第 34 卷第 7 期
2017 年 7 月

控 制 理 论 与 应 用
Control Theory & Applications

Vol. 34 No. 7
Jul. 2017

DOI: 10.7641/CTA.2017.60962

非完整移动机器人目标环绕动态反馈线性化控制

易 国, 毛建旭†, 王耀南, 郭斯羽, 缪志强

(湖南大学 电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410082; 机器人视觉感知与控制技术国家工程实验室, 湖南 长沙 410082)

摘要: 本文针对多个非完整移动机器人对静止或运动目标的环绕追踪问题进行研究. 每个机器人仅通过自身和其相邻的机器人的位置与方向信息以及所追踪的目标的位置信息来协调其运动. 首先, 提出了一种基于动态反馈线性化方法的分布式控制策略, 并引入一个控制机器人之间相对角间距的非线性函数, 控制机器人间的相对角间距. 使多个机器人能够以期望的与目标之间的相对距离、环绕速度和机器人之间的相对角间距对目标进行追踪. 然后, 利用Lyapunov工具对控制算法进行了渐近稳定性和收敛性分析. 最后构建了多移动机器人实验平台, 进行了数值仿真和实验验证, 仿真和实验的运行结果表明了所提出算法的有效性.

关键词: 目标跟踪; 协同控制; 移动机器人; 多智能体系统; 动态反馈线性化

中图分类号: TP242.6　　**文献标识码**: A

Circumnavigation of a target with nonholonomic mobile robots via dynamic feedback linearization

YI Guo, MAO Jian-xu†, WANG Yao-nan, GUO Si-yu, MIAO Zhi-qiang

(College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha Hunan 410082, China;
National Engineering Laboratory for Robot Visual Perception and Control Technology, Changsha Hunan 410082, China)

Abstract: This paper considers the problem of cooperative circumnavigation of a stationary or moving target with a group of autonomous nonholonomic mobile robots. The goal is achieved in a distributed way where each of the robots coordinates its motion knowing its own position and orientation, the orientation of its neighbors, and the position of the target. Firstly, a distributed control strategy using dynamic feedback linearization method is proposed, and a nonlinear function is introduced to control the relative angular spacing between the robots. It is shown that under the proposed control schemes, a group of nonholonomic robots can circumnavigate the stationary or moving target with prescribed radius, circular velocity, and inter-robot angular spacing. Then, explicit stability and convergence analysis are presented using Lyapunov tools. Finally, the experimental platform of multiple mobile robots is constructed, the effectiveness and applicability of the proposed control strategy are demonstrated through numerical simulation and experimental results.

Key words: target tracking; cooperative control; mobile robots; multi-agent systems; dynamic feedback linearization

1 引言(Introduction)

近些年来, 利用单个或多个机器人对目标追踪引起了人们的广泛兴趣, 并且有许多应用, 如航天器绕飞[1]、智能群体目标环绕运动[2]等. 机器人协同目标追踪是指一组移动机器人通过调整自身与目标及其他机器人之间的相对姿态, 在目标周围形成一定队形, 完成对目标的跟踪. 当机器人围绕目标做圆周运动时, 可以持续地监控保护和全方位的覆盖目标, 同时由于形成了运动队形, 个体的位置时刻变化, 减少了被攻击和目标信息丢失的可能.

利用单个机器人进行追踪已经进行了大量的研究. 文献[3]基于完整单积分机器人模型, 利用角度测量信息, 设计控制律实现对运动目标的跟踪. 随后文献[4]将文献[3]中的方法推广应用到非完整移动机器人. 文献[5–6]设计了基于距离的控制策略, 利用距离传感器来测量机器人与目标间的相对距离, 实现对目标的追踪. 文献[7]提出了轮式移动机器人安全目标追踪算法与双回路的追踪和避障控制方案, 使机器人追踪目标并保持一定的安全距离. 文献[8]利用向量场的方法研究了单个机器人对任意时变曲线的环绕跟踪问题.

与单个机器人相比, 多机器人系统具有更好的灵活性、冗余性和鲁棒性, 可以更好地完成对运动目标

收稿日期: 2016−12−21; 录用日期: 2017−05−09.
†通信作者. E-mail: maojianxu@hnu.edu.cn; Tel.: +86 13077317608.
本文责任编委: 方浩.
国家自然科学基金项目(61573134, 61471167, 61733004), 国家科技支撑计划项目(2015BAF13B00)资助.
Supported by National Natural Science Foundation of China (61573134, 61471167, 61733004) and National Science and Technology Support Program (2015BAF13B00).

的追踪. 相关学者提出了一些控制策略来解决协同追踪问题. 文献[9]提出了一种基于循环追踪策略的追踪方法来完成对运动目标的捕获. 文献[10]利用循环追踪的思想将文献[4]中关于单个机器人的结果推广到多机器人情形. 文献[11]将单向循环追踪策略推广到双向的情形, 个体之间采用双向环状的通信拓扑结构, 在柱面坐标下设计了控制律实现对运动目标的合围. 为简化控制律的设计, 在这些文献中机器人的模型均采用单积分模型. 但实际应用广泛的移动机器人以及固定翼无人机中, 运动学模型均存在非完整约束, 因此希望能够针对非完整机器人系统设计相应的协同追踪策略. 利用非完整移动机器人模型, 文献[12–13]研究了多个机器人围绕静止目标做圆周运动. 文献[14]只需要利用角度信息, 使单个非完整机器人对点状目标和圆形目标做圆周运动, 文献[15]将文献[14]中的方法推广到多个非完整移动机器人中, 并采用双轮差分驱动移动机器人进行了实验验证.

当机器人模型是非完整的且目标可任意运动时, 协同跟踪问题变得更具挑战性. 本文研究单个或多个非完整移动机器人对静止或运动目标的环绕追踪问题, 主要贡献如下: 1) 采用动态反馈线性化方法设计了追踪控制律, 实现单个非完整移动机器人以期望的与目标之间的相对距离、环绕速度对目标进行追踪. 2) 引入一个控制机器人之间相对角间距的非线性函数, 控制机器人间的相对角间距，将方法推广到多个移动机器人的情形. 3) 利用Lyapunov工具分析了系统的稳定性和收敛性.

本文的后续部分主要由以下4部分构成: 第2节介绍了数学基础知识, 对非完整移动机器人目标环绕问题进行了描述; 第3节为本文的主要结果; 第4节为所提方法的仿真和实验验证; 第5节为结论部分.

