

一种基于任务的机器人情感决策模型的构建

胡云斗, 胡丹丹, 高庆吉

(中国民航大学航空自动化学院, 天津 300300)

摘要: 为了使人机交流更自然, 提出一种基于任务的机器人情感决策模型, 建立从多种感知输入到多种行为输出的映射。机器人的情感状态采用 PAD (pleasure-arousal-dominance) 情感空间描述, 并考虑了个性因素。结合正态分布原型, 采用概率与情感结合的行为映射方式, 使决策模型的决策变量受随机因素和情感因素影响, 保证其输出行为更符合人类的情感变化。以“福娃”机器人为平台验证了该方法的正确性和实用性。

关键词: 任务; 情感决策模型; 福娃机器人

中图分类号: TP24

文献标识码: A

文章编号: 1002-0446(2010)-04-0464-06

Construction of a Robot Emotion Decision-making Model Based on Tasks

HU Yundou, HU Dandan, GAO Qingji

(Aeronautical Automation College, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

Abstract: To make communication more natural between robot and human, a robot emotion decision-making model based on tasks is proposed, and a mapping from multiple perception inputs to multiple behavior outputs is established. The PAD (pleasure-arousal-dominance) emotion space description considering individual factors is applied to describing the robot emotion. Based on normal distribution prototype, the behavior mapping mode combining probability with emotion is adopted so that the decision variables of decision-making model are influenced by random factors and emotion factors, which ensures the output behaviors to accord with human emotion variation. The experiment results on the Fuwa robot platform verify the validity and practicality of the method.

Keywords: task; emotion decision-making model; Fuwa robot

1 引言 (Introduction)

神经科学、认知科学和心理学的一些研究成果表明: 情感在注意力、计划、推理和决策方面扮演着关键角色。日本心理学家 Toda 认为: “具有情感的系统是最基本的和最优的, 如果可以产生这样一个人工系统, 将可以应用到很多工程领域”^[1]。美国麻省理工学院 Minsky 教授在“心智社会 (The Society of Mind)”专著中指出: “问题不在于智能机器能否有情感, 而在于机器在实现智能时怎么能没有情感”^[2]。Picard 认为: 情感是决策、感知、学习以及其它认知功能的基础^[3]。因此, 赋予机器人一定的情感将会更有意义, 并且会使人机交流更自然^[4]。

目前, 很多机器人领域的学者都在积极地设计社会型机器人, 关于情感在该类机器人中的应用已经取得了一些研究成果, 但大部分成果均处于理论阶段。总的来说, 人工情感研究可以概括为 3 方面:

情感识别、情感表达和情感控制体系。情感识别研究的内容是赋予机器人识别人类情感的功能, 机器人通过人的面部图像、身体姿势、声音等推断出人的情感^[5-6]。情感表达是使机器人在行为中将情感表现出来, 令使用者对人机交互过程更感兴趣^[7-8]。传统上情感通过脸部表达, 针对不同的平台建立相应的情感模型。典型的通过面部表达情感的机器人有 MIT 的 KisMet 机器人、早稻田大学的 WE-4R II 机器人, 它们仅仅通过对外部传感器感知对象的喜好来表达情感^[9]。情感控制体系结构主要研究机器人情感模型 (系统) 的构建, 及情感和认知如何影响最后的行为^[10]。比较典型的情感模型有: Sloman 提出的基于情感的三层智能体结构 (H-Cogaff)^[11]; Camurri 等人从实用的角度出发, 对 H-Cogaff 改进后提出的以情感为核心的模型^[12]等。

综上所述, 对于一个具有情感的机器人而言,

应该可以根据外部环境来更新自身情感, 并根据情感通过某种决策方法做出相应的行为. 因此, 本文提出一种机器人的情感决策模型, 建立从多种感知输入到多种行为输出的映射, 情感在决策过程中起到选择行为及如何执行行为的作用, 即机器人最终的行为受到情感因素的影响.

2 机器人情感决策模型的构建 (Construction of the robot emotion decision-making model)

根据 Picard “情感不能决定行为, 只能影响行为”^[3] 的理论, 应用文 [13] 的情感生成机制, 建立基于任务的智能机器人情感模型.

2.1 机器人情感生成机制

情感生成机制对于具有情感系统的机器人而言是非常关键的, 文 [13] 采用 PAD 3 维情感空间, PAD 3 维情感模型是一种维度观测量模型, 该模型认为情感具有愉悦度、激活度和优势度 3 个维度, 每一维从 -1 到 $+1$ 变化. 该模型还考虑了 OCC 情感模型中情感产生的来源、外界任务和机器人个性的影响, 使机器人在外界刺激下, 其情感变化更加自然.

