

基于多体动力学的轮式悬架移动并联机械手动力学性能研究^①

杨玉维^{②*} 赵新华^{*} 王收军^{*} 李彬^{*}

(* 天津理工大学天津市复杂系统控制理论及应用重点实验室 天津 300384)

(** 天津理工大学机械工程学院 天津 300384)

摘 要 考虑到移动串联机械手不能很好地满足高速、大负载、准确作业的性能要求,提出了一种新颖的轮式悬架移动并联机械手构型。为实现建模的通用性与完备性,基于多体动力学,在笛卡尔坐标下构建了系统逆动力学模型,并据此分别对移动串联机械手和移动并联机械手进行了逆动力学数值仿真,以验证建模方法的正确性和新构型移动机械手的动力学性能。仿真结果的比较、分析表明,与串联构型相比,移动并联机械手的系统刚度有所提高,且不必增大能耗为代价;电机驱动力矩有所降低,有利于电机的选型和控制策略的制定。

关键词 多体动力学,逆动力学模型,数值仿真

0 引 言

移动串联机械手拓展了机械手的工作空间,有着广阔的应用的前景,但其不满足高速、大负载、大范围准确作业的性能要求。由于高速构件具有较大惯性力,不利于系统控制,为此通常采用低质构件来降低惯性力,但这会使系统高速运转时易产生弹性变形、振动,导致作业精度降低。为了提高机械手末端轨迹跟踪精度,大量学者致力于柔性系统逆动力学研究和移动柔性机械手控制研究。文献[1,2]构建了柔性机械手的逆动力学模型,在频域内求解了关节前馈驱动力矩,并以此为已知条件,对系统正动力学模型进行通常意义(时域内)上的微分方程的求解,以获取弹性构件的弹性变形。但系统正动力学模型求解过程中,没有考虑到驱动力矩与构建末端运动的时间不同步问题(非因果性^[1,2]),所以该方法存在一定的不足;文献[3-6]研究了柔性机械手建模与控制问题;文献[7]综合考虑机构的奇异构型,并进行了平面结构逆动力学问题的研究;文献[8,9]分别基于线弹性动力学与结构动力学,相应采用有限元法和模态法构建了一平面并联机械手动

力学模型;文献[10]基于拉格朗日原理和有限元法及子结构法构建了一平面并联机械手动力学模型;文献[11,12]针对轮式平面柔性移动机械手逆动力学进行了系统研究,在有限元法基础上,综合利用虚功原理和牛顿-欧拉方程构建了该移动柔性机械手系统的完整逆动力学模型,并在频域下,求解了系统驱动力(矩)和弹性构型变量等。由于系统弹柔性的存在,在大负载、高速、轻质等工况下,系统末端执行器轨迹跟踪精度会相应的降低。为解决上述矛盾,本文借鉴并联机械手高速、大刚度、准确作业等优点,提出了一种新构型——轮式悬架移动并联机械手(专利号:ZL 201120108956.5)。针对这一新构型,以多体动力学理论基础,在笛卡尔坐标下,综合采用牛顿-欧拉法和拉格朗日法构建了系统逆动力学模型,并以此为基础分别针对移动串、并联机械手逆动力学进行仿真,并通过仿真结果比较分析,佐证了该构型移动机械手所具备的优点。

1 动力学模型建立

多体系统动力学建模通常采用 2 种坐标系:全局坐标系和体坐标系^[13]。体坐标系相对全局坐标

① 国家自然科学基金(51275353,51205289),天津市应用基础及前沿技术研究计划(自然科学基金一般项目)(12JCYBJC12200)和天津市高等学校科技发展基金计划(20100401)资助项目。

② 男,1975 年生,博士;研究方向:移动机器人;联系人,E-mail:buddhawei@126.com
(收稿日期:2013-03-11)

