

起伏地形环境中多移动机器人协作运输策略

杨帆^{1,2}, 刘士荣², 仲朝亮^{1,2}, 董德国^{1,2}

(1. 华东理工大学自动化研究所, 上海 200237; 2. 杭州电子科技大学自动化研究所, 浙江 杭州 310018)

摘要: 对多机器人协作运输时环境地形起伏不平, 运输过程中机器人和物体发生滑动的问题, 提出了起伏地形环境中的协作运输策略. 将观测者-推动者模式的多机器人协作推箱子任务转换为多机器人编队任务, 通过基于几何规划的虚拟目标序列跟踪方法实现被推动物体脱离运动方向时运输编队的重新形成. 协作运输策略中的观测者机器人采用平缓地形优先(navigate plain first to destination, NPDF)导航策略指导编队运动.

关键词: 多移动机器人; 协作运输; 起伏地形; 虚拟目标序列跟踪; 观测者-跟随者

中图分类号: TP24 **文献标识码:** A

Cooperative transport strategy for multiple mobile robots in the environment with undulating terrain

YANG Fan^{1,2}, LIU Shi-rong², ZHONG Chao-liang^{1,2}, DONG De-guo^{1,2}

(1. Institute of Automation, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China;

2. Institute of Automation, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou Zhejiang 310018, China)

Abstract: The cooperative transport strategy for multiple mobile robots in the environment with undulating terrain is proposed, considering the slipping problem of the box and robots in the transportation. The multi-robot cooperative box pushing problem, in which robots are in watcher-pusher mode, is transformed into the multi-robot formation problem. Geometric-based virtual target sequence tracking is introduced to achieve the rearrangement of the transport formation when the object strayed from its current path. The navigation strategy in the cooperative transport strategy, which is called the navigate plain first to destination (NPDF) is employed by the watcher to guide the formation. The box pushing simulation is performed; the result illustrates the feasibility of the proposed transport strategy in the environment with undulating terrain.

Key words: multiple mobile robot; cooperative transport; undulating terrain; virtual target sequence tracking; watcher-pusher

1 引言(Introduction)

多机器人出现以来, 其编队与协作在运输、围捕、巡逻等应用领域研究逐渐进入人们的视野. 而随着协作研究的深入, 能否利用机器人运输货物也获得了广泛的关注. 在工厂、仓库等结构化环境, 以及野外、灾后废墟等非结构化环境中, 出现了多机器人替代工人、车辆协作运输物体的研究. 在某些危险场合, 如2011年日本福岛核电站核反应堆辐射泄露范围内, 利用自主机器人运送救援物资, 在完成任务的基础上还能避免救援人员受到辐射污染, 具有极为重要的社会意义.

自20世纪90年代中期开始, 便开始有学者研究机器人运输, 其中机器人协作推箱子问题作为底层运动与高层规划的理论研究对象和典型实例有较高的研究价值. PARKER在设计著名的ALLIANCE结

构时就对多机器人推箱子任务进行了研究^[1], 该研究通过激励行为触发两个移动机器人的行为集, 协作推动箱子到达目的地; MATARIC等人通过感知、动作和控制层面的协作, 完成爬虫式机器人将物体推往光源的实验^[2]; GERKEY等人采用反应式行为控制方法对多机器人推箱子问题进行了实验^[3], 该方法采用了观测者(watcher)-推动者(pushers)模式完成机器人推箱子任务, 并在MURDOCH系统中^[4]以反应式行为完成推箱子和个体机器人出现错误时候的运动; ZIELINSKI等人同样采用了观测者-推动者模式, 将运输任务转换成基于生物启发的子行为, 并将行为组合成最终的运动, 完成机器人推箱子任务^[5]. 上述实验均采用了单纯反应式行为控制的方法, 容易导致行为重复与时间浪费. TANG等人以提出的ASyMTRe结构完成编队运动

与推箱子的任务^[6], 然而其研究重点在任务分配方面. STILWELL等人^[7], PEREIRA等人^[8]与SUGAR等人^[9]分别通过力觉传感器对多移动机器人的搬运任务进行了研究, 但均需要搭载专用传感器. DAS等人利用编队中领航机器人与跟随机器人之间的空隙, 夹持箱子运动^[10], 但仅局限于开阔环境. YAMADA等人对多机器人运输任务中的通信形式进行了研究^[11]. 丁滢颖等人利用外激素和自适应衰减因子解决基于蚁群算法的多机器人推箱子任务中的死锁问题^[12]. HOARE等人对人机协作推箱子任务进行了实验^[13]. 此外, 虚拟阻抗模型^[14]、前馈模糊神经网络^[15]、Q-学习^[16]、波阵面算法(wave-front algorithm)^[17]、快速探索随机树(RRT)^[18]和模糊控制器^[19]等方法也在多机器人运输中得到了应用.

然而, 对多移动机器人运输的研究仍主要集中在平坦环境的全局路径规划或反应式行为控制. 在一些灾害现场、军事领域, 以至星球表面的任务中, 地形较为复杂且延绵起伏. 在起伏地形环境中, 影响机器人运动的因素主要有: 侧滑、驱动轮形变、地表与机器人摩擦力和环境难以区分等. 现有复杂地形中的研究则以机器人自主运动与机器视觉领域内的区域划分为主^[20-21], 仍未涉及到多机器人应用领域. 而在起伏地形环境中观测者-推动者模式的多机器人协作推箱子, 由于箱子的阻碍与地形的约束、滑动等问题更容易发生在推动者机器人上, 且难以避免. 基于行为的方法是通过运动环境空间信息反馈来产生机器人运动行为, 这种方法可以不直接考虑摩擦力、动力学等因素, 因此本文对多机器人协作推箱子任务设计了相应的行为控制策略. 以箱子和推动者机器人组成编队, 将协作推箱子任务转换为多机器人编队问题, 并对起伏地形环境中的协作运输策略进行了研究. 将机器人与箱子之间的位姿误差作为机器人行为控制的输入. 当推动者机器人在运动过程中发生滑动时, 通过基于几何规划的虚拟目标序列跟踪方法实现运输编队的重新形成. 在协作推动箱子运动的过程中观测者机器人采用平缓地形优先(navigate plain first to destination, NPDF)导航策略指导编队运动. 在Microsoft Robotics Developer Studio仿真环境中以协作推箱子实验验证了多机器人协作运输策略在起伏地形环境中的有效性.

