

文章编号:1671-6833(2007)04-0043-04

## 基于 BP 神经网络的虚拟手术 实时仿真技术研究

张峰峰, 孙立宁, 杜志江, 贾志恒

(哈尔滨工业大学 机器人技术与系统国家重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘 要:** 在人体腿部的虚拟仿真研究中, 建立有限元模型并进行生物力学特性分析是一种有效的方法。但由于有限元模型数据量大, 解算时间长, 并且难以与既有系统融合, 因此不适合在实时的手术培训和手术预演中应用。为了提高虚拟手术仿真系统进行实际作业的能力, 笔者提出了以 BP 神经网络模型来代替有限元模型, 实现实时的生物力学响应。并结合已有的医疗机器人辅助接骨虚拟现实仿真手术系统, 构建了系统实验平台。实验结果证明, 人体腿部的 BP 神经网络模型能够完全满足手术仿真所需的实时性要求。

**关键词:** BP 神经网络; 虚拟手术仿真; 有限元模型; 医疗机器人

**中图分类号:** TP 391.9

**文献标识码:** A

### 0 引言

近年来, 以计算机辅助医疗外科技术为主要研究内容的虚拟手术 (Virtual Surgery) 受到越来越多的学者和研究机构的关注, 并在临床上得到了广泛的应用<sup>[1]</sup>。通过建立人体腿部的数字化模型来分析研究矫形外科手术中人体腿部的生物力学特性, 成为虚拟手术研究中的一重要研究内容。人们通常通过有限元 (FEM) 方法对人体腿部进行建模。由于人体软组织功能的非线性特性, 因此 FEM 被证明是一种有效的生物力学建模分析方法<sup>[2-4]</sup>。但是由于有限元模型数据量大, 解算时间长, 并且难以与既有系统融合, 因此不适合在实时性要求比较强的手术培训和手术预演中应用。

BP 神经网络作为目前应用最广泛的神经网络模型, 通过非线性插值节点的学习, 能够逼近任意非线性函数, 特别对于三元及三元以上的非线性函数, 更能显示传统插值方法无法比拟的优点。虽然笔者研究的是接骨手术操作时, 断骨间距离与牵引力之间的非线性关系模型问题, 此模型通过传统的非线性插值方法照样可以得到很好的建立。但是牵引力不仅与断骨间距离有关, 还与手

术过程中的腿部牵引速度、腿部固定位置等因素有关, 为了将来进一步研究需要, 笔者在既有的已经通过 FEM 对人体腿部建模并分析的基础上, 提出了以 BP 神经网络模型来代替 FEM 模型, 以实现实时的生物力学响应。

BP 神经网络模型建立以后, 结合已有的实际医疗机器人辅助接骨仿真系统<sup>[5-6]</sup>, 构建了虚拟手术仿真实验验证平台, 并进行了实时力反馈实验。实验过程中, 利用并联主手输入运动信息, 提供力反馈, 而虚拟环境则负责提供视觉和计算对抗牵引力的大小。实验完成后, 对结果进行了分析。

### 1 基于神经网络的生物力学模型

#### 1.1 BP 神经网络算法分析

BP 算法是一种有监督式的学习算法, 其学习的过程包括正向和反向传播两部分组成。输入学习样本之后, 如果不能在输出层得到期望的输出, 那么将转入反向传播过程, 将误差信号沿原来的连接通路返回, 通过修改各层神经元的权值, 逐次地向输入层传播去进行计算, 再经过正向传播过程, 由此进行反复的调整训练, 使输出的向量

收稿日期: 2007-07-03; 修订日期: 2007-10-08

基金项目: 国家“863”计划资助项目 (2004AA421030); 国家自然科学基金资助项目 (60505016); 长江学者创新团队计划 (IRT0423)。

作者简介: 张峰峰 (1979-), 男, 山东日照人, 哈尔滨工业大学博士研究生, 研究方向: 生物医学建模及仿真、网络遥操作技术研究。

万方数据

与期望向量尽可能地接近,当网络输出层的误差平方和小于指定的误差时训练完成,保存网络的权值和偏差.其神经网络结构如图 1 所示.

