

JST 积水潭

计算机辅助 骨科手术学

Computer-assisted
Orthopaedic Surgery

主 编 田 伟



人民卫生出版社
PEOPLE'S MEDICAL PUBLISHING HOUSE

第2版

计算机辅助 骨科手术学

Computer-assisted
Orthopaedic Surgery

王 岩 主 编

人民卫生出版社

计算机辅助骨科手术学

Computer-assisted Orthopaedic Surgery

主 编 田 伟 (北京积水潭医院)

副主编 王田苗 (北京航空航天大学机器人研究所)

王满宜 (北京积水潭医院创伤骨科)

刘 波 (北京积水潭医院脊柱外科)

郭晓忠 (北京积水潭医院矫形骨科)

冯 华 (北京积水潭医院运动损伤科)

牛晓辉 (北京积水潭医院骨肿瘤科)

郭 源 (北京积水潭医院小儿骨科)

编 者 (以姓氏拼音排序)

边 臻 (北京积水潭医院小儿骨科)

傅 刚 (北京积水潭医院小儿骨科)

高 雷 (北京积水潭医院小儿骨科)

韩 骁 (北京积水潭医院脊柱外科)

洪 雷 (北京积水潭医院运动损伤科)

胡 磊 (北京航空航天大学机器人研究所)

胡 临 (北京积水潭医院脊柱外科)

黄 野 (北京积水潭医院矫形骨科)

李 勤 (北京积水潭医院脊柱外科)

李志宇 (北京积水潭医院脊柱外科)

刘 波 (北京积水潭医院脊柱外科)

刘 庆 (北京积水潭医院矫形骨科)

刘文勇 (北京航空航天大学机器人研究所)

刘亚军 (北京积水潭医院脊柱外科)

孙宇庆 (北京积水潭医院脊柱外科)

王军强 (北京积水潭医院创伤骨科)

王 涛 (北京积水潭医院骨肿瘤科)

王雪松 (北京积水潭医院运动损伤科)

王永庆 (北京积水潭医院脊柱外科)

吴 昊 (广西壮族自治区人民医院骨科)

吴 坚 (北京积水潭医院矫形骨科)

吴静晔 (北京积水潭医院脊柱外科)

肖 斌 (北京积水潭医院脊柱外科)

张 辉 (北京积水潭医院运动损伤科)

张 清 (北京积水潭医院骨肿瘤科)

赵春鹏 (北京积水潭医院创伤骨科)

周 力 (北京积水潭医院创伤骨科)

人 民 卫 生 出 版 社

图书在版编目 (CIP) 数据

计算机辅助骨科手术学/田伟主编. —北京: 人民卫生出版社, 2011. 8

ISBN 978-7-117-14180-2

I. ①计… II. ①田… III. ①骨科学-外科手术-计算机辅助技术 IV. ①R687-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 026755 号

门户网: www.pmph.com	出版物查询、网上书店
卫人网: www.ipmph.com	护士、医师、药师、中医师、卫生资格考试培训

版权所有, 侵权必究!

计算机辅助骨科手术学

主 编: 田 伟

出版发行: 人民卫生出版社 (中继线 010-59780011)

地 址: 北京市朝阳区潘家园南里 19 号

邮 编: 100021

E-mail: pmph@pmph.com

购书热线: 010-67605754 010-65264830

010-59787586 010-59787592

印 刷: 北京人卫印刷厂

经 销: 新华书店

开 本: 889×1194 1/16 印张: 20

字 数: 616 千字

版 次: 2011 年 8 月第 1 版 2011 年 8 月第 1 版第 1 次印刷

标准书号: ISBN 978-7-117-14180-2/R·14181

定 价: 142.00 元

打击盗版举报电话: 010-59787491 E-mail: WQ@pmph.com

(凡属印装质量问题请与本社销售中心联系退换)

前言

随着 21 世纪的到来,新一代的临床骨科医师将面临更多的挑战,不仅需要了解更加宽阔的基础医学理论和掌握更加高超的临床医学技术,更需要学会利用一切有益的方法,特别是现代高科技手段,为临床实践服务。另一方面,骨科技术不断有各种内固定技术发明出来,手术方式也由大切口向着微创技术不断迈进。在这一过程中,骨科医生也在反思,我们和患者的希望到底是什么,当然一个手术痛苦小、伤口小自然很好,但是如果只是表面伤口小,里面损伤更严重,就不是微创手术的本意。所以手术最根本的追求还是手术的准确操作,只有准确了,才能获得更小的创伤。随着手术的进步,手术的复杂性也在不断增加,目前单纯靠人的眼睛和透视解决不了准确性的问题,一旦不准确,造成手术的误伤,就会给医患双方带来痛苦和损失。随着科学技术的进步,一种超越人的能力的智能手术方法被发明和应用于临床,这就是计算机辅助骨科手术技术。它可以在三维影像的实时引导下,进行 0.25mm 以下高精确性的手术。可以说这一技术的出现,开创了骨科手术的新时代。

然而,同任何新技术一样,其发展的过程也是曲折的。北京积水潭医院 2002 年在国内率先引进和开展计算机导航辅助骨科手术的时候,当时国内外对该技术的临床应用尚存在很多争议,很多临床骨科专家认为导航系统的实用性和临床精度差,临床应用的适应证和技术流程均不规范,应用范围非常局限。基于此现状,北京积水潭医院针对导航技术在临床应用中存在的亟待解决的关键问题进行了系列研究探索,解决了导航技术在骨科的临床实用性、可行性、适应证、操作规范和新技术开发等一系列关键问题。显著提高了导航系统的实用性和精确性,使得导航辅助骨科手术得到了迅猛发展。避免了资源浪费,缩短了医师的学习曲线,减少了手术并发症。同时大胆探索,开发了很多导航辅助骨科手术的新术式。仅以北京积水潭医院为例,导航手术全年例数已由 2003 年的 46 例发展至 2010 年的 1077 例,成为目前世界范围内开展计算机导航辅助骨科手术最多的医院。

