

并联式六维加速度感知机构的协调方程可生成闭链结构的 条件研究*

郭万荣，尤晶晶*，张显著，张缘为

(南京林业大学 机械电子工程学院，江苏 南京 210037)

摘要：并联式六维加速度传感器的测量性能与其感知机构的操作性能有关，若感知机构输出量的协调方程不能生成闭链结构，则传感器的故障自修复率普遍偏低，制约了多维运动传感技术的发展。为此，首先，以一种经典的拓扑构型为例，通过剖析协调方程的推导过程，挖掘出生成闭链结构的数学本质。然后，以动铰链位于质量块顶点为例，推导杆长约束方程和协调方程通式，进而提出闭链结构的判定准则。基于此，推导了动铰链位于质量块顶点时协调闭链的构型条件，得到支链的理想布局规律。接着，通过算例验证上述方法的有效性、可行性。最后，将动铰链的位置推广至质量块棱中点，推导出协调闭链的支链布局条件。

关键词：六维加速度传感器；并联机构；故障修复；协调方程；构型综合

中图分类号：TH825

文献标识码：A

Research on Coordination Closed Chain of parallel type six-axis acceleration sensing mechanisms*

GUO Wan-rong, YOU Jing-jing*, ZHANG Xian-zhu, ZHANG Yuan-wui

(College of Mechatronic Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing, Jiangsu 210037, China)

Abstract: The measurement performance of parallel six-axis acceleration sensors is related to the operation performance of their sensing mechanism, and if the coordination equation of the sensing mechanism's output fails to generate a closed-chain structure, the self-repairing rate of the sensor's faults is generally low, which restricts the development of multidimensional motion sensing technology. To this end, firstly, starting from the coordination equation of the configuration, a classical topological configuration is taken as an example, and the mathematical essence of forming a closed chain is excavated by dissecting the derivation process of the coordination equation. Then, taking the moving hinge located at the vertex of the mass block as an example, the general form of the rod length constraint equation and the coordination equation are deduced, and then the determination criterion of the closed chain structure is proposed. Based on this, the configuration conditions of the coordinated closed chain when the moving hinge is located at the apex of the mass block are derived, and the ideal layout law of the branched chain is obtained. Then, the validity and feasibility of the above method are

基金项目：国家自然科学基金项目（51405237）；江苏省大学生创新创业项目（202310298017Z）

***通讯作者：**尤晶晶(1985-)，男，博士，副教授，硕士生导师，研究方向为并联机器人机构学。E-mail: youjingjing251010@126.com

verified by arithmetic examples. Finally, the position of the moving hinge is extended to the midpoint of the mass block prism, and the layout conditions of the branched chain for the coordinated closed chain are deduced.

Key words: Six-Axis Accelerometer; Parallel Mechanism; Coordination Equation; Conformational Synthesis; Branch Chain Distribution

0 引言

随着科学技术的不断发展,人们认识客观世界的要求也不断提高。特别地,对三维空间内物体的六维运动进行探测显得越来越重要^[1]。六维加速度传感器是一种能够同时测量空间三维线加速度和三维角加速度的惯性测量仪器^[2]。由于多个敏感元件共用同一个质量块,并联式六维加速度传感器在理论上能够避开传统方案的不足,且具有结构紧凑、灵敏度高、量程大、动态特性好等优点,故在机器人^[3]、惯性导航^[4]、机械振动^[5]等领域有着广泛的应用前景。

目前,国内外市场上还没有一款真正成熟、完善的六维加速度传感器产品^[6]。容错能力不足是制约其产品化的一个重要原因。传感器的容错能力主要由感知机构的故障修复性能决定。并联式六维加速度感知机构的故障修复性能由修复率、修复精度、误判率和漏判率这四项指标度量^[7-9]。针对 Stewart 型并联机构,常用的故障诊断方法^[10]是实时监测机构的可操作度,当其超过预设阈值时,机构被诊断为故障。但该方法不能确定具体的故障支链。为此,尤晶晶等^[11]通过剖析 Stewart 型并联机构的有序单开链单元,提出了“协调闭链”概念。当检测到断链时,“断点”对应的支链被诊断为

