

Камеры машинного зрения в медицине

Анализ возможностей ПЗС-/КМОП-сенсоров с акцентом на обеспечении точности цветовоспроизведения

На протяжении последних десятилетий камеры играют все более важную роль в медицине. Сегодня они стали незаменимым элементом практически во всех процессах – от автоматизации лабораторий до оснащения операционных залов. Это особенно касается микроскопии, офтальмологии, патологии, эндоскопии, автоматизации лабораторных процессов и биомедицинских исследований.

В первой части этого технического документа приведены основные характеристики цифровых камер и преимущества использования систем машинного зрения в медицине. Затем поясняются понятия «вычисление цвета» и «точность цветовоспроизведения». В заключении мы обсуждаем тенденцию перехода от камер с технологией ПЗС на КМОП-камеры, а также рассматриваем характеристики сенсоров обоих типов, их преимущества и недостатки.

Содержание:

1. Выбор камеры для различных направлений медицины	1
2. Точность цветовоспроизведения в камерах для медицины.....	3
2.1 От объекта к результату измерения.....	4
2.2 Расчет значения RGB.....	4
2.3 Калибровка цветов.....	5
2.3.1 Баланс белого.....	5
2.3.2 Коррекция матрицы.....	6
2.3.3 Тон, насыщенность.....	6
2.3.4 «Шестикоординатный» оператор.....	6
2.4 Гамма-коррекция.....	6
2.5 Калибровка цветов на практике.....	7
3. Переход от камер с технологией ПЗС на КМОП-камеры	7
3.1 Каково различие между этими двумя типами сенсоров?.....	7
3.2 Устройство ПЗС-сенсора.....	7
3.3 Устройство КМОП-сенсора.....	8
3.4 Преимущества технологии КМОП в медицине и биологических науках.....	8

1. Критерии выбора камеры для медицины

Темпы разработки новых сенсоров и интерфейсов, подстегиваемые пользовательским спросом, в том числе определяют темпы внедрения новых технологий в медицине, основанных на использовании камер. Выбор камеры для решения различных задач в медицине все более усложняется ввиду огромного ассортимента предлагаемых сенсоров и интерфейсов на рынке. Во многих случаях при принятии решения необходимо учитывать целый ряд факторов как общего, так и частного характера. Ключевыми критериями при этом являются: (1) размеры и форм-фактор, (2) условия работы камеры, (3) сенсор камеры, (4) интерфейс, (5) объектив, (6) ожидаемый срок службы платформы и (7) возможности адаптации. В то время как пп. (1)–(5) определяются собственными характеристиками продукта, пп. (6) и (7) варьируются в зависимости от производителя камеры.

Этот документ содержит основные требования, предъявляемые к камерам в медицине и раскрывает несомненные преимущества камер машинного зрения по сравнению с камерами потребительского класса и проприетарными продуктами со стандартными сенсорами.

Размеры и форм-фактор

Размеры и форм-фактор – одни из важнейших критериев при выборе камеры. Если камера используется как внешнее устройство формирования изображения, например, для контроля за ходом операции или в микроскопии, то она должна быть помещена в надежный корпус. В случае интеграции камеры непосредственно в медицинский прибор важную роль играет наличие свободного пространства, поэтому большое значение придается компактности и размерам камеры. Не менее важную роль играют интерфейс и расположение кабельных разъемов. Если USB-порты расположены сбоку, для кабельных соединений потребуется больше места, тогда как интерфейсы на базе LVDS с ультрагибкими плоскими кабелями подходят даже для систем с крайне ограниченным пространством. Камеры машинного зрения проектируются с учетом сложных условий эксплуатации в промышленных условиях. В отличие от камер потребительского класса, при их разработке во внимание принимаются такие факторы как расположение сенсора, деформация камеры и связанное влияние на поле зрения сенсора. Учет всех этих факторов необходим для обеспечения высокого уровня стабильности и воспроизводимости данных изображения.

Условия эксплуатации камеры

Условия и сценарии эксплуатации камеры – еще один важный пункт, который следует учитывать при выборе компонентов системы. Камеры часто работают в меняющихся условиях освещения. Программное обеспечение, поставляемое вместе с системами машинного зрения, адаптирует настройки камеры к таким условиям, что позволяет использовать для получения требуемого результата не две камеры, а одну. В отношении типового ПО для камер машинного зрения это означает возможность управления различными функциями, такими как длительность экспозиции и коррекция баланса белого.

