

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¹⁾

景奉水 谭民 侯增广 王云宽

(中国科学院自动化研究所 北京 100080)

(E-mail: jing@compsys.ia.ac.cn)

摘要 该文研究多机器人协调理论在尺寸多变、重量庞大的船体分段对接中的应用,提出了基于多台3自由度移动机器人协调操作的船体分段位姿找正对接系统的结构、组织和协调操作方法.根据分段对接工艺特点,把位姿找正过程抽象成刚体小位移运动模型,建立了基准段、对接段和机器人个体坐标系转换关系,给出了位姿找正过程中的机器人的关节运动轨迹规划算法.

关键词 多机器人协调,移动机器人,位姿找正,轨迹规划

中图分类号 TP18

POSTURE ALIGNING AND MERGING SYSTEM FOR BOAT BLOCKS——REALIZATION OF COORDINATED MANIPULATION WITH A MULTI-ROBOT SYSTEM

JING Feng-Shui TAN Min HOU Zeng-Guang WANG Yun-Kuan

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

(E-mail: jing@compsys.ia.ac.cn)

Abstract This paper has studied the application of multi-robot coordination in a merging system for posture alignment of huge and heavy boat blocks. The system architecture, organization and posture coordinated manipulation method are proposed based on multiple 3DOF mobile robots. By virtue of the blocks merging technology, the blocks kinetic model was built as a rigid body moving with small displacement. The trajectory method of robot joints is also presented after the establishment of relationship among the coordinate systems of basis block, merging block and single robot.

Key words Multi-robot coordination, mobile robots, posture alignment, trajectory planning

1) 国家“863”高技术研究发展计划(9921-03)资助

收稿日期 2000-04-11 收修改稿日期 2001-10-26

1 引言

大型运载设备,例如飞机、船体、化工罐体,均采用模块化分段制造方式.在各分段制造完毕后,需要进行段与段拼装对接.这时,不仅要分段位置到位,还需要姿态对齐.但现存的拼装工作平台,只有行走功能和升降功能,难以完成姿态的精确调整,细调时需靠人推索拉.这种方式不但费时费力,而且难以保证对接质量.对于小型设备,使用单个 6 自由度工业机器人不失为一种较好解决方案.但是对于大型设备,尤其重几百吨,长达数十米的大型船体分段来说,采用这种方法几乎是不可行的,因为目前的技术还不足以建造这种巨型机器人.

多机器人协调(Multi-Robot Coordination)的研究起源于 20 世纪 80 年代初期,如何保持多机器人之间运动的同步和协调一致是其要解决的问题^[1].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起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^[2].目前机器人协调控制已引起普遍重视^[1,3~5].

受多机器人协调搬运大型物体技术的启发,本文对多机器人协调对接大型船体分段进行了研究,所得结果已应用到船体分段位姿找正对接系统中,后者在大型船体分段的实际对接中获得了成功.

2 机器人个体功能、组织结构和协调行为

2.1 机器人个体结构与功能

在位姿找正对接系统中,单个机器人结构如图 1 所示.

机器人主体部分是一可沿轨道前后移动的小车,机器人的手臂部分是由两个液压缸构成.主液压缸(简称主缸)做上下运动,被固定在可在小车表面做左右平移的滑块上;副液压缸一端固定于车体,另一端与主缸的滑块铰结,带动主缸做左右运动.油缸运动的液压伺服与位置控制电路,以及小车滚动的变频控制电路均在车体内.机器人的手部为一球铰,它除了具有主、副缸给予的上下、左右两个运动自由度,还具有小车滚动带来的前后行走自由度.

