

基于激光测距与双目视觉信息融合的 移动机器人 SLAM 研究

杜钊君, 吴怀宇

(武汉科技大学 信息科学与工程学院, 武汉 430081)

摘要: 未知复杂环境中不规则的障碍物使传感数据具有不确定性, 单依靠激光测距仪进行移动机器人的定位与自主导航可靠性不足; 针对此问题, 提出了一种基于激光测距仪和双目视觉传感器信息融合的精确定位方法, 利用加权最小二乘拟合方法和尺度不变特征变换(SIFT)算法分别从对激光信息与视觉信息中提取直线和点特征, 进行特征级的信息融合。通过对实验结果和数据分析, 多传感器信息融合可以有效提高移动机器人 SLAM (即时定位与地图构建) 的精度和鲁棒性。

关键词: 移动机器人; 即时定位与地图构建; 信息融合; 尺度不变特征变换

Research of Mobile Robot SLAM Based on Laser Range Finder and Binocular Vision Data Fusion

Du Zhaojun, Wu Huaiyu

(College of Information Science and Engineering, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, China)

Abstract: Relying solely on laser range finder make the localization and autonomous navigation of mobile robot highly uncertainty due to the irregular obstacles in unknown complex environment, This paper studied the accurate location of the method based on laser range finder and binocular vision sensor information fusion, extracting straight lines and some points features by using the weighted least squares fitting method and SIFT (Scale Invariant Feature Transform). The data fusion is performed at the level of features. The experiment results and data analysis show that multi-sensor fusion is an efficient way to improve the precision and robustness of mobile robot SLAM (Simultaneous Localization and Mapping).

Key words: mobile robot; simultaneous localization and mapping; data fusion; scale invariant feature transform

0 引言

移动机器人的自主导航是指机器人从一个地方自主地运动到另一个地方, 有效地探索未知区域并完成给定任务。这就要求机器人在未知区域内能够确定自身在环境中的位姿, 即机器人的自定位问题。而定位问题与环境地图的创建又是相辅相成、不断迭代的过程。因此, 机器人在自身位置不确定的未知环境中, 只能通过对外部环境进行识别并加以分析, 然后创建地图, 同时利用地图进行定位和导航, 即为移动机器人的同时定位与地图创建 (SLAM) 问题^[1]。

目前, 对 SLAM 的研究主要集中在提高实时性、数据关联和环路闭合等方面, 并在环境表示、地图创建、定位导航方面展开了一些研究: 文献 [2] 对移动机器人未知环境中自主导航 SLAM 问题进行了讨论, 设计了一种构建 2D 可视化路标特征地图的方案; 文献 [3] 对基于声纳信息与视觉信息相融合的 SLAM 进行了研究, 提高了机器人 SLAM 的准确度和鲁棒性; 文献 [4] 研究了室内环境中基于激光测距仪和单目视

觉的 SLAM, 实现了移动机器人的自主导航任务。

但是, 在未知复杂环境中, 空间存在不规则的静态障碍物和动态障碍物, 使得传感数据有着高度的不确定性, 单依靠激光测距仪进行移动机器人的定位与自主导航可靠性不够明显。因此, 本文将展开基于激光测距仪和双目视觉传感器信息融合的移动机器人 SLAM 研究。

1 基于信息融合的特征提取

1.1 激光测距仪信息提取

激光测距仪的原理是将激光束平行地反射出去, 通过测量发射到接收的时间差, 计算目标距离, 得到关于环境的水平剖面图。其测量结果称为距离扫描, 是一个长度有限的数字序列, 其中每个元素是表示在该元素对应角度方向上最近目标的距离^[5]。

SICK LMS-200 型激光测距仪具有扫描速度快、数据点密集和测量精度高的优点, 扫描数据可用极坐标表示为 $(d_n, \varphi_n)^T$ 或者由直角坐标表示为:

$$u_n = (x_n, y_n)^T, n = 1, 2, \dots, N \quad (1)$$

式中: $x_n = d_n \cos \varphi_n, y_n = d_n \sin \varphi_n$, N 为扫描数据点个数。设激光原始数据表示的线段特征在极坐标下为 (ρ, θ) , 则直角坐标系下线段方程为:

$$x \cos \theta + y \sin \theta - \rho = 0 \quad (2)$$

式中: $\rho > 0, -\pi \leq \theta \leq \pi$ 。对某一激光数据点 u_n 可计算出其到特征直线的距离为:

$$\rho_n = d_n \cos(\varphi_n - \theta) \quad (3)$$

收稿日期:2012-06-19; 修回日期:2012-08-19。

基金项目:国家自然科学基金项目(61075087);湖北省科技计划自然科学基金重点项目(2010CDA005)。

作者简介:杜钊君(1987-),男,硕士研究生,主要从事图像处理与计算机视觉方向的研究。

吴怀宇(1961-),男,博士,教授,博导,主要从事移动机器人智能控制、机电系统集成与控制等方向的研究。

考虑噪声的影响, 假设 ρ_n 服从高斯白噪声分布, 由误差传递公式可知:

$$P_n^2 = \sigma_d^2 \cos^2(\varphi_n - \theta) + \sigma_e^2 d_n^2 \sin^2(\varphi_n - \theta) \quad (4)$$

公式 (5) 为判断 u_n 是否属于特征直线的准则

$$\left| \frac{\rho_n}{P_n} - (k_1 \frac{\rho_{n-1}}{P_{n-1}} + k_2 \frac{\rho_{n+1}}{P_{n+1}}) \right| \leq \text{Var}(\epsilon) \quad (5)$$

对于所有共线的点, 由公式 (1. 6) 可以计算加权总长度

$$L(\theta) = \sum_{n=8}^e \frac{l_n}{P_{l_n}} + \sum_{n=8}^e \frac{|d_n|}{\sqrt{\sigma_d^2 + \sigma_e^2 d_n^2 \tan^2(\varphi_n - \theta)}} \quad (6)$$

式中: s 代表线段起始数据点, e 代表不满足共线准则的终止数据点。利用公式 (3) ~ (6) 可求出每一离散角度方向上的 $L(\theta)$, 其中最大值所对应的角度 θ 即为线段的实际特征值。线段特征的垂直距离 ρ 可由其均值进行初步估计得到

$$\rho = \frac{1}{e - s + 1} \sum_{n=s}^e \rho_n \quad (7)$$

通过方向角 10° 进行离散化得到的线段 $(\bar{\rho}, \bar{\theta})$ 只是对线段实际特征的粗略估计, 为从统计意义上对线段特征进行精确描述, 加权最小二乘拟合方法被采用。该方法加权最小二乘函数为:

$$x^2(\rho, \theta) = \sum_{n=s}^e \frac{(d_n \cos(\varphi_n - \theta) - \rho)^2}{\sigma_d^2 \cos^2(\varphi_n - \theta) + \sigma_e^2 d_n^2 \sin^2(\varphi_n - \theta)} \quad (8)$$

为使 $x^2(\rho, \theta)$ 取极小值, 可使其对 θ 和 ρ 一阶偏导为 0, 然后分别对 θ 和 ρ 进行优化估计。

1.2 双目立体视觉信息提取

激光测距仪获得的仅是水平面环境中物体与机器人之间的距离信息, 所以从双目视觉传感器中获得的数据所提供的特征信息是对环境感知的必要补充。因此, 一般使用激光传感器获取水平方向的环境信息, 用视觉传感器获取室内边缘特征信息^[4]。双目立体视觉是仿照人类利用双目视觉感知距离的方法, 实现对三维信息的感知, 在实现上采用基于三角测量的方法, 利用两个摄像机对同一景物从不同位置成像, 从而从视差中恢复距离信息。

目前, 比较常用的是利用尺度不变特征变换 SIFT (Scale Invariant Feature Transform) 进行特征点的提取和匹配, 选定一个尺度空间, 通过高斯差分尺度空间求出环境中的特征点。由于具有局部特殊性、多量性、高效性、可扩展性等特征, 因此使 SIFT 提取出的特征点成为里程计的合适路标点。

图 1 给出了 SIFT 算法匹配的图像, “+” 为 SIFT 算法提取出的特征点, 左右图像中特征点经匹配后中间用实线连接。图 2 为此帧左图与下一帧左图进行特征跟踪匹配结果。可以看出 SIFT 算法在进行特征匹配时具有很高的精度。

