DOI: 10.3901/JME.2020.05.133

空间多臂机构折展性及其结构配置设计*

赵福群 郭 盛 曲海波 张程煜

(北京交通大学机械与电子控制工程学院 北京 100044)

摘要: 为提高空间多臂机构折展特性和操作特性等运动性能,通过多臂机构与操作物体可组成并联机构拓扑形式的设计思想,提出了一类具有折展特性和多种操作能力的空间多臂机构。定义了用于叠放折展支链的区域及策略,提出了折展支链的延伸性判别条件。基于指定区域的尺度限制,设计了具有不同自由度且满足特定叠放要求的折展支链。其次,以拓扑形式分解的方法将操作物体工作模式进行分解表达,给出了多臂机构的结构配置形式。结果表明,基于所提方法,空间多臂机构可通过与操作物体自主释放与组合,改变拓扑形式,实现兼具折展性能和多种操作模式的设计目标。

关键词: 多臂机构; 叠放区域; 折展特性; 结构配置; 协同操作

中图分类号: TH112

Design of Deployable Space Multiple-arm Mechanism and Its Structure Configuration

ZHAO Fuqun GUO Sheng QU Haibo ZHANG Chengyu

(School of Mechanical, Electronic and Control Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044)

Abstract: To improve the folding and operation performance of multiple-arm mechanism, a class of multiple-arm mechanism with deployable characteristic and multiple-operation capability is proposed by the idea that parallel mechanism can be formed by multiple-arm mechanism and operation object. The definition of the region and strategy for storing deployable chains and the proposal of the extension criteria of deployable chains are proposed. Based on the specified scale-restricted area, deployable chains with different degrees of freedom are designed to satisfy specific storing requirements. Working modes of objects is decomposed and expressed by means of topological decomposition, and the multiple-arm structure configuration is given. The results show the multiple-arm mechanism can change the topological form by autonomous release and combination with the operation object, so that it can achieve the design purpose of deployable characteristic and multiple-operation based on the proposed method.

Key words: multiple-arm mechanism; storage area; folded-deployed property; structure configuration; concurrent operation

0 前言

空间操作臂类机构是应用于航空航天操作领域的一类典型机构^[1-2],主要执行包括检测维修、交会对接、目标抓捕等工作任务^[3-5]。随着空间技术的发展,对宇航机构的性能要求也不断提高,要求机构可通过构型及结构自主变化等方式以适应复杂化环境,从而完成多样操作任务。然而,多样化操作意味着操作臂本身具有自由度数目较多,这就造成了机构本体具有的杆件数目较多,机构体积较为庞大。因此,许多学者围绕操作臂类机构的折展性和操作性能开展了相应研究,如刘亚军等^[6-7]提出了基于可

操作性指标的 6R 操作臂型综合方法,并进行了展开和收拢状态的设计。

当多操作臂与操作物体连接时,可认定为某种并联机构拓扑形式。在设计此类机构时,可采用并联机器人设计思想,针对不同操作任务,进行任务分类和多臂配置设计,优化单臂所具驱动数目和占用体积。近年来,国内外诸多学者通过将并联机构的概念引入机械臂/手类机构的构型设计与分析中,取得了很好的效果。CORVES 等^[8]通过并联机构设计方法提出了具有可重构性质的多臂机器人系统,机构可通过切换不同操作臂对物体抓取来实现动力学等特性重构。LEE 等^[9]以并联机构概念为基础,根据任务所需自由度综合出不同手指数的灵巧手机构。HUNT 等^[10]基于螺旋理论提出了串并链机构混合的机械手。GOGU 等^[11-12]将并联机构理念运用到

* 国家自然科学基金(51875033)和中央高校基本科研业务费专项资金(2018YJS140)资助项目。20190310 收到初稿,20190728 收到修改稿

传统灵巧手的设计中,将灵巧性指标进行了比较并应用并联机构设计方法设计了新的抓取机构。DOLLAR 等^[13-14]结合并联机构构型设计和静力学分析等方法,对灵巧手进行了设计和分析,得到了基于并联机构概念的三指两关节灵巧手。NEFZI 等^[15-16]设计了一款多指夹持机构,将物体与支链整体视为并联机构,比较了综合出的机构性能指标,获得了理想的操作手机械本体。

