

An LMA-Based Emotion Expressing Method for Aerial Robot

Qingji Gao, Meng Li, Dandan Hu, Wei Hao

Robotics Institute of Civil Aviation University of China, Tianjin

Email: limengplum@126.com

Received: Dec. 30th, 2013; revised: Feb. 2nd, 2014; accepted: Feb. 10th, 2014

Copyright © 2014 Qingji Gao et al. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited. In accordance of the Creative Commons Attribution License all Copyrights © 2014 are reserved for Hans and the owner of the intellectual property Qingji Gao et al. All Copyright © 2014 are guarded by law and by Hans as a guardian.

Abstract: A method for the aerial robots' emotion expressing by simulating humans through the changes of trajectories of 3D motion is researched. Aiming at the problem of the perception to the emotion expressed through a trajectory in 3D space, a trajectory-emotion standard set is designed. For the problem of designing the multi-parameter trajectory, an emotion expressing model based on the parameters of the trajectory is established by using Laban Movement Analysis (LMA) theory. With this model, the emotions can be expressed by changing the trajectory according to the changes of emotional states. The effectiveness and sufficiency of this method are proved by experiments.

Keywords: Aerial Robot; Affective Computing; Emotion Expressing

基于 LMA 的空中机器人情感表达方法研究

高庆吉, 李 盟, 胡丹丹, 郝 伟

中国民航大学机器人研究所, 天津

Email: limengplum@126.com

收稿日期: 2013 年 12 月 30 日; 修回日期: 2014 年 2 月 2 日; 录用日期: 2014 年 2 月 10 日

摘 要: 研究了空中机器人通过三维运动轨迹链的变化模拟人类表达情感的方法。针对三维空间中行为轨迹链所表达情感的认识问题, 设计了轨迹链 - 情感标准集。针对多参数运动轨迹链设计, 采用拉班运动分析(Laban Movement Analysis, LMA)理论建立了基于运动轨迹链参数的情感表达模型, 根据情感状态及其变化而改变运动轨迹链从而实现情感表达。实验验证了该方法进行情感表达的有效性和充分性。

关键词: 空中机器人; 情感计算; 情感表达

1. 引言

近年来, 基于运动轨迹的情感表达成为非人形机器人情感表达研究的关注点。旋翼空中机器人可在三维空间中实现 6 自由度的运动, 具有很好的机动性, 与地面移动机器人相比, 可实现更丰富的动作, 有充分表达情感的空间, 使研究基于运动轨迹的情感表达更具现实意义。

针对情感和运动轨迹的相关性问题, 已经进行了

一些研究。Tremoulet 等通过对地面非人形机器人情感表达的研究, 从表征情感的运动参量上得出: 速度和方向这两种运动特征的改变就足以给人具有生命的印象^[1]。M. Saerbeck 等人也认为加速度和曲率对机器人情感表达作用显著, 在 PAD (Pleasure-Arousal-Dominance)空间中评价机器人所表达的情感倾向, 确定了加速度和曲率与情感表达的关系, 认为: (1) 机器人平台实体不影响情感的认知; (2) 激活度的大多

数信息是在运动的加速度参数中携带的；(3) 愉悦度受到加速度和曲率的共同影响^[2]。Camurri 则通过要求演员用愤怒、恐惧、悲伤和欢快四种不同的情感表达方式表演舞蹈，并从 LMA 中计算总持续时间、收缩指数、动量和动作流畅性，实现了对舞蹈表演中手势所表现的情感内容的自动认知^[3]。2013 年，M. Sharma 等在总结前人研究的基础上，根据拉班运动理论设计了空中机器人的运动轨迹，并通过统计学分析确定运动的拉班效果与人类对轨迹所表达情感的认知之间的关系^[4]，为三维空间中运动轨迹的自动设计提供了参考依据。但其中的运动轨迹设计需要专业知识且人工进行，使情感的自主表达能力和应用受到制约。

为此，提出一种基于 LMA 的情感表达轨迹链自动设计方法。首先确定了运动轨迹的形状及速度特征与情感认知之间的关系，建立了轨迹链 - 情感标准集，作为基于运动轨迹链的情感表达的评估依据。而后，提出基于 LMA 的机器人情感行为生成方法，将机器人情感描述为拉班效果因子，并将拉班效果因子映射为参数化运动轨迹链的参数，以实现通过轨迹形状和运动速度的变化表现情感。研究工作力求为机器人自主地通过运动轨迹链表达情感提供支持。

