

DOI: 10.12086/oe.2020.190547

望远镜中扰动抑制的 Youla 控制器优化设计

牛帅旭^{1,2,3}, 蒋晶^{1,2}, 唐涛^{1,2*},
杨涛^{1,2}, 包启亮^{1,2}

¹中国科学院光束控制重点实验室, 四川 成都 610209;

²中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209;

³中国科学院大学, 北京 100049

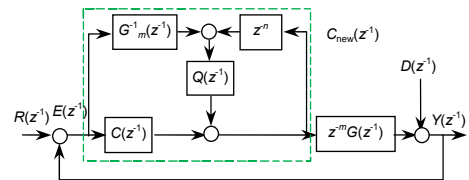
摘要: 在微弧度级的大型望远镜中, 抑制振动已经成为一项非常关键的技术。经典的反馈控制方法由于图像传感器本身具有采样频率低、积分时间长的特点使得控制回路的带宽受限的原因不能很好地抑制回路中的扰动, 尤其是存在范围广、能量较大的宽带扰动。本文基于优化的力设计理念提出一种扰动抑制的 Youla 控制器优化设计方法来提高系统的宽带扰动抑制能力。在可以获取到宽带扰动频率的情况下, 该方法通过设计合适的 Q 滤波器去适应宽带扰动, 从而达到抑制扰动的目的。仿真及实验结果表明, 相对于传统的比例-积分控制方法, 该方法极大地提高了系统的宽带扰动抑制能力, 增强了系统的闭环性能。此外, 由于此方法模型依赖程度低、易于实现, 故可以推广到许多工程实际中。

关键词: 望远镜; Youla 参数化; Q 滤波器; 宽带扰动抑制

中图分类号: TJ765.1

文献标志码: A

引用格式: 牛帅旭, 蒋晶, 唐涛, 等. 望远镜中扰动抑制的 Youla 控制器优化设计[J]. 光电工程, 2020, 47(9): 190547



Optimal design of Youla controller for vibration rejection in telescopes

Niu Shuaixu^{1,2,3}, Jiang Jing^{1,2}, Tang Tao^{1,2*}, Yang Tao^{1,2}, Bao Qiliang^{1,2}

¹Key Laboratory of Optical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China;

²Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China;

³University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: Vibration rejection is a key technology of telescopes with stable accuracy of μrad level. Due to the low-rate sample and large time delay of the image sensor, the conventional control loop cannot well mitigate vibrations, especially the wideband vibrations with wide range and large energy. On the concept of optimal force design, an improved wideband vibration rejection method based on Youla parameterization is proposed to mitigate vibrations for improving the closed-loop performance of telescopes. In the case that the disturbances frequency can be obtained, this method can mitigate wideband vibrations by designing an appropriate Q-filter to accommodate to the wideband vibrations. The simulation and experimental results show that the proposed method greatly improves the wideband

收稿日期: 2019-09-17; 收到修改稿日期: 2019-11-29

基金项目: 中国科学院青促会基金资助项目

作者简介: 牛帅旭(1992-), 女, 博士研究生, 主要从事望远镜中基于倾斜镜的振动抑制技术的研究。E-mail: 276854894@qq.com

通信作者: 唐涛(1980-), 男, 博士, 研究员, 主要从事光电工程领域中控制理论以及工程应用工作。E-mail: prettang@gmail.com

版权所有©2020 中国科学院光电技术研究所

vibration rejection ability and closed-loop performance of the system compared with the traditional proportional-integral control method. In addition, this method can be extended to many engineering projects because of its low dependence and easy implementation.

