

偏振成像系统中的面阵 CMOS 传感器非线性校正

付轶帆¹, 吴剑¹, 何宏辉²

- (1. 清华大学深圳研究生院生物医学工程研究所, 广东深圳 518055;
2. 清华大学深圳研究生院深圳市无损监测与微创医学技术重点实验室, 广东深圳 518055)

摘要: mueller 矩阵偏振成像可用于获取生物组织的浅表层生理学信息, 在疾病早期诊断与预防中具有重要意义。而在偏振成像系统中直接使用商用面阵 CMOS 相机不能得到用于解算 mueller 矩阵的正确图像信息, 限制了其在小型化内窥镜领域上的应用。对商用面阵 CMOS 的研究表明其光信号输入输出呈非线性映射关系。综合考虑到传感器固有的成像噪声, 提出一种基于校正的方法对 CMOS 的输出数据进行映射以获取正确的组织偏振信息值。实验结果表明校正后的偏振信息可以解算得到正确的 mueller 矩阵值, 误差可以控制在 3% 以内, 对蚕丝样品的测试也证明了该方法的有效性。上述结果使得内窥镜探头上应用小型化的商用面阵 CMOS 图像传感器进行体内生物组织 mueller 矩阵测量成为可能。

关键词: 非线性校正; 面阵 CMOS; mueller 矩阵; 内窥

中图分类号: TP212 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.0633001

Non-linear correction of area CMOS sensor in polarization imaging system

Fu Yifan¹, Wu Jian¹, He Honghui²

- (1. Institute of Biomedical Engineering, Graduate School at Shenzhen, Tsinghua University, Shenzhen 518055, China;
2. Shenzhen Key Laboratory for Minimal Invasive Medical Technologies, Graduate School at Shenzhen, Tsinghua University, Shenzhen 518055, China)

Abstract: Polarization imaging with mueller matrix can be used to obtain the physiological information of superficial biological tissue, which has significant importance in early diagnosis and prevention of cancerous disease. However, the mueller matrix deduced by the polarization information collected from the commercial CMOS sensor directly is not correct, which limits the application of commercial micro CMOS sensor in the endoscopic imaging. The study on commercial area CMOS sensor indicates its non-linear input to output mapping relationship for sensed light intensity. Considering the inherent background noise, a calibration-based method was proposed to mapping the output of the CMOS sensor to obtain the correct polarization information for tested samples. Experiment results demonstrate that the correct mueller matrix can be deduced according to the corrected polarization information, and the error compared to the

收稿日期: 2015-10-05; 修订日期: 2015-11-03

基金项目: 深圳市基础研究计划(JCY20130402145002404)

作者简介: 付轶帆(1987-), 男, 博士生, 主要从事医学图像处理、三维重建、偏振内窥方面的研究。Email: fuyf14@mails.tsinghua.edu.cn

导师简介: 吴剑(1976-), 男, 副教授, 博士生导师, 博士, 主要从事计算机辅助手术导航技术、医学图像处理方面的研究。

Email: wuj@sz.tsinghua.edu.cn

standard air mueller matrix is below 3%. The effectiveness of this method is demonstrated by the experiment implemented on silk sample. The results of the proposed method reveal the possibility to apply commercial micro CMOS sensor on the endoscopic tip for in vivo biological tissue mueller matrix measurement.

Key words: non-linear correction; area CMOS sensor; mueller matrix; endoscopic

0 引言

偏振测量在生物组织的早期病变检测中具有重要的意义,面阵成像传感器所测得的生物组织对于不同起偏状态和检偏状态下的偏振量,经过一定步骤的解算可以得到代表生物组织偏振信息。目前的生物组织偏振信息一般采用 4×4 阶的 mueller 矩阵表征,其 16 个阵元已经显示出揭示病变组织与正常组织的差异性的能力^[1-2]。

