

적응단면기법을 이용한 뇌모형제작

염상원[†] · 엄태준^{*} · 주영철^{*} · 김승우^{**} · 공용해^{**} · 천인국^{**} · 방재철^{***}
(2001년 11월 19일 접수, 2003년 2월 28일 심사완료)

Fabrication of a Brain Model Using the Adaptive Slicing Technique

Sang Won Yeom, Tai Joon Um, Yung Chul Joo, Seung Woo Kim,
Yong Hae Kong, In Gook Chun and Jae Chul Bang

Key Words: Rapid Prototyping(쾌속조형), Optimization(최적화), Adaptive Slicing(적응단면), Offset Contour(오프셋 윤곽선)

Abstract

RP(Rapid Prototyping) has been used in the various industrial applications. This paper presents the optimization techniques for fabricated 3D model design using RP machine for the medical field. Once the original brain model data are obtained from 2D slices of MRI/CT machine, the data can be modeled as an optimal ellipse. The objective of this study includes optimization of fabrication time and surface roughness using the adaptive slicing method. It can reduce fabrication time without losing surface roughness quality by accumulating the slices with variable thickness. According to the parameter tuning and synthesis of its effect, more suitable parameter values can be obtained by enhanced 3D brain model fabrication. Therefore, accurate 3D brain model fabricated by RP machine can enable a surgeon to perform pre-operation, to make a decision for the operation sequence and to perceive the 3D positions in prototype, before delicate operation of actual surgery.

1. 서 론

인체의 특정부분을 짧은 시간에 제작할 필요가 있을 때, RP(쾌속조형공정)를 이용하는 것이 유리한 경우가 많다. 특히 인간의 뇌모형을 RP로 제작하면 수술을 준비하는 의사가 사전모의수술용으로 사용할 수 있는 장점이 있다.

뇌 모형을 제작하기 위한 적층방법으로는 일정한 두께로 적층하는 일반적층방식과 기울기에 따르는 높이를 변화시키는 적응단면화방식이 있다.^(1,2)

기존의 RP(쾌속조형기법)를 이용한 연구에서는 적층두께를 일정하게 하거나 적응단면화방식인 경우라도 단면이 원형인 경우에 대한 연구가 대부분이었다.^(3,4)

본 논문의 연구 내용은 실제 뇌형상과 가까운 뇌모형의 제작을 위해 시간과 표면 조도를 개선할 수 있는 적층방법을 제안하고자 한다. 이를 위해 뇌모형의 단면을 실제와 가깝도록 모델링하고, 적응단면화 방식을 사용하였다.

적응단면화는 각각의 단면의 특성에 따라 두께를 달리하는 것을 의미한다. 윤곽선(뇌 종단면의 외곽선)의 기울기에 따라 두께를 달리하는 것이 합리적이므로 본 논문에서는 뇌의 종단면이 타원에 가깝다는 것을 이용하여 타원의 기울기에 따라 적응단면화 방식을 적용하려고 한다.

2. 뇌모형 모델링 및 적응단면화

[†] 책임저자, 회원, 순천향대학교 전기전자공학과

E-mail : tjoonum@sch.ac.kr

TEL : (041)530-1368 FAX : (041)530-1494

^{*} 회원, 순천향대학교 기계공학과

^{**} 순천향대학교 정보기술공학부

^{***} 순천향대학교 신소재·화학공학부

2.1 뇌모형 모델링

Fig. 1은 뇌의 종단면을 보이고 있다. 전체적인 윤곽을 타원으로 보는 것이 타당하다. 안쪽의 실선은 뇌의 종단면이며 점선으로 표시된 부분은 기준타원형을 90° 만큼 회전하여 타원의 장축과 단축을 비교하여 표시하고 있다.

Table 1은 실제 뇌의 데이터를 바탕으로 8개 단면(슬라이스)의 윤곽정보를 나타낸 것이다. 여기서 a는 타원 장축의 반지름, b는 타원 단축의 반지름, Real a는 실제 데이터의 반지름, e는 이심률($e = \sqrt{1 + b^2/a^2}$)을 나타낸다.

Table에 있는 e 값 중에서 대표적인 e 값을 선택해야 하나의 타원모형을 구할 수 있다. 그런데, 이 값들이 약간 차이를 보이고 있으므로 정밀도를 나쁘게 하지 않는 값을 선택해야 한다.

