

文章编号:1004-7220(2012)04-0438-06

航天员舱外活动生物力学仿真及验证

李静文¹, 丁立¹, 杨爱萍²

(1. 北京航空航天大学 生物与医学工程学院, 北京 100191; 2. 北京联合大学 机电学院, 工业工程与物流系, 北京 100020)

摘要: **目的** 目前航天员舱外活动所建的航天员生物力学模型缺乏人体解剖信息,且未见合理的验证方法;本文旨在给出相应解决方法,为航天员舱外活动仿真的进一步应用提供依据。**方法** 选取典型舱外活动实例,建立带有肌肉作用力的航天员上肢反向运动学、动力学模型并进行仿真计算;利用运动学结果驱动 OpenGL 软件生成动画,实现运动学验证,进而辅以实物模型完成模型的动力学验证。**结果** 运动学验证表明计算结果的正确性,动力学验证及仿真所得两块肌肉力结果的平均相对误差分别为 14.54% 和 0.91%。**结论** 本文建立了合理的航天员上肢模型,并进行了仿真计算;该仿真结果可信,提出的验证方法可行,为航天员舱外活动的生物力学仿真及验证提供支持。

关键词: 航天员; 舱外活动; 仿真; 运动学; 动力学; 生物力学

中图分类号: TP 391.9 **文献标志码:** A

Biomechanical simulation and verification of astronaut extravehicular activities

LI Jing-wen¹, DING Li¹, YANG Ai-ping² (1. School of Biological Science and Medical Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China; 2. Department of Industrial Engineering and Logistics, Mechanical and Electrical School, Beijing Union University, Beijing 100020, China)

Abstract: **Objective** The present biomechanical model built for extravehicular activities (EVA) of astronaut is lack of human anatomy features, and still there isn't a reasonable verification method. This study is aimed at solving the problems above and providing references for the further application of EVA simulation. **Methods** Based on a typical extravehicular activity, an inverse kinematical and dynamical upper limb model with muscle forces was built to conduct simulation calculation. Both the kinematical and dynamical results were verified through OpenGL animation sequence driven by kinematical calculation results and verification experiment with a real model, respectively. **Results** The animation built for kinematical verification proved that the calculation results were correct. The relative error of two muscle forces between dynamic verification and simulation was 14.54% and 0.91%, respectively. **Conclusions** A reasonable upper limb model of astronaut is established in this study. The simulation results are credible and the verification results showed that this feasible method could supports the further research on EVA simulation and verification.

Key words: Astronaut; Extravehicular activities; Simulation; Kinematics; Dynamics; Biomechanics

航天员舱外活动(extravehicular activity, EVA)是载人航天活动的重要组成部分,中国继“神七”出舱后即将进入舱外活动时代。针对 EVA 的研究,目

前普遍采用地面模拟失重环境对航天员进行训练,但该方法耗资巨大且存在局限性,故计算机仿真方法越来越受到重视。通过求算航天员执行 EVA 时

收稿日期:2011-10-14; 修回日期:2011-12-01

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51175021)。

通讯作者:丁立, Tel: (010)82339831; E-mail: ding1971316@buaa.edu.cn。

关节的运动和力学数据,可进一步从运动学及动力学角度对航天员的舱外活动动作进行科学细致的分析和规划。

目前国内外 EVA 仿真^[1-7]多采用刚体模型,未见对肌肉力进行考虑,缺少人体解剖信息,与真实情况相差较远。在动力学仿真部分多采用 Kane 方法^[2-6],该方法巧妙地避免系统内力的计算,并通过特定广义速率的选取简化动力学方程,计算得到航天员运动相关关节力矩数据;但由于缺乏试验验证的支持,不同文献得出的结果存在一定差异性^[1-2],无法对结果进行比较分析,限制了仿真计算的进一步应用。

本文基于典型航天员 EVA 实例,结合人体解剖知识,建立含有肌肉作用力的航天员 EVA 计算模型,得到了运动学、Kane 法动力学计算及实验验证结果,为航天员动力学仿真验证提供了依据。

1 仿真模型

1.1 仿真实例

模型原型系 STS-63 飞行中航天员搬运重物的实例^[3](见图 1),简化后任务为航天员脚部被限制,手部沿半径为 r 的圆形轨迹逆时针匀速运动,搬运大载荷^[1-2]。

