

面向重型挂弹装置的智能识别与自动挂载技术

于坤洋¹, 王健², 刘漫贤², 周曼娜³

1. 空军装备部航空装备科研局, 北京, 100083; 2. 中国科学院自动化研究所, 北京, 100190; 3. 北京航空工程技术研究中心, 北京, 100076

摘要: 针对当前国内重型挂弹装置操作效率低、安全性差、过度依赖操作人员经验与协调配合等问题, 提出了一种基于计算机视觉、惯性测量与轨迹控制方法的新型智能识别与自动挂载技术, 解决了复杂空间中导弹难以挂载的技术难题。利用智能识别技术提取挂点特征信息, 快速识别复杂环境下的难辨识特征, 并计算挂点位姿参数; 通过融合惯性导航与视觉图像的信息, 修正挂点检测误差, 提高位姿测量精度; 根据挂点位姿参数进行运动空间分析、轨迹规划, 结合模糊控制等算法, 使挂弹装置按照要求完成自动挂载。试验验证结果表明, 该技术可快速实现挂弹作业的智能识别及自动挂载, 提高了挂弹装置的自动化水平, 降低了操作人员劳动强度, 极大地提升了综合运挂效率及安全可靠性。

关键词: 挂弹装置; 智能识别; 位姿测量; 自动挂载

中图分类号: TP27 **文献标识码:** A

Intelligent Identification and Automatic Loading Technology for Heavy Bomb Loader

YU Kunyang, WANG Jian, LIU Manxian, ZHOU Manna

1. Air Force Equipment Ministry Type Department, Beijing 100843, China;
2. Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;
3. Beijing Aeronautical Technology Research Center, Beijing 100076, China

Abstract: Low operating efficiency, poor security, over-reliance on skilled operators and their cooperation have always existed in heavy bomb loader operation. The goal of this research is to solve these problems and to achieve fast bomb loading in complex scenery, so the intelligent identification and automatic loading techniques based on inertial measurement and trajectory control method are proposed. By using intelligent recognition to extract the features, which is difficult to identify in the complex environment, then we can do faster feature recognition and obtain the relative position and orientation. Meanwhile, integrating the inertial navigation data and image information to correct orientation error and improve the measuring accuracy. Lastly, combining motion space analysis, trajectory planning and fuzzy PID control algorithm to complete the loading operation. With the presented techniques, the labor-saving and reliable fast automatic bomb loading can be implemented.

Key words: bomb loader; intelligent identification; position and orientation measuring; automatic bomb loading

引言

重型挂弹装置指将各种重型机载武器运往悬挂位置的专用车辆, 目前国内外正在研制基于电驱的先进挂弹装置, 但由于液压系统能够提供移动重型导弹所需的大动力, 且传动装置结构紧凑, 目前重型导弹的挂载仍然采用液压挂弹装置^[1-3]。国外的先进挂弹装置研制以美国和俄罗斯的成果较

为显著，能够做到自主识别、高效挂弹、快速挂弹、自动挂弹等，缩短了地面保障作业所需要的时间，有效地保障了战机的连续出动能力^[4]。而国内重型挂弹装置的自动化程度较低，操作普遍依赖于观察员的指导，而观测工作又需要数名观察员才能完成，效率低下、安全性差、劳动强度大。因此，解决液压挂弹装置的弹型智能识别与自动挂接问题，具有重要意义^[5]。

1 系统架构

为了准确地识别出导弹滑块与导发梁挂点，并测量出两者之间的相对位姿关系，设计了一种智能识别设备。该设备由视觉模块、惯性测量模块、运算处理模块、交互操作按钮、温控模块、光源模块、报警提示模块等共同组成，具有完整的智能识别、位姿计算、自适应照明、轨迹规划及报警提示等功能，其系统架构如图 1 所示。

