

基于多传感器融合的鸡蛋裂纹系统性识别*

刘 鹏 屠 康 潘磊庆 刘 明 詹 歌

(南京农业大学食品科技学院, 南京 210095)

【摘要】 通过图像分析、敲击振动和电子鼻 3 种传感器分别输出与鸡蛋外部常规裂纹、外部细小裂纹和内部裂纹有关的无损检测参数并进行实验,设计一组针对鸡蛋裂纹程度的支持向量机判据。用该判据并结合实验数据构建一对多的支持向量数为 4 的鸡蛋裂纹判别模型。模型性能参数(模型拟合度为 0.973 5,收敛误差在 0.000 1 以内)和验证性实验(对确定的 5 种裂纹状态判别准确率均可达 90%)表明该模型具有可信的结构和较好的判别能力。

关键词: 鸡蛋 裂纹 支持向量机 判别模型 多传感器融合

中图分类号: S126 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2010)10-0185-05

Systematic Recognition Research of Egg Crack
Based on Multi-sensor Fusion

Liu Peng Tu Kang Pan Leiqing Liu Ming Zhan Ge

(College of Food Science and Technology, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

Abstract

The egg crack detection is one of the most important parts in the non-destructive detection of egg. The non-destructive testing parameters related the egg's external conventional cracks, the external minimal cracks and internal cracks were extracted through image analysis, impact excitation frequency analysis and electronic nose pattern recognition respectively. A non-destructive testing criterion was designed according to the eggs' cracks based on experimental research. The criterion was used to build the 'one-to-many' support vector discriminated model in eggs' crack combined with experiment data. Performance parameters of the model (the model fitting degree was 0.973 5, the convergence error was less than 0.000 1) and the confirmatory test (the discriminated accuracy in the five cracks status was more than 90%) indicates that the model has credible structure and good discriminated ability.

Key words Egg, Crack, Support vector machine, Discriminate model, Multi-sensor fusion

引言

鸡蛋储运过程中最主要的问题是由于各种原因造成的裂纹。有效快速识别裂纹是鸡蛋储运研究的重点领域。传统的光照法速度慢,主观性强,无法在线检测,制约了我国鸡蛋的自动分级与产品增值的

要求。近年来国内外许多专家学者进行了裂纹的无损检测和识别,包括光学方法(可见光、激光等)、振动频谱分析法、气味传感器分析法等^[1~3],这些研究采用单项检测方法对鸡蛋裂纹进行了有、无及面积大小的识别,取得了较好的效果。不足的是只根据是否有裂纹而进行简单的分拣,导致大量可再利用蛋品的浪费,并增加禽蛋储运的成本。从蛋品综合

收稿日期: 2009-12-14 修回日期: 2010-02-05

* 国家“863”高技术研究发展计划资助项目(2007AA10Z213)、江苏省攻关项目(BE2007320)和南京农业大学青年创新基金资助项目(Y200827)

作者简介: 刘鹏,博士生,主要从事农产品无损检测研究, E-mail: llxx_2000@126.com

通讯作者: 屠康,教授,博士生导师,主要从事农产品贮藏及物性研究, E-mail: kangtu@njau.edu.cn

利用的角度看,鸡蛋裂纹评价除了大小外还应考虑裂纹是否破坏蛋内膜,对内膜破坏和非破坏的蛋进行分类。若能准确地识别不同裂损程度的蛋并及时分类处理,可大幅降低鸡蛋的储运损耗,为企业创造效益。

多传感器融合是把在不同位置的多个传感器所提供的局部环境不完整信息加以综合,并消除传感器间可能存在的冗余和矛盾的信息,再加以互补,降低其不确定性,以形成对系统环境相对完整一致的感知描述,从而提高智能系统决策、规划、反应的快速性和正确性,降低决策风险的一种手段^[4]。多传感器融合在农产品无损检测中的应用研究在国内处于起步阶段,在国外已有较成熟的应用^[5~7]。

本文针对现有无损检测鸡蛋裂纹评判系统性不强、判别分析模型与蛋品综合利用以及出口要求不相适应的现状,利用电子鼻、计算机视觉及振动频谱分析 3 种传感器构建融合体系,结合实验数据设计基于支持向量机的裂纹系统性识别模型。

