

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2105848

# 一种新型骨外固定架系统标定方法

陈 巨 王明泉 李一丹 方子彬 李天宇

(中北大学 国防重点实验室 太原 030051)

**摘要:** 新型骨外固定架是一种可以用于治疗骨折,矫正骨骼畸形等病症的外固定器,在使用时需要使用处方软件对新型骨外固定架进行标定并制定治疗处方。基于双目立体视觉,为新型骨外固定架设计了一种系统标定方法。该方法首先对骨外固定架双目图像进行标定,求得相机内外参数,并对图像做矫正处理,之后利用双目立体视觉原理求解处理后图像中关键点坐标,利用关键点坐标计算固定架连杆长度。经实验验证,该方法可以将把误差控制在 0.5 mm 以内,之后处方软件在设计治疗方案时可直接使用该方法计算出的数据,对优化新型骨外固定架使用流程具有重要意义。

**关键词:** 新型骨外固定架;双目立体视觉;机器视觉;相机标定;畸变矫正

**中图分类号:** TP317.4 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.4050

## A new calibration method of external bone fixator system

Chen Gen Wang Mingquan Li Yidan Fang Zibin Li Tianyu

(Key Laboratory of National Defense, North University of China, Taiyuan 030051, China)

**Abstract:** The new bone fixator is an external fixator that can be used to treat fractures, correct skeletal deformities and other conditions, and requires prescription software to calibrate and prescribe treatment. A systematic calibration method is designed for a new external fixator based on binocular stereo vision. The method first calibrates the binocular image of the external fixator, finds the internal and external parameters of the camera and corrects the image, then uses the principle of binocular stereo vision to solve for the coordinates of the key points in the processed image and uses the key point coordinates to calculate the length of the fixator linkage. The method was validated to be able to control the error within 0.5 mm. The data calculated by this method can be used directly by the prescription software when designing the treatment plan, which is important for optimising the process of using the new external bone fixation frame.

**Keywords:** new bone external fixator; binocular stereo vision; machine vision; camera calibration; distortion correction

## 0 引 言

20世纪60年代,俄罗斯医生 Ilizarov 提出了张力-应力定律,并发明了 Ilizarov 骨外固定架(又称伊氏架)。伊氏架符合生物力学要求的轴向加压作用,可以很好地矫正骨骼畸形。但是医生在使用伊氏架时需要根据治疗部位选择不同的固定架部件,并且在治疗过程中不断更换部件来完成治疗。新型骨外固定架(以下称固定架)是一种六连杆并联机构<sup>[1]</sup>,它基于张力-应力定律,通过调节连杆长度改变固定架位姿从而起到矫正骨骼畸形的作用,且操作简单便于安装。固定架在使用时需要处方软件辅助,以建立正确的固定架二维坐标与三维坐标的对应关系,便于计算固定架空间位姿和连杆长度。浙江工业大学韩洪志<sup>[2]</sup>使用单目视

觉原理求得单张图片的二维坐标后使用 DLT 算法求解三维坐标<sup>[3]</sup>,该方法成本低,精度差,无法达到医生的使用标准;天津大学孙涛等<sup>[4]</sup>使用 CT 断层扫描技术结合 WebGL 三维模型渲染技术对固定架进行三维重建,获取固定架的三维坐标。虽然此方法精度高,满足临床需要,但是成本较高,无法普及。

双目立体视觉是机器视觉的一种重要形式。它基于视差原理,利用成像设备从不同的位置获取被测物体的两幅图像,通过计算图像对应点的位置偏差,来获取物体三维几何信息。双目立体视觉无需接触目标便可获得其位置信息,目前已广泛运用于医学、无人机、工业等领域<sup>[5-8]</sup>。

