

一种复杂系统多源信息分析建模新方法

张玉存, 邢婷婷

(燕山大学电气工程学院, 河北秦皇岛 066004)

摘要: 根据多源信息的耦合和系统状态属性, 将拓扑反变理论应用到多源信息分析中, 构建复杂系统多源信息的空间表述, 组成拓扑空间, 推导拓扑反变关系, 进而实现复杂系统多源信息的特征评判和动态监测, 为复杂系统多源信息表示和运行状态智能监测与控制奠定基础. 将该方法应用到机械手加工系统中, 对机械手动态准确性进行监测, 建立精度评价标准, 验证提出的理论方法正确性.

关键词: 复杂系统; 多源信息; 拓扑反变; 机械手

中图分类号: TP18 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2009) 11-2422-05

A New Method on Analyzing Modeling of Multi-Source Information in Complicated System

ZHANG Yu-cun, XING Ting-ting

(Institute of Electrical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004, China)

Abstract: According to multi-source information coupling and the conditional quality of the system, topology contravariant theory is applied to the complicated system of multi-source information analysis, topology contravariant relations were designed and the result can be expected to be of describing complicated multi-source information, evaluating character, dynamic analysis. The new method was laid the foundation of expressing complicated system of multi-source information and intellectual monitoring and control in running. Using the technique to the machining manipulator system, dynamic state of manipulator was monitored accurately. Precision was founded and the theory was tested.

Key words: complicated system; multi-source information; topology contravariant; manipulator

1 引言

对信号、系统的状态特征或不确定性进行描述的方法主要有基于模糊处理^[1]、符号表示^[2]、信息熵原理^[3]等, 其中用于定量描述信息不确定程度和复杂性程度的信息熵方法, 由于其可以与不同信号处理手段有机结合构建多种信号变换空间(如时域、频域、时频域)的信息测度模型, 因而对多源信息特征提取及融合问题更具优势, 并得到了广泛关注^[4,5]. 其后 S M Pincus^[6,7] 衡量时间序列复杂性的角度提出近似熵 (Approximate Entropy) 的概念, 并应用于生理性时间序列的复杂性分析中; D Dumitrescu^[8]、Changman Son^[9]、Jiu Lun Fan^[10] 提出并扩展模糊熵测度理论等.

本文将拓扑反变理论应用到多源信息分析中^[11,12], 提出用于复杂系统多源信息特征提取及综合表示的信息空间变换方法, 并构建拓扑反变关系, 实现复杂系统运行状态的智能监测与评价.

2 复杂系统拓扑空间建立

假定复杂系统原始信息空间为 X , 根据状态特征的不同属性和参量耦合等特点, 将复杂系统获取的参量特征信息分为 N 类, 每类特征中有 $n^i (i=1, 2, \dots, N)$ 子特征. 假定各类特征间是不相关的, 将特征全体表示为 $X = (X^1, X^2, \dots, X^N)$, X^i 为复杂系统状态随时间变化的相应时刻原始信息的第 i 类特征子空间. 由于各类特征间不相关, X^i 之间线性无关, 则一定存在一组子基 $\{a_i\} (i=1, 2, \dots, N)$, 使得 $X = \sum_{i=1}^N a_i X^i$. 每类子特征 X^i , 有

$$X^i = [x_1^i, x_2^i, \dots, x_{n^i}^i], i=1, 2, \dots, N \quad (1)$$

其中, $x_1^i, x_2^i, \dots, x_{n^i}^i$ 为特征子空间 X^i 的子特征. 根据上述, 复杂系统空间 (X, X) 可以划分为多个信息子空间 X^1, X^2, \dots, X^N . (X^1, X^2, \dots, X^N) 是 X 的一个子集族, 且满足:

$$(1) X, \emptyset \neq I X;$$

(2) 若 $X^i, X^j \perp X$, 且 X^i, X^j 为两类不同特征, 则 $X^i \cap X^j = \emptyset$;

(3) $X^i \subset X, n^i$ 为子特征数目, 则: $G_{X^i \perp X} X^i \perp X, (i = 1, 2, \dots, N; j = 1, 2, \dots, n^i)$.

