

文章编号 1004-924X(2017)03-0562-07

## 降钙素原胶体金试纸条显色分析仪

王霞<sup>1\*</sup>, 陈飞<sup>1</sup>, 宿宸铭<sup>1</sup>, 黎先龙<sup>2</sup>

(1. 北京理工大学 光电学院 光电成像技术与系统教育部重点实验室, 北京 100081;

2. 北京中科同和信息技术有限公司, 北京 100088)

**摘要:** 为了实现降钙素原浓度的定量测量, 设计了基于树莓派的 CMOS 图像传感器胶体金试纸条显色分析仪, 对胶体金试纸条拍照获取试纸显色反应的图像颜色特征量。首先, 根据降钙素原胶体金试纸条的显色特性对 CMOS 传感器进行合理的白平衡校正, 使 CMOS 传感器具有较好的色彩还原性。然后, 为解决不同设备间颜色管理的差异, 通过对 NCS 标准色卡拍照, 利用多项式回归法建立了图像传感器 RGB 空间到 XYZ 空间的模型, 并对仪器进行了颜色特性化校正。最后, 针对试纸显色不均匀的问题, 经过图像处理, 选择显色区域内具有代表性的像素点建立图像颜色特征量与样本浓度值的数学模型, 实现了待测样本浓度的精确测量。实验结果表明, 该胶体金试纸条显色分析仪的精度可达 93.8%, 重复测量误差小于 1.5%, 有效测量范围为 0.1~35 ng/mL。该分析仪成本低、测量速度快, 具有一定的应用价值。

**关键词:** 色度分析; 胶体金; 颜色空间; 多项式回归; 降钙素; 浓度测量

**中图分类号:** TH744.43; TN911.74 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20172503.0562

## Color analytical reader for procalcitonin colloidal gold test strips

WANG Xia<sup>1\*</sup>, CHEN Fei<sup>1</sup>, SU Chen-ming<sup>1</sup>, LI Xian-long<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of Optoelectronic Imaging Technology and System, Ministry of Education, School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

2. Beijing Zhongketonghe Information Technology Limited Company, Beijing 100088, China)

\* Corresponding author, E-mail: wx\_may@263.net

**Abstract:** The semi-quantitative method of Colloidal gold strip detection by colorimetric principle is widely used in biomedical diagnosis. To achieve quantitative measurement of calcitonin concentration, a CMOS color analytical reader based on raspberry Pi was designed for the acquisition of color characteristics of chromogenic reaction by taking a picture of colloidal gold strip. According to the color characteristics of procalcitonin colloidal gold test strips, the CMOS sensor was corrected by proper white balance parameter adjustment, which enabled the CMOS image sensor has a better color restoration property. In order to eliminate the difference of color management between different devices, the mathematical model of the sensor from RGB space to XYZ space was established via polynomial regression by taking pictures of NCS standard color cards. Thus the instrument was adjusted in color characteristics. Then, the mathematical model of XYZ values and concentration values of the samples was derived from the representative gray value pixel areas of the processed

收稿日期: 2016-10-14; 修订日期: 2016-12-06.

基金项目: 博士点基金资助项目 (No. 20131101130002)

images, thereby the color uniformity problem was solved and the concentration was accurately measured. The experiment results show that the measuring precision can be as high as 93.8%, the repeated measurement error is less than 1.5% and the effective measurement range is from 0.1 ng/mL to 35 ng/mL. With the virtues of cost effective and high measurement speed, the analyzer has a promising application prospect.

**Key words:** chrominance analysis; colloidal gold; color space; polynomial regression; procalcitonin; concentrate measurement

## 1 引言

胶体金免疫层析技术<sup>[1]</sup>是一种广泛应用于疾病检测、食品检疫的生物检测分析技术。相比于生物医学检测领域中传统的放射性同位素标记、酶标记等方法,胶体金试纸条主要是通过毛细作用,让待测物与试纸条纤维膜上的配体结合,抗原抗体再经过酶促显色反应短时间内得到直观的显色结果<sup>[2]</sup>。目前,根据光信号接收方式的不同,基于光电检测机理的胶体金试纸条显色测量方案<sup>[3]</sup>主要分为以下3种:光敏电阻检测、反射光纤传感器检测和图像传感器检测。其中,光敏电阻检测响应时间较长,不利于快速测量;反射光纤传感器对硬件设备的要求较高;图像传感器检测存在颜色测量难度较大的问题。而国内至今仍主要停留在人眼进行比色判断的定性或者半定量检测的状态。

