

文章编号: 1002-0446(2004)03-0198-06

非时间参考的移动机器人路径跟踪控制*

王栋耀, 马旭东, 戴先中

(东南大学自动控制系, 江苏 南京 210096)

摘要: 基于非时间参考的思想提出了一种移动机器人路径跟踪控制方法. 首先选择移动机器人实际路径在某参考系下的 x 轴投影作为非时间参考量, 并针对一类几何路径的跟踪建立移动机器人非时间参考的运动学模型, 据此设计以恒定速度跟踪期望路径的控制律, 然后在此基础上给出跟踪任意几何路径的分段控制策略. 此跟踪控制系统所采用的参考量为非时间量, 摆脱了时间因素的影响, 因此能提高移动机器人在不确定环境中的跟踪能力. 仿真和物理实验表明了控制方法的有效性.

关键词: 非时间参考; 路径跟踪; 运动学模型; 移动机器人

中图分类号: TP24 **文献标识码:** B

Non time Based Path Tracking Control for Mobile Robots

WANG Dong-yao, MA Xu-dong, DAI Xian-zhong

(Department of Automatic Control, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: In this paper a non-time based approach is proposed for a mobile robot to track paths. Firstly the x -axis projection of the mobile robot's actual path in some reference frame is selected as the non-time reference based on which for a kind of geometric paths the kinematics model of the mobile robot is built and the corresponding tracking control law with constant velocity is designed, then the strategy of tracking any geometric path is presented. Since the tracking system is based on the non-time reference and is immune to the time factor, its tracking capability in the uncertain environment can be improved. Simulation and experiment results are given to demonstrate the effectiveness of proposed method.

Keywords: non-time reference; path tracking; kinematics model; mobile robot

1 引言 (Introduction)

移动机器人是一个典型的非完整性约束系统, 这类系统的跟踪控制吸引了研究人员的广泛研究. 有关移动机器人的跟踪技术已有许多成果, 如用动态反馈线性化^[1]、Lyapunov 方法^[2]等方法实现移动机器人的跟踪控制. 这些方法大都将跟踪的期望轨线或路径视为时间的函数^[3], 在时间域内对问题进行求解, 使所得到的控制律依赖于时间. 然而, 在实际的移动机器人跟踪过程中, 可能存在各种外界干扰, 如动态障碍或能量不足等紧急突发事件, 移动机器人需要在相应处理后继续进行路径跟踪. 在这些情况下, 基于时间参考的控制往往会失去跟踪能力, 因为该路径规划器的输出在跟踪过程中断后就会失去意义. 若要恢复路径的跟踪, 在某些情况下需要付

出较大的代价^[4].

产生上述问题的根源是系统采用时间作为参考自由变量, 时间相对于路径跟踪问题来说显得过于“自由”, 而与系统的运行状态不相关, 从而导致系统的规划和控制不协调. 针对时间参考控制的不足, Ning Xi 等^[5]提出了基于非时间参考的控制思想, 引入其它非时间的运动参考量代替时间量, 由于这类参考量依赖于机器人的传感信息和执行任务^[5], 因此在此类控制系统中基于非时间参考量规划的期望值也依赖于系统的状态, 从而能提高系统在不确定性环境中的作业能力^[4].

相对于时域控制器的设计, 非时间参考控制器设计的难点在于非时间参考量的选取. Ning Xi 等^[5]首先设计“基于时间”的控制器, 然后利用 STR(state

* 基金项目: 国家 863 计划资助项目(2001 AA422260).

收稿日期: 2003-10-08

to reference) 映射将“基于时间”的控制器转换成非时间参考的控制器. 这种方法的实现较为复杂, 不易找到合适的 STR 映射. 文献[4]对机械手的运动采用其移动距离作为非时间参考量进行路径的规划和 PD 控制器的设计, 但仅实现了空间点到点的运动控制, 没有考虑曲线跟踪等复杂情况. 本文针对移动机器人的路径跟踪, 选择其实际路径在某一参考系下的 x 轴投影作为非时间参考量, 给出了一种简单有效的跟踪控制器设计方法. 该方法首先在非时间参考域内针对一类几何路径设计路径跟踪控制器, 然后利用分段的方式给出了任意几何路径的跟踪策略, 仿真和物理实验验证了该方法的有效性.

