

文章编号: 1001-3806(2007)06-0596-04

## 基于激光雷达测量技术的集装箱卡车定位系统

吕潮峰, 杜正春\*

(上海交通大学 机械与动力学院, 上海 200240)

**摘要:** 为了实现港口堆场作业自动化, 迫切需要一种快速准确的集卡定位系统。针对此需要设计了一套由运动控制卡、步进电机和 2-D 激光雷达组合而成的 3-D 激光雷达扫描系统, 采用了一种多个 3-D 激光雷达系统协同工作的工作方式和与之相适应的改进的 CP 数据处理算法以及先粗后精的分级定位方法。该系统工业性试生产的结果表明, 装卸效率达到 80TEU/h, 精度控制在 5mm 以内, 首次实现了无人驾驶轨道吊车对集卡的快速准确定位。该系统对于其它领域的大型部件的检测定位也有非常重要的意义。

**关键词:** 激光技术; 测量系统; CP 算法; 激光雷达

**中图分类号:** TN953.2 **文献标识码:** A

### Chassis positioning system based on the laser radar survey technology

LÜ Chao-feng, DU Zheng-chun

(School of Mechanical and Power Energy Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

**Abstract:** In order to realize the automation of the container yard work, a fast and accurate chassis positioning system is needed urgently. A 3-D laser radar scanning system, which was made up of a motion control card, a stepper motor and a 2-D laser radar, was designed to satisfy the requirement. On this foundation, more than one 3-D laser radar system work way and improved CP algorithm which adapts with 3-D laser radar system data processing and gradually localization method were applied in the chassis positioning system. The result of industry tries indicates that the loading efficiency achieved 80TEU/h and the control precision was less than 5mm. It is the first time that pilotless rail mounted gantry RMG is used to locate the container truck fast and accurately. This system also has much significance on other large-scale part examination and localization.

**Key words:** laser technique; measurement system; CP algorithm; laser radar

### 引 言

目前, 港口码头上的集装箱装卸, 大多数采用的是人工操作的方式, 这种工作方式的缺点在于工作效率较低, 集装箱的装卸速度上不去, 进而影响了整个港口码头的高速运作。集装箱码头生产的自动化是未来港口发展的趋势, 受到世界各大港口的重视。随着自动化技术的发展, 各国纷纷投资自动化堆场。为实现堆场集装箱生产作业<sup>[1]</sup>的自动化, 提高作业效率, 迫切需要一种能够快速准确的实现吊具 - 集装箱卡车 (以下简称集卡) 对箱的定位系统。作者利用了激光具有相干性好、方向性强, 不受现场环境因素影响的优点和激光雷达探测距离远, 测量精度高、响应速度快等特点, 采用多个激光雷达协同工作的方式首次在上海外

高桥集装箱码头无人堆场中实现了集装箱吊具对集卡的快速精确的对箱定位操作。

### 1 集卡定位系统的构成

整个集卡定位系统硬件构成如图 1 所示, 主要

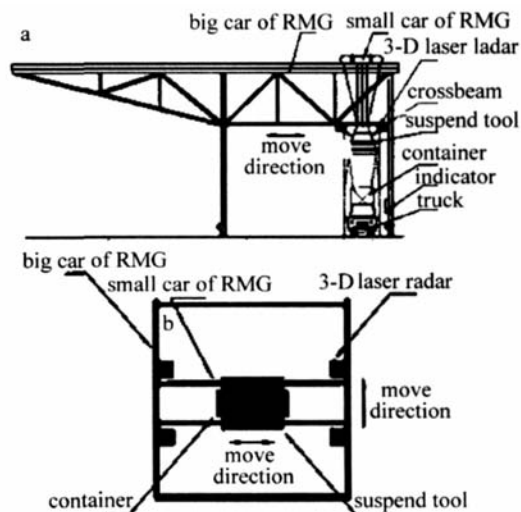


Fig 1 Chassis positioning system constitution

基金项目: 2004 年上海市科委重大科技攻关资助项目 (04dz11001)

作者简介: 吕潮峰 (1981-), 男, 硕士研究生, 主要从事计算机测试技术方面的研究工作。

\* 通讯联系人。E-mail: zcdu@sjtu.edu.cn

收稿日期: 2006-09-26; 收到修改稿日期: 2006-11-27

由轨道吊大车 (rail mounted gantry, RMG)、RMG 小车、3-D 激光雷达、RMG 横梁、RMG 吊具、集装箱、集卡对位指示装置和集卡组成。RMG 小车的运动方向如图 1 所示, RMG 大车的运行方向与该方向垂直 (水平运动)。4 个 3-D 激光雷达沿集装箱对角线方向对称安装在 RMG 大车低架横梁上。

