

全向轮式移动机器人的定位导航算法

熊家新, 刘丽, 徐鹤, 王丹丹, 苏东楠, 陈纯

(长春理工大学 机电工程学院, 长春 130022)

摘要:在全向轮式移动机器人定位及导航算法中, 存在特定方向驱动力小且高速走圆弧时超调和打滑的问题, 针对此问题, 本文进行了研究。首先介绍了全向随动轮定位数学模型及定位标定方法, 然后着重分析包括全向轮速度合成、直线导航和圆弧导航在内的全向导航算法, 最后分析全向轮式移动机器人定位及导航算法中存在的问题及产生的原因, 提出改进算法, 并通过实验测试。测试结果表明, 适当地选取 α 值即在两个方向上适当的分配速度能够达到减小超调的目的。关键词: 全向轮; 定位导航算法; 超调

中图分类号: TM383.6

文献标识码: A

文章编号: 1672-9870(2014)04-0083-06

Omni-directional Wheeled Mobile Robot's Positioning and Navigation Algorithm

XIONG Jiabin, LIU Li, XU He, WANG Dandan, SU Dongnan, CHEN Chun

(School of Mechatronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022)

Abstract: The problems in the driving force in a particular direction of small and overshoot and skid when high speed arc are researched, which existed in omni-directional wheel mobile robot's positioning and navigation algorithms. First of all the omni-directional supporting roller positioning mathematical model and calibration method were introduced. Then navigation algorithms including omni-directional wheel speed synthesis, straight and circular navigation are emphatically analyzed. Finally the existing problems and reasons of omni-directional wheeled mobile robot's positioning and navigation algorithms are analyzed, and then the improved algorithm are putted forward and tested through the experiment. The test results show that properly selecting a value in both directions namely proper allocation rate can reach the purpose of reduce the overshoot.

Key words: omni-directional wheel; positioning and navigation algorithm; overshoot

移动机器人在军事侦察、扫雷排险、防核化污染等危险与恶劣环境以及民用中的物料搬运上具有广阔的应用前景, 使得对它的研究在世界各国受到了普遍关注^[1]。目前的移动机构主要有履带式、轮式、腿式等, 其中轮式机构因为机构简单、运动稳定和容易控制等特点而被广泛采用^[2]。而导航是移动机器人必须具备的基本功能^[3], 因此对全向轮式移动机器人的定位导航算法中存在的问题进行研究, 对移动机器人的应用具有长远发展意义。

1 全向定位算法

1.1 全向轮式机器人的简单介绍

移动机器人家族最早出现和最普遍存在的一位

成员就是轮式移动机器人, 在1968-1972年中, 美国Staford研究院的Nils Nilsson和Charles Rosen等人, 研发出了自主轮式移动机器人Shakey^[4], 其目的是研究应用人工智能技术, 在复杂环境下机器人系统的自主推理、规划和控制^[5]。轮式移动机器人是一种采用轮子为移动方式, 集环境感知、行为决策与规划、运动控制与执行等功能为一体的综合系统^[6]。例如巡线机器人可以减轻工人巡线的劳动强度, 降低高压输电的运行维护成本, 提高巡检作业的质量和科学管理技术水平, 对于增强电力生产自动化综合能力, 创造高的经济效益和社会效益都具有重要意义^[7]。

1.2 全向随动轮定位数学模型

两随动轮的滚动方向的向量交点为随动轮坐标系的定位中心,这个点的坐标位置可以通过读取安装在随动轮上的光电码盘的值和陀螺的角度值计算出来。然后可通过坐标系转换求出所选定的机器人定位中心的坐标(机器人的定位中心可任意选取,甚至可以不在机器人上)。两随动轮旋转方向向量之间的夹角任意,只要不共线。

如规定机器人坐标系的Y方向为机器人上电时机器人车头所朝的方向,正X方向为正Y方向顺时针旋转90°的方向。两随动轮A、B滚动方向与正Y方向的夹角分别 α 、 β ($\alpha > 0, \beta > 0$),则如图1、图2所示(随动轮坐标系在全场坐标系中的位置)。

