

文章编号: 1000-5013(2009) 04 0366- 05

大型造船门式绳牵引并联起重机器人的 机构设计与运动学位置逆解分析

郑亚青

(华侨大学 机电及自动化学院, 福建 泉州 362021)

摘要: 针对大型造船门式起重机存在的翻身作业不灵活、机械结构复杂等缺陷, 将 3 根绳牵引的欠约束绳牵引并联机器人技术引入到对大型造船门式起重机的改造中, 提出大型造船门式绳牵引并联起重机器人的概念. 参照现有大型造船门式起重机的基本参数, 按照 1: 50 的比例, 对该机器人的机构参数进行配置, 详细分析其广义运动学位置逆解问题并给出计算方法. 实例仿真表明, 该机器人能实现 6 自由度的吊运任务.

关键词: 欠约束; 门式起重机; 绳牵引; 并联机器人

中图分类号: TH 213. 502. 2; TH 112

文献标识码: A

目前, 国内造船模式趋向于大分段建造方式, 其目的主要是为了缩短船坞(船台) 的使用周期, 提高船坞(船台) 的利用率. 在我国的船厂中, 船坞(船台) 侧配置的起重设备常见的是门座起重机. 与传统门座起重机相比, 大型造船门式起重机对船体分段的安装和运输具有明显的优势^[1], 但它需要上小车和下小车配合实现船体分段的翻身作业, 机械结构复杂且船体分段的翻身作业轨迹灵活性不大^[2-5]. 20 世纪 90 年代初, 各国学者开始将机器人技术引入到对起重机技术的研究中. 1989 年, 美国国家标准技术研究所(NIST) 开始了 Robor Crane 项目的研究工作^[6-7]. 1980 年代末, Albus 提出一种绳牵引的 Stewart 平台形式的起重机器人. 该机器人由 6 根绳牵引一个动平台实现吊运任务^[8-9]. 1992 年, 日本的 Arai 提出了 3 根绳牵引的起重机器人^[10]. 但以上的起重机器人形式都不合适门式起重机. 1998 年, 德国的 Rostock 大学开始对带有串联子系统的 3 根绳牵引的门式起重机器人 Cable V 进行研究, 在机构学理论与运动控制技术方面的研究取得了一系列的成果^[11-14]. 但其控制方案及检测系统还有待改善, 且没有具体的产品, 离实际应用还有一定距离. 本文引入门式起重机器人系统 Cable V 的概念^[15], 提出大型造船门式绳牵引并联起重机器人的概念, 对该机器人的机构参数进行配置, 分析其运动学位置逆解问题.

1 机构设计

1.1 机构参数配置

大型造船门式绳牵引并联起重机器人采用的机构类型, 如图 1 所示. 该机构为 3 根绳牵引的 6 自由度欠约束并联机构(IRPM3-3R3T, 即 3 个转动自由度和 3 个平动自由度, 而 IRPM 为不完全约束定位机构(Incompletely Restrained Parallel Mechanism)) 和 3 个子系统组成.

作为初始研究, 为了简化, 暂时不考虑大车行走机构, 即支腿(刚性腿和柔性腿) 和 3 根主梁(即小车的运行轨道) 形成一个固定的机架. 3 套小车运行机构分别由交流伺服电机通过直线单元驱动, 在各自的主梁上实现匀速运动. 3 根绳牵引的 6 自由度欠约束并联机构(IRPM3-3R3T) 的驱动装置(交流伺服电机及绞盘等) 固定在小车的车架上, 吊具由 3 根缠绕在绞盘上的绳牵引实现 6 自由度的运动(3 个平动和 3 个转动). 即使小车都不动, 吊具也能实现 6 自由度的运动. 在实际对船体分段的安装和运输时,

收稿日期: 2008-03-17

通信作者: 郑亚青(1974), 女, 副教授, 博士, 主要从事绳牵引并联机构的研究. E-mail: yq_zheng@hqu.edu.cn.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50805054); 国家自然科学基金国际(地区) 合作与交流项目(50910157)

