

**Broadview**<sup>®</sup>  
www.broadview.com.cn

Factor Graphs for Robot Perception


# 机器人感知

因子图在SLAM中的应用

[美] Frank Dellaert 著  
Michael Kaess

刘富强 董靖 译

非  
外  
借

 中国工信出版集团

 电子工业出版社  
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY  
http://www.phei.com.cn

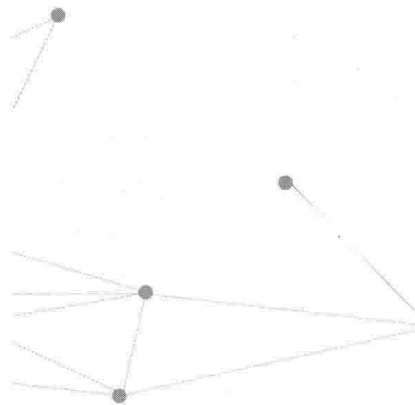
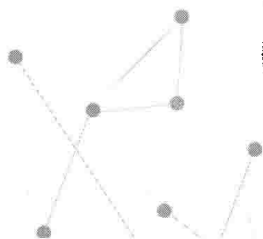
Factor Graphs for Robot Perception

# 机器人感知

因子图在SLAM中的应用

[美] Frank Dellaert 著  
Michael Kaess

刘富强 董靖 译



电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

© Frank Dellaert and Michael Kaess 2017. Authorized translation of the English edition.

© Publishing House of Electronics Industry. This edition is published and sold by permission of Now Publishers, Inc., the owner of all rights to publish and sell the same.

本书中文简体版专有出版权由 Now Publishers, Inc. 授予电子工业出版社, 未经许可, 不得以任何方式复制或抄袭本书的任何部分。

版权贸易合同登记号 图字: 01-2017-8743

### 图书在版编目 ( CIP ) 数据

机器人感知: 因子图在 SLAM 中的应用 / (美) 弗兰克·德尔阿特 (Frank Dellaert), (美) 迈克尔·克斯 (Michael Kaess) 著; 刘富强, 董靖译. —北京: 电子工业出版社, 2018.10

书名原文: Factor Graphs for Robot Perception

ISBN 978-7-121-33811-3

I. ①机…II. ①弗…②迈…③刘…④董…III. ①智能机器人—感知—研究 IV. ①TP242.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 042928 号

策划编辑: 郑柳洁

责任编辑: 白涛

印刷: 北京季蜂印刷有限公司

装订: 北京季蜂印刷有限公司

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: 720×1000 1/16 印张: 10.25 字数: 167 千字 彩插: 4

版次: 2018 年 10 月第 1 版

印次: 2018 年 11 月第 2 次印刷

定价: 59.00 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](mailto:zltz@phei.com.cn), 盗版侵权举报请发邮件至 [dbqq@phei.com.cn](mailto:dbqq@phei.com.cn)。