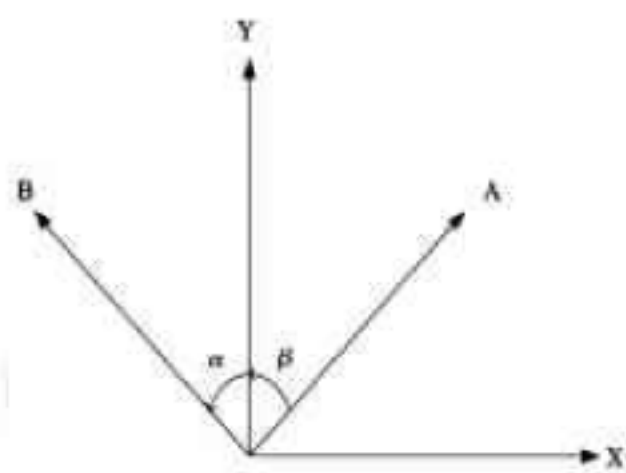


图1 静止时

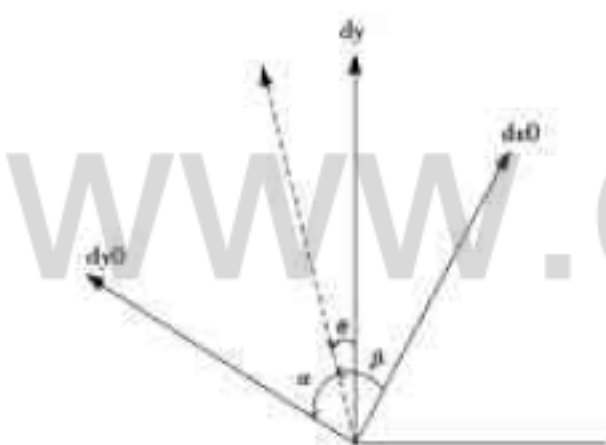


图2 上电后

$$\begin{cases} dx_0 = kA \cdot (\text{CoderA} - \text{LastCoderA}) \\ dy_0 = kB \cdot (\text{CoderB} - \text{LastCoderB}) \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} dx = \frac{dx_0 \cdot \cos(\alpha + \theta) - dy_0 \cdot \cos(\beta - \theta)}{\sin(\alpha + \beta)} \\ dy = \frac{dy_0 \cdot \sin(\beta - \theta) + dx_0 \cdot \sin(\alpha + \theta)}{\sin(\alpha + \beta)} \end{cases} \quad (2)$$

其中: dx, dy 随动轮坐标系定位中心在机器人坐标系中的位移增量; kA, kB 随动轮 A、B 的码盘值增量与沿滚动方向位移增量的转换系数; Coder, LastCoder 单位时间 Δt 内前后两次读取的码盘值; 上电后随动轮坐标系相对于机器人坐标系转过的角度, 由陀螺读取, 如图所示为正。

Δt - 积分的单位时间, 为定位函数的执行周期;

至此求得了随动轮定位中心在机器人坐标系内的位移增量。要将随动轮定位中心点 P 坐标 (x_0, y_0) 转化到所选定的机器人定位中心点 S 坐标 (x, y) , 如图3所示。

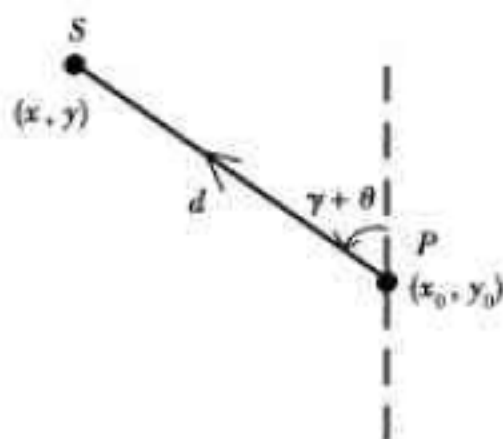


图3 随动轮定位中心与机器人定位中心相对位置示意图

由二者的相对位置关系, 总有:

$$\begin{cases} x = x_0 - d \cdot \sin(\gamma + \theta) \\ y = y_0 + d \cdot \cos(\gamma + \theta) \end{cases} \quad (3)$$

其中: d, γ —S 点在机器人坐标系中相对于 P 点的距离和偏角; θ —上电后机器人转过的角度。对于该算法在长时间运动引起的累计误差, 可通过在反馈控制端动态改变过程输入量的方法实时对定位误差进行补偿, 杨晶东等人^[6]通过实验验证了累计误差修正算法对消除累计误差的有效性。

1.3 全向随动轮定位标定方法

1.3.1 间接测量计算的方法 由式(1)、(2)可知, 只要求出 kA, kB, α 和 β

四个参数就可以实现机器人(随动轮定位中心)的全场定位。让机器人沿两个不同的方向走两条直线, 在行走过程中保持角度不变, 则可通过方程组求出这四个参数。

$$\begin{cases} dx_1 = \frac{kA \cdot \Delta \text{CoderA}_1 \cdot \cos \alpha - kB \cdot \Delta \text{CoderB}_1 \cdot \cos \beta}{\sin(\alpha + \beta)} \\ dy_1 = \frac{kB \cdot \Delta \text{CoderB}_1 \cdot \sin \beta + kA \cdot \Delta \text{CoderA}_1 \cdot \sin \alpha}{\sin(\alpha + \beta)} \\ dx_2 = \frac{kA \cdot \Delta \text{CoderA}_2 \cdot \cos \alpha - kB \cdot \Delta \text{CoderB}_2 \cdot \cos \beta}{\sin(\alpha + \beta)} \\ dy_2 = \frac{kB \cdot \Delta \text{CoderB}_2 \cdot \sin \beta + kA \cdot \Delta \text{CoderA}_2 \cdot \sin \alpha}{\sin(\alpha + \beta)} \end{cases} \quad (4)$$

