

面向大尺度产品对接的位姿测量模式研究与应用*

杜福洲, 吴典

(北京航空航天大学机械工程及自动化学院, 北京 100191)

[摘要] 位姿测量作为大尺度产品对接过程的关键环节,具有方法多样、理论复杂的特点。依据不同的测量原理划分位姿测量模式,并研究各类测量模式的特点,有助于从理论上分析位姿测量过程,对位姿精确测量具有重要的意义。首先,结合大尺度产品对接过程将部件的位姿划分为绝对位姿与相对位姿;其次,通过分析相对位姿的测量原理,开展位姿测量模式的研究,提炼出3种基本的位姿测量模式,并以此为基础衍生出3种复杂的位姿测量模式;最后,结合具体的相对位姿测量案例对位姿测量模式进行了应用研究,为大尺度产品对接任务中位姿测量方法的选择与优化提供了理论依据。

关键词: 大尺度产品;数字化测量;测量辅助装配;位姿测量;室内GPS;视觉测量;超声测距

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2019.15.034



杜福洲

博士、副教授,主要从事制造系统工程、数字化装配与测量技术应用研究及装备研发等。

航空航天、船舶等领域的机械产品由于其在空间与时间尺度上跨度大以及工艺结构复杂,难以通过整体加工成型,因此采用模块化制造,最终再以依次装配的方式完成生产,由于大尺度产品的最终对接过程涉及到的部件尺度大、时间跨度长、人员数量多、精度要求高、资源消耗大,因此是生产过程中的关键环节^[1-3]。

传统大尺度产品的对接过程由于受限于测量以及定位技术,通常以部件的几何特征(如孔、轴线、平面等)为对接基准,采用模拟量的方式实现从设计图纸到产品实物的基准传递,再结合标准工装与光学仪器对部件进行配合定位与测量,最终经人工判定,得出各关键装配特征是否满足要求的定性结论。

在大尺度计量学快速发展的基础上^[4-5],测量辅助装配技术^[6-7]赋

予对接系统精确、定量地测量与调整大部件位姿的能力,取代了基于模拟量传递的传统对接方法。由于测量数据依赖于坐标系存在,而部件的空间状态在坐标系中以位姿的形式表达与传递,因此位姿成为大尺度产品数字化对接过程的核心协调对象。而位姿的精确测量作为大尺度产品数字化对接的前提,直接影响最终对接质量。

针对航空航天、船舶领域大尺度产品的位姿精确测量问题,国内外众多学者进行了大量研究。范斌等^[8]通过对比激光跟踪仪研究了基于iGPS(indoor Global Positioning System)的飞机大部件数字化对接工艺流程,并通过工程应用验证和分析了测量系统的精度;Drouot等^[7]构建了一种面向飞机大部件装配任务的由工业机器人与测量系统集成的装配单

*基金项目:国防基础科研项目(JCKY2016206B009, JCKY2017206B004)。

元,其中测量系统采用K-CMM相机以及激光雷达等,实现了高柔性、低成本、高精度的飞机大部件对接;孟少华等^[9]提出一种基于双目视觉定位的机器人辅助装配路径规划方法,通过对螺纹孔精准定位,确定机器人和航天器之间的相对位姿关系,生成装配序列;Pravesh等^[10]研究了卫星天线装配对接的精确测量技术,构建起基于近景摄影测量技术的天线测调系统,并与采用经纬仪、激光跟踪仪的方法进行了对比分析以及误差源分析。黄斐等^[11]分析了全站仪的组成及测量原理,结合船舶分段建造与合拢实际场景,研究了全站仪在船体分段合拢中的应用。Porathd等^[12]分别以全站仪和iGPS作为测量系统,以六自由度平台车为调姿系统,进行测量辅助的船体调姿试验,并且以并联调姿平台作为调姿系统,构建自动化装配对接系统的原理样机。

大尺度产品的位姿测量方法多种多样,然而针对不同的对接任务,位姿测量方法的选择缺乏相应理论依据,因此本文从位姿测量原理出发,展开对位姿测量模式的研究与应用。

位姿分类

在欧式三维空间中,位姿由 4×4 的矩阵表达:

$$T_{4 \times 4} = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_{3 \times 3} & \mathbf{t}_{3 \times 1} \\ \mathbf{0}_{1 \times 3} & \mathbf{1}_{1 \times 1} \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中, $\mathbf{R}_{3 \times 3}$ 具有3个自由度,是正交矩阵,用于描述姿态变换,此外还可以通过欧拉角 (α, β, γ) 、四元数 $q = q_w + q_x i + q_y j + q_z k$ 、轴角 (θ, n) 的方式表达; $\mathbf{t}_{3 \times 1}$ 同样具有3个自由度,用于描述位置变换。根据在工程应用中参考坐标系不同,将对接过程所涉及的位姿划分为绝对位姿与相对位姿。