在 PAD 情感空间中, t 时刻的情感状态用情感向量表示为: $\mathbf{E}_t = (P_t, A_t, D_t)$, 其中 P_t, A_t, D_t 分别为 t 时刻情感状态的 3 个分量. 选取外向度、神经度和恐惧度 (extraversion, neuroticism and fear) 3 个维度来描述机器人的个性, 每一维都在 -1 到 1 区间上变化, 其值越大则表明在该轴上越容易发生情感转移. 采用向量 $\mathbf{P} = (E, N, F)$ 表示.

设 t 时刻机器人感知的外界事件对情感引起的客观变化量为 $\Delta \mathbf{E}_t$, 经过个性作用后, 变成对机器人情感变化的主观变化量 $\Delta \mathbf{E}'_t$, 具体变换关系如下:

$$\Delta \mathbf{E}'_t = \mathbf{P}_c(\Delta \mathbf{E}_t) = (\Delta P'_t, \Delta A'_t, \Delta D'_t)$$

$$\Delta \mathbf{E}_t = (\Delta P_t, \Delta A_t, \Delta D_t)$$

其中, \mathbf{P}_c 称为个性变换函数, 具体变换如下:

$$\mathbf{P}_c(\Delta \mathbf{E}_t) = \begin{bmatrix} 1+1/N & 0 & 0 \\ 0 & 1+1/N & 0 \\ 0 & 0 & 1/F-1 \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} E \\ N \\ F \end{pmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \Delta P_t \\ \Delta A_t \\ \Delta D_t \end{pmatrix}$$

情感生成机制如图 1 所示.

评价函数^[13]形式如下:

$$\mathbf{E}_{t+1} = \mathbf{F}(\psi(\mathbf{E}_t) + \Delta \mathbf{E}_t)$$

其中, 函数 $\psi()$ 是 t 时刻情感状态的衰减函数, 函数 $\mathbf{F}()$ 是一个限制函数, 限制情感状态在 PAD 3 维区间 $[-1, +1]$ 内变化.

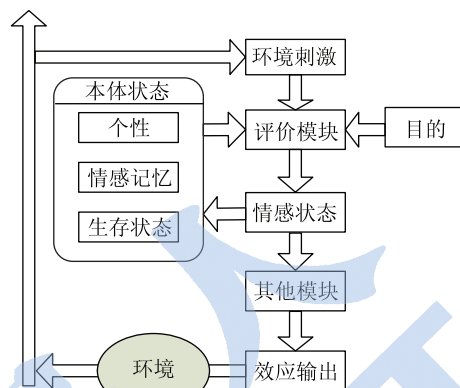


图 1 情感生成机制图

Fig.1 A robot emotion generation mechanism

2.2 机器人情感决策模型

建立基于任务的智能机器人情感决策模型, 如图 2 所示. 环境感知信息经过融合后, 输入到反应模块、评价模块和决策模块. 其中, 评价模块用于更新机器人的情感. 决策模块是整个系统的关键, 情感对正常逻辑推理的影响正体现于此, 如图 3 所示. 决策过程分为两个部分: 需求决策和行为决策. 需求决策根据当前状态和期望状态来确定机器人当前的需求, 通过需求实现期望状态. 这里, 期望状态是根据当前任务产生的, 而当前状态包含了情感状态、环境状态和自身状态 (包括电池电量、以前的经历与记忆等). 最终确定出需求后, 结合预先定义的行为集合, 通过行为决策产生相应行为.

