

三维图像配准及坐标变换膝关节运动分析在机构学中的应用

https://doi.org/10.12307/2022.517

王建平¹, 张晓辉¹, 余进伟², 魏绍亮¹, 张新民¹, 许幸新¹, 曲海军¹

投稿日期: 2021-07-21

送审日期: 2021-07-22

采用日期: 2021-09-18

在线日期: 2021-11-11

中图分类号:

R459.9; R318; R684.7

文章编号:

2095-4344(2022)12-01922-05

文献标识码: A

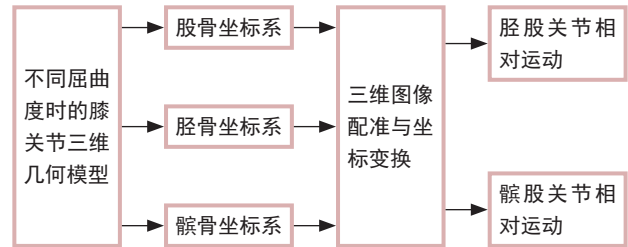
文章快速阅读:

文章特点一

△利用骨组合的膝关节CT图像,采用直接测量法得到人体下肢名义屈曲度分别为0°,30°,60°,90°及120°时的三维模型;

△利用构建的膝关节三维几何模型,分别建立了股骨坐标系、胫骨坐标系及髌骨坐标系;

△采用三维图像配准和坐标变换相结合的方法,构建关节在不同相位时的位置、转角及速度等运动特征。



文题释义:

膝关节运动分析: 膝关节运动一共包括6个自由度,其中3个旋转自由度:屈曲伸展、内收外展、内外旋,3个移动自由度:上下平移、内外平移、前后平移。膝关节的运动状态较为复杂,其运动数据的精确测量有很重要的研究价值和现实意义,其测量精度对膝关节的生物力学特性研究及膝关节假体的设计与手术实施有着决定性的影响。

医学图像处理: 是指利用计算机处理技术对二维医学切片图像进行分析和处理,实现对人体不同组织的分割、提取及重建,可以辅助医生对病变部位进行定量分析,以提高诊断的可靠性。医学图像处理在医学研究及关节置换术中同样起很重要的作用。医学图像处理主要表现在病变检测、图像分割、图像配准与融合等几个方面。

摘要

背景: 对膝关节各组织的运动过程、运动数据、运动机制的研究,有助于根据其运动特性及生物力学特征,设计、改进膝关节假体,改善膝关节运动功能,以及避免运动损伤、提高运动成绩和延长运动寿命。膝关节的运动数据是研究其力学特性的基础。

目的: 根据膝关节的三维几何模型,求解膝关节在不同屈曲角度时胫股关节、髌股关节的运动数据,为机器人等空间复杂机构的运动分析、人工假体的力学分析及其设计提供新的研究途径和参考方法。

方法: 首先,采用CT数据得到人体静态下屈曲0~120°范围膝关节典型相位的三维点云;其次,提出将三维图像配准和坐标变换相结合的方法以精确分析膝关节的相对运动。将不同屈曲度的膝关节各部分如股骨、胫骨、髌骨三维图像及其坐标放在同一坐标系下,分别建立膝关节各骨组织的正交坐标系,通过绕运动坐标系的Z-Y-X欧拉角方法进行坐标变换来研究膝关节的运动。

结果与结论: ①分别得到了膝关节屈曲0~120°范围内的胫股关节、髌股关节在5个自由度下的运动数据,为膝关节的力学特性及假体设计的研究提供支撑,适用于机构学中复杂运动形态运动副的运动分析;②该研究所提出的方法基于多静态离散医学影像进行人体运动的测量和分析,既能够利用既有的CT扫描设备和现有软件,设备成本低、方法简单易学;同时获得较高的测量精度,其精度误差小于1 mm。

关键词: 运动分析; 机构学; 三维图像处理; 图像配准; 坐标变换; 膝关节; 运动测量; 生物力学

Application of knee joint motion analysis in mechanism based on three-dimensional image registration and coordinate transformation

Wang Jianping¹, Zhang Xiaohui¹, Yu Jinwei², Wei Shaoliang¹, Zhang Xinmin¹, Xu Xingxin¹, Qu Haijun¹

¹School of Mechanical and Power Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, Henan Province, China; ²Department of Orthopedics, the First Affiliated Hospital of Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, Henan Province, China

Wang Jianping, PhD, Associate professor, School of Mechanical and Power Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, Henan Province, China