由拓扑空间定义, (X, X) 构成拓扑空间. 又 fr chet 空间定义, 知 X 为 fr chet 空间, 复杂系统原始信息空间 X 为赋范线性空间.

3 拓扑反变函数的建立

拓扑反变的含义是把一类未知的信号空间通过拓扑反变算子映射到已知的信号空间, 通过研究已知信号空间的性质达到研究未知信号空间性质的目的.

根据拓扑学的可数基定义, X 的每个子空间 X^i 都是 (X, X) 中的一个开集, 且 $G_{X^i \perp X} X = X$, 则 X 是 X 的一个覆盖, 又因为 X^i 是可数族, 则 X 是 X 的一个可数基. 则这个拓扑空间 (X, X) 满足第二可数性公理, 满足第二可数性公理的空间都是可分空间. 可分性是拓扑不变性, 原始信息空间 (X, X) 经过拓扑反变得到的空间, 称为目标信息空间, 表示为 (Y, Y) , 仍为可分性空间, 并且目标信息空间与原始信息空间具有相同的性质和结构, 则 Y 为:

$$Y = \bigcup_{i=1}^N b_i Y^i \quad (2)$$

其中, $Y^i (i = 1, 2, \dots, N)$ 为目标信息子空间. 各子空间 X^i 通过拓扑反变子函数 U 解耦映射到子空间 Y^i (若解耦映射变换后的维数小于 N , 必须先将基 Y^i 扩展维数至 N , 在不引起混淆情况下, 扩展维数后仍记为 Y^i).

设 $\{h_{\lambda}^i\} (i = 1, 2, \dots, N; \lambda = 1, 2, \dots, n^i)$ 是 Y^i 的 Hamel 基, 对于任一的 $Y^i \in Y$ 可以用 $\{y_{\lambda}^i\}$ 中有限个元素的线性组合来唯一表示: $Y^i = \bigcup_{\lambda=1}^{n^i} h_{\lambda}^i$. 复杂系统的目标信息空间 Y 表示为:

$$Y = \left\{ \bigcup_{i=1}^N b_i Y^i \mid Y^i = \bigcup_{\lambda=1}^{n^i} h_{\lambda}^i \right\} \quad (3)$$

拓扑反变子函数: $U: X^i \rightarrow Y^i$, 即:

$$U: (x_1^i, x_2^i, \dots, x_{n^i}^i) \rightarrow \bigcup_{\lambda=1}^{n^i} h_{\lambda}^i \quad (4)$$

令拓扑反变函数:

$$U = \bigcup_{i=1}^N U \quad (5)$$

为使得目标信息空间稳定, 建立拟线性映射 f , 由新闭图像定理可知 f 是连续映射. 则空间映射 $F: X \rightarrow Y$ 为:

$$F = f \circ U \quad (6)$$

X, Y 是两个拓扑空间, 由映射 F 知, Y 中每一个开集 Y^i 的原象 $F^{-1}(Y^i) = X^i$ 是 X 中的一个开集, 则由定义

可知, F 是从 X 到 Y 的一个连续映射. 由上述分析知, 拓扑空间 (Y, Y) 亦为完备的、分离的准范空间, 即 fr chet 空间.

至此, 建立了复杂系统的原始信息空间和目标信息空间之间的映射关系. 通过拓扑反变映射实现了复杂系统多源特征信息的解耦变换, 为目标信息空间的信息特征提取及系统状态空间智能监测奠定了基础.

4 动态监测以及应用

由建立的空间关系可知, 原始信息空间 X 和目标信息空间 Y 均是连续的动态空间, 映射 F 亦连续, 因此可以对运动空间进行动态监测, 并应用于对机械手的运动状态监测.