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

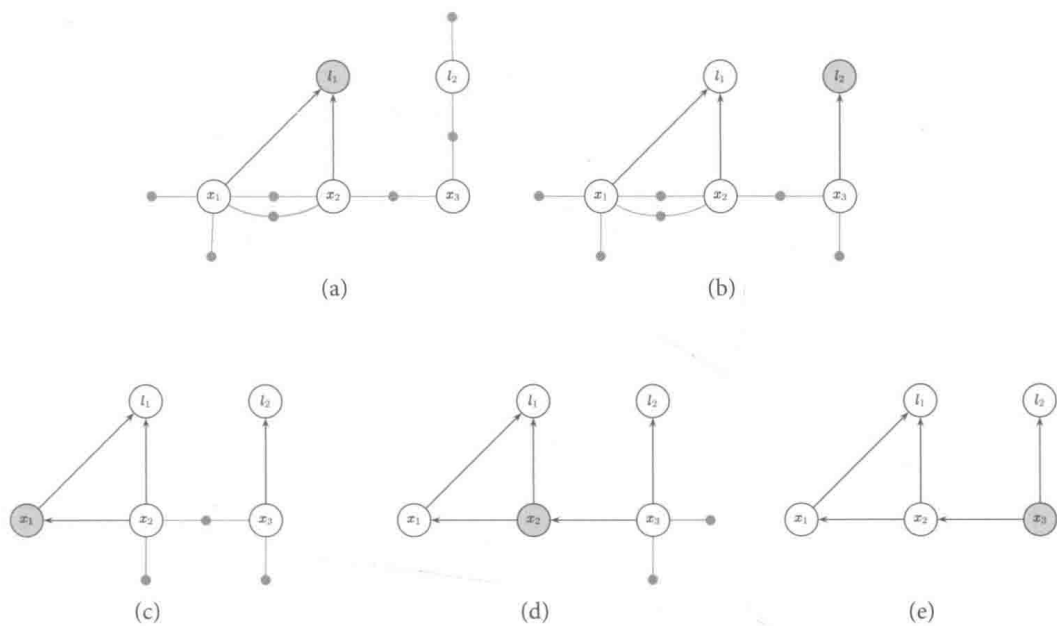


图 3-5

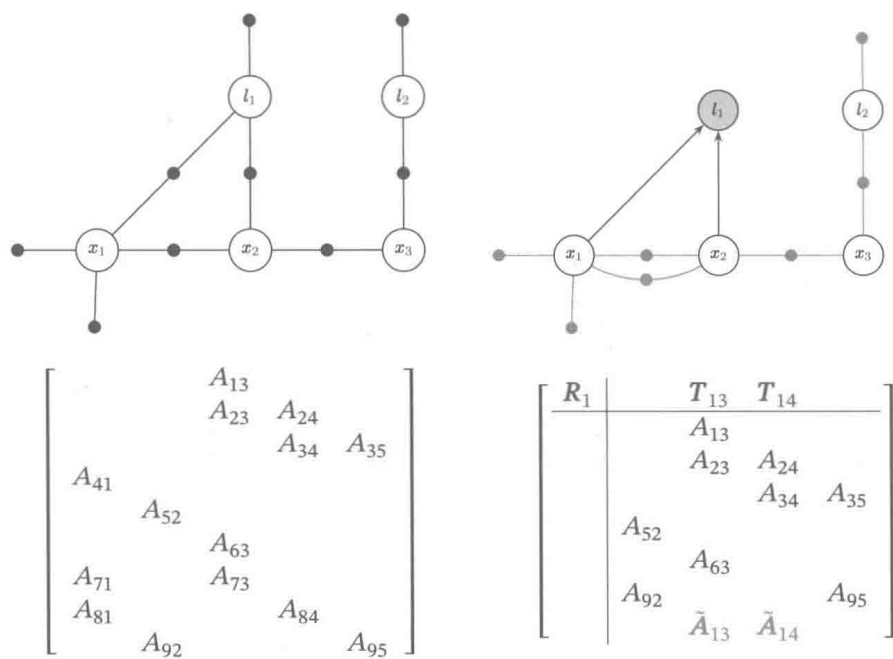
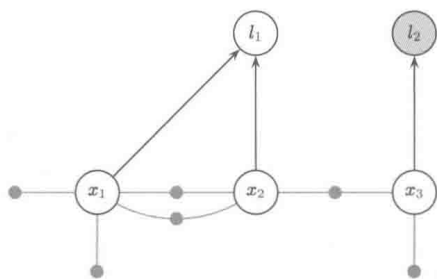
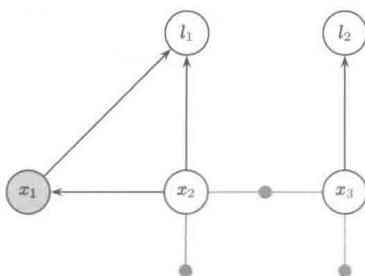