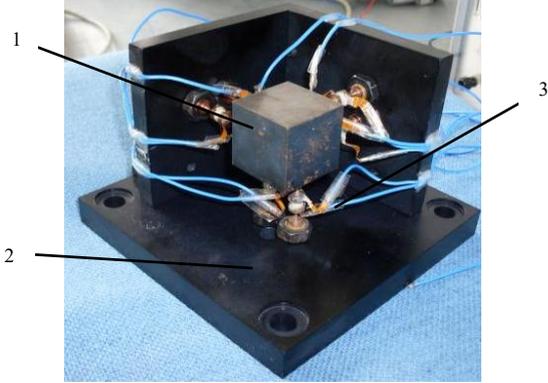
故障。然而,并不是所有的 Stewart 型并联机构的协调方程都能够生成闭链结构。

为此,本文从 Stewart 型并联机构的协调方程入手,结合协调闭链与协调矩阵,推导协调方程的通式,并挖掘支链杆长约束方程与闭链结构的关系。首先,以一种经典的动铰链位于质量块顶点的并联式拓扑构型为例,挖掘了协调方程的数学本质。然后,推导了动铰链为顶点的所有支链的杆长约束方程,并结合协调闭链与协调矩阵,推导出协调方程通式,进而提出判断构型输出是否为闭链的方法。接着,通过分析约束方程的组合关系,挖掘出动铰链为顶点时,支链的理想布局规律。然后,通过算例验证协调闭链形成条件的正确性。最后,将动铰链的位置推广至质量块棱中点,并分析了协调闭链的支链布局。

1 协调方程的推导

并联式六维加速度感知机构由一个边长为 $2L$ 的立方体质量块,一个内边长为 $2(N+L)$ 的立方体空壳状静平台(即基座),以及若干条支链组成,(见图 1)。在实际测量时,将基座刚性固定于待测载体上感应六维运动。若基座存在加速度,则质量块的位姿会相对于基座发生变化。此时,质量块上的惯性力会传递到所有支链上。由于压电陶瓷的正压电效应,

压电陶瓷的两端极化出电荷。通过构建并求解系统的反向动力学方程,可求解基座的六维加速度。



1-质量块 2-基座 3-压电陶瓷

图1 六维加速度感知机构的实物样机

为了最大程度地避免支链或铰链的干涉,并确保各方向上性能的均匀性,在设计时,所有支链相互平行或垂直,且动铰链在质量块上的位置为顶点或棱中点。以“12-6”构型(图2)为例,分别在质量块与基座上固联坐标系 $\{Q_1-X_1Y_1Z_1\}$ 、 $\{Q_2-X_2Y_2Z_2\}$ (图3)。初始状态下,它们的原点均与质量块质心重合。

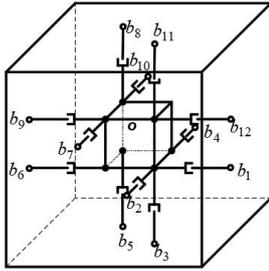


图2 并联式六维加速度感知机构

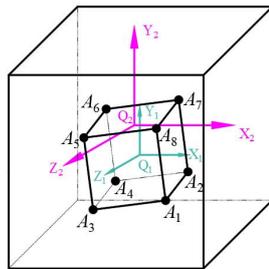


图3 质量块坐标系及基座坐标系

选取广义欧拉角表征感知机构质量块的姿态(即先绕 X_2 轴转动 α 、再绕 Y_2 轴转动 β 、

最后绕 Z_2 轴转动 γ)。文献[12]研究发现,质量块相对于基座的位姿变化很小,因此, $\{Q_1\}$ 相对于 $\{Q_2\}$ 的旋转矩阵 $R_{\{Q_1\}}^{\{Q_2\}}$ 可近似为:

$$R_{\{Q_1\}}^{\{Q_2\}} \approx \begin{bmatrix} 1 & -\gamma & \beta \\ \gamma & 1 & -\alpha \\ -\beta & \alpha & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

