

# 一种新型工业内窥系统的设计与实现\*

于 辉<sup>1</sup> 左洪福<sup>1</sup> 陈 果<sup>1</sup> 黄传奇<sup>2</sup>

<sup>1</sup>(南京航空航天大学民航学院 南京 210016) <sup>2</sup>(中国民用航空工业总局科技教育司 北京 100710)

**摘要** 作为 NDT 技术的分支,内窥技术从创建开始就一直在工业探伤、质量控制、产品评估等领域发挥着重要的作用。针对传统内窥技术所存在的无法定量测量和检测可达性差等缺陷,这里介绍的系统将立体视觉技术、图像处理技术等先进技术与内窥技术相融合,从硬件和软件两方面入手,研制开发出一套新型的基于立体视觉的内窥图像分析系统,实现了图像显示、深度测量和三维重建等创新性的功能。系统对我国自行研制新型内窥技术,提高工业内窥探伤和故障检测的水平,有着积极的推进意义。

**关键词** 内窥技术 立体视觉 摄像机定标 立体匹配 三维重建

## The Design and Implement of a Novel Industrial Endoscopic System

Yu Hui<sup>1</sup> Zuo Hongfu<sup>1</sup> Chen Guo<sup>1</sup> Huang Chuanqi<sup>2</sup>

<sup>1</sup>(Civil Aviation College, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016, China)

<sup>2</sup>(Department of Science, Technology & Education, Civil Aviation Administration of China, Beijing 100710, China)

**Abstract** As an embranchement of NDT, the endoscopy plays an important role in fields of industrial fault diagnosing, quality controlling and product evaluating from its beginning. The traditional endoscopy have many limitations, for example, incapable of measurement quantificationally and low accessibility of inspection. In order to improve them, the system combine many advanced theories such as stereo vision, image processing, etc with the endoscopy in software and hardware sides. A novel endoscopic image analysis system based on stereo vision is developed and the some novel functions are completed, for example image displaying, depth measuring and 3D reconstructing, etc. The system has active meaning in accelerating the development of novel endoscopy by ourselves, improving the level of industrial fault inspecting and diagnosing.

**Key words** Endoscopy Stereo vision Camera calibration Stereo matching 3D reconstruction

## 1 引 言

1921 年,以色列人 George S. Crampton 在美国加利福尼亚研制出世界上第一台工业内窥镜,用来检测蒸汽涡轮转子的内部裂缝。从此,内窥技术逐渐被工业界所重视并得到不断发展<sup>[1]</sup>。90 年来,工业内窥镜经历了第一代硬杆式、第二代软管式和第三代电子镜式的逐步发展过程,内窥技术也逐步发展成为一门崭新的科学技术,成为 RVI (Remote Visual Inspection, 远距离可视监测) 技术的重要分支。目前,内窥技术已经不再是初期的简单光学器件和机械控制的综合,而是光电技术、传感技术、机械制造技术以及自动控制技术

等现代技术的有效融合。同时,内窥技术的应用范围也有了很大地拓展,在工业、化工、交通以及航空航天等许多需要通过查看内部状况来进行质量控制、维修和产品评估的领域都有着广泛的应用,成为无损检测 (NDT: Nondestructive Testing) 技术的重要技术手段之一。

南京航空航天大学发动机故障诊断研究所经过长期的发动机内窥探伤研究,从实际需求出发研制出一套新型的工业内窥系统——基于立体视觉的内窥图像分析系统。该系统改善了传统技术中存在的依赖于目测和无法定量测量损伤的缺陷。同时,鉴于目前日本 Olympus 等公司已经研制出同类技术硬件产品,系统着重进行了软件方面的研究和开发,旨在促进我国面

\* 本文于 2001 年 9 月收到,系民航自选科技基金(E0101—071)资助项目。

向工业应用实际的内窥技术的发展。

这里阐述了系统的基本原理和技术思路,重点分析了系统中的软件关键技术以及系统的具体功能,并给出了实例进行验证。

## 2 系统基本原理

目前通用的内窥技术设备都存在着不小的缺陷和不足: 探头伸入过程操作复杂,对工作人员经验要求高; 检测工作主要靠工作人员直接目视; 无法对具体的损伤尺寸作定量的测量; 无法对内部损伤状况进行立体显示; 系统不能对缺陷或损伤做出自动评估,更不能预测故障的发生。因此,内窥技术必须通过新技术的引用来解决这些实际的问题。