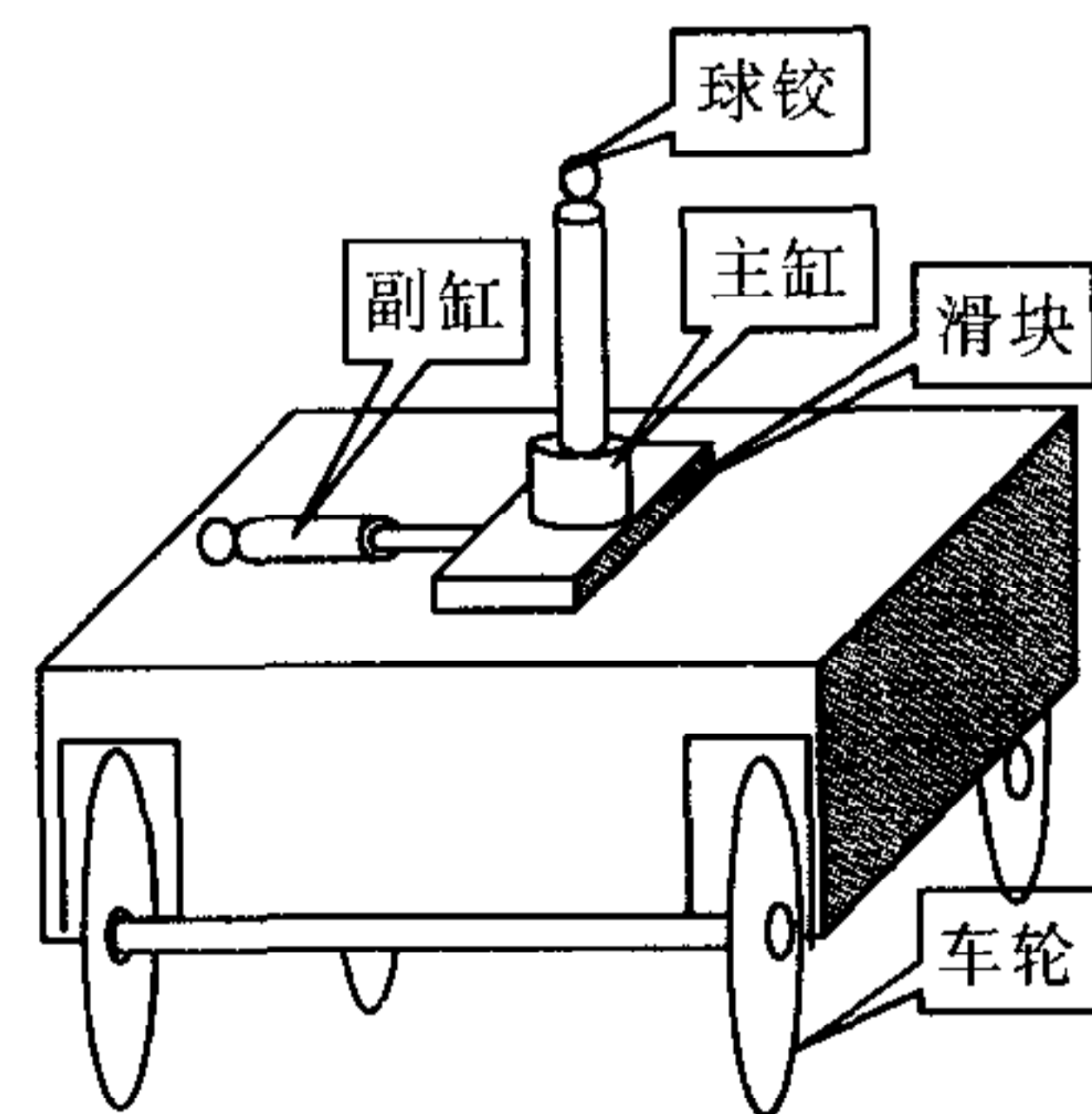


图 1 三自由度移动机器人

除能自主运动外,机器人还具有同外界通讯的 RS-485 接口,以及一个独立的通讯地址号来标志身份.

2.2 多机器人组织形式

多机器人组织可有 3 种形式:集中式、分层式和分布式.集中式是指系统中有一个主控 Agent,它完全控制从属者的行为,从而控制整个系统.分布式是指系统中各个个体处于平等地位,通过个体之间的交互、协商来确定个体的行为,进而实现整体行为.分层式系统由多个局部中心 Agent 逐级连接而成,上层对下层具有部分控制能力.

