

基于三维激光扫描仪的室内移动设备定位与建图^{*}

赵梓乔 肖 力

(华中科技大学自动化学院 武汉 430074)

摘 要 论文采用惯导与里程计组合辅助点云配准的方式实现了室内环境下移动设备的定位与地图建立,克服了自主研制的三维扫描仪数据更新频率低的缺点。首先,采用惯导与里程计组合完成移动设备的姿态测量与航位推算;然后,将航位推算的结果作为点云配准的初始值,之后采用基于正态分布变换的点云配准算法完成点云的顺序配准;最后,根据点云配准结果修正航位推算的定位结果,并在此基础上完成定位与建图。论文以轮式小车为实验平台,搭载自制的三维激光扫描仪,在楼道环境中验证了文中所述方法的有效性。

关键词 点云; 惯导; 正态分布变换; 定位; 建图

中图分类号 TN249 **DOI**:10.3969/j.issn.1672-9722.2016.11.032

Localization and Mapping Indoor for Mobile Devices Based on Three-dimensional Scanner

ZHAO Ziqiao XIAO Li

(School of Automation, Huazhong University of Science & Technology, Wuhan 430074)

Abstract In this paper, a solution is proposed to locate and map for mobile devices indoor by registration point cloud assisted with INS and odometer, it overcomes the shortcomings of the three-dimensional scanner's low data updating rate. First, the INS and odometer measure are used to accomplish mobile device's attitude and dead reckoning, then normal distribution transform (NDT) algorithm is applied to point cloud registration, as the initial value is the result of dead reckoning. Finally, the point cloud registration correction dead reckoning, and accomplish the localization and mapping. The effectiveness of the method described in the paper is demonstrated in a corridor, which using the wheeled trolley equipped with a three-dimensional laser scanner.

Key Words point cloud, INS, normal distribution transform, localization, mapping

Class Number TN249

1 引言

在未知环境中定位与环境地图的建立是设备自主导航的基础,特别是在无 GPS 信号的室内环境中。定位与地图信息是设备运动与行为决策的基本前提。在室内环境中一般采用基于 WLAN^[1]、Zigbee^[2] 以及 RSSI^[3] 等无线电技术的定位方式,此类方式需要在定位环境中布置大量无线节点,受障碍物的影响较大,定位精度无法满足设备自主导航的要求。

目前室内未知环境中主要采用机器视觉和二维或三维点云数据获取移动设备的运动信息,同时建立地图信息。其中基于视觉的同步定位与地图构建 (Simultaneous Localization and Mapping, SLAM) 系统发展较快,Stephen Se 等利用机器视觉采用尺度不变的地标完成了移动机器人的全局定位与建图,但实际应用中机器视觉受环境光线影响较大,系统鲁棒性低^[5]。Michael Bosse、Robert Zlot 等将型号为 Hokuyo UTM-30LX 的二维激光扫描仪安装在弹簧上使其旋转来获取三维点云信

^{*} 收稿日期:2016 年 5 月 6 日,修回日期:2016 年 6 月 25 日

作者简介:赵梓乔,男,硕士研究生,研究方向:点云处理,同时定位与建图。肖力,男,硕士生导师,研究方向:三维扫描技术与导航系统。

息,并由此完成三维空间的定位与建图,这种由二维扫描仪获取三维点云的方式在复杂环境中存在积累误差,不适合大范围场景的应用^[6]。Diego Viejo 使用型号为 LMS-200 Sick 的三维激光扫描仪实现了空间中六维位姿的估计,但该传感器成本较高,推广应用较为困难^[7]。

三维激光扫描仪受环境光照影响小,测量精度高,可以直接获取空间的三维信息。本文中使用的三维激光扫描仪为自主研制的低成本三维扫描仪,但目前扫描仪数据更新频率较低。为克服其数据更新频率低的缺点,本文采用间隔扫描的方式采集点云数据,期间通过惯导与里程计组合进行航位推算得到设备的位姿变化量,并将其作为点云配准的初始值,之后采用基于正态分布变换的点云配准算法^[4]完成点云的顺序配准。最后根据配准结果修正航位推算得到的位姿,同时建立三维点云地图。实验中对比了无惯导与里程计辅助的配准方式,证明了此方法在实际应用中的可行性与有效性。

