

다중재료용 고속 임의형상가공시스템의 개발

고민국, 영태준, 주영철, 공용해, 천인국, 방재철, 김승우
순천향대학교

Development of Agile SFFS(Solid Freeform Fabrication System)
for a Wide Variety of Engineering Materials

Minkook Ko, Taljoon Um, Youngcheol Joo,
Yonghae Kong, Ingoon Chun, Jaecheol Bang, Seungwoo Kim
Soonchunhyang University

Abstract - The objectives of this paper include the development of an agile prototype of SFFS, the CAFL^{VM}(Computer Aided Fabrication of Lamination for Various Material), which is suitable for the multi-item and small-quantity production and various material fabrication. This paper includes remodeling of the layer slices for the 2D cutting, supplementing information of the layer slices and developing process conditions to fabricate products of various shape. And also includes developing control hardware as well as software by enhancing DOF of the manipulator to 3 degree for the precise 2D cutting. It will generate optimal layer trajectory considering the dynamic characteristics of the laser beam. The system can be used as a competitive agile prototype system in terms of various materials, fabrication speed, and accuracy by CAD modeling, precise layer slicing, material development, robot path control, and optimization of the support structure.

이어 이송장치를 설계·제작하고 적층대 및 서포트부를 설계·제작한다. 그리고, 3자유도의 로봇제어를 설계하여 H/W 및 S/W를 통합하고, 로봇기구부와 제어기 사이의 안정된 인터페이스를 구축하며, 레이저와 제어 프로그램과의 상호협조 방법을 모색한다.

2. 본 론

2.1 CAFL^{VM}의 구조

CAFL^{VM}의 전체적인 구조를 살펴보면 CAD 모델링을 통하여 형상의 3차원 모델링(자체설계, 인터넷, 3D스캐너에 의한 설계)된 것을 2D 형상으로 레이저화(적용레이어 분할, 분할방향의 최적화)한 후 각 레이어의 제적정보를 제어프로그램에 전송하면 기구부의 정속 경로제어에 의해 레이저로 정밀·고속·경사절단 한다. 절단된 레이어는 이송장치의 정밀제어를 통해 쌓아 올리고 균일한 압력에 의해 레이어간 긴밀한 접합형성이 이루어진다. 가압적층된 레이어를 소결시켜 결합시킴으로써 모든 공정이 끝나게 된다.

1. 서 론

임의형상가공시스템 (SFFS: Solid Freeform Fabrication System)은 미국을 포함한 외국의 몇 개 기업에서 고속원형제작(rapid prototyping) 개념으로 상품화하고 있지만, 아직 많은 기술적인 문제를 가지고 있을뿐만 아니라 특히 사용 가능한 재료의 종류 및 형태가 제한되므로 금형제작의 추가 공정이 필요하다. 다품종 소량생산 환경에 적합하고 금속을 포함한 다양한 재료를 자유롭게 형상화할 수 있는 패속원형제작(agile prototyping)을 위한 새로운 방식이 필요하다. 본 연구에서는 재료 가공용 패속 SFFS인 CAFL^{VM}(Computer Aided Fabrication of Lamination for Various Material)의 개발을 주된 연구목표로 하고 아울러 개발된 시스템의 검증과 적용분야 확보를 위하여 다중재료를 사용하여 샘플을 제작한다. 논문의 내용은 CAD 시스템 구축을 위하여 CAD프로그램에 STL변환기를 장치하여 STL파일을 생성하고, STL 검정기 및 수정기를 개발하여 STL 레이어 생성기를 제작한다. 또, 시스템 특성에 맞는 재료의 선정 및 개발을 위하여 테이프캐스팅 및 압축성형이 적합성을 시험하고, 레이저 절단, 가압적층조건 및 소결공정조건을 개발한다. 로봇제어의 설계를 위하여 간편하고 효율적인 로봇제어의 개발환경을 구축하고, 로봇기구학 소프트웨어를 설계한다. 아울러 레

