

文章编号: 1002-0446(2002)04-0324-04

基于多机器人协调的船体分段对接系统的 运动学及对接精度研究*

景奉水 谭民 侯增广 梁自泽 王云宽

(中国科学院自动化研究所 北京 100080)

摘要: 本文研究了基于多机器人协调的船体分段对接系统的运动学和对接精度问题. 根据船体分段对接工艺特点, 提出了机器人的轨迹规划算法和对接控制方案. 在此基础上, 讨论了几种误差因素对系统对接精度的影响. 理论分析和仿真结果都表明, 在对接平台结构尺寸存在显著误差的情况下, 采用本文提出的方法仍可以保证船体分段对接精度.

关键词: 多机器人协调; 移动机器人; 对接精度; 运动学

中图分类号: TP24 **文献标识码:** B

STUDY OF KINEMATICS AND MERGING PRECISION OF A SHIP BLOCK MERGING SYSTEM BASED ON MULTI-ROBOT COORDINATION

JING Feng-shui TAN Min HOU Zeng-guang LIANG Zi-ze WANG Yun-kuan

(Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

Abstract This paper has studied the kinematics and the precision of a ship block merging system based on the multi-robot coordination. In coordination with the characteristics of the blocks merging technology, the boat blocks trajectory planning method and merging control scheme were presented. After that, we discussed a number of error factors, which may affect the system precision. The simulation results and theoretical analysis show that, the merging system's precision can be guaranteed with the proposed methods even there are significant dimensional errors of the system structure.

Keywords: multi-robot coordination, mobile robots, merging precision, kinematics

1 引言(Introduction)

多机器人协调(Multi-Robot Coordination)的研究起源于 20 世纪 80 年代初期. 在任务本身复杂的情况下, 如搬运大型物体, 单个机器人难以完成; 而多个机器人由于其内在分布特性, 通过共享资源(信息、知识、物理装置等)可弥补单个机器人能力的不足, 扩大能力范围, 往往就可以获得满意效果. 另外, 设计若干简单的机器人比为具体任务设计功能强大的单个机器人容易、经济, 且在容错性、柔性等方面具有优越性^[1]. 目前对多机器人协调的研究已引起普遍重视^[2, 3].

受多机器人协调搬运大型物体的启发^[4, 5, 6, 7], 本文对多机器人协调对接大型船体分段进行了研究.

2 对接系统结构(Merging system architecture)

如图 1 所示, 多个置于轨道上移动机器人的手部分别固定在两根刚性纵梁上, 在纵梁之上再铺设横梁, 从而构成托起移动段的平台. 每个移动机器人的手部具有上下、左右和前后三个垂直方向上的运动自由度. 系统依靠多个机器人协调运动, 调整移动段的位姿, 完成与基准段的对接.

* 基金项目: 国家“863”计划资助项目(9921-03).

收稿日期: 2001-10-30

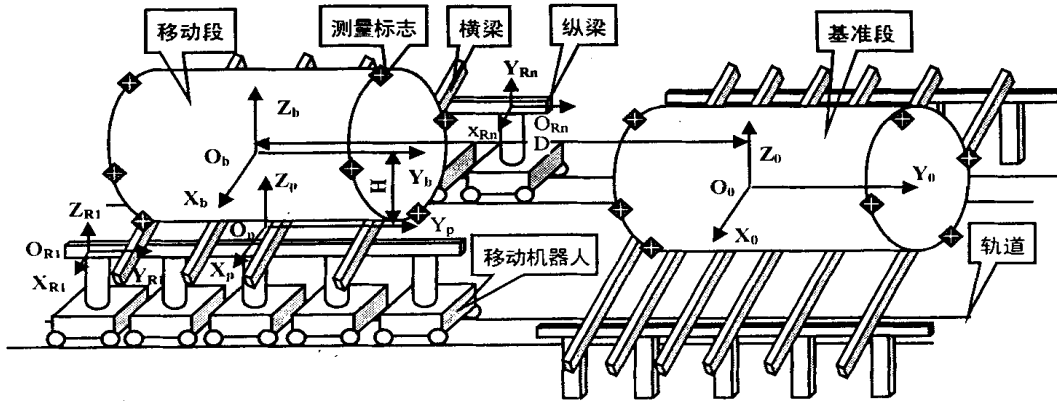


图 1 船体分段对接系统

Fig. 1 Ship block merging system

3 运动学与轨迹规划(Kinematics and trajectory planning)

