



数字摄影测量技术在结构实验变形量测中的应用

曲哲, 陆新征, 叶列平

(清华大学土木工程系, 北京 100084)

摘要: 目前结构实验中用位移计和电阻片测量结构构件的位移与应变的方法存在一定的局限性, 比如测点有限、量程有限、仪表必须与试件接触、无法获得位移场和变形场等全局数据, 且有时也具有无法避免的系统量测误差。数字摄影测量技术可以在适当的范围内弥补这些不足, 尤其适用于复杂受力情况下的位移场和变形场量测。该技术能够通过数字影像来识别人工标志点随构件变形的运动来获得观测范围内构件的位移场与应变场。运用数字摄影测量中的影像定向与定位理论, 可以有效的消除实验观测过程中人为因素引起的误差。这项技术成本相对较低, 测量结果丰富, 测量局限性小, 在大变形破坏性实验中尤为适用, 并为研究复杂受力的构件提供了可靠的实验依据, 在结构实验中有较大的应用前景。本文在简要回顾摄影测量发展历史的基础上, 介绍了数字摄影测量的基本原理, 包括影像特征的定位和影像的定向等, 并介绍了它在结构实验中应用的实例。

关键词: 数字摄影测量; 结构实验; 图像识别

Applications of the Digital Photogrammetric Technique in Structural Experiments

Qu Zhe, Lu Xinzheng, Ye Lieping

(Dept. of Civil Engineering, Tsinghua Univ., Beijing, 100084)

Abstract: Some disadvantages have limited the application of the traditional measuring method, such as LVDT of strain gauges, for the displacements and the strains of structural specimens, for example, the limitation for the number of measuring points and the strain measuring range. Furthermore, it can hardly

第一作者: 曲哲, 1983 年出生, 男, 陕西西安人, 清华大学土木工程系硕士研究生



obtain the global fields of displacement and strain and some system errors are often inevitable. The digital photogrammetric technique overcomes some of these disadvantages to some extent, which is especially capable for the measurement of displacement and strain fields of specimens under complex loading condition. The digital photogrammetric technique can obtain the fields of displacements and strains of the specimens by recognizing the motions of the mark points on the surfaces of the specimens directly from the digital photographs. Based on the theory of the photogrammetry, the errors introduced through the measuring procedure can be obviously reduced so that the precision of this method can satisfy the application requirement. This technique is low-cost and easy to use. It has less limitation compared with traditional method and is especially useful in experiments of large displacements. It can provide a substantial experimental basement for the researches of structural behaviors under complex loading conditions. In this paper, the basic theories and applications of this technique are presented, including the picture recognition and coordinates corrections. Some examples are also given to show the application of this technique.

key words: digital photogrammetry; structural experiment; picture recognition

1 摄影测量概述

摄影测量是利用摄影所得的影像，确定被摄物体几何、物理等信息的学科。根据处理对象和处理手段的不同，摄影测量从 19 世纪中叶开始发展至今，经历了模拟、解析和数字三个主要的发展阶段。

摄影测量中有两个基本的问题，首先是确定像点坐标，其次是根据像点坐标确定相应的物点坐标。在模拟和解析摄影测量中，像点坐标的确定都是人眼在精密仪器的帮助下完成的，二者的区别在于由像点坐标确定相应的物点坐标的过程。模拟法通过机械或光学的方法来交会空间点的坐标，而解析法通过数学的方法计算空间点的坐标。二者都需要昂贵的设备，模拟摄影测量的实现需要专业的量测用摄影机和立体测图仪，解析摄影测量虽然可以处理非量测用摄影机获取的图像，然而仍需要专门的解析测图仪。昂贵的仪器和专业的操作要求限制了摄影测量在非专业测绘领域（如结构试验）中的应用。

数字摄影测量继承了解析摄影测量中通过像点坐标解算相应物点坐标的理论，它也通过数学的方式完成这一过程，不同的是，数字摄影测量用计算机视觉代替了人眼视觉，它不再需要专门的精密仪器来确定像点平面坐标和物点空间坐标，而是由通过的计算机及相关的外部设备来完成所有必要的操作。随着计算机技术的飞速发展，人们已经可以通过计算机软件来实现影像的自动化处理，这极大的简化了摄影测量的工作。

