

# Navigation et Chirurgie du Rachis. Quelles nouveautés quinze ans après ?

## Computer aided spine surgery. What's new fifteen years later ?

Ph Merloz, S Ruatti, M Milaire, G Kerschbaumer, J Tonetti

*Clinique Universitaire d'Orthopédie - Traumatologie, CHU A Michallon, BP 217, 38043 Grenoble cedex 09*

### Mots clés

- ◆ Chirurgie du Rachis Assistée par Ordinateur
- ◆ Navigation Chirurgicale
- ◆ Chirurgie Orthopédique Assistée par Ordinateur
- ◆ Chirurgie du rachis
- ◆ Chirurgie assistée par ordinateur

### Résumé

Les premiers systèmes de navigation pour le rachis ont été introduits au milieu des années 90 pour optimiser le positionnement des vis pédiculaires. Deux technologies sont encore utilisées : la navigation à base TDM et la fluoronavigation (fluoronavigation 2D) qui est une alternative au système à base TDM. Depuis la fin des années 2000, trois nouveaux systèmes sont utilisés de façon plus ou moins spécifique en chirurgie rachidienne.

Les amplificateurs de brillance qualifiés de tridimensionnels (3D), se comportent comme de véritables scanner de bloc et ont un effet « CT like » avec une imagerie 3D immédiatement disponible.

Les gabarits individuels servent d'aide au positionnement d'outils. Sur le plan pratique il faut disposer d'un examen TDM et d'un système de prototypage rapide. Un planning informatisé permet de prévoir un trou orienté dans l'axe du pédicule autorisant alors, le passage d'un outil de forage.

Les minis robots sont du type « robot à fixation osseuse » et apparaissent comme des systèmes d'aide au positionnement d'outils. Ils fonctionnent à base TDM.

Les méta-analyses montrent que les systèmes de navigation à base fluoroscopique 3D sont légèrement plus précis que les systèmes de navigation à base TDM et que les systèmes de fluoronavigation 2D. En matière d'irradiation, la fluoronavigation 3D semble moins irradiante que la fluoroscopie conventionnelle, mais ceci reste à prouver formellement. Les résultats à grande échelle pour l'utilisation du robot et des gabarits individuels ne sont pas encore connus et leur domaine d'utilisation est en cours d'étude.

### Keywords

- ◆ Computer-assisted spine surgery
- ◆ Surgical navigation
- ◆ Computer-assisted orthopedic surgery
- ◆ Spine surgery
- ◆ Computer-assisted surgery

### Abstract

The first navigation systems for spine surgery were introduced in the mid 90's to optimize pedicle screws insertion. Both technologies are still used: CT-based navigation and fluoronavigation (2D fluoronavigation) system which can be considered as an alternative to CT-based navigation technology. Three new technologies were introduced in the late 2000's and can be added to the orthopedic intra-operative arsenal for spine surgery.

The 3D isocentric fluoroscope is a new type of fluoroscope, able to provide intra-operative CT-like images without the need of registration process.

With templating technology, patient's CT data is used to simulate and plan preoperatively the pedicle screw trajectory on a computer workstation. A rapid prototyping technology provides templates that are intra-operatively attached to the back side of the spine at their appropriate position, thanks to the precise representation of the bony surface. Then, each drill can be carried out accurately, exactly where it has been planned.

The small robots such as "Bone Mounted Robots" can be fixed directly within the operating field. With CT-based navigation technology, and a 3D - 2D registration process, they demonstrated their ability to help the surgeon to perform pedicle drilling with a high degree of accuracy.

Meta-analyses show that 3D fluoroscopic navigation systems are slightly more accurate than CT based and 2D fluoroscopic navigation systems. In terms of radiation dose, 3D fluoroscopic navigation seems less radiating than conventional fluoroscopy, but this remains to be proven formally. The results for a large-scale clinical use of the bone-mounted robot and templates are not yet known and their clinical application field is being to be considered.

