

动态环境视觉导航的有限状态粗集方法研究

高庆吉¹ 洪炳熔¹ 邢志伟² 牛国臣²

(1. 哈尔滨工业大学计算机科学与技术学院, 黑龙江哈尔滨 150001; 2. 中国民用航空学院, 天津 300300)

摘 要: 为实现移动机器人在多目标动态环境下导航与控制, 提出了有限状态机和粗糙集理论相结合的单 PT (Pair Tilt) 视觉系统监控策略. 首先定义了目标方位信息可信度估计模型及基于动态优先级的目标选定方法. 然后确定了每个目标监控的有限状态机模型, 并依据粗糙集理论对目标监控决策表进行了约简, 引入了非值约简描述方法, 得到了最小规则集. 在多目标环境下的移动机器人实验, 验证了所提出方法的有效性.

关键词: 视觉导航; 有限状态机; 粗糙集; 约简; 动态环境

中图分类号: TP242 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2005) 12-2183-04

Study on Visual Navigation in Dynamic Environment Based on Finite State Rough Set Theory

GAO Qing ji¹, HONG Bing-rong¹, XING Zhi-wei², NIU Guo-chen²

(1. Department of Computer Science and Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China;

2. Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

Abstract: A monitoring strategy for visual navigation in multi-object environment with only one PT (Pair Tilt) camera based on rough set theory under finite state machine frame is proposed. The model to estimate the reliability level of multi-object orientation and an algorithm to calculate the objects priority are defined firstly. Then a finite state machine model to monitoring each object is put forward. A minimal rule set for monitoring multi-object is achieved by using reduction algorithm of rough set theory. Also a description method of reduction based on not value property is proposed which is not included in the classical rough set theory. The validity and practicability of the strategy are proved by the experiments accomplished by using autonomous mobile robots to finish certain tasks in multi-object environment.

Key words: visual navigation; finite state machine; rough set; reduction; dynamic environment

1 引言

移动机器人视觉系统实时准确监控大范围多运动目标的能力决定其导航控制效果^[1]. 而摄像机监控方式是关键因素, 其同时制约视觉处理方法. 监控方式分为 FD (Fixed Direction)^[2]、OD (Omni Direction)^[3,4] 及 PT (Pair Tilt)^[5,6] 三种. FD 视觉具有固定视角并与机器人本体有相同自由度. OD 视觉通过检测锥面镜中图像获得全向图像, 对彩色及形状简单目标的方向判定能力强, 而通过图像恢复获得的形状及距离信息精度不高. PT 视觉可以确定目标的精确方向与距离, 而摄像机伺服控制策略决定可监控目标的分布范围与实时性.

具有 PT 视觉的机器人系统一般以固定监控某一目标为主, 同时也检测进入视野范围的其他目标, 可监控目标数量有限. 文献[7]通过扫描监控方式检测目标, 可检测到的目标多, 但存在对无目标区域的扫描, 摆动同时提取目标信息影响检测精度. 本文将实现一种多目标动态监控策略, 使机器人有效

监控与完成任务相关目标. 通过估计目标方位信息的动态信度确定其动态优先级, 选出下一个监控目标. 监控每个目标时采用有限状态机模型, 并依据粗糙集理论对目标监控决策表约简, 获得最小规则集, 从而实现多目标动态监控及导航任务.

2 多目标监控基本模型

2.1 目标方位信息的动态信度估计

在多目标动态环境下导航需要获得相关目标的实时位姿信息. 采用单目视觉动态监控多个目标时, 所有的目标不可能一直同时出现在当前的视野范围. 未见到的目标实时位姿可以采用 Kalman 滤波等方法获得^[8], 但信息可信度 (以下简称信度) 小于 1. 由于机器人的运动和动态目标的运动趋势具有不完全可预测的特点, 预测结果并不具备完全一致的可靠性. 用 $B_i(t)$ 来度量目标 i 在 t 时刻位姿信息的可信度, 称其为动态信度. $B_i(t) \in [0, 1]$. 确定 $B_i(t)$ 的策略描述如下:

- ①与导航任务相关的目标的位姿信度随时间延续而下降;
 - ②相对于机器人的运动速度大的目标位姿信度下降较快.
- t 时刻被监控目标 i 在视野范围内时其 $B_i(t)$ 取 1, 不在视野范围时按式(1) 计算.

$$B_i(t) = \delta_i^{V(i,t)} \times \varphi_i^{T(i,t)} \quad (1)$$

$V(i, t)$ 是 t 时刻目标 i 相对机器人的运动速度, 这里取跟踪该目标时 PT 摄像机的角速率. δ_i 为第 i 个目标的速度因子, $\delta_i \in [0, 1]$, 静止目标取值为 1. $T(i, t)$ 是目标 i 从上一次被监控结束到 t 时刻的时间间隔. φ_i 为时间因子, $\varphi_i \in [0, 1]$, 取值与目标的运动速率成反比.

2.2 监控目标的优选策略

由环境中目标分布状况决定监控的目标频率, 具有确定性. 而目标的动态特性则增加了监控频率的不确定性. 以机器人足球比赛为例, 球永远是必须监控目标. 在带上球后球门是必须监控目标. 当前进方向上的目标处于障碍区内时, 该障碍物是必须监控目标. 而障碍物的运动速度事先不能确定, 其大小将决定对其监控频率. 所以, 可以根据动态优先级确定下一次需要监控的目标. 由上级调度程序根据目标在某一任务阶段的重要程度确定的优先级为计划优先级, 用 $Im_i(t)$ 表示. 由于机器人本身的运动及环境中其他目标运动的不确定性, 动态信度 $B_i(t)$ 评价目标位姿信息的可信程度. 由 $Im_i(t)$ 和 $B_i(t)$, 确定当前每个目标的动态优先级 $P_i(t)$, 采用式(2) 计算.

$$P_i(t) = \psi_i Im_i(t) / B_i(t) \quad (2)$$

式中, ψ_i 是目标 O_i 的动态信度对动态优先级的调节因子, 为与 1 接近的正数. 按式(3) 可以确定出下一个监控目标为 O_k .

$$P_k(t) = \text{Max}(P_1(t), P_2(t), \dots, P_N(t)) \quad (3)$$

2.3 目标监控的有限状态机模型

由于监控的目标及机器人本身都具有机动性, 所以在确定监控某个目标后, 根据历史记录与预测, 首先需要将摄像机的视线移到该目标上, 使监控画面的中心点移到目标的中心点并在一段时间内保持偏差足够小, 以便于采集稳定清晰的图像. 确定 PT 摄像机监控目标的过程包括切换目标、稳定图像、搜索目标、瞄准目标、跟踪目标五个基本行为. 在根据动态优先级确定目标 O_k 为下一个监控目标之后, 即执行切换目标行为, 将摄像机转到该目标的当前预测方位上. 稳定图像行为是为了消除摄像机移动而引起的图像模糊. 稳定图像后经过分析与识别可能会出现三种情形之一, 即被监控目标正好在视野中心、在视野中但不对正或不在视野内. 相对应地要执行跟踪目标、瞄准目标和搜索目标行为. 这样, 监控一个目标的过程包括: 目标切换、稳定图像、搜索目标、瞄准目标和跟踪目标. 其中切换目标和稳定图像是必须的, 其余三个行为至少包含一个. 影响各个状态之间转换的因素包括:

- a: 摄像机当前状态. 将摄像机当前状态作为下一行为决策的依据. 将从切换目标到稳定图像的过程统称为状态转移. 因此, 系统的四个状态为: 目标切换、目标搜索、目标瞄准和目标跟踪, 用 q_0, q_1, q_2, q_3 表示;
- b: 监控目标是否在视野范围内的情况;
- c: 扫描整个视野的次数. 当扫描一次 PT 活动可达范围都没有发现要监控目标时记为本次扫描失败;

- d: 当前监控目标的计划优先级 $Im_i(t)$ 的优先级;
- e: 本次监控目标的累计时间是否大于规定时间片;
- f: 摄像机是否转到要监测目标的估计方位并且图像稳定的逻辑值.

