双模式双三角锥滚动机构设计与运动分析

李晔卓, 田耀斌, 姚燕安

(北京交通大学 机械与电子控制工程学院,100044 北京)

摘 要: 基于3-RSR并联机构,应用平行四边形机构缩放技术提出一种双模式双三角锥滚动机构.该机构在一般位置状态和奇异位置状态分别具有折叠模式和移动模式.在折叠模式下,仅通过一个自由度即可完成折叠功能,用以减少其存放或运输时所占的空间,同时为其提供隐蔽能力;在移动模式下,机构展开且处于奇异位置,通过3个自由度来进行移动和转向.对自由度及其变化原因进行分析,规划了驱动配置方案.计算缩放比,根据机构的运动方式,规划了滚动步态并进行运动仿真.制作了一台样机,验证了机构变形方式与滚动功能的可行性.

关键词: 折叠机构;奇异位置;双三角锥;滚动机构

中图分类号: TH112.1; TP242 **文献标志码**: A **文章编号**: 0367-6234(2014)05-0073-08

Locomotion analysis and design of a triangular bipyramid rolling mechanism with two modes

LI Yezhuo, TIAN Yaobin, YAO Yanan

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

Abstract: Based on 3-RSR parallel mechanism, a triangular bipyramid rolling mechanism with two modes is proposed by using parallelogram mechanism folding technique. The mechanism has folding mode and mobile mode in normal position and singular position respectively. In folding mode, it gains the ability of folding by single degree of freedom, and the ability of folding makes the mechanism decreasing the storage space and acquiring the concealed ability. In mobile mode, the mechanism has three degrees of freedom which makes it rolling by deforming. The structure and the reason of freedom changing are analyzed. A prototype is manufactured to testify the feasibility of deforming method and rolling function.

Keywords: folding mechanism; singular position; triangular bipyramid; rolling mechanism

滚动是移动机构在平整路面上高效率的一种运动方式.球形机器人通过球壳内部的设备和元件使其进行滚动[1].可重构的模块化机器人通过改变所组成的封闭环形状进行滚动[2-4].Curtis等[5]提出一种由12个四面体构成的多面体机器人,利用多级伸缩杆的大伸缩比实现机构的丰富变形,使其在移动时对地面具有更强的适应能力.Shibata和Hirai[6]提出了与刚性变形机构不同的绳索张拉机构,同时该机构还具有折叠缩放的功能.文献[7-10]提出了一系列以滚动步态行进的移动连杆机构.刘长焕等[7]将传统平面4R机构设计为沿直线滚动的移动机构,将球面4R机构设计为沿圆周滚动的移动机构,将Bennett机构设计为沿多边形滚动的移动机构.刘长焕等[8]还提出一种能够实现转向控制的8U并联机构,通过两个驱动器的控制实现其全方向的移动.田耀斌等[9-10]先后提出进行概率翻滚的单自由度双三角锥连杆机构,以及可进行转向控制的三自由度双三角锥滚动机构.文献[11]对一系列的可折叠地面移动连杆机构进行了研究,并在文献[10]的基础上提出了一种具有折叠功能的3-RSR滚动机构.采用折叠缩放技术使机构通过最少的自由度,

收稿日期: 2013-11-28.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51175030); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2012JBZ002); 教育部支撑技术项目(625010403).

作者简介: 李晔卓(1988—),男,博士研究生;
姚燕安(1972—),男,教授,博士生导师.

通信作者: 姚燕安,yayao@bjtu.edu.cn.

实现折叠变小以节省存放和运输空间.Fuller[12]提出了一种名为 Jitterbug 的机构,通过一个自由度实现多面体的放大和缩小.Fuller[13]还提出了一种实现空间大缩放比变形的绳索张拉机构,Shibata 和 Hirai[6]设计的滚动机器人利用了其大变形能力,可控制机器人整体滚动.Hoberman[14]用若干剪叉单元连成封闭的环,形成多种样式的缩放机构.Gosselin 等[15]在平行四边形单元的基础上提出了一种单自由度基于缩放多边形的可缩放多面体,并可以通过增加单元数实现更大的伸缩比.

本文对可折叠 3-RSR 滚动机构进行机构和运动能力分析,将一种以平行四边形单元为基础的缩放技术应用于双三角锥滚动机构,并根据 Gosselin 等[16]提出的第 3 种奇异位置对滚动机构在折叠和展开状态转换时的自由度变化进行分析,通过仿真模型和实物样机验证了其运动原理.

1 双三角锥滚动机构

文献[10]基于 3-RSR 并联机构提出了一种具有双三角锥几何外形的滚动机构.该机构由 3 个支链和两个顶点组成,每个支链由两个连杆通过球副连接而成,再将 3 个支链的两端分别通过转动副与两个顶点相连而构成.

由参考文献[17-18]可知 3-RSR 机构为非过约束机构,其自由度可以按 G-K 自由度计算公式

$$M = d(n - g - 1) + \sum_{i=1}^{g} f_i + \nu - \xi$$

计算.

其中:

$$d = 6,\ n = 8,\ g = 9,$$

$$\sum_{i=1}^{g} f_i = 15,\ \nu = 0,\ \xi = 0,$$

求得

$$M = 6(8 - 9 - 1) + 15 + 0 + 0 = 3.$$

即该机构通过 3 个自由度实现其滚动功能.

