● 装配·检测

卫星智能装配系统机器人装配仿真及其高精离线编程

罗正平 刘 康 刘 峰 沈文发 马 赫 韩文鹏 刘昊一 林 峰
（航天科工空间工程发展有限公司，武汉 430407）

摘要：卫星智能生产线需满足多型号、多批次产品柔性共线生产需求，现场机器人示教已严重制约装配系统设备利用率及产能提升。本文通过使用3D点云扫描技术和Tecnomatix平台，建立智能装配线高精度数字孪生模型，实现仿真模型与现场实物基本一致。在仿真平台中提前充分验证机器人装配工艺，识别并优化产品与工艺设计，验证工装夹具干涉性及可达性，输出高精度机器人离线轨迹程序。结果表明，该方法获得的高精度机器人离线轨迹在导入现场机器人后可直接载入机器人应用，显著缩短现场机器人示教时间，降低工艺与质量风险，提高生产效率。

关键词：卫星装配；Tecnomatix平台；3D点云；机器人仿真；离线编程
中图分类号：TH164；V468 **文献标识码：**A

Satellite Intelligent Assembly System Robotics Assembly Simulation and High Precise Offline Programming

Luo Zhengping Liu Kang Liu Feng Shen Wenfa Ma He Han Wenpeng Liu Haoyi Lin Feng
(CASIC Space Engineering Development Co., Ltd., Wuhan 43700)

Abstract: A certain satellite intelligent production line needs to meet the flexible production needs of multiple models and batches of products, and on-site robot teaching has seriously constrained the utilization rate and production capacity improvement of assembly system equipment. This article establishes a high-precise digital twin model of an intelligent assembly line using 3D point cloud scanning technology and Tecnomatix platform, achieving simulation models and on-site physical objects. Fully validate the robot assembly process in advance on the simulation platform, identify and optimize product and process design, verify fixture interference and accessibility, and output high-precise offline robot trajectory programs. The results show that the high-precise offline trajectory of the robot obtained by this method can be directly applied after being imported into the on-site robot, significantly reducing the teaching time of the on-site robot, reducing process and quality risks, and improving production efficiency.

Key words: satellite assembly; Tecnomatix platform; 3D point cloud; robotics simulation; offline program

1 引言

卫星智能装配生产线涉及大量高精机器人定位拍照与识别、设备夹取与放置、导热脂涂敷、机器人末端工具快换等机器人自动化作业[1-3]。前期，以上轨迹由机器人工程师现场示教完成，单个舱板机装设备轨迹示教约 1 周。随着型号产品日益丰富，现有装配工位产能渐趋饱和，现场示教方式已经严重制约智能

基金项目：国防科工局“十四五”预先研究项目（D02***1）。
收稿日期：2024-06-16

装配系统设备利用率及产能提升[4]。

因此，面对日趋丰富的卫星种类带来的复杂装配工艺，本文通过研究“机器人装配仿真+高精度离线编程”技术，在虚拟环境下提前充分验证机器人装配工艺，识别并优化产品设计与工艺，输出高精度机器人离线程序直接现场应用，缩短现场机器人示教调试周期，降低可能存在的工艺与质量风险，提高生产效率。

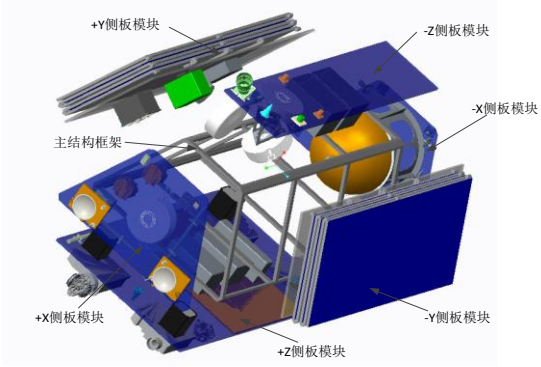


图 1　典型卫星组成示意图

2　小卫星智能装配方案

2.1　小卫星智能部装装配任务

典型小卫星产品采用模块化设计，分为主结构框架、+X 侧板模块、−X 侧板模块、+Y 侧板模块、−Y 侧板模块、+Z 侧板模块、−Z 侧板模块等，如图 1 所示。

智能部装生产系统主要用于卫星各舱板部组件的装配。不同型号整星舱板安装顺序存在差异，基本工艺流程如图 2 所示，主要包括物料配送、舱板固定、自动导热脂涂敷、设备自动定位并放置、人工紧固设备、阻抗测试、线缆安装、热控实施等工序。

