

带 Mecanum 轮的移动机器人全向移动控制研究

刘 磊, 许晓鸣

(上海理工大学 管理学院, 上海 200093)

摘 要 分析了一种配有 Mecanum 轮移动机器人的全向控制方法. 该方法有效的控制了 Mecanum 轮机器人平台, 对实验对象输入的导航参量设定值 (X 、 Y 方向的平移速度与转动角度) 转化为机器人各轮的控制转速设定值, 并通过机器人本体仿真模块对电机以及机器人模型的仿真解算, 得到机器人的实际位姿状况. 再反解出移动机器人的实际导航参量, 用于机器人的导航位姿闭环控制.

关键词 Mecanum 轮; 移动机器人; 软件仿真; 闭环控制

Research on omni directional control of Mecanum wheel mobile robot

LIU Lei, XU Xiao-ming

(Business School, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract This paper designs an method to implement the control of Mecanum wheel mobile robot. This method can transfer the navigation parameter setting value (velocity in X and Y axis direction and revolution angle) to controlling speed setting value of all wheels of robot, simulate the motor and robot model with the robot simulation module, and get the actual position and orientation status of robot. The actual navigation parameters can also be analyzed and used for navigation position and orientation close-loop control of robot.

Keywords Mecanums wheel; mobile robot; software simulation; close loop control

1 引言

Mecanum 轮这一设计方法是由 Bengt Ilon 在 1973 年设计的. 其在平面上可以实现前后、左右和自转 3 个自由度的运动. 称为全方位移动机构^[1]. 如图 1 所示. 所属 Mecanum 轮轮体的圆周分布了许多鼓形小辊子. 这些辊子的外廓线与轮子的理论圆周相重合, 并且辊子能自由旋转, 辊子的轴线与轮的轴线通常成 45 度角^[2-5].

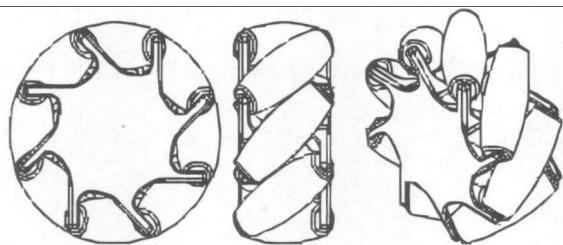


图 1 Mecanum 轮示意图

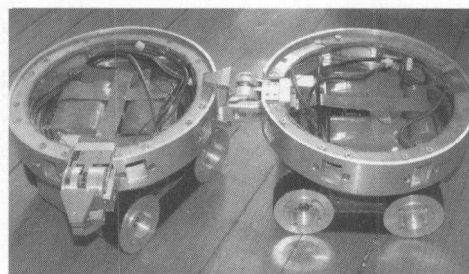


图 2 研究制造的群移动机器人

已设计制造了一群移动机器人, 移动方式采用的是履带, 如图 2 所示. 该群机器人可以通过机械手与另外的机器人腰带进行连接, 从而组成更大型的刚性机器人. 在连接的过程中, 采用履带机构不能实现机器人的全方位移动, 使得机器人在连接过程中首先要转向定位, 然后才能直线前进与另外的机器人进行机械手对接, 然后如果想要朝非机械手连接方向拖动被连接的机器人, 就需要借助机器人转台使机器人机械手的朝向

收稿日期: 2011-05-12

资助项目: 国家自然科学基金 (91024026); 上海市科委与地方院校能力建设项目 (10550500800)

作者简介: 刘磊 (1982-), 男, 博士研究生, E-mail: some_liu@hotmail.com.

与行进方向偏离才能实现. 在这个过程中需要消耗大量时间, 如果机器人采用的是全方位移动机构, 就可以直接进行机器人连接, 连接后也可直接向任何方向拖动, 从而可提高群体工作效率 [6].

本文即是先从系统的角度对 Mecanum 轮机构进行控制仿真, 获取设计参数, 为群机器人 Mecanum 轮全向移动机构的改造提供理论基础.

