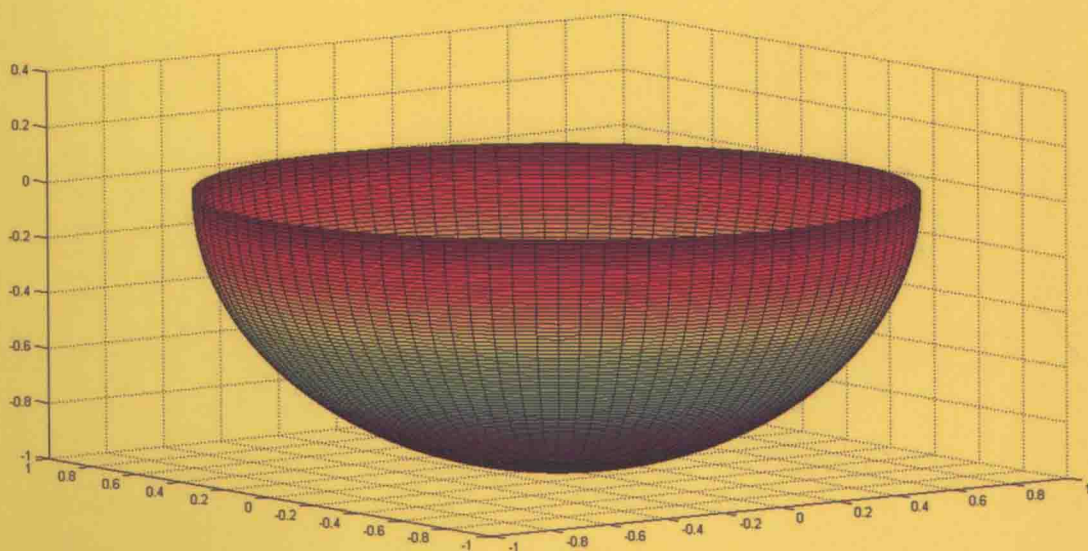


MATLAB 工程应用书库 ←

传感器信息融合 MATLAB程序实现

赵小川 等编著



MATLAB 中文论坛鼎力支持
为读者提供全面、系统、超值的配套服务



网上提供源代码下载
www.cmpbook.com

- ▶ 合理、完善的知识体系结构
- ▶ 内容丰富，重点突出，应用性强
- ▶ 免费提供相关程序源代码下载
- ▶ 深入、详细剖析 MATLAB 工程应用技术



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

MATLAB 工程应用书库

传感器信息融合——MATLAB 程序实现

赵小川 等编著



机械工业出版社

本书全面、系统地讲解了传感器信息融合的相关内容。全书首先介绍了传感器信息融合基本原理,之后从遥感、医学、生活、探测、导航等方面分析了多个传感器信息融合的实例,每个实例都附有 MATLAB 源代码和详细注解。本书可作为本科生毕业设计、研究生撰写学术论文的资料;也可从事信息处理、计算机技术、传感器研究的工程技术人员提供技术参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

传感器信息融合: MATLAB 程序实现/赵小川等编著. —北京:机械工业出版社, 2014. 6

(MATLAB 工程应用书库)

ISBN 978 - 7 - 111 - 46899 - 8

I. ①传… II. ①赵… III. ①Matlab 软件 - 应用 - 传感器 - 信息处理
IV. ①TP212

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 115864 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑: 张淑谦 责任编辑: 张淑谦

责任校对: 张艳霞

责任印制: 李 洋

三河市国英印务有限公司印刷

2014 年 6 月第 1 版 · 第 1 次

184mm × 260mm · 10.5 印张 · 257 千字

0001 - 3000 册

标准书号: ISBN 978 - 7 - 111 - 46899 - 8

定价: 35.00 元



凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心: (010) 88361066

教材网: <http://www.cmpedu.com>

销售一部: (010) 68326294

机工官网: <http://www.cmpbook.com>

销售二部: (010) 88379649

机工官博: <http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线: (010) 88379203

封面无防伪标均为盗版

前 言

随着信息处理技术和计算机技术的飞速发展，传感器信息融合技术已在遥感探测、医学成像、智能交通、无人系统等领域受到了广泛的重视并取得了众多成就。当前，在人工智能、思维科学、仿生学等新兴学科的推动下，传感器信息融合技术正在向着更高、更深层次发展，实用性也日渐增强。

传感器信息融合是一门实践性很强的技术，同时也具有坚实的理论基础。现有的一些书籍过于偏重理论推导和分析，与实际的工程实践与应用脱节，难以引起读者（特别是初学者）的兴趣。

本书紧扣读者需求，采用循序渐进的叙述方式，深入浅出地论述了传感器信息融合技术基础理论、应用实例、发展前沿；此外，本书还分享了大量的 MATLAB 程序源代码并附有详细的注解，有助于读者加深对传感器信息融合相关原理的理解。与同类书籍相比，本书有如下特色：

➤ 系统全面，循序渐进

全书以“需求分析→理论推导→编程实现→应用实例→优化总结”为主线，全面、系统地讲解了传感器信息融合的相关内容。在编写过程中兼顾循序渐进的原则和读者认知心理的特点，使所讲述的内容更容易被吸收。

