

一种单动力三杆两足移动机构

王曦鸣, 姚燕安

(北京交通大学机械与电子控制工程学院, 北京 100044)

摘要: 提出一种新概念移动机构. 其机器人特征为具有两个足, 能够两足接地实现类似步行的步态. 其机构学特性为: 是一种开链串联三杆机构; 由 3 个机件和 2 个转动副组成; 具有 2 个自由度; 仅用一个动力机进行驱动, 是一种欠驱动机构. 进行了步态分析, 并通过计算机仿真进行了验证. 进行了稳定性分析, 并对该两足移动机构的概念进行了拓展. 制作了两台样机, 实现了期望的移动.

关键词: 两足机构; 开链机构; 欠驱动机构

中图分类号: TH112, TP242

文献标识码: A

A Biped Mobile Mechanism with Three Links Driven by One Actuator

WANG Xi-ming, YAO Yan-an

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

Abstract: A novel mobile mechanism is proposed. Its robotic feature is that it has two feet and is able to perform a gait similar to walk with its feet touching the ground. Its mechanism characteristics include: it is an open chain serial mechanism with three links; it consists of three mechanical units and two revolute joints; it has two degrees of freedom; and it is an underactuated mechanism driven by only one actuator. Gait analysis is carried out and computer simulation is performed to verify its feasibility. Then stability analysis is carried out and the concept of this mobile mechanism is extended. Two prototypes are manufactured and the desired motion is realized.

Keywords: biped mechanism; open chain mechanism; underactuated mechanism

1 引言 (Introduction)

本文从机构学角度, 分析移动机器人系统的移动机构类型及其驱动方式, 提出一种新概念的移动机构.

考察组成结构最为简单的一种弹跳机器人, 如图 1(a) 所示^[1]. 其中, 一个设计成倒“T”字形的构件作为身体, 另一个杆形构件作为手臂, 由一个电机驱动手臂摆动产生离心力实现弹跳运动.

图 1(b) 所示为其对应的机构简图. 其机构学特征及驱动方式为:

(1) 它是一个开链串联二杆机构, 由 2 个机件 (L_1 和 L_2) 和 1 个转动副 (J_R) 组成;

(2) 它有 1 个自由度, 由 1 个动力机驱动 (驱动转动副).

图 2(a) 所示为在此概念基础上提出的另一种弹跳机器人^[1], 由两个电机分别驱动两个摆臂, 可通过不同的摆臂方式改变行进方向.

图 2(b) 所示为其对应的机构简图. 其机构学特征及驱动方式为:

(1) 它是一个开链串联三杆机构, 由 3 个机件 (L_1 、 L_2 和 L_3) 和 2 个转动副 (J_{R1} 和 J_{R2}) 组成;

(2) 它有 2 个自由度, 由 2 个动力机驱动 (分别驱动 2 个转动副).

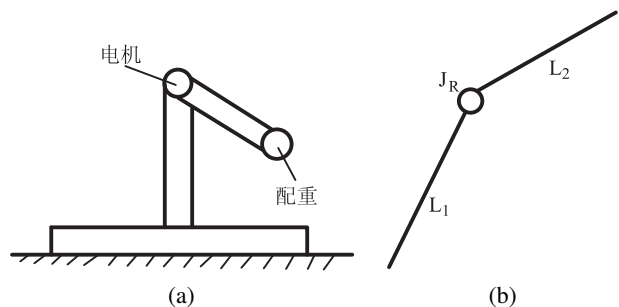


图 1 一种二杆弹跳机器人的结构示意图及其机构简图^[1]
Fig.1 Structure and mechanism of a jumping robot with two links

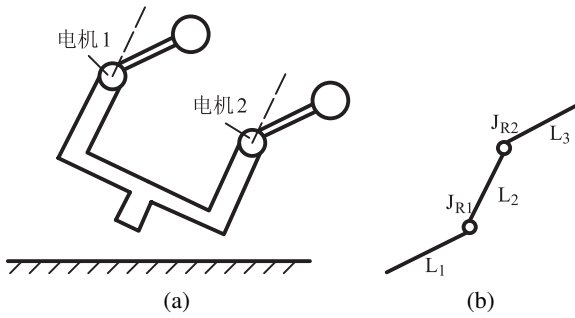


图 2 三杆钟摆式弹跳机的结构示意图及其机构简图^[1]
Fig.2 Structure and mechanism of a pendulum-type jumping machine with three links

图 3(a) 所示为一种活塞式弹跳机器人^[2,3], 腿部结构是一个活塞缸. 图 3(b) 所示为其对应的机构简图, 其机构学特征及驱动方式为:

- (1) 它是一个开链串联三杆机构, 由 3 个机件 (L_1 、 L_2 和 L_3)、1 个转动副 (J_R)、1 个移动副 (J_p) 组成;
- (2) 它有 2 个自由度, 由 2 个动力机驱动 (一个驱动转动副, 一个驱动移动副).

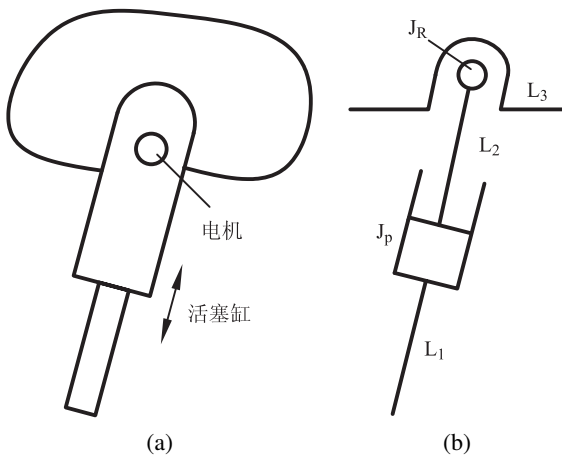


图 3 活塞式弹跳机器人的结构示意图及其机构简图^[4]
Fig.3 Structure and mechanism of a piston bouncing robot

图 4 所示移动机构是一种可重构机器人的一个单元^[5]. 其机构学特征及驱动方式与图 2 所示弹跳机器人完全相同. 若将两个交替接地机件作为两个足, 则可视为一种两足移动机器人.

