

建筑幕墙安装机器人的位置/力混合控制方法

胡河宇, 曹建福, 曹晔, 陶必荣

(西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 针对建筑领域幕墙安装过程中所面临的幕墙质量变化、接触环境改变以及机器人动力学参数漂移等问题,提出了基于阻抗模型和自适应补偿的机器人位置/力混合控制方法。分析了幕墙受力,建立了幕墙与环境之间的接触力模型,获得了机器人-幕墙-接触环境的综合动力学方程;为解决幕墙与环境接触时的力控制问题,在设计控制器时建立了幕墙位置与接触力之间的阻抗关系,同时通过李雅普诺夫稳定性理论构造了自适应控制器来补偿未知不确定项,使幕墙轨迹跟踪阻抗外环生成的参考轨迹。对不同任务时的幕墙安装过程进行多组仿真实验,结果表明:所提方法均能实现高精度的幕墙位置跟踪,误差精度小于 0.2 mm,同时可以使幕墙与环境之间有稳定的接触力,并具有一定的鲁棒性。

关键词: 幕墙安装机器人;位置/力混合控制;接触力;自适应控制

中图分类号: TP242.2 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202201006 **文章编号:** 0253-987X(2022)01-0051-10



OSID 码

Hybrid Position/Force Control Method for Slabstone-Installing Robot

HU Heyu, CAO Jianfu, CAO Ye, TAO Birong

(State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: To solve the problems of slabstone installation in construction field, such as slabstone weight change, environmental contact change and robot dynamic parameter drift, a robot hybrid position/force control method based on impedance model and adaptive compensation is proposed. Analyzing the force on slabstone, the contact force model between the slabstone and the environment is established, and the comprehensive dynamic equation relating robot, slabstone and contact environment is obtained. Aiming at force control for the contact between the slabstone and the environment, the impedance relationship between the position and the contact force is taken into account during controller design, and an adaptive controller is constructed to compensate the unknown uncertainties following Lyapunov stability theory, therefore the slabstone is able to track the reference trajectory generated by the outer loop of impedance. Multiple groups of simulation experiments on slabstone installation process for different tasks show that the proposed method with certain robustness can realize high precision position tracking with error accuracy less than 0.2 mm, and obtain a stable contact force between the slabstone and the environment.

Keywords: slabstone-installing robot; position/force hybrid control; contact force; adaptive control

在中国快速城市化进程中,出现了大量的高空建筑,幕墙已成为其主导性外部装饰^[1]。作为具有巨大发展潜力的建筑施工自动化装备,幕墙安装机器人有着广泛的应用前景和研究价值。然而,由于不同工作场合和任务需求中存在着被安装幕墙的质量改变、幕墙与墙壁之间的接触介质和安装工艺不同、机器人动力学参数的漂移和偏差等问题^[2],安装精度和安装效果被严重影响,这给幕墙安装机器人的位置/力混合控制带来了难题^[3-4]。

幕墙安装时与环境发生接触前,对机器人而言是位置控制过程,目前的方法是在对幕墙运动过程进行分解的基础上再进行位置或者速度控制^[5-6],如 Sloth 和 Pedersen 把玻璃幕墙安装任务分解为平动、滑动和提升共 3 种形式,根据参考速度和运动学模型设计了关节速度控制器^[7]。当幕墙与墙壁接触时,需要对幕墙的安装位置及其与环境的接触力同时进行控制。为此:刘智光等研究了高空幕墙安装机器人的力控制问题,提出了基于动力学参数估计的自适应阻抗控制方法^[8];陈贵亮等对幕墙安装机器人的柔顺操作策略进行研究,把幕墙的工作空间分为自由空间和接触空间,提出了基于自适应力的控制算法^[9];李铁军等提出了基础阻抗控制和自适应阻抗控制相结合的控制策略,能够满足自由空间快速运动和接触空间力控制的准确性要求^[10],更进一步提出了模型参考自适应控制方法^[11]。这些工作对幕墙安装机器人的位置/力控制进行了研究,然而未进一步考虑幕墙质量和接触环境等发生变化对安装过程的影响。

未知不确定性是机器人控制的一个重要研究方向。对于动力学参数发生变化的传统机器人(非建筑机器人),文献[12-14]设计自适应律对不确定项进行补偿,文献[15-16]使用时间延迟估计对未知项进行逼近,文献[17]提出速度估计的策略,均可实现期望的位置控制目标。当机器人接触环境未知或者不确定时,文献[18-19]根据检测到的接触力来控制机器人在未知环境中做出相应的运动,文献[20]采用速度控制的方法解决位置/力控制问题,文献[21]采用神经网络对未知项进行估计,文献[22]采用变阻抗的控制方法。这些工作能够解决机器人动力学的不确定性和环境接触的不确定性问题,然而未考虑工作对象发生变化时的情况,也未研究多种未知项同时出现的情况。

针对建筑幕墙机器人的位置/力控制任务,本文通过分析幕墙重量、环境接触和机器人自身动力学

参数等同时发生变化的情况,建立了含有不确定项的机器人-幕墙-接触环境综合动力学方程。结合自适应与阻抗控制方法,对安装机器人接触力进行柔顺控制,同时实现高精度的位置控制。

1 建筑幕墙安装机器人模型

建筑幕墙作业具有尺寸大、重量大和环境复杂等特点,使用通用工业机器人不能满足工程要求。图 1 为本文研究的幕墙安装机器人,其主要用于大型大理石、玻璃等外饰幕墙的吸取和安装,质量约为 350 kg,工作半径为 1.3 m,最大吸取质量为 50 kg,末端安装有真空吸盘。本文通过对幕墙、接触环境和机器人分别建模,得到综合动力学模型。



图 1 幕墙安装机器人

Fig. 1 Slabstone installing robot

1.1 幕墙的受力分析

建筑幕墙安装过程分为 3 个阶段:第 1 阶段,机器人从初始水平位置抓取幕墙之后,将其位姿调整至竖直状态,此过程中抓取力 F_c 向上且具有旋转分量,重力 $m_a g$ 向下,如图 2a 所示,其中, m_a 表示幕墙质量, g 表示重力加速度;第 2 阶段,幕墙在水平方向运动,直到与墙壁的位置临界接触,抓取力 F_c 在

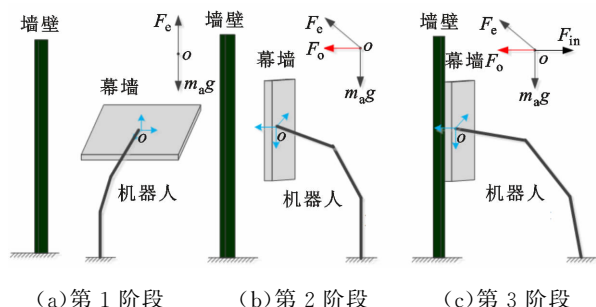


图 2 幕墙安装过程示意

Fig. 2 Schematic diagram of slabstone installation process

竖直方向上的分量抵消重力 $m_a g$ 的影响,在水平方向的分量 F 。使幕墙向墙壁方向运动,此过程中幕墙与墙壁的接触力 $F_{in}=0$,如图 2b 所示;第 3 阶段,幕墙从临界接触状态运动至稳定接触状态,与第二阶段相比,幕墙与墙壁的接触力 $F_{in} \neq 0$,如图 2c 所示。