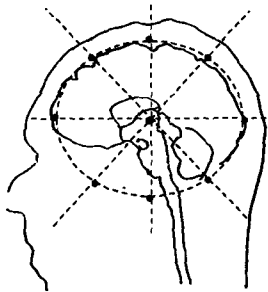


Fig. 1 Comparison of vertical-section with MRI data

Table 1 Vertical-sectional data of a brain model

| 종단면 | a | Real a | b | e | Ratio |
|------------|-------------|-------------|-------------|--------------|--------------|
| L62 | 41.0 | 41.0 | 34.0 | 1.299 | 1.206 |
| L56 | 40.5 | 40.5 | 33.0 | 1.289 | 1.227 |
| L50 | 40.0 | 40.0 | 31.0 | 1.265 | 1.290 |
| L46 | 39.0 | 39.0 | 30.0 | 1.262 | 1.300 |
| L38 | 36.0 | 36.0 | 26.0 | 1.233 | 1.385 |
| L32 | 32.0 | 32.0 | 24.0 | 1.250 | 1.333 |
| L26 | 27.7 | 22.0 | 21.0 | 1.254 | 1.319 |
| L20 | 23.7 | 17.0 | 18.0 | 1.256 | 1.317 |
| 평균 | 35.0 | 33.4 | 27.1 | 1.264 | 1.297 |

이러한 곡률의 차이를 감안하여 각 슬라이스 중에서 가장 이심률이 작은 1.233의 값(음영으로 표시된 부분)을 기준으로 하여야 더욱 정밀한 값을 가질 수 있다. 기울기가 완만하다는 것은 그만큼 많은 층을 가져야만 표면의 윤곽이 부드러운 곡선의 형태를 띠게 되므로 가장 완만한 기울기를 택하는 것이 좋다.

위와 같은 근거에 의하여 원에 적용하는 슬라이스 두께 L의 생성방법을 타원에도 적용할 수 있다.⁽⁵⁾ 원에 적용하는 방법은 이미 알려진 방법을 사용하고자 한다.⁽⁶⁾ Fig. 2에서 볼 수 있듯이 하나의 장축(a)으로 반지름이 길어지고 단축(b)에 대하여는 반경을 그대로 사용할 수 있다.

그러므로, 적응단면 반경($\Delta\rho$)의 길이가 변화하는 것을 측정해야하나 구의 반경 대신 $d \cdot \cos(\theta)$ 을 쓸 수 있다.

타원의 단면을 나타낸 Fig. 3에서 d의 길이 만큼 각각의 θ 의 값의 변화를 측정할 수가 있다.

그러므로, 다음 식을 생각할 수 있다.

$$\Delta\rho = d \cdot \cos \theta \tag{1}$$

L의 2차 방정식에서 ρ 대신에 $(\rho + \Delta\rho)$ 를 대입하면 다음과 같고

$$L^2 + 2(\rho + \Delta\rho) \sin \theta L - 2(\rho + \Delta\rho)\delta - \delta^2 = 0 \tag{2}$$

근의 공식을 사용하면 다음처럼 된다.

$$L = -(\rho + \Delta\rho) \sin \theta + \sqrt{(\rho + \Delta\rho)^2 \sin^2 \theta + 2(\rho + \Delta\rho)\delta + \delta^2} \tag{3}$$

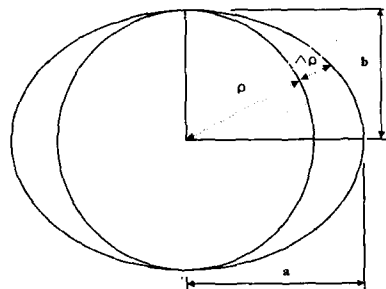


Fig. 2 Extension of the circle to an ellipse

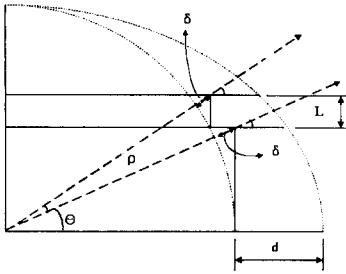


Fig. 3 Cross-sectional height of ellipse

위 그림에서 두께 \$L\$은 식 (3)에 의하여 결정된다. 각도 \$\theta\$가 커질수록 두께는 얇아지게 된다.

