一种新的反恐防暴机器人受限操作方法

王剑^{①③*}, 王挺^①, 姚辰^①, 李小凡^①, 吴成东^②

① 中国科学院沈阳自动化研究所, 机器人学国家重点实验室, 沈阳 110016;

② 东北大学信息科学与工程学院, 沈阳 110819;

③ 中国科学院大学, 北京 100049

* 联系人, E-mail: wangjian@sia.cn

2013-08-20 收稿, 2013-10-11 接受

摘要 反恐防暴机器人进入楼宇中有状况房间的开门操作问题属于运动受限机器人的力控制问题, 而传统的力觉控制方法在原理上都存在一些缺陷, 如力/位混合控制的力控制器和位置控制器不能同时起作用, 阻抗控制的力控制和位置控制间存在干涉, 最终都会影响到开门操作的应用效果. 因此从完整系统的角度出发, 将开门操作这个运动受限问题转化为完整系统约束反力的控制问题, 并给出一种能同时跟踪参考位置和参考约束反力的控制律, 最后以“灵蜥”反恐防暴机器人为试验平台, 通过与阻抗控制的比较说明该控制方法的优点.

关键词

反恐防暴机器人
完整系统
约束反力控制
受限操作

运动受限操作是反恐防爆机器人机械臂的作业能力和先进控制方法相结合的一种体现, 而开门操作属于其中很有实用价值的力控制问题. 已有的力觉控制或称主动柔顺控制方法^[1]在开门操作中都有成功的应用, 但在力控制原理上都存在缺陷, 如文献[2,3]中采用的基于力/位混合控制^[4]的开门算法, 通过选择矩阵实现了在力子空间和位置子空间的交替切换控制, 但是力控制器和位置控制器分开设计, 不能同时起作用. 又如文献[5,6]中采用了基于阻抗控制^[7]的开门算法, 通过加装力传感器, 将机械臂夹持构件开门过程中所受到的门的约束反力转化为机械臂的待调节位置量, 力控制和位置控制能同时起作用, 但是会出现力控制器的待调节位置量与位置控制器的待调节位置量间的矛盾, 造成了力跟踪控制与位置跟踪控制间的干涉, 在某些情况下如快速开门过程中可能引起力控制和位置控制的同时失效.

传统力觉控制方法在原理上的缺陷, 是由于在设计控制器时, 突出考虑了力控制问题, 将力控制和位置控制割裂开来, 没有从系统的角度将力控制和位置控制作为一个整体来设计. 本文从 Lagrange 力

学体系^[8,9]出发, 将开门操作问题转化为受完整约束的机器人系统的约束反力控制问题, 分析了开门过程的完整约束及对应的待控制反力含义并给出待规划路径的求法, 通过建立 D-H 坐标系求解机器人系统的 Lagrange 函数, 并结合完整约束给出一种新的控制律, 实现开门操作过程力与位置的同时控制. McClamroch 和 Wang^[10]曾经用过类似的思路解决过两机械手协调控制的受限运动问题, 但是他们没有弄清广义坐标与约束反力间的关系, 控制律中出现了反力误差.

1 受限运动约束分析及 Lagrange 函数建立

反恐防暴机器人的开门操作, 可以看作基座固定的机械臂开门过程, 机械臂末端夹持构件与门把手配合可看作转动副, 建立 D-H 坐标系(图 1), 并选取 4 个转动副的关节转角 $\mathbf{q}=[q_1, q_2, q_3, q_4]^T$ 为广义坐标, 而 θ 为门打开角度, 可完全由 q_1 表达, 作为任务变量.