3 台小车在各自的主梁上实现匀速运动, 而牵引吊具的 3 根绳索根据吊运轨迹的需要进行伸缩实现长度的变化, 从而使吊具按预期的轨迹进行运动。

结合大型造船龙门起重机的基本参数, 进行大型造船门式绳牵引并联起重机器人机构参数的配置 (按照 1: 50 的比例): 跨度为 2.24 m, 净空高度为 1.4 m, 支腿基距为 0.56 m, 吊具的形状为等边三角形, 边长为 l 。小车和吊具的起升速度可以调整, 吊具的吊运轨迹也可以灵活改变, 比现有的大型造船龙门起重机优越。

1.2 驱动与控制原理

驱动 3 台小车和 3 个绞盘为 6 套交流伺服系统。绞盘由交流伺服电机直接驱动, 而小车是由交流伺服电机通过直线单元而进行驱动的。6 套交流伺服系统由多轴运动控制卡如 PMAC 卡进行控制的。

2 建模

吊具在实际吊运中必须实现一定的轨迹, 而实现 6 自由度的运动, 其位姿无法直接由 3 根绳长来确定。所以, 必须研究机构系统的广义运动学位置逆解问题, 来确定 3 根绳的长度及 3 台小车的位置。

2.1 机器人与吊具的坐标系

如图 1 所示, 独立可控的机器人驱动器坐标 $q = (s_1 \ s_2 \ s_3 \ l_1 \ l_2 \ l_3)^T \in R^6$ 。其中, 小车位置向量 $q_1 = (s_1 \ s_2 \ s_3)^T$, 绳长向量 $q_2 = (l_1 \ l_2 \ l_3)^T$ 。吊具参考点 P 的位姿 $y_P = (r \ \alpha)^T$, $r = (r_x \ r_y \ r_z)^T$, $\alpha = (\varphi_1 \ \varphi_2 \ \varphi_3)^T$ 。它描述了吊具参考点 P 在固定坐标系 K_0 的空间位置 r , 以及固定在吊具参考点 P 的活动坐标系 K_P 相对于 K_0 的姿态 α 。吊具相对于 K_0 的空间速度 $\dot{s}_P = (v \ \omega)^T$, 平动速度 $v = \dot{r} = (\dot{r}_x \ \dot{r}_y \ \dot{r}_z)^T$, 吊具相对于 K_0 的角速度 $\omega = (\omega_x \ \omega_y \ \omega_z)^T$ 。位姿 y_P 关于时间的导数 $\dot{y}_P = H(y_P)\dot{s}_P$, 有

$$\begin{bmatrix} \dot{r} \\ \dot{\alpha} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{3 \times 3} & 0 \\ 0 & H_\omega(\alpha) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix}, \text{ 而 } H_\omega(\alpha) = \frac{1}{\cos \varphi_2} \begin{bmatrix} \cos \varphi_2 & \sin \varphi_1 \sin \varphi_2 & -\cos \varphi_1 \sin \varphi_2 \\ 0 & \cos \varphi_1 \cos \varphi_2 & \sin \varphi_1 \cos \varphi_2 \\ 0 & -\sin \varphi_1 & \cos \varphi_1 \end{bmatrix}.$$

运动学位置逆解问题是, 已知给定的 y_P , 求 q 。由于 3 根绳长的运动学方程只有 3 个, 还需要另 3 个方程来建立, 以求得 q 。运动学速度逆解问题可描述为 $\dot{s}_P = H^{-1}(y_P)\dot{y}_P$, 3 根绳牵引的系统的运动学是未定的, 即吊具有 3 个自由度的晃动运动。