➤ 例程丰富，解释翔实

书中每一个关于传感器信息融合的实例都附有 MATLAB 源代码和详细注解。通过对源代码的解析，不但可以加深读者对相关理论的理解，而且可以有效地提高读者在传感器信息融合方面的编程能力。

➤ 原理透彻，注重应用

将理论和实践有机地结合是进行数字图像处理研究和应用成功的关键。本书在介绍传感器信息融合基本原理的同时，从遥感、医学、生活、探测、导航等方面分析了多个传感器信息融合的实例，这些应用实例不但可以加深读者对所学知识的理解，而且也展现了现代传感器信息融合技术的研究热点。本书真正体现了理论联系实际的理念，使读者能够体会到学以致用乐趣。

本书的适应人群：

- 从事信息处理、计算机技术、传感器研究的工程技术人员。
- 进行毕业设计的本科、撰写学术论文的研究生。

本书主要由赵小川编写，参与编写的还有何灏、李喜玉、肖伟、梁冠豪、葛卓、常青、刘祥、李阳和刘瑞瑞。另外还要感谢寇宇翔、牛金喆、常之光、王萱、苏晓东、赵国建、王浩浩、丁宇、徐鹏飞、徐如强、邳威、孙祥溪、龚汉越、王鑫、李杰、姚猛、刘剑锋等博士、硕士在本书的资料整理及校对过程中所付出的辛勤劳动。

限于编者的水平和经验，加之时间仓促，疏漏或错误之处在所难免，敬请读者批评指正。感兴趣的读者可发送邮件到 zhaoxch1983@sina.com 与作者进行交流。

编 者

目 录

前言

第 1 章 传感器信息融合	1
1.1 传感器概述	1
1.1.1 传感器	1
1.1.2 传感器的组成	1
1.1.3 传感器的分类	2
1.1.4 传感器的基本特性	2
1.1.5 常见的传感器	3
1.2 传感器信息融合技术介绍	3
1.2.1 传感器信息融合	3
1.2.2 传感器信息融合的发展	4
1.2.3 传感器信息融合的一般结构	4
1.2.4 传感器信息融合的方法	5
1.2.5 传感器信息融合的效能评价	5
1.3 传感器信息融合的应用	9
1.3.1 传感器信息融合在工业领域的应用	9
1.3.2 传感器信息融合在导航定位中的应用	10
1.3.3 传感信息融合在智能机器人中的应用	10
1.3.4 传感器信息融合在农业领域中的应用	14
1.4 传感器信息融合的层次	15
1.5 传感器信息融合体系结构	16
1.6 传感器信息融合的研究热点	16
1.7 传感器信息融合的发展趋势	18
第 2 章 MATLAB 编程基础	19
2.1 矩阵运算	19
2.2 MATLAB 编程	25
2.2.1 顺序结构	25
2.2.2 选择结构	26
2.2.3 循环结构	28
2.3 M 文件与 M 函数	30
2.3.1 M 文件	30
2.3.2 M 函数	31
2.4 函数控点与匿名函数	31
2.5 MATLAB 编程技巧	32

2.6	基于 MATLAB 的绘图	33
2.6.1	创建图形窗口	33
2.6.2	二维曲线绘制	35
2.6.3	三维绘图	41
2.7	基于 MATLAB 的 C 代码的生成	45
第 3 章	GPS、INS 导航定位信息融合	53
3.1	全球定位系统	53
3.1.1	全球定位系统概述	53
3.1.2	全球定位系统的组成	53
3.1.3	全球定位系统的信号构成	54
3.1.4	全球定位系统的测量原理	55
3.1.5	全球定位系统的优缺点	57
3.2	惯性导航定位系统	58
3.2.1	惯性导航系统工作原理	58
3.2.2	惯性导航系统基本方程	59
3.2.3	惯性导航系统误差模型	62
3.3	基于 GPS、INS 的组合导航系统	63
3.4	GPS、INS 信息融合的优势	63
3.5	基于卡尔曼滤波的 GPS、INS 信息融合构架	63
3.6	卡尔曼滤波理论	66
3.6.1	离散型卡尔曼滤波基本方程	66
3.6.2	连续型卡尔曼滤波基本方程	67
3.7	GPS/INS 组合导航系统建模	68
3.7.1	状态方程的建立	68
3.7.2	位置速度组合量测方程建立	70
3.8	GPS/INS 信息融合的 MATLAB 程序实现	71
第 4 章	超声波传感器与视觉传感器信息融合	77
4.1	超声波传感器与视觉传感器信息融合的基本原理	77
4.2	超声波传感器	78
4.2.1	超声波	78
4.2.2	超声波测距的基本原理	78
4.2.3	超声波传感器的硬件组成	79
4.2.4	超声波传感器的软件设计	79
4.2.5	超声波传感器串口通信电路	80
4.3	视觉传感器	81
4.4	信息融合算法的具体实现过程	82
4.4.1	图像的增强	82
4.4.2	图像的边缘提取	86
4.4.3	霍夫变换检测障碍物轮廓	87