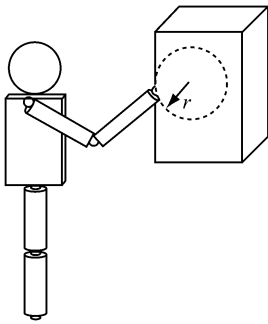


图 1 航天员搬运重物实例示意图

Fig. 1 Sketch map of astronaut carrying the payload

考虑到航天员躯干及下肢运动较小,运动主要集中于上肢^[8],本文只对上肢运动进行仿真验证。模型根据运动学、动力学计算内容不同,分为运动学模型和动力学模型。

1.2 运动学模型

运动学模型不涉及物体本身物理性质(如质

量、惯性等)以及物体所受外力和内力等力学因素,只需给出模型的几何尺寸及约束,用来研究包括运动轨迹、位移、(角)速度、(角)加速度等运动特征的物体运动规律。

本模型为反向运动学问题,即已知人体末端节段(手部)运动,反求各关节(肩、肘关节)的运动学参数。

假设航天员肩关节固定,航天员上肢简化为上臂 B_1 、前臂 B_2 、手部 B_3 3 个部分,分别由肘关节和腕关节相连,腕关节无自由度(见图 2)。相关参数意义及验证模型数据列于表 1。

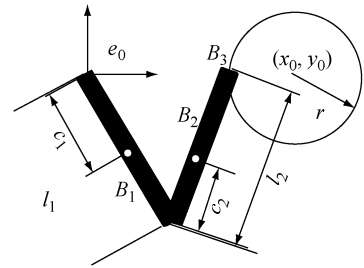


图 2 航天员上肢运动学模型示意图

Fig. 2 Sketch map of the astronaut's upper limb kinematical model

表 1 验证模型参数及运动参数

Tab. 1 Parameters of the verification model and kinematical parameters

参数	参数含义	数值
l_1/m	上臂长度	0.268
l_2/m	前臂长度	0.253
c_1/m	肩关节至上臂质心距离	0.14
c_2/m	肘关节至前臂质心距离	0.14
m_1/kg	上臂质量	0.358 8
m_2/kg	前臂质量	0.288 1
m_3/kg	重物质量	0
$J_1/g \cdot m^2$	上臂惯量	12.7
$J_2/g \cdot m^2$	前臂质量	10.1
l_3/m	三角肌终止点到肩关节距离	0.107
l_4/m	肱二头肌终止点到肘关节距离	0.044
$(x_2, y_2)/m$	肱二头肌起始点坐标	(0, 0.045)
$(x_3, y_3)/m$	三角肌起始点坐标	(0.05, 0.045)
$(x_0, y_0)/m$	圆形轨迹的圆心坐标	(0.385, -0.010)
r/m	圆形轨迹半径	0.07
T/s	手部圆周运动周期	10

1.3 动力学模型

航天员动力学仿真主要涉及求解航天员在运动过程中的关节力矩、力等力学参数,属于反向动力学问题。动力学模型需给出模型相关物理参数(质量、惯量等)以及所受外力等情况。

已有研究多缺少人体解剖学信息^[1-5];因此,本文根据人体上肢运动主要肌肉,建立含肌肉作用力的动力学模型。由人体解剖学可知,肩关节的前屈主要由三角肌的前束完成,肘关节的前屈主要由肱二头肌完成;且肌肉的作用力方向始终沿着其肌肉起始—终止位置:三角肌前束肌肉起始位置位于肩峰上表面,终止位置位于肱骨三角肌粗隆;肱二头肌起始位置位于肩胛骨关节盂上结节、喙突,终止位置位于桡骨粗隆。考虑在航天员仿真中仿真任务涉及的多是反向动力学问题,故可将肌肉力简化为沿起始—终止位置方向的被动作用力^[11]。即仿真计算中肌肉力为待求参数,其方向始终沿着其起始—终止位置(运动过程中随人体运动而改变),其大小利用反向动力学方法进行求算。仿真中将上述两块肌肉的起始终止位置按比例加入运动学模型中设置肌肉着力点(见表1),三头肌作用力记为 f_s ,肱二头肌作用力记为 f_g 。