系的位姿可采用笛卡尔坐标法或相对(关节)坐标法。鉴于笛卡尔坐标法具有以下优点:(1)动力学建模简单;(2)动力学方程中容易包含系统构件间运动学约束方程及运动副约束反力。本文采用笛卡尔坐标法描述系统运动学模型。图 1 所示为移动机械手简图,其中 $O-X^0 Y^0$ 、 $O^i-X^i Y^i$ 分别为轮式悬架移动机械手的全局坐标系和构件 i ($i=1,2,\dots,5$) 体坐标系。依据 Chales 定理^[13],构件 i 任一点位置矢量 $\mathbf{r}^i$ 可以描述为^[11,13]:

$$\mathbf{r}^i = \mathbf{R}^i + \mathbf{A}^i \bar{\mathbf{u}}^i \quad (1)$$

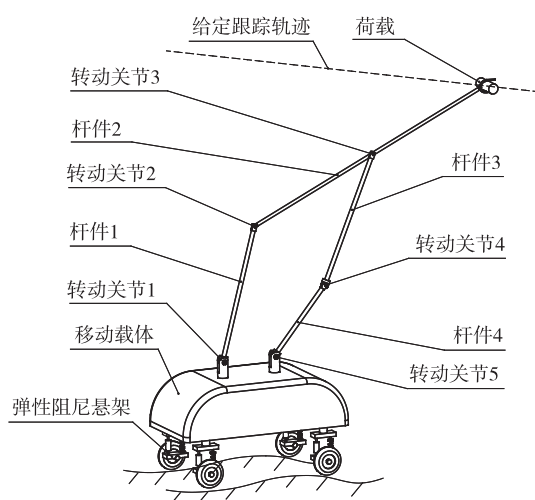


图 1 移动并联机械手

其中 $\bar{\mathbf{u}}^i$ 为构件 i 任一点位置矢量,上横线表示其度量于体坐标系,无(—)表示度量于全局坐标系; $\mathbf{R}^i$ 为其体坐标系原点相对全局坐标系原点的位置矢量; $\mathbf{A}^i = \begin{bmatrix} \cos\theta^i & -\sin\theta^i \\ \sin\theta^i & \cos\theta^i \end{bmatrix}$ 为机械手体坐标系转动矩阵^[13], θ^i 为构件 i 体坐标系与全局坐标系的 x 轴的夹角。引入用于描述构件 i 体坐标系的位姿变量: $\mathbf{q} = [\mathbf{R}^{3T} \theta^3]^T$ 。构件 i 任一点速度矢量 $\dot{\mathbf{r}}^i$ 可以描述为:

$$\dot{\mathbf{r}}^i = \mathbf{B}^i \dot{\mathbf{q}}^i \quad (2)$$

其中 $\mathbf{B}^i = [\mathbf{I} \quad \mathbf{A}_\theta^i \bar{\mathbf{u}}^i]$ 。

综合考虑系统非完整约束和完整约束(运动副约束及末端轨迹),采用独立坐标法^[11],可以得到系统独立变量 $\mathbf{q}_{id}$,并将之用于描述系统构型: $\mathbf{q} = \mathbf{f}_1(\mathbf{q}_{id}, t)$,其中 $\mathbf{q} = [\mathbf{q}^{1T} \dots \mathbf{q}^{5T}]^T$ 。

由于系统各构件体坐标系原点与构件质心相固结,致使构件平动与转动之间动力学解耦,从而使系统动力学模型得到简化。利用牛顿-欧拉法可以得到构件 i 系统动能: $T^i = \frac{1}{2} \dot{\mathbf{q}}_{id}^T \mathbf{M}_{id}^i \dot{\mathbf{q}}_{id}$,其中 $\mathbf{M}_{id}^i$ 表示

与独立坐标 $\mathbf{q}_{id}$ 相对应的构件 i (上角标)的惯性张量。由此可以推得系统动能: $T = \frac{1}{2} \dot{\mathbf{q}}_{id}^T \mathbf{M}_{id} \dot{\mathbf{q}}_{id}$,其中

$\mathbf{M}_{id} = \sum_{i=1}^5 \mathbf{M}_{id}^i$ 为与独立坐标相对应的系统惯性张量。应用拉格朗日法建立系统逆动力学模型,并采用独立坐标描述^[11]:

$$\mathbf{M}_{id} \ddot{\mathbf{q}}_{id} = \mathbf{Q}_{id} \quad (3)$$

上述动力学模型的构建具有通用性:无论移动载体还是机械手构件皆通用。且具有完备性:可以将系统约束方便地以拉格朗日乘子方式引入到系统动力学模型中,致使动力学模型中包含运动副约束反力。

2 数值仿真

为了说明移动并联机械手的优点,本文针对相同的跟踪轨迹、负载、工作时间和移动载体等,分别对移动并联和串联机械手进行数值仿真(平面工况),并对结果进行比较。具体如下:

