

两转一移三自由度并联机构研究进展

李秦川^{1*}, 柴馨雪¹, 陈巧红²

1. 浙江理工大学机械与自动控制学院, 杭州 310018;

2. 浙江理工大学信息学院, 杭州 310018

* 联系人, E-mail: lqchuan@zstu.edu.cn

2016-11-02 收稿, 2016-12-29 修回, 2016-12-29 接受, 2017-02-08 网络版发表

国家杰出青年科学基金(51525504)、国家自然科学基金(51475431, 51275479)和浙江省自然科学基金(LZ14E050005)资助

摘要 机构是制造装备的骨架和执行器, 装备的自主创新离不开机构创新. 对于大量自由度数少于6的操作任务, 应用优化后的少自由度并联机构比应用六自由度并联机构在制造、控制和维护方面具有更低的成本. 两转一移三自由度并联机构是少自由度并联机构中最具代表性的一类, 已被成功用于各类高端制造装备的主机构. 本文根据两转一移三自由度并联机构两条转轴的空间几何关系将其分为UP, PU, RPR和P*U*4类, 重点对其构型综合、性能分析和尺度综合三方面的国内外近年来研究进行了分析总结, 探讨了难点和前沿研究问题, 并对未来研究方向进行了展望.

关键词 并联机构, 螺旋理论, 构型综合, 性能指标, 尺度综合

并联机构具有高速、高刚度、承载能力大、动态响应好等特点, 以并联机构作为主机构的并/混联构型装备已获得广泛应用. 近10年来, 并联机构的应用逐渐拓展至很多不需要空间六个自由度的操作(如对准、姿态定位、轴对称的机加工), 此时使用合适的少自由度($M < 6$)并联机构可以降低加工制造、标定、控制和维护等方面成本, 少自由度并联机构已成为国际并联机构学术界和工业界关注的热点和前沿^[1~3]. 发达国家尤其注重少自由度并联机构在航空、航天、汽车食品医药等行业中的自主创新、系统设计和工程应用.

以少自由度并联机构作为装备主机构的成功范例有Z3并联主轴头(图1(a))^[4], Tricept混联机器人(图1(b))等^[5], Exechon混联机器人(图1(c))^[6,7]. 其中Z3并联主轴头主要用于大型航空结构件(梁、筋、肋板、框、壁板)的高速加工; Exechon混联机器人与Tricept混联机器人被广泛用于各类切削加工及装配作业.

从机构学角度而言, Z3主轴头基于3-PRS并联机构, Exechon混联机器人中的并联模块基于2-UPR-SPR并联机构, Tricept机器人基于3-UPS-UP并联机构(P: 移动副, R: 转动副, S: 球铰; U: 万向铰). 这3种并联机构的共同特点都是具有两个转动自由度(R)和一个移动自由度(T), 因此, 又可称之为两转一移(2R1T)三自由度并联机构, 应该指出的是, 本文为使表述简明, 当描述机构自由度时, “转”和“移”是并列关系, 不考虑其先后关系.

转动是导致刚体运动复杂性和多样性的根本原因. 在几何上, 转动自由度可以用一条直线即转轴来表征. 因此, 2R1T三自由度并联机构具有两条转轴, 它们之间的几何关系与该类机构运动性能密切相关. 本文根据转轴的几何关系将2R1T三自由度并联机构分为UP, PU, RPR和P*U*4类, 对其构型综合、性能分析和尺度综合三方面的国内外研究代表性成果进行了分析总结, 最后对今后研究趋势进行了展望.

引用格式: 李秦川, 柴馨雪, 陈巧红. 两转一移三自由度并联机构研究进展. 科学通报, 2017, 62: 1507–1519

Li Q C, Chai X X, Chen Q H. Review on 2R1T 3-DOF parallel mechanisms (in Chinese). Chin Sci Bull, 2017, 62: 1507–1519, doi: 10.1360/N972015-01228

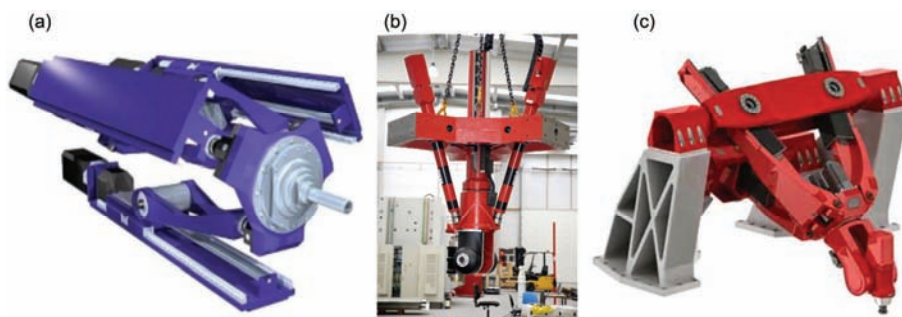


图1 (网络版彩色)基于两转一移三自由度并联机构的高端装备。(a) Z3 主轴头(Dörries Scharmann. <http://www.ds-technologie.de>); (b) tricept (Tricept PKM. <http://www.pkmtricept.com/>); (c) exechon (Exechon. <http://unisonltd.com/innovation/exechon/>)

Figure 1 (Color online) High-end equipment based on 2R1T parallel mechanism. (a) Head sprint Z3 (Dörries Scharmann. <http://www.ds-technologie.de>); (b) tricept (Tricept PKM. <http://www.pkmtricept.com/>); (c) exechon (Exechon. <http://unisonltd.com/innovation/exechon/>)

1 2R1T运动分类

Kong等人^[8]提出了用于并联机构分类和综合的虚链机构法,即将并联机构的运动用一条虚拟的串联运动链来表示。例如,六自由度的Stewart并联机构的运动可以用一条串联UPS或6R运动链表示。

根据2R1T并联机构中两条转轴的几何特性,我们运用虚链机构法将2R1T并联机构分为4类:UP类、PU类、RPR类和 P^*U^* 类。

UP类并联机构动平台的运动可用一条UP串联运动链实现,如图2(a)所示^[9]。动平台相对于固定坐标系有一条固定转轴,一条绕此固定转轴旋转的转轴,两条转轴垂直相交,且动平台还可以沿两条转轴之公法线方向移动。

PU类并联机构动平台的运动可以用一条PU串联运动链实现,如图2(b)所示。动平台相对于固定坐标系有

两条转轴,其中一条方向固定,位置变化,另一条位置方向随位形变化,两条转轴始终垂直相交。

RPR类并联机构动平台的运动可以用一条RPR串联链实现,如图2(c)所示。动平台相对于固定坐标系有两条转轴,其中一条位于机架近端方向、位置固定;另一条位于机架远端,位置方向随位形变化,两条转轴始终垂直。显然,由于两个转动副之间的杆长的放大作用,RPR串联链输出的两个转动范围不同,或者说其输出具有各向异性。

当两转一移三自由度并联机构的两条转轴具有时变性质,即两条瞬时转轴的扭角和最短距离均非常数,此时动平台的运动不能用一条三自由度的串联链来实现,故以虚拟串联链 P^*U^* 表示。

2 构型综合

构型综合(拓扑结构设计)是指给定动平台自由度数目与运动性质(转动或移动),确定各分支运动链中运动副的类型、数目、几何布置、驱动副选取以及分支间的几何关系。构型综合是一个非数值、非线性和一对多的映射,实现“从0到1”,决定知识产权的归属,体现原始创新。在国家自然科学基金委员会《机械工程学科发展战略报告(2011~2020)》中指出“在机构学研究中,重大科学问题涉及的是产品机构的原始创新问题,着力解决拓扑综合与尺度综合的集成设计问题”^[10]。法国机构学家Merlet^[11]曾在2002年美国机械工程年会主题报告中指出:与开链机构相反,并联机构构型综合十分困难,往往是凭设计者的经验和灵感,缺乏通用的系统理论和方法。

