



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 118372255 B

(45) 授权公告日 2024. 09. 06

(21) 申请号 202410804285.8

(22) 申请日 2024.06.21

(65) 同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 118372255 A

(43) 申请公布日 2024.07.23

(73) 专利权人 合肥工业大学
地址 230009 安徽省合肥市包河区屯溪路
193号

专利权人 合肥智子微控科技有限公司

(72) 发明人 周婷 李霄剑 肖夕林 石毓东
戴子扬 莫杭杰 李玲

(74) 专利代理机构 北京久诚知识产权代理事务
所(特殊普通合伙) 11542
专利代理师 王云海

(51) Int.Cl.

B25J 9/16 (2006.01)

(56) 对比文件

CN 115281841 A, 2022.11.04

CN 115356991 A, 2022.11.18

审查员 叶萌

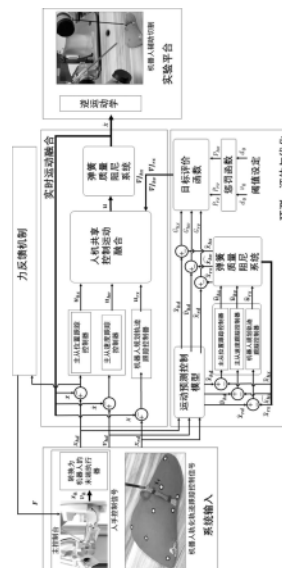
权利要求书5页 说明书13页 附图2页

(54) 发明名称

融合位置-速度-力的人机安全增强共享控制方法和装置

(57) 摘要

本发明提供一种融合位置-速度-力的人机安全增强共享控制方法和装置,涉及自动化与人工智能领域。本发明提出的方法融合了主手位置跟踪、主手速度跟踪和机器人规划轨迹跟踪三种目标控制器,保证了外科医生在整个手术过程中的持续掌控能力,从而增强了人机交互的安全性;建立了一种基于当前运动状态的目标预测评价机制,能够实现三种控制器之间控制权限的智能动态分配;设计了一种力反馈机制,能够帮助外科医生识别主手机器人的实时位置与运动融合控制输出之间的差异,提升外科医生的操作直觉,以增强共享控制的安全性。



1. 一种融合位置-速度-力的人机安全增强共享控制方法,其特征在于,包括:
 将机器人系统简化为一个弹簧-质量-阻尼系统,并建立状态方程;
 根据人机共享控制的目标需求,分别设定主手位置跟踪、主手速度跟踪和机器人规划轨迹跟踪三种目标控制器;
 建立相应的运动预测控制模型,以获取各个目标控制器的预测控制状态;
 根据各个预测控制状态,引入惩罚机制设置各个目标控制器的评价函数;
 根据各个评价函数,对应计算各个控制目标的预测评价梯度下降值,以获取各个目标控制器在不同场景下的权限分配向量;其中所述控制目标包括主手位置跟踪控制目标、主手速度跟踪控制目标以及机器人规划轨迹跟踪控制目标;
 将权限分配向量作为状态方程的输入,以输出融合后的系统运动状态和运动速度;
 根据融合后的系统运动状态与主手机器人的实时位置,基于力反馈机制生成作用于主手机器人的触觉力;
 根据融合后的运动速度以及姿态变化的速度,生成从手机器人的关节角的转动速度。

2. 如权利要求1所述的人机安全增强共享控制方法,其特征在于,所述状态方程为:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{\dot{x}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{k}{m} & -\frac{b}{m} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{m} \end{bmatrix} [u] \quad (1)$$

$$y = [1 \quad 0] \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \end{bmatrix} + [0][u] \quad (2)$$

其中, x 为系统运动状态, \dot{x} 为系统运动速度, \ddot{x} 为系统的加速度, u 为系统总的控制输入, y 为系统总的控制输出, m 、 b 和 k 分别为弹簧-质量-阻尼系统的惯性参数、阻尼参数和刚度参数。

3. 如权利要求2所述的人机安全增强共享控制方法,其特征在于,所述根据人机共享控制的目标需求,分别设定主手位置跟踪、主手速度跟踪和机器人规划轨迹跟踪三种目标控制器;包括:

设置主手位置跟踪控制器:

$$u_{hx} = k_{px}e_{hx} + k_{dx}\dot{e}_{hx} \quad (3)$$

$$e_{hx} = x_{hd} - x \quad (4)$$

其中, u_{hx} 为主手位置跟踪控制器的输入, k_{px} 、 k_{dx} 为主手位置跟踪控制器的比例系数和微分系数, x_{hd} 为主手机器人的实时位置, e_{hx} 为主手机器人的实时位置与系统运动状态的偏差, \dot{e}_{hx} 为主手机器人的实时位置与系统运动状态的偏差的变化速度;

设置主手速度跟踪控制器:

$$u_{hv} = k_{pv}e_{hv} \quad (5)$$

$$e_{hv} = v_{hd} - \dot{x} \quad (6)$$

其中, u_{hv} 为主手速度跟踪控制器的输入, k_{pv} 为主手速度跟踪控制器的比例系数, v_{hd} 为主手机器人的实时速度, e_{hv} 为主手机器人的实时速度与系统运动速度的偏差;

设置规划轨迹跟踪控制器:

$$\mathbf{u}_{rx} = k_{pr}\mathbf{e}_{rx} + k_{dr}\dot{\mathbf{e}}_{rx} \quad (7)$$

$$\mathbf{e}_{rx} = \mathbf{x}_{rd} - \mathbf{x} \quad (8)$$

其中, \mathbf{u}_{rx} 为规划轨迹跟踪控制器的输入, k_{pr} 、 k_{dr} 为规划轨迹跟踪控制器的比例系数和微分系数, \mathbf{x}_{rd} 为规划轨迹的实时位置, \mathbf{e}_{rx} 为规划轨迹的实时位置与系统运动状态的偏差, $\dot{\mathbf{e}}_{rx}$ 为规划轨迹的实时位置与系统运动状态的偏差的变化速度。

4. 如权利要求3所述的人机安全增强共享控制方法, 其特征在于, 所述建立相应的运动预测控制模型, 以获取各个目标控制器的预测控制状态; 包括:

$$\begin{bmatrix} \dot{\hat{\mathbf{x}}}_i \\ \ddot{\hat{\mathbf{x}}}_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{k}{m} & -\frac{b}{m} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{x}}_i \\ \dot{\hat{\mathbf{x}}}_i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{m} \end{bmatrix} [\mathbf{u}] \quad (9)$$

$$\hat{\mathbf{y}}_i = [1 \quad 0] \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{x}}_i \\ \dot{\hat{\mathbf{x}}}_i \end{bmatrix} + [0][\mathbf{u}] \quad (10)$$

其中, $\hat{\mathbf{x}}_i$ 为预测区间内控制器 i 的预测运动状态, $\dot{\hat{\mathbf{x}}}_i$ 为预测区间内控制器 i 的预测运动速度, $\ddot{\hat{\mathbf{x}}}_i$ 为预测区间内控制器 i 的预测加速度, $\hat{\mathbf{y}}_i$ 为预测区间内控制器 i 的预测控制输出;

$i=1$ 时, 对应的主手位置跟踪控制器的预测控制状态为 $\hat{\mathbf{x}}_{hx}$;

$i=2$ 时, 对应的主手速度跟踪控制器的预测控制状态为 $\hat{\mathbf{x}}_{hv}$;

$i=3$ 时, 对应的机器人规划轨迹跟踪控制器的预测控制状态为 $\hat{\mathbf{x}}_{rx}$ 。

5. 如权利要求4所述的人机安全增强共享控制方法, 其特征在于, 所述根据各个预测控制状态, 引入惩罚机制设置各个目标控制器的评价函数; 包括:

针对主手位置跟踪控制器建立目标评价函数:

$$J_{hx} = \int_{t_0}^{t_0+T} \max(0, G_{hx}(\mathbf{x}_0, \hat{\mathbf{x}}_{hx}, \hat{\mathbf{x}}_{hd}) - P_{hx}(\mathbf{v}_{hd}, v_0)) dt \quad (11)$$

$$G_{hx} = \|\hat{\mathbf{x}}_{hd} - \hat{\mathbf{x}}_{hx}\|^2 \quad (12)$$

$$P_{hx} = \max(0, \|\mathbf{v}_{hd}\| - v_0)^2 \quad (13)$$

其中, J_{hx} 为主手位置跟踪控制器在预测区间 t_0 到 t_0+T 时间段内的目标函数累计值, G_{hx} 为主手位置跟踪控制器在预测区间内单时刻点的目标评价函数值, \mathbf{x}_0 为 t_0 时刻系统的运动状态; $\hat{\mathbf{x}}_{hd}$ 为主手位置跟踪控制目标的预测控制位置, 按当前状态向前滚动平均计算得到; P_{hx} 为惩罚函数, v_0 为触发惩罚的系统控制速度阈值, 用于 $\|\mathbf{v}_{hd}\| > v_0$ 时减小 J_{hx} ;

针对主手速度跟踪控制器建立目标评价函数:

$$J_{hv} = \int_{t_0}^{t_0+T} G_{hv}(\mathbf{x}_0, \hat{\mathbf{v}}_{hd}, \hat{\mathbf{x}}_{hv}) dt \quad (14)$$

$$G_{hv} = \|\hat{\mathbf{v}}_{hd} - \dot{\hat{\mathbf{x}}}_{hv}\|^2 \quad (15)$$

其中, J_{hv} 为主手速度跟踪控制器在预测区间 t_0 到 t_0+T 时间段内的目标函数累计值, G_{hv} 为主手速度跟踪控制器在预测区间内单时刻点的目标评价函数值; \hat{v}_{hd} 为主手速度跟踪控制目标的预测控制速度, 按当前状态向前滚动平均计算得到; \hat{x}_{hv} 为主手速度跟踪控制器的预测控制状态速度;

针对机器人规划轨迹跟踪控制器建立目标评价函数:

$$J_{rx} = \int_{t_0}^{t_0+T} \max(0, G_{rx}(x_0, \hat{x}_{rx}, \hat{x}_{rd}) - P_{rx}(x_0, \hat{x}_{rd}, d_0) - P_{rv}(v_0, v_{hd})) dt \quad (16)$$

$$G_{rx} = \|\hat{x}_{rd} - \hat{x}_{rx}\|^2 \quad (17)$$

$$P_{rx} = \max(0, \|x_0 - \hat{x}_{rd}\| - d_0)^2 \quad (18)$$

$$P_{rv} = \max(0, v_0 - \|v_{hd}\|)^2 \quad (19)$$

其中, J_{rx} 为规划轨迹跟踪控制器在预测区间 t_0 到 t_0+T 时间段内的目标函数累计值, G_{rx} 为规划轨迹跟踪控制器在预测区间内单时刻点的目标评价函数值; \hat{x}_{rd} 为规划轨迹跟踪控制目标的预测控制位置, 按当前状态向前滚动平均计算得到; d_0 为触发惩罚的距离阈值, P_{rx} 为位置距离惩罚函数, 用于 $\|x_0 - \hat{x}_{rd}\| > d_0$ 时减小 J_{rx} ; P_{rv} 为速度距离惩罚函数, 用于 $\|v_{hd}\| < v_0$ 时减小 J_{rx} 。

6. 如权利要求5所述的人机安全增强共享控制方法, 其特征在于, 所述根据各个评价函数, 对应计算各个控制目标的预测评价梯度下降值, 以获取各个目标控制器在不同场景下的权限分配向量; 包括:

针对主手位置跟踪、主手速度跟踪和机器人规划轨迹跟踪三个控制目标分别计算预测评价梯度下降值:

$$\nabla J_{hx} = \frac{\partial J_{hx}}{\partial x} \Big|_{x=x_0} \quad (20)$$

$$\nabla J_{hv} = \frac{\partial J_{hv}}{\partial x} \Big|_{x=x_0} \quad (21)$$

$$\nabla J_{rx} = \frac{\partial J_{rx}}{\partial x} \Big|_{x=x_0} \quad (22)$$

其中, ∇J_{hx} 为主手位置跟踪控制目标的预测评价梯度下降值, ∇J_{hv} 为主手速度跟踪控制目标的预测评价梯度下降值, ∇J_{rx} 为机器人规划轨迹跟踪控制目标的预测评价梯度下降值;

根据场景控制需求融合到全局的系统输入中, 以获取各个目标控制器在不同场景下的权限分配向量:

$$\mathbf{u}^* = \frac{\|\nabla J_{hx}\|}{\|\nabla J\|} \mathbf{u}_{hx} + \frac{\|\nabla J_{hv}\|}{\|\nabla J\|} \mathbf{u}_{hv} + \frac{\|\nabla J_{rx}\|}{\|\nabla J\|} \mathbf{u}_{rx} - \lambda K_o \varphi_\alpha(\nabla J) \quad (23)$$

$$\nabla J = \nabla J_{hx} + \nabla J_{hv} + \nabla J_{rx} \quad (24)$$

$$\varphi_\alpha(\nabla J) = \begin{cases} \alpha \nabla J / \|\nabla J\|, & \|\nabla J\| > \alpha \\ \nabla J, & 0 < \|\nabla J\| \leq \alpha \\ \varepsilon, & \|\nabla J\| = 0 \end{cases} \quad (25)$$

其中, K_o 为比例系数矩阵, λ 为梯度调整的步长, ∇J 为总的预测评价梯度下降值, φ_α 为饱和和抑制函数, ε 为一个很小的常数, α 为阈值常数。

7. 如权利要求6所述的人机安全增强共享控制方法, 其特征在于, 所述根据融合后的系统运动状态与主手机器人的实时位置, 基于力反馈机制生成作用于主手机器人的触觉力; 包括:

$$\mathbf{F} = k_f \mathbf{e}_f + b_f \dot{\mathbf{e}}_f + m_f \ddot{\mathbf{e}}_f \quad (26)$$

$$\mathbf{e}_f = \mathbf{x}^* - \mathbf{x}_{hd} \quad (27)$$

其中, \mathbf{x}^* 为融合后的系统运动状态, \mathbf{F} 为反馈到主手机器人的触觉力, \mathbf{e}_f 、 $\dot{\mathbf{e}}_f$ 、 $\ddot{\mathbf{e}}_f$ 分别为融合后的系统运动状态与主手机器人的实时位置之间的误差、误差变化速度及误差变化加速度, k_f 、 b_f 和 m_f 分别表示力反馈系统的刚度参数、阻尼参数和惯性参数。

8. 如权利要求6所述的人机安全增强共享控制方法, 其特征在于, 所述根据融合后的运动速度以及姿态变化的速度, 生成从手机器人的关节角的转动速度; 包括:

$$\mathbf{Z}_t = \frac{\mathbf{y} - \mathbf{x}m}{\|\mathbf{y} - \mathbf{x}m\|} \quad (28)$$

$$\mathbf{Y}_t = \mathbf{Z}_t \times \mathbf{X}_{t-1} \quad (29)$$

$$\mathbf{X}_t = \frac{\mathbf{Y}_t}{\|\mathbf{Y}_t\|} \times \mathbf{Z}_t \quad (30)$$

$$\mathbf{q}_t = [\mathbf{X}_t \quad \mathbf{Y}_t \quad \mathbf{Z}_t] \quad (31)$$

$$\boldsymbol{\vartheta} = \zeta(\mathbf{q}_t) \quad (32)$$

$$\dot{\boldsymbol{\theta}} = \mathbf{J}^{-1}(\boldsymbol{\theta})[\dot{\boldsymbol{\vartheta}} \quad \dot{\mathbf{x}}^*]^T \quad (33)$$

其中, $\dot{\mathbf{x}}^*$ 为融合后的运动速度, $\mathbf{x}m$ 表示固定的远端运动中心, \mathbf{X}_t 表示姿态矩阵的X轴向量, \mathbf{Y}_t 表示姿态矩阵的Y轴向量, \mathbf{Z}_t 表示姿态矩阵的Z轴向量, \mathbf{q}_t 为机器人运动的姿态, 函数 ζ 表示将姿态旋转矩阵转换为笛卡坐标系下的欧拉角, $\boldsymbol{\vartheta}$ 为笛卡坐标系下的欧拉角, $\dot{\boldsymbol{\vartheta}}$ 为欧拉角变化的速度, $\dot{\boldsymbol{\theta}}$ 为从手机器人的关节角的转动速度; \mathbf{J}^{-1} 为雅可比矩阵, $\boldsymbol{\theta}$ 为从手机器人的关节角。

