

[研究·设计]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2016.03.001

食品检测咀嚼机器人工作空间研究

韩敬虎, 俞经虎

(江南大学机械工程学院, 江苏 无锡 214122)

摘要:为了提高食品检测效率,改善食品检测精度,增加食品检测的客观性,文章介绍了一种基于6-UPS机构的咀嚼机器人,介绍了咀嚼机器人的结构原理,求解了机构的运动学逆解,分析了机构的工作空间影响因素,利用MATLAB编程求得机构在定姿态下的工作空间。空间轮廓图表明,该机构在定姿态下能到达人类全部真实咀嚼空间,机构设计可靠,能够模拟人类咀嚼行为对食品进行检测。

关键词:食品检测;咀嚼机器人;工作空间;MATLAB仿真

中图分类号:TH122

文献标志码:A

文章编号:1005-2895(2016)03-0001-04

Study of Chew Food Testing Robot Work Space

HAN Jinghu, YU Jinghu

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

Abstract: In order to improve the efficiency of food testing, improve food testing precision, and increase the objectivity of food testing, this paper introduces a kind of chewing robot based on 6-UPS mechanism, presenting the structure principle of chewing robot, solving inverse kinematics of the mechanism, analyzing the factors that influence the work space of the mechanism. With the help of the MATLAB programming, the work space under fixed position was calculated. Space profile shows that the mechanism under fixed position can reach to all the real human chewing space. The mechanism design is reliable and can process food testing by simulating human chewing on the food.

Key words: food testing; bionic robot; work space; MATLAB simulation

伴随着生活水平的提高,人们对食品的需求越来越多样化,各种食品开发的周期越来越短,而作为食品开发中的重要一环,食品的检测需要更高效、准确、客观。目前市场上针对食品的检测有感官评价与仪器测定2种主流的评价方式,各有不足。感官评价一般就是依靠专家组的评价,其存在一定的主观性且不易标准化,不同的人具有不同的感觉敏感性、嗜好和评判标准,所以评价结果往往不相一致,还受到品尝环境、品尝时间以及品尝者性别年龄等诸多因素的影响;现有食品物性检测仪器检测食品物性数据与感官测试不一致。仪器测量值与口感存在一定的相关性,但这种相关性会受到温度、测试速度、测试样品形状及尺寸的影响^[1-2]。探索一种模拟人类咀嚼感知食品过程的物性

仿生检测方法是当前食品质地检测评价的发展趋势。

本文对一种基于Stewart的6-UPS咀嚼平台工作空间的主要限制因素进行详细分析;基于影响因素,利用MATLAB软件对咀嚼平台进行定姿态工作空间求解,并观察工作空间的点云图形状变化,检验机构仿生性能。

1 咀嚼平台介绍

人类的下颌是在空间里具有6个自由度的平移和转动,仿生人类下颌的运动特性,本文基于6-UPS并联机构设计了仿真咀嚼平台如图1所示。图1中下平台外联支架,起固定作用,6个由伺服电机驱动的驱动杆一端通过虎克铰连接下平台,另一端通过球副连接上平台;上平台上装有载物台,载物台上安装了唾液室和

收稿日期:2015-11-02;修回日期:2016-02-25

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

下颌骨,可根据检测物体的不同,按需要来配制不同的载物台以及唾液室等。上颌骨固定在机架上,由此,通过 6 个电机带动 6 根驱动杆的伸缩,驱动上平台整体做空间 6 自由度的运动,即实现了下颌骨的咀嚼运动。

