

多信息融合精密装配机器人建模 与控制方法研究

李壮举¹, 梅 杰¹, 曹少中², 赵 伟²

(1. 北京建筑大学电信学院, 北京 100044; 2. 北京印刷学院高端印刷装备信号与信息处理北京市重点实验室, 北京 102600)

摘 要: 本文针对印刷机轴承套筒质量大、配合精度高、人工安装效率低、对操作人员伤害大的问题, 基于六自由度微动平台设计了一种多信息融合印刷机精密装配机器人, 该机器人具有粗测系统和探入式精确测量系统能够代替人工自动完成印刷机套筒的装配. 对该机器人来说, 精确测量是完成装配的基础. 本文提出了探入式测量工装的使用策略, 建立了探入式测量工装的读数与平台和通孔的相对的位姿关系, 最终通过测量工装得到了机器人上板的速度与加速度. 之后利用滑模控制方法建立了控制器, 并证明了稳定性, 为实现印刷机精密装配奠定了理论基础.

关键词: 印刷机精密装配机器人; 多信息融合; 六自由度; 平台运动学; 滑模控制

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2018)03-0636-05

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2018.03.018

Modeling and Control of Automatic Precision Assembly Robot with Multi-information Fusion Measuring System and Control Algorithm

LI Zhuang-ju¹, MEI Jie¹, CAO Shao-zhong², ZHAO Wei²

(1. School of Electrical and Information Engineering, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China;

2. Beijing Key Laboratory of Signal and Information Processing for High-End Printing Equipment,
Beijing Institute of Graphic Communication, Beijing 102600, China)

Abstract: The printing machine's sleeves are heavy, and must be fit with high accuracy, so, hand operation is hard and low work efficiency, and large body injury for assembling workers. For solve these problems, a printing automatic precision assembly robot with multi-information fusion measuring system is designed. Precision measure is the base of precision assembly. The strategy of using probe-into measure tooling is put forward, which establishes the relative pose relations among the readings of probe-into measure tooling, platform and the through-holes. Thus, eventually, we can obtain the relationship between the readings of measure tooling and the pose of top plate, and then we can obtain the velocity and acceleration of top plate. Sliding mode controller is established for control this robot. The stability of the proposed controllers is proved. Our work will be the theoretical base of the printing automatic precision assembly robot.

Key words: printing automatic precision assembly robot; multi-information fusion; six degree of freedom platform; kinematics; sliding mode control

1 引言

大型印刷机的轴承套筒安装是整个印刷行业中安装难度最大的装配动作. 印刷机套筒质量可达 40 多千克; 要求配合精度在 $5\mu\text{m}$ 以内; 套筒需经过零下三十度低温冷冻, 在冷缩状态下 10 分钟内完成安装. 目前只能

依靠人工安装, 安装效率极其低下, 工人劳动强度大, 经常安装的工人都患有腰椎间盘突出疾病. 因此有必要实现印刷机套筒的智能装配. 六自由度并联微动平台作为一种高精度微动平台, 具有自由度多^[1]、刚度大、结构稳定^[2,3]、动力性能好^[4,5]、不会欠驱动操作、不存在关节误差积累等优点^[6]. 基于六自由度并联平台研

制了一种多信息融合印刷机精密装配机器人,该机器人可以代替人工,快速精确的实现印刷机套筒的全自动装配. 本文将对印刷机精密装配机器人的探入式测量工装进行建模,通过探入式测量工装的读数获得平台与通孔相对位姿之间的关系. 之后通过计算得到机器人上板的速度与加速度. 之后利用滑模控制方法建立控制器,实现对机器人的精确控制.

2 多信息融合印刷机精密装配机器人设计

因此我们基于六自由度并联平台研制了一种多信息融合印刷机精密装配机器人,如图 1 所示.



图1 多信息融合印刷机精密装配机器人

多信息融合印刷机精密装配机器人由六自由度并联平台、探入式测量工装、控制台等部分构成. 探入式测量工装是实现印刷机套筒精确安装的关键技术之一,其直径小于通孔的直径. 探入式测量工装有两组探头,每组有三个激光测距器,且测距器在圆面上对称分布.