将在基准坐标系下观测到的目标坐标系位置与姿态定义为绝对位

姿,其中基准坐标系通常是虚拟的,它不依附于实物,其意义在于将不同物体(目标坐标系)纳入同一个表述空间(基准坐标系),从而建立各物体之间的空间联系。而目标坐标系则与具体部件固连,作为部件局部坐标系存在,如图1所示。

在大尺度产品对接过程中,涉及若干坐标系,如装配坐标系、测量坐标系、部件坐标系、调姿坐标系等,坐标系之间若缺少统一基准作为参考,将难以有效传递信息,无法综合利用各坐标系内的数据来反映对接过程。因此将不同的坐标系纳入同一个基准坐标系下并考察其绝对位姿,才能够建立起它们的联系。

将在目标坐标系下观测到的另一目标坐标系的位置与姿态定义为相对位姿,它的意义在于能够更直接地描述物体之间的相对空间关系,如图2所示。

在大尺度产品对接过程中,涉及待装件与基准件两部分,各自拥有独立的局部坐标系,两个局部坐标系之间的空间关系就是典型的相对位姿,将其调整至目标值是整个对接过程的核心任务。

位姿测量模式

1 基本的位姿测量模式

大尺度产品对接过程涉及的诸多实物对象,通过坐标系之间的转换关系,建立基准的传递路径。一个最小的位姿测量系统包含基准坐标系、待装坐标系、测量坐标系与被测几何特征,分别对应于基准件、待装件、测量设备与被测对象。位姿测量的目标即是获得基准坐标系与待装坐标系之间的相对位姿关系,由于不同位姿测量方法中测量场构建方式不同,相关坐标系之间的关联方式则存在差异,体现出不同的特点。根据被测几何特征与部件坐标系的关系,可以将位姿测量方法划分为异坐标系、同坐标系、跨坐标系3种基本模式。

1.1 异坐标系模式

在该模式下被测几何特征一部分 (a_i) 存在于基准件坐标系,另一部分 (b_i) 存在于待装件坐标系,测量设备分别对不同被测几何特征进行测量,通过相应的位姿拟合算法,以测量坐标系为中间媒介,实现基准部件与待装部件相对位姿的测量,通常用于以点坐标为被测几何特征的位姿测量方法,如图3所示。该模式使

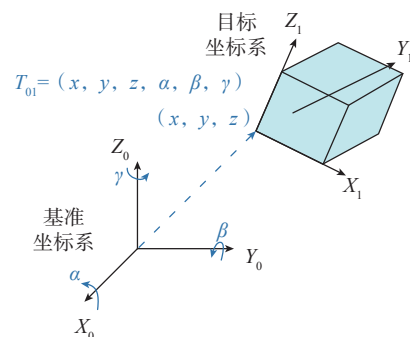


图1 绝对位姿示意图

Fig.1 Diagram of absolute pose

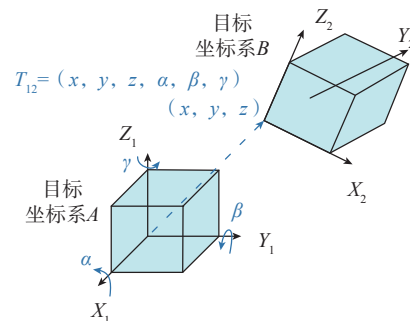


图2 相对位姿示意图

Fig.2 Diagram of relative pose

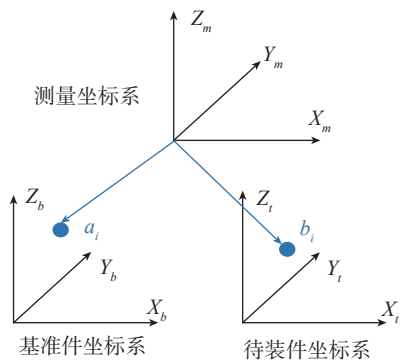


图3 异坐标系模式

Fig.3 Mode of different coordinate system

用前提是测量设备能够同时监测到两部分几何特征,对测量设备与部件相对位姿关系没有强制要求,适用范围广。但由于涉及很多被测对象,且需要先经过两次绝对位姿的拟合过程后,再求解相对位姿,因此位姿测量过程较繁琐。最终的位姿测量精度取决于两组被测特征的测量精度,以及位姿拟合的算法精度,误差传递路径长。该模式常见于激光跟踪仪、iGPS、全站仪、激光雷达、视觉摄影系统等测量系统,在测量场可测性的约束下,测量设备通常放置于对接部件外侧的地面上,典型应用场景如图4所示。

1.2 同坐标系模式

在该模式下所有被测几何特征(a_i)只存在于基准坐标系或待装坐标系,提前标定好测量设备与基准件/待装件之间固定的相对位姿关系,只需利用测量设备采集基准件/待装件上的几何特征便可拟合部件之间的相对位姿关系。该模式对部件相对位姿的测量方式直接,但需首先标定测量坐标系与基准件/待装件坐标系的关系,适用于测量设备相对基准件/待装件的位姿关系不变的情况,见图5。最终的位姿测量精度取决于测量设备相对基准坐标系相对位姿的标定精度、被测特征的测量精度以及位姿拟合算法精度,误差传递路径长。该模式常见于视觉摄影系统,测量设备固定于