2 方案介绍

本方案是一套机器人目标导航自主避障仿真系统的一部分. 该系统可实现 Mecanum 轮全向机器人目标导航、安全避障的目的, 用以开发合适的群机器人导航算法.

2.1 功能介绍

系统包括机器人运行环境, 机器人仿真程序两部分: 运行环境部分提供了机器人的运行地图. 机器人仿真程序分别模拟了机器人雷达, 避障算法, 机器人运动控制仿真. 初始化后, 读取地图数据, 存入地图结构体, 供机器人仿真雷达使用, 雷达仿真根据机器人的绝对位姿, 把地图数据转化为一般机器人机载激光雷达或超声波雷达的数据形式供机器人导航避障模块使用, 机器人导航避障模块把雷达数据转换为机器人的速度与方向数据, 该数据最后推动机器人运动控制仿真模块, 产生机器人绝对位姿的变化, 新的机器人位姿又会产生新的雷达数据. 周而复始, 最终实现机器人的导航避障仿真.

2.2 方案框架

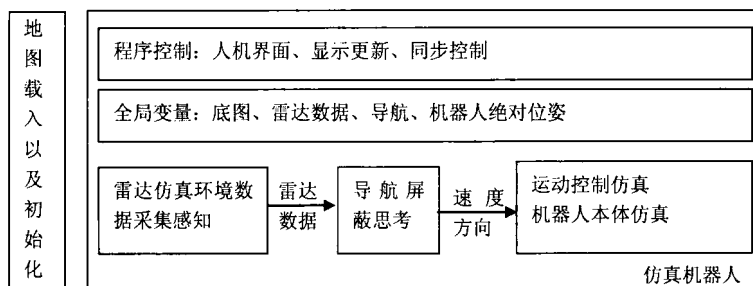


图 3 系统结构框架

该系统的框架结构如图 3 所示, 本文所提到的 Mecanum 轮移动机器人的全向控制方法即为图 3 所示的运动控制仿真模块, 该模块实现了把导航参量的设定值 (机器人 x 方向与 y 方向的速度以及机器人的朝向角度) 通过解算, 转化为机器人的 4 轮电机设定值, 并输入到机器人本体仿真模块中, 利用系统动力学仿真出机器人位姿的真实值, 最后实现运动的闭环控制. 在这个过程中可以调节得出机器人本体硬件参数以及运动控制器的参数.

3 Mecanum 轮全向移动原理

由图 4 所示带 Mecanum 轮的全向移动机构各方向移动的情况 [1], 辊子排列的方法是: 左前轮左旋, 右前轮右旋, 左后轮右旋, 右后轮左旋, 轮中的小斜线表示与地面接触的辊子的轴线方向. 每个轮都由一直流电机独立驱动, 通过四轮的转速适当组合, 可以实现机器人在平面上三自由度的全方位移动. 四 Mecanum 轮组成的机器人本体的受力与运动分析如图中所示, 其中 F_a 为轮子滚动时与地面接触的辊子所受到的轴向摩擦力; F_r 为辊子做从动滚动时受到的滚动摩擦力 (相比于 F_a 较小, 可忽略); ω 为各轮转动的角速度量. 推动机器人移动的主要动力为底面摩擦力 F_a . 由于 F_a 为斜向, 所以每个轮子不但有 Y 轴方向速度, 也同时具有了 X 轴方向的速度, 这是形成全向运动的关键.

