

一种新型烹饪并联机器人位置与工作空间分析

Position and workspace analysis of a novel parallel cooking robot

杨世明 马庆国 郭翠敏

YANG Shi-ming MA Qing-guo GUO Cui-ming

(天津工业大学机械工程学院, 天津 300387)

(School of Mechanical Engineering, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300387, China)

摘要:提出了一种基于新型并联机构的烹饪机器人。首先对人工烹饪时锅具的运动进行分析,设计了旋锅、颠锅、翻锅、倾斜 4 个基本动作;然后依据 4 个基本动作,设计了 2RRPS/SPS 并联机构作为烹饪机器人的工作平台。运用解析几何法求得工作平台位置正解表达式,并利用 MATLAB 软件验证了位置正解表达式的正确性,通过运动仿真验证了该烹饪机器人的有效性。

关键词:烹饪机器人;并联机构;位置分析;工作空间

Abstract: A cooking robot based on a new parallel mechanism is proposed. Firstly, analyzed the movement of the cookware during artificial cooking, and designed four basic actions of rotating the cookware, bumping the cookware, stir fry and tilting the cookware. Then according to the four basic actions, the 2RRPS/SPS parallel mechanism is designed as the working platform of the cooking robot. The analytic geometry method is used to obtain the forward and reverse solution expressions of the working platform, and the MATLAB software is used to analyze the example and exercise simulation to verify the effectiveness of the cooking robot.

Keywords: cooking robot; parallel mechanism; position analysis; workspace

目前中国的烹饪过程主要依靠人工来完成^[1-2],由于个人烹饪水平的不同,烹饪工艺也很难实现一致性,因此市场和家庭迫切需要一款能完成烹饪工艺的烹饪机器人,将烹饪工艺规范化^[3-4]、统一化。

目前国内外的烹饪机器人只能实现简单的搅拌,味道不能够保证,文献[5]提到的自动烹饪锅解决了烹饪的自动化问题,但不能实现炒、熘等中国烹饪工艺的核心技法。文献[6]中提到烹饪并联机器人实现了专业厨师动作要求,但由于自由度少,能实现的锅具运动有限。专利[7]中提到的自动炒菜机伺服机械装置,是可对菜肴进行多种操作加工的

装置,但却未具备物料的自动投放以及中餐核心烹饪工艺过程如划油、晃锅、翻锅等功能。

针对目前烹饪机器人存在的问题,结合烹饪工艺将人工烹饪动作进行分解,最终设计了 2RRPS/SPS 并联机构作为自动烹饪机器人工作平台,并对其进行位置分析和工作空间研究^[8-11]。以期最大程度地模仿人工烹饪动作,保证美味可口的同时人力,有利于烹饪工艺规范化发展。

1 烹饪机器人工作平台

1.1 工作原理

人工烹饪过程中锅具的运动轨迹较为复杂,锅具的运动方向、速度、加速度等特性直接影响着菜肴制作的质量。本研究选取几种最常见的锅具运动轨迹^[12-14]作为烹饪机器人工作平台的运动要求。

(1) 旋锅运动[图 1(a)]:工作平台做圆周运动,目的是使食物与锅壁产生相对滑动,防止黏锅。

(2) 颠锅运动[图 1(b)]:工作平台做前后摆动和上抛的

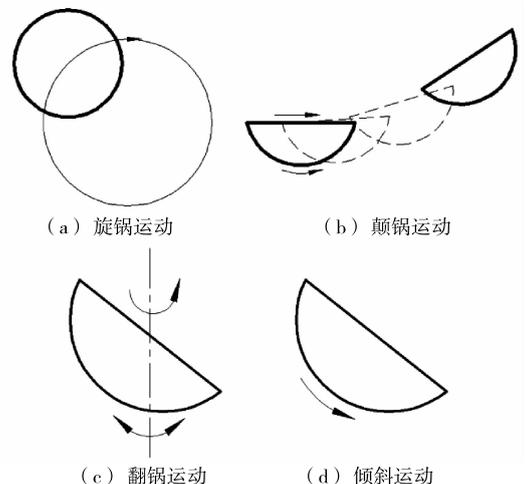


图 1 自动烹饪机器人工作平台工作原理

Figure 1 Working principle of automatic cooking robot working platform

作者简介:杨世明(1960—),男,天津工业大学教授,硕士。

E-mail: Yangshm126@126.com

收稿日期:2018-07-19

复合运动,目的是使食物翻转,搅拌均匀,防止粘锅和使食物受热均匀。

(3) 翻锅运动[图 1(c)]:工作平台轴线绕定轴做旋转运动的同时绕轴线做小幅摆动,目的是使食物沿着锅壁旋转,受热均匀。

(4) 倾斜运动[图 1(d)]:工作平台绕水平轴线做旋转运动,目的是使食物倒出。

1.2 工作平台的设计

根据锅具运动轨迹要求,烹饪机器人工作平台要实现 3 个方向移动和转动。为最大程度模仿人工烹饪动作,实现以上运动轨迹,设计了一个具有 6 自由度的 2RRPS/SPS 新型并联机构作为烹饪机器人的工作平台(图 2)。2 条结构相同的 RRPS 支链和 1 条 SPS 支链沿周向均布在定平台(下)和动平台(上)之间。文中的 R、P、S 分别表示转动副、移动副、球面副。其中转动副 R1 的轴线与定平台垂直,移动副 P1 和转动副 R2 轴线垂直,转动副 R2 轴线和转动副 R1 轴线垂直。

