文章编号: 1002-0446(2005)02-0158-05

基于多机器人的运动控制平台在刚体对接系统中的应用*

范国梁, 王云宽
(中国科学院自动化研究所, 北京 100080)

摘 要: 针对刚体对接系统, 引入虚拟分段概念, 分段位姿测量技术. 在统一的世界坐标框架内, 建立了平台的运动学模型, 导出了多机器人的协调运动方案. 该方案在基于多机器人的运动平台控制中具有广泛的适用性.

关键词: 多机器人; 运动平台; 位姿测量
中图分类号: TP24 文献标识码: B

Application of Multi-robot Based Motion Control Platform to Rigid Body Merging System

FAN Guo-liang, WANG Yun-kuan
(*Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100080, *China*)

Abstract: A platform based on multi-robot is introduced. As to merging system, the techology of position-orientation measurement is presented. Under world coordinates, the kinematics model of the platform is constructed. The motion scheme of the multi-robot is deduced, which can be used widely in the control of multi-robot motion platform.

Keywords: multi-robot; motion platform; position-orientation measurement

1 引言 (Introduction)

刚体对接是机械、建筑、造船、化工、航天等领域中常见的工程项目. 国内现有的对接工作平台一般只有行走和升降两个自由度. 在要求精密空间对接的场合, 这些平台无法提供足够的运动精度与运动灵活性. 而且控制算法一般采用的是对接段与基准段之间的相对坐标关系[9] (这样的坐标系是以基于基准段轴线, 与物理水平面平行, 并与对接运动轨道也平行的假设为前提). 这其实是很苛刻的, 即要求基准段具有严格的初始位姿. 又要有精密校准基准段初始位姿. 针对现有工作平台的不足, 本文介绍了一种基于多机器人的运动控制平台. 它可以对刚体位置和姿态进行精密调节, 操纵刚体在空间做 6自由度运动. 而且控制算法采用了独立的世界坐标系, 对基准段初始位姿没有特殊要求.

2 运动控制平台及坐标系 (Motion control platform and coordinate systems)

多机器人运动控制平台工作面由横纵梁构成, 如图 1所示. 机器人可以沿轨道移动, 其立柱可以相对于车体进行顶举和侧向运动, 并通过球绞与平台连接. 平台与对接段位置固定, 可视为一个刚体. 多机器人的协调运动可以实现整个刚体在空间中的六自由度运动. 立柱顶举和侧向移动由液压驱动, 并配有光栅尺作为位置传感器进行闭环控制. 移动机器人前进由变频调速电机驱动. 所有移动机器人通过总线网络与总控制柜连接, 由上位机统一控制.

文中涉及的坐标系如图 2所示.

世界坐标系: 坐标原点 O_w 在基准段外侧, Z_w 轴取物理铅垂线向上的方向, X_w 轴与轨道前进方向平行, 其在轨道面的投影与轨道中线重合, 由右手法则确定 Y_w 轴.

轨道坐标系: 坐标原点 O_g 在轨道平面内轨道中线上, X_g 轴与轨道中线重合, Z_g 轴垂直于轨道平面, 由右手法则确定 Y_g 轴.

平台坐标系: 坐标原点 O_p 在平台底面构成的平面内, 与对接段中心在平台底面的投影重合. Z_p 轴

* 收稿日期: 2004-08-28

垂直于平台底面，X_p 轴与对接段轴线在平台底面的投影重合，由右手法则确定 Y_p 轴.

