

(12) 按照专利合作条约所公布的国际申请

(19) 世界知识产权组织
国际局

(43) 国际公布日
2020 年 1 月 9 日 (09.01.2020)



(10) 国际公布号
WO 2020/007305 A1

- (51) 国际专利分类号:
B25J 9/16 (2006.01)
- (21) 国际申请号: PCT/CN2019/094431
- (22) 国际申请日: 2019 年 7 月 2 日 (02.07.2019)
- (25) 申请语言: 中文
- (26) 公布语言: 中文
- (30) 优先权:
201810711257.6 2018 年 7 月 3 日 (03.07.2018) CN
- (71) 申请人: 上海节卡机器人科技有限公司
(SHANGHAI JAKA ROBOTICS LTD.) [CN/CN]; 中国上海市中国 (上海) 自由贸易试验区耀华路 251 号一幢一层, Shanghai 200120 (CN)。
- (72) 发明人: 朱向阳 (ZHU, Xiangyang); 中国上海市中国 (上海) 自由贸易试验区耀华路 251 号一幢一层, Shanghai 200120 (CN)。 李
- 明洋 (LI, Mingyang); 中国上海市中国 (上海) 自由贸易试验区耀华路 251 号一幢一层, Shanghai 200120 (CN)。
- (74) 代理人: 北京超凡宏宇专利代理事务所 (特殊普通合伙) (CHOFN INTELLECTUAL PROPERTY); 中国北京市海淀区北四环西路 68 号左岸工社 1215-1218 室, Beijing 100080 (CN)。
- (81) 指定国 (除另有指明, 要求每一种可提供的国家保护): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL,

(54) Title: DRAGGING DEMONSTRATION SYSTEM AND METHOD

(54) 发明名称: 拖动示教系统和方法

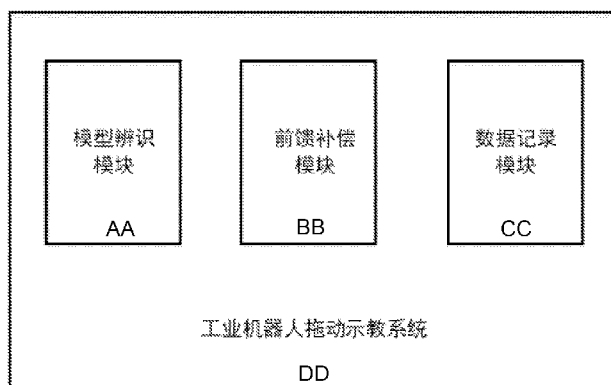


图 1

- AA Model identification module
BB Feedforward compensation module
CC Data recording module
DD Industrial robot dragging demonstration system

(57) Abstract: A dragging demonstration system and method. The dragging demonstration system comprises: a model identification module configured to build a static model of a robot and identify model parameters, wherein the static model comprises a gravity model and a Coulomb friction model; a feedforward compensation module configured to convey the identified model parameters to a current ring of each joint motor of the robot in a feedforward way according to the identified model parameters; and a data recording module configured to record the position information of each joint of the robot so that the robot can repeat the demonstration action. The system and method can make a user push the robot quite easily to implement dragging demonstration.

SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG,
US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW。

- (84) 指定国 (除另有指明, 要求每一种可提供的地区
保护): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ,
NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), 欧亚 (AM,
AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), 欧洲 (AL, AT, BE, BG,
CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU,
IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT,
RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI,
CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG)。

本国际公布:

- 包括国际检索报告 (条约第21条(3))。

(57) 摘要: 一种拖动示教系统和方法, 其中, 拖动示教系统包含: 模型辨识模块, 建立机器人的静力学模型, 并辨识出模型参数, 其中, 静力学模型包含重力学模型和库仑摩擦力模型; 前馈补偿模块, 根据辨识出的模型参数, 以前馈的方式传送给机器人各关节电机的电流环; 数据记录模块, 记录机器人各关节的位置信息, 用于机器人复现示教的动作。该系统和方法可以使用户很轻松地推起机器人, 完成牵引示教。

拖动示教系统和方法

相关申请的交叉引用

本申请要求于 2018 年 07 月 03 日提交中国专利局的申请号为 201810711257.6、名称为“拖动示教系统和方法”的中国专利申请的优先权，其全部内容通过引用结合在本申请中。

技术领域

本申请涉及工业机器人控制技术领域，具体涉及一种拖动示教系统和方法。

背景技术

拖动示教又称直接示教或者手动示教，是人机协作的主要方式之一，即人直接通过手动拖动的方式完成对机器人的示教编程工作。传统的示教方式主要依赖于示教器，而这样的示教方式具有工作效率较低，过程繁琐不直观，对操作人员知识水平要求高的特点。采用拖动示教的方式比较直观，且对现场操作人员的要求大大降低。

发明内容

本申请的目的包括例如提供一种拖动示教系统和方法，可以使用户很轻松地推起机器人，完成牵引示教。

本申请通过实施例实现了一种拖动示教系统，其特点是，适用于机器人，该拖动示教系统包含：

模型辨识模块，建立机器人的静力学模型，并辨识出模型参数，其中，静力学模型包含重力学模型和库仑摩擦力模型；

前馈补偿模块，根据辨识出的模型参数，以前馈的方式传送给机器人各关节电机的电流环；

数据记录模块，记录机器人各关节的位置信息，用于机器人复现示教的动作。

可选地，在本申请实施例中，所述机器人的静力学模型表示为：

$$\tau_i = -\mathbf{z}_0^T \cdot \left[\sum_{j=i}^n m_j (\mathbf{p}_{i-1,j} + R_j^{i-1} \cdot \mathbf{r}_j) \right] \times (R_0^{i-1} \cdot \mathbf{g}) + f_i \cdot \text{sgn}(\dot{q}_i) \quad (1)$$

式 (1) 中 i 表示第 i 个连杆， $\mathbf{z}_0$ 为常向量 $[0 \ 0 \ 1]^T$ ， m_j 为第 j 个连杆的质量， $\mathbf{p}_{i-1,j}$ 为在第 $i-1$ 个连杆坐标系下由该坐标系原点指向第 j 个连杆坐标系原点的向量， R_j^{i-1} 为第 j 个连杆坐标系到第 $i-1$ 个连杆坐标系的旋转矩阵， $\mathbf{r}_j$ 为第 j 个连杆坐标系下的连杆质心坐标， $\mathbf{g}$

为世界坐标系下的重力加速度向量, f_i 为该连杆近端关节的库仑摩擦力, $\text{sgn}(\cdot)$ 为取符号运算符, $\dot{q}_i$ 为第 i 关节速度, n 为机器人关节数;

令 $\boldsymbol{\tau} = [\tau_1 \cdots \tau_i \cdots \tau_n]^T$, $\boldsymbol{\pi} = [\boldsymbol{\pi}_g^T \boldsymbol{\pi}_f^T]^T$, 其中, $\boldsymbol{\pi}_g = g \cdot [m_1 \mathbf{r}_1^T \ m_1 \cdots m_i \mathbf{r}_i^T \ m_i \cdots m_n \mathbf{r}_n^T \ m_n]^T$, g 为加速度常数, $\boldsymbol{\pi}_f = [f_1 \cdots f_i \cdots f_n]^T$, 则式 (1) 可表述为;

