



(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 107398893 B

(45)授权公告日 2020.06.02

(21)申请号 201710796998.4

EP 3117966 A1,2017.01.18,

(22)申请日 2017.09.06

沈惠平等.基于自由度分配和方位特征集的混联机器人机型设计方法及应用.《机械工程学报》.2011,第56-64页.

(65)同一申请的已公布的文献号

申请公布号 CN 107398893 A

审查员 尚妍梅

(43)申请公布日 2017.11.28

(73)专利权人 河北科技大学

地址 050018 河北省石家庄市裕华东路70号

(72)发明人 张付祥 刘再 黄永建 黄凤山

(51)Int.Cl.

B25J 9/00(2006.01)

(56)对比文件

CN 106395051 A,2017.02.15,

CN 204397890 U,2015.06.17,

CN 105857813 A,2016.08.17,

权利要求书1页 说明书15页 附图1页

(54)发明名称

圆钢端面贴标混联机器人结构拓扑方法

(57)摘要

圆钢端面贴标混联机器人结构拓扑方法,包含如下步骤:根据圆钢端面贴标工艺,确定贴标混联机构的运动输出特性矩阵以及串并联机构的运动输出特性矩阵;构造并联机构支路结构类型,并确定支路组合方案;确定支路在两平台之间装配的几何条件,根据并联机构自由度公式检验自由度;判定消极运动副,判定主动副;进行BKC判定并计算耦合度,判定活动度类型,判断机构运动输入—输出解耦性;根据串联机构的运动特性矩阵和方位特征方程的运算规则,构造串联机构;将串联机构与并联机构串接构成贴标混联机器人,确定机器人和摄像机的布置方式。该方法有效地综合出圆钢端面自动贴标机器人的构型,提高了圆钢端面自动贴标机器人的实用性。



CN 107398893 B

1. 一种针对圆钢端面自动贴标混联机器人进行拓扑结构分析的方法,其特征在于包含如下步骤:

第1步,通过分析圆钢端面贴标工艺,圆钢端面自动贴标混联机器人需要空间三维移动输出、取标贴标的一维转动输出以及保证标签与圆钢端面垂直贴合的一维转动输出,即需要三维移动输出以及二维转动输出,贴标混联机构的运动输出特性矩阵 M_H 为 $[t^3 r^2]^T$,并联部分与基座相连实现三维移动输出,并联机构的运动输出特性矩阵 M_{pa} 为 $[t^3 r^0]^T$,串联部分与末端执行器相连实现三维转动输出,串联机构的运动输出特性矩阵 M_S 为 $[t^0 r^2]^T$;

第2步,根据并联机构运动输出特性矩阵 $M_{pa} = [t^3 r^0]^T$ 构造并联机构支路结构类型,假定相邻两运动副的轴线相互垂直或平行,为简化分析,构造支链只考虑P副(移动副)和R副(转动副),3T0R并联机构支路结构类型包括: $-P-P-P-$, $-R-P-P-P-(-C-P-P-)$, $-R//R-P-P-(-R//C-P-)$, $-R//R//R-P-(-R//R//C-)$, $-R-R-P-P-P-$, $-R//R-R-P-P-(-R//C\perp C-)$, $-R//R-P-R//R-(-R//R\perp R//C-)$, $-R//R//R-P-(-C//R//R\perp R-)$, $-R-R//R//R-R-$, $-R//R-R//R//R-$,将以上得到的支路运动链中的一个从动P副用一个由4个R副组成的平面平行四边形结构(用 P^{4R} 表示)替换,则可得到含有平面闭合回路的支路运动链,含有两个从动P副的支路中存在两个从动移动副,构成运动链的分支结构运动性能差,所以实际应用中这类机构并不实用剔除候选,根据贴标工作实用性确定候选组合方案为: $3-\{-R//R//R-P^{4R}-\}$, $3-\{-R//R-P^{4R}-//R//R-\}$, $3-\{-R-R//R//R//R-\}$;

第3步,确定支路在两平台之间装配的几何条件,3条支路在动平台装配的几何条件为:3个P副的轴线空间交叉,3条支路在静平台装配的几何条件为:第1条和第2条支路在静平台的两个R副的轴线互不平行、第3条支路不平行于前两个转动副的平面,根据并联机构自由度公式检验自由度;

第4步,根据消极运动副判定准则判定消极运动副,即:对活动度大于0的并联机构,若将某运动副刚化,得到的原机构的转化机构,若两者活动度相等,则该运动副为消极运动副,否则,该运动副存在相对运动,根据主动副判定准则判定主动副,即:对活动度为 F 的机构,选定 F 个运动副并刚化之,若刚化后机构的活动度为0,则选定的 F 个运动副可同时为主动副,否则,不能同时为主动副;

第5步,根据基本运动链判定准则进行基本运动链判定,根据耦合度公式计算耦合度,根据活动度判定准则进行活动度判定,根据拓扑结构的解耦原理判断机构运动输入-输出解耦性;

第6步,根据串联部分的运动特性矩阵 $M_S = [t^0 r^2]^T$ 以及串联机构方位特征方程的运算规则,构造串联机构,选择两个转动副轴线垂直的R副构成串联机构;

第7步,将串联机构与并联机构串接构成贴标混联机器人,机器人侧置式布置,摄像机固定在并联机构的动平台上。

圆钢端面贴标混联机器人结构拓扑方法

技术领域

[0001] 本发明涉及一种应用于圆钢端面自动贴标混联机器人的结构拓扑方法,属于冶金行业自动贴标技术领域。

背景技术

[0002] 目前,钢铁厂中完成圆钢端面贴标的工作主要是依靠人工,在部分钢铁企业中正在逐步采用自动贴标系统,实现了利用机器人对圆钢端面进行自动贴标。例如:中国专利号CN2016202585353、CN201610193686X中,提出了一种应用于成捆圆钢端面贴标的机器人自动贴标系统。系统中贴标机器人采用串联机器人存在速度慢、机构末端累积误差大的缺点,而商用的并联机器人又无法实现贴标工作时的俯仰运动且其工作空间相对较小。采用混联机构作为贴标机构是解决上述问题的有效方法,以并联机构作为贴标机构主体可实现高速高精度贴标运动,以串联机构联接末端执行器可实现贴标工作的俯仰运动且弥补了并联机构工作空间不足的缺点。

