

논문 2005-42SC-1-1

5축 매니퓰레이터를 이용한 쾌속 임의형상제작시스템의 구현에 관한 연구

(A Study on the Implementation of an Agile SFFS
Based on 5DOF Manipulator)

김 승 우*, 정 용 래**

(Seung-Woo Kim and Yong-Rae Jung)

요 약

본 연구에서는 다양한 재료의 시트(Sheet)를 각각 절단하여 적층하는 방법으로 기존 적층조형법과는 다른 쾌속 임의형상제작시스템인 CAFL^{VM}(Computer Aided Fabrication of Lamination for Various Material)을 제안한다. 이러한 조형 방법은 가공 속도를 빠르게 하며 복잡한 후처리 과정을 대폭 줄일 수 있고, 여러 가지 재료가 사용 가능한 장점을 지니고 있다. 이러한 목적으로 개발된 2자유도의 X-Y테이블 형태의 CAFL^{VM}은 레이저빔으로 시트(Sheet)를 절단, 적층하여 조형물을 완성하는 새로운 고속적층시스템으로 가능성을 검증하였다. 하지만 2자유도 시스템은 X-Y 평면을 이동하는 작업공간에 수직으로 레이저 가공이 이루어지는 방법으로, 조형된 사물의 표면에 계단 형상이 나타나는 표면정밀도상의 문제점을 드러낸다. 이러한 문제점을 해결하고자 2자유도에 3자유도를 추가한 5자유도 시스템을 제안하여 레이저의 경사절단이 가능하게 함으로서 조형된 사물의 표면 정밀도를 높이고, 일정한 폐단의 모양을 갖는 조형물 가공의 경우 여러 시트(Sheet)가 적층되는 부분을 한번에 가공할 수 있도록 하여 보다 빠르고 정밀한 5자유도 매니퓰레이터 CAFL^{VM}시스템을 설계한다. 즉, 정속경로제어와 경사각절단제어를 구현하고 그 외에 수반된 자동화 CAFL^{VM}시스템을 구현하는 것이 본 논문의 목적이다.

Abstract

Several Solid Freeform Fabrication Systems(SFFS) are commercialized in a few companies for rapid prototyping. However, they have many technical problems including the limitation of applicable materials. A new method of agile prototyping is required for the recent manufacturing environments of multi-item and small quantity production. The objectives of this paper include the development of a novel method of SFFS, the CAFL^{VM}(Computer Aided Fabrication of Lamination for Various Material), and the manufacture of the various material samples for the certification of the proposed system and the creation of new application areas. For these objectives, the technologies for a highly accurate robot path control, the optimization of support structure, CAD modeling, adaptive slicing was implemented. However, there is an important problem with the conventional 2D lamination method. That is the inaccuracy of 3D model surface, which is caused by the stair-type surface generated in virtue of vertical 2D cutting. In this paper, We design the new control algorithm that guarantees the constant speed, precise positioning and tangential cutting on the 5DOF SFFS. We develop the tangential cutting algorithm, to be controlled with constant speed and successfully implemented in the 5DOF CAFL^{VM} system developed in this paper. Finally, this paper confirms its high-performance through the experimental results from the application into CAFL^{VM} system.

Keywords : SFFS(Several Solid Freeform Fabrication Systems), CAFL^{VM}(Computer Aided Fabrication of Lamination for Various Material), Constant-Speed Path Control, Tangent-Cutting Control

I. 서 론

* 정희원, ** 학생회원, 순천향대학교 정보제어공학부
(Soonchunhyang University, Division of
Information Technology Engineering)
접수일자: 2004년7월28일, 수정완료일: 2005년1월12일

지금까지의 시제품을 만드는 과정은 CAD(Computer-Aided Design)를 디자인 및 설계 단계에서 적용하여 각종 부품을 CAD에서 모델링한 후 컴퓨터상에서 조립

시에 간접 확인 절차를 거쳐서 제품을 설계하는 것이다. 그 이후 시제품을 만들어 제품의 성능을 평가한 후 CAM(Computer-Aid Manufacture)을 이용하여 양산에 필요한 금형을 제작하는 것이다. 이러한 CAD/CAM을 이용한 방법은 시제품을 만드는 과정에서 시간과 비용이 부담되는 문제가 있다.

임의형상제작시스템(SFFS; Solid Freeform Fabrication System)은 이러한 한계들을 극복하기 위해 활용되고 있는 기술로서, 기존의 절삭가공법과는 달리 물체를 한 층씩 적층하여 제작하는 방식이다. 2-3개월 걸리는 실물제작 기간을 2-3일로 단축시킬 수 있으며, 공구가 필요 없으므로 절삭공구의 간접에 의해 제작할 수 없는 임의형상까지도 성형할 수 있는 장점이 있다. 이는 CAD상에서 설계한 데이터를 이용하여 바로 실물로 제작하고, 만들어진 실물로부터 설계오류를 확인하여 궁극적으로 설계 완성도를 향상시키고, 조형물의 제작 기간을 줄이고자 하는 목적으로 많이 활용되고 있다.

임의형상제작시스템(SFFS)은 상용화된 지 10여년 밖에 되지 않은 최신 기술로서 현재 세계적으로 미국이 기술과 실용화 측면에서 가장 앞서가고 있으며 한국을 포함한 일본 영국에서 다양한 연구가 진행되고 있다. 최초의 상업용 임의형상제작시스템은 미국 3D System사의 SLA(StereoLithographic Apparatus)이며 액체상태의 광경화성 수지에 레이저광을 선택적으로 조사하여 한 층씩 적층해 나가는 방법을 사용하고 있다. 가장 상업적으로 성공하고 있는 사례는 미국의 DTM사로 균일한 크기의 고체분말을 한 층씩 균일하게 도포한 후 제품 단면의 형상대로 레이저빔을 조사하여 고체분말을 용융 결합시켜 3차원 형상을 제작하는 SLS(Selective Laser Sintering) 방법을 이용하고 있다. 그 외에 전선 형태의 재료가 가열된 압출금형과 유사한 노즐의 내부로 이송된 후, 가열된 노즐로 재료를 용융시키고 노즐이 단면 형상대로 이동하면서 용융재료를 붙이는 방식으로 입체 형상을 제작하는 FDM(Fused Deposition Modeling), 종이를 재료로 사용하여 입체 형상을 제작하는 LOM(Laminated Object Manufacturing), 등의 다양한 시스템이 개발되어 자동차 및 가전제품을 중심으로 시제품 개발에 활용되고 있다.^{[1][3][6]} 하지만 현재 대부분의 임의형상제작시스템은 사용 가능한 재료의 종류 및 형태가 제한되고, 기타 복잡한 후처리 과정이 요구되어진다. 우리는 이러한 단점을 보완하고자 여러 가지 재료를 사용할 수 있고 보다 더 빠르게 가공 할 수 있는 새로운 임의형상 가공방법을 제안하고자 한다.