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{Y} \cdot \boldsymbol{\pi} \quad (2)$$

式中, $\mathbf{Y} = [\mathbf{Y}_g \ \mathbf{Y}_f]$, 即回归矩阵,

$$\mathbf{Y}_g = \begin{bmatrix} \mathbf{z}_0^T \cdot S(\mathbf{z}_g) \cdot [R_1^0 \ \mathbf{p}_{0,1} \cdots R_i^0 \ \mathbf{p}_{0,i} \cdots R_n^0 \ \mathbf{p}_{0,n}] \\ \vdots \\ \mathbf{z}_0^T \cdot S(R_0^{i-1} \cdot \mathbf{z}_g) \cdot [0 \ 0 \cdots R_i^{i-1} \ \mathbf{p}_{i-1,i} \cdots R_n^{i-1} \ \mathbf{p}_{i-1,n}] \\ \vdots \\ \mathbf{z}_0^T \cdot S(R_0^{n-1} \cdot \mathbf{z}_g) \cdot [0 \ 0 \cdots 0 \ 0 \cdots R_n^{n-1} \ \mathbf{p}_{n-1,n}] \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{Y}_f = \begin{bmatrix} \text{sgn}(\dot{q}_1) \cdots 0 \cdots 0 \\ \vdots \\ 0 \cdots \text{sgn}(\dot{q}_i) \cdots 0 \\ \vdots \\ 0 \cdots 0 \cdots \text{sgn}(\dot{q}_n) \end{bmatrix}$$

式中, $S(\cdot)$ 为叉积算子, $\mathbf{Y}_g$ 为 $(n \times 4n)$ 的矩阵, $\mathbf{Y}_f$ 为 $(n \times n)$ 的对角矩阵, $\mathbf{z}_g$ 为指向和 $\mathbf{g}$ 相同的单位向量;

依据式(2)并应用最小二乘法辨识出机器人的静力学模型, 即:

$$\boldsymbol{\pi}^* = (\mathbf{Y}^T \cdot \mathbf{Y})^{-1} \cdot \mathbf{Y}^T \cdot \mathbf{T} \quad (3)$$

式中, $\mathbf{Y} = \begin{bmatrix} \mathbf{Y}_g^* \\ \mathbf{M} \\ \mathbf{Y}_f^* \end{bmatrix}$, $\boldsymbol{\pi}^* = (\mathbf{Y}^T \cdot \mathbf{Y})^{-1} \cdot \mathbf{Y}^T \cdot \mathbf{T}$ 。

可选地, 在本申请实施例中, 所述机器人各关节的位置信息包含:

机器人关键点的位置或拖动示教时的拖动轨迹。

可选地, 在本申请实施例中, 将机器人各关节反馈速度经过一预设截至频率的滤波器滤波, 以降低速度信号中的噪声信号; 在此基础上叠加一定阈值一定频率的方波信号用以克服拖动示教功能起始时的静摩擦力, 阈值的设置和静摩擦力的大小有关, 频率的设置与启动效果有关。在机器人运动起来后, 该方波信号迅速衰减至零以提升拖动示教的舒适性。

可选地, 在本申请实施例中, 按照公式 $\boldsymbol{\tau} = \mathbf{Y}^* \boldsymbol{\pi}^*$ 将一个完整周期的实验数据带入 $\mathbf{Y}^*$ 中, 算出一组由所述静力学模型预测的转矩值, 并将所述转矩值与记录的电流指令做比较, 以验证辨识的静力学模型参数正确与否。

本申请实施例还公开了一种拖动示教方法, 其特点是, 包含以下步骤:

S1、建立机器人的静力学模型，并辨识出模型参数，其中，静力学模型包含重力学模型和库仑摩擦力模型；

S2、根据辨识出的模型参数，以前馈的方式传送给机器人各关节电机的电流环；

S3、记录机器人各关节的位置信息，用于机器人复现示教的动作。

可选地，在本申请实施例中，所述机器人的静力学模型表示为：

$$\tau_i = -\mathbf{z}_0^T \cdot \left[\sum_{j=i}^n m_j (\mathbf{p}_{i-1,j} + R_j^{i-1} \cdot \mathbf{r}_j) \right] \times (R_0^{i-1} \cdot \mathbf{g}) + f_i \cdot \text{sgn}(\dot{q}_i) \quad (1)$$

式(1)中 i 表示第 i 个连杆， $\mathbf{z}_0$ 为常向量 $[0 \ 0 \ 1]^T$ ， m_j 为第 j 个连杆的质量， $\mathbf{p}_{i-1,j}$ 为在第 $i-1$ 个连杆坐标系下由该坐标系原点指向第 j 个连杆坐标系原点的向量， R_j^{i-1} 为第 j 个连杆坐标系到第 $i-1$ 个连杆坐标系的旋转矩阵， $\mathbf{r}_j$ 为第 j 个连杆坐标系下的连杆质心坐标， $\mathbf{g}$ 为世界坐标系下的重力加速度向量， f_i 为该连杆近端关节的库仑摩擦力， $\text{sgn}(\cdot)$ 为取符号运算符， $\dot{q}_i$ 为第 i 关节速度， n 为机器人关节数；

令 $\boldsymbol{\tau} = [\tau_1 \ \cdots \ \tau_i \ \cdots \ \tau_n]^T$ ， $\boldsymbol{\pi} = [\boldsymbol{\pi}_g^T \ \boldsymbol{\pi}_f^T]^T$ ，其中， $\boldsymbol{\pi}_g = \mathbf{g} \cdot [m_1 \mathbf{r}_1^T \ m_1 \ \cdots \ m_i \mathbf{r}_i^T \ m_i \ \cdots \ m_n \mathbf{r}_n^T \ m_n]^T$ ， $\mathbf{g}$ 为加速度常数， $\boldsymbol{\pi}_f = [f_1 \ \cdots \ f_i \ \cdots \ f_n]^T$ ，则式(1)可表述为：

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{Y} \cdot \boldsymbol{\pi} \quad (2)$$

式中， $\mathbf{Y} = [\mathbf{Y}_g \ \mathbf{Y}_f]$ ，即回归矩阵，

$$\mathbf{Y}_g = \begin{bmatrix} \mathbf{z}_0^T \cdot \mathbf{S}(\mathbf{z}_g) \cdot [\mathbf{R}_1^0 \ \mathbf{p}_{0,1} \ \cdots \ \mathbf{R}_i^0 \ \mathbf{p}_{0,i} \ \cdots \ \mathbf{R}_n^0 \ \mathbf{p}_{0,n}] \\ \vdots \\ \mathbf{z}_0^T \cdot \mathbf{S}(\mathbf{R}_0^{i-1} \cdot \mathbf{z}_g) \cdot [\mathbf{0} \ \mathbf{0} \ \cdots \ \mathbf{R}_i^{i-1} \ \mathbf{p}_{i-1,i} \ \cdots \ \mathbf{R}_n^{i-1} \ \mathbf{p}_{i-1,n}] \\ \vdots \\ \mathbf{z}_0^T \cdot \mathbf{S}(\mathbf{R}_0^{n-1} \cdot \mathbf{z}_g) \cdot [\mathbf{0} \ \mathbf{0} \ \cdots \ \mathbf{0} \ \mathbf{0} \ \cdots \ \mathbf{R}_n^{n-1} \ \mathbf{p}_{n-1,n}] \end{bmatrix} ;$$

$$\mathbf{Y}_f = \begin{bmatrix} \text{sgn}(\dot{q}_1) & \cdots & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & & & & \\ 0 & \cdots & \text{sgn}(\dot{q}_i) & \cdots & 0 \\ \vdots & & & & \\ 0 & \cdots & 0 & \cdots & \text{sgn}(\dot{q}_n) \end{bmatrix}$$

