

一种室内轮式自主移动机器人的导航控制研究¹⁾

李 磊^{1,2} 陈细军¹ 曹志强¹ 侯增广¹ 谭 民¹

¹(中国科学院自动化研究所复杂系统与智能科学实验室 北京 100080)

²(中国科学院高技术产业发展局 北京 100864)

(E-mail: lilei@compsys.ia.ac.cn; lilei@cashq.ac.cn)

摘 要 介绍了一种室内移动机器人 CASIA-I. 对该机器人的运动机构做了较为详细地阐述, 针对该运动机构给出了机器人的运动方程和一种导航控制算法, 并根据该算法进行了软件仿真和实物实验. 在软件仿真和实物实验两种环境下, 机器人都能够实时避开障碍物奔向目标. 仿真和实验表明: 该移动平台具有良好的可靠性, 且该导航控制算法是一种有效的导航算法.

关键词 移动机器人, 运动机构, 导航控制

中图分类号 TP24

Research on the Navigation Control of an Indoor Wheeled Autonomous Mobile Robot

LI Lei^{1,2} CAO Zhi-Qiang¹ HOU Zeng-Guang¹ TAN Min¹

¹(Lab for Complex System and Intelligence Science, Institute of Automation,
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

²(Bureau of Hi-Tech Industry Development, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100864)

(E-mail: lilei@compsys.ia.ac.cn; lilei@cashq.ac.cn)

Abstract This paper describes an indoor autonomous wheeled mobile robot CASIA-I we developed. The locomotion system of the robot, besides kinematics equation, navigation algorithm is expounded here. The software simulation and experiment are conducted by the algorithm. Both in the environment of software simulation and in the condition of experiment, the robot can avoid obstacles and navigate itself to the destination in real time. The stability of the platform and effectiveness of the algorithm are demonstrated by means of simulation example and experiment results.

Key words Mobile robot, locomotion system, navigation control

1 引言

实时避障和导航技术是反映移动机器人自主能力的关键技术之一. 该项技术要求机器

1) 国家“863”计划(2001AA422340, 2002AA423160)和国家自然科学基金(60205004)资助

Supported by the National “863” Program(2001AA422340, 2002AA423160) and National Natural Science Foundation of P. R. China(60205004)

收稿日期 2002-09-27 收修改稿日期 2003-01-06

Received September 27, 2002; in revised form January 6, 2003

人既要有对其工作环境的充分感知能力,又要有对实时感知到的环境信息进行快速处理的能力. 对该项技术的研究,国内外许多研究人员都做了大量的研究工作,较为有效的方法是势场法^[1, 2]. 由于势场法算法简单且反应速度快而被广泛采用,但存在局部极小和在狭窄通道中摆动等缺陷. 本文介绍了我们自行设计开发的装有两个差动驱动轮和两个平衡轮的室内自主移动机器人 CASIA-I, 见图 1. 该机器人的外形为正 16 棱柱——类圆柱体, 并配有一个超声环和两个红外环, 用于避障和导航. 此外, 该机器人的运动机构能迅速地改变方向, 能在狭窄的空间实现快速地自由移动和绕自身质心的零半径自转. 针对该运动机构, 本文分析了该机器人的运动方程, 同时就势场法的缺陷, 提出了一种改进的导航算法, 并根据该导航算法进行了软件仿真和实物实验.