3.1 移动段的运动模型

由于船体分段重量较大, 在进行调整时, 已通过横梁和木桩压紧了纵梁, 使得从纵梁到分段范围内的所有物体可以看作一个整体——刚体。

另外, 机器人移动段的上下、左右平移, 以及绕 3 个轴的转动都是由液压伺服驱动, 而液压缸的有效行程同分段或纵梁尺寸相比, 可视为小位移。因此, 移动段的运动可以作为刚体小位移运动模型来处理。

3.2 移动段的逆运动学算法和轨迹规划算法

分段的对接是利用逆运动学算法, 由移动段同基准段的位姿偏差求出各机器人关节位移, 而后进行轨迹规划, 最后由机器人伺服系统执行以消除或缩小移动段与基准段偏差的过程。为描述逆运动学算法, 首先建立以下参考坐标系:

1) 基准段坐标系。如图 1 所示, 坐标系原点 O_0 为基准段几何形心, X_0 轴、 Y_0 轴在水平面上, Z_0 轴按右手系处于铅垂面内。

2) 移动段坐标系。如图 1 所示, 坐标系原点 O_b 为移动段的几何形心, X_b 轴、 Y_b 轴在移动段水平面上, Z_b 轴按右手系处于移动段铅垂面内。移动段坐标系原点同基准段坐标系原点沿 Y_0 方向相隔距离为 D 。当移动段与基准段对正时, 二者的水平面重合, 垂直面平行。

3) 平台坐标系。在移动段调整时, 可以认为机器人的手部中心始终处于同一平面, 称为移动平台面, 这一平面与移动段的水平面平行且相距 H ; 取移

动段坐标系的 Z_b 轴与该平面的交点为平台坐标系的原点 O_p , X_p 轴、 Y_p 轴在移动平台面上, 按右手系取 Z_p 轴, 如图 1 所示。

4) 机器人末端坐标系。机器人末端坐标系的原点 O_{Ri} 位于机器人手部中心, Z_{Ri} 轴竖直向上, 与主缸上移方向一致; X_{Ri} 轴水平向右, 与副缸右移方向一致, 按右手系取轴 $Y_{Ri}, i = 1, 2, \dots, n$ 。 n 为机器人数目。

记 $T(x, \varphi), T(y, \alpha), T(z, \theta)$ 表示绕 x, y, z 轴旋转齐次变换矩阵, $T \text{ran}(px, py, pz)$ 为平移齐次变换矩阵, $\varphi, \alpha, \theta, px, py, pz$ 分别为移动段绕 X_0, Y_0, Z_0 轴转角以及沿 X_0, Y_0, Z_0 轴的位移, 则第 i 个机器人坐标系到基准坐标系的齐次变化矩阵为

$$A_0^{Ri} = T \text{ran}(0, -D, 0) T(x, \varphi) T(y, \alpha) T(z, \theta) T \text{ran}(px, py, pz) T \text{ran}(0, 0, -H) T \text{ran}(x_{Ri}, y_{Ri}, 0) \quad (1)$$

由(1)式可得到第 i 个机器人坐标系原点, 即其手部在基准坐标系的齐次坐标

$$\begin{pmatrix} R_{xi} \\ R_{yi} \\ R_{zi} \\ 1 \end{pmatrix} = A_0^{Ri} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

将 $\varphi = \alpha = \theta = 0, px = py = pz = 0$ 代入(2)式, 得到移动段处于对正位姿时, 机器人坐标系原点在基准坐标系中的齐次坐标

$$\begin{pmatrix} R_{xi}^0 \\ R_{yi}^0 \\ R_{zi}^0 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_{Ri} \\ Y_{Ri} - D \\ -H \\ 1 \end{pmatrix} \quad (3)$$

机器人坐标系原点的位置与其手部位置一致,因此(2)式减去(3)式,得到移动段偏离对正位姿,做 φ, α, θ 旋转和 px, py, pz 平动时,机器人各关节需要移动的位移,即为机器人逆运动学解法;反之,(3)减去(2)式,得到移动段从偏离位置回到对正位姿时机器人各关节需要的位移量,即机器人在对正调整时各关节的运动轨迹:

主缸位移

$$R_{zi}^0 - R_{zi} = (s\alpha c\theta - c\alpha s\varphi\theta)x_{Ri} + (-s\alpha s\theta - c\alpha s\varphi\theta)y_{Ri} - (1 - c\alpha c\varphi)H + (s\alpha c\theta - c\alpha s\varphi\theta)px + (-s\alpha s\theta - c\alpha s\varphi\theta)py - c\alpha c\varphi pz \quad (4)$$