2.2 约束方程

2.2.1 几何约束(位置级别的约束) 如图 1 所示, 3 根绳存在介于机器人驱动器坐标 q 与吊具位姿坐标 y_P 之间的 3 个几何约束方程, 可表示为

$$g_i(q; y_P) = l_i^T l_i - \|l_i\|^2 = 0. \tag{1}$$

绳向量 l_i 在坐标系 K_0 下可表示为

$$l_i = r + {}^P T(\alpha) p_i - b_i, \quad i = 1, 2, 3. \tag{2}$$

其中, $l_1 = r + {}^P T(\alpha) p_1 - (0 \ d \ 0)^T + (s_1 \ 0 \ 0)^T$, $l_2 = r + {}^P T(\alpha) p_2 + (s_2 \ 0 \ 0)^T$, $l_3 = r + {}^P T(\alpha) p_2 + (0 \ d \ 0)^T - (s_3 \ 0 \ 0)^T$ 。 $p_i (i = 1, 2, 3)$ 为吊具相对于 K_P 的固定向量, 有 $p_1 = (\sqrt{3}/3l \ 0 \ 0)^T$, $p_2 = (-\sqrt{3}/6l \ -l/2 \ 0)^T$, $p_3 = (-\sqrt{3}/6l \ l/2 \ 0)^T$ 。 ${}^P T(\alpha)$ 是从 K_P 到 K_0 的坐标系变换矩阵, 满足

$$T(\alpha) = T_z(\varphi_3) T_y(\varphi_2) T_x(\varphi_1) = \begin{bmatrix} \cos \varphi_3 & -\sin \varphi_3 & 0 \\ \sin \varphi_3 & \cos \varphi_3 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \varphi_2 & 0 & \sin \varphi_2 \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \varphi_2 & 0 & \cos \varphi_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \varphi_1 & -\sin \varphi_1 \\ 0 & \sin \varphi_1 & \cos \varphi_1 \end{bmatrix}.$$

2.2.2 速度级别的约束 式(2)中的绳长向量对时间 t 求导, 可得

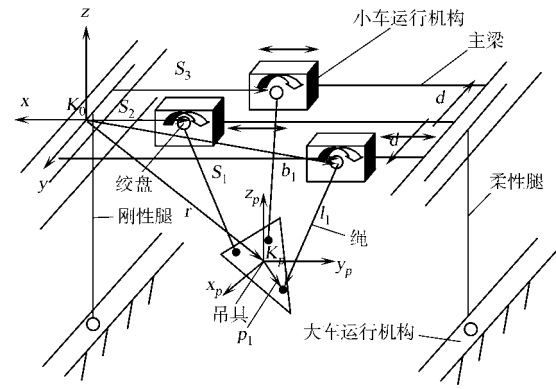


图 1 机构简图
Fig. 1 Sketch of the mechanism

$$\left. \begin{aligned} l_1 &= \dot{r} + \dot{p}_1 + (s_1 \ 0 \ 0)^T, \\ l_2 &= \dot{r} + \dot{p}_2 + (s_2 \ 0 \ 0)^T, \\ l_3 &= \dot{r} + \dot{p}_3 + (s_3 \ 0 \ 0)^T. \end{aligned} \right\} \tag{3}$$

式(1)对时间 t 求导, 可得

$$\dot{g}_i = 2l_i^T \dot{l}_i - 2 \|l_i\| \dot{l}_i = 0, \quad i = 1, 2, 3. \tag{4}$$

$p_i (i = 1, 2, 3)$ 对时间 t 的求导, \dot{p}_i 可由吊具的角速度 ω 来表达, 有 $\dot{p}_i = \tilde{\omega} p_i$. 则

$$\tilde{\omega} = \begin{bmatrix} 0 & -\omega_z & \omega_y \\ \omega_z & 0 & \omega_x \\ -\omega_y & \omega_x & 0 \end{bmatrix} = -\tilde{\omega}^T, \tag{5}$$

$$\tilde{\omega} p_i \equiv \omega \times p_i, \dot{l}_i = \dot{r} + \dot{p}_i - \dot{b}_i = v + \tilde{\omega} p_i - \dot{b}_i. \tag{6}$$

将式(3), (5)代入式(4), 有

$$\dot{g} \equiv G_s(q_1; y_P) \dot{s}_P + G_q(q; y_P) \dot{q} = 0. \tag{7}$$

这里, 约束矩阵 $G_s(q_1; y_P)$ 满足

$$G_s(q_1; y_P) = \begin{bmatrix} 2l_1^T & -2l_1^T \tilde{p}_1 \\ 2l_2^T & -2l_2^T \tilde{p}_2 \\ 2l_3^T & -2l_3^T \tilde{p}_3 \end{bmatrix} = [G_L \ G_R]. \tag{8}$$

