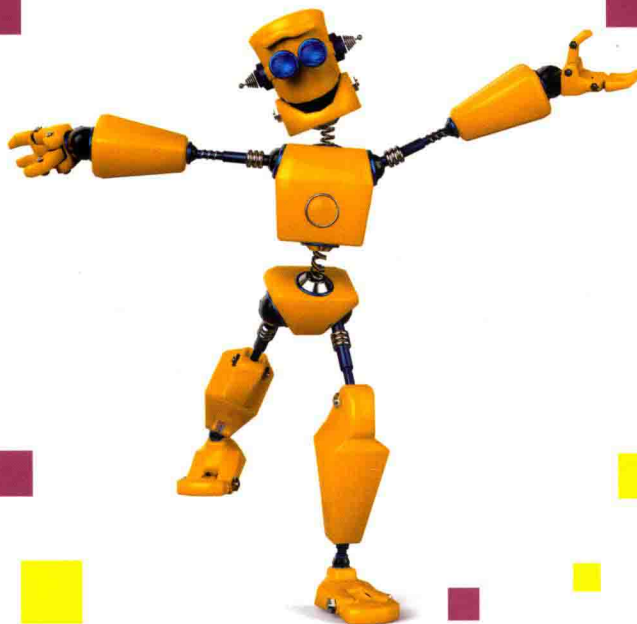




仿人机器人

原理与实战

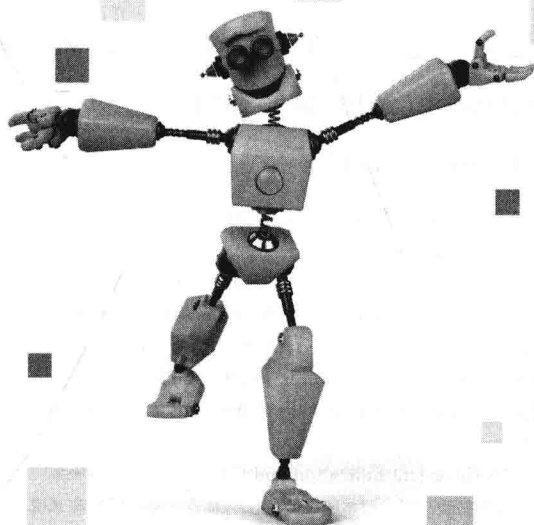
Androids
Build Your Own Lifelike Robots

[美] 布莱恩·伯杰伦 (Bryan Bergeron) 托马斯 B. 塔尔博特 (Thomas B. Talbot) 著

王伟 魏洪兴 刘斐 译



机械工业出版社
China Machine Press



仿人机器人 原理与实战

Androids

Build Your Own Lifelike Robots

[美] 布莱恩·伯杰伦 (Bryan Bergeron) 托马斯 B. 塔尔博特 (Thomas B. Talbot) 著
王伟 魏洪兴 刘斐 译



机械工业出版社
China Machine Press

图书在版编目 (CIP) 数据

仿人机器人原理与实战 / (美) 伯杰伦 (Bergeron, B.), (美) 塔尔博特 (Talbot, T. B.) 著; 王伟, 魏洪兴, 刘斐译. —北京: 机械工业出版社, 2015.6

(机器人设计与制作系列)

书名原文: Androids: Build Your Own Lifelike Robots

ISBN 978-7-111-50339-2

I. 仿… II. ①伯… ②塔… ③王… ④魏… ⑤刘… III. 智能机器人—研究 IV. TP242

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 111873 号

本书版权登记号: 图字: 01-2014-4756

Bryan Bergeron, Thomas B. Talbot: Androids: Build Your Own Lifelike Robots (0-07-181404-3).

Copyright © 2014 by McGraw-Hill Education.

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced or transmitted in any form or by any means, electronic or mechanical, including without limitation photocopying, recording, taping, or any database, information or retrieval system, without the prior written permission of the publisher.

This authorized Chinese translation edition is jointly published by McGraw-Hill Education and China Machine Press. This edition is authorized for sale in the People's Republic of China only, excluding Hong Kong, Macao SAR and Taiwan.

Copyright © 2015 by McGraw-Hill Education and China Machine Press.

版权所有。未经出版人事先书面许可, 对本出版物的任何部分不得以任何方式或途径复制或传播, 包括但不限于复印、录制、录音, 或通过任何数据库、信息或可检索的系统。

本授权中文简体字翻译版由麦格劳-希尔(亚洲)教育出版公司和机械工业出版社合作出版。此版本经授权仅限在中华人民共和国境内(不包括香港特别行政区、澳门特别行政区和台湾)销售。

版权 © 2015 由麦格劳-希尔(亚洲)教育出版公司与机械工业出版社所有。

本书封面贴有 McGraw-Hill Education 公司防伪标签, 无标签者不得销售。

仿人机器人 (Android) 是一种模仿人类的服务机器人, 具有丰富的交互功能。本书以生物学原理为基础, 从机械结构、硬件电路和软件编程等方面, 通过不同主题的实验展示如何将交互性恰当地设计和表达出来, 内容包括: 反射弧, 行为链, 动态平衡, 光与视觉, 耳朵, 心肺功能, 循环系统, 肌肉、心跳与年龄, 以及机器人的情感与表达。本书适合开发教育或娱乐机器人产品的工程师学习借鉴, 同时也可作为高等院校机械、自动化、电子和计算机等专业高年级本科生的参考读物。

