

基于无线传感器网络和ICA的桥梁诊断系统

程佳¹, 支小莉¹, 大贝晴俊²

(1. 上海大学 计算机工程与科学学院, 上海 200072;

2. 早稻田大学 大学院, 情报生产系统研究科, 日本 福岡 北九州 808-0135)

摘要:为桥梁的日常维护开发了一个桥梁诊断系统。其所用的技术包括:无线传感器网络、信号处理和桥梁结构分析等技术。通过无线传感器网络收集由外力所产生的振动数据,这些外力包括:风、水流、驶过的车辆等。然后用独立成分分析(ICA)和频谱分析方法来分析所收集的数据以提取桥梁的特征频率。这个系统可以识别桥梁的老化和腐蚀等现象。因此,这个诊断系统可以用来评估桥梁的健康状况,然后根据实际情况考虑进行一个全面的修理和加固。已经用此诊断系统在日本福岡北九州市的小仓青嵐桥进行了现场实验,成功地提取了该桥的桥墩的特征频率。

关键词:无线传感器网络;独立成分分析;桥梁诊断系统

中图分类号:TP393

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2009)06-0001-04

A Bridge Diagnosis System Based on Wireless Sensor Network and Independent Component Analysis

CHENG Jia¹, ZHI Xiao-li¹, OGAI Harutoshi²

(1. School of Computer Engineering and Science, Shanghai University, Shanghai 200072, China;

2. Graduate School of Information, Production and Systems, Waseda University,
Kitakyushu-shi, Fukuoka, 808-0135, Japan)

Abstract: The aim of this paper is to develop a bridge diagnosis system for daily bridge maintenance. The system includes the technology of wireless sensor network, signal processing, and structure analysis of a bridge. Collect the vibration data caused by external force such as wind pressure, water flow, running vehicles and etc. through wireless sensor network and then use independent component analysis (ICA) and spectral analysis to analyze the data for extracting character frequency. The diagnosis technology is developed to understand the phenomena like deterioration and corrosion of a bridge through the measurement result. So the diagnosis system can evaluate the health condition of a bridge and conduct a comprehensive deliberation on repair and reinforcement work. Applied this diagnosis system to field experiments at Kokura, Kitakyushu city in Japan and successfully extracted the character frequency of the bridge pier.

Key words: wireless sensor network; independent component analysis; bridge diagnosis system

0 引言

在日本有许多桥梁。一旦一座桥的建造时间超过了50年,就会有老化、开裂、腐蚀等许多问题悄悄出现。如果没有定期的检测和诊断,一些意想不到的灾难事故如桥梁垮塌、断裂就会发生。近来,在日本服务时间超过50年而又继续使用的桥于2020至2030年

会迅速增加。研究开发这个系统的意图在于保护人们的生活和生存环境,减少政府额外的经济花销。

在过去,桥梁的检测方法是使用锤击、肉眼、压力波等对桥梁健康状况进行检测^[1]。这些方法有的是破坏性检测;有的不能发现结构内部的问题;有的设备仪器操作复杂,而且这些检测通常是每五年进行一次,因此这些方法不能对桥梁进行日常的检测和维护,而且效率不高^[2]。因此要开发一个日常的桥梁诊断系统对桥梁进行安全维护。由此产生了这个桥梁健康诊断系统。这个系统所用的技术包括:无线传感器网络,信号处理和桥梁结构分析等技术。

通过无线传感器网络收集由外力所产生的振动数据,这些外力包括:风、水流、驶过的车辆等。然后用独立成分分析(ICA)和频谱分析分析所收集的数据来提

收稿日期:2008-10-21;修回日期:2009-02-17

基金项目:上海市教委重点学科建设项目资助(J50103);日本文部科学省北九州地域新生コンソーシアム研究開発事業和知的クラスター創成事業第2期项目基金资助

作者简介:程佳(1974-),男,硕士研究生,研究方向为嵌入式和信号处理;支小莉,博士,副教授,研究方向为嵌入式和网络计算;大贝晴俊,博士,教授,研究方向为过程控制、过程建模、过程分析。

