

基于聚类匹配的移动机器人地图实时创建算法

张辉,渠瀛,海丹,李勇,陈龙伟

(国防科学技术大学 机电工程与自动化学院,长沙 410073)

(yingzi2006@yahoo.cn)

摘要:提出了一种基于模式识别聚类思想的数据点集匹配算法。该匹配算法具有传统迭代匹配算法和非迭代匹配算法的优点,匹配速度快,精度高。结合上述匹配算法,给出了一种基于激光测距仪的移动机器人环境地图实时创建方法。该方法使用从环境数据中提取出的特征点来完成两组激光数据点集的匹配,进而完成环境地图的创建。利用本实验室自主研发的救援机器人平台对该算法进行了验证,实验结果表明,该算法能够完成室内环境下移动机器人实时准确有效的环境地图创建。

关键词:地图实时创建;匹配;迭代最近点;聚类

中图分类号: TP242.6 **文献标志码:** A

Real-time map building based on clustering for mobile robots

ZHANG Hui, QU Ying, HAI Dan, LI Yong, CHEN Long-wei

(College of Mechatronics Engineering and Automation, National University of Defense Technology, Changsha Hunan 410073, China)

Abstract: A new laser scan matching method based on clustering was advanced. It took the advantages of both non-iterative matching method and iterative matching method and increased the speed and the precision of matching. A method of map building based on laser scans using the matching method above was presented for mobile robots. The map building method matched two consecutive scans according to the feature points extracted from the scans and then completed the whole map building. In the experiment of rescue robot developed by our laboratory, the new method can accomplish the task of real-time map building in indoor environment accurately and effectively.

Key words: real-time map building; matching; Iterative Closest Point(ICP); clustering

0 引言

自主移动机器人技术是机器人学界研究的重点之一。环境地图的创建是移动机器人在未知环境下实现自主的基础。扫描匹配方法是环境地图创建的一种有效的方法,可分为迭代匹配算法和非迭代匹配算法。迭代最近点(Iterative Closest Point, ICP)算法是一种典型的迭代匹配算法^[1]。ICP算法通过在迭代过程中不断降低配准误差,获得两组点集间相对位姿变化。该算法的缺点是匹配收敛速度慢而且容易陷入局部最优解。此后,出现了许多基于ICP算法的改进算法。Lu和Milios提出了IMPP(Iterative Matching Range Point)算法^[2],该算法加快了角度匹配的收敛速度,但整体匹配收敛速度并没有得到根本的改善。直方图匹配算法^[3]是典型的非迭代匹配算法,该算法的最大优点是算法容易实现,匹配速度快,但是受构建特征直方图时分辨率选取的影响,匹配精度很难得到有效的提高。

总体而言:迭代匹配算法匹配精度高,但匹配收敛速度较慢,很难完成实时条件下环境地图的创建;非迭代匹配算法的匹配速度优于迭代匹配算法,但是匹配精度不高。

通过对迭代和非迭代两种匹配方法的详细研究,本文提出了一种新的匹配算法。该算法利用激光测距仪测得环境数据,从中提取出特征点,采用非迭代的方式,在误差函数的解空间采用聚类的方法完成点集的匹配,进而完成环境地图的

创建。在室内环境下对该算法进行了实验验证。实验结果表明,本文提出的算法匹配精度高,收敛速度快,实现了移动机器人实时准确有效的环境地图创建。

1 问题描述

在移动机器人地图创建过程中,采用激光测距仪进行环境信息数据的采集。由于相邻两次数据采集时间间隔比较短,因此利用匹配算法,使相邻两组点集之间的公共部分重合,就可以得到机器人的位姿变化量,以此类推,进而可以完成环境地图的创建。上述地图创建过程的数学描述如下:

假设激光测距仪中心与环境障碍物之间的距离为 ρ ,探测范围为 θ ,采样角度间隔为 φ ,则每个采样周期采集到 $n = \theta/\varphi$ 个距离值,表示为 ρ_k^i , $k = 1, 2, \dots, n$,其中上标 i 表示第 i 次采集。将 ρ_k^i 转换到笛卡尔坐标系中可得:

$$\mathbf{u}_k^i = \begin{pmatrix} x_k^i \\ y_k^i \end{pmatrix} = \rho_k^i \begin{pmatrix} \cos \theta_k^i \\ \sin \theta_k^i \end{pmatrix} \quad (1)$$

