



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 110703595 B

(45) 授权公告日 2022. 09. 30

(21) 申请号 201910710429.2

审查员 李朝霞

(22) 申请日 2019.08.01

(65) 同一申请的已公布的文献号  
申请公布号 CN 110703595 A

(43) 申请公布日 2020.01.17

(73) 专利权人 中国科学院力学研究所  
地址 100190 北京市海淀区北四环西路15号

(72) 发明人 李文皓 张珩 冯冠华

(74) 专利代理机构 北京和信华成知识产权代理  
事务所(普通合伙) 11390  
专利代理师 胡剑辉

(51) Int. Cl.  
G05B 13/04 (2006.01)  
G05D 1/08 (2006.01)

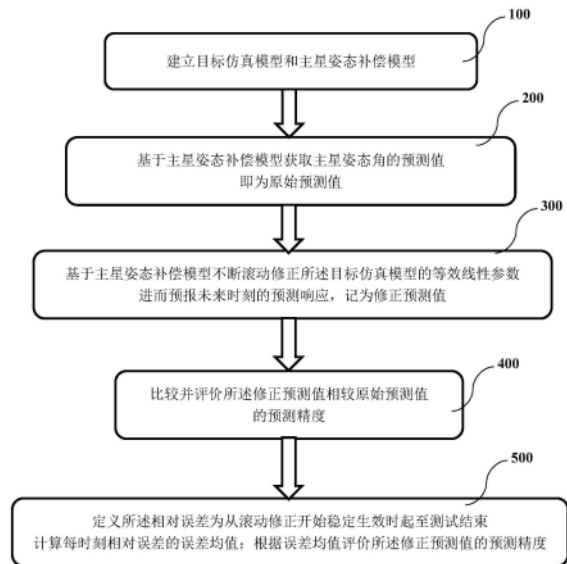
权利要求书4页 说明书17页 附图2页

(54) 发明名称

一种星-臂耦合系统的主星姿态预报方法及系统

(57) 摘要

本发明实施例公开了一种星-臂耦合系统的主星姿态高精度预报方法,包括如下步骤:先建立目标仿真模型和主星姿态补偿模型;再分别获取主星姿态角的原始预测值以及滚动修正后的修正预测值;然后比较并评价所述修正预测值相较原始预测值的预测精度,定义主星姿态角预测值在某一时刻t的相对误差为:该时刻t主星姿态角预测值的绝对误差,与历史T时间段内主星姿态角实测值的积分之比,计算每时刻相对误差的误差均值;根据误差均值评价所述修正预测值的预测精度,进而更准确的预报未来时刻的主星姿态。本发明能够更好的比较修正预测值对主星姿态角预报的准确性。



1. 一种星-臂耦合系统的主星姿态预报方法,其特征在于,包括如下步骤:

步骤100、依据所述星-臂耦合系统获取空间机器人的主星-机械臂耦合系统运动学方程,并建立目标仿真模型和主星姿态补偿模型;

步骤200、基于主星姿态补偿模型获取主星姿态角的预测值,即为原始预测值;

步骤300、基于主星姿态补偿模型不断滚动修正所述目标仿真模型的等效线性参数,进而预报未来时刻的预测响应,记为修正预测值;

步骤400、比较并评价所述修正预测值相较原始预测值的预测精度,

定义主星姿态角预测值在某一时刻 $t$ 的相对误差为:该时刻 $t$ 主星姿态角预测值的绝对误差,与历史 $T$ 时间段内主星姿态角实测值的积分之比,其中 $T$ 为预报时长,绝对误差为某一时刻 $t$ 预测值与实测值的差值;

步骤500,定义所述相对误差为从滚动修正开始稳定生效时起至测试结束,计算每时刻相对误差的误差均值;根据误差均值评价所述修正预测值的预测精度,进而更准确的预报未来时刻的主星姿态;

所述目标仿真模型和所述主星姿态补偿模型建立方法包括:

通过获得主星姿态角速度与机械臂关节角速度的等效线性关系式,以机械臂关节角速度为系统激励,获取主星姿态角速度的仿真响应,即为目标仿真模型;

获取所有历史时刻的主星姿态角速度的仿真响应和实测响应,并通过对所有历史数据的实测/仿真响应比加权求和获取不断更新的当前时刻的实测/仿真响应比,即为主星姿态补偿模型;

所述主星姿态补偿模型的建立方法包括:

设星-臂耦合系统从 $t_0$ 时刻开始运转,当前时刻为 $t_k$ ,获取过去 $t_0 \sim t_k$ 时间段内每一时刻主星姿态角速度的仿真响应 $\hat{\phi}_{sj}$ 和实测响应 $\dot{\phi}_{sj}$ ,并求得任意一历史时刻对应的实测/仿真响应比 $\hat{\Theta}_{ji}(t)$ ;

$$\hat{\Theta}_{ji}(t) = \frac{\hat{\phi}_{sj}(t)}{\dot{\phi}_{sj}(t)}, t \in (t_0, t_k]$$

对 $t_k$ 时刻之前 $[t_0, t_k]$ 区间内所有历史数据进行加权求和得到当前时刻实测/仿真响应比 $\bar{\Theta}_{ji}(t_k)$ ,即令当前时刻实测/仿真响应比:

$$\bar{\Theta}_{ji}(t_k) = \frac{\int_{t_0}^{t_k} w(t) \hat{\Theta}_{ji}(t) dt}{\int_{t_0}^{t_k} w(t) dt} = \frac{\int_{t_0}^{t_k} w(t) \frac{\hat{\phi}_{sj}(t)}{\dot{\phi}_{sj}(t)} dt}{\int_{t_0}^{t_k} w(t) dt};$$

其中, $w(t)$ 为加权重值,令 $\int_{t_0}^{t_k} w(t) dt = 1$ ,在离散情况下, $\bar{\Theta}_{ji}(t_k)$ 化为如下形式:

$$\bar{\Theta}_{ji}(t_K) = \frac{\sum_{k=0}^K w(t_k) \hat{\Theta}_{ji}(t_k)}{\sum_{k=0}^K w(t_k)} = \frac{\sum_{k=0}^K w(t_k) \frac{\hat{\phi}_{sj}(t_k)}{\dot{\phi}_{sj}(t_k)}}{\sum_{k=0}^K w(t_k)};$$

其中,  $t_k = t_0 + K \Delta t$ , 而  $\Delta t = t_{k+1} - t_k, k=0, 1, 2, \dots$  为离散时间步长, 同样, 令加权重值  $w(t_k)$  满足  $\sum_{k=0}^K w(t_k) = 1$ ; 获取预测响应  $\tilde{\phi}_{sj}$ :  $\begin{cases} \tilde{\phi}_{sj}(t) = \tilde{\Theta}_{ji}(t) \dot{\phi}_{sj}(t) \\ = \bar{\Theta}_{ji}(t_K) \dot{\phi}_{sj}(t) \end{cases}, t \in (t_k, t_k + T]$ ;

其中  $\tilde{\Theta}_{ji}(t)$  为用于修正未来某一时刻  $t \in (t_k, t_k + T]$  仿真响应的预测/仿真响应比, 直接取作当前时刻实测/仿真响应比  $\bar{\Theta}_{ji}(t_K)$ 。

2. 根据权利要求1所述的一种星-臂耦合系统的主星姿态预报方法, 其特征在于, 所述步骤400和步骤500具体包括:

令所述相对误差:

$$e_{re}(t) = \frac{\frac{1}{\sqrt{2}} \|\tilde{\phi}_s(t) - \hat{\phi}_s(t)\|_2}{\int_{t-T}^t \frac{1}{\sqrt{2}} \|\tilde{\phi}_s(\tau + d\tau) - \tilde{\phi}_s(\tau)\|_2} = \frac{\|\tilde{\phi}_s(t) - \hat{\phi}_s(t)\|_2}{\int_{t-T}^t \|\tilde{\phi}_s(\tau)\|_2 d\tau};$$

其中  $\tilde{\phi}_s$  为某一时刻  $t$  的原始预测值;  $\hat{\phi}_s$  为某一时刻  $t$  的实测值;  $\tilde{\phi}_s$  修正预测值;

上式在离散情况下化为如下形式:

$$\begin{aligned} e_{re}(t_K) &= \frac{\|\tilde{\phi}_s(t_K) - \hat{\phi}_s(t_K)\|_2}{\sum_{k=K-T/\Delta t+1}^K \|\hat{\phi}_s(t_k) - \hat{\phi}_s(t_{k-1})\|_2} \\ &= \frac{\|\tilde{\phi}_s(t_K) - \hat{\phi}_s(t_K)\|_2}{\sum_{k=K-T/\Delta t}^{K-1} \|\tilde{\phi}_s(t_k)\|_2 \Delta t} \end{aligned}$$

其中  $t_k$  为当前时刻,  $\Delta t$  为数据采样周期, 也即系统获取实测值的周期;

进一步获得所述误差均值:

$$E_{re} = \sum_{K=2T/D}^N e_{re}(t_K)$$

其中  $t_N$  为当次实验的终止时刻, 定义从起始时刻, 2倍的预报时长  $T$  之后稳定生效。

3. 根据权利要求2所述的一种星-臂耦合系统的主星姿态预报方法, 其特征在于, 所述主星姿态补偿模型中当前时刻的实测/仿真响应比  $\bar{\Theta}_{ji}(t_K)$  基于递推最小二乘法实时滚动修正, 具体方法包括:

取预测响应  $\tilde{\phi}_{sj}$  为参数估计模型中的输出变量, 取历史时刻的仿真响应  $\dot{\phi}_{sj}$  为参数估计模型中的输入变量  $\varphi$ , 取响应比  $\Theta_{ji}$  为待估计参数  $\theta$ , 在  $t_k$  时刻的迭代结果  $\theta(t_k)$  即为所要估计的当前时刻实测/仿真响应比  $\bar{\Theta}_{ji}(t_K)$ , 代入最小二乘法的递推公式, 得到下述参数估计模

型:

$$\bar{\Theta}_{ji}(t_K) = \bar{\Theta}_{ji}(t_{K-1}) + R(t_{K-1}) \left[ \hat{\dot{\phi}}_{Sj}(t_K) - \dot{\phi}_{Sj}(t_K) \bar{\Theta}_{ji}(t_{K-1}) \right]$$

$$P(t_K) = \frac{1}{\lambda} \left[ 1 - R(t_K) \dot{\phi}_{Sj}(t_K) \right] P(t_{K-1})$$

$$R(t_K) = \frac{P(t_{K-1}) \dot{\phi}_{Sj}(t_K)}{\lambda + \dot{\phi}_{Sj}(t_K) P(t_{K-1}) \dot{\phi}_{Sj}(t_K)}$$