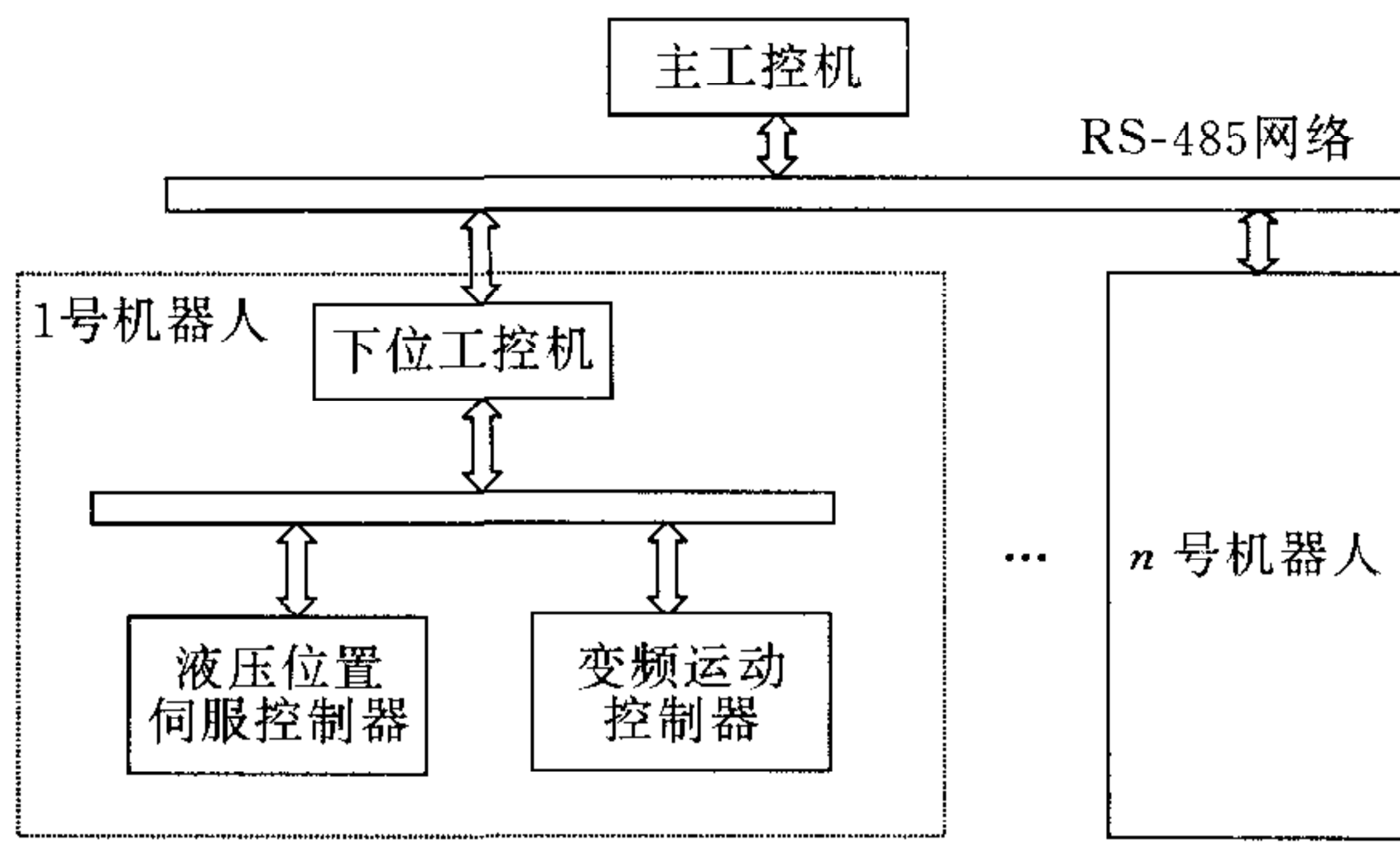


图 2 机器人的组织结构

由于位姿找正对接系统的作业环境相对固定,任务明确,不需要个体间的协商行为,因此采用了集中式组织结构,其物理实现见图 2.