其装配工作的流程如下:第 1 步,六自由度平台在原点,装上探入式测量工装;第 2 步,首先通过输入墙板通孔高度,让六自由度并联平台将探入式测量工装移动到通孔的大体位置,然后通过粗测量将探入式测量工装插进机体装配孔;第 3 步,首先利用探入式测量工装进行测量,然后把得到的六个读数反馈给控制系统,控制系统根据得到的数据控制六自由度并联平台运动,使得探入式测量工装的轴线与印刷机通孔的轴线重合,控制系统记下此时刻平台的位置;第 4 步,将平台收回原点,把探入式测量工装取下,装上刚从冰箱取出的套筒,然后控制机器人运动到电脑记忆的位置,完成装配. 安装工作示意图如图 2 所示.

实现这个过程需要对该机器人进行精确校准、建模、控制等问题的研究. 本文对多信息融合印刷机精密装配机器人进行了建模,其中包括六自由度并联平台运动学^[7,8]、动力学建模^[9]和探入式测量工装建模^[10,11].

3 机器人探入式测量工装使用策略与建模

3.1 机器人探入式测量工的使用策略

当经过粗测量将探入式测量工装插入机体装配孔后,通过六个探头的测量的到通孔壁的距离,建立起六自由度平台当前位置与目标位置之间的关系. 最终保

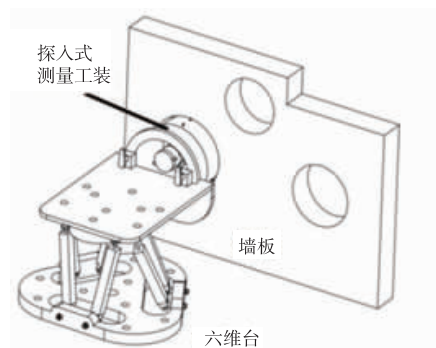


图2 多信息融合印刷机精密装配机器人工作示意图

证探入式测量工装的轴心和套筒的轴心完全重合. 探入式测量工装的移动策略如下:以探入式测量工装前中心为定点,旋转工装使得探入式测量工装的轴线与通孔的轴线平行,然后再移动工装使之与通孔轴线重合,至此调整完毕.

3.2 机器人探入式测量工装的建模

探入式测量工装的结构图,如图 3 所示.

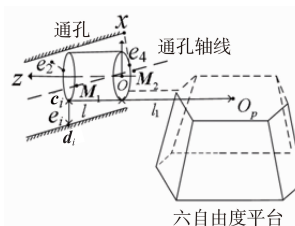


图3 机器人探入式测量工装工作原理示意图

为建立探入式测量工装与六自由度并联平台的关系,不妨建立如下坐标系:以探入式测量工装的的轴心为 z 轴,以正上方探头的位置为 x 轴,根据右手法则建立 y 轴. r 为探入式测量工装的的半径; l 为对应两组探头之间的距离; l_1 为平台质心与探入式测量工装末端的距离; c_i 为探入式测量工装的六个位置传感器的坐标点; e_i 为位置传感器的获取的探头到通孔壁的距离; d_i 为对应的位置传感器射到通孔壁上的点. 六个位置传感器的位置如图 3 所示,由此可以知道位置传感器的坐标.

$$c_1 = \left(-\frac{1}{2}r, \frac{\sqrt{3}}{2}r, 0 \right), \quad c_2 = \left(-\frac{1}{2}r, -\frac{\sqrt{3}}{2}r, 0 \right),$$

$$c_3 = (r, 0, 0), \quad c_4 = \left(-\frac{1}{2}r, \frac{\sqrt{3}}{2}r, l \right),$$

$$c_5 = \left(-\frac{1}{2}r, -\frac{\sqrt{3}}{2}r, l \right), \quad c_6 = (r, 0, l)$$

设向量 \boldsymbol{n} 为探入式测量工装的方向矢量,从坐标系中不难看出其方向:

$$\boldsymbol{n} = (0, 0, 1)$$

通过位置传感器获取了六个测量距离为 $e_1, e_2, e_3,$

e_4, e_5, e_6 , 对应的管壁上的点为 $d_1, d_2, d_3, d_4, d_5, d_6$.