2 双模式机构组成

如图 1 所示,双模式双三角锥滚动机构包括两个缩放顶点,其中每个缩放顶点中有一个双三角锥单元和 3 个平行四边形缩放单元.双三角锥单元通过转动副将 3 个支链和两个端点($A_1A_2A_3$ 和 $C_1C_2C_3$)连接,每个支链包含两个连杆,且每两个支链间的夹角为 120°.在每个支链上连接两个连杆构成构成一个缩放顶点,其中双三角锥单元的支链和与其相连的两个杆件构成一个平行四边形单元.通过将两个缩放顶点上的点 G_1、G_2 和 G_3 以球副形式连接,构成该滚动机构.

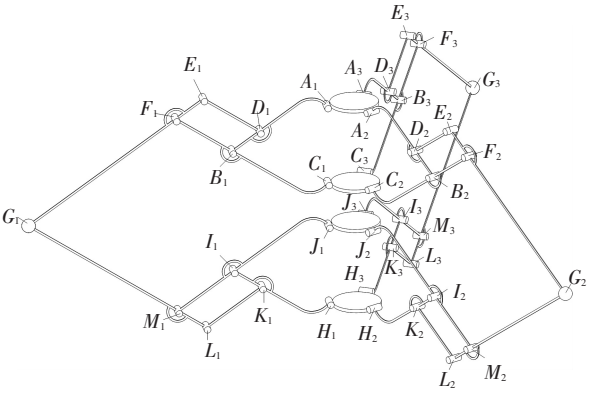


图 1 双模式双三角锥滚动机构示意

该机构具有折叠和移动两种模式,分别对应其一般位置和奇异位置.当处于折叠模式时,机构通过单自由度变形实现折叠,使其便于存放、携带或隐藏;当处于移动模式时,机构通过三自由度进行滚动和转向.

3 自由度分析与驱动方案设计

3.1 自由度分析

用螺旋理论对机构折叠模式的自由度进行计算.对双三角锥单元建立如图 2 所示的坐标和运动螺旋,x 轴通过下端平台中心,y 轴竖直向上,z 轴沿转动副的轴线方向.

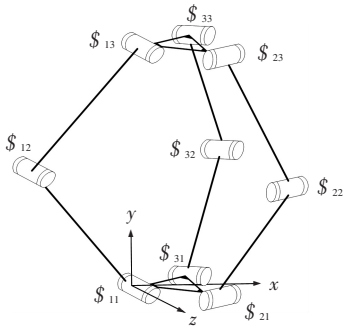


图 2 双三角锥单元的运动螺旋

9 个转动副的运动螺旋为

$$\$_{11} = (0\quad 0\quad 1;\quad 0\quad 0\quad 0),$$

$$\$_{12} = (0\quad 0\quad 1;\quad a_2\quad b_2\quad 0),$$

$$\$_{13} = (0\quad 0\quad 1;\quad a_3\quad b_3\quad 0),$$

$$\$_{21} = \left(\cos\frac{\pi}{6}\quad 0\quad -\sin\frac{\pi}{6};\quad 0\quad 0\quad 0\right),$$

$$\$_{22} = \left(\cos\frac{\pi}{6}\quad 0\quad -\sin\frac{\pi}{6};\quad a_5\quad b_5\quad 0\right),$$

$$\$_{23} = \left(\cos\frac{\pi}{6}\quad 0\quad -\sin\frac{\pi}{6};\quad a_6\quad b_6\quad 0\right),$$

$$\$_{31} = \left(-\cos\frac{\pi}{6}\quad 0\quad -\sin\frac{\pi}{6};\quad 0\quad 0\quad 0\right),$$

$$\$_{32}=\left(-\cos\frac{\pi}{6}\quad 0\quad -\sin\frac{\pi}{6};\quad a_8\quad b_8\quad 0\right),$$

$$\$_{33}=\left(-\cos\frac{\pi}{6}\quad 0\quad -\sin\frac{\pi}{6};\quad a_9\quad b_9\quad 0\right);$$

求得反螺旋为

$$\$^{\mathrm{r}}_{1}=(0\quad 0\quad 0;\quad 0\quad 1\quad 0).$$

因此，双三角锥单元中的所有杆件都具有一个绕 y 轴的约束力偶，使其公共约束为 $\lambda=1$. 再对一个支链的 3 个转动副建立螺旋：

$$\$_{11}=(0\quad 0\quad 1;\quad 0\quad 0\quad 0),$$

$$\$_{12}=(0\quad 0\quad 1;\quad a_2\quad b_2\quad 0),$$

$$\$_{13}=(0\quad 0\quad 1;\quad a_3\quad b_3\quad 0);$$

求得反螺旋为

$$\$^{\mathrm{r}}_{11}=(0\quad 0\quad 1;\quad 0\quad 0\quad 0),$$

$$\$^{\mathrm{r}}_{12}=(0\quad 0\quad 0;\quad 1\quad 0\quad 0),$$

$$\$^{\mathrm{r}}_{13}=(0\quad 0\quad 0;\quad 0\quad 1\quad 0).$$

根据反螺旋可知，除公共约束外每条支链还对上平台具有一个约束力和一个约束力偶.3 个约束力和 3 个约束力偶均相交于一点，且其中一个约束力或一个约束力偶可以被另外两个表示并替代，即有一个约束力和一个约束力偶是冗余约束，由此可知，双三角锥单元的冗余约束数为 $\nu=2$.

