

Laurence J. Thorpe



Yasuyuki Tomita



Ken Ito

高清外摄镜头的自动聚焦系统

作者： Laurence J. Thorpe、Yasuyuki Tomita和Ken Ito

使用当代高清镜头-摄像机系统报道体育赛事和特别活动，是一种全方位的工作，需要摄像师与节目导演密切协作，应用娴熟的构图、左右摇摄和上下摇摄等技巧，对复杂三维场景中的目标物体进行准确的聚焦。由于缺少真正的高清寻像器；高清拍摄中的聚焦敏感度远远高于标清；各种不同的场景照明条件需要较大的镜头光圈设置(导致景深变浅)等因素综合在一起，使对场景中快速移动物体进行准确聚焦尤为困难。这对摄像师造成了较大的压力，使其在长时间拍摄时过于疲劳。本文介绍了功能强大的创新自动聚焦技术，最近推出的两款大变焦高清外摄镜头(用于当今体育报道的镜头变焦范围达到了100:1)中采用了这种技术。它借用了拍摄静止图像的单反数码相机的一项核心技术——“二次成像相位检测系统”。该技术加入了保证高成像聚焦精度的检测功能，在跟踪场景中快速移动的物体时可保持精确聚焦。从而实现了稳定的高清图像锐度，使摄像师可以全力关注极为重要的构图创作，并减少镜头-摄像机位置控制带来的疲劳。

在开发当前大变焦高清系列镜头过程中，最重要的考虑因素是当拍摄环境中各种不受欢迎的物理干扰被系统放大时必须保持图像稳定性，如风、摄像机平台震动、强干扰声或其他扰动等。当前非常先进的光学稳定系统，是我们多年研究改进的重要成果，也是各种相关技术不断发展和源于现场经验的持续改善的明证。

要解决任何镜头聚焦操作的自动放大问题，必须采取更为谨慎的方法。清晰聚焦是优质高清的最重要的特性，不能有任何妥协。这就需要提高镜头聚焦控制灵敏度，并要求摄像师的注意力持续高度集中。摄像师既要努力确保高清图像构图，又要跟踪高速移动的体育赛事中的相关动作，同时还要保证清晰聚焦——要求毫不松懈关注所有这些因素，这对摄像师造成了极大的压力。如何解决该问题是一项很有价值的工程技术挑战。

我们很早就认识到，在较小的2/3英寸宽屏高清画幅的物理限制下确保清晰聚焦，一直是行业内普遍面临的挑战，即使是最有经验的摄像师也束手无策。与标清相比，高清本身就意味较小的光学“允许弥散圆”。摄像师不但要克服当代最好的高清寻像器也无法避免的锐度限制，还要同时应对多种影响成像的操作动态条件，这使聚焦更加困难。

开发自动聚焦(AF)系统的一个核心理念，是要确保摄像师能够全心专注于自己的首要职责。这些只有摄像师才能掌控的任务包括：操作镜头-摄像机系统、对目标图像构图、在导演的指示下调整焦距以及(在复杂场景中)选择最清晰聚焦的场景物体等。

在2006年，我们推出了自动聚焦系统的原型，并将其应用于100:1的大变焦比高清变焦镜头。随后，为达成以下目标在全世界范围内进行了早期技术展示：

- 发现所采用总体系统方法的可实施的标准。
- 允许广大专业摄像师测试系统、评价性能及提出建议。
- 发现操作问题。

数码单反相机的一个重要优势是避免了因视差引起的模糊。从略微不同的角度拍摄相同场景时，前景相对于背景会产生偏移——这种偏移称为视差——这是很容易产生的。如果摄像机和镜头没有围绕镜头入瞳旋转，在全景摄影的两个相邻图像重叠处就会出现视差。因此，为避免视差问题，数码单反相机中采用了通过镜头(TTL)检测系统——将由镜头射到主图像传感器的光束进行分离，并对分离出的部分光线进行检测。本文所讨论的高清镜头中也采用了相同的技术。

TTL二次成像相位检测系统的工作原理

这种系统的基本光学原理是：主图像平面(高清摄像机的图像传感器)与两个辅助图像分别在各自线阵传感器上同时准确聚焦。完全合焦时，会有一个假想的点在高清摄像机三个图像传感器上精确地聚焦，并且该焦点也正好精确位于两个线阵传感器的中心。两个中心的物理距离被称为计算算法的精确参考值(图1)。