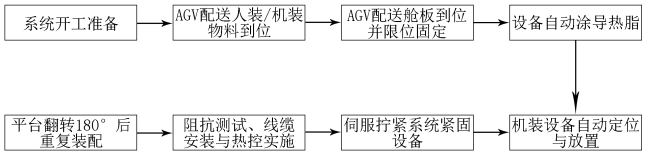


图 2　典型智能部装系统卫星舱板组件装配工艺流程图

2.2　小卫星智能部装系统

结合小卫星舱板组件部装的工艺流程和工艺特点，智能部装系统选用具有较高自动化率的人机协作方案，既可串行又可并行装配作业。该系统运用机器人技术，借鉴工业装配线自动化、集成化、柔性化的设计理念，采用全自动化物料配送、导热脂涂覆、螺钉涂胶方式，实现全自动力矩值采集、过程照片拍照、电阻值采集。该系统主要组成与功能介绍如下：

柔性装配平台：用于舱板组件装配时实现舱板 0°～180°翻转，并承载伺服拧紧系统、涂胶检测系统及阻抗测试系统。

机器人单元：用于设备抓取与放置、导热脂涂敷等作业。

快换工装放置架：用于放置机器人不同规格的夹具、换枪盘、夹具放置台等单元。

接驳单元：包括人工接驳站与机装设备站，用于 AGV 配送物料托盘接驳。

系统终端单元：包括 SCADA 与 MES 终端，用于装配过程的数字化工艺指导、质量数据采集记录与系统状态监测等。

安全防护单元：用于人员和设备的安全防护措施，包括激光扫描仪、安全地毯及围栏等。

3　智能部装系统机器人装配仿真与离线编程环境

3.1　3D 点云扫描环境

3D 点云数据通过 3D 激光扫描技术采集，该技术采用非接触式的测量方式，快速、精确、多方位地获取既有卫星智能生产线的完整点云数据。点云扫描环境由 3D 激光扫描仪、点云处理软件组成[5]。

本文点云数据采集所采用的设备型号为 FARO FocusS350 的 3D 激光扫描仪，由 3D 激光扫描仪、旋转云台、附件等构成。该激光扫描仪可进行水平 360° 垂直 300°的快速扫描（122 000～480 000 点/s），测距误差为+1 mm/25 m。扫描过程中若出现物体之间遮挡激光束无法扫描到目标，可增加多个扫描站点对同一目标进行多视点扫描，利用点云处理软件将各扫描站的点云数据拼接起来，得到高密度的车间点云数据，这些数据包含很多杂点、噪点，后期须进行过滤、删减、除噪等数据处理。3D 激光扫描仪及点云处理软

件界面如图 3 所示。

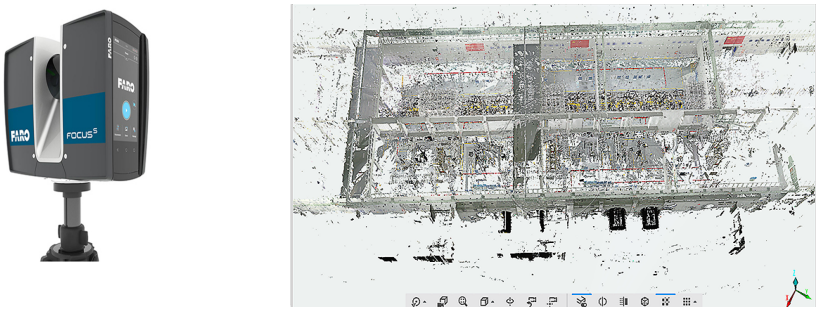


图 3 3D激光扫描仪及其扫描点云图

3.2 机器人装配仿真与离线编程环境介绍

过程仿真（Process Simulation，简称 PS）是 Tecnomatix 平台下的虚拟仿真软件，可实现机器人装配路径分析、装配顺序调整、离线编程、虚拟调试等[6]。卫星智能装配系统的机器人装配仿真与离线编程任务，具体实现方法如下：