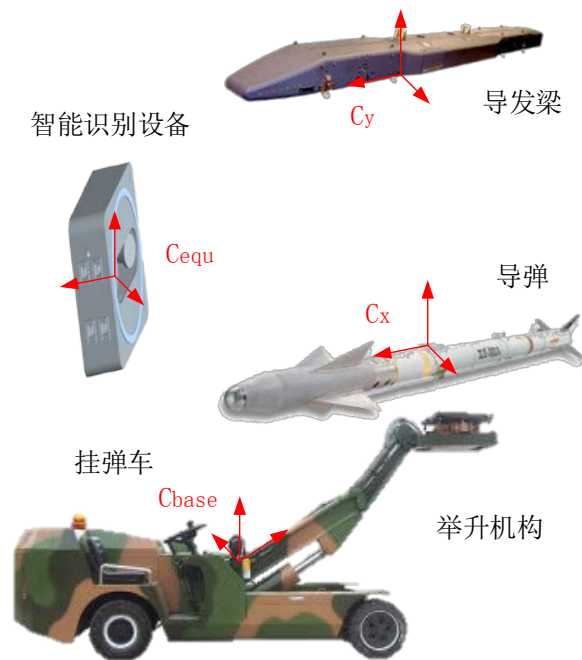


图 1 智能识别设备系统架构及坐标定义图

智能识别设备的工作流程如图 2 所示：设备上电后，由接近开关触发初始化操作，检测相机与芯片组的温度，通过加热器保障设备内元件处于工作温度内，然后开启相机，根据自适应的光源补偿算法动态调节光照强度，此时操作员按动拍照按钮采集导弹与导发梁的对应挂点图像。对图像进行去噪及畸变校正等处理，通过提取图像特征，识别导弹与导发梁挂点的类型，进而找到与之匹配的模板。模板匹配后得到位姿的测量值，融合拍摄时惯性传感器数据，经由 Kalman 滤波得到更准确的位姿估计值。

得到导弹与导发梁挂点之间的相对位姿后，读取举升机构各关节的传感器数据，经运动学解算可知导弹在挂弹装备基坐标系的当前位姿。以导发梁挂点位姿为目标位姿，进行轨迹规划，控制举升机构完成挂接动作。