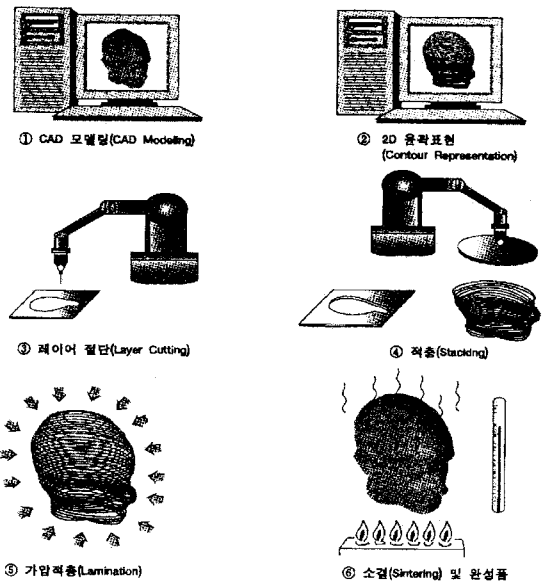


그림 2-1 CAFL^{VM}의 형상공정도

2.2 CAD 시스템 구축

2.2.1 STL 뷰어, 검증, 수정기 제작

제작된 STL 뷰어에서는 키보드를 이용하여 형상을 회전하고 X, Y, Z축 방향으로 자유자재로 움직일 수 있게 구현하였다. 또한, 축소·확대 기능도 가능하도록 구현하였다. STL 파일의 상태를 검증하기 위하여 검증기와 오류 수정기를 제작하였다. 패킷의 중복은 STL 자료 구조 때문에 흔히 발견할 수 있는 문제이다. 이러한 문제는 불필요한 시간 비용을 초래하여 시스템의 성능을 저하시킨다. 구현된 시스템에서는 STL 파일을 읽어들이면서, STL 검증기와 STL 수정기를 호출하도록 구현하였다. 새로운 STL 파일을 읽어들이 때마다 자동적으로 오류를 정정하여 버퍼(buffer)에 저장하도록 구현하여 문제를 해결하였다.

3D 형상을 확대할 경우, 패킷 사이의 공극이 생기는 문제는 꼭지점의 3D 좌표 값이 정확하게 일치하지 않는 데, 원인이 있다. 이런 문제를 해결하기 위해 정밀도를 설정하는 문제를 고려할 수 있지만, 부가적인 시간이 소요되기 때문에 시스템의 성능을 저하시킨다. STL 수정기에서 수행하도록 설계된 또 다른 중요 기능은 패킷의 세 꼭지점을 조사하여 법선 벡터 값의 오류를 정정하도록 하는 것이었다. 구현된 검증기에서는 이러한 다양한 오류를 검출하고 STL 수정기에서 이러한 오류를 수정할 수 있도록 설계하였다.

2.2.2 레이어 생성기 개발 및 객적 개발

STL 파일로 표현되는 3D 모델에서 레이어의 생성은 먼저 평면과 교차하는 패킷의 부분 집합을 찾아야 한다. 그림 2-2와 같이 평면과 교차하는 패킷들은 임의의 두 꼭지점의 좌표 값을 평면의 방정식에 대입하여 곱한 결과가 음수가 되는 조건을 가진다.

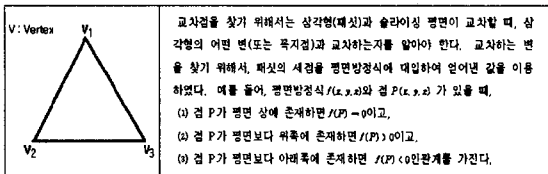


그림 3-2 평면과 교차하는 패킷의 조건

STL 레이어 생성 알고리즘이 실시간으로 화면상에 레이어를 표시하게 하기 위해 교차 패킷을 별도의 버퍼에 저장하여 해당 패킷에 손쉽게 접근할 수 있도록 해주는 참조 버퍼(index buffer)를 사용하였다. 또한 그림 2-3과 같은 특수 경우 평면 P와 접하는 패킷 $\triangle A, \triangle B, \triangle C, \triangle D, \triangle E, \triangle F, \triangle G, \triangle H$ 중 어느 패킷이 교차하는지 결정하기 어려운 모호성(ambiguity)을 해결하기 위해서 그림 2-4와 같이 2가지 조건을 만족하는 패킷을 선택하였으며 그 결과를 그림 2-5에 보였다. 개발된 레이어 생성기에 의해 평면과 교차하는 패킷의 부분 집합과 교차점들을 그림 2-6에 보였다.

