

DOI: 10.3901/JME.2009.01.068

新型 3 自由度并联机构的设计与分析*

张克涛 方跃法 郭 盛

(北京交通大学机械与电子控制工程学院 北京 100044)

摘要: 基于机构的概念, 将一种正方体折纸盒折痕等效为铰链, 连接折痕的纸板等效为连杆, 抽象出新型 3 自由度并联机构。该新型并联机构由定平台、动平台和 4 个连接支链组成, 各支链结构完全相同, 且都含有 1 个具有特殊结构的六杆球面变胞机构闭环子链。介绍此新型并联机构结构设计, 其特点是结构完全对称, 只含有单自由度转动运动副。详细描述各支链中闭环子链的结构特点、一般构态及其自由度数。应用螺旋理论, 分析运动支链中闭环子链的自由度特性。根据广义运动副的概念, 用广义运动副替代各支链中的六杆球面变胞机构, 并分析各运动支链末端约束。依据该并联机构的结构对称性, 分析其动平台的自由度数和相应的自由度特性, 得到动平台相对于定平台具有 2 个转动和 1 个移动自由度, 并具有连续转轴。

关键词: 变胞机构 并联机构 螺旋理论 自由度

中图分类号: TH122

Design and Analyses of a Novel 3-DOF Parallel Mechanism

ZHANG Ketao FANG Yuefa GUO Sheng

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

Abstract: Considering panels as links and creases as revolute joints, a cube paper fold can be taken as a novel 3-DOF parallel mechanism, based on the concept of mechanisms. The parallel mechanism consists of a base plate, a movable platform, and four connecting legs. The connecting legs have the same structure and each of them contains a closed-loop subchain, which is special six-bar spherical metamorphic mechanism. The configuration design of the new parallel mechanism is introduced. The parallel mechanism employs only revolute joints and has characteristics of symmetric structure. The mechanism characteristic, general configuration and mobility of the closed-loop subchain are introduced. The mobility of the closed-loop subchain is analyzed by using screw theory. The six-bar spherical metamorphic mechanism is replaced by a generalized kinematic pair, and the terminal constraints of the connecting legs are investigated by applying concept of generalized kinematic pair and screw theory. Considering the symmetrical structure of the parallel mechanism, the mobility characteristics of the movable platform are analyzed. The moving platform has three degrees of freedom, i.e. two degrees of rotational freedom and one degree of translational freedom, with respect to the base plate. The moving platform can rotate with continuously rotational axes.

Key words: Metamorphic mechanism Parallel mechanism Screw theory Mobility

0 前言

变胞机构是基于机构的自我组合和自我重构而出现的新机构^[1-2]。变胞机构的研究经常同一些常见的折叠纸板形式手工艺品联系在一起, 以往的研究应用机构的概念, 把纸板看作连杆, 折痕等效为连接相邻连杆的铰链, 将手工艺品转化为等效机构, 应用拓扑理论、群论和旋量理论等对其进行分析研

究^[3-5]。

3 自由度并联机器人是少自由度并联机器人研究的主要对象, 目前国际上已综合出较好的 3 自由度并联机器人机构只有很少的几种。包括 CLAVEL^[6]将 4S 平行四边形机构用于并联机器人的支链中, 设计出的著名的 3 自由度移动机构 DELTA; TSAI 等^[7]在 1996 年提出的 3 自由度移动并联机构, 支链中用到了 4R 平行四边形机构; 这类机构都可以归属于含有闭环子链的并联机构。对于这类复杂并联机构的自由度, 可以引入广义运动副的概念^[8]进行讨论。HUANG 等^[9-10]在少自由度并联机构型综合

* 国家自然科学基金资助项目(50675016)。20080116 收到初稿, 20080806 收到修改稿

中应用了广义运动副概念,并综合出新型并联机构。

本文根据正方体纸盒的制作过程,用一类具有特殊结构的六杆球面变胞机构的折纸原型分别代替正方体纸盒的四个侧面纸板,应用机构的概念,从该正方体折纸盒抽象出一种新型3自由度并联机构,它能实现2自由度的转动和1自由度的移动。该机构各支链为具有特殊结构的六杆球面变胞机构,所有支链具有完全相同的结构,保持结构的对称。黄真^[11]对该新型并联机构的结构进行了详细的描述,并应用广义运动副概念和螺旋理论对该新型并联机构的自由度特性进行了分析。该并联机构可以广泛应用于工业机器人、并联机床等行业中。