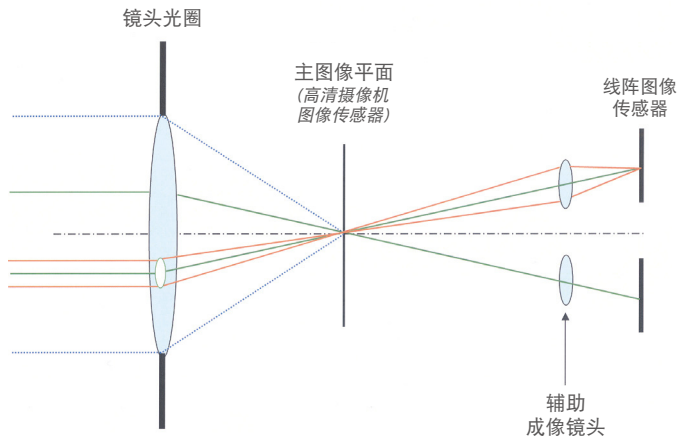


图1. 主高清外摄镜头用一个大镜片表示。在高清摄像机图像传感器上对主体图像精确聚焦。主光线束中有少量光线通过辅助双镜头系统，并分别在两组线阵传感器上聚焦。

图2描述了在两种不同的主镜头散焦情况下，系统的工作状态。

图2(a)显示了主镜头聚焦镜片向后移动时的情况。在摄像机图像传感器上的主图像明显散焦，同时两个辅助图像也在各自的线阵图像传感器上散焦。请注意，两个散焦的辅助图像的位置发生移动——趋于线阵的外侧边缘。两者间的物理距离增加到 D_I^* 。当检测到距离已经增加时，就可以明确地通知算法：必须向前移动主镜片以开始重新聚焦。这种已知的预测信息对总体系统速度有重要的影响。

与此同理，当主镜头聚焦镜片向前移动时，散焦的辅助图像移向线阵图像传感器的内侧边缘。

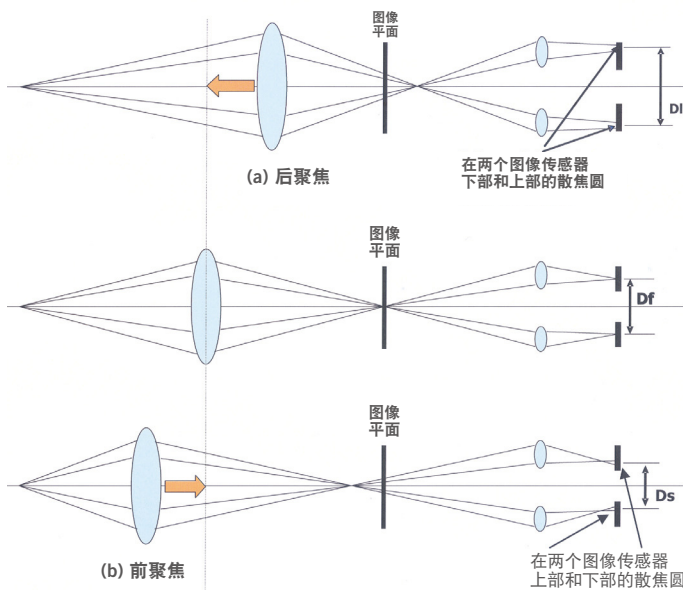


图2. 主镜头散焦的两个方向及两个散焦辅助图像间的物理距离相应变化之间的关系。

现在，两图像间的物理距离缩短了。同时，这也提供了重要的预测信息，可以使系统明确镜片的移动方向以开始聚焦校正。

如图3所示，在合焦时，会在精确的参考距离 D_f^* 处形成两个高对比度的辅助图像。即使严重失焦(两个方向)，辅助光学系统的检测器也可以检测到足够的细节，以确定两个失焦的低对比度辅助图像间的距离。