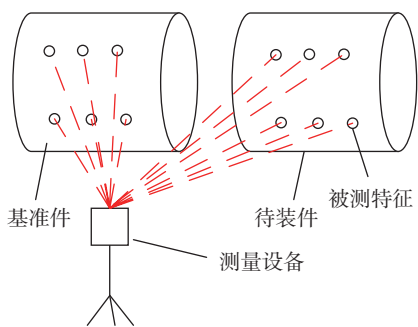


图4 异坐标系模式应用场景
Fig.4 Scene of different coordinate system mode

对接端面附近,典型应用场景如图6所示。

1.3 跨坐标系模式

在该模式下被测几何特征(a_i)不再是各对接部件上的独立特征,而是分别依附于不同对接部件上的相关几何特征联合而成的组合特征,例如分别处于不同对接部件上的相关特征点对之间的距离,如图7所示。通过若干组合特征的测量值,可以直接拟合部件的相对位姿,该方法需要测量设备具备监测组合特征的能力,位姿拟合原理较为复杂,但测量数据到位姿的传递路径最短,测量过程直接。最终的位姿测量精度取决于组合特征的测量精度以及位姿拟合算法精度,误差传递路径短。该模式常见于基于组网测距的位姿测量系统,测量设备配对使用且存在多组,测量网络包络对接部件的端面,典型应用场景如图8所示。

综上所述,3种基本的位姿测量模式对比结果如表1所示。

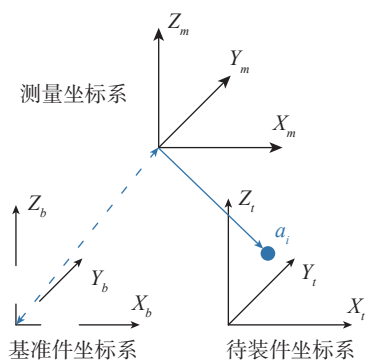


图5 同坐标系模式
Fig.5 Mode of same coordinate system

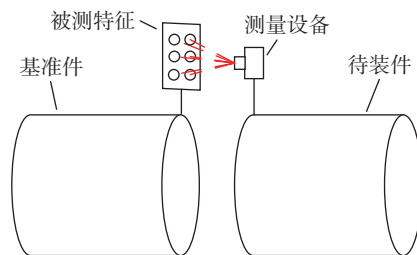


图6 同坐标系模式应用场景
Fig.6 Scene of same coordinate system mode

2 复杂的位姿测量模式

以最小测量系统为基本单元,按不同配合模式组织,形成复杂的位姿测量系统,以适应更为复杂的工况。根据多测量坐标系与被测几何特征的关联关系,可以将复杂的位姿测量模式划分为串行、并行、混合3种。

2.1 串行模式

串行模式即是在基础位姿测量模式的基础上,将测量坐标系拆分为多个子测量坐标系的串联组合,其中只有一个子测量坐标系用于监测被测几何特征,而其余的则用于监测下一级子测量坐标系的位姿,如图9所示。该模式可以发挥不同测量设备的功能性优势,提升整体测量能力,但是需要考虑各级子测量系统之间的集成接口,如利用iGPS与移动机器人组成广域测量场^[13],便集成了iGPS测量覆盖范围广与移动机器人执行末端灵活、精确的特性,但这势必会造成误差的叠加,损失测量精度。

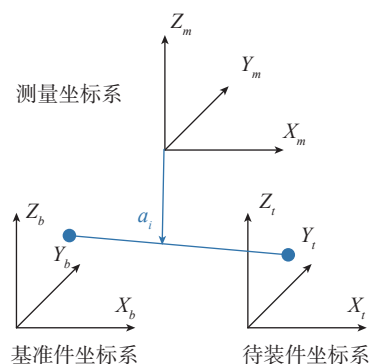


图7 跨坐标系模式
Fig.7 Mode of across coordinate system

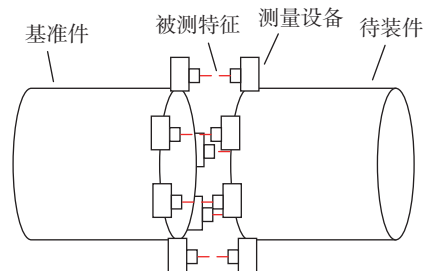


图8 跨坐标系模式应用场景
Fig.8 Scene of across coordinate system mode

2.2 并行模式

并行模式与串行模式类似,同样包含多个子测量坐标系,但这些子测量坐标系的组合形式不同,所有的子测量坐标系都用于监测被测几何特征,如图 10 所示。当各测量设备的测量精度处于同一量级时,综合处理来自不同设备的测量数据,能够提高被测数据的维度,减少随机误差,提高位姿测量精度。同时由于各测量设备都能单独测量被测几何特征,当部分测量设备失效时,测量系统仍能正常工作,从而提高了系统的可靠性,也扩大了系统的可测范围