具体步骤如下:

(1) 初始化,选定权系数及阈值的初值,设置学习步长  $\eta$ 、允许误差  $\varepsilon$ 、网络结构(即网络层数  $L$  和每层节点数  $n_l$ );

(2) 根据学习样本进行正向传播计算过程,计算隐含层和输出层各单元节点输出.对于网络中的第  $l(l=1,2,\dots,L-1)$  层中第  $j$  个神经元的操作特性为:

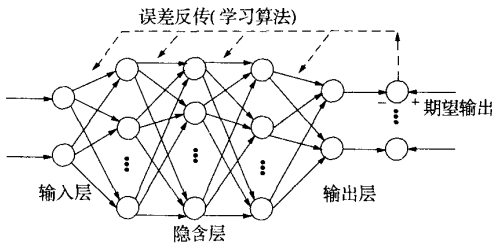


图 1 基于 BP 算法的神经网络结构

Fig. 1 The neural network structure base on BP Algorithm

$$net_{jp}^{(l)} = \sum_{i=1}^{n_{l-1}} W_{ji}^{(l)} O_{ip}^{(l-1)} - \theta_j^l \quad (1)$$

$$O_{jp}^{(l)} = f_i(net_{jp}^{(l)}) \quad (2)$$

式中:  $W_{ji}$  为神经元  $i$  到神经元  $j$  的连接权值;  $n_{l-1}$  是第  $l-1$  层的结点数;  $O_{ip}^{(l-1)}$  为神经元  $j$  的当前输入;  $O_{jp}^{(l)}$  为神经元  $j$  的输出.

$f_i$  为网络节点单元特性函数,一般取为 S 型函数,即

$$f_i(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}} \quad (3)$$

而对于输出层则有

$$O_{jp}^{(L)} = f_i(net_{jp}^{(L)}) = \sum_{i=1}^{n_{L-1}} W_{ji}^{(L)} O_{ip}^{(L-1)} - \theta_j^L \quad (4)$$

计算第  $p$  个样本的输出的误差  $E_p$  和网络的总误差  $E$ ,其中:

$$E_p = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^m (T_{jdp} - \hat{T}_{jp})^2, \quad (p = 1, 2, \dots, P) \quad (5)$$

式中:  $m$  为输出结点个数;  $T_{jdp}$ ,  $\hat{T}_{jp}$  分别为输出层第  $j$  个节点的期望输出和实际输出.

$$E = \sum_{p=1}^P E_p \quad (6)$$

(3) 当  $E$  小于允许误差  $\varepsilon$  或者达到指定的迭代次数时,学习过程结束,否则,进行误差反向传播,反向逐层计算网络各节点误差  $\delta_{jp}^{(l)}$ .

万方数据

对于输出层

$$\delta_{jp}^{(l)} = O_{jp}^{(l)} (1 - O_{jp}^{(l)}) (y_{jdp} - O_{jp}^{(l)}) \quad (7)$$

对于隐含层

$$\delta_{jp}^{(l)} = O_{jp}^{(l)} (1 - O_{jp}^{(l)}) \sum \delta_{jp}^{(l+1)} w_{kj}^{(l+1)} \quad (8)$$

(4) 修正网络连接权值

$$W_{ij}(k+1) = W_{ij}(k) + \eta \delta_{jp}^{(l)} O_{ip}^{(l-1)} \quad (9)$$

## 1.2 BP 神经网络的设计和仿真

在用神经网络模型来代替有限元模型时,输入的是两块断骨之间的距离,输出的是在此距离下所需要的牵引力.所以确定了 BP 神经网络的输入层和输出层的神经元个数都为 1. 隐层的神经元个数没有明确的理论指导,在实际中只能通过对不同的神经元数进行训练比较,然后选择适当的个数.

在神经网络模型的建立过程中,为了能分别应用在手术培训和手术预演中,笔者选取了 70 组实际实验的力位数据和 60 组 FEM 仿真数据,作为 BP 网络训练的样本<sup>[7]</sup>.

根据 BP 神经网络设计的一些原则,在保证精度的前提下,尽量减少网络模型的规模,根据已有实验数据样本,测试了若干种不同层数的 BP 神经网络,其结果如表 1 所示.综合各方面性能,最终选择神经网络的层数为 12 层.

表 1 不同层数的 BP 神经网络模型训练结果

Tab. 1 The training result of different layers for

BP neural network

类型	网络层数	误差精度	比例%	训练步数
BP 神经网络	1	12 237.20	3 059.30	4
	3	161.90	40.47	46
	6	5.45	1.36	101
	9	3.09	0.77	217
	12	2.00	0.50	421
	15	3.06	0.76	1 000

隐层和输出层的激活函数分别取为非线性 Sigmoid 函数和线性 Purelin 函数.

