

Implementation of Cervical Pedicle Surgical Guide for Safe Surgery

Ho-Young Kwak*, Jisoon Huh**, Won-Joo Lee***

Abstract

Screw insertion surgery is frequently required among surgical procedures. Especially, very careful attention should be paid to the insertion of screw in the operation of the cervical vertebra. Therefore, there is a need for a guide that allows the surgeon to reliably and promptly perform treatment by calculating the desired insertion angle and length for screw insertion. In this study, the center and direction of the pedicle were calculated through 3D modeling and 3D vector numerical analysis using the CT or MRI image of the patient for the safe operation of the guide, and based on this, After that, we will implement surgical guide based on this.

▶ Keyword: Surgical guide, pedicle screw fixation, cervical disc herniation, segmentation, isthmus, centroid

I. Introduction

최근 외과 수술 처치 방법 가운데 Screw 삽입 수술이 필요한 경우가 빈번히 발생한다. 특히 경추의 수술 경우에 screw 삽입에 있어서는 매우 세심한 주의가 필요하다. 따라서 screw 삽입을 위해 원하는 삽입 각도와 길이를 계산하여 수술의로 하여금 안심하고 신속히 처치를 실시할 수 있는 가이드의 필요성이 대두되고 있다.

많은 연구에서 이러한 위험성을 수반하는 Screw 삽입술에 대해 측면 나사 고정(laminar screw fixation)보다 척추경 나사 고정(pedicle screw fixation)의 생체 역학 강도가 더 나은 것으로 알려져 왔다. 그러나 비교적 작은 크기의 척추경(pedicle)과 척수(spinal code), 신경 뿌리 및 척추 동맥에 대한 상해의 위험으로 일반적으로 이 방법은 사용에 제한이 있었다. 최근 3차원 모델링 및 3D 프린팅 기술의 진보는 해부학적인 연구, 특히 척추를 포함한 뼈와 관련된 연구를 용이하게 하고 있으며, 로봇 수술을 위한 다양한 아이디어를 제공하고 있다.

본 연구에서는 위험성을 수반하는 경추 척추경에 나사를 삽입할 때 사용할 수 있도록 환자의 CT 또는 MRI 이미지를 이용하여 3D 모델링과 3차원 벡터 수치해석을 통해 척추경의

중심과 방향을 계산하고, 이를 3차원 프린터로 출력할 수 있도록 해당 축을 경추에 가공 구현하였다. 가공된 3차원 모델을 실사 출력하여 유연성 있는 재료를 이용하여 수술용 가이드를 제작하는 방법에 대하여 제시하였다.

본 논문의 구성으로 2장에서는 관련 연구에 대하여 설명하고, 3장에서는 척추경의 내경과 방향성을 구하는 방법에 대하여 설명하고 수술용 가이드를 생성하는 방법에 대해 기술하였다. 4장에서는 실험과 분석에 대한 고찰을 하였으며, 5장에서는 결론 및 향후 연구 방향에 대하여 제시하였다.

II. Related works

1. Cervical Disc Herniation

신경외과적 경추 추간관 탈출증(목 디스크)에 대한 그림은 Fig. 1과 같다[1]. Fig. 1에서 보면 화살표로 표기된 부분의 디스크가 중앙 신경 쪽으로 밀려나면서 이 신경을 눌러 통증

* First Author: Ho-Young Kwak, Corresponding Author: Won Joo Lee

*Ho-Young Kwak (kwak@jejunu.ac.kr), Department of Computer Engineering, Jeju National University

**Jisoon Huh (nsdrhuh@jejunu.ac.kr), Department of Neurosurgery, School of medicine, Jeju National University

***Won-Joo Lee (wonjoo2@inhac.ac.kr), Department of Computer Science, Inha Technical College

Received: 2017. 11. 03, Revised: 2017. 11. 23, Accepted: 2017. 12. 04.

“This research was supported by the 2017 scientific promotion program funded by Jeju National University.”