Les systèmes de navigation pour la chirurgie du rachis sont apparus au milieu des années 90, peu de temps après les systèmes de navigation et de robotique introduits dès la fin des années 80 pour la chirurgie stéréotaxique en neurochirurgie (1, 2). Rappelons que la grande idée des technologies de Chirurgie Assistée par Ordinateur (CAO) consiste à augmenter la précision de l'acte tout en réduisant la morbidité et le caractère

invasif des gestes. Le principe de base consiste à localiser en trois dimensions (3D) la position d'instruments chirurgicaux dans le champ opératoire et à faire apparaître ces mêmes instruments sur des images préopératoires (TDM ou IRM) ou peropératoires (images radiographiques) (1, 2).

Avant d'envisager les progrès récents accomplis en matière de CAO en chirurgie du rachis, nous rappellerons brièvement les

### Correspondance :

*Clinique Universitaire d'Orthopédie - Traumatologie, CHU A Michallon, BP 217, 38043 Grenoble cedex 09*

*Tel : + 33 4 76 76 55 93 - Fax : + 33 4 76 76 52 18*

*E-mail : PMerloz@chu-grenoble.fr*

Disponible en ligne sur [www.acad-chirurgie.fr](http://www.acad-chirurgie.fr)

1634-0647 - © 2013 Académie nationale de chirurgie. Tous droits réservés.



Figure 1 : Image de navigation sur la première vertèbre sacrée (après recalage sur base TDM).

L'interface utilisateur de la station de navigation permet à l'opérateur de visualiser sur le moniteur la progression de ses outils dans la vertèbre S1 en 3D et en temps réel (face + profil + vue axiale + modèle 3D).

deux techniques qui ont présidé à la naissance de la navigation au niveau du rachis, principalement pour optimiser l'insertion des vis pédiculaires. Il s'agit de la navigation à base TDM et de la navigation à base fluoroscopique.

## Navigation à base TDM

Cette technique fut la première à voir le jour au milieu des années 90 (3, 4). Le processus se déroule de la manière suivante : en préopératoire il est réalisé un examen TDM de la ou des vertèbres à opérer. Les images TDM sont transférées dans l'ordinateur puis segmentées afin de réaliser un modèle tridimensionnel (modèle 3D). En peropératoire le chirurgien acquiert au niveau de l'arc postérieur de la vertèbre opérée un certain nombre de points pris de façon aléatoire à l'aide d'un palpeur localisé dans l'espace grâce à un localisateur infrarouge. Ces points sont alors fusionnés avec les points de surface du modèle 3D de la même vertèbre. Cette technique de fusion d'images se réalise point à point et le recalage est dit rigide. Dès lors il devient possible de visualiser la progression en 3D et en temps réel d'un outil ou d'une vis à l'intérieur d'un pédicule vertébral (Fig. 1).

Ce type de système fournit réellement des informations en 3D ainsi que sur la densité osseuse. La précision est excellente. Par contre la phase de recalage peut parfois poser des problèmes de précision liés très souvent à une acquisition imprécise des points en peropératoire (5, 6, 7).

## Navigation à base fluoroscopique

Les amplificateurs de brillance modernes fournissent des images de bonne qualité qui peuvent être utilisées pour réaliser des gestes chirurgicaux précis. Une mire de calibrage appropriée placée sur le récepteur de l'amplificateur de brillance permet de corriger les phénomènes d'agrandissement et de déformation. Dans ces conditions et sous réserve que cette même mire de calibrage soit équipée de pastilles réfléchissantes afin d'être localisée dans l'espace, il est possible de projeter dans l'interface visuelle de l'ordinateur, l'image des outils et de les visualiser avec un excellent niveau de précision. Après acquisition et transfert vers l'ordinateur de plusieurs images fluoroscopiques (face, profil, éventuellement  $\frac{3}{4}$ ), l'amplificateur de brillance est retiré du champ opératoire