发明内容

[0003] 基于以上原因,本发明提出了一种圆钢端面贴标混联机器人结构拓扑方法。

[0004] 本发明圆钢端面贴标混联机器人结构拓扑方法,包含如下步骤:

[0005] 第1步,通过分析圆钢端面贴标工艺,确定贴标混联机构的运动输出特性矩阵

$$[0006] \quad M_H = \begin{bmatrix} t^{\xi_{HP}} \\ r^{\xi_{HR}} \end{bmatrix}, \xi_{HP}, \xi_{HR} = 0, 1, 2, 3$$

[0007] 并联部分的运动输出特性矩阵

$$[0008] \quad M_{Pa} = \begin{bmatrix} t^{\xi_{PaP}} \\ r^{\xi_{PaR}} \end{bmatrix}, \xi_{PaP}, \xi_{PaR} = 0, 1, 2, 3$$

[0009] 串联部分的运动输出特性矩阵

$$[0010] \quad M_S = \begin{bmatrix} t^{\xi_{SP}} \\ r^{\xi_{SR}} \end{bmatrix}, \xi_{SP}, \xi_{SR} = 0, 1, 2, 3$$

[0011] 其中,

$$[0012] \quad M_H = \begin{bmatrix} t^{\xi_{HP}} \\ r^{\xi_{HR}} \end{bmatrix} = M_S \left(= \begin{bmatrix} t^{\xi_{SP}} \\ r^{\xi_{SR}} \end{bmatrix} \right) \cup M_{Pa} \left(= \begin{bmatrix} t^{\xi_{PaP}} \\ r^{\xi_{PaR}} \end{bmatrix} \right)$$

[0013] 式中, $t^{\xi_{HP}}$ 为混联机构末端的独立平移输出, ξ_{HP} 为独立平移输出数;

[0014] $r^{\xi_{HR}}$ 为混联机构末端的独立转动输出, ξ_{HR} 为独立转动输出数;

[0015] $f^{\xi_{SP}}$ 为串联部分末端构件的独立平移输出, ξ_{SP} 为独立平移输出数;

[0016] $f^{\xi_{SR}}$ 为串联部分末端构件的独立转动输出, ξ_{SR} 为独立转动输出数;

[0017] $f^{\xi_{PaP}}$ 为并联部分动平台的独立平移输出, ξ_{PaP} 为独立平移输出数;

[0018] $f^{\xi_{PaR}}$ 为并联部分动平台的独立转动输出, ξ_{PaR} 为独立转动输出数。

[0019] 第2步,根据并联机构运动输出特性矩阵 M_{Pa} 构造并联机构支路结构类型,其支路运动输出特性矩阵 M_1 应满足下式

$$[0020] \quad M_1 \supseteq M_{Pa}$$

[0021] 根据串联机构方位特征方程

$$[0022] \quad M_S = \bigcup_{i=1}^m M_{J_i} = \bigcup M_{S_j}$$

[0023] 式中, M_S ——末端构件的POC; M_{J_i} ——第 i 个运动副的POC集; M_{S_j} ——第 j 个子SOC的POC集(当机构由若干个子SOC串联而成)。

[0024] 以及串联机构方位特征方程的运算规则

[0025] (1)转动元素之间的‘并’运算规则

$$[0026] \quad (a) \quad [r^1] \cup [r^1]$$

$$[r^1(//R_i)] \cup [r^1(//R_{i+1})]$$

$$[0027] \quad = \begin{cases} [r^1(//R_i)], R_i \text{ 与 } R_{i+1} \text{ 平行} \\ [r^2(//\diamond(R_i, R_{i+1}))], R_i \text{ 与 } R_{i+1} \text{ 不平行} \end{cases}$$

[0028] 式中, $r^1(//R_i)$ ——末端构件在平行于 R_i 副轴线方向存在一维转动;

$r^2(//\diamond(R_i, R_{i+1}))$ ——末端构件在平行于 R_i 副和 R_{i+1} 副轴线的平面内存在二维转动。

$$[0029] \quad (b) \quad [r^1] \cup [r^2]$$

$$[r^1(//R_i)] \cup [r^2(//\diamond(R_{i+1}, R_{i+2}))]$$

$$[0030] \quad = \begin{cases} [r^2(//\diamond(R_{i+1}, R_{i+2}))], R_i \text{ 与 } \diamond(R_{i+1}, R_{i+2}) \text{ 平行} \\ [r^3], R_i \text{ 与 } \diamond(R_{i+1}, R_{i+2}) \text{ 不平行} \end{cases}$$

[0031] 式中, r^3 ——末端构件存在三维转动。

$$[0032] \quad (c) \quad [r^2] \cup [r^2]$$

$$[0033] \quad \begin{aligned} & [r^2(//\diamond(R_{i-1}, R_i))] \cup [r^2(//\diamond(R_{i+1}, R_{i+2}))] \\ & = \begin{cases} [r^2(//\diamond(R_{i+1}, R_{i+2}))], \diamond(R_{i-1}, R_i) \text{ 与 } \diamond(R_{i+1}, R_{i+2}) \text{ 平行} \\ [r^3], \diamond(R_{i-1}, R_i) \text{ 与 } \diamond(R_{i+1}, R_{i+2}) \text{ 不平行} \end{cases} \end{aligned}$$

$$[0034] \quad (d) \quad [r^3] \cup [r^k]$$

$$[0035] \quad [r^3] \cup [r^k] = [r^3], k = 0, 1, 2, 3$$

[0036] (2) 移动元素之间的‘并’运算规则

$$[0037] \quad (a) \quad [t^1] \cup [t^1]$$

$$[0038] \quad \begin{aligned} & [t^1(//P_i)] \cup [t^1(//P_{i+1})] \\ & = \begin{cases} [t^1(//P_i)], P_i \text{ 与 } P_{i+1} \text{ 平行} \\ [t^2(//\diamond(P_i, P_{i+1}))], P_i \text{ 与 } P_{i+1} \text{ 不平行} \end{cases} \end{aligned}$$

