

基于在线最小二乘支持向量机的变形镜建模与控制

张东阁^{1,2}, 傅雨田^{1,2}

(1. 中国科学院红外探测与成像技术重点实验室, 上海 200083;

2. 中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083)

摘要: 为消除变形镜的建模误差, 提出了基于在线最小二乘支持向量机的变形镜建模方法。首先, 分析了温度和驱动器非线性等因素对变形镜响应矩阵的影响; 然后, 介绍了最小二乘支持向量机及在线更新的原理, 并将其引入 97 单元变形镜的集成仿真模型。根据变形镜不断更新的运行数据, 最小二乘支持向量机进行在线训练和模型更新, 构建当前状态变形镜的等效模型, 并输出下一时刻的电压预报值。仿真结果表明: 基于在线最小二乘支持向量机的变形镜建模方法摆脱了固定模型的约束, 具有自适应更新的特点, 稳健性好, 控制电压预测精度高, 有利于提高自适应光学系统的控制精度。

关键词: 变形镜; 支持向量机; 预测控制; 自适应光学

中图分类号: TP273.3; O439 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201645.1118007

Deformable mirror modeling and control based on on-line least square support vector machine

Zhang Dongge^{1,2}, Fu Yutian^{1,2}

(1. Key Laboratory of Infrared System Detecting and Imaging Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

2. Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract: The least square support vector machine (LSSVM) was applied for the online modeling of the deformable mirror, and it could be used to forecast the wavefront control voltage at the same time. The drift characteristic of the response matrix was analyzed in the beginning, which attribute mainly to the temperature varying and nonlinearity of the actuator, and the principle of the LSSVM and its updating mechanism were introduced in the following. The optical and electro-mechanical integrated model was built in the early stage for the study of the deformable mirror, and the LSSVM model was combined into the simulation model. When the deformable mirror run in the integrated model, the control voltages and the surface profile data were collected. The data were send to the LSSVM model for the online training and updating, and the control voltages for the following step were predicted by the LSSVM model at the same time. The deformable mirror which employing 97 actuators was taken as an example to illustrate the above processes, and the simulation results were presented in details. It could conclude that the

收稿日期: 2016-03-05; 修订日期: 2016-04-10

基金项目: 国家 863 计划(2015AA7015090, 2015AA7015097); 全球变化与海气相互作用专项任务(GASI-03-03-01-01);

上海技术物理研究所创新基金(2014-CX25)

作者简介: 张东阁(1986-), 男, 助理研究员, 博士, 主要从事光学设计和机械设计方面的研究。Email: zhangdongge@mail.sitp.ac.cn

通讯作者: 傅雨田(1966-), 男, 研究员, 博士生导师, 博士, 主要从事红外光电系统总体技术方面的研究。Email: yutianfu@mail.sitp.ac.cn

LSSVM use for the online modeling of the control voltage of the deformable mirror is adaptive and self-refreshing, so it could improve the control precision of the adaptive optical system.

Key words: deformable mirror; support vector machine; predictive control; adaptive optics

0 引言

根据波前检测环节的反馈信息,变形镜主动调整反射镜的面形,改变光学波前,实现自适应光学系统的闭环校正^[1]。只有准确快速的面形变化,才能实现自适应光学系统预定的功能和意义,国内外学者研究了多种变形镜建模和控制方法,用于提高波前控制的精度和速度。

中国科学院光电技术研究所颜召军提出了基于递推最小二乘法(Recurrence Least Square)和人工神经网络(Artificial Neural Net)的变形镜建模方法^[2-3]。依据前期收集的离线测试数据,建立变形镜的控制电压预测模型,作为控制器的前馈环节,可以提高变形镜的响应速度。

英国 Kent 大学 Sarmadi 比较了模拟退火算法(Simulated Annealing, SA)、粒子群算法(Particle Swarm Optimization, PSO)和遗传算法(Genetic Algorithm, GA)对无波前传感器变形镜系统的控制效果^[4],其中以粒子群算法的效果最佳,可以获得最佳的图像质量。

