

成人股骨颈骨折内固定技术的研究进展

董峻辰, 王剑飞

延安大学附属医院, 陕西 延安

收稿日期: 2022年2月9日; 录用日期: 2022年3月2日; 发布日期: 2022年3月11日

摘要

股骨颈骨折是临床常见损伤, 约占全身骨折总数的3.58%, 由于社会人口老龄化的逐渐发展, 预计到2050年全球髋部骨折患者将达到630万, 由于成人股骨颈骨折多数是由于高能量损伤造成, 此类骨折的断端存在较大垂直剪切力, 骨折端错位程度一般较重, 为不稳定型股骨颈骨折, 因而常伴有局部血管的损伤, 易引起骨不连、股骨头坏死及内固定的失效等问题, 这些对于骨折的治疗可能相当具有挑战性。其中成人股骨颈骨折的内固定技术在许多方面一直存在争议, 无论选择何种内固定方法, 目标都是解剖复位和稳定内固定。近年来, 计算机辅助骨科手术(computer assisted orthopaedic surgery, CAOS), 也称骨科导航手术, 发展十分迅速, 在提高手术定位精度、减少手术损伤、实施复杂骨科手术、提高手术成功率方面的表现卓越, 在股骨颈骨折治疗方面也充分体现了上述优点, 虽应用时间较短, 但正在被人们广泛地研究并逐渐地应用于临床, 受到各国骨科医师的高度重视。本文对不同成人股骨颈骨折的内固定方法及CAOS技术在治疗股骨颈骨折方面的优势和不足等进行综述。

关键词

股骨颈骨折, 内固定, 手术治疗, CAOS

Research Progress of Internal Fixation Technique for Femoral Neck Fracture in Adults

Junchen Dong, Jianfei Wang

Yan'an University Affiliated Hospital, Yan'an Shaanxi

Received: Feb. 9th, 2022; accepted: Mar. 2nd, 2022; published: Mar. 11th, 2022

Abstract

Femoral neck fracture is a common clinical injury, accounting for about 3.58% of the total number

of systemic fractures. Due to the gradual development of aging of society and population, it is expected that the number of hip fracture patients worldwide will reach 6.3 million by 2050. As most adult femoral neck fractures are caused by high-energy injuries, there is a large vertical shear force at the broken end of such fractures. The degree of dislocation at the fracture end is generally severe, which is an unstable femoral neck fracture, and is often accompanied by local vascular injury, which is easy to cause problems such as bone nonunion, femoral head necrosis and internal fixation failure, etc., which may be quite challenging for the treatment of fracture. Among them, the internal fixation technique of femoral neck fracture in adult has been controversial in many aspects. No matter what internal fixation method is chosen, the goal is anatomic reduction and stable internal fixation. In recent years, computer assisted orthopaedic surgery (CAOS), also known as orthopaedic navigation surgery, has developed rapidly and achieved remarkable performance in improving surgical positioning accuracy, reducing surgical injury, performing complex orthopaedic surgery, and improving the success rate of surgery. The above advantages are also fully reflected in the treatment of femoral neck fracture. Although it has been applied for a short time, it is being widely studied and gradually applied in clinical practice, and is highly valued by orthopedic surgeons around the world. This article reviews the advantages and disadvantages of different methods of internal fixation for femoral neck fracture in adults and CAOS technique in the treatment of femoral neck fracture.

