DOI: 10.3901/JME.2021.15.015

面向在轨智能装配的太空桁架结构编码与靶标系统设计*

胡佳兴 赵常捷 郭为忠

(上海交通大学机械系统与振动国家重点实验室 上海 200240)

摘要: 太空桁架在轨装配目前主要依靠值守空间站的航天员完成,开展在轨智能装配作业是未来发展趋势。针对可拓展太空桁架的在轨智能装配问题,对前期所研制新型桁架结构进行装配信息定义,建立桁架装配体编码规则和数据结构,定量描述不同基本单元的特征差异、位姿差异与连接关系,实现杆件和多头球点两类基本单元的独立编号;基于机器人视觉装配作业要求,设计出一套用于存储和提取桁架装配信息的靶标系统,实现桁架基本单元编码与靶标ID之间的映射,将桁架组件的识别与装配信息的提取过程转化为靶标的识别与靶标映射表的检索过程。5 m直立桁架仿真算例验证了所提方法的可行性和有效性。

关键词: 太空桁架; 在轨智能装配; 桁架组件编码; 靶标设计

中图分类号: TH112

Component Encoding and Fiducial Marker System Design for the On-orbit Intelligent Assembly of Modular Space Truss Structure

HU Jiaying ZHAO Changjie GUO Weizhong

(State Key Laboratory of Mechanical System and Vibration, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240)

Abstract: Space truss on-orbit assembly is currently mainly completed by astronauts on duty at the space station, and it is a future trend to carry out on-orbit intelligent assembly operations. Aiming at the problem of on-orbit intelligent assembly of modular space truss, the assembly information of the new truss structure developed in the early stage is defined, the coding rules and data structure of the truss assembly are established, and the characteristic difference, position and pose difference and connection relationship of different basic units are quantitatively described. The independent numbering of the two basic elements of rods and multi-headed nodes is developed. In addition, based on the requirements of robotic visual assembly operations, a set of fiducial marker systems for storing and extracting truss assembly information is designed, and the mapping between truss basic element serial numbers and marker ID is established. As a result, the process of truss component identification and assembly information extraction is transformed into fiducial marker identification and mapping table retrieval process. The simulation example of a five-meter vertical truss structure verifies the feasibility and effectiveness of the proposed method.

Key words: space truss; on-orbit intelligent assembly; truss component encoding; fiducial marker design

0 前言

大型空间桁架结构是空间站系统等建设和运维的基础。大型空间桁架结构由于尺寸大和结构复杂而必须采取在轨装配的建造方式^[1],目前主要依靠

值守空间站的航天员完成,存在周期长、风险大、成本高等问题,引入机器人技术开展空间桁架结构的在轨智能装配是未来的发展方向。20世纪90年代NASA研究并开发了桁架在轨智能装配的实验平台^[2-3],后因故经历多年停滞,近几年桁架自动装配技术重新得到重视和发展^[4]。除NASA开展的相关样机试验^[5-7],日本有个别学者采用强化学习进行了探索^[8]。国内相关研究处于起步阶段,以机械臂对

* ZR 航天领域预先研究(040102)资助项目。20201230 收到初稿, 20210422 收到修改稿

小型 3D 打印桁架样机的装配实验为主^[10-11],以真实尺度规模的桁架装配为对象的研究暂未见报道。目前已有的桁架装配研究仍限于传统的装配规划以及局部算法的验证,零部件的模型信息与机器人感知并未引入同一框架考虑,桁架装配的灵活性和智能化有所欠缺。

随着机器人的结构设计与控制算法日益完善,以及人工智能的迅猛发展和应用,机器人智能装配这一议题日渐成为研究热点。所谓机器人智能装配^[9],是指机器人能不限于传统既定的“点到点”编程,以传感器对环境感知为输入,结合传感器信息处理与控制算法,输出期望的力与运动,自主地操纵装配对象完成装配任务。机器人智能装配一般可划分为三个阶段:零件的识别与定位、装配序列规划与路径生成以及装配操作,其中零件的识别与定位是首要步骤,该步骤目的是确认零件的身份信息以及位姿信息,为后续规划和装配操作提供可靠依据。实现零件的识别与定位的方法较多,其中包括基准靶标类方法,目前该方法将靶标引入机械臂装配作业中^[10-11, 16-19],其目的是标识零件位姿信息。采用人为预先设计的标识图案作为特征,根据靶标特征与零件的已知关系,可间接确定零件的身份和位姿。该方法不依赖复杂的图像特征,实时性强、定位精度高,但需要人为引入靶标与零件固连,且需保证靶标始终处于相机视野内。目前已有多种靶标方案^[12-13],其中 ArUco 靶标在 AR、相机校准和目标定位领域有广泛应用^[14-15]。