1 新型并联机构的构形设计

用折纸来研究机构可以追述到 CUNDY 等^[12]的研究。借用折痕为旋转轴,连接纸板为杆件,折纸可以构造出一个机构。其典型的例子为如图1所示由带有折痕的L形纸板折叠并连接首尾而成的Sarrus机构。

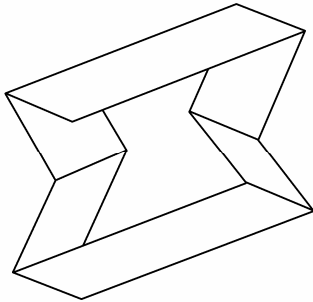


图1 折纸得到的 Sarrus 机构

常见的正方体纸盒可以由如图2所示带有折痕的T形纸板连接而成。在如图2所示的折纸中,将7与4合并,8和9分别与2合并,同时使相应的折痕与方形纸板的边重合,即可得到如图3所示的正方体折纸盒。

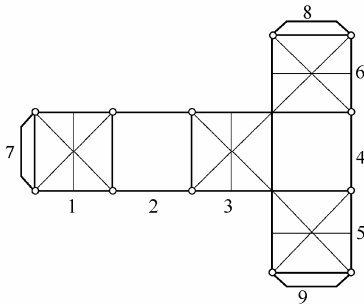


图2 T形折纸

应用机构的概念,可以由图3所示的正方体折

纸盒抽象出一种新型的并联机构,该并联机构以构件2和构件4为上下平台,如图4所示(为了清晰,仅画出了前面两个支链)。

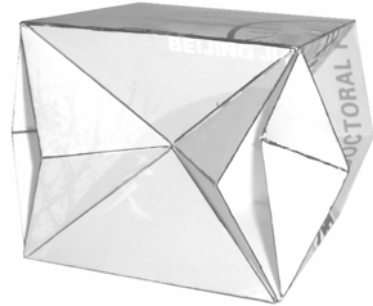


图3 正方体折纸盒

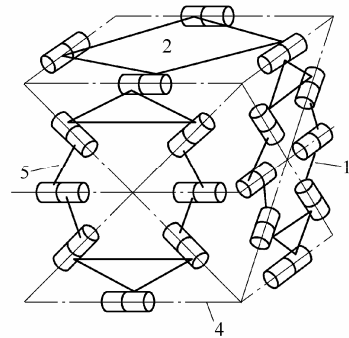


图4 一种新型并联机构

在图4所示并联机构中,平台2和4分别看作是并联机构的动平台和定平台,由具有特殊结构的六杆球面变胞机构闭环子链构成并联机构的4个支链。每个支链与上下平台用铰链连接。这样可以建立如图5所示的3自由度并联机构结构示意图。

