

## 双平面法标定的双目视觉三维测量系统

田小超, 李忠科

(第二炮兵工程大学理学院计算机室, 西安 710025)

**摘要:** 针对传统摄像机标定过程复杂、三维测量精度不高的问题,提出了一种基于投影直线相交的双目视觉三维测量方法,并给出了基于神经网络的标定方法。根据摄像机成像特点,利用双标定平面上的点求取投影直线方程;针对摄像机成像复杂的畸变模型,利用BP神经网络对复杂非线性映射关系的强大逼近能力,对左右两台摄像机于远近标定平面处分别进行隐式标定,得到图像像素坐标到平面模板二维物理坐标的映射关系;设计制作了试验平台,采用手工辅助的方法获得网格模板训练样本。此标定方法完全适用于大视场、近距离、高精度的双目视觉传感器。试验结果表明,系统对空间已知长度的测量结果误差约为0.109 mm,测量精度较高。

**关键词:** 双目视觉; 摄像机标定; BP神经网络; 三维测量

**中图分类号:** V271.4; TP391 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2015)03-0054-04

## Binocular Vision 3D Measurement System Calibrated by Dual Plane Method

TIAN Xiao-chao, LI Zhong-ke

(The Second Artillery Engineering College, Xi'an 710025, China)

**Abstract:** Considering the high complexity of traditional camera calibration process and the low accuracy of three-dimensional measurement, we proposed a kind of binocular visual 3D measurement method based on projection line and a calibration method based on Neural Network. According to the characteristics of camera imaging, the projection straight line equation was calculated by two points on the calibration plane. To the complex distorted model of camera imaging, the powerful ability of BP neural network for fitting the complicated nonlinear mapping relation was used for left and right cameras' implicit calibration at the far and near distance calibration planes, and mapping relationship between two-dimensional physical coordinates of plane template and pixel coordinates of image was obtained. A test platform was designed and established, and grid template training samples were obtained by using the manual assisted method. This calibration method is fully applicable to the large field-of-view, close range, high-precision binocular vision sensor. Test results show that the measuring error of known length in the space is about 0.109 mm and the system has a high measuring accuracy.

**Key words:** binocular visual; camera calibration; BP neural network; 3D measurement

### 0 引言

摄像机标定是双目视觉三维测量系统的基础,目前摄像机标定方法主要分为自标定、基于主动视觉标定和传统标定3类。其中:自标定方法不需要专用的标定物,但标定过程复杂且精度不高<sup>[1]</sup>;基于主动视觉

的标定方法需要专用的平台系统,精度依赖于所获取的运动信息的精度<sup>[2]</sup>;传统标定方法以已知的标定物为参照,通过空间点和图像点之间的对应关系来计算摄像机内外参数,可分为线性标定、非线性标定和两步法。线性标定法以理想小孔模型为成像模型,简单方便,但精度较低;非线性标定法在理想小孔模型的基础上增加了畸变模型<sup>[3]</sup>,精度较高,但模型复杂、计算繁琐、速度较慢;两步法则采用由粗到精的策略,标定过程简单且精度较高,目前已得到广泛应用,典型代表有Tsai方法<sup>[4]</sup>、张正友简易标定法<sup>[5]</sup>等。近年来,神经网

收稿日期:2014-05-05 修回日期:2014-05-22

基金项目:国家“八六三”计划课题(2013AA040802)

作者简介:田小超(1989—),男,河南正阳人,硕士生,研究方向为三维测量、嵌入式系统应用。

络也开始广泛应用于摄像机的标定<sup>[6]</sup>,能够克服摄像机复杂的成像和畸变模型,精度较高,但此方法需要昂贵的立体模板或者需要把平面模板置于多个位置进行测量标定,训练样本过大、收敛缓慢;遗传算法也引入摄像机标定<sup>[7-8]</sup>,能够迅速准确地找到摄像机参数。

本文在重点研究了传统标定法的基础上,提出了一种基于投影直线相交的双目视觉标定、测量方法,此方法标定过程简便,理论上能有效克服摄像机非线性畸变,试验结果证明了测量精度很高。