2.2 적층

2.2.1 적응단면기법

적응단면기법은 표면 기울기의 최대 수직방향 오차를 일정하게 유지함으로써, 균일한 두께의 적층 방식에 대한 보상으로써 표면의 균일함을 향상시킬 목적으로 사용된다. 앞서 말한 바와 같이 이심률의 가장 큰 값을 선택하여 가장 완만한 경사를 기준으로 삼기 때문에 그보다 급한 경사의 경우는 보다 정밀하고 부드러운 표면을 가지게 된다. 다만 초기 단면의 경우 곡률 반경이 크기 때문에 구형의 형상보다 초기치 면에서 두께가 커지는 단점이 있다. 하지만, 다음 층부터의 적층 시에는 구형의 형상보다 표면의 경사가 조밀해지며 기울기에 따른 두께변화에 의해 적층시간의 단축효과를 가지게 된다.^(8,9)

앞에서 Table 1의 빗금 친 부분의 Slice L38의 값을 직접 대입하면 Fig. 4와 같은 계단형태의 그래프가 그려진다. 최대 수직방향 오차의 크기(\$\delta\$)는 0.2를 기준으로 한다.

즉 위에서 한 층의 두께는 최대 수직방향 오차의 각도와 밀접한 관계를 가진다. 실제 적층시 곡면의 변화에 민감하게 반응하여 각각의 층을 각도에 맞추어 조절하는 기능을 가지게 된다.

각 층의 \$\theta\$ 값을 구하는 식은 다음과 같고

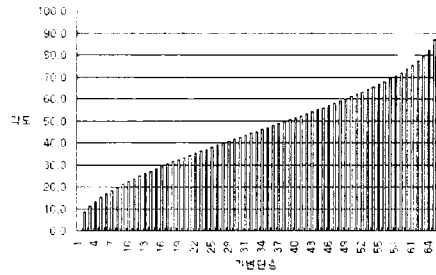


Fig. 4 Variation of adaptive angles

$$\theta = \sin^{-1}\left(\frac{L}{\rho}\right) \tag{4}$$

변화 각도를 측정하는 식은 다음과 같다.

$$\text{각도} = \theta * \frac{180}{\pi} \tag{5}$$

2.2.2 윤곽선 보정 및 구역 분할

뇌의 표면은 굴곡이 존재하고 또, 정수리 부분에서 내려다보는 위치에서 뇌를 보았을 때는 중앙 부위가 갈라져 있고 중반부도 여러 군데의 틈새가 나타난다. 이는 수평면을 기준으로 보았을 때 구역(partition)을 만들 수 있고 시술 부위만을 따로 정밀하게 제작함으로써 전체를 제작하는 것보다 제작시간을 감소시킬 수 있고 시술 부위 이외의 다른 면들은 전체 모양을 유지하는 틀로 생각할 수가 있다.

뇌는 좌 반구 및 우 반구로 나누어져 있으므로, 좌 반구만을 형성하고 우 반구는 외곽 형태를 유지하여 적층한다.

따라서, 좌 반구는 전체 면을 제작하고 특히, 우 반구는 윤곽면만을 고려하여 시간을 줄인다.

2.2.3 적 층

앞에서 정의된 적응단면화된 슬라이스들을 쌓아올려 뇌모형을 완성한다. 위에서 제시한 계산식들에 의해 Fig. 5에서처럼 근사화된 3D 모델을 얻을 수 있다. 최대 수직방향 오차의 기준값은 0.2 mm로 하였다.

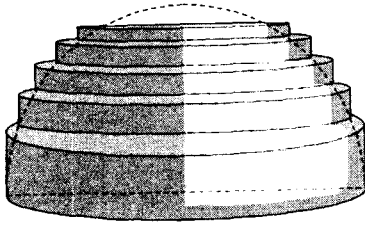


Fig. 5 3D Accumulation of the slices

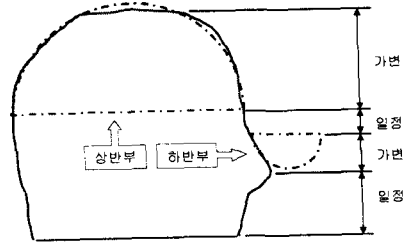


Fig. 6 Sectioning of adaptive slicing

3. 실험 및 결과 분석

3.1 실험방법

일정 두께 적층과 적응단면화 적층으로 형성되어진 층의 차이점과 이것에 대한 표면 곡률의 차이를 비교 분석하여 형상의 제작에서 빠르고 정밀한 모형을 확인한다. 실제 뇌의 MRI 데이터를 이용하여야 하지만, 뇌모형과 가장 가까운 머리 부분의 뼈로 대체한다. 그 이유는 뇌의 표면 굴곡이 심하므로 단순한 곡면의 기울기를 적용하는 방법으로 머리뼈 부분의 데이터를 이용한다. 모형제작을 위해 사용된 RP시스템은 SLS방식의 Sinterstation 2500이다.

