基于 RTK-GPS的提梁机组协调控制系统设计

郭中伟 李运华

(北京航空航天大学 自动化科学与电气工程学院, 北京 100191)

摘 要: 双提梁机组协调控制系统利用对称布置的双频载波相位 RTK-GPS(Real-Time Kinematic difference Global Position System)接收机完成对提梁机位置、航向位姿信息的测量,通过卡尔曼滤波与里程计融合,消除坐标定位信息的波动,提高位姿测定的精度;单机采用基于 CAN (Controller Area Network)总线的网络控制系统,机组间数据传输采用无线网络,构成混合网络控制系统;采用基于双闭环的同步控制策略实现对两提梁机的同步协调控制.实际应用结果表明,两提梁机间相对位置偏差不超过 0.1m,相对航向角度偏差不超过 0.1°.

关 键 词: 同步控制; 卡尔曼滤波; 提梁机; 动态实时差分全球定位系统(RTK-GPS)
中图分类号: TP 207
文献标识码: A 文 章 编 号: 1001-5965(2008)11-1280-04

Design of coordinated control system for beam-carried cranes group based on RTK-GPS

Guo Zhongwei Li Yunhua

(School of Automation Science and Electrical Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract The coordinated control system for beam-carried cranes group used symmetrically laid two dual-frequency carrier phase real-time kinematic difference global position system (RTK-GPS) receivers to complete the large-scale beam-carrier's position and direction measurement. Based on Kalman filter, the data fusion technology eliminated the volatility of the GPS data and improved the accuracy of location. The networked control system based on controller area network (CAN) bus combined the wireless network used for inter-crane communication to be as the foundation of the control system. Control strategy based on dual-closed-loop control achieved the synchronization of the beam-carried crane group. Practical application results show that the relative position deviation between the two cranes is not more than 0.1m, and relative heading angle deviation is not more than 0.1 degree.

Key words synchronized control; Kalman filter; beam-carried crane; real-time kinematic difference global positioning system (RTK-GPS)

在现代公路、铁路桥梁的建设中,轮胎式提梁机发挥着越来越重要的作用.本文所开发的两台国内最大跨度、最大吨位、横跨 3片梁联合作业的 DLT900t提梁机可以在预制场内以直行、斜行和横行等多种运行模式协调工作抬吊一片 1600t混凝土箱梁;可以完成箱梁的起吊、台座间的转移以及装船等工作.与通过整体钢结构联接的单 1600 提梁机相比,由两台单 900 t提梁机组成的双提梁机组联合作业具有节约材料,降低制造难度,整机自重减小,造价和运行成本都大幅度减低等优点,但难点是如何解决双提梁机联合作业时的协调控制问题.

目前,国内外关于多机器人合作搬运物体问题的研究很多,文献[1]着重研究了多机器人间合作搬运物体的任务实时规划和分配;而文献[2]的研究主要集中于多机器人合作时的路径规

收稿日期: 2007-12-04
基金项目: 国家自然科学基资助金项目(50575013);北京航空航天大学研究生创新实践基金资助项目
作者简介: 郭中伟(1982-),男,河南济源人,博士生, zhongweiguo@hotmail.com.

划算法.

多机器人集群控制中相对位姿的检测定位是保证同步控制的基础, 目前基于 GPS(Global Position System)进行坐标定位和位姿检测的研究更多的是集中于理论研究和实验验证, 在实际应用中的研究很少.

本文主要就提梁机组控制系统体系结构 (包括单机微电控制系统和上层协调控制系统)、同步协调控制策略和高精度位姿检测定位系统进行分析和设计, 从而实现一套高性能的综合协调控制系统.

1　双提梁机组协调控制系统

1.1　单提梁机微电控制系统

提梁机微电控制系统采用基于 CAN (Controller Area Network) 总线的网络控制系统. 图 1为提梁机微电控制系统结构图.