精确的连杆长度可以验证骨外固定架数学模型的准确度,确保治疗处方的有效性。本文基于双目立体视觉设计

收稿日期:2021-02-26

• 112 •

了一种新型骨外固定架标定方法,首先对拍摄的图像进行相机标定、畸变矫正、立体矫正,之后在矫正后的图像上人工选取关键点,并计算关键点三维坐标和连杆长度,将计算得出的连杆长度与实际测量长度进行比较,验证该方法的精度。

### 1 固定架系统标定

#### 1.1 相机标定

在图像测量和机器视觉应用中,为了确定三维空间中物体表面某点的位置与该点在二维图像中对应点的相互转换关系,需要考虑 4 个坐标系的相互转换,包括世界坐标系、相机坐标系、像素坐标系和图像物理坐标系。通过图像已知点的图像物理坐标与世界坐标确定相机参数,包括内参数、外参数<sup>[9]</sup>与畸变参数。内参数是相机的固有参数,只需标定一次;畸变参数描述了相机镜头在投影中产生的畸变效应;外参数表示立体视觉中两个相机之间的相对位置关系<sup>[10]</sup>,包括平移向量  $T$  和旋转矩阵  $R$ <sup>[11]</sup>。求解相机参数的过程称为相机标定。相机成像模型一般使用小孔成像模型描述<sup>[12]</sup>。图 1 所示为相机成像示意图。

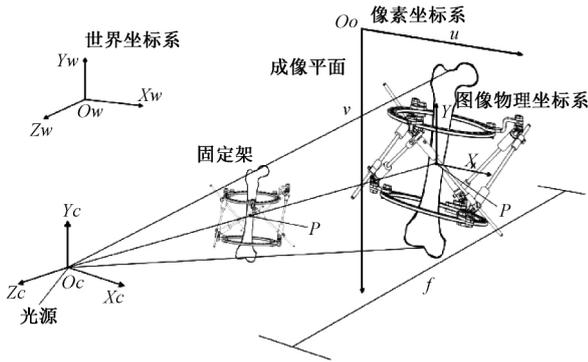


图 1 成像模型示意图

图像物理坐标系以图像中心为原点,  $X$ 、 $Y$  轴分别平行于图像两侧,建立坐标系,单位是 mm;像素坐标系以图像左上角为原点,  $X$ 、 $Y$  轴分别平行于图像两侧,建立坐标系,单位是 pixel。图像物理坐标系与像素坐标系转换关系如下:

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{dx} & 0 & u_0 \\ 0 & \frac{1}{dy} & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中:  $u$ 、 $v$  是像素坐标系坐标;  $x$ 、 $y$  为像素坐标系坐标;  $dx$ 、 $dy$  为感光元件上单个像素的实际大小,单位为 mm/pixel;  $u_0$ 、 $v_0$  为图像中心坐标。

相机坐标系以光心为原点,  $X$ 、 $Y$  轴分别平行于图像两侧,光轴为  $Z$  轴建立坐标系。世界坐标系就是客观三维世界的坐标系,用来描述相机与固定架的位置。世界坐标系

与相机坐标系之间的转换为刚体转换<sup>[13]</sup>,关系式如下:

$$\begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & T \\ \mathbf{0}^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中:  $X_c$ 、 $Y_c$ 、 $Z_c$  为点  $P$  在相机坐标系下坐标;  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  为点  $P$  在世界坐标系下的坐标;  $R$  是  $3 \times 3$  的旋转矩阵;  $T$  是  $3 \times 1$  的平移矩阵。

图 1 中点  $P$  为主点,设点  $P$  在相机坐标系下坐标为  $(X_c, Y_c, Z_c)$ 。点  $p$  为点  $P$  投影到成像平面上的点,坐标为  $(x, y)$ 。光源到成像平面的距离为焦距,表示为  $f$ 。由三角形相似原理可以得到如下关系式:

$$\begin{cases} \frac{x}{f} = \frac{X_c}{Z_c} \\ \frac{y}{f} = \frac{Y_c}{Z_c} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} Z_c \cdot x = f \cdot X_c \\ Z_c \cdot y = f \cdot Y_c \end{cases} \quad (3)$$