其中 $\theta_k^i = k \times \varphi$ 。为便于讨论,记:

$$\mathbf{a}_k = \mathbf{u}_k^i, \mathbf{b}_k = \mathbf{u}_k^{i+1}; k = 1, 2, \dots, n$$

$\{\mathbf{a}_k\}$ 为匹配的参考点集, $\{\mathbf{b}_k\}$ 为待匹配点集。定义点集 $\{\mathbf{a}_k\}$ 和 $\{\mathbf{b}_k\}$ 之间的误差函数表示为:

$$g(\mathbf{R}, \mathbf{T}) = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \|\mathbf{a}_j - \mathbf{R}\mathbf{b}_j - \mathbf{T}\|^2 \quad (2)$$

收稿日期:2009-02-26;修回日期:2009-04-09。

作者简介:张辉(1971-),男,安徽合肥人,副教授,主要研究方向:机器人控制、多智能体、模式识别;渠瀛(1984-),男,河北定州人,硕士研究生,主要研究方向:机器人控制;海丹(1980-),男,山西朔州人,博士研究生,主要研究方向:机器人控制;李勇(1985-),男,山东济宁人,硕士研究生,主要研究方向:机器人控制;陈龙伟(1982-),男,河北保定人,博士研究生,主要研究方向:地磁导航。

其中 R 为二维空间旋转矩阵, T 为平移向量, R 和 T 的具体形式可由下面矩阵给出:

$$R = \begin{pmatrix} \cos\varphi & \sin\varphi \\ -\sin\varphi & \cos\varphi \end{pmatrix}, T = \begin{pmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{pmatrix} \quad (3)$$

其中 φ 为两组点集之间的旋转角度, $\Delta x, \Delta y$ 分别为两组点集之间在 x 轴方向和 y 轴方向上的位移; a_j 和 b_j 为在相邻两组激光数据点集中的对应点; m 为对应点的对数。

使两组点集之间的公共部分重合, 等价于求取两组点集之间的最优变换参数 (R, T), 使式 (2) 所示的目标函数值 $g(R, T)$ 达到最小。

记:

$$c_a = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m a_j = \begin{pmatrix} c_a^x \\ c_a^y \end{pmatrix}$$

$$c_b = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m b_j = \begin{pmatrix} c_b^x \\ c_b^y \end{pmatrix}$$

$$a'_j = a_j - c_a = \begin{pmatrix} a_j^x \\ a_j^y \end{pmatrix}$$

$$b'_j = b_j - c_b = \begin{pmatrix} b_j^x \\ b_j^y \end{pmatrix}$$

可以解得两组点集之间的最优旋转角度 φ 和平移向量 T 分别为:

$$\varphi = \arctan \frac{\sum_j (a_j^x b_j^y - a_j^y b_j^x)}{\sum_j (a_j^x b_j^x + a_j^y b_j^y)} \quad (4)$$

$$T = \begin{pmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c_a^x \\ c_a^y \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} \cos\varphi & \sin\varphi \\ -\sin\varphi & \cos\varphi \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} c_b^x \\ c_b^y \end{pmatrix} \quad (5)$$

求出变换参数 (R, T) 之后, 利用公式:

$$\bar{u}_k^{i+1} = R \times u_k^{i+1} + T \quad (6)$$

将 u_k^{i+1} 进行变换得到 \bar{u}_k^{i+1} , 令:

$$a_k = \bar{u}_k^{i+1}, b_k = u_k^{i+2}$$

然后将 $\{a_k\}$ 作为下一次匹配的参考点集, $\{b_k\}$ 为待匹配点集, 将 $\{a_k\}$ 与 $\{b_k\}$ 进行匹配, 依此类推, 则可以完成环境地图的创建。

2 地图创建方法

本文提出的基于激光测距仪的地图创建方法主要分为特征点的提取和特征点集的匹配两个步骤, 整个算法框图如图 1 所示。

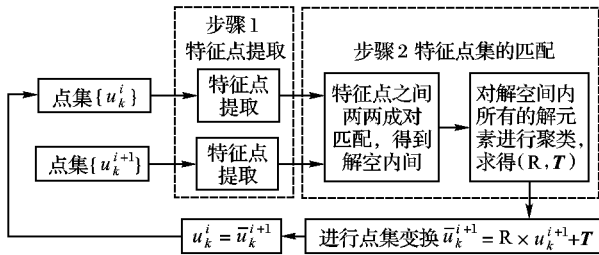


图1 改进算法的框图

2.1 特征提取

激光测距仪每次采样得到的信息很多, 直接利用这些信息进行匹配计算量大, 影响地图创建的实时性。室内环境中存在很多特征信息, 如墙角点、直线、区域端点等。特征信息具有标志性和固定性, 可以替代整个环境信息。因此, 利用特

