

基于蚁群算法的情感模型研究

张国丽,李祚泳

(成都信息工程学院 数学学院,成都 610225)

(zgl725@126.com)

摘 要:情感是人类智能中的一个重要表现形式,在人类决策过程中起着重要的作用。从情感的特征出发,抽取影响情感产生的载体因子,引入蚁群算法思想,将携带载体因子的蚂蚁,采用串行的方式,通过反应强度值的不断更新,完成寻找最优情感状态的任务,以此来考察人类的情感变化。通过和隐马尔可夫情感模型相比较,可以看出基于蚁群算法思想的情感模型实现过程简单,并反映了情感状态的变化过程。仿真结果表明了该模型与实际相符合,对研究计算机情感表达有较好的作用。

关键词:情感计算;蚁群算法;情感模型;载体因子;激励量

中图分类号: TP18 **文献标志码:** A

Emotional model based on ant colony algorithm

ZHANG Guo-li, LI Zuo-yong

(College of Mathematics, Chengdu University of Information Technology, Chengdu Sichuan 610225, China)

Abstract: Emotion is a kind of important expression of human intelligence, and plays an important role in human decision-making process. In this paper, from the emotional characteristics, it extracted the carrier factors that influence emotions and introduced ant colony algorithm. Ants who carry the vector factor search the best emotional state to complete the task through the reaction intensity, in order to study the human emotional changes. Compared with the Hidden Markov Model (HMM), we can see that the emotional model of the ant colony algorithm is simple and reflects the changes in emotional states. The simulation results prove that this method is in line with actuality, and it is effective for the study of computational emotional expression.

Key words: affective computing; ant colony algorithm; emotion model; carrier factor; stimulation consumption

0 引言

现代研究认为,情感能力是人类智能的重要标志,它影响着人的决策、学习和交流,并在人类的决策行为中起着决定性的作用^[1]。因此人类智能是一种广义上的智能,不但包括一定的智商,同时还包括一定的“情商”。目前,人工智能理论发展的一个重要方向为人工情感,情感计算被提到重要日程上来。1985 年,文献[2]作者首先提出了“要让计算机具有情感能力”,1997 年,文献[3]作者给出了情感计算的定义。但总的来说,情感计算的研究还处于初期阶段。具有情感的计算机首先必须有获得外界别人的情感。目前,国内外学者围绕这一问题作了许多研究,提出了一些模型,多数模型基于文献[4]作者提出的六种基本表情或其子集。情感是一种非线性动态过程和为瞬间的心理及生理现象,它代表机体对不断变化的环境所采取的适应模式^[5],且不确定性是人类情感行为的一个重要方面^[6]。

本文将反应强度值等价于信息素,应用到情感模型中,并将携带载体因子的蚂蚁采用串行的方式通过反应强度值不断更新来完成寻找最优情感状态的任务,得到基本情感的强度变化值,以此来考察人类的情感变化。

1 蚁群算法基本思想

蚁群算法^[7](Ant Colony Algorithm, ACA)是新近发展的

一种模拟昆虫王国中蚂蚁智能行为的仿生优化算法,它具有较强的鲁棒性,优良的分布式计算机制,易于与其他方法结合等优点。其基本思想是:蚂蚁在运动过程中会在经过的路径上释放一种特殊的分泌物——信息素,后到的蚂蚁能感知这种物质的存在及浓度,并倾向于朝信息素浓度高的方向移动,即选择该路径概率与当前这条路径上该物质的浓度成正比。信息素浓度越高的路径,选择它的蚂蚁就越多,在该路径上留下的信息素的浓度就越大,而浓度大的信息素又吸引更多的蚂蚁,从而形成一种正反馈。通过这种正反馈机制,蚂蚁最终可以发现最佳路径。

2 情感模型设计

受达尔文的理论影响,Ekman 提出 6 种基本情感:气愤、厌恶、恐惧、高兴、悲伤、惊讶。其他情感均可以由这六种基本情感构成,且这 6 种情感在文化传统间的差异很小,便于增强模型的通用性,所以本文采取此理论来研究情感状态的变化。