2 预备知识和问题描述(Preliminaries and problem formulation)

2.1 代数图论(Algebraic graph theory)

假设有n个机器人, 机器人之间的通信拓扑关系可以用一个有向图$\mathcal{G}=\{\mathcal{V},\mathcal{E},\mathcal{A}\}$表示, 有向图$\mathcal{G}$由节点集合$\mathcal{V}=\{1,2,\cdots,n\}$, 边集合$\mathcal{E}\subseteq\mathcal{V}\times\mathcal{V}$, 邻接矩阵$\mathcal{A}\in\mathbb{R}^{n\times n}$组成. 有向边$(j,i)$表示节点$i$可以访问节点$j$的状态. 邻接矩阵$\mathcal{A}=[a_{ij}]_{n\times n}$中的元素定义为: 如果$(j,i)\in\mathcal{E}$, 则$a_{ij}>0$; 否则, $a_{ij}=0$. 假设对所有i有$a_{ii}=0$. 如果邻接矩阵$\mathcal{A}$对称(对所有$i,j\in\mathcal{V}$有$a_{ij}=a_{ji}$), 则图$\mathcal{G}$是无向的.

给定n个状态变量$x_i\in\mathbb{R}^m$, $i=1,2,\cdots,n$, 根据文献[16–17]的研究, 有如下结论:

引理 1 如果邻接矩阵$\mathcal{A}$为对称的无向图, 下式成立:

$$\sum_i\sum_j a_{ij}x_i^{\mathrm{T}}(x_i-x_j)=\frac{1}{2}\sum_i\sum_j a_{ij}\|x_i-x_j\|^2.$$

引理 2 进一步地, 如果无向图$\mathcal{G}$是连通的, 下式成立:

$$\sum_i\sum_j a_{ij}\|x_i-x_j\|^2=0\Leftrightarrow x_i=x_j,\ \forall i,j\in\mathcal{V}.$$

2.2 问题描述(Problem formulation)

考虑一个由n个非完整移动机器人组成的多机器人系统. 机器人为双轮差分驱动式移动机器人, 由两个后驱动轮和一个前随动轮组成. 机器人在笛卡尔空间内的运动学模型为

$$\begin{cases}\dot{x}_i=v_i\cos\theta_i,\\ \dot{y}_i=v_i\sin\theta_i,\\ \dot{\theta}_i=\omega_i,\end{cases}\tag{1}$$

其中: $r_i=[x_i\ \ y_i]^{\mathrm{T}}$, θ_i分别表示机器人i的位置和方向, v_i,ω_i分别为机器人i的线速度和角速度. 一般而言, 由于轮式移动机器人无法发生侧向移动, 假定轮式移动机器人在运动过程中无打滑, 仅作纯滚动. 机器人在其横轴上没有运动分量, 由式(1)可以看出机器人受到式(2)描述的约束, 是一种非完整约束:

$$\dot{x}_i\sin\theta_i=\dot{y}_i\cos\theta_i.\tag{2}$$

每个机器人需要与指定的机器人集合N_i通信来实现协同跟踪任务, 本文假定机器人间的通信关系用无向图$G=\{V,E,A\}$表示, 并且无向图G是连通的.

如图1所示, 给定一个被追踪的运动目标$r_{\mathrm{t}}=[x_{\mathrm{t}}\ \ y_{\mathrm{t}}]^{\mathrm{T}}\in\mathbb{R}^2$, 其速度为$\dot{r}_{\mathrm{t}}=[\dot{x}_{\mathrm{t}}\ \ \dot{y}_{\mathrm{t}}]^{\mathrm{T}}\in\mathbb{R}^2$. 假定每一个移动机器人均能知道目标的位置与速度. 用ρ_i表示机器人i与目标之间的相对距离, φ_i表示机器人i与目标之间的角度, 表达式分别为

$$\rho_i=\|r_i-r_{\mathrm{t}}\|,\tag{3}$$

$$\varphi_i=\arctan(\frac{y_i-y_{\mathrm{t}}}{x_i-x_{\mathrm{t}}}).\tag{4}$$

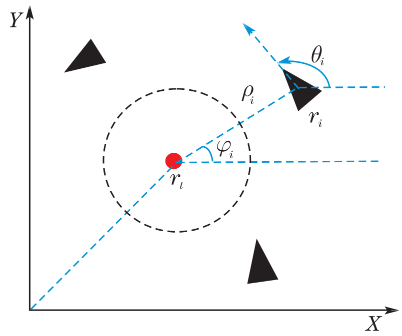


图 1 多个非完整移动机器人协同目标追踪

Fig. 1 Cooperative circumnavigation with multiple nonholonomic mobile robots

本文的任务是设计分布式控律, 使移动机器人系统能够以期望的环绕半径、环绕速度和机器人之间的相对角间距来跟踪运动目标. 具体来说, 对于单个机器人的追踪, 控制律应满足条件(5)–(6), 对于多个机器人的追踪, 控制律应满足条件(5)–(7):

$$\lim_{t\to\infty}\rho_i(t)=\rho_{\rm d},\ \forall i\in\mathbb{N},\tag{5}$$

$$\lim_{t\to\infty}\dot\varphi_i(t)=\omega_{\rm d},\ \forall i\in\mathbb{N},\tag{6}$$

$$\lim_{t\to\infty}\varphi_i(t)-\varphi_j(t)=\delta_{ij},\ \forall i\in\mathbb{N},\ j\in\mathbb{N},\tag{7}$$

其中: $\mathbb{N}=\{1,2,\cdots,n\}$, $\rho_{\rm d}>0$为期望的环绕半径, $\omega_{\rm d}\in\mathbb{R}$为期望的环绕速度, 以及$\delta_{ij}=-\delta_{ji}\in[-\pi,\pi]$为期望的机器人间的环绕角间距.