经过各国研究者20余年的努力,目前主要的少

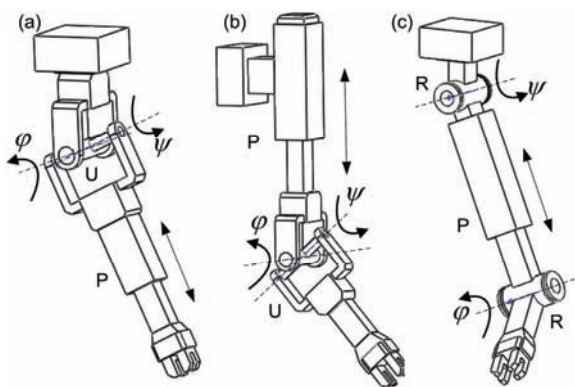


图2 PU, UP, RPR运动链^[9]。(a) PU运动链; (b) UP运动链; (c) RPR运动链

Figure 2 PU, UP and RPR kinematic chain^[9]。(a) PU kinematic chain; (b) UP kinematic chain; (c) RPR kinematic chain

自由度并联机构构型综合方法可以归为两类. 一类属于运动层面, 其核心思想是动平台的运动是各分支运动的交集, 包括位移群/流形综合法^[12~17]、微分几何综合法^[18,19]、Gf集综合法^[20]、线性变换综合法^[21]、POC综合法^[22,23]等; 另一类属于约束层面, 其核心思想是动平台所受的约束是各分支约束的并集, 这类方法主要使用的数学工具是螺旋理论, 故被称为约束螺旋综合法^[24~30]. 此外, Grassman线几何综合法可视为约束螺旋综合法的图形化表达, 更具直观性^[31,32], 以上方法具有普适性且各有特点, 研究者以之综合出大量的新机构.

2R1T三自由度并联机构动平台受到三个独立约束, 包括两个约束力和一个约束力偶. 其构型综合有两种思路, 一是使用三条六自由度的主动支链加上一条2R1T三自由度的被动支链, 由被动支链提供约束; 另一思路是采用三条少自由度主动支链, 不使用被动约束支链, 三条主动支链同时对动平台施加约束, 这些约束的共同作用等价于两个约束力和一个力偶. 两种思路相比而言, 前者实现更为简单, 后者因为各分支约束间的线型相关性与空间几何关系有关, 难度更大.

2.1 UP类三自由度并联机构构型综合

UP类三自由度并联机构可以通过使用三条六自由度的UPS/SPS支链和一条三自由度的UP支链来构建, 其中三条UPS是主动支链, 对动平台不施加约束, 而UP支链是提供约束的被动支链, 对动平台施加两个约束力和一个约束力偶, 分别约束动平台在U铰链平面内的两个移动自由度和绕U铰链平面法线的一个转动自由度. 通过这种方法得到的UP类三自

由度并联机构的典型例子是Tricept机器人.

然而, Tricept机器人中被动约束支链的存在给机构的性能带来一定的负面影响, 如运动副数目多, 运动部分质量较大等. 因此, Huang等人^[33,34]通过去掉Tricept的一条六自由度主动UPS支链, 并将原有的被动约束UP支链改为主动支链UP支链, 提出了TriVariant-A机构, 该机构在结构上继承Tricept自由度数目和类型及其可重构特点的同时, 其运动副数目要远小于Tricept运动副的数目. 在TriVariant-A机构基础之上, Sun等人^[35~37]进一步提出了Tricept-IV和T5机构. 以TriVariant为核心分别开发出铸钢节点消失模制造双机器人工作站(图3(a)), 用于上海世博轴阳光谷工程, 和相贯线切割双机工作站(图3(b)), 用于大型管类构件的切割.

由于球铰的转动范围和承载能力有限, 分支中的多个UPS支链会减小UP类并联机构动平台的姿态能力, 尽管在附加二自由度串联转头后位姿能力得到增强, 但研究者仍希望能针对某些应用场合综合出分支中不含六自由度支链的UP类并联机构. Kong等人^[8]运用虚链法和螺旋理论对不含六自由度支链的UP类并联机构进行了系统的构型综合, 得到了多种过约束和非过约束的UP类并联机构(图4). 但是, 这种实现方式要求多个转动副轴线空间汇交, 这对制造和装配造成较大困难, 同时, 其运动学模型也更为复杂.

目前, 不含六自由度支链的UP类并联机构的构型综合目前尚未解决的问题为能否综合出更具工程实用价值的构型.

2.2 P*U*类三自由度并联机构构型综合

P*U*类三自由度并联机构现有的构型均不含六



图3 (网络版彩色)TriVariant机器人工程应用(Atomrobot. http://www.cxrobot.com/gggh/0819_16.html). (a) 消失模节点双机器人工作站; (b) 相贯线切割双机工作站

Figure 3 (Color online) Engineering application of TriVariant mechanism (Atomrobot. http://www.cxrobot.com/gggh/0819_16.html). (a) Lost foam casting manufacturing double robot workstation; (b) intersecting line cutting double robot workstation

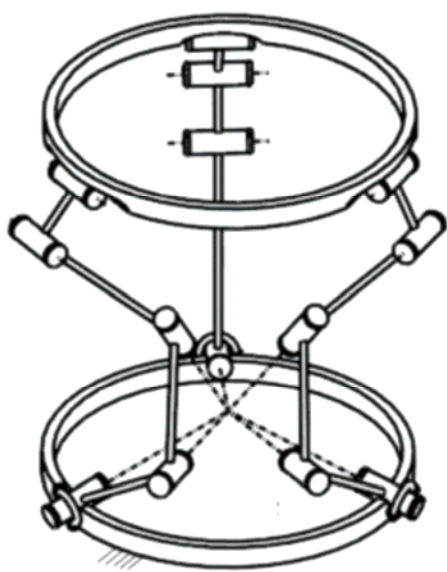


图4 UP类三自由度并联机构^[8]
Figure 4 UP type three DOF parallel mechanism^[8]

自由度支链,其原因在于尚未找到相应的串联运动链来实现其动平台的运动。P*U*类并联机构的典型代表为Hunt^[38]于1983年首次发明的3-RPS并联机构,其后各国研究者又陆续提出了3-PRS (Z3主轴头), 3-RRS, 3-PPS等同类异型机构。P*U*类并联机构被用作望远镜聚焦装置^[39]、运动模拟器^[40]、微操作机械手^[41]、坐标测量机^[42]等。

实际上,从构型角度来看,P*U*类机构分支运动链的特点在于均为五自由度,且球铰中心被约束在一个平面上运动。从约束层面看,每个分支对动平台施加一个约束力,约束力经过球铰中心,沿约束平面法线方向。根据这一特点,可以得到与RPS支链等价的支链,如PPS, RRS, PRS等,再进而综合出如3-PPS, 3-RRS和3-PRS等构型,P*U*并联机构又被称为PPS类机构^[43]。

Huang等人^[44~46]通过将Z3的拓扑构型改为3-RPS并联机构,发明了具有我国自主知识产权的一平动二转动(1T2R)三坐标并联动力头(图5),并具有良好的运动和力传递特性,以其为核心功能部件搭建的五坐标加工中心,可用于航空大型铝合金结构件5坐标高速数控加工。

值得指出的是,由于P*U*类并联机构两条转轴间的几何关系具有时变性质,会导致动平台中心点发生在x和y方向的牵连平动。Carretero等人^[39]称这种

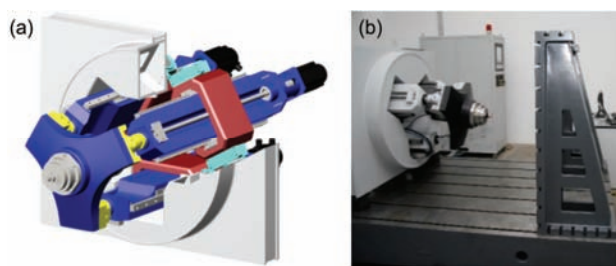


图5 (网络版彩色)A3主轴头^[45]. (a) CAD模型^[42]; (b) 真实机器
Figure 5 (Color online) A3 head^[45]. (a) CAD model^[42]; (b) real mechanism

在3-PRS并联机构被约束的自由度上发生的小幅运动为伴随运动。伴随运动幅值虽小,但对P*U*类并联机构的实际应用有重要影响。例如:当3-PRS并联机构应用为望远镜次级镜调焦装置时,x,y方向的两个伴随移动会使望远镜光轴偏斜,造成成像畸变。由于伴随运动是该机构固有特性,不能通过自身控制系统来补偿。实际应用中,通常将P*U*类并联机构与两个移动副串联,形成五自由度混联机构,通过控制这两个移动副来实时补偿P*U*类并联机构的伴随运动,例如使用Z3主轴头的Ecospeed五轴加工中心。虽然伴随运动可以用增加的两轴移动补偿,但其使得P*U*类并联机构的数学模型更为复杂,增加了控制和标定的难度,使终端精度的进一步提高更加困难。