[0039] 式中, P_i ——P副的移动或R副的伴随移动; $t^1(//P_i)$ ——末端构件在平行于 P_i 方向存在一个有限移动; $t^2(//\diamond(P_i, P_{i+1}))$ ——末端构件在平行于 P_i 和 P_{i+1} 的平面内存在二维有限移动。

$$[0040] \quad (b) \quad [t^1] \cup [t^2]$$

$$[0041] \quad \begin{aligned} & [t^1(//P_i)] \cup [t^2(//\diamond(P_{i+1}, P_{i+2}))] \\ & = \begin{cases} [t^2(//\diamond(P_{i+1}, P_{i+2}))], P_i \text{ 与 } \diamond(P_{i+1}, P_{i+2}) \text{ 平行} \\ [r^3], P_i \text{ 与 } \diamond(P_{i+1}, P_{i+2}) \text{ 不平行} \end{cases} \end{aligned}$$

[0042] 式中, t^3 ——末端构件存在三位移动

$$[0043] \quad (c) \quad [t^2] \cup [t^2]$$

$$[0044] \quad \begin{aligned} & [t^2(//\diamond(P_{i-1}, P_i))] \cup [t^2(//\diamond(P_{i+1}, P_{i+2}))] \\ & = \begin{cases} [t^2(//\diamond(P_{i+1}, P_{i+2}))], \diamond(P_{i-1}, P_i) \text{ 与 } \diamond(P_{i+1}, P_{i+2}) \text{ 平行} \\ [r^3], \diamond(P_{i-1}, P_i) \text{ 与 } \diamond(P_{i+1}, P_{i+2}) \text{ 不平行} \end{cases} \end{aligned}$$

$$[0045] \quad (d) \quad [t^3] \cup [t^k]$$

$$[0046] \quad [t^3] \cup [t^k] = [t^3], k=0, 1, 2, 3$$

[0047] (3) POC集独立元素的选取原则

[0048] POC集的独立元素数不大于机构DOF;任意两个独立元素不能是同一个R副的POC集元素。

[0049] 构造支路结构类型,并确定支路组合方案,根据贴标工作实用性确定候选组合方案;

[0050] 第3步,由期望得到的并联机构的POC集确定自由度,由串联机构的POC集法求出支路的POC集,根据并联机构方位特征方程 $M_{P_a} = \bigcap_{j=1}^{v+1} M_{b_j}$ 确定支路在两平台之间装配的几何条件,根据并联机构自由度公式检验自由度;

$$[0051] \begin{cases} F = \sum_{i=1}^m f_i - \sum_{j=1}^v \xi_{L_j} \\ \xi_{L_j} = \dim. \left\{ \left(\bigcap_{i=1}^j M_{b_i} \right) \cup M_{b_{(j+1)}} \right\} \end{cases}$$

[0052] 式中, F ——机构DOF; f_i ——第*i*个运动副的自由度; m ——运动副数; v ——独立回路数($v=m-n+1$, n ——构件数); ξ_{L_j} ——第*j*个独立回路的独立位移方程数; M_{b_i} ——第*i*条支路末端构件的POC集; $\bigcap_{i=1}^j M_{b_i}$ ——前*j*条支路组成的子并联机构动平台的POC集; $M_{b_{(j+1)}}$ ——第(*j*+1)条支路末端构件的POC集; ξ_{L_j} ——前*j*条支路组成的子并联机构的等效SOC和第(*j*+1)条支路构成的第*j*个独立回路的独立位移方程数,由串联机构POC方程确定。

[0053] 第4步,根据消极运动副判定准则:对 $F>0$ 的并联机构,若将某运动副刚化,得到的原机构的转化机构,若两者活动度相等,则该运动副为消极运动副;否则,该运动副存在相对运动,判定消极运动副。根据主动副判定准则:对活动度为 F 的机构,选定 F 个运动副并刚化之。若刚化后机构的活动度为0,则选定的 F 个运动副可同时为主动副,否则,不能同时为主动副,判定主动副;

[0054] 第5步,进行并联机构的特征分析。

[0055] (1)根据基本运动链(BKC)判定准则进行BKC判定。将机构依次分解为 v 个 SOC_i 及其约束度 Δ_i 自 Δ_1 开始,对 $\Delta_1, \Delta_2 \dots, \Delta_v$ 次划分为若干部分,且每一部分划分为最小划分,则

每一划分相当于一个BKC。并根据耦合度公式 $k = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^v |\Delta_j|$ 计算机构耦合度。

[0056] (2)根据活动度判定准则判定活动度类型。当 F 个主动副位于同一个基本运动链的支路中,机构具有完全活动度;当 F 个主动副位于不同BKC的支路中,机构具有部分活动度;当 F 个主动副位于不同BKC的支路中,且机架分割可使各子运动链独立,机构具有可分离活动度。

[0057] (3)根据拓扑结构的解耦原理判断运动输入-输出解耦性;

[0058] 第6步,根据串联部分的运动输出特性矩阵以及串联机构方位特征方程的运算规则进行串联部分型综合;

[0059] 第7步,根据串并联机构的运动特性以及实际贴标工况确定混联机器人在贴标系

统中的布置方式,并以此确定摄像机的布置方案。

[0060] 本发明的有益效果:本发明针对圆钢端面自动贴标混联机器人进行了结构拓扑,根据实际贴标工作进行自由度分配。采用基于方位特征集法进行结构拓扑,分别综合出混联机器人并联部分的构型及串联部分的构型进而综合出适用于圆钢端面贴标系统的混联机器人。根据混联机构的运动特性确定其在贴标工作中的位置布局。该方法有效地综合出圆钢端面自动贴标混联机器人的结构构型,优化了圆钢端面自动贴标混联机构的贴标适应度,提高了圆钢端面自动贴标机构的实用性。