征信息进行匹配, 既可以保证匹配的正确性, 还可以降低运算的复杂度。

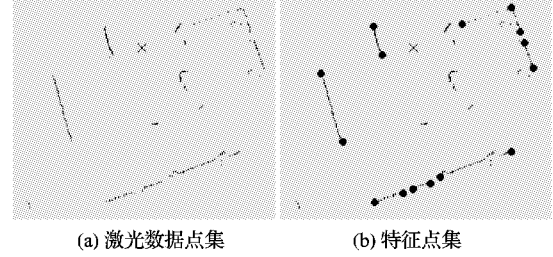


图2 提取特征信息效果

本文采用分割—聚合 (Split-and-Merge) 方法^[7]进行特征信息的提取, 该方法在线段信息的提取上速度快, 精度高^[8], 提取出的线段端点可以作为匹配的特征点。利用该方法提取特征信息的效果如图 2 所示, 其中 (a) 为激光测距仪得到的数据点集, (b) 中黑色圆点即为用分割—聚合方法提取出的特征点。

2.2 特征点集的匹配

本文提出的特征点集匹配基于以下两个假设条件: 一是环境中的特征点之间具有拓扑结构稳定性, 即两个特征点之间的欧式距离在相邻两组数据中是相等的, 在静态环境中这一假设条件一般能够满足; 二是在二维平面内, 相邻两组点集之间的变换可以视为刚体变换, 可由两组点集中的两个点之间的变换来表示, 这样可以提高算法效率, 降低计算复杂度。

基于上述假设, 本文提出一种新的匹配算法, 该算法可以概括为配对、计算、聚类三个步骤。

配对指的是在两组特征点集中选出所有欧氏距离相同的对应特征点对, 构成对应特征点对集合。

计算是指根据式 (4) 和式 (5), 计算得到上述集合中所有对应特征点对的变换参数, 求解的旋转矩阵 R 和平移向量 T 由 ($\varphi, \Delta x, \Delta y$) 表出, 所有结果构成三维向量解空间, 由 ψ 表示。

一般情况下, 对于配对过程中错误的特征点对, 即相对应的特征点不是环境中的同一个特征点, 用这些特征点对求得的变换参数 ($\varphi, \Delta x, \Delta y$) 在空间 ψ 中是随机分布的; 而对于配对过程中正确的特征点对, 求得的变换参数 ($\varphi, \Delta x, \Delta y$) 在理论上是相等的, 即对应于空间 ψ 中的同一点。但由于测量误差和计算误差的影响, 这些变换参数不会完全相等, 即对应于空间 ψ 中的不是某一点, 而是由许多点构成的密集点簇。显然, 以点簇的中心作为最优变换参数是比较合理的。

通过以上分析, 在空间 ψ 中对所有求得的变换参数 ($\varphi, \Delta x, \Delta y$), 采用适当的阈值进行聚类, 选出元素个数最多的类, 将此类的中心作为最优变换参数, 从而完成两组点集的匹配。上述算法的具体实现如下:

设两组激光数据点集通过特征提取后得到两组特征点集分别表示为 $u^i = \{u_1^i, u_2^i, u_3^i, \dots, u_m^i\}$ 和 $u^{i+1} = \{u_1^{i+1}, u_2^{i+1}, u_3^{i+1}, \dots, u_n^{i+1}\}$, 两组特征点集中特征点的个数分别为 m 和 n 。

1) 分别对两组点集 u^i 和 u^{i+1} 中所有的特征点两两之间进行排列组合, 得到有序点对集合: $C_i = \{(u_{j1}^i, u_{k1}^i) \mid j1 < k1, j1 = 1, 2, \dots, m, k1 = 1, 2, \dots, m\}$, $C_{i+1} = \{(u_{j2}^{i+1}, u_{k2}^{i+1}) \mid j2 < k2, j2 = 1, 2, \dots, n, k2 = 1, 2, \dots, n\}$ 。