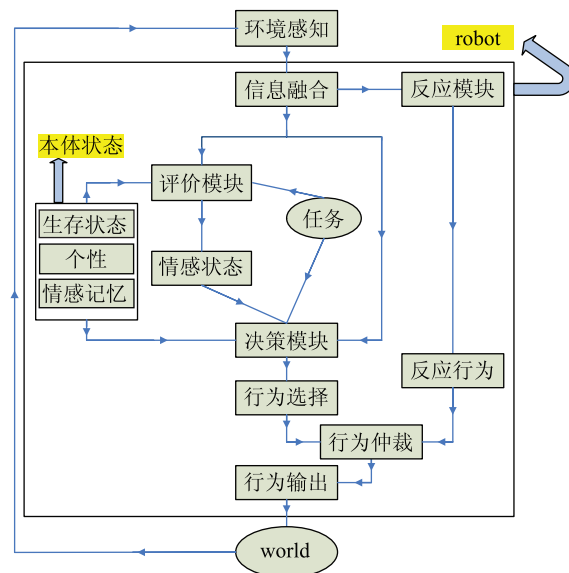


图 2 基于任务的情感决策模型框架

Fig.2 Emotion decision-making model based on task

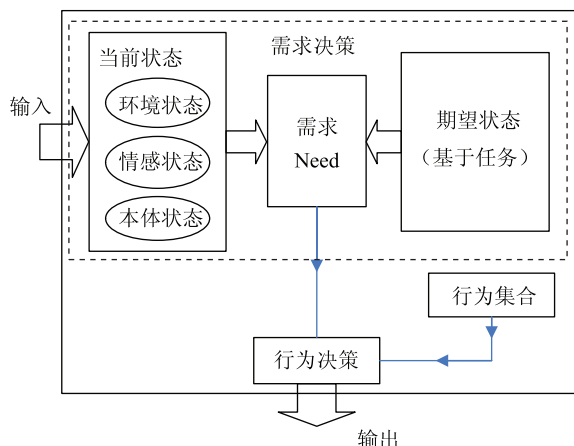


图3 情感决策模块图

Fig.3 Emotion decision-making module chart

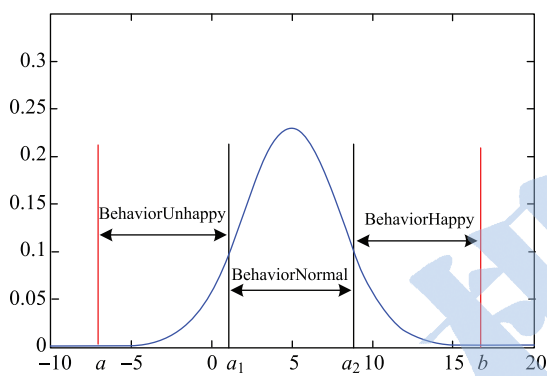


图4 正态分布到行为的映射图

Fig.4 Mapping chart from normal distribution to behavior

在需求决策过程中，根据当前事件确定出当前需求，每种需求事先映射到一个行为子集 $B_{\text{sub}} = \{B_1, B_2, \dots, B_n\}$ ，该子集有 n 种行为（ n 为奇数），定义如下：

$$B_i = \begin{cases} B_{\text{unhappy}} & i < (n+1)/2 \\ B_{\text{normal}} & i = (n+1)/2 \\ B_{\text{happy}} & i > (n+1)/2 \end{cases} \quad (1)$$

如何由当前需求映射到要执行的行为是机器人情感决策的关键部分。人的行为具有一定的稳定性，通常人们在外界刺激下选择的行为是正常的，但有时候选择的行为也会受情感的较大影响。这里结合正态分布原型，采取概率与情感结合的行为映射方法。以 $n=3$ 为例介绍该映射方法，机器人的行为子集有 3 种行为 $B_1 = B_{\text{unhappy}}$, $B_2 = B_{\text{normal}}$, $B_3 = B_{\text{happy}}$ 。

先取正态分布密度函数：

$$p(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (2)$$

μ, σ 为正态分布参数，图4为参数 $\mu=5, \sigma=3$ 时的密度函数图。

变量 x 由下式决定：

$$x = re \quad (3)$$

$$e = \frac{\alpha P + \beta A + \gamma D}{2(\alpha + \beta + \gamma)} + \frac{1}{2} \quad (4)$$

其中， r 为区间 $[a, b]$ 上的随机数， P, A, D 为当前情感状态的 3 个分量， α, β, γ 为 3 个分量的权重，称 e 为情感因子。

最后映射函数如下：

$$B_{\text{final}} = \begin{cases} B_{\text{normal}} & p > p(a_1) \\ B_{\text{happy}} & p < p(a_1) \text{ 且 } x > a_2 \\ B_{\text{unhappy}} & p < p(a_1) \text{ 且 } x < a_1 \end{cases} \quad (5)$$