系统的有限状态为 q_0, q_1, q_2, q_3 . 由 a, b, c, d, e, f 组成输入向量 V_s , 状态之间转换是确定的, 每次监控一个目标以 q_0 为初始状态, q_1, q_2, q_3 为可能的终止状态. 基于有限状态机模型的目标监控状态转换图如图 1 所示.

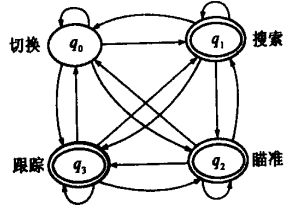


图 1 目标监控状态转换图

状态转换描述为 $\delta: Q \times V_s \rightarrow Q$. V_s 对应 $3 \times 2^4 = 48$ 个向量, 与四种状态组合, 共有 $4 \times 48 = 192$ 种可能的状态转移.

状态转换描述为 $\delta: Q \times V_s \rightarrow Q$. V_s 对应 $3 \times 2^4 = 48$ 个向量, 与四种状态组合, 共有 $4 \times 48 = 192$ 种可能的状态转移.

3 基于粗集的目标监控策略获取

3.1 知识描述

输入向量和当前状态决定摄像机的下一个行为. 将输入向量和当前状态合成共同的条件属性, 将下一个行为作为决策属性, 可以形成目标监控策略的决策表. 条件属性:

$$C = \{ a, b, c, d, e, f \}$$

决策属性 D 对应 5 个行为取值:

- 0: 继续转向当前要监控的目标;
- 1: 搜索目标;
- 2: 瞄准目标;
- 3: 跟踪锁定目标;
- 4: 结束当前目标的监控.

因此, 可以形成关于多目标监控的知识表达系统:

$$S = \langle U, C, D, V, f \rangle$$

其中, U 为研究论域, $C \cup D = R$ 是属性集合, 子集 C 和 D 分别称为条件属性和决策属性集合. $V = \cup_{r \in R} v_r$ 是属性值的集合, v_r 表示某一个属性 $r \in R$ 的属性值范围, f 定义一个信息函数, 即 $f: U \times R \rightarrow V$, 它指定 f 中每一对象 x 的属性值. S 的各项定义前文已经描述. 根据条件属性取值, 决策表有 192 条规则. 其中不存在重复信息, 所以决策表是协调的. 为此, 引入粗糙集理论^[9]的知识约简方法来进一步提取多目标监控的最小规则集.

3.2 属性约简

由波兰数学家 Pawlak 创立并得到发展的粗糙集理论, 可以对决策表进行属性约简和属性值约简, 求得具有高精度和最简属性描述形式的决策规则集^[10]. 其属性约简定义为:

对于给定的知识库 $k = (U, R)$, 等价关系 $R \subset \text{ind}(k)$, 且 $r \in R$. 如果存在:

$$\text{ind}(R) = \text{ind}(R - \{r\})$$

即删去某个属性后系统的等价关系不变, 则称 r 为 R 中可省略的. 对决策表的每个条件属性依次进行可删除性检查, 消去冗余的条件属性和重复的规则实例.

本文所讨论的问题中, 可以通过穷尽条件属性的取值空

间而获得完备的样例集合. 采用上述约简方法对多目标监控决策集的属性约简约去了属性 c 和 d , 消去重复规则, 获得 48 条规则. 对此解释为: 规定监控时间结束为更换监控目标的条件, 所以该属性对决策无影响, 只是在考虑与机器人本体行为协调时, 其可以作为机器人摆脱困境的依据. 而计划优先级大的目标的特权体现在动态优先级计算上, 在根据领域知识形成决策表时未予考虑, 所以, 约去该属性应该是合理的. 因此, a, b, e, f 为核属性.

3.3 属性值约简

按基本范畴内的定义, F 为条件属性的等价类数据模块, X_i 为其中某一等价类数据模块, Y 是决策属性的等价类数据模块, 当 $\cap F \subset Y$ 时, 如果存在 $\cap (F - \{X_i\}) \subset Y$, 则 X_i 为 F 中相对于 Y 可省略的. 根据这一定义, 对进行属性约简后的决策表的每条规则的每个属性进行处理后, 合并相同的规则, 得到具有 8 条决策规则的最小规则表, 如表 1 所示, 表中 ‘-’ 为任意值.

