

摘 要

人体自动三维测量是服装工业数字化的必要条件。人体非接触式测量技术的研究已有不少成果。以人体拓扑为基础的测量就是一种有效方法。本论文工作是对该方法的研究和改进。内容如下：

- (1) 原始图像预处理。对各种边缘检测方法进行了比较，选取最符合测量要求的基于 Canny 算子的边缘检测方法。
- (2) 摄像机自标定。使实际测量过程简便，同时考虑到畸变，自动校正，提高测量精度。
- (3) 人体测量三维数据进行重建，建立三维坐标数据库。使用 C Sharpe 编制应用软件。

通过实验验证所开发的软件可行，可以提高测量效果。降低对测量环境的要求，在室内自然光线条件下，以普通白炽灯作为补充光源，拍摄测量。测量时使用便携式的标定物，整个系统成本低。

关键词：人体测量，摄像机自标定，边缘检测，三维重建

Abstract

Three-dimensional automatic measuring for human-body is indispensable for digitalization of clothing industry. There is substantial body of literature in this field. Measurement method based on body-topology is an effective one. This work is its further study and improvement. Contents of the thesis are as follows:

- (1) Pre-processing of the camera image: the most advantageous algorithm with Canny operator for fringe detection is adopted in comparing with different methods.
- (2) Self-calibration camera: considering the abnormality eliminating accompanying with self-calibration, the measurement precision is improved with simplified manipulation.
- (3) 3D reconstruction for the body measured with database: application software is implemented by using C Sharpe.

It is verified by measuring test that the software system is feasible. The effect of measurement is improved, capable of using in natural environment added by tungsten light, employing a portable calibrator. The initial cost of the apparatus is reduced.

Keywords: non-contact human body-measure; camera self-calibration; edge detection; 3D reconstruction

关于硕士学位论文使用授权的说明

论文题目： 基于摄像机自标定技术的非接触人体测量

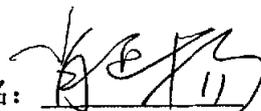
本学位论文作者完全了解大连轻工业学院有关保留、使用学位论文的规定，大连轻工业学院有权保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和磁盘，允许论文被查阅和借阅，可以将学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编学位论文，并且本人电子文档的内容和纸质论文的内容相一致。

保密的学位论文在解密后也遵守此规定。

是否保密（ 否 ），保密期至 年 月 日为止。

学生签名： 袁渊

导师签名：



2005 年 4 月 18 日

第一章 绪论

1.1 课题背景

三维人体测量是新一代服装 CAD 的必要条件。目前国内外二维服装 CAD 技术已趋成熟,逐步进入实用化阶段^[1, 2],而三维服装设计系统由于其开发难度较高,尚处于研制和开发阶段^[3, 4]。实现三维 CAD 关键在于人体测量的数字化^[5, 6]。

非接触三维自动测量是以现代光学为基础,融光电子学、计算机图像学、信息处理、计算机视觉等科学技术为一体的测量技术,弥补了常规的接触式人体测量的不足,使测量结果更加准确、可靠。与传统的测量方法相比较,三维人体测量方法主要特点是快速、准确、效率高等,因而非接触式三维人体自动测量系统的研究开发势在必行。但是人体测量装置在价格和性能方面尚存在某些不足,比如激光测量法虽然精度较高^[7, 8],但要求人体在几分钟内保持姿势不变,激光剂量小但心理上仍有压力,而且产生激光的装置结构复杂,造价昂贵而不宜于推广使用;投影条纹相位法会受到光栅面积的限制,要想测量人体全身尺寸,则需要大面积栅板^[9, 10]:一方面,高精度大光栅制作困难,另一方面,势必会造成设备体积庞大、笨重等缺陷;另外,计算机自动处理云纹图像也存在许多难点,首先,条纹中心线并非其几何中心线,自动寻找条纹中心线有时会产生误差,其次,自动识别凹凸部分不很容易,而且光学系统计算复杂,成本高,测量时间较长,同时测量人身体姿势的变化也对云纹图像有影响。

我们曾经开发设备简易,计算简单,成本低,保证精度等特点人体非接触式测量方法^[11]。这个方法和前人工作的不同在于以人体拓扑为基础,针对人体模型的特征曲线即标识线进行测量和建模。所谓标识线是为表达人体模型上重要的部位或必要的结构线而在人体模型上设置的标识线,这些标识线建立了人体模型,反映了模型的尺寸和几何特征,既能显示人体的自然形态又能符合服装设计的结构要求^[12]。这些标识线,其设定的基本原则是按照“横平竖直”与“自然流畅”,如图 1-1,纵向线有前中线、前公主线、侧缝线、后中线、后公主线,横向线有胸围线、背宽线、腰围线、臀围线,斜向线有领围线、袖窿线、肩缝线。

1.2 本论文的工作

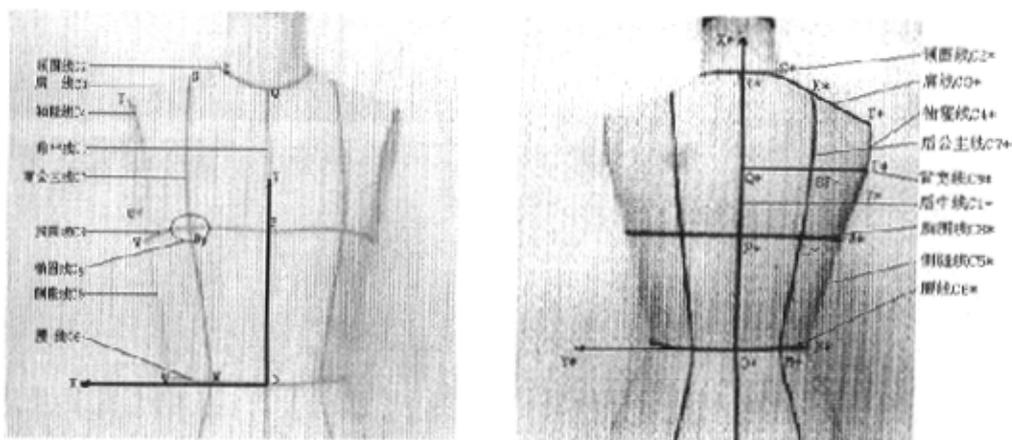


图 1-1 标识线

本论文工作是对上述成果的继续完善。主要工作内容如下几点：

1. 由数码相机获得人体图像，将人体图像作为检测和传递信息的载体，对其进行预处理，获得人体模型的特征曲线。

2. 进行主动视觉的摄像机自标定，考虑二阶畸变，得到内外部参数与畸变系数，建立数学模型。对所得到的模型进行校正，获得满意的模型参数。

3. 遵循人体特征曲线原则，进行对应元的匹配，利用三维空间特征点的空间位置与二维图像对应点的坐标间的定量关系以及相应的数学模型计算得到三维人体尺寸，从而进行三维重构。

4. 编制应用软件，通过实验考证上述理论和相应软件的正确性和可行性。

系统总体构成如图 1-2 所示：

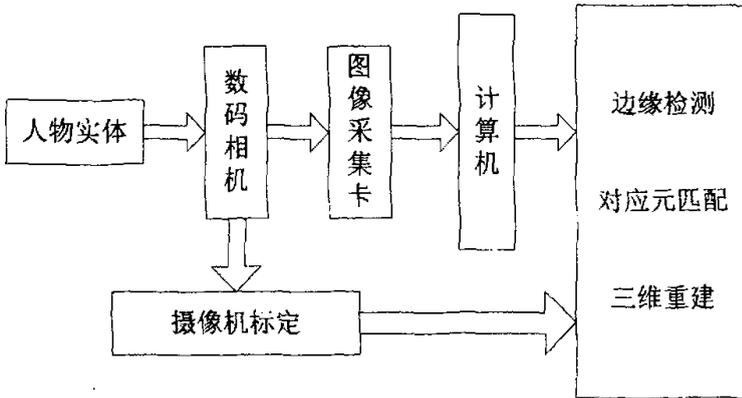


图 1-2 系统总体构成

第二章 数字图像预处理

2.1 计算机视觉概述

20 世纪 80 年代以来, 计算机视觉的研究已经历了从实验室走向实际应用的发展阶段, 从简单的二值图像处理到高分辨率多灰度的图像处理, 从一般的二值信息处理到三维视觉机理和算法的研究都取得了很大的进展, 现在计算机视觉已成为一门独立的新兴的发展迅速的学科。计算机视觉是指用计算机来模拟人眼的视觉功能, 对空间三维景物进行形态和运动识别。对于计算机视觉系统来说, 输入是表示三维景物投影的灰度阵列, 可以有若干个输入阵列, 这些阵列可提供从不同方向、不同视角、不同时刻得到的信息。输出是对图像所代表景物的符号描述, 通常这些描述是关于物体的类别和物体间的关系, 也可能包括如表面空间结构、表面物理特性(形状、纹理、颜色、材料)、阴影以及光源位置等信息^[13-15]。量体、试衣系统是计算机视觉技术应用于服装工业最直观、最有效的一个范例。随着服装 CAD 研究的进一步深入和推广, 在服装生产的其他环节应用计算机视觉技术, 更能体现服装生产的现代化程度; 计算机视觉技术应用在服装生产过程及产品质量检验方面能够更准确更快捷得保证生产和检验的顺利进行。因此服装工业中引入计算机视觉技术, 必将促进服装工业的发展, 对改善目前服装企业劳动生产率低、自动化程度不高的状况会产生积极的作用。

在计算机视觉中, 立体视觉是指由两幅或多幅图像恢复物体三维信息的方法。它直接模拟人类视觉处理景物的方式, 可以在多种条件下灵活地测量景物立体信息, 其作用是其他计算机视觉方法所不能取代的, 对它的研究, 无论从视觉生理的角度还是在工程应用中都具有十分重要的意义。计算机立体视觉的开创性工作是从 20 世纪 60 年代中期开始的。美国麻省工学院的 Robert 把二维图像分析推广到三维景物分析, 标志着计算机立体视觉技术的诞生, 并在随后的 20 年中迅速发展成一门新的学科。特别是 20 世纪 70 年代末, Marr 等创立的视觉计算理论对立体视觉的发展产生了巨大影响, 现已形成了从图像获取到最终的景物可视表面重建的比较完整的体系^[16]。立体视觉进行三维测量的基础是双眼视差(binocular disparity)理论, 即空间物体的同一特征点在两幅图像内的图像坐标差。人两眼从稍有不同的两个角度去观察客观三维世界的景物, 由于几何光学的

投影，距离观察者不同位置的像点在左右两眼视网膜上就不是在相同的位置上。这种两眼视网膜上位置差就称之为双眼视差，它反映了客观景物的深度。人能有深度感知，就是因为有了这个视差，再经大脑加工而形成的。基于视差理论的机器立体视觉，是运用两个或多个摄像机对同一景物从不同位置成像获得立体像对，通过各种算法匹配出相应像点，从而计算出视差，然后采用基于三角测量方法恢复深度（距离）信息。现有的绝大多数立体视觉系统均采用该项原理。

视差的计算依赖于特征点的两个对应图像坐标的求取，即图像对应点的匹配问题。有了特征点的对应图像坐标后，要想求得三维空间坐标，还需要摄像机的内部参数以及两摄像机之间的结构参数。有了这些条件，才能根据摄像机和传感器的模型计算出物体特征点的空间三维坐标^[17~19]。因此，一套典型的完整的立体视觉算法可分为五个主要部分：

1. 图像的获取；
2. 摄像机及传感器模型，包括摄像机的标定和传感器的结构参数标定；
3. 图像预处理和特征提取；
4. 特征立体匹配；
5. 根据摄像机模型和传感器的结构参数，计算特征点的三维坐标。

2.2 数字图像采集

三维数字图像测量系统的设计中，图像的获取是一个必不可少的步骤，它将可视化图像和特征转化为能被计算机处理的一系列数据。由于机器视觉系统强调精度和速度，所以需要图像采集部分及时、准确地提供清晰的图像，只有这样，图像处理部分才能在比较短的时间内得出正确的结果。由此可知图像采集部分的性能会直接影响整个机器视觉系统的性能。图像采集部分一般由光源、镜头、数字摄像机和图像采集卡构成。采集过程可简单描述为在光源提供照明的条件下，数字摄像机拍摄目标物体并将其转化为图像信号，最后通过图像采集卡传输给图像处理部分。在设计图像采集部分时，要考虑到多方面的问題，主要是关于数字摄像机、图像采集卡和光源方面的技术^[20]。

图像获取 (Image Acquisition) 通常由双摄像机获得，获取这些图像的视点可以在一条直线，也可以在一个平面上，或甚至呈立体分布。客观世界在空间上是三维的，因此在获取图像时要尽可能地保持场景的 3D 信息，并建立客观场景和所采集图像在空间上的对应性。由于计算机只能处理数字图像，而自然界提供的图像却是其他形式的，所以

数字图像处理的一个先决条件就是将图像转化为数字形式。图像输入、数字化和预处理工作由摄像机和图像采集卡完成,一般地,摄像机能将所感受的光信号转换为相应的电信号,将这种电信号送到荧光屏上,便可以呈现摄入的图像,这种图像称为视频图像。当摄像机作为计算机的“眼睛”,要把摄入的图像送入计算机进行处理时,首先要解决的问题是如何将视频图像变为计算机能够处理的数字图像。数字图像采集一般有两种方法可以选择:第一种方法采用 CCD 摄像机拍摄,连接主机采集卡,可以进行实时采集,易控制,但是图像的质量必须通过采用高分辨率的摄像机及采集卡来提高。第二种是用数码相机进行拍摄,然后输入到计算机,这种方法,速度慢,但可获得分辨率较高的图像。一般的数字图像采集系统主要包括三个基本部分:用于探测外界光线强度的图形传感器;对待探测信号进行扫描采样的扫描驱动硬件;将连续信号进行量化,产生适于计算机处理的数字化图像。本试验采用 SONY-DSP-P72 数码相机进行图像采集。

图像信号的采集与用适当的方法来表示(或存储)图像是数字图像处理中关键的步骤。自然界在人眼中呈现的图像一般都是连续的模拟图像,可以用下面连续二维函数的矢量形式表示:

$$f(x, y) = \{f_{red}(x, y), f_{green}(x, y), f_{blue}(x, y)\} \quad (2.1)$$

式中 f_{red} 、 f_{green} 、 f_{blue} 分别表示红、绿、蓝(RGB)三种成分。

它们都是空间的连续函数,即在连续空间的每一个点都有一个精确的值与之对应。如果图像中不含彩色(对应的彩色饱和度为零,此时 RGB 三个分量相等,称为黑白图像)。这时 $f(x, y)$ 表示图像空间某个点的灰度值。

2.3 边缘检测

计算机视觉预处理是进行边缘检测前的预处理过程,由光学成像系统生成的未经处理的二维图像,由于各种因素的影响,包含了各种各样的随机噪声和畸变,噪声恶化了图像质量,使图像模糊,甚至淹没了图像特征,给分析带来困难,因此需要对原始图像进行预处理,突出有用信息、抑制无用信息,改善图像质量。它包括噪声的滤除、边缘的增强、对比度的改善和边缘的有效提取等。其目的在于:(1)改善图像的视觉效果,提高图像的清晰度;(2)将图像转换成一种更适合于人或机器分析处理的形式,它不以图像保真为原则,而是通过处理与分析,有选择地突出某些感兴趣的信息,预处理中出现的错误和偏差会直接影响到后续处理与决策的正确性,预处理的精确为后续处理提供置信

度高的输入资料。能否正确地提取被检测物体的特征参数；能否尽可能少地受到图像中噪声的影响导致结果的准确性下降，这些都在很大程度上取决于对原始图像的预处理措施是否有效、是否符合实际情况，如何对图像进行处理和运算，即算法都体现在这里，是机器视觉系统开发中的重点和难点所在。

2.3.1 图像边缘概述

图像边缘是图像最基本的特征之一，往往携带着一幅图像的大部分信息，为人们描述或识别目标以及解释图像提供了一个有价值的和重要的特征参数。边缘存在于图像的不规则结构和不平稳现象中，例如目标与背景、目标与目标、区域与区域之间，也就是存在于信号的奇异点或突变点处，这些点给出了图像轮廓的位置，这些轮廓则常常是我们在图像处理时所需要的非常重要的一些特征条件。边缘检测就是在局部区域上针对这些“点”的一种运算，此运算表现为一种典型的信号处理问题。图像信息量巨大，而边缘信息是图像的一种描述，所包含的往往是图像中最重要的信息。由于这些原因使得边缘检测在计算机视觉的预处理算法中有着重要的地位^[21]。