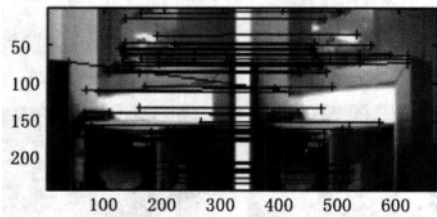


图 1 第 7 帧左右图像特征匹配结果

1.3 特征匹配与合并

机器人在某一位姿下获得的环境特征要经过融合与匹配后

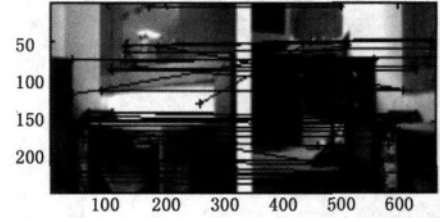


图 2 第 7 帧左图与第 8 帧左图特征跟踪结果

才能加入到全局地图中, 这些特征将由激光测距仪和视觉系统分别进行提取, 然后再从特征层次上进行匹配融合^[6]。

根据已经获得的激光数据特征角点和视觉数据特征角点匹配对, 采用迭代优化方法来求解三维空间到二维空间的射影变换, 采用高斯牛顿迭代法进行外参数优化求取^[7]。令激光提取的直角坐标 $(x_n, y_n)^T$ 转换为图像二维齐次坐标向量 $\bar{m} = [\bar{x}, \bar{y}, 1]^T$, 双目视觉通过 SIFT 提取的三维空间测量齐次坐标向量是 $m = [X, Y, Z, 1]^T$, 这样, 将三维空间点投影变换二维平面, 令 $m = H_{3 \times 4}$, 则:

$$H_{3 \times 4} = \arg \min_{H_{3 \times 4}} \sum_{i=1}^n \|\vec{y}_i - H \vec{x}_{iq}(\vec{x}_i, \vec{y}_i)\| \in X \quad (9)$$

式中: \vec{x}_i 是三维空间的齐次坐标, \vec{y}_i 二维平面的齐次坐标。则:

$$m = \arg \min_m \sum_{i=1}^n \|\bar{m}_i - m_i(\vec{p})\|^2 \quad (10)$$

由高斯牛顿迭代法, 给定初始解 \vec{p}^0 , 令 $\vec{e}^k = \vec{m}_i - m_i(\vec{p}^k)$, 在 \vec{p}^k 附近有:

$$m_i(\vec{p}^k + \Delta^k) = m_i(\vec{p}^k) + J_{p^k} \Delta^k \quad (11)$$

其中 Jacobian 矩阵 $J_{p^k} = \frac{\partial m_i}{\partial \vec{p}} \big|_{\vec{p}=\vec{p}^k}$, 寻找下一个迭代点 $\vec{p}^{k+1} = \vec{p}^k + \Delta^k$ 使得:

$$\sum_{i=1}^n \|\bar{m}_i - m(\vec{p}^{k+1})\|^2 = \min_{\Delta^k} \sum_{i=1}^n \|\bar{m}_i - m(\vec{p}^k) - J_{p^k} \Delta^k\|^2 = \min_{\Delta^k} \sum_{i=1}^n \|\vec{e}_i^k - J_{p^k} \Delta^k\|^2 \quad (12)$$

令 $\vec{e}_i^k - J_{p^k} \Delta^k \approx 0$, 得正规化方程:

$$\Delta^k = (J_{p^k}^T J_{p^k})^{-1} J_{p^k}^T \vec{e}^k \quad (13)$$

代入前式的高斯牛顿的迭代格:

$$\vec{p}^{k+1} = \vec{p}^k + (J_{p^k}^T J_{p^k})^{-1} J_{p^k}^T \vec{e}^k \quad (14)$$

已知两匹配点集, P, P' 分别表示起始点集和目标点集。求两三维点集的重心坐标:

$$\bar{p} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N p_i, p_i \in P, i \leq N \quad (15)$$

$$\bar{p}' = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N p'_i, p'_i \in P', i \leq N \quad (16)$$

求两数据点集的协方差矩阵:

$$A_{3 \times 3} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (p_i - \bar{p})(p'_i - \bar{p}')^T \quad (17)$$

令 $M_{3 \times 3} = A - A^T$,

设 $K_{3 \times 1} = [M_{23}, M_{31}, M_{12}]^T$, 构造矩阵如下:

$$H_{4 \times 4} = \begin{bmatrix} \text{tr}(A) & K^T \\ K & A + A^T - \text{tr}(A) I_{3 \times 3} \end{bmatrix} \quad (18)$$

