

基于改进QPSO的两轮移动机器人区间二型模糊逻辑控制

佃松宜, 梁伟博, 赵 涛[†]

(四川大学 电气信息学院, 成都 610065)

摘 要: 以两轮移动机器人(TWMR)为对象, 针对机器人的非线性模型分别设计控制机器人平衡和位置的区间二型模糊逻辑控制器(IT2 FLC). 针对区间二型模糊规则中参数难以设定的问题, 通过改进的量子粒子群算法(LTQPSO)优化区间二型模糊集参数, 并给出优化算法的流程图. 针对区间二型模糊逻辑控制器和一型模糊逻辑控制器(T1 FLC)对平衡和位置的控制效果进行对比. 进一步考虑质量不确定和位置扰动对两种控制器控制效果的影响. 仿真结果表明, IT2 FLC可以有效地达到设定的控制目标, 与T1 FLC相比, IT2 FLC拥有更好的处理不确定性的能力以及更强的抗扰动能力.

关键词: 区间二型模糊逻辑; 模糊集; 不确定性; 量子粒子群; 优化; 两轮移动机器人

中图分类号: TP273

文献标志码: A

Interval type-2 fuzzy logic control for a two-wheeled mobile robot based on improved QPSO

DIAN Song-yi, LIANG Wei-bo, ZHAO Tao[†]

(College of Electrical Engineering and Information Technology, Sichuan University, Chengdu, 610065, China)

Abstract: A two-wheeled mobile robot (TWMR) is considered, and an interval type-2 fuzzy logic controller (IT2 FLC) is designed to control its balance and position, respectively. It is difficult to determine the parameters in interval two type fuzzy rules, thus, the improved quantum particle swarm optimization (LTQPSO) algorithm is utilized to optimize the parameters of interval type-2 fuzzy sets. The flowchart of the optimization algorithm is also presented. The control effect of the IT2 FLC and the type-1 fuzzy logic controller (T1 FLC) on balance and position is compared. The influence of mass uncertainty and position disturbance on the control effect of two controllers is considered. The simulation results show that the IT2 FLC designed can achieve the set control objectives effectively. Compared with the T1 FLC, the IT2 FLC has better ability to handle uncertainty and stronger anti-disturbance ability.

Keywords: interval type-2 fuzzy logic; fuzzy set; uncertainty; quantum particle swarm; optimization; two-wheeled mobile robot

0 引 言

两轮移动机器人(TWMR)具有相对简易的机械结构以及自主平衡的能力, 更容易操控, 在各个领域中得到广泛使用, 可以作为勘探、救援、搜索任务中的移动平台^[1]. 在提倡清洁能源的当下, 也可以改造成广受使用者欢迎的两轮平衡小车. 两轮移动机器人本质上是一个两轮倒立摆, 两个同轴轮分别安装在机体两侧, 整体的质心位于轮轴的上方, 因此, 小车必须通过自身的运动维持平衡. 倒立摆是一种典型的非线性系统, 高度不稳定且易受干扰, 已广泛地作为研

究各种控制策略的展示平台. 有大量的文献对两轮移动机器人的建模^[2-7]、平衡和运动控制^[8-11]进行了研究. 然而, 现有研究较少考虑不确定性和外部扰动对两轮移动机器人性能的影响.

模糊逻辑控制(FLC)在处理不确定性以及干扰方面展现了卓越的性能. Elbardini等^[12]提出了一种IT2F-PID方法, 用于控制具有不确定模型的倒立摆; Lam等^[13]采用区间二型模糊模型来描述受不确定性影响的非线性对象的动力学模型; Wang等^[14]采用T-S模糊模型描述干扰. 二型模糊集(T2 FSs)采用

收稿日期: 2018-05-24; 修回日期: 2018-09-10.

基金项目: 国家自然科学基金项目(61703291); 四川省科技厅应用基础研究计划项目(2016JY0085).

责任编委: 侯忠生.

作者简介: 佃松宜(1972—), 男, 教授, 博士, 从事运动控制和机器人控制等研究; 赵涛(1988—), 男, 副研究员, 博士, 从事模糊控制及其应用等研究.

[†]通讯作者. E-mail: zhaotaozhaogang@126.com.

一型模糊集描述对象属于某个模糊集合的程度,从而有效提高了系统处理不确定性的能力^[15-17].近年来,二型模糊理论得到了较大的发展.系统复杂度越来越高,不确定性也越来越不可不免,二型模糊集的优势得以展现,研究者相继取得了许多有价值的成果^[18-29].因此,采用二型模糊集的模糊逻辑控制可以增强系统处理不确定性和干扰的能力^[13].

在二型模糊控制系统中,隶属度参数设置的优劣直接反映在控制效果上,尤其对于复杂性高、要求精度高的非线性被控系统,传统的参数设置方法(平均分配或试错法)往往很难满足系统的控制要求.另外,由于二型模糊控制系统隶属度函数参数维数和复杂度高于传统的模糊系统,使得传统的优化方法很难获得有效的参数配置.

粒子群算法(PSO)^[30]是一种广泛使用的优化算法.尽管 PSO 与遗传算法(GA)的效果基本相同,但 PSO 相较于 GA 更加高效^[31].量子粒子群算法(QPSO)是一种基于量子力学的全新粒子群优化方法,在量子空间中 δ 势是一种很好的粒子量子运动的模型,粒子在聚集状态下的性质完全不同.考虑到粒子的量子行为,根据量子的测不准原理描述粒子的运动状态,在整个可行解空间中搜索全局最优解,因此, QPSO 是一种全局收敛表现优于 PSO 的算法^[32].针对 QPSO,文献[33]实施了进一步的改进,并获得了较好的全局搜索能力.针对二型模糊系统规则参数设置问题,本文采用改进的量子粒子群算法^[33]优化隶属函数参数,并将优化后的区间二型模糊系统用于两轮移动机器人的平衡和位置控制.