(各测量设备可测范围的并集)。如将多台激光跟踪仪组网测量^[14]以获得更大的测量包络空间,以及更高的测量精度。

2.3 混合模式

混合模式中的子测量坐标系同时拥有上述两类组合方式,如图 11 所示,能够灵活适应复杂的测量工况,同时也兼顾测量精度,然而由于数据传递路径类型并不单一,因此涉及更复杂的坐标系转换关系与数据融合算法。

综上所述,3种复杂的位姿测量模式对比结果如表 2 所示。

应用案例

1 基于 iGPS 的相对位姿测量

在卫星舱段对接过程中,以卫星上舱段作为基准件,下舱段作为待装件,利用并联调姿平台将其相对位姿调整至目标值后,借助导向销完成最终对接。上述相对位姿实际测量值通过 4 个 iGPS 信号发生器组网测量,在上、下舱段各布置有 4 个测量点用于位姿测量,如图 12 所示。其中卫星下舱段局部坐标系为 $O-X_1Y_1Z_1$,卫星上舱段局部坐标系为 $O-X_2Y_2Z_2$,各 iGPS 信号发生器局部坐

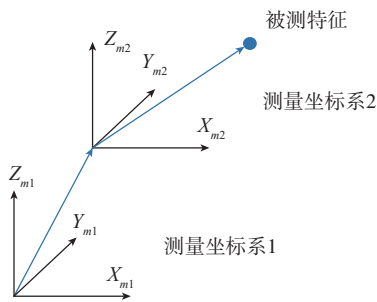


图9 串行模式
Fig.9 Serial mode

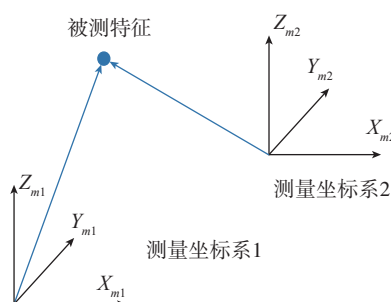


图10 并行模式
Fig.10 Parallel mode

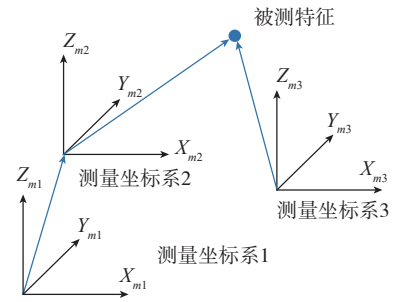


图11 混合模式
Fig.11 Mixed mode

表1 3种基本的位姿测量模式对比

Table 1 Comparison of three basic pose measurement modes

项目	异坐标系	同坐标系	跨坐标系
使用前提	测量场包络两组被测特征	测量设备与某一部件保持相对静止	测量设备能够监测跨越部件的组合特征
被测对象	处于不同部件坐标系	处于单一部件坐标系	跨越不同部件坐标系
位姿拟合算法	原理简单、拟合两次	原理简单、拟合一次	原理复杂、拟合一次
误差组成	测量误差、拟合误差	测量误差、拟合误差、标定误差	测量误差、拟合误差
误差传递路径	长	长	短
应用场景	测量设备位于对接部件外侧	测量设备位于对接部件端面	测量设备包络对接部件端面

表2 3种复杂的位姿测量模式对比

Table 2 Comparison of three complex pose measurement modes

项目	串行模式	并行模式	混合模式
子系统监测对象	下一级测量系统位姿 / 被测几何特征	被测几何特征	两者都有
综合测量误差	逐级累加误差	互补融合误差	两者都有
优点	综合各测量设备功能优势	综合各测量设备精度优势,系统可靠性高	灵活应对各种测量需求
缺点	测量误差累积,需考虑设备间集成接口	数据需要融合处理	系统复杂
应用场景	测量需求复杂,需要多测量设备配合测量	测量需求单一,方法多样,需要数据融合	测量需求复杂,部分子系统精度要求高