在确定了样本和隐含层层数之后,BP 神经网络的结构便可以确定下来,如图 2 所示.

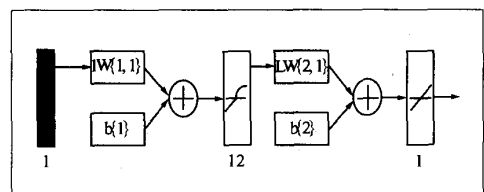


图 2 基于 BP 算法所设计的神经网络结构

Fig. 2 The designed neural network structure

利用 MATLAB 中的神经网络工具箱,建立好

BP网络,对模型进行了训练,训练效果如图3所示.从图中可以看出,经过421步训练后,目标函数已经达到了 $2N$ 以下.

训练完成后,网络的权值和阈值都已经固定了,仿真的过程只是网络前向运算的过程.根据BP神经网络的算法可知,网络训练好了以后,在以后的应用中只需要进行信息的前向传播,其计算过程只是一些简单的加减乘除幂等运算,其运算速度十分快.

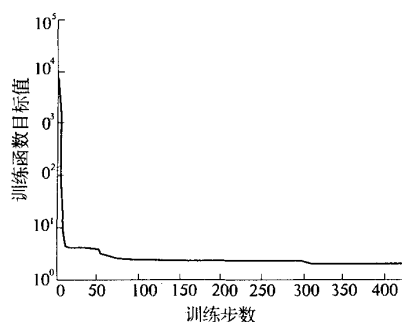


图3 BP神经网络训练结果

Fig.3 BP neural network training result

## 2 实时力反馈实验

BP神经网络模型建立后,将其集成进现有机器人仿真系统,同时,重建的皮肤、骨骼、髓内钉等一系列模型也都按照实际手术情况添加到虚拟手术场景中,如图4所示.

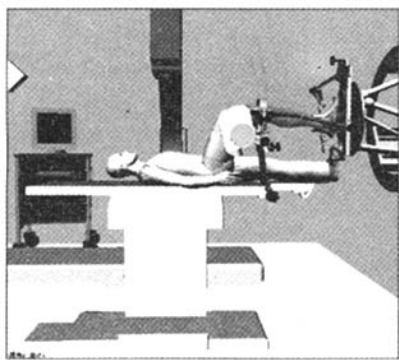


图4 集成后的虚拟手术场景

Fig.4 The integrated virtual surgery scene

为了验证虚拟手术系统的实时性能,本实验利用6自由度的并联机器人作为力反馈平台,来检验所得基于BP神经网络的人体腿部模型的实时性能.在实验中,操作者通过并联主手控制断骨间的位移,然后虚拟系统根据位移计算出反馈力再表现在主手上.系统原理如5所示.

万方数据

在实验过程中,当主手控制系统和虚拟环境生成机通过局域网连接成功后,主手控制系统就每隔15ms采集一次并联主手的运动位姿,将数据通过网络传到虚拟环境端,同时虚拟环境端开辟一个单独的线程用来接收信号,信号按照既定方式解析成功后,将6个位姿信号数据加载到并联上平台,从而产生与主手一致的运动.根据联平台的运动情况可以计算出断骨之间的位移,将此位移输入培训好的神经网络模型可以得到在当前情况下所需的力,这个力可以通过并联主手反馈给操作者,从而完成了一个完整的闭环<sup>[8]</sup>,实验过程如图6所示.

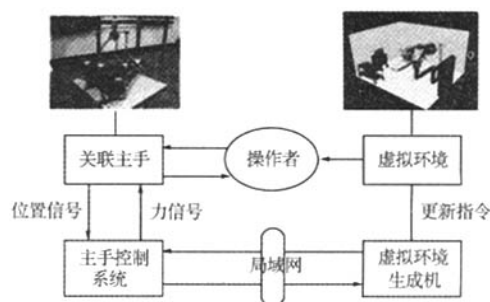


图5 实时力反馈系统工作示意图

Fig.5 The working map of real-time force feedback system

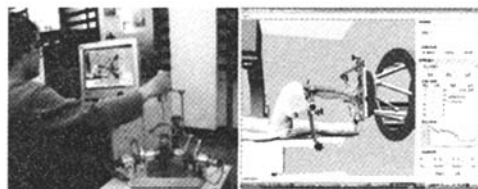


图6 虚拟手术系统操作界面

Fig.6 The working interface of Virtual surgery system

经实验测知,利用BP神经网络模型,使用相同的计算机,在给定断骨间距离,求解牵引力的运算过程中,每次计算的过程都在10ms以内.而有限元模型来求解,每次计算需要的时间在1200s以上.相比之下,神经网络的运算速度提高了五个数量级以上.由此,通过BP神经网络的成功应用,我们达到了虚拟手术的实时仿真目的.