因此,针对操作臂类机构的叠放性和操作性进行研究,以减少运载压力,提高操作性能,对机器人机构学和空间技术领域具有一定的研究意义。本文基于指定尺度限制的延伸性原则,设计了满足特定叠放要求的可折叠操作臂。利用多臂机构与操作物体连接组成并联机构的拓扑形式,将操作物体定义为并联机构的动平台,可折叠操作臂定义为并联机构的折展支链,所提出的多臂机构可通过释放关节与操作物体进行自主释放和组合,实现并联机构自身拓扑形式的改变和多种操作模式的协同操作。

1 多臂机构拓扑描述及其配置数目

1.1 机构拓扑描述

图1所示为空间多臂机构与操作物体所形成的并联机构拓扑描述。此时,操作臂1,操作臂2和操作臂4通过可释放关节与操作物体进行连接,形成并联机构的拓扑形式。而操作臂3处于非工作状态,叠放于折展单元内。折展单元为存放操作臂的折展平台所分配给不同臂的存放区域。

图1 多臂机构拓扑描述

在本文中,将操作臂定义为所形成的并联机构的支链,具有折展性能的操作臂称为折展支链。在与操作物体连接前,折展支链中的各运动副通过驱动电机实现由叠放与展开状态的转换,并控制支链末端位置与物体进行连接。在多臂机构与操作物体

连接形成并联机构的拓扑形式后,整体机构需满足并联机构的运动特性,即机构整体所具有的驱动数目应等于机构整体具有的独立自由度数。此时,支链中某些驱动关节通过电机去使能的方式转化为并联机构中的被动关节。在机构工作时,与操作物体连接的支链称为执行支链,其余称为待执行支链。支链通过可释放关节与操作物体进行释放和组合来改变并联机构的拓扑形式。

为使组成的并联机构具有三维空间运动形式,需要3条以上支链与物体进行连接。本文以多臂机构含有4条机械臂的构型为例,进行多臂机构折展性的设计。如图2所示,虚线区域为折展单元,由每条支链的起始杆件和存放区域构成,4条支链两两垂直,将折展平台划分为4个区域。

图2 折展支链及叠放区域示意图

由于各折展支链为若干杆件通过运动副以串联的形式进行连接,若虚线部分表示各折展支链所形成的存放区域,则各支链中的起始杆件决定了存放区域的边长。图2中,假定支链1的起始杆件的长度为 L_{c1} ,则支链1和支链4所具存放区域的长度在 x 方向的长度要小于 L_{c1} ,支链1和支链4起始杆件的长度决定了整个折展平台在 x 方向的长度。同理,支链2和支链4起始杆件的长度决定了整个折展平台在 y 方向的长度。

1.2 多臂配置数目

由于操作物体在空间中实现自由度数最多为6,在非冗余条件下,折展平台所配置折展支链的数目最多为6,且当多臂机构对物体进行操作时,为形成闭环结构,执行支链的数目应不小于2

$$2 \leq L \leq 6 \quad (1)$$

式中, L 为折展支链配置的数目,在所有配置折展支链中, A 表示执行支链的数目, R 表示待执行支链的数目。

在 $L=2\sim 6$ 的多臂机构中, 通过配置不同数量的执行支链, 可调整操作模式的数目也不相同。如在 $L=3$ 时, 若执行支链的数目 $A=2$, 则机构可调整操作模式的数目为 2。将机构对操作物体的可调整自由度的数目定义为可配置操作度, 则整体机构自由度、可配置操作度 λ_m 与折展支链数目存在关系见表 1。

表 1 机构自由度、折展支链数和可配置操作度关系

折展支链数目 L	待执行支链数目 R				
	0	1	2	3	4
2	DOF ≤ 2 ; $\lambda_m=1$	—	—	—	—
3	DOF ≤ 3 ; $\lambda_m=1$	DOF ≤ 2 ; $\lambda_m=3$	—	—	—
4	DOF ≤ 4 ; $\lambda_m=1$	DOF ≤ 3 ; $\lambda_m=4$	DOF ≤ 2 ; $\lambda_m=6$	—	—
5	DOF ≤ 5 ; $\lambda_m=1$	DOF ≤ 4 ; $\lambda_m=5$	DOF ≤ 3 ; $\lambda_m=10$	DOF ≤ 2 ; $\lambda_m=10$	—
6	DOF ≤ 6 ; $\lambda_m=1$	DOF ≤ 5 ; $\lambda_m=6$	DOF ≤ 4 ; $\lambda_m=15$	DOF ≤ 3 ; $\lambda_m=20$	DOF ≤ 2 ; $\lambda_m=15$