4.5	MATLAB 程序实现	89
4.5.1	直线检测程序	89
4.5.2	串口通信程序	90
4.5.3	GUI 界面设计	91
4.6	实验结果与过程	94
第 5 章	双目视觉传感器信息融合	98
5.1	双目立体视觉	98
5.2	双目视觉融合的基本原理	98
5.3	双目视觉融合的流程	99
5.4	极线几何	101
5.5	双目视觉测量模型	102
5.5.1	成像几何基础	102
5.5.2	双目立体视觉测量数学模型	103
5.6	本质矩阵与基础矩阵	104
5.7	图像校正	105
5.8	立体匹配	105
5.9	MATLAB 程序实现	106
5.10	双目立体视觉的最新应用及发展方向	115
第 6 章	多源图像融合及其实现	117
6.1	多源图像融合概述	117
6.1.1	多源图像融合	117
6.1.2	图像融合的层次	119
6.1.3	常见的图像融合类型	120
6.2	图像融合的主要步骤	120
6.3	图像配准概述	121
6.4	图像融合典型方法	123
6.4.1	加权平均融合法	124
6.4.2	基于 HIS 色彩映射的融合法	124
6.4.3	基于 PCA 的融合法	124
6.4.4	多尺度分解融合法	124
6.5	图像融合规则	125
6.6	图像融合效果评价	125
6.6.1	主观评价方法	125
6.6.2	客观评价方法	126
6.7	加权平均图像融合方法及其程序实现	127
6.7.1	基本原理	127
6.7.2	程序实现	127
6.8	基于主成分分析的图像融合方法及其程序实现	128
6.8.1	PCA 变换的基本原理	128

6.8.2	主成分分析的计算步骤	130
6.8.3	基于主成分分析的图像融合的核心思想	131
6.8.4	程序实现	131
6.9	基于金字塔分解的图像融合	134
6.9.1	图像金字塔	134
6.9.2	基于拉普拉斯金字塔变换的图像融合	134
6.10	基于 IHS 变换的遥感图像融合	139
6.10.1	进行遥感图像融合的必要性	139
6.10.2	IHS 变换的基本原理	139
6.10.3	基于 IHS 变换的遥感图像融合的基本原理	141
6.10.4	MATLAB 程序实现	141
6.11	基于小波变换的图像融合	143
6.11.1	连续小波变换	145
6.11.2	离散小波变换	146
6.11.3	基于小波变换的图像融合的步骤	149
6.11.4	基于小波变换的图像融合的程序实现	151
6.12	基于余弦变换的多聚焦图像融合	152
6.12.1	多聚焦图像	152
6.12.2	融合的基本原理	153
6.12.3	程序实现	154
参考文献		158

第1章 传感器信息融合

随着精密制造技术、计算机技术、信息处理技术的飞速发展，越来越多的传感器得到了应用。若对各传感器采集的信息进行单独、孤立的处理，不仅会导致信息处理工作量极大地增加，而且还会割断各传感器信息间的内在联系，丢失信息经有机组合后可能蕴含的有关环境的特征，造成信息资源的浪费。信息融合技术可有效地解决上述问题，它综合利用信号处理、人工智能、数理统计、控制原理以及仿生学等方面的相关理论，把分布在不同位置、处于不同状态的多个传感器所提供的局部的、不完整的感测量有机地进行综合，利用信息互补，降低不确定性，以形成对外界环境相对全面的描述，从而提高智能系统决策、规划的科学性，反应的正确性和快速性。

本章主要介绍传感器信息融合的基本原理、实现过程、主要方法、应用领域及发展方向。在此之前，先来了解一下什么是传感器。

1.1 传感器概述

1.1.1 传感器

国家标准 GB/T 7665—2005 对传感器的定义如下：“能感受规定的被测量并按照一定的规律转换成可用信号的器件或装置，通常由敏感元件和转换元件组成”。传感器是一种检测装置，能感受到被测量的信息，并能将感受到的信息按一定规律转换成电信号或以其他所需形式的信息输出，以满足信息的传输、处理、存储、显示、记录和控制等要求，它是实现自动检测和智能控制的首要环节。传感器技术、通信技术和计算机技术被称为现代信息产业的三大支柱，它们分别构成了信息技术系统的“感官”“神经”和“大脑”。

1.1.2 传感器的组成

一般情况下，传感器由敏感元件、变换元件、信号调理电路及辅助电源构成，其基本构成如图 1-1 所示。

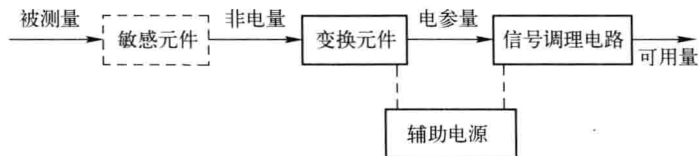


图 1-1 传感器的基本构成

其中，敏感元件是指传感器中能直接感受被测量的部分，变换元件是指传感器中能将敏感元件输出量转换为适于传输和测量的电信号部分。

1.1.3 传感器的分类

传感器主要有以下三种分类：

1) 按传感器测量的物理量分类，可分为位移、力、速度、温度、流量、气体成分等传感器。

2) 按传感器的工作原理分类，可分为电阻、电容、电感、电压、霍尔、光电、光栅、热电偶等传感器。

3) 按传感器输出信号的性质分类，可分为：输出为开关量（“1”和“0”或“开”和“关”）的开关型传感器；输出为模拟量的模拟型传感器；输出为脉冲或代码的数字型传感器。