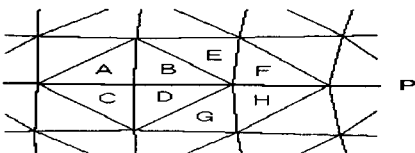


그림 2-3 교차패킷 선택시 발생하는 특수 경우

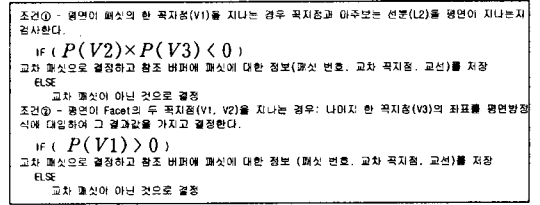


그림 2-4 교차패킷 선택 기준

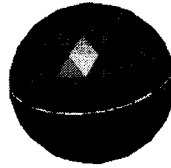


그림 2-5 배제결과

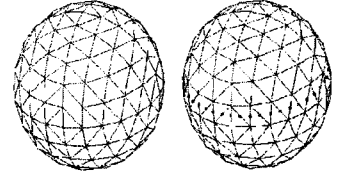
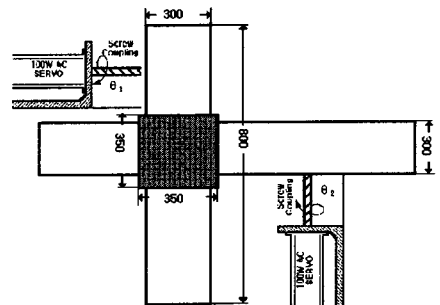
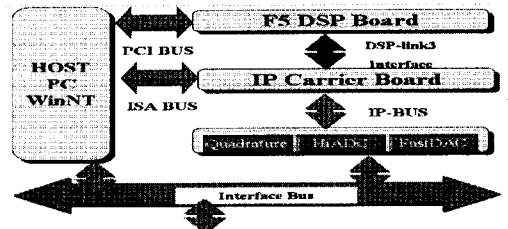


그림 2-6 레이어 교차점

생성된 레이어는 인접한 패킷들의 관계를 추론하여 교차점들을 시계방향(또는 시계반대방향)으로 재배열하여 객적의 정보를 가지는 포맷으로 변환되어 절단 제어기에 제공한다.

2.3 CAFL^{VM} 제어환경의 구축

CAFL^{VM}의 제어환경은 윈도우 NT를 기반으로 구축하였으며 TMS32C44 DSP 프로세서를 사용하여 고정도의 제어가 가능하도록 하였다. IP(Industry Pack) 캐리어 보드는 4장의 IP 모듈을 탑재할 수 있으며, DSP 보드와 RP 머신과의 인터페이스를 통하여 데이터들을 입출력할 수 있다. 제어환경의 구성도는 그림 2-7에서 볼 수 있다.



2-7 CAFL^{VM}시스템 제어환경의 구성도

제어실험 환경시스템에서 IP 캐리어보드의 슬롯1과 슬롯2에는 타이머/카운터 기능이 있는 엔코더회로가 설계되어 있고, 슬롯3에는 D/A컨버터가 슬롯4에는 A/D컨버터가 장착되어 있다. RP 머신까지의 명령 경로는 호스트 PC에서 PCI 버스를 통하여 DSP 보드에게 명령이 전달되어지고, 인터페이스되어 있는 IP 캐리어보드가

RP 머신에 명령을 전달한다. 잘못된 명령값으로 오동작 및 기계적 파손을 막기 위해서 호스트 PC에서 RP 머신으로 직접 정지명령을 줄 수 있도록 하였다.

CAFL^{VM}의 초기화 프로그램은 윈도우즈용 비주얼 C++를 사용하였다. 우선 축을 설정하고 제어축의 지연(Delay), 위치(Position), 속도(Velocity), 가속(Accel), 감속(Decel)을 설정할 수 있다. 속도 프로파일은 사다리꼴, S 곡선 등을 적용할 수 있으며, ACCEL, DECEL값을 다르게 적용할 경우 비대칭 사다리꼴, S 곡선 프로파일로 움직일 수 있게 설계하였다. 또한 모든 축의 위치 및 속도를 실시간으로 모니터 할 수 있도록 하드웨어적으로 감지한 위치 및 속도를 표시해준다. 머신제어의 초기화 소프트웨어 주화면을 그림 2-8에서 볼 수 있다.