机器人满足的约束方程:

$$l_9 = l_2 + l_3 \cos q_2 - l_4 \cos(q_2 + q_3) + l_5 \cos(q_2 + q_3 - q_4), \quad (1)$$

引用格式: 王剑, 王挺, 姚辰, 等. 一种新的反恐防暴机器人受限操作方法. 科学通报, 2013, 58(增刊II): 91-96

Wang J, Wang T, Yao C, et al. A novel control law for constrained manipulation with its usage in the explosives ordnance disposal robot (in Chinese). Chin Sci Bull (Chin Ver), 2013, 58(Suppl.II): 91-96, doi: 10.1360/972013-941

图 1 D-H 坐标系及广义坐标

$$l_8 = l_1 + l_3 \sin q_2 - l_4 \sin(q_2 + q_3) + l_5 \sin(q_2 + q_3 - q_4), \quad (2)$$

$$q_4 = q_2 + q_3, \quad (3)$$

$$\text{其中 } l_9 = \sqrt{l_7^2 + (l_6^2 + l_7^2) - 2l_7\sqrt{l_6^2 + l_7^2} \cos\left(\arctan \frac{l_6}{l_7} - \theta\right)},$$

$$l_9 \sin\left(\arctan \frac{l_7}{l_6} - q_1\right) = l_7 \sin\left(\arctan \frac{l_6}{l_7} - \theta\right), \text{ 约束(1)表}$$

示夹持构件端点的运动轨迹受限在开门过程门把手所经过的圆弧上, 对应的约束反力为门对夹持构件施加的位于圆弧法向的力 $2\lambda_1$; 约束(2)表示夹持构件端点被约束于门把手的高度上, 对应的反力为门对夹持构件施加的铅直方向上的力 $2\lambda_2$, 约束(3)表示夹持构件始终保持水平, 对应的反力为门对夹持构件施加的扭矩 $2\lambda_3$ (图 2)。

如果选取任务方程为: $\theta = \omega \cdot t$, 即理想情况下门匀速转动被机器人打开. 这样可由 1 个任务方程和 3 个约束方程求出理想开门过程的 4 个广义坐标的角

图 2 夹持构件受到门施加的约束反力

度、角速度、角加速度, 把它们作为参考输入. 如 q_1 的理想输入曲线:

$$q_{1d} = \arctan \frac{l_7}{l_6} - \arcsin \left[\frac{l_7}{l_9} \sin \left(\arctan \frac{l_6}{l_7} - \omega \cdot t \right) \right]. \quad (4)$$

控制器的设计目标是使机器人在 4 个关节电机扭矩作用下, 门按参考轨迹 $q_d = [q_{1d}, q_{2d}, q_{3d}, q_{4d}]^T$ 变化且 3 个约束对夹持构件的约束反力全部为零, 即 $\lambda_d = [\lambda_{1d}, \lambda_{2d}, \lambda_{3d}]^T = [0, 0, 0]^T$.

表 1 给出机器人的相关参数, 且可以根据文献[11], 计算构件 $ii+1$ 的动能:

$$T_{ii+1} = \frac{1}{2} m_{ii+1} \left| {}^0 v_{Cii+1} \right|^2 + \frac{1}{2} {}^i \omega_{ii+1}^T {}^i I_{Cii+1} {}^i \omega_{ii+1}, \quad i=1, \dots, 4, \quad (5)$$

如构件 12 的动能: $T_{12} = \frac{1}{2} m_{12} \dot{q}_1^2 h_{12x}^2 + \frac{1}{2} {}^1 I_{C12z} \dot{q}_1^2$, 并

计算各构件重力势能 V_{ii+1} , 如构件 12 的重力势能: $V_{12} = m_{12} g h_{12z}$. 其中 m_{ii+1} 为构件 $ii+1$ 的质量, ${}^0 v_{Cii+1}$ 为 0 坐标系下构件 $ii+1$ 的质心速度, ${}^i \omega_{ii+1}$ 为 i 坐标系下构件 $ii+1$ 的角速度, ${}^i \rho_i = [h_{ii+1x}, h_{ii+1y}, h_{ii+1z}]^T$ 为 i 坐标系下构件 $ii+1$ 的重心矢量, 而

$${}^i I_{Cii+1} = \begin{bmatrix} {}^i I_{Cii+1x} & -{}^i I_{Cii+1xy} & -{}^i I_{Cii+1xz} \\ -{}^i I_{Cii+1xy} & {}^i I_{Cii+1y} & -{}^i I_{Cii+1yz} \\ -{}^i I_{Cii+1xz} & -{}^i I_{Cii+1yz} & {}^i I_{Cii+1z} \end{bmatrix}, \quad (6)$$

