

柔性冗余度机器人力矩优化的研究*

边宇枢 陆 震

(北京航空航天大学机器人研究所 100083)

摘 要 本文首先应用模态理论,对柔性冗余度机器人振动的控制问题的原理与策略进行了研究.在此基础上通过对满足抑振要求的自运动的选取进行分析,指出柔性冗余度机器人在通过优化其自运动实现振动抑制的同时还具有二次优化的能力,并给出了在满足抑振的前提下实现关节力矩优化的方法.最后对一个末杆为柔杆的平面三杆机械手的振动控制与力矩优化进行了仿真,结果验证了该方法的可行性.

关键词 柔性冗余度机器人,力矩优化,抑振,自运动

1 引言

柔性冗余度机器人一般是指具有柔性部件的冗余度机器人.从工作的安全角度出发,使机器人具有最小关节驱动力矩是十分重要的,它可以防止关节力矩的过载^[3,4].与刚性冗余度机器人一样,柔性冗余度机器人利用其冗余特性可以在完成给定的末端任务时实现关节力矩的优化.但是结构柔性的存在使得机器人在运动过程中不可避免地产生振动,这给执行操作任务带来严重的不利影响.因此对于柔性冗余度机器人而言,关节力矩的优化必须以振动的抑制为前提.文献[7]针对这一问题进行了研究,但没有给出既能保证振动抑制又使关节力矩最小的有效方法.目前对于柔性冗余度机器人力矩优化的研究还很不够,为此本文首先研究了柔性冗余度机器人振动的控制问题;在此基础上通过对自运动的选取进行分析,指出柔性冗余度机器人在实现振动抑制的同时还具有二次优化的能力,并给出了实现力矩优化的方法;最后通过仿真验证了该方法的可行性.

2 冗余度机器人的控制原理

利用 Kane 方法和假设模态法,柔性机器人动力学方程一般可以写为如下形式:

$$[D]\{\dot{q}\} + \{E\} = \{\tau\} \quad (1)$$

$$[M]\{\ddot{\mathcal{Q}}\} + [C]\{\dot{\mathcal{Q}}\} + [K]\{\mathcal{Q}\} = \{F\} - [G]\{\ddot{q}\} \quad (2)$$

其中, $\{\tau\}$ R^{n_R} 为施加在关节处的驱动力矩; $[D]$ $R^{n_R \times n_R}$; $\{E\}$ R^{n_R} ; $[M]$, $[C]$ 和 $[K]$ 分别为 $n_F \times n_F$ 阶质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵; $\{F\}$ R^{n_F} ; $[G]$ $R^{n_F \times n_R}$; $\{q\}$ R^{n_R} 为关节转角; $\{\mathcal{Q}\}$ R^{n_F} 为描述杆件柔性变形的广义坐标; n_R 为刚性自由度数; n_F 为柔性自由度数; n 为系统总的自由度数, $n_R + n_F = n$. 对于柔性冗余度机器人,其末端位置 $\{x\}$ 不仅与关节运动而且还与系统的柔性变形有关.但是当以消除机器人的振动为目的来研究时,通常在操作空间中按照机器人的刚性运动进行轨迹规划,则机器人的运动方程可近似地表示为:

$$\{x\} = f(\{q\}) \quad (3)$$

* 国家自然科学基金和航空科学基金资助项目. 1998-02-01 收稿

而把由此带来的偏差看作是柔性变形振动对刚性运动产生的扰动予以消除。

对(3)式两次求导可得:

$$\{\dot{x}\} = [J_R]\{\dot{q}\} + [\dot{J}_R]\{q\} \quad (4)$$

对于冗余度机器人, (4)式的通解 $\{\dot{q}\}$ 为:

$$\{\dot{q}\} = [J_R^+](\{\dot{x}\} - [\dot{J}_R]\{q\}) + ([I] - [J_R^+][\dot{J}_R])\{\epsilon\} \quad (5)$$

式中, $J_R = df/dq$, J_R^+ 为 J_R 的广义逆, $\{\epsilon\} \in R^{n_r}$ 为任意矢量, $[I] \in R^{n_r \times n_r}$ 为单位阵。

