대한정위기능신경외과학회지

JKSFN

Journal of the
Korean Society of Stereotactic
and Functional Neurosurgery

Technical Report

pISSN 1738-6217 • eISSN 2765-6608

J Korean Ster Func Neurosurg 2021;17(1):43-47
https://doi.org/10.52662/jksfn.2021.00052

Received: May 31, 2021
Accepted: June 14, 2021

Address for correspondence:
Sang Don Kim, MD
Department of of Neurosurgery, Bucheon St. Mary's Hospital, School of Medicine, The Catholic University of Korea, 327 Sosa-ro, Wonmi-gu, Bucheon 14647, Korea
Tel: +82-32-340-2259
Fax: +82-32-340-7391
E-mail: kimsd@catholic.ac.kr
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5453-4185

© 2021 The Korean Society of Stereotactic and Functional Neurosurgery

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

영상 유도 항법 장치를 이용한 척추 수술

김상돈

가톨릭대학교 의과대학 부천성모병원 신경외과학교실

Spinal surgery using image-guided navigation systems: a technical note

Sang Don Kim, MD

Department of of Neurosurgery, Bucheon St. Mary's Hospital, School of Medicine, The Catholic University of Korea, Bucheon, Korea

Image-guided navigation systems have been used in spinal surgery since the 1990s, and the technology of these systems continues to advance with artificial intelligence, virtual reality, extended reality, and robotic research. The basic components of these systems and procedures are described in this article, including preoperative preparation, the operating room setting, registration, and intraoperative procedures. An understanding of this information not only provides the ability to use these navigation systems, but also sheds light on the fundamental principles for future device development.

KEY WORDS: Spine, Surgery, Methods

서론

영상 유도 항법 장치(image-guided navigation)는 뇌 정위(stereotaxy) 수술의 원리에서부터 시작되어 1990년대 척추 수술 분야에 적용되면서 지속적인 진화의 과정을 거쳐 오늘날에 이르렀다. 초기에는 요추부 기구 고정술에서 국한적으로 사용되었으나 해부학적 구조상 기구 고정의 정확성과 안정성이 요구되는 흉추와 경추 부위의 수술에도 적용되면서 퇴행성 척추질환은 물론 척추 변형과 종양 분야에서도 그 사용이 증가하고 있다. 초기 영상 유도 항법 장치는 복잡한 등록 과정(registration)과 수술 전 컴퓨터 단층촬영이 필요하고, 컴퓨터 조작의 불편함 등의 이유와 수술 시간의 지연 및 학습 곡선(learning curve)의 필요성 때문에 사용을 꺼려하기도 했다. 하지만 관련된 기술의 비약적인 발전과 지속적인 문제점 보안과 더불어 인공지능(artificial intelligence), 증강 현실(virtual reality), 확장 현실(extended reality) 및 로봇 기술(robotic technology) 등의 융합으로 현재는 없어서는 안 되는 주요 보조 수술 기구로 거듭나고 있다. 이에 본 저자는 영상 유도 항법 장치의 구성요소와 사용 절차의 기본을 정리하여 임상적 유용성을 알리는 한편 어떠한 요소들의 단점을 보완하여 사용자 측면에서 보다 완벽한 기술 개발에 도움이 되는지 알아보고자 한다.

본론

영상 유도 항법 장치의 구성요소(Fig. 1)

우선 영상 유도 항법 장치의 기본적인 구성은 영상을 처리하고 전체적인 시스템을 제어하는 운영체제(operating system)를 탑재한 단말 장치(workstation)와 시스템과 사용하는 기구들 간의 소통을 지속적으로 유지하는 신호 감지기(localizer)이다. 이때, 주로 사용되는 신호는 적외선(infrared ray)과 자기장(magnetic)인데, 적외선을 사용할 때는 광학 카메라(optical camera)가 필수적이다. 광학 카메라는 항법 유도 탐침(navigational probe)과 수술에 사용되는 기구에서 발생하는 적외선을 탐지하는 역할을 하거나 반대로 적외선을 방출하여 탐침이나 정해진 수술 기구로부터 반사되는 신호를 받아 기구의 끝이 위치한 척추의 해부학적 위치를 파악하게 된다. 또 다른 구성요소 중 하나는 이 단말기를 제어하는 장치인 사용자 인터페이스(user interface)라고 하는데, 마우스(mouse)나 발 스위치(foot switch)에서 시작되어 원격제어 기구(smart remote)나 터치스크린(touch screen) 등으로 사용자가 편리하도록 개발되어 사용중이다. 또한 척추 수술에는 기준점을 확보해야 하는 이유 때문에 추적 장치(tracking device)가 필요하다. 이때 추적 장치는 극돌기 등의 노출되어 있는 부위에 단단히 고정되어야 하는데, 수술 중 움직임으로 초래되는 오류를 극복하기 위해서 새로운 장치들이 개발되고 있다. 이 외에도 여러 기구를 사용할 때마다 단말 장치에 기구에 대한 정보를 입력하기 위해서 교정 장치(calibration device)들이 필요하다.