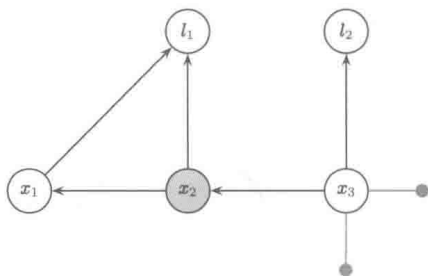
图 3-6



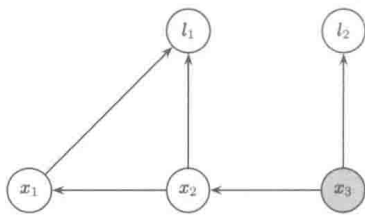
$$\left[ \begin{array}{cc|cc} \mathbf{R}_1 & & T_{13} & T_{14} \\ & \mathbf{R}_2 & & T_{25} \\ \hline & & A_{13} & \\ & & A_{23} & A_{24} \\ & & & A_{34} & A_{35} \\ & & A_{63} & & \\ \tilde{\mathbf{A}}_{13} & & \tilde{\mathbf{A}}_{14} & & \\ & & & & \tilde{\mathbf{A}}_{25} \end{array} \right]$$



$$\left[ \begin{array}{ccc|cc} \mathbf{R}_1 & & T_{13} & T_{14} & \\ & \mathbf{R}_2 & & T_{25} & \\ & & \mathbf{R}_3 & T_{34} & \\ \hline & & & A_{34} & A_{35} \\ & & & \tilde{\mathbf{A}}_{25} & \\ & & & \tilde{\mathbf{A}}_{34} & \end{array} \right]$$

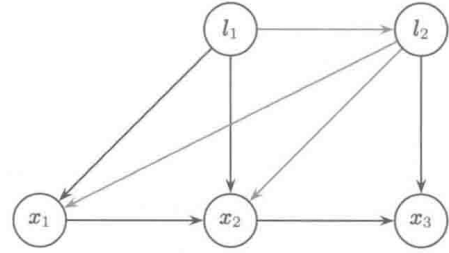
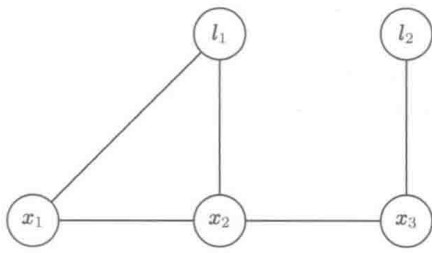


$$\left[ \begin{array}{ccc|cc} \mathbf{R}_1 & & T_{13} & T_{14} & \\ & \mathbf{R}_2 & & T_{25} & \\ & & \mathbf{R}_3 & T_{34} & \\ & & & \mathbf{R}_4 & T_{45} \\ \hline & & & & \tilde{\mathbf{A}}_{25} \\ & & & & \tilde{\mathbf{A}}_{45} \end{array} \right]$$



$$\left[ \begin{array}{cccc|c} \mathbf{R}_1 & & T_{13} & T_{14} & \\ & \mathbf{R}_2 & & T_{25} & \\ & & \mathbf{R}_3 & T_{34} & \\ & & & \mathbf{R}_4 & T_{45} \\ & & & & \mathbf{R}_5 \end{array} \right]$$

图 3-7



$$\begin{bmatrix} \Lambda_{11} & \Lambda_{12} & \Lambda_{13} & \Lambda_{14} & \Lambda_{15} \\ \Lambda_{21} & \Lambda_{22} & \Lambda_{23} & & \Lambda_{25} \\ & \Lambda_{32} & \Lambda_{33} & & \Lambda_{35} \\ \Lambda_{41} & & \Lambda_{43} & \Lambda_{44} & \\ & \Lambda_{52} & \Lambda_{53} & & \Lambda_{55} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{R}_1 & & & & \\ & T_{12} & & & \\ & & \mathbf{R}_2 & & \\ & & & T_{23} & \\ & & & & \mathbf{R}_3 \\ & & & & & T_{34} \\ & & & & & & \mathbf{R}_4 \\ & & & & & & & T_{45} \\ & & & & & & & & \mathbf{R}_5 \end{bmatrix}$$