a. 模型搭建。利用 3D 软件进行产品布局建模，并转换为轻量化的 JT 格式后，导入 PS 软件。根据负载及可达范围，选择合适型号的机器人，导入 PS 软件中，完成完整的模型搭建。

b. 虚拟装配。通过装配顺序规划，创建对应设备操作、机器人操作、物料流等，实现符合工艺顺序的设备自动装配流程。

c. 仿真分析。利用仿真工具对机器人装配任务进行可达性、干涉性等装配仿真分析等。

d. 改进优化。根据仿真分析结果，若出现干涉、盲操、不可达等问题，则优化工艺、更改工装等，消除工艺设计不合理风险，最终实现对装配工艺的改进。

4 基于 3D 点云扫描的高精仿真模型建立

4.1 智能生产线点云扫描

点云数据的采集与处理需要经过一系列的操作步骤，具体流程如图 4 所示。

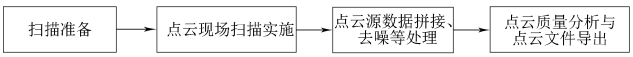


图 4 智能生产线点云扫描流程

a. 扫描准备与测点规划

结合车间布局图，在其上进行初步扫描点规划，布置扫描点的原则是在现场每站周围合理布置多个扫描点，确保现场各生产设备的信息都能被扫描获取到。

b. 现场扫描实施

现场扫描作业流程主要包括测量控制、扫描站布测、点云数据及纹理图像采集。

扫描站布测时应遵循如下原则：扫描站应设置在视野开阔、地面稳定的安全区域；扫描站的布设应尽可能覆盖整个扫描目标物，且设站数目尽量少；对于结构复杂、密集度高、通视困难的生产线体应适当增加扫描站；生产线体内布站不得架于设备之上，且连续相邻两站尽量通视；必要时可搭设平台架设扫描站。

点云数据采集应遵循如下原则：按要求设置点间距或采集分辨率，并布设扫描站点；设有控制点的区域应进行控制点的识别和精确扫描；扫描作业结束后，应将扫描数据导入计算机检查标靶数据可用性和点云数据覆盖完整性，对缺失和异常数据，应及时补扫。

纹理图像采集应遵循如下原则：纹理图像像元尺寸应≤2 mm；带颜色采集的点云扫描应尽量安排在白天光线明亮时进行，光线过暗或能见度过低，须开启现场照明配合，必要时另设灯光设备；尽量避免人员走动以及物体移动。

c. 扫描数据处理

扫描数据处理流程包括数据处理、点云拼接、坐标系转换、彩色点云制作、除噪/杂与抽稀、数据输出。

数据处理。数据处理时应选择全景图像数据，通过软件映射至相应的点云数据上，制作完成的彩色点云应真实且清晰反映扫描目标物的颜色、图案、结构

特征等，无明显色差。

点云拼接。在拼接之前要先导入测量点，测量点信息主要包括车间内特定标识物（标识点、标识球等）的坐标。根据不同的作业方式，可选择标靶、标靶和控制点结合、公共特征进行点云数据的拼接。

去除噪点。除噪/杂与抽稀应符合下列规定：点云数据中存在脱离扫描目标物的异常点、孤立点或与目标物无关的点时，应采用滤波和人为方式进行除噪、除杂处理；点云数据抽稀应不影响目标物特征的识别与提取，且抽稀后的最大点间距≤6 mm。

点云数据输出。点云数据输出应符合下列规定：点云数据输出格式为*.pod，文件以字母或阿拉伯数字命名；输出并经格式转换的点云，其色彩、目标物特征不得失真；点云数据按厂房结构、生产线体分区导出，所有导出的分区点云应保证同一参考系；所有原始点云数据应保存归档，并保证数据完整性。

