

智能机器人神经心理模型

刘海波, 顾国昌, 沈 晶, 付 岩

(哈尔滨工程大学 计算机科学与技术学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 为了从结构、功能和行为 3 个层面对智能机器人体系结构进行一体化描述, 本文提出了智能机器人神经心理模型。借鉴脑的 3 个基本机能联合区理论建立了智能机器人的神经生理结构模型, 将机器人思维系统划分为感知区、反射区和慎思区, 每个区均由三级皮层构成, 采用拓展的 BDI 逻辑(机器人心智逻辑 RML)描述机器人的认知心理机制, 给出了神经心理框架下的机器人智能行为过程, 从理论上证明了 RML 的可靠性与完备性, 采用水下机器人编队穿越未知雷区的对比仿真实验验证了神经心理模型的可行性和有效性。

关键词: 智能机器人; 神经心理模型; 神经生理; 认知心理; 智能行为

中图分类号: TP18, TP242 **文献标识码:** A

Neuropsychological model for intelligent robot

LIU Hai-bo, GU Guo-chang, SHEN Jing, FU Yan

(College of Computer Science and Technology, Harbin Engineering University, Harbin Heilongjiang 150001, China)

Abstract: In order to depict an intelligent robot in three different levels: architecture, functions, and behaviors, a neuropsychological model for intelligent robot is presented in this paper. A neurophysiological architecture is first proposed based on the theories of principal function units of brain. The thinking system of a robot is then partitioned into three function units: perception unit, reflex unit, and deliberate unit. Each unit is composed of three cortices. A robot mental logic (RML) system, extended from BDI logic, is employed for explaining the cognitive psychological mechanism of robot. Based on the proposed model, the acting process of intelligent behaviors is also given. The reliability and completeness of RML is proved theoretically. Finally, the feasibility and validity are demonstrated by comparison simulation experiments with autonomous underwater vehicle formation cruising through an unknown water mine area.

Key words: intelligent robot; neuropsychological model; neurophysiology; cognitive psychology; intelligent behavior

1 引言(Introduction)

近年来, 智能机器人体系结构的研究成果层出不穷^[1], 其中最具有代表意义的当属三层结构^[2]和社会机器人结构^[3]. 三层结构既吸取了慎思型分层递阶结构中高层规划的智能性, 又保持了反应型包容结构中低层反应的灵活性, 其后实现的绝大部分机器人都是基于三层结构进行的改进、扩充或变种. 社会机器人结构采用智能体(Agent)对机器人建模, 继承了智能体的自治性、反应性、社会性、主动性等一系列良好的智能特性, 能更好地描述智能机器人的智能、行为、信息、控制的时空分布模式, 因而成了近年智能机器人体系结构研究的一个热点. 以往智能机器人体系结构研究更多地侧重于自治性和反应

性的实现, 大多集中在机器人控制系统功能的划分和物理框架的设计上. 其中: 一部分工作是将单机器人系统内部各部件(如感知、推理、动作等)分别抽象为 Agent, 然后以 MAS(multi-agent system)模型构筑机器人个体^[4], 采用 MAS 协调机制来处理机器人内部各控制部件间的协调控制问题; 另一部分工作是将 Agent 理论应用于机器人建模(一个 Agent 对应一个机器人整体而不是一个机器人部件)和多机器人协作协调, 并逐渐发展成一个新兴领域——MARS(multi-agent robot system), 国际上有代表性的研究成果有 ACTRESS, CEBOT, GOFER, SWARM, ARCHON, RoboCup 等等^[5,6]. 这些群体机器人的研究主要侧重于机器人社会性的实

现或群体智能行为的突现,研究精力基本都放在协作与协调算法或社会规则上.上述工作均忽视了机器人神经系统结构、相应心理机制以及所表现出的智能行为的整合研究,致使机器人的结构、功能与行为之间彼此脱节,缺乏一体的模型对此进行系统地描述.