将 $\lambda=1$ 和 $\nu=2$ 带入 G－K 自由度计算公式

$$M=d(n-g-1)+\sum_{i=1}^{g}f_i+\nu-\xi.$$

其中：

$$d=6-\lambda=5,\ n=8,\ g=9,$$

$$\sum_{i=1}^{g}f_i=9,\ \nu=2,\ \xi=0,$$

求得

$$M=5(8-9-1)+9+2+0=1.$$

其自由度为 1，与参考文献[19]通过螺旋理论得出相同结果.

通过在双三角锥单元的每个支链连接一个Ⅱ级杆组组成平行四边形缩放单元.对于每个支链所在平面，连接基本杆组不会使自由度产生变化，所以由此组成缩放顶点的自由度为 $M=1$.

将缩放顶点中点 G_1、G_2 和 G_3 所组成的三角形区域作为其输出. 可以得到输出三角形 $\triangle G_1G_2G_3$ 的面积 $f(\theta)$ 为

$$f(\theta)=3\sqrt{3}(l_{CF}\sin\theta+l_{FG}\sin\theta+r)^2/4.$$

其中：θ 为上部分缩放顶点的输入角度（B_1C_1 间连线与竖直方向的夹角），l_{CF} 为 C_1 点到 F_1 点的距离，l_{FG} 为 F_1 点到 G_1 点的距离，r 为端点（$A_1A_2A_3$ 和 $C_1C_2C_3$）的半径.

对于另一个与之相连接的缩放顶点，可以得到输出三角形 $\triangle G_1'G_2'G_3'$ 的面积 $g(\theta')$ 为

$$g(\theta')=3\sqrt{3}(l_{JM}\sin\theta'+l_{MG}\sin\theta'+r)^2/4.$$

其中：θ' 为下部分缩放顶点中 I_1J_1 间连线与竖直方向的夹角，l_{JM} 为 J_1 点到 M_1 点的距离，l_{MG} 为 M_1 点到 G_1 点的距离.

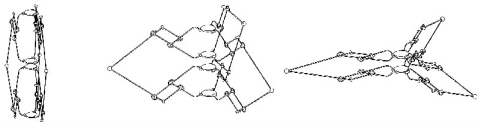
上下两部分的缩放顶点通过 3 个球副连接在一起，所以使 $f(\theta)=g(\theta')$.

由于 $l_{CF}=l_{JM}>0$，$l_{FG}=l_{MG}>0$，$r>0$，且 $\theta\in[0,\pi/2]$，$\theta'\in[0,\pi/2]$，因此可得

$$\theta=\theta'.$$

由此可知，上部分缩放顶点的输入角度可以确定下部分缩放顶点的运动，即将两个缩放顶点通过 3 个球副连接后所组成的机构具有一个自由度.该机构在折叠模式的自由度为 $M=1$.

如图 3 所示为机构的展开过程，通过转动关节使其外形变化，从而使杆组呈放射状展开. 图 3(a)所示为机构完全折叠收缩的状态；通过转动关节的控制，机构进行展开如图 3(b)所示；如图 3(c)所示，当关节转过一定角度时，机构展开呈双三角锥外形，此时机构的自由度发生变化，使得机构的各支链可以独立运动.



(a) 完全折叠状态　　(b)展开动作　　(c)展开状态

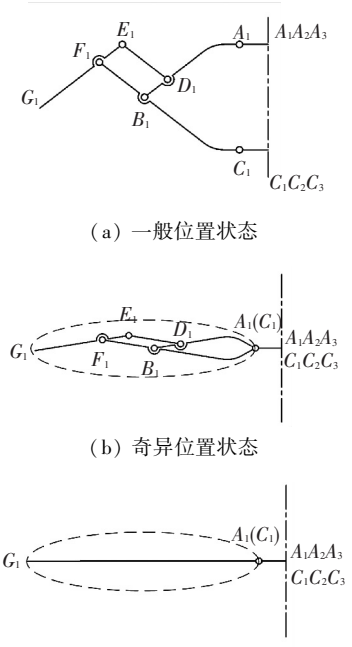
图 3　机构的展开过程

对缩放顶点的一个支链进行分析.如图 4(a)所示，当机构在折叠模式的一般位置状态时两个端点（$A_1A_2A_3$ 和 $C_1C_2C_3$）不重合；当机构运动至如图 4(b)所示的展开状态时两个端点（$A_1A_2A_3$ 和 $C_1C_2C_3$）重合，使得转动轴 A_1 和转动轴 C_1 的轴线重合. 机构处于文献[16]中所述的第 3 种奇异位置. 此时，平行四边形单元退化为一个连杆（A_1G_1），通过转动轴 A_1 与端点 $A_1A_2A_3$ 连接. 在展开状态时，机构中缩放顶点的每个支链都会产生这样的退化，并使其自由度发生变化.

为使 A_1 和 C_1 重合达到奇异位置的同时，平行四边形单元避开奇异位置，杆件设计时需要满足两个几何条件：一是 A_1 和 C_1 到 B_1 的距离相等；二是连杆 A_1B_1 上的 3 个点 A_1、D_1 和 B_1 不共线，和/或连杆 C_1F_1 上的 3 个点 C_1、B_1 和 F_1 不共线.

在奇异位置，由于机构的退化，使其在移动模式变为三自由度 3-RSR 并联机构.

大多数机构为了保证其性能，避免出现奇异位置；而该机构将奇异位置作为常态位置，利用在奇异位置增加的自由度实现其移动功能.