将式(3)变为矩阵齐次形式可得:

$$Z_c \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

联立式(1)、(2)、(4)可得:

$$Z_c \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{dx} & 0 & u_0 \\ 0 & \frac{1}{dy} & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R & T \\ \mathbf{0}^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & f_y & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R & T \\ \mathbf{0}^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} = K \begin{bmatrix} R & T \\ \mathbf{0}^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

其中,矩阵  $K$  称为内参数矩阵,矩阵  $R$  与  $T$  称为外参数矩阵。

#### 1.2 畸变矫正

相机标定过程中使用的是理想小孔成像模型,在实际使用过程中由于相机透镜的制作和安装等问题会引入畸变,导致图像失真<sup>[14]</sup>。相机畸变包括径向畸变与切向畸变两种。

径向畸变是由于光线在距离透镜中心较远的位置发生变形造成的,一般包括枕形畸变与桶形畸变,如图 2 所示。

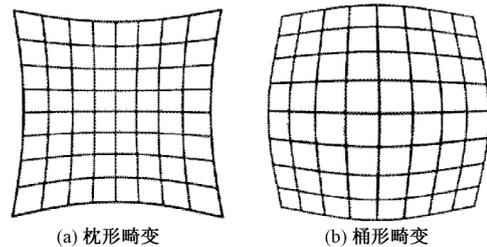


图 2 两种径向畸变

实际情况下,径向畸变程度较小,本文使用主点周围的泰勒级数展开式的前 3 项来表示。

$$\begin{cases} x_0 = x(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) \\ y_0 = y(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $k_1, k_2, k_3$  为径向畸变参数;  $x_0, y_0$  为矫正后坐标;  $r^2 = x^2 + y^2$ 。除使用畸变较大的镜头,如鱼眼镜头等,  $k_3$  通常忽略不计。

切向畸变通常因为透镜与成像平面不平行造成,这种情况多出现于镜头安装时。切向畸变模型用式(7)描述:

$$\begin{cases} x_0 = 2p_1 xy + p_2(r^2 + 2x^2) \\ y_0 = 2p_2 xy + p_1(r^2 + 2y^2) \end{cases} \quad (7)$$

其中,  $p_1, p_2$  为切向畸变参数。合并式(5)、(6),可得:

$$\begin{cases} x_0 = x(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) + 2p_1 xy + p_2(r^2 + 2x^2) \\ y_0 = y(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) + 2p_2 xy + p_1(r^2 + 2y^2) \end{cases} \quad (8)$$

式中:  $k_1, k_2, k_3, p_1, p_2$  统称为畸变参数。由式(8)可以求得无畸变的图像坐标。

### 1.3 立体矫正

在使用双目立体视觉对固定架进行系统标定时会用到两个相机,理想的双目立体视觉系统要求两相机的成像平面处于同一平面内,相机光轴垂直于成像平面,像点在左右两相机的成像平面上高度一致。但在实际使用中无法达到理想程度,因此需要对相机进行立体矫正<sup>[15]</sup>。

在立体矫正中,将右相机相对左相机的旋转矩阵  $R$  分解为  $R_l$  和  $R_r$  两个矩阵,其中:

$$\begin{cases} R_l = R^{\perp} \\ R_r = R^{-\perp} \end{cases} \quad (9)$$

构造变换矩阵  $R_{rect}$ ,使得基线与成像平面平行。

$$R_{rect} = \begin{bmatrix} e_1^T \\ e_2^T \\ e_3^T \end{bmatrix} \quad (10)$$

要通过变换矩阵  $R_{rect}$  将左视图的极点变换到无穷远处,使级线达到水平,所以右相机相对左相机的平移向量就是  $e_1$  方向:

$$e_1 = \frac{T}{\|T\|}, T = (T_x, T_y, Y_z)^T \quad (11)$$

式中:  $T$  为右相机相对左相机的平移向量。

$e_2$  方向与主光轴方向正交,且垂直于  $e_1$ ,则  $e_1$  与主光轴方向的叉乘经过归一化后可得  $e_2$ :

$$e_2 = \frac{[-T_y \quad T_x \quad 0]}{\sqrt{T_x^2 + T_y^2}} \quad (12)$$

$e_3$  与  $e_1, e_2$  相互正交,  $e_3 = e_1 \cdot e_2$ 。将矩阵  $R_l$  和  $R_r$  分别与变换矩阵  $R_{rect}$  相乘。可以求得左右相机的旋转矩阵,将左右相机的坐标系分别与求得的旋转矩阵相乘,便可以完成立体矫正。

$$\begin{cases} R'_l = R_{rect} \cdot R_l \\ R'_r = R_{rect} \cdot R_r \end{cases} \quad (13)$$

### 1.4 固定架位姿计算

图像在立体矫正后,原双目立体视觉系统矫正为理想双目立体视觉系统,如图 3 所示。左右相机光心分别在左右两个成像平面上的像素坐标为  $(u_l, v_l), (u_r, v_r)$ 。目标点  $P$  在左右成像平面上投影点坐标分别为  $P_l(x_l, y_l)$  和  $P_r(x_r, y_r)$ 。利用相似原理可以得出:

$$\begin{cases} x = \frac{B(x_l - u_l)}{(x_l - x_r)} \\ y = \frac{B(y_l - v_l)}{(x_l - x_r)} \\ z = \frac{Bf}{(x_l - x_r)} \end{cases} \quad (14)$$

其中,  $B$  为基线长,  $f$  为焦距,  $P(x, y, z)$  是点  $P$  在相机坐标系下坐标。

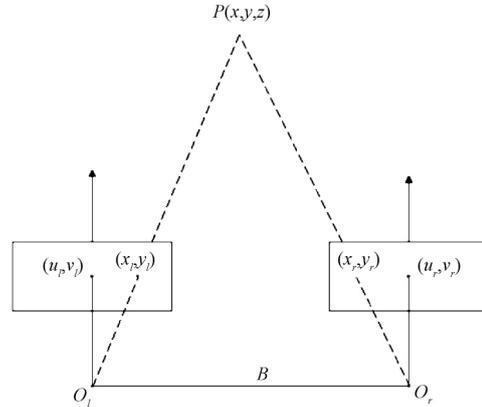


图 3 立体视觉系统

## 2 实验与结果

本节将按照上文所述步骤,通过比较计算得出的连杆长度与人工测量的连杆长度,对本方法精度予以实验验证。实验使用 2 台 pointgray 公司生产的  $4\ 096 \times 3\ 000$  分辨率的工业相机,配合 16 mm 镜头拍摄实验所需照片。相机具体参数如表 1 所示。实验共拍摄 27 组标定图片用于相机标定,1 组固定架图片。实验使用 VS2019 编写标定程序。图 4 所示为新型骨外固定架模型。

表 1 相机详细参数

型号	GS3-U3-123S6C-C
尺寸	44 mm × 29 mm × 58 mm
帧率	30 fps
分辨率	4 096 × 3 000
芯片	Sony IMX253
像元尺寸	3.45 μm
供电电压	5 V
数据接口	USB 3.0
曝光时间	0.01 ms ~ 32 s

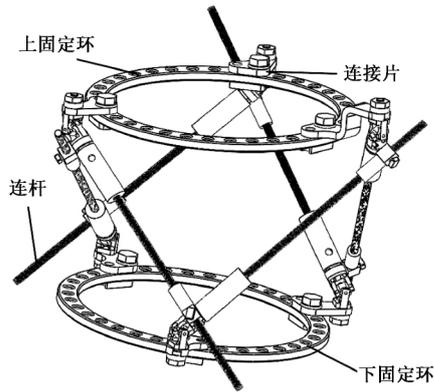


图 4 新型骨外固定架模型

标定求得相机内外参数如表 2 所示。根据标定求得的畸变参数对拍摄的固定架图片进行畸变矫正,结果如图 5、6 所示,图 5 中,(a)为左相机拍摄的固定架图片原图,(b)为完成校正的固定架图片,图 6 同图 5。分别从图 5、6 中截取图中矩形框选部分并放大,(c)为校正前图像放大部分,(d)为矫正后放大部分。