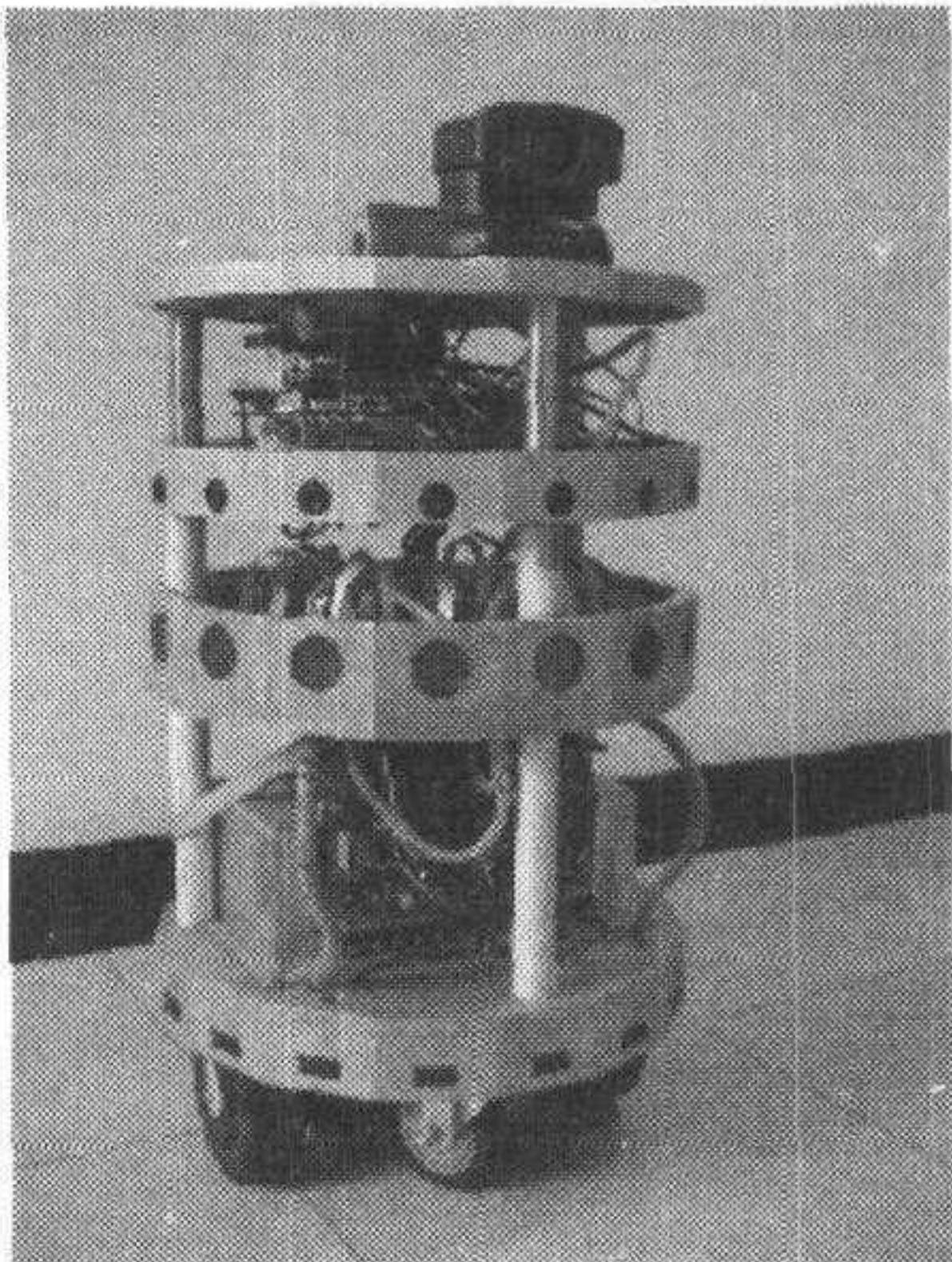


图 1 移动机器人 CASIA-I 整体结构图
Fig. 1 General framework of mobile robot CASIA-I

2 运动机构

移动机器人 CASIA-I 的底盘装有两个伺服主驱动轮; 在主驱动轮轴线的中垂线上, 各装有一个平衡轮. 主驱动轮上集成有直流无刷伺服电机、光电轴编码器、轴编码轮轮毂和驱动轮轮毂; 平衡轮配有直流无刷伺服导向电机. 为保正机器人通过斜坡或凹坑时, 驱动轮与凹凸地面始终保持良好地接触, 我们在平衡轮上安装了悬挂系统.