9. 一种融合位置-速度-力的人机安全增强共享控制装置, 其特征在于, 包括:

建立模块, 用于将机器人系统简化为一个弹簧-质量-阻尼系统, 并建立状态方程;

设定模块, 用于根据人机共享控制的目标需求, 分别设定主手位置跟踪、主手速度跟踪和机器人规划轨迹跟踪三种目标控制器;

预测模块,用于建立相应的运动预测控制模型,以获取各个目标控制器的预测控制状态;

设置模块,用于根据各个预测控制状态,引入惩罚机制设置各个目标控制器的评价函数;

计算模块,用于根据各个评价函数,对应计算各个控制目标的预测评价梯度下降值,以获取各个目标控制器在不同场景下的权限分配向量;其中所述控制目标包括主手位置跟踪控制目标、主手速度跟踪控制目标以及机器人规划轨迹跟踪控制目标;

输出模块,用于将权限分配向量作为状态方程的输入,以输出融合后的系统运动状态和运动速度;

反馈模块,用于根据融合后的系统运动状态与主手机器人的实时位置,基于力反馈机制生成作用于主手机器人的触觉力;

生成模块,用于根据融合后的运动速度以及姿态变化的速度,生成从手机器人的关节角的转动速度。

融合位置-速度-力的人机安全增强共享控制方法和装置

技术领域

[0001] 本发明涉及自动化与人工智能领域,具体涉及一种融合位置-速度-力的人机安全增强共享控制方法和装置。

背景技术

[0002] 随着自动化与人工智能的迅速发展,机器人已广泛渗透到人类的日常生活和工作。人与机器人的合作方式也由传统的共存不交互,转变为如今远程操控、人机协同、人机共享合作的控制模式。当前,面对非结构化的场景或者复杂的任务,机器人很难完全自主执行任务。人机交互的方式可以结合双方的优势:人具有善于推理和解决问题的能力,且面对复杂的环境能灵活应变;而机器人在执行方面具有抗疲劳、高精度的优势,特殊的材料结构特性也能胜任恶劣的工作环境。

[0003] 现有的人机共享控制研究主要围绕提升任务执行的表现与效率、机器人自主智能纠偏人的行为、以及机器人主动适应人的行为等方面,相关应用包括自动驾驶下保留驾驶员的控制能力、虚拟夹具提供引导与碰撞规避、强化学习识别并适应人的行为、自主颤动补偿提升手术质量、生产协作中角色智能切换来提高生产效率等。

[0004] 例如,《A Confidence-Based Shared Control Strategy for the Smart Tissue Autonomous Robot (STAR)》,其提出一种基于置信度的控制权分配函数,能够在自主控制和手动控制之间进行自动切换,从而提高机器人辅助手术系统整体任务的性能。然而,该方案虽然考虑了机器人自主控制与人类控制的结合,但过于强调自主智能的利用,而忽视了人类在手术中的主导地位。在自主智能作为领导者过程中,当外科医生意识到即将发生的危险时,操作人员在返回控制回路时缺乏态势感知,从自主控制突然切换到手动控制会导致瞬态误差增加,如果处理不当则会增加系统的风险。

[0005] 再如,《Adaptive Impedance Controller for Human-Robot Arbitration based on Cooperative Differential Game Theory》,其提出了一种基于合作微分博弈的人机交互控制权重分配方法,用于解决物理人机交互过程中人与机器的角色切换问题。然而,该方案通过力传感器虽然可以采集主手端人施加的力,达到估计人的控制意图的目的,但考虑到手术过程中手感对于医生操控而言十分重要,在机器人自主操控策略和医生手术指引意图的高频交互中,缺乏符合医生操控直觉的力反馈,很难保证手术执行过程的安全可控性。

发明内容

[0006] (一)解决的技术问题

[0007] 针对现有技术的不足,本发明提供了一种融合位置-速度-力的人机安全增强共享控制方法和装置,解决了人与机器人的角色完全转移存在医生不可掌控的隐患以及力学感知信息的缺失无法有效保障机器人手术安全的技术问题。

[0008] (二)技术方案

[0009] 为实现以上目的,本发明通过以下技术方案予以实现:

[0010] 一种融合位置-速度-力的人机安全增强共享控制方法,包括:

[0011] 将机器人系统简化为一个弹簧-质量-阻尼系统,并建立状态方程;

[0012] 根据人机共享控制的目标需求,分别设定主手位置跟踪、主手速度跟踪和机器人规划轨迹跟踪三种目标控制器;

[0013] 建立相应的运动预测控制模型,以获取各个目标控制器的预测控制状态;

[0014] 根据各个预测控制状态,引入惩罚机制设置各个目标控制器的评价函数;

[0015] 根据各个评价函数,对应计算各个控制目标的预测评价梯度下降值,以获取各个目标控制器在不同场景下的权限分配向量;

[0016] 将权限分配向量作为状态方程的输入,以输出融合后的系统运动状态和运动速度;

[0017] 根据融合后的系统运动状态与主手机器人的实时位置,基于力反馈机制生成作用于主手机器人的触觉力;

[0018] 根据融合后的运动速度以及姿态变化的速度,生成从手机器人的关节角的转动速度。

[0019] 优选的,所述状态方程为:

$$[0020] \quad \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{\ddot{x}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{k}{m} & -\frac{b}{m} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} [u] \quad (1)$$

$$y = [1 \quad 0] \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \end{bmatrix} + [0][u] \quad (2)$$

[0021] 其中,其中, x 为系统运动状态, \dot{x} 为系统运动速度, \ddot{x} 为系统的加速度, u 为系统总的控制输入, y 为系统总的控制输出, m 、 b 和 k 分别为弹簧-质量-阻尼系统的惯性参数、阻尼参数和刚度参数。

[0022] 优选的,所述根据人机共享控制的目标需求,分别设定主手位置跟踪、主手速度跟踪和机器人规划轨迹跟踪三种目标控制器;包括:

[0023] 设置主手位置跟踪控制器:

$$[0024] \quad u_{hx} = k_{px} e_{hx} + k_{dx} \dot{e}_{hx} \quad (3)$$

$$e_{hx} = x_{hd} - x \quad (4)$$

[0025] 其中, u_{hx} 为主手位置跟踪控制器的输入, k_{px} 、 k_{dx} 为主手位置跟踪控制器的比例系数和微分系数, x_{hd} 为主手机器人的实时位置, e_{hx} 为主手机器人的实时位置与系统运动状态的偏差, \dot{e}_{hx} 为主手机器人的实时位置与系统运动状态的偏差的变化速度;

[0026] 设置主手速度跟踪控制器:

$$[0027] \quad u_{hv} = k_{pv} e_{hv} \quad (5)$$

$$e_{hv} = v_{hd} - \dot{x} \quad (6)$$

[0028] 其中, u_{hv} 为主手速度跟踪控制器的输入, k_{pv} 为主手速度跟踪控制器的比例系数, v_{hd} 为主手机器人的实时速度, e_{hv} 为主手机器人的实时速度与系统运动速度的偏差;

[0029] 设置规划轨迹跟踪控制器:

$$\mathbf{u}_{rx} = k_{pr}\mathbf{e}_{rx} + k_{dr}\dot{\mathbf{e}}_{rx} \quad (7)$$

[0030]

$$\mathbf{e}_{rx} = \mathbf{x}_{rd} - \mathbf{x} \quad (8)$$

[0031] 其中, \mathbf{u}_{rx} 为规划轨迹跟踪控制器的输入, k_{pr} 、 k_{dr} 为规划轨迹跟踪控制器的比例系数和微分系数, \mathbf{x}_{rd} 为规划轨迹的实时位置, \mathbf{e}_{rx} 为规划轨迹的实时位置与系统运动状态的偏差, $\dot{\mathbf{e}}_{rx}$ 为规划轨迹的实时位置与系统运动状态的偏差的变化速度。

[0032] 优选的, 所述建立相应的运动预测控制模型, 以获取各个目标控制器的预测控制状态; 包括:

$$\begin{bmatrix} \dot{\hat{\mathbf{x}}}_i \\ \dot{\hat{\mathbf{x}}}_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{k}{m} & -\frac{b}{m} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{x}}_i \\ \dot{\hat{\mathbf{x}}}_i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} |\mathbf{u}| \quad (9)$$

