

文章编号:1004-7220(2010)01-0040-05

基于关节坐标系的肌肉骨骼间附着点坐标转换方法

唐 刚, 季文婷, 李元超, 王成焘
(上海交通大学 机械与动力工程学院生命所, 上海 200240)

摘要: 目的 运动状态下对人体骨肌系统进行运动学及动力学分析时,应避免对人体造成伤害。本研究通过尸体切片、CT 或者 MRI 图像重建等方法构建静态骨肌模型,并将其应用于活体进行分析。方法 采用尸体切片数据重建下肢的三维骨肌模型,并对此骨肌模型及活体下肢建立统一规则的关节坐标系,详细描述人体骨肌系统模型和活体上相关肌肉骨骼间附着点空间坐标值转换。结果 对研究对象膝关节屈曲运动中股二头肌短头力臂及长度进行计算和分析。结论 该方法对提高人体运动学和动力学仿真及肌肉力预测具有重要意义。

关键词: 骨肌模型; CT; 关节坐标系; 下肢; 力臂; 运动学

中图分类号: R318.04 文献标志码: A

JCS-based method on coordinate transformation of attachment points between muscle and bone

TANG Gang, JI Wen-ting, LI Yuan-chao, WANG Cheng-tao (*School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China*)

Abstract: Objective In order to avoid potential injuries imposed to human body, it could be feasible to use the musculoskeletal models which can be reconstructed from the cadaver color cryosection (CCC) images, computerized tomography (CT) images, magnetic resonance (MR) images or other images to analyze the dynamic properties of muscles in vivo during human movement. **Method** We reconstruct the lower limb musculoskeletal model and define the uniform joint coordinate system (JCS) on the model and the subject. The coordinate transformation of the muscle attachment points both on the model and the subject is described in detail. **Results** The length and the moment arm of the biceps femoris (short head) during knee flexion are calculated and analyzed. **Conclusion** This method plays an important role in improving the kinematics and dynamic simulation and the muscle force estimation.

Key words: Musculoskeletal model; Computerized tomography; Joint coordinate system; Lower limb; Moment arm; Kinematics

随着人体生物力学的发展,人们越来越关注运动过程中人体肌肉的力学特性^[1-2],对肌肉力的分析需要构建完善的骨肌模型,这样可以方便的分析肌肉的动态特性。伴随图像技术的进步,出现了大量的越来越完善的人体下肢骨肌系统模型^[3-5]。但是,如何将人体骨肌系统模型应用于活体进行动态分析

成为迫切需要解决的问题。目前,国外的相关工作正在开展^[6],国内的研究还比较欠缺。本文以下肢为例阐述了相关研究工作。

本文首先重建了下肢的三维骨肌模型,根据国际上推荐的人体关节坐标系相关术语定义方法对大腿和小腿相关解剖学特征点及髋关节和膝关节坐标

收稿日期:2009-11-19; 修回日期:2010-11-13

基金项目:国家自然科学基金重点项目(30530230)。

作者简介:唐 刚(1982-),男,研究方向:人体运动神经骨肌生物力学。

通讯作者:王成焘, Tel: (021)34206078, E-mail: trib@sjtu.edu.cn。

系进行定义^[7-8]。然后对膝关节相关肌肉骨骼间附着点在骨肌模型和活体上进行世界坐标和局部坐标变换。最后采用运动捕捉系统对研究对象下肢屈曲运动进行数据采集,计算求得股二头肌短头运动过程中的长度和力臂的变化,并将力臂值与相关参考文献数据对比。

1 人体骨肌模型

骨肌模型的重建采用的数据为重庆第三军医大学提供的中国数字化可视人体数据集(<http://www.chinesevisiblehuman.com>)首例男性切片数据 CVH-1。该标本为一中国健康男性尸体,年龄 35 岁,身高 1.70 m,体重 65 kg。通过图像处理,骨骼轮廓曲线构建,CAD 建模及添加肌肉模型等步骤,在切片所定义的原始坐标系 A 下建立了完整的下肢骨肌模型。

2 关节坐标系及相关术语的定义

小腿和大腿的主要解剖学特征点的相关定义和术语如表 1 所示,有关解剖学特征点的定义和术语都参考相关的解剖学文献,并且考虑从活体和人体骨肌模型中容易提取的因素而制定^[9-10]。本文所有数据均以右下肢为例(故图 1 中所有特征点前均加 R)。