2 多机器人协作运输问题描述(Multi-robot cooperative transport problem formulation)

2.1 任务描述(Task formulation)

在平坦地形环境中, 基于几何规划的编队运输任务^[22]基础之上, 本文利用多机器人协作推箱子任务研究了起伏地形环境中的编队协作运输问题. 机器人团队包括了观测者与推动者两种职责的移动机器人^[3]. 任务中地形是连续起伏面, 忽略突起障碍物对

机器人产生的影响. 各机器人需要完成的任务及约束条件描述如下:

1) 观测者机器人配备视觉、激光传感器和陀螺仪, 能够获得自身的位姿与箱子需要被推到的最终目标坐标、箱子的具体位置、姿态; 观测者机器人需要设计合适的路径向目标点运动. 此外观测者机器人在环境中运动不会发生滑动;

2) 推动者机器人配备视觉传感器, 能够获得与箱子的相对位置, 但由于箱子的阻挡, 无法获得环境信息; 推动者机器人需要协作推动箱子到达观测者当前位置的一定范围内以完成推箱子任务;

3) 机器人相互之间通过系统内部的局域网交换信息;

4) 推动者机器人与箱子之间并无固定连接, 仅能通过差分轮的驱动力产生向前的推力推动箱子运动. 此外, 箱子比任一机器人都要大, 需要在机器人协作产生的推动力下才能运动.

2.2 基于位姿误差的机器人运动行为(Posture deviation-based robot motion behavior)

在全局地形未知的任务环境中, 由于移动机器人需要在高低起伏的地形上运动, 因此其位姿表示为

$$\mathbf{q}(t) = [x(t) \ y(t) \ z(t) \ \alpha(t) \ \beta(t) \ \theta(t)]^T. \quad (1)$$

式(1)包括机器人在参考坐标系 x - y - z 中的坐标 x , y , z 与分别绕 x , y 与 z 轴的旋转角度 α , β 与 θ , 机器人输出是两差分轮旋转角速度 $\dot{\varphi} = [\dot{\varphi}_r \ \dot{\varphi}_l]^T$, 下标 r 表示右轮, 下标 l 表示左轮. 其中, 机器人坐标高度 z 及其绕参考坐标 x , y 轴的旋转角度 α , β 依地形变化而改变, 并非由差分轮运动主动产生. 因此将坐标信息投影到 xoy 平面, 简化为 $\mathbf{q} = [x \ y \ \theta]^T$. 编队运输系统包括了一个观测机器人

$$\mathbf{q}_L = [x_L \ y_L \ \theta_L]^T$$

和两个推动机器人

$$\mathbf{q}_{F2} = [x_{F2} \ y_{F2} \ \theta_{F2}]^T, \ \mathbf{q}_{F3} = [x_{F3} \ y_{F3} \ \theta_{F3}]^T,$$

被运输的箱子表示为

$$\mathbf{q}_b = [x_b \ y_b \ \theta_b]^T.$$

协作运输系统如图1所示.

图1中: 处于观测者角色的机器人 \mathbf{q}_L 需要探测环境和目标, 以设计合适的路径向目标点运动; 而处于推动者角色的机器人 \mathbf{q}_{F2} 与 \mathbf{q}_{F3} 需要推动箱子 \mathbf{q}_b 到达观测者 \mathbf{q}_L 所在的位置. 通过观测者向目标点运动, 而推动者向观测者运动完成箱子的运输任务.

由于地形起伏不平, 机器人运动过程中受到包括地面对箱子的摩擦力、地形对机器人的滚动摩擦力、箱子对机器人的阻力在内的各种因素的影响. 各种摩擦力、阻力与被运输物体材质、地形种类、接触面不同而不同, 且随运动发生改变. 因此对起伏地形环境下的协作运输进行建模较为复杂, 而在 xoy 平

面, 利用图1中箱子 q_b 与观测者 q_L 之间的距离差值设计运动行为, 可以在忽略上述摩擦力、阻力影响的情况下完成箱子的推动任务. q_b 与 q_L 位姿关系可表示为

$$e_{Lb} = \begin{bmatrix} e_{Lb}^x \\ e_{Lb}^y \\ e_{Lb}^\theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_b & \sin \theta_b & 0 \\ -\sin \theta_b & \cos \theta_b & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} (q_L - q_b). \quad (2)$$

式(2)中: e_{Lb}^x 和 e_{Lb}^y 分别表示观测者 q_L 在箱子 q_b 的坐标系中 x 和 y 轴方向上的距离, e_{Lb}^θ 表示 q_L 与 q_b 在 xoy 平面绕 z 轴偏角之间的差值. 箱子到达观测者位置的时候理论应满足式(2)中 e_{Lb}^x , e_{Lb}^y 和 e_{Lb}^θ 均趋向于 0, 即

$$\lim_{t \rightarrow \infty} e_{Lb}(t) = 0. \quad (3)$$

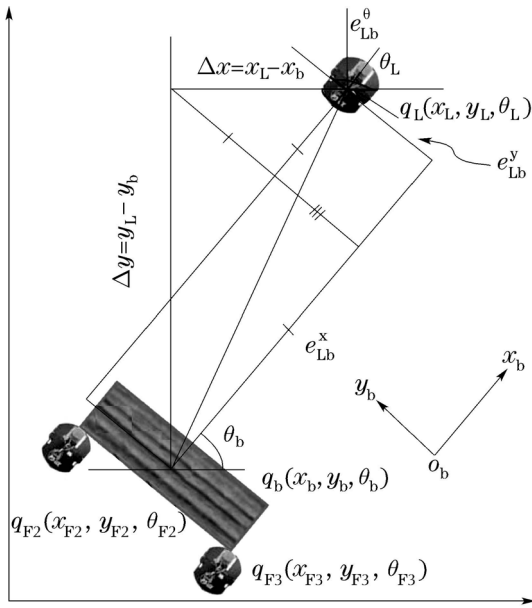


图 1 系统中机器人与被运输箱子位姿关系
Fig. 1 Posture relationships between robots and the box being pushed