取桥梁特征频率。该诊断技术可以识别桥梁的老化和腐蚀现象(可以参照后面的模拟实验部分)^[3]。因此,这个诊断系统可以用来对桥梁的健康状况进行评估并由此作出一个全面的桥梁修理和加固方案。

1 桥梁诊断系统

桥梁诊断系统是一个智能系统能够基于被测数据实时评估桥梁的状况。系统的结构如图 1 所示。

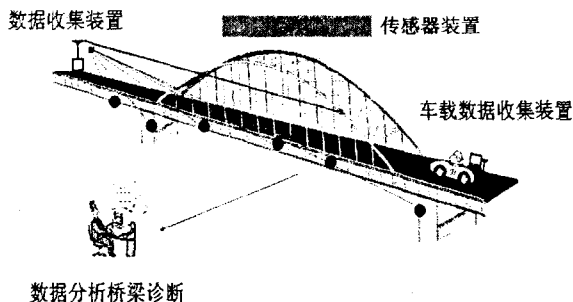


图 1 桥梁健康诊断系统

桥梁的诊断步骤如下:用传感器测定桥梁的振动,用无线技术传输被测定的数据。数据被存储在数据收集装置中或者用车载数据收集装置收集数据。最后,分析这些数据来诊断桥梁的健康状况。

这个桥梁诊断系统使用无线传感器技术、信号处理技术、结构分析技术,通过独立成分分析(ICA)和频谱分析分析所收集的数据来提取桥梁的特征频率。传感器测定由于外力如风压、水流压力、行驶车辆对桥产生的微小位移和振动来实时测定整个桥的振动信息。而桥梁的振动情况又是和桥梁的健康程度如:是否有裂缝、腐蚀、老化,有直接的关系。因此利用传感器测定的振动数据可以计算出桥梁部件振动所产生的位移,通过独立成分分析法(ICA)和频谱分析来获得各个部分的特征频率,由此对桥梁的健康程度进行评估,基于此评估可以对桥梁执行一个全面、精心的修理和加固工作。图 1 描述了使用 ICA 和无线传感网络的桥梁诊断系统的一个大致的情况,利用此系统可以了解公共设施的使用状况,对其在整体上进行资产评估,用最小的投资获得最大的经济效益。

2 无线传感器网络

无线传感器网络是一个空间分布的自组织的网络设备,它利用传感器来协同监控不同地点的物理和环境状况如:温度、声音、振动、压力、污染等^[4]。

在桥面和桥墩上放置一些传感器,收集由于外力对桥产生的振动数据,然后用 ICA 和频谱分析对数据进行分析。

所使用的无线传感器模块是由早稻田大学 IPS 学院的山内实验室和日本北九州 Logical Product Company 合作开发的 WHM-2,英文全名是 Waseda Hibikino Module 2nd version。其工作频段是 2.4Gh,内部的加速度计是日本 Kionix 公司的 KXM52-1050。WHM-2 使用一个 Rensesas 公司生产的低功耗的微控制器 H8,此微控制器有模数输入输出端口。该传感器模块可以用 RS232 数据线 with 计算机进行连接,图 2 是 WHM-2,所使用的操作系统是 Smart&Light 操作系统,该操作系统是一个实时操作系统,内有微 TCP/IP 协议,由 Rensesas 北日本半导体有限公司生产。该操作系统的主要功能是:任务管理,通讯同步和时间管理和设置等。此操作系统仅支持 H8(Rensesas 北日本半导体有限公司生产)系列的微处理器。

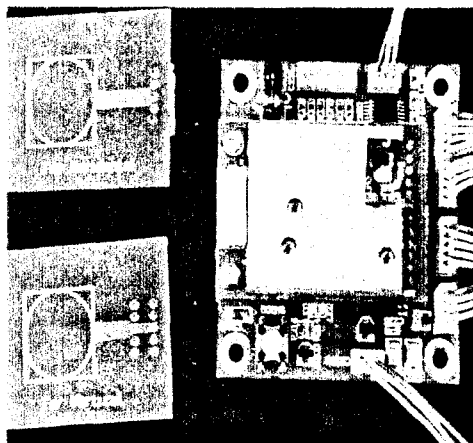


图 2 无线传感器模块(WHM-2)