2.3 吊具的动力学方程

吊具的动力学方程由式 $\dot{y}_P = H(y_P) \dot{s}_P$, 式(1)和 6 个运动微分方程组成, 有

$$\begin{bmatrix} mI & 0 \\ 0 & \theta_P \end{bmatrix}_{6 \times 6} \begin{bmatrix} \dot{v} \\ \dot{\omega} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \tilde{\omega}(\theta_P \omega) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_G \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} G_L^T \\ G_R^T \end{bmatrix}_{6 \times 3} \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \lambda_3 \end{bmatrix}. \tag{9}$$

其矩阵的形式为

$$M \dot{\dot{s}}_P + k_s = W_G + G_s^T \lambda$$

式中, m 为吊具的质量, θ_P 为吊具关于 K_P 的惯性张量, F_G 为吊具的重力向量, $\lambda \in R^{3 \times 1}$ 为 Lagrange 乘子, 是绳拉力坐标, 3 根绳的拉力可表示为 $F_i = 2l_i^T \lambda (i = 1, 2, 3)$.

3 广义运动学位置逆解

广义运动学位置逆解问题可描述为: 对给定的吊具的运动轨迹 $y_P(t)$, 在吊具沿该轨迹处于动力学平衡时来计算机器人坐标 $q(t)$.

由 $y_P(t)$ 可求得 $\dot{s}_P(t)$ 和 $\ddot{s}_P(t)$, 吊具沿 $y_P(t)$ 时处于动力学平衡状态. 记

$$G_s^T(q_1; y_P) \lambda = -W_d(y_P, \dot{s}_P, \ddot{s}_P), \tag{10}$$

则有

$$W_d(y_d, \dot{z}_d, \ddot{z}_d) = W_G - M \dot{\dot{s}}_P - K_s. \tag{11}$$

绳拉力坐标 λ 可由式(10)的第 3, 4, 5 行显式地表达出, 有

$$\lambda = \Phi_\lambda(q_1; y_P). \tag{12}$$

将式(12)应用于式(10)的第 1, 2, 6 行, 则可计算出 $q^1 = (s^1 \ s^2 \ s^3)^T$, 而绳长向量 $q^2 = (l^1 \ l^2 \ l^3)^T$ 可分别由 $l_i = \|l_i\| = \sqrt{l_i^T l_i} (i = 1, 2, 3)$ 来求得, 最终得到了 q .

4 仿真分析

为了计算方便, 假设吊具的形状为一个圆盘, 如图 1 所示. 该起重机器人机构系统的尺寸参数: $d =$

0.5 m, $m = 0.5$ kg, $l = 0.1$ m, $\theta_P = \begin{bmatrix} \frac{ml^2}{6} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{ml^2}{6} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$

(1) 吊具作纯平动. 假设吊具作沿 y 轴纯平动, $y_P(t) = (-1.12 \quad t^2 \quad -0.5 \quad 0 \quad 0 \quad 0)^T (0 \leq t \leq 5)$, 即 $r = (-1.12 \quad t^2 \quad -0.5)^T$, $\alpha = \mathbf{0}$, 驱动 3 台小车和 3 个绞盘的 6 套交流伺服电机及其驱动器. 求当 $t = 1$ s 时的机器人驱动器坐标 q .

因为 $\dot{y}_P(t)|_{t=1} = (0 \quad 2t \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0)^T = (0 \quad 2 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0)^T$, $H(y_P) = I_{6 \times 6}$, 则 $\dot{s}_P = H^{-1}(y_P) \times \dot{y}_P = (0 \quad 2 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0)^T$, 而 $\ddot{s}_P = (0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0)^T$, $\omega = \mathbf{0}$, 故 $k_s = \mathbf{0}$.