本文首先引入并剖析 Лурия 的脑的3个基本机能联合区理论^[7],基于该理论提出智能机器人神经心理模型,并在 Rao 和 Georgeff 的 BDI(belief-desire-intention)逻辑^[8]基础之上拓展出机器人心智逻辑(RML: Robot Mental Logic),用于表示和处理机器人的心理机制.文中将从智能机器人的神经生理结构、认知心理机制和智能行为过程3个层面对该模型进行探讨.

2 脑的基本机能联合区理论(Theories of principal function units of brain)

神经心理学把脑当作心理活动的物质基础来研究脑和心理或脑和行为的关系^[9].神经心理学家 Лурия^[7]创立了脑基本机能联合区理论,他认为心理过程是个复杂的功能系统,由3个基本的联合区构成,每一个基本联合区都有着分层次的结构,至少是由彼此重叠的3种类型的皮层区组成:一级皮层区(又称投射区),从外周来的冲动达到这里或是冲动由这里走向外周;二级皮层区(又称投射-联络区),对所有的信息进行加工或者准备相应的程序;三级皮层区(又称重叠区),综合许多皮层区域的协同活动,以保证形成心理活动的最复杂形式.第一基本机能联合区按照“非特异性”神经网络的形式构成的,分阶段、逐步地改变自己的兴奋水平,从而调节整个神经器官的状态,它是在皮层高级部位的调节和控制下工作的,同时也接受外界刺激;第二基本机能联合区接受个别神经冲动,根据“全或无”的规律来工作,具有高度的模式特异性.这一联合区以一级皮层区为基础,并在二级皮层区进行信息加工和编码,在三级皮层区进行高级抽象和经验储存,它们按照模式特异性递减和功能渐进性偏侧化的原则分层次地工作;第三基本机能联合区按照与第二联合区一样的原则分层地工作,但神经冲动传递方向与第二联合区相反.该区三级皮层区可将皮层各叶三级区的信息进行第二次加工,形成自己的行动、计划与程序,调节自己的行为,使之符合原初的意图,二级皮层区接受三级皮层区传达的信息,把将执行某种行为的指令进行有组织的运动整合,然后再将指令传达到一级皮质区的中央前回运动区,将实现

精细、准确行为的神经冲动发往外周.

Лурия 认为:意识活动的每一种形式总是依靠脑的3个基本机能联合区的协同工作来实现的,每一个机能联合区都对整个心理过程的实现做出自己的贡献.

3 神经生理结构(Neurophysiological architecture)

本文将智能机器人分为本体(即物理框架)和思维(即规划控制)两个子系统:机器人本体由传感系统、执行机构、通信系统构成;借鉴 Лурия 的脑的3个基本机能联合区理论思想,机器人思维系统由感知区、反射区和慎思区构成,每个区均由三级皮层构成(见图1).

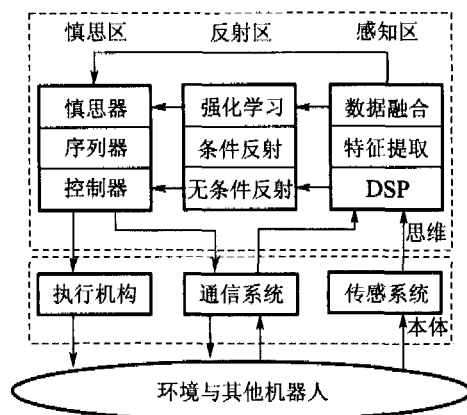


图1 智能机器人神经生理结构

Fig. 1 Neurophysiological architecture for intelligent robots

感知区由 DSP(数字信号处理)、特征提取和数据融合三级皮层构成.传感系统或通信系统在外部事件(如遇到障碍、通信请求等)的触发下产生的神经冲动,通过传入神经进入 DSP,经处理后,分别传入特征提取层及位于反射区的无条件反射层.特征提取层具有高度的模式特异性,对 DSP 输出的不同类别信号(如声纳、视觉信号等)分别由特定的组件处理.特征提取层的处理结果进入数据融合层,经融合处理后生成高度抽象的感知数据分别传入反射区和慎思区.

