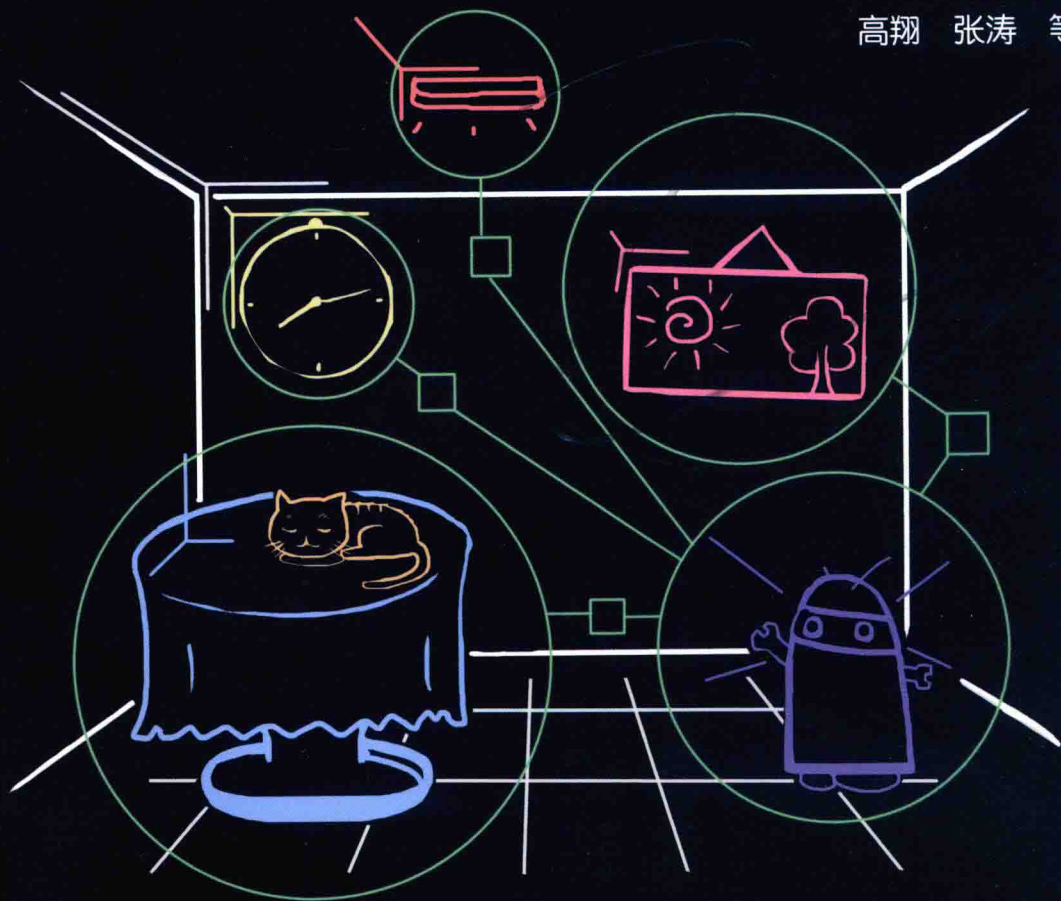


视觉SLAM十四讲

从理论到实践



高翔 张涛 等著

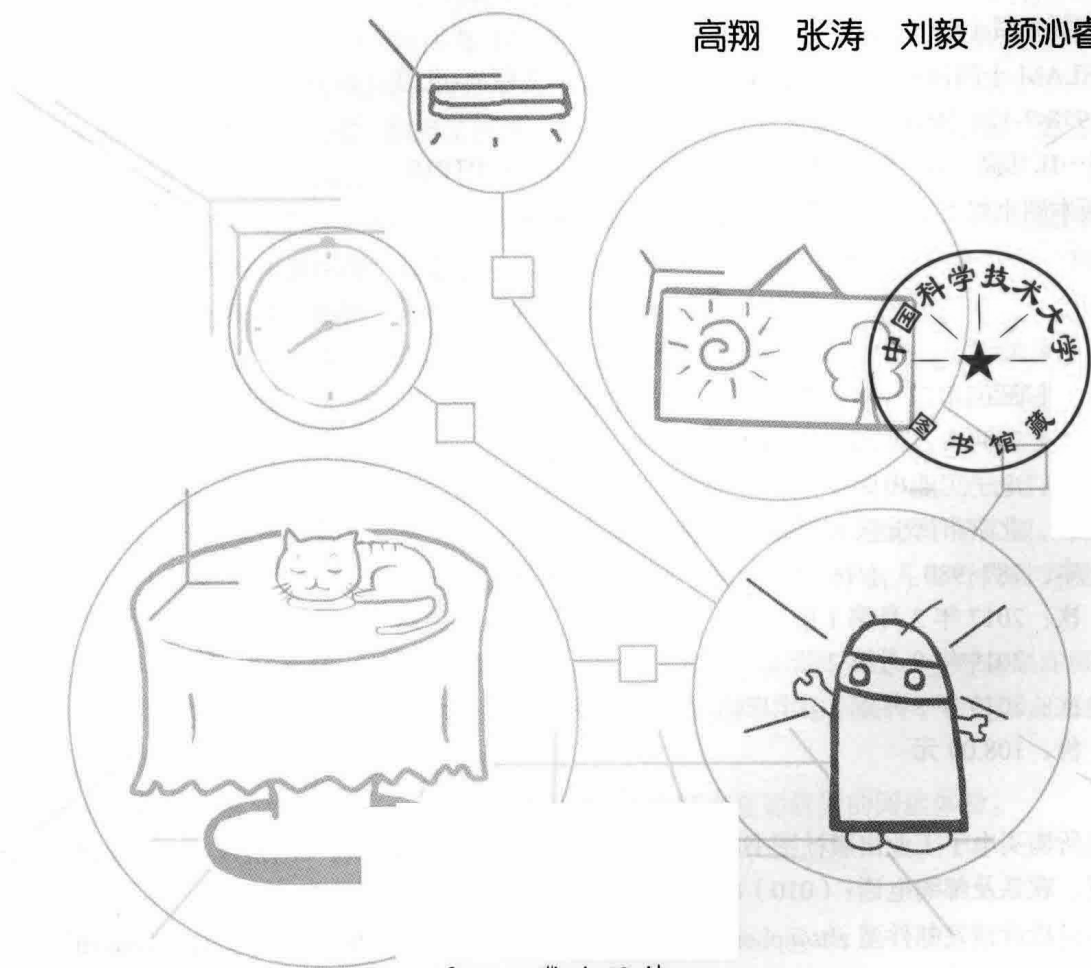


视觉SLAM十四讲

从理论到实践

第2版

高翔 张涛 刘毅 颜沁睿 著



电子工业出版社
Publishing House of Electronics Industry
北京·BEIJING

内 容 简 介

本书系统介绍了视觉 SLAM（同时定位与地图构建）所需的基本知识与核心算法，既包括数学理论基础，如三维空间的刚体运动、非线性优化，又包括计算机视觉的算法实现，如多视图几何、回环检测等。此外，本书还提供了大量的实例代码供读者学习研究，从而更深入地掌握这些内容。

本书可以作为对 SLAM 感兴趣的研究人员的入门自学材料，也可以作为高等院校相关专业的本科生或研究生教材。

未经许可，不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有，侵权必究。

图书在版编目（CIP）数据

视觉 SLAM 十四讲：从理论到实践 / 高翔等著. — 2 版. — 北京：电子工业出版社，2019.8

ISBN 978-7-121-36942-1

I. ①视…II. ①高…III. ①人工智能—视觉跟踪—研究 IV. ①TP18

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2019）第 125604 号

责任编辑：郑柳洁

印 刷：三河市君旺印务有限公司

装 订：三河市君旺印务有限公司

出版发行：电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱

邮编：100036

开 本：787×980 1/16 印张：25.5 字数：576.8 千字 彩插：4

版 次：2017 年 3 月第 1 版

2019 年 8 月第 2 版

印 次：2019 年 8 月第 1 次印刷

定 价：108.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题，请向购买书店调换。若书店售缺，请与本社发行部联系，联系及邮购电话：（010）88254888，88258888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn，盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

本书咨询联系方式：（010）51260888-819，faq@phei.com.cn。

作者简介



· 高翔 ·

清华大学自动化系博士，慕尼黑工业大学博士后。研究兴趣主要为计算机视觉、定位与建图、机器学习等，主要著、译作包括《视觉SLAM十四讲：从理论到实践》《机器人学中的状态估计》，在 *RAS*、*Auto Robotics*、*IROS* 等期刊和会议上发表论文，现从事自动驾驶车辆研发工作。



· 张涛 ·

清华大学自动化系教授、系主任。1995年9月至1999年9月在清华大学自动化系检测技术与自动化装置专业学习，获博士学位。1999年10月至2002年9月在日本国立佐贺大学大学院工学系研究科系统控制专业学习，获博士学位。研究方向包括机器人、控制理论、人工智能等。



· 刘毅 ·

华中科技大学人工智能与自动化学院博士。长期致力于计算机视觉、三维重建、视觉SLAM、传感器融合的研究和应用。现于广州视源电子科技有限公司（CVTE）的中央研究院担任高级研究员。