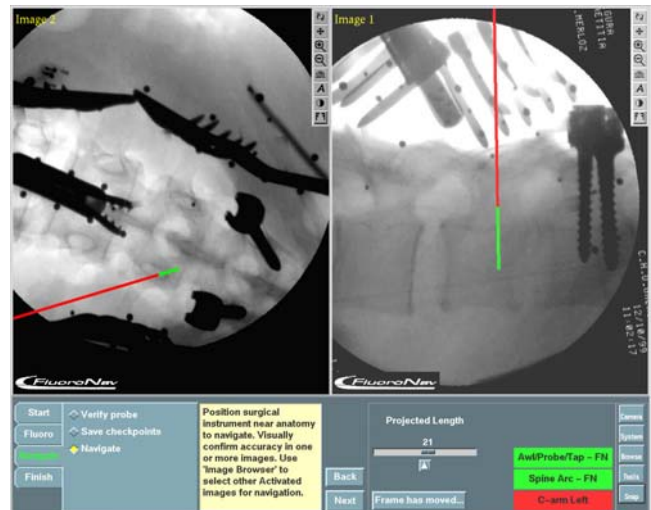


Figure 2 : Système de fluoronavigation.

L'amplificateur de brillance muni de sa grille de calibrage fixée au récepteur permet d'acquérir deux images face et profil de la vertèbre opérée. Les deux images seront reformatées par l'ordinateur permettant alors une navigation en temps réel, sans recalage mais en deux dimensions seulement (vertèbre lombaire).

toire et la navigation peut commencer immédiatement, en temps réel et simultanément sur plusieurs vues radiographiques (8, 9, 10). La navigation à base fluoroscopique (ou fluoroscopie virtuelle) est un outil pratique et facile à utiliser. La fluoroscopie virtuelle permet de se passer d'examen spécifique préopératoire et donc de toute technique de recalage (Fig. 2). L'inconvénient de cette méthode est de ne fournir qu'une information bidimensionnelle, en supprimant toute possibilité de vue axiale (d'où l'autre appellation de « fluoroscopie 2D »). De ce fait, la précision du système est moins performante que celle d'un système à base TDM, comme cela a été rapporté dans un certain nombre de publications (8, 9, 10). De plus elle génère une irradiation au bloc opératoire (patient et personnel).

## Les trois nouveautés

Elles concernent les amplificateurs de brillance tridimensionnels (3D), les gabarits de forage et les robots à fixation osseuse.

### L'amplificateur de brillance tridimensionnel (3D)

Il s'agit d'un amplificateur de brillance traditionnel doté d'un « bras en C » classique, décrit aussi sous l'appellation « fluoroscope 3D ». Ce qui change par rapport à l'amplificateur de brillance conventionnel c'est que le « bras en C » peut être animé de mouvements en rotation et que les images sont reformatées en 3 dimensions. La rotation du « bras en C » et donc de l'ensemble émetteur/récepteur se fait sur 180°. Pendant cette rotation, les images sont émises puis captées en rafale, de façon régulière. L'accumulation d'images sur 180° permet de formater un modèle tridimensionnel (11). Pour atteindre ce but il faut que l'appareil soit doté d'une capacité isocentrique de façon à ce que l'organe radiographié reste toujours équidistant de l'émetteur et du récepteur. La navigation est autorisée après acquisition des images sous réserve qu'un arc de référence soit fixé sur l'organe opéré (vertèbre) (11, 12).

Les avantages d'un amplificateur de brillance tridimensionnel sont les suivants : les images sont réellement tridimensionnelles avec un véritable effet « CT like ». Il n'y a pas de recalage et le fonctionnement du système est fiable (Fig. 3). De plus le système permet un contrôle préopératoire de la posi-