一般判断边缘点的依据就是图像一阶导数的极大值或者二阶导数的过零点即为边缘点。通常我们将边缘划分为阶跃状和屋顶状两种类型^[22]分别如图 2-1，图 2-2。阶跃边缘中边缘两边的灰度值有明显的变化；而屋顶状边缘中边缘位于灰度增加与减少的交界处。在数学上可利用灰度的导数来刻画边缘点的变化，对阶跃边缘、屋顶状边缘分别求其一阶、二阶导数。可见，对阶跃边缘点其灰度变化曲线的一阶导数在 A 点达到极大值；二阶导数在 A 点与零交叉。对屋顶状边缘点 B，其灰度变化曲线的一阶导数在 B 点与零交叉，二阶导数在 B 点达到极值。因此，A 点、B 点就是这两种类型的边缘点。如果一个像素落在图像中某一个物体的边界上，那么它的领域将称为一个灰度级的变化带。对这种变化最有用的两个特征使灰度的变化率和方向，它们分别以梯度向量的幅度和方向来表示的。边缘检测算子检查每个像素的领域并对灰度变化率进行量化，也包括方向的确定。绝大多数传统算子算法使用基于方向导数求卷积的方法。

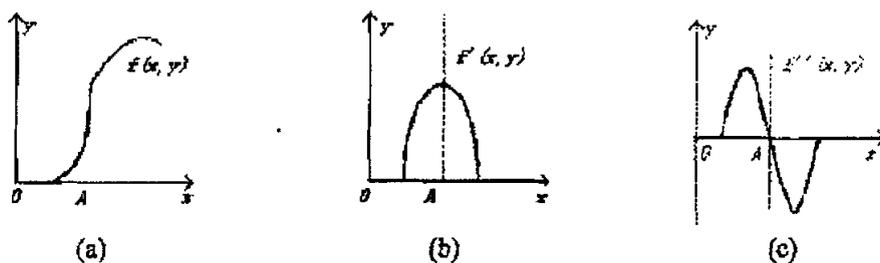


图 2-1 阶跃边缘

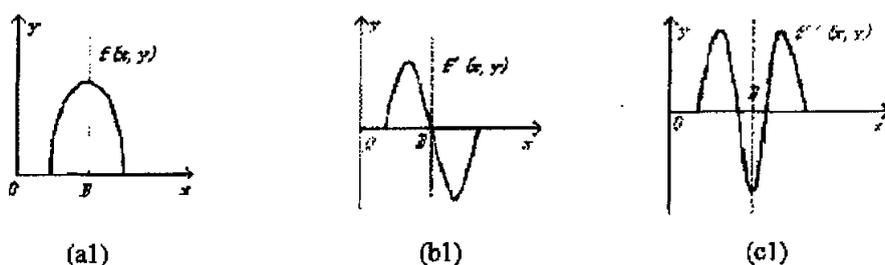


图 2-2 屋顶状边缘

2.3.2 传统边缘检测方法

在计算机视觉中，边缘检测算法则是图像处理问题中的经典技术之一，它的解决对于我们进行高层次的特征描述、识别和理解等有着重大的影响；又由于边缘检测在许多方面都有着非常重要的实用价值，所以人们一直在致力于研究和解决如何构造出具有良好性质和良好效果的边缘检测算子的问题。边缘检测的实质是采用某种算法来提取出图像中对象与背景间的交界线。我们将边缘定义为图像中灰度发生急剧变化的区域边界。图像灰度的变化情况可以用图像灰度分布的梯度来反映，即其附近灰度的变化情况可从它相邻像素灰度分布的梯度来反映，因此我们可以用局部图像微分技术来获得边缘检测算子。经典的边缘检测方法，是对原始图像中像素的某小邻域来构造边缘检测算子。以下是对几种经典的边缘检测算子进行理论分析^[23]，并对各自的性能特点作出了比较和评价。首先介绍传统边缘检测算子的流程图：

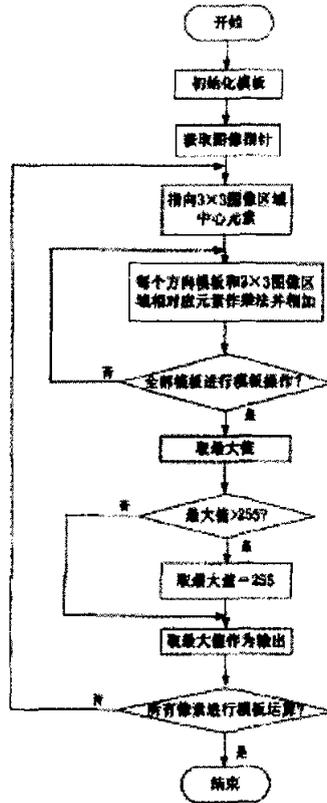


图 2-3 传统算子算法流程图

前人提出了多种边缘检测算子，为了计算方便，传统的边缘检测算法常用差分来代替微分，其定义的形式为：

$$F_x(x, y) = F(x, y) - F(x-1, y) \quad (2.2)$$

$$F_y(x, y) = F(x, y) - F(x, y-1) \quad (2.3)$$

在实际运算中，常用小区域模板进行卷积来近似梯度计算。构造边缘检测算子的数学基础是一阶和二阶导数变化。通常一个梯度算子会由两个模板组成，分别代表 X 方向和 Y 方向的梯度运算。这样的算法例子很多，常用的如：如 Roberts 算子、Sobel 算子、Prewitt 算子、Laplace 算子等。这些方法多是以待处理像素为中心的邻域来作为进行灰度分析的基础，实现对图像边缘的提取并取得了较好的处理结果，如图 2-4 所示。

1. Roberts 算子：利用局部差分算子寻找边缘像素

$$g(x, y) = \left\{ \left[\sqrt{f(x, y)} - \sqrt{f(x+1, y+1)} \right]^2 + \left[\sqrt{f(x+1, y)} - \sqrt{f(x, y+1)} \right]^2 \right\}^{1/2} \quad (2.4)$$

Roberts 算子计算时利用的像素为四个，平方根运算的目的是使处理近似人类视觉系统的效果，其边缘定位准确，但对噪声敏感，适用于边缘陡峭的低噪声图像。

2. Sobel 算子：

$$\begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix}$$

Sobel 算子计算时利用的像素为八个，对于水平和垂直的边缘检测效果较好。图像中每点均用此算子作卷积，一个核对垂直边缘响应最大，另一个核对水平边缘响应最大。取两个卷积的最大值作为该点的输出值，运算的结果是一幅边缘幅度图像。

3. Laplacian 算子：拉普拉斯算子是一种二阶导数算子

$$\begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ -1 & 4 & -1 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -8 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

它对噪声比较敏感，通常需要与平滑算子结合起来生成新的模板。另外它常产生双像素宽的边缘，而且不能提供边缘方向的信息，因此拉普拉斯算子主要用于已知边缘像素后确定该像素在图像暗区或明区一侧。



(a)



(b)

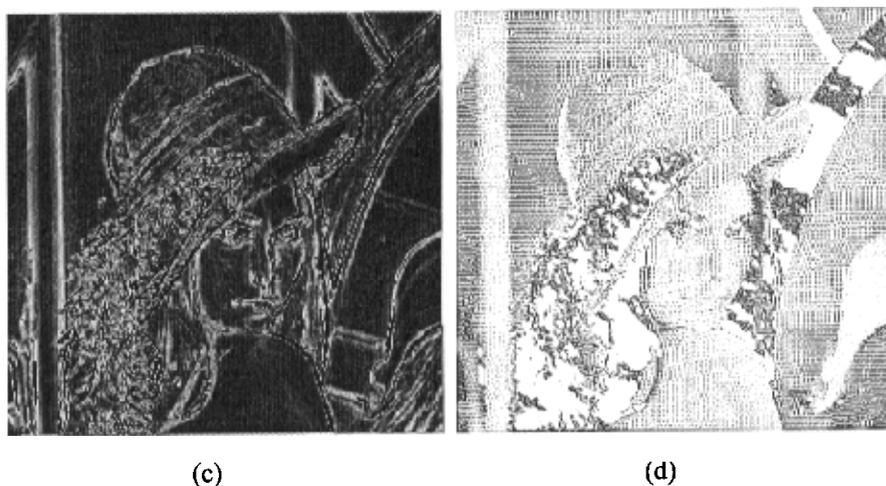


图 2-4 (a) 原始 (lena) 图像 (b) Roberts 算子
(c) Sobel 算子 (d) Laplacian 算子

通过分析和比较，以上方法存在有边缘非单像素宽、边缘定位不精确、噪声干扰较严重，即使采用滤波等手段来加以去噪，也会相应地带来使边缘模糊的副作用等难以克服的缺陷，而且由于得到图像时的物理和光照的等等原因，使得图像中的边缘通常产生在不同的尺度范围内，利用传统算法中单一尺度的边缘检测算子是不可能正确地检测出所有边缘的。这类算子存在上述缺陷的关键是其等效平滑算子过于简单。为解决这一问题产生了平滑滤波边缘检测方法，也就是边缘检测中理论最成熟的线性滤波方法，也称线性滤波边缘检测算子。在线性滤波边缘检测方法中，由于小波变换具有良好的时频局部化特性及多尺度分析能力，在不同尺度上具有“变焦”的功能，适合于检测突变信号，是检测突变信号强有力的工具，因此近年来小波变换在图像边缘检测中得到了广泛的重视，最具代表性的是 Marr-Hildreth 提出的边缘检测方法、Canny 最优算子及 Mallat 等提出的小波边缘检测方法^[24]，它们都具有非常良好的性质和比较好的检测效果。

2.3.3 基于 Canny 算子的边缘检测

近年来，Canny 边缘检测算子在灰度图像处理中得到广泛应用。根据边缘检测的有

效性和定位的可靠性, Canny 研究了最优边缘检测器所需的特性, 推导出最优边缘检测器的数学表达式。Canny 算子的基本思想是: 先对处理的图像选择一定的 Guass 滤波器进行平滑滤波, 然后采用一种称之为“非极值抑制”(Nonmaxima Suppression)的技术, 对平滑后的图像处理, 得到最后所需的边缘图像。

(一) 图像边缘检测技术中的最优准则—Canny 准则

Canny 考察了以往的边缘检测算子和边缘检测的应用, 发现尽管这些应用出现在不同的领域, 但是他们都有一些共同的要求:

1. 好的检测结果;
2. 对边缘的定位要准确;

在实践中, 发现仅仅满足这两条件的算子并不好, 有的算子会对一个边缘产生多个响应。也就是说图像上本来只有一个边缘点的, 可是检测时就会出现多个边缘点。于是再添加一个要求:

3. 对同一边缘要有低的响应次数。

这就是 Canny 三准则^[25], 是第一个完整明确地提出这三条准则, 更重要的是 Canny 给出了这三条准则的数学表达式, 这就使得寻找给定条件下最优算子的工作转化为一个泛函优化问题。这三个数学表达式如下:

(1) 好的检测结果 (Good Detection):

好的检测结果, 或者说对边缘的错误检测率要尽可能低: 就是要把是边缘但是没有检测出来的和不是边缘却检测出来是边缘的这种概率降到最低, 这是显然的, 所有使用边缘检测做更深入工作的系统, 它的性能都依赖于边缘检测的误差。由于这两个概率都随着信噪比提高而单调下降, 所以这第一个准则就等价于求 $f(x)$ 使得检测后的图像在边缘点的信噪比最大化。

经过 $f(x)$ 滤波后, 边缘点处的图像信号的响应是:

$$H_G = \int_{-w}^w G(-x)f(x)dx \quad (2.5)$$

而噪声的响应的平方根是

$$H_n = n_0 \left[\int_{-w}^w f^2(x)dx \right]^{1/2} \quad (2.6)$$

这里的 n_0^2 是单位长度上噪声的均方。

于是 Canny 第一准则的数学表达式就是:

$$SNR(f) = \frac{H_G}{H_n} = \frac{\left| \int_{-W}^W G(-x)f(x)dx \right|}{\left[\int_{-W}^W f^2(x)dx \right]^{1/2}} \quad (2.7)$$

(2) 定位准则:

对边缘的定位要准确: 也就是标记出的边缘位置要和图像上真正边缘的中心位置充分接近。设检测出的边缘位置在 x_0 (记住: 实际的边缘在 $x=0$), 则有

a. $H_G(x) + Hn(x)$ 在 x_0 处取得最大值, 所以 $H'_G(x) + H'n(x) = 0$

b. $H_G(x)$ 在 $x=0$ 取得最大值, 所以 $H'_G(0) = 0$

c. 于是就是 $H'_G(x_0) = H'_G(0) + H''_G(0)x_0 + \sigma(x_0^2) \approx H''_G(0)x_0$ 即 $H''_G(0)x_0 = -H'_n(x_0)$

从而 $E(x_0^2) = \frac{E\left[\left(H'_n(x_0)\right)^2\right]}{\left(H''_G(0)\right)^2} = \frac{n_0^2 \int_{-W}^W f'^2(x)dx}{\left[\int_{-W}^W G'(-x)f'(x)dx\right]^2}$ 这里 $E(x)$ 表示的是 x 的期望。因为 x_0 越

小定位越准确, 所以定位准则的数学表达式为: $Loc(f) = \frac{\left| \int_{-W}^W G'(-x)f'(x)dx \right|}{n_0^2 \int_{-W}^W f'^2(x)dx}$ 则最终目标

是求一个函数 $f(x)$, 使得下面这个式子达到最大值:

$$J(f) = \frac{\left[\int_{-W}^W G(-x)f(x)dx \right] \left[\int_{-W}^W G'(-x)f'(x)dx \right]}{n_0^2 \left[\int_{-W}^W f'^2(x)dx \right]^{1/2} n_0^2 \int_{-W}^W f'^2(x)dx} \quad (2.8)$$

(3) 在理想情况下, 用滤波器对噪声响应的两个峰值间的距离来近似滤波器对一个边缘点响应的长度。因为输出信号中相邻两个极大值点的距离是相邻两个交叉点距离的 2 倍, 高斯噪声在函数 g 滤波后输出信号中相邻两个零交叉点的距离 $x = \pi \left(\frac{-R(0)}{R''(0)} \right)^{1/2}$

其中 $R(0) = \int_{-\infty}^{\infty} g^2(x)dx$ $R''(0) = \int_{-\infty}^{\infty} g'^2(x)dx$ 所以噪声在 $f(x)$ 滤波后两个相邻极大值点的

距离为 $\chi_{\max} = 2\pi \cdot \left(\frac{\int_{-\infty}^{\infty} f'^2(x)dx}{\int_{-\infty}^{\infty} f''^2(x)dx} \right) = kW$ 这里的 W 是滤波器 $f(x)$ 的半宽度。

(二) Canny 边缘检测算法

Canny 依据图像边缘检测最优准则设计 Canny 边缘检测算法，具有较好的结果：

1. 首先用 2D 高斯滤波模板进行卷积以消除噪声；
2. 利用导数算子（比如 Prewitt 算子、Sobel 算子）找到图像灰度的沿着两个方向的偏导数 (G_x, G_y) 并求出梯度的大小； $|G| = \sqrt{G_x^2 + G_y^2}$
3. 利用 (2) 的结果计算出梯度的方向 $\theta = \text{Arc tan}(\frac{G_y}{G_x})$

4. 一旦知道了边缘的方向，就可以把边缘的梯度大致地分为四种（水平，竖直，135 方向，225 方向）。也就是把 0~180 分为 5 个部分：0—22.5 以及 157.5—180 算做是水平方向；22.5—67.5 算做 45 度方向，67.5—112.5 算是竖直方向；112.5—157.5 记为 135 度方向。这些方向是梯度的方向，也就是可能的边缘方向的正交方向。通过梯度的方向，就可以找到这个像素梯度方向的邻接像素；

5. 非最大值抑制：遍及图像，若某个像素的灰度值与其梯度方向上前后两个像素的灰度值相比不是最大的，那么这个像素值置为 0，即不是边缘；

6. 使用累计直方图计算两个阈值。凡是大于高阈值的一定是边缘；凡是小于低阈值的一定不是边缘；如果检测结果大于低阈值但又小于高阈值，那就要看这个像素的邻接像素中有没有超过高阈值的边缘像素；如果有的话那么它就是边缘，否则它就不是边缘；如图 2-5 就是用 Canny 算法对原始图像进行处理的效果图。