中国科学院长春光学精密机械与物理研究所刘磊采用随机并行梯度下降算法(Stochastic Parallel Gradient Descent, SPGD)对激光光束的整形实验^[5],也是基于启发式算法的原理。

荷兰 Delft 理工大学 Simonov 利用查表法,实现了口径 25 mm 变形镜的高速控制^[6]。变形镜共有 12 个驱动器,最高工作频率可以达到 700 Hz,对应的行程达到了 2 μm。

变形镜的镜面薄,热惯性小,受温度影响显著,再加上摩擦、间隙和驱动器非线性等因素的影响,变形镜会偏离预期的运行状态。

传统的离线建模方法采用了变形镜的稳态数据或静态数据,对非线性和时变因素估计不足,不能准确描述变形镜的实际运行状态,降低了变形镜的控制精度,不利于充分发挥变形镜的校正能力。

以 SPGD 为代表的启发式算法包含了对变形镜实际运行状态的反馈,能够感知变形镜运行状态的

变化。这些算法以随机化、并行化技术搜索整个解空间,从原理上保证了收敛性,但是也带来了迭代次数多的缺陷,难以满足高的时间分辨率要求。

统计学习理论提供了人工神经网络和支持向量机(Support Vector Machine, SVM)等模型和方法,用于解决多变量回归分析和模式识别等问题。

中国科学院光电技术研究所史晓雨等提出了利用神经网络模型对变形镜进行离线辨识的设想,并进行了分析和实验^[7]。由于自身原理的限制,神经网络模型并不能满足模型在线更新的要求。

主要表现在:(1)神经网络的模型结构需要根据使用者的经验人为设定;(2)神经网络模型基于经验风险最小化的原理,容易陷入局部最优值;(3)神经网络模型需要大样本量的训练集合才能获得较好的近似效果,其泛化能力受到有限样本和学习能力的限制。

文中针对变形镜运行状态漂移的问题,提出了用在线最小二乘支持向量机(Least Square Support Vector Machine, LSSVM)进行变形镜建模和控制电压预测的设想。首先分析了变形镜的运行特性,研究了温度和驱动器因素对变形镜响应矩阵的影响,然后介绍了 LSSVM 及其在线更新的原理,分析了用在线 LSSVM 进行变形镜建模和电压预报的步骤。最后用一个 97 单元变形镜实例,说明了使用在线 LSSVM 进行变形镜建模和电压预测控制的过程和实用性。

1 扰动对变形镜运行特性的影响分析

针对 m 个分立驱动器的薄镜面变形镜,第 i 个驱动器在电压 U_i 驱动下使镜面发生变形,得到 N 阶 Zernike 系数表示的面形变化量,可表示为 $Z=f(U)$,其中 U 是驱动电压向量, Z 是 N 阶 Zernike 系数向量。 $Z=f(U)$ 可展开为:

$$Z=Z_0+U\frac{\partial f(U)}{\partial U}+O(U^2) \quad (1)$$

令 $D=\frac{\partial f(U)}{\partial U}$,并忽略高阶项,得到 $\Delta Z=DU$ 。

响应矩阵 D 是变形镜的输入电压向量到

Zernike 系数矩阵的变换矩阵,即对于一组控制电压 U ,经过响应矩阵 D 的变换,得到面形变化量 ΔZ 。变形镜的面形控制问题就是根据面形要求 ΔZ 和响应矩阵 D ,求解方程 $DU=\Delta Z$,得到驱动器的控制电压向量 U 。