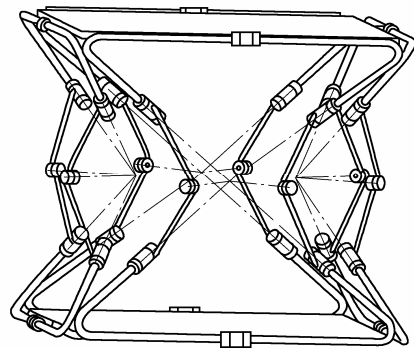


图5 3自由度并联机构结构示意图

由该新型并联机构的结构对称性可知,4个支链中闭环子链转动副轴线的交点始终保持共面,而且整个机构关于该平面对称,上下平台中心连线与该对称平面保持垂直。

2 一类特殊六杆球面变胞机构

典型的球面变胞机构^[13]可以从一些折纸抽象

演变而生。由一常见的矩形折纸抽象演变而来的六杆球面变胞机构如图 6、7 所示。

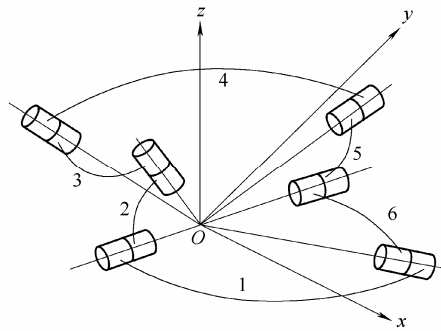


图 6 六杆球面变胞机构

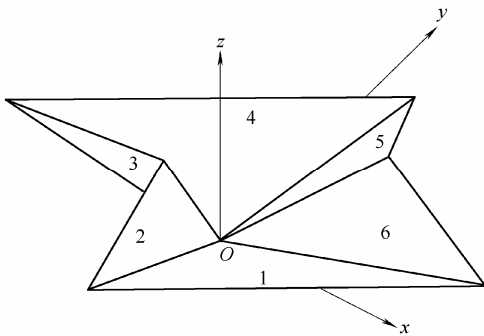


图 7 相应于六杆球面变胞机构的折纸

六杆球面变胞机构根据各相邻转动副之间夹角的不同,可构成具有不同特性的球形机构。如图 8 所示为一类相邻转动副轴线之间夹角对称相等的特殊六杆球面变胞机构各转动副轴线共面时的构态,其中 $\theta_1=\theta_4$, $\theta_2=\theta_5$, $\theta_3=\theta_6$, 且 $\theta_2=\theta_3$, $\theta_5=\theta_6$ 。如果取 $\theta_1=\theta_4=90^\circ$, $\theta_2=\theta_3=\theta_5=\theta_6=45^\circ$ 时,此类特殊六杆球面变胞机构可以由正方形折纸抽象得到。

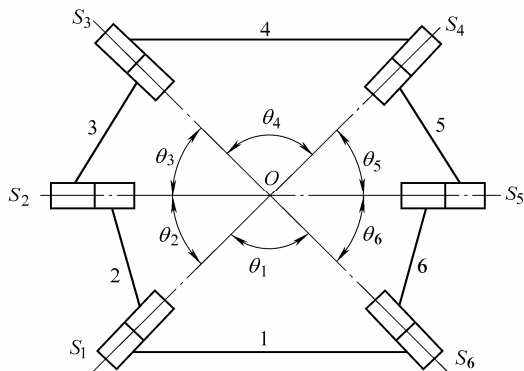


图 8 具有对称结构的特殊六杆球面变胞机构

可以根据活动度的不同,分析该类相邻转动副轴线之间的夹角对称相等的特殊六杆球面变胞机构构态变化。当各转动副轴线不在同一平面内时,机构的活动度为 3,称为该特殊六杆球面变胞机构的第一构态。

3 新型并联机构的自由度分析

并联机构中的闭环子链一般是指在并联机构中出现的 4R 平行四边形子链、4U 平行四边形子链或 4S 平行四边形子链等。根据广义运动副的定义^[14],闭环链两个选定的构件之间具有稳定的相对自由度时,该两构件可视为广义运动副的两个运动副元素,而该闭环链视为广义运动副。如图 4 所示的处于第一构态时的特殊六杆球面变胞机构,构件 1 和构件 4 之间具有稳定的相对自由度,所以可以将该特殊六杆球面变胞机构视为广义运动副。本文设计的如图 5 所示的新型并联机构可以看作是含特殊六杆球面变胞机构闭环子链的并联机构,可以引入广义运动副的概念进行自由度分析。

为了将含闭环子链的机构转换为一般并联机构再进行自由度计算,首先把闭环子链看成 1 个多自由度的广义运动副;然后通过约束分析,确定两个运动副元素之间的相对自由度数目和性质;再以相应的若干单自由度运动副代之,形成 1 个串连链,用以代替并联机构支链中的闭环。

为研究图 5 所示并联机构的自由度,现单独把处于第一构态的特殊六杆球面变胞机构拿出来当作一个广义运动副,分析其上下连杆的相对自由度。这个闭环是两个 3R 分支构成的并联机构,以构件 4 为动平台,构件 1 为固定机架,由于每个分支的 3 个 R 副轴线相交于一点,所以选择如图 9 所示的坐标系,坐标系原点选在轴线的交点上, x 轴与第二个转动副轴线重合, y 轴在第二个转动副轴线 S_2 和第五个转动副轴线 S_5 确定的平面内。