2.3 多机器人的协调行为

船体分段在 6 个运动自由度方向上都可能偏离正确的对接位姿,而单个机器人的只有 3 个运动自由度,因此要完成船体分段对接,必须依靠多机器人的整体行为.对于图 2 所示的集中控制式

系统,整体行为的设计规划是由主工控机实现的.如图 3 所示,多个机器人分成两排,每排上顶一纵梁,机器人手部的球铰与纵梁铰结.在主工控机(它被固定于一纵梁上)的指令下,两排已铰接到纵梁上的机器人步调一致地行走走到支撑船体分段的横梁下面,然后同时上举纵梁,抬起船体分段,开始分段的位置和姿态调整.

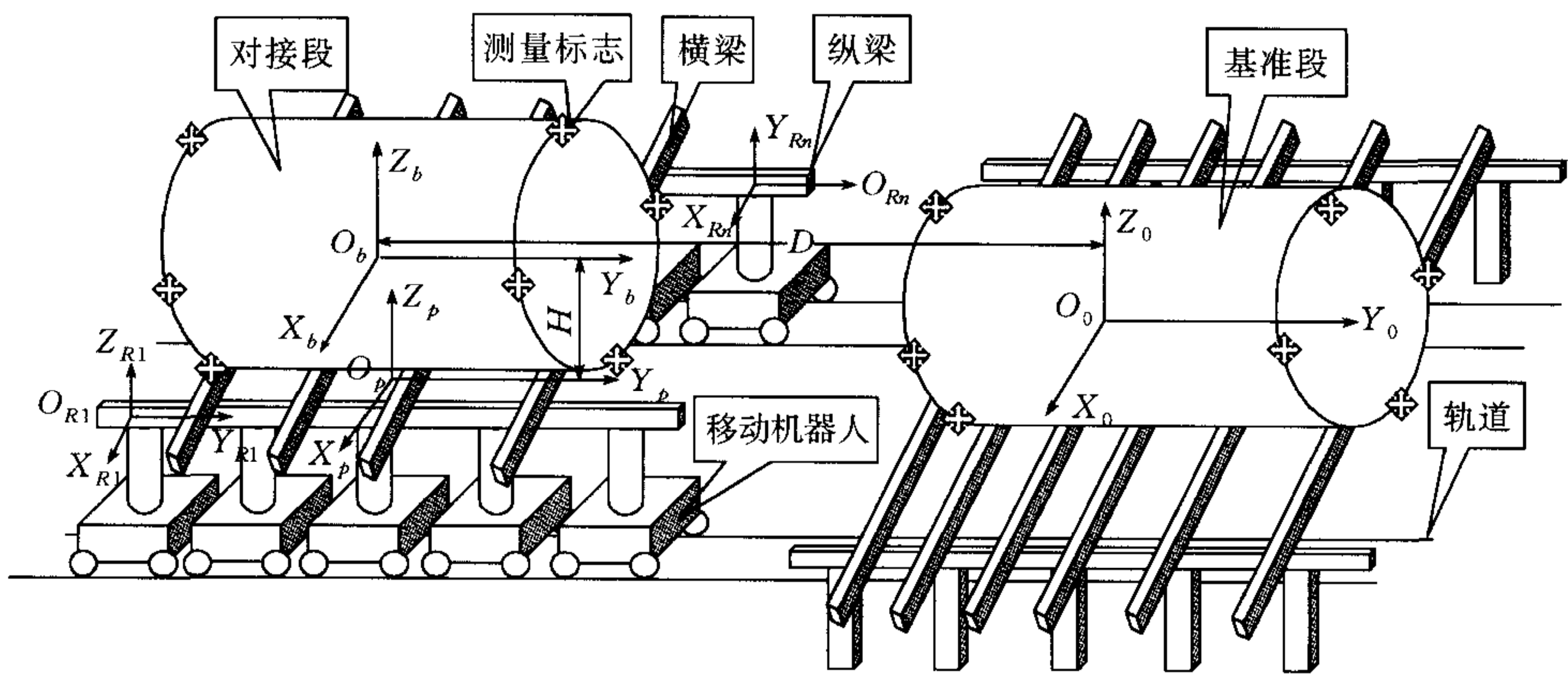


图 3 船体分段的位姿找正对接

位置调整包括分段上下、左右和前后 3 个方向的平动.由图 3 可以直观看出,两排机器人的手臂的上下或左右同步运动,可以带动分段做上下或左右平移;而车体的沿平直轨道的前进和后退,可使分段产生前后运动.相比之下,姿态的调整要复杂得多,例如,若让分段绕其前后轴旋转,两排机器人的手臂必须上下、左右同时协调运动才可能完成;否则,分段将一边绕轴转动,一边向左(或右)平动.因此,要对分段进行位姿调整,需要建立分段的运动模型和规划机器人的运动.