记:

$$c_{s1}^i = (u_{j1}^i, u_{k1}^i); s1 = 1, 2, \dots, l'_1$$

$$c_{s2}^{i+1} = (u_{j2}^{i+1}, u_{k2}^{i+1}); s2 = 1, 2, \dots, l'_2$$

其中 l'_1, l'_2 为集合中元素的个数。

2) 在集合 C_i 和 C_{i+1} 之间寻找欧氏距离相同的元素即 $dis(u_{j1}^i, u_{k1}^i) = dis(u_{j2}^{i+1}, u_{k2}^{i+1})$ 两两进行配对。配对结果用集合表示为:

$$Cor = \{(ct_{s1}^i, ct_{s2}^{i+1}) \mid s1 = 1, 2, \dots, l'_1, s2 = 1, 2, \dots, l'_2\}$$

记: $cr_{s3} = (ct_{s1}^i, ct_{s2}^{i+1}), s3 = 1, 2, \dots, l_{cr}$, 其中 l_{cr} 为配对得到的对应元素 cr_{s3} 的个数。则 (u_{j1}^i, u_{k1}^i) 与 $(u_{j2}^{i+1}, u_{k2}^{i+1})$ 分别为对应的特征点。

3) 用式(4)和式(5)求解 Cor 中每个元素的变换参数, 得到集合:

$$Tr = \{(\varphi_s, \Delta x_s, \Delta y_s) \mid s = 1, 2, \dots, l_{cr}\}$$

其中 $tr_s = (\varphi_s, \Delta x_s, \Delta y_s)$ 表示集合 Cor 中第 s 个元素匹配求得的变换参数。

4) 对集合 Tr 中的所有元素以 $\varphi, \Delta x, \Delta y$ 作为特征进行聚类。以 Tr 中的第一个元素作为初始类和类的中心, 类的个数采取设定阈值, 动态选取的方式如下确定: 如果一个元素到任何一个类的中心的距离都大于某一阈值, 则将此元素构成一个新的类。通过以上方式进行聚类可得到类别的集合:

$$Cl = \{(k, num_k, \bar{\varphi}_k, \bar{\Delta x}_k, \bar{\Delta y}_k) \mid k = 1, 2, \dots, l_{cl}\}$$

记: $cl_k = (k, num_k, \bar{\varphi}_k, \bar{\Delta x}_k, \bar{\Delta y}_k); k = 1, 2, \dots, l_{cl}$, 其中 cl_k 表示第 k 个类别, num_k 表示第 k 个类别中元素的个数, $\bar{\varphi}_k, \bar{\Delta x}_k, \bar{\Delta y}_k$ 分别为第 k 个类别中的所有元素的 $\varphi, \Delta x, \Delta y$ 的均值, 即类的中心, l_{cl} 表示类别的总数。

5) 搜索元素个数最多的类, 即:

$$t = \max_{k=1, 2, \dots, l_{cl}} \{num_k\}$$

记元素个数最多的类为 cl_{max} , cl_{max} 的中心 $\bar{\varphi}, \bar{\Delta x}, \bar{\Delta y}$ 即为所求得的变换参数。