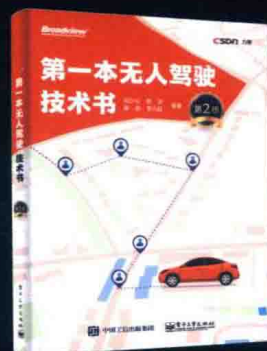


· 颜沁睿 ·

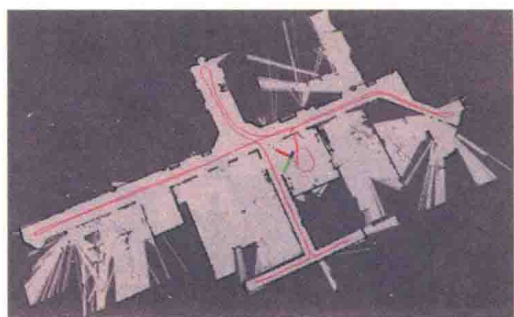
比利时荷语鲁汶大学（KU Leuven）人工智能专业硕士。致力于推动计算机视觉技术在智能驾驶领域的产品化演进，对视觉SLAM算法进行系统异构化加速。曾带领团队在FPGA平台上实现能够实时半稠密建图的单目SLAM系统，被英特尔公司选为官方示范应用案例。现担任地平线公司地图定位系统架构师。



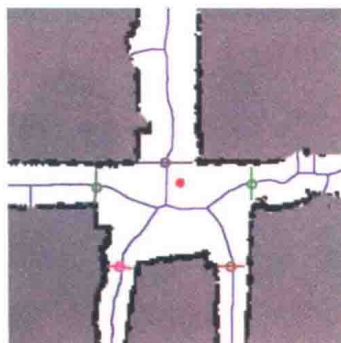
《机器人感知：因子图在SLAM中的应用》
ISBN 978-7-121-33811-3
[美] Frank Dellaert Michael Kaess 著
刘富强 董靖 译
定价：59.00元



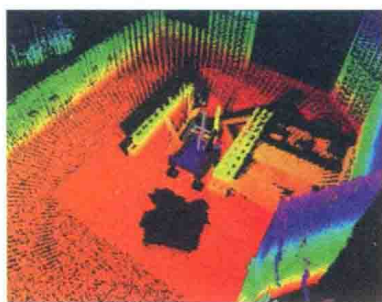
《第一本无人驾驶技术书（第2版）》
ISBN 978-7-121-36493-8
刘少山 唐洁 吴双 李力耘 等著