反射区由无条件反射、条件反射和强化学习三级皮层构成.无条件反射层由预编程的基本生存规则集组成,机器人根据基本生存规则采取反射行为,对意外的或危险的情况做出迅速反应.条件反射层由条件反射规则集组成,可在动作期间通过强化学习不断生成、修改无法预编程的、更复杂的反射行为.无条件反射层在接受 DSP 输出的激励信号后,

同时匹配基本生存规则集和条件反射规则集,根据匹配结果生成反射行为并立即驱动控制器指挥机器人采取行动,无需经过任何推理、规划等慎思过程.强化学习层采用BP网络实现的Q-学习方法对机器人的行为做出评价,评价结果指导条件反射规则集的修改和慎思器的心智活动过程.

慎思区由慎思器、序列器和控制器三级皮层构成.慎思器和序列器基于拓展的BDI模型建造(图2),是机器人心理(心智)活动的中枢,由信念、愿望(含目标)、能力、意图、承诺、承诺规则、学习和规划等心智组件构成.信念包含环境、自身及群体中其它成员的状态信息,愿望包含机器人任务目标,能力包含机器人可执行的动作,意图是机器人对所选择目标的承诺或者协作请求,承诺是依据信念、目标和能力应用承诺规则产生意图,承诺规则是机器人做出承诺的形式依据,规划是依据意图和能力产生动作序列,学习是对能力和承诺规则的更新和维护,以不断增强机器人心智系统性能.机器人心理活动主要由目标驱动,而不是单纯由环境激发,充分体现其主动性心智特征.慎思器生成行为意图后,交由序列器规划出动作序列,再经由控制器操纵执行机构或通信系统产生机械动作或通信信息.

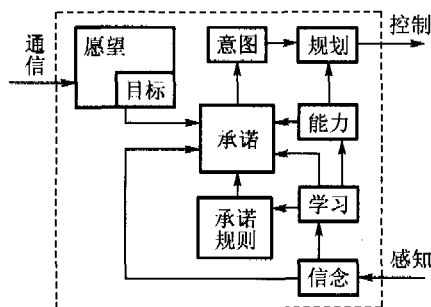


图2 智能机器人心理模型

Fig.2 Mental model for intelligent robots

4 认知心理机制 (Cognitive psychological mechanism)

机器人的智能行为由其心智状态驱动,心智状态为机器人如何行动提供了一种解释,认知心理机制决定机器人的心智活动.心理学上,心智状态是指人的知识、信念、能力、意向、期望、动机、选择、承诺、目标、策略等心理范畴.10多年前,人们就开始研究信念(belief)、愿望(desire)、意图(intention)的关系和形式化描述,建立了BDI模型.为了描述机器人的认知心理机制,本文对BDI逻辑进行拓展,定义一种含模态词BEL(信念)、GOAL(目标)、CAP(能

力)、INT(意图)与L(上一次)、N(下一次)、P(曾经)、F(将会)、H(总有)、G(总会)的一阶模态时态混合逻辑系统——机器人心智逻辑RML.

4.1 RML 语形 (Syntax of RML)

定义1 RML语言(简记为 L_R)由个体常项($c_1, c_2, c_3, \dots$)、个体变项($x_1, x_2, x_3, \dots$)、谓词符号($P_1, P_2, P_3, \dots$)、联接词($\neg, \vee$)、心智模态词(BEL, GOAL, CAP, INT)、时态模态词(L, N, P, F, H, G)、量词($\forall, \exists$)和圆括号构成.

定义2 L_R 的公式定义如下:

- 1) 谓词原子公式是 L_R 的公式;
- 2) 若 φ 和 ψ 是 L_R 的公式,则 $\neg \varphi, (\varphi \vee \psi), \forall x\varphi, \exists x\varphi$ 和 $X(\varphi)$ 都是 L_R 的公式,其中 X 为定义1中给出的任一模态词,公式最外层的括号可以省略;
- 3) 有限次应用式(1)和(2)构成的非空符号串是 L_R 的公式.