幕墙的运动空间包含 3 个平移方向和 3 个旋转方向^[23-24],其动力学参数主要受质量影响。在不同的任务中,幕墙的重量不同,且无法获得其准确值。本文建立动力学模型

$$(M_a(x) + \Delta M_a(x))\ddot{x} + (C_a(x, \dot{x}) + \Delta C_a(x, \dot{x}))\dot{x} + (G_a(x) + \Delta G_a(x)) = F_e - F_{in} \quad (1)$$

式中: x 表示幕墙质心的位置; $M_a(x) \in \mathbf{R}^{6 \times 6}$ 、 $C_a(x, \dot{x}) \in \mathbf{R}^{6 \times 6}$ 、 $G_a(x) \in \mathbf{R}^6$ 分别表示幕墙的质量矩阵、向心力和科氏力矩阵、重力矩阵, $\Delta M_a(x) \in \mathbf{R}^{6 \times 6}$ 、 $\Delta C_a(x, \dot{x}) \in \mathbf{R}^{6 \times 6}$ 、 $\Delta G_a(x) \in \mathbf{R}^6$ 为相应的未知部分。在不引起混淆的情况下,本文省略函数矩阵的自变量,比如 $M_a(x)$ 、 $C_a(x, \dot{x})$ 、 $G_a(x)$ 记为 M_a 、 C_a 、 G_a 。

1.2 幕墙与环境的接触模型

幕墙与墙壁等环境之间的填充材料通常是水泥砂浆等柔性体。假设填充材料为均质分布,幕墙与环境之间的接触力位于法线方向,实验表明接触前期的形变位移和力之间基本为线性关系^[25]。由于待安装幕墙及其工艺不同,与墙壁接触时的刚度系数不同且无法准确获得。当幕墙与外界环境接触如图 2c 所示时,可线性描述接触力模型

$$F_{in} = (K_e + \Delta K_e)E_e \quad (2)$$

$$E_e = x - x_e \quad (3)$$

式中: K_e 表示环境刚度系数的已知部分; ΔK_e 表示未知部分; x_e 表示安装环境所处位置; E_e 表示环境接触误差。

1.3 幕墙安装机器人动力学模型

对于图 1 所示的六自由度幕墙安装机器人,假设连杆都是刚性的,末端的吸盘抓取幕墙后无相对位移,运动学模型精确已知,并且机器人在运行过程中躲避所有奇异位姿,自由度和空间维数均为 6。由于存在的动力学参数漂移问题,在关节空间中机器人拉格朗日动力学方程表达式为

$$(M_1(q) + \Delta M_1(q))\ddot{q} + (C_1(q, \dot{q}) + \Delta C_1(q, \dot{q}))\dot{q} + (G_1(q) + \Delta G_1(q)) = \tau - J_m^T(q)F_e + \tau_d(q, \dot{q}) \quad (4)$$

式中: $q \in \mathbf{R}^6$ 表示机械臂的关节角度向量; $M_1(q) \in \mathbf{R}^{6 \times 6}$ 、 $C_1(q, \dot{q}) \in \mathbf{R}^{6 \times 6}$ 、 $G_1(q) \in \mathbf{R}^6$ 表示机械臂的质量矩阵、向心力和科氏力矩阵、重力矩阵的已知部分, $\Delta M_1(q) \in \mathbf{R}^{6 \times 6}$ 、 $\Delta C_1(q, \dot{q}) \in \mathbf{R}^{6 \times 6}$ 、 $\Delta G_1(q) \in \mathbf{R}^6$

表示对应的未知部分; $F_e \in \mathbf{R}^6$ 表示机器人受到幕墙施加的力/力矩; $\tau \in \mathbf{R}^6$ 表示关节力矩; $\tau_d(q, \dot{q}) \in \mathbf{R}^6$ 表示干扰力; $J_m(q) \in \mathbf{R}^{6 \times 6}$ 表示雅可比矩阵。

1.4 机器人与物体的综合动力学模型

根据式(1)~(4)可以得到机器人-幕墙-接触环境的综合动力学方程

$$M_t \ddot{x} + C_t \dot{x} + G_t + \rho_1 + \rho_2 + \rho_3 = \tau - J_m^T K_e (x - x_e) + \tau_d \quad (5)$$

式中: $M_t = J_m^{-1} M_1 + J_m^T M_a$; $C_t = C_1 J_m^{-1} - M_1 J_m^{-1} \dot{J}_m J_m^{-1} + J_m^T C_a$; $G_t = G_1 + J_m^T G_a$; $\rho_1 = J_m^T (\Delta M_a \ddot{x} + \Delta C_a + \Delta G_a)$; $\rho_2 = J_m^T \Delta K_e (x - x_e)$; $\rho_3 = \Delta M_1 \ddot{q} + \Delta C_1 \dot{q} + \Delta G_1(q)$ 。 M_t 、 C_t 、 G_t 表示综合动力学模型中的已知部分, ρ_1 表示安装幕墙质量改变引起幕墙动力学的未知不确定项, ρ_2 表示幕墙与墙壁之间接触材料改变引起的接触力不确定项, ρ_3 表示机器人动力学参数漂移引起的未知部分。为了使用式(5)对机器人及幕墙进行基于模型的高精度位置/力控制,需要做以下假设。

假设 1 幕墙质量变化范围有界,式(1)中的不确定项满足

$$\|\Delta M_a \ddot{x} + \Delta C_a \dot{x} + \Delta G_a\| \leq a_1 + a_2 \|\dot{x}\| + a_3 \|\ddot{x}\| \quad (6)$$

式中 a_1 、 a_2 、 a_3 为未知的非负实数。

假设 2 幕墙与墙壁之间的接触材料(如胶泥、混凝土等)改变时,环境接触刚度系数变化值有界,式(2)满足

$$\|\Delta K_e\| \leq b \quad (7)$$

式中 b 未知的为非负实数。

假设 3 机器人本身参数的漂移和干扰项有界,式(4)中不确定项满足

$$\|\Delta M_1 \ddot{q} + \Delta C_1 \dot{q} + \Delta G_1(q)\| + \|\tau_d\| \leq c_1 + c_2 \|\dot{q}\| + c_3 \|\ddot{q}\|^2 \quad (8)$$

式中 c_1 、 c_2 、 c_3 为未知的非负实数。

在复杂建筑环境下,幕墙质量和接触环境刚度的变化是有界的,因此假设 1 和假设 2 合理。由文献[26]可知,幕墙安装机器人的动力学参数漂移值有界,且 $\Delta M_1 \ddot{q}$ 与关节角速度 $\|\dot{q}\|$ 和 $\|\ddot{q}\|^2$ 有关,因此假设 3 合理。

2 控制器设计

幕墙安装机器人执行任务过程中,需要保证位置精度以及幕墙和墙壁接触之间的接触力平稳。因此,本文的控制目标为:①机器人沿着期望轨迹运动,即 $x \rightarrow x_d$;②幕墙与墙壁之间的环境接触力 F_{in}

$=\mathbf{K}_e(\mathbf{x}-\mathbf{x}_e)$,使得 $\mathbf{F}_{in}\rightarrow\mathbf{F}_d$ 。为达到该目标,本文提出了基于双环策略的阻抗自适应控制器,外环中使用阻抗控制模型处理环境接触力与位置的关系,在内环中设计自适应控制器补偿模型不确定项,实现幕墙的高精度位置控制轨迹。