使用阵列传感器实时检测光学聚焦

检测特定真实场景中所选物体有三个要素：

- (1) 所选物体本身可能没有足够多的细节——在这种情况下，需要连续检查多个小区域。
- (2) 物体可能沿水平x轴，垂直y轴和纵深z轴这三个轴线中的一个或多个移动——在这种情况下，需要由多个传感器提供信息进行复杂的计算。
- (3) 物体可能处于快速移动中——在这种情况下，需要尽量实时地进行检测和相关的计算。

*这些字母代表两个辅助图像之间特定的光学距离。当系统未精确合焦时，该距离以 D_f 表示(“f”代表“焦点”)。当失焦时(后)，以 D_I 表示(“I”表示两图像之间的“最长”距离)。当沿相反方向失焦时(前)，以 D_s 表示(“s”表示两图像之间的“最短”距离)。

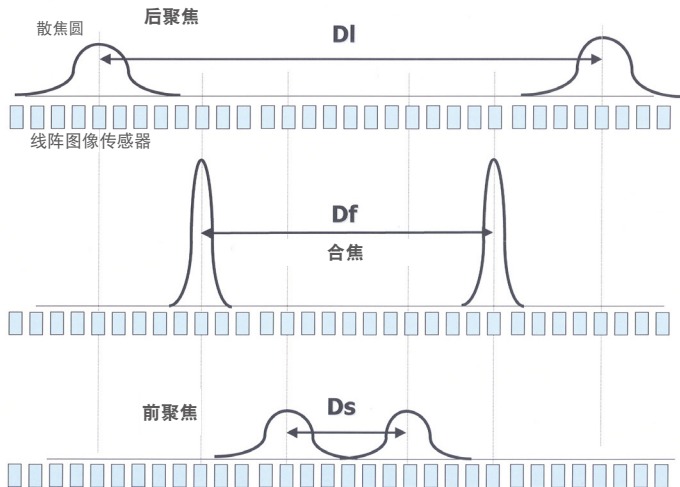


图3. 简要描绘用于自动聚焦的二次成像相位检测系统的重要测量技术。

为了达到以上目的，我们设计制造了独特的自动聚焦传感器阵列，包含多个在整个图像平面上空间排列的阵列传感器。传统面阵图像传感器（具有多个垂直行，每行由多个水平传感器组成）对于60P高清的正常垂直周期累积与读取时间为16.7ms。对于60i高清所需的时间则更长，生成一幅全帧视频需要33.4ms的时间。

要达到向高清摄像机提供全动态图像的高清镜头的必要检测速度，必须大幅度缩短读取时间。在新型自动聚焦传感器阵列中，可以在数毫秒内对单个传感器单独进行访问和读取操作。当前采用的自动聚焦传感器为CMOS——但将来可能出现其他的传感器技术。在图4中简要说明了自动聚焦传感器的原理。