仿人机器人原理与实战

出版发行: 机械工业出版社 (北京市西城区百万庄大街 22 号 邮政编码: 100037)

责任编辑: 曲 熠

责任校对: 殷 虹

印 刷: 北京市荣盛彩色印刷有限公司

版 次: 2015 年 6 月第 1 版第 1 次印刷

开 本: 186mm × 240mm 1/16

印 张: 16.25

书 号: ISBN 978-7-111-50339-2

定 价: 69.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

客服热线: (010) 88379426 88361066

投稿热线: (010) 88379604

购书热线: (010) 68326294 88379649 68995259

读者信箱: hzit@hzbook.com

版权所有 · 侵权必究

封底无防伪标均为盗版

本书法律顾问: 北京大成律师事务所 韩光 / 邹晓东

译者序

机器人是 21 世纪目前这 15 年中最热门的词语之一，也是人类知识领域和经济领域备受关注的热点话题。机器人是一种可编程的机械电子设备，可以帮助人类完成重复、危险的作业任务，甚至为人类提供生活服务。随着硬件成本的降低和移动互联网技术的普及，各种用途的机器人进入千家万户的可能性越来越大。在不远的将来，许多家用电器的功能可能被家用服务机器人所替代。仿人机器人（Android）是一种特殊的模仿人类本身的服务机器人，其主要技术特征在于具有较丰富的交互功能。如何将这种交互性恰当地设计和表达出来是仿人机器人研究要解决的关键问题之一，也是本书的主旨。

本书在介绍仿人机器人制作方面别出心裁，文笔风趣生动，令人耳目一新。本书包括 9 章，每章设置一个主题，包括仿人机器人的机械结构、硬件电路和软件编程等内容，指导读者逐步完成相应主题的仿人机器人制作。每一章中，作者首先讲述相关生物学基础知识，接着提出仿人机器人的设计要点，然后设计入门实验和进阶实验，给出硬件组成和重要的 Arduino 源代码，之后指出实验中可能存在的技术问题，最后为读者提供相关搜索关键词。书中列出了较多具体的硬件型号，在国内一般可以采购到类似的硬件。但读者不必受具体器件型号的限制，可以大胆利用等效器件或方案实现仿人机器人的功能。

本书的付梓得益于翻译团队每位成员高昂的工作热情与细致的工作态度。翻译工作由北京航空航天大学王伟老师统一负责和最终统稿，魏洪兴教授和负超教授为我们提供了大量技术指导，刘斐翻译了部分章节，参与初稿翻译的人员还有北京航空航天大学机械工程及自动化学院的魏来、唐嘉琪、崔文君等。同时感谢机械工业出版社的编辑给予我们的支持和理解。

尽管译者认真严谨，但受限于自身水平，本书难免存在疏漏之处。恳请各位读者批评指正，欢迎通过邮箱反馈：jwwx@163.com。最后，真诚期望本书为大家设计和制作仿人机器人提供帮助！

译者

2015 年 4 月

于北京航空航天大学机器人研究所

前 言

本书以人体为讨论对象，采用一种独特而有趣的视角来学习嵌入式系统、机器人学和电子学。诚然，爬行机器人和地毯清洁机器人是非常酷的实验平台，但是它们多半是冷冰冰的、毫无生气的机器。反之，人类拥有复杂的神经反射，包括根据压力调节心跳频率和根据环境光线强度调节瞳孔大小等。如果你想迈出制造更接近人类的机器人的第一步，那么本书是你的不二选择。

首先，本书的灵感一部分来源于科幻作家所描绘的影像，一部分来源于我们开发救生用人工智能系统的经验。如果你已经看过《银翼杀手》《太空堡垒卡拉狄加》《异形》《终结者》《普罗米修斯》或《神秘博士》，那么就不能将机器人的最高水平简单地等同于一个会思考的罐头盒，而忽略它的智能。在这些或者其他科幻经典中塑造的仿人机器人不仅可以通过图灵测试，而且在生理学上是正确的——它们能够跟我们一样呼吸、流血和出汗。因此，如果不做外科手术式的深究，那么这些仿人机器人与人类实在难以区分。

其次，本书的灵感中更急迫和更实际的部分来源于仿人替代品，这种替代品可以用来训练健康监护人员以挽救和护理真实的病人。然而在开发这些替代品的过程中获得的经验是，我们离这个目标还有很大差距。现有的这些系统除了多了几个传感器外，跟街边玻璃柜子里的人体模特没有多大区别。我们现在需要的是一群充满渴望与热情的工程师、实验师和发明家，一起创造下一代仿人替代品。希望本书能使你迈出探索旅程的第一步，即使你的终极目标是创造一个配得上“银翼杀手”称号的仿人机器人，你也应该坚持读完本书。设计一种有利于拯救生命的人工智能系统是个不错的开端。

在编写本书的过程中，我们做了以下几个假设：

- ❑ 你已经阅读了一些有关电子学的入门书籍。
- ❑ 你已经对某种流行的微控制器做过编程，特别是 Arduino。
- ❑ 你已经通过操作机器人装置或者学习网站 / 杂志上的文章获得了一些有关构建机器人的基本经验。
- ❑ 你已经了解电气安全知识并且在实际操作中遵守这些规则。

