

[研究·设计]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2016.02.005

食品检测咀嚼机器人灵活性分析与运动仿真

韩敬虎, 俞经虎

(江南大学机械工程学院, 江苏 无锡 214122)

摘要:为了解决目前食品检测中检测不准确,反馈速度慢,评价不客观等问题,设计了基于 Stewart 平台的咀嚼仿生机器人;介绍了咀嚼仿生机器人的工作原理;推导了机构的雅可比矩阵;分析了机构在中位时的局部灵活性;建立了仿真咀嚼平台的虚拟样机模型;模拟了下颌简单的张合运动。仿真结果表明驱动杆的各种物理量变化曲线与人类真实咀嚼运动比较吻合,机构的设计合理可靠。该机构能准确、快速、客观地实现食品的检测。

关键词:食品检测;咀嚼仿生机器人;并联机器人;雅可比矩阵;ADAMS 软件

中图分类号:TS207.7;TP274

文献标志码:A

文章编号:1005-2895(2016)02-0020-06

Chewing Food Testing Robot for Flexibility Analysis and Motion Simulation

HAN Jinghu, YU Jinghu

(School of Mechanical Engineering, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China)

Abstract: In order to resolve the problems of detecting inaccuracy in current food testing, slow feedback, non-objective evaluation and so on, the chewing bionic robot was designed based on Stewart platform. The working principle of the chewing bionic robot was introduced. The agency Jacobi matrix was derived. The organization of local flexibility in the neutral position was analyzed. The virtual prototype simulation chew platform was established, and the simple mandibular movement was simulated. The results show that the drive rod of various physical quantities curves are consistent with the real chewing movement of human, and the institutional design is reasonable and reliable. The robot can accurately and quickly achieve the objective of food testing.

Key words: food testing; chewing bionic robot; parallel robot; Jacobi flexibility matrix; ADAMS software

近年来有很多学者研究咀嚼机器人, Xu 等^[1]首次展开了应用于食品评估的仿生机器人研究。其用一个执行器代表一个肌肉群,每个执行器的插入坐标通过扫描人类咀嚼的下颌骨得到,对人类咀嚼食品时咀嚼肌的活动进行了模拟。法国的 Woda^[2]则通过不同个体的咀嚼实验,研制了模仿人的口腔的微型机构。国内对咀嚼机器人的研究起步较晚,且研究机构较少。其中,从明等^[3]进行研究,并取得丰硕成果;雷孟冬等^[4]利用机械虚拟技术建立六自由度咀嚼虚拟样机模型;俞经虎、李晓锋等^[5-6]利用六自由度并联机构实现了牙齿的咀嚼模拟,并构建了压缩咀嚼模式下粘弹性食品材料——琼脂凝胶小变形条件下的应力应变模

型,获得了食品咀嚼过程中物性实时检测的方法。

本文以基于 6-UPS 并联机构来设计咀嚼机器人,结合人类下颌系统运动与 6-UPS 并联机构的灵活性分析,并使用 Adams 对机构进行运动仿真以验证设计的可行性。

1 仿真咀嚼平台简述

下颌运动是转动与平移的空间六自由度运动。考虑到实际的应用性及可行性,Stewart 机构是六自由度并联机器人中最具代表性的,也是实际应用最多的机构。为了达到咀嚼运动要求,本文所设计的机构就是基于 6-UPS 并联机构演化而来的高仿真咀嚼平台,如图 1 所示。图中对上颌骨、下颌骨及牙齿进行了简化。