2 惯导与里程计组合定位

2.1 基于 kalman 滤波器的姿态测量模型

载体的姿态测量用到的传感器包括:三轴陀螺仪、三轴加速度计以及三轴磁力计。陀螺仪可以测量得到载体坐标系相对惯性坐标系的旋转角速率,其测量值表示为 $\omega = [\omega_x \ \omega_y \ \omega_z]^T$ 。陀螺仪的误差模型^[8] 可以表示为

$$\tilde{\omega} = \omega + \nu + \eta_1 \tag{1}$$

$$\dot{\nu} = -T^{-1}\nu + \eta_2 \tag{2}$$

其中 $\tilde{\omega}$ 表示陀螺仪的测量值, ω 表示真实的角速率, η_1 与 η_2 表示三维的高斯白噪声, ν 表示随机游走噪声, $T = \tau I_{3 \times 3}$ 为一个对角矩阵, τ 表示时间常数。三轴加速度计测量值包含载体自身运动的加速度与重力加速度,其误差模型可以表示为

$$\tilde{a} = a + \eta_a \tag{3}$$

其中 \tilde{a} 为加速度计测量值; a 为载体运动加速度与重力加速度和; η_a 为加速度计测量误差,表示为一个高斯白噪声过程。三轴磁力计用于测量设备所处环境中的磁场大小,在没有外界磁场的干扰下,磁力计的测量值为地磁场大小,其误差模型可以表示为

$$\tilde{m} = m + \eta_m \tag{4}$$

其中 \tilde{m} 为磁力计测量值; m 为地磁场与外界干扰磁场之和; η_m 为磁力计的测量误差,表示为一个高斯白噪声过程。

采用陀螺仪的测量值进行卡尔曼滤波器的状

态更新,加速度计与磁力计的测量值作为观测值,根据四元数微分方程与陀螺仪误差测量模型建立卡尔曼滤波器的 7 维状态方程^[9] 如下:

$$\dot{x}(t) = \begin{bmatrix} A_1 & 0_{4 \times 3} \\ 0_{3 \times 4} & A_2 \end{bmatrix} x(t) + w(t) \tag{5}$$

其中状态变量 $x(t) = [q_0 \ q_1 \ q_2 \ q_3 \ \nu_x \ \nu_y \ \nu_z]^T$, q_0, q_1, q_2, q_3 为 t 时刻的表示姿态的四元数, ν_x, ν_y, ν_z 陀螺仪的三轴随

机游走; $A_1 = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 0 & -\omega_x & -\omega_y & -\omega_z \\ \omega_x & 0 & \omega_z & -\omega_y \\ \omega_y & -\omega_z & 0 & \omega_x \\ \omega_z & \omega_y & -\omega_x & 0 \end{bmatrix}$, $\omega_x, \omega_y,$

ω_z 为三轴陀螺仪的测量值;

$$A_2 = \begin{bmatrix} -\tau_x & 0 & 0 \\ 0 & -\tau_y & 0 \\ 0 & 0 & -\tau_z \end{bmatrix}, \tau_x, \tau_y, \tau_z \text{ 为陀螺仪}$$

三轴随机游走的反时间常数; $w(t)$ 为系统的高斯白噪声, $E[w(t)] = 0, Cov[w(k), w(j)] = E[w(k)w(j)^T] = Q_k$ 。

加速度计与磁力计的测量值作为观测量建立卡尔曼滤波器的观测方程:

$$z = H(x, t) + v(t) \tag{6}$$

其中观测矩阵

$$H(x, t) = \begin{bmatrix} -(2q_1q_3 - 2q_0q_2)g \\ -(2q_2q_3 + 2q_0q_1)g \\ -(q_0^2 - q_1^2 - q_2^2 + q_3^2)g \\ R_n^b M \end{bmatrix},$$

观测量 $z = [a_x \ a_y \ a_z \ h_x \ h_y \ h_z]^T$, a_x, a_y, a_z 为加速度计测量值, h_x, h_y, h_z 为磁力计测量值, $M = [m \cos \gamma \ m \sin \gamma \ m_z]^T$, γ 为磁偏角(地理北极与地磁北极之间的夹角), m 与 m_z 分别表示地磁场在水平面与竖直方向上的分量, R_n^b 为四元数表示的姿态矩阵; $v(t)$ 为测量白噪声信号, $E[v(t)] = 0, Cov[v(k), v(j)] = E[v(k)v(j)^T] = R_k$, 同时满足 $Cov[w(k), v(j)] = 0$ 。

将系统状态方程(5)离散化,同时将卡尔曼滤波器的观测方程(6)线性化。根据卡尔曼滤波器的离散状态方程与线性化之后的观测方程,进行卡尔曼滤波器的迭代计算便可得到滤波之后的姿态信息。

