



高新科技译丛

Mobile Robots: Navigation, Control and Remote Sensing

移动机器人导航、 控制与遥感

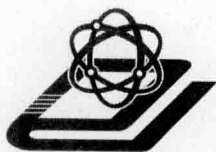
【美】Gerald Cook 著 赵春晖 潘泉 杨峰 靳珍璐 译



WILEY



国防工业出版社
National Defense Industry Press



装备科技译著出版基金

移动机器人导航、控制与遥感

Mobile Robots: Navigation, Control and Remote Sensing

【美】Gerald Cook 著

赵春晖 潘泉 杨峰 靳珍璐 译

国防工业出版社

· 北京 ·

著作权合同登记 图字:军-2012-169 号

图书在版编目(CIP)数据

移动机器人导航、控制与遥感 / (美)库克(Cook, G.)著;赵春晖等译.

—北京:国防工业出版社,2015.10

(高新科技译丛)

书名原文:Mobile Robots: Navigation, Control and Remote Sensing

ISBN 978-7-118-09920-1

I. ①移... II. ①库... ②赵... III. ①移动式机器人-研究 IV. ①TP242

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第196438号

Mobile Robots: Navigation, Control and Remote Sensing by Gerald Cook.

ISBN 978-0-470-63021-1

Copyright © 2011 by Institute of Electrical and Electronics Engineers. All Rights Reserved.

This translation published by John Wiley & Sons. No part of this book may be reproduced in any form without the written permission of the original copyrights holder.

本书中文版由 John Wiley & Sons 授权国防工业出版社独家出版发行。

版权所有,侵权必究。

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路23号 邮政编码100048)

三河市众誉天成印务有限公司印刷

新华书店经售

*

开本710×1000 1/16 印张13 字数251千字

2015年10月第1版第1次印刷 印数1—2500册 定价58.00元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

前 言

移动机器人,顾名思义,是具有移动能力的智能机械装置,它们可以在地面、水面、水下或空中自动行驶,与固定在某地的定点机器人截然不同。定点机器人在机械制造领域非常普遍,如汽车装配、飞机组装、电子零件组装、焊接、喷漆及其他领域,它使用有限的传感器,用程序控制其重复执行某种任务。而移动机器人则很少采用结构化的控制方式且需要使用更多的传感器。

移动机器人在执行任务时,获得自身位置和方向的信息是非常重要的。只有这样,移动机器人才能获得精确的环境感知信息并加以充分利用,并且在指挥移动机器人到达指定目的地的过程中也需要进行路径导航。因此,导航信息的获取是必须的。除导航之外,还需要稳定和高效的控制策略。控制与导航必须并行工作,一旦移动机器人到达目的地,传感器可以获得所需的数据,并且可以将数据存储起来以便后续传输,或者立即报告给上一级。因此,为了有效利用移动机器人,就需要一个能实现各种功能的完整系统。

移动机器人可在各种不同的控制模式下运行,其中之一就是遥控模式。在该模式下,操作人员需要通过指令来控制机器人。通过机器人上的摄像机等传感器提供的信息,操作人员对当前形势进行评估,并决定机器人下一步的行动。这种模式下人对机器人的控制可能是非常彻底的,不让机器人做任何决策,当然也可能仅仅位于较高决策级别并由机器人上的算法解决一些细节问题。采用这种运行模式的应用实例包括:火星探测器和进入到华盛顿州圣海伦斯火山的步行机器人。此外,该类机器人的应用还有对核废料、炸药等有害物质的处理,战争中对地雷等爆炸物的搜索,以及用于侦察的无人机(UAV)和自主水下机器人(AUV)等。移动机器人的航路一般是预先设定的,但可以采用如口令等形式对机器人进行行动干预或重定向。

20世纪90年代在弗吉尼亚州威廉王子郡曾发生了一个涉及遥控式移动机器人的有趣故事。一名犯罪嫌疑人被警察困在一幢公寓楼里,因嫌犯经过武装,警察决定安排移动机器人进入公寓。该机器人是一个履带式小车,带有摄像头、铰链式机械手和一支电击枪。在操作人员的控制下,机器人依次爬上楼梯、打开房门、打

