

基于 G_F 集理论的五自由度混联机器人构型综合*

曹毅^{1,2} 秦友蕾^{1,2} 陈海^{1,2} 葛姝翌^{1,2} 周辉^{1,2}

(1. 江南大学机械工程学院, 无锡 214122; 2. 江苏省食品先进制造装备技术重点实验室, 无锡 214122)

摘要: 基于 G_F 集理论提出了一种简单而有效的混联机器人构型综合方法。首先阐述了 G_F 集的基本概念、运算法则及转动特征存在条件。其次通过分析混联机构结构组成特点, 提出了基于 G_F 集元素组合和转动轴线迁移定理安排混联机构拓扑结构的方法, 建立了混联机构数综合方程并给出了混联机构构型综合的具体步骤。基于该构型综合理论, 综合出了具有确定运动特征的 3T2R 混联机构。针对综合出的混联机构, 提出了一种混联机构末端运动特征的分析方法, 运用该方法分析了一种综合得到的 3PRP_aR&RR 混联机构, 证明了该构型理论的正确性。设计出的 3PRP_aR&RR 混联机构具有结构紧凑、定位精确、高速等优点, 同时给出了实例应用。

关键词: 混联机构 构型综合 G_F 集

中图分类号: TH112 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)11-0392-07

Structural Synthesis of 5-DOF Hybrid Mechanisms Based on G_F Set

Cao Yi^{1,2} Qin Youlei^{1,2} Chen Hai^{1,2} Ge Shuyi^{1,2} Zhou Hui^{1,2}

(1. School of Mechanical Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, China

2. Jiangsu Key Laboratory of Advanced Food Manufacturing Equipment and Technology, Wuxi 214122, China)

Abstract: Hybrid mechanisms have attracted great attention as a robotic mechanism which merges the advantages of serial and parallel mechanisms. In order to obtain structures of hybrid robot, a very simple yet effective method for structural synthesis of hybrid mechanisms was proposed based on G_F set. The basic concept and mathematical operation of G_F set, and requirements for rotation based on G_F set were firstly introduced. Secondly, this paper presents a method for synthesizing hybrid mechanisms by analyzing characteristics of structure composition of hybrid mechanisms. It is shown that structural synthesis of hybrid mechanisms can be developed by the combination of elements of G_F set and rotation axis transfer theorem, number synthesis formulas were set up, and a detailed algorithm of type synthesis for hybrid mechanisms was proposed as well. According to the proposed approach, structural synthesis of 3T2R 5-DOF hybrid mechanisms was given in detailed. A lot of novel topological structures of hybrid mechanisms were designed. Meanwhile, a method was proposed to analyze kinematic characteristic of hybrid mechanisms synthesized above. Finally, a 3PRP_aR&RR hybrid mechanism was synthesized to demonstrate the applicability of the novel method of structural synthesis for hybrid mechanisms. The 3PRP_aR&RR manipulator performs very well with regard to high stiffness and better accuracy and motion transmission capabilities. At the same time a specific application was given. The research provides a general method for hybrid robot mechanism design and the obtained mechanisms do a beneficial supplement to the hybrid mechanism.

Key words: Hybrid mechanism Structural synthesis G_F set

收稿日期: 2015-04-15 修回日期: 2015-06-19

* 国家自然科学基金资助项目(50905075)、机械系统与振动国家重点实验室开放课题资助项目(MSV201407)和江苏省食品先进制造装备技术重点实验室开放课题资助项目(FM-201402)

作者简介: 曹毅, 副教授, 博士, 主要从事机器人机构学理论及机器人技术研究, E-mail: caoyi@jiangnan.edu.cn

引言

混联机器人兼具串联机器人工作空间大、易于控制,并联机器人结构稳定、刚性好、累积误差小、动态性能好、精度高各自的优点,同时又能避免单纯串、并联机器人所带来的问题,因而在工业生产中更具实用性,也是机构学研究的一个重要方向。国内外已设计并成功应用多种混联机器人,如瑞典 Neos Robotic 公司生产的五自由度 Tricept 系列机器人、天津大学黄田发明的 TriVariant 系列机器人^[1]。同时还可以应用于要求重载、高速、高效的大型精密装备,如各种复杂程度的加工中心、混合机、娱乐平台、振动筛、太阳能跟踪机等。

国内外学者^[2-6]对混联机器人的研究主要集中在运动学建模和动力学分析,而对混联机器人构型综合的研究较少。沈惠平等^[7]提出了一种基于自由度分配和方位特征混联机构的设计方法,给出了整体的设计思路,但缺乏具体的算法和步骤。曾强等^[8]提出一种基于数理逻辑和位移群论的方法,但该方法系统繁杂,需要较深的理论基础。Campos 等^[9]基于杆组理论提出了一种构造混联机构的方法,该方法本质是以串联机构为主要单元,综合出的混联机构刚性较差。混联机构设计方法和型综合理论的研究,不仅具有重要的理论意义,还具有广泛的应用前景^[7]。

本文基于 G_F 集理论提出一种混联机器人构型综合理论和设计方法,建立混联机构数综合方程并给出构型综合的具体步骤。基于该构型综合理论,综合出具有确定运动特征的 3T2R 混联机构以验证其有效性。

1 机构的运动特征描述

1.1 G_F 集的基本概念

机器人末端一般运动特征的集合称之为 G_F 集^[10],可以描述为

$$G_F = (T_a \ T_b \ T_c; R_\alpha \ R_\beta \ R_\gamma) \quad (1)$$

式中: $T_i (i = a, b, c)$ 描述了机器人末端移动特征; $R_j (j = \alpha, \beta, \gamma)$ 用以描述机器人末端转动特征。