“This paper is an extension of the paper published in KSCI 2017 Summer Conference.”

이나 마비 증상을 가져오게 된다. 이에 대한 처치를 위해서는 여러 가지 방법이 있는데, 그 중 증상이 심한 경우에는 디스크를 제거하고 경추를 나사로 고정하는 스크류 삽입술(screw insertion)로 처치를 하고 있으며 그 결과는 Fig. 2와 같다.



Fig. 1. Cervical disc herniation

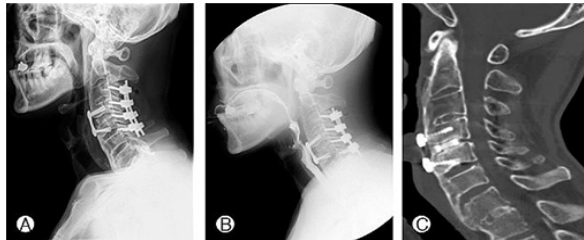


Fig. 2. Screw Insertion for Cervical disc herniation

일반적인 스크류 삽입술은 Fig. 3에서 보인 바와 같이 측면 나사 고정(laminar screw fixation) 방법이 간편하고 비교적 안전하여 많이 시행되고 있다[2, 3]. 그러나 이 방법의 단점은 단단하게 고정이 되지 않는다는 것이다. 이에 반해 척추경 나사 고정(pedicle screw fixation) 방법은 시술이 어렵지만 정확한 시술이 가능하면 단단히 고정할 수 있어 환자에게 보다 완벽한 처치가 가능하게 된다[4]. 따라서 척추경 나사 고정 방법을 적용하기 위해서는 환자마다 또 경추의 위치마다 모두 척추경의 모양과 방향이 다르기 때문에 이에 대한 정확한 측정이 필요하며, 로봇 수술을 시행하기 위해서는 이러한 측정이 필수 조건이다.

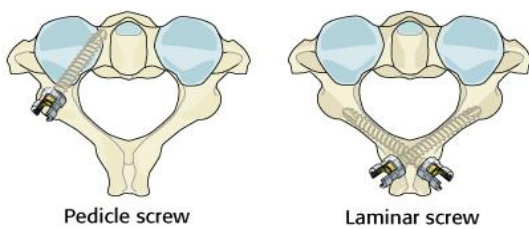


Fig. 3. Comparison of Pedicle screw and Laminar screw

2. 3D Modeling

CT 또는 MRI 영상을 이용하여 3D 프린터로 3차원 실사 출력력을 하기 위해서는 해당 영상에서 필요한 부분 즉, CT 이미지에서 경추 부분의 영상에 대해 이미지를 분할하는 기술(image segmentation)이 필요하다. 이 세그멘테이션 기술은 영상처리 분야에서 오랜 시간 연구되어 왔으며, 컴퓨터 시각에서의 이미지 분할은 디지털 영상을 여러 개의 픽셀 집합

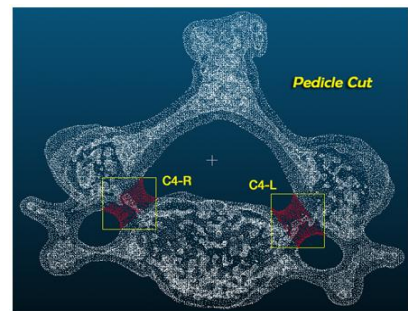
(point cloud)으로 나누는 과정을 말한다.

본 논문에서는 환자의 CT 영상 이미지를 대상으로 경추만을 세그멘테이션하여 실제의 경추 모양을 가지는 3차원 point cloud 데이터를 구하였다. 이 작업을 위해 사용한 소프트웨어는 의료 연구용으로 많이 사용되는 Materialise사의 mimics version 10.01을 이용하였다[5].