4.1 动态监测函数建立

定义 对于任给 $u \in C^m(\mathbb{R})$, 规定范数

$$\|u\|_{m,p} = \left(\int_{|a| \leq m} \|s^a u\|_p^p \right)^{1/p},$$

$$S = \{u \in C^m(\mathbb{R}) : \|u\|_{m,p} < \infty\}$$

是一个赋范空间, 则其完备化是一个 Banach 空间, 称之为 Sobolev 空间.

设运动空间由位移、速度、加速度等组成, 分别用 $u, u', u'', \dots, u^{(m)}$ 表示, 其中 m 表示 m 阶导数, 规定范数:

$$\begin{aligned} \|u\|_{m,p} &= \left(\int_{|a| \leq m} \|s^a u\|_p^p \right)^{1/p} \\ &= \left(\int_0^T |u|^2 dt + \int_0^T |u'|^2 dt + \int_0^T |u''|^2 dt + \dots + \int_0^T |u^{(m)}|^2 dt \right)^{1/2} \end{aligned} \quad (7)$$

则 $\|u\|$ 范数可以同时度量 $m+1$ 个变量.

4.2 在机械手运动中的应用

二连杆机械手动力学模型为:

$$T = J(q) \ddot{q} + C(q, \dot{q}) + G(q) + F(\dot{q}) \quad (8)$$

其中, $T = (S_1, S_2)^T$ 是机械臂上的驱动力矩矢量; $q = (H_1, H_2)^T$ 是各个关节的关节角矢量; J 是惯性矩阵; C 是离心力矩和哥氏力矩向量; G 是代表重力矩; F 代表摩擦力矩.

机械手第 $i (i \in N)$ 个手指抓取物件时稳定度为: $s_i = \frac{1}{\sqrt{f_{i1}^2 + f_{i2}^2}}$, 其中 L 为手指与物体接触处的摩擦系数, f_{i1}, f_{i2}, f_{i3} 为手指 i 对物体施加的指端接触力 (f_{i3} 是沿物体上接触点的法线方向), 且 $\sqrt{f_{i1}^2 + f_{i2}^2} \in [f_{i3}, f_{i3} \setminus 0]$. 欲保持稳定的接触关系, 必须保证 $s_i \in [1, \dots]$. 多指手抓取的稳定性决定于各个手指的接触稳定度. 用 DSG (Degree of the Stability of Grasping) 定义抓取物体的稳定性, 即:

$$DSG = \sum_{i=1}^n C_i s_i \tag{9}$$

其中 $C_i \in [0, 1]$ 是由各接触点位置、物体姿态以及接触力的特点确定的加权因子。

手指数为 $n \setminus 3$ 的机械手, 在满足稳定性条件下, 抓取物件后的任务可分为 m 个阶段, 设第 j 个阶段物体实际运动的位移、速度和加速度分别为 s_j, v_j 和 a_j , 令 $Q_j = \{s_j, v_j, a_j\}$, 整个任务可表示为:

$$Q = \left\{ \sum_{j=1}^m Q_j \mid Q_j = \{s_j, v_j, a_j\} \right\} \tag{10}$$

由式(8)~(10), 机械手原始信息空间为:

$$X = \begin{bmatrix} T & 0 & 0 \\ 0 & DSG & 0 \\ 0 & 0 & Q \end{bmatrix} \tag{11}$$

机械手目标信息空间为:

$$Y = f(X) = f. U(X) = f \begin{bmatrix} U_1 T & 0 & 0 \\ 0 & U_2 DSG & 0 \\ 0 & 0 & U_3 Q \end{bmatrix} \tag{12}$$

其中, U_1, U_2, U_3 分别为 3 个子空间的变换, 将复杂系统的原始信息空间解耦. 为使控制稳定, 则令拟线性控制矩阵 f 为:

$$f = [f_1 \ f_2 \ f_3] = [L_1 \ L_2 \ L_3] \tag{13}$$

则式(12)可进一步表示为:

$$\begin{aligned} Y &= f \begin{bmatrix} U_1 T & 0 & 0 \\ 0 & U_2 DSG & 0 \\ 0 & 0 & U_3 Q \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} L_1 \\ L_2 \\ L_3 \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} U_1 T & 0 & 0 \\ 0 & U_2 DSG & 0 \\ 0 & 0 & U_3 Q \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} L_1 \cdot U_1 T \\ L_2 \cdot U_2 DSG \\ L_3 \cdot U_3 Q \end{bmatrix}^T \end{aligned} \tag{14}$$