2. 轨迹链 - 情感标准集的建立

情感表达机器人运动轨迹链与情感表达之间的定性关系如表 1 所示。

考虑到旋翼空中机器人在三维空间中运动的复杂性，需要重新定义影响情感表达的运动参数，并通过分析人类对空中机器人运动轨迹链所表达的情感认知，确定轨迹链 - 情感标准集。空中机器人的运动参数主要包括环形运动的曲率和周期性运动的频率。运动参数取值范围与情感认知的关系如表 2 所示。

该标准集确定了运动轨迹链特征与所表达的情感之间的关系，为基于运动轨迹链的情感表达提供了评价依据。

根据运动参数取值与情感认知的关系确定运动轨迹链 - 情感的标准集，总结出四种基本情感对应的三维空间中的典型运动轨迹链特征如表 3 所示。

3. 基于运动轨迹链的情感表达模型构建

旋翼空中机器人是一个非线性欠驱动系统，其运

Table 1. The relation between the robot's motion and emotion^[5]
表 1. 机器人运动与情感的基本关系^[5]

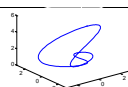
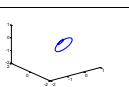
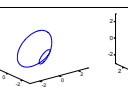
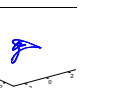
运动特征	情感		
	快乐	愤怒	悲伤
速度	快	快	慢
流畅性	流畅	断续	流畅
规律性	规律、环形	不规律	规律

Table 2. The relation between the parameters of a motion and the emotion recognized

表 2. 运动参数取值与情感认知的关系

运动参数	情感			
	快乐	悲伤	平静	愤怒
曲率	大	小	中	极大
频率	低	低	低	高

Table 3. The character of the trajectories for different moods
表 3. 不同情感的轨迹链特点和典型轨迹

情感	快乐	悲伤	平静	愤怒
典型轨迹				
轨迹链特点	空间范围大 形状较圆润 频率较高 速度较快	空间范围小 形状圆润 频率低 速度慢	空间范围中 形状圆润 频率较低 速度较慢	空间范围中 形状尖锐 频率高 速度快

动方式有一定的特殊性^[6]。由于姿态与加速度的耦合性，单纯研究姿态变化的行为缺乏可行性，故将机器人视为质点，仅以其运动轨迹链作为行为设计研究的对象。

基于运动轨迹链参数的情感表达模型结构如图 1 所示。

借助 PAD 情感模型，将基本情感映射到 PAD 空间上，根据 LMA 理论，确定各个效果因子的极性，并由基于 LMA 的情感表达模型得到运动轨迹链的参数值，生成相应的行为轨迹链。

3.1. PAD 情感模型

参考 Ekman 的基本情感分类法^[7]，选择四种基本情感：快乐、悲伤、愤怒和平静，并将其映射到 PAD 情感空间进行量化。PAD 空间的三个维度分别描述和衡量情感状态：愉悦度、激活度和优势度。根据 Mehrabian 的 PAD 情感量表^[8]，可以归纳出 PAD 空间



Figure 1. The emotion expression model based on the parameters of the trajectory

图 1. 基于运动轨迹链参数的情感表达模型

中各维度上的取值与情感的对应关系如表 4 所示。

在 PAD 空间定义情感向量 $e = [e_p \ e_A \ e_D]$ ，其中 $e_p, e_A, e_D \in [-1, 1]$ ，分别反映在愉悦度、激活度和优势度三个维度上的情感强度。

3.2. LMA 效果映射

LMA 主要研究四类问题：肢体、效果、形状和空间。对于旋翼空中机器人的运动轨迹链，只需对效果类问题进行研究。效果类亦称为动态类，该系统用于理解运动中的微妙特征，如基于内在意图实现的动作。效果类包括四个子类，亦称效果因子，每一个因子有对立的两极(效果要素)。表 5 列出了四种基本情感在 PAD 空间中的取值以及对应的效果因子中各个值的取值。

如悲伤的情感对应 PAD 空间中 -P-A-D 的区域，反映悲伤情感的效果因子为：空间因子为负极，即非直接的、迂回的；力度因子为负极，即力度较弱；时间因子为负极，即持续的；流畅性因子对悲伤情感没有直接影响。

3.3. 基于 LMA 的情感表达模型

引进傅里叶级数法进行运动的参数化，对任意轨迹链 $s(t)$ 可以展开为：

$$s(t) = a_0 + \sum_{k=1}^N [a_k \cos(k\omega t) + b_k \sin(k\omega t)] \quad (1)$$