本文提出一种由 3 个机件和 2 个转动副组成的新概念移动机构, 能够两足接地实现类似步行的步态. 其拓扑结构特性与图 4 所示移动机构相同, 不同之处在于通过机件结构的巧妙设计以及动力机的灵活布置, 使得所提出的新型移动机构仅需要一个动力机即可驱动实现类似步行的步态, 即欠驱动. 因而, 此两足移动机构的结构极为简单. 在公开发表的论文和专利文献中, 尚未发现与之类似的移动

机构.

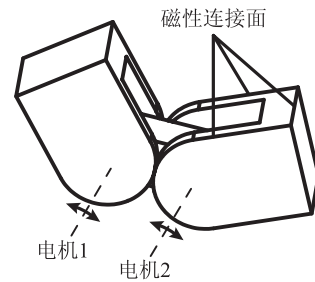
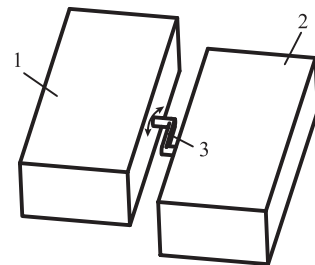


图 4 一种可重构机器人的三杆单元结构示意图^[5]
Fig.4 Structure of a three-link unit of a reconfigurable robot

2 结构与移动原理 (Structure and locomotion principle)

2.1 结构组成

图 5 为所提出单动力三杆两足移动机构的结构示意图.



1. 左足; 2. 右足; 3. 中间连杆
图 5 两足移动机构结构示意图

Fig.5 Structure of the biped mobile mechanism

该两足移动机构是由 3 个机件和 2 个转动副组成的开链串联三杆机构. 将两个机件作为左、右两足, 分别以转动副与中间连杆连接, 两个转动副轴线平行. 由一个电动机作为动力机, 安装在其中一足之上, 通过转动副驱动中间连杆做回转运动. 不妨设电动机装在左足上, 左足成为驱动足, 右足为从动足.

2.2 移动原理

该机构实现移动的基本方式为: 初始时刻, 驱动足完全接触地面, 电机转矩 T 驱动中间连杆转动, 拖动从动足向前运动; 当从动足完全接触地面之后, 电机转矩 T 仍然作用于中间连杆, 拖动驱动足向前运动, 完成一个移动周期.

事实上, 行进过程中两足均将侧倾, 且不能与地面完全脱离接触, 即以拖行方式行进. 为分析其原理, 进行单足的受力分析, 如图 6 所示.

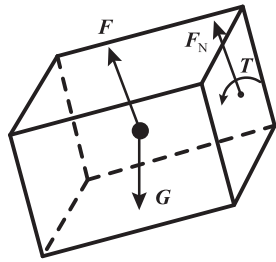


图 6 迈步足摆动离开地面时的受力分析

Fig.6 Force analysis on the moving foot when it swings off the ground

假设迈步足可以摆动离开地面，则其受到自身的重力 G 、连杆的支撑反力 F_N 、电机转矩 T 和作用于其质心的惯性离心力 F 。

将这些力对铰链点取矩。作用于迈步足质心的惯性离心力 F 对铰链的力矩不足以平衡重力 G 对铰链的力矩时，迈步足会向其自身一侧发生倾斜，依靠地面支反力对铰链的力矩来平衡重力矩。又由于两足结构上的关联性，支撑足也将在连杆的作用下跟随迈步足产生同一方向的侧倾。即在迈步时，双足将向迈步足一侧同时发生侧倾，在前进的过程中双足始终保持同侧一条边跟地面接触。下面对这种侧向倾斜移动方式进行分析。

为便于分析，将左足、右足均简化为长为 B 、高为 H 、宽为 A 的长方体。两足横向间距为 d ，纵向间距为 l ，均由中间连杆的结构尺寸决定。 t 时刻中间连杆的转角为 θ ，易证两足的侧倾角相等，记为 α 。不妨设两足的质量相同 ($m_1 = m_2$)，而且中间连杆的质量相对于足的质量来说很小，可以忽略不计 ($m_3 = 0$)。

如图 7 所示，在支撑足的支撑边中点建立坐标系 $\Sigma_{x_0y_0z_0}$ ，坐标系 $\Sigma_{x_1y_1z_1}$ 、 $\Sigma_{x_2y_2z_2}$ 分别固结于两足质心，故左、右足质心在坐标系 $\Sigma_{x_0y_0z_0}$ 中分别表示为：

$$r_{c2}^0 = \begin{pmatrix} l \cos \theta \\ \frac{1}{2} [-(A + 2d) \cos \alpha - \sin \alpha (H + 2l \sin \theta)] \\ \frac{1}{2} [-(A + 2d) \sin \alpha + \cos \alpha (H + 2l \sin \theta)] \\ 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$r_{c1}^0 = \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{1}{2} (A \cos \alpha - H \sin \alpha) \\ \frac{1}{2} (H \cos \alpha + A \sin \alpha) \\ 1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