式中， $\mathbf{S}(\cdot)$ 为叉积算子， $\mathbf{Y}_g$ 为 $(n \times 4n)$ 的矩阵， $\mathbf{Y}_f$ 为 $(n \times n)$ 的对角矩阵， $\mathbf{z}_g$ 为指向和 $\mathbf{g}$ 相同的单位向量；

依据式(2)并应用最小二乘法辨识出机器人的静力学模型，即：

$$\boldsymbol{\pi}^* = (\mathbf{Y}^T \cdot \mathbf{Y})^{-1} \cdot \mathbf{Y}^T \cdot \mathbf{T} \quad (3)$$

式中， $\mathbf{Y} = \begin{bmatrix} \mathbf{Y}_g^T \\ \mathbf{M} \\ \mathbf{Y}_f^T \end{bmatrix}$ ， $\boldsymbol{\pi}^* = (\mathbf{Y}^T \cdot \mathbf{Y})^{-1} \cdot \mathbf{Y}^T \cdot \mathbf{T}$ 。

可选地，在本申请实施例中，所述机器人各关节的位置信息包含：

机器人关键点的位置或拖动示教时的拖动轨迹。

可选地，在本申请实施例中，将机器人各关节反馈速度经过一预设截至频率的滤波器滤波，以降低速度信号中的噪声信号；在此基础上叠加一定阈值一定频率的方波信号用以克服拖动示教功能起始时的静摩擦力，阈值的设置和静摩擦力的大小有关，频率的设置与启动效果有关。在机器人运动起来后，该方波信号迅速衰减至零以提升拖动示教的舒适性。

可选地，在本申请实施例中，按照公式 $\tau = Y^* \hat{\theta}^*$ 将一个完整周期的实验数据带入 Y^* 中，算出一组由所述静力学模型预测的转矩值，并将所述转矩值与记录的电流指令做比较，以验证辨识的静力学模型参数正确与否。

根据本申请的一种拖动示教系统和方法与现有技术相比具有以下优点：

本申请无需多维力传感器，系统简洁、成本低、示教灵活，示教效率高，为各类运动轨迹复杂的机器人示教开辟了新途径。

附图说明

图 1 为根据本申请的一种拖动示教系统的整体结构框图；

图 2 为根据本申请的一种拖动示教方法的流程图；

图 3 为模型辨识模块的辨识效果验证图；

图 4 为前馈补偿模块的第六关节效果图；

图 5 为记录的拖动示教过程中的第六关节轨迹图。

具体实施方式

体现本申请特征与优点的实施例将在后段的说明中详细叙述。应理解的是本申请能够在不同的示例上具有各种的变化，其皆不脱离本申请的范围，且其中的说明及图示在本质上当作说明之用，而非用以限制本申请。

本申请实施例公开了一种拖动示教系统，适用于机器人，如图 1 所示，该拖动示教系统包含：模型辨识模块，建立机器人的静力学模型，并辨识出模型参数，其中，静力学模型包含重力学模型和库仑摩擦力模型；前馈补偿模块，根据辨识出的模型参数，以前馈的方式传送给机器人各关节电机的电流环；数据记录模块，记录机器人各关节的位置信息，用于机器人复现示教的动作。

在本申请实施例中，作为一种实施方式，所述机器人的静力学模型表示为：

$$\tau_i = -\mathbf{z}_0^T \cdot \left[\sum_{j=i}^n m_j (\mathbf{p}_{i-1,j} + R_j^{i-1} \cdot \mathbf{r}_j) \right] \times (R_0^{i-1} \cdot \mathbf{g}) + f_i \cdot \text{sgn}(\dot{q}_i) \quad (1)$$

式 (1) 中 i 表示第 i 个连杆， $\mathbf{z}_0$ 为常向量 $[0 \ 0 \ 1]^T$ ， m_j 为第 j 个连杆的质量， $\mathbf{p}_{i-1,j}$ 为在第 $i-1$ 个连杆坐标系下由该坐标系原点指向第 j 个连杆坐标系原点的向量， R_j^{i-1} 为第 j 个连杆坐标系到第 $i-1$ 个连杆坐标系的旋转矩阵， $\mathbf{r}_j$ 为第 j 个连杆坐标系下的连杆质心坐标， $\mathbf{g}$

为世界坐标系下的重力加速度向量, f_i 为该连杆近端关节的库仑摩擦力, $\text{sgn}(\dot{q}_i)$ 为取符号运算符, $\dot{q}_i$ 为第 i 关节速度, n 为机器人关节数;

令 $\tau = [\tau_1 \cdots \tau_i \cdots \tau_n]^T$, $\pi = [\pi_g^T \pi_f^T]^T$, 其中, $\pi_g = g \cdot [m_1 r_1^T \ m_1 \cdots m_i r_i^T \ m_i \cdots m_n r_n^T \ m_n]^T$, g 为加速度常数, $\pi_f = [f_1 \cdots f_i \cdots f_n]^T$, 则式 (1) 可表述为;

$$\tau = Y \cdot \pi \quad (2)$$

式中, $Y = [Y_g \ Y_f]$, 即回归矩阵,

$$Y_g = \begin{bmatrix} z_0^T \cdot S(z_g) \cdot [R_1^0 \ p_{0,1} \cdots R_i^0 \ p_{0,i} \cdots R_n^0 \ p_{0,n}] \\ \vdots \\ z_0^T \cdot S(R_0^{i-1} \cdot z_g) \cdot [0 \ 0 \cdots R_i^{i-1} \ p_{i-1,i} \cdots R_n^{i-1} \ p_{i-1,n}] \\ \vdots \\ z_0^T \cdot S(R_0^{n-1} \cdot z_g) \cdot [0 \ 0 \cdots 0 \ 0 \cdots R_n^{n-1} \ p_{n-1,n}] \end{bmatrix};$$

$$Y_f = \begin{bmatrix} \text{sgn}(\dot{q}_1) & \cdots & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & & & & \\ 0 & \cdots & \text{sgn}(\dot{q}_i) & \cdots & 0 \\ \vdots & & & & \\ 0 & \cdots & 0 & \cdots & \text{sgn}(\dot{q}_n) \end{bmatrix}$$

式中, $S(\cdot)$ 为叉积算子, Y_g 为 $(n \times 4n)$ 的矩阵, Y_f 为 $(n \times n)$ 的对角矩阵, z_g 为指向和 g 相同的单位向量;

依据式(2)并应用最小二乘法辨识出机器人的静力学模型, 即:

$$\pi^* = (Y^T \cdot Y)^{-1} \cdot Y^T \cdot T \quad (3)$$

式中, $Y = \begin{bmatrix} Y_g^T \\ Y_f^T \end{bmatrix}$, $\pi^* = (Y^T \cdot Y)^{-1} \cdot Y^T \cdot T$ 。

