

计算机技术

轮腿式机器人多运动模式运动学分析与建模

徐 岩¹ 吴立勋¹ 段星光^{2*}

(河北师范大学¹, 石家庄 050024; 北京理工大学², 北京 100081)

摘 要 轮腿式移动机器人具有轮式、履带式和腿式等多种运动模式, 对不同运动模式下的运动特性进行了分析, 建立了轮式运动模式下的运动学方程, 对履带运动模式下的转向运动学进行了运动学建模; 通过对机器人在腿式模式的姿态描述, 建立其运动学模型。为对轮腿式机器人进行综合运动分析, 实现机器人控制提供了理论基础。

关键词 轮腿式机器人 多运动模式 运动学建模

中图法分类号 TP242.3; **文献标志码** A

移动机器人在危险环境作业、太空探测、军事作战、公共安全等应用背景的牵引下, 各种移动机器人不断涌现。轮式移动机器人以其简单易控发展最为普遍。相对于轮式机器人来说, 履带式机构具有较好的地形适应能力^[1-3], 而从理论上讲, 足式机器人为解决三维复杂地形下的运动问题提供了一种可选方案^[4], 但其运动机构与控制的复杂性依然没有得到有效解决。对机器人越障能力和环境适应能力不断提高的要求大大增加了机器人的复杂性。研究人员采取通过增加轮子、摆臂式履带以及辅助腿等多种措施来提高机器人的越障能力和环境适应能力, 并由此逐步诞生了一种轮腿式机器人, 如具有代表性的有 Urban^[5]、WorkPartner^[6]等。

轮腿式机器人综合了轮式机构与腿式机构各自的优点, 成为移动机器人当中重要的一种类型。由于它将轮式机构驱动效率高、速度快、方便控制的优点和腿式机构环境适应性强、越障能力强、可以实现主动的姿态控制等优点结合为一体, 使得轮腿式机器人得到广泛的应用。从小型实验型的 GOFOR、Hylos^[7,8] 机器人到登月、火星探测机器人都采用了类似的结构, 并在实际中验证了其性能的优越性。

对于机器人的运动控制方法通常是基于建模和运动分析的。本文就轮腿式机器人的运动模式及其运动学建模进行研究, 揭示轮腿式机器人的多种运动模式下的运动学问题, 特别是在腿式运动模式下,

其运动姿态, 不再是简单的姿态向量, 还包含了机器人车体在空间中的俯仰、横滚乃至偏转角, 包含了车体相对于运行地面的位置以及两侧摆臂相对于车体和摆臂之间的方位、距离等信息。所以需要对其运动学进行分析, 以实现对其机器人的姿态优化控制。

1 轮腿式机器人

1.1 轮腿式机器人的机构特征

轮腿式机器人的机构特征可通过几个典型的机器人系统来揭示, 如 GO-FOR、WorkPartner、Hylos^[7,8] 以及 MOBIT^[9] 等。GO-FOR 的基本构成是由一个车体、四个主动控制的关节腿和四个轮子组成。四个腿可以绕各自的中心轴旋转, 同时每个轮子也具有驱动自由度, 以提供机器人的牵引力。从其配置中可以明显地看出, 主动驱动控制腿的摆动角度可以完全控制轮子与地面的接触力, 并同时影响到机器人的姿态、牵引力及其稳定性, 最终影响到机器人运动性能的提高和优化。WorkPartner 的每个腿机构具有三个主动控制的运动自由度——两个为腿部的关节角自由度, 一个为轮子的驱动自由度。该运动系统相比于 GO-FOR 而言, 在每条腿的中间增加了一个关节自由度, 这样系统的姿态控制性能将优于前者, 但是, 由于增加了更多的冗余驱动, 所以其闭环链的受力情况以及运动学、动力学分析会更加复杂, 其综合优化的可控性参数会更多。类似的轮腿系统如 Hylos、MOBIT^[10] 等。这些轮腿式系统的共同特点是它们可以通过腿部关节角的位置来实现机器人姿态的控制。但这种冗余驱动系统所带来的与环境的复杂交互以及机器人姿态、牵引驱动、稳定性控制等问题相对于普通的轮式机器人来说困难许多^[11-13]。

2015年10月23日收到

第一作者简介: 徐 岩, 女, 河北石家庄人, 硕士, 教授。研究方向: 先进制造技术, 机器人技术。

* 通信作者简介: 段星光, 男, 河北万全人, 博士, 教授, 博士生导师。研究方向: 特种机器人、医疗机器人、仿生机构与控制。E-mail: duan-star@bit.edu.cn。



