

引文格式: 李根, 李鹏程, 吴超, 等. 基于遗传算法的机器人负载重力补偿优化算法研究 [J]. 航空制造技术, 2021, 64(5):52-59.

LI Gen, LI Pengcheng, WU Chao, et al. Research on optimization algorithm of robot load gravity compensation based on genetic algorithm[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2021, 64(5):52-59.

# 基于遗传算法的机器人负载重力补偿优化算法研究\*

李根, 李鹏程, 吴超, 沈焯

(南京航空航天大学机电学院, 南京 210016)

[摘要] 航空航天装配领域, 利用安装在机器人末端的六维力传感器来感知外力是实现工业机器人柔顺装配的关键技术之一, 而负载的存在会干扰对外力的感知。针对工业机器人末端负载的重力补偿, 提出一种基于遗传算法的重力补偿优化算法。此方法以误差平方和最小为目标建立了最优解模型, 利用遗传算法求解, 最终可以在不使用测量仪器的情况下, 估计力传感器安装偏角, 提高重力补偿精度。同时设计了特定的机器人测量姿态来减少系统误差。试验表明, 优化算法可以补偿任意角度的力传感器安装偏角, 与补偿前相比, 各方向最大重力补偿误差及平均重力补偿误差都有所减小。

关键词: 重力补偿; 传感器标定; 工业机器人; 六维力传感器; 遗传算法

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2021.05.052



李根

硕士研究生, 主要研究方向为机器人柔顺控制、人机协作。

随着新型航空装配对装配精度以及研制周期的要求越来越高, 工业机器人应用在航天装备自动化装配的场合越来越多<sup>[1-2]</sup>。在利用机器人进行装配任务时, 有很多场合是机器人与人在共享的工作空间中协作完成复杂的任务, 即人机协作, 而外力感知是实现人机协作的关键技术之一<sup>[3]</sup>。

在现阶段, 对于机器人装配, 通常是在负载与工业机器人末端法兰之间安装六维力传感器(下文简称为力传感器), 以实现机器人的力反馈控制。力传感器的主要功能是感知作用在其敏感端的力及力矩并使之三维正交化<sup>[4]</sup>, 机器人在静止状态下时, 力传感器的测量数值由 3 部分组

成: 负载重力、力传感器零点和施加外力。负载的存在会干扰对外力的感知, 对于人机协作而言, 从测量数据中得到精准外力信息格外重要, 因此需要对安装在力传感器上的负载进行重力补偿。

在机器人末端负载重力补偿方面, Stavros<sup>[5]</sup>从力传感器测量值的组成出发, 通过将机器人末端移动到特定位置来标定力传感器的质心和重量; Kim 等<sup>[6]</sup>提出了在重力补偿之前对六维力传感器进行回零处理, 从而消除零点漂移误差; Kubela 等<sup>[7]</sup>提出了利用机器人姿态来计算负载重力作用在六维力传感器各方向的分力, 并通过 KUKA 公司的 RSI 通讯进行了实时负载重力补

\* 基金项目: 某基础科研计划 (JCKY2019606B001); 国家科技重大专项课题 (2018ZX04014001)。

偿;张光辉等<sup>[8]</sup>在机器人运动学的基础上,将力传感器信息和负载信息转换至基坐标系求解;缪新等<sup>[9]</sup>将力传感器坐标系和法兰坐标系分开考虑,通过最优解的方式,利用多组机器人姿态测量数据,计算出力传感器偏角;高强等<sup>[10]</sup>先在机器人原点测量负载重力,然后在机器人运动时,利用基坐标与力传感器的旋转矩阵,将负载重力转换至力传感器坐标系进行求解,从而抵消负载重力;张立建等<sup>[11]</sup>通过最小二乘法,利用不少于3个随机机器人姿态的力传感器数值,分别计算出传感器零点、负载重力重心、机器人安装倾角。

其中,文献[5-10]都是假设世界坐标系与机器人基坐标系重合,即重力方向为机器人的Z轴,但在实际情况下,例如安装在AGV上的机器人,其基坐标系并不一定与世界坐标系平行。而且,文献[7-10]未考虑力传感器的零点漂移,默认力传感器的初始值为0,这与事实不符。虽然文献[5-6]考虑了零点漂移问题,但它们未考虑在每次安装负载后,力传感器零点都会改变,如果每次都按照文献中的方法进行标定,标定时间过长。文献[11]默认力传感器坐标系与法兰坐标系平行,这对连接件的制造精度有非常高的要求,但如果遇到如文献[9]中力传感器与法兰安装误差角度过大的情况,则会出现很大误差。

综上所述,在现有的关于负载重力补偿的研究中,大多默认机器人基坐标系Z轴与重力方向相同,但在实际情况中,往往需要考虑基坐标系与世界坐标系的关系。在进行补偿时,应该综合考虑力负载重力、传感器零点漂移、机器人安装倾角、力传感器安装偏角。对于航空航天装配系统而言,由于大多都是大负载,为了使机器人得到更加精准的外力感知能力,应该尽可能使补偿效果达到最好。

本文研究一种工业机器人末端负载重力补偿优化方法,通过分析机器人系统各部分之间的位置关系,建立重力补偿模型,考虑力传感器安装偏角对补偿结果的影响,以误差平方和最小为目标建立最优解模型,利用遗传算法进行求解,同时在测量时设置了特定姿态来减少系统误差,最终可以在不使用测量仪器的情况下,估计力传感器安装偏角,从而提高重力补偿精度。

