

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2021.07.044

基于六维力传感器的机器人本体碰撞点检测研究

王志军^{1,2} 刘璐^{1,2} 李占贤^{1,2}

(1. 华北理工大学机械工程学院, 唐山 063210; 2. 河北省工业机器人产业技术研究院, 唐山 063210)

摘要: 针对皮肤力传感器对机器人碰撞点检测的不足, 提出了一种利用六维力传感器进行机器人本体碰撞点检测的方法。该方法利用传感器采集数据进行自约束, 无需依赖碰撞体表面几何信息, 将空间碰撞外力矢量线投影到最优平面中进行初步求解, 再代入原始方程进行碰撞点的求解; 引入了误差因子, 以保证计算结果的绝对误差最小; 在数据预处理方面, 提出了一种动态力补偿算法, 以保证基座处六维力传感器在机器人运动过程无外力碰撞下的读数恒为零, 当传感器的数值超过一定阈值后即可认为机器人与外界发生碰撞。对本文提出的算法进行了仿真实验, 结果表明, 动态力补偿算法的合力最大相对误差为 4.8925%, 碰撞点检测算法在实验距离最远 598.61 mm 处误差最大, 为 8.7119%。本文提出的动态力补偿算法的精度随碰撞点距离的增加没有明显变化, 但在碰撞力一定时, 随着碰撞距离的增加相对误差不断增大。

关键词: 六维力传感器; 碰撞点检测; 动态力补偿; 碰撞感知

中图分类号: TP242.6 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2021)07-0395-07

OSID:



Collision Point Detection of Robot Body Based on Six-axis Force/Torque Sensor

WANG Zhijun^{1,2} LIU Lu^{1,2} LI Zhanxian^{1,2}

(1. School of Mechanical Engineering, North China University of Science and Technology, Tangshan 063210, China)

(2. Industrial Robotics Research Institute of Hebei Province, Tangshan 063210, China)

Abstract: Aiming at the shortcomings of the skin force sensor to detect the collision point of the robot, a method using the six-axis force/torque sensor to detect the collision point of the robot body was proposed. The sensor-collected data was used for self-constraint, without relying on the geometric information of the collision body surface. The space collision external force vector line was firstly projected into the optimal plane for preliminary solution, and finally brought into the original equation to solve the collision point. In order to ensure that the absolute error of the calculation result was the smallest, an error factor was introduced. In terms of data preprocessing, a dynamic force compensation algorithm was proposed to ensure that the six-axis force/torque sensor at the base had a constant reading of zero when there was no external force collision during the robot movement. The robot can be considered collide with the outside world when the sensor value exceeded a certain threshold. Finally, a simulation experiment was performed on the proposed algorithm. The experimental results showed that the maximum error of the dynamic force compensation algorithm was 4.8925%, and the collision point detection algorithm had the largest error at the experimental distance of 598.61 mm, which was 8.7119%. The experimental results showed that the accuracy of the proposed dynamic force compensation algorithm was not changed significantly as the distance of the collision point was increased, but the relative error of the collision point detection algorithm was increased with the increase of the collision distance when the collision force was constant.

Key words: six-axis force/torque sensor; collision point detection; dynamic force compensation; collision perception

收稿日期: 2020-09-04 修回日期: 2020-11-04

基金项目: 国家自然科学基金项目(51505124)、河北省高等学校科学技术研究项目(ZD2020151)、河北省自然科学基金项目(E2016209312)和华北理工大学培育基金项目(JP201505)

作者简介: 王志军(1983—), 男, 教授, 主要从事机器人技术和六维力传感器技术研究, E-mail: zjwang@ncst.edu.cn

0 引言

共融机器人是下一代机器人的发展目标,实现人机共融的首要问题是安全^[1-4]。在机器人作业过程中,为了保证人、机、物的安全,需要对作业环境信息进行感知,而力信息和机器人碰撞点的位置检测是其中的重要部分。为此,越来越多的传感器被集成到机器人系统中^[5-9];这些传感器可协助机器人获取环境信息,有助于机器人作出正确判定^[10-14]。视觉传感器协助机器人获取环境的外观信息,用于实现目标跟踪和物体捕获等^[15-17]。碰撞感测也是一种重要的环境感测方法,通过该方法机器人感测碰撞点和碰撞方向,以免再次发生碰撞,并实现对机器人的反馈控制。在包含人和机器人的环境中,碰撞感知对避免严重碰撞至关重要^[18-21]。贴在机器人整个表面上的皮肤力传感器(如人体皮肤系统)可以感应力作用点、方向和大小。麻省理工学院研究了一种称为 QTC(量子隧道复合材料)的特殊复合材料,该材料受到金属和非金属的挤压时^[22-23],传感器可通过电阻变化测量力信息。与之相类似的还有由并五苯分子和电子皮肤组成的有机薄膜等。皮肤力传感器价格昂贵、易损坏、设计复杂、对环境要求较高、采样率低、通用性较差^[24-26],难以在现实中使用。皮肤传感器的灵敏度系统无法获得碰撞方向信息,并会受到许多因素的影响,例如温度和湿度等。在利用力传感器进行碰撞点检测方面,文献[27]基于力/力矩传感器和结构化的探针建立一种物体轮廓探测方法,文献[28]基于力/力矩传感器数据和机械手指端几何模型提出求解触点位置的方法。已有研究主要针对结构化碰撞过程中没有形变产生的碰撞点进行识别,若碰撞体表面为非规则形状或建模较难,则已有的方法应用较为受限。

按照碰撞点和碰撞外力的不同,机器人本体碰撞大体可以分为单点单外力碰撞、单点外力/外力矩混合碰撞、多点外力碰撞、多点外力/外力矩混合碰撞等。多点多外力/外力矩的碰撞可以视为单点单外力的特殊组合形式。