Keywords: telescopes; Youla parameterization; Q-filter; wide-band vibrations rejection

Citation: Niu S X, Jiang J, Tang T, *et al.* Optimal design of Youla controller for vibration rejection in telescopes[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2020, 47(9): 190547

1 引言

自古以来,人类一直都在不断地探索未知的宇宙世界。望远镜的发明及其性能的提升使得人们能够逐步观察到更远、更暗的物体,然而由风振、设备振动以及平台振动引起的望远镜的结构振动严重地影响了望远镜的成像质量和其观察微弱目标的能力,故而为了达到望远镜的衍射极限需要抑制望远镜机械振动等干扰^[1]。传统的闭环反馈控制方法由于图像传感器本身具有采样频率低、曝光时间长等特点给控制回路带来了时间延迟,限制了控制回路的带宽,因而无法抑制此类振动^[2-3]。由此,一些专家学者提出了额外利用加速度计、光纤陀螺等惯性传感器对扰动进行测量并前馈的扰动前馈控制方法,例如在文献[4]中德国的 Sawodny 等人针对大望远镜的结构振动问题,提出利用加速度计将干扰信号前馈的方法,并分别采用基于卡尔曼滤波器和自适应谐振器的方式建立倾斜镜的模型,该研究对于大振幅的振动抑制效果较好,但小幅度的振动重建偏差较大。这是由于这种额外增加惯性传感器对扰动信号进行测量的方法虽然有抑制带宽不受限的优点但也不可避免存在以下缺点:首先,测量设备其本身存在的低频漂移和高频噪声无疑会降低测量的精度和系统性能;再者,即使可以获取到准确的扰动信号,如何从中提取出真实的扰动信号也是一项十分具有挑战性的工作。由于额外增加传感器的方法存在如上所述的问题,给系统性能的提升带来了很大的挑战和限制,一些专家学者便在扰动前馈的基础上提出了改进控制结构以及优化的控制算法,例如在文献[5]中 Sivo 等人利用基于卡尔曼滤波方法的线性二次高斯控制器抑制了 4.2 m 威廉赫歇尔望远镜的 Nasmyth 平台上的 CANARY 仪器振动,系统的扰动抑制能力较传统的比例-积分控制器有了明显的提升,且系统的稳定性也较强;在文献[6]中 Guesalaga 等人通过最小化倾斜镜的闭环残差的 H_2 范数来合成控制器去改善系统在不同振动条件下的整体性能,并在 Paranal 的 NACO 和 Gemini-South 的 GeMS 两个设备

上进行了测试,实验结果表明,与传统的比例-积分控制器相比,该合成控制器的闭环性能有了明显的提升。然而,采用改进的控制结构或优化的控制算法虽然提高了系统的扰动抑制能力,却也面临着扰动估计不准确以及模型辨识不精准两大难题,因此这些方法的提升能力也十分有限。于是,为减小控制器对准确的扰动信号以及精准的系统模型的依赖度,本文提出一种扰动抑制的 Youla 参数控制器优化设计方法。该方法可以在仅依赖一个低频的系统模型的基础上提升系统的宽带扰动抑制能力。由于宽带振动存在范围广、能量大,其对系统的性能影响也较大^[10-11],本文设计了合适的 Q 滤波器对宽带扰动起到了较好的抑制效果,因此该方法对系统的闭环性能提升较大。

2 控制器结构

经典的闭环反馈控制结构如图 1 所示,图中 $R(z^{-1})$ 代表目标轨迹,也就是输入信号; $Y(z^{-1})$ 代表了输出信号; $E(z^{-1})$ 则表示了输出信号与目标轨迹之间的误差信号; $C(z^{-1})$ 代表的是位置控制器; z^{-m} 表示了控制系统的时间延迟; $G(z^{-1})$ 代表的是控制模型,主要包括平台以及驱动模块的特性; $D(z^{-1})$ 代表着扰动信号。

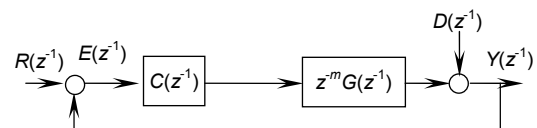


图 1 经典的控制结构图

Fig. 1 The typical control structure

在经典的反馈控制结构中系统的扰动抑制能力可表示为以下形式:

$$S'_D(z^{-1}) = \frac{Y(z^{-1})}{D(z^{-1})} = \frac{1}{1 + C(z^{-1})G(z^{-1})z^{-m}} \quad (1)$$

