

# 11 微电子学讲座

石井威望

下山 勋

(日) 井上博允 著

广濑通孝

中岛尚正

## 机械电子学

科学出版社

7P24  
4

微电子学讲座 11

# 机 械 电 子 学

【日】石井威望 下山 助 井上博允 著  
广瀬通孝 中岛尚正

卢伯英 余达大 王 平 张春玲 译



科 学 出 版 社

1991

## 内 容 简 介

本书是“微电子学讲座”第11卷。它系统地介绍了以机器人为中心的机械电子学的基础知识,其中包括传感器的基本知识,计算机控制的算法和程序等,并在此基础上定义了功能集,构成了机器人系统。应该指出的是,本书中介绍的机器人系统的构成方法是比较新颖的。

本书可供从事机械电子技术工作的科技人员参考,也可以作为大专院校机械、电子、控制、计算机、机器人等专业师生的教学参考书。

石井威望 下山 勲 井上博允 廣瀬通孝 中島尚正 著

岩波講座 マイクロエレクトロニクス 11

メカトロニクス

岩波書店, 1985

## 微电子学讲座 11

### 机 械 电 子 学

〔日〕石井威望 下山 勲 井上博允 著  
廣瀬通孝 中島尚正

卢伯英 余达太 王 平 张春玲 译

责任编辑 魏 玲

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码: 100707

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

★

1991年1月第一版 开本: 850×1168 1/32

1991年1月第一次印刷 印张: 8 2/3

印数: 0001—1 800 字数: 230 000

ISBN 7-03-002008-1/TN·94

定价: 9.50元

## 译 者 的 话

**Mechatronics (机械电子学)** 这个日制英语名词, 自 1972 年 1 月由日本(株)安川电机制作所将其作为商标正式登记之后, 经过短短的 10 年, 就得到了世界各国产业界、学术界的承认, 同时它作为面向 21 世纪的一项科学与技术的结晶, 愈来愈受到人们的重视。机电一体化产业和机械电子学学科业已逐步形成。可以预测, 今后十几年内, 机电一体化技术给社会及各产业界的巨大冲击, 将可以和 18 世纪的欧洲工业革命及 19 世纪前期的工业自动化相提并论。

对“机械电子学”这一新学科虽然尚未有明确的学术定义, 但它在技术概念与技术内容上都有所创新, 是一个全新的学术领域。机械电子学的三大技术支柱是微电子技术、机械与计算机。这三大技术体系的复合加上必不可少的人文科学与社会科学, 就代表了现代科学技术发展的主要趋势。因此, 机械电子学作为科学综合发展的结晶, 越来越引起我国广大科技人员的重视, 越来越多的研究机关、大学、企业开始向机电一体化进军, 国家教育委员会也于 1989 年将机器人学列入我国的学科专业目录, 新的机电控制与自动化学科的确立也已提到议事日程上来。为了适应我国机械电子学这一新学科发展的需要和满足国内广大学者、科研人员及工程技术人员对新技术、新知识的渴求与人才培养的需要, 我们翻译了本书。翻译此书的宗旨在于向有志于投身机械电子学技术研究、开发的同行和有关专业的研究生、大学生提供一本系统性强、观点新颖的教材或参考书, 为我国机电一体化技术的发展和人才培养贡献一点微薄的力量。

本书序言, 第一、二、三、四章由北京航空航天大学卢伯英翻译, 前言、第五章、索引由北京科技大学余达太翻译, 第六章由日本

冲电气公司张春玲翻译，第七、八章由北京航空航天大学王平翻译，全书由卢伯英统一校订定稿。

译者水平有限，译文难免有疏漏之处，欢迎广大读者批评指正。

卢伯英 余达太

1989年8月

## 原 编 者 的 话

随着大规模集成 (LSI) 电路技术的不断发展, 迎来了超大规模集成 (VLSI) 电路时代。现在, 一个大规模的系统已经能够集成在一块 VLSI 芯片内, 因而, 面向 VLSI 的系统设计技术以及把这些 VLSI 组合起来构成巨大系统的技术, 在目前均被看作是微电子学的一部分。