3 诊断方法

3.1 独立成分分析(ICA)

独立成分分析是一个信号处理技术,目的是用统计成分独立的线性变量的组合来表示一系列随机变量^[5,6]。

假设观测到在时间点 t 的 n 个独立成分 $s(t) = [s_1(t), \dots, s_n(t)]^T$ 且 $E\{s(t)\} = 0$ 的 n 个线性混合 $x(t) = [x_1(t), \dots, x_n(t)]^T$:

$$x(t) = As(t) \quad (1)$$

在这里 A 是一个 $n \times k$ 阶的满秩标量矩阵,ICA 信号分离的过程如图 3 所示。

$$y = A^{-1}x = Wx \approx s \quad (2)$$

的各分量尽可能统计独立。可以认为恢复信号 y 就是要找的源信号^[7]。

ICA 模型的关键是估计非高斯性。当采用负熵作为非高斯的测度时,有:

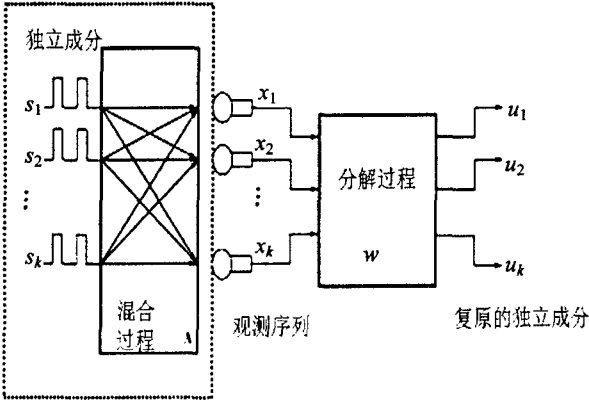


图3 盲信号源分离和信号重构的工具ICA

$$J(y) = H(y_{\text{gauss}}) - H(y) \quad (3)$$

$$\text{其中: } H(y) = - \int f(y) \log f(y) dy \quad (4)$$

式中, y_{gauss} 表示与 y 同方差的高斯变量, $f(y)$ 为变量 y 的概率密度函数。由于变量的概率分布未知, 必须对上述负熵作估计。可采用基于最大熵理论的负熵估计, 得到如下的近似公式:

$$JG(W) = [E\{G(y)\} - E\{G(y_{\text{gauss}})\}]^2 \quad (5)$$

式中, $E(\cdot)$ 为求期望值, 可由大量向量的采样点计算出来, G 为非线性函数, 可采用多种表达形式, 如: $G(u) = u^4/4$ 。

3.2 FastICA 算法

FastICA 算法, 又称定点算法, 分为两个步骤^[8]:

(1) 观测向量 x 的白化处理。它可去除各观测信号间的相关性, 因而简化了后续独立分量提取算法。设白化后的信号为 X , 则 x 满足 $E(XX^T) = I$, 其中 I 为单位矩阵。

(2) 独立成分提取。它的基本原理为通过随机梯度法调节权值阵 W 来优化式(5)的目标函数。进一步可以得到权值迭代公式:

$$\begin{aligned} W^+ &= E\{XG'(W^T X)\} - E\{G'(W^T X)\} W \\ W^* &= W + \parallel W^+ - W \parallel \end{aligned} \quad (6)$$

由式(6)计算出 W , 然后通过式(2)便得到源信号 s 的估计值 y 。

FastICA 算法由于收敛速度快, 是处理实际问题的较常用的算法, 因此使用该算法来进行多传感器的数据融合^[9]。

4 使用 ICA 的模拟诊断

模拟诊断的方法如下所述: 通过驶过的汽车将外力施加于桥梁模型。振动信号被传感器测定。由于传感器测定的信号是混合信号含有桥梁的振动信号和一些噪声信号, 所以用 ICA 将桥梁的振动信号成分抽出, 然后利用频谱分析计算出桥的特征频率。表 1 是

分析结果。

表 1 分析结果

	桥梁状况	最大位移(mm)	特征频率(Hz)
行驶车辆(时速 40km/h)	健康	0.0006289	0.2083
	老化	0.0007244	0.1833
	腐蚀	0.0006946	0.1917