2.2 姿态与里程计组合航位推算

采用光电编码器作为里程计传感器,相对于传统的里程计,光电编码器有更高的测量精度。车头方向为载体坐标系的 X 轴正方向,光电编码器的采

样周期为 Δt ,则在 Δt 时间内车辆的位移在载体坐标系中可以表示为

$$\Delta S^b = \begin{bmatrix} \Delta S \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \tag{7}$$

其中 $\Delta S = K_D n_D$ 为载体在 X 轴方向上位移, n_D 为光电编码里程计的脉冲个数, K_D 为里程计的刻度系数。

结合上一小节得到的姿态,载体在导航坐标系中的位移可以表示为

$$\Delta S^n = R_b^n \Delta S^b = \begin{bmatrix} \cos\theta\cos\phi \\ \cos\theta\sin\phi \\ -\sin\theta \end{bmatrix} K_D n_D \tag{8}$$

其中 ϕ 与 θ 分别表示偏航角与俯仰角。根据式(8)累加各个采样周期内载体的位移,进行航位推算即可得到设备的实时位置。

3 NDT 点云配准与建图

Biber 与 Straber 提出了基于正态分布变化 (Normal-Distributions Transform, NDT) 的点云配准算法,并成功应用于二维点云数据的配准^[4]。与迭代最近点 ICP 配准算法^[10]不同的是 NDT 配准算法不直接采用参考点云与目标点云之间点到点的匹配,而通过建立参考点云点分布的正态分布模型计算目标点云在参考点云中所处位置的概率大小。相比于 ICP, NDT 配准算法所花费的时间更少^[11]。假如参考点云的概率分布函数为 $p(\vec{x})$, $\hat{Q} = T(\vec{p}, Q)$ 表示目标点云 Q 经过位姿向量 \vec{p} 变换之后得到的点云,目标点云表示为 $Q = \{\vec{q}_1, \dots, \vec{q}_n\}$, 则使概率函数最大的 \vec{p} 即为配准结果:

$$\Psi = \prod_{k=1}^n p(T(\vec{p}, \vec{q}_k)) \tag{9}$$

其中位姿 $\vec{p} = [x, y, z, \varphi, \theta, \psi]^T$, x, y, z 为三轴平移量, φ, θ, ψ 为旋转变换的三个欧拉角。

NDT 配准的具体步骤如下:

- 1) 根据参考点云 P 各点的位置,将各点存储到 m 个栅格中,栅格表示为 $B = \{b_1, b_2, \dots, b_m\}$;
- 2) 计算各个栅格中点云的分布函数;
- 3) 计算 NDT 配准的目标函数的函数值,采用牛顿法迭代计算最优的六维位姿向量;
- 4) 牛顿迭代法收敛或迭代次数达到最大迭代次数时配准完成。

室内环境中如楼梯、过道等场景之间相似度高,当两幅点云相差距离较大时配准失败的可能性增加,同时配准迭代的次数增加,耗费更多时

间。惯导与里程计组合的航位推算在短距离范围内的积累误差较小,将航位推算得到的位姿变换作为 NDT 配准的初始值可以减少配准的迭代次数,增加配准成功的可能性,同时利用点云配准结果可以减小航位推算的积累误差。本文中使用的三维激光扫描仪为实验室自主研制, 360° 全景扫描时的点云数据更新频率在 20s 左右,惯导与里程计组合航位推算的更新频率为 20Hz。整个定位与建图过程采用停—走—停模式,总的步骤如下:

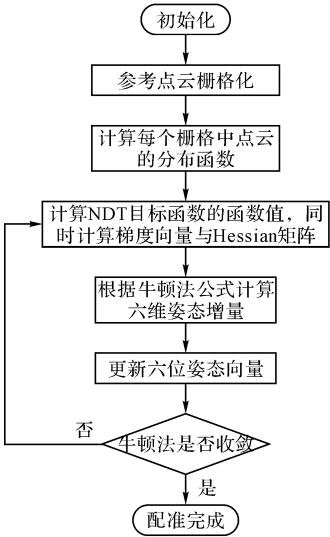


图 1 NDT 配准的流程图

- 1) 在起始位置全景扫描得到一幅点云数据作为初始参考点云加入全局点云地图;
- 2) 开始移动,期间惯导与里程计组合进行航位推算实时更新移动设备的位置与姿态;
- 3) 停止移动,全景扫描得到此处点云数据,以航位推算得到的位姿变换作为初始值将点云数据与上一幅点云数据进行 NDT 配准,将配准后的点云加入全局点云地图;
- 4) 根据配准结果修正航位推算的位姿,返回步骤 2)。