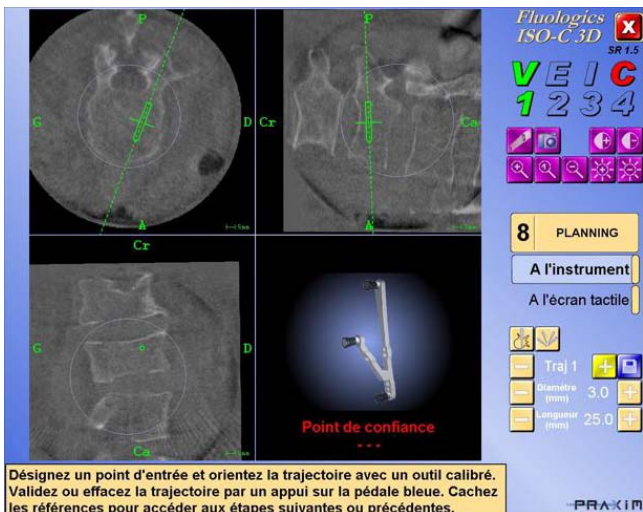


Figure 3 : Système de fluoroscopie 3D + Navigation.  
 Les images acquises pendant la rotation du bras en « C » sont reformattées puis présentées sur les écrans du système comme les planches TDM que nous utilisons quotidiennement, c'est à dire sous un mode « pseudo 3D » (images coronales sagittales et axiales), donnant un effet « CT like ».

tion des implants. Par contre, les récepteurs sont encore de taille réduite et il est difficile d'avoir des images de qualité pour de gros volumes. Les images provenant de récepteurs plans (*silicium*) sont de bien meilleure qualité et devraient donner un élan prometteur à l'utilisation de ce type d'outil (11, 12, 13).

Le terme ultime des amplificateurs de brillance 3D est le véritable scanner de bloc opératoire. Certaines unités de radiologie interventionnelle en sont dotées (Fig. 4). Ce scanner peut être déplacé sur un rail au plancher ou au plafond de la salle (13, 14). Certains scanners de bloc ont des fonctions robotisées plus ou moins sophistiquées permettant d'optimiser les conditions d'obtention des images radiographiques.

### Les gabarits de forage

Ils ont été mis au point en Allemagne par l'équipe de Klaus Radermacher (université de Aachen) (15, 16) et ils s'apparentent à des systèmes de navigation semi-actifs. Leur forme est

Figure 5 : Gabarits.  
 Les gabarits individuels servent d'aide au positionnement d'outils. Sur le plan pratique il faut disposer d'un examen TDM et d'un système de prototypage rapide. Un planning informatisé permet de percer un trou orienté dans l'axe du pédicule autorisant alors le forage (image Klaus Radermacher, Helmholtz-Institute, Biomedical Engineering, Aachen university, Allemagne).

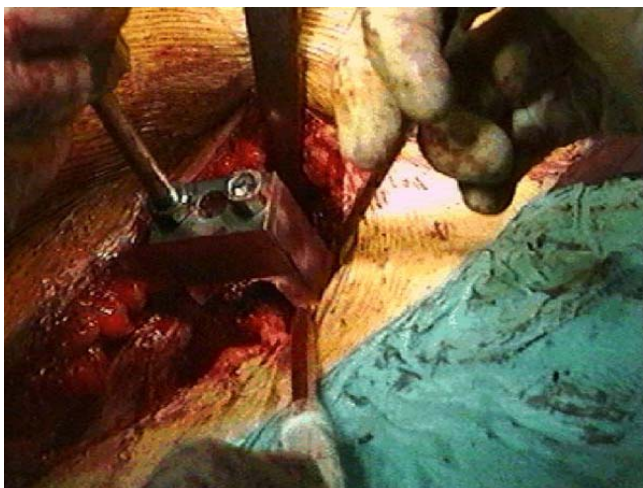
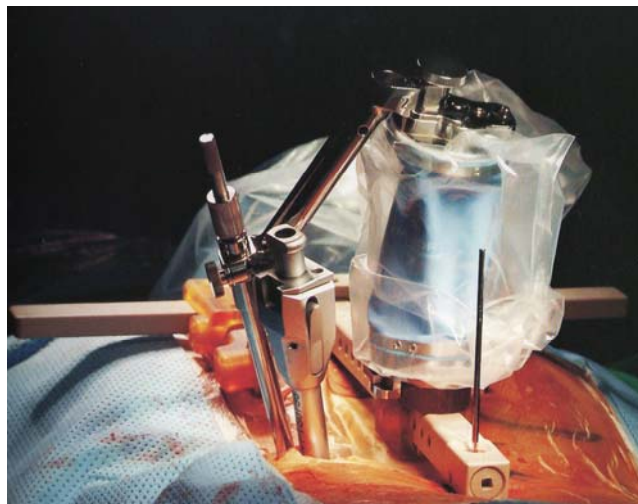