图1 Go-for
Fig. 1 Go-for

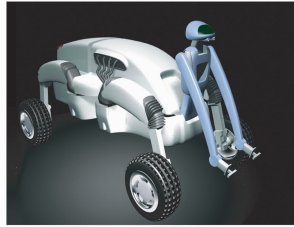


图2 Work Partner
Fig. 2 Work Partner

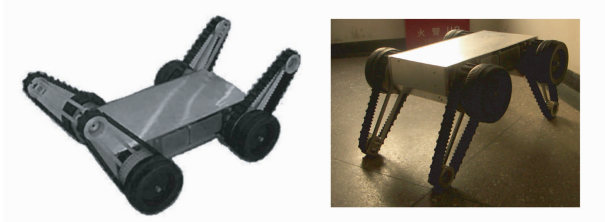


图3 MOBIT
Fig. 3 MOBIT

文献[7]对 MOBIT 机器人(如图3)的总体结构进行了详细描述,其基本结构形式是由四个车轮、四个摆臂和车体构成的三节式复合结构,每个运动单元包括一个履带腿机构和一个驱动轮机构,四条履带腿均配置在车轮内侧,不仅能够实现履带自身的旋转传动,而且能够绕驱动轮中心轴摆动。该结构具有典型的轮腿式机器人的结构特点,本文将以该机器人为例来研究其多运动模式下的运动学分析与建模方法。

1.2 运动模式

该实验平台具有多种运动模式,在文献[9,10]中已对其进行了详细介绍,主要包括:四轮模式、履带模式、四腿模式以及其他模式。由此可知,除可以采用轮式或履带模式运动以外,该机器人通过控制4个摆臂下摆以抬起车体,从而形成一种非常有意义的腿式模式。事实上,在腿式模式时,其演变为轮腿式移动机器人。当机器人的腿或轮子的自由度是独立驱动的时候,这类系统具有控制自身姿态的能力。该运动模式在增加车体净空高度、提高非结构环境下越障能力方面有明显效果。通过对不同模式下机器人的运动学分析,建立起机器人运动和机器人控制变量之间的关系,作为控制系统对运动控制参数处理的依据。

2 运动学分析与建模

MOBIT 轮腿式机器人具有多种不同的运动模式,因此导致了其运动学模型的差异。

2.1 轮式运动模式的运动学分析

2.1.1 坐标系建立

对机器人来说,在地面的运动可以分为在二维

平面内的运动和三维空间的越障运动。轮式运动模式下,机器人在平面和准平面的地形中运动,即以看作是一个普通的四轮机器人,在纯滚动无滑动的条件下运动。其运动学研究主要是以实现机器人导航、定位、路径规划等任务目的。此时,机器人的位姿可以通过如下定义来描述(图4)。图4中, $R_w = (X_w, Y_w, Z_w)$ 为一个任意的被固定在运动平面内的世界坐标系; $R = \{G, X, Y, Z\}$ 为固连在机器人平台上的任一参考, G 为机器人重心; θ 是机器人的方位角。在此基础上,定义一个标准正交惯性基, x, y 是参考点 G 在固定标准正交惯性基 $\{0, I_1, I_2\}$ 中的坐标。

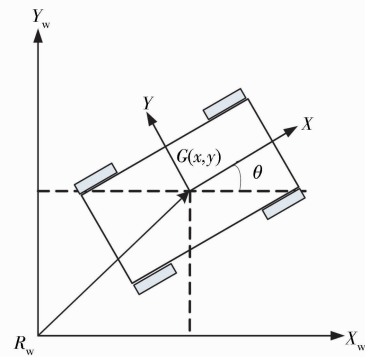


图4 机器人四轮运动简化模型

Fig. 4 The simplified four-wheel motion model

这样,在平面内机器人的位置可以描述为:

$$OP = xI_1 + yI_2 \quad (1)$$

机器人的位姿可以通过三个变量构成的姿态坐标向量 ξ 来描述:

$$\xi = (x, y, \theta)^T \quad (2)$$

以标准旋转矩阵表示为:

$$R(\theta) = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

其变换算子为: $R = \text{Tans}(x, y, 0) \text{Rotz}(\theta)$, 展开得:

$$R = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 & x \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 & y \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