表 1 PT 监测目标规则表

U	a	b	e	f	D
1	0	0	0	0	0
2	1	0	0	-	1
3	2	0	0	-	1
4	3	0	0	-	1
5	-	0	0	1	1
6	-	1	0	-	2
7	-	2	0	-	3
8	-	-	1	-	4

从表中提出 5 条决策规则为:

- (1) $a_0 \wedge b_0 \wedge e_0 \wedge f_0 \Rightarrow D_0$;
- (2) $\bar{a}_0 \wedge b_0 \wedge e_0 \Rightarrow D_1$;
- (3) $b_0 \wedge e_0 \wedge f_1 \Rightarrow D_2$;
- (4) $b_2 \wedge e_0 \Rightarrow D_3$;
- (5) $e_1 \Rightarrow D_4$;

在规则(2)中 \bar{a}_0 定义为 $a \neq 0$, 这一表示方法使三条规则可以用一条规则描述, 称其为属性非值简化. 可定义为: 在进行基于粗糙集的决策表约简获得规则表中, 如果存在 M ($M > 2$) 条规则, 其只有一个属性取值不同且该属性有 $M-1$ 个取值, 则采用属性非值简化描述, 约去 $M-2$ 条规则. 非值简化未包含在经典粗糙集范畴, 是本文对其进行的扩展, 简化后的规则是有效的, 且易形成程序语言的逻辑表达形式.

在确定了多目标监控的各种决策属性后, 依据领域知识, 穷举了 192 条属性组合规则, 使各种决策规则的上近似包含了全部可能规则. 通过约简及属性非值的简化表示获得 5 条决策规则. 因此, 所得的可应用规则是最小完备规则集.

4 导航实验及结果分析

自行开发的自主移动机器人实验平台采用双轮差速驱动, 安装了 Sony D100p 型 PTZ 摄像机, 处理器主频 800MHz, 基于编程, 采用文献[11]中彩色目标识别算法进行分割与识别. 基于上述多目标监控策略, 进行了单项和连续过程实验. 在实验中, 增加了一项转移条件, 即处于目标跟踪状态时如果连续

三次检测到目标对正, 则认为该目标检测结果可信度为 1, 执行行为 4, 以提高监控效率.

单项实验: 包括两个和三个目标静态和动态环境下不同优先级的监控实验, 实验环境如图 2(a) 和图 2(b) 所示. 实验中人为移动红球(左)和黄球(右), 另一台机器人作为不动的障碍, 运动目标的时间因子 φ 取 0.8, 不动目标取 0.98, 目标的速度因子 δ 均取 0.98. 机器人记录实验过程中每次监控不同目标时目标与机器人的相对位置、目标的动态优先级、目标动态信度及实际的时间分配. 实验结果统计如表 2 所示. 监控时间段内各个监控目标被成功检测次数的比为监控几率比. 从表中可以看出: ①计划优先级比和监控几率比接近; ②动态环境下受目标机动性的影响监控几率比略有差异; ③监控时间比与计划优先级比有偏差, 主要原因是目标机动运动增加了运动目标的搜索与瞄准时间增强了目标监控时间的不确定性.