Сенсор камеры

Будучи «глазами» камеры, оптический сенсор является одним из важнейших ее компонентов. В зависимости от типа объектов съемки, сенсор должен обеспечивать съемку изображений на полном разрешении с минимального расстояния. Так, при использовании камер в диагностике, к сенсорам предъявляются такие требования, как высокая чувствительность и разрешение до 20 Мп. Требования к скорости съемки также зависят от области применения. Если требуется съемка в режиме реального времени, предполагающая взаимодействие с пользователем (как, например, в микроскопии), рекомендуется выбирать сенсоры с частотой кадров 25–30 кадр/с, которые позволяют вести плавную съемку объектов. В то же время для экспертизы и анализа закрепленных образцов скорость съемки не является критичной, уступая место другим критериям, например типу сенсора. В большинстве случаев (в том числе при использовании камер в офтальмологических рефрактометрах) вполне достаточно монохромного сенсора. В других сферах, например для получения изображений глазного дна, цвет объекта исследования имеет существенное значение для последующего анализа. В особенности это касается диагностических процедур (например, в офтальмологии, патологии и дерматологии). Корректная цветопередача – еще один важный критерий, подробно рассматриваемый в этом техническом документе. В условиях слабой освещенности (например, при флуоресцентном освещении) требуются особые сенсоры с высокой квантовой эффективностью, низким уровнем темнового шума и шума считывания данных. Дополнительным требованием в таких областях становятся низкий уровень шума и большая площадь светочувствительных элементов (пикселей).

Производители камер машинного зрения, как правило, предлагают для своих камер широкий спектр сенсоров. В некоторых случаях одинаковые модели сенсоров адаптируются для работы с разными интерфейсами. Это значительно упрощает процесс проектирования решений, позволяя использовать готовые камеры вместо разработки специальной системы для решения конкретной задачи, что крайне важно с точки зрения сокращения затрат на разработку и уменьшения сроков вывода продукта на рынок. Другим преимуществом по сравнению с камерами потребительского класса является качество изображения. Камеры машинного зрения оснащаются встроенным вычислительным блоком, который осуществляет предварительную обработку данных. Эта технология совершенствовалась на протяжении многих лет и сегодня позволяет разгрузить процессор ПК, взяв на себя такие ресурсоемкие операции, как дебайеризация, шумоподавление и алгоритмы коррекции. В идеале вычислительные блоки опираются на программируемую вентильную матрицу (FPGA) для моментального перенаправления данных изображения. Немаловажным преимуществом камер машинного зрения является полная прозрачность параметров. В то время как считывание данных с сенсоров в камерах потребительского класса – абсолютно скрытый от пользователя процесс, результат которого может быть изменен только при последующей обработке, разработчики камер машинного зрения предлагают пользователю полный контроль над настройками камеры.

Еще одно важнейшее отличие камер машинного зрения – приспособленность сенсоров к круглосуточной работе. Камеры потребительского класса начинают давать сбои уже после нескольких часов непрерывной работы – наиболее характерными ошибками являются искажение изображения и пропуск кадров. Камеры машинного зрения могут работать непрерывно в течение многих лет безо всяких ограничений.

Интерфейс

В системах машинного зрения наиболее популярен интерфейс Gigabit Ethernet (GigE). Технология GigE популярна и в медицине благодаря своей совместимости со стандартными сетевыми архитектурами и возможности использования кабелей большой длины. В последние годы набирает популярность интерфейс USB3, преимуществом которого является простота интеграции благодаря технологии Plug-and-Play. Производители систем машинного зрения разработали специальные стандарты передачи данных изображения через порты GigE и USB3: GigE Vision и USB3 Vision. Эти протоколы значительно экономичнее и стабильнее протоколов потребительского класса и гарантируют намного более быструю передачу потоков данных изображения. Для компактных устройств пропускная способность – ключевой аспект не только в отношении выбора интерфейса, но и с точки зрения обработки изображений. При работе со стереоизображениями предпочтительней использовать интерфейсы на базе LVDS. Они могут быть интегрированы в вычислительный блок (например, в программируемую вентильную матрицу) на плате обработки изображения, что обеспечит максимально быстрое выполнение вычислительных задач без увеличения нагрузки на процессор ПК. Интерфейсы на базе LVDS также предполагают использование плоских кабелей – идеальное решение в условиях ограниченного пространства ввиду их гибкости.