- ❑ 你拥有并使用保护眼睛的装置（如果碰巧有个线头飞进你的眼睛，那么在仿生植入技术获得突破前，你的视力可能会永久损伤）。
- ❑ 你拥有自然且强烈的好奇心。

学习目标

我们竭尽全力确保你读完本书后可以获得以下技能：

- ❑ 加深对人工智能系统的理解。每一章中的项目都有助于你在生物机能方面获得全新的体验。
- ❑ 进一步理解如何利用微控制器、传感器和驱动器等组件对人体系统进行建模和仿真。
- ❑ 帮助你将在嵌入式系统应用到本书以外的人工智能系统中。人体是一部相当复杂的机器，内部成千上万个子系统互相连接，作为本书实例再恰当不过了。
- ❑ 帮助你在设计和建造人工智能系统时考虑得更加周全。也许你将会花费数千元购买那些与实物几乎一模一样的道具，但最为关键的是在探索旅程中对机器人内部原理的理解。本书并不是要建造一个《太空堡垒卡拉狄加》的6号克隆品，其实这将是我们将下一本书关注的核心内容。

本书结构

本书是按照系统来组织和布局各章节内容的，从而逐步提高项目的复杂度。你可以随意跳转到自己感兴趣的项目，但是仍然有必要略读该项目之前的章节。前面章节设计的项目是为了更好地支持后续章节中更高级的项目。

各章的组织框架如下：

- ❑ **生物学基础** 描述各章内容涉及的生物学基础理论。
- ❑ **与仿人机器人设计的关系** 描述如何将生物学转换到仿人机器人系统设计。
- ❑ **实验入门** 描述如何利用电路、Arduino、源代码和传感器亲自动手做实验。
- ❑ **实验进阶** 描述如何从基础实验的启发中获得更多知识。
- ❑ **“小魔怪”** 描述各章的共性问题和注意事项。
- ❑ **搜索关键词** 读者可以在搜索引擎中搜索自己感兴趣的关键词，扩大知识面。

第1章 反射弧

利用一对舵机、几个传感器和一个 Arduino 微控制器来探索反射弧的基本概念。首先利

用这些电路资源仿真一个神经反射单元——反射弧，之后你就可以获得许多反射模板，并将这些模板扩展和应用到仿人机器人设计中。

第2章 行为链

以第1章内容为基础，探索行为链以及行为链如何形成仿生的多样性，利用五自由度机械臂、热传感器、光传感器和几个LED，阐述如何建造一个自主且具有可预知行为的机器人。

第3章 动态平衡

利用Arduino、温度传感器和加热源来探索热平衡与相关基本控制理论。我们将应用Arduino的PID库，以便将焦点放在控制理论的应用上，而不是简单地重复执行。

第4章 光与视觉

主要研究光传感器，为仿人机器人增加一定程度的视觉功能。我们将创建一双具备可变瞳孔的人造眼，并能够随时盯着光源。这样，仿人机器人就会拥有一张能够与人交流的活生生的脸。

第5章 耳朵

探索声音定位，并模拟追踪声源时的眼睛和头部运动。我们还将使用定向和全向麦克风、硅胶耳朵、被动式红外传感器、舵机控制转台、Arduino微控制器和高性能的ChipKit Arduino等器材。

第6章 心肺功能

探索声音和触觉反馈以及仿人的心音与肺音。我们将使用MP3扩展板、Arduino微控制器、几个霍尔效应传感器和用来产生理想热源和呼吸音的表面换能器。我们也将探索如何使声音对内部或外部环境中的行为触发器做出反应。

第7章 如果仿人机器人流血了，我们能止血吗

学习如何为仿人机器人增加一套具备脉冲功能的循环系统。我们将使用流体泵、压力传感器和Arduino脉冲监视器扩展板来生成脉冲压力波，为各器官提供逼真的脉冲，从而使机器人对外部和内部条件变化做出反应。该章内容需要使用第3章开发的系统。

第8章 只是时间问题

你是否发现很多机器人开发者都忽视了对年龄和衰老的模拟？该章将阐述这个共性问

题，探索生物系统为什么会衰老，更重要的是在智能系统中如何模拟恰当的行为。我们需要用到第 2 章和第 6 章中的系统。

第 9 章 情感与表达

探索制造具有表达能力的机器人的几种可行方法，这将是非常有趣的。我们会用到 EMIC-2 文本-语音模块、一组 8×8 双色 LED 矩阵和一些多色 LED 来创建一个可以说话和表达的机器人头部。

附录 相关资源

提供了有关传感器、驱动器和 Arduino 兼容硬件的一系列清单，当然也包括一些参考网站。

可下载的代码

完整的代码可以从 www.mhprofessional.com/Androids 找到。

有关硬件的说明

我们尽量将各章中的项目设计得简单可行。尽管这些项目多数都采用 Arduino Uno 或等效微控制器，但是如果你手头已经有 Arduino Leonardo、Mega 或者 80MHz ChipKit Uno32，那么这些也是可行的。类似地，尽管我们列出了许多特定品牌的扩展板、传感器和输出设备，但是如果你已经拥有同类产品，那就没有必要购买了。例如，尽管我们在第 2 章中使用标准 Lynxmotion 机器人手臂，但你当然可以购买舵机等零件，还可 DIY 机器人所需的夹具。