由表 1 可以看出, 根据操作物体实现不同自由度要求, 可通过配置不同数目的折展支链来实现。针对第 1.1 节中的四臂机构, 当 $A=3$, $R=1$ 时, 即机构中始终有 3 条折展支链与操作物体连接, 机构可通过配置 4 组不同的 3 条支链对物体进行操作, 实现操作物体在空间中的 3 种不同的运动形式。表 1 中, 当 $R=5$, $R=6$ 时, 机构中执行支链的数目 $A\leq 1$, 结果全部为表中“—”, 故没有列出。

2 多臂机构构型折展设计

2.1 关节数量的确定

若多臂机构使操作物体实现的自由度为 F , 则各支链具有的链接度^[9]必须至少等于 F , 为避免冗余存在, 链接度 C_i 应不大于 6, 那么可得

$$F \leq C_i \leq 6 \quad (2)$$

式中, 支链的链接度 C_i 表示支链中各关节自由度数目之和。

若每条折展支链中所具有关节数目为 m_i , 则有

$$F \leq m_i \leq 6 \quad (3)$$

通过表 1 可知, 若 $A=2$, 则机构对物体的可操作度为 0。同时, 机构实现操作物体自由度的数目也有限制, 即

$$2 \leq F \leq 6 \quad (4)$$

若支链中各关节自由度等于 1, 由式(3)可以得到支链中关节数目满足

$$2 \leq m_i \leq 6 \quad (5)$$

式(5)说明了操作臂中各运动副自由度为 1 时, 所具有的关节数量范围。通常, 操作臂中的运动副由 R 副和 P 副构成, 而 R 副和 P 副的关节数量需要使得操作臂可叠放于图 2 中所示的存放区域。P 副具有在单一方向上的伸展特性, 但不具备向其余方向延伸的能力。所以, 为防止支链超出限制区域, 需要配备转动副使得支链向不同方向延伸, 从而满足叠放要求。因此, 支链若实现折展, 其具有转动副的数目 R_n 与移动副的数目 P_n 需要满足下式关系

$$R_n \geq P_n \quad (6)$$

支链若满足含有大于 2 的转动副数目($R_n \geq 2$)和支链杆件数小于 5($l_n \leq 5$)的条件, 则支链所具有运动副的组合形式有: 6R、5R1P、5R、4R、4R2P、4R1P、3R、3R2P、3R1P、2R2P、2R1P、2R。

2.2 折展支链延伸性

在此类机构折展支链中, 折展区域基于杆件尺寸构成, 折展区域在 x 和 y 轴方向上的尺寸设为 L_c 和 L_w 。机构支链在折叠状态下, 各杆件不超过折叠平面中两个方向中最长杆件长度。如图 3 中所示,

图 3 折展区域的尺度限制及延伸性

支链通过末端与固定平台连接, 各杆件通过运动副连接形成支链构型。为使支链可以叠放到折展区域内, 各转动副可分为两种类型。其中, 第 I 类转动副轴线位于图中折展区域平面内, 可通过自身转动使后一级处于叠放平面内, 第 II 类转动副轴线垂直于叠放平面, 可通过自身转动使后一级具有向根部

延伸的能力,以满足折展区域限制。

由图 3 可以看出,支链实现折展需要满足两个要求:① 支链中各杆件轴线在折叠状态时处于同一平面;② 各转动副后的杆件具有向支链起始端方向转动的能力。而第 I 类转动副决定了使支链在折叠状态时所有杆件位于同一平面内,第 II 类转动副决定了支链实现折展的能力。

在明确不同类型转动副的功能后,需要对其连接和组合方式进行确定。图 4a 中的杆件 BC 与转动副 B 在转动时,不能使杆件 BC 进行向起始杆件末端的运动,使其超出区域限制,不能满足叠放区域限制。而图 3b 中,通过转动副连接的虚线处的杆件表示其位于非合理位型,需通过转动副进行转动,使后一级杆件处于叠放区域,达到合理位型。在图 4b 中,杆件 BC 可通过转动副 B 运动到折展区域内。同理,如图 4c 所示,杆件 CD 可通过转动副 C 运动到折展区域内。而在确定转动副连接方式后,可以在杆件中按照自由度数目需求,利用 P 副来取代杆件的位置,如图 4d 所示。