2 仿真计算步骤

2.1 运动学仿真

2.1.1 建立坐标、选取广义坐标 在肩关节处建立惯性坐标系 e_0 ,同时分别在肩关节、肘关节及腕关节建立连体坐标系 $e_i(i=1,2,3)$,选取 q_1, q_2 为本文模型广义坐标,两者同时分别是肩关节、肘关节运动角度参数(见图3)。

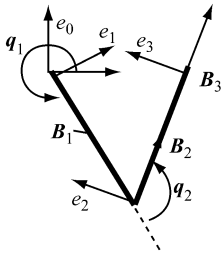


图3 坐标系及广义坐标

Fig.3 Coordinate system and generalized coordinates

2.1.2 关节运动角度、角速度、角加速度求解 采用直观几何约束来确定关节运动角度。已知末端手

部运动方程:

$$\left. \begin{aligned} x_s &= x_0 + r \cos(\omega_0 t + \pi) \\ y_s &= y_0 + r \sin(\omega_0 t + \pi) \\ \omega_0 &= 2\pi/T \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

根据模型有以下几何约束方程:

$$\left. \begin{aligned} l_1 \cos q_1 + l_2 \cos(q_1 + q_2) &= x_s \\ l_1 \sin q_1 + l_2 \sin(q_1 + q_2) &= y_s \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

求解式(1)、(2)可得肩、肘关节运动角度 q_1, q_2 表达式:

$$\begin{aligned} q_1 &= \arccos\left(\frac{x_s - l_2 y_s \sin q_2 / l_1 + l_2 \cos q_2}{l_1 + l_2 \cos q_2 + l_2^2 \sin^2 q_2 / l_1 + l_2 \cos q_2}\right) \\ q_2 &= \arccos\left(\frac{x_s^2 + y_s^2 - l_1^2 - l_2^2}{2l_1 l_2}\right) \end{aligned}$$

角度求一阶导即为关节角速度,求二阶导数即为角加速度。

2.1.3 关节(加)速度、节段质心(加)速度求解 由速度公式

$$v = v_A + \omega \times r$$

欧拉公式

$$\dot{r} = \omega \times r$$

可得(加)速度公式,详见文献[2]。

所得结果(参考惯性坐标)表示为矩阵形式:

针对 B_1

$$\omega_{1,0} = [0 \ 0 \ \dot{q}_1]^T \quad \dot{\omega}_{1,0} = [0 \ 0 \ \ddot{q}_1]^T$$

$$v_{c10} = [-c_1 \dot{q}_1 \sin q_1 \quad c_1 \dot{q}_1 \cos q_1 \quad 0]^T$$

$$\dot{v}_{c10} = \begin{bmatrix} -c_1 \dot{q}_1 \cos q_1 - c_1 \ddot{q}_1 \sin q_1 \\ -c_1 \dot{q}_1 \sin q_1 + c_1 \ddot{q}_1 \cos q_1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

针对 B_2

$$\omega_{2,0} = [0 \ 0 \ \dot{q}_1 + \dot{q}_2]^T$$

$$\dot{\omega}_{2,0} = [0 \ 0 \ \ddot{q}_1 + \ddot{q}_2]^T$$

$$v_{c20} = \begin{bmatrix} -l_1 \dot{q}_1 \sin q_1 - c_2 (\dot{q}_1 + \dot{q}_2) \sin(q_1 + q_2) \\ l_1 \dot{q}_1 \cos q_1 + c_2 (\dot{q}_1 + \dot{q}_2) \cos(q_1 + q_2) \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\dot{v}_{c20} = \begin{bmatrix} -l_1 \dot{q}_1^2 \cos q_1 - l_1 \ddot{q}_1 \sin q_1 - c_2 (\dot{q}_1 + \dot{q}_2)^2 \cos(q_1 + q_2) - c_2 (\ddot{q}_1 + \ddot{q}_2) \sin(q_1 + q_2) \\ -l_1 \dot{q}_1^2 \sin q_1 + l_1 \ddot{q}_1 \cos q_1 - c_2 (\dot{q}_1 + \dot{q}_2)^2 \sin(q_1 + q_2) + c_2 (\ddot{q}_1 + \ddot{q}_2) \cos(q_1 + q_2) \\ 0 \end{bmatrix}$$