$$d_1 = \left(-\frac{1}{2}r - \frac{1}{2}e_1, \frac{\sqrt{3}}{2}r + \frac{\sqrt{3}}{2}e_1, 0 \right),$$

$$d_2 = \left(-\frac{1}{2}r - \frac{1}{2}e_2, -\frac{\sqrt{3}}{2}r - \frac{\sqrt{3}}{2}e_2, 0 \right),$$

$$d_3 = (r + e_3, 0, 0),$$

$$d_4 = \left(-\frac{1}{2}r - \frac{1}{2}e_4, \frac{\sqrt{3}}{2}r + \frac{\sqrt{3}}{2}e_4, l \right),$$

$$d_5 = \left(-\frac{1}{2}r - \frac{1}{2}e_5, -\frac{\sqrt{3}}{2}r - \frac{\sqrt{3}}{2}e_5, l \right),$$

$$d_6 = (r + e_6, 0, l)$$

设向量 $m = (m_x, m_y, m_z)$ 为套筒的轴心方向向量, 由管壁对应坐标可以知道两个中心坐标点为:

$$M_1 = \frac{d_1 + d_2 + d_3}{3}$$

$$M_2 = \frac{d_4 + d_5 + d_6}{3}$$

则 $m = M_1 - M_2$

则可以求出套筒的轴心坐标 m

$$m_x = \frac{1}{6}(2e_6 - 2e_3 + e_1 - e_4 + e_2 - e_5),$$

$$m_y = \frac{\sqrt{3}}{6}(e_4 - e_1 + e_2 - e_5),$$

$$m_z = l$$

以原点 O 为定点, 作平行于套筒且长度为 l 的线段, 设线段的端点坐标为 $F = (x_F, y_F, z_F)$ 则可以知道

$$|F|^2 = x_F^2 + y_F^2 + z_F^2 = l^2$$

由两直线平行运算设:

$$\frac{x_F}{m_x} = \frac{y_F}{m_y} = \frac{z_F}{m_z} = \lambda$$

从而求出:

$$\lambda = \frac{l}{\sqrt{m_x^2 + m_y^2 + m_z^2}}$$

则

$$F = \left(\frac{lm_x}{\sqrt{m_x^2 + m_y^2 + m_z^2}}, \frac{lm_y}{\sqrt{m_x^2 + m_y^2 + m_z^2}}, \frac{l^2}{\sqrt{m_x^2 + m_y^2 + m_z^2}} \right)$$

可以知道由平台坐标系到测量工作的坐标系的旋转矩阵为

$$R_1 = \begin{bmatrix} \frac{\sqrt{2}}{2} & 0 & \frac{\sqrt{2}}{2} \\ -\frac{\sqrt{2}}{2} & 0 & \frac{\sqrt{2}}{2} \\ 1 & 0 & \frac{\sqrt{2}}{2} \end{bmatrix}$$

所以可知, 相对于平台的移动后的 $F^T = R_1 F^T$, 线上任意一点在平台坐标下的坐标为 $n^T = R_1 n^T$, 由此可以解

出 R 中沿 3 个坐标轴旋转的关系如下:

$$\begin{cases} c\beta c\gamma - c\alpha s\gamma + s\alpha s\beta c\gamma = \frac{\lambda m_x}{l} \\ c\beta s\gamma + c\alpha c\gamma + s\alpha s\beta s\gamma - s\alpha c\gamma + c\alpha s\beta s\gamma = \frac{\lambda m_y}{l} \\ -s\beta + s\alpha c\beta + c\alpha c\beta = \lambda \end{cases}$$

从而建立了六个测量长度和 (α, β, γ) 之间的关系. 已知了探入式测量工装的 6 个读数, 通过方程组就可以求解得带上平台的 (α, β, γ) .