支链矢量在 $\{Q_2\}$ 中表达为:

$$l_i = A_h - b_i = O^{\{Q_2\}} + R_{\{Q_1\}}^{\{Q_2\}} A_h' - b_i$$

$$h = \begin{cases} 1 (i=1,2); 5 (i=7,8); \\ 2 (i=3,4); 6 (i=9,10); \\ 3 (i=5,6); 7 (i=11,12) \end{cases} \quad (2)$$

式中, A_h 、 b_i 、 $O^{\{Q_2\}}$ 为质量块顶点、球铰链、质量块质心在 $\{Q_2\}$ 中的坐标, A_h' 为质量块顶点在 $\{Q_1\}$ 中的坐标, l_i 表示支链矢量。

将图2所示构型的8个顶点、12个球铰链的坐标代入式(2),利用Taylor公式在支链原长处展开,并忽略二阶以上无穷小量,求出12条支链的杆长约束方程:

$$\begin{cases} l_1 \approx L - x - n\beta - n\gamma; l_2 \approx L - z + n\alpha + n\beta; \\ l_3 \approx L + y + n\alpha + n\gamma; l_4 \approx L + z - n\alpha - n\beta; \\ l_5 \approx L + y - n\alpha - n\gamma; l_6 \approx L + x + n\beta + n\gamma; \\ l_7 \approx L - z - n\alpha - n\beta; l_8 \approx L - y + n\alpha + n\gamma; \\ l_9 \approx L + x - n\beta - n\gamma; l_{10} \approx L + z + n\alpha + n\beta; \\ l_{11} \approx L - y - n\alpha - n\gamma; l_{12} \approx L - x + n\beta + n\gamma; \end{cases} \quad (3)$$

根据式(3),利用Hooke定律推导“12-6”构型非独立输出量的协调方程组,将其表示成矩阵形式:

$$(g_1, g_2, g_3, g_4, g_5, g_6)^T = C_{“12-6”}(f_1, f_2, \dots, f_{12})^T \quad (4)$$

式中, g_k 表示第 k 个方程的非齐次项阈值, f_i 表示第 i 条支链的输出量, $C_{“12-6”}$ 表示“12-6”构型的协调矩阵:

$$C_{n_{12-6}} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

2 协调闭链的条件

协调方程是各支链杆长约束方程的线性组合。本节提出一种由支链布局判断协调方程是否为闭链的方法，进而创建一种新的构型综合方式。

2.1 杆长约束方程

当动铰链点为质量块顶点时，立方体质量块的 8 个顶点上一共可分布 24 条支链。对支链进行编号，如图 4 所示。

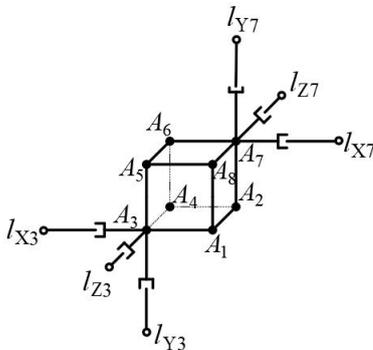


图 4 动铰链为顶点的支链

运用式(1)、(2)，计算 24 条支链的杆长约束方程（如表 1）：

表 1 动铰链为顶点的杆长约束方程

方向	杆长约束方程		
X 向	$l_{X1} = L - x - n\beta - n\gamma$	$l_{X2} = L - x + n\beta - n\gamma$	
	$l_{X3} = L + x + n\beta + n\gamma$	$l_{X4} = L + x - n\beta + n\gamma$	
	$l_{X5} = L + x + n\beta - n\gamma$	$l_{X6} = L + x - n\beta - n\gamma$	
	$l_{X7} = L - x + n\beta + n\gamma$	$l_{X8} = L - x - n\beta + n\gamma$	
	Y 向	$l_{Y1} = L + y - n\alpha + n\gamma$	$l_{Y2} = L + y + n\alpha + n\gamma$
		$l_{Y3} = L + y - n\alpha - n\gamma$	$l_{Y4} = L + y + n\alpha - n\gamma$
$l_{Y5} = L - y + n\alpha + n\gamma$		$l_{Y6} = L - y - n\alpha + n\gamma$	
$l_{Y7} = L - y - n\alpha - n\gamma$		$l_{Y8} = L - y + n\alpha - n\gamma$	