采用状态空间法描述上述动力学模型(式(3))。定义状态向量为 $\mathbf{Y} = [\mathbf{q}_{id}^T \quad \dot{\mathbf{q}}_{id}^T]^T$, $\dot{\mathbf{Y}} = [\dot{\mathbf{q}}_{id}^T \quad \ddot{\mathbf{q}}_{id}^T]^T$,将之代入动力学方程(式(3)),经过适当变换,可以得到

$$\dot{\mathbf{Y}} = \mathbf{f}(\mathbf{Y}, t) \quad (4)$$

式(4)为二阶常微分方程组(ordinary difference equations, ODE),则对轮式悬架移动机械手逆动力学方程(式(3))的求解,转换为带初值的二阶常微分方程组求解问题。由于该动力学方程组的高度非线性,获取其解析解在多数情况下是不可行的。基于 Gear's 法(高阶线性多步法^[11]),并采用软件 Matlab2012 对之进行数值法求解。

轮式移动串、并联机械手数值仿真所用参数^[11]如表 1、表 2 所示,移动并联机械手工况如图 2 所示。

表 1 移动并联机械手数值仿真模型参数

$m^1 = 20\text{kg}$	$m^2 = 1\text{kg}$	$m^3 = 1\text{kg}$	$m^4 = 1.3\text{kg}$
$m^5 = 1.3\text{kg}$	$l^1 = 0.5\text{m}$	$l^2 = 0.6\text{m}$	$l^3 = 1.2\text{m}$
$l^4 = 0.5\text{m}$	$l^5 = 0.5\text{m}$	$m_{or1} = 0.5\text{kg}$	
$m_{or2} = 0.5\text{kg}$	$m_p^3 = 5\text{kg}$		
$K_1 = 2000\text{N/m}$	$C_1 = 200\text{N} \cdot \text{s/m}$	$K_2 = 5000\text{N/m}$	
$C_2 = 500\text{N} \cdot \text{s/m}$	$\theta = 5^\circ$	$l_{01} = 0.2075\text{m}$	$l_{02} = 0.2175\text{m}$
$l^{11} = 0.22\text{m}$	$t = 10\text{s}$	$v = 0.3\text{m/s}$	
$\lambda = 0.4\text{m}$	$H_0 = 0.03\text{m}$		

表 2 移动串联机械手数值仿真模型参数

$m^1 = 20\text{kg}$	$m^2 = 1\text{kg}$	$m^3 = 1\text{kg}$	$m_p^3 = 5\text{ kg}$	$m_{or1} = 0.5\text{ kg}$
$m_{or2} = 0.5\text{ kg}$	$l^1 = 0.5\text{m}$	$l^2 = 0.6\text{m}$	$l^3 = 1.2\text{m}$	
$K_1 = 2000\text{N/m}$	$C_1 = 200\text{N} \cdot \text{s/m}$	$K_2 = 5000\text{ N/m}$		
$C_2 = 500\text{N} \cdot \text{s/m}$	$\theta = 5^\circ$	$l_{01} = 0.1450\text{m}$	$l_{02} = 0.1480\text{m}$	
$t = 10\text{s}$	$v = 0.3\text{m/s}$			
$\lambda = 0.4\text{m}$	$H_0 = 0.03\text{m}$			

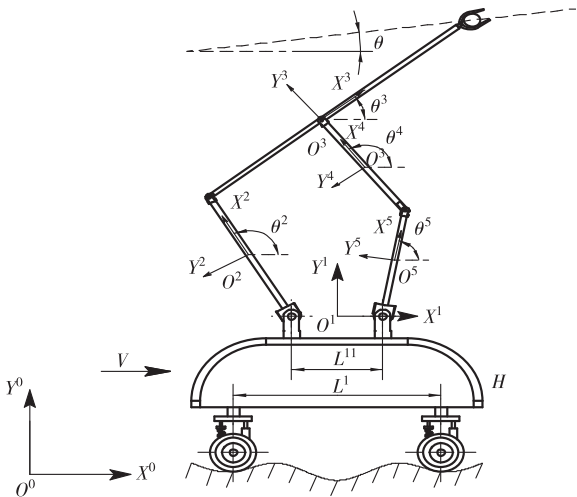


图 2 移动并联机械手工况

移动串、并联机械手针对相同给定工况(图 2, 表 1,2 所示。)下,机械手驱动电机所耗能量如表 3 所示。

表 3 移动机械手能耗

	移动载体 能耗(J)	电机 1 能耗(J)	电机 2 能耗(J)	总能耗 (J)
移动并联机械手	1.0380	12.9585	56.6154	70.6120
移动串联机械手	1.5124	27.8913	39.0612	68.4648

