

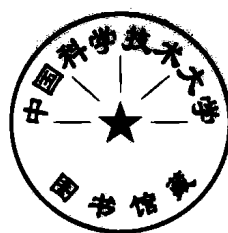


# 图 像 测 量 入 门

〔日〕精机学会图像测量分会编

植村恒彦 主编

孙培懋 等译



计 量 出 版 社

1 9 8 3

## 内 容 提 要

本书综述了图像测量的各种方法、原理和应用。内容包括科技摄影的利用, 高速摄影和实体摄影测量, 利用全息术、激光散斑和莫尔拓扑法进行的光学图样测量, 微图形的瞄准、定位和判读, 利用图像传感器的实时测量和采用数字计算机及光学信息处理的图像数据处理等。本书可供从事精密计量、图像测量和信息处理的技术人员及高等院校的有关师生参考。

### 画 像 計 測 入 門

〔日〕精機学会画像計測分科会編

編集委員長 植村恒義

株式会社昭晃堂 1979

### 图 像 测 量 入 門

〔日〕精机学会图像测量分会編

植村恒義 主编

孙培煜 等译

计量出版社出版

(北京和平里41区7号)

北京计量印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售



开本 850×1168 1/32

印张 8

字数 199 千字

印数 8000

1983年 4 月第一版

1983年 4 月第一次印刷

统一书号 15210·143

定价 1.20 元

科技新书目: 21—149

# 图 像 测 量 入 门

(日本) 精密机械学会图像测量分会编  
编辑、执笔人名单 (按50音图顺序)

|    |         |              |
|----|---------|--------------|
| 主编 | 植 村 恒 義 | 东京大学工学院      |
| 编委 | 齋 藤 弘 義 | 理化学研究所       |
|    | 辻 内 順 平 | 东京工业大学工学院    |
|    | 吉 澤 徹   | 东京农工大学工学院    |
|    | 吉田庄一郎   | 日本光学工业公司     |
|    | 山 本 芳 孝 | 东京大学工学院      |
| 执笔 |         |              |
|    | 秋 山 伸 幸 | 日立制作所生产技术研究所 |
|    | 植 村 恒 義 | 东京大学工学院      |
|    | 倉 沢 一 男 | 浜松电视公司       |
|    | 齋 藤 弘 義 | 理化学研究所       |
|    | 鈴 木 正 根 | 富士写真光机公司     |
|    | 辻 内 順 平 | 东京工业大学工学院    |
|    | 長 野 末 光 | 纳库公司         |
|    | 丹 羽 登   | 东京大学宇宙航空研究所  |
|    | 松 永 梧 郎 | 纳库公司         |
|    | 道 野 敏 雄 | 纳库公司         |
|    | 山 口 一 郎 | 理化学研究所       |
|    | 山 本 芳 孝 | 东京大学工学院      |
|    | 吉 澤 徹   | 东京农工大学工学院    |
|    | 吉田庄一郎   | 日本光学工业公司     |

## 译 者 的 话

随着近代技术的发展，几何量的尺寸和形位测量已从简单的一维坐标或形体发展到复杂的二维甚至三维的物体；从静止的对象发展到高速运动的物体；从宏观物体发展到微观的结构。这当中无论哪种形式的测量，或者其被测量的对象本身就是一个图像，或者其结果需要以图像的形式表现出来。这些图像中包含着极其丰富的信息，是人们从客观世界中获得信息的重要手段。因此，正确地测量和处理图像已成为测量技术中的重要课题，形成了一个新的分支——图像测量技术。它广泛地应用于航空等遥感测量及图像处理、医用及金属图像的测量、微电子技术中微图形的检测、精密复杂机件的微尺寸和外观质量的检验、光波干涉图、应力应变场等状态分布图的判读等和图像有关的技术领域中。图像测量作为机器视觉的基础，当它与被测对象组成反馈回路时，还可构成能具有自动瞄准、定位、校准、判读和景物识别等各种功能的控制系统，这就为进一步发展人工智能技术打下了良好的基础。因此，作为图像科学的一个组成部分，图像测量将会随着信息科学和人工智能的发展而日益显示其重要的作用。

为满足各种技术领域对图像测量提出的日益增多的技术要求，图像测量已从古典的光学测量方法跨入近代科学的行列中。它广泛地引进了高速及立体摄影、激光测量、电视及光电子学、计算机技术和图像处理等新技术，组成混合的测量系统，这就极大地提高了它的测量能力，扩大了应用的灵活性，并为它的应用和发展开辟了崭新的途径。因此，图像测量是近代技术相互渗透的跨学科的结果，涉及到广泛的学科领域。