$$\begin{array}{l} Z \text{ 向} \\ l_{Z1} = L - z + n\alpha + n\beta \\ l_{Z2} = L + z - n\alpha - n\beta \\ l_{Z3} = L - z + n\alpha - n\beta \\ l_{Z4} = L + z - n\alpha + n\beta \\ l_{Z5} = L - z - n\alpha - n\beta \\ l_{Z6} = L + z + n\alpha + n\beta \\ l_{Z7} = L + z + n\alpha - n\beta \\ l_{Z8} = L - z - n\alpha + n\beta \end{array}$$

由表 1 可知，杆长约束方程中共 6 个变量，而每个方程含 3 个变量。以 X 向支链为例，每条支链对应的杆长约束方程中均含变量 x 、 β 、 γ ，将其杆长约束方程写成：

$$l_{X1} = L - x - n\beta - n\gamma = L + (-1, 0, 0, 0, -1, -1)(x, y, z, n\alpha, n\beta, n\gamma)^T \quad (5)$$

2.2 协调方程的通式

由文献[11]可知，“12-6”构型能形成协调闭链，如图 5 所示。

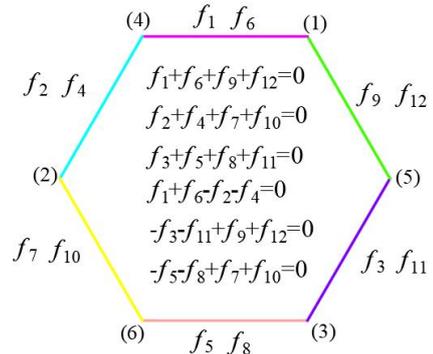


图 5 正六边形协调闭链

将图 5 中每条边对应的 2 条支链称为“支链对”，用 Wr 表示， r 表示方向。观察协调方程组可知，每一个协调方程均为正六边形两条邻边对应的 2 个支链对的线性组合。因此，构成每一个协调方程的最小单元均为协调闭链的一条边，即一个支链对。

协调方程为正六边形任意两条邻边对应的两个支链对的线性组合。每条边都有两条邻边，且在对应的两个支链对的方向中，一个与自身相同，一个相反。因此，6 个协调方程中，

3 个为同轴向 4 条支链力的线性组合, 3 个为异轴向 4 条支链力的线性组合。

对于 12 支链的拓扑构型, 协调闭链的每条边对应支链的方向有且仅有一种情况, 如图 6 所示。

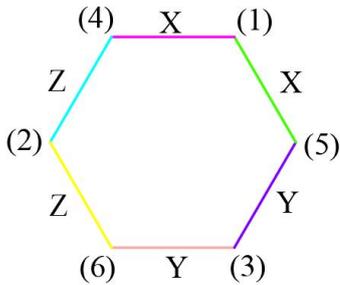


图 6 协调方程的组合

由此, 可推导出形成闭链结构的协调方程通式:

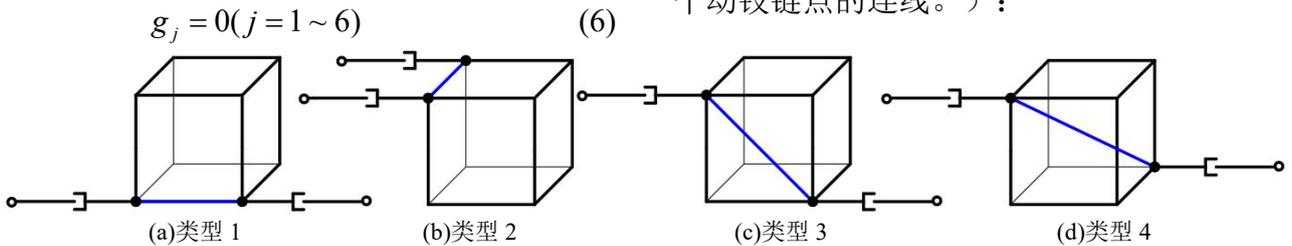


图 7 动铰链为顶点时动铰链的位置类型

计算图 7 所示 4 种类型支链对的和矩阵, 结果如表 2 所示。元素 $H_j (j=1\sim 6)$ 仅有 0、2、-2 三种可能, 故设置变量 t 为 +2 或 -2。

表 2 和矩阵

类型	线性组合结果
类型 1	$(0, 0, 0, 0, 0, 0)$
类型 2	$(t, 0, 0, 0, 0, t)$
	$(t, 0, 0, 0, t, 0)$
	$(0, 0, 0, 0, t, 0)$
类型 3	$(t, 0, 0, 0, 0, 0)$
	$(0, 0, 0, 0, 0, t)$
类型 4	$(0, 0, 0, 0, t, t)$

结合表 2, 分别对图 7 中的 4 类情况进行讨论:

类型 1 的和矩阵为 $(0, 0, 0, 0, 0, 0)$, 又由于零矩阵与非零矩阵的和一定不为零矩

$$\text{式中: } \begin{cases} g_1 = W_{X1} + W_{X2}; g_2 = W_{Y1} + W_{Y2} \\ g_3 = W_{Z1} + W_{Z2}; g_4 = W_{X1} + W_{Y1} \\ g_5 = W_{X2} + W_{Z1}; g_6 = W_{Y2} + W_{Z2} \end{cases} .$$

2.3 支链布局条件

由式(6)可知, 协调方程中支链总是成对出现。将支链对中 2 条支链的系数矩阵的和定义为“和矩阵”, 用 H 表示, 并将其作为最小单元进行线性组合。

和矩阵的结果与动铰链的位置以及支链对中 2 条支链的动铰链连线的类型有关。以 X 方向的 8 条支链为例, 如图 7 所示, 将支链对分为以下四类 (图中蓝色粗实线代表支链对中两个动铰链点的连线。):

阵, 故仅当 X、Y、Z 三个方向的支链对均为类型 1 时, 满足闭链条件。

类型 2 的 H_1 均非零, 又 Y、Z 向支链的杆长约束方程一定不含变量 x , 即 Y、Z 向支链的 H_1 均为零, 故该支链对不能与其他方向支链对构成协调方程, 即不满足闭链条件。同理, 当 X 向支链对的和矩阵同时含变量 β 和 γ (即 H_5 、 H_6 同时为零) 时, 也不满足闭链条件。

综上, 若 H_1 、 H_2 、 H_3 中有非零元素, 或 H_4 、 H_5 、 H_6 中含 2 个及以上非零元素时, 支链对一定不能构成协调闭链。

若支链对中动铰链的几何位置为类型 3,

排除支链对和矩阵第 1 列元素非零的情况, 剩余 2 种情况分别对应于和矩阵 $(0, 0, 0, 0, t, 0)$ 和 $(0, 0, 0, 0, 0, t)$ 。

若 X 向某个支链对的和矩阵为 $(0, 0, 0, 0, t, 0)$, 由于 Y 向支链的杆长约束方程中无 β , 即 Y 向支链对的 H_5 始终为零, 其和矩阵不能与 X 向支链对的和矩阵线性组合为零矩阵。因此, 支链对中动铰链的几何位置为类型 3 时不能构成协调闭链。

