

螺母型超声电机驱动的综合透镜调焦系统

周铁英^{①*}, 陈宇^①, 鹿存跃^①, 傅德永^①, 胡笑平^②, 李毅^②, 田斌^②

① 清华大学物理系, 北京 100084;

② 博立码杰通讯(深圳)有限公司 深圳 518031

* E-mail: zhouty@tsinghua.edu.cn

收稿日期: 2008-11-18; 接受日期: 2009-05-27

国家自然科学基金(批准号: 50577035, 10676015)和国家高技术研究发展计划(“863”计划)(批准号: 2006AA02Z472)资助项目

摘要 介绍一款螺母型超声电机驱动的综合光学调焦模组系统. 该系统用光学镜头(M6 或 M7)作为转子, 粘有压电元件的多面体铜管作为定子, 成像传感器安放在定子轴的底部. 驱动芯片(IC)控制电机运行. AF 模组尺寸是 8.5 mm×8.5 mm×5.9 mm. 转子的外螺纹与定子的内螺纹相互啮合. 当驱动 IC 激励定子上的压电片时, 在定子中激励出沿圆周传播的面内弯曲行波. 图像质量由多次成像的清晰度反馈到驱动 IC, 再由驱动 IC 对镜头位置进行控制, 从而实现 AF 功能. 工作时功耗小于 0.25 W, 静止时功耗为 0. 调焦精度<10 μm, 运动速度>3 r/s, 响应时间<10 ms. 该系统模组还具有耐冲击和抗跌落, 机构简单没有附加传动机构等特点. 在试验样机中已经获得 3~5 MP 的图像分辨率.

关键词

超声电机

模组

驱动 IC

Auto-focus (AF)

1 引言

随着手机产业的迅速发展, 人们对手机照相功能的要求越来越高. 但是由于手机的体积限制, 使得用于手机的照相模组体积要远远小于用于数码相机的照相模组, 并且需要省电节能, 成本低廉, 工作稳定, 抗冲击. 传统的电磁电机虽然已经研究得非常成熟, 但是随着电机尺寸的减小, 其效率急剧下降^[1], 已遇到小型化的技术瓶颈. 目前许多公司都将目光集中到超声电机上. 超声电机是利用压电材料的逆压电效应制成的新型驱动器. 它由定子、转子以及施加预压力的机构等部件构成. 把超声频域交变电压施加在压电陶瓷上可以使定子产生超声振动, 通过定子与转子之间的摩擦力驱动转子运动^[2]. 超声电机的主要特点: 1) 大力矩低转速, 不需减速机构; 2) 能量密度大, 可达电磁电机的 3~10 倍; 3) 响应速度快,

仅 ms 量级; 4) 因为靠摩擦驱动, 具有自锁的功能, 定位精度高; 5) 无电磁干扰, 也不怕电磁干扰; 6) 运行基本无噪声.

日本在超声电机的产业化方面一直处于领先地位. 早在 20 世纪 80 年代, 佳能公司就已经成功地将超声电机用于相机的调焦系统, 实现了超声电机的产业化. 2005 年韩国三星公司推出了具有光学变焦功能的手机, 并陆续研发出用于驱动光学变焦模组的多款超声电机, 以及惯性冲量式直线超声微电机.

2005 年美国 New Scale Tech 公司的 Squiggle 电机问世^[3]. 其结构是通过带有内螺纹的两端附加的螺母堵头驱动带有外螺纹的轴, 由此实现直线运动. 该螺纹轴的顶端通过传动机构使透镜模组进行调焦和变焦^[4]. 图 1 是螺杆弯曲超声电机结构和示意图, 以及用于模组的驱动机构.

引用格式: 周铁英, 陈宇, 鹿存跃, 等. 螺母型超声电机驱动的综合透镜调焦系统. 中国科学 E 辑: 技术科学, 2009, 39(10): 1650—1654

Zhou T Y, Chen Y, Lu C Y, et al. Integrated lens auto-focus system driven by a nut-type ultrasonic motor USM. Sci China Ser E-Tech Sci, 2009, 52(9): 2591—2596, doi: 10.1007/s11431-009-0246-6

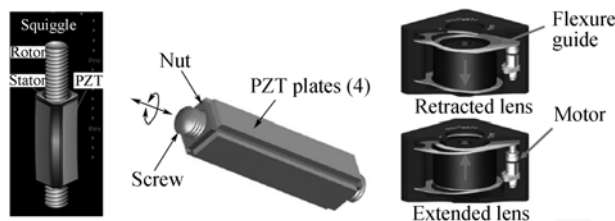


图 1 螺杆弯曲超声电机结构示意图, 以及用于模组的驱动机构

关于螺纹驱动直线电机实际上早在 1989 年日本 Ueha 教授^[4]就进行了研发. 该电机是直径 40 mm 的面外弯曲行波, 如图 2 所示, 期望用于透镜调焦/变焦系统. 因为该电机效率低, 没有得到进一步的研究和应用.