2.1 阻抗控制模型

阻抗控制通过建立机器人末端作用力与位置之间的动态关系,达到控制环境接触力的目的,且运动过程平稳、抖动小。针对幕墙安装过程,在基础的阻抗控制算法中引入期望力 $\mathbf{F}_d$,建立阻抗关系

$$\mathbf{F}_{in}-\mathbf{F}_d=\mathbf{M}_d\ddot{\mathbf{E}}+\mathbf{B}_d\dot{\mathbf{E}}+\mathbf{K}_d\mathbf{E} \quad (9)$$

式中: $\mathbf{E}$ 为需要补偿的阻抗偏差; $\mathbf{F}_d$ 为期望力; $\mathbf{M}_d$ 、 $\mathbf{B}_d$ 、 $\mathbf{K}_d$ 表示阻抗模型中的质量、阻尼和刚度系数,通过调整此类阻抗参数值,可获得理想的力柔顺效果。根据式(9)中环境接触力与期望力的误差 $\mathbf{F}_{in}-\mathbf{F}_d$,可计算出位置补偿值 $\mathbf{E}$,进而得到参考轨迹

$$\mathbf{x}_r=\mathbf{x}_d-\mathbf{E} \quad (10)$$

式中 $\mathbf{x}_r$ 为经阻抗模型补偿后的参考轨迹。本文设计自适应位置控制器,保证幕墙跟踪参考轨迹 $\mathbf{x}\rightarrow\mathbf{x}_r$ 。

2.2 自适应控制器

机器人-幕墙-接触环境的综合动力学模型式(5)中存在着幕墙质量不确定、幕墙与环境的接触刚度不确定、机器人动力学参数漂移以及干扰项,给高精度位置控制带来了挑战。本文首先根据假设1~3提取出不确定项范数上界的粗糙信息,进而估计上界中参数不确定项,设计相应的自适应控制方法,保证幕墙跟踪参考轨迹 $\mathbf{x}_r$,最后结合李雅普诺夫稳定性分析给出严格的证明。具体过程如下,首先定义误差项

$$\mathbf{e}=\mathbf{x}-\mathbf{x}_r \quad (11)$$

引入滤波误差 $\mathbf{S}$

$$\mathbf{S}=\dot{\mathbf{e}}+\lambda\mathbf{e} \quad (12)$$

式中常数 $\lambda>0$ 。进而,设计控制器为

$$\boldsymbol{\tau}=-k_{11}\hat{a}\Phi_a^2\mathbf{S}-k_{21}\hat{b}\Phi_b^2\mathbf{S}-k_{31}\hat{c}\Phi_c^2\mathbf{S}+\mathbf{u}_t \quad (13)$$

$$\dot{\hat{a}}=-k_{12}\hat{a}+k_{11}\Phi_a^2\|\mathbf{S}\|^2 \quad (14)$$

$$\dot{\hat{b}}=-k_{22}\hat{b}+k_{21}\Phi_b^2\|\mathbf{S}\|^2 \quad (15)$$

$$\dot{\hat{c}}=-k_{32}\hat{c}+k_{31}\Phi_c^2\|\mathbf{S}\|^2 \quad (16)$$

$$\mathbf{u}_t=-k_0\mathbf{M}_t\mathbf{S}+\mathbf{M}_t(\ddot{\mathbf{x}}_r-\lambda\dot{\mathbf{e}})+\mathbf{C}_t\dot{\mathbf{x}}-0.5\mathbf{M}_t\mathbf{S}+\mathbf{G}_t+\mathbf{J}_m^T\mathbf{K}_e(\mathbf{x}-\mathbf{x}_e) \quad (17)$$

式中: $\hat{a}$ 、 $\hat{b}$ 、 $\hat{c}$ 为参数估计值; $\mathbf{u}_t$ 为模型中已知确定项; λ 为常数; Φ_a 、 Φ_b 、 Φ_c 为不确定项的核函数, $\Phi_a=\|\mathbf{J}_m\|(1+\|\dot{\mathbf{x}}\|+\|\ddot{\mathbf{x}}\|)$, $\Phi_b=\|\mathbf{J}_m^T\mathbf{W}(\mathbf{x}-\mathbf{x}_e)\|$, $\Phi_c=1+\|\dot{\mathbf{q}}\|+\|\ddot{\mathbf{q}}\|^2$, $\mathbf{W}$ 为对角矩阵,在幕

墙与环境产生接触的方向上为1,其他方向为0; k_0 、 k_{11} 、 k_{12} 、 k_{21} 、 k_{22} 、 k_{31} 、 k_{32} 为人工调节的正实数。

定理1 考虑机器人与幕墙的综合动力学模型式(5),不确定项满足假设1~3,如果使用自适应控制器式(13)~(17),则可实现期望的跟踪目标且所有内部信号一致有界;对于任意有界的初始条件,所有内部信号均有界,控制信号均一致连续并且不需要考虑过多的初始条件。

证明 由式(12)的 Hurwitz 特性可知,如果保证 $\mathbf{S}\rightarrow\mathbf{0}$,则 $\mathbf{e}\rightarrow\mathbf{0}$ 。定义关于滤波误差 $\mathbf{S}$ 的李雅普诺夫函数

$$V_1=\frac{1}{2}\mathbf{S}^T\mathbf{M}_t\mathbf{S} \quad (18)$$

对式(18)求导可得

$$\dot{V}_1=\mathbf{S}^T\mathbf{M}_t\dot{\mathbf{S}}+0.5\mathbf{S}^T\dot{\mathbf{M}}_t\mathbf{S} \quad (19)$$

根据系统模型式(5)可得

$$\mathbf{M}_t\ddot{\mathbf{x}}=\boldsymbol{\tau}-\mathbf{J}_m^T\mathbf{K}_e(\mathbf{x}-\mathbf{x}_e)-\mathbf{C}_t\dot{\mathbf{x}}-\mathbf{G}_t-\boldsymbol{\rho}_1-\boldsymbol{\rho}_2-\boldsymbol{\rho}_3+\boldsymbol{\tau}_d \quad (20)$$

由式(12)(20)可得

$$\begin{aligned} \mathbf{M}_t\dot{\mathbf{S}} &= \mathbf{M}_t\ddot{\mathbf{x}}-\mathbf{M}_t\ddot{\mathbf{x}}_r+\lambda\mathbf{M}_t\dot{\mathbf{e}}= \\ & \boldsymbol{\tau}-\mathbf{J}_m^T\mathbf{K}_e(\mathbf{x}-\mathbf{x}_e)-\mathbf{C}_t\dot{\mathbf{x}}-\mathbf{G}_t-\mathbf{M}_t\ddot{\mathbf{x}}_r+ \\ & \lambda\mathbf{M}_t\dot{\mathbf{e}}-\boldsymbol{\rho}_1-\boldsymbol{\rho}_2-\boldsymbol{\rho}_3+\boldsymbol{\tau}_d \end{aligned} \quad (21)$$

将式(21)代入式(19)可得

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 &= \mathbf{S}^T(-k_0\mathbf{M}_t\mathbf{S}+\boldsymbol{\tau}-\mathbf{u}_t-\boldsymbol{\rho}_1-\boldsymbol{\rho}_2-\boldsymbol{\rho}_3+ \\ & \boldsymbol{\tau}_d)\leq \mathbf{S}^T(-k_0\mathbf{M}_t\mathbf{S}+\boldsymbol{\tau}-\mathbf{u}_t)+\|\mathbf{S}\|(\|\boldsymbol{\rho}_1\|+ \\ & \|\boldsymbol{\rho}_2\|+\|\boldsymbol{\rho}_3\|+\|\boldsymbol{\tau}_d\|) \end{aligned} \quad (22)$$