3 分段的对接与机器人轨迹规划算法

3.1 分段的运动模型

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.

机器人液压缸的有效行程比较分段或纵梁尺寸,可视为小位移.分段的上下、左右平移,以及绕 3 轴的转动都是由液压缸的移动引起的,所以这些运动都看作刚体的微小平动或转动.因此,分段的运动可以作为刚体小位移运动模型来处理.

3.2 坐标系组

1) 基准段坐标系.如图 3 所示,坐标系原点 O_0 为基准段几何形心, X_0 和 Y_0 轴在水平面上, Z_0 轴按右手系处于铅垂面内.

2) 分段坐标系.如图 3 所示,坐标系原点 O_b 为分段几何形心, X_b 和 Y_b 轴在分段水平面上, Z_b 轴按右手系处于分段铅垂面内.分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 .

3) 平台坐标系.在分段调整时,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,这一平面与分段的水平面平行且相距 H ;取分段坐标系的 Z_b 轴与该平面的交点为平台坐标系的原点 O_p , X_p 和 Y_p 轴在移动平台面上,按右手系取 Z_p 轴,如图 3 所示.

4) 机器人坐标系.机器人坐标系的原点 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.

在分段调整过程中,基准段坐标系为固定坐标系.其它坐标系为移动坐标系,但是它们之间相对位姿保持不变.

3.3 机器人的轨迹规划算法

为了便于推导,我们对三维空间位置矢量 $p=(px, py, pz)^T$ 用齐次坐标 $p'=(px, py, pz, 1)^T$ 表示,其中第 4 个分量为比例因子.这样就可以利用 4×4 的齐次变换矩阵,把一个用齐次坐标表示的位置矢量从一个坐标系影射到另一个坐标系.以下是 4 个基本齐次变换矩阵:

$$T(x, \phi) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & C\phi & -S\phi & 0 \\ 0 & S\phi & C\phi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad T(y, \alpha) = \begin{bmatrix} C\alpha & 0 & S\alpha & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -S\alpha & 0 & C\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$T(z, \theta) = \begin{bmatrix} C\theta & -S\theta & 0 & 0 \\ S\theta & C\theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad Tran(px, py, pz) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & px \\ 0 & 1 & 0 & py \\ 0 & 0 & 1 & pz \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中 $\phi, \alpha, \theta, px, py, pz$ 分别为绕 x, y, z 轴角位移及沿 x, y, z 轴的线位移; $S\phi, Sa, S\theta, C\phi, Ca, C\theta$ 分别代表 ϕ, α, θ 的正弦和余弦函数(以下同). $T(x, \phi), T(y, \alpha), T(z, \theta)$ 分别为 x, y, z 轴旋转齐次变换矩阵, $Tran(px, py, pz)$ 为平移齐次变换矩阵.机器人坐标系可由基准坐标系经过下列变换得到:

基准坐标系 $\xrightarrow{Tran(0, -D, 0)}$ 处于找正位置的分段坐标系 $\xrightarrow{T(x, \phi), T(y, \alpha) T(z, \theta) Tran(px, py, pz)}$

分段移动后坐标系 $\xrightarrow{Tran(0, 0, -H)}$ 平台坐标系 $\xrightarrow{Tran(X_{Ri}, Y_{Ri}, 0)}$ 第 i 个机器人坐标系,

其中 $\phi, \alpha, \theta, px, py, pz$ 为对接段偏离位姿找正位置时绕 X_b, Y_b, Z_b 轴转动以及沿 X_b, Y_b, Z_b 轴的平动; X_{Ri}, Y_{Ri} 为第 i 个机器人坐标系的原点相对平台坐标系的 X_p, Y_p 轴的坐标; D, H