[0033]

$$\hat{\mathbf{y}}_i = [1 \quad 0] \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{x}}_i \\ \dot{\hat{\mathbf{x}}}_i \end{bmatrix} + [0] |\mathbf{u}| \quad (10)$$

[0034] 其中, $\hat{\mathbf{x}}_i$ 为预测区间内控制器 i 的预测运动状态, $\dot{\hat{\mathbf{x}}}_i$ 为预测区间内控制器 i 的预测运动速度, $\ddot{\hat{\mathbf{x}}}_i$ 为预测区间内控制器 i 的预测加速度, $\hat{\mathbf{y}}_i$ 为预测区间内控制器 i 的预测控制输出;

[0035] $i=1$ 时, 对应的主手位置跟踪控制器的预测控制状态为 $\hat{\mathbf{x}}_{hx}$;

[0036] $i=2$ 时, 对应的主手速度跟踪控制器的预测控制状态为 $\hat{\mathbf{x}}_{hv}$;

[0037] $i=3$ 时, 对应的机器人规划轨迹跟踪控制器的预测控制状态为 $\hat{\mathbf{x}}_{rx}$ 。

[0038] 优选的, 所述根据各个预测控制状态, 引入惩罚机制设置各个目标控制器的评价函数; 包括:

[0039] 针对主手位置跟踪控制器建立目标评价函数:

$$J_{hx} = \int_{t_0}^{t_0+T} \max(0, G_{hx}(\mathbf{x}_0, \hat{\mathbf{x}}_{hx}, \hat{\mathbf{x}}_{hd}) - P_{hx}(\mathbf{v}_{hd}, v_0)) dt \quad (11)$$

[0040]

$$G_{hx} = \|\hat{\mathbf{x}}_{hd} - \hat{\mathbf{x}}_{hx}\|^2 \quad (12)$$

$$P_{hx} = \max(0, \|\mathbf{v}_{hd}\| - v_0)^2 \quad (13)$$

[0041] 其中, J_{hx} 为主手位置跟踪控制器在预测区间 t_0 到 t_0+T 时间段内的目标函数累计值, G_{hx} 为主手位置跟踪控制器在预测区间内单时刻点的目标评价函数值, \mathbf{x}_0 为 t_0 时刻系统的运动状态; $\hat{\mathbf{x}}_{hd}$ 为主手位置跟踪控制目标的预测控制位置, 按当前状态向前滚动平均计算得到; P_{hx} 为惩罚函数, v_0 为触发惩罚的系统控制速度阈值, 用于 $\|\mathbf{v}_{hd}\| > v_0$ 时减小 J_{hx} ;

[0042] 针对主手速度跟踪控制器建立目标评价函数:

$$J_{hv} = \int_{t_0}^{t_0+T} G_{hv}(x_0, \hat{v}_{hd}, \hat{x}_{hv}) dt \quad (14)$$

[0043]

$$G_{hv} = \|\hat{v}_{hd} - \hat{x}_{hv}\|^2 \quad (15)$$

[0044] 其中, J_{hv} 为主手速度跟踪控制器在预测区间 t_0 到 t_0+T 时间段内的目标函数累计值, G_{hv} 为主手速度跟踪控制器在预测区间内单时刻点的目标评价函数值; \hat{v}_{hd} 为主手速度跟踪控制目标的预测控制速度, 按当前状态向前滚动平均计算得到; \hat{x}_{hv} 为主手速度跟踪控制器的预测控制状态速度;

[0045] 针对机器人规划轨迹跟踪控制器建立目标评价函数:

$$J_{rx} = \int_{t_0}^{t_0+T} \max(0, G_{rx}(x_0, \hat{x}_{rx}, \hat{x}_{rd}) - P_{rx}(x_0, \hat{x}_{rd}, d_0) - P_{rv}(v_0, v_{hd})) dt \quad (16)$$

[0046]

$$G_{rx} = \|\hat{x}_{rd} - \hat{x}_{rx}\|^2 \quad (17)$$

$$P_{rx} = \max(0, \|x_0 - \hat{x}_{rd}\| - d_0)^2 \quad (18)$$

$$P_{rv} = \max(0, v_0 - \|v_{hd}\|)^2 \quad (19)$$

[0047] 其中, J_{rx} 为规划轨迹跟踪控制器在预测区间 t_0 到 t_0+T 时间段内的目标函数累计值, G_{rx} 为规划轨迹跟踪控制器在预测区间内单时刻点的目标评价函数值; \hat{x}_{rd} 为规划轨迹跟踪控制目标的预测控制位置, 按当前状态向前滚动平均计算得到; d_0 为触发惩罚的距离阈值, P_{rx} 为位置距离惩罚函数, 用于 $\|x_0 - \hat{x}_{rd}\| > d_0$ 时减小 J_{rx} ; P_{rv} 为速度距离惩罚函数, 用于 $\|v_{hd}\| < v_0$ 时减小 J_{rx} 。

[0048] 优选的, 所述根据各个评价函数, 对应计算各个控制目标的预测评价梯度下降值, 以获取各个目标控制器在不同场景下的权限分配向量; 包括:

[0049] 针对主手位置跟踪、主手速度跟踪和机器人规划轨迹跟踪三个控制目标分别计算预测评价梯度下降值:

$$\nabla J_{hx} = \frac{\partial J_{hx}}{\partial x} \Big|_{x=x_0} \quad (20)$$

$$\nabla J_{hv} = \frac{\partial J_{hv}}{\partial x} \Big|_{x=x_0} \quad (21)$$

[0050]

$$\nabla J_{rx} = \frac{\partial J_{rx}}{\partial x} \Big|_{x=x_0} \quad (22)$$

[0051] 其中, ∇J_{hx} 为主手位置跟踪控制目标的预测评价梯度下降值, ∇J_{hv} 为主手速度跟踪控制目标的预测评价梯度下降值, ∇J_{rx} 为机器人规划轨迹跟踪控制目标的预测评价梯度下降值;

[0052] 根据场景控制需求融合到全局的系统输入中, 以获取各个目标控制器在不同场景下的权限分配向量:

$$u^* = \frac{\|\nabla J_{hx}\|}{\|\nabla J\|} u_{hx} + \frac{\|\nabla J_{hv}\|}{\|\nabla J\|} u_{hv} + \frac{\|\nabla J_{rx}\|}{\|\nabla J\|} u_{rx} - \lambda K_o \varphi_\alpha(\nabla J) \quad (23)$$

$$\nabla J = \nabla J_{hx} + \nabla J_{hv} + \nabla J_{rx} \quad (24)$$

[0053]

$$\varphi_\alpha(\nabla J) = \begin{cases} \alpha \nabla J / \|\nabla J\|, & \|\nabla J\| > \alpha \\ \nabla J, & 0 < \|\nabla J\| \leq \alpha \\ \varepsilon, & \|\nabla J\| = 0 \end{cases} \quad (25)$$

[0054] 其中, K_o 为比例系数矩阵, λ 为梯度调整的步长, ∇J 为总的预测评价梯度下降值, φ_α 为饱和抑制函数, ε 为一个很小的常数, α 为阈值常数。

[0055] 优选的, 所述根据融合后的系统运动状态与主手机器人的实时位置, 基于力反馈机制生成作用于主手机器人的触觉力; 包括:

$$F = k_f e_f + b_f \dot{e}_f + m_f \ddot{e}_f \quad (26)$$

[0056]

$$e_f = x^* - x_{hd} \quad (27)$$

[0057] 其中, x^* 为融合后的系统运动状态, F 为反馈到主手机器人的触觉力, e_f 、 \dot{e}_f 、 \ddot{e}_f 分别为融合后的系统运动状态与主手机器人的实时位置之间的误差、误差变化速度及误差变化加速度, k_f 、 b_f 和 m_f 分别表示力反馈系统的刚度参数、阻尼参数和惯性参数。

