

基于 CT 重建和机器人磨削的个性化 假体 CAD/CAM 方法

李晴¹, 王世明¹, 吴琪², 庞滨³, 管晓东³, 席文明³, 高亢⁴

(1 上海海洋大学工程学院, 上海 201306; 2 中国人民解放军第 82 医院, 淮安 223001;

3 厦门大学航空航天学院, 厦门 361005; 4 南京以琳水务科技有限公司, 南京 210011)

摘要: 人体髋关节髓腔具有个性化的 S 型形状, 现有标准型的直柄股骨假体与病人髓腔形成三点接触, 降低了股骨假体与病人髓腔的匹配度。利用猪腿骨的 CT 数据重建其髓腔的三维模型, 将该三维模型作为假体设计模型导入机器人仿真软件进行编程和磨削仿真, 并生成机器人磨削程序, 利用机器人磨削程序将该假体模型复制到铜棒上。将加工好的假体与猪腿骨髓腔匹配, 通过 X 射线图检测两者匹配情况, 利用截取的骨断面测量假体与髓腔断面间的尺寸误差, 验证个性化假体设计方法以及机器人磨削个性化假体的可行性。实验结果表明, 假体与髓腔完成匹配后, 90.84% 匹配区域的假体与髓腔的间隙小于 1mm。

关键词: CT; 重建; 假体; 机器人磨削

中图分类号: TP249 文献标志码: A 文章编号: 1671—3133(2017)04—0067—06

DOI: 10.16731/j.cnki.1671-3133.2017.04.013

A CAD/CAM method of individualized prosthesis base on CT reconstructing and robot grinding

Li Qing¹, Wang Shiming¹, Wu Qi², Pang Bang³, Guan Xiaodong³, Xi Wenming³, Gao Kang⁴

(1 College of Engineering Science and Technology, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;

2 The 82 Hospital of People's Liberation Army, Huaian 223001, Jiangsu, China;

3 School of Aerospace Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, Fujian, China;

4 Nanjing Yilin Water Science and Technology Co. Ltd., Nanjing 210011, China)

Abstract: Human hip joint has a S-shaped canal, the existing standard straight hip prosthesis matching with the femur cavity of the patient, will form a three-point contact and reduce the fit precision between hip prosthesis and femur cavity. The pig shank CT data is applied to reconstruct the three-dimensional model of femur cavity to as a design model of the prosthesis, which is imported into robot simulation software for programming and simulation of grinding, then the prosthesis model is copied on the copper bar by using robotic grinding technology. After the prosthesis matched with femur cavity, the matching case is detected by X-ray image, and the size error between the prosthesis and femur cavity on the cross-sectional is measured to verify the method of individualized prosthesis design and the feasibility of robot grinding prosthesis. The experimental results show that 90.84% of the matching area is less than 1mm when the femur cavity is matched with prosthesis.

Key words: CT; reconstructing; prosthesis; robot grinding

0 引言

生物型股骨假体依靠骨长入其表面微孔而达到长期固定, 股骨假体与髓腔之间的间隙决定着骨组织能否长入股骨假体表面的微孔。具有羟基磷灰石涂层的生物型股骨假体, 当间隙大于 1mm 时, 将在股骨假体和髓腔间形成纤维组织, 使得股骨假体产生无菌

松动, 不能形成股骨假体的长期固定。而间隙小于 1mm 时, 将在股骨假体和髓腔间形成骨组织, 使股骨假体长期固定^[1-5]。

髋关节髓腔结构与解剖型股骨假体如图 1 所示。在图 1a 中, 从侧位看, 人体股骨髓腔具有个性化的 S 型形状, 当标准型的直柄假体与髓腔匹配时会形成三点接触, 图 1b 中用箭头标注出接触位置。在医生手

工扩髓时,股骨假体与髓腔间隙小于1mm的区域只有28%左右,即匹配度为28%左右^[6]。为了获得较高的股骨假体与髓腔的匹配度,德国LINK公司研制了解剖型股骨假体Ribbed,其侧位形状为S型,与髌关