降钙素原浓度作为全身细菌性感染诊断和鉴别的重要指标,开发胶体金标降钙素原试纸条显色分析仪在临床上具有非常实用的价值。它不需要借助射线测量仪、酶标检测仪等昂贵的精密仪器,具有快速、成本低、操作简单等优点。近年来,随着机器视觉的不断发展,图像检测与颜色特征提取取得了长足的进步<sup>[4]</sup>。本文针对图像传感器检测存在的问题,基于朗伯-比尔定律<sup>[5]</sup>,利用胶体金显色试纸条的图像颜色特征量,设计了一种基于树莓派且能快速准确地实现降钙素原浓度定量测量的仪器。首先根据CMOS图像传感器的成像特点、照明光源和试纸条显色特性,选用合适器件对CMOS传感器进行颜色特性化校正<sup>[6]</sup>,并对图像进行白平衡处理,保证图像的色彩还原性<sup>[7]</sup>。另外,针对试纸条显色不均匀的问题,选取了具有代表性的显色区域的颜色特征量与样品浓度建模。实验表明,降钙素原胶体金试纸条显色分析仪在保证测量精度的同时,具有快速简单、成本低、可靠性高的特点。

## 2 胶体金显色分析仪的构成及原理

### 2.1 胶体金显色分析仪的硬件构成

图1为降钙素原胶体金试纸条显色分析仪的原理图。它主要由标准色卡槽、光源模块、CMOS图像传感器模块、树莓派数据计算控制模块、液晶屏触摸显示模块等组成。标准色卡槽用于放置校准色卡和待测试纸条,其位置相对固定使插拔测试样品的偏移量较小。光源模块由两个相同型号的LED灯和相关电路组成,其中两个贴片LED灯分别在CMOS传感器的两侧,提供相对均匀的照明光源。图像采集模块由变焦镜头、CMOS图像传感器和相关驱动控制电路组成。为解决传统硬件实时性差、难度大的问题,采用树莓派数据处理模块,它是整个仪器的核心部分,通过数据总线与CMOS传感器、液晶屏进行数据交换。另外它还可以通过千兆网口与电脑实现通信,由电脑远程控制树莓派。液晶屏触摸显示模块具有显示校正、拍照测量以及打印等功能。首次测量之前需要先插入校准色卡进行CMOS颜色的特性化校正,再进行拍照测量,以后定期校正即可。

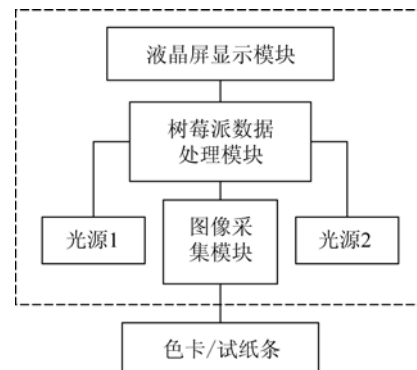


图1 胶体金显色分析仪简图

Fig. 1 Schematic diagram of color analytical reader for colloidal gold test strips

## 2.2 胶体金显色分析仪的工作原理

胶体金显色分析仪的基本工作原理如图 2 所示,基于树莓派编程,利用 CMOS 对胶体金试纸条拍照并获取显色反应的图像颜色特征量,从而测出降钙素原浓度。

根据朗伯-比尔定律可知,液体的吸光度与溶液浓度呈线性关系。同样,对于胶体金试纸来说,在显色区域相对光滑、均匀的条件下,反射光强只和试纸条上的待测物浓度呈线性关系。不同大小的胶体金颗粒吸收不同波长的光谱<sup>[5]</sup>,降钙素原胶体金标试纸呈现出深浅不同的紫红色,待测物浓度不同对应的图像颜色特征量也不同。

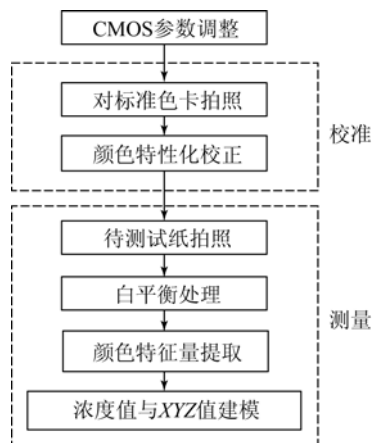


图 2 胶体金显色分析仪的工作原理

Fig. 2 Working principle of color analytical reader for colloidal gold test strips