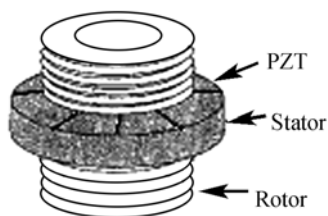


图 2 面外弯曲螺纹超声电机

New Scale Tech 公司的 Squiggle 电机是采用自由-自由梁的弯曲模态. 这种模态易于制作细长型结构, 不宜与镜头装配成整体模组.

清华大学物理系在 2005 年与博立码杰通讯有限公司合作, 研发了一款面内弯曲行波超声电机, 如图 3 所示. 该电机的定子为管状, 外表面是形似螺母的多面体, 内表面是与镜头外螺纹配合的内螺纹^[5~7]. 该电机的优点在于: 1) 定子和转子的孔径内均可以嵌入透镜片, 不需其他传动机构从而实现了调焦系统的一体化设计; 2) 通过螺纹直接驱动镜头转子, 使镜头转子的旋转运动直接变为直线运动进行调焦, 省掉了齿轮等传动装置, 零件数目少; 3) 可实现微米定位精度; 4) 摩擦力就是驱动力, 减少了摩擦损耗, 提高了效率(与用齿轮或螺纹传动机构驱动镜头转子的方法相比); 5) 螺纹配合抗跌落耐冲击; 6) 适用于低温环境(需使用低温压电元件).

目前该电机已经试用于手机样机, 组装成集成的 AF 模组^[8,9], 如图 4 所示.

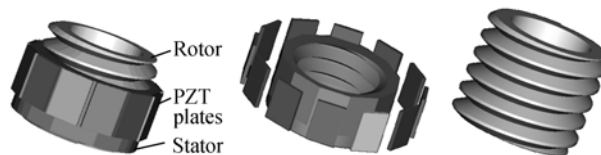


图 3 面内弯曲螺母型超声电机

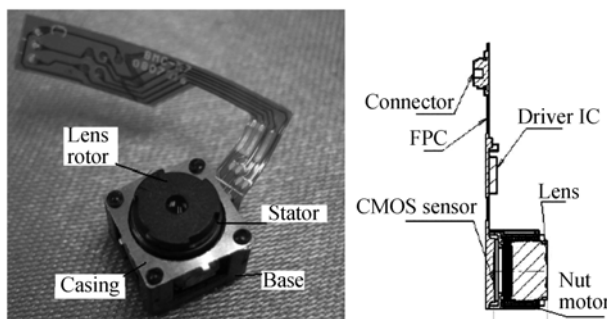


图 4 螺母型超声电机驱动集成模组系统

2 电机结构和工作原理

2.1 电机结构

螺母型超声电机主要由 3 个部分组成: 定子、转子和压电元件. 其中定子为一个多边形金属管(如图 3), 该管外壁加工成多个平面(定子截面可以为 6, 8, 9, 12 等正多边形), 内壁加工出内螺纹, 转子为一具有外螺纹的圆柱或圆筒, 其与定子内螺纹相啮合, 转子在定子的圆管内可以旋转并通过螺纹直接转换为沿轴向的直线运动. 压电元件为等厚度的矩形薄片, 极化方向沿厚度方向, 并粘贴到多边形金属管外壁的平面上.

2.2 工作原理

由于压电元件较薄, 可以忽略其影响, 将定子看作一薄壁圆管. 根据振动理论, 自由状态下, 薄壁圆管沿圆周方向的 2 阶和高阶振动模式如图 5 所示. 由于共振频率越高, 振动衰减越大, 所以一般优先选择低阶模式作为工作模式.

