

文章编号:1006-2467(2008)10-1717-04

一种无人化气压沉箱三维地貌建模、测量及避碰系统

李宝顺¹, 曹其新¹, 张蕾¹, 李杰²

(1. 上海交通大学 机械与动力工程学院, 上海 200240;
2. 辛辛纳提大学 智能维护中心, 辛辛纳提 210072)

摘要: 针对无人化气压沉箱的三维建模和测量问题, 提出了一种无人化气压沉箱三维地貌建模、测量及避碰系统. 系统利用多个二维激光传感器, 实现沉箱地貌扫描; 提出了配准、三维数据分割和重建方法, 实现了沉箱内的三维场景重建和实时测量; 通过多个传感器融合, 实现了挖掘机避碰、沉箱姿态测量. 实验表明: 系统工作稳定, 各项指标满足现场要求, 系统已可应用于实际.

关键词: 三维建模; 气压沉箱; 激光扫描; 深度测量

中图分类号: TP 274 **文献标识码:** A

A 3D Reconstruction, Measurement and Collision System for Unmanned Pneumatic Caisson

LI Bao-shun¹, CAO Qi-xin¹, ZHANG Lei¹, JAY Lee²

(1. School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China;
2. Research Center of Intelligent Maintenance Systems, the University of Cincinnati, Cincinnati 210072, USA)

Abstract: A 3D surface modeling, measuring and excavator collision detection system was presented. By using several 2D laser scanning sensors, the system can scan the whole surface in the pneumatic caisson. After registration and segmentation of point cloud, a real 3D scene of the working chamber of the pneumatic caisson can be modeled. With multi-sensor fusion, the collision detection of excavators and measurement of the pose of the pneumatic caisson can be done. The experiments show that the system has good performance and good stability and can be put into practical use.

Key words: three-dimensional modeling; pneumatic caisson; laser scanner; depth measurement

无人化气压沉箱工法通过工作人员在地面观察安装在地下的摄像机传来的图像, 遥控挖掘机进行挖掘作业, 实现无人进箱, 避免了传统沉箱工法对工人的危害, 使得该工法在大深度、高地下水压、施工场地狭窄、临近施工的情况下, 具有极大优势^[1-3].

虽然, 近年来无人化气压沉箱已得到了长足的

发展, 但是在无人化气压沉箱施工过程中还存在以下问题:

(1) 无人化气压沉箱在施工过程中无人进箱, 管理人员仅通过摄像机传来的图像观察沉箱工作室内的情况. 由于缺乏有效的手段, 不能对沉箱工作室内地貌挖掘情况进行有效测量, 难以获得挖掘地貌

收稿日期: 2007-10-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50705054); 上海市科委重大科技攻关项目(04DZ12006);
上海交通大学青年教师启动基金(A2846B)

作者简介: 李宝顺(1974-), 男, 山东临沐人, 博士生, 主要研究方向为三维地貌建模和三维物体识别.

曹其新(联系人), 男, 教授, 博士生导师, 电话(Tel.): 021-54748985; E-mail: qxcao@sjtu.edu.cn.

的确切数据,更谈不上实时测量。

(2) 传统的无人化气压沉箱施工中,一般在地下沉箱工作室需要装有多部摄像机,挖掘机操作人员是通过观察摄像机图像来操纵挖掘机.由于摄像机图像是二维图像,故操作人员缺乏身临其境的感觉^[3].

(3) 沉箱工作室一般较大,挖掘机都是固定在沉箱工作室顶板轨道上的.完成挖掘任务需要多部挖掘机协同作业,在协同作业的过程中,挖掘机容易发生碰撞.为防止碰撞,如日本白石公司采用了多个传感器来测量挖掘机各臂的角度和位置,经计算得到挖掘机的所处的空间位置,进而进行碰撞检测^[4].这种方法既需要对挖掘机进行改造以安装的角度或位置传感器,也无法形成真实感的沉箱工作室场景.

(4) 现有的三维激光扫描系统虽然可以建立三维场景,但目前现有的三维激光系统^[5,6],其结构及特点均不适合用于气压沉箱.

为解决存在的问题,上海交通大学机器人研究所与上海建工集团合作,研制了一种无人化气压沉箱三维地貌建模及避碰系统.该系统采用激光扫描传感器实时采集沉箱地下工作室内地貌数据,实时建立沉箱工作室三维地貌;提供沉箱姿态参数,并可实现实时任意点挖掘深度测量;采用激光测距传感器结合激光扫描传感器数据,实现挖掘机避碰报警.该系统已经成功应用于沉箱中,结果表明是可靠的.