数字摄影测量技术的发展推动了摄影测量技术在各个领域的普遍应用。在结构工程界，数字摄影测量已被用于土坡稳定、钢结构变形等位移场的监测，但这方面工作基本上仍处于起步阶段。下文将结合结构实验量测的具体特点，讨论实用的数字摄影测量技术及其原理，并介绍该技术在清华大学工程结构实验室的应用。



2 数字摄影测量的基本原理

如上文所述，摄影测量中要解决两个基本的问题，一是从影像中获取像点的平面坐标，这在数字摄影测量中是提取与定位影像特征的问题；二是通过像点平面坐标得到相应物点的空间坐标，这在数字摄影测量中是影像定向和空间坐标交会的问题。分别详述如下。

2.1 像点定位

在地形测量中像点的定位主要是为了从大地参考点出发得出测区的绝对坐标，然而与地形图测量不同，结构试验往往要观测结构构件在荷载作用下的变形过程。这是通过事先在构件的被测表面上布置人工标志点，并在试验过程中用一系列影像来记录每个人工标志点的坐标变化来实现的。其中一个关键的问题便是在不同时间拍摄的影像上找到同名点，即相同的人工标志点的中心。

2.1.1. 高精度直线和角点定位算子

通过定位算子，往往可以使定位精度达到子像素级别，即 0.1 像素以下。由于高精度定位算子的计算成本较高，有必要对图像进行一次粗扫描，提取图像中有用的小区域，这个过程称为特征提取。可以利用灰度梯度算子来提取影像的线特征，即确定边缘点。图 1 显示了人工标志点的中心区域在数码照片中的形态，其中包含两个线特征，即两条黑白两色的分界线。在其附近提取出边缘点，作为下一步高精度定位算子定位的基础。

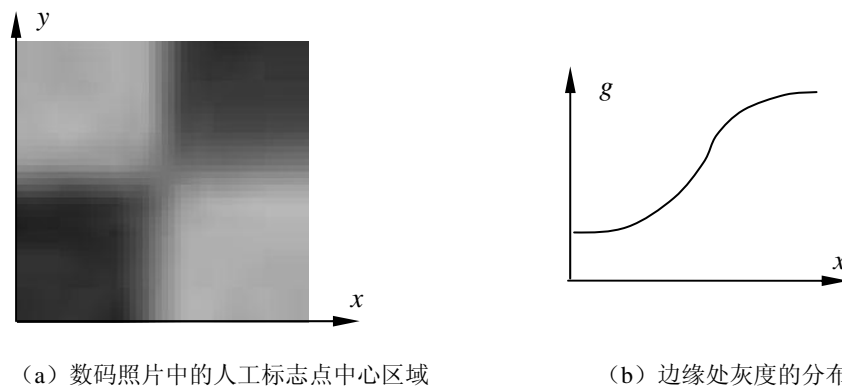


图 1 影像的线特征

Fig.1 Line character in the digital photograph

在足够小的邻域中，角点总是由两条直线交汇而成的。通过高精度的直线定位算子精确的定位直线，便可以间接的计算出角点的精确坐标。数字摄影测量理论指出，一个理想边缘经一成像系统输出，其影像梯度与系统的线扩散函数成正比，并且理想的线扩散函数服从高斯分布^[1]。以此为基础，对于一条给定的直线，就可以通过高斯分布计算出某一像点本身及其附近像点的灰度。将计算得到的灰度分布与实测的灰度分布作一比较，给出的结果最能吻合实测灰度分布的直线即为待求的边缘直线。这是高精度直线定位算子的基本原理。它在实际应用中需要进行迭代求解，需要事先确定比较合适的初值，并且还会遇到定位窗口的选取等问题，实施过程比较复杂。文献[1]指出，通过对其定位精度的统计计算，这种方法的理论定位精度为 0.02 像素。



2.1.2. 简单定位算子

高精度定位算子比较复杂，计算成本也比较高。为了简化计算，我们针对专门的人工标志点形式（如图 2 所示）采用简单的定位算子。这种人工标志点通过黑白相间的四个正方形来确定一个中点。简单定位算子的实施步骤如下。