收稿日期:2015-09-30;修回日期:2015-10-30

基金项目:国家自然科学基金项目:面向食品材料物性检测与评价的仿生咀嚼机器人研究(51375209)。

作者简介:韩敬虎(1990),男,安徽阜阳人,硕士研究生,主要研究方向为面向食品检测的并联机器人设计。E-mail:595403814@qq.com

仿真咀嚼平台从性能仿生角度出发,模拟咀嚼时下颌运动情况设计而成:下平台固定;上颌骨通过伺服电动缸固定在机架上,伺服电动缸伸长使上颌骨达到咀嚼时的指定位置并静止;下颌骨通过载物台固定在上平台上,由上平台驱动下颌运动,实现下颌中下牙与固定上颌中上牙的咬合咀嚼运动;上颌骨、下颌骨、唾液室组成仿生口腔,检测时在仿生口腔中放入需要检测样品与模拟唾液;上平台、下平台之间通过6个相同的驱动杆(P)连接,驱动杆与上平台、下平台分别通过球面副(S)和虎克铰(U)连接;6个伺服电机的旋转实现驱动杆的伸长与缩短,带动上平台空间运动,从而使下颌按设定的程序值进行仿生咀嚼。另外,该高仿真咀嚼平台可以依据检测样品和分析指标的不同,灵活选用载物台并将上颌骨替换相应的检测探头,这样通过更换探头和控制检测程序,可以实现通用物性检测仪器的食物性的基础测试。由此看来,此咀嚼平台可以代替传统质构仪对食物性的检测。

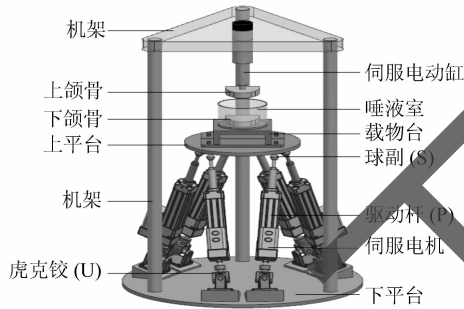


图1 高仿真咀嚼平台模型

Figure 1 High simulation model of chew platform

2 咀嚼平台的灵活性研究

2.1 6-UPS 机构的速度雅可比矩阵

6-UPS 机构的原理图及相关动静坐标系如图2所示。其中:静坐标系 O_1xyz 建立于下铰点 U_i 所在的圆心上;在上铰点 S_i 所在的圆心 O_2 建立与上平台固结的动坐标系 $O_2-x_1y_1z_1$;上下铰点所在圆半径分别为 r, R ;在初始位置时,动静坐标系原点距离为 h ;下平台短边 U_1U_2 所对的圆心角为 α_1 ,上平台长边 S_1S_2 所对的圆心角为 α_2 。

由图2可知,6-UPS 机构主要结构参数: r, R, α_1, α_2 和 h 。

假设上铰点 S_i 在动坐标系 $O_1-x_1y_1z_1$ 中的位置矢量是 s_i ,在静坐标系 O_1xyz 中位置矢量是 S_i ,上平台与下平台之间的旋转矩阵是 G ,动坐标系原点 O_1 在静坐标系中的矢量 O_{01} ,可得