在实际运行过程中,变形镜自身因素和环境因素的变化都会对响应矩阵 D 造成影响,影响控制电压 U 的求解精度。

(1) 温度对响应矩阵 D 的影响

薄镜面变形镜的热容量小,在连续输入的外热流辐照下,温度导致的面形变化较为明显。同时环境温度的不均匀变化,还会导致薄镜面的局部区域产生起伏,影响变形镜的校正效果。

2008 年,洛克希德公司的 Advanced Technology Center 研究了温度变化对变形镜波前校正能力的影响^[8]。针对口径 50 mm 的薄镜面变形镜,环境温度从 23 °C 上升到 35 °C,自适应光学系统在工作状态的斯特列尔比下降了 77%。

2009 年,中国科学院光电技术研究所宁禹测试了 20 单元压电变形镜的温度特性^[9],由于薄镜面和压电材料的膨胀系数很难严格相等,当环境温度变化时,变形镜表现出明显的双金属效应,导致镜面面形发生变化。当环境温度从 13 °C 上升到 25 °C,变形镜的离焦量变化了 1.37 μm ,慧差、像散和球差项都有不同程度的变化。

2015 年,中船重工集团某研究所牛志峰研究了变形镜的热畸变问题^[10],在镜面吸收功率 8 W/cm² 时,变形镜的面形变化量峰谷值 $PV=0.9 \mu\text{m}$,同时强激光经过变形镜的反射镜面,还会产生与驱动器位置对应的印痕效应。笔者提出了改变驱动器排列方式,增加补偿镜等方法,减少和消除变形镜的热畸变。

2015 年,四川大学彭家琪分析了变形镜热变形对波前质量的影响^[11],变形镜本身要校正波前畸变,但是热变形引入了新的波前畸变,制约了变形镜的波前校正能力。在相同温度变化条件下,变形镜的热变形大于相同口径的高反射镜,只有采用局部换热等措施,才能降低热变形的影响。

(2) 驱动器的状态漂移对响应矩阵 D 的影响

压电陶瓷驱动器能够输出直线位移,具有分辨率高、输出力大的特点,但也存在迟滞和回环等非线性响应,而且非线性响应还会随工作频率的变化而

变化,导致实际的输出力偏离预定值。

2014 年,山东大学赵学良分析了压电驱动器的蠕变特性^[12],在台阶逼近的低频正弦电压信号驱动下,压电驱动器表现出明显的蠕变和迟滞特性。在 47.7 V 驱动电压下,20 个台阶的蠕变范围是 320 个台阶蠕变范围的 11.44 倍,增加台阶可以减少蠕变,但是降低了时间分辨率。

2009 年,中国科学院光电技术研究所宁禹对压电驱动变形镜进行的测试^[9],也表明了压电变形镜的变形量和电压呈现非线性,主要由变形镜的结构和压电驱动器的材料特性决定,线性关系的假设只能在一定条件下成立。

(3) 工作状态改变对响应矩阵 D 的影响

中国科学院长春光学精密机械与物理研究所林旭东报道了口径 243 mm 的 961 单元超薄变形镜的研制成果^[13],变形镜安装在两维角度调整台上,可以整体改变光轴指向。对反射镜进行有限元分析,计算光轴从水平到竖直变化时,重力加速度对变形镜面形的影响。

变形镜在主动展平之后的面形精度是 0.014λ ($\lambda=632 \text{ nm}$),而重力引起的变形量最大可达 $0.0068 \mu\text{m}$,对应的面形变化量峰谷值 0.011λ 。重力变形导致的面形变化与变形镜的展平面形处于同一量级,可见重力加速度的影响不可忽略,俯仰角度的变化也会对变形镜的面形造成影响。

此外变形镜和驱动器之间的力反馈装置、柔性环节,以及变形镜机电作动系统的间隙、摩擦、死区等非线性环节,对响应矩阵 D 都有影响,综合表现为响应矩阵的漂移和时变特性。