定义3 为便于表达,扩充 $\wedge$ 和 $\rightarrow$ 两个联接词:

- 1) $\varphi \wedge \psi =_{\text{def}} \neg (\neg \varphi \vee \neg \psi)$;
- 2) $\varphi \rightarrow \psi =_{\text{def}} \neg \varphi \vee \psi$.

4.2 RML 语义 (Semantics of RML)

RML的语义模型由八元组 $M = (S, T, D, V, B, G, C, I)$ 构成,其中 S 为状态集; $T \subseteq S^Z$,即从整数集 Z 到状态集 S 的映射的集合, T 中的任一元素 σ 称为状态序列,用来反映状态随时间的变化情况; D 为个体域; $V \subseteq \Phi \times T \times Z$ 为对原子公式的真值指派, Φ 为原子公式集; $B \subseteq T \times Z \times T$ 为信念的可达关系; $G \subseteq T \times Z \times T$ 为目标可达关系; $C \subseteq T \times Z \times T$ 为能力的可达关系; $I \subseteq T \times Z \times T$ 为意图的可达关系.RML中的满足关系可递归定义如下:对任何 $\sigma \in T, i \in Z, P_k(x_1, x_2, \dots, x_n) \in \Phi$ 为原子公式, φ, ψ 为 L_R 的公式,有

- 1) $M, \sigma, i, V \models P_k(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 当且仅当 $(P_k(x_1, x_2, \dots, x_n), \sigma, i) \in V$;
- 2) $M, \sigma, i, V \models \neg \varphi$ 当且仅当 $M, \sigma, i, V \not\models \varphi$ 不成立;
- 3) $M, \sigma, i, V \models \varphi \vee \psi$ 当且仅当 $M, \sigma, i, V \models \varphi$ 或 $M, \sigma, i, V \models \psi$;
- 4) $M, \sigma, i, V \models \varphi \wedge \psi$ 当且仅当 $M, \sigma, i, V \models \varphi$ 且 $M, \sigma, i, V \models \psi$;
- 5) $M, \sigma, i, V \models \varphi \rightarrow \psi$ 当且仅当 $M, \sigma, i, V \models \neg \varphi$ 或 $M, \sigma, i, V \models \psi$;
- 6) $M, \sigma, i, V \models \text{BEL}(\varphi)$ 当且仅当对任何 $\sigma' \in T$,若 $(\sigma, i, \sigma') \in B$,则 $M, \sigma', i, V \models \varphi$;
- 7) $M, \sigma, i, V \models \text{GOAL}(\varphi)$ 当且仅当对任何

$\sigma' \in T$, 若 $(\sigma, i, \sigma') \in G$, 则 $M, \sigma', i, V \vdash \varphi$;

8) $M, \sigma, i, V \vdash \text{CAP}(\varphi)$ 当且仅当对任何 $\sigma' \in T$, 若 $(\sigma, i, \sigma') \in C$, 则 $M, \sigma', i, V \vdash \varphi$;

9) $M, \sigma, i, V \vdash \text{INT}(\varphi)$ 当且仅当对任何 $\sigma' \in T$, 若 $(\sigma, i, \sigma') \in I$, 则 $M, \sigma', i, V \vdash \varphi$;

10) $M, \sigma, i, V \vdash \text{L}(\varphi)$ 当且仅当 $i = 0$ 或 $M, \sigma, i - 1, V \vdash \varphi$;

11) $M, \sigma, i, V \vdash \text{N}(\varphi)$ 当且仅当 $M, \sigma, i + 1, V \vdash \varphi$;

12) $M, \sigma, i, V \vdash \text{P}(\varphi)$ 当且仅当存在 $i' \in \mathbb{Z}$, $i' < i, M, \sigma, i', V \vdash \varphi$;

13) $M, \sigma, i, V \vdash \text{F}(\varphi)$ 当且仅当存在 $i' \in \mathbb{Z}$, $i' \geq i, M, \sigma, i', V \vdash \varphi$;

14) $M, \sigma, i, V \vdash \text{H}(\varphi)$ 当且仅当对任何 $i' \in \mathbb{Z}$, $i' < i, M, \sigma, i', V \vdash \varphi$;