由于机器人自转时平衡轮的方向与机器人运动的方向会出现正交, 施加于自由旋转的

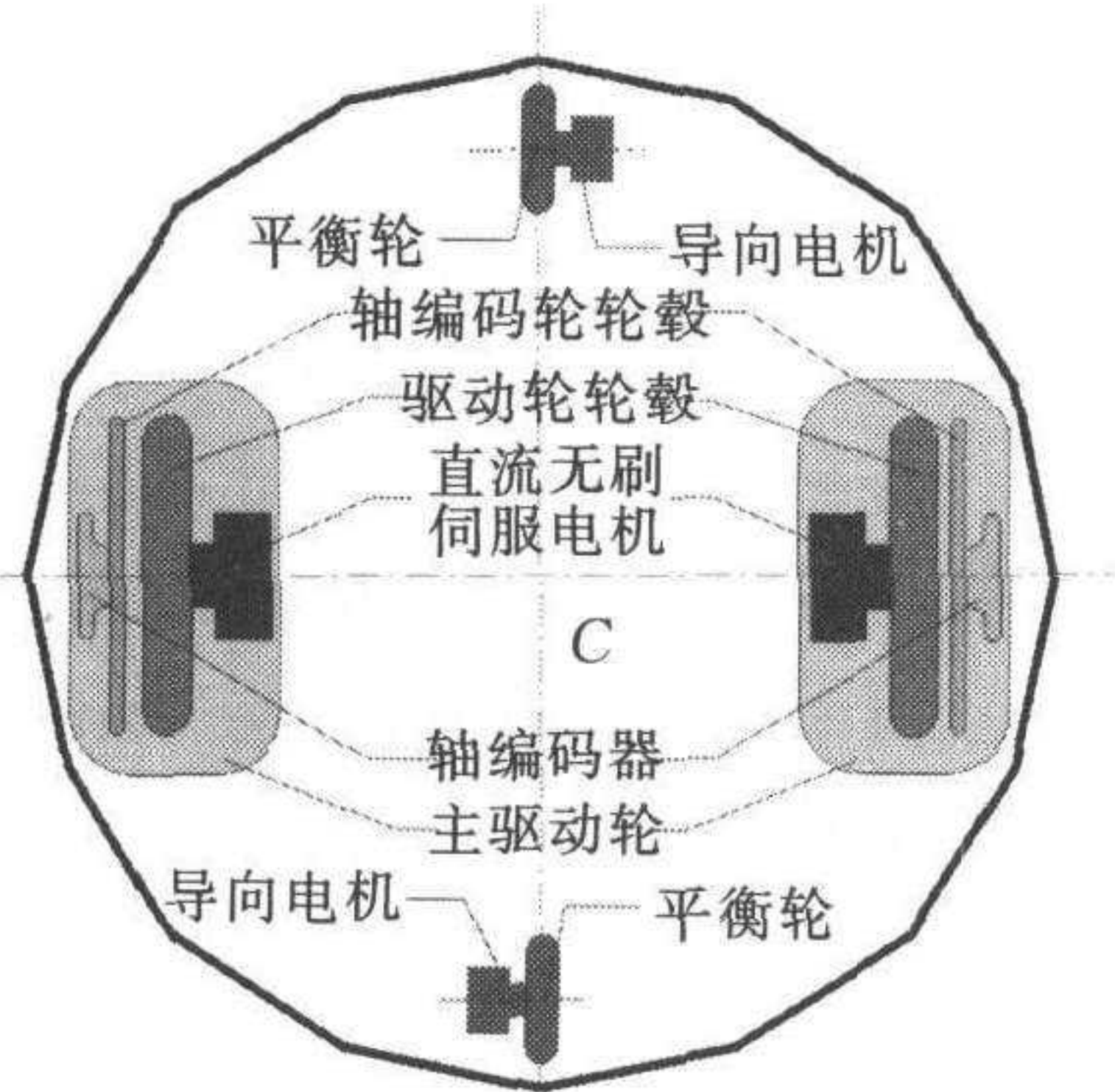


图 2 移动机器人 CASIA-I 轮系结构
Fig. 2 Wheels framework of mobile robot CASIA-I

平衡轮上的摩擦力会阻碍其运动, 进而导致定位误差. 我们在两个平衡轮上分别安装了直流无刷伺服电机, 当正交力加载到平衡轮上时, 平衡轮上的电机将做出响应, 使平衡轮适当地转动, 以摆脱机构的上述死锁状态. 光电编码器及其轮毂用于推测航行法 (dead-reckoning), 它使机器人能确定自身的相对位置. CASIA-I 轮系的布置情况参见图 2. 该布置方法使机器人能够前进、后退、转弯和原地自转. 与以往传统轮式移动机器人相比, 该机器人机械系统的设计降低了能耗, 负载能力更强.

3 运动学模型与导航控制

3.1 运动学模型

由文献[3~8]的分析知: 由于平衡轮只起支撑作用, 既不掌舵也不产生推进力, 在求解 2-DOF 轮式移动机器人的运动学方程时, 平衡轮可以被忽略, 其个数不会影响运动学方程. 于

是得出具有两个同轴驱动轮和与之正交的两个平衡轮的移动机器人 CASIA-I 的运动学方程为

$$\dot{\boldsymbol{p}} = \begin{bmatrix} \dot{x}(t) \\ \dot{y}(t) \\ \dot{\theta}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta(t) & 0 \\ \sin\theta(t) & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \boldsymbol{q} \tag{1}$$

上式中 $\boldsymbol{p} = (x(t) \ y(t) \ \theta(t))^T$; $(x(t), y(t))$ 为 t 时刻移动机器人的位置, 由其两个驱动轮的轴中点 C 的坐标表示, 见图 2; $\theta(t)$ 为 t 时刻移动机器人的方向角, 由机器人前进方向与 X 轴夹角 $\theta(t)$ 来表示; $\boldsymbol{q} = (v(t) \ \omega(t))^T$; $v(t), \omega(t)$ 分别为 t 时刻移动机器人的线速度和角速度, 在运动学模型中二者是控制输入.

3.2 导航控制

本文采用的机器人导航控制结构为 avoid_obstacle 和 move_to_goal 两个行为模块构成的包容式结构. 如图 3 所示, 整个控制结构由上述两个行为模块构成, 不同的行为模块根据传感器的输入, 决定该行为的输出. 同时, 高层行为可以抑制低层行为, 图 3 中 S 表示抑制. 用于避障的 avoid_obstacle 行为抑制用于奔向目标的 move_to_goal 行为. 本文的导航方法是由 avoid_obstacle 或 move_to_goal 行为规划控制输入向量 $\boldsymbol{q}$.

3.2.1 move_to_goal 行为

当机器人未探测到障碍时, move_to_goal 行为被激活. 以机器人起始点 S 为极点 O , X 轴为极轴, 建立极坐标系, 如图 4 所示. 机器人当前位置 R 为 $(\rho_R, \beta(t))$, $0 \leq \beta(t) \leq 2\pi$; 目标点 D 坐标为 (ρ_D, α) , $0 \leq \alpha \leq 2\pi$; 机器人当前位置到目标点的距离为 $|\overline{RD}|$; $\varphi(t)$ 为机器人期望转向角, Δt 为采样周期.