把(5)式代入(2)式可得:

$$[M]\{\ddot{q}\} + [C]\{\dot{q}\} + [K]\{q\} = \{U\} \quad (6)$$

式中, $\{U\} = \{F\} - [G][J_R^+](\{\dot{x}\} - [\dot{J}_R]\{q\}) - [G]([I] - [J_R^+][\dot{J}_R])\{\epsilon\}$ 。方程(6)为柔性冗余度机器人的振动方程。

把(5)式代入(1)式可得:

$$\{\tau\} = [D][J_R^+](\{\dot{x}\} - [\dot{J}_R]\{q\}) + [D]([I] - [J_R^+][\dot{J}_R])\{\epsilon\} + \{E\} \quad (7)$$

方程(7)为柔性冗余度机器人的驱动力矩方程。

从(6)式可以看出, 柔性冗余度机器人的振动方程中含有对应于自运动的任意矢量 $\{\epsilon\}$ 。由于 $\{\epsilon\}$ 的选取直接影响机器人的振动响应, 所以 $\{\epsilon\}$ 的任选性使我们得以利用自运动这一冗余度机器人的内在优点来克服结构柔性带来的振动。

3 任意矢量 $\{\epsilon\}$ 的选取

3.1 选取的方法

由振动理论可知, 一个振动系统的响应衰减的快慢与系统的阻尼和刚度有关, 增大阻尼是抑制振动特别是抑制共振响应的主要因素和重要途径, 同时增大刚度会进一步加快振动的衰减。由于 $\{\epsilon\}$ 的选取直接影响机器人的振动响应, 所以 $\{\epsilon\}$ 的任选性使我们可以在模态空间中“主动地”给系统施加某种形式的模态控制力, 它的加入一方面使振动方程右端的激振力为零, 从而使振动方程变为自由振动方程, 另一方面又相当于增大了系统的阻尼与刚度, 机器人的振动因此得以迅速衰减。

对(6)式作变换:

$$\{\ddot{q}\} = [P]\{\ddot{\eta}\} \quad (8)$$

把(6)式转化到模态空间, 在比例阻尼情况下, 可得到一组解耦方程:

$$\ddot{\eta}_i + 2\zeta_i\omega_i\dot{\eta}_i + \omega_i^2\eta_i = f_i, \quad i = 1, 2, \dots, n_F \quad (9)$$

其中, $[P]$ 为 $n_F \times n_F$ 阶模态矩阵; η 为模态坐标; ω 为系统的第 i 阶固有频率; ζ 为模态阻尼比; f_i 为模态激振力。

(9)式可写为如下的矩阵形式:

$$\{\ddot{\eta}\} + \text{diag}[2\zeta\omega]\{\dot{\eta}\} + \text{diag}[\omega^2]\{\eta\} = \{f\} \quad (10)$$

式中, $\{\eta\} = \{\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_{n_F}\}^T$; $\{f\} = \{f_1, f_2, \dots, f_{n_F}\}^T = [P]^T\{U\}$, (10)式为柔性冗余度机器人在模态空间中表示的振动方程。

加入模态控制力 f_{ic} , 则(9)式变为:

$$\ddot{\eta}_i + 2\zeta_i\omega_i\dot{\eta}_i + \omega_i^2\eta_i = f_i + f_{ic}, \quad i = 1, 2, \dots, n_F \quad (11)$$

从振动的主动控制角度出发, 我们希望降低系统的振动量级。令选取的模态控制力为:

$$f_{ic} = - (P_1^i\dot{\eta}_i + P_2^i\eta_i) / R_i - f_i, \quad i = 1, 2, \dots, n_F \quad (12)$$

式中,
$$P_1^i = -R_i \omega^2 + \overline{R_i^2 \omega^4 + R_i Q_i^i} \quad (13)$$

$$P_2^i = -2\xi_i R_i \omega + (4R_i^2 \xi_i^2 \omega^2 + R_i Q_2^i - 2R_i^2 \omega^2 + 2R_i \overline{R_i^2 \omega^4 + R_i Q_i^i})^{1/2} \quad (14)$$

Q_1^i 与 Q_2^i 为二阶半正定对角加权矩阵 Q^i 的对角线元素; R_i 为加权系数.