标系为 $O-X_i Y_i Z_i$ ($i=1,2,3,4$)。

根据卫星舱段上特征点实际测量坐标值的齐次矩阵 P_1 、 P_2 与理论坐标值的齐次矩阵 P_1^0 、 P_2^0 ，可以推导上、下舱段在测量坐标系下的绝对位姿 T_{m1} 、 T_{m2} ，如式(2)和(3)所示，再根据式(4)在测量坐标系下推导出舱段之间当前相对位姿的测量值 T_{21} ，以三维对接模型中舱段相对位姿的理论值作为目标值，进行位姿调整，实现卫星舱段对接。

$$P_1 = T_{m1} P_1^0 \quad (2)$$

$$P_2 = T_{m2} P_2^0 \quad (3)$$

$$T_{m1} = T_{21} T_{m2} \quad (4)$$

舱段测量点理论值的标定数据

表3 测量点标定值

Table 3 Calibration of measuring points

类别	X/mm	Y/mm	Z/mm
上舱段 测量点 P_2	-194.61	-1283.58	79.70
	1290.85	-438.02	80.56
	305.54	1300.84	81.42
	-1184.56	455.49	81.33
下舱段 测量点 P_1	-530.39	271.27	-84.29
	25.50	-602.47	-83.60
	584.29	135.99	-84.01
	495.79	353.86	-84.29

如表3所示，相应的测量数据如表4所示。

最终的位姿重复测量精度如表5所示，其中位置与姿态的综合精度为0.442mm与0.035°。

上述测量方案采用异坐标系测量模式，在该模式下，若在同一测量坐标系下分别提取到舱段上、下两部分特征点的坐标值，就能利用上述求解方法进行位姿求解，因此可以改变上述测量设备为激光跟踪仪、激光雷达等，具体测量设备的选择根据位姿测量精度以及制造成本要求决定。

2 基于视觉的相对位姿测量

将视觉测量设备固定于机械臂

(模拟待装件)，靶标板(模拟基准件)放置于地面，利用视觉测量设备拍摄靶标板图像，通过解析所有靶标点的中心在同一幅图像中的坐标关系，求解机械臂相对地面的相对位姿，如图13所示。

其中视觉测量设备在基准件上的位姿 T_c 可提前标定，而待装件相对于视觉测量设备的位姿 T_m 可以由式(5)求得。

$$Z_c \begin{pmatrix} x \\ y \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f_x & 0 & u_0 \\ 0 & f_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} (R|t) \begin{pmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{pmatrix} \quad (5)$$

$$T_m T_c = T_r \quad (6)$$

其中， Z_c 为像平面距光心距离；(X_w , Y_w , Z_w) 与 (x , y) 分别为特征点三维坐标于对应的像素坐标，内参数(f_x ,

表4 iGPS测量结果

Table 4 Measurement results by iGPS

类别	X/mm	Y/mm	Z/mm
上舱段 测量点 P_2	1826.08	416.88	123.29
	378.27	1325.30	136.59
	-687.18	-365.61	147.54
	762.65	-1278.21	135.00
下舱段 测量点 P_1	594.77	-623.93	-49.15
	1163.35	299.38	-49.29
	165.34	431.04	-49.31
	50.07	259.22	-49.30

表5 位姿重复测量精度

Table 5 Repeated measurement accuracy of pose

项目	标准差	综合结果
X/mm	0.231	0.442
Y/mm	0.256	
Z/mm	0.277	
$\alpha / (^\circ)$	0.024	0.035
$\beta / (^\circ)$	0.019	
$\gamma / (^\circ)$	0.017	

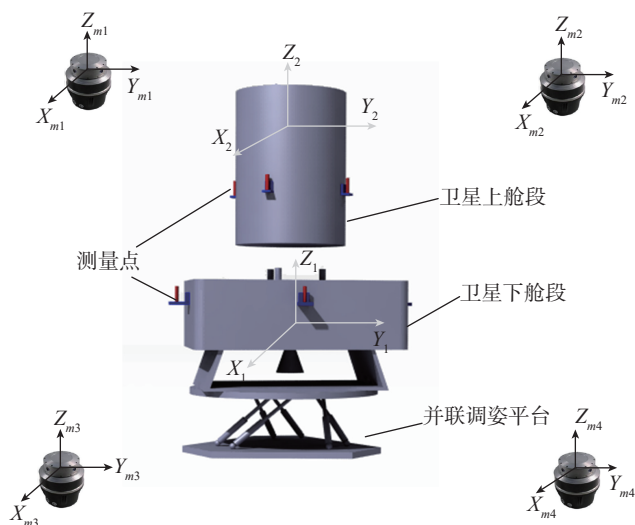


图12 基于iGPS的位姿测量场景

Fig.12 Pose measurement scene based on iGPS

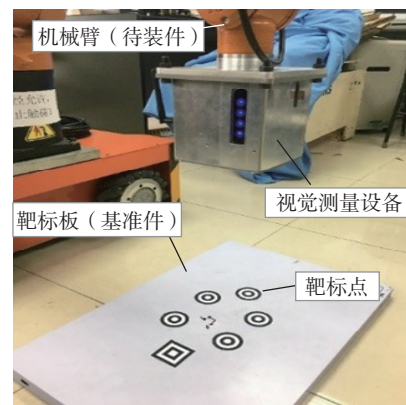


图13 基于视觉的位姿测量试验场景

Fig.13 Experiment scene of visual-based pose measurement

f_y, u_0, v_0)为相机的固有参数可以提前标定;外参旋转矩阵 R 与平移矩阵 t 共同组成 T_m 。构建若干靶标点,联立每一组点的上述关系式,可以解算出 T_m ,再由式(6)可以进一步求出部件之间的相对位姿 T_r 。在实际测量过程中,从靶标图像中提取中心点的流程,如图 14 所示。