本书是一本有关图像测量的技术参考书。书中从精密测量的角度出发，系统地阐述了利用近代光学、电子学和计算机技术进行图像测量的方法和原理，收集了近年来有关技术的重要成果和

许多已在生产实践中行之有效的各种应用实例，其中包括科技摄影的基本方法和装置，高速摄影和实体摄影测量，利用全息术、激光散斑法和莫尔拓扑法进行的光学图样测量、对以大规模集成电路为代表的微尺寸和微图形的瞄准和测量，利用各种类型图像传感器的实时测量和采用数字计算机和光学信息处理的图像处理方法。全书共分六章，由日本精密机械学会图像测量分会组织日本有关专家集体编写而成。书中对有关图像的许多领域中的技术成果进行了归纳和提炼，确立了图像测量学科的基础。尽管这种归纳方法尚有待进一步的发展，但作为一个良好的开端应该说这是该书的一个重要的贡献。

本书取材新颖，涉及技术范围广泛，既有一定的理论深度又侧重于实际的应用，因此对于在理、工、医各领域中从事图像测量和信息处理的技术人员，高等院校应用物理、光学、电子学、精密测量、医学工程等专业的师生，都是一本有用的入门参考书。

本书的性质是入门性的，这就要求在一定的篇幅内对图像测量作全面的阐述，因此书中的有些论述和应用介绍是很精炼的。读者在需要时请参照书中所列的参考文献。

参加本书译校工作的有：康立民（第一章译），何庆生（第二章译），孙培懋（绪论、第三、四、五章译，第一、二章校），何树荣（第六章译），李达成（第三章、六章后部校）张孝楝（第三章部分校），丁天怀（第四、五章校）和容观澳（第六章前部校）。孙如心同志对全书的文稿作了详细的审核，最后由孙培懋整理定稿。郑容和李滋兰参加了译校工作。由于我们的水平有限，译文难免有错误和不妥之处，尚请读者指正。

最后要提到的是，在本书的翻译过程中，得到了原书的主编、东京大学工学院植村恒义教授和清华大学精密仪器系光学仪器教研组许多同志的帮助，在此向他们表示深切的感谢。

1981年7月于清华大学

## 前 言

图像测量是以光学为中心发展起来的测量方法，由于日本先进科学技术的支持，这一学科即便在精密机械学会也成为重要的活动范围。近年来科学技术的显著发展，不仅采用了光学而且由于引进了电子学和计算机技术，正在使图像测量进一步引向实际应用。鉴于这种形势，精密机械学会从1975年也设置了“图像测量研究调查分会”，一直在切实地开展着活动。作为其活动的一环，于1976年秋举办了以“最近的图像测量及其方法”为题的图像测量讲习班，博得了相当的好评。除了有精密和机械工程的技术人员参加外，还有许多来自电工学直至医学牙科学等各领域的参加者。这里，把当时的教材在重新构思的基础上进行了全面地改写，从精密测量的观点重新评价图像测量的范围，经过整理试编成了本书。

图像测量是近几年来突出发展起来的学科，尽管最近以来各种专题文章在许多领域中显露头角，但是作为汇编成文的著作还未见诸于世。因此我们主要以最近的专题为主，通过对图像测量的重新认识，试图组成统一的整体。正因为这是边缘学科特点很强的领域，作为一个统一的体系，很难说处理得非常得当，对于不协调和不足之处，希望给予谅解。

本书是按照图像的形成、记录、处理、再现这样的安排，从精密工程的角度编写的。我们恳切地期待这本书不仅能对精密工程、机械工程，而且能对从事电气、电子、医学等各方面的有关人员提供参考。

另外，作为和本书有关的国际会议，曾于1978年8月20日到25日在东京召开了“第13次高速摄影和图像测量国际会议”（由精密机械学会主办，有20余学会和协会参加）。

该会议包括为研究高速现象所采用的“由毫秒到微秒”的各

种测量法及其在各领域中的应用，有关图像处理以及与之相关的图像测量方法等广泛的内容。发表了国外的学术论文 120 篇，国内论文 60 篇。特别是在中心会场历时五天举行了“特别招待报告会”。会上发表了来自世界各国的权威专家的 13 篇报告和日本国内专家的 10 篇报告。作为学术交流会，它不但对了解该领域内日本国的现状而且对了解世界各国的发展状况都取得了显著的成效。这次会议有来自国外的约 160 人和国内的约 500 人参加。同时举办了“瞬间的世界”的图片展览和第一次国际图像测量仪器展览，展览历时四天，有一万多人应邀前来参观。