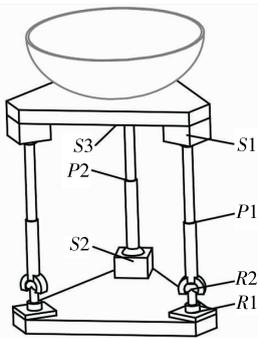


图 2 烹饪机器人工作平台

Figure 2 Cooking robot work platform

图 3 为 2RRPS/SPS 新型并联机构坐标系简图,该机构驱动件包括 3 个驱动杆(杆长分别为 L_1 、 L_2 、 L_3)和 3 个驱动轴(转角分别为 ξ_1 、 ξ_2 、 ξ_3), $B_1B_2B_3$ 构成等边三角形为定平台,边长为 $\sqrt{3}R$,定坐标系 $OXYZ$ 的原点 O 固接于定平台的中心点上, Z 轴垂直于定平台竖直向上, Y 轴平行于 B_2B_3 , X 轴通过 B_1 点,RRPS 支链中 R2 轴线和定平台之间的距离 B_1S_1 、 B_2S_2 均为 S 。 $P_1P_2P_3$ 构成等边三角形为动平台,边

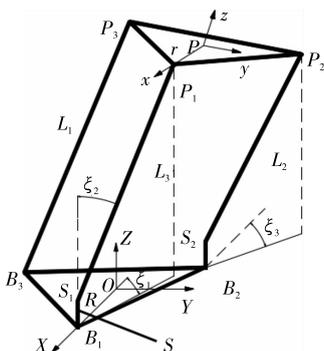


图 3 2RRPS/SPS 新型并联机构坐标系简图

Figure 3 2RRPS/SPS new parallel mechanism coordinate system diagram

长为 $\sqrt{3}r$,动坐标系 $Pxyz$ 原点 P 固接于动平台的中心点上, z 轴垂直于动平台竖直向上, y 轴平行于 P_2P_3 , x 轴通过 P_1 点。 S_1P_1 、 S_2P_2 、 B_3P_3 的距离分别为 L_1 、 L_2 、 L_3 , S_1P_1 、 S_2P_2 在 XOY 面上的投影与 X 轴负方向的夹角分别为 ξ_1 、 ξ_3 , S_1P_1 与 Z 轴正方向的夹角分别为 ξ_2 。

2 工作平台位置分析

2.1 位置反解

已知动平台的位姿,求解驱动件的位置称为机构的反解^[15-17]。目前,并联机构位置分析的主要方法有数值法^[18-20]和解析法^[20-23]。数值法的优点是建立数学模型简单,没有繁琐的数学推导,可求解任何并联机构,缺点是计算量大,速度慢且迭代结果有可能发散,很难求得机构的所有位置解。解析法的优点是不需要初值并且可以求得全部解,能避免奇异问题,缺点是数学推导极为复杂。结合烹饪机器人工作平台的空间结构分布,运用解析几何法,对其进行位置反解。

已知动平台位姿 α 、 β 、 γ 、 0X_P 、 0Y_P 、 0Z_P ,求 3 个驱动杆长度(L_1 、 L_2 、 L_3)和 3 个驱动轴角度(ξ_1 、 ξ_2 、 ξ_3)。根据已知条件和机构几何关系,可求出 P_1 、 P_2 、 P_3 在动坐标系中的坐标值 ${}^P P_1$ 、 ${}^P P_2$ 、 ${}^P P_3$ [式(2)],通过姿态变换矩阵 T [式(3)]可进一步求得 P_1 、 P_2 、 P_3 在定坐标系中的坐标值 ${}^O P_i$ ($i=1,2,3$),即:

$${}^O P_i = T[{}^P P_i \quad 1], \quad (1)$$

$$\begin{cases} {}^P P_1 = [r \quad 0 \quad 0]^T; \\ {}^P P_2 = \left[-\frac{1}{2}r \quad \frac{\sqrt{3}}{2}r \quad 0\right]^T; \\ {}^P P_3 = \left[-\frac{1}{2}r \quad -\frac{\sqrt{3}}{2}r \quad 0\right]^T, \end{cases} \quad (2)$$

$$T = \begin{bmatrix} C\alpha C\beta & C\alpha S\beta S\gamma - S\alpha C\gamma & C\alpha S\beta C\gamma + S\alpha S\gamma & {}^0X_P \\ S\alpha S\beta & S\alpha S\beta S\gamma + S\alpha S\gamma & S\alpha S\beta C\gamma - C\alpha S\gamma & {}^0Y_P \\ -S\beta & C\beta S\gamma & C\beta C\gamma & {}^0Z_P \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