(a) 一般位置状态

(b) 奇异位置状态

(c) 机构的退化

图 4　缩放顶点支链的退化过程

3.2　驱动方案设计

在移动模式下,机构的 3 个支链可用 3 个电机分别控制;而在折叠模式下,机构仅需要一个电机控制.从图 3(c)的状态进行折叠和展开动作,需要连杆 A_iB_i、连杆 C_iF_i 以同速反向转动,使缩放顶点中的两个端点分开;从图 3(c)的状态进行翻滚动作,需要连杆 A_iB_i、连杆 C_iF_i 以同速同向转动,使缩放顶点中的两个端点保持重合.为了控制两组端点在图 3(c)状态的分开与重合,需要在两个缩放顶点中各增加安装一个电机.

如图 5 所示,对控制机构整体的 5 个电机进行驱动配置.一端缩放顶点中,第 1 组支链与两端点的转动轴处分别设有驱动电机 1 和驱动电机 2,其中驱动电机 2 控制该缩放顶点中两个端点的分开与重合;机构另一端缩放顶点中,第 2 组支链与两端点的转动轴处分别设有驱动电机 3 和驱动电机 4,其中驱动电机 4 控制该缩放顶点中两个端点的分开与重合;在第 3 组支链与任意端点的转动轴处设有驱动电机 5.

处于折叠模式时仅需要一个驱动电机完成折叠和展开动作,其余 4 个驱动电机作为冗余驱动.其中,驱动电机 1 和 2 的转动方向相反;驱动电机 3 和 4 的转动方向相反;驱动电机 5 进行跟随转动.

处于移动模式时需要 3 个驱动电机完成移动功能.其中,驱动电机 1 和 2 与驱动电机 3 和 4 分别相互作为冗余驱动,用以控制各自所在支链;驱动电机 5 控制第 3 组支链的运动.

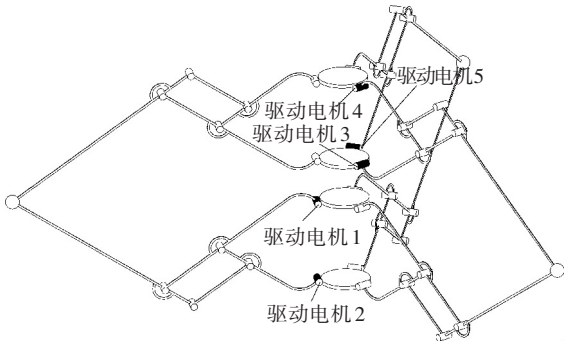


图 5　移动机构的驱动配置

在折叠模式或移动模式时,为了简化对电机的控制,可在每个电机上安装离合器,仅在在两种模式间切换时,使用 5 个电机同时工作,而在两种模式下,使不需要工作的电机与连接杆处于断开状态.

4　折叠模式分析

由于机械结构的对称性,取一个平行四边形缩放单元对机构折叠功能的伸缩比进行分析与计算.

4 个连杆 A_1B_1、D_1E_1、E_1G_1 和 C_1F_1,设其长度分别为 l_1、l_1-e、$2l_1$、$2l_1-e$,其中 e 为连杆 D_1E_1 和连杆 C_1F_1 在连杆 A_1B_1 和连杆 E_1G_1 上的间距.假定 l_1 为 1,折叠状态下平行四边形缩放单元在长度上最短,为

$$l = E_1G_1 = 2;$$

该单元在展开情况下长度最长,为

$$L = C_1F_1 + F_1G_1 = 2(2-e).$$

故,该机构的缩放比为

$$k = L/l = 2 - e.$$

其中 e 不能为 0,因此 k 可以接近于 2.由于机构的对称性,折叠多面体机构的缩放比近似于 2.

通过叠加多组平行四边形单元能够实现机构伸缩比的增加.可以得到 $C_{11}D_{12}$ 以及 $G_{1(n-1)}G_{1n}$ 的长度分别为 $2-2e$ 和 $2-e$.如图 6 所示,支链构成 $(n+1)/2$ 个等腰三角,其中 $(n-1)/2$ 个三角的腰长为 $2-2e$,1 个三角的腰长为 $2-e$.由此支链的展开长度为

$$L = [(n-1)/2]\cdot 2(2-2e) + 1\cdot 2(2-e) = 2(n+1) - 2ne.$$

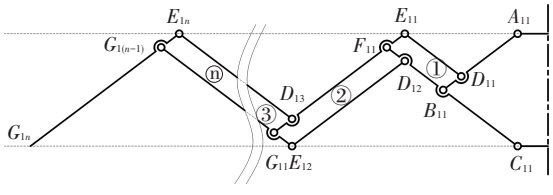


图 6　平行四边形单元的叠加

叠加 n 组平行四边形单元时的缩放比为

$$k = L/l = (n+1) - ne.$$

通过叠加多组平行四边形单元的方式，可以增大滚动机构的缩放比以满足需要.例如，保持机构移动模式的尺寸，可以在折叠模式下提供更小的存放或运输体积；而保持折叠模式的尺寸，可以增加机构移动时的滚动步长，提高移动速度.

5　移动模式分析

在移动模式下，机构退化为一个 3－RSR 机构.

当机构两个支链的输入角度（θ_2 和 θ_3）相同时，机构处于如图 7 所示的面对称状态.将其投影到对称平面后，进行同样运动的两个支链被视为一个支链进行分析.此时，通过控制对称平面内支链的输入角度 θ_1 来实现机构的运动.因此，机构可向 $y-z$ 平面进行投影，简化为如图 8 所示的平面机构进行运动分析，其中点 H 为顶点 $H_1H_2H_3$，点 A 为顶点 $A_1A_2A_3$，β 为等效输入角度，h 为 AG_2 杆和 HG_2 杆的投影长度.