附图说明

[0061] 本发明圆钢端面贴标混联机器人结构拓扑方法的评价指标层次结构图。

具体实施方式

[0062] 圆钢端面贴标混联机器人结构拓扑方法,包含如下步骤:

[0063] 第1步,通过分析圆钢端面贴标工艺,确定贴标混联机构的运动输出特性矩阵

$$[0064] \quad M_H = \begin{bmatrix} t^{\xi_{HP}} \\ r^{\xi_{HR}} \end{bmatrix}, \xi_{HP}, \xi_{HR} = 0, 1, 2, 3$$

[0065] 并联部分的运动输出特性矩阵

$$[0066] \quad M_{Pa} = \begin{bmatrix} t^{\xi_{PaP}} \\ r^{\xi_{PaR}} \end{bmatrix}, \xi_{PaP}, \xi_{PaR} = 0, 1, 2, 3$$

[0067] 串联部分的运动输出特性矩阵

$$[0068] \quad M_S = \begin{bmatrix} t^{\xi_{SP}} \\ r^{\xi_{SR}} \end{bmatrix}, \xi_{SP}, \xi_{SR} = 0, 1, 2, 3$$

[0069] 其中,

$$[0070] \quad M_H = \begin{bmatrix} t^{\xi_{HP}} \\ r^{\xi_{HR}} \end{bmatrix} = M_S \left(= \begin{bmatrix} t^{\xi_{SP}} \\ r^{\xi_{SR}} \end{bmatrix} \right) \cup M_{Pa} \left(= \begin{bmatrix} t^{\xi_{PaP}} \\ r^{\xi_{PaR}} \end{bmatrix} \right)$$

[0071] 式中, $t^{\xi_{HP}}$ 为混联机构末端的独立平移输出, ξ_{HP} 为独立平移输出数;

[0072] $r^{\xi_{HR}}$ 为混联机构末端的独立转动输出, ξ_{HR} 为独立转动输出数;

[0073] $t^{\xi_{SP}}$ 为串联部分末端构件的独立平移输出, ξ_{SP} 为独立平移输出数;

[0074] $r^{\xi_{SR}}$ 为串联部分末端构件的独立转动输出, ξ_{SR} 为独立转动输出数;

[0075] $t^{\xi_{PaP}}$ 为并联部分动平台的独立平移输出, ξ_{PaP} 为独立平移输出数;

[0076] $r^{\xi_{PaR}}$ 为并联部分动平台的独立转动输出, ξ_{PaR} 为独立转动输出数。

[0077] 第2步,根据并联机构运动输出特性矩阵 M_{Pa} 构造并联机构支路结构类型,其支路运

动输出特性矩阵 M_1 应满足下式

$$[0078] \quad M_1 \supseteq M_{Pa}$$

[0079] 根据串联机构方位特征方程

$$[0080] \quad M_S = \bigcup_{i=1}^m M_{J_i} = \bigcup M_{S_j}$$

[0081] 式中, M_S ——末端构件的POC; M_{J_i} ——第*i*个运动副的POC集; M_{S_j} ——第*j*个子SOC的POC集(当机构由若干个子SOC串联而成)。

[0082] 以及串联机构方位特征方程的运算规则

[0083] (1)转动元素之间的‘并’运算规则

$$[0084] \quad (a) \quad [r^1] \cup [r^1]$$

$$[r^1(//R_i)] \cup [r^1(//R_{i+1})]$$

$$[0085] \quad = \begin{cases} [r^1(//R_i)], R_i \text{ 与 } R_{i+1} \text{ 平行} \\ [r^2(//\diamond(R_i, R_{i+1}))], R_i \text{ 与 } R_{i+1} \text{ 不平行} \end{cases}$$

[0086] 式中, $r^1(//R_i)$ ——末端构件在平行于 R_i 副轴线方向存在一维转动;

$r^2(//\diamond(R_i, R_{i+1}))$ ——末端构件在平行于 R_i 副和 R_{i+1} 副轴线的平面内存在二维转动。

$$[0087] \quad (b) \quad [r^1] \cup [r^2]$$

$$[r^1(//R_i)] \cup [r^2(//\diamond(R_{i+1}, R_{i+2}))]$$

$$[0088] \quad = \begin{cases} [r^2(//\diamond(R_{i+1}, R_{i+2}))], R_i \text{ 与 } \diamond(R_{i+1}, R_{i+2}) \text{ 平行} \\ [r^3], R_i \text{ 与 } \diamond(R_{i+1}, R_{i+2}) \text{ 不平行} \end{cases}$$

[0089] 式中, r^3 ——末端构件存在三维转动。

$$[0090] \quad (c) \quad [r^2] \cup [r^2]$$

$$[r^2(//\diamond(R_{i-1}, R_i))] \cup [r^2(//\diamond(R_{i+1}, R_{i+2}))]$$

$$[0091] \quad = \begin{cases} [r^2(//\diamond(R_{i+1}, R_{i+2}))], \diamond(R_{i-1}, R_i) \text{ 与 } \diamond(R_{i+1}, R_{i+2}) \text{ 平行} \\ [r^3], \diamond(R_{i-1}, R_i) \text{ 与 } \diamond(R_{i+1}, R_{i+2}) \text{ 不平行} \end{cases}$$

$$[0092] \quad (d) \quad [r^3] \cup [r^k]$$

[0093] $[r^3] \cup [r^k] = [r^3], k = 0, 1, 2, 3$

[0094] (2) 移动元素之间的‘并’运算规则

[0095] (a) $[t^1] \cup [t^1]$

$$[t^1(//P_i)] \cup [t^1(//P_{i+1})]$$

[0096]
$$= \begin{cases} [t^1(//P_i)], P_i \text{ 与 } P_{i+1} \text{ 平行} \\ [t^2(//\diamond(P_i, P_{i+1}))], P_i \text{ 与 } P_{i+1} \text{ 不平行} \end{cases}$$