为构件 $ii+1$ 在 i 坐标系中关于质心的惯性矩阵。

当门被打开时, 假设门轴对门施加恒摩擦扭矩, 门把手便对机器人夹持构件施加大小不变的阻力, 方向与把手运动圆弧相切 (图 2), 克服阻力所耗费的能量可看作某种意义的势能加入到机器人系统的 Lagrange 函数中^[8], 由 Hamilton 原理的一般形式

$$\int_{t_0}^{t_1} (\delta T + \delta W) dt = 0 \text{ 可推出}$$

$$\left(\int_{t_0}^{t_1} \frac{\partial T}{\partial \dot{q}} \delta \dot{q} + \frac{\partial T}{\partial q} \delta q - \frac{\partial V}{\partial q} \delta q - \delta f_s \theta + \tau \delta q \right) dt = 0, \quad (7)$$

从而推出系统的 Lagrange 函数为

表 1 “灵蜥”机器人 D-H 坐标系中各构件参数值

杆 $ii+1$	扭角 a_{ii+1} (rad)	移动 a_{ii+1} (m)	转角 θ_{i+1} (rad)	升降 d_{i+1} (m)
01	0	0	$-q_1$	0
12	$\pi/2$	l_2	q_2	0
23	0	l_3	$q_3 - \pi$	0
34	0	l_4	$\pi - q_4$	0

$$L = \sum_{i=1}^4 T_{ii+1} - \sum_{i=1}^4 V_{ii+1} - f_s \cdot \theta, \quad (8)$$

其中 f_s 为恒定的摩擦扭矩。

2 受限操作过程控制器设计

防暴机器人系统中有 4 个广义坐标, 3 个独立的完整约束方程, 系统自由度为 1, 以定理形式给出完整系统的控制律设计, 使控制器跟踪给定的广义坐标的参考输入轨迹, 同时跟踪给定的约束反力的参考输入轨迹。

定理: 系统中有 n 个广义坐标, g 个独立完整约束, Hamilton 原理一般形式下的动力学方程可表示为:

$\int_{t_0}^{t_1} (D\ddot{q} + C\dot{q} + G - \tau)^T \delta q dt = 0$, 其中 $D \in R^{n \times n}$ 为惯性力项矩阵, $C \in R^{n \times n}$ 为哥氏力项矩阵, $G \in R^{n \times 1}$ 为重力项矩阵, $\tau \in R^{n \times 1}$ 为控制器作用于 q 上的广义力。完整约束的约束方程为: $f(q, t) = 0$, 其中向量函数 $f(\cdot) \in R^{g \times 1}$, 则系统自由度为 $k=n-g$, 系统中有 k 个独立的广义坐标, 可设为 $q_k = [q_1, q_2, \dots, q_k]^T \in R^{k \times 1}$, 而 $q_g = [q_{k+1}, q_{k+2}, \dots, q_n]^T \in R^{g \times 1}$, 设 $D_k \in R^{n \times k}$, $D_g \in R^{n \times g}$ 分别为 D 中对应于 $\ddot{q}_k$, $\ddot{q}_g$ 的子块矩阵, 若矩阵

$$\begin{bmatrix} D_k - D_g \left(\frac{\partial f}{\partial q_g^T} \right)^{-1} \frac{\partial f}{\partial q_k^T} \bigg| - \frac{\partial f^T}{\partial q} \end{bmatrix} \in R^{n \times n}$$

可逆, 则广义坐标 q_k 和约束反力 λ 可跟踪, 给出一种控制律为

$$\tau = \begin{bmatrix} D_k - D_g \left(\frac{\partial f}{\partial q_g^T} \right)^{-1} \frac{\partial f}{\partial q_k^T} \bigg| - \frac{\partial f^T}{\partial q} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{q}_{kd} + K_D \dot{e}_k + K_P e_k \\ \lambda_d \end{bmatrix} - D_g \left(\frac{\partial f}{\partial q_g^T} \right)^{-1} \left(c\ddot{q} + 2 \frac{\partial^2 f}{\partial t \partial q^T} \dot{q} + \frac{\partial^2 f}{\partial t^2} \right) + C\dot{q} + G. \quad (9)$$