2.3 PU类三自由度并联机构构型综合

实际上,伴随运动的产生与机构构型有直接联系。如不改变构型拓扑结构,在已有的P*U*类机构如3-RPS或3-PRS机构中仅靠参数优化难以消除伴随运动。注意到PU串联链其末端转动中心就是U铰中心,始终被约束在一条直线上运动,不存在其他方向的平移运动。因此,如何将动平台的转动中心约束在一条直线上,成为PU类并联机构构型综合的难题。

一种思路是可用两条六自由度的主动PSS支链加上一条三自由度的主动PU支链来构造2-PSS-PU并联机构(图6(b));或用三条六自由度的主动UPS支链加上一条被动PU支链构造3-UPS-PU并联机构,其中PU支链是约束支链。这种构型综合的思路虽然简单易行,但受制于球铰有限的转动范围,机构整体转动能力不高。

另一种思路是使用少自由度支链来构建PU类并联机构。本文作者运用位移流形综合法,将无伴随运动的数学条件转化为几何条件,综合出了PU类并联

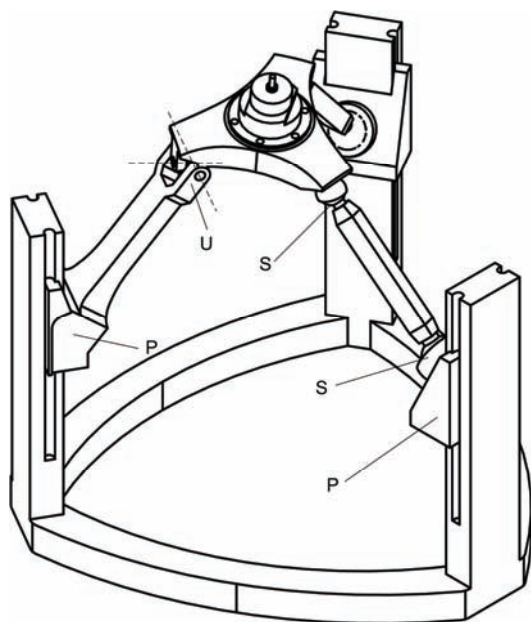


图6 2-PSS-PU机构

Figure 6 2-PSS-PU parallel mechanism

机构^[16]。PU类并联机构可分为非过约束机构,如2-PRS-PRRU(图7(a)), 3-PRRU(图7(c)), 和过约束机构,如2-PRU-PRRU(图7(b))。优点在于其移动和两个转动解耦,即转动中心点被限制于移动方向的一条直线上,换言之,动平台的两个转动运动不会改变转动中心点的位置,因此不会有伴随运动,这给该类机构的控制带来很大的好处。

此外, Xie等人^[47,48]结合加工制造需求,提出了一种无伴随运动的PU类并联机构PSS-PRU-PU,如图8(a)所示,其中U为两条支链共用的复合U铰。尽管该机构含有单条PSS支链,但由于复合U铰结构设计

巧妙,支链中的球铰并未影响动平台的姿态范围,机构具有很高的转动输出能力,特别适用于作为类似Z3主轴头的加工模块。结合水平方向上的大行程移动工作台和该三自由度模块在竖直方向上的大行程升降运动,最终开发了如图8(b)所示的卧式五轴联动混联加工中心,可应用于飞机整体结构件包括整体框、梁、肋、接头、壁板等复杂结构件的五轴联动加工。

陈子明等人^[49]提出了一种无伴随运动的2R1T对称3-UPU并联机构,其动平台可绕对称平面内任一轴线发生连续运动,绕对称平面法线方向连续转动以及沿法线方向移动。

2.4 RPR类三自由度并联机构构型综合

已有的并联机构大都具有各向输出同性,然而在某些工程实际中要求机构具有各向输出异性,例如搅拌摩擦焊中,对于并联机构在经向和纬向的输出姿态能力要求相差很大。RPR类并联机构正是典型的具有输出各向异性的机构。

Li等人^[9]运用位移流形法系统研究了RPR类并联机构的构型综合,提出大量RPR类并联机构的新构型,如图9所示2-UPR-RPU机构。Exechon混联机器人的并联模块是两转一移三自由度2-UPR-SPR机构。与之相比,2-UPR-RPU并联机构结构更为简单,RPU分支比SPR分支减少了一个自由度。我们在2-UPR-RPU并联机构动平台上安装一个2RR串联机构以构成五轴混联机器人,可实现Exechon混联机器人的功能(图10(a));或者与两个移动副相集成,构成五轴搅拌摩擦焊混联机器人(图10(b))。Jin等人^[50]提出将基于RPR类并联机构的五轴混联机器人用于飞机机翼

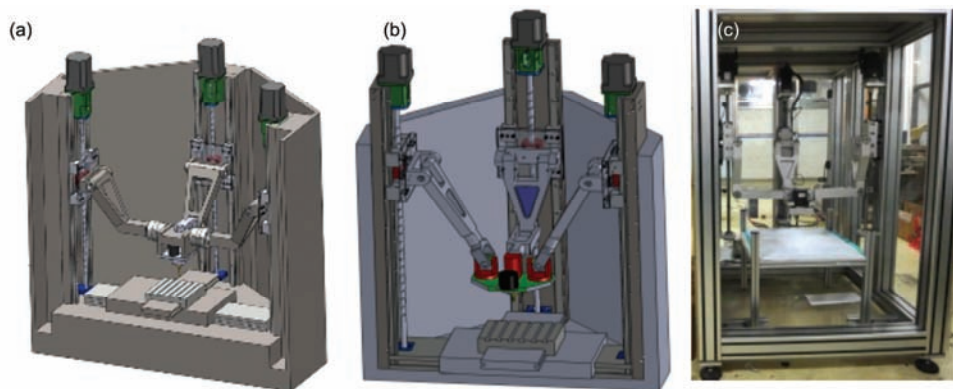


图7 (网络版彩色)PU类两转一移并联机器人。(a) 2-PRS-PRRU; (b) 2-PRU-PRRU; (c) P3

Figure 7 (Color online) 2R1T parallel mechanism of PU type. (a) 2-PRS-PRRU; (b) 2-PRU-PRRU; (c) P3

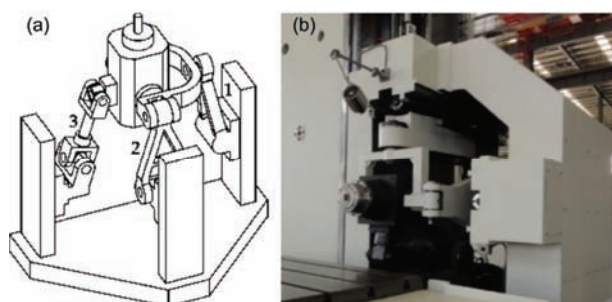


图8 (网络版彩色)含复合U铰的PU类并联机构^[47,48]. (a) CAD模型; (b) 真实机器

Figure 8 (Color online) Parallel mechanism of PU type which contains composite U joint^[47,48]. (a) CAD model; (b) real mechanism

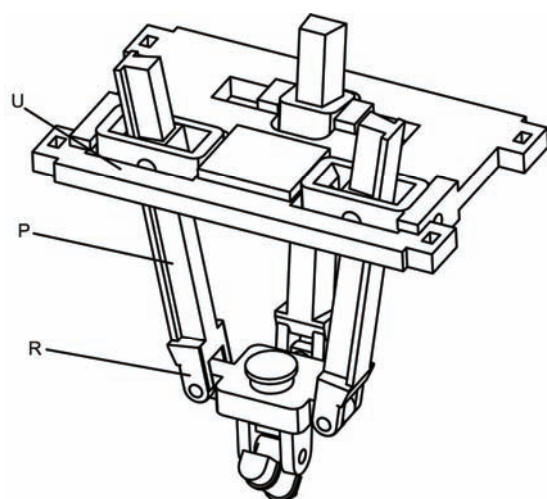


图9 2-UPR-RPU机构

Figure 9 2-UPR-RPU parallel mechanism

装配.