1.1.4 传感器的基本特性

传感器的基本特性是指传感器的输出与输入之间关系的特性，分为静态特性和动态特性。在生产过程和科学实验中，要对各种各样的参数进行检测和控制，就要求传感器能感受被测非电量的变化，并将其不失真地转换成相应的电量，这取决于传感器的基本特性，即输出/输入特性。如果把传感器看作二端口网络，即有两个输入端和两个输出端，那么传感器的输出/输入特性是与其内部结构参数有关的外部特性。传感器的基本特性可用静态特性和动态特性来描述。

传感器的静态特性是指对静态的输入信号，传感器的输出量与输入量之间所具有的相互关系。因为这时输入量和输出量都和时间无关，所以它们之间的关系，即传感器的静态特性可用一个不含时间变量的代数方程来表达，或以输入量作横坐标，把与其对应的输出量作纵坐标，用画出的特性曲线来描述。表征传感器静态特性的主要参数有：线性度、灵敏度、分辨力和迟滞等。

通常情况下，传感器的实际静态特性输出是条曲线而非直线。在实际工作中，为使仪表具有均匀刻度的读数，常用一条拟合直线近似地代表实际的特性曲线，线性度（非线性误差）就是这个拟合直线近似程度的一个性能指标。

拟合直线的选取有多种方法。例如，将零输入和满量程输出点相连的理论直线作为拟合直线；或将与特性曲线上各点偏差的平方和为最小的理论直线作为拟合直线，此拟合直线称为最小二乘法拟合直线。

灵敏度是指传感器在稳态工作情况下输出量变化 Δy 对输入量变化 Δx 的比值。它是输出/输入特性曲线的斜率。如果传感器的输出和输入之间为线性关系，则灵敏度 S 是一个常数，否则，它将随输入量的变化而变化。灵敏度的量纲是输出、输入量的量纲之比。例如，某位移传感器，在位移变化 1 mm 时，输出电压变化为 200 mV，则其灵敏度应表示为 200 mV/mm。当传感器的输出、输入量的量纲相同时，灵敏度可理解为放大倍数。提高灵敏度，可得到较高的测量精度。但灵敏度越高，测量范围越窄，稳定性也往往越差。

分辨力是指传感器可能感受到的被测量的最小变化的能力。也就是说，如果输入量从某一非零值缓慢地变化，当输入变化值未超过某一数值时，传感器的输出不会发生变化，即传感器对此输入量的变化是分辨不出来的。只有当输入量的变化超过分辨力时，其输出才会发生变化。通常传感器在满量程范围内各点的分辨力并不相同，因此常用满量程中能使输出量

产生阶跃变化的输入量中的最大变化值作为衡量分辨力的指标。上述指标若用满量程的百分比表示，则称为分辨率。

迟滞特性表征传感器在正向（输入量增大）和反向（输入量减小）行程间输出/输入特性曲线不一致的程度，通常用这两条曲线之间的最大差值 Δ_{MAX} 与满量程输出 $F \cdot S$ 的百分比表示。

传感器的动态特性是指传感器在输入变化时，它的输出的特性。在实际工作中，传感器的动态特性常用它对某些标准输入信号的响应来表示。这是因为传感器对标准输入信号的响应容易用实验方法求得，并且它对标准输入信号的响应与它对任意输入信号的响应之间存在一定的关系，往往知道了前者就能推定后者。最常用的标准输入信号有阶跃信号和正弦信号两种，所以传感器的动态特性也常用阶跃响应和频率响应来表示。

1.1.5 常见的传感器

常见的传感器是电阻式传感器。电阻式传感器是将被测量，如位移、形变、力、加速度、湿度、温度等这些物理量转换成电阻值的一种器件。主要有电阻应变式、压阻式、热电阻、热敏、气敏、湿敏等电阻式传感器件。

电阻应变式传感器的原理如下：传感器中的电阻应变片具有金属的应变效应，即在外力作用下产生机械形变，从而使电阻值随之发生相应的变化。电阻应变片主要有金属和半导体两类，金属应变片有金属丝式、箔式、薄膜式之分。半导体应变片具有灵敏度高（通常是丝式、箔式的几十倍）、横向效应小等优点。

压阻式传感器是根据半导体材料的压阻效应，在半导体材料的基片上经扩散电阻而制成的器件。其基片可直接作为测量传感元件，扩散电阻在基片内接成电桥形式。当基片受到外力作用而产生形变时，各电阻值将发生变化，电桥就会产生相应的不平衡输出。用作压阻式传感器的基片（或称膜片）材料主要为硅片和锗片，由硅片敏感材料制成的硅压阻传感器越来越受到人们的重视，尤其以测量压力和速度的固态压阻式传感器应用最为普遍。