### 1 系统原理

系统测量原理如图 1 所示。OXYZ 为世界坐标系,坐标原点 O 位于系统近距离处标定平板的中心,平面 OXY 为系统近距离处标定平板所在的平面,平面 O'X'Y' 为系统远距离处标定平板所在的平面。根据理想的小孔模型,空间中的一点 P 经过左摄像机的投影中心在左像面成像为 P<sub>l</sub>,所以, P<sub>l</sub> 唯一对应一条经过投影中心 S<sub>l</sub> 和点 P 的直线 L。假设此直线 L 与远近两个标定平面的交点为 P<sub>l'</sub>, P<sub>l''</sub>。同理,点 P 在右摄像机像面的成像 P<sub>r</sub>,也唯一对应一条直线 R,直线 L, R 的交点即为目标点 P。

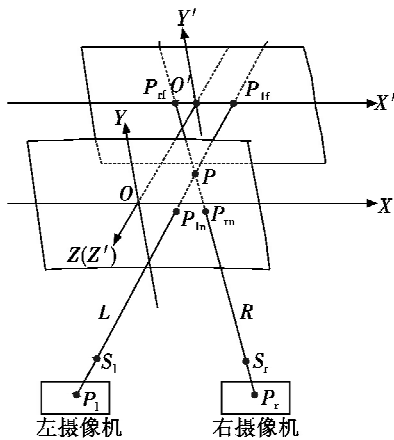


图 1 系统测量原理图

Fig. 1 The measurement principle of system

根据以上原理,确定直线 L 和 R,即可求出目标点的三维坐标,而点 P<sub>l'</sub>和 P<sub>l''</sub>可确定直线 L,点 P<sub>r'</sub>和 P<sub>r''</sub>可确定直线 R。这 4 个点的 Z 轴坐标是已知的, X 轴和 Y 轴坐标可通过左右摄像机分别对远近处的标定平板进行标定获得。以点 P<sub>l'</sub>为例,把标定平板置于远距离处,用 BP 神经网络实现左摄像机的标定,得到图像中像点与平板上二维世界坐标系中物点的映射关系,像点 P<sub>l</sub> 根据此映射关系即得到点 P<sub>l'</sub>的 X 轴和 Y 轴坐标。

在考虑摄像机非线性畸变的情况下,仍然可认为一条视线上所有物点都成像在像面上同一位置<sup>[9-10]</sup>,所以本系统测量方法能有效避免摄像机成像非线性畸变带来的系统误差。

## 2 基于 BP 神经网络的摄像机标定

### 2.1 BP 神经网络技术

摄像机标定的目的是建立空间坐标系中物点与其在图像中像点之间的对应关系。基于 BP 神经网络的摄像机标定方法,利用 BP 神经网络的非线性映射能力,不需要建立摄像机成像的数学模型,避免了因数学模型的不完善而带来的系统误差,有利于提高测量精度。BP 神经网络由输入层、隐层和输出层组成。在理论上,如果隐层节点数目可以任意多,则只需要一层隐层,BP 神经网络就可以以任意精度逼近任意连续函数,所以本系统采用只含一层隐层的三层 BP 神经网络。

### 2.2 训练样本的获取

系统结构如图 2 所示,图中,网格平面在世界坐标系中为 XOY 平面, Z = 0, 网格间距 5 mm。当滑动座前移靠近前挡板时,网格平面 Z = 40 mm。

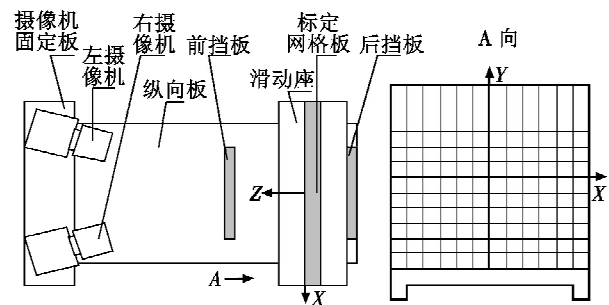


图 2 系统结构图

Fig. 2 System structure

左右摄像机对处于前后限位处的网格图案拍照,共有 4 张图像作为标定图像,以图像网格交叉点作为训练样本,分别进行摄像机标定。为求出网格交叉点图像像素坐标及对应的实际坐标,采用手工辅助的手段,建立图像空间和网格所在空间之间存在的粗略的连续映射关系,进而求出所有网格交点粗略的图像像素坐标,再用模板加权法求得精确的像素坐标。程序用 VB6.0 编写,在 Windows XP 系统下运行,具体过程可分为以下两步进行。