设,在机器人坐标系上一点 $P(x_p, y_p, 0, 1)^T$, 那么在世界坐标系下的齐次坐标为:

$$W_p = R(\theta)P = \begin{bmatrix} x_p \cos\theta - y_p \sin\theta + x \\ x_p \sin\theta + y_p \cos\theta + y \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

2.1.2 运动学模型

设平台左右轮的轮距为 W_y , 前后轴的轴距为 L_x ; 将机器人重心近似地看作位于车体的几何中心。设 $\dot{x}, \dot{y}, \dot{z}$ 表示机器人的运动速度; $\dot{\theta}$ 表示机器人重心转动的角速度, 则有机器人平台的绝对速度为:

$$\begin{cases} \dot{X} = \dot{x}\cos\theta - \dot{y}\sin\theta \\ \dot{Y} = \dot{x}\sin\theta + \dot{y}\cos\theta \\ \dot{Z} = 0 \end{cases} \quad (6)$$

以矩阵形式表示为:

$$\begin{bmatrix} \dot{X} \\ \dot{Y} \\ \dot{Z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{bmatrix} = \mathbf{R}(\theta) \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{bmatrix} \quad (7)$$

对式(7)微分, 得到机器人平台的绝对加速度为:

$$\begin{cases} \ddot{X} = \ddot{x}\cos\theta - \dot{x}\sin\theta\dot{\theta} - \ddot{y}\sin\theta - \dot{y}\cos\theta\dot{\theta} \\ \ddot{Y} = \ddot{x}\sin\theta + \dot{x}\cos\theta\dot{\theta} - \ddot{y}\cos\theta + \dot{y}\sin\theta\dot{\theta} \\ \ddot{Z} = 0 \end{cases} \quad (8)$$

即:

$$\begin{bmatrix} \ddot{X} \\ \ddot{Y} \\ \ddot{Z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x} - \dot{y}\dot{\theta} \\ \ddot{y} + \dot{x}\dot{\theta} \\ 0 \end{bmatrix} = \mathbf{R}(\theta) \begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中, $[a_x, a_y, 0]^T$ 代表机器人在固定坐标系下的沿 x 轴、 y 轴和 z 轴方向的加速度。

2.1.3 转向运动分析

在轮式运动模式时, 主要考虑机器人的定位与路径规划等问题, 所以需要对于机器人的前进、后退、转弯等运动学进行分析。由于采用差动驱动方式, 所以依照一般的差动驱动式机器人几何模型来进行分析其速度表达式。

如图5所示, R 为驱动轮的半径, V_L 和 V_R 表示机器人左右轮的驱动速度, ω_L 和 ω_R 为各自的角速度。

根据机器人的几何关系及其运动约束关系, 可以得出机器人平台中沿两个坐标轴方向的速度:

$$\begin{cases} \dot{X} = \frac{(V_R + V_L)}{2} \cos\theta \\ \dot{Y} = \frac{(V_R + V_L)}{2} \sin\theta \end{cases} \quad (10)$$

机器人在做转向运动时, 在转向的任一瞬间, 都

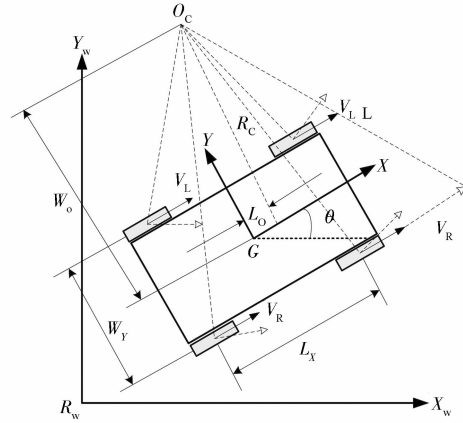


图5 轮式差速运动分析模型

Fig. 5 The roller differential motion analysis model

可以看作是机器人绕某一垂直轴线作旋转运动, 该轴线在地面上的投影为一个点就是瞬时转动中心, 记为 O_C , 其转向半径为 R_C :

$$R_C = \frac{W(V_L + V_R)}{2(V_R - V_L)} \quad (11)$$

于是可以得到机器人轮式模式运动时其重心 G 沿 x 轴、 y 轴方向上的速度和机器人平台的旋转角度。其位姿向量为:

$$\xi = \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{R(\omega_L + \omega_R)}{2} \\ x_C \dot{\theta} \\ \frac{R(\omega_R - \omega_L)}{W} \end{bmatrix} \quad (12)$$