3 主要结果(Main results)

对于移动机器人目标环绕追踪问题, 机器人i和目标之间的相对动力学可以表示为

$$\begin{cases}\dot{\tilde r}_i=g(\theta_i)v_i-\dot r_{\rm t},\\ \dot\theta_i=\omega_i,\end{cases}\tag{8}$$

其中: $g(\theta_i)=[\cos\theta_i\ \ \sin\theta_i]^{\rm T}$, $\tilde r_i=r_i-r_{\rm t}$. 在设计控制律之前, 首先引入一个非线性函数

$$h_i=h(e_i),\tag{9}$$

其中

$$e_i=\sum_{j\in N_i}a_{ij}(\varphi_i-\varphi_j-\delta_{ij}).\tag{10}$$

当为单个移动机器人对运动目标环绕时$h_i=0$, 当为多个移动机器人时, 函数h_i负责控制机器人之间相对角间距, 当控制目标(7)实现时, h_i趋于零. 式中$a_{ij}=a_{ji}>0$, 非线性函数h满足以下假设:

假设 1 对于所有$\eta\in\mathbb{R}$, 函数$h(\cdot)$具有下列性质:

1) $\exists\, h_0>0,\ |h(\eta)|\leqslant h_0$;

2) $h(\eta)\eta\geqslant 0$;

3) $h'(\eta)>0$.

假设1表明函数$h(\cdot)$为满足$h(0)=0$的单调有界递增奇函数. 存在许多函数满足以上假设条件, 如:

$$h(\eta)=h_0\tanh\eta,$$

$$h(\eta)=\frac{2h_0}{\pi}\arctan\eta,$$

$$h(\eta)=\frac{2h_0\eta}{1+\eta^2},$$

$$h(\eta)=\frac{h_0\eta}{\sqrt{1+\eta^2}}.$$

基于方向场理论, 空间速度场是由多个速度向量所构成的, 而速度向量可定义为空间中任意一点到指定轨迹的最短距离与该轨迹曲线的切线向量所构成. 将速度场的概念应用于二维平面, 如图2所示, 定义由两个正交子向量组成的速度向量$f_i=[f_i^1\ \ f_i^2]^{\rm T}$:

$$f_i=[-k_1\tilde\rho_i I+\rho_{\rm d}(\omega_{\rm d}-h_i)P]\frac{\tilde r_i}{\|\tilde r_i\|},\tag{11}$$

其中: $k_1>0$, $\tilde\rho_i=\rho_i-\rho_{\rm d}$, 矩阵$I$, P分别定义为

$$I=\begin{bmatrix}1&0\\0&1\end{bmatrix},\ P=\begin{bmatrix}0&-1\\1&0\end{bmatrix}.\tag{12}$$

对$\dot{\tilde r}_i$求导数, 可得

$$\begin{aligned}\ddot{\tilde r}_i=&\,\dot g(\theta_i)\dot\theta_i v_i+g(\theta_i)\dot v_i-\ddot r_{\rm t}=\\ &H_i\begin{bmatrix}\dot v_i\\ \omega_i\end{bmatrix}-\ddot r_{\rm t},\end{aligned}\tag{13}$$

其中

$$H_i=\begin{bmatrix}\cos\theta_i&-v_i\sin\theta_i\\ \sin\theta_i&v_i\cos\theta_i\end{bmatrix},\tag{14}$$

可以得出$|H_i|=v_i$, 所以当$v_i\neq 0$时, 二阶矩阵H_i为非奇异矩阵. 为了保证逆矩阵可求解, 本文假定机器人初始速度不为零.

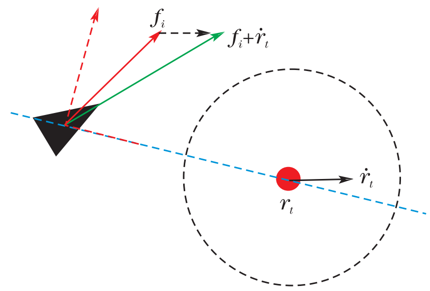


图 2 向量f_i示意图

Fig. 2 Diagram of vector f_i

机器人的速度与f_i之间的误差为

$$s_i=\dot{\tilde r}_i-f_i,\tag{15}$$

对误差s_i求导, 可得

$$\begin{aligned}\dot s_i=&\,\ddot{\tilde r}_i-\dot f_i=\\ &H_i\begin{bmatrix}\dot v_i\\ \omega_i\end{bmatrix}-\ddot r_{\rm t}-\dot f_i.\end{aligned}\tag{16}$$

假设外部定位系统能够测量机器人的位姿信息x_i, y_i, θ_i. 本文的目的是设计反馈控制算法, 利用被测量量的反馈来解决跟踪问题, 利用动态反馈线性化方法, 考虑如下控制律:

$$\begin{bmatrix}\dot v_i\\ \omega_i\end{bmatrix}=H_i^{-1}(-k_2s_i+\ddot r_{\rm t}+\dot f_i).\tag{17}$$

定理 1 考虑机器人系统(1)及控制律(17), 误差动态系统(15)是渐近稳定的, 且控制目标(5)–(7)最终将成立.

证 将方程(17)代入式(16), 误差动态系统变为

$$\begin{cases}\dot{\tilde r}_i=s_i+f_i,\\ \dot s_i=-k_2s_i.\end{cases}\tag{18}$$

考虑如下Lyapunov函数:

$$V_1=\frac12\sum\tilde\rho_i^2+\frac12\sum s_i^{\rm T}s_i,\tag{19}$$

函数V_1关于时间变量的导数为

$$\dot V_1=\sum\tilde\rho_i(\frac{\tilde r_i}{\|\tilde r_i\|})^{\rm T}\dot{\tilde r}_i+\sum s_i^{\rm T}\dot s_i=$$

$$\sum \tilde{\rho}_i(\frac{\tilde{r}_i}{\|\tilde{r}_i\|})^{\mathrm{T}}(f_i+s_i)-\sum k_2 s_i^{\mathrm{T}} s_i. \tag{20}$$

因为 f_i 由两个正交向量组成, 将 f_i 的表达式代入式(20), 整理后得

$$\dot{V}_1=-\sum k_1\tilde{\rho}_i^2+\tilde{\rho}_i(\frac{\tilde{r}_i}{\|\tilde{r}_i\|})^{\mathrm{T}}s_i-\sum k_2 s_i^{\mathrm{T}}s_i. \tag{21}$$

利用Young不等式

$$a^{\mathrm{T}}b\leqslant\frac{1}{2\gamma^2}a^{\mathrm{T}}a+\frac{\gamma^2}{2}b^{\mathrm{T}}b,\ \gamma>0,$$

可得

$$\dot{V}_1\leqslant-\sum(k_1-\frac{1}{2\gamma^2})\tilde{\rho}_i^2-\sum(k_2-\frac{\gamma^2}{2})s_i^{\mathrm{T}}s_i. \tag{22}$$

设c_1, c_2为任意正数, 当k_1, k_2满足

$$k_1>\frac{1}{2\gamma^2}+c_1,\ k_2>\frac{\gamma^2}{2}+c_2$$

时, 有

$$\dot{V}_1\leqslant-\sum c_1\tilde{\rho}_i^2-\sum c_2 s_i^{\mathrm{T}}s_i. \tag{23}$$

由Lyapunov稳定性理论可得出$\tilde{\rho}_i$, s_i有界并且指数收敛于零.