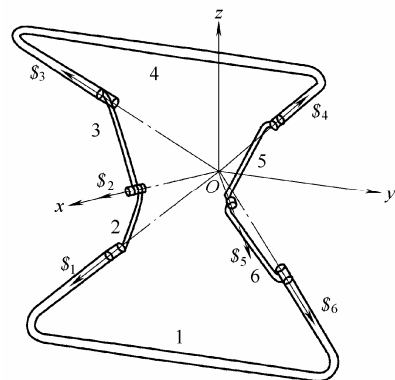


图 9 特殊六杆球面变胞机构子链

机构处于如图 9 所示的位形时,分支 1 的运动螺旋系为

$$\begin{cases} \mathcal{S}_1 = (a_1 & b_1 & c_1; 0 & 0 & 0) \\ \mathcal{S}_2 = (a_2 & 0 & 0; 0 & 0 & 0) \\ \mathcal{S}_3 = (a_3 & b_3 & c_3; 0 & 0 & 0) \end{cases} \quad (1)$$

式中 (a_1, b_1, c_1) 、 $(a_2, 0, 0)$ 、 (a_3, b_3, c_3) 为分支 1 中各转动副的方向数。求其反螺旋可得分支 1 的约束螺旋系为

$$\begin{cases} \mathcal{S}_{r1} = (0 \ 0 \ 1; \ 0 \ 0 \ 0) \\ \mathcal{S}_{r2} = (0 \ 1 \ 0; \ 0 \ 0 \ 0) \\ \mathcal{S}_{r3} = (1 \ 0 \ 0; \ 0 \ 0 \ 0) \end{cases} \quad (2)$$

式中 \mathcal{S}_{r1} 、 \mathcal{S}_{r2} 、 \mathcal{S}_{r3} 分别表示沿 z 、 y 、 x 坐标轴线的约束力。

同样，分支 2 的运动螺旋系为

$$\begin{cases} \mathcal{S}_4 = (a_4 \ b_4 \ c_4; \ 0 \ 0 \ 0) \\ \mathcal{S}_5 = (a_5 \ b_5 \ 0; \ 0 \ 0 \ 0) \\ \mathcal{S}_6 = (a_6 \ b_6 \ c_6; \ 0 \ 0 \ 0) \end{cases} \quad (3)$$

式中 (a_4, b_4, c_4) 、 $(a_5, b_5, 0)$ 、 (a_6, b_6, c_6) 为分支 2 中各转动副的方向数。求其反螺旋可得分支 2 的约束螺旋系为

$$\begin{cases} \mathcal{S}_{r4} = (0 \ 0 \ 1; \ 0 \ 0 \ 0) \\ \mathcal{S}_{r5} = (0 \ 1 \ 0; \ 0 \ 0 \ 0) \\ \mathcal{S}_{r6} = (1 \ 0 \ 0; \ 0 \ 0 \ 0) \end{cases} \quad (4)$$

式中 \mathcal{S}_{r4} 、 \mathcal{S}_{r5} 、 \mathcal{S}_{r6} 分别表示沿 z 、 y 、 x 坐标轴线的约束力。

两分支有相同的约束反力作用到构件 4 上，因此作为动平台的构件 4 共受到 6 个约束的作用，其中 \mathcal{S}_{r1} 和 \mathcal{S}_{r4} 、 \mathcal{S}_{r2} 和 \mathcal{S}_{r5} 、 \mathcal{S}_{r3} 和 \mathcal{S}_{r6} 构成三个公共约束。这样该特殊六杆球面变胞机构的约束螺旋系即为

$$\begin{cases} \mathcal{S}_{rm1} = (0 \ 0 \ 1; \ 0 \ 0 \ 0) \\ \mathcal{S}_{rm2} = (0 \ 1 \ 0; \ 0 \ 0 \ 0) \\ \mathcal{S}_{rm3} = (1 \ 0 \ 0; \ 0 \ 0 \ 0) \end{cases} \quad (5)$$