Figure 4 : Scanner de Bloc.  
 Le terme ultime de la fluoroscopie 3D est représenté par le scanner de bloc. Il est utilisé ici pour des gestes de radiologie interventionnelle (image Yvan Bricault, CHU Grenoble).

déterminée à partir d'une base d'images TDM de l'organe opéré (en l'occurrence de la ou des vertèbres). Grâce à un système de prototypage rapide, il est construit un gabarit qui s'adapte exactement sur la face postérieure du rachis, au niveau de la ou des vertèbres que l'on doit instrumenter. A partir de l'examen TDM préopératoire, une prévision permet de déterminer avec précision le trajet pédiculaire. La machine-outil de prototypage rapide peut alors forer l'axe du pédicule dans le gabarit. Une fois que le gabarit est correctement positionné sur le rachis, l'opérateur peut introduire un outil de perçage dans les trous prévus à cet effet sur le gabarit (Fig. 5). Cette technologie est fiable et son usage est facile. Par contre, tout changement de direction ou d'axe, ou de point de pénétration de l'outil est naturellement impossible. En plus, l'établissement de soins doit être équipé d'un système de prototypage rapide qui comprend habituellement des moyens informatiques performants capables de réaliser des modèles en trois dimensions et un outillage basé soit sur l'usinage très grande vitesse, la stéréolithographie ou l'impression 3D (17, 18).

Figure 6 : Robot.  
 Le système « Renaissance™ » est un positionneur d'outils créé pour la mise en place des vis pédiculaires. Il est très compact et fonctionne à base TDM. Sa géométrie hexapodale lui permet d'avoir 6 degrés de liberté.



## Les robots

Un robot en chirurgie effectue un travail autonome et indépendant du chirurgien, conformément à un planning établi en préopératoire. Il n'y a pas à notre connaissance de robot fonctionnant sur ce mode et appliqué à la chirurgie du rachis. Les robots « rachidiens » sont représentés par le concept intitulé « Bone Mounted Robot » (robot à fixation osseuse) (19, 20). Ces robots miniaturisés sont en fait des positionneurs d'outils. Ils fonctionnent à base TDM et la détermination du point d'entrée et de l'axe du pédicule se fait à partir du planning préopératoire. La navigation est possible à partir d'un recalage entre les images scanner préopératoires et des images de fluoroscopie 2D peropératoires (recalage dit « 3D/2D »). L'exemple type est le système Renaissance™. C'est un positionneur d'outils créé pour la mise en place des vis pédiculaires. Il est compact, léger et se fixe directement sur le processus épineux vertébral (Fig. 6). Sa géométrie hexapodale lui permet d'avoir six degrés de liberté (21, 22, 23).

Un des inconvénients du système est qu'il ne permet pas le contrôle direct du positionnement des implants. Pour réaliser cette étape il faut recommencer une procédure de recalage 3D-2D en peropératoire.

## Efficacité, précision et avenir de ces nouvelles technologies

De nombreuses publications sur la précision du positionnement des implants pédiculaires en région thoracique et lombaire (avec ou sans utilisation de système de navigation) comparent les résultats obtenus avec différents types de systèmes : base TDM, fluoroscopie 2D et 3D (24, 25, 26).

Toutefois l'impact des nouvelles technologies en termes d'utilisation clinique reste encore limité sauf pour la fluoroscopie naviguée 3D.