其中: dx_1, dy_1, dx_2, dy_2 表示所行走的两条直线在机器人坐标系中的位移增量, 通过测量得到; ΔCoder 表示随动轮码盘值增量, 可通过液晶显示得到。

1.3.2 直接测量的方法

若随动轮 A、B 在机器人上的安装位置如图4所

示, 测量随动轮B的旋转方向与机器人正前方(速度分配V的方向)夹角 α 时, 先大致给一个底盘速度分配角 γ , 在程序中通过随动轮B的码盘值调整角 γ , 保持机器人的角度 0° , 直到随动轮B不转。这时机器人的平移方向理论上与随动轮的B的旋转方向垂直, 即有 $\alpha + \gamma = 90^\circ$ 。

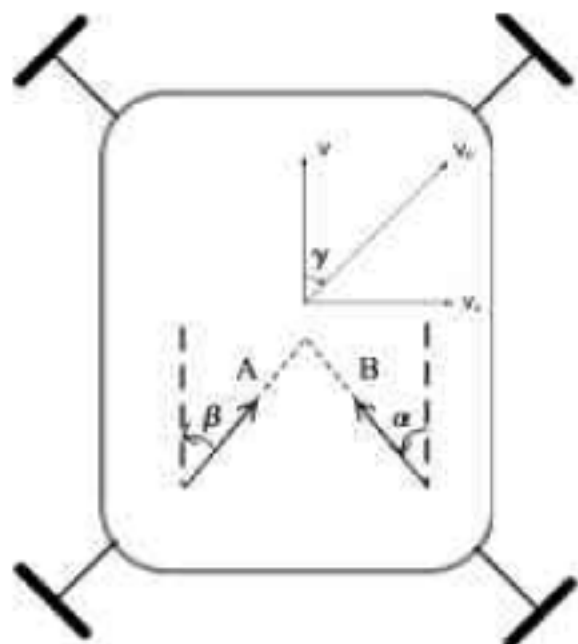


图4 随动轮在机器人上的安装位置示意图

通过无线设备将角 γ 的值发送到PC上, 绘出 γ 随时间变化的曲线, 即可得到 α (当然也可以用别的方式得到 γ)。实际中获得的 γ 值变化趋势如图5所示。

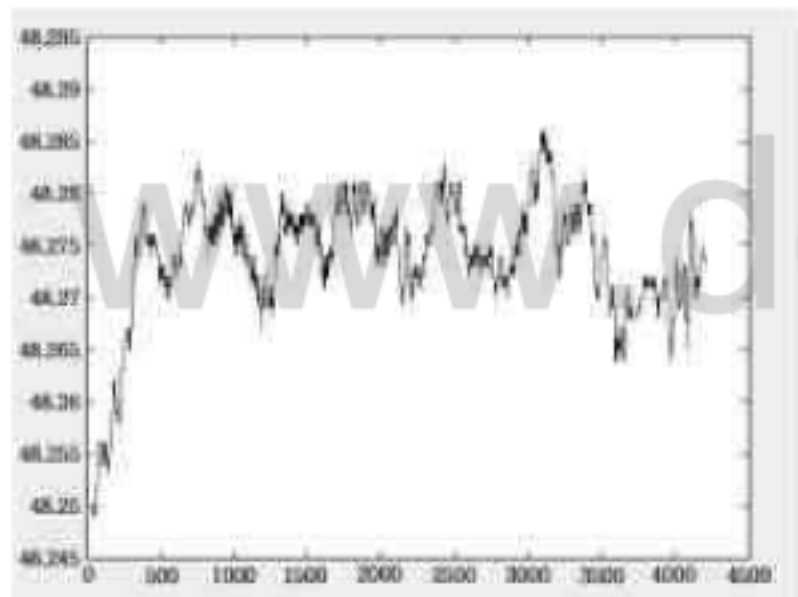


图5 蓝牙发回的角 γ 值变化图

可以看出最终 γ 稳定在 $48.26^\circ \sim 48.28^\circ$, 所以取 $\gamma = 48.27^\circ$, 则 $\alpha = 90 - \gamma = 41.73^\circ$ 。用同样的方法可以测得 $\beta = 48.32^\circ$ 。接下来用类似的方法测 k_A 和 k_B 。可以发现 $\alpha + \beta = 90.05^\circ$, 可以认为是 90° , 即认为随动轮A、B的旋转方向垂直。测量 k_A 时, 保持机器人的角度为 0° , 以随动轮B的码盘值为偏差量, 速度分配角为控制量, 既保证随动轮B不转的情况下机器人沿随动轮A方向平移距离 S_a 。若随动轮A的码盘值为 Coder_A , 有 $k_A = S_a / \text{Coder}_A$, 用同样的方法可测得 k_B 。