根据假设1,幕墙动力学不确定项 $\boldsymbol{\rho}_1$ 可表示为

$$\|\boldsymbol{\rho}_1\|\leq\|\mathbf{J}_m\|(a_1+a_1\|\dot{\mathbf{x}}\|+a_2\|\ddot{\mathbf{x}}\|)\leq a\Phi_a \quad (23)$$

式中 $a=\max\{a_1,a_2,a_3\}$ 。

根据假设2,接触力的不确定项 $\boldsymbol{\rho}_2$ 可表示为

$$\begin{aligned} \|\boldsymbol{\rho}_2\| &= \|\mathbf{J}_m^T\Delta\mathbf{K}_e(\mathbf{x}-\mathbf{x}_e)\|\leq \\ & \|\Delta\mathbf{K}_e\|\|\mathbf{J}_m^T\mathbf{W}(\mathbf{x}-\mathbf{x}_e)\|\leq b\Phi_b \end{aligned} \quad (24)$$

根据假设3,机器人动力学参数的不确定性 $\boldsymbol{\rho}_3$ 和干扰项 $\boldsymbol{\tau}_d$ 可表示为

$$\|\boldsymbol{\rho}_3\|+\|\boldsymbol{\tau}_d\|\leq c_1+c_2\|\dot{\mathbf{q}}\|+c_3\|\ddot{\mathbf{q}}\|^2\leq c\Phi_c \quad (25)$$

式中 $c=\max\{c_1,c_2,c_3\}$ 。

将式(23)~(25)代入式(22)可得

$$\dot{V}_1\leq \mathbf{S}^T(-k_0\mathbf{M}_t\mathbf{S}+\boldsymbol{\tau}-\mathbf{u}_t)+a\Phi_a\|\mathbf{S}\|+b\Phi_b\|\mathbf{S}\|+c\Phi_c\|\mathbf{S}\| \quad (26)$$

根据杨氏不等式^[27]可得

$$\Phi_a\|\mathbf{S}\|\leq k_{11}\Phi_a^2\|\mathbf{S}\|^2+1/4k_{11} \quad (27)$$

$$\Phi_b\|\mathbf{S}\|\leq k_{21}\Phi_b^2\|\mathbf{S}\|^2+1/4k_{21} \quad (28)$$

$$\Phi_c \| \mathbf{S} \| \leq k_{31} \Phi_c^2 \| \mathbf{S} \|^2 + 1/4k_{31} \quad (29)$$

将式(27)~(29)代入式(26)可得

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 \leq & \mathbf{S}^T (-k_0 \mathbf{M}_t \mathbf{S} + \boldsymbol{\tau} - \mathbf{u}_t) + ak_{11} \Phi_a^2 \| \mathbf{S} \|^2 + \\ & \frac{a}{4k_{11}} + bk_{21} \Phi_b^2 \| \mathbf{S} \|^2 + \frac{b}{4k_{21}} + ck_{31} \Phi_c^2 \| \mathbf{S} \|^2 + \frac{c}{4k_{31}} \end{aligned} \quad (30)$$

将式(13)代入式(30)可得

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 \leq & -k_0 \mathbf{S}^T \mathbf{M}_t \mathbf{S} + ak_{11} \Phi_a^2 \| \mathbf{S} \|^2 + \frac{a}{4k_{11}} + \\ & bk_{21} \Phi_b^2 \| \mathbf{S} \|^2 + \frac{b}{4k_{21}} + ck_{31} \Phi_c^2 \| \mathbf{S} \|^2 + \frac{c}{4k_{31}} \end{aligned} \quad (31)$$

定义参数估计误差 $\bar{a} = a - \hat{a}$, $\bar{b} = b - \hat{b}$, $\bar{c} = c - \hat{c}$ 。构造李雅普诺夫函数

$$V = V_1 + \frac{1}{2} \bar{a}^2 + \frac{1}{2} \bar{b}^2 + \frac{1}{2} \bar{c}^2 \quad (32)$$

对式(32)求导可得

$$\dot{V} = \dot{V}_1 - \bar{a} \dot{\bar{a}} - \bar{b} \dot{\bar{b}} - \bar{c} \dot{\bar{c}} \quad (33)$$

代入自适应律式(14)~(16)可得

$$\begin{aligned} \dot{V} \leq & -k_0 \mathbf{S}^T \mathbf{M}_t \mathbf{S} + k_{12} \bar{a} \dot{\bar{a}} + k_{22} \bar{b} \dot{\bar{b}} + k_{32} \bar{c} \dot{\bar{c}} + \\ & \frac{a}{4k_{11}} + \frac{b}{4k_{21}} + \frac{c}{4k_{31}} \end{aligned} \quad (34)$$

再依据弹性不等式^[27],得到

$$\bar{a} \dot{\bar{a}} = \bar{a} (a - \hat{a}) = \bar{a} a - \bar{a}^2 \leq \frac{1}{2} (a^2 - \bar{a}^2) \quad (35)$$

$$\bar{b} \dot{\bar{b}} = \bar{b} (b - \hat{b}) = \bar{b} b - \bar{b}^2 \leq \frac{1}{2} (b^2 - \bar{b}^2) \quad (36)$$

$$\bar{c} \dot{\bar{c}} = \bar{c} (c - \hat{c}) = \bar{c} c - \bar{c}^2 \leq \frac{1}{2} (c^2 - \bar{c}^2) \quad (37)$$

将式(35)~(37)代入式(34)可得

$$\begin{aligned} \dot{V} \leq & -k_0 \mathbf{S}^T \mathbf{M}_t \mathbf{S} - \frac{1}{2} k_{12} \bar{a}^2 - \frac{1}{2} k_{22} \bar{b}^2 - \frac{1}{2} k_{32} \bar{c}^2 + \\ & \frac{1}{2} k_{12} a^2 + \frac{1}{2} k_{22} b^2 + \frac{1}{2} k_{32} c^2 + \\ & \frac{a}{4k_{11}} + \frac{b}{4k_{21}} + \frac{c}{4k_{31}} \end{aligned} \quad (38)$$

由此可得

$$\dot{V} \leq -\rho V + \gamma \quad (39)$$

式中: $\rho = \min\{2k_0, k_{12}, k_{22}, k_{32}\}$; $\gamma = \frac{1}{2} k_{12} a^2 + \frac{1}{2} \cdot$

$$k_{22} b^2 + \frac{1}{2} k_{32} c^2 + \frac{a}{4k_{11}} + \frac{b}{4k_{21}} + \frac{c}{4k_{31}}.$$

根据式(39)可知,当 $V \geq \frac{\gamma}{\rho}$ 时, $\dot{V} \leq 0$, 因此 V 最终会进入并保持在集合 $\Omega_1 = \{V \mid |V| \leq \frac{\gamma}{\rho}\}$ 内, 滤波误差 $\mathbf{S}$ 最终会进入并保持在集合 $\Omega_2 = \{\|\mathbf{S}\| \mid \|\mathbf{S}\|$

$\leq 2 \frac{\gamma}{\rho \lambda_{\min}}\}$ 内, 其中 $\lambda_{\min}$ 为矩阵 $\mathbf{M}_t$ 的最小特征值。对