4 实验结果与分析

本文中的移动设备为轮式小车,作为里程计的编码器与车轮刚性连接,用于获取三维点云的三维激光扫描仪为实验室自制,如图 2 所示。此外,姿态测量的惯性传感器采用 ADIS16405,其内部集成陀螺仪、加速度计以及磁力计,通过 SPI 接口输出传感器的原始测量数据。实验在实验室外的楼道中进行,整个楼道呈长条状,总长约 75m,每间隔 3m~4m 进行一次全景扫描。



图2 三维激光扫描仪实物

楼道环境单一,直接采用 NDT 配准后两点云之间仍存在较大偏差,如图 3 所示,图中的网格边长为 1m。两幅点云中点个数都在 16 万左右,配准过程总共迭代 27 次,耗时 6.597s。当采用航位推算辅助配准后,配准过程总共迭代 16 次,耗时 3.968s,迭代次数减少了 9 次,时间减少了 2.6s,如图 4 所示,局部放大部分两点云之间相差约 2cm。图 5 中黑色线条为移动设备在楼道点云地图中的移动轨迹。点云配准完成后可以修正航位推算的积累误差,如图 5 中箭头所指的地方。图 6 为整个楼道的点云地图的俯视图,图中网格的边长为 2m。

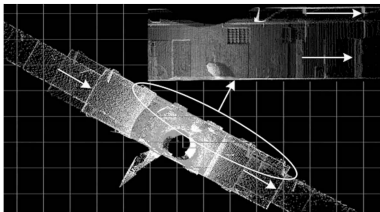


图3 无航位推算的配准结果

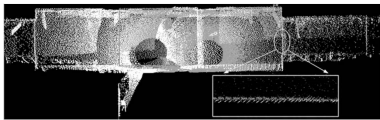


图4 航位推算辅助的配准结果

上述算法均在 Qt 5.4.2 环境下采用 C++ 编程实现,点云与行进轨迹的显示采用 OpenGL 直接绘制。执行程序的 PC 平台为: Intel (R) Core (TM) i5-4430 CPU @ 3.00GHz 四核, RAM 4.00GB DDRIII。

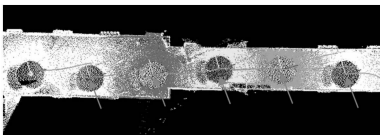


图5 设备在点云地图中的移动轨迹

对比上述结果,可以发现惯导与里程计组合的航位推算不仅可以加快点云配准的速度,而且提高

了点云配准的成功率。短距离高频率的航位推算可以很好地弥补实验室自主研制的三维扫描仪数据更新频率低的缺点,同时间断性的点云配准数据可以修正航位推算的积累误差,两者之间相辅相成。

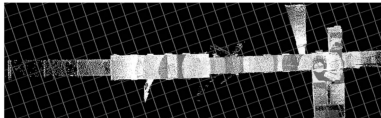


图6 楼道点云地图

5 结语

本文介绍了一种基于三维激光扫描仪的定位与点云地图构建系统。首先,建立基于 kalman 滤波器的姿态测量模型,由惯导的测量计算得到的设备的实时姿态;然后,与编码器测量得到的里程数据组合进行航位推算得到移动设备的实时位姿;之后采用基于正态分布变换的点云配准算法配准间隔扫描得到的点云数据,配准的初始值由航位推算得到;最后,根据配准结果修正航位推算的定位结果,并完成点云地图的构建。实验证明本系统有效地克服了三维扫描仪数据更新速度慢的缺点,实现了高频航位推算与低频点云数据的结合。

参考文献

- [1] 郎昕培,许可,赵明. 基于无线局域网的位置定位技术研究和发 展[J]. 计算机科学,2006(6):21-24.
LANG Xinpei, XU Ke, ZHAO Ming. Research &Development of WLAN-based Location Techniques [J]. Computer Science,2006(6):21-24.
- [2] Yuh-Ming Cheng. Using ZigBee and Room-Based Location Technology to Constructing an Indoor Location-Based Service Platform[C]// Intelligent Information Hiding and Multimedia Signal Processing, 2009. IHH-MSP'09. Fifth International Conference on. 12-14 Sept, 2009:803-806.
- [3] Junhui Zhao, Yuqiang Zhang, MengjieYe. Research on the Received Signal Strength Indication Location Algorithm for RFID System[C]// Communications and Information Technologies, 2006. ISCIT '06. International Symposium on. Oct. ,2006,18:881-885.
- [4] Peter Biber and Wolfgang Straßer. The normal distributions transform: A new approach to laser scan matching[C]// In Proceedings of the IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). 27-31 Oct. 2003:2743-2748.
- [5] Stephen Se, David G. Lowe, James J. Little. Vision-

based global localization and mapping for mobile robots [J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2005, 21(3): 364-375.

