

一种全方位移动机器人的运动学分析*

邓旭玥, 易建强, 赵冬斌

(中国科学院自动化所复杂系统与智能科学实验室, 北京 100080)

摘要: 介绍了本所开发的全方位移动机器人的机械结构, 分析了它的运动学模型. 并在此基础上, 讨论了几种特殊的运动方式. 最后分析了实际存在的滑动对模型的影响.

关键词: 移动机器人; 偏心万向轮; 运动学; 滑动

中图分类号: TP24

文献标识码: B

KINEMATIC ANALYSIS OF AN OMNI-DIRECTIONAL MOBILE ROBOT

DENG Xu-yue, YI Jian-qiang, ZHAO Dong-bin

(Laboratory of Complex Systems and Intelligence Science, Institute of Automation, CAS, Beijing 100080, China)

Abstract: In this paper, the mechanical structure of the omnidirectional mobile robot developed by our institute is introduced, and the kinematics analysis is presented. Then some special motions are discussed in detail, and the influence of slip on the kinematic model accuracy is analysed.

Keywords: mobile robot; off-centered omnidirectional wheel; kinematics; slip

1 引言 (Introduction)

轮式移动机器人由于其良好的稳定性、较快的移动能力等优点, 得到了广泛的应用. 通常, 如果机器人具有平面运动的全部 3 个自由度, 则称之为全方位移动机器人. 轮式全方位移动机器人的驱动系统一般由不少于 3 个偏心万向轮或瑞典轮等构成^[1]. 非全方位的轮式机器人^[4]多用差动轮系, 有时加上一至二个导向轮或随动轮来驱动. 与全方位移动机器人相比, 它在移动方向上受到一定限制.

许多学者对全方位移动机器人的运动学模型进行了分析和讨论^[1~3]. 但这些分析都建立在无限精度的基础上, 没有讨论实际存在的偏差. 本文在此处作一较为深入的探讨.

本文介绍了本所开发的全方位移动机器人(下文简称为机器人)的机械结构及运动学模型; 讨论了几种简单但方便实用的控制方式; 分析了实际运动过程中难以避免的滑动对模型精度的影响.

2 运动学模型 (Kinematic model)

本文所述机器人的驱动系统由三个偏心万向轮

构成, 其中每个轮由两个伺服电机控制: 一个滚动驱动电机和一个转向驱动电机.

下文分别以轮 1、轮 2、轮 3 表示这三个轮子. 三个轮子的俯视图如图 1 所示.

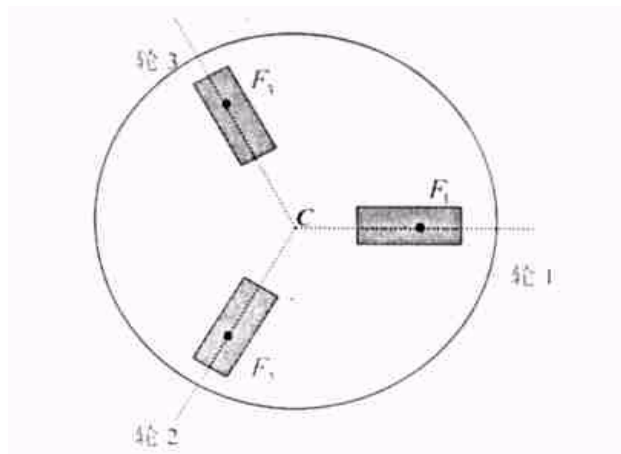


图 1 轮子的位置(俯视图)

Fig.1 Wheel positions (top view)

图 1 中, F_1 、 F_2 、 F_3 分别表示三个轮子在运动过程中相对机器人本体的不动点, 它在相应各个轮子竖直转向轴的中心轴线上. C 为机器人本体中心. 相

邻 $CF_i (i=1, 2, 3)$ 之间的夹角均为 120° , 即每个轮子在机器人本体上的位置是等同的, 而且它们的机械尺寸相同.