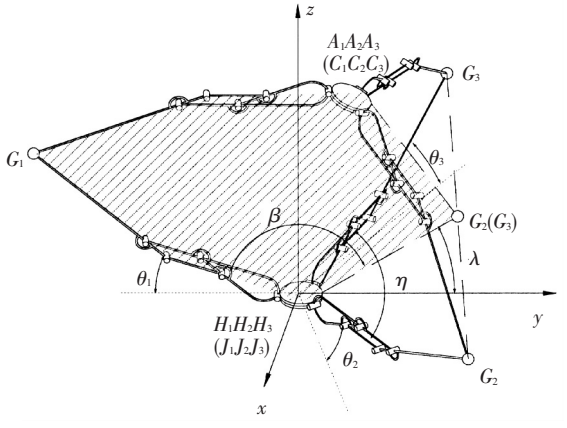


图 7　输入角度 θ_2 和 θ_3 相同时机构的对称面

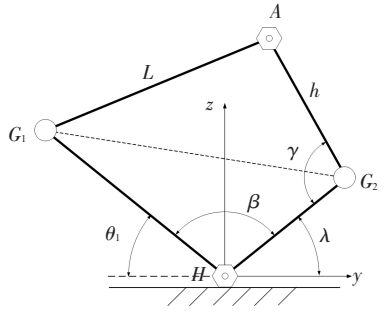


图 8　滚动机构投影至 *y-z* 平面的坐标

如图 9 所示，机构滚动时其顶点 $H_1H_2H_3$，与点 G_2、点 G_3 构成机构的支撑三角形，此时机构处于两边着地的稳定支撑状态.

为了使机构能够滚动，需要其沿着支撑平面的边界翻倒.当 ZMP 点沿支撑三角形点 G_2 和点 G_3 连线方向超出时，机构经过两点着地状态翻到至两边着地状态；当 ZMP 点沿支撑三角形点 H 方向超出时，机构经过单点着地状态翻到至单边着地状态.根据 Vukobratovic 和 Stepanenko 所提出的 ZMP 公式[20]，机构 ZMP 点在 y 轴上的投影 y_{ZMP} 可表示为

$$y_{\mathrm{ZMP}}=\frac{\sum_{i=1}^{n}\left[m_i y_i(\ddot{z}_i+g_z)-m_i z_i\ddot{y}_i\right]+\left(\sum_{i=1}^{n}J_i\alpha_i\right)_x}{\sum_{i=1}^{n}m_i(\ddot{z}_i+g_z)}. \tag{1}$$

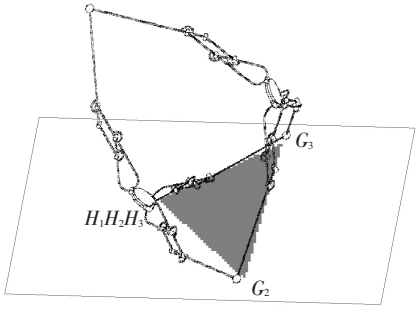


图 9　机构两边着地的支撑状态

对机构两边着地的稳定支撑状态建立坐标系，如图 10 所示.

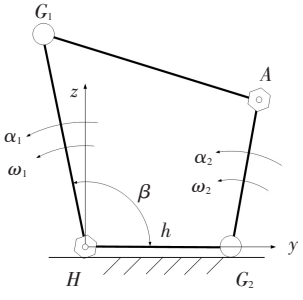


图 10　稳定支撑状态下建立的坐标

由于机构的驱动电机主要布置在两端的顶点上，且其他杆件相对较轻，所以其质量分布主要在 H、A 两点，其位置坐标为

$$\begin{bmatrix} r_H & r_A \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} 0 & h(1-\cos\gamma) \\ 0 & h\sin\gamma \end{bmatrix}. \tag{2}$$

其中：

$$\gamma=2\arcsin\left(\frac{L\sin\beta}{\sqrt{L^2+h^2-2hL\cos\beta}}\right),$$

$$h=L\cos\eta/2,$$

$$\beta=\pi-\lambda-\theta_1,$$

$$\eta=\arccos(1-3/2\cos^2\theta_2),$$

$$\lambda=\arctan(2\tan\theta_2).$$

对称布置冗余电机或配重可以使 H、A 两点质量相同，所以 $m_H=m_A=m$.对式(2) 求二阶导后带入式(1)，可得

$$y_{\mathrm{ZMP}}=\frac{mh[p\sin\gamma-(\cos\gamma-1)(g+q)+\alpha_2/12]}{m(2g+q)}. \tag{3}$$

其中：

$$p=h(-\alpha_2\sin\gamma-\omega_2^2\cos\gamma),$$

$$q=h(\alpha_2\cos\gamma-\omega_2^2\sin\gamma),$$

$$\omega_2=\omega_1\frac{2L^2-2hL\cos\beta}{L^2+h^2-2hL\cos\beta},$$

$$\alpha_2=-u+v,$$

$$u=\frac{2L(h\omega_1^2\sin\beta+L\alpha_1-h\alpha_1\cos\beta)}{L^2+h^2-2hL\cos\beta},$$

$$v=\frac{4L^2\omega_1^2h(L-h\cos\beta)\sin\beta}{(L^2+h^2-2hL\cos\beta)^2}.$$

根据式(3)可以得到机构 ZMP 点在 y 轴上的投影 y_{ZMP}. 当 $y_{\mathrm{ZMP}}>k$ 时，机构沿点 G_2 和点 G_3 连线翻倒；当 $y_{\mathrm{ZMP}}<0$ 时，机构沿点 H 翻倒.