分别在矫正后的左右两张图片上选取 3 根固定架连杆端点,坐标如表 3 所示。其中  $A_1、C_1$  为  $L_1$  杆端点,  $A_3、C_3$  为  $L_2$  杆端点,  $A_5、C_5$  为  $L_3$  杆端点。

按照式(14)求出上述 6 点对应的世界坐标系后根据线段长计算公式求得三根杆的长度后,与预先测量出的连杆长度作比较,其结果如表 4 所示。

表 2 标定结果

参数	左相机	右相机
内参数	$\begin{bmatrix} 1\ 801.17 & -5.51 & 2\ 038.47 \\ 0 & 1\ 801.35 & 1\ 546.54 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1\ 805.29 & -6.71 & 2\ 055.38 \\ 0 & 1\ 802.64 & 1\ 530.648 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$
焦距	$[1\ 801.17\ 1\ 801.35]$	$[1\ 805.29\ 1\ 802.64]$
畸变参数	$(-0.116\ 3\ 0.072\ 3\ -0.016\ 5)$	$(-0.112\ 9\ 0.069\ 9\ -0.014\ 9)$
主点坐标	$(2\ 038.47\ 1\ 546.54)$	$(2\ 055.38\ 1\ 530.64)$
旋转矩阵	$\begin{bmatrix} 1 & -0.000\ 79 & 0.001\ 90 \\ 0.000\ 79 & 1 & 0.000\ 53 \\ -0.001\ 90 & -0.000\ 53 & 1 \end{bmatrix}$	
平移向量	$[495.319\ 9\ 0.300\ 8\ 4.548\ 6]$	

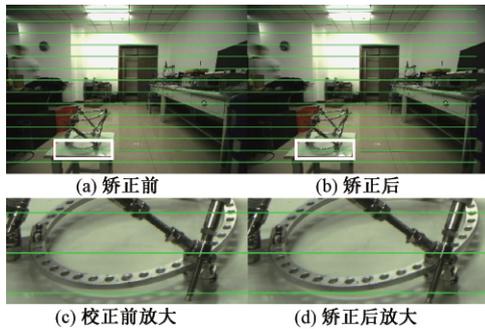


图 5 左相机畸变矫正对比图

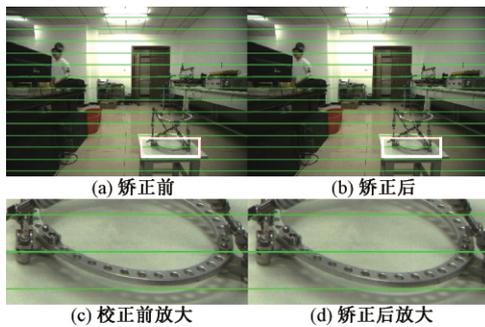


图 6 右相机畸变矫正对比图

表 3 端点坐标

端点编号	左	右
$A_1$	(1 694, 1 909)	(3 083, 1 888)
$A_3$	(1 119, 2 135)	(2 939, 2 102)
$A_5$	(1 203, 1 856)	(2 504, 1 840)
$C_1$	(1 507, 2 508)	(3 153, 2 478)
$C_3$	(948, 2 410)	(2 465, 2 376)
$C_5$	(1 503, 2 219)	(2 742, 2 195)