这样测得的 k_A , k_B , α 和 β 四个参数是以图5中V的方向为主方向的。但机器人要求在给定的场地中走出正X, 正Y方向, 最好将定位的主方向调整到场地的正X, 正Y方向。对于图4所示的机器人, 可将机器人靠在场边一边的栅栏上, 沿现在的定位主方向走一条直线, 测出这条直线与所靠栅栏的夹角, 将 α , β 加上(减去), 减去(加上)这个夹角即可。

标定完成后, 让机器人沿正X, 正Y方向走两条相同长度的直线, 发现在一个方向上走得长, 另一个方向上走得少, 并且两个方向上的差值与给定值相等。通过实验发现这个差值受 $\alpha + \beta$ 影响, 可用试验的方法调整这个值达到两个方向上偏差消失, 但此时定位主方向已经变了, 因为改变了 α , β 的值, 再将主方向调整到场地的正X, 正Y方向即可。

至此实现了随动轮坐标系的定位, 要将随动轮坐标转换到机器人坐标系, 即求出 d 和 γ , 可通过如下方法。如图6所示, 让机器人以选定的定位中心为旋转中心转 90° 。

$$\begin{cases} \Delta x = d \cdot (\sin \gamma + \cos \gamma) \\ \Delta y = d \cdot (\cos \gamma - \sin \gamma) \end{cases} \quad (5)$$

其中: $\Delta x, \Delta y$ —机器人坐标改变量, 通过液晶显示得到。

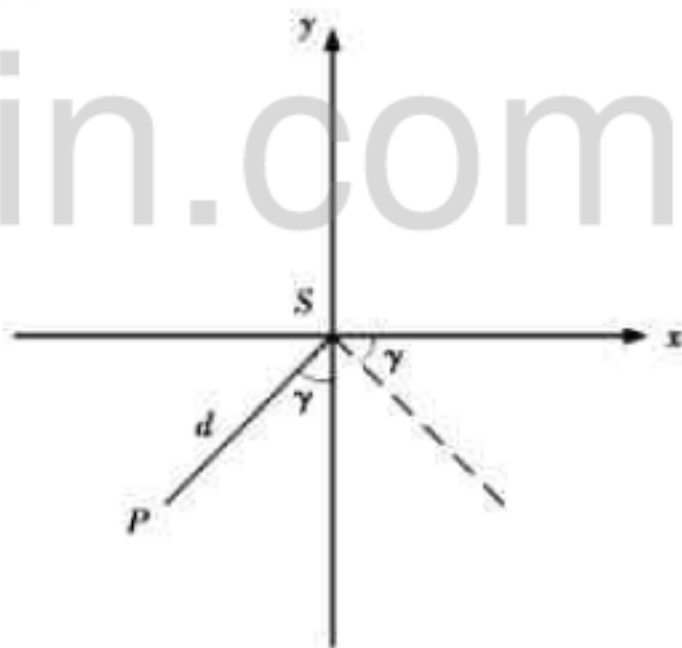


图6 随动轮坐标系到全场坐标系的转换示意图

2 全向导航算法

2.1 全向轮速度合成

全向轮模型图如图7所示, 滚子释放了与车轮滚动方向垂直方向的约束, 使得全向轮可以一边向前滚动, 一边横移。因此, 全向车轮在运动中的实际速度应为车轮滚动方向的线速度与由于滚子横移所产生的线速度的矢量和, 如图8所示。