热电阻传感器主要是利用电阻值随温度变化而变化这一特性来测量温度及与温度有关的参数。在温度检测精度要求比较高的场合，这种传感器比较适用。目前常用的热电阻材料为铂、铜、镍等，它们具有电阻温度系数大、线性好、性能稳定、使用温度范围宽、加工容易等特点，用于测量 $-200 \sim +500^{\circ}\text{C}$ 范围内的温度。

1.2 传感器信息融合技术介绍

1.2.1 传感器信息融合

不同的角度对“传感器信息融合”的定义有所不同：从仿生学角度看，传感器信息融合是模仿自然界中的生物，通过自身所具有的各种感觉器官来感知外部生存空间的各种状态以及环境变换，根据所收集到的信息进行“综合处理”，并得到准确可靠判断的过程；从数学角度看，不同传感器的测量值组成了一个测量子空间，而信息融合则是各测量子空间按照一定法则向信息融合空间投影；从工程角度来定义，传感器信息融合是指为了完成所需的决策和估计任务，对于来自不同源、不同模式、不同媒质、不同时间的信息，按一定的准则加

以综合分析，得到对被感知对象的更精确的描述。因此，传感器信息融合的本质不单是一种数据处理方法，还是认知和改造世界的方法学。

1.2.2 传感器信息融合的发展

信息融合技术是美国于 20 世纪 70 年代初提出的，80 年代发展成为军事领域的一项重要技术，用以提高传感器系统在实时目标识别、跟踪、战场势态以及威胁估计等方面的性能。1987 年，Kluwer Academic Publishers 先后出版了牛津大学 Durrant-Whyte 所著的《Integration, Coordination and Control of Multi-sensor Robot Systems》和哥伦比亚大学 Allen 所著的《Robotic Object Recognition Using Vision and Touch》，这两本书是传感器信息融合技术应用于机器人领域的开山之作。1988 年 International Journal of Robotics Research 率先推出 Sensor Data Fusion 专辑，从此传感器信息融合技术在机器人领域的研究变得十分活跃。1994 年 10 月在美国召开的 IEEE International Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems 标志着传感器信息融合这一新兴学科已得到学术界的认可。2000 年 7 月出现了第一个报道信息融合技术研究进展及动向的国际学术期刊《Information Fusion》。ISIF (International Society of Information Fusion) 于 2004 年推出以信息融合为主要内容的著名学术刊物《Journal of Advances in Information Fusion》。我国的传感器信息融合研究已经起步，在军事决策、特种机器人等领域开展了相关的理论和应用实验研究，并将其列入了 863 计划。国家自然科学基金和 973 计划也把多传感器信息融合作为重点鼓励研究领域之一。中国首届信息融合年会于 2009 年 10 月 25 日在山东烟台举行。

1.2.3 传感器信息融合的一般结构

传感器信息融合的一般结构如图 1-2 所示。传感器采集的信息经过模数转换、数据检验、信息分类等环节到达融合中心进行融合，进而得出对环境的描述。传感器信息协调管理模块根据目标任务对数据采集、转换、处理和融合的过程进行统筹协调。多传感器系统是信息融合的物质基础；传感器采集的信息是信息融合的加工对象；协调管理是信息融合的关键，它是系统性能好坏的决定因素；融合处理是传感器信息融合的核心，在具体的系统中它通常由各种算法来实现。

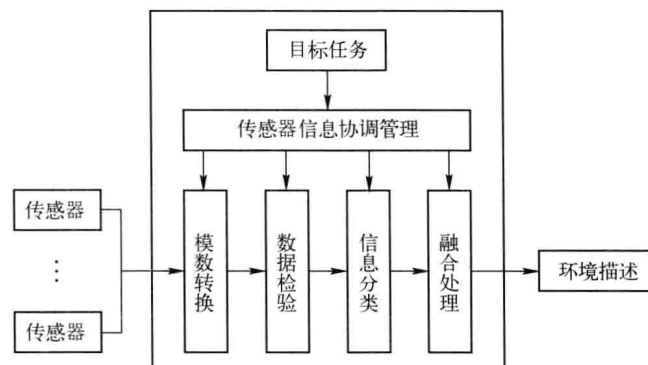


图 1-2 传感器信息融合的一般结构图

1.2.4 传感器信息融合的方法

传感器信息融合方法主要包括：加权平均法、卡尔曼滤波、贝叶斯推理、Dempster - Shafer 证据推理、模糊逻辑、神经网络等算法。运用这些方法可以进行数据层、特征层以及决策层等不同层次的融合，也可以实现测距传感器信息、内部航迹推算系统信息、全局定位信息之间的信息融合，进而准确、全面地描述和认识被测对象与环境，为控制决策提供依据。

加权平均法是一种最简单、最直观的信息处理的融合算法，该方法把来自不同传感器的冗余信息进行加权，得到的加权平均值即为融合的结果。其最大的弊端就是很难获得最优加权平均值且确定权值需要花费大量的时间。

