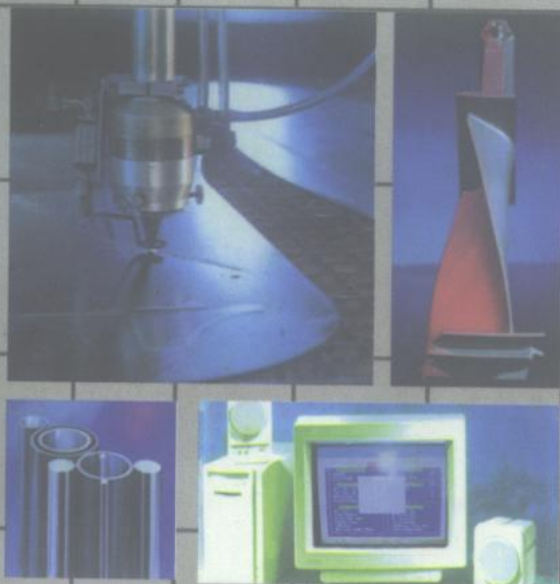


学 术 著 作 丛 书

多传感器融合理论 及在智能制造系统中的应用

李圣怡 吴学忠 范大鹏 编著



图书在版编目(CIP)数据

多传感器融合理论及在智能制造系统中的应用/李圣怡, 吴学忠, 范大鹏编著. —长沙: 国防科技大学出版社, 1998. 11

ISBN 7-81024-495-7

I. 多传感器融合理论及在智能制造系统中的应用

II. 李圣怡, 吴学忠, 范大鹏

III. ①传感器理论 ②智能制造

IV. TH166

国防科技大学出版社出版发行

电话: (0731) 4555681 邮政编码: 410073

E-mail: gfkdcbs@public.cs.hn.cn

责任编辑: 卢天祝 责任校对: 张静

新华书店总店北京发行所经销

国防科技大学印刷厂印装

*

850×1168 1/32 印张: 14.125 字数: 354 千

1998年11月第1版第1次印刷 印数: 1—800册

*

定价: 25.00元

内 容 提 要

多传感器融合技术是近几年发展起来的一门新兴技术,已广泛应用于军事领域,并逐渐在航天、遥感、机械制造等领域得到应用。

本书内容包括多传感器融合的基本原理、理论方法及在智能制造系统中的应用,附录中还给出了 MATLAB 的神经网络 Toolbox 的一些使用方法,以及作者在研究中开发和使用过的一些核心程序。

本书是目前国内最系统介绍多传感器融合方法的专著,书中汇集了作者多年研究应用的成果,在超精密加工的多传感器在线测量与误差补偿方面具有特色和创新。本书可供工科研究生、大学本科高年级学生及有关的工程技术人员参考。

前 言

多传感器融合技术是近几年发展起来的一门新兴技术,已广泛应用于军事领域,并逐渐在航天、遥感、机械制造等领域得到应用。随着计算机技术的普及,多传感器融合技术的重要性越来越为人们所认识。

本书是作者从事国家自然科学基金项目“CIMS 环境下多传感器融合技术”(1993~1996 年)和国防预研基金项目“FMS 中多传感器融合智能检测技术”(1995~1998 年)研究的总结。全书共分十章。

第一、第二章着重介绍多传感器融合技术的概念、原理、体系结构和各个层次的关键技术,并且介绍了该项目在工业及军事中的应用成果。

第三章介绍了多传感器融合技术所涉及的信号获取、预处理、信号处理和分析建模的理论与方法。

第四~七章着重介绍了多传感器融合的几种主要方法,包括模糊逻辑融合、统计决策融合、D-S 证据融合和基于神经网络的信息融合方法。分别详尽地阐述了有关理论、数学推导和实现技术,全面系统地介绍了多传感器融合的核心理论和方法。

第八、九、十章着重介绍了多传感器融合技术在智能制造中的应用。这些内容主要包括:①多传感器融合在超精密加工中对工件形状误差进行在线检测,以实现高精度的误差分离和补偿,这也是作者长期进行超精密加工研究的主要成果。②多传感器融合在刀具磨损、破损监控中的运用,这是 CIMS 环境下实现无人化、自动化加工的一项关键技术。③多传感器融合在机床热误差补偿中的