对于实际系统, 由于差分轮驱动速度具有最低阈值, 在采样时间 Δt 内当驱动速度小于阈值时驱动轮无法转动. 此外, 到达观测者位置时候并不需要角度的调整, 因此式(3)修改为

$$\lim_{t \rightarrow T} e_{Lb}^{xy}(t) = \delta. \quad (4)$$

式中: e_{Lb}^{xy} 包含误差分量 e_{Lb}^x 与 e_{Lb}^y , T 为运动的有限时间. 由图1可以看出, 箱子 q_b 转向观测者 q_L 时 e_{Lb}^x 减小, 箱子 q_b 往 q_L 运动过程中 e_{Lb}^y 减小. 箱子的运动行为可归纳为前进forward、右转turn-right、左转turn-left与停止stop:

$$\begin{cases} \text{forward,} & \text{如果 } |e_{Lb}^y| \leq \delta, |e_{Lb}^x| > \delta, \\ \text{turn-right,} & \text{如果 } e_{Lb}^y < -\delta, |e_{Lb}^x| > \delta, \\ \text{turn-left,} & \text{如果 } e_{Lb}^y > \delta, |e_{Lb}^x| > \delta, \\ \text{stop,} & \text{如果 } |e_{Lb}^y| \leq \delta, |e_{Lb}^x| \leq \delta. \end{cases} \quad (5)$$

如式(5)所示, 依据 e_{Lb}^x , e_{Lb}^y 大小, 推动者机器人利用上述4种行为推动箱子到达目标点 q_L 附近. 而观测者机器人 q_L 则采用式(5)判断其与运输目的地之间的位置关系最终完成 $e_{TL}^{xy} < \delta$.

运动过程中, 若要使箱子运动, q_b 与推动者 q_{Fi} ($i \in \{2, 3\}$) 之间需要保持接触且相对位姿不变, 即保证式(6)中 e_{bFi} 不变:

$$\begin{cases} e_{bFi} = \begin{bmatrix} e_{bFi}^x \\ e_{bFi}^y \\ e_{bFi}^z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_{Fi} & \sin \theta_{Fi} & 0 \\ -\sin \theta_{Fi} & \cos \theta_{Fi} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} (q_b - q_{Fi}), \\ i \in \{2, 3\}. \end{cases} \quad (6)$$

由图1可以看出, 除 q_L 外, q_b 与 q_{F2} , q_{F3} 组成固定的三角形队形, 可以看成是一种编队控制. 以式(5)为判断依据, 作为 q_b 运动输入的 q_{F2} , q_{F3} 两差分轮旋转角速度 $[\dot{\varphi}_{rF2} \ \dot{\varphi}_{lF2}]^T$, $[\dot{\varphi}_{rF3} \ \dot{\varphi}_{lF3}]^T$ (下标r表示右轮, l表示左轮)在旋转运动阶段定义为

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \dot{\varphi}_{rF2} \\ \dot{\varphi}_{lF2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{\varphi}_{MAX} \cdot \frac{(r_f + d)}{(r_f + 2d)} \\ \dot{\varphi}_{MAX} \end{bmatrix}, \\ \begin{bmatrix} \dot{\varphi}_{rF3} \\ \dot{\varphi}_{lF3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \dot{\varphi}_{MAX} \cdot \frac{d}{(r_f + 2d)} \end{bmatrix}, & \text{若turn-right,} \\ \begin{bmatrix} \dot{\varphi}_{rF2} \\ \dot{\varphi}_{lF2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{\varphi}_{MAX} \cdot \frac{d}{(r_f + 2d)} \\ 0 \end{bmatrix}, \\ \begin{bmatrix} \dot{\varphi}_{rF3} \\ \dot{\varphi}_{lF3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{\varphi}_{MAX} \\ \dot{\varphi}_{MAX} \cdot \frac{(r_f + d)}{(r_f + 2d)} \end{bmatrix}, & \text{若turn-left,} \end{cases} \quad (7)$$

式中: r_f 为两机器人中点之间距离, d 为机器人两轮之间距离, $\dot{\varphi}_{MAX}$ 为驱动轮的最大旋转角速度. 在forward行为中, q_{F2} , q_{F3} 的驱动轮速度均为 $\dot{\varphi}_{MAX}$; 在stop行为中为0. 上述行为的输出 $\dot{\varphi} \geq 0$, 也仅在机器人速度非负的情况下, 箱子才会随着机器人的运动而运动. 由上述设计的运动完成推动者机器人将箱子推往观测者位置的任务.

3 基于虚拟目标序列跟踪的运输编队重新形成(Sequential virtual target sequence-based transport formation rearrangement)

由于地形起伏, 在机器人运动过程中会出现箱子受到摩擦力的作用而影响机器人的正常运动, 造成推动者机器人出现滑动、偏离正常轨迹的问题. 将之作为编队问题进行处理, 提出了基于虚拟目标序

列跟踪的编队重新形成方法予以解决.

由前文任务约束条件可知,推动者机器人能够通过视觉传感器获得其与箱子之间的相对位姿.由图1可知,在正常推动箱子运动的情况下,箱子在推动者机器人视觉图像中占据图像宽度的一半,当箱子与机器人位置发生变化时,该宽度会发生改变,由此产生的推动者机器人与箱子间的位姿关系 e_{bF2} 或 e_{bF3} 发生变化.在连续 K 个采样时间内,若 e_{bF2} 或 e_{bF3} 各分量连续发生变化,即

$$\begin{cases} e_{bFi}(k) \neq e_{bFi}(k-1), i=2 \text{ 或 } 3, \\ \forall k \in [2, \dots, K], \end{cases} \quad (8)$$

则判定机器人出现滑动,应当重新编队.该判断条件同时考虑了机器人处于斜面的情况,此时视觉图像中箱子并未占图像宽度的一半,但机器人在斜面运动过程中与箱子位姿关系各分量并未在 K 个采样时间内连续改变,因此判断未发生滑动.调整过程如图2所示.