式(39)两边分别乘以 $e^{\rho t}$, 可以得到

$$\frac{d}{dt}(V(t)e^{\rho t}) \leq \gamma e^{\rho t} \quad (40)$$

在时间 $[0, t]$ 上对式(40)进行积分, 可以得到

$$V(t) \leq e^{-\rho t} V(0) + \frac{\gamma}{\rho} (1 - e^{-\rho t}) \leq V(0) + \frac{\gamma}{\rho} \quad (41)$$

由式(41)可知, 对于任意的初始条件 V 有界, 进而可得 $\mathbf{S}$ 、 $\hat{a}$ 、 $\hat{b}$ 、 $\hat{c}$ 均有界; 由式(12)可知, 位置 $\mathbf{x}$ 及其误差 $\mathbf{e}$ 有界; 由式(23)~(25)可知, Φ_a 、 Φ_b 、 Φ_c 有界; 由式(13)~(16)可知, $\dot{a}$ 、 $\dot{b}$ 、 $\dot{c}$ 均有界。因此, 系统所有内部信号有界。

由定理1的证明过程可知, 系统模型存在不确定情况下, 设计的控制器式(13)和自适应律式(14)~(16)可保证系统一致最终有界, 实现期望的位置追踪目标。通过增大参数 k_0 、 k_{11} 、 k_{21} 、 k_{31} , 可减小滤波误差 $\mathbf{S}$, 使误差 $\mathbf{e}$ 能够收敛到足够小的邻域内。

2.3 幕墙安装机器人的阻抗自适应控制器设计

根据幕墙安装过程中对位置/力的控制目标, 设计如图3所示的双环控制策略。外环中, 根据编码器测得的机器人关节角度 $\mathbf{q}$, 使用正运动学计算得到幕墙的位置 $\mathbf{x}$, 再依据环境接触模型获取接触力 $\mathbf{F}_m$; 通过阻抗控制模型求出位置的补偿偏差 $\mathbf{E}$, 进而得到参考轨迹 $\mathbf{x}_r$ 。内环中, 根据参考轨迹 $\mathbf{x}_r$ 和实际位置 $\mathbf{x}$, 设计3种更新率 $\hat{a}$ 、 $\hat{b}$ 、 $\hat{c}$ 分别补偿幕墙质量变化、接触刚度变化和机器人动力学参数漂移引起的不确定性。通过阻抗和自适应相结合的控制策略, 解决幕墙安装过程的位置/力控制问题。

需要注意的是, 文献[8-10]的幕墙安装机器人位置/力控制方案仅考虑机器人接触环境的改变。不同于这些结果, 本文设计的阻抗自适应控制器可同时适应于幕墙质量变化、接触环境变化和机器人动力学参数漂移的情况。首先, 利用模型的已知信息设计位置的控制器 $\mathbf{u}_t$; 其次, 在线估计复杂环境(幕墙质量变化、接触环境变化和机器人动力学参数漂移)带来的参数不确定项, 在内环控制中增加相应的自适应补偿项, 提高位置的跟踪精度; 最后, 结合阻抗控制模型, 实现位置和力的混合控制。除此之外, 文献[8-10]设计的控制器需要使用机器人惯性矩阵的估计值, 当机器人关节数增多时会导致计算的复杂性, 本文设计的控制方法可以避免此类问题。

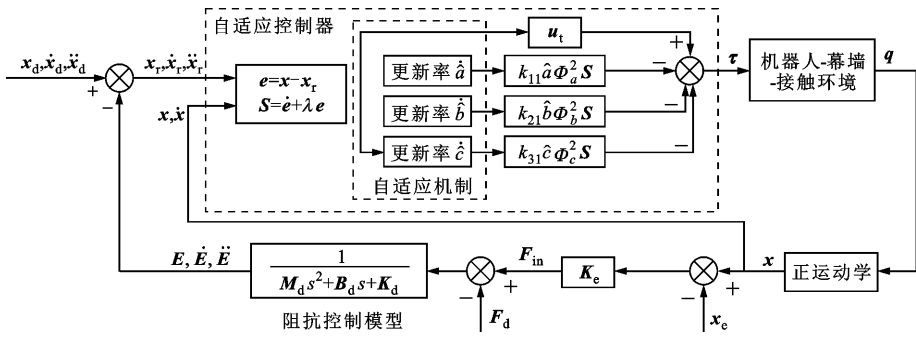


图3 幕墙安装机器人位置/力控制框图

Fig. 3 Position/force control block diagram of slabstone installing robot

3 仿真实验

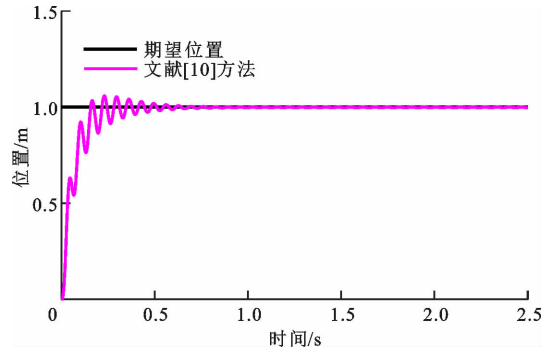
为研究所提出控制的特点及其效果,本文将六自由度建筑安装机器人串联结构模型简化为两关节的连杆结构,动力学与运动学公式与文献[10]相同。连杆质量及长度分别为: $m_1=200\text{ kg}, m_2=900\text{ kg}; a_1=1.080\text{ m}, a_2=0.640\text{ m}$ 。幕墙的动力学模型中,已知参数矩阵的表达式分别为

$$\left. \begin{aligned} M_a(x) &= \begin{bmatrix} m_a & 0 \\ 0 & m_a \end{bmatrix}; C_a(x, \dot{x}) = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \\ G_a(x) &= \begin{bmatrix} 0 \\ g \end{bmatrix} \end{aligned} \right\} \quad (42)$$

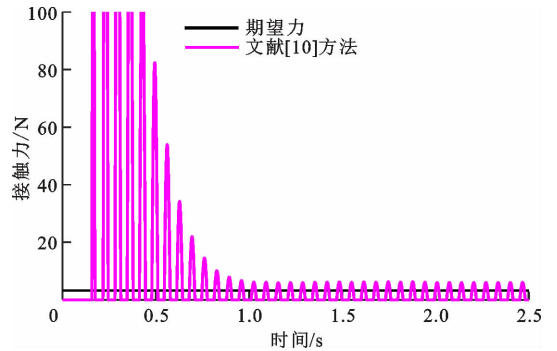
设定幕墙的初始位置为(0,1.2) m,期望位置为(1,1.2) m,环境接触位置为(0.999,1.2) m。阻抗系数为 $M_d=[100,0;0,100], B_d=[1\ 000,0;0,1\ 000], K_d=[4\ 000,0;0,4\ 000]$ 。幕墙与墙壁的环境接触刚度取值为 $K_e=[k_e,0;0,0]\text{ N/m}$, $k_e=4\ 000$,接触力方向矩阵 $W=[1,0;0,0]$ 。期望力 $F_d=[3.3;0]\text{ N}$,重力加速度 $g=9.8\text{ m/s}^2$ 。控制器参数 $\lambda=100, k_0=6, k_{11}=0.001, k_{12}=0.001, k_{13}=0.000\ 4, k_{21}=0.2, k_{22}=0.000\ 3, k_{32}=0.01$ 。仿真时分别处理幕墙质量变化、接触环境改变以及机器人动力学参数漂移共3种情况,并与文献[10]中提出的方法进行结果对比。