应用,这是提高加工精度的一项十分有效的方法,具有广泛的工业应用前景。

附录 1、附录 2 提供了作者在该项研究中用 C 语言和 MATLAB 语言编写的一些实用程序,可为读者提供一些运用实例和编程借鉴。

本书的出版得到了国防科技大学学术著作出版基金的赞助,在此向有关领导和同志致以衷心的感谢。

本书在编写过程中得到了系领导、教研室领导以及教研室许多同志和博士生、硕士生的关心和帮助,在出版过程中得到了国防科技大学出版社有关同志的支持,在此均表示感谢。

限于作者的水平,书中不妥和错误之处在所难免,敬请读者批评指正。

作 者

1998 年 10 月

于湖南长沙

目 录

第一章 绪论

- 1.1 制造系统的智能化趋势 (1)
- 1.2 多传感器集成与融合的作用 (2)
- 1.3 多传感器融合系统的应用 (9)
- 1.4 多传感器融合的现状 (19)

第二章 多传感器融合一般原理

- 2.1 多传感器融合的基本原理 (23)
- 2.2 多传感器融合的系统结构 (35)
- 2.3 多传感器融合的过程 (43)
- 2.4 多传感器信息的获取 (44)
- 2.5 多传感器信号的预处理 (52)

第三章 多传感器信号的分析与建模

- 3.1 信号的时域分析与建模 (61)
- 3.2 信号的频域分析与建模 (71)
- 3.3 信号的时—频域分析与建模 (82)

第四章 多传感器融合的模糊逻辑理论

4.1 模糊理论基础	(97)
4.2 可能性理论	(108)
4.3 基于可能性理论的信息融合	(112)
4.4 模糊关系函数的融合	(119)
4.5 模糊关系融合在机器人中的应用	(125)

第五章 多传感器融合的统计决策理论

5.1 问题描述	(129)
5.2 统计决策理论	(132)
5.3 最优融合	(139)
5.4 位置参数模型	(140)
5.5 不确定种类	(144)
5.6 应用举例	(147)
5.7 位置信息的鲁棒性融合	(154)

第六章 多传感器融合的 D—S 证据理论

6.1 证据理论基础	(158)
6.2 证据组合规则	(162)
6.3 证据推理模型	(170)
6.4 融合中心的最终决策	(171)
6.5 应用	(173)

第七章 多传感器融合的神经网络理论

- 7.1 反向传播学习算法及应用 (198)
- 7.2 径向基函数网络及应用 (212)
- 7.3 自适应共振理论及应用 (219)
- 7.4 特征映射理论及应用 (226)

第八章 多传感器融合在超精密加工 在线检测与误差补偿中的应用

- 8.1 实验装置与仪器 (243)
- 8.2 多传感器圆度及圆柱度在线测量技术 (251)
- 8.3 多传感器直线度误差测量与分离技术 (272)
- 8.4 多传感器融合在大型平面度在线检测中的应用
..... (302)

第九章 多传感器融合在机床热误差补偿中的应用

- 9.1 机床热变形的机理 (315)
- 9.2 机床热变形的测量 (320)
- 9.3 基于多传感器融合的机床热误差补偿技术 (325)

第十章 多传感器融合在刀具状态监测中的应用

- 10.1 概述 (347)
- 10.2 刀具状态的多传感器监测原理 (352)
- 10.3 铣削过程多传感器监测实验研究 (360)

10.4 基于模糊集理论的刀具状态监测	(371)
10.5 基于神经网络的刀具状态监测	(378)

附录 1: MATLAB 神经网络工具箱(NN Toolbox)软件简介	(391)
附录 2: 实用程序源代码	(408)

第一章 绪 论

1.1 制造系统的智能化趋势

近年来,随着计算机科学、集成制造技术、人工智能等技术的发展,出现了一种新型制造工程——智能制造技术(Intelligent Manufacturing Technology, IMT)和新一代制造系统——智能制造系统(Intelligent Manufacturing System, IMS)。IMT 和 IMS 是在制造工业的各个环节以一种高度柔性 with 高度集成的方式,通过计算机模拟人类专家的智能活动,进行分析、判断、推理、构思和决策,旨在取代或延伸制造环境中人的部分脑力劳动,并对人类专家的制造智能进行收集、存贮、完善、共享、继承与发展。IMT 和 IMS 的研究与开发对于提高产品质量、生产效率和降低成本,提高国家制造业适应市场变化的能力和速度,以及提高国家的经济实力和国民的生活水准,具有重大意义,因而受到众多国家的政府、工业界和科学家们的广泛重视。

作为智能制造系统关键性技术的智能加工技术(Intelligent Machining Technology),是为了解决传统加工技术所不能解决的众多问题、适应现代加工技术的迫切需求以及顺应 IMT 和 IMS 的发展而产生的,它的目标是建立 IMS 的智能物理环节,为 IMS