与现有文献相比,本文的主要创新点如下:1)针对两轮移动机器人的平衡和位置控制,分别设计基于优化思想的 IT2 FLC;2)针对两轮自平衡移动机器人二型模糊逻辑控制中规则参数难以确定的问题,基于改进的 QPSO 算法优化区间二型模糊系统规则参数,从而提升区间二型模糊逻辑控制器控制效果;3)通过添加不确定性和干扰测试了所设计的优化控制器的先进性.最后通过仿真实验验证了本文所提出方法的有效性.

1 两轮移动机器人(TWMR)

首先,针对一个标准的两轮移动机器人阐述其工作原理.两轮移动机器人本质上是一个两轮倒立摆,假设其工作在一个平面上,结构示意图如图1.两个同轴轮分别安装在车体两侧,两轮独立驱动,整体的质心位于轮轴的上方.因此,小车必须通过自身的运动维持平衡.

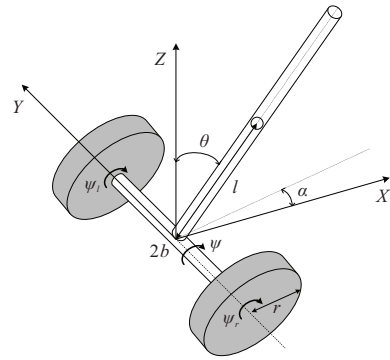


图1 两轮移动机器人结构示意图

图1中: r 是轮子的半径, ψ_l 、 ψ_r 分别是左右轮的旋转角度, $2b$ 为两轮之间的距离, l 表示轮轴与倒立摆重心之间的距离, α 为两轮移动倒立摆的偏航角度, θ 为倒立摆的俯仰角度.

两轮移动机器人的非线性模型^[2,34]可表示为

$$\dot{x} = f(x) + g(x)u. \quad (1)$$

其中

$$f(x) = \frac{1}{\Delta} [f_1, f_2, f_3, f_4]^T, \quad (2)$$

$$g(x) = \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} \hat{m}_{11} + \hat{m}_{12} \cos x_1 \\ -\hat{m}_{22} - \hat{m}_{12} \cos x_1 \end{bmatrix},$$

$$\Delta = \hat{m}_{12}^2 \cos^2 \theta - \hat{m}_{11} \hat{m}_{22};$$

$$\begin{cases} f_1 = \Delta \cdot x_2, \\ f_2 = \hat{m}_{12}^2 x_2^2 \cos x_1 \sin x_1 - 2\hat{m}_{12} \cos x_1 \hat{d}_w x_4 - \\ \quad \hat{m}_{11} \hat{g}_b \sin x_1 + 2\hat{m}_{12} \cos x_1 \hat{d}_b (x_2 - x_4) + \\ \quad 2\hat{m}_{11} \hat{d}_b (x_2 - x_4), \\ f_3 = \Delta \cdot x_4, \\ f_4 = -\hat{m}_{22} \hat{m}_{12} x_2^2 \sin x_1 + 2\hat{m}_{22} \hat{d}_w x_4 - \\ \quad 2\hat{m}_{22} \hat{d}_b (x_2 - x_4) + \hat{m}_{12} \hat{g}_b \cos x_1 \sin x_1 - \\ \quad 2\hat{m}_{12} \hat{d}_b (x_2 - x_4) \cos x_1; \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} \psi = \frac{1}{2}(\psi_r + \psi_l), \\ \hat{m}_{11} = (\hat{m}_b + 2\hat{m}_w) \hat{r}^2 + 2\hat{n}_{wa}, \\ \hat{m}_{12} = \hat{m}_b \hat{l} \hat{r}, \\ \hat{m}_{22} = \hat{m}_b \hat{l}^2 + \hat{n}_{yb}, \\ \hat{n}_{bla} = \hat{n}_{zb} + \hat{m}_b \hat{l}^2, \\ \hat{g}_b = \hat{m}_b \hat{g} \hat{l}, \\ \hat{m}_{33} = 2\hat{n}_{wd} + 2\hat{b}^2 / \hat{r}^2 (\hat{n}_{wa} + \hat{m}_w \hat{r}^2). \end{cases} \quad (4)$$

\hat{m}_b 和 \hat{m}_w 分别为机器人身体和轮子的质量, \hat{n}_{yb} 和 \hat{n}_{zb} 分别为机器人绕 Y 轴和 Z 轴转动的转动惯量,

\hat{n}_{wa} 和 \hat{n}_{wd} 是轮子绕轮轴转动的转动惯量, \hat{d}_b 和 \hat{d}_w 是驱动系统和地面的阻力.

本文对两轮移动机器人的控制分为两部分: 平衡控制和位置控制. 机器人可以通过自身前后移动维持自身平衡 ($\theta = 0$), 因此, 只需给定适当的控制量即可实现对机器人的平衡控制. 移动机器人的位置控制原理如图2所示. 图2(a)机身向前倾斜 ($\theta > 0$), 机器人应加速向前移动来使自身维持平衡, 此时倾斜角不断减小, 移动速度也逐渐降低, 直至图2(b)所示状态, 速度降为0; 反之如图2(c)所示 ($\theta < 0$), 机器人应向后移动. 因此, 位置控制可以通过给予移动机器人一定的倾斜角(俯仰角)来实现.