$$S_i = Gs_i + O_{01} \quad (1)$$

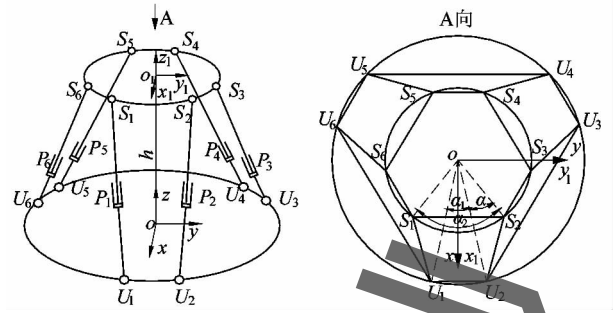


图2 6-UPS 的机构原理图及坐标系

Figure 2 Institution schematics and coordinates of 6-UPS

下铰点 U_i 在静坐标系 O_1xyz 中位置矢量是 U_i ,则第 i 个驱动杆在静坐标系 O_1xyz 中的位置矢量

$$L_i = S_i - U_i = O_{01} + Gs_i - U_i \quad (2)$$

式(2)的两端对时间 t 求导,可得上铰点 S_i 的速度^[7],即

$$v_{S_i} = V + \omega \times Gs_i \quad (3)$$

式中: v_{S_i} 表示上铰点 S_i 的速度; V 表示上平台中心点 O_1 的线速度; ω 表示上平台的角速度。

根据速度约束关系,上铰点 S_i 速度沿杆方向速度为

$$V_{l_i} = e_i \cdot v_{S_i} = e_i \cdot (V + \omega \times Gs_i) \quad (4)$$

式中: e_i 表示第 i 驱动杆的单位方向矢量,即

$$e_i = \frac{L_i}{l_i} \quad (5)$$

式中 l_i 表示第 i 驱动杆的长度。

同时考虑 6 根驱动杆,化简式(4)写成矩阵形式,即

$$V_{l_i} = J(V \ \omega)^T \quad (6)$$

式中: V_{l_i} 表示 6 根驱动杆的速度矩阵,即

$$V_{l_i} = (V_{l_1} \ V_{l_2} \ V_{l_3} \ V_{l_4} \ V_{l_5} \ V_{l_6})^T;$$

J 表示 6-UPS 的速度雅可比矩阵,即

$$J = \begin{bmatrix} e_1^T & (Gs_1 \times e_1)^T \\ e_2^T & (Gs_2 \times e_2)^T \\ \vdots & \vdots \\ e_6^T & (Gs_6 \times e_6)^T \end{bmatrix} \quad (7)$$

当 6-UPS 机构处在初始位置时,即当在中位时,根据图2所示,上下铰点分别在动静坐标系中的矢量 s_i , U_i 分别为:

$$s_i = (r \cos \theta_i \ r \sin \theta_i \ 0)^T, i = 1, \dots, 6; \quad (8)$$

$$U_i = (R \cos \varphi_i \ R \sin \varphi_i \ 0)^T, i = 1, \dots, 6. \quad (9)$$

式(8)~(9)中:

$$\theta_1 = -\frac{\alpha_2}{2}; \varphi_1 = -\frac{\alpha_1}{2};$$

$$\theta_2 = \frac{\alpha_2}{2}; \varphi_2 = \frac{\alpha_1}{2};$$

$$\theta_3 = \frac{2\pi}{3} - \frac{\alpha_2}{2}; \varphi_3 = \frac{2\pi}{3} - \frac{\alpha_1}{2};$$

$$\theta_4 = \frac{2\pi}{3} + \frac{\alpha_2}{2}; \varphi_4 = \frac{2\pi}{3} + \frac{\alpha_1}{2};$$

$$\theta_5 = -\frac{2\pi}{3} - \frac{\alpha_2}{2}; \varphi_5 = -\frac{2\pi}{3} - \frac{\alpha_1}{2};$$

$$\lambda_1 = \lambda_2 = \frac{3}{2l^2} (\sqrt{4R^2h^2r^2 + h^4r^4 + 2h^4r^2 + h^4 + l^4 - 2h^2l^2 - 2h^2l^2r^2 - 8Rh^2r^3 \cos \alpha + 4h^2r^4 \cos \alpha + l^2 - h^2 + R^2h^2}); \quad (11)$$

$$\lambda_3 = \lambda_4 = \frac{3}{2l^2} (\sqrt{4R^2h^2r^2 + h^4r^4 + 2h^4r^2 + h^4 + l^4 - 2h^2l^2 - 2h^2l^2r^2 - 8Rh^2r^3 \cos \alpha + 4h^2r^4 \cos \alpha - l^2 + h^2 - R^2h^2}); \quad (12)$$

$$\lambda_5 = 6h^2/l^2; \quad (13)$$

$$\lambda_6 = 6(R^2r^2 \sin^2 \alpha)/l^2. \quad (14)$$

将式(10)代入式(11)~(14)中,并根据奇异值定义化简可得各奇异值 σ_i 为:

$$\sigma_1 = \sigma_2 = \sqrt{\frac{3}{2} \left(\frac{n}{m} + \sqrt{\frac{n^2 - 4h^2\mu^2 \sin^2 \alpha}{m^2}} \right)^{1/2}},$$

$$\sigma_3 = \sigma_4 = \sqrt{\frac{3}{2} \left(\frac{n}{m} - \sqrt{\frac{n^2 - 4h^2\mu^2 \sin^2 \alpha}{m^2}} \right)^{1/2}},$$

$$\sigma_5 = \sqrt{6} \frac{h}{R \sqrt{m}},$$

$$\sigma_6 = \sqrt{6} \frac{R\mu \sin \alpha}{\sqrt{m}}.$$

式中: $\mu = r/R$;

$$n = 1 + h^2\mu^2 + \mu^2 - 2\mu \cos \alpha;$$

$$m = 1 + h^2/R^2 + \mu^2 - 2\mu \cos \alpha.$$

2.2 局部灵活性指标解析分析

并联机器人的输入与输出之间各种物理量映射关系,包括速度、力、误差,这些映射关系都可以由雅可比矩阵 J 来体现,且映射后矢量长度的极值通常用来评价机器人的操作性能^[8-10]。

6个奇异值有3种常用的灵活性指标:

1) 最小奇异值指标

$$\sigma_{\min} = \sigma_3 = \sigma_4;$$

2) 条件数指标

$$C_n = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{\min}};$$

3) 可操作性指标

$$\theta_6 = -\frac{2\pi}{3} + \frac{\alpha_2}{2}; \varphi_6 = -\frac{2\pi}{3} + \frac{\alpha_1}{2}.$$

咀嚼平台处于中位时,上下平台平行且无绕静坐标系 z 轴旋转,根据机构几何关系可得到此时驱动杆的长度 l_i 为:

$$l_i = \sqrt{h^2 + R^2 + r^2 - 2Rr \cos \alpha}. \quad (10)$$

中位时, $l_1 = l_2 = l_3 = l_4 = l_5 = l_6 = l$ 。

利用 MATLAB 工具求解雅可比矩阵的特征值,6个特征值 λ_i 为:

$$D = |\det(J)| = \sigma_1 \sigma_2 \sigma_3 \sigma_4 \sigma_5 \sigma_6 = \frac{54h^3 \mu^3 \sin^3 \alpha}{m}.$$

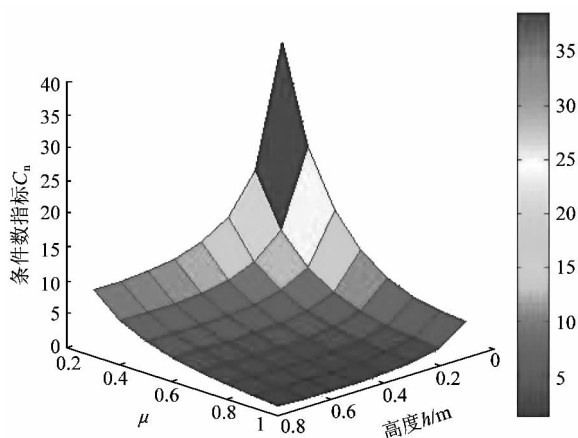
根据3种指标的解析式可以看出,3种指标与6-UPS机构的4个结构参数有关,即:平台高度 h ,上下平台的半径 r, R (或 r, R, μ 之中的2个),平台结构扭角 α 。

选用6-UPS构型的Stewart机构作为驱动平台。考虑到驱动杆的物理尺寸及防止杆件之间的干涉,可取 $\alpha_1 = 30^\circ, \alpha_2 = 90^\circ$,故此时结构扭角 $\alpha = \frac{\alpha_2 - \alpha_1}{2} = 30^\circ$ 。