1 实验设计与方法

1.1 裂纹的多传感器融合总体流程

根据融合系统所处理的信息层面可以将多传感器信息融合分为决策层、特征层和原始数据层(像素级融合)3 个层面^[4]。在本文讨论的融合系统中,敲击振动分析系统、可见光图像分析系统以及电子鼻可以看作完全不同的传感器,由于其产生的信号类型及激励-响应方式均存在较大差异,原始数据层融合缺乏条件,故考虑在特征层进行融合,这种方式不仅保留了足够数量的原始信息,而且实现了一定的数据变换和压缩,有利于提高处理效果和精度。

在本研究中,鸡蛋的裂纹主要从大小和深浅两方面考察,大小主要指裂纹在蛋壳表面分布的范围,可通过计算机视觉和敲击振动来识别完成,有的裂纹可能看起来不大但比较深,可能全部或部分破坏了蛋壳内膜,这种蛋是储藏过程中最容易变质的,容易染菌,成为完全无法利用的霉变蛋^[8~9],电子鼻则可以有效的识别蛋壳内膜破坏后蛋内部逸出的气味。用融合的方法可以快速识别裂纹并完成对蛋表面和内部裂纹的系统性识别分析。融合方法流程如图 1 所示。

1.2 材料、方法及实验设计

实验材料为罗曼蛋鸡新鲜鸡蛋 300 枚(产自南京源创无公害畜禽产品有限公司),其中包括数量不等的各种裂纹蛋。新鲜鸡蛋经过净化处理,表面无污斑,自然运输到实验室。分为模型构建组(200 枚)和验证组(100 枚),其中模型构建组样本逐个分别

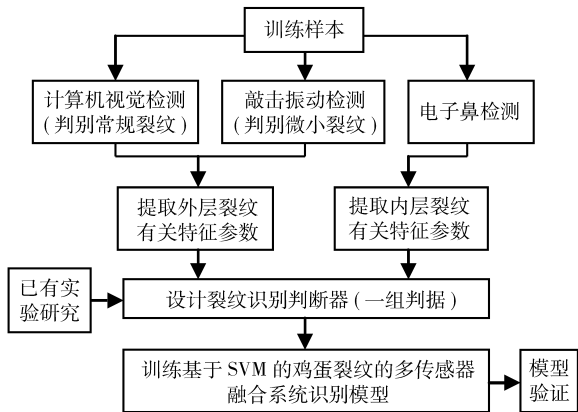


图 1 鸡蛋裂纹的多传感器融合检测流程

Fig. 1 Egg crack detection flow by multi-sensor fusion

运用可见光计算机视觉分析、敲击振动频谱分析以及电子鼻气味测定后再经人工光照,开壳检测其裂纹程度,记录其结果。模型验证组用以上方法测定其无损指标,记录其人工检测结果。把无损指标代入构建的模型中,输出判定结果,再比对人工检测结果。分析模型的识别能力。不同传感器的检测参数:裂纹区域的图像;敲击振动主频率均值、变异系数;电子鼻各个传感器的响应值之比;开壳状态下,可见光人工照射观察裂纹的程度。实验装置简图如图 2 所示。

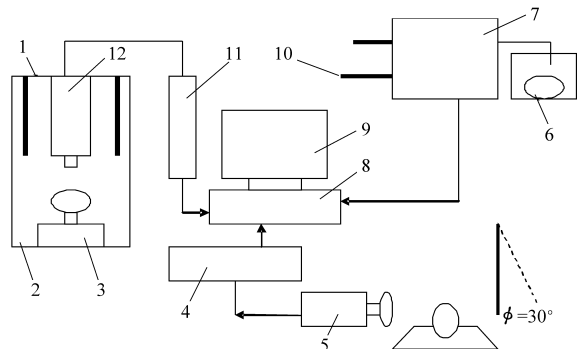


图 2 实验装置简图

Fig. 2 Multi-sensor fusion equipment of egg crack detection

1. 光源 2. 光照箱 3. 载物台 4. FFT 变换器 5. 声级计
6. 样品 7. PEN3 型电子鼻 8. 工控机 9. 融合分析系统
10. 洗脱系统 11. 图像采集卡 12. 摄像头