本文 6-UPS 并联机构由下平台、上平台和 6 个驱动杆组成,共 14 个构件,即 $n = 14$,每个驱动杆与下平台虎克铰(U)连接,与上平台球面副(S)连接,每条支腿中有一个移动副,即 $g = 18$ 。三维空间机构的自由度可以根据 KUTZBACH-GRUBLER 公式计算^[3],则有

$$F = 6 \times (n - g - 1) + \sum_{i=1}^g f_i =$$

$$6 \times (14 - 18 - 1) + (6 \times 2 + 6 \times 1 + 6 \times 3) = 6。$$

式中: F 为机构的自由度数; n 为构件的数目; g 为 n 个构件之间的运动副数目; f_i 为第 i 个运动副的自由度数。

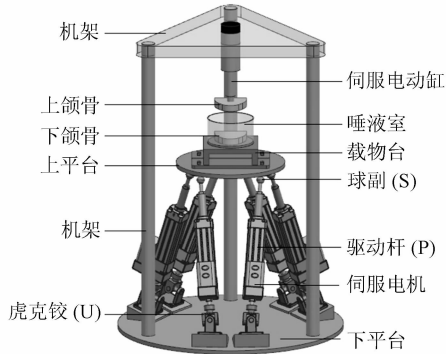


图 1 高仿真咀嚼平台模型

Figure 1 High simulation platform model of chewing

2 咀嚼平台的坐标系建立及运动学逆解

2.1 咀嚼平台坐标系的建立

由生物学可知,人类咀嚼过程中上颌骨保持静止,

$${}^0_p G' = G'(z, \gamma) G'(y, \beta) G'(x, \alpha) = \begin{pmatrix} \cos \gamma & -\sin \gamma & 0 \\ \sin \gamma & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix} =$$

$$\begin{pmatrix} \cos \beta \cdot \cos \gamma & \sin \alpha \cdot \sin \beta \cdot \cos \gamma - \cos \alpha \cdot \sin \gamma & \cos \alpha \cdot \sin \beta \cdot \cos \gamma + \sin \alpha \cdot \sin \gamma \\ \cos \beta \cdot \sin \gamma & \sin \alpha \cdot \sin \beta \cdot \sin \gamma + \cos \alpha \cdot \cos \gamma & \cos \alpha \cdot \sin \beta \cdot \sin \gamma - \sin \alpha \cdot \cos \gamma \\ -\sin \beta & \sin \alpha \cdot \cos \beta & \cos \alpha \cdot \cos \beta \end{pmatrix}。$$

式中: α, β, γ 代表动系 $\{O_1\}$ 分别绕静系 $\{O\}$ x 轴, y 轴, z 轴旋转角度。

已知上铰点 S_i 在动系 $\{O_1\}$ 的位置矢量 S'_i ,则在静系 $\{O\}$ 任意时刻的位置矢量为 $S'_i = (S_{ix} \ S_{iy} \ S_{iz})^T$,根据复合变换可得

$$\begin{pmatrix} S_{ix} \\ S_{iy} \\ S_{iz} \end{pmatrix} = {}^0_p G' \begin{pmatrix} S_{iu} \\ S_{iv} \\ S_{iw} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix},$$

只有下颌骨相对头骨做空间三维运动。故本文主要对此高仿真咀嚼平台的驱动机构实现下颌仿生咀嚼的情况进行研究^[4]。

为了便于后文分析说明与计算,现对咀嚼平台建立如图 2 所示坐标系。

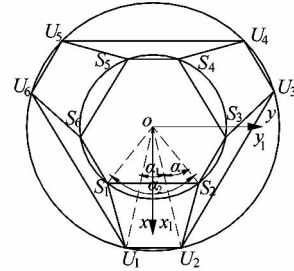


图 2 各坐标系位置关系及上下铰点位置关系

Figure 2 Coordinate position relationship and upper and lower hinge point position

图 2 中静坐标系 $O-xyz$ 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_1 建立与上平台固结的动坐标系 $O_1-x_1y_1z_1$,上下铰点所在圆半径为 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 。