此外，还开发了现场可编程门阵列(FPGA)微电路，用来处理来自这些传感器的视频信号。此过程只需几毫秒即可完成。

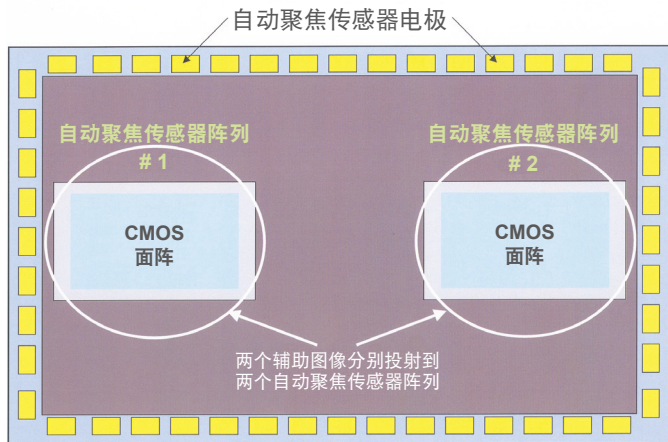


图4. 二次成像相位检测系统工作原理——由两个辅助图像(投射到由传感器空间阵列构成的两个面阵检测器上)检测所需的自动聚焦差异信息。

自动聚焦检测系统的实现

如图5所示，辅助成像系统是特别粘合在一起的两个小镜头，对主图像平面进行采样。两个辅助成像镜头分别将生成主物体图像的部分光线投射在各自的自动聚焦传感器阵列上。

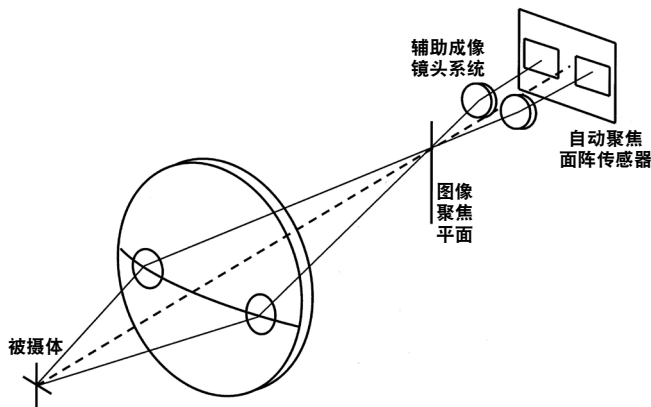


图5. 简要描绘两个二次成像系统及其相关自动聚焦传感器的光学系统布置。

由于相位差检测系统依赖于散焦点在整个场景中的差异移动，两个镜头专门用于生成两个可完成这种移动的图像。将两个镜头适当并排放置，可以在两个传感器阵列上生成两个单独的图像。首先需要特别注意的是，相对于主高清镜头光学系统，这两个子光学系统与其不在同一光轴上。这会产生一个光学作用，使散焦图像转化为两个辅助图像的水平移动。

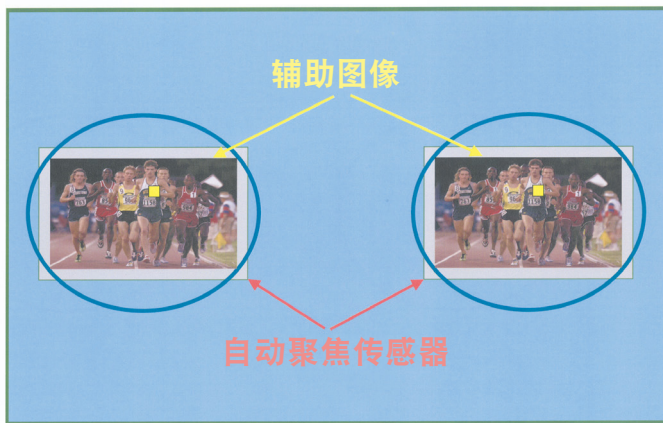
其次需要特殊注意的是，辅助光学图像是由构成主镜头物体图像的全部光线的一小部分形成的。从而，其等效光圈的F值要比主镜头高。也就是说，辅助图像的等效焦距远远大于主图像。因此，即使主图像严重散焦，辅助镜头系统的长焦距也可产生清晰的图像轮廓，而在较大的主图像上，该轮廓会极其模糊。

在系统付诸实施时，自动聚焦传感器并不是像图5那样放置于主图像传感器之后，而是在等效的光学距离处。

自动聚焦传感器的工作方式

散焦测量系统特有的差异图像移动检测需要两个单独的传感器系统，每个系统含有一个传感器空间阵列，用于检测并将输出反馈到中央处理单元(CPU)进行数据采集和处理。图6模拟了两个不同图像分别投射到各自的传感器阵列上的情形。当主图像精确合焦时，两个蓝色的圆圈表示图像投射在两个传感器阵列上并形成中心对称。

自动聚焦传感器阵列

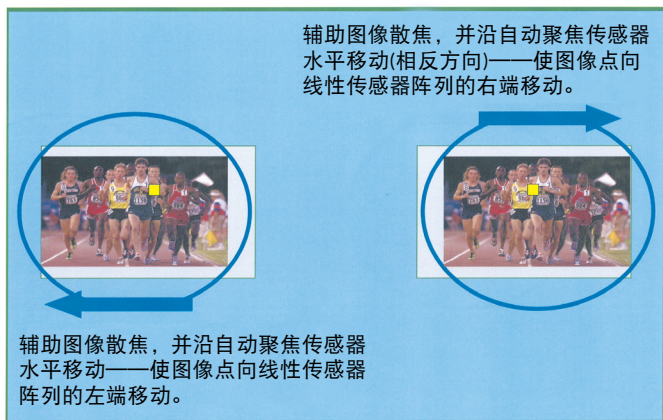


合焦状态

图6. 说明辅助镜头将形成主图像的全部光线的一小部分投射到两个自动聚焦传感器中心。

当主图像散焦时，辅助图像也明显处于散焦状态。但由于二者不同轴的光学结构，两辅助图像也已相对移动。当主镜头聚焦镜片如前面图2(a)所示后移，两个辅助图像将如图7所示，分别朝相反方向移动。