根据式(4)中φ_i的定义, 且P^{T}为反对称矩阵, 对φ_i求导可得

$$\begin{aligned}
\dot{\varphi}_i&=\frac{\tilde{r}_i^{\mathrm{T}}P^{\mathrm{T}}\dot{\tilde{r}}_i}{\|\tilde{r}_i\|^2}=\frac{\tilde{r}_i^{\mathrm{T}}P^{\mathrm{T}}(f_i+s_i)}{\|\tilde{r}_i\|^2}=\\
&\frac{\rho_{\mathrm{d}}}{\rho_i}(\omega_{\mathrm{d}}-h_i)+\frac{\tilde{r}_i^{\mathrm{T}}P^{\mathrm{T}}(-k_1\tilde{\rho}_i I)\tilde{r}}{\|\tilde{r}_i\|^3}+\frac{\tilde{r}_i^{\mathrm{T}}P^{\mathrm{T}}s_i}{\|\tilde{r}_i\|^2}=\\
&\frac{\rho_{\mathrm{d}}}{\rho_i}(\omega_{\mathrm{d}}-h_i)+\frac{\tilde{r}_i^{\mathrm{T}}P^{\mathrm{T}}s_i}{\|\tilde{r}_i\|^2}=\\
&\omega_{\mathrm{d}}-h_i+\xi_i,
\end{aligned} \tag{24}$$

其中变量ξ_i定义为

$$\xi_i=-\frac{\tilde{\rho}}{\rho_i}(\omega_{\mathrm{d}}-h_i)+\frac{\tilde{r}_i^{\mathrm{T}}P^{\mathrm{T}}s_i}{\|\tilde{r}_i\|^2}. \tag{25}$$

由于$\tilde{\rho}_i$, s_i有界并且指数收敛于零, 有ρ_i收敛于ρ_{d}, 也可以推出ξ_i指数收敛于0.

当为单机器人目标环绕追踪时有$h_i=0$, 所以得出$\dot{\varphi}_i$收敛于ω_{d}, 控制目标(5)–(6)成立.

对于多机器人情形, 令$\bar{\varphi}_i=\varphi_i-\omega_{\mathrm{d}}t-\delta_i$, $\delta_{ij}=\delta_i-\delta_j$, 可得

$$\dot{\bar{\varphi}}_i=-h(e_i)+\xi_i. \tag{26}$$

因为e_i也可以表示为$e_i=\sum\limits_{j\in N_i}a_{ij}(\bar{\varphi}_i-\bar{\varphi}_j)$, 所以有

$$\dot{e}_i=-\sum_{j\in N_i}a_{ij}[h(e_i)-h(e_j)-(\xi_i-\xi_j)]. \tag{27}$$

考虑如下Lyapunov函数:

$$V_2=\sum_i\int_0^{e_i}h(s)\mathrm{d}s, \tag{28}$$

则V_2函数关于时间变量的导数为

$$\begin{aligned}
&\dot{V}_2=\sum_i h(e_i)\dot{e}_i=\\
&-\sum_i\sum_{j\in N_i}a_{ij}h(e_i)[h(e_i)-h(e_j)]+\\
&\sum_i\sum_{j\in N_i}a_{ij}h(e_i)(\xi_i-\xi_j).
\end{aligned} \tag{29}$$

应用引理1, 可得

$$\begin{aligned}
\dot{V}_2=&-\frac{1}{2}\sum_i\sum_{j\in N_i}a_{ij}[h(e_i)-h(e_j)]^2+\\
&\sum_i\sum_{j\in N_i}a_{ij}h(e_i)(\xi_i-\xi_j),
\end{aligned} \tag{30}$$

因此$\dot{V}_2$满足以下不等式:

$$\begin{aligned}
\dot{V}_2\leqslant&-\frac{1}{2}\sum_i\sum_{j\in N_i}a_{ij}[h(e_i)-h(e_j)]^2+\\
&\sum_i\sum_{j\in N_i}a_{ij}h_0(|\xi_i|+|\xi_j|).
\end{aligned} \tag{31}$$

对表达式(31)两边关于时间从0到t积分可得

$$\begin{aligned}
&V_2(t)+\frac{1}{2}\int_0^t\sum_i\sum_{j\in N_i}a_{ij}[h(e_i)-h(e_j)]^2\mathrm{d}s\leqslant\\
&V_2(0)+\int_0^t\sum_i\sum_{j\in N_i}a_{ij}h_0(|\xi_i|+|\xi_j|)\mathrm{d}s.
\end{aligned} \tag{32}$$

函数h是一个有界单调递增的奇函数, 根据h函数的性质, 有$V_2\geqslant 0$成立. 由于ξ_i指数收敛于零, 可以得出$\int_0^t\sum\limits_i\sum\limits_{j\in N_i}a_{ij}h_0(|\xi_i|+|\xi_j|)\mathrm{d}s$有界. 因此, 不等式(32)表明$V_2(t)$有界, 且有

$$\int_0^t\sum_i\sum_{j\in N_i}a_{ij}[h(e_i)-h(e_j)]^2\mathrm{d}s\leqslant\infty. \tag{33}$$

根据Barbalat定理, 可得

$$\lim_{t\to\infty}\sum_i\sum_{j\in N_i}a_{ij}[h(e_i)-h(e_j)]^2=0. \tag{34}$$

根据引理2和方程(34), 可得当$t\to\infty$时, 对所有i, j有$h(e_i)=h(e_j)$. 考虑到函数h的单调性, 这也意味着对所有的i, j有$e_i=e_j$. 因为$\sum_i e_i=0$和$e_i=e_j$, $\forall i, j$, 表明$e_i=0$, $\forall i$. 因为图G是连通的, $e_i=\sum\limits_{j\in N_i}a_{ij}(\bar{\varphi}_i-\bar{\varphi}_j)=0$说明$\bar{\varphi}_i-\bar{\varphi}_j=0$或$\varphi_i-\varphi_j=\delta_{ij}$, $\forall i\in\mathbb{N}$, $j\in\mathbb{N}$. 当e_i或$h(e_i)$趋向于零时, 根据式(24)可以推出$\dot{\varphi}_i$趋于ω_{d}. 由此控制目标(5)–(7)最终将成立.