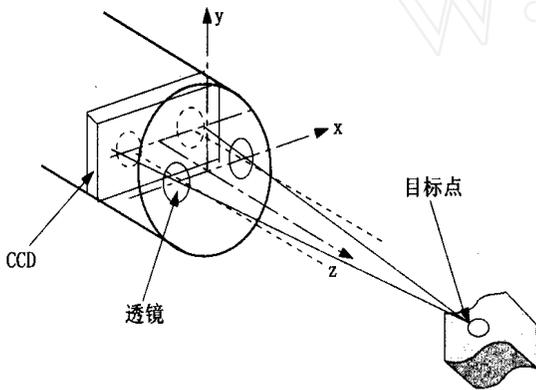


图 1 平行光轴双目成像原理图

20 世纪 70 年代末, Marr 创立的视觉计算理论对立体视觉的发展产生了巨大的影响, 现已形成了从图像获取到最终的景物可视表面重建的完整体系, 在整个计算机视觉中已占有越来越重要的地位。立体视觉的基本原理与人类视觉的体感知过程类似, 是从两个(或多个)视点观察同一景物, 以获取在不同视角下的感知图像, 通过三角测量原理计算图像像素间的位置偏差(即视差)来获取景物的三维信息<sup>[2]</sup>。近年来, 立体视觉技术在医学诊断和工业检测中的应用越来越广泛, 医用和工业内窥技术设备是其重要的应用方面之一, 如日本 OLYMPUS 公司最新研制的 M6C6 和 N8C6 系列工业可测量内窥镜产品, 充分利用立体视觉原理, 实现了被测工件的三维测量, 从而使得工作人员直接利用系统得到各项损伤数据, 进行损伤评估, 大大促进了工业无损检测技术的发展。

立体视觉技术中图像获取的关键点在于对应立体像对的产生。通常可以采用双目视觉, 其基本原理是在自然光或一定环境光照的条件下, 由分离一定距离的

两个相机各自摄取对象的图像, 找出空间物点在两个图像中的对应点, 从而根据几何成像关系得到该点的距离信息, 图 1 为平行光轴的双镜头立体成像系统原理图。图中两个目镜的光轴平行, 有固定的间距, 从工件反射的光线通过透镜被 CCD 的不同感光区吸收, 是获取左右对应图像对的关键。对目标物体上的一个固定点, 由于基线距离左右图像对应点间产生视差, 成为立体匹配和深度获取的基础<sup>[3]</sup>。

## 3 系统的组成

### 3.1 硬件系统组成

系统硬件部分主要由内窥镜成像系统(包括操纵机构)、CCD 摄像机和视频监控器、CPU 控制部分和微机系统组成, 其组成及相互关系如图 2 所示。在目前研究阶段, 第一、二部分均直接采用 OLYMPUS N6C6 工业内窥镜的图像采集部件, 而作者集中进行第三、四部分硬件及软件部分的研制。

内窥图像采集的过程为: 将内窥探头伸入到欲检测的零部件内部, 如燃烧室, 位于内窥探头头部的光源发出的光线通过反射, 进入探头头部的目镜, 再投射到 CCD 芯片上, CCD 芯片将光信号转变成为电信号, 通过电缆线可以直接传给监视器。同时, 电信号也可以传给图像采集卡, 通过 A/D 转换和帧存储器, 将视频信息转换成数字信息, 在计算机上获得左右图像对。CCD 的性能是保证所获取的图像质量的关键。

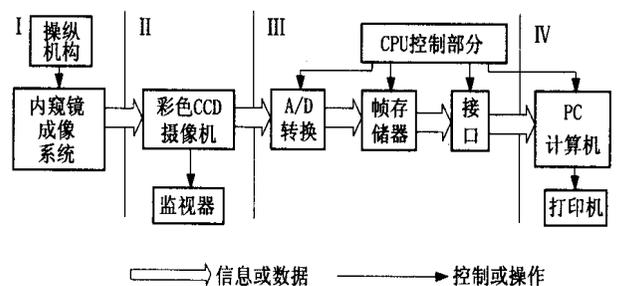


图 2 基于立体视觉的内窥分析系统硬件组成框图

系统探头部分的硬件技术指标如下: 光学视角范围为 60°; 深度范围为 7~60mm, 埠外径为 6.1mm, 端头硬段长度为 38mm。探头由两组镜头和 CCD 组成, 焦距 f 相等且固定, CCD 光轴固定平行。

