

DOI: 10.13973/j.cnki.robot.2017.0070

咀嚼机器人殆运循环规划及驱动力优化分配方法

王贵飞¹, 丛明¹, 徐卫良², 温海营¹, 秦文龙¹

(1. 大连理工大学机械工程学院, 辽宁 大连 116024; 2. 奥克兰大学机械工程系, 新西兰 奥克兰 1142)

摘要: 为了实现面向牙科患者的个性化成品义齿性能测试, 基于 6PUS-2HKP 空间冗余驱动并联仿生咀嚼机器人, 设计了可安装牙模的仿生上颌、下颌结构. 针对义齿性能测试对高仿生咀嚼运动的要求, 提出了一种基于颞下颌关节 (TMJ) 运动理论的后牙殆运循环参数化仿生规划方法. 利用拉格朗日方程和虚功原理, 推导了冗余驱动咀嚼机器人的动力学方程. 分别以颞下颌关节内力 2 范数最小和驱动力 2 范数最小为优化目标, 建立了基于遗传算法的冗余驱动咀嚼机器人驱动力优化分配数学模型. 将食品质构仪获取的仿真食物力-变形关系曲线加载到机器人磨牙上完成了殆运循环下咀嚼仿真食物实验. 结果表明, 咀嚼机器人切牙运动轨迹形状、切牙运动速度变化规律、髁突运动形式等均与人类咀嚼运动一致, 空载和加载仿真食物两种条件下均可求得合理的驱动力优化分配结果. 同时, 以仿真实验得到的 6 组驱动力为输入, 采用咀嚼机器人样机进行了殆运循环实验. 样机实验和咀嚼仿真食物实验证明了殆运循环规划方法的仿生性和驱动力优化分配方法的可行性.

关键词: 咀嚼机器人; 殆运循环规划; 驱动力优化分配; 牙科义齿性能测试

中图分类号: TP242

文献标识码: A

文章编号: 1002-0446(2017)-01-0070-11

Occlusion Masticatory Cycle Planning and Driving Force Optimal Distribution of an Actuation Redundant Chewing Robot

WANG Guifei¹, CONG Ming¹, XU Weiliang², WEN Haiying¹, QIN Wenlong¹

(1. School of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116023, China;

2. Department of Mechanical Engineering, The University of Auckland, Auckland 1142, New Zealand)

Abstract: In order to achieve individualization of denture performance test for dental patients, the biomimetic maxilla and mandible structures installing a dental model are designed based on a 6PUS-2HKP spatial parallel biomimetic chewing robot with redundant actuation. In order to satisfy requirements of highly biomimetic chewing movements in the denture performance test, a parametric biomimetic planning method for the posterior teeth occlusion masticatory cycle is proposed on the basis of temporomandibular joint (TMJ) motion theories. Combining Lagrangian formulation and virtual work principle, dynamics of the actuation redundant chewing robot is deduced. The mathematics model of driving force optimal distribution of the actuation redundant chewing robot is established by means of genetic algorithm under 2 different optimization goals, i.e. minimal 2-norm of temporomandibular joint forces and minimal 2-norm of driving forces. Applying force-deformation curve of simulation food silicon rubber, which is obtained by food texture analyser, to the molar tooth of the chewing robot, chewing experiments on simulation food under occlusion masticatory cycle are carried out. The experiment results show that incisor trajectory shape, incisor velocity changing rules, and condylar motion forms, and so on, all conform to human chewing movements. Reasonable driving force optimal distribution results can be obtained under conditions with or without simulation food. The occlusion masticatory cycle experiment is carried out on the chewing robot with 6 actuation forces obtained by the simulation as the input. Prototype experiments and chewing experiments on simulation food demonstrate the bio-imitability of the parametric planning method for the posterior teeth occlusion masticatory cycle and the feasibility of the driving force optimal distribution method.

Keywords: chewing robot; occlusion masticatory cycle planning; driving force optimal distribution; denture performance test

1 引言 (Introduction)

人类咀嚼系统功能的机械再现, 对于牙科义齿材料性能测试、牙科手术前后咀嚼功能对比、食品质地评估等领域至关重要^[1]. 目前, 针对不同的应用领域, 国内外已研发了几种不同机构的咀嚼机器人 (或设备), 并进行了咀嚼运动轨迹规划、动力学分析和控制等方面的研究. 在食品质地评估领域, 文 [2] 构建了基于 6-UPS 并联机构的仿生咀嚼检测平台, 提出基于三次 B 样条曲线的仿生咀嚼运动轨迹规划. 文 [3] 采用伪逆法对 6RSS 冗余驱动并联咀嚼机器人进行了驱动力优化分配, 并研究了带有驱动力反馈环节的关节空间运动控制方法. 在牙科义齿性能测试领域, 目前多采用单轴或双轴咀嚼模拟机测试义齿的强度、疲劳寿命等, 多自由度的仿生咀嚼机器人的研究与应用较少. 文 [4] 研制了一种基于 Stewart 平台的牙科咀嚼机器人, 可用于牙科组件材料的磨损实验. 采用点接触高副模拟颞下颌关节的 6PUS-2HKP 冗余驱动并联仿下颌运动机器人见文 [5-7].

上述现有的仿生咀嚼机器人 (或设备) 模拟了开口运动、闭口运动、捣碎运动等多种运动形式, 但都未能实现高仿生的咀嚼运动. 高仿生的咀嚼运动对于保证义齿性能测试的有效性和准确性具有非常重要的意义. 咀嚼运动可分为前牙切割和后牙的捣碎、磨细 3 个基本动作. 在咀嚼过程中, 3 个动作连续顺畅、重复进行, 完成整个进食过程. 后牙的捣碎和磨细运动也称为殆运循环. 对咀嚼功能的模拟从简单捣碎动作转向复杂的后牙殆运循环是咀嚼机器人发展的必然趋势^[8].

冗余驱动根据优化目标分为基于驱动力、内力或能耗最小的驱动力优化分配策略, 根据优化算法分为加权伪逆法、显式拉格朗日乘法以及直接代替法, 目前主要应用伪逆法对冗余驱动并联机构进行内力分配^[9-10]. Shang 等^[10] 采用伪逆法对一种平面冗余驱动并联机构进行驱动力优化分配. 目前, 冗余驱动并联机构的驱动力优化分配主要是针对平面并联机构, 空间冗余驱动并联机构的驱动力优化分配方法的相关研究较少.

在 6PUS-2HKP 空间冗余驱动并联仿生咀嚼机器人基础上, 为实现面向患者的个性化成品义齿性能测试, 设计了可安装牙模的仿生上颌、下颌结构, 提出了一种基于颞下颌关节运动理论的后牙殆运循环参数化仿生规划方法, 建立了基于遗传算法的空间冗余驱动并联咀嚼机器人驱动力优化分

配数学模型, 最后通过咀嚼仿真食物实验和样机实验, 对殆运循环仿生规划方法和驱动力优化分配方法进行了分析和验证.

2 义齿性能测试咀嚼机器人 (Chewing robot for denture performance test)

根据人类口颌系统解剖结构和生物力学理论提出的具有 6PUS-2HKP 空间冗余驱动并联机构的仿生咀嚼机器人机构简图如图 1 所示, 该机器人含有 6 条驱动支链 PUS、2 个点接触高副 HKP、仿生上颌、仿生下颌等部件, 其仿生设计及验证详见文 [1].