Keywords

Femoral Neck Fracture, Internal Fixation, Surgical Treatment, CAOS

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 前言

股骨颈骨折是指股骨头下至股颈基底的骨折。与老年股骨颈骨折不同的是,成人股骨颈骨折常见的原因是高能量损伤[1],此时骨折线更加垂直(即 Pauwels III 型),并且常常存在明显的移位[2],此种类型的股骨颈损伤容易发生骨坏死和骨不连等并发症,股骨颈骨折内固定后再手术率为 20%,其中缺血性骨坏死(14.35%)和骨不连(9.30%)是导致重复手术最常见的并发症[3]。因此,成人股骨颈骨折治疗起来具有更大的挑战性,但最终目的都是在达到解剖复位的基础上恢复患肢功能,同时尽量减少并发症的发生。近年来,手术植入物及辅助手术的新型技术仍在不断发展,旨在恢复解剖结构、稳定内固定及减少并发症的发生,对成人股骨颈骨折内固定方式的选择仍存在争议[4]。本文就成人股骨颈骨折常用的内固定方式及辅助技术进行综述,旨在为临床治疗成人股骨颈骨折提供一定理论参考依据。

2. 内固定方式的选择

目前,成人股骨颈骨折的内固定方式较多,固定方式的选择并无统一标准,不同内固定方式有其各自的优缺点及适用骨折类型。许多生物力学及有限元分析研究指出 3 枚空心螺钉呈倒三角形、分散对称分布的方式综合效果最理想[5]。

1) 空心加压螺钉(cannulated compression screw, CCS),一般遵循滑动加压理论,采用 3 枚平行于股骨颈的三角形构型,正三角形因下方 2 枚螺钉应力集中易导致股骨粗隆下骨折,现多主张倒三角形排列,可提供更好的机械稳定性[6]。3 枚倒三角形平行空心螺钉固定的缺点是可发生股骨颈短缩、螺钉松动及

退钉等, 从而导致一定的内固定失败率。特别是在青壮年股骨颈骨折中, 因受伤机制不同, 骨折断端不稳定, 垂直剪切力大, 3枚平行空心螺钉固定的失败率 20%~48% [7]。这引起了国内外学者的注意并作出了一些改良。陈武生等[8]选用 2枚半螺纹空心钉与 1枚全螺纹钉倒等腰三角形构型置入治疗青壮年股骨颈骨折, 在靠近股骨颈后壁处用 1枚全螺纹钉固定, 这样比使用 3枚半螺纹空心钉在固定效果上更加稳定, 可减少股骨颈短缩、退钉等现象发生。张鹏翼等[9]采用 3枚 Acutrak 加压空心钉治疗 43例青壮年股骨颈骨折, 发现此治疗方式骨折愈合率高, 关节功能恢复好。有学者研究, 治疗不稳定型股骨颈骨折时, 增加 1枚横向插入的螺钉将提高固定的稳定性[10]。还有学者行 3枚倒三角形空心螺钉外加 1枚与骨折线垂直的空心螺钉可以更稳定地固定骨折[11]。Filipov 等[12]研究了一种双平面双支撑的固定技术即 F 技术, 在两个平面上固定骨折, 有更好的支撑及抗压作用, 骨折断端不易短缩, 术后可早期完全负重。有文献报道, 应用血管化的自体骨移植治疗股骨颈骨折。Li 等[13]分别应用旋髂深动脉植骨术联合 3枚空心螺钉和单纯 3枚空心螺钉固定对比治疗青壮年股骨颈骨折患者, 发现骨移植术治疗后骨不连与股骨头坏死的发生率有明显的降低。一篇 Meta 分析研究表明, 带蒂股方肌骨瓣移植联合 3枚加压空心螺钉和单纯空心加压螺钉固定治疗股骨颈骨折, 在骨折愈合率、股骨头坏死率、髋关节功能优良率及骨折愈合时间等方面前者均优于后者[14]。

2) DHS 主要包含滑动髋螺钉(sliding hip screw, SHS)和侧方钢板, SHS 可在套筒内轻度滑动是 DHS 的特点, SHS 放置的尖-顶距通常应 <25 mm, 以减少 SHS 断裂的可能[15]。SHS 可通过股骨颈骨折断端滑动提供持续的动态及静态加压作用, 为骨折愈合提供坚强的固定, 以加快骨折愈合。DHS 在治疗 Pauwels III 型股骨颈骨折的效果明显优于 CCS [16] [17], 可显著加强高能量损伤所致骨折的固定。Li 等[18]报道显示, DHS 联合腓骨移植治疗青年 Pauwels III 型股骨颈骨折可以缩短患者骨折愈合时间, 降低骨不连和股骨头缺血性坏死的发生率。总之, DHS 具有利于骨折复位和愈合的特点, 但其抗旋转性能不足。