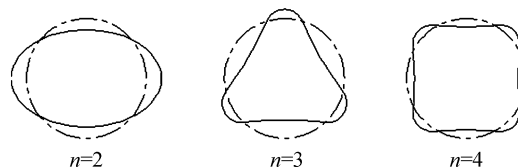


图 5 振动模式示意图(虚线和实线分别表示变形前后的形状)

对压电元件施加某一频率的交流电信号时, 就会在定子壁上激励出弯曲振动. 设用正弦电信号激励某一压电陶瓷片(第*i*片), 可以激励出定子上的*n*阶驻波

$$U_i = A \sin n(\theta - \phi_i) \sin(\omega_n t), \quad (1)$$

其中, *A* 为振幅, ω_n 为 *n* 阶模态的激励信号频率, θ 为定子壁上对应点位置的角度, ϕ_i 为第 *i* 个压电陶瓷片对应位置的角度, 并定义逆时针为正方向.

为了使定子表面质点产生驱动转子运动的椭圆轨迹, 则需要多个压电元件的适当组合. 对于横截面为八边形的定子(如图 6 所示), 将 8 片压电元件分为 2 组, 每一组的 4 片压电元件分别施加 $\sin \omega_n t$, $\cos \omega_n t$, $-\sin \omega_n t$ 和 $-\cos \omega_n t$ 的电信号, 则 8 片压电元件分别可以激励出驻波. 定子总的振动就是这 8 个驻波的叠加, 如下式

$$U = \sum_{i=1}^8 A \sin \left[n \left(\theta - \frac{i-1}{4} \pi \right) \right] f_i(\omega_n t), \quad (2)$$

式中, *i* 为压电元件的编号(对应 $\phi_i = \frac{i-1}{4} \pi$), $f_i(\omega_n t)$ 为所加电信号函数($\sin \omega_n t$, $\cos \omega_n t$, $-\sin \omega_n t$ 和 $-\cos \omega_n t$). 适当安排各组压电元件上所加电信号的相位关系, 就可以叠加形成绕定子圆周方向传播的行波(也可参考文献[10]中行波型旋转超声电机的运动机理).

对于二阶振动(*n*=2), 在如图 6 所示的信号连接方式下, 8 个驻波可以叠加出行波, 如下式

$$\begin{aligned} U &= A \{ \sin(2\theta) \sin(\omega_2 t) + \sin(2\theta - \pi/2) \cos(\omega_2 t) \\ &\quad - \sin(2\theta - \pi) \sin(\omega_2 t) - \sin(2\theta - 3\pi/2) \cos(\omega_2 t) \\ &\quad + \sin(2\theta - 2\pi) \sin(\omega_2 t) + \sin(2\theta - 5\pi/2) \cos(\omega_2 t) \\ &\quad - \sin(2\theta - 3\pi) \sin(\omega_2 t) - \sin(2\theta - 7\pi/2) \cos(\omega_2 t) \} \\ &= A [4 \sin(2\theta) \sin(\omega_2 t) - 4 \cos(2\theta) \cos(\omega_2 t)] \\ &= -4A \cos(\omega_2 t + 2\theta). \end{aligned} \quad (3)$$

如果将薄壁管沿任意母线剪开, 即可以展成一个薄板(如图 7 所示). 设薄板厚 *t*, 根据薄板振动理论, 以中性层为零点建立 *x-y* 坐标系. 设中性层在 *y* 方向无伸长, 定子表面质点 *P* 在 *x, y* 方向的位移分别为 u_x , u_y . 根据前面的讨论, 圆管的行波可表示为 $u_x = u_0 \cos(\omega t - ky)$, 其中 u_0 是定子振幅, 波数 $k = 2\pi/\lambda$. 其表面质点沿 *y* 方向的位移 u_y 可表示为

$$u_y = -\frac{t}{2} \frac{\partial u_x}{\partial y} = -\frac{t}{2} k u_0 \sin(\omega t - ky), \quad (4)$$