其中 $\omega = 2\pi/T$ 表示符合时间 T 的基频。 $a_0, a_k, b_k \in \mathbb{R}^3$ ， $k \in K = \{1, 2, \dots, N\}$ ， a_0 为 3 维列向量， a_k 和 b_k 为 $3 \times N$ 的矩阵，且 $N \geq 1$ ；定义 $p = \{\omega, N, a_0, a_k, b_k | k \in K\}$ ，该参数即可表征不同的运动轨迹链^[6]。

对于参数化的运动轨迹链 $s(t)$ ，定义空间系数 A_s ：

$$A_s = \sqrt{\|a_k\|_2^2 + \|b_k\|_2^2} \quad (2)$$

用以表征运动轨迹在空间中的运动幅度， p 中的参数 a_0 ， a_k 和 b_k 定义周期性运动的振幅，以及运动

Table 4. The relation between PAD space and basic moods^[9]
表 4. PAD 情感空间与情感关系表^[9]

PAD 空间	情感	PAD 空间	情感
+P+A+D	快乐	-P-A-D	悲伤
+P+A-D	依赖	-P-A+D	自大
+P-A+D	平静	-P+A-D	忧虑
+P-A-D	温和	-P+A+D	愤怒

Table 5. The polarity in the PAD space and the value of effect factors for 4 basic moods

表 5. 四种基本情感在 PAD 空间及效果因子的极性

情感	PAD 空间	效果因子			
		空间	力度	时间	流畅性
悲伤	-P-A-D	-	-	-	+/-
愤怒	-P+A+D	-	+	+	+
平静	+P-A+D	+	-	-	-
快乐	+P+A+D	+	-	+	+/-

的空间维度。当 a_k 和 b_k 中各项的值较小时，曲线在空间中运动的幅度较小，反之幅度较大。

定义运动的能量系数 E_s ：

$$E_s = N \quad (3)$$

用以表征运动轨迹的能量特性，能量系数反映运动轨迹尖锐的程度。 E_s 的值越大，轨迹形状的平滑度越差。 p 中的参数 N 为谐波的个数， N 的值越大，高频运动越明显，反映在轨迹形状上越锐利和有能量。

定义平均运动速度 \bar{v}_s ，表征运动速度的大小。 \bar{v}_s 可根据运动周期 T 计算：

$$\bar{v}_s = \frac{s}{T} = \frac{\int s(t) dt}{2\pi/\omega} \quad (4)$$

其中 s 为轨迹链 $s(t)$ 的长度。

流畅性因子受动作连接方式的影响，与运动轨迹链无直接关系，在这里不作考虑。

根据^[2]的研究，对于 PAD 空间中的某一情感倾向 $e = [e_p \ e_A \ e_D]$ ，影响愉悦度分量 e_p 的因素主要为轨迹形状的平滑度，可由能量系数 E_s 的值体现。激活度分量 e_A 主要受平均速度 \bar{v}_s 的影响。优势度分量 e_D 同时受到 E_s 和 \bar{v}_s 的影响。轨迹的振幅 A_s 对情感表达的影响比较复杂，首先它与速度 \bar{v}_s 具有耦合性，在情感表达上与其具有一致性，同时，它的取值又影响曲线上每一点的曲率，而曲率被证明与愉悦度之间存在

较大的关联性，因此 A_s 对愉悦度和激活度均有影响。式 1 表示了这些量之间的关系：

$$\begin{cases} A_s = \lambda_p e_p + \lambda_A e_A \\ E_s = \xi_p e_p + \xi_D e_D \\ \bar{v}_s = \zeta_A e_A + \zeta_D e_D \end{cases} \quad (5)$$

其中， $\lambda_p, \lambda_A, \xi_p, \xi_D, \zeta_A, \zeta_D$ 分别为系数。当情感发生变化时， e_p 、 e_A 和 e_D 的值改变，相应地改变 E_s 、 A_s 和 \bar{v}_s 的值即可相应地改变运动轨迹的形状和运动的速度，从而实现不同情感的表达。

设初始状态的情感为 $e_0 = [e_{p0} \ e_{A0} \ e_{D0}]$ ，目标状态的情感为 $e_1 = [e_{p1} \ e_{A1} \ e_{D1}]$ 由(5)式可得：

$$\begin{cases} \Delta A_s = \lambda_p (e_{p1} - e_{p0}) + \lambda_A (e_{A1} - e_{A0}) \\ \Delta E_s = \xi_p (e_{p1} - e_{p0}) + \xi_D (e_{D1} - e_{D0}) \\ \Delta \bar{v}_s = \zeta_A (e_{A1} - e_{A0}) + \zeta_D (e_{D1} - e_{D0}) \end{cases}$$