求 H 矩阵最大特征值对应的特征向量, 即为旋转变换的四元数表达。利用与矩阵的转换关系得到的旋转变换矩阵

$R_{3 \times 3}$, 进一步根据两点集间重心偏移计算平移变换向量:

$$T_{3 \times 1} = \bar{p}' - R_{3 \times 3} \bar{p} \quad (19)$$

利用该迭代格式 (14) 求出满足公式 (19) 的变换参数, 即可得到参数结果。

2 SLAM 问题的解决方案

2.1 SLAM 建模

SLAM 问题是指移动机器人在不知道环境地图和自身位姿的前提下, 仅依赖观测 z_t 和控制 u_t 确定自身的相对位姿, 并构建地图。也就是在未知环境中运动时递增构建周围环境的地图, 同时利用构建的地图对机器人位姿进行估计。机器人的位姿可以用一个三维向量 $p = (x, y, \theta)$ 表示, 并且在全局坐标系和局部坐标系下可以很方便地进行转换。SLAM 问题通常采用递归贝叶斯估计来描述 SLAM 问题:

$$P(x_t, m | z_{t-1}, u_t, x_0) = \int P(x_t | x_{t-1}, u_t) P(x_{t-1}, m | z_{t-1}, u_{t-1}, x_0) dx_{t-1} \quad (20)$$

$$P(x_t, m | z_t, u_t, x_0) = \frac{P(z_t | x_t, m) P(x_t, m | z_{t-1}, u_{t-1}, x_0)}{P(z_t | z_{t-1}, u_t)} \quad (21)$$

式中: x_t 表示 t 时刻机器人的位姿向量; z_t 为 t 时刻的观测量; u_t 表示 $t-1$ 时刻给机器人的控制信息; m_i 表示第 i 个路标的位置向量, 示意图如图 3 所示。

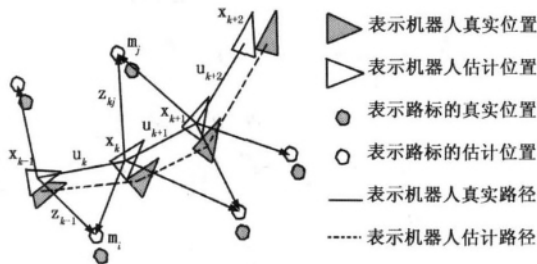


图 3 SLAM 问题的示意图

2.2 SLAM 算法的具体实现

基于上述对信息融合和 SLAM 的建模的分析, 拟采用下述方案实现移动机器人在位置环境中的导航, 步骤如下: (1) 用加权最小二乘法对激光测距仪的数据进行处理, 得到环境中障碍物的精确距离信息; (2) 用 SIFT 算法从视觉传感器中不同视觉或距离获得的图像中寻找特征点, 匹配并得到旋转角度; (3) 通过导航工具箱 (Carmen) 消除机器人在行走过程中左右摄像头得到图像时间上的差别; (4) 结合激光和视觉传感器, 融合距离信息和旋转角度信息, 定位移动机器人的初始位置; (5) 根据融合后的信息获得路标信息, 构建特征地图, 并采用扩展卡尔曼滤波器 (EKF) 进行自主导航^[8-10]。

3 移动机器人 SLAM 实验分析

本文采用的研究平台为 MT-R 机器人, 如图 4 (a) 所示, 其运动模型如图 4 (b) 所示。

3.1 SLAM 仿真实验

移动机器人 SLAM 实验的实际环境为办公室, 其中室内过道为主要部分。图 5 为基于 EKF 的移动机器人 SLAM 实验结果图, 其中点划线是航迹推算得到的路径; 实线是通过 SLAM 得到的路径。图 6 是 SLAM 实验中机器人的位姿误差曲线^[11]。