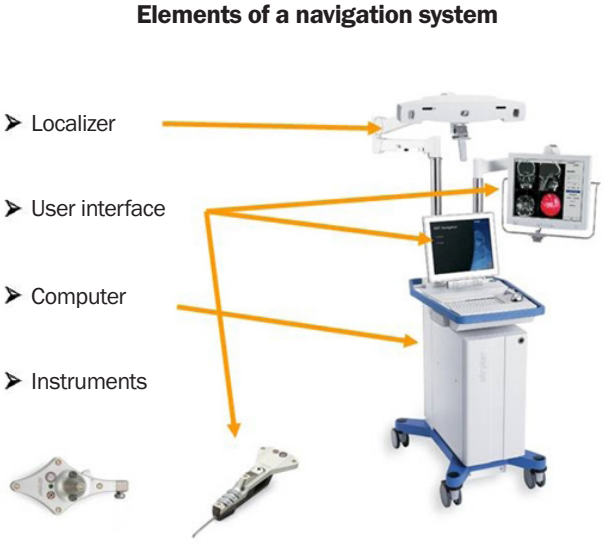

Fig. 1. Elements of a navigation system. Localizer: a camera with two optical lens, User interface: a monitor and instruments that can control the computer, Computer: a workstation that process all images, Instruments: medical appliances.

영상 유도 항법 장치의 사용 절차

현재까지 영상 유도 항법 장치의 발전과정을 3단계 세대(generation)로 구분지어 설명하고 있는데, 1세대는 수술 전 컴퓨터 단층촬영을 통해서 얻은 영상을 이용한 항법 장치로서, 3차원적인 해부학적 형태를 얻을 수 있으나 수술 전 형태만을 반영하기 때문에 수술 중 공간의 변화를 감지하지 못해 다소의 오차를 감수해야 한다. 이 단점을 극복하기 위해 발전된 2세대 투시 영상 유도 항법 장치(fluoroscopy-guided navigation)는 수술중 실시간 영상을 얻을 수 있고, 자동적인 등록이 가능하며, 장치 설비 시간이 짧아 방사선 노출 정도를 줄일 수 있으나 2차원적인 영상밖에 얻을 수 없는 단점을 노출하였다. 결국 최근에는 이 두 가지의 장, 단점을 보완한 컴퓨터 단층/투시 영상 복합형의 유도 항법 장치(computed tomography/fluoro hybrid navigation)가 개발되어 3세대로 사용 중이며, 기존의 오차 범위를 유의하게 줄일 수 있을 뿐 아니라 사용 절차가 간소화된 장점이 있다. 현재 척추 수술에 사용 중인 영상 유도 항법 장치는 Airo Mobile Intraoperative Computed Tomography-Based Spinal Navigation (Brainlab, Feldkrchen, Germany), Stryker Spinal Navigation with SpineMask Tracker and SpineMap Software (Stryker, Kalamazoo, MI, USA), Stealth Station Spinal Surgery Imaging and Surgical Navigation with O-arm (Medtronic, Minneapolis, MN, USA), 그리고 Ziehm Vision FD Vario 3-Dimensional with NaviPort Integration (Ziehm Imaging, Orlando, FL, USA) 등이 있는데, 각각의 미세한 구성요소가 조금씩 차이가 있고, 이로 인한 사용 절차도 다르다. 이 논문에서는 가장 기본적인 1세대의 영상 유도 항법 장치의 사용 절차를 설명하고자 하며, 어떤 단계가 항법 장치의 발전에 따라서 축소되거나 생략되었는지를 이해시키고자 한다[1].