表 1 解剖学特征点
Tab.1 The anatomical landmarks

骨骼	特征点	定义
股骨	GT	大转子
股骨	LK	外上髁
股骨	MK	内上髁
小腿	LA	外踝
小腿	MA	内踝

(1) 髋关节局部坐标系- $X_h Y_h Z_h$ (见图 1)。 O_h : 坐标原点,与 GT 点重合; Z_h : GT 与 O_k (LK 与 MK 连线的中点)的连线,方向指向 O_k ,方向向量为 v_{hz} ; X_h : 由 LK、MK 和 GT 3 点构成的平面的法线,方向指向前向,方向向量为 v_{hx} ; Y_h : Z_h 轴和 X_h 轴构成的平面的法线,方向指向右向,方向向量为 v_{hy}

(2) 膝关节局部坐标系- $X_k Y_k Z_k$ (见图 1)。 O_k :

坐标原点,与 LK 与 MK 连线的中点重合; Z_k : O_k 与 O_a (LA 与 MA 连线的中点)的连线,方向指向 O_a ,方向向量为 v_{kz} ; X_k : 由 LA、MA 和 O_k 3 点构成的平面的法线,方向指向前向,方向向量为 v_{kx} ; Y_k : Z_k 轴和 X_k 轴构成的平面的法线,方向指向右向,方向向量为 v_{ky}

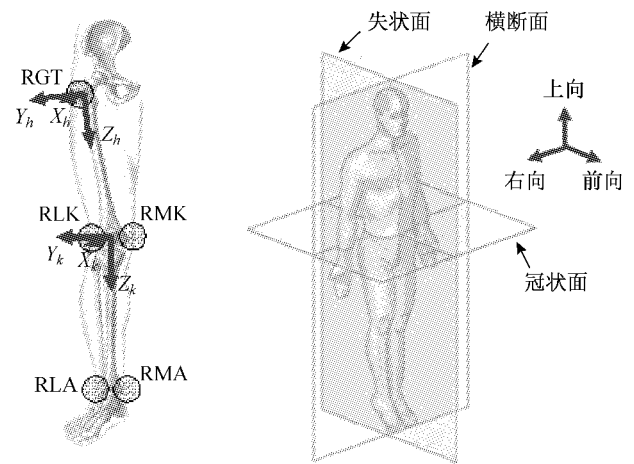


图 1 关节坐标系示意
Fig.1 The sketch map of joint coordinate systems

3 肌肉骨骼间附着点坐标空间变换

假设人体运动过程中,骨骼是刚体,肌肉骨骼间附着点在骨骼上的相对空间坐标值是不变的。

为了获得关节运动过程中肌肉骨骼间附着点的空间位置变化,需要将肌肉骨骼间附着点在世界坐标系 A 的坐标值变换为关节坐标系下的坐标值,我们假设骨肌模型上的关节坐标系与活体上的关节坐标系有一一对应的关系,于是可以将模型上关节坐标系的坐标值变换到活体世界坐标系 B 任一时刻的坐标值。最后通过肌肉骨骼间附着点的空间位置变化可以分析运动过程中肌肉的变化状况。

如图 2 所示, A 为骨肌模型世界坐标系, B 为活体世界坐标系。假设 P 和 Q 为跨膝关节某一肌肉的起点和止点,起点 P 在大腿的骨骼上,止点 Q 在小腿的骨骼上。

则坐标变换的步骤为:

(1) 将起点 P 在世界坐标系 A 的坐标值(x_{PA}, y_{PA}, z_{PA})转换为髋关节坐标系 $X_h Y_h Z_h$ 下的局部坐标值(x_{Ph}, y_{Ph}, z_{Ph}),同时将止点 Q 在世界坐标系 A 的坐标值(x_{QA}, y_{QA}, z_{QA})转换为膝关节坐标系 $X_k Y_k Z_k$