各靶标点在靶标板坐标系下的坐标如表 6 所示。固定视觉测量设备与靶标板的相对位姿不变,测量靶标相对于视觉测量设备的位姿,并重复多次,分析视觉测量设备的重复测量精度。

得到 1000 次重复测量结果,其中解析到的靶标点测量值标准差如表 7 所示,测量设备对于靶标点的重复测量精度为 0.7mm。

根据上述 1000 组靶标点测量数据,计算对应的靶标板相对相机的

位姿,并统计结果,得到位姿测重复测量精度,如表 8 所示。其中测量设备对于位置的重复测量精度分别为 0.3mm、0.4mm、0.7mm,综合精度为 0.9mm;对于姿态角的重复测量精度分别为 0.05° 、 0.03° 、 0.03° ,综合精度为 0.06° 。

上述测量方案采用同坐标系位姿测量模式,由于视觉测量设备固定于基准件,所以可以适用于基准件本

身存在位姿变动的情况。根据同坐标系位姿测量模式的定义,上述测量方案中,也可以将测量设备进行替换,如激光跟踪仪、全站仪等,只要保证仪器与基准件的位姿在测量过程中保持不变,同时提前标定测量坐标系与基准件坐标系的相对位姿关系即可。

3 基于跟踪测距的相对位姿测量

研制如图 15 所示的分体式高精度超声对射测距装置,其外形尺寸为 $100\text{mm} \times 120\text{mm} \times 130\text{mm}$,采用 GPS 作为时间同步信号,距离重复测量精度在亚毫米水平。在基准件上固定 6 只发射端,在待装件上相应位置固定 6 只接收端,设备的信号接收/发射点提前标定,作为相关点特征,根据 6 组距离测量值可以解析待装件与基准件的相对位姿,其位姿测量原理如图 16 所示。

表6 靶标点坐标

Table 6 Coordinates of target points

标识	X/mm	Y/mm	Z/mm
P_1	408.82	363.29	0
P_2	192.71	365.05	0
P_3	50.06	212.40	0
P_4	185.62	45.67	0
P_5	402.36	46.17	0
P_6	550.82	215.61	0

表7 靶标点重复测量精度

Table 7 Repeated measurement accuracy of target points mm

标识	标准差	标准差	标准差
P_1	0.076	0.359	0.128
P_2	0.080	0.613	0.276
P_3	0.219	0.566	0.341
P_4	0.404	0.584	0.288
P_5	0.387	0.356	0.201
P_6	0.122	0.235	0.101

表8 位姿重复测量精度

Table 8 Repeated measurement accuracy of pose

项目	标准差	综合结果
X/mm	0.285	0.818
Y/mm	0.357	
Z/mm	0.678	
$\alpha/(\circ)$	0.046	0.060
$\beta/(\circ)$	0.030	
$\gamma/(\circ)$	0.025	