本讲座中所介绍的微电子学就是这种广义的微电子学, VLSI 的发展将给今后的社会带来巨大的影响。因而, 本讲座的目的就是要集中介绍设计制作 VLSI 及由 VLSI 构成的计算机、通信、机械电子学等信息系统所必需的理论和技術。

然而, 微电子学是 LSI 技术诞生后不久出现的、发展十分迅速的领域, 至于它将以何种形态向前发展, 其可能性是很多的。所以, 若想把它汇总成一个完整的学科系统还有许多困难。因此, 本讲座的目的是:

(1) 向关心微电子学的初学者和准备应用微电子技术的人们介绍有关微电子学的基础知识。

(2) 作为在计算机、通信、机械电子学领域工作的技术人员、研究人员的实践指南。

(3) 把掌握微电子学所必需的基础知识和技术明确化、系统化。

(4) 把微电子学作为一门新的学科进行系统介绍, 并使其成为向理想教学用书迈进的里程碑。

希望本讲座能成为学生、技术人员、研究人员的良师益友。

元冈 达 菅野卓雄 渡边 诚

渊 一博 石井威望

## 前 言

去年(1984年),日本机械学会编辑出版了“机械电子学丛书”(共计七卷,技报堂出版)。这一情况表明,“机械电子学(メカトロニクス)”这个术语,终于得到了学术界的承认。一般来说,有权威的日本大学会,在采用日本式英语片假名单词时,照例会遇到相当大的阻力。因此“机械电子学”这个术语居然能被人们接受,确实是出乎意料的。究其原因,恐怕是由于在产业界中,机械电子学的应用范围迅速扩大,所占比重日益增长的缘故吧。例如,在汽车制造的现场中,往往有数百台工业机器人在工作着。如果走进机床国际博览会,人们看到的全是数控(NC)化展品,非数控机床几乎看不到。此外,生产出来的汽车也好,机床也好,其出口量之大,已经达到了引起国际贸易摩擦的程度,而且这些产品的质量,在国际上也获得了很高的评价。总之,工业界人士已普遍认识到,机械工业的核心部分已经发生了根本变化,这也许就是“机械电子学”这个术语之所以能得到社会承认的原因吧。

在四分之一世纪以前,人们使用的还是电子管计算机,对于我们这一代熟悉继电器式计算机的人来说,做梦也没有想到机械电子学会在现代产业中扮演主角。当今科学技术发展十分迅速,特别是日本,在科学技术上取得了长足的进步。然而,作为个人回顾往事,则有惭愧之感。作者1957年在通产省是负责机床方面事务的官员。当时的技术水平,不单单是机床工业,整个机械工业与各先进国家比较都有明显的差距,其落后程度简直令人绝望,使人们不由自主地产生一种“我们的努力何时才能奏效”这类不安的念头。怎样才能加快对先进国家的追赶速度,摆脱技术落后的状态呢?当然是想尽了办法,也尽了最大努力。但是当时机械电子学还处于发展初期,人们对机电一体化问题还在进行讨论。就日本

当时的实际情况来说,还远没有取得人们期待的成果。当然,这些经验未必都是无用的。实际上,每一项技术成果,都必然是在总结前人失败经验的基础上得到的,这早已为历史所证明。

现在的机械电子学基础,早在 60 年代便确立了其基本发展方向,70 年代形成为完整体系。进入 80 年代后,便在机械电子学的基础上,出现了上述实际成果。本书作者的阵容竟如实地反映了日本的机械电子学发展历史,这是事前没有想到的。本书的五名作者,皆为东京大学工学系机械工程专业和工业机械工程专业教师。从他们自该大学工学系毕业的年代看,可以划分为下列三代:本前言作者(石井)毕业于 50 年代中期,属于第一代;中岛和井上两位教授毕业于 60 年代中期,属于第二代;而广濑和下山两位副教授毕业于 70 年代中期,则属于第三代。