图 2 是轮 i (这里, $i=1, 2, 3$. 下文如无特别说明, 均是如此) 的侧视图. 此时, 轮 i 所在平面平行于 CF_i . 对任意一个轮 i 来说, 点 F_i 到机器人本体中心 C 的水平距离为 D , 偏心距为 d , 则轮子的中心 O_i 到 C 的最大水平距离均为 $D+d$ (此时轮 i 相对于机器人本体的位置定义为初始相对位置). 轮子半径均为 r , 轮子转动的角速度为 $\dot{\varphi}_i$, 以图中箭头所示方向即逆时针方向为正.

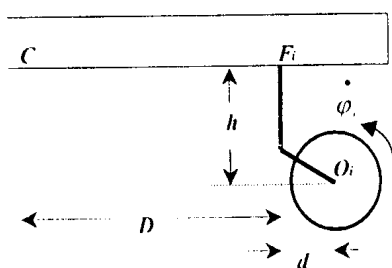


图 2 轮 i 的侧视图

Fig.2 Side view of wheel i

选定三维世界坐标系 $OXYZ$. 假定机器人在水平面上运动, 这样, 可在二维坐标系 OXY 中讨论机器人本体的运动. 如图 3 所示, 定义机器人的前方为射线 CF_1 所指的方向, 机器人的方向角为 θ , 中心点 C 的坐标为 (x, y) . 这样, 机器人的位姿可以用三个参量来表示: $\xi = (x \ y \ \theta)^T$.

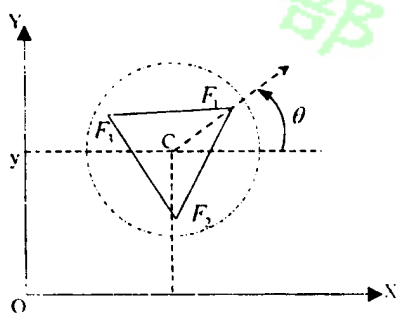


图 3 机器人本体位姿参数

Fig.3 Posture parameters of the robot base

图 4 是轮 i 在运动过程中某时刻的示意图. 图中 $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$ 分别是坐标系 $OXYZ$ 中 x 轴、 y 轴、 z 轴的单位矢量. 在世界坐标系中, 定义 CF_i 的角度为 $\alpha_i + \theta$, 轮 i 的角度为 β_i , 则 $\alpha_1 = 0, \alpha_2 = -2\pi/3, \alpha_3 = 2\pi/3$. 这里 α_i 可理解为 CF_i 偏离 CF_1 的角度.

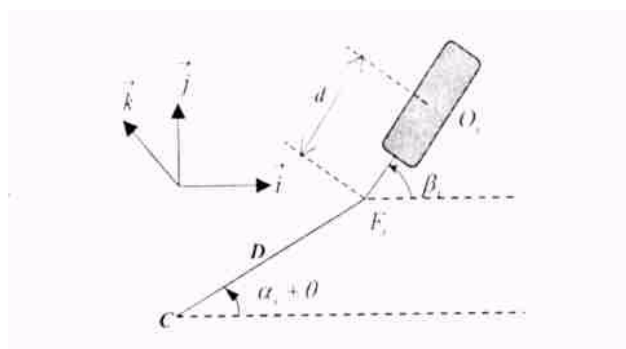


图 4 机器人的偏心轮

Fig.4 Off-centered wheel of the robot

如图 5 所示, 轮 i 在水平地面上运动; 图中 T 是轮子与地面的接触点, $O_i S$ 垂直于轮 i 所在平面.

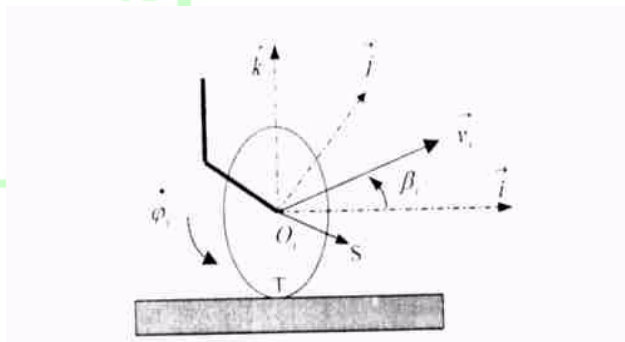


图 5 轮 i 的速度

Fig.5 Velocity of wheel i

根据刚体运动学, 有下式成立:

$$\vec{v}_T = \vec{v}_i + \dot{\varphi}_i \hat{O_i S} \times \vec{O_i T}$$

式中 $\hat{O_i S}$ 表示 $\vec{O_i S}$ 的单位矢量; $\vec{v}_T$ 表示轮 i 上 T 处的速度矢量; $\vec{v}_i$ 表示轮 i 中心 O_i 处的速度矢量. 作如下假定: 轮子在运动过程中不出现滑动, 则 $\vec{v}_T = 0$. 根据上式, 得到:

$$0 = \vec{v}_i + \dot{\varphi}_i (\vec{i} \sin \beta_i - \vec{j} \cos \beta_i) \times r(-\vec{k})$$

这样,

$$\vec{v}_i = -r\dot{\varphi}_i (\vec{i} \cos \beta_i + \vec{j} \sin \beta_i)$$

根据刚体运动学, 参照图 4 可知:

$$\vec{v}_i = \vec{v}_C + \vec{k}(\dot{\theta} + \dot{\alpha}_i) \times \vec{CF}_i + \vec{k}\dot{\beta}_i \times \vec{F_i O_i}$$

从而

$$\begin{aligned} \vec{v}_C = & \vec{v}_i - \vec{k}\dot{\theta} \times D[\vec{i} \cos(\alpha_i + \theta) + \vec{j} \sin(\alpha_i + \theta)] \\ & - \vec{k}\dot{\beta}_i [d(\vec{i} \cos \beta_i + \vec{j} \sin \beta_i) - h\vec{k}] \end{aligned}$$

其中, $\vec{v}_C$ 为机器人本体中心的速度矢量, 且有:

$$\vec{v}_C = \vec{i}\dot{x} + \vec{j}\dot{y} + \vec{k}\dot{\theta}.$$

令 $\eta = \beta - (\alpha_i + \theta)$, 它的物理意义是轮 i 相对机器人本体偏离初始位置的角度, 下文称之为轮 i 的相对方向角. 由 α_i 是常量可得 $\beta_i = \dot{\eta}_i + \theta \dot{\eta}_i$ 和 φ_i 是轮 i 的转向电机和滚动电机的转速.

根据上述内容, 有下式成立:

$$\begin{aligned} \vec{v}_C = & \vec{v}_i - \vec{k} \dot{\theta} \times [\vec{i} (D \cos(\alpha_i + \theta) + d \cos \beta) \\ & + \vec{j} (D \sin(\alpha_i + \theta) + d \sin \beta)] \\ & - \vec{k} \dot{\eta}_i \times d (\vec{i} \cos \beta + \vec{j} \sin \beta) \end{aligned}$$

将上式写为矩阵, 形式如下:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = M_{3 \times 3}(\alpha_i, \beta, \theta) \begin{bmatrix} \varphi_i \\ \eta_i \\ \theta \end{bmatrix} \quad (1)$$

或

$$\begin{bmatrix} \varphi_i \\ \eta_i \\ \theta \end{bmatrix} = N_{3 \times 3}(\alpha_i, \beta, \theta) \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中

$$\begin{aligned} M_{3 \times 3}(\alpha_i, \beta, \theta) &= \begin{bmatrix} -r \cos \beta & d \sin \beta & D \sin(\alpha_i + \theta) + d \sin \beta \\ -r \sin \beta & -d \cos \beta & -D \cos(\alpha_i + \theta) - d \cos \beta \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ N_{3 \times 3}(\alpha_i, \beta, \theta) &= \begin{bmatrix} -\frac{1}{r} \cos \beta & -\frac{1}{r} \sin \beta & -\frac{D}{r} \sin \eta \\ \frac{1}{d} \sin \beta & -\frac{1}{d} \cos \beta & -\frac{D}{d} \cos \eta - 1 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

式(1)写为:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -r \cos \beta & d \sin \beta \\ -r \sin \beta & -d \cos \beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\varphi}_i \\ \dot{\eta}_i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} D \sin(\alpha_i + \theta) + d \sin \beta \\ -D \cos(\alpha_i + \theta) - d \cos \beta \end{bmatrix} \dot{\theta}$$

两边各左乘 $[\sin \beta \quad -\cos \beta]$, 可得关于 θ 变化情形的显式表达式, 如下:

$$(D \cos \eta + d) \dot{\theta} + d \dot{\eta}_i = \dot{x} \sin \beta - \dot{y} \cos \beta \quad (3)$$

从(3)式可以看出, 如果 $\dot{\theta} \neq 0$, 单个轮子是非完整约束系统, 从而这种机器人也是非完整约束系统.