RPR类并联机构提出时间较短,当前面临的关键问题是如何根据应用场合要求遴选出在运动学和

静力学层面上具有工程应用价值的构型,为后续研究和应用提供基础.

3 性能分析

性能分析是指在并联机构构型确定之后,对机构进行运动学、工作空间、奇异、动力学、精度、刚度等方面的分析,是对机构进行优化设计的基础.

3.1 两转一移三自由度并联机构运动特性研究

大量工作集中于2R1T并联机构的运动学正反解、工作空间、奇异等方面. Lee等人^[51]最早研究了3-RPS并联机构运动学正反解和球铰运动范围约束的影响. Fang等人^[52]研究了3-RPS机构的运动学,通过引入3个约束方程,将 3×6 的雅可比长方阵降维至 3×3 方阵,这对后续性能分析非常有利. Huang等人^[53,54]还通过虚设机构法、螺旋理论和二次曲面退化方法识别了3-RPS并联机构的主螺旋,这对于分析其瞬时运动特性具有重要意义. Tsai等人^[55]采用Bezout消元法优化求解3-PRS机构的运动学正解. Li等人^[56]研究了在不同P副倾角下3-PRS机构的运动学正反解、工作空间和灵巧度等. Gallardo等人^[57]运用螺旋理论对3-RPS机构进行了速度和加速度分析,得到了形式紧凑的表达式. Gallardo-Alvarado等人^[58]将两个3-RPS机构串联在一起,并分析了其运动学特性.

一般认为3-RPS类并联机构的两个转动是绕固定坐标系 X 和 Y 轴^[56,59]的认识并不严格. 正如前文所说,转动自由度的关键是其转轴所在直线. Huang等人^[60]指出,3-RPS并联机构在动平台平行于定平台的初始位形下,3个球铰中心点决定的平面内任一条直线可以作为动平台的瞬时转轴,任意两个球铰中

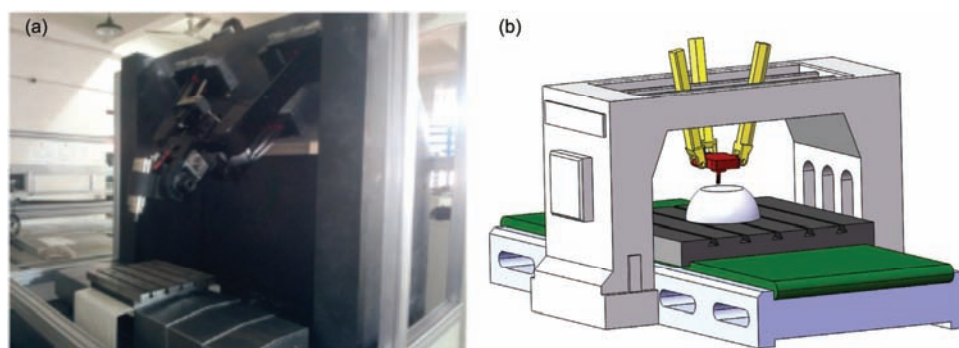


图10 (网络版彩色)2-UPR-RPU并联机构应用. (a) 五轴混联机器人; (b) 五轴搅拌摩擦焊混联机器人

Figure 10 (Color online) Application of 2-UPR-RPU parallel mechanism. (a) Five axes hybrid mechanism; (b) five axes hybrid friction stir welding mechanism

心点的连线可以作为动平台的连续转轴。而当动平台发生连续转动后,动平台的两个转轴的空间分布更为复杂,不宜简单地认为是绕固定坐标系 X, Y 的转动^[61]。

3.2 两转一移三自由度并联机构伴随运动研究

自2000年Carretero等人^[39]提出3-PRS机构存在伴随运动以来,各国研究者对两转一移三自由度并联机构伴随运动开展了大量研究。Carretero等人^[59]提出了通过结构参数优化使伴随运动最小的方法;Liu等人^[62]提出用方位角和转角来描述[PP]S类并联机构的姿态,减小伴随运动对运动学模型复杂度的影响。Li等人^[16,63]通过建立一般3-PRS并联机构伴随运动运动学模型,揭示出并联机构各项几何结构参数与伴随运动的内在联系,证明了3-PRS并联机构无伴随运动所必须满足的结构充要条件,还比较了3-PRS并联机构在不同的分支几何布局下的伴随运动。

3.3 两转一移三自由度并联机构奇异研究

并联机构在奇异位型处会失去刚度,导致机构失控,因此在实际应用中必须避开奇异。Joshi等人^[64]运用螺旋理论发现了3-RPS机构的两种奇异位形。李艳文^[65]运用奇异研究的运动学方法得到了3-RPS并联机构一般奇异判别式和三维奇异分布。Schadlbauer等人^[66]用代数几何方法对3-RPS机构运动学特性进行了分析,得到了具有闭环形式的运动学正解和全局的奇异集合。Nurahmi等人^[67]对3-RPS角台并联机构的运动学正解奇异和工作空间进行了分析。李秦川等人^[68]对2-PRS-PRRU并联机构的运动学和奇异进行了研究。O'Brien^[69]提出一种与坐标系无关的几何方法,通过建立两个稀疏矩阵的欠秩条件来辨识3-RPS并联机构的约束奇异。柴馨雪等人^[70]研究了2-UPR-RPU并联机构的奇异性。Li等人^[71]运用几何代数方法对3-RPS并联机构进行了奇异分析。

3.4 两转一移三自由度并联机构动力学研究

在高速或重载工况下,并联机构要取得较好的定位精度必须具有优良的动力学特性。并联机构的逆动力学是指根据给定轨迹,求出实现这一轨迹所需的驱动力或力矩,其中可考虑摩擦、重力和弹性变形的影响。因此,并联机构逆动力学模型在优化杆件截面尺寸、预估伺服电机参数和设计控制算法等方面

至关重要。并联机构动力学建模的方法可以分为3类:经典的牛顿欧拉法、拉格朗日算子法和虚功原理,但并联机构多环闭链的本质使得其动力学建模非常复杂,运算量很大。

Lee等人^[72]采用拉格朗日方法研究了3-RPS机构的动力学特性。Shiau等人^[73]在考虑关节柔性、间隙和摩擦的情况下,研究了3-PRS并联机构的非线性动力学行为,发现关节间隙对机构的动力学特性影响最明显。Tsai等人^[74]在关节空间中建立了3-PRS并联机构的动力学模型,该模型特点在于通过引入分支与动平台间的三个完整约束方程实现把约束力处理为内力,从而将动平台的动力学模型与支链动力学模型解耦,有效地提高了计算效率。Yuan等人^[75]还提出一种考虑摩擦的3-PRS并联机构的正向动力学分析方法,该方法通过将关节反力分解实现雅可比矩阵的降维,从而大幅减少了正向动力学分析的计算量。Staicu^[76]采用虚功原理建立了3-PRS并联机构的动力学模型,并将其表示成紧凑的矩阵形式。Zhang等人^[77]提出了基于本征方程的3-RPS并联机构的动力学分析方法,该方法用螺旋理论建立了包含弯曲、拉伸和扭转变形的支链弹性模型,再通过拉格朗日方程建立了整个机构的解析动力学模型。Li等人^[78]在考虑重力的情况下对基于3-RPS机构的A3主轴头进行了弹性分析,通过将重力视为等效外力,可以建立从操作空间外力到关节空间关节反力的全雅可比矩阵,和使用商用有限元软件相比,这种方法更为快捷。

3.5 两转一移三自由度并联机构刚度与精度研究

在刚度和静力分析方面,胡波和路懿^[79]通过在3-RPS并联机构约束反力产生变形的方向上虚设P副,将3-RPS机构刚度分析转化为等效的六自由度3-RPPS机构的刚度分析,从而在整个机构的刚度分析中考虑了约束反力产生的变形。Zhao等人^[80]采用螺旋理论对3-RPS并联机构进行力分析,该方法特点在于大幅减少未知数的数目,在计算上具有优势。落海伟等人^[81]提出了基于子结构综合和静态凝聚技术的3-RPS并联机构的静刚度建模方法,该方法综合考虑了铰链和支链弹性对机构静刚度的贡献。

在精度分析与标定方面,Fan等人^[82]研究了3-PRS主轴头的精度敏感性,发现滑块定位精度、连杆长度和刀具长度对动平台精度影响最大。Farhat等人^[83]通过非线性约束优化方法研究了3-RPS机构的

动力学参数辨识. 黄鹏等人^[84]建立了3-PRS并联机构全误差模型, 提出了基于遗传算法的误差辨识方法. 李新友等人^[85]采用正交设计的思想对3-RPS并联机构进行了精度分析与综合. 潘伯钊等人^[86]建立了3-SPR并联机构的误差映射模型, 分析了各支链零点误差对动平台的影响, 提出了基于激光跟踪仪的快速零点标定方法.