图 4-3

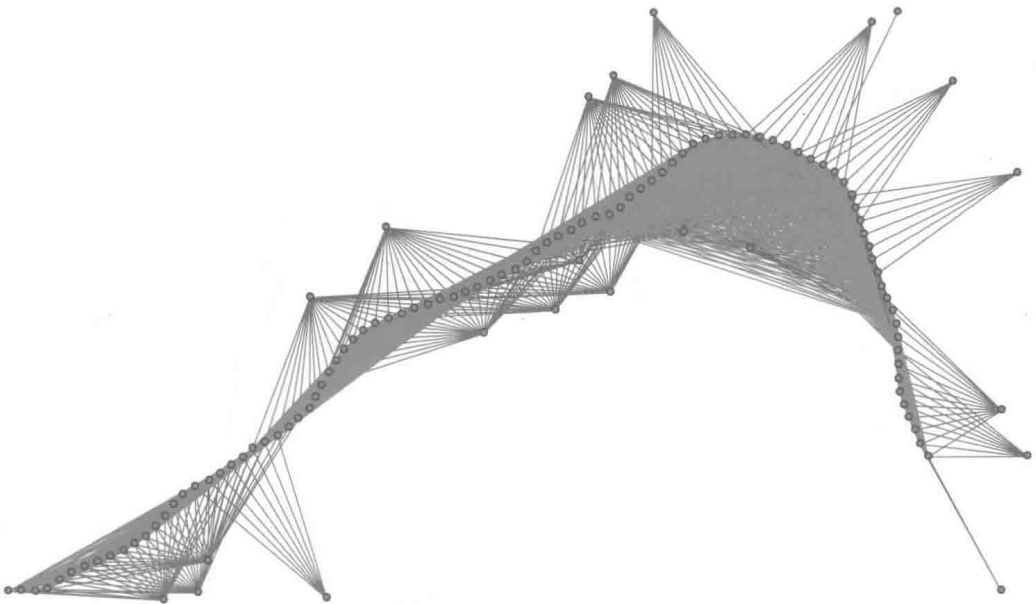


图 4-4

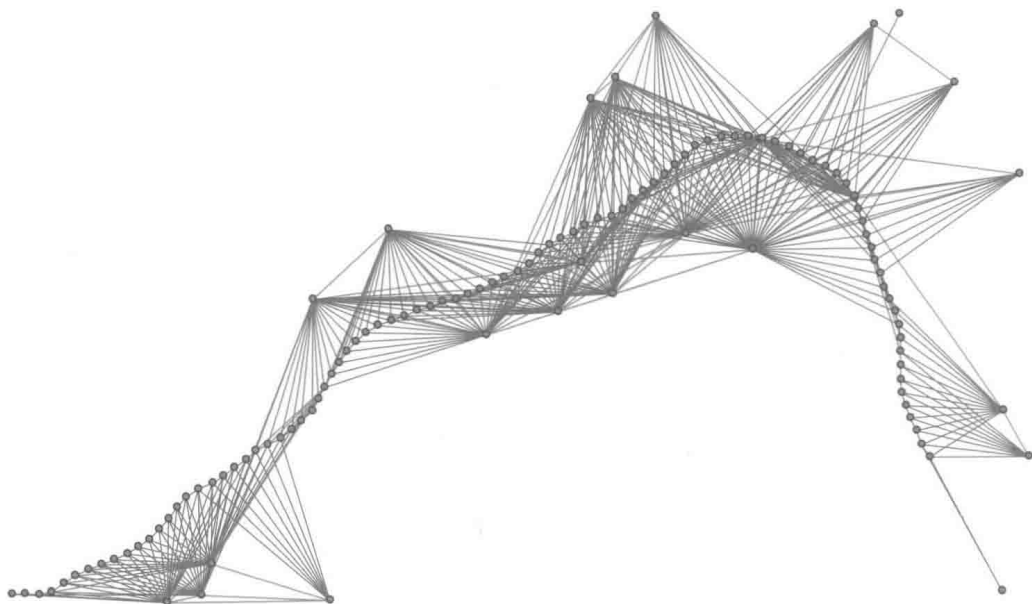


图 4-5

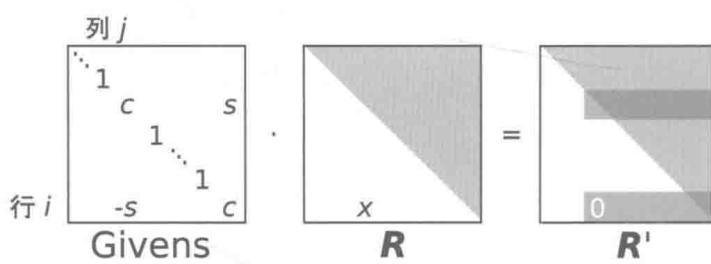


图 5-2

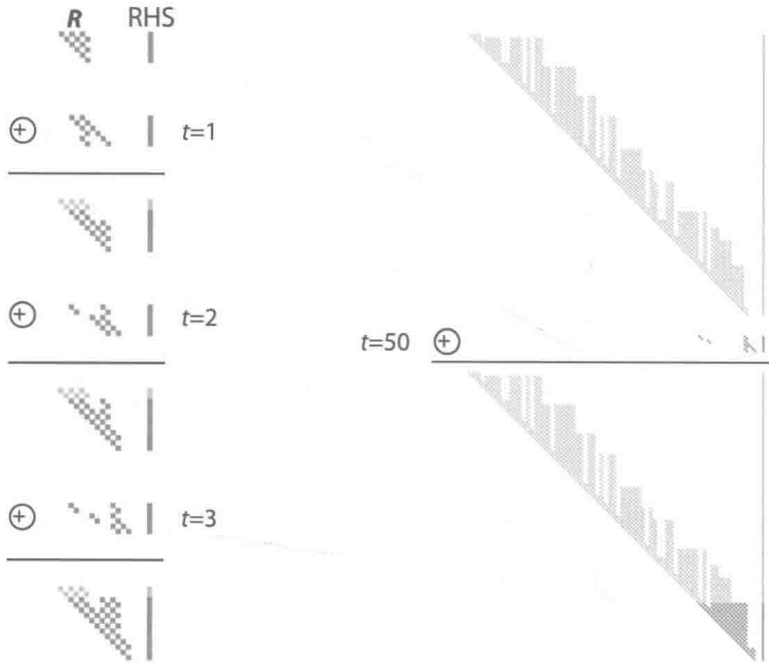
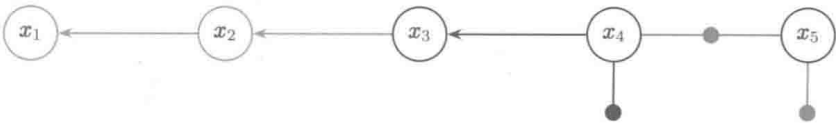


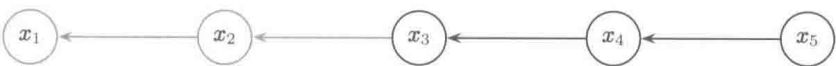
图 5-3



(a) 有 4 个观测量，被完全消元的贝叶斯网络。在一个  $n = 3$  的固定滞后平滑滤波中，我们“忘记”位姿  $x_1$ ，在图中表现为灰色。这在数学上等价于边缘化过程



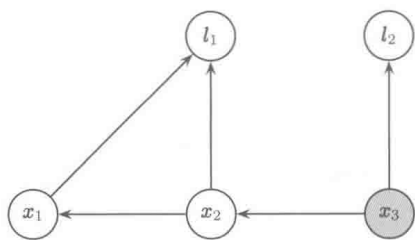
(b) 在下一步，通过运动模型因子预测了新的位姿  $x_5$ ，并且通过一个新的一元因子进行观测，两个因子都被标为红色。我们也将位姿  $x_4$  上的概率密度转换回一元因子，并标为黑色



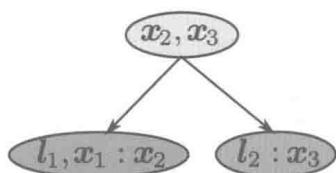
(c) 先将  $x_4$  和  $x_5$  按顺序消元后，我们又得到了一个完全消元的贝叶斯网络。在线性情况下，我们并不需要重新对  $x_3$  消元，也可以得到同样的结果

图 5-4





(a) 弦贝叶斯网络



(b) 贝叶斯树

$$R = \begin{matrix} & l_1 & l_2 & x_1 & x_2 & x_3 \\ \begin{matrix} \text{X} & & & & & \\ & \text{X} & & & & \\ & & \text{X} & & & \\ & & & \text{X} & & \\ & & & & \text{X} & \\ & & & & & \text{X} \end{matrix} \end{matrix}$$