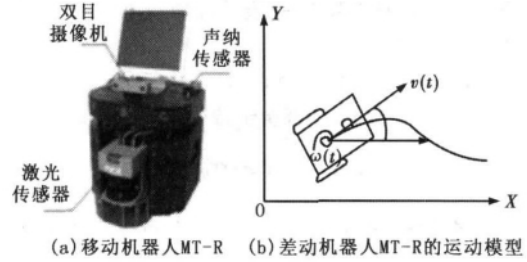


图 4 移动机器人实验平台

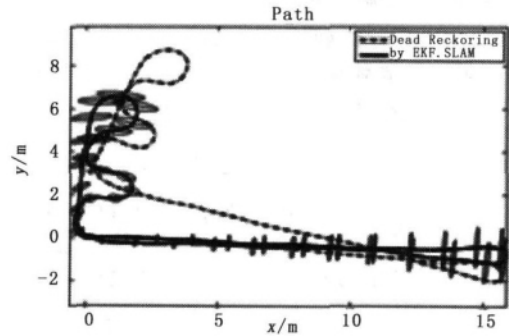


图 5 移动机器人 SLAM 实验结果图

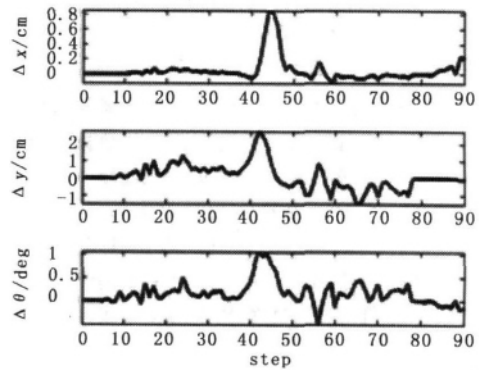


图 6 SLAM 实验中机器人位姿误差曲线

3.2 移动机器人实际导航实验

设定移动机器人的最大线速度限定为 0.3 m/s, 最大线加速度限定为 0.2 m/s², 最大角速度限定为 1.5 rad/s。基于激光测距仪的移动机器人室内导航结果图如图 7 所示, 其中方块

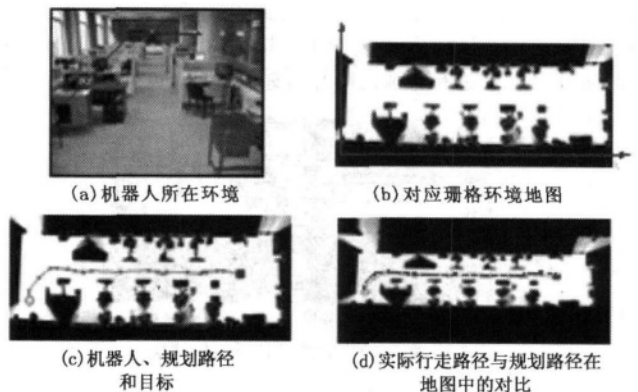


图 7 基于激光测距仪的移动机器人室内导航实验

代表机器人,圆圈代表目标。机器人与目标之间的连线为实时规划的路径,路径中的“×”号为路径中存在的拐点,可以看出由于实验室过道比较直^[12]。

4 结论

本文重点研究了如何融合激光测距仪与视觉传感器的信息,在未知环境中充分利用传感器获取数据中的冗余信息,提高机器人各种数据的使用效率。实验结果表明,采用基于激光与视觉信息融合的方法进行机器人的同时定位与地图创建(SLAM),可以充分利用冗余信息,从而提高机器人的定位精度,并且具有更好的鲁棒性。

采用信息融合解决机器人 SLAM 问题存在一定的局限性。其一,机器人各传感器信息融合的程度决定了机器人定位的精度,必须深化信息融合的研究;其二,SLAM 中一个重要方面是解决地图实时更新中的数据关联问题,这给信息融合的实时性带来一定挑战,必须实现并使其适用于动态环境^[13-14]。

参考文献:

- [1] Sebastian Thrun. Simultaneous Localization and Mapping [M]. Robotics and Cognitive Approaches to Spatial Mapping Springer Tracts in Advanced Robotics, 2008, 38/2008, 13-41.
- [2] 陶 辉, 吴怀宇等. 基于特征地图的移动机器人 EKF-SLAM 和 FastSLAM 算法自主导航研究 [J]. 北京联合大学学报 (自然科学版), 2010, 24 (2): 18-24.
- [3] 罗荣华, 洪炳镨. 基于信息融合的同时定位与地图创建研究 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2004, 36 (5): 566-569.
- [4] 庄 严, 王 伟, 王 珂等. 移动机器人基于激光测距和单目视觉的室内同时定位和地图构建 [J]. 自动化学报, 2005, 31 (6): 925-933.
- [5] 黄明登, 肖晓明, 蔡自兴等. 机器人局部环境特征提取方法的研究 [J]. 计算机测量与控制, 2007, 15 (2): 241-244.
- [6] 李铁铮, 居鹤华. 基于栅格空间的移动机器人快速路径规划方法 [J]. 计算机测量与控制, 2012, 20 (1): 164-166.
- [7] 王 珂. 基于视觉-激光的移动机器人自定位研究 [D]. 大连理工大学, 2008. 9.
- [8] Durrant-Whyte H., Bailey T. Simultaneous localization and mapping (SLAM): part I essential algorithms [J]. IEEE Robotics and Automation Magazine, 2006, 13 (2): 99-108.
- [9] Durrant-Whyte H., Bailey T. Simultaneous localization and mapping (SLAM): part II state of the art [J]. IEEE Robotics and Automation Magazine, 2006, 13 (3): 108-117.
- [10] Siegwart R., Nourbakhsh I. R. 自主移动机器人导论 [M]. 李人厚译. 西安: 西安交通大学出版社, 2006.
- [11] 杨 明, 王 宏, 张 钺. 基于激光雷达的移动机器人位姿估计方法综述 [J]. 机器人, 2002, 24 (2): 177-183.
- [12] 温安邦, 吴怀宇, 赵 季. 基于扫描匹配预处理的即时定位与地图创建 [J]. 计算机工程与应用, 2009, 45 (33): 245-248.
- [13] 陈 东. 三维激光和单目视觉间的联合标定与数据融合 [D]. 大连理工大学, 2009. 12.
- [14] 宁 珊. 基于多传感器的机器人环境感知方法研究 [D]. 哈尔滨工程大学, 2007. 2.

福禄克公司产品硕果累累, 摘获多项行业媒体大奖

作为世界电子测试工具的领导者之一, 福禄克一直致力于为各个工业领域提供优质的测试测量解决方案, 其产品广泛应用于现代工业的多个领域, 并以其值得信赖的品质赢得了全球用户的共识。福禄克自 1978 年进入中国市场, 始终遵循“立足于中国, 服务于中国”的理念, 在为广大中国用户同步提供国外先进技术产品的同时, 着力于本土化研发及生产制造, 不断完善其在中国市场研发、生产、采购、销售、服务等环节的完整价值链。福禄克的产品正在帮助中国各行各业的业务高效运转和不断发展, 并以精准、耐用、安全、创新、便携、易操作等特点取胜于市场, 备受中国用户赞誉。2012 年, 福禄克公司的多项新品更在中国多个行业媒体年度评选中, 荣获多项媒体大奖, 实质名归。

未来, 福禄克公司依旧会坚持多元化的产品路线, 在“精准、耐用、安全、创新”的指导方针下, 做专做精, 致力于降低客户的总拥有成本和提升性价比, 为用户提供最优产品及解决方案。持续性加大对中国市场的投资, 并根据中国用户的需求研发更多可满足本土化需求的产品。不断建立与加强与中国伙伴互惠互利的合作关系, 以期共创更加美好的未来。

* 福禄克 Ti125 红外热像仪, EDN China 2012 年度创新产品奖

* 福禄克 F754 全功能文档化智能 HART 校准器, 控制工程中文版 2012 年度最佳产品奖

* 福禄克 F430 II 系列手持式三相电能质, 福禄克 Raytek-MI3 系列红外测温仪, 福禄克 Ti125 红外热像仪, 工厂工程 (中国) (PLANT ENGINEERING China) 2012 年度最佳产品奖

要了解更多相关信息, 请访问福禄克网站 <http://www.fluke.com.cn>, 或拨打客服热线电话 400-810-3435。

福禄克公司成立于 1948 年, 是世界电子测试工具的领导者, 多年来, 创造和发展了一个特定的技术市场, 为各个工业领域提供了优质的测量和检测故障产品。福禄克的用户涵盖面广, 包括技术人员、工程师、计量人员等等, 他们利用福禄克的测试工具进行工业用电、电器设备和过程校准的安装、故障诊断和管理, 并以此控制质量。在过去的五年中, 福禄克的测试工具屡获殊荣, 赢得了《测试与测量世界》最佳测试工具奖、《控制工程》工程师选择奖等 50 多个年度产品奖项, 备受用户赞誉。