3) 经皮加压钢板固定系统(percutaneous compression plate, PCCP), PCCP 主要由锁定钢板、颈部螺钉和骨干部螺钉组成, 可以经皮植入, 具有切口较小等优点, 能最大程度减少股骨颈周围软组织的损伤。徐可林等[19]研究发现, PCCP 固定治疗股骨颈骨折, 术后骨折愈合时间早于空心螺钉固定。殷渠东等[20]研究发现, PCCP 固定治疗移位明显的股骨颈骨折, 在维持骨折端稳定性及滑动加压方面优于空心螺钉固定, 可早期进行康复训练, 有利于降低骨折不愈合及股骨头坏死的发生率。Zhu 等[21]采用 PCCP 固定治疗股骨颈骨折患者 74 例, 术后所有患者骨折均愈合, 2 例出现股骨头坏死。Arirachakaran 等[22]研究发现, PCCP 固定治疗股骨颈骨折可缩短手术时间, 且并发症发生率较低。对于闭合性损伤且骨折类型为 Garden II 型及以上或囊内型股骨颈骨折患者, 采用 PCCP 固定治疗, 远期髋关节功能评分优良率较高[23]。关于 PCCP 固定治疗股骨颈骨折的疗效, 目前尚缺乏大样本的随机对照试验验证。

4) 内侧支撑钢板固定 CCS、DHS 固定治疗股骨颈骨折, 均不能为股骨颈下内侧提供可以消除垂直剪切力的支撑。近年来, 股骨颈内侧支撑的问题逐渐受到临床重视。内侧支撑钢板具有抗滑功能, 且能为股骨颈提供有效支撑, 可以为骨折愈合创造良好的环境。内侧支撑钢板固定治疗股骨颈骨折, 在植入 2枚平行螺钉后, 于股骨近端内侧植入 1块支撑钢板, 可通过钢板的支撑作用将骨折断端间的垂直剪切力转化为有利于骨折愈合的压应力, 可在一定程度上防止青壮年患者术后出现内固定失败[24]。内侧支撑钢板的应力转化作用, 有利于预防垂直型股骨颈骨折内固定术后股骨头塌陷及骨折不愈合等并发症。Ye 等[25]对 28 例 60 岁以下的 Pauwels III 型股骨颈骨折患者行内侧支撑钢板联合空心螺钉固定治疗, 并进行了平均 13.6 个月的随访, 结果 3 例患者出现内固定失败, 至末次随访时均未出现股骨头坏死; 该研究结果表明, 内侧支撑钢板联合空心螺钉固定治疗股骨颈骨折的并发症较少, 但其远期疗效有待进一步研究。

5) 股骨颈动力交叉钉系统(femoral neck system, FNS)是一种固定股骨颈骨折的新方法, 其创伤小, 又

可提供稳定的抗旋转力和抗剪切力,且不易出现螺钉切割、退钉等现象[26] [27];另外,其埋头设计可减少钉尾对周围软组织的激惹。但目前 FNS 相关临床研究较少,临床效果仍不明确。