본 논문은 제작하려는 가공물을 로봇에 탑재된 레이저에 의해 고체 시트를 절단하여 적층하는 쾌속 임의형상 제작시스템인 CAFL^{VM}(Computer Aided Fabrication of Lamination for Various Material)을 개발하는데 있다. 이미 제작되어진 고체시트를 절단하여 적층하는 방법은 한가지의 재료에만 국한되지 않고 다양한 재료를 사용할 수 있다는 큰 장점을 갖는다.

본 시스템의 가공방법에 있어서 핵심 기술은 레이저를 이용하여 정밀하게 절단하는 방법에 있다. 레이저는 특성상 순간적으로 파워를 조정하기 힘들기 때문에 평균적인 파워를 이용하여 재료물을 가공하게 된다. 또한 레이저 가공시간이 길어지면 재료물이 타는 등의 문제점이 발생하고 반대로 가공시간이 짧아지면 재료물의 가공도가 떨어진다. 따라서 레이저의 가공시간을 일정하게 유지시키는 정속위치제어기가 필요하다.

정속위치제어와 레이저 파워제어를 이용한 2자유도 시스템을 구성하여 고체시트 적층조형법을 검증한 결과 임의형상의 가공시스템으로서 가능성이 검증 되었으나, 가공물의 표면이 경사도가 있을 경우 시트간의 크기 차이로 인하여 외부 표면이 계단 모양으로 돌출이 생기게 되는 단점이 발견되었다. 이것은 레이저빔이 시트에 수직으로 교차되는 이유로, 시트의 두께를 최대한 얇게 하면 표면정밀도는 향상 시킬 수 있으나, 시트를 얇게 할수록 가공물 완성시간은 길어지고 미세하지만 표면 정밀도 문제도 여전히 존재하게 된다. 이점을 해결할 수 있는 방법으로 그 동안의 레이저 수직 가공방법을 가공물의 표면 경사도에 따라 레이저 가공각도가 변하는 경사각 절단 방법을 제시 할 수 있다.

따라서 기존의 2자유도 시스템의 부족한 자유도를 보완한 5자유도 매니퓰레이터 시스템을 도입하여 경사각 가공이 가능하도록 시스템을 구현한다. 그러므로, 본 논문의 최종목표는 2자유도에서의 정속경로제어와 5자유도에서의 경사각절단제어기를 설계하고, 본 논문에서 개발한 임의형상제작시스템 CAFL^{VM}에 적용 실현한 결과를 통하여 자동제어기의 우수성을 확인하는 것이다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서 CAFL^{VM} 시스템의 특징 및 구성을 설명하고, III장에서는 시스템 제어를 위한 기구학적 해석을 시도하며, IV장에선 정속 경로제어기와 경사각절단제어기의 설계 방법을 설명한다. V장과 VI장에선 실험절차 및 결과 그리고 본 논문의 결론을 맺는다.

II. CAFL^{VM} 시스템의 개념 및 구조

1. CAFL^{VM} 시스템 특징

본 논문에서 설계하는 CAFL^{VM} 시스템은 CAD 모델링을 사용하여 제작하려는 형상을 설계한 후 3차원 CAD 모델링 데이터를 일정한 방향으로 슬라이싱하여 여러개의 단층형상 데이터로 만들어 낸다.

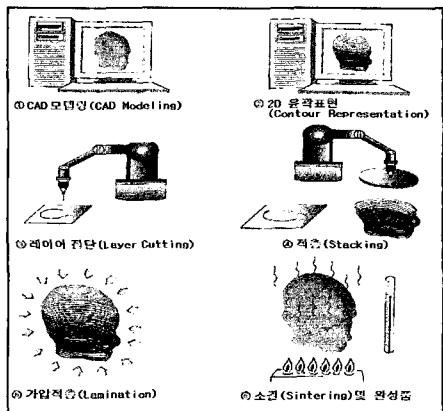


그림 1. CAFL^{VM} 공정

Fig. 1. Process of CAFL^{VM}.

이렇게 각각 생성된 2차원의 단층 형상 데이터를 바탕으로 재료물(시트)을 레이저로 커팅한 후 적층하는 과정을 반복하며, 커팅 적층 공정이 마무리되면 가압과 소결 과정을 거쳐 형상을 완성하게 된다.

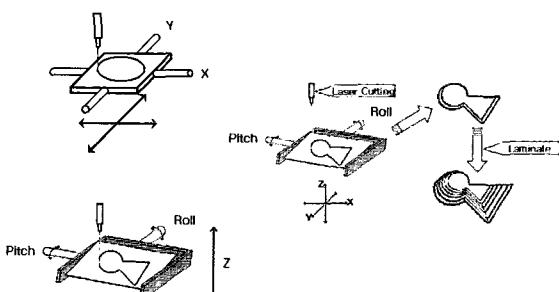


그림 2. CAFL^{VM} 시스템의 개념

Fig. 2. Concept of CAFL^{VM} System.

기구부는 2자유도 시스템은 평면상의 위치이동을 하기위한 (X, Y)축으로만 구성되어 있으며, 5자유도 시스템은 작업면에 경사성분을 줄 수 있는 (Roll, Pitch)축, 그리고 레이저빔과 작업면과의 초점거리를 유지해 주는 Z축이 추가되어 모두 5축으로 구성된 로봇 매니퓰레이터 시스템으로 구성되어 있다.

2. CAFL^{VM} 시스템 구조

CAFL^{VM}의 매니퓰레이터 관절들은 AC서보모터로 구

성되어 있으며 2자유도 CAFL^{VM}은 2개의 선형이동축 (Prismatic Joint)으로 구성되며, 5자유도 CAFL^{VM}은 1개의 선형이동축(Prismatic Joint)과 2개의 회전이동축 (Revolute Joint)이 추가되어 구성된다.

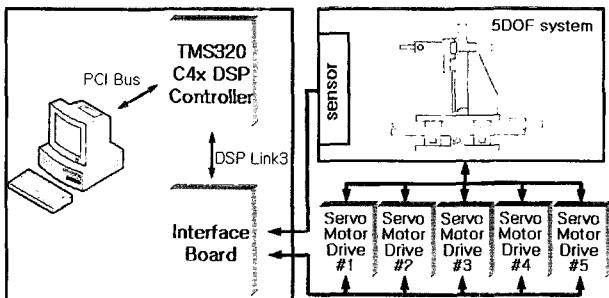


그림 3. CAFL^{VM} 시스템 구조

Fig. 3. System Configuration of CAFL^{VM}.