可以从上表发现, 桥梁的状况不同其特征频率会发生相应变化, 这就给桥梁健康状况的评估提供了手段^[10]。

5 诊断系统实地实验

实地实验于 2007 年 11 月至 2008 年 5 月在日本进行。实验对象是日本福岡北九州市小仓区的西岚桥。实验收集汽车驶过时桥墩的振动数据, 尝试从干扰信号中提取特征频率。对于汽车驶过时桥墩的振动测定 10 次, 每次测定时间是 1 分钟, 采样频率是 200Hz。此外, 用摄像机拍下汽车的行驶状况以备参考和分析。图 4 是西岚桥的全景。

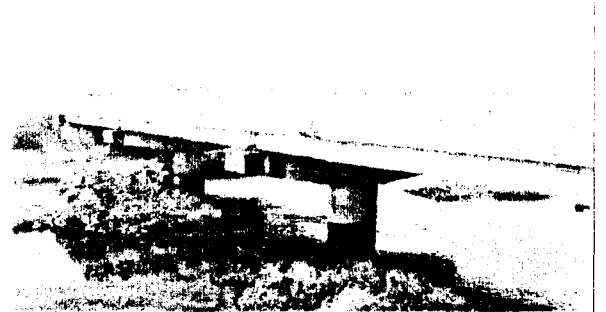


图 4 日本福岡北九州市小仓西岚桥

这个诊断系统是由无线传感器组件、中继器、数据存储系统组成。传感器种类有: 加速度传感器、温度传感器、膜盒真空传感器。用这个系统获得数据和分析数据(文中使用的是加速度传感器数据)。首先, 将加速度传感器放置在桥墩上(如图 5 所示)。

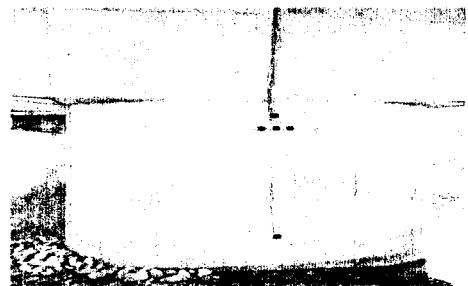
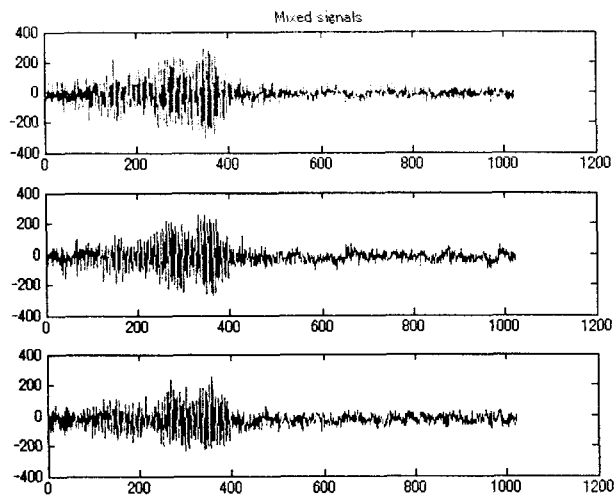


图 5 桥墩上的加速度传感器

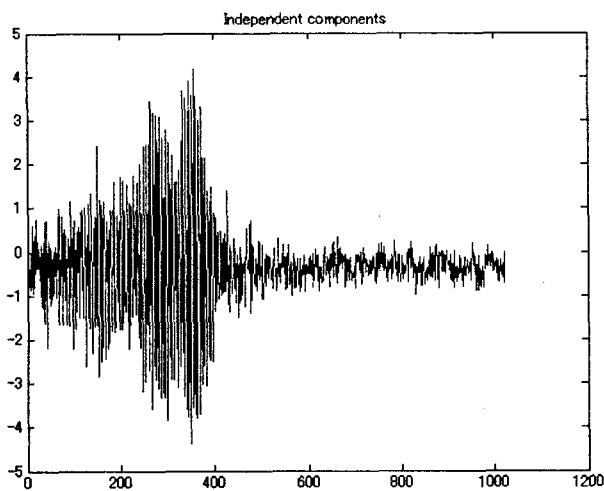
当行驶的轿车或卡车通过桥梁, 振动就会产生。传感器将这些振动数据测定下来, 并以无线方式传输到数据收集装置。然后, 挑选数据并用独立成分分析法和频谱分析法分析这些数据。