考虑到太空在轨装配光照条件恶劣,桁架结构复杂,处理器算力局限,基准靶标类方法具有显著优势。本文将基于 ArUco 靶标,依托研究团队前期研制的新型可拓展太空桁架结构,在装配体模型信息基础上定义桁架装配体的装配信息,在此基础上针对性地设计一套靶标系统,以实现桁架零件的身份信息与位姿信息的提取,并将其作为机器人智能装配的信息基础。根据预先给定的零件编码与靶标 ID 构成的映射表,如图 1 所示,不仅实现仅凭单个靶标即可获取零件的身份信息与位姿信息的功能,还能根据靶标信息提取装配信息以引导机械臂进行装配任务规划。本文提出的方法突破了仍停留在对单一种类简单零件的定位与识别的现有研究,实现对复杂桁架系统的整体描述与智能装配引导。

图 1 中实线箭头与顺时针循环表示的①~④步骤为桁架靶标系统的生成过程,根据桁架结构 CAD

模型,提取桁架装配体的装配信息,再根据桁架信息和靶标数量构建靶标映射表,从靶标映射表生成 ArUco 靶标字典,随后将靶标打印并贴附到基本单元表面;虚线箭头与逆时针循环表示的⑤~⑩步骤是靶标系统的解译过程,相机采集的图片经过靶标识别后,可输出靶标在对应字典的 ID,根据靶标 ID 在映射表中查找到对应的基本单元编号,从基本单元编号可解译出基本单元的基本信息,再结合基本单元在 CAD 模型中的装配信息,便可以指导机械臂执行装配操作。

图 1 桁架靶标系统整体流程示意图

本文首先进行可拓展太空桁架装配体与装配信息定义,接着讨论靶标系统的设计与编码映射,再介绍靶标系统的算法验证工作。

1 可拓展太空桁架装配信息定义

1.1 可拓展太空桁架结构

本文讨论的桁架结构如图 2 左侧所示,为研究团队前期研制的可拓展太空桁架的单元立方体装配体模型,包含四种零件(不计螺丝垫片轴套等配件):球点、球接头、杆接头和杆件(图 2 右侧)。球点是杆件与杆件之间的连接节点,形状为二十六面体,其中十八个正方形面有孔,可装球接头;杆件为长圆管,两端固连有相同朝向的杆接头;球点和杆通过分别固连在其上的球接头和杆接头相连,接头的连接方式采用径向对接方式,只需要将杆件两端接头分别与两端球接头对准、径向插入并自动锁紧,即可完成单根杆的装配。

图 2 可拓展太空桁架结构单元

1.2 桁架装配信息定义

为设计靶标系统，需要确定桁架装配信息。本文将桁架的装配信息定义为描述整个桁架装配体的数据结构。对于一个已知的桁架装配体，其装配信息是完全确定的；对于一组确定的装配信息，有且仅有一个桁架装配体与之对应。桁架装配信息由基本单元定义、基本单元编号、基本单元连接信息三部分构成。

1.2.1 基本单元定义

基本单元定义所存储的是桁架装配体组成单元的身份信息，不同的基本单元，其身份信息并不相同。考虑到实际装配情景，所有的球点都会预先装配球接头，因此构成桁架装配体的基本单元仅包含多头球点和杆件两类。对杆件来说，其结构差异仅来源于杆件长度，对一般的立方体单元，杆件只包含短杆、长杆、体对角杆三类。对多头球点来说，由于球点多面体的结构，以及接头装配方向的多样性，其结构差异将来源于三方面：接头数量、接头所在面与接头朝向。如图 3 所示，接头数量差异、接头所在面的差异和接头朝向差异所得到的多头球点结构是截然不同的。

图 3 基本单元的种类差异

为定量反映不同种类球点的差异，需要将球点的十八个带孔方形面按照一定规律编号，构成球点模板，而对每一个方形面，其接头朝向也分成八个标准方向(其中接头 0 方向与面 1 法向夹角在 $-\pi/2$ 到 $\pi/2$ 之间)，由此可以完全定义多头球点，如图 4 所示(面 18 位于面 1 正后方，图中未标出)。杆件则相对简单，取其标准长度(正方形面边、面对角线和体对角线)作为区分即可。