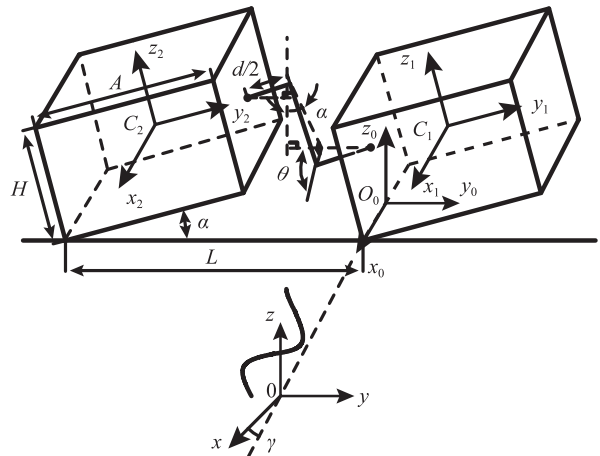


图 7 坐标系及几何参数示意图

Fig.7 Schematic of coordinate system and geometric parameters

如图 7 所示，由几何关系有：

$$(A \sin \alpha + \frac{H}{2} \cos \alpha) - \frac{H}{2} \cos \alpha = l \sin \theta \cos \alpha - d \sin \alpha$$

等式左右两端均为两转动副中心之间的垂直距离，整理后得侧倾角 α 和 t 时刻连杆转角 θ 关系：

$$\sin \theta = \frac{A + d}{l} \tan \alpha \quad (3)$$

将 (3) 式代入 (1)、(2) 式，即可得到左足、右足的姿势与输入电机转角 θ 的关系。反过来证明了这种侧向倾斜移动方式可以在单动力驱动下实现。

进一步发现，在移动过程中，双足不仅如上所述会发生侧倾，而且将发生扭转，其运动轨迹类似“Z”字形。在初始时刻支撑足的支撑边中点建立全局坐标系 Σ_{xyz} 。如图 7 所示，初始时刻，左、右足支撑边的位置沿坐标轴 x 方向，此刻双足均已发生 γ 角度的扭转。在全局坐标系 Σ_{xyz} 下左、右足的质心坐标可表示为：

$$x_{c2} = \frac{1}{2} \{ 2 \cos \gamma [l \cos \theta + (k - 1)D_s] - 2d \cdot \text{mod}[k, 2] \cdot \sin \gamma + \sin \gamma [2d + (A + 2d) \cos \alpha + \sin \alpha (H + 2l \sin \theta)] \} \quad (4)$$

$$y_{c2} = \frac{1}{2} \{ 2d \cdot \text{mod}[k, 2] \cdot \cos \gamma + 2[(k - 1)D_s + l \cos \theta] \cdot \sin \gamma - \cos \gamma [2d + (A + 2d) \cos \alpha + \sin \alpha (H + 2l \sin \theta)] \} \quad (5)$$

$$z_{c2} = \frac{1}{2} [-(A + 2d) \sin \alpha + (H + 2l \sin \theta) \cos \alpha] \quad (6)$$

$$x_{c1} = (k - 1)D_s \cos \gamma - d \cdot \text{mod}[k, 2] \cdot \sin \gamma + \frac{1}{2} (2d - A \cos \alpha + H \sin \alpha) \sin \gamma \quad (7)$$

$$y_{c1} = d \cdot \text{mod}[k, 2] \cdot \cos \gamma + \frac{1}{2} [\cos \gamma (-2d + A \cos \alpha - H \sin \alpha) + 2(k - 1)D_s \sin \gamma] \quad (8)$$

$$z_{c1} = \frac{1}{2}(H \cos \alpha + A \sin \alpha) \quad (9)$$

D_s 为移动机构的步长, k 表示第 k 步 ($k = 1, 2, 3 \dots$). 又由

$$\mathbf{r}_c = \begin{pmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{pmatrix} = \frac{m_1 \cdot \mathbf{r}_{c1} + m_2 \cdot \mathbf{r}_{c2}}{m_1 + m_2} \quad (10)$$

可以得到该双足系统的质心在全局坐标系 Σxyz 中的表示, 同理由 (3) 式可消去未知参数 α .

当左足摆动向前运动, 拖动右足时, 为分析其移动原理, 分析该双足系统的受力, 如图 8 所示.

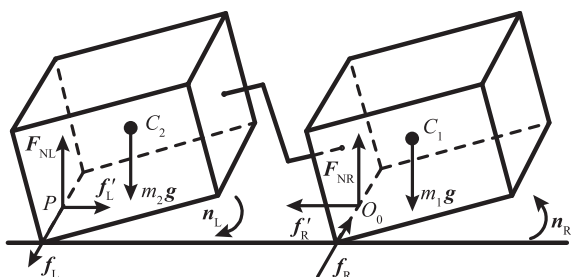


图 8 迈步期两足受力分析

Fig.8 Force analysis on two feet in swing phase

将该两足移动机构看作 3 个刚性杆件构成的运动链. 当其在平坦路面上运动时, 整个双足系统受到的外力有: 作用于 O_0 点的地面给右足的支撑反力 F_{NR} , 摩擦分力 f_R 、 f'_R , 摩擦力矩 n_R ; 作用于 P 点的地面给左足的支撑反力 F_{NL} , 摩擦分力 f_L 、 f'_L , 摩擦力矩 n_L ; 以及右足、左足的重力 m_1g 、 m_2g . 由质点系的达朗贝尔原理, 在运动的任意瞬时, 该双足移动系统上的外力与虚加于系统中各质点的惯性力组成平衡力系, 故有:

$$\begin{cases} F_{NL} + F_{NR} - (m_1 + m_2)g = (m_1 + m_2)\ddot{z}_c \\ f_R - f_L = -(m_1 + m_2)\ddot{x}_c \\ f'_R - f'_L = -(m_1 + m_2)\ddot{y}_c \end{cases} \quad (11)$$