La fluoronavigation 3D apparaît comme un outil intéressant car il associe les avantages de l'effet « CT like » et ceux de la fluoroscopie naviguée 2D. En matière de précision, pour l'insertion des vis pédiculaires, la fluoronavigation 3D apparaît supérieure à la chirurgie conventionnelle mais aussi à la navigation à base TDM et à la fluoroscopie naviguée 2D (taux de pénétration extra-pédiculaire de 4 à 6 % en moyenne, contre plus de 20 % en chirurgie conventionnelle). Si on compare la navigation fluoroscopique 3D à la navigation à base TDM, on observe que le taux de perforation pédiculaire atteint 9 % avec la navigation à base TDM contre 6,6 % avec la navigation à base fluoroscopique 3D. Ces différences sont statistiquement significatives (27-31).

La mise en œuvre récente des systèmes robotisés limite les publications sur leur efficacité clinique. Néanmoins, des expériences cliniques d'importance variable (21, 22, 23) permettent de dire que l'utilisation du robot avec une chirurgie à ciel ouvert ou une chirurgie percutanée et comparée à la technique conventionnelle permet d'augmenter de façon sensible la précision de pose des implants pédiculaires (plus de 90 % de vis strictement intra-pédiculaires).

La technique des gabarits individuels (ou guides de perçage) pour la pose des vis pédiculaires est restée d'utilisation confidentielle jusqu'à la fin des années 2000. Elle réapparaît actuellement (notamment en Asie) de façon spectaculaire en chirurgie du rachis (17, 18). Son utilisation reste toutefois restreinte pour des raisons de coût et d'environnement technique (machine de prototypage rapide).

Même si nous manquons actuellement de certitude, il semble que la fluoronavigation 3D apparaisse un peu moins irradiante que la fluoroscopie conventionnelle, dans la mesure où les conditions d'utilisation clinique des deux systèmes sont similaires (32, 33). Dans tous les cas ces technologies nouvelles restent consommatrices de temps en peropératoire (24).

Les différents systèmes de navigation (Base TDM, fluoroscopie 2D et 3D, scanner de bloc, gabarit de forage et robots) sont particulièrement utiles lorsque l'anatomie rachidienne est modifiée : scoliose, rachis préalablement arthrodésé par fusion postérieure ou postéro-latérale, cal vicieux ou malformation congénitale. Dans ces situations si l'aide à l'implantation des vis pédiculaires apparaît incontestable, les techniques récentes (fluoroscopie 3D et scanner de bloc surtout) permettent de visualiser l'axe d'une ostéotomie ou les limites d'une résection osseuse. Dans d'autres circonstances (traumatologie courante du rachis), ces mêmes techniques ont élargi la voie des indications de l'implantation percutanée du matériel d'ostéosynthèse.

## Conclusions

La supériorité des systèmes de navigation est évidente lorsqu'ils sont utilisés pour mettre en place des implants pédiculaires dans les grandes déformations rachidiennes ou sur des segments rachidiens préalablement fusionnés. Parmi les trois systèmes de navigation couramment utilisés, les méta-analyses montrent que les systèmes de navigation à base TDM sont légèrement plus précis que les systèmes de fluoronavigation 2D. Ces deux derniers restent toutefois de précision légèrement inférieure à celle fournie par les nouveaux systèmes de navigation à base fluoroscopique 3D. En matière d'irradiation, la fluoronavigation 3D semble moins irradiante que la fluoroscopie conventionnelle, mais surtout elle autorise un contrôle immédiat peropératoire qui fait disparaître le risque de ré-intervention pour implant mal placé. Pour l'instant, seules quelques équipes aux États-Unis pour le robot et en Asie pour les gabarits individuels étudient le domaine d'utilisation de ces deux derniers systèmes.