分别带入(2)、(3)、(4)式，即可得到目标情感状态的轨迹链参数：

$$\begin{aligned} \|a_{k1}\|_2 &= \frac{\lambda_p e_{p1} + \lambda_A e_{A1}}{\lambda_p e_{p0} + \lambda_A e_{A0}} \|a_{k0}\|_2 \\ \|b_{k1}\|_2 &= \frac{\lambda_p e_{p1} + \lambda_A e_{A1}}{\lambda_p e_{p0} + \lambda_A e_{A0}} \|b_{k0}\|_2 \\ N_1 &= \frac{\xi_p e_{p1} + \xi_D e_{D1}}{\xi_p e_{p0} + \xi_D e_{D0}} N_0 \\ \omega_1 &= \frac{\zeta_A e_{A1} + \zeta_D e_{D1}}{\zeta_A e_{A0} + \zeta_D e_{D0}} \cdot \frac{\sqrt{\|a_{k0}\|_2^2 + \|b_{k0}\|_2^2}}{\sqrt{\|a_{k1}\|_2^2 + \|b_{k1}\|_2^2}} \omega_0 \end{aligned}$$

4. 实验及效果分析

拟通过仿真实验，及在空中机器人平台上进行不同情感表达的实验，验证机器人在不同情感下，自动改变其运动轨迹链，考察轨迹链参数，分析轨迹链与当前情感之间的对应关系。

4.1. 实验环境

实验平台为基于四旋翼飞机的情感表达系统，如图 2 所示。

首先给出机器人情感倾向和轨迹链的初始值，假设机器人初始状态的情感倾向为平静，通过改变 e_p 、 e_A 和 e_D 的值，使机器人处于不同的情感状态，计算平静 - 快乐 - 愤怒 - 悲伤 - 快乐状态下运动参数的



Figure 2. The emotion expressing aerial robot platform: (a) Aerial robot; (b) Ground station
图 2. 情感表达空中机器人平台: (a) 空中机器人; (b) 地面监控程序界面

改变，生成新的运动轨迹链，观察运动轨迹链随情感的变化。

4.2. 实验结果及分析

表 6 中列出了平静 - 快乐 - 愤怒 - 悲伤 - 快乐状态转换过程中各参数的变化情况。 e_p 、 e_A 和 e_D 分别为各情感状态在 PAD 空间中的值。根据基于 LMA 的情感表达模型，可以得到运动轨迹链的参数 $\|a_0\|_2$ 、 $\|a_k\|_2$ 、 $\|b_k\|_2$ 、 N 和 ω ，以及轨迹链的空间系数 A_s 、能量系数 E_s 和平均速度 \bar{v}_s 。

以平静到快乐的情感变化为例，平静状态下 A_s 值适中， E_s 较小， \bar{v}_s 较小。图 3 中虚线为平静状态的轨迹链，其形状平滑，幅度较小，速度较低。

进入快乐状态后 e_p 和 e_D 不变， e_A 增大。 e_A 的增大使得 $\|a_0\|_2$ 、 $\|a_k\|_2$ 、 $\|b_k\|_2$ 增大， A_s 增大。同时使得 ω 增大，运动周期缩短，且由于 A_s 的增大，轨迹长度增长， \bar{v}_s 显著增加。而由于 e_p 和 e_D 不变， N 值保持不变。图 3 中实线为快乐状态的轨迹链，其形状平滑，幅度大，速度快，符合快乐情感的运动特征。

全部状态转换过程参数取值如表 6 中所示，从表中可以看出，当情感发生变化时，轨迹链参数的变化趋势与轨迹链 - 情感标准集中的轨迹链特征一致。

特别地，在相互对立的情感状态之间转换会造成 e_p 、 e_A 和 e_D 同时发生改变，图 4 表示了悲伤到快乐状态变化时轨迹链的变化情况，从中可以看出，进入快乐状态后，运动轨迹幅度增大、形状较平滑、速度加快，仍然符合轨迹链 - 情感标准集中快乐情感的轨迹链特征。表 6 中的数据也证明了这一点。

需要指出，运动轨迹链的参数与情感倾向并不是一一对应的。本模型描述的是当情感发生改变时，运

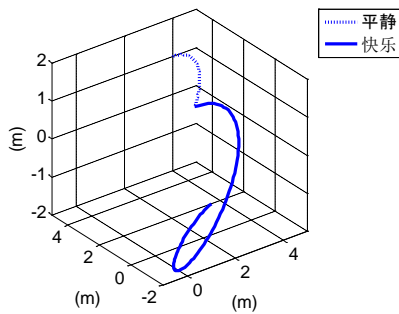


Figure 3. The trajectory changes from calm to happy state
图 3. 平静 - 快乐状态转换下的轨迹链变化