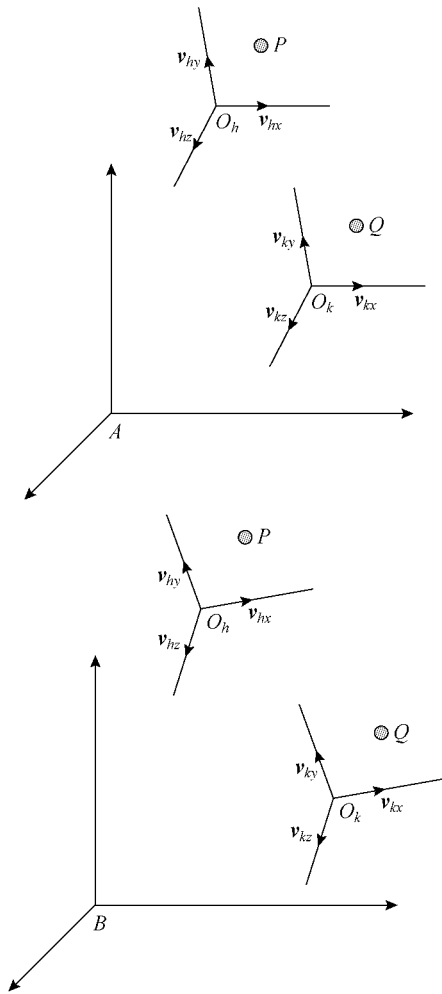


图2 骨肌模型坐标和活体坐标系示意
Fig. 2 The sketch map of coordinate systems in model and vivo

下的局部坐标值 (x_{Qk}, y_{Qk}, z_{Qk}) ：

$$\begin{aligned} (x_{Ph}, y_{Ph}, z_{Ph}) &= (x_{PA}, y_{PA}, z_{PA}, 1) \cdot T_h \cdot R_h = \\ & (x_{PA}, y_{PA}, z_{PA}, 1) \times \\ & \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -x_h & -y_h & -z_h & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_{hx1} & v_{hy1} & v_{hz1} & 0 \\ v_{hx2} & v_{hy2} & v_{hz2} & 0 \\ v_{hx3} & v_{hy3} & v_{hz3} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ (x_{Qk}, y_{Qk}, z_{Qk}) &= (x_{QA}, y_{QA}, z_{QA}, 1) \cdot T_k \cdot R_k = \\ & (x_{QA}, y_{QA}, z_{QA}, 1) \times \\ & \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -x_k & -y_k & -z_k & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_{kx1} & v_{ky1} & v_{kz1} & 0 \\ v_{kx2} & v_{ky2} & v_{kz2} & 0 \\ v_{kx3} & v_{ky3} & v_{kz3} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

(2) 将起点 P 在髌关节坐标系 $X_h Y_h Z_h$ 的局部坐标值 (x_{Ph}, y_{Ph}, z_{Ph}) 转换为任一时刻 t 世界坐标系 B 下的坐标值 (x_{PB}, y_{PB}, z_{PB}) , 同时将止点 Q 在膝关节坐标系 $X_k Y_k Z_k$ 下的局部坐标值 (x_{Qk}, y_{Qk}, z_{Qk}) 转换为任一时刻 t 世界坐标系 B 下的坐标值 (x_{QB}, y_{QB}, z_{QB}) ：

$$\begin{aligned} (x_{PB}, y_{PB}, z_{PB}, 1)^t &= (x_{Ph}, y_{Ph}, z_{Ph}, 1) \times \\ & (R_h^t)^{-1} \cdot (T_h^t)^{-1} = (x_{Ph}, y_{Ph}, z_{Ph}, 1) \times \\ & \begin{bmatrix} v_{hx1}^t & v_{hy1}^t & v_{hz1}^t & 0 \\ v_{hx2}^t & v_{hy2}^t & v_{hz2}^t & 0 \\ v_{hx3}^t & v_{hy3}^t & v_{hz3}^t & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -x_h^t & -y_h^t & -z_h^t & 1 \end{bmatrix}^{-1} \\ (x_{QB}, y_{QB}, z_{QB}, 1)^t &= (x_{Qk}, y_{Qk}, z_{Qk}, 1) \times \\ & (R_k^t)^{-1} \cdot (T_k^t)^{-1} = (x_{Qk}, y_{Qk}, z_{Qk}, 1) \times \\ & \begin{bmatrix} v_{kx1}^t & v_{ky1}^t & v_{kz1}^t & 0 \\ v_{kx2}^t & v_{ky2}^t & v_{kz2}^t & 0 \\ v_{kx3}^t & v_{ky3}^t & v_{kz3}^t & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -x_k^t & -y_k^t & -z_k^t & 1 \end{bmatrix}^{-1} \end{aligned}$$