样机套件同样如此。如果你教授一个班级的课程且准备时间很短，那么你应该考虑各种各样现有的样机套件和设备。我们在一些项目中采用 Grove 平台，当然其他同类或者更高级的平台也是可行的。

最后，在设计这些项目的过程中，我们没有接受任何赞助商的支持或者资金资助，我们是通过零售渠道购买实验器材的。唯一例外的是第 9 章中的机器人身体部分是从美国军方远程医疗和高新技术研究中心 (TATRC) 借用的。

目 录

译者序

前言

第 1 章 反射弧..... 1

- 1.1 反射弧生物学基础 1
- 1.2 反射弧与仿人机器人设计..... 6
- 1.3 反射弧实验入门 7
- 1.4 反射弧实验进阶 12
- 1.5 反射弧“小魔怪” 31
- 1.6 反射弧搜索关键词 32

第 2 章 行为链..... 33

- 2.1 行为链生物学基础 33
- 2.2 行为链与仿人机器人设计..... 36
- 2.3 行为链实验入门 37
- 2.4 行为链实验进阶 46
- 2.5 行为链“小魔怪” 53
- 2.6 行为链搜索关键词 54

第 3 章 动态平衡..... 55

- 3.1 动态平衡生物学基础 55
- 3.2 动态平衡与仿人机器人设计..... 58
- 3.3 热平衡模拟器 65
- 3.4 热平衡实验进阶 72
- 3.5 附加项目：电加热板的 PID 控制 77

3.6 热平衡“小魔怪” 79

3.7 动态平衡搜索关键词 80

第 4 章 光与视觉..... 81

- 4.1 生物学基础与瞳孔光反射..... 81
- 4.2 光反射实验入门 82
- 4.3 创建动态的眼睛 86
- 4.4 一双活生生的眼睛 89
- 4.5 对光有反应的生动的眼睛..... 91
- 4.6 项目：Mark54 瞳孔检查模拟器 92
- 4.7 光线跟踪与目标检测 95
- 4.8 光线跟踪检查 95
- 4.9 小结..... 99

第 5 章 耳朵 102

- 5.1 耳朵生物学基础 102
- 5.2 耳朵与仿人机器人设计..... 107
- 5.3 声音定位实验入门 107
- 5.4 声音定位实验进阶 115
- 5.5 声音定位“小魔怪” 149
- 5.6 声音定位搜索关键词 149

第 6 章 心肺功能..... 150

- 6.1 心肺功能生物学基础 150
- 6.2 心肺功能与仿人机器人设计..... 153
- 6.3 心音模拟器 153

6.4 肺音模拟器	164
6.5 心音与肺音联合模拟器	168
6.6 心肺功能“小魔怪”	173
6.7 心肺功能搜索关键词	173

第7章 如果仿人机器人流血了，我们能止血吗

7.1 循环系统生物学基础	175
7.2 循环系统与仿人机器人设计	180
7.3 心脏脉冲模拟器	180
7.4 心脏脉冲模拟器进阶	186
7.5 与心音和肺音模拟器集成	190
7.6 循环系统“小魔怪”	193
7.7 循环系统搜索关键词	194

第8章 只是时间问题

8.1 肌肉力量与衰老问题	195
8.2 心跳恢复率与健康程度	205
8.3 年龄“小魔怪”	213
8.4 年龄搜索关键词	213

第9章 情感与表达

9.1 仿人机器人高仿真方法	215
9.2 仿人机器人低仿真方法	217
9.3 机器人的微笑	217
9.4 声音合成	222
9.5 EMIC-2 指令集	224
9.6 语音验证实验入门	225
9.7 利用 Epson 解析器表达声音	227
9.8 利用 DECTalk 解析器表达声音	228
9.9 构建会表达的仿人机器人	231
9.10 Tatrck 如何表达	236
9.11 实例 1：利用多彩眼睛打招呼	239
9.12 实例 2：做坏事的机器人	240
9.13 实例 3：困惑的小孩	240
9.14 实例 4：喝醉的机器人	241
9.15 实例 5：聪明的智者	242
9.16 实例 6：耐心的病人	242
9.17 小结	243

附录 相关资源

附录 相关资源	245
---------------	-----

第 1 章

反 射 弧

当你翻到这一页时，会不由自主地做稍许停留或阅读，部分原因是你产生了反射，即本能的半自主行为。大多数反射依赖于体内的神经元和脊髓，更多的脑部神经元用于完成阅读和思考人生、宇宙的答案等任务。因此，仿人机器人和一些半自主运载工具可以从反射中获益，从而释放珍贵的运算资源用于完成即时定位与地图构建（Simultaneous Localization And Mapping, SLAM）等高级任务。

在这一章中我们将借助一对舵机、几个传感器以及 Arduino 微控制器来一起探索一些基本反射。在连接好一系列电路之后，就完成了反射的基本生物单元——反射弧的仿真。之后，你就相当于拥有了一个反射库，可以“随心所欲”地在仿人机器人中进行扩展与应用。