卡尔曼滤波用于动态环境中冗余传感器信息的实时融合。该方法用系统状态模型及量测模型的统计特性递推给出在统计意义下最优的融合数据估计。如果系统具有线性动力学模型，且系统噪声和传感器噪声是符合高斯分布的白噪声，那么，卡尔曼滤波为融合数据提供唯一的统计意义下的最优估计。这种方法的递推特性加快了其运算速度，且不需要过多的存储空间。应用卡尔曼滤波获得理想滤波效果的前提条件是，必须已知系统模型和量测模型以及系统噪声和量测噪声的统计特性，并且噪声过程必须为零均值白噪声。如果滤波模型与实际系统不符，不能真实地反映物理过程，就会产生滤波误差，甚至可能发生滤波发散现象。

贝叶斯推理是融合静态环境中多传感器信息的一种常用方法，其信息描述为概率分布，适用于具有可加高斯噪声的不稳定性情况。Dempster - Shafer 证据推理是贝叶斯方法的扩展。Dempster - Shafer 证据推理用信任区间描述传感器的信息，不但可以表示信息的已知性和确定性，而且能够区分未知性和不确定性。运用该方法进行信息融合时，将传感器采集的信息作为证据，在决策目标集上建立一个相应的基本信任度，论据推理在同一决策框架下，通过合并规则将不同的信息合并成一个统一的信息表示。

模糊逻辑是一种多值型逻辑，其指定一个从 0 到 1 之间的实数表示其隶属度，模糊推理过程直接将不确定性表示在推理过程中。模糊逻辑由于可以不依赖数学模型，因而可以应用于模型未知的复杂系统或动态特性变化的对象。

神经网络算法根据样本的相似性，通过网络权值进行调整。神经网络的结构本质上是并行的，具有内部知识表示形式统一、容错性和鲁棒性强等优点，但神经网络算法的实时性较差。由于模糊逻辑和神经网络具有互补的特性，研究者通常综合使用这两种方法。

上述传感器信息融合算法都是针对具体的应用系统提出的，有各自的优点和缺陷。它们的适用范围也往往局限于特定的系统中。由于目前有关多传感器信息融合的方法缺乏一般化和体系化，至今尚未形成具有普遍指导意义的原理和方法。

1.2.5 传感器信息融合的效能评价

效能评价是科学研究和产品研发的重要环节，只有遵循“设计研究→实验分析→效能评估→改进完善”的思路，才能不断挖掘系统潜力、提高系统效能。不合理的效能评价不但不能正确地描述系统，而且会直接影响到系统性能的优化与提升。

传感器信息融合系统是一个涉及多个领域、多项技术的复杂系统，各部分有机组合、相

互影响。因此，仅通过单一指标的优劣或某几项实验结果的好坏不能全面、合理地反映其综合效能。但综观传感器信息融合的研究现状，对其效能评价尚未形成全面、统一的评价方法与体系。

评价模型的优劣将直接影响到评价效果的好坏，在建立传感器信息融合系统的效能综合评价模型时应遵循如下原则：

(1) 全面完整、重点突出 效能综合评价模型应能够全面、客观地评价被评估系统，既要反映系统的优点，又要指出其不足，以便进行改进与完善，切不可顾此失彼，以偏概全。同时，一个系统是由多个子系统组成的，其性能受多个因素影响，但每个因素的影响程度不同。因此，效能评价模型还应突出主要影响因素，不能够不加区别等同对待。

(2) 科学合理、层次清晰 效能综合评价模型中各评价指标设置应当科学与合理，各指标要有明确的内涵；评价模型体系结构应能够清楚地反映各影响因素、评价指标的支配关系和隶属关系。

(3) 有效可行、易于实现 效能综合评价模型应综合实验数据、性能测试、专家经验、理论分析等手段，对被评估系统做出有效的评价；同时，效能评价模型不能过于复杂，应力求易于实现。

传感器信息融合系统是一个涉及多个领域、多项技术的复杂系统，存在着大量的随机变化和模糊因素。因此，本书在建立传感器信息融合系统效能评价模型时，以模糊数学为基础，在实验数据、性能测试、理论分析和专家经验的基础上，将定量计算与定性分析有机地结合。

任何事物都具有对立统一性。因此，本书提出传感器信息融合的效能综合评价模型，从“效果”和“代价”两个大的方面传感器信息融合的效能其进行评价，以保证评价的全面性。

在对传感器信息融合进行综合评价的过程中，所涉及的评价指标和影响因素很多，而且有些因素还具有多个层次，相互之间存在着隶属关系。因此，本书所提出的效能综合评价模型采用多级分层递阶综合评价的方法，从下到上逐层递进地进行评价。采用层次分析法确定各评价指标的权重系数，在全面评价的同时突出主导影响因素。