针对皮肤力传感器对机器人碰撞点检测的不足,本文提出一种利用基座处六维力传感器采集信息进行自约束,从而对机器人本体碰撞点进行检测的方法。在对基座处六维力传感器进行动态补偿后,运动过程中机器人数值在零点附近波动,当传感器数值超过一定阈值后即可认为机器人与外界发生碰撞,对经过补偿后的传感器每帧数据进行自约束,可计算出机器人本体碰撞点坐标。

1 碰撞点检测模型

与传统的应用六维力传感器不同,为了实现对机器人本体的碰撞位置检测将机器人安装在基座处。传感器的安装位置示意图如图 1 所示。

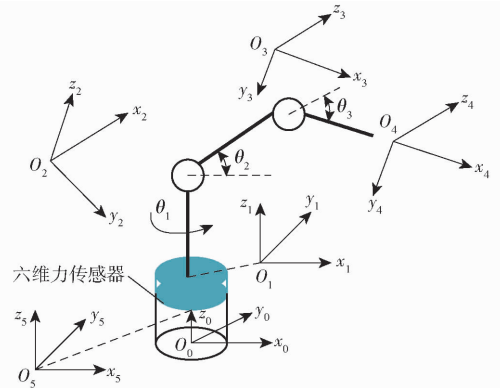


图 1 传感器安装位置示意图

Fig. 1 Schematic of sensor installation location

六维力传感器可以测得力 and 力矩在 3 个轴上的分量信息,假设基座处传感器采集了 $F(F_x, F_y, F_z)$ 和 $M(M_x, M_y, M_z)$,则碰撞点的位置信息表示为

$$M = PF \quad (1)$$

式中 $P(P_x, P_y, P_z)$ 为碰撞点相对于传感器坐标系的位置矢量。式(1)可以改写为

$$\begin{bmatrix} F_y & -F_x & 0 \\ 0 & F_z & -F_y \\ -F_z & 0 & F_x \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_z \end{bmatrix} \quad (2)$$

由于 $|F| = 0$,所以碰撞点的位置解并不唯一,这时需要利用其他约束条件来确定碰撞点的位置。

将传感器采集到某一帧的数据代入式(2)可以得到 1 条外力作用矢量线 $L_c(p)$,其表达式为

$$\frac{x}{F_x} = \frac{y + \frac{M_z}{F_x}}{F_y} = \frac{z + \frac{M_y}{F_x}}{F_z} \quad (3)$$

传感器每帧采集的不同参数决定了不同的外力矢量线,在实际中碰撞外力的方向大多数与机器人的运动方向存在一定夹角,因此利用传感器不同帧数计算的外力矢量线在空间中会相交于某点 P_c ,该点即为碰撞点,具体计算方法为

$$\{P(x, y, z) \mid (x, y, z) \in L_{c1}(p) \cap L_{c2}(p)\} \quad (4)$$

由于传感器存在的测量误差会使得计算的空间力矢量线在空间中不会相交在碰撞点,但在某一平面内的投影会相交于正式的碰撞点在该平面的投影附近。所以可以通过投影法先求得外力矢量线在平面的交点,再将交点坐标代入原始方程求得碰撞点信息,如图 2 所示。

假设 L'_{xOy} 是 $L_c(p)$ 在 XOY 平面的投影直线,在

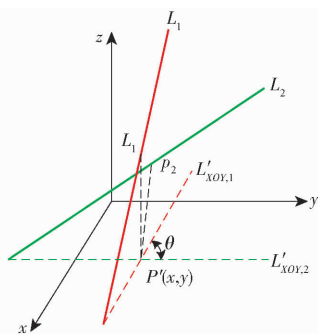


图2 投影法原理图

Fig. 2 Schematic of projection method

XOZ 平面的投影为 L'_{xOz} , 在 YOZ 平面的投影为 L'_{yOz} , 计算式为

$$\begin{cases} F_y F_z x - F_x F_z y = -F_x M_x - F_y M_y \\ F_y F_z x - F_x F_y z = F_x M_x + F_z M_z \\ F_x F_z y - F_x F_y z = -F_y M_y - F_z M_z \end{cases} \quad (5)$$

图2中 $P'(x, y)$ 是2条外力矢量线的投影 $L'_{xOz,1}$ 和 $L'_{xOz,2}$ 的交点, P_1, P_2 为投影交点在外力矢量线上的对应点, P_1, P_2 计算式为

$$P_n = \begin{cases} \eta L'_1(P') \\ \eta L'_2(P') \quad (n=1, 2) \\ L_{cn}(p) \end{cases} \quad (6)$$

式中 η ——确定最佳投影平面的选择因子
投水平面选择规则为

$$\max(\theta_{xOy}, \theta_{xOz}, \theta_{yOz}) = \begin{cases} \theta_{xOy} (L'_n = L'_{xOy,n}) \\ \theta_{xOz} (L'_n = L'_{xOz,n}) \\ \theta_{yOz} (L'_n = L'_{yOz,n}) \end{cases} \quad (7)$$

其中

$$\begin{cases} \theta_{xOy} = \left| \arctan \frac{F_{y1}}{F_{x1}} - \arctan \frac{F_{y2}}{F_{x2}} \right| \\ \theta_{xOz} = \left| \arctan \frac{F_{z1}}{F_{x1}} - \arctan \frac{F_{z2}}{F_{x2}} \right| \\ \theta_{yOz} = \left| \arctan \frac{F_{y1}}{F_{z1}} - \arctan \frac{F_{y2}}{F_{z2}} \right| \end{cases} \quad (8)$$

式中 $\theta_{xOy}, \theta_{xOz}, \theta_{yOz}$ ——外力矢量线在 XOY, XOZ, YOZ 平面投影 $L'_{xOy,1}$ 和 $L'_{xOy,2}$ 的夹角