综上, 当且仅当三个方向的支链都为共线支链对 (即 H_j 均为零) 时, 输出为协调闭链。因此, 当动铰链为质量块顶点时, 若想构建输出为闭链的构型, 仅需将 X、Y、Z 三个方向的支链均布置为共线支链对。

3 算例验证

根据协调闭链结构的支链布局规律, 综合出一个满足闭链条件的构型, 即三个正交方向上各取 2 个共线支链对, 如图 8 所示。

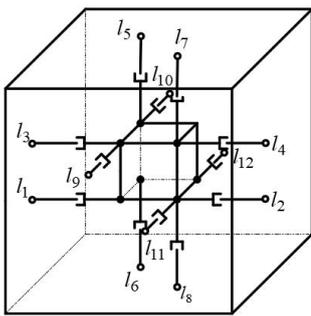


图 8 支链布局图

推导杆长约束方程:

$$\begin{cases} l_1 \approx L+x+n\beta+n\gamma; l_2 \approx L-x-n\beta-n\gamma; \\ l_3 \approx L+x+n\beta-n\gamma; l_4 \approx L-x-n\beta+n\gamma; \\ l_5 \approx L-y-n\alpha+n\gamma; l_6 \approx L+y+n\alpha-n\gamma; \\ l_7 \approx L-y+n\alpha-n\gamma; l_8 \approx L+y-n\alpha+n\gamma; \\ l_9 \approx L-x-n\beta-n\gamma; l_{10} \approx L+x+n\beta+n\gamma; \\ l_{11} \approx L-x+n\beta+n\gamma; l_{12} \approx L+x-n\beta-n\gamma; \end{cases}$$

计算协调矩阵 C :

$$C = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

由 C 可知, 该构型满足闭链条件 (如图 9)。

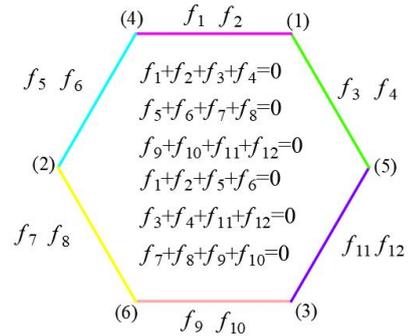


图 9 协调闭链图

因此, 若构型的协调方程能形成闭链, 则对应的协调矩阵需满足以下条件:

- 1) 每行中有且仅有 4 个非零元素, 且正、负元素的个数均为偶数。
- 2) 每列中有且仅有 2 个元素。

若 12 条支链分布在质量块的 8 个顶点上, 则存在 $C_8^4 \times C_8^4 \times C_8^4 = 343000$ 种构型。若支链分布满足闭链条件, 以 X 向支链为例, 则 4 条支链能组成 2 个共线支链对。如图 10 所示, X 向至多存在 4 个共线支链对, 则支链布局仅有 C_4^2 种类型。因此, 协调闭链对应的支链布局共有 $C_4^2 \times C_4^2 \times C_4^2 = 216$ 种类型。