## 重力补偿计算模型建立

本文的重力补偿模型一部分参考了文献[11]。

### 1 坐标系关系建立

机器人系统由机器人本体、力传感器、负载组成。设世界坐标系为 $O_w-X_w Y_w Z_w$ ,机器人坐标系为 $O_r-X_r Y_r Z_r$ ,法兰坐标系为 $O_f-X_f Y_f Z_f$ ,力传感器坐标系为 $O_s-X_s Y_s Z_s$ ,它们之间关系如图1所示。

假设世界坐标系的 $Z_w$ 方向与重力方向平行且反向。

规定以下转换关系:

(1) $O_s-X_s Y_s Z_s$ 相对于 $O_f-X_f Y_f Z_f$ 的姿态转换矩阵为 ${}^fR = R_Z(\alpha)R_Y(\beta)R_Z(\gamma)$ 。

(2) $O_f-X_f Y_f Z_f$ 相对于 $O_r-X_r Y_r Z_r$ 的姿态转换矩阵为 ${}^rR = R_Z(A)R_Y(B)R_Z(C)$ 。

(3) $O_r-X_r Y_r Z_r$ 相对于 $O_w-X_w Y_w Z_w$ 的姿态转换矩阵为 ${}^wR = R_X(\theta)R_Y(\omega)$ 。

其中, $R$ 为 $3 \times 3$ 的旋转矩阵。 ${}^wR$ 的设置是为了表示机器人安装平面与地面的安装倾角,一般只存在于 $O_w-X_w Y_w Z_w$ 的 $X_w Z_w$ 平面和 $Y_w Z_w$ 平面,因此不考虑 $O_s-X_s Y_s Z_s$ 相对于 $O_w-X_w Y_w Z_w$ 的 $Z_w$ 轴旋转。

### 2 力传感器与负载关系

首先假设无外力,以力传感器坐标系为基准分解负载重力,如图2所示。

从图2中可以得到:

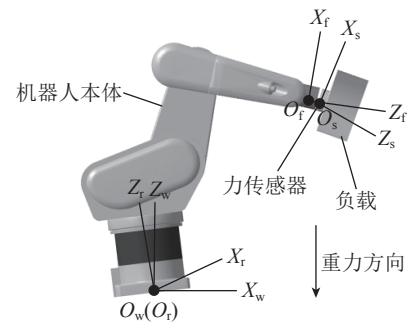


图1 坐标系关系

Fig.1 Coordinate system relationship

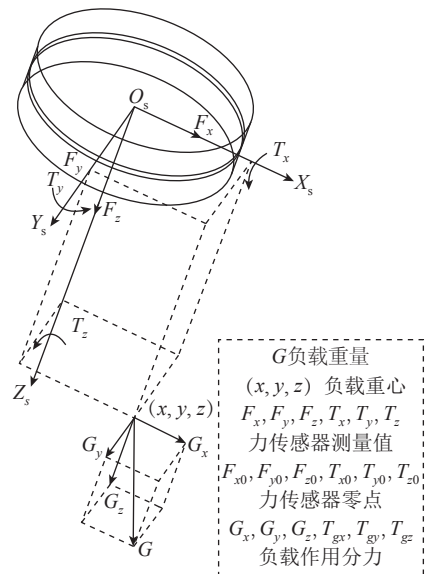


图2 力传感器坐标系与负载关系

Fig.2 Relationship between force sensor coordinate system and load

$$\begin{cases} T_{gx} = G_z \times y - G_y \times z \\ T_{gy} = G_x \times z - G_z \times x \\ T_{gz} = G_y \times x - G_x \times y \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} G_x = F_x - F_{x0} \\ G_y = F_y - F_{y0} \\ G_z = F_z - F_{z0} \\ T_{gx} = T_x - T_{x0} \\ T_{gy} = T_y - T_{y0} \\ T_{gz} = T_z - T_{z0} \end{cases} \quad (2)$$

将式(2)代入式(1)并整理成矩阵形式可得式(3)。

$$\begin{bmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & F_z & -F_y & 1 & 0 & 0 \\ -F_z & 0 & F_x & 0 & 1 & 0 \\ F_y & -F_x & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ d_1 \\ d_2 \\ d_3 \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中,  $d_1=T_{x0}+F_{y0} \times z-F_{z0} \times y$ ,  $d_2=T_{y0}+F_{z0} \times x-F_{x0} \times z$ ,  $d_3=T_{z0}+F_{x0} \times y-F_{y0} \times x$ 。

可简写为:

$$t = \Phi \cdot p \quad (4)$$

通过改变  $N$  次不共面的机器人姿态 ( $N \geq 3$ ), 在机器人稳定后, 读取力传感器数值, 得到  $N$  组力传感器测量数据, 整理可得:

$$T = \Phi \cdot p \quad (5)$$

其中,  $T = [t_1^T \ t_2^T \ \dots \ t_N^T]_{3N}^T$ ,

$\Phi = [\varphi_1^T \ \varphi_2^T \ \dots \ \varphi_N^T]_{3N \times 6}^T$ , 下标表示测量数据编号。

式(5)两边同时左乘  $\Phi^T$  可得:

$$p = (\Phi^T \Phi)^{-1} \Phi^T T \quad (6)$$

由此可以算出负载在力传感器坐标系下的坐标  $(x, y, z)$  以及  $d_1, d_2, d_3$ 。

### 3 力传感器与机器人本体关系

重力在世界坐标系  $O_w-X_w Y_w Z_w$  中的方向向量为  $g_w = [0 \ 0 \ -1]^T$ , 则重力在力传感器坐标系  $O_s-X_s Y_s Z_s$  中可以表示为:

$$\begin{bmatrix} G_x \\ G_y \\ G_z \end{bmatrix} = G_s^f R_f^w R_r^w R_g^w = {}_s^f R_f^f R \begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \\ k_3 \end{bmatrix} \quad (7)$$