3. 计算机导航在股骨颈骨折中的应用

3.1. CAOS 术中的工作原理

CAOS 在 20 多年前引入[28] [29] [30], 已经成为一个新的独立领域, 代表了使用计算机跟踪系统或机器人设备来提高可见性的方法并提高了在各种外科手术过程中的应用的准确性。计算机导航技术是集医学、生物力学、机械力学、材料科学、计算机科学技术等于一体的一个新的交叉研究领域。具体是利用数字化扫描技术(X 线、CT、MRI 等)将患者术前或术中所得到的相关影像资料在计算机上重建出病人的 3D 影像, 手术医生即可在此影像基础上利用相关软件进行术前计划或术中定位。在实际手术过程中, 该系统是基于骨骼上的示踪器与直接连接在计算机上的信号发射器及感应装置组成的三维空间定位系统。手术过程中导航系统的红外线摄像头, 动态追踪手术器械相对患者解剖结构的实时空间位置关系, 术者通过计算机显示屏从各个方位(轴位、矢状位、冠状位、术野前方透视层面等)观察到当前的手术入路及各种参数如角度、深度等, 从而最大限度地避开危险区域, 在最短的时间内到达病灶靶点, 大大减少病人的失血量、手术创伤及并发症, 完成真正意义上的微创手术。

3.2. CAOS 在股骨颈骨折手术中的优势

与传统手术相比, 导航系统在以下几方面显示出了它的优势: 1) 提高了手术效果: 借助导航系统, 在外部空间坐标跟踪设备的帮助下, 测量患者的手术靶区和手术器械或机器人的空间坐标来得到它们之间的相对位置关系, 可以指导医生进行准确、快速、安全的植物定位和植入。由于定位精确, 避免了反复的钻孔, 减少了早期固定失效的机率。2) 明显减少了射线暴露: 通过精密影像联合技术, 进行术前技术中的合理规划, 达到持续导航的作用, 有效的在导航屏幕上显示手术有关的有效信息, 只要少量照射, 即可完成手术, 可极大地减少工作人员和患者的辐射从而保护了患者及医务人员的健康[31]。3) 缩短手术时间和减少了手术创伤。由于术前及术中的精密计划, 在导航屏幕上保留的资料, 随时可反复操作, 而且对手术操作没有任何妨碍作用, 手术者根据导航模拟的预置钉道, 选择最合适的位置操作, 可以明显减少手术时间和反复钻孔带来的内部创伤。吴景华[31]用导航引导下置钉的手术时间仅有 15~25 min。

3.3. CAOS 在股骨颈骨折手术中的不足

1) 缺乏统一的操作规范和评价标准: 由于目前世界上成型的 CAOS 系统多达几十种, 各系统的设备、原理、周边配套、使用成本、精确性、兼容性及实用性有较大的差别。目前还没有关于此项技术绝对的标准的手术操作规范和评价准则, 由于不同设备的价位大多都很昂贵, 这使得具体临床操作者无法评价不同类型设备的优劣, 在比较不同临床手术效果时缺乏足够的依据和对比。

2) 术中影像漂移: 即手术进行中由于操作时组织结构移位从而使得导航显示的影像与真实位置存在误差, 这是目前得知导航系统参与手术时最大的弊病, 发生率甚至高达 60%。影像漂移又分为因导航和手术设备移位如固定架松动, 和被定位的标记物移位如术中骨块等移位引起的结构性影像漂移等引起的系统性影像漂移。大大影响了手术的精准性[32] [33]。

3) 学习曲线较长: 由于不同导航系统都有一个共性, 其系统操作通常都较复杂, 一般都需要专科医生在熟练掌握传统手术方案的基础上系统性地学习三个阶段, 首先是用生尸体骨的操作, 在使用熟练后并非直接用于手术, 而是作为监测系统及术中测量使用, 最后熟练后才用于临床, 整体学习周期较长, 通常需要半年以上, 而与此同时此技术更新的速度有时甚至快于医生掌握技术的速度, 再加上缺乏统一