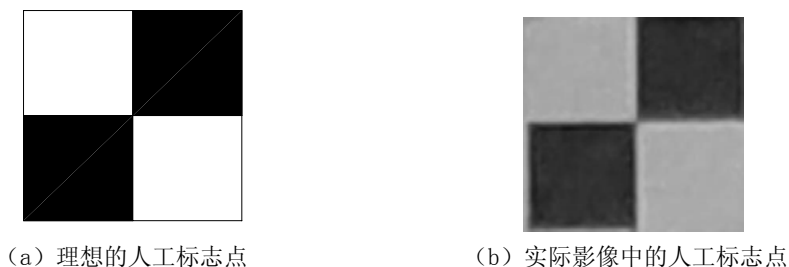


图 2 人工标志点
Fig.2 Mark point

首先由于实际影像中人工标志点的黑白并不理想，往往具有灰度，需要定义一种标准来判断相对的黑白，即认为凡满足一定条件的点，均为黑色的点，而满足另外一些条件的点，均为白色的点，其余的点则为一般的灰色点。

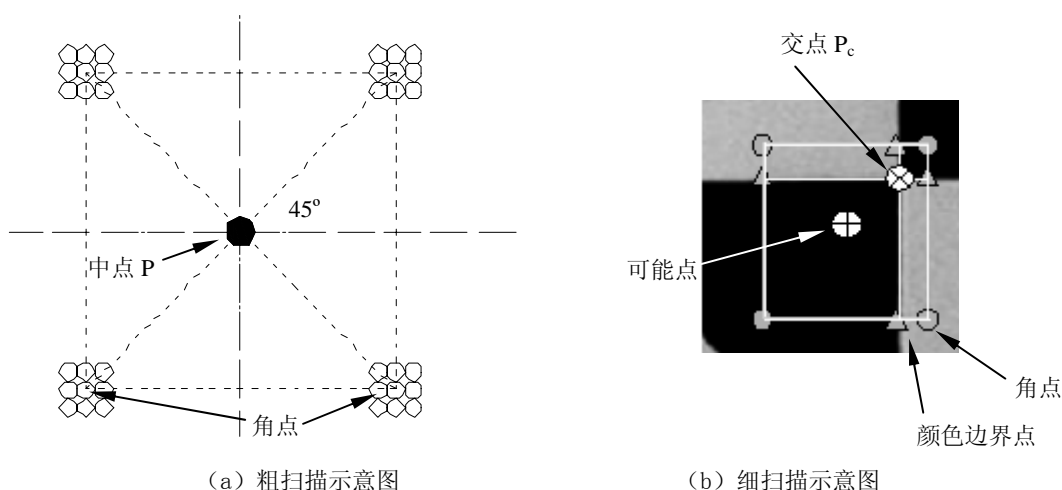


图 3 简单定位算子
Fig.3 Simple locating process arithmetic

在建立了黑白色的判断标准后便可以开始人工标志点的中心点的定位。为了减少计算成本，定位分两步进行。首先进行粗扫描。如图 3 (a) 所示，对影像中的任意一个像素点 P，判断距其一定距离处的 4 组角点（每组包含 9 个像素点）的颜色。如果角点非黑即白，并且临边角点颜色不同，则确定 P 为一个可能点。通过粗扫描找出所有的可能点。这一步的作用类似于上文提到的特征提取。在细扫描中，以每一个可能点为中心作一适当大小的正方形，逐个判断正方形四条边上所有像素点的颜色，在每条边上找出黑白交界处的像素点。由于黑白之间有一灰色的过渡带，故在实际中需分别找出边界附近最内侧的黑点和白点，以二者的中点为颜色边界点，如图 3 (b) 所示。两组对边上的颜色边界点的连线的交点记为 P_c 。定义 P_c 距相应的可能点的距离为 D ，对所有可能点均求出相应的 D ，对应于最小 D 值的可能点便为定位的中心点。



由于简单定位算子直接对像素点进行定位，其精度只能是像素级。通过一些平差手段可以在一定程度上提高其定位精度。

2.1.3. 人工标志点内的局部平差

数码照片中的存贮色彩等信息的最小单位是像素，一个像素只具有一种颜色，像素实际上在数码照片上划出了背景网格。假设照片中的标志点是理想的没有大小的一点，则这个点与背景网格可能有不同的位置关系，如图 4 (a) 所示。简单定位算子认为人工标志点的中心即位于求得的像素的中心，这样，标志点的真实位移与识别位置之间的误差最大为 0.5 像素。图 4 (b) 通过一种简单的情况展示了人工标志点内局部平差的思路。粗线方框的四个角点分别是四个中心点，粗线方框对角线的交点为所需的真实点。四个中心点所在的像素被识别，再由这四个像素的中心点的对角连线的交点确定识别点。从图 4 (b) 中可以直观的看到真实点与识别点之间的误差减小了。这种做法可以用一种能够预测结果的方式减小定位误差。