拓扑反变映射过程 U 如下:

由机械手动力方程可知, 其动力方程是非线性的, 需要对机械手动力学模型线性化. 由二连杆机械手动力学模型可知, 二连杆机械手惯性矩阵可逆:

$$J^{(-1)}(q) = B(q) = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} \\ b_{21} & b_{22} \end{bmatrix} \tag{15}$$

$$\begin{aligned} 5(q, \dot{q}) &= \begin{vmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \end{vmatrix} \\ &= -B(q)[C(q, \dot{q}) + G(q) + F(\dot{q})] \end{aligned} \tag{16}$$

由式(8)、(15)和(16), 二连杆机械手线性化为二阶线性单输入单输出子系统:

$$\ddot{q} = 5(q, \dot{q}) + B(q)T \tag{17}$$

即:

$$\begin{cases} \ddot{q}_1 = \dot{c}_1 + b_{11}S_1 + b_{12}S_2 \\ \ddot{q}_2 = \dot{c}_2 + b_{21}S_1 + b_{22}S_2 \end{cases} \tag{18}$$

令:

$$\begin{cases} b_{10} = \min(b_{11}), \quad b_{20} = \min(b_{22}) \\ W_1 = \dot{c}_1 + (b_{11} - b_{10})S_1 + b_{12}S_2 \\ W_2 = \dot{c}_2 + b_{21}S_1 + (b_{22} - b_{20})S_2 \end{cases} \tag{19}$$

则有

$$\begin{cases} \ddot{q}_1 = b_{10}S_1 + W_1 \\ \ddot{q}_2 = b_{20}S_2 + W_2 \end{cases} \tag{20}$$

其中, b_{10}, b_{20} 反映了关节驱动力矩对于关节角加速的比例作用; W_1, W_2 反映了系统广义扰动. 以 W_1, W_2 作为系统的扩展状态, 并引入状态反馈:

$$\begin{cases} S_1 = v_1 / b_{10} - W_1 / b_{10} \\ S_2 = v_2 / b_{20} - W_2 / b_{20} \end{cases} \tag{21}$$

则式(18)可线性化为 2 个分别以 v_1, v_2 为输入的二阶线性系统:

$$\begin{cases} \ddot{q}_1 = v_1 \\ \ddot{q}_2 = v_2 \end{cases} \tag{22}$$

令 $\mathbb{X} = [\mathbb{X}_1 \ \mathbb{X}_2]^T = [v_1 \ v_2]^T$. 由式(15)~(22)得到 U_1 . DSG 是单一量不存在耦合性则 $U_2 = I$. 机械手抓取物体后各个运动阶段 Q_j 之间关系可知, $U_3 = I$.

根据上述, 式(14)可进一步表示为:

$$\begin{aligned} Y &= f. U(X) = f \begin{bmatrix} U_1 T & 0 & 0 \\ 0 & U_2 DSG & 0 \\ 0 & 0 & U_3 Q \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} L_1 \\ L_2 \\ L_3 \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} U_1 T & 0 & 0 \\ 0 & U_2 DSG & 0 \\ 0 & 0 & U_3 Q \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} L_1 \mathbb{X} \\ L_2 DSG \\ L_3 IQ \end{bmatrix}^T \end{aligned} \tag{23}$$

4.1.3 目标信息空间状态监测

由 Sobolev 空间的动态监测方程(7)可知, 对目标空间的关节转角 q 、关节角速度 \dot{q} 及关节角加速度 \ddot{q} 和机械手抓取物体后运动 m 个运动阶段的位移 s_j 、速度 v_j 和加速度 a_j :

$$\begin{aligned} \|u\| &= \left[\int_0^T |q|^2 dt + \int_0^T |\dot{q}|^2 dt + \int_0^T |\ddot{q}|^2 dt \right]^{1/2} \\ &+ \sum_{j=1}^m \left[\int_0^{N_j} |s_j|^2 dt + \int_0^{N_j} |v_j|^2 dt + \int_0^{N_j} |a_j|^2 dt \right]^{1/2} \end{aligned} \tag{24}$$

其中, $(N_j, N_{j+1}) \in [0, T]$, 且 $\sum N_j = T$.