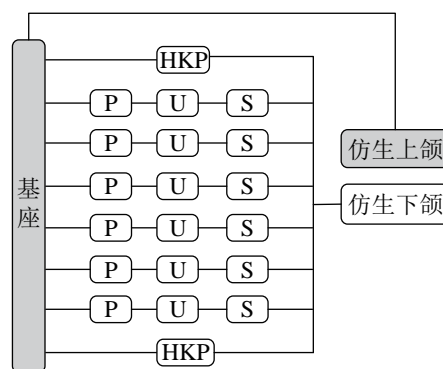


图 1 6PUS-2HKP 机构
Fig.1 6PUS-2HKP mechanism

在此工作基础之上, 以具有健康殆的成年人作为实验对象制作牙模, 利用牙科 CAD/CAM 系统扫描其 3 维模型, 设计可安装牙模及力传感器的仿生上颌、下颌结构, 如图 2 所示. 该部分结构主要包括力传感器安装板、6 维力传感器、牙模安装板、牙模等部件, 以患者牙模替代健康殆牙模, 并调整点接触高副的空间位置, 可实现利用该咀嚼机器人进行面向患者的个性化成品义齿性能测试的目的, 样机如图 3 所示.

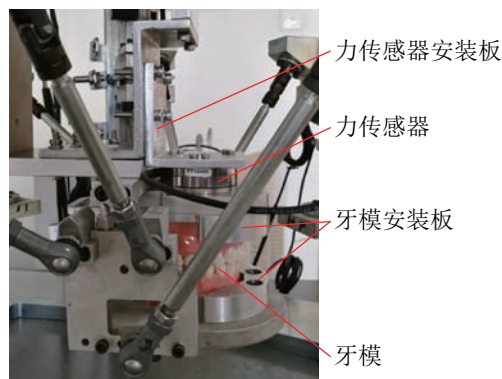


图 2 仿生上颌、下颌结构
Fig.2 Biomimetic maxilla and mandible structures



图3 义齿性能测试咀嚼机器人样机

Fig.3 Chewing robot for denture performance test

为描述咀嚼机器人殆运循环, 建立3个坐标系:

全局坐标系 Σ_G : 原点位于下颌初始位置处两髁突的连线中点, Z 方向竖直向上, Y 方向与髁突连线方向平行;

平移坐标系 Σ_I : 随下颌运动, 与全局坐标系平行, 原点在两髁突的连线中点;

下颌坐标系 Σ_M : 随下颌运动, 初始位置时, 下颌坐标系和全局坐标系重合.

图4描述了采用点接触高副设计的仿生颞下颌关节运动示意图, 其中两髁突之间的距离设为 $2d$, 左侧髁突球心 O_1 坐标 ${}^G O_1 = [X_{01}, Y_{01}, Z_{01}]^T$, O_2 坐标 ${}^G O_2 = [X_{02}, Y_{02}, Z_{02}]^T$.

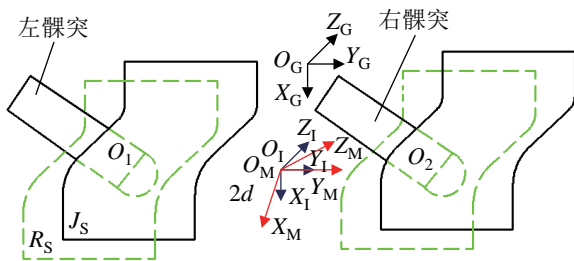


图4 仿生颞下颌关节

Fig.4 Biomimetic TMJs

下颌运动时髁突需始终沿着关节面 J_S 运动, 可知髁突球心 O_1 、 O_2 始终在关节面的等距面 R_S (距离为髁突球的半径) 上运动, 等距面的表达式记作:

$$Z = f_{SR}(X) \quad (1)$$

由刚体一般运动的方程可知, 咀嚼机器人的运动可用 Σ_I 相对 Σ_G 的平移运动量 X 、 Y 、 Z 和 Σ_M 绕 O_1 的旋转运动滚动角 α 、俯仰角 β 和偏航角 γ 描述. 刚体变换矩阵如下:

$${}^G I_M = \begin{bmatrix} c\gamma \cdot c\beta & -s\gamma \cdot c\alpha + c\gamma \cdot s\beta \cdot s\alpha & s\gamma \cdot s\alpha + c\gamma \cdot s\beta \cdot c\alpha & X \\ s\gamma \cdot c\beta & c\gamma \cdot c\alpha + s\gamma \cdot s\beta \cdot s\alpha & -c\gamma \cdot s\alpha + s\gamma \cdot s\beta \cdot c\alpha & Y \\ -s\beta & c\beta \cdot s\alpha & c\beta \cdot c\alpha & Z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式(2)、(5)~(11)中, c 均代表 \cos , s 均代表 \sin .

但在仿生颞下颌关节的约束下, 咀嚼机器人只具有4个自由度. 为便于规划仿生颞下颌关节的运动, 采用4个独立位姿参数 X 、 Y 、 β 和 γ 描述对称运动, X_{01} 、 Y 、 β 和 γ 描述非对称运动. 咀嚼机器人各个参数之间的函数关系如下:

$$X = \frac{X_{01} + X_{02}}{2} \quad (3)$$

$$Z = \frac{Z_{01} + Z_{02}}{2} \quad (4)$$

$$\alpha = \arcsin \frac{Z_{02} - Z_{01}}{2d \cdot c\beta} \quad (5)$$

$$s\gamma = \frac{-f_1 + \tan\beta \cdot f_2}{1 - \left(\frac{Z_{02} - Z_{01}}{2d}\right)^2} \quad (6)$$

其中,

$$f_1 = \sqrt{1 - \left(\frac{Z_{02} - Z_{01}}{2d \cdot c\beta}\right)^2}$$

$$f_2 = \frac{Z_{02} - Z_{01}}{2d} \sqrt{1 - \left(\frac{Z_{02} - Z_{01}}{2d}\right)^2 - \left(\frac{X_{02} - X_{01}}{2d}\right)^2}$$

3 后牙殆运循环参数化仿生规划 (Parametric biomimetic planning of posterior teeth occlusion masticatory cycle)

捣碎运动以下颌的上下运动为主, 从牙尖交错位开始的捣碎运动, 髁突的运动形式为滑动加转动. 将捣碎运动分为开口阶段和闭口阶段, 分别采用8次多项式构造下颌独立位姿参数 X 和 β 的时间函数, 可实现捣碎运动的仿生规划.

磨细运动以侧方运动为主, 其典型的运动轨迹(切牙为参考, Σ_M 中坐标 ${}^G I = [X_1, Y_1, Z_1]^T$) 在冠状面具有似泪滴状的形态, 如图5所示, 可由下面的参数描述^[11]: (1) 下颌从牙尖交错位下降0.5 mm时在冠状面上的开口角 θ_{op} 和闭口角 θ_{cl} ; (2) 开口时长 T_{op} 、闭口时长 T_{cl} 和咬合时长 T_{oc} ; (3) 开闭口过程中的最大速度 V_{mop} 和 V_{mcl} ; (4) 竖直方向最大位移 D_v ; (5) 开口相水平位移 D_{op} 和闭口相水平位移 D_{cl} .

侧方运动为非对称运动, 选取 X_{01}, X, β 和 Y 四个独立位姿参数描述机器人的运动. 正常情况下, 左右侧方运动差别不大, 只研究一侧即可. 本文规划左侧方运动, 其关键点如图 5(a) 所示, A 点下颌处于牙尖交错位, B 和 F 点处下颌下降 0.5 mm, C 点和 E 点分别为开口相和闭口相水平方向极限位置, D 点处下颌竖直方向位移最大.