若 XOY 平面为最优投影平面, 则 $P_1(x_1, y_1, z_1)$ 和 $P_2(x_2, y_2, z_2)$ 计算公式为

$$\begin{bmatrix} F_{y1} F_{z1} & -F_{x1} F_{z1} & 0 \\ F_{y2} F_{z2} & -F_{x2} F_{z2} & 0 \\ -F_{z1} & 0 & -F_{x1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -F_{x1} M_{x1} - F_{y1} M_{y1} \\ -F_{x2} M_{x2} - F_{y2} M_{y2} \\ M_{y1} \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\begin{bmatrix} F_{y1} F_{z1} & -F_{x1} F_{z1} & 0 \\ F_{y2} F_{z2} & -F_{x2} F_{z2} & 0 \\ -F_{z2} & 0 & -F_{x2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -F_{x1} M_{x1} - F_{y1} M_{y1} \\ -F_{x2} M_{x2} - F_{y2} M_{y2} \\ M_{y2} \end{bmatrix} \quad (10)$$

真实的碰撞点坐标在两点附近, 但精确位置无法计算, 因此初步判定碰撞点 P 为两点的中点, 即

$$P = \frac{1}{2}(P_1 + P_2) \quad (11)$$

在机器人碰撞瞬间传感器可以采集到多组数据, 求解的空间外力矢量线示意图如图3所示。为了在多组计算结果中搜索出和真实碰撞点最近的最优解, 假设 $\zeta(\zeta_{M_x}, \zeta_{M_y}, \zeta_{M_z})$ 为误差因子, $P''(x'', y'', z'')$ 为初步计算的碰撞点坐标。可得

$$\begin{cases} \zeta_{M_x} = F_z y'' - F_y z'' - M_x \\ \zeta_{M_y} = F_x z'' - F_z x'' - M_y \\ \zeta_{M_z} = F_y x'' - F_x y'' - M_z \end{cases} \quad (12)$$

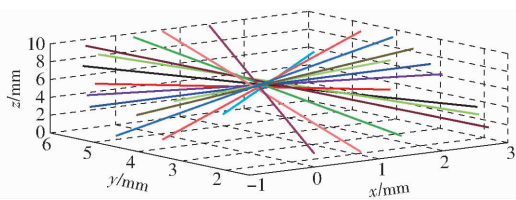


图3 外力矢量线示意图

Fig. 3 Schematic diagram of external force vector line

在初步确定的碰撞点中搜索使得 $|\zeta| = \sqrt{\zeta_{M_x}^2 + \zeta_{M_y}^2 + \zeta_{M_z}^2}$ 最小的点, 即认为是与真实碰撞点最近的最优解, 最优搜索结果如图4所示。

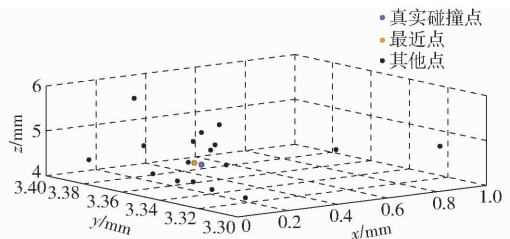


图4 最优搜索结果示意图

Fig. 4 Diagram of the best search results

2 动力学补偿算法

将六维力传感器安装在机器人基座处时应首先消除机器人本体的重力和运动过程中末端负载对传感器的影响, 应对传感器进行动态力补偿。在传感器上执行动态力补偿后, 当机器人处于运动状态且不受外力作用时, 读数将恒定为零。若传感器读数超过阈值, 即认为机器人与外界意外碰撞。机器人重力补偿如图5所示。

利用 D-H 参数法来建立机器人各关节坐标系 $\{i\}$, 连杆的齐次变换矩阵 ${}^{i-1}T_i$ 的计算式为

$${}^{i-1}T_i = \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\sin\theta_i & 0 & \alpha_{i-1} \\ \cos\alpha_{i-1}\sin\theta_i & \cos\alpha_{i-1}\cos\theta_i & -\sin\alpha_{i-1} & -d_i\sin\alpha_{i-1} \\ \sin\alpha_{i-1}\sin\theta_i & \sin\alpha_{i-1}\cos\theta_i & \cos\alpha_{i-1} & d_i\cos\alpha_{i-1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

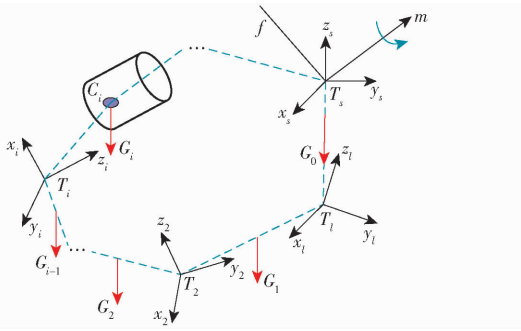


图5 重力分析

Fig. 5 Gravity analysis

由式(13)可得

$${}^{i-1}T = \begin{bmatrix} {}^{i-1}R_i & {}^{i-1}p \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

将机器人各连杆参数代入式(13)中,可依次得到相邻连杆之间的位姿变换矩阵。坐标系 $\{i\}$ 相对于坐标系 $\{0\}$ 的变换矩阵为

$${}^0T = {}^0T_1 {}^1T_2 {}^2T_3 \dots {}^{i-1}T = \begin{bmatrix} {}^0R & {}^0p \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (15)$$