标准的设备操作规范及评价标准, 使医生面临更大的挑战[34]。

4. 展望

自从第一个针对 CAOS 的机器人和导航系统问世以来, 已经过去了 20 多年。在这期间, 这项技术已经从实验室逐步在手术室中使用并造福患者, 并可能即将成为某些骨科常规手术中的不可缺少的技术。随着科学技术的不断创新, CAOS 技术将向以下方向发展: 1) 机器人化操作: 未来导航技术发展的很重要的方向是改进导航和手术工具, 整合数字化手术室并结合机器人技术, 使外科医生通过指挥机器人完成手术治疗, 并与增强现实技术结合, 通过虚拟医院对外地患者进行远程手术, 使得手术导航系统不再只是一种辅助工具, 而是能够独立完成外科手术的工具, 从而为骨科手术带来革命性的技术变革, 目前有报道导航技术与机器人技术相结合远程操作取得了初步的喜人效果。2) 更加微创化: CAOS 技术与现有的微创技术广泛结合, 使目前的微创手术走向更加微创。(提高精度和灵活性: 将 CT、MRI、血管造影和 PET 等多模三维图像融合在一起形成四维或多维图像, 使导航的精度和灵活性更高。软件的人性化: 软件的设计要充分反映医生的思想, 软件界面要符合医生的手术流程, 原则性和灵活性相结合。)总之, 导航技术是骨科手术一个很有用的工具, 它必定随着其他学科的发展得到完善。随着导航技术不断地改进和推广, 可以预见用导航技术闭合复位空心钉内固定治疗股骨颈骨折的临床效果也将会有很大的提高。

参考文献

- [1] 张弓, 李松军, 董杰. 股骨颈加压锁定骨板与空心拉力螺钉治疗青年股骨颈骨折的效果比较[J]. 中国当代医药, 2018, 25(22): 25-28.
- [2] Marsh, J.L., Slongo, T.F., Agel, J., et al. (2007) Fracture and Dislocation Classification Compendium-2007: Orthopaedic Trauma Association Classification, Database and Outcomes Committee. *Journal of Orthopaedic Trauma*, **21**, S1-S133. <https://doi.org/10.1097/00005131-200711101-00001>
- [3] Slobogean, G.P., Sprague, S.A., Scott, T., et al. (2015) Complications Following Young Femoral Neck Fractures. *Injury*, **46**, 484-491. <https://doi.org/10.1016/j.injury.2014.10.010>
- [4] Schemitsch, E.H., Sprague, S., Heetveld, M.J., et al. (2019) Loss of Independence after Operative Management of Femoral Neck Fractures. *Journal of Orthopaedic Trauma*, **33**, 292-300. <https://doi.org/10.1097/BOT.0000000000001444>
- [5] Oakey, J.W., Stover, M.D., Summers, H.D., et al. (2006) Does Screw Configuration Affect Subtrochanteric Fracture after Femoral Neck Fixation? *Clinical Orthopaedics and Related Research*, **443**, 302-306. <https://doi.org/10.1097/01.blo.0000188557.65387.fc>
- [6] Yang, J.J., Lin, L.C., Chao, K.H., et al. (2013) Risk Factors for Nonunion in Patients with Intracapsular Femoral Neck Fractures Treated with Three Cannulated Screws Placed in Either a Triangle Or an Inverted Triangle Configuration. *The Journal of Bone and Joint Surgery. American Volume*, **95**, 61-69. <https://doi.org/10.2106/JBJS.K.01081>
- [7] Panteli, M., Rodham, P. and Giannoudis, P.V. (2015) Biomechanical Rationale for Implant Choices in Femoral Neck Fracture Fixation in the Non-Elderly. *Injury*, **46**, 445-452. <https://doi.org/10.1016/j.injury.2014.12.031>
- [8] 陈武生, 王明森, 王锡奕, 等. 全螺纹钉加拉力螺钉内固定治疗股骨颈骨折的临床应用[J]. 吉林医学, 2017, 38(6): 1008-1009.
- [9] Pauyo, T., Drager, J., Albers, A. and Harvey, E.J. (2014) Management of Femoral Neck Fractures in the Young Patient: A Critical Analysis Review. *World Journal of Orthopaedics*, **5**, 204-217. <https://doi.org/10.5312/wjo.v5.i3.204>
- [10] Gümüştas, S.A., Tosun, H.B., Iri, A., et al. (2014) Influence of Number and Orientation of Screws on Stability in the Internal Fixation of Unstable Femoral Neck Fractures. *Acta Orthopaedica et Traumatologica Turcica*, **48**, 673-678. <https://doi.org/10.3944/AOTT.2014.14.0088>
- [11] 虎伟山, 李山珠, 袁锋. 三枚和四枚空心钉内固定治疗股骨颈骨折的比较研究[J]. 中国骨与关节损伤杂志, 2013, 28(4): 307-309.
- [12] Filipov, O. (2011) Biplane Double-Supported Screw Fixation (F-Technique): A Method of Screw Fixation at Osteoporotic Fractures of the Femoral Neck. *European Journal of Orthopaedic Surgery & Traumatology*, **21**, 539-543. <https://doi.org/10.1007/s00590-010-0747-9>
- [13] Li, G., Jin, D., Shao, X., et al. (2018) Effect of Cannulated Screws with Deep Circumflex Iliac Artery-Bone Grafting in the Treatment of Femoral Neck Fracture in Young Adults. *Injury*, **49**, 1587-1593.