取 $L=250$ mm，$m=3$ kg，移动过程中保持 $\theta_2=\theta_3=0$，即 $\eta=120°$.

当机构处于两边着地的稳定支撑状态，$\omega_1\leqslant 0$ 时，取 $\omega_1=\{0,-180,-270\}$(°)/s，β 从 90°变为 60°过程中的 ZMP 曲线如图 11 所示.

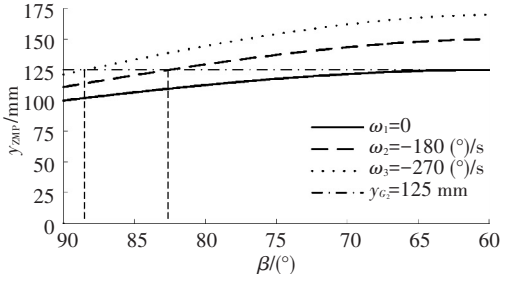


图 11 $\omega_1\leqslant 0$ 时的 ZMP 曲线

由图 11 可知，当 ω_1 为 0 时 ZMP 曲线一直无法超出支撑区域，即机构无法通过改变质心位置进行滚动；当 ω_1 为 −180(°)/s 时，随着 β 减小，ZMP 曲线在 $\beta\approx 83.68°$ 时超出支撑区域的边界，使机构沿着点 G_2 和点 G_3 连线翻倒并经过两点着地状态达到下一个两边着地状态；当 ω_1 为 270(°)/s 时，ZMP 曲线将在 $\beta\approx 88.55°$ 时便超出支撑区域的边界，从而使机构翻倒，可以发现随着 ω_1 的增大，机构将更容易进行翻滚动作.

当 $\omega_1\geqslant 0$ 时，取 $\omega_1=\{0,180,270\}$(°)/s，β 从 90°变为 180°过程中的 ZMP 曲线如图 12 所示.

由图 12 可知，当 ω_1 为 0 时机构同样无法通过改变质心位置进行滚动；而当 ω_1 为 180(°)/s 时，随着 β 增大，ZMP 曲线在 $\beta\approx 162.68°$ 时超出支撑区域的边界，使机构沿着点 H 翻倒并经过单点着地状态达到单边着地状态；当 ω_1 为 270(°)/s 时，ZMP 曲线将在 $\beta\approx 148.60°$ 时便超出支撑区域的边界使机构滚动.

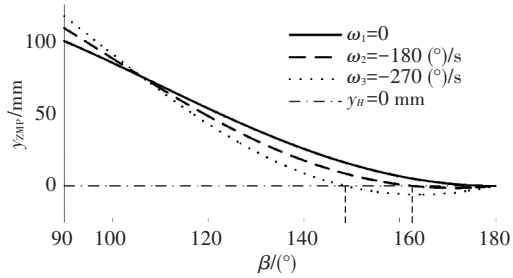
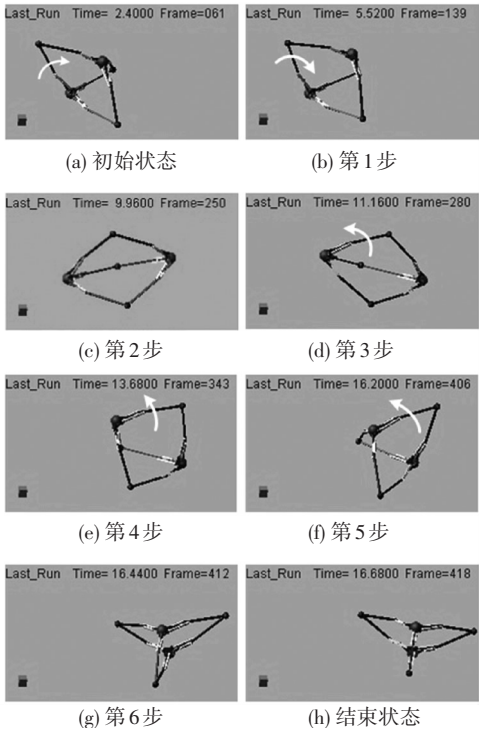


图 12 $\omega_1\geqslant 0$ 时的 ZMP 曲线

通过 ADAMS 对机构的移动功能进行仿真. 如图 13 所示为机构的直线滚动，机构从双边着地的初始状态开始滚动，达到单边着地的结束状态完成直线滚动. 图中的箭头表示驱动电机转动的方向.



(a) 初始状态 (b) 第 1 步

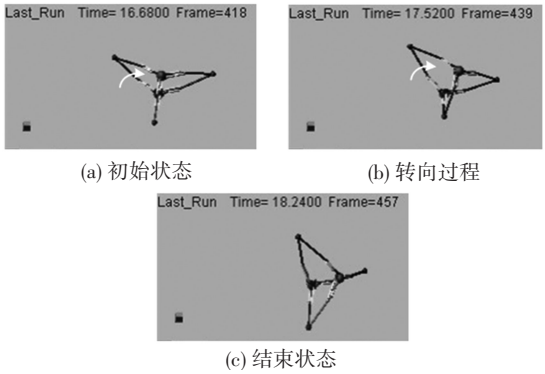
(c) 第 2 步 (d) 第 3 步

(e) 第 4 步 (f) 第 5 步

(g) 第 6 步 (h) 结束状态

图 13 机构的直线滚动

如图 13(h)所示，当以一个边着地时，机构通过不着地的两个边使机构的质心偏向转向一侧，可以使其中一个边着地来使其稳定，并实现转动方向的选择. 图 14(a)到(c)展示了向一个方向的转动过程.