在固定世界坐标系下, 平台的速度为:

$$\begin{bmatrix} \dot{X} \\ \dot{Y} \\ \dot{Z} \end{bmatrix} = \mathbf{R}(\theta) \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{bmatrix} \quad (13)$$

在固定世界坐标系下, 平台的加速度为:

$$\begin{bmatrix} \ddot{X} \\ \ddot{Y} \\ \ddot{Z} \end{bmatrix} = \mathbf{R}(\theta) \begin{bmatrix} \ddot{x} - \dot{y}\dot{\theta} \\ \ddot{y} + \dot{x}\dot{\theta} \\ 0 \end{bmatrix} = \mathbf{R}(\theta) \begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ 0 \end{bmatrix} \quad (14)$$

由上述分析可知, 不同的速度差可以得到不同的转向半径。通过以上运动学分析, 求出机器人运动时的实际转速, 以便进行电机速度的驱动控制。

2.2 履带模式的运动学分析

履带运动模式下, 最主要的问题是履带滑动转向问题所引起的控制和能耗问题, 所以重点探讨其转向运动学问题。

在图6中, 设转向轴线 O_C 到底盘纵向对称面的垂直距离为 R_C , 称为理论转向半径, 以 V_L, V_C, V_R 分

别表示转向时相对于底盘上 O_L 、 O 、 O_R 三点的运动速度。

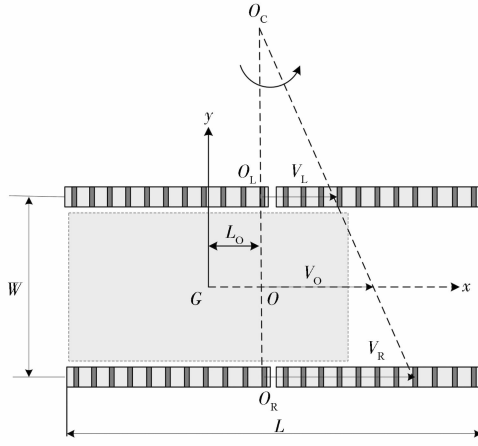


图6 履带模式转向运动学分析

Fig. 6 Caterpillar pattern steering kinematics analysis

当考虑在履带模式下的滑移、滑转特性时,以 V_s 表示其由于滑转造成的速度差,则有:

$$V_s = \left(\dot{x} \pm \frac{W}{2} \dot{\theta} \right) - R\omega \quad (15)$$

则其滑转率系数 δ 为:

$$\delta = \frac{V_s}{R\omega} = \frac{\left(\dot{x} \pm \frac{W}{2} \dot{\theta} \right) - R\omega}{R\omega} \quad (16)$$

设 V_{sL} 、 V_{sR} 分别代表机器人转动过程中履带旋转内侧和外侧相对于地面的滑转、滑移驱动速度之差,用 ω_L 、 ω_R 分别代表内、外侧履带旋转驱动的角速度。则其滑转率系数为:

$$\delta_L = \frac{V_{sL}}{R\omega_L} = \frac{\left(\dot{x} - \frac{W}{2} \dot{\theta} \right) - R\omega_L}{R\omega_L} \quad (17)$$

$$\delta_R = \frac{V_{sR}}{R\omega_R} = \frac{\left(\dot{x} + \frac{W}{2} \dot{\theta} \right) - R\omega_R}{R\omega_R} \quad (18)$$

于是可以得到机器人履带模式运动时沿 x 轴、 y 轴方向上的速度和机器人平台的旋转角度。其位姿向量为:

$$\xi = \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\omega_L R(1 + \delta_L) + \omega_R R(1 + \delta_R)}{2} \\ -\dot{x}\sigma \\ \frac{\omega_R R(1 + \delta_R) - \omega_L R(1 + \delta_L)}{W} \end{bmatrix} \quad (19)$$

式(19)中, $\sigma = \tan\alpha = \frac{-\dot{y}}{\dot{x}}$ 为侧滑角系数。

在固定世界坐标系下,平台的速度为:

$$\begin{bmatrix} \dot{X} \\ \dot{Y} \\ \dot{Z} \end{bmatrix} = R(\theta) \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{bmatrix} \quad (20)$$