传统的离线测试方法,采用静态或稳态数据对响应矩阵进行标定,得到的响应矩阵 D 不能随着变形镜运行状态的变化而更新。

在稳态数据测试过程中,间隙和摩擦等误差并不会全部表现出来,也将使变形镜的响应矩阵偏离实际的运行状态。

由于变形镜的时变和迟滞特性,以及随机噪声的影响,有必要使用在线辨识算法对变形镜进行动态建模,才能避免离线标定和随机搜索等方法的不足。

2 在线更新的最小二乘支持向量机

支持向量机是一种专门解决小样本条件的机器

学习理论,较好地解决了小样本、非线性、高维数和局部极值问题,具有全局最优性和良好的泛化能力,广泛应用于预测控制和模式识别等领域。

最小二乘支持向量机(Least Square SVM,LSSVM)是支持向量机的一种改进形式,采用误差二次项作为目标函数,求解线性方程组的等式约束,得到模型所需要的参数,与支持向量机相比具有计算量小,求解速度快等特点^[14]。

2014 年,安徽大学梁栋利用 LSSVM 对叶面积指数的时间序列进行估计^[15],解决了遥感数据缺失的问题,而且与经典向量机相比,LSSVM 对叶面积时间序列的预测精度更高,求解速度更快。

武汉大学邓兴升研究了 LSSVM 的样本更新原理^[16-17],提出了增量和减量学习算法,使用分块矩阵求逆的迭代计算公式,利用已有的计算结果,实现了 H 及逆矩阵 H^{-1} 的迭代更新,避免了直接的大规模矩阵求逆运算。

在此基础上,浙江大学林伟青利用在线更新的 LSSVM 对数控机床热误差进行建模^[18],根据数控机床最新的运行数据,在线修正数控机床的热误差模型,输出机床的热变形误差用于在线补偿,提高了机床的加工精度。

2014 年,哈尔滨工业大学胡强用时间加权在线训练的 LSSVM 对导引头的视线角速率进行实时预测^[19],弥补了云层遮挡带来的导引数据缺失问题,提高了导航精度。

2.1 在线更新的变形镜模型

设定样本数据固定为 M 组,其中样本数据包含:(1)输入电压数据 $\{U_k, k=1, 2, \dots, M\}$;(2)输出的面形数据是 $\{\Delta Z_k, k=1, 2, \dots, M\}$,即有 M 组输入电压和输出面形数据对 $\{U, \Delta Z\}$ 。

变形镜开始运行之后,按照时间序列得到新的变形镜样本数据 $\{U_{t+1}, \Delta Z_{t+1}\}, \{U_{t+2}, \Delta Z_{t+2}\}, \dots, \{U_{t+n}, \Delta Z_{t+n}\}$ 。当训练样本数据增加一个新样本 $\{U_{t+M+1}, \Delta Z_{t+M+1}\}$ 时,就去掉一个旧样本 $\{U_{t+1}, \Delta Z_{t+1}\}$,随后增加了一个新样本 $\{U_{t+M+2}, \Delta Z_{t+M+2}\}$,就去掉一个旧样本 $\{U_{t+2}, \Delta Z_{t+2}\}$,以此类推。

依据当前的样本数据 $\{U, \Delta Z\}$ 和上一步的矩阵 H 及 H^{-1} ,用分块矩阵求逆子程序计算当前的矩阵 H 及 H^{-1} ,然后计算 α_i 和 b 的最新值,根据当前的 α_i 和 b ,更新 LSSVM 模型,即实现了一次模型的在线更新。

随着运行时间的增加,在 M 次样本更新之后,样本数据全部变成了变形镜的实际运行态数据,此时的 LSSVM 包含了当前最新的变形镜运行状态信息,实现了变形镜的在线建模和更新。

由于 LSSVM 采用等式约束,失去了支持向量的稀疏性,每一组样本数据都成为 LSSVM 的支持向量。而变形镜每一次的运行数据都是变形镜运行状态的反应,样本数据更新的时间序列反应了变形镜运行状态的转移,不必对支持向量进行稀疏化处理。采用 LSSVM 作为变形镜的电压预测模型,起始阶段既可以采用离线数据作为学习样本,也可以采用空样本,在运行过程中采集当前的输入输出数据作为学习样本。每次运行结束,保存当前的支持向量或 LSSVM 模型,作为下次运行的初始化数据。