最后，向为本书提供了标致的卷头插图和封面照片的频闪观测法创始人、著名的美国麻省理工学院名誉教授 Harold E. Edgerton 博士致以深切的感谢。

主编 植村恒义

1979年3月



# 目 录

|                         |                |
|-------------------------|----------------|
| 图像测量绪论 .....            | ( I )          |
| 第一章 摄影测量法基础 .....       | ( 1 )          |
| 1.1 摄影测量法的特点 .....      | 植村 山本·· ( 1 )  |
| 1.2 摄影测量法的主要问题 .....    | 植村 山本·· ( 2 )  |
| (1) 摄影的真实性问题 .....      | ( 2 )          |
| (2) 图像质量问题 .....        | ( 4 )          |
| (3) 曝光时间问题 .....        | ( 6 )          |
| (4) 显微镜放大摄影的问题 .....    | ( 7 )          |
| (5) 黑白摄影和彩色摄影 .....     | ( 7 )          |
| 1.3 感光材料 .....          | 植村 山本·· ( 8 )  |
| (1) 感光材料的感光度 .....      | ( 8 )          |
| (2) 感色性 .....           | ( 9 )          |
| (3) 鉴别率 .....           | ( 10 )         |
| (4) 颗粒性与对比度 .....       | ( 10 )         |
| (5) 显影处理 .....          | ( 11 )         |
| (6) 其它感光材料 .....        | ( 11 )         |
| 1.4 照明光源 .....          | 植村 山本·· ( 12 ) |
| (1) 照明光源的必要特性 .....     | ( 12 )         |
| (2) 主要的照明光源及其特性 .....   | ( 13 )         |
| 参考文献 .....              | ( 15 )         |
| 第二章 高速摄影测量和实体摄影测量 ..... | ( 16 )         |
| 2.1 瞬时摄影法 .....         | 植村 山本·· ( 16 ) |
| (1) 瞬时照明法 .....         | ( 16 )         |
| (2) 瞬时快门法 .....         | ( 20 )         |
| 2.2 高速电影摄影法 .....       | 植村 山本·· ( 23 ) |
| (1) 间歇写入式高速摄影机 .....    | ( 24 )         |
| (2) 旋转棱镜式高速摄影机 .....    | ( 25 )         |

|                                 |      |
|---------------------------------|------|
| (3) 鼓轮式超高速摄影机和旋转反射镜式超高速摄影机····· | (26) |
| (4) 变像管分幅摄影机·····               | (30) |
| (5) 电视方式·····                   | (31) |
| <b>2.3 扫描摄影法</b> ·····植村 山本··   | (31) |
| (1) 胶片移动型超高速扫描摄影机·····          | (32) |
| (2) 旋转反射镜式超高速扫描摄影机·····         | (33) |
| (3) 变像管超高速扫描摄影机·····            | (33) |
| <b>2.4 高速全息术</b> ·····植村 山本··   | (34) |
| (1) 瞬时全息术·····                  | (34) |
| (2) 分幅摄影全息术·····                | (35) |
| (3) 高速全息干涉法·····                | (35) |
| <b>2.5 实体摄影测量</b> ·····植村 山本··  | (38) |
| (1) 概述·····                     | (38) |
| (2) 实体照相摄影法·····                | (38) |
| (3) 实体摄影用的图示仪·····              | (40) |
| (4) 实体摄影测量的应用·····              | (41) |
| (5) 实体摄影测量法的发展·····             | (42) |
| <b>参考文献</b> ·····               | (43) |
| <b>第三章 光学图样的测量</b> ·····        | (45) |
| <b>3.1 全息术</b> ·····斋藤··        | (45) |
| (1) 原理和特点·····                  | (45) |
| (2) 全息干涉法·····                  | (53) |
| <b>3.2 散斑</b> ·····山口··         | (58) |
| (1) 散斑的特性·····                  | (60) |
| (2) 基本性质·····                   | (62) |
| (3) 应用·····                     | (65) |
| (4) 特殊散斑的应用·····                | (74) |
| <b>3.3 莫尔条纹</b> ·····吉澤··       | (75) |
| (1) 莫尔现象·····                   | (75) |
| (2) 莫尔条纹的性质·····                | (76) |
| (3) 莫尔条纹的形成·····                | (81) |
| (4) 莫尔应用的发展·····                | (84) |