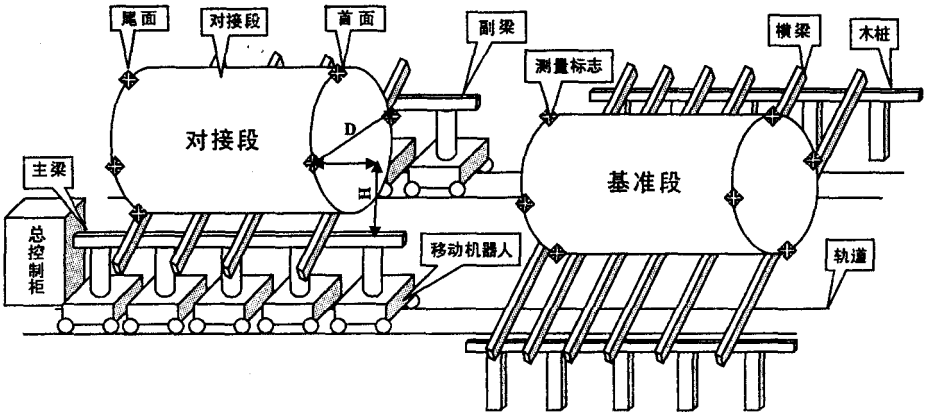

图 1　运动控制平台及对接系统

Fig. 1　Motion control platform and merging system

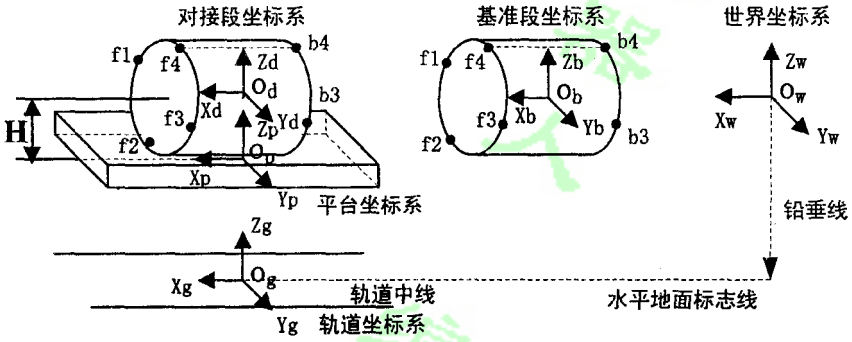

图 2　运动控制系统中的坐标系

Fig. 2　Coordinates of motion control system

对接段坐标系： 坐标原点 O_d 在对接段中心，X_d 轴沿对接段轴线方向，Y_d 轴与 Y_p 轴平行，由右手法则确定 Z_d 轴.

基准段坐标系： 坐标原点 O_b 在基准段中心，X_b 轴与基准段轴线方向重合，Z_b Y_b 的确定与测量标志点有关.见说明 (5).

说明：

(1) 两条轨道经过水平校准和调高校准，轨道平面实际为物理水平面.

(2) 世界坐标系的具体实现：坐标原点 O_w 在基准段外侧，与基准段端面圆圆心同高，Z_w 轴沿铅垂线向上，X_w 轴方向由水准仪标定的地面标志线 (轨道中线)确定，Y_w 由右手定则确定.本文的测量和控制方案建立在这个统一的坐标框架内.

(3) 移动机器人立柱 3自由度运动方向与轨道坐标系对应坐标轴平行.由说明 (1)、(2)，得轨道坐标系与世界坐标系对应坐标轴平行，则立柱顶点在两个坐标系中位移变化量的坐标表示形式相同.

(4) 由坐标系的定义知，平台坐标系与对接段坐标系只差相对高度 H，如图 2所示.

(5) 在图 2中，基准段与对接段上都存在 $f_1 f_2 f_3 f_4 b_1 b_2 b_3 b_4$ 8个测量标志点，用于分段位姿测量.标志点取法与对应关系如下：在对接段表面上取 $f_4 b_4$ 两点，使其连线与 X_d 共面，并与 Z_d 相交. $f_1 b_1$、$f_2 b_2$、$f_3 b_3$ 取法类似.同理在基准段上取 $f_1 f_2 f_3 f_4 b_1 b_2 b_3 b_4$，并使 $f_1 f_2 f_3 f_4$ 与对接段的 $b_1 b_2 b_3 b_4$ 对应.在 X_b 与 $f_4 b_4$ 所共平面内，取 Z_b 轴使其与 X_b 垂直，并 $f_4 b_4$ 相交，由右手法则可确定 Y_b 轴.