作用于该双足移动系统的外力矩 (对 O_0 点或其它任意固定参考点) 之和与系统中各个机件对同一点的角动量变化之和相等. 以 O_0 点为简化中心, 可以得到:

$$\begin{aligned} & \mathbf{O}_0\mathbf{P} \times (f_L\mathbf{i} + f'_L\mathbf{j} + F_{NL}\mathbf{k}) + \mathbf{O}_0\mathbf{C}_2 \times m_2\mathbf{g} + \mathbf{n}_L \\ & + \mathbf{n}_R + \mathbf{O}_0\mathbf{C}_1 \times m_1\mathbf{g} = \sum_{i=1}^2 \mathbf{n}_{ci} + \sum_{i=1}^2 m_i\mathbf{r}_{ci}^0 \times \mathbf{a}_{ci}^0 \end{aligned} \quad (12)$$

\mathbf{n}_{c1} 、 \mathbf{n}_{c2} 分别为右足和左足绕其质心的力矩, C_1 、 C_2 分别为右足和左足的质心位置, \mathbf{a}_{c1}^0 、 \mathbf{a}_{c2}^0 分别为右足和左足质心的线性加速度.

为进一步分析, 做右足受力分析图, 如图 9 所示. 作用于右足上的外力 F_{NR} 、 f_R 、 f'_R 、 n_R 、 m_1g , 电机转矩 T , 中间连杆作用于铰链点 Q 处的约束反力 F'_N 和惯性力组成平衡力系, 根据达朗贝尔定理, 对右足有:

$$\begin{cases} F_{NR} - F'_N \cos \alpha - m_1g = m_1\ddot{z}_{1c} \\ F'_N \sin \alpha - f'_R = m_1\ddot{y}_{1c} \\ f_R = -m_1\ddot{x}_{1c} \end{cases} \quad (13)$$

$$\mathbf{n}_R + \mathbf{O}_0\mathbf{C}_1 \times m_1\mathbf{g} + \mathbf{T} = \mathbf{n}_{c1} + m_1\mathbf{r}_{c1}^0 \times \mathbf{a}_{c1}^0 \quad (14)$$

将前面得到的 (1)~(3) 式、(7)~(10) 式代入 (11)~(14) 式可得到地面反力与驱动关节运动以及机构相对地面扭转运动之间的关系. 右足摆动向前运动, 拖动左足的情况类似, 不再重复.

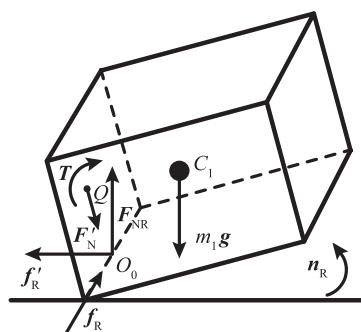


图 9 迈步期右足受力分析

Fig.9 Force analysis on the right foot in swing phase

3 运动仿真 (Motion simulation)

通过分析可知, 该两足移动机构仅使用一个电机驱动即可实现侧向倾斜式移动, 其移动周期由两个过程组成:

(1) 初始时刻, 双足完全接触地面, 电机转矩 T 驱动中间连杆转动, 拖动从动足向前运动. 双足向从动足一侧发生侧倾, 并产生相应的扭转. 连杆转至 90° (即 $\theta = 90^\circ$) 时, 双足与地面倾角 α 最大.

(2) 当从动足完全接触地面之后, 电机转矩 T 仍然作用于中间连杆, 拖动驱动足向前运动. 双足向驱动足一侧发生侧倾, 并产生与前半周期相反方向的扭转. 驱动足完全接触地面后, 该两足移动机构完成一个移动周期, 重新回到原行进方向上.

为验证分析结果, 在 Adams 环境下, 建立了该双足移动系统模型进行仿真. 其一个周期内的各个运动阶段如图 10 所示. 通过仿真, 再次证明了该两足移动机构在单动力作用下侧向倾斜前进的移动方式.

如图 11 所示, 该两足移动机构的质心运动轨迹类似“Z”字形. 该仿真结果显示, 在运动过程中

该两足移动机构质心位置发生偏移, 且会发生微小的跑偏现象, 经分析, 这主要是由于其侧向倾斜的

移动方式和不对称布置的单个动力源驱动方式造成的, 可通过控制系统对跑偏量进行反馈和调节.

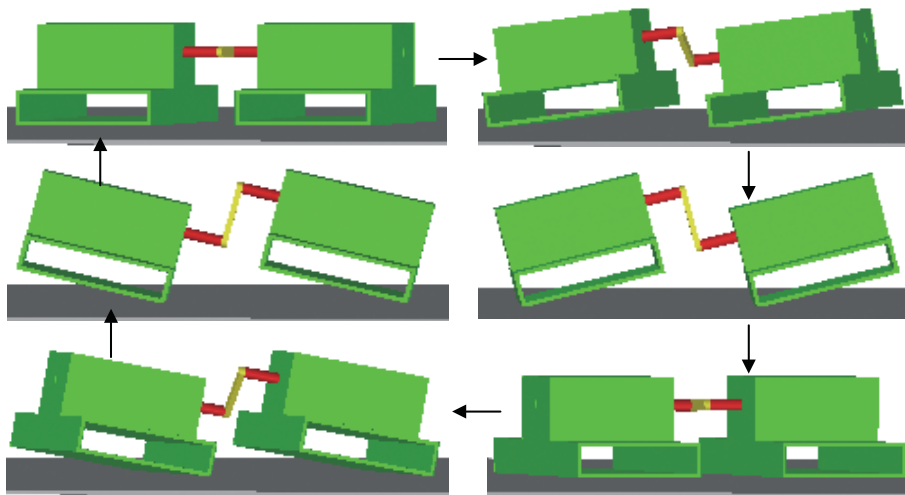


图 10 两足移动机构一个直行周期分解图

Fig.10 The locomotion phases of the biped mobile mechanism in a cycle while moving in one direction