3 几种特殊的运动方式(Some special motions)

为方便起见, 定义三个列向量如下: $\varphi = (\varphi_1 \quad \varphi_2 \quad \varphi_3)^T$, $\beta = (\beta_1 \quad \beta_2 \quad \beta_3)^T$, $\eta = (\eta_1 \quad \eta_2 \quad \eta_3)^T$.

由(2)式得到

$$\dot{\varphi} = J_1(\beta, \eta) \dot{\xi} \quad (4)$$

和

$$\dot{\eta} = J_2(\beta, \eta) \dot{\xi} \quad (5)$$

其中

$$\begin{aligned} J_1(\beta, \eta) &= \begin{bmatrix} -\frac{1}{r} \cos \beta_1 & -\frac{1}{r} \sin \beta_1 & -\frac{D}{r} \sin \eta_1 \\ -\frac{1}{r} \cos \beta_2 & -\frac{1}{r} \sin \beta_2 & -\frac{D}{r} \sin \eta_2 \\ -\frac{1}{r} \cos \beta_3 & -\frac{1}{r} \sin \beta_3 & -\frac{D}{r} \sin \eta_3 \end{bmatrix} \\ J_2(\beta, \eta) &= \begin{bmatrix} \frac{1}{d} \sin \beta_1 & -\frac{1}{d} \cos \beta_1 & -\frac{D}{d} \cos \eta_1 - 1 \\ \frac{1}{d} \sin \beta_2 & -\frac{1}{d} \cos \beta_2 & -\frac{D}{d} \cos \eta_2 - 1 \\ \frac{1}{d} \sin \beta_3 & -\frac{1}{d} \cos \beta_3 & -\frac{D}{d} \cos \eta_3 - 1 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

3.1 直线或圆弧运动

从式(5)得出, 当三个轮子均不变向即 $\dot{\eta} = 0$ 时, 若要机器人运动(通过三轮的滚动, 即 $\varphi \neq 0$ 来实现), 即 $(\dot{x} \quad \dot{y} \quad \dot{\theta})^T \neq 0$, 则必须:

$$|J_2(\beta, \eta)| = 0 \quad (6)$$

式(6)要求三个轮子相互平行, 或三个轮子中心所在平面的瞬时转动中心相同, 如图 6 所示.

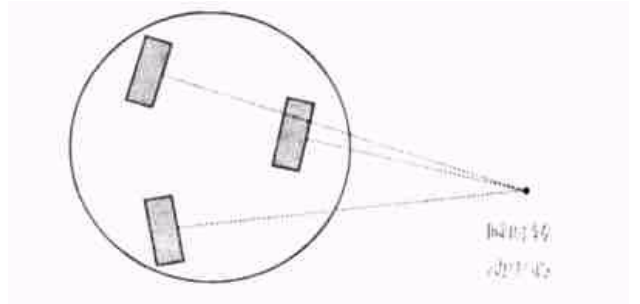


图 6 三轮瞬时转动中心重合

Fig. 6 Superposition of three wheels' instantaneous centers of rotation

这时, 驱动滚动电机, 就可以驱动机器人在直线或以瞬时转动中心为圆心的圆弧上运动, 其速度由 $\dot{\varphi}$ 决定.