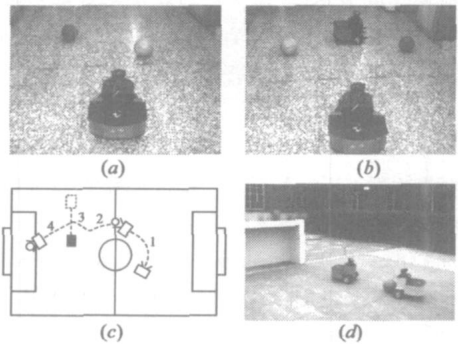


图 2 多目标监控试验环境

表 2 多目标监控效果分析表

目标数	目标情况	计划优先级	监控几率比	信度(最低比/均值比)	监控时间比
2	静态	1: 1	28: 27	86: 87 96: 94	46: 39
		2: 1	44: 26	82: 68 94: 87	62: 35
	动态	1: 1	12: 12	96: 91 98: 98	13: 25
		2: 1	53: 28	96: 89 98: 96	99: 58
3	静态	1: 1: 1	29: 28: 28	83: 83: 77 93: 91: 92	45: 35: 29
		3: 2: 1	34: 24: 12	94: 92: 90 97: 93: 93	45: 31: 13
	动态	1: 1: 1	23: 22: 19	74: 70: 76 88: 86: 95	42: 39: 21
		1: 1: 2	21: 21: 35	70: 71: 94 86: 84: 95	43: 34: 33

连续过程实验: 进行了机器人找球射门实验, 可分为(1)机器人带上球、(2)带球接近球门、(3)带球避障及(4)向球门运动四个阶段. 目标运动轨迹如图 2(c) 所示, 其中的深黑色目标为防守机器人, 实验环境如图 2(d) 所示. 通过上级调度程序在四个阶段确定的监控目标和其监控计划优先级分别为 I (球, 1)、II (球: 门, 2: 1)、III (球: 障碍: 门, 2: 2: 1) 和 IV (球: 门, 2: 1), 按(4)式确定每次监控哪个目标. 各个目标的方位坐标的动态信度 $B_i(t)$ 变化过程如图 3(a) 所示. 目标被监控的时间分配结果如图 3(b) 所示. 其间 PTZ 摄像机的 Pan 和 Tilt 值的变化过程如图 3(c) 所示, 可以看出实现单目视觉动态多目标监控是通过增加摄像机的运动实现的. 被监控目标与机器人的相对距离如图 3(d) 所示. 通过单 PTZ 摄像机监控多个目标实现了动态环境下的导航及射门任务. 整个过程在 45 秒

内完成,需要监控目标的动态信度都维持在 0.6 以上.

5 结论

针对动态多目标环境中移动机器人基于 PT 视觉进行导航问题提出一种按需监控方法.

(1) 根据导航环境的动态不确定性, 提出实时计算每个目标的动态优先级来确定当前需要监控的目标的思想. 方法兼顾了实际环境中目标位置的动态不确定性和任务调度对目标的监控优先级要求. 比扫描监控方式及固定监控方式更加有效.

(2) 监控某一目标的过程采用了有限状态机模型, 依据粗糙集理论, 对依据领域知识穷举的状态转换规则进行了约简, 提出了规则的非值简化描述方法, 得到了完备的最小决策规则集, 使多目标的切换和单目标的监控得以有效实施.

(3) 所提出的方案中, 可监控目标的机动性与摄像机转动的角速度及图像处理速度有关. 本文所提出的方法对于 PT 摄像机监控多个动态目标具有普遍适用性.

参考文献:

- [1] 赵清杰, 连广宇, 孙增圻. 机器人视觉伺服综述[J]. 控制与决策, 2001, 16(6): 849- 853.
Zhao Qing-jie, Lian Guangyu, Sun Zengqi. Survey of Robot Visual Servoing[J]. Control and Decision, 2001, 16(6): 849- 853. (in Chinese)
- [2] Peter I, Seth A H, et al. Real Time Vision, Tracking and Control[A]. Proc of the 2000 IEEE International Conf on Robotics & Automation[C]. San Francisco, USA: IEEE, 24-28, 2000, 1: 1622- 629.
- [3] Pedro L, Andrea B. Omni directional catadioptric vision for soccer robots[J]. Robotics and Autonomous System, 2001, 36(3): 87- 102.
- [4] Yagi Y. Real time Omni directional Image Sensor for Vision guided navigation[J]. IEEE Trans on Robotics and Automation, 1994, 10(1): 11- 22.
- [5] Madsen B C, Anderson S C. Optimal land mark selection for triangulation of robot position[J]. Journal of Robotics and Autonomous Systems, 1998, 23(4): 277- 292.
- [6] Kazutaka K, Katsu Y. Optical motion capture system with par tilt camera tracking and real time data processing[A]. Proc of the 2002 IEEE International Conf on Robotics & Automation [C]. Washington DC: ICRA ' 02. 2002. 1241- 1248.
- [7] Juan F. Fast Goal Navigation with Obstacle Avoidance using a Dynamic Local Visual Model[EB/ OL]. <http://www2.cs.cmu.edu/~mmw/papers/04robocupjuan.pdf>, 2004. 12- 03.
- [8] Sasiadek J D, Wang Q. Sensor fusion based on fuzzy Kalman filtering for autonomous robot vehicle[A]. Proc of the 1999 IEEE Inter Conf on Robotics & Automation[C]. Michigan