图 4 多头球点方形面展开模板与接头朝向模板

综合上述定义，多头球点和杆件可分别用如下

集合形式描述。

多头球点可定义为

$$N_i = \{c_i, f_i, d_i\} \quad (1)$$

接头数目

$$c_i = \{n | n = 0, 1, \dots, 18\} \quad (2)$$

接头所在面

$$f_i = \{face_1, \dots, face_{c_i}\} \quad (3)$$

式中， $face_1, \dots, face_{c_i}$ 为球点方形面 0, 1, 2, ..., 18 的一个组合。

接头朝向

$$d_i = \{direction_1, \dots, direction_{c_i}\} \quad (4)$$

式中， $direction_1, \dots, direction_{c_i}$ 为标准装配方向 0, 1, ..., 7 的一个排列。

杆件单元可定义为

$$S_j = \{l_j\} \quad (5)$$

其中杆件长度

$$l_j = \{l | l = 1, \sqrt{2}, \sqrt{3}\} \quad (6)$$

1.2.2 基本单元编号信息

基本单元的编号即基本单元在装配体内独一无二的编号信息，对应基本单元相对装配体的位姿信息和装配序列。针对不同的装配体结构，不同的编号规则，基本单元的编号自然不同。对于大多数的装配体，可以考虑建立如下坐标系(默认为右手坐标系)，其中 z 轴方向为装配体中轴线或最小包围椭球体的长轴， x 方向取 XOY 平面内任意一根杆件方向，则 y 方向则根据右手坐标系给出。

如图 5 所示，编号的遍历原则为：将装配体沿 z 轴切成有限层，每一层为一个桁架子装配体，包含处于同一平面的杆件和多头球点(统称为面装配体)，或者包含连接相邻两层面装配体的杆件(统称为片装配体)，在每个层内，从 $\theta = 0$ 到 2π ， $r = 0$ 至无穷的顺序遍历， θ 方向通过 z 轴采用右手定则确定，编号时球点和杆件分组编号，斜杆在短杆编号完成之后再行编号。根据上述规则，将所有层的基本单元完成编号，基本单元编号信息便完全确定下来。

上述编号过程可用伪代码表示如下。

(1) 初始化基本单元编号的存储变量。

(2) 按照总装配体-子装配体-零件的层级关系建立嵌套循环，遍历各基本单元。

(3) 将基本单元编号信息存储成表。

图 5 桁架装配体的分解与基本单元的编号规则

```

 $i=0, j=0, k=0$ 
 $sub\_Assembly=[]$ 
 $No\_Node=[]$ 
 $No\_Strut=[]$ 
For  $z=0:\Delta z:h$ 
  For  $r=0:\Delta r:R$ 
    For  $\theta=0:\Delta\theta:2\pi$ 
       $No\_Node[i] \leftarrow \{z, r, \theta\}$ 
       $i \leftarrow i+1$ 
     $sub\_Assembly[k] \leftarrow No\_Node$ 
     $k \leftarrow k+1$ 
   $No\_Node=[]$ 
For  $z=0:\Delta z':h$ 
  For  $r=0:\Delta r':R$ 
    For  $\theta=0:\Delta\theta':2\pi$ 
       $No\_Strut[j] \leftarrow \{z, r, \theta\}$ 
       $j \leftarrow j+1$ 
     $sub\_Assembly[k] \leftarrow No\_Strut$ 
     $k \leftarrow k+1$ 

```

1.2.3 基本单元连接信息

在得知基本单元定义和编号信息后, 还需要基本单元连接信息才能完整确定一个桁架装配体, 所谓连接信息, 即各基本单元互相连接的方式与对象, 不同的桁架装配体, 即便基本单元组成一致, 其连接信息也大不相同。考虑到桁架结构的客观要求与实际应用场景, 基本单元的连接需要满足以下约束条件。

- (1) 接头约束: 球点(杆)只能与杆(球点)连接, 且任一球点(杆)至少要与两个杆(球点)连接。
- (2) 空间约束: 基本单元之间不能发生干涉。
- (3) 刚体约束: 杆件长度必须与球点距离相匹配。