2.1 Robot 情感模型的构建

2.1.1 情感特征之间的欧式距离

文献[8]对 10 位测试者的上述 6 种基本表情共 60 幅图像进行了表情特征提取,作为表情模板和被测表情,计算其两两间的欧式距离,并对其取平均值。六种表情间的平均欧式距离如表 1 所示,从表中可以看出:不同测试者的不同表情特征间的欧式距离较大,相同表情特征间的欧式距离较小,其中

收稿日期:2009-04-20;修回日期:2009-06-11。

作者简介:张国丽(1982-),女,山西忻州人,硕士研究生,主要研究方向:情感算法、人工智能; 李祚泳(1944-),男,四川成都人,教授,博士生导师,主要研究方向:人工神经网络、智能优化算法。

恐惧的欧氏距离最小,愤怒的欧氏距离最大。

表 1 六种基本表情特征的平均欧氏距离

情感状态	高兴	惊讶	悲伤	恐惧	愤怒	厌恶
高兴	13.5	42.2	43.5	50.4	44.7	43.5
惊讶		14.3	40.5	56.1	43.0	36.6
悲伤			13.8	48.5	38.0	36.8
恐惧				9.36	73.3	47.7
愤怒					17.0	66.7
厌恶						14.4

2.1.2 Robot 的情感个性化分析

为了便于讨论,本文将影响情感产生的因素抽象为外部因素和内部因素。其中外部因素仅考虑环境刺激(基因源,相当于事件刺激)和他人行为(针对事件刺激做出反应,进而影响 Robot 的情感行为);内部因素仅考虑个性类型(Robot 自身的个性)和需求程度(考虑 Robot 自身对事件的期待),上述 4 个因素称为“载体因子”。假设 4 个载体因子 $I_j (j = 1, 2, 3, 4)$ 的取值范围为 $(0, 1)$ 。按其激励的大小分为三个级别,其参数阈值设置为:当 $0 < I_j < 0.3$ 时,判为轻度激励,当 $0.3 \leq I_j < 0.6$ 时,为中度激励;当 $I_j \geq 0.6$ 时,为重大激励。根据人类经验,假使在受到轻度激励时,情感状态向强度减小的方向转移概率最大;在受到中度激励时,情感状态保持原状态的概率最大;在受到重大激励时,情感状态向强度增加的方向转移概率最大。

2.1.3 Robot 的情感选择模型

如果将情感 Robot 对应成一只只的“蚂蚁”,那么就可以把情感选择问题同蚂蚁寻径原理联系起来,且承袭了蚂蚁算法的许多优点,通过释放“人工蚂蚁群”创建基于蚁群算法的路径选择模型。由式(1)表示的 p_{uv}^k 给出了在载体因子 k 的激励下,情感状态 u 转变到情感状态 v 的转移概率:

$$p_{uv}^k = \frac{[\pi_v]^\alpha \cdot [\lambda_{uv}]^\beta}{\sum_{w \in I(u)} [\pi_w]^\alpha \cdot [\lambda_{uw}]^\beta} \quad (1)$$

其中: π_v 为状态 v 的“反应强度值”, λ_{uv} 表示由状态 u 转变为状态 v 的“期望程度值”,它与两个状态 u 和 v 之间的平均欧氏距离 $0 \leq I_j < 0.3$ 有关,即可定义为:

$$\lambda_{uv} = \frac{1}{d_{uv}} \quad (2)$$

α 为反应强度的相对重要性(通常取 $\alpha = 0.7$); β 为状态转移的期望程度的重要性(通常取 $\beta = 0.3$);

2) 在载体因子 k 的激励下,状态 v 的反应强度值的更新公式由式(3)计算:

$$\pi_v(t+1) = \rho \pi_v(t) + \Delta \pi_v(t) \quad (3)$$

其中: ρ 为状态 v 的反应强度的衰减率,取 $0 \leq \rho \leq 1$ 的一个定值, $\Delta \pi_v(t)$ 为状态 v 的反应强度的增加量,它由式(4)计算:

$$\Delta \pi_v = I_v \times \pi_v \quad (4)$$

其中: I_v 为激励向量 $I = (I_1, I_2, \dots, I_v, \dots, I_6)$ 的第 v 个分量, π_v 为反应强度 $\pi = (\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_v, \dots, \pi_6)$ 的第 v 个分量,其中 I_v, π_v 都取 $(0, 1)$ 之间的一个数值,且 I_v, π_v 应满足:

$$\sum_{v=1}^6 I_v = 1, \sum_{v=1}^6 \pi_v = 1 \quad (5)$$

2.2 算法设计

由于情感状态是一个隐含在多个生理和行为特征之中的

不可直接观测的量,不易建模。且情感模型是针对个人生活的,并可在特定的状态下进行编辑,具有自适应性(可根据情况自动进行调整)。所以本文假设在情感状态空间中,4 种载体因子的激励量值所对应的分量分别表示高兴、悲伤、惊讶、恐惧、愤怒和厌恶的强度值,根据直觉和对人类情绪的通常理解来定义六种状态对各个因子的激励量值。值越大,说明在此因子下发生的概率越大,且满足在任何时刻,各情感状态的概率之和为 1。让不同的用户对系统进行测试,可使我们更好地完善这些设定值,从而产生令人信服的结果。

基于蚁群算法的情感模型计算步骤如下:以下假设都是根据用户的不同需求来设置的。首先设第 1 只携带“环境刺激”载体因子的蚂蚁 m_1 ,在接到情感 Robot 个性化的请求后,6 种状态对环境刺激的激励量组成行向量 $I = (0.2, 0.01, 0.6, 0.04, 0.1, 0.05)$,根据式(2)~(4)计算在此载体因子作用下 Robot 的状态分布的反应强度值;接着第 2 只携带“他人行为”载体因子的蚂蚁 m_2 ,在 m_1 的转移概率的基础上再采用和 m_1 类似的方式完成反应强度值的更新,依此类推,直到第 4 只携带“需求程度”的载体因子的蚂蚁完成任务,最终由式(1)计算得到最大的转移概率行向量,即为 Robot 的当前状态,通过得到的行向量来判断此时的情感状态。

2.3 模型结果分析与讨论

假设情感机器人 Robot 初始情感状态为平静状态,在情感状态空间中,各基本情感的强度相等,用表达式 $\pi(0) = (0.167, 0.167, 0.167, 0.167, 0.167, 0.167)$,分量分别表示高兴、悲伤、惊讶、恐惧、愤怒和厌恶的强度值。对于相同的初始情感状态 $\pi(0)$,考虑以下两种情况:1)假设在 4 种载体因子的作用下,6 种状态的激励量相同;2)假设对 4 种载体因子的作用,6 种状态的激励量各不相同;通过计算比较最终的情感状态的趋势。

1) 激励量相同。

假设对 4 种载体因子(环境刺激、他人行为、个性类型和需求程度)的作用激励量保持不变($I_1 = I_2 = I_3 = I_4$),分量分别对应于高兴、悲伤、惊讶、恐惧、愤怒和厌恶六种状态,并设其惊讶状态的值最大。由于值越大,说明在此因子下情感状态发生的概率越大,且满足在任何时刻,各情感状态的概率之和为 1。所以 4 种载体因子分别为: $I_1 = I_2 = I_3 = I_4 = (0.2, 0.01, 0.6, 0.04, 0.1, 0.05)$,先利用式(4)计算 $\Delta \pi = (I \times \pi(0)) = (0.0334, 0.00167, 0.1002, 0.00668, 0.0167, 0.00835)$,假设状态 v 的激励强度的衰减率 $\rho = 1$,再利用式(3)计算,得到 $\pi = (0.2004, 0.16867, 0.2672, 0.17368, 0.1837, 0.17535)$,最后将其代入式(1)计算其情感状态的转移概率的行向量为 $P_1^{(1)} = (0.1705, 0.1502, 0.2050, 0.1322, 0.1497, 0.1523)$ 。这样第一只携带“环境因子”的蚂蚁 m_1 完成了任务,可以看出 $P_1^{(1)}$ 中惊讶的转移概率最大为 0.2050,高兴的转移概率次大为 0.1705;接着携带“他人行为”的蚂蚁 m_2 在 $P_1^{(1)}$ 的基础上继续类似 m_1 的行程,得到 $P_1^{(2)}$,直到携带“需求程度”的蚂蚁 m_4 完成任务得到 $P_1^{(4)}$,此时四只蚂蚁完成一次循环。通过 Matlab 验证四只蚂蚁经过 5 次循环,达到稳定值,如表 2 所示。