서보모터 드라이브단은 시스템을 직접 구동하는 부분으로 각 자유도마다 독립적으로 구성되어 있으며, 하나의 서보드라이브에 이상이 생길 경우 시스템 안전을 위하여 나머지 모든 서보드라이브의 동작을 차단할 수 있는 구조로 되어 있다. 이러한 제어환경 시스템의 구성을 그림 3에서 볼 수 있다.

III. CAFL^{VM} 시스템 해석

1. CAFL^{VM} 시스템의 기구학적 해석

자유도를 갖는 로봇시스템을 제어하기 위해선 그 시스템의 기계적인 구조를 이해할 필요가 있다. 따라서 자유도를 갖는 시스템의 기구학 해석은 제어기 설계 이전에 선행되어야 한다.

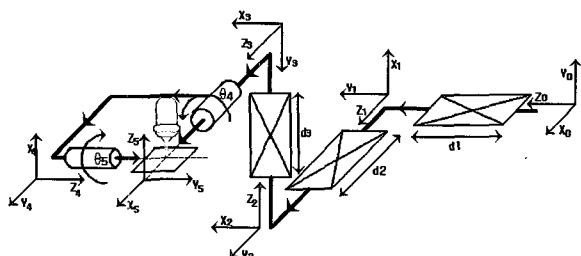


그림 4. 5DOF CAFL^{VM} 시스템의 골격구조

Fig. 4. Skeleton Structure of 5DOF CAFL^{VM} System.

본 연구에서 기구학 해석 방법으로 Denavit-Hartenberg 방법을 이용하였고 5자유도 시스템을 중심으로 하였다. 이것은 5자유도 시스템 해석이 2자유도 시스템 해석을 포함하기 때문이다.^{[5][11][13][14]}

그림 4는 5DOF(Degree of Freedom) CAFL^{VM} 시스템

을 해석하기 위하여 3개의 선형이동축(Prismatic Joint)과 2개의 회전이동축(Revolute Joint)으로 구성되는 골격구조(Skeleton Structure)형태로 표현한 것이다.

표 1. 5DOF 매니퓰레이터 시스템의 링크 파라미터
Table 1. Link Parameters of 5DOF Manipulator System.

Link number	α	a	d	θ
1(X,Prismatic)	90°	0	d_1	90°
2(Y,Prismatic)	90°	0	d_2	90°
3(Z,Prismatic)	-90°	0	d_3	0
4(Roll)	90°	0	0	θ_4
5(Pitch)	90°	0	0	θ_5

θ : A rotation about the z-axis.

a: The length of each common normal (Joint offset).

d: The distance on the z-axis.

α : The angle between two successive z-axes (Joint twist)

5DOF 매니퓰레이터의 골격구조를 토대로 Denavit-Hartenberg 방식에서의 각 링크간의 파라미터를 표(1)과 같이 구성하였다. 링크간의 파라미터를 이용하여 n축에서 n-1축까지의 각 링크간의 관계를 나타내면 식(1)에서 (5)와 같이 4×4 매트릭스로 표현이 된다. 여기서 $s_i = \sin(\theta_i)$, $c_i = \cos(\theta_i)$ 로 간략화 한다.

$$A_1^0 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$A_2^1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & d_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$A_3^2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & d_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$A_4^3 = \begin{bmatrix} c_4 & 0 & s_4 & 0 \\ s_4 & 0 & -c_4 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$A_5^4 = \begin{bmatrix} c_5 & 0 & s_5 & 0 \\ s_5 & 0 & -c_5 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

첫번째 조인트에서 엔드이펙터(End Effector)까지 모

든 인접링크들간의 변환 행렬을 정리하면 식(6)과 같다.

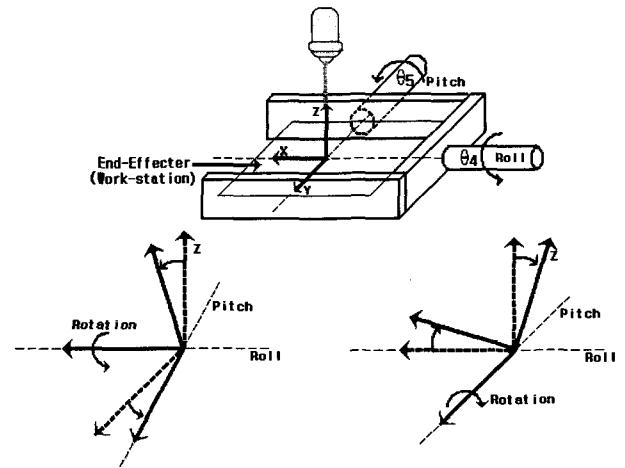


그림 5. WS(Work-Station)의 이동과 회전

Fig. 5. Translation and Rotation of WS(Work-Station).

$$A_5^0 = A_1^0 A_2^1 A_3^2 A_4^3 A_5^4 = \begin{bmatrix} C_4 C_5 & S_4 & C_4 S_5 & d_1 \\ S_5 & 0 & -C_5 & d_2 \\ -S_4 C_5 & C_4 & -S_4 S_5 & d_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

본 시스템의 엔드이펙터는 레이저 가공이 이루어지는 작업대(Work-Station)로 간략하게 WS로 표현하기로 한다. 기구학적 해석을 간단하게 표현하기 위해서 레이저의 초점과 5DOF 시스템 엔드이펙터의 Z축을 일직선상으로 유지한다. 실제 절단 작업에 필요한 벡터값으로, 레이저 초점이 이동할 수 있는 벡터성분 T(translation)와 레이저빔과 동일선상을 기준으로 경사 절단 각도를 나타낼 수 있는 회전벡터성분 O(Orientation)로 분리하여 벡터 (T, O)로 표현한다.