参照质构仪载物台的大小,可以确定上平台的半径大小 $r = 0.11 \text{ m}$ 。

当 r, α 确定之后,下平台的半径 R 大小可以根据半径比 μ 对条件数指标 C_n 的影响关系确定。图3所示为 $r = 0.11 \text{ m}, \alpha = 30^\circ$ 时,条件数指标 C_n 与 μ 和 h 之间的关系。从图中可以看出,当 $\mu \geq 0.5$ 时,不同的 μ 对应的 C_n 相差很小,尤其在 $h \geq 0.3$ 以后;而当 $\mu < 0.5$ 时, C_n 随着 μ 的减小而急剧增大;当 h 越大, C_n 越接近最小值;同时可以看出当高度 $h > 0.3$ 时,高度 h 的变化对条件数指标 C_n 影响较小。故理论上,当上下平台半径比 $\mu \in [0.5, 1]$ 和高度 $h \in [0.3, 0.8]$ 时,雅可比矩阵的条件数 C_n 接近于最小值。

为了确保咀嚼机器人整体结构所占体积空间较小,同时考虑到机构的稳定性,故综合考虑参数 μ, h 的影响与实际工程的需要,现取 $\mu = 0.55$,则

图3 条件数 C_n 与 μ, h 的关系Figure 3 Relationship between condition number C_n and μ, h

$$R = \frac{r}{\mu} = \frac{0.11}{0.55} = 0.20 \text{ m}.$$

取 $h = 0.325 \text{ m}$, 则高仿真咀嚼平台驱动机构的参数如表 1 所示。

表 1 驱动机构的尺寸参数

Table 1 Parameter dimensions of drive mechanism

下圆心角 $\alpha_1 / (^\circ)$	上圆心角 $\alpha_2 / (^\circ)$	上平台直 径 r / m	下平台直 径 R / m	半径 比 μ	平台高 度 h / m	条件 数 C_n
30	90	0.110	0.200	0.550	0.325	4.023 6

由表 1 可知, 当咀嚼平台处于中位时, 条件数指标 C_n 满足:

$$1 < C_n = 4.023\ 6 < \infty.$$

可见中位时条件数指标 C_n 较小, 说明此时的机构局部灵活性较好。

3 高仿真咀嚼平台的仿真分析

3.1 仿真咀嚼平台的虚拟样机建立

考虑到 ADAMS 软件对复杂机械系统建模繁琐的特点, 为提高样机建模的效率, 利用三维设计软件 UG 与 ADAMS 进行联合建模。首先, 在 UG 中完成仿真咀嚼平台的实体模型, 导出 Parasolid 格式, 与 ADAMS 建立数据接口, 导入 ADAMS 中。仿真咀嚼平台的 ADAMS 模型如图 4 所示, 对其进行以下处理:

1) 设置坐标系。选择笛卡尔坐标系表示, 欧拉角顺序为 123, 勾选相对于全局坐标系。

2) 设置单位。选用长度为 mm; 质量为 kg; 力为 N; 时间为 s; 角度为 $(^\circ)$; 频率为 Hz。

3) 设置重力。选择 Z 轴负方向, $g = -9\ 806.65 \text{ mm/s}^2$ 。

4) 简化模型。利用求和命令, 将下平台与虎克铰

支座合并为一个部分(part), 上平台与球铰支座、载物台、下颌合并为一个部分(part)。

5) 添加约束副。将下平台与大地固定约束; 驱动杆与下平台之间的虎克铰约束用 2 个垂直的旋转副替换; 驱动杆上添加移动副, 其方向沿驱动杆轴线; 上平台与驱动杆之间球副约束, 各约束副如图 4 所示。利用 Model Verify 命令, 对模型进行检测, 显示检测结果对话框, 得出该机构有 6 个自由度, 与上文自由度数求解一致, 如图 5 所示。