从表 2 数据可以看出,当第 5 次循环完成时,各状态的转移概率值趋于稳定。惊讶状态的转移概率值一直有增加趋势,而其他各状态都有下降的趋势,结果输出 $P_5^{(4)} =$

(0.1704, 0.1116, 0.3145, 0.1360, 0.1106, 0.1171)。此时惊讶的转移概率值最大为 0.3145, 高兴的转移概率值次大为 0.1704, 通过计算可得此时情感机器人 Robot 的情感状态 $(0.3145 - 0.1704) / 0.3145 \times 100\% \approx 45.82\%$ 。可见惊讶状

态的强度远远大于高兴状态, 所以可以不考虑高兴的情感因素对于当前情绪的影响, 说明情感 Robot 当前的状态为惊讶状态。因为对载体因子的作用, 皆是惊讶状态的激励量最大, 故最终向惊讶状态转移。

表 2 5 次循环下各状态的情感转移概率

循环次数	情感转移概率值	状态					
		高兴	悲伤	惊讶	恐惧	愤怒	厌恶
1	m_1	0.1705	0.1502	0.2050	0.1322	0.1497	0.1523
	m_2	0.1719	0.1385	0.2351	0.1348	0.1378	0.1419
	m_3	0.1722	0.1303	0.2577	0.1359	0.1295	0.1345
	m_4	0.1746	0.1265	0.2631	0.1390	0.1256	0.1312
2	m_1	0.1736	0.1220	0.2701	0.1384	0.1210	0.1270
	m_2	0.1727	0.1188	0.2888	0.1378	0.1178	0.1240
	m_3	0.1721	0.1166	0.2965	0.1373	0.1156	0.1219
	m_4	0.1716	0.1151	0.3019	0.1369	0.1140	0.1204
3	m_1	0.1713	0.1140	0.3057	0.1367	0.1129	0.1194
	m_2	0.1710	0.1132	0.3084	0.1365	0.1122	0.1187
	m_3	0.1708	0.1127	0.3103	0.1363	0.1117	0.1182
	m_4	0.1707	0.1123	0.3116	0.1362	0.1113	0.1178
4	m_1	0.1706	0.1121	0.3126	0.1361	0.1111	0.1176
	m_2	0.1705	0.1119	0.3132	0.1361	0.1109	0.1174
	m_3	0.1705	0.1118	0.3137	0.1361	0.1108	0.1173
	m_4	0.1704	0.1117	0.3140	0.1360	0.1107	0.1172
5	m_1	0.1704	0.1116	0.3142	0.1360	0.1106	0.1171
	m_2	0.1704	0.1116	0.3144	0.1360	0.1106	0.1171
	m_3	0.1704	0.1116	0.3145	0.1360	0.1106	0.1171
	m_4	0.1704	0.1116	0.3145	0.1360	0.1106	0.1171

2) 激励量不同。

在现实生活中, 对 4 种载体因子的作用, 各情感状态的激励量取值大多是各不相同。针对个人的情感模型, 对于每一个个性化因素, 需要设定一个概率值, 应尽可能地满足自适应性, 以便根据人类的情感概率的变化推断得出相应的情感走向, 提供情感交互和交流的可能。由于情感状态不易直接观测, 所以目前只能人为地规定, 但是相信今后高科技的传感器可以为我们提供需要的数据和一些可供参考的建议。

假设环境刺激因子(基因源)激励量仍为惊讶状态的值最大, $I_1 = (0.2, 0.01, 0.6, 0.04, 0.1, 0.05)$; 根据通常的理解, 一般认为他人行为和环境因素应保持大致相同的激励量, 且满足 6 种状态的概率和为 1, 故他人行为的激励量设置为: $I_2 = (0.15, 0.02, 0.65, 0.01, 0.15, 0.02)$; 考虑 Robot 的个性处于亢奋状态, 或喜或悲, 其他状态值的概率较小, 则个性类型的激励量为 $I_3 = (0.4, 0.5, 0.01, 0.02, 0.04, 0.03)$; 并假设针对基因源的事件刺激, 该 Robot 的厌恶情绪占优势, 此时 Robot 的需求程度的激励量为 $I_4 = (0.3, 0.02, 0.1, 0.05, 0.03, 0.5)$, 利用与上述同样的方法计算最终情感 Robot 的情感状态变化。通过 Matlab 验证 4 只蚂蚁第 6 次循环后, 即第 7 次循环开始时各状态的情感转移概率趋于稳定值, 如表 3 所示。