이동 벡터성분 T는 X축과 Y축의 평면 이동으로 해석이 용이하고, 회전 벡터성분 O는 WS의 가공지점과 수직으로 레이저 초점이 일치하는 축을 Z축으로 놓고 이 축을 기준으로 한 회전각 성분으로 나타낼 수 있다. 이 점들을 고려하여 마지막 5번 째 축의 링크와 WS의 링크간의 관계를 나타내면 식(7)과 같이 표현이 가능하며 박스내부의 파라미터만으로 표현이 가능하다. b_i 성분은 Z축을 기준으로 한 회전벡터(O)이고 p_i 성분은 WS작업 지점의 이동벡터(T)이다.

$$A_{WS}^5 = \begin{bmatrix} n_x & t_x & b_x & p_x \\ n_y & t_y & b_y & p_y \\ n_z & t_z & b_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

식(6)과 식(7)을 이용하여 1축 링크단에서 WS까지의 링크관계를 정리하면 식(8)과 같이 정리 된다.

$$A_0^{WS} = A_5^0 A_{WS}^0$$

$$= \begin{bmatrix} \nabla & \nabla \\ \nabla & \nabla \\ \nabla & \nabla \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{array}{c|c} \textcircled{1} & \textcircled{2} \\ \hline b_x c_4 c_5 + b_y s_4 + b_z c_4 s_5 & b_x c_4 c_5 + b_y s_4 + b_z c_4 s_5 + d_1 \\ b_x s_5 - b_z c_5 & b_x s_5 - b_z c_5 + d_2 \\ -b_z s_4 c_5 + b_y c_4 + b_z s_4 s_5 & -b_z s_4 c_5 + b_y c_4 + b_z s_4 s_5 + d_3 \\ 0 & 1 \end{array} \quad (8)$$

∇ 는 WS가 이동(Translation)과 회전(Rotation)하는 데 있어서 필요하지 않는 요소이기 때문에 생략한 것이다. ①은 벡터 O, ②는 T를 나타낸다. ②의 성분 Pz는 레이저와 WS와의 초점거리가 된다. 우리는 이 초점거리를 항상 일정한 값으로 유지 시켜야 하는 조건으로, 이 거리를 0으로 고려하여 벡터 T와 O를 각각 분리하면 식(9)를 유도할 수 있다.

$$A_{ws}^0 \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad A_{ws}^0 \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

식(9)의 관계로부터 정기구학의 결과를 유도하면 식(10)과 같다.

$$p_x = -\frac{d_2}{s_5}, \quad p_y = -\frac{d_2 c_4 c_5 - d_1 s_5}{s_4 s_5}$$

$$b_x = -\frac{s_4 c_5}{s_4 s_5 + c^2 s_5}, \quad b_y = c_4$$

$$b_z = -\frac{s^2 4}{s_4 s_5 + c^2 s_5}$$

$$(s_i = \sin(\theta_i), c_i = \cos(\theta_i)) \quad (10)$$

제어기 데이터로 활용되는 역기구학 결과는 식(10)으로부터 식(11)과 같이 유도할 수 있다.

$$\theta_4 = \tan^{-1} \left(\frac{b_x c_5 + b_z s_5}{-b_y} \right) \quad \theta_5 = \tan^{-1} \left(\frac{b_z}{b_x} \right)$$

$$d_1 = -p_x c_4 c_5 - p_y s_4, \quad d_2 = -p_x s_5 \quad (11)$$

$$d_3 = p_x s_4 c_5 - p_y c_4$$

$$(s_i = \sin(\theta_i), c_i = \cos(\theta_i))$$

IV. CAFL^{VM}시스템 제어 알고리즘

CAD에 의하여 설계된 3차원 모델은 STL파일 형식으로 변환된 후 소프트웨어적으로 2차원 단층 절단과정을 거쳐 각각의 레이어로 분리되며, 각각의 레이어에서 결정된 위치 및 각도 데이터를 이용하여 정속경로제어와 경사각절단제어를 거쳐 실물 레이어들이 만들어지며, 그것들을 적층하여 최종 3차원 실물 모델이 제작된다.

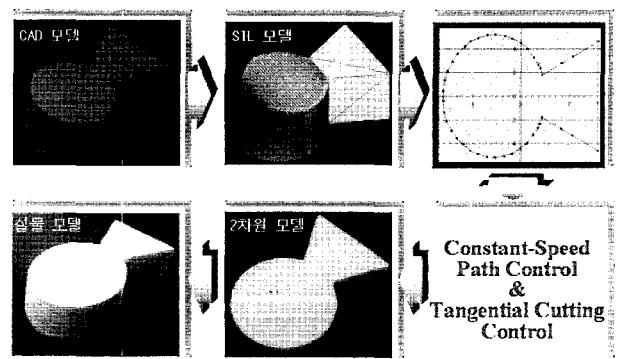


그림 6. CAFL^{VM} 공정제어 흐름도
Fig. 6. Control Process of CAFL^{VM}.

1. 정속경로제어 알고리즘

본 제어시스템은 CAD에 의해 가공물의 형상을 설계하여 폐싯(Facet) 렌더링(Rendering) 방법을 이용하여 그 데이터를 STL 포맷으로 저장하는 방법을 사용하고 있다.

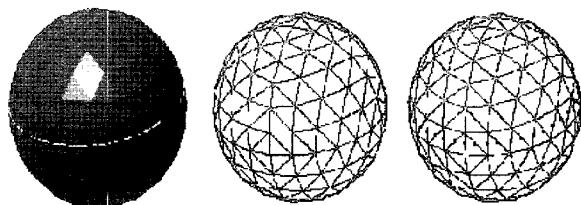


그림 7. 교차 폐싯과 교차점
Fig. 7. Cross Facet and Intersection.

폐싯(Facet) 렌더링(Rendering)은 실물 객체의 표면을 삼각형 모양으로 근사화하는 방법으로 빠른 연산을 할 수 있다는 장점을 지니고 있다. 이렇게 교차되는 삼각형들의 구조로 이루어진 객체에 일정한 방향으로 슬라이싱을 하여 슬라이싱면과 객체를 이루는 삼각형들간의 교차점을 2차원 단층 데이터로 저장 되며, CAFL^{VM} 시스템의 입력 파라미터로 사용된다.

폐싯 렌더링기법에 기초한 2차원 단층 데이터는 객

체의 표면이 삼각형구조로 이루어졌기 때문에 슬라이싱 면에 따라 각각 2차원 단층 데이터를 구성하는 데이터 간의 간격이 일정하지 않은 상황이 발생한다. 이것은 레이저 가공시간을 일정하게 유지시키는데 있어서 큰 단점으로 작용한다. 따라서 폐식 렌더링기법을 이용한 2차원 데이터는 직접 사용될 수 없으며 레이저빔의 정속가공을 위하여 새롭게 수정될 필요가 있다.