其中,  $k_1=G \cos \theta \sin \omega$ ,  $k_2=-G \sin \theta$ ,  $k_3=-G \cos \theta \cos \omega$ 。

由式(2)可得:

$$\begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_x \\ G_y \\ G_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} F_{x0} \\ F_{y0} \\ F_{z0} \end{bmatrix} = {}_s^f R_f^f R \begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \\ k_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} F_{x0} \\ F_{y0} \\ F_{z0} \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} f \\ s \end{bmatrix} R_f^f R \mid I \Big]_{3 \times 6} \begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \\ k_3 \\ F_{x0} \\ F_{y0} \\ F_{z0} \end{bmatrix} \quad (8)$$

可简写为:

$$f = r \cdot K \quad (9)$$

其中,  $K=[k_1 \ k_2 \ k_3 \ F_{x0} \ F_{y0} \ F_{z0}]^T$ 。根据前文得到的  $N$  组测量数据, 整合可得:

$$F = R(a, \beta, \gamma) \cdot K \quad (10)$$

其中  $F = [f_1^T \ f_2^T \ \dots \ f_N^T]_{3N \times 1}^T$ ,

$R = [r_1^T \ r_2^T \ \dots \ r_N^T]_{3N \times 6}^T$ ,  $R$  含有参数  $\alpha, \beta, \gamma$ , 对于  $\alpha, \beta, \gamma$  的选取下文论述, 此时假设  $\alpha, \beta, \gamma$  已知, 由于旋转矩阵的性质, 可以确定  $R$  是满列秩的。

式(10)两边同时左乘  $R^T$  得:

$$K = (R^T R)^{-1} R^T F \quad (11)$$

由此可以算出  $k_1, k_2, k_3, F_{x0}, F_{y0}, F_{z0}$ 。

进而可得

$$\begin{cases} T_{x0} = d_1 - F_{y0} \times z + F_{z0} \times y \\ T_{y0} = d_2 - F_{z0} \times x + F_{x0} \times z \\ T_{z0} = d_3 - F_{x0} \times y + F_{y0} \times x \end{cases} \quad (12)$$

至此, 若力传感器安装偏角  $\alpha, \beta, \gamma$  已知, 可将负载在力传感器坐标系下的坐标  $(x, y, z)$ , 力传感器零点  $[F_{x0} \ F_{y0} \ F_{z0} \ T_{x0} \ T_{y0} \ T_{z0}]^T$ , 负载重量  $G = \sqrt{k_1^2 + k_2^2 + k_3^2}$ , 机器人底座倾角  $\theta = \arcsin(-k_y/G)$ ,  $\omega = \arctan(-k_x/k_z)$  全部得出。

### 4 力传感器与法兰的关系

连接件与法兰、力传感器连接处一般通过定位销定位, 用螺栓连接, 只要连接件的机械加工精度达到要求, 一般认为法兰坐标系  $O_f-X_f Y_f Z_f$  和力传感器坐标系  $O_s-X_s Y_s Z_s$  平行, 即  $\alpha = \beta = \gamma = 0$ 。但有时由于加工误差、安装误差等因素, 往往会出现或大或小的传感器安装偏角, 而这些角度很难测得。因此, 为了获取更加准确的

传感器安装偏角并使重力补偿效果提升, 对重力补偿算法进行了优化。

## 重力补偿优化算法研究

### 1 重力补偿误差分析

本文的重力补偿算法是建立在最小二乘法的基础之上的, 而最小二乘法的目的是使所求数据与实际数据之间的误差平方和最小<sup>[12]</sup>, 因此误差平方和是判定所求数据是否更贴近于实际的指标。当无外力时, 对于第  $i$  个 ( $1 \leq i \leq N$ ) 测量姿态有

$$\begin{bmatrix} \delta_{xi} \\ \delta_{yi} \\ \delta_{zi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{xi} \\ F_{yi} \\ F_{zi} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} F_{x0} \\ F_{y0} \\ F_{z0} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} G_{xi} \\ G_{yi} \\ G_{zi} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \delta_{ai} \\ \delta_{bi} \\ \delta_{ci} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{zi} \\ T_{yi} \\ T_{xi} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} T_{z0} \\ T_{y0} \\ T_{x0} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} T_{gzi} \\ T_{gyi} \\ T_{gxi} \end{bmatrix} \quad (13)$$

其中,  $\delta_{xi}, \delta_{yi}, \delta_{zi}, \delta_{ai}, \delta_{bi}, \delta_{ci}$  为第  $i$  个测量姿态下的重力补偿误差,  $F_{xi}, F_{yi}, F_{zi}, T_{xi}, T_{yi}, T_{zi}$  为第  $i$  个测量姿态下的实际测量值(即力传感器数值),  $G_{xi}, G_{yi}, G_{zi}$  和  $T_{gxi}, T_{gyi}, T_{gzi}$  可分别由式(7)和式(1)得到。从前文的重力补偿模型可以看出, 重力补偿误差与负载重量  $G$  有密切的关系, 而负载重量  $G$  与六维力传感器的测量力值相关。因此本文的优化模型只考虑测量力值。