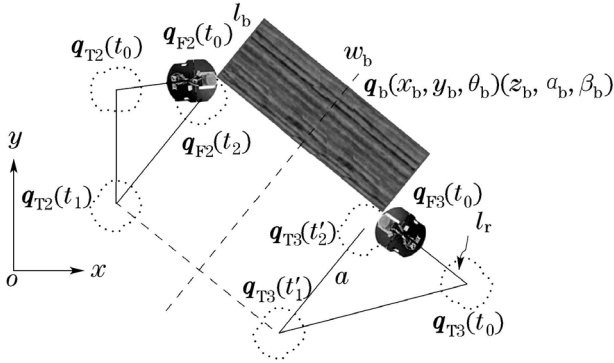


图2 编队重新形成轨迹与虚拟目标序列

Fig. 2 Trajectory of formation rearrangement and virtual target sequence

图2中: $q_{Ti}(t_j)$ ($i \in \{2, 3\}, j \in \{0, 1, 2\}$)表示推动者机器人 q_{Fi} ($i \in \{0, 2\}$)在重新形成编队过程中的虚拟跟踪目标序列.依据时间 $t_0 - t_2$ (t'_2),推动者机器人 q_{F2} , q_{F3} 需要跟踪的虚拟目标 $q_{T2}(t_j)$, $q_{T3}(t'_j)$ 重新形成编队.依据几何原理,可以具体设计出各虚拟目标点的位姿.此时虚拟目标位姿的计算是由 q_b 的完整位姿决定,即除 $[x_b \ y_b \ \theta_b]^T$ 外,还包括了 (z_b, α_b, β_b) .而依据式(2),在机器人跟踪的时候需要完成的是 xoy 平面的目标跟踪,因此 (z_b, α_b, β_b) 不在机器人的位姿中表示.此外,假设各虚拟目标与箱子的距离足够接近以至于在编队重新形成的过程中机器人视为在同一平面内运动,虚拟目标具有相同的偏角 α_b, β_b 与 θ_b .其中 $q_{Ti}(t_0)$ 为各推动者机器人在某采样时间范围内直线后退固定距离后完成,目的用于在机器人转向 $q_{Ti}(t_1)$ 时不会与箱子发生碰撞导致侧翻或改变箱子位姿.其后的虚拟目标 $q_{Ti}(t_1)$,

$q_{Ti}(t_2)$ 定义为

$$\begin{cases} q_{T2}(t_1) = \\ \text{rot}(\alpha_b, \beta_b, \theta_b) \times \begin{bmatrix} -[\frac{l_b + l_r}{2} + a] \\ \frac{\omega_b}{2} \\ 0 \end{bmatrix} + q_b, \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases} q_{T2}(t_2) = \\ \text{rot}(\alpha_b, \beta_b, \theta_b) \times \begin{bmatrix} -\frac{l_b + l_r}{2} \\ \frac{\omega_b}{2} \\ 0 \end{bmatrix} + q_b, \end{cases}$$

$$\begin{cases} q_{T3}(t'_1) = \\ \text{rot}(\alpha_b, \beta_b, \theta_b) \times \begin{bmatrix} -[\frac{l_b + l_r}{2} + a] \\ -\frac{\omega_b}{2} \\ 0 \end{bmatrix} + q_b, \end{cases} \quad (10)$$

$$\begin{cases} q_{T3}(t'_2) = \\ \text{rot}(\alpha_b, \beta_b, \theta_b) \times \begin{bmatrix} -\frac{l_b + l_r}{2} \\ -\frac{\omega_b}{2} \\ 0 \end{bmatrix} + q_b, \end{cases}$$

$$\begin{aligned} \text{rot}(\alpha_b, \beta_b, \theta_b) = & \begin{bmatrix} \cos \theta_b & -\sin \theta_b & 0 \\ \sin \theta_b & \cos \theta_b & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \beta_b & 0 & \sin \beta_b \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta_b & 0 & \cos \beta_b \end{bmatrix} \times \\ & \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha_b & -\sin \alpha_b \\ 0 & \sin \alpha_b & \cos \alpha_b \end{bmatrix}, \end{aligned} \quad (11)$$

式中: l_b, w_b 分别为箱子的长度与宽度, l_r 为机器人长度, a 为常数,如图2所示.虚拟目标 $q_{Ti}(t_2)$ 为机器人正常推动箱子时的位置,虚拟目标 $q_{Ti}(t_1)$ 的引入能够避免机器人从其他位置到达 $q_{Ti}(t_2)$ 时旋转造成箱子的滑动.对每个推动者机器人 q_{Fi} ,都按照策略1所示完成虚拟目标序列的跟踪运动.

策略1 运输失败时编队重新形成策略.

BEGIN

Generate the virtual targets sequence $q_{Ti}(t_j)$ ($i \in \{2, 3\}, j \in \{0, 1, 2\}$, 下同)

if ($e_{Ti(t_2)Fi} \leq \delta$) && (the other pusher is pushing box)

Break; %推动箱子继续前进

else

(Track) %跟随虚拟目标序列

```

Halt the other pushers;
for 0 ≤ j < 3
    Track virtual target  $q_{Ti}(t_j)$ 
    if  $e_{Ti(t_j)Fi} < \delta$ 
        j++;
    endif
endifor
(Wait) %等待其余机器人到达目标
if  $e_{Ti(t_2)Fi} > \delta$ 
    Turn to (Wait);
endif
endif
END
    
```

图3显示了在仿真环境下当两个推动机器人均发现运输失败时的编队重新形成过程. 如图3(a)所示, 机器人 q_{F2} 与 q_{F3} 开始跟踪虚拟目标, 首先在采样时间内退后, 分别到达虚拟目标 $q_{F2}(t_0)$ 与 $q_{F3}(t_0)$ 的位置. 由于偏离的角度不同, 在图3(b)时刻机器人 q_{F2} 已经完成虚拟目标的跟踪, 而 q_{F3} 正在跟踪虚拟目标 $q_{F3}(t_1)$. 到图3(c)所示时刻, 两机器人均完成虚拟目标跟踪, 重新形成运输编队, 继续推动箱子运动.

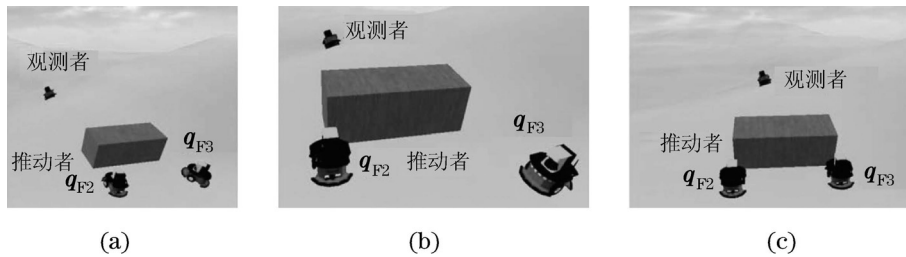


图 3 运输失败时编队重新形成

Fig. 3 Rearrangement the formation when the transport task failed

本节提出的虚拟目标序列跟踪策略, 在运输任务失败的时候, 推动者机器人能够完成运输编队的重新形成, 继续推动箱子运动.

4 编队协作运输策略(Formation cooperative transport strategy)

在起伏地形的运输过程中, 推动者利用上述基于虚拟目标序列的编队重新形成方法能够在运输失败的时候完成运输编队的重新形成. 而作为观测者, 依据一定的导航策略选择路径在协作运输中同样具有重要的意义.