作为一个多学科交叉的新领域,为了团结国内各相关学科专家学者,共同促进我国计算机辅助外科事业的健康有序发展,2007 年 3 月,中国计算机辅助外科学会成立。中国第一个计算机辅助外科研究与应用中心也同时成立(场所地点设在北京积水潭医院)。中国计算机辅助外科学会现已开展多方面工作,并积极同国外及中国港台地区进行交流合作,多次为中国香港、新加坡、美国、德国等国家骨科医师进行相关培训,建立了具有一定国际影响的导航技术研究培训中心。受中华人民共和国卫生部委托,目前我国第一个关于计算机导航手术的技术规范也已开始制定。

目前我国拥有计算机导航设备的医疗机构正在逐渐增多,但是很多导航设备都处于闲置状态,不少骨科医生仍然感觉该技术操作复杂,难以学习掌握。甚至由于盲目使用,反而造成手术精确性的下降,手术并发症增加。究其原因,还是因为对导航技术缺少深入的理解和认识,缺少规范的技术操作指导。这也是本书编写的最重要目的之一。本书全面系统地论述了该类新技术的基础与临床应用,以便读者能够深入、全

面掌握此类新技术,以利于其临床应用的规范、有序推广。

在编写过程中,我们力求抓住计算机辅助骨科手术技术的特点和在临床应用中的关键步骤,有的放矢的将最有价值的信息呈现给广大临床医生,突出其权威性、系统性及实用性。依托北京积水潭医院丰富的病例资源和临床经验,本书着重论述各种计算机辅助骨科技术,尤其是计算机导航技术在骨科的适用范围、规范的手术步骤和临床实践中发现、总结的实践经验奉献给大家。

贴近临床、服务临床是我们编写本书的初衷。希望我们的工作能够为对计算机辅助骨科手术有强烈学习愿望的或者正在逐步开展此类手术的临床骨科医师以及进行此类研究的科研院所研究人员和骨科研究生提供一个较高的起点和正确的方向,使他们能够更好的发挥自己的聪明才智,掌握最先进的医学理念和技术,服务社会大众,推动我国卫生事业的不断发展。

临床应用部分的作者都是北京积水潭医院各临床科室中专攻计算机辅助手术的专家,相关基础理论部分由国内在该技术领域卓有建树的专家学者编写。在此向每一位作者表示感谢!同时,也要特别感谢参与稿件整理和编排的每一位骨科同仁以及人民卫生出版社的编审,没有他们的辛勤劳动,就没有呈现在您面前的这本《计算机辅助骨科手术学》的面世。对此,再次表示我诚挚的感谢和敬意。

计算机辅助骨科手术是一个全新的医学领域,没有太多前人的经验供我们借鉴,虽然有那么多专家的参与,但是由于是初次编写这方面的书籍,难免存在遗漏和不足,希望热情的读者给予点评和指正,我们一定会在今后的修订版本中加以改正。

最后,希望这本书得到大家的认可和喜爱,并且期望更多的骨科同仁投入到计算机辅助骨科手术的事业中来。

田 伟

目 录

第一篇 总 论

第一章 计算机辅助骨科学发展历史和基础知识	田伟	2
第一节 计算机辅助骨科手术技术的发展历史概述		2
第二节 计算机辅助骨科手术的基本构成		3
第三节 计算机辅助骨科手术技术的分类		5
第二章 各种导航技术的应用特点		7
第一节 基于影像的导航技术	王田苗 刘文勇 胡磊	7
第二节 非基于影像的导航系统	吴昊	10
第三章 骨科手术机器人系统基本原理	王田苗 刘文勇 胡磊	17
第一节 手术机器人系统的基本原理		17
第二节 典型骨科机器人系统分析		18
第四章 远程医疗技术的基本原理	王田苗 王满宜 王军强	22
第一节 概述		22
第二节 远程医疗技术的应用现状及发展趋势		23

第二篇 计算机辅助脊柱外科手术

第五章 计算机辅助脊柱外科手术概述	田伟 刘亚军	26
第一节 计算机辅助骨科手术在脊柱外科的应用原则及临床适应证		26
第二节 计算机辅助骨科手术在脊柱外科的应用中存在的问题和思考		31
第三节 脊柱外科常用导航系统简介及操作流程		31
第六章 计算机导航辅助椎弓根螺钉内固定手术		35
第一节 计算机导航辅助颈椎椎弓根螺钉内固定技术	李志宇	35
第二节 计算机导航辅助胸椎椎弓根螺钉内固定技术	刘波	44
第三节 计算机导航辅助腰椎椎弓根螺钉内固定技术	胡临	47
第七章 计算机导航辅助上颈椎内固定技术		54
第一节 计算机辅助寰枢椎经关节螺钉内固定技术	田伟 王永庆	54