(3) 在世界坐标系 B 下, 如果假设 P 和 Q 连线为肌肉的力线, 连线的长度代表肌肉长度, 则膝关节中心到 PQ 连线的距离即肌肉在此空间位置相对于膝关节中心的力臂长度。

4 实验与计算

膝关节屈曲运动是下肢的一个基本运动, 因此通过分析研究对象膝关节屈曲运动中下肢的运动轨迹来说明下肢肌肉骨骼间附着点的空间相对位置关系。

如图3(a)所示, 根据解剖学特征点定义方法及关节坐标系定义方法, 在人体骨肌系统模型上建立了髌关节和膝关节的关节坐标系; 如图3(b)所示, 根据解剖学特征点定义方法, 在活体上标定了相关光标标记点的空间位置, 为后面在活体上建立动态关节坐标系做准备。

实验对象为健康男性, 年龄36岁, 身高1.71 m, 体重65 kg, 与骨肌系统模型参数基本一致, 假设骨肌系统模型完全适用于实验对象。

实验中采用 Optotrak Certus (NDI, 加拿大) 运

动捕捉系统, 采样频率为 50 Hz, 共采集 250 帧数据 (如图 4(a) 所示, 为某一状态下, 各虚拟标记点的空间位置关系)。取其中一个相对稳定且数据完整的周期, 共 80 帧数据进行分析。如图 4(b) 所示, 为通

过活体上虚拟标记点空间坐标所构建的局部坐标系。

如图 5 所示, 为研究对象下肢屈曲运动过程中, 屈曲角从 $0^\circ \sim 121.58^\circ$ 变化过程中, 股二头肌短头

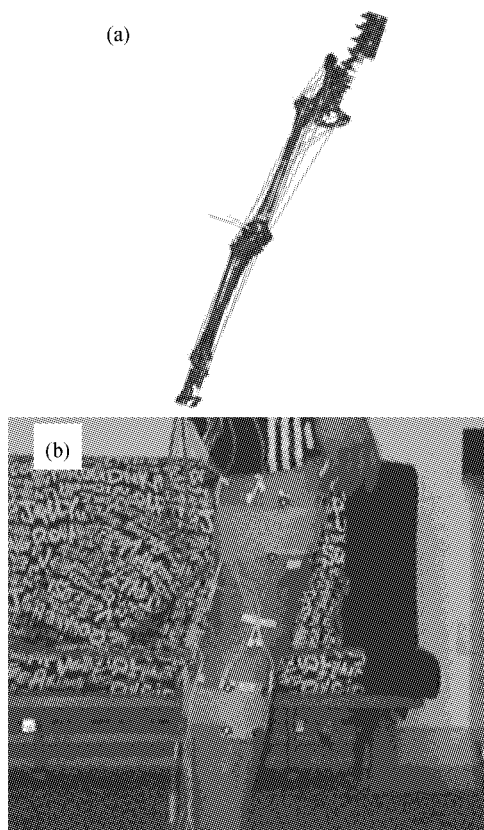


图 3 骨骼模型上定义关节坐标系及活体上光标标记点位置

Fig. 3 The coordinate systems in model and the positions of the markers *in vivo*

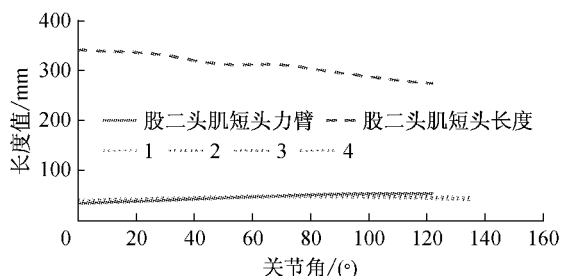


图 5 股二头肌短头长度及力臂曲线图 (图中点线 1~4 为 Carman^[11] 的数据, 因为将股二头肌简化为 4 根折线, 所以有 4 个数值)
 Fig. 5 The graph of the length and the moment arm of the biceps femoris (the dotted line of 1-4 is the data from the literature of Carman^[11])