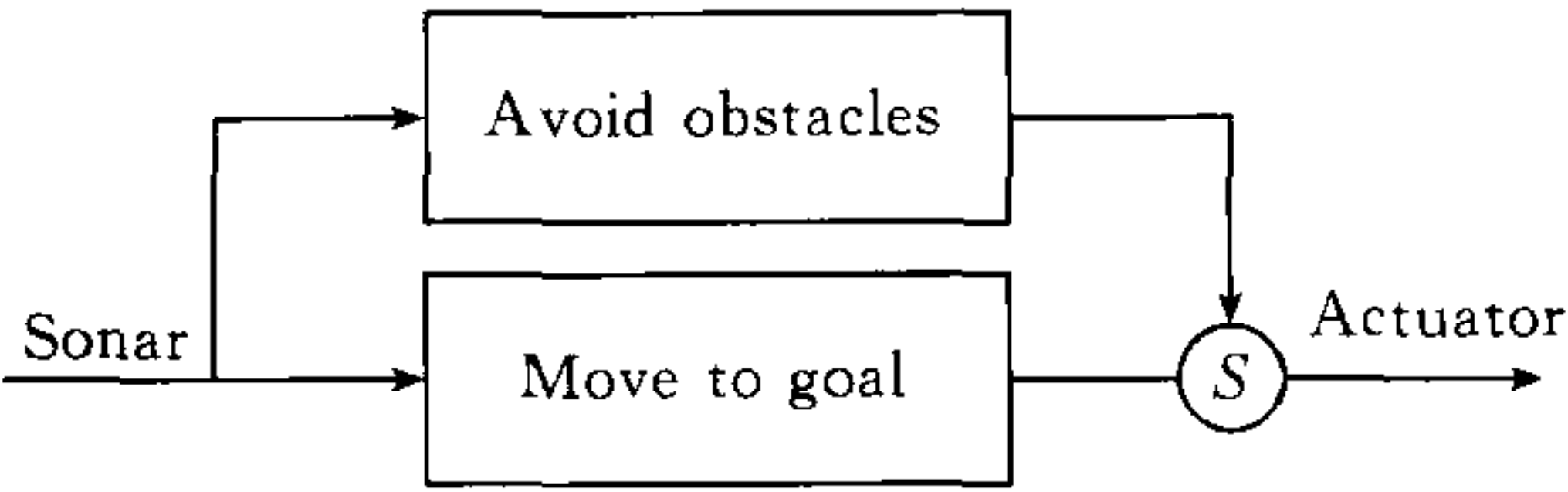


图 3 机器人 CASIA-I 的控制结构
Fig. 3 Control architecture of robot CASIA-I

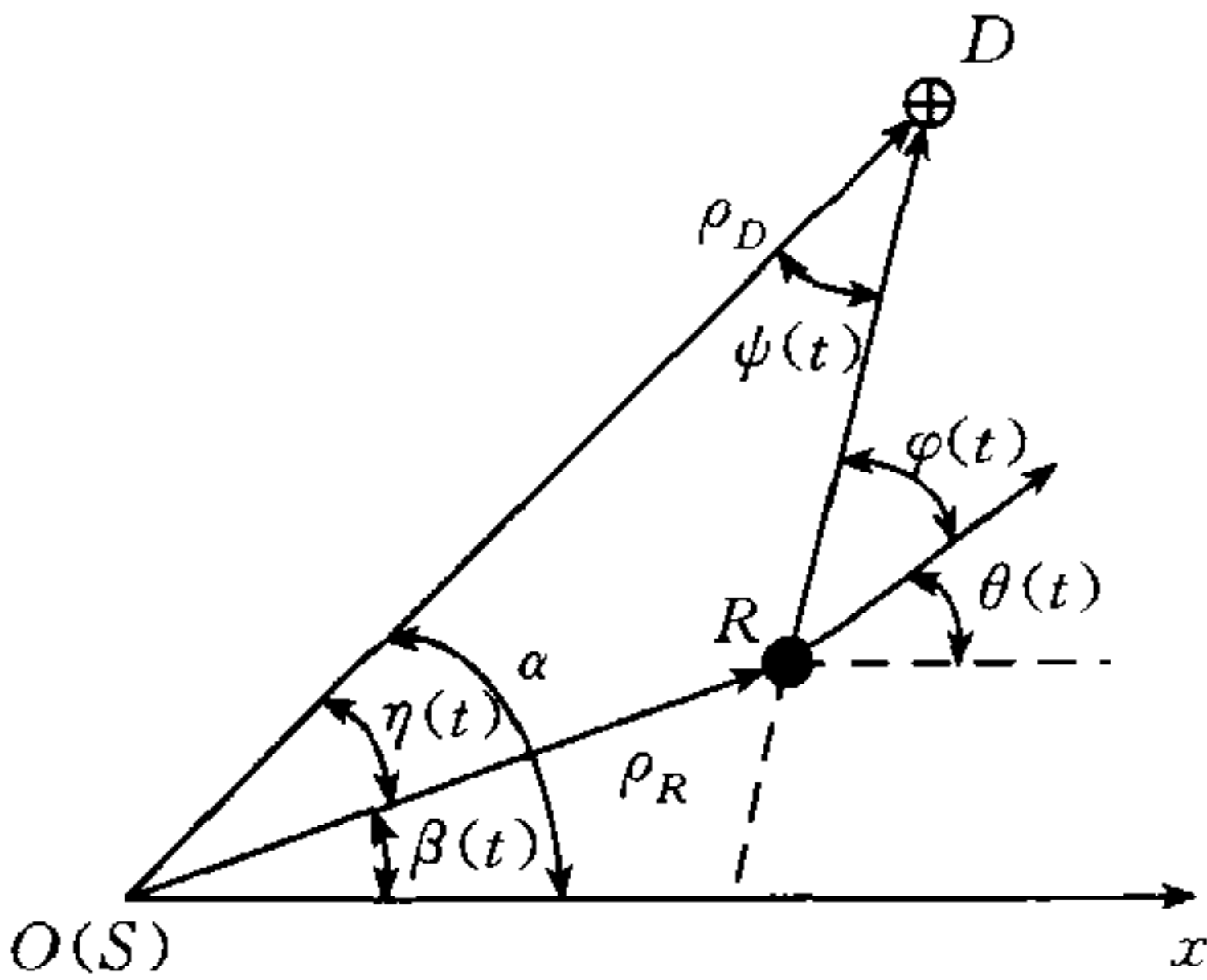


图 4 move_to_goal 示意图
Fig. 4 Sketch map for move_to_goal

考虑到最大角速度 $\omega_{\max}$ 的限制, 则 move_to_goal 行为规划的控制输入为

$$v_{mtg}(t) = \begin{cases} v_{\max}, & |\overline{RD}| \geq v_{\max} \cdot \Delta t \\ |\overline{RD}| / \Delta t, & |\overline{RD}| < v_{\max} \cdot \Delta t \end{cases} \tag{2}$$

其中 $v_{\max}$ 为机器人最大直线运动速度.

$$\omega_{mig}(t) = \begin{cases} \omega_{\max}, & \omega_r(t) \geq \omega_{\max} \\ \omega_r(t), & \omega_r(t) < \omega_{\max} \end{cases} \quad \omega_r(t) = \frac{\gamma(t)}{\Delta t}$$
$$\gamma(t) = \begin{cases} \delta(t), & \delta(t) \in [0, 2\pi) \\ \delta(t) + 2\pi, & \delta(t) \in [-2\pi, 0) \\ \delta(t) + 4\pi, & \delta(t) \in [-3\pi, -2\pi) \\ \delta(t) - 2\pi, & \delta(t) \in [2\pi, 3\pi) \end{cases} \quad (3)$$