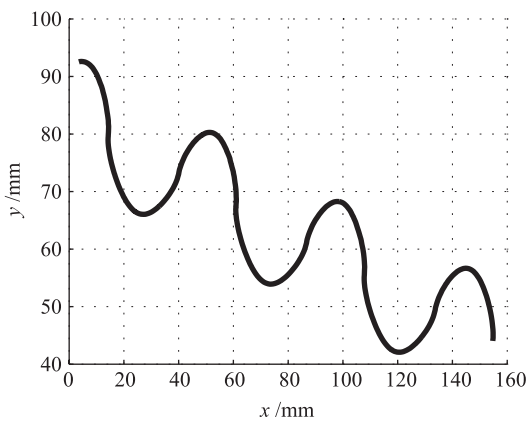


图 11 两足移动机构直行时的质心运动轨迹

Fig.11 The trajectory of mass center while the biped mobile mechanism moving in one direction

4 稳定性分析 (Stability analysis)

在移动的过程中, 该两足移动机构能保持动作协调连续且整体处于不失稳状态的条件是系统的 ZMP 点必须始终位于由两条支撑边决定的支撑平面内. 由运动和几何关系可得其 x_{zmp} 允许的变化范围:

$$\begin{cases} -B/2 \sim B/2 + l \cos \theta & \theta \in [0, \pi/2) \\ -B/2 - l \cos(\pi - \theta) \sim B/2 & \theta \in [\pi/2, \pi] \end{cases} \quad (15)$$

B 为移动机构的足长 (m), A 为移动机构的足宽 (m), H 为移动机构足的高度 (m), l 为中间连杆的长度 (m), d 为两足之间的距离 (m), M 为移动机构足质量 (kg).

采用如表 1 所示的一组结构参数, 进行下面的计算. 由 (15) 式绘制出图 12, 阴影部分对应不同 θ 值下 x_{zmp} 允许的变化范围.

表 1 该两足移动机构的参数
Tab.1 Parameters of the biped mobile mechanism

B/m	A/m	H/m	l/m	d/m	M/kg
0.24	0.1	0.07	0.04	0.03	0.5

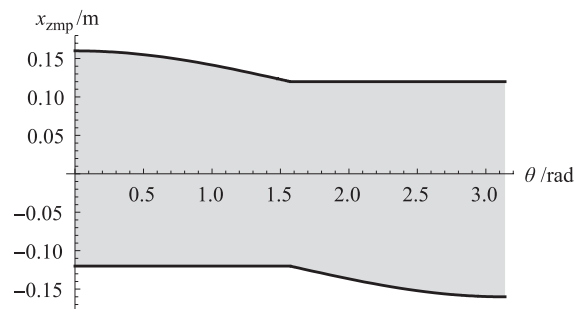


图 12 x_{zmp} 允许范围随 θ 的变化

Fig.12 The allowable variation range of x_{zmp} versus θ

同理可以得到 y_{zmp} 允许的变化范围为 $-L \sim 0$. 由 $L = (A + d) / \cos \alpha$, $\sin \theta = \frac{A + d}{l} \tan \alpha$ 可得, 当 θ 由 0 变化到 π 时, 对应 α 由 0 变到 0.2728 rad 再变回 0, y_{zmp} 允许的变化范围如图 13 所示.

根据图 12 和图 13, 认为 x_{zmp} 允许变化范围是 $[-0.12, 0.12]$, y_{zmp} 允许变化范围是 $[-0.13, 0]$.

利用式 (16)、(17) 来计算这个两足移动机构的 ZMP^[6]. 绘制出在不同电机角速度 ω (rad/s) 下 x_{zmp} 随连杆转角 θ 变化的曲线图 14 和 y_{zmp} 随连杆转角 θ 变化的曲线图 15, 并对该两足移动机构的稳定性

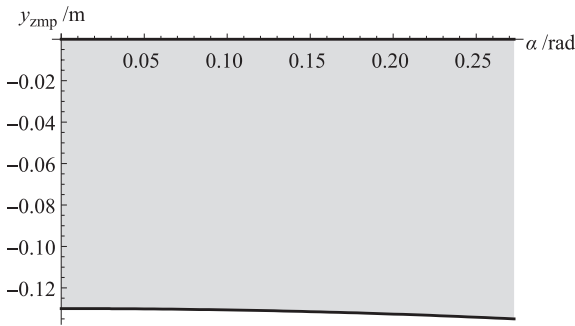


图 13 y_{zmp} 允许范围随 θ 的变化

Fig.13 The allowable variation range of y_{zmp} versus θ

进行讨论.