的含义同前. 在以后的推导过程中, 如无特别说明, 这些量含义不变. 于是可得到由第 i 个机器人坐标系到基准坐标系的齐次变换矩阵

$$A_0^{Ri} = \text{Tran}(0, -D, 0)T(x, \phi)T(y, \alpha)T(z, \theta)\text{Tran}(px, py, pz) \\ \text{Tran}(0, 0, -H)\text{Tran}(X_{Ri}, Y_{Ri}, 0) \quad (2)$$

由上式可得到第 i 个机器人坐标系原点在基准坐标系的齐次坐标

$$\begin{pmatrix} R_{xi} \\ R_{yi} \\ R_{zi} \\ 1 \end{pmatrix} = A_0^{Ri} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} (CaC\theta + SaS\phi S\theta)X_{Ri} + (-CaS\theta + SaS\phi C\theta)Y_{Ri} - SaC\phi H + \\ C\phi S\theta X_{Ri} + C\phi C\theta Y_{Ri} + S\phi H + C\phi S\theta px + C\phi C\theta py - S\phi pz - D \\ (-SaC\theta + CaS\phi S\theta)X_{Ri} + (SaS\theta + CaS\phi C\theta)Y_{Ri} - CaC\phi H + \\ (CaC\theta + SaS\phi S\theta)px + (-CaS\theta + SaS\phi C\theta)py + SaC\phi pz \\ (-SaC\theta + CaS\phi S\theta)px + (SaS\theta + CaS\phi C\theta)py + CaC\phi pz \end{bmatrix} \quad (3)$$

式(2)和(3)中各符号的意义同式(1).

将 $\phi = \alpha = \theta = 0, px = py = pz = 0$ 代入式(3), 得到分段处于找正位姿时, 机器人坐标系原点在基准坐标系中的齐次坐标

$$\begin{pmatrix} R_{xi}^0 \\ R_{yi}^0 \\ R_{zi}^0 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} X_{Ri} \\ Y_{Ri} - D \\ -H \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

机器人坐标系原点的位置与其手部位置一致, 因此式(4)减去式(3), 得到分段做 ϕ, α, θ 旋转和 px, py, pz 平动后, 重新回到原始位置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

$$R_{zi}^0 - R_{zi} = (SaC\theta - CaS\phi S\theta)X_{Ri} + (-SaS\theta - CaS\phi C\theta)Y_{Ri} - (1 - CaC\phi)H + \\ (SaC\theta - CaS\phi S\theta)px + (-SaS\theta - CaS\phi C\theta)py - CaC\phi pz \quad (5)$$

副缸位移

$$R_{xi}^0 - R_{xi} = (1 - CaC\theta - SaS\phi S\theta)X_{Ri} + (CaS\theta - CaS\phi C\theta)Y_{Ri} + SaC\phi H + \\ (-CaC\theta - SaS\phi S\theta)px + (CaS\theta - SaS\phi C\theta)py - SaC\phi pz \quad (6)$$

行走位移

$$R_{yi}^0 - R_{yi} = -C\phi S\theta X_{Ri} + (1 - C\phi C\theta)Y_{Ri} - S\phi H - C\phi S\theta px - C\phi C\theta py + S\phi pz \quad (7)$$

3.4 轨迹规划算法的简化

根据前面的小位移假设, $\phi, \alpha, \theta, px, pz$ 均为小位移, ϕ, α, θ 的相应正弦值也很小. 因此所

有这些值都可作为无穷小处理.

另外,由于 py 项仅影响对接分段与基准段的间距,即只影响分段的对接,而不影响分段的对正;而且对接分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:分段位姿找正和分段对接.