수술 전 계획(Fig. 2)

수술 부위의 영상을 얻기 위해 주로 컴퓨터 단층촬영을 시행하는데, 수술하고자 하는 부위의 1-2 레벨 위아래로 충분한 부위를 촬영하며, 연속성 이미지로 촬영하는 것이 원칙이고, 1 mm 간격의 촘촘한 간격이 권장된다. 수술실에서는 촬영된 영상 이미지를 영상 유도 항법 장치의 컴퓨터 단말기에 저장하고, 이 이미지들을 모니터에서 확인하면서 시상면(sagittal), 축면(axial), 관상면(coronal) 및 3차원 이미지(3-dimensional image)를 모두 확보하고, 실제 수술 부위와 부합되는 수개의 참고 점(reference point)을 표시한다. 이때 수술자는 환자의 이미지가 맞는지, 방향이 정확한지, 왜곡된 이미지가 없는지, 수술 부위가 충분히 포함되어 있는지 확인해야 한다. 이 절차는 2, 3세대 유도 항법 장치 사용 시에는 실시간 영상자료 확보로 생략된다[2].

수술실에서의 설치(Fig. 3)

우선 영상 유도 항법 장치와 수술대 및 수술자의 위치를 결정하는

https://doi.org/10.52662/jksfn.2021.00052

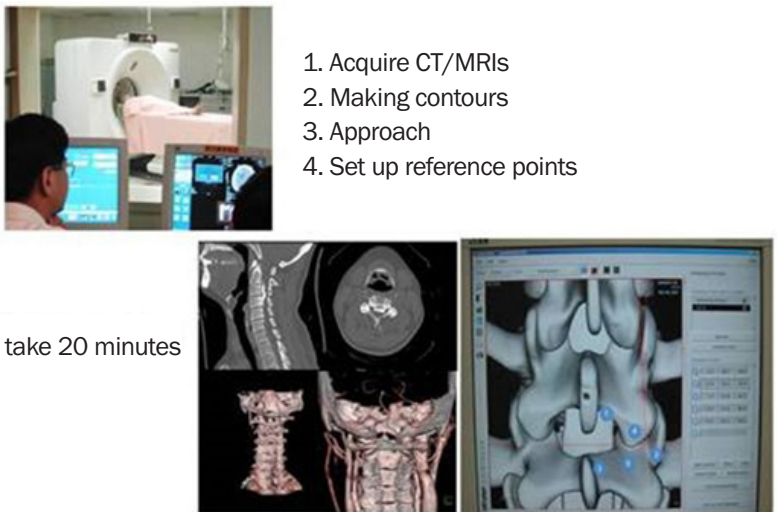

Fig. 2. Preoperative planning. 1. Acquire computed tomography/magnetic resonance imagings (ST/MRIs) (left-upper); 2. Making contours (left-lower); 3. Approach: confirm the right patient's image, right position, no false images and adequate image needed (left-lower); 4. Set up reference points (right-lower).

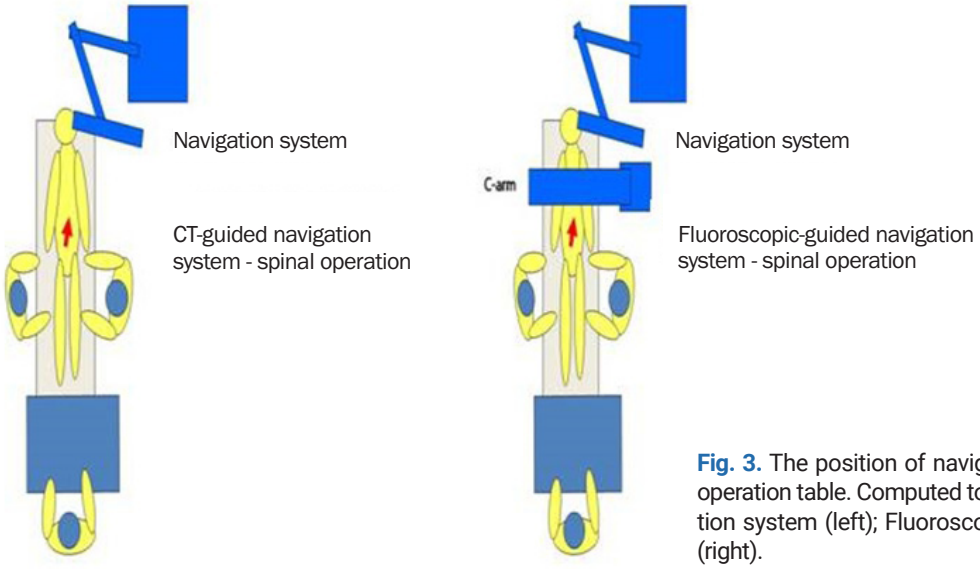

Fig. 3. The position of navigation system and operator at operation table. Computed tomography (CT)-guided navigation system (left); Fluoroscopic-guided navigation system (right).