图 2-5 Canny 边缘检测

小结：通过对现有的图像边缘检测技术进行比较和分析，针对边缘检测中噪声抑制和提取边缘细节的问题，采用 Canny 边缘检测算法，在进行边缘检测之前，对图像进行高斯滤波处理，达到锐化边缘，不漏检微弱边缘的目的。将 Canny 最优边缘检测准则转换为数学模型，对 Canny 边缘检测算法仿真和分析得到理想的结果。

第三章 基于主动视觉的摄像机自标定技术

3.1 概述

在计算机视觉中,设备标定与三维重构是基于二维图像的三维空间定量分析的关键内容,也是后期视觉的主要研究内容。在利用计算机技术实现对三维景物的描述、识别和理解这一任务时,CCD 摄像机、数码相机是在这个过程的基本测量工具,通过计算三维物体的位置、形状等几何信息,而由此识别环境中的物体,才能做出正确的反应,因此计算机视觉的中心任务就是利用计算机实现对三维景物的描述和识别,所谓描述就是指由三维信息生成二维图像的过程,而识别就是二维图像的三维恢复,无论哪种任务,首先必须解决的都是三维物点与二维像点的对应关系问题,数码相机所获取的三维物体的二维图像是以像素为单位的,如何确定物体的三维空间坐标和二维图像的对应关系是摄像机标定工作所要解决的问题。空间物体表面某点的三维几何位置与其在图像中对应点之间的相互关系是由摄像机成像的几何模型决定的,这些几何模型参数就是摄像机参数,为了得到这些参数而进行的实验与计算的过程称为摄像机标定。一旦建立了这种对应关系,就可以通过二维像点坐标推出物点三维世界坐标,或相反的,从已知的三维信息推出二维信息。由此可见,摄像机标定是计算机视觉实现的前提和基本问题,是实现三维欧氏空间立体视觉的基本而又关键的一步^[26]。

摄像机标定就是求它们的内部参数(包括焦距、纵向和横向像素点间距、光轴与成像平面的交点坐标和变形系数)和外部参数(包括成像设备与被测对象间的三个坐标方向的位移和转角)的过程^[27~30]。摄像机标定在该系统中起着重要的作用:由摄像机标定所确定的摄像机模型和参数能够提供一种给定某目标点的图像坐标,确定一条实际目标点必在其上的空间直线的方法,利用两幅这样的图像,就可以由两条直线的交点确定这一目标点的空间位置,从而实现三维重建。根据是否需要放置标定参照物,摄像机标定技术可以分为两类:一是传统的摄像机标定技术,二是自标定技术^[31]。

3.2 成像几何模型以及双视点几何模型

计算机立体视觉系统是从摄像机获取的图像信息出发, 计算三维环境物体的位置、形状等几何信息。要认识图像产生及其所携带信息的内在性质, 必须了解描述三维景物如何形成二维图像的成像几何模型。因此本节首先介绍成像几何模型, 然后介绍双视点几何方面的知识。

一. 坐标系

我们先定义不同类型的坐标系: 世界坐标系、摄像机坐标系、图像坐标系。如图 3-1。

1. 世界坐标系: X_w, Y_w, Z_w

由于摄像机可安放在环境中的任何位置, 所以在环境中还应该选择了一个基准坐标系来描述摄像机的位置, 并用它描述环境中其它任何物体的位置, 该坐标系称为世界坐标系, 它由 X_w, Y_w, Z_w 轴组成, 其刻度单位属于物理单位。如图 3-1a。

2. 图像坐标系: $(u, v)(x, y)$

通过摄像机采集的图像都是以标准电视信号的形式输入计算机, 并经计算机中的专用数模转换器转换成数字图像。每幅数字图像在计算机内为 $M \times N$ 数组, M 行 N 列的图像中的每一个元素我们称之为像素, 其数值即为图像点的亮度。于是在图像上定义了一个直角坐标系 u, v , 每一个像素的坐标 (u, v) 分别是该像素在数组中的列数与行数。所以, (u, v) 是以像素为单位的图像坐标系的坐标。由于 (u, v) 只表示像素位于数组中的列数与行数, 并没有用物理单位表示出该像素在图像中的位置, 因而需要再建立以物理单位表示的图像坐标系, 该坐标系以图像内某一点为原点, x, y 轴分别与 u, v 轴平行。

3. 摄像机坐标系: X_c, Y_c, Z_c

为了分析摄像机成像的几何关系, 我们又定义了一个新的坐标系, 其原点 O 在摄像机的光心上, X_c 轴和 Y_c 轴和图像坐标系中的 x 轴与 y 轴平行, Z_c 为摄像机的光轴, 它与图像平面垂直, 光轴与图像平面的交点即为图像坐标系的原点。如图 3-1b。

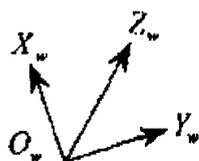
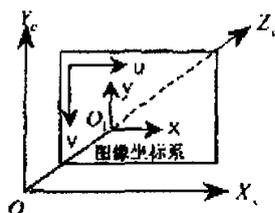


图 3-1 (a)世界坐标系



(b)摄像机坐标系

二. 成像几何模型

成像几何模型是光学成像几何的简化，我们选用的摄像机模型为小孔透视模型 (*pin-hole model*)^[32]这是一种最常用的理想状态模型，其物理上相当于薄透镜成像，它的最大优点是成像关系是线性的、简单实用而不失准确性。如图 3-2 所示，摄像机坐标系 ($O_c - X_c Y_c Z_c$) 的原点 O_c 即为摄像机的光心， Z_c 轴与光轴重合。图像物理坐标系 ($o - xy$) 的坐标原点在光轴与图像平面的交点处，其 x, y 轴分别平行于摄像机坐标系的 X_c, Y_c 轴。三维世界坐标系 ($O_w - X_w Y_w Z_w$) 中物体点 P 的三维坐标是 (X_w, Y_w, Z_w) ， (u, v) 是计算机图像坐标系中空间任意一点 P 点的成像点 p 的实际图像坐标，单位是像素数 (*pixel*)。焦距 f 为图像平面到光学中心的距离。

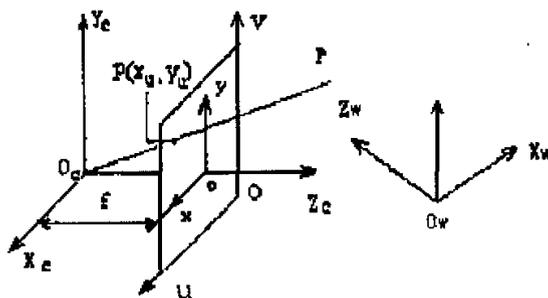


图 3-2 针孔摄像机模型

P 在图像上的成像位置 p 通过透视投影几何关系如下确定：

$$x_u = f \frac{X_c}{Z_c}, \quad y_u = f \frac{Y_c}{Z_c} \quad (3.1)$$

其中， (X_c, Y_c, Z_c) 是 P 在摄像机坐标系中的三维坐标。 (x_u, y_u) 是理想小孔摄像机模型下 p 点的物理图像坐标，单位为毫米 (*mm*)。

由于图像点的像素坐标 (u, v) 表示的是像素位于数字图像数组中的行数和列数，并没有用物理单位表示该像素在图像中的位置，因此建立了以物理单位 (毫米) 来表示的图像物理坐标系 $o - xy$ ，它与 $o - uv$ 图像像素坐标系的关系如图 3-3 所示，对于数码摄像机来说，两个坐标系之间的关系依赖于像素的尺寸和形状，图像中任意一个像素在两个坐标系下有如下关系：

$$\begin{cases} u = s_x \cdot x_u + u_0 \\ v = s_y \cdot y_u + v_0 \end{cases} \quad (3.2)$$

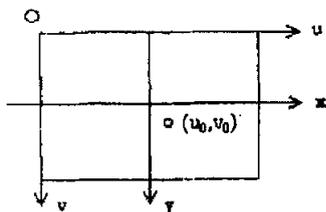


图 3-3 图像物理坐标系与图像像素坐标系之间的关系

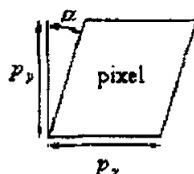


图 3-4 像素点倾斜角

其中, s_x, s_y 为图像平面单位距离上的像素数 ($pixels/mm$), (u_0, v_0) 为摄像机光轴与图像平面的交点, 称为主点坐标。由 (3.1) (3.2) 式可得:

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_u & (\tan \alpha) f_v & u_0 \\ 0 & f_v & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_c/Z_c \\ Y_c/Z_c \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_u & s & u_0 \\ 0 & f_v & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_c/Z_c \\ Y_c/Z_c \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

其中, $f_u = f \cdot s_x$, $f_v = f \cdot s_y$, f_u 称为图像 u 轴的尺度因子, f_v 称为图像 v 轴的尺度因子, 由于摄像机制造及工艺等原因, 像素点很可能发生畸变。如图 3-4 所示, $p_x = 1/s_x$, $p_y = 1/s_y$, p_x, p_y 分别为像素的宽和高, α 为像素点的倾斜角。 $s = \tan(\alpha) f_v$ 称为畸变因子, 当像素点是矩形时, $\alpha = 0, s = 0$ 当像素点不是矩形时, 将不为 0。令 p 为规一化的理想图像坐标, 即相当于假设摄像机焦距等于 1, 其中 $x = X_c/Y_c$, $y = Y_c/Z_c$ 。则有:

$$p = \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_c/Y_c \\ Y_c/Z_c \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

则图像点的像素坐标 m 与规一化图像坐标 p 之间的关系以齐次坐标表示为:

$$m = \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_u & s & u_0 \\ 0 & f_v & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_c/Z_c \\ Y_c/Z_c \\ 1 \end{bmatrix} = Kp \quad (3.5)$$

其中, K 包含五个内参数, 它反映的是摄像机内部的成像参数, 所以称为内参数矩阵。

选择一个世界坐标系作为基准坐标系，世界坐标系与摄像机坐标系的转换关系为：

$$\begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & T \\ 0^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

其中， R 和 T 分别为从世界坐标系到摄像机坐标系的旋转和平移变换。它反映的是摄像机坐标系与世界坐标系之间的位置关系，因此称为外参数。 R 是一个 3×3 的单位正交矩阵，一般考虑三个方向的旋转变换，即三个自由度，绕 X 轴旋转角 ϕ (俯仰角) 的变换、绕 Y 轴旋转角 θ (旋转角) 的变换、绕 Z 轴旋转角 ψ (侧倾角) 的变换来决定，如式 (3.8)。 T 是 3×1 的平移向量，如式 (3.9)。由 (3.5)、(3.6) 可得空间点的实际三维坐标与像素坐标之间的关系如下：

$$\begin{aligned} Z_c \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} f_u & s & u_0 \\ 0 & f_v & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_u & s & u_0 & 0 \\ 0 & f_v & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R & T \\ 0^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \\ &= M_{\text{内}} M_{\text{外}} X = MX \end{aligned} \quad (3.7)$$

$$\begin{aligned} R = R(\psi)R(\theta)R(\phi) &= \begin{bmatrix} \cos \psi & -\sin \psi & 0 \\ \sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \phi & -\sin \phi \\ 0 & \sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \cos \psi \cos \theta & \cos \psi \sin \theta \sin \phi - \sin \psi \cos \phi & \cos \psi \sin \theta \cos \phi - \sin \psi \sin \phi \\ \sin \psi \cos \theta & \sin \psi \sin \theta \sin \phi + \cos \psi \cos \phi & \sin \psi \sin \theta \cos \phi + \cos \psi \sin \phi \\ -\sin \theta & \cos \theta \sin \phi & \cos \theta \cos \phi \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3.8)$$

$$T = [T_x, T_y, T_z] \quad (3.9)$$

其中 M 为 3×4 矩阵，称为透视变换矩阵， $M_{\text{内}}$ 只与摄像机内部结构有关，称为摄像机内部参数； $M_{\text{外}}$ 只与摄像机相对于世界坐标系的方位有关，称为摄像机外部参数。 X 为空间点在世界坐标系下的齐次坐标。

3.3 传统的摄像机标定方法

传统的摄像机标定方法是在一定的摄像机模型下，在摄像机前放置一个已知的标定参照物，利用已知物体的一些点的三维坐标和它们的图像坐标，求取摄像机模型的内部参数和外部参数，算法比较复杂。它是基于单帧图像的基本方法和基于多帧已知对应关系的立体视觉方法。一般最经常采用的方法是线性求解方法。一般线性求解方法是透视变换方法，从摄影测量学的角度研究摄像机图像和环境物体之间的关系，建立摄像机成像几何的线性模型，这种线性模型参数的估计完全可以由线性方程的求解来实现，然后由求得的解再分解得到摄像机参数^[33]。线性变换的过程就是首先将像点和物点的成像几何关系在齐次坐标下写成透视投影矩阵的形式：

$$Z_c \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} & m_{14} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} & m_{24} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} & m_{34} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

其中， $(X_w, Y_w, Z_w, 1)^T$ 为空间三维点的世界坐标， $(u, v, 1)^T$ 为相应的图像坐标， m_{ij} 为透视变换矩阵 M 的元素。它包含三个方程，整理消去 Z_c 后，得到如下的关于 m_{ij} 的线性方程：

$$\begin{cases} m_{11}X_w + m_{12}Y_w + m_{13}Z_w + m_{14} - uX_w m_{31} - uY_w m_{32} - uZ_w m_{33} = um_{34} \\ m_{21}X_w + m_{22}Y_w + m_{23}Z_w + m_{24} - vX_w m_{31} - vY_w m_{32} - vZ_w m_{33} = vm_{34} \end{cases} \quad (3.11)$$

这两个方程描述了三维世界坐标点 $(X_w, Y_w, Z_w, 1)^T$ 与相应的图像点 $(u, v, 1)^T$ 之间的关系。如果已知三维世界坐标和相应的图像坐标，将变换矩阵看作未知数，则共有 12 个未知数。对于每一个物体点，都犹如上的两个方程，一般可以假设 $m_{34} = 1$ ，则共有 11 个未知数，取六个目标点可得 12 个方程，是一个超定方程，利用最小二乘法可以很容易求出上述线性方程的解。采用更多的已知点，可以使方程的个数大大超过未知数的个数，用最小二乘法求解可以降低误差造成的影响，对透视变换矩阵分解可得内外参数。

线性求解方法的缺点是摄像机的系统误差不能加进去，因而不能进行系统误差的修正，另外由于中间参数间互相存在约束，它的维数大于原参数的维数，加上存在噪声及镜头像差的影响，使得标定精度不高。最后该方法能得到隐式解而未必能得到理想的显式解。

3.4 摄像机自标定技术

作为近年来发展起来的一类新型的摄像机标定技术,摄像机自标定方法与传统的摄像机标定方法的显著不同之处在于,摄像机自标定方法不需要借助于任何外在的特殊标定物或某些三维信息已知的控制点,而是仅仅利用了图像对应点的信息,直接通过图像来完成标定任务的。正是这种独特的标定思想赋予了摄像机自标定方法巨大的灵活性,同时也使得计算机视觉技术能够面向范围更为广阔的应用。众所周知,在许多实际应用中,由于经常需要改变摄像机的参数,因此经常需要进行实时的、在线的标定,而传统的摄像机标定方法在此类情况下将由于需要借助于特殊的标定物而变得不再适合。正是因为其应用的广泛性和灵活性,摄像机自标定技术的研究已经成为近年来计算机视觉研究领域的热点方向之一。

3.4.1 基于主动视觉的摄像机自标定

在已有的摄像机标定技术当中,鉴于传统方法和自标定方法的不足,降低求解的复杂性,人们提出了基于主动视觉的摄像机标定方法,通过利用主动视觉系统控制摄像机做特定运动来求取内参数。所谓基于主动视觉的摄像机标定,是指“已知摄像机的某些运动信息”下标定摄像机的方法^[34]。与自标定方法一样,也是一种仅从图像对应点进行标定的方法,不需要高精度的标定块。这里,“已知摄像机的某些运动信息”包括定量信息和定性信息。定量信息如摄像机在平台坐标系下朝某一方向平移某一给定量,摄像机的二平移运动正交等。定性信息如摄像机仅作纯平移运动或仅作旋转运动等。

该方法主要包括基于纯旋转运动和纯平移运动自标定方法两种^[35]:

1. 基于纯旋转运动的摄像机自标定技术。该方法是由 Basu^[36], Du 和 Brady^[37], Hartley^[38]提出的,通过摄像机作纯旋转运动来求解内参数。该算法具有一定的局限性,它要求摄像机只绕光源中心旋转,不能有任何平移,但在实际应用中光源中心难以确定。

2. 基于纯平移运动的摄像机自标定技术^[39]。该方法通过控制摄像机在三维空间内作两组纯平移运动,其中每组包含三次两两正交的平移运动,可以线性求解五个参数的内参数矩阵,这就使得平移运动在普通的工作平台上即可实现。