2D栅格地图



2D拓扑地



3D点云地图



3D网格地图

图2-10 形形色色的地图

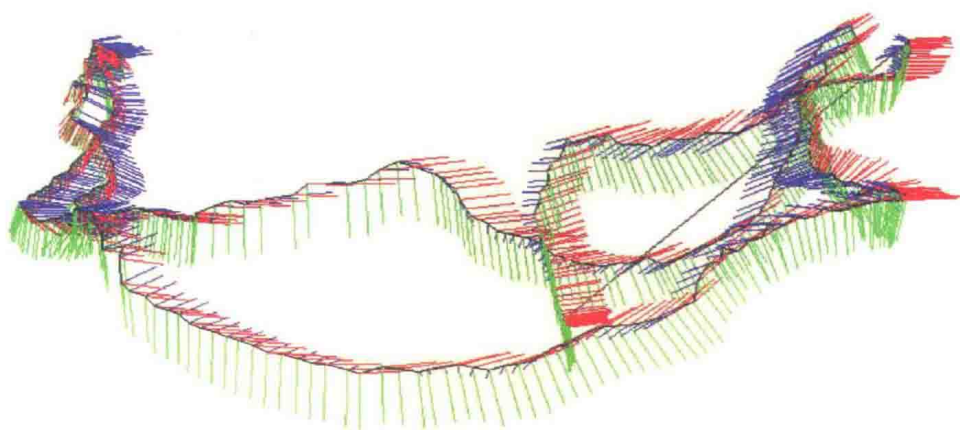


图3-3 位姿可视化的结果

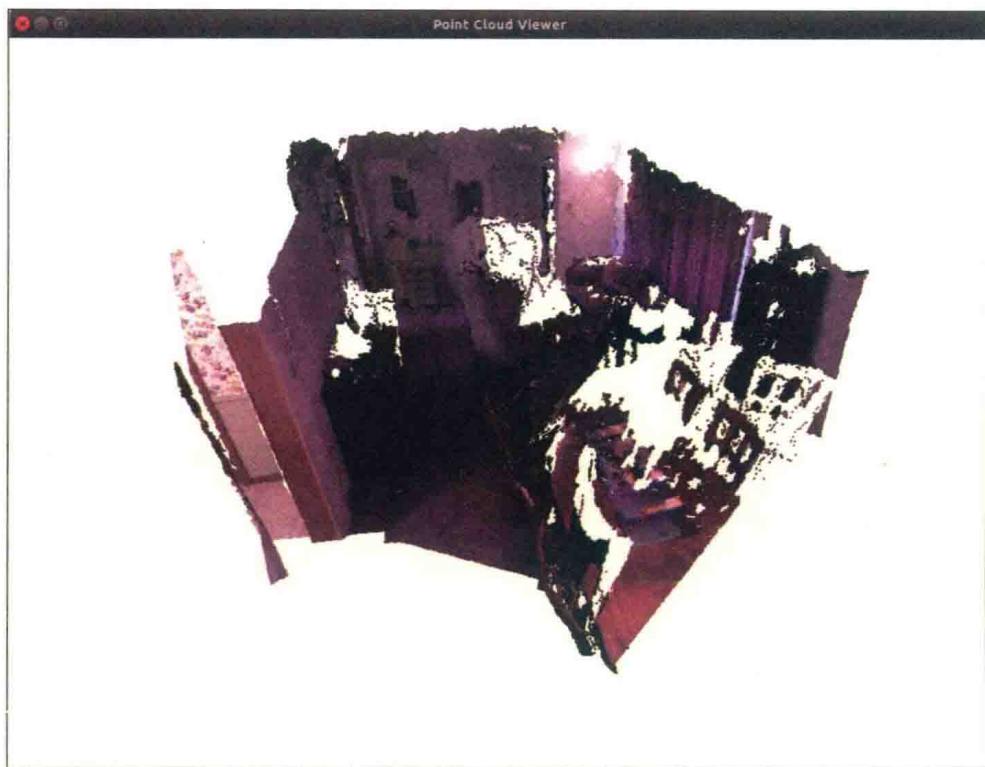


图5-10 拼合的点云地图

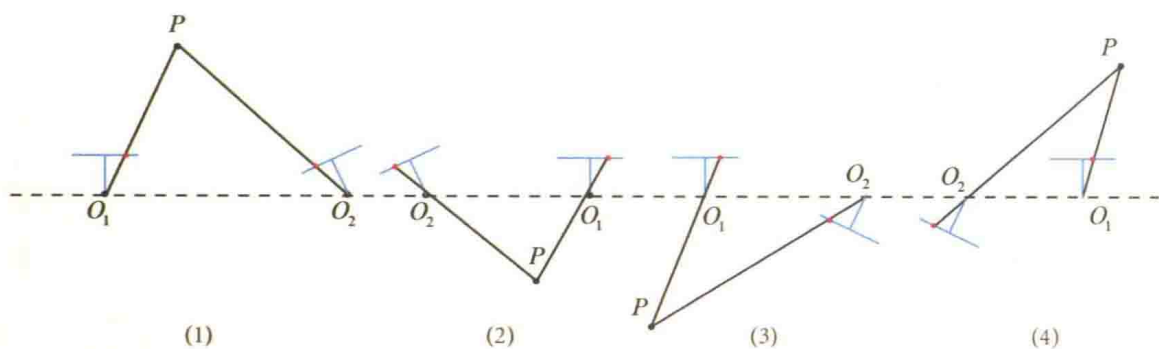


图7-10 分解本质矩阵得到的4个解。在保持投影点（红色点）不变的情况下，两个相机及空间点一共有4种可能的情况

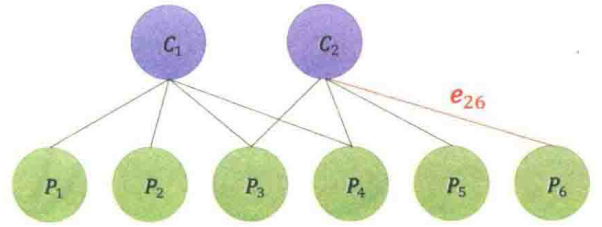
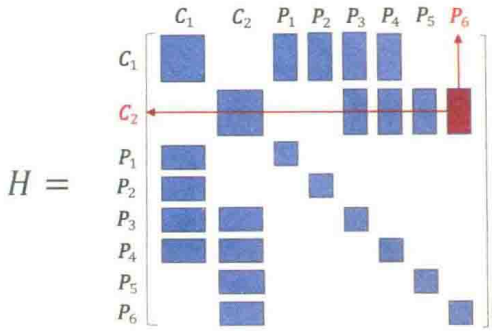


图9-7 H 矩阵中非零矩阵块和图中边的对应关系。如左图 H 矩阵中右侧的红色矩阵块，表示在右图中其对应的变量 C_2 和 P_6 之间存在一条边 e_{26}



(a)



(b)