其中 $\bar{\Theta}_{ji}$ 的初值 $\bar{\Theta}_{ji}(t_1)$ 设为1,R为参数估计模型的迭代中间参数,不具备实质定义,P的初值为一个足够大的正实数,获取后续每个时刻的仿真响应和实测响应,并依据参数估计模型实时更新对应的K、P和 $\theta$ 。

4. 根据权利要求3所述的一种星-臂耦合系统的主星姿态预报方法,其特征在于,所述参数估计模型的实现方法包括:

步骤401、设定迭代参数初值 $\bar{\Theta}_{ji}(t_1)$ 和 $P(t_1)$ ;

步骤402、依据不断获取实时更新后的当前时刻 $t_K$ 的主星姿态角速度的实测响应 $\hat{\dot{\phi}}_{Sj}(t_K)$ 以及姿态角实测值 $\hat{\phi}_{Sj}(t_K)$ ,以得到实时更新后所有历史数据;

步骤403、根据所述的参数估计模型,不断实时更新当前时刻实测/仿真响应比 $\bar{\Theta}_{ji}(t_K)$ ;

步骤404、将 $\hat{\dot{\phi}}_{Sj}(t_K)$ 和 $\hat{\phi}_{Sj}(t_K)$ 作为运动学仿真的初始状态,获取未来机械臂运动指令 $\dot{\phi}_{M(\text{cmd})}$ ,并认为机械臂在良好受控条件下,其运动状态机械臂关节角速度 $\dot{\phi}_M$ 与运动指令 $\dot{\phi}_{M(\text{cmd})}$ 相同,计算未来 $t \in (t_K, t_K+T]$ 时间内的仿真响应 $\dot{\phi}_{Sj}(t)$ ,在仿真过程中,将求得的每个时刻的仿真响应 $\dot{\phi}_{Sj}(t)$ 立刻修正为预测响应 $\tilde{\dot{\phi}}_{Sj}(t)$ ,并用于后续的积分计算;

步骤405、当前时刻递增为 $t_{K+1}$ ,转步骤402步,循环更新。

5. 一种基于权利要求1-4任一项所述预报方法的星-臂耦合系统的主星姿态预报系统,其特征在于,包括:

第一建模单元,用于获取空间机器人的主星-机械臂耦合系统运动学方程,并建立目标仿真模型和主星姿态补偿模型;

数据获取单元,基于主星姿态补偿模型获取主星姿态角的预测值,即为原始预测值;

第二建模单元,建立用于实时滚动更新当前时刻实测/仿真响应比的主星姿态补偿模型;基于主星姿态补偿模型不断滚动修正所述目标仿真模型的等效线性参数,进而预报未来时刻的预测响应,记为修正预测值;

精度评价单元,比较所述修正预测值相较原始预测值的预测精度,通过主星姿态角预测值在某一时刻 $t$ 的相对误差进行评价。

6. 根据权利要求5所述的一种星-臂耦合系统的主星姿态预报系统,其特征在于,所述第二建模单元包括:

获取所有历史时刻的主星姿态角速度的仿真响应和实测响应,并通过对所有历史数据

的实测/仿真响应比加权求和获取不断更新的当前时刻的实测/仿真响应比,即为主星姿态补偿模型。

## 一种星-臂耦合系统的主星姿态预报方法及系统

### 技术领域

[0001] 本发明实施例涉及机器人技术领域,具体涉及一种星-臂耦合系统的主星姿态预报方法及系统。

### 背景技术

[0002] 空间机器人已经成为在轨操作和在轨服务的高技术装备,星-臂耦合系统主星姿态对在任意机械臂构型下的位姿有重要影响,因此准确的预测基座的姿态,对于执行空间机器人的在轨任务非常重要。

[0003] 由于空间机器人在轨飞行时,燃料消耗不可避免,随着燃料的消耗,星-臂耦合系统的动力学参数(如质量、转动惯量、质心等)都会发生改变,而针对于动力学参数发生改变的星-臂耦合系统,在相同的机械臂运动路径下,如果对动力学参数没有补偿控制(比如喷气)的手段,自由基座产生的姿态变化会与预计的不同,这将严重影响到空间人物的执行安全。

[0004] 现有一些辨识方法,通过较准确的辨识基座参数,从而改进动力学预报的精度,然而辨识方法不管如何有效,总是会有残余误差,这种误差会随着预报时间的不断增加而累积,当预报时间增加时,累积的误差不能得到有效消除,则仍然会带来严重隐患。例如,在长延时的遥操作条件下,一段时间内无法获取当前信息,必须预报当前的主星姿态信息,因此,当前时刻主星姿态预报尤其重要,同样的,对于未来时刻的预报也同样具有重要意义。

[0005] 对此问题,利用滚动修正的思路,不断改变星-臂耦合系统的预测模型参数来进行解决,但是,其预结果都是将姿态角、姿态角速度各自的三个分量进行分别统计,并且统计主星姿态角的仿真值、辨识值的相对误差时,是采取直接求某一时刻的角度偏差值与实际值的比值的办法;而事实上,在空间坐标系中,姿态角本身是可以通过改变其初始朝向而人为定义的,因此对于采用大量随机初始条件进行的实验而言,若要比修正预测值相对于原预测值的改进,这一指标显得不够稳定,预报精度还有待提升。

### 发明内容

[0006] 为此,本发明实施例提供一种星-臂耦合系统的主星姿态预报方法,以解决现有技术中基于预报结果的统计方式在比较修正预测值相对于原预测值的改进,这一指标显得不够稳定的问题。

[0007] 为了实现上述目的,本发明的实施方式提供如下技术方案:

[0008] 在本发明实施例的第一个方面,提供了一种星-臂耦合系统的主星姿态高精度预报方法,包括如下步骤:

[0009] 步骤100、依据所述星-臂耦合系统获取空间机器人的主星-机械臂耦合系统运动学方程,并建立目标仿真模型和主星姿态补偿模型;

[0010] 步骤200、基于主星姿态补偿模型获取主星姿态角的预测值,即为原始预测值;

[0011] 步骤300、基于主星姿态补偿模型不断滚动修正所述目标仿真模型的等效线性参

数,进而预报未来时刻的预测响应,记为修正预测值;

[0012] 步骤400、比较并评价所述修正预测值相较原始预测值的预测精度,

[0013] 定义主星姿态角预测值在某一时刻 $t$ 的相对误差为:该时刻 $t$ 主星姿态角预测值的绝对误差,与历史 $T$ 时间段内主星姿态角实测值的积分之比,其中 $T$ 为预报时长,绝对误差为某一时刻 $t$ 预测值与实测值的差值;

[0014] 步骤500,定义所述相对误差为从滚动修正开始稳定生效时起至测试结束,计算每时刻相对误差的误差均值;根据误差均值评价所述修正预测值的预测精度,进而更准确的预报未来时刻的主星姿态。

[0015] 作为本发明实施例的一种优选方案,所述步骤400和步骤500具体包括:

[0016] 令所述相对误差:

$$[0017] \quad e_{re}(t) = \frac{\frac{1}{\sqrt{2}} \|\tilde{\phi}_S(t) - \hat{\phi}_S(t)\|_2}{\int_{t-T}^t \frac{1}{\sqrt{2}} \|\tilde{\phi}_S(\tau + d\tau) - \tilde{\phi}_S(\tau)\|_2} = \frac{\|\tilde{\phi}_S(t) - \hat{\phi}_S(t)\|_2}{\int_{t-T}^t \|\tilde{\phi}_S(\tau)\|_2 d\tau};$$

[0018] 其中 $\tilde{\phi}_S$ 为某一时刻 $t$ 的原始预测值; $\hat{\phi}_S$ 为某一时刻 $t$ 的实测值; $\tilde{\phi}_S$ 修正预测值;

[0019] 上式在离散情况下化为如下形式:

$$[0020] \quad e_{re}(t_k) = \frac{\|\tilde{\phi}_S(t_k) - \hat{\phi}_S(t_k)\|_2}{\sum_{k=K-T/\Delta t+1}^K \|\hat{\phi}_S(t_k) - \hat{\phi}_S(t_{k-1})\|_2} = \frac{\|\tilde{\phi}_S(t_k) - \hat{\phi}_S(t_k)\|_2}{\sum_{k=K-T/\Delta t}^{K-1} \|\hat{\phi}_S(t_k)\|_2 \Delta t}$$

[0021] 其中 $t_k$ 为所预测的时刻, $\Delta t$ 为数据采样周期,也即系统获取实测值的周期;

[0022] 进一步获得所述误差均值:

$$[0023] \quad E_{re} = \sum_{K=2T/D}^N e_{re}(t_k)$$

[0024] 其中 $t_N$ 为当次实验的终止时刻,定义从系统起始时刻,2~3倍的预报时长 $T$ 之后稳定生效。

[0025] 作为本发明实施例的一种优选方案,所述目标仿真模型和的所述主星姿态补偿模型建立方法包括:

[0026] 通过获得主星姿态角速度与机械臂关节角速度的等效线性关系式,以机械臂关节角速度为系统激励,获取主星姿态角速度的仿真响应,即为目标仿真模型;

[0027] 获取所有历史时刻的主星姿态角速度的仿真响应和实测响应,并通过对所有历史数据的实测/仿真响应比加权求和获取不断更新的当前时刻的实测/仿真响应比,即为主星姿态补偿模型。

[0028] 作为本发明实施例的一种优选方案,所述主星-机械臂耦合系统运动学方程为:

$$[0029] \quad \bar{I}_S \dot{\phi}_S + \bar{I}_M \dot{\phi}_M = L_0$$

[0030] 其中: $\bar{I}_S$ 为主星的广义雅克比矩阵,满足:

$$\begin{aligned} \bar{\mathbf{I}}_S = & \left[ \sum_{i=0}^n (\mathbf{A}_{i1} \mathbf{I}_i \mathbf{A}_{i1}) \mathbf{A}_{i0} \hat{\mathbf{x}}_0 + \sum_{i=0}^n m_i \cdot \mathbf{r}_i \times \sum_{j=1}^n K_{ij} \frac{\partial \mathbf{A}_{i0}}{\partial \alpha} (\mathbf{A}_{0j} \mathbf{a}_j + \mathbf{A}_{0,j-1} \mathbf{b}_{j-1}), \right. \\ [0031] \quad & \sum_{i=0}^n (\mathbf{A}_{i1} \mathbf{I}_i \mathbf{A}_{i1}) \mathbf{A}_{i0} \hat{\mathbf{y}}_0 + \sum_{i=0}^n m_i \cdot \mathbf{r}_i \times \sum_{j=1}^n K_{ij} \frac{\partial \mathbf{A}_{i0}}{\partial \beta} (\mathbf{A}_{0j} \mathbf{a}_j + \mathbf{A}_{0,j-1} \mathbf{b}_{j-1}), \\ & \left. \sum_{i=0}^n (\mathbf{A}_{i1} \mathbf{I}_i \mathbf{A}_{i1}) \mathbf{A}_{i0} \hat{\mathbf{z}}_0 + \sum_{i=0}^n m_i \cdot \mathbf{r}_i \times \sum_{j=1}^n K_{ij} \frac{\partial \mathbf{A}_{i0}}{\partial \gamma} (\mathbf{A}_{0j} \mathbf{a}_j + \mathbf{A}_{0,j-1} \mathbf{b}_{j-1}) \right] \end{aligned}$$