4.1 地形信息分类(Classification of terrain information)

根据前文所述的任务约束条件, 在起伏地形中的运动, 作为观测者的机器人应当能够通过传感器获取环境中的地形信息, 如图4所示.

图4所示为起伏环境中几种典型的地貌特征. 观测者机器人 q_L 利用视觉传感器与陀螺仪相结合, 可以获得其前方的地形信息.

图4中分上下两部分, 上部分为RGB实时图像, 下部分是特征提取之后对应的二值图(基于颜色信息的特征提取方法获得), 横线是机器人视觉的水平线. 当机器人处于水平面时, 高于水平线的特征区域可以看成是前进方向上的坡(图4(a)). 当机器人俯仰角为正时, 通常会出现图4(b)的情况, 即机器人正在爬坡, 此时特征区域在机器人视觉水

平线以下. 当机器人俯仰角为负时, 机器人处于下坡的状态, 此时视觉中的特征区域在水平线以上, 当前方有凹陷区域的时候, 出现图4(c)的空白区域.

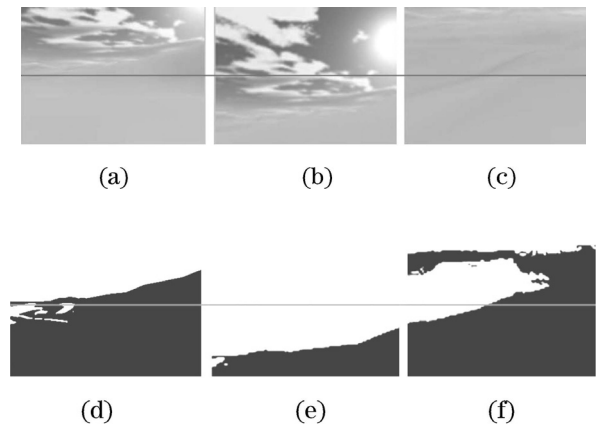


图 4 起伏地形环境中几种典型的地形特征

Fig. 4 Several typical features in undulating terrain environment

依据上述对地形特征的识别, 观测者采用NPDF导航策略以完成协作运输任务.

4.2 NPDF策略(NPDF strategy)

NPDF策略为在目标点位于观测者机器人前方的条件下, 每一时刻观测者机器人在其获得的画面中, 寻找一条最接近目前高度的平缓路径运动,

到达目的地. 当目的地在观测者机器人视野前方, 且无起伏环境遮挡(即可视), 则直接向目标运动. 在途中出现推动者机器人发生滑动, 脱离其在箱子后方固定位置的时候修正其自身位置, 继续推动箱子运动(见图5), 表述为策略2的形式.

策略2 NPDF策略.

BEGIN (Watcher)

if (Target detected)

Move to Target q_T ;

Return;

endif

if $|e_{TL}^\theta| > \frac{\pi}{2}$

Turn to target q_T ;

endif

Generate $P(t)$;

(q_L 当前视觉画面中地面与天空的交点集)

Select $p_k(t) = |\arg \min_k [z(p_k(t)) - z(q_L(t))]|$,

$p_k(t) \in P(t)$;

if $|e_{TL}^{xy}| > \delta^{xy}$

Move to target q_T ;

else

Stop;

endif

END

BEGIN (Pusher)

if $|e_{TL}^{xy}| > \delta^{xy}$

Push the box to the position represented by q_L ;

Follow formation rearrangement strategy in Strategy 1;

else

Stop;

endif

END

图5(a)–(b)分别为在图5(c)时刻观测者机器人视觉获取的RGB信息及处理后的二值图像, 黑色部分为起伏地面, 中间空白部分为连续起伏面的凹陷部分. 在该策略导航下, 初始时刻机器人寻找较为平缓的路径, 到达图5(c)所示位置. 此时观测者机器人获得的视觉信息显示前方整块均为凹陷路面, 仅当右侧是贴近目前高度的路面, 因此此时需要向右转继续运动. 在该策略中, 目标点需要保持在观测者机器人的前方, 否则可能会出现观测者机器人不停寻找平缓的运动方向而离目标点越来越远的情况.

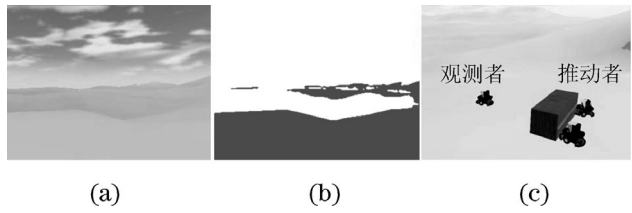


图5 NPDF策略中观测者及推动者的运动
Fig. 5 The motion of both watcher and the pushers in the NPDF strategy

4.3 NPDF导航策略下的多机器人协作运输策略(Multi-robot cooperative transport strategy with NPDF navigation strategy)

以NPDF导航策略结合基于虚拟目标序列跟踪的运输编队重新形成策略, 形成完整的多机器人协作运输的控制结构, 如图6所示.

图6为多机器人协作运输的控制框图. 观测机器人需要通过传感器获得目的地的位置 q_T , 同时在运输失败时需要获得自身与箱子之间的相对位姿以计算箱子的位姿 q_b 并提供给推动者机器人 q_F . 推动者机器人需要获得与箱子 q_b 的相对位姿及作为其目标点的观测者的位姿 q_L 以决定自己是调整姿态或是推动箱子运动, 同时还需要将自己的状态信息反馈给观测机器人 q_L 作为其运动的依据. 在观测者与推动者机器人上的协作运输策略具体流程如图7所示.

图7中竖直虚线的右边表示协作运输策略在观测者上运行部分的流程, 左边表示协作运输策略在推动者机器人上运行的部分. 观测者部分的两条虚线箭头相连. 具体的运输策略步骤如策略3所示.

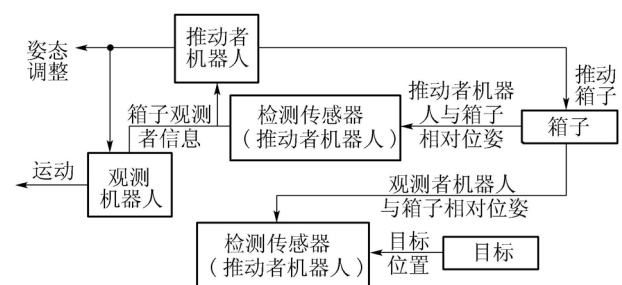


图6 多机器人协作运输控制框图
Fig. 6 Control architecture of multi-robot cooperative transport

策略3 多机器人协作运输策略.