从表 3 数据可以看出, 当第 6 次循环完成后, 从第 7 次循环开始各情感状态的转移概率值也趋于稳定。由于假设各状态的激励量各不相同, 所以各状态的转移概率值一直随着激励量的变化而变化, 最终情感状态的转移概率值输出结果为

$P_7^{(4)} = (0.2101, 0.1541, 0.1775, 0.1829, 0.1081, 0.1674)$ 。从结果可以看出此时情感 Robot 的状态较为复杂, 究其原因与载体因子的激励量不同所导致, 应以高兴状态为主, 但混合着其他一些复杂的情感。

2.4 与隐马尔可夫情感模型比较

为了说明蚁群算法情感模型的优点, 我们用隐马尔可夫情感模型来验证一下情感机器人 Robot 情感变化状态。在同样的条件下, 计算情绪的变化情况:

$$e_s^{n+1} = e_s^n + e_s^n \times p_s =$$

$$\begin{bmatrix} 0.167 & 0.167 & 0.167 & 0.167 & 0.167 & 0.167 \\ 0.167 & 0.167 & 0.167 & 0.167 & 0.167 & 0.167 \end{bmatrix}' +$$

$$\begin{bmatrix} 0.2 & 0.01 & 0.61 & 0.03 & 0.12 & 0.02 \\ 0.18 & 0.01 & 0.65 & 0.01 & 0.13 & 0.04 \\ 0.16 & 0.02 & 0.6 & 0.05 & 0.14 & 0.03 \\ 0.14 & 0.03 & 0.68 & 0.04 & 0.1 & 0.02 \\ 0.17 & 0.02 & 0.7 & 0.05 & 0.1 & 0.2 \\ 0.15 & 0.02 & 0.62 & 0.02 & 0.09 & 0.05 \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} 0.3340 & 0.1854 & 0.8116 & 0.2004 & 0.2896 & 0.1971 \end{bmatrix}'$$

其中: e_s^n 为情感机器人的当前情感状态; p_s 为情感状态变化转移矩阵, 对角线上的元素即为刺激作用下情感出现的概率; e_s^{n+1} 为下一时刻的情感状态, ' 表示矩阵转置。

在刺激量一致的情况下, 此时情感 Robot 的情感状态为惊讶的概率值最大, 和前面的结论一致。但是实际生活中存在着刺激量不一致的情况, 此时隐马尔可夫情感模型判别起来比较复杂。由于本文假设情感状态变化转移矩阵 p_s 的对角线上的元

素即为刺激作用下情感出现的概率,所以针对刺激量不一致的情况时,载体因子(环境刺激、他人行为、个性类型和需求程度)各不相同,此时就无法判定对角线上的元素到底该由哪一个载体因子来决定,具体如何确定,还有待于进一步探讨。而且

p_i 矩阵的获取比较繁琐,情感状态的变化过程没有很好的体现。通过比较可以看出基于蚁群算法思想的情感模型实现过程简单,并反映了情感状态的变化过程。利用仿生学的知识解决模糊的情感状态,是我们今后研究的一个方向。