[0058] 优选的, 所述根据融合后的运动速度以及姿态变化的速度, 生成从手机器人的关节角的转动速度; 包括:

$$Z_t = \frac{y - xm}{\|y - xm\|} \quad (28)$$

$$Y_t = Z_t \times X_{t-1} \quad (29)$$

$$X_t = \frac{Y_t}{\|Y_t\|} \times Z_t \quad (30)$$

[0059]

$$q_t = [X_t \ Y_t \ Z_t] \quad (31)$$

$$\vartheta = \zeta(q_t) \quad (32)$$

$$\dot{\theta} = J^{-1}(\theta) [\dot{\vartheta} \ \dot{x}^*]^T \quad (33)$$

[0060] 其中, \dot{x}^* 为融合后的运动速度, xm 表示固定的远端运动中心, X_t 表示姿态矩阵的 X 轴向量, Y_t 表示姿态矩阵的 Y 轴向量, Z_t 表示姿态矩阵的 Z 轴向量, q_t 为机器人运动的姿态, 函数 ζ 表示将姿态旋转矩阵转换为笛卡坐标系下的欧拉角, ϑ 为笛卡坐标系下的欧拉角, $\dot{\vartheta}$ 为欧拉角变化的速度, $\dot{\theta}$ 为从手机器人的关节角的转动速度; J^{-1} 为雅可比矩阵, θ 为从手机器人的关节角。

[0061] 一种融合位置-速度-力的人机安全增强共享控制装置, 包括:

[0062] 建立模块, 用于将机器人系统简化为一个弹簧-质量-阻尼系统, 并建立状态方程;

[0063] 设定模块, 用于根据人机共享控制的目标需求, 分别设定主手位置跟踪、主手速度跟踪和机器人规划轨迹跟踪三种目标控制器;

[0064] 预测模块, 用于建立相应的运动预测控制模型, 以获取各个目标控制器的预测控

制状态；

[0065] 设置模块,用于根据各个预测控制状态,引入惩罚机制设置各个目标控制器的评价函数；

[0066] 计算模块,用于根据各个评价函数,对应计算各个控制目标的预测评价梯度下降值,以获取各个目标控制器在不同场景下的权限分配向量；

[0067] 输出模块,用于将权限分配向量作为状态方程的输入,以输出融合后的系统运动状态和运动速度；

[0068] 反馈模块,用于根据融合后的系统运动状态与主手机器人的实时位置,基于力反馈机制生成作用于主手机器人的触觉力；

[0069] 生成模块,用于根据融合后的运动速度以及姿态变化的速度,生成从手机器人的关节角的转动速度。

[0070] (三)有益效果

[0071] 本发明提供了一种融合位置-速度-力的人机安全增强共享控制方法和装置。与现有技术相比,具备以下有益效果：

[0072] 本发明设定主手位置跟踪、主手速度跟踪和机器人规划轨迹跟踪三种控制器,实现位置-速度的融合,提高了人机共享控制中人的掌控能力；此外,将三种控制器融合结果与力反馈机制关联,实现位置-速度-力的融合,增强了系统人机交互的安全性。

附图说明

[0073] 为了更清楚地说明本发明实施例或现有技术中的技术方案,下面将对实施例或现有技术描述中所需要使用的附图作简单地介绍,显而易见地,下面描述中的附图仅仅是本发明的一些实施例,对于本领域普通技术人员来讲,在不付出创造性劳动的前提下,还可以根据这些附图获得其他的附图。

[0074] 图1为本发明实施例提供的一种融合位置-速度-力的人机安全增强共享控制方法的方框图；

[0075] 图2本发明实施例提供的一种融合位置-速度-力的人机安全增强共享控制方法在肝叶切除手术场景下的应用原理示意图。

具体实施方式

[0076] 为使本发明实施例的目的、技术方案和优点更加清楚,对本发明实施例中的技术方案进行清楚、完整地描述,显然,所描述的实施例是本发明一部分实施例,而不是全部的实施例。基于本发明中的实施例,本领域普通技术人员在没有作出创造性劳动前提下所获得的所有其他实施例,都属于本发明保护的范围。

[0077] 本申请实施例通过提供一种融合位置-速度-力的人机安全增强共享控制方法和装置,解决了人与机器人的角色完全转移存在医生不可掌控的隐患以及力学感知信息的缺失无法有效保障机器人手术安全的技术问题。

[0078] 本申请实施例中的技术方案为解决上述技术问题,总体思路如下：

[0079] 针对现有技术的不足,本发明提供了一种融合位置-速度-力的人机安全增强共享控制方法,针对现有人与机器人的角色完全转移存在医生不可掌控的隐患、力学感知信息

的缺失无法有效保障机器人手术安全的不足,构建了一种融合位置-速度-力的人机安全增强共享控制方法。

[0080] 该方法融合了主手位置跟踪、主手速度跟踪和机器人规划轨迹跟踪三种目标控制器,保证了外科医生在整个手术过程中的持续掌控能力,从而增强了人机交互的安全性;建立了一种基于当前运动状态的目标预测评价机制,能够实现三种控制器之间控制权限的智能动态分配;设计了一种力反馈机制,能够帮助外科医生识别主手机器人的实时位置与运动融合控制输出之间的差异,提升外科医生的操作直觉,以增强共享控制的安全性。

[0081] 为了更好的理解上述技术方案,下面将结合说明书附图以及具体的实施方式对上述技术方案进行详细的说明。

[0082] 实施例:

[0083] 如图1所示,本发明实施例提供了一种融合位置-速度-力的人机安全增强共享控制方法,包括:

[0084] S1、将机器人系统简化为一个弹簧-质量-阻尼系统,并建立状态方程;

[0085] S2、根据人机共享控制的目标需求,分别设定主手位置跟踪、主手速度跟踪和机器人规划轨迹跟踪三种目标控制器;

[0086] S3、建立相应的运动预测控制模型,以获取各个目标控制器的预测控制状态;

[0087] S4、根据各个预测控制状态,引入惩罚机制设置各个目标控制器的评价函数;

[0088] S5、根据各个评价函数,对应计算各个控制目标的预测评价梯度下降值,以获取各个目标控制器在不同场景下的权限分配向量;

[0089] S6、将权限分配向量作为状态方程的输入,以输出融合后的系统运动状态和运动速度;

[0090] S7、根据融合后的系统运动状态与主手机器人的实时位置,基于力反馈机制生成作用于主手机器人的触觉力;

[0091] S8、根据融合后的运动速度以及姿态变化的速度,生成从手机器人的关节角的转动速度。

[0092] 在以上方案中,本发明实施例设定主手位置跟踪、主手速度跟踪和机器人规划轨迹跟踪三种控制器,实现位置-速度的融合,提高了人机共享控制中人的掌控能力;此外,将三种控制器融合结果与力反馈机制关联,实现位置-速度-力的融合,增强了系统人机交互的安全性。

[0093] 接下来将详细说明上述方案的各个步骤:

[0094] 在步骤S1中,将机器人系统简化为一个弹簧-质量-阻尼系统,并建立状态方程;其中所述状态方程为:

$$[0095] \quad \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{\dot{x}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{k}{m} & -\frac{b}{m} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} [u] \quad (1)$$

$$y = [1 \quad 0] \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \end{bmatrix} + [0][u] \quad (2)$$

[0096] 其中,其中, x 为系统运动状态, \dot{x} 为系统运动速度, \ddot{x} 为系统的加速度, u 为系统总的控制输入, y 为系统总的控制输出, m 、 b 和 k 分别为弹簧-质量-阻尼系统的惯性参数、阻尼

参数和刚度参数。

[0097] 在步骤S2中,根据人机共享控制的目标需求,分别设定主手位置跟踪、主手速度跟踪和机器人规划轨迹跟踪三种目标控制器;包括:

[0098] (1) 针对主手机器人(由外科医生或其他操作者直接操作控制)的位置跟踪目标,设置主手位置跟踪控制器,保证机器人能跟随主手机器人切割的路径:

$$[0099] \quad \mathbf{u}_{hx} = k_{px}\mathbf{e}_{hx} + k_{dx}\dot{\mathbf{e}}_{hx} \quad (3)$$

$$\mathbf{e}_{hx} = \mathbf{x}_{hd} - \mathbf{x} \quad (4)$$

[0100] 其中, \mathbf{u}_{hx} 为主手位置跟踪控制器的输入, k_{px} 、 k_{dx} 为主手位置跟踪控制器的比例系数和微分系数, \mathbf{x}_{hd} 为主手机器人的实时位置, \mathbf{e}_{hx} 为主手机器人的实时位置与系统运动状态的偏差, $\dot{\mathbf{e}}_{hx}$ 为主手机器人的实时位置与系统运动状态的偏差的变化速度;