第二节 术中即时三维导航辅助齿状突螺钉内固定	田伟 刘亚军	64
第八章 计算机导航辅助微创技术及其他		69
第一节 计算机辅助导航在微创脊柱外科中的应用	李勤 肖斌	69
第二节 计算机导航系统辅助经皮椎体成形术	田伟 韩骁 刘亚军	77
第三节 计算机导航辅助脊柱转移瘤的微创手术技术	孙宇庆	79
第四节 计算机导航辅助椎间盘镜下椎间盘摘除术	李勤 刘亚军	83
第五节 导航辅助下经椎弓根椎体截骨治疗胸腰椎陈旧骨折伴后凸畸形	李勤 吴静晔	86
第六节 计算机导航辅助椎板减压术	刘波	88

第三篇 计算机辅助创伤骨科手术

第九章 计算机辅助创伤骨科手术概述	王满宜 王军强 周力	92
第一节 计算机辅助骨科手术在创伤骨科的应用原则		92
第二节 计算机辅助骨科手术在创伤骨科的临床适应证		94
第三节 计算机辅助骨科手术在创伤骨科的应用中存在的问题和思考		94
第十章 常用创伤骨科导航手术	赵春鹏 王军强 王满宜	97
第一节 髌臼骨盆骨折		97
第二节 股骨颈骨折的计算机导航辅助手术治疗		111
第十一章 骨科机器人辅助技术在创伤骨科的应用	王军强 周力 赵春鹏	115
第一节 外科机器人技术在骨科手术中的应用概述		115
第二节 外科机器人技术在创伤骨科中的临床应用		115

第四篇 计算机导航辅助关节外科手术

第十二章 计算机导航辅助关节外科手术概述		130
第一节 计算机辅助骨科手术在矫形骨科的应用原则	郭晓忠	130
第二节 导航系统分类	黄野 郭晓忠	135
第三节 导航人工关节置换手术目前存在的一些问题	吴坚 郭晓忠	140
第十三章 计算机导航辅助全膝关节置换术	郭晓忠	143
第一节 概述		143
第二节 膝关节导航系统分类及特点		144
第三节 全膝导航的手术操作步骤		148
第四节 为什么采用计算机导航辅助人工全膝关节置换术		166
第五节 导航技术辅助全膝关节置换术的优点和缺陷		167
第十四章 计算机导航辅助全髋关节置换术	刘庆 郭晓忠	169
第一节 概述		169
第二节 全髋关节置换术的导航		170
第三节 全髋关节置换术的导航手术步骤	蒋毅 郭晓忠	170
第四节 计算机导航在微创人工髋关节置换术中的应用		177

第五篇 计算机辅助运动损伤手术

第十五章	计算机辅助运动损伤手术概述	冯华 张辉 洪雷 王雪松	182
第一节	计算机辅助骨科手术在运动损伤的应用原则		182
第二节	计算机辅助骨科手术在运动损伤的临床适应证		183
第三节	计算机辅助骨科手术在运动损伤的应用中存在的问题和思考		183
第十六章	计算机辅助前、后交叉韧带重建手术	冯华 张辉 洪雷 王雪松	186
第一节	计算机辅助前交叉韧带重建手术		186
第二节	计算机辅助后交叉韧带重建手术		201

第六篇 计算机辅助骨肿瘤手术

第十七章	计算机辅助骨肿瘤手术概述	王涛 牛晓辉	210
第一节	计算机辅助骨肿瘤外科手术原则		210
第二节	计算机导航技术应用于骨肿瘤外科治疗的意义		211
第三节	计算机辅助骨科手术在骨肿瘤外科治疗的临床适应证		216
第四节	计算机辅助骨科手术在骨肿瘤外科治疗应用中的问题和思考		235
第五节	骨肿瘤常用导航系统		235
第十八章	常用骨肿瘤外科治疗的导航手术	张清 王涛	239
第一节	计算机导航辅助股骨上端骨肿瘤切除及重建术		239
第二节	计算机导航辅助膝部骨肿瘤切除及重建术		248
第三节	计算机导航辅助骨盆骨肿瘤切除及重建术		266
第四节	计算机导航辅助骶骨骨肿瘤切除及重建术		284
第五节	Iso-C 3D 计算机导航辅助良性骨肿瘤的局切术		295

第七篇 计算机辅助小儿骨科手术

第十九章	计算机辅助小儿骨科手术概述	郭源 傅刚	302
第一节	计算机辅助手术在小儿骨科的应用原则		302
第二节	计算机辅助手术在小儿骨科的临床适应证		303
第三节	计算机辅助手术在小儿骨科的应用中存在的问题和思考		303
第二十章	小儿骨科常用的计算机辅助手术	郭源 傅刚 高雷 边臻	305
第一节	计算机辅助骨桥切除术		305
第二节	计算机辅助股骨头骺滑脱螺钉固定术		308
第三节	计算机辅助股骨近端骨样骨瘤切除术		309

第一篇

总 论

计算机辅助骨科学发展历史和基础知识

第一节 计算机辅助骨科手术技术的发展历史概述

近年来,随着计算机技术和精密机械自动控制技术的日益成熟,其在医学领域的应用进展迅速,计算机医学图像处理技术、立体定位导航技术、医用机器人技术以及远程医疗技术等相结合,形成了一门崭新的医学生物工程研究学科——计算机辅助外科手术(computer-assisted surgery)技术,简称CAS。于此相对应,其在骨科领域的应用成为计算机辅助骨科手术(computer-assisted orthopaedic surgery)技术,简称CAOS。