令

$$S(\alpha, \beta, \gamma) = \sum_{i=1}^N (\delta_{xi}^2 + \delta_{yi}^2 + \delta_{zi}^2) \quad (14)$$

其中,  $S$  为测量误差的平方和, 根据所述算法可以发现, 它是一个关于  $\alpha, \beta, \gamma$  的函数, 若  $\alpha, \beta, \gamma$  已知, 误差平方和  $S$  便可以求出。

### 2 优化模型建立

通过仿真发现,  $\alpha, \beta, \gamma$  越接近实际转角, 误差的平方和会越小, 且重力补偿效果会越好。因此, 可以利用寻找最优解的方法, 找出误差的平方和最小时的  $\alpha, \beta, \gamma$  值, 将其设为预

测值,步骤如下。

$\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  的值由两部分组成,可以表示为:

$$\begin{cases} \alpha = \alpha_0 + \Delta\alpha \\ \beta = \beta_0 + \Delta\beta \\ \gamma = \gamma_0 + \Delta\gamma \end{cases} \quad (15)$$

其中,  $\alpha_0$ 、 $\beta_0$ 、 $\gamma_0$  为传感器偏角的初始预估值,  $\Delta\alpha$ 、 $\Delta\beta$ 、 $\Delta\gamma$  为传感器偏角的优化值。

如果连接件的加工误差不大,  $O_f-X_f Y_f Z_f$  和  $O_s-X_s Y_s Z_s$  的  $XY$  平面几乎重合,因此  $\beta_0$ 、 $\gamma_0$  一般设置为  $0^\circ$ 。 $\alpha_0$  可以通过安装传感器时法兰  $X$  正方向与传感器  $X$  正方向的关系设置,如果同向,  $\alpha_0$  可以设置为  $0^\circ$ ; 如果反向,  $\alpha_0$  可以设置为  $\pm 180^\circ$ , 以此类推。

给  $\Delta\alpha$ 、 $\Delta\beta$ 、 $\Delta\gamma$  设置一个范围,即

$$\begin{cases} \Delta\alpha \in [l_\alpha, u_\alpha] \\ \Delta\beta \in [l_\beta, u_\beta] \\ \Delta\gamma \in [l_\gamma, u_\gamma] \end{cases} \quad (16)$$

其中,  $l_\alpha$ 、 $l_\beta$ 、 $l_\gamma$  分别为  $\Delta\alpha$ 、 $\Delta\beta$ 、 $\Delta\gamma$  的下界,  $u_\alpha$ 、 $u_\beta$ 、 $u_\gamma$  分别为  $\Delta\alpha$ 、 $\Delta\beta$ 、 $\Delta\gamma$  的上界。范围的选取与初始预估值的准确度有关,如果初始预估值较为准确(例如法兰  $X$  正方向与传感器  $X$  正方向几乎重合),可以选取在一个较小的范围;相反,如果初始预估值无法准确预估(例如传感器与法兰之间随机安装),可以选取一个较大的范围。 $\Delta\alpha$ 、 $\Delta\beta$ 、 $\Delta\gamma$  的范围影响遗传算法的计算效率及准确度。

那么优化问题可以描述为:

$$\min(S) \quad (17)$$

$$\begin{cases} l_\alpha \leq \Delta\alpha \leq u_\alpha \\ l_\beta \leq \Delta\beta \leq u_\beta \\ l_\gamma \leq \Delta\gamma \leq u_\gamma \end{cases}$$

本文采用遗传算法对优化问题进行求解。

由于求解的是目标函数最小值的优化问题,所以应对原始的目标函数进行变换:

$$F(X) = \begin{cases} C_{\max} - S(X) & S(X) < C_{\max} \\ 0 & S(X) \geq C_{\max} \end{cases} \quad (18)$$

其中,  $C_{\max}$  为参考系数,根据试验经验,一般取 10 左右; 0 为遗传算法中

的个体。

个体编码采用浮点数编码方法。假设  $l_\alpha=l_\beta=l_\gamma=-1$ ,  $u_\alpha=u_\beta=u_\gamma=1$ , 由于染色体  $X$  的初始值是随机的,则

$$X = [x_\alpha, x_\beta, x_\gamma]^T \quad (19)$$

其中,  $x_\alpha$ ,  $x_\beta$ ,  $x_\gamma \in [-1.000, 1.000]$ , 精确到小数点后 3 位,比如,  $X$  的表现型可以是  $[-0.061, 0.123, -0.950]^T$ 。

使用乘幂尺度变换的方法进行适应度评价,即

$$F' = F^k \quad (20)$$

其中,  $F'$  表示变换后的适应度,  $k$  为调整参数,  $F$  是步骤 (1) 中的变换目标函数。

选择算子采用比例选择方法,变异算子采用均匀变异的方法,交叉算子选择每个基因的相连处。群体大小  $M$ 、交叉概率  $p_c$  (0.4~0.99)、变异概率  $p_m$  (0.0001~0.1)、终止代数  $T$  (100~1000) 根据  $\Delta\alpha$ 、 $\Delta\beta$ 、 $\Delta\gamma$  的取值范围具体调整,其中群体大小  $M$  可以选取较大的数。由于篇幅原因,在此不进行具体描述。

通过遗传算法算出最优解,选取的值为  $\Delta\alpha_c$ 、 $\Delta\beta_c$ 、 $\Delta\gamma_c$  (用下标  $c$  表示其已知),使  $\alpha = \alpha_0 + \Delta\alpha_c$ ,  $\beta = \beta_0 + \Delta\beta_c$ ,  $\gamma = \gamma_0 + \Delta\gamma_c$ , 得到预估的传感器安装偏角。