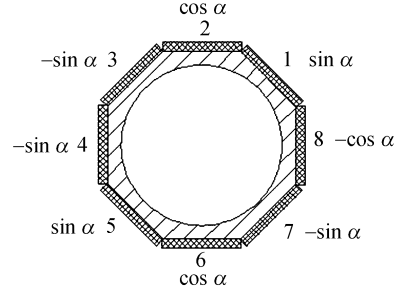


图 6 八边形定子 2 阶行波的信号连接方式

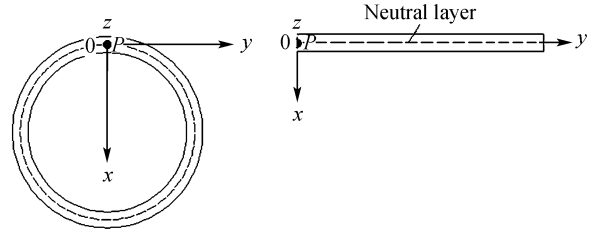


图 7 坐标系

则质点 *P* 的运动轨迹是 *x-y* 平面内的椭圆, 即

$$\left(\frac{2u_y}{tku_0} \right)^2 + \left(\frac{u_x}{u_0} \right)^2 = 1. \quad (5)$$

定子内壁质点的椭圆运动是定子驱动转子沿周向运动的基础. 实际上, 考虑到螺纹线有小倾角 β , u_y 在 *z* 方向的位移分量可近似简化为

$$u_z = u_y \tan \beta = -tku_0 \tan \beta \sin(\omega t - ky) / 2, \quad (6)$$

则质点 *P* 的运动轨迹也是 *x-z* 平面内的椭圆, 即

$$\left(\frac{2u_z}{tku_0 \tan \beta} \right)^2 + \left(\frac{u_x}{u_0} \right)^2 = 1. \quad (7)$$

此为转子沿轴向运动的基础.

2.3 定子结构的有限元建模和优化设计

利用有限元分析软件, 单元类型采用 SOLID5, 通过参数化编程, 对不同形状的电机电定子进行建模计算和优化设计^[6]. 其中, 横截面外轮廓为八边形的铜定子, 内表面为 M7 的标准螺纹, 简化为内径 $d_i = 7$ mm 的圆孔, 八边形对应的内切圆直径 $d_0 = 7.5$ mm, 定子高 $h = 4$ mm, 最薄处的壁厚为 $t_c = 0.25$ mm, 外壁粘贴 $t_p = 0.25$ mm 厚的 PZT5X 压电陶瓷片, 高 $h_p = 4$ mm, 宽度与铜定子外平面的面宽相同, 约 2.9 mm.

计算得到自由状态下它的 2 阶正交振动模态(*n*=2)频率分别为 16.901 和 16.919 kHz, 电场强度 $E = 6.7$

V/mm 时内表面振幅为 $A=1\ \mu\text{m}$. 自由状态下它的 3 阶振动模态($n=3$)频率为 $\sim 47\ \text{kHz}$ (图 8).

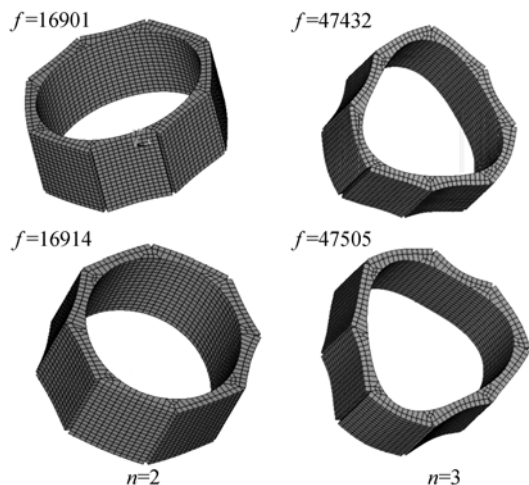


图 8 有限元模态图(上下分别为正交模态)

因为电机装配成模组后, 边界接近轴向约束状态, 因此计算了一端若干点轴向约束和两端若干点轴向约束条件下电机的振动模态. 结果表明, 一端轴向约束条件下, 电机谐振频率有所增加, 切向振幅稍有下降. 如果底端轴向约束($z=0$ 的点, $u_z=0$)条件下, 螺母电机的二阶振动模态频率增加约 $500\ \text{Hz}$. 如果上下端部若干点都轴向约束($z=0$ 和 $z=h$ 的点, $u_z=0$)条件下, 螺母电机的 2 阶振动模态频率增加约 $1\ \text{kHz}$, 达到 $\sim 18\ \text{kHz}$. 而此时切向振幅下降约 20% .