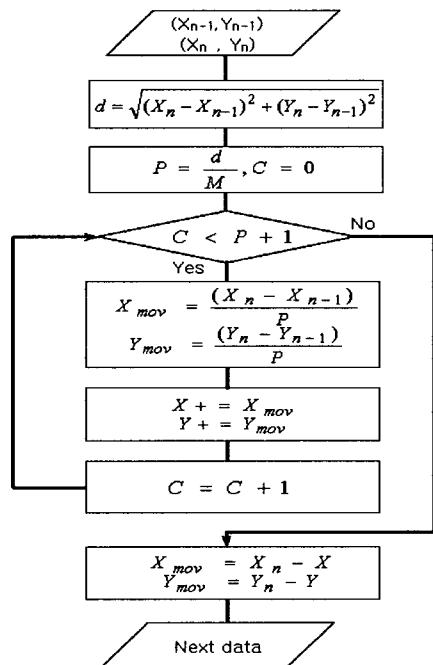


그림 8. 정속경로 제어의 흐름도
Fig. 8. Flowchart of Constant Speed Path Control.

정속경로제어를 위하여 레이저빔이 이동할 일정한 간격을 미세구간들로 나누어 정속을 확보한다. 그림 8은 정속위치제어 알고리즘의 흐름을 나타낸 순서도이다. 구간이동 데이터(X_{n-1}, Y_{n-1})와 (X_n, Y_n)를 이용하여 이동거리(d)를 계산한 후, d 를 미소분할하는 미소이동거리(M)를 결정하여 미소이동횟수(P)를 구한다. 다음으로 P 만큼 미소이동을 반복한다. 결국 평면상의 이동은 X 와 Y 축, 각각의 이동으로 이루어지기 때문에 X_{mov} 와 Y_{mov} 는 정속 경로제어의 지령값이다. X 와 Y 는 누적이동 거리를 알기 위한 내부 연산을 나타내고 있다. P 만큼의 반복 미소이동이 종료되면 미소이동거리보다 짧은 나머지 거리를 이동한 후 다음 데이터(X_n, Y_n , (X_{n+1}, Y_{n+1})를 입력받는다.

2. 경사각 절단제어 알고리즘

2DOF CAFL^{VM}시스템에 의한 가공물의 거친 표면정

밀도를 해결하기 위해서는 경사각 절단(Tangential Cutting)이라는 새로운 제어방식이 필요하다. 그림 9는 5DOF CAFL^{VM}시스템의 경사각 제어 흐름을 나타낸 것이다. STL파일에서 경사각 제어에 필요한 파라미터(Roll, Pitch)를 추출하여 경사각 제어 알고리즘을 거쳐서 네 번째와 다섯 번째 조인트의 적합한 지령으로 바뀌게 된다.

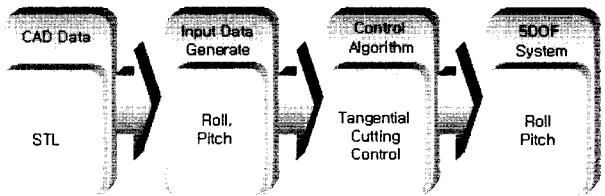


그림 9. CAFL^{VM}의 경사각 제어 구조
Fig. 9. The Architecture of TCC(tangent-cutting control).

경사각 절단제어 파라미터는 그림 10에서 볼 수 있듯이 슬라이싱 면에 존재하는 데이터를 기준으로 기본절단경로(Base Cutting Path)를 결정하고, 경로상의 경사각을 계산한다. 그 경사각으로부터 Roll과 Pitch 성분의 파라미터를 추출한다.

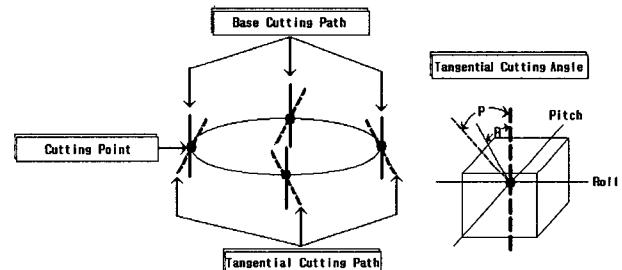


그림 10. 경사각 제어성분의 생성
Fig. 10. Generation of TCC Parameters.

정속제어를 위한 미소이동기법으로 인한 데이터량의 증가에 대응하여 각도입력 파라미터의 수정이 필요하다. 경사각 제어 파라미터는 정속위치제어 알고리즘의 X 축과 Y 축이 이동하는 전체 거리에서 미소거리가 차지하는 비율만큼 데이터간의 이동 각도를 세분화 하며 이동한다.

$$P_d = R \times \tan(P_a) \quad PR_d = P_d \times \cos(R_a) \quad (12)$$

R : WS의 원점과 각 데이터 지점과의 거리

P_a : Pitch Angle

R_a : Roll Angle

P_d : Pitch Angle에 의한 초점 보상거리

PR_d : Pitch와 Roll에 의한 초점 보상거리

R : WS의 원점과 각 데이터 지점과의 거리

레이저빔 가공에서 일정한 초점거리를 유지하는 것도 정속 가공만큼이나 재료물의 가공도에 있어서 상당한 영향을 준다.

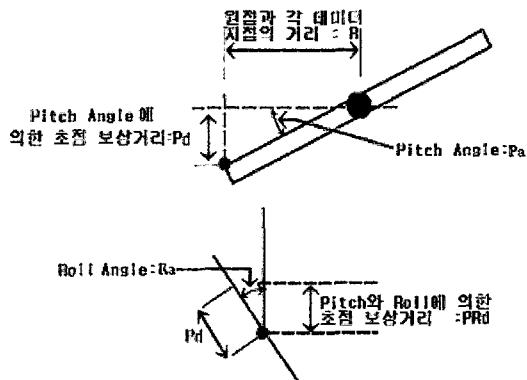


그림 11. 초점거리 연산 방법

Fig. 11. A Solution for the Laser Focal Distance.

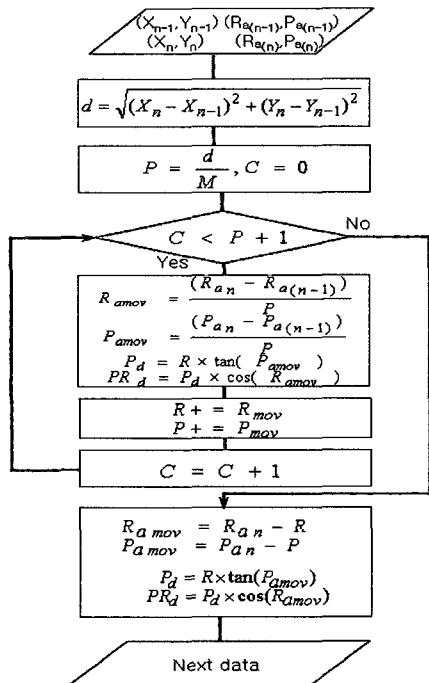


그림 12. 경사각절단제어 흐름도

Fig. 12. Flow Chart of TCC(Tangent -Cutting Control).