(6) 对接段与基准段坐标系间的位姿偏差较小.这可以在对接段初始放置时，就与基准段大致对齐来保证.这样的小角度偏差假定 (对应坐标轴夹角小于 5°)可以简化工程计算和测量工艺.世界坐标系 $X_w O_w Y_w$ 平面的选择也兼顾了小角度偏差的假定，即 $X_w O_w Y_w$ 平面与 $X_b O_b Y_b$ 平面夹角不大.

3 刚体分段的位姿测量 (Position-orientation measurement of rigid body block)

基本思路: 设分段坐标系是世界坐标系旋转平移 (虚拟运动)的结果 ,这样分段在世界坐标系原点处存在一个虚拟分段 .在世界坐标系中 ,运用运动学模型 ,导出虚拟运动前后分段的坐标偏差与运动参数 (旋转与平移量)的关系 .通过测量得到坐标偏差 ,进而求解得到虚拟运动参数 ,从而得到分段的绝对位置和姿态 .首先考虑基准段的位姿测量 .

基准段及其虚拟分段 ,如图 3所示 .虚拟分段中心位于世界坐标原点 O_w 处 ,并且端面与 $Y_w O_w Z_w$ 平面平行 ,轴线与 X_w 方向一致 . 8个虚拟测量标志点 b_1 b_2 b_3 b_4 f_1 f_2 f_3 f_4,对应连线与 X_w 轴共面 ,分别与 $Z_w Y_w$ 轴相交 .在基准段长度 L和直径 D已知的条件下 ,可以确定这些虚拟标志点的坐标 .

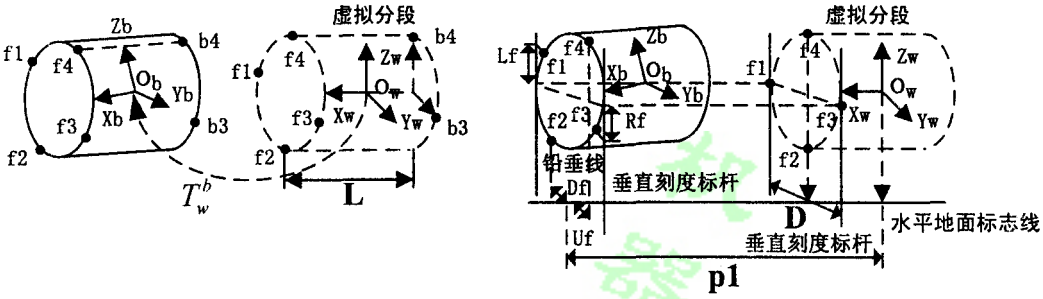

图 3 分段的虚拟运动与位姿测量 (前端面)

Fig 3 Virtual motion and position-orientation measurement of block (front section only)

由虚拟分段的定义 ,存在下面的关系 :

$$X_b = \begin{vmatrix} R & P \\ 0 & 1 \end{vmatrix} X_w = T_w^b X_w \tag{1}$$

其中 : X_b, $X_w \in R^4$, 分别为测量标志点及其虚拟对应点在世界坐标系中的齐次坐标 . $T_w^b = \begin{vmatrix} R & P \\ 0 & 1 \end{vmatrix} \in R^{4\times 4}$ 为虚拟运动坐标变换矩阵 ,其中 $R \in R^{3\times 3}$为旋转矩阵 . $R = \begin{vmatrix} c\phi c\theta & c\phi s\theta s\gamma - s\phi c\gamma & c\phi s\theta c\gamma + s\phi s\gamma \\ s\phi c\theta & s\phi s\theta s\gamma + c\phi c\gamma & s\phi s\theta c\gamma - c\phi s\gamma \\ -s\theta & c\theta s\gamma & c\theta c\gamma \end{vmatrix}$,其中 $s\theta = \sin(\theta)$, $c\theta = \cos(\theta)$, $s\phi = \sin(\phi)$, $c\phi = \cos(\phi)$, $s\gamma = \sin(\gamma)$, $c\gamma = \cos(\gamma)$. 旋转顺序 :先绕 X_w 轴旋转 γ角 ,再绕 Y_w 轴旋转 θ角 ,最后 Z_w 绕旋转 ϕ角 . $P = [p_1\ p_2\ p_3]^T \in R^3$ 表示虚拟运动的平移量 .