15) $M, \sigma, i, V \vdash \text{G}(\varphi)$ 当且仅当对任何 $i' \in \mathbb{Z}$, $i' \geq i, M, \sigma, i', V \vdash \varphi$;

16) $M, \sigma, i, V \vdash \forall x\varphi$ 当且仅当对任何 $d \in D$, $M, \sigma, i, V_{(\cup d)} \vdash \varphi$;

17) $M, \sigma, i, V \vdash \exists x\varphi$ 当且仅当存在 $d \in D$, $M, \sigma, i, V_{(\cup d)} \vdash \varphi$;

4.3 RML 公理和规则 (Axioms and deductive rules of RML)

机器人遵循承诺规则产生意图, 初始承诺规则由 RML 公理和演绎规则构成, 机器人生命期内可通过学习产生 RML 定理加入承诺规则. RML 公理由标准谓词逻辑系统扩充 32 条公理构成, 这 32 条公理规定了信念、目标、意图和能力之间的激发和约束关系、时序关系以及量词演算关系, 限于篇幅, 这些公理不一一列出. 演绎规则包括如下两条:

R1 若 φ 和 $\varphi \rightarrow \psi$ 则 ψ ;

R2 若 φ 则 $\forall x\varphi$.

4.4 RML 可靠性 (Soundness of RML)

引理 1 A 为 RML 公理集, 对任意公式 φ 和模型 M , 有

1) 若 $\varphi \in A$, 则 $M \vdash \varphi$;

2) 若 $M \vdash \varphi$ 且 $M \vdash \varphi \rightarrow \psi$, 则 ψ ;

3) 若 $M \vdash \varphi$, 则 $\forall x\varphi$.

证明从略.

定理 1 (RML 可靠性定理) 若 $\vdash \varphi$, 则 $M \vdash \varphi$.

证 若 $\vdash \varphi$, 则存在 RML 中的证明序列 $\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_n$, 使得 $\varphi_n = \varphi$. 施归纳于证明长度 n :

1) $n = 1$, 则 $\varphi \in A$, 由引理 1(1) 知 $M \vdash \varphi$;

2) 设 $n < k (k > 1)$ 时有 $M \vdash \varphi$, 则对 $n = k$ 时

有下列 3 种情况:

① $\varphi \in A$, 由引理 1(1) 有 $M \vdash \varphi$;

② φ 是由 φ_i 和 φ_j 运用 R1 推出的, $\varphi_j = \varphi_i \rightarrow \varphi$, 且 $i, j < k$, 由归纳假设有 $M \vdash \varphi_i$ 和 $M \vdash \varphi_i \rightarrow \varphi$, 由引理 1-2) 有 $M \vdash \varphi$;

③ φ 形为 $\forall x\varphi_m$, 是 φ_m 运用 R2 推出的, $m < k$, 则由归纳假设有 $M \vdash \varphi_m$, 由引理 1-3) 有 $M \vdash \forall x\varphi_m$, 即 $M \vdash \varphi$.

由 1) 和 2) 可知, 若 $\vdash \varphi$, 则 $M \vdash \varphi$. 证毕.

4.5 RML 完备性 (Completeness of RML)

定义 4 E_M 形式递归定义如下:

1) 若 x 在公式 φ 中有自由出现, 则称公式 $\exists x\varphi$ 是一个 0 阶的 E_M 形式;

2) 若 φ 是一个 n 阶 E_M 形式, ψ 是一个 L_R 公式, 则 $X(\psi) \rightarrow X(\varphi \wedge \psi)$ 是一个 $n + 1$ 阶的 E_M 形式, 其中 X 为定义 1 中给出的任一模式词.