2 传感器信息提取及处理

2.1 鸡蛋表面可见光图像参数提取

每个样品采集 5 幅图像,其中蛋钝端和尖端各采集 1 幅,蛋横卧于载物台上,以其长轴为转轴每 120°采集一幅图像(共 3 幅)。实验获得 800 × 600 大小的 BMP 彩色图像,经过背景去除、灰度转换、中值滤波、阈值分割、区域标记和特征提取等图像预处理和处理技术^[9],从鸡蛋的图像中分割出裂纹区域,并提取出裂纹区域的几何特征参数。提取的几

何区域特征参数主要是裂纹区域面积,记为 A_e (即裂纹区域的像素点数)。

2.2 鸡蛋蛋体敲击振动频谱信号提取

所有受测鸡蛋沿赤道顺时针方向每 90° 敲击一次,共敲击 4 次。每次敲击后记录 PC 输出频谱图中除噪声外幅值最大的频率值 f ,即特征响应频率^[10],并统计赤道区域频率的变异系数 f_{cv} (变异系数按照标准差与均值之比计算)。

2.3 电子鼻响应参数提取

将每个鸡蛋置于 250 mL 烧杯内,并用封口膜封口,于 20°C 静止 20 min 后测定电子鼻响应参数。电子鼻用以判定识别裂纹是否涉及内层,蛋壳内膜是否被破坏。蛋品的挥发性气体以 200 mL/min 流速通过采集管吸到电子鼻的传感器通道里,使气体传感器响应值发生改变。该响应值是传感器接触到样品挥发物后的电阻量 (G) 与传感器在经过标准活性炭后过滤气体的电阻量 (G_0) 的比值 (G/G_0),其敏感性为 $1\text{ cm}^3/\text{m}^3$ 。检测时间设定为 60 s,特征值提取时间点为响应曲线平稳时刻 50 s,这有利于减小选定时间点造成的误差;清洗时间都设置为 90 s,可以基本使传感器响应恢复到初始状态。提取的特征参数为 50 s 时各个传感器的 G/G_0 均值。前期研究表明 2 号、5 号、8 号 3 个传感器对蛋的内层裂纹识别性能最好,可能的原因是以上传感器对芳香成分、氮氧化合物以及氨类成分灵敏度较大^[11]。

2.4 特征参数集合的构建

将以上提取的各个传感器的特征参数以矩阵形式整理成一个集合: $V = \{A_e, f_{cv}, G/G_{0s2}, G/G_{0s5}, G/G_{0s8}\}$ 。式中 G_{0s2} 、 G_{0s5} 、 G_{0s8} 分别为 2、5、8 号传感器测定的电阻量。

3 鸡蛋裂纹系统识别模型构建

3.1 不同类型缺陷的传感器特征参数判别函数

由图 1 中的融合流程,对未破坏内膜的裂纹(包括常规裂纹和微小裂纹),通过 A_e 、 f_{cv} 两个参数判断。实验表明当敲击振动特征峰频率的变异系数小于 0.001,所有鸡蛋样品经人工检查比对都没有可见的裂纹,而变异系数在 0.001 和 0.002 之间内的样本(灵敏限在 0.001),出现裂纹的数量达到整个样本的 5%,故将变异系数 f_{cv} 的判别阈值设定为 0.001^[12-15]。若常规裂纹图像分析检测出裂纹区域,则计算该区域像素数量(裂纹面积 A_e),根据前期研究表明 A_e 计算值大于 30 时则肯定存在裂纹^[9]。

电子鼻对蛋内层裂纹具有很好的识别能力,蛋壳内膜是否破坏是该识别过程的主要理论基础。通过前期实验^[11-12]表明 99% 以上的样品蛋壳内膜破

损,电子鼻的 2、5、8 号传感器分别有特征性很强的识别阈值。其中 5 号传感器的响应值小于某特定值时可认为是蛋壳内膜未破,无内部气味的渗漏的情况。而 2 号和 8 号传感器的响应值大于某特定值时可认为是蛋壳内膜未破,无内部气味的渗漏的情况。从 2 号传感器(内膜破损为 -1,未破损为 1)可以看出(图 3):当响应值在 1.18 以上所有样品内膜经人工检查未破,当响应值在 1.18 以下时所有的样品内膜经人工检查均存在一定程度的破损,故将该传感器对蛋壳内膜是否破损的判别阈值设为 1.18。5 号和 8 号传感器也有类似的判别情况,其对应的判别阈值分别为 0.97 和 1.23。