2 非时间参考的路径跟踪问题描述 (Description of non time based path tracking problem)

对于具有非完整性约束的移动机器人, 其动力学特性可由下列微分方程描述:

$$\begin{cases} \dot{x} = v \cos \theta \\ \dot{y} = v \sin \theta \\ \dot{\theta} = \omega \end{cases} \quad (1)$$

其中, v 和 ω 分别是移动机器人的平移速度和转动速度, 为控制变量; (x, y) 为移动机器人在运动平面上的笛卡儿坐标系中的位置坐标, θ 为移动机器人相对于 x 轴的姿态角.

假定移动机器人的轮子不存在滑动, 移动机器人所受的非完整性约束方程如下:

$$x \sin \theta - y \cos \theta = 0 \quad (2)$$

在上述微分方程中, 时间是自由变量 (free variable).

定义一个非时间的参考标量 s , 为一时间 t 的单调递增函数, 即有 $s = S(t)$, $S(t) > 0$, 例如, S 可取为机器人走过的路径长度等. 则对于非时间参考量 s , 移动机器人的动力学特性可描述如下:

$$\begin{cases} \frac{dx}{ds} = \frac{dx}{dt} \frac{dt}{ds} = \frac{\dot{x}(t)}{S(t)} \Big|_{t=S^{-1}(s)} \\ \frac{dy}{ds} = \frac{dy}{dt} \frac{dt}{ds} = \frac{\dot{y}(t)}{S(t)} \Big|_{t=S^{-1}(s)} \\ \frac{d\theta}{ds} = \frac{d\theta}{dt} \frac{dt}{ds} = \frac{\dot{\theta}(t)}{S(t)} \Big|_{t=S^{-1}(s)} \end{cases} \quad (3)$$

借助于文献[3]的路径跟踪描述, 基于非时间参考的移动机器人的跟踪问题可以描述如下: 对于任意给定的几何路径 $f(x, y) = 0$, 寻找反馈控制律 U

$= (v, \omega)^T = (v(s), \omega(s))^T$, 使系统(3)沿期望的几何路径运动, 即对任意给定的 $\xi > 0$, 存在 $S > 0$, 使得当 $s > S$ 时有 $f(x(s), y(s)) < \xi$.

显然, 由于 S 是时间 t 的单调递增函数, 此反馈控制律在时间域中也满足: 对任意给定的 $\xi > 0$, 存在 $T > 0$, 使得当 $t > T$ 时有 $f(x(t), y(t)) < \xi$.

3 非时间参考的跟踪控制器设计 (Design of non time based tracking controller)

首先对期望路径作如下假设:

①移动机器人所要跟踪的期望路径 $f(x, y) = 0$ 可表示成 y 相对于 x 的单值函数, 即: $y = g(x)$, $x \in [0, +\infty)$.

②函数 $y = g(x)$, $x > 0$, 存在二阶导数 $g''(x)$, 且满足 $|g''(x)| < \infty$.

说明: 对于假设①, 若期望路径函数可以表示成 x 相对于 y 的单值函数, 由对称性可知这类情况和①相似. 同时若期望路径的起始点的 x 轴坐标不为 0, 则可通过平移路径曲线使其等于 0. 对于有限长度的路径曲线可对其在 x 轴正向进行解析延拓. 对于假设②, 即要求期望路径上的任何一点 p^d (除起始点外) 的曲率 $c(p^d)$ 可求, 此点上期望平移速度 $v(p^d)$ 和期望转动速度 $\omega(p^d)$ 存在如下关系:

$$\frac{\omega(p^d)}{v(p^d)} = c(p^d) \quad (4)$$

选择移动机器人实际路径在 x 轴的投影作为非时间参考量, 即 $s = x(t)$, 如图 1 所示.