$$S\alpha = \sin\alpha; C\alpha = \cos\alpha; S\beta = \sin\beta; C\beta = \cos\beta; S\gamma = \sin\gamma;$$

$$C\gamma = \cos\gamma.$$

根据烹饪机器人工作平台给定的结构尺寸,可列出驱动杆和驱动轴与 ${}^O P_i$ 间的关系,即:

$$L_1 = \sqrt{({}^O X_{P_1} - R)^2 + ({}^O Y_{P_1})^2 + ({}^O Z_{P_1} - S)^2}, \quad (4)$$

$$\xi_1 = \arctan\left(-\frac{{}^O Y_{P_1}}{{}^O X_{P_1} - R}\right), \quad (5)$$

$$\xi_2 = \arctan\left(\frac{\sqrt{({}^O Y_{P_1})^2 + ({}^O X_{P_1} - R)^2}}{{}^O Z_{P_1} - S}\right), \quad (6)$$

$$L_2 = \sqrt{\left({}^O X_{P_2} + \frac{R}{2}\right)^2 + \left({}^O Y_{P_2} - \frac{\sqrt{3}}{2}R\right)^2 + ({}^O Z_{P_2} - S)^2}, \quad (7)$$

$$\xi_3 = \arctan\left(-\frac{{}^O Y_{P_2} - \frac{\sqrt{3}}{2}R}{{}^O X_{P_2} + \frac{R}{2}}\right), \quad (8)$$

$$L_3 = \sqrt{\left({}^0X_{P_3} + \frac{R}{2}\right)^2 + \left({}^0Y_{P_3} + \frac{\sqrt{3}}{2}R\right)^2 + {}^0Z_{P_3}^2}, \quad (9)$$

式中:

${}^0X_{P_i}, {}^0Y_{P_i}, {}^0Z_{P_i} (i=1, 2, 3)$ 分别为式(1)中求得的 P_i 点在定坐标系中 X, Y, Z 方向的坐标值。

式(4)~(9)为 6 个驱动件的变化规律,利用式(4)~(9)对该工作平台进行反解,可以得到 3 个驱动杆杆长和 3 个驱动轴转角。

2.2 位置正解

已知并联机构驱动件的位置参数,求解输出件的位姿称为机构的正解。在已知 L_1, ξ_1, ξ_2 时,根据该工作平台的几何关系,可求出 P_1 点在定坐标系中的坐标值 0P_1 , 即:

$$\begin{cases} {}^0X_{P_1} = R - L_1 \sin \xi_2 \cos \xi_1 \\ {}^0Y_{P_1} = L_1 \sin \xi_2 \sin \xi_1 \\ {}^0Z_{P_1} = L_2 \cos \xi_2 \end{cases} \quad (10)$$

P_1 位置确定后,根据给定的驱动件的位置参数(L_2, ξ_3)和几何关系,可求出 P_2 点在定坐标系中的坐标值 0P_2 , 即:

$$\begin{cases} \left({}^0X_{P_2} - {}^0X_{P_1}\right)^2 + \left({}^0Y_{P_2} - {}^0Y_{P_1}\right)^2 + \left({}^0Z_{P_2} - {}^0Z_{P_1}\right)^2 = 3r^2 \\ \left({}^0X_{P_2} + \frac{R}{2}\right)^2 + \left({}^0Y_{P_2} - \frac{\sqrt{3}}{2}R\right)^2 + \left({}^0Z_{P_2} - S\right)^2 = L_2^2 \\ -\frac{{}^0Y_{P_2} - \frac{\sqrt{3}}{2}R}{{}^0X_{P_2} + \frac{R}{2}} = \tan \xi_3 \end{cases} \quad (11)$$

同理,可求出 P_3 点在定坐标系中的坐标值 0P_3 , 即:

$$\begin{cases} \left({}^0X_{P_3} - {}^0X_{P_1}\right)^2 + \left({}^0Y_{P_3} - {}^0Y_{P_1}\right)^2 + \left({}^0Z_{P_3} - {}^0Z_{P_1}\right)^2 = 3r^2 \\ \left({}^0X_{P_3} - {}^0X_{P_2}\right)^2 + \left({}^0Y_{P_3} - {}^0Y_{P_2}\right)^2 + \left({}^0Z_{P_3} - {}^0Z_{P_2}\right)^2 = 3r^2 \\ \left({}^0X_{P_3} + \frac{R}{2}\right)^2 + \left({}^0Y_{P_3} + \frac{\sqrt{3}}{2}R\right)^2 + {}^0Z_{P_3}^2 = L_3^2 \end{cases} \quad (12)$$