먼저, 일반적인 적층의 방법을 이용하여 두께 0.2 mm 두께로 적층을 한다. 이것은 표면의 곡면이나 기울기에 상관없이 일정한 간격으로 나누어 준다. 즉, CT나 MRI 데이터 그 자체를 바로 사용할 수 있다.

이에 반하여 표면의 곡률과 기울기를 적용하여 Fig. 6에서처럼 각각의 영역별로 일정 두께 부분과 적응단면화된 두께 부분으로 구분한다.

즉, 일정부분에서는 RP 시스템의 범위 안에서 최대 값으로 일정하게 적층을 하고 적응단면화 부분에서는 앞에서 전개한 식을 이용하여 곡률에 따른 최대 수직방향 오차의 값을 고려하여 적층한다. 상반부 부분의 최대 수직방향 오차의 값은 0.07 mm를 사용하고, 하반부 부분의 최대 수직방향 오차의 값은 0.15 mm를 사용한다. 이는 곡면에 기울기에 가장 적합한 최적의 값으로 선택하는 것으로 개인차가 존재하므로 각각의 모형마다 고려해 주어야 할 부분이다.

Table 2 Surface Roughness

| 항목 | 적층법 | | 일반 적층 | 적응 단면화 |
|-------|-----|---------|-------|--------|
| | | | | |
| 기준길이 | mm | | 0.25 | 0.25 |
| 범위 | mm | | 0.20 | 0.20 |
| 평가길이 | mm | | 0.75 | 0.75 |
| 표면 조도 | 전면 | μm | 24.60 | 11.40 |
| | 후면 | μm | 16.70 | 9.40 |

3.2 적층 기법과 표면 조도의 비교

표면 조도를 측정하는 부분은 뇌모형의 전반부와 후반부의 두 곳을 설정한다. 이는 타원형이라도 실제 각각의 표면의 접선에 기울기가 다르므로 최적화 된 값의 오차를 확인하는데 필요하다. 이러한 것은 최대 수직방향 오차와 두께와의 차이를 나타낸다.

표면 조도 측정은 Taylor Hobson Ltd.의 Surtronic 3+ 의 고정밀도 2차원 측정기를 사용하여 측정한다. 정밀도는 $\pm 0.01 \mu m$ 이며, 2차원의 면을 스캔하여 형상의 표면의 데이터를 읽어낸다. 작동원리는 센서가 표면을 지나가면서 높낮이를 측정하여 통계적으로 처리한다. Table 2에 보이는 값들은 3회 측정 후 평균을 낸 값이다.

Fig. 7에서 형상의 표면을 확대해 보면 굴곡이 존재함을 알 수 있다. 위의 방법을 이용하면서 특히 측정기의 흔들림이 없도록 유지하며 표면의 결이 심할 경우 그 결에 직각 방향으로 측정한다. 측정위치는 위쪽인 그림의 A, B로 표시된 위치로서 조도가 가장 큰 곳에 해당된다.

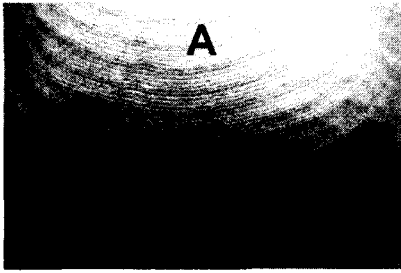


Fig. 7 Ordinary Accumulation

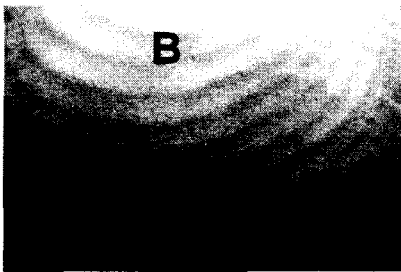


Fig. 8 Adaptive Accumulation

Table 3 Parameters of RP system

| 파라미터 | 적층법 | | 적응 단면화 |
|--------|-----|-------|------------|
| | | 일반 적층 | |
| 두께 | mm | 0.1 | 0.08 ~ 0.4 |
| Feed 량 | mm | 0.25 | 0.2 ~ 1 |
| 레이저 파워 | W | 10 | 9 ~ 16 |
| 층 수 | EA | 1160 | 583 |
| 소요시간 | min | 590 | 338 |

Table 3은 실험에 사용된 파라미터 값들을 보여주고 있다.