由式(1)可知,在该控制结构下系统的扰动抑制能力依赖于位置控制器 $C(z^{-1})$ 的高增益以及精确的系统模型 $G(z^{-1})$ 。然而图像传感器带来的时间延迟致使控制器的增益有限,并且在高频区域很难得到一个精确的系统模型 $G(z^{-1})$,这两方面的限制使得系统的扰动

抑制能力十分有限。由此，本文提出一种改进的控制器结构，该结构是一种基于 Youla 参数化的改进的控制结构。Youla 参数化是指 Youla 等人在二十世纪七十年代后期证明的一种可以在保证控制系统闭环稳定的基础上将控制器参数化的方法^[7]。基于 Youla 参数化的改进的扰动观测器结构如图 2 所示。其中 $Q(z^{-1})$ 表示的是一个低通滤波器； $G_m^{-1}(z^{-1})$ 描述了控制模块 $G(z^{-1})$ 的逆，图 2 中绿色虚线框内为等效控制器 $C_{new}(z^{-1})$ ，其他参数如图 1 相同的定义。

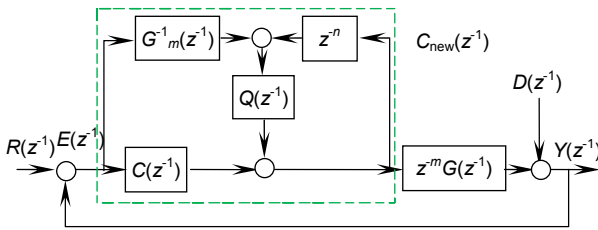


图 2 改进的 Youla 控制器结构图
Fig. 2 The improved Youla controller structure

基于改进的 Youla 控制器结构下系统的扰动抑制能力可表示为 $S_D(z^{-1}) = \frac{Y(z^{-1})}{D(z^{-1})} = \frac{1 - z^{-n}Q(z^{-1})}{1 + CGz^{-m} + (z^{-m}GG_m^{-1}(z^{-1}) - z^{-n})Q(z^{-1})}$ 。 (2)

对比式(1)和式(2)可知，式(2)的特征多项式与式(1)的特征多项式的区别在于 $(z^{-m}GG_m^{-1} - z^{-n})Q$ 这一部分。当 $(z^{-m}GG_m^{-1} - z^{-n})Q \approx 0$ 时， $S_D = (1 - z^{-n}Q)S_D'$ ，抑制扰动的关键便转化为 $1 - z^{-n}Q(z^{-1})$ 的最小化，也就是 Q 滤波器的设计以及参数的优化的问题。要使得 $(z^{-m}GG_m^{-1} - z^{-n})Q \approx 0$ ，就要 $(z^{-m}GG_m^{-1} - z^{-n}) \approx 0$ 、 $Q \approx 0$ 两个条件至少有一个成立。在中低频区域不难获得一个相对精确的系统模型 $G(z^{-1})$ ，故而在中低频区域不难满足 $(z^{-m}GG_m^{-1} - z^{-n})Q \approx 0$ ，但在高频区域获得一个精确的系统模型 $G(z^{-1})$ 却十分具有挑战性，故而 Q 滤波器需要设计为低通滤波器才能保证系统的稳定性。

3 系统的稳定性分析

保证系统的稳定性是控制器设计的前提。改进的控制结构实际上是设计了一个等效控制器 $C_{new}(z^{-1})$ 去替代之前的位置控制器 $C(z^{-1})$ 。等效控制器 $C_{new}(z^{-1})$ 是一个 Youla 参数化的等效控制器，可以表示为

$$C_{new}(z^{-1}) = \frac{C(z^{-1}) + G_m^{-1}(z^{-1})Q(z^{-1})}{1 - z^{-n}Q(z^{-1})} \quad (3)$$