### 3.2 软件系统组成

基于立体视觉的内窥图像分析系统是作者自行开发的基于 Windows 95/98/NT 的一套应用软件, 它将

硬件系统采集得到的立体图像对进行分析计算,得到所要测量的数据结果,并用根据需要对图像进行三维重建。根据立体视觉基本原理,一个完整的立体视觉系统通常包括图像获取、摄像机定标、特征提取、立体匹配、深度确定及内插等6大部分。软件系统的方案如图3所示。下面就软件系统中的关键技术实现加以详细阐述。

### 3.2.1 图像基本操作与预处理模块

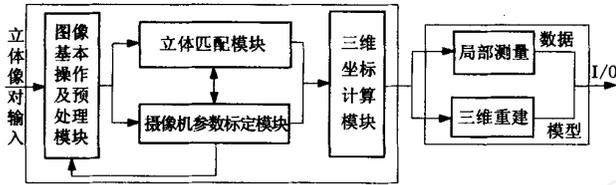


图3

从图像获取系统得到的是符合立体视觉原理的左右灰度图像对,在对其进行操作和计算之前,必须对其进行必要的预处理,完成图像变换、图像处理以及图像调整等具体功能。图像调整直接关系到立体视觉中的匹配,直接影响到匹配的准确度和计算的精度。

由于内窥镜头属于广角镜头,在远离图像中心处会有较大的非线性畸变,它由径向畸变、离心畸变和薄棱镜畸变三部分构成<sup>[4]</sup>。在只考虑径向畸变的条件下,可用描述为式(1):

$$\begin{cases} Y = y + k_2 r^2 \\ X = x + k_1 r^2 \end{cases} \quad (1)$$

其中,  $(X, Y)$  为图像点坐标的理想值;  $(x, y)$  是实际的图像点坐标;  $r^2 = x^2 + y^2$ , 该式表明,  $x$  方向与  $y$  方向的畸变相对值与径向半径的平方成正比,即在图像边缘处的畸变较大。因此,图像调整的重要目的在于裁剪掉左右像对中畸变较大区域,减少匹配中的不确定性。同时,根据双目的基线距离  $b$ 、左右摄像机的视角等摄像机的内部参数以及相机姿态的外部参数来确定左右图像的公共区域,以确保左图像中的点在右图像中具有匹配点。

### 3.2.2 CCD 参数标定模块

在本系统中,CCD 的标定不同于单目视觉中的标定,不仅需要单个 CCD 的参数进行标定,而且需要标定 CCD 之间的相对关系参数。在系统中,左右 CCD 光轴固定平行,基线距离固定,因此,CCD 参数的标定不需要所有的内外参数,而仅需要标定出每个 CCD 的焦距  $f$  和基线距离  $b$  即可。包括焦距在内的内部参数和外部参数的标定过程与一般单 CCD 的标定相同,当然  $f$  和  $b$  可直接从部件生产厂家获取,但在实际应用中  $f$  和  $b$  应该通过精确标定来得到<sup>[5]</sup>。根据平行光轴立体视觉的深度计算原理,通常将世界坐标系的原点定于左右摄像机光心的中点时且平行于左右摄像机坐标,如图4所示。

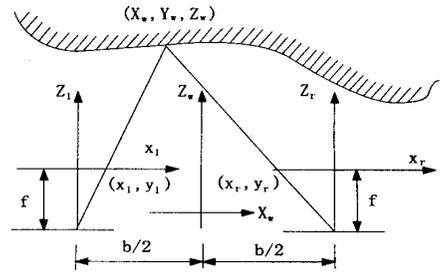


图4 平行光轴立体视觉模型

有式(2):

$$\begin{cases} X_w = b \cdot \frac{x_l + x_r}{2} \cdot \frac{1}{D} \\ Y_w = b \cdot \frac{y_l + y_r}{2} \cdot \frac{1}{D} \\ Z_w = b \cdot f \cdot \frac{1}{D} \end{cases} \quad (2)$$