图7 全向轮模型图

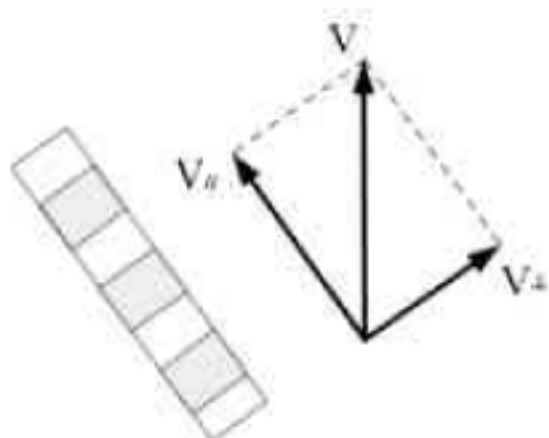


图8 全向轮速度合成示意图

2.2 全向轮底盘速度分配公式

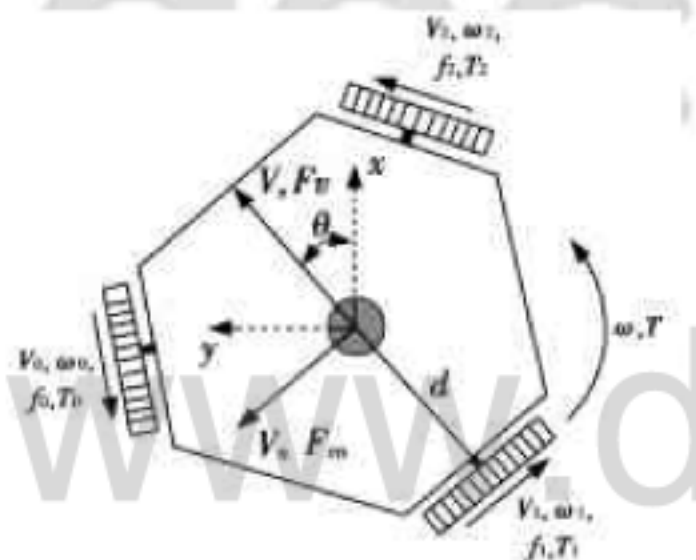


图9 全向轮底盘速度分配示意图

以图9所示的全向轮底盘为例,三个轮子成 120° 对称分布。若机器人在给定坐标系中期望有速度 (V_x, V_y, ω) ,对选定的底盘速度分配主方向有

$$\begin{bmatrix} V \\ V_n \\ \omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 0 \\ -\sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_x \\ V_y \\ \omega \end{bmatrix} \quad (6)$$

其中: x, y, θ —机器人的坐标 (x, y) 和所选定的机器人(速度分配)主方向与 V_y 方向的夹角 θ ;
 V, V_n, ω —机器人在定义的主方向上的线速度和旋转角速度;然后由刚体的运动有:

$$\begin{bmatrix} V_0 \\ V \\ V_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin(\pi/3) & \cos(\pi/3) & d \\ 0 & -1 & d \\ \sin(\pi/3) & \cos(\pi/3) & d \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V \\ \omega \end{bmatrix} \quad (7)$$

其中: V_1, V_2, V_3 —车轮滚动方向线速度; d —车轮到选定的旋转中心距离,这里为底盘的几何中心,三

个轮都一样。

2.3 全向机器人导航

前面可知,全向轮机器人导航的过程就是根据机器人的当前坐标 (x, y, θ) 获得在该坐标点应有的速度 (V_x, V_y, ω) ,再通过式(6)、(7)获得分配给驱动轮的轮速 (V_1, V_2, V_3) ,从而使机器人按照预定的轨迹运动的过程。由于机器人的运动轨迹一般由直线和圆弧拼接而成,所以导航常用到的是直线导航跟圆弧导航。

2.3.1 直线导航

由于全向底盘可以边走边转,所以一段直线路

经的主要参数有直线的起点坐标 (x_1, y_1) ,终点坐标 (x_2, y_2) ,起点和终点机器人的方位角 Q_1 和 Q_2 ,如图10所示。

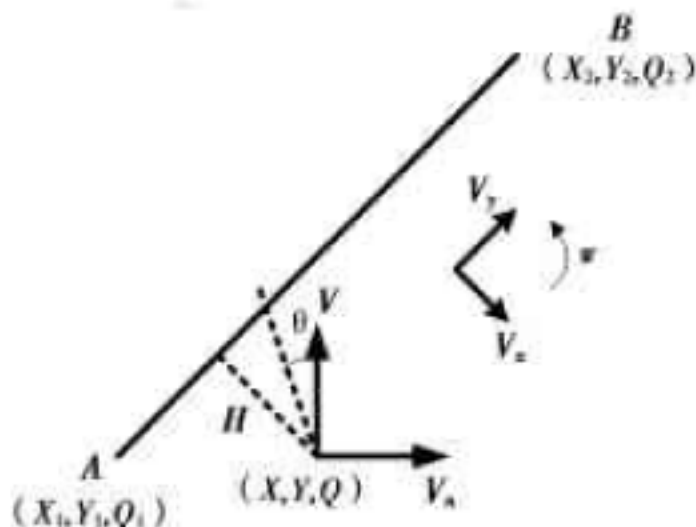


图10 全向直线路径示意图

要使机器人从A运动到B,首先分配一个沿路径方向的速度 V_y 。当机器人偏离直线H距离时,分配一个纠偏速度 V_x 。对于机器人的当前坐标 (x, y) ,要求机器人具有的当前角度为Q根据机器人此时的角度偏差 θ 再分配一个纠偏角速度 ω 。通过式(6)、(7)获得分配给驱动轮的轮速 (V_1, V_2, V_3) ,对电机进行速度闭环控制,即实现直线导航。 V_y 根据机器人的当前坐标 (x, y) 按照预定的加减速分配。位置环和速度环都采用PID控制。