1) 手工选定 9 个交叉点,确定其精确的像素坐标。

运行标定处理软件,在文件操作中打开标定图像文件,在选择控件上点击选择鼠标操作,以中心黑线的中点作为坐标原点,然后在图像上网格坐标 (5, 5), (0, 5), (-5, 5), (5, 0), (0, 0), (-5, 0), (5, -5), (0, -5), (-5, -5) 处附近按一定顺序依次点击,鼠标点击位置即可作为粗略的交叉点像素坐标,根据网格图像的特点,用两相互垂直的矩形作为模板,在粗略点 (x, y) 的 dt 邻域内用模板对图像加权求和,和值最小时的模板中心即为精确的交叉点,算法原理如图 3

所示。

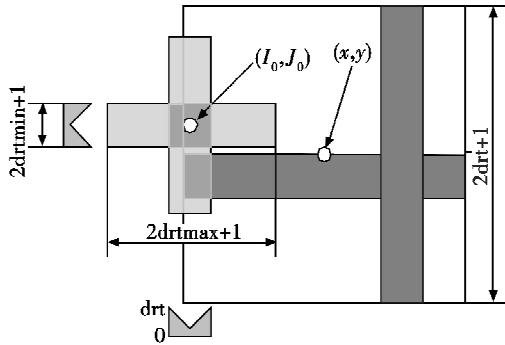


图3 精确搜索算法示意图

Fig.3 Schematic diagram of exact search algorithm

2) 搜索全部交叉点像素坐标及对应的实际坐标。

根据网格图像的特点,可以认为在图像空间和网格所在空间存在连续映射关系,且这个关系可用双二次多项式近似表示为

$$x_p(i) = a_x X^2 Y^2 + b_x X^2 Y + c_x X^2 + d_x Y^2 X + e_x Y^2 + f_x XY + g_x X + h_x Y + i_x \quad (1)$$

$$y_p(i) = a_y X^2 Y^2 + b_y X^2 Y + c_y X^2 + d_y Y^2 X + e_y Y^2 + f_y XY + g_y X + h_y Y + i_y \quad (2)$$

将第1)步中的9个已知点代入,建立方程组,可以分别求出关于式(1),(2)中 $x$ 和 $y$ 的9个系数,然后将所有网格交叉点的实际坐标代入方程,求出图像上对应交叉点的概略坐标,如图4所示。

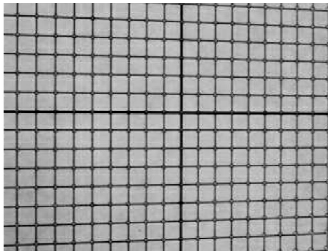


图4 网格交叉点示意图(局部)

Fig.4 Schematic diagram of partial grid cross-point

交叉点上的圆圈圆心是概略位置,再根据精确搜索算法求出交叉点精确像素坐标,交叉点的像素坐标和对应的实际坐标即为所需的样本数据。

### 2.3 BP神经网络的训练

标定平板在远、近距离处时用BP神经网络对左、右摄像机分别进行标定。将标定板上网格交叉点对应的图像像素坐标作为BP神经网络的输入,交叉点在标定平板上的二维实际坐标作为输出。采用一个三层的BP神经网络,由一个输入层(2个节点),一个隐层(7个节点)和一个输出层(2个节点)组成,如图5所示。隐层传递函数选择log-sigmoid函数,输出层传递函数选择线性函数。为快速收敛,采用LM算法,把训练样本代入BP神经网络进行反复训练,直至得到满

意的 $X_{out}, Y_{out}$ 的输出误差。

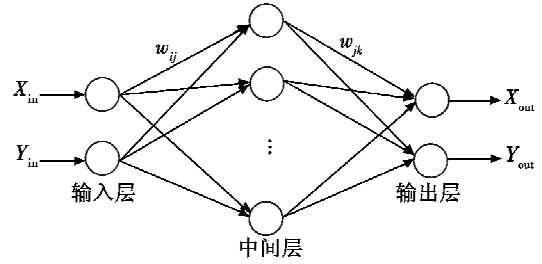


图5 BP网络模型

Fig.5 BP network model

BP神经网络经过一段时间的训练之后, $X_{out}, Y_{out}$ 的输出误差可在0.005 mm以内,即三维空间虚拟点 $P_H, P_L, P_H, P_m$ 的 $X$ 轴、 $Y$ 轴坐标误差不大于0.005 mm。