P_1, P_2, P_3 点位置确定,则动平台的位姿已确定,其中动平台中心点 P 的坐标为:

$$\begin{cases} {}^0X_P = \frac{1}{2}({}^0X_{P_1} + {}^0X_{P_2}) + \frac{1}{3}\left[{}^0X_{P_3} - \frac{1}{2}({}^0X_{P_1} + {}^0X_{P_2})\right] \\ {}^0Y_P = \frac{1}{2}({}^0Y_{P_1} + {}^0Y_{P_2}) + \frac{1}{3}\left[{}^0Y_{P_3} - \frac{1}{2}({}^0Y_{P_1} + {}^0Y_{P_2})\right] \\ {}^0Z_P = \frac{1}{2}({}^0Z_{P_1} + {}^0Z_{P_2}) + \frac{1}{3}\left[{}^0Z_{P_3} - \frac{1}{2}({}^0Z_{P_1} + {}^0Z_{P_2})\right] \end{cases} \quad (13)$$

3 算例

如图 2, 设 $R = r = 500 \text{ mm}, s = 50 \text{ mm}$, 运用 Matlab 软件编程,对烹饪机器人工作平台进行位置正解和运动仿真。表 1 为工作平台的反解计算结果;表 2 为工作平台的正解计算结果。表 2 中的 5 组正解与表 1 中的 5 组反解相比,有微小误差,这主要是由于表 2 中的驱动件参数为近似值所引起的,正反解结果总体上相互吻合,从而验证了正反解表达式的正确性。这 5 组解对应的工作平台位置见图 4。

将对锅具的 4 种基本运动进行运动仿真:

(1) 旋锅运动:令 $L_1 = L_2 = 800 \text{ mm}, L_3 = 843.672 \text{ mm}, \xi_1 = \xi_3 = 0^\circ, \xi_2 = \pi/6$, 给烹饪机器人工作平台的驱动轴 ξ_1, ξ_3 施加相同角速度,其他驱动件保持不变进行仿真(图 5),检测动平台中心点的运动轨迹,同时动平台平行于 XOY 平面。

表 1 反解计算结果

Table 1 Inverse solution calculation results

序号	${}^0X_P/\text{mm}$	${}^0Y_P/\text{mm}$	${}^0Z_P/\text{mm}$	α/rad	β/rad	γ/rad	L_1/mm	L_2/mm	L_3/mm	ξ_1/rad	ξ_2/rad	ξ_3/rad
1	0	0	1 000	0	0	0	950.000	950.000	1 000.000	0.000	0.000	0.000
2	-500	0	1 000	0	0	0	1 073.546	1 073.546	1 118.034	0.000	0.485	0.000
3	-500	600	1 000	0	0	0	1 229.837	1 229.837	1 268.858	0.876	0.688	0.876
4	-500	600	1 000	$\pi/6$	0	0	1 395.161	1 242.129	1 160.432	0.983	0.822	0.548
5	-500	600	1 000	$\pi/6$	$\pi/3$	$\pi/4$	1 186.070	1 439.771	1 283.728	0.747	1.120	1.060

表 2 正解计算结果

Table 2 Positive solution calculation results

序号	L_1/mm	L_2/mm	L_3/mm	ξ_1/rad	ξ_2/rad	ξ_3/rad	${}^0X_P/\text{mm}$	${}^0Y_P/\text{mm}$	${}^0Z_P/\text{mm}$
1	950.000	950.000	1 000.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1 000.000
2	1 073.546	1 073.546	1 118.034	0.000	0.485	0.000	-500.496	0.000	999.743
3	1 229.837	1 229.837	1 268.858	0.876	0.688	0.876	-500.000	600.685	1 000.884
4	1 395.161	1 242.129	1 160.432	0.983	0.822	0.548	-500.524	600.741	1 000.895
5	1 186.070	1 439.771	1 283.728	0.747	1.120	1.060	-500.684	600.362	1 000.652