在本申请实施例中, 作为一种实施方式, 所述机器人各关节的位置信息包含: 机器人关键点的位置或拖动示教时的拖动轨迹。

结合上述的拖动示教系统, 本申请还公开了一种应用于上述拖动示教系统的拖动示教方法, 如图 2 所示, 包含以下步骤:

S1、建立机器人的静力学模型, 并辨识出模型参数, 其中, 静力学模型包含重力学模型和库仑摩擦力模型。

S2、根据辨识出的模型参数, 以前馈的方式传送给机器人各关节电机的电流环。

具体地, 将机器人各关节反馈速度经过一预设截至频率的滤波器滤波, 以降低速度信号中的噪声信号;

在此基础上叠加一定阈值一定频率的方波信号用以克服拖动示教功能起始时的静摩擦力，阈值的设置和静摩擦力的大小有关，频率的设置与启动效果有关。在机器人运动起来后，该方波信号迅速衰减至零以提升拖动示教的舒适性。

在本申请实施例中，作为一种具体示例，辨识出机器人的模型参数，这里以型号为 A-05-2 的富士康机器人为例，其 DH 参数参见表 1。

表 1 该串联旋转关节机器人 DH 参数表

连杆序号	α (rad)	a (mm)	d (mm)	θ (rad)
1	$-\pi/2$	75	360	0
2	0	270	0	$-\pi/2$
3	$-\pi/2$	110	0	0
4	$\pi/2$	0	306	0
5	$-\pi/2$	0	0	0
6	0	0	0	0

按照公式 (2)，可以算出该机器人的回归矩阵 Y (6×30)，按照去除 Y 中线性相关列向量的规则，可以得出 Y 中第 1、2、3、4、7、8、10、12、14、16、18、20、23、24 列可以去除，从而得到 Y^* (6×16)。

在本申请实施例中，用 dSPACE 的 MicroLabBox 控制该机器人；在实验过程中，让机器人每个关节跟踪一个周期为 400s 的正弦信号，其幅值从第一轴到第六轴依次为 π 、 0.4π 、 0.3π 、 π 、 π 、 π ；同时每个关节的反馈位置和电流/转矩指令被记录下来并转换到连杆侧。在本实施例中，分别从正负向两段数据中随机抽取 500 个数据点，分别计算 Y^* ，继而将各点对应的 τ ， Y^* 按以下形式排列：

$$Y = \begin{bmatrix} Y_1^* \\ M \\ Y_{1000}^* \end{bmatrix}, \quad T = \begin{bmatrix} \tau_1^T & L & \tau_{1000}^T \end{bmatrix}^T, \quad \text{式中 } Y \text{ 为 } (6000 \times 16) \text{ 的矩阵, } T \text{ 为 } (6000 \times 1) \text{ 的列向量。}$$

量。

最后按照公式 (3) 计算出静力学模型参数 π^* (见表 2)，其中前 10 个模型参数为重力参数，后 6 个模型参数为摩擦力参数；为验证辨识的静力学模型参数正确与否，按照公式 $\tau = Y^* g \pi^*$ 将一个完整周期的实验数据带入 Y^* 中，算出一组由静力学模型预测的转矩值，并将其与记录的电流指令（连杆侧）做比较，结果如图 3 所示，预测指令和实验数据一致性很好，说明辨识的模型参数是正确的。

表 2 辨识的静力学模型参数值

模型参数	值 (N.m)	标准差 σ (N.m)
$\pi^*(1)$	57.6236	0.1694
$\pi^*(2)$	0.3428	0.1015
$\pi^*(3)$	13.0967	0.0845

$\pi^*(4)$	25.7057	0.0840
$\pi^*(5)$	0.1663	0.0437
$\pi^*(6)$	-0.2694	0.0523
$\pi^*(7)$	-0.0069	0.0158
$\pi^*(8)$	3.4484	0.0106
$\pi^*(9)$	3.1992	0.0048
$\pi^*(10)$	-0.9099	0.0049
$\pi^*(11)$	10.6672	0.0238
$\pi^*(12)$	12.8996	0.0689
$\pi^*(13)$	8.3933	0.0615
$\pi^*(14)$	4.9496	0.0219
$\pi^*(15)$	3.1910	0.0075
$\pi^*(16)$	1.1455	0.0029

在这基础上，将辨识的模型参数应用到公式(2)中，经适当改进就可以用前馈的方式加入电流环中，这里以第六关节为例具体介绍改进之处，首先为去除速度信号中的噪声，用截至频率为 10Hz 的一阶滤波器对其滤波；其次，由于公式(2)中的 $\text{sgn}(\dot{q}_i)$ 具有不连续性，用连续函数 $\frac{2}{\pi} \text{atan}(K \cdot \dot{q}_i)$ 替换，这里 $\dot{q}_i$ 的单位为弧度每秒， K 取 500；最后，在六关节电流环中叠加一个频率为 20Hz 幅值在第六关节静止时为辨识出的摩擦力大小两倍的方波，并且其幅值随第六关节速度增大而成指数形式衰减，最后的补偿效果如图 4 所示，前五秒第六关节保持静止，可以明显看到方波，后五秒第六关节在手的拖动下往复运动，可以看到方波几乎衰减到零，而库伦摩擦补偿占据主导地位。

S3、记录机器人各关节的位置信息，用于机器人复现示教的动作。

具体地，如图 5 所示，为数据记录模块记录的第六关节的拖动轨迹，由于等时间间隔记录，该轨迹可以很方便对时间进行缩放，从而在复现示教路径时能够以不同速度执行。

尽管本申请的内容已经通过上述优选实施例作了详细介绍，但应当认识到上述的描述不应被认为是对本申请的限制。在本领域技术人员阅读了上述内容后，对于本申请的多种修改和替代都将是显而易见的。因此，本申请的保护范围应由所附的权利要求来限定。

工业实用性

本申请提供的拖动示教系统和方法可以使用户很轻松地推起机器人，完成牵引示教，无需多维力传感器，且系统简洁、成本低、示教灵活，示教效率高，为各类运动轨迹复杂的机器人示教开辟了新途径。

权利要求书

1. 一种拖动示教系统，其特征在于，适用于机器人，该拖动示教系统包含：

模型辨识模块，建立机器人的静力学模型，并辨识出模型参数，其中，所述静力学模型包含重力学模型和库仑摩擦力模型；

前馈补偿模块，根据辨识出的模型参数，以前馈的方式传送给机器人各关节电机的电流环；

数据记录模块，记录机器人各关节的位置信息，用于机器人复现示教的动作。

2. 如权利要求 1 所述的拖动示教系统，其特征在于，所述机器人的静力学模型表示为：

$$\tau_i = -\mathbf{z}_0^T \cdot \left[\sum_{j=i}^n m_j (\mathbf{p}_{i-1,j} + R_j^{i-1} \cdot \mathbf{r}_j) \right] \times (R_0^{i-1} \cdot \mathbf{g}) + f_i \cdot \text{sgn}(\dot{q}_i) \quad (1)$$