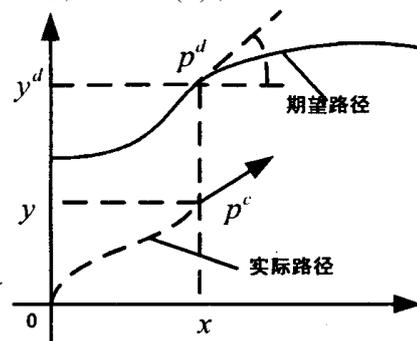


图 1 移动机器人路径跟踪示意图

Fig.1 Path tracking of the mobile robot

由 $\dot{x}(t) = v(t) \cos \theta(t)$ 可以得到, 只要 $v(t) > 0$ 且 $\theta(t) \in (-\pi/2, \pi/2)$, 则 $\dot{s} > 0$, 满足非时间参考变量的条件. 期望跟踪路径可以描述为 $y = g(s)$. 同时移动机器人的路径跟踪系统可以描述为如下的二阶系统:

$$\begin{cases} \frac{dy}{ds} = \tan \theta(s) \\ \frac{d\theta}{ds} = \frac{\omega(s)}{v(s) \cos \theta(s)} \end{cases} \quad (5)$$

假定移动机器人以恒定的平移速度 v_d 跟踪期望路径,则需要寻求移动机器人转动速度 ω 的反馈控制律.首先说明其中的一些变量: $y_d(s)$ 为 s 参考量下路径曲线上期望点在 y 轴的投影值, $\theta_d(s)$ 是路径曲线上期望点的切线与 x 轴正向的夹角,也即移动机器人的期望姿态角. $\omega_d(s)$ 是期望点处的期望转动速度,其计算公式为: $\omega_d(s) = v_d(s) c(s) = v_d c(s)$, $v_d(s)$ 、 $c(s)$ 分别为期望点处的期望移动速度和曲率.

定义移动机器人的路径跟踪误差为 $d = y(s) - y_d(s)$.令 $x_1 = d$, $x_2 = \dot{d}$, 状态方程为:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = \frac{d}{ds} \left| \frac{d(y(s) - y_d(s))}{ds} \right| \\ = \frac{\omega(s)}{v(s) \cos^3 \theta(s)} - \frac{\omega_d(s)}{v_d(s) \cos^3 \theta_d(s)} \end{cases} \quad (6)$$

同文献[3,6]的方法相似,令 ω 控制律如下:

$$\omega(s) = v(s) \cos^3 \theta(s) (-k_1(y(s) - y_d(s)) - k_2(\tan \theta(s) - \tan \theta_d(s))) + \frac{v(s) \cos^3 \theta(s) \cdot \omega_d(s)}{v_d \cos^3 \theta_d(s)} \quad (7)$$

其中常数 $k_1 > 0$, $k_2 > 0$, 得到:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = -k_1 x_1 - k_2 x_2 \end{cases} \quad (8)$$

由于 $k_1 > 0$, $k_2 > 0$, 根据控制理论,状态 x_1 、 x_2 是渐近稳定的,即保证 $\lim_{s \rightarrow \infty} x_1 = 0$, $\lim_{s \rightarrow \infty} x_2 = 0$.由 $x_2 = \tan \theta(s) - \tan \theta_d(s)$ 可知,移动机器人的位置渐近收敛到期望的路径上,并且其运动方向正好为期望路径的切线方向.

说明:假设移动机器人的初始姿态角度 $\theta(0) \in (-\pi/2, \pi/2)$ (若不满足此假设,可以首先控制机器人转动使 $\theta(0) \in (-\pi/2, \pi/2)$), 由 ω 的表达式可知,当机器人的姿态角度 $\theta(s) = \pi/2 \pm k\pi$ ($k = 0, 1, 2, \dots$) 时有 $\omega(s) = 0$, 此时机器人不再改变姿态角度.理想条件下,移动机器人的姿态角不可能超越 $\pi/2$ 和 $-\pi/2$, 也即 $\theta(s) \in [-\pi/2, \pi/2]$. 但对于一个实际的移动机器人系统,由于其机械机构和地面状况等因素,越过 $\pi/2$ 和 $-\pi/2$ 这两个边界是完全可能的.这种情况下非时间参考量 s 的逆将不存在.同时由式(5)和式(7)可以看出,系统存在一类奇异点,即 $\theta(s) = \pi/2$ 或 $-\pi/2$. 当移动机器人的运动

方向与 x 轴正向的夹角大于或等于 $\pi/2$ 时,在上述控制律下系统的参考变量 s 将停止变化甚至减少,这时机器人无法再跟踪期望路径.这两种情况的处理方法是给系统施加特殊的控制量,当机器人的姿态角度 $\theta(s) \geq \pi/2$ 时,使 ω 的值并不为零,即当 $\theta(s) \geq \pi/2$, $\omega(s) = -\omega_c$; 当 $\theta(s) \leq -\pi/2$, $\omega(s) = \omega_c$, ω_c 为正的常数.当机器人的姿态角度回到区间 $(-\pi/2, \pi/2)$ 后,又恢复成(7)式的控制量.事实上,只要移动机器人的初始状态在期望路径附近,且期望路径没有特别剧烈的变化,系统的状态一般不会出现上述两种情况^[3].