## Références

1. Lavallée S, Troccaz J, Sautot P, Mazier B, Cinquin Ph, Merloz Ph et al. Computer assisted spine surgery using anatomy-based registration. In: Taylor R, Lavallée S, Burdea G, Mösger R, editors. Computer Integrated Surgery MIT Press, Cambridge 1995 : 425-49.
2. Troccaz J, Peshkin M, Davies B. The use of Localizers, Robots and Synergistic Devices in C.A.S. In Troccaz J, Grimson E, Mösger M, editors. Lecture notes in computer science, Springer Verlag Berlin 1997 : 727-36.
3. Nolte LP, Visarius H, Arm E, Langlotz F, Schwarzenbach O, Zamorano L. Computer aided fixation of spinal implants. J Image Guid Surg 1995 ; 1 : 88-93.
4. Lavallée S, Sautot P, Troccaz J, Cinquin Ph, Merloz Ph. 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.
5. Merloz Ph, Tonetti J, Pittet L, Coulomb M, Lavallée S, Sautot P. Pedicle screw placement using Image Guided Techniques. Clin. Orthop 1998 ; 354 : 39-48.
6. Merloz Ph, Tonetti J, Cinquin P, Lavallée S, Troccaz J, Pittet L. Chirurgie Assistée par Ordinateur : vissage automatisé des pédicules vertébraux. Chirurgie 1998 ; 123 : 482-90.
7. Merloz Ph, Tonetti J, Pittet L, Coulomb M, Lavallée S, Troccaz J et al. Computer Assisted Spine Surgery. Comput. Aided Surg. 1999 ; 3 : 297-305.
8. Foley KT, Simon D, Rampersaud YR. Virtual Fluoroscopy. Oper. Techniques in Orthop 2000 ; 10 : 77-81.
9. Merloz Ph, Huberson Ch, Tonetti J, Eid A, Vouaillat H. Computer-Assisted Pedicle Screw Insertion. Techniques in Orthopaedics 2003 ; 18 : 149-159.
10. Merloz P, Troccaz J, Vouaillat H, Vasile C, Tonetti J, Eid A et al. Fluoroscopy-based navigation system in spine surgery. Proc Inst Mech Eng (H) 2007 ; 221 : 813-820.
11. Desbat L, Fleute M, Defrise M, Liu X, Huberson C, Laouar R et al. Minimally Invasive Interventional Imaging for Computer-Assisted Orthopaedic Surgery. In Troccaz J, Merloz Ph, editors. "Surgetica 2002", Computer-aided medical interventions: tools and applications, Sauramps Medical, Montpellier 2002 : 288-295.
12. Wendl K, von Recum J, Wentzensen A, Grütznier PA. Iso-C (3D0-