另由于 ${}^P T(\alpha) = I_{3 \times 3}$, $l_1 = r + p_1 - (0 \quad d \quad 0)^T + (s_1 \quad 0 \quad 0)^T$, $l_2 = r + p_2 + (s_2 \quad 0 \quad 0)^T$, $l_3 = r + p_2 + (0 \quad d \quad 0)^T - (s_3 \quad 0 \quad 0)^T$, $p_1 = (\sqrt{3}/3l \quad 0 \quad 0)^T$, $p_2 = (-\sqrt{3}/6l \quad -l/2 \quad 0)^T$, $p_3 = (-\sqrt{3}/6l \quad l/2 \quad 0)^T$, 则

$$G_s = \begin{bmatrix} 2l_1^T & -2l_1^T \tilde{p}_1 \\ 2l_2^T & -2l_2^T \tilde{p}_2 \\ 2l_3^T & -2l_3^T \tilde{p}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -7967/3750 + 2s_1 & 1 & -1 & 0 & 433/7500 & 433/7500 \\ -17233/7500 + 2s_2 & 1.9 & -1 & 0.05 & -433/1500 & -1273/7500 + 0.1s_2 \\ -17233/7500 - 2s_3 & 1.1 & -1 & -0.05 & -433/15000 & 1247/15000 + 0.1s_3 \end{bmatrix}.$$

可计算得出 $W_d = (0 \quad -1 \quad -5 \quad 0 \quad 0 \quad 0)^T$.

根据式(12), 可求得 $\lambda = (-5/3 \quad -5/3 \quad -5/3)^T$, 以及求得 3 台小车的位置, 即 $q_1 = (s_1 \quad s_2 \quad s_3)^T = (1.665 \quad 0.015 \quad 0.05)^T$. 然后, 求出 3 根绳的长度, 则有 $q_2 = (l_1 \quad l_2 \quad l_3)^T = (0.7958 \quad 1.1242 \quad 1.3295)^T$, 则 $q = (1.665 \quad 0.015 \quad 0.05 \quad 0.7958 \quad 1.1242 \quad 1.3295)^T$ m.

(2) 吊具作纯转动. 假设吊具作绕 z 轴的纯转动, 则 $y_P(t) = (-1.12 \quad 0 \quad -0.5 \quad 0 \quad 0 \quad \frac{\pi}{6}t^2)^T (0 \leq t \leq 5)$, 即 $r = (-1.12 \quad 0 \quad -0.5)^T$, $\alpha = (0 \quad 0 \quad \frac{\pi}{6}t^2)^T$, 求当 $t = 1$ s 时的机器人驱动器坐标 q .

因为 $\dot{y}_P(t)|_{t=1} = (0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad \frac{\pi}{3}t^2)^T = (0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad \frac{\pi}{3})^T$, 而 $H(y_P) = I_{6 \times 6}$, 则有 $\dot{s}_P = H^{-1}(y_P)\dot{y}_P = (0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad \frac{\pi}{3})^T$, 而 $\ddot{s}_P = (0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0)^T$. $\omega = (0 \quad 0 \quad \frac{\pi}{3})^T$, 故 $k_s = \mathbf{0}$.

另由于 ${}^P T(\alpha) = \begin{bmatrix} 0.866 & -0.5 & 0 \\ 0.5 & 0.866 & 0 \\ 0 & 0 & 1.0 \end{bmatrix}$, 则

$$G_s = \begin{bmatrix} -2.14 + 2s_1 & -0.9723 & -1 & 0 & 0.0577 & -0.0544 \\ -2.24 + 2s_2 & -0.1155 & -1 & 0.05 & -0.0289 & -0.1087 + 0.1s_2 \\ -2.34 - 2s_3 & -0.9423 & -1 & -0.05 & -0.0289 & 0.1442 + 0.1s_3 \end{bmatrix}.$$

可计算得出 $W_d = (0 \quad 0 \quad -5 \quad 0 \quad 0 \quad -0.0009)^T$.

根据式(12), 可求得 $\lambda = (-5/3 \quad -5/3 \quad -5/3)^T$, 以及求得 3 台小车的位置, 有 $q_1 = (s_1 \quad s_2 \quad s_3)^T = (2.24 \quad 1.63 \quad 0.01)^T$. 然后, 求出 3 根绳的长度, 则有 $q_2 = (l_1 \quad l_2 \quad l_3)^T = (1.3566 \quad 0.7165 \quad 1.3654)^T$, 则 $q = (2.24 \quad 1.63 \quad 0.01 \quad 1.3566 \quad 0.7165 \quad 1.3654)^T$ m.

这里, 仅给出了吊具的参考点处于 2 个特定位姿处的广义运动学位置逆解. 因此, 可以按照吊具的实际轨迹要求, 根据文中提出的计算方法来求更多的广义运动学位置逆解问题, 为以后设计吊具的轨迹跟踪控制方案作理论准备.