纵观骨科学的发展历史,现代骨科学领域的进步都与科学技术的进步密切相关,并且受到科学技术发展水平的限制。在不同的时代,外科医师的追求其实是一致的,都希望通过最精确、最微创的方法,最大限度的解决患者的病痛,同时最大限度的保留患者的生理功能。但是这一愿望要受到同时代科学技术发展水平的限制。最初的骨外科手术是以截肢等毁损性手术为主,随着19世纪无菌技术和麻醉技术的进步,20世纪X线和抗生素的发现和应用、输血技术的发展,生物医学工程和材料学的进步,使骨科技术逐渐发展到以矫正畸形,切除病灶同时保留肢体功能为主,如各种关节置换技术和内固定技术等。现在,如何才能最大限度减少手术的创伤,仍然是外科医师孜孜追求的目标。

计算机断层影像(computer tomography, CT)、磁共振影像(magnetic resonance image, MRI)以及计算机三维影像重建技术等现代影像技术已经基本可以

实现骨科疾病的术前精确定位诊断,但是在骨科手术中,能够应用的影像技术仍然以术中X线透视和平片为主,仅能提供解剖结构的二维信息,不仅术中放射线量过多可以造成放射性损伤,而且可能误导术者。如何才能实现术中即时的三维立体解剖结构重现呢?20世纪70年代后期计算机信息技术迅猛发展及80年代后期微创外科理念出现,大大促进了图像引导手术的应用和普及,以及机器人技术在外科领域的应用,这促进了一种新的多学科交叉的前沿技术——计算机导航技术的诞生。关于计算机导航先后出现了很多的相关技术和名称,比如图像引导手术、计算机集成手术、医用机器人、电视外科、计算机辅助外科等,目前更多地称为计算机辅助外科技术。

利用计算机导航技术进行立体定位是外科医生一直的梦想,希望可以更精确地手术。1906年英国伦敦皇家医院Clarke和Horsley医生利用自行研制的脑三维定向仪成功进行了动物的脑定向手术。20世纪70年代中期后,由于计算机断层扫描技术(CT)及磁共振成像(MRI)技术的引入,使立体定向技术的精确性大大提高。1986年,美国斯坦福医学院Roberts医生最早将导航系统应用于临床;90年代以后,随着计算机水平的提高和红外追踪定位技术及人工智能技术的引入,使计算机导航系统逐渐趋于成熟,成为一种智能化的手术辅助系统。计算机辅助外科技术的应用也从神经外科领域逐步扩展到骨科(关节、脊柱、创伤等)、眼科、泌尿外科、颅颌面外科和心脏外科等多个外科领域,先后出现了多种新的治疗理念和方法。1995年Amiot首先在椎弓根固定的手术中使用了计算机导航技术。

手术机器人系统是计算机辅助骨科手术的另一重要组成部分。早在 1994 年,德国就开始了主动机器人系统 ROBODOC(Integrated Surgical Systems, Davis, CA)的临床应用。其被应用于非骨水泥型的全髋关节置换术,用于股骨端髓腔的准备。但是,在临床应用过程中,逐渐发现其存在一定的弊端,如手术时间和术中出血量显著增加、体积过大影响手术操作、需要附加固定针置入手术,而且设备昂贵。此外,机器人辅助手术组病例的初始稳定性与传统手术组相比并没有明显的优越性,因此其临床应用并未得到普及。现在,随着新一代的小型机器人系统的发展,与导航技术相结合,又重新成为计算机辅助骨科手术领域的研究热点之一。

改革开放以来,中国的现代医学也发生着日新月异的变化。随着我国综合国力的提升以及国际交流与合作的逐渐增多,很多新技术得以在发展早期引入中国,而且由于我国丰富的病例资源和临床实践经验,以及综合科研能力的提高,我国在相关领域的研究也日益受到国际社会的关注,产生了一定的国际影响力。

北京积水潭医院作为中国最负盛名的骨科医院之一,自 2002 年以来在国内率先引进和开展了计算机导航辅助骨科手术的临床应用。当时国内外对该技术的临床应用存在很多争议,很多临床骨科专家认为导航系统的实用性和临床精度差,临床应用的适应证和技术流程均不规范,应用范围非常局限。基于此现状,北京积水潭医院针对导航技术在临床应用中存在的亟待解决的关键问题进行了一系列研究探索,解决了导航技术在骨科的临床实用性、可行性、适应证、操作规范和新技术开发等一系列关键问题,显著提高了导航系统的实用性和精确性,使得导航辅助骨科手术得到了迅猛发展,避免了资源浪费,缩短了医师的学习曲线,减少了手术并发症。仅以北京积水潭医院为例,导航手术全年例数已由 2003 年的 46 例发展至 2010 年的 1077 例。成为目前世界范围内开展计算机导航辅助骨科手术最多的医院。

国内外计算机辅助外科相关学术团体也陆续建立。1984 年国际计算机辅助影像与外科学会在德国成立,1996 年国际计算机辅助外科学会在法国成立,2000 年国际计算机辅助骨科学会在德国成立,2003 年亚洲计算机辅助骨科学会在印度成立。2007 年 3 月,中国计算机辅助外科学会成立,北京积水潭医院田伟教授当选首任主任委员。计算机辅

助外科研究与应用中心也同时成立。2008 年在北京召开了首届中国计算机辅助外科学术会议。中国计算机辅助外科学会现已开展多方面工作,并积极同国外及中国港台地区进行交流合作,多次为中国香港、新加坡、美国、德国等国家和地区的骨科医师进行相关培训,建立了具有一定国际影响的导航技术研究培训中心。田伟教授也于 2010 年当选为亚太地区计算机辅助骨科学会主席。