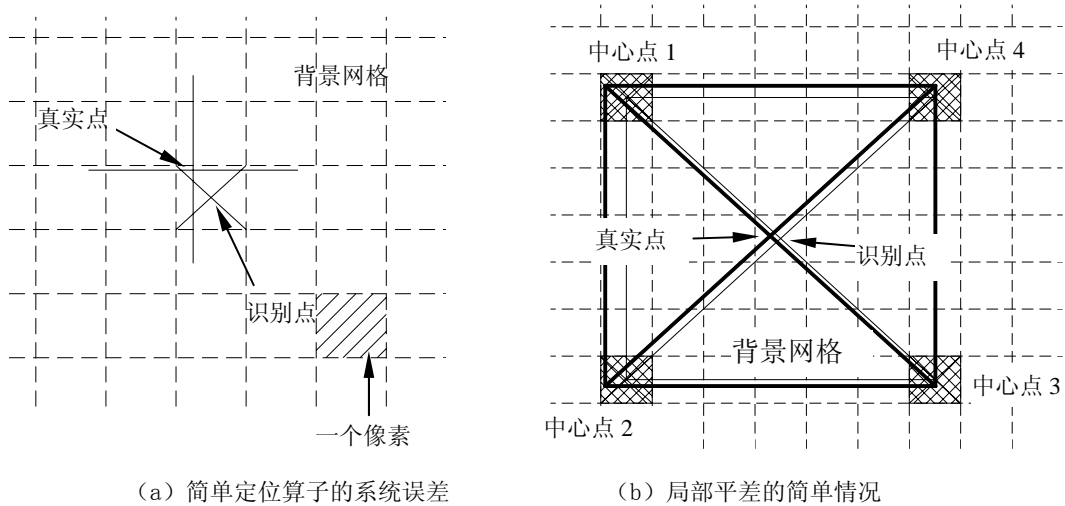


图 4 人工标志点内的局部平差

Fig.4 Local balancing inside the mark point

对于高精度定位算子同样可以通过局部平差的方式适当的提高定位精度。可以设计出不同样式的人工标志点以实现局部平差。

2.2 确定物点坐标

2.2.1. 物点二维坐标的确定

摄影测量的另一个基本任务是通过像点在影像上的平面坐标确定相应的物点的空间坐标。解析或数字三维摄影测量通过解算严密的共线条件方程来获得物点的空间坐标^[2]。它的定向任务是保证产生一个像对的两台摄影机的像空间坐标均与物方空间坐标平行。然而由于三维测量需要在物方空间中精确的布置控制点，这对试验条件要求较高。另外共线条件方程的计算成本很高，它在近景摄影测量中的应用可参见相关专著。本文仅讨论确定同一被测平面内物点的二维坐标的方法。

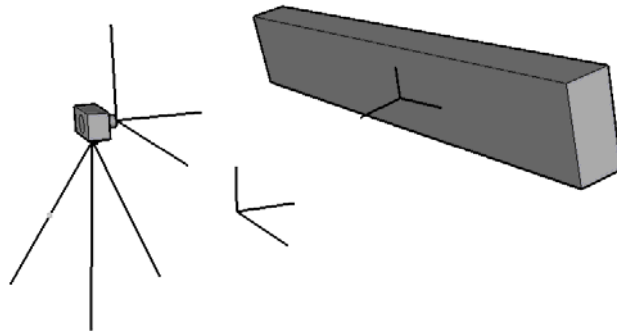


图5 平面摄影测量中的坐标系

Fig.5 Coordinate systems in 2D photogrammetry

平面摄影测量的定向任务实际是处理 3 个坐标系的相对关系。如图 5 所示，在平面摄影测量中，像平面坐标系、被测表面坐标系和绝对坐标系是三个基本的组成部分。当只希望得到构件上的相对变形场时不必处理绝对坐标系。