位置环中,纠距离偏差时, H 为偏差量, V_x 为控制量;纠角度时, θ 为偏差量, ω 为控制量。速度环中,当前电机转速与目标转速的偏差为偏差量,以电机的驱动电流为控制量。

2.3.2 圆弧导航

一段圆弧路径的主要参数有圆弧的起点坐标 (x_1, y_1) ,圆弧的终点坐标 (x_2, y_2) ,圆心坐标 (x_0, y_0) ,

起点和终点机器人的方位角 Q_1 和 Q_2 。圆弧导航的基本思路如图11所示。

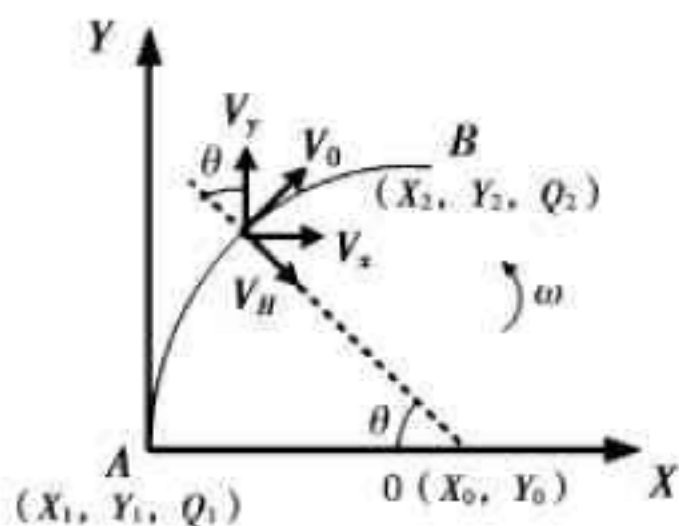


图 11 全向圆弧路径示意图

根据机器人当前坐标 (x, y) 按预定加减速规律分配一个沿圆弧切向的速度 V_0 ，对于圆弧径向的距离偏差 H ，PID 控制后分配一个纠偏速度 V_H 作为控制量，对于机器人在当前位置的角度偏差 PID 控制后分配一个纠偏角速度 ω ，机器人沿给定的圆弧路径转过的圆心角为 θ ，由矢量预算有：

$$\begin{cases} V_y = V_0 \cdot \sin \theta - V_H \cdot \cos \theta \\ V_x = V_0 \cdot \cos \theta + V_H \cdot \sin \theta \end{cases} \quad (8)$$

通过式 (6)、(7) 将 (V_x, V_y, ω) 分配给底盘电机即实现圆弧导航。

3 全向轮底盘存在的问题及解决方法

3.1 全向轮底盘存在的问题

(1) 在特定方向驱动力小的问题

如图 12 所示的底盘， α 角越小，底盘沿 X 向的驱动力与 Y 向相比越小。机器人在沿 X 向横移时，由于底盘前后部分动力性不一致，导致加减速过大时车身转动。

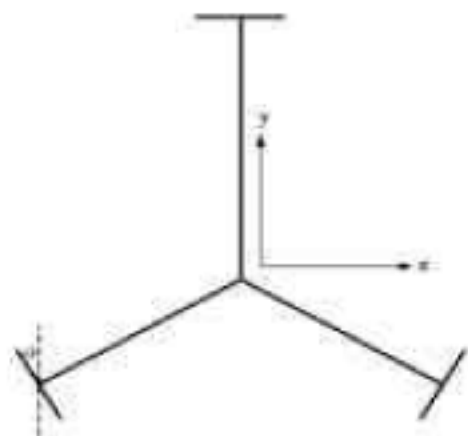


图 12 三轮全向底盘示意图

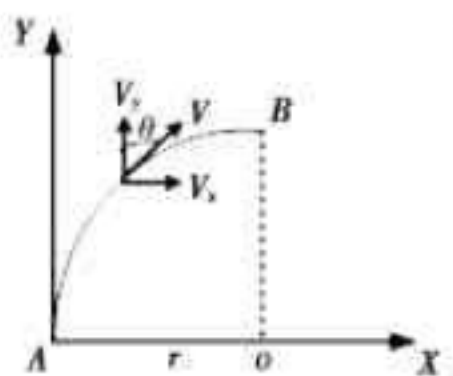


图 13 圆弧速度分配示意图

(2) 高速走圆弧时存在超调和打滑 全向轮在行走时在一个方向是滚子与地面的滚动摩擦，所以抓地力不如差速轮好，所以在加减速过大时易打滑。对于如图 13 所示的一段圆弧路径。