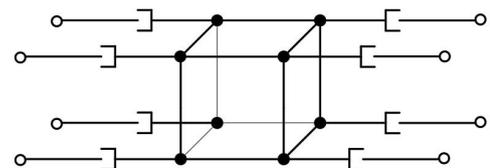


图 10 X 向共线支链对

综上, 本文通过研究协调方程生成闭链结构的条件, 得到了支链的理想布局规律, 大大

减少了构型支链布局的种类，为寻最优支链布局提供了新思路。

4 动铰链位于质量块棱中点的情况

当动铰链位于质量块棱中点时，对部分支链进行编号，如图 11 所示。计算杆长约束方程，如表 3 所示。

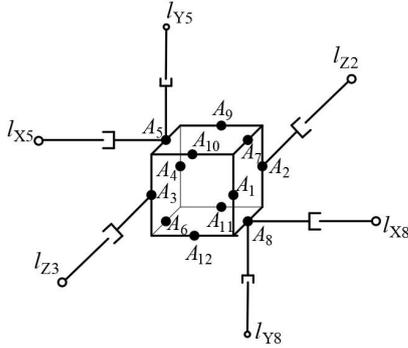


图 11 动铰链为棱中点的支链

表 3 动铰链为棱中点的杆长约束方程

方向	杆长约束方程	
X 向	$l_{X1} = L - x - n\beta$	$l_{X2} = L - x + n\beta$
	$l_{X3} = L + x + n\beta$	$l_{X4} = L + x - n\beta$
	$l_{X5} = L + x - n\gamma$	$l_{X6} = L + x + n\gamma$
	$l_{X7} = L - x + n\gamma$	$l_{X8} = L - x - n\gamma$
Y 向	$l_{Y5} = L - y + n\gamma$	$l_{Y6} = L + y - n\gamma$
	$l_{Y7} = L - y - n\gamma$	$l_{Y8} = L + y + n\gamma$;
	$l_{Y9} = L - y - n\alpha$	$l_{Y10} = L - y + n\alpha$
	$l_{Y11} = L - y - n\gamma$	$l_{Y12} = L + y - n\alpha$
Z 向	$l_{Z1} = L - z + n\beta$	$l_{Z2} = L + z - n\beta$
	$l_{Z3} = L - z - n\beta$	$l_{Z4} = L + z + n\beta$
	$l_{Z9} = L + z + n\alpha$	$l_{Z10} = L - z - n\alpha$
	$l_{Z11} = L + z - n\alpha$	$l_{Z12} = L - z + n\alpha$

以 X 向为例，结合支链对中动铰链的几何位置，将 28 对支链的几何位置分为图 12 所示的五类。计算它们的和矩阵，如表 4 所示。

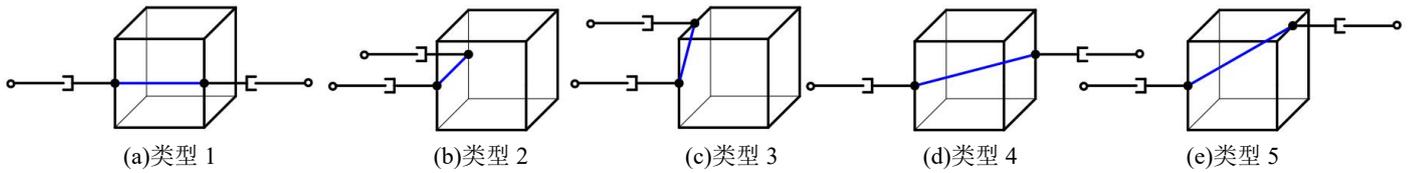


图 12 动铰链为棱中点时动铰链的位置类型

表 4 和矩阵

类型	线性组合结果
类型 1	(0, 0, 0, 0, 0, 0)
类型 2	(t, 0, 0, 0, 0, 0)
类型 3	(t, 0, 0, 0, t, t)
类型 4	(0, 0, 0, 0, t, 0)
类型 5	(0, 0, 0, 0, 0, t)

类比 2.1 节的推导方法，可得动铰链为棱中点时，有两种情况输出为闭链：（1）三个方向支链对的几何位置均为类型 1，即都为共线支链对；（2）每个支链对中 2 条支链的动铰链连线为质量块的面对角线。此时，X 向支链的布局如图 13 所示，蓝色粗实线为 2 个支链对的动铰链连线。

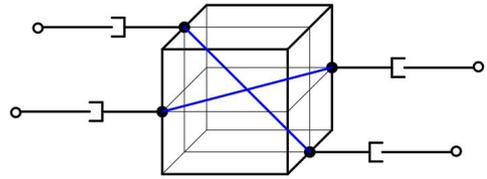


图 13 X 向支链的布局

5 结论

（1）推导了动铰链为顶点时，输出协调闭链的协调方程通式，并提出了闭链结构的判定准则。

（2）当动铰链位于质量块顶点时，欲生成闭链结构，仅需将三个正交方向上的支链均布置为共线支链对。反之，若三个正交方向上的支链均为共线支链对，则一定能够形成输出协调闭链。