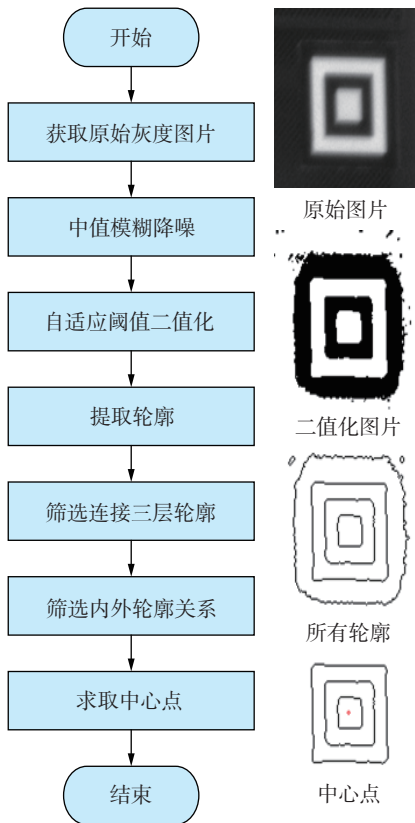


图14 靶标中心点提取流程
Fig.14 Process of target center point extraction

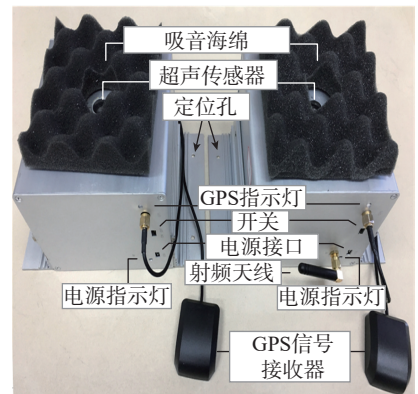


图15 超声测距设备
Fig.15 Ultrasound ranging instrument

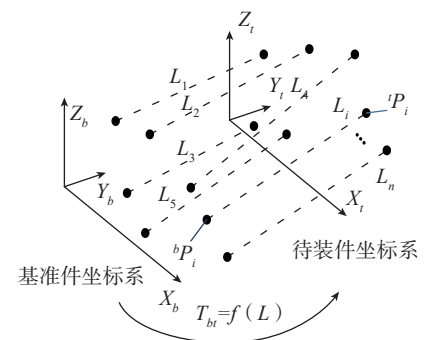


图16 基于跟踪测距的位姿测量原理
Fig.16 Principle of pose measurement by tracking ranging

其中,相应的特征点 bP 、 lP 之间的间距 L_i 满足式(7),特征点的理论坐标可以提前标定。

$$\|R^{3 \times 3} \cdot {}^bP_i^{3 \times 1} + t_i^{3 \times 1} - {}^lP^{3 \times 1}\| = L_i \quad (7)$$

联立6组测距对应的等式方程,可以得到关于部件相对位姿 R 、 t 的方程组。由于旋转矩阵 R 中含有大量三角函数,因此直接求解该非线性方程组较为困难,将其转化为优化问题求解,如式(8)所示。

$$\min \sum_{i=1}^n (\|R^{3 \times 3} \cdot {}^bP_i^{3 \times 1} + t_i^{3 \times 1} - {}^lP^{3 \times 1}\| - L_i)^2 \quad (8)$$

以iGPS测量数据为参照依据,构建如图17所示的相对位姿测量试验场景,在不同相对位姿下,得到位姿的重复测量值(7组),其对比结果如表9所示,综合位置偏差为4.04mm,综合姿态偏差为0.32°。此方法的位姿测量结果相较前两种而言

精度偏低,但可以应用于船舶搭载等测量精度要求相适应的场景,同时也可以通过精度更高的测距设备实现更高精度的位姿测量,如各种构型的并联机器人,利用光栅尺进行杆长测距,解析最终执行末端的相对位姿^[15]。

上述测量方案采用跨坐标系位姿模式,测量设备直接测量的几何特征是分别位于待装件与基准件上相关特征点的间距,该特征横跨基准件与待装件坐标系,可以直接建立部件之间的相对位姿关系,求解过程更为直接。

结论

(1)结合工程应用场景,对空间位姿的类别进行了划分,提出绝对位姿与相对位姿的概念。

(2)以测量对象与坐标系的关系为分类依据,提出了位姿测量的3种基本模式,分析了它们的特征,并

以此为基础衍生出3种复杂的位姿测量模式。

(3)分别以iGPS、工业相机、超声测距装置为测量设备,进行了3种测量方法的应用研究,并结合位姿测量模式,分析了3种测量方法的特点。



图17 基于超声测距设备的相对位姿测量场景
Fig.17 Scene of relative pose measurement based on ultrasound ranging instruments

表9 试验结果

Table 9 Result of experiment

项目	序号	X/mm	Y/mm	Z/mm	$\alpha / (^\circ)$	$\beta / (^\circ)$	$\gamma / (^\circ)$
相对位姿测量值	I	428.940	-192.131	2524.680	3.424	13.442	1.535
	II	410.558	-163.237	2159.683	3.174	9.759	1.213
	III	272.791	-142.741	1998.588	3.281	5.181	0.525
	IV	255.106	-126.683	1863.557	3.488	2.621	0.501
	V	205.707	-116.611	1698.162	3.246	0.049	0.250
	VI	153.994	-81.481	1391.176	4.080	-1.296	-0.158
	VII	90.611	-39.071	926.976	4.196	2.494	0.397
相对位姿参照值	I	427.815	-192.249	2524.844	3.387	13.461	1.275
	II	411.742	-165.799	2159.235	3.210	9.739	1.456
	III	274.801	-142.188	1998.374	3.267	5.189	0.449
	IV	252.652	-129.150	1863.695	3.455	2.642	0.189
	V	203.383	-113.485	1698.675	3.230	0.071	-0.052
	VI	153.406	-83.220	1391.128	4.073	-1.295	-0.176
	VII	89.590	-38.500	927.103	4.195	2.504	0.191
最大偏差	—	2.48	3.16	0.33	0.02	0.01	0.31