Corresponding author: Qu Haijun, PhD, Lecturer, School of Mechanical and Power Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, Henan Province, China

¹河南理工大学机械与动力工程学院,河南省焦作市 454003; ²河南理工大学第一附属医院骨科,河南省焦作市 454003

第一作者: 王建平,男,1969年生,山西省晋城市人,2010年上海交通大学毕业,博士,副教授,主要从事生物力学CAD/CAE方面的研究。

通讯作者: 曲海军,博士,讲师,河南理工大学机械与动力工程学院,河南省焦作市 454003

https://orcid.org/0000-0003-3465-9615 (王建平)

基金资助: 国家自然科学基金项目“高屈曲人工膝关节的高屈曲稳定性机制研究”(31370999),项目负责人:王建平;河南省高等教育教学改革研究项目“工程教育专业认证视角下的工科专业非技术能力培养研究与实践”(2019SJGLX056),项目负责人:张新民;河南省高等教育教学改革研究项目(2012SJGLX127),项目参与人:张晓辉;河南省高等教育教学改革研究项目“研究生教育”成果(2019SJGLX017Y),项目参与人:王建平;2021年度河南理工大学课程思政样板课程,项目负责人:许幸新

引用本文: 王建平, 张晓辉, 余进伟, 魏绍亮, 张新民, 许幸新, 曲海军. 三维图像配准及坐标变换膝关节运动分析在机构学中的应用[J]. 中国组织工程研究, 2022, 26(12):1922-1926.



Abstract

BACKGROUND: Research on movement process, data, and mechanism of the knee joint is helpful to design and modify a knee joint prosthesis, and improve the knee joint movement function according to its movement characteristics and biomechanical characteristics, so as to avoid sports injuries, improve sports performance and prolong sports life. The movement data of the knee joint are the basis for studying its mechanical properties.

OBJECTIVE: According to the three-dimensional geometric model of the knee joint, to determine the movement data of the tibiofemoral joint and the patellofemoral joint at different flexion angles, thereby providing a new approach and reference for the kinematic analysis of complex spatial mechanisms such as robots and for the mechanical analysis and design of artificial prostheses.

METHODS: First, the three-dimensional point cloud of the knee joint at 0°–120° static knee flexion was captured using computed tomography. Secondly, the combination of three-dimensional image registration and coordinate transformation was proposed to accurately analyze the relative motion of the knee joint. Three-dimensional images of the knee joint (including the femur, tibia, patella) in different flexion positions and their coordinates were presented in the same coordinate system. The orthogonal coordinate system of each bone tissue of the knee joint was then established. The movement of the knee joint was studied based on coordinate transformation using the Z-Y-X Euler angle method around the motion coordinate system.

RESULTS AND CONCLUSION: (1)The motion data of the tibiofemoral and patellofemoral joints with 0°–120° of knee flexion were obtained in the five degrees of freedom, which offers a support for studying the mechanical properties of the knee joint and prosthetic design. This method could be used for the motion analysis of kinematics pairs under complex kinematics in mechanism. (2)To conclude, this method is proposed based on multi-static discrete medical images for kinematic measurement and analysis in human body. It can be conducted based on existing computed tomography scanning equipment and existing software, which has low cost and is easily understood. Moreover, this method is characterized by high measurement accuracy and the accuracy error is less than 1 mm.

Key words: motion analysis; mechanism; three-dimensional image processing; image registration; coordinate transformation; knee joint; motion measurement; biomechanics

Funding: the National Natural Science Foundation of China, No. 31370999(to WJP); Higher Education Teaching Reform Research Project of Henan Province, No. 2019SJGLX056(to XJM); Higher Education Teaching Reform Research Project of Henan Province, No. 2012SJGLX127(to ZXH); Higher Education Teaching Reform Research Project of Henan Province, No. 2019SJGLX017Y(to WJP); 2021 Ideological and Political Model Course of Henan Polytechnic University(to XXX)

How to cite this article: WANG JP, ZHANG XH, YU JW, WEI SL, ZHANG XM, XU XX, QU HJ. Application of knee joint motion analysis in mechanism based on three-dimensional image registration and coordinate transformation. *Zhongguo Zuzhi Gongcheng Yanjiu*. 2022;26(12):1922-1926.