본 시스템은 레이저빔이 작업영역 위에 수직으로 고정되어 있기 때문에 작업영역을 움직여서 가공을 하는 특징을 갖고 있다. 이러한 점은 경사각 가공에 있어서 레이저빔의 초점거리가 변할 수 있다는 것을 의미하며, 일정한 초점거리의 유지를 위한 제어가 필요하다. 초점 거리를 위한 제어방법으로 Roll과 Pitch의 회전(Rotation)과 동시에 Z축의 이동으로 레이저와 가공물 사이의 초점거리를 일정하게 유지시켜준다.

Roll과 Pitch의 각도변화에 의한 레이저의 초점거리는 간단한 삼각함수를 사용하여 보상거리를 연산해 낼 수 있다. 그림 11과 식(12)에 의해 최종 초점 보상거리인 PR_d 의 연산 과정을 보여주고 있다. 그림 12는 경사각절단제어 흐름을 나타낸다.

V. 실험 및 결과

1. CAFL^{VM} 시스템의 시뮬레이션

그림 13은 실험대상 샘플의 2차원 단면 데이터이다. 그림의 왼쪽 원 부분과 오른쪽 사다리꼴 부분을 나누어서 확인하면 원 부분은 데이터 간격이 비교적 일정하게 유지되는 반면, 사다리꼴 부분의 경우 데이터 간격이 원 부분보다 상당히 떨어져 있으며 일정한 거리를 유지하지도 않는다.

데이터간의 간격을 일정한 미소거리로 나누기 위하여, 데이터와 그 다음 데이터간의 간격을 조금씩 조정하는 방법을 사용하였다. 정속제어용 변환데이터 결과를 그림 14에서 보여주고 있다. 초기 입력 위치데이터와 비교하여 원 부분과 사다리꼴 부분의 데이터 간격이 일정하게 유지되어 정속 레이저빔 가공이 가능해진 반면, 데이터의 증가로 인한 연산량의 증가, 그리고 지나

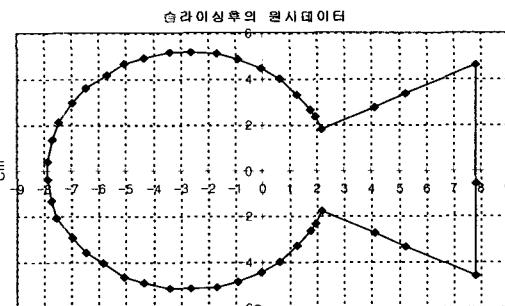


그림 13. 슬라이싱후의 원시데이터

Fig. 13. Original Data After Slicing.

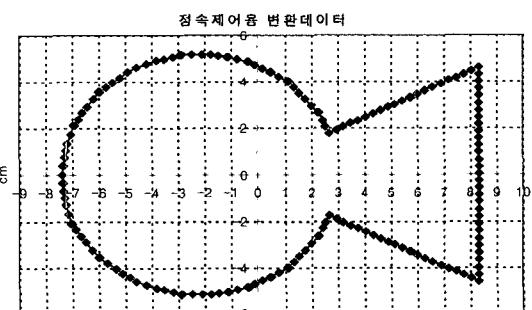


그림 14. 정속제어용 변환데이터

Fig. 14. Modified Data for Constant-Speed Control.

치게 짧은 거리의 미소거리로 구성될 경우 기계적인 응답성의 한계에 의해 정밀 가공이 힘들어지는 문제점이 나타난다. 따라서 미소거리는 앞의 2가지 문제점을 고려하여 적절한 타협(Trade-Off)점이 필요하다.

그림 16은 앞서 언급된 정속경로제어에 의해 증가된 데이터에 대응하여 그림 15의 데이터를 수정한 것을 나타내고 있다. 그리고 Roll과 Pitch의 회전(Rotation)에 의해 변화된 초점거리를 보상하는 제어 파라미터가 추가되어 있으며, Roll과 Pitch의 각도 변화에 따라 초점거리 보상 값이 변하는 것을 확인 할 수 있다.

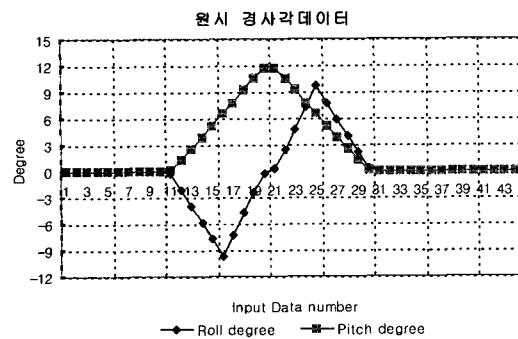


그림 15. 원시 경사각 데이터

Fig. 15. The Original Data of Tangent Angle.

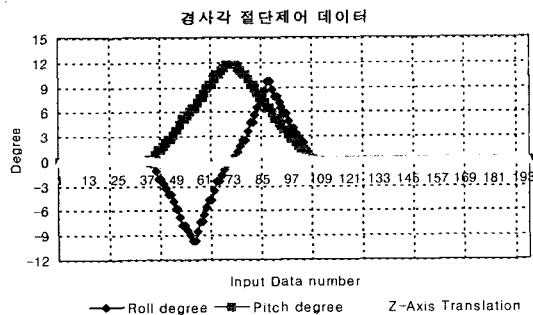


그림 16. 경사각 절단제어용 수정 데이터

Fig. 16. The Modified Data for TCC.

경사각 절단제어 파라미터 생성방법에 의한 Roll과 Pitch의 회전각(Rotation Angle) 데이터를 나타내는 것을 그림 15에서 볼 수 있다.

2. CAFL^{VM} 시스템 실험

(가) 2DOF CAFL^{VM} 시스템 실험

CAFL^{VM} 시스템의 X축은 100W AC서보 모터, Y축은 200W AC서보 모터를 사용하였고, 제어프로그램에 의하여 단면을 절단하는 레이저 발생장치는 20W용량의 CO₂ 레이저를 사용하였다. 6개의 리미트센서(Limit Sensor)를 사용하여 흡 위치 확보와 작업영역 밖에서는

자동적으로 비상정지를 할 수 있도록 하였다. 인터페이스 보드와 IP(Industry Pack) 모듈간의 데이터 송수신은 IP 버스를 사용한다. 제어부는 윈도우즈 NT를 기반으로 구축하였으며 중앙처리장치 보드와 입/출력 제어 신호를 발생시키는 I/O 보드로 구성이 되어 있다. 중앙 처리 장치로는 TMS32C44 DSP 컨트롤러를 사용하여 고속연산이 가능하도록 하였다. 인터페이스 보드는 4장의 IP 모듈을 탑재할 수 있으며, DSP 보드와 CAFL^{VM} 시스템과의 인터페이스를 통하여 데이터들을 입출력 할 수 있다. 인터페이스 보드에는 12비트 A/D 컨버터 및 16비트 D/A 컨버터와 24비트 카운터 모듈, 8채널의 디지털 I/O 보드가 탑재되어 있다. DSP 보드와 인터페이스 보드간의 데이터 송수신은 DSP Link3 버스를 사용하였다.