3.2 本体位置不变条件下的变向

由(2)式可以得出, 当 $\dot{x} = 0$ 且 $\dot{y} = 0$ 时, 则:

$$\begin{cases} \dot{\eta}_i = (-\frac{D}{d} \cos \eta - 1) \dot{\theta} \\ \dot{\varphi}_i = (-\frac{D}{r} \sin \eta) \dot{\theta} \end{cases} \quad (7)$$

当 $\cos \eta \neq -\frac{d}{D_1}$ 时, 由式(7)可得:

$$\left\{ \begin{array}{l} \eta_i = \eta \frac{\frac{D}{d} \cos \eta + 1}{\frac{D}{d} \cos \eta + 1} \quad i = 2, 3 \\ \varphi_i = \eta \frac{\frac{D}{r} \sin \eta}{\frac{D}{d} \cos \eta + 1} \quad i = 1, 2, 3 \end{array} \right. \quad (8)$$

这表明, 以 η 为控制变量, 通过恰当地调整轮子转向和滚动的速度, 可以实现机器人本体的方向调整.

3.3 本体不变向的运动

由(4)、(5)式可以得到, 当 $\theta=0$ 即 $\theta=\theta_0$ 时,

$$\begin{bmatrix} \varphi \\ \eta \\ \varphi \\ \eta \\ \varphi \\ \eta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{r} \cos \beta & -\frac{1}{r} \sin \beta \\ \frac{1}{d} \sin \beta & -\frac{1}{d} \cos \beta \\ -\frac{1}{r} \cos \beta & -\frac{1}{r} \sin \beta \\ \frac{1}{d} \sin \beta & -\frac{1}{d} \cos \beta \\ -\frac{1}{r} \cos \beta & -\frac{1}{r} \sin \beta \\ \frac{1}{d} \sin \beta & -\frac{1}{d} \cos \beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{bmatrix} \quad (9)$$

令:

$$J_0(i) = \begin{bmatrix} -\frac{1}{r} \cos \beta & -\frac{1}{r} \sin \beta \\ \frac{1}{d} \sin \beta & -\frac{1}{d} \cos \beta \end{bmatrix}$$

由于 $|J_0(i)| = \frac{1}{rd}$, $J_0^{-1}(i)$ 总是存在, 因此:

$$\left\{ \begin{array}{l} \begin{bmatrix} \varphi \\ \eta \end{bmatrix} = J_0(2) J_0^{-1}(1) \begin{bmatrix} \varphi \\ \eta \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} \varphi \\ \eta \end{bmatrix} = J_0(3) J_0^{-1}(1) \begin{bmatrix} \varphi \\ \eta \end{bmatrix} \end{array} \right. \quad (10)$$

由式(10)可知, 只要以 φ 、 η 为控制变量, 总可以实现本体不转向的运动.

4 滑动对运动学模型的影响 (Influence of slip on the kinematic model)

在实际运动过程中, 各个电机的转速并不总是能如式(4)、(5)所描述的相互协调. 如果三个转向电机或三个滚动电机一起主动驱动, 一般来说, 将不可避免地发生滑动.

下面在本体不转向的运动即 3.3 所述情形下讨论滑动对运动学模型的影响. 作如下假设: 在理想情形下, 一个控制周期 T 中, η_i 和 φ_i 是常数 (在电机转速控制方式下, 这种假设是恰当的). 控制周期 T 从时刻 t_0 开始到时刻 t_1 结束. 在起始时刻 t_0 , 机器人位姿为 ${}^0\xi = ({}^0x {}^0y {}^0\theta)$, 轮 i 的相对方向角为 ${}^0\eta$. 在式(1)中, 令 $\eta_i = \eta$, $\varphi_i = \varphi$, $\theta=0$, 得下式:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = -r\omega \cos \beta(t) + d\dot{\varphi} \sin \beta(t) \\ \dot{y}(t) = -r\omega \sin \beta(t) - d\dot{\varphi} \cos \beta(t) \end{cases} \quad (11)$$

这时 $\beta(t) = \alpha_i + {}^0\theta + {}^0\eta + \alpha_i(t - t_0)$. 对上式(11)积分可得:

$$\begin{aligned} {}^1x &= {}^0x - \frac{r\omega}{\dot{\alpha}_i} [\sin({}^1\beta) - \sin({}^0\beta)] \\ &\quad - d[\cos({}^1\beta) - \cos({}^0\beta)] \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} {}^1y &= {}^0y + \frac{r\omega}{\dot{\alpha}_i} [\cos({}^1\beta) - \cos({}^0\beta)] \\ &\quad - d[\sin({}^1\beta) - \sin({}^0\beta)] \end{aligned} \quad (13)$$