데, 보통 수술자가 수술 시야와 모니터를 빠른 시간 내에 확인할 수 있도록 환자의 머리 쪽에 기구를 설치하는 것이 좋으며, 광학 카메라 사용 시 수술 시야와 카메라 사이에 방해가 되는 물건을 정리하는 것이 중요하다. 이때 2세대 투시 영상 유도 항법 장치나 3세대 항법 장치를 사용할 때는 실시간 영상자료를 얻기 위해 촬영해야 할 기구가 진입하는 공간을 확보해야 한다[3].

수술 시야 소독, 수술 부위 절개, 환자 추적 장비 설치(Fig. 4)

추적 장치는 충분한 수술 시야를 확보하고 신호를 용이하게 전달할 수 있도록 가장 노출된 부위에, 그리고 수술중 사용자들로부터 충돌하는 일을 방지하기 위해 수술 부위에서 가장 머리쪽의 극돌기를 선정하여 장치를 최대한 강하게 설치한다.

등록 과정(Fig. 5)

이 절차는 수술 전 영상자료와 이와 부합되는 해부학적 구조의 위치 관계를 정해진 수학적 공식에 따라 일치시키는 작업으로 가장 중요한 과정이라 할 수 있다. 최소한 세 포인트를 일치시키는 것이 기본이며, 탐침의 끝을 수술 시야에서 술 전 해부학적 정보와 미리 일치되어 있는 부위에 놓고 컴퓨터 단말기에 등록시킨다. 이를 한 쌍점(paired-point) 등록이라고 하며 등록이 끝나면 자동으로 컴퓨터

에서 오류의 정도를 산출하여 제시하는데, 오차 범위가 1 mm 내외면 그 정확성이 허용될 수 있다. 조금 더 정밀한 등록 단계를 추가하는데, 이를 표면 제작(surface mapping)이라 하고, 수술 시야에서 직접 여러 개의 해부학적 지점을 약 30개의 포인트로 지정하게 된다. 최근에는 이를 자동으로 컴퓨터가 인지하여 어느 정도의 정확도가 인지되면 짧은 시간 내에 과정을 마칠 수 있다. 모든 등록 과정에서도 부정확한 정보를 최소한 줄이기 위해서는 수술 부위에 장착하는 기구가 적외선 탐지기와 정확하게 일치하도록 해부학적 구조상 최대한 노출되어 있는 장소에 부착되어야 하고, 또한 흔들림 없이 강하게 고정되어 있어야 한다[4].

수술

척추 수술은 여러 가지 종류의 기구 사용이 불가피하여 이를 변경시에는 반드시 단말기에 사용 전 신호를 보내야 하고, 수술 중 영상 유도 항법 장치의 부정확성을 유발하는 문제점이 발생할 시, 특히 환자에게 부착된 추적 장치의 위치 변경이나 해부학적 구조의 변화가 감지되면 재등록 과정을 반복해야 한다. 2, 3세대 영상 유도 항법 장치에서는 위의 등록 과정들이 축소되거나 생략된 것이 특징이나

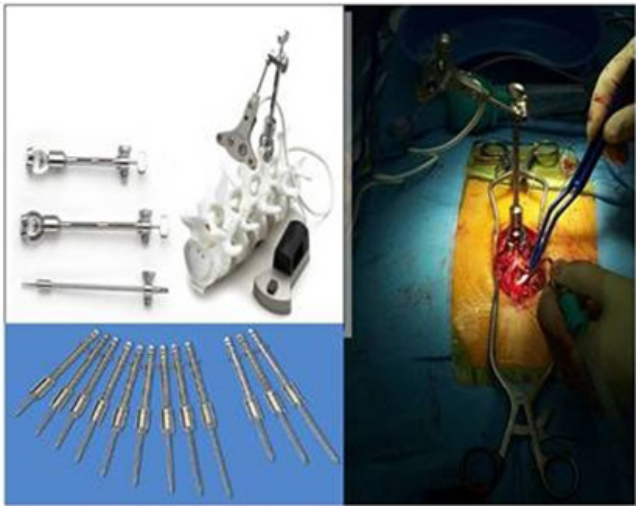

Fig. 4. Patient tracker placement. The instruments that apply at spinous process (left-upper); The instruments that apply to the pedlcles (left-lower); Incision and patient tracker that applied to the spinous process (right).