Объектив

После выбора камеры, осветительной установки, устройства обработки данных и алгоритмов настанет черед определения требований, предъявляемых к объективу. На создание и производство объектива по индивидуальным требованиям может уйти несколько лет, поэтому крайне важно позаботиться об этом на самых ранних этапах разработки системы. Некоторые производители камер машинного зрения предлагают объективы и кабели, подходящие к камерам. Возможность приобретения всех компонентов в одном месте экономит время и ресурсы разработчиков решений, сокращая, в то же время, риски, связанные с надежностью поставщика.

Ожидаемый срок службы

Ожидаемый срок службы платформы также является важным аспектом при выборе производителя камеры. Жизненный цикл продукта в области медицинской диагностики (в частности, в хирургии и офтальмологии) должен составлять до 10 лет из-за длительных и сложных процедур сертификации (ISO, FDA). По этой причине крайне необходимо, чтобы производитель камеры наладил надежное взаимодействие с целой сетью поставщиков, чтобы гарантировать доступность компонентов в продаже на протяжении длительного времени. Этот критерий настолько важен, что производители медицинского оборудования зачастую отказываются от инноваций в пользу продуктов, которые, по их мнению, еще долго будут предлагаться на рынке.

Возможности адаптации

Производители камер машинного зрения давно привыкли адаптировать свою продукцию с учетом самых разнообразных требований клиентов. Эта гибкость играет особую роль в медицине. В случае сертификации продукта для использования в медицине разработка встроенного программного обеспечения для клиента прерывается, и камеры поставляются клиенту с версией программного обеспечения, действительной на момент сертификации. Во многих случаях камеры планируются поместить в стандартизованный корпус медицинского прибора, что подразумевает ее адаптацию в отношении материалов, этикеток и цветов.

Краткие выводы

Ниже перечислены преимущества, подтверждающие, что камеры машинного зрения – лучший выбор для медицинской отрасли:

1. Длительный срок службы камер: надежный корпус, малая деформация сенсора, качественная обработка.
2. Стабильное современное программное обеспечение с возможностями адаптации камеры к различным сценариям использования и уровням освещенности, широкие возможности управления (в отличие от камер потребительского класса).
3. Широкий выбор сенсоров и типов интерфейса, а также качественная поддержка, что гарантирует быструю и эффективную интеграцию и небольшой срок вывода продукта на рынок.
4. Камеры машинного зрения обеспечивают четкие и воспроизводимые изображения с точной передачей цветов объекта съемки. Камеры потребительского класса изначально полагаются на различные алгоритмы для повышения качества изображения.
5. Сегодня КМОП-сенсоры можно считать доступной по цене альтернативой ПЗС-сенсорам.
6. Камеры машинного зрения оснащаются интерфейсом GigE или USB 3.0, специально разработанными для передачи изображений.
7. Благодаря новым интерфейсам, таким как LVDS, появилась возможность установки систем машинного зрения в условиях ограниченного пространства (например, в портативных устройствах, стереоскопических системах).
8. Возможность приобретения всех компонентов (камеры, объектива и кабеля) у одного поставщика для сокращения рисков.
9. Программные и аппаратные платформы, созданные производителями систем машинного зрения, служат много лет.
10. Существует возможность выполнять особые требования клиента (к цветам, этикеткам, материалам и т. п.).

2. Точность цветовоспроизведения в медицинских камерах

Точность цветовоспроизведения – задача № 1 в ряде стремительно развивающихся направлений диагностической медицины, в том числе в цифровой патологии, офтальмологии, гематологии и микроскопии.