假设关节 i 的质心 c_i 相对于关节坐标系 i 的位置矢量为

$$c_i = [c_{ix} \ c_{iy} \ c_{iz}]^T \quad (16)$$

各连杆质心坐标系 $\{c_i\}$ 相对于 $\{0\}$ 系的齐次变换矩阵为

$${}^0T_{c_i} = {}^0T_i T_{c_i} = \begin{bmatrix} {}^0R & {}^0p \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (17)$$

其中 ${}^0p = [p_{cx} \ p_{cy} \ p_{cz}]^T$

在对基座处六维力传感器进行动态力补偿时,需要对组成多刚体系统的机构、机械臂连杆等各关节的位置、速度、加速度和力矩之间的关系进行分析。假设机器人各关节臂质量为 m_i ($i=1,2,\dots,6$),关节 i 的质心 c_i 相对于坐标系 $\{i\}$ 的位置矢量为 r_i ($i=1,2,\dots,6$),关节 i 的位移为 θ_i ,速度为 $\dot{\theta}_i$,加速度为 $\ddot{\theta}_i$ 。首先计算出各关节的质心加速度,具体计算方法为

$$\omega_{i+1} = {}^{i+1}R \omega_i + \dot{\theta}_{i+1} Z_{i+1} \quad (18)$$

$$\dot{\omega}_{i+1} = {}^{i+1}R \dot{\omega}_i + {}^{i+1}R \omega_i \times \dot{\theta}_{i+1} e_{i+1} + \ddot{\theta}_{i+1} Z_{i+1} \quad (19)$$

$$\dot{v}_{i+1} = {}^{i+1}R [\dot{v}_i + \dot{\omega}_i \times {}^i p + \omega_i \times (\omega_i \times {}^i p)] \quad (20)$$

$$\dot{v}_{c_{i+1}} = \dot{v}_{i+1} + \dot{\omega}_{i+1} \times r_{i+1} + \omega_{i+1} \times (\omega_{i+1} \times r_{i+1}) \quad (21)$$

其中需要指出 $\omega_0 = \dot{\omega}_0 = v_0 = \dot{v}_0 = [0 \ 0 \ 0]^T$, Z_i ($i=1,2,\dots,6$) = $[0 \ 0 \ 1]^T$ 。图6为机器人运动过程中的连杆受力示意图。

可以对连杆之间建立动力学方程

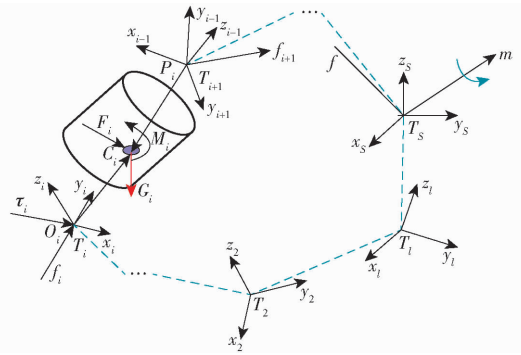


图6 动态力分析

Fig. 6 Dynamic force analysis

$$F_i^{i-1} = F_i^{i+1} + m_i \dot{v}_{c_i} - c_i G_i \quad (22)$$

$$M_i^{i-1} = M_i^{i+1} - r_{i+1,c_i} F_i^{i+1} + r_{i,c_i} F_i^{i-1} + I_i \dot{\omega}_i + \omega_i I_i \omega_i \quad (23)$$

式中 F_i^{i-1} ——杆 $i-1$ 对杆 i 的作用力

F_i^{i+1} ——杆 $i+1$ 对杆 i 的作用力

M_i^{i-1} ——杆 $i-1$ 对杆 i 的作用力矩

M_i^{i+1} ——杆 $i+1$ 对杆 i 的作用力矩

r_{i,c_i} ——关节 i 上附着的坐标系原点 O_i 到质心 c_i 的矢径

r_{i+1,c_i} ——关节 $i+1$ 上附着的坐标系原点 O_{i+1} 到质心 c_i 的矢径

I_i ——杆 i 相对于其质心 c_i 的惯性张量

由式(18)~(23)可计算出 $F_0^1 = -F_1^0$, $M_0^1 = -M_1^0$ 。力传感器坐标系 $\{S\}$ 与基坐标系 $\{0\}$ 姿态相同,在 Z 轴上偏移距离 $-h$,可以得到 0f 和 0m 在坐标系 $\{0\}$ 与坐标系 $\{S\}$ 中的变换矩阵为

$$\begin{bmatrix} {}^s f \\ {}^s m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^s R & 0 \\ S({}^s p_0) {}^s R & {}^s R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^0 f \\ {}^0 m \end{bmatrix} \quad (24)$$

将基座处的受力信息经过式(24)进行坐标变换即可得到基座处六维力传感器最终所需要的重力补偿数值,即 ${}^s f$ 和 ${}^s M$ 。若机器人处于某一位姿时,基座六维力传感器的力/力矩传感器读数分别为 ${}^d f$ 和 ${}^d M$,则经过重力补偿后的力/力矩信息 F 和 M 为

$$\begin{bmatrix} F_T \\ M_T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^d f - {}^s f \\ {}^d M - {}^s M \end{bmatrix} \quad (25)$$

经过动态力补偿后,在运动过程中没有外力的情况下,机器人可以使六维力传感器的读数恒定为零。一旦基座处的六维力传感器的读数超过设置的阈值,就可认为机器人与外部发生碰撞。机器人与外界之间的碰撞是一个连续的过程,因此,在动态力补偿后,基座上的传感器读取的每一帧数据都可以用作碰撞点检测算法的输入。