其中

$$\begin{aligned} {}^0\beta &= \alpha_i + {}^0\theta + {}^0\eta \\ {}^1\beta &= \alpha_i + {}^0\theta + {}^1\eta \\ &= \alpha_i + {}^0\theta + [{}^0\eta + \alpha_i T] \end{aligned}$$

在实际运动过程中, 有两个主要因素导致轮子的滑动: 1) 电机转速的波动; 2) 电机达到要求速度的加速或减速过程. 下面分别讨论.

4.1 电机转速波动的影响

设 α_i 、 ω_i 的波动幅度分别不超过 $\Delta\alpha_i$ 、 $\Delta\omega_i$, 在 α_i 、 ω_i 的波动幅度保持最大的情形下, 1x 、 1y 的偏离幅度为:

$$\begin{aligned} \Delta^1x &= -r \left| \frac{\omega_i + \Delta\omega_i}{\alpha_i + \Delta\alpha_i} \sin({}^1\beta + \Delta\alpha_i T) - \frac{\omega_i}{\alpha_i} \sin({}^1\beta) \right| \\ &\quad - d[\cos({}^1\beta + \Delta\alpha_i T) - \cos({}^1\beta)] \\ \Delta^1y &= r \left| \frac{\omega_i + \Delta\omega_i}{\alpha_i + \Delta\alpha_i} \cos({}^1\beta + \Delta\alpha_i T) - \frac{\omega_i}{\alpha_i} \cos({}^1\beta) \right| \\ &\quad - d[\sin({}^1\beta + \Delta\alpha_i T) - \sin({}^1\beta)] \end{aligned}$$

当 $\Delta\alpha_i$ 、 $\Delta\omega_i$ 很小, 周期 T 较小时, 可以认为:

$$\frac{\omega_i + \Delta\omega_i}{\alpha_i + \Delta\alpha_i} \approx \frac{\omega_i}{\alpha_i}, \cos(\Delta\alpha_i T) \approx 1,$$

$$\sin(\Delta\alpha_i T) \approx \Delta\alpha_i T.$$

则有:

$$\Delta^1x = -r \frac{\omega_i}{\alpha_i} \Delta\alpha_i T \cos({}^1\beta) + d \Delta\alpha_i T \sin({}^1\beta) \quad (14)$$

$$\Delta^1 y = -r \frac{\omega_i}{q_i} \Delta q_i T \sin({}^1 \beta) - d \Delta q_i T \cos({}^1 \beta) \quad (15)$$

从上式(14)、(15)可以看出,转向电机转速的波动对运动学模型的精确性的影响比滚动电机转速的波动的影响大。

4.2 电机加速过程的影响

本文只讨论加速过程的影响.设轮*i*转向电机和滚动电机原来的转速分别为 ${}^0 q_i (< q_i)$ 、 ${}^0 \omega_i (< \omega_i)$.为简单起见,假定加速过程中加速度不变(实验证明可以作如此近似),分别为 a_{q_i} 、 a_{ω_i} .图7是轮*i*的转向电机的速度曲线图。

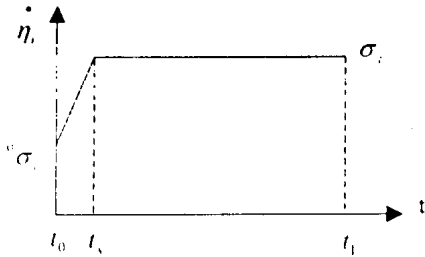


图7 轮*i*转向电机的速度曲线

Fig.7 Velocity graph of wheel *i* steering motor

这样,在加速阶段 $t_0 \rightarrow t_s$,式(11)修正为:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = -\eta_i^0 \omega_i + a_{\omega_i}(t - t_0) \cos \beta(t) \\ \quad + d[{}^0 q_i + a_{q_i}(t - t_0)] \sin \beta(t) \\ \dot{y}(t) = -\eta_i^0 \omega_i + a_{\omega_i}(t - t_0) \sin \beta(t) \\ \quad - d[{}^0 q_i + a_{q_i}(t - t_0)] \cos \beta(t) \end{cases} \quad (16)$$