节的S型髓腔形状一致,如图1c所示。该假体与髓腔具有较高的匹配度,获得了好的置换效果^[7-9]。但该假体也存在一个严重的问题,即部分病人髓腔S型形状与股骨假体不匹配,置换后引发病人股骨骨折^[10]。



图1 髌关节髓腔结构与解剖型股骨假体

要想获得理想的股骨假体与髓腔的匹配度,需要对股骨假体进行个性化设计与制造。CT数据已从术前诊断、手术导航发展为人工假体设计和制造的重要工具,CT数据重建的三维模型精度可达到0.29mm^[11-13],可直接用CT数据重建的模型进行人工假体的磨削加工^[14]。现有个性化股骨假体主要用五轴加工中心进行铣削加工,由于个性化股骨假体的复杂外形,在加工前需要对设计模型进行简化处理,降低了加工的股骨假体与髓腔的匹配度^[15-17]。

本文利用CT数据重建猪腿骨髓腔三维模型,将重建的模型作为个性化假体的设计模型;再将该设计模型导入机器人仿真软件进行编程和仿真,利用编制的程序,直接对个性化假体进行机器人磨削加工。通过上述方法,希望得到一种基于机器人的高效、低成本和一体化的个性化假体CAD/CAM方法。

1 个性化假体CAD方法

直接用猪腿骨的CT数据重建其三维髓腔实体模型,将该三维髓腔实体模型作为个性化假体的设计模型,如图2所示。

在中国人民解放军第82医院的64排螺旋CT机上以0.5mm层厚对猪腿骨进行扫描,然后将扫面的CT图片导入Mimics软件进行三维重建,图2a是三维重建后的猪腿骨模型,图2b是通过Mimics软件中的填充命令对猪腿骨髓腔进行实体填充,然后再和图2a进行布尔运算获得的猪腿骨髓腔实体模型,该模型只是截

取了髓腔的一部分,截取部分为图2a中的方框区域。

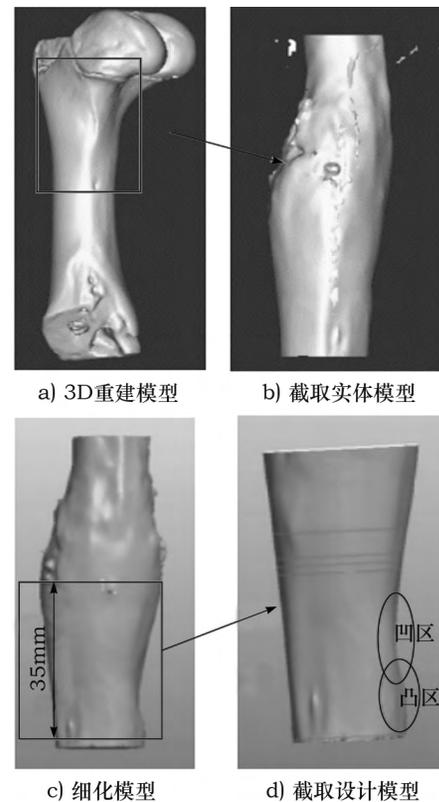


图2 猪腿骨三维模型与个性化假体设计模型

图2c是利用Pro/E软件对三维髓腔实体进行细化处理后的模型,图2d是在细化后的模型上截取一段作为个性化假体的设计模型,截取的长度为猪腿骨髓腔峡部向上35mm段,该段髓腔具有上下大、中间小

的形状结构,髓腔峡部是指处于图2c方框的下边框处的位置。

从图2c和图2d可以看出,个性化假体模型下端有凹凸区域,如果按实体模型进行加工,在个性化假体与猪腿骨髓腔匹配时会产生干涉,需要对凹凸区域进行处理,其方法是调整磨削时的轨迹点,使凸出部分加工后和凹入部分平齐。