$$x_{zmp}(t) = \frac{\sum_{i=0}^n [m_i x_i(t)(\ddot{z}_i(t) + g_z) - m_i z_i(t)(\ddot{x}_i(t) + g_x)]}{\sum_{i=0}^n m_i (\ddot{z}_i(t) + g_z)} \quad (16)$$

$$y_{zmp}(t) = \frac{\sum_{i=0}^n [m_i y_i(t)(\ddot{z}_i(t) + g_z) - m_i z_i(t)(\ddot{y}_i(t) + g_y)]}{\sum_{i=0}^n m_i (\ddot{z}_i(t) + g_z)} \quad (17)$$

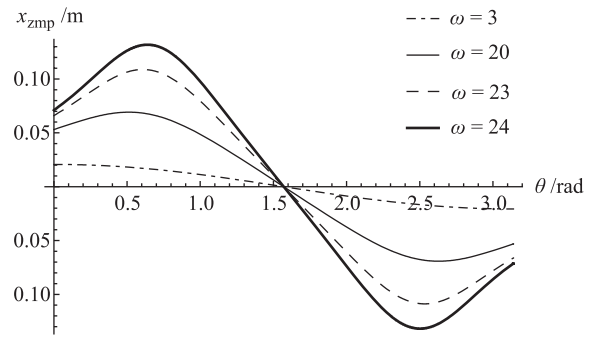
$x_i(t), y_i(t), z_i(t)$ 为第 i 个构件重心坐标, g_x, g_y, g_z 为重力加速度在基坐标系下的分量.

如图 14(a) 所示, $\omega \leq 3 \text{ rad/s}$ 时, 该两足移动机构在即将开始移动的时刻, 其 x_{zmp} 几乎与质心的 x 坐标重合. 移动过程中 x_{zmp} 在一个小范围 $[-0.02, 0.02]$ 内变化, 该移动过程具有很好的稳定性.

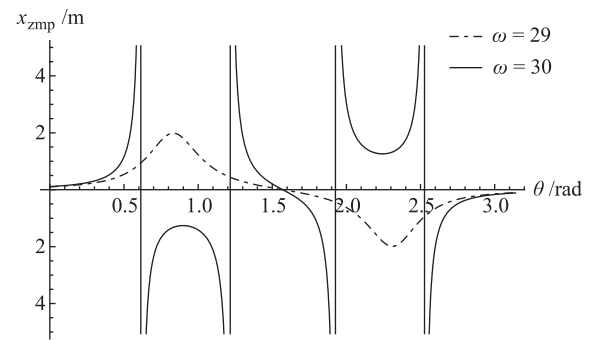
当 $3 \text{ rad/s} < \omega \leq 23 \text{ rad/s}$ 时, 这个两足移动机构在即将开始移动的时刻, 其 x_{zmp} 不再与其质心的 x 坐标重合. 但在移动过程中, x_{zmp} 仍在所允许的范围 $[-0.12, 0.12]$ 内变化. 直到 $\omega > 23 \text{ rad/s}$ 时, x_{zmp} 将超出此允许范围, 该两足移动机构在 x 方向失稳.

从 x_{zmp} 分析来看, x_{zmp} 可指导足的长度设计. 如图 14(b) 所示, $\omega < 30 \text{ rad/s}$ 时, 仍然可以按照图示曲线合理设计足长度, 以满足稳定性要求. $\omega \geq 30 \text{ rad/s}$ 时, 无论如何设计足长度, 都不可能再满足稳定性要求.

从 y_{zmp} 来分析, 如图 15(a) 所示, $\omega \leq 3 \text{ rad/s}$ 时该两足移动机构在即将开始移动的时刻, 其 y_{zmp} 几乎与质心的 y 坐标重合, 移动过程中 y_{zmp} 在一个小范围 $[-0.032, -0.015]$ 内变化, 该移动过程具有很好的稳定性. $3 \text{ rad/s} < \omega < 19 \text{ rad/s}$ 时, 该两足移动机构在即将开始移动的时刻, 其 y_{zmp} 不再与其质心的 y 坐标重合. 但在移动过程中, y_{zmp} 仍在所允许的范围 $[-0.13, 0]$ 内变化.



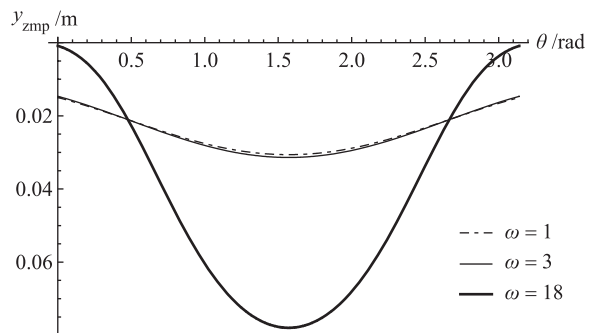
(a)



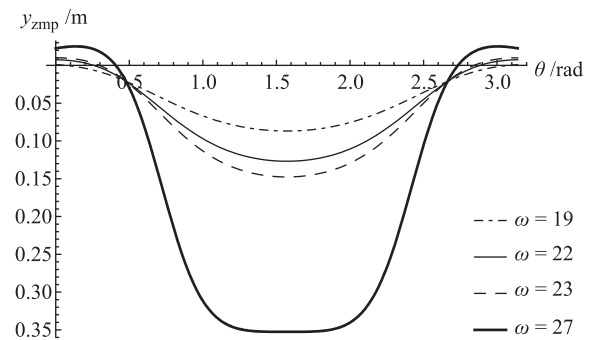
(b)

图 14 不同电机角速度 ω 下 x_{zmp} 随 θ 变化曲线

Fig.14 The x_{zmp} curve versus θ under different motor angular velocity ω



(a)



(b)