因此, 实现对目标空间机械手及抓取物件后运动进行的动态监测.

5 动态监测应用结果

将建立的理论模型应用于三手指机械手抓取直径

为20mm, 质量为 300g 的圆柱体, 抓取误差为 e 、抓取稳定度为 s 和抓取稳定后运动状况是: (1) 在 O 点将圆柱体抓取; (2) 从 O 点到 D 做水平直线加速运动, 加速度 $a_1 = 0.13\text{m/s}^2$; (3) 从 D 点到 A 点作水平直线减速运动, 加速度为 $a_2 = -0.15\text{m/s}^2$, A 点速度为零. 如图 2 所示.

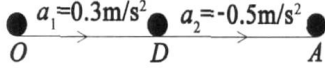


图2 机械手运动阶段图

要求位置误差矢径小于 5mm, 方向误差小于 5° . 为保证抓取圆柱体的稳定性, 在当前任务的每个阶段中 DSG \ 115, 取摩擦系数 $L = 0.13$, $s_i \ 115$, $C_i = 1/3$, 各手指的接触点在物体坐标系. 经过实际监测显示, 各参量符合要求标准的概率见表 1.

抓取物件后机械手运动实际值和理论值的速度、加速度及位移比较如图 3 所示, 虚线表示实际五次测量

表1 各个参量测试结果及机械手完成当前工作任务的准确度

测试参数 测试次数	位置误差/mm	方向误差/b	DSG
1	3.67	3.52	1.69
2	5.32	6.47	2.14
3	4.17	4.74	2.03
4	3.96	5.38	1.87
5	3.41	3.68	2.40
准确度	80%	60%	100%

值的平均值, 实线表示理论值. 其中, 图 3(a)、(b) 和 (c) 为两阶段的位移和速度曲线比较, 两曲线变化一致说明对位移和速度状态监测可行, 图 3(d) 是加速度比较, 由于在实际机械手运动中加速存在延迟, 所以是加速度线是曲线而不是理想的直线, 模型有效的完成动态监测任务.

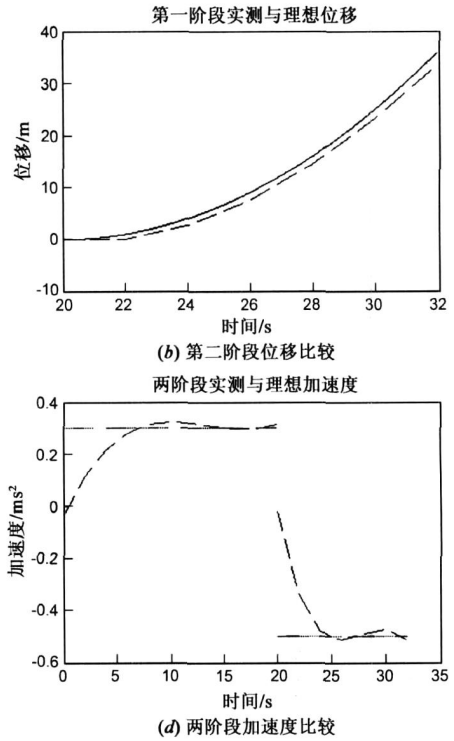
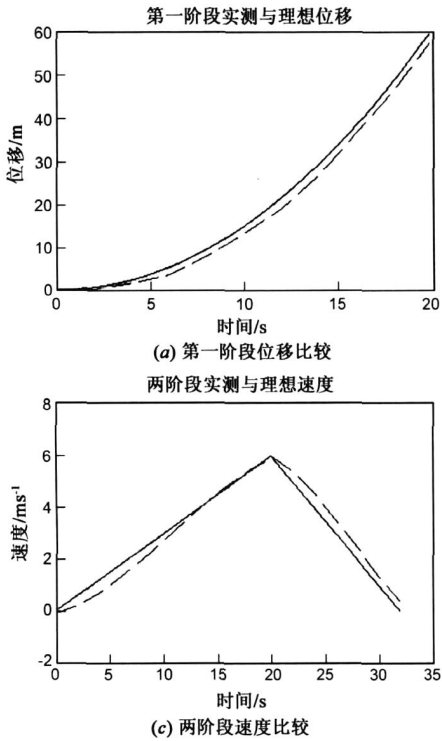