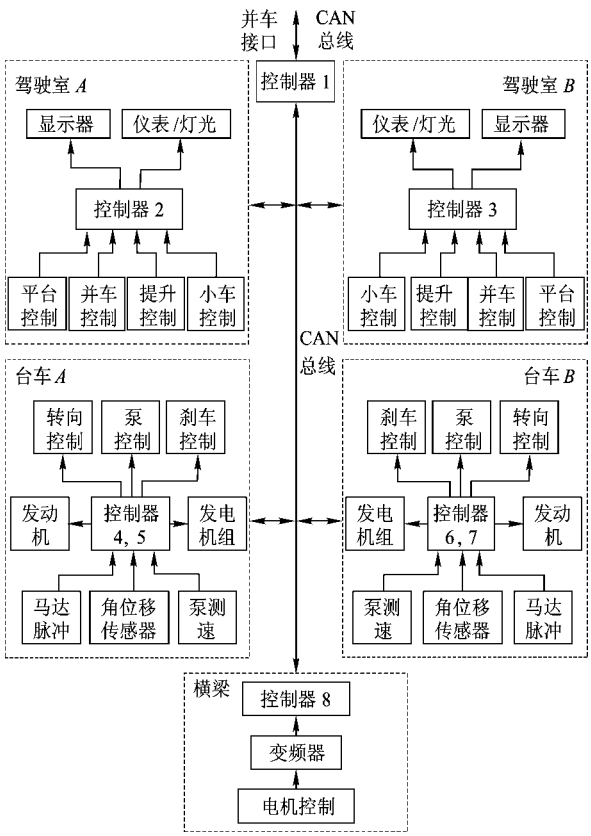

图 1　提梁机微电控制系统结构图

驾驶室为控制中心单元, 所有操作控制指令通过总线发送到相应的现场控制模块, 由现场控制模块结合各种车载速度、转角传感器实现闭环控制.

1.2　协调控制系统总体结构

双提梁机并用协调控制系统采用基于 RTK-GPS(Real-Time Kinematic difference Gbbal Position System)位姿测量, 嵌入式控制, 无线网络数据传输的体系结构. 协调控制系统结构示意图如图 2所示.

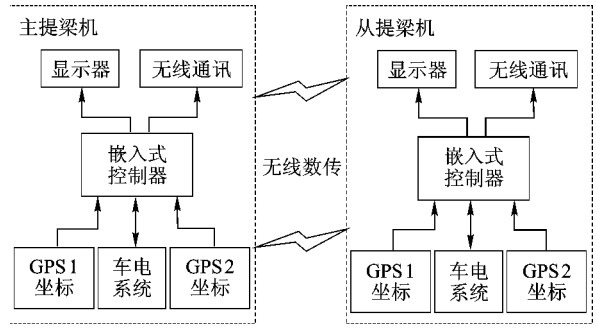

图 2　协调控制系统结构示意图

基于 RTK-GPS的测量系统模块主要完成对两提梁机位姿信息的测量; 嵌入式控制系统完成对整个协调控制系统的综合管理; 基于无线网络的数据传输链路作为两提梁机间数据传输的通道.

1.3　协调控制系统工作原理

两辆提梁机分别作为整个系统的主车与从车. 当两机并车协调工作时, 主车做主动控制, 从车通过并车协调控制系统的控制实现跟随控制. 提梁机并用时有多种工作模式, 在不同工作模式下采用不同的通讯协议和协调控制策略. 而其中两提梁机并用行驶时的“台车工作模式”最为关键, 下面详细介绍该模式下控制策略.

当两提梁机并用行驶搬运预制梁时通过控制提梁机两侧的台车行走来实现提梁机的行走, 通过控制台车的转向来实现提梁机的横行、直行、斜行和八字转向等操作[3]. 采用双闭环的控制模式, 保证两提梁机的速度同步和航向同步[4].

主提梁机以驾驶员给出的速度指令作为参考值, 在运行过程中紧密跟踪系统给定值. 从提梁机以主提梁机的速度和位置作为自己的参考值, 在运行过程中紧密跟踪主提梁机运动[5]. 图 3为速度同步协调控制的控制模型.