定义 5 E_M 公式递归定义如下:

1) 若 $\exists x_i\varphi(x_i)$ 是一个 E_M 形式, x_j 在 φ 中不出现, 用 x_j 取代 φ 中 x_i 的每一次自由出现所得的公式为 $\varphi(x_j)$, 则称 $\exists x_i\varphi(x_i) \rightarrow \varphi(x_j)$ 是一个相对于 x_j 的 E_M 公式, 并称此 E_M 公式具有 E_M 形式 $\exists x_i\varphi$;

2) 若 φ 是一个相对于 x_j 的 E_M 公式, 并且具有 E_M 形式 φ' , ψ 是一个 L_o 公式, 且 x_j 在 ψ 中不出现, 则称 $X(\psi) \rightarrow X(\varphi \wedge \psi)$ 是一个相对于 x_j 的 E_M 公式, 并称这一公式具有 E_M 形式 $X(\psi) \rightarrow X(\varphi' \wedge \psi)$.

定义 6 若 E_M 公式 φ 具有 n 阶 E_M 形式, 则称 φ 是一个 n 阶 E_M 公式.

定义 7 Γ 是 RML 中的一个公式集, 若对每一个 E_M 形式, 都存在至少一个具有该形式的 E_M 公式属于 Γ , 则称公式集 Γ 具有 E_M 性质.

定义 8 设 φ 是 RML 任一公式, $\{\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_n\}$ 是任一有穷公式集, Γ 是任一无穷公式集,

1) φ 是 RML-相容的, 当且仅当 $\vdash \neg \varphi$;

2) $\{\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_n\}$ 是 RML-相容的, 当且仅当 $\varphi_1 \wedge \varphi_2 \wedge \dots \wedge \varphi_n$ 是 RML-相容的;

3) Γ 是 RML-相容的, 当且仅当 Γ 的任意有穷子集是 RML-相容的.

定义 9 设 Γ 是 RML 任一公式集, 称 Γ 是 RML-极大相容集, 当且仅当 Γ 是 RML-相容的, 并且对任意公式 φ , 若 $\Gamma \cup \{\varphi\}$ 是 RML-相容的, 则 $\varphi \in \Gamma$.

引理 2 Σ 是 RML-相容的非空公式集, φ 是一个相对于 x_j 的 E_M 公式, 且 x_j 在 Σ 的任何公式中均不出现, 则 $\Sigma \cup \{\varphi\}$ 是 RML-相容的.

引理 3 若 φ 是 RML-相容的, 则存在具有 E_M

性质的RML-极大相容集 Γ ,使得 $\varphi \in \Gamma$.

引理4 若 φ 是RML的任意公式, Γ 是具有 E_M 性质的RML-极大相容集,则存在模型 $M = (S, T, D, V, B, G, C, I)$,在每一个状态序列 $\sigma \in T$ 和时刻 $i \in \mathbb{Z}$,有 $\varphi \in \Gamma$ 当且仅当 $V(\varphi, \sigma, i) = 1$.

引理2~引理4的证明请参阅文献[10],限于篇幅,本文从略.

定理2 (RML完备性定理) 若 $M \vdash \varphi$,则 $\vdash \varphi$.

证 用反证法.假设 $M \vdash \varphi$ 但 $\nvdash \varphi$,则 $\neg \varphi$ 是RML-相容的,由引理4,存在模型 $M = (S, T, D, V, B, G, C, I)$ 中的状态序列 $\sigma \in T$ 和时刻 $i \in \mathbb{Z}$,使得 $V(\neg \varphi, \sigma, i) = 1$,因而 $V(\varphi, \sigma, i) = 0$,即 $M \not\models \varphi$,与假设中 $M \vdash \varphi$ 矛盾,因此有,若 $M \vdash \varphi$,则 $\vdash \varphi$.
证毕.

5 智能行为过程(Acting process of intelligent behaviors)

机器人智能行为主要由心理活动驱动,其过程如下:

- 1) 初始待命状态;
- 2) 接受任务,建立愿望(目标);
- 3) 若目标集为空,转1),否则,选择尚未实现的目标做出承诺,产生意图;

4) 若意图集为空,转3),否则,选择尚未实现的意图进行行为规划,生成动作序列,指控机器人执行机构;

5) 行为评估,在线学习,更新承诺规则和能力库;

6) 删除目标为真的意图,转4).