在经过对数据的动态力补偿以后,判断发生碰

撞与否的阈值确定与机器人的整体结构参数、末端负载情况、传感器的精度等情况有关。因此增加 S 作为安全阈值的判断环节, S 取值 0 或 1。当 $S = 0$ 时机器人与外界不发生碰撞, 机器人正常工作, $S = 1$ 是继任为机器人与外界发生碰撞^[29]。表达式为

$$S = \begin{cases} 0 & (F_T \in [-\delta_f, \delta_f]; M_T \in [-\delta_m, \delta_m]) \\ 1 & (F_T \notin [-\delta_f, \delta_f]; M_T \notin [-\delta_m, \delta_m]) \end{cases} \quad (26)$$

通常情况下结合机器人实际情况进行人为设定, 为了提高碰撞识别的精度, 选择了每个方向最小的力误差作为识别是否发生碰撞的阈值, 即 $\delta_f = 0.4923 \text{ N}$ 。

3 仿真实验

为了验证本文提出的动态力补偿算法和碰撞点检测算法的有效性和精度, 构建了 1 个 3 自由度机器人模型进行仿真实验, 如图 7 所示。

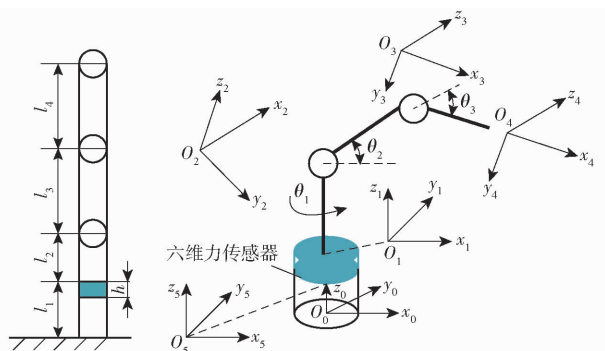


图 7 机器人结构

Fig. 7 Robot structure

为了减少计算量, 机械手的连杆和关节中心对称, 每个连杆的重心位于其自身的中心轴上。表 1 给出了本文 3 自由度机器人每个连杆的结构参数, 材料为合金, $\rho = 2.7 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 。图 7 中, $l_1 = 120 \text{ mm}$, $l_2 = 150 \text{ mm}$, $l_3 = 200 \text{ mm}$, $l_4 = 200 \text{ mm}$, $h = 30 \text{ mm}$ 。

表 1 连杆参数

Tab. 1 Connecting rod parameters

连杆序号	质量/kg	质心相对位置/mm
0	1.598	(0, 0, 60)
1	1.686	(0, 0, 70.024)
2	2.489	(84.685, 0, 0)
3	3.201	(104.684, 0, 0)

各连杆相对于其质心的惯性张量为

$$I_2 = \begin{bmatrix} 390.122 & 0 & -0.164 \\ 0 & 2.137 & 0 \\ -0.164 & 0 & 391.366 \end{bmatrix} \quad (27)$$

$$I_3 = \begin{bmatrix} 402.110 & 515.403 & -89.144 \\ 515.403 & 700.313 & -66.861 \\ -89.144 & -66.861 & 1077.722 \end{bmatrix} \quad (28)$$

$$I_4 = \begin{bmatrix} 123.919 & -292.363 & -103.181 \\ -192.163 & 809.897 & 37.927 \\ -103.181 & 37.927 & 905.914 \end{bmatrix} \quad (29)$$

基座处传感器采集的数据随着时间而不断变化, 将传感器采集到的数据经过动态补偿处理后作为式(2)的输入进行碰撞点的计算。将机器人模型导入 ADAMS, 以验证所提出的动态力补偿算法和碰撞点检测算法。实验中模拟施加的碰撞力的大小、方向和位置已知, 并且实验结果数据以传感器坐标系为基准。

实验中 $\theta_1 = -\pi/6$, $\theta_2 = -\pi/6$, $\theta_3 = -\pi/4$, $\dot{\theta}_1 = \dot{\theta}_2 = \dot{\theta}_3 = 0$, $\ddot{\theta}_1 = 0.3491 \text{ rad/s}^2$, $\ddot{\theta}_2 = 0.1746 \text{ rad/s}^2$, $\ddot{\theta}_3 = 0.4363 \text{ rad/s}^2$ 。机器人按照设置的参数重复运动 10 次, 并在运行至第 3 秒时以相同的碰撞力 (100 N) 在不同的点进行碰撞测试。实验结果如表 2 所示。

为了验证提出算法的精度, 对实验结果进行了误差分析。

各方向分力的相对误差计算式为

$$\Delta F = \frac{\Delta F_n}{|F_c|} \times 100\% \quad (n = x, y, z) \quad (30)$$

式中 ΔF_n ——力在 3 个方向的绝对误差

$|F_c|$ ——测量力矢量的模

合力相对误差计算式为

$$\Delta F_D = \frac{|\sqrt{f_{cx}^2 + f_{cy}^2 + f_{cz}^2} - \sqrt{f_{dx}^2 + f_{dy}^2 + f_{dz}^2}|}{\sqrt{f_{cx}^2 + f_{cy}^2 + f_{cz}^2}} \times 100\% \quad (31)$$

式中 f_{cx} 、 f_{cy} 、 f_{cz} ——测量力的 3 个方向分量

f_{dx} 、 f_{dy} 、 f_{dz} ——计算力的 3 个方向分量

位置各方向的相对误差计算式为

$$\Delta P = \frac{\Delta P_n}{|P_c|} \times 100\% \quad (n = x, y, z) \quad (32)$$

位置的相对误差计算式为

$$\Delta P_D = \frac{\Delta P_x + \Delta P_y + \Delta P_z}{\sqrt{P_{cx}^2 + P_{cy}^2 + P_{cz}^2}} \times 100\% \quad (33)$$