(c) 平方根信息矩阵

图 5-5

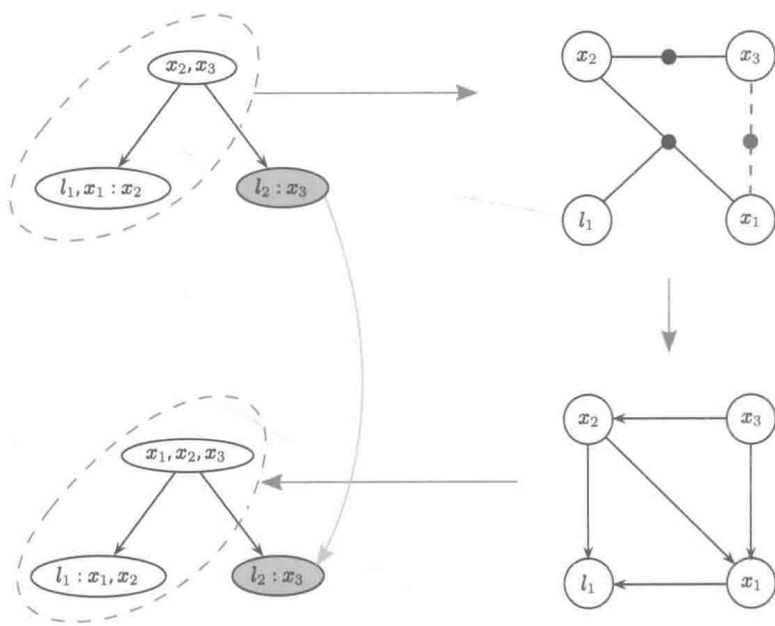


图 5-6

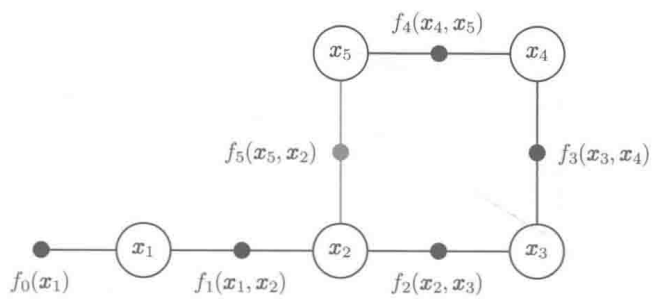


图 6-2

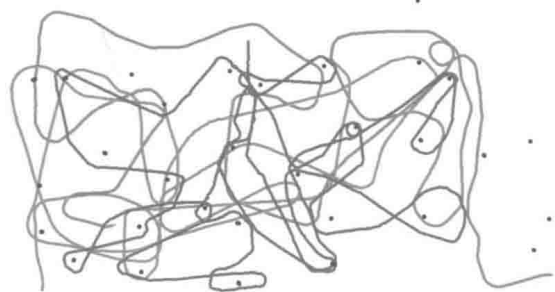
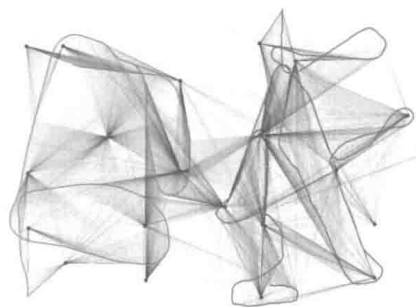


图 7-9



图 7-10

# 好评袭来

---

Factor graphs provide a framework for thinking about perception and sensor fusion problems in both Robotics and Computer Vision. We wrote this article to provide a tutorial introduction to factor graphs and how insight in their (sparse) structure leads to efficient sensor fusion algorithms. In addition, we survey several applications in which factor graphs have been used with great success to enable autonomy on the road, in the air, and even underwater. We could not be happier that a Chinese translation of our text will now be available and enable many more people to discover and use factor graphs in their own robotics projects.