表 3 7 次循环下各状态的情感转移概率

循环次数	情感转移概率值	状态					
		高兴	悲伤	惊讶	恐惧	愤怒	厌恶
1	m_1	0.170 5	0.150 2	0.205 0	0.132 2	0.149 7	0.152 3
	m_2	0.167 0	0.139 6	0.240 5	0.130 4	0.142 3	0.139 2
	m_3	0.191 8	0.176 4	0.193 6	0.134 7	0.130 0	0.133 6
	m_4	0.199 3	0.157 6	0.175 4	0.139 5	0.120 4	0.167 8
2	m_1	0.192 5	0.143 8	0.217 7	0.140 7	0.118 8	0.152 5
	m_2	0.181 7	0.135 3	0.245 7	0.137 1	0.120 9	0.139 2
	m_3	0.203 3	0.172 4	0.196 4	0.138 6	0.115 8	0.133 5
	m_4	0.207 4	0.154 9	0.177 1	0.142 1	0.110 9	0.167 5
3	m_1	0.198 0	0.142 1	0.213 1	0.142 5	0.112 1	0.157 3
	m_2	0.185 3	0.134 2	0.246 9	0.138 5	0.116 1	0.139 1
	m_3	0.206 1	0.171 4	0.197 0	0.139 5	0.112 6	0.133 4
	m_4	0.209 4	0.154 3	0.177 4	0.142 7	0.108 7	0.167 4
4	m_1	0.199 3	0.141 7	0.213 3	0.142 7	0.110 6	0.152 2
	m_2	0.186 2	0.133 9	0.247 1	0.138 7	0.115 1	0.139 0
	m_3	0.206 8	0.171 2	0.197 1	0.139 7	0.111 9	0.133 3
	m_4	0.209 9	0.154 2	0.177 5	0.142 9	0.108 3	0.167 3
5	m_1	0.199 6	0.141 6	0.213 4	0.143 0	0.110 3	0.152 1
	m_2	0.186 4	0.133 9	0.247 2	0.138 8	0.114 8	0.139 0
	m_3	0.206 9	0.171 1	0.197 2	0.139 7	0.111 7	0.133 3
	m_4	0.210 0	0.154 1	0.177 5	0.142 9	0.108 1	0.167 4
6	m_1	0.199 7	0.141 6	0.213 4	0.143 0	0.110 1	0.152 2
	m_2	0.186 5	0.133 9	0.247 2	0.138 8	0.114 7	0.139 0
	m_3	0.207 0	0.171 1	0.197 2	0.139 7	0.111 6	0.133 3
	m_4	0.210 1	0.154 1	0.177 5	0.142 9	0.108 1	0.167 4
7	m_1	0.210 1	0.154 1	0.177 5	0.142 9	0.108 1	0.167 4
	m_2	0.210 1	0.154 1	0.177 5	0.142 9	0.108 1	0.167 4
	m_3	0.210 1	0.154 1	0.177 5	0.142 9	0.108 1	0.167 4
	m_4	0.210 1	0.154 1	0.177 5	0.142 9	0.108 1	0.167 4

3 结语

本文借助蚁群算法思想对情感的状态转移进行了研究,在情感 Robot 的初始情感均为平静状态时,考虑了激励量相同和不同两种情况,将影响情感的因素简化为 4 个载体因子,采用“蚂蚁”(携带载体因子)串行的方式来完成寻找最优状态的任务,以此来考察情感的变化过程。通过实验仿真,其情感转移概率值最终都会趋于一个稳定值,结果表明了该模型与实际相符合,将此模型应用到现有的情感机器人平台中,对研究计算机情感表达有一定的指导作用。

现阶段机器人情感技术的研究还处于起步阶段,即利用生物学和心理学技术来让机器人模拟人类情感。要使机器人真正具有人类情感,还有赖于人类情感解剖学理论的发展。本文提出的模型和方法有待于进一步完善,可以考虑为模型添加更多更细化的因素或添加适当的满足不同机器人的个性偏好,此外,基于论文所述的情感诱导方式的仿真软件也有待于进一步研究。

参考文献:

[1] LEDOUX J E, HIRST W. Mind and brain: Dialogues in cognitive

neuroscience[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1986: 275 - 300.

[2] MISKY M. The emotion machine[EB/OL]. [2009 - 01 - 01]. <http://web.media.mit.edu/Minsky/>.

[3] PICARD R W. Affective computer[M]. Cambridge: MIT Press, 1997.

[4] KMAN E, FRIESEN W. Facial action coding system[M]. Palo Alto, CA: Consulting Psychologists Press, 1997.

[5] DAVIDSON R J, ABERCROMIE H, NITSCHKE J B, *et al.* Regional brain function, emotion and disorders of emotion[J]. Current Opinion in Neurobiology, 1999, 9(2): 228 - 234.

[6] KSHIRSAGAR S. A multilayer personality model[C]// Proceedings of the 2nd International Symposium on Smart Graphics. New York, ACM Press, 2002: 107 - 115.

[7] COLIORIN A, DORGO M, MANIEZZO V, *et al.* Distributed optimization by ant colonies[C]// Proceedings of the 1st European Conference on Artificial Life. [S.l.]: Elsevier Publishing, 1991: 134 - 142.

[8] 詹永照,李婷,周庚涛. 基于混合特征和多 HMM 融合的图像序列表情识别[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2008, 20(7): 900 - 905.