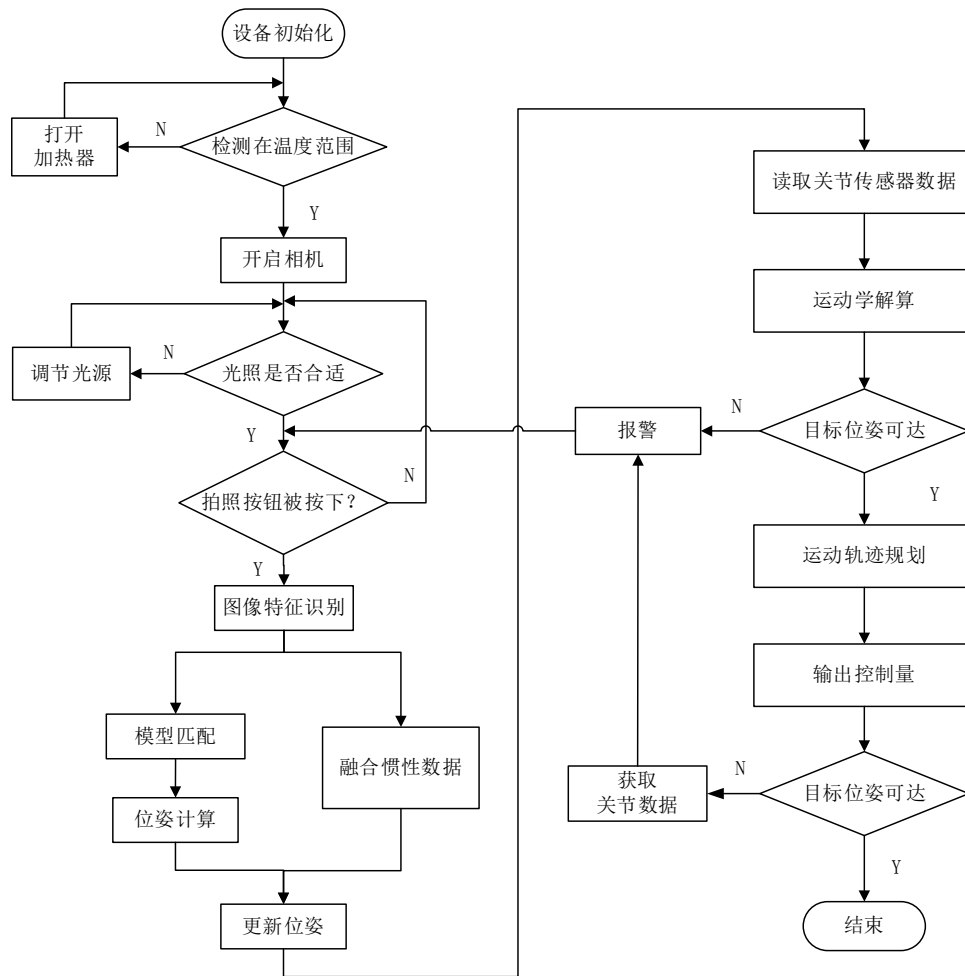


图 2 工作流程图

2 智能识别算法及运动控制方法

2.1 坐标系定义

在导弹的自动挂接过程中，滑块逐渐接近导发梁，最终与导发梁上挂点重合。从控制的角度描述该挂接过程，即在挂弹装备的基坐标下将滑块坐标系调整到与导发梁坐标系姿态一致，并运动到导发梁坐标系所在位置。该过程在数学上用姿态转移矩阵表示，确定滑块与导发梁之间的相对位姿即是求取导发梁坐标系相对于滑块坐标系的位姿转移矩阵。挂弹装备的各坐标系定义如图 1 所示：

挂弹装备基坐标系 C_{base} ：原点位于挂弹装备举升机构与车体的联接关节处，Z 轴重合于机构的摆动关节轴线，指向天空。

滑块坐标系 C_x ：即导弹滑块坐标系，原点位于滑块上表面中心点处，Z 轴垂直于滑块上表面，指向天空。

导发梁坐标系 C_y ：原点位于导发梁下表面的挂点中心处，Z 轴垂直于导发梁下表面，指向天空。

设备坐标系 C_{equ} ：即智能识别设备的坐标系，原点为设备的几何中心，Z 轴垂直于设备上表面，指向天空。

2.2 图像识别原理

通过视觉模块中采集导发梁和滑块的图像，经过滤波、边缘检测、特征提取、目标识别、三维

重建以及坐标计算等步骤，实现导发梁和滑块相对位姿的智能识别，图像算法的详细流程如图 3 所示。

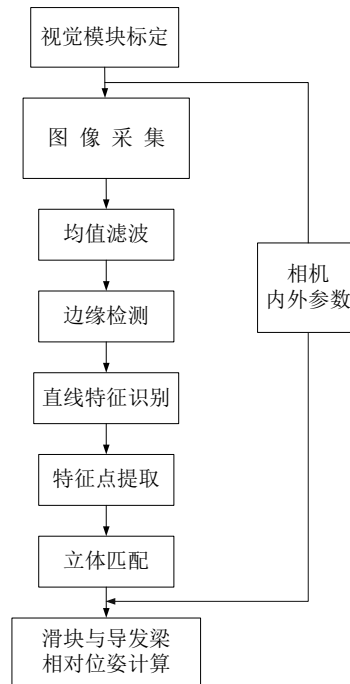


图 3 图像识别算法流程图

在进行图像处理前，需要对视觉模块进行标定，获取相机的内参和外参，以用于后续相对位姿解算。以导发梁为例，图像采集完毕后，首先采用均值滤波消除背景和噪声造成的干扰。利用优化的 Sobel 算子实现边缘检测，经过 3×3 的卷积模板，对图像每个像素的横向及纵向灰度值 G 进行加权：

$$G = \sqrt{G_x^2 + G_y^2} \quad (1)$$

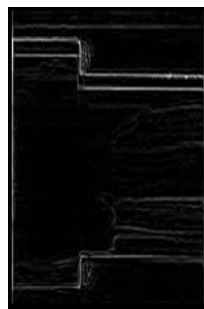
为了提高效率，使用不开平方的近似值：

$$G = \frac{|G_x| + |G_y|}{4} \quad (2)$$

最终，得到如图 4(b)所示的导发梁轮廓。对图像轮廓进行 Hough 直线变换，效果如图 4(c)，并对所有直线信息进行识别，剔除非特征直线后，效果如图 4(d)；直线交点作为识别对象的特征点（图 4(e)中红色标记点）。根据特征点在图像中的二维信息以及标定所得的相机内、外参数，进行立体匹配，得到特征点在视觉模块中的三维坐标。根据特征点三维坐标结果，计算得到滑块坐标系与导发梁坐标系的相对位姿。