针对 B_3

$$\boldsymbol{\omega}_{3,0} = [0 \quad 0 \quad \dot{q}_1 + \dot{q}_2]^T$$

$$\dot{\boldsymbol{\omega}}_{3,0} = [0 \quad 0 \quad \ddot{q}_1 + \ddot{q}_2]^T$$

$$\mathbf{v}_{c30} = \begin{bmatrix} -l_1 \dot{q}_1 \sin q_1 - l_2 (\dot{q}_1 + \dot{q}_2) \sin(q_1 + q_2) \\ l_1 \dot{q}_1 \cos q_1 + l_2 (\dot{q}_1 + \dot{q}_2) \cos(q_1 + q_2) \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\dot{\mathbf{v}}_{c30} = \begin{bmatrix} -l_1 \dot{q}_1^2 \cos q_1 - l_1 \dot{q}_1 \sin q_1 - l_2 (\dot{q}_1 + \dot{q}_2)^2 \cdot \\ \cos(q_1 + q_2) - l_2 (\ddot{q}_1 + \ddot{q}_2) \sin(q_1 + q_2) \\ -l_1 \dot{q}_1^2 \sin q_1 + l_1 \dot{q}_1 \cos q_1 - l_2 (\dot{q}_1 + \dot{q}_2)^2 \cdot \\ \sin(q_1 + q_2) + l_2 (\ddot{q}_1 + \ddot{q}_2) \cos(q_1 + q_2) \\ 0 \end{bmatrix}$$

其中:第1个数字下标表示刚体编号,第2个数字下标表示参考坐标系的编号。

2.2 动力学仿真

本文采用 Kane 方法^[2,10,12]进行动力学计算。

Kane 法采用广义坐标及广义速率描述系统的状态;而由于广义速率的选取有很大的自由,故有可能得到十分简洁并便于推导的动力学方程。此外,Kane 法中大量使用加法和乘法,方便计算机编程计算。其具体计算步骤如下。

2.2.1 偏速度、偏角速度求解 选取广义坐标的导数为广义速率,进而得到关节(角度)速度、质心速度关于广义速率的系数,即为偏速度、偏角速度。其中,第 r 偏速度、偏角速度分别表示为 $\mathbf{v}_i^{(r)}$ 、 $\boldsymbol{\omega}_i^{(r)}$ 。求得偏速度及偏角速度表示为矩阵形式为:

针对 B_1

$$\boldsymbol{\omega}_{1,0}^{(1)} = [0 \quad 0 \quad 1]^T, \quad \boldsymbol{\omega}_{1,0}^{(2)} = [0 \quad 0 \quad 0]^T$$

$$\mathbf{v}_{c1,0}^{(1)} = [-c_1 \sin q_1 \quad c_1 \cos q_1 \quad 0]^T$$

$$\mathbf{v}_{c1,0}^{(2)} = [0 \quad 0 \quad 0]^T$$

针对 B_2

$$\boldsymbol{\omega}_{2,0}^{(1)} = [0 \quad 0 \quad 1]^T, \quad \boldsymbol{\omega}_{2,0}^{(2)} = [0 \quad 0 \quad 1]^T$$

$$\mathbf{v}_{c2,0}^1 = \begin{bmatrix} -l_1 \sin q_1 - c_2 \sin(q_1 + q_2) \\ l_1 \cos q_1 + c_2 \cos(q_1 + q_2) \\ 0 \end{bmatrix}^T$$

$$\mathbf{v}_{c2,0}^2 = [-c_2 \sin(q_1 + q_2) \quad c_2 \cos(q_1 + q_2) \quad 0]^T$$

针对 B_3

$$\boldsymbol{\omega}_{3,0}^{(1)} = [0 \quad 0 \quad 1]^T, \quad \boldsymbol{\omega}_{3,0}^{(2)} = [0 \quad 0 \quad 1]^T$$

$$\mathbf{v}_{c3,0}^{(1)} = \begin{bmatrix} -l_1 \sin q_1 - l_2 \sin(q_1 + q_2) \\ l_1 \cos q_1 + l_2 \cos(q_1 + q_2) \\ 0 \end{bmatrix}^T$$

$$\mathbf{v}_{c3,0}^{(2)} = [-l_2 \sin(q_1 + q_2) \quad l_2 \cos(q_1 + q_2) \quad 0]^T$$