3 基于在线最小二乘支持向量机的变形镜建模

3.1 在线更新最小二乘支持向量机的原理

针对变形镜在输入电压下的面形响应问题 $Z=f(U)$,就是要建立一个 LSSVM 模型:

$$Z(U)=\sum_{i=1}^M \alpha_i k(U, U_i)+b \quad (2)$$

使 $Z(U)$ 以尽可能高的概率逼近 $Z=f(U)$ 。其中 $Q=k(U_i, U_j), i, j=1, 2, \dots, M, k(U, U)$ 是核函数,一般选用径向基函数。

为了求解待定系数 α_i 和 b ,用拉格朗日法求解上述有约束的优化问题,得到矩阵公式(3)。用 M 组样本数据计算矩阵 Q ,代入公式(3),即可解得系数 α_i 和 b ,从而得到 LSSVM 模型。

$$\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & Q+C^{-1}I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b \\ \alpha \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ Z \end{bmatrix} \quad (3)$$

令 $H=Q+C^{-1}I$,则

$$H = \begin{bmatrix} k(U_1, U_1)+1/C & \dots & k(U_{M-1}, U_1) & k(U_M, U_1) \\ \dots & \ddots & \dots & \dots \\ k(U_1, U_{M-1}) & \dots & \dots & k(U_M, U_{M-1}) \\ k(U_1, U_M) & \dots & k(U_{M-1}, U_M) & k(U_M, U_M)+1/C \end{bmatrix} \quad (4)$$

样本数据 $\{U, Z\}$ 的增减和变化都会影响矩阵 $H=Q+C^{-1}I$,也会影响到 α_i 和 b ,从而影响到 LSSVM 的模型更新。如果每次样本数据的增减变化,都要计算矩阵 H 及逆矩阵 H^{-1} ,需要消耗较多的计算时间

和空间。

3.2 变形镜仿真模型

针对口径 200 mm 薄镜面变形镜的研制需求,建立了相应的光机集成仿真模型,用于变形镜的性能分析,图 1 是变形镜驱动点的分布图。

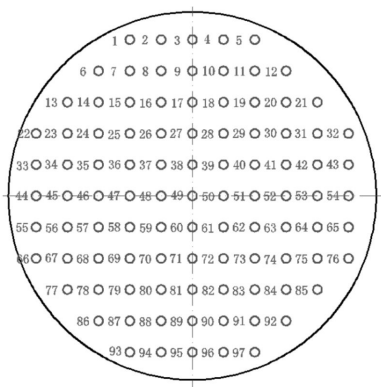


图 1 口径 200 mm 的变形镜及其驱动点布置

Fig.1 Layout of $\phi 200$ mm deformable mirror and its actuators

变形镜的有效通光口径 190 mm,驱动器共有 97 个,呈等间隔方形排列,间隔 15 mm。

按照 2.1 节的约定,将 LSSVM 模型集成到仿真模型,变形镜的运行数据传递到 LSSVM 模块,用于变形镜的在线建模和控制电压预报。

为避免驱动电压和驱动力超限,将驱动电压进行归一化处理,同时将运行数据加上不同类型的随机数,模拟不同类型扰动的影响。

3.3 基于 LSSVM 的变形镜建模

根据第 2 节 LSSVM 的原理,先从 3.1 节的集成仿真模型中收集 300 组数据,分成 2 种情况进行建模。

(1) 以控制电压向量 U 作为输入数据,以面形变化量 ΔZ 为输出数据,建立正向 LSSVM 模型,即根据当前的控制电压 U ,利用 LSSVM 输出面形变化量 ΔZ 。