通过以上步骤就可以完成两组激光数据点集的匹配。

3 实验结果与分析

本章利用实验室研发的装配有型号为 URG-04XL 激光测距仪的救援机器人, 如图 3 所示, 在室内环境下进行环境地图的创建。

整个实验运行在处理器为 Intel(R) Core(TM)2 Duo CPU T5250 主频 1.50 GHz, 内存为 1.99 GB 的计算机上。

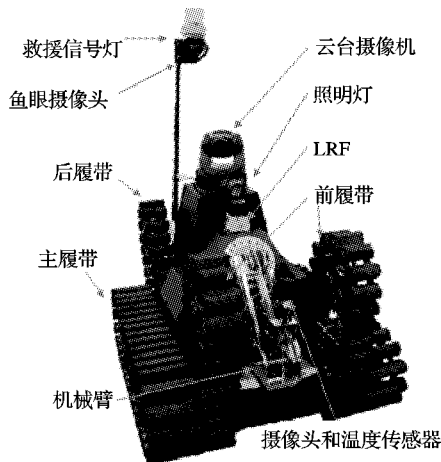


图 3 救援机器人平台

如图 4 为相邻两组采集到的激光数据点集。× 标记为机器人上激光测距仪的中心位置, 黑色点云为机器人在 i 时刻

采集到的激光数据, 灰色点云为机器人在 $i+1$ 时刻采集到的激光数据。

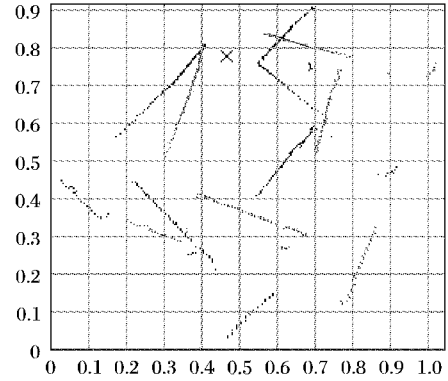


图 4 相邻两组激光数据点集

图 5 所示为上述两组点集匹配过程中, 每组对应特征点对所求出的变换参数在空间 ψ 的三维坐标系下的表示, $angle$ 表示角度分量, $xmov$ 表示沿 x 轴的位移分量, $ymov$ 表示沿 y 轴的位移分量, 圆圈表示所求出的变换参数的位置。

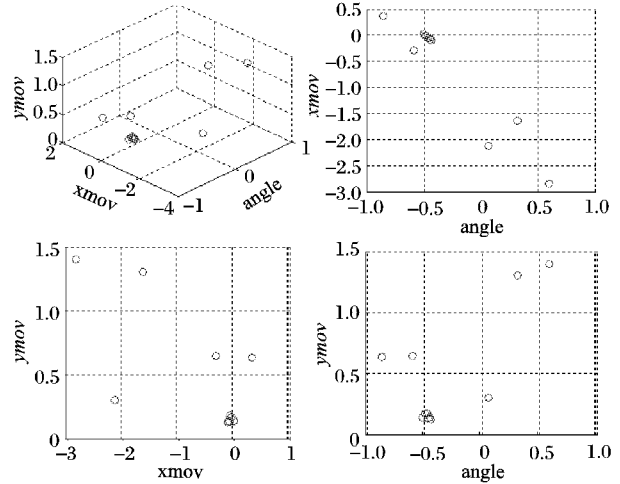


图 5 变换参数在解空间中的分布

可以看出, 圆圈在坐标系中的聚散程度不同: 单点分布圆圈的就是配对过程中错误的特征点对的变换参数, 聚合分布的圆圈就是配对过程中正确的特征点对的变换参数, 正确变换参数集合的中心就是所求得的最优变换参数。用正确变换参数的集合中心作为最优变换参数的优点是能够有效地消除激光测距仪的测量误差和特征点提取过程中所产生的误差。

用本文所述的匹配算法对两组点集进行匹配, 匹配结果与传统 ICP 算法对比如图 6 所示。

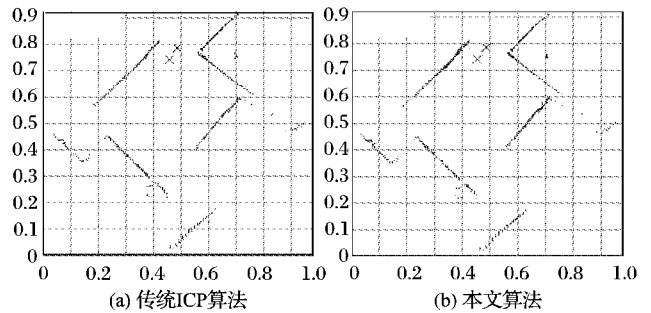


图 6 本文算法与传统 ICP 算法匹配结果对比

由图 6 可以看出, 本文所提出的算法在匹配精度上和传统 ICP 算法相差不大, 匹配效果很理想。对以上两组数据进行匹配, 传统 ICP 算法所用时间为 469 ms, 本文所提出的算法

所用时间仅为 16 ms,要远远小于传统 ICP 算法。

为进一步研究算法的性能,分别在实验室室内环境和标准国际救援比赛场地环境随机采集了 100 帧激光数据,相邻采集的两帧数据分为一组,一共分成 50 组,分别用典型的非迭代匹配方法—直方图匹配算法,典型的迭代匹配方法—传统 ICP 匹配算法和本文提出的匹配算法对以上数据进行匹配。在匹配精度和匹配时间两个方面对以上三种算法进行了对比。其中匹配精度采用目标评价函数式(2)进行度量。匹配精度以米计,匹配时间以毫秒计。三种算法的结果对比如图 7 和图 8 所示。图 7 为三种算法在匹配时间上的对比,图 8 为三种算法在匹配精度上的对比。