容易得到系统的闭环传递函数为 $W(z^{-1}) = z^{-m}$

$$\frac{C(z^{-1})G(z^{-1}) + Q(z^{-1})G_m^{-1}(z^{-1})G(z^{-1})}{1 + C(z^{-1})G(z^{-1})z^{-m} + (z^{-m}G(z^{-1})G_m^{-1}(z^{-1}) - z^{-n})Q(z^{-1})} \quad (4)$$

由式(4)可知，系统的传递函数的特征多项式可以表示为

$$\begin{aligned} W_{cp}(z^{-1}) &= 1 + C(z^{-1})G(z^{-1})z^{-m} \\ &\quad + (z^{-m}G(z^{-1})G_m^{-1}(z^{-1}) - z^{-n})Q(z^{-1}) \\ &= (1 + C(z^{-1})G(z^{-1})z^{-m}) \\ &\quad \cdot \left(1 + \frac{(z^{-m}G(z^{-1})G_m^{-1}(z^{-1}) - z^{-n})Q(z^{-1})}{1 + C(z^{-1})G(z^{-1})z^{-m}} \right) \\ &= (1 + C(z^{-1})G(z^{-1})z^{-m})(1 + A(z^{-1})) \end{aligned} \quad (5)$$

在式(5)中 $1 + C(z^{-1})G(z^{-1})z^{-m}$ 是闭环稳定的，故而只需保证 $|A(z^{-1})| < 1$ 就可以满足改进的控制器稳定性要求，也就是说 Q 滤波器的设计必须满足如下所示的关系式：

$$|Q(z^{-1})| < \left| \frac{1 + C(z^{-1})G(z^{-1})z^{-m}}{z^{-m}G(z^{-1})G_m^{-1}(z^{-1}) - z^{-n}} \right| \quad (6)$$

由上述分析易知， $Q(z^{-1})$ 需设计为一个带宽小于 $1 + C(z^{-1})G(z^{-1})z^{-m}$ 以及 $1/(z^{-m}G(z^{-1})G_m^{-1}(z^{-1}) - z^{-n})$ 的低通滤波器来满足稳定性要求^[9]。

4 Q 滤波器的参数化设计

在 Q 滤波器的设计阶段，本文采用了一种新颖的设计方法。既然 $1 - z^{-n}Q(z^{-1})$ 的最小化是等效控制器设计的最终目标，那么本文假设 $K(z^{-1}) = 1 - z^{-n}Q(z^{-1})$ ， $1 - z^{-n}Q(z^{-1})$ 的最小化就是 $K(z^{-1})$ 的最小化，求得最小化后的 $K(z^{-1})$ 再反向求出 $Q(z^{-1})$ ，就可得到 Q 滤波器的形式。本研究旨在抑制控制系统中最为常见的、对系统稳定性影响较大的宽带扰动，考虑到系统的稳定及其性能，本文并没有把 Q 滤波器设计为传统的带阻滤波器去抑制宽带扰动，而是以一种新的设计思路去设计 Q 滤波器：宽带扰动可以看成是几个或者多个扰动中心点频率十分接近的窄带扰动的集成，抑制宽带扰动就是要针对不同的窄带扰动设计相应的陷波滤波器，最后使这些滤波器同时作用对扰动反向施力来达到抑制宽带扰动的目的。由上述分析可知，Q 滤波器设计的第一步是要设计抑制窄带扰动的陷波滤波器。从抑制扰动的初衷来看，在扰动频率 w_i 处使得 $K(z^{-1})|_{z=e^{jw_i}} = 0$ 是最理想的设计结果，因为这就意味着该控制器可以将扰动完全抑制掉。首先假设 $K(z^{-1})$ 的形式为 $K(z^{-1})|_{z=e^{jw_i}} = K(jw) = 1 - w^2/w_i^2$ ，明显这种假设是非因果的，于是一种新颖的陷波滤波器被提出^[8]，