(a) 初始状态 (b) 转向过程

(c) 结束状态

图 14 机构的转向滚动

6　样机实验

如图 15 所示，制作一台样机用以验证机构在奇异位置时的自由度变化，折叠和展开两种状态间进行转换，移动模式下的翻滚，以及机构的缩放比.样机使用锂电池开关量控制，由两组开关分别控制 5 个直流驱动电机的正转与反转.

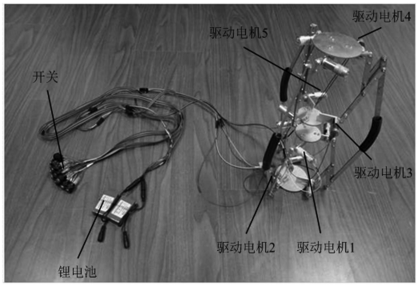
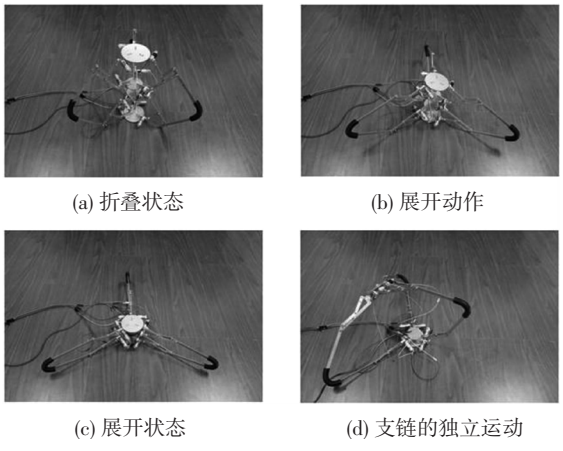


图 15　双模式双三角锥滚动机构样机

机构在一般位置的折叠模式时，进行如图 16(a)~(c)所示的展开过程，相反为其折叠过程.在如图 16(c)所示的展开状态下，机构的高度尺寸为 110 mm，其直径为 720 mm.机构在一般位置时需要 5 个电机同时工作完成单自由度的运动；而达到奇异位置后，机构的每个支链可以进行如图 16(d)所示的单独运动，此时机构具有 3 个自由度.



(a) 折叠状态　(b) 展开动作

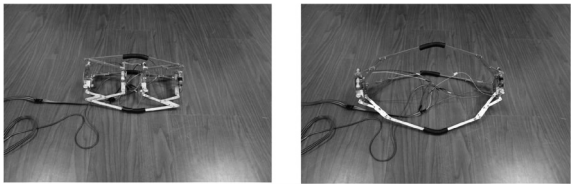
(c) 展开状态　(d) 支链的独立运动

图 16　折叠模式下的展开过程与展开后支链的独立运动

在如图 17(a)所示的完全折叠状态下，机构的高度为 410 mm，直径为 260 mm；在如图 17(b)所示的完全展开状态下，机构的高度为 590 mm，直径为 420 mm.两种状态下，机构在高度上的缩放比约为 1.44.可以通过减少 e 的设计尺寸增大机构的缩放比.

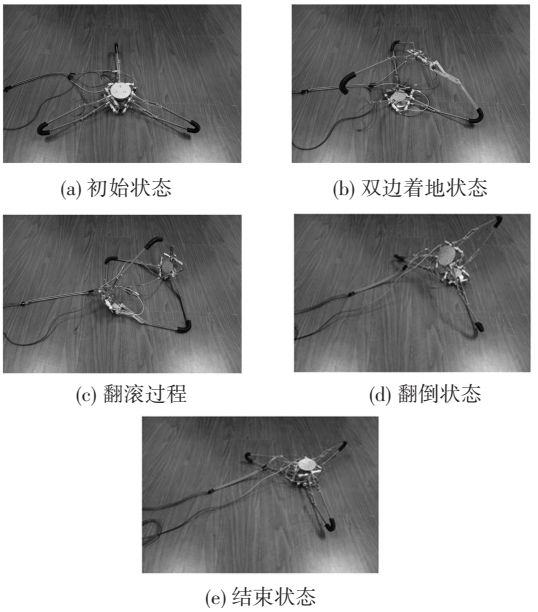
机构具有 3 种状态尺寸为其提供相对应的隐蔽能力，并且在折叠状态下便于存放.

当展开至如图 16(c)所示的奇异位置时，机构具有的 3 个自由度可以实现滚动步态.图 18(a)~(e)为机构在移动模式下的翻滚动作.



(a) 完全折叠状态　(b) 完全展开状态

图 17　机构的完全折叠状态和完全展开状态



(a) 初始状态　(b) 双边着地状态

(c) 翻滚过程　(d) 翻倒状态

(e) 结束状态

图 18　移动模式下的翻滚动作

7　结　论

1)基于双三角锥滚动机构，利用平行四边形机构缩放技术，提出一种具有移动模式和折叠模式的双模式双三角锥滚动机构.

2)通过奇异位置的设计，使该机构在折叠模式和移动模式具有不同的自由度.在折叠模式，仅需要一个驱动电机即可实现折叠功能，使其减少存放或运输时所占的空间，并能够提供隐蔽能力；在移动模式，能够通过 3 个自由度实现直行和转向.