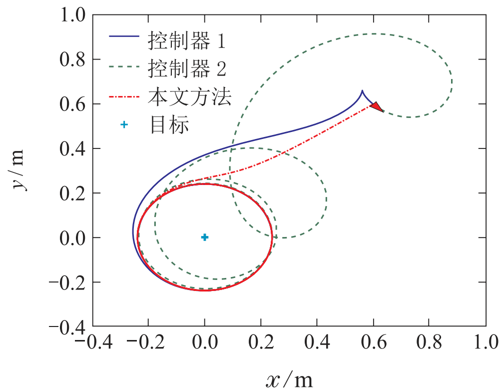
4 仿真和实验(Simulations and experiments)

4.1 仿真(Simulations)

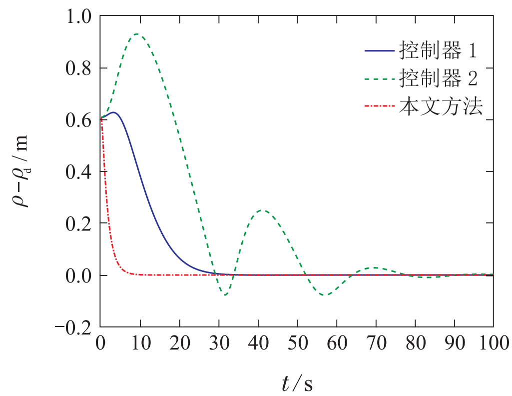
1) 单移动机器人环绕.

考虑单个非完整移动机器人对静止目标追踪, 机器人的初始位置为$r(0)=[0.6\ \ 0.6]^{\mathrm{T}}$ m, 机器人的初

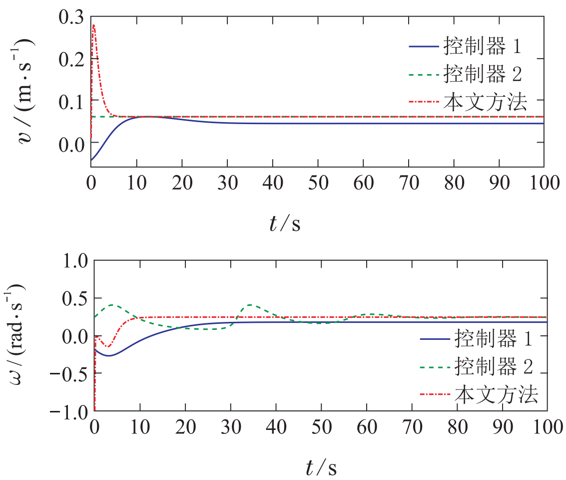
始方位角为$-\pi/4$, 初始线速度设置为0.01 m/s. 静止目标位置为: $r_{\rm t}(0) = [0\ \ 0]^{\rm T}$ m控制目标中期望的环绕半径和环绕速度为$\rho_{\rm d} = 0.24$ m, $\omega_{\rm d} = 0.25$ rad/s, 控制系数$k_1 = 0.5$, $k_2 = 5$. 为了验证本文所提出追踪控制策略的有效性, 与文献[14–15]中控制器1和控制器2相比较的仿真结果如图3所示. 文献[14–15]方法的优点是只需要测量角度信息, 本文所提方法具有更快的收敛速度, 仿真效果表明了本文算法的有效性.



(a) 机器人在平面的轨迹



(b) 机器人和目标间的距离误差



(c) 机器人线速度v与角速度ω

图 3 $\dot{r}_{\rm t} = [0\ \ 0]^{\rm T}$时的单机器人环绕仿真结果

Fig. 3 Simulation results with $\dot{r}_{\rm t} = [0\ \ 0]^{\rm T}$ using a single robot

2) 多移动机器人环绕.

3个非完整移动机器人组成多机器人系统, 机器人之间的通信关系如图4所示, 邻接矩阵为$A = [0, 1, 0; 1, 0, 1; 0, 1, 0]$. 每个机器人只知道局部信息: 与之相邻接机器人的位姿信息以及所追踪目标的信息.

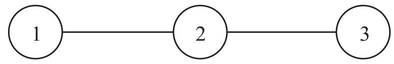


图 4 机器人之间的通信拓扑结构

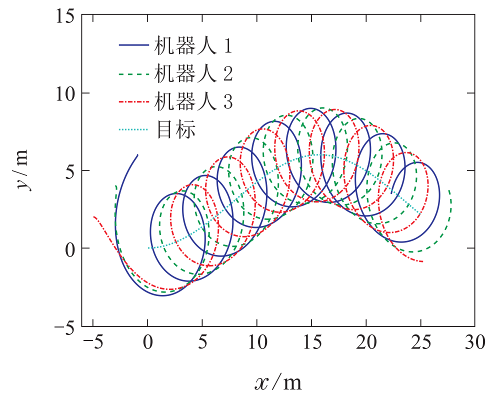
Fig. 4 Communication graph of multiple robots

机器人的初始位置为

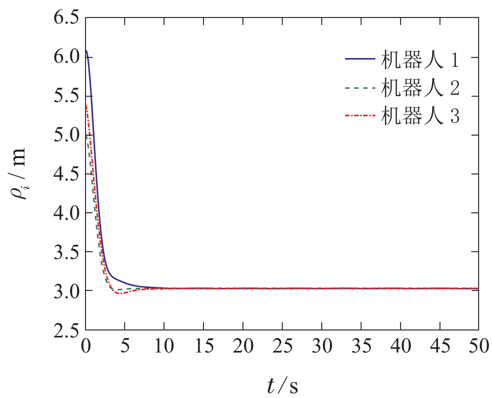
$$r_1(0) = [-1\ \ 6]^{\rm T}\,{\rm m},\ r_2(0) = [-3\ \ 4]^{\rm T}\,{\rm m},$$
$$r_3(0) = [-5\ \ 2]^{\rm T}\,{\rm m},$$

机器人的初始方位角均为零, 初始线速度均为1 m/s. 目标初始位置为$r_{\rm t}(0) = [0\ \ 0]^{\rm T}$ m, 速度为$\dot{r}_{\rm t} = [0.5\ \ 0.3\sin(0.1t)]^{\rm T}$ m/s. 控制目标中期望的环绕半径和环绕速度为$\rho_{\rm d} = 3$ m, $\omega_{\rm d} = 1$ rad/s, 3个机器人的相对角间距为$\delta = 2\pi/3$ rad, 控制参数$h_0 = 0.5$, $k_1 = 0.5$, $k_2 = 2$.