提供可向上集成的实物系统。IMT 和 IMS 面向的是整个制造工业的各个环节,而智能加工则是面向加工过程。由于加工过程中有许多因素直接或间接影响加工效果,如工件毛坯余量不均、材料硬度不一致、刀具磨损或破损、工件变形、机床热变形等,因而,在实际加工过程中,采用传统加工技术是很难达到用最佳参数进行加工的。而智能加工可以根据加工过程状态的变化,综合考虑理论知识、人的经验和各种影响因素,自动调整并保持最优加工状态,从而取得更好的经济效益和更高的加工精度。

在国内外有关智能加工技术的研究中,通常用基于多传感器融合基础上的智能决策及实时控制,来实现加工过程的真正智能化。智能监测、智能决策与智能控制是智能加工的三个方面。智能决策的依据和前提是智能监测,而智能决策的实现要依赖于智能控制。智能监测与控制不同于智能决策之处在于,它们直接面向加工过程,与具体设备和仪器相联系。因此,能适用于未知环境、动态环境的高精度、高可靠性、大信息和实时性强的传感技术与控制技术,就成了智能监测与控制的关键,也是目前限制智能加工监测与控制系统发展的瓶颈。

在智能加工的监测与控制中,传统的感知单一属性的传感技术和经典控制方法已不能满足要求。进入 20 世纪 80 年代中期,逐渐活跃起来的多传感器融合技术给智能加工的监控带来了一种全新的概念。毫无疑问,基于多传感融合技术的智能加工监控代表着未来智能加工技术的发展方向。

1.2 多传感器集成与融合的作用^[1]

人类的信息活动可以抽象为:获取数据、提取信息、上升为知识和决策控制等几个阶段。例如,人通过各种感觉器官(眼、耳、鼻、

手等)来获取各种数据(如图像、声音、气味和触觉等),然后根据先验知识、经验等对这些数据进行去伪存真、由表及里的处理过程以提取有用的信息,再将这些信息上升为新的知识,并基于这些知识做出反应式决策。与此同时,人还可以根据需要根据不断调整自己的感官,使得人的感官对于不同时空范围内发生的物理现象能采用不同的测量特征来度量、获取和提炼,因此,人的信息活动过程实际上是一种复杂的自适应反馈控制过程。

为了使系统能够在复杂环境中、在无人干预的条件下正常工作,就必须使系统具有类似于人的这种信息处理能力。要达到这一目的,首先要求系统的传感器能提供足够多和足够好的原始信息,其次是系统应采用有足够智能的信息处理方法。

系统所使用的传感器类型、性能、数量以及传感器的布置和组织方法,对于不同目的和不同时空条件都应有一个合理要求,采用的信息处理技术应该在不同层次实现简化、压缩、滤波、提取特征、映射、变换、学习和决策等功能,这也是多传感器融合技术所涉及的主要内容。

或许有人会问,如果单个传感器能够提高系统的性能,那么使用多个传感器是否能进一步提高系统的性能?回答是肯定的。在过去的十几年里,许多研究人员不仅从理论上对这个问题进行了研究,而且还通过在不同应用领域建立实际的多传感器系统,来验证了这个问题。能够从多传感器的使用中获得收益的典型应用有:自动目标识别、移动机器人导航、战场管理中的军事指挥与控制、目标跟踪、飞行器导航以及工业领域中的装配与状态监测等。

举一个简单的例子,一个人捂上左眼,只用右眼观察一个物体,在大脑神经中枢形成一个影像;捂上右眼,只用左眼观察同一个物体,在大脑神经中枢也形成一个影像。这两个影像虽然是源于同一物体,但由于两眼观察角度不同,影像位置及其视面也就不同,这就是单眼效应。对于上述同一物体,如果同时用双眼观察,则