步骤①:对 300 组的数据集 $\{U, \Delta Z\}$ 进行预处理。

步骤②:利用 300 组的数据集,按照公式(2)~(4)建立 LSSVM 模型,并进行模型验证。计算 MSE 参数,验证模型的近似能力。

步骤③:保存支持向量矩阵阵 H , α_i 和 b 等模型参数。

经过上述步骤,建立了初始的 LSSVM 模型,可以等效表示变形镜的运行状态。

(2) 以面形变化量 ΔZ 为输入数据,以电压控制向量 U 为输出数据,建立逆向 LSSVM 模型,即根据当前的面形参数 ΔZ ,利用 LSSVM 输出控制电压预测值 U 。

步骤①:对 300 组的数据集 $\{\Delta Z, U\}$ 进行预处理。

步骤②:利用 LSSVM 根据当前的 ΔZ ,输出控制电压预测值 U 。

步骤③:若控制电压预测值产生的面形变化量满足要求,将当前的 $\{U_i, \Delta Z_i\}$ 加入学习样本,并转步骤⑥,否则转步骤④

步骤④:若控制电压预测值产生的面形超标,将当前的 $\{U_i, \Delta Z_i\}$ 加入学习样本。

步骤⑤:利用分块矩阵求逆的子程序,依据当前的训练数据 $\{U, \Delta Z\}$,计算 H 及其逆矩阵、 α_i 和 b 等参数,更新当前的 LSSVM 模型。

步骤⑥:读取下一组 ΔZ ,转步骤②,直到数据结束或者停机。

经过上述步骤,建立了变形镜初始的在线更新 LSSVM 模型,可用于驱动电压的预测控制。

3.4 基于 LSSVM 的控制电压预报

为了比较不同更新机制的作用,设置了 3 种模型作为对照,分别是:(1) 样本数据不更新的 LSSVM 模型;(2) 样本数据只增加,不减少的 LSSVM 模型,即没有遗忘机制的 LSSVM;(3) 样本数据在线更新的 LSSVM 模型。

再取额外的 100 组样本数据,添加均值为 0,方差为 0.33 的均匀分布随机数作为扰动,用于上述 3 个模型的测试。

计算 3 种模型的电压预测向量 U 与实际电压 U 的均方误差(Mean Square Error, MSE)作为比较。

图 2 从上至下共有 3 条曲线和 3 条直线,其中 3 条直线是对应曲线的平均值。曲线 1 是没有更新机制的 LSSVM 模型的电压预测结果,平均预测误差 4.4535,单个驱动器的平均预测偏差是 0.045。曲线 2 是没有遗忘机制的 LSSVM 模型,对模拟在线运行的变形镜预测电压的 MSE 曲线,平均误差 0.333 4,单个驱动器的平均预测偏差是 0.003。曲线 3 是在线更新的 LSSVM 模型,对在线运行变形镜的预测电压 MSE 曲线,平均预测误差 0.240 1,单个驱动器的平均预测偏差是 0.002。

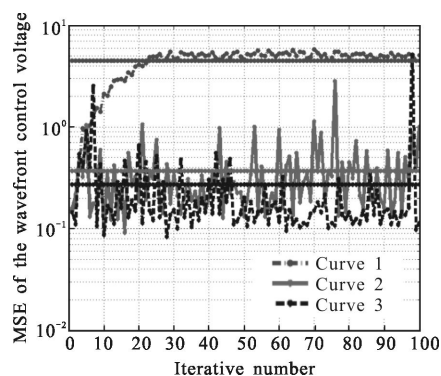


图 2 不同更新机制 LSSVM 模型的 MSE 比较

Fig.2 Comparison of LSSVM model with different updating mechanism

为了验证在线更新 LSSVM 模型对变形镜控制电压的预测效果,分析模型对不同扰动的适应能力,分别对样本数据添加不同类型的随机数扰动,模拟变形镜运行过程中的系统误差和随机误差。

图 3 是在线更新的 LSSVM 模拟变形镜添加不同扰动的仿真结果,从上到下依次是曲线 1 添加指数分布(均值是 1,方差是 1)的扰动量,LSSVM 模型在线学习过程中对电压预测的 MSE 曲线,MSE 均值是 0.4548,相当于均匀分布 MSE 均值的 145.4%,单个驱动器的控制电压平均预测误差是 0.004。