2.2 位置分析

建立好坐标系之后,根据运动学基础的数学知识,就可以描述下颌的运动位姿^[5]。已知动坐标系 $\{O_1\}$ 在静坐标系 $\{O\}$ 下的位置矢量 Q

$$Q = (x \ y \ z)^T。$$

本文采用 RPY 角描述下颌运动姿态,根据旋转矩阵的定义知,动系 $\{O_1\}$ 相对于静系 $\{O\}$ 的旋转矩阵

$$\begin{pmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix} =$$

式中: S_{ix}, S_{iy}, S_{iz} 为上铰点在静坐标系里的坐标, S_{iu}, S_{iv}, S_{iw} 为上铰点在动坐标系里的坐标。

这时 6 个驱动杆的杆长矢量 L'_i 可以在静系 $\{O\}$ 中表示为

$$L'_i = S'_i - U'_i \quad (i = 1, 2, \dots, 6)。$$

下铰点 U_i 在静系 $\{O\}$ 中位置矢量为

$$U'_i = (U_{ix} \ U_{iy} \ U_{iz})^T。$$

故有

$$\mathbf{L}'_i = \begin{pmatrix} L_{ix} \\ L_{iy} \\ L_{iz} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_{ix} - U_{ix} \\ S_{iy} - U_{iy} \\ S_{iz} - U_{iz} \end{pmatrix}。$$

式中: U_{ix}, U_{iy}, U_{iz} 为下绞点在静坐标系里的坐标。从而得到咀嚼平台的6根驱动杆长

$$l_i = \sqrt{(S_{ix} - U_{ix})^2 + (S_{iy} - U_{iy})^2 + (S_{iz} - U_{iz})^2}, \quad (i = 1, 2, \dots, 6),$$

即为咀嚼平台的位置逆解方程。

3 咀嚼平台的工作空间影响因素

3.1 驱动杆行程的限制

该高仿真咀嚼平台的驱动杆是由6个完全相同的伺服驱动缸构成的,电动缸在伺服电机的带动下,自由伸缩,形成移动副。但是伺服电动缸长度的变化是有范围的,用 l_{imin}, l_{imax} 分别表示第 i 个伺服电动缸的最小杆长和最大杆长。该并联机器人的任一伺服电动缸达到极限长度时,根据工作空间的定义,指定参考点也就达到了工作空间的边界。故驱动杆行程 l_i 有

$$l_{imin} \leq l_i \leq l_{imax}, \quad (i = 1, 2, \dots, 6)。$$

3.2 运动副转角的限制

在此高仿真咀嚼平台中,伺服电动缸与上平台、下平台分别通过球面副(S)和虎克铰(U)连接。在实际中,球面副和虎克铰都有一定的转角限制。

运动副转角的限制条件是

$$\begin{cases} \theta_{S_i} \leq \theta_{Smax} \\ \theta_{U_i} \leq \theta_{Umax} \end{cases} \quad (i = 1, 2, \dots, 6)。$$

式中: $\theta_{Smax}, \theta_{Umax}$ 表示球面副、虎克铰允许的最大转角。

3.3 驱动杆之间干涉的限制

为了研究方便,假设各驱动杆都是圆柱形,设其直径为 d ,若 $d_i (i = 1, 2, \dots, 6)$ 表示2个相邻驱动杆中心线段的最短距离,那么满足不发生干涉的条件是^[6-7]:

$$d_i \geq d_{min};$$

$$d_i = \frac{|\mathbf{N}_i \cdot \mathbf{M}_i|}{|\mathbf{N}_i|}。$$

式中: $\mathbf{N}_i = \mathbf{L}'_i \times \mathbf{L}'_{i+1}$, $\mathbf{L}'_i$ 和 $\mathbf{L}'_{i+1}$ 为驱动杆杆长矢量; S_i 和 S_{i+1} 分别为驱动杆上两点, $\mathbf{M}_i$ 为点 S_i 到点 S_{i+1} 的向量。

3.4 定姿态工作空间求解

并联机器人的工作空间是执行器上指定参考点所有可能达到的点的集合^[8]。本文选用的参考点为下切牙的中心点,即动坐标系的原点 O_1 搜索其定姿态工作空间。其程序搜索流程如图3所示。