### 1.1 3-D 激光雷达系统的工作原理

在集卡定位系统中,采用二维测距激光雷达 LMS291,步进电机和运动控制卡组合而成的 3-D 激光雷达系统。LMS291 激光雷达测距仪采用飞行时间法测距,其工作原理见图 2。LMS291 激光雷达工作时,

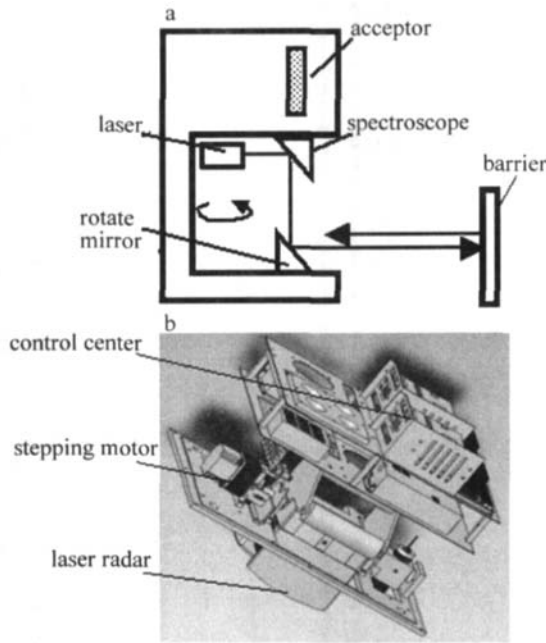


Fig 2 Laser radar principle of work

激光器<sup>[2]</sup>向外发射脉冲激光束,并检测被测物体反射回来的脉冲激光束,通过计算发射脉冲光束与接收脉冲光束间的时差,测量出激光检测器与被测物体间的距离 $s$ <sup>[3]</sup>。运动控制卡控制步进电机,带动激光雷达旋转,结合激光束的偏转角度 $\alpha$ 和步进电机的旋转角度 $\theta$ ,即可得到激光测距坐标的计算公式: $x = S \cos\theta \cos\alpha$ ;  $y = S \cos\theta \sin\alpha$ ;  $z = S \sin\theta$ ,从而可精确检测出被测物体的轮廓。该 3-D 激光雷达系统最大扫描范围可达 $80\text{ m}$ <sup>[4]</sup>,而误差不超过 $\pm 10\text{ mm}$ ,垂直扫描角度可达 $180^\circ$ ,每一激光束间的角度分辨为 $0.25^\circ$ ,水平扫描角度可达 $100^\circ$ ,步进电机的角度分辨率为 $0.01^\circ$ 。

### 1.2 多个激光雷达协同工作

所谓多个激光雷达协同工作是指每个激光雷达在各自的线程控制下独立运行,而每个独立的线程则通过主处理模块,实现各线程间的同步,使多个激光雷达共同完成扫描任务。

首先,通过中央处理模块设定每个激光雷达的起

始扫描角度和终止扫描角度来对每个激光雷达扫描区域进行划分。为了保证测量的完整性和准确性,扫描区域必须有重合部分。集装箱的扫描任务可以分解为两类:箱体顶面的扫描和 4 个侧面的扫描,如图 3 所

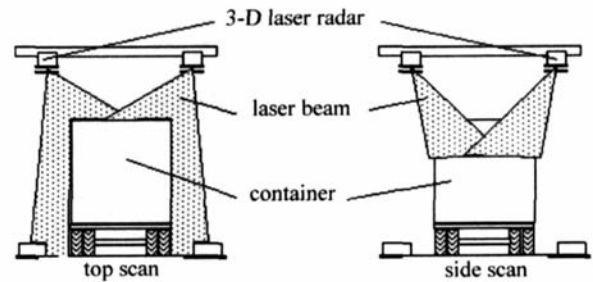


Fig 3 Scanning schematic

示。箱体顶面的扫描要求 4 个激光雷达分别从自身安装最近的边逐渐扫向另一边,直到重合部分大小符合系统初始设定的要求。4 个侧面扫描与顶面扫描不同的是,每个侧面通过与之同侧的两个激光雷达完成扫描。