2.2.2 广义力、广义惯性力求解 选用节段质点为参考点,记为 O 。根据广义主动力和广义惯性力定义,可得用偏速度(偏角速度)表示的广义主动力 $F^{(r)}$ 和广义惯性力 $F^{*(r)}$:

$$\left. \begin{aligned} F^{(r)} &= \sum_{i=1}^m (\mathbf{F}_i \cdot \mathbf{v}_i^{(r)} + \mathbf{M}_i \cdot \boldsymbol{\omega}_i^{(r)}) \\ F^{*(r)} &= \sum_{i=1}^m (\mathbf{F}_i^* \cdot \mathbf{v}_i^{(r)} + \mathbf{M}_i^* \cdot \boldsymbol{\omega}_i^{(r)}) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中: \mathbf{F}_i 、 \mathbf{M}_i 分别表示主动力及主动力矩, \mathbf{F}_i^* 、 \mathbf{M}_i^* 分别表示惯性力及惯性力矩,具体计算时的公式为

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{F}_i &= \sum \mathbf{f}_o \quad \mathbf{M}_i = \sum (\mathbf{r}_o \times \mathbf{f}_o) \\ \mathbf{F}_i^* &= - \sum \mathbf{m}_i \cdot \mathbf{v}_o \quad \mathbf{M}_i^* = \\ &\quad - [\mathbf{J}_o \cdot \boldsymbol{\omega}_i + \boldsymbol{\omega}_i \times (\mathbf{J}_o \cdot \boldsymbol{\omega}_i)] \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中: \mathbf{f}_o 为主动力的主矢, \mathbf{r}_o 为力臂矢量, \mathbf{J}_o 为相对于点 O 惯量值。

2.2.3 Kane 法求解肌肉作用力 假设两个未知肌肉作用力 f_g 、 f_s 方向与水平方向夹角分别为 A 、 B , 即有:

$$\sin A = \frac{\Delta y_3}{\sqrt{\Delta x_3^2 + \Delta y_3^2}}, \quad \cos A = \frac{\Delta x_3}{\sqrt{\Delta x_3^2 + \Delta y_3^2}}$$

$$\sin B = \frac{\Delta y}{\sqrt{\Delta x_3^2 + \Delta y_3^2}}, \quad \cos B = \frac{\Delta x_3}{\sqrt{\Delta x_3^2 + \Delta y_3^2}}$$

其中: $\Delta x_3 = x_3 - l_3 \cos q_1$ $\Delta y_3 = y_3 - l_3 \sin q_1$

$$\Delta x_2 = x_2 - (l_1 \cos q_1 + l_4 \cos(q_1 + q_2))$$

$$\Delta y_2 = y_2 - (l_1 \sin q_1 + l_4 \sin(q_1 + q_2))$$

将肌肉作用力 f_g 、 f_s 分别正交分解,写成矩阵形式:

$$\mathbf{f}_s = [f_s \cdot \cos A \quad f_s \cdot \sin A \quad 0]$$

$$\mathbf{f}_g = [f_g \cdot \cos B \quad f_g \cdot \sin B \quad 0]$$

选取两个子刚体的质心作为参考点写出广义主动力(含肌肉作用力)代入 Kane 公式:

$$\mathbf{F}^r + \mathbf{F}^{*r} = 0, \quad r = 1, 2, \dots, n \quad (5)$$

最终可得表达式结果如下:

$$f_g = \frac{-F^{*2} + m_2 g \cdot c_2 \cos(q_1 + q_2)}{M_1}$$

$$f_s = \{ -F^{*1} - f_g \cdot M_2 + m_1 g \cdot c_1 \cdot \cos q_1 + m_2 g \cdot [l_1 \cdot \cos q_1 + c_2 \cdot \cos(q_1 + q_2)] \} / N$$

其中:

$$M_1 = -c_2 \cdot [\cos B \cdot \sin(q_1 + q_2) + \sin B \cdot \cos(q_1 + q_2)] - (c_2 - l_4) \cdot [\cos B \cdot \sin(q_1 + q_2) - \sin B \cdot \cos(q_1 + q_2)]$$

$$M_2 = \cos B \cdot [-l_1 \cdot \sin q_1 - c_2 \cdot \sin(q_1 + q_2)] + \sin B \cdot [l_1 \cdot \cos(q_1 + q_2) + c_2 \cdot \cos(q_1 + q_2)] + (c_2 - l_4) \cdot [\cos B \cdot \sin(q_1 + q_2) - \sin B \cdot \cos(q_1 + q_2)]$$

$$N = -c_1 \cdot \cos A \cdot \sin q_1 + c_1 \cdot \sin A \cdot \cos q_1 + (c_1 - l_3) \cdot [\cos A \cdot \sin q_1 - \sin A \cdot \cos q_1]$$