在速度同步控制时, 主车行走台车控制器结

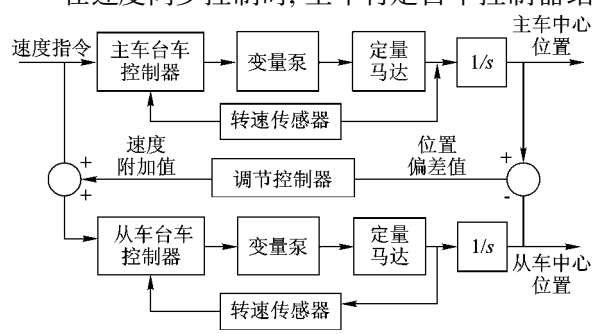

图 3　速度协调控制模型

合转速传感器构成速度闭环控制始终跟踪驾驶员给定的速度指令;同时控制指令通过协调控制系统控制从车行走台车的运动,但为了保证两提梁机的位置同步,需实时的调整从车的行走速度指令.在协调控制系统中通过坐标测量系统获得的两提梁机中心位置坐标计算出两提梁机间的相对位置偏差和航向偏差,偏差结果作为反馈量经调节控制器计算后生成速度附加值参与从车速度控制,从而保证两提梁机的位置同步.在本系统中协调控制器采用的是分段比例积分微分控制器.

两提梁机并用行走时的航向同步也采用同样的控制策略,不过这时控制对象变为电液比例控制阀,给定指令变为转向角度指令,协调控制量变为两提梁机的航向偏差角.

2 基于 RTK-GPS的坐标测量系统

双提梁机并用协调控制系统要求实时获取两提梁机的位姿信息(包括位置坐标和航向).基于双频 RTK-GPS接收机的坐标测量系统采用绝对坐标测量方法,安装使用方便,且其定位精度高、长期稳定性好、无误差累积,因而被应用在双提梁机协调控制系统中.

2.1 坐标测量系统架构

基于 RTK-GPS定位的坐标系统采用高精度的双频载波相位 GPS接收机,通过差分处理可获得厘米级精度的动态定位坐标,结合提梁机转速传感器测得的提梁机速度信号通过滤波算法可以得到更稳定、可靠、高精度的坐标数据.图 4为GPS坐标测量系统的布置图.

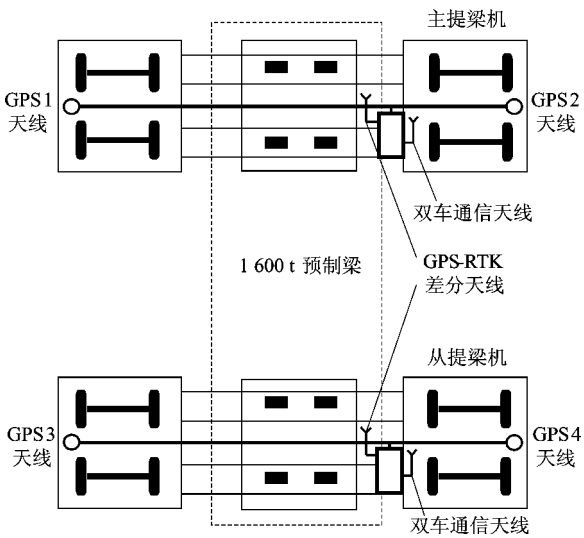

图 4 GPS坐标测量系统布置图

通过对称安装在提梁机横梁两端的 GPS接收机天线可以获得提梁机两端点的经纬度坐标位置,通过高斯投影坐标变换和坐标系平移、旋转变换即可获得提梁机在制梁场平面直角坐标系中的位置坐标,再通过计算可以获得提梁机中心点的位置坐标和航向信息[6-7].

2.2 基于卡尔曼滤波的数据处理算法

经高斯投影计算、坐标转换后的坐标仍然不能够直接作为协调控制系统中的反馈量使用,这是由于载波相位 GPS在测量过程中不可避免的存在一些异常误差,比如跳周和电磁干扰等,给测量结果带来很大的影响,形成突变或者"野值".