理想情况下，三个坐标系始终保证相互平行，摄影测量将变得非常简单。这时只需要知道由照片上的图像与实际结构之间的放大系数 α ，就可以通过照片得到观测平面上任何一点的坐标。然而实际上几乎不可能做到这一点。于是需要对照片上得到的图像进行定向。目前的手段是在被测平面内和绝对空间中布置特殊的人工标志点（分别称为构件控制点和绝对控制点）以便对观测区域内各点的放大系数 α 进行修正。为了简化，应尽量将绝对控制点布置在构件平面内，并假设构件平面在试验过程中不会发生摇摆或俯仰变化。平面测量中完备的控制点布置可如图 6 所示。

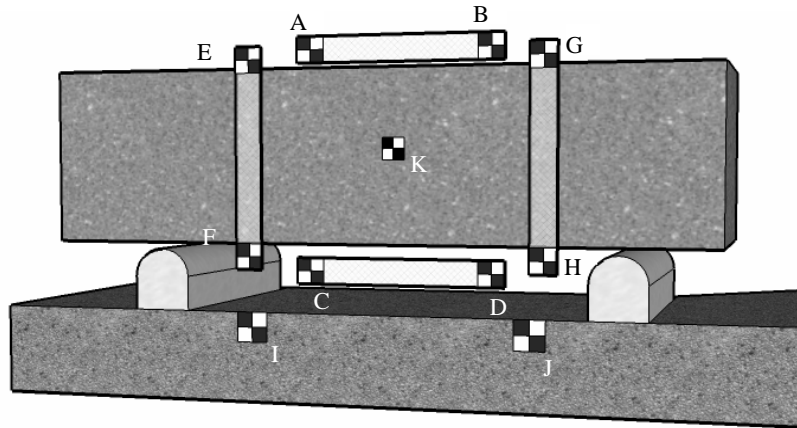


图6 平面数字摄影测量中完备的控制点布置方案

Fig.6 Complete plan of control points in 2D photogrammetry

图 6 中，I、J 为绝对参考点，可以用它们得到绝对平面坐标的原点和 x 轴的正方向。A-H 为构件参考点，理想情况下它们始终位于构件待测平面中并且 AB、CD、EF、GH 距离不变。这四条连线构成一个矩形框，便可以通过线性插值来得到构件平面上任一点的放大系数 α_x 和 α_y 。设横向连线 AB、CD 的放大系数分别为 α_{x1} 和 α_{x2} ，则观测平面上任一点 K 的横向放大系数

$$\alpha_{xK} = \frac{(y_K - y_2)\alpha_{x1} + (y_1 - y_K)\alpha_{x2}}{y_1 - y_2} \quad (1)$$



其中 y_1 、 y_2 分别为 AB 连线和 CD 连线的平均纵坐标， y_K 为 K 点的纵坐标。

竖向放大系数 α_y 可以按相同的方法得到。事实上连线 AB、CD 修正了相机光轴与观测平面之间的俯仰角引起的误差，EF、GH 修正了相机光轴与观测平面之间的水平摇摆角引起的误差。而绝对参考点 I、J 则修正了相机在试验过程中相对于绝对平面的旋转。图 6 所示的参考点布置方案对于平面测量来说是完备的，针对不同的试验条件，可以适当的简化参考点的布置。