副缸位移

$$R_{xi}^0 - R_{xi} = (1 - c\alpha c\theta - s\alpha s\varphi\theta)x_{Ri} + (c\alpha s\theta - s\alpha s\varphi\theta)y_{Ri} + s\alpha c\varphi H + (-c\alpha c\theta - s\alpha s\varphi\theta)px + (c\alpha s\theta - s\alpha s\varphi\theta)py - s\alpha c\varphi pz \quad (5)$$

行走位移

$$R_{yi}^0 - R_{yi} = -c\varphi\theta x_{Ri} + (1 - c\varphi\theta)y_{Ri} - s\varphi H - c\varphi\theta px - c\varphi\theta py + s\varphi pz \quad (6)$$

式中, s 表示正弦函数, c 表示余弦函数, 以下同。

由于 py 项仅影响移动段与基准段的间距, 即只影响分段的对接, 而不影响分段的对正; 而且移动段沿平直轨道与基准段对接时, 不会影响分段原有的姿态和对正结果。利用这一点, 可将分段的对接分成两个阶段: 分段位姿对正和分段对接。在分段位姿对正完成后, 分段对接只是简单的多机器人同步行走任务。以下只考虑分段位姿对正问题。

令 $py = 0$, 并忽略关于 $s\varphi, s\alpha, s\theta, px, pz$ 的 2 阶以上项, 整理式(4) - (6), 得到机器人各关节在分段位姿对正时的运动轨迹:

$$R_{zi}^0 - R_{zi} = s\alpha c\theta x_{Ri} - c\alpha s\varphi\theta y_{Ri} - (1 - c\alpha c\varphi)H - c\alpha c\varphi pz \quad (7)$$

$$R_{xi}^0 - R_{xi} = (1 - c\alpha c\varphi)x_{Ri} + c\alpha s\theta y_{Ri} + s\alpha c\varphi H - c\alpha c\theta px \quad (8)$$

$$R_{yi}^0 - R_{yi} = -c\varphi\theta x_{Ri} + (1 - c\varphi\theta)y_{Ri} - s\varphi H - c\varphi\theta px + s\varphi pz \quad (9)$$

3.3 移动段偏移 $\varphi, \alpha, \theta, px, pz$ 的计算

以上公式中都是以移动段的旋转角位移和平动线位移为自变量的。这些值难以在现场直接测量得到, 但可以通过测量移动段定位点偏移的方法间接获得。

如图 1 所示, 在分段首尾端分别设置 4 个共圆定位点, 且上下 4 个定位点处于同一平面, 称为分段铅垂面; 左右 4 个标志点也在同一平面, 称为分段水

平面。对正的目标即是要求移动段的上下标志点位于基准段的铅垂面上, 左右标志点位于基准段的水平面上。引入记号 $U_f, D_f, L_f, R_f, U_b, D_b, L_b, R_b$ 来表示分段 8 个定位点的偏移值, U, D, L, R 代表上、下、左、右; 下标 f, b 代表移动段的前后端面。它们共同说明标志点所在位置。偏移的正负号依坐标轴的正负方向定义, 即向上偏移、向右偏移为正, 反之为负。用 W_f, W_b 来记前后端面定位圆的直径, E 来表示移动段长度。现说明如何由偏差测量值计算移动段偏移 $px, pz, \varphi, \alpha, \theta$ 。

因为是小位移, 易由各量间的几何关系和三角函数关系得到下列位移计算方法。

1) 前端面的平移量 px_f, pz_f 和绕 Y 轴角位移 α_f

$$px_f = \frac{1}{2}(U_f + D_f)$$

$$pz_f = \frac{1}{2}(L_f + R_f)$$

$$\alpha_f = \operatorname{tg}^{-1} \left| \frac{L_f - R_f}{W_f} \right|$$

$$\text{或 } \alpha_f = \operatorname{tg}^{-1} \left| \frac{U_f - D_f}{W_f} \right| \quad (10)$$

2) 后端面的平移量 px_b, pz_b 和绕 Y 轴角位移 α_b

$$px_b = \frac{1}{2}(U_b + D_b)$$

$$pz_b = \frac{1}{2}(L_b + R_b)$$

$$\alpha_b = \operatorname{tg}^{-1} \left| \frac{L_b - R_b}{W_b} \right|$$

$$\text{或 } \alpha_b = \operatorname{tg}^{-1} \left| \frac{U_b - D_b}{W_b} \right| \quad (11)$$

3) 移动段偏移 $px, pz, \varphi, \alpha, \theta$

$$px = \frac{1}{2}(px_f + px_b)$$

$$pz = \frac{1}{2}(pz_f + pz_b)$$

$$\alpha = \frac{1}{2}(\alpha_f + \alpha_b)$$

$$\varphi = \operatorname{tg}^{-1} \left| \frac{pz_f - pz_b}{2E} \right|$$

$$\theta = \operatorname{tg}^{-1} \left| \frac{px_b - px_f}{2E} \right| \quad (12)$$

4 控制方案和精度分析 (Control scheme and precision analysis)

前面给出的船体分段位姿对正时的轨迹规划算法, 并没有考虑模型误差。一般情况下, 不能仅靠一

次调整就能达到对接精度要求, 往往需要多次调整才能达到对正的目标, 我们采用了图 2 所示控制方案.