证明: 由于 g 个完整约束 $f(q, t) = 0$ 独立, 则 $\frac{\partial f}{\partial q_g} \in R^{g \times g}$ 可逆, 由隐函数定理反解出:

$$q_g = q_g(q_k, t). \quad (10)$$

通过对时间求导和矩阵分块解出:

$$\dot{q}_g = - \left(\frac{\partial f}{\partial q_g^T} \right)^{-1} \left(\frac{\partial f}{\partial q_k^T} \dot{q}_k + \frac{\partial f}{\partial t} \right), \quad (11)$$

$$\ddot{q}_g = - \left(\frac{\partial f}{\partial q_g^T} \right)^{-1} \left(\frac{\partial f}{\partial q_k^T} \ddot{q}_k + c\ddot{q} + 2 \frac{\partial^2 f}{\partial t \partial q^T} \dot{q} + \frac{\partial^2 f}{\partial t^2} \right). \quad (12)$$

系统带 Lagrange 乘子的 Lagrange 方程为

$\int_{t_0}^{t_1} \left(D\ddot{q} + C\dot{q} + G - \frac{\partial f^T}{\partial q} \lambda - \tau \right)^T \delta q dt = 0$, 其中有 k 个独立变分, 另外可调整 g 个系数 λ , 使不独立变分前的系数为 0, 则有

$$D\ddot{q} + C\dot{q} + G - \frac{\partial f^T}{\partial q} \lambda - \tau = 0. \quad (13)$$

将(12), (11), (10)式依次代入(13)式, 得到只含有独立广义坐标 q_k 和约束反力 λ 的动力学方程:

$$\begin{bmatrix} D_k - D_g \left(\frac{\partial f}{\partial q_g^T} \right)^{-1} \frac{\partial f}{\partial q_k^T} \bigg| - \frac{\partial f^T}{\partial q} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{q}_k \\ \lambda \end{bmatrix} - D_g \left(\frac{\partial f}{\partial q_g^T} \right)^{-1} \left(c\ddot{q} + 2 \frac{\partial^2 f}{\partial t \partial q^T} \dot{q} + \frac{\partial^2 f}{\partial t^2} \right) + C\dot{q} + G = \tau. \quad (14)$$

若设计控制律为(9), 并代入动力学方程(14)中, 则有:

$$\begin{bmatrix} D_k - D_g \left(\frac{\partial f}{\partial q_g^T} \right)^{-1} \frac{\partial f}{\partial q_k^T} \bigg| - \frac{\partial f^T}{\partial q} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \ddot{q}_k - \ddot{q}_{kd} - K_D \dot{e}_k - K_P e_k \\ \lambda - \lambda_d \end{bmatrix} = 0, \quad (15)$$

其中 q_{kd} , $\dot{q}_{kd}$, $\ddot{q}_{kd}$ 和 λ_d 表示 q_k , $\dot{q}_k$, $\ddot{q}_k$ 和 λ 所期望的跟踪值。而定义误差函数为 $e_k = q_{kd} - q_k$, $\dot{e}_k = \dot{q}_{kd} - \dot{q}_k$, $\ddot{e}_k = \ddot{q}_{kd} - \ddot{q}_k$ 。 K_D , K_P 为可选的正定矩阵。

由定理可知, 当矩阵

$$\begin{bmatrix} D_k - D_g \left(\frac{\partial f}{\partial q_g^T} \right)^{-1} \frac{\partial f}{\partial q_k^T} \bigg| - \frac{\partial f^T}{\partial q} \end{bmatrix}$$

可逆时, 上面方程只有零解, 即

$$\begin{cases} \ddot{e}_k + K_D \dot{e}_k + K_P e_k = 0, \\ \lambda = \lambda_d. \end{cases} \quad (16)$$

由 $\lambda = \lambda_d$ 可知, 该控制律可以控制完整约束的约束反力, 同时选 Lyapunov 函数为 $V = \frac{1}{2} \dot{e}_k^T \dot{e}_k + \frac{1}{2} e_k^T K_P e_k$, 可证明采用控制律(9)使被控变量 q_k 最终能跟踪给定的参考输入 q_{kd} 。证毕。

由系统的 Lagrange 函数(8)和

$$\int_0^t \left[\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}} \right) - \frac{\partial L}{\partial q} - \tau \right]^T \delta q dt = 0, \quad (17)$$

计算其所对应的表达式 $\int_0^t (D\ddot{q} + C\dot{q} + G - \tau)^T \delta q dt = 0$. 根据定理中(9)式设计控制器(图 3), 使机器人系统跟踪(4)式的参考输入 q_{1d} 和理想约束反力 $\lambda_{1d} = \lambda_{2d} = \lambda_{3d} = 0$.