6) 定义材料属性。本文统一为模型添加“steel”材料, 密度 $\rho = 7.801 \times 10^{-3} \text{ kg/mm}^3$ 。

7) 定义坐标系。利用标记(marker)点设置动静坐标系, 静坐标系固定于大地, 位置(location)为(0,0,0), 方向(orientation)为(0,0,0); 动坐标系固定于下颌, 位置(location)为(80,0,-38), 方向(orientation)为(0,0,0)。

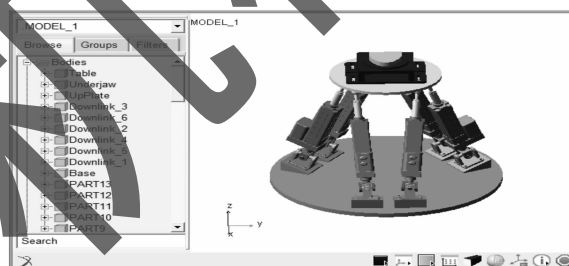


图4 仿真咀嚼平台的 ADAMS 模型

Figure 4 ADAMS simulation model of chew platform

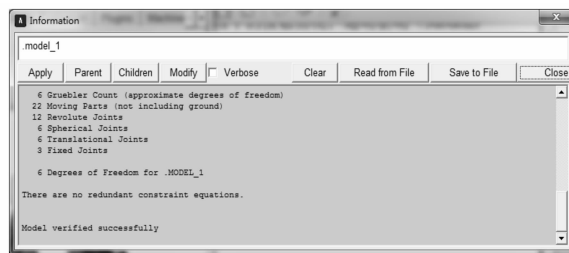


图5 样机模型自检信息结果

Figure 5 Self-test result information of prototype

3.2 仿真咀嚼平台运动学仿真

对仿真咀嚼平台进行运动学仿真, 可以了解驱动机构与动平台之间的位置、速度、加速度等映射关系。采用下颌切点(动系原点 O_1)进行测试, 分别以人类下颌基本的张合运动、咀嚼食物时复合运动为算例, 在 ADAMS 中添加点驱动进行仿真, 运用 ADAMS 测量功能来测试构件及运动副相关物理量, 并运用 ADAMS 的后处理模块来绘制曲线。

在仿真之前, 需要对机构进行定义驱动, ADAMS

中常用的两类驱动方式:铰驱动(joint motions)和点驱动(general motions)。对此运动形式进行逆解分析,需要在动平台中点处添加相应的自由度驱动,即使用general motions添加一个六自由度数的驱动,包括3个平移与3个旋转。点击点驱动命令后,选择:2 bodies-2 locations,然后选择动平台与大地,并确定动点(moving point)与参考点(reference point)。

$$\begin{aligned} X_{\text{tra}} &= \sqrt{(38 \times 38 + 80 \times 80)} \cdot \cos(\arctan(38/80) + |(\pi/6) \cdot \sin(\pi \cdot t)|), \\ Y_{\text{tra}} &= 0 \cdot t, \\ Z_{\text{tra}} &= -\sqrt{(38 \times 38 + 80 \times 80)} \cdot \cos(\arctan(38/80) + |(\pi/6) \cdot \sin(\pi \cdot t)|), \\ X_{\text{rot}} &= 0 \cdot t, \\ Y_{\text{rot}} &= |(\pi/6) \cdot \sin(\pi \cdot t)|, \\ Z_{\text{rot}} &= 0 \cdot t. \end{aligned}$$

将6个驱动的类型选择为:disp(time),上式添加到点驱动后,设置仿真时间为3 s,步数为300。仿真完成后,在后处理模块下,依次选取相关物理量并绘制曲线,包括驱动杆每一时刻的长度、速度与加速度,其变化曲线如图6所示。