就是在上述第一代人之前,作为第一代人的老师的渡边茂和藤井澄二两位名誉教授(40 年代毕业),就已经跨进了机械工程专业,从而为培养机械电子学方面的人才起到了伟大先驱者的作用。尽管各代人在不同的时期内同时工作着,但是各代人都起到了他们各自不同的作用。机械电子学发展的最大转机,要算 70 年代半导体集成电路的飞跃进步了。虽然习惯上有集成电路革命之称,但在文字上一般都把集成电路写成半导体集成电路。现在,半导体集成电路已经像螺栓和螺帽那样,成为不可缺少的机械零件了。对于第三代以后的技术工作者来说,将集成电路革命的说法改为革命,已不再使人感到惊奇,成为非常自然的事情了。如果把今天对机电一体化这个名词的理解,与这个名词刚出现时对它的认识进行比较的话,就会发现它们之间存在着天壤之别。但是拿现状与机械电子学的理想目标进行比较,事实上还相差得很远。不过可以预料,经过第四代和第五代后继者的努力,机械电子学内部的潜在能力将会全面地发挥出来。

现在是 80 年代中叶,值此《机械电子学》一书问世之际,千头万绪涌上心头。面对发展速度比预想要快得多的机械电子学的进展势头,感慨万千。展望十余年后即将到来的 21 世纪,我们期待着

机械电子学能有更加迅速的发展,另一方面这也促使我们对机械电子学的发展现状进行探讨。从这种意义上来看,本书也许可以看作是一本尚未写完的书籍。把这本书作为微电子学讲座丛书的最后一卷,作为编者之一,我确实感到不胜荣幸。但是另一方面也感到有些不安,担心本卷与其他各卷比较,多少会使读者产生一些不协调的感觉。当然,如果缺少了机械电子学这一内容,这个讲座肯定也是不完善的。如果本书能使读者在微电子学中最有希望的分支之一的机械电子学方面获得一些有益的启示,那么作为编者和本卷书籍的执笔者,我将感到十分荣幸。

本书各章的执笔分配情况如下:

|     |                |      |
|-----|----------------|------|
| 第一章 | 绪论——机械电子学的考虑方法 | 石井威望 |
| 第二章 | 传感器            | 下山 勋 |
| 第三章 | 执行器            | 下山 勋 |
| 第四章 | 实现             | 下山 勋 |
| 第五章 | 机器人系统          | 井上博允 |
| 第六章 | 分散化和高可靠性       | 广濑通孝 |
| 第七章 | CAD 系统基础       | 中岛上正 |
| 第八章 | 展望             | 石井威望 |

最后,为了完成本书,曾得到岩波书店的大力支持和热情关怀,在此向岩波书店有关人士致以衷心谢意。

石井威望

1985年1月

# 目 录

|                    |     |
|--------------------|-----|
| 第一章 绪论——机械电子学的考虑方法 | 1   |
| 1.1 微电子学与机械电子学     | 1   |
| 1.2 机器人学的意义        | 3   |
| 1.3 本书的主要内容        | 6   |
| 第二章 传感器            | 9   |
| 2.1 连续系统和离散系统      | 9   |
| 2.2 传感器算法          | 21  |
| 第三章 执行器            | 29  |
| 3.1 执行器            | 29  |
| 3.2 控制算法           | 32  |
| 第四章 实现             | 48  |
| 4.1 计算机的结构         | 48  |
| 4.2 指令系统           | 56  |
| 4.3 程序设计           | 72  |
| 4.4 开发效率与工具        | 78  |
| 第五章 机器人系统          | 83  |
| 5.1 作为系统的机器人       | 83  |
| 5.2 功能集            | 86  |
| 5.3 并行过程的监控        | 108 |
| 5.4 传感器的交互作用       | 119 |
| 5.5 机器人语言          | 128 |
| 5.6 装配作业的程序        | 138 |
| 5.7 小结             | 149 |
| 第六章 分散化和高可靠性       | 151 |
| 6.1 机械电子学的目标       | 151 |
| 6.2 分散化            | 153 |
| 6.3 高可靠性           | 185 |