3 仿真与实验

反恐防暴机器人的结构参数如表 2 所示, 利用

图 3 按定理设计的完整系统位/力控制框图

MATLAB 中的 STATEFLOW 模块对本文所提出的开门操作控制方法进行仿真(图 4), 并以“灵蜥”为实验平台进行开门操作(图 5).

其中假设门被打开的理想转速为 $\omega = \pi/12$ rad/s, 实验中测得门轴的摩擦扭矩为 $f_s = 13.5$ N·m, 可选取正定阵 $K_D = 14$, $K_P = 100$.

按定理设计控制律, 图 4(a)表示开门过程各关节所需的电机扭矩, 图 4(b)表示按照此扭矩控制, 可使机器人精确跟踪所要求控制约束(1)的约束反力, 图 4(c)~(f)则表示机器人可跟踪所要求控制的广义坐标 q_1 的角度、角速度、角加速度和 q_4 的角度(篇幅所限, 图 4 只列出约束 1 的反力控制, 和关节 1, 4 的位置控制, 其余类同). 位置可看成对应于时间的零阶导数, 而力可看成对应于时间的二阶导数, 所以不同于对位置的控制, 约束反力可实现精确控制, 这也是本文所提出的完整系统约束反力控制的一个特点. 图 5 给出按本方法控制的开门操作过程.

表 2 “灵蜥”机器人中各构件的结构参数值

构件 $ii+1$	m_{ii+1} (kg)	h_{ii+1x} (m)	h_{ii+1y} (m)	h_{ii+1z} (m)	I_{Cii+1x} (kg m ²)	$I_{Cii+1xy}$ (kg m ²)	$I_{Cii+1xz}$ (kg m ²)	I_{Cii+1y} (kg m ²)	$I_{Cii+1yz}$ (kg m ²)	I_{Cii+1z} (kg m ²)
12	2.832	0.042	0	-0.109	—	—	—	—	—	0.0016
23	10.371	0.285	0.011	0	0.0236	0.0299	0	0.6931	0	0.7504
34	16.034	0.288	0.049	0	0.0393	0.1278	0	0.7234	0	0.8483
45	8.046	0.195	0	0	0.0074	0	0	0.6439	0	0.4278

图 4 本文提出的开门控制方法仿真结果

(a) 各关节所需提供的扭矩; (b) 约束反力 $\lambda_1 = \lambda_{1d} = 0$; (c) 广义坐标或关节 1 的角度; (d) 广义坐标或关节 1 的角速度; (e) 广义坐标或关节 1 的角加速度; (f) 广义坐标或关节 4 的角度

图5 “灵蜥”开门实验组图

图6 采用阻抗控制开门方法的仿真结果

(a) 门把手运动轨迹的法向; (b) 门把手运动轨迹的纵向; (c) 夹持构件的旋转

用同样的机器人参数,对阻抗控制的开门操作进行仿真(图6).阻抗控制模型可选为: $M\ddot{\Delta} + B\dot{\Delta} + K\Delta = F_e$, 其中 $\Delta = [\Delta_n, \Delta_z, \Delta_\phi]^T$ 为待调节位置量, $F_e = 2\lambda - 2\lambda_0$ 为夹持机构所受外力增量, $M = \text{diag}(6, 6, 6)$, $B = \text{diag}(80, 80, 80)$, $K = \text{diag}(400, 400, 300)$ 分别为机器人的惯性、黏性阻尼和刚度矩阵.把门看作弹簧,外力由门的刚度提供: $-K_e\Delta = F_e$, 其中 $K_e = \text{diag}(450, 400, 500)$.当力控制与位置控制需要对某一相同广义坐标进行调整时,两者对广义坐标调整量的方向和大小不完全相同,造成力控制与位置控制间的干涉,这种干涉在某种限度内,力与位置会最终收敛到各自的参考输入(图6(a)),若这种干涉达到某种限度,力与位置会达到与各自参考输入不同的某种动态平衡(图6(b)),若这种干涉超出某种限度时,力与位置最终都会发散,不能追踪各自的参考输入(图6(c)).而这种限度是由位置控制参考轨迹的速度和形成约

束的外界环境的刚度决定的.