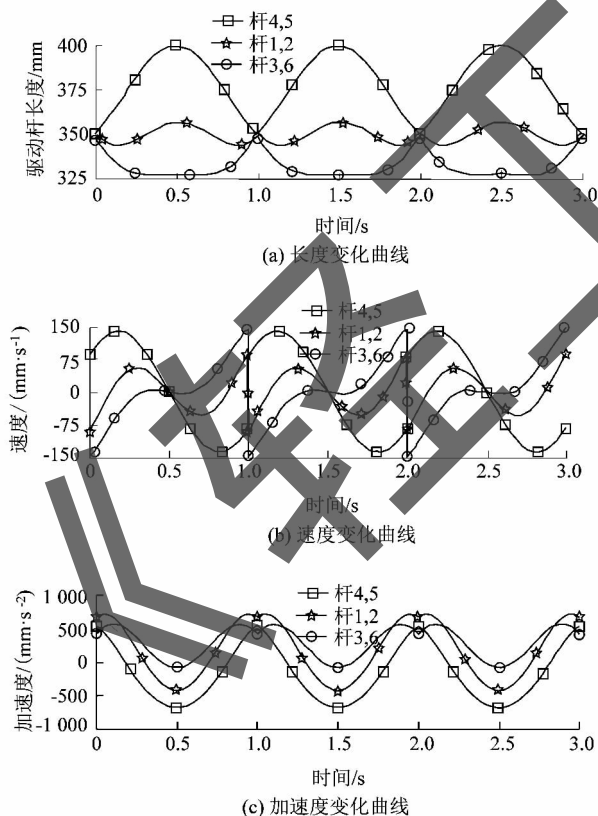


图6 张合运动时驱动杆长度、速度、加速度曲线图
Figure 6 Length, velocity and acceleration graphs of drive rod when open and close

下颌张合运动是人类咀嚼运动最基本的形式之一,也是咀嚼时对食物切割的主要形式。参考下颌运动范围可知,人类下颌绕铰链轴旋转的最大角度为30°。对张合运动进行简化处理,认为只绕铰链(y轴)旋转,本文用三角函数近似模拟。由于是耦合运动,绕y轴旋转必定引起x,z轴上坐标的变化,根据几何知识,确定动平台位姿参数随时间t的程序表达式为:

由图6可知,当咀嚼平台模拟近似张合运动时,驱动杆的杆长、速度、加速度呈现周期性变化,这由所加驱动函数的性质所致;同时,曲线两两重合是由于结构的对称性所致,这都与实际情况相符。由图6(b)可知,每当回到初始位置时,速度都会发生突变,这是驱动函数所致,现实模拟应尽量避免。当下颌由初始位置往下张开时,驱动杆1,2的长度先减小后增大,速度方向先沿杆往下后往上;驱动杆3,6的长度减小,当接近最下端时,长度有稍微增大,速度方向沿杆往下,当接近最下端时,速度沿杆往上;驱动杆4,5的长度增大,速度方向沿杆往上;6个驱动杆的加速度方向都是先沿杆往上后往下。当由最下端返回初始位置时,与前半个周期的运动情况相反。

4 结语

本文设计了仿生咀嚼机器人的机械结构,运用MATLAB求解了机构雅可比矩阵,在满足灵活性指标的情况下,确定了机构的各部分尺寸,在ADAMS上仿真了张合运动和复合运动,分析驱动杆长变化,驱动杆速度和加速度的曲线图,验证了本机构设计的合理性,基本能够实现咀嚼运动,为以后的动力学分析和电机的选配控制打下了基础。

参考文献:

- [1] XU W L, TORRANCE J D, CHEN B Q, et al. Kinematics and experiments of a life-sized masticatory robot for characterizing food texture [J]. IEEE transactions on industrial electronics, 2008, 55 (5): 2121 - 2132.
- [2] WODA A, MISHALLANY-DUTOUR A, BATIER L, et al. Development and validation of a mastication simulator [J]. Journal of biomechanics, 2010, 43 (9): 1667 - 1673.

(下转第29页)