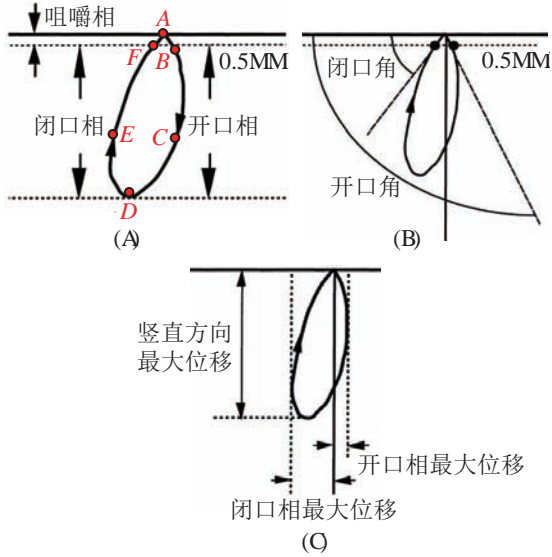


图 5 下颌侧方运动时的切牙轨迹

Fig.5 Incisor trajectory during mandibular lateral movement

依据人体颞下颌关节运动理论, 确定咀嚼机器人 4 个独立位姿参数的变化规律为: 在切牙从 A 经 B, C 到达 D 的过程中, X_{01}, X, β 从 0 变化到最大值 $X_{01\max}, X_{\max}, \beta_{\max}$, 在从 D 经 E, F 到达 A 的过程中, 减小到 0; 对于 Y , 从 A 到 C 时, Y 从 0 增大到开口过程中的最大值 $Y_{\max0}$, 从 C 到 D 时, Y 减小到 0, 从 D 到 E 时, Y 从 0 增大到闭口过程中的最大值 Y_{\maxc} , 从 E 到 A 时, Y 减小到 0.

在 D 点, 由式 (2) 可推导切牙竖直方向最大位移为

$$D_V = Z_I - [-s\beta_{\max} \cdot X_I + (c\beta_{\max} \cdot s\alpha) \cdot Y_I + (c\beta_{\max} \cdot c\alpha) \cdot Z_I + Z] \quad (7)$$

联合式 (3) ~ (5) 和 (7), 可知若 $X_{01\max}, X_{\max}, D_V$ 已知, 可计算 β_{\max} .

在 B 点, 下颌开口角:

$$\theta_{op} = \pi - \arctan \frac{0.5}{Y_B - Y_I} \quad (8)$$

在 F 点, 下颌闭口角:

$$\theta_{cl} = \arctan \frac{0.5}{Y_I - Y_F} \quad (9)$$

在 C 点, 开口相水平位移:

$$D_{op} = (s\gamma \cdot c\beta) \cdot X_I + (c\gamma \cdot c\alpha + s\gamma \cdot s\beta \cdot s\alpha) \cdot Y_I + (-c\gamma \cdot s\alpha + s\gamma \cdot s\beta \cdot c\alpha) \cdot Z_I + Y - Y_I \quad (10)$$

在 E 点, 闭口相水平位移:

$$D_{cl} = Y_I - (s\gamma \cdot c\beta) \cdot X_I - (c\gamma \cdot c\alpha + s\gamma \cdot s\beta \cdot s\alpha) \cdot Y_I - (-c\gamma \cdot s\alpha + s\gamma \cdot s\beta \cdot c\alpha) \cdot Z_I - Y \quad (11)$$

综合分析式 (8) ~ (11) 可知, 开口角、闭口角、竖直方向最大位移及水平方向最大位移均与 Y 有关, 再考虑到 Y 方向位移与其他独立位姿参数没有耦合, 因此将下颌在各个关键点的 X_{01}, X, β 作为已知量, 推导计算满足轨迹参数的 Y 值, 即可确定下颌在各个关键点的 4 个独立位姿参数.

下颌运动可等效为刚体的运动, 刚体做一般运动时, 刚体内任一点的速度, 等于基点速度与该点随刚体绕基点转动速度的矢量和. 切牙速度为

$$\mathbf{V}_I = \mathbf{V}_0 + \boldsymbol{\omega} \times \boldsymbol{\gamma} \quad (12)$$

其中, $\mathbf{V}_0 = (\dot{X} \ \dot{Y} \ \dot{Z})$ 为下颌平移速度向量, $\boldsymbol{\omega} = (\dot{\alpha} \ \dot{\beta} \ \dot{\gamma})$ 为角速度向量, $\boldsymbol{\gamma} = (X_I \ Y_I \ Z_I)$ 为切牙与 Σ_M 原点的矢径.

C 点处, 下颌开口速度最大:

$$V_{mop} = \|\mathbf{V}_{0c} + \boldsymbol{\omega}_c \times \boldsymbol{\gamma}\| \quad (13)$$

E 点处, 下颌闭口速度最大:

$$V_{mcl} = \|\mathbf{V}_{0e} + \boldsymbol{\omega}_e \times \boldsymbol{\gamma}\| \quad (14)$$

由式 (1)、(3) 和 (5) 可知 α 为 X_{01}, X, β 的函数, 记作 $\alpha = f_\alpha(X_{01}, X, \beta)$, 则

$$\dot{\alpha} = \frac{\partial f_\alpha}{\partial X_{01}} \dot{X}_{01} + \frac{\partial f_\alpha}{\partial X} \dot{X} + \frac{\partial f_\alpha}{\partial \beta} \dot{\beta} \quad (15)$$

由式 (1)、(2), 可得 $Z = f_{SR}(X_{01}) + d \cdot \cos \beta \cdot \sin \alpha$, 记作 $Z = f_Z(X_{01}, \alpha, \beta)$, 则

$$\dot{Z} = \frac{\partial f_Z}{\partial X_{01}} \dot{X}_{01} + \frac{\partial f_Z}{\partial \alpha} \dot{\alpha} + \frac{\partial f_Z}{\partial \beta} \dot{\beta} \quad (16)$$

由式 (3) 和 (6) 可得 γ 为 X_{01}, X, β 的函数, 记作 $\gamma = f_\gamma(X_{01}, X, \alpha, \beta)$, 则

$$\dot{\gamma} = \frac{\partial f_\gamma}{\partial X_{01}} \dot{X}_{01} + \frac{\partial f_\gamma}{\partial \alpha} \dot{\alpha} + \frac{\partial f_\gamma}{\partial \beta} \dot{\beta} + \frac{\partial f_\gamma}{\partial X} \dot{X} \quad (17)$$

综合式 (13) ~ (17) 可推导得出下颌开闭口过程中最大速度与 4 个独立位姿参数速度的关系, 因此可通过合理选择 4 个独立位姿参数的取值, 满足下颌运动速度的要求.

将侧方运动轨迹分 2 段进行规划, 第 1 段从 A 经 B, C 到 D , 第 2 段从 D 经 E, F 到 A . 根据轨

迹特征参数计算各个关键点4个独立位姿参数,再采用多项式曲线连接各个关键点4个独立位姿参数值,形成整个开闭口过程中4个独立位姿参数的时间函数曲线.开口轨迹和闭口轨迹规划方法类似,仅描述从A经B、C到D过程.

X_{01}, X, β 变化规律相同,描述X的规划过程.设X的8次多项式时间函数为 $f_X(t) = \mathbf{L}_X \cdot \mathbf{T}$, 其中 \mathbf{L}_X 为系数矩阵, $\mathbf{T} = [t^8 t^7 t^6 t^5 t^4 t^3 t^2 t^1]^T$. X在A、C、D点的时间、位移、速度和加速度分别记为 $t_A, X_A, \dot{X}_A, \ddot{X}_A, t_C, X_C, \dot{X}_C, \ddot{X}_C, t_D, X_D, \dot{X}_D$ 和 \ddot{X}_D , 代入 $f_X(t) = \mathbf{L}_X \cdot \mathbf{T}$, 可得 $\mathbf{L}_X = \mathbf{L}_{BX} \cdot \mathbf{T}_X^{-1}$. 其中, $\mathbf{L}_{BX} = [X_A \dot{X}_A \ddot{X}_A X_C \dot{X}_C \ddot{X}_C X_D \dot{X}_D \ddot{X}_D]$, $\mathbf{T}_X = [T(t_A) \dot{T}(t_A) \ddot{T}(t_A) T(t_C) \dot{T}(t_C) \ddot{T}(t_C) T(t_D) \dot{T}(t_D) \ddot{T}(t_D)]$. 同理,可规划 X_{01} 和 β 的时间函数.

通过运动学逆解可推导出实现咀嚼机器人下颌4个独立位姿参数 X_{01}, X, β, Y 多项式时间函数的6组驱动.