由式 (1)得 :

$$X_b - X_w = \begin{vmatrix} R - E & P \\ 0 & 0 \end{vmatrix} X_w \tag{2}$$

其中 E为 3×3单位阵 .求解 R和 P,需要 $X_b - X_w$. $X_b - X_w$ 为世界坐标系中实体分段与虚拟分段的坐标偏差 ,下面介绍坐标偏差的测量过程 :

(1) 按坐标系定义与说明 ,确定铅垂线和水平地面标志线 ,如图 2所示 .在基准段上分别从 $f_1 f_4 b_2 b_4$ 4个测量标志点下放铅垂线 ,可以得到 4个水平偏差 $U_f D_f U_b D_b$,如图 3所示 (图中只显示了前端面的 U_f、D_f).

(2) 在水平面内距水平标志线 $D/2$ (D为分段端面圆的直径)处及基准段端面附近立垂直刻度标杆 .所有标杆对应刻度同高 ,相同刻度线形成物理水平面 .以特定高度 (基准段端面圆圆心的铅垂高度)为基准 ,确定世界坐标系的 $X_w O_w Y_w$ 平面 .这样在分段实体附近处的垂直刻度标杆上 ,直接读出 4个测量标志点 $f_1 f_3 b_1 b_3$ 与 $X_w O_w Y_w$ 平面的竖直偏差 $L_f R_f L_b R_b$,如图 3所示 (图中只显示了前端面的 L_f、R_f).

利用上述测量的偏差数据 ,代入式 (2)中得 :

$$X_b - X_w = \begin{vmatrix} R - E & P \\ 0 & 0 \end{vmatrix} X_w = \begin{vmatrix} * & * & * & * & * & * & * & * \\ * & D_f & * & U_f & * & D_b & * & U_b \\ L_f & * & R_f & * & L_b & * & R_b & * \\ * & * & * & * & * & * & * & * \end{vmatrix} \tag{3}$$

其中：* 表示未知，$X_w = \begin{vmatrix} L/2 & L/2 & L/2 & L/2 & -L/2 & -L/2 & -L/2 & -L/2 \\ -D/2 & 0 & D/2 & 0 & -D/2 & 0 & D/2 & 0 \\ 0 & -D/2 & 0 & D/2 & 0 & -D/2 & 0 & D/2 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{vmatrix}$

根据坐标系定义与说明 (2)、(5)、(6),确定 ϕ、θ、γ 为小角度,式 (3)可以简化为：

$$\begin{vmatrix} 0 & -\phi & \theta & p_1 \\ \phi & 0 & -\gamma & p_2 \\ -\theta & \gamma & 0 & p_3 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{vmatrix} X_w = \begin{vmatrix} * & * & * & * & * & * & * & * \\ * & D_f & * & U_f & * & D_b & * & U_b \\ L_f & * & R_f & * & L_b & * & R_b & * \\ * & * & * & * & * & * & * & * \end{vmatrix} \tag{4}$$

由式 (4)得基准段的位置与姿态参数：

$$\rho_b = [p_1\ p_2\ p_3\ \phi\ \theta\ \gamma]^T = \left| p_1\ \ \frac{Z_f + Z_b}{2}\ \ \frac{Y_f + Y_b}{2}\ \ \frac{Z_f - Z_b}{L}\ \ \frac{Y_b - Y_f}{L}\ \ \frac{D_f + D_b + R_f + R_b - U_f - U_b - L_f - L_b}{4D} \right|^T \tag{5}$$

其中： $Z_f = \frac{U_f + D_f}{2}$, $Z_b = \frac{U_b + D_b}{2}$, $Y_f = \frac{L_f + R_f}{2}$, $Y_b = \frac{L_b + R_b}{2}$, p_1 从图 3中测量得出.将 ρ_b 代入式 (1),可得 T_w^b.

运用同样的测量方法可以得到对接段的位置与姿态参数 ρ_d,及其虚拟运动坐标变换矩阵 T_w^d.