III. Methods and Implementation for Pedicle Screw Fixation

1. Applied Methods

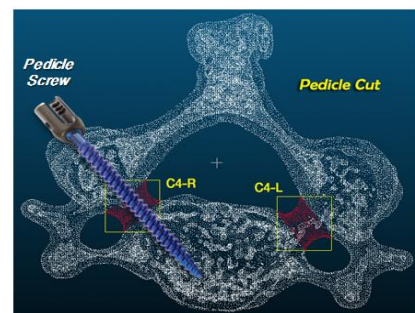
IRB가 인증한 환자의 CT 사진을 기반으로 하여 3D 벡터 형태의 point cloud 정보를 이용하여 척추경을 추출하면 Fig. 4 와 같다. 추출된 척추경의 일반적인 모양은 비대칭 장구형의 관으로 이루어져 있으며, 이 비대칭 튜브형 관의 중심을 찾아내고, 이 중심점을 통과하는 척추경의 방향을 찾아내는 것이 목표이다[6, 7 ,8].



(a) segmentation result for C4



(b) Pedicle cut of segmented C4



(c) Ideal screw insertion direction for pedicle

Fig. 4. 3D vector's pedicle cut of cervical spine(C4) and the direction of pedicle screw

Fig. 4의 (b)와 같이 세그멘테이션 된 척추경의 표면은 장구 모양의 튜브(tube) 형태로 구성되어 있다. 기존 벡터 점 집합에서 고리의 내부를 구성하는 최대 너비로 닫힌 곡선을 얻고, 그 곡선을 이용하여 선택된 점들의 중심점을 구하기 위해서는 벡터 정보를 극좌표계로 변환하고, 단계적으로 [10] 회전 변환 처리를 통하여 얻을 수 있다. 따라서 극좌표계로 변환 시 모든 점을 변환하고 θ 에 대하여 좌표 정렬을 수행해야 한다. 이 정렬을 위해 다음과 같이 4단계로 처리한다.

- 1 단계 : 점 집합을 극좌표계로 변환을 한다.
- 2 단계 : 단위 범위 내에서 가장 가까운 점을 선택한다.
- 3 단계 : 선택된 점들을 이용하여 중심 값을 구한다.
- 4 단계 : 3단계에서 얻은 중심 값을 극좌표계로 변환할 때 다시 그 중심(원점)으로 사용하여 1 단계와 2 단계를 반복하여 최종 내부 폐곡선을 구한다.

제안된 방법을 이용하여 단위 범위 내에서 처리하는 방법으로는 일정 개수의 점들을 샘플링하는 방법과 일정 각도를 범위로 정하는 방법이 있다. 일정 각도를 범위로 정하는 방법의 경우 일정 각도 내에서 원점과 가장 가까운 점을 선택한다. 이 방법의 경우 점들의 분포가 고르게 분포되어 있지 않은 경우에는 Fig. 5와 같이 잘못된 점을 선택할 소지가 존재한다.

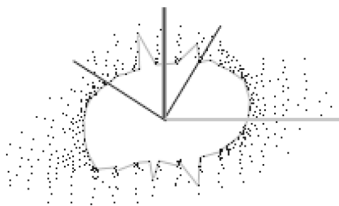


Fig. 5. Miss sampled points

일정 개수의 점을 샘플링하는 방법의 경우에는 일정 개수의 점들을 샘플링하여 선택한 후, 그 중 원점과 가장 가까운 점을 찾아 선택하고, 선택된 점을 중심으로 다시 일정 개수의 점을 샘플링한다. 이 방법은 Fig. 6과 같이 일정 각도를 범위로 하는 방법보다 정밀한 결과를 보인다.

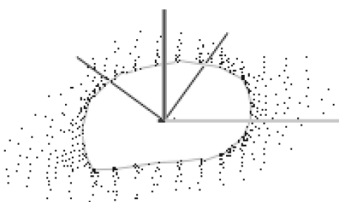


Fig. 6. Elegant sampled points

이상에서 설명한 방법으로 튜브형 구조를 갖는 척추경을 관통하는 중심축의 단위 벡터를 계산하는 방법에 대한 처리 절차는 Fig. 7과 같다. 이 방법에 따라 처리하여 구해진 척추경의 협부(isthmus)와 그 중심은 Fig. 8과 같다.