3.1 幕墙质量变化

幕墙质量 $m_a=300\text{ kg}$ 时,文献[10]方法的位置/力跟踪结果如图4所示。可以看出,位置和接触力产生抖动会导致安装失败,原因是设计的控制器中未考虑幕墙质量,以致适用范围狭小。幕墙质量 $m_a=200,600\text{ kg}, \Delta m_a=-100\text{ kg}$ 时,本文方法的位置/力跟踪结果如图5和图6所示。可以看出,稳定接触的位置误差精度为0.20、0.08 mm,接触力误差分别为0.27、0.78 N。本小节结果表明,本文方

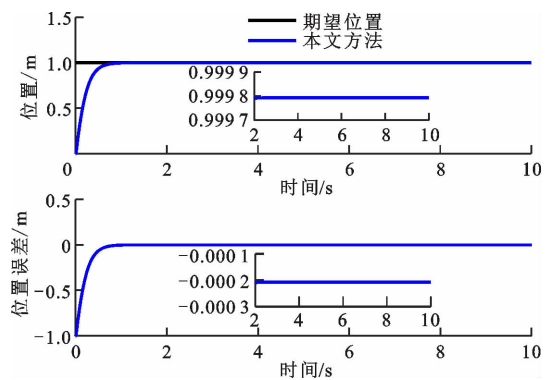


(a)位置跟踪结果

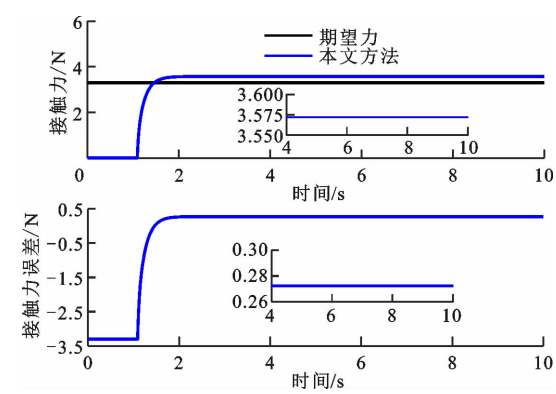


(b)接触力跟踪结果

图4 $m_a=300\text{ kg}$ 时文献[10]方法的位置/力跟踪结果
Fig. 4 Position/force tracking results of the method in ref. [10] when $m_a=300\text{ kg}$



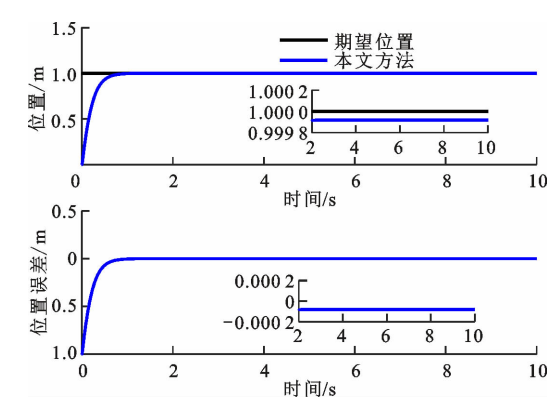
(a)位置跟踪结果



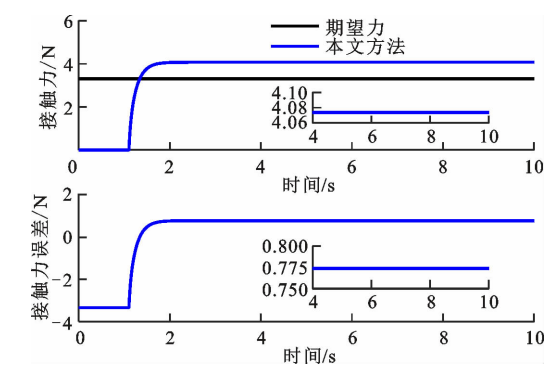
(b)接触力跟踪结果

图 5 $m_a=200\text{ kg}$ 、 $\Delta m_a=-100\text{ kg}$ 时本文方法的位置/力跟踪结果

Fig. 5 Position/force tracking results of the proposed method ($m_a=200\text{ kg}$ and $\Delta m_a=-100\text{ kg}$)



(a)位置跟踪结果



(b)接触力跟踪结果

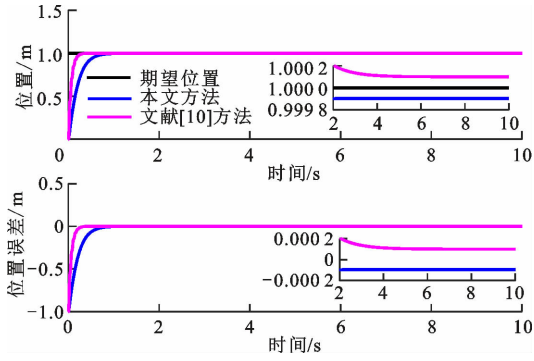
图 6 $m_a=600\text{ kg}$ 、 $\Delta m_a=-100\text{ kg}$ 时本文方法的位置/力跟踪结果

Fig. 6 Position/force tracking results of the proposed method ($m_a=600\text{ kg}$ and $\Delta m_a=-100\text{ kg}$)

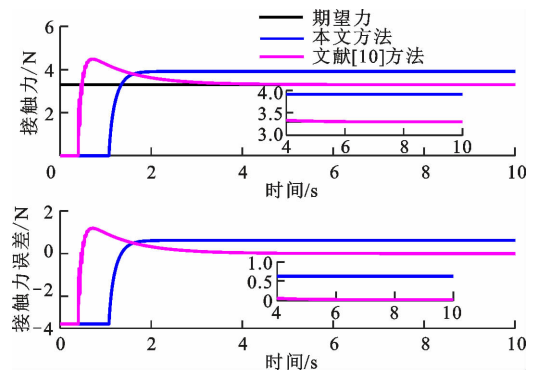
法能够完成幕墙质量在 0~600 kg 之间的安装任务,适用的幕墙质量变化范围相比文献[10]方法更为宽广。

3.2 幕墙与墙壁之间接触环境变化

环境接触刚度 $k_e=3\,000, 5\,000\text{ N/m}$ 时,本文方法和文献[10]方法的位置/力跟踪结果如图 7 和图 8 所示。可以看出,本文方法稳定接触的位置误差精度为 0.13 和 0.17 mm,接触力误差为 0.6 和 0.9 N。本文方法和文献[10]方法都能使机器人末端与环境的接触力最终维持在稳定的状态,实现对接触力和位置的控制。这是因为二者都考虑了接触环境变化的影响。由此可见,外界环境变化情况下,本文方法和文献[10]方法都能获得好的位置和力跟



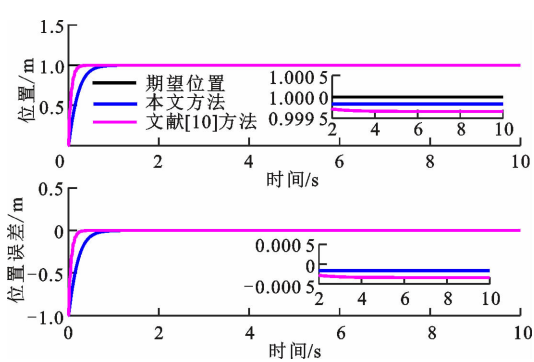
(a)位置跟踪结果



(b)力跟踪结果

图 7 $k_e=3\,000\text{ N/m}$ 时本文方法和文献[10]方法的位置/力跟踪结果

Fig. 7 Position/force tracking results of the methods in this paper and in ref. [10] ($k_e=3\,000\text{ N/m}$)