1 系统方案及原理

1.1 系统方案

沉箱三维地貌建模、测量及避碰系统功能组成如图1所示.系统由运动控制器控制精密步进电机经减速机带动激光扫描传感器旋转,实现三维空间扫描;一般一个沉箱内需要多台激光扫描传感器,以实现在地面的全面采样(见图2).对采用多个激光传感器的系统,将采集的数据配准到同一个坐标中,并根据倾角传感器数据算出沉箱姿态,将采集的数据进行融合;在此基础上,实现三维场景分割和物体识别,并进行三维重建.沉箱工作室地面的任意处的深度测量用人机交互技术实现.挖掘机避碰结合激光测距传感器数据和物体识别后的数据,并利用挖掘机前一时刻姿态信息实现,报警采用语音报警.系统组成结构示意图如图3所示,分为地下和地上两部分.地下有三维激光扫描系统、激光测距仪及倾角传感器等;地上部分有计算机和控制柜组成,计算机用于三维建模、测量、避碰计算和人机交互.

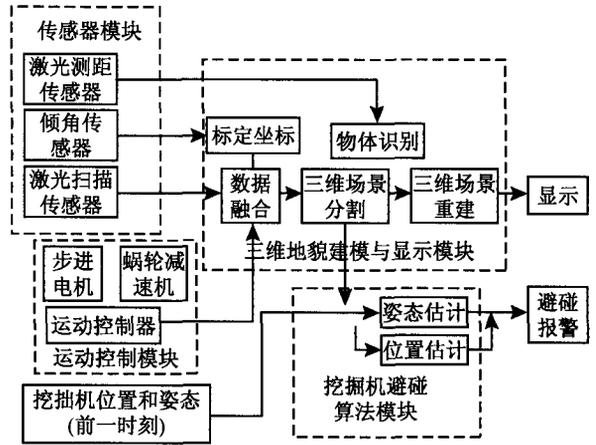


图1 系统功能框图

Fig.1 Diagram of the system structure

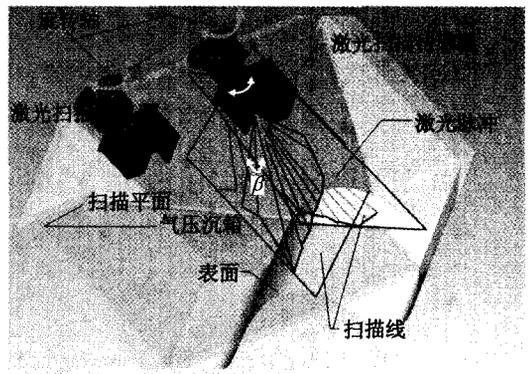


图2 多激光扫描沉箱原理示意图

Fig.2 Schematic of scanning pneumatic caisson with multi-3D laser scanners

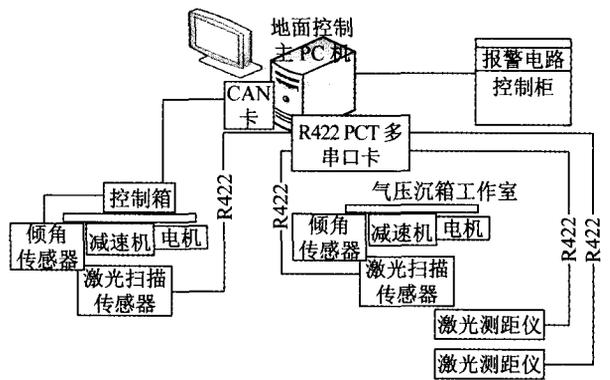


图3 系统结构示意图

Fig.3 Diagram of the 3D surface reconstruction, measurement and collision detection system

1.2 三维激光扫描器原理

气压沉箱工作室内部空间有限,加上安装在顶板上的挖掘机来回运动.要求三维激光扫描器系统体积小和视野范围宽.为了满足上述要求,本文开发了

三维激光扫描系统,其中双机扫描原理如图 2 所示,图 4 给出了安装在沉箱中的三维激光扫描系统,该系统的激光扫描传感器采用了基于测量激光脉冲时间原理(Time-of-Flight)的二维激光传感器(LMS291)。该三维激光扫描系统有单步扫描和连续步工作方式。