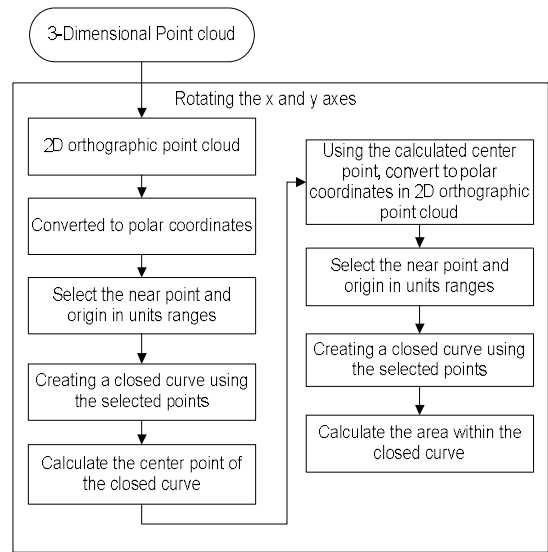


Fig. 7. The processing flow for orientation by 3D vectors

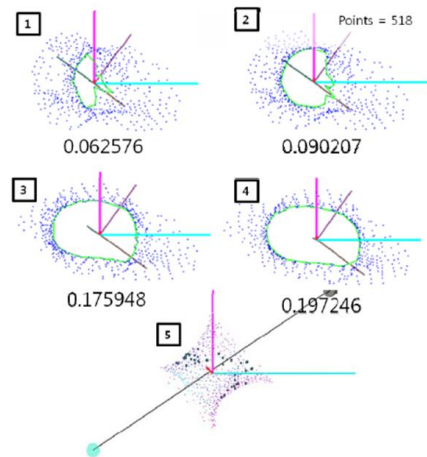


Fig. 8. The calculation of isthmus and orientation

- 실제 척추경에 대해 추출된 point cloud는 Fig. 8의 ①과 같다.

- Fig. 8의 ②, ③, ④는 회전축 x와 y를 각각 이동했을 때 보여지는 이미지를 나타내고 있다. 이렇게 3차원 벡터를 2차원 평면 벡터로 변환하여 x축과 y축을 중심으로 좌표값을 이동하여 내경을 이루는 점들을 선택하고, 선택된 점들로 구성되는 다각형의 면적이 최대가 되는 점들을 찾아내는 것이다.

- Fig. 8의 ⑤는 단위 벡터를 실제 3D 모양으로 병합하여 얻은 이미지를 보여준 것이다.

2. Implementation of Orientation and Centroid

추출된 척추경에 대한 3D 벡터 데이터를 이용하여 척추경의 중심과 방향을 구하는 프로그램의 실행 화면은 Fig. 9와 같다.

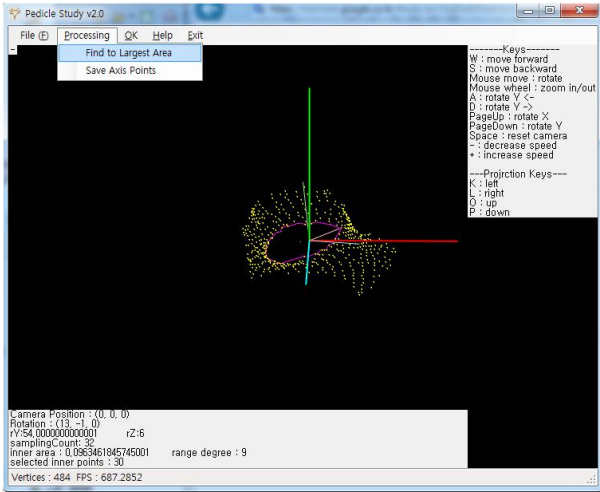


Fig. 9. Pedicle Study v2.0 program for the solving method

본 연구진이 구현한 Pedicle Study(version 2.0) 응용프로그램으로 구현한 결과는 Fig. 10과 같다. 경추 4번 우측 척추경에 대한 중심축과 방향을 계산한 결과 화면이다.