满足上述三条原则, 连接信息即可定义为每根

杆两端所连接的多头球点的球点编号与接头编号。遍历所有杆件后, 得到所有杆件分别对应的一对球点编号与接头编号信息, 以及装配模式, 即为桁架装配体完整的连接信息。

1.3 桁架装配体的数据结构

上述装配信息是对桁架装配体规范化的定性描述, 若要使其在后续的装配引导算法中发挥作用, 则需要对装配信息进行编码, 并与基本单元上的靶标关联。考虑到基本单元仅包含多头球点和杆件两大类, 而靶标必须贴附在基本单元上才能起到作用, 故需对装配信息进行分类和重组, 以得到桁架装配体的数据结构(数据结构的含义是与任意确定的桁架装配体对应的一套编码), 数据结构如表 1 所示。具体规定如下所述。

(1) 子装配体编号: 即面装配体和片装配体的编号, A 代表面装配体, B 代表片装配体。

(2) 基本单元信息: N 代表多头球点, S 代表杆件。

(3) 球点模式: 球点模式的引入目的是简化多头球点的编码, 在目前已有的桁架结构(尤其是大型装配体)中, 大多数多头球点通过刚体变换和镜像得到, 其结构是完全相同的, 将大多数相同结构的基本单元统一编码可以大幅提高编码的紧凑程度。同一种球点模式的球点接头数量、每个接头位置和接头装配方向都是相同的。

(4) 靶标信息: 此处规定靶标仅可贴附在球点不含球接头的正方形面上, 且靶标在任意正方形面的位姿一致(靶标坐标系 y 方向与方形面 0 方向重合), 满足上述规定时, 靶标信息仅包含靶标所在面编号, 一般情况下为了让摄像头能够从尽可能多的角度检测到靶标, 球点上靶标数量应至少包括两个。

表 1 桁架装配体的信息结构

信息名称	信息格式	示例
装配体信息	装配体代号	5m-01
多头球点信息	子装配体编号+球点编号+球点模式+靶标信息	A02-N01-03-02
杆件信息	子装配体编号+杆件编号+杆类型+杆件左右端连接的球点编号和接头编号	B03-S02-01-03(05)-04(12)

2 靶标系统设计与装配信息提取

2.1 靶标系统设计与生成

在文献[20]中, 靶标被简要分成存储型和识别型两类, 本文选用的 ArUco 靶标属于识别型靶标,

相较于以二维码为代表的存储型靶标识别效果更好,鲁棒性更强,而且 ArUco 库集成于 OpenCV 库中,使用更为方便。ArUco 识别图案由二进制方阵构成,包含宽度为 1 的黑边以及内部编码矩阵,其中黑边用于加速识别,内部编码矩阵用于判断靶标信息与误差校核。在 ArUco 靶标库内,一系列不同图案(内部编码矩阵构成的黑白图形)构成字典(Dict),每个图案在该字典内都有唯一的 ID 编码,ArUco 库调用识别程序得到的靶标识别结果也是靶标对应的 ID,ArUco 靶标识别的图像处理部分主要由三个步骤组成,首先对输入图像进行自适应阈值图像分割、滤波处理和轮廓提取,以筛选出候选区域,再根据预定义字典对候选区域图案进行匹配和校核,最后将符合条件的候选区域作为识别结果,从中可提取出靶标 ID 与靶标四角点坐标处理计算^[13]。采用 ArUco 靶标进行桁架装配信息存储有两种途径:

方法一:自定义靶标,即对桁架装配体数据结构的各基本单元编码采用二进制数据存储,排列成矩阵形式,生成对应的一系列靶标图案,利用 ArUco 库包含的自定义靶标函数,将靶标图案组成字典存储下来。解码时,根据靶标 ID 确定靶标编码矩阵,将编码矩阵还原成基本单元编号。

方法二:建立靶标映射表,即靶标根据所需数量直接继承 ArUco 内置靶标,并将靶标与基本单元编号建立映射表。解码时,根据靶标 ID 查询装配体数据结构对应的映射表,获取基本单元编号。

图6 靶标生成方法对比

方法一相较方法二更为简单直接,但直接采用二进制数据存储基本单元编码所得到的靶标缺少最小汉明距离^[21]的约束,字典内相邻靶标图案会较为相近,导致识别准确率大大下降。方法二映射表的引入可避免这一问题。并且,方法二的映射表可以很容易地扩展到任意结构的桁架装配体情况,不需要考虑基本单元编码转化为 ArUco 库支持的正方形二进制编码矩阵可能遇到的额外问题(码位不足或冗余)。因此,综合考虑两种方法的优劣,基于靶标映射表的方法二更符合桁架智能