Table 6. The value of the parameters in 4 emotional state
表 6. 四种情感状态下各参数取值

参数	情感				
	平静	快乐	愤怒	悲伤	快乐
e_r	1	1	-1	-0.5	0.5
e_A	-1	1	1	-1	0.5
e_D	1	1	1	-0.5	0.5
$\ a_k\ _2$	3.70	5.92	2.37	1.78	3.46
$\ b_k\ _2$	1.73	2.77	1.11	0.83	1.62
A_i (m)	4.08	6.54	2.62	1.96	3.82
N	2	2	4	2	4
E_s	2	2	4	2	3
ω (rad/s)	1	3	3	2	4.5
\bar{v}_i (m/s)	4.15	19.88	11.40	3.98	24.93

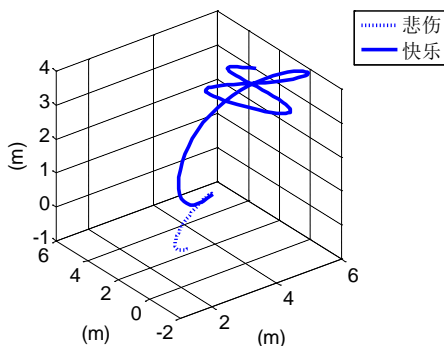


Figure 4. The trajectory changes from sad to happy state
图 4. 悲伤 - 快乐状态转换下的轨迹链变化

动参数变化的方式，而非给出一个绝对的轨迹链。观察轨迹的形状，在快乐和平静这两种情感间转换时，

轨迹形状变化不明显，而是反映在运动速度和幅度上。

通过四旋翼空中机器人进行了配合音乐情感的舞蹈表演。根据音乐内容，确定各乐段情感主题，并使用上述基于 LMA 的空中机器人情感表达方法，由空中机器人自主完成各乐段的动作设计，实际舞蹈表演中能较好地展示乐曲的情感主题。

5. 结论

针对空中机器人运动的情感表达问题，提出一种基于 LMA 的情感表达轨迹链自动设计方法。建立了轨迹链参数与情感表达的关系模型，设计了轨迹链 - 情感标准集，并提出了一种基于 LMA 理论的机器人运动轨迹链情感表达模型。该方法为机器人完全自主地通过运动轨迹链表达情感奠定基础。实验验证了该方法的有效性。情感变化过程中不同轨迹的平滑衔接问题，还有待进一步研究。

参考文献 (References)

- [1] Tremoulet, P.D. and Feldman, J. (2000) Perception of animacy from the motion of a single object. *Perception*, **29**, 943-951.
- [2] Burger, B., et al. (2010) Communication of musical expression by means of mobile robot gestures. *Journal on Multimodal User Interfaces*, **3**, 109-118.
- [3] Camurri, A., Lagerlof, I. and Volpe, G. (2003) Recognizing emotion from dance movement: Comparison of spectator recognition and automated techniques. *International Journal of Human-Computer Studies*, **59**, 213-225.
- [4] Sharma, M., Hildebrandt, D., Newman, G., Young, J.E. and Eskicioglu, R. (2013) Communicating affect via flight path Exploring use of the Laban Effort System for designing affective locomotion paths. *8th ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction (HRI)*, Tokyo, 3-6 March 2013, 293-300.
- [5] Masuda, M. and Kato, S. (2010) Motion rendering system for emotion expression of human form robots based on Laban movement analysis. *IEEE RO-MAN*, Viareggio, 13-15 September 2010, 324-329.
- [6] Schöllig, A., Hehn, M., Lupashin, S. and D'Andrea, R. (2011) Feasibility of motion primitives for choreographed quadcopter flight. *2011 American Control Conference on O'Farrell Street*, San Francisco, 29 June-1 July 2011, 3843-3849.
- [7] Ekman, P. (1982) *Emotion in the human face*. University of Cambridge Press, Cambridge.
- [8] Mehrabian, A. (1996) Pleasure-arousal-dominance: A general framework for Describing and measure individual differences in temperament. *Current Psychology: Developmental, Learning, Personality, Social*, **4**, 261-292.
- [9] 胡云斗, 胡丹丹, 高庆吉 (2010) 一种基于任务的机器人情感决策模型的构建. *机器人*, **4**, 464-469, 477.