0 引言 Introduction

随着复杂柔性系统相关的工业自动化以及运动医疗等的发展,传统简单机构运动分析已经难以满足单运动副多自由度的高要求。目前,工业机器人和仿生机器人等空间串联开链连杆机构的运动分析多建立在理论分析、仿真模拟和实验的基础上^[1-4]。机械原理运动分析教学中多针对平面闭链机构,较少涉及空间开链机构。机器人教学中的每个机器人关节一般只有1个自由度,大多采用DH法、矩阵法或利用ADAMS仿真方法研究^[5-7]。而人体下肢膝关节运动就包括6个自由度,运动形态复杂,且不同个体之间差异性较大。另一方面,膝关节及骨肌系统均隐藏于身体内部,难以直接观测。因此,人体膝关节在各相位的运动参数则难以精确测量。

目前,已有较多的膝关节运动间接测量法,如运动捕捉、高速摄影及三维激光扫描^[8-10]。运动捕捉是通过观测粘于皮肤表面标记物的运动特征来反推内部骨骼及其关节的运动参数,其精度不稳定。该方法测量胫骨前后位移和膝关节旋转所产生的误差达到了13 mm和4.4°^[11],如此量级的误差掩盖了膝关节真实的运动规律。因此,对股关节的运动测量方法提出了几种改进措施,如X射线立体摄影分析法(RSA)、二平面图像配准技术、录像X射线透视法、摄影对照磁共振(PCMRI)技术等^[12-13],其中X射线立体摄影分析法对人体的侵害性限制了它的广泛应用。这些改进方法实质上是通过医学影像的一系列离散位置进行插值而得到其连续运动曲线。因此,可通过测量不同位置的静态关节位置及其相互关系进行多自由度单运动副三维运动分析^[9-10, 14]。

该研究拟利用骨组合的膝关节CT图像,采用直接测量法得到人体下肢名义屈曲度分别为0°, 30°, 60°, 90°及120°时的三维模型,采用三维图像配准和坐标变换相结合的方法,构建关节在不同相位时的位置、转角及速度等运动特征^[15-18],为机械原理及机器人技术课程单运动副多自由度空

间开链机构运动分析及人工假体的力学分析及其设计提供新的研究途径^[4, 8, 19-27]。

1 材料和方法 Materials and methods

1.1 设计 基于三维图像配准及坐标变换的膝关节运动分析。

1.2 时间及地点 实验于2019年6月至2020年1月在第二军区大学附属长征医院骨科完成。

1.3 材料 螺旋CT(Toshiba Aquilion16);医学断层图像处理软件Mimics 8.1(比利时Materialise)。

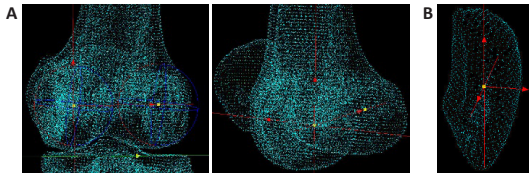
1.4 方法

1.4.1 建立膝关节的三维几何模型 使用螺旋CT对1名身高1.73 m、体质量60 kg、36周岁的男性健康志愿者的膝关节进行扫描,扫描参数为120 kV、150 mA、层距1 mm,共226层。通过Mimics医学断层图像处理软件进行目标组织分割、轮廓跟踪,提取膝关节各个断层轮廓点云,得到0°, 30°, 60°, 90°, 120°膝关节不同屈曲位下股骨、胫骨和髌骨的骨骼三维点云模型^[28]。

1.4.2 骨组织正交坐标系的构建 由于膝关节股骨的内外后髌皮质骨轮廓可以看作两个球面的一部分,将其轮廓拟合为两个球,连接两球心的连线即得股骨坐标系的x轴。由于该连线近似平行于关节线,因此根据胫骨左、右平台表面的中心点建立一平行于x轴且包含关节线在内的平面。然后,通过内侧髌球心作该平面的垂线,即为z轴,见图1A。同时,定义y轴通过股骨内侧髌球心并垂直于x、z轴,将轴与胫骨关节线所在平面的交点作为原点,即得股骨正交坐标系,见图1B。将股骨正交坐标系平移可得胫骨正交坐标系。