3 仿真实验方法

3.1 运动学验证

为验证运动学计算结果的正确性,采用 OpenGL^[9-10]建立航天员上肢运动三维模型,并利用所得关节运动角度动态结果驱动生成动画,比较分析动画中末端手部运动轨迹同实际运动轨迹符合程度。

通过 C++ 编程,利用函数 fopen() 实现将文本文档(*.txt)中运动数据的读取并进行运算,进而通过 OpenGL 中函数 void auxSwapBuffers(void) 利用双缓冲技术最终实现动画。

3.2 动力学验证

考虑到目前航天员动力学仿真^[1-4]缺少试验验证支持,针对航天员动力学模型建立起基本条件相同的实物模型(见图4),进行测量试验数据同计算结果的比较。

关节由平面铰链(螺栓螺母连接)模拟。用棉绳拉力代替两个肌肉力的作用。各自起始点由两颗距离很近的细钉确定。上肢的两个终止点通过打孔实现。实物模型各节段尺寸均根据人体上肢模型实现了比例上的对应;对关节的模拟同仿真模型中关节的类型一致。同时,肌肉起始点及终止点的位置亦根据人体上肢模型进行比例对应,且均表示一种被动力模型。故本文采用的实物模型具有验证所需的参数、性质要求,可以作为动力学验证的依据。实物模型相关运动学及动力学数据见表1。

上述实物模型通过螺栓螺母固定于一块木板上(尺寸满足上肢运动范围),并在相应位置画出手部运动圆形轨迹(见图4)。试验时,木板竖直放置。步骤如下:

- (1) 在已有的圆形轨迹做标记点,相隔 22.5°, 共 16 个点。
- (2) 利用代表三角肌和肱二头肌的两股绳子拉动上臂,使模型末端运动至标记点处;同时,绳子另一端连接弹簧测力计,读取其显示的拉力值。
- (3) 重复步骤(2) 3 次,取各组平均值作为结果。

4 结果比较分析

4.1 运动学结果

仿真时间步长取做 0.05 s,利用 q_1, q_2 表达式在 Matlab 6.5 中编程实现仿真计算,得到关节运动角度动态结果如图 5 所示。

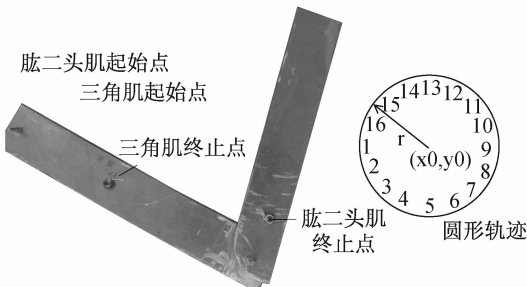


图4 上肢验证实物模型

Fig.4 Experimental model for the upper limb verification

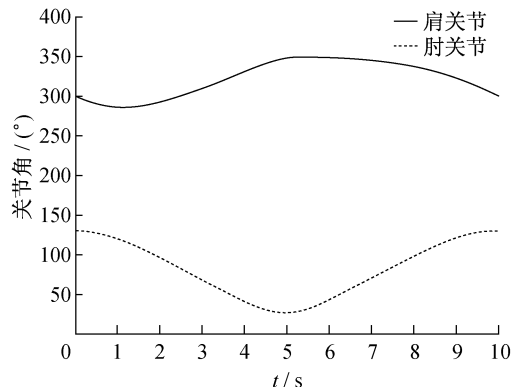


图5 运动学计算结果

Fig.5 Results of kinematics calculation

实物模型中,两段厚铝板分别代表上臂、前臂,

如图6所示,利用 OpenGL 验证结果(即上肢运

动画帧)可知,前臂圆柱体的底面中心(即手部质点)一直沿着已知的圆形轨迹运行。故本文所得的肩关节及肘关节运动参数的规律是正确的,从而验证了本文采用的反向运动学计算方法的正确性和可信性。