## 试验验证

### 1 试验条件

试验采用 KUKA 公司的 KR210-2700 机器人,其主要参数见表 1。六维力传感器采用 ATI 公司的 Gamma IP60 型传感器,其测量范围及精度参数见表 2。

试验用的力传感器负载重约 12kg,试验实物如图 3 所示。

### 2 试验过程及结果

由于最小二乘法对于个体数据的误差比较敏感,理论上是测量数据越多,优化结果越好,而获取过多的测量数据会花费较多的时间。因此为了提高优化效果,并避免测量时间冗长,选取对称机器人姿态作为测量姿态,如表 3 所示。这样设置的好

表 1 KR210-2700 机器人技术参数

Table 1 KR210-2700 robot technical parameters

最大负载 /kg	重复定位精度 /mm	最大工作半径 /mm	轴数 / 个
275	$\pm 0.05$	2701	6

表 2 Gamma IP60 F/T 力传感器技术参数

Table 2 Gamma IP60 F/T force sensor technical parameters

属性	$F_x$ /N	$F_y$ /N	$F_z$ /N	$T_x$ /(N·m)	$T_y$ /(N·m)	$T_z$ /(N·m)
量程	130	130	400	400	10	10
分辨率	1/40	1/40	1/20	1/800	1/800	1/800

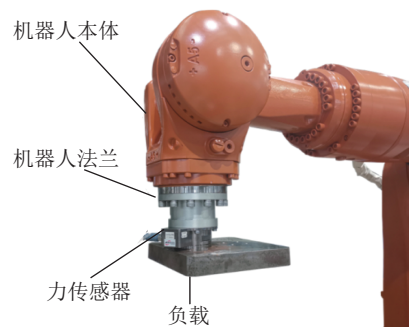


图 3 重力补偿试验平台

Fig.3 Gravity compensation experiment platform

表3 机器人测量姿态  
Table 3 Robot measuring attitude

机器人姿态	序号													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
A/(°)	0	-180	54.79	125.26	-125.26	-54.74	-90	-125.3	-54.74	0	54.74	90	125.26	0
B/(°)	90	0	-30	30	30	-30	0	-30	30	0	30	0	-30	-90
C/(°)	0	-180	144.74	144.74	-144.74	-144.74	-90	-35.26	0	35.26	35.26	90	35.26	0

处在于,不仅可以充分利用到每个轴的数据,还可以避免一些不必要的误差。例如,由于传感器的分辨率,当在测量姿态1状态下时,可能Z轴测得的负载重量会多一个或少一个分辨率单位的误差,这就会导致计算结果偏大或者是偏小;而在测量姿态14状态下,Z轴测得的数据会反方向多一个或少一个分辨率单位的误差,根据最小二乘法原理,可使计算结果更加准确。

因为本文的重点在于验证预估力传感器安装偏角的有效性,对于不同负载的重力补偿效果在此不进行赘述。考虑两种情况:

- (1)力传感器安装失误(力传感器X正方向与法兰X正方向反向);
- (2)力传感器安装正确(力传感器X正方向与法兰X正方向几乎重合)。

为了更好说明本文方法的有效性,两种情况均不使用定位销,从而使传感器安装偏角存在随机性。下文简称这两种情况为情况(1)和情况(2)。

分别进行试验,每次试验依次调整机器人到表3所列的14个姿态,每个姿态下,连续采集1000组传感器数据,求其平均值作为计算参考数据,表4和表5为试验数据。

在情况(1)时,设置传感器安装偏角初始预估值为 $[180^\circ, 0^\circ, 0^\circ]$ ;在情况(2)时,设置传感器安装偏角初始预估值为 $[0^\circ, 0^\circ, 0^\circ]$ 。首先分别通过优化前的重力补偿算法得到安装后的负载重力、负载重心、传感

表4 安装失误时力传感器测量数据  
Table 4 Force sensor measurement data when installed incorrectly

序号	测量方向					
	$F_x/N$	$F_y/N$	$F_z/N$	$T_x/(N \cdot m)$	$T_y/(N \cdot m)$	$T_z/(N \cdot m)$
1	-127.3189	4.9439	7.0310	-0.2559	-1.5137	-0.1384
2	-6.0194	5.4411	127.2172	-0.1733	6.4508	-0.1575
3	53.2523	66.1553	92.4681	-1.1582	5.6368	-3.2102
4	-67.0308	65.2755	92.2761	-1.1876	3.7363	-3.1375
5	-66.3563	-54.1310	92.4172	0.7667	3.7462	2.8094
6	53.6035	-52.7198	92.8688	0.8283	5.6945	2.7368
7	-6.6631	-115.5394	7.7431	1.7857	0.4677	5.7643
8	54.1819	-54.6492	-78.1011	0.7798	-2.9299	2.7693
9	-67.0278	-55.7630	-78.2030	0.7371	-4.8536	2.8506
10	-7.3960	4.2929	-113.9025	-0.2225	-5.6993	-0.1577
11	-67.8588	65.1436	-78.4052	-1.2267	-4.8583	-3.1579
12	-7.2827	124.9369	7.3084	-2.1848	0.4220	-6.1538
13	53.3910	66.0253	-78.2743	-1.1964	-2.9340	-3.2388
14	114.2307	6.3579	7.8275	-0.1731	2.3355	-0.2675