其中  $(X_w, Y_w, Z_w)$  为物点的世界坐标,  $(x_l, y_l)$  和  $(x_r, y_r)$  分别为物点在左右像面上的对应点坐标,  $D = (x_l - x_r)$  为视差。从上式可以看到,对空间一定距离  $L$  的两点  $M$  和  $N$ ,通过匹配在左右像面上找到它们的像点  $(x_{Ml}, y_{Ml})$ 、 $(x_{Mr}, y_{Mr})$  和  $(x_{Nl}, y_{Nl})$ 、 $(x_{Nr}, y_{Nr})$ , 其视差分别为  $D_M$  和  $D_N$ , 当  $f$  确定时, 就可以求出  $b$ 。相关公式见(3)式:

$$b = \frac{2L}{\sqrt{\left(\frac{x_{Ml} + x_{Mr}}{D_M} - \frac{x_{Nl} + x_{Nr}}{D_N}\right)^2 + \left(\frac{y_{Ml} + y_{Mr}}{D_M} - \frac{y_{Nl} + y_{Nr}}{D_N}\right)^2 + 4f^2 \left(\frac{1}{D_M} - \frac{1}{D_N}\right)^2}} \quad (3)$$

### 3.2.3 立体匹配模块

立体匹配是最主要的步骤之一,也是立体视觉技术中最困难的问题。立体匹配方法的选择必须解决以下三个问题: 图像匹配特征的正确选择; 寻找特征间的本质属性; 建立快速和可靠的匹配算法<sup>[3]</sup>。

在解决大多数工业应用问题中,常用的匹配算法有相关算法、松弛算法、多面体的对应算法以及三相机系统的对应算法等等<sup>[3]</sup>。在这里,将极线几何约束条件与灰度相关算法相结合,实现了较高的匹配精度和匹配速度。

根据极线相关原理(如图 5 所示),物点 P 在左视平面  $P_1$  上的像点为  $I_1$ ,其在右视平面上的对应点一定在内极线  $DE_2$  上,即  $E_2$ 。同理,右视平面上的像点  $I_2$  在左视平面上的对应点也在内极线  $DE_1$  上。据此,对任意  $P_1$  上一点  $I_1$ ,可根据其在  $P_1$  上的  $N$  矢量,利用坐标变换求得其在  $P_2$  上对应点  $E_2$  所在的内极线  $DE_2$ ,从而将匹配搜索范围大大缩小。对于平行光轴双目立体视觉,问题更简化为沿着纵坐标相等的直线的搜索,极大提高了匹配速度。

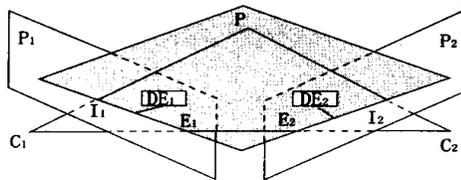


图 5 极线相关原理图

结合内极线所构成的局部约束条件,系统再运用灰度相关原理来进行计算。在灰度匹配计算中,采用了基于特征匹配和基于面积匹配的融合算法,即在特征提取的基础上,对特征点进行基于面积的灰度匹配。在匹配过程中,以互相关函数作为两个搜索区域的相似性测度。

对左图像  $f_L(x, y)$  中点  $(x_L, y_L)$ , 取以其为中心大小为  $m \times n$  的模板  $T$ , 在右图像  $f_R(x, y)$  中平移  $T$ 。假设在水平方向移动  $\Delta x$ , 在垂直方向移动  $\Delta y$ , 它所覆盖下的  $f_R(x, y)$  的第  $k$  个子图为  $S_k$ 。如果  $T$  与  $S_k$  相同, 则它们的差为零。定义  $T$  与  $S_k$  之间差别的测度为:

$$D(T, S_k) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n [S_k(i, j) - T(i, j)]^2 \quad (4)$$

当  $D(T, S_k)$  最小时,  $T$  与  $S_k$  达到最佳匹配。

归一化互相关函数定义为:

$$C(\Delta x, \Delta y) = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n [S_k(i, j) \cdot T(i, j)]}{\left\{ \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n [S_k(i, j)]^2 \right\}^{1/2} \cdot \left\{ \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n [T(i, j)]^2 \right\}^{1/2}} \quad (5)$$