装配的要求。

2.2 桁架装配信息提取

采用方法二建立映射表首先需要确定基本单元对应的靶标数量,根据靶标数量确定靶标字典大小,随后建立包含所在球点编号的靶标编号与靶标 ID 的一对一映射表。解码时,根据视觉识别得到的靶标 ID 检索映射表,从映射表中的靶标编号提取出基本单元编号,随后根据基本单元编号在装配体信息数据结构中检索所需的装配信息。

根据机械臂视觉装配要求,所需装配信息可分为以下几点。

(1) 待求基本单元相对桁架装配体坐标系的理想位姿。

(2) 待求球点靶标(接头所在面)相对待求球点的理想位姿。

(3) 待装配球接头相对待装配杆件接头的理想位姿。

其中 1 部分(图 7a)装配信息可根据基本单元编号规则还原,2 部分(图 7b)可根据球点已知 CAD 模型,结合杆件靶标信息提供的球点信息计算得出,而 3 部分(图 7c)待求接头相对机械臂的位姿则需要多个坐标系之间转化求得。此处定义如下坐标系。

桁架坐标系: {桁架基坐标系} O_t 。

靶标坐标系: {球点靶标坐标系} O_{nm} 、{杆靶标坐标系} O_{sm} 。

多头球点坐标系: {球点中心坐标系} O_n 、{球点面坐标系} $O_n + f_{aceID}$ 。

由于接头形状较为复杂,球接头与杆接头的相对位姿宜通过靶标的相对位姿间接获取。已知图像中球点靶标与杆靶标的编码信息和位姿信息,由于靶标位于基本单元上,因此求待装配球点接头与杆件接头相对位姿等价于求当前装配杆接头靶标与球点靶标的相对位姿 $\{T_{sm}^{nm}\}_{ideal}$ 。欲求

$\{T_{sm}^{nm}\}_{ideal}$,则需要借助已知的球点形状结构信息。

在此引入位姿转换链,对任意球点,球点靶标相对球点中心的位姿变换 T_n^{nm} 、球点中心相对接头所在面位姿变换 $T_{n+faceID}^n$ 、接头所在面相对于杆件靶标位姿变换 $T_{sm}^{n+faceID}$ 均可根据 CAD 模型预先求得并存储下来,因此,对处在球点面编号为 i 的靶标,欲求其相对于待装配球接头所在面编号为 j 的杆件接头的位姿变换,可由位姿转换链求得,即

$$\{T_{sm}^{nm}\}_{ideal} = T_n^{nm} \cdot T_{n+faceID}^n \cdot T_{sm}^{n+faceID} \quad (7)$$

图 7 桁架装配信息示意图

2.3 桁架靶标系统解译流程

在完成靶标系统设计以及装配信息提取后,便可设计算法流程实现从靶标信息到装配信息的解译过程。程序运行开始时,将载入待装配的桁架装配体数据,包括预先定义好的靶标系统以及靶标映射表,并采用树状图进行桁架装配体数据结构的可视化。随后将根据用户输入确定所查询的装配信息类型。

考虑到实际装配过程与后续装配规划算法的兼容性,本文设计的算法流程提供编号查询和图像查询两种查询方式,其中编号查询对应第 2.2 节中定义的第一类装配信息,图像查询对应第二类和第三类装配信息。编号查询方法可在已知待装配基本单元编号时,为机器人提供待装配球点相对于桁架装配体的相对位姿,缩小机器人的搜索范围与定位成本;图像查询可在摄像机捕捉到基本单元靶标的条件下,为机器人装配提供准确的目标位姿信息。两种方法结合即可为桁架智能装配提供充分的装配信息来源,让机器人得以高效、柔性地执行桁架装配任务。

图 8 桁架靶标系统解译流程示意图

3 桁架靶标系统的算法验证

下面以 5 m 直立桁架为例,验证上述所定义的桁架装配信息与靶标系统算法。该直立桁架共包含 24 个多头球点、70 根杆件,受篇幅限制,本文仅展示第一个面装配体的基本单元编号以及映射表,如表 2、3 所示。