上平台原点坐标 O_p 相对于探入式测量工装的表示为:

$$O_p = (-l_1 + r, 0, l_2)$$

l_1 为上平台原点到第一侧探头所在面的距离; l_2 为上平台原点到探入式测量工装最下面的距离; 则通过坐标变化可以知道上平台位置的 (x, y, z)

$$\begin{cases} x = (1 - c\beta c\gamma)(l_1 + r) + (s\alpha s\gamma + c\alpha s\beta c\gamma - 1)l_2 \\ y = (1 - c\beta s\gamma)(l_1 + r) + (-s\alpha s\gamma + c\alpha s\beta s\gamma - 1)l_2 \\ z = (1 + s\beta)(l_1 + r) + (c\alpha s\beta - 1)l_2 \end{cases}$$

至此已经知道了将探入式测量工装的轴心按照一个定点如何旋转到与套筒的轴心平行. 然后只要将平台上下或者左右平动, 就可以将两个轴心完全重合, 从而实现仪器的精确安装. 此时

$$\begin{cases} x = x_F - m_x \\ y = y_F - m_y \\ z = z_F - m_z \end{cases}$$

综上可以知道平台 (x, y, z) 与六个测量的距离的关系

$$\begin{cases} x = (1 - c\beta c\gamma)(l_1 + r) + (s\alpha s\gamma + c\alpha s\beta c\gamma - 1)l_2 + x_F - m_x \\ y = (1 - c\beta s\gamma)(l_1 + r) + (-s\alpha s\gamma + c\alpha s\beta s\gamma - 1)l_2 + y_F - m_y \\ z = (1 + s\beta)(l_1 + r) + (c\alpha s\beta - 1)l_2 + z_F - m_z \end{cases}$$

通过探入式测量工装, 机器人可以准确的测量出套筒中轴与通孔中轴的相对位置, 也就是为了达到目标位置(两者轴线平行与重合), 六自由度平台平台应该移动的广义坐标 $q_F = (x_F, y_F, z_F, \alpha_F, \beta_F, \gamma_F)$, 当六自由度平台位姿运动了不可直接测量的广义坐标 $q_a = (x_a, y_a, z_a, \alpha_a, \beta_a, \gamma_a)$, 位置发生改变后, 探入式测量工装又能得到此刻两个中轴线重合需要移动的广义坐标 $q_b = (x_b, y_b, z_b, \alpha_b, \beta_b, \gamma_b)$.

则可以得到由 q_F 引起的坐标变换

$$\begin{aligned} {}^F_o T(x_F, y_F, z_F, \alpha_F, \beta_F, \gamma_F) &= {}^F_A T {}^A_o T \\ &= \begin{bmatrix} {}^F_A R & {}^A_o R & {}^F_A R {}^A P_{OORG} + {}^F P_{AORG} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

其中, ${}^F_A T, {}^A_o T$ 为 q_b, q_a 引起的坐标变换. 由于 q_b, q_F 可知, 因此 ${}^F_A T, {}^A_o T, {}^F_A R, {}^A_o R$ 可知. 由于 ${}^A_o R = {}^F_A R^{-1} {}^F_o R$, 则通过得到的变换矩阵可进一步计算出运动过的广义坐标角

度 $(\alpha_a, \beta_a, \gamma_a)$. 计算出运动过的广义坐标 (x_a, y_a, z_a) . 因此通过探入式测量工装, 可以得到六自由度平台运动过的广义坐标. 通过微分的方法可以计算出位置的变化率, 即位移速度和转动速度. 这样就给机器人控制系统提供了位置和速度的反馈. 使得本机器人无需正解和其他传感器就实现六自由度平台基于工作空间的控制.