2 软件空间与实际空间的一致性

机器人磨削轨迹点在仿真软件中产生,当仿真软件中的轨迹点向实际机器人磨削空间映射时,将产生误差,该映射误差由仿真软件中各单元与实际空间中对应各单元的位姿关系不一致造成,需要在假体磨削前,建立仿真软件空间与实际空间中各对应单元的位姿关系一致性,其示意图如图3所示。

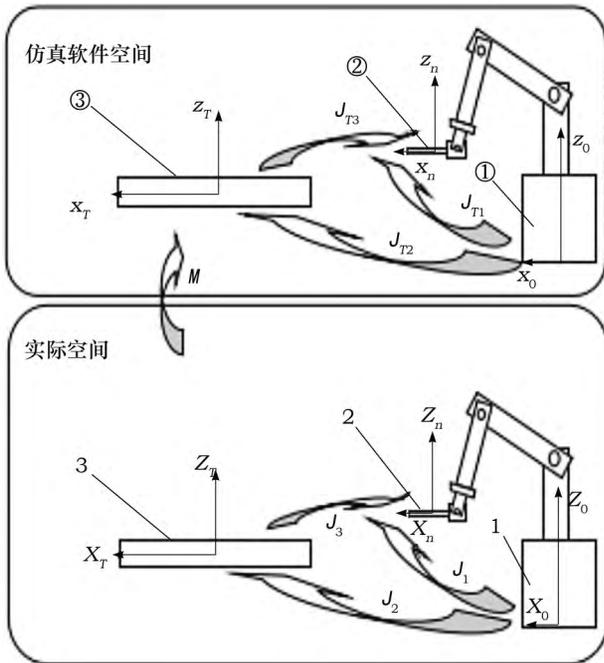


图3 仿真软件空间与实际空间一致性建立示意图

图3所示仿真软件空间中的①为机器人模型,②为铜棒模型,③为磨削轮模型,3个模型的坐标系分别为 $x_0y_0z_0$ 、 $x_ny_nz_n$ 和 $x_Ty_Tz_T$;实际空间中,1为机器人,2为铜棒,3为磨削轮,它们的坐标系分别为 $X_0Y_0Z_0$ 、 $X_nY_nZ_n$ 和 $X_TY_TZ_T$ 。机器人1与铜棒2间的转换矩阵为 J_1 、机器人1与磨削轮3间的转换矩阵为 J_2 、磨削轮3与铜棒2间的转换矩阵为 J_3 , M 为实际空间与仿真软件空间之间的比例映射矩阵, J_{T1} 为仿真软件空间中机器人模型①与铜棒模型②之间的转换矩阵, J_{T2} 为机器人模型①与磨削轮模型③之间的转换矩阵, J_{T3} 为

磨削轮模型③与铜棒模型②之间的转换矩阵。仿真软件与实际空间中各对应单元的一致性如公式(1)所示:

$$\begin{cases} J_{T1} = mIJ_1 \\ J_{T2} = mIJ_2 \\ J_{T3} = mIJ_3 \end{cases} \quad (1)$$

式中: J_1 、 J_2 、 J_3 、 J_{T1} 、 J_{T2} 、 J_{T3} 均为 4×4 的齐次坐标矩阵; m 为比例系数; $M = mI$, I 为 4×4 单位矩阵。

开始标定前,假设仿真软件空间中机器人模型相对磨削轮模型的位置、姿态与实际空间中的机器人相对磨削轮位置、姿态一致,则:

$$J_0 = \frac{1}{m} J_{T0} \quad (2)$$

式中: J_{T0} 为开始标定时仿真软件中机器人模型到磨削轮模型的初始转换矩阵; J_0 为实际空间中与 J_{T0} 对应的机器人到磨削轮的初始转换矩阵。

由于存在机器人、磨削轮、铜棒的制造和安装误差, J_0 和 J_2 不相等。假设 J_0 和 J_2 之间的姿态误差为 $ROT(X_T, \alpha)$ 、 $ROT(Y_T, \beta)$ 、 $ROT(Z_T, \gamma)$; J_0 和 J_2 之间的位置误差为 $Tran(X_T, p_x)$ 、 $Tran(Y_T, p_y)$ 、 $Tran(Z_T, p_z)$,由式(2)得:

$$\begin{aligned} J_2 = J_0 \cdot ROT(X_T, \alpha) \cdot ROT(Y_T, \beta) \cdot ROT(Z_T, \gamma) \cdot \\ Tran(X_T, p_x) \cdot Tran(Y_T, p_y) \cdot \\ Tran(Z_T, p_z) = \frac{1}{m} J_{T0} \cdot ROT(X_T, \alpha) \cdot \\ ROT(Y_T, \beta) \cdot ROT(Z_T, \gamma) \cdot Tran(X_T, p_x) \cdot \\ Tran(Y_T, p_y) \cdot Tran(Z_T, p_z) \end{aligned} \quad (3)$$

式中: $ROT(X_T, \alpha)$ 、 $ROT(Y_T, \beta)$ 、 $ROT(Z_T, \gamma)$ 分别为绕磨削轮上坐标系 $X_TY_TZ_T$ 的 X_T 、 Y_T 、 Z_T 轴旋转 α 、 β 、 γ 角形成的 4×4 齐次坐标矩阵; $Tran(X_T, p_x)$ 、 $Tran(Y_T, p_y)$ 、 $Tran(Z_T, p_z)$ 分别为沿磨削轮上坐标系 $X_TY_TZ_T$ 的 X_T 、 Y_T 、 Z_T 轴平移 p_x 、 p_y 、 p_z 距离形成的 4×4 齐次坐标矩阵。

将式(3)代入式(1)得:

$$\begin{aligned} J_{T2} = J_{T0} \cdot ROT(X_T, \alpha) \cdot ROT(Y_T, \beta) \cdot \\ ROT(Z_T, \gamma) \cdot Tran(X_T, p_x) \cdot \\ Tran(Y_T, p_y) \cdot Tran(Z_T, p_z) \end{aligned} \quad (4)$$

公式(3)中 α 、 β 、 γ 和 p_x 、 p_y 、 p_z 可通过标定工具和机器人正运动学得到。利用公式(4)对仿真软件中的磨削轮模型进行调整,使其与实际空间中的磨削轮位置、姿态一致。

3 个性化假体CAM方法

机器人磨削轨迹及磨削过程如图4所示。将个性

化假体的设计模型导入到机器人仿真软件中,并和机器人末端法兰盘固结在一起。在假体模型全长上取8个断面,相邻断面间的距离为5mm,每个断面上取48点,其点位于假体模型表面,法向量垂直于假体表面并指向假体外部。通过依次连接8个断面上的对应点,形成Z字型机器人磨削轨迹,见图4a。在图4a上显示了8个点连接成的一条折线,8个点分别用1~8表示,每个点处于不同的断面上。这样,利用48条折线近似假体表面,这些连续折线即为机器人的磨削轨迹。假体采用砂带磨削技术,砂带支撑在磨削轮上,而假体在磨削轮表面的砂带上磨削。假体模型上凸出区域的点需要特殊处理,否则加工完成的假体与髓腔产生干涉。首先,在凸出区域取点,然后移动凸出区域的点使其与凹入区域的点平齐。在移动点时,点的法向量保持不变,这样处理的结果可使假体凸出区域被磨平至凹入区域。

假体模型将被复制到直径为 $\phi 30\text{mm}$ 的铜棒上,该铜棒通过两个圆柱销和一个螺钉连接在方形标定块上,而方形标定块连接在机器人末端法兰盘上。假体模型和铜棒的相互位置关系为铜棒包容假体,当机器人按假体模型上轨迹点磨削时,将对铜棒进行加工,从而将假体模型复制到铜棒上,见图4b。

磨削首先在磨削机床的上轮上进行,其目的是将铜棒磨削到与假体尺寸相近。上轮为圆柱形橡胶轮,直径为 $\phi 350\text{mm}$,采用 0.3mm/r 的进给量,通过带动砂带将铜棒磨削到接近假体模型尺寸,见图4c。