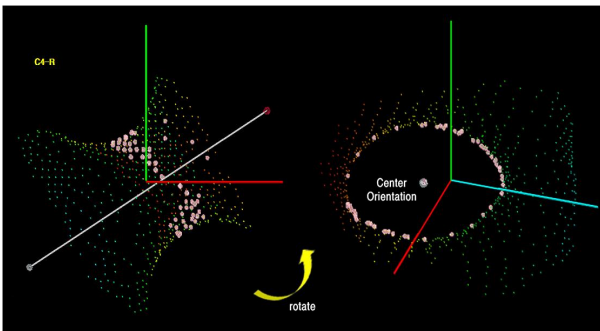
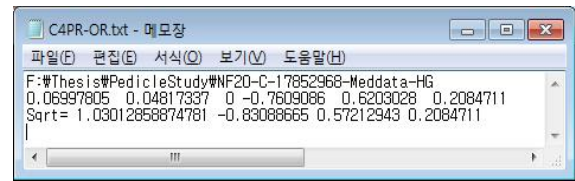


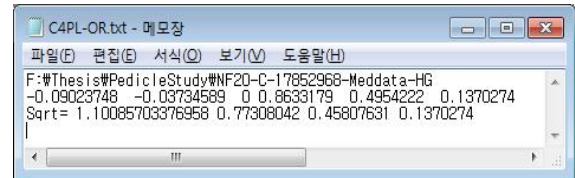
Fig. 10. Solving method of direction and center point for cervical pedicle (example: C4 right pedicle)

Fig. 10에서 같이 불규칙하고 비대칭적인 튜브형 관의 모양을 가지고 있는 척추경의 중심을 구하기 위해서는 튜브형 관을 돌려서 보이는 내부의 면적이 최대가 될 때를 찾는 것이 스크립트를 삽입할 때 가장 안전성이 보장되는 방향이 된다. 따라서 척추경을 x, y, z 축으로 일정한 각도(실험에서는 1°씩 회전)만큼씩을 회전시키고, 각 회전된 3차원 벡터를 2차원으로 투영한 후, 투영된 내부의 점을 획득한다. 획득된 내부의 점을 이용하여 면적을 계산하고, 이렇게 계산된 면적이 최대가 되는 시점의 방향을 획득하도록 하였다.

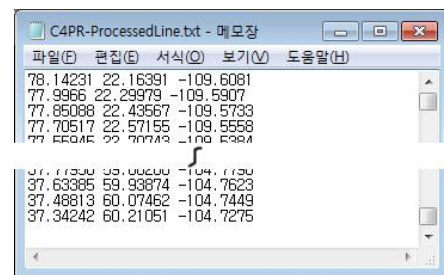
Fig. 11은 프로그램을 실행하여 경추 4번 우측 척추경(right pedicle; C4-R)과 좌측 척추경(left pedicle; C4-L)에 대한 중심점과 방향성을 갖는 단위 벡터를 계산한 값은 Fig. 11 (a), (b)이며, 그 중심점을 지나는 축 벡터를 이용하여 그 축을 직선으로 표현한 벡터 값은 Fig. 11 (c)이다.