对于髌骨局部坐标系,根据髌骨上下、前后和内外轮廓边界的中点定义髌骨坐标系原点。由于髌骨的上下移动

轨迹近似垂直于股骨的后髁轴线^[29]，将股骨坐标系的 x 、 y 、 z 轴由其原点平移到髌骨坐标系的原点来建立髌骨坐标系，见图 1B。



图注：图 A 为股骨正交坐标；B 为髌骨坐标
图 1 | 股骨和髌骨坐标系的构建

Figure 1 | Construction of coordinate system of the femur and patella

1.4.3 膝关节三维图像的配准 事实上，由于膝关节的解剖复杂性及分层扫描，不同屈曲角度时 CT 扫描的参考坐标系是不同的，所建立各个骨组织的物体坐标系也会产生误差，从而对膝关节的相对运动分析带来不利因素。因此，提出采用三维图像配准和坐标变换相结合的方法进行运动分析。三维图像配准流程如下：

已知目标点集 P 有 N_p 点集 $\{p_i\}$ ，配准点集 X 有 N_x 点集，点集 Y 为配准过程中向目标点集逼近的点集。配准数据点集间距离的均方差：

$$d_k = \frac{1}{N_p} \sum_{i=1}^{N_p} \|y_{ik} - p_i\|^2 \quad (1)$$

迭代初始值： $P_0 = P$ ， $\bar{q}_0 = [1, 0, 0, 0, 0, 0]$ ， $k=0$ 。迭代循环：

- ① 计算逼近点集 $Y_k = C(P_k, X)$ ；
- ② 配准计算 $(\bar{q}_k, d_k) = Q(P_0, Y_k)$ ；
- ③ 实施配准 $P_{k+1} = \bar{q}_k(P_0)$ ；
- ④ 当 $d_k - d_{k+1} < \tau$ 时，终止循环，配准误差可通过公式 (1) 计算得到。

将不同屈曲位下的膝关节三维点云数据输入 Imageware。按照前述坐标系构建方法，在伸直位膝关节建立参考坐标系并分别在股骨、胫骨和髌骨上建立相应的物体坐标系。由上述流程，利用 Imageware 软件中的配准模块进行骨组织配准，取 $\tau=0.0001 \text{ mm}$ 。

为分析髌骨相对于股骨的 3 个相对位移和其余的旋转自由度，同理分别进行配准。根据平移、旋转后的 0° 髌骨的相应正交坐标平面建立 90° 髌骨的物体坐标系。

1.4.4 膝关节相对运动计算 定义伸直位时的胫骨坐标系为参考坐标系 1，股骨坐标系为固定坐标系，其他相位的股骨坐标系为运动坐标系 2。则股骨从 0° 伸直位坐标系 1 变换到其他相位坐标系 2 的 Z-Y-X 欧拉角为 ϕ 、 θ 、 ψ ，分别表示股骨相对胫骨的内外旋、内收外展、屈伸角。

通过三维图像配准，可得到股骨从伸直位 0° 坐标系 1 变换到其他相位坐标系 2 的 Z-Y-X 欧拉角旋转矩阵

$$R_{ZYX}(\phi, \theta, \psi) = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \quad (2)$$

又，其通式为

$$\begin{aligned} R_{ZYX}(\phi, \theta, \psi) &= R(Z, \phi)R(Y, \theta)R(X, \psi) \\ &= \begin{bmatrix} C\phi C\theta & C\phi S\theta S\psi - S\phi C\psi & C\phi S\theta C\psi + S\phi S\psi \\ S\phi C\theta & S\phi S\theta S\psi + C\phi C\psi & S\phi S\theta C\psi - C\phi S\psi \\ -S\theta & C\theta S\psi & C\theta C\psi \end{bmatrix} \end{aligned}$$

令以上二式相等，由此求出股骨相对胫骨的内外旋、内外翻、屈伸角度 ϕ 、 θ 和 ψ 。

$$\begin{aligned} \phi &= A \tan 2(r_{21}, r_{11}) \\ \theta &= A \tan 2(-r_{31}, \sqrt{r_{11}^2 + r_{21}^2}) \\ \psi &= A \tan 2(r_{32}, r_{33}) \end{aligned} \quad (3)$$