(a)位置跟踪结果

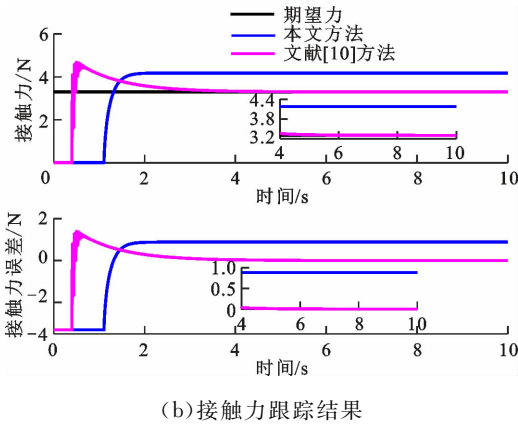


图 8 $k_c=5\,000\text{ N/m}$ 时本文方法和文献[10]方法的位置/力跟踪结果

Fig. 8 Position/force tracking results of the methods in this paper and in ref. [10] ($k_c=5\,000\text{ N/m}$)

踪效果。

3.3 机器人参数漂移引起的动力学不确定

当动力学参数漂移量 $\Delta M_1=0.2M_1$ 时,采用文献[10]方法的位置/力跟踪结果如图 9 所示。可以看出,位置和接触力产生抖动导致安装失败,原因是文献[10]中使用机器人惯性矩阵的估计值代替真实值,不适用于此种工况。当动力学参数漂移量 ΔM_1

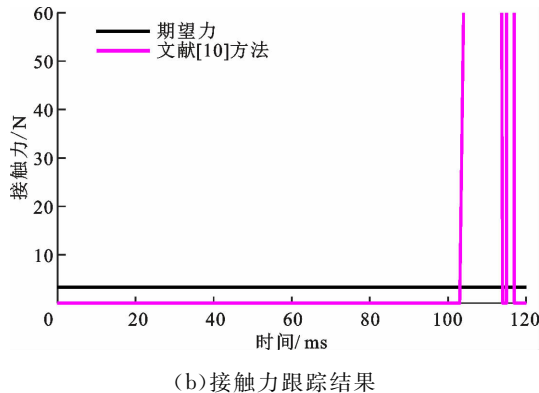
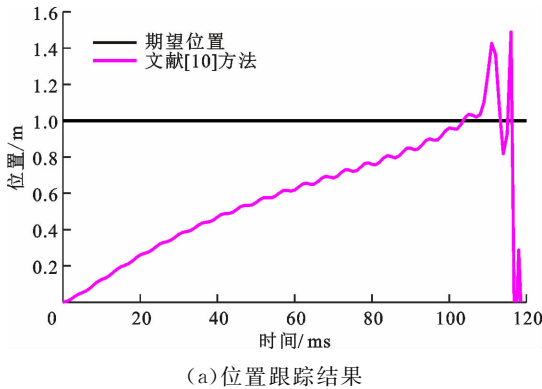
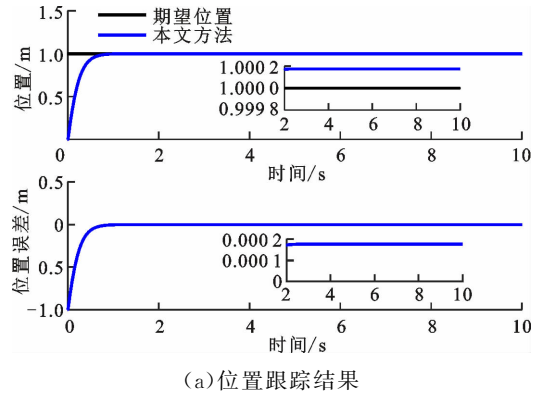
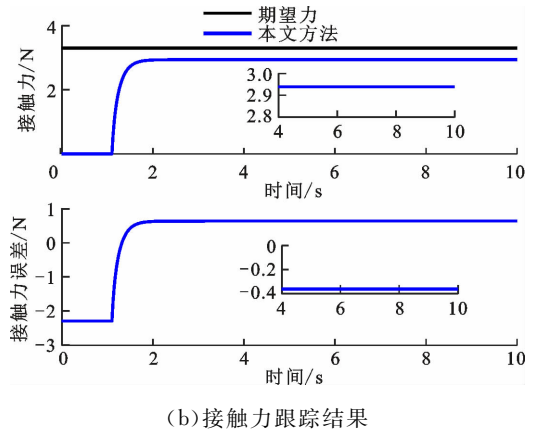


图 9 $\Delta M_1=0.2M_1$ 时文献[10]方法的位置/力跟踪结果
Fig. 9 Position/force tracking results of the method in ref. [10] as parameter shift term $\Delta M_1=0.2M_1$

分别为 $-0.2M_1$ 和 $0.2M_1$ 时,采用本文方法的位置/力跟踪结果如图 10 和图 11 所示。可以看出,稳定接触的位置误差精度为 0.17 和 0.15 mm,接触力误差为 0.36 和 0.42 N。本小节实验说明了本文方法的适用性更为广泛。



(a)位置跟踪结果

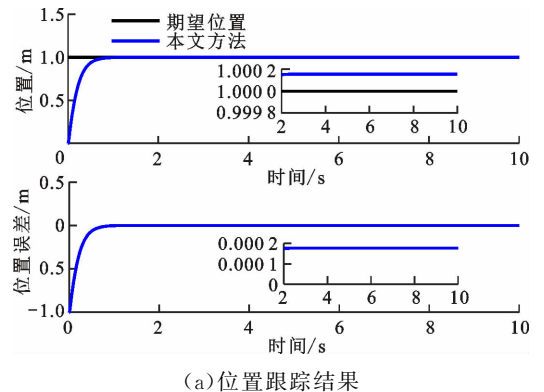


(b)接触力跟踪结果

图 10 $\Delta M_1=-0.2M_1$ 时本文方法的位置/力跟踪结果
Fig. 10 Position/force tracking results of the proposed method as parameter shift term $\Delta M_1=-0.2M_1$

4 结 论

本文研究了建筑作业场景下幕墙安装机器人工作过程中的位置/力混合控制方法,建模时考虑幕墙重量变化、接触环境改变和机器人动力学参数漂移,



(a)位置跟踪结果

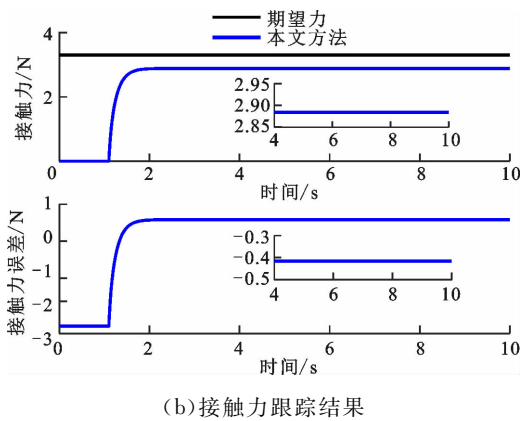


图 11 $\Delta \mathbf{M}_1=0.2\mathbf{M}_1$ 时本文方法的位置/力跟踪结果

Fig.11 Position/force tracking results of the proposed method when parameter shift term $\Delta \mathbf{M}_1=0.2\mathbf{M}_1$

建立了包含 3 种不确定项的机器人-幕墙-接触环境综合动力学方程。为达到幕墙安装过程中位置/力的混合控制,在设计双环控制器时,外环中依据阻抗模型对位置/力进行平衡和实现柔顺控制,内环中设计不同的自适应律来处理 3 种不确定项,进而实现高精度的位置跟踪。该控制器充分利用了综合动力学方程中已知确定存在的参数,根据李雅普诺夫稳定性理论得出一致最终有界的结论。对不同任务需求中的幕墙安装过程进行仿真,结果表明,本文控制方法能够实现高精度的位置控制,接触力能够达到稳定状态。本文方法具有较强的可行性和合理性。

参考文献:

[1] LEE Y S, KIM S H, GIL M S, et al. The study on the integrated control system for curtain wall building façade cleaning robot [J]. Automation in Construction, 2018, 94: 39-46.