当磨削余量为 0.5mm 时,在中间轮上进行磨削,中间轮直径为 $\phi 150\text{mm}$ 。轮的外廓加工成外凸圆弧形状,以便磨削复杂外形的假体模型,见图4d。

仿真完成后,仿真软件生成机器人磨削程序,将该程序下载到机器人控制器中,运行该磨削程序,对铜棒进行磨削。机器人磨削程序每行的格式为:“CONST robtarget p10:=[[x y z],[q₁ q₂ q₃ q₄]]”,其中x、y、z表示当前点(p10)的3个位置坐标,单位是mm; q₁、q₂、q₃、q₄表示机器人姿态的四元素,可以转换成3个姿态角,单位是(°)。由于铜棒柄体表面是复杂的自由曲面,因此机器人需要根据铜棒柄体表面的法向量不断改变位置和姿态,通过六轴联合运动,完成铜棒柄体磨削加工。Z字型磨削轨迹沿铜棒柄体圆周分布,其首尾相连形成一个封闭的加工轨迹,整个加工过程是连续磨削。

图4e所示为机器人在实际机床磨削轮上进行磨削示意图,图4f所示为机器人在实际机床中间轮上进行

磨削示意图。磨削完成后,利用布轮由机器人完成对假体的抛光,图4g所示为抛光后的假体照片。

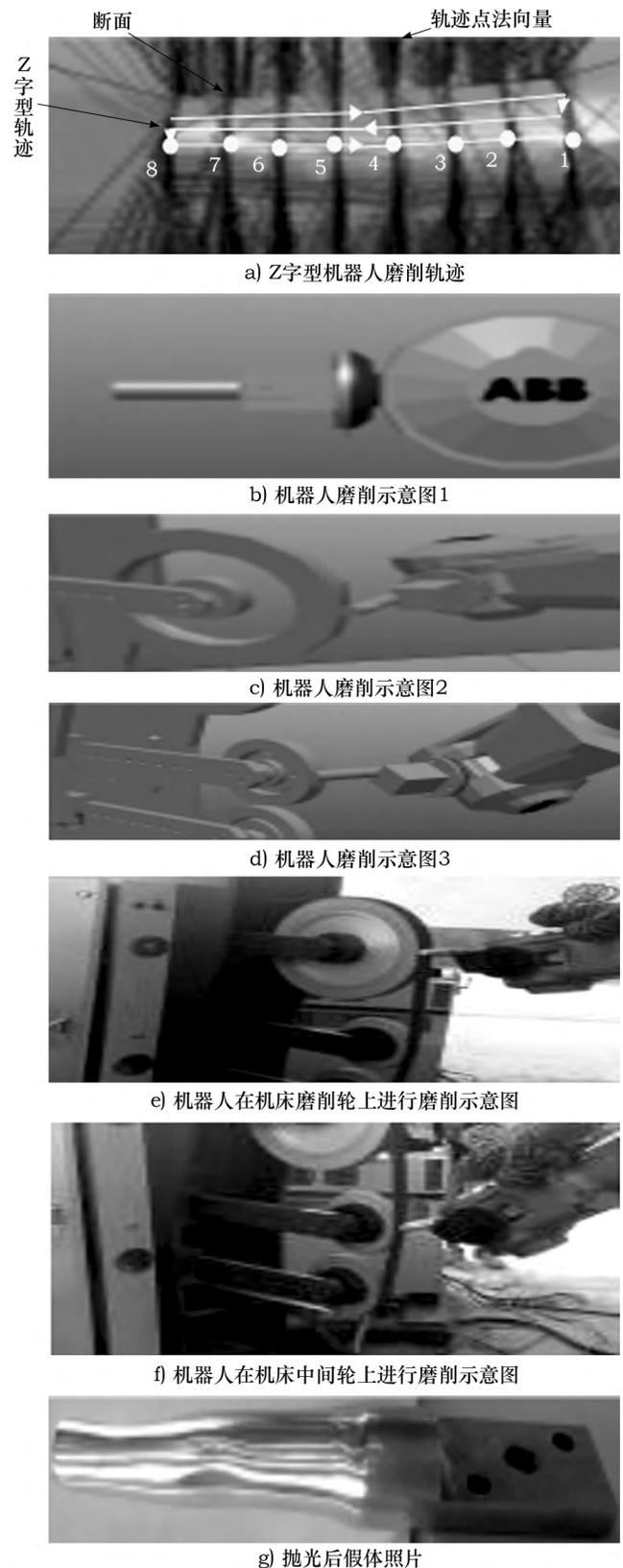


图4 机器人磨削轨迹及磨削过程