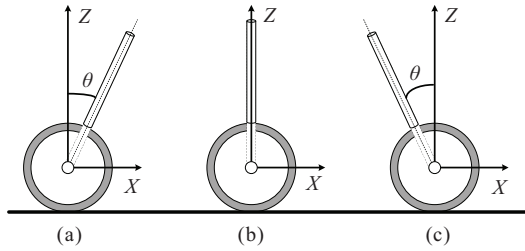


图2 两轮移动机器人位置控制原理

2 改进的量子粒子群算法原理

2.1 量子粒子群算法

在QPSO算法中, 由 M 个代表潜在问题解的粒子组成群体, 即 $X = \{X_1, X_2, \dots, X_M\}$, 每个粒子存在于一个 N 维的目标搜索空间中. 在 t 时刻, 第 i 个粒子位置表示为 $X_i(t) = (x_{i,1}(t), x_{i,2}(t), \dots, x_{i,N}(t))$. 个体最好位置表示为 $P_i(t) = (P_{i,1}(t), P_{i,2}(t), \dots, P_{i,N}(t))$, 种群最好位置为 $G(t) = (G_1(t), G_2(t), \dots, G_N(t))$, 且 $G(t) = P_g(t)$, 其中 g 表示处于全局最优位置的粒子的下标, $g \in \{1, 2, \dots, M\}$.

粒子 i 的个体最好位置 $P_i(t)$ 可由下式确定:

$$P_i(t) = \begin{cases} X_i(t), & f(X_i(t)) < f(P_i(t-1)); \\ P_i(t-1), & f(X_i(t)) \geq f(P_i(t-1)). \end{cases} \quad (5)$$

群体的全局最好位置 g 由下式确定:

$$g = \arg \min_{1 \leq i \leq M} \{f(P_i(t))\}, \quad (6)$$

$$G(t) = P_g(t). \quad (7)$$

在量子时空框架中, 粒子的量子态由波函数 $\psi(x, t)$ 表示, 利用 δ 势阱和 Monte Carlo 方法, 在经典空间中粒子位置的更新可由下式表示:

$$x_{i,j}(t+1) = p_{i,j}(t) \pm L_{i,j}(t)/2 \cdot \ln(1/u_{ij}(k)), \quad (8)$$

$$p_{i,j}(t) = \varphi_j P_{i,j}(t) + (1 - \varphi_j) G_j(t). \quad (9)$$

其中: $u_{i,j}, \varphi_j$ 是在 $(0, 1)$ 上均匀分布的随机数; $L_{i,j}(t)$

可由下式计算得到:

$$L_{i,j}(t) = 2\alpha |C_j(t) - x_{i,j}(t)|; \quad (10)$$

α 为收缩-膨胀系数, 可以是一个固定的值或线性递减, 一般取 $\alpha < 1.781$. $C(t)$ 为所有粒子最好位置的均值, 即

$$C(t) = (C_1(t), C_2(t), \dots, C_N(t)) = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M P_i(t) = \left(\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M P_{i,1}(t), \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M P_{i,2}(t), \dots, \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M P_{i,N}(t) \right). \quad (11)$$

2.2 改进的量子粒子群算法(LTQPSO)

文献[30]中将粒子位置的更新改进为

$$p_{i,j}(t+1) = G_j(t) + \varphi_i p_i(t) (P_{i,j}(t) - G_j(t)), \quad (12)$$

$$x_{i,j}(t+1) =$$

$$p_{i,j}(t) \pm \alpha |m_i(t) - g s_{i,j}(t) x_{i,j}(t) \cdot \ln(1/u)|. \quad (13)$$

式(12)中

$$ip_i(t) = \frac{F(G(t))}{F(P_i(t))}, \quad 1 \leq i \leq M, \quad (14)$$

其中 $F(G(t))$ 、 $F(P_i(t))$ 分别表示全局最优位置的适应度和当前粒子最好位置的适应度.

注1 由式(12)可知, $ip_i(t)$ 的值越大, 进化的速度越快, 且 $0 < ip_i(t) \leq 1$, 当 $ip_i(t) = 1$ 时获得最优解.

式(13)中

$$g s_{i,j} = (g s_{i,1}(t), g s_{i,2}(t), \dots, g s_{i,N}(t)) = \left(\frac{\sigma(P_{i,1}(t))}{\sigma(x_{i,1}(t))}, \frac{\sigma(P_{i,2}(t))}{\sigma(x_{i,2}(t))}, \dots, \frac{\sigma(P_{i,N}(t))}{\sigma(x_{i,N}(t))} \right). \quad (15)$$

其中: $\sigma_P(t) = (\sigma(P_{i,1}(t)), \sigma(P_{i,2}(t)), \dots, \sigma(P_{i,N}(t)))$ 表示该粒子最好位置的标准差, $\sigma_x(t) = (\sigma(x_{i,1}(t)), \sigma(x_{i,2}(t)), \dots, \sigma(x_{i,N}(t)))$ 表示该粒子当前位置的标准差.

注2 $g s_{i,j}(t)$ 反映的是粒子的分散程度和粒子群的多样性, $g s_{i,j}(t)$ 的值越大, 粒子的分散程度越高, 粒子群更具有多样性. 当粒子的最优位置与当前位置相同时, $g s_{i,j}(t) = 1$.

3 区间二型模糊控制器设计与优化

3.1 控制器设计

本节将设计区间二型模糊控制器控制两轮移动机器人的平衡和位置.

根据两轮移动机器人的非线性模型^[29], 状态量 $x = [x_1, x_2, x_3, x_4]^T = [\theta, \dot{\theta}, \psi, \dot{\psi}]^T$, 其中 $\psi = (\psi_l + \psi_r)/2$. 为避免模糊规则过多, 导致系统复杂度过高, 本文采用串联模糊控制的方法, 分别设计平衡模糊控制器和位置模糊控制器.