式 (1) 中 i 表示第 i 个连杆， $\mathbf{z}_0$ 为常向量 $[0 \ 0 \ 1]^T$ ， m_j 为第 j 个连杆的质量， $\mathbf{p}_{i-1,j}$ 为在第 $i-1$ 个连杆坐标系下由该坐标系原点指向第 j 个连杆坐标系原点的向量， R_j^{i-1} 为第 j 个连杆坐标系到第 $i-1$ 个连杆坐标系的旋转矩阵， $\mathbf{r}_j$ 为第 j 个连杆坐标系下的连杆质心坐标， $\mathbf{g}$ 为世界坐标系下的重力加速度向量， f_i 为该连杆近端关节的库仑摩擦力， $\text{sgn}(\cdot)$ 为取符号运算符， $\dot{q}_i$ 为第 i 关节速度， n 为机器人关节数；

令 $\boldsymbol{\tau} = [\tau_1 \ \cdots \ \tau_i \ \cdots \ \tau_n]^T$ ， $\boldsymbol{\pi} = [\boldsymbol{\pi}_g^T \ \boldsymbol{\pi}_f^T]^T$ ，其中， $\boldsymbol{\pi}_g = \mathbf{g} \cdot [m_1 \mathbf{r}_1^T \ m_1 \ \cdots \ m_i \mathbf{r}_i^T \ m_i \ \cdots \ m_n \mathbf{r}_n^T \ m_n]^T$ ， $\mathbf{g}$ 为加速度常数， $\boldsymbol{\pi}_f = [f_1 \ \cdots \ f_i \ \cdots \ f_n]^T$ ，则式 (1) 可表述为：

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{Y} \cdot \boldsymbol{\pi} \quad (2)$$

式中， $\mathbf{Y} = [\mathbf{Y}_g \ \mathbf{Y}_f]$ ，即回归矩阵，

$$\mathbf{Y}_g = \begin{bmatrix} \mathbf{z}_0^T \cdot \mathbf{S}(\mathbf{z}_g) \cdot [\mathbf{R}_1^0 \ \mathbf{p}_{0,1} \ \cdots \ \mathbf{R}_i^0 \ \mathbf{p}_{0,i} \ \cdots \ \mathbf{R}_n^0 \ \mathbf{p}_{0,n}] \\ \vdots \\ \mathbf{z}_0^T \cdot \mathbf{S}(\mathbf{R}_0^{i-1} \cdot \mathbf{z}_g) \cdot [\mathbf{0} \ \mathbf{0} \ \cdots \ \mathbf{R}_i^{i-1} \ \mathbf{p}_{i-1,i} \ \cdots \ \mathbf{R}_n^{i-1} \ \mathbf{p}_{i-1,n}] \\ \vdots \\ \mathbf{z}_0^T \cdot \mathbf{S}(\mathbf{R}_0^{n-1} \cdot \mathbf{z}_g) \cdot [\mathbf{0} \ \mathbf{0} \ \cdots \ \mathbf{0} \ \mathbf{0} \ \cdots \ \mathbf{R}_n^{n-1} \ \mathbf{p}_{n-1,n}] \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{Y}_f = \begin{bmatrix} \text{sgn}(\dot{q}_1) & \cdots & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & & & & \\ 0 & \cdots & \text{sgn}(\dot{q}_i) & \cdots & 0 \\ \vdots & & & & \\ 0 & \cdots & 0 & \cdots & \text{sgn}(\dot{q}_n) \end{bmatrix}$$

式中， $\mathbf{S}(\cdot)$ 为叉积算子， $\mathbf{Y}_g$ 为 $(n \times 4n)$ 的矩阵， $\mathbf{Y}_f$ 为 $(n \times n)$ 的对角矩阵， $\mathbf{z}_g$ 为指向和 $\mathbf{g}$ 相同的单位向量；

依据式(2)并应用最小二乘法辨识出所述机器人的静力学模型，即：

$$\pi^* = (Y^T \cdot Y)^{-1} \cdot Y^T \cdot T \quad (3)$$

式中, $Y = \begin{bmatrix} Y_f \\ M \\ Y_s \end{bmatrix}$, $\pi^* = (Y^T \cdot Y)^{-1} \cdot Y^T \cdot T$ 。

3. 如权利要求 1 或 2 所述的拖动示教系统, 其特征在于, 所述机器人各关节的位置信息包含:

机器人关键点的位置或拖动示教时的拖动轨迹。

4. 如权利要求 1-3 中任一项所述的拖动示教系统, 其特征在于, 将机器人各关节反馈速度经过一预设截至频率的滤波器滤波, 以降低速度信号中的噪声信号; 在此基础上叠加一定阈值一定频率的方波信号用以克服拖动示教功能起始时的静摩擦力, 所述阈值的设置和所述静摩擦力的大小有关, 所述频率的设置与启动效果有关; 在所述机器人运动起来后, 所述方波信号迅速衰减至零。

5. 如权利要求 2-4 中任一项所述的拖动示教系统, 其特征在于, 按照公式 $\tau = Y^* \pi^*$ 将一个完整周期的实验数据带入 Y^* 中, 算出一组由所述静力学模型预测的转矩值, 并将所述转矩值与记录的电流指令做比较, 以验证辨识的静力学模型参数正确与否。

6. 一种拖动示教方法, 其特征在于, 包含以下步骤:

S1、建立机器人的静力学模型, 并辨识出模型参数, 其中, 静力学模型包含重力学模型和库仑摩擦力模型;

S2、根据辨识出的模型参数, 以前馈的方式传送给机器人各关节电机的电流环;

S3、记录机器人各关节的位置信息, 用于机器人复现示教的动作。

7. 如权利要求 6 所述的拖动示教方法, 其特征在于, 所述机器人的静力学模型表示为:

$$\tau_i = -z_0^T \cdot \left[\sum_{j=i}^n m_j (\mathbf{p}_{i-1,j} + R_j^{i-1} \cdot \mathbf{r}_j) \right] \times (R_0^{i-1} \cdot \mathbf{g}) + f_i \cdot \text{sgn}(\dot{q}_i) \quad (1)$$

式 (1) 中 i 表示第 i 个连杆, z_0 为常向量 $[0 \ 0 \ 1]^T$, m_j 为第 j 个连杆的质量, $\mathbf{p}_{i-1,j}$ 为在第 $i-1$ 个连杆坐标系下由该坐标系原点指向第 j 个连杆坐标系原点的向量, R_j^{i-1} 为第 j 个连杆坐标系到第 $i-1$ 个连杆坐标系的旋转矩阵, $\mathbf{r}_j$ 为第 j 个连杆坐标系下的连杆质心坐标, $\mathbf{g}$ 为世界坐标系下的重力加速度向量, f_i 为该连杆近端关节的库仑摩擦力, $\text{sgn}(\cdot)$ 为取符号运算符, $\dot{q}_i$ 为第 i 关节速度, n 为机器人关节数;