其中

$$\beta(t) = q_i + {}^0 \theta + {}^0 \eta + {}^0 q_i(t - t_0) + \frac{1}{2} a_{q_i}(t - t_0)^2.$$

直接对式(16)积分是很困难的.由于最终目的是求出 ${}^1 x$ 、 ${}^1 y$ 偏离幅度的范围,并不要求准确的数值,因此,在计算过程中,可作如下简化:在 $t_0 \rightarrow t_s$

时,转向电机和滚动电机的转速分别为 $\frac{q_i + {}^0 q_i}{2}$ 、

$\frac{\omega_i + {}^0 \omega_i}{2}$,依据式(16)及(11),积分可得:

$$\begin{aligned} {}^1 x &= {}^0 x - r \frac{q_i + {}^0 q_i}{q_i + {}^0 q_i} [\sin({}^s \beta) - \sin({}^0 \beta)] \\ &\quad - r \frac{\omega_i}{q_i} [\sin({}^1 \beta) - \sin({}^s \beta)] \\ &\quad - d \cos[\cos({}^1 \beta) - \cos({}^0 \beta)] \end{aligned}$$

$${}^1 y = {}^0 y + r \frac{q_i + {}^0 q_i}{q_i + {}^0 q_i} [\cos({}^s \beta) - \cos({}^0 \beta)]$$

$$\begin{aligned} &+ r \frac{\omega_i}{q_i} [\cos({}^1 \beta) - \cos({}^s \beta)] \\ &- d[\sin({}^1 \beta) - \sin({}^0 \beta)] \end{aligned}$$

其中

$$\begin{aligned} {}^s \beta &= q_i + {}^0 \theta + {}^s \eta \\ &= q_i + {}^0 \theta + \left[{}^0 \eta + \frac{q_i + {}^0 q_i}{2} (t_s - t_0) \right] \end{aligned}$$

则

$$\Delta^1 x = r \left(\frac{\omega_i + {}^0 \omega_i}{q_i + {}^0 q_i} - \frac{\omega_i}{q_i} \right) [\sin({}^0 \beta) - \sin({}^s \beta)] \quad (17)$$

$$\Delta^1 y = r \left(\frac{q_i + {}^0 q_i}{q_i + {}^0 q_i} - \frac{q_i}{q_i} \right) [\cos({}^s \beta) - \cos({}^0 \beta)] \quad (18)$$

从式(17)、(18)可以看出:增大加速度,从而减少 $t_s - t_0$ 进而减小 ${}^s \beta$ 与 ${}^0 \beta$ 的差别;减小滚动电机的转速,都有助于减小滑动的影响。

5 结论 (Conclusion)

本文根据刚体运动学,分析了一种全方位移动机器人的运动学模型,并讨论几种特殊但实用的运动方式.参照实际情形,分析了在控制驱动电机转速的方式下,实际存在的滑动对模型精确性的影响,并得出了一些有助于减小滑动影响的结论。

参考文献 (References)

- [1] Campion G, Bastin G, D'Andrea Novel B. Structural properties and classification of kinematic and dynamic models of wheeled mobile robots[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1996, 12(1): 47 - 62.
- [2] Yi B J, Kim W K. The kinematics for redundantly actuated omnidirectional mobile robots[A]. Proceedings of the 2000 IEEE International Conference on Robotics & Automation[C]. 2000. 2485 - 2492.
- [3] Jung M J, Kim J H. Mobility augmentation of conventional wheeled bases for omnidirectional motion[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 2002, 18(18): 81 - 87.
- [4] 李艳,林廷圻,高峰.一种3自由度自动导引车的运动学建模与仿真[J].系统仿真学报, 2003, 15(4): 479 - 481.

作者简介:

邓旭玥(1979-),男,博士生.研究领域:机器人.

易建强(1963-),男,博士,研究员,博士生导师.研究领域:机器人,智能控制.

赵冬斌(1972-),男,博士,副研究员.研究领域:机器人,智能控制.