表 2 面装配体 A01 多头球点的靶标映射表

多头球点编号	靶标编号	靶标 ID(6×6)
A01-N01-01-01	N01-01	1
A01-N01-01-01	N01-02	2
A01-N01-01-01	N01-03	3
A01-N02-02-02	N02-01	4
A01-N02-02-02	N02-02	5
A01-N02-02-02	N02-03	6
A01-N03-03-03	N03-01	7
A01-N03-03-03	N03-02	8
A01-N03-03-03	N03-03	9
A01-N04-04-04	N04-01	10
A01-N04-04-04	N04-02	11
A01-N04-04-04	N04-03	12

表 3 面装配体 A01 杆件的靶标映射表

杆件编号	靶标编号	靶标 ID(4×4)
A01-S01-01-0118-0418	S01-1	1
A01-S01-01-0118-0418	S01-2	2
A01-S02-01-0110-0206	S02-1	3
A01-S02-01-0110-0206	S02-2	4
A01-S03-01-0218-0318	S03-1	5
A01-S03-01-0218-0318	S03-2	6
A01-S04-01-0306-0410	S04-1	7
A01-S04-01-0306-0410	S04-2	8
A01-S05-02-0214-0416	S05-1	9
A01-S05-02-0214-0416	S05-2	10

桁架装配体的数据结构可以用树状结构表示, 根据桁架基本单元编号, 结合 ArUco 自带靶标库, 可以生成一系列靶标图案, 如图 8 所示。在本文案例中, 一个多头球点对应三个 6×6 靶标, 一根杆件对应两个 4×4 靶标(分别位于杆件两端的杆接头附近)。ArUco 靶标识别程序识别出靶标在字典中的靶标 ID 时, 即可通过上表查出靶标对应的基本单元编号, 根据基本单元编号和装配体数据结构可以确定后续的装配信息。

图 9 桁架装配体数据结构与基本单元对应靶标

装配信息提取问题可分成如下三类。

(1) 根据基本单元编号, 确定其中心坐标系相对桁架基坐标系的位姿。

(2) 根据球点编号或球点靶标信息, 确定靶标面编号与接头面编号。

(3) 根据杆靶标和球点靶标提供的信息, 确定杆靶标相对球点靶标的理想位姿。

本文对上述三类问题均设计算法实现。其中 `node_query()` 与 `strut_query()` 函数可根据基本单元编号, 确定该编号对应的球点或杆相对桁架装配体基坐标系的位姿, `marker_id()` 函数调用 ArUco 库的识别程序, 提取出靶标图片中的靶标 ID, 根据映射表

查找出对应的基本单元编号, `find_nodeconnectors()` 与 `find_nodemarkers()` 用来根据球点编号确定球点接头和靶标所在的面编号, 判断当前装配的杆件与装配规划是否一致, `connector_query()` 用来确定杆接头靶标相对球点接头的理想位姿。如图 9 所示, 在测试程序 `test_query.py` 中, 程序可以根据用户输入加载五米直立桁架装配体的数据结构, 生成靶标, 根据基本单元编号查询其在桁架装配体中对应的位姿, 并从摄像头读取的图片中识别靶标, 提取所需的装配信息。

图 10 仿真程序结构图与结果

4 结论

可拓展太空桁架的在轨智能装配是未来发展方向, 具有挑战性和复杂性, 目前其研究仍处于起步阶段。本文对此开展了初步研究, 对桁架装配体装配信息进行定义, 设计出一套靶标系统用于存储和提取装配信息, 将记录装配信息的装配体基本单元编号与靶标 ID 建立映射关系, 实现装配信息的存储和解码, 将复杂的零件识别与装配信息提取步骤转换为简易的靶标识别与映射表检索过程, 并以 5 m 直立桁架为例对本文所提方法的可行性和有效性进行了验证。后续研究计划将桁架靶标系统拓展到其他类型桁架系统, 并对其进行仿真与实物样机验证。

参 考 文 献

- [1] BOWMAN L M, BELVIN W K, KOMENDERA E E, et al. In-space assembly application and technology for NASA's future science observatory and platform missions[C]// Space Telescopes and Instrumentation 2018: Optical, Infrared, and Millimeter Wave. International Society for Optics and Photonics, 2018: 1069826.
- [2] DOGGETT W. Robotic assembly of truss structures for space systems and future research plans[C]// Proceedings,