另外, 图 1 所展示的多机器人协调对接平台的结构是庞大且相对松散的, 由于制造精度、弹性变

形、测量精度等原因, 各种结构尺寸实际值和名义值之间必然存在误差, 而且数值往往远大于对接精度 (典型的对接精度要求定位点偏差在 1mm 左右). 因此必须研究结构尺寸误差对于对接精度和系统稳定性的影响.

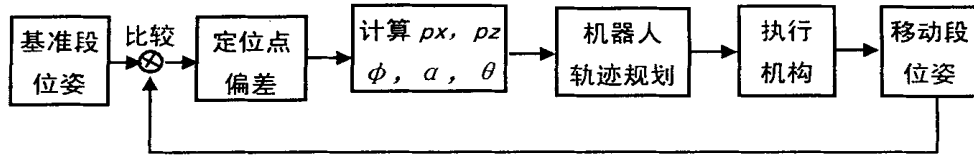


图 2 分段位姿对正的控制方案

Fig. 2 Control scheme of the posture aligning of ship blocks

从式(7) - (9)容易看出, 结构尺寸误差直接影响机器人轨迹规划结果. 令

$$m = \begin{bmatrix} R_{zi}^0 - R_{zi} \\ R_{xi}^0 - R_{xi} \\ R_{yi}^0 - R_{yi} \end{bmatrix}, \quad v = \begin{bmatrix} x_{Ri} \\ y_{Ri} \\ H \end{bmatrix}$$

m 为机器人关节位移矢量, v 平台结构尺寸矢量. 由式(7) - (9)可得到,

$$J = \frac{\partial m}{\partial v} = \begin{bmatrix} s\alpha c\theta & -c\alpha s\theta & c\alpha c\varphi & -1 \\ 1 - c\alpha c\theta & c\alpha s\theta & s\alpha c\varphi & \\ -c\varphi\theta & 1 - c\varphi & -s\varphi & \end{bmatrix} \quad (13)$$

式中, J 为 m 对 v 的 Jacobian 矩阵, 反映了 v 的变化对 m 的影响程度, 即有如下关系

$$\|\Delta m\| \approx \|J\| \cdot \|\Delta v\| \quad (14)$$

J 内元素均是关于 φ, α, θ 函数, 不难看出, 在小位移前提下, J 近为零矩阵. 换言之, m 对 v 的变化不敏感, 不会对图 2 所示控制系统的稳定性产生大的影响.

不失一般性, 考察由 4 个 3 自由度移动机器人构成的船体分段对接平台. 两纵梁的名义长度 $L_B = 20000.00\text{mm}$, 名义间距 $S_B = 20000.00\text{mm}$. 各机器人分布在平台左右两根纵梁的两端, 其手部坐标系原点在平台坐标系坐标 (x_{Ri}, y_{Ri}) 分别为 $(-S_B/2, L_B/2)$, $(-S_B/2, -L_B/2)$, $(S_B/2, L_B/2)$, $(S_B/2, -L_B/2)$. 移动段前后端面的定位圆直径 $W_f = W_b = 10000.00\text{mm}$, 移动段长度 $E = 15000.00\text{mm}$, 移动段水平面与平台移动面名义距离 $H = 12000.00\text{mm}$. 偏差测量数据为 $U_f = -4.99\text{mm}$, $D_f = -205.02\text{mm}$, $L_f = 225.02\text{mm}$, $R_f = 24.99\text{mm}$, $U_b = 145.02\text{mm}$, $D_b = -55.01\text{mm}$, $L_b = 75.01\text{mm}$, $R_b = -125.01\text{mm}$.

假设由于各种原因, 使得 L_B, S_B, H 的实际值偏离了名义值, 变化范围为 10%. 表 1 显示了当按 L_B, S_B, H 名义值计算机器人关节位移, 而按实际值计算移动段位姿时, 均方差为

$$\sigma = \frac{U_f^2 + D_f^2 + L_f^2 + R_f^2 + U_b^2 + D_b^2 + L_b^2 + R_b^2}{8}$$

随位姿对正次数增加而变化的情况(表 1 中的数据单位为 mm).