相机和光源是对图像颜色特征影响最大的两个因素,在选取合适的光源,CMOS 相机设置合理的参数后,首先对已知 XYZ 值的 NCS 标准色卡拍照,进行白平衡处理,保证色彩测量的准确性。然后获取相应位置的 RGB 值,利用多项式回归法建立从 RGB 空间到 XYZ 空间的模型,从而对 CMOS 进行颜色特性化校正<sup>[8]</sup>,校正不同设备间颜色管理的差异。再对显色后的降钙素原胶体金试纸条进行拍照,所得图像经均值滤波、分割后用一个固定大小的矩形框循环遍历显色区域,通过统计分析已知浓度的试纸的测量结果,在临床检测精度要求下先舍去 RGB 值最大和最小的像素点,再找到矩形框选区域内 RGB 值误差较小的一个区域来代表整个显色区域的颜色特征,建立图像颜色特征量与样本浓度之间的数学模型,实

现降钙素原浓度的测量<sup>[9]</sup>。整个测量过程没有外界光照影响,只有 LED 光源照明。CMOS 获取的数字图像信号传送到树莓派,由树莓派进行建模、白平衡校正、滤波、颜色特征量提取等计算处理,再由液晶屏显示测量结果。

## 3 胶体金显色分析仪的关键算法

### 3.1 CMOS 颜色特性化校正

为了防止彩色图像在数字图像设备之间传输和复制的过程中发生颜色失真,需要进行色彩管理,其核心就是对设备进行颜色特性化校正。通常采用 RGB 颜色空间来定量描述相机、电视、LED 显示屏等的颜色。因为 RGB 空间与设备有关<sup>[10]</sup>,同一个色彩颜色经过不同的 CMOS 传感器输出色彩会有差异,所以要对 CMOS 传感器进行颜色特性化校正,以保证拍照得到的数字图像的色彩还原性较高,这样才能真实反映出胶体金显色区域的颜色特征。因此,本文采用与设备无关的 XYZ 颜色空间来进行颜色特性化校正。

常用的相机颜色特性化校正方法有查找表法、多项式回归法和神经网络算法。其中,查找表法通过三维空间中几何体的顶点数据值来插值计算出内部点的颜色数据<sup>[11]</sup>,建立颜色真实值与设备颜色值之间的查找关系。几何体的顶点数据来源于所建立的多维查找表,精度取决于查找表数据的密度。多项式回归根据三刺激值的可加性原理<sup>[6]</sup>,在已知的源色空间和目标色空间中建立多项式回归模型,把 RGB 值直接变换为 CIE 色度值并得到映射关系。神经网络算法在不断成熟<sup>[11]</sup>,自适应学习输入与输出的关系,具有很强的适用性,且能达到较高的精度。在运用神经网络来进行设备色彩特性化校正时,采用的模型一般是 BP 神经网络算法模型。其特点是传递过程中根据预测误差调整权值和阈值,使输出不断逼近期望输出值。

查找表法的精度相对较高,但是需要测量大量的颜色样本建立标准的颜色库才能达到较为准确的结果。多项式回归法和神经网络法则只需用较少的样本,不过神经网络模型在进行非线性关系转换时样本的学习和训练比较复杂,不适合用于小型的快速检测仪器。多项式回归拟合方法简

单,当进行校正的色域范围较小时,选择合适的多项式项数可以得到理想的精度。胶体金试纸条显色集中在紫红色区域,所以分析仪采用多项式回归法。一般的多项式回归公式为:

$$f(x, y, z) = a_1 x + a_2 y + a_3 z,$$

$$\begin{pmatrix} X_1 & Y_1 & Z_1 \\ X_2 & Y_2 & Z_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ X_n & Y_n & Z_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_1 & G_1 & B_1 \\ R_2 & G_2 & B_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ R_n & G_n & B_n \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{pmatrix}, \quad (2)$$

令  $\mathbf{X} = \begin{pmatrix} R_1 & G_1 & B_1 \\ R_2 & G_2 & B_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ R_n & G_n & B_n \end{pmatrix}$ ,  $\mathbf{y} = [X_1 \ X_2 \ \dots \ X_n]^T$ ,