[0032]  $\bar{\mathbf{I}}_M$  为多关节机械臂的广义雅克比矩阵, 满足:

$$\begin{aligned} \bar{\mathbf{I}}_M = & \left[ \sum_{i=1}^n (\mathbf{A}_{i1} \mathbf{I}_i \mathbf{A}_{i1}) \mathbf{A}_{i1} \hat{\mathbf{z}}_1 + \sum_{i=0}^n m_i \cdot \mathbf{r}_i \times \boldsymbol{\mu}_{i1}, \right. \\ [0033] \quad & \sum_{i=2}^n (\mathbf{A}_{i1} \mathbf{I}_i \mathbf{A}_{i1}) \mathbf{A}_{i2} \hat{\mathbf{z}}_2 + \sum_{i=0}^n m_i \cdot \mathbf{r}_i \times \boldsymbol{\mu}_{i2}, \\ & \dots, \\ & \left. \sum_{i=n}^n (\mathbf{A}_{i1} \mathbf{I}_i \mathbf{A}_{i1}) \mathbf{A}_{in} \hat{\mathbf{z}}_n + \sum_{i=0}^n m_i \cdot \mathbf{r}_i \times \boldsymbol{\mu}_{in} \right] \end{aligned}$$

[0034] 其中  $\dot{\boldsymbol{\phi}}_S = \begin{bmatrix} \dot{\alpha} \\ \dot{\beta} \\ \dot{\gamma} \end{bmatrix}$  为主星姿态角速度,  $\dot{\boldsymbol{\phi}}_M = \begin{bmatrix} \dot{\phi}_1 \\ \dot{\phi}_2 \\ \vdots \\ \dot{\phi}_n \end{bmatrix}$  为机械臂关节角速度,  $L_0$  为系统初始

角动量。

[0035] 作为本发明实施例的一种优选方案, 所述主星姿态角速度与机械臂关节角速度的等效线性关系的获取方法为:

[0036] 选择惯性系, 并令系统的初始角动量为0, 得到:

$$[0037] \quad \bar{\mathbf{I}}_S \dot{\boldsymbol{\phi}}_S + \bar{\mathbf{I}}_M \dot{\boldsymbol{\phi}}_M = \mathbf{0}$$

[0038] 由此可以得到:

$$[0039] \quad \dot{\boldsymbol{\phi}}_S = (-\bar{\mathbf{I}}_S^{-1} \bar{\mathbf{I}}_M) \dot{\boldsymbol{\phi}}_M;$$

[0040] 定义  $\bar{\mathbf{I}} = -\bar{\mathbf{I}}_S^{-1} \bar{\mathbf{I}}_M$ ; 得到在某个确定的机械臂构型下主星姿态角速度与机械臂关节角速度等效线性关系式:

$$[0041] \quad \dot{\boldsymbol{\phi}}_S = \bar{\mathbf{I}} \dot{\boldsymbol{\phi}}_M.$$

[0042] 作为本发明实施例的一种优选方案, 所述主星姿态补偿模型的建立方法包括:

[0043] 设星-臂耦合系统从  $t_0$  时刻开始运转, 当前时刻为  $t_k$ , 获取过去  $t_0 \sim t_k$  时间段内每一时刻主星姿态角速度的仿真响应  $\dot{\boldsymbol{\phi}}_{Sj}$  和实测响应  $\hat{\boldsymbol{\phi}}_{Sj}$ , 并求得任意一历史时刻对应的实测/仿真响应比  $\hat{\boldsymbol{\theta}}_{ji}(t)$ ;

$$[0044] \quad \hat{\boldsymbol{\theta}}_{ji}(t) = \frac{\hat{\boldsymbol{\phi}}_{Sj}(t)}{\dot{\boldsymbol{\phi}}_{Sj}(t)}, t \in (t_0, t_k]$$



[0045] 对 $t_k$ 时刻之前 $[t_0, t_k]$ 区间内所有历史数据进行加权求和得到当前时刻实测/仿真响应比 $\bar{\Theta}_{ji}(t_k)$ ,即令当前时刻实测/仿真响应比:

$$[0046] \quad \bar{\Theta}_{ji}(t_k) = \frac{\int_{t_0}^{t_k} w(t) \hat{\Theta}_{ji}(t) dt}{\int_{t_0}^{t_k} w(t) dt} = \frac{\int_{t_0}^{t_k} w(t) \frac{\hat{\phi}_{Sj}(t)}{\dot{\phi}_{Sj}(t)} dt}{\int_{t_0}^{t_k} w(t) dt};$$

[0047] 其中, $w(t)$ 为加权重值,令 $\int_{t_0}^{t_k} w(t) dt = 1$ ,在离散情况下, $\bar{\Theta}_{ji}(t_k)$ 化为如下形式:

$$[0048] \quad \bar{\Theta}_{ji}(t_k) = \frac{\sum_{k=0}^K w(t_k) \hat{\Theta}_{ji}(t_k)}{\sum_{k=0}^K w(t_k)} = \frac{\sum_{k=0}^K w(t_k) \frac{\hat{\phi}_{Sj}(t_k)}{\dot{\phi}_{Sj}(t_k)}}{\sum_{k=0}^K w(t_k)};$$

[0049] 其中, $t_k = t_0 + K \Delta t$ ,而 $\Delta t = t_{k+1} - t_k, k=0, 1, 2, \dots$ 为离散时间步长,同样,令权值 $w(t_k)$ 满足 $\sum_{k=0}^K w(t_k) = 1$ ;

$$[0050] \quad \text{获取预测响应 } \tilde{\phi}_{Sj}: \quad \begin{aligned} \tilde{\phi}_{Sj}(t) &= \tilde{\Theta}_{ji}(t) \dot{\phi}_{Sj}(t) \\ &= \bar{\Theta}_{ji}(t_k) \dot{\phi}_{Sj}(t) \end{aligned}, \quad t \in (t_k, t_k + T];$$

[0051] 其中 $\tilde{\Theta}_{ji}(t)$ 为用于修正未来某一时刻 $t \in (t_k, t_k + T]$ 仿真响应的预测/仿真响应比,直接取作当前时刻实测/仿真响应比 $\bar{\Theta}_{ji}(t_k)$ 。

[0052] 作为本发明实施例的一种优选方案,所述主星姿态补偿模型中当前时刻的实测/仿真响应比 $\bar{\Theta}_{ji}(t_k)$ 基于递推最小二乘法实时滚动修正,具体方法包括:

[0053] 取预测响应 $\hat{\phi}_{Sj}$ 为参数估计模型中的输出变量 $y(k)$ ,取历史时刻的仿真响应 $\dot{\phi}_{Sj}$ 为参数估计模型中的输入变量 $\varphi$ ,取响应比 $\bar{\Theta}_{ji}$ 为待估计参数 $\theta$ ,在 $t_k$ 时刻的迭代结果 $\theta(t_k)$ 即为所要估计的当前时刻实测/仿真响应比 $\bar{\Theta}_{ji}(t_k)$ ,代入最小二乘法的递推公式,得到下述参数估计模型:

$$[0054] \quad \bar{\Theta}_{ji}(t_k) = \bar{\Theta}_{ji}(t_{k-1}) + R(t_{k-1}) \left[ \hat{\phi}_{Sj}(t_k) - \dot{\phi}_{Sj}(t_k) \bar{\Theta}_{ji}(t_{k-1}) \right]$$

$$[0055] \quad P(t_k) = \frac{1}{\lambda} \left[ 1 - R(t_k) \dot{\phi}_{Sj}(t_k) \right] P(t_{k-1})$$

$$[0056] \quad R(t_k) = \frac{P(t_{k-1}) \dot{\phi}_{Sj}(t_k)}{\lambda + \dot{\phi}_{Sj}(t_k) P(t_{k-1}) \dot{\phi}_{Sj}(t_k)}$$

[0057] 其中 $\bar{\Theta}_{ji}$ 的初值 $\bar{\Theta}_{ji}(t_1)$ 设为1, $R$ 为参数估计模型的迭代中间参数,不具备实质定义, $P$ 的初值为一个足够大的正实数,如 $10^7$ ,获取后续每个时刻的仿真响应和实测响应,并依据参数估计模型实时更新对应的 $K$ 、 $P$ 和 $\theta$ 。

- [0058] 作为本发明实施例的一种优选方案,所述参数估计模型的实现方法包括:
- [0059] 步骤401、设定迭代参数初值  $\bar{\Theta}_{ji}(t_1)$  和  $P(t_1)$ ;
- [0060] 步骤402、依据不断获取实时更新后的当前时刻  $t_k$  的主星姿态角速度实测值  $\hat{\phi}_{sj}(t_k)$ , 以得到实时更新后所有历史数据;
- [0061] 步骤403、根据所述的参数估计模型,不断实时更新当前时刻实测/仿真响应比  $\bar{\Theta}_{ji}(t_k)$ 。
- [0062] 步骤404、将  $\hat{\phi}_{sj}(t_k)$  和  $\hat{\phi}_{sj}(t_k)$  作为运动学仿真的初始状态,获取未来机械臂运动指令  $\dot{\phi}_{M(\text{cmd})}$ , 并认为机械臂在良好受控条件下,其运动状态  $\dot{\phi}_M$  与运动指令  $\dot{\phi}_{M(\text{cmd})}$  相同,计算未来  $t \in (t_k, t_k+T]$  时间内的仿真响应  $\dot{\phi}_{sj}(t)$ , 在仿真过程中,将求得的每个时刻的仿真响应  $\dot{\phi}_{sj}(t)$  立刻修正为预测响应  $\tilde{\phi}_{sj}(t)$ , 并用于后续的积分计算;
- [0063] 步骤405、当前时刻递增至  $t_{k+1}$ , 转步骤402步,循环更新。
- [0064] 在本发明实施例的第二个方面,提供了一种星-臂耦合系统主星姿态高精度预报系统,其特征在于,包括:
- [0065] 建模单元,用于获取空间机器人的主星-机械臂耦合系统运动学方程,并建立目标仿真模型和主星姿态补偿模型;
- [0066] 数据获取单元,基于主星姿态补偿模型获取主星姿态角的预测值,即为原始预测值;
- [0067] 建模单元,建立用于实时滚动更新当前时刻实测/仿真响应比的主星姿态补偿模型;基于主星姿态补偿模型不断滚动修正所述目标仿真模型的等效线性参数,进而预报未来时刻的预测响应,记为修正预测值;
- [0068] 精度评价单元,比较所述修正预测值相较原始预测值的预测精度,通过主星姿态角预测值在某一时刻  $t$  的相对误差进行评价。
- [0069] 作为本发明实施例的一种优选方案,所述建模单元包括:
- [0070] 获取所有历史时刻的主星姿态角速度的仿真响应和实测响应,并通过对所有历史数据的实测/仿真响应比加权求和获取不断更新的当前时刻的实测/仿真响应比,即为主星姿态补偿模型。
- [0071] 本发明的实施方式具有如下优点:
- [0072] 本发明引入姿态角的相对误差的概念,能够更好的比较修正预测值对主星姿态角预报的准确性。