- <https://doi.org/10.1016/j.injury.2018.06.014>
- [14] Wang, X.J., Zhang, Z.H., Li, L., *et al.* (2017) Quadratus Femoris Muscle Pedicle Bone Flap Transplantation in the Treatment of Femoral Neck Fracture for Chinese Young and Middle-Aged Patients: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Chinese Journal of Traumatology*, **20**, 347-351. <https://doi.org/10.1016/j.cjtee.2017.07.003>
- [15] Duffin, M. and Pilson, H.T. (2019) Technologies for Young Femoral Neck Fracture Fixation. *Journal of Orthopaedic Trauma*, **33**, S20-S26. <https://doi.org/10.1097/BOT.0000000000001367>
- [16] Hartsock, L.A. and Barfield, W.R. (2017) Re: Vertically Oriented Femoral Neck Fractures: A Biomechanical Comparison of 3 Fixation Constructs. *Journal of Orthopaedic Trauma*, **31**, 363-368. <https://doi.org/10.1097/BOT.0000000000000934>
- [17] Stoffel, K., Zderic, I., Gras, F., *et al.* (2017) Biomechanical Evaluation of the Femoral Neck System in Unstable Pauwels III Femoral Neck Fractures: A Comparison with the Dynamic Hip Screw and Cannulated Screws. *Journal of Orthopaedic Trauma*, **31**, 131-137. <https://doi.org/10.1097/BOT.0000000000000739>
- [18] Li, Z., Zhang, X., Li, Z., *et al.* (2020) Comparative Study of Pauwels Type III Femoral Neck Fractures Managed by Short Dynamic Hip Screw with Fibula Bone Graft or Cannulated Screws in Young Adults. *Annals of Translational Medicine*, **8**, 681. <https://doi.org/10.21037/atm-19-3344>
- [19] 徐可林, 刘宇, 王建伟, 等. 经皮加压钢板固定治疗股骨颈骨折的疗效研究[J]. 中国修复重建外科杂志, 2020, 34(11): 1364-1368.
- [20] 殷渠东, 顾三军, 王建兵, 等. 经皮加压钢板治疗移位型股骨颈骨折的前瞻性随机对照研究[J]. 中国修复重建外科杂志, 2016, 30(8): 951-955.
- [21] Zhu, F., Liu, G., Shao, H.G., *et al.* (2015) Treatment of Femoral Neck Fracture with Percutaneous Compression Plate: Preliminary Results in 74 Patients. *Orthopaedic Surgery*, **7**, 132-137. <https://doi.org/10.1111/os.12170>
- [22] Arirachakaran, A., Amphansap, T., Thanindratar, N.P., *et al.* (2017) Comparative Outcome of PFNA, Gamma Nails, PCCP, Medoff Plate, LISS and Dynamic Hip Screws for Fixation in Elderly Trochanteric Fractures: A Systematic Review and Net-Work Meta-Analysis of Randomized Controlled Trials. *European Journal of Orthopaedic Surgery & Traumatology*, **27**, 937-952. <https://doi.org/10.1007/s00590-017-1964-2>
- [23] 李英周, 叶锋, 万蕾, 等. 改良经皮加压钢板治疗 Pauwels III 型股骨颈骨折的疗效分析[J]. 中国骨伤, 2018, 31(2): 120-123.