开壁橱门、掀开盖在嫌疑人身上的一堆衣服,然后击晕嫌疑人并使其被捕。该例中,采用移动机器人可以降低警察受伤或死亡的风险。

另一种是自主控制模式。除利用自带传感器获取控制信息之外,机器人不需要其他的外部控制输入。在利用传感器进行避撞或信号搜索时,这种控制模式下的移动机器人的运动具有随机性。其中一个实例是弗吉尼亚州兰利市中情局的微型太阳能割草机。这种移动机器人如餐盘大小,有锋利的刀片,其工作场地非常平整且具有清晰的边界。机器人可沿任意方向移动,直至遇到障碍并转向一个新方向。另一个实例是泳池清洁器,该装置在泳池周围移动,吸收池底的碎屑并将其泵入过滤系统。泳池清洁器的运动也是随机的,泳池墙壁为其提供了自然的边界。类似的机器人还有房屋或办公室的吸尘机器人等。

2009年,一个非常令人兴奋的实例是名为 Scarlet 的水下半自主机器人——深海滑翔机,它从美国新泽西海岸穿越大西洋,到达了西班牙海岸。该 AUV 是美国罗格斯大学与 Teledyne Webb 联合研究小组的作品,长 8ft (1ft = 0.3048m),质量为 135lb (1lb = 0.4536kg)。此次航行用了 221 天,航程超过 4600mile (1mile = 1.60934km),收集了大西洋水温、盐度与深度的函数关系数据。Scarlet 由电池供电,它通过机舱前部泵出或吸入海水来控制机体上升或下潜,通过电池向前或向后滑动来改变机体重心以调整滑行角度。与一个从二楼窗户扔出的纸飞机基本原理一样,随着 Scarlet 下潜或上升,水动力机翼为其提供前进的动力。此外,Scarlet 还配备了方向舵来转向。通常 Scarlet 可以潜入到海面以下 600ft,然后上升到距海面 60ft 以内。Scarlet 每天都会浮出水面以获得 GPS 信息来确定自身位置,并与监控人员取得无线电联系,以获得新的航路点从而确定航向。显然,Scarlet 配备有惯性测量装置,能够在水下提供航向信息。(《华盛顿邮报》,2009 年 12 月 15 日星期二,《健康和科学板块》,E1 和 E6 页面。)

在工业生产中,移动机器人的应用实例如轮式车辆,它可用于在工作区之间搬运物料。地板上的边界线规定了移动机器人需要行走的路线,移动机器人通过光学传感器检测边界线,判断并发指令给转向系统使其沿规定路线行走。类似的方案也可用于移动机器人在仓库等大型场所中完成库存检查或安全检查任务。这类机器人的运行路径是规定好的,传感器用于获取并存储移动机器人运行过程中所需的周围环境信息。

地面移动机器人通常采用两种转向方式,这两种转向方式都要求移动机器人有一个或两个前轮。一种转向方式是类似于汽车的前轮转向,由于其转弯半径受到机器人长度和最大转向角的限制,这种转向方式对控制器提出了挑战。另一种

转向方式是独立控制机器人每一边的轮子,通过左、右轮以相同转速反向旋转,使得机器人原地转向,即转向半径为零。履带式汽车也采用相同的差动驱动转向策略,称为滑动转向。

我们希望本书能为移动机器人领域的技术人员提供参考。因为书名所涉及的多项重要目标,本书跨越了传统课程的界限,融合了来自不同工程学科的内容。因此,本书也可以作为电气工程、机械工程、航空航天工程以及其他相关学科的教材。另外,提示一下,关于附录 A 中项目的两个视频可以在网址 www.wiley.com/wiley-CDA/wileytitle/productCd-0470630213.html 观看。

最后,感谢那些在该书写作过程中给我鼓励的人,包括 NVESD 资助者 Kelly Sherbondy,前同事 Cuy Beale,我的学生 Patrick Kreidl、Smriti Kansal 和 Shwetha Jakikidi,工业研究员 Bill Pettus,美国海军研究实验室的合作伙伴 Jay Oaks,以及其他提出宝贵意见的人。

目 录

第 1 章 移动机器人的运动模型	1
1.0 引言	1
1.1 前轮转向移动机器人	1
1.2 差动转向移动机器人	4
习题	6
参考文献	6
第 2 章 移动机器人控制	8
2.0 引言	8
2.1 前轮转向移动机器人的航向控制	8
2.2 前轮转向移动机器人的速度控制	15
2.3 差动转向移动机器人的航向和速度控制	16
2.4 前轮转向移动机器人的参考轨迹和增量控制	18
2.5 基于非线性模型的前轮转向移动机器人航向控制	22
2.6 前轮转向移动机器人航向与速度的计算力矩控制	25
2.7 基于非线性模型的差动移动机器人航向控制	26
2.8 差动移动机器人航向与速度的计算力矩控制	27
2.9 基于局部坐标系的转向控制	28
2.10 前轮转向移动机器人的最优控制	38
2.11 无约束最终航向角前轮转向移动机器人的最佳转向	50
习题	51
参考文献	52
第 3 章 机器人姿态	53
3.0 引言	53
3.1 偏航、俯仰、滚转的定义	53