BEGIN (Watcher)

while $|e_{TL}^{xy}| > \delta^{xy}$

```

Move to Target  $q_T$ ;
Update and broadcast watcher's posture  $q_L$ ;
if formation is rearranging
    Turn to target  $q_T$ ;
    Stop;
    Broadcast the box posture  $q_b$ ;
endif
if  $|e_{TL}^{xy}| > \zeta$  ( $\zeta$ 为事先设置的常数)
    Stop and wait for the box;
endif
endwhile
END
BEGIN (Pusher)
    Acquire watcher's posture  $q_L$  and the box posture  $q_b$ ;
    (first time)
    while  $|e_{TL}^{xy}| > \delta^{xy}$ 
        Acquire watcher's posture  $q_L$ ;
        if  $e_{Ti(t_2)Fi} > \delta$ 
            Announce formation rearrangement;
            Acquire box posture  $q_b$ ;

```

```

Follow formation rearrangement strategy in Strategy 1;
else
    if received formation rearrangement announcement
        Stop and wait for announcement of formation rearrangement clean;
    else
        Push the box  $q_b$  to the position represented by  $q_L$ ;
    endif
endif
endwhile
END

```

在上述策略中, 观测者机器人及推动者机器人之间通过局域网通信交流箱子的位姿、观测者机器人的位姿以实现信息的合理利用. 当箱子距离观测者过远或推动者机器人需要重新形成运输编队时, 观测者机器人会停止运动等待. 利用上述分别在观测者机器人及推动者机器人上运行的策略, 能够完成多机器人协作运输的任务.

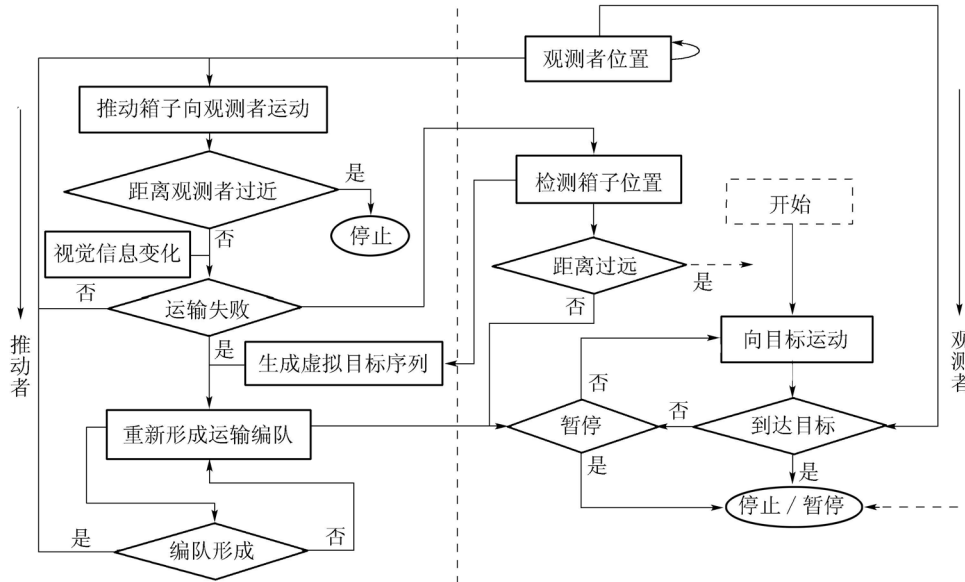


图 7 多机器人协作运输流程图

Fig. 7 Flow chart of multi-robot cooperative transport

5 仿真实验结果(Simulation results)

本文对编队协作运输任务进行了仿真实验, 对协作运输策略及基于序列目标跟踪的运输编队重新形成策略进行了验证. 系统中各机器人 q_L, q_{F2} ,

q_{F3} 及箱子 q_b , 目的地 q_T 初始位姿分别为

$$q_L(t_0) = \begin{bmatrix} 2 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad q_{F2}(t_0) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0.8 \\ 0 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{q}_{F3}(t_0) = \begin{bmatrix} 0 \\ -0.8 \\ 0 \end{bmatrix}, \mathbf{q}_b(t_0) = \begin{bmatrix} 0.6 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \mathbf{q}_T(t_0) = \begin{bmatrix} 30 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}.$$

在该实验中,箱子需要被推动到距离其初始位姿 $\mathbf{q}_b(t_0) = [0.6 \ 0 \ 0]^T$ 的30 m远的目标点 $\mathbf{q}_T = [30 \ 0 \ 0]^T$. 仿真实验在Microsoft Robotics Developer Studio (MRDS) 2008 R3软件环境下进行,硬件环境为Dell Optiplex GX620, 2.8 GHz CPU, 3.5 G RAM, RADEON X600 12 M, Win 7 OS.

由于MRDS具有高度逼真的物理引擎,在多机器人协作推动箱子过程中由于受到视觉图像噪声、摩擦力、采样时间、CPU占用率、线程响应时间等各种因素的影响,即使在相同参数环境中进行多次实验,每次实验中机器人发生滑动的地点、次数及重新形成编队所需的时间仍存在差异,因此进行20次实验取平均完成时间作为导航结果.

仿真环境中以初始水平面为参考平面,最高处、最低处分别与水平面高度差分别为1 m和-1 m.

图8显示了观测者机器人在NPDF策略进行导航的单个较好的仿真实验结果,其中:图8(a)为系统运动轨迹的立体视图,图8(b)为运动轨迹的俯视图,图8(c)为运动轨迹在 xoz 平面的视图.