5 结束语

所提出的大型造船门式绳牵引并联起重机器人的概念, 旨在以机器人机构的形式来实现更重的起重能力、更灵活的吊运轨迹、更大的吊运空间, 以及更精确的吊运轨迹跟踪控制. 若所提出的造船门式绳牵引并联起重机器人能得以成功研制, 可将其进一步工程化, 即与起重机械制造公司进行产业化合作. 后续的研究工作将涉及大型造船门式绳牵引并联起重机器人的控制问题.

参考文献:

- [1] 茅金龙. 对加快建造大型门式起重机步伐的看法[J]. 上海造船, 1996(2): 52-54.
- [2] 张浩星, 胡桂军. 480 t 门式起重机[J]. 中国港湾建设, 2001(6): 56-58.
- [3] 陈 坚. 船厂大型龙门吊吊梁设计[J]. 江苏船舶, 2006, 23(3): 1.
- [4] 何守义. 600 t 龙门吊小车轨道焊接工艺[J]. 中国修船, 2005(1): 32-33.
- [5] 何庆生. 300 t 大型造船门式起重机的设计[J]. 造船设备, 2000, 17(3): 23-26.
- [6] DAGALAKIS N G, ALBUS J S, WANG B L, et al. Stiffness study of a parallel link robot crane for shipbuilding applications[J]. ASME Journal on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 1989, 111(3): 183-193.
- [7] BOSTELMAN R, ALBUS J, DAGALAKIS N, et al. Applications of the NIST robo crane[C] // Proceedings of the 5th International Symposium on Robotics and Manufacturing Hawaii: [s. n.], 1994.
- [8] ALBUS J S, BOSTELMAN R V, DAGALAKIS N. The NIST Robo Crane[J]. Journal of Robotics System, 1992, 10(5): 709-724.
- [9] BOSTELMAN R, ALBUS J, DAGALAKIS N, et al. Robo Crane project: An advanced concept for large scale manufacturing[C] // Proceedings of the AUVSI Conference Orlando: [s. n.], 1996.
- [10] ARAI T, OSUMI H. Three wire suspension robot[J]. Industrial Robot, 1992(19): 17-22.
- [11] MAIER T, WOERNLE C. Kinematic control of cable suspension robots[C] // Proceedings of the NATO-ASI Computational Methods in Mechanisms Varna: [s. n.], 1997.
- [12] MAIER T, WOERNLE C. Inverse kinematics for an underconstrained cable suspension manipulator[M] // Advances in Robot Kinematics: Analysis and Control. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1998: 97-104.
- [13] MAIER T, WOERNLE C. Flatness based control of underconstrained cable suspension manipulators[C] // Proceedings of ASME Design Engineering Technical Conference. Las Vegas: [s. n.], 1999.
- [14] HEYDEN T, WOERNLE C. Dynamics and flatness based control of a kinematically undetermined cable suspension manipulator[J]. Multibody System Dynamics, 2006, 16(2): 155-177.

Mechanism Design and Analysis of Inverse Pose Kinematics Problem of a Large Sized Wire Driven Parallel Gantry Crane Robot for Shipyards

ZHENG Ya-qing

(College of Mechanical Engineering and Automation, Huaqiao University, Quanzhou 362021, China)

Abstract: The concept of a large sized wire driven parallel gantry crane robot for shipyards is presented when a 6 degree-of-freedom incompletely restrained parallel mechanism (IRPM) with 3 wires is introduced to large sized gantry cranes for shipyards to overcome the disadvantages of the current large sized gantry cranes such as the dull trajectory for turn over operation and complicated mechanical structure. According to the basic parameters of current large sized gantry cranes for shipyards, the mechanism configuration of the large sized wire driven parallel gantry crane robot for shipyards is given. The inverse pose kinematics problem is analyzed in detail and the computation method is given, and the case study has shown that the robot can realize 6 degree of freedom motion for handling task.

Keywords: incompletely restrained; gantry crane; wire driven; parallel robot

(责任编辑: 鲁 斌 英文审校: 郑亚青)