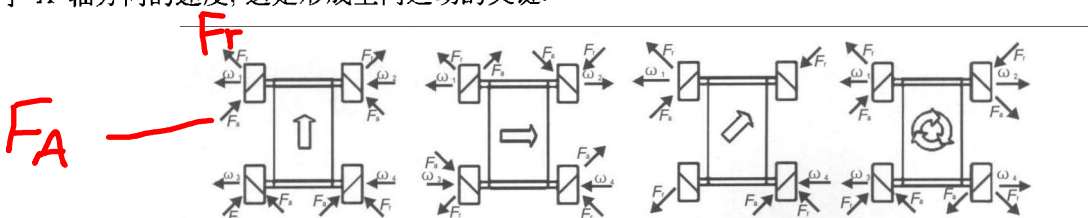


图 4 带 Mecanum 轮的全向移动机构各方向移动的情况

4 运动控制模型

本文所提到的 Mecanum 轮移动机器人的全向控制方法的运动控制模型为接收自主避障模块所产生的导航参量, 经过运动控制以及运动解算可得到机器人的绝对位姿供给雷达仿真模块使用, 以便在新的导航周期与地图环境互动, 产生新的雷达数据.

4.1 运动控制框架

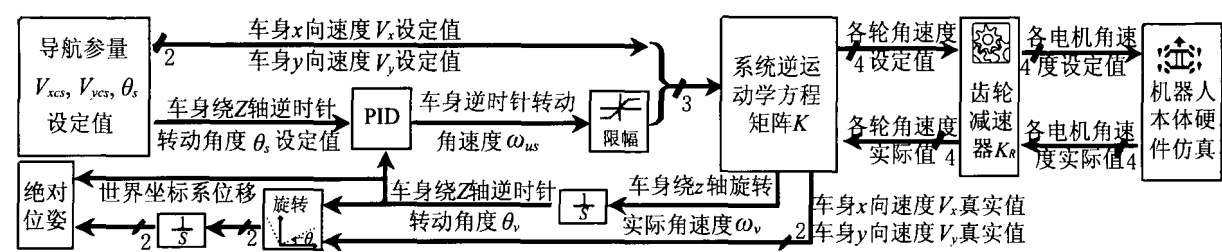


图 5 运动控制框架

运动控制模型的程序框架如图 5 所示, 导航参量的设定值为机器人车身坐标系 X 轴方向速度 V_{xcs} , Y 轴方向速度 V_{ycs} , 以及世界坐标系下机器人绕 z 轴逆时针转动角度 θ (航向角度). 该控制模块程序首先对机器人航向角度 θ 设定值做 PID 闭环控制, 使得机器人的实际转角与设定值保持一致. PID 控制器控制量是机器人转动的航向角速度. 该控制量经过限幅(即控制量不超过机器人最大的转动角速度)与车身速度 V_{xcs} , V_{ycs} 一起构成机器人的导航速度向量 $[V_{xcs}, V_{ycs}, \omega_s]$. 构建四 Mecanum 轮机器人的逆运动学方程矩阵 K , 与该矩阵相乘, 可将导航速度向量转化为四个轮子的角速度向量 $[\omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4]$. 知道电机减速器的减速比, 轮子的角速度与电机的角速度可以互相推导. 将导航参量的设定值所解算出的各电机角速度设定值输入机器人本体硬件仿真模块, 就可以得到各电机角速度的实际值. 经过逆运动学方程矩阵 K 的反解, 得到实际车身速度以及车身导航角速度的真实值. 该角速度经过积分得到机器人在世界坐标系下的航向角度 θ 的实际值, 对车身速度实际值 $[V_{xcv}, V_{ycv}]$ 向量顺时针旋转 θ 实际值, 得到世界坐标系下的 x 轴方向, y 轴方向速度的实际值. 经过积分得到世界坐标系下的位移坐标 [7].

pwm测TIM5电机 ω 表

4.2 运动控制模型的计算步骤

导航角度 PID 控制器传递函数为:

$$\omega_{us} = k_{p\theta} \left[(\theta_s - \theta_v) + \frac{\theta_s - \theta_v}{T_{i\theta} \cdot S} + T_{d\theta} \cdot (-\dot{\theta}_v) \cdot S \right],$$

ω_{us} 为设定角速度控制量, θ_s 为导航角度设定值, θ_v 为导航角度真实值, $k_{p\theta}$ 为导航角度 PID 控制器的比例系数, $T_{i\theta}$ 为积分常数, $T_{d\theta}$ 为微分常数. 对 ω_{us} 进行限幅运算, 得到导航角速度的设定量 ω_s .