图9-13 优化前后的可视化点云。(a)为优化前的初始值；(b)为优化后的优化值

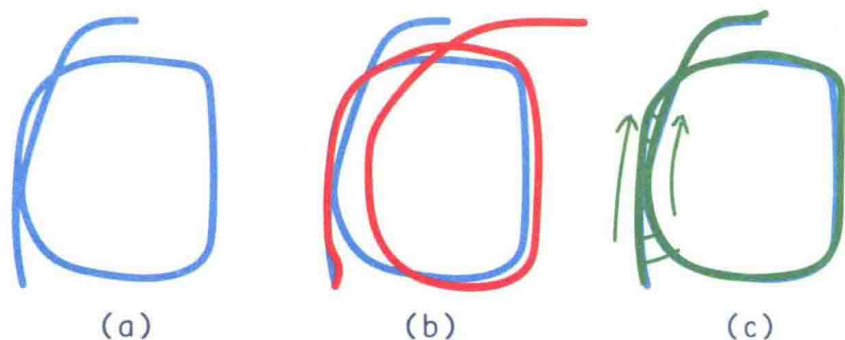


图11-1 漂移示意图。(a) 真实轨迹；(b) 由于前端只给出相邻帧间的估计，优化后的位姿图出现漂移；(c) 添加回环检测后的位姿图可以消除累积误差

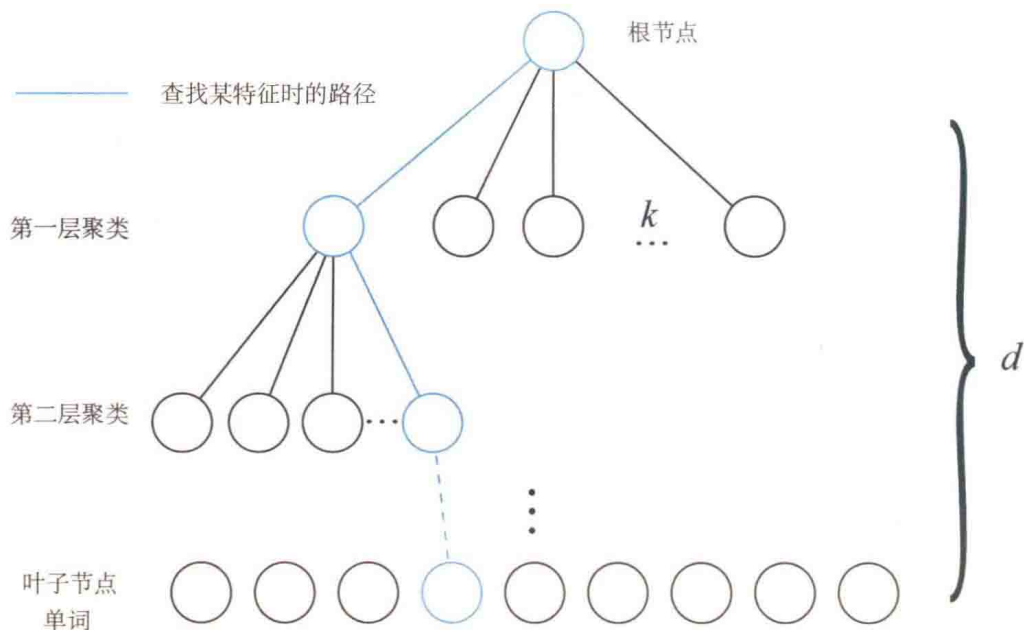


图11-4 K 叉树字典示意图。训练字典时，逐层使用K-means聚类。根据已知特征查找单词时，可逐层比对，找到对应的单词