磨削加工采用的是ABB公司4400工业机器人,其抓取重量为60kg,位置精度为0.16mm,磨削机床为自行研制。

4 实验结果

在普通台式钻床上,利用圆柱钻头打开CT机扫描过的猪腿骨髓腔,然后利用手工钻的圆柱钻头人工仔细扩展所钻的孔,将圆柱孔扩展成锥形,直至锥形孔小端直径和猪腿骨近端髓腔尺寸一致。假体和髓腔匹配以及匹配后的X射线图像如图5所示。利用假体的Pro-E模型确定加工后假体插入猪腿骨髓腔的姿态,将假体插入到猪腿骨髓腔后,轻敲假体头部,使假体与髓腔贴合,见图5a。在中国人民解放军第82医院,利用X射线机拍摄不同姿态的假体与髓腔的匹配图像,见图5b~图5d,从图中可以看出,假体与髓腔匹配良好。

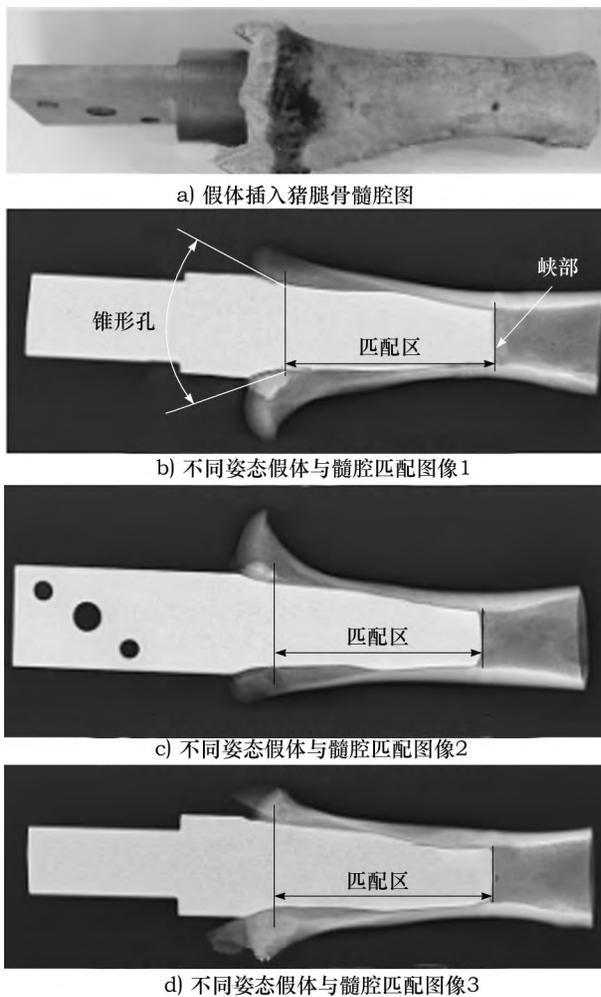


图5 假体和髓腔匹配以及匹配后的X射线图像

在假体与髓腔匹配后的实物上,沿猪腿骨长度方

向截取6个断面,断面间的距离为5mm。用游标卡尺测量假体表面与髓腔表面之间的间隙大小,当间隙尺寸大于1mm时,记录断面位置与间隙尺寸,图6所示为假体与髓腔表面间的6个断面最大间隙处的图像。表1所示为每个断面上假体和髓腔之间的最大间隙,以及超过1mm的间隙所对应断面弧长与断面周长的比值。