$$\omega_s = \begin{cases} \omega_{\max}, & \omega_{us} > \omega_{\max} \\ \omega_{us}, & \omega_{\min} < \omega_{us} < \omega_{\max} \\ \omega_{\min}, & \omega_{us} < \omega_{\min} \end{cases}$$

设系统逆运动学方程矩阵为 K (下节有详细的计算), 可由当行参量沿车身 X 轴方向的速度 V_{xcs} , 沿车身 Y 轴方向的速度 V_{ycs} , 以及由上述 PID 控制器得出的导航角速度设定量 ω_s . 得出机器人个轮的转速, 逆运动学方程为:

$$K \begin{bmatrix} V_{xcs} \\ V_{ycs} \\ \omega_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \omega_{w1s} \\ \omega_{w2s} \\ \omega_{w3s} \\ \omega_{w4s} \end{bmatrix},$$

其中, $\omega_{w1s}, \omega_{w2s}, \omega_{w3s}, \omega_{w4s}$ 分别为 4 个 Mecanum 轮的设定转速. 由轮转角速度设定值经过减速器可得到各驱动电机转动角速度的设定值:

$$K_R \begin{bmatrix} \omega_{w1s} \\ \omega_{w2s} \\ \omega_{w3s} \\ \omega_{w4s} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \omega_{m1s} \\ \omega_{m2s} \\ \omega_{m3s} \\ \omega_{m4s} \end{bmatrix},$$

K_R 为电机减速机的减速比, $\begin{bmatrix} \omega_{m1s} \\ \omega_{m2s} \\ \omega_{m3s} \\ \omega_{m4s} \end{bmatrix}$ 为 4 个电机角速度设定值.

电机角速度设定值经过机器人本体硬件仿真后会得到电机角速度的真实值. 通过减速器, 可得到各轮角速度的真实值:

$$K_R \begin{bmatrix} \omega_{w1v} \\ \omega_{w2v} \\ \omega_{w3v} \\ \omega_{w4v} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \omega_{m1v} \\ \omega_{m2v} \\ \omega_{m3v} \\ \omega_{m4v} \end{bmatrix}.$$

由系统逆运动学方程矩阵为 K 求解机器人的真实导航参量 $[V_{xcv} \ V_{ycv} \ \omega_v]$. 对 ω_v 积分 $\theta_v = \frac{\omega_v}{S}$, 得到机器人航向角度的实际值 θ_v . 为得到机器人在地图上的具体坐标, 需要对机器人坐标系下的实际导航速度转化为世界坐标系下的速度分量 $[V_{xv}, V_{yv}]$. 要经过旋转变换:

$$\begin{bmatrix} V_{xv} \\ V_{yv} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_v) & \sin(\theta_v) \\ \sin(\theta_v) & -\cos(\theta_v) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{xcv} \\ V_{ycv} \end{bmatrix}.$$

对世界坐标系下的机器人速度进行积分, 可得机器人在世界坐标系下的坐标, 即机器人的绝对位置 $[X, Y]$.

$\begin{bmatrix} X \\ Y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{xv} \\ V_{yv} \end{bmatrix} \cdot \frac{1}{S}$. 机器人绝对姿态即为 θ_v .

4.3 运动方程解算

Mecanum 轮机器人运动控制模型的核心即是要得到逆运动学方程矩阵 K , 该阵可以把导航速度向量映射到四轮角速度向量上. 即对模型输入导航参量 (沿 X 轴的速度, 沿 Y 轴的速度, 绕 Z 轴的角度), 模型输出机器人四个电机的转动速度.