4 冗余驱动空间并联机器人驱动力优化分配 (Driving force optimal distribution of an actuation redundant spatial parallel robot)

4.1 基于拉格朗日方程和虚功原理的动力学模型

采用第二类拉格朗日方程建立咀嚼机器人的动力学方程:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\mathbf{q}}} \right) - \frac{\partial L}{\partial \mathbf{q}} = \mathbf{Q}_d + \mathbf{Q}_c \quad (18)$$

其中, L 为拉格朗日函数,等于系统动能与势能之差; \mathbf{q} 为独立的广义坐标位置矢量; $\dot{\mathbf{q}}$ 为独立的广义坐标速度矢量; \mathbf{Q}_d 为映射到广义坐标上的广义驱动力; \mathbf{Q}_c 为映射到广义坐标上的广义咀嚼力.

铰运循环下,6组驱动力 $\mathbf{f} = [f_1 f_2 f_3 f_4 f_5 f_6]^T$, 咀嚼力 $\mathbf{F}_c = [F_{cx} F_{cy} F_{cz}]^T$, 取广义坐标为 X_{01}, Y, β 和 γ , 利用虚功原理可将驱动力和咀嚼力映射到4个广义坐标中,计算 \mathbf{Q}_d 和 \mathbf{Q}_c :

$$\begin{aligned} \mathbf{Q}_c &= [Q_{cx01} \quad Q_{cx} \quad Q_{cy} \quad Q_{c\beta}]^T \\ \mathbf{Q}_d &= [Q_{dx01} \quad Q_{dx} \quad Q_{dy} \quad Q_{d\beta}]^T \end{aligned}$$

广义虚位移 $\delta \mathbf{X}$ 下,6组驱动力所作虚功 δW_{dx} 可以表示为

$$\delta W_{dx} = \sum_{i=1}^6 (f_i \cdot \frac{\partial S_i}{\partial X} \cdot \delta X) \quad (19)$$

其中, S_i 是移动副的位移, $i = 1, 2, \dots, 6$.

δW_{dx} 还可以写成:

$$\delta W_{dx} = Q_{dx} \cdot \delta X \quad (20)$$

联立式(19)和(20),可得

$$Q_{dx} = \sum_{i=1}^6 \left(\frac{\partial S_i}{\partial X} \cdot f_i \right) \quad (21)$$

设咀嚼力 \mathbf{F}_c 作用点在 Σ_G 下的坐标为 $\mathbf{P}_a = [X_p \quad Y_p \quad Z_p]^T$, 广义虚位移 $\delta \mathbf{X}$ 下,咀嚼力所作虚功 δW_{cx} 可以表示为

$$\delta W_{cx} = F_{cx} \cdot \frac{\partial X_p}{\partial X} \cdot \delta X + F_{cy} \cdot \frac{\partial Y_p}{\partial X} \cdot \delta X + F_{cz} \cdot \frac{\partial Z_p}{\partial X} \cdot \delta X \quad (22)$$

δW_{cx} 还可以表示为

$$\delta W_{cx} = Q_{cx} \cdot \delta X \quad (23)$$

联合式(22)和(23)可得

$$Q_{cx} = F_{cx} \cdot \frac{\partial X_p}{\partial X} + F_{cy} \cdot \frac{\partial Y_p}{\partial X} + F_{cz} \cdot \frac{\partial Z_p}{\partial X} \quad (24)$$

再将咀嚼力和驱动力映射到其他3个独立广义坐标,得到的冗余驱动并联机器人完整的动力学方程如下:

$$\mathbf{Q}_L = \mathbf{G}_c \cdot \mathbf{F}_c + \mathbf{G}_f \cdot \mathbf{f} \quad (25)$$

其中,

$$\mathbf{G}_f = \begin{bmatrix} \frac{\partial S_1}{\partial X_{01}} & \frac{\partial S_2}{\partial X_{01}} & \frac{\partial S_3}{\partial X_{01}} & \frac{\partial S_4}{\partial X_{01}} & \frac{\partial S_5}{\partial X_{01}} & \frac{\partial S_6}{\partial X_{01}} \\ \frac{\partial S_1}{\partial X} & \frac{\partial S_2}{\partial X} & \frac{\partial S_3}{\partial X} & \frac{\partial S_4}{\partial X} & \frac{\partial S_5}{\partial X} & \frac{\partial S_6}{\partial X} \\ \frac{\partial S_1}{\partial Y} & \frac{\partial S_2}{\partial Y} & \frac{\partial S_3}{\partial Y} & \frac{\partial S_4}{\partial Y} & \frac{\partial S_5}{\partial Y} & \frac{\partial S_6}{\partial Y} \\ \frac{\partial S_1}{\partial \beta} & \frac{\partial S_2}{\partial \beta} & \frac{\partial S_3}{\partial \beta} & \frac{\partial S_4}{\partial \beta} & \frac{\partial S_5}{\partial \beta} & \frac{\partial S_6}{\partial \beta} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{Q}_L = \begin{bmatrix} \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{X}_{01}} \right) - \frac{\partial L}{\partial X_{01}} \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{X}} \right) - \frac{\partial L}{\partial X} \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{Y}} \right) - \frac{\partial L}{\partial Y} \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\beta}} \right) - \frac{\partial L}{\partial \beta} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{Q}_c = \begin{bmatrix} \frac{\partial X_p}{\partial X_{01}} & \frac{\partial Y_p}{\partial X_{01}} & \frac{\partial Z_p}{\partial X_{01}} \\ \frac{\partial X_p}{\partial X} & \frac{\partial Y_p}{\partial X} & \frac{\partial Z_p}{\partial X} \\ \frac{\partial X_p}{\partial Y} & \frac{\partial Y_p}{\partial Y} & \frac{\partial Z_p}{\partial Y} \\ \frac{\partial X_p}{\partial \beta} & \frac{\partial Y_p}{\partial \beta} & \frac{\partial Z_p}{\partial \beta} \end{bmatrix}$$

4.2 基于遗传算法的驱动力优化分配数学模型

咀嚼机器人的动力学方程含有6组驱动和4个约束,具有冗余驱动的特点.给定运动及咬合力后,每条支链的驱动力具有无数组解,因此可选择合理的优化目标采用遗传算法对驱动力进行优化分

配, 使咀嚼机器人既能输出义齿测试所需咬合力, 又能使得机构性能达到最佳.

根据人体口颌系统生物力学的研究成果, 本文选取 6 组驱动力 2 范数最小和颞下颌关节内力 2 范数最小 2 种优化准则进行驱动力优化分配. 数学模型如下:

优化变量: 6 组驱动力 $f_i, i = 1, 2, \dots, 6$.

优化目标:

(1) 6 组驱动力 2 范数最小, 简记 MME:

$$\min F_1 = \sum_{i=1}^6 f_i^2 \quad (26)$$

(2) 颞下颌关节内力 2 范数最小, 简记 MJL:

$$\min F_2 = F_{Ltmj}^2 + F_{Rtmj}^2 \quad (27)$$

约束: $\mathbf{Q}_L = \mathbf{G}_c \cdot \mathbf{F}_c + \mathbf{G}_f \cdot \mathbf{f}$.

遗传算法具有较好的全局搜索能力^[12], 本文采用遗传算法对上述优化模型进行求解. 适应度函数定义为

$$f_G = \sum_{i=1}^6 \eta_i f_i^2 + \sigma_1 F_{Ltmj}^2 + \sigma_2 F_{Rtmj}^2 \quad (28)$$

其中, f_G 为基因适合度指标, η_i 为 6 组驱动力的加权因子, σ_1, σ_2 为颞下颌关节内力的加权因子.

加权因子表征算法对各力要求的严格程度. 如果优化目标为 MME, 那么 $\eta_i \neq 0, \sigma_1 = \sigma_2 = 0$. 如果优化目标为 MJL, 那么 $\eta_i = 0, \sigma_1 \neq 0, \sigma_2 \neq 0$.