图 1a 表示 G_F 的 3 个移动 $T_i (i = a, b, c)$ 方向,图 1b 表示 3 个转动 $R_j (j = \alpha, \beta, \gamma)$ 轴线方向。 G_F 集中的 6 个分量是互相独立表示的,其值可为 0 或非 0。当 G_F 集相关元素不为零,表示机器人末端具有其相应的运动特征;反之,末端不具有某些运动特征^[9-10]。

基于移动特征对转动特征的影响, G_F 集可分为两大类:第 1 类如图 2a 所示,转动中心随移动的变

化而变化的 G_F 集,即 $G_F^I (T_a \ T_b \ T_c; R_\alpha \ R_\beta \ R_\gamma)$;第 2 类如图 2b 所示,转动中心不随移动的变化而变化,即 $G_F^{II} (R_\alpha \ R_\beta \ R_\gamma; T_a \ T_b \ 0)$ 。

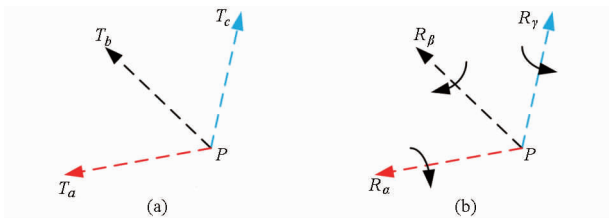


图 1 G_F 运动特征描述

Fig. 1 Description of kinematic characteristic of G_F

(a) G_F 移动的描述 (b) G_F 转动的描述

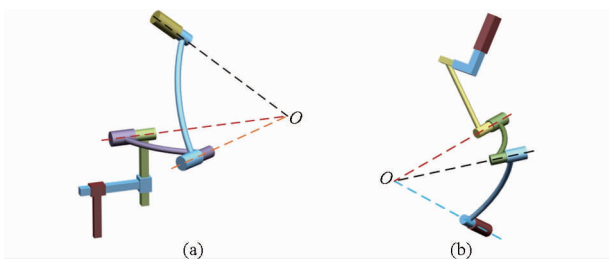


图 2 具有不同类型 G_F 集的支链

Fig. 2 Different kinds of limbs with different classes of G_F

(a) G_F 第 1 类 (b) G_F 第 2 类

1.2 G_F 集的运算法则

G_F 集的运算主要包括求和运算和求交运算。 G_F 集的求和运算适用于串联机构,而求交运算则适用于并联机构^[11],其可以分别描述为

$$G_{F1} = (A; B) = (T_{a1} \ T_{b1} \ T_{c1}; R_{\alpha1} \ R_{\beta1} \ R_{\gamma1})$$

$$G_{F2} = (C; D) = (T_{a2} \ T_{b2} \ T_{c2}; R_{\alpha2} \ R_{\beta2} \ R_{\gamma2})$$

$$\text{则 } G_F = G_{F1} \cup G_{F2} = (T_a \ T_b \ T_c; R_\alpha \ R_\beta \ R_\gamma) \quad (2)$$

$$(T_a \ T_b \ T_c) = A \cup C \cup T((A+B) \cup (C+D))$$

$$(R_\alpha \ R_\beta \ R_\gamma) = R((A+B) \cup (C+D))$$

式中“ $\cup$ ”为求和运算符,“+”为 T_i 对 R_j 的影响运算符,其满足转动轴线迁移定理^[10]。

求交运算具体定义为

$$G_F = G_{F1} \cap G_{F2} = (T_a \ T_b \ T_c; R_\alpha \ R_\beta \ R_\gamma) \quad (3)$$

$$(T_a \ T_b \ T_c) = A \cap C$$

$$(R_\alpha \ R_\beta \ R_\gamma) = R((A+B) \cap (C+D))$$

式中“ $\cap$ ”表示求交运算符。

移动特征的存在很容易确定,而转动特征的存在判断比较困难。如图 3 所示,刚体上任意两点 A_o 、 B_o ,当刚体绕 A_o 点旋转时,点 B_o 到达点 B 。由坐标变换位移矩阵可知

$$\begin{cases} \mathbf{B} = \mathbf{R}_{\alpha,\beta,\gamma}(\mathbf{B}_o - \mathbf{A}_o) + \mathbf{A} \\ \begin{bmatrix} \mathbf{B} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_{\alpha,\beta,\gamma} & -\mathbf{R}_{\alpha,\beta,\gamma}\mathbf{A}_o + \mathbf{A} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{B}_o \\ 1 \end{bmatrix} \end{cases} \quad (4)$$

式中 $\mathbf{A}_o$ 、 $\mathbf{B}_o$ ——刚体上两点起始位置矩阵

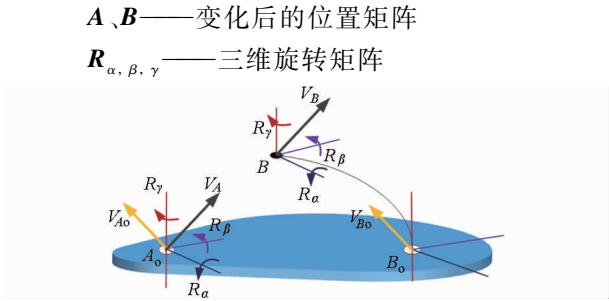


图3 两点间三维相对转动关系示意图
Fig.3 Relationship between relative rotations of two points

由式(4)可知, V_B 不仅具有 V_A 相同的转动而且 B 点还产生三维伴随移动,即

$$\begin{cases} G_{FA}^{\parallel} = (R_{\alpha} & R_{\beta} & R_{\gamma}; 0 & 0 & 0) \\ G_{FB}^I = (T_a & T_b & T_c; R_{\alpha} & R_{\beta} & R_{\gamma}) \\ G_{FA}^{\parallel} \cap G_{FB}^I = (R_{\alpha} & R_{\beta} & R_{\gamma}; 0 & 0 & 0) \end{cases} \quad (5)$$