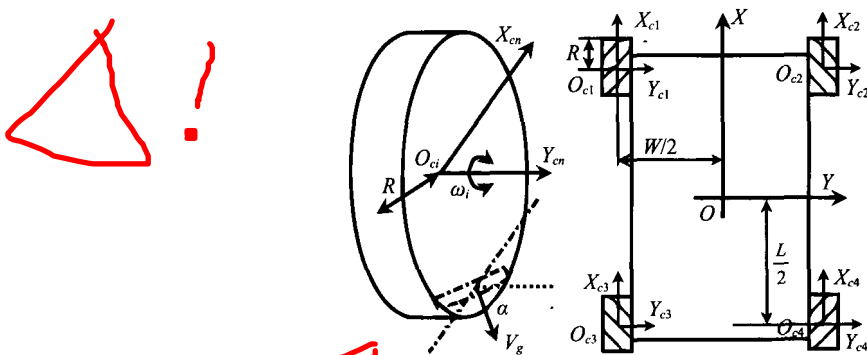


图 6 运动方程建模

如图 6 所示, 为机器人的一个 Mecanum 轮, α 为辊子的螺旋角, 其中左旋 α 为 45 度, 右旋 α 为 -45 度. 图 6 所显示的为左旋 Mecanum 轮, 该轮的角速度为 ω_i , 轮子底部示意了与地面接触的辊子, 由于该辊子的存在, 使得该轮产生了侧滑现象. 侧滑速度为 V_g . 设轮子沿 X_{cn} 轴方向的速度和沿 Y_{cn} 轴方向的速度分别为 V_{xn} 和 V_{yn} , 轮子半径为 R .

$$V_{xn} = V_g \cdot \cos \alpha, \quad V_{yn} = \omega_i \cdot R - V_g \cdot \sin \alpha.$$

由此可得

$$\omega_n = \frac{V_{xn} \cdot \tan \alpha + V_{yn}}{R}, \quad V_{xn} = V_x - \omega \cdot Y_{ocn}, \quad V_{yn} = V_y + \omega \cdot X_{ocn}.$$

其中, V_x, V_y 为机器人沿车身 X 方向, Y 方向的导航速度, ω 为机器人逆时针旋转的导航角速度. 其中 X_{oci}, Y_{oci} 的值分别为:

左前轮: $i = 1$, 左旋 $\alpha = 45$ 度, $X_{oc1} = -W/2, Y_{oc1} = L/2$, 右前轮: $i = 2$, 右旋 $\alpha = -45$ 度, $X_{oc2} = W/2, Y_{oc2} = L/2$, 左后轮: $i = 3$, 右旋 $\alpha = -45$ 度, $X_{oc3} = -W/2, Y_{oc3} = -L/2$, 右后轮: $i = 4$, 左旋 $\alpha = 45$ 度,

$X_{oc4} = W/2, Y_{oc4} = -L/2$. 可得, 逆运动学方程:

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{R} & \frac{1}{R} & -\frac{L+W}{2R} \\ -\frac{1}{R} & \frac{1}{R} & \frac{L+W}{2R} \\ -\frac{1}{R} & \frac{1}{R} & -\frac{L+W}{2R} \\ \frac{1}{R} & \frac{1}{R} & \frac{L+W}{2R} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_x \\ V_y \\ \omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ \omega_3 \\ \omega_4 \end{bmatrix}$$

5 机器人本体仿真

如图 7 所示, 该软件模块接收各电机速度的设定值, 采用 PID 闭环反馈控制电机速度, 控制电压经过限幅通过电机产生扭矩驱动 Mecanum 轮移动平台模块, 得到实际各轮的角速度, 该实际值将反馈给 PID 控制模块, 同时返回到上级模块用于计算机器人的实际位姿。

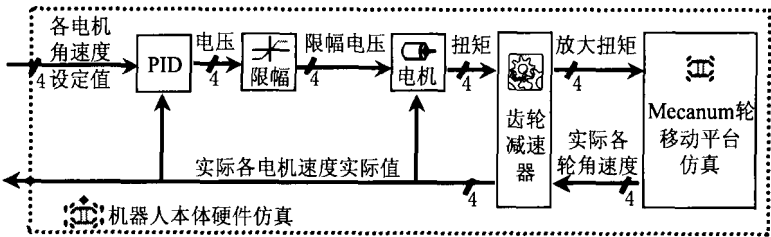


图 7 机器人本体硬件仿真框图

5.1 控制器与电机仿真

电机控制器采用 PID 控制方式设定合理的 K_p, T_i, T_d 系数, 得到较理想的控制效果. 控制器结构如图 8 所示. 电机仿真公式:

$$T_n = V_n - k\omega_{mnv}$$

V_n 为控制电压, ω_{mnv} 为电机实际转速, k 为常数. n 为 1 到 4 的整数. 控制限幅器为:

$$U_n = \begin{cases} U_{\max}, & \text{当 } U_{un} > U_{\max} \\ U_{un}, & \text{当 } U_{\min} < U_{un} < U_{\max} \\ U_{\min}, & \text{当 } U_{un} < U_{\min} \end{cases}$$

其中 U_n 为第 n 个电机的控制电压, U_{\max} 为正向电压最大值, U_{\min} 为反向电压最大值, U_{un} 为第 n 个电机 PID 控制器直接输出的控制电压, 其中 n 为 1 到 4 的整数. 电机减速器同上节所述.

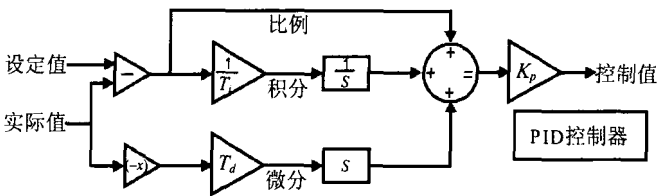


图 8 PID 控制器结构

5.2 Mecanum 轮移动平台仿真

Mecanum 轮移动平台仿真程序框架如图 9 所示.

如 10 图所示, 辊子所受轴向摩擦力 F_a 向 X 轴, Y 轴产生的分力 $[F_{axn}, F_{ayn}]$. 大小等于输入扭矩除以轮半径. 如图所示的 ω_n 方向为各个轮子角速度的正方向, 其产生的效果为机器人顺时针旋转. 根据所产生的摩擦力 F_a 在 X 轴, Y 轴方向的分量, 分别对移动平台 X 方向, Y 方向移动, 以及车体逆时针转动的贡献可由如图 9 所示的 3×4 的矩阵表示. 经过该矩阵变换可把各轮摩擦力转化为沿车身 X 轴, Y 轴方向的分力以及绕车中心逆时针转动的扭矩 (假设平台重心与平台中心相互重合). 其中, X 轴, Y 轴方向的分力除以机器人质量得到沿车身 X 轴, Y 轴加速度, 绕车中心逆时针转动的扭矩除以转动惯量得到机器人航向角加速度 ω' . 经过两次积分, 分别得到机器人航向角速度 ω 与机器人航向角度 θ_v . 把沿车身 X 轴, Y 轴加速度组成的向量经过逆时针转动 θ_v , 产生世界坐标系下的加速度 $[a_x, a_y]$, 经过积分器转化为世界坐标系下的