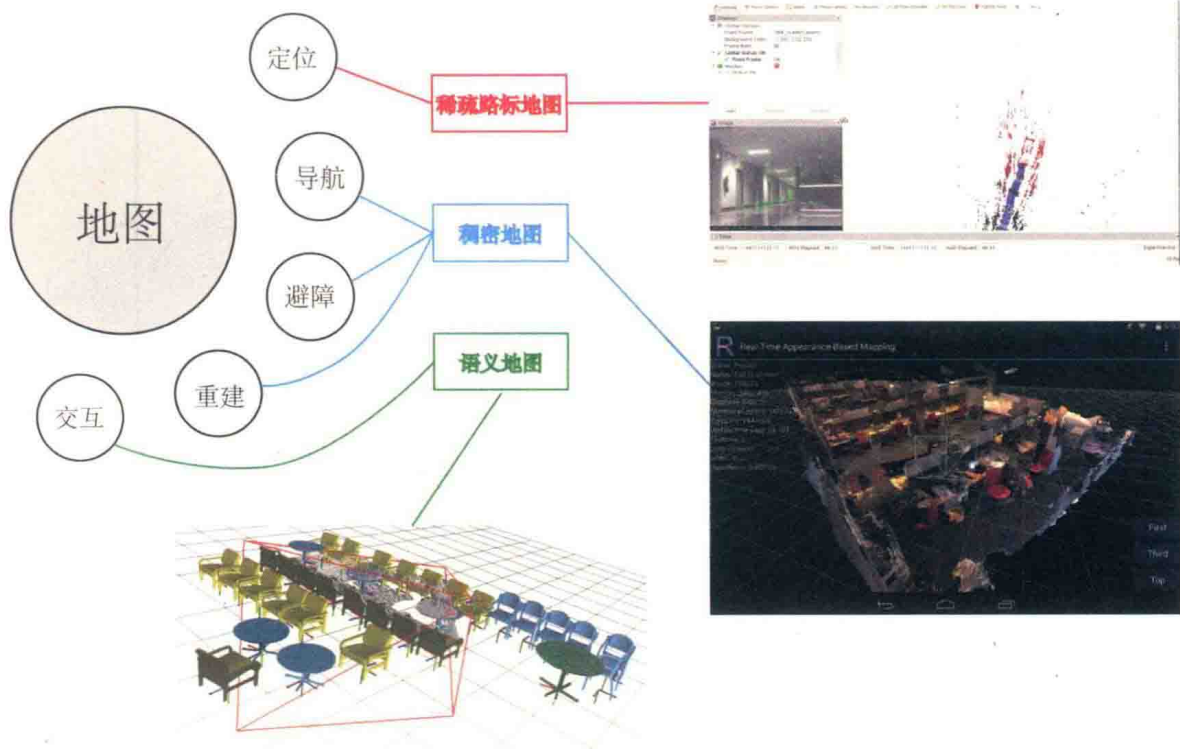


图12-1 各种地图的示意图。例子分别来自参考文献[88, 119, 120]



图13-1 从简单的事物出发，逐渐搭建复杂但优秀的作品

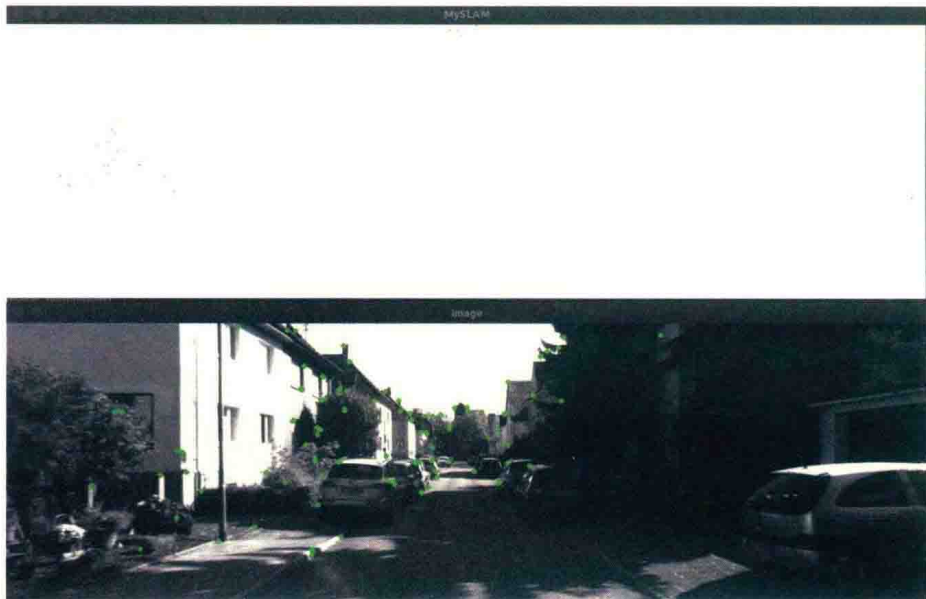


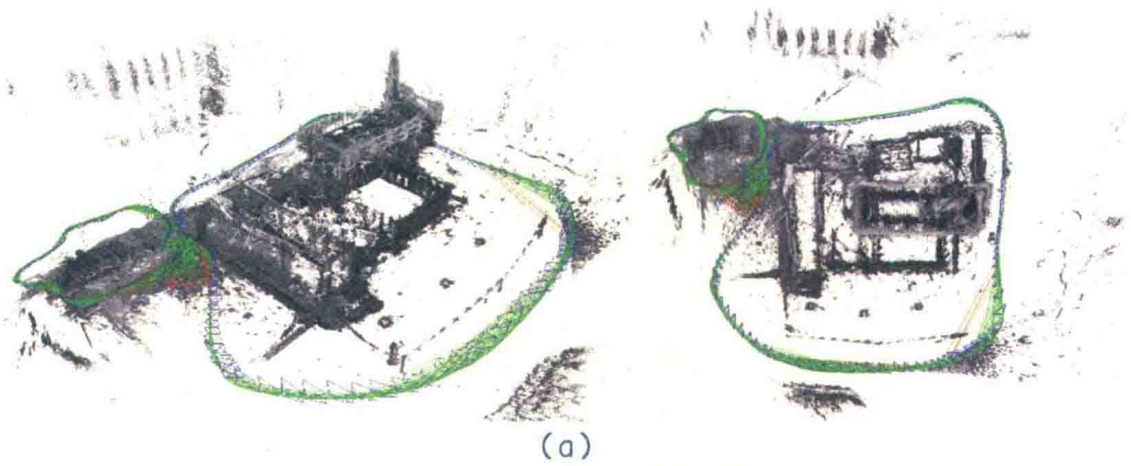
图13-4 视觉里程计运行截图



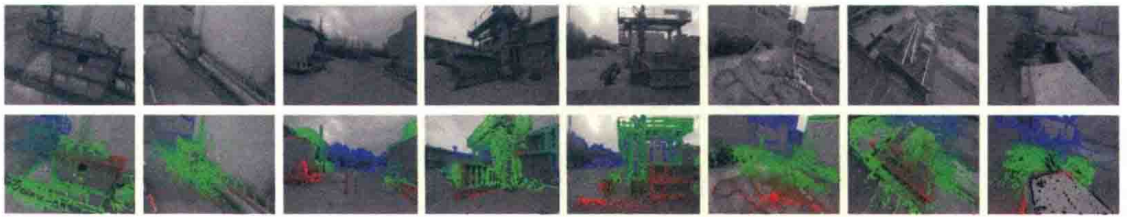
(a)