5 殆运循环下咀嚼仿真食物实验 (Chewing experiments under occlusion masticatory cycle)

为了验证本文所提出的殆运循环规划和驱动力优化分配方法, 采用硅胶作为仿真食物, 完成咀嚼仿真食物实验.

5.1 仿真食物硅胶质地评估实验

咀嚼仿真食物分析需要利用食物的力-变形关系曲线, 计算作用在牙齿上的咬合力, 将其输入到冗余驱动咀嚼机器人的驱动力优化分配数学模型中, 求解 6 组驱动力.

本文选择硅胶作为仿真食物, 利用 3D 打印机打印模具, 浇铸的 10 mm×10 mm×10 mm 样品如图 6 所示. 从样品中挑选 6 粒, 利用英国 SMSTA 公司的 TA.XT Plus 质构仪以 0.5 mm/s 的速度对其进行压缩实验 (图 7), 实验结果如图 8 所示.



图 6 硅胶样品

Fig.6 Silicon rubber sample

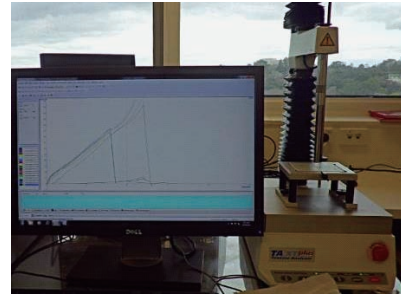


图 7 TA.XT Plus 食品质构仪

Fig.7 TA.XT Plus food texture analyser

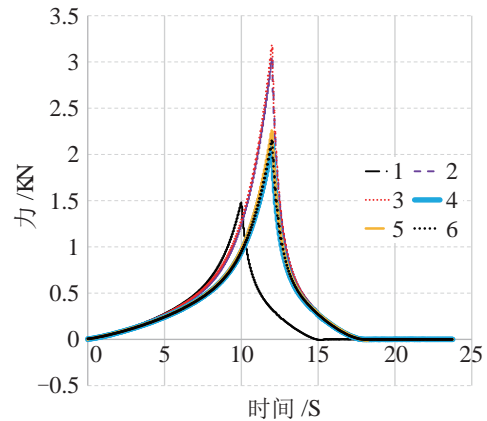


图 8 硅胶力-时间曲线

Fig.8 Silicon rubber force-time curve

将压缩力与时间的关系曲线, 转换成压缩力 f_{com} 与变形量 χ 的关系曲线, 采用多项式曲线拟合法对 6 组实验数据进行处理, 得到的仿真食物硅胶力-变形关系曲线如下:

$$f_{com}(\chi) = -(1.59e-5) \cdot \chi^8 + (3.5e-4) \cdot \chi^7 - (2.8e-3) \cdot \chi^6 + 0.011 \cdot \chi^5 - 0.023 \cdot \chi^4 + 0.019\chi^3 + 0.015\chi^2 + 0.049\chi \quad (29)$$

5.2 殆运循环轨迹

捣碎运动比较简单, 本文着重研究磨细运动. 参考文献 [11] 利用医学实验获得的咀嚼运动参数, 并结合本文所采用的仿真食物尺寸, 确定殆运循环参数如表 1 所示.

采用第 3 节所提出的后牙殆运循环参数化仿生规划方法, 对咀嚼机器人进行 2 个周期的殆运循

环规划. 切牙和磨牙的运动轨迹如图9所示, 从图中可以看出磨牙在水平和垂直方向的位移均小于切牙, 两者运动轨迹形状类似, 均在冠状面呈泪滴状, 在矢状面为一条倾斜的曲线.

表1 殆运循环特征参数

Tab.1 Characteristic parameters of occlusion masticatory cycle

参数	
开口角 / (°)	60.8
闭口角 / (°)	113.1
开口相水平位移 / mm	0.75
闭口相水平位移 / mm	10
最大竖直位移 / mm	20
开口相时长 / s	0.31
闭口相时长 / s	0.51
咬合相时长 / s	0.18
最大开口速度 / (mm/s)	151
最大闭口速度 / (mm/s)	84

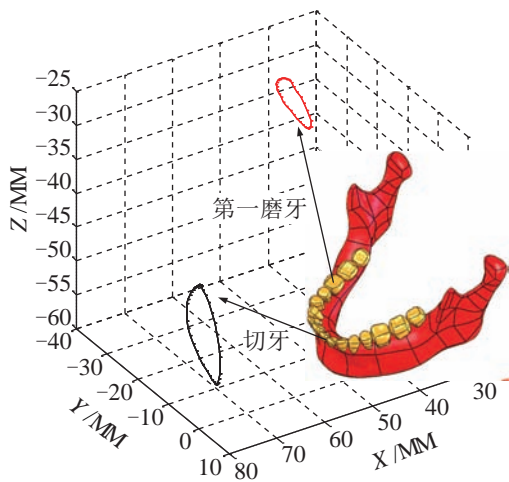


图9 切牙和磨牙的规划轨迹

Fig.9 Planned trajectories of incisor and molar

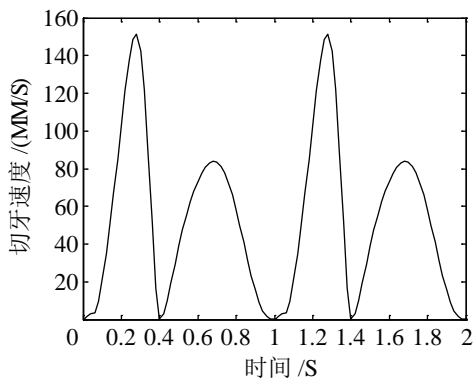


图10 切牙速度

Fig.10 Incisor velocity

殆运循环中, 切牙的运动速度变化如图10所示. 开口最大速度为151 mm/s, 闭口最大速度为

84 mm/s. 下颌自牙尖交错位向下开口运动时, 运动速度逐渐加快, 近最大开口位时运动速度缓慢趋于静止. 闭口运动开始, 下颌上升, 速度复又加快. 闭口运动将近咬合接触时运动速度缓慢, 近牙尖交错殆时, 运动速度减缓趋于静止不动. 切牙运动速度的最大值与给定的最大值一致, 且其变化规律与成人咀嚼轨迹特征相符.

由下颌4个独立位姿参数 X_{01} 、 Y 、 β 、 γ 和两侧颞下颌关节的运动方程式(1)~(6)可推导出机器人下颌的平移参数(X 、 Y 、 Z)和旋转参数(滚动角 α 、俯仰角 β 、偏航角 γ), 分别如图11和图12所示.

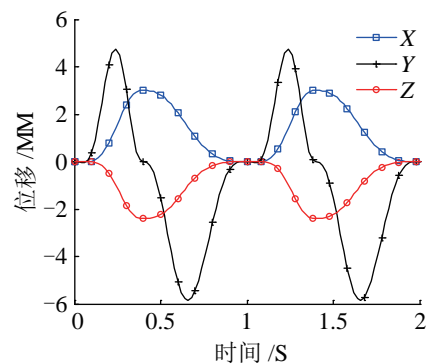


图11 下颌平移参数

Fig.11 Mandible translational parameters

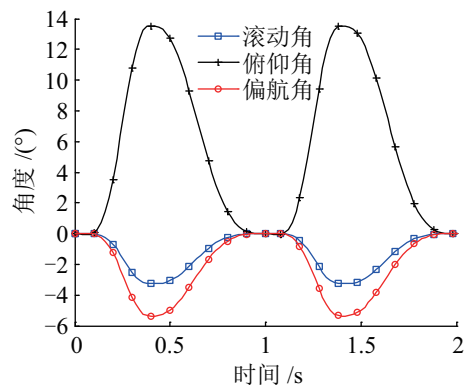


图12 下颌旋转参数

Fig.12 Mandible rotational parameters

从图11可以看出, X 在开口过程中从0增加到3 mm, 在闭口过程又减小到0. Y 在开口过程中从0增加到4.8 mm再逐渐减小到0, 在闭口过程中从0变化到-5.8 mm再增大到0. Z 在开口过程中从0变化到-2.5 mm, 在闭口过程中又增大到0. 下颌坐标系 Σ_M 的原点在开口过程中向前向右向下运动, 在闭口过程中向后向左向上运动. 从图12可以看出, 下颌开口角(俯仰角)、滚动角、偏航角的最大值分别为13.6°、3.5°和5.8°. 开口角最大、偏航角次之、滚动角最小. 开口过程中, 下颌向下向左

旋转, 闭口过程中, 下颌向上向右旋转. 殆运循环中, 机器人下颌的运动方式与人类左侧咀嚼运动中下颌运动形式一致.