若机器人沿圆弧切向为匀速 $V=300\text{r/min}$ (以底盘电机转速作为速度量纲，大约为 24m/s)，计算底盘在两个方向上的加减速有 $\frac{dV_y}{dx} = \frac{d(V \cdot \cos \theta)}{dt} = \frac{V \cdot d(\cos(\frac{V}{r}t))}{dt} = -\frac{V^2}{r} \cdot \sin(\frac{V}{r}t)$ ， $\frac{dV_x}{dt} = \frac{V^2}{r} \cdot \cos(\frac{V}{r}t)$ 。

若 $r=1000\text{mm}$ ，则两个方向上的最大加减速均为 $300^2/1000=90$ 。根据经验，在当前量纲下，机器人的加减速超过 50，就不再具有好的运动平稳性了。这时，若电机驱动力不足，则路线超调严重；若驱动力充足，则车轮打滑现象严重，并伴随超调现象，因为打滑时地面提供给车轮的摩擦驱动力要比不打滑时小。

对于图 13 所示的圆弧路径，在两个方向上期望的速度变化规律是如图 14 所示。

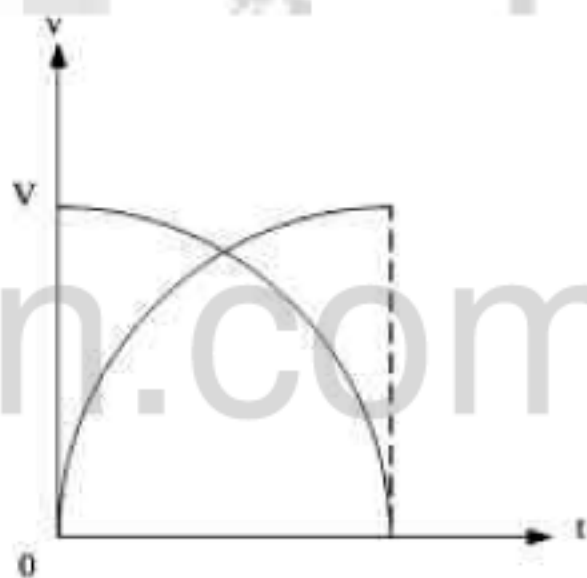


图 14 圆弧路径在 X、Y 向上的速度时域曲线

这实际上是不合理的，因为如果走一种在两个方向上都是匀加匀加速的路径，同样的 1000mm 内速度由 300 减到 0，加减速仅为 $300^2/(2 \times 1000)=45$ 。从而可以得出这样的结论：圆弧路径其实是不适合全向轮底盘的，应该用一种合理的分配速度的路径来取代圆弧。实际中普遍使用圆弧路径是因为规划路径时的方便，即很容易通过直线加圆弧逐段相切的方式规划出各种复杂的路径，并且保证路径切换时速度连续。

3.2 解决方法

在两个方向上速度分配的推广实际中，由于车轮与地面摩擦模型未知，驱动力不足，惯量太大，以及一些考虑不到等诸多原因，按时间匀加匀减的分配方式有时也不能够得到良好的效果，于是想到可