## 附图说明

[0073] 为了更清楚地说明本发明的实施方式或现有技术中的技术方案,下面将对实施方式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示例性的,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,还可以根据提供的附图引伸获得其它的实施附图。

[0074] 本说明书所绘示的结构、比例、大小等,均用以配合说明书所揭示的内容,以供熟悉此技术的人士了解与阅读,并非用以限定本发明可实施的限定条件,故不具技术上的实质意义,任何结构的修饰、比例关系的改变或大小的调整,在不影响本发明所能产生的功效及所能达成的目的下,均应仍落在本发明所揭示的技术内容得能涵盖的范围内。

[0075] 图1为本发明实施方式中方法流程图;

[0076] 图2为本发明实施方式中星-臂耦合运动学建模对象示意图。

### 具体实施方式

[0077] 以下由特定的具体实施例说明本发明的实施方式,熟悉此技术的人士可由本说明书所揭露的内容轻易地了解本发明的其他优点及功效,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做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。

[0078] 本发明提供的主星姿态高精度预报方法及系统是基于现有的星-臂耦合系统来实现的,以下先定义后续建模和推导中涉及到的物理量及其符号。

[0079] 如图2所示,具体为星-臂耦合运动学建模对象示意图。

[0080] 其中,符号A代表特定坐标系或者坐标变换,具体包括:

[0081] 坐标系 $A_1$ 定义为惯性系,一般将其定义在星-臂耦合系统(统一简称为系统)的初始位置,并以与系统质心相同的初速度做惯性运动,出于保持符号统一与简便考虑,在一些推导过程中,同时令 $A_{-1}=A_1$ ,也表示惯性系。

[0082]  $A_0$ 定义为主星随体系,其原点在主星质心上,坐标系三轴方向与主星自身设计坐标系一致即可,主星本体坐标系与惯性坐标系之间的变换依欧拉角定义。

[0083]  $A_i (i=1, \dots, n)$ 定义为多刚体系统中连杆i的随体系,其原点固定在关节i上前后两连杆铰接点处,坐标系z轴与关节i的旋转轴保持一致,x轴与y轴参考机械臂D-H参数定义, $\hat{x}_i, \hat{y}_i, \hat{z}_i$ 分别表示 $A_i$ 的三轴单位矢量。

[0084]  $A_{i-1,i} (i=1, \dots, n)$ 定义为从坐标系 $A_i$ 到坐标系 $A_{i-1}$ 的坐标变换,其满足如下关系式:

$$\begin{aligned}
 A_{i-1,i} &= E_{z\bar{\phi}_i} E_{x\psi_i} E_{z\phi_i} \\
 [0085] \quad &= \begin{pmatrix} \cos \bar{\phi}_i & -\sin \bar{\phi}_i & 0 \\ \sin \bar{\phi}_i & \cos \bar{\phi}_i & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \psi_i & -\sin \psi_i \\ 0 & \sin \psi_i & \cos \psi_i \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \phi_i & -\sin \phi_i & 0 \\ \sin \phi_i & \cos \phi_i & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} (1)
 \end{aligned}$$

[0086] 其中 $\psi_i$ 为由D-H参数规定的关节i的x轴扭转角, $\bar{\phi}_i$ 同样为D-H参数规定的z轴初始旋转角, $\phi_i$ 为z轴旋转角。

[0087] 而主星与惯性系之间的坐标转换矩阵 $A_{10}$ 则满足:

$$\begin{aligned}
 A_{i0} &= E_{z\gamma} E_{y\beta} E_{x\alpha} \\
 [0088] \quad &= \begin{pmatrix} \cos \gamma & -\sin \gamma & 0 \\ \sin \gamma & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \beta & 0 & -\sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \beta & 0 & \cos \beta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 \\ \sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2)
 \end{aligned}$$

[0089] 其中 $\alpha, \beta, \gamma$ 分别为主星姿态三轴Euler角。

[0090] 对于 $i < j$ ,坐标转换矩阵显然满足 $A_{ij} = A_{i,i+1} A_{i+1,i+2} \dots A_{j-1,j}$ ;对于 $i = -1, \dots, n$ 则有 $A_{ii} = 1$ ;

[0091] 系统中的结构参数定义如下:

[0092]  $l_i = a_i + b_i$  ( $i = 1, \dots, n$ ) 定义为由 $A_i$ 原点指向 $A_{i+1}$ 原点的矢量;其中 $a_i$ 为随体系 $A_i$ 原点指向连杆 $i$ 质心的矢量, $b_i$ 为由连杆 $i$ 质心指向随体系 $A_{i+1}$ 原点的矢量。这三者都定义在坐标系 $A_i$ 中。

[0093] 由于整个空间机器人的系统结构参数是在发射之前就设计好的,因此在一次任务中, $l_i, a_i, b_i$ 都是固定不变的常量。

[0094] 出于符号统一性考虑,定义 $a_0 = 0$ 为由主星随体系 $A_0$ 原点指向主星质心的矢量, $l_0 = b_0$ 为由主星质心(也即 $A_1$ 原点)指向 $A_1$ 原点的矢量。

[0095] 定义在具体的坐标系中的各物理参数符号如下:

[0096]  $m_i$  ( $i = 0, \dots, n$ ):连杆 $i$ (或主星)的质量。

[0097]  $w$ :系统总质量。

[0098]  $r_i$  ( $i = 0, \dots, n$ ):连杆 $i$ (或主星)的质心位置,定义在惯性系 $A_{-1}$ 中。

[0099]  $r_G$ ,系统质心位置矢量。

[0100]  $I_i$  ( $i = 0, \dots, n$ ):连杆 $i$ (或主星)关于自身质心的转动惯量,定义在自身随体系 $A_i$ 中。

[0101]  $R_i$  ( $i = 0, \dots, n$ ):坐标系 $A_i$ 原点的位置,定义在 $A_{-1}$ 中。也即, $A_i$ 原点的矢径在惯性系中的分量组成的向量。 $R_i$ 满足:

$$[0102] \quad \mathbf{R}_i = \mathbf{R}_0 + \sum_{k=1}^i \mathbf{A}_{i,k-1} \mathbf{r}_{k-1,k}, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

[0103] 其中 $R_0$ 即为主星体坐标系原点在惯性系中的位置。

[0104]  $v_i$  ( $i = 0, \dots, n$ ):连杆 $i$ (或主星)质心速度,定义在惯性系 $A_{-1}$ 中。

[0105]  $V_i$  ( $i = 0, \dots, n$ ):坐标系 $A_i$ 原点的线速度,定义在惯性系 $A_{-1}$ 中。也即, $A_i$ 原点的绝对速度矢量在惯性系中的分量组成的向量。 $V_i$ 满足:

$$[0106] \quad \mathbf{V}_i = \mathbf{V}_0 + \sum_{k=0}^i \mathbf{A}_{i,k} \boldsymbol{\Omega}_k^\times \mathbf{r}_{k,k+1}, \quad i = 1, \dots, n \quad (4)$$

[0107]  $\phi_i$ ,关节 $i$ 的旋转角。

[0108]  $\bar{\phi}_i$ ,关节 $i$ 的初始D-H角参数。

[0109]  $\dot{\boldsymbol{\Phi}}_i$  ( $i = 0, \dots, n$ ):连杆 $i$ (或主星)相对于连杆 $i-1$ (或主星/惯性系)的角速度,定义在 $A_i$ 中。也即, $A_i$ 相对于 $A_{i-1}$ 的角速度矢量在 $A_i$ 体坐标系下的分量组成的向量。

[0110]  $\boldsymbol{\Omega}_i$  ( $i = 0, \dots, n$ ):连杆 $i$ (或主星)的角速度,其定义在 $A_i$ 中,也即,坐标系 $A_i$ 的绝对

角速度矢量在其自身体坐标系下的分量组成的向量。显然有：

$$[0111] \quad \Omega_i = \sum_{k=0}^i A_{ik} \dot{\Phi}_k, \quad i=0,1,\dots,n \quad (5)$$

[0112] 以及：

$$[0113] \quad \Omega_0 = \dot{\Phi}_0 \quad (6)$$

[0114]  $\omega_i$  ( $i=0, \dots, n$ ) : 连杆 $i$  (或主星) 的角速度, 定义在惯性系 $A_I$ 中。

[0115] 在惯性系中, 不受外力作用条件下, 包括主星、机械臂以及可能的被抓取物体, 整个系统线动量守恒, 如式 (7) 所示：

$$[0116] \quad \sum_{i=0}^n m_i \dot{\mathbf{r}}_i = \text{const} \quad (7)$$

[0117] 同样满足角动量守恒, 如式 (8) 所示：

$$[0118] \quad \sum_{i=0}^n (A_{Ii} I_i \Omega_i + m_i \mathbf{r}_i \times \dot{\mathbf{r}}_i) = \mathbf{L}_0 = \text{const} \quad (8)$$

[0119] 两相邻连杆质心之间的几何方程如式 (9) 所示：

$$[0120] \quad \mathbf{r}_i - \mathbf{r}_{i-1} = A_{Ii} \mathbf{a}_i + A_{I,i-1} \mathbf{b}_{i-1} \quad (9)$$

[0121] 机械臂连杆末端手抓满足的几何方程如式 (10) 所示：

$$[0122] \quad \mathbf{r}_i + A_{Ii} \mathbf{b}_i = \mathbf{r}_0 + A_{I0} \mathbf{b}_0 + \sum_{l=1}^i A_{Il} \mathbf{l}_l \quad (10)$$

[0123] 将式 (9) 展开至 $\mathbf{r}_0$ , 得到 (11) 式：

$$[0124] \quad \mathbf{r}_i = \sum_{l=1}^i (A_{Il} \mathbf{a}_l + A_{I,l-1} \mathbf{b}_{l-1}) + \mathbf{r}_0, \quad i \geq 1 \quad (11)$$

[0125] 而整个系统质心位置如式 (12) 所示：

$$[0126] \quad \sum_{i=0}^n m_i \mathbf{r}_i = \mathbf{r}_a \sum_{i=0}^n m_i \quad (12)$$