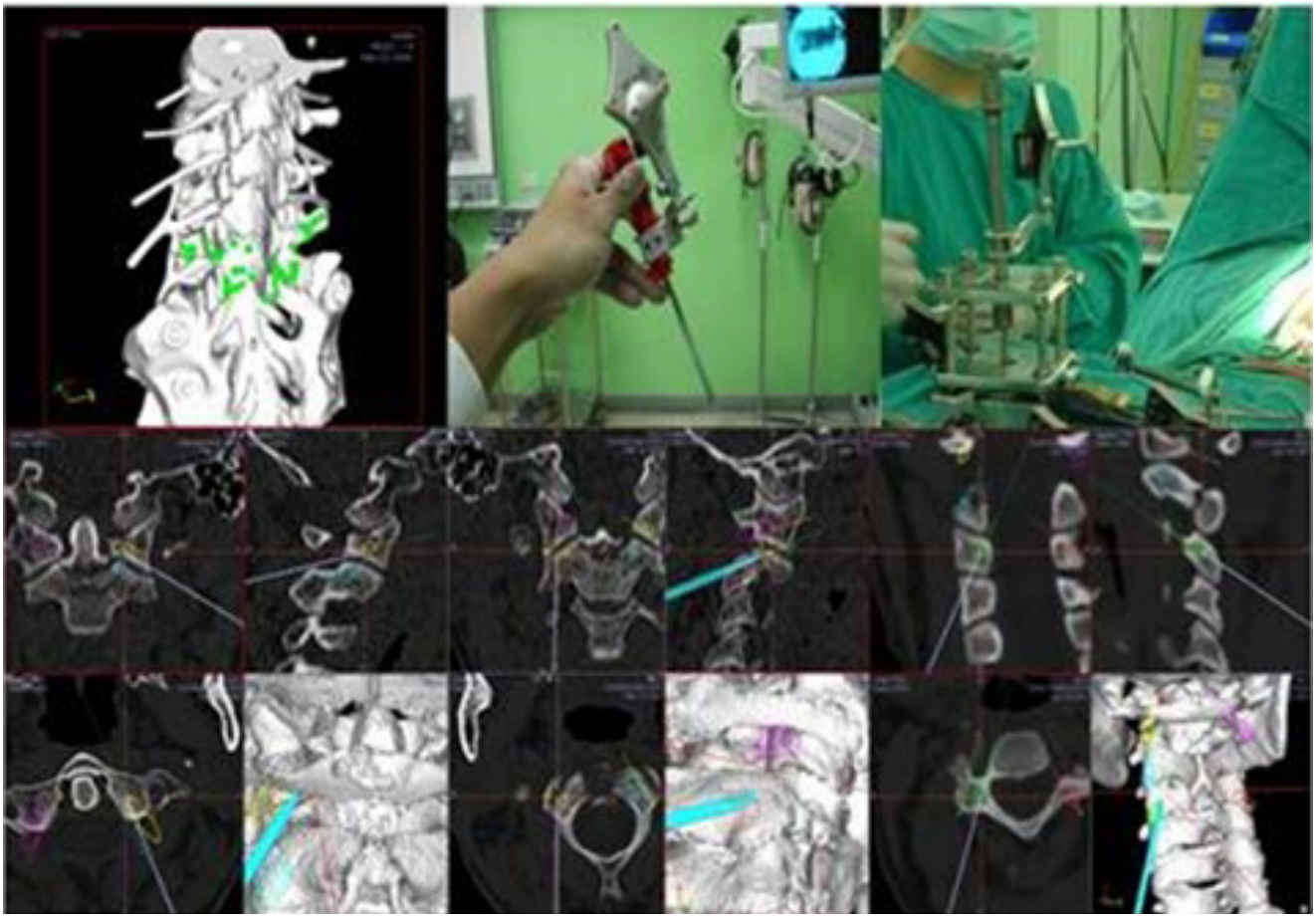

Fig. 5. The registration procedures and simulation processes before screw palcement.

https://doi.org/10.52662/jksfn.2021.00052

이때도 수술중 오류가 감지되었을 때는 재촬영을 시행해야 하는 번거로움은 피할 수 없다.