4.2　高精数字孪生模型建立

仿真资源数模导入与初步布局。将智能生产线各类仿真资源数模按标准放入仿真后台后导入 PS 软件，根据生产线布局图调整各类资源位置，完成数字孪生模型初版建立。

点云数据导入。将已完成处理的点云数据放置在 PS 软件的项目后台 sysroot 路径下的 Point Cloud 文件夹并设置软件访问路径。在 PS 软件中插入点云文件，即可完成点云文件的导入，如图 5 所示。通过软件点云编辑功能，可对点云进行区域划分，实现分区显示，以提升仿真环境的流畅性及工作效率。

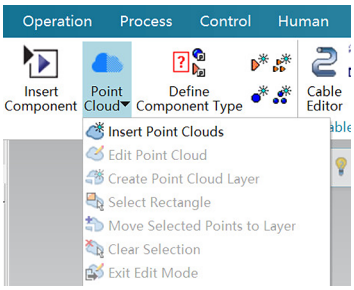


图 5　点云路径设置、导入与编辑

高精仿真模型建立。以厂房立柱等公共特征为基准，将点云中基准与数字孪生模型中基准重合，再对单个设备选取特征点，将仿真资源数模平移至与点云重合。

5　智能装配系统机器人装配仿真

5.1　工艺规划仿真验证

工艺规划验证主要包括机器人可达性验证、装配顺序合理性验证（干涉性）、节拍分析验证 3 个方面。

a. 机器人可达性验证

机器人可达性分为机器人安装位置可达和在安装位置处关键工艺点机器人关节可达 2 种。

机器人安装位置可达：经验证，在 2 000×2 000 的九宫格中，有 3 个位置能满足现有布局。当前机器人处于可达位置（蓝色带 x 位置）；然后在可达位置上对机器人各工艺点姿态进行分析，确保机器人预留足够余量。机器人安装位置评估如图 6 所示。