4 尺度综合

尺度综合是指选定构型后, 根据运动学、动力学性能评价指标, 优化杆件的几何参数, 如动/定平台半径, 连杆长度等, 但不涉及杆件的截面参数. 尺度综合的关键在于选用具有物理意义清楚、与坐标系和尺度无关等性质的性能评价指标. 目前, 相关研究绝大多数使用运动学性能指标进行优化设计, 动力学性能评价指标的相关报道较少.

4.1 基于齐次雅可比矩阵代数特征值的尺度综合

在相当长的时间内, 少自由度并联机构的尺度综合基本沿用串联机构的优化设计思路, 即通过建立末端操作器速度空间与关节驱动速度空间的雅可比矩阵, 以雅可比矩阵的各种代数特征值(如行列式值、条件数、最大/小奇异值等)作为性能指标, 来描述机构的性能并据之进行参数优化. 但六维运动旋量空间和六维力旋量空间为非欧空间^[87], 在非欧空间上使用欧氏度量(范数)在数学上并不严格, 易导致歧义和错误的阐释. Merlet^[1,88]指出, 对于具有混合自由度的并联机构, 其雅可比矩阵元素的量纲不统一, 因此条件数等性能指标在物理意义上不清楚, 与坐标系和尺度相关, 必须谨慎使用. 因此, 各国学者提出了多种方法来实现雅可比矩阵的齐次化, 达到统一量纲的目的^[64,89~93].

Pond等人^[94]通过齐次雅可比矩阵的条件数和奇异值, 对3种不同布局的3-PRS机构进行了优化比较, 选出了最适于加工用途的布局. Sun等人^[95]通过选取动平台上的三点建立了3-PRS机构无量纲的齐次雅可比矩阵, 采用该雅可比矩阵的条件数作为全局性能指标, 综合考虑伴随运动和工程实际约束, 采用非线性规划方法对3-PRS机构进行了优化设计. Li等人^[45]建立了基于3-RPS机构的A3主轴头的半解析刚度模型, 该模型考虑了驱动和约束零件的弹性, 通过对刚度模型的无量纲化, 得到了可用于优化设计的全

局性能指标. Rao等人^[96,97]在考虑驱动器行程和球铰转动角度限制下, 在遗传算法中混合入单纯形算法, 对3-RPS进行了尺度综合, 这种方法收敛速度较快, 可得到全局的次最优解. Shi等人^[98]采用齐次雅可比矩阵的全局灵巧度指标, 对用于搅拌摩擦焊的3-PRS机构进行了优化. 总体而言, 通过建立齐次雅可比矩阵对机构进行尺度综合是目前学术界2R1T并联机构优化设计的主流方法之一.

4.2 基于运动/力传递特性的尺度综合

在螺旋理论中, 一个力螺旋对一个运动螺旋的作用的瞬时功率可以用这两个螺旋的互易积描述, 其单位值被称为虚系数(virtual coefficient)^[99]. 在此基础之上, 各国学者发展出多种用于分析机构运动/力传递性能的指标^[100~104]. 显然, 基于虚系数的运动/力传递性能指标物理意义清晰, 具有坐标和尺度不变性. 但这些指标适用于单驱动单环机构, 很难用于具有多驱动多闭环的并联机构.

Wang等人^[105]利用反螺旋理论, 从并联机构动平台运动旋量空间中分离出单个驱动力螺旋对应的单自由度运动螺旋, 从而可将虚系数应用于并联机构, 其后逐渐形成了系统的运动/力传递性能评价体系^[106~109].

运动/力传递性能指标适用于具有混合自由度的并联机构, 在2R1T并联机构的性能分析和优化设计中应用尤其突出. Xie等人^[47,48,110,111]运用运动/力传递性能指标对多种2R1T并联机构2PUR-1PRS、2PRU-1PUR、3-RPS等进行了优化设计. Wang等人^[112~114]应用运动/力传递性能指标对RPR类并联机构2-UPR-RPU和Exechon机器人的并联模块2-UPR-SPR机构进行了优化设计, 对3种PU类并联机构进行了性能比较, 得到优选构型.

此外, 值得注意的是, Huang等人^[115]从运动学标定的角度提出了3-PRS并联机构误差参数的可识别性指标, 并通过该指标对3-PRS并联机构进行尺度综合, 所得优化参数对提高运动学标定中误差参数的可识别性具有重要意义.

5 展望

机构是制造装备的骨架和执行器. 两转一移三自由度并联机构是最具工程应用价值的并联机构之一, 其性能特性与两条转轴的空间几何关系密切相关,

可根据两条转轴在空间的几何关系可将其分为UP, PU, RPR和P*U*4类. 近年来, 我国学者在两转一移三自由度并联机构构型综合和运动学分析与设计等方面取得了国际上公认的学术成果, 综合出大量新机构, 开发了一批样机, 其中部分得到了初步应用. 然而,

就机构学而言, 当前明显缺乏遴选具有工程实用价值新机构的基本准则和方法, 这是我国并联机构基础理论研究在支持装备自主创新方面所面临的重要挑战. 此外, 在刚柔耦合动力学设计、精度标定、控制等方面亦存在大量难题, 亟需开展系统深入的研究.

参考文献

- 1 Merlet J P. Parallel Robots. Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 2006
- 2 Huang Z, Kong L F, Fang Y F. Mechanism Theory of Parallel Robotic Manipulator and Control (in Chinese). Beijing: China Machine Press, 1997 [黄真, 孔令富, 方跃法. 并联机器人机构学理论及控制. 北京: 机械工业出版社, 1997]
- 3 Huang Z, Li Q, Ding H. Theory of Parallel Mechanisms. Netherlands: Springer, 2012
- 4 Wahl J. Articulated tool head. US Patent, 6431802, 2002-8-13
- 5 Siciliano B. The Tricept robot: Inverse kinematics, manipulability analysis and closed-loop direct kinematics algorithm. Robotica, 1999, 17: 437-445
- 6 Bi Z M, Jin Y. Kinematic modeling of Exechon parallel kinematic machine. Robot Cim-Int Manuf, 2011, 27: 186-193
- 7 Neumann K E. Robot. US Patent, 4732525, 1988-3-22
- 8 Kong X, Gosselin C M. Type synthesis of three-dof up-equivalent parallel manipulators using a virtual-chain approach. In: Advances in Robot Kinematics. Netherlands: Springer, 2006. 123-132
- 9 Li Q, Hervé J M. Type synthesis of 3-DOF RPR-equivalent parallel mechanisms. IEEE Trans Robot, 2014, 30: 1333-1343
- 10 Department of Engineering & Material Science of National Natural Science Foundation of China. Mechanical Engineering Discipline Development Strategy Report (2011-2020) (in Chinese). Beijing: Science Press, 2010 [国家自然科学基金委员会工程与材料科学部. 机械工程学科发展战略报告(2011-2020). 北京: 科学出版社, 2010]
- 11 Merlet J P. Still a long way to go on the road for parallel mechanisms. In: The Proceedings of ASME 27th Biennial Mechanisms and Robotics Conference. Montreal, Quebec: The American Society of Mechanical Engineers, 2002
- 12 Hervé J M. Analyse structurelle des mécanismes par groupe des déplacements. Mech Mach Theory, 1978, 13: 437-450
- 13 Li Q, Huang Z, Herve J M. Type synthesis of 3R2T 5-DOF parallel mechanisms using the Lie group of displacements. IEEE Trans Robot Autom, 2004, 20: 173-180
- 14 Li Q, Herve J M. Parallel mechanisms with bifurcation of schoenflies motion. IEEE Trans Robot, 2009, 25: 158-164
- 15 Herve J M. Uncoupled actuation of pan-tilt wrists. IEEE Trans Robot, 2006, 22: 56-64
- 16 Li Q, Hervé J M. 1T2R parallel mechanisms without parasitic motion. IEEE Trans Robot, 2010, 26: 401-410
- 17 Rico J M, Cervantes-Sánchez J J, Tadeo-Chávez A, et al. New considerations on the theory of type synthesis of fully parallel platforms. J Mech Design, 2008, 78: 409-410
- 18 Meng J, Liu G, Li Z. A geometric theory for analysis and synthesis of sub-6 dof parallel manipulators. IEEE Trans Robot, 2007, 23: 625-649
- 19 Wu Y, Wang H, Li Z. Quotient kinematics machines: Concept, analysis, and synthesis. J Mech Robot, 2011, 3: 2739-2744
- 20 Gao F, Yang J L, Ge Q D. Type Synthesis of Parallel Mechanisms Based on GF Sets Theory (in Chinese). Beijing: Science Press, 2011 [高峰, 杨加伦, 葛巧德. 并联机器人型综合的 Gf 集理论. 北京: 科学出版社, 2011]
- 21 Gogu G. Structural synthesis of fully-isotropic translational parallel robots via theory of linear transformations. Eur J Mech A Solids, 2004, 23: 1021-1039
- 22 Jin Q, Yang T. Theory for topology synthesis of parallel manipulators and its application to three-dimension-translation parallel manipulators. J Mech Design, 2004, 126: 625-639
- 23 Yang T L. Robot Mechanism Topology (in Chinese). Beijing: China Machine Press, 2004 [杨廷力. 机器人机构拓扑结构学. 北京: 机械工业出版社, 2004]
- 24 Huang Z, Li Q. General methodology for type synthesis of symmetrical lower-mobility parallel manipulators and several novel manipulators. Int J Robot Res, 2002, 21: 131-145
- 25 Huang Z, Li Q. Type synthesis of symmetrical lower-mobility parallel mechanisms using the constraint-synthesis method. Int J Robot Res, 2003, 22: 59-79