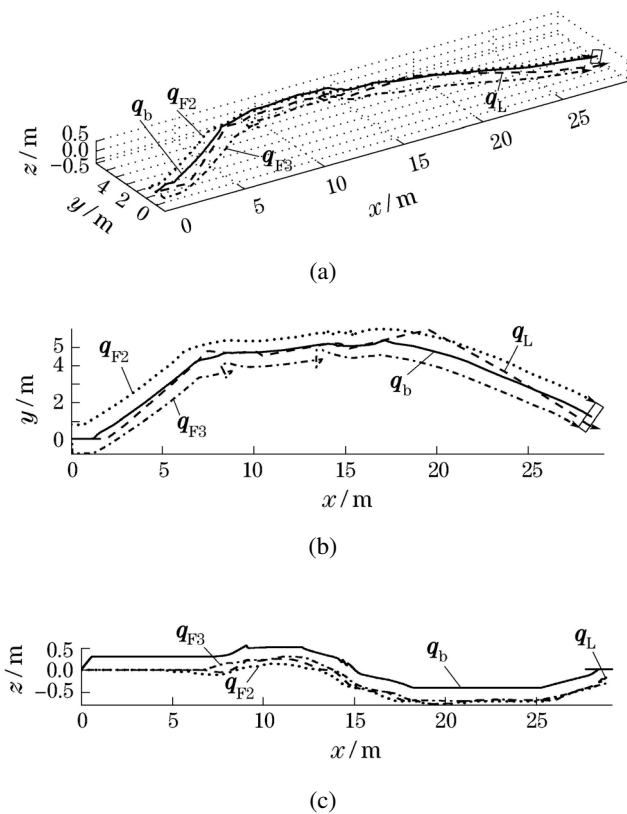


图8 协作运输仿真结果

Fig. 8 Cooperative transport simulation result

图8所示的仿真结果轨迹显示,当任务开始后,观测者机器人便选择一条向左的路径,当箱子被推动到 $x \approx 5$ m时,即到达图5所示的位置.同样在到 $x \approx 10$ m处,机器人 \mathbf{q}_{F3} 判断出自己发生滑动,需要重新形成运输编队,此时推动者机器人 \mathbf{q}_{F2} 判断自身未发生滑动,因此停留等待 \mathbf{q}_{F3} 完成位置修正.该次实验中,箱子到达目的地所用时间为382.4 s.重新形成运输编队4次.20次实验中箱子到达目的地所需要的时间范围为382.4 s~434.8 s,平均时间为398.3 s;实验中重新形成编队次数范围为4~6次.可以看出,在本文所述的前提条件下,多机器人能够协作推动箱子到达目的地.

图8(c)显示了箱子运动过程中的高度变化,初始时刻箱子的重心高度为 $z = 0.3$ m.在NPDF策略下,箱子到达的最高高度为 $z = 0.5$ m,而最低高度为 $z = -0.5$ m.从图中可以看出,由于环境未知,初始时刻机器人能够找到一条平缓的路径运动,而到达 $x \approx 13$ m处时,在朝向目标的视觉信息中无法在找到平缓的路径,因此出现了高度大幅度降低的缺陷.运动过程中各推动者机器人与箱子间的位姿误差变化如图9所示.

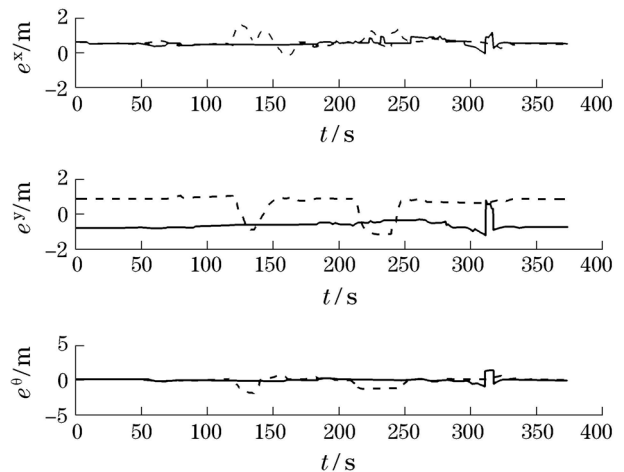


图9 运输过程中推动者机器人与箱子间的位姿误差变化
Fig. 9 Posture deviation between pusher robots and the box during the transport process

图9中,实线代表 \mathbf{q}_{F2} 与箱子间的位姿误差 \mathbf{e}_{bF2} 各分量随时间的变化,虚线代表 \mathbf{q}_{F3} 与箱子间的位姿误差 \mathbf{e}_{bF3} 各分量随时间的变化.从图中可以看出,运输编队在 $t = 150$ s前后, $t = 230$ s, $t = 310$ s附近发生滑动,利用提出虚拟目标跟踪方法重新形成编队,使各推动者机器人和箱子间的误差分量回到初始大小.

从该实验结果可以看出,在本文的假设条件下,

设计的编队协作运输策略能够完成多移动机器人协作推动箱子的任务. 在运动的过程中, 基于虚拟目标序列跟踪的策略均能够使推动者机器人重新形成运输编队以继续推动箱子运动.

为验证提出的策略的有效性, 将目标点设置在机器人初始位置的右方, 如图10所示的观测者机器人前方, 该方向上为连绵起伏的陡坡, 以提高仿真实验的难度.

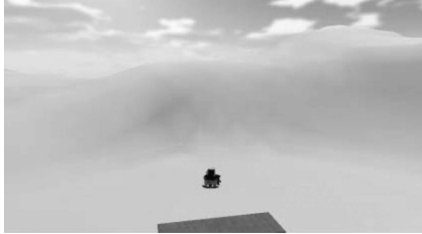


图10 多机器人协作运输过程中出现的陡坡
Fig. 10 Rapid ascent in the environment of multi-robot cooperative transport

仿真实验中当系统中各机器人 q_L , q_{F2} , q_{F3} 及箱子 q_b , 目的地 q_T 初始位姿分别为

$$\begin{aligned} q_L(t_0) &= \begin{bmatrix} 2 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad q_{F2}(t_0) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0.8 \\ 0 \end{bmatrix}, \\ q_{F3}(t_0) &= \begin{bmatrix} 0 \\ -0.8 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad q_b(t_0) = \begin{bmatrix} 0.6 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \\ q_T(t_0) &= \begin{bmatrix} 15 \\ -10 \\ 0 \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

在此运输目标位姿的条件下, 机器人团队推箱子任务的仿真研究结果如图11所示.

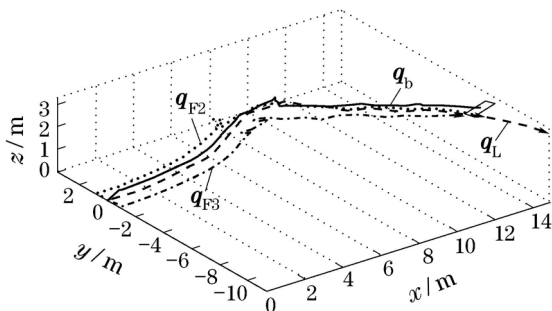


图11 行进方向上坡度较高情况下协作运输仿真结果
Fig. 11 Cooperative transport simulation results with rapid ascent on the forward path

由图11可以看出, 利用NPDF导航策略, 虽然绕过的路程较远, 且在运动过程中机器人发生多次

滑动导致需要重新形成编队, 但是最终机器人成功将箱子推动到目标点 $q_T = [15 \ -10 \ 0]^T$ 附近, 完成了协作运输任务.