4 机器人滑模控制器的设计

动力学方程可以改写为如下形式:

$$\ddot{\mathbf{q}} = \mathbf{A}(\mathbf{q}) + \mathbf{C}(\mathbf{q})\mathbf{J}^T \boldsymbol{\tau} = \mathbf{A}(\mathbf{q}) + \mathbf{B}(\mathbf{q})\mathbf{u}$$

上式中 $\boldsymbol{\tau} = (\tau_1, \tau_2, \tau_3, \tau_4, \tau_5, \tau_6)$ 因 \mathbf{q} 为笛卡儿坐标, $\mathbf{q} = (x, y, z, \alpha, \beta, \gamma)$, 令 $\boldsymbol{\tau} = \mathbf{u} = (u_1, u_2, u_3, u_4, u_5, u_6)$

因此动力学方程可以进一步化为:

$$\begin{aligned} \ddot{x} &= \mathbf{A}_1(\mathbf{q}) + \mathbf{B}_1(\mathbf{q})\mathbf{u} \\ \ddot{y} &= \mathbf{A}_2(\mathbf{q}) + \mathbf{B}_2(\mathbf{q})\mathbf{u} \\ \ddot{z} &= \mathbf{A}_3(\mathbf{q}) + \mathbf{B}_3(\mathbf{q})\mathbf{u} \\ \ddot{\alpha} &= \mathbf{A}_4(\mathbf{q}) + \mathbf{B}_4(\mathbf{q})\mathbf{u} \\ \ddot{\beta} &= \mathbf{A}_5(\mathbf{q}) + \mathbf{B}_5(\mathbf{q})\mathbf{u} \\ \ddot{\gamma} &= \mathbf{A}_6(\mathbf{q}) + \mathbf{B}_6(\mathbf{q})\mathbf{u} \end{aligned}$$

设计控制器, 针对系统笛卡尔空间位置的六个控制目标, 对六自由度平台进行位置姿态控制. 当达到所需位姿角度时, 机器人的六自由度上移动速度为 0, 摆角 $\alpha = \alpha_e, \beta = \beta_e, \gamma = \gamma_e$, 位移 $x = x_e, y = y_e, z = z_e$. 对六个状态变量分别设置滑模面. 六个滑动面组成一个向量型滑动面 $\mathbf{S} = \mathbf{H}(\mathbf{q} - \mathbf{q}_e) + \mathbf{Z}\dot{\mathbf{q}}$

$$\text{其中 } \mathbf{H} = \begin{bmatrix} h_1 & & & & & \\ & h_2 & & & & \\ & & h_3 & & & \\ & & & h_4 & & \\ & & & & h_5 & \\ & & & & & h_6 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{Z} = \begin{bmatrix} z_1 & & & & & \\ & z_2 & & & & \\ & & z_3 & & & \\ & & & z_4 & & \\ & & & & z_5 & \\ & & & & & z_6 \end{bmatrix}$$

取 Lyapunov 能量函数为

$$V = \mathbf{S}^T \mathbf{S} / 2 = (S_1^2 + S_2^2 + S_3^2 + S_4^2 + S_5^2 + S_6^2) / 2$$

采用指数趋近律. 令:

$$\dot{\mathbf{S}} = -\varepsilon \text{sgn}(\mathbf{S}) - k\mathbf{S}$$

即:

$$\dot{S}_n = -\varepsilon \text{sgn}(S_n) - kS_n, n = 1, 2, \dots, 6$$

其中, $\varepsilon > 0, k > 0$

$$\dot{\mathbf{S}} = \mathbf{H}\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{Z}\dot{\mathbf{q}} = -\varepsilon \text{sgn}(\mathbf{S}) - k\mathbf{S}$$

带入 $\dot{\mathbf{q}} = \mathbf{A}(\mathbf{q}) + \mathbf{B}(\mathbf{q})\mathbf{u}$ 得到:

$$\mathbf{H}\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{Z}(\mathbf{A}(\mathbf{q}) + \mathbf{B}(\mathbf{q})\mathbf{u}) = -\varepsilon \text{sgn}(\mathbf{S}) - k\mathbf{S}$$

可推导出

$$\begin{aligned} V &= S_1 \dot{S}_1 + S_2 \dot{S}_2 + S_3 \dot{S}_3 + S_4 \dot{S}_4 + S_5 \dot{S}_5 + S_6 \dot{S}_6 \\ &= \sum_{n=1}^6 (-\varepsilon |S_n| - kS_n^2) < 0 \end{aligned}$$