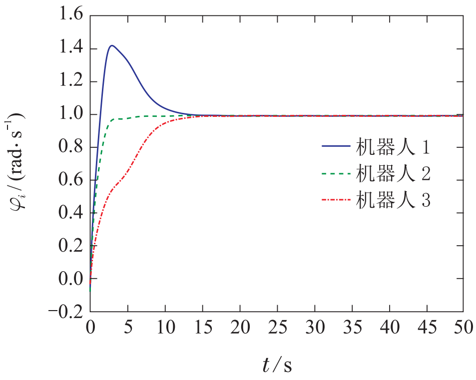
如图5所示, 仿真结果表明多机器人系统能实现预期控制目标. 图5(e)–(f)显示出每个机器人的线速度和角速度大小有界且在一定合理范围. 仿真结果表明基于动态反馈线性化的控制策略有效, 且具有良好的跟踪性能.



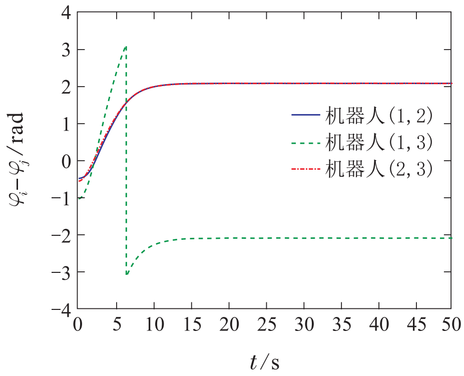
(a) 机器人在平面的轨迹



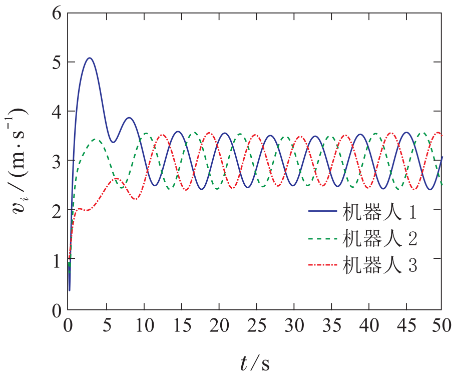
(b) 机器人和目标间的距离ρ_i



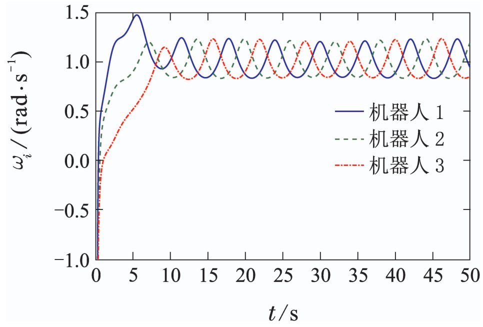
(c) 机器人的环绕速度$\dot{\varphi}_i$



(d) 机器人间的角间距$\varphi_i-\varphi_j$



(e) 机器人的线速度v_i



(f) 机器人的角速度ω_i

图 5 $\dot{r}_\mathrm{t}=[0.5\ \ 0.3\sin(0.1t)]^\mathrm{T}$时的多机器人环绕仿真结果

Fig. 5 Simulation results with $\dot{r}_\mathrm{t}=[0.5\ \ 0.3\sin(0.1t)]^\mathrm{T}$ using a group of mobile robots

4.2 实验(Experiments)

1) 视觉定位实验平台.

实验部分, 以3个双轮差分驱动式移动机器人为实验对象. 课题组自行研制的多移动机器人视觉定位与控制实验平台如图6所示, 通过控制左右驱动轮的速度来实现机器人的运动. 左右轮直流电机自带AB相增量式霍尔编码器, 编码器的精度为390线每圈, 底层驱动实现机器人的速度控制. 置于场景顶部的以太网摄像机与计算机构成的视觉定位系统, 实时提供机器人的位置和方向信息, 摄像机的分辨率为1280×960. 计算机运行控制算法, 使用Wi-Fi将速度指令发送给每个机器人. 将位姿信息作为控制算法的输入.

摄像机为针孔模型, 其光轴中心线不必垂直于地面, 如图7所示, O为摄相机的光心, 图像平面与地平面的坐标关系为射影变换或2D单应. 利用直接线性变换(direct linear transformation, DLT)[18]方法完成图像平面与地平面坐标的标定. 利用文献[19]中的方法跟踪获取每一个移动机器人三角形图案的边缘点, 利用文献[20]提出的三角形拟合方法拟合边缘点, 得到三角形顶点在图像中的坐标, 计算机器人的位姿信息.

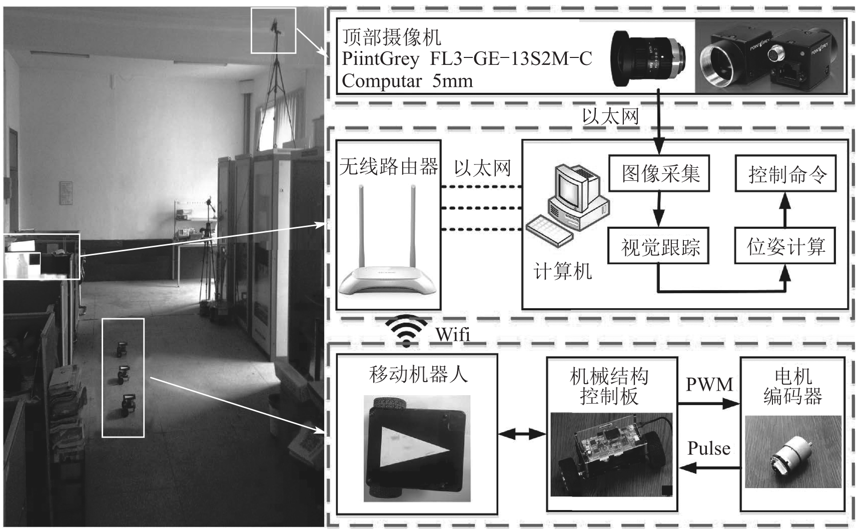


图 6 多移动机器人实验平台

Fig. 6 Multiple mobile robots experiments platform

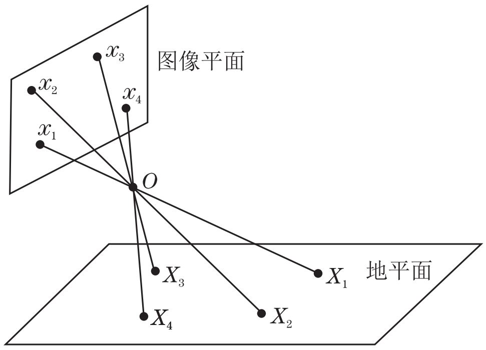


图 7　图像平面与地平面的2D单应

Fig. 7　2D homography of image plane and floor plane

2)　多移动机器人环绕实验.