参考文献

- [1] 赵建国, 郭洪杰, 王丽秀, 等. 飞机数字化柔性精准装配技术研究及应用[J]. 航空制造技术, 2014, 57(21): 32–35.
- ZHAO Jianguo, GUO Hongjie, WANG Lixiu, et al. Study and application technology on digital flexible accurate assembly for aircraft[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2014, 57(21): 32–35.
- [2] 易旺民, 段碧文, 高峰, 等. 大型舱段装配中的水平对接技术[J]. 计算机集成制造系统, 2015, 21(9): 2354–2360.
- YI Wangmin, DUAN Biwen, GAO Feng, et al. Level docking technology in large cabin assembly[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2015, 21(9): 2354–2360.
- [3] 陈文豪. 基于测量数据的大部件对接装配仿真技术研究及其应用[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
- CHEN Wenhao. Research on the technology of large parts assembly simulation based on measurement data and its application[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014.
- [4] SCHMITT R H, PETEREK M, MORSE E, et al. Advances in large-scale metrology –review and future trends[J]. CIRP Annals, 2016, 65(2): 643–665.
- [5] ESTLER W T, EDMUNDSON K L, PEGGS G N, et al. Large-scale metrology – an update[J]. CIRP Annals, 2002, 51(2): 587–609.
- [6] MEI Z Y, MAROPOULOS P G. Review of the application of flexible, measurement-assisted assembly technology in aircraft manufacturing[J]. Proceeding of the Institution of Mechanical Engineers Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2014, 228(10): 1185–1197.
- [7] DROUOT A, ZHAO R, IRVING L, et al. Measurement assisted assembly for high accuracy aerospace manufacturing[J]. IFAC-PapersOnline, 2018, 51(11): 393–398.
- [8] 范斌, 季青松, 李明飞, 等. iGPS 测量系统与激光跟踪仪在某飞机大部件数字化装配中的对比应用[J]. 航空制造技术, 2019, 62(5): 57–62.
- FAN Bin, JI Qingsong, LI Mingfei, et al. iGPS and laser tracker applications comparison in digital assembly of large aircraft parts[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2019, 62(5): 57–62.
- [9] 孟少华, 胡瑞钦, 张立建, 等. 一种基于机器人的航天器大型部件自主装配方法[J]. 机器人, 2018, 40(1): 81–89.
- MENG Shaohua, HU Ruiqin, ZHANG Lijian, et al. A method of autonomous assembly of large spacecraft components using robot[J]. Robot, 2018, 40(1): 81–89.
- [10] PRAVESH M, C. KOTESHWAR R, SWAPNIL P, et al. A novel measurement technique for the alignment of satellite reflectors and feeds: from subsystem to spacecraft and up to final Rf testing[C]// Proceeding of 2011 Indian Antenna Week (IAW). New York: IEEE, 2011.
- [11] 黄斐, 厉文耀. 全站仪在船体分段合拢中的应用[J]. 造船技术, 2015(4): 63–66.
- HUANG Fei, LI Wenyao. The application of total station in hull block assembly[J]. Marine Technology, 2015(4): 63–66.
- [12] PORATHD M D C, SIMONY R, NUNES R D A, et al. Feasibility of measurement-assisted assembly of ship hull blocks[J]. Marine Systems & Ocean Technology, 2019(14): 23–33.
- [13] 杜福洲, 于浩, 李强. 基于多源测量数据融合的间隙与阶差自动化测量技术研究[J]. 航空制造技术, 2019, 62(8): 14–20.
- DU Fuzhou, YU Hao, LI Qiang. Research on gap and step difference automatic measurement technology based on multi-source measurement data fusion[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2019, 62(8): 14–20.
- [14] 兰翔, 李晓星, 周国锋, 等. 激光跟踪仪组网测量在大型紧缩场反射面装调中的应用[J]. 航天制造技术, 2015(2): 18–22.
- LAN Xiang, LI Xiaoxing, ZHOU Guofeng, et al. Application of laser tracker network measurement in alignment of large-scale compact range[J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2015(2): 18–22.
- [15] 秦志刚. 3-PPTRR 精密并联机器人的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008.
- QIN Zhigang. Research on 3-PPTRR precision parallel robot[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2008.

通讯作者: 杜福洲, E-mail: du-fuzhou@163.com。

Research and Application of Pose Measurement Mode for Large-Scale Product Assembly

DU Fuzhou, WU Dian

(School of Mechanical Engineering & Automation, Beihang University, Beijing 100191, China)

[ABSTRACT] As a key stage in the assembly process of large-scale products, pose measurement has characteristics of diverse methods and complex theory. It is helpful to analyze process of pose measurement theoretically by dividing pose measurement modes according to different measurement principles, and studying characteristics of various measurement modes is of great significance for accurate pose measurement. Firstly, pose of component was divided into absolute pose and relative pose according to the assembly process of large-scale products. Secondly, by analyzing principle of relative pose measurement, the research of pose measurement mode was carried out, three basic pose measurement modes were defined, and three combination modes were derived on this basis. Finally, the application of pose measurement mode was analyzed with three specific relative pose measurement cases, which provided a theoretical basis for selection and optimization of pose measurement method in large-scale products assembly tasks.

Keywords: Large-scale product; Digital measurement; Measurement assisted assembly; Pose measurement; Indoor GPS; Vision measurement; Ultrasonic ranging

(责编 长青)