Цифровая патология – крайне удобный метод переноса изображений образцов между лабораториями. Он значительно удешевляет анализ, одновременно повышая его эффективность и надежность – любые расстояния преодолеваются моментально, благодаря чему образец может одновременно подвергаться исследованию даже в разных странах. Просматривать и комментировать оцифрованные образцы исследователям помогает программное обеспечение. После оцифровки подозрительные зоны в образце можно отправить на обработку аналитическими алгоритмами. Этот метод компьютерной медицинской диагностики основан на алгоритмах распознавания образов с помощью нейронных сетей и в последние годы был значительно усовершенствован. Благодаря его использованию существенно повышается точность диагностики, а также экономятся время и деньги за счет возможностей предварительной оценки образцов. Опытные патологи рассматривают цвет определенных структур в образце как важный индикатор с точки зрения диагностического анализа, поэтому камеры должны соответствовать строгим требованиям, которые гарантируют надлежащую передачу деталей и цветового тона образца в его цифровой версии.

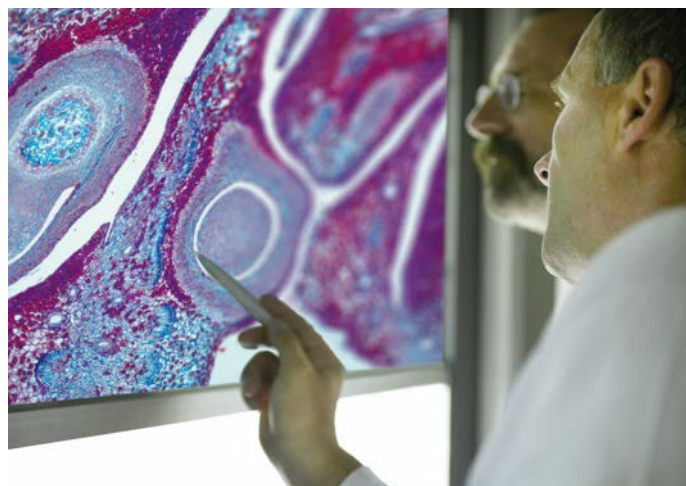


Рис.1. Цифровая патология. После оцифровки образца исследователи могут идентифицировать патогенные структуры и применить алгоритмы распознавания образов.

В ходе цифровой дерматоскопии камера снимает потенциально злокачественные новообразования кожи. Традиционные оптические дерматоскопы, позволяя оценить участки кожи, пораженные раком, не дают возможности подготовить стандартизованную документацию или провести количественное наблюдение в динамике на протяжении времени. При каждом цифровом дерматоскопическом обследовании изменения подозрительного участка кожи фотографируются. Если такие обследования проводятся на протяжении длительного времени, то запись позволит отследить изменение пигментного

образования. Программное обеспечение сохраняет изображения, после чего выводит их на экран. Дерматолог ставит диагноз, руководствуясь различными критериями, такими как радиус и цвет пигментного пятна. Таким образом, точность цветовоспроизведения оказывает огромное влияние на результаты диагностики и потому является одним из ключевых критериев выбора камеры. Для цифровой дерматоскопии это не просто требование к качеству продукции – цвет должен быть передан максимально точно независимо от типа освещения и цвета люминофора.

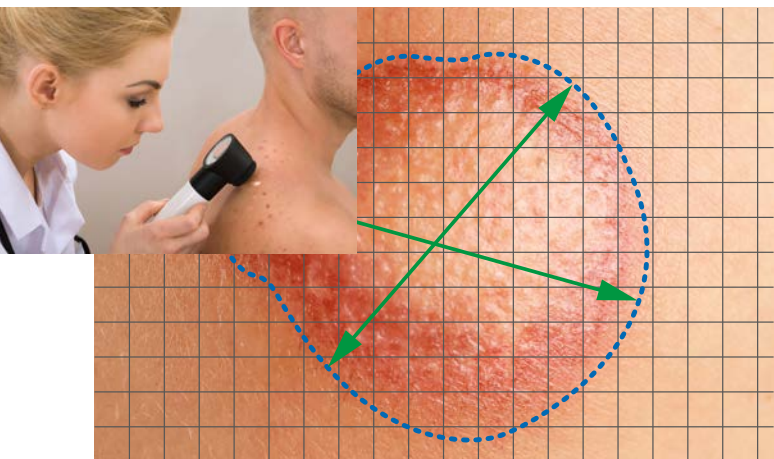


Рис. 2. Цифровая дерматоскопия. Потенциально патогенные кожные новообразования сохраняются при каждом осмотре с помощью цифрового дерматоскопа, после чего подвергаются анализу в специализированном ПО.