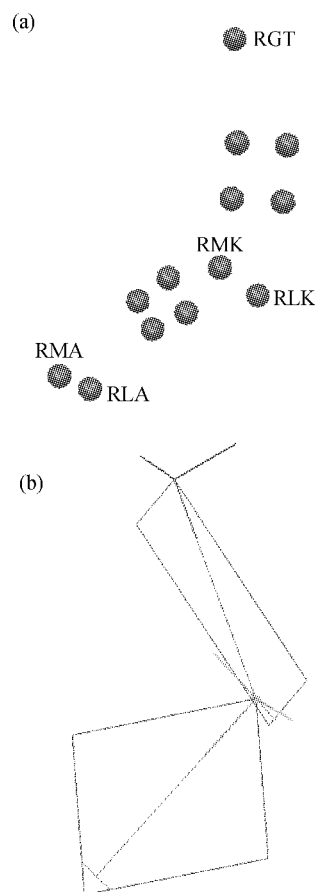


图 4 虚拟标记点空间位置关系及活体上局部坐标系的构建

Fig. 4 The positions of the visual makers and the joint coordinate systems *in vivo*

长度及力臂值的变化, 股二头肌短头长度变化范围为 274.99 ~ 341.85 mm, 一直是递减趋势; 股二头肌短头力臂变化范围为 36.08 ~ 55.48 mm, 屈曲角分别在 0° 和 100.81° 时达到最小和最大值。

5 结语

本文所求得的股二头肌力臂数值与 Carman^[11] 所计算的数值基本一致。人体肌肉的构造和属性都非常复杂, 本文主要从分析人体多刚体运动的角度出发, 肌肉模型可以采用简化的直线模型, 对于形态

复杂的肌肉可用多根直线描述。本文所描述的肌肉主要为影响关节运动的骨骼肌,包含肌腱部分;其方法也可适用于其它关节和不同研究对象,在对不同研究对象分析时,需要对骨肌模型进行缩放变换。

参考文献:

- [1] 张希安,叶铭,王成焘. 基于骨肌模型的肌肉力计算方法及其面临的若干问题[J]. 医用生物力学, 2008, 23(6): 475-479.
- [2] Fukashiro S, Hay DC, Nagano A. Biomechanical behavior of muscle-tendon complex during dynamic human movements [J]. *Journal of Applied Biomechanics*, 2006, 22(2): 131-147.
- [3] Arnold AS, Salinas S, Asakawa DJ, *et al.* Accuracy of muscle moment arms estimated from MRI-based musculo-skeletal models of the lower extremity [J]. *Computer Aided Surgery*, 2000, 5(2): 108-119.
- [4] Lafortune M, Caranagh PR, Sommer HJ, *et al.* Three-dimensional kinematics of the human knee during walking [J]. *Journal of Biomechanics*, 1992, 25(4): 347-357.
- [5] Wilson D, O'Connor J. A three-dimensional geometric model of the knee for the study of joint forces in gait [J]. *Gait & Posture*, 1997, 5(2): 108-115.
- [6] Delp S, Anderson FC, Ardnd AS, *et al.* OpenSim: Open-source software to create and analyze dynamic simulations of movement [J]. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 2007, 54(11): 1940-1950.
- [7] Cappozzo A, Catani F, Croce UD, *et al.* Position and orientation in space of bones during movement: anatomical frame definition and determination [J]. *Clinical Biomechanics*, 1995, 10(4): 171-178.
- [8] Wu G, Vander Helm FCT, Veeger HEJ, *et al.* ISB recommendation on definitions of joint coordinate system of various joints for the reporting of human joint motion-part I: ankle, hip, and spine [J]. *Journal of Biomechanics*, 2002, 35(4): 543-548.
- [9] Van Sint Jan S. Color atlas of skeletal landmark definitions-Guidelines for reproducible manual and virtual palpations [M]. New York: Elsevier Health Sciences, 2007.
- [10] 高士濂. 实用解剖学图谱下肢分册[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2004.
- [11] Carman A, Milburn P. Dynamic coordinate data for describing muscle-tendon paths: a mathematical approach [J]. *Journal of Biomechanics*, 2005, 38(4): 943-951.