表 1 仿真结果

Table 1 Simulation results

平台结构	$L_B = 20000$	$L_B = 22000$	$L_B = 20000$	$L_B = 22000$
实际值	$S_B = 20000$	$S_B = 22000$	$S_B = 20000$	$S_B = 22000$
	$H = 12000$	$H = 12000$	$H = 13200$	$H = 13200$
调整前 σ	131.636	131.636	131.636	131.636
调整 1 次后 σ	2.121	7.1224	17.082	11.543
调整 2 次后 σ	0.000	0.620	0.003	1.035
调整 3 次后 σ	0.000	0.056	0.000	0.094

从表 1 可以看出, 即使结构尺寸的实际值偏离名义值高达 10%, 在增加少量调节次数条件下, 仍可保证对接精度, 这与前面分析的结论一致.

5 结论(Conclusion)

一个相对松散的分布式系统, 在存在大的结构尺寸误差的情形下, 通过采用恰当的建模方法和控制策略, 可达到精密对接的目标, 是本文的一个重要结果. 此外, 文中的机器人轨迹规划算法与机器人的数量无关, 可以根据移动段的重量和尺寸来决定参与操作的机器人个数, 使系统具有柔性和适应能力, 显示出多机器人系统的优越性.

参考文献 (References)

- [1] 谭民. 机器人团体协作与控制的研究. 见: 863 计划自动控制领域发展战略研讨会论文集, 北京: 1999, 185- 190
- [2] 王越超, 谈大龙. 协作机器人学的研究现状与发展. 机器人, 1998, 20(1): 69- 75
- [3] Cao Y, Fukunaga A, Kahng A. Cooperative mobile robotic: antecedents and directions. Autonomous Robotics. 1997, 4(1): 7 - 27
- [4] M Hashimoto, F Oba. Dynamic control approach for motion coordination of multiple wheeled mobile robots transporting a single object. In IEEE/RSJ IROS, 1993, 1944- 1951
- [5] Johnson P J, Bay J S. Distributed control of simulated autonomous mobile-robot collective in payload transportation. Autonomous Robots, 1995, 2(1): 43- 63
- [6] Z-D Wang, E Nakano, T Matsukawa. Cooperating multiple behavior based robots for object manipulation. In IEEE/RSJ IROS, 1994, 1524- 1531
- [7] D J Stillwell, J S Bay. Toward the development of a material transport system using swarms of ant-like robots. In IEEE ICRA, 1993, 6: 766- 771
- [8] Fukuda T, Iritani G. Construction mechanism of group behavior with cooperation. In Proceedings of the 1995 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Pennsylvania, USA: 1995, 535- 542

作者简介:

景奉水 (1969-), 男, 博士研究生. 研究领域: 机器人控制和机器人视觉.

谭 民 (1962-), 男, 研究员, 博士生导师. 研究领域: 机器人控制等.

侯增广 (1969-), 男, 副研究员. 研究领域: 移动机器人.

(上接第 318 页)

零位标定偏差. 尽管如此, 从图中仍可看出基关节两个自由度方向的力矩控制还是能够较好地实现期望的控制要求.

7 结论(Conclusion)

机器人多指灵巧手同人手一样具有很好的灵巧性, 通用性和适应性, 它可以使机器人能够真正灵巧地进行细微操作. 本文建立了 HIT-1 型多指手两自由度手指基关节的运动学及动力学模型, 并采用工业中常用的 PID 控制算法设计了基关节的位置和力矩反馈控制系统, 通过实验实现了手指基关节在自由空间的位置控制和在约束空间的力矩控制, 验证了控制系统的有效性和 HIT-1 型手结构的合理性, 为以后多指协调控制奠定了基础.

参考文献 (References)

- [1] H Liu, P Meusel. DIR's Multisensory Articulated Hand Part II : The Parallel Torque/Position Control System. Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Robotics & Automation. May 1998
- [2] C S Lovchik, M A Diftler. The Robonaut Hand: A Dexterous Robot Hand For Space. Proceedings of the 1999 IEEE International Conference on Robotics & Automation, May 1999
- [3] 陈哲. 现代控制理论. 冶金出版社, 1987: 10- 41

作者简介:

何 平 (1976-), 男, 博士生, 研究领域: 多指手协调控制, 机电一体化技术.

金明河 (1970-), 男, 博士, 研究领域: 机器人技术, 机电一体化技术.

刘 宏 (1963-), 男, “长江学者计划”特聘教授, 研究领域: 多指机器人系统.