图 4 安装气压沉箱中的实物图

Fig. 4 The laser scanner installed in pneumatic caisson

(1) 单步扫描方式. 步进电机带动每转设定单位角度后停止,激光扫描传感器连续扫描,实现对扫描平面 180°范围内的点采样. 步进电机再转单位角度,激光扫描传感器再扫描采样,依次进行,直到步进电机带动减速器轴完成 180°旋转后,步进电机再按设定角度逆向旋转,激光扫描传感器再采样. 依次进行,直到激光扫描传感器旋转到初始位置,三维激光扫描系统完成一个工作周期. 单步扫描扫描点坐标计算公式为:

$$\begin{aligned} x &= r \cos \beta \cos \alpha \\ y &= r \cos \beta \sin \alpha \\ z &= r \sin \beta \end{aligned}$$

式中: x, y, z 为扫描点坐标; α 为激光扫描传感器旋转角度; β 为激光扫描传感器扫描角度。

(2) 连续步工作方式. 步进电机与激光扫描传感器同时工作. 步时电机以速度 v 匀速旋转,同时,激光扫描传感器连续扫描. 步进电机带动激光扫描传感器旋转 180°后,步进电机停止,激光扫描传感器也同时停止. 然后,步进电机以相同速度逆向旋转,激光扫描传感器也同时进行连续扫描. 旋转到起始位置后,步进电机停止,激光扫描传感器停止,完成一个工作周期. 一个工作周期实现对沉箱工作室的 2 次完整扫描,点坐标计算公式为

$$\begin{aligned} x &= r \cos \varphi \cos \mu t \\ y &= r \cos \varphi \sin \mu t \\ z &= r \sin \varphi \end{aligned}$$

式中: φ 为激光扫描传感器旋转角度,当正向旋转

时, $\varphi = vt$,否则, $\varphi = \pi - vt$; v 为激光扫描传感器旋转速度; μ 为激光扫描传感器扫描速度; t 为时间步。

2 数据配准、三维分割、重建、测量及避碰算法

2.1 数据配准

2 台(或多台)激光扫描系统扫描得到的数据需要转换到同一个坐标系内,即配准. 虽然沉箱三维激光扫描仪是固定地安装在沉箱上的,但在安装时,产生安装误差,所以,在第 1 次使用时,需要进行多机位配准. 配准是三维重建领域中的基本问题之一^[7],但是,这种方法需要 2 个三维数据点集中的点对点对应. 而在本文中得到的扫描点集,较为稀疏,且密度不均匀,传统的方法并不适用. 考虑到沉箱工作室初始时墙壁和地面可近似为平面,本文采用基于 Hough 变换平面提取的方法来实现三维数据配准^[8](见图 5),其步骤如下:

(1) 平面特征提取. 利用 Hough 变换对每个激光扫描数据点集分别进行平面点集提取;

(2) 对每个点集中提取的平面,计算其在局部坐标中的参数;

(3) 以面积最大的平面为基准,分别计算本点集中其他平面对本平面的夹角和距离;

(4) 对 2 个三维点集中分别选取对应的 4 对平面. 这 4 对平面在各自的局部坐标系内之间的关系参数相同;

(5) 利用这 4 对平面参数,反求出配准矩阵。

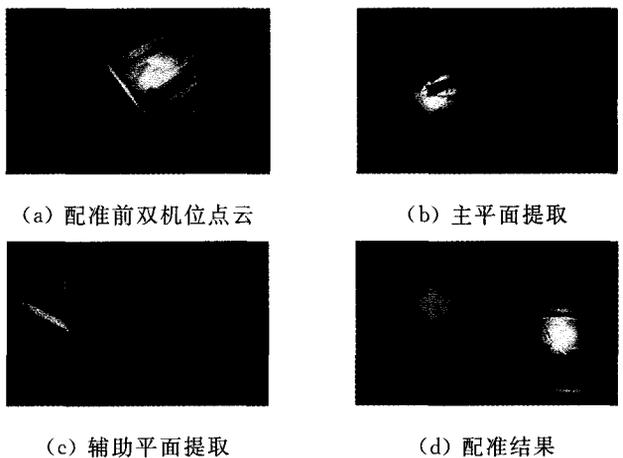


图 5 基于平面提取的配准

Fig. 5 Registration based on plane extraction

2.2 三维点集分割

由于激光扫描时,是对沉箱整个场景的扫描采样,采样点既包括沉箱工作室地面、工作室 4 个墙壁,还包括挖掘机等设备. 故为了快速进行三维重

建,需要进行点云分割.本文采用如下步骤进行点云分割.

(1) 分割出沉箱4壁的点.依据配准得到的关系,可以确定沉箱工作室4壁的位置及参数.将所有落在这4壁上的点分割出来.