偏振测量中的成像单元通常情况下采用 CCD 和 CMOS 两种。科研型 CCD 灰度响应范围较大(一般在 10 位以上)^[3],其光强响应特性在低阶灰度部分表现为线性,此外,CCD 的传感器底噪小,选择低灰度区域进行偏振光强信息成像即可获取正确的组织偏振信息。而对于商业化 CMOS 而言,其灰度响应范围为 8 位,为容纳更多的动态范围,内置电路会对获取的光电信息进行非线性映射,导致其光强响应特性在整个灰度区间内皆呈现非线性对应^[4],同时由于固有噪声的存在^[5]使得所采集的图像不能正确表示待测组织的偏振信息。因此,需要对此进行非线性校正以获得正确的偏振态信息。

在用于 mueller 矩阵计算的偏振信息的获取过程中,面阵 CMOS 图像传感器的光强响应主要受到以下因素的影响:(1) CMOS 的非线性响应特性;(2) CMOS 感光元件的底噪;(3) 光学元件的洁净程度、制造工艺造成的误差;(4) 不同的外部设置条件(温度、快门速度)对光强响应曲线的影响。

综合以上的考虑,对 CMOS 的光强响应曲线校正的目的在于将非线性响应校正为理想情况下的线性响应,所描述的是 CMOS 图像传感器的静态输出-输入关系。校正考虑 CMOS 的固有噪声和非线性映射。固有噪声即是指 CMOS 感光原件的底噪。如果底噪对于不同的光照强度、快门速度以及感光度等外部条件呈现一致性,则可考虑为常数,可采用直线校正的方式^[6];反之需要引入噪声输入,以及传

感器响应的非均匀性因素^[7],与外部光强一起影响着具体的响应曲线,对于这类有多个变量影响的传感器校正类问题可采用神经网络的方法^[8]。

文中根据商用型面阵 CMOS 传感器的相机响应函数以及应用于组织偏振信息测量的具体应用,提出一种简单有效的校正方法对采用 CMOS 作为偏振成像系统图像获取单元的装置进行非线性映射,以获取能够正确表征组织偏振信息的图像以解算对应组织的 mueller 矩阵。

1 方法

实验在暗室中进行,将环境光的影响降到最低,控制感光度为固定值,仅改变快门速度。CMOS 图像传感器的响应特性稳定,在一段时间内不随着时间和环境的变化而变化^[9]。由多项式表示的实际输入输出关系:

$$y_{\text{real}} = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_nx^n \quad (1)$$

式中: a_0 对应输入量 x 为 0 时的输出量,为传感器固有噪声; a_1, a_2, \dots, a_n 为非线性系数。

1.1 CMOS 光强响应特性获取

采用旋转偏振片的方式获取相对光强响应曲线。实验配置如图 1 所示,CMOS 上的接收光强度由旋转偏振片 2 与偏振片 1 的主偏振方向形成相对偏振角度 θ 获得出射光 $I_0 = I_i \cos^2 \theta$ 。

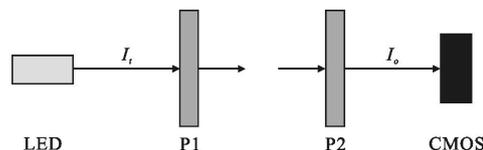


图 1 相对入射光调节获取 CMOS 响应曲线

Fig.1 Device to obtain CMOS response curve by relative incident light regulation

1.2 非线性响应校正方法

对于上述方式获取的响应曲线,其理论输出值与实际输出值之间的关系可由线性映射的方式求

解,采用的线性方程表示:

$$y_{ideal}=cx+d \quad (2)$$

校正的过程即为求得合适的参数 c 和 d 以使得误差项最小,采用三种映射方式,并对比优缺点,校正结果以及误差。

(1) 0~255 校正,将灰度映射到 CMOS 成像范围的整个灰度区间;使用于计算 mueller 矩阵的校正后的图像利用整个 CMOS 的动态范围。

(2) 首尾顶点校正,将灰度映射到由响应曲线所确定的灰度区间内;根据当前校正曲线灰度的最大值与最小值确定映射直线。

(3) 最小二乘校正,将灰度映射到由最小二乘法所确定的灰度区间内。基于最小二乘理论,采用 m 个校正测试点,参数 c 和 d 的如公式(3)所示。其中 x_i 和 y_i 分别对应第 i 个校正测试点的值。

$$c = \frac{m \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{m \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2}$$

$$d = \frac{\sum x_i^2 \sum y_i - \sum x_i \sum x_i y_i}{m \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \quad (3)$$

2 实验及流程

计算样品的 mueller 矩阵需要连续获取该样品对应不同起偏状态和检偏状态的 30 幅图像^[10]。实验配置如图 2 所示,首先针对空气进行成像校准,如

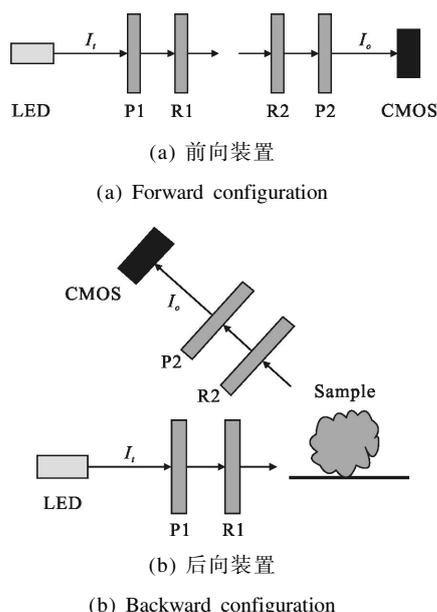


图 2 获取样品 mueller 矩阵的实验配置
Fig.2 Device to obtain mueller matrix

图2(a)所示。校正完成后获取偏振片与 1/4 波片的相对角度补偿参数;随后对实际样品进行测试,如图2(b)所示。实验中所采用的传感器为 Canon 70D 内置 CMOS。

2.1 相对入射响应曲线校正

入射光强响应曲线获取采用图 2 所示装置,实验过程中进行条件控制,采用固定入射光强度与 CMOS 感光度,图像模式为单色模式,灰度范围为 0~255。改变偏振片之间的相对角度,获取校准点后插值得到完整的光强响应曲线。选取曝光时间为 1/1 000 s 获取相对光强响应曲线,按照三种校正方式获得校正参数。在同等条件下获取前向装置用于计算空气 mueller 矩阵(4 阶单位矩阵)的数据。图 3 所示为对应于三种映射方式的校正曲线以及校正前后的数据解算得到的 mueller 矩阵。

$\begin{bmatrix} 1.0000 & 1.0014 & -0.0170 & -0.0084 \\ 0.3903 & 0.4388 & 0.0244 & 0.0008 \\ -0.0690 & -0.0233 & 0.3174 & 0.0027 \\ 0.0014 & 0.0023 & 0.0038 & 0.6741 \end{bmatrix}$ (a)	$\begin{bmatrix} 1.0000 & 1.0097 & 0.0023 & 0.0152 \\ 0.0113 & 0.9829 & -0.0020 & 0.0035 \\ -0.0291 & -0.0020 & 1.0272 & 0.0006 \\ 0.0144 & -0.0149 & 0.0169 & 0.9808 \end{bmatrix}$ (b)
$\begin{bmatrix} 1.0000 & 0.0097 & 0.0023 & 0.0152 \\ 0.0113 & 0.9829 & -0.0020 & 0.0035 \\ -0.0291 & -0.0020 & 1.0272 & 0.0006 \\ 0.0144 & -0.0149 & 0.0169 & 0.9808 \end{bmatrix}$ (c)	$\begin{bmatrix} 1.0000 & 0.0079 & 0.0019 & 0.0124 \\ 0.0092 & 0.8023 & -0.0016 & 0.0029 \\ -0.0238 & -0.0016 & 0.8385 & 0.0005 \\ 0.0118 & -0.0121 & 0.0138 & 0.8006 \end{bmatrix}$ (d)