4 讨论

运动受限机器人受到的约束反力本质上是由系统动力源所施加的广义力造成的,环境对机器人的约束反力是对系统广义力的反映.阻抗控制等通过测量约束反力的力觉控制方法,只是根据反力与位置调节量的关系来对系统的位置控制进行被动的补偿,必然会造成力控制与位置控制的冲突.当冲突超过限度时,如高速开门,力控制和位置控制会同时失效.而本文采用的方法,从完整系统的角度出发,找到广义力与约束反力间的关系,直接对广义力实施控制,从而实现约束反力的精确跟踪控制,而且同时实现了对广义坐标的规划路径的跟踪控制.此外,该控制方法也可以解决张拉机器人、磨削机器人等运动受限机器人的力操作问题.

参考文献

- 1 殷跃红,朱剑英.智能机器人力觉及力控制研究综述.航空学报,1999,20:1-7
- 2 Pujas A, Dauchez P, Pierrot F. Hybrid position/force control: Task description and control scheme determination for a real implementation. In: Proceedings of the 1993 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Yokohama: IEEE Press, 1993. 841-846
- 3 Ma D, Wang H, Chen W. Unknown constrained mechanisms operation based on dynamic hybrid compliance control. In: Proceedings of the 2011 IEEE International Conference on Robots and Biomimetics. Phuket: IEEE Press, 2011. 2366-2371

- 4 Raibert M H, Craig J J. Hybrid position/force control of manipulators. *Trans of ASME, J Dyn Sys, Meas, Contr*, 1981, 103: 126–133
- 5 Lutscher E, Lawitzky M, Cheng G, et al. A control strategy for operating unknown constrained mechanisms. In: *IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Anchorage: IEEE Press, 2010. 819–824
- 6 孙逸翔, 陈卫东. 基于预测和阻抗控制的未知受限机构操作. *机器人*, 2011, 33: 563–569
- 7 Hogan N. Impedance control: An approach to manipulation, Part I-III. *Trans of ASME, J Dyn Sys, Meas, Contr*, 1985, 107: 1–24
- 8 叶敏, 肖龙翔. 分析力学. 天津: 天津大学出版社, 2001. 4
- 9 Liang L F, Hu H C, Chen D M. Lagrangian theoretical framework of dynamics of nonholonomic systems. *Sci China Ser G-Phys Mech Astron*, 2007, 50: 766–778
- 10 McClamroch H N, Wang D. Feedback stabilization and tracking of constrained robots. *IEEE Trans Automat Contr*, 1988, 33: 419–426
- 11 霍伟. 机器人动力学与控制. 北京: 高等教育出版社, 2004. 1

A novel control law for constrained manipulation with its usage in the explosives ordnance disposal robot

WANG Jian^{1,3}, WANG Ting¹, YAO Chen¹, LI XiaoFan¹ & WU ChengDong²

¹ State Key Laboratory of Robotics, Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China;

² School of Information Science & Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China;

³ University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Manipulation of the explosives ordnance disposal robot into the situational room in buildings can be regarded as a complex force control problem for a motion constrained robot. There are some defects on traditional force control methods in principle, such as the fact that the force controller and the position controller of hybrid force/position control cannot perform at the same time, and that impedance control causes interference between its force control and position control, and such defects should affect the door-opening operation eventually. So based on the holonomic system, a novel control law for tracking the reference position and the reference constrained force at the same time is proposed, and then the motion constrained problem of the door-opening operation can be transformed into the control problem for the constrained force of a holonomic system through the proposed control law. Finally, by the experimental platform, “Ling Xi” explosives ordnance disposal robot, a comparison is made between the proposed method and the impedance control, which proves the advantage of the proposed one.

explosives ordnance disposal robot, holonomic system, control for constrained force, constrained manipulation

doi: 10.1360/972013-941