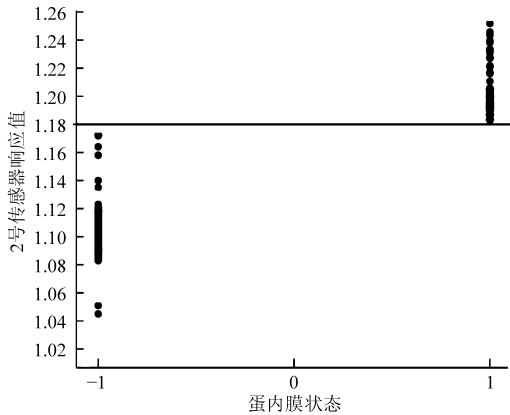


图 3 不同蛋内膜状态下电子鼻响应值
Fig. 3 Electric nose response value with different egg intima state

按照以上分析设计一组供支持向量机分类的判别 $F_1(x) \sim F_4(x)$ (其中 Min 为取最小值运算)。

$$F_1(x) = \text{Min} \{ (0.001 - f_{cv}); (30 - A_e); (G/G_{0s2} - 1.18); (G/G_{0s5} - 0.97); (G/G_{0s8} - 1.23) \} \tag{1}$$

$F_1(x)$ 模型用于判断无裂纹蛋(3 种传感器的输出参数均不在有任何种类和程度裂纹时对应的阈值范围内)情况。

$$F_2(x) = \text{Min} \{ (G/G_{0s2} - 1.18); (G/G_{0s5} - 0.97); (G/G_{0s8} - 1.23) \} \tag{2}$$

$F_2(x)$ 模型结合式(1)用于判断外部存在裂纹,但内部无裂纹的情况。

$$F_3(x) = \text{Min} \{ (0.001 - f_{cv}); (30 - A_e) \} \tag{3}$$

$F_3(x)$ 模型结合式(1)用于判断是否存在复合裂纹的情况。

$$F_4(x) = 0.2 - f_{cv} \tag{4}$$

$F_4(x)$ 模型用于判断是否为等外样品(前期研究表明当振动频谱特征峰的变异系数大于 0.2 时,该样品蛋壳存在巨大的裂损,可以认为是无法贮藏而需要马上处理的等外样品)。

3.2 系统识别支持向量机设计与构建

支持向量机是一种建立在统计学习理论和结构风险最小化原理基础上的新型学习机器。支持向量机最初是针对二值分类问题提出来的,因为实际问题一般都是多值分类问题,因此需要将其推广到多类问题的划分中^[13-15]。在鸡蛋的裂纹研究体系内,可以将裂纹的程度分为正常、外层裂纹、内层裂纹、复合裂纹(表面裂纹、内层裂纹都存在的情况)以及有巨大缺陷的等外样品几种情况(分别用字母 a~e 表示)。本研究采用“一对多”的分类方法,设计构

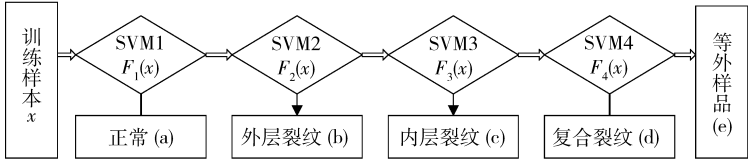


图 4 支持向量机识别鸡蛋裂纹逻辑模型
Fig.4 SVM logistic model of egg crack detection

按照每一种裂纹状态都将挑选出一定数量的数据作为裂纹分析和裂纹特征提取数据的原则,先分别提取模型构建组样品的裂纹(包含 5 种裂纹状态)无损检测参数数据共 200 组。对所有数据进行独立分量分析去噪。无损检测参数信号经过独立分量去噪以后,将其中的 5 个参数矩阵化后作为裂纹特征向量代入 3.1 节中确定的判别函数 $F_1(x)$ 、 $F_2(x)$ 、 $F_3(x)$ 、 $F_4(x)$ 中。再将以上赋值的判别函数装入支持向量机中,比对模型构建组样品的人工检查结果进行支持向量机训练。支持向量机回归建模选择 LIBSVM 软件包^[15]进行。其中支持向量分类类型采用 C-SVC 结构,核函数类型为多项式。支持向量机训练参数 Degree、Gamma、nu、probability 分别为 3、0.704、0.510 和 1。通过训练和构建,得到的模型拟合度为 0.973 5,且收敛误差在 0.000 1 以内。说明该支持向量模型是可信的,且具有较好的判别性能。