各个方向的分力和位置误差如图 8 所示。在对数据进行误差计算过程中若分母为 0, 则计算结果输出为 0。

由图 8 可以看出, 当碰撞力恒定时, 随着碰撞点距离的变化, 各个方向上分力的相对误差在 5% 以下范围内波动, 合力最大相对误差为 4.8925%。但

表2 不同碰撞点的实验结果

Tab.2 Experimental results of different collision points

序号	检测力/ N	3个方向 分力/N	碰撞位置/ mm	计算力/ N	计算位置/ mm	力绝对误差/ N	力相对 误差/%	位置绝对 误差/mm	位置相对 误差/%
1	100	92.687 3	40.03	94.562 9	40.462 7	1.875 6		0.432 7	
		10.348 6	0	9.674 5	0.043 6	0.674 1	2.204 4	0.043 6	1.547 0
		36.082 8	148.03	37.550 1	149.926	1.467 3		1.896 0	
2	100	62.348 6	0	60.381 3	1.346 8	1.967 3		1.346 8	
		73.948 3	38.49	72.750 0	37.643 3	1.198 3	2.379 9	0.846 7	1.785 6
		25.383 1	167.03	24.315 2	167.897 2	1.067 9		0.867 2	
3	100	-82.943 6	46.83	-84.190 5	47.316 1	1.246 9		0.486 1	
		48.672 5	0	49.607 1	2.379 1	0.934 6	1.946 0	2.379 1	2.391 5
		-27.410 7	184.16	-29.051 4	85.839 1	1.640 7		1.679 1	
4	100	76.894 2	64.07	78.761 5		1.867 3		2.648 3	
		14.687 9	36.83	16.419 5	261.176 3	1.731 6	0.756 5	2.167 3	2.854 0
		-62.221 8	264.19	-61.653 9		0.567 9		3.013 7	
5	100	-16.483 4	82.64	-18.050 5	79.170 9	1.567 1		3.469 1	
		84.678 1	6.76	85.661 5	9.408 1	0.983 4	1.528 3	2.648 1	3.967 9
		-50.575 9	306.82	-51.422 6	313.313 7	0.846 7		6.493 7	
6	100	-45.016 7	116.79	-46.363 5	122.100 8	1.346 8		5.310 8	
		-62.864 3	69.72	-62.229 7	76.489 1	0.634 6	0.876 0	6.769 1	4.826 4
		63.415 9	298.71	64.450 5	302.471 3	1.034 6		3.761 3	
7	100	-86.034 8	190.46	-87.797 2	180.786 6	1.762 4		9.673 4	
		32.186 4	80.73	33.051 6	92.223 7	0.865 2	2.250 0	11.493 7	7.578 0
		39.522 8	422.67	-40.670 4	408.176 6	1.147 6		14.493 4	
8	100	72.189 4	213.41	70.713 2	226.900 1	1.476 2		13.490 1	
		30.160 9	124.08	29.668 6	135.714 8	0.492 3	0.579 6	11.634 8	7.779 2
		-62.281 7	486.49	-63.275 8	503.803 7	0.994 1		17.313 7	
9	100	-80.793 4	219.46	-82.516 8		1.723 4		16.004 6	
		52.879 2	97.61	54.339 6	505.411 4	1.460 4	4.892 5	18.493 7	8.526 3
		26.004 2	519.73	27.138 8		1.134 6		14.318 6	
10	100	-68.493 7	234.18	-70.634 3	253.864 3	2.140 6		19.684 3	
		-24.679 1	126.49	-23.639 4	139.958 2	1.039 7	1.886 2	13.468 2	8.711 9
		-68.553 3	536.18	-69.518 1	555.177 3	0.964 8		18.997 3	

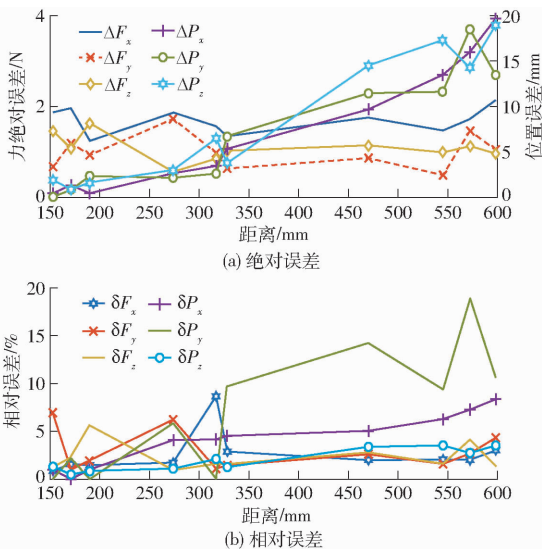


图8 实验结果

Fig.8 Experimental results

随着碰撞点的距离增加,碰撞位置在各个方向上的绝对误差和相对误差不断增加,在最远处距离力传感器坐标系 598.61 mm 的位置碰撞点坐标相对误差达到最大值 8.711 9%。采用这种方法进行碰撞点检测满足机器人最远点碰撞精度要求。

4 结束语

提出了一种单点单外力机器人碰撞点检测算法,并在此基础上提出了六维力传感器动态力补偿算法。对该算法进行了仿真实验,证明了该算法的有效性,同时表明,动态力补偿算法的精度不会随着碰撞点位置的变化产生明显变化。碰撞点检测算法的准确性受碰撞位置影响,在最远处 598.61 mm 位置上碰撞点的相对误差最大值为 8.711 9%,满足机器人碰撞点检测算法的精度要求。