[0101] (2) 针对主手机器人的速度跟踪目标,设置主手速度跟踪控制器,以跟踪主手机器人的运动趋势,无需准确跟踪人手位置:

$$[0102] \quad \mathbf{u}_{hv} = k_{pv}\mathbf{e}_{hv} \quad (5)$$

$$\mathbf{e}_{hv} = \mathbf{v}_{hd} - \dot{\mathbf{x}} \quad (6)$$

[0103] 其中, \mathbf{u}_{hv} 为主手速度跟踪控制器的输入, k_{pv} 为主手速度跟踪控制器的比例系数, \mathbf{v}_{hd} 为主手机器人的实时速度, \mathbf{e}_{hv} 为主手机器人的实时速度与系统运动速度的偏差;

[0104] (3) 针对机器人规划轨迹跟踪目标,设置规划轨迹跟踪控制器,保证机器人辅助切割执行过程满足规划轨迹的设定:

$$[0105] \quad \mathbf{u}_{rx} = k_{pr}\mathbf{e}_{rx} + k_{dr}\dot{\mathbf{e}}_{rx} \quad (7)$$

$$\mathbf{e}_{rx} = \mathbf{x}_{rd} - \mathbf{x} \quad (8)$$

[0106] 其中, \mathbf{u}_{rx} 为规划轨迹跟踪控制器的输入, k_{pr} 、 k_{dr} 为规划轨迹跟踪控制器的比例系数和微分系数, \mathbf{x}_{rd} 为规划轨迹的实时位置, \mathbf{e}_{rx} 为规划轨迹的实时位置与系统运动状态的偏差, $\dot{\mathbf{e}}_{rx}$ 为规划轨迹的实时位置与系统运动状态的偏差的变化速度。

[0107] 在步骤S3中,建立相应的运动预测控制模型,以获取各个目标控制器的预测控制状态;包括:

$$[0108] \quad \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{x}}_i \\ \hat{\dot{\mathbf{x}}}_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{k}{m} & -\frac{b}{m} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{x}}_i \\ \hat{\dot{\mathbf{x}}}_i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ m \end{bmatrix} [\mathbf{u}] \quad (9)$$

$$\hat{\mathbf{y}}_i = [1 \quad 0] \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{x}}_i \\ \hat{\dot{\mathbf{x}}}_i \end{bmatrix} + [0][\mathbf{u}] \quad (10)$$

[0109] 其中, $\hat{\mathbf{x}}_i$ 为预测区间内控制器*i*的预测运动状态, $\hat{\dot{\mathbf{x}}}_i$ 为预测区间内控制器*i*的预测运动速度, $\hat{\ddot{\mathbf{x}}}_i$ 为预测区间内控制器*i*的预测加速度, $\hat{\mathbf{y}}_i$ 为预测区间内控制器*i*的预测控制输出;

[0110] $i=1$ 时,对应的主手位置跟踪控制器的预测控制状态为 $\hat{\mathbf{x}}_{hx}$;

[0111] $i=2$ 时,对应的主手速度跟踪控制器的预测控制状态为 $\hat{\mathbf{x}}_{hv}$;

[0112] $i=3$ 时,对应的机器人规划轨迹跟踪控制器的预测控制状态为 $\hat{\mathbf{x}}_{rx}$ 。

[0113] 在步骤S4中,根据各个预测控制状态,引入惩罚机制设置各个目标控制器的评价函数;包括:

[0114] (1) 针对主手位置跟踪控制器建立目标评价函数,以评估主手位置跟踪控制在预测区间内的有效性:

$$J_{hx} = \int_{t_0}^{t_0+T} \max(0, G_{hx}(x_0, \hat{\mathbf{x}}_{hx}, \hat{\mathbf{x}}_{hd}) - P_{hx}(v_{hd}, v_0)) dt \quad (11)$$

$$G_{hx} = \|\hat{\mathbf{x}}_{hd} - \hat{\mathbf{x}}_{hx}\|^2 \quad (12)$$

$$P_{hx} = \max(0, \|\mathbf{v}_{hd}\| - v_0)^2 \quad (13)$$

[0116] 其中, J_{hx} 为主手位置跟踪控制器在预测区间 t_0 到 t_0+T 时间段内的目标函数累计值, G_{hx} 为主手位置跟踪控制器在预测区间内单时刻点的目标评价函数值, x_0 为 t_0 时刻系统的运动状态; $\hat{\mathbf{x}}_{hd}$ 为主手位置跟踪控制目标的预测控制位置,按当前状态向前滚动平均计算得到; P_{hx} 为惩罚函数, v_0 为触发惩罚的系统控制速度阈值,用于 $\|\mathbf{v}_{hd}\| > v_0$ 时减小 J_{hx} ,从而限制主手位置跟踪控制器的效果;

[0117] (2) 针对主手速度跟踪控制器建立目标评价函数,以评估主手速度跟踪控制在预测区间内的有效性:

$$J_{hv} = \int_{t_0}^{t_0+T} G_{hv}(x_0, \hat{\mathbf{v}}_{hd}, \hat{\mathbf{x}}_{hv}) dt \quad (14)$$

$$G_{hv} = \|\hat{\mathbf{v}}_{hd} - \hat{\mathbf{x}}_{hv}\|^2 \quad (15)$$

[0119] 其中, J_{hv} 为主手速度跟踪控制器在预测区间 t_0 到 t_0+T 时间段内的目标函数累计值, G_{hv} 为主手速度跟踪控制器在预测区间内单时刻点的目标评价函数值; $\hat{\mathbf{v}}_{hd}$ 为主手速度跟踪控制目标的预测控制速度,按当前状态向前滚动平均计算得到; $\hat{\mathbf{x}}_{hv}$ 为主手速度跟踪控制器的预测控制状态速度;

[0120] (3) 针对机器人规划轨迹跟踪控制器建立目标评价函数,以评估规划轨迹跟踪控制在预测区间内的有效性:

$$J_{rx} = \int_{t_0}^{t_0+T} \max(0, G_{rx}(x_0, \hat{\mathbf{x}}_{rx}, \hat{\mathbf{x}}_{rd}) - P_{rx}(x_0, \hat{\mathbf{x}}_{rd}, d_0) - P_{rv}(v_0, \mathbf{v}_{hd})) dt \quad (16)$$

$$G_{rx} = \|\hat{\mathbf{x}}_{rd} - \hat{\mathbf{x}}_{rx}\|^2 \quad (17)$$

$$P_{rx} = \max(0, \|\mathbf{x}_0 - \hat{\mathbf{x}}_{rd}\| - d_0)^2 \quad (18)$$

$$P_{rv} = \max(0, v_0 - \|\mathbf{v}_{hd}\|)^2 \quad (19)$$

[0122] 其中, J_{rx} 为规划轨迹跟踪控制器在预测区间 t_0 到 t_0+T 时间段内的目标函数累计值, G_{rx} 为规划轨迹跟踪控制器在预测区间内单时刻点的目标评价函数值; $\hat{\mathbf{x}}_{rd}$ 为规划轨迹

跟踪控制目标的预测控制位置,按当前状态向前滚动平均计算得到; d_0 为触发惩罚的距离阈值, Prx 为位置距离惩罚函数,用于 $\|\mathbf{x}_0 - \hat{\mathbf{x}}_{rd}\| > d_0$ 时减小 J_{rx} ,从而限制规划轨迹跟踪控制器的效果; Prv 为速度距离惩罚函数,用于 $\|\mathbf{v}_{hd}\| < v_0$ 时减小 J_{rx} ,从而限制规划轨迹跟踪控制器的效果。

[0123] 在步骤S5中,根据各个评价函数,对应计算各个控制目标的预测评价梯度下降值,以获取各个目标控制器在不同场景下的权限分配向量;包括:

[0124] 首先,针对主手位置跟踪、主手速度跟踪和机器人规划轨迹跟踪三个控制目标分别计算预测评价梯度下降值:

$$\nabla J_{hx} = \frac{\partial J_{hx}}{\partial \mathbf{x}} \Big|_{\mathbf{x}=\mathbf{x}_0} \quad (20)$$

$$[0125] \quad \nabla J_{hv} = \frac{\partial J_{hv}}{\partial \mathbf{x}} \Big|_{\mathbf{x}=\mathbf{x}_0} \quad (21)$$

$$\nabla J_{rx} = \frac{\partial J_{rx}}{\partial \mathbf{x}} \Big|_{\mathbf{x}=\mathbf{x}_0} \quad (22)$$