4 对接平台的运动控制 (Motion control of merging platform)

基本思路:确定对接前后移动机器人立柱顶点在世界坐标系中的坐标变化,进而导出每个机器人三自由度的位移量.精确而统一地控制这些位移量,就可以实现平台位置和姿态的调节,进而完成刚体的空间对接.

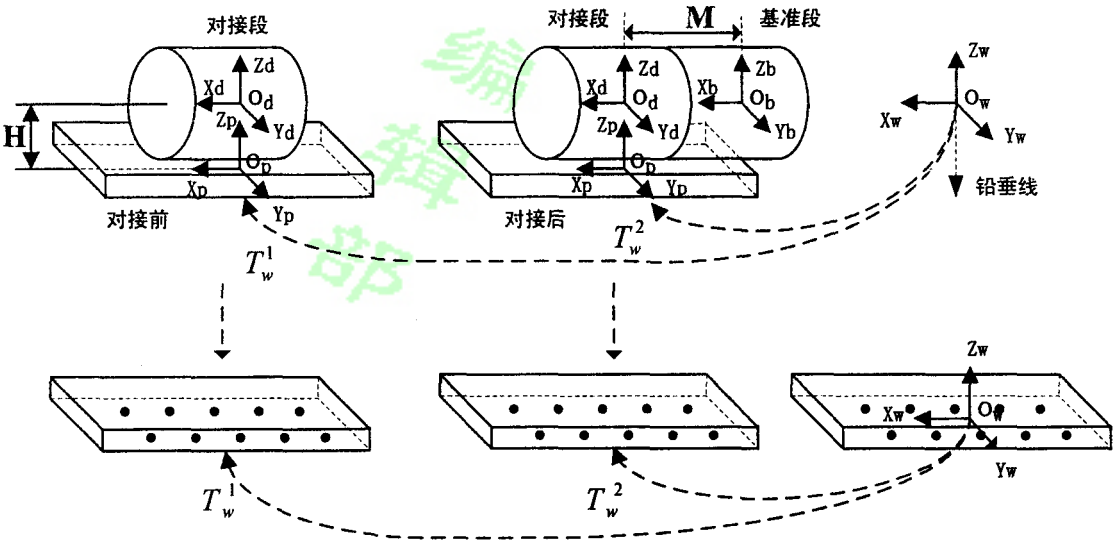

图 4　上方:平台坐标系在对接前后的位姿变化　下方:移动机器人立柱顶点在对接前后的坐标变化

Fig. 4　(U) Position-orientation change of platform coordinates before and after merging

(D) The world coordinates change of car's head before and after merging

对接运动过程如图 4所示.对接前,存在如下关系：

$$T_w^d = \mathrm{trans}(0,\ 0,\ H)\, T_w^1 \tag{6}$$

其中：T_w^d 为对接段坐标系的虚拟运动坐标变换矩阵,已在上节中测出. T_w^1 为平台坐标系的虚拟运动坐标变换矩阵. $\mathrm{trans}(0,\ 0,\ H) = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & H \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}$.

由式 (6)得:

$$T_w^1 = (\mathrm{trans}(0,\ 0,\ H))^{-1}\, T_w^d \qquad (7)$$

同理, 对接后存在如下关系:

$$\mathrm{trans}(M,\ 0,\ 0)\, T_w^b = \mathrm{trans}(0,\ 0,\ H)\, T_w^2 \qquad (8)$$

其中: T_w^b 为基准段坐标系的虚拟运动坐标变换矩阵,已在上节中测出. T_w^2 为对接后平台坐标系的虚拟运动坐标变换矩阵. $\mathrm{trans}(M,\ 0,\ 0) = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & M \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}$,

M为对接完成后对接段与基准段的中心距离.