如下所示：

$$K(jw) = \frac{1}{1 - \frac{w^2}{w_i^2} + j\eta\zeta \frac{w}{w_i}} \cdot \left(1 - \frac{w^2}{w_i^2} + j\zeta \frac{w}{w_i} \right), \quad (7)$$

其中： ζ 与 η 是两个可调参数，并且 $0 < \zeta < 1$ ， $1 < \eta$ 。对式(7)分析可得：当 $w < w_i$ 时， $K(jw)$ 呈现一个单调递减的趋势，当 $w_i < w$ 时， $K(jw)$ 则呈现出单调递增的趋势，于是在 $w = w_i$ 时， $K(jw)$ 取得最小值 $1/\eta$ ，符合我们的设计初衷，可以达到抑制振动的效果。

由 $Q(jw) = 1 - K(jw)$ 可以得到 $Q(jw)$ ，如式(8)所示：

$$Q(jw) = \frac{1}{1 - \frac{w^2}{w_i^2} + j\eta\zeta \frac{w}{w_i}} \cdot \left(j(\eta - 1)\zeta \frac{w}{w_i} \right). \quad (8)$$

对式(8)分析可得：当 $w < w_i$ 时， $Q(jw)$ 是单调递增，当 $w_i < w$ 时， $Q(jw)$ 则是单调递减；在 $w = w_i$ 时， $|Q(jw)|$ 取得最大值 $(\eta - 1)/\eta \leq 1$ 。由此该种形式的滤波器是一个带通滤波器，符合低通滤波器的前提条件。

设定 $N = |K(jw)|$ ，可以求得陷波滤波器的陷波宽度 Δw 为

$$\Delta w = w_i \sqrt{\frac{\zeta^2(\eta^2 N^2 - 1)}{1 - N^2}}. \quad (9)$$

易知 $0 < N < 1$ ，当 N 为定值时， Δw 会受到 ζ 、 η 两个可调参数的影响。当控制系统中存在扰动时，调节参数 ζ 、 η 使滤波器的宽度可以适应扰动的宽度，当陷波滤波器的宽度在增加的同时， $N = |K(jw)|$ 就会有更多地向0靠近，由于 $Q(jw) = 1 - K(jw)$ ， $Q(jw)$ 就会更多地向1靠近，也就是说 $Q(jw)$ 的带宽会显著增加。这种趋势很容易使式(6)不成立，给系统的稳定性带来挑战。因此，仅用一个带宽适宜的带阻滤波器抑制宽带扰动是不合理的，于是本研究利用多个中心频率点接近的抑制窄带扰动的滤波器去抑制宽带扰动，该种滤波器 $mQ(jw)$ 可以表示为

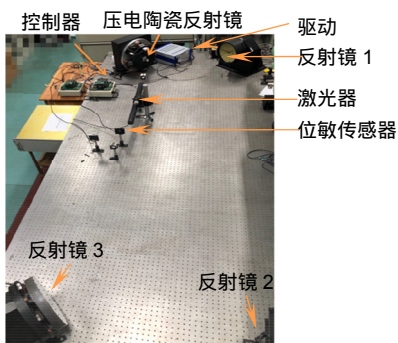


图3 实验平台

Fig. 3 Experimental devices

$$mQ(jw) = \prod_{i=1}^m \frac{1}{1 - \frac{w^2}{w_i^2} + j\eta_i\zeta_i \frac{w}{w_i}} \cdot \left(j(\eta_i - 1)\zeta_i \frac{w}{w_i} \right), \quad (10)$$