其中 $p(a_1) = p(a_2)$ ，且 $a_1 < \mu < a_2$ 。

变量 r 是在区间 $[a, b]$ 上均匀分布的随机变量，其数学期望 $E(r) = (a+b)/2$ ，情感因子 e 一般在 0.5 附近波动，其数学期望 $E(e) = 0.5$ ，由于变量 r 与 e 是相互独立的，故 $E(x) = E(r) \cdot E(e)$ 。要使变量 x 最终映射的行为大部分为正常行为，则 x 的均值在正态分布的均值 μ 附近变化。因此， a, b, μ 3 个参数应该满足以下条件：

$$\frac{a+b}{2} \cdot \frac{1}{2} \in [\mu - \delta, \mu + \delta] \quad (6)$$

式中， δ 是一个较小的正数。

由映射规则看出，决定最后行为的是概率 p 和变量 x ，而变量 x 受随机因素和情感因素影响，导致最终输出的行为是不确定的，受情感和随机数共同影响。从正态分布函数与决策规则上看，大部分行为输出是正常行为，其他行为输出正体现了不确定性。当机器人情感状态不好时，即使随机数 r 比较大，因情感因子 e 的值比较小，故上面结论仍然成立。

当机器人执行行为时，该行为中的一些参数受情感状态 E_t 的影响，可以建立 P, A, D 与 B_{final} 的映射关系，即 $B_{\text{final}}(P, A, D)$ 。这样，无论何种行为，都可以看出其情感状态，也体现了情感对行为执行的“度”的影响。

行为是由多个动作组成的，机器人的每个行为都可能涉及到手臂、眼睛及头部的动作，也就是说 B_{final} 是上面各部分动作的集合，即：

$$B_{\text{final}}(P, A, D) = \{B_{\text{head}}(P, A, D), B_{\text{eye}}(P, A, D), B_{\text{arm}}(P, A, D), \dots\} \quad (7)$$

因此，在应用时，只需确定 PAD 空间到各部分动作空间的关系即可。

3 实验结果与分析 (Experimental results and discussion)

3.1 实验平台介绍

使用福娃机器人作为实验平台，如图 5 所示，验证上述方法的正确性和实用性。福娃机器人应用在机场航站楼内，具有礼仪和服务两个主要功能，可以主动向旅客问好，与旅客进行简单语音交流、握手、表演舞蹈。其感知传感器主要包括 CCD、红外传感器、超声波传感器等，能够体现行为的部件有头部、眼睛、手臂、本体及语音音乐输出。



图 5 福娃机器人“妮妮”
Fig.5 Fuwa robot “Nini”

3.2 实验设计

(1) 机器人行为的定义

机器人的行为从表达方式上分为两类：语音行为和肢体行为。语音行为包括回应人的对话和播放背景音乐；肢体行为包括头部、手臂和本体的动作。或者是两类行为的组合，如表 1 所示。

表 1 机器人行为表
Tab.1 Robot behavior table

编号	行为内容	类别
1	和人打招呼行为（迎宾）	语音行为和肢体行为
2	和人再见行为（送宾）	语音行为和肢体行为
3	和人握手行为	语音行为和肢体行为
4	没人时的休闲行为	语音行为和肢体行为
5	和人对话	语音行为

机器人在处于不同情感状态时会以不同的方式完成同一种行为。因此，把每一类行为分成 3 种，分别为正常情感状态下的行为、不高兴时的行为和高兴时的行为。机器人执行哪一种行为，由机器人当时的情感状态和决策方法决定。

(2) 事件到需求的映射

把机器人对外界的感知分成 5 类事件，如表 2 所示。机器人根据事件确定当前需求，根据需求映射到相应的行为。例如，当机器人感知到人来时，确定出当前需求为迎宾，然后根据决策方法和情感状

态选择一种行为并执行。

表 2 事件需求映射表
Tab.2 Mapping table of event requirement

事件	需求	可能的行为
看见人来	迎宾	Reception-Normal Reception-Unhappy Reception-Happy
人离开	送宾	SendOff-Normal SendOff-Unhappy SendOff-Happy
人提出握手时	握手回应	HandShake-Normal HandShake-Happy HandShake-Unhappy
人问问题	回答问题	Answer-Normal Answer-Happy Answer-Unhappy
无人搭理时	休闲	Rest-Normal Rest-Unhappy Rest-Happy