一、极线几何约束与极点表达

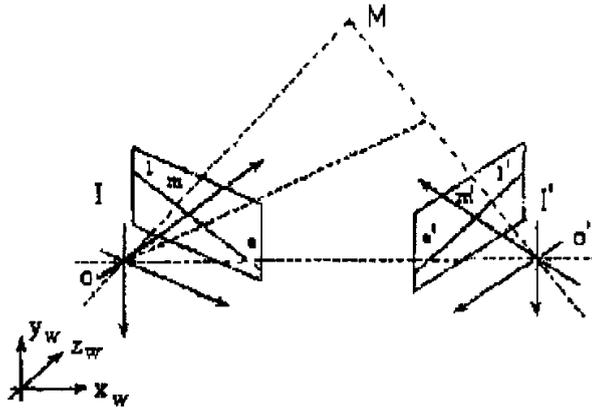


图 3-5 极线几何约束

由图 3-5 可见，尽管空间点 M 的实际位置未知，但通过它在第一幅图像上的图像点 m ，可以得到它在空间的一条对应射线，这条射线投影到第二幅图像得到一条线 l' ，其对应点 m' 就在 l' 上，这称为极线几何约束。事实上，由两个投影中心 o 和 o' ，以及 M 点确定的平面 L 上的所有点在第二幅图像的投影都在 l' 上，在第一幅图像的投影都在 l 上。 o 、 o' 、 m 、 m' 和 M 都属于平面 L ，称极平面。 l' 即为极平面与第二个摄像机像平面 I' 的交线， l 为极平面与第一个摄像机像平面 I 的交线。 l 和 l' 称为对应极线。经过投影中心 o 和 o' 的每个平面产生一系列的对应极线，如图 3-6 所示，所有这些线都经过两个特殊点 e 和 e' ，即极点。所以 e' 为连接 oo' 的基线与 I' 平面的交点； e 为连接 oo' 的基线与 I 平面的交点。因此 e' 为第一幅图像摄像机投影中心 o 在第二幅图像的投影， e 为第二幅图像摄像机投影中心 o' 在第一幅图像上的投影。

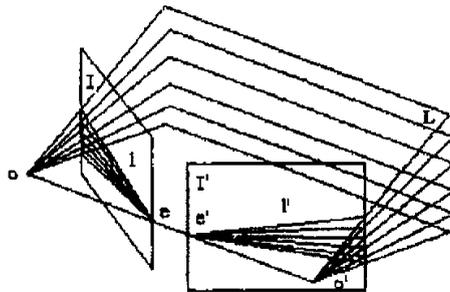


图 3-6 多条极线交于一点，即极点

设空间点 M 在世界空间坐标系下的坐标为 X ，在第一个摄像机的坐标系下为 X_{c1} ，则 X 与 X_{c1} 的关系如下：

$$X_{c1} = \begin{bmatrix} X_{c1} \\ Y_{c1} \\ Z_{c1} \end{bmatrix} = R_{wc1}X + T_{wc1} \quad (3.12)$$

其中 R_{wc1} 为从世界坐标系到第一个摄像机坐标系的旋转矩阵， T_{wc1} 为从世界坐标系到第一个摄像机坐标系的平移向量。

第二幅图像摄像机坐标系可看成由第一幅图像摄像机坐标系经旋转与平移后得到。设空间点 M 在第二幅图像摄像机坐标系下的坐标为 X_{c2} ，其三维空间刚体位置变换为：

$$X_{c2} = RX_{c1} + T \quad (3.13)$$

其中， R ， T 为从第一个幅图像的摄像机到第二幅图像的摄像机的刚体运动，则在第一个摄像机坐标系下两个摄像机之间的平移向量为 $-T$ 。由式子 (3.12)、(3.13) 有第二个摄像机坐标系与世界坐标系的转换关系为：

$$X_{c2} = R(R_{wc1}X + T_{wc1}) + T \quad (3.14)$$

则第一个摄像机的光心在世界坐标系下为：

$$X_{wo1} = -R^{-1}_{wc1}T_{wc1} \quad (3.15)$$

当摄像机做纯平移运动时，有 R 为单位阵，则第二个摄像机的光心在世界坐标系下为：

$$X_{wo2} = -R^{-1}_{wc1}(T_{wc1} + T) \quad (3.16)$$

则在世界坐标系下，第一个摄像机光心到第二个摄像机光心的平移运动向量为：

$$T_{w21} = -R^{-1}_{wc1}T \quad (3.17)$$

可见世界坐标系下的摄像机平移运动向量 T_{w21} 与第一个摄像机坐标系下的平移向量 $-T$ 之间相差一个旋转矩阵 R_{wc1} 。

摄像机采用针孔模型，则 m 与 X_{c1} 之间的关系如下表示：

$$m = \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_u & s & u_0 \\ 0 & f_v & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{c1}/Z_{c1} \\ Y_{c1}/Z_{c1} \\ 1 \end{bmatrix} = \lambda_1 KX_{c1} \quad (3.18)$$

其中， K 为内参数矩阵。 λ_1 为非零常数因子。由(3.13)和(3.18)有：

$$m' = \lambda_2 KX_{c2} = \lambda_2 KRX_{c1} + \lambda_2 KT \quad (3.19)$$

λ_2 为非零常数因子。由于 e' 为第一幅图像摄像机投影中心 o 在第二幅图像的投影，有如下极点表示：

$$e' = \lambda_2 KR(0,0,0)^T + \lambda_2 KT = \lambda_2 KT \quad (3.20)$$

同理， e 为第二幅图像摄像机投影中心 o' 在第一幅图像上的投影，极点如下表达：

$$e = \lambda_1 KX_{c1} = \lambda_1 K(R^{-1}(0,0,0)^T - R^{-1}T) = -\lambda_1 KR^{-1}T \quad (3.21)$$

由上式可知，当摄像机作纯平移运动时， R 为单位阵，得到的两幅图像的极点相等。即

$$e = e' \approx KT \quad (3.22)$$

其中， \approx 代表相差一个非零常数因子意义下的相等。本文算法就是基于此式的。展开(3.18)式可得：

$$\begin{cases} u = f_u \cdot \frac{X_{c1}}{Z_{c1}} + s \cdot \frac{Y_{c1}}{Z_{c1}} + u_0 \\ v = f_v \cdot \frac{Y_{c1}}{Z_{c1}} + v_0 \end{cases} \quad (3.23)$$

令平移向量 $T = (t_x, t_y, t_z)^T$ ，则当摄像机平移到新的位置时，有：

$$\begin{cases} u' = f_u \cdot \frac{X_{c1} + t_x}{Z_{c1} + t_z} + s \cdot \frac{Y_{c1} + t_y}{Z_{c1} + t_z} + u_0 \\ v' = f_v \cdot \frac{Y_{c1} + t_y}{Z_{c1} + t_z} + v_0 \end{cases} \quad (3.24)$$

则用式子(5-13)减(5-12)，得

$$\begin{cases} u' = \left(u + \frac{f_u t_x + s \cdot t_y + u_0 \cdot t_z}{Z_{c1}} \right) / \left(1 + \frac{t_z}{Z_{c1}} \right) \\ v' = \left(v + \frac{f_v \cdot t_x + v_0 \cdot t_z}{Z_{c1}} \right) / \left(1 + \frac{t_z}{Z_{c1}} \right) \end{cases} \quad (3.25)$$

由上式可以看出，当在摄像机坐标系下做平行于摄像机坐标系的 X_{c1} 轴的运动时(此时 $t_x \neq 0, t_y = 0, t_z = 0$)，运动前后得到的对应点在图像 v 方向是不变的。当在摄像机坐标系下做平行于摄像机坐标系的 Y_{c1} 轴的运动时(此时 $t_x = t_z = 0, t_{y1} = -t_{y2} \neq 0, t_{x1} = t_{x2} = 0$)，则有：

$$\begin{cases} u = u' + u'' \\ v = v' + v'' \end{cases} \quad (3.26)$$

其中, (u, v) 为空间某点在平移前拍摄下的像点, (u', v') 为第一次平移运动得到的对应像点, (u'', v'') 为做方向相反的第二次平移运动得到的对应像点。

二、线性内参数子标定算法

1. 求解极点

本文求极点的方法采用在纯平移运动下的两点算法^[40]。具体算法如下, 当平移运动时, 基本矩阵为反对称矩阵, 一对对应点可以产生如下一个约束:

$$\begin{bmatrix} v-v' & u'-u \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} = [u'v - uv'] \quad (3.27)$$

其中, $m = (u, v, 1)^T$, $m' = (u', v', 1)^T$, $e = e' = (a, b, 1)^T$ 。为了使 e 有唯一解, 需要两对或两对以上的对应点。因为在图像的中心附近点的畸变较小, 所以尽量选取中间的对应点来求取极点。

2. 求解内参数

由(3.22)式可以看出, 如果我们知道纯平移运动的一次平移向量 T 和相应的极点 e , 就可以得到关于内参数的两个线性约束方程:

$$A_{2 \times 5} P = e \quad (3.28)$$

其中, $P = (f_u, f_v, u_0, v_0, s)^T$, 令 $e = (a, b)^T$, 令

$$A_{2 \times 5} = \begin{bmatrix} t_x & 0 & 1 & 0 & t_y \\ t_z & & & & t_z \\ 0 & t_y & 0 & 1 & 0 \\ & & & & t_z \end{bmatrix} \quad (3.29)$$

为了获得 P 的唯一解, 至少需要三次不在一个平面的平移运动 ($N \geq 3$)。可通过下式线性求解内参数:

$$A_{2N \times 5} P = e_{2N \times 1} \Rightarrow \begin{bmatrix} t_x & 0 & 1 & 0 & t_y \\ t_z & & & & t_z \\ 0 & t_y & 0 & 1 & 0 \\ & & & & t_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_u \\ f_v \\ u_0 \\ v_0 \\ s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} \quad (3.30)$$

三、注意事项

在进行内部参数的求解时要注意以下两点:

1. 调整摄像机位置

在主动视觉系统中, 摄像机固定在一个可精确控制的平台上, 平台的运动参数可以从仪器上读出, 即世界坐标系下的摄像机平移向量 T_{w21} 可以直接获得。令世界坐标系的

坐标轴与摄像机坐标系的坐标轴平行,保持摄像机相对于世界坐标系的位置和姿势不变,即令(3.12)式中的 $R_{wc1} = E$ 。因此如何调整摄像机的位置使 $R_{wc1} = E$ 成为关键,具体作法如下:将摄像机固定放置在平台上,首先用目测的方法,使它与世界坐标系的三个坐标轴平行,这种目测的方法可以将坐标轴角度的偏差控制在 5° 内。控制摄像机沿世界坐标系的 X_w 轴运动一段距离,拍摄一幅图像,选取两幅图像中心点附近的几对不在一行的对应点,若两幅图像的对应点在同一行或相差一行(由于镜头畸变,允许相差一个像素),说明上式(3.25)的摄像机坐标系下的平移向量的三个分量 $t_x \neq 0, t_y = 0, t_z = 0$ 。即摄像机坐标系的 X_{c1} 轴与世界坐标系的 X_w 轴是平行的。通过调整摄像机,使摄像机坐标系的 X_{c1} 轴与世界坐标系的 X_w 轴平行。然后回到初始位置,控制摄像机沿世界坐标系的 Y_w 轴运动一段距离,拍摄一幅图像,再回到初始位置,控制摄像机沿世界坐标系的 Y_w 轴的反方向运动相同的距离,再拍摄一幅图像。比较三幅图像,又式(3.26)成立,则摄像机坐标系的 Y_{c1} 轴与世界坐标系的 Y_w 轴是平行的。通过调整摄像机,使两个坐标系的 Y 轴平行。 X 轴与 Y 轴都平行, Z 轴就可保证是平行的。

2. 稳定性分析

用上面的方法求解内参数,在没有误差的情况下,得到的解是正确的,但是如果方程组是病态的,很小的扰动也会导致结果的很大偏差。所谓病态是这样定义的:对于线性方程组(3.32),它的病态性质是系数矩阵 A 的条件数: $Cond(A) = \|A^{-1}\| \cdot \|A\|$ 其中 $\|A\|$ 是矩阵 A 的范数。 $Cond(A)$ 越大,方程组就越病态,求得的解就越不稳定。若 A 的矩阵元素的数量极相差很大,则 A 很容易发生病态。在实际自标定中,由于得到的极点可能存在误差,因而要防止病态方程组的存在。解决方法就是使系数矩阵 A 的数量级相差不很大,因为 A 矩阵主要是由平移矩阵的三个分量组成,只要使平移向量 T 的三个分量在一个数量级上即可。

综上所述,本文的线性摄像机内参数自标定算法步骤如下:

STEP1:调整摄像机,使 $R_{wc1} = E$,固定摄像机的位置。

STEP2:控制摄像机分别做 N ($N \geq 3$)次不在一个平面的已知运动参数的平移运动。

STEP3:根据(3.27)式,通过两个或两个以上的图像对应点计算每次平移运动的极点。

STEP4:根据(3.30)式建立约束方程,求解矩阵 P ,即得内参数矩阵 K 。

3.4.2 外部参数的标定

内参数求出后,还要求解外参数。摄像机外部参数是特定目标的世界坐标系与摄

像机坐标系之间的几何变换，它并非摄像机固有，并且随应用环境而不断变化的。在主动视觉平台上，可直接获得相对的平移向量 T ，由于本系统只有侧倾角 θ ，而其它俯仰角 ϕ 和旋转角 ψ 都为零，则就可以知道：

$$R = \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 & \sin\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\theta & 0 & \cos\theta \end{bmatrix} \quad (3.31)$$

那么式(3.8)就变成：

$$\begin{aligned} Z_c \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} f_u & s & u_0 \\ 0 & f_v & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} f_u & s & u_0 & 0 \\ 0 & f_v & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 & \sin\theta & T_x \\ 0 & 1 & 0 & T_y \\ -\sin\theta & 0 & \cos\theta & T_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{w0} \\ Y_{w0} \\ Z_{w0} \\ 1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3.32)$$

但是世界坐标系与摄像机初始位置的坐标系之间的平移向量 $T_{wc1} = (T_x, T_y, T_z)$ 还未知，因此关键是确定外参数 T_{wc1} 。

取被摄物体的一个特征点为世界坐标系的原点，由(3.12)式可知，此点在第一个摄像机坐标下的坐标为 $X_{c1} = T_{wc1}$ ，因此世界坐标系原点在平移运动前后两幅图像伤的对应点 m 和 m' ，重构它在第一摄像机坐标系下的坐标 X_{c1} ，即得外参数 T_{wc1} 。重构算法如下：在摄像机作平移运动时，由(3.18)、(3.19)有：

$$KX_{c1} = \rho m \quad (3.33)$$

$$KX_{c1} + KT = \rho' m' \quad (3.34)$$

上面两式相减得：

$$KT = \rho' m' - \rho m \quad (3.35)$$

则由下式成立：

$$\begin{bmatrix} m' & -m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \rho' \\ \rho \end{bmatrix} = KT \quad (3.36)$$

应用最小二乘法可解得 ρ' 和 ρ 。用下式重构世界坐标系原点在第一个摄像机坐标系下的坐标：

$$X_{c1} = \rho K^{-1} m \quad (3.37)$$

其中 X_{cl} 即为要求得到的外参数 T_{wc1}

3.5 空间透视畸变的校正方法

在非接触式人体测量中,所摄取的人体图像信息存在许多干扰和误差,如光学成像误差、采样误差、标定误差、分析方法误差所造成的系统误差以及图像干扰、光学干扰、光线干扰、人体活动等所造成的随机误差等^[41],还有受景物对象与 CCD 摄像机三维空间相对位置关系和摄像机质量等问题的影响,其中由于光学成像系统所产生的图像非线性几何畸变,是较为显著的误差和干扰之一,它直接影响由图像所获得的尺寸的客观性和精确性,在进行基于图像分析的检测、模式匹配等定量分析时,就需要对有几何畸变的图像进行校正。