3 驱动 IC

研制了可供两路或三路信号输出的驱动 IC. 图 9 为驱动原理图: 由外部电感、二极管和驱动 IC 内部开关管组成 Boost 升压电路, 内置开关频率为 $500\ \text{kHz}$. 其中 V_{CC} 为低压电源, V_{BB} 为内部高压电源的测量端, 当 SHDN 为高时, 驱动 IC 开始工作. V_{BB} 为升压后所得到的支路高电平. 高电压值由 V_{BB} 和 GND 之间的分压电阻决定; IN, DIR, SEL 是 AF 电机驱动控制信号通过相位控制逻辑产生三路不同相位的脉冲, 这三路脉冲通过由 V_{BB} 供电的三相逆变电路后输出高低电平, $0\sim 36\ \text{V}$ 的交流脉冲信号, 驱动 AF 电机. SEL 为高时, 输出频率为输入时钟频率的 $1/2$, SEL 为低时, 输出频率为输入时钟频率的 $1/3$. 图 9(a) 是输出电压 $V_{BB} = (R_1 + R_2) \times 0.254 / R_2$. 图 9(b) 是典型应用图.

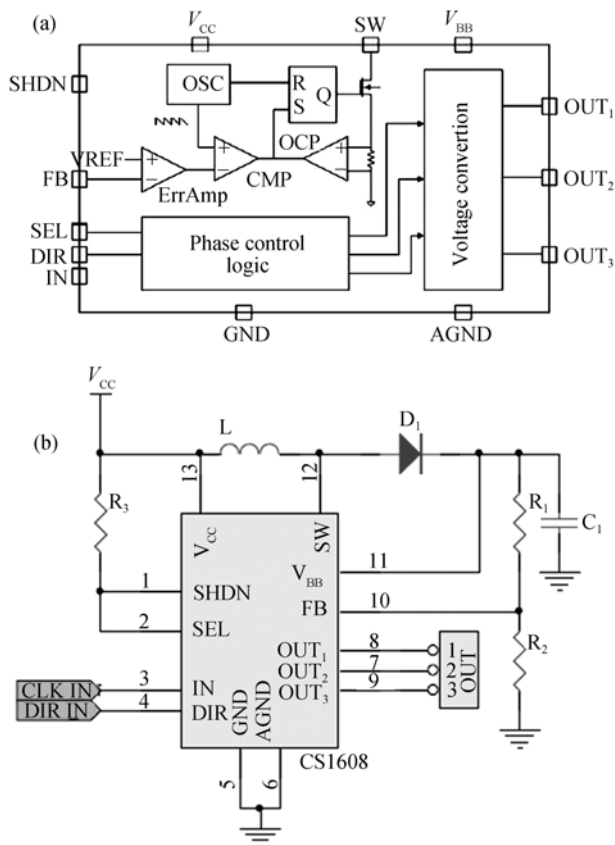


图 9 驱动 IC 原理图(a)和典型应用电路(b)

采用单电源 $3\sim 5\ \text{V}$ 供电, 这适用于手持设备低待机电流, 该电路的特点是外围器件少, 输出电压可调, 幅值达 $36\ \text{V}$, 封装尺寸 $3\ \text{mm} \times 3\ \text{mm}$.

BM730-A0 驱动 IC 特性如下.

- 1) 两相/三相交流输出可调.
- 2) 内置开关频率为 $500\ \text{kHz}$ boost DC/DC 的升压模块.
- 3) 单电源供电 $3\sim 5\ \text{V}$, 适用于手持式设备.
- 4) 低待机电流, 外围零件少.
- 5) 输出电压可调, 峰值可达 $36\ \text{V}$.
- 6) QFN-16 封装, $3\ \text{mm} \times 3\ \text{mm}$.

4 模组特性

封装后的模组, 其定子的上、下边界接近轴向约束. 用压电阻抗测试仪测得电机的主要特性如图 10 所示, 共振频率约 $18\ \text{kHz}$, 有效机电耦合系数 $k_{\text{eff}}=0.21$, 机械品质因数 $Q_m=40$, 动态电阻 $R_l > 1000\ \Omega$. 用转速表测得镜头转子转速约 $3\ \text{r/s}$ ($180\ \text{r/min}$), 停止力大于

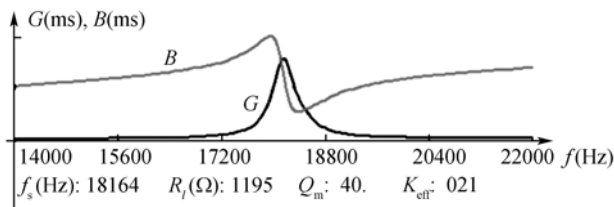


图 10 模组的导纳频谱图

20 gf. 电机的行程决定于镜头转子的长度, 原则上可达 10 mm 以上, 实际上, 对应目前应用, 只需要 2~3 mm.