在固定世界坐标系下,平台的加速度为:

$$\begin{bmatrix} \ddot{X} \\ \ddot{Y} \\ \ddot{Z} \end{bmatrix} = R(\theta) \begin{bmatrix} \ddot{x} - \dot{y} \cdot \dot{\theta} \\ \ddot{y} + \dot{x} \cdot \dot{\theta} \\ 0 \end{bmatrix} = R(\theta) \begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ 0 \end{bmatrix} \quad (21)$$

由上述分析可知,不同的速度差可以得到不同的转向半径。如果一侧被制动(如 $V_L = 0$),则其转向半径为 $W/2$;当 $V_L = -V_R$ 时, $R_C = 0$ 。可以通过以上的运动学分析,求出机器人运动时的实际转速,以便进行电机速度的驱动控制。

2.2.1 腿式模式下坐标系的建立

其简化模型可如图7所示。

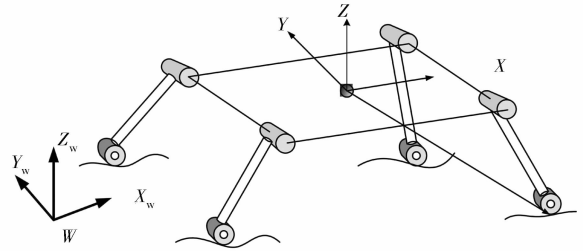


图7 轮腿运动简化模型

Fig. 7 Simplified model wheel of leg movement

从机器人的摆臂配置可以明显地看出,主动驱动摆动角度 $\{\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3\}$ 可以完全控制各个轮子在平面内与环境的接触情况。为分析问题方便,在其初始位置的姿态配置下,假定前后两对摆臂的角度位置相同。在此基础上,首先给出机器人平台的相关坐标系定义,整个系统共有三个不同的坐标系,分别描述如下:

$R_w = (X_w, Y_w, Z_w)$ 表示一个任意的被固定在运动环境中的世界坐标系;

$R = \{G, X, Y, Z\}$ 表示带有平台重心 G 的固定在机器人平台的机器人坐标系; G 表示机器重心。

2.2.2 轮-地接触点坐标

通过控制机器人各个摆臂的关节角位置以达到控制机器人姿态的目的。而在确定其姿态时,轮子与地面的相互作用是关键的因素,所以需要对轮-地接触点进行建模与分析。

定义轮-地接触点的局部坐标系,如图8所示, P_i 表示车轮与地面的第 i 个接触点 ($i = 1, 2, 3, 4$); W_i 是垂直于接触平面切线方向的法向向量; U_i 是第 i 个车轮的切线方向; $V_i = W_i \times U_i$,则由此三个互相垂直的向量构成机器人轮-地接触点的局部坐

标系, $R_i = (P_i, U_i, V_i, W_i)$ 并满足右手法则。

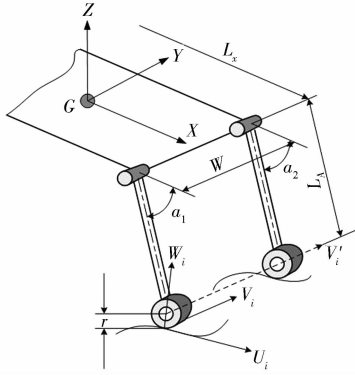


图8 轮腿参数模型

Fig. 8 Wheel leg parameter model

同样可以知道,如果设沿第 i 个轮子轴线方向的单位向量为 V'_i , 那么有:

$$U_i = \frac{W_i \times V'_i}{\|W_i \times V'_i\|} \quad (22)$$

局部坐标系的 V_i 方向始终与平台坐标系的 Y 方向一致,而 U_i 和 W_i 方向始终位于与平台坐标系 $R = \{G, X, Y, Z\}$ 的坐标平面 XGZ 平行的局部坐标系坐标平面 $U_i P_i W_i$ 中。

于是,每一个轮-地接触点 P_i 的位置 (x_i, y_i, z_i) 可以表示为:

$$\begin{cases} x_i = \pm \frac{L_x}{2} + L_A \cos \alpha_i \\ y_i = \pm \frac{W}{2} \\ z_i = -(L_A \sin \alpha_i + r) \end{cases} \quad (23)$$