作为一种新兴的科学技术,该领域很多专业术语的使用尚不规范、统一,影响了该技术的进一步推广普及和交流。目前计算机导航设备的研发机构和生产厂家逐年增多,但是尚无此类商品的设备技术标准 and 评价标准。有鉴于此,国际计算机辅助骨科技术学会、国际材料与测量协会美国分会和美国骨科协会生物工程委员会已经开始骨科导航技术标准相关工作。受中华人民共和国卫生部委托,在田伟教授主持下,目前我国第一个关于计算机导航手术的技术规范也已开始制定。多学科的合作和联合研发,必将有力推动该技术在我国的规范化推广、普及和发展。

第二节 计算机辅助骨科手术的基本构成

如上所述,计算机辅助骨科技术的发展是多学科交叉渗透发展的结果,其相关关键技术分述如下:

一、术中解剖结构重现技术

在导航系统辅助骨科手术中,骨科医师希望导航系统能够给术者“一双可以透视的眼睛”,在术中不需要过分显露即可以获得拟手术解剖结构的三维信息,以精确引导手术操作。这需要将术中实时解剖结构通过影像重建技术虚拟显示在屏幕上。目前已有多种解剖结构重现技术应用于临床,主要包括基于放射影像的解剖结构重现技术(image-based navigation)和非基于放射影像的解剖结构重现技术(image-free navigation)。前者又可分为术前放射影像和术中放射影像两种类型。

较早应用于导航系统的放射影像为术前 CT,术前 CT 影像可以清晰显示骨性结构,分辨率高而且没有几何形变。MRI 影像也可以应用于导航系统,但与 CT 相比,MRI 对骨性结构的显示欠清晰,而且有几何形变情况,所以临床应用受到限制。现在已经有学者开始尝试利用不同的扫描方式或利用多影

像融合技术解决该问题,但目前尚处于实验阶段。术前放射影像应用于术中导航系统,首先需要进行图像注册(registration)或配准(matching)。图像注册方法主要包括基于图像外部特征的注册和基于内部特征的注册两种。基于外部特征的注册需要以人工标记物附加固定在患者的体表或骨骼上,然后进行术前图像获取。术中再利用这些标记物进行注册。目前常用的标记物有铬合金珠和明胶球等,其可以在放射影像中清晰显影,在术中精确检测,如果术前和术中位置没有发生变化,则可以实现高精度的配准。但是,此类标记物的固定多是有创的,给患者造成了额外的创伤,而且术中一旦标记物位置发生变化,则无法进行重复注册,无法继续导航操作。基于内部特征的注册是利用解剖结构自身的特征点进行配准,并通过人工交互识别一些解剖标记点来限制参数的搜索空间。具体方法主要包括点对点注册(point-to-point matching)和表面注册(surface matching)。无论哪种注册方法,均需要术者在术中根据选择的参考点进行手动注册,因此延长了手术时间,并有可能产生误差。如果术中解剖结构的序列或形态较术前发生变化,则术前图像不能反映术中即时解剖结构,有可能误导操作者。例如在不稳定性骨折或寰枢椎不稳定的稳定性重建手术中,患者的术中解剖结构序列与术前获取放射影像时相比常有变化,需要术者提高警惕,以免被误导。

术中放射影像也可以应用于导航系统。术中C形臂二维透视影像的获取简便,但是只能提供二维平面信息,有其本身固有的局限性。现在,新型的可术中进行三维影像重建的C形臂已经应用于临床。1999年,德国西门子公司生产了世界上第一台可以进行术中即时三维影像重建的电动C形臂系统——Iso-C 3D系统。该装置在机械设计上去除了中央管球与C形臂几何旋转轴之间的分叉,采用步进电机设定C形臂的自动连续旋转角度,C形臂自动连续旋转 190° 采集100幅数字点片图像并自动重建三维图像。也可以由术者根据需要自行设定旋转角度范围和数字点片频率。近年来,该项技术已经成功地与导航系统结合,应用于临床。虽然其图像的分辨率较传统的CT影像差,但已可以满足骨科导航的需要。术中即时影像导航可以在术中根据需要随时更新导航图像,而且不再需要术者进行手动注册,减少了配准误差。C形臂需要由工程师进行校准,并安装C形臂示踪器(C-arm tracker),扫描图像可以由导航系统自动注册。

非基于放射影像的解剖结构重建技术目前主要用于关节手术。其导航图像不是传统的放射影像,而是模拟的立体几何图像。术中以指点器(pointer)点选解剖结构的特征点和面,与模拟图像的旋转中心或关节轴线进行配准。其典型应用为膝关节置换术,可以更精确地设计置换关节的力线。

二、立体定位技术

手术导航系统所采用的立体定位技术,其原理与目前广泛应用的全球定位系统(global positioning system, GPS)相似,是世界坐标系(术中解剖结构的三维坐标系)与虚拟坐标系(导航影像的三维坐标系)的组合。立体定位技术是联系虚拟与现实的桥梁,可以应用于外科导航手术的立体定位技术主要包括光学定位法、机械定位法、超声波定位法和电磁定位法。

(一) 光学定位法

该方法是目前应用最普遍和立体定位精度最高的方法。根据光源类型可分为主动式光学定位法和被动式光学定位法。其基本原理是将患者示踪器(patient tracker)牢固固定于术中解剖结构(刚体),通过至少两个摄像机(camera)观测由刚体结构发射或反射的红外线信息,然后通过计算机系统计算确定目标点的三维坐标。在主动红外线光学导航系统,红外线发光二极管被安装在各个示踪器(tracker)和智能手术器械(smart tools),其发射的红外线信号由摄像机(camera)接收后传至导航工作站进行处理。在被动红外线光学导航系统,安装在各个示踪器和智能手术器械上的是红外线被动反射球,红外线发射装置被安装在摄像机上,摄像机发射的红外线被反射球反射后再折返至摄像机,由摄像机接收后传至导航工作站进行处理。