$\beta_1 = [a_{11} \ a_{21} \ a_{31}]^T$ , 在求解系数矩阵第一列  $\beta_1$  时,有  $\mathbf{y} = \mathbf{X}\beta_1$ , 利用最小二乘法可得到一个合适的解。然后,用迭代法找到一组系数,使得全部测量值与回归值的残差平方和  $Q(x_1, x_2, \dots, x_n)$  最小。残差平方和为:

$$Q(x_1, x_2, \dots, x_n) = \sum_{i=1}^m \left[ \sum_{j=1}^n a_{ij} x_j - y_i \right]^2. \quad (3)$$

在多项式回归算法中,必须保证样本个数大于多项式项数才能解出模型中的系数。项数不同,模型精度也不同,适当增加项数可以提高校正精度,但当项数增加到一定程度时会引起震荡。这里通过最小二乘法解矛盾方程来计算回归系数。

在进行 CMOS 颜色特性化校正时,调整好光源角度和 CMOS 传感器的拍照参数,对在标准光源下 XYZ 值已知的 NCS 标准色卡进行拍照,要求校正色卡颜色的深浅不一,让 CMOS 传感器对其响应有明显差别。然后获取标准色卡相应位置的 RGB 值,利用多项式回归法对 CMOS 建立从 RGB 空间到 XYZ 空间的数学模型,完成颜色特性化校正。

### 3.2 白平衡校正

白平衡校正是色彩还原过程中的重要步骤<sup>[12]</sup>,对图像成像质量有着重要影响。由于待测胶体金试纸含有大面积的白色区域,假设镜面区域完美反射后的颜色可以完全表现出光源的颜色,本文基于图像灰度值利用镜面法进行校正。镜面法主要包括镜面区域选择、色温估计和校正 3 个步骤<sup>[13-16]</sup>。

$$f(x, y, z) = a_0 + a_1 x + a_2 y + a_3 z + a_4 x^2 + a_5 y^2 + a_6 z^2,$$

$$f(x, y, z) = a_0 + a_1 x + a_2 y + a_3 z + a_4 xy + a_5 yz + a_6 zx. \quad (1)$$

以  $3 \times 3$  的系数矩阵为例,颜色特性化校正建立的模型为<sup>[6]</sup>:

在 YCbCr 空间中进行镜面区域的选择,得到:

$$\begin{cases} Y > \chi \\ -\alpha < Cb < \alpha \\ -\beta < Cr < \beta \\ |Y - |Cb|| - |Cr| > \varphi \end{cases}, \quad (4)$$

其中  $\alpha, \beta, \chi, \varphi$  根据实际胶体金取阈值。另外,针对满足式(4)的像素点,还需要根据图像灰度值判断所选镜面区域的 RGB 值是否为整个胶体金试纸最大的像素点。色温估计的计算如下:

$$\sigma_X = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i (X = Y, Cb, Cr). \quad (5)$$

接下来根据光源变换进行校正,如式(6)所示:

$$(\rho_1, \rho_2, \rho_3)^T = \begin{pmatrix} \sigma_Y \\ \sigma_{Cb} \\ \sigma_{Cr} \end{pmatrix} (\rho'_1, \rho'_2, \rho'_3)^T, \quad (6)$$

其中  $(\rho_1, \rho_2, \rho_3)^T$  和  $(\rho'_1, \rho'_2, \rho'_3)^T$  分别表示校正后的理想图片和实际光源下的图片。



(a)原始图片 (b)白平衡校正图片  
(a)Original image (b)Image after white balance correction

图 3 白平衡校正前后图片对比

Fig. 3 Image contrast before and after white balance correction

图 3 为镜面法校正前后的图片对比(彩图见期刊电子版)。如图 3(a)所示,原始图片中非显色区域中的白色区域有很大一部分偏红色,而经过白平衡校正后图像变得更加接近真实情况,能更好地反映胶体金试纸的显色特性。

表 1 白平衡校正前后图片的 RGB 值

Tab. 1 RGB values of image before and after white balance correction

	校正前	校正后
R	187	181
G	172	178
B	163	174

更具体地,分割出两幅图像中所有的白色区域,分别计算 RGB 值的平均值,结果如表 1 所示。白平衡校正后,图像的颜色特征有了显著提高。

### 3.3 颜色特征量提取

在数字图像产生、传输和变换的过程中会产生各种各样的噪声,这些噪声会影响检测精度与灵敏度,因此在提取显色区域颜色特征量之前需要进行滤波降噪处理。胶体金试纸显色的过程中,试纸表面不光滑会造成显色不均匀,从而出现一些灰度值明显偏大或偏小的像素点,采用非线性滤波器中的均值滤波器进行降噪,不仅对孤立点、线条的干扰有用,还能较好地保护显色区域的边缘轮廓<sup>[5]</sup>。