自动聚焦传感器阵列

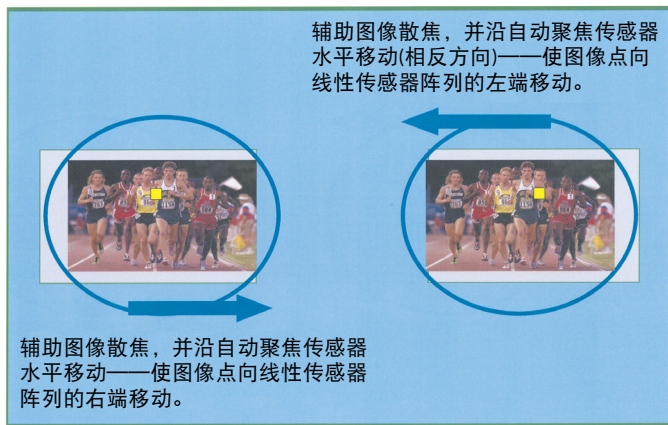


后失焦状态

图7. 差异图像的重新定位是由二次成像系统采用不同轴的光学设计造成的，并由各自的传感器阵列进行检测。

这两个辅助图像可预测的差异重新定位，对于高效实现前面图2描述的图像相位检测机制至关重要。图8显示了主镜头聚焦镜片移向精确合焦位置的前方时，两个辅助图像交替的差异移动。

自动聚焦传感器阵列



前失焦状态

图8. 差异图像的重新定位是由二次成像系统的光学设计造成的，并且每个传感器阵列会在其自身的图像区域内检测这种移动。

对快速移动被摄体保持自动聚焦

当代单反数码相机的连拍速度越来越高——10张/秒，这是迄今为止深受专业摄影师青睐的连拍功能的最高记录。拍摄大场景中快速移动的被摄体特别需要高帧速率，这不断促进当前相位检测自动聚焦系统的创造性发展。

例如拍摄向镜头方向飞奔的赛马，摄像机的瞬时采样速率就成为一个重要因素。疾速奔驰的赛马其速度可以达到每小时40英里，也就是每秒59英尺。这意味着在单反数码相机每生成一个完整帧(1/10秒)时，赛马将跨过6英尺的距离。这对于高清最重要特征——全动态图像拍摄(60帧/秒的采集速率)将构成严峻挑战。

电影高清摄像机的特殊检测要求

自动聚焦镜头与数字电影高清摄像机配合，可以实现高达每秒60个完整帧的拍摄速度，比当代单反数码相机快6倍。更高的拍摄速度要求大幅提升硬件和软件性能，以满足精确控制高清镜头的自动聚焦反馈校正系统的要求。尤其是高清大变焦比镜头必须能够充分满足各种体育赛事户外广播报道的要求——某些还会涉及高速运动，如：赛车、赛马、赛狗、自行车比赛及滑雪等。图9展示了众多体育赛事中高速运动的重要被摄体的一小部分示例。在这种报道中，需要高清自动聚焦系统跟踪重要被摄体，并保持准确聚焦。



图9. 快速移动对高清自动聚焦系统提出了特殊挑战：灵缇犬的速度高达62英尺/秒；自行车赛车的速度为80英里/小时(118英尺/秒)；赛马的速度为40英里/小时(59英尺/秒)。

在长焦拍摄中(常用于赛马报道)，景深非常浅。例如，镜头焦距设置为930mm且光圈设置为f4.7时，景深将减少到仅60英尺。以60英尺/秒速度移动的被摄体将会对摄像师在整个拍摄中保持精确聚焦带来极大困难。当然，这对有经验的摄像师并非无法实现——但这需要摄像师视觉注意力高度集中，并且长时间操作高清摄像机进行赛事报道极易导致疲劳。