(b)

图14-1 MonoSLAM 的运行时截图。(a) 追踪特征点在图像中的表示；(b) 特征点在三维空间中的表示



(a)



(b)

图14-4 LSD-SLAM 的运行情况。(a) 为估计的轨迹与地图；(b) 为图像中被建模的部分，即具有较好的像素梯度的部分



图14-5 SVO 跟踪关键点的图片

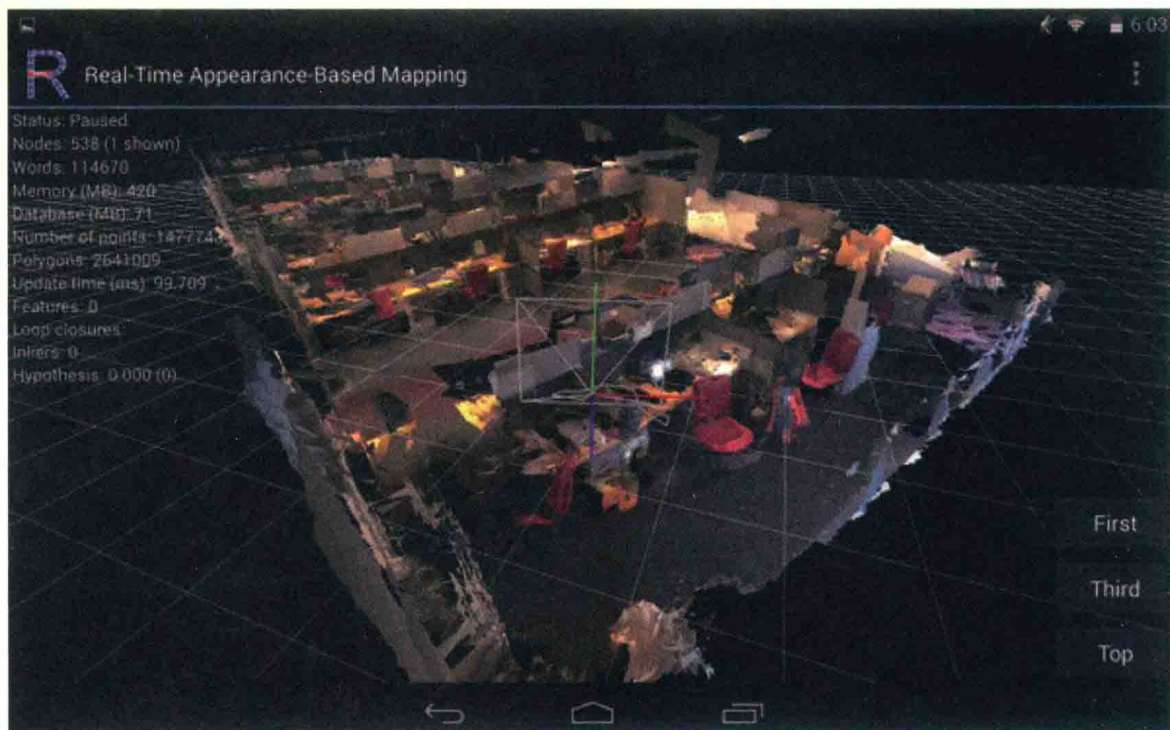


图14-6 RTAB-MAP 在Google Project Tango 上的运行样例



(a)



(b)

图14-8 语义SLAM 的一些结果，(a) 和 (b) 分别来自文献[152, 154]

第二版序

《视觉 SLAM 十四讲：从理论到实践》出版已经两年多。两年来，这本书经历了 13 次重印，在 GitHub 上拥有 2500 个星星，也在业界引起了广泛的关注和讨论。大多数读者评价是正面的，当然，书中也有些地方不够令人满意。例如，这本书面向初学者，有些应该深入的地方讲得不够深入；书中的数学符号不够统一，有些地方容易令读者产生误解；工程实践章节内容不够丰富，介绍较浅，等等。实际上，我在 2016 年中期开始创作第 1 版，所有文字、图片和代码都是从零开始准备的，再加上当时在读博士，也是第一次写这么厚的书，错漏在所难免。2018 年，我在慕尼黑工大给学生讲 SLAM 课程，期间又积累了一些材料，所以本书从内容上更丰富、更合理。在第 1 版的基础上做了如下改动：