其中 m 为抑制窄带扰动的滤波器的个数，由式(10)可知：

$$|mQ(jw)| = m|Q(jw)| = \prod_{i=1}^m \left| \frac{j(\eta_i - 1)\zeta_i \frac{w}{w_i}}{1 - \frac{w^2}{w_i^2} + j\eta_i\zeta_i \frac{w}{w_i}} \right|. \quad (11)$$

由于 $0 < Q(jw) < 1$ ，且每个 $|Q(jw)|$ 具有相似的值，故而可以得出 $m|Q(jw)| < |Q(jw)|$ 。由此可以得出，利用多个中心频率点接近的抑制窄带扰动的滤波器去抑制宽带扰动，比利用单个的带阻滤波器去抑制宽带扰动更有利于保持系统的稳定性。

5 实验结果分析

本文利用如图3所示的实验平台进行实验，主要包括光源(激光器)，一个压电陶瓷反射镜、三个反射镜(反射镜1、反射镜2、反射镜3)、一个位移传感器以及控制器和驱动。其中反射镜1不仅用作反射镜，同时用来模拟扰动。光线由激光器产生，经压电陶瓷反射镜、反射镜1、反射镜2、反射镜3反射后投到位敏传感器，由位移传感器探测光斑的位置后进行反馈，由此提供位置偏差信号给控制器。

为了更好地验证该方法抑制宽带扰动的有效性，我们将本实验的目标设定为一个保持固定不变的值，即 $R(z^{-1}) = 0$ ，整个系统的采样频率为500 Hz，宽带扰动分布在5.5 Hz到9.5 Hz之间，其频域如图4所示。

根据该宽带扰动的频谱图，我们将宽带扰动视为扰动中心频率为6.5 Hz以及8.5 Hz的两个窄带扰动，针对这两个窄带扰动设计式(12)、式(13)所示的两个陷波滤波器，同时作用抑制系统中存在的宽带扰动。

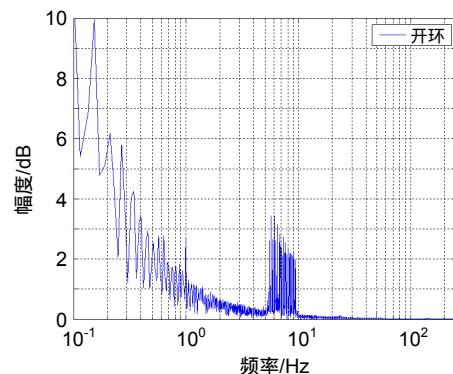


图4 宽带扰动频谱图

Fig. 4 The spectrum of a wideband vibrations

$$K_1(s) = \frac{0.0005995s^2 + 0.0007346s + 1}{0.0005995s^2 + 0.01616s + 1}, \quad (12)$$

$$K_2(s) = \frac{0.0003506s^2 + 0.0005617s + 1}{0.0003506s^2 + 0.01011s + 1}, \quad (13)$$

$$mK(s) = K_1(s) \times K_2(s). \quad (14)$$

由上述分析容易得到 Q 滤波器的表达式：

$$mQ(s) = 1 - mK(s) = \frac{1.113E - 05s^3 + 0.000163s^2 + 0.02498s}{2.102E - 07s^4 + 1.173E - 05s^3 + 0.001114s^2 + 0.02627s + 1}. \quad (15)$$

其伯德图如图 5 所示。图 6 是分别采用传统的比例-积分控制方法以及上述基于 Youla 参数化的改进的宽带扰动抑制方法抑制扰动后的对比结果图。由图 6 可以看出改进的宽带振动抑制方法较传统的比例-积分控制方法抑制效果有了显著的提升。