3.2	偏航旋转矩阵	54
3.3	俯仰旋转矩阵	55
3.4	滚转旋转矩阵	56
3.5	通用旋转矩阵	58
3.6	齐次变换	59
3.7	向量的旋转	62
	习题	63
	参考文献	64
第4章	机器人导航	65
4.0	引言	65
4.1	坐标系	65
4.2	地心地固坐标系	65
4.3	相关的坐标系	67
4.4	通用横轴墨卡托坐标系	69
4.5	全球定位系统	71
4.6	使用 GPS、数值方法计算接收器位置	73
4.6.1	基于牛顿法的 GPS 定位	73
4.6.2	基于性能指标最小化的 GPS 定位	78
4.7	GPS 天线阵列	84
4.8	平台式惯导系统	85
4.9	捷联式惯性导航系统	88
4.10	航位推算	93
4.11	测斜仪/罗盘	94
	习题	97
	参考文献	99
第5章	卡尔曼滤波器的应用	100
5.0	引言	100
5.1	批处理方法估计固定量	100
5.2	固定量的递推估计	101
5.3	动态系统状态估计	104
5.4	非线性系统的扩展卡尔曼滤波状态估计	112
	习题	124

参考文献	126
第 6 章 遥感	128
6.0 引言	128
6.1 相机类传感器	128
6.2 立体视觉	136
6.3 雷达探测:合成孔径雷达(SAR)	138
6.4 探测目标时的距离传感器	142
6.5 探测传感器的扫描模式	145
习题	148
参考文献	149
第 7 章 目标跟踪	150
7.0 引言	150
7.1 传感器置信区域	150
7.2 目标定位模型	154
7.3 被测目标信息存储	157
习题	160
参考文献	161
第 8 章 障碍物映射及其在机器人导航中的应用	163
8.0 引言	163
8.1 障碍物检测与地理标定传感器	163
8.2 航位推算导航	165
8.3 利用已检测到的障碍物进行导航	167
8.4 同步修正障碍物与机器人的坐标	170
习题	173
参考文献	173
第 9 章 机械手控制	175
9.0 引言	175
9.1 正向运动学方程	175
9.2 关节空间路径规范	176
9.3 逆向运动学方程	179

9.4 笛卡儿空间下的路径描述	180
9.5 各方向的速度关系	185
9.6 力和力矩	189
习题	190
参考文献	191
第 10 章 无人机在遥感技术中的应用	192
10.0 引言	192
10.1 传感器的安装	192
10.2 传感器的分辨率	192
10.3 机载设备的精度	193
10.4 地理信息综合精度	194
习题	195
参考文献	195
附录 大学生机器人项目展示	196
A.0 引言	196
A.1 GEONAVOD 机器人	197
A.2 自平衡自行车机器人 (ABRB)	197

第1章 移动机器人的运动模型

1.0 引言

根据机器人可实现运动的基本几何原理,本章建立了两种类型轮式机器人的运动模型。虽然这两种类型不能涵盖轮式机器人的所有情况,但以此为基础,其他情况都可进行原理性讨论。

1.1 前轮转向移动机器人

一类是前轮转向移动机器人。本章所涉及移动机器人通常是后轮驱动模式,通过控制前轮以实现转向。

图 1.1 是前轮转向四轮机器人原理示意图。下述方程也适用于一个前轮的情况。前轮与机器人纵轴 y_{robot} 之间的夹角被定义为 α ,以逆时针方向为正。纵轴 y_{robot} 与地面坐标系纵轴 y_{ground} 的夹角被定义为 ψ ,也是以逆时针方向为正。机器人的瞬时转向中心是两条车轮轴线的交点。