表 4 长度对比

连杆编号	计算长度/mm	测量长度/mm
$L_1$	165.84	165.50
$L_2$	162.86	163.11
$L_3$	185.11	184.93

由表 4 可知,本方法计算得出的长度与实际测量长度相差在 0.3~0.4 mm 之间,误差主要来自图像拍摄角度、关键点的选取等,此外手工测量连杆长度也存在一定误差。固定架在医学应用过程中,医生单次调节连杆的长度通常在 1 mm 左右,允许的调节误差为 0.5 mm。由单目视

觉和 DLT 算法计算出的关键点坐标通常会有 30 ~ 40 pixel 的误差,即使使用优化后的 PnP 算法也难以达到医生要求。本文方法相较于单目视觉获取到的关键点坐标更精确,计算出的数据可以用于后续矫正算法的计算。

### 3 结 论

本文使用双目立体视觉原理,设计了一种新的骨外固定架标定方法,对拍摄的图像分别进行相机标定、畸变矫正、立体矫正,在矫正后的图像上选取关键点,根据关键点的二维坐标计算三维坐标,从而建立二维坐标与三维坐标的转换关系。通过实验验证该方法可以将误差控制在 0.5 mm 以内,数据可以用于后续矫正计算。但是该方法在实验时容易因为操作产生实验误差,并且误差原因不易发现。如何优化操作流程仍有待进一步研究。

### 参考文献

- [1] 傅超,范佳程,王石刚,等.Ortho-SUV 支架空间位姿建模与求解[J].上海交通大学学报,2020,54(10):1007-1014.
- [2] 韩洪志.骨外固定矫形支架系统研究与开发[D].杭州:浙江工业大学,2016.
- [3] 刘士兴,周启航,马登科,等.基于单目视觉的电梯曳引轮磨损检测系统研制[J].电子测量与仪器学报,2020,34(9):55-61.
- [4] 孙涛,闫巍,孙振辉,等.外固定支架模型重建软件开发与安装参数识别研究[J].天津大学学报(自然科学与工程技术版),2020,53(6):593-600.
- [5] 董默,赵若晗,周志尊,等.医学图像三维重建系统设计与应用[J].软件,2018,39(1):87-90.
- [6] 杨岳航,陈武雄,朱明,等.基于机器视觉的无人机自主着陆技术[J].国外电子测量技术,2020,39(4):57-61.
- [7] 罗久飞,邱广,张毅,等.基于自适应双阈值的 SURF 双目视觉匹配算法研究[J].仪器仪表学报,2020,41(3):240-247.
- [8] MING C, FU K Z, DONG L, et al. Uncalibrated workpiece positioning method for peg-in-hole assembly using an industrial robot[J]. Instrumentation, 2019, 6(4):26-36.
- [9] 潘雨坤.基于双目立体视觉的运动目标检测系统设计与实现[D].上海:华东师范大学,2019.
- [10] 刘钰卿.基于双目匹配技术的室内定位方法研究与实现[D].长春:东北师范大学,2019.
- [11] 毕凌铨,杨立娜.基于双目立体视觉的运动目标探测[J].科技创新与应用,2018(17):14-15.
- [12] 姜映舟.基于计算机视觉的测距技术研究[D].桂林:桂林电子科技大学,2019.
- [13] 李明东,卢彪,金传宇.基于双目视觉立体匹配技术的双目测距研究[J].廊坊师范学院学报(自然科学版),2019,19(2):18-20.
- [14] MATOS A C, TERROSO T A, CORTE-REAL L, et al. Stereo vision system for human motion analysis in a rehabilitation context [J]. Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering: Imaging & Visualization, 2019, 7(5/6):707-723.
- [15] 张曙,华云松.基于双目立体视觉的目标物定位研究[J].软件导刊,2018,17(2):198-201.

### 作者简介

陈亘,硕士,主要研究方向为图像处理、生物医学工程。

E-mail:756815270@qq.com

王明泉,教授,博士生导师,主要研究方向为射线图像处理。

E-mail:wangmq@nuc.edu.cn