同理，为便于描述股骨相对胫骨的前后、内外和上下平移的描述，定义参考坐标系 3 为伸直位胫骨坐标系，固定坐标系 10° 为股骨坐标系，其余相位股骨坐标系为运动坐标系 2。则膝关节股骨从 0° 伸直位坐标系 1 平移变换到其余相位坐标系 2 的前后、内外和上下平移分别为沿胫骨坐标系 3 的 x 、 y 和 z 轴，坐标系 1 和坐标系 2 的原点坐标向量 ${}^3O_1(X_1, Y_1, Z_1)$ 、 ${}^3O_2(X_2, Y_2, Z_2)$ 相减后得到向量

$${}^3T(X, Y, Z) = {}^3O_1(X_1, Y_1, Z_1) - {}^3O_2(X_2, Y_2, Z_2) \quad (4)$$

其中 X 、 Y 、 Z 分别表示股骨相对胫骨的内外移、前后移、上下移。

1.5 主要观察指标 膝关节运动的 6 个自由度，包括绕坐标轴的 3 个转动及沿坐标轴的 3 个移动，即胫股关节的相对旋转和平移、髌股关节的相对旋转和平移。

2 结果 Results

由此可得 0° 和其他相位膝关节股骨、胫骨和髌骨的坐标系，以及股骨相对胫骨的相对运动参数^[28]，见表 1。同理，得到髌骨相对股骨的相对运动参数，见表 2。

表 1 | 胫股关节的相对旋转和平移
Table 1 | Relative rotation and translation of the tibiofemoral joint

内旋 (-)/外旋 (+)(°)	外展 (-)/内收 (+)(°)	内屈 (°)	内后髁平移 (mm)	外后髁平移 (mm)
8.4	1.4	17.2	(0.26, 2.33, -1.83)	(-0.28, -4.70, -0.66)
14.7	2.1	47.5	(1.48, 2.57, -3.35)	(-0.12, -9.60, -1.60)
30.8	1.0	87.9	(0.87, 4.26, -3.06)	(-5.91, -20.29, -2.24)
23.5	0.7	118.5	(0.41, -0.30, -2.99)	(-3.57, -19.40, -2.39)

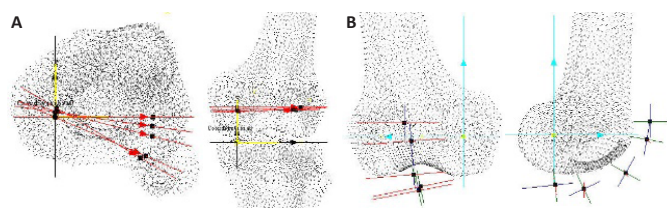
表 2 | 髌股关节的相对旋转和平移
Table 2 | Relative rotation and translation of the patellofemoral joint

股骨屈曲 (°)	内倾 (+)/外倾 (-)(°)	外旋 (+)/内旋 (-)(°)	髌骨屈曲 (°)	中心点平移 (mm)
17.2	-5.0	-4.40	10.0	(-3.69, -2.04, -10.68)
47.5	-2.7	-4.90	29.0	(-5.30, -14.41, -30.24)
87.9	-0.25	-11.0	64.76	(-8.00, -39.02, -39.67)
118.5	-1.8	-11.8	83.7	(-9.00, -55.92, -37.39)

表 1 和表 2 中的旋转角度由股骨相对胫骨以及髌骨相对股骨按照绕运动坐标系的 Z-Y-X 欧拉角方法获得，其中股骨的内外旋、内收外展 (或髌骨的内外倾、内外旋) 和屈曲度分别表示膝关节不同屈曲度下股骨坐标系 (或髌骨坐标系)

先后绕伸直位参考坐标系 z 、 y 和 x 轴旋转的角度，该角度的方向定义为绕各正向顺时针旋转为负，逆时针旋转为正。表 1、2 中的平移数据分别表示不同屈曲度下股骨内外后髌中心点或髌骨中心点分别沿胫骨和股骨参考坐标系 x 、 y 和 z 轴的平移，其方向定义为沿各轴正向平移为正，沿各轴负向平移为负。

经分析计算，分别获得股骨相对胫骨的内外旋、内收外展、屈曲度、内外平移、前后位移和上下平移，见图 2A。由图可以看出股骨的内外后上髌中心点及其连线（股骨坐标系的 x 轴）不同屈曲位时在冠状面（即 xy 平面）和矢状面（即 xz 平面）的变化。同理，获得髌骨相对股骨的内外倾、内外旋、屈曲度、内外平移、前后位移和上下平移，见图 2B。由图可以看出髌骨的中心点及其坐标系各轴线在不同屈曲位时的变化。



图注：图 A 为髌股关节相对运动；B 为胫股关节相对运动
图 2 | 胫股关节和髌股关节的相对旋转及平移

Figure 2 | Relative rotation and translation of the tibiofemoral and patellofemoral joints