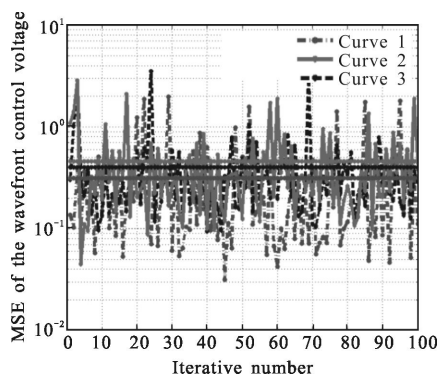


图 3 不同扰动下在线更新 LSSVM 模型的 MSE

Fig.3 Comparison of LSSVM model with different turbulence

图 3 中曲线 2 是添加正态分布(均值是 0,方差是 1)扰动之后,LSSVM 模型在线学习过程中预测电压的 MSE 曲线,MSE 均值是 0.4019,相当于均匀分布 MSE 均值的 128.5%,单个驱动器的控制电压平均预测误差是 0.004。

图 3 中曲线 3 是添加均匀分布(均值是 0,方差是 0.33)扰动之后,LSSVM 在线更新模型对电压预

测的 MSE 曲线,MSE 均值是 0.3129,单个驱动器的控制电压平均预测误差是 0.003。

3.5 结果分析

图 2 显示了 3 种不同更新机制的 LSSVM 模型对控制电压预测的 MSE 比较。增加了遗忘机制以后,样本能够在线更新,此时 LSSVM 模型的 MSE 均值最小。没有遗忘机制的 LSSVM 的 MSE 均值是 0.3334。其中样本数据不能更新的 LSSVM 的效果最差,MSE 均值是 4.4535。以上数据对比表明了样本更新机制的功能和意义。

样本更新环节如果没有遗忘机制,会带来 2 个问题。(1) LSSVM 的支持向量不断增加,导致矩阵 H 及 H^{-1} 的规模增加,耗费更多的计算时间和存储空间。(2) 样本数据集保留了过多过时信息,不利于 LSSVM 对当前状态进行准确回归。

对于在线更新的 LSSVM 模型参数,大都由建模程序根据样本数据自主决定,只有样本数量 M 要人为设定。对于在线更新 LSSVM 模型,必然存在一个最佳的样本数量。

过多的样本数量,并不会改善 LSSVM 模型的预测精度,不仅降低了 LSSVM 模型的近似能力,而且增加了矩阵 H 及其逆矩阵 H^{-1} 的存储和计算难度,同时也降低了在线更新的速度。

为了确定 97 单元变形镜 LSSVM 模型的最佳样本数量,首先以 97 个样本开始,按照二分法成倍地增减样本数量 M ,以 LSSVM 输出的 MSE 最小为依据,确定了 97 单元变形镜 LSSVM 模型对应的最佳样本量是 230 组。

4 结论

为了提高变形镜的建模精度,解决变形镜响应矩阵漂移的问题,提出了用在线更新的 LSSVM 进行变形镜建模和预测控制的方法。

根据不断更新的样本数据,在线 LSSVM 模型逐渐学习归纳出变形镜的运行规律,再利用这些规律对下一时刻的控制电压进行预测,提高了变形镜的适应能力。

用变形镜的在线数据建立 LSSVM 模型的过程是自适应校正的过程,这个过程不是一次离线完成的,而是反复在线进行的,不是一劳永逸的模型,而是反复优化的模型,有利于克服各种原因导致的模

型失配,减少外界扰动的影响,有助于充分发挥变形镜的像差校正能力。

在线 LSSVM 的建模方法与变形镜具体的模型参数无关,可满足不同参数和类型变形镜的控制要求,而且建模时间短,稳健性强,尤其符合变形镜的多变量、强耦合、非线性和不确定问题的应用特点,具有广泛的通用性和实用性。