对于一定的机器人来说,参数 L_x, W, L_A, r 为常量, α_i 为控制变量。

2.3 轮腿模式下机器人的姿态表达

在腿式运动模式下研究的重点将是机器人与环境的交互、机器人的环境适应能力以及通过主动控制机器人的姿态达到改善运动特性的目的等方面的研究。

任意刚体在空间方位的姿态描述不仅要表示在空间某个点的位置,而且需要表示物体的方位 (orientation)。最常用的方法是 3×3 的方向余弦矩阵 R 和 4×4 的位姿矩阵。虽然用方向余弦法作为坐标系之间的映射和作为点的运动算子都得到广泛的应用,但是方向余弦矩阵对描述物体在空间的姿态不是很方便。一方面,要计算多达 9 个参数,另一方面它很难直观地形成物体在空间的具体方位,物理意义不明确。结合机器人平台在腿式运动时空姿态的表示需要,我们采用 RPY 法来表示其空间姿态。在机器人的运动分析过程中,我

们希望能够及时地知道物体在空间的姿态,以便于实时地实现其姿态控制。采用该方法不仅能够较好地表示出物体的姿态,而且直观形象,便于进行机构的运动分析。

机器人平台车体 B 相对于世界坐标系的方位参数通过三个角度来描述,为保持符号表示的一致,特定义如下:

绕 X 轴的旋转角度为横滚角 (Roll) ϕ ;

绕水平轴 Y 的旋转为俯仰角 (Pitch) ψ ;

绕铅垂轴 Z 旋转为偏转角 (Yaw) θ , 如图 9 所示。

则绕各个轴的旋转矩阵分别为:

$$\text{Rot}(z, \theta) = \begin{bmatrix} C_\theta & -S_\theta & 0 \\ S_\theta & C_\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (24)$$

$$\text{Rot}(y, \psi) = \begin{bmatrix} C_\psi & 0 & S_\psi \\ 0 & 1 & 0 \\ -S_\psi & 0 & C_\psi \end{bmatrix} \quad (25)$$

$$\text{Rot}(x, \phi) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & C_\phi & -S_\phi \\ 0 & S_\phi & C_\phi \end{bmatrix} \quad (26)$$

式中, S 表示 \sin , C 表示 \cos 。

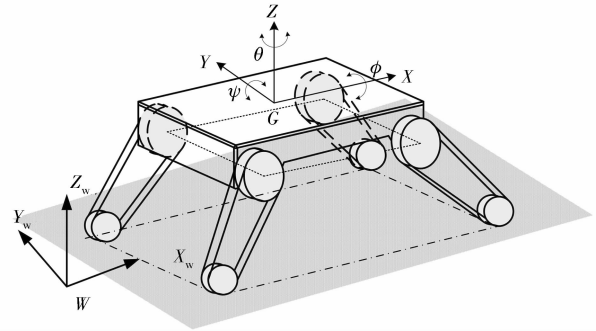


图9 机器人平台姿态描述

Fig. 9 The robot platform attitude

于是,用 RPY 表示横滚、俯仰和偏转三个旋转的组合所构成的旋转矩阵, Rot 表示机器人车体的姿态。

$$\begin{aligned} RPY(\phi, \psi, \theta) &= \text{Rot}(z, \theta) \text{Rot}(y, \psi) \text{Rot}(x, \phi) = \\ &= \begin{bmatrix} C_\theta & -S_\theta & 0 \\ S_\theta & C_\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_\psi & 0 & S_\psi \\ 0 & 1 & 0 \\ -S_\psi & 0 & C_\psi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & C_\phi & -S_\phi \\ 0 & S_\phi & C_\phi \end{bmatrix} = \\ &= \begin{bmatrix} C_\theta & -S_\theta & 0 \\ S_\theta & C_\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_\psi & S_\psi S_\phi & S_\psi C_\phi \\ 0 & C_\phi & -S_\phi \\ -S_\psi & C_\psi S_\phi & C_\psi C_\phi \end{bmatrix} = \end{aligned}$$

$$\begin{bmatrix} C_\theta C_\psi & -S_\theta C_\phi + C_\theta S_\psi S_\phi & S_\theta S_\phi + C_\theta S_\psi C_\phi \\ S_\theta C_\psi & C_\theta C_\phi + S_\theta S_\psi S_\phi & -C_\theta S_\phi + S_\theta S_\psi C_\phi \\ -S_\psi & C_\psi S_\phi & C_\psi C_\phi \end{bmatrix} \quad (27)$$

3 结语

本文描述了一种轮腿式机器人在不同运动模式下的运动学问题,建立了其运动学模型。通过分析可以看出,由于不同的模式导致其运动不再是简单的姿态向量,另外还包含了机器人车体中的俯仰、横滚乃至偏转角,包含了车体相对于运行地面的位置以及两侧摆臂相对于车体和摆臂之间的方位、距离等信息。该运动学模型的建立,为轮腿式机器人在不同运动模式下的运动控制奠定了基础。