由图 7 可以看出,本文所提出的算法在匹配时间上要远远小于传统 ICP 算法,优于直方图匹配算法。直方图匹配算法和本文所提出算法的时间曲线与传统 ICP 算法的时间曲线相比较为平滑,这是由于三种算法所采用匹配方式的不同所造成的。迭代匹配方法的匹配时间与对应点选取的正误有关。如果对应点选取正确,匹配时间就会很短,如果对应点选取有误,匹配时间就会很长,还有可能导致匹配失败。直方图匹配算法和本文所提出的算法没有对应点选取的步骤,所以匹配时间较为固定,时间曲线较为平滑。

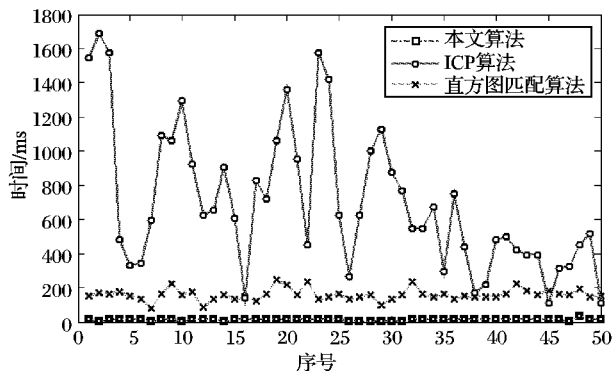


图7 匹配时间对比

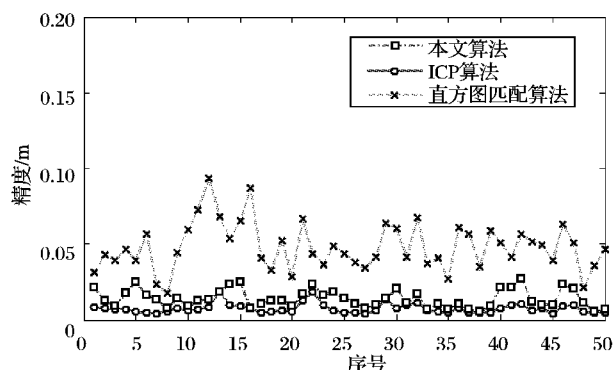


图8 匹配精度误差对比

由图 8 可以看出,本文所提出的算法在匹配精度上优于直方图匹配算法,与传统 ICP 算法很接近。影响本文算法精度的主要原因是特征提取阶段时产生的误差和激光测距仪测量误差。提高特征提取的精度将会提高整个算法的精度。直方图匹配算法的精度受到构建特征直方图时分辨率选取的影响。如果分辨率选取很高,匹配精度就很高,但是需要大量的存储空间,匹配时间也会相应增加,直接影响到算法的性能。

图 9 为上述三种算法在实验室环境下地图创建的结果。

通过以上实验分析可以看出,本文所提出的匹配算法在匹配时间上要远远小于传统 ICP 算法,在匹配精度上和传统

ICP 算法很接近,优于直方图匹配算法。本文所提出的算法能够有效地完成在室内环境下实时精确的地图创建。

4 结语

本文给出了室内环境下移动机器人环境地图创建方法的框架,提出了一种新的基于聚类思想的点集匹配算法。该算法利用从激光测距仪测得的环境数据中的特征点,基于模式识别中的聚类思想,采用非迭代的方式完成两组激光数据点集的匹配,匹配速度快,精度高。利用本实验室的救援机器人平台对地图创建方法进行验证,并与传统的基于 ICP 算法和直方图匹配算法的地图创建方法进行比较。实验结果表明,本文提出的算法在匹配时间上优于 ICP 算法,在匹配精度上优于直方图算法,与 ICP 算法相当,具有传统迭代匹配方法和非迭代匹配方法的优点,能够更好地完成移动机器人实时的环境地图创建。