6 总结(Conclusion)

本文对起伏地形环境下的多移动机器人协作运输问题进行了研究. 在起伏地形环境中由于地形起伏的影响, 进行协作运输作业的机器人会出现侧滑等现象. 针对这一问题, 提出了基于虚拟目标序列跟踪的运输编队重新形成方法, 当某一推动者机器人脱离箱子后方推动点的时候观测者机器人与另一推动者机器人会停留等待. 此外, 设计了编队协作运输策略, 观测者利用NPDF导航策略运动, 推动者将观测者当前位姿作为箱子的目标利用基于几何规划的运动规则推动箱子运动. 在仿真环境中对协作推箱子问题进行了实验, 验证了编队协作运输策略在设定的仿真环境中的有效性.

参考文献(References):

- [1] PARKER L E. ALLIANCE: an architecture for fault tolerant, cooperative control of heterogeneous mobile robots [C] // *Proceedings of the IEEE/RSJ/GI International Conference on Intelligent Robots and Systems*. New York: IEEE, 1994, 2: 776 – 783.
- [2] MATARIC M J, NILSSON M, SIMSARIAN K T. Cooperative multi-robot box-pushing [C] // *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. New York: IEEE, 1995, 3: 556 – 561.
- [3] GERKEY B P, MATARIC M J. Pusher-watcher: an approach to fault-tolerant tightly-coupled robot coordination [C] // *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*. New York: IEEE, 2002, 1: 464 – 469.
- [4] GERKEY B P, MATARIC M J. Sold!: auction methods for multi-robot coordination [J]. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 2002, 18(5): 758 – 768.
- [5] ZIELINSKI C, TROJANEK P. Stigmergic cooperation of autonomous robots [J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2009, 44(4): 656 – 670.
- [6] FANG T, PARKER L E. ASyMTRe: automated synthesis of multi-robot task solutions through software reconfiguration [C] // *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*. New York: IEEE, 2005: 1501 – 1508.
- [7] STILWELL D J, BAY J S. Toward the development of a material transport system using swarms of ant-like robots [C] // *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*. New York: IEEE, 1993, 1: 766 – 771.
- [8] PEREIRA G A S, PIMENTEL B S, CHAIMOWICZ L, et al. Coordination of multiple mobile robots in an object carrying task using implicit communication [C] // *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*. New York: IEEE, 2002, 1: 281 – 286.
- [9] SUGAR T G, KUMAR V. Control of cooperating mobile manipulators [J]. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 2002, 18(1): 94 – 103.

- [10] DAS A K, FIERRO R, KUMAR V, et al. A vision-based formation control framework [J]. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 2002, 18(5): 813 – 825.
- [11] YAMADA S, SAITO J Y. Adaptive action selection without explicit communication for multirobot box-pushing [J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews*, 2001, 31(3): 398 – 404.
- [12] 丁滢颖, 何衍, 蒋静坪. 基于蚁群算法的多机器人协作策略 [J]. 机器人, 2003, 25(5): 414 – 418.
(DING Yingying, HE Yan, JIANG Jingping. Multi-robot cooperation method based on the ant algorithm [J]. *Robot*, 2003, 25(5): 414 – 418.)
- [13] HOARE J R, PARKER L E. Using on-line conditional random fields to determine human intent for peer-to-peer human robot teaming [C] // *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. New York: IEEE, 2010: 4914 – 4921.
- [14] OTA J, ARAI T. Transfer control of a large object by a group of mobile robots [J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 1999, 28(4): 271 – 280.
- [15] PHAM D T, AWADALLA M H. Neuro-fuzzy based adaptive cooperative mobile robots [C] // *Proceedings of the IEEE 28th Annual Conference of the Industrial Electronics Society*. New York: IEEE, 2002, 4: 2962 – 2967.
- [16] INOUE Y, TOHGE T, IBA H. Cooperative transportation system for humanoid robots using simulation-based learning [J]. *Applied Soft Computing*, 2007, 7(1): 115 – 125.
- [17] PARRA-GONZALEZ E F, RAMIREZ-TORRES J G. Cooperative multi-robot box-pushing in a cluttered environment [C] // *Proceedings of the 5th Meeting of the Electronics, Robotics and Automotive Mechanics Conference*. New York: IEEE, 2008: 514 – 519.
- [18] OTANI T, KOSHINO M. Applying a path planner based on RRT to cooperative multirobot box-pushing [J]. *Artificial Life and Robotics*, 2009, 13(2): 418 – 422.
- [19] GOLKAR M A, NAMIN S T, AMINAIEE H. Fuzzy controller for cooperative object pushing with variable line contact [C] // *Proceedings of the IEEE International Conference on Mechatronics*. New York: IEEE, 2009, 1 – 6.
- [20] SHOEMAKER C M, BOMSTEIN J A. Overview of the Demo III UGV program [C] // *Proceedings of the the International Society for Optical Engineering*. New York: SPIE, 1998, 3366: 202 – 211.
- [21] KROTKOV E, FISH S, JACKEL L, et al. The DARPA PerceptOR evaluation experiments [J]. *Autonomous Robots*, 2007, 22(1): 19 – 35.
- [22] YANG F, LIU S R, LIU F. Cooperative transport strategy for formation control of multiple mobile robots [J]. *Journal of Zhejiang University-SCIENCE C (Computers & Electronics)*, 2010, 11(12): 931 – 938.

作者简介:

杨帆 (1984–), 男, 博士研究生, 研究方向为多机器人编队与协作、群体智能算法理论与应用, E-mail: yf848@hotmail.com;

刘士荣 (1952–), 男, 博士, 教授, 研究方向为复杂系统建模、优化与控制、智能机器人与智能控制、可再生能源发电与微型电网技术, E-mail: liushirong@hdu.edu.cn;

仲朝亮 (1980–), 男, 博士研究生, 研究方向为智能机器人与智能系统、智能算法理论与应用, E-mail: cpenet@163.com;

董德国 (1982–), 男, 博士研究生, 研究方向为智能机器人系统、网络机器人, E-mail: dongdeguo@163.com.