(a) 折展支链病态延伸

(b) 折展支链健康延伸

(c) 折展支链折叠状态

(d) P 副可作为杆件替换

图 4 折展区域限制下满足折展要求的配置方式

通过图 3 可以看出,在折展支链中,转动副的下一杆件的轴线应保证与该转动副轴线相互垂直,即杆件轴线沿转动副转动的径向方向,使支链末端具有向支链起始端收展的趋势和叠放于折展区域的能力。将第 2.1 节中得到的 12 种运动副组合方式按照上述连接方式可得到不同自由度且满足叠放要求的折展支链构型。图 5 为折展支链构型设计实例与折叠状态。在设计折展支链时,存在两种特殊情况:① 在折展区域某方向包含两个及以上杆件,其长度之和不超过折展区域在这一方向的限制,与图 3a 中所示不同,平面区域某个方向的长度均由一个杆件构成,而在实际设计过程中,在某一方向上,可以有 2 个或以上杆件,此时,需保证所有杆件的尺寸之和满足平面区域尺度的限制。如图 5a 所示,杆件 R_1R_2 与 R_2R_3 通过转动副 R_2 相连,转动副 R_1 至 R_3 距离构成了折展区域长度 L_C ;② 为提高叠放性能,通过结构设计,最后一个杆件可通过转动副的转动与前一杆件重合,如图 5b 所示。杆件 R_4R_5 通过转动副 R_4 与杆件 R_3R_4 重合。

(a) 两杆件构成折展区域 L_C 的长度

(b) 末端杆件与前一杆件重合

图 5 折展支链构型设计实例图

3 多臂机构结构配置设计

多臂机构通过不同臂与物体连接来实现对物体操作模式的转换, 且形成并联机构的拓扑形式。传统并联机构的设计方法^[17-18]是将末端物体所具有自由度形式分配到各支链中, 来得到理想构型。然而, 对于多臂机构而言, 在进行多臂结构配置时, 操作物体可根据任务需求配置不同的操作臂组合, 实现操作模式的切换。因此, 需要将不同操作模式对应的多种拓扑形式进行分解表示。

在四臂机构中, 与操作物体可连接的支链数目分别为 2、3、4。当支链连接数目为 2, 即整体机构中每次执行操作时, 具有 2 个配置折展支链与操作物体连接, 对应情况为表 1 中的 $L=4$ 和 $R=2$, 不同组支链可与物体形成 6 种并联机构的拓扑形式, 使多臂机构具有 6 种不同的操作模式。

图 6 所示为多臂机构中 2 条操作臂与操作物体进行连接的拓扑结构, 折展平台 1 通过折展支链与操作物体 6 相连接。此时, 操作物体运动形式的集合可表示为

$$M=\{S_1 \cap S_2\} \quad (7)$$

式中, M 表示各组支链与操作物体连接后所实现的自由度形式, S_i 表示单支链末端所具有运动形式。 M 和 S_i 为运动集合的形式, 其表示方式与文献[17]相同。

图 6 支链连接数为 2 时的分解拓扑结构示意图

同理, 可得到其余 5 组支链组合对物体实现的操作模式。多臂机构对物体的操作模式总数为每组

支链所形成的运动集合的并集

$$M=\{S_1 \cap S_2\} \cup \{S_2 \cap S_3\} \cup \{S_3 \cap S_4\} \cup \{S_1 \cap S_4\} \cup \{S_2 \cap S_4\} \cup \{S_1 \cap S_3\} \quad (8)$$

若已知多臂机构实现的既定操作模式, 当支链连接数为 2 时, 其操作模式可分解为 1~6 组支链中, 基于操作模式分解的支链配置构造过程如下所述。设操作物体实现的运动集合为

$$M=(T_u \quad T_v \quad T_w; R_u \quad R_v \quad 0) \quad (9)$$

假设集合 $\{M\}$ 是由两个运动集合 $\{M_1\}$ 和 $\{M_2\}$ 求并集所得, 即 $\{M_1 \cup M_2\} \subset \{M\}$ 。因此, 我们可以选择其中一种分解方式, 即 $\{S_1 \cap S_3\}=\{M_1\}$, $\{S_2 \cap S_4\}=\{M_2\}$, 运动传递集合 M_1 可以写为

$$\{M_1\}=\{S_1 \cap S_3\}= \\ (T_u \quad 0 \quad T_w; 0 \quad R_v \quad 0) \quad (10)$$

同理, M_2 可以写为

$$\{M_2\}=\{S_2 \cap S_4\}= \\ (0 \quad T_v \quad T_w; R_u \quad 0 \quad 0) \quad (11)$$