根据约束螺旋系可以得到特殊六杆球面变胞机构广义副的自由度的数目和性质，即

$$\begin{cases} \mathcal{S}_{g1} = (0 \ 0 \ 1; \ 0 \ 0 \ 0) \\ \mathcal{S}_{g2} = (0 \ 1 \ 0; \ 0 \ 0 \ 0) \\ \mathcal{S}_{g3} = (1 \ 0 \ 0; \ 0 \ 0 \ 0) \end{cases} \quad (6)$$

它们表示 3 转动自由度。由此可见，该特殊六杆球面变胞机构可以看作是有 3 转动自由度的广义副。

在如图 5 所示的并联机构中每个支链中闭环子链以广义副替代后，都可以看作由 4 个连杆和 5 个运动副(R[RRR]R)组成，其中第一个 R 副与并联机构中的上平台相连接，第五个 R 副与并联机构中的下平台连接，如图 10 所示。

在并联机构中建立支链坐标系时，不失一般性，可以让坐标系 y 轴沿该并联机构下平台上的转动副轴线方向， x 轴在下平台所在平面内，如图 11

所示。

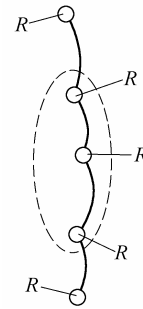


图 10 并联机构支链广义副

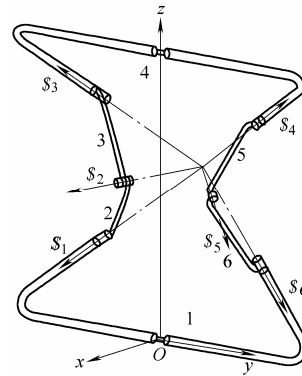


图 11 并联机构支链坐标系

这样，当每个支链连接上下平台的两转动副轴线相互平行时，支链运动螺旋系为

$$\begin{cases} \mathcal{S}_{o1} = (0 \ 1 \ 0; \ 0 \ 0 \ 0) \\ \mathcal{S}_{g1} = (0 \ 0 \ 1; \ 0 \ -x_1 \ 0) \\ \mathcal{S}_{g2} = (0 \ 1 \ 0; \ -z_1 \ 0 \ 0) \\ \mathcal{S}_{g3} = (1 \ 0 \ 0; \ 0 \ x_1 \ z_1) \\ \mathcal{S}_{o2} = (0 \ 1 \ 0; \ -z_2 \ 0 \ 0) \end{cases} \quad (7)$$

式中 $(x_1, 0, z_1)$ 、 $(0, 0, z_2)$ 分别为并联机构支链中相应转动副中心点的坐标。求其反螺旋可得并联机构的支链约束螺旋系为

$$\mathcal{S}_{ro} = (0 \ 1 \ 0; \ -z_1 \ 0 \ x_1) \quad (8)$$

式(8)表明，每个支链对并联机构上平台(动平台)都施加一个过特殊六杆球面变胞机构各转动副轴线交点，平行于下平台与支链连接转动副轴线方向的约束力。

全部 4 个支链对动平台共施加了 4 个力约束，分别平行于下平台的 4 个转动副轴线方向，这 4 个约束力构成两个分别垂直于下平台的约束力偶，这两个约束力偶构成一个公共力偶约束，同时，由 4 个约束力之间的线性相关性可以得到存在两个冗余约束力。由于所有约束力共面，且在机构的对称平面内，公共约束力偶始终垂直于约束力所在平面，可以得到该新型并联机构的自由度数为 3。根据约

束螺旋系及其附加约束力偶可知,在这样的约束条件下,上平台允许的 3 个运动是上平台沿上下平台中心连线方向的移动和上平台的二维转动(约束了绕上下平台中心连线的转动)。由于特殊六杆球面变胞机构在支链中看作是有 3 转动自由度的广义副,并且该新型并联机构的 4 个支链具有完全相同的结构,保持结构对称,满足各向同性的要求,所以该并联机构动平台具有连续的转轴。