图 15 不同电机角速度 ω 下 y_{zmp} 随 θ 变化曲线

Fig.15 The y_{zmp} curve versus θ under different motor angular velocity ω

如图 15(b) 所示, 当 $19 \text{ rad/s} \leq \omega < 23 \text{ rad/s}$ 时, 该

两足移动机构在移动过程中 y_{zmp} 没有越过允许变化范围的下限 -0.13 ；却在即将开始移动时刻，其 y_{zmp} 突然越过允许变化范围上限 0 ，此时该两足移动机构在 y 轴正方向上失稳。 $\omega = 23 \text{ rad/s}$ 时，在移动过程中 y_{zmp} 开始越过允许变化范围的下限 -0.13 ，该两足移动机构在 y 轴负方向上也开始失稳，且移动周期内处于不稳定状态的时间随着 ω 增加逐渐增加。

5 概念拓展 (Concept extension)

前面方案中的两足移动机构结构参数完全对称，只能实现直行。在 Adams 环境下，调整了仿真模型中两足的质量。

当驱动足的质量比从动足质量大时，该两足移动机构能实现绕驱动足转弯；当驱动足的质量较从动足质量足够大时，从动足能够完全脱离地面行走，仿真结果如图 16 所示。

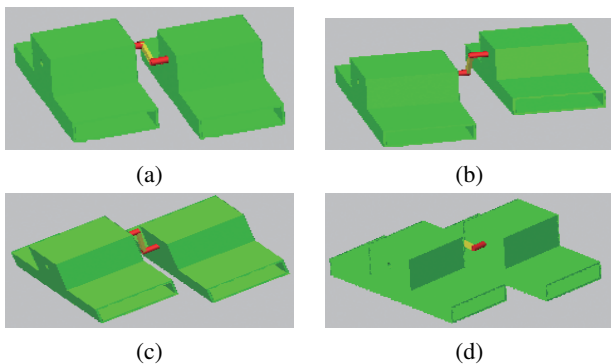


图 16 绕驱动足转弯

Fig.16 Turning around the foot equipped with actuator

当从动足的质量比驱动足质量大时，该两足移动机构能实现绕从动足转弯；当从动足的质量较驱动足质量足够大时，驱动足能够前端抬起拖行，如图 17 所示。

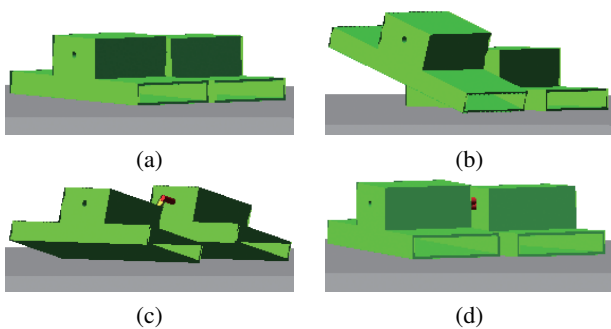


图 17 绕从动足转弯

Fig.17 Turning around the foot not equipped with actuator

若改变连接该移动机构两足与中间连杆的两个转动副轴线方位，使两转动副的轴线不做平行布置，

而成一定角度，其运动仿真情况见图 18，该两足移动机构不再直行而作绕圈移动，其运动轨迹如图 19 所示。

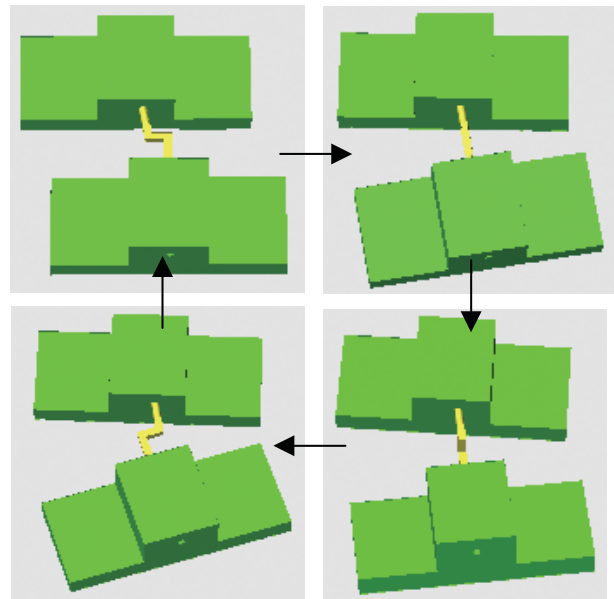


图 18 两足移动机构绕圈移动时的一个周期分解

Fig.18 The locomotion phases of the biped mobile mechanism in a cycle while moving along a circle

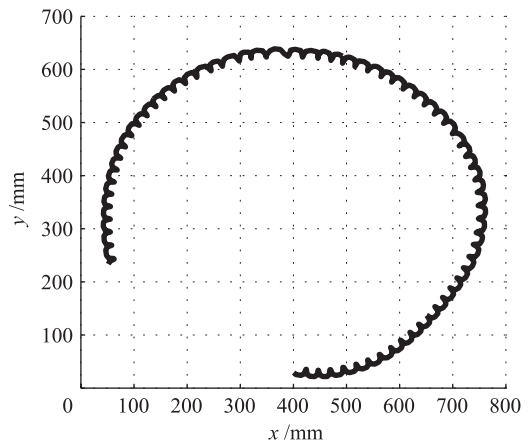


图 19 两足移动机构绕圈移动时的质心运动轨迹

Fig.19 The trajectory of mass center while the biped mobile mechanism moving along a circle

6 样机 (Prototype)