机器人 1, 2, 3 的通信拓扑结构与仿真相同, 如图4所示. 每一个机器人只知道与其相邻接的机器人的位姿信息以及所追踪的目标的信息. 为了说明的控制策略的分布式特性, 每个机器人运行独立的控制策略, 以完成控制目标.

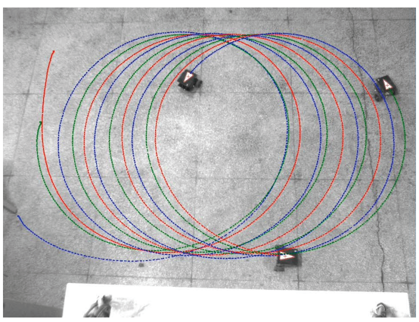
在实验中, 3个移动机器人追踪一个水平匀速运动的虚拟目标, 并在虚拟目标周围形成一个均匀分布的圆形. 机器人的初始线速度均为0.01 m/s. 虚拟目标初始位置为$r_{\rm t}(t) = [1.2\quad 1.2]^{\rm T}$ m, 虚拟目标的速度为$\dot{r}_{\rm t}(t) = [0.01\quad 0]^{\rm T}$ m/s, 期望的环绕半径和环绕速度为

$$\rho_{\rm d} = 1\,{\rm m},\ \omega_{\rm d} = 0.2\,{\rm rad/s},$$

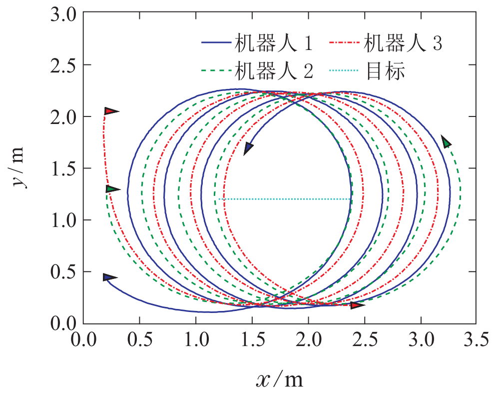
3个机器人间的相对角间距为$\delta = 2\pi/3$ rad, 控制参数

$$h_0 = 0.08,\ k_1 = 0.2,\ k_2 = 0.8.$$

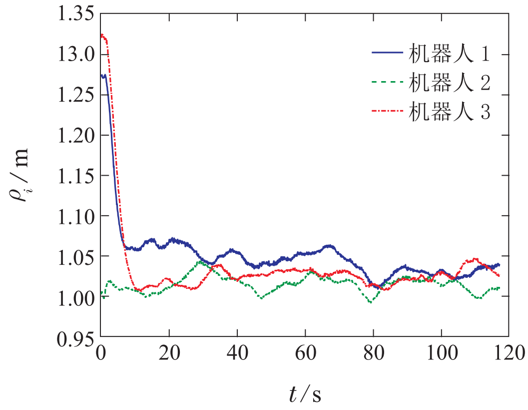
移动机器人在图像中的轨迹和在地面坐标系中的运动轨迹分别如图8(a)–(b)所示, 由轨迹可以看出3个机器人围绕目标形成了均匀分布的圆形队形. 图8(c)–(f)表明机器人与目标间的相对距离在期望距离1 m处波动, 机器人之间的相对角间距也收敛于期望值, 机器人的线速度在期望值0.2 m/s波动, 角速度收敛于期望值. 实验结果表明所提出的控制策略能够有效工作, 在工程上具有实用价值.



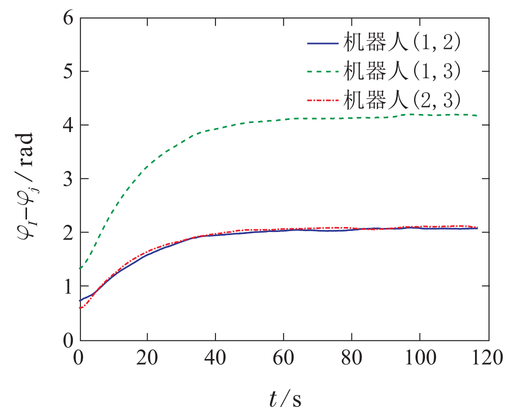
(a)　机器人在图像中的轨迹



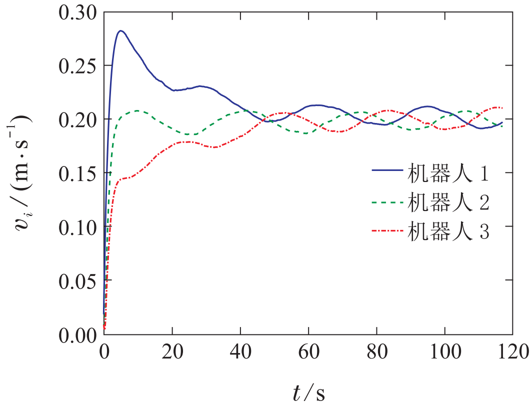
(b)　机器人在地平面中的轨迹



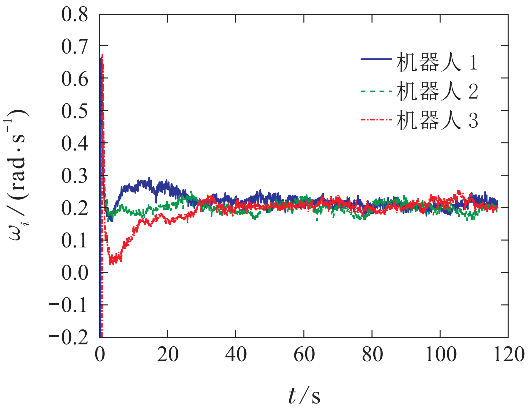
(c)　机器人和目标间的距离ρ_i



(d)　机器人间的角间距$\varphi_i - \varphi_j$



(e)　控制器输出的机器人线速度v_i



(f) 控制器输出的机器人角速度ω_i

图 8 $\dot{r}_{\mathrm{t}}(t)=[0.01\ \ 0]^{\mathrm{T}}$ m/s时的实验结果

Fig. 8 Experimental results with $\dot{r}_{\mathrm{t}}(t)=[0.01\ \ 0]^{\mathrm{T}}$ m/s