3.5.1 产生几何畸变的原因

一般光学成像系统都存在一定的像差,几何畸变是其中的一种。一般规则的几何畸变由两种表现形式^[42]:即桶形畸变与枕形畸变,如图 3-5 所示。

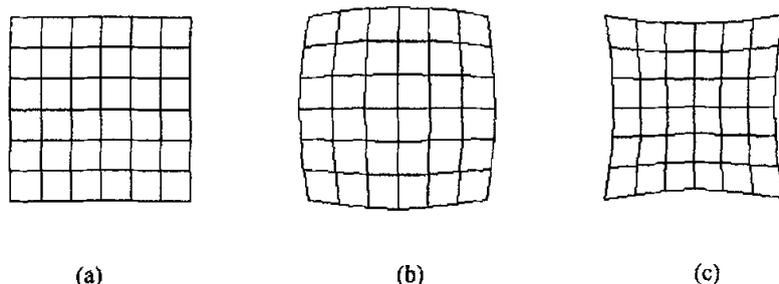


图 3-5 (a) 实际图像 (b) 桶形畸变 (c) 枕形畸变

由于单个透镜对一位置有一定大小的物体的不同部分因物象之间是否满足近轴光线的不同有不同的放大率,使影像产生扭曲变形。如图 3-6 所示,在同一视场中,物体上 A 点和 B 点处于不同的位置, A 点距主光线较远,靠近边缘, B 点距主光线较近,靠近中心。当透镜中心和边缘都属近轴光线时放大率相同, $K = A'C'/AC = B'C'/BC$, 此时,影像不会发生畸变。当影像中心放大率大于边缘部分 ($A'C'/AC < B'C'/BC$) 产生桶形畸变,反之则产生枕形畸变,一般摄像装置的成像系统常产生桶形畸变。

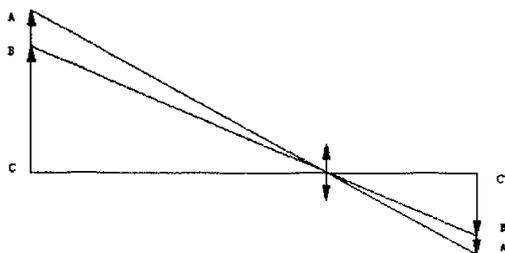


图 3-6 畸变原理

3.5.2 考虑二阶径向畸变的成像模型

在众多非线性镜头畸变中有很多是可以忽略不计，但是径向畸变却对短焦距成像影响很大，不可忽略，由于在一般工业视觉中，只需要考虑二阶径向畸变即可，因而本系统只要进行二阶径向畸变校正^[43]。如图 3-8 所示， P_u 是 P 点在理想小孔摄像机模型下在图像上的投影， P_d 是 P 点在考虑二阶透镜径向畸变的小孔模型下在图像上的投影。径向畸变是无论畸变如何变化，从图像中心点 O 到图像点 P_d 的向量 OP_d 的方向保持不变，都与向量 OP_u 平行。 (u, v) 是计算机图像坐标系中 P_d 点的实际图像坐标，单位是像素数 (pixel)。

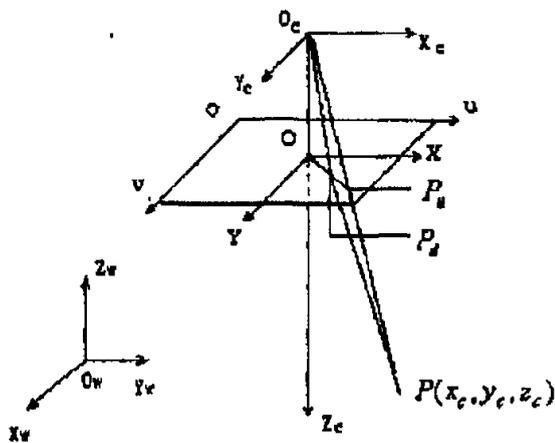


图 3-8 考虑二阶径向畸变的成像模型

不考虑畸变的图像点的规一化坐标 P 与有畸变的实际图像点的规一化坐标 P_d 之间的关系如下:

$$P_d = \begin{bmatrix} x_d \\ y_d \end{bmatrix} = (1 + k_1 r^2 + k_2 r^4) \begin{bmatrix} X_c/Z_c \\ Y_c/Z_c \end{bmatrix} = \lambda \begin{bmatrix} X_c/Z_c \\ Y_c/Z_c \end{bmatrix} = \lambda P \quad (3.38)$$

其中, $r^2 = (X_c/Z_c)^2 + (Y_c/Z_c)^2$, $\lambda = (1 + k_1 r^2 + k_2 r^4)$, k_1, k_2 为径向畸变系数。从公式可以看出, 图像中心点处的畸变很小, 而在图像边缘处的畸变较大, 证明了畸变原理。考虑畸变后, 图像点的像素坐标与规一化坐标 p 之间的关系如下:

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_u & s & u_0 \\ 0 & f_v & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_d \\ y_d \\ 1 \end{bmatrix} = K \begin{bmatrix} \lambda X_c/Z_c \\ \lambda Y_c/Z_c \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \lambda & 0 & 0 \\ 0 & \lambda & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} K \begin{bmatrix} X_c/Z_c \\ Y_c/Z_c \\ 1 \end{bmatrix} = \nabla KP \quad (3.39)$$

其中 ∇ 称为畸变系数矩阵:

$$\nabla = \begin{bmatrix} \lambda & 0 & 0 \\ 0 & \lambda & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 & 0 & 0 \\ 0 & 1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.40)$$

以上导出了畸变模型, 我们要求解的是径向畸变系数 k_1, k_2 以及校正后内参数矩阵 K 。

3.5.3 考虑二阶径向畸变的极线几何约束

设 X_{c1} 空间点 M 在第一个摄像机坐标系下的坐标, m 为 M 点在第一幅图像上的投影齐次坐标, 由(3.18)式、(3.39)式可知, m 与 X_{c1} 之间的关系如下表示:

$$m = \begin{bmatrix} u \\ v \\ l \end{bmatrix} = \nabla_1 KP \approx \nabla_1 KX_{c1} \quad (3.41)$$

其中, \approx 代表相差一个非零常数因子意义下的相等, ∇_1 为 X 的畸变系数矩阵。

第二幅图像摄像机坐标系可看成由第一幅图像摄像机坐标系经旋转与平移后得到。设空间点 M 在第二幅图像摄像机坐标系下的坐标为 X_{c2} , 其三维空间刚体位置变换为:

$$X_{c2} = RX_{c1} + T \quad (3.42)$$

R, T 定义同 (3.13) 式, 设 m' 为点 M 在第二幅图像上的投影齐次坐标, 则有:

$$m' = \nabla_2 KP' \approx \nabla_2 KX' = \nabla_2 KRX + \nabla_2 KT \quad (3.43)$$

其中, ∇_2 为 X' 的畸变系数矩阵, P' 为 X' 的规一化坐标。

由于 e' 为第一个摄像机光心 o 在第二幅图像的投影, o 在第一个摄像机坐标系的坐标为 $(0,0,0)^T$, 则根据(3.42)式可得它在第二个摄像机坐标系的坐标为 T , 则第二幅图像的极点如下表示:

$$e' = \nabla_2 KP' \approx \nabla_2 KT \quad (3.44)$$

其中, $T = (t_x, t_y, t_z)^T$, T 的规一化坐标为 $P' = t_n$, $t_n = (t_x/t_z, t_y/t_z, 1)^T$ 。

同理, e 为第二个摄像机光心 o' 在第一幅图像上的投影, o' 在第二个摄像机坐标系的坐标为 $(0,0,0)^T$, 则根据(3.40)式可得它在第一个摄像机坐标系的坐标为 $-R^{-1}T$ 则第一幅图像的极点如下表示:

$$e = \nabla_1 KP \approx -\nabla_1 KR^{-1}T \quad (3.45)$$

如果经过纯平移运动, 即 R 为单位阵, 则(3.45)式转为

$$e = \nabla_1 Kt'_n \approx -\nabla_1 Kt_n \quad (3.46)$$

其中, T 的规一化坐标为 $P = t'_n$, $t'_n = (t_x/t_z, t_y/t_z, 1)^T$, 很显然, $t_n = t'_n$ 。因 $\lambda_1 = (1 + k_1 r_1^2 + k_2 r_1^4)$, $\lambda_2 = (1 + k_1 r_2^2 + k_2 r_2^4)$, 且 $r_1^2 = r_2^2 = (t_x/t_z)^2 + (t_y/t_z)^2$, 所以 $\lambda_1 = \lambda_2$, 由(3.40)式知, 一次纯平移运动得到的两个极点的畸变系数矩阵 ∇_1 和 ∇_2 是相等的。由(3.44)、(3.45)式可知, 如 ∇_1 和 ∇_2 相等, 则两幅图像的极点相等。因而考虑径向畸变后, 纯平移运动后得到的两幅图像的极点仍相等。即

$$e = e' = \nabla Kt_n \quad (3.47)$$

其中, $\nabla = \nabla_1 = \nabla_2$ 。

3.5.4 小结

一. 求解极点

本文求极点的方法采用在纯平移运动下的两点算法^[39], 并考虑二阶径向畸变的存在, 在图像的不同地方选取两对对应点得到的极点是不同的, 这是因为不同点的畸变系数矩阵不同。由于图像中心处的畸变很小, 畸变系数矩阵几乎是单位阵, 基于此, 在图像的中心附近选取两对或两对以上对应点可以得到较精确的极点。

二. 二阶径向畸变系数

在内参数的求解方案的基础上, 即已知内部参数, 令平台坐标系的坐标轴与摄像机坐标系的坐标轴平行, 保持摄像机相对于平台的位姿不变。则可得摄像机坐标系下的摄像机的平移运动的运动参数。由(3.47)式可以看出, 经过一次纯平移运动, 平移向量 T 已知, 相应的极点 e 可以求得, 畸变系数矩阵 ∇ 中的 r^2 和 r^4 也可以求得, 因此可以得到关

于内参数矩阵 K 和二阶径向畸变系数 k_1, k_2 的两个非线性约束方程:

$$\begin{cases} \lambda_i \left(\frac{t_{xi}}{t_{zi}} f_u + \frac{t_{yi}}{t_{zi}} s + u_0 \right) = a_i \\ \lambda_i \left(\frac{t_{xi}}{t_{zi}} f_v + v_0 \right) = b_i \end{cases} \quad (3.48)$$

其中, (a_i, b_i) 为第 i 次平移运动得到的极点坐标。其中五个内部参数是已知的, 则方程是关于 k_1, k_2 的方程, 至少需要二次不在一个平面的平移运动 $T_i, i=(1, 2 \wedge N, N \geq 2)$ 。具体求解方法如下, 通过二次以上的纯平移运动, 由式(3.48)可得 4 个非线性方程, 因为 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4$ 都是关于 k_1, k_2 的方程, 所以 λ_3, λ_4 可由下式表示:

$$\begin{cases} \lambda_3 = \begin{bmatrix} r_3^2 & r_3^4 \\ r_3^4 & r_3^8 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \lambda_1 - 1 \\ \lambda_2 - 1 \end{bmatrix} + 1 \\ \lambda_4 = \begin{bmatrix} r_4^2 & r_4^4 \\ r_4^4 & r_4^8 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \lambda_1 - 1 \\ \lambda_2 - 1 \end{bmatrix} + 1 \end{cases} \quad (3.49)$$

由 (3.48) 式的两个非线性方程以及(3.49)式共组成 4 个非线性方程组如下:

$$\begin{cases} \lambda_1 \left(\frac{t_{x1}}{t_{z1}} f_u + \frac{t_{y1}}{t_{z1}} s + u_0 \right) = a_1 \\ \lambda_1 \left(\frac{t_{x1}}{t_{z1}} f_v + v_0 \right) = b_1 \\ \lambda_2 \left(\frac{t_{x2}}{t_{z2}} f_u + \frac{t_{y2}}{t_{z2}} s + u_0 \right) = a_2 \\ \lambda_2 \left(\frac{t_{x2}}{t_{z2}} f_v + v_0 \right) = b_2 \\ \lambda_3 = f_1(\lambda_1, \lambda_2) \\ \lambda_4 = f_2(\lambda_1, \lambda_2) \end{cases} \quad (3.50)$$

其中有 4 个未知数 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4$, 使用非线性最小二乘法如果给定一个合理的

初值，可以很容易得到精确解。已知 λ_1, λ_2 后，径向畸变系数 k_1, k_2 由下式得到：

$$\begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_1^2 & r_1^4 \\ r_2^2 & r_2^4 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \lambda_1 - 1 \\ \lambda_2 - 1 \end{bmatrix} \quad (3.51)$$

通过基于纯平移运动的线性自标定方法求解五个内部参数，通过非线性自标定对内参数进行校正，可以标定摄像机的两个径向畸变系数，提高精度，降低求解的复杂性。

第四章 特征线的三维重建以及对应元匹配

4.1 三维重建

现实的客观世界是一个三维空间，可是经过成像系统便丢失了第三维深（高）度信息的二维图像，立体视觉的最终目的就是为了恢复景物可视表面的完整信息，为了使人们在计算机上更直观的看到恢复的景物，就要用到计算机三维重建技术来实现目标的三维定位^[45]。三维重建是指从二维图像信息中恢复出图像所反映的场景中的三维物体的形状和空间位置^[46]，通过三维的重建可以恢复丢失的三维信息，得到被测物体表面几何形状的精确描述，构成完整的 CAD 模型。

双目立体视觉系统是基于立体视觉原理，在生物视觉系统中，人们早就注意到，几乎所有具有视觉的生物都有两个眼睛。用两个眼睛同时观察物体时，会有深度或远近的感觉。立体电影之所以有逼真的深度感，也是仿照了立体视觉原理。在立体电影拍摄中，用两个摄像机（模仿人的双眼）同时拍摄，而在放映时，将两个摄像机拍摄的图像同时投影到屏幕上，并利用偏振光的原理，使人的双眼分别看到左右摄像机拍摄的图像，从而使人有真实三维景物的立体感。虽然双目立体视觉法是最传统的一种立体视觉测量方法，但双目立体视觉直接模拟人类双眼处理景物的方式，具有简单、可靠、灵活、使用范围广等特点，又具有较高的检测精度和检测速度，可以进行非接触、自动、在线的检测，因而十分具有应用前途和价值。本测量系统选用双目立体视觉测量系统，就是利用一台摄像机，从不同的两个角度获取同一景物的两幅图像，如同人的双眼一样。计算机通过同一物点在两幅图像上两个像点的检测和匹配，得到物点的深度值。双目立体视觉成像的原理很简单，但需要左右图像中匹配出对应的技术，计算出三维物体的几何参数坐标，并以一定的形式输出显示。通过计算空间点在两幅图像中的像差来获得其三维坐标值。基本原理如图 4-1 所示， J 为空间任意一点，通过图像处理及分析测定点 J 像坐标 (u_i, v_i) ($i=1,2$) 建立三维空间重构算法，即可由 (u_i, v_i) ($i=1,2$) 恢复点 J 的三维坐标 (X, Y, Z) 。工作流程如图 4-2。

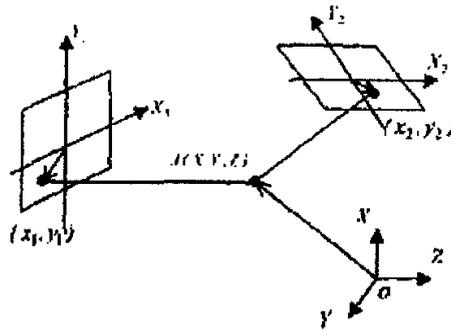


图 4-1 立体视觉成像原理示意图

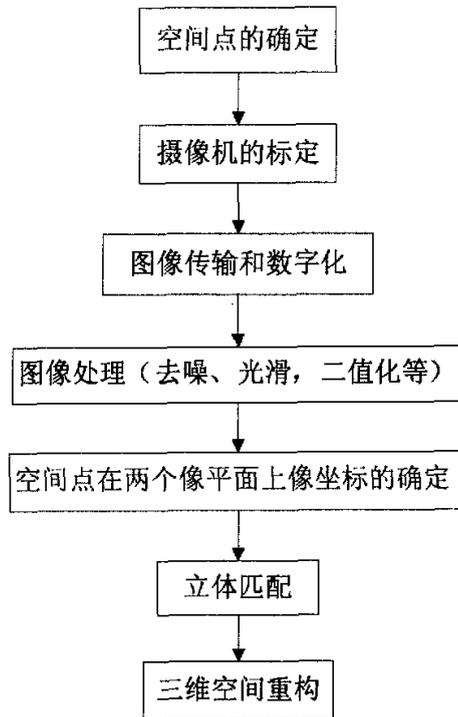


图 4-2 立体视觉测量工作流程图

三维重建的方法有空间点重建，空间直线重建和空间二次曲线重建等方法。目前，哪种方法都不能由两幅图像恢复出所有图像点的三维信息，如何快速而又

准确地由两幅图像恢复物体的三维形状，是阻碍计算机立体视觉进一步发展的一大难题。为了有效的保护景物面的不连续信息，Grimson 根据物体的表面物理性质和景物成像特征，提出了三维重建所必须满足的表面相容性原理，并建立了正则化重建算法^[47]；Terzopoulos 提出了由粗到细的多通道重建技术^[48]，以改善重建精度和加速收敛过程。