同理可知当 $R_{\alpha,\beta,\gamma}$ 变为 $R_{\alpha,\beta}$ 及 R_{α} 时, B 点运动特征均满足转动特征合成定律: 当一个刚体绕点 A 旋转, 所有固定在刚体上的点 B 具有与点 A 相同的旋转, 此外 B 点还应具有绕点 A 转动所产生的移动。

G_F 集求和、求交运算是机构综合的理论基础, 而轴线迁移定理和转动合成定律是运算法则的依据。

2 基于 G_F 集的混联机构构型综合理论

2.1 混联机构构型综合方法

目前国内外机构的构型综合理论主要有 5 种: 基于螺旋理论的约束综合法^[12]; 基于微分几何理论^[13]; 机构型综合的图论方法^[14]; 基于线性变换的型综合方法^[15]; 基于 PoC 单元的运动综合方法^[16]。

基于 G_F 集的分类, 将混联机器人分成两类: 第 1 类 $G_F^I(T_a \ T_b \ T_c; R_{\alpha} \ R_{\beta} \ R_{\gamma})$, 混联机器人即转动中心随移动的变化而变化; 第 2 类 $G_F^{\parallel}(R_{\alpha} \ R_{\beta} \ R_{\gamma}; T_a \ T_b \ 0)$, 混联机器人即转动中心不随移动的变化而变化。其区别在于当给定机构末端参考点 P 时机构是否仍完全具有原始的转动能力。图 4a 所示 G_F^I 混联机构其转动中心 O 可在移动副的作用下在三维空间内转动, 而图 4b 所示机构其转动中心 O 不受移动副的影响。

根据混联机构的定义可知串联与并联机构是混联机构构型综合的基础, 其构型方法具有相似性, 故可借鉴其集合的思想。按照集合的观点: 混联机构是由串联机构模块与并联机构模块按照一定的次序及准则串联组合形成, 基于 G_F 集理论可表述为

$$G_F = G_{FS1} \cup G_{FS2} \cdots \cup G_{FPI} \cdots \cup G_{FPj} \cdots \cup G_{FSi} \quad (6)$$

式中, G_F 为混联机构的末端运动特征; G_{FSi} 为串联形式运动特征; G_{FPj} 为并联形式运动特征。

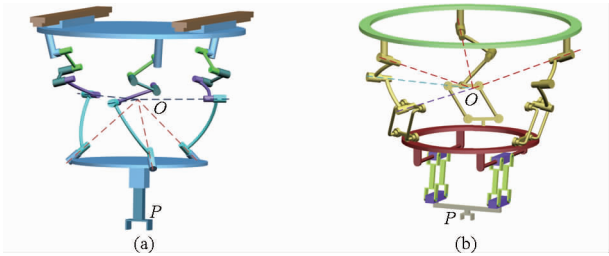


图4 两种不同类型的混联机构
Fig.4 Two different kinds of hybrid mechanisms
(a) G_F^I 混联机构 (b) $G_F^{\parallel}$ 混联机构

由式(6)可知, 对于给定末端运动特征的混联机构的构型综合, 理论上只需综合出并联模块及串联支链并按照一定的方式连接即可。混联机器人机构的驱动器可布置在不同的支链上, 同时还可以具有被动支链, 因此有必要建立机构的拓扑结构与机构的基本拓扑元素及结构参数之间的关系模型, 即混联机构数综合方程

$$\begin{cases} F = F_p + F_s \\ F - \sum_{i=1}^n q_i = 0 \\ N = F - \sum_{i=1}^n (q_i - 1) + p \\ n = N - p \quad (n \leq F) \end{cases} \quad (7)$$

式中 F, F_p, F_s ——混联、并联、串联特征 G_F 集维数
 q_i ——主动支链 i 上的驱动数
 N ——支链数 n ——主动驱动数
 p ——被动支链数

基于 G_F 集的混联机器人构型理论的特点为:

- (1) 该构型方法是一种针对串联形式运动副和并联单元机构末端运动特征的求和运算, 且这些支链均具有确定的运动特征, 故不存在瞬时性。
- (2) G_F 集的求和运算不满足交换率, 故交换次序后构型将发生改变。

2.2 混联机构 G_F 元素组合原则

混联机构末端运动特征与 G_{FSi}, G_{FPj} 中元素的排列位置和顺序密切相关, 尤其是当 G_{FSi}, G_{FPj} 具有转动特征时确定转动轴线的位置至关重要, 因此有必要研究 G_F 集中元素排列位置和顺序对混联机构末端转动特征的影响规律。

混联机构转动轴线迁移定理: 如果 G_{FSi} 和 G_{FPj} 中机构末端特征为 $G_F^I(T_a \ T_b \ 0; R_{\alpha} \ 0 \ 0)$ 且满足 $R_{\alpha} \perp \square T_a \ T_b$, 则转动副的排列位置和顺序的变化不影响机构末端转动特征; 如果混联机构末端存在三维移动, 则转动副位置的顺序可以任意排列而不改变末端转动特征。

为使创新出来的方案更加合理, 在此给出混联

机构结构方案合理性原则：

(1) 混联机构中考虑其易于控制的特性,制造和装配的简单,并联结构为对称结构。

(2) 混联机构中考虑其刚性和设计简单的要求,并联机构中被动支链 $p = 0$,且各主动链中驱动数 $q_i = 1$ 。

(3) G_F 元素组合时必须遵循混联机构转动轴线迁移定理。

2.3 混联机构构型综合步骤

根据上述设计方法和原则,得到构型综合步骤：

(1) 对于给定混联机构的末端运动特征,将其用 G_F 集表示为 $G_F^I(T_a \ T_b \ T_c; R_\alpha \ R_\beta \ 0)$ 。

(2) 将 $G_F^I(T_a \ T_b \ T_c; R_\alpha \ R_\beta \ 0)$ 根据

式(6)以及 G_F 元素组合原则进行组合,确定并联机构 G_F 集表达式 $G_{FPj}(j)$ 及串联机构 G_F 集表达式 G_{FSi} ,根据式(7)确定各结构参数。