1.1 反射弧生物学基础

当内部或外界事件发生时，体会反射过程似乎是一件困难的事，因为在某些事件发生之前，有些反射是没有被激活的。我们不妨援用下面的故事来解释这一过程。

1.1.1 猴子突袭

设想身处旧金山普雷西迪奥的你正漫步在桉树林中，此时，一只 75 磅的硕壮的猴子突然跳到你的背上。如果你姿势不错，那么你还能保持直立，然后把它从脖子上抓下来，在它戳你眼睛、咬你耳朵之前把它扔到地上。反之，如果此时你膝部弯曲，那么你会毫无悬念地摔倒在地，而猴子又将跳到你的胸口，没准儿你会因此呼吸困难，事情不太可能完美收场。

现在，我们一起设想，在遇袭的那一刻（即在意识到即将承受 75 磅附加重量之前），你的体内到底发生了哪些变化。由于剧烈的震动和摇晃，你的关节、脚底、肌肉、筋腱以及器官中无数的感受器被触发，从而产生了成千上万的反射。其中一些反射让腿部肌肉吸震以减小冲击，然后调动手臂和上身去躲避猴子，而不只是理性地保持身体平衡。

1.1.2 反射弧

为了更好地理解体内发生的变化，我们模拟身体内不同程度的反射，这些反射反映了从

肌肉中蛋白质折叠结构的微小改变到总体行为改变的不同形态。我们首先从神经、肌肉和感受器的层面考虑反射是如何发生的，具体地说，是研究右腿股四头肌肉的单个肌肉纺锤体感受器，即伸缩感受器。当你伸展股四头肌时，纺锤体感受器就被触发，且感受器触发速度随肌肉伸展速度的加快而加快。

当猴子突然跳到你的背上时，股四头肌被迅速拉伸，导致伸缩感受器快速触发，同时发出的电脉冲流会沿着神经纤维到达脊髓。信号穿过间隙传播到第二神经纤维，然后通过另外一个突触到达股四头肌的肌肉纤维。最终，股四头肌收缩，使人得以支撑猴子的重量。在股四头肌以及全身肌肉中，类似的牵张反射可以通过很多纺锤体纤维和肌肉纤维实现。

连接肌肉中感受器和脊髓的弧线或路径穿过间隙，回到肌肉纤维，我们称之为反射弧 (reflex arc)。图 1-1 呈现了牵张反射的组成原理，是一个简单的反射弧实例。注意，反射的一个基本特征是单向连接：从感受器单向到感觉纤维，再通过间隙或突触到达运动纤维，之后穿过肌肉神经结点最终传递到肌肉纤维。由肌肉纺锤体感受器传来的信号伴随肌肉的伸缩而改变，这也为牵张反射提供了反馈回路。

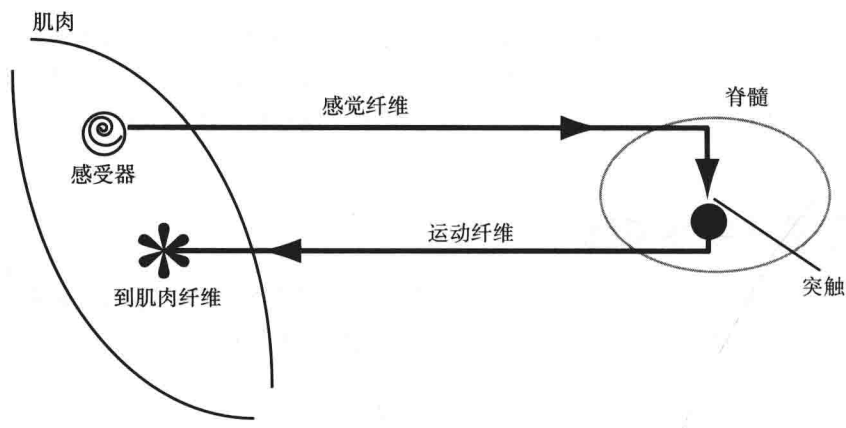


图 1-1 牵张反射的组成，一个简单的反射弧实例

当然，这只是突遇袭击时体内复杂反射过程的简化描述。除了股四头肌收缩，与股四头肌对立的肌肉，即大腿后部的腿筋也会有反射松弛，这样股四头肌无须克服腿筋来保持身体平衡。还有一种反射是基于肌腱的应力，它可以抑制过于迅猛的肌肉紧缩，从而避免撕扯连接肌肉和骨骼的肌腱。总而言之，多亏了我们体内数以千计的反射弧，你才幸运地躲过了猴子的袭击并且毫发无伤地活了下来。

感受器和与之相关的反射弧有不同的阈值。与数字电子系统类似，一旦感受器被触发，它会达到满振幅，脉冲流的速率可以反映感受器的激活程度。例如，如果是一只重约 6 盎司的小松鼠从远处向你飞来，而不再是一只 75 磅的胖猴子，那么被激活的纺锤体纤维感受器会相应地减少，同时发出低速率脉冲信号。最终，由于只有少量的肌肉纤维被轻微地激活，所以股四头肌会轻微收缩。

反射的另外一个特点是，它有一定的绝对不应期（absolute refractory period），或者说在触发后需要经过一定的时间才能再次触发（见图 1-2）。我们可以把这一阶段认为是感受器重启期。