传感器信息融合的效能综合评价模型的符号示意图如图 1-3 所示。该模型从“效果”和“代价”两方面对所有的评价指标进行划分，再将每个指标层层细分为若干个子指标，基于模糊数学的原理，根据实验数据、性能测试、理论分析和专家经验，从下到上逐层递进地进行评价。在图 1-3 所示的模型中， V 表示对系统的总体评价， E 为“效果”的评价指标， D 为“代价”的评价指标， W 为权重矩阵， R 为单因素评价矩阵， B 为综合评价矩阵。

传感器信息融合的多层次效能综合评价模型的构建步骤如下：

(1) 建立评价指标集 根据传感与信息融合技术的特点以及传感器与信息融合系统的任务要求、作业环境以及性能指标，从系统实现的“效果”和付出的“代价”两方面入手，确定各评价指标。设 U 为全体评价指标的集合， E 为“效果”评价指标、 D 为“代价”评价指标，则有：

$$U = \{E, D\} \quad (1-1)$$

将“效果”评价指标集合 E 按照属性划分为 S 个子集，记为 E_1, E_2, \dots, E_s ，其应满足：

$$\bigcup_{i=1}^s E_i = E, E_i \cap E_j = \phi (i \neq j) \quad (1-2)$$

按照式 (1-2) 可将各子集继续划分。同理，将“代价”评价指标集合 D 进行划分。

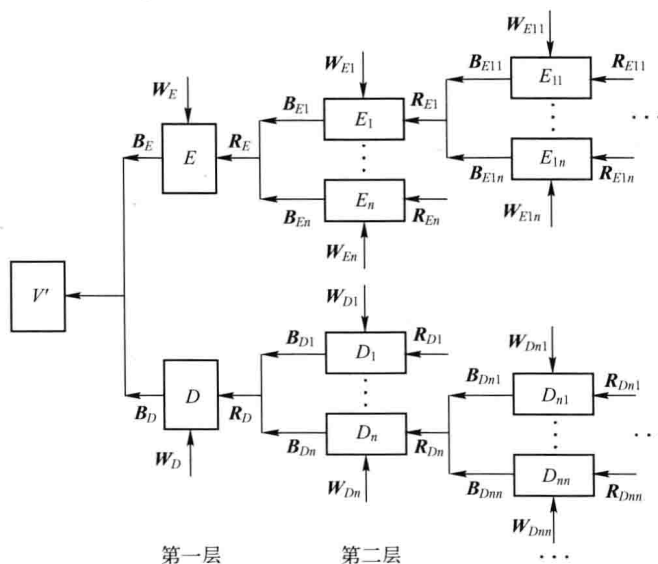


图 1-3 传感器信息融合的效能综合评价模型的符号示意图

(2) 建立备择集 备择集是对各评价指标所做出的各种评价的集合。采用专家评估法来确定备择集中各元素的取值，记作：

$$v = \{v_1, v_2, \dots, v_n\} \quad (1-3)$$

(3) 确定每层各评价指标的权重系数 以第二层中各效果评价指标 E_i 为例，设其权重为 w_i ，则有：

$$\sum_{i=1}^s w_i = 1 \quad (1-4)$$

专家经验法和层次分析法是确定评价指标权重时常用的两种方法。专家经验法是建立在个人经验基础之上，难免具有主观性和片面性。层次分析法将定量计算与定性分析有机地结合，把影响因素分解成多个具有隶属关系的子评价指标，并按支配关系将这些指标形成有序的递阶层次结构，通过相互比较的方式确定每一层次内指标的相对权重系数；然后，在递阶层次结构中逐层合成，以形成各层次评价指标的相对权重系数。层次分析法增强了评价的科学性与合理性，因而，本书在构建效能综合评价模型的过程中，权重的确定采用层次分析法。层次分析法的基本思想是把复杂问题中的各因素划分为互相联系的有序层，从而使之条理化；根据实际情况，就每一层次评价标准的相对重要性用 1~9 标度法给出定量的表示，再利用数学方法确定全部元素相对重要性的权系数，形成判断矩阵 $W = \{w_{ij}\}$ 。计算判断矩阵 W 的最大特征根 λ_{\max} 及其对应的特征向量 A ，此特征向量就是各评价因素的重要性排序，即每层各评价指标的权重系数。标度法中各数值含义见表 1-1。

在层次分析法中需要检验思维判断的一致性。判断矩阵偏离一致性指标为：

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (1-5)$$

式 (1-5) 中， n 为判断矩阵的阶数。

判断矩阵的平均随机一致性指标用 RI 来表示，1~9 阶判断矩阵的平均随机一致性指标见表 1-2。

表 1-1 1~9 标度法中各数值含义

标 度	含 义
1	两个指标相比, 具有同样的重要性
3	两个指标相比, 前者比后者稍微重要
5	两个指标相比, 前者比后者明显重要
7	两个指标相比, 前者比后者强烈重要
9	两个指标相比, 前者比后者极端重要
2, 4, 6, 8	上述两相邻判断中值

表 1-2 1~9 阶判断矩阵的 RI 值

阶数	1	2	3	4	5	6	7	8	9
RI 值	0	0	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45

通过式 (1-6) 计算一致性比率:

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (1-6)$$

当 $CR < 0.10$ 时, 认为层次分析排序的结果有满意的一致性, 即权重系数的分配是合理的; 否则, 要调整判断矩阵的元素取值, 重新分配权重系数的值。

(4) 按递阶顺序进行各层次模糊综合评价 根据实验数据、性能测试、专家经验、理论分析等对每个评价指标进行赋值, 由下到上、层层递进地对每个评价指标进行模糊综合评价。

将每一层评价指标的权重矩阵 A 与该层各评价指标的单因素模糊评价矩阵进行合成, 得到该层的综合判断矩阵, 即:

$$A \cdot R = [a_1, a_2, \dots, a_p] \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1m} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ r_{p1} & r_{p2} & \dots & r_{pm} \end{bmatrix} = [b_1, b_2, \dots, b_m] = B \quad (1-7)$$

其中, 矩阵 R 中第 i 行、第 j 列元素 r_{pm} 表示某个被评事物从某因素来看对 v_j 等级模糊子集的隶属度。 b_j 是由 A 与 R 的第 j 列运算得到的, 它表示被评事物从整体上看对 v_j 等级模糊子集的隶属程度。

(5) 计算总评分 采用加权平均的方法将最终评判等级 b_j' 与其对应的分值 v_j' 相结合, 计算出总评分 V' , 即:

$$V' = \frac{(\sum_{j=1}^n b_j v_j')}{\sum_{j=1}^n b_j} \quad (1-8)$$

(6) 分析、总结 对整个评价过程及结果进行分析、总结, 以便完善被评价系统的性能。

1.3 传感器信息融合的应用

1.3.1 传感器信息融合在工业领域的应用

在工业机器人中，传感器的作用日益重要。除采用传统的位置、速度和加速度传感器外，装配、焊接机器人还应用了视觉、力觉和超声波等传感器。精度高、可靠性好是工业机器人对传感器的一般要求。由于工业机器人一般均工作在结构化的环境中，工作环境的大部分特征是已知的，多传感器信息融合技术在该领域的应用较为简单。多传感器信息融合技术在工业领域应用的典型实例见表 1-3。

表 1-3 多传感器信息融合技术在工业领域应用的典型实例

研究者	使用传感器的类型	所实现的功能
Hitachi 公司	三维视觉传感器、力觉传感器	抓取、放置半导体器件
Groen 等人	视觉传感器、超声波传感器、力/力矩传感器、触觉传感器	机械产品装配
Smith、Nitan 等人	视觉传感器、力觉传感器	粘贴包装标签
Kremers 等人	视觉传感器、激光测距扫描仪	完成无缝焊接
Georgia 理工学院	视觉传感器、触觉传感器	检验工件的一致性
王敏、黄心汉	视觉传感器、超声波传感器	自动识别并抓取工件

机器人手爪是机器人执行复杂、精巧任务的重要组成部分，为了能够在存在不确定性的环境下进行作业，机器人手爪必须具备较强的感知能力，机器人手爪通过传感器来获得环境信息以实现快速准确的触摸、抓取、装配等动作。美国的 Utah/MIT 灵巧手、日本的 ARH 智能手爪以及我国的 HIT/DLR 机器人灵巧手、BH-3 灵巧手都配有多种传感器，其中主要包括视觉传感器、接近觉传感器、力/力矩传感器、位姿/姿态传感器、速度/加速度传感器、温度传感器以及触觉/滑觉传感器等。

图 1-4 所示的是哈尔滨工业大学和德国宇航中心联合研制的新一代多传感器、高集成度的 HIT/DLR 机器人灵巧手。配备多种传感器是 HIT/DLR 机器人灵巧手的显著特点之一。该机器人手爪主要配备的传感器包括：指尖力/力矩传感器、关节力矩传感器、关节位置传感器、电动机霍尔传感器和温度传感器等 94 个传感器，传感器信息处理系统采用总线型多处理器网络结构，并且实现了传感器系统的全数字化、电路的高度集成化和通信控制系统的高速智能化。

贝叶斯算法和 Dempster - Shafer 论据常用于机器人手爪的传感器信息融合。文献 [34] 将这两种算法综合运用到一个装有六种传感器的机器人手爪中，并进行了工件识别的抓取实验，正确率达 96.7%。美国的 LUO 提出了基于视觉、接近觉、触觉、位置、力/力矩及滑觉等传感器信息融合的新方法，并在 PUMA 560 机器人手臂控制的夹持型手爪上实现。整个过程分为三步：首先，采集多传感器的原始数据，并用 Fisher 模型进行局部估计；其次，对

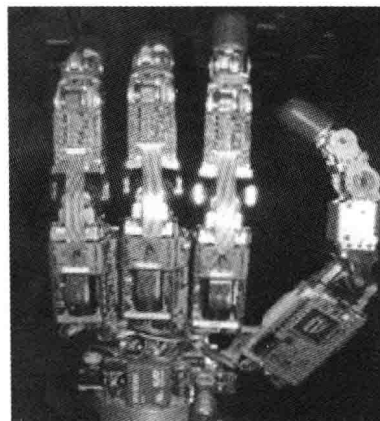


图 1-4 机器人灵巧手