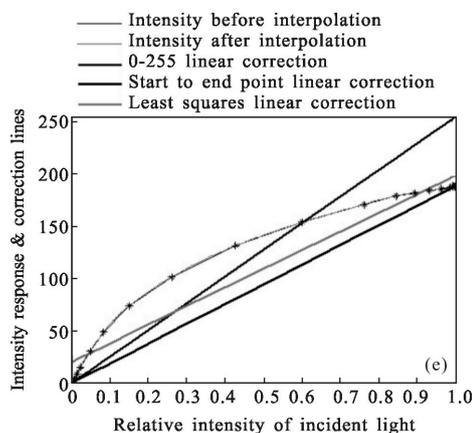


图 3 相对入射响应曲线校正结果

Fig.3 Result of the proposed correction method for relative incident light

由图 3 的结果可以看出,校正前数据相对于标准空气阵 mueller 矩阵误差达到了 43%,而校正后的数据都接近于空气的 mueller 矩阵。经过校正后的数据较之未校正的数据有明显优化,其中 0~255 校正与首尾顶点校正所得到的空气 mueller 矩阵相同,且最大

误差明显小于最小二乘法。原因在于这种方式所得到的映射后的数据最大限度地占满了整个灰度区间,可以得到最小的量化误差。而最小二乘校正后的数据离真实值差距最远,最小二乘法只是选取了一种统计上的最优解,而实际上这种映射并不能正确地反映实际上所控制到的光强值。一个最明显的特点在于采用最小二乘法在相对光强为 0 时图像灰度值不为 0,从图 3 所示的校正曲线上即可看出,这与实际情况不符。相对光强为 0 时反映的是此时相机的底噪,从 0~255 校正以及首尾顶点相连法校正来看,这也进一步印证了将底噪假设为 0 是一种合理的方式。而校正的误差则来源于实验中所包含的其它因素,如由灰尘引入的随机误差,由光路的准直性以及光学器件的制造工艺引入的系统误差。(a) 原始数据解算 mueller 矩阵,(b) 0~255 校正数据解算 mueller 矩阵,(c) 首尾点校正后数据解算 mueller 矩阵,(d) 最小二乘优化校正数据解算 mueller 矩阵,(e) 所示为三种校正直线(上述数据的曝光时间为 1/1 000 s)。

图 4 所示为针对三种校正方式校正前后的 30 幅图像的连续灰度图,其所表示的是解算 mueller 矩阵的输入数据,由图中可以看出经过 0~255 校正后整个灰度曲线具有更大的拉伸范围,从而使得量化误差最小。

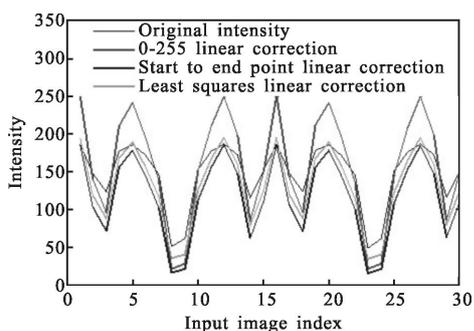


图 4 校正前后的连续灰度曲线(曝光时间 1/1 000 s)

Fig.4 Consecutive intensity curve for the correction methods
(Exposure time of the experiment data used is 1/1 000 s)

为验证 CMOS 的校正曲线是否具有唯一性,以当前曝光时间下获取的相对光强响应曲线校准其它曝光时间下所获取的 mueller 矩阵解算数据,解算得到的校准后的 mueller 矩阵较理想 mueller 矩阵的最大误差如图 5 所示。