### 3 目标点的求解

假设由BP神经网络得到的4个三维空间虚拟点坐标分别为 $P_H(X_a, Y_a, Z_a), P_L(X_b, Y_b, Z_b), P_H(X_c, Y_c, Z_c), P_m(X_d, Y_d, Z_d)$ ,则点 $P_H, P_L$ 构成直线 $L$ ,点 $P_H, P_m$ 构成直线 $R$ 方程分别为

$$(x, y, z)^T = k_l \cdot \mathbf{l}^T + (X_a, Y_a, Z_a)^T \quad (3)$$

$$(x, y, z)^T = k_r \cdot \mathbf{r}^T + (X_c, Y_c, Z_c)^T \quad (4)$$

式中: $k_l, k_r$ 为参数; $\mathbf{l}^T = (X_a - X_b, Y_a - Y_b, Z_a - Z_b)^T$ ,为直线 $L$ 的方向向量; $\mathbf{r}^T = (X_c - X_d, Y_c - Y_d, Z_c - Z_d)^T$ ,为直线 $R$ 的方向向量。

理论上来说,目标点应为两空间直线 $L$ 和 $R$ 的交点,但由于误差的存在,直线 $L$ 和 $R$ 并不一定相交,故取直线 $L$ 和 $R$ 公垂线的中点坐标作为目标点的坐标。两空间直线 $L$ 和 $R$ 公垂线方向向量为 $\mathbf{n}^T = \mathbf{l}^T \times \mathbf{r}^T$ 。设直线 $L$ 与公垂线所在的平面为 $\alpha$ ,则 $\alpha$ 的法向量为 $\mathbf{m}^T = \mathbf{l}^T \times \mathbf{n}^T$ ,其方程为

$$(x - X_a, y - Y_a, z - Z_a) \cdot \mathbf{m}^T = 0 \quad (5)$$

设直线 $R$ 与平面 $\alpha$ 的交点为 $P_1(x_1, y_1, z_1)$ ,则由式(4)、式(5)知,点 $P_1$ 满足方程 $\mathbf{A} \cdot (x_1, y_1, z_1, k_r)^T = \mathbf{B}$ ,其中

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -r(1) \\ 0 & 1 & 0 & -r(2) \\ 0 & 0 & 1 & -r(3) \\ m(1) & m(2) & m(3) & 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ X_a \cdot m(1) + Y_a \cdot m(2) + Z_a \cdot m(3) \end{bmatrix} \quad (7)$$

则点 $P_1$ 坐标为 $(x_1, y_1, z_1, k_r)^T = \mathbf{A}^{-1} \cdot \mathbf{B}$ 。

同理,设直线 $R$ 与公垂线所在的平面为 $\beta$ , $\beta$ 的法向量为 $\mathbf{h}^T = \mathbf{r}^T \times \mathbf{n}^T$ ,设直线 $L$ 与平面 $\beta$ 的交点为

$P_2(x_2, y_2, z_2)$ , 满足方程  $C \cdot (x_2, y_2, z_2, k_1)^T = D$ , 其中

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -l(1) \\ 0 & 1 & 0 & -l(2) \\ 0 & 0 & 1 & -l(3) \\ h(1) & h(2) & h(3) & 0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$D = \begin{bmatrix} X_a \\ Y_a \\ Z_a \\ X_c \cdot h(1) + Y_c \cdot h(2) + Z_c \cdot h(3) \end{bmatrix} \quad (9)$$

则点  $P_2$  坐标为  $(x_2, y_2, z_2, k_1)^T = C^{-1} \cdot D$ 。设目标点  $P$  坐标为  $(x, y, z)$ , 则  $(x, y, z, k)^T = ((x_1, y_1, z_1, k_1)^T + (x_2, y_2, z_2, k_1)^T) / 2$ 。

### 4 试验验证及相关分析

#### 4.1 验证试验设计

为验证本系统三维测量精度, 采用图6所示的验证板进行试验验证。试验板上黑色大矩形尺寸为  $50 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$ , 两对角线长度为  $64.031 \text{ mm}$ , 以对角线作为验证标准。根据黑色小矩形与大矩形交界处的角点特征, 采用基于环形模板的棋盘格角点检测方法<sup>[11]</sup>, 可精确确定目标点像素坐标。