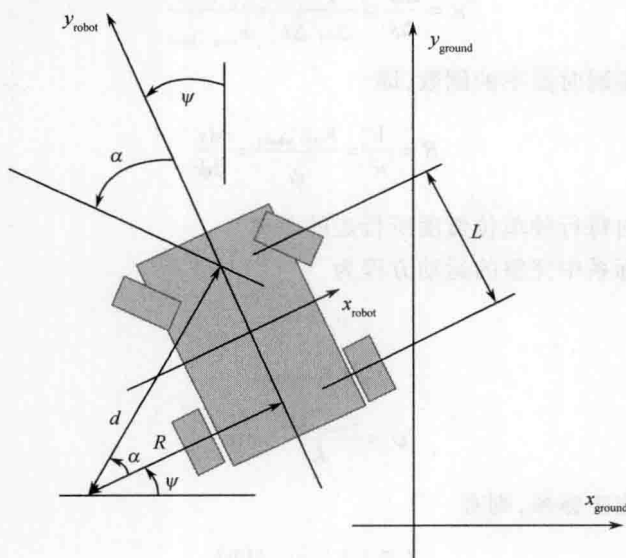


图 1.1 前轮转向四轮机器人原理示意图

由几何学可以得到

$$\frac{L}{R} = \tan\alpha$$

由此可推导出机器人后轮轮轴中点处的瞬时曲率半径,即

$$R = \frac{L}{\tan\alpha} \quad (1.1)$$

由几何学还可以得到

$$v_{\text{rear wheel}} = R \frac{d}{dt}(\psi) = R \dot{\psi}$$

或

$$\dot{\psi} = \frac{v_{\text{rear wheel}}}{R}$$

也可以写成

$$\dot{\psi} = \frac{v_{\text{rear wheel}}}{L/\tan\alpha} = \frac{v_{\text{rear wheel}}}{L} \tan\alpha \quad (1.2)$$

如果转向角 α 恒定,轨迹将成圆形,其半径由方程(1.1)中的实际转向角和机器人长度决定。

瞬时曲率被定义为角度变化率除以距离变化率,或者机器人行驶单位距离的角度变化,即

$$\kappa = \frac{\Delta\psi}{\Delta s} = \frac{\Delta\psi/\Delta t}{\Delta s/\Delta t} = \frac{\dot{\psi}}{v_{\text{rear wheel}}}$$

曲率半径是瞬时曲率的倒数,即

$$R = \frac{1}{\kappa} = \frac{v_{\text{rear wheel}}}{\dot{\psi}} = \frac{ds}{d\psi}$$

即沿航向角方向每行驶单位弧度所行走的距离。

机器人坐标系中完整的运动方程为

$$v_x = 0 \quad (1.3a)$$

$$v_y = v_{\text{rear wheel}} \quad (1.3b)$$

$$\dot{\psi} = \frac{v_{\text{rear wheel}}}{L} \tan\alpha \quad (1.3c)$$

转换为大地坐标系,则有

$$\dot{x} = -v_{\text{rear wheel}} \sin\psi \quad (1.4a)$$

$$\dot{y} = v_{\text{rear wheel}} \cos\psi \quad (1.4b)$$

$$\dot{\psi} = \frac{v_{\text{rear wheel}}}{L} \tan \alpha \quad (1.4c)$$

上述方程的形式简单,然而,应该注意这些方程是非线性的。参见 Dudek 和 Jenkin 的文章。

如果考虑到实际上转向角和速度不能瞬间改变,就可以将这些变量的导数或比率定义为控制信号,即

$$\dot{\alpha} = u_1 \quad (1.5a)$$

和

$$\dot{v}_{\text{rear wheel}} = u_2 \quad (1.5b)$$

该系统方程是五阶的,表述了在 xy 平面上运动和旋转时变量之间的运动学关系,但不包括静止或动态特性等复杂情形,也不包括机器人的俯仰和滚转。

依据这些方程可推导出离散时间模型,这在计算机仿真及其他应用中非常有用。但上述方程是非线性的,在这里采用线性连续系统离散化的方法并不适用。对于非线性系统,一种可用的方法是欧拉积分法,该方法用一阶泰勒级数来近似积分,并用有限差分来近似导数,即

$$\dot{x}(t) \approx \frac{x(t + \Delta t) - x(t)}{\Delta t}$$

重新排列后可以得到

$$x(t + \Delta t) \approx x(t) + \dot{x}(t) \Delta t$$

设置 $t = kT$, 采样间隔 $\Delta t = T$, 则有

$$x((k+1)T) = x(kT) - Tv_{\text{rear wheel}}(kT) \sin \psi(kT) \quad (1.6a)$$

$$y((k+1)T) = y(kT) + Tv_{\text{rear wheel}}(kT) \cos \psi(kT) \quad (1.6b)$$

$$\psi((k+1)T) = \psi(kT) + T \frac{v_{\text{rear wheel}}(kT)}{L} \tan \alpha(kT) \quad (1.6c)$$

$$\alpha((k+1)T) = \alpha(kT) + Tu_1(kT) \quad (1.6d)$$

$$v((k+1)T) = v(kT) + Tu_2(kT) \quad (1.6e)$$

此时,依据原微分方程的动态特性,采样间隔 T 必须足够小,这时离散时间模型才能与原系统相匹配。对于线性系统,因所需精度要求,将采样间隔大约取为系统最小时间常数的 $1/5$ 或者更小。对于非线性系统,需要根据经验确定。离散时间模型可用于系统分析、控制设计、估计器设计和计算仿真等方面。