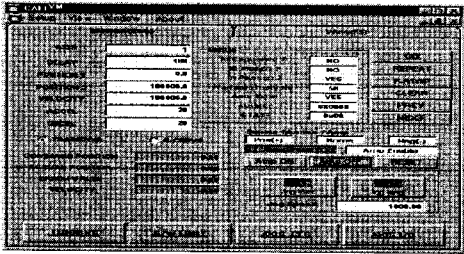


그림 2-8 초기화 프로그램의 주메뉴 화면

2.4 정속 경로제어기(Path Controller)의 개발

2.4.1 미소변위기구학 해석

θ_1 과 θ_2 의 미소변위 및 속도분석을 위하여 야코비안(Jacobian) 행렬을 구하고, 그것을 이용하여 링크 간의 속도 관계식을 구하면 다음과 같다. 여기서 RP 머신 서포트부의 중심점 속도 벡터는 $v = [v_x, v_y]^T$ 로 정의한다.

$$J = \begin{bmatrix} -l_1 \sin \theta_1 - l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) & -l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \\ l_1 \cos \theta_1 + l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) & l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

$$\frac{dv_x}{dt} = \frac{-v_y \cos(\theta_1 + \theta_2) + v_2 \sin(\theta_1 + \theta_2)}{\sin \theta_2} \quad (2.2)$$

$$\frac{dv_y}{dt} = \frac{v_x [\cos \theta_1 + \cos(\theta_1 + \theta_2)] + v_2 [\sin \theta_1 + \sin(\theta_1 + \theta_2)]}{\sin \theta_2} \quad (2.3)$$

CAD와의 인터페이스에서 모든 궤적은 벡터형태로 변형하여 궤적제어부로 전송된다. 벡터는 직선(Line)과 원호(Arc)로서 표현되며, 그것을 궤적의 경로제어기에서는 다시 직선으로 분할하고 인터플레이션하여 경로제어를 완성한다. 그림 2-9는 레이저의 절단 궤적을 예들 들어 설명하고 있다.

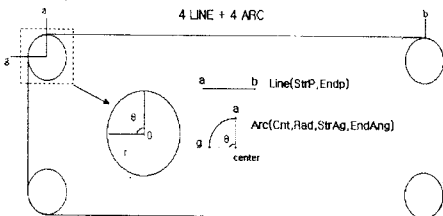


그림 2-9 CAD 인터페이스에서의 라운딩 사각형 궤적 예

CAFL^{VM}시스템의 경로제어는 궤적의 위치 및 속도의 정확성을 요구하므로 다음의 세가지 특성을 만족할 수 있도록 알고리즘을 개발하였다.

- 1) 모든 궤적에서 위치, 속도, 가속도의 연속성 확보
- 2) 주어진 궤적에 경로를 정확하게 움직이는 제어의 정확성
- 3) 중간경로에서 연속 경로를 예측하여 급격한 궤적변화에 대한 적용성

본 논문에서 구현한 경로제어의 기본 전략 알고리즘을 6단계로 나누면 다음과 같이 설명할 수 있다.

Step 1 궤적을 k개의 세그먼트로 분할한다.

Step 2 세그먼트들의 카티산(Cartesian) 좌표를 각 조인트 각도의 출발점과 끝점의 위치로 변환한다.

Step 3 세그먼트 경로제어 시간을 결정한다. (여기서 i 는 1, 2이다)

$$T_{seg} = \max \frac{\theta_{i1} - \theta_{i2}}{\omega_i} \quad (2.4)$$

Step 4 T_{seg} 를 m개의 시간분할로 나누고, 나누어진 시간을 ΔT_{seg} 라고 한다.

$m = T_{seg} * f_{samp}$ 과 f_{samp} 은 샘플링 신호이다. (CAFL^{VM}에서는 50~60Hz)

Step 5 각 조인트에 대하여 ΔT_{seg} 동안 이동될 각도의 거리를 결정한다.

$$\Delta \theta_i = \frac{\theta_{i1} - \theta_{i2}}{m} \quad (2.5)$$

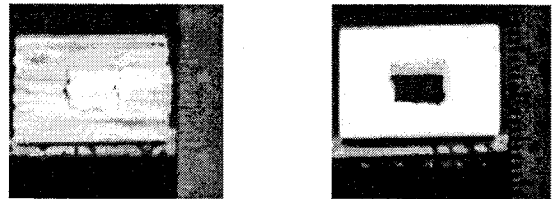
$$(\Delta T_{seg} = 1 / f_{samp})$$

Step 6 n번째 샘플링타임에서 모터는 셋포인트 $n \theta_i$ 을 받아서 궤적제어를 시작한다.