由式 (8)得:

$$T_w^2 = (\mathrm{trans}(0,\ 0,\ H))^{-1}\, \mathrm{trans}(M,\ 0,\ 0)\, T_w^b \qquad (9)$$

由图 4中的下方图可知: i号机器人立柱顶点在对接前后坐标变化为:

$$\Delta X^i = [\,\Delta X_x^i \quad \Delta X_y^i \quad \Delta X_z^i \quad 1\,]^{\mathrm{T}} = (T_w^2 - T_w^1)\, X_w^i \qquad (10)$$

其中: $X_w^i = [\,X_{wx}^i \quad X_{wy}^i \quad 0 \quad 1\,]^{\mathrm{T}}$ 为立柱顶点在世界坐标系中的初始坐标. X_{wx}^i、X_{wy}^i只与每个移动机器人立柱在横纵梁平台上的物理连接有关,是已知量.将式 (7)、(9)代入式 (10),得立柱顶点对接前后的坐标变化.由坐标系定义和说明 (3)知,对接前后移动机器人立柱顶点在轨道坐标系的坐标变化量与世界坐标系中一样,所以对应的 i号机器人顶举、侧移、前进量为: ΔX_z^i, ΔX_y^i, ΔX_x^i.

控制操作过程: 在上位机中输入分段和平台的相关固有参数 (L、D、M、H)以及测量的偏差数据,解算出 T_w^b、T_w^d,由式 (7)、(9)、(10)得出每个机器人的顶举、侧移、前进的位移量.精确控制这些位移量,就可实现刚体的空间对接.

5 结论 (Conclusion)

本系统提出的新的测量与运动控制方案已多次在实际对接工程中得以应用,完成了许多巨型刚体的对接任务,效果很好.本方案有如下特点:

(1) 建立了世界坐标系,所有的计算和变换都以这个统一坐标系为基础.

(2) 引入虚拟分段的概念,满足小角度偏差假设. 通过简单的仪器设备和测量工艺,得出了基准段和对接段的绝对位置和姿态信息.

(3) 利用移动机器人三自由度运动方向与世界坐标系坐标轴平行的特点,结合绝对位姿数据和平台运动学模型,方便地导出单个机器人所需的运动位移量.

(4) 由于算法和控制方案对机器人数目没有限制,顶举和侧移采用液压驱动,该系统具有很强的承载能力,可以操纵巨型刚体, 可以实现刚体在空间中的 6自由度运动.

(5) 由于小角度偏差假设和油缸行程的限制,使本测量与控制方案只能在刚体最后精密对接阶段采用,即对接段采用其他方法初始粗放置,后运用本方案精密对接.同样由于小角度偏差的假设,基准段在世界坐标系中的位姿偏差不可太大,本方案不适于基准段轴线与物理水平面大角度倾斜的工作场合.允许其小角度偏移放置或固有倾斜,具有相当范围的适用性.

参考文献 (References)

[1] Johnson P J, Bay J S. Distributed control of simulated autonomous mobile-robot collective in payload transportation[J]. Autonomous Robots, 1995, 2(1): 43 - 63.

[2] Jstillwell D, Bay J S. Towards the development of a material transport system using swarms of ant-like robots[A]. Proceedings of the 1993 IEEE International Conference on Robotics and Automation[C]. Atlanta, Georgia, USA: 1993, 1. 766 - 771.

[3] Lytle A M, *et al*. Adapting a teleoperated device for autonomous control using three-dimensional positioning sensors: experience with the NIST RoboCrane[J]. Automation in Construction, 2004, 13(1): 101 - 118.

[4] Ahmadabadi M N, *et al*. A unified distributed cooperation strategy for multiple object handling robots[A]. Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation[C]. Leuven, Belgium: 1998. 3625 - 3630.

[5] 牧野洋,谢存禧,郑时雄. 空间机构及机器人机构学[M]. 北京: 机械工业出版社, 1986.

[6] 蔡自兴. 机器人学[M]. 北京:清华大学出版社, 2000.

[7] 日本机器人学会. 机器人技术手册[M]. 北京: 科学出版社, 1996.

[8] 邹豪,王启义,余晓流, 等. 并联 Stewart机构位姿误差分析[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2000, 21(3): 301 - 304.

[9] 景奉水, 等. 船体分段位姿找正对接系统 ——一个多机器人协调操作系统的实现[J]. 自动化学报, 2002, 28(5): 708 - 714.

作者简介:

范国梁 (1979-),男,博士生.研究领域:机器人控制.

王云宽 (1966-),男,研究员,博士生导师.研究领域:机器人控制,先进控制与制造技术,交流伺服,机电一体化.