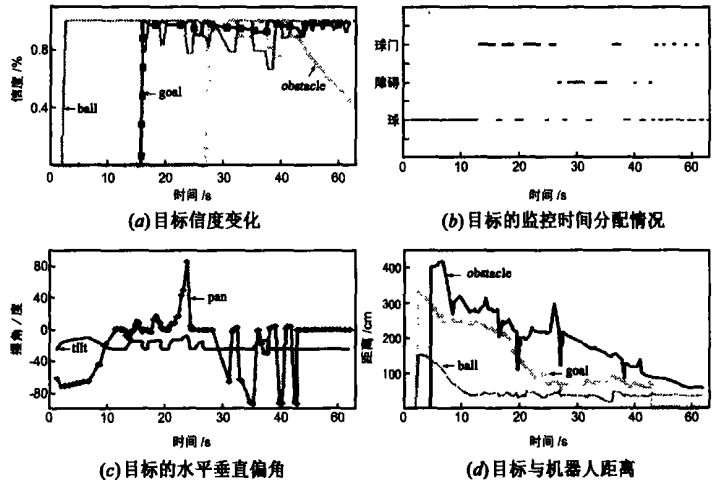


图 3 带球射门实验曲线

USA: IEEE, 1999. 2970- 2975.

- [9] Pawlak Z. Rough classification[J]. Int J Man Machine Studies, 1984, 20(5): 469- 483.
- [10] Questier F, Amari R I. Application of rough set theory to feature selection for unsupervised clustering[J]. Chemometrics and Intelligent Laboratory System, 2002, 63(2): 155- 167.
- [11] James B, Tucker B. Fast and inexpensive color image segmentation for interactive robots[A]. Proc of the 2000 IEEE/RSJ Inter Conf on Intelligent Robots and Systems[C]. New York, USA, IEEE, 3: 1- 5. 2000, 3: 2061- 2066.

作者简介:



高庆吉 男, 副教授, 1966 年 2 月出生于黑龙江省桦川县, 1988 年本科毕业于武汉水利电力学院计算机及应用专业, 1993 年硕士毕业于东北电力学院控制理论与控制工程专业, 现为哈尔滨工业大学计算机科学与技术学院博士生. 曾在国内外学术刊物发表学术论文 20 余篇, 负责和参加完成国家 863 课题 2 项及横向科研课题多项, 获部级科技进步奖 1 项. 目前主要研究方向为移动机器人导航与协作. E-mail: gaoqingji@sohu.com.

洪炳熔 男, 1937 年 8 月出生于哈尔滨, 博士生导师, 教授, 负责完成了多项国家 863 课题、国家自然科学基金课题及国际合作项目, 发表各类学术论文百余篇, 在机器人足球领域、空间自由飞行机器人领域及家庭服务机器人等领域取得多项研究成果, 获多项国家专利. E-mail: hongbr@hope.hit.edu.cn.

邢志伟 男, 1970 年 1 月出生于辽宁省新民市, 硕士生导师, 博士, 副教授, 2003 年 6 月毕业于中科院沈阳自动化研究所, 获工学博士学位, 现在中国民航学院航空地面特种设备基地工作, 主要从事水下机器人及民航特种机器人的控制研究. E-mail: zwxing@cauc.edu.cn.

牛国臣 男, 1981 年 2 月出生于山东菏泽, 硕士, 中国民航学院电子工程系教师, 助教, 研究方向: 机器人控制. E-mail: niuguoichen@sohu.com.