比较实用的设计是在自然光照下摄取的图像来进行三维重建的系统。相对与用外部投影设备的主动系统、这种技术成为被动系统。在现研究阶段，重建立体图像的首要条件是能提供合理精确度的图像线索。但这有两个重要的缺陷：需要两台摄像机；不能用于非纹理的表面，比如通常工业生产的物体。而比较简单的三维重建的方式是，单台摄像机运动来组成一对摄像机组。摄像机在一定时间内在空间的不同位置进行拍摄。用两幅图像或者多幅图像作为立体图像对。其优势是：造价低，只需要一个摄像机，另外一个优点是工程方面：摄像机可以自由移动，不需要特定的标定。这类技术也称为运动结构技术。本论文就是综合应用计算机立体视觉技术和三维重建技术来实现立体视觉摄影测量。

在进行三维重建之前，有三个关键的步骤需要完成：摄像机内参数的获得、图像对应点的确定以及摄像机外部运动参数的确定，摄像机的内部参数和外部参数都可以在第三章的摄像机自标定中得到，推导出摄像机在两个位置拍摄两幅图像的投影矩阵为 M_1 、 M_2 ：

$$M_1 = \begin{bmatrix} f_u & s & u_0 & 0 \\ 0 & f_v & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \psi_1 & 0 & \sin \psi_1 & T_x \\ 0 & 1 & 0 & T_y \\ -\sin \psi_1 & 0 & \cos \psi_1 & T_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

$$M_2 = \begin{bmatrix} f_u & s & u_0 & 0 \\ 0 & f_v & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \psi_2 & 0 & \sin \psi_2 & T_x \\ 0 & 1 & 0 & T_y \\ -\sin \psi_2 & 0 & \cos \psi_2 & T_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

带入二维图像与三维图像的转换关系式：

$$Z_c \begin{bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ 1 \end{bmatrix} = M_1 \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{11}^1 & m_{12}^1 & m_{13}^1 & m_{14}^1 \\ m_{21}^1 & m_{22}^1 & m_{23}^1 & m_{24}^1 \\ m_{31}^1 & m_{32}^1 & m_{33}^1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

$$Z_c \begin{bmatrix} u_2 \\ v_2 \\ 1 \end{bmatrix} = M_2 \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m^2_{11} & m^2_{12} & m^2_{13} & m^2_{14} \\ m^2_{21} & m^2_{22} & m^2_{23} & m^2_{24} \\ m^2_{31} & m^2_{32} & m^2_{33} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

由上式可以得到有关三维世界坐标 X_w 、 Y_w 、 Z_w 的四个线性方程组：

$$(u_1 m^1_{31} - m^1_{11})X_w + (u_1 m^1_{32} - m^1_{12})Y_w + (u_1 m^1_{33} - m^1_{13})Z_w = m^1_{14} - u_1 \quad (4.5)$$

$$(v_1 m^1_{31} - m^1_{21})X_w + (v_1 m^1_{32} - m^1_{22})Y_w + (v_1 m^1_{33} - m^1_{23})Z_w = m^1_{24} - v_1 \quad (4.6)$$

$$(u_2 m^2_{31} - m^2_{11})X_w + (u_2 m^2_{32} - m^2_{12})Y_w + (u_2 m^2_{33} - m^2_{13})Z_w = m^2_{14} - u_2 \quad (4.7)$$

$$(v_2 m^2_{31} - m^2_{21})X_w + (v_2 m^2_{32} - m^2_{22})Y_w + (v_2 m^2_{33} - m^2_{23})Z_w = m^2_{24} - v_2 \quad (4.8)$$

通过解析几何知识可以知道，三维空间的平面方程为线性方程，两个平面方程的联立为空间直线方程，两相交空间直线方程联立为空间点，所以上面前两式联合为空间直线 O_1P ，后面两式联合为空间直线 O_2P ， O_1P 与 O_2P 联合得到空间交点 P ， $P(X_w, Y_w, Z_w)^T$ 必然满足上述方程。由于有三个未知数的四个方程，所以可用任意三个方程或者最小二乘法计算出最优解 $P(X_w, Y_w, Z_w)^T$ 。

4.2 对应点匹配

双目立体视觉的测量是建立在对应点的视差基础之上，因此左右图像中各点的匹配关系成为双目视觉技术的一个极其重要的问题。双目测量原理是利用空间同一点在两个摄像机面上的视差大小计算空间点的三维坐标，要完成空间坐标点的测量，首先必须确定知道空间点在两像面上的像点坐标，此两像点称为匹配像点。在实际测量中，要从获得的左右摄像机的像面图像恢复空间点的三维坐标，须在两幅图像中找到匹配的像点坐标，这一过程被称为特征点匹配。所以立体匹配的本质就是，给定一幅图像中的一点，寻找另一幅图像中的对应点，使得这两点维空间同一物体点的投影。

立体匹配有三个基本步骤组成：1. 从立体图像对中的一幅图像如左图上选择与实际物理结构相应的图像特征；2. 在另一幅图像如右图中确定出同一物理结构的对应图像特征；3. 确定这两个特征之间的相对关系，得到对应点。其中的步骤 2

是实现匹配的关键。在成像过程中，由于噪声、阴影、透视效果等因素的影响，立体像对中的对应特征的表象存在着差异。所以为了实现可靠匹配，找出唯一的对应关系，利用各种约束条件消除不确定性，以达到局部的或全局的匹配唯一性。这些约束条件是根据对匹配所作的假设产生的，约束条件主要包括以下三条：

1. 相容性约束

如果两个匹配基元确实是由同一物理标记产生的，那么它们就可以匹配起来。如果不是这样，它们就不能匹配。在判断两个匹配基元是否相容时要根据它们之间的相似性。问题是如何度量匹配基元的相似性。有两种相似性的假设。一种是基于光学不变性的性质。即左、右图像对应区域中灰度的变化情况相似。另一种相似性的假设是根据几何学不变性，即两幅图像中描述对象的几何结构相同。例如，在以边缘作为匹配基元时，沿外极线上任何扫描方向，在左、右图像边缘出现的次序相同。

2. 唯一性约束

由于在任何时刻位于某一物质表面上的一个给定点在空间只占有一个唯一的位置，所以，除了极个别的情况外，某个匹配基元只能与另一幅图像中的一个匹配基元相匹配。这样，图像中的每一个匹配基元最多只能有一个视差值。

3. 连续性约束

这条约束条件的含义是匹配得到的视差值的变化在图像中几乎处处平滑。

本文针对数字化立体剪裁的实际需要，提出一种简化的处理方法。该方法计算量少，误差小，但不具有普遍性，只能对本特定实验条件所接受。在第一章中介绍了本试验需要测量的特征线分为三类：水平方向的线（腰线，胸围线，肩线，背宽线），垂直方向的线（中线，侧缝线，公主线），不规则线（袖隆线，领围线，椭圆线）如图 1-1 这些人体特征线具有一下特点：

（1）除公主线外，所有的纵向线都是铅垂线在人体表面上的水平投影线公主线的主要功能是装饰，因而应强调人体曲线的美感。在设置公主线时，前后公主线都应从距领围线 4cm 处起始，前公主线通过胸高点（点）、后公主线通过肩胛骨中心，然后斜向至腰围线，再向外斜向放宽至臀围线直至底部。这样形成左右两侧的公主线在胸围线处距离较宽，再腰围线处收窄，在臀围线处又较宽，从而体现出女性三维尺寸收缩与扩张所形成的美感；

（2）横向线都必须保持水平位置。胸围线经过胸高点，即胸围线与前公主线在胸高点处相交；

(3) 斜向线要严格按照尺寸和位置要求确定。如袖窿线在确定时,要先按人体模型的尺寸求出袖窿线长,然后用弯尺按此长度作成弧线状,将尺子贴近人体模型相应位置,确定袖窿线并用粘和带标志。

本论文实验结合匹配原则与标示线特征,基于摄像机相对人体仅在水平方向上移动,垂直方向不变的特点,因而不同图像的对应点只是 u 坐标不同,而 v 坐标相同。对于三类特征线采用不同的解法。如图4-3。

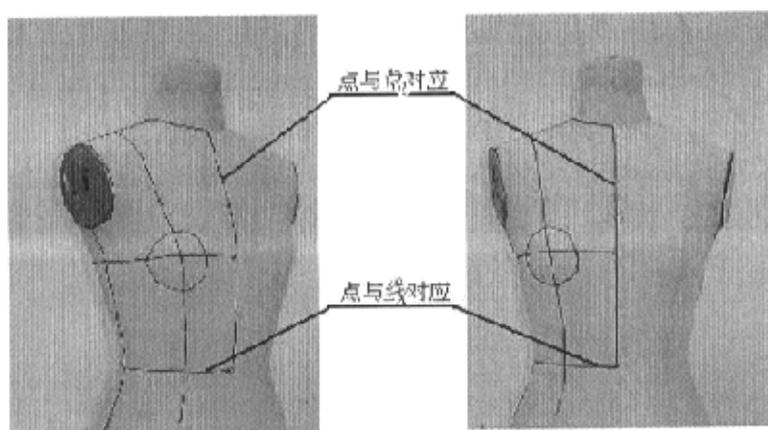


图 4-3 匹配原则

1. 平线,因其投影的特殊性,可不作点与点之间的匹配,仅需点与线之间的匹配即可进行三维重建。由特征曲线的设置可以知道,水平方向线上的点的 Z_w 坐标相同。投影到图像上即 v 坐标相同。与一幅图像特征曲线上的点对应的另一幅图像上的同一特征线上的匹配点,无论是那一点其 v 坐标均相同。

2. 对于竖直方向的线和不规则的曲线,可以采用在小范围内 v 坐标相同的有效点即为对应点,即可用公式(4.5)(4.6)(4.7)和(4.8)中任意三个进行三维重建。

第五章 实验

5.1 试验设备器材的介绍

人体模型；

SONY-DSP-P72 数码相机；

转台；

标定块；

图像采集卡。实验场景如图 5-1

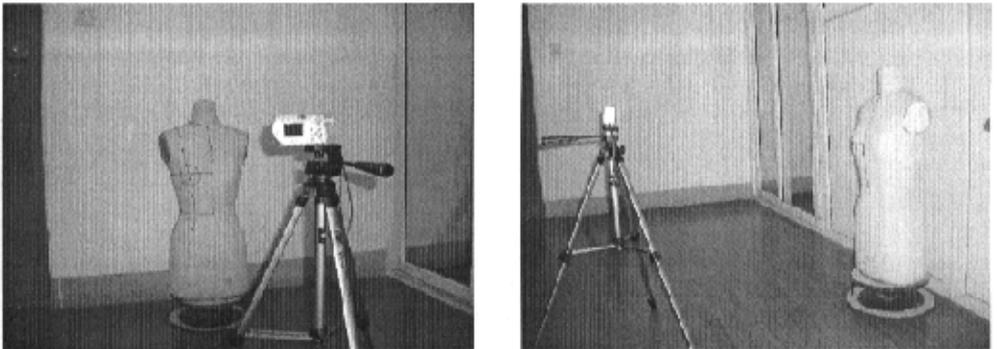


图 5-1 实验场景图

5.2 摄像机的内外参数标定

5.2.1 内部参数的确定

我们将 SONY-DSP-P72 型数码相机平放在测试平台上，对固定在夹具上的标定图进行拍摄，通过控制摄像机和标定图的相对位置来获得精确的纯平移运动向量，实验场景如图 5-2，控制摄像机相对于初始位置作 5 次纯平移运动，摄像机相对于初始位置的平

移向量分别为 $T_1 = [15 \ -15 \ 10]^T$, $T_2 = [10 \ 20 \ 10]^T$, $T_3 = [-20 \ 10 \ -10]^T$, $T_4 = [0 \ 0 \ -20]^T$, $T_5 = [0 \ 20 \ -20]^T$, 共拍摄 6 幅图像。分别如图 5-3 所示。其中图 (a) 为摄像机在初始位置拍摄的图片, (1) ~ (5) 分别为相对于初始位置平移到新的位置拍摄的图像。对 6 幅图像进行预处理, 提取对应点。

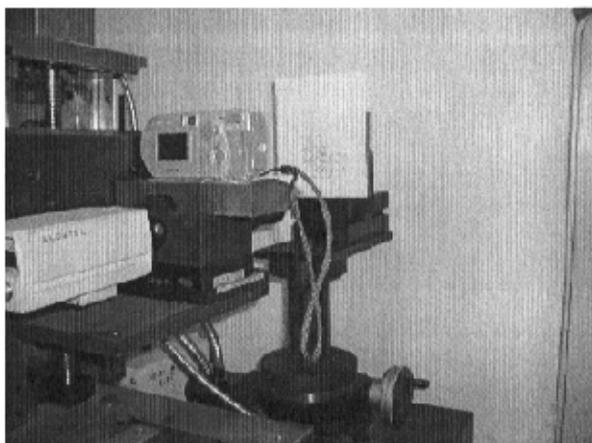
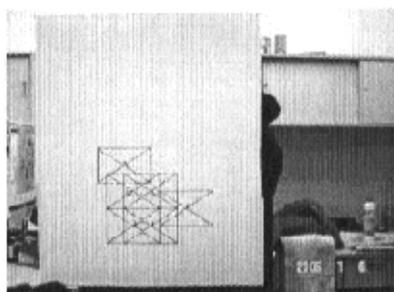
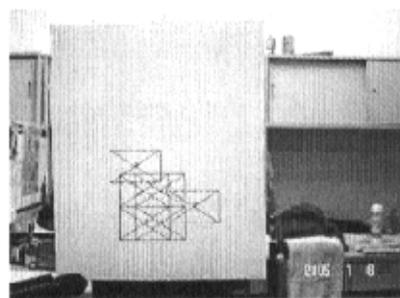


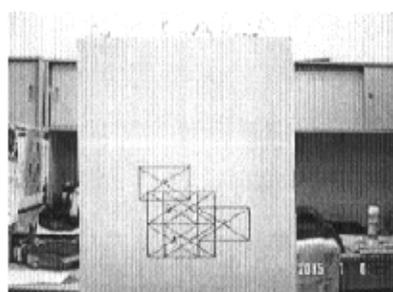
图 5-2 内参数标定试验场景



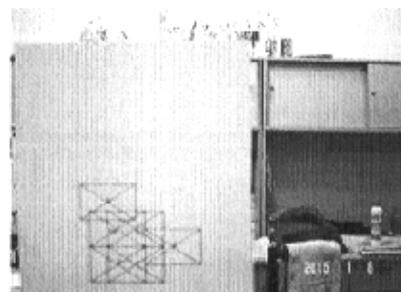
(a) 初始位置



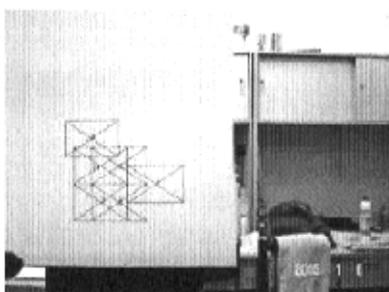
(1) $T_1 = [15 \ -15 \ 10]^T$



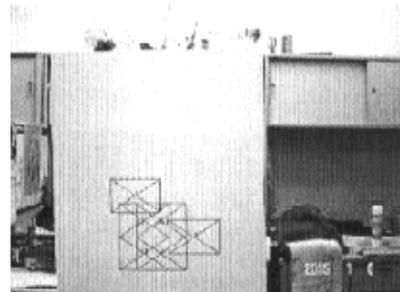
$$(2) T_2 = [10 \quad 20 \quad 10]^T$$



$$(3) T_3 = [-20 \quad 10 \quad -10]^T$$



$$(4) T_4 = [0 \quad 0 \quad -20]^T$$



$$(5) T_5 = [0 \quad 20 \quad -20]^T$$

图 5-3 实验摄得的六幅图像

我们分别用三次平移运动的不同组合（共四幅图像）、四次平移运动的不同组合（共五幅图像）以及五次平移运动（共六幅图像）进行标定，由式(3.30)采用以上 10 次标定结果的平均值作为标定的内参数。标定结果如表所示，其中第一列括号中的数字代表平移运动的标号。

表 5-1 内部参数计算结果

图像组合	f_v	f_u	u_0	v_0	s
(345)	2456.8	2473.1	1022.42	770.10	15
(145)	2472.9	2467.3	1025.60	769.24	15.8
(125)	2465.6	2458.6	1021.78	767.94	16.5