文献 [2] 证明了加入这种形式的模态控制力可以满足上述要求, 并且系统是渐近稳定的. 把 (12) 式代入 (11) 式可得:

$$\ddot{\eta}_i + 2\xi_i \omega \dot{\eta}_i + \omega^2 \eta_i = -R_i^{-1} (P_1^i \eta_i + P_2^i \dot{\eta}_i), \quad i = 1, 2, \dots, n_F \quad (15)$$

将 (13) 式和 (14) 式代入 (15) 式, 经整理得到:

$$\begin{aligned} \ddot{\eta}_i + R_i^{-1} (4R_i^2 \xi_i^2 \omega^2 + R_i Q_2^i - 2R_i^2 \omega^2 + 2R_i \overline{R_i^2 \omega^4 + R_i Q_i^i})^{1/2} \dot{\eta}_i \\ + \overline{\omega^4 + Q_i R_i^{-1} \eta_i} = 0, \quad i = 1, 2, \dots, n_F \end{aligned} \quad (16)$$

由 (16) 式可以看出, 控制力的加入一方面使振动方程右端的激振力为零, 另一方面相当于增大了系统的模态阻尼和模态刚度. (16) 式即为我们期望实现的振动衰减规律.

为了研究方便, (15) 式可以写为如下的矩阵形式:

$$\{\ddot{\eta}\} + \text{diag}[2\xi_i \omega] \{\dot{\eta}\} + \text{diag}[\omega^2] \{\eta\} = \{f_m\} \quad (17)$$

式中, $\{f_m\} = \{-R_1^{-1}(P_1^1 \eta_1 + P_2^1 \dot{\eta}_1) \dots - R_{n_F}^{-1}(P_1^{n_F} \eta_{n_F} + P_2^{n_F} \dot{\eta}_{n_F})\}^T$; 由于 (10) 式中的 $\{f\}$ 由 $\{\epsilon_i\}$ 唯一确定, 所以可通过选择 $\{\epsilon_i\}$ 使 $\{f\} = \{f_m\}$, 即:

$$[P]^T \{U\} = \{f_m\} \quad (18)$$

展开可得:

$$\begin{aligned} [P]^T [G] ([I] - [J_R^*] [J_R]) \{\epsilon_i\} &= [P]^T \{F\} - \\ [P]^T [G] [J_R^*] (\{x\} - [J_R] \{\dot{q}\}) - \{f_m\} \end{aligned} \quad (19)$$

求解 (19) 式便可得到满足 (16) 式即满足抑振要求的任意矢量 $\{\epsilon_i\}$.

3.2 讨论

上面介绍了选择任意矢量 $\{\epsilon_i\}$ 的方法, 使机器人的振动得以尽快衰减. 为了能够实施这种控制, 必须讨论在求解 $\{\epsilon_i\}$ 时会碰到的一些问题.

(19) 式可以写为更一般的形式:

$$[A] \{\epsilon_i\} = \{B\} \quad (20)$$

式中, $[A] = [P]^T [G] ([I] - [J_R^*] [J_R])$; $\{B\} = [P]^T \{F\} - [P]^T [G] [J_R^*] (\{x\} - [J_R] \{\dot{q}\}) - \{f_m\}$; (20) 式是一个由 n_F 个方程组成的方程组, 未知量 $\{\epsilon_i\}$ 的分量数目是 n_R 个.

理论上柔性冗余度机器人的振动模态具有无穷多阶, 模态截断后其柔性自由度依然较多, 而一般的冗余度机器人是低冗余度的. 令 m 为机器人在操作空间的维数, 则有: $n_R - m < n_F$, 即机器人冗余度数小于其柔性自由度数, 这是柔性冗余度机器人的普遍情况. 至于 $n_R - m = n_F$ 的情况较少而且容易解决^[1]. 因此我们主要研究前一种情况.