[0126] 其中, ∇J_{hx} 为主手位置跟踪控制目标的预测评价梯度下降值, ∇J_{hv} 为主手速度跟踪控制目标的预测评价梯度下降值, ∇J_{rx} 为机器人规划轨迹跟踪控制目标的预测评价梯度下降值;

[0127] 然后,根据场景控制需求融合到全局的系统输入中,以获取各个目标控制器在不同场景下的权限分配向量:

$$\mathbf{u}^* = \frac{\|\nabla J_{hx}\|}{\|\nabla J\|} \mathbf{u}_{hx} + \frac{\|\nabla J_{hv}\|}{\|\nabla J\|} \mathbf{u}_{hv} + \frac{\|\nabla J_{rx}\|}{\|\nabla J\|} \mathbf{u}_{rx} - \lambda K_o \varphi_\alpha(\nabla J) \quad (23)$$

$$[0128] \quad \nabla J = \nabla J_{hx} + \nabla J_{hv} + \nabla J_{rx} \quad (24)$$

$$\varphi_\alpha(\nabla J) = \begin{cases} \alpha \nabla J / \|\nabla J\|, & \|\nabla J\| > \alpha \\ \nabla J, & 0 < \|\nabla J\| \leq \alpha \\ \varepsilon, & \|\nabla J\| = 0 \end{cases} \quad (25)$$

[0129] 其中, K_o 为比例系数矩阵, λ 为梯度调整的步长, ∇J 为总的预测评价梯度下降值, φ_α 为饱和抑制函数, ε 为一个很小的常数, α 为阈值常数。

[0130] 在步骤S6中,将权限分配向量作为状态方程的输入,以输出融合后的系统运动状态和运动速度。

[0131] 不难理解的是,将步骤S5中融合所得的权限分配向量 \mathbf{u}^* 代入状态方程的公式(1)和(2)中,也即将融合所得的权限分配向量 \mathbf{u}^* 作为前述弹簧-质量-阻尼系统总的控制输入,从而得到融合后的系统运动状态 \mathbf{x}^* 、融合后的运动速度 $\dot{\mathbf{x}}^*$ 等输出结果。

[0132] 在步骤S7中,根据融合后的系统运动状态与主手机器人的实时位置,基于力反馈机制生成作用于主手机器人的触觉力;包括:

$$[0133] \quad F = k_f e_f + b_f \dot{e}_f + m_f \ddot{e}_f \quad (26)$$

$$e_f = x^* - x_{hd} \quad (27)$$

[0134] 其中, x^* 为融合后的系统运动状态, F 为反馈到主手机器人的触觉力, e_f 、 \dot{e}_f 、 \ddot{e}_f 分别为融合后的系统运动状态与主手机器人的实时位置之间的误差、误差变化速度及误差变化加速度, k_f 、 b_f 和 m_f 分别表示力反馈系统的刚度参数、阻尼参数和惯性参数。

[0135] 可理解, 通过引入上述力反馈机制, 可帮助外科医生或其他操作者有效识别机器人辅助控制意图以及危险操控风险特征。

[0136] 在步骤S8中, 根据融合后的运动速度以及姿态变化的速度, 生成从手机器人的关节角的转动速度; 包括:

$$Z_t = \frac{y - xm}{\|y - xm\|} \quad (28)$$

$$Y_t = Z_t \times X_{t-1} \quad (29)$$

$$[0137] \quad X_t = \frac{Y_t}{\|Y_t\|} \times Z_t \quad (30)$$

$$q_t = [X_t \quad Y_t \quad Z_t] \quad (31)$$

$$\vartheta = \zeta(q_t) \quad (32)$$

$$\dot{\theta} = J^{-1}(\theta) [\dot{\vartheta} \quad \dot{x}^*]^T \quad (33)$$

[0138] 其中, \dot{x}^* 为融合后的运动速度, xm 表示固定的远端运动中心 (即RCM点), X_t 表示姿态矩阵的X轴向量, Y_t 表示姿态矩阵的Y轴向量, Z_t 表示姿态矩阵的Z轴向量, q_t 为机器人运动的姿态, 函数 ζ 表示将姿态旋转矩阵转换为笛卡坐标系下的欧拉角, ϑ 为笛卡坐标系下的欧拉角, $\dot{\vartheta}$ 为欧拉角变化的速度, $\dot{\theta}$ 为从手机器人的关节角的转动速度 (也即由从手机器人执行融合运动); J^{-1} 为雅可比矩阵, θ 为从手机器人的关节角。

[0139] 为了更好理解本发明实施例提供的方法的优越性, 现以医生在操作腹腔手术机器人执行手术切割任务为例进行说明:

[0140] 在某些情况下, 机器人辅助可以使外科医生实现精确的切割操作, 以满足他们精细操作的要求或者避免错误操作的发生, 所以希望机器人执行的轨迹应该与外科医生预先确定的规划路径紧密一致。相反, 在某些情况下, 外科医生的控制对于主动调整切割轨迹至关重要, 例如: 电凝止血、主动避开障碍物、紧急停止和主动暂停切割等操作。在这些情况下, 机器人执行的轨迹应该反映外科医生的实际操作路径。

[0141] 对此, 该融合位置-速度-力的人机安全增强共享控制方法, 针对完全人手主从操控场景和机器人辅助操控场景需求, 设计了主手位置跟踪、主手速度跟踪和机器人规划轨迹跟踪三种目标控制器以及目标评价函数, 并建立基于当前运动状态的预测和评价状态反馈机制, 以此计算各控制器评价梯度下降值, 以生成运动融合后的机器人执行轨迹, 最后根据机器人运动轨迹与人手实际操作轨迹偏差建立力反馈机制, 帮助外科医生有效识别机器人辅助控制意图以及危险操控风险特征, 算法的流程如图2所示, 图2以肝叶切除术手术

场景为例。

[0142] 本发明实施例还提供了一种融合位置-速度-力的人机安全增强共享控制装置,包括:

[0143] 建立模块,用于将机器人系统简化为一个弹簧-质量-阻尼系统,并建立状态方程;

[0144] 设定模块,用于根据人机共享控制的目标需求,分别设定主手位置跟踪、主手速度跟踪和机器人规划轨迹跟踪三种目标控制器;

[0145] 预测模块,用于建立相应的运动预测控制模型,以获取各个目标控制器的预测控制状态;

[0146] 设置模块,用于根据各个预测控制状态,引入惩罚机制设置各个目标控制器的评价函数;

[0147] 计算模块,用于根据各个评价函数,对应计算各个控制目标的预测评价梯度下降值,以获取各个目标控制器在不同场景下的权限分配向量;

[0148] 输出模块,用于将权限分配向量作为状态方程的输入,以输出融合后的系统运动状态和运动速度;

[0149] 反馈模块,用于根据融合后的系统运动状态与主手机器人的实时位置,基于力反馈机制生成作用于主手机器人的触觉力;

[0150] 生成模块,用于根据融合后的运动速度以及姿态变化的速度,生成从手机器人的关节角的转动速度。

[0151] 可以理解的是,本发明实施例提供的融合位置-速度-力的人机安全增强共享控制装置与本发明实施例提供的融合位置-速度-力的人机安全增强共享控制方法相对应,其有关内容的解释、举例和有益效果等部分可以参考人机安全增强共享控制方法中的相应部分,此处不再赘述。

[0152] 综上所述,与现有技术相比,具备以下有益效果:

[0153] 1、本发明实施例提供了一种融合位置-速度-力的人机安全增强共享控制方法,引入主手位置跟踪、主手速度跟踪和机器人规划轨迹跟踪三种控制器,实现“位置-速度”的融合,提高了人机共享控制中人的掌控能力;将三种控制器融合结果与力反馈机制关联,实现“位置-速度-力”的融合,增强了系统人机交互的安全性。

[0154] 2、在人手掌控方面,通过运动融合机制实现自主场景和控制器的智能动态切换,控制权限在三个控制器之间分配,并保证主手速度控制或主手位置控制二者有其一,操作者也可以随时通过降低主手机器人的速度来获得完全控制权,从而不会剥夺外科医生在手术过程中的掌控权。