当  $C(\Delta x, \Delta y)$  达到最大时, 得到左图像中的点  $(x_L, y_L)$  与右图像中的点  $(x_L + \Delta x, y_L + \Delta y)$  相匹配。

### 3.2.4 计算、测量和重建模块

通常在平行光轴的双目立体视觉中,世界坐标系的原点选在两摄像机中心连线的中点,且坐标轴与两摄像机的坐标轴平行,如图 4 所示。通过标定可以获取左右摄像机的焦距  $f$  和基线距离  $b$ 。同时,在完成匹配工作后,可以找到左右对应点的  $(x_l, y_l)$  和  $(x_r, y_r)$ 。然后,由三角形

测量原理,可以得到场景中空间任意点  $P$  在世界坐标系下的三维坐标  $(x_w, y_w, z_w)$ , 如式(2)所示。

由此可见,利用式(2)可以计算得到场景中物体表面的三维坐标,再通过表面插值即可得到光滑的表面数据。于是便可进行物体表面的立体测量。在发动机内窥技术中,通常需要了解发动机关键部件(如叶片和燃烧室)的表面损坏情况,如裂纹的长度和深度、凹坑的面积和深度、以及烧伤面积的大小等三维数据。这些数据可以通过对物体表面的三维数据进行空间点—点距离、点—线距离和点—面距离的计算来获取。其计算方法为:

#### (1) 点—点距离

设空间点  $(x_1, y_1, z_1)$  和  $(x_2, y_2, z_2)$ , 则:

$$d_{\text{point-point}} = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2} \quad (6)$$

#### (2) 点—线距离

设空间直线由点  $(x_1, y_1, z_1)$  和点  $(x_2, y_2, z_2)$  确定, 已知点为  $(x_0, y_0, z_0)$ , 则通过推导可以得到:

令:

$$\begin{cases} p = x_2 - x_1 \\ q = y_2 - y_1 \\ r = z_2 - z_1 \end{cases} \begin{cases} a = q(z_0 - z_1) - r(y_0 - y_1) \\ b = r(x_0 - x_1) - p(z_0 - z_1) \\ c = p(y_0 - y_1) - r(x_0 - x_1) \\ e = \sqrt{p^2 + q^2 + r^2} \end{cases} \quad (7)$$

则:

$$d_{\text{point-line}} = \frac{\sqrt{a^2 + b^2 + c^2}}{e} \quad (8)$$

#### (3) 点—面距离

设空间平面由点  $(x_1, y_1, z_1)$ 、点  $(x_2, y_2, z_2)$  和  $(x_3, y_3, z_3)$  确定, 已知点为  $(x_0, y_0, z_0)$ , 则通过推导可以得到:

令:

$$\begin{cases} a = (y_2 - y_1)(z_3 - z_1) - (z_2 - z_1)(y_3 - y_1) \\ b = (z_2 - z_1)(x_3 - x_1) - (x_2 - x_1)(z_3 - z_1) \\ c = (x_2 - x_1)(y_3 - y_1) - (y_2 - y_1)(x_3 - x_1) \end{cases} \quad (9)$$

则:

$$d_{\text{point-plane}} = \frac{(ax_0 + by_0 + cz_0) - (ax_1 + by_1 + cz_1)}{\sqrt{a^2 + b^2 + c^2}} \quad (10)$$

为了将所获取的物体三维表面数据形象直接地显示出来,可以应用三维数据场的可视化技术来实现,现有的软件如 Matlab 及 Original 等均可以实现物体表面三维数据的立体显示,并很容易实现表面插值、视图定义、光设置、颜色选择等运算。在发动机内窥技术中

的重建模块中,拟定用OpenGL或Matlab来实现发动机关键部件表面损伤部位的立体显示,使操作者很直观地了解损伤的严重程度和部位,同时配合三维数据的立体测量,可以得到其损伤的具体量值,为发动机的故障诊断提供更为可靠的依据。