2.1 От объекта к результату измерения: как цифровые камеры передают цвет

В приведенном выше примере наглядно продемонстрировано, как цифровые камеры используются для ведения документации, поддержки исследований и выполнения измерений, а также насколько критичны требования к точности цветовоспроизведения в медицине. Чтобы описать процесс цветопередачи, необходимо понять, как определяются цвет объекта и яркость изображения, учитывая путь, который свет проходит от объекта через объектив к сенсору, где происходит вычисление цветового значения.

При захвате изображения свет, отраженный от объекта, сначала проходит через объектив, после чего попадает на сенсор камеры. При этом крайне важны все три компонента этого процесса: чем лучше освещенность объекта, тем больше степень точности, с которой сенсор сможет определить яркость цвета. Поскольку отраженный свет проецируется на сенсор через объектив, качество последнего также играет важную роль.

Сенсор состоит из множества отдельных пикселей, которые регистрируют поступающие фотоны света и, в зависимости от их количества, передают результаты их анализа с помощью электрического сигнала, соответствующего различным уровням яркости. Таким образом, отдельные пиксели можно рассматривать как «ловушки», в которые попадают входящие фотоны. Чтобы сенсоры могли различать спектральные характеристики фотонов (длину их волны), на них накладывается

массив цветных фильтров, известный как шаблон или матрица Байера (рис. 3). Каждый цветной фильтр, входящий в этот массив, пропускает свет только определенной длины волны, соответствующий основным цветам (красный, зеленый или синий) (рис. 4). Структура шаблона Байера может значительно отличаться в разных моделях сенсоров, однако в общем случае состоит из трех типов фильтров: 50% площади шаблона занимают зеленые, 25% – красные и 25% – синие фильтры.

Рис. 3. Шаблон Байера с фильтрами разных цветов на пикселях сенсора. Каждый цветной пиксель состоит из 4 базовых пикселей (1 синий, 2 зеленых, 1 красный).

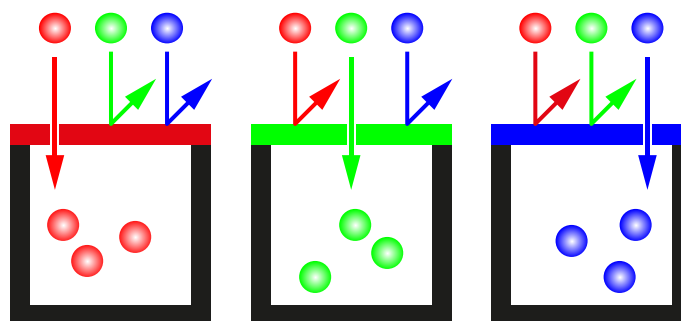
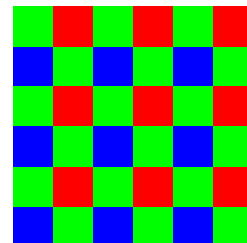


Рис. 4. Цветные фильтры пропускают свет только с определенной длиной волны – красного, зеленого или синего цвета. Фотоны с другой длиной волны не могут пройти сквозь цветной фильтр.

2.2 Расчет значения RGB

На следующем этапе значения яркости, зафиксированные отдельными цветными пикселями, используются для вычисления цветовых значений. Цель – экстраполировать значения яркости, полученные с помощью шаблона Байера (например 8 бит на пиксель), на данные цветовой модели RGB (24 бита на пиксель: 8 на красный, 8 на зеленый и 8 на синий цвет). Этот процесс известен как дебайеризация и заключается в интерполяции отсутствующих у каждого пикселя цветовых значений. Дебайеризация – процесс, значительно повышающий нагрузку на центральный процессор. В современных камерах, включая модели Basler, этот процесс выполняется средствами встроенных программируемых вентиляционных матриц (FPGA). Для пользователя это означает меньшую вычислительную нагрузку на ЦП, что важно, например, в случае встраиваемых систем, для которых доступность вычислительных ресурсов является критичной. Кроме того, при использовании FPGA сводится к минимуму время задержки, обусловленное вычислениями.