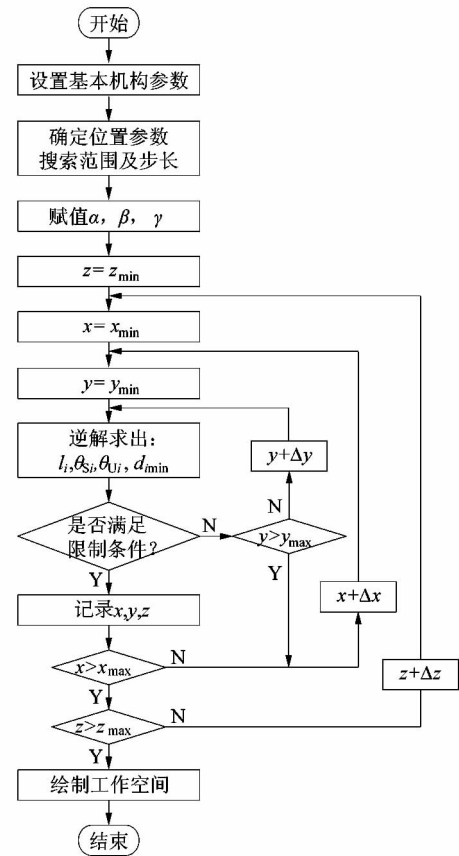


图3 定姿态工作空间搜索流程图

Figure 3 Set posture work flow chart of search space

参照日常生理活动,下颌张合运动是人类咀嚼运动最基本最主要的运动形式之一。故本文主要研究下颌绕铰链轴张开不同角度(β)的工作空间仿真。令 $\alpha = \gamma = 0^\circ$, 当 β 分别取 $0^\circ, 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ$ 时,运行工作空间求解程序,得到工作空间三维边界轮廓图,其输出结果如图4~7所示。