2.5 실험 및 고찰

2.5.1 가압적층 및 소결

내부가 비워있는 형태와 같이 다양한 형상의 제품을 제조하기 위해서 임시층(fugitive layer)을 사용하였다. 즉, 테이프 적층시 필요한 곳에 임시층을 삽입하여 임시 지지층의 역할 및 압축공정시 균일한 압축전달체의 역할로 사용하고 소결공정시 완전히 연소시켜 제거하는 방식에 의해 다양한 형상의 제조가 가능하도록 하였다. 이러한 임시층에 적합한 재료로 전분가루를 선정하였다. 이 전분가루를 세라믹 그린테이프의 제조에 사용한 유기바인더 시스템과 혼합하여 테이프 형태로 제조를 하였다. 제조된 전분 테이프는 레이저에 쉽게 절단되었으며, 가압적층시 세라믹 그린테이프 사이에서 잘 적층되었다. 소결 전, 임시층이 세라믹 테이프 사이에 적층되어 있는 경우와 소결 후, 임시층이 완전 연소되어 내부가 빈 형상의 완성품으로 제작된 것을 그림 2-10에 나타내었다.



(a) 가압적층 후

(b) 소결 후

그림 2-10 임시층에 의한 다양한 형상의 제작 예

2.5.2 레이저 궤적절단

본 연구에서 제작한 시편을 초점거리 230mm의 회전 거울 방식과 초점거리 38mm의 이동 거울 방식의 장치를 이용하여 절단하였다. 두 방식 모두 25W 공랭식 CO₂ 레이저(미국 Synrad사)를 사용하였다. 그림

2-13 (a)는 회전 거울 방식으로 절단한 두께 1mm의 콘스타치 테이프로 절단이 잘 되었다. 이에 반해 그림 2-13 (b)는 두께 0.7mm의 세라믹 테이프를 절단이 거의 되지 않았다. 콘스타치 테이프는 세라믹 테이프에 비해서 레이저로 쉽게 절단되는 재료이므로 어느 방식의 레이저 가공기를 이용하는 문제가 되지 않지만 세라믹 테이프는 레이저의 강도가 절단의 주요 변수가 되는 것을 알 수 있었다. 이동 거울 방식으로 절단한 두께 0.5mm의 세라믹 테이프는 절단이 비교적 쉽게 되었는데, 이는 이동 거울 방식의 초점거리가 회전 거울 방식의 초점거리보다 6배 가량 짧아서 레이저 빔의 집중강도가 높아졌기 때문으로 판단된다.

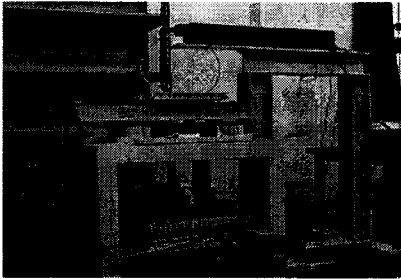


그림 2-11 CAFL^{VM}시스템

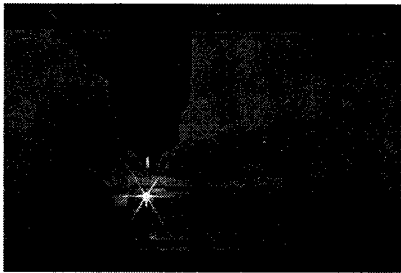
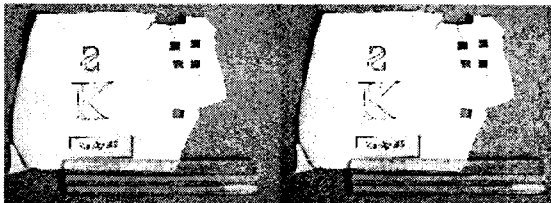


그림 2-12 레이저 가공모습



(a)콘스타치테이프(1mm)(b)세라믹테이프(0.7mm)
그림 2-13 회전 거울 방식의 레이저 가공기로 절단한 시편(그림의 차는 20cm자임)