以按距离匀加匀减。比如一段减速距离为 l ，初速度为 V_0 ，已经走过距离 s ，则分配当前速度：

$$V = \frac{l-s}{l} \cdot V_0 \quad (9)$$

我们进一步想到，可以将式(9)变形为：

$$V = \left(\frac{l-s}{l}\right)^a \cdot V_0 \quad (10)$$

其中，指数 a 可以调整，但要注意不同的 a 值对应的期望速度分配是不是实际所需要的。如图15所示为几个不同的 a 值下期望的速度分配。

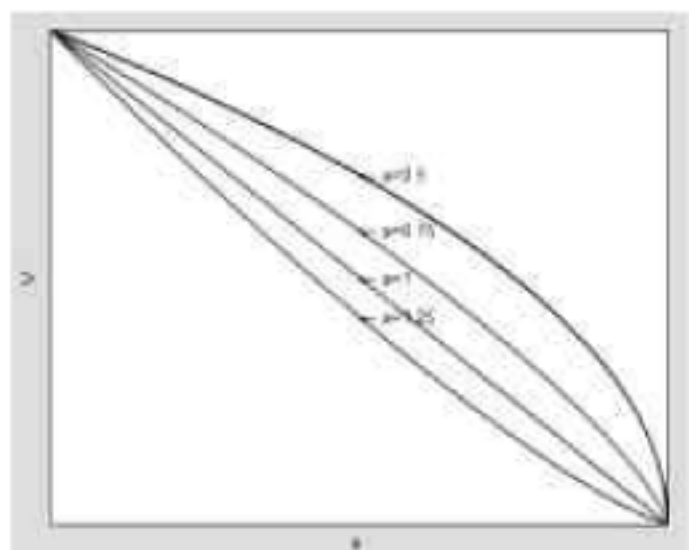


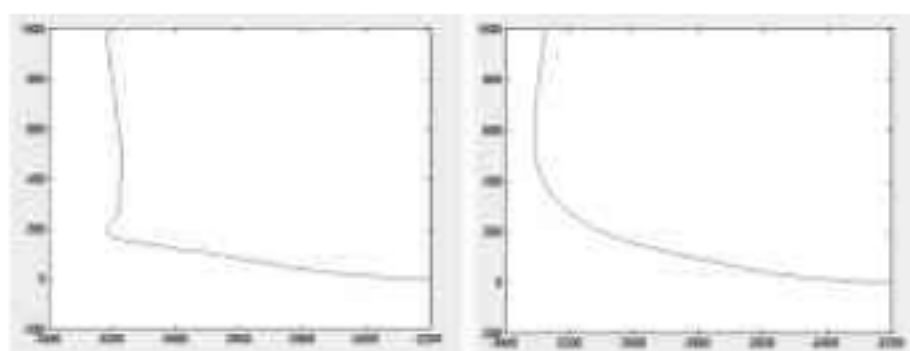
图15 不同的 a 值下 V 随 s 变化的趋势图



图16 测试中的机器人

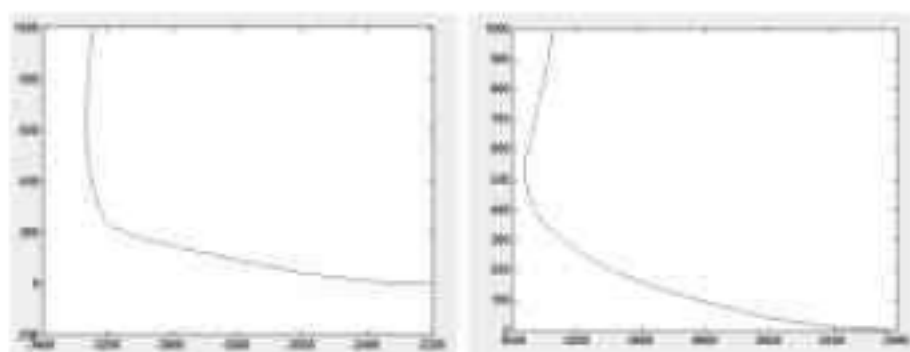
实际中我们做了如下测试：三轮全向底盘，如图16，在1000mm内让速度由300r/min减到0，在与减速方向垂直的方向让速度上1000mm内让速度由0增大到300r/min，即让机器人走出一条能够替代半径为1000mm的1/4圆弧路径的曲线。调整指数 a 的值，将机器人的坐标通过无线设备发送到PC上绘制路径曲线，观察不同的 a 值对机器人走出路径形状的影响。

可以看出， a 值越大，超调越严重，即速度完全减到0需要的距离越长。所以适当地选取 a 的值确实能够达到减小超调的目的。另外，可以看出曲线形状与理想情况差异较大，其原因很多，包括大惯量，车轮与地面存在打滑，控制精度依赖于定位导航函数的执行周期和电机速度闭环的控制周期等。



(a) $a=0.5$

(c) $a=1.0$



(b) $a=0.75$

(d) $a=1.25$

图17 不同的 a 值下走出的圆弧替代路径的轨迹

4 结论

针对全向轮式移动机器人定位及导航算法中存在的在特定方向驱动力小且高速走圆弧时超调和打滑的问题进行研究。通过在两个方向上进行速度的分配，调整指数 a ，可以看出 a 值越大，超调越严重，即速度完全减到0需要的距离越长。所以适当地选取 a 的值确实能够达到减小超调的目的。

参考文献

- [1] 徐国华, 谭民. 移动机器人的发展现状及趋势[J]. 机器人技术与应用, 2001(3): 7-14.
- [2] 陈旭东, 孔令成, 刘尊朋. 基于全向轮的机器人移动机构运动分析与控制设计[J]. 测控技术, 2012, 31(1): 48-56.
- [3] 帅知春. 混合智能算法在移动机器人导航中的研究及应用[D]. 广州: 广东工业大学, 2007.
- [4] Hart A P, Nilsson N J, Raphael B. A formal basis for the heuristic determination of minimum cost paths[J]. IEEE Trans Systems Science and Cybern, 1968(4): 100-107.
- [5] 朱骏. 移动机器人操作机械手设计与分析[D]. 南京: 南京理工大学, 2006.
- [6] 王珊珊. 轮式移动机器人控制系统设计[D]. 南京: 南京理工大学, 2013.
- [7] 李晓舟, 许金凯, 于化东, 等. 超高压输电线路巡线机器人结构设计与运动学仿真[J]. 长春理工大学学报: 自然科学版, 2009, 32(3): 377-380.
- [8] 杨晶东, 洪炳熔, 周彤, 等. 移动机器人里程计非系统误差不确定分析方法[J]. 机械工程学报, 2008, 44(8): 7-12.