平衡控制模糊规则为

Rule i : if θ is \tilde{A}_θ and $\dot{\theta}$ is \tilde{B}_θ , then u_θ is \tilde{C}_θ .

规则前件中 $\theta \in [-\pi/6, \pi/6]$ 表示机器人的俯仰角度, 俯仰角速度 $\dot{\theta} \in [-3, 3]$; 规则后件中 $u_\theta \in [-60, 60]$ 表示模糊控制器输出.

位置控制模糊规则为

Rule i : if p_e is \tilde{A}_D and $\dot{\theta}$ is \tilde{B}_θ , then θ_{off} is \tilde{C}_D .

其中: $p_e \in [-3, 3]$ 为位置误差; 当机器人未达到指定位置时, 模糊控制器的输出 $\theta_{\text{off}} \in [-\pi/40, \pi/40]$ 不为零, 机器人不能维持在平衡状态. 整体的控制原理如图3所示.

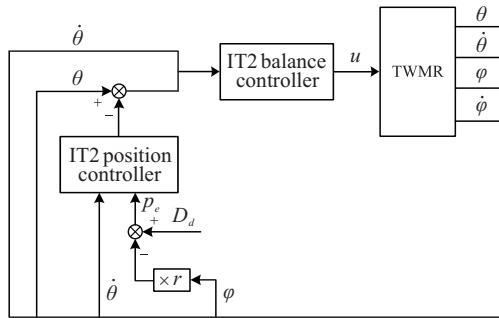


图3 两轮移动机器人模糊控制原理

注3 本文设计的区间二型模糊逻辑系统采用单点模糊化, 每个前件、后件划分成7个三角形区间二型模糊集 (NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB). 其中: NB、NM、NS、ZO、PS、PM、PB 分别表示负大、负中、负小、零、正小、正中、正大, 代表的是7个模糊集. 模糊推理采用Mamdani型最小 t -范, EIASC降型解模糊方法, 规则表如表1所示.

表1 平衡(位置)控制模糊规则表

$u_\theta(\theta_{\text{off}})$	$\dot{\theta}$							
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB	
$\theta(p_e)$	NB	PB	PB	PB	PB	PM	PS	ZO
	NM	PB	PB	PB	PM	PS	ZO	NS
	NS	PB	PB	PM	PS	ZO	NS	NM
	ZO	PB	PM	PS	ZO	NS	NM	NB
	PS	PM	PS	ZO	NS	NM	NB	NB
	PM	PS	ZO	NS	NM	NB	NB	NB
	PB	ZO	NS	NM	NB	NB	NB	NB

3.2 模糊规则参数优化

传统的隶属函数参数根据专家经验选取, 本文为获得更好的控制器控制效果, 采用上一节中介绍的优化算法优化参数. 优化算法中适应度函数的选取直接影响优化效果, 因此, 选取常用的时间乘以误差绝对值后积分 (Integral of the time multiplied by the absolute value of the error, ITAE) 作为适应度函数. 为方便计算, 在不失准确性的前提下将其改写成离散形

式. 单独优化平衡控制时适应度函数选择为

$$F_1 = \lambda \sum_{i=1}^m t_i |\theta(i)|; \quad (16)$$

优化位置控制时适应度函数选择为

$$F_2 = \lambda \sum_{i=1}^m t_i |D(i)|. \quad (17)$$

其中: λ 表示计算步长, t_i 表示 i 时刻, $|\theta(i)|$ 和 $|D(i)|$ 分别表示 i 时刻的俯仰角误差和位置误差. 优化算法的迭代流程如图4所示.

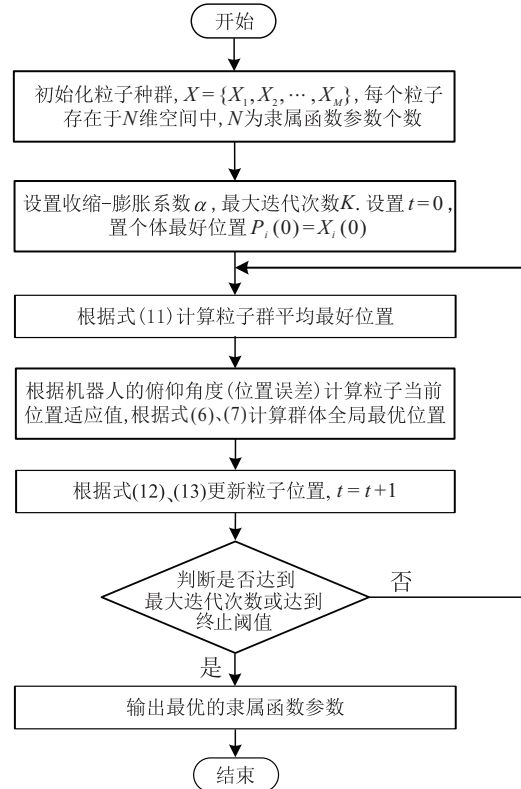


图4 优化算法流程

4 仿真结果与分析

本节将针对两轮移动机器人的非线性模型^[2,34], 运用本文的控制方法对其进行平衡和位置控制, 并采用PSO、QPSO、LTQPSO三种优化算法分别对平衡和位置控制进行优化. 另外, 本文将考虑系统不确定性(质量不确定)和位置扰动对控制效果的影响, 同时为验证所提出方法的优越性, 增加了与LTQPSO算法优化后的一型模糊逻辑控制器(T1 FLC)进行对比.