图3 机械手轨迹状态监测图

6 结论

将拓扑反变理论应用到复杂系统多源信息分析中, 构建用于复杂系统状态监测的多源信息分析理论模型, 解决多源耦合信息的综合表示、解耦变换、特征融合及动态决策的相关问题, 为复杂系统综合分析提供有效方法. 应用所研究理论, 构建多源信息分析计算模型, 建立机械手末端状态监测与抓取稳定性评价模型, 并通过实验验证理论模型有效性.

参考文献:

[1] Mauris G, Foulloy L. A fuzzy symbolic approach to formalized sensory measurement application to a comfort sensor[A]. Proceedings of the 18th IEEE Instrumentation Measurement Technology Conference[C]. IEEE Press, 2001. 1413- 1417.
 [2] Finkelstein L. Representation by symbol systems as an extension of the concept of measurement[J]. Kybernetes, 1975, 4(4): 215 - 223.
 [3] Roberts Stephen, Guilford Tim, Rezek Iead, Biro Dora. Pos2

- tional entropy during pigeon homing I: application of Bayesian latent state modeling[J]. *Journal of Theoretical Biology*, 2004, 227(1): 39- 50.
- [4] J Hagenauer, Z Dawy. Genomic analysis using methods from information theory [A]. *Proceedings of Information Theory Workshop [C]*. IEEE Press, 2004. 55- 59.
- [5] Oliver Johnson, Christophe Vignat. Some results concerning maximum R nyi entropy distributions[J]. *Annales de l'Institut Henri Poincaré*, 2007, 43(3): 339- 351.
- [6] S M Pincus. Approximate entropy as a measure of system complexity[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 1991, 88(6): 2297- 2301.
- [7] S M Pincus. A regularity statistic for medical data analysis[J]. *Journal of clinical Monitoring*, 1991, 7(4): 335- 345.
- [8] D Dumitrescu. Entropy of fuzzy dynamical systems[J]. *Fuzzy sets and systems*, 1995, 70 (1): 45- 57.
- [9] Changman Son. Optimal control planning strategies with fuzzy entropy and sensor fusion for robotic part assembly tasks[J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2002, 42 (12): 1335- 1344.
- [10] Jiu2Lun Fan, Yuan2Liang Ma. Some new fuzzy entropy formulas[J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 2002, 128(2): 277- 284.
- [11] 刘彬, 张玉存. 基于拓扑反变理论的瞬时频率检测方法 [J]. *中国机械工程*, 2006, 17(8): 785- 787.
- [12] 张玉存, 刘彬. 一种检测动力系统振动频率的新方法 [J]. *计量学报*, 2006, 27(4): 339- 342.

作者简介:



张玉存 男, 1969年9月出生于河北秦皇岛. 博士、副教授、硕士生导师. 1994年毕业于浙江理工大学自动化专业, 2003年获得燕山大学测量技术及仪器专业硕士学位, 2006年9月获得燕山大学电路与系统专业博士学位. 主要从事信号处理与识别、测试技术、故障诊断等方面研究工作. E-mail: qunli@ysu.edu.cn



邢婷婷 女, 1984年出生于河北邢台. 2007年毕业于燕山大学电气工程学院, 同年进入燕山大学检测技术与自动化装置系, 现为硕士研究生. 主要从事复杂系统理论、测试技术的有关研究.