参 考 文 献

- [1] 丁汉. 共融机器人的基础理论和关键技术[J]. 机器人产业, 2016(6):12-17.
DING Han. Basic theories and key technologies of inclusive robots[J]. Robot Industry, 2016(6):12-17. (in Chinese)
- [2] 王志军,刘璐,李占贤. 共融机器人综述及展望[J]. 制造技术与机床,2020(6):30-38,43.
WANG Zhijun, LIU Lu, LI Zhanxian. Summary and prospect of inclusive robot[J]. Manufacturing Technology and Machine Tool,2020(6):30-38,43. (in Chinese)
- [3] 励建安. 人机共融,天人合一——关于康复机器人应用与发展的思考[J]. 中国康复医学杂志,2020,35(8):897-899.
LI Jian'an. Human-machine integration, harmony between man and nature—reflections on the application and development of rehabilitation robots[J]. Chinese Journal of Rehabilitation Medicine,2020,35(8):897-899. (in Chinese)
- [4] 王朝立. 人机共融安全技术发展趋势展望[J]. 自动化仪表,2020,41(3):1-5,10.
WANG Chaoli. Prospect for the development trend of man-machine integration safety technology[J]. Automation Instrumentation,2020,41(3):1-5,10. (in Chinese)
- [5] 禹鑫焱,王正安,吴加鑫,等. 满足不同交互任务的人机共融系统设计[J/OL]. 自动化报:1-12[2020-09-04]. <https://doi.org/10.16383/j.aas.c190753>. (网络首发,录用定稿)
YU Xinyi, WANG Zhengang, WU Jiabin, et al. Human-machine integration system design to meet different interactive tasks[J/OL]. Automation News:1-12[2020-09-04]. <https://doi.org/10.16383/j.aas.c190753>. (in Chinese)
- [6] 迟明善,姚玉峰,刘亚欣. 基于示教编程的共融机器人技能学习方法的研究进展[J]. 仪器仪表学报,2020,41(1):71-83.
CHI Mingshan, YAO Yufeng, LIU Yaxin. Research progress of communicative robot skill learning methods based on teaching programming[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument,2020,41(1):71-83. (in Chinese)
- [7] 于朝晖. 人机共融 憧憬美好明天——2019世界机器人大会在京成功举办[J]. 网信军民融合,2019(8):21-24.
YU Zhaohui. Human-machine integration, looking forward to a better tomorrow—the 2019 World Robotics Conference was successfully held in Beijing[J]. Network Information Military-civilian Integration,2019(8):21-24. (in Chinese)
- [8] 顾锡新. 共融机器人与深海航行器前沿技术[J]. 张江科技评论,2019(4):55-57.
GU Xixin. The cutting-edge technology of inclusive robots and deep-sea vehicles[J]. Zhangjiang Science and Technology Review,2019(4):55-57. (in Chinese)
- [9] 石金进,吴海彬,马志举. 一种新型机器人仿生皮肤的设计[J]. 机器人,2013,35(1):32-38.
SHI Jinjin, WU Haibin, MA Zhijun. Design of a new robot skin[J]. Robot, 2013, 35(1):32-38. (in Chinese)
- [10] ZAMAN M, ISLAM M R, RAHMAN M H, et al. Robot sensor system for supervised rehabilitation with real-time feedback [J]. Multimedia Tools and Applications, 2020,79(35):26643-26660.
- [11] 卞正岗. 机器人和机器人用传感器的发展[J]. 智慧工厂,2019(10):46-49.
BIAN Zhenggang. The development of robots and robot sensors[J]. Smart Factory,2019(10):46-49. (in Chinese)
- [12] 严尔军,张强. 基于多维尺度法和卡尔曼滤波的机器人传感器网络跟踪定位[J]. 中国工程机械学报,2018,16(6):486-491.
YAN Erjun, ZHANG Qiang. Robot sensor network tracking and positioning based on multidimensional scaling method and Kalman filter[J]. Chinese Journal of Construction Machinery,2018,16(6):486-491. (in Chinese)
- [13] ARKADIUSZ G, MICHAL P. Implementation of an external laser scanner into control system of the NAO Robot [J]. IFAC PapersOnLine, 2018,51(6):34-39.
- [14] 刘可,李可,宿磊,等. 基于蚁群算法与参数迁移的机器人三维路径规划方法[J/OL]. 农业机械学报,2020,51(1):29-36.
LIU Ke, LI Ke, SU Lei, et al. Three-dimensional path planning method for robots based on ant colony algorithm and parameter migration[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2020,51(1):29-36. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20200103flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2020.01.003. (in Chinese)
- [15] 翟国栋,张文涛,岳中文,等. 基于双目视觉技术的煤矿救援机器人研究进展[J]. 煤炭科学技术,2020,48(7):206-217.
ZHAI Guodong, ZHANG Wentao, YUE Zhongwen, et al. Research progress of coal mine rescue robot based on binocular vision technology[J]. Coal Science and Technology,2020,48(7):206-217. (in Chinese)
- [16] 张初宏. 基于虚拟定标线的巡检机器人视觉导航设计研究[J]. 内燃机与配件,2020(12):227-228.
ZHANG Chuhong. Research on visual navigation design of inspection robot based on virtual calibration line [J]. Internal Combustion Engine & Parts,2020(12):227-228. (in Chinese)
- [17] 陈章宝,侯勇. 网球捡球机器人视觉导航系统设计[J]. 廊坊师范学院学报(自然科学版),2020,20(2):42-45.
CHEN Zhangbao, HOU Yong. Design of visual navigation system of tennis ball picking robot[J]. Journal of Langfang Teachers College (Natural Science Edition),2020,20(2):42-45. (in Chinese)
- [18] 王先伟,吴明晖,周俊,等. 采茶机器人导航避障及路径规划研究[J]. 农业装备与车辆工程,2019,57(12):121-124.
WANG Xianwei, WU Minghui, ZHOU Jun, et al. Research on navigation obstacle avoidance and path planning of tea picking robot[J]. Agricultural Equipment and Vehicle Engineering,2019,57(12):121-124. (in Chinese)
- [19] 李智靖,叶锦华,吴海彬. 机器人带未知负载条件下的碰撞检测算法[J]. 机器人,2020,42(1):29-38.
LI Zhijing, YE Jinhua, WU Haibin. Collision detection algorithm for robot with unknown load[J]. Robot,2020,42(1):29-38. (in Chinese)
- [20] 赵京,张自强,郑强,等. 机器人安全性研究现状及发展趋势[J]. 北京航空航天大学学报,2018,44(7):1347-1358.
ZHAO Jing, ZHANG Ziqiang, ZHENG Qiang, et al. Research status and development trend of robot safety[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2018, 44(7):1347-1358. (in Chinese)