6 仿真实验(Simulation experiments)

在CADCON^[11]平台上分别对实现了神经心理模型(以下称“1号编队”)和未实现该模型(以下称“2号编队”)的两组自治水下机器人(AUV)穿越未知雷区进行了实验对比.实验中,每个编队由5个同构AUV成雁翅状排列编成,编队航道前方长500 m×宽100 m×深100 m的水域中随机布设若干锚雷,锚雷数量和分布情况对AUV编队而言均未知,设AUV探测范围为正前方开角90°、半径150 m的锥体空间,锚雷危险半径为90 m. AUV编队的任务是以尽可能小的代价(触雷损失、耗时、耗能)穿越雷区.分别对1号和2号编队以相同的避雷策略执行相同任务进行仿真,两组编队均能探测到未知雷区并在穿越过程中自主回避,从而在无触雷损失情况下安全穿越雷区,但1号编队航迹更平滑(图3),耗时和耗能分别比2号编队节约43.6%和8.6%.

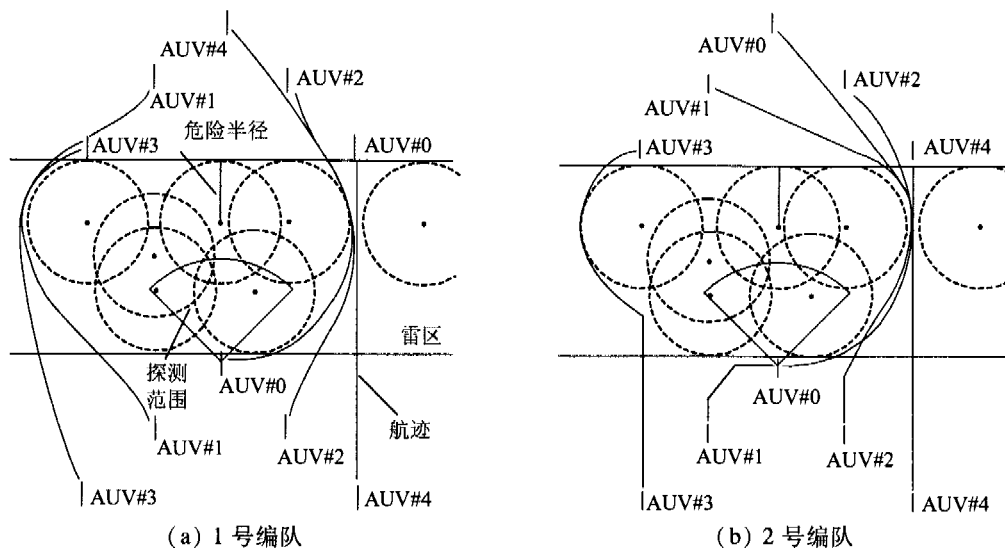


图3 航迹俯视图

Fig. 3 Tracks planform

从分析和设计角度看,采用神经心理模型更易于描述机器人的控制结构,可以清晰地刻画机器人结构、功能和行为3个层面的特征.从仿真结果看,实现了神经心理模型的1号编队能在神经生理结构的支撑下,在认知心理机制的约束下表现出更好的智能行为,从而有效降低穿越雷区的代价.

7 结论(Conclusion)

本文融合了脑基本机能联合区理论和机器人心智逻辑RML建立了智能机器人神经心理模型.联合区理论由Лурия创立,本文直接借鉴其思想和研究成果.RML是由Rao和Georgeff的BDI逻辑拓展而得,文中详细描述了RML的语形、语义、公

理和演绎规则,并给出了 RML 可靠性和完备性的证明,RML 未采用 K 公理和 N 规则,因而不存在一般 BDI 逻辑中的逻辑全知问题和副作用问题,这对资源有限的机器人来说是适用的、合理的。

神经心理模型可以对机器人从神经生理到认知心理再到智能行为完成一体化的描述,为机器人的设计和实现提供了一种描述模式,逆向描述应用于机器人设计阶段,正向描述体现在机器人实现阶段。