고찰

정리하자면, 컴퓨터 단층영상 유도 항법 장치는 상당한 정확성과 효율성이 이미 입증되었으나 사용 초기에 등록 시간에 많은 시간을 소비하고, 수술 전에 실제 환자의 수술 위치와 차이가 있는 컴퓨터 단층영상이 필요하며, 수술 시야에 부착된 여러 가지 고정물에 대한 무의식적인 충돌로 인한 부정확성의 가능성이 존재하기 때문에 일정 기간의 학습 기간이 반드시 필요하다. 한편, 투시 영상 유도 항법 장치는 수술 전 영상을 필요로 하지 않으며, 등록이 사용 초기에도 간단하고, 실시간 영상을 얻는 장점을 가지고 있으나 기존의 투시 영상기의 수준에 따라 해상도 차이가 나고, 2차원적 영상에 국한된다는 단점을 갖고 있다. 현재 이 두 가지의 강점을 포함하고 단점을 보완한 컴퓨터 단층-투시 영상 복합기의 빠른 실용화로 보다 정확하고 안정성이 높은 수술 기법이 척추 기구 고정술에 적용되었으나 사용 접근성의 이유로 추가적인 개발의 노력이 필요하다[5].

결국 척추 수술에 있어서 영상 유도 항법 장치의 절대적 가치는 정확도의 개선, 방사선 피폭의 감소와 효율성의 극대화라고 볼 수 있다. 3세대에 걸친 항법 장치의 진화는 이 세 가지 요소를 충족시키기 위해서 지속적인 발전을 거듭해 온 것도 사실이다. 무엇보다도 사용자의 입장에서의 수술 전 영상자료의 생략과 등록 절차의 간소화 및 컴퓨터 단말기 사용의 용이성은 그동안 기구의 사용을 꺼려하던 척추 수술자들의 시선을 돌리는 데 중요한 역할을 했다. 방사선 피폭의 감소 또한 수술실 내의 의료진은 물론 환자에게도 그 안정성을 충분히 인정받았다고 볼 수 있다. 하지만 아직도 추적 장치의 개발, 컴퓨터 운영 체계의 향상, 기구의 크기 축소, 가격의 합리화 등 개선의 여지가 남아 있고, 추후 인공지능, 로봇 수술 및 증강, 확장현실의 기술과 융합을 통해 보다 높은 가치를 창출해야 할 숙제가 있다.

결론

영상 유도 항법 장치의 구성요소와 사용 절차의 이해는 척추 수술에 있어서 보다 정확하고 안전하며 효율적인 수술 보조 도구의 기법을 습득하고자 하는 데 그 첫 번째 목적이 있다. 또한 각 내용을 영상 유도 항법 장치의 기본 작동 원리로서 이해하는 것은 결국 이를 기반으로 진화하고 융합하는 미래 기술을 인지하는 데 필수 요건이 될 것이다.

CONFLICTS OF INTEREST

No potential conflict of interest relevant to this article was reported.

REFERENCES

1. Rawicki N, Dowdell JE, Sandhu HS. Current state of navigation in spine surgery. Ann Transl Med 2021;9:85. doi: 10.21037/atm-20-1335
2. Lavallée S, Sautot P, Troccaz J, Cinquin P, Merloz P. Computer-assisted spine surgery: a technique for accurate transpedicular screw fixation using CT data and a 3-D optical localizer. J Image Guid Surg 1995;1:65-73
3. Kim SU, Roh BI, Kim SJ, Kim SD. The clinical experience of computed tomographic-guided navigation system in C1-2 spine instrumentation surgery. J Korean Neurosurg Soc 2014;56:330-3
4. Kotani Y, Abumi K, Ito M, Minami A. Improved accuracy of computer-assisted cervical pedicle screw insertion. J Neurosurg 2003;99:257-63
5. Kim JS, Eun SS, Prada N, Choi G, Lee SH. Modified transcorporeal anterior cervical microforaminotomy assisted by O-arm-based navigation: a technical case report. Eur Spine J 2011;20 Suppl 2:S147-52