因此, 可求得

$$\{M\}=\{M_1 \cup M_2\}= \\ (T_u \quad 0 \quad T_w; 0 \quad R_v \quad 0) \cup (0 \quad T_v \quad T_w; R_u \quad 0 \quad 0)= \\ (T_u \quad T_v \quad T_w; R_u \quad R_v \quad 0) \quad (12)$$

式(12)中对应的分配方式如图 7 所示, 每条执行支链的构型可根据 S_i 由第 2.2 节中所述支链配置方式进行确定。然而, 图 7 所示结果为将操作物体所实现操作模式分解为 2 组支链中的情况, 其余分解方式与上述过程一致。

图 8 所示为支链连接数为 3 时的分解拓扑结构示意图, 此时, 每个执行支链组合由 3 条折展支链组成并与操作物体连接, 对应的情况为 $L=4$ 和 $R=1$ 。在四臂机构中, 有 4 组由 3 条不同折展支链构成的支链组合。

图7 多臂机构在 $L=4$ 和 $R=2$ 条件下可实现的操作任务示意图

图8 支链连接数为3时的分解拓扑结构示意图

在此情况下,通过每个支链组合运动集合的并集可以得到机构对物体实现的操作自由度总数

$$M_1 = \{S_1 \cap S_2 \cap S_3\} \cup \{S_2 \cap S_3 \cap S_4\} \cup \{S_1 \cap S_3 \cap S_4\} \cup \{S_1 \cap S_2 \cap S_4\} \quad (13)$$

如图9所示,第一组支链可实现对物体操作的运动集合可表示为

$$M_1 = \{S_1 \cap S_2 \cap S_3\} = (T_u \ 0 \ T_v; R_u \ 0 \ 0) \quad (14)$$

若仍以实现 $(T_u \ T_v \ T_w; R_u \ R_v \ 0)$ 的操作模式为目的,在确定第一组支链的运动集合后,根据操

作任务所需自由度可分解为其余折展支链的所实现的运动形式,其运动集合 $\{M_2\}, \{M_3\}$ 及 $\{M_4\}$ 可表示为

$$M_2 = \{S_2 \cap S_3 \cap S_4\} = (T_u \ 0 \ T_w; R_u \ 0 \ 0) \quad (15)$$

$$M_3 = \{S_1 \cap S_3 \cap S_4\} = (T_u \ 0 \ T_w; R_u \ R_v \ 0) \quad (16)$$

$$M_4 = \{S_1 \cap S_2 \cap S_4\} = (0 \ T_v \ T_w; R_u \ 0 \ 0) \quad (17)$$

则多臂机构对操作物体实现的操作模式为

$$M = \{M_1 \cup M_2 \cup M_3 \cup M_4\} = (T_u \ T_v \ T_w; R_u \ R_v \ 0) \quad (18)$$

图9所示为多臂机构实现 $(T_u \ T_v \ T_w; R_u \ R_v \ 0)$ 操作模式时,对应支链配置形式的其中一种情况。在非工作状态时,支链可折叠于叠放区域内,通过4组支链组合与操作物体形成了4种并联机构的拓扑形式,从而改变对末端物体的操作模式,实现多臂机构对目标物体的多样化操作。在实际执行任务中,可根据不同工作任务,切换至所需拓扑形式。

图 9 多臂机构在 $L=4$ 和 $R=1$ 条件下可实现的操作任务示意图

4 结论

(1) 本文通过多臂机构与操作物体可组成并联机构拓扑形式的设计思想, 提出了一类具有折展特性和协调操作能力的空间多臂机构, 得到了机构自由度、折展支链数和可配置操作度的关系, 利用并联机构的概念解决了多臂机构多样化操作的问题。

(2) 以配置 4 条折展支链为设计要求, 基于指定的尺度限制区域, 提出了折展支链的延伸性判别条件, 给出了折展支链结构配置的方式, 设计出了具有不同自由度且满足特定叠放要求的折展支链, 为设计具有折展性能的多臂机构提供依据。

(3) 利用分解拓扑的方法对多臂机构进行结构配置。通过该方法所得到的多臂机构可以在非工作状态时叠放于指定区域内, 在执行任务时, 根据不同的操作任务, 切换至所需的拓扑形式。