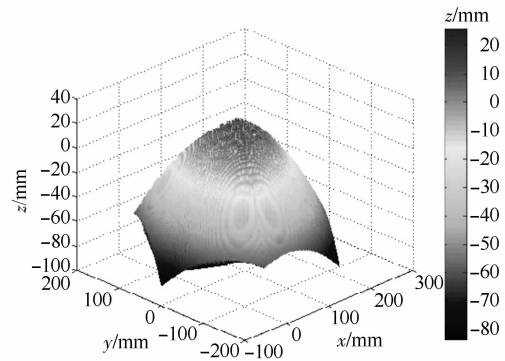


图4 $\beta = 0^\circ$ 时工作空间

Figure 4 $\beta = 0^\circ$ work space

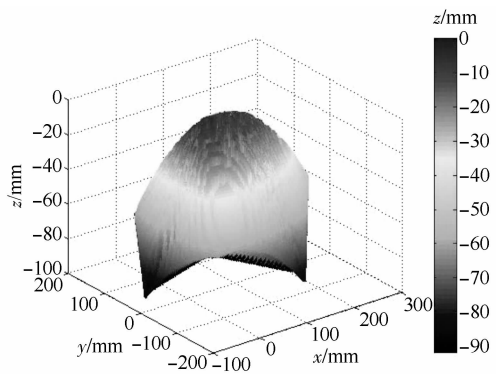


图5 $\beta = 10^\circ$ 时 workspace
Figure 5 $\beta = 10^\circ$ work space

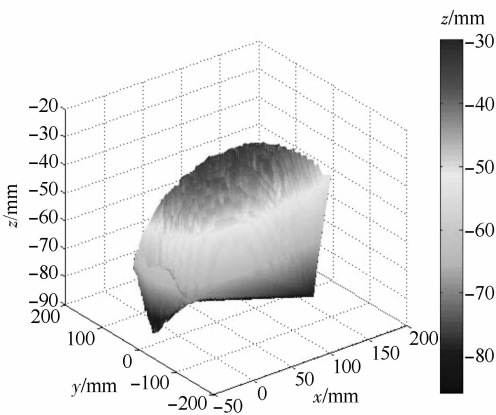


图6 $\beta = 20^\circ$ 时 workspace
Figure 6 $\beta = 20^\circ$ work space

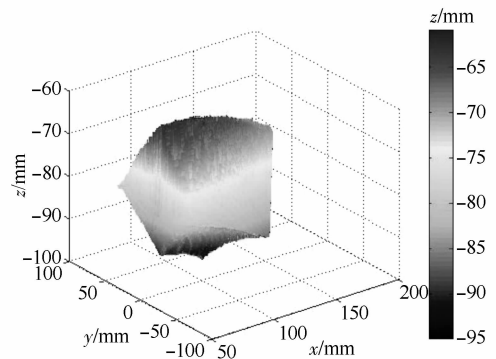


图7 $\beta = 30^\circ$ 时 workspace
Figure 7 $\beta = 30^\circ$ work space

由图4~7可以看出:

1) 受各种约束条件的限制,该咀嚼平台的定位姿

workspace大致呈蘑菇形状,且随着下颌平台张开角度 β 的增大,workspace整体往下移动,workspace的大小呈减小趋势;

2) 不管 β 取何值时,workspace都关于 y 轴对称,这是由于咀嚼平台关于定系 $\{O\}$ 的 y 轴成对称所致;

3) 随着 β 增大,workspace的顶部由尖变成平,说明此时取到 z 较大值的点相对越来越多;

4) 当咀嚼平台处于初始位置时,即 $(\alpha \ \beta \ \gamma) = (0^\circ \ 0^\circ \ 0^\circ)$ 时,workspace达到最大;随着 β 增大, x 轴取值区间逐渐变小(这是由于当 β 增大时 $x < 80 \text{ mm}$ 部分workspace点减少速度较快所致)。

4 结语

本文介绍了咀嚼机器人的结构原理,在求得其反解方程的基础上,结合workspace影响因素,利用MATLAB软件首先对咀嚼平台进行定姿态workspace求解,并观察workspace的点云图形状变化,发现在不同的张开角度时,定姿态workspace的形状的变化规律与人类咀嚼动作一致^[9-10];验证该咀嚼平台完全可以模拟人类咀嚼运动形式。

参考文献:

- [1] YU Jinghu, PEI Gang, ZHANG Yinshi. Reverse kinematics of bionic 6-RSS chewing robot for food mechanical properties measuring [J]. Applied mechanics and materials, 2012, 127: 3-11.
- [2] 李晓峰. 六自由度仿生咀嚼机器人研究[D]. 无锡: 江南大学, 2014: 24-38.
- [3] 宋佳. 仿下颌运动并联机器人的性能分析与参数优化[D]. 大连: 大连理工大学, 2013: 11-27.
- [4] 黄真, 赵永生, 赵铁石. 高等空间机构学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006: 115-323.
- [5] 毕军. 6-PSS 并联机器人的运动学及动力学研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2011: 23-41.
- [6] GOSSELIN C M, PIERRE E S. Development and experimentation of a fast 3-DOF camera-orientating device [J]. International journal robotics research, 1997, 16(5): 619-630.
- [7] GOUTTEFARDE M, GOSSELIN C M. Analysis of the wrench-closure workspace of planar parallel cable-driven mechanisms [J]. IEEE transactions on robotics, 2006, 22(3): 434-445.
- [8] 赵克定, 杨灏泉, 吴盛林. Stewart 平台局部灵活度的解析研究[J]. 宇航学报, 2002, 23(4): 42-46.
- [9] 徐樱华. 实用牙合学[M]. 成都: 四川大学出版社, 1990: 82-92.
- [10] 张震康, 邱蔚六. 口腔颌面外科临床解剖学[M]. 济南: 山东科学技术出版社, 2001: 442-454.