器零点、机器人安装偏角。之后利用遗传算法,求解最优解,并将最优解代入算法算出补偿后的重力补偿数据,得到优化前后的数据,如表6所示。

可以看出,无论力传感器安装是否正确,本文的优化算法都可以进行有效预估传感器安装偏角。其中,在情况(1)时,如果不考虑传感器安装偏角,重力补偿结果异常,误差平方和也非常大,而经过优化后,重力补偿结果正常(主要从负载重量项看出),误差平方和大幅度减小。

随后在情况(2)下,任意调整机器人姿态并采集传感器数据,验证姿态如表7所示的,比较补偿传感器安装偏角前后的重力补偿误差,如图4和图5所示。

从图4可以看出,在补偿传感器安装偏角后,各方向的最大重力补偿误差、平均重力补偿误差都明显减小。图5中的合力误差为 $\sqrt{\delta_{xi}^2 + \delta_{yi}^2 + \delta_{zi}^2}$ ,合力矩误差为 $\sqrt{\delta_{ai}^2 + \delta_{bi}^2 + \delta_{ci}^2}$ ,从中可以看出,与优化前相比,优化后的合力最大重力补偿误差降低(1-0.9095/1.5298)

表5 安装正确时力传感器测量数据

Table 5 Force sensor measurement data when installed correctly

序号	测量方向					
	$F_x/N$	$F_y/N$	$F_z/N$	$T_x/(N \cdot m)$	$T_y/(N \cdot m)$	$T_z/(N \cdot m)$
1	116.051	6.17439	1.63997	-0.250067	2.08609	-0.015629
2	-5.96189	5.43666	120.603	-0.332315	-5.8255	-0.14606
3	-64.3004	-56.3396	85.9138	0.6303	-5.02863	-3.26445
4	55.7107	-54.6537	86.3175	0.650031	-3.11703	-3.06703
5	53.7715	65.5401	86.1738	-1.26464	-3.11043	2.85513
6	-66.4017	64.0974	85.764	-1.25457	-5.02764	2.6939
7	-6.98055	125.607	1.26127	-2.18678	0.184539	5.77921
8	-66.5748	64.8734	-84.1143	-1.18065	3.47686	2.72501
9	54.8401	66.4051	-83.6502	-1.17189	5.40493	2.90379
10	-4.16412	5.79186	-119.455	-0.203575	6.22965	-0.13883
11	56.8385	-54.8047	-83.5675	0.758768	5.40288	-3.0835
12	-3.51224	-116.013	1.44469	1.66606	0.178795	-6.14607
13	-64.5603	-56.7106	-84.0739	0.749466	3.47397	-3.27483
14	-125.946	3.26896	1.04909	-0.266179	-1.75799	-0.373797

表6 优化前后结果比较

Table 6 Comparison of results before and after optimization

参数	情况(1)		情况(2)	
	优化前	优化后	优化前	优化后
$\alpha/(\circ)$	0	179.946	0	0.355
$\beta/(\circ)$	0	0.037	0	-0.157
$\gamma/(\circ)$	0	0.225	0	0.036
$\theta/(\circ)$	0.0338	-0.0055	-0.011	-0.0066
$\omega/(\circ)$	0.0243	0.0061	0.0059	0.0052
$x/mm$	-50.195	-50.195	49.789	49.789
$y/mm$	0.0329	0.0329	-0.305	-0.305
$z/mm$	16.176	16.176	15.971	15.971
$F_{x0}/N$	-6.7353	-6.7349	-5.085	-5.0831
$F_{y0}/N$	5.4947	5.5052	4.7163	4.7919
$F_{z0}/N$	7.449	6.6568	0.602	0.6634
$T_{x0}/(N \cdot m)$	-0.2076	-0.2078	-0.258	-0.2592
$T_{y0}/(N \cdot m)$	0.0485	0.0485	0.2382	0.2383
$T_{z0}/(N \cdot m)$	-0.1962	-0.1968	-0.1937	-0.1899
$G/N$	17.0986	120.5323	120.5394	120.5392
$S$	16588.8	0.3394	0.3503	0.2157

=40.55%，合力平均重力补偿误差降低 $(1-0.4027/0.7063)=42.98\%$ ，合力矩最大重力补偿误差降低 $(1-0.2602/0.2751)=5.42\%$ ，合力矩平均重力补偿误差降低 $(1-0.2353/0.2507)=6.14\%$ 。因此，证明补偿的传感器安装偏角有效。

之后，对负载重力进行测量。根据表5的结果，优化前的负载重力测量值为120.5394N。优化后和负载重力测量值为120.5392N。将负载拆下，和连接用的螺栓一起利用标准仪器称重，测得12.057kg，重量为 $12.057 \times 9.805=118.218885N$ 。由于力传感器敏感端也有重量，它也被计算在负载重力之内，所以在没有负载的时候，再次移动到表5所示的姿态并测量，对得到的力传感器数值进行求解，得敏感端重量为1.6515N，则测量负载共119.870385N，测量误差在0.558%之内，证明重力补偿结果有效。

如文献[11]所述，姿态误差和采样数据随机误差会影响重力补偿结果，这不仅会影响负载重量的计算，也会进一步导致有些位姿下的优化效果不佳，这就解释了图4和图5中为何会出现优化后误差不降反增的情况，但从总体看来，优化效果良好。

## 结论

本文面向工业机器人在柔顺控制、人机协作等应用中的外力感知需求，在已有的重力补偿算法上进行了优化。

此方法在最小二乘法的基础上，通过分析力传感器偏角对补偿结果的影响，以误差平方和最小为目标建立最优解模型，利用遗传算法，补偿力传感器安装偏角。试验中通过采集指定姿态下的力传感器数值来减少系统误差，利用遗传算法优化后，任意调整机器人姿态，验证优化效果。试验结果表明，优化后的各方向