a) 导发梁滑轨挂接点实物图



b) sobel 边缘检测



c) Hough 直线变换

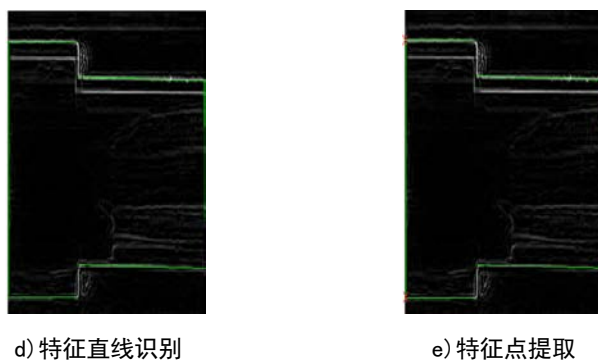


图 4 图像处理结果

2.3 多传感器融合方法

根据图像识别的结果进行位姿计算，得到导弹滑块与导发梁之间的相对位姿。融合视觉与惯性传感器的数据，由惯性数据对测量结果进行误差校正，提高位姿的测量精度。

智能识别设备启动后惯性传感器持续运行，记录测量过程中设备完整的惯性轨迹，通过分析每个时刻设备的轨迹数据，并结合视觉识别中的智能匹配模板共同完成导弹型号的确认为。其次，滑块和导发梁是相对静止的，设备相对于滑块运动，利用惯性传感器与图像处理结果的融合，实现导发梁与滑块相对位姿的精确测量。

具体的融合方法是：利用同一次测量中滑块与导发梁相对静止的约束条件，建立智能识别设备运动的数学模型，结合数学模型推导出卡尔曼滤波器的状态方程和观测方程，进而得到误差修正后的滑块与导发梁相对位姿。

2.4 运动学分析

通过建立挂弹装备举升结构完整的数学模型^[6-7]，在获得滑块与导发梁相对位姿后，由正逆运动学的分析，可以得到挂弹过程中举升机构各关节的起始位置与目标位置。运动控制系统结合数值插补与轨迹规划方法，得到举升机构完整的举升轨迹。

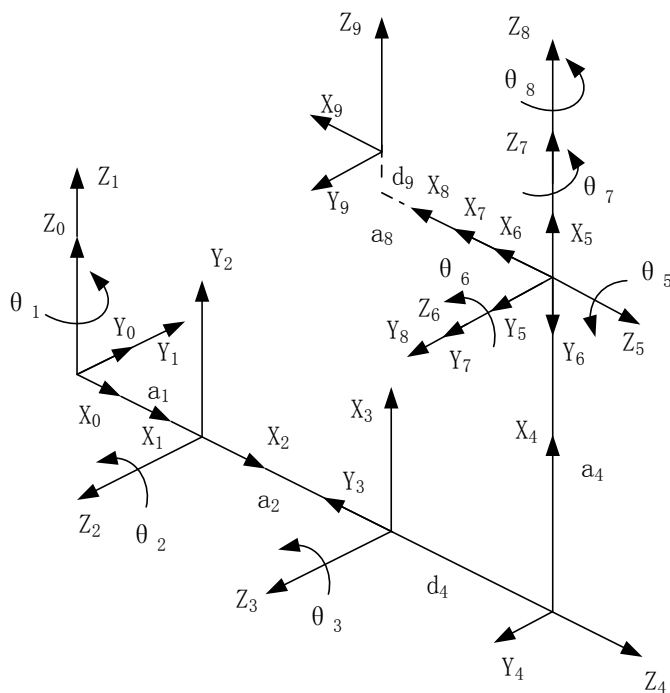


图 5 DH 模型

根据关节的尺寸与连接关系，建立如图所示的挂弹装备举升机构 DH 模型，其中相邻两坐标系之间关系由下列 4 个参数确定：偏距 d_{i+1} （从 X_i 轴沿 Z_{i+1} 轴指向 X_{i+1} 轴）、转角 θ_{i+1} （绕 Z_{i+1} 轴沿逆时针方向从 X_i 到 X_{i+1} 的转角）、杆长 a_i （沿 X_i 轴方向从 Z_i 到 Z_{i+1} 的垂直距离）和扭角 α_i （绕 X_{i+1} 轴沿逆时针方向从 Z_i 到 Z_{i+1} 的转角）。由 DH 模型中相邻连杆坐标系间的连接关系，通过矩阵运算导出相邻连杆间坐标系的变换矩阵 T_{i+1}^i ， i 从 0 开始，基坐标系即坐标系 0。