由此可得 0° 和其他相位膝关节股骨、胫骨和髌骨的坐标系，以及股骨相对胫骨的相对运动参数^[28]，见表 1。同理，得到髌骨相对股骨的相对运动参数，见表 2。胫股关节运动数据如下：在 87.9° 屈曲时，获得的股骨相对胫骨外旋角度为 30.8° ，股骨外髌前后移为 20.29 mm 。较其他屈曲相位而言，上述两数值明显偏大，主要是由于膝关节 90° 屈曲时在各方向上的旋转及位移均具有最大活动度。有文献表明，膝关节屈曲 90° 的运动数据偏差最大^[30]。

髌股关节运动数据如下：在股骨从伸直位到约 120° 屈曲过程中，髌骨的内旋角度逐渐增大至最大值 11.8° 。另一方面，膝关节屈曲 $0-120^\circ$ 之间时，髌骨的外倾角度先减小后增大，在屈曲 90° 时达到最小值。随着股骨从 $0-120^\circ$ 屈曲的变化，髌骨沿股骨髌面中央沟发生平移，同时髌骨的屈曲角度逐渐增大至 83.7° 。在内外轴方向，内移量增大，但其增幅逐渐减小。在前后轴方向，后移量逐渐增大至其最大值 55.92 mm ；在上下轴方向，髌骨先下移后转为上移，在屈曲 90° 最大下移量 39.67 mm 。

3 讨论 Discussion

该研究认为人体连续运动分析的实质是通过一系列离散位置进行插值而得到其连续运动曲线。因此，可通过测量不同位置的静态关节位置及其相互关系进行多自由度单运动副三维运动分析^[14]。目前，已有运动捕捉、高速摄影及三维激光扫描等测量方法^[8]。这些方法各有优劣，例如有的运动捕

捉误差达到了 13 mm 和 4.4^{mm} ^[11]，还有几种改进措施，例如 X 射线立体摄影分析法、摄影对照磁共振技术等^[12]，由于其设备和方法的昂贵和复杂性限制了它的广泛应用。该研究所提出的方法基于静态离散的 CT 影像进行人体运动分析，既能够利用既有的 CT 扫描设备，同时方法简单易学；测量得到的精度小于 1 mm 。

对于股骨胫骨以及髌骨股骨的相对运动，许多学者采用不同的方法进行了研究^[31-32]，该研究所得数据与其基本一致。通过比较可以看出，在 90° 屈曲时，该研究所获得的股骨相对胫骨的外旋为 30.8° ，股骨外后髌前后移动 20.29 mm ，研究数据偏大，这是由于膝关节 90° 屈曲时在各个方向上的旋转和位移活动度最大。在分析其他研究数据时，也可以看出在 90° 屈曲时的运动数据偏差较大。

由图 2B 可看出髌骨中心点及其坐标系各轴线在不同屈曲位时的变化情况。ASANO 等^[29]所采用的评价膝关节髌股关节相对位移、旋转的中心点和坐标系的设置与该研究所述方法基本一致。

许多学者采用其他方法进行相对运动研究，如 X 射线立体摄影分析法以及 3D 数字仪，但对于人体具有侵害性，因而不能广泛应用。使用 MRI 对于软组织具有较好的分辨率，且无侵害性，在开放式磁共振扫描仪上可以进行大屈曲度测量，而在普通磁共振扫描仪上只能进行较小范围测量。采用 CT 可进行大范围屈曲度测量，对于骨组织的分辨率优于 MRI，但 CT 具有放射性，同时对软组织的分辨率欠佳。这些方法各具特色，该研究所提思路均适用于上述方法，同时也适于人体其他关节的运动研究。

膝关节的相对运动分析很大程度上依赖于膝关节内部各骨组织——股骨、胫骨和髌骨上所建立的局部坐标系。不同学者使用不同的方法建立各骨组织的局部坐标系^[33]。不同的方法会导致产生不同的运动分析结果^[34]。事实上，上述方法都是根据骨骼解剖特征点的选取来建立坐标系的。因此，由于膝关节骨组织重建所带来的几何模型的方位误差会引起膝关节相对运动的测量和计算误差，进而影响后期有限元分析的质量。