将验证板以不同姿态置于标定时的前后限位之内的不同位置, 如图6所示, 分别测得4个角点的三维坐标, 计算两条对角线的长度, 并与其真实值 ( $64.031 \text{ mm}$ ) 进行比较。结果如表1所示, 最大误差为  $0.17 \text{ mm}$ 。

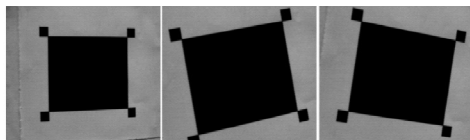


图6 试验板

Fig. 6 Test board

表1 坐标测量数据

Table 1 Measured data mm

位置	对角线1		对角线2	
	测量值	误差	测量值	误差
1	63.988	0.043	64.201	-0.170
2	64.183	-0.152	63.959	0.072
3	64.170	-0.139	64.106	-0.075
平均误差	0.109			

#### 4.2 系统性能分析

本系统设计时, 标定板有效尺寸为  $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ , 前后限位之间的距离为  $40 \text{ mm}$ , 严格来说, 系统的测量范围应为标定时前后限位之间以标定板为截面的长方体区域, 实际上, 由于神经网络的拓展性, 在此区域之外的一定范围内也可进行高精度的三维测量。

本系统是一个大视场、近距离、高精度的双目视觉

传感器, 摄像机视场角约为  $55^\circ$ , 测量区域应在焦点附近景深范围之内, 大小由标定板决定。标定板只需在视场范围之内, 不需要完全覆盖整个视场, 其大小应根据测量目标尺寸而定, 而大尺寸标定板不易制作, 故本方法不能直接用于大尺寸目标的三维测量。

### 5 结语

本系统基于投影直线相交的原理, 先用 BP 神经网络实现从左右两个摄像机图像像素坐标到远近标定平面二维坐标的映射关系, 训练样本相对较少, 收敛迅速, 标定精度很高; 再根据空间解析几何求解出目标点的三维坐标, 可以有效克服摄像机成像的非线性畸变, 测量精度较高。系统可广泛应用于小空间内三维坐标测量, 目前已应用于牙齿模型三维运动轨迹跟踪装置, 取得良好效果。

### 参考文献

- [1] 许勇, 郭鹏宇, 龙古灿, 等. 摄像机全自动标定方法研究[J]. 光学学报, 2013, 33(6): 139-149. (XU Y, GUO P Y, LONG G C, et al. Research on fully automatic calibration method[J]. Journal of Optics, 2013, 33(6): 139-149.)
- [2] 胡占义, 吴朝福. 基于主动视觉摄像机标定方法[J]. 计算机学报, 2002, 25(11): 1149-1156. (HU Z Y, WU C F. A review on some active vision based camera calibration techniques[J]. Chinese Journal of Computers, 2002, 25(11): 1149-1156.)
- [3] 薛白, 段锁林, 邹凌. 考虑径向畸变的机器人视觉系统的参数标定[J]. 计算机工程与设计, 2012, 33(11): 4407-4411. (XUE B, DUAN S L, ZOU L. Calibration of camera parameters with radial distortion for robot vision system[J]. Computer Engineering and Design, 2012, 33(11): 4407-4411.)
- [4] TSAI R Y. A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lens[J]. IEEE Journal on Robotics and Automation, 1987, 3(4): 323-344.
- [5] ZHANG Z Y. A flexible new technique for camera calibration[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22(11): 1330-1334.
- [6] 崔鹏飞. 基于 BP 神经网络的摄像机标定方法[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013. (CUI P F. Research of the cameration methods based on neural network[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013.)
- [7] 江祥奎, 汪友明. 基于蚁群遗传算法的 BP 神经网络摄像机标定[J]. 机械与电子, 2013(12): 60-62. (JIANG X K, WANG Y M. BP neural network camera calibration (下转第96页)