相对移动并联机械手而言,电机 1、2 分别代表转动关节 1、5 的驱动电机;相对移动串联机械手^[14]而言,电机 1、2 分别代表转动关节 1、2 的驱动电机。

通过比较能耗不难发现:移动并联机械手比移动串联机械手多 2 个构件,但针对同工况和任务,系统能耗略有增加。相对串联机械手而言,并联机械手的刚度获得较大的提高,有利于准确作业,同时移动并联机械手将机械手驱动电机布置在移动载体上,相机械手运动而言,移动载体速度低于机械手,

从而大大降低了电机系统与移动机械手间的动力学非线性耦合程度,同时也改善了电机系统的工作环境,延长了使用寿命等等。

部分变量数值仿真结果如图 3 - 图 10 所示。图 3 所示,机械手构件角位移、速度、加速度间关系符合: $\theta^i = \frac{d\theta^i}{dt}$, $\ddot{\theta}^i = \frac{d^2\theta^i}{dt^2}$, 从而验证了该逆动力学模型和数值算法的有效性与正确性;图 4 - 图 6 为移动串、并联机械手 3 个驱动电机力矩仿真,通过比较可以发现:相对串联而言,移动并联机械手针对相同工况完成一样任务所需驱动力矩较小,有利于降低成本;图 7 - 图 9 为移动串、并联机械手相应构件转动变量 $\theta^{1,2,3}$ 数值仿真,结果表明 2 种构型的移动机械手相应构件转动变量 $\theta^{1,2,3}$ 相差甚微;图 10 为移动并联机械手构件 5 的转动变量 θ^5 数值仿真,其中图 10 与图 9 比较可得,并联机械手的构件 5 的转动速度将大于移动串联机械手的构件 3,从而导致表 3 中电机 2 能耗的差异。

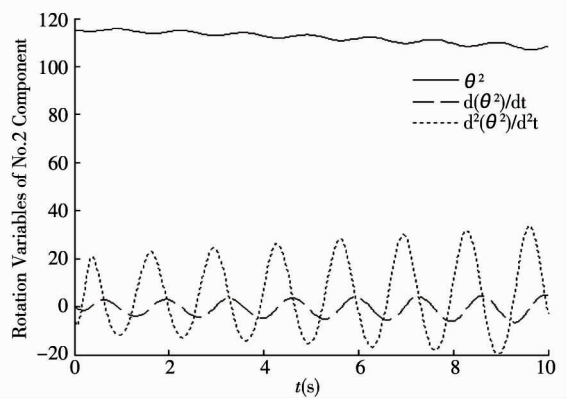


图 3 移动并联机械手 $\theta^2, \dot{\theta}^2, \ddot{\theta}^2$ 数据仿真

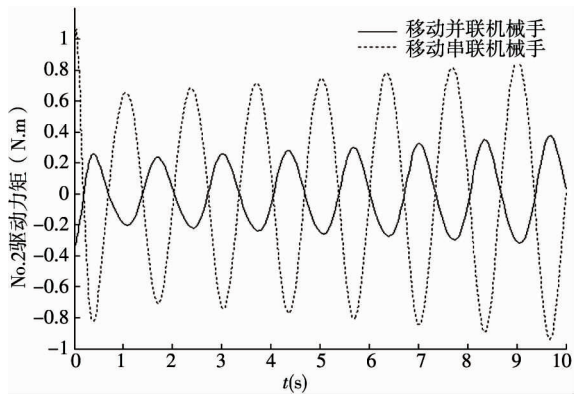


图 4 移动载体水平驱动力(移动并联、串联机械手)

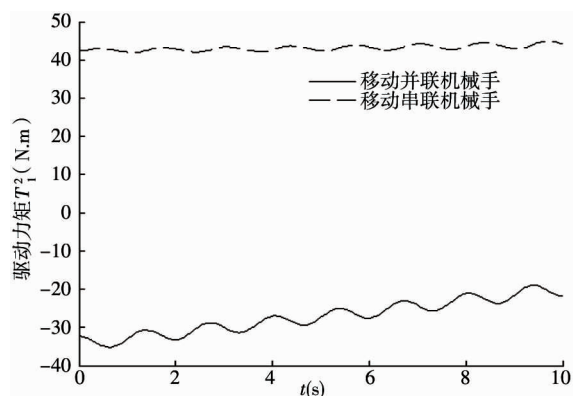


图 5 机械手第一驱动力矩数据仿真
(移动并联、串联机械手)