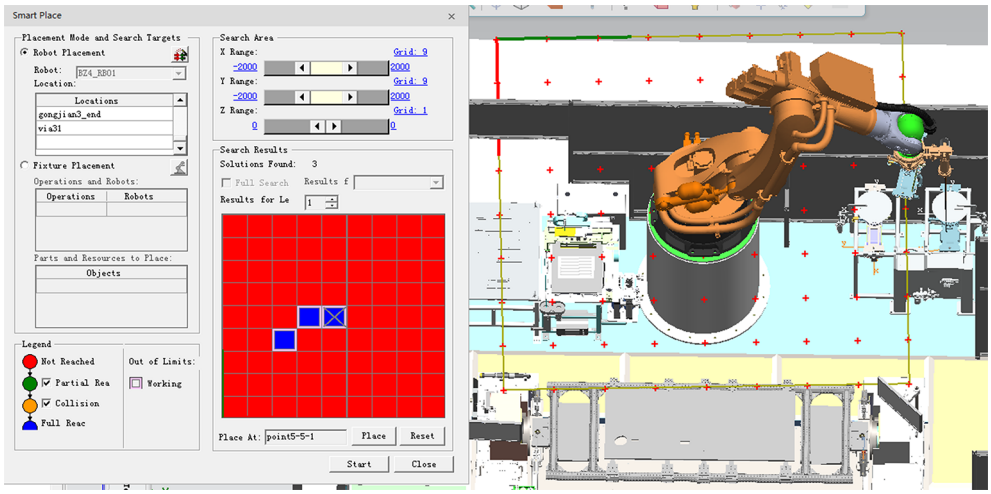


图 6　机器人安装位置评估

机器人关节可达性：经验证，机器人在拍照位置、抓放件位置、抓手换装位置等均满足工艺需求，图 7 为其拍照位验证结果。

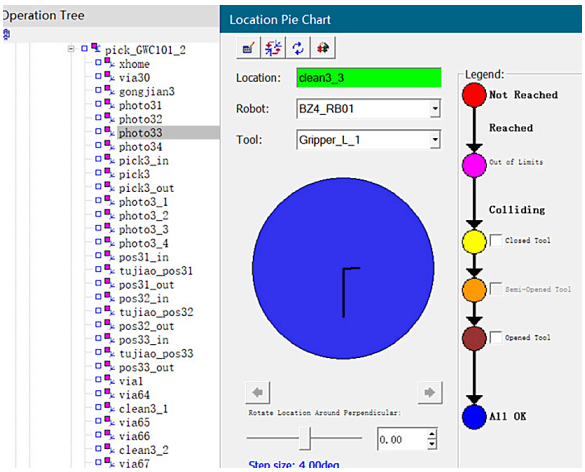


图 7　机器人工艺点可达性分析

通过机器人安装位置可达，初步选取机器人安装位置，结合工艺点可达性分析、工艺点前后路径点规划，确定机器人最终安装位置及安装高度，机器人周边设备需避开机器人路径。

b. 装配顺序合理性验证（干涉性）

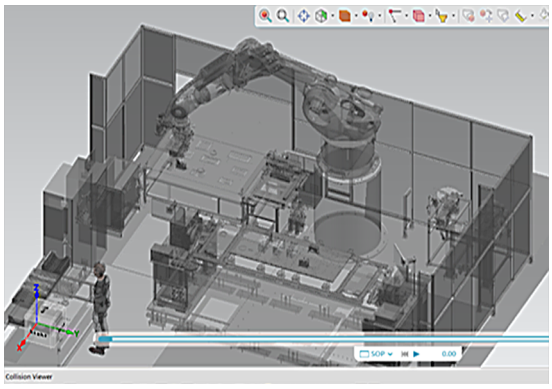


图 8　干涉性分析

通过干涉验证，可分析按原规划的装配顺序装配，工具与产品、产品与产品、产品与设备等在装配过程中是否存在干涉或干涉风险，并优化装配顺序，从而避免装配过程中干涉或降低干涉风险，确保有问题的布局及工艺顺序、有干涉的设备在完成优化后应用至现场，如图 8 所示。

c. 节拍分析验证

生产节拍验证对产品产能分析至关重要。通过仿真分析可将各工艺流程分解生成甘特图，确定装配操作所需时间，然后对机器人轨迹进行合理规划，配置机器人 RCS 控制器，计算机器人运行时间，从而得出节拍，如图 9 所示。

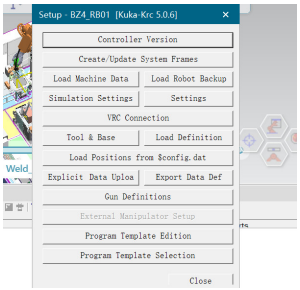


图 9　机器人 RCS 配置

5.2　SOP 仿真验证与作业指导视频输出

对整个工艺流程进行分解，搭建每个独立的工艺操作，按工艺顺序依次连接，实现完整工艺流程呈现，检验工艺流程与工时的合理性，形成完整的 SOP（Standard of Operation）工艺流程，如图 10 所示。SOP 的创建便于工艺流程梳理以及工艺视频录制，可以指导现场作业人员快速、直观、准确了解工艺流程。图 11 所示为机器人装配作业 SOP 仿真视频。