Frank & Michael

近年来增强现实和自动驾驶异常火热，其中的关键技术 SLAM 也因而备受关注。SLAM 里的一个核心问题是如何对设备的位姿和构建的地图进行高效优化，而基于因子图的优化是其中常用的方法。本书的作者 Frank Dellaert 和 Michael Kaess 在 SLAM 领域的造诣非常深厚，此书是他们师生二人多年来在因子图上的研究成果的汇集和整理，讲解系统深入，翻译也很到位，是一本非常好的 SLAM 方面的书籍。

浙江大学  
章国锋教授

“Factor Graphs for Robot Perception” has been meticulously translated by two experts on SLAM technology, Fuqiang Liu of Harbin Engineering University and Jing Dong of the Georgia Institute of Technology. Fuqiang Liu is the founder of the world’s largest think tank on SLAM technology, where he regularly leads SLAM discussions in both English and Chinese. Jing Dong is currently conducting SLAM research led by one of the book’s original English authors, Dr. Frank Dellaert. I highly recommend this translated version of “Factor Graphs for Robot Perception”.

MIT  
Wanda

Frank Dellaert 与 Michael Kaess 是机器人行业大家，他们两位在机器人感知方向有多年经验及很深的理解。本书中，Frank 与 Michael 深入浅出地介绍了因子图数学定义、推断方法，以及真实环境中机器人上的各种应用。本书对于希望深入研究 SLAM 技术的专业人士很有帮助。对无人驾驶应用感兴趣的读者可以深入了解本书中关于因子图在惯性导航及地图构建方面的应用范例。

PerceptIn 创始人，《第一本无人驾驶技术书》作者  
刘少山

随着 ROS 操作系统的大范围普及，SLAM 这个在学界广泛探讨的话题逐渐褪去神秘面纱，呈现在公众视野中，但是其复杂性往往令初学者望而却步。Frank Dellaert 和 Michael Kaess 两位大师是促成 SLAM 从经典卡尔曼滤波形式向图优化模型转变的关键人物。本书从因子图的角度出发，以深入浅出的直观概念阐述了图优化模型中的非线性优化算法、稀疏矩阵表示等问题，提供给初学者一把打开 SLAM 大门的金钥匙。译者以广博的知识和丰富的经验，将原文的内涵和精髓准确地表达出来，对于国内机器人领域的科技人员和相关从业人员都有非常巨大的帮助和推动作用。

国防科技大学  
王维博士

好评袭来

SLAM 是移动机器人应用中一项至关重要的技术，也是机器人领域一个经典而古老的问题，对此进行的研究已超过 30 年，可以说理论已趋于成熟。但在实际应用中，仍难免会遇到各种意想不到的问题。深入理解 SLAM 背后的数学原理，是分析、解决这些问题的必经之路。本书深入介绍了 SLAM 背后的诸多概率、优化方面的原理和算法，兼具理论和实践价值，值得一读。

百度资深研发工程师

刘浩敏

本书对 SLAM 算法相关的理论和数学基础工具有非常详细的讲解，通俗易懂，且覆盖全面，全书讲授的思路连贯并且具备很好的深度，非常适合对 SLAM 算法有一定基础，希望深入学习理论并开展研究工作的同学。整书翻译流畅，逻辑关系清晰，是值得阅读的佳作。

阿里巴巴天猫事业部互动技术专家

蒋佳忆

智能机器人时代的到来，离不开核心技术的支撑，而 SLAM 就是其中之一。它关系到机器人运动时“在哪里，去哪里，如何去”，是机器人运动智能的关键。本书聚焦的基于因子图对机器人位置和姿态及地图构建的高效优化有非常强的科研和应用价值。本书讲解系统深入，是 SLAM 领域难得的一本好书。

北京理工大学智能机器人研究所

孔祥战博士

# 译者序 1

---

《机器人感知：因子图在 SLAM 中的应用》译稿终于完成了。翻译一本书付出的劳动远远大于阅读一本书。在翻译的过程中，我反反复复阅读原版书籍及翻译版加起来不下 30 遍。当将终稿交给编辑时，心里还是满满的收获和兴奋。

2017 年 8 月 22 日中午 13:30，董靖在泡泡机器人微信群中分享了这本由他的老师 Frank Dellaert (GTSAM 的作者) 和 Michael Kaess (iSAM 的作者) 合写的书，我没有任何犹豫，当天就给 Frank 发了邮件，问他是否可以允许我来翻译这本书。Frank 非常热情地答应了，同时还推荐他的得意弟子董靖跟我一起翻译，并且说，相信我们可以合作得很好。