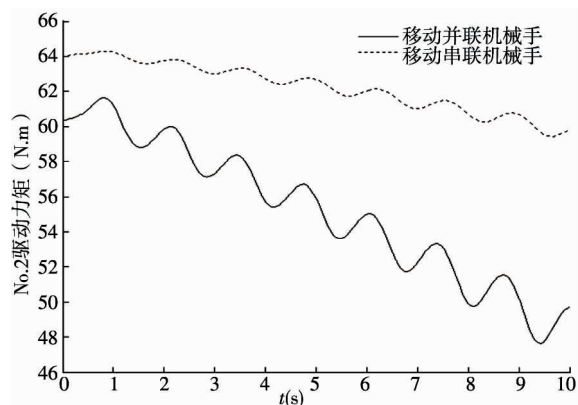


图 6 机械手第二驱动力矩数据仿真
(移动并联、串联机械手)

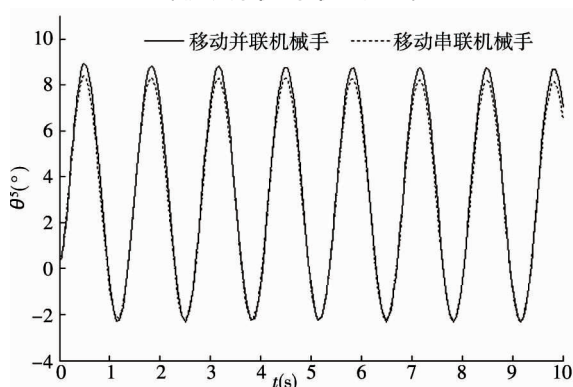


图 7 θ^1 数据仿真(移动并联、串联机械手)

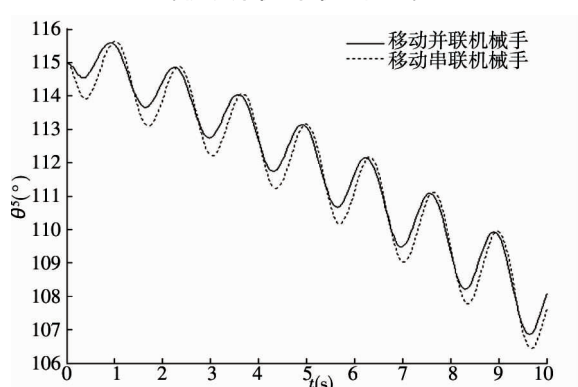


图 8 θ^2 数据仿真(移动并联、串联机械手)

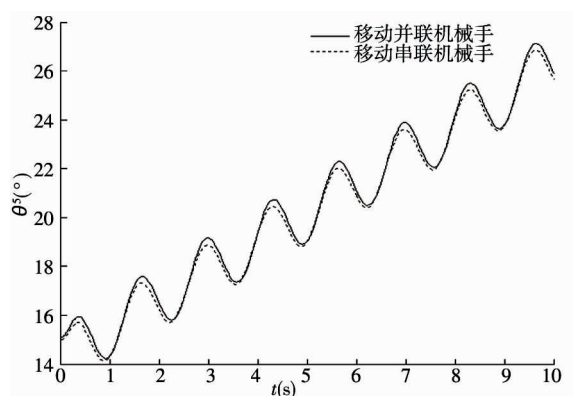


图 9 θ^3 数据仿真(移动并联、串联机械手)

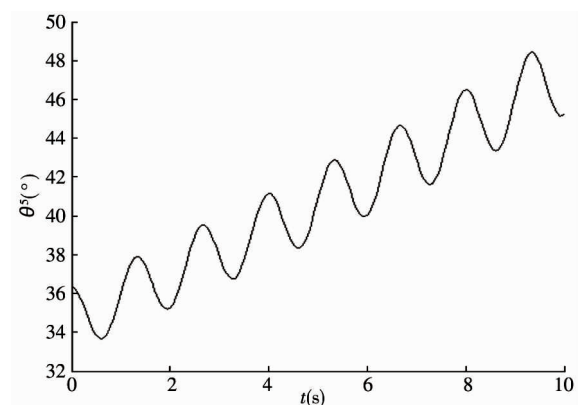


图 10 移动并联机械手 θ^5 数据仿真

3 结 论

本研究以多体动力学为指导并采用笛卡尔坐标系构建了移动机械手逆动力学模型,并针对相同工况和相关参数分别对移动串联、并联机械手进行了逆动力学数值仿真,仿真结果表明:(1)相对串联构型而言,移动并联机械手的系统刚度的提高,并不是以提高总体能耗为代价(如表 3 所示),从而从动