(a) Unit vector of centroid and direction for right pedicle of C4

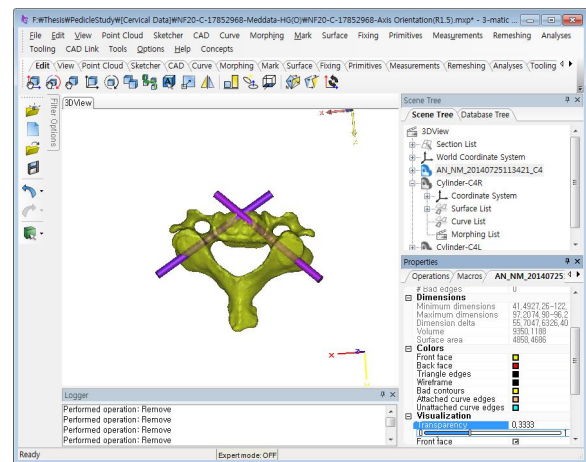


(b) Unit vector of centroid and direction for left pedicle of C4

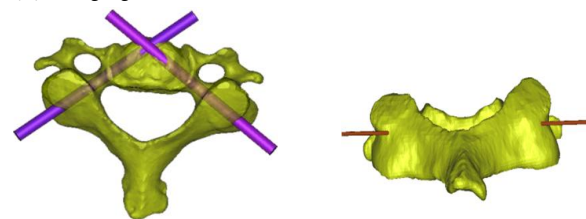


(c) Result data of calculated center axis

Fig. 11. Unit vectors of centroid and direction for C4's pedicle



(a) Merging the cervical model and axes with 3-matics



(b) A merged 3D model for C4

Fig. 12. Representation of merged 3D model for 3D printer

3. Implementation of Surgical Guides

앞에서 설명한 방법으로 구해진 척추경의 협부(isthmus)에 대한 중심점과 그 중심점을 지나는 척추경의 방향 값을 이용하여 Fig. 12와 같이 세그멘테이션 해놓은 경추의 3D 모델에 적용하여 새로운 3D 데이터를 얻는다. 구해진 척추경 협부의 중심점과 방향값을 해당 경추의 세그멘테이션된 point cloud 집합과의 병합 과정으로 Materialise사의 3-matic version 6.1을 이용하여 구현하였다.

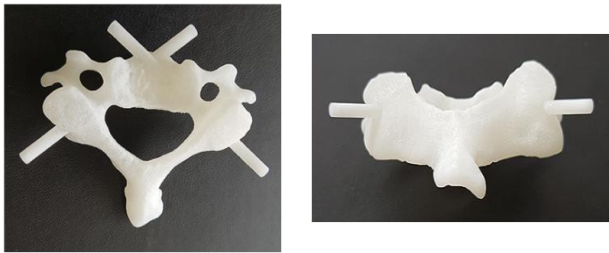


Fig. 13. Representation of calculated direction and center point through 3D printer

Fig. 12의 병합 처리로 얻어진 3D 프린터용 데이터를 가지고 실제 3차원 출력을 실시한 결과는 Fig. 13과 같다.

3D 프린팅 결과를 이용하여 수술용 가이드를 제작하는 방법은 다음과 같다.

1. Fig. 14 (a)에서처럼 환자의 경추 모델을 3D 프린터로 출력하고 실제 경추 모양을 구현한다. 이때 screw를 삽입할 경추 모델은 축을 병합한 모델로 출력한다.
2. 구현된 경추 모델에 Fig. 14. (b)와 같이 가이드 제작용 클레이를 씌워 모양을 만든다. 본 논문에서는 실험을 위해 이 반죽용 클레이를 ‘허니 클레이’라는 어린이용 반죽을 사용하였다.
3. 일정 시간 경과 후 굳어진 수술용 가이드는 Fig. 14의 (c)와 같다.
4. 제작된 수술용 가이드는 실제 임상에서는 멸균 처리를 실시한 후 수술장에서 사용할 수 있도록 한다.

Fig. 14의 (c)에서 보인 바와 같이 수술용 가이드의 구멍은 척추경의 방향을 나타내고 있으며, 안쪽의 면은 해당 경추의 겉 표면과 동일한 굴곡을 가지고 있다. 멸균 처리되어 최종 가공된 수술용 가이드를 이용하여 수술장에서는 환자의 경추에 밀착시키고 Fig. 14의 (d)에서 보인 바와 같이 스크류를 삽입하는 작업을 쉽게 실행할 수 있다. 일정 길이 부분을 삽입한 후에 이 가이드는 잘라서 제거하고 난 후 나머지 부분에 대한 스크류 작업을 실행한다.