$$T_{i+1}^i = \begin{bmatrix} \cos \theta_{i+1} & -\sin \theta_{i+1} & 0 & a_i \\ \sin \theta_{i+1} \cos \alpha_i & \cos \theta_{i+1} \cos \alpha_i & -\sin \alpha_i & -\sin \alpha_i d_{i+1} \\ \sin \theta_{i+1} \sin \alpha_i & \cos \theta_{i+1} \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & \cos \alpha_i d_{i+1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

导弹滑块坐标系在挂弹装备基坐标系中的位姿，通过正运动学方法求解。根据挂弹装备各关节传感器反馈的关节角度与位置信息，求取从挂弹装备基坐标系到滑块坐标系的姿态变换矩阵。

从 DH 模型图中可知，滑块坐标系 9 在基坐标系 0 中的位姿变换矩阵为：

$$T_9^0 = T_1^0 T_2^1 T_3^2 T_4^3 T_5^4 T_6^5 T_7^6 T_8^7 T_9^8 \quad (4)$$

导发梁坐标系 d 在滑块坐标系 9 中的位姿变换矩阵由智能视觉识别算法给出，那么导发梁坐标系 d 在基坐标系 0 中的位姿变换矩阵为：

$$T_d^0 = T_9^0 T_d^9 \quad (5)$$

求解滑块坐标系位于导发梁坐标系所在位姿时，挂弹装备各关节的对应角度与位置是典型的逆运动学问题。对于 6 自由度的举升机构来说，运动学反解非常复杂，一般没有封闭解。但如果机构满足 Pieper 法则两个充分条件中的一个，就能得到封闭的运动学逆解：

- (1) 三个相邻关节轴相交于一点；
- (2) 三个相邻关节轴相互平行。

挂弹装备举升机构的模型恰好满足 Pieper 法则的第一个充分条件，因此在求取举升机构逆解的过程中，应用 Pieper 法则将位置与姿态的自由度分离，通过姿态信息求解共轴线的关节角度；然后利用机构本身的运动约束关系简化模型，通过矩阵的逆运算求解其余关节角度。再由约束关系简化后的模型，根据各关节运动范围的限定，得到在该定义域内，值域与定义域的唯一对应关系。

2.5 基于模糊 PID 的轨迹控制

重型挂弹装备的举升机构各关节转角的变化由各回路液压缸活塞杆位移来驱动。整个举升机构液压结构复杂，进液流量到活塞杆位移再到各关节转角的转化受传动比等许多因素的影响，系统辨识难度大，准确数学模型很难建立。其次，采用的电液比例系统在流体动力学及电磁转换方面具有特殊性，各类文献建立数学模型时采用了很多假设和理想值，而且真实工作环境下存在着无法建模的未知干扰与误差，简单的数学模型难以全面地描述系统特性，准确的高阶非线性模型的建立又非常复杂^[8-9]。

若采用传统的 PID 控制，经常会因为电液系统或外部负载的一个微小改变，造成 PID 的参数不再适用，使系统产生震荡。为解决举升机构的电液控制问题，引入不依赖精确数学模型的模糊控制方法。依据调试的经验和先验知识，经数据处理形成若干条模糊规则，仿照人脑的模糊推理过程做出决策，对 PID 控制器的参数进行模糊自适应的动态调整，控制器结构如图 6 所示。