$$\delta(t) = (-1)^k \cdot \psi(t) + \alpha - \theta(t), \quad k = \begin{cases} 0, & \alpha - \beta(t) \in [0, \pi] \cup [-2\pi, -\pi] \\ 1, & \alpha - \beta(t) \in [-\pi, 0] \cup [\pi, 2\pi] \end{cases}$$

$$\psi(t) = \arccos \frac{\rho_D - \rho_R \cos \eta(t)}{\sqrt{\rho_D^2 + \rho_R^2 - 2\rho_D\rho_R \cos \eta(t)}}$$
$$\eta(t) = \begin{cases} \alpha - \beta(t), & \alpha - \beta(t) \in [0, \pi] \\ \beta(t) - \alpha, & \alpha - \beta(t) \in [-\pi, 0] \\ \beta(t) - \alpha + 2\pi, & \alpha - \beta(t) \in [\pi, 2\pi] \\ \alpha - \beta(t) + 2\pi, & \alpha - \beta(t) \in [-2\pi, -\pi] \end{cases} \quad (4)$$

3.2.2 avoid_obstacle 行为

本文研究的机器人导航,采用的传感器为安装在机器人超声环上的 16 个超声阵列传感器,如图 5 所示. 16 个超声传感器沿机器人四周均匀分布,表示为 $S_0 \sim S_{15}$,超声 S_i 的输出为 R_i . 每个传感器的探测区域均为圆心角 22.5° 的一个扇形区域. 该超声环的输出是一系列距离值,通过事先已确定的各个超声相对机器人当前运动方向的角度,就可以确定在机器人的