通过安装在提梁机台车上的转速传感器可以测量并计算出提梁机两个台车的速度,因此通过式(1)即可以计算出提梁机的实时位置和航向角度:

$$\left.\begin{aligned} v &= \frac{v_{\mathrm{L}} + v_{\mathrm{R}}}{2} \\ \omega_{\mathrm{d}} &= \frac{v_{\mathrm{R}} - v_{\mathrm{L}}}{L} \\ \theta_{k+1} &= \theta_k + \omega_{\mathrm{d}} T \\ x_{k+1} &= x_k + v\cos(\theta_{k+1})T \\ y_{k+1} &= y_k + v\sin(\theta_{k+1})T \end{aligned}\right\} \tag{1}$$

式中,v为台车线速度;v_{L}为提梁机左侧台车线速度;v_{R}为提梁机右侧台车线速度;ω_{d}为提梁机航向变化的角速度;L为提梁机左右台车的间距;x_k和y_k为提梁机中心的坐标位置;θ_k为提梁机的航向角,表示提梁机航向与坐标系x轴正方向之间的夹角;T为采样周期.通过式(1)计算提梁机位置和姿态的方法称为软件里程计,其主要用于对GPS测量数据进行剔除"野值"计算.

GPS数据经过预处理,实现坐标系投影转换并且剔除"野值"后,可以通过卡尔曼滤波算法消除 GPS定位数据中的短时波动,从而进一步提高坐标定位的精度[8].

系统状态方程和量测方程表示为

$$\left.\begin{aligned} \boldsymbol{X}_{k+1} &= \boldsymbol{A}\boldsymbol{X}_k + \boldsymbol{W}_k \\ \boldsymbol{Z}_{k+1} &= \boldsymbol{H}\boldsymbol{X}_k + \boldsymbol{V}_k \end{aligned}\right\} \tag{2}$$

式中,$\boldsymbol{A}$, $\boldsymbol{H}$为矩阵;$\boldsymbol{W}_k$为协方差是$\boldsymbol{Q}$的系统噪声矩阵;$\boldsymbol{V}_k$为协方差是$\boldsymbol{R}$的系统量测噪声矩阵.

系统的状态变量选取为

$$\boldsymbol{X} = [x \quad y \quad v_x \quad v_y \quad a_x \quad a_y]^{\mathrm{T}} \tag{3}$$

式中,(x, y)为提梁机中心位置坐标;(v_x, v_y)为提梁机移动速度在x轴和y轴方向的分量值;(a_x, a_y)为提梁机移动加速度在在x轴和y轴方向的分量值.

系统的量测变量选取为

$$\boldsymbol{Z} = [L_x \quad L_y]^{\mathrm{T}} \tag{4}$$

式中, (L_x, L_y)为 GPS测量的提梁机中心位置坐标经过高斯投影坐标转换和平移后在 x轴和 y轴方向的分量值.

卡尔曼滤波方程为

$$\left.\begin{aligned} \boldsymbol{X}_{k+1/k} &= \boldsymbol{A}\boldsymbol{X}_{k/k} \\ \boldsymbol{P}_{k+1/k} &= \boldsymbol{A}\boldsymbol{P}_{k/k}\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}} + \boldsymbol{Q} \\ \boldsymbol{K} &= \boldsymbol{P}_{k+1/k}(\boldsymbol{P}_{k+1/k} + \boldsymbol{R})^{-1} \\ \boldsymbol{X}_{k+1/k+1} &= \boldsymbol{X}_{k+1/k} + \boldsymbol{K}(\boldsymbol{Z}_k - \boldsymbol{X}_{k+1/k}) \\ \boldsymbol{P}_{k+1/k+1} &= (\boldsymbol{I} - \boldsymbol{K})\boldsymbol{P}_{k+1/k} \end{aligned}\right\} \quad (5)$$

式中, $\boldsymbol{I}$为单位矩阵; $\boldsymbol{K}$为卡尔曼滤波系数矩阵; $\boldsymbol{P}$为估测协方差矩阵.