3.3 模型验证

为了验证建立的支持向量机判别模型的性能,选择 100 个样品进行模型验证。具体步骤为:

(1)利用 3 种不同的传感器,输出检测系统的状态信号(图像、振动和气味信息)。

(2)提取向量化的无损检测特征参数(经消噪后的 $A_c \sqrt{f_{CV}}$ 、 G/G_{0S2} 、 G/G_{0S5} 、 G/G_{0S8} 5 个参数)。

(3)利用步骤(2)中提取的裂纹特征向量作为支持向量机的输入向量,进行裂纹识别。

(4)进行无损检测后,将该 100 个样品进行人工开壳检查,记录其裂纹情况。将支持向量机融合无损判别结果和人工开壳检测结果进行比对,计算

建 4 个支持向量机(即 SVM1、SVM2、SVM3、SVM4)组成裂纹的判断器,其逻辑框图如图 4 所示。其中支持向量判别模型工作过程如下:若 SVM1 输出为正值,则属于正常鸡蛋;若 SVM1 输出为负值则进入 SVM2,若 SVM2 输出为正值,则属于外部裂纹鸡蛋;若 SVM2 输出为负值则进入 SVM3,若 SVM3 输出为正值,则属于内层裂纹鸡蛋;若 SVM3 输出为负值则进入 SVM4,SVM4 输出为正值,则属于同时存在内外裂纹的复合裂纹鸡蛋,若 SVM4 输出为负值则说明该样品为等外样品。

准确率。

经过人工检查,总共输入到分类器中的样本数量是 100 个(其中 25 个正常样品、20 个外部裂纹样品、25 个内层裂纹样品、20 个复合裂纹样品、10 个等外样品),部分样品的支持向量状态、相关判别分类结果及人工检测结果如表1所示(限于篇幅只列

表 1 模型验证结果						
Tab.1 Model discriminating verification results						
样本 编号	支持向量机状态 (其中的正负规则与图 3 对应)				支持向量机 判别结果	人工检 测结果
	SVM1	SVM2	SVM3	SVM4		
1	+				a	a
2	-	+			b	b
3	-	-	+		c	c
4	-	-	-	-	e	e
5	-	+			b	b
6	-	-	-	+	d	d
7	-	+			b	c
8	-	-	+		c	c
9	+				a	a
10	+				a	a
11	+				a	a
12	-	-	-	+	d	d
13	-	-	+		c	c
14	-	+			b	b
15	+				a	a
45	-	+			b	b
46	-	+			b	b
47	-	-	+		c	c
49	-	+			b	b
48	-	-	-	+	d	d
96	-	+			b	b
97	-	-	-	+	d	d
98	-	-	+		c	c
99	-	-	-	-	e	e
100	-	-	-	-	e	e

出部分结果)。通过计算表明正常蛋、内层裂纹蛋、等外蛋的多传感器支持向量判别模型判断结果和人工检查结果完全一致,准确率达到 100%。外层裂纹蛋和复合裂纹蛋各出现了 1 个和 2 个误判,准确率分别为 95% 和 90%。出现误判的原因可能是由于仪器测定过程的误差。

4 结论

(1)将电子鼻、图像分析、敲击振动 3 种传感器构建的融合体系用于鸡蛋的裂纹检测。基于实验研

究,对前期单一传感器检测裂纹的研究进行了规约,设计了一组供支持向量机分类的裂纹程度判据。

(2)将 3 种传感器的无损检测参数代入支持向量机模型进行训练,构建了基于多传感器参数融合的鸡蛋裂纹支持向量机识别模型。

(3)模型性能参数(模型拟合度为 0.973 5,收敛误差在 0.000 1 以内)和验证性实验(确定的 5 种裂纹状态判别准确率均可达 90%)表明该模型具有可信的结构和很好的判别能力。