两侧同时积分, 可得

$$\begin{aligned} V(t) - V(0) &= \int_0^t \sum_{n=1}^6 (-\varepsilon |S_n| - kS_n^2) d\sigma \\ &= \sum_{n=1}^6 \int_0^t (-\varepsilon |S_n| - kS_n^2) d\sigma \end{aligned}$$

进而得到

$$\begin{aligned} V(t) &= \frac{1}{2} \mathbf{S}^T \mathbf{S} \\ &= (S_1^2 + S_2^2 + S_3^2 + S_4^2 + S_5^2 + S_6^2) / 2 \leq V(0) \\ &= \frac{1}{2} \mathbf{S}(0)^T \mathbf{S}(0) < \infty \end{aligned}$$

又因为 Lyapunov 函数

$$V = \mathbf{S}^T \mathbf{S} / 2 = (S_1^2 + S_2^2 + S_3^2 + S_4^2 + S_5^2 + S_6^2) / 2$$

正定, 恒大于零. 因此可以得出:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \sum_{n=1}^6 \int_0^t (\varepsilon |S_n| + kS_n^2) d\sigma \leq V(0) < \infty$$

进而得到

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \int_0^t |S_n| d\sigma < \infty;$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \int_0^t S_n^2 d\sigma < \infty, n = 1, 2, \dots, 6$$

因此 $S_n \in L_1$ (S_n 绝对值可积分), $S_n \in L_2$ (S_n 平方可积分).

同时由式(20)有:

$$V(t) = (S_1^2 + S_2^2 + S_3^2 + S_4^2 + S_5^2 + S_6^2) / 2 < \infty$$

可知 $S_n \in L_\infty$

则可知:

$$\dot{V} = S_1 \dot{S}_1 + S_2 \dot{S}_2 + S_3 \dot{S}_3 + S_4 \dot{S}_4 + S_5 \dot{S}_5 + S_6 \dot{S}_6 < \infty$$

进而有 $S_n \in L_\infty$.

根据 Barbalat 引理, 有 $\lim_{t \rightarrow \infty} S_n = 0$, 即滑动面 S_n 是渐近稳定的, 也即向量滑动面 \mathbf{S} 是渐近稳定的.

5 仿真实验

在 Matlab 软件中对多信息融合印刷机精密装配机器人控制算法进行仿真实验. 设定控制目标为让机器人上板到达指定位姿. 反解得到每根支杆所需达到的长度值 z_n 其中 $n = 1, 2, \dots, 6$, 之后滑模控制器控制支杆从运动范围最大的中间长度到达目标长度, 取其中一根支杆 z_1 的长度变化如下图 4 所示.

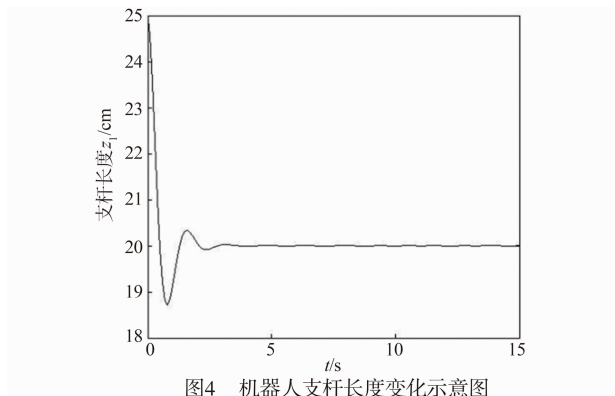


图4 机器人支杆长度变化示意图

由仿真结果可以看出,机器人支杆长度能够在较短时间内由中间长度变化达到目标长度,证明了滑模控制器的有效性。

6 结束语

本文完成了多信息融合印刷机精密装配机器人探入式测量工装的建模,通过探入式测量工装的读数得到了平台与通孔的相对位姿之间的关系。最终通过测量工装得到了机器人上板的速度与加速度。之后利用滑模控制方法建立了控制器,实现了对机器人的精确控制。本项目除了可以应用于印刷机套筒安装之外,在精密装配领域有广泛的应用价值,在精密操作,手术医疗等方面有广泛的推广价值。