通过以上卡尔曼滤波后获得的 GPS定位数据精度大为提高. 如图 5所示为提梁机匀速向东直线行驶测得的坐标数据与经过滤波后坐标数据对比图, 可以看出精度大为提高.

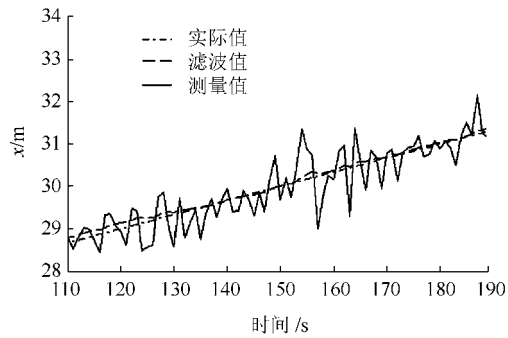

图 5　滤波效果图

经过滤波处理后的 GPS定位坐标数据用来对里程计的累积误差进行补偿, 保持里程计的实时定位精度, 同时补偿过的里程计数据又用来对 GPS坐标数据进行“野值”剔除计算, 两者互为补充, 提高整个位姿测量系统的精确度.

3　实际应用情况

基于 RTK-GPS的提梁机组协调控制系统已成功应用于国内某一跨海大桥预制桥梁的搬运施工中, 如图 6所示.



图 6　双提梁机施工作业现场

使用情况表明, 所设计的同步协调控制策略和所设计的高精度坐标测量系统在实际应用中完全满足控制精度的要求. 目前该系统已在舟山连岛工地成功运行, 具有生产效率高和操纵灵活等优点, 为确保施工进度做出了贡献.

4　结 束 语

基于载波相位 RTK-GPS系统与车载里程计数据融合, 经过滤波处理后很好的提升了定位数据的准确度和稳定性; 无线协调控制系统与车辆总线微电控制系统的结合为解决多机组的集群协调控制提供了很好的解决办法, 而且便于系统的扩展; 采用双闭环的同步控制策略保证了双提梁机的同步协调工作. 整个系统的开发设计对其它相关系统的研制具有很好的借鉴意义.

参考文献 (**References**)

[1] Miyata N, Ota J, Arai T, et al. Cooperative transport by multiple mobile robots in unknown static environments associated with real-time task assignment[J]. Transactions on Robotics and Automation, 2002, 18(5): 769–780

[2] Nishi T, Ando M, Konishi M. Distributed route planning for multiple mobile robots using an augmented lagrangian decomposition and coordination technique[J]. Transactions on Robotics, 2005, 21(6): 1191–1200

[3] Li Yunhua, Yang Liman, Yang Guilin. Network-based coordinated motion control of large-scale transportation vehicles[J]. Transactions on Mechatronics, 2007, 12(2): 208–215

[4] Nakamura M, Hiyamizu D, Kyura N. A method for precise contour control of mechatronic servo system with master-slave axes by use of synchronous position control[J]. Transactions of the Society of Instrument and Control Engineers, 1997, 33(4): 247–253

[5] 逄波, 王占林, 白国长. 工程机械液压底盘试验台双马达同步的研究[J]. 系统仿真学报, 2007, 19(9): 2018–2021
Pang Bo, Wang Zhanlin, Bai Guochang. Study of dual motors synchronism drive based on engineering machine hydraulics underpan test-bed[J]. Journal of System Simulation, 2007, 19(9): 2018–2021(in Chinese)

[6] Wu Chihuang, Chou Huangju, Su Weihan. A genetic approach for coordinate transformation test of gps positioning[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2007, 4(2): 297–301

[7] Brown A K. GPS/INS uses low-cost MEMS IMU[J]. Aerospace and Electronic Systems Magazine, 2005, 20(9): 3–10

[8] Sharaf R, Noureldin A, Osman A, et al. Online INS/GPS integration with a radial basis function neural network[J]. Aerospace and Electronic Systems Magazine, 2005, 20(3): 8–14

(责任编辑: 刘登敏)