[0097] 式中, P_i ——P副的移动或R副的伴随移动; $t^1(//P_i)$ ——末端构件在平行于 P_i 方向存在一个有限移动; $t^2(//\diamond(P_i, P_{i+1}))$ ——末端构件在平行于 P_i 和 P_{i+1} 的平面内存在两维有限移动。

[0098] (b) $[t^1] \cup [t^2]$

$$[t^1(//P_i)] \cup [t^2(//\diamond(P_{i+1}, P_{i+2}))]$$

[0099]
$$= \begin{cases} [t^2(//\diamond(P_{i+1}, P_{i+2}))], P_i \text{ 与 } \diamond(P_{i+1}, P_{i+2}) \text{ 平行} \\ [t^3], P_i \text{ 与 } \diamond(P_{i+1}, P_{i+2}) \text{ 不平行} \end{cases}$$

[0100] 式中, t^3 ——末端构件存在三位移动

[0101] (c) $[t^2] \cup [t^2]$

$$[t^2(//\diamond(P_{i-1}, P_i))] \cup [t^2(//\diamond(P_{i+1}, P_{i+2}))]$$

[0102]
$$= \begin{cases} [t^2(//\diamond(P_{i+1}, P_{i+2}))], \diamond(P_{i-1}, P_i) \text{ 与 } \diamond(P_{i+1}, P_{i+2}) \text{ 平行} \\ [t^3], \diamond(P_{i-1}, P_i) \text{ 与 } \diamond(P_{i+1}, P_{i+2}) \text{ 不平行} \end{cases}$$

[0103] (d) $[t^3] \cup [t^k]$

[0104] $[t^3] \cup [t^k] = [t^3], k=0, 1, 2, 3$

[0105] (3) POC集独立元素的选取原则

[0106] POC集的独立元素数不大于机构DOF;任意两个独立元素不能是同一个R副的POC集元素。

[0107] 构造支路结构类型,并确定支路组合方案,根据贴标工作实用性确定候选组合方案;

[0108] 第3步,由期望得到的并联机构的POC集确定自由度,由串联机构的POC集法求出支

路的POC集,根据并联机构方位特征方程 $M_{P_a} = \bigcap_{j=1}^{v+1} M_{b_j}$ 确定支路在两平台之间装配的几何条件,根据并联机构自由度公式检验自由度:

$$[0109] \quad \begin{cases} F = \sum_{i=1}^m f_i - \sum_{j=1}^v \xi_{L_j} \\ \xi_{L_j} = \dim. \left\{ \left(\bigcap_{i=1}^j M_{b_i} \right) \cup M_{b_{(j+1)}} \right\} \end{cases}$$

[0110] 式中, F ——机构DOF; f_i ——第*i*个运动副的自由度; m ——运动副数; v ——独立回路数($v=m-n+1$, n ——构件数); ξ_{L_j} ——第*j*个独立回路的独立位移方程数; M_{b_i} ——第*i*条支路末端构件的POC集; $\bigcap_{i=1}^j M_{b_i}$ ——前*j*条支路组成的子并联机构动平台的POC集; $M_{b_{(j+1)}}$ ——第(*j*+1)条支路末端构件的POC集; ξ_{L_j} ——前*j*条支路组成的子并联机构的等效SOC和第(*j*+1)条支路构成的第*j*个独立回路的独立位移方程数,由串联机构POC方程确定。

[0111] 第4步,根据消极运动副判定准则:对 $F>0$ 的并联机构,若将某运动副刚化,得到的原机构的转化机构,若两者活动度相等,则该运动副为消极运动副;否则,该运动副存在相对运动,判定消极运动副。根据主动副判定准则:对活动度为 F 的机构,选定 F 个运动副并刚化之。若刚化后机构的活动度为0,则选定的 F 个运动副可同时为主动副,否则,不能同时为主动副,判定主动副;

[0112] 第5步,进行并联机构的特征分析。

[0113] (1)根据基本运动链(BKC)判定准则进行BKC判定。将机构依次分解为 v 个SOC_{*i*}及其约束度 Δ_i 。自 Δ_1 开始,对 $\Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_v$ 依次划分为若干部分,且每一部分划分为最小划分,

则每一划分相当于一个BKC。并根据耦合度公式 $k = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^v |\Delta_j|$ 计算机构耦合度。

[0114] (2)根据活动度判定准则判定活动度类型。当 F 个主动副位于同一个基本运动链的支路中,机构具有完全活动度;当 F 个主动副位于不同BKC的支路中,机构具有部分活动度;当 F 个主动副位于不同BKC的支路中,且机架分割可使各子运动链独立,机构具有可分离活动度。

[0115] (3)根据拓扑结构的解耦原理判断运动输入-输出解耦性;

[0116] 第6步,根据串联部分的运动输出特性矩阵以及串联机构方位特征方程的运算规则进行串联部分型综合;

[0117] 第7步,根据串并联机构的运动特性以及实际贴标工况确定混联机器人在贴标系统中的布置方式,并以此确定摄像机的布置方案。

[0118] 此外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:

[0119] (1)自由度要求——必须实现运动平台期望的运动输出,且使非期望运动输出为

常量；

[0120] (2) 结构要求——机构结构简单, 结构对称即各支路结构相同；

[0121] (3) 工作空间要求——优先考虑具有较大工作空间的并联机构；

[0122] (4) 驱动方式——全部驱动副位于同一静平台上, 或尽可能靠近静平台, 以利于驱动器配置, 并改善机构动力学性能, 并联机构中被动支链数为0, 且各主动链中驱动数为1；