3.3 결과 분석

일반 적층은 적층두께가 위치에 따라 일정한데 비하여 적응단면화는 위치에 따라 두께가 다르다. 이것은 곡면에 따른 적응단면화 기법의 결과로 최대 수직방향 오차를 0.07 mm를 기준으로 두께가 변하므로 옆부분에서 채워지는 Feed 량도 두께에 따라 변하고, 두께변화에 따라 레이저 파

워 또한 가변의 값을 가진다.

그 중 층수와 시간의 비슷한 것을 비교해보면 적응단면화가 층수와 시간이 많다. 하지만 이것은 일반 적층은 시간을 고려하여 두께를 두껍게 했기 때문이며 앞에서 언급한 바와 같이 표면의 조도는 평균 두 배 이상 향상된 것을 알 수 있다.

앞의 그림에서 제작된 두개골 모형의 그림에서도 알 수 있듯이 표면의 정밀도가 차이나는 것을 확인 할 수 있다. 확대 부분의 그림은 전면의 그림으로 같은 높이, 같은 위치에서 측정한 결과이다.

그러므로, 적응단면화 기법과 표면 조도는 같은 두께를 가지는 것보다 시간적으로나 표면 조도에 많은 영향을 주고 이는 표면의 곡률을 잘 반영한 결과이다.

4. 결론

본 연구에서는 뇌모형의 효율적인 모델링 및 적응단면화 방법을 이용하여 실제 모형의 제작방법을 제시하였다. 뇌의 중단면을 타원으로 가정하여, 경사도에 따른 위치(각도) 변화를 이용하여 모델을 구하였다. 이에 따라 적응단면화 기법인 Adaptive Slicing 기법을 적용하여 각 층의 두께를 위치에 따라 산출하였다. 적응단면화시 수평 단면을 각각의 구역으로 나누어 수술부위만을 고려한 부분 분할방법 즉, 윤곽선 보정을 이용하여 제작시간을 줄이도록 하였다.

적응단면화의 효과를 실증하기 위해 RP 시스템인 SLS장비를 이용하여 실제 모형을 제작하였고, 표면조도를 측정하여 결과를 분석하였다. 실험결과, 타원모델에 의한 적응단면화의 결과가 일반적층의 경우보다 제작시간 및 표면조도에서 우수함을 입증하였다.

이러한 연구를 바탕으로 다른 인공신체의 모형을 효과적으로 모델링하고 제작하는데 활용할 수 있을 것으로 생각된다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(과제번호:2000-2-30400-006-3)지원으로 수행되었음.

참고문헌

- (1) Huh, S., Han, D., Lee, K., Lee, S. and Choi, B., 2000, "Study on the Reconstruction of Skull Prototype using Sliced Image Data," *J. of the Korean Society of Precision Engineering*, Vol. 17, No. 5, pp. 76~83.
- (2) Dolence, A. and Makela, I., 1994, "Slicing Procedures for Layered Manufacturing Technique," *Computer Aided Design*, Vol. 26, No. 2, pp. 119~126.
- (3) Mani, K., Kulkarni, P. and Dutta, D., 1999, "Region-based Adaptive Slicing," *Computer Aided Design*, Vol. 31, No. 5, pp. 317~333.
- (4) Bang, C., Kim, Y., Kang, S. and Kim, N., 1998, "STL File Generation for Rapid Prototyping Implants Models," *Proc. of Korean Society of CAD/CAM Engineers Conference*, pp. 436~441.
- (5) Yeom, S., Bang, J., Um, T., Joo, Y., Kim, S., Kong, Y., Chun, I. and Kim, B., 2000, "Study for Development of the Fabrication System of Brain Model for Surgery Emulation," *Korea Automatic Control Conference*, pp. 298~301.
- (6) Kulkarni, P. and Dutta, D., 1996, "An Accurate Slicing Procedure for Layered Manufacturing," *Computer Aided Design*, Vol. 28, No. 9, pp. 687~693.
- (7) Tyberg, J. and Bohn, J. H., 1998, "Calibration Fused Deposition Modeling Rapid Prototyping System for Adaptive Build Layer Thickness, 1998, "The 3rd Pacific Rim International Conference on Advanced Materials and Processing, PRICM3, Vol. 1, pp. 1573~1579.
- (8) Choi, K. and Lee, K., 1998, "An Adaptive Slicing Method Using both Contour Lines and Vertical Character Lines," *Proc. of Korean Society of CAD/CAM Engineers Conference*, pp. 429~435.
- (9) Novac, A. S., Lee, C. H. and Thomas, C. L., 1997, "Automated Technique for Adaptive Slicing in Layered Manufacturing," *The Seventh International Conference on Rapid Prototyping*, pp. 85~93.