（3）当动铰链位于质量块棱中点时，有

两种情况能形成闭链，分别为：三个方向上支链均为共线支链对；支链对动铰链点的连线均为质量块的面对角线。

参考文献

- [1] YOU J J, XI F F, SHEN H P, et al. A novel Stewart-type parallel mechanism with topological reconfiguration: Design, kinematics and stiffness evaluation[J]. Mechanism and Machine Theory, 2021,(162):104329.
- [2] BLACK L, YOU J, YANG X, et al. Forward and inverse dynamics of a six-axis accelerometer based on a parallel mechanism[J]. Sensors, 2021, 21(1):233.
- [3] PIETER T, MARION G. A Vibration Sensing Device Using a Six-Axis IMU and an Optimized Beam Structure for Activity Monitoring[J]. Sensors, 2023, 23(19):8045.
- [4] ANDREA C, PASQUALE C, GIUSEPPE D M, et al. Optimal custom design of both symmetric and unsymmetrical hexapod robots for aeronautics applications[J]. Robotics and Computer integrated Manufacturing, 2017, 44:1-16.
- [5] 史浩飞, 尤晶晶, 王林康, 等. 六维加速度传感器标定平台的设计与仿真研究[J]. 传感器与微系统, 2023, 42(01):50-54.
- SHI H F, YOU J J, WANG L K, et al. Design and Simulation Research of the Six-Degree-of-Freedom Accelerometer Calibration Platform[J]. Sensors and Microsystems, 2023, 42(01):50-54.
- [6] 尤晶晶, 李成刚, 左飞尧, 等. 六维加速度传感器的研究现状及发展趋势[J]. 振动与冲击, 2015, 34(11):150-159.
- YOU J J, LI C G, ZUO F R, et al. The Current Research Status and Development Trend of Six-Dimensional Acceleration Sensors[J]. Vibration and Shock, 2015, 34(11):150-159.
- [7] 姚建涛, 崔朋肖, 朱佳龙, 等. 预紧式并联六维力传感器容错测量机理与标定测试研究[J]. 机械工程学报, 2016, 52(08):58-66.
- YAO J T, CUI P X, ZHU J L, et al. Pre-tightened Parallel Six-axis Force Sensor Fault-Tolerant Measurement Mechanism and Calibration Testing Research[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(08):58-66.
- [8] LI C G, WANG Y, CHEN J, et al. Fault diagnosis in a gyroscope-based six-axis accelerometer[J]. Transactions of FAMEN A, 2018, 42(3):103-114.
- [9] YOU J J, WANG L K, XI F K, et al. Decoupling algorithm and maximum operation frequency of a novel parallel type six-axis accelerometer[J]. IEEE Sensors Journal, 2020, 20(21):12637-12651.
- [10] 李成刚, 陈晶, 尤晶晶, 等. 并联式六维加速度传感器故障诊断与修复[J]. 振动与冲击, 2017, 36(15):222-229.
- LI C G, CHEN J, YOU J J, et al. Troubleshooting and Repair of Parallel Six-Dimensional Acceleration Sensors[J].

Vibration and Shock,2017,36(15):222-229.

- [11]尤晶晶,符周舟,陈华鑫,等.Stewart 型六维加速度传感器的双支链故障自修复[J]. 压电与声光,2021,43(05):715-719.

YOU J J, FU Z Z, CHEN H X, et al. Self-healing of double-branching faults in Stewart-type six-dimensional accelerometers[J]. Piezoelectricity and Acousto-Optics,2021,43(05):715-719.

- [12]尤晶晶,王林康,刘云平,等.基于并联机构的六维加速度传感器的反向动力学[J].机械工程学报,2022,58(06):10-25.

YOU J J, WANG L K, LIU Y P, et al. Inverse dynamics of a six-dimensional acceleration sensor based on a parallel mechanism[J]. Journal of Mechanical Engineering,2022,58(06):10-25.