[0123] 本实施例拓扑结构综合的步骤如下：

[0124] 第1步, 分析圆钢端面贴标工艺可知贴标机构末端操作器需要空间三维移动输出、取标贴标的一维转动输出以及保证标签与圆钢端面垂直贴合的一维转动输出, 即机构末端需要三维移动输出以及二维转动输出, 由此确定贴标混联机构的运动输出特性矩阵

$$[0125] \quad M_H = \begin{bmatrix} t^{\xi_{HP}} \\ r^{\xi_{HR}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t^3 \\ r^2 \end{bmatrix}$$

[0126] 考虑到并联部分决定机器人的精度、刚度、体积和承载能力, 串联部分则决定机器人的调姿能力和末端执行器的悬挂形式, 并联部分与基座相连实现三维移动输出, 串联部分与末端执行器相连实现三维转动输出。二者串接构成混联机构。则并联部分的运动输出特性矩阵

$$[0127] \quad M_{Pa} = \begin{bmatrix} t^{\xi_{PaP}} \\ r^{\xi_{PaR}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t^3 \\ r^0 \end{bmatrix}$$

[0128] 串联部分的运动输出特性矩阵

$$[0129] \quad M_S = \begin{bmatrix} t^{\xi_{SP}} \\ r^{\xi_{SR}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t^0 \\ r^2 \end{bmatrix}$$

[0130] 其中,

$$[0131] \quad M_H = \begin{bmatrix} t^3 \\ r^2 \end{bmatrix} = M_S \left(= \begin{bmatrix} t^0 \\ r^2 \end{bmatrix} \right) \cup M_{Pa} \left(= \begin{bmatrix} t^3 \\ r^0 \end{bmatrix} \right)$$

[0132] 第2步, 根据并联机构运动输出特性矩阵 M_{Pa} 构造并联机构支路结构类型, 其支路运动输出特性矩阵 M_1 应满足下式

$$[0133] \quad M_1 \supseteq M_{Pa} = \begin{bmatrix} t^3 \\ r^0 \end{bmatrix}$$

[0134] 并联机构支路的型综合, 即综合出在主动副驱动方向上末端构件的输出速度仅与主动副的输入速度相关, 且两者呈线性映射关系的分支结构, 为了简化支路中运动副的配置方式, 本文假定相邻两运动副的轴线相互垂直或平行; 为简化分析, 构造支链只考虑P副(移动副)和R副(转动副), 其构成的单开链(Single Opened Chain)可简记为SOC。其他运动副或闭合回路都可用P副和R副代替; 驱动方案选择: 根据自动贴标快速、轻载的工作情况,

宜采用电机驱动。考虑到直线驱动两种方式,其一滚珠丝杠传动结构复杂,其二直线电机无法自锁且技术不成熟,这里选用旋转驱动的方案,这就要求支路中需要含有R副。

[0135] 根据串联机构方位特征方程以及串联机构方位特征方程的运算规则构造支路结构类型,如表1所示

[0136] 表1 3TOR并联机构支路结构类型

F_c	结构类型	序号	运动输出矩阵	
			坐标形式	矢量形式
3	-P-P-P-	1	$\begin{bmatrix} x & y & z \\ \bullet & \bullet & \bullet \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} t^3 \\ r^0 \end{bmatrix}$ 不能绕任意方向转动
[0137]	-R-P-P-P- (-C-P-P-)	2	$\begin{bmatrix} x & y & z \\ \bullet & \bullet & \gamma \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} t^3 \\ r^1 \end{bmatrix}$ 只能绕与R副轴线平行的方向转动
	-R//R-P-P- (-R//C-P-)	3		
	-R//R//R-P- (-R//R//C-)	4		
5	-R-R-P-P-P-	5	$\begin{bmatrix} x & y & z \\ \bullet & \beta & \gamma \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} t^3 \\ r^2 \end{bmatrix}$ 转动轴线平于不同方向两个R副所平行的平面
	-R//R-R-P-P- (-R//C⊥C-)	6		
	-R//R-P-R//R- (-R//R⊥R//C-)	7		
	-R//R//R-R-P- (-C//R//R⊥R-)			
	-R-R//R//R//R-	8		
-R//R-R//R//R-				

[0138] 基于等效支路的结构类型拓展:

[0139] 若将以上得到的支路运动链中的一个从动P副用一个由4个R副组成的平面平行四边形结构(用 P^{4R} 表示)替换,则可得到含有平面闭合回路的支路运动链。支路中的闭合回路结构不仅可以提高机构的刚度和稳定性,还能够改善机构的运动性能。

[0140] 基于改变支路运动副次序的类型拓展:

[0141] 保持运动副输出特征不变条件下,改变支路的运动副次序,可以增加新类型。例如单开链支路{-R//R//C-}等效于单开链支路{-R//C//R-},两种支路的运动输出特征等效,其区别仅在于C副在支路中位置不同。所以这里不讨论改变支路运动副次序的改变造成的不同支路类型。

[0142] 由表中序号1-8的支链结构类型可以综合出三平移并联机构的结构类型。对于序号为1、2的支路,即含有两个从动P副的支路来说,因支路中存在两个从动移动副,构成运动链的分支结构运动性能差,所以实际应用中这类机构并不实用;根据基于等效支路的结构类型拓展,以 P^{4R} 代替支路中的从动P副以使机构性能更佳;根据基于改变支路运动副次序的类型拓展,这里不考虑运动副顺序。故选取序号为4、7、8的支路(含从动P副的支链以 P^{4R} 代替从动P副)进行并联机构的构造。以3-{-R//R//R-P-}为例进行分析;

[0143] 第3步,由期望得到的并联机构的POC集可知,其自由度为3;由串联机构的POC集法

求出支路的POC集为 $M_{b_i} = \begin{bmatrix} t^3 \\ r^1 \end{bmatrix}, i = 1, 2, 3$;由POC集‘交’运算的逆运算可知,为实现动平