两轮移动机器人的参数及相应的值如表2所示.

表2 两轮移动机器人相应的参数值

参数	参数值	参数	参数值
\hat{m}_b / kg	2.58	\hat{r}	0.04
\hat{m}_w / kg	0.14	\hat{b}	0.15
\hat{n}_{wa}	0.00014	\hat{i}	0.0622
\hat{n}_{wd}	0.00054	\hat{d}_b	0.001
\hat{n}_{yb}	0.00128	\hat{d}_w	0.01
\hat{n}_{zb}	0.00128		

4.1 平衡控制

首先,在不考虑任何不确定性的情况下,对比PSO、QPSO、LTQPSO优化平衡控制的效果.图5为改进的QPSO优化之后规则前件中的区间二型模糊集(IT2 FSs),优化得到的后件集如表3所示.

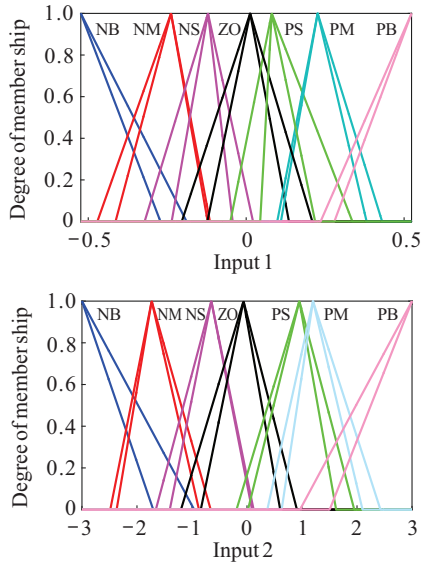


图5 优化后的平衡控制前件隶属函数

表3 平衡控制后件集

后件集	区间	后件集	区间
NB	[-60.00, -26.01]	PS	[0.46, 6.00]
NM	[-12.00, -10.32]	PM	[0.75, 26.86]
NS	[-11.22, -1.96]	PB	[21.19, 60.00]
ZO	[-1.98, 2.00]		

图6为仅平衡控制时机器人的俯仰角以及行进速度的优化控制效果,初始状态 $x_0 = [0.48, 0, 0, 0]^T$.可以看出,俯仰角在采用LTQPSO的情况下更快地达到零角度.图7更好地说明本文采用的优化算法可以更快地找到最优解.

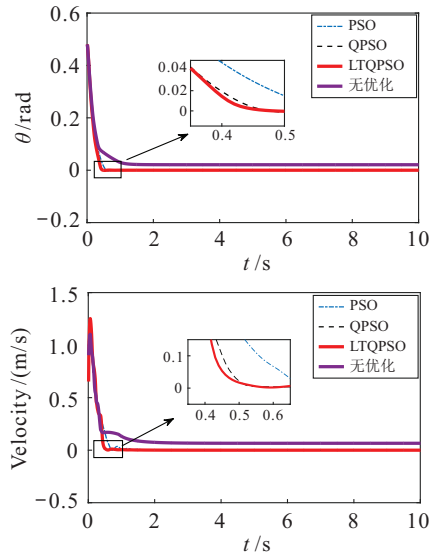


图6 仅平衡控制

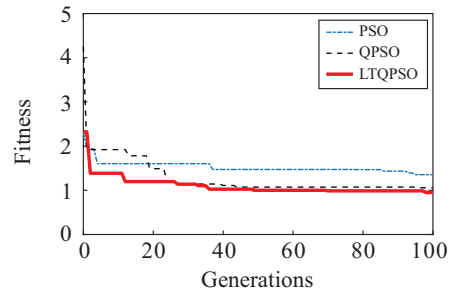


图7 平衡控制适应度

注4 适应度值由式(12)和(13)得到,适应度是误差对时间的积分.因此,适应度值越小,控制效果越好;适应度收敛到稳定值的速度越快,算法找到最优解的速度越快.

4.2 位置控制

首先,在不考虑任何不确定性的情况下,对比PSO、QPSO、LTQPSO优化位置控制的效果,初始状态 $x_0 = [0.48, 0, 0, 0]^T$.

图8、图9分别为LTQPSO优化之后位置控制模糊规则前件和后件中的IT2 FSs.

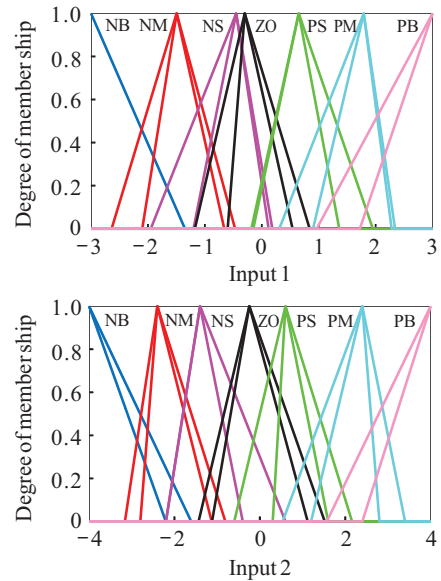


图8 优化后的位置控制前件隶属函数

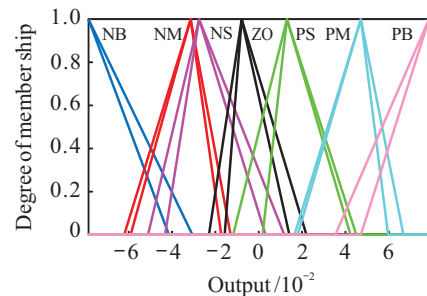


图9 优化后的位置控制后件隶属函数

注5 图9所示的模糊集无法直接参与降型解模糊的过程,因此,需要通过KM算法^[35]计算得到区间二型模糊集的区域,如表4所示.