其次,在每个激光雷达工作子线程上建立数据采集线程,数据处理线程和雷达状态监控线程。原始测量数据通过数据采集线程被记录在缓存中,启动数据处理线程,对原始测量数据进行滤波处理。在整个扫描过程和处理过程中,雷达状态监控线程对每个雷达状态进行了监控,当雷达发生故障时,能够进行自动诊断和屏蔽。

最后,在每个雷达完成独立的扫描处理工作之后,将测量数据传给主处理模块进行多个测量数据的配准和融合。

### 1.3 数据的配准

对于多激光雷达扫描定位系统而言,数据处理的一个重要工作就是将在不同的视点得到的深度数据配准到一个统一的坐标系下。多个激光雷达从不同视点获取深度数据后,首先对数据进行二维中值滤波处理<sup>[5]</sup>,可以在匹配前去除一些无法匹配的噪声点,从而提高匹配的精度和匹配速度。一般采集的数据中,其相邻的高度数据之间大多具有很高的相关性,也就是差别不是很大,而数据中的噪声,通常表现为一些孤立点。采用改进的二维中值滤波的方法,在极值判断的基础上加入门限判别,判断数据是噪声还是信号,并以此为基础对噪声进行中值滤波。

对于将在不同的视点测量得到的深度数据配准到统一的坐标系下而言,具体说来,也就是寻求一个 $3 \times 3$ 的旋转矩阵 $\mathbf{R}$ 和 3 维平移向量 $\mathbf{t}$ ,使得被测物体中任意一点 $P$ 在扫描空间坐标系 1 中的三维坐标和其在扫描空间坐标系 2 中的三维坐标满足如下关系:

$$(x_p^2 + y_p^2 + z_p^2)^T = \mathbf{R} (x_p^1 + y_p^1 + z_p^1)^T + \mathbf{t} \quad (1)$$

配准的目标就是要找出满足上述条件的 $(\mathbf{R}, \mathbf{t})$ 。

BESL和MCKAY提出的迭代最近点算法(iterative closest point, ICP)<sup>[6]</sup>,被认为目前三维点云数据配准的主导性算法。传统的ICP算法具有较高的匹配精度,但是存在计算量大和迭代过程可能无法收敛到全局最优解的缺陷。作者在集卡定位系统中,结合系统本身的特点,对传统的ICP算法进行了如下改进。

传统的ICP算法计算量大主要体现在对应点的寻找过程中,根据集卡定位系统的特殊性,利用主处理模块对扫描区域进行的划分,提取出扫描的重合区域,把对应点寻找的范围控制在重合区域内,这个在很大程度上加快了搜索对应点的速度。

同时传统ICP算法中,初始位置矩阵选取的不正确或者不合适,往往会导致整个迭代过程不能收敛到全局最优解。在集卡定位系统中,4个激光雷达在整个工作过程中都是固定在横梁上的,通过机械测量的手段可以得到每个激光雷达的相对位置,也就是能计算出每个3-D激光雷达的测量坐标系和世界坐标系的关系。在这个基础上估算的初始位置矩阵,不但可以减少整个数据的迭代次数,而且保证了迭代的收敛性。

改进的ICP算法具体实现过程如图4所示。假设

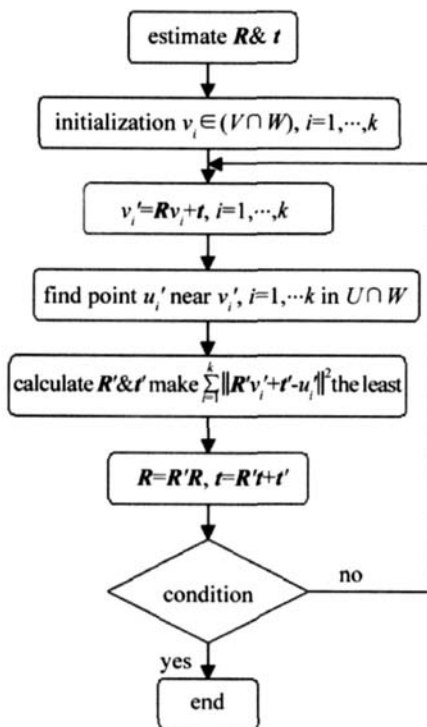


Fig 4 Improved ICP algorithm

两个激光雷达采集的数据点集分别是  $U$  和  $V$ , 主处理模块控制的重合区域为  $W$ , 初始的旋转矩阵和 3 维平移向量分别是  $R$  和  $t$ 。

通过上述改进的 ICP 算法<sup>[7]</sup>, 通过对点云数据的处理<sup>[8]</sup>和雷达数据三维模型重建<sup>[9]</sup>, 可以最后得到数据配准后的图像。图 5 所示为 4 个激光雷达扫描系统的扫