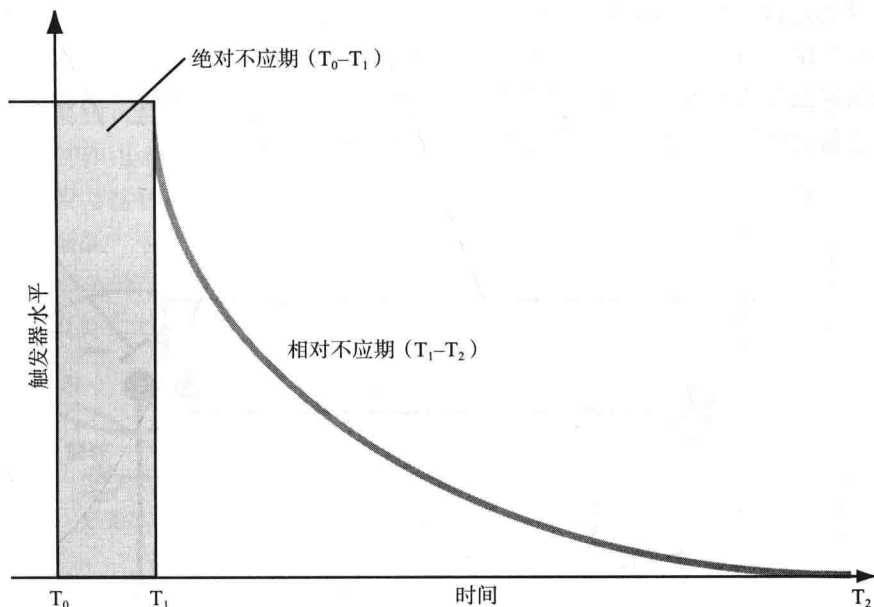


图 1-2 反射的绝对不应期和相对不应期

在绝对不应期中，感受器对刺激是不敏感的。随后，反射呈现出一个相对不应期（relative refractory period）。如图 1-2 所示，在绝对不应期之后，感受器的不敏感程度呈指数形式减弱。

1.1.3 疼痛与折磨

假设第二种情景，这时你正在工作台上组装仿人机器人的腿部样机。当你伸手去拿线性驱动器时，手背不小心碰触到电烙铁尖端最热的部分。于是，你的局部皮肤温度上升，热疼痛感受器（即伤害感受器，nociceptor）发送脉冲流，沿着纤维到达脊髓。在几毫秒内，信号穿过反射弧，包括脊髓的突触，并通往手臂和手的肌肉纤维的运动纤维。于是，你的手会从烙铁的尖端退缩回来。如果反射作用足够迅速，那你的皮肤可能只是轻微红肿，可以继续工作并瞬间忘记这件小事。反之，如果你在闻到皮肤烤焦的味道之后才慢慢把手挪开，那么不仅会严重烧伤、感染，还会留下令人讨厌的疤痕。

假设这一情景的目的除了提醒你将注意力集中到眼下的工作上以外，更重要的是说明反射行为的速度远大于刻意行为的速度。刻意的控制行为可能涉及各种信号，它们在大脑中需要穿过成百上千的连接点或神经突触（neural synapse），而反射弧只涉及一对局部神经元，所以刻意控制行为要缓慢得多。比如，如果只有在昆虫或污垢碰到睫毛之后你才会下意识地眨

眼睛，毫无疑问，你早就失明了。

让我们继续研究反射弧的典型原理示意图，如图 1-3 所示，其中包含以下几个组成部分：在前臂皮肤中的热伤害感受器，由感受器到脊髓的传入纤维，以及一段由脊髓到手臂肌肉运动传出纤维的连接，传出纤维的终点是手臂和手上的肌肉纤维。事实上，还存在来自大脑的第三种神经纤维，当它被激活时，能抑制（inhibit）反射弧的行为。虽然在电烙铁情景中，这种有意识的抑制行为并没有发生（除非你有某种严重的生理问题），但是当你拿着一杯煮沸的咖啡时，它就会抑制反射弧，从而阻止你本能地把咖啡洒在膝上。

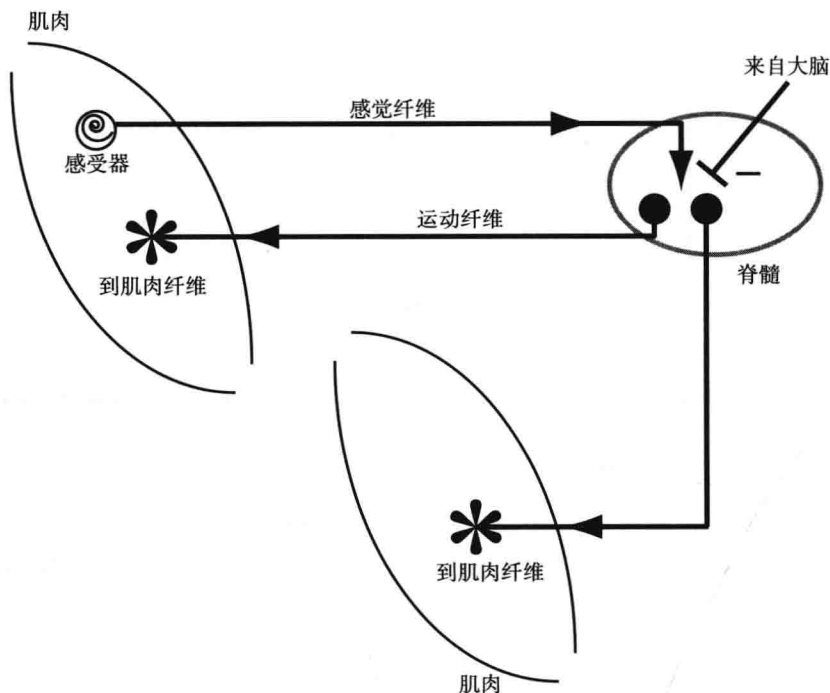


图 1-3 带多个突触和来自脑部的抑制连接的复杂反射弧原理图

疼痛能很好地反映出身体的某些地方出现了问题，为了避免受伤，它也暗示你应该采取一些措施或者停止某种错误的行为。一些伤害感受器根据刺激的强度做出反应，反之，其他伤害感受器在外界刺激到达某一限度时，就由关闭状态转换为触发状态。