(123)	2468.0	2468.4	1024.96	768.80	15.2
(2345)	2465.3	2458.8	1061.76	784.10	14.8
(1345)	2469.2	2470.5	1031.70	763.04	15.7
(1245)	2470.3	2465.8	1032.92	761.94	15.9
(1235)	2462.8	2467.5	1018.94	772.60	14.5
(1234)	2466.5	2465.5	1030.40	767.08	16
(12345)	2468.7	2469.2	1035.24	763.02	15.2
平均值	2468.39	2467.37	1025.172	768.786	15.5

$$M_{\text{内}} = \begin{bmatrix} 2468 & 15.5 & 1024 & 0 \\ 0 & 2468 & 768 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

由第三章中的式(3.37)外部参数的求解方法，得到平移参数：

$$T_x = 44.65\text{mm}、T_y = 422.90\text{mm}、T_z = 1406.632\text{mm}$$

5.2.2 参数的验证

为了验证内参数的正确性和求外参数理论的可行性，选取一个标准块（110×110×30）进行验证，具体实验过程如下：

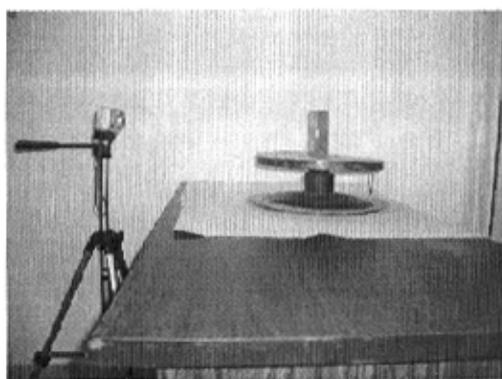


图 5-4 验证参数的试验场景

开始进行测量外部距离（世界坐标系于摄像机坐标系的距离），由第三章可以得到从世界坐标系到摄像机坐标系的旋转参数，如下：

$$M_{\text{外参数转角}} = \begin{bmatrix} \cos\psi & 0 & \sin\psi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\psi & 0 & \cos\psi \end{bmatrix} \quad \psi = 0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ, 120^\circ, 150^\circ, 180^\circ$$

要求平移变换参数 T_x 、 T_y 、 T_z ，首先要确定世界坐标系的原点，取转盘中心为世界坐标系原点，将标定块的一个角与转盘中心重合，即此角的三维坐标为 $(0,0,0)$ ，转角 $\psi = 0^\circ$ ，用式(3.37)外参数标定方法，得到外部平移参数：

$$T_x = 6.5111\text{mm}、T_y = 14.1428\text{mm}、T_z = 775.6571\text{mm}$$

将转盘旋转 $\psi = 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ ，由 $45^\circ, 90^\circ$ 两幅图求取图 5-4 里 A、B、C 点的三维坐标。



图 5-5 验证参数试验

表 5-2 验证试验数据

	A 点			B 点			C 点		
	测量值	计算值	误差	测量值	计算值	误差	测量值	计算值	误差
x 坐标	110	109.439	0.509%	0	0.855	0.855%	0	0.542	0.542%
y 坐标	0	0.254	0.254%	-30	-31.051	3.5%	-30	-29.568	1.44%
z 坐标	110	109.857	0.129%	110	110.560	0.509%	0	0.451	0.451%

由表 5-2，分析试验结果： x 坐标与 y 坐标的误差很小，只是 z 坐标的误差较大，

原因是可以知道旋转的精度对此实验的影响很大，因此在做人体实验时，要注意旋转的精度，以便保证测量精度；由于整体误差很小，基本符合理论的准确性和可行性。

5.2.3 投影矩阵 M

通过上述的参数验证试验，证明使用这些参数是可行的，由式(4.1)得到本人体测量系统的投影矩阵：

$$M_{\psi=0^\circ} = (M_{13} M_{\text{外}\psi=0^\circ}) / T_z$$

$$= \begin{bmatrix} 2468 & 15.5 & 1024 & 0 \\ 0 & 2468 & 768 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 44.65 \\ 0 & 1 & 0 & 422.90 \\ 0 & 0 & 1 & 1406.632 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \Big/ 1406.632$$

$$= \begin{bmatrix} 1.754546 & 0.011019 & 0.727980 & 1107.000493 \\ 0 & 1.754546 & 0.545985 & 1509.991338 \\ 0 & 0 & 7.109180e-004 & 1.000000 \end{bmatrix}$$

$$M_{\psi=30^\circ} = (M_{13} M_{\text{外}\psi=30^\circ}) / T_z$$

$$= \begin{bmatrix} 2468 & 15.5 & 1024 & 0 \\ 0 & 2468 & 768 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0.866025 & 0 & 0.500000 & 44.65 \\ 0 & 1 & 0 & 422.90 \\ -0.500000 & 0 & 0.866025 & 1406.632 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \Big/ 1406.632$$

$$= \begin{bmatrix} 1.155490 & 0.011019 & 1.507722 & 1107.000493 \\ -0.272993 & 1.754546 & 0.472837 & 1509.991338 \\ -3.554590e-004 & 0 & 6.156728e-004 & 1.000000 \end{bmatrix}$$

$$M_{\psi=60^\circ} = (M_{13} M_{\text{外}\psi=60^\circ}) / T_z$$

$$= \begin{bmatrix} 2468 & 15.5 & 1024 & 0 \\ 0 & 2468 & 768 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0.500000 & 0 & 0.866025 & 44.65 \\ 0 & 1 & 0 & 422.90 \\ -0.866025 & 0 & 0.500000 & 1406.632 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \Big/ 1406.632$$

$$= \begin{bmatrix} 0.246824 & 0.011019 & 1.883470 & 1107.000493 \\ -0.472837 & 1.754546 & 0.272993 & 1509.991338 \\ -6.156728e-004 & 0 & 3.554990e-004 & 1.000000 \end{bmatrix}$$

$$M_{\psi=90^\circ \text{ 外}} = (M_{\text{内}} M_{\text{外}, \psi=90^\circ}) / T_z$$

$$= \begin{bmatrix} 2468 & 15.5 & 1024 & 0 \\ 0 & 2468 & 768 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1.000000 & 44.65 \\ 0 & 1 & 0 & 422.90 \\ -1.000000 & 0 & 0 & 1406.632 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}_{\psi=30^\circ} / 1406.632$$

$$= \begin{bmatrix} -0.727980 & 0.011019 & 1.754546 & 1107.000493 \\ -0.545985 & 1.754546 & 0 & 1509.991338 \\ -1 & 0 & 0 & 1.000000 \end{bmatrix}$$

$$M_{\psi=120^\circ \text{ 外}} = (M_{\text{内}} M_{\text{外}, \psi=120^\circ}) / T_z$$

$$= \begin{bmatrix} 2468 & 15.5 & 1024 & 0 \\ 0 & 2468 & 768 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -0.500000 & 0 & 0.866025 & 44.65 \\ 0 & 1 & 0 & 422.90 \\ -0.866025 & 0 & -0.500000 & 1406.632 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}_{\psi=120^\circ} / 1406.632$$

$$= \begin{bmatrix} -1.507722 & 0.011019 & 1.155490 & 1107.000493 \\ -0.472837 & 1.754546 & -0.272993 & 1509.991338 \\ 6.156728e-004 & 0 & 3.554590e-004 & 1.000000 \end{bmatrix}$$

$$M_{\psi=150^\circ \text{ 外}} = (M_{\text{内}} M_{\text{外}, \psi=150^\circ}) / T_z$$

$$= \begin{bmatrix} 2468 & 15.5 & 1024 & 0 \\ 0 & 2468 & 768 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -0.866025 & 0 & 0.500000 & 44.65 \\ 0 & 1 & 0 & 422.90 \\ -0.500000 & 0 & -0.866025 & 1406.632 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}_{\psi=150^\circ} / 1406.632$$

$$= \begin{bmatrix} -1.883470 & 0.011019 & 0.246824 & 1107.000493 \\ -0.272993 & 1.754546 & -0.472837 & 1509.991338 \\ -3.554590e-004 & 0 & -6.156728e-004 & 1.000000 \end{bmatrix}$$

$$M_{\psi=180^\circ \text{ 外}} = (M_{\text{内}} M_{\text{外}, \psi=180^\circ}) / T_z$$

$$= \begin{bmatrix} 2468 & 15.5 & 1024 & 0 \\ 0 & 2468 & 768 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 44.65 \\ 0 & 1 & 0 & 422.90 \\ 0 & 0 & -1 & 1406.632 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \Bigg|_{\psi=0^\circ} / 1406.632$$

$$= \begin{bmatrix} -1.754546 & 0.011019 & -0.727980 & 1107.000493 \\ 0 & 1.754546 & -0.545985 & 1509.991338 \\ 0 & 0 & -7.109180e-004 & 1.000000 \end{bmatrix}$$

5.2.4 摄像机参数校正

此校正试验是在上述内参数求解方案的基础上进行的, 已知内部参数, 由于图像中心处的畸变很小, 因此, 在图像的中心附近选取两对或两对以上对应点可以得到较精确的极点。由(3.47)式可以看出, 经过一次纯平移运动, 平移向量 T 已知, 相应的极点 e 可以求得, 畸变系数矩阵 ∇ 中的 r^2 和 r^4 也可以求得, 由式(3.50)得:

$$\lambda_1 = 1.0376$$

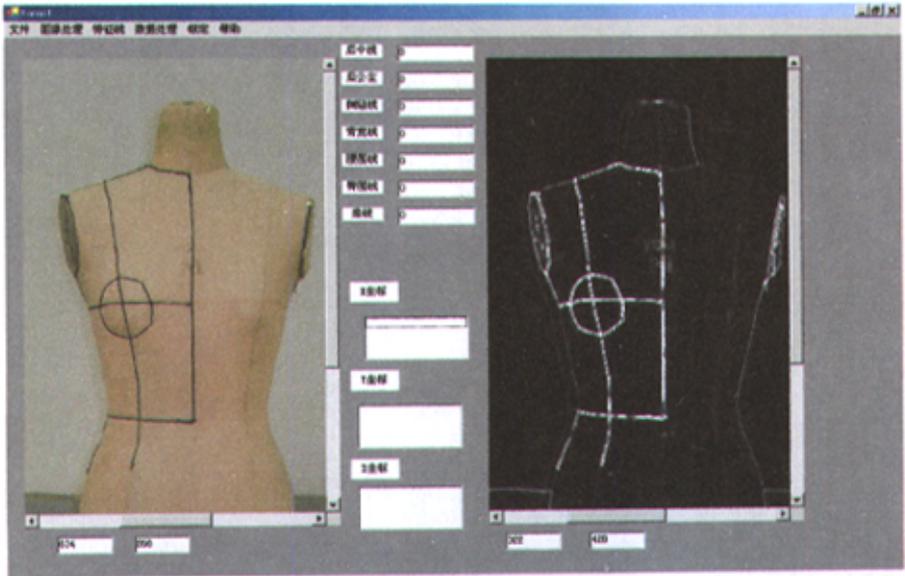
$$\lambda_2 = 0.9714$$

因此可以由(3.51)得到二阶径向畸变系数 k_1, k_2 。

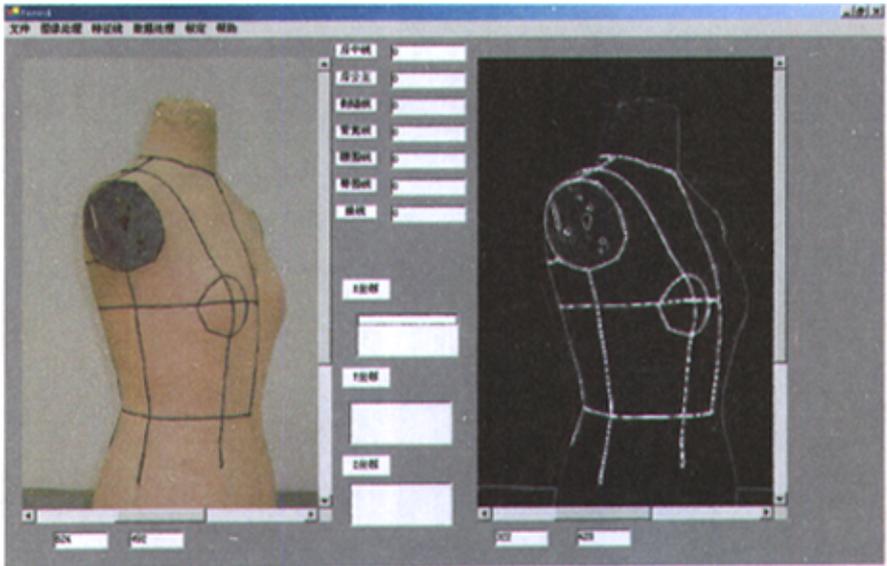
$$k_1 = 0; k_2 = 0.0376$$

5.3 图像特征线提取以及三维重建的软件实现

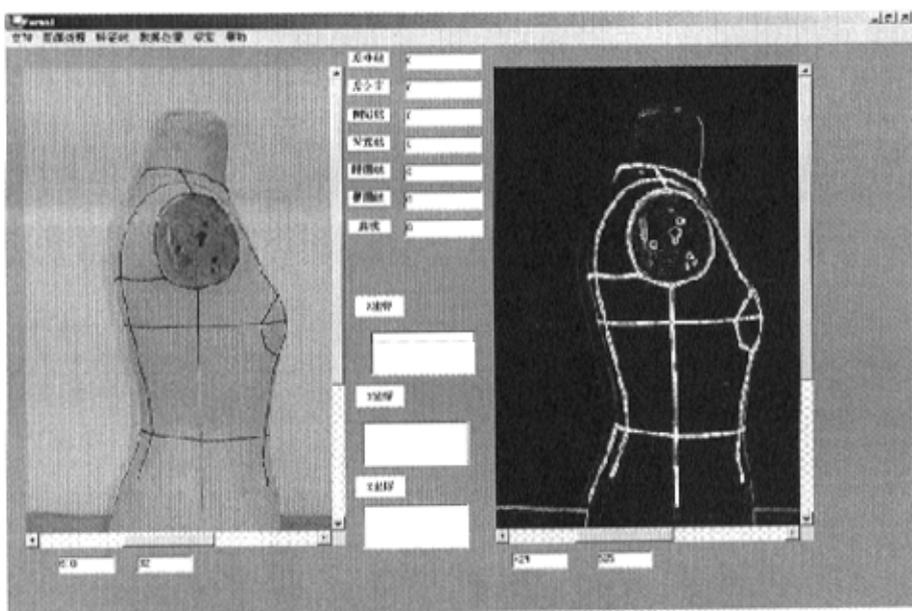
将理论与实验相结合编制应用软件, 该软件将图像处理、对应点匹配、三维重建合为一体, 如图 5-6 是该应用软件运用 Canny 算子进行图像处理的界面。



(a)



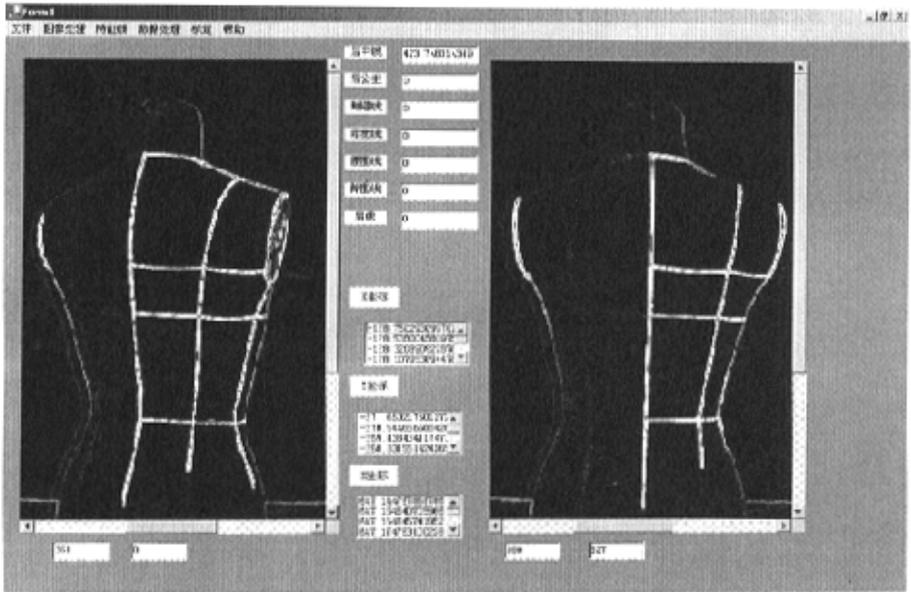
(b)