令 $\tau = [\tau_1 \ \cdots \ \tau_i \ \cdots \ \tau_n]^T$, $\pi = [\pi_g^T \ \pi_f^T]^T$, 其中, $\pi_g = g \cdot [m_1 \mathbf{r}_1^T \ m_1 \ \cdots \ m_i \mathbf{r}_i^T \ m_i \ \cdots \ m_n \mathbf{r}_n^T \ m_n]^T$, g 为加速度常数, $\pi_f = [f_1 \ \cdots \ f_i \ \cdots \ f_n]^T$, 则式 (1) 可表述为;

$$\tau = Y \cdot \pi \quad (2)$$

式中, $Y = [Y_g \ Y_f]$, 即回归矩阵,

$$Y_g = \begin{bmatrix} \mathbf{z}_0^T \cdot S(\mathbf{z}_g) \cdot [R_1^0 \mathbf{p}_{0,1} \cdots R_i^0 \mathbf{p}_{0,i} \cdots R_n^0 \mathbf{p}_{0,n}] \\ \vdots \\ \mathbf{z}_0^T \cdot S(R_0^{i-1} \cdot \mathbf{z}_g) \cdot [0 \ 0 \cdots R_i^{i-1} \mathbf{p}_{i-1,i} \cdots R_n^{i-1} \mathbf{p}_{i-1,n}] \\ \vdots \\ \mathbf{z}_0^T \cdot S(R_0^{n-1} \cdot \mathbf{z}_g) \cdot [0 \ 0 \cdots 0 \ 0 \cdots R_n^{n-1} \mathbf{p}_{n-1,n}] \end{bmatrix};$$

$$Y_f = \begin{bmatrix} \text{sgn}(\dot{q}_1) & \cdots & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & & & & \\ 0 & \cdots & \text{sgn}(\dot{q}_i) & \cdots & 0 \\ \vdots & & & & \\ 0 & \cdots & 0 & \cdots & \text{sgn}(\dot{q}_n) \end{bmatrix}$$

式中, $S(\cdot)$ 为叉积算子, Y_g 为 $(n \times 4n)$ 的矩阵, Y_f 为 $(n \times n)$ 的对角矩阵, $\mathbf{z}_g$ 为指向和 $\mathbf{g}$ 相同的单位向量;

依据式(2)并应用最小二乘法辨识出所述机器人的静力学模型, 即:

$$\boldsymbol{\pi}^* = (\mathbf{Y}^T \cdot \mathbf{Y})^{-1} \cdot \mathbf{Y}^T \cdot \mathbf{T} \quad (3)$$

式中, $\mathbf{Y} = \begin{bmatrix} Y_1^* \\ \mathbf{M} \\ Y_n^* \end{bmatrix}$, $\boldsymbol{\pi}^* = (\mathbf{Y}^T \cdot \mathbf{Y})^{-1} \cdot \mathbf{Y}^T \cdot \mathbf{T}$ 。

8. 如权利要求 6 或 7 所述的拖动示教方法, 其特征在于, 所述机器人各关节的位置信息包含:

机器人关键点的位置或拖动示教时的拖动轨迹。

9. 如权利要求 6-8 中任一项所述的拖动示教系统, 其特征在于, 将机器人各关节反馈速度经过一预设截至频率的滤波器滤波, 以降低速度信号中的噪声信号; 在此基础上叠加一定阈值一定频率的方波信号用以克服拖动示教功能起始时的静摩擦力, 所述阈值的设置和所述静摩擦力的大小有关, 所述频率的设置与启动效果有关; 在所述机器人运动起来后, 所述方波信号迅速衰减至零。

10. 如权利要求 7-9 中任一项所述的拖动示教系统, 其特征在于, 按照公式 $\boldsymbol{\tau} = \mathbf{Y}^* \boldsymbol{g}^*$ 将一个完整周期的实验数据带入 $\mathbf{Y}^*$ 中, 算出一组由所述静力学模型预测的转矩值, 并将所述转矩值与记录的电流指令做比较, 以验证辨识的静力学模型参数正确与否。