描数据经过改进的 ICP 配准算法后得到的整体图像。

## 2 集卡定位系统的工作原理

激光雷达的测量精度和测量的距离有关, 为了提

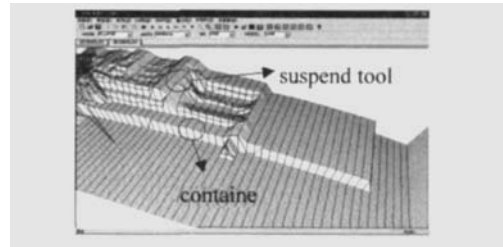


Fig 5 Result of scanning

高整体的定位精度, 集卡定位系统在定位方法上, 采用了先粗后精的分级定位方法。

首先, 集卡到达车道后, 安装在 RMG 大车低架横梁上的 3-D 激光雷达完成第 1 次扫描, 扫描数据通过集卡定位系统软件处理以后, 判断出集卡的车型、轮廓、大小和位置, 获取集卡相对于 RMG 大车运动方向的位置误差, 以及 RMG 小车相对于集卡在 RMG 小车运行方向的位置误差。通过集卡对位指示装置, 提示司机在 RMG 大车运行方向上调整集卡, 同时控制 RMG 小车运动到相应区域, 实现集卡的粗定位。

粗定位结束后, RMG 吊具快速下降, 当下降到距离集装箱顶端 1m 高度时, 通过 3-D 激光雷达完成第 2 次扫描, 通过数据分析识别出每一条扫描线中的边界点数据。对每一个表面的所有边界点数据, 利用集装箱形状为矩形的先验知识, 采用最小二乘方法, 拟合所有边界点数据: 通过对集装箱顶面边界点数据的拟合, 精确确定出集装箱边界的平面位置坐标和偏转姿态; 通过侧面边界点数据, 精确确定出集装箱的高度坐标; 从而获取吊具的精确姿态和位置, 实时控制 RMG 吊具机构的微动平移调整以及扭转调整, 实现对集卡的精确对箱定位, 完成对集装箱的装卸。

整个集卡定位系统的测量范围主要由选用激光雷达的测量范围所决定, 根据选用的 LMS291 激光雷达的数据结构, 一共有 8 183m, 16 385m, 32 759m 和 81. 83m 4 种测量模式。根据精度要求, 在粗定位和精定位的过程中分别采用 81. 83m 和 8 183m 两个量程, 测量的精度分别达到了 10mm 和 1mm。激光雷达每扫一个截面需要的耗时是 26. 64ms, 每次测量的截面控制在 50 个, 测量数据通过 RS422, 以 500k/s 的速度传输给中央处理器进行数据处理, 整个测量的粗定位和精确定位过程在 5s 内就能全部完成。在测试报告中, 该系统在满负荷运行的情况下, 每 90s 就能完成一次完整的装卸, 定位精度控制在了 5mm 以内, 符合装卸的定位要求。



### 3 集卡定位系统的实施效果

多个激光雷达协同的工作方式和改进的 ICIP 算法,缩短了扫描时间,与单个激光雷达相比较平均缩短时间达到 50%。先粗后精的定位方法,提高了定位精度,误差控制在 5mm 以内。整个集卡定位系统降低了集卡司机的驾驶难度,满足自动化堆场内 RMG 对集卡装卸集装箱的对箱定位要求,提高了装卸效率。

该集卡定位系统已经于 2006 年 3 月在上港集装箱外高桥码头分公司投入工业性试生产,至今共完成了 11240 TEU 标准箱的工作任务,起重机的装卸效率达到 80 TEU/h。该系统大大提高了堆场的装卸效率,降低了运行成本,年通过能力超过 54 万标箱。2006-09-19,整个基于激光雷达定位的无人堆场系统获得鉴定专家委员会的鉴定通过。

### 4 结束语

采用运动控制卡控制步进电机,带动 2-D 激光雷达旋转,实现了二维平面扫描到三维空间扫描,降低了定位系统开发的成本。基于三维空间扫描定位原理,开发了一种多激光雷达协同的工作方式,并提出了一种基于该系统的改进 ICIP 算法以及分级定位的思想,提高了扫描的效率、扫描精度和定位精度,在集卡定位系统中获得了良好的效果。系统首次实现了自动化无