- assisted) navigated implantation of pedicle screws in thoracic lumbar vertebrae. *Unfallchirurg* 2003 ; 106 : 907-13 (Article in German).
13. Grütznér PA, Beutler T, Wendl K, von Recum J, Wentzensen A, Nolte LP. Intraoperative three-dimensional navigation for pedicle screw placement. *Chirurg* 2004 ; 75 : 967-75 (Article in German).
  14. von Recum J, Wendl K, Vock B, Grütznér PA, Franke J. Intraoperative 3D C-arm imaging. State of the art. *Unfallchirurg* 2012 ; 115 : 196-201 (Article in German).
  15. Radermacher K, Portheine F, Zimolong A, Eichhorn C, Staudte HW, Rau G. Image Guided Orthopedic Surgery Using Individual Templates. In Troccaz J, Grimson E, Mösges M, editors. *Lecture notes in computer science*, Berlin : Springer Verlag 1997 : 606-15.
  16. Radermacher K, Portheine F, Anton M, Zimolong A, Kaspers G, Rau G et al. Computer assisted orthopedic surgery with image based individual templates. *Clin Orthop Relat Res*. 1998 : 28-38.
  17. Birnbaum K, Schkommodau E, Decker N, Prescher A, Klapper U, Radermacher K. Computer-assisted orthopedic surgery with individual templates and comparison to conventional operation method. *Spine (Phila Pa 1976)* 2001 ; 26 : 365-70.
  18. Lu S, Xu YQ, Chen GP, Zhang YZ, Lu D, Chen YB et al. Efficacy and accuracy of a novel rapid prototyping drill template for cervical pedicle screw placement. *Comput Aided Surg* 2011 ; 16 : 240-8.
  19. Shoham M, Burman M, Zehavi E, Joskowicz L, Batkilin E, Kunicher Y. Bone mounted miniature robot for surgical procedures: concept and clinical applications. *IEEE Transactions on Robotics and Automation* 2003 ; 19 : 893-901.
  20. Shoham M, Lieberman IH, Benzel EC, Togawa D, Zehavi E, Zilberstein B et al. Robotic assisted spinal surgery - from concept to clinical practice. *Computer Aided Surg* 2007 ; 12 : 105-115.
  21. Pechlivanis I, Kiriyanthan G, Engelhardt M, Scholz M, Lücke S, Harders A et al. Percutaneous placement of pedicle screws in the lumbar spine using a bone mounted miniature robotic system, first experiences and accuracy of screw placement. *Spine* 2009 ; 34 : 392-8.
  22. Devito DP, Kaplan L, Dietl R, Pfeiffer M, Horne D, Silberstein B et al. Clinical acceptance and accuracy assessment of spinal implants guided with SpineAssist surgical robot: retrospective study. *Spine* 2010 ; 35 : 2109-15.
  23. Kantelhardt SR, Martinez R, Baerwinkel S, Burger R, Giese A, Rohde V. Perioperative course and accuracy of screw positioning in conventional, open robotic-guided and percutaneous robotic-guided, pedicle screw placement. *Eur Spine J*. 2011 ; 20 : 860-868.
  24. Tian NF, Huang QS, Zhou P, Zhou Y, Wu RK, Lou Y et al. Pedicle screw insertion accuracy with different assisted methods: a systematic review and meta-analysis of comparative studies. *Eur Spine J*. 2011 ; 20 : 846-59. Epub 2010 Sep 23.
  25. Fu TS, Chen LH, Wong CB, Lai PL, Tsai TT, Niu CC et al. Computer assisted fluoroscopic navigation of pedicle screw insertion: an in vivo feasibility study. *Acta Orthop. Scand* 2004 ; 75 : 730-5.
  26. Youkilis AS, Quint DJ, McGillicuddy JE, Papadopoulos SM. Stereotactic navigation for placement of pedicle screws in the thoracic spine. *Neurosurgery* 2001 ; 48 : 771-9.
  27. Mirza SK, Wiggins GC, Kuntz C 4th, York JE, Bellabarba C, Konodi MA et al. Accuracy of thoracic vertebral body screw placement using standard fluoroscopy, fluoroscopic image guidance, and computed tomographic image guidance: a cadaver study. *Spine* 2003 ; 28 : 402-13.
  28. Rajasekaran S, Vidyadhara S, Ramesh P, Shetty AP. Randomized clinical study to compare the accuracy of navigated and non-navigated thoracic pedicle screws in deformity correction surgeries. *Spine* 2007 ; 32 : E56-E64.
  29. Nottmeier EW, Seemer W, Young PM. Placement of thoracolumbar pedicle screws using three-dimensional image guidance: experience in a large patient cohort. *J Neurosurg Spine* 2009 ; 10 : 33-9.
  30. Nakashima H, Sato K, Ando T, Inoh H, Nakamura H. Comparison of the percutaneous screw placement precision of isocentric C-arm 3-dimensional fluoroscopy-navigated pedicle screw implantation and conventional fluoroscopy method with minimally invasive surgery. *J Spinal Disord Tech* 2009 ; 22 : 468-72.
  31. Gruetzner PA, Waelti H, Vock B, Hebecker A, Nolte LP, Wentzensen A. Navigation using fluoro-CT technology, concept and clinical experience in a new method for intraoperative navigation. *Eur J Trauma* 2004 ; 30 : 161-70.
  32. Slomczykowski M, Roberto M, Schneeberger P, Ozdoba C, Vock P. Radiation dose for pedicle screw insertion. Fluoroscopic method versus computer-assisted surgery. *Spine* 1999 ; 24 : 975-82.
  33. Kraus MD, Krischak G, Keppler P, Gebhard FT, Schuetz UH. Can computer-assisted surgery reduce the effective dose for spinal fusion and sacroiliac screw insertion? *Clin Orthop Relat Res* 2010 ; 468 : 2419-29. Epub 2010 Jun 3.