- 26 Kong X, Gosselin C M. Type synthesis of 3T1R 4-DOF parallel manipulators based on screw theory. *IEEE Trans Rob Autom*, 2004, 20: 181–190
- 27 Kong X, Gosselin C M. Type synthesis of three-degree-of-freedom spherical parallel manipulators. *Int J Robot Res*, 2004, 23: 237–245
- 28 Fang Y, Tsai L W. Structure synthesis of 4-DOF and 5-DOF parallel manipulators with identical limbs. *Int J Rob Res*, 2002, 21: 799–810
- 29 Carricato M, Parenti-Castelli V. Singularity-free fully-isotropic translational parallel manipulators. In: *The Proceedings of ASME 2002 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*. Montreal, Quebec: The American Society of Mechanical Engineers, 2002. 1041–1050
- 30 Carricato M. Fully isotropic four-degrees-of-freedom parallel mechanisms for Schoenflies motion. *Int J Robot Res*, 2005, 24: 397–414
- 31 Xie F, Liu X J, You Z, et al. Type synthesis of 2T1R-type parallel kinematic mechanisms and the application in manufacturing. *Robot Cim-Int Manuf*, 2014, 30: 1–10
- 32 Xie F, Liu X J, Li T. Type synthesis and typical application of 1T2R-type parallel robotic mechanisms. *Math Probl Eng*, 2013, 9: 497–504
- 33 Huang T, Li M, Zhao X, et al. Conceptual design and dimensional synthesis for a 3-DOF module of the TriVariant-a novel 5-DOF reconfigurable hybrid robot. *IEEE Trans Robot*, 2005, 21: 449–456
- 34 Li M, Huang T, Chetwynd D G, et al. Forward position analysis of the 3-DOF module of the TriVariant: A 5-DOF reconfigurable hybrid robot. *J Mech Design*, 2006, 128: 319–322
- 35 Sun T, Song Y. Comparison between a 4-DOF hybrid module and Tricept module focusing on inverse kinematics and stiffness. In: *Proceedings of 2009 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO)*. New York: IEEE, 2009. 1597–1602
- 36 Sun T, Song Y, Li Y, et al. Workspace decomposition based dimensional synthesis of a novel hybrid reconfigurable robot. *J Mech Robot*, 2010, 2: 191–220
- 37 Lian B, Sun T, Song Y, et al. Stiffness analysis and experiment of a novel 5-DoF parallel kinematic machine considering gravitational effects. *Int J Mach Tool Manu*, 2015, 95: 82–96
- 38 Hunt K H. Structural kinematics of in-parallel-actuated robot-arms. *J Mech Design*, 1983, 105: 705–712
- 39 Carretero J, Nahon M, Gosselin C, et al. Kinematic analysis of a three-dof parallel mechanism for telescope applications. In: *Proceedings of 1997 ASME Design Engineering Technical Conferences*. Sacramento: ASME, 1997
- 40 Poulriot N A, Gosselin C M. Motion simulation capabilities of three-degree-of-freedom flight simulators. *J Aircr*, 1998, 35: 9–17
- 41 Pernet E, Henein S, Magnani I, et al. Design of parallel robots in microrobotics. *Robotica*, 1997, 15: 417–420
- 42 Liu D, Che R, Li Z, et al. Research on the theory and the virtual prototype of 3-DOF parallel-link coordinate-measuring machine. *IEEE Trans Instrum Meas*, 2003, 52: 119–125
- 43 Liu X J, Wu C, Wang J S. Attitude description method of [PP]S type parallel robotic mechanisms (in Chinese). *J Mech Eng*, 2008, 44: 19–23 [刘辛军, 吴超, 汪劲松. [PP]S 类并联机器人机构姿态描述方法. *机械工程学报*, 2008, 44: 19–23]
- 44 Huang T, Liu H. Parallel mechanism having two rotational and one translational degrees of freedom. US Patent, 7793564, 2010-9-14
- 45 Li Y, Liu H, Zhao X, et al. Design of a 3-DOF PKM module for large structural component machining. *Mech Mach Theory*, 2010, 45: 941–954
- 46 Chen X, Xie F, Liu X, et al. A comparison study on motion/force transmissibility of two typical 3-DoF parallel manipulators: The sprint Z3 and A3 tool heads. *Int J Adv Manuf Tech*, 2014, 11: 1–10
- 47 Xie F, Liu X J, Wang J. A 3-DOF parallel manufacturing module and its kinematic optimization. *Robot Cim-Int Manuf*, 2012, 28: 334–343
- 48 Xie F, Liu X J, Li T. A comparison study on the orientation capability and parasitic motions of two novel articulated tool heads with parallel kinematics. *Adv Mech Eng*, 2013, 5: 249103
- 49 Chen Z M, Zhang Y, Huang K, et al. Symmetrical 2R1T parallel mechanism without parasitic motion (in Chinese). *J Mech Eng*, 2016, 52: 9–17 [陈子明, 张扬, 黄坤, 等. 一种无伴随运动的对称两转一移并联机构. *机械工程学报*, 2016, 52: 9–17]
- 50 Jin Y, Kong X, Higgins C, et al. Kinematic design of a new parallel kinematic machine for aircraft wing assembly. In: *Proceedings of 2012 10th IEEE International Conference on Industrial Informatics (INDIN)*. New York: IEEE, 2012. 669–674
- 51 Lee K M, Shah D K. Kinematic analysis of a three-degrees-of-freedom in-parallel actuated manipulator. *IEEE Trans Rob Autom*, 1988, 4: 354–360
- 52 Fang Y, Huang Z. Kinematics of a three-degree-of-freedom in-parallel actuated manipulator mechanism. *Mech Mach Theory*, 1997, 32: 789–796
- 53 Huang Z, Wang J. Identification of principal screws of 3-DOF parallel manipulators by quadric degeneration. *Mech Mach Theory*, 2001, 36: 893–911
- 54 Huang Z, Wang J, Fang Y. Analysis of instantaneous motions of deficient-rank 3-RPS parallel manipulators. *Mech Mach Theory*, 2002, 37: 229–240
- 55 Tsai M S, Shiau T N, Tsai Y J, et al. Direct kinematic analysis of a 3-PRS parallel mechanism. *Mech Mach Theory*, 2003, 38: 71–83