(3) 基于并联机构 G_F 集表达式 G_{FPj} 综合考虑并联机构的对称性,按照式(3)和式(7)构造满足要求的并联机构。

(4) 基于串联机构 G_F 集表达式 G_{FSi} 按照式(2)构造满足要求的串联支链。

(5) 将从步骤(3)、(4)得到的并联机构 G_{FPj} 及串联支链 G_{FSi} 按式(6)模块单元顺序及混联机构转动轴线迁移定理组合成混联机构。

为了更清楚表达创新设计步骤,用设计流程图 5 来反映设计程序。

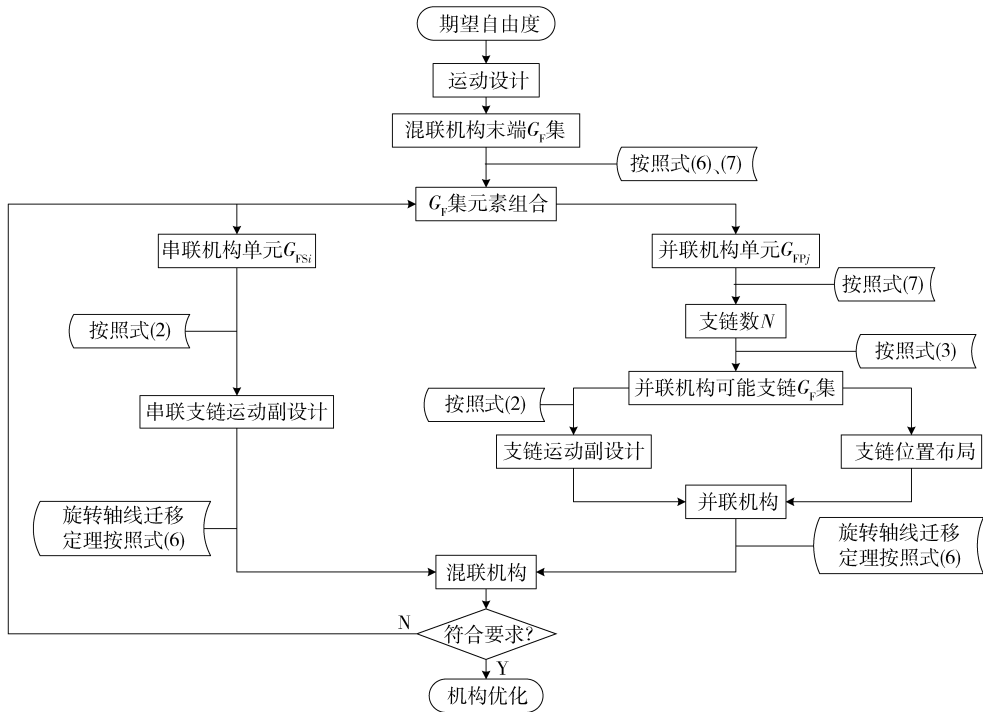


图 5 混联机器人构型综合流程图

Fig. 5 Flowchart of type synthesis for hybrid mechanisms

3 3T2R 类混联机构型综合

运用上述构型综合方法和步骤对 3T2R 五自由度混联机构进行构型综合,其末端的 G_F 集表达式为 $G_F^I(T_a \ T_b \ T_c; R_\alpha \ R_\beta \ 0)$,按照 G_F 元素组合原则可得表 1。

表 1 中 G_{FP}^{3T1R} 表示并联形式运动特征 $G_F^I(T_a \ T_b \ T_c; R_\alpha \ 0 \ 0)$, G_{FP}^{2R1T} 代表并联形式运动特征 $G_F^{II}(R_\alpha \ R_\beta \ 0; T_a \ 0 \ 0)$, G_{FS}^{2T} 表示串联支链运动特征 $G_F^I(T_a \ T_b \ 0; 0 \ 0 \ 0)$ 。

由于 G_{FP}^{1T1R} 、 G_{FP}^{1R1T} 型并联机构有且仅有一种对称构型满足移动平行且转动轴线重合条件,故在本文中不予考虑, G_{FP}^{2R} 无对称结构也不予考虑。根据表 1 给出的混联组合方式及式(2)、(3)可构造出与之一

一对应的混联机构,为不失一般性,以序号 4 的组合方式为例来构造混联机构。

首先根据 $G_{FP}^{2T1R} \cup G_{FS}^{1T1R}$ 顺序构造 G_{FP}^{2T1R} 并联模块,其运动特征为 $G_F^I(T_a \ T_b \ 0; R_\alpha \ 0 \ 0)$,按照式(7)及合理性原则其结构参数符合关系

$$\begin{cases} p = 0 \\ q_i = 1 \quad (i = 1, 2, 3) \\ n = 3 \\ N = 3 \end{cases} \quad (8)$$