与反射弧相连接的疼痛感受器的触发源包括极端的温度、压力、声音以及光亮。当然，有时候也会发生另外一种情况：由于来自大脑的抑制连接，你可能会战胜某些疼痛反射——例如，虽然腿部酸疼，但你仍然能依靠信念坚持跑完马拉松。但是与此同时，你也会发现有些反射是不能被意识所控制的——例如，在一阵风袭来或瞬间被强光照射时，你还是会不可避免地眨眼睛。

1.1.4 化学增压器

神经系统本质上是一个电化学信号处理器，受到数百种化学物质的调节和影响。在谈及反射时，我们有必要研究一种化学物质——肾上腺素，它是在人体经历某些刺激后，由肾上腺释放的激素。肾上腺素的作用比较复杂，而且对不同器官的影响也大相径庭。不过，总体上来说，它能暂时增强肌肉收缩力并增强忍耐力。

我们把多突触和抑制性反射这两个部分补充到反射弧原理示意图中，这样就可以进一步模拟肾上腺素的作用（见图 1-4）。一般电化学信号由大脑或感受器发出，最终传递到神经纤维，但肾上腺素与这些电化学信号不同，它不生成信号。事实上，它降低了触发感受器的阈值，而且当反射弧产生时，能最大限度地发挥肌肉的收缩潜能。我们用电子管或金属氧化物半导体场效应晶体管（MOSFET）做比喻，肾上腺素的作用如同控制栅极，用来改变系统的有效增益（或损失）。

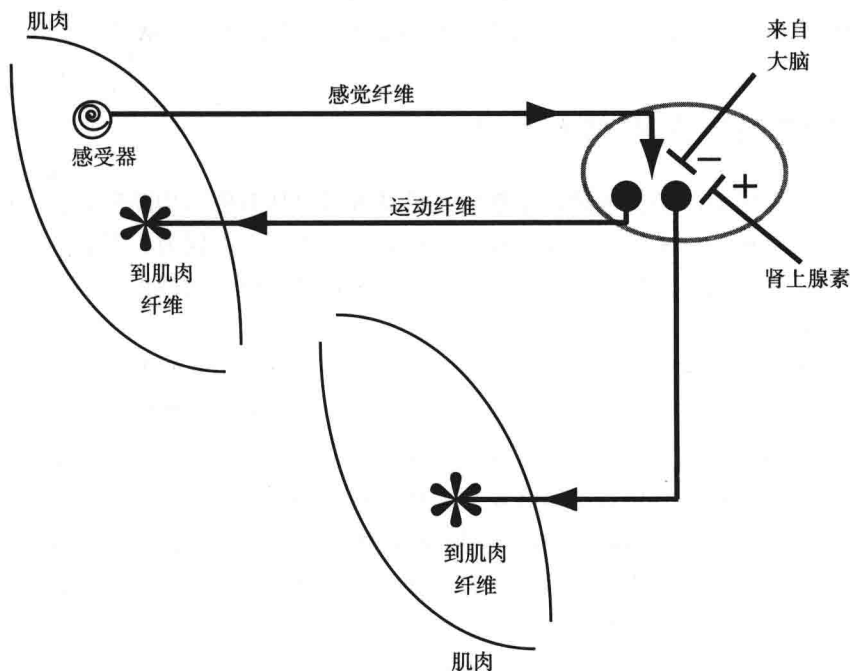


图 1-4 受肾上腺素影响的复杂反射原理图

为了研究肾上腺素在反射弧中的实际作用，让我们一起回顾猴子突袭的案例。如果你立刻把猴子扔到地上，并狂奔 100 码到达安全的地方，此时，当你回头看遇袭的地方时，才意识到只用了 12 秒就跑完全程——个人最好成绩。若考虑到你还穿着远足靴，这样的成绩的确相当不错。

你完全有能力达到这样优秀的成绩，因为分泌出的肾上腺素有效地增加了神经系统的压力，还影响了身体的其他机能，从心跳增加、血压上升到血液流动加快、肌肉营养增加。这

种作用在短时间内是可行的，但是希望依靠肾上腺素长期维持爆发力是不可能的，你不仅会更迅猛地消耗体能，还会有中风、心脏病发作的风险。这两点同样适用于仿人机器人，在达到仿人机器人设计极限的状态下，它不能长时间、不间断地运行。

1.1.5 性格

或许你会对自己说：“等下，大概是生来如此，我一定不会逃跑，我会站着与猴子战斗到底！”这样的情况是可能存在的。选择战斗而不是逃跑反映出你的总体性格。分泌出的肾上腺素既可以支撑你跑到另一个山坡，也可以给你力量让你站着和猴子战斗到底。