|                             |             |
|-----------------------------|-------------|
| 3.4 图样的应用测量 .....           | 鈴木··· (95)  |
| (1) 前言 .....                | (95)        |
| (2) 利用全息术的测量 .....          | (97)        |
| (3) 利用散斑的测量 .....           | (104)       |
| (4) 利用莫尔拓扑法的测量 .....        | (106)       |
| 参考文献 .....                  | (114)       |
| 第四章 微图形的测量 .....            | (117)       |
| 4.1 微图形的显微镜测量 .....         | 吉田··· (117) |
| (1) 显微镜的光学性能 .....          | (117)       |
| (2) 显微镜测量的自动化 .....         | (120)       |
| (3) 利用显微镜的图形测量 (应用举例) ..... | (128)       |
| 4.2 在生产线上的应用 .....          | 秋山··· (133) |
| (1) 微小缺陷检查 .....            | (133)       |
| (2) 精密位置检测 .....            | (143)       |
| 参考文献 .....                  | (150)       |
| 第五章 利用图像传感器的测量 .....        | (152)       |
| 5.1 图像测量系统和图像传感器 .....      | 仓沢··· (152) |
| (1) 图像测量系统与扫描方式 .....       | (152)       |
| (2) 非扫描型传感器 .....           | (157)       |
| (3) 扫描型传感器 .....            | (159)       |
| 5.2 利用图像信息的测量 .....         | 丹羽··· (173) |
| (1) 利用扫描提取图像信息 .....        | (173)       |
| (2) 位移和宽度的测量 .....          | (175)       |
| (3) 位置的测量 .....             | (177)       |
| (4) 面积的测量 .....             | (179)       |
| (5) 亮度分布的测量 .....           | (180)       |
| (6) 粒度分布的测量 .....           | (180)       |
| (7) 温度分布的测量 .....           | (181)       |
| (8) 三维测量 .....              | (182)       |
| 5.3 图像信息的特征与检测中的问题 .....    | 丹羽··· (182) |
| (1) 信息特征的识别 .....           | (182)       |
| (2) 取样率的提高 .....            | (183)       |

|                                  |       |
|----------------------------------|-------|
| (3) 分辨率和灰阶的提高·····               | (184) |
| (4) 位置测量精度的提高·····               | (184) |
| <b>参考文献</b> ·····                | (185) |
| <b>第六章 图像数据处理</b> ·····          | (186) |
| <b>6.1 数字处理</b> ·····松永 道野 長野··· | (186) |
| (1) 概述·····                      | (186) |
| (2) 图像数据的数字处理系统·····             | (188) |
| (3) 数字图像的处理·····                 | (194) |
| (4) 数字处理的小结·····                 | (199) |
| (5) 数字图像处理的应用·····               | (199) |
| (6) 数字图像处理的应用举例( I )·····        | (203) |
| (7) 数字图像处理的应用举例( II )·····       | (206) |
| <b>6.2 模拟处理</b> ·····辻内···       | (208) |
| (1) 作为模拟处理的光学图像处理·····           | (208) |
| (2) 使用相干光学系统的处理·····             | (209) |
| (3) 使用非相干光学系统的处理·····            | (225) |
| <b>参考文献</b> ·····                | (236) |

# 第一章 摄影测量法基础

## 1.1 摄影测量法的特点

所谓摄影测量法是从用各种感光材料记录到的照片图像中提取信息,并用来进行各种测量的方法.从普通卤化银感光材料的照片图像中获得的信息只是密度和色调的变化.如果广义地考虑感光材料而不只限于卤化银,则除了密度和色调信息外,折射率、反射率、偏光率、厚度、硬度以及电荷分布等也能记录成图像的形式而用于测量中.利用这些现象检测出信号并作成图像的方法已被应用于特殊用途的实际应用中.由于黑白照片没有色调的变化,因此图像只有密度的变化才是直接的信息.而利用密度变化与曝光量成正比的特点,可以对被测对象的照度、亮度、光谱分布等进行测量.进一步根据干涉仪的照片等还可将密度的变化用于测量温度和压力的变化.摄影测量法具有其它测量法所没有的许多特点,第一由于是利用人的视觉,因而可以直观地理解现象.也就是说,往往是一经观察就能够理解现象.而且照片图像常常能够同时全面地进行二维空间的记录.相对其它方法,特别是对电气测量这种在本质上是一维记录的方法来说,这也是个很大的特点.例如,虽然利用电的方法所形成的典型的电视图像是二维的,但对记录、再现以及传输来说,不管怎样还必须作为一维信息进行处理.此外,照片图像必然要将时间停住.不言而喻曝光时间是必要的,但曝光时间是可以缩短的.特别是如果需要高的时间分辨率,尚可以利用高速摄影.当进行摄影记录时,不需要直接接触物体,这一点也是个很大的特征.因此摄影测量法是一种非接触的测量方法,可以进行远距测量.它对那些一旦接触就有危险的情况和不能靠近的情况,或者是一经接触后现象就