(二) 机械定位法

机械定位法是最早应用于临床的定位方法,是一种配备电位测量计或光编码轴的多轴机械臂系统,与机械臂相连的手术器械的位置和旋转能够通过机械手的几何模型和编码器的瞬时值实时计算。该系统比较庞大,无法跟踪移动目标并且自由运动有限。

(三) 超声波定位法

其基本原理是超声测距。该方法虽然价格便宜,校准方便,但是容易受周围环境影响,空气温度、位移和空气非均匀性均可能影响定位精度,而且操作较复杂,因此临床应用很少。

(四) 电磁定位法

电磁定位系统由磁场发生器和检测器组成。磁场覆盖整个手术区域,检测器检测磁场的强度和相位,由此测算空间位置。与光学定位法和超声波定位法不同,电磁定位法不存在线性遮挡的问题,但是电磁场容易受到强磁体如手术器械等的干扰,对手术器械的要求很高,需要专门的非金属的手术器械进行手术,限制了该方法的临床应用。

三、外科机器人导航系统

外科机器人导航系统(robotic navigation system)又称主动式导航系统(active navigation system),是机器人技术与导航技术相结合发展起来的一种手术技术。将导航系统的位置传感器固定于机器人的机械臂,注册后机械臂的位置坐标即可以显示在导航图像上。术前设定机器人要进行的操作程序,完成导航图像注册后,机器人即可以按照设定的程序在导航图像的引导下自动完成预设定的工作。

机器人系统应用于骨科临床的尝试已经有很多,但是对其临床实用性一直存在争议。此类系统一般均价格昂贵,但临床可应用的领域有限。早期的外科机器人系统多由工业机器人系统改造而成,体积较大,临床应用和器械消毒均非常不方便。而且,对于完全依赖机器人进行关键步骤操作,大多数外科医师心存疑虑,担心系统一旦发生故障,后果有可能是灾难性的。

半主动式机器人系统是近年来的一种新的尝试,此类系统预先设定安全工作范围,允许术者在一定的安全移动范围内自主操控机械臂。如 Jakopeć 等设计的 ACROBOT 系统。该系统主要应用于膝关节手术。与全主动式机器人系统不同,在进行股骨端的磨削时,该系统不是由机械臂完全主动控制,而是允许术者在一定的安全范围内自由操作磨削器。但是,当磨削范围超出设定的安全范围时,机器人系统则会进行主动干预,自动停止磨削操作。

随着科学技术的进步,更加具有临床实用性的小型化机器人也逐渐发展起来。如 Shoham 等设计的 MARS(Miniature Robot for Surgical procedures)系统,该系统体重只有 200g,体积为 5cm × 5cm × 7cm,具有六个方向的自由度。该系统在术中可以直接固定在解剖结构上,进行脊柱外科椎弓根螺钉或创伤骨科远端带锁髓内针的置入。

在骨科临床应用中,被动式导航系统仍然占有绝对的主导地位,是目前的发展方向。但是,随着机

器人系统研发的进步,主动式导航系统在未来有可能成为最具发展潜力的外科技术。

第三节 计算机辅助骨科手术技术的分类

计算机辅助骨科技术作为一个新兴的技术领域,是骨科手术治疗技术的一次革新。自从 CAOS 技术应用于临床以来,随着立体定向、图像配准、机器人以及网络技术等的不断进步,其产品越来越完善,越来越显示出其对骨科手术的巨大帮助。目前临床应用最广泛的此类技术仍然是计算机导航技术,本节主要简述该技术的分类。

计算机导航技术的分类主要依据各种关键技术进行的不同进行分类,部分内容已在第二节论述。

一、根据立体定位技术进行分类

(一) 机械定位导航

(二) 光学定位导航

又可分为主动式光学定位法和被动式光学定位法。

(三) 超声波定位导航

(四) 电磁定位导航

二、根据术中解剖结构重现技术进行分类

(一) 基于放射影像的导航技术

1. 术前放射影像导航技术

(1) 术前 CT 导航。

(2) 术前 MRI 导航。

2. 术中放射影像导航技术

(1) 术中 C 形臂透视导航。

(2) 电动 C 形臂或 O 型臂术中即时三维图像导航。

(3) 术中即时 MRI 导航:目前由 Medtronic 公司和 GE 公司联合研制的术中即时 MRI 导航系统已进入临床测试阶段。

(4) 术中即时 CT 三维图像导航。

3. 影像融合导航技术 将不同种类的影像进行融合,以获取更好的导航影像质量或提高导航精确性。

(二) 非基于放射影像的导航技术

目前主要用于关节手术。

三、根据“人机”交互方式进行分类

- (一) 被动式导航技术
- (二) 半主动式导航技术
- (三) 主动式导航技术

四、按照临床应用领域进行分类

随着导航技术的逐步发展,其骨科临床应用领域也逐渐拓展,目前主要骨科临床应用领域包括:

- (一) 脊柱外科导航技术
- (二) 关节外科导航技术
- (三) 创伤骨科导航技术
- (四) 运动医学导航技术
- (五) 骨肿瘤导航技术
- (六) 小儿骨科导航技术

(田 伟)