机器人的情感行为如图 6 所示，由事件和 PAD 情感通过决策机制最后映射到语音和肢体行为的表达。

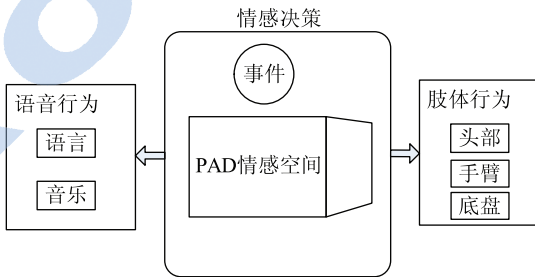


图 6 机器人情感行为表达示意图
Fig.6 Robot emotion and behavior expression

(3) 模型中相关参数及关系的确定

情感生成机制中的情感变化量 $\Delta E = (\Delta P, \Delta A, \Delta D)$ ，采用如下表示方法：

$$\begin{aligned}\Delta P &= W_P \times e \\ \Delta A &= W_A \times e \\ \Delta D &= W_D \times e\end{aligned}$$

其中 W_P 、 W_A 、 W_D 为 3 个权系数，根据经验得到，如表 3 所示。 e 为情感变化单位元。

随机数 r 变化的区间 $[a, b]$ 取 $[0, 16]$ ，即 $a = 0$ ， $b = 16$ 。正态分布的参数 $\mu = 5$ ， $\sigma = 3$ 。情感因子 e 中的 3 个权值 $\alpha = 2$ ， $\beta = 1$ ， $\gamma = 1$ 。

PAD 主要影响机器人各个动作执行的角度或位移和时间。设角度或位移为 D_{part} ，时间为 T_{part} ，因此只需建立 D_{part} 和 T_{part} 与 PAD 情感空间的关系：

$$D_{part} = D_{part_origin} \cdot (0.5 + e_d)$$
$$T_{part} = T_{part_origin} / (0.5 + e_v)$$
$$e_d = \frac{2P + D}{6} + \frac{1}{2}$$
$$e_v = \frac{A}{2} + \frac{1}{2}$$

其中, e_d 为影响机器人动作执行角度或位移的情感因子, e_v 为影响机器人动作执行时间的情感因子, D_{part_origin} 为该动作通常的角度或位移, T_{part_origin} 为完成该动作通常需要的时间, D_{part} 为经过情感影响后的角度或位移, T_{part} 为经过情感影响后的时间, P 、 A 、 D 分别对应该时刻情感状态的 3 个分量.

表 3 外界事件到情感变化映射表
Tab.3 The mapping table from external event to emotion variety

事件编号	事件	W_P	W_A	W_D
Ev ₁	有人到来	2	1	1
Ev ₂	人离开	-3	-2	-1
Ev ₃	人要握手	4	5	3
Ev ₄	打招呼	3	3	2
Ev ₅	听到表扬的话	5	4	4
Ev ₆	听到友好的话	2	2	2
Ev ₇	听到中性的话	1	0	1
Ev ₈	听到不友好的话	-2	3	-2
Ev ₉	听到批评的话	-5	4	-4

3.3 实验过程

为了验证情感决策模型的有效性,设计两个人和机器人交流的场景,从机器人的反应来观察机器人的情感变化.

场景 1: 有人到来与机器人打招呼,对机器人说中性、友好和表扬的话,例如:“你几岁了? 我们认识一下好吗? 你真聪明”,人要求与机器人握手,对机器人说中性、不友好、批评的话,例如:“你会唱歌吗? 你的头真大呀! 你真笨!”,人离开;又有人到来与机器人打招呼,对机器人说中性、友好和表扬的话,人离开. 情景事件序列如表 4 所示.

表 4 事件序列表 1
Tab.4 Table one of event sequence

序号	1	2	3	4	5	6	7	8
事件编号	Ev ₁	Ev ₄	Ev ₇	Ev ₇	Ev ₆	Ev ₆	Ev ₅	Ev ₅
序号	9	10	11	12	13	14	15	16
事件编号	Ev ₃	Ev ₇	Ev ₇	Ev ₈	Ev ₈	Ev ₈	Ev ₉	Ev ₉
序号	17	18	19	20	21	22	23	24
事件编号	Ev ₂	Ev ₁	Ev ₄	Ev ₇	Ev ₆	Ev ₅	Ev ₅	Ev ₂

场景 2: 有人到来与机器人打招呼,对机器人说中性、不友好、批评的话,人要求与机器人握手,对机器人说中性、友好和表扬的话,人离开;又有人到来与机器人打招呼,对机器人说中性、友好和表扬的话,人离开. 情景事件序列如表 5 所示.

以机器人高兴的和不高兴的送宾行为为例,机器人相应的具体行为参数变化情况如表 6 所示.