根据式(8)构造 G_{FP}^{2T1R} 并联模块支链,根据式(2)设计各支链运动副,具体如表 2 所示。

同理 G_{FS}^{1T1R} 可按照式(2)构造串联支链,具体如表 3 所示。

表 1 $G_F^1(T_a\ T_b\ T_c; R_\alpha\ R_\beta\ 0)$ 的组合方式

Tab.1 Hybrid mechanism based on $G_F^1(T_a\ T_b\ T_c; R_\alpha\ R_\beta\ 0)$

序号	组合形式	序号	组合形式
1	$G_{FP}^{3T1R} \cup G_{FS}^{1R}$	13	$G_{FS}^{2T} \cup G_{FP}^{1T2R}$
2	$G_{FP}^{2T2R} \cup G_{FS}^{1T}$	14	$G_{FS}^{2T} \cup G_{FP}^{2R1T}$
3	$G_{FP}^{3T} \cup G_{FS}^{2R}$	15	$G_{FS}^{1T2R} \cup G_{FP}^{2T}$
4	$G_{FP}^{2T1R} \cup G_{FS}^{1T1R}$	16	$G_{FP}^{2T} \cup G_{FS}^{1T2R}$
5	$G_{FP}^{2T1R} \cup G_{FS}^{1R1T}$	17	$G_{FP}^{2T} \cup G_{FS}^{2R1T}$
6	$G_{FP}^{1T2R} \cup G_{FS}^{2T}$	18	$G_{FP}^{1T2R} \cup G_{FP}^{2T}$
7	$G_{FP}^{2T} \cup G_{FS}^{1T2R}$	19	$G_{FS}^{1T} \cup G_{FP}^{1T2R} \cup G_{FS}^{1T}$
8	$G_{FP}^{2T} \cup G_{FS}^{2R1T}$	20	$G_{FS}^{1T} \cup G_{FP}^{1R2T} \cup G_{FS}^{1R}$
9	$G_{FS}^{1T} \cup G_{FP}^{2T2R}$	21	$G_{FS}^{1T} \cup G_{FP}^{2T1R} \cup G_{FS}^{1R}$
10	$G_{FS}^{1T} \cup G_{FP}^{2R2T}$	22	$G_{FS}^{1T} \cup G_{FP}^{2R1T} \cup G_{FS}^{1T}$
11	$G_{FS}^{1T1R} \cup G_{FP}^{1R2T}$	23	$G_{FS}^{1T} \cup G_{FP}^{2T} \cup G_{FS}^{2R}$
12	$G_{FS}^{1T1R} \cup G_{FP}^{2T1R}$	24	$G_{FS}^{1T1R} \cup G_{FP}^{2T} \cup G_{FS}^{1R}$

表 2 G_{FP}^{2T1R} 型对称并联机构类型

Tab.2 Type of symmetrical G_{FP}^{2T1R} parallel mechanism

序号	组合形式	机构类型
1	$G_{FS}^{2T1R} \cap G_{FS}^{2T1R} \cap G_{FS}^{2T1R}$	$3(RRR)_{pl}\ 3(PRR)_{pl}\ 3(RP_aR)_{pl}$
		$3(U^*R)_{pl}\ 3(PPR)_{pl}\ 3(RP_aP_a)_{pl}$
2	$G_{FS}^{2T2R} \cap G_{FS}^{2T2R} \cap G_{FS}^{2T2R}$	$3U^*(RR)_o\ 3(RRP)_{pl}R\ 3PPU$
		$3(PPR_o)_{sp}R_o\ 3P_aUP\ 3PP(RR)_o$
3	$G_{FS}^{2T3R} \cap G_{FS}^{2T3R} \cap G_{FS}^{2T3R}$	$3(RR)_{//}(RRR)_o\ 3(RRR)_{pl}(RR)_o$
		$3(RP)_{\perp}(RRR)_o\ 3C(RRP_a)_{pl}$

表 3 G_{FS}^{1T1R} 型串联支链构型

Tab.3 Type of G_{FS}^{1T1R} serial mechanism

运动副	支链类型	备注
P,R	PR	$T_a \neq R_\alpha$
P_a,R	P_aR	
$U^{\wedge}$	$U^{\wedge}$	复合铰链

最后,根据式(6)将表 2 中的机构类型串接表 3 中的支链类型可综合出满足 $G_{FP}^{2T1R} \cup G_{FS}^{1T1R}$ 的混联机构。根据表 1 给出的组合方式及式(2)、(3)可构造出与之一一对应的混联机构,如表 4 所示。

表中 P_a 为平行四边形铰链, U^* 为纯平动万向铰,2-UU 为平行四边形万向铰, $U^{\wedge}$ 、 $U^{\vee}$ 为转-平动万向铰, U^P 、 ${}^P U$ 为平面移动万向铰, U 为万向铰,C 为圆柱副,S 为球面副^[17],部分三维 CAD 构型如图 6 所示。

4 实例分析

4.1 机构自由度及性能分析

为验证上述综合出的 3T2R 五自由度混联机构的准确性,提出了基于 G_F 集的混联机构末端运动特征分析方法,该方法的基本思路是:首先分析混联机

表 4 $G_F^1(T_a\ T_b\ T_c; R_\alpha\ R_\beta\ 0)$ 型混联机构类型

Tab.4 Structure types of hybrid mechanism $G_F^1(T_a\ T_b\ T_c; R_\alpha\ R_\beta\ 0)$