5 结论(Conclusions)

本文以多个非完整移动机器人对运动目标的协同追踪为背景, 采用动态反馈线性化方法设计了控制律, 利用Lyapunov工具进行了稳定性分析和收敛性证明, 实现了预期的控制目标. 进行了数值仿真与实验验证, 表明了本文所提出控制策略的有效性. 在算法设计中, 因为设计的控制律中需要运动目标的位置和速度信息, 所以假定目标的位置和速度是已知的, 在实际的工程实践中, 可以采用滤波技术(如卡尔曼滤波)来实时估计目标的状态.

参考文献(References):

[1] WANG Gongbo, MENG Yunhe, ZHENG Wei, et al. Fast fly around satellite space circle formation design [J]. *Journal of Astronautics*, 2010, 31(11): 2465 – 2470.
(王功波, 孟云鹤, 郑伟, 等. 快速绕飞卫星空间圆编队设计方法 [J]. 宇航学报, 2010, 31(11): 2465 – 2470.)

[2] DUAN Min, GAO Hui, SONG Yongduan. Distributed encirclement control of multi-agent systems [J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, 63(14): 44 – 52.
(段敏, 高辉, 宋永端. 智能群体环绕运动控制 [J]. 物理学报, 2014, 63(14): 44 – 52.)

[3] DEGHAT M, SHAMES I, ANDERSON B D O, et al. Localization and circumnavigation of a slowly moving target using bearing measurements [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2014, 59(8): 2182 – 2188.

[4] DEGHAT M, DAVIS E, SEE T L, et al. Target localization and circumnavigation by a non-holonomic robot [C] //*IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. Vilamoura, Portugal: IEEE, 2012: 1227 – 1232.

[5] SHAMES I, DASGUPTA S, FIDAN B, Circumnavigation using distance measurements under slow drift [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2012, 57(4): 889 – 903.

[6] CAO Y. UAV circumnavigating an unknown target under a GPS-denied environment with range-only measurements [J]. *Automatica*, 2015, 55(C): 150 – 158.

[7] LI Baoguo, ZHANG Chunxi. Safe target-tracking algorithm with obstacle avoidance for unicycle mobile robots [J]. *Control Theory & Applications*, 2007, 24(4): 535 – 540.
(李保国, 张春熹. 双轮移动机器人安全目标追踪与自动避障算法 [J]. 控制理论与应用, 2007, 24(4): 535 – 540.)

[8] GONCALVES V M, PIMENTA L C A, MAIA C A, et al. Vector fields for robot navigation along time-varying curves in n-dimensions [J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2010, 26(4): 647 – 659.

[9] KIM T H, SUGIE T. Cooperative control for target-capturing task based on a cyclic pursuit strategy [J]. *Automatica*, 2007, 43(8): 1426 – 1431.

[10] SWARTLING J O, SHAMES I, JOHANSSON K H, et al. Collective circumnavigation [J]. *Unmanned Systems*, 2014, 2(3): 219 – 229.

[11] FRANCHI A, STEGAGNO P, ORIOLO G. Decentralized multi-robot encirclement of a 3D target with guaranteed collision avoidance [J]. *Autonomous Robots*, 2016, 40(2): 245 – 265.

[12] CECCARELLI N, DI MARCO M, GARULLI A, et al. Collective circular motion of multi-vehicle systems [J]. *Automatica*, 2008, 44(12): 3025 – 3035.

[13] LAN Y, YAN G, LIN Z. Distributed control of cooperative target enclosing based on reachability and invariance analysis [J]. *Systems & Control Letters*, 2010, 59(7): 381 – 389.

[14] ZHENG R, SUN D. Circumnavigation by a mobile robot using bearing measurements [C] //*IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. Chicago, USA: IEEE, 2014: 4643 – 4648.

[15] ZHENG R, LIU Y, SUN D. Enclosing a target by nonholonomic mobile robots with bearing-only measurements [J]. *Automatica*, 2015, 53(C): 400 – 407.

[16] ZHANG H, LEWIS F L, QU Z. Lyapunov, adaptive, and optimal design techniques for cooperative systems on directed communication graphs [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2012, 59(7): 3026 – 3041.

[17] LEWIS F L, ZHANG H, HENGSTER-MOVRIC K, et al. *Cooperative Control of Multi-agent Systems* [M]. London: Springer, 2014.

[18] ABDEL-AZIZ Y I, KARARA H M, HAUCK M. Direct linear transformation from comparator coordinates into object space coordinates in close-range photogrammetry [J]. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 2015, 81(2): 103 – 107.

[19] MARCHAND E, SPINDLER F, CHAUMETTE F. ViSP for visual servoing: a generic software platform with a wide class of robot control skills [J]. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 2005, 12(4): 40 – 52.

[20] PARVU O, GILBERT D. Implementation of linear minimum area enclosing triangle algorithm [J]. *Computational and Applied Mathematics*, 2016, 35(2): 423 – 438.

作者简介:

易 国 (1981–), 男, 博士研究生, 目前研究方向为机器人视觉、多机器人系统协调控制, E-mail: yiguo@126.com;

毛建旭 (1974–), 男, 副教授, 博士生导师, 目前研究方向为数字图像处理、模式识别、计算机视觉, E-mail: maojianxu@hnu.edu.cn;

王耀南 (1957–), 男, 教授, 博士生导师, 目前研究方向为智能控制理论及应用、智能机器人技术、智能图像处理技术等, E-mail: yaonan@hnu.edu.cn;

郭斯羽 (1975–), 男, 副教授, 目前研究方向为图像处理与机器视觉、系统建模与仿真, E-mail: syguo75@163.com;

缪志强 (1989–), 男, 博士, 目前研究方向为机器人学、非线性系统建模与控制、多机器人系统协调控制, E-mail: miaozhiqiang@hnu.edu.cn.