显然, $\text{rank}([A]) = \min(\text{rank}([P]^T [G]), \text{rank}([I] - [J_R^*] [J_R]))$. 除了一些特殊位形, $[P]^T [G]$ 一般满秩, 此时 $\text{rank}([P]^T [G]) = \min(n_R, n_F)$; 另外, 当机器人处于非奇异位形时, $\text{rank}([I] - [J_R^*] [J_R]) = n_R - m$ ^[1]. 在这里我们假设机器人所处位形满足上述两种情况.

当 $n_R < n_F$ 时, $\text{rank}([A]) = \min(n_R, n_R - m) = n_R - m < n_R$.

当 $n_R = n_F$ 时, $\text{rank}([A]) = \min(n_R, n_R - m) = n_R - m < n_R$.

无论上述哪种情况, $[A]$ 均为列不满秩矩阵, 令 $[A] \quad \{B\}$ 表示方程组 (20) 的增广矩阵, 有:

$$\text{rank}([A]) = \text{rank}([[A] \quad \{B\}]) \quad (21)$$

当 $\text{rank}([A]) = \text{rank}([[A] \quad \{B\}])$ 时, 方程组 (20) 有无穷多组解, 其通解形式为:

$$\{\epsilon_1\} = [A^+]\{B\} + ([I] - [A^+][A])\{\epsilon_2\} \quad (22)$$

式中, $\{\epsilon_2\}$ 为 $n_r \times 1$ 阶任意矢量列阵, $[A^+]$ 为 $[A]$ 的广义逆. 这个通解所对应的自运动可以使机器人末端的振动按照 (16) 式迅速衰减下来, $[A^+]\{B\}$ 为通解中的最小范数解.

当 $\text{rank}([A]) < \text{rank}([[A] \quad \{B\}])$ 时, 方程组 (20) 为矛盾方程, 由于 $[A]$ 为列不满秩矩阵, 所以满足 $\min(\|[A]\{\epsilon_1\} - \{B\}\|_2)$ 的最小二乘解不唯一, 它可以写为通式形式^[5]

$$\{\epsilon_1\} = [A^+]\{B\} + ([I] - [A^+][A])\{\epsilon_2\} \quad (23)$$

式中, $[A^+]\{B\}$ 为通解中的最小范数最小二乘解. 虽然这个通解所对应的自运动不能使机器人末端的振动完全按照 (16) 式衰减, 但它所对应的自运动可以使振动响应最接近于我们期望的衰减规律, 因此依然能够有效地抑制振动, 这从后面的算例可以得到证实.

4 力矩优化

从 (22) 式和 (23) 式可以看出, 满足抑振要求的任意矢量 $\{\epsilon_1\}$ 的选取不是唯一的, 也就是说满足抑振要求的自运动并不唯一, 它还取决于任意矢量 $\{\epsilon_2\}$ 的选取. 由于 $([I] - [A^+][A])\{\epsilon_2\}$ 属于 $[A]$ 的零空间向量, 所以理论上 $\{\epsilon_2\}$ 无论怎样选取都能够保证其对应的 $\{\epsilon_1\}$ 满足抑振要求. 这样, 便可以通过选取 $\{\epsilon_2\}$ 在满足振动抑制的前提下继续进行关节力矩的优化, 我们把这称为“二次优化”.

把 (22) 式或 (23) 式代入 (7) 式得:

$$\{\tau\} = \{\tau\} + [D]([I] - [J_R^k][J_R])([I] - [A^+][A])\{\epsilon_2\} \quad (24)$$

其中, $\{\tau\} = [D][J_R^k](\{\dot{x}\} - [J_R]\{\dot{q}\}) + [D]([I] - [J_R^k][J_R])[A^+]\{B\} + \{E\}$;