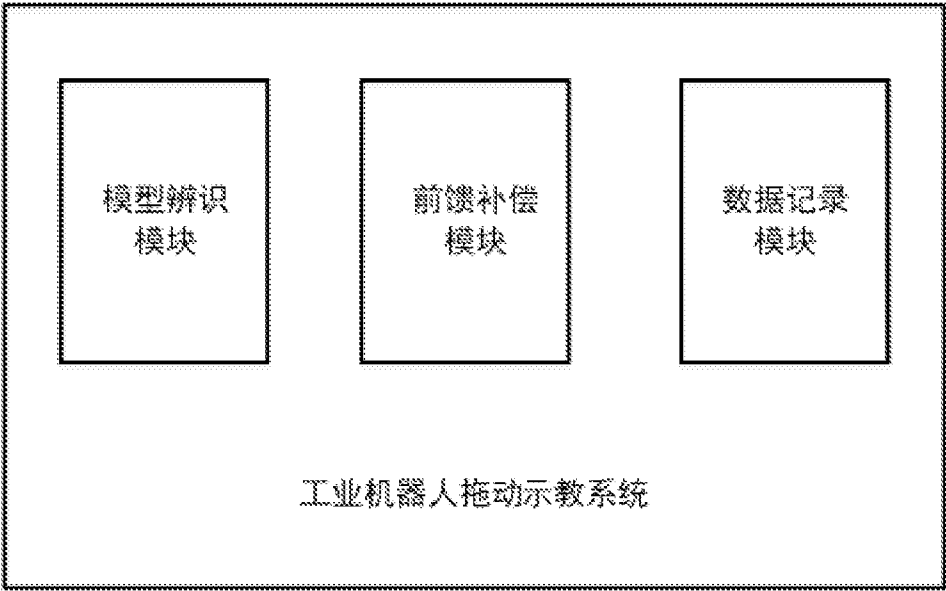


图 1

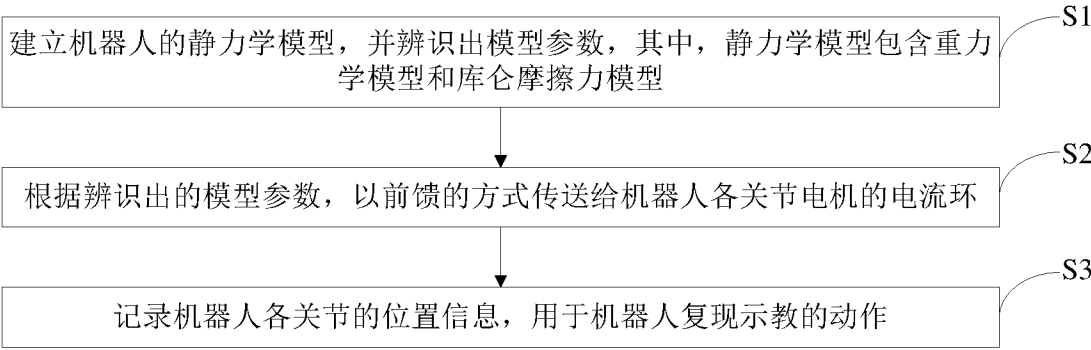


图 2

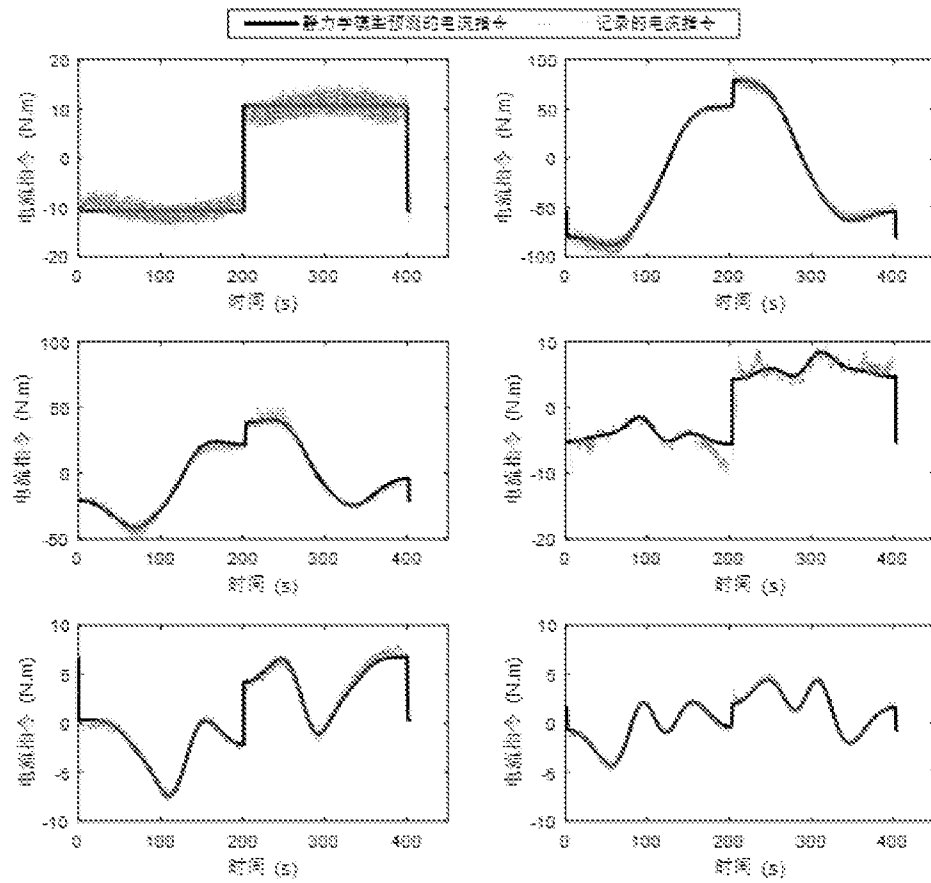


图 3

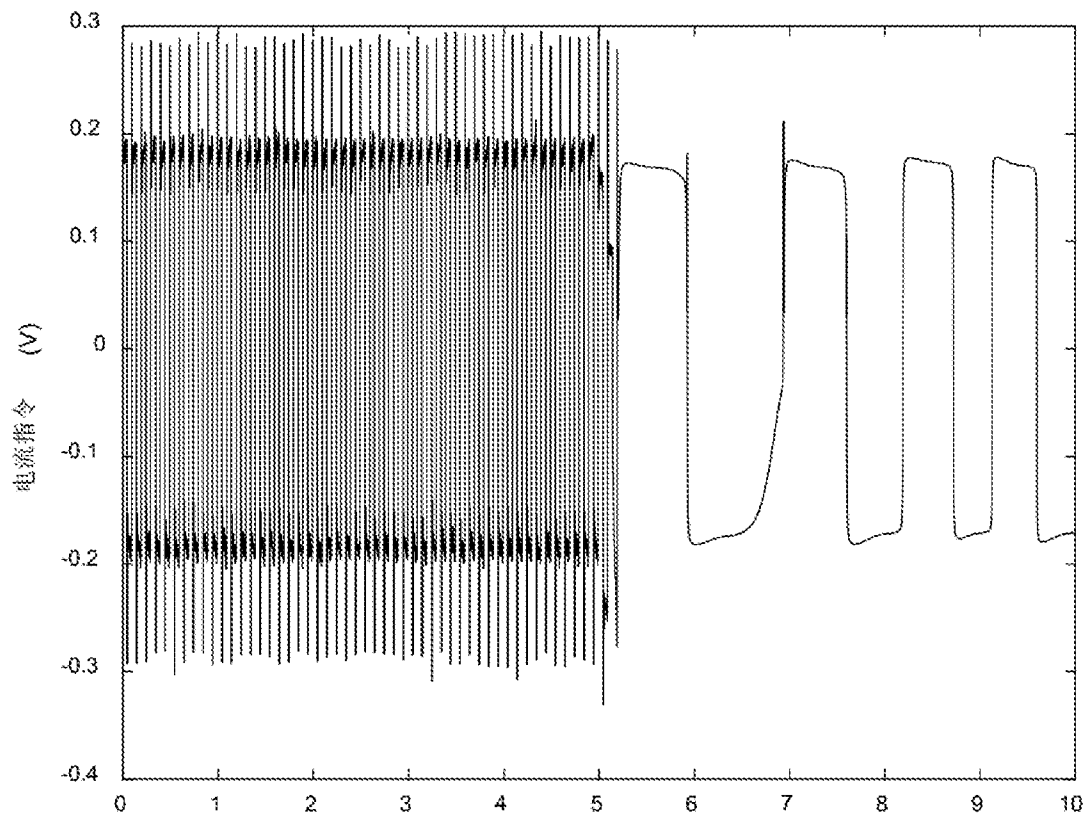


图 4

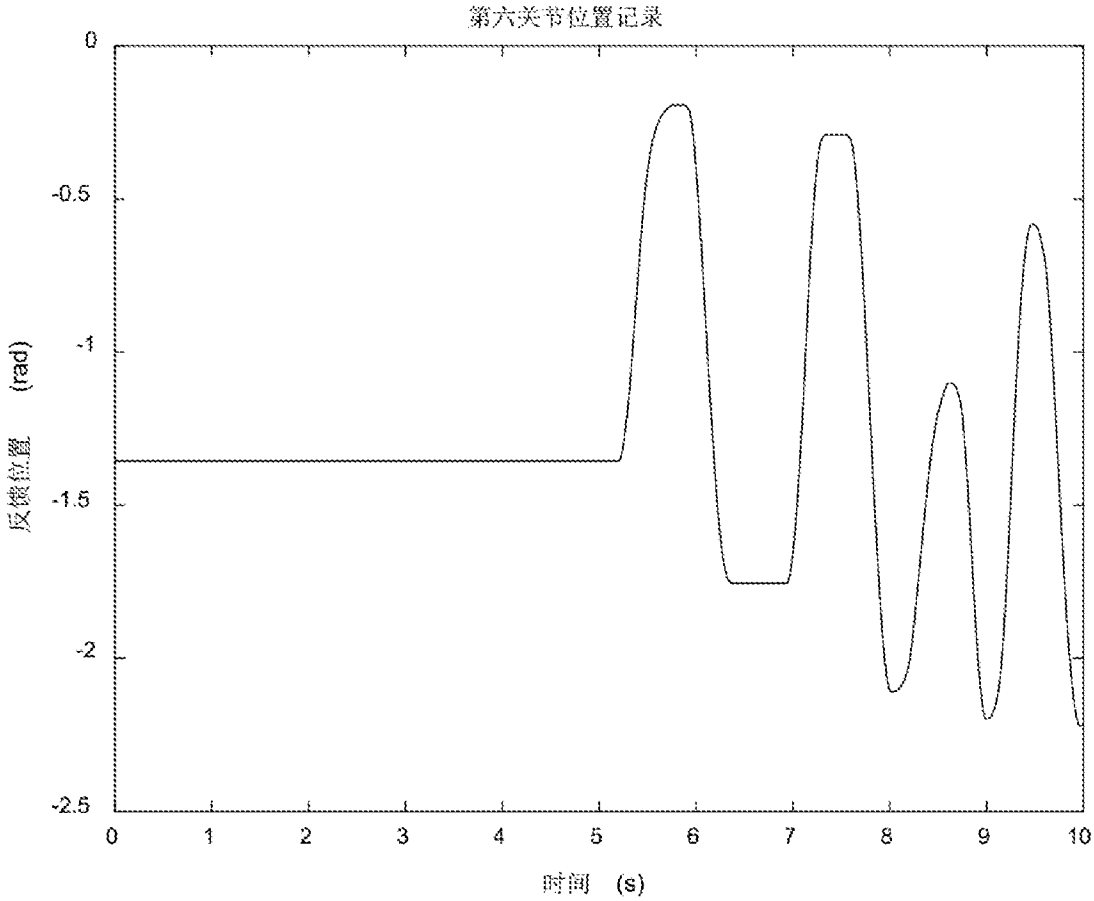


图 5

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/CN2019/094431

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

B25J 9/16(2006.01)i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

B25J

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

VEN, CNABS, CNKI: 示教, 拖动, 机器人, 静力学, 模型, 重力, 摩擦力, 前馈, 补偿, 关节, teach+, simulat+, robot, module, model, compensat+, joint+, static, gravity, friction

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
PX	CN 108839023 A (SHANGHAI JAKA ROBOT TECHNOLOGY CO., LTD.) 20 November 2018 (2018-11-20) see entire document	1-10
A	CN 105479459 A (SHENZHEN INOVANCE TECHNOLOGY CO., LTD.) 13 April 2016 (2016-04-13) see claims 1-10	1-10
A	CN 106313044 A (SOUTH CHINA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY) 11 January 2017 (2017-01-11) see entire document	1-10
A	CN 107097233 A (ROKAE (SHANDONG) INTELLIGENT TECHNOLOGY CO., LTD.) 29 August 2017 (2017-08-29) see entire document	1-10
A	EP 2875914 A1 (YASKAWA DENKI SEISAKUSHO K.K.) 27 May 2015 (2015-05-27) see entire document	1-10

☐ Further documents are listed in the continuation of Box C.☒ See patent family annex.

* Special categories of cited documents:

“A” document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

“E” earlier application or patent but published on or after the international filing date

“L” document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

“O” document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

“P” document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

“T” later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

“X” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

“Y” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

“&” document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

26 August 2019

Date of mailing of the international search report

19 September 2019

Name and mailing address of the ISA/CN

China National Intellectual Property Administration (ISA/CN)
No. 6, Xitucheng Road, Jimenqiao, Haidian District, Beijing 100088
China

Facsimile No. (86-10)62019451

Authorized officer