表4 位置控制后件集

后件集	区间	后件集	区间
NB	$[-0.064, -0.062]$	PS	$[0.017, 0.020]$
NM	$[-0.036, -0.035]$	PM	$[0.043, 0.044]$
NS	$[-0.022, -0.020]$	PB	$[0.066, 0.068]$
ZO	$[-0.003, 0]$		

图10所示为IT2 FLC在位置控制中的控制效果,显然,采用本文的优化方法可以更快地到达指定位置,并在指定位置维持平衡.图11则更加清晰地表明LTQPSO可以更快地找到最优解.

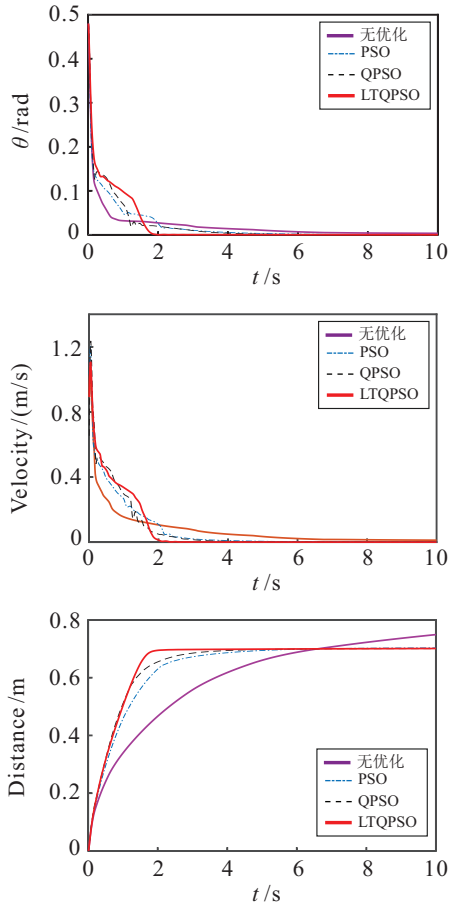


图10 平衡与位置控制

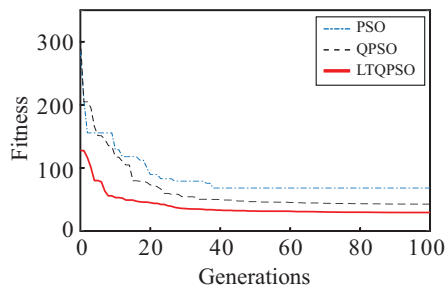


图11 位置控制适应度

接下来考虑机器人质量不确定的情况.当机器人达到平衡状态之后自身质量出现陡增,即 $\hat{m}_b = \hat{m}_b + \Delta\hat{m}_b$.图12表示在不考虑质量不确定性和位置扰动的情况下IT2 FLC与T1 FLC控制效果的对比.显然,IT2 FLC可以更快地使机器人达到指定位置.图

13则为在 $t = 8s, \Delta\hat{m}_b = 45kg$ 的情况下,IT2 FLC与T1 FLC控制效果的对比.T1 FLC在8s之后明显出现抖动,幅度不断扩大;而IT2 FLC可以很好地处理质量不确定的状况.

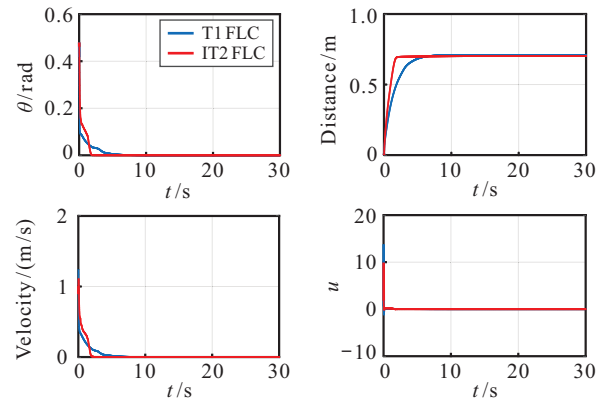


图12 一般情形

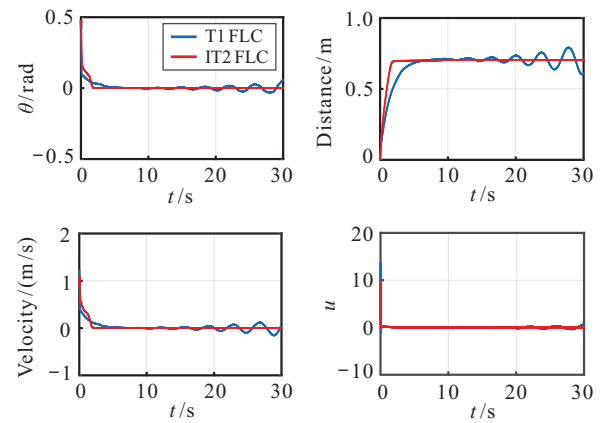


图13 质量不确定($\Delta\hat{m}_b = 45kg$)

考虑位置扰动的情况.当机器人达到指定位置之后在 $t = 8s$ 时,在位置信息上施加一个 $0.2m$ 的瞬时扰动($position = (\psi + \Delta\psi) \times r$).图14为 $\Delta\psi = 5rad$ 时IT2 FLC与T1 FLC控制效果的对比.可见,在受到扰动之后,IT2 FLC具有更快的反应速度,机器人迅速增大向反方向倾斜的角度,以获得更快的移动速度直至回到指定位置.