#### 4 系统功能综述

在工业内窥探伤和故障诊断实际工作中,如何能够定性而又定量的了解损伤区域的状态和性能,是内窥探伤分析的核心问题。

系统立足于自行研制开发先进工业内窥技术产品的目标,借鉴OLYMPUS公司的IV6C6工业内窥系统的硬件技术,利用先进的光电技术、立体视觉技术以及图像处理技术等软件技术,实现了内窥图像的3D测量和立体重建。系统的具体功能包括:内窥图像对获取;图像预处理;立体图像匹配;摄像机定标;

深度计算及三维测量;图像三维重建等。这些基本功能定性和定量的解决了工业内窥探伤中所存在的问题,同时也为后期的硬件系统自行研制以及内窥图像智能分析系统的开发奠定了技术基础。

#### 5 系统应用实例

系统较好地解决了目前工业内窥检查与探伤中所急需解决的问题,有着较大的实用价值。在系统研制过程中,多次对发动机实体进行成像分析实验,取得了良好的实验结果,在此将某腔体内表面的凹坑图像的大致分析结果来展示说明。

在立体视觉分析模块中,对调整后的图像进行立体匹配,并根据需要选择计算模式。如图6所示,选择点面模式,图像中周围三点为平面确定点,中间点为测量点(均以白色标识出),测量结果为0.03456mm,测

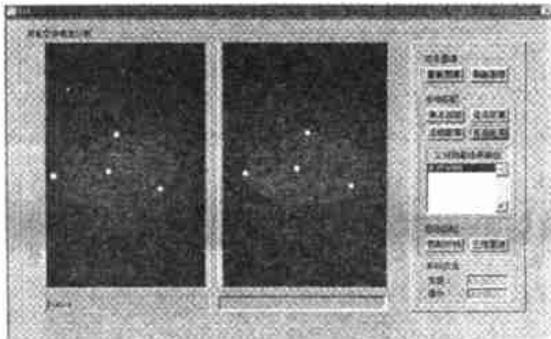


图6 内窥图像立体视觉分析及其结果

量点低于平面。图7为选择的重点区域进行自动匹配后重建的曲面模型结果,可以清楚看出表面凹坑的效果图。实验证明,该结果与实际状况基本符合。

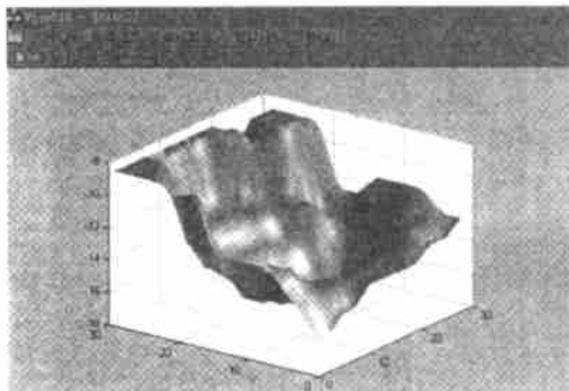


图7 内窥图像表面重点区域重建效果图

#### 6 结束语

基于立体视觉的内窥图像分析系统成功地将传统的内窥技术与计算机软件技术、立体视觉技术相结合,很好的解决了目前内窥技术中存在的实际问题,使得用户可以通过系统对损伤和工件内部状况有定性和定量的了解,也为损伤的预测与防治提供了重要的依据,并通过计算机工具实现了交互。系统的研制对工业内窥新技术的推广应用有着很大的现实意义,为工业故障诊断提供了数据基础和技术保障。

同时,受国内工业基础限制,系统的硬件特别是光学元件部分目前还无法自行研制,这也限制着系统目前难以走向实用产品阶段,相信通过努力这些问题会逐步解决,新的内窥系统将在工业应用中发挥出应有的价值。

#### 参考文献

- 1 William J. Lang, George S. Crampton and the origins of industrial endoscopy. *Materials Evaluation*, 1988, (46): 1639 ~ 1642
- 2 Marr D. *Vision*. W. H. Freeman and Company, 1982
- 3 刘巽亮. 光学视觉传感. 北京: 中国科学技术出版社, 1998
- 4 马颂德, 张正友. 计算机视觉——计算理论与算法基础. 北京: 科学出版社, 1998
- 5 Tsai R. Y. A versatile camera calibration technique for high accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV camera and lenses. *IEEE J. RA* - 3, 1987, (4): 323 ~ 344