- IEEE Aerospace Conference. IEEE, 2002: 7-7.
- [3] WILL R W, RHODES M D. Automated assembly system for large space structures[C]// Cooperative Intelligent Robotics in Space. International Society for Optics and Photonics, 1991: 60-71.
- [4] XUE Zhihui, LIU Jinguo, WU Chenchen, et al. Review of in-space assembly technologies[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2020(10): 1-27.
- [5] DORSEY J, DOGGETT W, HAFLEY R, et al. An efficient and versatile means for assembling and manufacturing systems in space[C]// AIAA SPACE 2012 Conference & Exposition, 2012: 5115.
- [6] KOMENDERA E E, DORSEY J. Initial validation of robotic operations for in-space assembly of a large solar electric propulsion transport vehicle[C]// AIAA SPACE and Astronautics Forum and Exposition, 2017: 5248.
- [7] KOMENDERA E, CORRELL N. Precise assembly of 3D truss structures using MLE-based error prediction and correction[J]. The International Journal of Robotics Research, 2015, 34(13): 1622-1644.
- [8] SENDA K, TANI Y. Autonomous robust skill generation using reinforcement learning with plant variation[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2014, 6: 276264.
- [9] SCHOLZ-REITER B, FREITAG M. Autonomous processes in assembly systems[J]. CIRP annals, 2007, 56(2): 712-729.
- [10] YANG S, WEN H, HU Y, et al. Coordinated motion control of a dual-arm space robot for assembling modular parts[J]. Acta Astronautica, 2020, 177: 627-638.
- [11] LU Y, HUANG Z, ZHANG W, et al. Experimental investigation on automated assembly of space structure from cooperative modular components[J]. Acta Astronautica, 2020, 171: 378-387.
- [12] LIGHTBODY P, KRAJNÍK T, HANHEIDE M. An efficient visual fiducial localisation system[J]. ACM SIGAPP Applied Computing Review, 2017, 17(3): 28-37.
- [13] KROGIUS M, HAGGENMILLER A, OLSON E. Flexible layouts for fiducial tags[C]// IROS, 2019: 1898-1903.
- [14] ROMERO-RAMIREZ F J, MUÑOZ-SALINAS R, MEDINA-CARNICER R. Speeded up detection of squared fiducial markers[J]. Image and vision Computing, 2018, 76: 38-47.
- [15] GARRIDO-JURADO S, MUÑOZ-SALINAS R, MADRID-CUEVAS F J, et al. Automatic generation and detection of highly reliable fiducial markers under occlusion[J]. Pattern Recognition, 2014, 47(6): 2280-2292.
- [16] 陈杉. 物体位姿单目视觉测量系统的研究[D]. 天津: 天津大学, 2007.
- CHEN Shan. Research on monocular vision measurement system of position and orientation of object[D]. Tianjin: Tianjin University, 2007.
- [17] 初广丽. 航天器合作靶标自动识别关键技术研究[D]. 长春: 中国科学院研究生院(长春光学精密机械与物理研究所), 2015.
- CHU Guangli. Study on the key technologies of automatic identification for cooperative target on spacecraft[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2015.
- [18] HAMNER B, KOTERBA S, SHI J, et al. An autonomous mobile manipulator for assembly tasks[J]. Autonomous Robots, 2010, 28(1): 131.
- [19] 季旭全, 王君臣, 赵江地, 等. 基于机器人与视觉引导的星载设备智能装配方法[J]. 机械工程学报, 2018, 54(23): 77-86.
- JI Xuquan, WANG Junchen, ZHAO Jiangdi, et al. Intelligent robotic assembly method of spaceborne equipment based on visual guidance[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(23): 77-86.
- [20] AVOLA D, CINQUE L, FORESTI G L, et al. A practical framework for the development of augmented reality applications by using ArUco markers[C]// International Conference on Pattern Recognition Applications and Methods. SCITEPRESS, 2016: 645-654.
- [21] GARRIDO-JURADO S, MUNOZ-SALINAS R, MADRID-CUEVAS F J, et al. Generation of fiducial marker dictionaries using mixed integer linear programming[J]. Pattern Recognition, 2016, 51: 481-491
-
- 作者简介: 胡佳兴, 男, 1997 年出生。主要研究方向为机器人智能装配与机器视觉。
E-mail: jiaxing_hu@foxmail.com
- 赵常捷, 男, 1989 年出生, 博士研究生。主要研究方向为机构智能设计。
E-mail: zhaochangjie@sjtu.edu.cn
- 郭为忠(通信作者), 男, 1970 年出生, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为现代机构学与并联机器人学。
E-mail: wzguo@sjtu.edu.cn