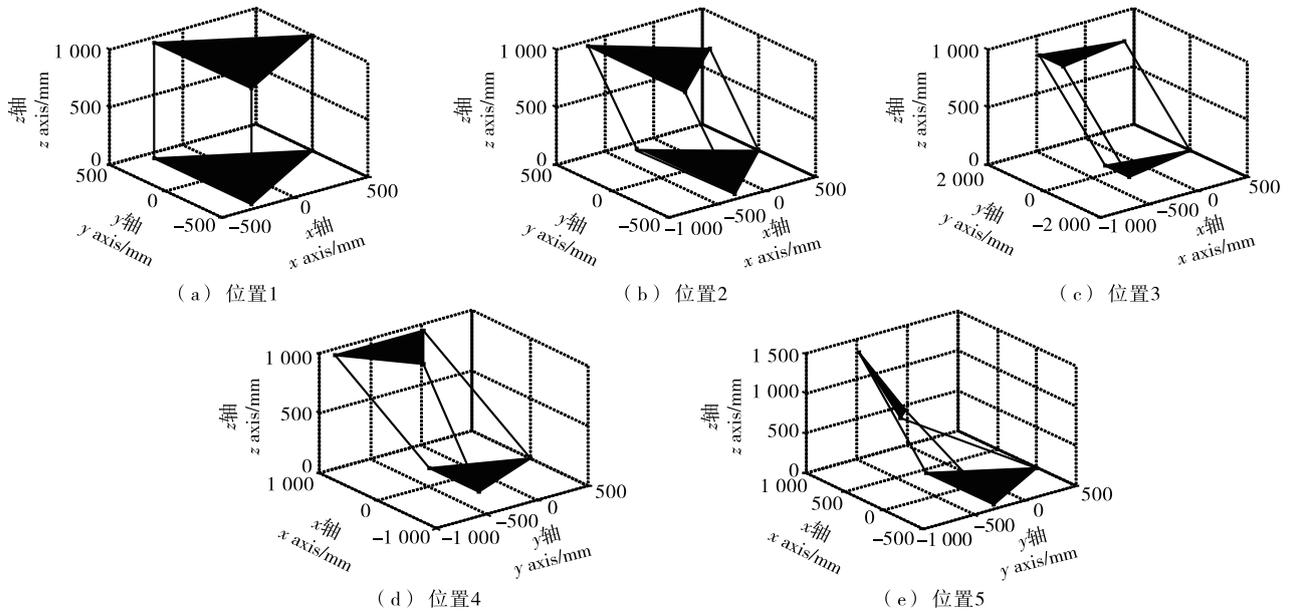


图4 工作平台位置图
Figure 4 Work platform location map

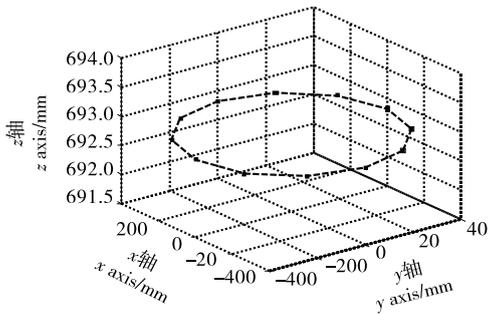


图5 旋锅运动
Figure 5 Rotating the cookware

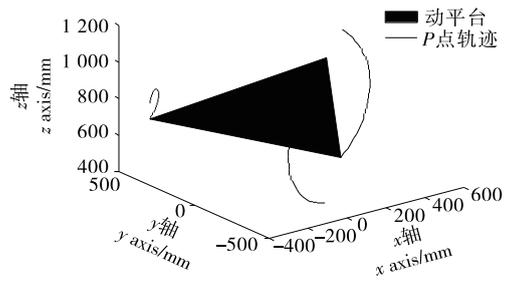


图7 翻锅运动
Figure 7 Stir fry sports

(2) 颠锅运动: 令 $L_1=L_2=L_3-50=800$ mm, $\xi_1=\xi_2=\xi_3=0$, 给烹饪机器人工作平台的驱动杆 L_1, L_2, L_3 施加线速度(其中 $v_1 < v_2 = v_3$), 同时对驱动轴 ξ_2 施加角速度, 其他驱动件保持不变进行仿真(如图6所示), 检测动平台中心点的位置和运动轨迹以及动平台在做运动时的5个位置。

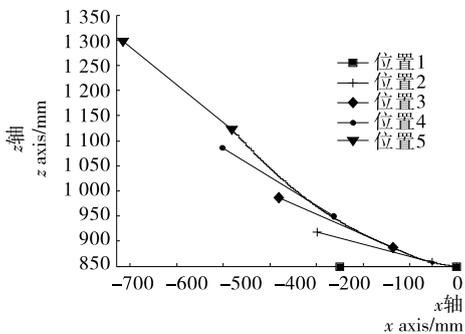


图6 颠锅运动
Figure 6 Rotating the cookware

(4) 倾斜运动: 令 $L_1=L_2=L_3-50=800$ mm, $\xi_1=\xi_2=\xi_3=0$, 给烹饪机器人工作平台的驱动杆 L_1 均匀线速度, 其他驱动件保持不变进行仿真(如图8所示), 检测动平台中心点的位置和运动轨迹以及动平台在运动时的5个位置。

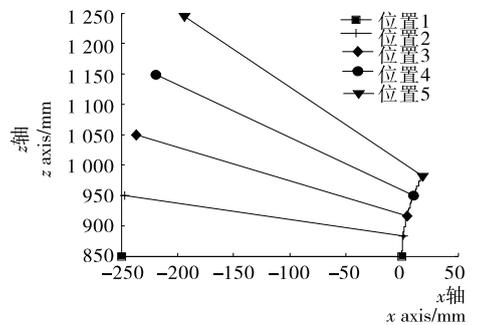


图8 倾斜运动
Figure 8 Tilting the cookware

(3) 翻锅运动: 令 $L_1=L_2=800$ mm, $L_3=950$ mm; $\xi_1=\xi_2=\xi_3=0$, 令烹饪机器人工作平台的驱动杆 L_1, L_2, L_3 依次伸缩, 其他驱动件保持不变进行仿真(图7), 检测动平台的位置和 P_1, P_2, P_3 运动轨迹。