于是,令 $py=0$,并忽略关于 $S\phi, S\alpha, S\theta, px, pz$ 的 2 阶以上无穷小项,整理式(5)~(7),得到关于分段偏差 $\phi, \alpha, \theta, px, pz$ 的机器人各关节在分段位姿找正时的运动控制律:

主缸位移

$$R_{zi}^0 - R_{zi} = S\alpha C\theta X_{Ri} - C\alpha S\phi C\theta Y_{Ri} - (1 - C\alpha C\phi)H - C\alpha C\phi pz \quad (8)$$

副缸位移

$$R_{xi}^0 - R_{xi} = (1 - C\alpha C\theta)X_{Ri} + C\alpha S\theta Y_{Ri} + S\alpha C\phi H - C\alpha C\theta px \quad (9)$$

行走位移

$$R_{yi}^0 - R_{yi} = -C\phi S\theta X_{Ri} + (1 - C\phi C\theta)Y_{Ri} - S\phi H - C\phi S\theta px + S\phi pz \quad (10)$$

3.5 分段偏移 $\phi, \alpha, \theta, px, pz$ 的计算

以上公式中都是以分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得,但可以通过测量分段定位点偏移的方法间接获得.

如图 3 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.找正的目标即是要求对接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 代表分段的前后端面.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,即向上偏移和向右偏移为正,反之为负.用 W_f, W_b 来记前后端面定位圆的直径, E 表示分段长度.现说明如何由偏差测量值计算分段偏移 $px, pz, \phi, \alpha, \theta$.

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

$$\begin{aligned} px_f &= \frac{1}{2}(U_f + D_f), \quad pz_f = \frac{1}{2}(L_f + R_f), \\ \alpha_f &= \text{tg}^{-1}\left(\frac{L_f - R_f}{W_f}\right) \quad \text{或} \quad \alpha_f = \text{tg}^{-1}\left(\frac{U_f - D_f}{W_f}\right) \end{aligned} \quad (11)$$

2)后端面的平移量 px_b, pz_b 和绕 Y 轴角位移 α_b

$$\begin{aligned} px_b &= \frac{1}{2}(U_b + D_b), \quad pz_b = \frac{1}{2}(L_b + R_b) \\ \alpha_b &= \text{tg}^{-1}\left(\frac{L_b - R_b}{W_b}\right) \quad \text{或} \quad \alpha_b = \text{tg}^{-1}\left(\frac{U_b - D_b}{W_b}\right) \end{aligned} \quad (12)$$

3)分段偏移 $px, pz, \phi, \alpha, \theta$

$$\begin{aligned} px &= \frac{1}{2}(px_f + px_b), \quad pz = \frac{1}{2}(pz_f + pz_b), \quad \alpha = \frac{1}{2}(\alpha_f + \alpha_b), \\ \phi &= \text{tg}^{-1}\left(\frac{pz_f - pz_b}{2E}\right), \quad \theta = \text{tg}^{-1}\left(\frac{px_b - px_f}{2E}\right) \end{aligned} \quad (13)$$

4 结束语

1) 用多个 3 自由度移动机器人构成位姿调整平台,能够满足分段在 6 个自由度方向上的位姿找正对接要求. 与单个 6 自由度关节机器人相比,其关节轨迹算法简单可靠,不存在奇异解问题.

2) 机器人轨迹规划算法与机器人的数量无关,这样就可以根据分段的重量和尺寸来决定每次参与位姿找正对接任务的机器人个数,增加了系统的柔性和适应能力.

3) 由轨迹规划算法还可以看出,要实现平台的 6 自由度运动,3 个运动自由度是对单个机器人的最低要求.

4) 本文的模型是建立在刚体小位移运动模型基础上,适用于分段的小偏差调整.

参 考 文 献

- 1 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
- 2 谭 民. 机器人群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
- 3 Cao Y, Fukunaga A, Kahng A. Cooperative mobile robotic: Antecedents and directions. *Autonomous Robotics*, 1997, 4(1):7~27
- 4 Fukuda T, Iritani G. Construction mechanism of group behavior with cooperation. In: Proc the 1995 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Pennsylvania USA; 1995. 535~542
- 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

景奉水 博士研究生. 当前研究方向为机器人控制和视觉伺服.

谭 民 简介见本刊第 24 卷第 1 期.

侯增光 简介见本刊第 24 卷第 2 期.

王云宽 副研究员. 主要研究方向为机电伺服控制.