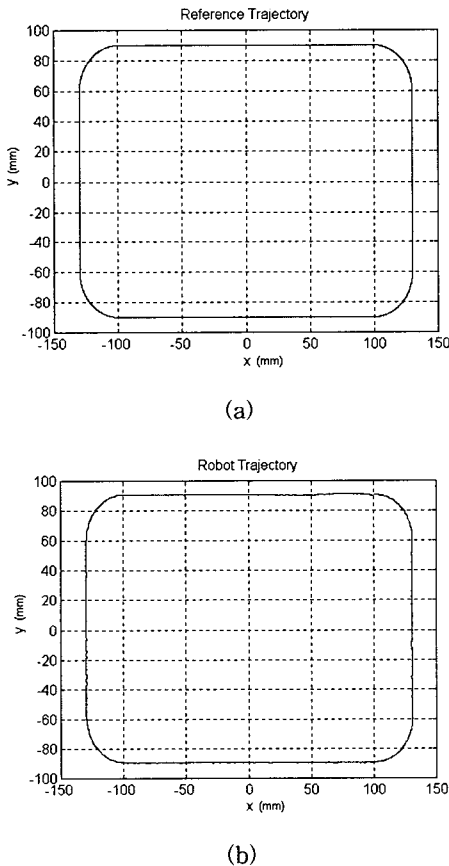


그림 10. (a) 목표 가공 궤적 (b) 로봇에 의한 가공 결과.
Fig. 10. (a) Desired working path (b) Processed working path.

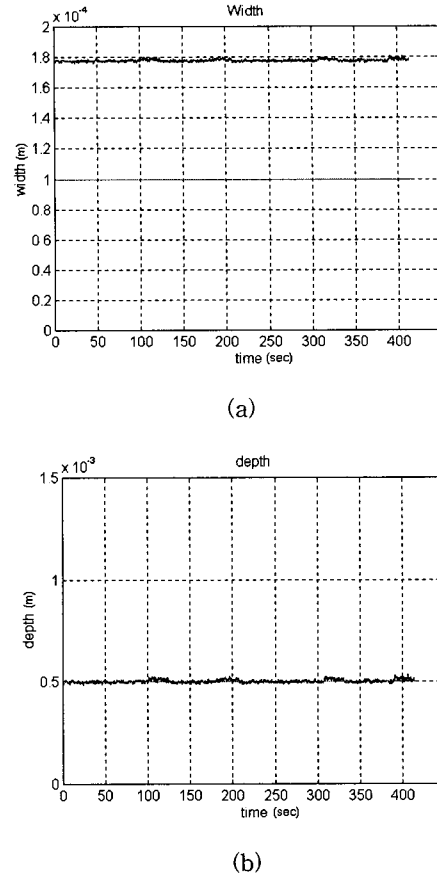


그림 11. (a) 가공 궤적의 폭의 변화 (b) 가공 궤적의 깊이의 변화.
Fig. 11. (a) Variation of processed width (b) Variation of processed depth.

나타내는 중요한 지표로서 매니플레이터의 이동 속도에 직접 관련되는 값이다. 그림 11(a)에서 가공 결과는 기준치 0.1mm보다 넓게 형성되었고 그림 (b)에서 깊이는 기준치보다 적게 가공된 결과를 나타내고 있는데 이는 레이저 자체의 기술적 문제에 기인하는 것으로 보인다. 그러나 기존의 비가시형 방법인 고주파 방식에 의한 가공 결과가 0.6~0.7mm 정도의 폭을 갖는 홈이 형성된 것에 비해 본 논문에서 제안한 방법에 의한 가공 결과는 그 폭이 0.18mm 정도로 기존의 방식에 비해 더욱 정밀하게 가공할 수 있음을 알 수 있다. 특히 그림 11(a)와 (b)에서 가공 결과는 균일한 분포를 나타내고 있는데 이로부터 매니플레이터가 정확히 정속 제어되었음을 알 수 있다.

V. 결론

자동차의 에어백 장착용 대시보드의 가공 기술은 가시 방법에서 발생하는 문제점으로 인하여 비가시방법으로 발전해가고 있다. 그러나 기존의 비가시방법은 접촉식 가공으로 비가시방법에서 생기는 문제는 해결하였으나 여전히 극복하기 어려운 문제점을 남겨놓고 있었다. 따라서, 본 논문에서는 자동차의 에어백 장착용 대시보드에 일정한 폭과 깊이의 홈을 가공하기 위하여 레이저

와 반사용 거울, 초점렌즈를 이용한 가공 기술을 제안하였다.