人堆场中集装箱吊具对集卡的自动定位。

### 参 考 文 献

- [1] YANG W J, LUO Zh X, LU J G. Container unload position system [J]. Application of Electronic Technique, 2006, 31 (3): 81 ~ 83 (in Chinese).
- [2] XU X W, GUO J, YU Q Y *et al*. Key technique of laser range gated imaging [J]. Laser Technology, 2003, 27 (6): 603 ~ 605 (in Chinese).
- [3] JIA Y H. Automatic on-ling load measurement system for mine truck based on the laser-radar survey technology [J]. Mining Research and Development, 2006, 26 (2): 62 ~ 63 (in Chinese).
- [4] SICK A G Cop. Technical description: LMS200/LMS211/LMS220/LMS221/LMS291 laser measurement systems [EB/OL]. <http://www.sick.com>, 2003-04-04.
- [5] TIAN J, SHA F, ZHANG X Sh. Applied image analyzing and processing technology [M]. Beijing: Electronic Industry Press, 1995. 77 ~ 81.
- [6] BESL P J, MCKAY C D. A method for registration of 3-d shapes [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine in Telligence, 1992, 14 (2): 239 ~ 256.
- [7] GUO H, LI H, WANF Y X. Investigation of main techniques in robot three-dimensional localization [J]. Journal of System Simulation, 2006, 18 (S1): 99 ~ 102 (in Chinese).
- [8] HUANG X F, JIANG W Sh, GONG J Y. Real-time radar large amount of point clouds data [J]. Editorial Board of Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2005, 30 (11): 975 ~ 978 (in Chinese).
- [9] GAO Zh, ZHONG S D, SONG L H. 3-D model reconstruction based on data of laser radar [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2004, 25 (S2): 495 ~ 499 (in Chinese).
- [10] MOK J T, EGLETON B J. Expect more delays [J]. Nature, 2005, 433 (7028): 811 ~ 812.
- [11] MOK J T, TSOY E, LITTLER ICM *et al*. Slow gap soliton propagation excited by microchip Q-switched pulses [A]. The 18th Annual Meeting of IEEE Lasers & Electro-Optics Society [C]. Los Alamitos: IEEE, 2005. 509 ~ 510.
- [12] ZHANG G Q, BO F, DONG R *et al*. Phase-coupling-induced ultrashort light propagation in solids at room temperature [J]. Phys Rev Lett, 2004, 93 (13): 133903-1 ~ 133903-4.
- [13] CHRISTODOULIDES D N, JOSEPH R I. Slow Bragg solitons in nonlinear periodic structures [J]. Phys Rev Lett, 1989, 62 (15): 1746 ~ 1749.
- [14] CHEN W, MLLSD L. Gap solitons and the nonlinear optical response of superlattices [J]. Phys Rev Lett, 1987, 58 (2): 160 ~ 163.
- [15] SPIE JOHN E, WNFUL HERBERT G. Nonlinear schrödinger solitons in a periodic structure [J]. Opt Lett, 1988, 13 (2): 132 ~ 133.
- [16] LITICH NITSER N, AGRAWAL G, EGLETON B *et al*. High-repetition-rate soliton-train generation using fiber Bragg gratings [J]. Optics Express, 1998, 3 (11): 411 ~ 417.
- [17] YE W N. All-optical signal processing using nonlinear periodic structures: a study of temporal response [D]. Toronto: University of Toronto, 2002. 16 ~ 17.

### 参 考 文 献

- [1] WILLIAM C KM, CHU P L, MALOMED B A. Solitary waves in coupled nonlinear waveguides with Bragg gratings [J]. J O S A, 1998, B15 (6): 1685 ~ 1692.
- [2] LIU YM, YU Zh Y, YANG H B *et al*. The investigation of the nonlinear characteristics of fiber Bragg gratings [J]. Laser Technology,

(上接第 595 页)

色散参量有相反的符号时,脉冲峰值将经历先增加后减小、脉冲宽度将经历先减小后增加的演变过程;而当啁啾参量为 0 或啁啾参量与色散参量有相同的符号时,脉冲峰值将经历单调递减、脉冲宽度将经历单调递增的演变过程。从脉冲传输的速度来看,此时的脉冲还表现出一定的慢光延迟特性,并且传输速度随失谐量的减小而减小,即在传输相同的距离时,延迟时间越长。因此,在 UPS 中,可以通过调节失谐量的大小来控制脉冲的传输速度,为了实现低功率的脉冲在一定的延迟传输后仍然具有与入射脉冲相当的峰值功率,应给予入射脉冲一定量的与群色散参量符号相反的初始啁啾参量。