殆运循环中, 两侧髁突的运动轨迹如图 13 所示. 左侧为工作侧, 右侧为非工作侧, 工作侧髁突沿关节面向后运动 1 mm, 非工作侧髁突沿关节面向前滑移 6.5 mm. 髁突的运动规律与人类颞下颌关节的运动形式一致.

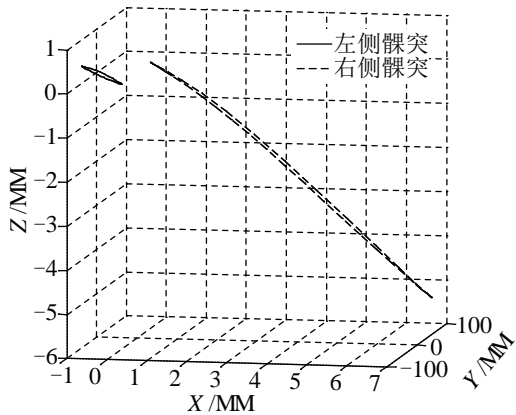


图 13 髁突轨迹

Fig.13 Condylar trajectories

图 14 描述了殆运循环下利用咀嚼机器人的运动学模型推导出的 6 组驱动 (移动副) 位移变化曲线. 6 组位移曲线均是光滑连续变化的.

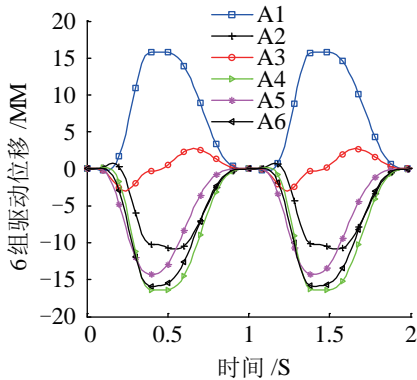


图 14 6 组驱动位移

Fig.14 6 actuation displacements

利用美国 Delta Tau 公司的 PMAC2 PCI 多轴运动控制卡及其附件 ACC-8S 搭建咀嚼机器人控制系统, 如图 15 所示, 完成殆运循环轨迹验证实验.

以图 14 中 6 组移动副位移为输入, 将其转化为电机的脉冲输入, 采用位置控制模式控制咀嚼机器人完成殆运循环实验. 机器人位姿变化如图 16 所示, 6 组电机的驱动如图 17 所示. 从图 17 可以看出, 6 组电机的最大转速分别为 1200 r/min、1100 r/min、380 r/min、1220 r/min、2100 r/min、

2900 r/min. 最大扭矩分别为额定扭矩的 15%、9%、11%、9%、8%、12%. 实验结果表明, 咀嚼机器人样机可实现采用后牙殆运循环参数化仿生规划方法得到的殆运循环轨迹.

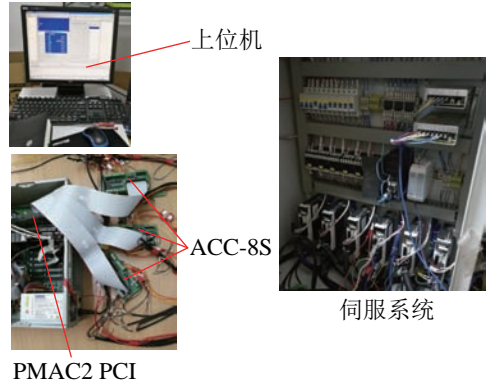
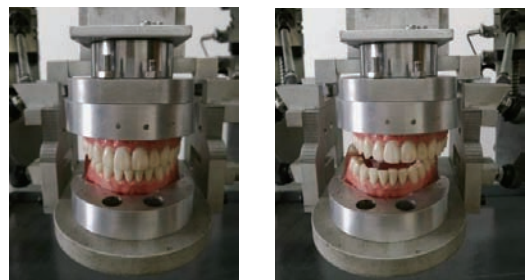