제안된 방법에서 정확한 가공을 위해서는 레이저 빔이 원하는 궤적을 따라 일정 속도로 추종하도록 제어할 수 있어야 된다. 그러므로 본 논문에서는 원하는 궤적의 정확한 지점에 일정량의 레이저를 투사하기 위하여 레이저 빔 반사용 거울 시스템을 장착하고 있는 매니플레이터의 엔드-이펙터를 일정 자세로 유지하면서 정속 궤적 추종하는 제어를 구현하였다. 매니플레이터의 핸드가 정속과 특정 자세로 정밀하게 궤적 제어되므로서 레이저 빔에 의하여 작업 대상체인 폴리머가 원하는 궤적을 따라 일정한 폭과 깊이로 부분 절단되어지도록 하였다.

본 논문에서 제안한 가공 방법은 비가시형 방법으로서 에어백을 장착하여 승객이 가지는 불필요한 불안감을 해소할 수 있고, 대시보드 전체 모양을 자유로이 설계할 수 있으며, 접촉식 고주파 방식에 비해 고정밀도를 갖는 가공 결과를 얻을 수 있으며 제조 공정이 비접촉식이므로 제조 과정에서 발생하는 여러 가지 기술적인 어려움을 해결할 수 있는 장점이 있다.

참고문헌

- [1] S. M. Metev, V. P. Veiko, *Laser-Assisted Microtechnology*, Springer Series in Materials Science, chap. 6, Edited by R. M. Osgood, Jr., June, 1994.
- [2] J. C. Miller (Ed.), *Laser Ablation. Principles and Applications*, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, London, Paris, Tokyo, Hong Kong, Barcelona, Budapest, 1994.
- [3] J. T. Verdeyen, *Laser Electronics*, Prentice-Hall Inc. Englewood Cliffs, N. J. 07632, 1981.
- [4] A. Yariv, *Introduction to Optical Electronics*, 2nd ed., New York: Holt, Rinehart and Winston, 1971, Chap. 3.
- [5] A. Maitland and M. H. Dunn, *Laser Physics*, Amsterdam: North-Holland Publishing Company, chaps. 4-7, 1969.
- [6] S. Fukushima, H. Sogi, "Method for manufacturing an air bag attachment," *United States Patent*, Patent no. 5084122, Intl. Class(Ed.5):B29 C059/10, Issued date: Jan. 28, 1992.
- [7] J. Ball, W. Henseler, U. Gerstenberg, T. Fischer, "Instrument panel in a motor vehicle," *United States Patent*, Patent no. 5487558, Intl. Class (Ed.6):B60R021/16, Issued date: Jan., 30, 1996.
- [8] R. P. Paul and H. Zong, "Robot motion trajectory specification and generation," *2nd International Symposium on Robotics Research*, Kyoto, Japan, August, 1984.
- [9] H. P. Huang and N. H. McClamroch, "Time-Optimal control for a robotic contour following problem," *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, vol. 4, no. 2, pp. 140-149, April, 1988.
- [10] M. Erlic and W. S. Lu, "A reduced-order adaptive velocity observer for manipulator control," *IEEE Trans. Robotics and Automation*, vol. 11, no. 2, pp. 293-303, April, 1995.
- [11] F. Pfeiffer and R. Johanni, "A concept for manipulator trajectory planning," *IEEE Trans. Robotics and Automation*, vol. RA-3, no. 2, pp. 115-123, April, 1987.
- [12] A. A. Goldberg, B. Benhabib, and R. G. Fenton, "A complete generalized solution to the inverse kinematics of robots," *IEEE Journal of Robotics and Automation*, vol. RA-1, no.1, pp. 14-20, March, 1985.
- [13] F. L. Lewis, C. T. Abdallah, D. M. Dawson, *Control of Robot Manipulators*, Macmillan Publishing Company, New York, 1993
- [14] J. J. Craig, *Introduction to Robotics: Mechanics and Control*, 2nd Ed., Addison-Wesley Publishing Company, 1989.
- [15] S.W. Kim, M. Park, S.B. Lee, "A study on compliance robot using a PID adaptive controller," *Journal of the Korean Institute of Telematics and Electronics* 27, pp. 105-110, 1990.