序 号	机构类型		
1	$4PPPR_1R_2$	$4U^*PR_1R_2$	$4P_aP_aU^{\wedge}R_2$
	$4R_1R_1R_1R_2R_2R_3$	$4CPP\&R_2$	$4(2-UU)_{//}R_1R_2_{//}\&R$
	$4C_{//}R_{//}R_{//}\&R$	$4U^PR_1P\&R_2$	$4P_a(RRR)_{//}\&R_2$
2	$4PP(RRR)_o\&P_a$	$4R_{//}R_{//}UR_o\&P_a$	$4(U^PR)_{pl}(RR)_o\&P$
	$4P_{\perp}R(UR)_o\&P$	$4U^{\wedge}(RRR)_o\&P$	$4R_{\perp}(CRR)_o\&P$
	$4PP(RRR)_o\&P$	$4(U^R)_{pl}(RR)_o\&P$	$4(RR)_{//}(RRR)_o\&P$
3	$3PU^*R\&(RR)_o$	$3(U^P)_{pl}P\&(RR)_o$	$3PPPR_1R_2\&(RR)_o$
	$3U^P P\&(RR)_o$	$3(RRC)_{pl}\&(RR)_o$	$3(2-UU)_{//}R\&(RR)_o$
	$3(RRR)_{pl}\&PR$	$3(PPR_o)_{sp}R_o\&U^{\wedge}$	$3U^*(RR)_o\&PR$
4	$3C(RRP_a)_{pl}\&P_aR$	$3(RRR)_{pl}(RR)_o\&U^{\wedge}$	$3(RRP)_{pl}R\&PR$
	$3PPU\&P_aR$	$3(RP)_{\perp}(RRR)_o\&U^{\wedge}$	$3(U^*R)_{pl}\&PR$
	$3P_aUP\&P_aR$	$3(RR)_{//}(RRR)_o\&U^{\wedge}$	$3PP(RR)_o\&PR$
5	$3U^P(RR)_o\&R_{//}P$	$3(U^P_a)_{pl}\&P_{//}R$	$3PP(RRR)_o\&R_{//}P_a$
	$3(RRP)_{pl}R\&R_{//}P_a$	$3U^{\wedge}(RRR)_o\&C$	$3(RU^P)_{pl}\&C$
	$3PP(RRR)_o\&U^P$	$3P_aPS\&PP$	$3RPS\&PP_a$
6	$3(PPR)_{sp}(RR)_o\&U^*$	$3R_{//}R(RC)_o\&PP$	$3(PPR)_{pl}(RR)_o\&U^P$
	$2(PPR)_{sp}\&U^{\vee}R_o$	$2PP(RR)_o\&P(RR)_o$	$2PP\&P_a(RR)_o$
	$2(RR)_oU^P\&(CR)_o$	$2U^*\&P(RR)_o$	$2CP\&P(RR)_o$
8	$2(PPR)_{sp}\&UP$	$2PP(RR)_o\&(RR)_oP$	$2PRP\&R^{\vee}U_o$
	$2U^P(RR)_o\&(CR)_o$	$2(R^{\vee}U)_{sp}\&(RR)_oP_a$	$2(P_aC)_{sp}\&UP_a$
	$P\&4PP(UR)_o$	$P\&4PUPR_o$	$P\&4R_{\perp}(CRR)_o$
9	$P_a\&4(RP)_{\perp}(CR)_o$	$P_a\&4P_{\perp}R(UR)_o$	$P_a\&4R_{//}RUR_o$
	$P\&4(RC)_o(RP)_{\perp}$	$P\&4(RR)_o(U^R)_{pl}$	$P\&4(RR)_o(RRR)_{pl}$
	$P_a\&4(RRR)_o(RP)_{\perp}$	$P_a\&4(RR)_o(PPR)_{pl}$	$P_a\&4(RRC)_oP$
11	$R_{//}R\&(RRR)_o^{\vee}U$	$R_{\perp}P\&3R(U^R)_{pl}$	$U\&3R(CP)_{sp}$
	$U^{\wedge}\&3(RRR)_o(RR)_{//}$	$P_aR\&3R(RPR)_{pl}$	$U^{\wedge}\&3(RR)_oU^P$
	$PR\&3U^{\wedge}(RRR)_o$	$PR\&3(U^R)_{pl}R$	$PR\&3C(R^{\vee}U)_{pl}$
12	$U^{\wedge}\&3(RR)_{//}(RRR)_o$	$PR\&3U^*(RR)_o$	$PR\&3(RPR)_{pl}$
	$PP\&3R_{//}RS$	$U^*\&3(PPR_o)_{sp}(RR)_o$	$PP\&3RPS$
	$PP_a\&3U^*S$	$U^P\&3PR(RRR)_o$	$PP\&3R_{//}R(RC)_o$
14	$U^*\&3(RR)_o(U^P)_{pl}$	$PP\&3(RR)_o(RRR)_{pl}$	$U^*\&3(RR)_o(PPR)_{pl}$
	$PP_a\&3(RR)_o(U^PR)_{pl}$	$PP\&3(RR)_o(PU^{\wedge})_{pl}$	$U^P\&3(RR)_o(P_aU^{\wedge})_{pl}$
	$P(RR)_o\&2(PPR)_{sp}(CR)_o\&2(RR)_oPP_a$	$P(RR)_o\&2PRP$	
15	$P(RR)_o\&2(R^{\vee}U)_{sp}$	$U^{\vee}R_o\&2P_aP(RR)_o$	$(CR)_o\&2U^*(RR)_o$
	$2U^*\&3PP(RRR)_o$	$2P^{\vee}U\&3(PPR)_{sp}(RR)_o$	$2U^P\&3(PPR)_{pl}(RR)_o$
	$2(U^R)_{sp}\&3U^PS$	$2U^P(RR)_o\&3U^{\wedge}(RC)_o$	$2PP\&3R_{//}R(RRR)_o$
17	$2U^*\&3RR_o(U^P)_{pl}$	$2U^P\&3(RR)_o(P_aU^{\wedge})_{pl}$	$2P^{\vee}U\&3(RR)_o(PPR)_{pl}$
	$2PP_a\&3RR_o(U^PR)_{pl}$	$2U^P R\&3RR_o(PU^{\wedge})_{pl}$	$2PP\&3(RR)_o(RRR)_{pl}$
18	$3PP(RRR)_o\&2U^*$	$3P_aPS\&2(U^R)_{sp}$	$3RPS\&PP_a$
	$3R_{//}RS\&2CP$	$3U^P(RRR)_o\&2(P_aC)_{sp}$	$3R_{//}R(RC)_o\&2U^PR_o$
19	$P\&3U^*(RRR)_o\&P$	$P_a\&3RPS\&P$	$P\&3(U^PR)_{pl}RR_o\&P_a$
	$P\&3R_{//}RS\&P$	$P\&3U^{\wedge}(RC)_o\&P$	$P\&3R_{//}R(RRR)_o\&P$
20	$P\&3(RR)_oPP\&R$	$P\&3(RRR)_o(RP)\&R$	$P\&3R(RRR)_{pl}\&R$
	$P\&3R(U^R)_{pl}\&R$	$P\&3(RRR)_o(RR)_{//}\&R$	$P\&3(RRR)_oU^{\wedge}\&R$
	$P\&3U^P(RR)_o\&R$	$P\&3(RRR)_{pl}(RR)_o\&R$	$P\&3(PPR_o)_{sp}R_o\&R$
21	$P\&3PPU\&R$	$P\&3(RRR)_{pl}C\&R$	$P\&3U^P(RRR)_o\&R$
	$P\&3RR_o(PU^{\wedge})_{pl}\&P$	$P\&3(RR)_o(U^R)_{pl}\&P$	$P\&3(RR)_o(U^R)_{pl}\&P$
	$P\&3RR_o(U^*R)_{pl}\&P$	$P\&3(RR)_o(U^PR)_{pl}\&P$	$P\&3(RR)_o(RPR)_{pl}\&P$
23	$P\&2U^*\&(RR)_o$	$P\&2(U^R)_{sp}\&(RR)_o$	$P\&2(PPR)_{sp}\&(RR)_o$
	$P\&2P_aP_a\&(RR)_o$	$P\&2(U^PR)_{sp}\&(RR)_o$	$P\&2U^P(RR)_o\&(RR)_o$
	$P_aR\&2(PaC)_{sp}\&R$	$U^{\wedge}\&2U^*(RR)_o\&R$	$U^{\wedge}\&2PP(RR)_o\&R$
24	$U^{\wedge}\&2PRP\&R$	$PR\&2(RR)_oPP_a\&R$	$R_{//}R\&2CP\&R$