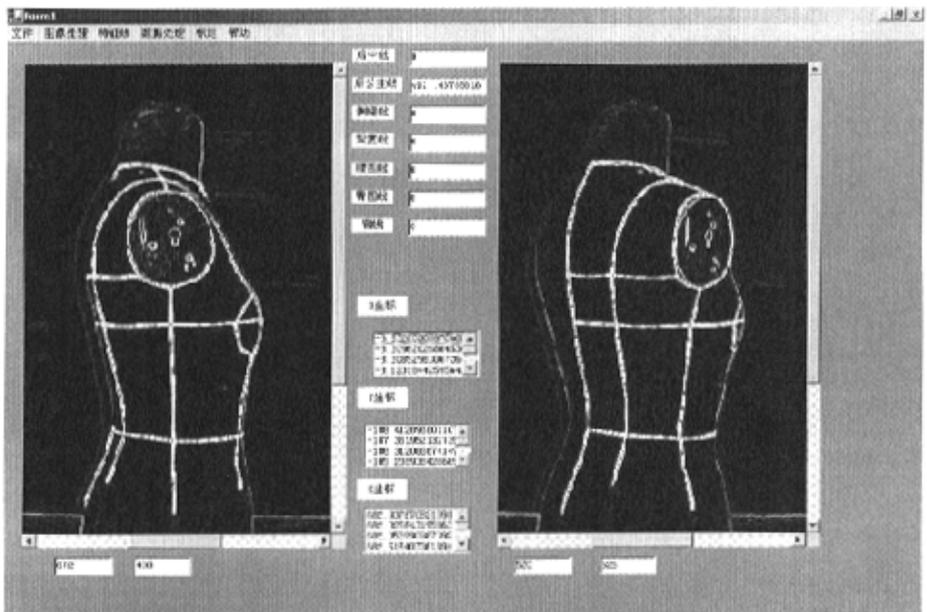
(c)

图 5-6 图像处理效果图 (a) 0° (b) 60° (c) 90°

选取特定的图像，提取同一个特征线确定对应元进行三维重建，通过软件实现三维坐标以及长度的实现。例如在 0° ， 30° 所得到的两幅图像可进行前中线、前公主线、椭圆线的三维重建，而在 60° ， 90° 可进行侧缝线、袖窿线。用手工测量对人体模型的有关尺寸进行测量。



(a)



(b)

图 5-7 三维重建的软件实现界面

建立 Access 数据库，保存三维坐标，为数字化剪裁提供可靠数据。如图 5-7 为测量后中线的三维坐标数据。

X	Y	Z
-126.987738448572	251.6360275131.6	647.744343592066
-126.919033; 81795	-200.40619603705	648.263285231159
-126.715436045034	259.370822774572	648.274946571154
-126.513094371156	-253.257097019504	648.286741209065
-126.311387936645	-257.145213614568	648.298589254875
-126.251252070032	-255.986001774303	648.310050011619
-126.052375842148	-254.870892190380	648.331391676729
-125.854735087465	-253.754556642056	648.343049799424
-125.658233552137	-252.637642500253	648.354633693907
-125.463574615904	-251.476021908791	649.378871110955
-125.411553157902	-250.368009471817	649.392065030522
-125.287298856697	-249.263402817909	649.096020168007
-125.15548337417	-248.134073542532	648.690213454400
-125.004875784215	-247.014068611928	648.653740995064
-124.9658052474	-245.948482781258	649.417853781407
-124.777147737628	-244.7268822493	649.431883702229
-124.650129163889	-243.504597657573	649.446045542500
-124.454326528713	-242.4810644532	649.460342252627
-124.373075442591	-241.312092510821	649.566403121705
-124.189966302594	-240.137822158623	650.001201738429
-124.007474271891	-239.052416041854	650.016103730406
-123.826507391229	-237.956882618743	650.031203930923
-123.808670516351	-236.782866618227	650.555210219015
-123.625012505138	-235.53552518225	650.574778074145
-123.447682478649	-234.307619030474	650.590481436006
-123.271582119724	-233.379064811731	650.606320315684

图 5-5 后中线数据库

表 5-1 服装原型主要标示线的长度检验

单位: mm

线类型	竖直线			水平线		特殊线
	前公主线	后中线	侧缝线	腰围线		
特征线	前公主线	后中线	侧缝线	前	后	袖窿线
本试验测量值	410.6	423.74	255.42	173.56	150.36	332.6

实际值	404.8	415.5	252.8	171.8	148.5	329.1
误差	1.43%	1.98%	1.04%	1.02%	1.25%	1.06%

小结：该系统由于图像采集、摄像机标定及校正仍然存在误差，使测量结果还有较小的误差，但在服装设计要求范围内。整体装置结构简单、操作方便，对使用环境条件无特殊要求，方法科学、技术先进、数据可靠、测量速度快，不仅可以获取服装设计所需的特征尺寸，还可根据需要获取人体图像特征线上任意一点的三维坐标。

第六章 结论与展望

6.1 结论

对人体形态进行研究, 准确掌握人体形态的特征, 是服装造型研究中的首要问题。而人体测量又是研究人体形态最基础的工作, 随着人体测量技术的发展, 三维测量技术将越来越广泛地应用到服装生产中去, 本文分析了国内外各种非接触式人体测量系统的原理、构成及使用情况, 提出了采用一台 CCD 照相机直接摄取人体不同方向的数字图像, 根据获得的人体图像信息, 测量出人体三维尺寸, 其主要研究过程及要点总结如下:

1. 本课题作为非接触式人体测量系统研究的重要组成部分, 在数字图像处理及人体图像边缘探测方面均具有独特的解决方法且效果明显, 主要表现在: 本系统结合人体测量的特点, 提出利用基于 Canny 算子的数字图像边缘检测方法来提取人体的边缘; 通过分析人体数字图像的边缘提取图, 利用最大阈值法找到数字图像中人体特征线的最佳分割阈值; 一定程度上排除了拍摄时内外部因素对人体数字图像造成的干扰, 使系统能有效检测人体边缘。

2. 采用直接摄影方法, 摄取人体不同方向的数字图像, 通过基于主动视觉的摄像机自标定技术, 直观地获得摄像机的内参数和外参数, 对图像进行透视和几何畸变校正获得人体投影图像, 从中提取有效的人体特征线信息;

3. 自行设计制作了集摄影和标定功能于一体的测量装置, 在测量的同时自动完成标定过程, 该装置可进一步改进为便携式, 以方便操作和使用。

4. 本文结合原有非接触人体测量系统, 采用面向对象的软件工程技术, 将原系统面向过程的软件再改进为面向对象的实现。通过人机交互设计和辅助功能设计出方便实用的软件系统。

5. 为进一步研究开发非接触式人体测量系统奠定了主要基础。

6.2 展望

本课题是三维人体测量的一个阶段, 还有许多问题需要在理论和实践上继续研究验

证。把今后的工作和开发重点放在以下几个方面，作者认为将是有益的：

1. 寻找更加优化的存储大量数据的数据结构和存储方式。一个人体模型要用到大量的数据，数据结构会直接影响到程序运行速度，也可以说数据结构是程序效率的关键。

2. 优化已有尺寸的提取算法，设计新尺寸的提取算法。本课题中的算法大都是根据人体尺寸的几何特征设计，依据标准人体在同一姿态下来实现，即人体模型的姿势，人体体型和姿态直接影响提取的结果。设计不同姿态下的提取算法和提高算法在不同体型上的适用性，应该是今后努力方向。

3. 在测得的结果中，只有特征线的数据，而如果得到多条非特征线的三维数据，建立网状人体模型，将可提高三维重建的效果。

4. 在软件平台上加入支持复杂人机交互功能的机制以适应三维设计的需要，系统中要有友好界面，良好的显示、预览功能以满足用户的需求。

至此，作者的研究工作告一段落，由于理论水平有限和写作时间仓促等原因，论文可能存在这样那样的不足之处，希望各位专家、学者批评指教。

参考文献

- [1]梁建军, 冯毅力, 等. 服装 CAD 技术研究的现状与方向. 纺织学报 2004 (24) 6: 104~107.
- [2]翟红英, 杨钦. 服装样片二、三维转换算法. 工程图学学报. 2002 (4): 15~19.
- [3]周旭东, 李艳梅. 人体三维测量技术分析. 上海纺织科技. 2002, 12 (6): 58~59.
- [4]邹奉元, 张颖. 基于不同方法的人体测量数据重复性研究. 纺织学院 2004. 25 (4): 71~73.
- [5]张建纲, 张弛. 服装领域内的数字化技术的应用. 武汉科技学院学报. 2004. 10 (17) 6: 1~3
- [6]Choat A G. Optica and digital processing techniques in a machine vision metrology system. Optical Engineering[J], 1989, 28 (12): 1311~1316.
- [7]龙玺, 钟约先. 结构光三维扫描测量的三维拼接技术[J]. 清华大学学报, 2002, 242 (4): 477~480.
- [8]Cyberware Inc. 3D Developments[EB/OL]. <http://www.cyberware.com>, 2001, 9.
- [9]Textile/Clothing Technology Corporation. Research and Development. <http://www.tc2.com>, 2003-01.
- [10]丁其涓, 荣国浚, 苏红宇. 相位测量技术在人体尺寸自动测量中的应用[J]. 北京服装学院学报. 1992. 12 (2): 54~59.
- [11]胡志萍, 肖正扬, 陶学恒, 等. 服装立体设计中的非接触测量技术. 大连轻工业学报, 2001, 20 (1): 44~48.
- [12]杨继新. 三维服装 CAD 的几何学原理与数字化立体剪裁技术的研究[博士学位论文]. 大连: 大连理工大学机械制造及自动化, 2001 .
- [13]刘伟军, 董再励. 基于立体视觉的移动机器人自主导航定位系统[J]. 高技术通讯, 2001, 11 (10): 91~94.
- [14]吴卫国, 陈辉堂. 基于彩色图像的移动机器人定位[J]机器人, 1999, 21 (5): 340~346.
- [15]Atiya S, Hager G D. Real-Time Vision-Based Robot Location [J]. IEEE Transaction on Robotics And automation 1993, 9 (6): 785~800.
- [16]方漪, 吴焕明. 基于计算机立体视觉的图像测量技术. 2002, 23 (4): 60~67.
- [17]王緌, 刘文清. 具有快速、可靠机器视觉的智能传感器[J]. 光电子技术与信息, 2000, 13 (6): 28~30.
- [18]孟晓桥. 摄像机自标定方法的研究与进展[J]. 自动化学报, 2003, 29 (1): 110~122.
- [19]刘焕军, 王耀南, 段峰. 机器视觉中的图像采集技术[J]. 电脑与信息技术. 2003 (1): 18~21.
- [20]荆仁杰. 计算机图像处理. 杭州: 浙江大学出版社, 1990.
- [21]M. Sun and R. J. Sclabassi. Symmetric wavelet edge detection of the minimum length. Image Processing. Proceedings International Conference .1995 (2): 177~180.
- [22]徐建华. 图像处理与分析[M]. 北京: 科学出版社, 1992 年.

- [23][日]田村秀行,等著,赫荣威,等编译.计算机图象处理技术[M]:北京师范大学出版社,1988年.
- [24]Mallat S, Hwang W L. Singularity and processing with wavelets (J). IEEE Trans on information Theory. 1992, 38(2):617~643.
- [25]Canny J F.A Computational Approach to Edge Detection. IEEE Trans on PAMI,1986, 8(6):679~698.
- [26]胡茂林,梁栋,等.三维欧氏重构的快速算法.系统仿真学报,2001(13)增:165~168.
- [27]Fauheras O, Toscani G. The Calibration Problem of Stereo. In ProcCVPR'86,1986:15~20.
- [28]Tsai R Y. An Efficient and Accurate Camera Calibration Technique for 3D Machine Vision. In ProcCVPR'86,1986:364~374.
- [29]Wei G Q, Ma S D. Implicit and Explicit Calibration: Theory and Experiments. IEEE Trans on PAMI, 1994, 16(4):469~480.
- [30]Wei G Q, Ma S D. Camera Calibration by Vanishing Point and Cross Ratio. In Proc IEEE Int ConfASSP, 1989:1630~1633.
- [31]邱茂林,马颂德,李毅.计算机视觉中摄像机定标综述.自动化学报,2000,26(1):43~55.
- [32]马颂德,张正友.计算机视觉—计算理论与实践.北京:科学出版社,1998.
- [33]Gana Pathy S. Decomposition of transformation matrices for robot vision. Proc. Int. Conference on Robotics and Automation.1984:130~139.
- [34]S .D. Ma, A self-calibration technique for active vision system, IEEE Trans. on robot automation, 1996, 12(1):P114~P120.
- [35]S. D. Ma. A self-calibration technique for active vision system. IEEE Trans. Robotics and Automation, 1996, 12(1):114~120.
- [36]Basu A .Active calibration: alternative strategy and analysis. Proc IEEE Conf on Computer Vision and Pattern Recognition. Piscataway: IEEE,1993:495~500.
- [37]Du F, Brady M. Self-calibration of the intrinsic Parameters of camera for active vision system. In Proc IEEE Conf on Computer Vision and Pat' tern Recognition. Piscatlawav: IEEE, 1993:477~482.
- [38]R.I Hartley. Estimation of relative camera Position for uncalibrated camera. Proc. of the ECCV' 92. Italy: Santa Margherita Ligure.1992:379~387.
- [39]袁野.摄像机标定方法及边缘检测和轮廓跟踪算法研究.[博士学位].大连:大连理工大学机械制造及自动化,2002.
- [40]杨忠根.摄像机内征参数的标定.仪器仪表学报.1999,20(2):129~132.
- [41]刘金根.一种基于现场标定的光电图像畸变校正算法.光子学报.2004.33(6):P732~735.
- [42]Connolly T J, Parent L R. Influence of specific energy on the properties of hydro entangled no woven pabrics[J].Nonwovens Conference, 1993, (1):213~219.
- [43]李华,吴福朝,胡占义.一种新的线性摄像机自标定方法.计算机学报,2000,23(11):1121~1129.
- [44]刘翼亮,光学视觉传感.北京:中国科学技术出版社,1998.
- [45]田思,袁占亭.计算机视觉系统框架的新构思.计算机工程与运用[J],2000(6):P57~P59.

- [46]Grmison WEL. Surface Consistency constraints in Vision[J]CVGIP, 1983, (24) :28~51.
- [47]Terzopoulos D. The Computer of Visible-Surface Representations[J], IEEE Trans. on PAMI, 1988, 10(40): 417~438.

致 谢

经过两年多的奋斗，我的硕士学位论文研究工作终于可以告一段落，所取得的成果并不属于我个人，其中凝结了许多长辈和朋友们的辛勤和汗水。

本文的研究工作是在我的导师肖正扬教授、杨继新老师的精心指导下完成的。导师渊博的学术知识、严谨的治学作风、敏锐的科研眼光，活跃的学术思维给我留下了深刻的印象，是我学习的楷模。在他们的谆谆教导下，才使我不断进步，对学科中的前沿领域有了较深的理解和掌握，知识逐渐积累、科研能力逐渐提高，顺利完成了硕士课题，另外，尚教授诚实严谨，一丝不苟的风范和品质给我今后的人生道路以很大的启迪，帮助我极大地提高了自己从事科研和实践的能力，这是我在他们门下求学的最大的收获，也为我今后的工作学习打下了基础。

特别感谢熊第霖教授，在熊第霖教授的悉心指导和关心下，圆满地完成了本文的研究工作以及论文的撰写。通过两年来学习和生活中的交往，深深感受到熊教授严谨的治学态度，以及在学术上孜孜以求的精神。熊教授在专业学科领域中有深厚的造诣；他对待自己的学生严格要求，对学生的学习和科研工作从不马虎。

特别感谢陶学恒教授，这几年来许多研究工作中疑难之处的解决都得益于他的指导。

特别感谢周雅各教授，在课题试验中，耐心仔细地帮助我设计实验装置，使试验顺利完成！

对陈显冰、杨旭、王飞，贾治国等同学以及刘宝龙、梁猛等师兄弟们，在我的设计过程当中所给与的帮助和支持我表示感谢，是他们使我保持了良好的科研心态和积极的进取精神，给我提供了自由的实验室研究气氛，陪我度过了那些艰苦的岁月。

还有许多关心和帮助过我的老师、同学和朋友们，在这里无法一一列出他们的名字，在此向他们致谢。

向所有关心我的老师，同学和亲友表示由衷的谢意。