参考文献:

- [1] Ma Jianqiang, Liu Ying, Chen Junjie, et al. Design and performance testing of 200 element silicon unimorph deformable mirror [J]. *Optica and Precision Engineering*, 2014, 22(8): 2047–2053. (in Chinese)
- [2] Yan Zhaojun, Li Xinyang. Neural network prediction algorithm for control voltage of deformable mirror in adaptive optical system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(4): 911–916. (in Chinese)
- [3] Yan Zhaojun, Li Xinyang, Rao Changhui. Multi channel adaptive control algorithm for closed loop adaptive optical system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33 (3): 0301002. (in Chinese)
- [4] Nasiri-Avanaki M R, Sarmadi H, Meadway A, et al. Comparative assessment of three algorithms to control a deformable mirror for an adaptive optics system with no wavefront sensor [C]//SPIE, 2011, 7904: 790415.
- [5] Liu Lei, Guo Jin, Zhao Shuai, et al. Application of stochastic parallel gradient descent algorithm in laser beam shaping[J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(2): 260–266. (in Chinese)
- [6] Simonov A N, Hong S, Vdoin G. Piezoelectric deformable mirror with adaptive multiplexing control [J]. *OE Letters*, 2006, 45(7): 070501.
- [7] Shi Xiaoyu, Feng Yong, Chen Ying, et al. Predicting control voltages of deformable mirror in adaptive optical system[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2012, 24(6): 1281–1286. (in Chinese)
- [8] Kathleen A M, Stuart L M, Jeff Fixler. Thermo mechanical characterization of a membrane deformable mirror [J]. *Applied Optics*, 2008, 47(29): 5325–5329.
- [9] Ning Yu, Yu Hao, Zhou Hong, et al. Performance test and closed loop correction experiment of a 20 element bimorph deformable mirror [J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, 58(7): 4717–4723. (in Chinese)
- [10] Niu Zhifeng, Guo Jianzeng, Zhou Xiaohong. Simulation and compensation of wavefront aberration caused by deformable mirror thermal deformation [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2015, 27(1): 011010.
- [11] Peng Jiaqi, Hu Xiaochuan, Chen Lixia, et al. Effect of structural parameters of deformable mirrors on phase characteristics of high power laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(5): 0514001. (in Chinese)
- [12] Zhao Xueliang, Zhang Chengjin, Gu Jianjun, et al. Creep characteristics of stack piezo actuator effected by discretized sine voltage[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22 (4): 942–948. (in Chinese)
- [13] Lin Xudong, Liu Xinyue, Wang Jianli, et al. Development and performance test of the 961 element deformable mirror [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(6): 0601001. (in Chinese)
- [14] Chen Jindong, Pan Feng. Online support vector regression based nonlinear model predictive control [J]. *Control and Decision*, 2014, 29(3): 460–464. (in Chinese)
- [15] Liang Dong, Xie Qiaoyun, Huang Wenjiang, et al. Using least squares support vector machines to estimate time series leaf area index [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(1): 243–248. (in Chinese)
- [16] Deng Xingsheng, Hua Xianghong. Learning algorithm of dynamic least square support vector machine [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2008, 33 (11): 1122–1125. (in Chinese)
- [17] Zhang Haoran, Wang Xiaodong. Incremental and online learning algorithm for regression least squares support vector machine [J]. *Chinese Journal of Computer*, 2006, 29(3): 400–405. (in Chinese)
- [18] Lin Weiqing, Fu Jianzhong, Xu Yazhou, et al. Thermal error modeling and compensation of numerical control machines tools based on on line least squares support vector machine [J]. *Computer Integrated Manufacturing System*, 2008, 14 (2): 295–299. (in Chinese)
- [19] Hu Qiang, Song Shenmin. Online predicting of line of sight angular rate based on LSSVM method [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(11): 3019–3023. (in Chinese)