Любая неточность цветопередачи может привести к серьезным последствиям на этапе анализа цветных медицинских изображений. Стандартизованное цветовое пространство sRGB было разработано для унификации отображения цвета в разных камерах и на разных сенсорах. В медицине, где стандартизации уделяется очень большое внимание, пространство sRGB является основой цветовоспроизведения. Использование

стандарта sRGB гарантирует, что изображения с идентичными значениями sRGB будут выглядеть одинаково на всех мониторах, откалиброванных в этой же цветовой модели.

Преобразование в камере значений RGB в стандартизованные значения sRGB происходит посредством двух алгоритмов: калибровки цветов и гамма-коррекции.

2.3 Калибровка цветов

Как уже было сказано выше, цветовые значения, создаваемые камерой, зависят от различных факторов, таких как освещение, объективы, сенсор и интерполяция (дебайеризация). Прежде чем вы сможете использовать вычисленные цветовые значения в медицинской диагностике, необходимо предпринять некоторые действия, которые бы обеспечили соответствие этих цветовых значений реальным объектам – процесс, известный как калибровка цветов. В современных системах камер калибровка цветов подразделяется на несколько этапов: так называемая коррекция матрицы и коррекция с использованием шестикоординатного оператора. После выполнения этих двух этапов выполняется гамма-коррекция, несмотря на то что этот этап не имеет непосредственного отношения к калибровке цветов.

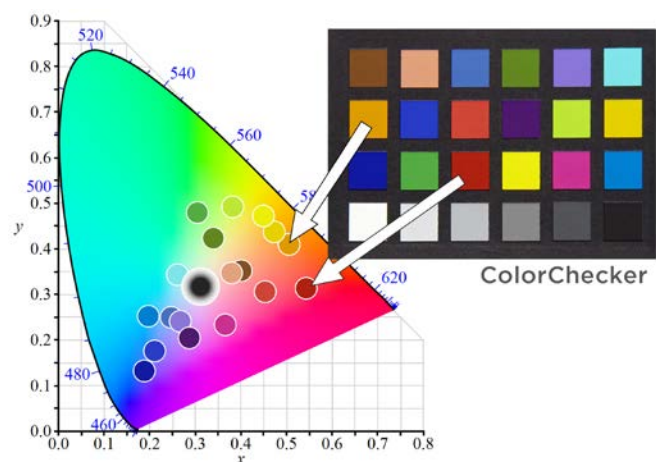


Рис. 5. Шкала ColorChecker с 24 цветами и 6 градациями серого. Значение sRGB шкалы ColorChecker в цветовом пространстве L*a*b* (или одном из его уровней).

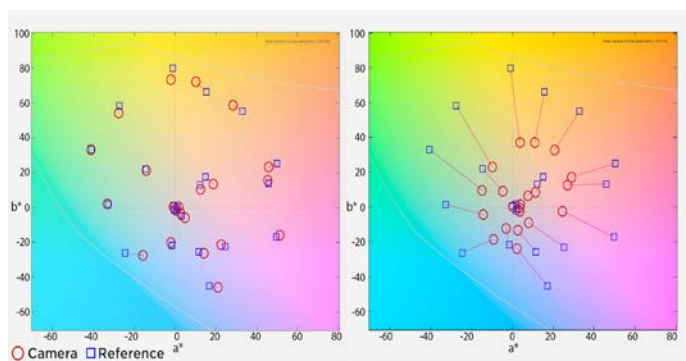


Рис. 6. Длина вектора между одним результатом измерения (круглая точка – камера) и другим результатом измерения (квадратная точка – эталон) определяется как цветовая ошибка ΔE. Благодаря калибровке цветов цветовой ошибке удается свести к минимуму.

В процессе калибровки используются три шкалы ColorChecker (рис. 5, справа). Шкала ColorChecker представляет собой поле из 24 цветами и 6 градациями серого, расположенных в ячейках, находящихся рядом друг с другом. При строго заданном освещении значения sRGB для каждого отдельного поля известны (рис. 5, слева), что позволяет использовать ColorChecker в качестве эталонного тестера для определения корректности отображения цветов камерой. Цветовое значение камеры измеряется на основе особого поля, содержащего значение sRGB, которое можно использовать для сравнения с актуальным известным значением цветового поля. Длина вектора между точкой измерения и известной точкой в цветовом пространстве называется ΔE (см. рис. 6) и соответствует цветовой ошибке. Значение ΔE = 1 называется дифференциальным порогом. Значение ΔE > 1 определяется как отличающийся цвет. Цель процесса калибровки – максимально уменьшить цветовую ошибку ΔE. В прошлом существовали различные методы для вычисления цветовой ошибки ΔE. В 1970-е гг. значение ΔEab, как описано выше, использовалось для измерения евклидова вектора смещения; позднее использовались такие определения, как ΔE94 и ΔE00, для более точного учета человеческого восприятия на отрезке между точками.