参考文献

- [1] 李磊. 六自由度并联平台位置正解及控制方法研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2008. 7.
Li Lei. Research on forward kinematics and control method of 6-Dof parallel platform[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2008.
- [2] K H Hunt. Kinematic Geometry of Mechanisms[M]. Oxford: Clarendon Press, 1978. 268 - 270.
- [3] H Mac Callion, D T Pham. The analysis of a 6-DOF workstation for mechanized assembly[A]. Proc 5rd Congress on TMM[C]. Montreal, Canada: Springer, 1979. 611 - 616.
- [4] K H Hunt. Structural kinematic of inparallel-actuated robot-arms[J]. Journal of Mechanical Design, 1983, 105(4): 705 - 712.
- [5] Yiu Y K Hunt. Kinematic geometry, dynamic and control of parallel Manipulator[D]. Hong Kong: Hong Kong University of Science and Technology, 2002. 35 - 49.
- [6] 石德新, 万磊, 江世媛, 等. 6 自由度船舶运动模拟系统[J]. 船舶工程, 1997, 1997(2): 4 - 6.
Shi Dexin, Wan Lei, Jiang Shiyuan, et al. 6-D of ship motion simulation platform[J]. Ship Engineering, 1997, 2: 4 - 6. (in Chinese)

- [7] 黄真, 孔令富, 方跃法. 并联机器人机构学及理论控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 1997. 6 - 32.
Huang Zhen, Kong Lingfu, Fang Yuefa. Kinematic of Machinery And Control of Parallel Actuated Robot[M]. Beijing: China Machine Press, 1997. 6 - 32. (in Chinese)
- [8] 汪劲松, 段广洪, 杨向东, 等. VAMITIY 虚拟轴机床[J]. 制造技术与机床, 1998, (2): 42 - 43.
Wang Jinsong, Duan Guanghong, Yang Xiangdong, et al. VAMITIY parallel kinematics machine tools[J]. Manufacturing Technology and Machine Tools, 1998, (2): 42 - 43. (in Chinese)
- [9] Nguyen C C, Antrazi S S, Zhou Z L. Adaptive control of a Stewart Platform-based manipulator[J]. Journal of Robotic Systems, 1993, 10(5): 657 - 687.
- [10] Kim N, Lee C W, Liang C G. High speed tracking control of stewart platform manipulator via enhanced sliding mode control[A]. Proc of the IEEE International Conference on Robotics and Automation[C]. Leuven, Belgium: IEEE, 1998. 2716 - 2721.
- [11] 苏娟, 王百合, 刘代志, 等. 一种基于拓扑约束的多核跟踪算法[J]. 电子学报, 2015, 43(2): 353 - 357.
Su Juan, Wang Baihe, Liu Daizhi, et al. A multi-kernel tracking algorithm based on topology constraint[J]. Acta Electronica Sinica, 2015, 43(2): 353 - 357. (in Chinese)
- [12] 阎大海, 李元香, 龚文引, 等. 一种求解约束优化问题的自适应差分进化算法[J]. 电子学报, 2016, 44(10): 2535 - 2542.
Xia Da-hai, Li Yuan-xiang, Gong Wen-yin, et al. An adaptive differential evolution algorithm for constrained optimization problems[J]. Acta Electronica Sinica, 2016, 44(10): 2535 - 2542. (in Chinese)

作者简介



李壮举 男, 1975 年生于河南南阳, 工学博士, 研究方向为多变量系统解耦控制、复杂系统的控制研究、机器人技术研究。
E-mail: lizhuangju@bucea.edu.cn

梅杰 男, 1991 年生于河南驻马店, 硕士研究生, 研究方向为复杂系统的控制研究、机器人技术研究。
E-mail: 2358759207@qq.com

曹少中 男, 1965 年生于河北保定, 工学博士, 北京印刷学院信息工程学院教授, 研究方向为非线性系统理论、机器人控制理论。
E-mail: caoshaozhong@bigc.edu.cn

赵伟 男, 1983 年生于山东泰安, 工学博士, 北京印刷学院信息工程学院讲师, 研究方向为机器人技术。
E-mail: zhaoweihu@163.com