由图 5 可以看出明显的对角线效应,对角线下

侧的结果显示校正后可以得到正确的空气 mueller 矩阵,而处于对角线上侧的结果显示误差较大,而且呈现逐步上升的趋势。最直接的原因在于处于对角线上侧用于校正的数据的曝光时间小于待校正数据的采集时间,导致待校正数据中灰度大于校正曲线灰度值的部分没有可用于映射的值。另外,图 5 所示的情况表明校正曲线的一致性,即当满足用于校正的曲线覆盖到待校正数据的整个灰度范围,都可用于相应数据的校正。

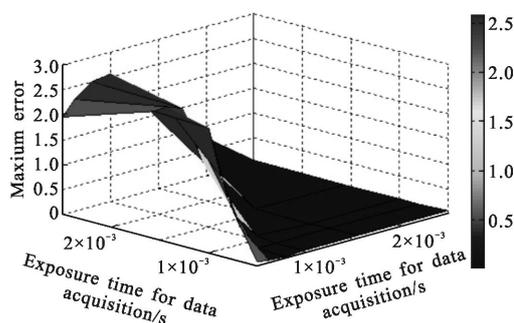


图 5 不同曝光时间下的校正结果对比(0~255 校正)

Fig.5 Results for different combination of exposure time
(for 0~255 correction)

由图 5 所示数据可看出,校正后的空气 mueller 矩阵阵元相对于标准空气 mueller 矩阵具有一定的误差,统计数据表明该误差项分布在 1%~6%之间,该误差项来源于传感器响应曲线的误差,偏振测量系统的系统误差,图像的采集及量化误差。

2.2 样品实验

对样品进行数据的采集用于计算组织 mueller 矩阵。图 6(a)所示为未校正的数据获取的蚕丝样品的 mueller 矩阵,图 6(b)所示为根据 0~255 校正后获取的蚕丝样品的 mueller 矩阵,图 6(c)所示为采用科研型 CCD(Retiga 4 000 R, Qimaging)获取的蚕丝样品的 mueller 矩阵。

从图 6 可以看出,校正前的数据所表现的蚕丝 mueller 矩阵具有一定的排布模式,但是在不同组织之间的区分性很弱,不能表示正确的偏振信息。而经由 0~255 校正后的图像信息解算得到的 mueller 矩阵,除了图像旋转了 180°(Canon 70D 的成像与 Retiga 4000R 成像角度的区别),具有与科研相机获取的数据解算得到的矩阵有相同的表现形式及细节,能够正确地且示出样品的不同区域以及各向性区别。