[0127] 将 (11) 代入 (12), 容易得到：

$$[0128] \quad \mathbf{r}_G \sum_{i=0}^n m_i = \sum_{i=0}^n m_i \mathbf{r}_i = \mathbf{r}_0 \sum_{i=0}^n m_i + \sum_{i=1}^n \left[ m_i \sum_{l=1}^i (A_{Il} \mathbf{a}_l + A_{I,l-1} \mathbf{b}_{l-1}) \right] \quad (13)$$

$$[0129] \quad \mathbf{r}_0 = \mathbf{r}_G - \frac{\sum_{i=1}^n \left[ m_i \sum_{l=1}^i (A_{Il} \mathbf{a}_l + A_{I,l-1} \mathbf{b}_{l-1}) \right]}{w} \quad (14)$$

[0130] 其中 $w = \sum_{i=0}^n m_i$ , 为整个系统的总质量。

[0131] 将 (14) 代回式 (11), 得：

$$\begin{aligned}
\mathbf{r}_i &= \frac{1}{w} \sum_{j=0}^n m_j \sum_{l=1}^i (\mathbf{A}_{il} \mathbf{a}_l + \mathbf{A}_{l,l-1} \mathbf{b}_{l-1}) + \mathbf{r}_G - \frac{1}{w} \sum_{j=1}^n \left[ m_j \sum_{l=1}^j (\mathbf{A}_{il} \mathbf{a}_l + \mathbf{A}_{l,l-1} \mathbf{b}_{l-1}) \right] \\
&= \frac{1}{w} m_0 \sum_{l=1}^i (\mathbf{A}_{il} \mathbf{a}_l + \mathbf{A}_{l,l-1} \mathbf{b}_{l-1}) + \frac{1}{w} \sum_{j=1}^n m_j \sum_{l=1}^i (\mathbf{A}_{il} \mathbf{a}_l + \mathbf{A}_{l,l-1} \mathbf{b}_{l-1}) \\
&\quad - \frac{1}{w} \sum_{j=1}^n m_j \sum_{l=1}^j (\mathbf{A}_{il} \mathbf{a}_l + \mathbf{A}_{l,l-1} \mathbf{b}_{l-1}) + \mathbf{r}_G \\
[0132] \quad &= \frac{1}{w} \sum_{l=1}^i (\mathbf{A}_{il} \mathbf{a}_l + \mathbf{A}_{l,l-1} \mathbf{b}_{l-1}) \cdot m_0 + \frac{1}{w} \sum_{l=1}^i (\mathbf{A}_{il} \mathbf{a}_l + \mathbf{A}_{l,l-1} \mathbf{b}_{l-1}) \left[ \sum_{j=1}^n m_j - \sum_{j=l}^n m_j \right] \quad (15) \\
&\quad - \frac{1}{w} \sum_{l=i+1}^n (\mathbf{A}_{il} \mathbf{a}_l + \mathbf{A}_{l,l-1} \mathbf{b}_{l-1}) \sum_{j=l}^n m_j + \mathbf{r}_G \\
&= \frac{1}{w} \sum_{l=1}^i (\mathbf{A}_{il} \mathbf{a}_l + \mathbf{A}_{l,l-1} \mathbf{b}_{l-1}) \sum_{j=0}^{l-1} m_j - \frac{1}{w} \sum_{l=i+1}^n (\mathbf{A}_{il} \mathbf{a}_l + \mathbf{A}_{l,l-1} \mathbf{b}_{l-1}) \sum_{j=l}^n m_j + \mathbf{r}_G \\
&= \sum_{l=1}^n (\mathbf{A}_{il} \mathbf{a}_l + \mathbf{A}_{l,l-1} \mathbf{b}_{l-1}) \cdot K_{il} + \mathbf{r}_G
\end{aligned}$$

[0133] 将式(15)简化,为两个不同的区间定义了形式上统一的 $K_{i1}$ ,令其满足:

$$[0134] \quad K_{il} = \begin{cases} \frac{1}{w} \sum_{j=0}^{l-1} m_j, & i \geq l \\ -\frac{1}{w} \sum_{j=l}^n m_j, & i < l \end{cases} \quad (16)$$

[0135] 需要注意的是,在一次任务过程中,卫星的设计尺寸、质量特性,一般都不会发生变化,即是说, $a_i, b_i, K_{i1}$ 都是与时间无关的常量。因此,将(15)式对时间求导,可以得到:

$$[0136] \quad \dot{\mathbf{r}}_i - \dot{\mathbf{r}}_G = \sum_{j=1}^n K_{ij} (\dot{\mathbf{A}}_{ij} \mathbf{a}_j + \dot{\mathbf{A}}_{l,j-1} \mathbf{a}_{j-1}) \quad (17)$$

[0137] 其中坐标转换矩阵 $A_{ji}$ 满足如下关系式:

$$\begin{aligned}
\mathbf{A}_{il} &= \mathbf{A}_{l0} \mathbf{A}_{01} \cdots \mathbf{A}_{l-2,i-1} \mathbf{A}_{l-1,i} \\
[0138] \quad &= (\mathbf{E}_{z\gamma} \mathbf{E}_{y\beta} \mathbf{E}_{x\alpha}) (\mathbf{E}_{z\phi_1} \mathbf{E}_{x\psi_1}) \cdots (\mathbf{E}_{z\phi_{l-1}} \mathbf{E}_{x\psi_{l-1}}) (\mathbf{E}_{z\phi_l} \mathbf{E}_{x\psi_l}) \quad (18)
\end{aligned}$$

[0139] 其中E为单轴旋转矩阵,满足:

$$\begin{aligned}
\mathbf{E}_{z\gamma} &= \begin{pmatrix} \cos \gamma & -\sin \gamma & 0 \\ \sin \gamma & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \\
[0140] \quad \mathbf{E}_{y\beta} &= \begin{pmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta \end{pmatrix} \quad (19) \\
\mathbf{E}_{x\alpha} &= \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix}
\end{aligned}$$

[0141] 将(18)式中的坐标转换矩阵对时间求导,有:

$$\begin{aligned}
 \dot{A}_{ii} &= \frac{d}{dt}(A_{I0}A_{01}\cdots A_{i-2,i-1}A_{i-1,i}) \\
 [0142] \quad &= \dot{A}_{I0}A_{01}\cdots A_{i-2,i-1}A_{i-1,i} + A_{I0}\dot{A}_{01}\cdots A_{i-2,i-1}A_{i-1,i} + \cdots \\
 &\quad + A_{I0}A_{01}\cdots \dot{A}_{i-2,i-1}A_{i-1,i} + A_{I0}A_{01}\cdots A_{i-2,i-1}\dot{A}_{i-1,i}
 \end{aligned} \quad (20)$$

[0143] 其中 $\dot{A}_{i-1,i}$ 为机械臂各连杆间转换矩阵对时间的一阶导形式,其满足如下形式:

$$[0144] \quad \dot{A}_{i-1,i} = \dot{\phi}_i \begin{pmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} E_{z\phi_i} E_{x\psi_i} \equiv \dot{\phi}_i D_z E_{z\phi_i} E_{x\psi_i} \equiv \dot{\phi}_i \frac{\partial A_{i-1,i}}{\partial \phi_i}, \quad i \geq 1 \quad (21)$$

[0145] 其中 $D_z$ 定义为针对z轴的微分矩阵。

[0146] 而与机械臂各连杆的转换矩阵稍有不同的是,从惯性系到主星基座的转换矩阵的导数 $\dot{A}_{I0}$ 为如下形式:

$$\begin{aligned}
 \dot{A}_{I0} &= \frac{d}{dt}(E_{z\gamma}E_{y\beta}E_{x\alpha}) \\
 [0147] \quad &= \dot{\gamma} \begin{pmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} E_{z\gamma} E_{y\beta} E_{x\alpha} + \dot{\beta} E_{z\gamma} \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \end{pmatrix} E_{y\beta} E_{x\alpha} + \dot{\alpha} E_{z\gamma} E_{y\beta} \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} E_{x\alpha} \quad (22) \\
 &= \dot{\gamma} D_z E_{z\gamma} E_{y\beta} E_{x\alpha} + \dot{\beta} E_{z\gamma} D_y E_{y\beta} E_{x\alpha} + \dot{\alpha} E_{z\gamma} E_{y\beta} D_x E_{x\alpha} \\
 &\equiv \dot{\gamma} \frac{\partial A_{I0}}{\partial \gamma} + \dot{\beta} \frac{\partial A_{I0}}{\partial \beta} + \dot{\alpha} \frac{\partial A_{I0}}{\partial \alpha}
 \end{aligned}$$

[0148] 将以上(18)至(22)诸式代入(17)式中,得到:

$$[0149] \quad \dot{\mathbf{r}}_i - \dot{\mathbf{r}}_G = \sum_{j=1}^n K_{ij} \left( \dot{\gamma} \frac{\partial A_{I0}}{\partial \gamma} + \dot{\beta} \frac{\partial A_{I0}}{\partial \beta} + \dot{\alpha} \frac{\partial A_{I0}}{\partial \alpha} \right) (A_{0j} \mathbf{a}_j + A_{0,j-1} \mathbf{b}_{j-1}) + \sum_{l=1}^n \mu_{il} \dot{\phi}_l \quad (23)$$

[0150] 其中: $\dot{\mathbf{r}}_G$ 为惯性系中系统质心线速度,在线动量守恒的条件下,容易通过选取合理的初始坐标系,令 $\dot{\mathbf{r}}_G = 0$ 。

[0151]  $\mu_{ij}$ 为机械臂各关节末端的广义速度,当计算指定的机械臂连杆末端线速度时,它代表当某个关节以单位角速度旋转时所给出的线速度贡献。其具体表达式如(24)式所示:

$$[0152] \quad \mu_{il} = \sum_{j=l}^n K_{ij} \left( A_{I,l-1} \frac{\partial A_{l-1,l}}{\partial \phi_l} A_{lj} \mathbf{a}_j \right) + \sum_{j=l+1}^n K_{ij} \left( A_{I,l-1} \frac{\partial A_{l-1,l}}{\partial \phi_l} A_{l,j-1} \mathbf{b}_{j-1} \right) \quad (24)$$

[0153] 式(23)便是系统中各个连杆刚体质心的线速度在惯性系中的表达式。

[0154] 另外,考虑式(8)中的角速度表达式,其中每个刚体的角速度 $\omega_i$ 满足下式:

$$[0155] \quad \omega_i = \sum_{j=0}^i A_{ij} \Omega_j = A_{I0} (\hat{\mathbf{x}}_0 \dot{\alpha} + \hat{\mathbf{y}}_0 \dot{\beta} + \hat{\mathbf{z}}_0 \dot{\gamma}) + \sum_{j=1}^i (A_{ij} \hat{\mathbf{z}}_j) \dot{\phi}_j + \omega_G \quad (25)$$

[0156] 其中 $\hat{\mathbf{z}}_j$ 表示j坐标系中的z轴单位矢量, $\omega_G$ 表示惯性系中系统的初始角速度,在本推导中一般可以认为 $\omega_G = 0$ 。