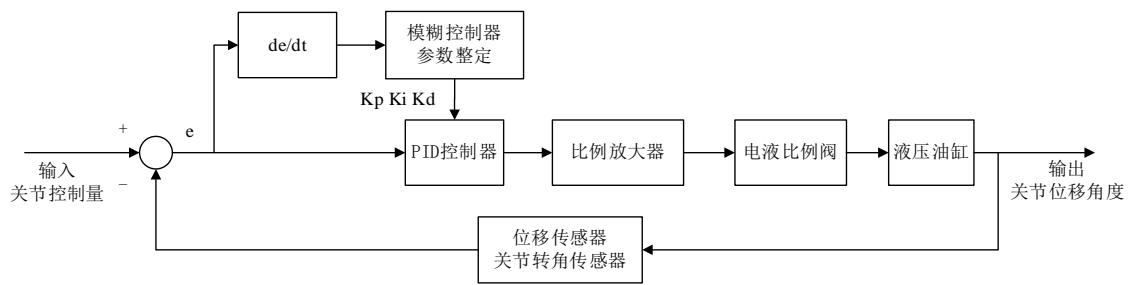


图 6 模糊 PID 控制器结构

3 实验结果

为了验证智能识别设备的检测精度及自动挂接的可行性，在实验室环境下搭建模拟试验平台，以导发梁模型、导弹滑块模型作为被检测目标，使用高精度的六自由度 FANUC M-20iA 机器人来模拟挂弹装备举升机构。利用已标定好的智能识别设备检测滑块和导发梁的相对位姿，实验场景如图 7 所示。

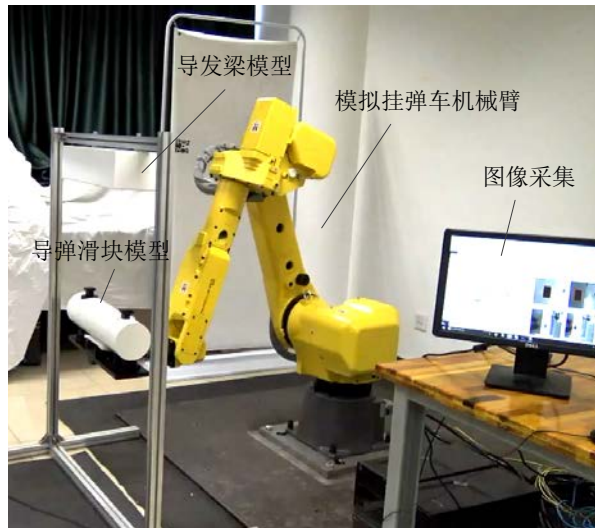


图 7 试验场景

采用拟水平法均匀重复试验方式，同时对精度和检测速度进行测试。试验因素为 X、Y、Z 轴平移量、俯仰角、滚转角、航向角。将挂弹装备举升机构各自由度的运动范围扩大 1.5 倍，并做均匀分布处理，用作试验因素的数值。

实验过程如图 8 所示，每次试验前先将导弹模型和导发梁模型进行对接，根据试验表中各自由度的行程，控制机器人将导弹下降并偏移到指定位置，使用智能识别设备检测，并将检测结果和行程设定值进行比较。



a) 初始对接状态



b) 导弹下降偏移过程



c) 分析检测结果

图 8 实验过程

试验结果如图 9 所示, 识别导弹与导发梁挂点的成功率为 100%, 位移检测精度 $\leq \pm 2\text{mm}$, 角度检测精度 $\leq \pm 3^\circ$, 平均检测时间为 3.54s, 最长检测时间为 5.23s。试验结果表明, 导弹的当前位置和挂接位置处于举升机构的运动范围内时, 检测设备均能够有效地检测, 并且具有较高的精度和较快的检测速度。