2.3.1 Коррекция баланса белого

Коррекция баланса белого используется для адаптации камеры к цветовой температуре света, используемого для освещения объекта съемки. Для этого используются поля с оттенками серого на шкале ColorChecker. Глаз человека выполняет собственную коррекцию баланса белого, известную как цветовая адаптация. Эта особенность позволяет людям воспринимать цвет объекта примерно одинаково даже при изменении цветовой температуры освещения. Белый лист бумаги воспринимается нами как белый при свете дня и в условиях искусственного освещения.

Коррекция баланса белого может выполняться различными способами. Наиболее простой – попросить пользователя выбрать в средстве просмотра область белого цвета. Тем не менее, во многих системах коррекция баланса белого выполняется автоматически. Для этого могут применяться разные методы, например, чрезвычайно простой метод Grey World. Он подразумевает, что на стандартном изображении среднее значение всех цветов соответствует серому цвету. Если определить разницу между серым цветом и вычисленным средним цветовым значением, после чего умножить ее на число цветочных каналов, то для белых поверхностей значения по каналам должны быть равны (R=G=B).

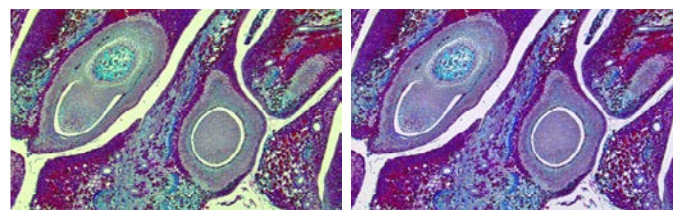


Рис. 7. Результат коррекции баланса белого для изображения, передаваемого камерой для микроскопии Basler pulse puA2500, в режиме реального времени. Слева – до выполнения коррекции. Справа – после автоматической коррекции баланса белого.

2.3.2 Коррекция матрицы

Коррекция матрицы используется для адаптации спектральной чувствительности цветных пикселей сенсора к спектральной чувствительности человеческого глаза. Поскольку цветовая модель RGB состоит из красного, зеленого и синего, значение чувствительности перемножается на цветовую матрицу 3x3, которая почти соответствует корректному цветовому тону. Результат коррекции матрицы используется затем для преобразования специфичного для камеры значения RGB в стандартизованное значение sRGB.

2.3.3 Тон, насыщенность

При создании систем машинного зрения для медицины перед разработчиками часто ставится задача не только свести к минимуму цветовые ошибки, но и сделать получаемые изображения эстетически привлекательными. Поскольку камеры используются как для измерений, так и для фотодокументирования – в данном случае, для макроскопического наблюдения за клеточными структурами, – возникает необходимость получения привлекательных цветных изображений. В этой ситуации могут помочь функции для работы с тоном и насыщенностью.

Внутри цветового пространства повышение насыщенности вызывает смещение цветовых точек к внешнему краю (см. рис. 9, справа). Изменение тона, наоборот, вызывает вращение цветовых пикселей (см. рис. 9, слева). Поэтому необходимо помнить, что изменение тона и насыщенности – глобальные операции. Любое использование этих функций отразится на всех цветах одинаковым образом.

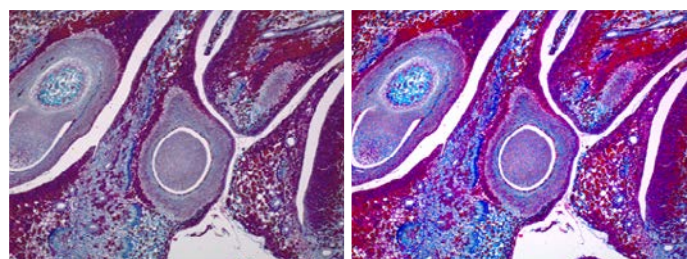


Рис. 8. Повышение насыщенности в процессе записи деятельности клеточных структур в режиме реального времени с помощью камеры для микроскопии (Basler pulse puA2500).