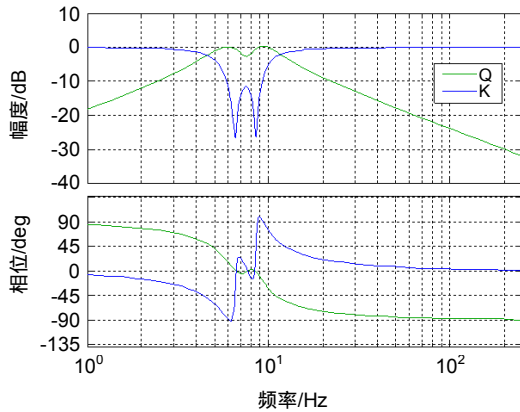


图 5 Q 滤波器的伯德图

Fig. 5 Bode response of Q-filter

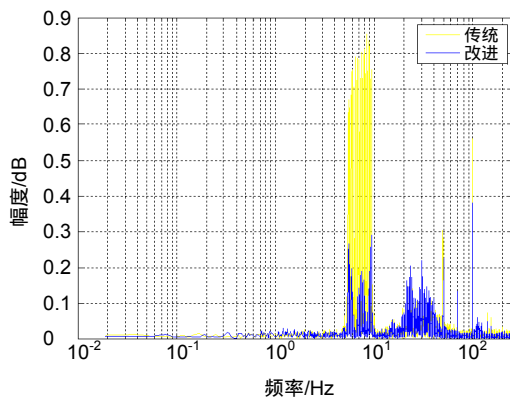


图 6 不同控制器作用下的闭环误差对比图

Fig. 6 Spectra of closed-loop errors with different controllers

6 结论

本文提出一种基于 Youla 参数化的宽带扰动抑制

方法来提高系统的扰动抑制能力。通过控制器的结构分析、Q 滤波器的参数化设计及实验分析，证实了该方法的有效性及其可行性。由实验结果可知，在振动频率可以获取的情况下，该方法较传统的比例-积分控制方法对宽带扰动的抑制效果有明显的提升。此外，该方法模型依赖程度低，并且只利用了一个位置传感器去探测跟踪误差信号并进行反馈，成本低、实施简便，因此该方法可以应用于多种需要进行扰动抑制的工程实际中。不过本实验中的扰动信号为一个已获取的信号，为了将本方法推广到更多实际的工程项目中，下一步的工作重心我们将放在扰动的在线识别以及 Q 滤波器参数的在线调节。

参考文献

- [1] Sivo G, Kulcsár C, Conan J M, et al. On-sky validation of an optimal LQG control with vibration mitigation: from the CANARY Multi-Object Adaptive Optics demonstrator to the Gemini Multi-Conjugated Adaptive Optics facility[C]//American Astronomical Society Meeting, 2018.
- [2] Petit C, Conan J M, Kulcsár C, et al. First laboratory validation of vibration filtering with LQG control law for adaptive optics[J]. *Optics Express*, 2008, **16**(1): 87–97.
- [3] Tang T, Yang T, Qi B, et al. Error-based feedforward control for a charge-coupled device tracking system[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2018, **66**(10): 8172–8180.
- [4] Glück M, Pott J U, Sawodny O. Piezo-actuated vibration disturbance mirror for investigating accelerometer-based tip-tilt reconstruction in large telescopes[J]. *IFAC-PapersOnLine*, 2016, **49**(21): 361–366.
- [5] Sivo G, Kulcsár C, Conan J M, et al. First on-sky SCAO validation of full LQG control with vibration mitigation on the CANARY pathfinder[J]. *Optics Express*, 2014, **22**(19): 23565–23591.
- [6] Guesalaga A, Neichel B, O'Neal J, et al. Mitigation of vibrations in adaptive optics by minimization of closed-loop residuals[J]. *Optics Express*, 2013, **21**(9): 10676–10696.
- [7] Xue Z Y. Research on acquisition and tracking technologies in satellite optical communication[D]. Chengdu: Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, 2015. 薛正燕. 卫星光通信捕获跟踪技术研究[D]. 成都: 中国科学院光电技术研究所, 2015.
- [8] Tang T, Qi B, Yang T. Youla-Kucera parameterization-based optimally closed-loop control for tip-tilt compensation[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2018, **18**(15): 6154–6160.
- [9] Tang T, Niu S X, Yang T, et al. Vibration rejection of Tip-Tilt mirror using improved repetitive control[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2019, **116**: 432–442.
- [10] Sun L T, Chen X, Tomizuka M. Enhanced wide-spectrum vibration suppression based on adaptive loop shaping[C]//2016 American Control Conference (ACC), 2016.
- [11] Sun L T, Jiang T Y, Xu C. Adaptive loop shaping for wideband disturbances attenuation in precision information storage systems[J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2017, **53**(5): 3301813.
- [12] Tang T, Niu S X, Ma J G, et al. A review on control methodologies of disturbance rejections in optical telescope[J]. *Opto-Electronic Advances*, 2019, **2**(10): 190011.