除此之外,有更复杂和更可靠的方法将连续动态系统模型转换为离散模型,参

见 Hartley、Beale 和 Chicatelli 编写的 *Digital Simulation of Dynamic Systems* 一书。

速度的表示方法有很多种,各单位间的速度数值关系如下:

$$10(\text{km/h}) = 2.778\text{m/s} = 6.2137\text{m/h}$$

1.2 差动转向移动机器人

另一类是差动转向移动机器人,其原理示意图见图 1.2。图中机器人两侧的车轮独立控制,通过协调两侧车轮的不同速度,可以使机器人在某处原地旋转、直线行驶、转弯或者按照任何指定的轨迹运动。

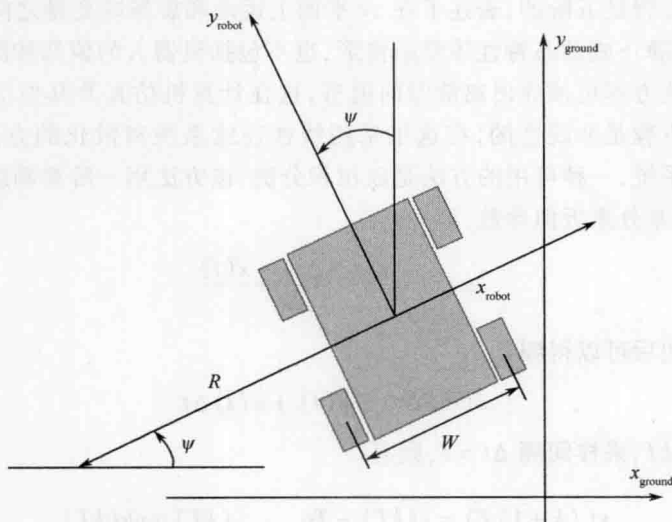


图 1.2 差动转向移动机器人原理示意图

根据几何学原理,容易得到差动转向机器人的运动方程。 R 代表机器人轨迹的瞬时曲率半径, W 代表车辆的宽度,即车轮间距,可得

$$v_{\text{left}} = \dot{\psi} (R - W/2) \quad (1.7a)$$

和

$$v_{\text{right}} = \dot{\psi} (R + W/2) \quad (1.7b)$$

上述两个方程相减,得

$$v_{\text{right}} - v_{\text{left}} = \dot{\psi} W$$

得到机器人的角速度为

$$\dot{\psi} = \frac{v_{\text{right}} - v_{\text{left}}}{W} \quad (1.8)$$

瞬时曲率半径为

$$R = \frac{v_{\text{left}}}{\dot{\psi}} + \frac{W}{2}$$

或

$$R = \frac{v_{\text{left}}}{\frac{v_{\text{right}} - v_{\text{left}}}{W}} + \frac{W}{2}$$

或

$$R = \frac{W v_{\text{right}} + v_{\text{left}}}{2 v_{\text{right}} - v_{\text{left}}} \quad (1.9)$$

可以得到沿机器人纵向轴线的速度表达式为

$$v_y = \dot{\psi} R = \frac{v_{\text{right}} - v_{\text{left}}}{W} \frac{W v_{\text{right}} + v_{\text{left}}}{2 v_{\text{right}} - v_{\text{left}}} = \frac{v_{\text{right}} + v_{\text{left}}}{2}$$