柔性冗余度机器人最小关节力矩的控制, 是选择零空间矢量极小化 $\{\tau\}$ 数学描述为:

$$\text{Minimize } \|\{\tau(\epsilon_2)\} - \{\tau_{\min}\}\|_2 \quad (25)$$

式中, $\{\tau_{\min}\}$ 是要求的最小关节驱动力矩. 若假定机器人关节驱动力矩的上限 $\{\tau^+\}$ 和下限 $\{\tau^-\}$ 大小相等、符号相反, 即 $\{\tau^+\} = -\{\tau^-\}$, 并选取 $\{\tau_{\min}\}$ 等于机器人关节力矩的上限与下限之和的一半, 则 $\{\tau_{\min}\} = \{0\}$. 由 (24) 式和 (25) 式可得:

$$\{\epsilon_2\} = -[[D]([I] - [J_R^k][J_R])([I] - [A^+][A])]^+ \{\tau\} \quad (26)$$

把 (26) 式代入 (22) 式或 (23) 式, 再把 (22) 式或 (23) 式代入 (5) 式可得:

$$\begin{aligned} \{\ddot{q}\} = & [J_R^k](\{\ddot{x}\} - [J_R]\{\ddot{q}\}) + ([I] - [J_R^k][J_R])[A^+]\{B\} - ([I] - [J_R^k][J_R]) \\ & ([I] - [A^+][A])[D]([I] - [J_R^k][J_R])([I] - [A^+][A])^+ \{\tau\} \end{aligned} \quad (27)$$

当机器人按照 (27) 式给出的规律运动时, 可以在振动抑制的同时具有最小的关节力矩.

按 (27) 式计算, 主要问题是计算稳定性不够理想. 如果不考虑 (27) 式中的第三项, 即:

$$\{\ddot{q}\} = [J_R^k](\{\ddot{x}\} - [J_R]\{\ddot{q}\}) + ([I] - [J_R^k][J_R])[A^+]\{B\} \quad (28)$$

按 (28) 式计算出的关节力矩较大, 但稳定性很好, 并且依然满足抑振的要求. 可以看出: 要想获得比较好的数值稳定性, 需要牺牲关节力矩最小的指标为代价. 根据前面的讨论, 可以提出改进数值稳定性的措施. 由于 (27) 式稳定性不好的原因主要在于计算出的 $\{\ddot{q}\}$ 比较大, 因此可以在计算过程中监视 \dot{q}° 数值的变化, 即: 如果在计算过程中, $\dot{q}^\circ > a$, 则规划算法自动转换到按 (28) 式计算 $\{\ddot{q}\}$, 到 $\dot{q}^\circ < a$ 时, 再转到按 (27) 式计算, 其中 $a > 0$ 是预先设定的 \dot{q}° 上限值. 利用这种切换技术, 既可以保证数值的稳定性, 又能在一定程度上极小化关节力矩, 这样

就在稳定性和关节力矩最小二者之间做到一个折衷的处理。

5 算例仿真

为了验证本文所提方法的正确性,这里对一末杆为柔杆的平面3杆机械手进行了仿真研究.图1中机械手的3个臂长均为1m,截面为矩形,宽×高=0.05m×0.005m,材料密度和弹性模量分别为 2710kg/m^3 和 71GPa .柔杆的弹性变形发生在该平面上,若不考虑机械手末端的姿态变化,则机械手对末端位置有一个冗余度.

我们的任务是控制手臂末端沿预定轨迹运动时的振动,并在此基础上进行力矩优化.初始状态:3个关节角初值 $\{q(0)\} = \{75 \quad 150 \quad 45\}^T \text{deg}$;3个角速度初值 $\{\dot{q}(0)\} = \{0 \quad 0 \quad 0\}^T \text{deg/s}$;末端速度初值 $\{p(0)\} = \{0 \quad 0\}^T \text{m/s}$.末端运动轨迹:

$$\{p^\circ(t)\} = \begin{cases} \{1 \quad 1\}^T \text{m/s}^2 & 0 \leq t < 1.0\text{s} \\ \{-1 \quad -1\}^T \text{m/s}^2 & 1.0\text{s} < t \leq 2.0\text{s} \end{cases}$$

本例控制系统的前两阶模态,其中 Q^i 为单位阵,加权系数 $R_i = 5 \times 10^{-6}$, $i = 1, 2$.加权系数的选取在控制规律中起着重要作用,在文献[6]等均有介绍.

以下分3种情况进行仿真,在力矩图中3个关节的驱动力矩曲线依次用点线、虚线和实线来描述.