表 7 机器人验证姿态  
Table 7 Robot verification posture

序号	机器人位姿					
	X/mm	Y/mm	Z/mm	A/(°)	B/(°)	C/(°)
1	-116.51	-1733.48	1812.58	122.71	52.78	-138.51
2	-251.15	-1651.35	1872.83	117.98	5.95	-100.01
3	-189.43	-1593.35	2152.08	139.20	-7.61	-73.34
4	-376.10	-1534.27	2035.87	-144.98	-22.42	-106.10
5	-740.98	-1567.71	1791.79	-127.84	3.89	-94.54
6	-1685.45	-433.43	1370.76	45.06	12.01	132.47
7	1176.05	-1322.99	1069.58	100.16	-15.11	-165.76
8	971.08	-102.14	2168.95	174.38	74.05	150.62
9	711.74	361.49	1980.32	13.42	60.73	-73.22
10	544.42	440.87	1941.87	171.09	0.23	8.68
11	492.44	1203.87	1287.81	-134.26	54.46	69.91
12	217.48	1504.85	1710.59	16.6	44.3	-112.36

最大重力补偿误差、平均重力补偿误差均有所减少。

与现有方法相比,本文方法的优势在于可以在不使用外部测量仪器的情况下,估计出力传感器安装偏角。此方法可以补偿由于连接件加工精度不足或者安装失误导致的误差。而已有方法是通过精密的机械结构保证力传感器坐标系与法兰坐标系平行,或者是通过单独调姿过程对力传感器安装偏角、力传感器零点进行标定,这样会增加成本或者增加标定时间。利用本文方法不仅会使效率高、成本降低而且鲁棒性得到提升。

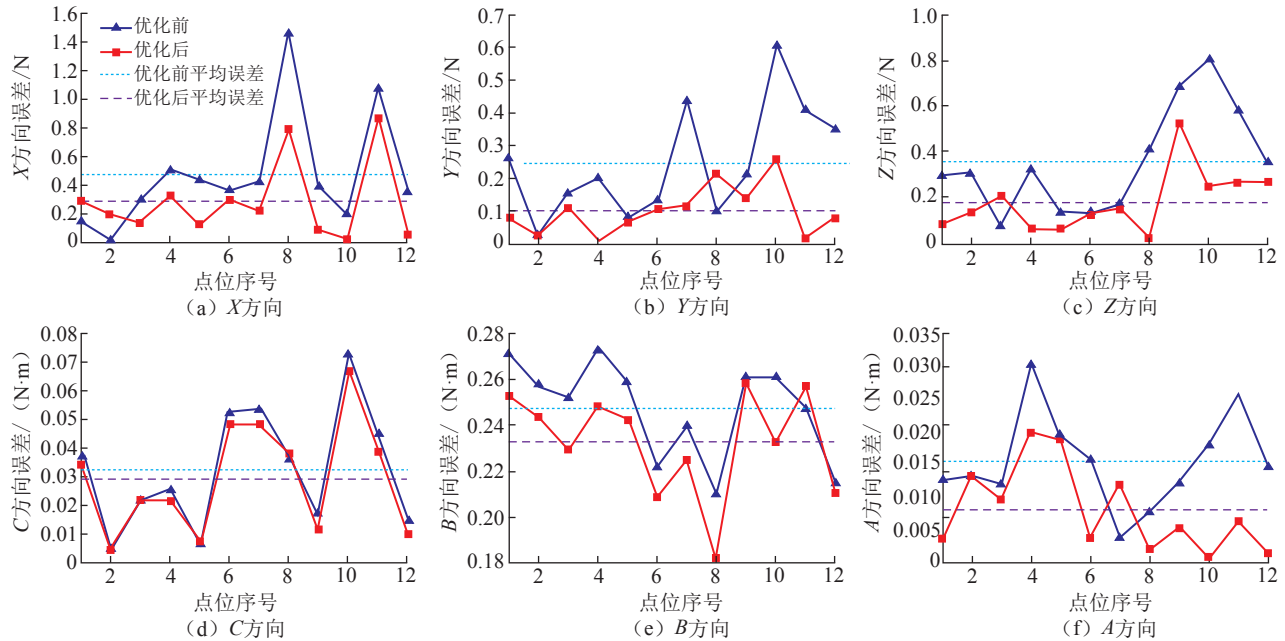


图 4 优化前后各方向重力补偿误差

Fig.4 Gravity compensation error of all direction before and after optimization

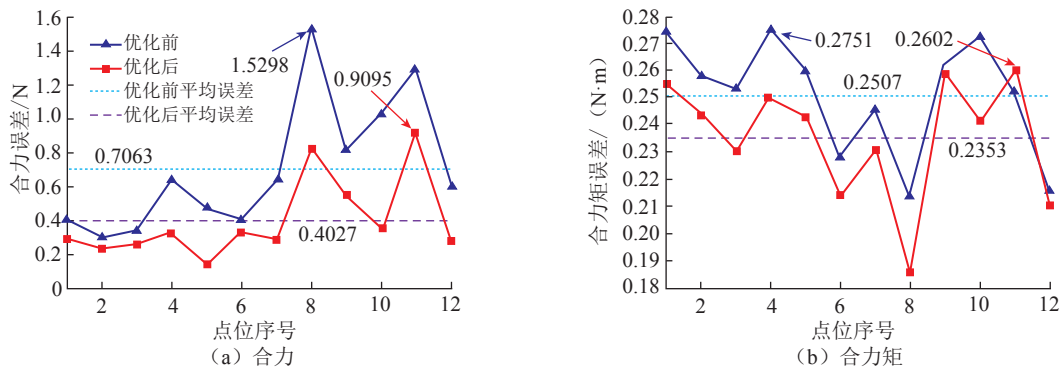


图 5 优化前后合力(矩)重力补偿误差

Fig.5 Gravity compensation error of resultant force (torque) before and after optimization