在这种情况下，快速可靠的自动聚焦系统的辅助对摄像师无疑大有益处。但是，系统需要可靠而准确地跟踪赛马的运动，并连续对保持聚焦的反馈回路进行更新——所有这一切都可以通过寻像器观察。这要求快速检测和快速更新镜头聚焦镜片运动——理想的时间应该远少于形成一个高清视频帧的时间。

根据赛事的情况、摄像机位置的安排、摄像师的移动以及导演的创作要求，场景中被摄体的运动可以是沿x、y、z三个轴的多个矢量的复合。对移动被摄体进行成像的单个传感器会产生多种输出，这将导致相关的数据处理数量非常庞大。阵列传感器的巨大优势在于其读取速度非常快，可为检测系统中的计算算法提供高度相关的信息。

跟踪快速移动被摄体的标准

要跟踪纷乱场景中快速移动的被摄体，必须对自动聚焦控制系统的三个主要因素进行优化，才能实现高速操作：

- (1) 自动聚焦检测系统必须尽可能实时地提供可靠的检测信息。
- (2) 自动聚焦算法的数据处理与相关的计算速度必须非常快。
- (3) 驱动控制光学聚焦镜片的聚焦马达的数字电子电路与数字伺服系统，必须以非常高的速度和精度运行。

在历经多代EOS数码相机的发展后，这三个要素已经逐步得到改善和提高——尽管当前机型的连拍速度已经提高到10张/秒的水平，但专业摄影师的要求也随之水涨船高。然而，还需要大量的改进才能满足高清摄像机进行60场/秒隔行扫描(30帧)和60帧逐行扫描的更高要求。幸好，当前广播级镜头中的数字伺服系统经过多年的发展优化，已经能够满足富于创造力的摄像师连续、高速、实时的操作需要。

自动聚焦系统的操作控制

由于二维高清图像可能含有多个迥然不同的主体和对象，而且彼此相对运动，必须采用一些能够区分这些主体和对象的方法，从而有助于通知检测系统，摄像师已经选择对哪个特定的被摄体进行清晰聚焦。通过适当地选择在图像平面上布置大量传感器可以解决此问题。摄像师会控制寻像器中的方框形游标，从而在复杂的三维场景中选择需要清晰聚焦的特定被摄体。通过控制寻像器中的方框形游标就可以完成这一选择。进而，这个方框形游标向检测系统发送信号，通知只选择方框内的传感器参与自动聚焦计算。

所选的自动图像聚焦区域由摄像师手动调节聚焦控制手柄进行定位。通过镜头控制器与摄像机之间的数字信号传输，选定的区域会显示在摄像机寻像器上。图像区域由寻像器上的方框形游标来标识，其尺寸可通过旋钮进行选择，还可以通过聚焦控制手柄上的小操控杆来改变其位置(图10)。