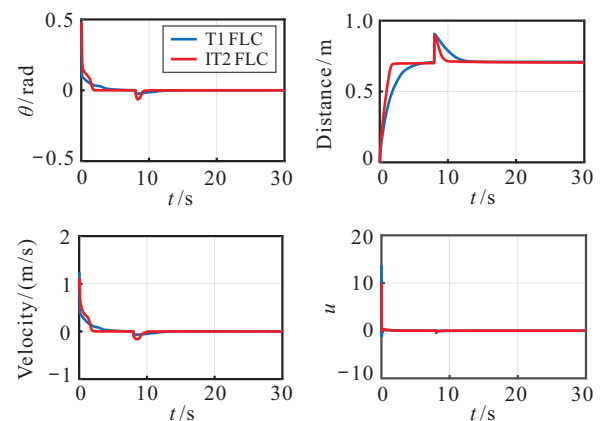


图14 位置扰动($\Delta\psi = 5rad$)

图15所示为同时考虑质量不确定性和位置扰动的情况下,IT2 FLC与T1 FLC控制效果的对比。在 $t = 8\text{ s}$, $\Delta\hat{m}_b = 45\text{ kg}$ 且 $\Delta\psi = 1\text{ rad}$ 的情况下,T1 FLC在8s之后出现抖动,在大约20s之后振荡发散;而IT2 FLC在该情况下表现出很好的控制效果。

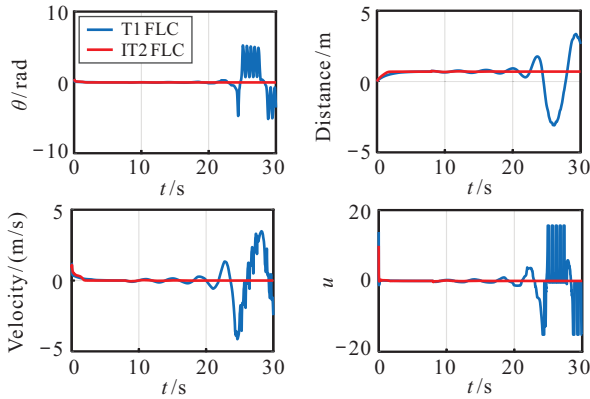


图15 质量不确定($\Delta\hat{m}_b = 45\text{ kg}$)和位置扰动($\Delta\psi = 1\text{ rad}$)

5 结论

本文针对两轮移动机器人设计了平衡和位置IT2 FLC,并针对模糊规则中模糊集参数难以确定的问题,采用了改进的QPSO优化模糊集参数。仿真结果表明,LTQPSO比PSO、QPSO具有更加优秀的优化效果。通过与T1 FLC控制效果的对比表明,本文所设计的IT2 FLC能够有效地控制机器人的平衡和位置,且拥有更佳快速性。另外,本文分别考虑了在质量不确定和位置扰动的情况下对控制效果的影响。仿真结果表明,IT2 FLC比T1 FLC拥有更佳的处理不确定性和抗扰动的能力。未来进一步的工作将聚焦于相关算法的硬件实现,并基于实验验证所提出方法的有效性。

参考文献(References)

- [1] Chan R P M, Stol K A, Halkyard C R. Review of modelling and control of two-wheeled robots[J]. *Annual Reviews in Control*, 2013, 37(1): 89-103.
- [2] Huang J, Ri M H, Wu D, et al. Interval type-2 fuzzy logic modeling and control of a mobile two-wheeled inverted pendulum[J]. *IEEE Trans on Fuzzy Systems*, 2018, 26(4): 2030-2038.
- [3] Huang J, Ri S, Liu L, et al. Nonlinear disturbance observer-based dynamic surface control of mobile wheeled inverted pendulum[J]. *IEEE Trans on Control Systems Technology*, 2015, 23(6): 2400-2407.
- [4] Nawawi S W, Ahmad M N, Osman J H S. Development of a two-wheeled inverted pendulum mobile robot[C]. *The 5th Student Conf on Research and Development*. Selangor: IEEE, 2007: 1-5.
- [5] Li J, Gao X, Huang Q, et al. Mechanical design and dynamic modeling of a two-wheeled inverted pendulum mobile robot[C]. *IEEE Int Conf on Automation and Logistics*. Ji'nan: IEEE, 2007: 1614-1619.
- [6] Kim S, Kwon S J. Dynamic modeling of a two-wheeled inverted pendulum balancing mobile robot[J]. *Int J of Control Automation and Systems*, 2015, 13(4): 926-933.
- [7] Muhammad M, Buyamin S, Ahmad M N, et al. Takagi-Sugeno fuzzy modeling of a two-wheeled inverted pendulum robot[J]. *J of Intelligent and Fuzzy Systems*, 2013, 25(3): 535-546.
- [8] Huang C H, Wang W J, Chiu C H. Design and implementation of fuzzy control on a two-wheel inverted pendulum[J]. *IEEE Trans on Industrial Electronics*, 2011, 58(7): 2988-3001.
- [9] Xu J X, Guo Z Q, Tong H L. Design and implementation of a takagi-sugeno-type fuzzy logic controller on a two-wheeled mobile robot[J]. *IEEE Trans on Industrial Electronics*, 2013, 60(12): 5717-5728.
- [10] Villacrés J, Viscaíno M, Herrera M, et al. Real-time implementation of different controllers for a two-wheeled inverted pendulum[J]. *Int J of Circuits, Systems, and Signal Processing*, 2016, 10: 281-290.
- [11] Sun N, Wu Y, Fang Y, et al. A new triple-stage stabilizing control method for two-wheeled inverted pendulum robots[C]. *IEEE Int Conf on Real-Time Computing and Robotics*. Angkor Wat: IEEE, 2016: 27-32.
- [12] Elbardini M, Elnagar A M. Interval type-2 fuzzy PID controller for uncertain nonlinear inverted pendulum system[J]. *ISA Transactions*, 2014, 53(3): 732-743.
- [13] Lam H K, Seneviratne L D. Stability analysis of interval type-2 fuzzy-model-based control systems[J]. *IEEE Trans on Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics*, 2008, 38(3): 617-628.
- [14] Wang B, Xue J, Wu F, et al. Stabilization conditions for fuzzy control of uncertain fractional order non-linear systems with random disturbances[J]. *IET Control Theory and Applications*, 2016, 10(6): 637-647.
- [15] Zhao T, Dian S. State feedback control for interval type-2 fuzzy systems with time-varying delay and unreliable communication links[J]. *IEEE Trans on Fuzzy Systems*, 2018, 26(2): 951-966.
- [16] 肖建,赵涛. T-S模糊控制综述与展望[J]. *西南交通大学学报*, 2016, 51(3): 462-474. (Xiao J, Zhao T. Overview and prospect of T-S fuzzy control[J]. *J of Southwest Jiaotong University*, 2016, 51(3): 462-474.)
- [17] Zadeh L A. The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning — I[J]. *Information*