|                           |            |
|---------------------------|------------|
| <b>第七章 CAD 系统基础 .....</b> | <b>210</b> |
| 7.1 CAD 的演变.....          | 210        |
| 7.2 设计物的表示法 .....         | 212        |
| 7.3 坐标变换 .....            | 214        |
| 7.4 局部坐标系与绝对坐标系 .....     | 218        |
| 7.5 实体模型和数据结构 .....       | 223        |
| 7.6 定尺寸 .....             | 231        |
| 7.7 装配和定尺寸 .....          | 235        |
| 7.8 装配的输入和数据结构 .....      | 239        |
| 7.9 功能的模拟 .....           | 248        |
| <b>第八章 展望.....</b>        | <b>257</b> |
| 8.1 向产业界挑战 .....          | 257        |
| 8.2 新技术的交叉影响 .....        | 261        |
| <b>参考文献.....</b>          | <b>266</b> |
| <b>索引.....</b>            | <b>270</b> |

# 第一章 绪论——机械电子学的考虑方法

## 1.1 微电子学与机械电子学

在日本,“机械电子学”这个术语虽然是在 1980 年前后才确定下来,但是“机电一体化”这类相似的术语,在这以前就已被人们广泛采用。尽管初看起来这两个术语有相似之处,然而它们产生的时代背景却大不相同。从这一点考虑,机械电子学作为一个新术语是有其新意的。

首先,机械电子学与机电一体化所处的时代不同,机械电子学时代的最大特征是由于出现了微电子学,能够开始提供功能强大的新的基本元件,从而使机械电子学能在近期内得到了真正的发展。

近年来兴起的微电子学,优于过去的机电一体化技术,现在我们来研究由此带来的一些优点。微电子学的核心技术之一,是高度的电路集成技术。例如,它可以把复杂的逻辑电路集成到一块硅芯片上,其结果是可以把原来的电子线路的尺寸大幅度减小,重量大大减轻,从而可很容易地安装在机械设备内部。这样,一种远远超过过去的机电一体化水平的组合体就能够实现了。

但是,仅仅作到小型化这一点,就认为组入机械设备内部的功能元件就能产生预期的效果,显然是不现实的。与电子仪器的工作环境相比,机械设备内部的环境条件要恶劣得多。例如,对于飞机上安装的电子线路,由于各种执行机构的动作而产生的电气噪声、飞机本身的机械振动、温度的大幅度改变等,所有这些恶劣条件均需要加以考虑。实际上不限于飞机,就是对于汽车、工业机器人、磁带录像机(VTR)这样一些普通机械电子产品,本质上其工作环境的恶劣程度也是同样的。

• • •

其次,机械电子化的第二个作用,是由于电路的集成化而使其抗环境干扰的能力迅速提高。具体地说,这是由于电路实现了固体化和集成化,从而使布线连接部分减少所产生的效果。

第三,电路的装配工作显著简化,产品的价格可以大幅度下降。这在工业上具有特别重要的意义。近年来,迅速发展起来的机械电子技术,在日本正在引起人们的普遍关注,其中一个重要原因就是集成化技术的发展,使得大量在过去来说价格昂贵的电子部件,可以集成到一块芯片上,从而降低了价格,同时元件的性能也比较稳定,并且能够源源不断地供应市场。

总之,通过电子技术和机械技术的结合,将要产生一种崭新的机械,这种设想看来是很自然的。但是在微电子学时代以前,要想在工程上实现这种机械决非易事,从这种意义上看,可以说微电子学对于这种新型机械,即对于所谓机械电子机器的实现起到了决定性作用。

可是,为什么现在在工业生产和社会生活上,对机械电子机器的需要会如此迫切呢?从工业生产方面来说,这是由于对自动化程度的要求越来越高。从历史上看,正是为了把人们从单纯的体力劳动中解放出来,才开创了自动化技术。自动化技术发展到今天,其研究对象正在朝着高度智能化作业转变。