以上4种运动仿真与设定的4种锅具运动轨迹吻合, 可以达到预期效果, 验证了该烹饪机器人工作平台的有效性。

4 定姿态工作空间分析

烹饪机器人工作平台的设计主要是为了更好地拟合人

工烹饪动作实现各种锅具运动,因此运动轨迹的优劣对烹饪机器人的质量有关键性的影响。

影响烹饪机器人工作平台的工作空间因素^[24-27]有:转动副的转角范围、主动杆的运动行程、连杆的干涉。综合以上 3 条影响因素,给定姿态角 $\alpha = \beta = \gamma = 0^\circ$, $750 \text{ mm} \leq L_1 = L_2 \leq 1250 \text{ mm}$, $0 \text{ mm} < L_3 < 1300 \text{ mm}$, 检测动平台中心点的空间边界图和该点所能达到的所有位置(图 9)。求得 0X_P 、 0Y_P 、 0Z_P 取值范围分别为 $-919.24 \text{ mm} \leq {}^0X_P \leq 919.24 \text{ mm}$, $-919.24 \text{ mm} \leq {}^0Y_P \leq 919.24 \text{ mm}$, $800 \text{ mm} \leq {}^0Z_P \leq 1300 \text{ mm}$ 。

给定姿态角 $\alpha = \gamma = 0^\circ$, $\beta = 15^\circ$, $750 \text{ mm} \leq L_1 = L_2 \leq 1250 \text{ mm}$, $0 \text{ mm} \leq L_3 \leq 1300 \text{ mm}$, 检测动平台中心点的空间边界图和该点所能达到的所有位置(图 10)。与图 9 相比,工作平台的工作空间明显缩小,同时整体向 X 轴负方向偏移,求得 0X_P 、 0Y_P 、 0Z_P 取值范围分别为 $-1069.5 \text{ mm} \leq {}^0X_P \leq 617.5 \text{ mm}$, $-873.28 \text{ mm} \leq {}^0Y_P \leq 873.28 \text{ mm}$, $929.84 \text{ mm} \leq {}^0Z_P \leq 1235.24 \text{ mm}$ 。

由图 9、10 可知,烹饪机器人工作平台有较大的工作空间,工作空间边界光滑且内部没有空洞,为后期工作平台运

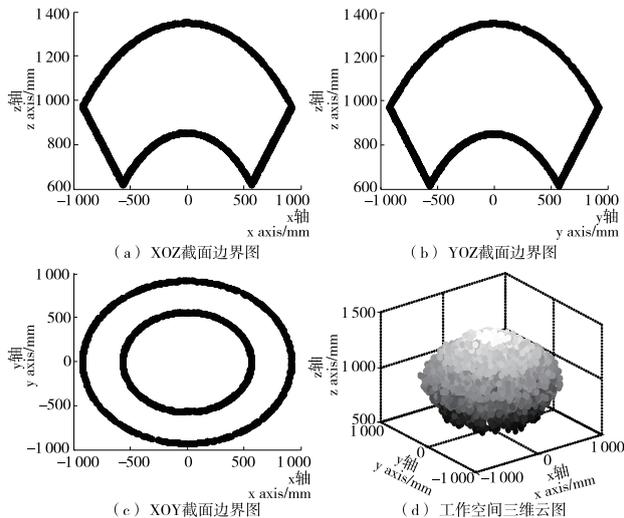


图 9 定姿态工作空间

Figure 9 Fixed attitude workspace

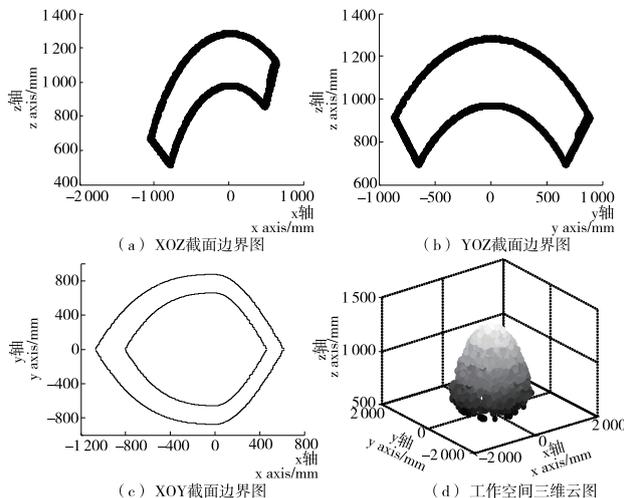


图 10 定姿态工作空间

Figure 10 Fixed attitude workspace

动轨迹的优化提供了理论基础。

5 结论

提出一种基于并联机构的烹饪机器人工作平台,该平台能实现旋锅、翻锅、颠锅、倾斜等人工烹饪时的运动轨迹。运用解析几何法对该工作平台进行了位置分析,给出了该工作平台的位置反解表达式和位置正解表达式;通过 MATLAB 软件进行了位置正反解验证,通过运动仿真,验证了该烹饪机器人工作平台的有效性;对工作平台进行位姿下工作空间分析,得到该工作平台的这个范围,为后期运动轨迹优化提供了理论依据。