4 结 论

(1) 本文根据正方体折纸盒制作过程,应用机构的概念,提出具有两转动一移动的新型 3 自由度并联机构。应用广义运动副概念和螺旋理论分析了各支链末端约束。

(2) 该并联机构具有以下特点:各支链完全相同,结构完全对称;只采用单自由度转动运动副;将转动自由度和移动自由度结合在以特殊结构球面六杆变胞机构为闭环子链的空间 3 自由度并联机构中。

(3) 根据其结构特点及运动度特性,该并联机构可用于并联机床以及其他工业领域。

参 考 文 献

- [1] DAI J S, REES J J. Mobility in metamorphic mechanisms of foldable/erectable kinds[J]. ASME Transaction, Journal of Mechanical Design, 1999, 121(3): 375-382.
- [2] DAI J S, ZHANG Q X. Metamorphic mechanisms and their configuration models[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2000, 13(3): 212-218.
- [3] LI D L, DAI J S, SUN H. Configuration based synthesis of a Carton-like metamorphic mechanism of foldable and erectable[J]. Journal of Engineering Design, 2005, 16 (4): 375-386.
- [4] DAI J S, REES J J. Kinematics and mobility analysis of carton folds in packing manipulation[J]. Journal of Mechanical Engineering Science, Proc. Instn. Mech. Engrs, 2002, 216(C10): 959-970.
- [5] DAI J S, HUANG Z, LIPKIN H. Screw system analysis of parallel mechanisms and applications to constraint and mobility study[C]// Proc. of the ASME 28th Biennial Mechanisms and Robotics Conference, 2004, Salt Lake City. New York: ASME, 2004: 1 569-1 582.
- [6] CLAVEL R. Device for the movement and positioning of an element in space: United States Patent, 4976582[P]. 1989-09-06.
- [7] TSAI L W, WALSH G C, STAMPER R E. Kinematics of a Novel Three DOF Translational Platform[C]// Proc. of 1996 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, April, 1996, Minneapolis, Minnesota. USA: IEEE Press, 1996: 3 446-3 451.
- [8] 赵铁石. 空间少自由度并联机器人机构分析与综合的理论研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2000.
ZHAO Tieshi. Some theoretical issues on analysis and synthesis for spatial imperfect-DOF parallel robot[D]. Qinghuangdao: Yanshan University, 2000.
- [9] HUANG Z, LI Q C. Type synthesis of symmetrical lower-mobility parallel mechanisms using the constraint-synthesis method[J]. The International Journal of Robotics Research, 2003, 22(1): 59-79.
- [10] HUANG Z, LI Q C. General methodology for type synthesis of symmetrical lower-mobility parallel manipulators and several novel manipulators[J]. The International Journal of Robotics Research, 2002, 21(2): 131-145.
- [11] 黄真. 空间机构学[M]. 北京: 机械工业出版社, 1991.
HUANG Zhen. Spatial mechanism[M]. Beijing: China Machine Press, 1991.
- [12] CUNDY H M, ROLLET A P. Mathematical models[M]. New York: Tarquin Publications, 1951.
- [13] 戴建生, 丁希仑, 邹慧君. 变胞原理和变胞机构类型[J]. 机械工程学报, 2005, 41(6): 7-12.
DAI Jiansheng, DING Xilun, ZOU Huijun. Fundamentals and categorization of metamorphic mechanisms[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2005, 41(6): 7-12.
- [14] 黄真, 赵永生, 赵铁石. 高等空间机构学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
HUANG Zhen, ZHAO Yongsheng, ZHAO Tieshi. Advanced spatial mechanism[M]. Beijing: Higher Education Press, 2006.

作者简介: 张克涛(通信作者), 男, 1985 年出生, 博士研究生。主要研究方向为机构学与机器人技术。

E-mail: ztu-yin@163.com

方跃法, 男, 1958 年出生, 教授。主要研究方向为机构学与机器人技术。

E-mail: yffang@bjtu.edu.cn

郭盛, 男, 1972 年出生, 讲师。主要研究方向为机器人技术。

E-mail: shguo@bjtu.edu.cn