- [24] Mir, H. and Collinge, C. (2015) Application of a Medial Buttress Plate May Prevent Many Treatment Failures Seen after Fixation of Vertical Femoral Neck Fractures in Young Adults. *Medical Hypotheses*, **84**, 429-433. <https://doi.org/10.1016/j.mehy.2015.01.029>
- [25] Ye, Y., Chen, K., Tian, K., *et al.* (2017) Medial Buttress Plate Augmentation of Cannulated Screw Fixation in Vertically Unstable Femoral Neck Fractures: Surgical Technique and Preliminary Results. *Injury*, **48**, 2189-2193. <https://doi.org/10.1016/j.injury.2017.08.017>
- [26] Tidermark, J., Ponzer, S., Svensson, O., *et al.* (2003) Internal Fixation Compared With total Hip Replacement for Displaced Femoral Neck Fractures in the Elderly. *The Journal of Bone and Joint Surgery. British Volume*, **85**, 380-388. <https://doi.org/10.1302/0301-620X.85B3.13609>
- [27] Schopper, C., Zderic, I., Menze, J., *et al.* (2020) Higher Stability and More Predictive Fixation with the Femoral Neck System versus Hansson Pins in Femoral Neck Fractures Pauwels II. *Journal of Orthopaedic Translation*, **24**, 88-95. <https://doi.org/10.1016/j.jot.2020.06.002>
- [28] Amiot, L.P., Labelle, H., DeGuise, J.A., Sati, M., Brodeur, P. and Rivard, C.H. (1995) Image-Guided Pedicle Screw Fixation—A Feasibility Study. *Spine*, **20**, 1208-1212. <https://doi.org/10.1097/00007632-199505150-00019>
- [29] Nolte, L.P., Zamorano, L.J., Jiang, Z., Wang, Q., Langlotz, F. and Berlemann, U. (1995) Image-Guided Insertion of Transpedicular Screws. A Laboratory Set-Up. *Spine (Phila Pa 1976)*, **20**, 497-500. <https://doi.org/10.1097/00007632-199502001-00016>
- [30] Mittelstadt, B., Kazanzides, P., Zuhars, J., Williamson, B., Cain, P., Smith, F. and Bargar, W.L. (1996) The Evolution of a Surgical Robot from Prototype to Human Clinical Use. In: Taylor, R.H., Lavallée, S., Burdea, G.C. and Mösges, R., Eds., *Computer Integrated Surgery*, The MIT Press, Cambridge, 397-407.
- [31] 吴景华, 吴波, 霍华春, 等. 应用计算机导航系统治疗股骨颈骨折[J]. 中国矫形外科杂志, 2005, 13(8): 626-627.
- [32] 肖德明. 计算机辅助骨科导航技术面临的主要问题[J]. 中华创伤骨科杂志, 2005, 7(7): 617-619.
- [33] Citaka, M., Board, T.N., Sun, Y., *et al.* (2007) Reference Maker Stability in Computer Aided Orthopedic Surgery—A Biomechanical Study Inartificial Bone and Cadavers. *Technology and Health Care*, **15**, 407-414. <https://doi.org/10.3233/THC-2007-15603>
- [34] 罗从风. 创伤骨科导航手术操作与技巧[M]. 北京: 人民卫生出版社, 2008: 158.