[2] 杨冬,王刚,岳建章,等. 高层建筑板材安装平台系统的动力学研究 [J]. 机床与液压, 2015, 43(17): 160-164, 172.

YANG Dong, WANG Gang, YUE Jianzhang, et al. Dynamics research on aerial work platform of installing slabstone for high-rise buildings [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2015, 43(17): 160-164, 172.

[3] CALANCA A, MURADORE R, FIORINI P. A review of algorithms for compliant control of stiff and fixed-compliance robots [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2016, 21(2): 613-624.

[4] VANDERBORGHT B, ALBU-SCHAEFFER A, BICCHI A, et al. Variable impedance actuators: a review [J]. Robotics and Autonomous Systems, 2013, 61(12): 1601-1614.

[5] GIL M S, KANG M S, LEE S, et al. Installation of heavy duty glass using an intuitive manipulation device [J]. Automation in Construction, 2013, 35: 579-586.

[6] YOUSEFIZADEH S, FLORES MENDEZ J D D, BAK T. Trajectory adaptation for an impedance controlled cooperative robot according to an operator's force [J]. Automation in Construction, 2019, 103: 213-220.

[7] SLOTH C, PEDERSEN R. Control of wall mounting robot [J]. IFAC-PapersOnLine, 2017, 50(1): 5648-5653.

[8] 刘智光,于菲,张靓,等. 基于模糊自适应阻抗控制的机器人接触力跟踪 [J]. 工程设计学报, 2015, 22(6): 569-574, 588.

LIU Zhiguang, YU Fei, ZHANG Liang, et al. Force tracking research for robot based on fuzzy adaptive impedance control algorithm [J]. Chinese Journal of Engineering Design, 2015, 22(6): 569-574, 588.

[9] 陈贵亮,曹伟涛,杨冬,等. 基于阻抗控制的幕墙安装机器人柔顺操作研究 [J]. 工程设计学报, 2017, 24(1): 100-107.

CHEN Guiliang, CAO Weitao, YANG Dong, et al. Compliant operation research for slabstone-installing robot based on impedance control [J]. Chinese Journal of Engineering Design, 2017, 24(1): 100-107.

[10] 李铁军,张改萍,杨冬,等. 关于幕墙安装机器人的力控制算法性能分析 [J]. 机械设计与制造, 2018(11): 154-157, 162.

LI Tiejun, ZHANG Gaiping, YANG Dong, et al. Force control algorithm performance analysis for curtain wall installation robot [J]. Machinery Design & Manufacture, 2018(11): 154-157, 162.

[11] 沈永旺,李铁军,杨冬. 建筑幕墙安装机器人的力控制分析 [J]. 机械设计与研究, 2018, 34(2): 15-20.

SHEN Yongwang, LI Tiejun, YANG Dong. The force control research of slabstone-installing robot [J]. Machine Design & Research, 2018, 34(2): 15-20.

[12] YANG Zeqi, PENG Jinzhu, LIU Yanhong. Adaptive neural network force tracking impedance control for uncertain robotic manipulator based on nonlinear velocity observer [J]. Neurocomputing, 2019, 331: 263-280.

[13] HUANG Panfeng, WANG Dongke, MENG Zhongjie, et al. Impact dynamic modeling and adaptive target capturing control for tethered space robots with uncertainties [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2016, 21(5): 2260-2271.

[14] LIU Linzhi, ZHANG Liyin, WANG Youming, et al.

- A novel robust fixed-time fault-tolerant tracking control of uncertain robot manipulators [J]. *IET Control Theory & Applications*, 2021, 15(2): 195-208.
- [15] JIN Yi, CHANG P H, JIN Maolin, et al. Stability guaranteed time-delay control of manipulators using nonlinear damping and terminal sliding mode [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2013, 60(8): 3304-3317.
- [16] WANG Yaoyao, LIU Lufang, WANG Dan, et al. Time-delay control using a novel nonlinear adaptive law for accurate trajectory tracking of cable-driven robots [J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2020, 16(8): 5234-5243.
- [17] XIAO Bing, CAO Lu, XU Shengyuan, et al. Robust tracking control of robot manipulators with actuator faults and joint velocity measurement uncertainty [J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2020, 25(3): 1354-1365.
- [18] MAHVASH M, DUPONT P E. Stiffness control of surgical continuum manipulators [J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2011, 27(2): 334-345.
- [19] CAPISANI L M, FERRARA A. Trajectory planning and second-order sliding mode motion/interaction control for robot manipulators in unknown environments [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2012, 59(8): 3189-3198.
- [20] 段星光, 韩定强, 马晓东, 等. 机械臂在未知环境下基于力/位/阻抗的多交互控制 [J]. *机器人*, 2017, 39(4): 449-457.
- DUAN Xingguang, HAN Dingqiang, MA Xiaodong, et al. Multi-interaction control for manipulators in unknown environments based on hybrid position-impedance-force control [J]. *Robot*, 2017, 39(4): 449-457.
- [21] 李正义, 曹汇敏. 适应环境刚度、阻尼参数未知或变化的机器人阻抗控制方法 [J]. *中国机械工程*, 2014, 25(12): 1581-1585.
- LI Zhengyi, CAO Huimin. Robot impedance control method adapting to unknown or changing environment stiffness and damping parameters [J]. *China Mechanical Engineering*, 2014, 25(12): 1581-1585.
- [22] DUAN Jinjun, GAN Yahui, CHEN Ming, et al. Adaptive variable impedance control for dynamic contact force tracking in uncertain environment [J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2018, 102: 54-65.
- [23] 霍伟. 机器人动力学与控制 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2005: 63-71.
- [24] 贺军. 变负载双臂机器人阻抗自适应控制系统研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2016: 44-45.
- [25] MA Siwei, QIAN Ye, KAWASHIMA S. Experimental and modeling study on the non-linear structural build-up of fresh cement pastes incorporating viscosity modifying admixtures [J]. *Cement and Concrete Research*, 2018, 108: 1-9.
- [26] YU Shuanghe, YU Xinghuo, SHIRINZADEH B, et al. Continuous finite-time control for robotic manipulators with terminal sliding mode [J]. *Automatica*, 2005, 41(11): 1957-1964.
- [27] ZHANG Zhirong, SONG Yongduan, ZHAO Kai. Neuroadaptive cooperative control without velocity measurement for multiple humanoid robots under full-state constraints [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2019, 66(4): 2956-2964.

(编辑 陶晴)