台的三平移运动,3条支路在动平台装配的几何条件仅为:3个P副的轴线空间交叉;由POC集

‘交’运算的逆运算可知,为使第1,2条支路POC集的‘交’能减少一个转动元素,这两个支路在静平台装配的几何条件为:两支路在静平台的两个R副的轴线互不平行;由POC集‘交’运算的逆运算可知,第3条支路的装配应减少一个转动元素。因此,第3条支路在静平台装配的几何条件为:不平行于前两个转动副的平面。

[0144] 根据自由度公式,并考虑到两条支路的R副 R_{11}, R_{21} 不平行,由第1、第2条支路组成的第1个独立回路的 ξ_{L_1} 为

$$\begin{aligned}
 \xi_{L_1} &= \dim.(M_{b_1} \cup M_{b_2}) \\
 [0145] \quad &= \dim.\left(\left[\begin{array}{c} r^3 \\ r^1(//R_{11}) \end{array}\right] \cup \left[\begin{array}{c} r^3 \\ r^1(//R_{21}) \end{array}\right]\right) \\
 &= \dim.\left(\left[\begin{array}{c} r^3 \\ r^2(//\diamond(R_{11}, R_{21})) \end{array}\right]\right) = 5
 \end{aligned}$$

[0146] 第1、第2条支路组成子并联机构DOF为

$$[0147] \quad F_{(1-2)} = \sum_{i=1}^m f_i - \sum_{j=1}^v \xi_{L_j} = 8 - 5 = 3$$

[0148] 根据并联机构方为特征方程与 $F_{(1-2)} = 3$,第1、第2条支路组成子并联机构动平台的POC集为

$$\begin{aligned}
 M_{P_2(1-2)} &= M_{b_1} \cap M_{b_2} \\
 [0149] \quad &= \left[\begin{array}{c} r^3 \\ r^1(//R_{11}) \end{array}\right] \cap \left[\begin{array}{c} r^3 \\ r^1(//R_{21}) \end{array}\right] \\
 &= \left[\begin{array}{c} r^3 \\ r^0 \end{array}\right]
 \end{aligned}$$

[0150] 由自由度公式,并考虑到 R_{11}, R_{21} 与 R_{31} 为空间任意交叉,则 ξ_{L_2} 为

$$\begin{aligned}
 \xi_{L_2} &= \dim.(M_{P_2(1-2)} \cup M_{b_3}) \\
 [0151] \quad &= \dim.\left(\left[\begin{array}{c} r^3 \\ r^0 \end{array}\right] \cup \left[\begin{array}{c} r^3 \\ r^1(//R_{31}) \end{array}\right]\right) \\
 &= \dim.\left(\left[\begin{array}{c} r^3 \\ r^1(//R_{31}) \end{array}\right]\right) \\
 &= 4
 \end{aligned}$$

[0152] 则并联机构的自由度为

$$\begin{aligned}
 [0153] \quad F &= \sum_{i=1}^m f_i - \sum_{j=1}^v \xi_{L_j} \\
 &= 12 - (5 + 4) \\
 &= 3
 \end{aligned}$$

[0154] 因此机构自由度满足设计要求；

[0155] 第4步，根据消极运动副判定准则，假设刚化R₃₁副，得到一个新机构，那么这条支路结构变成SOC{-R₃₂//R₃₃-P₃₄-}，其末端构件POC集为

$$\begin{aligned}
 [0156] \quad M_{b_3} &= \begin{bmatrix} r^1(\perp R_{33}) \\ r^1(\parallel R_{33}) \end{bmatrix} \cup \begin{bmatrix} r^1(\parallel P_{34}) \\ r^0 \end{bmatrix} \\
 &= \begin{bmatrix} r^2(\parallel \diamond(R_{33}, P_{34})) \\ r^1(\parallel R_{33}) \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

[0157] 因为第1,2条支路没有变化，故 $\xi_{L_1} = 5$ ，根据第3步 ξ 的求法可得

$$\begin{aligned}
 [0158] \quad \xi_{L_2} &= \dim.(M_{P_0(1-2)} \cup M_{b_3}) \\
 &= \dim. \left(\begin{bmatrix} r^3 \\ r^0 \end{bmatrix} \cup \begin{bmatrix} r^2 \parallel \diamond(R_{33}, R_{34}) \\ r^1(\parallel R_{33}) \end{bmatrix} \right) \\
 &= \dim. \left(\begin{bmatrix} r^3 \\ r^1 \end{bmatrix} \right) \\
 &= 4
 \end{aligned}$$

[0159] 则新机构的自由度为

$$\begin{aligned}
 [0160] \quad F^* &= \sum_{i=1}^m f_i - \sum_{j=1}^v \xi_{L_j} \\
 &= 11 - (5 + 4) \\
 &= 2
 \end{aligned}$$

[0161] 由于新机构的自由度比原机构的自由度减少1，由消极运动副判定准则知R₃₁不是消极运动副。同理可证明该机构的全部运动副均不是消极运动副。

[0162] 假设刚化R₁₁, R₂₁与R₃₁副，得到一个新机构，支路结构变为SOC{-R_{i2}//R_{i3}-P_{i4}-} (i=1, 2, 3)，其末端构件POC集为

$$\begin{aligned}
 [0163] \quad M_{b_i} &= \begin{bmatrix} r^1(\perp R_{i3}) \\ r^1(\parallel R_{i3}) \end{bmatrix} \cup \begin{bmatrix} r^1(\parallel P_{i4}) \\ r^0 \end{bmatrix} \\
 &= \begin{bmatrix} r^2 \\ r^1(\parallel R_{i3}) \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

[0164] 根据自由度公式,并考虑到两条支路的R副 R_{11}, R_{21} 不平行,由第1、第2条支路组成的第1个独立回路的 ξ_{L_1} 为

$$\begin{aligned} \xi_{L_1} &= \dim.(M_{b_1} \cup M_{b_2}) = \dim.\left(\left[\begin{array}{c} r^2 \\ r^1(//R_{12}) \end{array}\right] \cup \left[\begin{array}{c} r^2 \\ r^1(//R_{22}) \end{array}\right]\right) \\ [0165] \quad &= \dim.\left(\left[\begin{array}{c} r^3 \\ r^2(//\diamond(R_{12}, R_{22})) \end{array}\right]\right) \\ &= 5 \end{aligned}$$