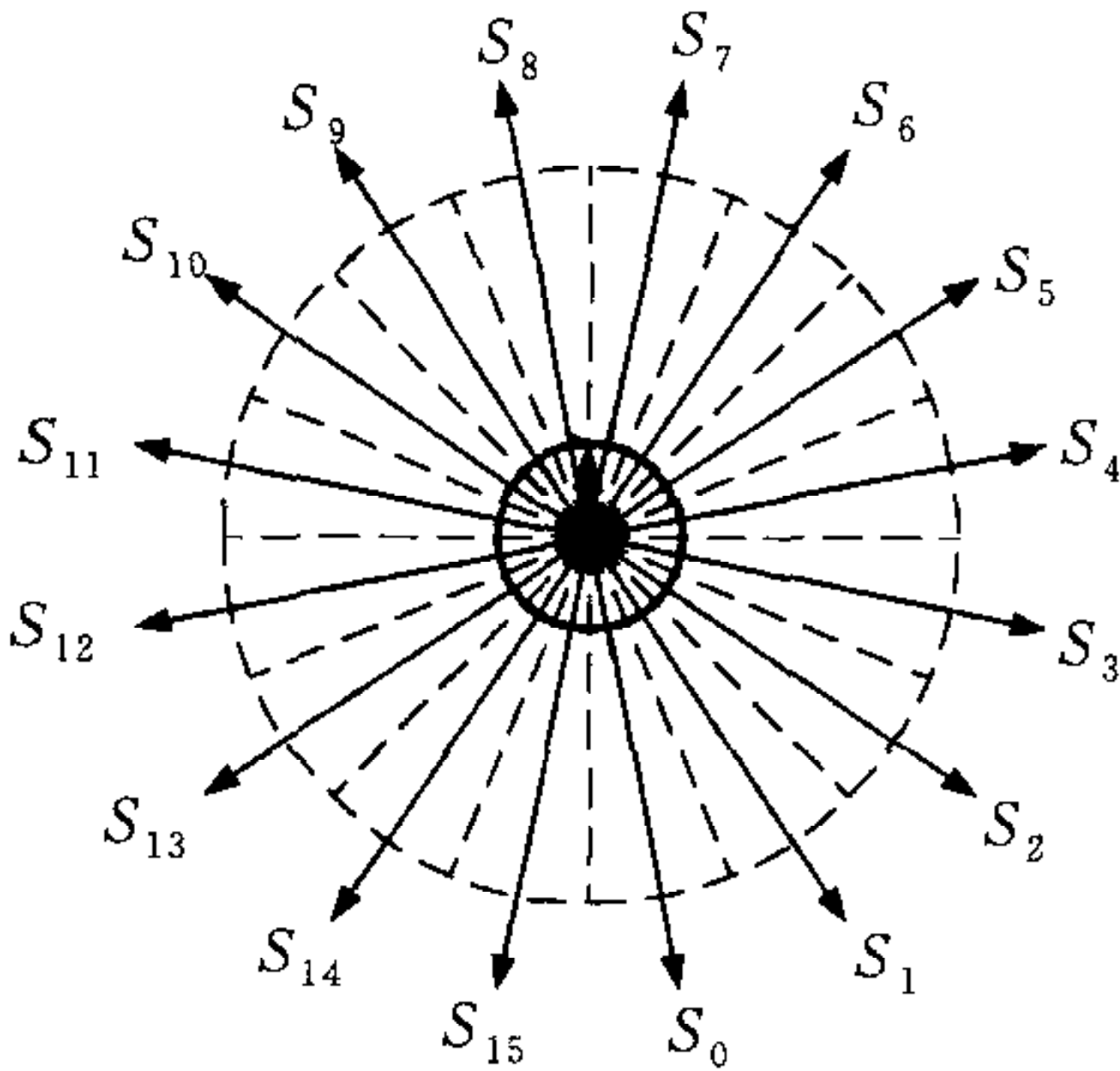


图 5 CASIA-I 超声布置图
Fig. 5 Disposal map for robot CASIA-I

各个方向上是否有障碍以及机器人与该障碍的距离. 如某超声在其所正对的方向上没探测到障碍物,则该超声的输出为 -1. avoid_obstacle 行为根据机器人当前探测到的环境信息,决定机器人如何运动才能避开环境中的障碍物. 当该行为与 move_to_goal 行为相结合时,能使机器人绕开环境中的障碍到达目标点. 该行为不仅要决定遇到障碍物时机器人的运动,而且要决定何时抑制其底层的 move_to_goal 行为.

根据 Khatib 的人工势场法^[1],本文 avoid_obstacle 行为设计对该方法进行了改进. 根据文献[9~12]所述,人工势场法认为在不同方向上的障碍物对机器人的威胁是相同的,并对各方向上的障碍相同对待,虽可以保证机器人与静态障碍不发生碰撞,但机器人的运动轨迹却不是最优轨迹. 其实,在不同方向上的障碍物对机器人的威胁是不同的,因为机器人的运动总是朝向前方的,所以位于机器人正前方的障碍对于机器人的影响最大,而其侧面的障碍的影响相对小一些.

改进的势场法认为不同方向上的障碍对机器人的影响大小是不同的,着重于机器人正前方的障碍. 为保证不与障碍物发生碰撞,avoid_obstacle 行为的输出须满足避开正前方障碍的要求. 则 avoid_obstacle1 行为规划的控制输入为

$$v_{ao}(t) = \begin{cases} \phi, & l = I_{\min} \cap r = I_{\min} \\ 0, & l > I_{\max} \cup r > I_{\max} \\ v_{\max}, & \text{其它} \end{cases} \quad (5)$$

$$\omega_{ao}(t) = \begin{cases} \phi, & l = I_{\min} \cap r = I_{\min} \\ \theta_0/\Delta t, & l \leq r \\ -\theta_0/\Delta t, & l > r \end{cases} \quad (6)$$