对于任意的几何路径,可以首先将此任意几何路径按下述原则进行分段,然后对每一段都采用上述方法进行跟踪控制,以前一段路径跟踪结束时机器人的状态作为下一段路径跟踪的初始状态.路径划分的原则如下:

(1) 路径上一阶导数不存在的点是分界点,即路径上不光滑的点是分界点.

(2) 划分后的每一段,在通过坐标旋转平移变换后能够满足假设①②.

(3) 路径划分的段数尽量少.

如对于圆路径 $x^2 + y^2 = r^2$, 可以分为3段,每一段在通过坐标的旋转变换后都可表示为 $y = \sqrt{r^2 - x^2}$, $-\sqrt{3}/2 r \leq x \leq \sqrt{3}/2 r$. 在几何路径分段跟踪过程中,若前一段路径跟踪结束时机器人的姿态角在经过旋转平移变换后不在 $(-\pi/2, \pi/2)$ 区间内,则需要对机器人进行相应的控制以使其姿态角位于 $(-\pi/2, \pi/2)$ 区间内.

4 仿真与实验 (Simulation & experiments)

4.1 仿真结果

针对上述控制方法,首先采用 MATLAB 对移动机器人系统进行数字仿真研究.由于移动机器人的转动速度一般都有一个最大值 ω_{\max} , 因此对上述控制律进行限幅控制,即有:

$$\begin{cases} \omega(s) = \omega_{\max}, & \text{若 } \omega(s) > \omega_{\max} \\ \omega(s) = \omega_{\max}, & \text{若 } -\omega_{\max} \leq \omega(s) \leq \omega_{\max} \\ \omega(s) = -\omega_{\max}, & \text{若 } \omega(s) < -\omega_{\max} \end{cases} \quad (9)$$

在实验中, ω_{\max} 取为每秒 60° , 即 1.047 弧度/秒.在 MATLAB 仿真中,控制器的采样周期设为 $T = 10 \text{ ms}$, 参数 $k_1 = k_2 = 9.0$, 移动机器人在跟踪过程中的平移速度 $v_d = 0.4 \text{ m/s}$. 分别对正弦曲线路径 $y = 0.5 \sin 2x - 1$ 以及圆曲线路径 $x^2 + y^2 = r^2$ (其中 $r =$

1.5 m) 的跟踪进行仿真实验,得到图 2、图 3 的曲线.