## 参考文献

- [1] DEVLIEG R, SITTON K, FEIKERT E, et al. ONCE (ONE-sided cell end effector) robotic drilling system[C]//SAE Technical Paper Series. Warrendale: SAE International, 2002.
- [2] 黎田, 胡晓雪, 姚为, 等. 机器人在航天装备自动化装配中的应用研究[J]. 航空制造技术, 2014, 57(21): 102-104, 108.
- LI Tian, HU Xiaoxue, YAO Wei, et al. Research on application of robot in space equipment automatic assembly[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2014, 57(21): 102-104, 108.
- [3] CALANCA A, MURADORE R, FIORINI P. A review of algorithms for compliant control of stiff and fixed-compliance robots[J]. ASME Transactions on Mechatronics, 2016, 21(2): 613-624.
- [4] 赵磊, 刘巍, 巩岩. 预紧式 Stewart 结构六维力/力矩传感器[J]. 光学精密工程, 2011, 19(12): 2954-2962.
- ZHAO Lei, LIU Wei, GONG Yan. Pre-stressed six-axis force/torque sensor based on Stewart platform[J]. Optics and Precision Engineering, 2011, 19(12): 2954-2962.
- [5] STAVROS V. Bias estimation and gravity compensation for force-torque sensors[D]. Greece: University of Macedonia, 2001.
- [6] KIM Y, HAN S, PARK S, et al. Tool Gravity Compensation for Maneuverability Enhancement of Interactive Robot Control for Bone Fracture Reduction System[C]//ISR 2013. Seoul, 2013.
- [7] KUBELA T, POCHYLY A, SINGULE V, et al. Force-torque control methodology for industrial robots applied on finishing operations[J]//Mechatronics, 2012: 429-437.
- [8] 张光辉, 王耀南. 末端 F/T 传感器的重力环境下大范围柔顺控制方法[J]. 智能系统学报, 2015, 10(5): 675-683.
- ZHANG Guanghui, WANG Yaonan. A wide range compliance control method in gravity environment based on end force/torque sensor[J]. CAAI Transactions on Intelligent Systems, 2015, 10(5): 675-683.
- [9] 缪新, 田威. 机器人打磨系统控制技术[J]. 机电一体化, 2014, 20(11): 8-14.
- MIAO Xin, TIAN Wei. The control technology on robotic grinding system[J]. Mechatronics, 2014, 20(11): 8-14.
- [10] 高强, 田凤杰, 杨林, 等. 机器人自动研抛系统平台搭建及重力补偿研究[J]. 工具技术, 2015, 49(8): 47-50.
- GAO Qiang, TIAN Fengjie, YANG Lin, et al. Research on platform of robot automatic polishing system and gravity compensation[J]. Tool Engineering, 2015, 49(8): 47-50.
- [11] 张立建, 胡瑞钦, 易旺民. 基于六维力传感器的工业机器人末端负载受力感知研究[J]. 自动化学报, 2017, 43(3): 439-447.
- ZHANG Lijian, HU Ruiqin, YI Wangmin. Research on force sensing for the end-load of industrial robot based on a 6-axis force/torque sensor[J]. Acta Automatica Sinica, 2017, 43(3): 439-447.
- [12] 邹乐强. 最小二乘法原理及其简单应用[J]. 科技信息, 2010, 2(23): 288-289.
- ZOU Leqiang. The principle of least square method and its simple application[J]. Science and Technology Information, 2010, 2(23): 288-289.

通讯作者: 李鹏程, 讲师、博士, 研究方向为机器人视觉, E-mail: lpcemee@nuaa.edu.cn; 李根, E-mail: 459159012@qq.com。

## Research on Optimization Algorithm of Robot Load Gravity Compensation Based on Genetic Algorithm

LI Gen, LI Pengcheng, WU Chao, SHEN Ye

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

**[ABSTRACT]** In the field of aeronautical and astronautical assembly, the six-dimensional force sensors installed on the end of robot is commonly used to derive external forces, which is one of the key technologies to realize the compliance control of industrial robots, but the presence of loads will interfere the perception of external forces. To compensate the gravity of end load of industrial robots, a genetic algorithm-based gravity compensation optimization algorithm is proposed. Based on the least squared method, this method considers the influence of force sensor installation deflection angle on compensation effect, and an optimal solution model is established with the objective of minimizing the sum of squared error, by using genetic algorithm. As a result, the installation deflection angle of force sensor can be estimated without use of measuring instruments, and the accuracy of gravity compensation can be improved. In the meantime, the system errors are reduced effectively by designing specific robot measuring attitude. The experiments show that arbitrary angles of the installation deflection angle can be compensated by optimization algorithm. Compared with before compensation, maximum gravity compensation errors in each direction and average gravity compensation errors are both generally reduced.

**Keywords:** Gravity compensation; Sensor calibration; Industrial robot; Six-dimensional force sensor; Genetic algorithm

(责编 阳光)