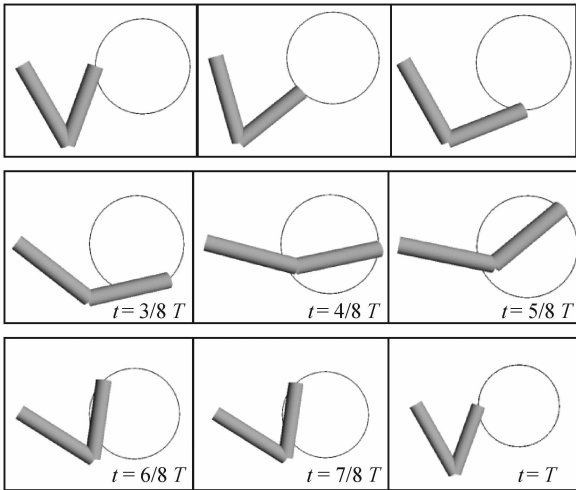


图6 OpenGL 动画帧

Fig. 6 Animation sequence of OpenGL

此外,文献[1-2]中的模型与本文相比,在手部的起始位置以及运动的方向均是一致的,然而文献给出的运动学结果与本文并不相同。通过本文的动画帧的验证,提示本文的结果是正确的。事实上,从定性角度分析,亦可看出文献中给出的运动学结果存在问题:肩关节在实际运动的初始阶段,其角度应当呈下降趋势,而文献中给出了上升的结果。

4.2 动力学结果

将实物模型具体尺寸带入航天员动力学仿真结果公式中,得到实物模型的仿真结果,并将试验结果绘制成点(见图7)。由图7可知,验证试验的结果和仿真计算的结果吻合较好。两者结果相比,平均相对误差肱二头肌为14.54%,三角肌为0.91%,前者误差略大,可能是由于肱二头肌作用前臂实物模型实验时存在一定摩擦及阻力。由此证明,Kane法动力学仿真计算结果可信,验证方法可行。

5 结语

本文建立了合理的包含肌肉作用力的航天员上肢模型,并基于OpenGL利用运动学计算结果驱动

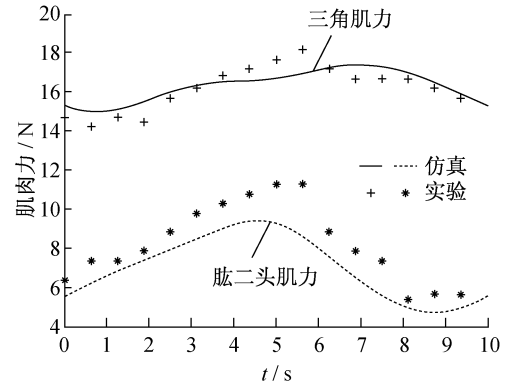


图7 动力学验证结果

Fig. 7 Results of dynamics verification

生成动画,验证了反向运动学计算的正确性。利用实物模型验证 Kane 法反向求解所得动力学参数,结果符合度较高。

本文将肌肉力引入航天员活动仿真研究中,得到合理结果,并分别进行了运动学、动力学验证,为航天员舱外活动生物力学仿真及验证提供了依据。

参考文献:

- [1] 杨峰, 袁修干. 基于 Lagrange 方法的航天员舱外活动计算机仿真[J]. 宇航学报, 2003, 24(4): 337-340.
- [2] 杨爱萍, 杨春信. 基于 Kane 方法的宇航员舱外活动仿真[J]. 系统仿真学报, 2008, 20(20): 5646-5650.
- [3] Schaffner G, Newman DJ, Robinson SK. Inverse dynamic simulation and computer animation of extravehicular activity (EVA) [C]// Annual Conference of the American Institute of Aeronautics and Astronautics. Reno, USA: [s. n.], 1997.
- [4] Schaffner G, Newman DJ, Robinson SK. Computational simulation of extravehicular activity dynamics during a satellite capture attempt [J]. J Guid Control Dynam, 2000, 23(2): 367-369.
- [5] Stirling L, Willcox K, Newman D. Development of a computational model for astronaut reorientation [J]. J Biomech, 2010, 43(12): 2309-2314.
- [6] 王宪民, 赵拥军, 孙天成, 等. 失重情况下人体动力学方程及开门动作分析[J]. 航天医学与医学工程, 1997, 10(3): 187-191.
- [7] 郝卫亚. 人体运动的生物力学建模与计算机仿真进展[J]. 医用生物力学, 2011, 26(2): 97-104.