1. **更多的实例。**增加了一些实验代码来介绍算法的原理。在第 1 版中，多数实践代码调用了各种库中的内置函数，现在我认为更深入地介绍底层计算会更好，所以本书中的许多代码，除了调用库函数，还提供了底层的实现。
 2. **更深入的内容。**主要是从第 7 讲至第 12 讲的部分，同时删除了一些泛泛而谈的边角料（比如 GTSAM 相关内容^①）。对第 1 版大部分数学公式进行了审查，重写了那些容易引起误解的内容。
 3. **更完善的工程项目。**将第 1 版的第 9 讲移至第 13 讲。于是，我们可以在介绍了所有必要知识之后，向大家展现一个完整的 SLAM 系统是如何工作的。相比于第 1 版，我在本书的项目中将追求以精简的代码实现完整的功能，你会得到一个由几百行代码实现的、有完整前后端的 SLAM 系统。
 4. **更通俗、简洁的表达。**我觉得这是一本好书的标准，特别是当介绍一些看起来高深莫测的数学知识时。我重新制作了部分插图，使它们即使在黑白印刷条件下也能看起来很清楚。当然，每讲前的简笔画我是不会改的！
- 总之，我尽量做到深入浅出，也希望本书能够给你带来更加舒适的阅读体验。

^①因子图优化现在已有完整的书籍《机器人感知：因子图在 SLAM 中的应用》，用一小节很难介绍清楚。

目录

第 1 讲 预备知识	1
1.1 本书讲什么	1
1.2 如何使用本书	3
1.2.1 组织方式	3
1.2.2 代码	5
1.2.3 面向的读者	6
1.3 风格约定	6
1.4 致谢和声明	8
第 1 部分 数学基础	10
第 2 讲 初识 SLAM	11
2.1 引子：小萝卜的例子	13
2.2 经典视觉 SLAM 框架	19
2.2.1 视觉里程计	20
2.2.2 后端优化	21
2.2.3 回环检测	22
2.2.4 建图	23
2.3 SLAM 问题的数学表述	24
2.4 实践：编程基础	27
2.4.1 安装 Linux 操作系统	27
2.4.2 Hello SLAM	29
2.4.3 使用 cmake	30
2.4.4 使用库	32
2.4.5 使用 IDE	35

第 3 讲	三维空间刚体运动	40
3.1	旋转矩阵	42
3.1.1	点、向量和坐标系	42
3.1.2	坐标系间的欧氏变换	43
3.1.3	变换矩阵与齐次坐标	46
3.2	实践: Eigen	47
3.3	旋转向量和欧拉角	53
3.3.1	旋转向量	53
3.3.2	欧拉角	54
3.4	四元数	56
3.4.1	四元数的定义	56
3.4.2	四元数的运算	57
3.4.3	用四元数表示旋转	59
3.4.4	四元数到其他旋转表示的转换	59
3.5	* 相似、仿射、射影变换	61
3.6	实践: Eigen 几何模块	62
3.6.1	Eigen 几何模块的数据演示	62
3.6.2	实际的坐标变换例子	64
3.7	可视化演示	66
3.7.1	显示运动轨迹	66
3.7.2	显示相机的位姿	69
第 4 讲	李群与李代数	71
4.1	李群与李代数基础	73
4.1.1	群	73
4.1.2	李代数的引出	74
4.1.3	李代数的定义	76
4.1.4	李代数 $\mathfrak{so}(3)$	76
4.1.5	李代数 $\mathfrak{se}(3)$	77
4.2	指数与对数映射	78
4.2.1	$SO(3)$ 上的指数映射	78
4.2.2	$SE(3)$ 上的指数映射	80

4.3	李代数求导与扰动模型	81
4.3.1	BCH 公式与近似形式	81
4.3.2	SO(3) 上的李代数求导	83
4.3.3	李代数求导	84
4.3.4	扰动模型 (左乘)	85
4.3.5	SE(3) 上的李代数求导	85
4.4	实践: Sophus	86
4.4.1	Sophus 的基本使用方法	86
4.4.2	例子: 评估轨迹的误差	89
4.5	* 相似变换群与李代数	92
4.6	小结	93
第 5 讲	相机与图像	95
5.1	相机模型	97
5.1.1	针孔相机模型	97
5.1.2	畸变模型	100
5.1.3	双目相机模型	103
5.1.4	RGB-D 相机模型	104
5.2	图像	106
5.3	实践: 计算机中的图像	107
5.3.1	OpenCV 的基本使用方法	107
5.3.2	图像去畸变	112
5.4	实践: 3D 视觉	113
5.4.1	双目视觉	113
5.4.2	RGB-D 视觉	115
第 6 讲	非线性优化	119
6.1	状态估计问题	121
6.1.1	批量状态估计与最大后验估计	121
6.1.2	最小二乘的引出	123
6.1.3	例子: 批量状态估计	125
6.2	非线性最小二乘	126
6.2.1	一阶和二阶梯度法	127
6.2.2	高斯牛顿法	128