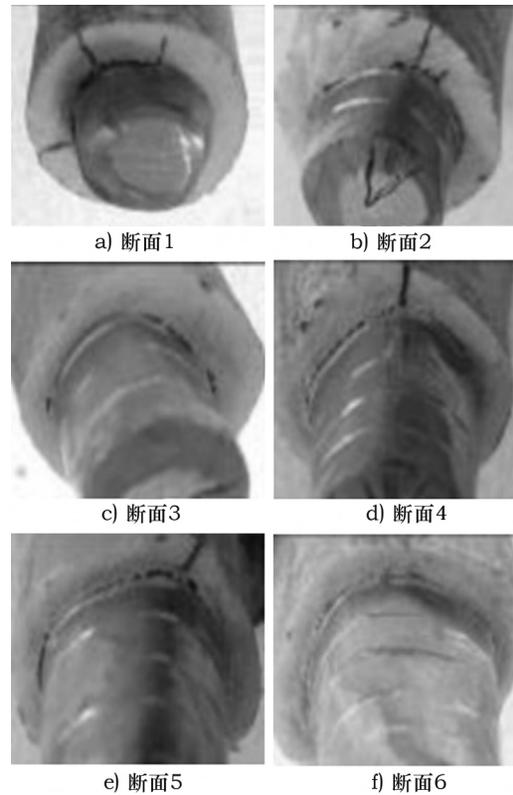


图6 假体与髓腔表面间的6个断面最大间隙处的图像

表1 断面上最大间隙和超过1mm间隙的断面弧长与断面周长的比值

断面	最大间隙/mm	超过1mm间隙的断面弧长与断面周长的比值
1	1.4	1/3
2	1.0	0
3	0.8	0
4	0.5	0
5	1.1	1/36
6	0.3	0

在图6a中,假体和髓腔间的最大间隙达到1.4mm,超过1mm的间隙占断面周长的三分之一,这是因为三维髓腔实体表面存在凹凸区域,见图2d。编制机器人磨削程序时,在图2中分别用椭圆和箭头指示出了凸区和凹区,将凸区的表面加工点下移到和凹区相平齐,从而带来大的间隙,不同点的下移量不同,点的最大下移量为1mm。图6e中,假体和髓腔间的最大

间隙为 1.1mm,超过 1mm 间隙的弧长占断面周长的 1/36,这主要是断面上有小的圆弧,机器人在磨削小圆弧邻近区域的大曲面时,会磨削到小圆弧。假设匹配后的猪腿骨水平放置,当一个断面中的最大间隙超过 1mm 时,观察其相邻的第一左断面和第一右断面的最大间隙是否超过 1mm,如果超过,则观察第一左断面左边相邻的第二左断面和第一右断面右边相邻的第二右断面的最大间隙,直至第 n 左断面和第 l 右断面的最大间隙小于 1mm。在 n 和 l 断面间,以断面上超过 1mm 间隙弧长的最大值计算超过 1mm 间隙区域的面积。用同样的方法观察其他断面,计算超过 1mm 间隙区域的面积,然后将超过 1mm 间隙区域的面积累加并计算其与匹配区域的髓腔表面积比值的百分比,该百分比即为假体与髓腔的非匹配度。通过计算,在假体与髓腔的匹配区域,其匹配度为 90.84%。

5 结语

本文利用 CT 图片重建模型进行个性化假体设计,利用机器人磨削技术对设计的假体进行磨削加工,其目的是希望得到一种新的基于机器人磨削的个性化股骨假体 CAD/CAM 方法,满足生物型股骨假体与髓腔高匹配度的要求。实验结果表明,采用本文方法,其假体和猪腿骨髓腔的匹配度可以达到 90.84%,远高于标准假体与人体髓腔的匹配度。后期,笔者将结合有限元分析方法,研究股骨假体力传递与假体几何形状的关系。

参考文献:

- [1] SAKAI R, ITOMAN M, MABUCHI K. Assessments of different kinds of stems by experiments and FEM analysis: appropriate stress distribution on a hip prosthesis [J]. *Clinical Biomechanics*, 2006(21): 826 - 833.
- [2] RUBEN R B, FOLGADO J, FEMANDES P R. Three-dimensional shape optimization of hip prostheses using a multicriteria formulation [J]. *Struct. Multidisc. Optim.*, 2007(34): 261 - 275.
- [3] RAHMATI S, FARAHMAND F, ABBASZADEH F. Application of rapid prototyping for development of custom-made orthopedics prostheses: an investigative study [J]. *MAJLESI JOURNAL of MECHANICAL ENGINEERING*, 2010, 3(2): 11 - 16.
- [4] KHANUJA H S, VAKILJ J, GODDARD M S, et al. Cementless femoral fixation in total hip arthroplasty [J]. *The journal of bone and joint surgery*, 2011(13): 500 - 509.
- [5] 谭瑞昌, 范红松, 吴方, 等. 齿槽型人工髋关节骨应力分布的三维有限元分析 [J]. *生物医学工程杂志*, 2011, 23(4): 732 - 736.
- [6] MITTELSTADT B, PAUL H, KAZANZIDES P, et al. Development of a surgical robot for cementless total hip replacement [J]. *Robotica*, 1993(11): 553 - 560.
- [7] 史庆轩, 李佩佳, 孙磊, 等. 662 髋 Ribbed 假体中远期临床疗效观察 [J]. *中国矫形外科杂志*, 2007, 21(3): 244 - 246.
- [8] 林均馨, 张鹏, 刘玉江, 等. 148 髋 Ribbed 假体全髋关节置换的临床研究 [J]. *中国骨与关节外科*, 2010, 3(1): 57 - 58.
- [9] 雷光华, 曾凯斌, 李康华, 等. 解剖型非骨水泥全髋人工假体置换术近中期疗效研究 [J]. *中国修复重建外科杂志*, 2007, 21(3): 244 - 246.
- [10] 王敏, 张峡, 郝勇, 等. 解剖型股骨柄假体植入并发股骨近段骨折与股骨近段髓腔解剖分析 [J]. *第三军医大学学报*, 2011, 33(14): 1522 - 1525.
- [11] PAWLIKOWSKI M, SKALSKI K, HARABURDA M. Process of hip joint prosthesis design including bone remodeling phenomenon [J]. *Computers and structures*, 2003(81): 887 - 893.
- [12] WEI Z J, FAN L, RONG D Q, et al. Computer-assisted design of individualized femoral prosthesis according to 3D reconstruction of CT images [J]. *Journal of Clinical Rehabilitative Tissue Engineering Research*, 2010, 14(35): 6639 - 6642.
- [13] PAUL H A, MITTELSTADT B, BARGAR W L, et al. A surgical robot for total hip replacement surgery. *Proceedings of the 1992 IEEE international conference on robotics and automation* [C]. Nice, France. [s. n.], 1992: 606 - 611.
- [14] TAYLOR R H, MITTELSTADT B D, PAUL H A, et al. An image-directed robotic system for precise orthopaedic surgery [J]. *IEEE transactions on robotics and automation*, 1994, 10(3): 261 - 275.
- [15] LEE Jeng-Nan, CHANG Kuan-Yu. An integrated investigation of CAD/CAM for the development of custom-made femoral stem [J]. *Life Science Journal*, 2009, 7(1): 56 - 61.
- [16] RAWAL B R, RIBEIRO R, MALHOTRA R, et al. Design and manufacturing of femoral stem for the indian population [J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2012(14): 216 - 223.
- [17] WERNER A, LECHNIAK Z, SKALSKI K, et al. Design and manufacture of anatomical hip joint endoprosthesis using CAD/CAM systems [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2000(107): 181 - 186.

作者简介: 李晴, 硕士研究生。
E-mail: 18801771885@163.com
收稿日期: 2016-03-08