降噪之后根据图像大小、显色区域的面积和位置分割显色区域。用一个固定大小的矩形框循环遍历分割出来的显色区域,找到矩形框选区域内 RGB 误差较小的一个区域来代表整个显色区域的颜色特征,建立图像颜色特征量与样本浓度之间的数学模型,从而实现降钙素原浓度的测量。根据 RGB 空间与 XYZ 空间的数学模型算出胶体金试纸条显色区域的 XYZ 值。图 4(a)和 4(b)分别为原始胶体金试纸显色部分截取的照片和滤波后进行颜色特征量提取的图片。其中矩形框内对应的 XYZ 值分别为 30.62, 23.24, 37.18。再对已知浓度的样本进行拍照测量,建立图像颜色特征量 XYZ 值与样本浓度的数学模型,便可得到一个可靠的测量值。

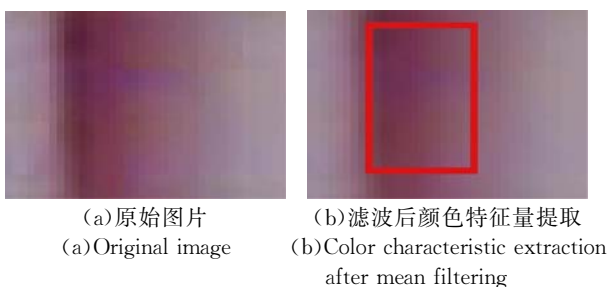


图 4 颜色特征量提取结果

Fig. 4 Result of color characteristic extraction

## 4 测量实验与结果

### 4.1 CMOS 颜色特性化校正实验

在进行降钙素原测量之前,对已知标准光源下 XYZ 值的 NCS 标准色卡颜色进行拍照。胶体金试纸显色和校准色卡的颜色均覆盖在色品图的紫红色域,对校准色卡上颜色编号为:S 0520-R60B、S 1040-R10B、S 1040-R50B、S 1040-R60B 的 4 个颜色进行多项式回归建模校正后,再对 25 个分布在紫红色色域的标准色卡进行测量及精度验证。事实上,在实际产品中上述 4 个校准色卡的颜色是在胶体金试纸显色的对应位置上打印相同大小的颜色带,并先用光度计准确测量出其 XYZ 值。

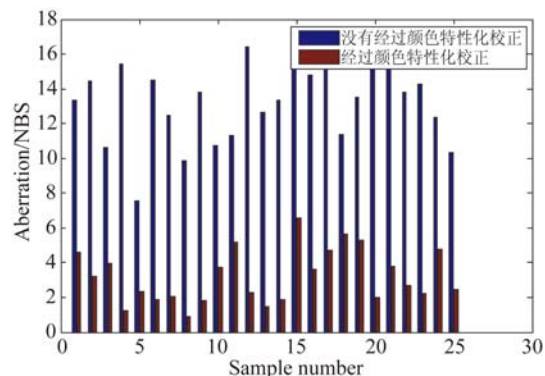


图 4 颜色特性化校正实验的色差对比

Fig. 4 Aberration contrast in color characteristic correction experiment

图 4 表示 CMOS 颜色特性化校正后对色卡样本拍照所得颜色与标准值之间的差值。实验结果表明,在均匀颜色空间 Lab 中最大色差为 6.552 3 个 NBS 单位,最小色差为 0.881 9 个 NBS 单位,平均色差为 3.206 个 NBS 单位。与校正前 13.24 个 NBS 单位的平均色差相比有了明显提高。为了验证 CMOS 颜色特性化校正后测量结果的稳定性,当光源稳定后,选取 20 个色卡,在 10 个不同时刻对每一个色卡进行测量,得到的重复测量误差小于 1%。由此可知颜色特性化校正后性能稳定。

### 4.2 浓度测量实验

实验中随机配比了 20 个浓度分布在 0.1~40 ng/mL 的降钙素原胶体金试纸条进行测量。图 5 表示颜色特性化校正后 XYZ 值与浓度的关

系。在浓度相对较低的时候,XYZ 值随浓度的升高显著下降;当浓度升高到一定值时,由于显色趋于饱和,变化缓慢,结果不仅与理论分析相符合,和实际浓度值也有很好的对应关系。