## 3 实验结果分析

本文建立的人体腿部仿真模型在实时力反馈实验过程中显示出了以下几个优点:

(1) 论文提出了采用BP神经网络的方法,来替代解算时间长,计算量大的有限元模型.在保

留了原有有限元模型的力学特性的基础上,成功地实现了实时响应,大大地增加了操作的临场感。

(2) 所建立的 BP 神经网络模型与已有的 Java/Java3D 开发的机器人仿真系统实现了无缝结合,解决了有限元模型难以与其他系统集成的困难。

(3) 在实验中,实现了虚拟手术环境中,机器人、病人和操作者三者之间的交互作用,并在并联主手上的到了反馈力体现。

(4) 在本实验中,无论是力反馈数据的传递,还是虚拟环境的更新信息,都是字节级的。如此小的数据量,占用的网络带宽很小,不易受网络波动的影响,为下一步实施网络遥操作打下了良好的基础。

#### 4 结论

笔者设计并实现了 BP 神经网络,来代替有限元模型实现牵引复位手术中牵引力的实时仿真输出。在将 BP 神经网络模型嵌入既有机器人仿真系统之后,构建了实时力反馈实验平台。通过实验,证明所建立的神经网络模型完全达到了实时仿真所需的实时性要求,大大提高了虚拟手术仿真系统进行实际作业的能力。

#### 参考文献:

- [1] SATAVA R. Medical virtual reality: the current status of the future[A]. In Proc. 4th conf. Medicine Meets Virtual Reality (MMVR IV)[C]. San Diego, Canada: IOS Press, 1996. 100 - 106.
- [2] GRIGORE C B. Invited Review: The synergy between virtual reality and robotics[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1999, 15(3): 400 - 410.
- [3] HERMAN G T, LIU H K. Three - dimensional display of human organs from computed tomograms[J]. Computer Graphics Image Processing, 1979, 9(2): 1 - 21.
- [4] CLINE H E. Two algorithms for the three - dimensional reconstruction of tomograms[J]. Medical Physics, 1988, 15(3): 320 - 327.
- [5] DU Z J, YANG D H, SUN L N. Research on a robot simulation and monitoring system based on Java3D [A]. IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics [C]. Shenyang, China: IEEE PRESS, 2004. 281 - 286.
- [6] DU Z J, JIA Z H, KONG M X. Virtual reality - based telesurgery via teleprogramming scheme combined with semi - autonomous control [A]. Proceedings of the 2005 IEEE Engineering in Medicine and Biology 27th Annual Conference [C]. Shanghai, China: IEEE PRESS, 2005. 386 - 392.
- [7] 飞思科技产品研发中心. Matlab 6.5 辅助神经网络分析与设计[M]. 北京: 电子工业出版社, 2003. 32 - 36, 50 - 55.
- [8] SZEKELY G, BAJKA M, BRECHBUHLER C H, et al. Virtual reality based simulation of endoscopic surgery[J]. Teleoperators and Virtual Environments, 2000, 9(3): 310 - 333.

### The Real - time Simulation Research of Virtual Surgery Based on BP Neural Network

ZHANG Feng-feng, SUN Li-ning, DU Zhi-jiang, JIA Zhi-heng

(State Key Laboratory of Robotics and Mechatronics, Harbin University of Technology Harbin 150001, China)

**Abstract:** It is an effective method to establish the finite element model and analyze its biomedical characteristic in the research of the virtual simulation on human leg. However, because of the large volume of data, long solving time, and the difficulty to integrate with the existing system, the finite element model is unsuitable to use in the surgery training and practice. To enhance the operational capacity of the virtual surgery simulation system, a BP neural network model is presented to replace the finite element model, which can realize real - time biomechanical response. Combined with the existing virtual simulation system of Robot assisted orthopedic system, the experimental platform is constructed. The experimental result shows that the BP neural network of human leg could fully satisfy the requirement of real - time simulation.

**Key words:** BP neural network; virtual surgery simulation; FEM model; medical robot