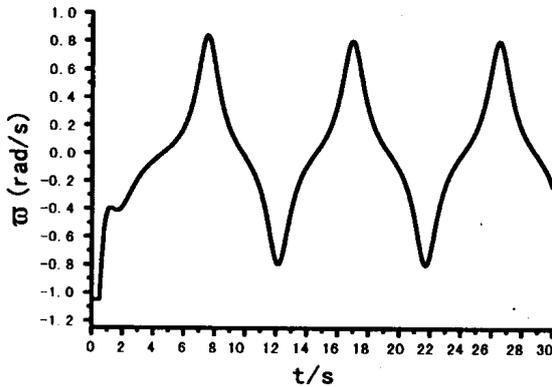


图 2(a) 正弦曲线跟踪时 ω 的曲线

Fig.2(a) The control parameter ω of sinr path tracking

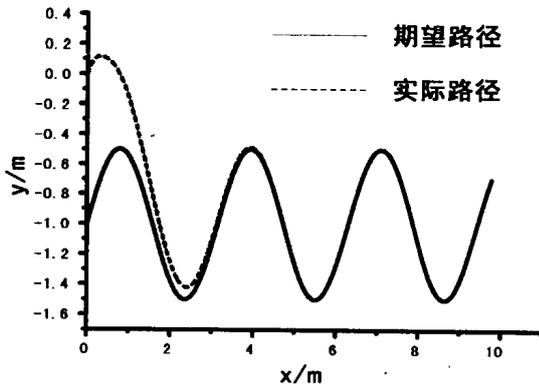


图 2(b) 正弦曲线跟踪效果图

Fig.2(b) Tracking results of sinr path

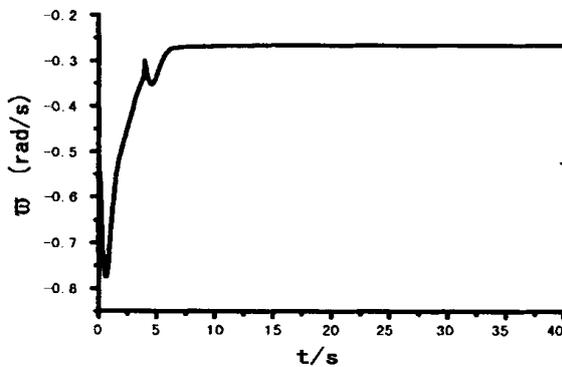


图 3(a) 圆路径跟踪时 ω 的曲线

Fig.3(a) The control parameter ω of circle-path tracking

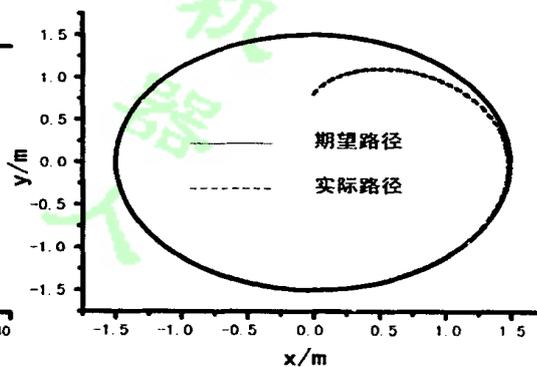


图 3(b) 圆路径跟踪效果图

Fig.3(b) Tracking results of circle-path

图 2(a) 是移动机器人从初始状态 $(0, 0, \pi/4)$ 出发,跟踪正弦曲线 $y = 0.5\sin 2x - 1$ 时控制量 ω 的变化曲线图,图 2(b) 则是跟踪效果图.图 3 是移动机器人从初始状态 $(0, 0.8, \pi/3)$ 出发跟踪圆曲线路径的控制量 ω 的变化曲线图和跟踪效果图(对于圆路径,将其分为 3 段进行跟踪).

从多次仿真实验看出, k_1 、 k_2 的取值对系统的收敛性有较大的影响,若其取值使式(8)系统的特征根存在虚部,则在跟踪的开始阶段会存在振荡的过程,如图 4(a)所示,其中 $k_1 = 9.0$, $k_2 = 1.0$.同时对于如圆这样的分段路径,机器人的初始位置误差相对于分段长度来说,一般不宜过大,否则较难收敛到期望路径,如图 4(b)所示,其中期望圆路径的半径为 0.4 m,而机器人的初始位置为 $(0, 1.0, 0)$.

4.2 实验结果

上述仿真是在较为理想的条件下进行的,在移动机器人跟踪的过程中没有考虑不确定事件的发生.将此控制方法应用于 Pioneer2-DX 机器人,这种

机器人具有两个差分驱动的车轮,每个车轮都装有位置编码器以计算机器人的位置.控制算法通过设置机器人的平移速度和转动速度来控制其运动.同时机器人装备有声纳测距仪,在实验中用来检测移动机器人正前方的障碍物.机器人的控制周期是 100 ms,最大转动速度设置为 $60^\circ/\text{s}$,路径跟踪的速度设为 300 mm/s,控制器的参数 $k_1 = 4.0$ 、 $k_2 = 5.0$.在实验过程中,对机器人施加两种干扰,一是动态障碍,二是随机让机器人中断跟踪,执行其它任务.同样,让机器人跟踪正弦曲线路径 $y = 0.5\sin 2x - 1$ 和圆曲线路径 $x^2 + y^2 = r^2$ ($r = 1.5 \text{ m}$).

如图 5 所示,移动机器人从初始状态 $(0, 0, 0)$ 开始跟踪正弦路径,期间机器人在 25s 遇到动态障碍(人).当移动机器人通过声纳测距仪检测到正前方有障碍物时,则逐渐减速直至在 28s 停止运动,而在 48s 当前方障碍物消失后又恢复控制以跟踪路径.由图 5(b)可以看出,机器人跟踪路径的效果没有受到太大的影响.图 5(a) 给出了上述过程中控制律 ω

以及 x 、 y 的变化曲线图,在静止区内,机器人的相关状态都停止变化.因此在静止区之后系统无需对

期望路径的跟踪进行重新规划,减轻了计算负担.