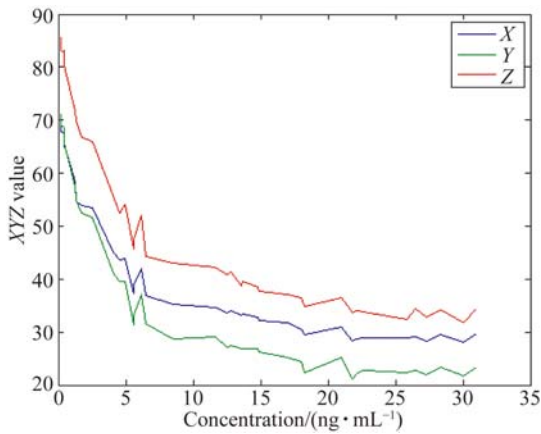


图 5 颜色特性校正后 XYZ 值与浓度的关系

Fig. 5 Relationship between XYZ value and concentration after color characteristic correction

图 5 能较好地拟合出 XYZ 值与浓度的曲线。在测量得到的降钙素原浓度数据中,舍去个别随机误差较大的数据,对配比的 20 个浓度进行多次浓度测量实验,结果如表 2 所示。

表 2 系统比例尺的标定结果

Tab. 2 Result of system scale calibration

序号	标准值	测量值	序号	标准值	测量值
1	0.12	0.17	11	8.50	9.16
2	0.24	0.20	12	10.23	10.02
3	0.53	0.62	13	12.55	11.51
4	1.26	1.48	14	13.56	13.81
5	2.53	2.88	15	17.99	18.93
6	4.09	4.24	16	21.02	20.05
7	4.59	5.33	17	22.17	23.24
8	4.98	4.60	18	26.52	25.75
9	5.62	5.78	19	28.33	29.62
10	6.49	6.11	20	33.45	34.27

根据表 2 计算得到浓度测量值的平均准确率可达 93.8%,尤其是对 2.5 ng/mL 以上的中高浓度的测量准确率可达 95% 以上。由于低浓度显色特性相对来说不稳定、均匀性较差,所以多次测

参考文献:

[1] 王帅,郑德智,樊尚春. 定量胶体金试剂条浓度检测

量低浓度后直接进行插值计算,最终有效测量浓度可达 0.1~35 ng/mL。

为了验证胶体金显色分析仪测量结果的稳定性,排除试纸条显色差异带来的误差,当光源稳定后,对实验配比的 20 个降钙素原浓度值、每个浓度分别用 10 根试纸条测量,结果表明重复测量误差小于 1.5%,而临床上降钙素诊断的浓度范围在 2 ng/mL 以上,所以该胶体金显色分析仪的稳定性较高、适用性较好。降钙素原胶体金试纸条显色分析仪的实物如图 6 所示。



图 6 降钙素原胶体金试纸条显色分析仪

Fig. 6 Photo of color analytical reader for procalcitonin colloidal gold test strips

5 结 论

本文根据现代生物医学检测速度快、价格低、精度高的要求,提出了一种基于树莓派的降钙素胶体金试纸条显色分析仪,利用胶体金显色试纸条的图像颜色特征可以快速准确地实现待测物浓度的测量。介绍了胶体金显色分析仪的基本结构和工作原理,研究了显色分析仪中的 CMOS 颜色特性校正算法和白平衡算法,最后根据颜色特征给出了较大范围内降钙素原浓度的测量曲线。实验结果表明:该胶体金试纸条显色分析仪的精度可达 93.8%,重复测量误差小于 1.5%,有效测量范围为 0.1~35 ng/mL,基本满足临床上降钙素原浓度测量的要求。不过由胶体金试纸条本身显色不均匀带来的浓度匹配误差还有待进一步研究。

方法[J]. 北京航空航天大学学报,2009,35(8): 942-945.