结论：该研究基于多静态离散医学影像进行人体运动的测量和分析，既能够利用既有的 CT 扫描设备和现有软件，设备成本低、方法简单易学；同时获得较高的测量精度，其精度误差小于 1 mm 。该研究的创新点在于，分别建立膝关节股骨和髌骨的正交坐标系之后，根据三维点云配准将不同屈曲位的膝髌股关节三维图像放在同一坐标系下，即采用三维图像配准，可以将不同坐标系下的各个骨组织不同相位的三维图像统一在同一坐标系下进行相对运动分析，并且可以将不同屈曲位的膝关节各个部分如股骨、胫骨、髌骨的物体坐标系精确地建立在同样的位置和方向上，避免了根据特定参考坐标和参考点选择参考坐标系所引入的误差。因此，提出了采用三维图像配准和正交坐标系的 Z-Y-X 欧拉角相结合的方法进行坐标变换，该方法适合于通过编制专用的计算程序对人体正常运动下的连续运动进行快速分析。

作者贡献: 实验设计为王建平, 实验实施为张晓辉和余进伟, 实验评估为许章新, 资料收集为曲海军。

经费支持: 该文章接受了“国家自然科学基金项目(31370999), 河南省高等教育教学改革研究项目(2019SJGLX056), 河南省高等教育教学改革研究项目(2012SJGLX127), 河南省高等教育教学改革研究项目‘研究生教育’成果(2019SJGLX017Y), 2021年度河南理工大学课程思政样板课程”的资助。所有作者声明, 经费支持没有影响文章观点和对研究数据客观结果的统计分析及其报道。

利益冲突: 文章的全部作者声明, 在课题研究和文章撰写过程中不存在利益冲突。

知情同意问题: 1名男性健康志愿者参与该项研究, 志愿者对实验方案知情同意并签署了“知情同意书”。

写作指南: 该研究遵守《观察性临床研究报告指南》(STROBE指南)。

文章查重: 文章出版前已经过专业反剽窃文献检测系统进行3次查重。

文章外审: 文章经小同行外审专家双盲外审, 同行评议认为文章符合期刊发稿宗旨。

文章版权: 文章出版前杂志已与全体作者授权人签署了版权相关协议。

开放获取声明: 这是一篇开放获取文章, 根据《知识共享许可协议》“署名-非商业性使用-相同方式共享4.0”条款, 在合理引用的情况下, 允许他人以非商业性目的基于原文内容编辑、调整和扩展, 同时允许任何用户阅读、下载、拷贝、传递、打印、检索、超级链接该文献, 并为之建立索引, 用作软件的输入数据或其它任何合法用途。

4 参考文献 References

[1] 于勇, 刘静华, 赵罡. 与基于模型定义技术相融合的工程图学课程教学探讨[J]. 图学学报, 2019,40(4):816-821.

[2] 吴泽斌, 张东亮, 李基拓, 等. 复杂场景下的人体轮廓提取及尺寸测量[J]. 图学学报, 2020,41(5):740-749.

[3] 张延恒, 莫春晖, 张莹, 等. 移动式康复训练机器人及下肢康复运动分析[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2021,49(3):6-11.

[4] ADOUNI M, FAISAL TR, GAITH M, et al. A multiscale synthesis: characterizing acute cartilage failure under an aggregate tibiofemoral joint loading. Biomech Model Mechanobiol. 2019;18(6):1563-1575.

[5] 白云峰, 吴汉忠, 刘建辉. 一种可穿戴下肢外骨骼机器人的结构设计及仿真[J]. 毛纺科技, 2021,49(7):68-74.

[6] 李书阁, 赵鹏举, 王伟强. 基于连杆机构的四足仿生机器人的设计[J]. 装备制造技术, 2021(6):23-26.

[7] 史亦凡, 管小荣. 外肢体机器人的运动分析与控制仿真[J]. 兵器装备工程学报, 2021,42(4):218-223.

[8] WANG JP, WANG SH, WANG YQ, et al. A data process of human knee joint kinematics obtained by motion-capture measurement. BMC Med Inform Decis Mak. 2021;21(1):121.

[9] 王建平, 梁军, 张雁儒, 等. 人体膝关节股胫关节运动特性分析[J]. 中国临床解剖学, 2017,35(1):62-68.

[10] 王建平, 符龙, 张雁儒, 等. 正常膝关节和人工膝关节髌股关节高屈曲运动特性及其比较分析[J]. 中国临床解剖学杂志, 2016,34(4):432-438.

[11] BENOIT DL, RAMSEY DK, LAMONTAGNE M, et al. Effect of skin movement artifact on knee kinematics during gait and cutting motions measured in vivo. Gait Posture. 2006;24(2):152-164.