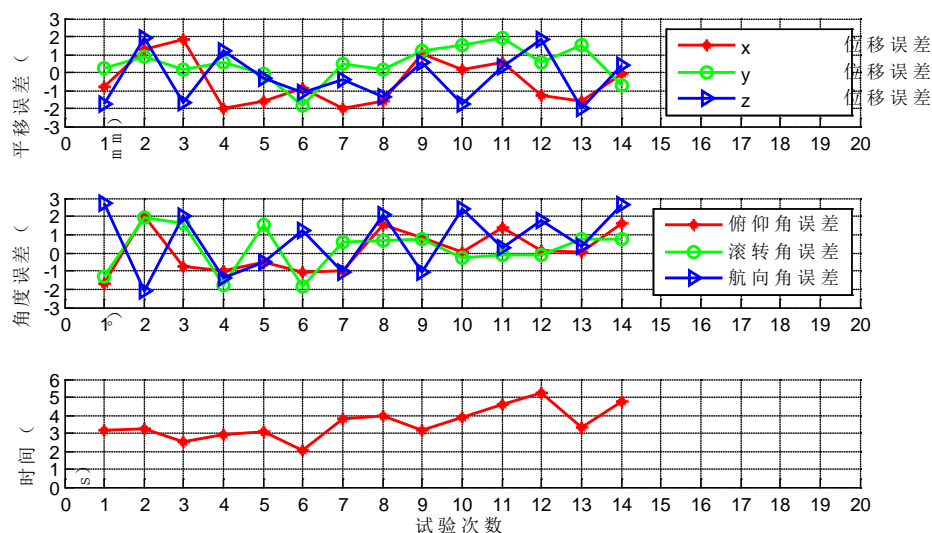


图 9 拟水平均匀重复试验结果

4 结论

针对当前国内重型挂弹装备操作效率低、安全性差、劳动强度大等问题, 本文基于机器视觉、建模匹配、惯性测量、模糊控制等方法, 提出了一种智能识别与自动挂接技术。通过模拟试验表明, 采用基于多传感器融合的导弹智能识别与自动挂接技术可行, 挂点识别准确率高, 位姿测量精度高, 挂接轨迹平滑流畅。相比传统方式, 采用该技术能够显著地提高挂接效率。

研究发现, 液压举升机构的精确自动控制对传感器的精度、电液比例阀的性能提出了较高的要求。加上重型挂弹装备负载大, 导致液压举升机构呈现出一定的柔性, 这将增加控制系统设计的复杂程度, 而采用电驱的挂接装备在可控性、刚性以及精度上都具有较大优势。电驱挂接装备是未来挂弹装备的发展趋势, 随着相关研究的不断展开, 将进一步研究智能识别及自动挂接技术在电驱挂接方面的应用。

参考文献

- [1]郭立红, 于洪君, 陈健. 机载制导武器地面设备概述[J]. 光机电信息, 2011, 28(11):13-19.
- [2]王意. 我国军用航空保障车辆液压技术的成就及其模块化、车族化的发展前景[A]. 全国流体传动与控制学术会议暨 2008 年中国航空学会液压与气动学术会议[C]. 2008.
- [3]王瑾. [别样的驮马]挂弹车王意总设计师访谈录[J]. 兵器知识, 2007(5):26-28.
- [4]韦艺, 康锐, 程海龙. 军用飞机再次出动准备时间计算方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2008, 34(12):1415-1418.
- [5]沈铖武, 刘畅, 王志乾, 等. 全自动挂弹车相对位置测量方法[J]. 激光与红外, 2013, 43(7):790-793.
- [6]刘中新, 王占富. 挂弹车举升系统整体研究与运动仿真分析[J]. 兵工自动化, 2012, (04):35-38.
- [7]耿文涛, 武旭东, 刘虎, 等. 基于 Virtools 的战斗机挂弹仿真[J]. 飞机设计, 2009, 29(1):51-56.
- [8]王道臣. 四自由度电液控制运动平台的研制[D]. 浙江大学, 2011.
- [9]王志, 种洋, 刘清林. 臂式挂装车工作装置液压系统试验分析[J]. 流体传动与控制, 2008(3):17-20.

作者简介:

于坤洋(1974—), 男, 博士研究生, 工程师, 研究方向: 航空保障。

Tel: 13522308972

E-mail: kunyangyu@sina.com

王健(1969—), 男, 博士研究生, 副研究员, 研究方向: 智能计算与控制。

Tel: 010-82544566

E-mail: jian.wang@ia.ac.cn

刘漫贤(1986—) **【通讯作者】**, 男, 硕士研究生, 工程师, 研究方向: 航空航天智能装备。

Tel: 010-82544566

E-mail: manxian.liu@ia.ac.cn **【通讯邮箱】**

周曼娜(1975—), 女, 硕士研究生, 高级工程师, 研究方向: 航空地面保障。

Tel: 13021126820

E-mail: 13701212982@139.com