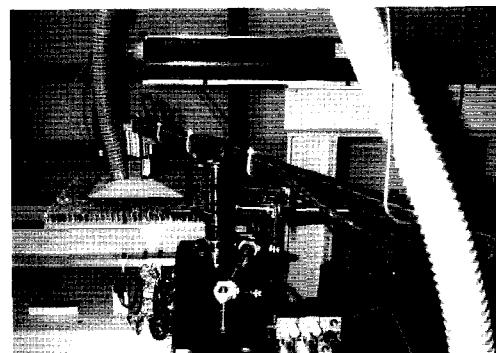


그림 17. 2자유도 CAFL^{VM} 시스템

Fig. 17. 2DOF CAFL^{VM} System.

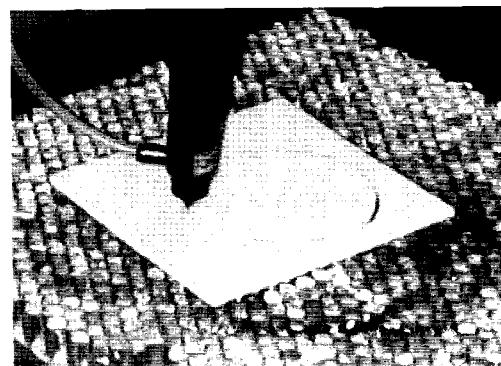


그림 18. 정속경로제어의 결과

Fig. 18. A Result of Constant-Speed Path Control.

본 논문에서 제작한 임의형상제작시스템 CAFL^{VM}을 그림 17에서 볼 수 있다.

그림 18은 정속위치제어 알고리즘으로 2DOF CAFL^{VM} 시스템의 작업영역에서 레이저 가공과정을 보여주고 있으며, 작업대는 레이저 가공을 위한 허니컴(Honeycomb)구조의 재료물로 구성되었다.

(나) 5DOF CAFL^{VM}시스템 실험

본 논문에서 설계한 5DOF CAFL^{VM}시스템은 그림 19과 같이 WS(Work-Space)의 위치이동을 담당하는 X(400W), Y(400W)축, WS와 레이저간의 초점거리를 담당하는 Z(200W)축, 경사 가공을 담당하는 Roll(400W), Pitch(100W) 회전축으로 구성되어 있다.

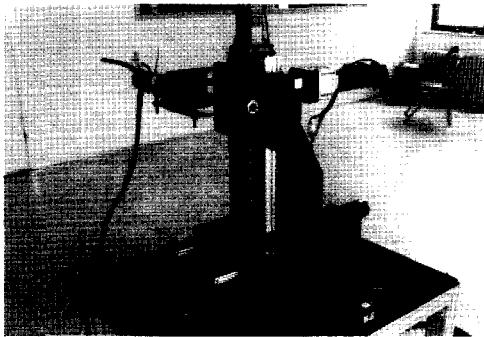
그림 19. 5자유도 CAFL^{VM} 시스템Fig. 19. 5DOF CAFL^{VM} System.

표 2에서 각 구동부와 연결부의 사양을 나타내고 있다. 각 축의 양극단에 리미트센서(Limit Sensor)는 디지털 I/O 보드와 연결되어 홈 위치와 작업환경을 벗어난 경우 자동으로 멈출 수 있는 기능을 수행하도록 하였다. 시스템의 기구부 제어를 담당하고 전원 공급 및 입출력 신호를 담당하는 제어부는 각 조인트 구동용 서보드라이브, 입출력 신호 케이블이 연결되는 커넥터, 전원 공급 장치 및 안전용 릴레이 시스템 등이 설치되어 있다.

표 2. 5자유도 CAFL^{VM}의 기구부 사양Table 2. Mechanical Specification of 5DOF CAFL^{VM}.

	Rated Power	Reduction Ratio	Pitch(mm)/rpm	Brake
X	400(W)	1/1	10(1 rotation)	NB
Y	400(W)	1/1	10(1 rotation)	NB
Z	200(W)	1/1	10(1 rotation)	B
Roll	400(W)	1/15	3000rpm/10 volt	NB
Pitch	100(W)	1/10	3000rpm/10 volt	B

(NB:Non Brake, B:Use Brake)

그림 20은 2자유도 CAFL^{VM}과 5자유도 CAFL^{VM}에 의하여 각각 제작된 3차원 실물 사진이다. 좌측이 2DOF 실험 결과물이고, 우측이 5DOF 실험 결과물이다. 사진에서 볼 수 있듯이 좌측의 샘플은 정속위치제어에 의하여 레이저 범의 정확한 2차원 절단을 통하여 정밀한 2차원 모형을 만들어냈다. 그러나 레이저빔의

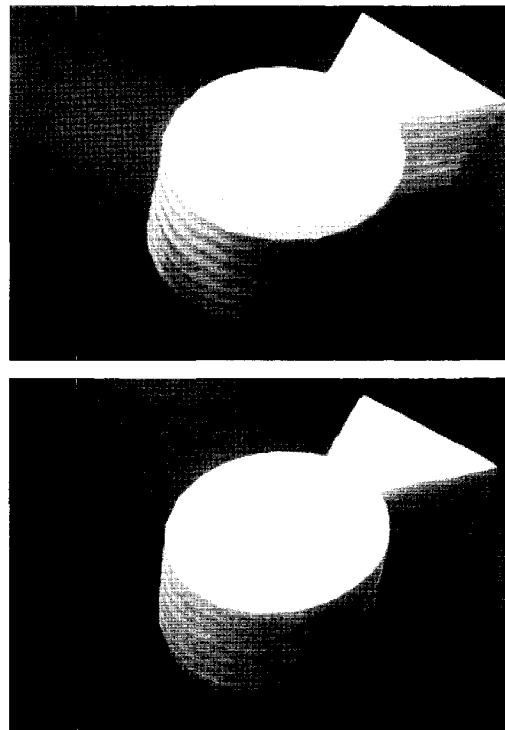


그림 20. 2자유도 가공 샘플(상)과 5자유도 사각절단 가공 샘플(하)

Fig. 20. The Fabricated Samples of 2DOF CAFL^{VM} and 5DOF CAFL^{VM}.