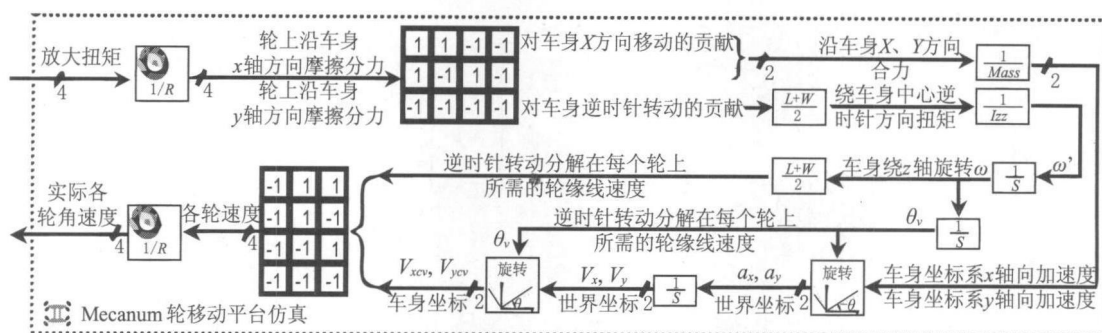


图 9 Mecanum 轮移动平台仿真程序框架

速度 $[V_x, V_y]$, 并对该向量逆时针旋转 θ_v 角, 得到沿车体 X 方向, Y 方向的速度分量 V_{xcv}, V_{ycv} . 由于机器人航向角角速度 ω 也会引起轮子在 X 轴方向、 Y 轴方向速度, 其乘以车身长宽和的一半, 并与沿车体 X 方向、 Y 方向的速度分量合并, 经过如图 9 所示 3×4 矩阵的转换, 并除以轮半径, 得到实际各轮角速度 ω_{wnv} .

5.3 Mecanum 轮移动平台仿真计算步骤

各轮所受沿机器人车身 X 、 Y 轴方向分力为: $F_{axn} = F_{ayn} = T_{wn}/R$, 其中 T_{wn} 为各轮扭矩, n 为 1 到 4 的整数, R 为车轮半径. 机器人所受 X 方向合力 F_{xc} 与所受 Y 方向合力 F_{yc} 为:

$$\begin{bmatrix} F_{xc} \\ F_{yc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_{ax1} & F_{ay1} \\ F_{ax2} & F_{ay2} \\ F_{ax3} & F_{ay3} \\ F_{ax4} & F_{ay4} \end{bmatrix}$$

机器人所受逆时针转动的转矩 T_c 为: 其中 W 为机器人车体宽度, L 为机器人车体长度.

$$T_c = \begin{bmatrix} \frac{W}{2} & \frac{W}{2} & \frac{W}{2} & \frac{W}{2} \\ \frac{L}{2} & \frac{L}{2} & \frac{L}{2} & \frac{L}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_{ax1} & F_{ay1} \\ F_{ax2} & F_{ay2} \\ F_{ax3} & F_{ay3} \\ F_{ax4} & F_{ay4} \end{bmatrix}$$

所以机器人沿车身 X 、 Y 轴方向加速度: $\begin{bmatrix} a_{xc} \\ a_{yc} \end{bmatrix} = \frac{1}{m} \begin{bmatrix} F_{xc} \\ F_{yc} \end{bmatrix}$, m 为机器人质量. 机器人绕 Z 轴逆时针转动的角加速度为: $\omega' = T_c/I_{zz}$, I_{zz} 为机器人绕 z 轴的转动惯量. 导航角速度与导航角度分别为: $\omega_v = \frac{\omega'}{S}$, $\theta_v = \frac{\omega_v}{S}$. 对加速度顺时针旋转 θ_v , 得到世界坐标系下的加速度的实际值:

$$\begin{bmatrix} a_x \\ a_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_v) & \sin(\theta_v) \\ \sin(\theta_v) & -\cos(\theta_v) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_{xc} \\ a_{yc} \end{bmatrix},$$

世界坐标系速度实际值: $\begin{bmatrix} V_x \\ V_y \end{bmatrix} = \frac{1}{S} \cdot \begin{bmatrix} a_x \\ a_y \end{bmatrix}$ 对世界坐标系实际速度逆时针旋转 θ_v , 得到沿机器人车体方向的速度:

$$\begin{bmatrix} V_{xc} \\ V_{yc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_v) & -\sin(\theta_v) \\ -\sin(\theta_v) & -\cos(\theta_v) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_x \\ V_y \end{bmatrix}.$$

各轮的线速度为

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 & -1 & 1 & 1 \\ -1 & -1 & 1 & -1 \\ -1 & -1 & -1 & 1 \\ -1 & -1 & -1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{L}{2} \cdot \omega \\ \frac{W}{2} \cdot \omega \\ V_{xc} \\ V_{yc} \end{bmatrix},$$