3. 결 론

CAD 모델링에서는 3D 모델을 CATIA로 제작하여 STL 파일로 출력하였다. 출력된 STL 파일은 개발된 레이저 생성기에서 각각의 레이어로 분할되고, 분할된 레이어는 LDF 형식으로 변환되어 레이저 절단기에 전송되어 제품을 가공한다. 이를 위해 STL 뷰어는 아스키와 바이너리 형식 입력, 다양한 화면 표시모드, 확대축소, 객체 색상설정, 좌표축 표시, 광원 효과 등을 지원하고, 다양한 오류를 검출하고 오류를 수정할 수 있도록 설계하였다. STL 레이어 생성기는 3D 모델에서 평면과 교차하는 패킷들을 추출하고, 패킷 내에서 교차점을 이진분할 알고리즘으로 구하였으며, 레이어 적용분할 기법

을 개발하여 적층 시간의 단축과 표면 거칠기 향상이 가능하게 하였다. 이렇게 생성된 레이어 정보는 절단기의 레이저빔이 직선 및 곡선 구간에서 일정한 속도로 진행하기 적합한 형태로 변환, 재배열되어 로봇제어기에 LDF의 형태로 제공하였다.

본 연구에서 사용한 재료로 세라믹을 선택하였으며, 각 세라믹 분말과 유기 바인더 재료와의 혼합으로 슬러리를 거쳐 진공챔버(vacuum chamber)에서 탈포(de-airing)공정을 거친 후, 자동테이프캐스터에 의해 그린테이프(두께 0.10.8 mm)를 제조하였다. 그리고, 레이저로 절단된 그린테이프를 적층한 후, 일축가압성형기로 100에서 120psi의 압력으로 1분간 유지시켜 일체형 형상으로 하였으며, 소결은 각각 Al₂O₃는 1580, ZnTiO₃는 900에서 2시간 하였다. 소결 후, 견고한 치밀체를 얻을 수 있었다.

로봇제어를 위해 CAFL^{VM} 제어환경을 구축하고, 초기화 시스템을 설계하고, 정속 경로제어기를 개발, 정속 경로제어 알고리즘을 개발하였다. 가공정밀도를 유지하기 위해서 레이저는 고정하고 재료가 고정되는 X-Y테이블을 제어하는 방식을 채택하였다. 최적의 레이저 가공기를 선정하여 X-Y 테이블에 부착하여 절단시험을 행하고, 절단할 재료를 지지하는 서포트부를 설계하였다. 절단된 단면을 이송하는 이송장치도 아울러 설계하였다. 활용범위면에서 다른 임의형상가공시스템보다 재료의 다양성, 제작속도, 정밀도 부분에서 경쟁력을 갖게 될 것이다.

(참 고 문 헌)

- [1] R. H. Crawford and J. J. Beaman, "Solid Freeform Fabrication: A New Manufacturing Paradigm," IEE E 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] J. D. Cawley, Z. E. Liu, W. S. Newman, B. B. Mathewson, and A. H. Heuer, "Al₂O₃ Ceramics Made by CAM-LEM Technology," *Solid Freeform Symposium Proceedings*, 9, Austin TX, 1995
- [4] 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.
- [5] P. Bonaldi and C. Barlier, "Examination of Various Stochastic Algorithms Research on Placement Methods Dedicated to the Rapid Prototyping Process: Stratocoception "Proceedings of the 6th European Conference on Rapid Prototyping and Manufacturing, Nottingham, UK, July 1997.
- [6] Y. Zheng and W. S. Newman, "Software Design Challenges for Computer-Aided Manufacturing, Nottingham, UK, July 1997.
- [7] E. A. Griffin, D. R. Mumm, and D. B. Marshall, "Rapid Prototyping of Functional Ceramic Composites," *Am. Ceram. Soc. Bull.*, 75 [7] 65, 1996.
- [8] E. A. Griffin, J. Daufenbach, and S. McMillin, "Desktop Manufacturing: LOM vs Pressing," *Am. Ceram. Soc. Bull.*, 73 [8] 109, 1994.
- [9] R. E. Mistler, "Tape Casting: The Basic Process for Meeting the Needs of the Electronics Industry," *Am. Ceram. Soc. Bull.*, 69 [6] 1022, 1990.
- [10] J. D. Cawley, A. H. Heuer, W. S. Newman, and B. B. Mathewson, "Computer-Aided Manufacturing of Laminated Engineering Materials," *Am. Ceram. Soc. Bull.*, 75 [5] 75, 1996.