[0157] 式 (25) 便是机器人系统中各个连杆刚体的角速度在惯性系中的表达。

[0158] 将角动量守恒式 (8) 中的左边第一项展开成为惯性坐标系中的表达, 并将 (23) 中的线速度和 (25) 中的角速度代入, 得到如下形式:

$$\begin{aligned}
 & \sum_{i=0}^n \mathbf{A}_i \mathbf{I}_i \boldsymbol{\omega}_i \\
 = & \left[ \sum_{i=0}^n (\mathbf{A}_{i1} \mathbf{I}_i \mathbf{A}_{i1}) \mathbf{A}_{i0} \hat{\mathbf{x}}_0, \sum_{i=0}^n (\mathbf{A}_{i1} \mathbf{I}_i \mathbf{A}_{i1}) \mathbf{A}_{i0} \hat{\mathbf{y}}_0, \sum_{i=0}^n (\mathbf{A}_{i1} \mathbf{I}_i \mathbf{A}_{i1}) \mathbf{A}_{i0} \hat{\mathbf{z}}_0, \right. \\
 [0159] & \left. \sum_{i=1}^n (\mathbf{A}_{i1} \mathbf{I}_i \mathbf{A}_{i1}) \mathbf{A}_{i1} \hat{\mathbf{x}}_1, \dots, \sum_{i=n}^n (\mathbf{A}_{i1} \mathbf{I}_i \mathbf{A}_{i1}) \mathbf{A}_{in} \hat{\mathbf{z}}_n \right] \cdot [\dot{\alpha}, \dot{\beta}, \dot{\gamma}, \dot{\phi}_1, \dots, \dot{\phi}_n]^T \\
 & + \sum_{i=0}^n (\mathbf{A}_i \mathbf{I}_i \mathbf{A}_i) \boldsymbol{\omega}_G
 \end{aligned} \tag{26}$$

[0160] 同理, 式 (8) 的第二项展开得到:

$$\begin{aligned}
 & \sum_{i=0}^n m_i \mathbf{r}_i \times \dot{\mathbf{r}}_i \\
 = & \sum_{i=0}^n m_i \left[ \mathbf{r}_i \times \sum_{j=1}^n K_{ij} \frac{\partial \mathbf{A}_{i0}}{\partial \alpha} (\mathbf{A}_{0j} \mathbf{a}_j + \mathbf{A}_{0,j-1} \mathbf{b}_{j-1}), \right. \\
 [0161] & \mathbf{r}_i \times \sum_{j=1}^n K_{ij} \frac{\partial \mathbf{A}_{i0}}{\partial \beta} (\mathbf{A}_{0j} \mathbf{a}_j + \mathbf{A}_{0,j-1} \mathbf{b}_{j-1}), \\
 & \mathbf{r}_i \times \sum_{j=1}^n K_{ij} \frac{\partial \mathbf{A}_{i0}}{\partial \gamma} (\mathbf{A}_{0j} \mathbf{a}_j + \mathbf{A}_{0,j-1} \mathbf{b}_{j-1}), \\
 & \left. \mathbf{r}_i \times \boldsymbol{\mu}_{i1}, \mathbf{r}_i \times \boldsymbol{\mu}_{i2}, \dots, \mathbf{r}_i \times \boldsymbol{\mu}_{in} \right] \cdot [\dot{\alpha}, \dot{\beta}, \dot{\gamma}, \dot{\phi}_1, \dots, \dot{\phi}_n]^T \\
 & + \sum_{i=0}^n m_i \mathbf{r}_i \times \dot{\mathbf{r}}_G
 \end{aligned} \tag{27}$$

[0162] 将 (26) 和 (27) 代入 (8) 式, 将其中涉及的主星姿态角速度  $[\dot{\alpha}, \dot{\beta}, \dot{\gamma}]^T$  和机械臂关节角速度  $[\dot{\phi}_1, \dots, \dot{\phi}_n]^T$  提取出来, 写成矩阵形式, 即可以得到如下的空间机器人主星-机械臂耦合系统运动学方程。

[0163] 实施例1:

[0164] 本发明基于上述星-臂耦合系统的参数定义和公式推导, 如图1所示, 具体提供一种星-臂耦合系统的主星姿态高精度预报方法, 主星姿态实际中可相当于主星的自由基座的姿态, 其具体步骤如下:

[0165] 包括如下步骤:

[0166] 步骤100、依据所述星-臂耦合系统获取空间机器人的主星-机械臂耦合系统运动学方程, 并建立目标仿真模型和主星姿态补偿模型;

[0167] 步骤200、基于主星姿态补偿模型获取主星姿态角的预测值, 即为原始预测值;

[0168] 步骤300、基于主星姿态补偿模型不断滚动修正所述目标仿真模型的等效线性参数, 进而预报未来时刻的预测响应, 记为修正预测值;



[0169] 步骤400、比较并评价所述修正预测值相较原始预测值的预测精度，

[0170] 定义主星姿态角预测值在某一时刻 $t$ 的相对误差为：该时刻 $t$ 主星姿态角预测值的绝对误差，与历史 $T$ 时间段内主星姿态角实测值的积分之比，其中 $T$ 为预报时长，绝对误差为某一时刻 $t$ 预测值与实测值的差值；

[0171] 步骤500，定义所述相对误差为从滚动修正开始稳定生效时起至测试结束，计算每时刻相对误差的误差均值；根据误差均值评价所述修正预测值的预测精度，进而更准确的预报未来时刻的主星姿态。

[0172] 作为本发明实施例的一种优选方案，所述步骤400和步骤500具体实现方式及原理为：

[0173] 考虑刚体动力学中用于表征坐标系旋转的欧拉轴/角(或称轴角)表述：任何坐标变换矩阵可以写作 $\Phi e$ 的形式，其中 $e = e_x \hat{x} + e_y \hat{y} + e_z \hat{z}$ 为两个坐标系之间的相对转轴，称作欧拉轴， $\hat{x}$ ， $\hat{y}$ 和 $\hat{z}$ 为参考坐标系的三轴单位矢量；而 $\Phi$ 称作轴角。该变换表示，所有坐标之间的转换关系可以通过绕着欧拉轴 $e$ ，一次性转动 $\Phi$ 角度而完成。

[0174] 通过轴/角表述，我们可以用单一标量 $\Phi$ 来表征两个坐标系之间的整体偏差程度。若一个坐标系相对于另一个坐标系的三个对应坐标轴的偏角分别为 $\alpha$ ， $\beta$ 和 $\gamma$ ，则轴角 $\Phi$ 满足：

$$[0175] \quad \sin^2 \frac{\Phi}{2} = \frac{1}{2} \left( \sin^2 \frac{\alpha}{2} + \sin^2 \frac{\beta}{2} + \sin^2 \frac{\gamma}{2} \right)$$

[0176] 当偏角较小时，该式化为：

$$[0177] \quad \Phi = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\alpha^2 + \beta^2 + \gamma^2}$$

[0178] 该式实际上相当于将三轴偏角合成为一个，从而给出了主星姿态角的整体绝对误差水平，相当于：

$$[0179] \quad e_{ab}(t) = \frac{1}{\sqrt{2}} \left\| \tilde{\phi}_s(t) - \hat{\phi}_s(t) \right\|_2$$

[0180] 在此基础上，引入姿态角相对误差的概念。即令：

[0181] 相对误差：

$$[0182] \quad e_{re}(t) = \frac{\frac{1}{\sqrt{2}} \left\| \tilde{\phi}_s(t) - \hat{\phi}_s(t) \right\|_2}{\int_{t-T}^t \frac{1}{\sqrt{2}} \left\| \tilde{\phi}_s(\tau + d\tau) - \tilde{\phi}_s(\tau) \right\|_2} = \frac{\left\| \tilde{\phi}_s(t) - \hat{\phi}_s(t) \right\|_2}{\int_{t-T}^t \left\| \tilde{\phi}_s(\tau) \right\|_2 d\tau} ;$$

[0183] 其中 $\tilde{\phi}_s$ 为某一时刻 $t$ 的原始预测值； $\hat{\phi}_s$ 为某一时刻 $t$ 的实测值； $\tilde{\phi}_s$ 修正预测值；

[0184] 上式在离散情况下化为如下形式：

$$[0185] \quad e_{re}(t_k) = \frac{\left\| \tilde{\phi}_s(t_k) - \hat{\phi}_s(t_k) \right\|_2}{\sum_{k=K-T/\Delta t+1}^K \left\| \hat{\phi}_s(t_k) - \hat{\phi}_s(t_{k-1}) \right\|_2} = \frac{\left\| \tilde{\phi}_s(t_k) - \hat{\phi}_s(t_k) \right\|_2}{\sum_{k=K-T/\Delta t}^{K-1} \left\| \hat{\phi}_s(t_k) \right\|_2 \Delta t}$$

[0186] 其中 $t_k$ 为所预测的时刻， $\Delta t$ 为数据采样周期，也即系统获取实测值的周期；在实

际计算中,可以随意取该式中两个等号右边的两种形式;在不考虑采样误差的情况下,这两者应当是等价的进一步获得所述误差均值:

$$[0187] \quad E_{re} = \sum_{K=2T/D}^N e_{re}(t_K)$$

[0188] 其中 $t_N$ 为当次实验的终止时刻,定义从系统起始时刻,2~3倍的预报时长T之后稳定生效。

[0189] 通过该评价方法,能够更好的比较修正预测值对主星姿态角预报的准确性。

[0190] 其中步骤100中,目标仿真模型和的所述主星姿态补偿模型建立方法包括:

[0191] 通过获得主星姿态角速度与机械臂关节角速度的等效线性关系式,以机械臂关节角速度为系统激励,获取主星姿态角速度的仿真响应,即为目标仿真模型;

[0192] 获取所有历史时刻的主星姿态角速度的仿真响应和实测响应,并通过对所有历史数据的实测/仿真响应比加权求和获取不断更新的当前时刻的实测/仿真响应比,即为主星姿态补偿模型。

[0193] 在本方法中,由于实际中一般最需要获取的为当前主星自由基座的相关参数(本实施方式均以自由基座角速度为例),因此,根据历史数据就能够不断滚动更新当前时刻的预测响应,而对于未来时刻的预测响应一般等同于当前时刻预测响应的的时间函数,该时间函数可以通过历史数据获得,并且时间函数的参数也可以根据历史数据的积累不断滚动更新。