- [6] Michael Bosse, Robert Zlot, and Paul Flick. Design of a Spring Mounted 3D Range Sensor with Application to Mobile Mapping[J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2012,28(5):1104-1119.
- [7] Diego Viejo Miguel Cazorla. A robust and fast method for 6DoF motion estimation from generalized 3D data [J]. *Autonomous Robot*,2014,36(4):295-308.
- [8] J. F. Guerrero-Castellanos, H. Madrigal-Sastre, S. Durand; N. Marchand. Design and implementation of an Attitude and Heading Reference System (AHRS) [C]// 2011 8th International Conference on Electrical

Engineering Computing Science and Automatic Control
(CCE), 26-28 Oct. 2011;1-5.

- [9] R. R. Lima, L. A. B. Trres, Performance Evaluation of Attitude Estimation Algorithms in the Design of an AHRS for Fixed Wing UAVs[C]// Robotics Symposium and Latin American Robotics Symposium (SBR-LARS),2012,16-19;255-260.
- [10] Besl P J, McKay N D. Method for registration of 3-D shapes[J]. Robotics-DL tentative. International Society for Optics and Photonics,1992;586-606.
- [11] Martin Magnusson, Achim Lilienthal, Tom Duckett. Scan registration for autonomous mining vehicles using 3D-NDT[J]. Journal of Field Robotics,24(10): 803-827.

(上接第 2217 页)

类分析方法,并在某企业 PDM 系统中进行实践,取得了不错的应用效果,也为今后后续研究积累了相关经验。

参考文献

- [1] D. Lindeman, Brian Moore. PDM, An Enabling Technology for Integrated Product Development[C]//1994 Proceedings Annual Reliability and Maintainability Symposium, 1994; 320-326.
- [2] J Han J, Kamber M. 范明, 孟小峰, 等译. 数据挖掘概念与技术(第一版)[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006: 185-217.
Han J, Kamber M., & Fan Ming, & Meng Xiaofeng. (2006). The concept and technology of data mining (the first edition). 185-217. Beijing: Mechanical industry press, 2006; 185-217.
- [3] T. Kanungo, D. M Mount, N. S. Netanyahu, et al. An efficient K-means clustering algorithm: analysis and implementation[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2002, 24(7): 881-892.
- [4] M. Meila, D. Heckerman. An experimental comparison of model-based Clustering methods[J]. Machine Learning, 2001, 42(1/2): 9-29.
- [5] G. Sudipto, R. Rajeev, S. Kyuseok. Cure: an efficient clustering algorithm For large databases[J]. Information Systems, 2001, 26(1): 35-58.
- [6] Xu, J. Jager, H. P. Kriegel. A fast Parallel clustering algorithm for large spatial databases[J]. Data Mining and Knowledge Discovery, 1999, 3(3): 263-290.

- [7] Marie Chavent, Yves Lechevallier, Olivier Briant, mono-thetic divisive hierarchical clustering method[J]. Elsevier Science Publishers B. V, 2007, 52(2): 687-701.
- [8] E. Hartuv, R. Shamir. A clustering algorithm based on graph connectivity[J]. Information Processing Letters, 2000, 76: 175-181.
- [9] M.J. Symons. Approximate clustering criteria and multi-variate normal mixtures [J]. Biometrics, 1981, 37: 35-43.
- [10] G.A. Jacques, R. Roger. Clustering of a molecular dynamics trajectory with a Harnming distance[J]. Computers and Chemistry, 2000, 24(6): 693-698.
- [11] 姜园, 张朝阳, 仇佩亮, 等. 用于数据挖掘的聚类算法 [J]. 电子与信息学报, 2005, 27(4): 655-662.
JIANG Yuan, ZHAN Chaoyang, QIU Peiliang, et al. The clustering algorithm of data mining[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2005, 27(4): 655-662.
- [12] 袁方, 周志勇, 宋鑫. 初始聚类中心优化的 k-means 算法[J]. 计算机工程, 2007, 33(3): 65-66.
YUAN Fang, ZHOU Zhiyong, SONG Xing. The initial clustering center optimized k - means algorithm [J]. Computer Engineering, 2007, 33(3): 65-66.
- [13] 杨善林, 李永森, 胡笑旋, 等. K-means 算法中的 k 值优化问题研究[J]. 系统工程理论与实践, 2006, 26(2): 97-101.
YANG Shanlin, LI Yongsen, HU Xiaoxuan, et al. K value optimization research in K-means algorithm[J]. System Engineering Theory and Practice, 2006, 26(2): 97-101.