表 5 事件序列表 2
Tab.5 Table two of event sequence

序号	1	2	3	4	5	6	7	8
事件编号	Ev ₁	Ev ₄	Ev ₇	Ev ₇	Ev ₈	Ev ₈	Ev ₉	Ev ₉
序号	9	10	11	12	13	14	15	16
事件编号	Ev ₃	Ev ₇	Ev ₇	Ev ₆	Ev ₆	Ev ₆	Ev ₅	Ev ₅
序号	17	18	19	20	21	22	23	24
事件编号	Ev ₂	Ev ₁	Ev ₄	Ev ₇	Ev ₆	Ev ₅	Ev ₅	Ev ₂

表 6 高兴送宾行为与不高兴送宾行为对比
Tab.6 Comparative result of sendoff-happy and sendoff-unhappy behaviors

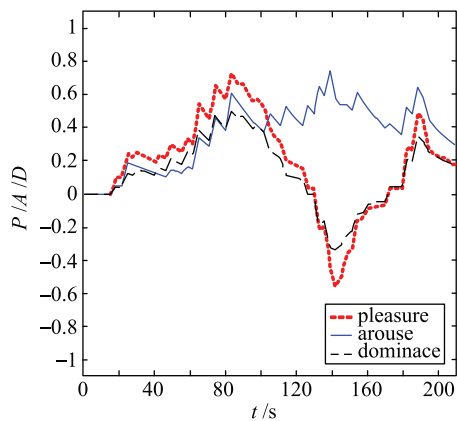
送宾行为	高兴状态	不高兴状态
语音内容	朋友, 祝你旅途愉快, 再见!	再见!
身体前移距离	51 cm	18 cm
手臂挥动时间	13 s	4 s
肩部关节抬起角度	112°	62°

3.4 结果与分析

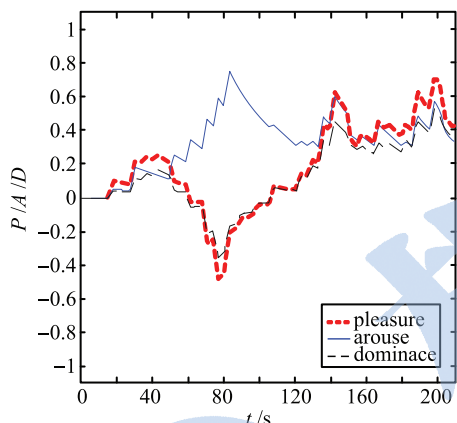
在场景 1 中, 机器人播放的背景音乐可以体现出机器人的情感变化, 如图 8 所示. 开始时, 机器人处于正常状态, 采取的是正常的打招呼行为; 接着, 由于人的一些友好的问题以及表扬的话, 机器人处于高兴状态, 采取的行为是高兴地与交流者握手; 接着, 由于人的批评, 机器人处于悲伤状态, 人离开时, 机器人采取的是不高兴的送宾行为; 最后人们又比较友好地与它交流, 机器人又处于高兴状态, 此时人离开, 机器人采用的是正常的送宾行为. 机器人的情感变化如图 7(a) 所示.

在场景 2 中, 开始时, 机器人处于正常状态, 采取的是正常的打招呼行为; 接着, 由于人的批评, 其处于悲伤状态, 采取的行为是不乐意与交流者握手; 接着, 由于人的一些友好的问题以及表扬的话, 机器人处于高兴状态, 此时人离开, 机器人采用的是正常的送宾行为; 又有人到来时, 机器人采取的是高兴的迎宾行为, 接着人们又比较友好地与它交流,

机器人处于更高兴状态，人离开时，采取的是高兴的送宾行为。机器人的情感变化如图 7(b) 所示。



(a) 实验 1 对应的机器人情感变化曲线



(b) 实验 2 对应的机器人情感变化曲线

图 7 机器人情感变化曲线

Fig.7 Variation of the robot emotion

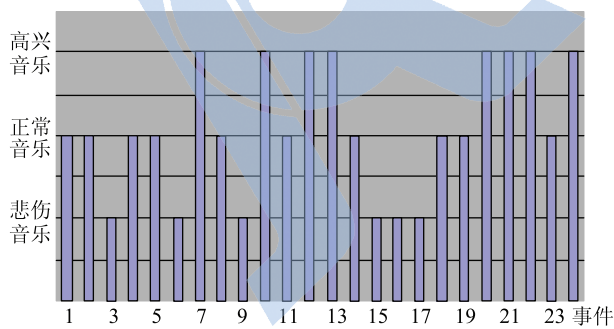


图 8 实验 1 中背景音乐变化图

Fig.8 Variation of background music in experiment 1

综上所述，从整个交流过程来看，机器人的反应基本上和场景的设计是一致的。

综合两次实验，机器人的情感行为分布如图 9 所示。可以看出，机器人大部分时候会表现出高兴行为和正常行为，根据决策模型，计算出机器人理论上应执行正常行为 68%，高兴行为和悲伤行为都是 16%。与图 9 中的实际分布相比，实际的高兴行