会发生变化的情况都是非常有利的。摄影记录时只有光是输入信号，因此，只要被摄物体本身不发光，就必须给以外部照明。再有根据前面的说明，摄影记录是以二维空间记录的形式得到的。从这点来看，信息量通常是多的，信息的记录、存贮和保存性能都是稳定的。然而想把照片的信息用在测量上，必须十分注意照片所具有的非线性特点。

## 1.2 摄影测量法的主要问题

### (1) 摄影的真实性问题

在日语中“写真”这个词意味着描绘真实，照相是否描绘真实呢？原来英语的“photography”只具有“光画”的意义。明治初期也曾经译成过“光画”，而现在只用“写真”这个译名。往往有人以为是屡次映摄在照片上，于是就照这个词那样单纯地相信了是真实的，但有可能造成很大的错误。因此对摄影的真实性必须进行充分的研究，并要慎重地判断所拍摄的结果意味着什么。本来照片是通过光学系统将原来是三维的物体在底片上成二维像记录下来的，它将一些方面的真实性记录下来是没有问题的，但却不能记录下物体的全部真实性。下面分析一下有关影响摄影真实性的一些条件。

#### (a) 照明方法

常常有这样的情况，当不同形式地改变照明方法时，即使摄取同一被摄物体也会出现被认为是别的物体的照片这种结果。例如，当拍摄从喷嘴中喷出薄膜状的液体微粒化现象时<sup>[1]</sup>，利用从前面用杂散光和平行光照明，从背面用杂散光和平行光作为背影摄影的照明时，以及采用斯列伦摄影法\*和干涉法摄影时，能得到结果非常不同的照片。

这种情况下，为达到测量的目的，采用怎样的照明方式最为适合，对此应作仔细地研究再行选择是十分重要的。根据情况的

\* 斯列伦摄影法 (Schlieren method) 也称纹影照相。——译者注

不同有时需要同时使用2—3种方法。

#### (b) 望远镜头和广角镜头

用望远镜头和广角镜头这两种镜头拍摄时，所得到的照片与实际感觉有非常大的不同。用望远镜头拍摄道路上的许多汽车时，距离的感觉受到压缩，因而感到非常混乱。但使用广角镜头时，只有近处的汽车拍摄得大，稍离开一些的汽车就显得非常小，感到非常空旷。此外，当拍摄室内时，使用望远镜头会感到很狭窄，若用广角镜头拍摄得到的感觉又比实际要宽。如果忽视镜头的像差，两者的结果应当是与被摄物体完全相似的。可是从照片上得到的感觉和实际感觉却很不一样。

#### (c) 摄影镜头的畸变

这种像差在摄影测量时是影响很大的因素，必须加以注意。它是在画面的中央和周边处的倍率不同带来的像差，能够将一个正方形拍摄成线锤型或木桶型。如果使用广角镜头时该像差会增大，因此必须加以注意。

#### (d) 摄影镜头其它像差的影响

除了畸变以外的像散、球差、慧差、像面弯曲，色差等等，有时也是破坏照片真实性的原因，因此这些情况也是必须注意的。

#### (e) 镜头的重像、光斑的影响

在视场内有明亮的光源时，由于镜头内表面的反射，常常会发生将单个的光源拍摄成几个重像的现象，或者由于镜筒内壁的反射形成雾状光斑的现象，因而影响到照片的真实性。

#### (f) 焦深问题

当调焦到某一距离上时，在焦深范围内的被摄物体能拍摄得很清晰，但其前后的物体会变得模糊，特别在显微镜放大摄影时，其焦深更是非常浅，眼前的物体变成很大的模糊点，因此妨碍了视场，变成一幅与实际感觉完全不同的照片。