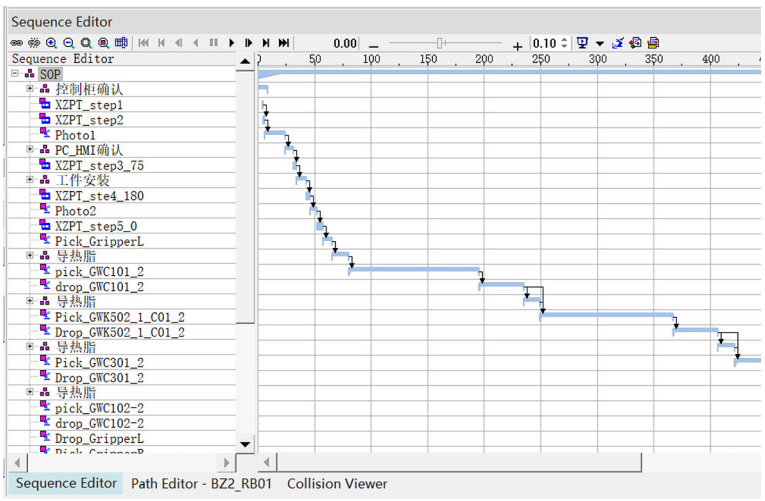


图 10　工艺流程甘特图

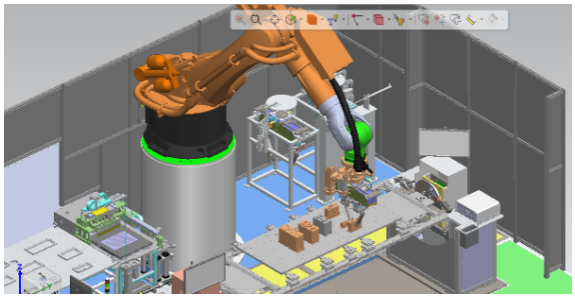


图 11　机器人装配作业 SOP 仿真视频

6　机器人离线编程与现场验证

6.1　机器人离线编程

通过机器人装配仿真验证，可以获得完整的机器人运行轨迹。为获取机器人轨迹程序，需要根据机器人型号进行相应的配置，如机器人关节配置、工具坐标系配置、基准坐标系配置、机器人运动方式配置，可以输出离线轨迹。机器人离线轨迹程序配置如图 12 所示，输出的机器人轨迹程序如图 13 所示。

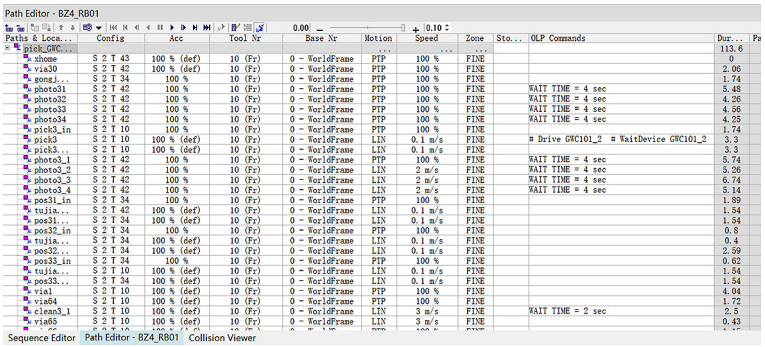


图 12　机器人离线轨迹程序配置

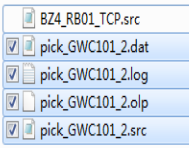


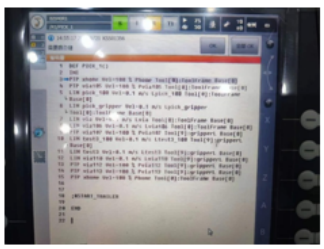
图 13　机器人离线轨迹程序输出

表 1　离线程序与理论轨迹偏差情况　　mm

验证对象	装配流程	抓取精度	导热脂精度	放置精度
设备 1	抓取→放置	5	—	5
设备 2	抓取→涂导热脂→放置	3	3	4
设备 3	抓取→涂导热脂→放置	4	5	4

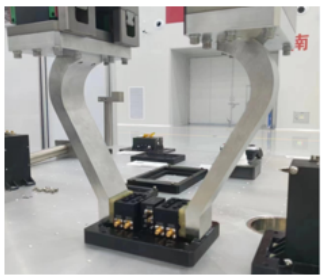
6.2　离线程序导入现场机器人验证

通过将离线轨迹程序导入到现场机器人示教器中，对运行轨迹进行验证。经离线导入的机器人轨迹精度与理论轨迹偏差如表 1 所示，现场轨迹验证情况如图 14 所示。可见，离线程序精度均在±5 mm 内，在现场视觉识别相机的可识别视野范围 50 mm×50 mm 内，满足工艺使用要求。此外，对比传统现场示教时间，单个设备抓取→放置的时间约为 40 min，抓取→涂导热脂→放置的时间约为 80 min，而经离线输出的轨迹程序导入现场验证主要包括离线导入机器人控制器时间为 2～5 min，离线程序现场运行验证的时间为 35～40 min，且这部分时间与机器人装配的设备数据关系不大，因此现场轨迹示教效率提升超 75%。