力学性能角度上证实了并联构型的优点;(2)相对移动串联机械手而言,移动并联机械手各电机驱动力矩均低于相应移动串联机械手电机驱动力矩,从而有利于电机的选型与后续控制策略的制定。总之,在不提高能耗的前提下,相对移串联机械手而言,移动并联机械手驱动电机工作环境得到改善;电机系统与机械手系统间的动力学非线性耦合得到削弱;系统刚度得到增强,作业精度得到提高。

参考文献

- [1] Bayo E. A finite-element approach to control the end point motion of a single link flexible robot. *Journal of Robotic systems*, 1987, 4(1) : 63-75
- [2] Bayo E, Movaghar R, Medus M. Inverse dynamics of a single-link flexible robot: analytical and experimental results. *International Journal of Robotics Automation*, 1987, 3(3) : 150-157
- [3] Moallem M, Patel R V, Khorasani K. An observer based inverse dynamics control strategy for tip position tracking of flexible multi-link manipulators. In: Proceedings of the IEEE Conference on Decision and Control, 1966, 4112-4117
- [4] Moulin H C, Bayo E. Accuracy of discrete models for the solution of the inverse dynamics problem for flexible arms, feasible trajectories, ASME. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 1997, 119(9) : 396-404
- [5] Zou J Q, Zhang J J, Lu Y F, et al. An explicit recursive formulation and parallel computation for inverse dynamics of planar flexible manipulators, Proceedings of the IEEE International Symposium on Industrial Electronics 3, 1997, 906-909
- [6] Trautt T A, Bayo E. Inverse dynamics of flexible manipulators with Coulomb friction and backlash and non-zero initial conditions. *Dynamics and Control*, 1999, 9(2) : 173-195
- [7] Kanaoka K, Yoshikawa T. Dynamic singular configurations of flexible manipulators. In: Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2000, 1 : 46-51
- [8] Piras G, Cleghorn W L, Mills J K, et al. Dynamic finite-element analysis of a planar high-speed high-precision parallel manipulator with flexible links [J]. *Mechanism and machine theory*, 2005, 40 : 849-862
- [9] Zhang X P, James Mills K, William L C. Dynamic modeling and experimental validation of a 3-PRR parallel manipulator with flexible intermediate links. *J Intell Robot Syst*, 2007, 50 : 323-340
- [10] Wang X Y, James K M. Dynamic modeling of a flexible-link planar parallel platform using a substructuring approach. *Mechanism and machine theory*, 2006, 41 : 671-687
- [11] 杨玉维, 张明路. 轮式悬架移动 2 连杆柔性机械手动力学研究与仿真. 高技术通讯, 2009, 19(10) : 1067-1072
- [12] 杨玉维, 张明路等. 轮式移动单杆柔性机械手逆动力学研究与仿真. 机械工程学报, 2010, 46(21) : 76-81
- [13] Ahmed A. Shabana. Dynamics of Multi-body Systems. Third Edition. Cambridge University Press, 2005, 189-247

Dynamic character study of a wheeled suspension mobile parallel manipulator based on multi-body dynamics

Yang Yuwei^{* **}, Zhao Xinhua^{* **}, Wang Shoujun^{* **}, Li Bin^{* **}

(^{*} Tianjin Key Laboratory for Control Theory & Applications in Complicated Systems,
Tianjin University of Technology, Tianjin 300384)

(^{**} School of Mechanical Engineering, Tianjin University of Technology, Tianjin 300384)

Abstract

A novel configuration for a wheeled suspension mobile parallel manipulator was presented based on the consideration of mobile serial manipulators' low performance in the circumstances of high speed, heavy load, etc. . According to multi-body dynamics, an inverse dynamic model was constructed in the Cartesian coordinate system to achieve modelling's generality and integration. Based on the model, the inverse dynamic simulation for a mobile serial manipulator and the presented mobile parallel manipulator was carried out to verify the correction of the modelling and the dynamic performance of the new presented manipulator. The simulation results show that the new manipulator has the better system rigid and the lower motor-driven torque compared with mobile serial manipulators.

Key words: multi-body dynamics, inverse dynamic model, numeric simulation