Frank Dellaert 是佐治亚理工学院的教授，Michael Kaess 从佐治亚理工学院毕业后，去麻省理工学院做了几年博士，目前在卡内基梅隆大学任职。两人都是 SLAM 界的大牛，他们的开源的 iSAM 和 GTSAM 利用因子图对位姿及地图进行高效优化。除了在 SLAM 领域，iSAM 和 GTSAM 在其他许多机器人领域也得到了非常广泛的应用，如机械臂路径规划、空间-时序重建、大规模三维场景重建等。

目前，市面上关于 SLAM 的书非常少。希望本书的出版能够为推动国内 SLAM 的研究贡献出一份力量。本书从 iSAM 和 GTSAM 所用到的理论基础出发，系统、完整地对其进行了介绍，相信大家读完本书后，会对基于因子图的优化有深入的理解。书中不仅有概率推断、贝叶斯网络、因子图、非线性优化、流形及在其上的优化、贝叶斯树、QR 分解、乔里斯基分解、边缘化 (Marginalization) 等基础知识的讲解，还有增量平滑与地图构建 (iSAM) 的

理论基础的讲解，同时第 7 章还专门介绍了因子图在机器人领域的各种应用案例。

真正理解这本书的一般性内容需要花一些时间，融会贯通则更需要下功夫。在品尝主食（本书）的同时，我们为大家推荐 3 个配菜。

1. 源码：iSAM 及 GTSAM 的代码均已开源，在看书的过程中，可以配合源码一起看，这样能够更好地理解本书的理论内容。
2. 在【泡泡机器人 SLAM】(ID: paopaorobot\_slam) 微信公众号上面，搜索董靖讲解的“GTSAM Tutorial”公开课，可以帮助你快速了解 GTSAM 的整体框架和应用。
3. 在泡泡论坛 (<http://paopaorobot.org>) 上进行交流。在看书过程中遇到的任何问题都可以在论坛上提问，只有互相交流才能更好地理解书上的内容。

与董靖合作翻译的过程非常愉快，他是本书作者之一 Frank 的弟子，对于本书的内容非常熟悉，我们经常高密度地对有疑问的内容进行讨论，在这个过程中，他也给了我非常多的启发。

在本书的翻译过程中，我得到了很多人的帮助和支持。首先要感谢电子工业出版社的郑柳洁女士及白涛老师，没有你们就没有这本书的面世。郑编辑也为我们处理了所有翻译之外的事情，让我们能不受干扰地完成这本书的翻译。感谢泡泡机器人学术组织的章国锋老师、黄山老师，以及周平、蔡育展、鲁涛、刘畅、王慧国、陈世浪等同学的反馈意见。

在这里，我想把这本书送给我的妻子李明晓，遇到你是我这辈子最大的幸运，你的境界、心态和思想都深深地影响着我，让我变得更加成熟稳重。有你的地方就是家，就是可以栖息的港湾。我爱你。同时，也将此书献给我的女儿刘天琦，爸爸希望你能够有天地般宽广的胸怀，同时能够一生都对所有事物保持好奇心，做一个快乐的科学家。还有我的奶奶、爸爸妈妈、岳父岳母。我之所以可以活得这么快乐简单，后面是你们的负重前行，谢谢你们。感谢麻省理工学院的 Wanda，与她的每次交流都让我受益匪浅，从她的身上我学到了非常多好的习惯。感谢我的老师王宗义教授在我读博期间对我的言传身教，他让我体会到了做实业的快乐和成就感，也让我养成了良好的科研习惯。



严复翻译《天演论》时，在译例言中讲到：“译事三难：信、达、雅”。“信”是指翻译要准确，“达”是指不拘泥于原文，“雅”是指语句要得体适当。我们尽了自己最大的努力保证翻译的“信”，同时期望可以达到“达”和“雅”的境界。尽管如此，限于译者水平，译文的缺点和错误在所难免，诚恳地希望读者批评指正。

刘富强