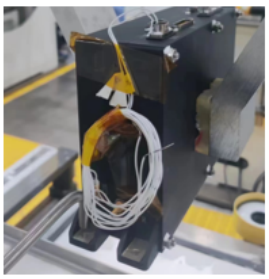


a　导入示教器的离线程序

b　设备 2 导热脂涂敷轨迹验证



c　设备抓取精度验证



d　设备放置精度验证

图 14　离线程序现场轨迹精度验证

7 结束语

通过机器人装配仿真技术手段，将传统只能在工艺、制造阶段发现的若干问题提前到设计阶段解决，降低了潜在问题出现的概率，有效减少了产品研制过程中实物试装次数，提高了产品装配效率和质量可靠性。通过高精度机器人离线编程技术的应用，使得工艺人员可以在虚拟环境中合理规划机器人装配工艺，优化装配顺序和干涉区设置，评估生产节拍，提前预判现场改造调试问题并解决，确保现场改造各环节顺利进行。高精度的离线程序在导入现场机器人后只需将离线程序进行微调和在线验证便可直接投入使用，消除了因现场长时间机器人示教工作而带来的安全隐患，使机器人程序便于规范管理，提升了装配质量，缩短了现场改造调试周期。

参考文献

[1] 高飞 . 智能制造在卫星批量生产中的应用与发展[J]. 国际太空，2021(11)：38-42.

[2] 张名毅，邱增帅，马庆双 . 小卫星总装技术发展历程与展望[J]. 航天器工程，2021，30(6)：106-112.

[3] 姜钊，于辉，解晓莉，等 . 卫星整星智能制造关键技术及应用[J]. 航天制造技术，2020(6)：63-67.

[4] 潘慧君 . 机器人仿真软件及其在选型中的重要性[J]. 现代工业经济和信息化，2021(8)：162-164.

[5] 郝杰，李震帅，王亚娟，等 . 基于点云的数字化工厂在涂装通过性分析的应用[J]. 汽车工艺与材料，2021(2)：26-30.

[6] 高建超，常楠楠 . 基于 Tecnomatix 的机器人滚边虚拟调试研究与应用[J]. 制造业自动化，2019，41(6)：78-82.

（上接第71页）

assembly[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, 70(1): 621-633.

[5] 许谦，连培园 . 激光跟踪仪在大型双反射面天线型面在线调整中的应用[J]. 武汉大学学报（信息科学版），2022，47(3)：396-404.

[6] 闫俊杰，王红伟，于功敬，等 . 基于机器视觉的卫星天线模块自动精密装配技术[J]. 测控技术，2022，41(5)：23-32.

[7] 李云，张加波，韩建超，等 . 大型天线装配测量与实时反馈调整技术[J]. 南京航空航天大学学报，2019，51（增刊）：88-93.

[8] Du Jingli, Gu Yongzhen, Bao Hong, et al. Shape adjustment optimization and experiment of cable-membrane reflectors[J]. Acta Astronautica, 2018, 45(146): 192-201.

[9] Nie Rui, He Baiyan, Hodges D H, et al. Integrated form finding method for mesh reflector antennas considering the flexible truss and hinges[J]. Aerospace Science and Technology, 2019, 23(84): 926-937.

[10] Pan Minghui, Tang Wencheng, Xing Yan, et al. The clamping position optimization and deformation analysis for an antenna thin wall parts assembly with ASA, MIGA and PSO algorithm[J]. Precision Engineering and Manufacturing, 2017, 18(3): 345-357.

[11] Wang Wei, Lian Peiyuan, Zhang Shuxin, et al. Effect of facet displacement on radiation field and its application for panel adjustment of large reflector antenna[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2017, 30: 578-586.

[12] 宋祥帅 . 星载天线反射器高精度型面主动控制方法与实验研究[D]. 大连：大连理工大学，2021.

[13] Lian Peiyuan, Wang Congsi, Xue Song, et al. Future research trend for improving large reflector antenna service performance[J]. Engineering, 2021, 7(8): 1047-1050.

[14] 梁标 . 飞机装配几何特征自动识别与重构技术[D]. 南京：南京航空航天大学，2022.