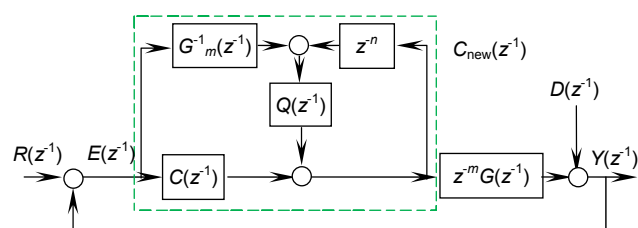
Optimal design of Youla controller for vibration rejection in telescopes

Niu Shuaixu^{1,2,3}, Jiang Jing^{1,2}, Tang Tao^{1,2*}, Yang Tao^{1,2}, Bao Qiliang^{1,2}

¹Key Laboratory of Optical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China;

²Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China;

³University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China



The improved Youla controller structure

Overview: Vibration rejection is a key technology of telescopes with stable accuracy of μrad level. Because the image sensor has the characteristics of low sampling rate and large delay time, the bandwidth of the control system is limited, and the control system cannot well mitigate vibrations, especially the wideband vibrations with wide range and large energy. Therefore, some new methods of vibration rejections have been developed, such as disturbance feed-forward control, as well as some improved control structures and optimized controls. Although these methods have the advantage of the control loop bandwidth without the limitation of the low sampling rate and large delay time of image sensor, they inevitably have some disadvantages: the closed-loop performance of the system is not only affected by the low-frequency drift and high-frequency noise of the measurement link, but also by the accuracy of the disturbance and the precision of the dynamic model. Therefore, an improved wideband vibration rejection method based on Youla parameterization is proposed to reduce these problems for improving the vibration rejection ability of the system. In the case that the disturbances frequency can be obtained, this method can mitigate wideband vibrations by designing an appropriate Q-filter to accommodate to the wideband vibrations. Considering the stability and closed-loop performance of the system, this paper proposes a novel design method of Q-filter to mitigate wideband vibrations, which is based on that wideband vibrations can be viewed as the multiple narrow-band vibrations with similar central frequencies so that multiple notch filters can be designed to act simultaneously to mitigate wideband vibrations. In this paper, we focus on introduction of the improved wideband vibration rejection method and its stability, and the design of the Q-filter. What's more, experiments are carried out to verify the correctness and feasibility of the method. Because this improved EDOB controller has a low dependence on the system model, the vibration rejection ability of the control system won't be restricted by the noise in the loop. The theoretical and experimental results show that this method can effectively mitigate wideband vibrations and improve the vibrations rejection ability of the system. Furthermore, this control method only utilizes an image sensor that only provide position deviation, which is not only economical, but also convenient to implement. Moreover, this method can be used not only in the tip-tilt mirror system but also in other servo control systems because of its simple structure and design process. Next work will concentrate on automatically designing for the parameters of the Q-filter, so we need to do the online identification of disturbances firstly.

Citation: Niu S X, Jiang J, Tang T, *et al.* Optimal design of Youla controller for vibration rejection in telescopes[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2020, 47(9): 190547

Supported by Youth Innovation Promotion Association CAS

* E-mail: prettang@gmail.com