[0194] 在本实施方式中,所需要预报的未来时刻定义为包括当前时刻在内的未来时刻。

[0195] 其中,根据参数定义和公式推导得到的主星-机械臂耦合系统运动学方程为:

$$[0196] \quad \bar{I}_S \dot{\phi}_S + \bar{I}_M \dot{\phi}_M = L_0$$

[0197] 其中: $\bar{I}_S$ 为主星的广义雅克比矩阵,包含了主星姿态角以及主星姿态角速度两个信息,满足:

$$[0198] \quad \bar{I}_S = \left[ \begin{array}{l} \sum_{i=0}^n (A_{ii} I_i A_{ii}) A_{i0} \hat{x}_0 + \sum_{i=0}^n m_i \cdot r_i \times \sum_{j=1}^n K_{ij} \frac{\partial A_{i0}}{\partial \alpha} (A_{0j} a_j + A_{0,j-1} b_{j-1}), \\ \sum_{i=0}^n (A_{ii} I_i A_{ii}) A_{i0} \hat{y}_0 + \sum_{i=0}^n m_i \cdot r_i \times \sum_{j=1}^n K_{ij} \frac{\partial A_{i0}}{\partial \beta} (A_{0j} a_j + A_{0,j-1} b_{j-1}), \\ \sum_{i=0}^n (A_{ii} I_i A_{ii}) A_{i0} \hat{z}_0 + \sum_{i=0}^n m_i \cdot r_i \times \sum_{j=1}^n K_{ij} \frac{\partial A_{i0}}{\partial \gamma} (A_{0j} a_j + A_{0,j-1} b_{j-1}) \end{array} \right]$$

[0199]  $\bar{I}_M$ 为多关节机械臂的广义雅克比矩阵,包含了机械臂关节角以及机械臂关节角速度两个信息,满足:

$$\begin{aligned}
 \bar{\mathbf{I}}_M = & \left[ \begin{aligned} & \sum_{i=1}^n (\mathbf{A}_{I_i} \mathbf{I}_i \mathbf{A}_{I_i}^T) \mathbf{A}_{I_1} \hat{\mathbf{z}}_1 + \sum_{i=0}^n m_i \cdot \mathbf{r}_i \times \boldsymbol{\mu}_{i1} , \\ & \sum_{i=2}^n (\mathbf{A}_{I_i} \mathbf{I}_i \mathbf{A}_{I_i}^T) \mathbf{A}_{I_2} \hat{\mathbf{z}}_2 + \sum_{i=0}^n m_i \cdot \mathbf{r}_i \times \boldsymbol{\mu}_{i2} , \\ & \dots , \\ & \sum_{i=n}^n (\mathbf{A}_{I_i} \mathbf{I}_i \mathbf{A}_{I_i}^T) \mathbf{A}_{I_n} \hat{\mathbf{z}}_n + \sum_{i=0}^n m_i \cdot \mathbf{r}_i \times \boldsymbol{\mu}_{in} \end{aligned} \right]
 \end{aligned}$$

$$[0201] \quad \text{其中 } \dot{\boldsymbol{\phi}}_S = \begin{bmatrix} \dot{\alpha} \\ \dot{\beta} \\ \dot{\gamma} \end{bmatrix} \text{ 为主星姿态角速度, } \dot{\boldsymbol{\phi}}_M = \begin{bmatrix} \dot{\phi}_1 \\ \dot{\phi}_2 \\ \vdots \\ \dot{\phi}_n \end{bmatrix} \text{ 为机械臂关节角速度, } L_0 \text{ 为系统初始}$$

角动量。

[0202] 进一步地,主星姿态角速度与机械臂关节角速度的等效线性关系(目标仿真模型)的获取方法为:

[0203] 选择惯性系,并令系统的初始角动量为0,得到:

$$[0204] \quad \bar{\mathbf{I}}_S \dot{\boldsymbol{\phi}}_S + \bar{\mathbf{I}}_M \dot{\boldsymbol{\phi}}_M = \mathbf{0}$$

[0205] 由此可以得到:

$$[0206] \quad \dot{\boldsymbol{\phi}}_S = (-\bar{\mathbf{I}}_S^{-1} \bar{\mathbf{I}}_M) \dot{\boldsymbol{\phi}}_M ;$$

[0207] 其中,等式右侧的 $\dot{\boldsymbol{\phi}}_M$ 为机械臂关节角速度,是由空间机器人控制系统给出的输入指令,也即系统的激励,在本实施方式中相当于用于获取目标参数的重要现有已知参量, $(-\bar{\mathbf{I}}_S^{-1} \bar{\mathbf{I}}_M)$ 是一个与机械臂当前构型相关的状态矩阵,其本质是一个 $3 \times n$ 的矩阵,因此,可以定义 $\bar{\mathbf{I}} = -\bar{\mathbf{I}}_S^{-1} \bar{\mathbf{I}}_M$ ;得到主星姿态角速度与机械臂关节角速度等效线性关系式:

$$[0208] \quad \dot{\boldsymbol{\phi}}_S = \bar{\mathbf{I}} \dot{\boldsymbol{\phi}}_M .$$

[0209] 结合式(29)和(30),可以得到 $\bar{\mathbf{I}}$ 的表达式中只有与机械臂当前构型相关的变量,而不包含这些量对时间的导数;换言之,在任意特定时刻,机械臂具有特定的构型,系统响应或仿真响应(主星的姿态角速度 $\dot{\boldsymbol{\phi}}_S$ )与系统激励(机械臂关节角速度 $\dot{\boldsymbol{\phi}}_M$ )之间为等效线性关系。

[0210] 因此,在确定的构型和其他条件下,给定瞬时的机械臂关节角速度作为系统激励,可以得到瞬时的主星姿态角速度的系统响应或仿真响应。

[0211] 在实际的星-臂耦合系统中,机械臂末端执行机构(夹具、手爪等抓取机构)已经抓牢了某一刚性目标物体的情况下,可以将该目标物体视为机械臂的一个新的连杆。不失一般性,不妨设该假想连杆的随体坐标系朝向与机械臂原本的末端连杆(抓取机构)始终保持相同。于是可以通过将被抓取的目标物体视为一个额外新增的机械臂连杆,即将系统中的连杆数 $n$ 简单加一。

[0212] 步骤300中的主星姿态补偿模型的建立方法包括:

[0213] 设星-臂耦合系统从 $t_0$ 时刻开始运转,当前时刻为 $t_k$ ,获取过去 $t_0 \sim t_k$ 时间段内每一时刻主星姿态角速度的仿真响应 $\dot{\phi}_{sj}$ 和实测响应 $\hat{\phi}_{sj}$ ,并求得任意一历史时刻对应的实测/仿真响应比 $\hat{\Theta}_{ji}(t)$ ;

$$[0214] \quad \hat{\Theta}_{ji}(t) = \frac{\hat{\phi}_{sj}(t)}{\dot{\phi}_{sj}(t)}, t \in (t_0, t_k]$$

[0215] 对 $t_k$ 时刻之前 $[t_0, t_k]$ 区间内所有历史数据进行加权求和得到当前时刻实测/仿真响应比 $\bar{\Theta}_{ji}(t_k)$ ,即令当前时刻实测/仿真响应比:

$$[0216] \quad \bar{\Theta}_{ji}(t_k) = \frac{\int_{t_0}^{t_k} w(t) \hat{\Theta}_{ji}(t) dt}{\int_{t_0}^{t_k} w(t) dt} = \frac{\int_{t_0}^{t_k} w(t) \frac{\hat{\phi}_{sj}(t)}{\dot{\phi}_{sj}(t)} dt}{\int_{t_0}^{t_k} w(t) dt};$$

[0217] 其中, $w(t)$ 为加权重值,令 $\int_{t_0}^{t_k} w(t) dt = 1$ ,在离散情况下, $\bar{\Theta}_{ji}(t_k)$ 化为如下形式:

$$[0218] \quad \bar{\Theta}_{ji}(t_k) = \frac{\sum_{k=0}^K w(t_k) \hat{\Theta}_{ji}(t_k)}{\sum_{k=0}^K w(t_k)} = \frac{\sum_{k=0}^K w(t_k) \frac{\hat{\phi}_{sj}(t_k)}{\dot{\phi}_{sj}(t_k)}}{\sum_{k=0}^K w(t_k)};$$

[0219] 其中, $t_k = t_0 + K \Delta t$ ,而 $\Delta t = t_{k+1} - t_k, k=0, 1, 2, \dots$ 为离散时间步长,同样,令权值 $w(t_k)$ 满足 $\sum_{k=0}^K w(t_k) = 1$ ;

$$[0220] \quad \text{获取预测响应 } \tilde{\phi}_{sj}: \begin{aligned} \tilde{\phi}_{sj}(t) &= \tilde{\Theta}_{ji}(t) \dot{\phi}_{sj}(t) \\ &= \bar{\Theta}_{ji}(t_k) \dot{\phi}_{sj}(t) \end{aligned}, t \in (t_k, t_k + T];$$

[0221] 其中 $\tilde{\Theta}_{ji}(t)$ 为用于修正未来某一时刻 $t \in (t_k, t_k + T]$ 仿真响应的预测/仿真响应比,直接取作当前时刻实测/仿真响应比 $\bar{\Theta}_{ji}(t_k)$ 。

[0222] 在未来某一时刻的响应比 $\Theta_{ji}$ ;既是所预测的时刻 $t$ 的函数(响应比是时间的缓变函数),又是当前时刻 $t_k$ 的函数;显然,预测是在当前时刻 $t_k$ 做出的,对某一特定时刻 $t$ 做出的预测将随着当前时刻向前流逝而不断地滚动更新。同理,随着历史实测数据的不断获取,仿真值和预测值也在滚动更新。因此实际上,所有未来值都是当前时刻 $t_k$ 的函数,可以分别写作 $\tilde{\Theta}_{ji}(t, t_k)$ ,  $\dot{\phi}_{sj}(t, t_k)$ 和 $\tilde{\phi}_{sj}(t, t_k)$ ,但在当前时刻 $t_k$ ,将其略去。

[0223] 在本实施方式中,主星姿态补偿模型中当前时刻的实测/仿真响应比 $\bar{\Theta}_{ji}(t_k)$ 可以基于递推最小二乘法实时滚动修正,具体方法包括:

[0224] 取预测响应 $\hat{\phi}_{sj}$ 为参数估计模型中的输出变量 $y(k)$ ,取历史时刻的仿真响应 $\dot{\phi}_{sj}$ 为参数估计模型中的输入变量 $\varphi$ ,取响应比 $\Theta_{ji}$ 为待估计参数 $\theta$ ,在 $t_k$ 时刻的迭代结果 $\theta(t_k)$ 即为

所要估计的当前时刻实测/仿真响应比  $\bar{\Theta}_{ji}(t_k)$ ，代入最小二乘法的递推式，得到下述参数估计模型：

$$[0225] \quad \bar{\Theta}_{ji}(t_k) = \bar{\Theta}_{ji}(t_{k-1}) + R(t_{k-1}) \left[ \hat{\dot{\phi}}_{Sj}(t_k) - \dot{\phi}_{Sj}(t_k) \bar{\Theta}_{ji}(t_{k-1}) \right]$$

$$[0226] \quad P(t_k) = \frac{1}{\lambda} \left[ 1 - R(t_k) \dot{\phi}_{Sj}(t_k) \right] P(t_{k-1})$$

$$[0227] \quad R(t_k) = \frac{P(t_{k-1}) \dot{\phi}_{Sj}(t_k)}{\lambda + \dot{\phi}_{Sj}(t_k) P(t_{k-1}) \dot{\phi}_{Sj}(t_k)}$$