(1) 只考虑关节力矩的优化,仿真结果见图2.从图2(a)中可以看出,关节力矩得到了最小化;但从图2(b)中看到,此时末端振动变形误差很大.由于末端振动的存在会严重影响机器人准确执行操作任务,所以关节力矩的优化必须以振动的抑制为前提.

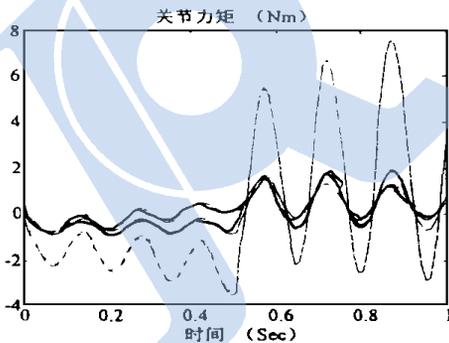


图2(a) 关节驱动力矩

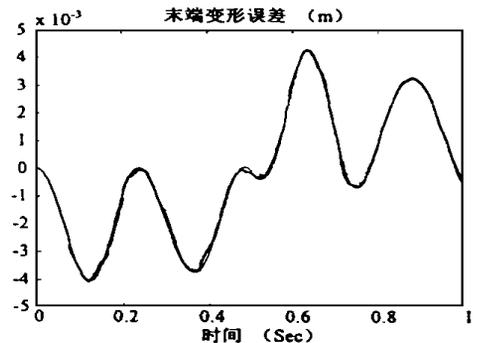


图2(b) 末端振动变形误差

(2) 只考虑振动的抑制,仿真结果见图3.从图3(b)中可以看出,末端振动得到了很好的抑制;但从图3(a)中看到,与第一种情况相比,为了实现振动的抑制,此时关节驱动力矩不但变得较大而且产生了较强的波动.

(3) 同时考虑振动的抑制和关节力矩的优化,仿真结果见图4.与图3(a)相比,图4(a)中的关节力矩得到了优化,而且从图4(b)中可以看出,末端振动也得到了很好的抑制.