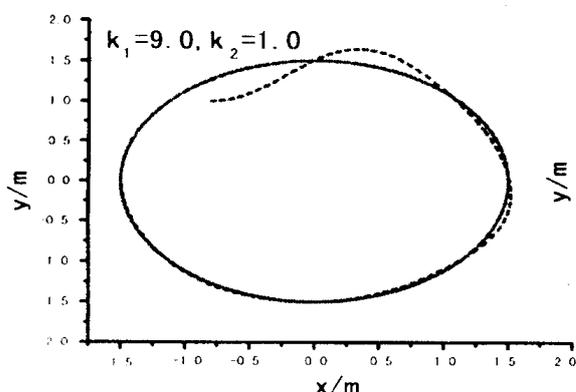


图 4(a) 存在振荡过程跟踪图
Fig.4(a) The tracking with oscillation process

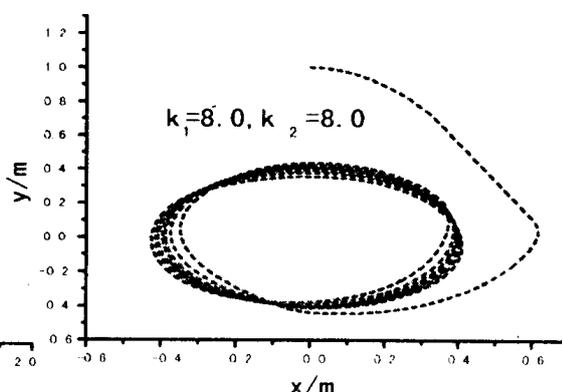


图 4(b) 初始位置过远跟踪图
Fig.4(b) The tracking with over-far starting position

在图 6 中,移动机器人从初始状态(0,0.8,0)开始跟踪圆路径,在 30s 给移动机器人发送命令以中断机器人的跟踪,让机器人执行其它动作.实验中让机器人执行圆周运动,即图中的小圆圈,在 50s 机器人接着进行中断前的路径跟踪控制.由图 6(b)可知,跟踪有较为满意的结果.机器人在恢复跟踪之后出现一段稍大的跟踪误差,这是由于机器人在恢复跟踪时的状态与期望路径点的不一致所造成.图 6(a)给出了上述过程中控制律 ω 、 x 、 y 的变化曲线

图.在实际的移动机器人任务执行过程中,中断过程会比上述圆周运动复杂得多.然而中断任务执行结束时移动机器人可以处于任何位置,若从此位置继续进行路径跟踪,其后继续跟踪会出现存在多条期望分段路径(如图 6(b)中位置 A)以及图 4(b)所示等问题.其简单的处理方法是在中断过程中采用“记忆”等手段,使移动机器人能够在中断任务结束后回到中断任务开始时的状态附近.

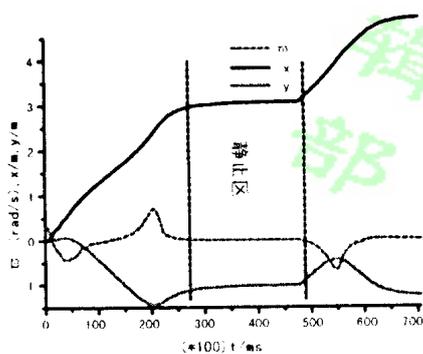


图 5(a) 正弦曲线跟踪时 ω 、 x 、 y 曲线
Fig.5(a) The parameters ω 、 x 、 y of sin-path tracking

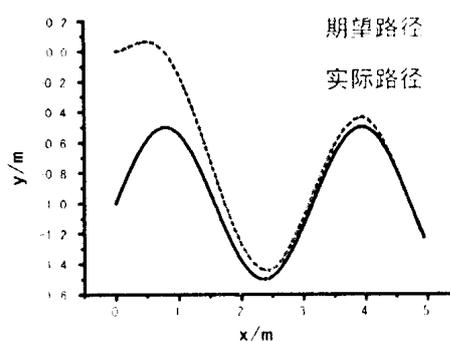


图 5(b) 正弦曲线跟踪效果图
Fig.5(b) Tracking results of sin-path

从上述实验可以看出,所提跟踪算法具有较好的收敛性,基于非时间参考设计的跟踪控制器也摆脱了时间的影响.若把机器人突发事件的处理过程看作一个时间段,则从跟踪效果看,突发事件对基于非时间参考的跟踪控制没有太大影响.在实际应用中只要在正常的跟踪过程中的中断处插入突发事件