事实上,日本工业界在50年代到60年代中期,大体上已经完成了为大批量生产使用的生产设备的技术开发工作。70年代,已经转变到以多品种、小批量生产为目标的新技术开发时期。随着时间的推移,人们进一步加深了对生产系统状况的认识,从而意识到,为了组合成多功能的复杂机械,元、部件必须具有很高的信息功能。总之,只用过去生产出来的元、部件构成的生产设备,其性能决不能满足为完成上述精确而复杂的任务所提出的性能要求。因此,人们不是从以前的机械部件中简单地更换几个电子元件,而是进一步把注意力集中到具有更高性能指标的机械电子机器上。

微电子学的发展是机械电子学发展的必要前提,前面的论述已经说明了这一点。但是,另一方面,由于机械电子学所要求的高

性能技术条件，又促进了微电子技术的更进一步发展。例如在机械工程范围内研究的燃烧、断裂以及运动等现象中，存在着许多比微型计算机运算速度高得多的演变过程。尤其是为了构成高度智能化的机器人，现有的计算机功能肯定是不能胜任的。此外，为了使作为医学机械电子设备创举的人工心脏能付诸应用，在可靠性方面，也要求能有重大改进。

反过来讲，作为微电子学典型器件的半导体的制造设备，也需要有高精度的加工机械。由于机械电子化，各种机械的精度（如定位等的工作精度、时间测量精度、环境控制能力，以及与测量能力的提高相关的产品纯度管理精度等等广泛意义上的精度）都可望得到提高。据此便有可能制作更加精密的电路，从而促使微电子技术得到更进一步的发展。

这样一来，微电子学和机械电子学就成了两个相辅相成、彼此促进、循环发展的学科。

## 1.2 机器人学的意义

在机械电子学中，最有代表性的产品就是机器人。如果把在电子部件的作用完全丧失的情况下机械中的功能下降程度看作是机械电子化的指标，则当今在汽车等车用电子化的公开宣传中，机械电子化所占比重并不大。EFI 化的发动机也有相同情况。如果把这个历史发展阶段，看作是在过去的机械部件中又加进了一些电子部件，那将是很自然的事情。

对机器人来说，从其诞生开始，就是以计算机控制作为其先决条件的。没有信息系统的机器人只不过是一种连杆机构。从这种意义出发，可以说机器人的机械电子化程度实质上是非常高的。因此，不难想象，就机器人而言，机械电子学的固有特点，不论是好的方面还是坏的方面都将被增强，并且将极为鲜明地表现出来。正是出于这种考虑，本书才利用了比较多的篇幅阐述有关机器人学的问题，不过这里要稍微强调一点，那就是本书中阐述的内容，不

仅适用于机器人，同样也适用于大多数其它机械电子产品，所以是具有普遍意义的。

在机器人中，(1) 可以主动对外界产生作用，它把原来的机械技术进行扩充，增加了执行器部分；(2) 它把原来的测量技术进行扩充，增加了采集外界信息的传感器部分。(3) 它把原来的计算机技术加以扩充，增加了信息处理部分。这些部分有机的结合在一起，就构成了机器人。上述三部分缺一不可，否则机器人将不能产生连续而平滑的动作。机器人产生于本世纪60年代后期，它的出现绝非单纯空想的产物，而是以切切实实的技术基础作基础的。例如当时有一种被称为万能机的装置，它在当时是一种有代表性的机器人，从本质上说，它和现代的产业机器人大体上具有完全相同的构造原理。不过，当时的计算机技术尚不成熟，因此还没有达到实用的地步。

机器人技术在产业界受到广泛重视，或许是从本世纪80年代初期开始的。正如前面谈到的那样，它是和微电子学技术的成熟密切相关的。由于电子元件的固体化，计算机的可靠性大幅度提高，从而使其能在生产现场安装使用。这样，在进行现场作业时，只要提高计算机本身的信息处理能力就可以了。

通常，机器人可以按照表1.1那样进行分类。第一叫做手控操作手，它是一种由人进行操作的机器人，机器人如何动作，由人发出的指令决定。总之，这是一种只有执行器部分的机器人。第二是定序机器人，如同风琴演奏那样，把某种确定的演奏程序记忆下来，从而构成一种能反复自动进行演奏的机器人。第三是变序机器人，这种机器人的工作程序，具有某种程度的选择范围，而且可以在复数域内设定程序。第四是再现机器人，人预先给出(示教)机器人的运动轨迹，然后机器人准确地重复再现这种轨迹。最后是智能机器人，它可以实时地采集外界不断变化的信息，并且可以自行变更其本身的运行情况，所以它是一种具有综合功能的智能机器人。