图 15 机器人控制系统

Fig.15 Robot control system

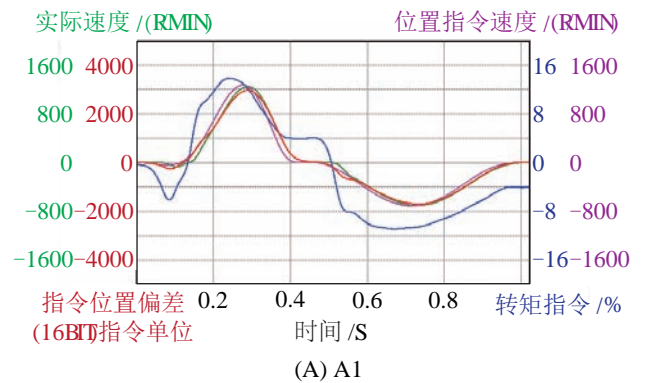


(A) 牙尖交错位

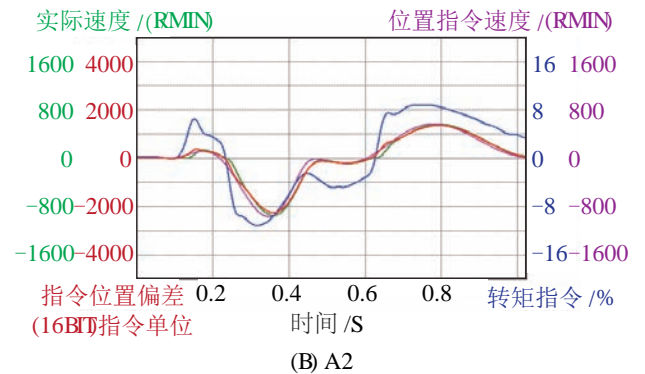
(B) 侧方殆

图 16 殆运实验

Fig.16 Occlusion movement experiment



(A) A1



(B) A2

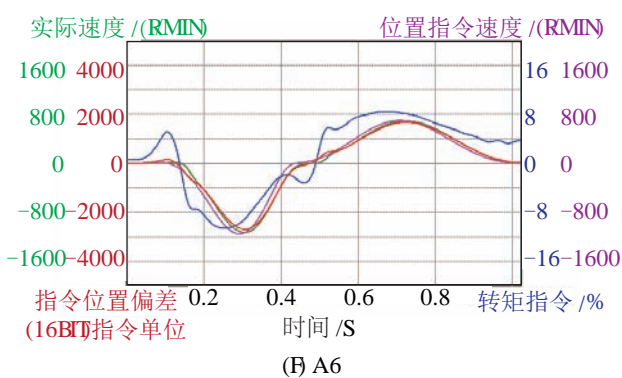
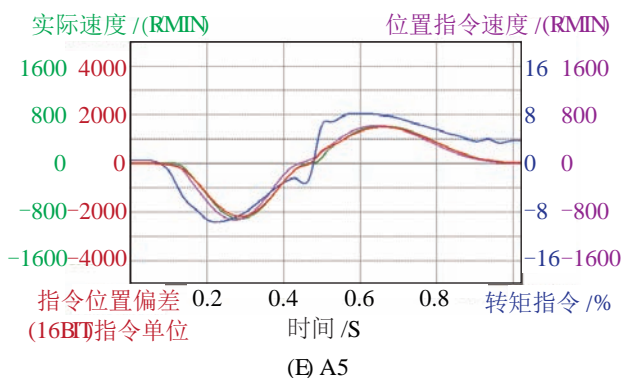
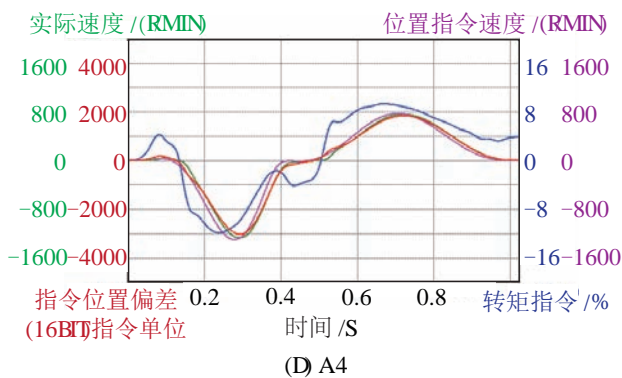
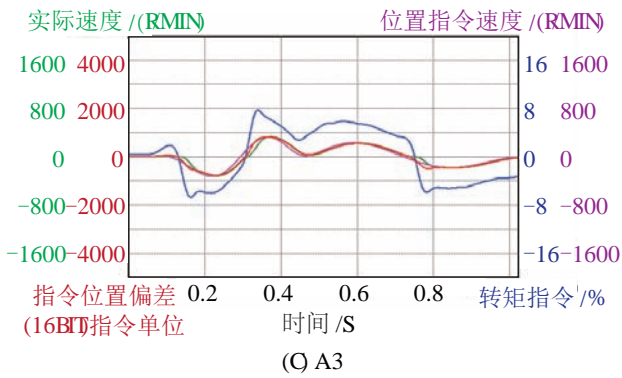


图 17 6 组电机的驱动
Fig.17 Actuation of 6 motors

5.3 不加仿真食物的舾运循环驱动力优化分配

图 18 和图 19 描述了优化目标为 MME 的驱动力优化分配结果. 6 组驱动力的最大值分别为 35 N、41 N、23 N、57 N、24 N、53 N. 左侧颞下颌关节内力最大值为 70 N, 右侧最大值为 150 N.

图 20 和图 21 描述了优化目标为 MJL 的驱动力优化分配结果, 6 组驱动力的最大值分别为 342 N、167 N、569 N、554 N、261 N、346 N. A3、A4 明显大于其他 4 组驱动. 左右侧颞下颌关节内力最大值不超过 1.2 N. 优化目标为 MME 得到的颞下颌关节内力虽然大于 MJL 得到的颞下颌关节内力, 但在人类颞下颌关节内力范围之内^[13], 且 6 组驱动力最大值约为 MJL 得到的 6 组驱动力最大值的 10%, 功耗较低, 因此对于不加载仿真食物的舾运循环, 优化目标 MME 得到的驱动力优化分配结果更为合理.

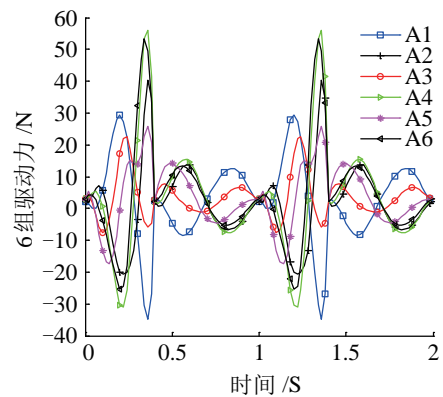


图 18 无食物的 6 组驱动力 (MME)
Fig.18 6 actuation forces without food (MME)

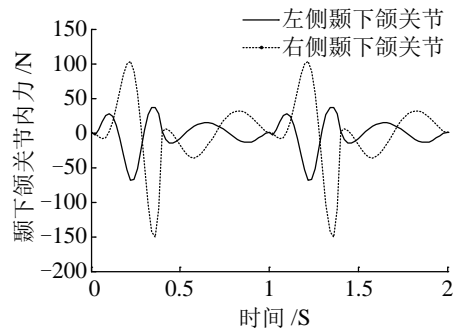


图 19 无食物的颞下颌关节内力 (MME)
Fig.19 TMJ forces without food (MME)

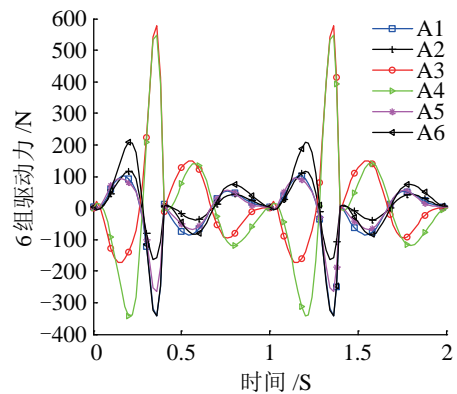


图 20 无食物的 6 组驱动力 (MJL)
Fig.20 6 actuation forces without food (MJL)

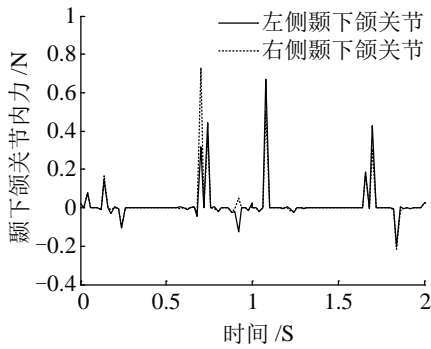


图 21 无食物的颞下颌关节内力 (MJL)
Fig.21 TMJ forces without food (MJL)

5.4 咀嚼仿真食物硅胶的颌运循环驱动力优化分配

第 1 个颌运循环闭口过程中, 在第一磨牙上加载仿真食物硅胶, 随着机器人下颌向上运动, 上、下磨牙之间的垂直距离减小, 小于 10 mm 时, 硅胶发生变形, 产生力的效应. 第 2 个颌运循环开口过程中硅胶回弹, 力的效应逐渐减小到 0, 闭口过程开始前从下颌上移除硅胶.

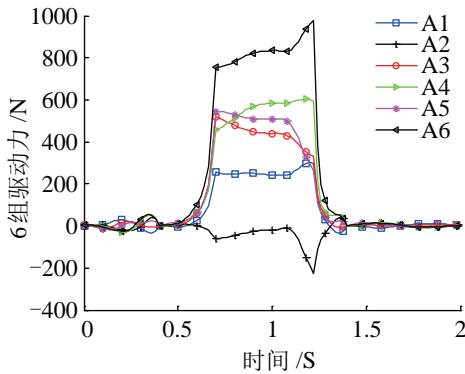


图 22 咀嚼硅胶的 6 组驱动力 (MME)
Fig.22 6 actuation forces when chewing silicon rubber (MME)

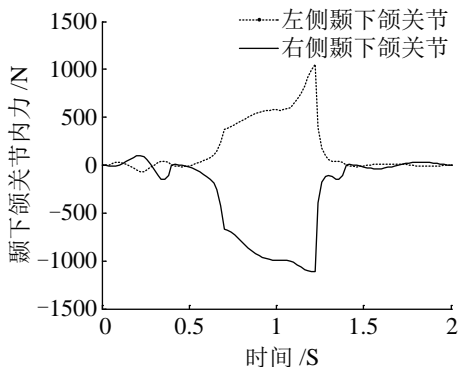


图 23 咀嚼硅胶的颞下颌关节内力 (MME)
Fig.23 TMJ forces when chewing silicon rubber (MME)

图 22 和图 23 描述了优化目标为 MME 时的驱动力优化分配结果. 6 组驱动力的最大值分别为 285 N、212 N、480 N、605 N、550 N、986 N. A6

最大, A3、A4、A5 接近, A1 次之, A2 较小. 左、右侧颞下颌关节内力最大值相近, 都在 1000 N 以上, 但力的方向相反. 图 24 和图 25 描述了优化目标为 MJL 时的驱动力优化分配结果, 6 组驱动力的最大值分别为 483 N、1361 N、1804 N、3197 N、500 N、920 N. A4、A3 较大, A6、A2 次之, A5、A1 较小. 优化目标为 MME 时得到的 6 组驱动力最大值约为优化目标为 MJL 时得到的 6 组驱动力最大值的 31%, 但颞下颌关节内力太大, 远远大于人类颞下颌关节内力, 而优化目标为 MJL 时得到的颞下颌关节内力最大值为 53 N, 在人类颞下颌关节内力范围之内^[13]. 对于咀嚼硅胶颌运循环, 优化目标为 MJL 时得到的驱动力优化结果更为合理.