#### (g) 照片的修正和合成问题

考虑到各种条件之后，好不容易拍摄成的照片无论怎样还总是不清晰时，常常会有人从善意出发对原图进行修改。然而笔者

认为：对科学摄影来说在保持其真实性的意义上是绝对不应进行修改的。如果原来画面不清楚，应该另外附上设想的描绘像。

再有，有目的地进行修改、特技、合成等情况已不在科学摄影的讨论范围之内，但重要的是不要被这些照片所欺骗。譬如，最近空中飞碟的照片已成为话题，可是现在所发表的这种水平的照片是可以利用特技与合成摄影制成的。因而不能成为飞碟存在的确切证据。

除此之外，影响照片真实性的因素还很多。

## (2) 图像质量问题

在摄影测量和图像测量方面，要求尽可能摄取清楚的照片以便能进行高精度的测量分析。通常图像的质量是由所得到的照片的每一单位长度的分辨率（线分辨率）及画面的大小决定的。因此，不论线分辨率如何好，如若画面小，则整个画面的质量就不会好，而且即使线分辨率较差，只要能得到大的画面，整个画面的质量就能变好\*。图像质量的问题常常被误解，有人认为在极端的情况下，若线分辨率是无限大的，只要摄影后加以放大即可，这是个很大的错误。线分辨率决定于所用的光学系统和感光材料的分辨率这两个方面。

普通的摄影镜头，画面中心处的线分辨率是100条/mm左右，边缘线分辨率为70—80条/mm。但照相用的胶片的线分辨率在通常显影条件下为60—70条/mm，故往往用胶片所具有的线分辨率来决定综合线分辨率。特别由于曝光时间不足而进行过显影时，以及使用具有复杂光学系统的高速摄影机的情况，常常出现总分辨率低于50条/mm。这种情况不论将底片上的像放大多大，都只能出现模糊的像和胶片上粒子的粗糙情况，因此在胶片面上就不能测量小于 $1/50\text{mm}$ 以下的像及其活动。

作为提高线分辨率的方法，可以考虑采用缩微复制用的高分

---

\* 原文如此：意思是小的画面放大，照片质量要下降。反之，大的画面缩小，照片质量会提高。——译者注



辨率的光学系统和微粒感光材料，可是目前在感光度和处理条件等方面尚不很实用。

如上所述，由于线分辨率是有限度的，因此为了提高图像质量，需要用尽可能大的画面，以由35mm至6×6幅面(开)，由6×6至4英寸×5英寸幅面(开)为宜。

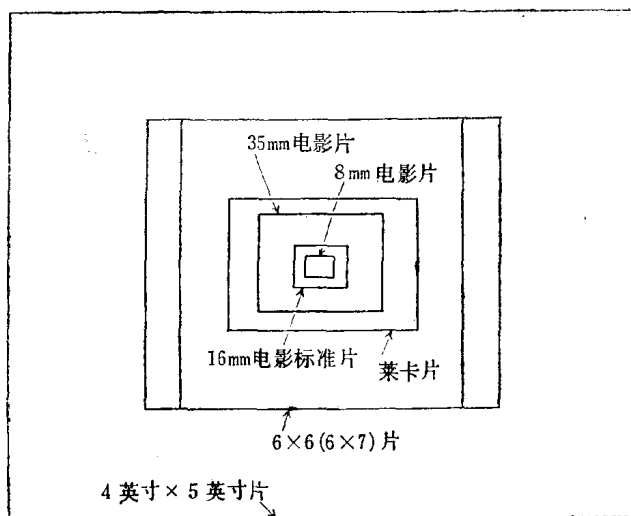


图 1.1 画面尺寸的比较

拍摄单张时使用大幅面的照像机是容易的，但如果是用来拍电影，就需要很多幅画面，因此胶片的用量也非常多，尤其高速影片的情况更为显著。

考虑一下各种照像机的幅面大小可以看到，35mm 莱卡幅面(开)是24mm×36mm，16mm胶片的幅面尺寸是7.6×10 (mm)，8mm胶片幅面是其1/4，为3.8×5(mm)，超8mm，面积增加50%。6×6幅面(开)是55×55 (mm)。由此可知，例如16mm与6×6幅面(开)的面积比为76mm<sup>2</sup>：3025mm<sup>2</sup>，即为1：40，若总线分辨率大致相同时，则所记录的信息量，16mm幅面(开)为6×6幅面(开)的1/40，因此可了解到图像质量上是有差别的。