[0155] 3、在增强安全性方面,力反馈的设计使得该共享控制机制可以有效过滤掉一些手部抖动或非主观错误操作,另外,人手可以通过力反馈获得手部实际位置与运动融合控制输出之间的差异,增强了人在机器人手术过程中的力感知能力,能够有效提升手术的安全性。

[0156] 4、该方法在人-机器人共享控制任务中表现出良好的能力,保证了手术机器人系统的可控性、安全性、透明性和适应性。未来的工作将把这种方法应用到更复杂的外科手术中,并引入更多的智能控制器来验证人机集成的性能。

[0157] 需要说明的是,在本文中,诸如第一和第二等之类的关系术语仅仅用来将一个实

体或者操作与另一个实体或操作区分开来,而不一定要求或者暗示这些实体或操作之间存在任何这种实际的关系或者顺序。而且,术语“包括”、“包含”或者其任何其他变体意在涵盖非排他性的包含,从而使得包括一系列要素的过程、方法、物品或者设备不仅包括那些要素,而且还包括没有明确列出的其他要素,或者是还包括为这种过程、方法、物品或者设备所固有的要素。在没有更多限制的情况下,由语句“包括一个……”限定的要素,并不排除在包括所述要素的过程、方法、物品或者设备中还存在另外的相同要素。

[0158] 以上实施例仅用以说明本发明的技术方案,而非对其限制;尽管参照前述实施例对本发明进行了详细的说明,本领域的普通技术人员应当理解:其依然可以对前述各实施例所记载的技术方案进行修改,或者对其中部分技术特征进行等同替换;而这些修改或者替换,并不使相应技术方案的本质脱离本发明各实施例技术方案的精神和范围。

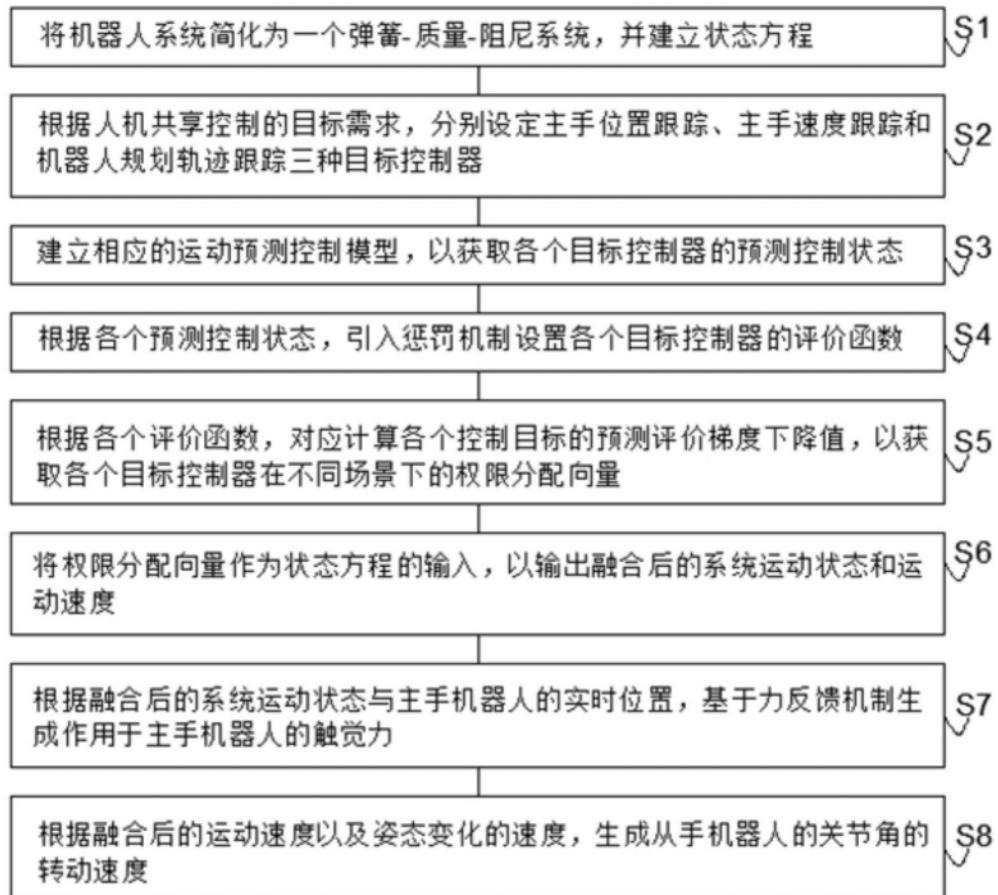


图1

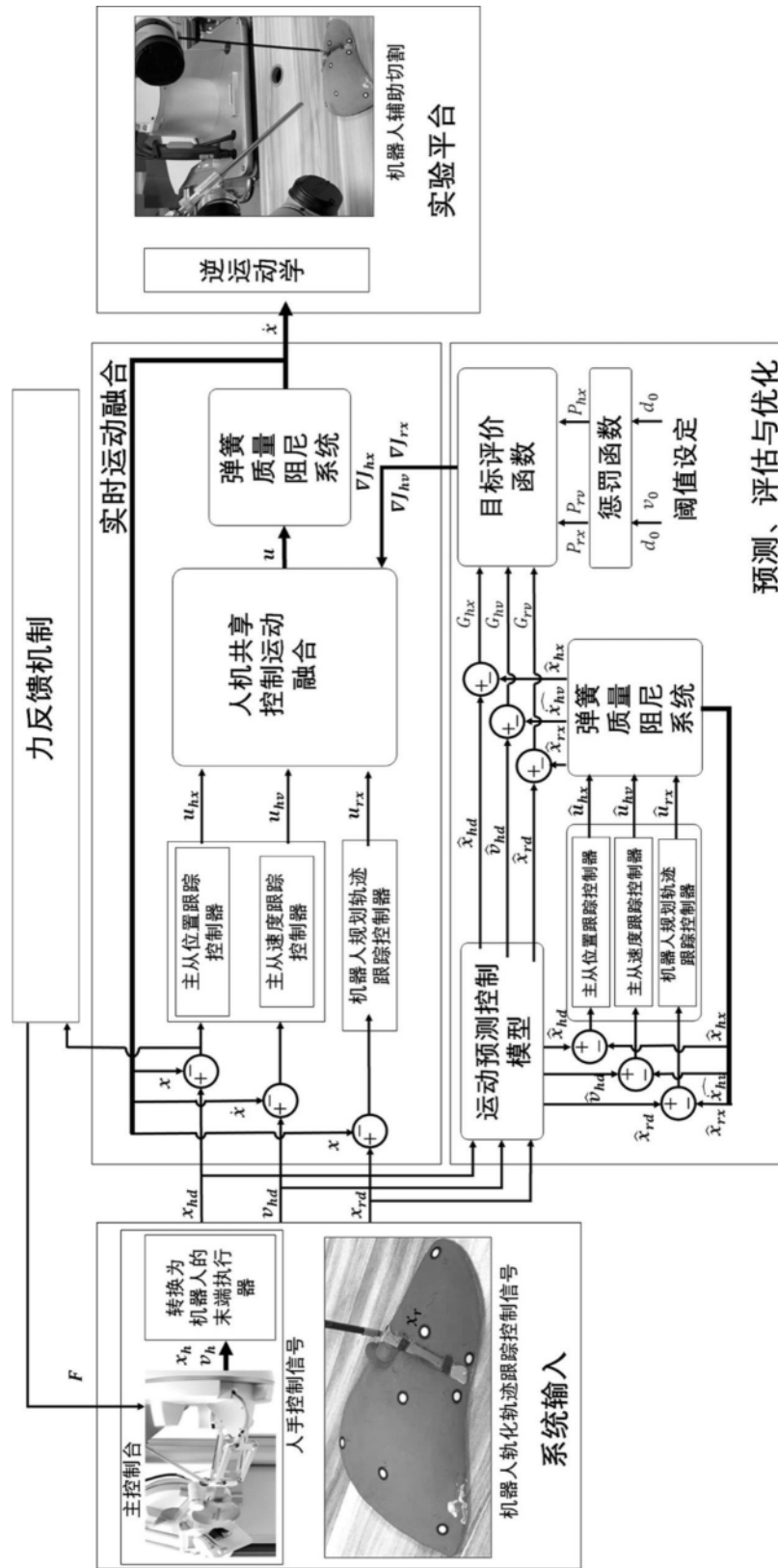


图2