## 参 考 文 献

- [1] 袁正,孙志杰.空空导弹引战系统设计[M].北京:国防工业出版社,2007.(YUAN Z, SUN Z J. Air-to-air missile fuze-warhead design[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2007.)
- [2] 樊会涛.第五代空空导弹的特点及关键技术[J].航空科学技术,2011(3):1-5.(FAN H T. Characteristics and key technologies of the fifth generation of air to air missiles[J]. Aeronautical Science and Technology, 2011(3):1-5.)
- [3] ABERNATHY D D, ADAMS H D, GILBERTSON W L, et al. Variable geometry warhead:USA, 3960085[P].1976-06-01.
- [4] 李记刚,余文力,王涛.定向战斗部的研究现状及发展趋势[J].飞航导弹,2005(5):25-29.(LI J G, YU W L, WANG T. Research status and development trend of directional warhead[J]. Aerodynamic Missile Journal, 2005(5):25-29.)
- [5] 张天光.美英定向战斗部的研究与应用[J].航空兵器,2002(3):38-41.(ZHANG T G. Research and application of directional warhead in America and England[J]. Aero Weaponry, 2002(3):38-41.)
- [6] 刘俞平,冯成良,王绍慧.定向战斗部研究现状与发展趋势[J].飞航导弹,2010(10):88-93.(LIU Y P, FENG C L, WANG S H. Research status and development trend of directional warhead[J]. Aerodynamic Missile Journal, 2010(10):88-93.)
- [7] 兰志,杨亚东,韩玉.起爆方式对偏心式定向战斗部破片速度分布的影响研究[J].弹箭与制导学报,2010,30(3):159-161.(LAN Z, YANG Y D, HAN Y. Research on the distribution of fragment velocity of a eccentric initiation warhead by initiation mode[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2010, 30(3):159-161.)
- [8] 毛亮,姜春兰,严翰新,等.可瞄准预制破片战斗部数值模拟与试验研究[J].振动与冲击,2012,31(13):66-70,75.(MAO L, JIANG C L, YAN H X, et al. Numerical simulation and experiment on directional warhead of pre-made fragment[J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(13):66-70, 75.)
- (上接第 57 页)
- based on ant colony genetic algorithm[J]. Journal of Mechanical and Electronic, 2013(12):60-62.)
- [8] 张建德,徐金宝,陈行,等.基于量子遗传的摄像机参数标定方法研究[J].计算机工程与设计,2013,34(11):4037-4040.(ZHANG J D, XU J B, CHEN X, et al. Research of camera parameters calibration based on quantum genetic algorithm[J]. Computer Engineering and Design, 2013, 34(11):4037-4040.)
- [9] 刘超,李醒飞,郭敬滨,等.基于共线点的镜头畸变校正方法[J].计算机应用,2013,33(12):3555-3558.(LIU C, LI X F, GUO J B, et al. Lens distortion correction method based on collinear points[J]. Journal of Computer Applications, 2013, 33(12):3555-3558.)
- [10] 徐嵩,孙秀霞,刘树光,等.摄像机畸变标定的模型参考逼近方法[J].光学学报,2013,33(7):231-242.(XU S, SUN X X, LIU S G, et al. Model reference approaching method of camera distortion calibration[J]. Journal of Optics, 2013, 33(7):231-242.)
- [11] 储珺,郭卢安政,赵贵花.采用环形模板的棋盘格角点检测[J].光学精密工程,2013,21(1):189-196.(CHU J, GUO L A Z, ZHAO G H. Chessboard corner detection based in circular template[J]. Optics and Precision Engineering, 2013, 21(1):189-196.)

## 下 期 要 目

一种瞄准式战斗部瞄准控制方案  
 多无人机超视距空战博弈策略研究  
 基于相似理论和贝叶斯理论的航材失效率确定  
 舰载无人机保障激光末制导炮弹射击阵位配置  
 基于互信息的亚像素级立体视觉点匹配方法研究  
 激光主动成像图像边缘检测算法  
 基于多位域的等概率随机 IP 流抽样算法  
 基于 EMD 和误差匹配的动态测试系统误差溯源

结合 shearlet 与 Bayesian MAP 估计的图像去噪  
 反潜直升机吊声搜潜悬停探测飞行模型  
 主战飞机大修生产线能力评估方法  
 基于 ARINC661 的触摸屏显控系统研究与设计  
 基于线阵 CCD 的二维轮廓扫描系统  
 基于 Vague 集的潜艇威胁目标类型判别方法  
 用于胚胎电子阵列的实验系统  
 目标的位置信息场定位技术