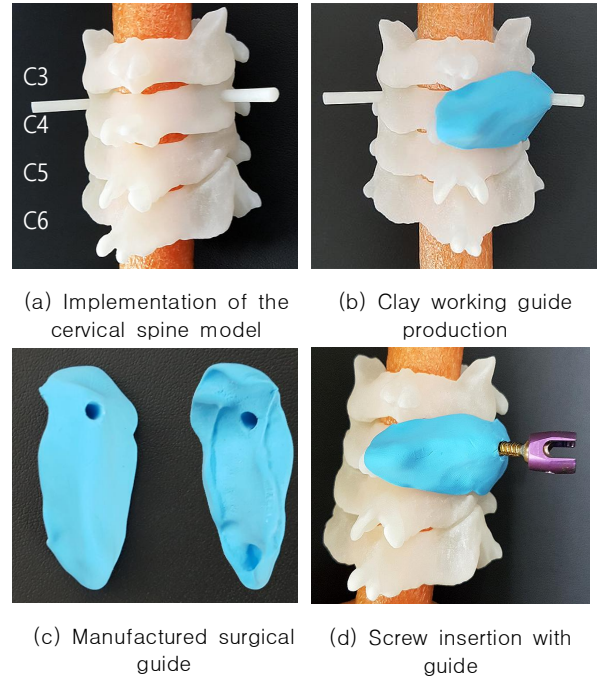


Fig. 14. Surgical guide manufacturing process

IV. Experiment & Analysis

본 논문에서 제안한 방법으로 IRB가 인증한 44명(남성 23명, 여성 21명)의 환자를 대상으로 경추 3~6번을 대상으로 좌우 척추경에 대한 데이터를 처리한 결과는 Fig. 15와 Table 1과 같다. 이는 기존의 해부학적 연구 결과와 큰 차이를 보이지 않으므로써 이 방법으로 해석한 내용이 올바르다는 것을 알 수 있었다.

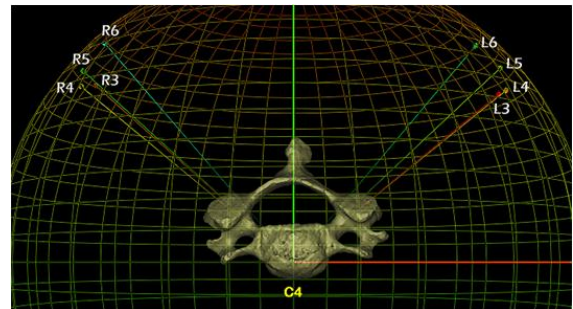


Fig. 15. Mean value for 44 subjects

Table 1. Mean value for 44 subjects

Level	Rt Mean ±SD	Max	Min	Lt Mean ±SD	Max	Min
C3	49.36±2.1	61.46	16.17	51.84±5.69	86.25	34.41
C4	51.04±3.01	68.22	25.46	51.79±8.50	74.23	41.00
C5	48.33±2.93	76.55	32.47	47.26±14.91	61.54	25.82
C6	41.76±7.83	60.00	26.28	40.71±12.22	61.71	21.70

구현된 소프트웨어를 통해 44명의 환자에 대한 경추 척추경에 대한 일반적인 통계치도 얻었으며 그 결과는 Table 1과 같다. 이를 분석한 결과 해부학적 연구와 동일한 결론을 얻었다. 따라서 척추경 스크류 삽입술에 대한 제안된 컴퓨터 해석적 접근 방법이 올바름을 알 수 있었다. 향후 본 연구 결과를 척추경 스크류 삽입술에 적용한다면 정확한 데이터를 이용한 로봇 수술이 가능할 것으로 판단된다.