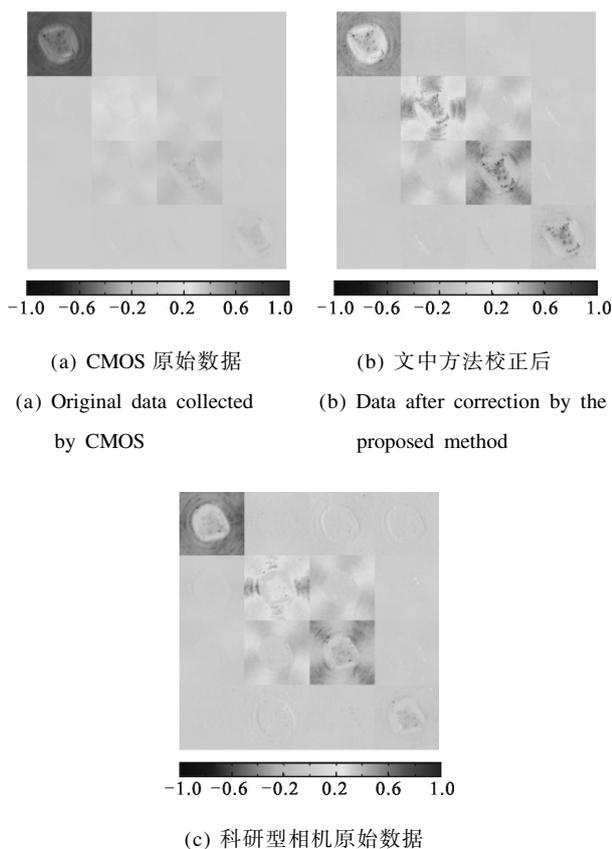


图 6 对蚕丝背向成像的 mueller 矩阵

Fig.6 Mueller for back scatter silk

3 结 论

文中提出了一种应用于商用化 CMOS 图像传感器的校正方法,并将其应用到偏振测量上。首先获取了 CMOS 对于不同曝光时间的光强响应曲线,采用直线映射的方式获取校正参数。将该参数应用于校正 CMOS 获取的带有偏振信息的图像。对多种曝光参数设置下的数据进行实验证实了光强响应曲线对于不同曝光时间下获取的数据解算 mueller 矩阵的一致有效性。利用前向装置获取的空气 mueller 矩阵表明文中方法对获取的空气偏振信息进行校正表明系统误差在 3% 以内。利用背向装置获取的蚕丝 mueller 矩阵和 CCD 方法的比较证实了文中方法应用于组织样品测试的有效性。同时也揭示了在内窥探头中应用小型化 CMOS 进行生物组织信息探测并进行组织内 mueller 矩阵计算的可能性。

文中方法用于校正 CMOS 获取的组织偏振图像还存在一定的系统误差,主要来源于校正曲线的获

取误差,偏振测量系统的系统误差,CMOS 图像传感器的采集及量化误差。其中校正曲线误差可通过多次实验获取统计意义上的有效值,偏振测量系统的系统误差可以通过精确的调校趋于理想的情况,而 CMOS 图像传感器的采集误差主要指 CMOS 的底噪以及环境噪声,这部分的误差在当前实验中假设为恒定值,而 CMOS 的量化误差由 CMOS 的最大灰度量级决定,这部分是固定的。为提高系统的测量及校正精度,下一步的工作需要获取更精确的校正曲线,另外综合考虑 CMOS 图像传感器的底噪随外部条件的改变对图像信息的影响。

参考文献:

- [1] Du E, He H, Zeng N, et al. Mueller matrix polarimetry for differentiating characteristic features of cancerous tissues [J]. *Journal of Biomedical Optics*, 2014, 19(7): 1729-1733.
- [2] Novikova T, Pierangelo A, De Martino A, et al. Polarimetric imaging for cancer diagnosis and staging [J]. *Optics and Photonics News*, 2012, 23(10): 26-33.
- [3] Janesick J R. Scientific Charge-coupled Devices [M]. Bellingham: SPIE Press, 2001.
- [4] Debevec P E, Malik J. Recovering high dynamic range radiance maps from photographs [C]//ACM Siggraph, 2008 Classes ACM, 2008: 31.
- [5] Wang Hua, Cao Jianzhong, Wang Huawei, et al. Column fixed pattern noise correction of the CMOS image sensor based on estimation method [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(7): 1928-1932. (in Chinese)
- [6] Li Desheng, Zhao Xinmin. A sensor nonlinear inverse function correction method [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 1991, 12(2): 215-218. (in Chinese)
- [7] Zhang Honghui, Luo Haibo, Yu Xinrong, et al. Adaptive non-uniformity correction algorithm based on multi-point correction [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(11): 3651-3654. (in Chinese)
- [8] Tian Sheping, Zhao Yang, Wei Hongyu, et al. Nonlinear correction of sensors based on neural network model [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2006, 14(5): 896-902. (in Chinese)
- [9] Dong Jianting, Yang Xiaole, Dong Jie. Performance test and image processing of area CMOS image sensor [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(12): 3396-3401. (in Chinese)
- [10] Azzam R M A. Photopolarimetric measurement of the Mueller matrix by Fourier analysis of a single detected signal [J]. *Optics Letters*, 1978, 2(6): 148-150.