- 56 Li Y, Xu Q. Kinematic analysis of a 3-PRS parallel manipulator. *Robot Cim-Int Manuf*, 2007, 23: 395–408
- 57 Gallardo J, Orozco H, Rico J M. Kinematics of 3-RPS parallel manipulators by means of screw theory. *Int J Adv Manuf Tech*, 2008, 36: 598–605
- 58 Gallardo-Alvarado J, Posadas-Garcia J D D. Mobility analysis and kinematics of the semi-general 2 (3-RPS) series-parallel manipulator. *Robot Cim-Int Manuf*, 2013, 29: 463–472
- 59 Carretero J, Podhorodeski R, Nahon M, et al. Kinematic analysis and optimization of a new three degree-of-freedom spatial parallel manipulator. *J Mech Design*, 2000, 122: 17–24
- 60 Huang Z, Tao W, Fang Y. Study on the kinematic characteristics of 3 DOF in-parallel actuated platform mechanisms. *Mech Mach Theory*, 1996, 31: 999–1007
- 61 Li Q, Chen Q, Wu C, et al. Geometrical distribution of rotational axes of 3-[P][S] parallel mechanisms. *Mech Mach Theory*, 2013, 65: 46–57
- 62 Liu X J, Wang J. A new methodology for optimal kinematic design of parallel mechanisms. *Mech Mach Theory*, 2007, 42: 1210–1224
- 63 Li Q, Chen Z, Chen Q, et al. Parasitic motion comparison of 3-PRS parallel mechanism with different limb arrangements. *Robot Cim-Int Manuf*, 2011, 27: 389–396
- 64 Joshi S A, Tsai L W. Jacobian analysis of limited-DOF parallel manipulators. *J Mech Design*, 2002, 124: 254–258
- 65 Li Y W. On Singularity of Several Kinds of Spacial Parallel Manipulators (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Qinhuangdao: Yanshan University, 2005 [李艳文. 几类空间并联机器人的奇异研究. 博士学位论文. 秦皇岛: 燕山大学, 2005]
- 66 Schadlbauer J, Walter D, Husty M. The 3-RPS parallel manipulator from an algebraic viewpoint. *Mech Mach Theory*, 2014, 75: 161–176
- 67 Nurahmi L, Schadlbauer J, Caro S, et al. Kinematic analysis of the 3-RPS cube parallel manipulator. *J Mech Robot*, 2015, 7: 011008
- 68 Li Q C, Sun X D, Chen Q H, et al. Kinematics and singularity analysis of 2-PRS-PRRU parallel mechanism (in Chinese). *J Mech Eng*, 2011, 47: 21–27 [李秦川, 孙晓东, 陈巧红, 等. 2-PRS-PRRU 并联机构运动学与奇异分析. 机械工程学报, 2011, 47: 21–27]
- 69 O'Brien J F. A Coordinate-free method for finding constraint singularities in parallel robots. *Int J Robot Autom*, 2011, 26: 204–211
- 70 Chai X X, Xiang J N, Li Q C. Singularity analysis of a 2-UPR-RPU parallel mechanism (in Chinese). *J Mech Eng*, 2015, 51: 144–151 [柴馨雪, 项济南, 李秦川. 2-UPR-RPU 并联机构奇异分析. 机械工程学报, 2015, 51: 144–151]
- 71 Li Q, Xiang J N, Chai X, et al. Singularity analysis of a 3-RPS parallel manipulator using geometric algebra. *Chin J Mech Eng*, 2015, 28: 1204–1212
- 72 Lee K M, Shah D K. Dynamic analysis of a three-degrees-of-freedom in-parallel actuated manipulator. *IEEE Trans Rob Autom*, 1988, 4: 361–367
- 73 Shiau T N, Tsai Y J, Tsai M S. Nonlinear dynamic analysis of a parallel mechanism with consideration of joint effects. *Mech Mach Theory*, 2008, 43: 491–505
- 74 Tsai M S, Yuan W H. Dynamic modeling and decentralized control of a 3 PRS parallel mechanism based on constrained robotic analysis. *J Manuf Sci E-T Asme*, 2011, 63: 525–545
- 75 Yuan W H, Tsai M S. A novel approach for forward dynamic analysis of 3-PRS parallel manipulator with consideration of friction effect. *Robot Cim-Int Manuf*, 2014, 30: 315–325
- 76 Staicu S. Matrix modeling of inverse dynamics of spatial and planar parallel robots. *Multibody Syst Dyn*, 2012, 27: 239–265
- 77 Zhang J, Dai J S, Huang T. Characteristic equation-based dynamic analysis of a three-revolute prismatic spherical parallel kinematic machine. *J Comput Nonlinear Dyn*, 2015, 10: 021017
- 78 Li Q, Wang M, Huang T, et al. Compliance analysis of a 3-DOF spindle head by considering gravitational effects. *Chin J Mech Eng*, 2015, 28: 1–10
- 79 Hu B, Lu Y. New approach for analyzing the stiffness of 3-RPS parallel manipulator (in Chinese). *J Mech Eng*, 2010, 46: 24–29 [胡波, 路懿. 求解 3-RPS 并联机构刚度的新方法. 机械工程学报, 2010, 46: 24–29]
- 80 Zhao Y, Liu J, Huang Z. A force analysis of a 3-RPS parallel mechanism by using screw theory. *Robotica*, 2011, 29: 959–965
- 81 Luo H W, Zhang J, Wang H, et al. Static stiffness modeling method of 3-RPS PKM (in Chinese). *J Tianjin Univ*, 2015, 48: 797–803 [落海伟, 张俊, 王辉, 等. 3-RPS 并联机构静刚度建模方法. 天津大学学报, 2015, 48: 797–803]
- 82 Fan K C, Wang H, Zhao J W, et al. Sensitivity analysis of the 3-PRS parallel kinematic spindle platform of a serial-parallel machine tool. *Int J Mach Tool Manu*, 2003, 43: 1561–1569
- 83 Farhat N, Mata V, Page A, et al. Identification of dynamic parameters of a 3-DOF RPS parallel manipulator. *Mech Mach Theory*, 2008, 43: 1–17
- 84 Huang P, Wang J S, Wang L P, et al. Kinematical error analysis and identification of a 3-PRS parallel mechanism (in Chinese). *J Tsinghua Univ (Sci Technol)*, 2010, 11: 1811–1814 [黄鹏, 汪劲松, 王立平, 等. 3-PRS 并联机构误差运动学分析及辨识. 清华大学学报: 自然科学版, 2010, 11: 1811–1814]
- 85 Li X Y, Chen W Y, Han X G. Accuracy analysis and synthesis of 3-RPS parallel machine based on orthogonal design (in Chinese). *J Beijing Univ Aeronaut Astronaut*, 2011, 37: 979–984 [李新友, 陈五一, 韩先国. 基于正交设计的 3-RPS 并联机构精度分析与综合.