上式中 ϕ 表示 avoid-obstacle 行为的输出为空, 即不抑制其底层行为 move-to-goal 的输出; θ_0 是一个确定值, 表示机器人在一步中转动的角度; l, r 表示机器人当前位置上左右两边障碍物的逼近程度. 当左边障碍物更接近机器人时, 机器人就右转; 当右边障碍物更接近机器人时, 机器人就左转. l, r 的值可由下式得到

$$l = \sum_{i=8}^{12} \frac{|\cos\alpha_i|}{(R_i + R_0)}, \quad r = \sum_{i=3}^7 \frac{|\cos\alpha_i|}{(R_i + R_0)}$$

$$\alpha_i = \begin{cases} \frac{(2 \cdot (7-i) + 1) \cdot \pi}{16}, & 0 \leq i \leq 7 \\ \frac{(2 \cdot (i-8) + 1) \cdot \pi}{16}, & 8 \leq i \leq 16 \end{cases} \quad (7)$$

式中 α_i 为第 i 个超声在机器人局部坐标系中的方向角, $\cos\alpha_i$ 表示第 i 个超声所探测到的障碍物对当前机器人的影响权系数. 当 S_i 的输出大于 0 时, R_i 就是 S_i 的输出; 当 S_i 的输出小于 0 时, R_i 为超声的探测范围. 为防止 l, r 趋于无穷大, 取 R_0 为一裕量. 因为 S_0, S_1, S_2 三个超声指向机器人的后方, 对于机器人躲避静态障碍的影响不大, 故求 l 时不考虑这三个传感器的读数; 同理, 求 r 时不考虑 S_{13}, S_{14}, S_{15} 的读数.

$I_{\min}$ 用于确定在何种情况下机器人不用考虑与障碍物的碰撞, 即不抑制其底层的行为. 当传感器没有探测到障碍物时, avoid-obstacle 行为就不被激活. 设超声的最大探测范围为 $R_{\text{range}} > R_i$, 则 $I_{\min}$ 可表示为

$$I_{\min} = \sum_{i=3}^7 \frac{|\cos\alpha_i|}{(R_{\text{range}} + R_0)} = \sum_{i=8}^{12} \frac{|\cos\alpha_i|}{(R_{\text{range}} + R_0)} \quad (8)$$

$I_{\max}$ 用于判断障碍是否离机器人很近. 当障碍离机器人很近时, 机器人必须停止, 以避免碰撞. 假设机器人的最大速度为 $v_{\max}$, 采样周期为 Δt , 则为确保机器人不会与障碍物碰撞, $I_{\max}$ 可表示为

$$I_{\max} = \frac{1}{(v_{\max} \cdot \Delta t + R_0)} \quad (9)$$

以保证机器人距任何静态障碍物的距离都不会小于其最大步长 $v_{\max} \cdot \Delta t$.

根据式(2)~(9), 机器人可以在复杂环境中规划出一条无碰撞的较优路径.

4 实时导航仿真与实验

仿真实验环境是模拟实验室的一段走廊, 在该段走廊中给定了机器人的起始点 S 和目标点 D , 并在该两点之间放置了大小不同的三个方形静态障碍物. 仿真实验要求机器人根据上述的机器人导航控制算法, 在给定起始点和目标点之后, 从起始点出发能够迅速地避开该两点之间的障碍物, 最终到达目标点. 我们在自己开发的 Multisim 仿真平台上进行了上述仿真实验.

仿真参数设置:取机器人直径 0.45m,最大速度 0.8m/s,超声传感器的最大探测距离 $R_{\text{range}}=1.1\text{m}$,avoid-obstacle 的行为参数为 $\theta_0=\pi/16$, $R_0=0.01$, $I_{\text{min}}=2.554$, $I_{\text{max}}=11.11$. 机器人的任务是从起始点 $S(0,0)$ 运动到目标点 $D(8.01,1.46)$, $\omega_{\text{max}}=2.6\text{rad/s}$,采样周期 $\Delta t=100\text{ms}$. 仿真结果如图 6 所示.