为大于理论上的分布，原因是两次实验的交流场景中，大部分事件均有利于机器人情感向正面（高兴）发展，因而决策模型的决策变量受随机因素和情感因素影响，最后的输出行为是高兴状态的行为概率大，悲伤状态行为概率小，符合人类的情感变化。

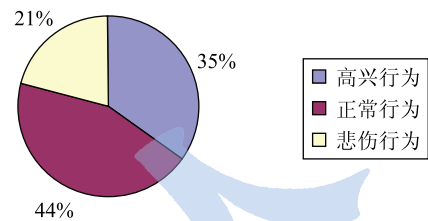


图 9 机器人情感行为分布

Fig.9 Behavior distribution of the robot emotion

4 结论 (Conclusion)

本文提出了一种基于正态分布模型的机器人情感决策模型，该模型的行为输出受情感状态和随机因子的影响，机器人的行为大部分是正常的，但是在情感的作用下可以产生相应的情感行为。通过实验证明了该模型可以产生反映机器人情感状态的行为。本模型中，机器人偶尔会做出与场景不一致的行为，需要进一步使其行为与交流场景更加一致。

参考文献 (References)

[1] Toda M. Kokoro wo Motta Kikai[R]. Japan: Diamond Co., 1987.

[2] Minsky M. The society of mind[M]. New York, USA: Simon and Schuster, 1988.

[3] Picard R W. Affective computing[M]. Cambridge, MA, USA: MIT Press, 1997.

[4] Rani P, Sarkar N. Making robots emotion-sensitive – Preliminary experiments and results[C]//IEEE International Workshop on Robot and Human Interactive Communication. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2005: 1-6.

[5] Busso C, Deng Z G, Yildirim S, et al. Analysis of emotion recognition using facial expressions, speech and multimodal information[C]//6th International Conference on Multimodal Interfaces. New York, NY, USA: ACM, 2004: 205-211.

[6] Suzuki K, Camurri A, Ferrentino P, et al. Intelligent agent system for human-robot interaction through artificial emotion[C]//IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 1998: 1055-1060.

[7] 王国江, 王志良, 杨国亮, 等. 人工情感研究综述 [J]. 计算机应用研究, 2006, 23(11): 7-11.

Wang Guojiang, Wang Zhiliang, Yang Guoliang, et al. Survey of artificial emotion[J]. Application Research of Computers, 2006, 23(11): 7-11.

[8] 孟秀艳, 王志良, 李娜, 等. 情感机器人的情感模型研究 [J]. 计算机科学, 2008, 35(6): 158-162.

Meng Xiuyan, Wang Zhiliang, Li Na, et al. Research on affective model of affective robot[J]. Computer Science, 2008, 35(6): 158-162.