[12] ISAAC DL, BEARD DJ, PRICE AJ, et al. In-vivo sagittal plane knee kinematics: ACL intact, deficient and reconstructed knees. Knee. 2005; 12(1):25-31.

[13] REES JL, BEARD DJ, PRICE AJ, et al. Real in vivo kinematic differences between mobile-bearing and fixed-bearing total knee arthroplasties. Clin Orthop Relat Res. 2005;(432):204-209.

[14] 王建平, 赵焜, 胡海, 等. 基于 MATLAB 的人体膝关节运动捕捉测量与分析[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2020,39(3):86-93.

[15] 劳峥, 樊文慧. 医学图像处理 MIM 软件和 Velocity 软件在弹性模体中形变配准精度的比较研究[J]. 中国医学装备, 2021,18(6):47-51.

[16] ZHANG J, LIU F, YU X, et al. A 3D medical image registration method based on multi-scale feature fusion. Journal of Physics Conference Series. 1948(1):012057.

[17] LUO Y, CAO W, HE Z, et al. Deformable adversarial registration network with multiple loss constraints. Comput Med Imaging Graph. 2021;91:101931.

[18] 宋泉, 朱家明, 徐婷宜. 基于 B 样条仿射和 GANs 的医学图像配准[J]. 无线电工程, 2021,51(6):433-439.

[19] SAEIDI M, GUBAUA JE, KELLY P, et al. The influence of an extra-articular implant on bone remodelling of the knee joint. Biomech Model Mechanobiol. 2020;19(1):37-46.

[20] 骆健, 王立华, 王涛. 不同材料赋值方法下踝关节三维有限元模型的应力及位移变化[J]. 中国组织工程研究, 2019,23(18):2822-2826.

[21] 刘韵婷, 郭辉, 黄将诚. 基于 UG 与 ADAMS 的人体下肢骨骼肌建模及仿真[J]. 中国组织工程研究, 2018,22(11):1719-1724.

[22] 余华, 李少星, 赵长义. 胫骨远端关节面缺损有限元模型的生物力学分析[J]. 中国组织工程研究, 2013,17(43):7571-7580.

[23] WANG JP, GUO D, WANG SH, et al. Structural stability of a polyetheretherketone femoral component-A 3D finite element simulation. Clin Biomech (Bristol, Avon). 2019;70:153-157.

[24] 何晓宇, 王朝强, 周之平. 三维有限元方法构建足部健康骨骼与常见疾病模型及生物力学分析[J]. 中国组织工程研究, 2020,24(9):1410-1415.

[25] 张吉超, 董万鹏. 膝关节有限元模型参数设置[J]. 中国组织工程研究, 2021,25(30):4781-4786.

[26] 高辉, 王晨艳. 不同屈曲状态下固定轴和移动轴膝关节胫-股关节的生物力学变化[J]. 太原理工大学学报, 2021,52(1):144-150.

[27] 侯波, 王毅, 沈宇辉. 膝关节动态有限元模型的力学分析[J]. 中国组织工程研究, 2013,17(22):3998-4004.

[28] 王建平, 韩雪莲, 季文婷, 等. 人体膝股胫关节相对运动的三维图像配准分析[J]. 生物医学工程学报, 2009,26(6):1340-1344.

[29] ASANO T, AKAGI M, KOIKE K, et al. In vivo three-dimensional patellar tracking on the femur. Clin Orthop Relat Res. 2003;(413):222-232.

[30] JOHAL P, WILLIAMS A, WRAGG P, et al. Tibio-femoral movement in the living knee. A study of weight bearing and non-weight bearing knee kinematics using ‘interventional’ MRI. J Biomech. 2005;38(2):269-276.

[31] ASANO T, AKAGI M, TANAKA K, et al. In vivo three-dimensional knee kinematics using a biplanar image-matching technique. Clin Orthop Relat Res. 2001;(388):157-166.

[32] IWAKI H, PINSKEROVA V, FREEMAN MA. Tibiofemoral movement 1: the shapes and relative movements of the femur and tibia in the unloaded cadaver knee. J Bone Joint Surg Br. 2000;82(8):1189-1195.

[33] BULL AM, AMIS AA. Knee joint motion: description and measurement. Proc Inst Mech Eng H. 1998;212(5):357-372.

[34] CHURCHILL DL, INCAVO SJ, JOHNSON CC, et al. The transepicondylar axis approximates the optimal flexion axis of the knee. Clin Orthop Relat Res. 1998;(356):111-118.

(责任编辑: MZH, ZN, ZH)