下面是实验分析的结果:

(1) 独立成分分析的结果(如图 6 所示)。



混合信号



桥梁的振动信号

图 6 独立成分分析结果

(2) 频谱分析的结果(如图 7 所示)。从频谱分析的结果,可以得到桥墩的特征频率大约是 3Hz。

因为实验的桥是一座健康程度良好的桥,如果其桥墩的特征频率发生很大改变,不是 3Hz,那么就可以认为该桥状况发生了改变,必须对其进行全面检查和维护。

6 结束语

桥梁诊断系统是由传感器组件、数据存贮装置、数据获取设备组成的智能系统。使用独立成分分析将数据中的噪声去除,留下桥墩的振动信号。使用频谱分析去除了噪声的桥墩振动信号数据来提取桥墩的特征频率。由此对桥梁的健康程度进行评估,基于此

评估可以对桥梁执行一个全面、精心的维护。

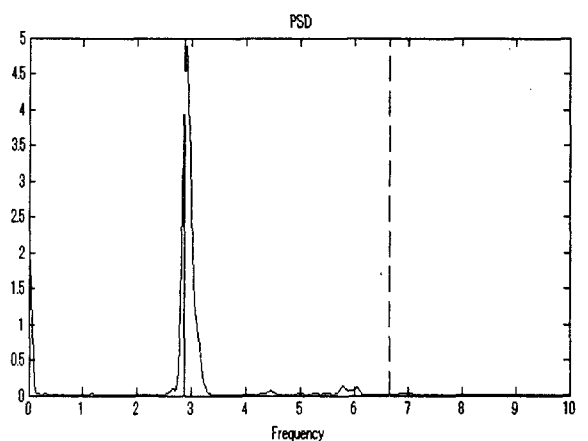


图 7 频谱分析结果

致 谢

本研究受到日本文部科学省 (Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology of Japan) 和日本地域研发国际财团项目 (Regional R&D Consortium Project in Japan) 的支持。

参考文献:

- [1] 袁万城, 崔 飞, 张启伟. 桥梁健康监测与状态评估的研究现状与发展[J]. 同济大学学报, 1999, 27(2): 184-188.
- [2] 潘志强. 浅谈桥梁健康监测技术[J]. 中国水运: 理论版, 2006, 4(3): 77-78.
- [3] Hsieh Mingyuan, Ogai H, Inujima H, et al. Development of bridge asset management technology using wireless sensor network[D]. SICE SI2005. Okayama, Japan Okayama University, 2005: 1175-1176.
- [4] The definition of Wireless Sensor Network. Wikipedia[EB/OL]. 2005. http://en.wikipedia.org/wiki/Main_Page.
- [5] 陈华富, 尧德中. 独立成分分析的梯度算法及应用[J]. 信号处理, 2001, 17(6): 506-509.
- [6] Hyvarinen A, Karhunen J, Oja E. Independent Component Analysis[D]. New York: John Wiley, 2001.
- [7] Nemoto I, Kawakatsu M. ICA: The New world of Signal Analysis[D]. Tokyo: Tokyo Denki University Press, 2005.
- [8] 杨竹青, 李 勇, 胡德文. 独立成分分析方法综述[J]. 自动化学报, 2002, 28(5): 762-772.
- [9] 张建明, 林亚平, 吴宏斌, 等. 独立成分分析的研究进展[J]. 系统仿真学报, 2006, 18(4): 992-1001.
- [10] Nakayama M, Ogai H, Cheon Jong-In, et al. Development of bridge diagnosis system by using sensor network[C]// The Thirteenth International Symposium on Artificial Life and Robotics 2008 (AROB 13th'08). B-Con Plaza, Beppu, Oita, Japan: [s.n.], 2008.