参 考 文 献

- 何丽红,刘金刚,文友先. 基于粗糙集与支持向量机的禽蛋蛋壳无损检测[J]. 农业机械学报,2009,40(3):167~171.
He Lihong, Liu Jin'gang, Wen Youxian. Nondestructive testing of eggshell based on rough sets and support vector machine [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2009,40(3):167~171. (in Chinese)
- 黄耀志. 基于神经网络分析的鲜蛋破损检测[J]. 振动测试与诊断,2003,23(3):205~209.
Huang Yaozhi. Automatic detection damaged fresh eggs based on neural networks[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis,2003,23(3):205~209. (in Chinese)
- 王树才,任奕林,陈红,等. 利用敲击声音信号进行禽蛋破损检测和模糊识别[J]. 农业工程学报,2007,23(4):130~133.
Wang Shucui, Ren Yilin, Chen Hong, et al. Detection of cracked-shell eggs using acoustic signal and fuzzy recognition[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2007,23(4):130~133. (in Chinese)
- Lawrence A Klein. 多传感器数据融合理论及应用[M]. 戴亚平,刘征,郁光辉,译. 北京:北京理工大学出版社,2004:15~45.
- Marc Valente, Riccardo Leardi, Guy Self, et al. Multivariate calibration of mango firmness using vis/NIR spectroscopy and acoustic impulse method[J]. Journal of Food Engineering, 2009,94(1):7~13.
- Bulanon D M, Burks T F, Alchanatis V. Image fusion of visible and thermal images for fruit detection[J]. Biosystems Engineering,2009,103(1):12~22.
- 陈全胜,赵杰文,蔡健荣. 基于近红外光谱和机器视觉的多信息融合技术评判茶叶品质[J]. 农业工程学报,2008,24(3):5~9.
Chen Quansheng, Zhao Jiewen, Cai Jianrong. Inspection of tea quality by using multi-sensor information fusion based on NIR spectroscopy and machine vision[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2008,24(3):5~9. (in Chinese)
- 丁幼春,文友先. 鸭蛋蛋壳破损检测方法及其发展趋势[J]. 中国家禽, 2007,29(6):51~54.
- 潘磊庆,屠康,苏子鹏,等. 基于计算机视觉和神经网络检测鸡蛋裂纹的研究[J]. 农业工程学报,2007,23(5):154~158.
Pan Leiqing, Tu Kang, Su Zipeng, et al. Crack detection in eggs using computer vision and BP neural network [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2007,23(5):154~158. (in Chinese)
- 潘磊庆,屠康,赵立,等. 敲击振动检测鸡蛋裂纹的初步研究[J]. 农业工程学报,2005,21(4):11~14.
Pan Leiqing, Tu Kang, Zhao Li, et al. Preliminary research of chicken egg crack detection based on acoustic resonance analysis[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2005,21(4):11~14. (in Chinese)
- Ritaban Dutta, Evor L Hines, Julian W Gardner et al. Non-destructive egg freshness determination: an electronic nose based approach[J]. Measurement Science and Technology,2003,14(2):190~198.
- 刘鹏,屠康,潘磊庆. 基于虚拟仪器和神经网络的禽蛋检测系统设计[J]. 农业工程学报, 2009,25(1):158~160.
Liu Peng, Tu Kang, Pan Leiqing. Design of a non-destructive detection system for eggs based on virtual instrument and neural network[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2009,25(1):158~160. (in Chinese)
- Burges C J C. A tutorial on support vector machines for pattern recognition[J]. Data Mining and Knowledge Discovery, 1998, 2(2):121~169.
- Liu Xiangdong, Zhu Meilin, Chen Zhaoqian. Support vector machine and its applications in pattern recognition[J]. Computer Science, 2003,30(6):113~117.
- Chang K W, Hsieh C J, Lin C J. Coordinate descent method for large-scale L2-loss linear SVM[J]. Journal of Machine Learning Research, 2008,9 :1 369~1 398.

变形灵活性也必然会随之降低。在实际应用中,要求柔性机构在实现高效的运动(变形)传递能力的同时应尽可能避免其产生低阶谐振现象或共振现象^[3,7],显然上述两者在基于铰链柔性变形为基础的柔性微动并联机构中是相互矛盾的。

系统固有频率随着驱动刚度的增加而逐渐增大,但并未呈现为线性。

4.3 仿真计算

利用 Matlab 仿真软件进行理论分析计算,将上述所列机构几何参数和材料参数代入式(12)求解,得到此类柔性机构的前 3 阶固有频率分别为: 1 201.6、1 201.7、1 520.6 Hz。

为了验证所建动力学模型的有效性,运用有限元仿真软件 ANSYS 建立 3-PRR 柔性并联机构的有限元模型,并进行模态仿真分析,得到如图 6 所示的前 3 阶模态形式及相应的固有频率。