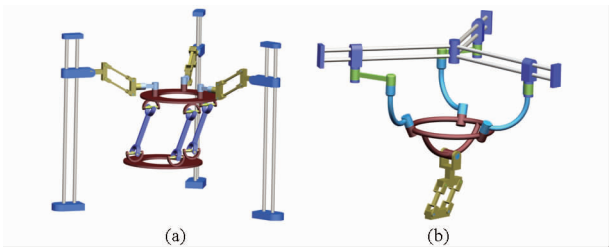


图 6 五自由度混联机构 CAD 模型

Fig.6 CAD models of 5-DOF hybrid mechanism

(a) $3(PRPa)_{pl}RR_o \& U^*$ (b) $3(PRR)_{pl}R \& RP_a$

构的构造方式,确定机构中的并联机构和串联机构模块单元形式;其次将各个模块单元运动特征用 G_F 集表示;然后对各个并联结构单元的 G_F 集进行求交运算,得到其交集,而对各个串联结构单元的 G_F 集进行求和运算,得到其和集;最后将多个模块 G_F 集进行求和运算,求得和集就是整个混联机构的末端运动特征,它代表了混联机构末端的运动。

下面以 $3PRP_aR \& RR$ 混联机构(图 7a)为例利用基于 G_F 集的混联机构末端特征分析法对该混联机器人机构进行分析。

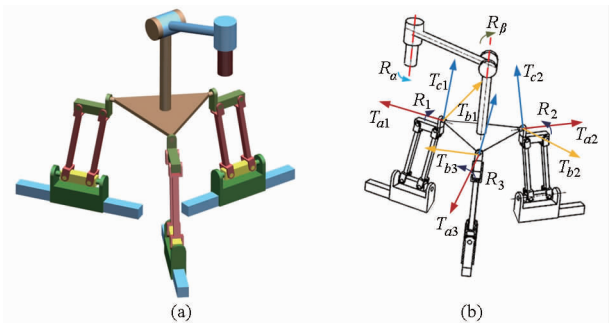


图 7 $3PRP_aR \& RR$ 混联机构

Fig.7 $3PRP_aR \& RR$ hybrid mechanism

(a) CAD 模型 (b) 机构运动特征

由图 7a 可知,该混联机器人机构由与平台相连的三导轨、3 个 PRP_aR 支链与动平台、2 个转动头构成。由于 $3PRP_a$ 并联机构由 3 个相同的支链构成,可任取一个支链进行分析。 PRP_aR 支链为 $3T1R$ 类支链。因此它的运动特征可描述为: $G_{FS1}^1(T_{a1} T_{b1} T_{c1}; R_1 0 0); G_{FS2}^1(T_{a2} T_{b2} T_{c2}; R_2 0 0); G_{FS3}^1(T_{a3} T_{b3} T_{c3}; R_3 0 0)$ 。如图 7b 所示, R_1, R_2, R_3 互不平行,由式(3)可得

$$\begin{aligned} G_{FP}^1 &= G_{FS1}^1 \cap G_{FS2}^1 \cap G_{FS3}^1 = \\ & (T_a T_b T_c; 0 0 0) \cap \\ & (T_{a3} T_{b3} T_{c3}; R_3 0 0) = \\ & (T_a T_b T_c; 0 0 0) \end{aligned}$$

两个转动头的运动特征分别为 $G_{FS4}^1 = (0 0 0;$

$R_\alpha 0 0), G_{FS5}^1 = (0 0 0; 0 R_\beta 0)$,由式(4)可得

$$\begin{aligned} G_F &= G_{FP}^1 \cup G_{FS4}^1 \cup G_{FS5}^1 = \\ & (T_a T_b T_c; 0 0 0) \cup \\ & (0 0 0; R_\alpha R_\beta 0) = \\ & (T_a T_b T_c; R_\alpha R_\beta 0) \end{aligned}$$

由以上分析可知, $3PRP_aR \& RR$ 混联机器人的末端运动特征为 $G_F = (T_a T_b T_c; R_\alpha R_\beta 0)$ 。

$3PRP_aR \& RR$ 混联机构中 $3PRP_aR$ 并联模块有 3 个四自由度支链,其中一个平行四边形铰链起到了增加机构刚度的作用,在空间呈 120° 布置,但是由于机构本身约束限制了动平台只能实现三维空间移动,不具备调姿的能力,同时由于 $3PRP_aR$ 并联机构的运动具有耦合性,因此该机构具有承载力强、累计误差小、运动速度快等优点。同时在该机构动平台上连接了一个二自由度的转动头,使得机器人末端具有了调整运动姿态的能力,提高了该混联机器人的应用范围。该混联机构具有结构紧凑、定位精确、高速等优点。