形成一个有立体感和距离感的新影像,该影像不同于上述两个影像中的任何一个,这是每一个正常人都可以感受到的。上述两眼观察物体成像的过程就是神经中枢信息融合的过程。

在自然界中,高等脊椎动物的多传感器集成主要体现在以下三种不同形式:同类传感器多方位测量(如使用两只眼睛)、不同传感器多方位测量(如观察和触摸同一目标)及分布测量(如皮肤中的传感器网络)。但迄今为止,有关生物进行多传感器融合的过程还没有被人们所掌握。人们对神经系统不太复杂的蝮蛇和眼镜蛇进行了研究,结果发现这些蛇的光学热窝(脊椎动物中的中脑结构)中的神经元,既能接收视觉信息又能接收红外信息。从图 1.1 中可以看到,眼镜蛇的左眼和热窝都能接收到来自左上方区域的信息。来自热窝的红外信息和来自眼睛的视觉信息都以相同的空间方位呈现在视觉中枢的表面上,以使光学覆盖层的每个区域接收到的信息都来自环境中的同一区域。这就使得“多模式”(Multi-modal)的神经元能够响应不同组合的视觉和红外信息。那些“或”神经元对其中一种模式的信息作出反应,使蛇能够根据这些信息监测出昏暗条件下的灰度。而那些“与”神经元对两种模式的信息都作出反应,使蛇能够根据这些信息识别出热血的老鼠和冷皮肤的青蛙。于是,“与”神经元被形象地称为鼠检测仪。大多数的脊椎动物都有类似的信息集成功能。

用于多传感器信息集成的方法有许多,其中最简洁的方法是让每个传感器的信息单独输入到系统控制器中。如果每个传感器所提供的信息反映的是环境中完全不同的方面,那么这种方法最适合。该方法的主要优点是增大了所传感的环境范围。如果传感器所能够传感到的环境内容出现重叠,以及可能出现信息的冗余、矛盾与相关,甚至出现其中的某个传感器影响其它传感器的工作,则来自不同传感器的信息就必须在多种表达层次上实现融合。在这种情况下,传感器融合能使系统获得更高质量的信息,这是任何

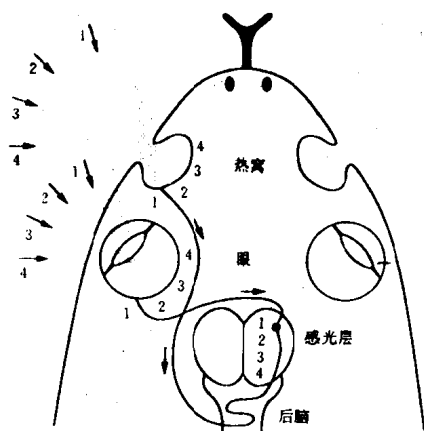


图 1.1 响尾蛇的左眼和热窝正在接收区域 1 的信息

单独工作的单个传感器所无法直接得到的。

在许多多传感器的数据系统中,处理输入信息的数量和速率已超过操作人员的能力。此外,数据的复杂性(如多维测量)和测量中的模糊性也都超出了人们对数据的关联和分类能力。这就要求各单独的融合处理方法全部或部分地实现自动化,以从大量的原始信息中获得精确的、易于理解的信息。就自动系统的应用来说,自动信息融合可以使人类从重复的劳动中解脱出来。因此,模拟人的融合处理方法,以提高处理速度、容量或改善处理精度是研究多传感器信息融合的重要原因。

多传感器集成与融合技术实际上是一种多源信息的综合技术,通过对来自不同传感器(信息源)的数据信息进行分析 and 综合,可以获得被测对象及其性质的最佳一致估计。

多传感器集成(Multisensor integration)是指某个多传感器系统为完成某一任务,对来自不同传感器的信息进行综合的系统控制过程。它强调的是系统中不同数据的转换和流动的的总体结构。

多传感器融合(Multisensor fusion)是指在多传感器集成过程中,将传感器的信息合并成统一的综合信息的任何一个具体阶段。它强调的是数据的转换和合并的具体方法与步骤。

图 1.2 所示的组网结构为多传感器集成与信息融合的一般模式。信息融合在图中的各节点上进行,而整个结构是一个多传感器集成的实例。

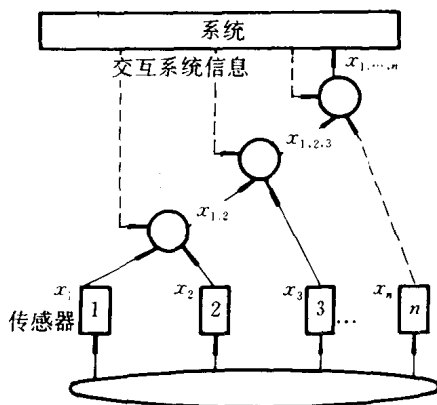


图 1.2 多传感器集成的一般模式

从图 1.2 中可以看到,几个传感器组合成一体为整个系统提供信息。前两个传感器的输出 x_1 和 x_2 在左下边的节点中进行融合后形成新的信息,用 $x_{1,2}$ 表示,第三个传感器的输出 x_3 又在下一个节点与 $x_{1,2}$ 融合,结果表示为 $x_{1,2,3}$,依此类推。系统所有传感器的输出以类似的方式融合成一个结构。从系统方框到每一节点的虚线,表示信息融合过程中有可能与系统进行信息交互。大多数多传感器集成结构的共同之处在于当信息向上移动时,信息的表示形式由低级向高级变换,即在结构的最低一级,原始数据进入传感器,并转换为信号信息。经过一系列信息融合之后,信号逐渐变为更加抽象的数字或符号。