处理算法即可,而对其它地方则无需作任何改动.反之,在考虑突发事件的处理时也无需在跟踪控制上花费太多精力.从这一点上看,与基于时间的跟踪控制相比,非时间参考的跟踪控制具有较好的跟踪能力.机器人系统根据传感器信息计算其非时间参考量的 s 值并反馈给路径的规划器,路径规划器根据

此参考值计算路径跟踪的控制量.系统一般能以很高的频率重复这一过程.正是这种不断的调整使机

器人的跟踪能适应各种突发事件和干扰^[5].

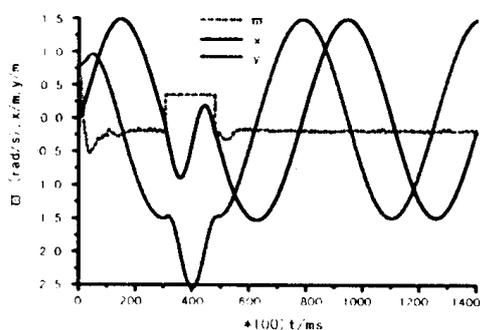


图 6(a) 圆曲线跟踪时 ω, x, y 的曲线

Fig.6(a) The parameters ω, x, y of circle-path tracking

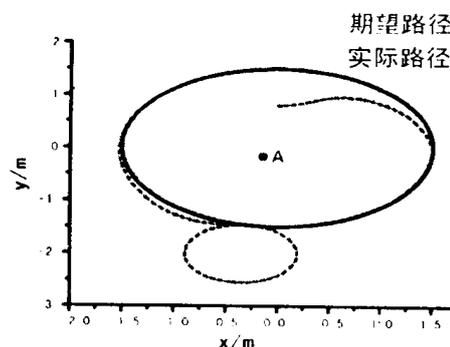


图 6(b) 圆曲线跟踪效果图

Fig.6(b) Tracking results of circle-path

5 结论 (Conclusion)

本文对移动机器人的路径跟踪问题进行了研究,基于非时间参考的思想提出了一种几何路径跟踪的控制方法.仿真例子及实物实验均证明了该控制方法的有效性.该方法之所以能提高机器人在不确定环境中的跟踪能力,其关键在于系统采用了非时间的参考量,消除了时间对控制的直接影响.同时,在现实世界中存在着很多受时间影响的系统,如基于 Internet 的机器人控制等,非时间参考的思想为解决此类系统中的问题拓展了思路,对其作进一步的深入研究将是作者下一阶段的工作.

参考文献 (References)

[1] D Andrea-Novel B, Campion G, Bastin G. Control of nonholonomic wheeled mobile robots by state feedback linearization[J]. International Journal of Robotics Research, 1995: 543 - 559.

[2] Kanayama Y, Kimura Y, et al. A stable tracking control method for an autonomous mobile robot[A]. Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation[C]. 1990:384

- 389.

[3] 马保离,霍伟.移动小车的路径跟踪与镇定[J].机器人,1995,17(6):358-362.

[4] 李杰,韦庆,常文森.非时间参考的机器人路径规划与控制方法[J].机器人,2001,23(1):11-14.

[5] Wei K, Xi N, Tan J. Analysis and design of non-time based motion controller for mobile robots[A]. Proceedings of the 1999 IEEE International Conference on Robotics & Automation[C], Detroit, Michigan: 1999. 2964 - 2969.

[6] Alberto B, Mauro D M, Alberto T. Wall-following controllers for sonar-based mobile robots[A]. Proceedings of the 36th Conference on Decision & Control[C], San Diego, California USA: 1997. 3063 - 3068.

作者简介:

王栋耀 (1977-),男,博士生.研究领域:网络机器人及其应用.移动机器人控制.

马旭东 (1962-),男,教授.研究领域:网络化移动机器人,分布式控制系统,实时系统软件.

戴先中 (1954-),男,博士生导师.研究领域:神经网络、非线性控制、计算机控制、机器人控制、电力系统控制.