- [12] Salter R B, Harris D J. The healing of intra-articular fractures with continuous passive motion[M]//AAOS Instructional Course Lectures, vol.28. Rosemont, IL, USA: American Academy of Orthopaedic, 1979: 102-117.
- [13] Salter R B. The biologic concept of continuous passive motion of synovial joints[J]. *Clinical Orthopaedics and Related Research*, 1989(242): 12-25.
- [14] 姚太顺, 孟宪杰. 踝关节外科 [M]. 北京: 中国中医药出版社, 1998.
- Yao Taishun, Meng Xianjie. Ankle surgery[M]. Beijing: China Press of Traditional Chinese Medicine, 1998.
- [15] 丰健民, 李成永. 踝关节扭伤的治疗 [J]. 第二军医大学学报, 1997, 18(2): 184-185.
- Feng Jianmin, Li Chengyong. The treatment of ankle sprain[J]. *Academic Journal of Second Military Medical University*, 1997, 18(2): 184-185.
- [16] 王强, 孙建华, 郭荣光, 等. 踝关节损伤临床诊断分型 [J]. 中国矫形外科杂志, 2000, 7(6): 609.
- Wang Qiang, Sun Jianhua, Guo Rongguang, et al. Clinical diagnosis typing of ankle injury[J]. *The Orthopedic Journal of China*, 2000, 7(6): 609.
- [17] Agrawal A, Banala S K, Agrawal S K, et al. Design of a two degree-of-freedom ankle-foot orthosis for robotic rehabilitation[C]//IEEE 9th International Conference on Rehabilitation Robotics. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2005: 41-44.
- [18] Lin C-C K, Ju M-S, Chen S-M, et al. A specialized robot for ankle rehabilitation and evaluation[J]. *Journal of Medical and Biological Engineering*, 2008, 28(2): 79-86.
- [19] 刘更谦, 高金莲, 杨四新. 踝关节康复训练并联机构构型及其运动学分析 [J]. 机电产品开发与创新, 2005, 18(5): 13-15.
- Liu Gengqian, Gao Jinliang, Yang Sixin, et al. The configuration of the ankle rehabilitation exercises parallel mechanism and its kinematics analysis[J]. *Development & Innovation of Machinery & Electrical Products*, 2005, 18(5): 13-15.
- [20] 赵铁石, 于海波, 戴建生. 一种基于 3-RSS/S 并联机构的踝关节康复机器人 [J]. 燕山大学学报, 2005, 29(6): 471-475.
- Zhao Tieshi, Yu Haibo, Dai Jiansheng. An ankle rehabilitation device based on 3-RSS/S parallel mechanism[J]. *Journal of Yanshan University*, 2005, 29(6): 471-475.
- [21] Girone M, Burdea G, Bouzit M, et al. A Stewart platform-based system for ankle telerehabilitation[J]. *Autonomous Robots*, 2001, 10(2): 203-212.
- [22] 黄真, 孔令富, 方跃法. 并联机器人机构学理论及控制 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1997.
- Huang Zhen, Kong Lingfu, Fang Yuefa. Parallel robot mechanics: Theory and control[M]. Beijing: China Machine Press, 1997.
- [23] Zhao T S, Dai J S, Huang Z. Geometric analysis of overconstrained parallel manipulators with three and four degrees of freedom[J]. *JSME International Journal, Series C: Mechanical Systems, Machine Elements and Manufacturing*, 2002, 45(3): 730-740.
- [24] 赵铁石, 黄真. 欠秩空间并联机器人输入选取的理论及应用 [J]. 机械工程学报, 2000, 36(10): 81-85.
- Zhao Tieshi, Huang Zhen. Theory and application of selecting actuating components of spatial parallel mechanisms[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2000, 36(10): 81-85.
- [25] 李宁宁, 赵铁石, 边辉. 双重驱动四自由度并联机构型综合 [J]. 机械设计与研究, 2008, 24(1): 51-53, 57.
- Li Ningning, Zhao Tieshi, Bian Hui. Type synthesis of dual-driven 4-DOF parallel mechanism[J]. *Machine Design and Research*, 2008, 24(1): 51-53, 57.

作者简介:

边 辉 (1982-), 男, 博士生. 研究领域: 并联机器人, 康复机器人.

赵铁石 (1963-), 男, 博士. 教授. 研究领域: 并联机器人, 微操作机器人, 康复机器人.

田行斌 (1972-), 男, 博士. 副教授. 研究领域: 并联机器人, 机器人控制.

(上接第 469 页)

- [9] Miwa H, Okuchi T, Takanobu H, et al. Development of a new human-like head robot WE-4[C]//IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2002: 2443-2448.
- [10] 解仑, 王志良, 余军. 人工心理情感模型的个人机器人 [J]. 智能系统学报, 2009, 4(1): 59-66.
- Xie Lun, Wang Zhiliang, Yu Jun. A personal robot based on an affective model of artificial psychology[J]. *CAAI Transactions on Intelligent Systems*, 2009, 4(1): 59-66.
- [11] Sloman A. Damasio, descartes, alarms and meta-management [C]//IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 1998: 2652-2657.
- [12] Camurri A, Coglio A. An architecture for emotional agents[J]. *IEEE Multimedia Magazine*, 1998, 5(4): 24-33.
- [13] Gao Q J, Wang K, Liu H J. A robot emotion generation mechanism based on PAD emotion space[M]//Intelligent Information Processing IV. New York, USA: Springer, 2008: 138-147.

作者简介:

胡云斗 (1965-), 男, 硕士生, 副教授. 研究领域: 机器人导航控制.

胡丹丹 (1979-), 女, 硕士, 讲师. 研究领域: 机器人环境感知认知.

高庆吉 (1966-), 男, 博士, 教授. 研究领域: 机器人智能与系统.