부록

부록 A. 직선 궤적에 대한 위치 명령

2차원 평면($x-y$ 평면)에서 직선의 일반적인 표현은 다음 (A-1)과 같으며,

$$ax + by = c \quad (A-1)$$

엔드-이펙터의 정속도 유지를 위해서는 (7)에서 $v(t) = v_c$ (v_c 는 상수)이어야 한다.

$$\dot{f}(t)^2 + \dot{g}(t)^2 = v_c^2 \quad (A-2)$$

$$af(t) + bg(t) + c = 0 \quad (A-3)$$

(A-3)의 양변을 t 에 대해 미분하면

$$a\dot{f}(t) + b\dot{g}(t) = 0 \quad (A-4)$$

(A-2)와 (A-4)에 의해

$$f(t) = \pm \frac{v_c}{\sqrt{1 + (\frac{a}{b})^2}} (t - t_0) + f(t_0) \quad (b \neq 0),$$

$$f(t) = -\frac{c}{a} \quad (b = 0) \quad (A-5)$$

$$g(t) = \mp \operatorname{sgn}(ab) \frac{v_c}{\sqrt{1 + (\frac{b}{a})^2}} (t - t_0) + g(t_0) \quad (a \neq 0),$$

$$g(t) = -\frac{c}{b} \quad (a = 0) \quad (A-6)$$

여기서 \pm 부호는 이동 방향을 의미하므로 작업 방향에 따라 선택할 수 있다.

부록 B. 원호 궤적에 대한 위치 명령

2차원 평면에서 원의 일반적인 표현은 다음 (B-1)과 같으며,

$$(x-\alpha)^2+(y-\beta)^2=r^2 \quad (B-1)$$

엔드-이펙터의 정속도 운동을 위해서는 (3-3)에서 $v(t) = v_c$ (v_c 는 상수)이어야 한다.

$$\dot{f}(t)^2+\dot{g}(t)^2=v_c^2 \quad (B-2)$$

$$(f(t)-\alpha)^2+(g(t)-\beta)^2=r^2 \quad (B-3)$$

(B-2)와 (B-3)에서

$$f(t)=r \cos \theta(t)+\alpha \quad (B-4)$$

$$g(t)=r \sin \theta(t)+\beta \quad (B-5)$$

로 두고 (B-4)와 (B-5)의 양변을 t 에 대해 미분하면

$$\dot{f}(t)=-r \dot{\theta}(t) \sin \theta(t) \quad (B-6)$$

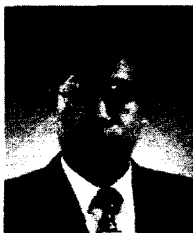
$$\dot{g}(t)=r \dot{\theta}(t) \cos \theta(t) \quad (B-7)$$

(B-2), (B-6), (B-7)에 의해

$$f(t)=r \cos \left\{ \pm \frac{v_c}{r} (t-t_0)+\theta(t_0) \right\}+\alpha \quad (B-8)$$

$$g(t)=r \sin \left\{ \pm \frac{v_c}{r} (t-t_0)+\theta(t_0) \right\}+\beta \quad (B-9)$$

여기서 \pm 부호는 회전 방향을 의미하므로 작업 방향에 따라 선택할 수 있다.



김 승 우

1961년 10월 15일생. 1987년 연세대학교 전자공학과 졸업(공학사). 1989년 동 대학원 전자공학과 졸업(공학석사). 1989년-1990년 삼성 종합 기술원 연구원. 1994년 동 대학원 전자공학과 졸업(공학 박사). 1994년-1995년 순천향대학교 제어계측공학과 전임강사. 1996년-현재 순천향대학교 제어계측공학과 조교수. 1998년-현재 미국 Case Western Reserve University의 방문교수. 주관심 분야는 퍼지 제어 이론, 퍼지 응용 시스템, 퍼지 모델링, 로봇틱스 및 자동화, 로봇 비전 등임.

박 민 용

제어 · 자동화 · 시스템 공학회지 제3권, 제3호, 참조.



조 영 완

1968년 10월 10일생. 1991년 연세대학교 전자공학과 졸업(공학사). 1993년 동 대학원 전자공학과 졸업(공학석사). 1993년-현재 동 대학원 전자공학과 박사과정 재학중. 1993년-현재 연세대 산업 기술 연구소 연구원. 주관심 분야는 퍼지 제어 이론 및 응용 시스템, 적응 제어 및 로버스트 제어, 지능 제어, 로봇틱스 등임.