[0228] 其中  $\bar{\Theta}_{ji}$  的初值  $\bar{\Theta}_{ji}(t_1)$  设为1，R为参数估计模型的迭代中间参数，不具备实质定义，P的初值为一个足够大的正实数，如  $10^7$ ，获取后续每个时刻的仿真响应和实测响应，并依据参数估计模型实时更新对应的K、P和 $\theta$ 。

[0229] 参数估计模型的实现方法包括：

[0230] 步骤401、设定迭代参数初值  $\bar{\Theta}_{ji}(t_1)$  和  $P(t_1)$ ；

[0231] 步骤402、依据不断获取实时更新后的当前时刻  $t_k$  的主星姿态角速度实测值  $\hat{\dot{\phi}}_{Sj}(t_k)$  以及姿态角实测值  $\hat{\phi}_{Sj}(t_k)$ ，以得到实时更新后所有历史数据；

[0232] 步骤403、根据所述的参数估计模型，不断实时更新当前时刻实测/仿真响应比  $\bar{\Theta}_{ji}(t_k)$ ；

[0233] 步骤404、将  $\hat{\dot{\phi}}_{Sj}(t_k)$  和  $\hat{\phi}_{Sj}(t_k)$  作为运动学仿真的初始状态，获取未来机械臂运动指令  $\dot{\phi}_{M(\text{cmd})}$ ，并认为机械臂在良好受控条件下，其运动状态  $\dot{\phi}_M$  与运动指令  $\dot{\phi}_{M(\text{cmd})}$  相同，计算未来  $t \in (t_k, t_k+T]$  时间内的仿真响应  $\dot{\phi}_{Sj}(t)$ ，在仿真过程中，将求得的每个时刻的仿真响应  $\dot{\phi}_{Sj}(t)$  立刻修正为预测响应  $\tilde{\dot{\phi}}_{Sj}(t)$ ，并用于后续的积分计算；

[0234] 步骤405、当前时刻递增为  $t_{k+1}$ ，转步骤402步，循环更新。

[0235] 实施例2：

[0236] 本发明还提供了一种星-臂耦合系统主星姿态高精度预报系统，其特征在于，包括：

[0237] 建模单元，用于获取空间机器人的主星-机械臂耦合系统运动学方程，并建立目标仿真模型和主星姿态补偿模型；

[0238] 数据获取单元，基于主星姿态补偿模型获取主星姿态角的预测值，即为原始预测值；

[0239] 建模单元，建立用于实时滚动更新当前时刻实测/仿真响应比的主星姿态补偿模型；基于主星姿态补偿模型不断滚动修正所述目标仿真模型的等效线性参数，进而预报未来时刻的预测响应，记为修正预测值；

[0240] 精度评价单元，比较所述修正预测值相较原始预测值的预测精度，通过主星姿态角预测值在某一时刻  $t$  的相对误差进行评价。

[0241] 作为本发明实施例的一种优选方案,所述建模单元包括:

[0242] 获取所有历史时刻的主星姿态角速度的仿真响应和实测响应,并通过对所有历史数据的实测/仿真响应比加权求和获取不断更新的当前时刻的实测/仿真响应比,即为主星姿态补偿模型。

[0243] 本发明通过以上三个单元实现:获取动力学方程来预报当前时刻或未来时刻主星姿态的目标仿真模型,即为主星姿态角速度与机械臂关节角速度的等效线性关系式,即为目标仿真模型,并通过对历史时刻的实测/仿真响应比的加权求和不断滚动更新当前时刻的实测/仿真响应比,从而滚动修正等效线性关系式的等效线性参数,进而预报未来时刻的预测响应;基于滚动修正的思路,不断修正目标仿真模型的等效线性参数,使得目标仿真模型误差的影响不会随着预报时间的延长而不断积累。

[0244] 该系统既可以在在使用当前条件下的信息经过修正后预测未来,也可以使用过去的信息预测现在,因此适用于空间机器人的遥操作应用;可以在消耗较小的算力资源条件下,对于较大参数误差(可达30%)仍然可以得到较好的预报效果,因此该方法可以不依赖于前置条件独立形成预报能力。最主要的是通过精度评价单元获取主星姿态角预测值在某一时刻 $t$ 的相对误差来提高预报精度。

[0245] 虽然,上文中已经用一般性说明及具体实施例对本发明作了详尽的描述,但在本发明基础上,可以对之作一些修改或改进,这对本领域技术人员而言是显而易见的。因此,在不偏离本发明精神的基础上所做的这些修改或改进,均属于本发明要求保护的范围。

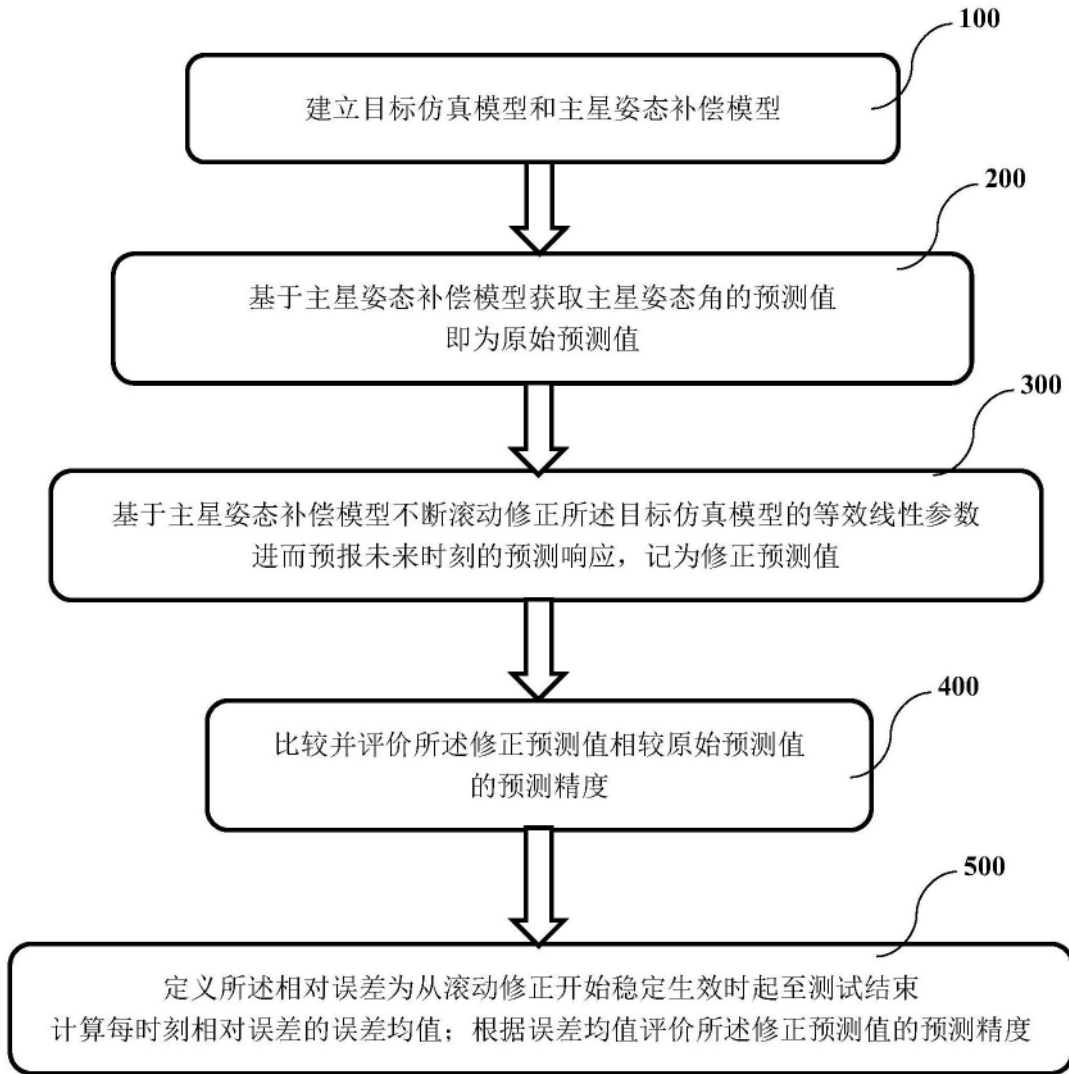


图1

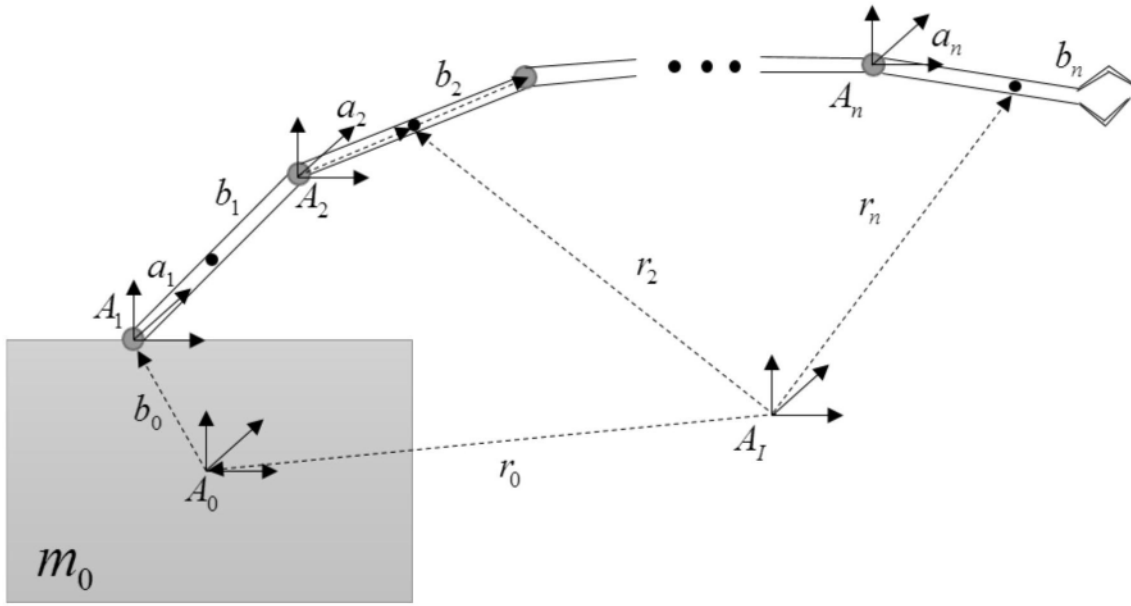


图2