- 北京航空航天大学学报, 2011, 37: 979–984]
- 86 Pan B Z, Song Y M, Wang P F, et al. Laser tracker based rapid home position calibration of a hybrid robot (in Chinese). *J Mech Eng*, 2014, 50: 31–37 [潘伯钊, 宋轶民, 王攀峰, 等. 基于激光跟踪仪的混联机器人快速零点标定方法. *机械工程学报*, 2014, 50: 31–37]
- 87 Doty K L, Melchiorri C, Schwartz E M, et al. Robot manipulability. *IEEE Trans Rob Autom*, 1995, 11: 462–468
- 88 Merlet J P. Jacobian, manipulability, condition number, and accuracy of parallel robots. *J Mech Design*, 2006, 128: 199–206
- 89 Angeles J. A scale-independent and frame-invariant index of kinematic conditioning for serial manipulators. In: *Advances in Robot Kinematics*. 2nd. New York: Springer-Verlag, 1991
- 90 Tandirci M, Angeles J, Ranjbaran F. The characteristic point and the characteristic length of robotic manipulators. In: *Proceedings of ASME 22nd Biennial Conference*. New York: ASME Press, 1992. 45: 203–208
- 91 Kim S G, Ryu J. New dimensionally homogeneous Jacobian matrix formulation by three end-effector points for optimal design of parallel manipulators. *IEEE Trans Rob Autom*, 2003, 19: 731–736
- 92 Liu H, Huang T, Chetwynd D G. A method to formulate a dimensionally homogeneous Jacobian of parallel manipulators. *IEEE Trans Robot*, 2011, 27: 150–156
- 93 Liu Z Z, Liu H Y, Luo Z, et al. Jacobian matrix normalization based on variable weighting matrix (in Chinese). *J Mech Eng*, 2014, 50: 29–35 [刘志忠, 柳洪义, 罗忠, 等. 基于可变加权矩阵的机器人雅可比矩阵规范化. *机械工程学报*, 2014, 50: 29–35]
- 94 Pond G, Carretero J A. Architecture optimisation of three 3-RS variants for parallel kinematic machining. *Robot Cim-Int Manuf*, 2009, 25: 64–72
- 95 Sun T, Song Y, Li Y, et al. Dimensional synthesis of a 3-DOF parallel manipulator based on dimensionally homogeneous Jacobian matrix. *Sci China Ser E*, 2010, 53: 168–174
- 96 Rao N M, Rao K M. Dimensional synthesis of a spatial 3-RPS parallel manipulator for a prescribed range of motion of spherical joints. *Mech Mach Theory*, 2009, 44: 477–486
- 97 Rao N M. Synthesis of a spatial 3-RPS parallel manipulator based on physical constraints using hybrid GA simplex method. *Int J Adv Manuf Tech*, 2011, 52: 777–787
- 98 Shi J, Wang Y, Zhang G, et al. Optimal design of 3-DOF PKM module for friction stir welding. *Int J Adv Manuf Tech*, 2013, 66: 1879–1889
- 99 Ball R S. *A Treatise on the Theory of Screws*. London: Cambridge University Press, 1998
- 100 Yuan M S C, Freuden F, Woo L S. Kinematic Analysis of Spatial Mechanisms by Means of Screw Coordinates. 2. Analysis of Spatial Mechanisms. *J Eng Ind*, 1971, 93: 67
- 101 Sutherland G, Roth B. A transmission index for spatial mechanisms. *J Manuf Sci E-T Asme*, 1973, 95: 589–597
- 102 Tsai M J, Lee H W. The transmissivity and manipulability of spatial mechanisms. *J Mech Design*, 1994, 116: 137–143
- 103 Tsai M J, Lee H W. Generalized evaluation for the transmission performance of mechanisms. *Mech Mach Theory*, 1994, 29: 607–618
- 104 Chen C, Angeles J. Generalized transmission index and transmission quality for spatial linkages. *Mech Mach Theory*, 2007, 42: 1225–1237
- 105 Wang J, Wu C, Liu X J. Performance evaluation of parallel manipulators: Motion/force transmissibility and its index. *Mech Mach Theory*, 2010, 45: 1462–1476
- 106 Liu X J, Wang J. *Parallel Kinematics: Type, Kinematics, and Optimal Design*. Berlin: Springer Science & Business Media, 2013
- 107 Liu H, Wang M, Huang T, et al. A Dual Space Approach for Force/Motion Transmissibility Analysis of Lower Mobility Parallel Manipulators. *J Mech Robot*, 2015, 7: 034504
- 108 Huang T, Wang M, Yang S, et al. Force/motion transmissibility analysis of six degree of freedom parallel mechanisms. *J Mech Robot*, 2014, 6: 031010
- 109 Chen X, Xie F G, Liu X J. Evaluation of the maximum value of motion/force transmission power in parallel manipulator (in Chinese). *J Mech Eng*, 2014, 50: 1–9 [陈祥, 谢福贵, 刘辛军. 并联机构中运动/力传递功率最大值的评价. *机械工程学报*, 2014, 50: 1–9]
- 110 Xie F, Liu X J, Wu C, et al. A novel spray painting robotic device for the coating process in automotive industry. In: *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C. J Mech Engin Sci*, 2015, 229: 2081–2093
- 111 Xie F, Liu X J, Wang C. Design of a novel 3-DoF parallel kinematic mechanism: Type synthesis and kinematic optimization. *Robotica*, 2015, 33: 622–637
- 112 Wang F, Chen Q, Li Q. Optimal design of a 2-UPR-RPU parallel manipulator. *J Mech Design*, 2015, 137: 054501
- 113 Wang F B, Chen Q H, Wu C Y, et al. Dimensional synthesis of a 2-UPR-SPR parallel manipulator (in Chinese). *J Mech Eng*, 2015, 51: 24–32 [王飞博, 陈巧红, 武传宇, 等. 2-UPR-SPR 并联机构尺度综合. *机械工程学报*, 2015, 51: 24–32]
- 114 Wang F B, Wu W F, Chen X, et al. Optimal type selection of 1T2R parallel mechanisms based on motion/force transmissibility (in Chinese). *J Mech Eng*, 2014, 50: 20–28 [王飞博, 吴伟峰, 陈祥, 等. 基于运动/力传递特性的 1T2R 并联机构构型优选. *机械工程学报*, 2014, 50: 20–28]
- 115 Huang P, Wang J, Wang L, et al. Dimensional synthesis for 3-PRS mechanism based on identifiability performance. *Chin J Mech Eng*, 2012, 25: 234–240

Summary for “两转一移三自由度并联机构研究进展”

Review on 2R1T 3-DOF parallel mechanisms

LI QinChuan^{1*}, CHAI XinXue¹ & CHEN QiaoHong²

¹ Faculty of Mechanical Engineering & Automation, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China;

² School of Information, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China

* Corresponding author, E-mail: lqchuan@zstu.edu.cn

Mechanisms are the skeletons and end-effectors of manufacturing equipments. The innovation of mechanism is indispensable to the independent innovation of manufacturing equipments. Compared with serial industrial manipulators, parallel mechanisms offer high rigidity, good dynamic response, potential high accuracy and large payload capability with the price of less dexterity, complex distribution of singular configurations and limited workspace. Over the last two decades, lower-mobility parallel mechanisms whose degrees of freedom (DOF) are fewer than six have been successfully implemented in many applications like positioning, orientation, and axis-symmetrical machining, which do not require all six DOFs. With the well optimized architecture of a lower-mobility parallel mechanism, the reduced cost of fabrication, actuation, control and maintenance can be obtained compared with their 6-DOF counterparts. The 2R1T (R: rotation, T: translation) 3-DOF parallel mechanisms are most typical examples of successful applications in advanced manufacturing equipments such as parallel kinematic machine, industrial robot, and articulated tool head. Based on the relative geometrical relations between the two axes of rotation, the 2R1T 3-DOF parallel mechanism is classified into four categories: UP, PU, RPR and P*U*. The motion of the moving platform of a UP (U: universal joint, P: prismatic joint) parallel mechanism can be generated by a UP serial chain, including a rotation about a fixed axis, a rotation about a moving axis perpendicular to the fixed one, and a translation along the normal of the two axes. The motion of the moving platform of a PU parallel mechanism can be generated by a PU serial chain, including a rotation about an orientation-fixed axis, a rotation about a moving axis perpendicular to the orientation-fixed one, and a translation perpendicular to the orientation-fixed one. The motion of the moving platform of a RPR parallel mechanism can be generated by a RPR serial chain, including a rotation about a fixed axis near the base, a translation perpendicular to the fixed revolute axis and a rotation about a moving axis perpendicular to the orientation-fixed one. When the orientation and position of the two rotational axes of a 2R1T parallel mechanism are time varying, the motion of the moving platform cannot be modeled by a 3-DOF serial chain and is denoted by a virtual serial chain P*U*. The current research status of study on type synthesis, performance analysis and dimensional synthesis of the UP, PU, RPR and P*U* parallel mechanisms are reviewed and discussed. It is worth noting that despite the fact that many well-acknowledged progresses have been obtained by Chinese researchers in type synthesis, kinematic analysis and synthesis of lower-mobility parallel mechanisms, there is still a lack of basic principles and methods for selecting the architectures with engineering potentials from the massive outputs of type synthesis. This is an important challenge that the Chinese researchers in the fundamental research area of parallel mechanisms must face to support the self-innovation of manufacturing equipments. In addition, there are many open problems concerning rigid-flexible coupled dynamic design, accuracy calibration, and control of 2R1T 3-DOF parallel mechanisms, which require an immediate deployment of systematic and thorough research.

parallel mechanism, screw theory, type synthesis, performance index, dimensional synthesis

doi: 10.1360/N972015-01228