- Sciences, 1975, 8(3): 199-249.
- [18] Li H, Sun X, Shi P, et al. Control design of interval type-2 fuzzy systems with actuator fault: Sampled-data control approach[J]. Information Sciences, 2015, 302: 1-13.
- [19] Li H, Sun X, Wu L, et al. State and output feedback control of interval type-2 fuzzy systems with mismatched membership functions[J]. IEEE Trans on Fuzzy Systems, 2015, 23(6): 1943-1957.
- [20] Li H, Wang J, Wu L, et al. Optimal guaranteed cost sliding-mode control of interval type-2 fuzzy time-delay systems[J]. IEEE Trans on Fuzzy Systems, 2018, 26(1): 246-257.
- [21] Xie X, Yue D, Peng C. Multi-instant observer design of discrete-time fuzzy systems: A ranking-based switching approach[J]. IEEE Trans on Fuzzy Systems, 2017, 25(5): 1281-1292.
- [22] Xie X, Yue D, Zhang H, et al. Control synthesis of discrete-time T-S fuzzy systems: Reducing the conservatism whilst alleviating the computational burden.[J]. IEEE Trans on Cybernetics, 2017, 47(9): 2480-2491.
- [23] Li H, Wang J, Lam H K, et al. Adaptive sliding mode control for interval type-2 fuzzy systems[J]. IEEE Trans on Systems, Man, and Cybernetics, 2017, 46(12): 1654-1663.
- [24] 姚兰, 肖建, 蒋玉莲. 基于SVD方法的简约型区间二型模糊模型构建[J]. 控制与决策, 2013, 28(8): 1273-1276.
(Yao L, Xiao J, Jiang Y L. Construction of parsimonious interval type-2 fuzzy model based on SVD[J]. Control and Decision, 2013, 28(8): 1273-1276.)
- [25] 王家军. 一种新型区间二型模糊神经网络隶属函数的设计[J]. 自动化学报, 2017, 43(8): 1425-1433.
(Wang J J. A new type of fuzzy membership function designed for interval type-2 fuzzy neural network[J]. Acta Automatica Sinica, 2017, 43(8): 1425-1433.)
- [26] Zhao T, Xiao J. A new interval type-2 fuzzy controller for stabilization of interval type-2 T-S fuzzy systems[J]. J of the Franklin Institute, 2015, 352(4): 1627-1648.
- [27] Zhao T, Xiao J. State feedback control of interval type-2 Takagi-Sugeno fuzzy systems via interval type-2 regional switching fuzzy controllers[J]. Int J of Systems Science, 2015, 46(15): 2756-2769.
- [28] Zhao T, Xiao J, Sheng H, et al. H_∞ control of continuous-time interval type-2 T-S fuzzy systems via dynamic output feedback controllers[J]. Neurocomputing, 2015, 165: 133-143.
- [29] Zhao T, Xiao J, Han L, et al. Static output feedback control for interval type-2 T-S fuzzy systems based on fuzzy Lyapunov functions[J]. Asian J of Control, 2014, 16(6): 1702-1712.
- [30] Kennedy J. Particle swarm optimization[J]. Proc of 1995 IEEE Int Conf on Neural Networks, 2011, 4(8): 1942-1948.
- [31] Hassan R, Cohan B E, de Weck O L. A comparison of particle swarm optimization and the genetic algorithm[C]. Structures, Structural Dynamics and Material Conf. Seattle, 2004: 833-843.
- [32] Sun J, Feng B, Xu W. Particle swarm optimization with particles having quantum behavior[C]. Proc of the 2004 Congress on Evolutionary Computation. Portland: IEEE, 2004: 325-331.
- [33] Xue T, Li R, Tokgo M, et al. Trajectory planning for autonomous mobile robot using a hybrid improved QPSO algorithm[J]. Soft Computing, 2017, 21(9): 2421-2437.
- [34] Huang J, Ding F, Fukuda T, et al. Modeling and velocity control for a novel narrow vehicle based on mobile wheeled inverted pendulum[J]. IEEE Trans on Control Systems Technology, 2013, 21(5): 1607-1617.
- [35] Mendel J M. Uncertain rule-based fuzzy logic systems: Introduction and new directions[J]. Ptr Upper Saddle River Nj, 2001, 133(2): 1-20.

(责任编辑: 李君玲)