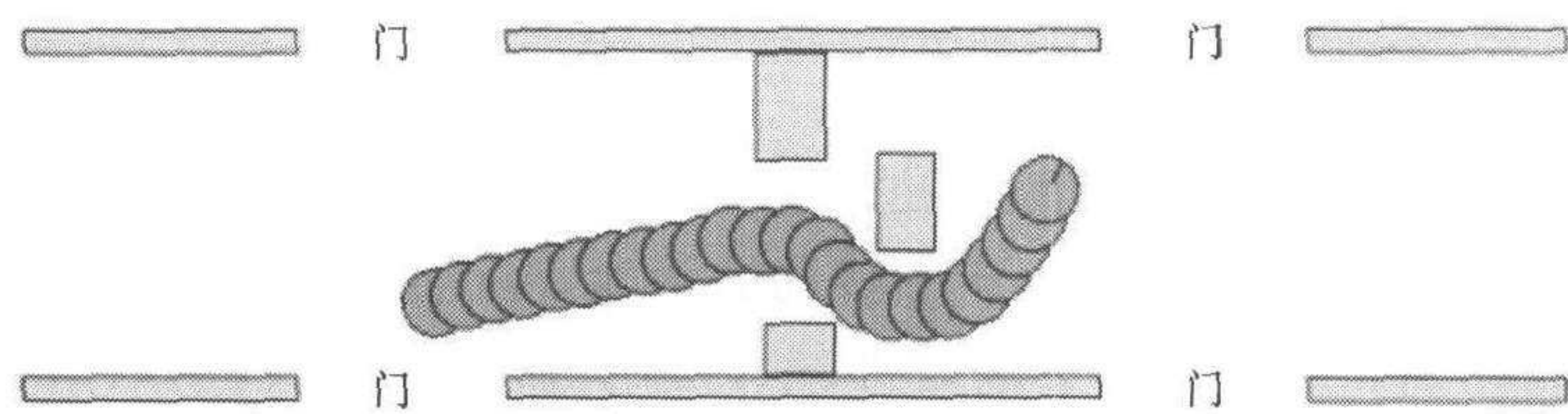


图 6 走廊中障碍环境下的机器人导航仿真

Fig. 6 Simulation for robot navigation in obstacle present corridor

仿真实验结果表明,我们提出的机器人导航控制算法是一种有效的导航算法. 为了进一步验证我们所提出的导航控制算法的有效性,我们按照仿真实验的环境布置和参数设置,设计了实物导航实验. 在实验室的走廊中放置大小不同的三个箱子作为静态障碍物,如图 7 所示. 在给定机器人的目标点后,机器人开始从图(a)所示的起始点向图(b)所示的目标点运动. 当遇到障碍物后,采用上述的导航算法,实时避开障碍最后到达目标点. 整个过程经历了约 12 秒.



图 7 导航实验过程

Fig. 7 Scene for robot navigation experiment

实物导航实验进一步说明上述的导航控制算法是一种较为有效的移动机器人导航算法.

5 结 论

本文设计了基于 16 个超声传感器的导航控制算法,并对该算法进行了仿真和真实场景实验. 仿真和实验结果表明:在满足运动学约束的情况下,机器人可实时避开障碍物奔向目标. 该导航控制算法是一种有效的导航算法. 同时该实验也测试了我们设计的移动平台具有良好的可靠性.

References

- 1 Khatib O. Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots. *International Journal of Robotics Research*, 1986, **5**(1): 90~98
- 2 Wang Yue-Chao, Jing Xing-Jian. Steering and control of nonholonomic wheeled mobile robots using artificial fields. *Acta Automatica Sinica*, 2002, **28**(5): 777~783(in Chinese)
- 3 Guy Campion, Georges Bastin *et al.* Structural properties and classification of kinematics and dynamic models of

- wheeled mobile robots. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 1996, **12**(1): 47~62
- 4 Gregory Dudek, Michael Jenkin. *Computational Principles of Mobile Robotics*. London: Cambridge University Press, 2000. 67~240
- 5 Ma Bao-Li, Huo Wei. Corrdinated motion control of free-flying space robot system. *Acta Automatica Sinica*, 1998, **24**(1):50~55(in Chinese)
- 6 Dong Wen-Jie, Huo Wei. Tracking control of mobile robots with nonholonomic constraint. *Acta Automatica Sinica*, 2000, **26**(1):1~6(in Chinese)
- 7 Jiang Ping, Lin Jing, Chen Hui-Tang, Wang Yue-Juan. Integration of vision and control for robot curve tracking. *Acta Automatica Sinica*, 1999, **25**(1):18~24(in Chinese)
- 8 Wu Wei-Guo, Chen Hui-Tang, Wang Yue-Juan. Global trajectory tracking control of mobile robots. *Acta Automatica Sinica*, 2001, **27**(3):326~331(in Chinese)
- 9 Bryson A E, Ho Y C. *Applied Optimal Control*. New York: Wiley, 1975. 82~128
- 10 Zhang Bin. Research and development of simulation platform for multi-robot systems[*master dissertation*]. Beijing: Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, 2001(in Chinese)
- 11 Wang Shuo, Fan Yong, Tan Min. Parameter optimization based on genetic algorithm in multiple mobile robot system. *Acta Automatica Sinica*, 2002, **28**(4):642~645(in Chinese)
- 12 Yang Xin-Xin, He Ke-Zhong, Guo Mu-He, Zhang Bo. A front wheel steering model of outdoor mobile robot based on neural networks. *Acta Automatica Sinica*, 2000, **26**(2):154~161(in Chinese)

李 磊 博士. 主要研究方向为机器人视觉、图像处理、智能机器人控制等.

(**LI Lei** Ph. D. . His research interests include robot vision, image processing, and intelligent robot control.)

陈细军 中国科学院自动化研究所博士研究生. 主要研究方向为机器人控制、工业过程控制等.

(**CHEN Xi-Jun** Ph. D. candidate at Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences. His research interests include robot control and industry control.)

曹志强 博士. 目前的研究方向为多机器人系统、智能机器人等.

(**CAO Zhi-Qiang** Ph. D. . His research interests include multi-robot systems and intelligent robot.)

侯增广 博士, 副研究员. 研究兴趣为机器人技术、智能控制、多传感器数据融合.

(**HOU Zeng-Guang** Ph. D. , associate professor at Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences. His research interests include robotics, intelligent control, data fusion, and optimization methods.)

谭 民 研究员, 博士生导师. 主要研究方向为智能机器人技术、智能控制、先进制造系统.

(**TAN Min** Ph. D. , he is a professor at Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences. His research interests include intelligent robot, intelligent control, and advanced manufacturing system.)