(2) 分割出落在设备上的点.由于沉箱中的设备除挖掘机外,其他设备对激光扫描仪的相对位置均固定,故很容易将这上面的点分割出来,这一过程可以看作是物体识别.

(3) 确定挖掘机上的点.由激光测距仪可得到挖掘机底座的位置,挖掘机回转半径已知.首先,将高于某个域值的点分割出来,这些点必定落在挖掘机上,然后使用这些点,分割其他落在挖掘机上的点.

(4) 分割完以上的点后,剩下的点是落在地面上的点.

2.3 三维重建

三维重建是当前的一个研究热点,已经有很多成熟的算法^[9-12],但目前三维重建算法过于重视重建的质量,而将重建的时间置于较为次要的地位,仅几百个点的三维重建需要数十秒^[9]甚至几十分钟^[10,11].本文为减少重建时间,充分利用扫描数据组织规律,给出了一种较快建模方法.其基本思想是针对每条扫描线分割成不同的折线段,对每条折线段求其在相邻扫描面上的对应折线,用该折线和对应折线建立三角形,完成三维重建.其步骤如下:

(1) 对每条扫描线按照距离分割成不同的折线段.

(2) 对每条折线段(母折线段)在其相邻扫描线上找距离最近的折线段,称为对应折线段.

(3) 如果该对应折线段上的点数少于母折线段上扫描点数,则按照母折线段上的点变化规律对对应折线段进行插值;反之,如果对应折线段上的点多于母线上的点,以母线一端为起始点,取该点在对应折线最近的点,以此点按照母线上点的对应顺序,取与母线相等数目的点.

(4) 母折线和对应折线对应点组成三角形.

2.4 挖掘机避碰

本文根据三维激光扫描系统和激光测距仪提供的信息,按如下方法进行挖掘机避碰检测(见图6).

(1) 根据激光测距仪给出的挖掘位置信息,如果2台挖掘中心距离大于安全距离,则无碰撞.

(2) 否则,取最新3条扫描线,判断是否有挖掘机处于此区域内,如果有,则依据此扫描线给出挖掘姿态平面加上激光测距仪给出的位置,判断两挖掘

是否可能相交(碰撞).

(3) 如果没有挖掘机处于最近3条扫描线内,则继续使用此前的信息姿态加上当前激光测距仪给出的位置信息判断.

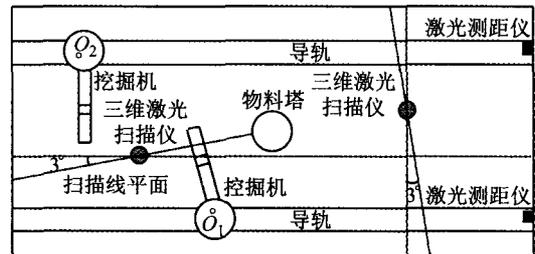


图6 避碰原理图

Fig. 6 Schematic of the collision detection

3 实验及结果分析

本文所开发的系统应用在上海地铁七号线上的某气压沉箱施工上,该气压沉箱宽长分别为12 m×25 m,最大深度为29 m,工作室内的相对工作压力为0~0.3 MPa.现场实验表明,该系统可正常工作于该沉箱环境.本系统在单步工作方式下,其建模精度可达到10 mm.连续步工作方式下,由于步进电机与激光同步的影响,故建模精度略低于单步工作方式下.单步工作方式下一个周期需要70 s,连续步工作下工作周期小于5 s.对一帧数据进行三维分割,然后进行三维建模.图7所示为某一帧建模效果,其上显示数字为实时深度测量.经计算机测定,该系统挖掘机避碰最小反应间隔为0.2 s,基本实现实时避碰.

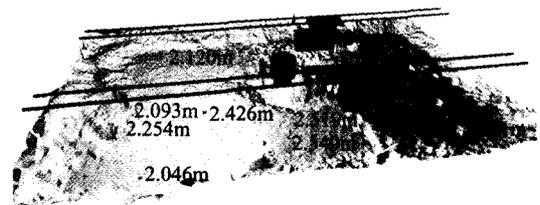


图7 三维重建及测量图

Fig. 7 3D surface reconstruction and measuring the depth

4 结语

本文研究的三维无人化气压沉箱三维地貌建模、测量及避碰系统不仅为沉箱挖掘机操作人员提供一个真实、实时的三维场景,还使沉箱管理人员不必进入沉箱,即可实时对沉箱工作室任意位置的挖掘情况进行测量;实现了挖掘机有效避碰;极大地提高了沉箱施工的效率和质量.