参 考 文 献

1. 田伟. C-CAS 必将促进中国外科计算机辅助技术研究应用与交流. 中国医药生物技术, 2007;2(2):86-87
2. 梁国穗. 导航手术正在改革创伤骨科和外科. 中国医药生物技术, 2007;2(2):87-88
3. 田伟, 刘亚军, 刘波, 等. 计算机导航在脊柱外科手术应用实验和临床研究. 中华骨科杂志, 2006;26(10):671-675
4. 彭玉. 不断提高我国计算机辅助外科的工作水平. 中国医药生物技术, 2007;2(2):85-86
5. 王田苗, 刘文勇, 胡磊. 医用机器人与计算机辅助手术 MRCAS 进展. 中国生物医学工程学报, 2008, 27(1): 137-145
6. 邓宁, 吴伟坚, 梁国穗. 机器人和计算机辅助骨科手术. 中华创伤骨科杂志, 2005, 7(7):620-624
7. Merloz P, 吴昊. 计算机辅助外科手术的基本概念. 中国修复重建外科杂志, 2006, 20(3):276-278
8. Amoit LP, Labelle H, DeGuise JA, et al. Computer-assisted pedicle screw fixation. A feasibility study. Spine, 1995, 20: 1208-1212.
9. Wei Tian, Zhao Lang. Placement of pedicle screws using three-dimensional fluoroscopy-based navigation in lumbar vertebrae with axial rotation. European Spine Journal, 2010 (19):1928-1935
10. Yajun Liu, Wei Tian, Bo Liu, et al. Comparison of the clinical accuracy of cervical (C2-C7) pedicle screw insertion assisted by fluoroscopy, computed tomography-based navigation, and intraoperative three-dimensional C-arm navigation. Chinese Medical Journal 2010, 123(21):2995-2998
11. Shoham M, Burman M, Zehavi E, et al. Bone-mounted miniature robot for surgical procedures. concept and clinical applications. IEEE T Robotic Autom, 2003, 19:893-901
12. Jakopc M, Harris SJ, Rodriguezy Baena F, et al. The first clinical application of a hands-on robotic knee surgery system. Comput Aided Surg, 2001, 66:329-339
13. Nolte LP, Beutler TB. Basic principles of CAOS. Injury, 2004, 35:S6-S16

各种导航技术的应用特点

第一节 基于影像的导航技术

医学影像,尤其是医学 X 线成像技术(包括 X 线照相术、CT、C 形臂透视等)的影像,在 CAOS 领域

应用非常广泛。根据成像方式和成像时间的不同,基于 X 线影像的导航技术又可以分为 3 类,分别是基于术前 CT、C 形臂二维透视、术中即时三维的导航技术。图 2-1-1 给出了这三种导航系统的基本构成。