参考文献

[1] ARMOUR R H, VINCENTM J F V. Rolling in nature and robotics: a review [J]. Journal of Bionic Engineering, 2006, 3(4): 195-208.

[2] YIM M, DUFF D G, ROUFAS K D. PolyBot: a modular reconfigurable robot [C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. San Francisco: CA, 2000:514-520.

[3] SASTRA J, CHITTA S, YIM M. Dynamic rolling for a modular loop robot [J]. The International Journal of Robotics Research, 2009,28(6): 758-773.

[4] SHEN Weimin,KRIVOKON M,CHIU H, et al. Multimode locomotion via super bot reconfigurable robots [J].

Autonomous Robots, 2006,20(2): 165-177.
[5] CURTIS S, BRANDT M, BOWERS G, et al. Tetrahedral robotics for space exploration [J]. Aerospace and Electronic Systems Magazine, 2007, 22(6): 22-30.
[6] SHIBATA M, HIRAI S. Rolling locomotion of deformable tensegrity structure[C]//12th International Conference on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines. Istanbul:[s.n.], 2009: 479-486.
[7] LIU Changhuan, YAO Yanan, LI Ruiming, et al. Rolling 4R linkages[J]. Mechanism and Machine Theory, 2012, 48: 1-14.
[8] LIU Changhuan, LI Ruiming, YAO Yanan. An omnidirectional rolling 8U parallel mechanism[J]. Journal of Mechanisms and Robotics, 2012, 4(3): 034501-1-034501-6.
[9] 田耀斌,郭一竹,刘长焕,等. 单自由度概率翻转移动连杆机构[J].机械工程学报,2011,47(3):14-20.
[10] TIAN Yaobin, YAO Yanan. Constructing rolling mechanisms based on tetrahedron units [C]//Advances in Reconfigurable Mechanisms and Robots I. Berlin: Springer, 2012: 221-232.
[11] 李晔卓. 可折叠地面移动连杆机构的研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2013.
[12] FULLER R B. Synergetics[M]. New York: Macmillan, 1975.
[13] FULLER R B. Tensile-integrity Structures: U.S. Patent, 3,063,521[R]. 1962-11-13[2013-04-01].
[14] HOBERMAN. Transformable Design[EB/OL]. [2013-03-18]. http://www.hoberman.com/home.html.
[15] GOSSELIN C M, GAGNON-LACHANCE D. Expandable polyhedral mechanisms based on polygonal one-degree-of-freedom faces[J]. Journal of Mechanical Engineering Science, 2006, 220(7): 1011-1018.
[16] GOSSELIN C, ANGELES J. Singularity analysis of closed-loop kinematic chains[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1990, 6(3): 281-290.
[17] DUNLOP D R, JONES T P. Position analysis of a 3-DOF parallel manipulator[J]. Mechanism and Machine Theory, 1997, 32(8): 903-920.
[18] GREGORIO R D. Kinematics of the 3-RSR Wrist[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2004, 20(4): 750-753.
[19] 李端玲,戴建生,张启先,等. 一种变胞机构——魔术花球的自由度分析[J].机械工程学报,2002,38(9): 12-16.
[20] VUKOBRATOVI C M, STEPANENKO J. On the stability of anthropomorphic systems[J]. Mathematical Biosciences, 1972, 15(1): 1-37.

(编辑 杨 波)

(上接第27页)

[5] 田勇.基于分段导轨模式的电动车无线供电技术关键问题研究[D].重庆:重庆大学出版社,2012.
[6] 毛银花. 用于无线传感器网络的磁共振式无线能量传输系统[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.
[7] 赵鑫. 基于低频大功率无线能量传输机理的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
[8] LEE S, HUH J, PARK C, et al. On-line electric vehicle using inductive power transfer system[C]//2010 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). Atlanta, GA: IEEE, 2010: 1598-1601.
[9] NAGATSUKA Y, EHARA N, KANEKO Y, et al. Compact contactless power transfer system for electric vehicles[C]//The 2010 International Power Electronics Conference. Sapporo: IEEE, 2010: 807-813.
[10] CHIGIRA M, NAGATSUKA Y, KANEKO Y, et al. Small-size light-weight transformer with new core structure for contactless electric vehicle power transfer system[C]// 2011 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). Phoenix, AZ: IEEE, 2011: 260-266.
[11] ONAR O C, MILLER J M, CAMPBELL S L, et al. A novel wireless power transfer for in-motion EV/PHEV charging [C]//2013 Twenty-Eighth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC). Long Beach, CA, USA: IEEE, 2013: 3073-3080.
[12] NILLER J M, WHITE C P, ONAR O C, et al. Grid side regulation of wireless power charging for plug-in electric vehicles [C]//2012 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). Raleigh, NC: IEEE, 2012: 261-268.
[13] ONAR O C, MILLER J M, CAMPBELL S L, et al. Oak ridge national laboratory wireless power transfer development for sustainable campus initiative [C]// 2013 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC). Detroit, MI: IEEE, 2013: 1-8.
[14] KIM H, SONG C, KIM J, et al. Shielded coil structure suppressing leakage magnetic field from 100 W-class wireless power transfer system with higher efficiency [C]//IMWS-IWPT2012 Proceedings. Kyoto: IEEE, 2012: 83-86.
[15] 王天宇. 基于松耦合变压器的大功率感应电能传输技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
[16] BORGHETTI A, NUCCI C A, PASINI G, et al. Tests on self-healing metalized polypropylene capacitors for power applications [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1995, 10(1): 556-561.

(编辑 杨 波)