2.2.2. 被测平面的全局平差

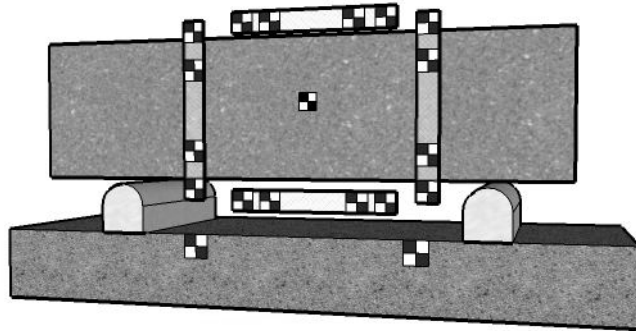


图 7 全局平差的控制点布置

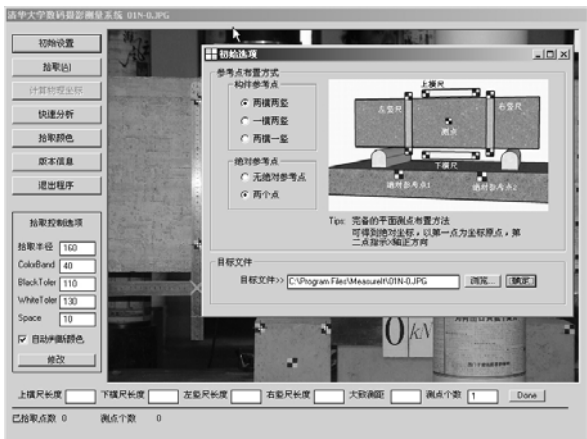
Fig.7 Plan of control point for global balancing

当在一次测量中采用多套控制点时，便可以在被测平面内进行全局平差，如图 7 所示。对应于每套控制点，可以得到被测平面的一个坐标场，全局平差就是利用不同控制点对应的不同坐标场之间互相平差来提高精度的。与局部平差不同，全局平差对精度的提高比较模糊，它对各种因素引起的误差都能不同程度的发挥作用。

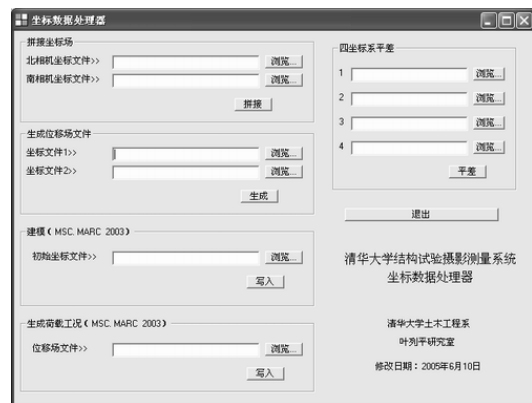
3 应用

3.1 清华大学结构试验数字摄影测量系统

自动化向来是摄影测量的发展方向。从模拟摄影测量开始，人们就以测图的自动化程度来标榜技术的先进。然而直到数字摄影测量的出现，才在真正有可能实现自动测图了，其手段就是集成的计算机软件环境。



(a) YES-DPS 主界面



(b) 配套的数据处理器



图8 清华大学结构试验数字摄影测量系统

Fig.8 Digital Photogrammetric System for Structural Experiment of Tsinghua Univ.

清华大学土木工程系结合数字摄影测量在结构试验中的具体应用，开发了配套的数字影像处理系统 YES-DPS。其主界面和配套的数据处理器的界面如图 8 所示。该系统的功能可分为三个主要部分：一是像点定位，目前采用的是不带局部平差的简单定位算子；二是物坐标求解，采用本文 2.2 节介绍的方法；三是针对结构试验的特殊性所作的数据处理，包括从坐标场得到位移场和应变场。

3.2 数字摄影测量在钢筋混凝土梁剪切破坏试验中的应用

清华大学工程结构实验室从 2002 年开始在结构试验中采用数字摄影测量技术作为辅助的量测手段。现介绍该技术在最近的两个钢筋混凝土梁剪切破坏试验中的应用情况。

两个试验中典型的摄影测量装置如图 9 所示。为了减小每个相机拍摄区域的大小，试验中采用了两台数码相机，分辨率分别为 400 万像素和 500 万像素，每台相机使用一套完备的平面摄影测量控制点。照片分辨率带来的位移量测的系统误差如表 1 所示，平均约为 0.5mm。