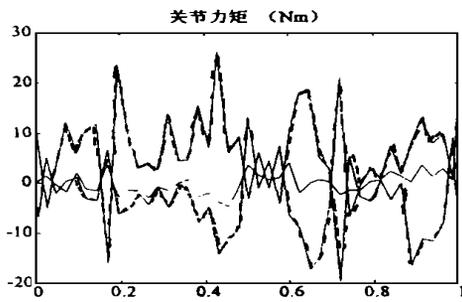


图 3(a) 关节驱动力矩

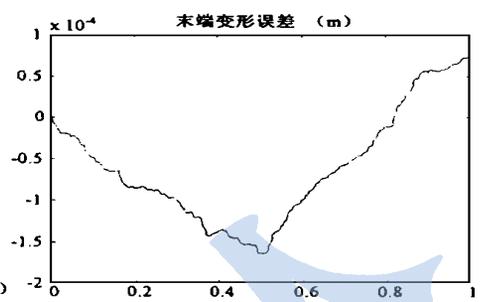


图 3(b) 末端振动变形误差

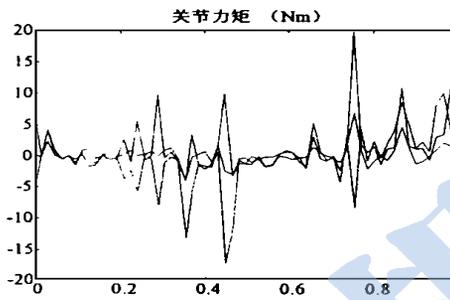


图 4(a) 关节驱动力矩

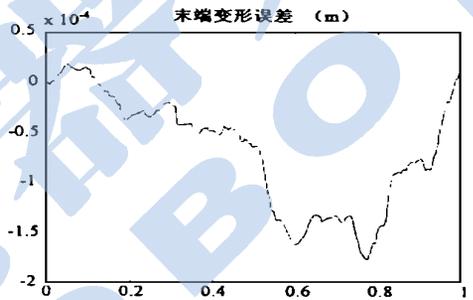


图 4(b) 末端振动变形误差

6 结论

由于柔性冗余度机器人在运动过程中不可避免地会产生振动, 所以对于柔性冗余度机器人而言, 关节力矩的优化必须以振动的抑制为前提, 如果只考虑力矩的优化而忽略对振动的控制, 则机器人无法准确完成操作任务. 为此, 本文首先对柔性冗余度机器人振动的控制问题的原理与策略进行了研究. 在此基础上, 通过对满足抑振要求的自运动的选取进行分析, 得出柔性冗余度机器人具有二次优化的能力, 即在满足振动抑制的前提下仍然具有再优化的能力. 利用这种二次优化的能力, 我们进行了关节力矩的优化, 使柔性冗余度机器人在振动得到抑制的同时具有最小的关节驱动力矩. 仿真结果证实了这种方法的有效性.

参 考 文 献

- 1 Nguyen L A, Walker I D *et al*. Dynamic Control of Flexible Kinematically Redundant Robot Manipulators. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 1992, 8(6): 759 ~ 767
- 2 张宪民, 刘宏昭, 曹惟庆. 柔性机构弹性振动的主动控制. *机械工程学报*, 1996, 32(1): 9 ~ 16
- 3 Kazerooni K, Nedungdi A. An Alternative Method for Minimization of the Driving Forces in Redundant Manipulators. *IEEE Conf on Robotics and Automation*. 1987: 1701 ~ 1706
- 4 Hollerbach J M, Suh K C. Redundancy Resolution of Manipulator Through Torque Optimization. *IEEE J of Robotics and Automation*. 1987, 3(4): 308 ~ 316
- 5 王国荣. 矩阵与算子广义逆. 北京: 科学出版社, 1994
- 6 解学书. 最优控制理论与应用. 北京: 清华大学出版社, 1986
- 7 岳士岗. 冗余度柔性机器人动力学研究. 北京工业大学博士学位论文, 1995

STUDY ON TORQUE OPTIMIZATION FOR FLEXIBLE REDUNDANT MANIPULATORS

BIAN Yushu LU Zhen

(*Institute of Robotics Research, Beijing University of Aeronautics and Astronautics* 100083)

Abstract In this paper, the theory and strategy of vibration control for flexible redundant manipulators are firstly studied by the modal theory. On this basis, by analyzing the selection of self-motions which meet the need of suppressing vibration, we point out that flexible redundant manipulators still have the second optimization capability at the time of suppressing vibration, then a method for optimizing joint-torques on the premise of suppressing vibration is presented. Finally, with this method, simulations of suppressing vibration and optimizing joint-torques for a planar three-link manipulator with the last link flexible are carried out. The simulation results demonstrate its feasibility.

Key words Flexible redundant manipulator, torque optimization, suppressing vibration, self-motion

作者简介

边宇枢: 男, 27岁, 博士研究生. 研究领域: 柔性机器人、冗余度机器人动力学与控制.

陆震: 男, 56岁, 教授, 博士生导师. 研究领域: 多体动力学、机器人动力学.

(上接第 377 页)

SIMULATION ON PREDICTION TRACE OF PING-PANG BALL USING LWR LEARNING

RUI Qing HU Zongwu

(*Faculty of Mechanical Engineering Shanghai Jiaotong University* 200030)

FU mio Miyazaki

(*Faculty of Engineering Science Osaka University Japan*)

Abstract The task of Ping-Pong Robot is to hit back the ping-pong ball to the opposite court., and it is made up of two steps: sensing and hitting. This paper studies the sensing of the robot. The method uses LWR (Locally Weighted Regression) learning to estimate the trace of the ping-pong ball after bounding.

Key words Ping-Pong Robot, trace, LWR (Locally Weighted Regression)

作者简介

芮庆: 女, 34岁, 博士研究生. 研究领域: 振动控制、智能机器人.

胡宗武: 男, 64岁, 教授, 博士生导师. 研究领域: 振动分析与控制、机械强度可靠性.

宫崎文夫: 男, 46岁, 教授, 博士生导师. 研究领域: 机械系统的控制、机器人的智能化.