(下转第1725页)

实验曲线显示了测量均值及范围(3倍标准偏差)。对于 $\kappa < 0.10$ 没有实验数据,因为 κ 值较低时机器人的运动幅度相当大,由于系统中存在的延时,使机器人来不及在 yoyo 到达下一个最高位置前就返回到其原始位置。因此,系统实际能实现的稳定域比理论计算的要小。

4 结 语

本文提出了一种简单的机器人 yoyo 操作算法,并分析了闭环系统的动态特性。控制算法包含一个自由参数 κ ,它表征了机器人向上的加速度值。通过对与原连续系统相关的返回映射的数学分析表明,在所提出的控制规律作用下,周期性的 yoyo 运动是可以实现的。理论和实验结果表明,当 κ 大于某一临界值时,就可以保证其稳定性。

参考文献:

[1] Hashimoto K, Noritsugu T. Modeling and control of robotic yoyo with visual feedback[C]//**Proc IEEE Int**

Conf Robotics and Automation. Minneapolis, MN: IEEE Press, 1996: 2650-2655.

- [2] Buehler M, Koditschek D E. From stable to chaotic juggling: Theory, simulation, and experiments[C]//**Proc IEEE Int Conf Robotics and Automation**. Cincinnati, OH: IEEE Press, 1990:1976-1981.
- [3] JIN H L, Zacksenhouse M. Necessary condition for simple oscillatory neural control of robotic yoyo [C]//**Int Joint Conf. Neural Networks-World Congress on Computational Intelligence**. Honolulu, HI: IEEE Press, 2002:1427-1432.
- [4] JIN H L, Zacksenhouse M. Oscillatory neural networks for robotic yoyo control [J]. **IEEE Trans Neural Networks**, 2003, 14(2): 317-325.
- [5] Jin H L, Zacksenhouse M. Yoyo dynamics: Sequence of collisions captured by a restitution effect [J]. **J Dynamic Systems, Measurement, and Control**, 2002, 124(3): 390-397.
- [6] Jin H L, Zacksenhouse M. Robotic yoyo playing with visual feedback [J]. **IEEE Trans on Robotics**, 2004, 20(4): 736-744.

(上接第 1720 页)

参考文献:

- [1] 彭芳乐,孙德新,大内正敏,等.日本气压沉箱的历史与现状[J].**岩土工程师**,2003,15(2):22-29.
PENG Fang-le, SUN De-xin, Ohuchi Masatoshi, et al. The history and existing state of pneumatic caisson in Japan[J]. **Geotechnical Engineer**, 2003, 15(2):22-29.
- [2] 彭芳乐,孙德新,大内正敏,等.无人化气压沉箱信息化施工[J].**岩土工程师**,2003,15(3):29-32.
PENG Fang-le, SUN De-xin, Ohuchi Masatoshi, et al. Information construction of unmanned pneumatic caisson [J]. **Geotechnical Engineer**, 2003, 15(3):29-32.
- [3] Kodaki K, Nakano M, Maeda S. Development of the automatic system for pneumatic caisson[J]. **Automation in Construction**, 1997, 6:241-255.
- [4] Tetsuro S, Makoto T. Posture indication method of pneumatic caisson excavator[P]. Japan, JP7113237, 1995-05-02.
- [5] Tognola G, Parazzini M, Svelto C, et al. A fast and reliable system for 3D surface acquisition and reconstruction[J]. **Image and Vision Computing**, 2003, 21(3):295-305.
- [6] Frohlich C, Mettenleiter M. Terrestrial laser scanning-new perspectives in 3D surveying[J]. **International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, 2006, 30(12):7-11.
- [7] Besl P J, McKay N D. A method for registration of 3D shapes[J]. **IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence**, 1992, 14(2):239-256.
- [8] Ding Y, Ping X, Hu M, et al. Range image segmentation based on randomized Hough transform [J]. **Pattern Recognition Letters**, 2005, 26:2033-2041.
- [9] Hoppe H, DeRose T, Duchamp T, et al. Surface reconstruction from unorganized points[J]. **Computer Graphics**, 1992, 26(2): 71-78.
- [10] Amenta N, Bern M, Kamvysselis M. A new voronoi-based surface reconstruction algorithm[J]. **Computer Graphics**, 1998, 32(6):415-421.
- [11] Dey T K, Sugihara K, Bajaj C L. Delaunay triangulations in three dimensions with finite precision arithmetic[J]. **Computer Aided Geometric Design**, 1992, 9(5): 457-470.
- [12] Gregor J, Whitaker R T. Indoor scene reconstruction from sets of noisy range images[J]. **Graph Models**, 2001, 63(5):304-332.