参 考 文 献

- 1 Lee W, Kang S, Kim M. ROBHAZ-DT3: teleoperated mobile platform with passively adaptive double-track hazardous environment applications. Proc of IROS. Sendai, 2004;33—38
- 2 Lee C H, Kim S H, Kang S C, *et al.* Double-track mobile robot for hazardous environment applications. The International Journal of the Robotics Society of Japan Advanced Robotics, 2003; 17 (5): 447—459
- 3 Hirose S, Fukushima E F. Design of terrain adaptive versatile crawler vehicle HELI20S-VI. Proc of Int Conf on ICRA, Seoul, 2001; 1540—1545
- 4 Huang Q, Kenji K, Kazunito Y, *et al.* Balance control of a biped robot combing off-line pattern with real-time modification. Proc IEEE Int Conf Robotics and Automation, 2000;3346—3352
- 5 Matthies L, Xiong Y, Hogg R, *et al.* A portable, autonomous, urban reconnaissance robot. Robotics and Autonomous Systems, 2002;40: 163—172
- 6 Halme A, Leppänen I, Salmi Y, *et al.* Development of workpartner-robot-design of actuating and motion control system. Research Applies AI to Computer Animation, 2004;(7): 2—5
- 7 Grand C, BenAmar F, Plumet F, *et al.* Decoupled control of posture and trajectory of the hybrid wheel-legged robot hylos. Proc of the IEEE Int Conf on Robotics & Automation, 2004; 5111—5116
- 8 Chol B J, Sreenivasan S V. Motion planning of a wheeled mobile Robot with slip-free motion capability on a smooth uneven surface. Proc of the IEEE International Conference on Robotics & Automation, 1998; 3727—3732
- 9 段星光,黄 强,李科杰. 小型轮履腿复合式机器人设计及运动特性分析. 机械工程学报,2005;41 (8):108—114
Duan Xingguang, Huang Qiang, Li Kejie. Miniature wheel-track-legged mobile robot. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2005; 41 (8):108—114
- 10 段星光,黄 强,李京涛. 多模式运动的小型地面移动机器人设计与实现. 中国机械工程,2007;12(1): 8—12
Duan Xingguang, Huang Qiang, Li Jingtao. Design and implementation of a small ground mobile robot with multi-locomotion modes. China Mechanical Engineering, 2007;12(1):8—12
- 11 田海波,方宗德,周 勇,等. 轮腿式机器人倾覆稳定性分析与控制. 机器人,2009; 31(2):159—165
Tian Haibo, Fang Zongde, Zhou Yong, *et al.* Analysis and control for tumble stability of wheel-legged robots. Robot, 2009;31(2) 159—165
- 12 田海波,方宗德,古玉锋. 轮腿式机器人越障动力学建模与影响因素分析. 机器人,2010;32(3):390—397
Tian Haibo, Fang Zongde, Gu Yufeng. Dynamic modeling for obstacle negotiation of wheel-legged robot and analysis on its influential factors. Robot, 2010;32(3):390—397
- 13 罗 洋,李奇敏,温皓宇. 一种新型轮腿式机器人设计与分析. 中国机械工程,2013;24(22):3018—3022
Luo Yang, Li Qimin, Wen Haoyu. Design and analysis of a new kind of wheel-legged rover. China Mechanical Engineering, 2013; 24(22):3018—3022

Kinematic Modeling of Wheel-legged Robot with Multi-locomotion Modes

XU Yan¹, WU Li-xun¹, DUAN Xing-guang^{2*}

(Hebei Normal University¹, Shijiazhuang 050024, P. R. China; Beijing Institute of Technology², Beijing 100081, P. R. China)

[Abstract] Aiming at the moving requests of the miniature mobile robot under the environment of indoors and outdoors, a miniature track-wheel-legged mobile robot with multiple moving modes such as wheeled, tracked and legged locomotion was designed. Kinematic modeling is described and kinematic equations are derived based on its legged mode, which can supply a theoretic base of coupled posture control of stability and traction optimization of HWLV mobile robot, building the coupled optimization criteria, and realizing the coupled optimization with the posture control.

[Key words] mobile robot wheel-legged robot multi-locomotion modes kinematic modeling