在表1.1的分类中，粗略地说，排列顺序越往下功能越强，因而

表1.1 产业用机器人的分类

---

|       |
|-------|
| 手控操作手 |
| 定序机器人 |
| 变序机器人 |
| 再现机器人 |
| 智能机器人 |

---

越需要采用高技术,特别是需要高性能的计算机。

现在的产业机器人,多数是程序机器人和再现机器人。由于计算机技术和传感器技术的发展,现在已经进入了智能机器人的研制阶段。一些智能机器人已开始逐渐投入现场应用,智能机器人的普及推广也正在稳步进行。

但是,现在的机器人还存在一些尚未解决的问题。这里我们要强调指出一些遗留下来的根本问题。首先,正如前面所说的那样,现在的机器人在有关信息部分方面,可以说正在取得显著进步。但是这方面强调得有些过分。相比之下,对于基础部分的研究则往往被人们忽视。

例如,关于能源的供应问题,目前还没有进行充分研究。对于采用双足或多足的机器人,怎样才能使它平稳地行走,在各个研究机关正积极地进行着这类问题的研究。当前,有关机器人行走的算法已经完成,但对于在外部设置能源供给部分的机器人,究竟采用何种能源供给方式对步行有利,尚待进一步研究。顺便说一下,就现在的机器人技术水平来说,要制造能够自己站起来的机器人,还是一件相当困难的事情。

一般来说,当把技术内容区分为“与质量有关的内容”,“与能量有关的内容”和“与信息有关的内容”时,前两方面的相互关系比较容易理解,例如火箭,为了获得较大的运动能量,必须装载较多的燃料,或者当需要提高飞机发动机的输出时,就要装配大型的发动机。但是随着机体的改变,又会导致重量的增大和速度的降低。诸如此类的例子,人们是不乏切身体验的。但是,在有关包含

信息的讨论中,这样一些相互关系却往往被人们忽视。

总之,实际上在设计装载有计算机的机器人时,信息处理部分必然占据一定重量。一般来说,信息处理能力越强,其重量便越大。因此,在小型化技术尚未发展到一定水平时,信息处理部分的安装必将导致重量的增加,因而也增加了控制方面的困难。其结果是进一步要求增加额外的信息处理设备,这又可能招致重量进一步增加,造成恶性循环。从另一方面说,如果机器人有可能达到某一临界的轻量化水平,则机器人就可能开始站立起来,并且能够自由地行走。上述讨论表明,在设计机器人时,需要以联立方程式的形式,同时考虑信息质量与能量之间的关系。

如果从更广义的观点去看,机械电子学这一术语,确实不限于它本来的含义。它要求将机械设计、电路设计和软件设计这样一些本质上完全不同的设计体系融合为一体。体现这种要求的最直接了当的实例就是机器人。

近来生产出来的机械电子部件,已经达到了非常精密的地步。与此相比,通常的机械部件却未必能说已经达到了完善的地步。对于机器人来说,其执行器部分与控制器部分的结构存在很大差别,虽然它们是一些常规结构,但今后仍可望得到改进,顺便指出,这里的机械与电气之间的关系,是在所谓强电与弱电部件范围内谈的,对于强电部件,可以不必考虑有关大规模集成电路的注意事项。

总而言之,如果只有先进的微电子学技术,将不会有优良的机器人,也不会有真正的机械电子学技术。如果没有先进的执行器、放大器等外围支援技术,就不能充分发挥微电子学技术的固有潜力。

在这种意义上,当前有关机器人的研究开发工作,对于推动整个机械电子学的发展,具有决定性作用。同时也可以预料,具有崭新结构的机械电子学专用部件,将会不断地被开发出来。

### 1.3 本书的主要内容

本书由八章组成,正像前一节叙述的那样,作为具有代表性的