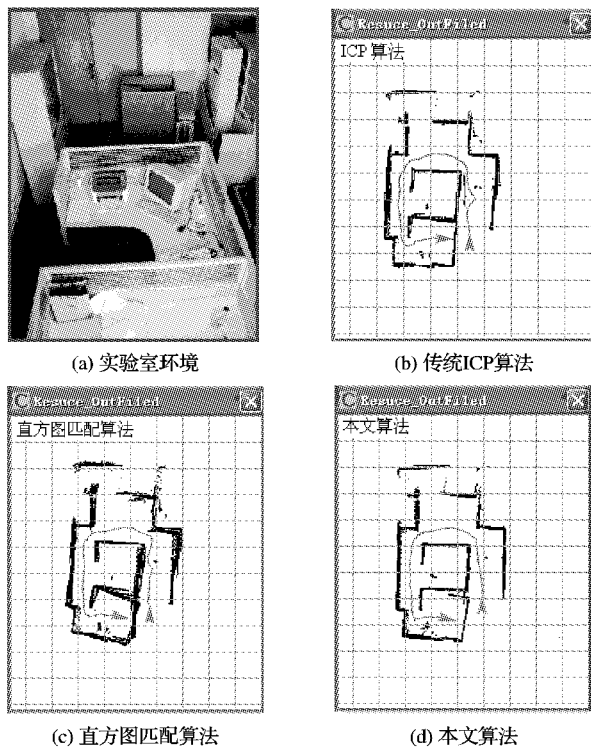


图9 本文算法与传统 ICP 算法和直方图算法建图结果对比

参考文献:

- [1] BESL P J, MCKAY N D. A method for registration of 3-D shapes [J]. IEEE Transactions Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1992, 14(2): 239-256.
- [2] LU FENG, MILIOS E. Robot pose estimation in unknown environments by matching 2D range scans[J]// Proceedings of the IEEE Computer Vision and Pattern Recognition Conference (CVPR'94). [S. l.]: IEEE, 1994: 935-938.
- [3] THOMAS R. Using histogram correlation to create consistent laser scan maps[C]// Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics Systems. EPFL Lausanne, Switzerland: IEEE, 2002: 625-630.
- [4] FAIRFIELD N, MAXWELL B. Mobile robot localization with sparse landmarks[C]// Proceedings of SPIE on Mobile Robots XVI. [S. l.]: SPIE, 2001, 4573: 148-555.
- [5] SHARP G, LEE S, WEHE D. ICP registration using invariant features[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2002, 24(1): 90-102.

户的基本信息从卡中读出,显示在客户端应用程序界面里,这样和 eMTM 连锁的服装专卖店就可以根据客户体形信息选择合适的服装推荐给客户。当客户需要更具体的人体信息或者需要定制服装时,客户端应用程序就需要通过因特网和远程的 eMTM 中心平台系统连接起来。

3.4 原型系统的实现

原型系统主要功能均在 Windows 环境下开发实现,Web 服务器则采用 Apache Tomcat 4.1,开发工具采用 JDK1.5.0_06。考虑到系统数据的多样性和数据存取的性能,数据库采用 Oracle 9i 标准版。人体测量样本信息、顾客的个人基本信息、测量信息、体形分析数据等分别存储在不同的表中,人体测量样本数据和照片等信息均以 clob/blob 等字段形式直接存储在数据库中,需要进行系统数据交换时,再从数据库中取出存储为 XML 文档格式进行交换。系统中人体模板信息独立存储在 MySQL 数据库中,和三维人体生成引擎部署在一起,以实现人体生成引擎和 Web 应用功能的分隔。

人体虚拟建模用 vrmf 文件表示,采用 Java 3D SDK 实现。Java3D 是面向对象的编程,数据结构采用的是场景图,它是具有方向性的不对称的树状层次模型,由两个分支组成:内容分支和视图分支。场景图的根节点是 Virtual Universe,下面是代表位置点的 Locale 节点,每个 Locale 上拥有一个或多个 BranchGroup 子节点。BranchGroup 的子节点则是三维环境中的各种形体(Shape)节点,以及用来设定形体的摆放位置的 TransformGroup 节点,观察位置由 ViewPlatform 节点设定,它是 TransformGroup 的子节点。人体的坐标系信息可以放在 TransformGroup 节点,人体部件(躯干、左手、右手等)作为子 TransformGroup 节点,人体部件的几何坐标以及肤色信息作为 Geometry 和 Appearance 节点。虚拟人体的存储方法见 2.3 节。

原型衣片的生成则是生成了一套提取服装原型主要参数的 API 工具集,根据对应的基准点(线),在顾客的虚拟人体上逐一提取出所有需要的参数,根据参数集计算出生成服装原型衣片所需的关键点,将这些关键点按照一定规则连接起来,得到原型衣片。