试制样机两台，1 号样机由 3 个机件和 2 个转动副组成，其中两个机件作为左、右两足，两个转动副的轴线平行。仅用一个 12 V 直流电机驱动，实现了直线移动。图 20(a)~(f) 为 1 号样机一个周期内的各运动阶段。

2 号样机的结构与 1 号样机类似，不同之处在于，其两个转动副的轴线不平行而成一定角度布置。该机也只使用一个 12 V 直流电机驱动，实现了绕圈移动。图 21(a)~(d) 为 2 号样机一个周期内的各运动

阶段。

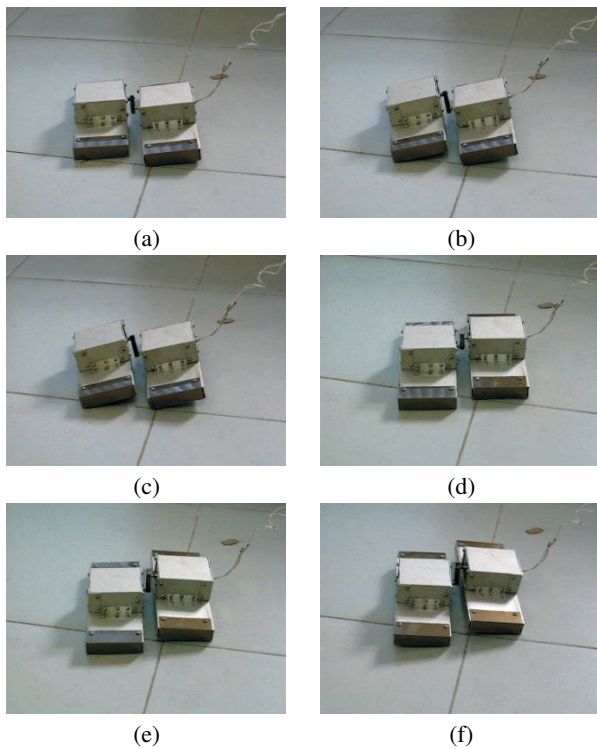


图 20 1 号样机一个移动周期分解

Fig.20 The locomotion phases of the 1st prototype in a locomotion cycle

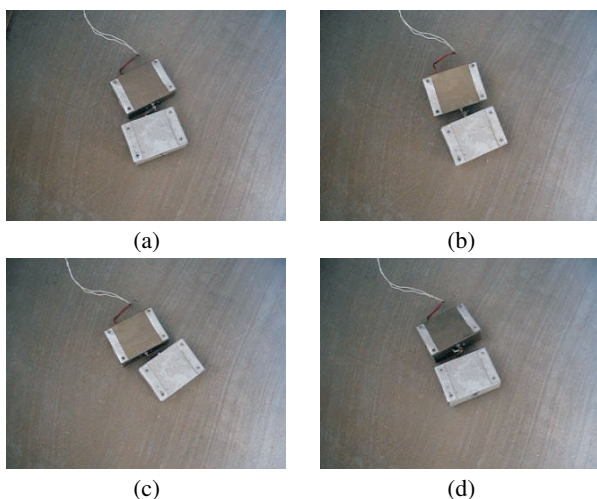


图 21 2 号样机一个移动周期分解

Fig.21 The locomotion phases of the 2nd prototype in a locomotion cycle

7 结论 (Conclusion)

提出一种由三杆两转动副组成、仅需一个动力

机驱动的两足移动机构。分析了其结构组成、步态以及稳定性，在 Adams 环境下进行了运动仿真，并制作了两台模型样机。

从工程应用的角度考察：

(1) 从结构上看，该两足移动机构只用 3 个机件即实现了移动功能，结构极为简单，易于制造和工程实现；

(2) 从动力机的数目看，该两足移动机构只用一个动力机进行驱动，在欠驱动方式下实现移动，亦相当简单，对相应控制系统的要求也显著降低；

(3) 从移动方式上看，该两足移动机构的步态类似爬行，在崎岖、松软的某些特定路面环境下，可能具有一定优势。

就学术研究的价值而言，证明了具有三杆两转动副的连杆机构在欠驱动条件下可以实现类似步行的两足移动，从而为移动机器人家族增添了一个结构极为简单的新成员。

参考文献 (References)

- [1] Hayashi R, Tsujio S. High-performance jumping movements by pendulum-type jumping machines[A]. Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems[C]. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2001. 722~727.
 - [2] Raibert M H. Legged Robots That Balance[M]. Cambridge, USA: MIT Press, 1986.
 - [3] Raibert M H. Dynamic stability and resonance in a one legged hopping machine[A]. Proceedings of the CISM-IFTOMM Symposium on Theory and Practice of Robots and Manipulators[C]. 1981. 419~429.
 - [4] Berkemeier M D, Fearing R S. Control of a two-link robot to achieve sliding and hopping gaits[A]. Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation[C]. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 1992. 286~291.
 - [5] Yoshida E, Murata S, Kamimura A, *et al.* A self-reconfigurable modular robot: Reconfiguration planning and experiments[J]. The International Journal of Robotics Research, 2002, 21(10-11): 903~915.
 - [6] 伍科布拉托维奇. 马培荪, 沈乃勋. 步行机器人和动力型假肢 [M]. 北京: 科学出版社, 1983.
- Vukobratovic M. Ma Pei-sun, Shen Nai-xun. Robot and Dynamic Working Leg[M]. Beijing: Science Press, 1983.

作者简介:

王曦鸣 (1985-), 女, 硕士生. 研究领域: 机器人学.

姚燕安 (1972-), 男, 教授, 博士生导师. 研究领域: 机构与机器人学.