综上所述,在机器人坐标系中的运动方程为

$$v_x = 0 \quad (1.10a)$$

$$v_y = \frac{v_{\text{right}} + v_{\text{left}}}{2} \quad (1.10b)$$

$$\dot{\psi} = \frac{v_{\text{right}} - v_{\text{left}}}{W} \quad (1.10c)$$

转换为大地坐标系,则有

$$\dot{x} = -\frac{v_{\text{right}} + v_{\text{left}}}{2} \sin\psi \quad (1.11a)$$

$$\dot{y} = \frac{v_{\text{right}} + v_{\text{left}}}{2} \cos\psi \quad (1.11b)$$

$$\dot{\psi} = \frac{v_{\text{right}} - v_{\text{left}}}{W} \quad (1.11c)$$

引入速率作为控制变量,即

$$\dot{v}_{\text{right}} = u_1 \quad (1.12a)$$

$$\dot{v}_{\text{left}} = u_2 \quad (1.12b)$$

该运动模型描述的是五阶系统。

同样,可以使用欧拉积分法得到该非线性系统的离散时间模型,即

$$x((k+1)T) = x(kT) - T \frac{v_{\text{right}}(kT) + v_{\text{left}}(kT)}{2} \sin\psi(kT) \quad (1.13a)$$

$$y((k+1)T) = y(kT) + T \frac{v_{\text{right}}(kT) + v_{\text{left}}(kT)}{2} \cos\psi(kT) \quad (1.13b)$$

$$\psi((k+1)T) = \psi(kT) + T \frac{v_{\text{right}}(kT) - v_{\text{left}}(kT)}{W} \quad (1.13c)$$

$$v_{\text{right}}((k+1)T) = v_{\text{right}}(kT) + Tu_1(kT) \quad (1.13d)$$

$$v_{\text{left}}((k+1)T) = v_{\text{left}}(kT) + Tu_2(kT) \quad (1.13e)$$

不可否认,存在推导离散时间模型更复杂和更精确的方法,如包括俯仰、滚转和垂直运动的移动机器人模型。然而,如果采样间隔足够小,采用欧拉方法的模型是非常有用的,如系统分析、控制器设计、估计器设计和系统仿真等。

习 题

1. 某前轮转向机器人以 20m 的曲率半径向左转,该机器人宽 1m、长 2m,问其转向角是多少?

2. 某差动转向机器人以 20m 的曲率半径向左转,行驶速度为 1m/s,宽 1m,长 2m。问右侧和左侧的车轮速度应该是多少?

3. 采用离散模型,对转向角 45° 、长度 1.5m、速度 2.778m/s 的前轮转向机器人进行数字仿真。取不同的采样间隔 T 进行实验,找出能够得到一致结果的最大采样时间。

4. 为前轮转向机器人建立一个数字仿真系统。假设车轮间距为 1m,轮轴间距为 2m,输入为不同的速度和转向角。所建模型中应当限制转向角不超过 $\pm 45^\circ$,而与输入指令无关。分别对直线运动、转向角恒为 45° 、转向角恒为 -45° 的机器人运动进行模拟,仿真持续时间取为几秒。使用欧拉公式进行积分,并对不同采样间隔进行实验。然后将采样间隔取为 0.1s,看能否得到正确结果。绘制 x 、 y 、航向角随时间的变化图,以及 y 与 x 的曲线关系图。

5. 为差动转向机器人建立一个数字仿真系统。假设车轮间距为 1m,轮轴间距为 2m,输入为不同的左、右轮速度序列。分别对直线运动、右侧车轮速度比平均速度(即(右速度+左速度)/2)高出 10%、左侧车轮速度低于平均速度 10% 时的机器人运动进行模拟,仿真持续时间取为几秒。使用欧拉公式进行积分,并对不同采样间隔进行实验。然后,将采样间隔取为 0.1s,看能否得到正确结果。绘制 x 、 y 、航向角随时间的变化图,以及 y 与 x 的曲线关系图。

参 考 文 献

- Carlos Canudas de Wit, Bruno Siciliano, Georges Bastin (eds), "Theory of Robot Control", Springer 1996.
- Corke, P.I.; Ridley, P., "Steering kinematics for a center-articulated mobile robot", Robotics and Automation, IEEE Transactions on vol. 17, no. 2, 2001, pp. 215-218.
- Farbod Fahimi, "Autonomous Robots: Modeling, Path Planning, and Control", Springer.
- Gregory Dudek, Michael Jenkin, "Computational Principles of Mobile Robotics", Cambridge University Press, 2000.
- Hartley, Tom, Guy O. Beale and Stephen P. Chikatelli, "Digital Simulation of Dynamic Systems", Prentice Hall, 1994.
- Kansal, S. Jakkidi, S. and Cook, G. "The Use of Mobile Robots for Remote Sensing and Object Localization" *Proceedings of IECON 2003*, (pp 279-284, Roanoke, Va, USA, Nov. 2-6, 2003).
- Indiveri, G. An Introduction to Wheeled Mobile Robot Kinematics and Dynamics. In *Robocamp? Padeborn (Germany)*, April 8 2002.