多传感器集成与融合的主要优点体现在以下几个方面：

(1)提高了信息的可信度

利用多传感器能够更加准确地获得环境与目标的某一特征或一组相关特征,整个系统所获得的综合信息与任何单一传感器所获得的信息相比,具有更高的精度和可靠性。

(2)增加了目标特征矢量的维数

各个传感器性能相互补充,收集到的信息中不相关的特征增加了,整个系统获得了任何单个传感器所不能获得的独立特征信息,可显著提高系统的性能,使多传感器系统不易受到自然现象的破坏或外界的干扰。

(3)降低了获得信息的费用

与传统的单个传感器系统相比,在相同的时间内,多传感器系统能够获得更多的信息,从而降低了获得信息的费用,这在测量运动速度快的目标时尤为重要。

(4)减少了信息获取的时间

由于多传感器系统的信息处理是并行的,从而大大缩短了系统信息处理的总时间。

(5)提高了系统的容错能力

由于多个传感器所采集的信息具有冗余性,当系统中有一个甚至几个传感器出现故障时,尽管某些信息减少了,但仍可由其他传感器获得有关信息,使系统继续运行,具有很好的容错能力。

(6)提高了整个系统的性能

国外已从理论上证明了,通过多传感器信息的融合而获得的对环境或目标状态的最优估计,不会使整个系统的性能下降,即多传感器信息融合系统的性能不会低于单传感器系统的性能,并且证明了使用多传感器一般总能提高系统的性能^[2]。

为便于理解,请看一个目标识别的例子。图 1.3 描述了目标识别中的信息互补和信息冗余问题。图 1.3(a)中有四个物体,现

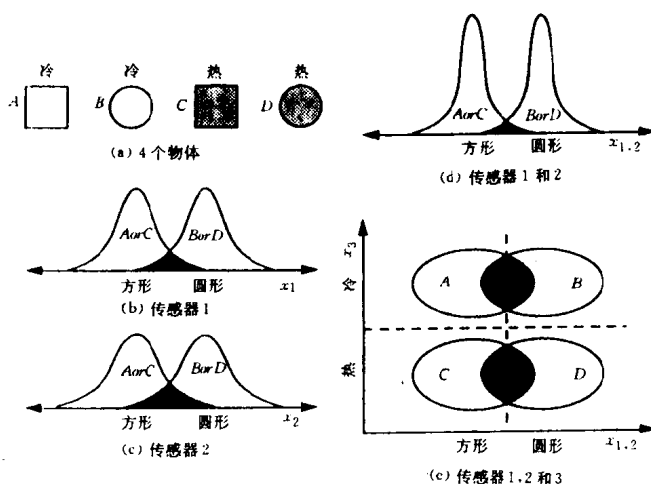


图 1.3 运用三个传感器的冗余和互补信息识别四个不同的物体

在要通过形状和温度这两个独立特征将它们区分开。传感器 1 和 2 提供物体形状方面的冗余信息，传感器 3 提供物体温度方面的信息。图 1.3(b)和(c)所示为“方形”和“圆形”物体的假设概率分布。两个图中的横坐标代表传感器的可能读数范围。输出值 x_1 和 x_2 分别为每个传感器所确定的物体的“方度和圆度”值。由于传感器 1 和 2 不能检测物体的温度，因此无法区分物体 A 和 C(以及 B 和 D)。图中的黑影部分范围内，被测物体形状具有不确定性。图 1.3(d)所示为 x_1 和 x_2 融合后的概率分布。无论融合是以何种方式进行，冗余信息融合后的概率分布与各分量的分布相比，其分散程度降低。图 1.3(d)所示的不确定度大约是图 1.3(b)或(c)的一半。图 1.3(e)中，来自传感器 3 的有关温度独立特征的互补信息与图 1.3(d)所示的来自传感器 1 和 2 的形状信息进行融合。由于融合了附加特征信息，现在就可以将这四个物体区分开。这种分辨能力的增强应归功于互补信息的融合。