除电机和电路外, 成像元件和图像处理尤为重 要. 其中成像元件采用 CMOS 传感器, 芯片选配型号 OV3640. 图像清晰度通过软件计算, 由多次成像的 清晰度比较, 通过反馈信号控制驱动 IC 芯片, 对镜头 进行调焦. 达到最好的图像分辨率.

以 BM730-A0 型号为例, 其模组特性如表 1.

5 应用展望

研究工作得到同行的肯定[11], 进一步的工作如下.

1) 附加镜头和外壳可实现镜头组之间的相对运 动, 由此实现可同时调焦和变焦(ZOOM)功能.

2) 还可用于相机、数码相机、数码视频、和其 他可使用调焦的设备, 空间机器人, 钟表, 磁头精密 定位, 核磁共振仪 MRI 的外部装置和汽车电子等.

3) 螺母型超声电机不仅有独特的设计, 而且是 可与被驱动的镜头等物体进行一体化的设计安装, 使其系统组装使用的器件数很少. 对于集成系统和 低成本、低功耗的驱动结构具有明显的优势.

表 1 BM730-A0 模组特性

$L \times W \times H$	8.5 mm×8.5 mm×5.3 mm
Fit for sensor (optional)	1/3", 2—5 MP
Available area for sensor	7.9 mm×7.9 mm
Foot print (PCB)	8.5 mm×8.5 mm
Sensor (optional)	OV3640
Lens diameter	M74P+IR
Height (to image plane)	5.9 mm
F.No.	2.8
Focal length / view angle	4.7 mm/63°
Resolution	125 LP/mm
Focus range	5 cm—∞
After the intercept	≥1.1 mm
Motor	USM screw direct
Axial resolution	<10 μm
Motor speed	3 r/s(180 r/min)
Response time	<10 ms
Stop force	>20 gf
Input capacitance	<1 nF
Driver IC	QFP16 outside
Supply voltage	3—5 V
Work frequency	~18 kHz
Input/holding power	0.25 / 0.00 W
Fit temperature	-20℃—+50℃
Shock resistance	>5 g
Life time	>100000 cycles
Weight	2.1 gf
Control interface	FPC 3 pin

4) 所研究的 BM730-A0 型号的成像系统模组正 在产业化; 进一步研制的 BM730-A1 改进了调焦镜头 的运动导向; 并在加速进行实现模组的 ZOOM 功能.

期盼不久在市场上会看到多款手机和相关设计将 用到本文所介绍的螺母型超声电机驱动集成模组.

参考文献

1 Henderson D A. Piezo ceramic motors improve phone camera auto focus and zoom. New Scale Technologies (www. NewS-caleTech.com)

2 Ucha S, Tomikawa Y. Ultrasonic Motors: Theory and Application. Oxford: Clarendon Press, 1993. 11—25

3 Henderson D A. Simple ceramic motor... Inspiring smaller products actuator 2006. In: 10th International Conference on New Actua-tors, Bremen, Germany, June 2006. 14—16

4 上羽贞行. 超音波アクチュエ-タ. 电子情报通信学会志, 1989, 72(4): 457—462

5 周铁英, 鹿存跃, 陈宇, 等. 螺纹驱动多面体超声电机. 中国专利 CN 1767347, 2005-11-16

6 周铁英, 张筠, 陈宇, 等. 螺母型超声电机及其在透镜调焦中的应用. 科学通报, 2008, 53(11): 1251—1256

7 Zhou T Y, Lu C Y, Chen Y, et al. A thread driven polyhedron ultrasonic motor. World Patent No. PCT/WO2006/003088

8 胡笑平, 田斌, 李毅, 等. 一种一体化光学设备调焦/变焦系统. 中国专利 CN1873455, 2006-4-14

9 Hu X P, Tian B, Li Y, et al. Integrated focal length adjusting system for optical apparatus. World Patent No.PCT/WO2007/001197

10 赵淳生, 著. 超声电机技术与应用. 北京: 科学出版社, 2007. 9, 162—171

11 Zhou T Y, Hu X P, Integrated optical auto-focus system driven by a nut-type USM. IWPMA5 Invited Report at Pennsylvania State University, USA, 2008