表 1 分辨率限制引起的系统误差

Tab.1 System error caused by the limitation of the resolution

试件编号	A	B
相机 1 系统误差	0.49mm	0.45mm
相机 2 系统误差	0.57mm	0.51mm

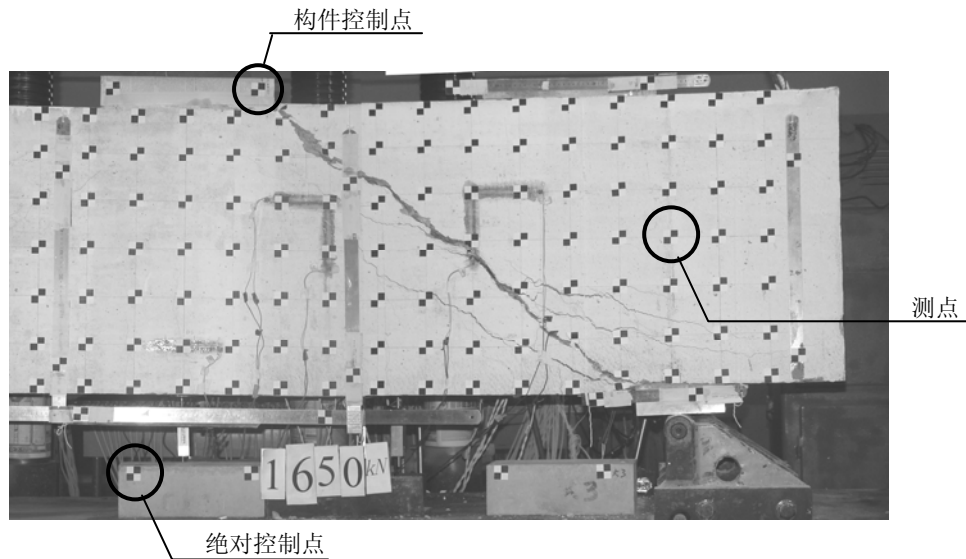


图9 钢筋混凝土梁剪切破坏试验中数字摄影测量的标志点布置

Fig.9 Distribution of the mark points for digital photogrammetry in shear tests of RC beams

两个试件的几何、物理参数均相同，唯一的不同的是 B 试件采用了 CFRP U 形箍对梁腹进行了加固。图 10 比较了数码摄影测量得到的梁底跨中竖向位移与位移计量测结果的比较。其误差基本来自于分辨率的限制。从图中可以看到对 B 试件的数码摄影测量结果好于 A 试件，这是因为它采用了多套构件控制点实施全局平差。图 11 显示了数字摄影测量得到的梁身应变场的发展情况，图中同时画出了试件破坏时的裂缝分布以作为比较，应变分布图右上角的数字表示当时的荷载水平 P/P_u 。

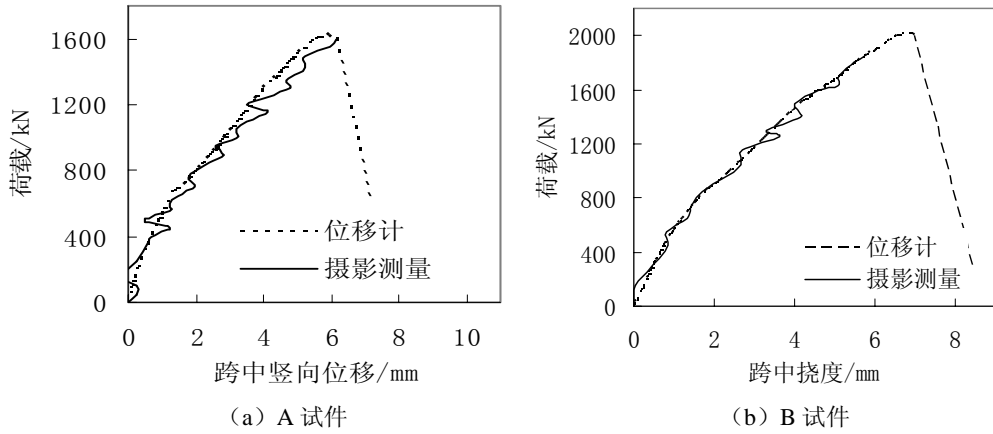


图 10 数码摄影测量结果与位移计量测结果的比较
Fig.10 Comparison between the results of photogrammetry and LVDT