参考文献

- [1] 张少文, 吴学梅. 新型烹饪机器人锅具运动机构的设计及运动学仿真[J]. 食品与机械, 2013, 29(4): 92-94.
- [2] 刘银华, 闫维新, 周晓燕, 等. 自动烹饪机器人[J]. 上海交通大学学报, 2007(1): 119-122.
- [3] 候兵. 中国烹饪产业化发展的趋势及其原则[J]. 扬州大学烹饪学报, 2003(2): 7-10.
- [4] 陈靖显. 与国际接轨规范烹饪酒产品[J]. 酿酒, 2000(6): 28-29.
- [5] 张泓. 水产菜肴的自动烹饪技术[J]. 渔业现代化, 2003(3): 33-34.
- [6] 陈原, 李兵, 刘小勇, 等. 一种新型烹饪并联机器人的工作空间和灵活性分析[J]. 机械科学与技术, 2009, 28(6): 749-753.
- [7] 高均. 自动炒菜机伺服机械装置: 中国, 1055476 A[P]. 1991-10-23.
- [8] ZHAO Yan-zheng, FU Zhuang, CAO Qi-xin, et al. Development and applications of wall-climbing robots with a single suction cup[J]. Robotica, 2004, 22: 643-648.
- [9] 余顺年, 马履中. 两平移一转动并联机构位置及工作空间分析[J]. 农业机械学报, 2005(8): 103-106.
- [10] 郭万金, 李瑞峰, 曹维清. 五自由度机器人逆运动学解法与工作空间分析[J]. 华中科技大学学报: 自然科学版, 2015, 43(S1): 14-18.
- [11] 郭宗和, 段建国, 郝秀清, 等. 4-PTT 并联机构位置正反解与工作空间分析[J]. 农业机械学报, 2008(7): 144-148, 138.
- [12] 周晓燕, 唐建华, 赵言正, 等. 自动烹饪机器人锅具运动机构的设计原理[J]. 食品科学, 2007(3): 373-376.
- [13] 刘银华, 闫维新, 刘小勇, 等. 曲柄摇块机构在自动烹饪机器人中的应用[J]. 机械工程师, 2006(5): 64-66.
- [14] JI Ye, LIU Hong-zhao, YUAN Daning. Workspace and Scale Analysis of 4-SPS /PPU Parallel Mechanism[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(11): 322-328.
- [15] 黄秀琴, 辛秀梅. 一种新型 3 自由度并联机构的设计和运动学分析[J]. 机械设计, 2010(7): 4-6.
- [16] 赵新华, 彭高贤, 张伟军, 等. 一种分析并联机器人位置正解的高效算法[J]. 天津大学学报, 2000(2): 134-137.
- [17] 车林仙, 程志红, 何兵. 4-PRUR 并联机构及其位置分析的差分进化算法[J]. 机械工程学报, 2010, 46(23): 36-44.

(下转第 125 页)

可更准确地表征海产品在贮藏期间的品质状态,具有更广阔的应用前景。

参考文献

- [1] SI Yu-feng, WEN Hai-shen, LI Yun, et al. Liver transcriptome analysis reveals extensive transcriptional plasticity during acclimation to low salinity in *Cynoglossus semilaevis*[J]. *Bmc Genomics*, 2018, 19(1): 464.
- [2] 张伟. 地下深井水及水温对半滑舌鳎生长发育的影响[J]. *水产养殖*, 2018, 39(5): 1-2.
- [3] 吴奇子, 陈雪, 刘欢, 等. 不同贮藏温度条件下鲈鱼货架期预测模型的构建[J]. *食品科学*, 2015, 36(22): 232-236.
- [4] 雷志方, 谢晶. 金枪鱼基于理化指标的货架期预测模型的建立[J]. *食品与发酵工业*, 2015, 41(11): 185-191.
- [5] RAMOS F C P, RIBEIRO S C A, JOELE M R S P, et al. Kinetic modeling to study the quality of tambaqui (*Colossoma macropomum*) sous vide during storage at different temperatures[J]. *J Food Sci Technol*, 2017, 54(8): 2 452-2 463.
- [6] 吴行印, 谢晶, 张新林, 等. 动力学模型预测三文鱼在不同温度的货架期[J]. *包装工程*, 2017(3): 1-6.
- [7] BAHRAM S, REZAIIE M, SOLTANI M, et al. Effect of whey protein concentrate coating cinamon oil on quality and shelf life of refrigerated beluga sturgeon (*Huso huso*) [J]. *Journal of Food Quality*, 2016, 67(12): 28-34.
- [8] 李敬, 韩冬娇, 刘红英. 复合生物保鲜剂对半滑舌鳎保鲜效果的研究[J]. *河北农业大学学报*, 2016, 39(1): 84-88.
- [9] 李婷婷, 陈思, 李欢, 等. 冷藏鲑鱼优势腐败菌致腐能力的初步分析[J]. *食品与发酵工业*, 2017, 43(6): 140-145.
- [10] 朱文慧, 宦海珍, 步营, 等. 不同解冻方式对秘鲁鲑鱼肌肉保水性和蛋白质氧化程度的影响[J]. *食品科学*, 2017, 38(11): 6-11.
- [11] MU Gang, BERGSSON A B, JONSSON A, et al. The effects of ambient temperature and holding time during processing on drip of saithe (*Pollachius virens*) and deepwater redfish (*Sebastes mentella*) fillets[J]. *Journal of Food Engineering*, 2017, 200: 40-46.
- [12] 于林, 陈舜胜, 王娟娟, 等. 茶多酚改性胶原蛋白-壳聚糖复合膜对冷藏斜带石斑鱼的保鲜效果[J]. *食品科学*, 2017, 38(3):

220-226.