V. Conclusions

본 논문에서는 로봇 수술을 위한 안전한 궤적과 중심을 계산할 수 있는 방법을 제시하고 구현하였다. 또한 구현된 소프트웨어를 통해 44명의 환자에 대한 경추 척추경에 대한 통계치를 획득함으로써 가이드를 사용하지 않고 수술하는 실제 임상에도 유용한 정보로 사용되었다. 또한, 획득된 중심점과 방향에 대한 분석 결과 기존의 의학 논문에서 발표한 해부학적 연구와도 같은 결론을 얻었다. 따라서 Pedicle Screw Fixation에 대한 제안 알고리즘의 컴퓨터 해석적 접근 방법이 올바름을 보였다. 아울러 3D 모델링 방법을 통한 가이드 제작을 통해 실제 수술에서 안전하게 수술할 수 있도록 하는 방법을 제시하였으며, 이 방법은 향후 로봇 수술을 위해서도 동일하게 적용될 수 있음을 알 수 있었다.

REFERENCES

- [1] L. Lunsford, D. Bissonette, P. Jannetta, D. Zorub, "Anterior surgery for cervical disc disease: Treatment of lateral cervical disc herniation in 253 cases," *Journal of Neurosurgery*, Vol. 53, No. 1, pp.1-11, July 1980.
- [2] S. Inoue, F Okada, S. Yoshiya, "Cervical lateral mass screw fixation without fluoroscopic control: Analysis of risk factors for complications associated with screw insertion," *Arch Orthop Trauma Surg*, 132:947-953, July 2012.
- [3] JT Hong, JH Sung, BC Son, SW Lee, CK Park, "Significance of laminar screw fixation in the subaxial cervical spine," *Spine*, Vol. 33, Issue 16, pp. 1739-1743, July 2008
- [4] K Abumi, Y Shono, M Ito, H Taneichi, Y Kotani, "Complications of pedicle screw fixation in reconstructive surgery of the cervical spine," *Spine*, Vol. 25, Issue.8, pp. 962-969, Apr. 2000.
- [5] <http://www.materialise.com>
- [6] HY Kwak, UH Sung, JS Huh, "Calculate of Flattened Centroid and Orientation in 3D Tube Structure," *Conference on KSCI 2014*, Vol. 22, No. 2, pp. 431-432, 2014.
- [7] HY Kwak, JS Huh, SE Lee, "The Computerized Numerical Analysis of Cervical Pedicle Orientation," *The 4th ICSMA*, 1.1:287-290, 2016.
- [8] HY Kwak, JS Huh, WJ Lee, "Measurement of Ideal Trajectory of The Cervical Pedicle for Robotic Surgery," *In Proceeding of KSCI 2017 Summer Conference(ISSN 2005-1344)*, Vol. 25, No. 2, pp. 99-100, 2017.

Authors



Ho-Young Kwak received the B.S., M.S. and Ph.D. degrees in Computer Science from Hong-ik University, Korea, in 1983, 1985 and 1990, respectively. Dr. Kwak joined the faculty of the Department of Computer Engineering at Jeju National University,

Jeju, Korea, in 1990. He is currently a Professor in the Department of Computer Engineering, Jeju National University. He is interested in IT-Medical convergence, USN, software system.



Jisoon Huh received the B.S., M.S. and Ph.D. degrees in Medicine from A-Ju University, Korea, in 1996 and 2001, respectively. Dr. Huh joined the Department of Neurosurgery, School of Medicine at Jeju National University, Jeju, Korea, in 2006. He is currently a Associate

Professor in the School of Medicine, Jeju National University. He is interested in Neurosurgery, medical information system.



Won Joo Lee received the B.S., M.S. and Ph.D. degrees in Computer Science and Engineering from Hanyang University, Korea, in 1989, 1991 and 2004, respectively. Dr. Lee joined the faculty of the Department of Computer Science at

Inha Technical College, Incheon, Korea, in 2008, where he has served as the Director of the Department of Computer Science. He is currently a Professor in the Department of Computer Science, Inha Technical College. He has also served as the Vice-president of The Korean Society of Computer Information and the Editor-in-Chief for the *Journal of The Korean Society of Computer Information*. He is interested in parallel computing, internet and mobile computing, and cloud computing.