参 考 文 献

- [1] 郭宏伟, 刘荣强, 邓宗全. 索杆铰接式伸展臂动力学建模与分析[J]. 机械工程学报, 2011, 47(9): 66-71.
GUO Hongwei, LIU Rongqiang, DENG Zongquan. Dynamic modeling and analysis of cable-strut deployable articulated mast[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(9): 66-71.
- [2] NOKLEBY S B. Singularity analysis of the Canadarm2[J]. Mechanism and Machine Theory, 2007, 42(4): 442-454.
- [3] 邓宗全. 空间折展机构设计[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2013.
DENG Zongquan. Design of space deployable and foldable mechanisms[M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2013.
- [4] DONG Q, CHEN L. Impact dynamics analysis of free-floating space manipulator capturing satellite on orbit and robust adaptive compound control algorithm design for suppressing motion[J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2014, 35(1): 413-422.
- [5] 张凯锋, 周晖, 温庆平, 等. 空间站机械臂研究[J]. 空间科学学报, 2010, 30(6): 612-619.
ZHANG Kaifeng, ZHOU Hui, WEN Qingping, et al. Review of the development of robotic manipulator for international space station[J]. Chinese Journal of Space Science, 2010, 30(6): 612-619.
- [6] 刘亚军, 刘海涛, 黄田. 基于可操作性指标的 6R 操作臂型综合方法[J]. 机械工程学报, 2011, 47(3): 8-13.
LIU Yajun, LIU Haitao, HUANG Tian. Type synthesis of 6R serial manipulators using manipulability index[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(3): 8-13.
- [7] 刘亚军, 黄田. 6R 操作臂逆运动学分析与轨迹规划[J]. 机械工程学报, 2012, 48(3): 9-15.
LIU Yajun, HUANG Tian. Inverse kinematics and trajectory planning of 6R serial manipulators[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(3): 9-15.
- [8] CORVES B, MANNHEIM T, RIEDEL M. Re-grasping: Improving capability for multi-arm robot system by dynamic reconfiguration[C]// International Conference on Intelligent Robotics and Applications, December 6-8, 2011, Aachen, Germany. Germany: Springer-Verlag, 2011: 132-141.
- [9] LEE J, TSAI L. Structural synthesis of multi-fingered hands[J]. Journal of Mechanical Design, 2002, 124(2): 272-276.
- [10] HUNT K H, SAMUEL A E, MCAREE P R. Special configurations of multifinger multi freedom grippers-a kinematic study[J]. International Journal of Robotics Research, 1991, 10(10): 123-134.
- [11] ÖZGÜR E, GOGU G, MEZOUAR Y. A study on dexterous grasps via parallel manipulation analogy[J]. Journal of Intelligent and Robotic Systems, 2017, 87: 1-12.
- [12] ÖZGÜR E, GOGU G, MEZOUAR Y. Structural synthesis

- of dexterous hands[C]// IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, September 14-18, 2014, Palmer House Hilton, Chicago. Washington DC: IEEE, 2014: 1676-1681.
- [13] BORRÀS J, DOLLAR A. Analyzing dexterous hands using a parallel robots framework[J]. *Auton Robot*, 2014, 36: 169-180.
- [14] BORRÀS J, DOLLAR A. A parallel robots framework to study precision grasping and dexterous manipulation[C]// IEEE International Conference on Robotics and Automation, May 6-10, 2013, Kongresszentrum Karlsruhe, Karlsruhe. Washington DC: IEEE, 2013: 1595-1601.
- [15] NEFZI M, RIEDEL M, CORVES B. Development and design of a multi-fingered gripper for dexterous manipulation[J]. *IFAC Proceedings Volumes*, 2006, 39(16): 133-138.
- [16] RIEDEL M, NEFZI M, HÜSING M, et al. An adjustable gripper as a reconfigurable robot with a parallel structure[C]// Proceedings of the Second International Workshop on Fundamental Issues and Future Research Directions for Parallel Mechanisms and Manipulators, September 21-22, 2008, Montpellier, France. Germany: Rwth Aachen, 2012: 1-8.
- [17] GAO F, LI W, ZHAO X, et al. New kinematic structures for 2-, 3-, 4-, and 5-DOF parallel manipulator designs[J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2002, 37: 1395-1411.
- [18] HE J, GAO F, MENG X, et al. Type synthesis for 4-DOF parallel press mechanism using G_F set theory[J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2002, 37: 1395-1411.
-
- 作者简介: 赵福群, 男, 1992 年出生, 博士研究生。主要研究方向为机器人机构学。
E-mail: 16116362@bjtu.edu.cn
- 郭盛(通信作者), 男, 1972 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为机器人机构学、运动控制学、机电一体化。
E-mail: shguo@bjtu.edu.cn