- [15] 张彦斌, 吴鑫. 完全解耦二移动二转动并联机构结构综合[J/OL]. 农业机械学报, 2013, 44(8): 250-256.
ZHANG Yanbin, WU Xin. Structural synthesis of fully-decoupled two-translational and two-rotational parallel mechanisms[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(8): 250-256. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20130843&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2013.08.043. (in Chinese)
- [16] GAN D, DAI J S, DIAS J, et al. Singularity-free workspace aimed optimal design of a 2T2R parallel mechanism for automated fiber placement[J]. Journal of Mechanisms and Robotics, 2015, 7(4): 041022.
- [17] 范彩霞, 刘宏昭, 张彦斌. 基于构型演变和李群理论的2T2R型四自由度并联机构型综合[J]. 中国机械工程, 2010, 21(9): 1101-1105.
FAN Caixia, LIU Hongzhao, ZHANG Yanbin. Type synthesis of 2T2R 4-DOF parallel mechanism based on configuration evolution and Lie Group theory[J]. China Mechanical Engineering, 2010, 21(9): 1101-1105. (in Chinese)
- [18] LI Q, HERVÉ J M. 1T2R parallel mechanisms without parasitic motion[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2010, 26(3): 401-410.
- [19] GOSSELIN C, ANGELES J. Singularity analysis of closed-loop kinematic chains[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1990, 6(3): 281-290.
- [20] TSAI L W. Robot analysis; the mechanics of serial and parallel manipulators[M]. John Wiley & Sons, 1999.
- [21] LI Y, XU Q. Stiffness analysis for a 3-PUU parallel kinematic machine[J]. Mechanism and Machine Theory, 2008, 43(2): 186-200.
- [22] WANG C, FANG Y, GUO S, et al. Design and kinematical performance analysis of a 3-RUS/RRR redundantly actuated parallel mechanism for ankle rehabilitation[J]. Journal of Mechanisms and Robotics, 2013, 5(4): 041003.
- [23] ARSENAULT M, BOUDREAU R. The synthesis of three-degree-of-freedom planar parallel mechanisms with revolute joints (3-RRR) for an optimal singularity-free workspace[J]. Journal of Robotic Systems, 2004, 21(5): 259-274.
- [24] WU J, WANG J, WANG L, et al. Performance comparison of three planar 3-DOF parallel manipulators with 4-RRR, 3-RRR and 2-RRR structures[J]. Mechatronics, 2010, 20(4): 510-517.
- [25] SAGLIA J A, DAI J S, CALDWELL D G. Geometry and kinematic analysis of a redundantly actuated parallel mechanism that eliminates singularities and improves dexterity[J]. Journal of Mechanical Design, 2008, 130(12): 124501.
- [26] WANG C, FANG Y, GUO S, et al. Design and kinematic analysis of redundantly actuated parallel mechanisms for ankle rehabilitation[J]. Robotica, 2015, 33(2): 366.

~~~~~

(上接第 401 页)

- [21] 吴海彬, 彭爱泉, 何素梅. 基于危险指数最小化的机器人安全运动规划[J]. 机械工程学报, 2015, 41(9): 18-27.  
WU Haibin, PENG Aiquan, HE Sumei. Robot safe motion planning based on minimization of hazard index[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 41(9): 18-27. (in Chinese)
- [22] SOMEYA T, KATO Y, SEKITANI T, et al. Conformable, flexible, large-area networks of pressure and thermal sensors with organic transistor active matrixes[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2005, 102(35): 12321-12325.
- [23] HUANG Y, WEI L U, ZHAO X, et al. Design and experiment of flexible multi-functional tactile sensors for robot skin[J]. Robot, 2011, 33(3): 347-353.
- [24] WANG L, DING T, WANG P. Research on stress and electrical resistance of skin-sensing silicone rubber/carbon black nanocomposite during decompressive stress relaxation[J]. Smart Materials & Structures, 2009, 18(6): 065002.
- [25] HUANG Y, MING X, XIANG B, et al. Two types of flexible tactile sensor arrays of robot for three-dimension force based on piezoresistive effects[C]//IEEE International Conference on Robotics & Biomimetics. IEEE, 2009.
- [26] YU Q L, ZHENG C C, XU H, et al. Collision sensing using force/torque sensor[J]. Journal of Sensors, 2016: 6291216.
- [27] HAN Z, ZHANG Y R, SHANG C X, et al. Analysis of contact localization of dexterous robot hand using force/torque measurement[C]//Control, Automation, Robotics and Vision Conference, 2005: 1303-1308.
- [28] 韩壮志, 王田苗, 张玉茹, 等. 基于指端6维力传感器的接触点测量算法研究[J]. 北京航空航天大学学报, 2004, 30(5): 400-404.  
HAN Zhuangzhi, WANG Tianmiao, ZHANG Yuru, et al. Research on contact point measurement algorithm based on fingertip 6-dimensional force sensor[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2004, 30(5): 400-404. (in Chinese)
- [29] 张昱东. 基于六维力传感器的机器人力控制方法研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2019.  
ZHANG Yudong. Research on robot force control method based on six-dimensional force sensor[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2019. (in Chinese)