4.2 实例应用

由上述分析可知 $3PRP_aR \& RR$ 混联机器人末端可以实现空间三维移动和两维转动的功能,可用于要求喷涂 5 个面,且喷涂速度达 1 m/s 以上,喷涂对象为扁平面型五面立方体工件。 $3PRP_aR$ 并联单元通过控制 3 个支链中的移动副可完成沿空间 3 个坐标轴的快速移动,可以实现机器人喷涂时的精确定位。在整个立方体工件喷涂过程中,需要改变喷枪的姿态,RR 串联单元完成了绕 Z 轴的转动及末端的摆动,可作为定向系统,对在喷涂时机构末端操作实现微调。

5 结论

(1) 基于 G_F 集理论,提出了一种混联机构型综合理论和分析混联机构末端特征的方法。

(2) 将混联机构分成两类,给出了混联机构型综合的具体算法、设计步骤,同时建立了混联机构数综合方程。

(3) 综合出了含对称并联结构的 $3T2R$ 五自由度混联机构,分析了综合出的一种 $3T2R$ 机构的末端运动特征,验证了构型综合理论的正确性。

(4) 该综合方法可用于具有确定运动特征的串联、并联以及混联机构的构型设计,对机构型综合具有一定的理论指导作用。

参 考 文 献

- 1 李彬, 黄田, 刘海涛, 等. Exechon 混联机器人三自由度并联机构模块位置分析[J]. 中国机械工程, 2010, 21(23): 2785–2789.
Li Bin, Huang Tian, Liu Haitao, et al. Position analysis of a 3-DOF PKM module for a 5-DOF hybrid robot Exechon[J]. China Mechanical Engineering, 2010, 21(23): 2785–2789. (in Chinese)
- 2 李菊, 赵德安, 沈惠平, 等. 多喷枪协同式喷涂五轴混联机器人设计 [J]. 农业机械学报, 2012, 43(4): 216–220.
Li Ju, Zhao Dean, Shen Huiping, et al. Design of 5-axes hybrid robot with several spray guns for collaborative spraying[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(4): 216–220. (in Chinese)
- 3 陈纯, 黄玉美, 韩旭焰, 等. 五面加工混联机床概念设计[J]. 农业机械学报, 2009, 40(9): 187–192.
Chen Chun, Huang Yumei, Han Xuzhao, et al. Conceptual design of a novel hybrid machine tool with five-face machining capability[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(9): 187–192. (in Chinese)
- 4 Huang Tian, Wang Panfeng, Zhao Xueman. Design of a 4-DOF hybrid PKM module for large structural component assembly[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2010, 59(1): 159–162.
- 5 高云峰, 吕明睿, 周伦, 等. 一种五自由度混联机器人运动学分析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2014, 46(7): 1–7.
Gao Yunfeng, Lü Mingrui, Zhou Lun, et al. Analysis of kinematics of a five-axis hybrid manipulator[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2014, 46(7): 1–7. (in Chinese)
- 6 Liu Haitao, Huang Tian, Mei Jianping, et al. Kinematic design of a 5-DOF hybrid robot with large workspace limb-stroke ratio [J]. ASME Journal of Mechanical Design, 2007, 129(5): 53–57.
- 7 Shen Huiping, Zhao Haibin, Deng Jiaming, et al. Type design method and the application for hybrid robot based on freedom distribution and position and orientation characteristic set [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(23): 56–64.
- 8 Zeng Qiang, Fang Yuefa. Structural synthesis and analysis of serial-parallel hybrid mechanisms with spatial multi-loop kinematic chains[J]. Mechanism and Machine Theory, 2012, 49(3): 198–215.
- 9 Alexandre Campos, Christoph Budde, Jurgen Hesselbach. A type synthesis method for hybrid robot structures[J]. Mechanism and Machine Theory, 2008, 43(8): 984–995.
- 10 高峰. 并联机器人型综合的 G_F 集理论[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
- 11 史巧硕, 高峰, 余发国, 等. 基于 G_F 集的自由度移动并联机构构型研究[J]. 上海交通大学学报, 2008, 42(7): 1109–1115.
Shi Qiaoshuo, Gao Feng, Yu Faguo, et al. Type synthesis of 3-DOF translational parallel mechanisms based on G_F set[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2008, 42(7): 1109–1115. (in Chinese)
- 12 Huang Zhen, Li Qinchuan. General methodology for type synthesis of lower-mobility symmetrical parallel manipulators and several novel manipulators[J]. International Journal of Robotics Research, 2002, 21(2): 131–145.
- 13 Li Qinchuan, Huang Zhen, Hervé J M. Displacement manifold method for synthesis of lower-mobility parallel mechanisms[J]. Science in China Series E: Technological Sciences, 2004, 47(6): 641–650.
- 14 Lu Yi, Ding Ling, Yu Jianping. Autoderivation of topological graphs for type synthesis of planar 3DOF parallel mechanisms[J]. ASME Journal of Mechanisms and Robotics, 2010, 2(1): 011002-011002-8.
- 15 Gogu G. Structural synthesis of maximally regular T3R2-type parallel robots via theory of linear transformations and evolutionary morphology[J]. Robotica, 2009, 27(1): 79–101.
- 16 Yang Tingli, Liu Anxin, Jin Qiong, et al. Position and orientation characteristic equation for topological design of robot mechanisms[J]. ASME Journal of Mechanical Design, 2009, 131(2): 210011–210011–7.
- 17 Gao Feng, Li Weiming, Zhao Xianchao, et al. New kinematic structures for 2-, 3-, 4-, and 5-DOF parallel manipulator designs [J]. Mechanism and Machine Theory, 2002, 37(12): 1395–1411.