图 5 分别为生成的客户个性化三维人体模型和二维服装原型衣片。

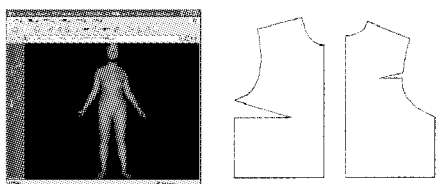


图 5 个性化三维人体模型和二维原型衣片

4 结语

本课题研究的 eMTM 系统通过采集人体体形数据,形成一系列的三维虚拟人体模板,然后根据客户个体体形特征数据选定对应的三维虚拟人体模板,提取模板截面数据,生成个性化的三维虚拟人体模型,再通过三维测量,生成符合量身定制要求的个性化服装原型衣片。实验表明,eMTM 原型系统方案设计合理,技术路线正确。本课题研究的 eMTM 原型系统允许顾客通过三种方式提供个人人体信息文件,并进行不同的处理,生成个性化的三维虚拟人体模型,最终生成原型衣片。其中一种方式只需两张照片和几个简单数据即可,满足了 eMTM 应用的多种需求,易于推广,而目前国内其他研究一般只提供一种方式,且较为复杂。

参考文献:

- [1] 万志琴. 服装生产管理[M]. 上海: 中国纺织出版社, 2001: 57 - 80.
- [2] Euratex. E-TAILOR - Integration of 3D Body Measurement, Advanced CAD and E-Commerce Technologies in the European Fashion Industry [EB/OL]. [2004 - 03 - 01]. <http://www.ist-world.org/ProjectDetails.aspx?ProjectId=08a6e5284e78407d9582752972ce08ac>.
- [3] 石秀金. 面向服装 eMTM 应用的系统平台的设计与实现[D]. 上海: 东华大学, 2006.
- [4] 李白, 李雪飞, 刘正东. 基于三维点云数据的虚拟人台模型的构建[J]. 北京服装学院学报, 2008, 28(1): 7 - 12.
- [5] 胡敏, 李勇, 张新民. 基于特征的三维人体建模[J]. 天津工业大学学报, 2003, 21(5): 83 - 85.
- [6] 吴龙, 张欣, 任小玲, 等. 基于三维人体测量的参数化人台的研究[J]. 西安工程科技学院学报, 2005, 19(4): 415 - 419.
- [7] 孟凡娟. 个性化三维服装人台建模的研究与系统开发[D]. 成都: 四川大学, 2005.
- [8] 周晓晶, 赵正旭. 基于照片的三维虚拟人重建技术[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2008, 38(4): 633 - 636.
- [9] 李基拓, 王阳生, 周霞. 由正交图像造型三维个性化虚拟人体模型[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2008, 20(5): 554 - 559.
- [10] 范庆玲, 李继云. 基于照片的三维人体模型研究与实现[J]. 微型电脑应用, 2006, 22(3): 5 - 6.
- [11] 张增林, 施霞萍. 基于遗传算法的聚类分析在体型分析中的应用[J]. 微计算机信息, 2005(32): 173 - 174.
- [12] 朱光宇. 基于 eMTM 的数字服装人体测量与个性化服装原型生成技术的研究[D]. 上海: 东华大学, 2008.

(上接第 2119 页)

- [6] LINGEMANN K, SURMANN H, NUCHTER A, et al. High-speed laser localization for mobile robots[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2005, 51(4): 275 - 296.
- [7] BORGES G A, ALDON M J. A Split - and - merge segmentation algorithm for line extraction in 2-D range images[C]// Proceedings of IEEE International Conference on Pattern Recognition. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2000: 441 - 444.
- [8] NGUYEN V, MARTINELLI A, TOMATIS N, et al. A comparison of line extraction algorithms using 2D laser rangefinder for indoor mobile robotics[C]// Proceedings of the IEEE/RSJ International

- Conference on Intelligent Robots and Systems. [S. l.]: IEEE, 2005: 1929 - 1934.
- [9] GUTMANN J-S, SCHLEGEL C. AMOS: Comparison of scan matching approaches for self-localization in indoor environments [C]// Proceedings of the 11th European Workshop on Advanced Mobile Robots (EUROBOT'96). Kaiserslautern, Germany: [s. n.], 1996: 61 - 67.
- [10] PFISTER S T, KRIECHBAUM K L, ROUMELIOTIS S I, et al. Weighted range sensor matching algorithms for mobile robot displacement estimation[C]// Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA'02). [S. l.]: IEEE, 2002: 667 - 1674.