수직가공에 의해 레이어와 레이어 사이의 위치 차이로 인한 계단 현상으로 전체적인 샘플의 표면이 거친 형태를 확인 할 수 있고, 우측의 샘플은 레이저의 경사각절단가공에 의해서 레이어와 레이어의 크기 차이에 의한 계단현상을 보상하여 2DOF 시스템의 샘플의 표면보다 매끄러운 표면이 나타남을 확인할 수 있다.

VI. 결 론

본 논문에서 설계한 CAFL^{VM}(Computer Aided Fabrication of Lamination for Various Material)은 레이저에 의한 2차원 절단 가공 방식을 이용하여 다양한 재료를 3차원의 정밀 형상으로 가공하는 새로운 임의형상제작시스템이다. 정속위치제어 알고리즘과 그것을 2자유도 CAFL^{VM}에 구현함으로써, 레이저빔의 경로(Path) 이동시 정속을 확보하지 못하여 발생하는 모든 문제를 해결하였다. 그러나 2자유도 시스템의 레이저 수직가공법 때문에 거친 표면정밀도 문제가 발생하였고, 그것을 해결하기 위한 새로운 경사각절단제어기와 5자유도 CAFL^{VM}을 개발하였다.

본 논문에서 제작한 임의형상제작시스템 CAFL^{VM}은

보다 높은 자유도를 갖기 때문에 정밀한 제어를 위해 기구적인 해석을 시도하였고, 그에 따른 정속위치 및 경사각절단제어기를 구현하였다. 이에 따라 기존 시스템의 단점이었던 표면의 계단과 현상으로 인한 표면정밀도 문제를 극복하여 보다 실물에 가까운 시제품을 완성하였다.

CAFL^{VM} 시스템의 특성상 레이어의 지속적인 적층이 필요하므로 이송 장치와 연계한 자동화 시스템을 구현하여 능률적인 작업 환경을 조성하였고, 기존의 임의형상제작시스템보다 작업 안정성을 높였다. 또한 이러한 경사절단가공 방법과 통합자동화구현은 임의형상제작시스템의 우수성 확보와 다른 레이저응용시스템의 제작 기술 및 통합자동화에도 적용될 수 있을 것으로 본다.

참 고 문 헌

- [1] R. H. Crawford and J. J. Beaman, "Solid Freeform Fabrication: A New Manufacturing Paradigm," IEEE Spectrum Magazine, Feb. 1999.
- [2] Lee, C. H., T. M. Gaffney, and C. L. Thomas, "Soft Tooling for Low Production Manufacturing of Large Structures," in Solid Freeform Symposium Proceedings. University of Texas at Austin, Austin, Texas, pp. 207-214, Aug. 1996.
- [3] Chua chee kai, Leong kah Fai, Nanyang Technological University "Rapid Prototyping: Principles& Applications in Manufacturing" John Wiley & Sons, Inc. June. 1996.
- [4] Wesley E. Snyder "Industrial Robots: Computer Interfacing and Control" in differential motions and the jacobian pp.151-175, in Path control pp.178-200, Prentice-Hall, 1985.
- [5] Brady, M. "Basics of robot motion planning and Control." in Robot motion, pp.1-50, MIT Press, 1983.
- [6] Weiss, L., Prinz, F., Neplotnik, G., Padmanabhan, K Schultz, L. And Merz, R., "Shape Deposition Manufacturing of Wearable Computers," in Solid Freeform Symposium Proceedings, University of Texas at Austin Austin, Texas, pp. 31-38, Aug. 1996.
- [7] P.Bonaldi and C.Barlier, "Examination of Various Stochastic Algorithms Research on Placement Methods Dedicated to the Rapid Prototyping Process: Strato- Conception "Proceedings of the 6th European Conference on Rapid Prototyping and Manufacturing, Nottingham, UK July 1997.
- [8] Jacobs, P., "Stereolithography 1993: Epoxy Resins, Improved Accuracy and Investment Casting", Proceedings of the Fourth International Conference on Rapid Prototyping, Dayton, OH, pp.249-262, 1993.
- [9] Y. Zheng and W. S. Newman, "Software Design Challenges for Computer-Aided Manufacturing System Nottingham, UK, July 1997.
- [10] E. A.Griffin, J Daufenbach, and S. McMillin, "Desktop Manufacturing: LOM vs Pressing," Am. Ceram. Soc. Bull 1994.
- [11] Ballou, Kevin R., "Precise Friction Modeling and Compensation in Robot Control", M.S.thesis in Department of Electrical Engineering and Applied Physics, Case Western Reserve University, 1990.
- [12] Beattie, M., "Nonlinear Modeling and Control of an Industrial Robot", M.S. thesis in Department of Electrical Engineering and Applied Physics, Case Western Reserve University, 1989.
- [13] Zong, G., Wu, Y., Tran, N., Lee, I., Bourell, D. L., Beaman, J. J. and Marcus, H. L., "Direct Selective Laser Sintering of High Temperature Metals", Proceedings of the Solid Freeform Fabrication Symposium, University of Texas at Austin, Austin, Texas, pp.72- 85, 1992.
- [14] Paredis, C. J. J., Khosla, P. K., "Kinematic Design of Serial Link Manipulators from Task Specification", The International Journal of Robotics and Research, 1993. 12(3): pp.274-287.
- [15] Van Willigenburg, L. G., "Computation and Implementation of Digital Time-Optimal Feedback Controllers for an Industrial X-Y Robot Subject to Path, Torque, and Velocity Constraints", The International Journal of Robotics and Research, 1993. 12(5): pp. 420-433.

저 자 소 개



정 용 래(학생회원)
2002년 순천향대학교 제어계측
공학과 졸업
2003년 순천향대 정보제어공학과
졸업(석사).
현재 순천향대학교 정보제어
공학 과정(박사)

<주관심분야: 로봇위치 제어, 임베디드 시스템,
신호처리>



김 승 우(정회원)
1987년 연세대 전자공학과 졸업.
1989년 동 대학원 전자공학과
졸업(석사).
1989년 ~ 1990년 삼성종합기술원
근무.
1994년 ~ 현재 순천향대학교 정보
기술공학부 부교수.
1998년 ~ 1999년 미국 Case Western Reserve
University 방문교수.
<주관심분야: 로봇 응용 기술, 퍼지제어시스템,
자동화기술>