- [13] 苏辉, 谢晶, 黎柳, 等. 不同温度下鲳鱼品质及微观组织的变化研究[J]. *现代食品科技*, 2014(8): 106-111.
- [14] 郑捷, 尚校兰, 刘安军. 超高压对海鲈鱼鱼肉的蒸煮损失及蛋白质降解程度的影响[J]. *天津科技大学学报*, 2013(1): 10-13.
- [15] 卢涵. 鲷鱼肉低温贮藏过程中蛋白氧化、组织蛋白酶活性与品质变化规律的研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2017: 16-18.
- [16] 刘彩华, 邱恒恒, 朱新荣, 等. 冷藏温度对白斑狗鱼肌肉质构特性的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2017, 43(12): 137-143.
- [17] 曾名勇, 黄海, 李八方. 不同冻藏温度对鲈鱼肌肉蛋白质生化特性的影响[J]. *中国海洋大学学报: 自然科学版*, 2003, 33(4): 525-530.
- [18] SONG Yong-ling, LIU Lei, SHEN Hui-xing, et al. Effect of sodium alginate-based edible coating containing different anti-oxidants on quality and shelf life of refrigerated bream (*Megalobrama amblycephala*) [J]. *Food Control*, 2011, 22(3): 608-615.
- [19] MOHAN C O, RAVISHANKAR C N, LALITHA K V, et al. Effect of chitosan edible coating on the quality of double filleted Indian oil sardine (*Sardinella longiceps*) during chilled storage[J]. *Food Hydrocolloids*, 2012, 26(1): 167-174.
- [20] STOREAKKEN T, FOSS P, SCHIEDT K, et al. Carotenoids in diets for salmonids IV: Pigmentation of Atlantic salmon with astaxanthin, astaxanthin dipalmitate and canthaxanthin[J]. *Aquaculture*, 1987, 65(3): 279-292.
- [21] FENG Xiao, NG V K, MIKS K M, et al. Effects of fish gelatin and tea polyphenol coating on the spoilage and degradation of myofibril in fish fillet during cold storage [J]. *Food & Bioprocess Technology*, 2017(10): 1-14.
- [22] 王文娟, 汪水平, 李代金, 等. 不同贮藏温度齐口裂腹鱼肌肉品质的变化及货架期预测[J]. *食品科学*, 2014, 35(14): 229-233.
- [23] 鞠健, 胡慧慧, 熊光权, 等. 基于空气(普通包装)和真空包装条件下鲈鱼片脂肪氧化指标建立鲈鱼货架期预测模型[J]. *食品工业科技*, 2018, 39(6): 191-198.
- [24] SHI Ce, HAN Lu, CUI Jian-yun, et al. Study on the predictive models of the quality of Silver Carp (*Hypophthalmichthys Molitrix*) fillets stored under variable temperature conditions[J]. *Journal of Food Processing & Preservation*, 2014, 38(1): 356-363.

(上接第 100 页)

- [18] 伞红军, 钟诗胜, 王知行. 一种新型五轴并串联机床的工作空间分析[J]. *四川大学学报: 工程科学版*, 2010, 42(2): 243-249.
- [19] 李庆兴, 刘淑英, 范顺成, 等. 正交结构 6-PP+S 并联机构的工作空间分析[J]. *天津大学学报*, 2009, 42(6): 560-565.
- [20] 李秦川, 孙晓东, 陈巧红, 等. 2-PRS-PRRU 并联机构运动学与奇异分析[J]. *机械工程学报*, 2011, 47(3): 21-27.
- [21] 黄真, 孔令富, 方跃法. 并联机器人机构学理论及控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 1997: 72-80.
- [22] LI Yang-ming, XU Qing-song. Kinematic analysis of a 3 PRS parallel manipulator [J]. *Robotics and Computer-Integrated*

Manufacturing, 2007, 23(4): 395-408.

- [23] LEE K M, SHAH D K. Kinematic analysis of a three-degree-of-freedom in parallel actuated manipulator[J]. *IEEE Journal of Robotics and Automation*, 1988, 4(3): 354-356.
- [24] 季晔, 刘宏昭, 原大宁. 4-SPS/PPU 型并联机构工作空间与尺度分析[J]. *农业机械学报*, 2013, 44(11): 322-328.
- [25] 鲁开讲, 牛禄峰, 刘亚茹, 等. 3-RPS 并联机构奇异位形及工作空间研究[J]. *农业机械学报*, 2007(5): 143-146.
- [26] 黄宇中, 张宗明, 何奇伟. 机器人灵活工作空间的边界分析[J]. *机器人*, 1991(2): 18-24.
- [27] 刘迎春, 余跃庆, 姜春福. 机器人可操作性研究进展[J]. *机械设计与研究*, 2003(4): 34-37, 7.