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.

PCT/CN2019/094431

Patent document cited in search report			Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)			Publication date (day/month/year)
CN	108839023	A	20 November 2018	None			
CN	105479459	A	13 April 2016	CN	105479459	B	14 November 2017
CN	106313044	A	11 January 2017	CN	106313044	B	14 September 2018
CN	107097233	A	29 August 2017	None			
EP	2875914	A1	27 May 2015	US	2015151431	A1	04 June 2015
				WO	2014013605	A1	23 January 2014
				CN	104470687	A	25 March 2015
				JP	WO2014013605	A1	30 June 2016

国际检索报告

国际申请号

PCT/CN2019/094431

A. 主题的分类

B25J 9/16 (2006.01) i

按照国际专利分类(IPC)或者同时按照国家分类和IPC两种分类

B. 检索领域

检索的最低限度文献(标明分类系统和分类号)

B25J

包含在检索领域中的除最低限度文献以外的检索文献

在国际检索时查阅的电子数据库(数据库的名称, 和使用的检索词(如使用))

VEN, CNABS, CNKI:示教, 拖动, 机器人, 静力学, 模型, 重力, 摩擦力, 前馈, 补偿, 关节, teach+, simulat+, robot, module, model, compensat+, joint+, static, gravity, friction

C. 相关文件

类 型*	引用文件, 必要时, 指明相关段落	相关的权利要求
PX	CN 108839023 A (上海节卡机器人科技有限公司) 2018年 11月 20日 (2018 - 11 - 20) 参见全文	1-10
A	CN 105479459 A (深圳市汇川技术股份有限公司) 2016年 4月 13日 (2016 - 04 - 13) 参见权利要求1-10	1-10
A	CN 106313044 A (华南理工大学) 2017年 1月 11日 (2017 - 01 - 11) 参见全文	1-10
A	CN 107097233 A (珞石山东智能科技有限公司) 2017年 8月 29日 (2017 - 08 - 29) 参见全文	1-10
A	EP 2875914 A1 (YASKAWA DENKI SEISAKUSHO KK) 2015年 5月 27日 (2015 - 05 - 27) 参见全文	1-10

☐ 其余文件在C栏的续页中列出。☒ 见同族专利附件。

* 引用文件的具体类型:

“A” 认为不特别相关的表示了现有技术一般状态的文件

“E” 在国际申请日的当天或之后公布的在先申请或专利

“L” 可能对优先权要求构成怀疑的文件, 或为确定另一篇引用文件的公布日而引用的或者因其他特殊理由而引用的文件(如具体说明的)

“O” 涉及口头公开、使用、展览或其他方式公开的文件

“P” 公布日先于国际申请日但迟于所要求的优先权日的文件

“T” 在申请日或优先权日之后公布, 与申请不相抵触, 但为了理解发明之理论或原理的在后文件

“X” 特别相关的文件, 单独考虑该文件, 认定要求保护的发明不是新颖的或不具有创造性

“Y” 特别相关的文件, 当该文件与另一篇或者多篇该类文件结合并且这种结合对于本领域技术人员为显而易见时, 要求保护的发明不具有创造性

“&” 同族专利的文件

国际检索实际完成的日期

2019年 8月 26日

国际检索报告邮寄日期

2019年 9月 19日

ISA/CN的名称和邮寄地址

中国国家知识产权局(ISA/CN)

中国北京市海淀区蓟门桥西土城路6号 100088

传真号 (86-10)62019451

受权官员

郝桂亮

电话号码 86-(010)-62085399

国际检索报告
关于同族专利的信息

国际申请号

PCT/CN2019/094431

检索报告引用的专利文件			公布日 (年/月/日)	同族专利			公布日 (年/月/日)
CN	108839023	A	2018年 11月 20日	无			
CN	105479459	A	2016年 4月 13日	CN	105479459	B	2017年 11月 14日
CN	106313044	A	2017年 1月 11日	CN	106313044	B	2018年 9月 14日
CN	107097233	A	2017年 8月 29日	无			
EP	2875914	A1	2015年 5月 27日	US	2015151431	A1	2015年 6月 4日
				WO	2014013605	A1	2014年 1月 23日
				CN	104470687	A	2015年 3月 25日
				JP	W02014013605	A1	2016年 6月 30日