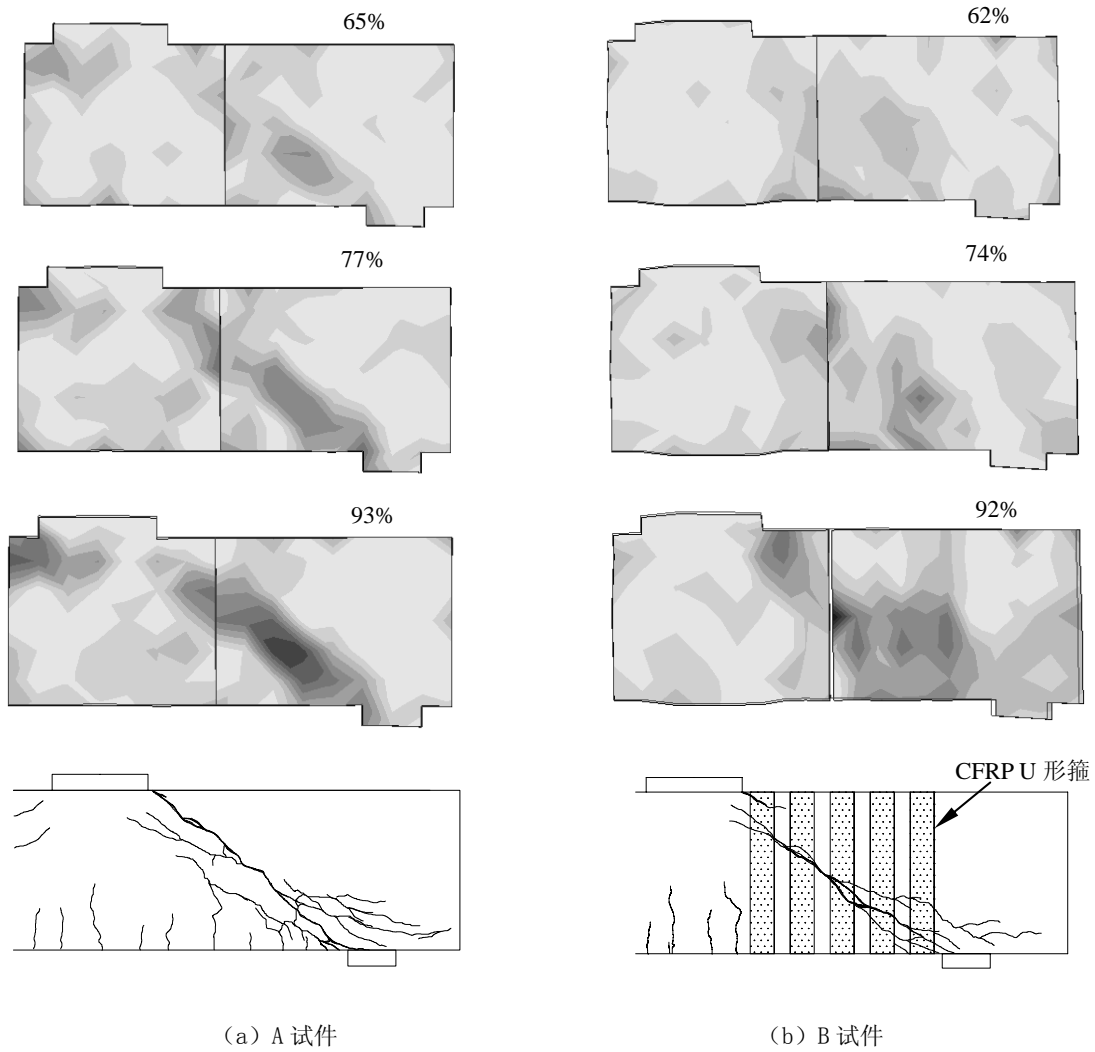


图 11 摄影测量得到的 A 试件与 B 试件的主拉应变场
Fig.11 Principle tension strain field of specimen B and D by photogrammetry



4 结语

本文结合结构试验的特殊要求，讨论了数字摄影测量技术中的相关问题，并介绍了它的实际应用。可以看出，虽然目前而言结构试验中的数字摄影测量技术在精度方面尚有不尽如人意之处，然而随着相机分辨率的提高和先进算法的采用，数字摄影测量技术在精度方面有很大的提升空间，完全有能力满足结构试验的需要。而该技术本身又具有传统量测手段无法比拟的优越性，若与有限元分析结合起来，用数字摄影测量得到的全局位移场、应变场结果来评价有限元分析模型与结果的合理性，将为探索结构在复杂受力状态下的力学行为提供有力的支持。

参考文献

- [1] 张祖勋、张剑清. 数字摄影测量学[M], 武汉: 武汉测绘科技大学出版社, 1996.第 141 至 143 页
- [2] 李德仁、郑肇葆. 解析摄影测量学[M], 北京: 测绘出版社, 1992. 第 16 至 33 页