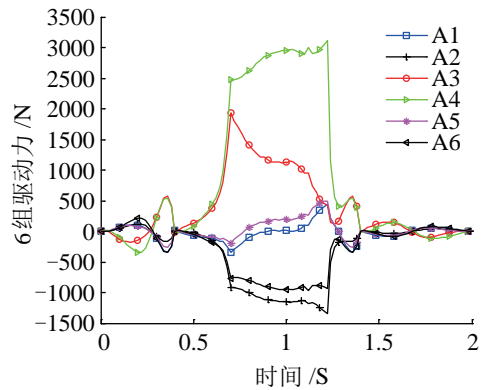


图 24 咀嚼硅胶的 6 组驱动力 (MJL)
Fig.24 6 actuation forces when chewing silicon rubber (MJL)

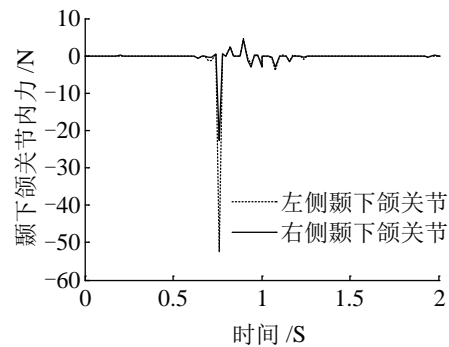


图 25 咀嚼硅胶的颞下颌关节内力 (MJL)
Fig.25 TMJ forces when chewing silicon rubber (MJL)

6 结论 (Conclusion)

(1) 基于 6PUS-2HKP 空间冗余驱动并联机器人, 设计了可安装牙模的仿生上颌、下颌结构, 搭建了可进行个性化成品义齿性能测试的咀嚼机器人.

(2) 提出了一种基于颞下颌关节运动理论的后牙颌运循环参数化仿生规划方法, 分别通过咀嚼仿真食物实验和颌运循环样机实验进行了验证. 咀嚼机器人切牙运动轨迹形状、切牙运动速度变化规

律、髁突运动形式等均与人类咀嚼运动一致，充分证明了所提出的规划方法的仿生性。

(3) 建立了基于遗传算法的驱动力优化分配数学模型，通过咀嚼仿真食物实验验证了其可行性。不加载仿真食物时以驱动力 2 范数最小为优化目标得到的下颌受力较为合理，加载仿真食物时以颞下颌关节内力 2 范数最小为优化目标得到的下颌受力较为合理。

在本文研究的基础上，需要进一步研究空间冗余驱动并联咀嚼机器人的动力学控制问题。

参考文献 (References)

- [1] Wang G F, Cong M, Xu W L, et al. A biomimetic chewing robot of redundantly actuated parallel mechanism[J]. *Industrial Robot*, 2015, 42(2): 103-109.
- [2] 马德军, 王加森, 卢慧, 等. 基于三次 B 样条曲线的食品物性检测系统的仿生咀嚼运动轨迹规划 [J]. *机械制造*, 2015, 53(8): 6-9.
Ma D J, Wang J S, Lu H, et al. Bionic mastication movement planning based on cubic B-spline curve of an detecting instrument for physical foodstuff properties[J]. *Machinery*, 2015, 53(8): 6-9.
- [3] Chen C, Xu W L, Shang J Z. Distributed-torque-based independent joint tracking control of a redundantly actuated parallel robot with two higher kinematic pairs[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2016, 63(2): 1062-1070.
- [4] Alemzadeh K, Raabe D. Prototyping artificial jaws for the bristol dento-munch robo-simulator – A parallel robot to test dental components and materials[C]//29th Annual International Conference of the IEEE Engineering-in-Medicine-and-Biology Society. Piscataway, USA: IEEE, 2007: 1453-1456.
- [5] Wen H Y, Xu W L, Cong M. Kinematic model and analysis of an actuation redundant parallel robot with higher kinematic pairs for jaw movement[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2015, 62(3): 1590-1598.
- [6] 温海营, 丛明, 王贵飞, 等. 冗余驱动仿下颌运动机器人工作空间分析及试验验证 [J]. *机器人*, 2015, 37(3): 286-297.
Wen H Y, Cong M, Wang G F, et al. Workspace analysis and experimental verification of a redundantly actuated jaw movement robot[J]. *Robot*, 2015, 37(3): 286-297.
- [7] 杜婧, 丛明, 温海营, 等. 冗余驱动仿下颌运动机器人的机构设计及轨迹规划 [J]. *机器人*, 2015, 37(1): 43-52.
Du J, Cong M, Wen H Y, et al. Mechanism design and trajectory planning of a redundantly actuated parallel robot for jaw movement [J]. *Robot*, 2015, 37(1): 43-52.
- [8] 魏玉华, 杨苗. 咀嚼模拟机设计与应用进展 [J]. *口腔医学研究*, 2013, 29(9): 881-882.
Wei Y H, Yang M. Progress of design and application of chewing simulation machines[J]. *Journal of Oral Science Research*, 2013, 29(9): 881-882.
- [9] 窦玉超, 姚建涛, 高思慧, 等. 冗余驱动并联机器人动力学建模与驱动力协调分配 [J]. *农业机械学报*, 2014, 45(1): 293-300.
Dou Y C, Yao J T, Gao S H, et al. Dynamic modeling and driving force coordinate distribution of the parallel robot with redundant actuation[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2014, 45(1): 293-300.
- [10] Shang W W, Cong S. Adaptive compensation of dynamics and friction for a planar parallel manipulator with redundant actuation[C]//IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics. Piscataway, USA: IEEE, 2010: 507-512.
- [11] Ogawa T, Ogawa M, Koyano K. Different responses of masticatory movements after alteration of occlusal guidance related to individual movement pattern[J]. *Journal of Oral Rehabilitation*, 2001, 28(9): 830-841.
- [12] 祁若龙, 周维佳, 王铁军. 一种基于遗传算法的空间机械臂避障轨迹规划方法 [J]. *机器人*, 2014, 36(3): 263-270.
Qi R L, Zhou W J, Wang T J. An obstacle avoidance trajectory planning scheme for space manipulators based on genetic algorithm[J]. *Robot*, 2014, 36(3): 263-270.
- [13] Koolstra J H, van Eijden, T M G J, Weijs W A, et al. A 3-dimensional mathematical model of the human masticatory system predicting maximum possible bite forces[J]. *Journal of Biomechanics*, 1988, 21(7): 563-576.

作者简介:

- 王贵飞 (1986 -), 女, 博士生. 研究领域: 仿生机器人及其控制, 并联机器人.
- 丛明 (1963 -), 男, 博士, 教授. 研究领域: 机构与机器人学, 仿生机器人及其控制, 工业机器人技术与应用, 智能控制.
- 徐卫良 (1961 -), 男, 博士, 教授. 研究领域: 机器人智能技术, 机电一体化智能技术, 机电一体化产品设计.