关键在于反射与性格大体一致。例如，如果你是一名训练有素的士兵，那么在听到巨大响声或看到瞬间强光时，正常来说，你应立刻准备就绪并保持进攻姿势。反过来说，如果你是一名性格内敛的图书管理员，那么在发生险情时，你更有可能做出一些防守型姿势。当然，还存在一些例外情况，例如精神病院和监狱里就有数不清的反例。在设计仿人机器人时，如何设计它的性格是值得考虑的。对于这一部分，我们将在第2章进一步讲解。

1.2 反射弧与仿人机器人设计

鉴于人类反射机制的各种优势，显然仿人机器人可以从类似的功能中获益。例如，将传感器和末端执行器的处理从主控制器转移到外设微处理器中，不仅为更复杂的工作腾出运算资源，也降低了灾难式单点故障发生的可能性。但是在设计仿人机器人时，还需要仔细考虑如何将这些优势与你的设计相匹配。

在设计仿人机器人的反射功能时，主要问题是带自主反射仿人机器人与其所处环境的隔离程度。为给这个话题添加一个有实际意义的上下文，想象搜索和救援仿人机器人在一个部分坍塌的矿井中搜索失踪人员的情景。现在，我们假设仿人机器人的振动感受器检测到一段高强度、低振幅的震动，意味着这里将要被掩埋。我们的仿人机器人是应该继续搜救，还是选择逃出矿井寻求保护呢？当然，我们没有办法说哪个选择是正确的，因为这取决于以下几个因素：还有多少仿人机器人仍在执行任务；找到幸存者的可能性；幸存者的价值（是否值得救援）；仿人机器人的相对成本。如果仿人机器人的成本只有100美元，那么应该继续搜救，但如果成本是10 000美元，那么应避免破坏仿人机器人——除非你刚好也陷在碎石里无法逃离。

另外一个核心问题是保证响应与反射能满足机器人的使用目的。例如，你的仿人机器人属于攻击型机器人，当侦查到潜在危险时，它会摆出进攻的架势，准备随时应对袭击。反之，如果这款仿人机器人的设计初衷只为家政服务，那么它的反应就应该是自卫型姿势。如果你要设计一个患抑郁症的机器人，就像Douglas Adams笔下的Marvin，那么它对任何事物的反应就显得既缓慢又慎重。

如何操控多个传感器共同完成一个反射动作，这个问题虽然低级但却关键。解决途径之

一是利用包容体系结构 (subsumption architecture)。在这种等级体系内,某些特定的传感器能否决或抑制其余的传感器。按照这个等级体系,你可以手动或自动地划分反射弧等级。例如,在设计仿人机器人时,假设你认为避免温度过高比避免机械过载的优先级高,那么温度传感器和相应的反射弧应优先于任何有关伺服载荷的传感器输入。

包容体系结构的限制之处在于,它不能很好地处理一些错综复杂的状况。设想,仿人机器人有 50 条反射弧,你应该怎样划分反射弧等级呢?以人体生理学为模型,假设一种荒唐的情景:一只蜜蜂蛰了你的腿,同时一只猴子跳到你背上。你会先拍死蜜蜂再处理猴子,还是反过来呢?即使你已经深思熟虑,确定了仿人机器人应有的反应,但正如无论哪种解决办法都不可能适用于任何状况一样,在微控制器中对反射弧等级使用固定编码也显得不太现实。

另外一种解决途径是传感器融合 (sensor fusion),它也可以处理那些由不同传感器发出的可能冲突的信号,简单来说就是将传感器发出的信号混合。事实上,有数百种途径可以实现融合,简单的方式就是直接计算信号平均值,较为复杂的方法是将数字信号滤波器应用于多传感器输出的信号。在面对复杂状况,例如当仿人机器人踩到香蕉皮开始摇晃时,传感器融合可能比包容体系结构表现得更好。经适当调试的传感器融合程序将相关传感器传来的信号按特定方式综合,通过这种方式,对涉及触发还是抑制反射的复杂问题给出一个有意义且实时的响应。

在了解以上基础理论后,我们就可以着手构建一些反射模拟器。首先,我们利用一套标准舵机、几个传感器和 Arduino Uno 微控制器构建基本的生理反射弧模拟器。在连接完成后,组成的多个回路可以直接应用于仿人机器人的设计,这也是构成复杂反射的基础。

1.3 反射弧实验入门

现在到了你卷起衣袖运用理论的时间了,我们从一个简单的反射弧模拟器开始。该模拟器可以模仿之前详述的简单反射,但是两者之间有一些区别:在脊髓中的突触被隐藏了,而纺锤体纤维中的牵引传感器首先由瞬时接触开关代替,再由力传感器代替。事实上,你们会发现将模拟装置简单化的设计方法可以应用在任何一个仿人机器人的设计上。

1.3.1 器材清单

为了构建在本章的第一部分提到的一系列简单反射弧,我们需要以下器材:

- ☐ 模拟量舵机 (2 个)
- ☐ 瞬时接触开关 (2 个)
- ☐ 10k Ω 电位器 (2 个)
- ☐ Arduino Uno 微控制器
- ☐ 5V 直流电源
- ☐ 10k Ω , 1/4W 电阻