5 结束语

基于两端铰支 Euler-Bernoulli 梁理论,采用假设模态法,分析各支链上从动杆的柔性,考察了其在

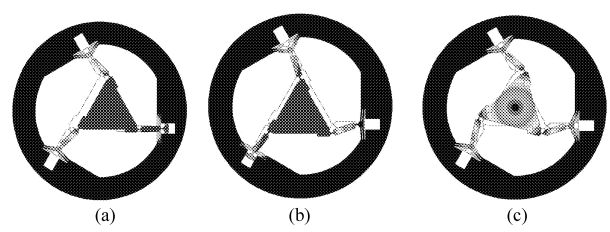


图 6 3-PRR 柔性并联机构 3 种模态形式
Fig. 6 Mode shapes of 3-PRR compliant mechanism
(a) 1 106.4 Hz (b) 1 106.7 Hz (c) 1 446.3 Hz

工作过程中的变形量和势能,通过与柔性铰链内所储存的势能进行比较,确定了在进行机构动力学分析过程中,将其作为刚性杆处理的依据。利用拉格朗日方程建立了此类柔性并联机构的动力学弹性振动微分方程,并借助数值算例,说明动平台、从动杆惯量参数(质量、转动惯量)、柔性环节刚度对系统固有频率的影响规律。利用 ANSYS 有限元分析软件进行仿真计算,仿真结果与理论计算结果相对误差在 10% 以内,说明建立修正动力学模型时所作的一系列简化及假设是合理的,所建动力学模型有效可用,为进一步的动力学优化设计奠定了基础。

参 考 文 献

- 1 Tian Y, Shirinzadeh B, Zhang D. A flexure-based mechanism and control methodology for ultra-precision turning operation[J]. Precision Engineering, 2009,33(2):160~166.
- 2 Tian Y, Shirinzadeh B, Zhang D, et al. Development and dynamic modeling of a flexure-based Scott-Russell mechanism for nanomanipulation[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2008, 23(3): 957~978.
- 3 杜兆才,余跃庆,苏丽颖. 动平台惯性参数对柔性并联机构动力学特性的影响及优化设计[J]. 光学精密工程, 2006, 6(14): 1 009~1 016.
Du Zhaocai, Yu Yueqing, Su Liying. Effects of inertia parameters of moving platform on the dynamic characteristic of flexible parallel mechanism and optimal design[J]. Optics and Precision Engineering, 2006, 6(14): 1 009~1 016. (in Chinese)
- 4 Li Y M, Xu Q S. A novel design and analysis of a 2-DOF compliant parallel micromanipulator for nanomanipulation[J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2006,3(3):247~254.
- 5 Zhang X P, James K M, William L C. Dynamic modeling and experimental validation of a 3-PRR parallel manipulator with flexible intermediate links[J]. Journal of Intelligent and Robotic Systems, 2007, 50: 323~340.
- 6 Dong J Y, Yao Q, Placid M F. A novel parallel-kinematics mechanism for integrated, multi-axis nanopositioning[J]. Precision Engineering, 2008, 32(1): 20~33.
- 7 鲁开讲,师俊平,高秀兰,等. 平面柔性并联机构弹性动力学研究[J]. 农业机械学报,2010,41(6):208~215.
Lu Kaijiang, Shi Junping, Gao Xiulan, et al. Elastic-dynamics of planar flexile parallel mechanism[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010,41(6):208~215. (in Chinese)

(上接第 189 页)

- 16 刘鹏,屠康,潘磊庆. 基于计算机视觉与敲击振动融合技术检测鸭蛋壳强度[J]. 农业机械学报,2009,40(8):175~180.
Liu Peng, Tu Kang, Pan Leiqing. Duck egg's shell intensity model based on fusion of computer vision and impact excitation [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009,40(8):175~180. (in Chinese)
- 17 王巧华,邓小炎,文友先. 鸡蛋敲击响应的奇异性特征与蛋壳裂纹多层检测[J]. 农业机械学报,2008,39(12):127~131.
Wang Qiaohua, Deng Xiaoyan, Wen Youxian. Egg-shell crack multi-level detection based on the singularity feature of dynamic resonance[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008,39(12):127~131. (in Chinese)
- 18 周平,刘俭英,文友先. 基于支持向量机的鸭蛋破损检测技术[J]. 农业机械学报,2008,39(1):195~197,204.