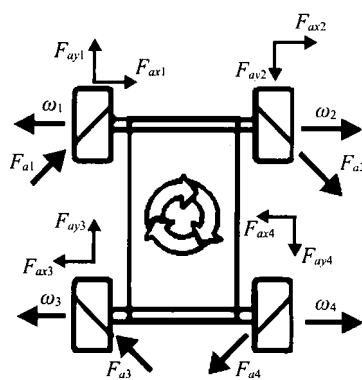


图 10 受力分析

得到个轮实际角速度为:

$$\begin{bmatrix} \omega_{w1v} \\ \omega_{w2v} \\ \omega_{w3v} \\ \omega_{w4v} \end{bmatrix} = \frac{1}{R} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \end{bmatrix}.$$

6 实验结果

由上述仿真方案, 编写仿真软件, 例子设计参数为: 轮半径 76.8mm、电机减速比: 86.3. 积分器采用龙格库塔四阶方法进行结算, 仿真时间间隔为 10 毫秒. 得到如图 11 所示的导航阶跃响应的仿真效果图. 基本在两秒内跟踪上设定值. 达到了预期的实验效果.

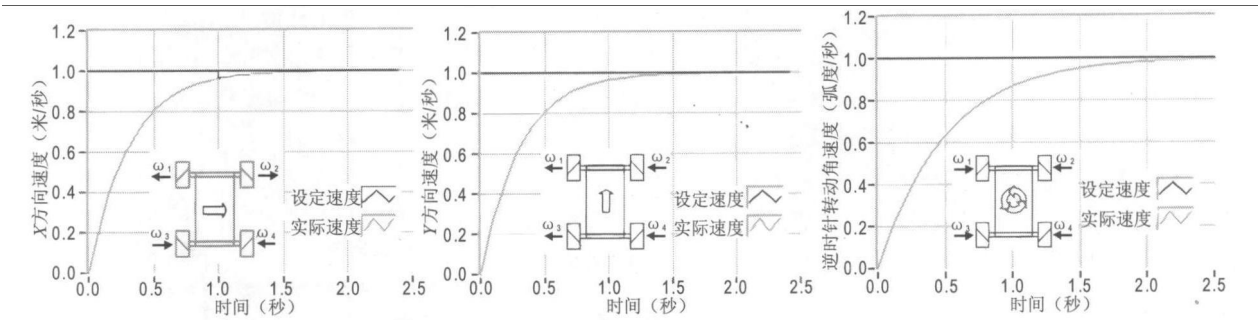


图 11 仿真 X 轴方向、Y 轴方向、逆时针转动速度效果图

7 结语

本文描述了 Mecanum 轮移动机器人的原理、控制以及仿真机理, 并得到了预期的实验效果. 机器人可以全方位导航运行, 通过仿真设计为课题组今后机器人全向改造提供了有力的理论支持.

参考文献

[1] 刘洲, 吴洪涛. Mecanum 四轮全方位移动机构运动分析与仿真 [J]. 中国制造业信息化, 2011(5): 43-45.

[2] Doroftei I, Grosu V, Spinu V. Design and control of an omni-directional mobile robot[C]// Novel Algorithms and Techniques in Telecommunications, Automation and Industrial Electronics, Springer Science+Business Media B.V., 2008: 105-110.

[3] Efendi J, Salih M, Rizon M, et al. Designing omni-directional mobile robot with Mecanum wheel[J]. American Journal of Applied Sciences, 2006, 3(5): 1831-1835.

[4] Diegel O, Badve A, Bright G, et al. Improved Mecanum wheel design for omni-directional robots[C]// IEEE International Conference on Robotics and Automation, Auckland, New Zealand, 2002: 117-121.

[5] Gfrerrer A. Geometry and kinematics of the Mecanum wheel[J]. Computer Aided Geometric Design, 2008, 25(9): 784-791.

[6] Hamner B, Koterba S, et al. An autonomous mobile manipulator for assembly tasks[J]. Autonomous Robots, 2010, 28(1): 131-149.

[7] Gurzoni Jr G A. On the construction of a RoboCup small size league team[J]. Journal of the Brazilian Computer Society, 2011, 17(1): 69-82.