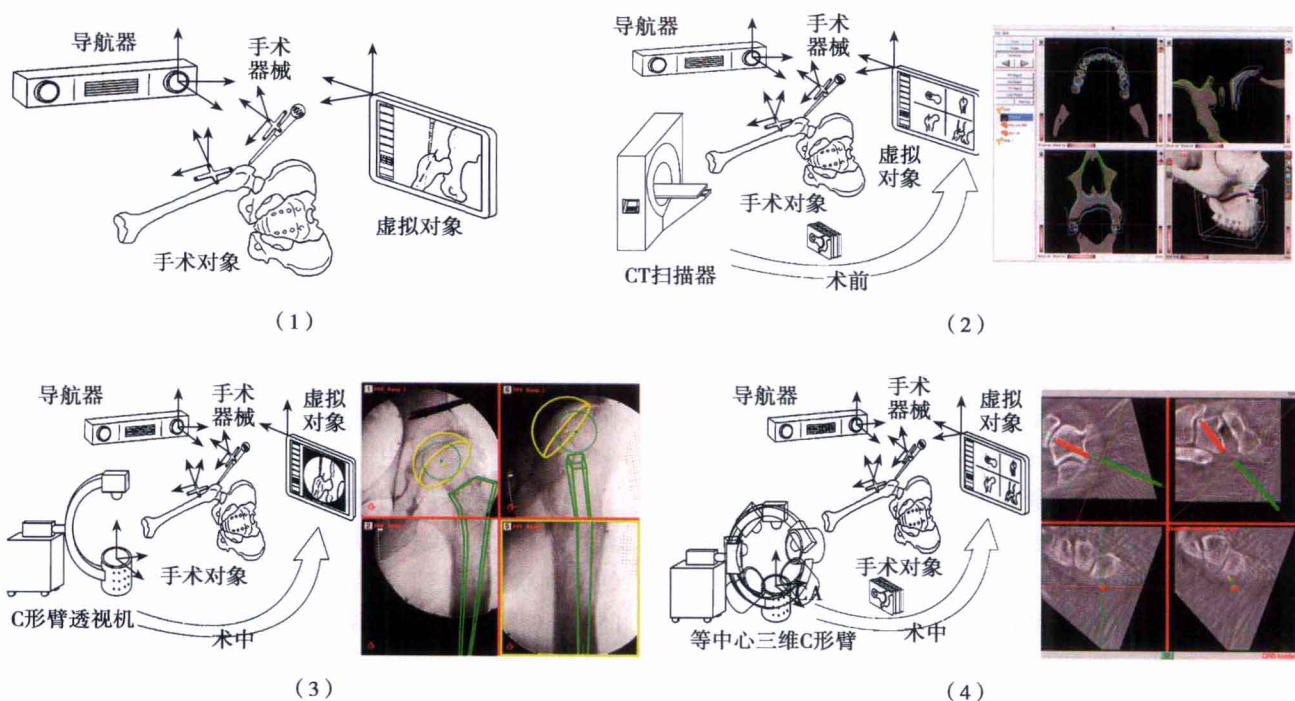


图 2-1-1 基于 X 线影像的手术导航系统的基本构成

(1) 骨科手术导航系统基本构成;(2) 基于术前 CT 的手术导航构成;(3) 基于 C 形臂二维透视的手术导航构成;(4) 基于术中即时三维的手术导航构成

一、术前 CT 导航

术前 CT 导航(preoperative CT-based navigation)是发展最早也是技术最成熟的一类手术导航方法。

(一) 原理与应用特点

其原理是在手术之前获得患者的图像扫描数据,在术中建立患者实际解剖结构与术前 CT 图像之间的联系,为医生进行规划和操作提供丰富的二

维或者三维导航信息,如图 2-1-1(4)所示。

这种技术的实现多采用“CT + 光电系统/数字机械臂”的方式。这种技术允许在术前进行精确的解剖结构建模,因此,多用于骨科中的脊柱或骨盆等解剖结构较为复杂的骨科手术中。

(二) 发展历史

国际上的研究开始于 20 世纪 80 年代中期。1985 年,美国托马斯杰斐逊大学医院利用 CT 数据,重建出了三维的骨折髓臼,实现了放射学诊断的标志性突破。1987 年,日本藤田保健卫生大学开始将 CT 图像与定位系统(装有码盘的机械臂)相关联来引导手术定位。随后的十几年,科领域出现了多套基于术前 CT 的 CAOS 系统。美国卡耐基梅隆大学研制了 HipNav 导航系统(1995 年)和 KneeNav 导航系统(2004 年),分别用于全髋置换和关节置换手术,两者也采用了 CT 图像进行术前三维规划。

国内的研究则始于 20 世纪 90 年代,起步稍晚,但取得了显著成果。北京航空航天大学、清华大学、复旦大学等单位先后开发了用于脊柱外科、关节外科的导航系统,并开展了临床应用。

(三) 基本操作过程

1. 术前数据采集 进行 CT 扫描,获取手术部位的断层图像(层厚要求在 3mm 以内)。对脑外科等可在皮肤上固定标志点的适应证,在进行扫描之前需加标志点,作为影像配准的标记点。

2. 手术规划 读入 DICOM 格式的图像数据,重构形成三维影像,工作站显示二维片层及三维重建的影像。由医生进行手术规划,以使手术路径避开主要组织,或者不致产生失误,可在工作站上进行手术部位的模拟显示;同时,在每个图像上选定用于配准的外加标记或者解剖标志。

3. 术中数据采集 术中拍摄不同体位的 X 线片或者采集超声图像,在病变部位以及手术器械上固定并调整好导航定位装置(手术中不能有任何移动,否则会影响导航的精度)。

4. 配准 按照导航系统提示进行操作,首先对手术器械进行注册。利用手术器械对手术部位进行配准,医生使用手术定位工具末端依次接触术前选择的标记点,将标记点与三维影像中选定的标记点一一匹配,使术前影像学资料与手术部位在空间上建立对应关系。建立术中影像、手术器械与病变部位之间的坐标变换关系。

5. 实时定位 将手术器械(也可以是机器人)对准病变部位,根据计算机屏幕上显示的虚拟手术

器械位置,调整实际手术器械的位置与状态,直至与规划轨迹一致,确认手术路径。

(四) 未来趋势

术前 CT 导航已经在临床上获得了有效应用。但随着现代外科对手术质量的要求越来越高,这种导航方法所固有的术前图像与术中解剖对象之间的配准误差已成为不可忽视的问题,因此,近年来出现了将 CT 设备引入手术室的理念,利用术中实时获得的 CT 断层图像进行手术导航。但是,术中 CT 设备庞大、复杂,普及度不高,短期内很难配置到常规手术室中。随着 CT 成像设备不断向小型化、专门化发展,术中 CT 导航技术有望在不久的将来得到推广。

二、C 形臂二维透视导航

透视技术能够有效显示骨骼等高密度组织,因此二维透视导航(2D fluoroscopy-based navigation)首先在骨科领域得到了应用和大范围推广。

(一) 原理与应用特点

透视导航的主要特点是透视图像和手术操作的紧密关联性(耦合性),其原理是将手术器械实时、虚拟地显示在术中透视图像上,为医生提供良好的视觉效果,方便医生在图像上跟踪手术器械和测量手术信息。目前,透视导航的典型设备是 C 形臂 X 线机。C 形臂透视造价低,机动灵活,操作方便,可有效用于术中的实时监控。

这种技术的实现多采用“X 线透视 + 光电系统/机器人系统”的方式。这类系统能够减少 X 线的辐射,但缺点是没有三维影像作为参考,多用于解剖结构不太复杂的创伤骨科等手术中。

(二) 发展历史

二维透视导航出现较早,它是借助跟踪器来监测手术环境对象(包括 C 形臂、手术器械、患者等)的空间状态,并建立相互之间的位置映射关系。同时,在 C 形臂上安装有成像参数标定模型(一般是双层结构的标定靶),用来完成图像失真校正、参数标定、状态跟踪等。目前,典型的商业化透视导航系统主要有美国史赛克公司(Stryker)的 Stryker 系统、德国博医来公司(BrainLab)的 VectorVision 系统、美国美敦力公司(Medtronic)的 StealthStation 系统等。

我国上海交通大学、北京航空航天大学等先后开展了透视导航下关节类手术系统的研究,而深圳安科高技术股份有限公司推出的光电引导下的透视导航系统已经在创伤、脊柱等领域获得了一定应用。