[0166] 第1、第2条支路组成子并联机构DOF为

$$\begin{aligned} F_{(1-2)} &= \sum_{i=1}^m f_i - \sum_{j=1}^p \xi_{L_j} \\ [0167] \quad &= 6 - 5 \\ &= 1 \end{aligned}$$

[0168] 根据并联机构方为特征方程与 $F_{(1-2)} = 1$,第1、第2条支路组成子并联机构动平台的POC集为

$$\begin{aligned} M_{P_2(1-2)} &= M_{b_1} \cap M_{b_2} \\ [0169] \quad &= \left[\begin{array}{c} r^2 \\ r^1(//R_{12}) \end{array}\right] \cap \left[\begin{array}{c} r^2 \\ r^1(//R_{22}) \end{array}\right] \\ &= \left[\begin{array}{c} r^1 \\ r^0 \end{array}\right] \end{aligned}$$

[0170] 由自由度公式,并考虑到 R_{11}, R_{21} 与 R_{31} 为空间任意交叉,则 ξ_{L_2} 为

$$\begin{aligned} \xi_{L_2} &= \dim.(M_{P_2(1-2)} \cup M_{b_3}) \\ [0171] \quad &= \dim.\left(\left[\begin{array}{c} r^1 \\ r^0 \end{array}\right] \cup \left[\begin{array}{c} r^2 \\ r^1(//R_{32}) \end{array}\right]\right) \\ &= \dim.\left(\left[\begin{array}{c} r^3 \\ r^1 \end{array}\right]\right) \\ &= 4 \end{aligned}$$

[0172] 则新机构的自由度为

$$\begin{aligned}
 F^* &= \sum_{i=1}^m f_i - \sum_{j=1}^p \xi_{L_j} \\
 [0173] \quad &= 9 - (5 + 4) \\
 &= 0
 \end{aligned}$$

[0174] 由于新机构的自由度为0,由主动副判定准则, R_{11} , R_{21} 与 R_{31} 副可同时为主动副;

[0175] 第5步,进行并联机构的特征分析

[0176] (1)BKC类型及其耦合度。由于机构的3条支路相同,取构成任一回路的单开链为SOC₁。

[0177] SOC{-R₁₁//R₁₂//R₁₃-P₁₄-P₂₄-R₂₃//R₂₂//R₂₁-}

[0178] 由第3步知 $\xi_{L_1} = 5$,故SOC₁约束度 Δ_1 为

$$\begin{aligned}
 \Delta_1 &= \sum_{i=1}^{m_1} f_i - I_1 - \xi_{L_1} \\
 [0179] \quad &= 8 - 2 - 5 \\
 &= 1
 \end{aligned}$$

[0180] 第2个单开链SOC₂为

[0181] SOC{-R₃₁//R₃₂//R₃₃-P₃₄-}

[0182] 由第3步知 $\xi_{L_2} = 4$,故SOC₂约束度 Δ_2 为

$$\begin{aligned}
 \Delta_2 &= \sum_{i=2}^{m_2} f_i - I_2 - \xi_{L_2} \\
 [0183] \quad &= 4 - 1 - 4 \\
 &= -1
 \end{aligned}$$

[0184] 由BKC判定方法知该机构只包含一个BKC,且其耦合度为

$$[0185] \quad k = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^p |\Delta_j| = 1$$

[0186] (2)活动度类型。由于该机构只包含一个BKC,按照活动度类型判定准则,该机构具有完全活动度。

[0187] (3)根据拓扑结构的解耦原理,又已知该机构具有完全活动度,因此,该机构不具有运动输入-输出解耦性;

[0188] 第6步,串联部分的运动特性矩阵为

$$[0189] \quad M_S = \begin{bmatrix} t^{\xi_{SP}} \\ t^{\xi_{SR}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t^0 \\ t^2 \end{bmatrix}$$

[0190] 串联机构方位特征方程的运算规则,选择两个转动副轴线垂直的R副构成串联机构;

[0191] 第7步,将串联机构与并联机构串接构成贴标混联机器人,机器人的布置方式可选择倒置式以及侧置式。并联机构作为贴标混联机器人的主体决定了混联机器人能否实现贴标工作。所构造并联机构的工作空间为直径为 d ,高为 h 的圆柱形空间,而圆钢捆的直径一般小于360mm,并联机构通过合理配置可以容易地实现 $d>360\text{mm}$,但由于与主动副转角以及杆长的限制, h 难以大于360mm,故机器人选择侧置式布置。为避免机器人影响摄像机采集圆钢位置信息,将摄像机固定在并联机构的动平台上。

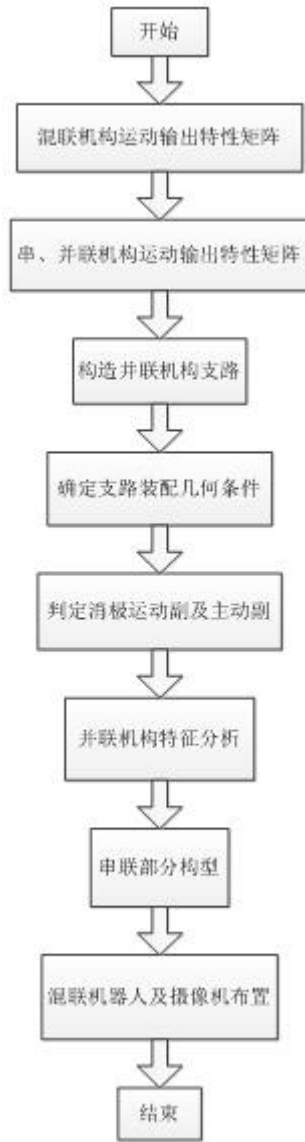


图1