参考文献(References):

- [1] 刘海波,顾国昌,张国印. 智能机器人体系结构分类研究[J]. 哈尔滨工程大学学报,2003,24(6):664-668.
(LIU Haibo, GU Guochang, ZHANG Guoyin. Classification of intelligent robot architecture [J]. *J of Harbin Engineering University*, 2003,24(6):664-668.)
- [2] GAT E. On three-layer architectures [C]// *Artificial Intelligence and Mobile Robots: Case Studies of Successful Robot Systems*. Menlo Park, USA; MIT/AAAI Press, 1998:195-210.
- [3] ROONEY C F B, O'DONOGHUE R P S, DUFFY B R, et al. The social robot architecture: towards sociality in a real world domain [C]// *Proc of Towards Intelligent Mobile Robots 99*. Bristol, UK: University of Manchester, 1999:77-84.
- [4] 朱森良,张新晖,王寻羽,等. 基于 Agent 的自主式智能机器人体系结构及集成系统[J]. 模式识别与人工智能,2000,13(1):36-41.
(ZHU Miaoliang, ZHANG Xinhui, WANG Xunyu, et al. Computer integration system of autonomous intelligent robot self-organization structure IRASO [J]. *Pattern Recognition and Artificial Intelligence*, 2000,13(1):36-41.)
- [5] 陈忠泽,林良明,颜国正. 基于 MAS(Multi-Agent System)的多机器人系统:协作多机器人学发展的一个重要方向[J]. 机器人,2001,23(4):368-373.
(CHEN Zhongze, LIN Liangming, YAN Guozheng. An approach to scientific cooperative robotics: through MAS (multi-agent system) [J]. *Robot*, 2001,23(4):368-373.)
- [6] IOCCHI L, NARDI D, SALERNO M. Reactivity and deliberation: a survey on multi-robot systems [C]// *Balancing Reactivity and Social Deliberation in Multi-Agent Systems (LNAI 2103)*. Heidelberg, Germany; Springer, 2001:9-34.
- [7] ЛУРИЯ А Р. Основы нейропсихологии [M]. Москва: Изд-во МГУ, 1973.
- [8] RAO A S, GEOREFF M P. Modelling rational agents within a BDI-architecture [C]// *Proc of the Second Int Conf on Principles of Knowledge Representation and Reasoning (KR91)*. San Mateo, USA; Morgan Kaufmann Publishers, 1991:473-484.
- [9] BANICH M T. *Cognitive Neuroscience and Neuropsychology* [M]. 2nd ed. Boston, MA; Houghton Mifflin, 2004.
- [10] 冯棉. 广义模态逻辑[M]. 上海:华东师范大学出版社,1990.
(FENG Mian. *Generalized Modal Logic* [M]. Shanghai: East China Normal University Press, 1990.)
- [11] CHAPPELL S G, KOMERSKA R J, PENG L, et al. Cooperative AUV development concept (CADCON) an environment for high-level multiple AUV simulation [C]// *Proc of the 11th Int Symposium on Unmanned Untethered Submersible Technology (UUST99)*. Lee, NH, USA; Autonomous Undersea Systems Institute, 1999:112-120.

作者简介:

刘海波 (1976—),男,博士,IEEE 计算机学会专业会员,主要研究方向为智能机器人体系结构、多智能体系统,E-mail:liuhaibo@hrbeu.edu.cn;

顾国昌 (1946—),男,教授,博士生导师,中国人工智能学会智能机器人学会理事,黑龙江省计算机学会副理事长,黑龙江省通信学会理事,省高校科学技术顾问委员会委员,主要研究方向为机器人智能决策与规划技术,E-mail:guguochang@hrbeu.edu.cn;

沈晶 (1969—),女,博士生,主要研究方向为人工免疫系统、强化学习,E-mail:shenjing@hrbeu.edu.cn;

付岩 (1978—),女,博士生,助理研究员,主要研究方向为机器人智能规划技术,E-mail:fuyan@hrbeu.edu.cn.