自动聚焦传感器阵列



前失焦状态

图10. 摄像师使用方框形游标，可以向自动聚焦检测系统发送信号，以决定哪些传感器将参与所选场景中被摄体的自动聚焦计算。

TTL二次成像相位检测系统的实现

1/2档光圈的少量光线由分光棱镜从通过镜头的主光学路径分离出去，如图11所示。

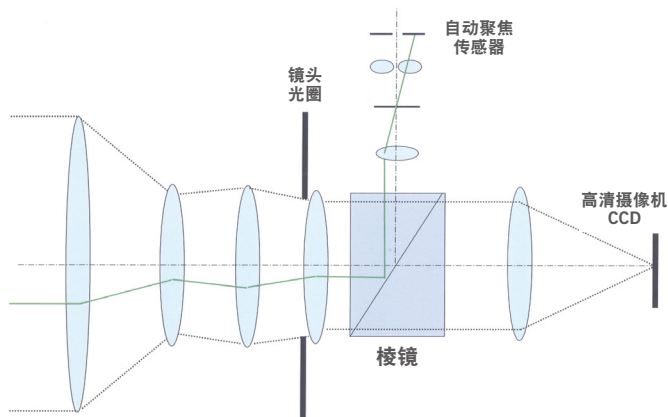


图11. 说明将棱镜放置于高清外摄镜头的主光学路径中，以便对通过镜头形成图像的光线进行分离，使其投射在二次成像系统中，用于自动聚焦检测。

将棱镜放置在镜头光圈后方，可确保棱镜成为整个镜头系统中光学传递路径的一部分，同样可使用较小的分光棱镜完成这一操作。完整的自动聚焦控制系统如图12所示。

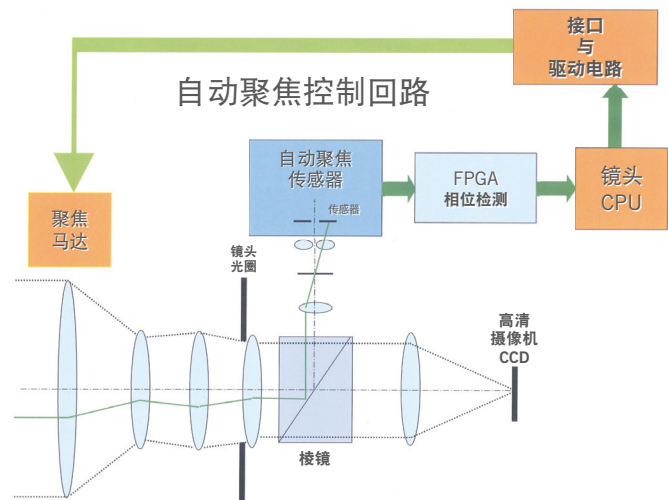


图12. 自动聚焦系统的完整控制回路。

数字伺服控制系统

高清外摄镜头中的CPU必须要满足变焦、聚焦和光圈设置等的实时操作要求。非常重要的恒定角度聚焦系统(CAFS)会对CPU提出额外的计算要求，以自动对变焦镜片进行适当调整，从而校正由移动聚焦镜片造成的视场角改变(传统的聚焦呼吸效应)。多年来，相关的高清外摄镜头数字伺服系统不断进行优化，可以实现非常迅速且

高度精确的移动。

两者均使用具有16位分辨率的高精度微型光学编码器，可以向控制CPU提供明确的位置信息。对于变焦比为100:1的镜头，可以在0.6秒内完成整个变焦范围的操作，在0.8秒内完成整个聚焦范围的操作。这样的速度足以支持在自动聚焦操作过程中同时控制两个伺服器。

预测算法

根据拍摄环境的差异(所报道事件的特点和各种与所选准确聚焦被摄体移动相关的因素)，摄像师可以通过控制盒上的一个小旋钮对反馈控制回路的操作速度进行选择。

在需要高速控制系统时，采用具有一定程度的计算算法预测能力的软件系统，可以增强此控制系统。阵列传感器所提供的数据传输了与运动方向相关的矢量信息，然后CPU能够对被摄体一两毫秒后可能到达的位置进行插值计算。根据此预测，自动聚焦CPU可以向聚焦数字伺服系统发布指令，以提高其预判所需最新聚焦位置的操作速度。

结论

本文介绍了一种集成到高清大变焦比外摄镜头中的创新自动聚焦系统。这种聚焦系统专门为满足全动态高清视频拍摄的苛刻要求而设计，在这种拍摄中频繁出现快速的被摄体运动(如体育赛事)。系统的核心在于一种创新的自动聚焦检测系统，后者使用专门开发的自动聚焦传感器，以高速提供较大场景中快速移动被摄体的瞬时位置信息。与对比度检测相比，二次成像相位检测可以提供明确的预测信息，有助于决定聚焦镜片的移动方向以恢复准确聚焦。另外一个优势在于，当被摄体失焦时，可以提供可靠的检测信息。这种系统能够将所检测数据的高速处理和专用CPU的高速计算能力结合在一起。进而控制可以驱动镜头聚焦镜片移动的高速数字伺服系统。在多种真实的现场测试中，此自动聚焦系统的整体精度和速度性能都表现优异。我们确信在高清拍摄领域又取得了一项重要的性能提升成果。该成果不但有助于消除长时间使用高清设备报道体育赛事所引发的压力和疲劳，还可以保证对选定的快速移动被摄体进行准确聚焦，从而提升了拍摄创作的附加价值。