WANG SH, ZHENG D ZH, FANG SH CH. Detecting method of quantitative colloidal gold test

- strip concentration [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2009, 35(8): 942-945. (in Chinese)
- [2] 汪燕,白玉洁,张艳超,等.基于 CCD 的胶体金试纸条光电检测仪器设计及实验研究[J].*传感技术学报*,2008,21(8):1370-1373.  
WANG Y, BAI Y J, ZHANG Y CH, *et al.*. Design and reasearch of a photoelectrical apparatus for later-flow based on CCD [J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2008, 21(8): 1370-1373. (in Chinese)
- [3] KIM S, PARK J. Development of a test strip reader for a lateral flow membrane-based immunochromatographic assay [J]. *Biotechnology and Bioprocess Engineering*, 2004, 9(2): 127-131.
- [4] HONG G W, LUO M R, RHODES P A. A study of digital camera colorimetric characterization based on polynomial modeling [J]. *Color Res. Appl.*, 2001, 26(1): 76-84.
- [5] 王洋. 高精度金标试纸读数仪的设计与开发[D]. 杭州:浙江大学,2013.  
WANG Y. *Design of a Colloidal-gold Strip reader with High Accuracy* [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013. (in Chinese)
- [6] 徐艳芳,刘文耀,左坤隆,等.彩色扫描仪的特征化[J].*光学精密工程*,2004,12(1):15-20.  
XU Y F, LIU W Y, ZUO K L, *et al.*. Reasearch on hierarchical color correction method[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2004, 12(1): 15-20. (in Chinese)
- [7] 赵梓权,王瑞光,郑喜凤,等.用彩色 CCD 相机测量发光二极管显示屏的色度[J].*光学精密工程*, 2013,21(3):575-582.  
ZHAO Z Q, WANG R G, ZHENG X F, *et al.*. Measurement of chroma of LED display with color CCD camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(3): 575-582. (in Chinese)
- [8] 赵萍,王文举,陈伟.分层色彩校正算法研究[J].*计算机工程与应用*,2015,51(6):158-162.  
ZHAO P, WANG W J, CHEN W. Research on hierarchical colour correction method [J]. *Engineering and Applications*, 2015, 51(6): 158-162. (in Chinese)
- [9] QIU X B, LIU CH CH, MAUK M G. A portable analyzer for pouch-actuated, immunoassay cassettes [J]. *Sensors and Actuators B:Chemical*, 2011, 160(1): 1529-1535.
- [10] BARNARD, FUNT B. Camera characterization for color research[J]. *Color Res. Appl.*, 2002, 27(3): 152-163.
- [11] CHEUNG T L V, WESTLAND S. Color camera characterisation using artificial neural networks [C]. *IS & T/SID Tenth Color Imaging Conference*, 2002: 117-120.
- [12] 孙海超,田睿,丁南南,等.基于直方图均衡化的自动白平衡算法及其 FPGA 实现[J].*仪器仪表学报*,2015,36(12):222-226.  
SUN H C, TIAN R, DING N N, *et al.*. Automatic white balance algorithm based histogram equalization and its FPGA implementation [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2015, 36(12): 222-226. (in Chinese)
- [13] LI B, XU D, XIONG W H, *et al.*. Color constancy using achromatic surface [J]. *Color Res. Appl.*, 2010, 35(4): 304-312.
- [14] KAWAKAMI R, ZHAO H X, TAN R T, *et al.*. Camera spectral sensitivity and white balance estimation from sky images [J]. *International Journal of Computer Vision*, 2013, 105(3): 187-204.
- [15] 许敏芬,王立强,袁波.基于无色差表面识别的高清电子内窥镜自动白平衡算法[J].*红外与激光工程*, 2014, 43(9): 3110-3115.  
XU M F, WANG L Q, YUAN B. Auto white balance algorithm of high definition electronic endoscope [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(9):3110-3115. (in Chinese)
- [16] 姚洪涛,田青青,苏伟,等.基于彩色直方图均衡化的自动白平衡算法研究[J].*长春理工大学学报:自然科学版*,2014,37(4):104-107.  
YAO H T, TIAN Q Q, SU W, *et al.*. Reasearch on automatic white balance algorithm based on color histogram equalization [J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology: Natural Science Edition*, 2014, 37(4): 104-107. (in Chinese)

#### 作者简介:



王霞(1972—),女,河北邯郸人,博士,副教授,博士生导师,1996年、1999年于中国矿业大学(北京)分别获得硕士、博士学位,主要从事光电成像技术与系统方面的研究。E-mail: wx\_may@263.net



陈飞(1993—),男,云南曲靖人,硕士研究生,2016年于北京理工大学获得学士学位,主要从事图像处理和机器视觉方面的研究。E-mail: 1727334460@qq.com