2.3.4 Шестикоординатный оператор

В отличие от функций изменения тона и насыщенности, шестикоординатный оператор не приводит к глобальным изменениям. Он позволяет обрабатывать отдельные цвета в цветовом пространстве, не влияя на другие цвета.

В некоторых областях, включая съемку глазного дна, перед исследователями стоит задача изучения восприятия различных цветов. Шестикоординатные операторы помогают адаптировать представление цветов в соответствии с потребностями исследователей. Если сравнивать с другими методами, в случае разработки новых устройств, вплоть до замены компонентов камеры, цветовосприятие снимка останется прежним.

Кроме того, при применении шестикоординатного оператора существует возможность усилить различие между цветами (например, между двумя очень похожими оттенками красного цвета). В данном примере светло- и темно-красный цвета можно заменить на желтый и пурпурный.

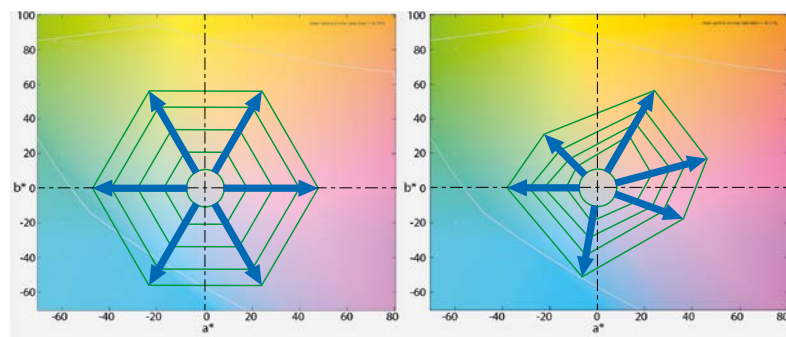
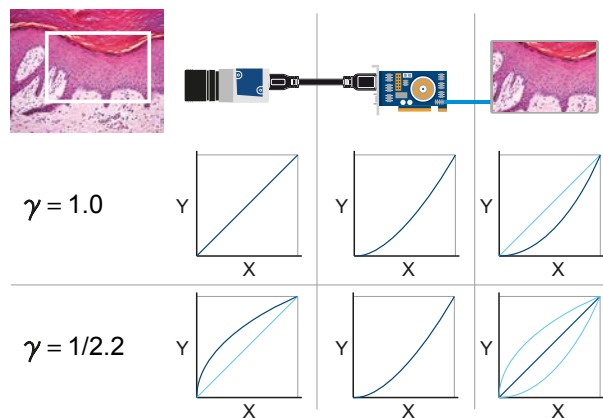


Рис. 9. Визуализация операций на уровне цветового пространства L*a*b*. Слева: тогда как изменение тона и насыщенности являются глобальными операциями, оказывающими влияние на расположение точек в цветовом пространстве (то есть изменение насыщенности повлияет сразу на все цветовые точки), шестикоординатный оператор (справа) позволяет преобразовывать отдельные цвета в цветовом пространстве в другие – не оказывая влияния на прочие цвета.

2.4 Гамма-коррекция

В отличие от человеческого глаза, для сенсоров камеры яркость выражается в линейных значениях. Другими словами, увеличение количества фотонов в 2 раза приводит к увеличению измеренной яркости ровно в 2 раза. В ходе эволюции человеческий глаз научился оценивать изменение яркости нелинейно. Яркость темных областей имеет для человека значительно больше градаций, чем яркость светлых областей. Поэтому гамма-коррекцию необходимо выполнять до того, как полученное изображение будет передано для воспроизведения на устройство. В ходе гамма-коррекции значения яркости возводятся в степень на основе кривой, которая увеличивает градации в темных областях, одновременно уменьшая их в светлых. Цель – повторно добиться линейности для уровня яркости монитора. Поскольку во время передачи изображение подвергается выпуклой нелинейности, то для компенсации этого эффекта его необходимо заранее применить вогнутую нелинейность (см. рис. 10).



X = Exposure, Y = Light intensity

Рис. 10. Визуализация гамма-коррекции. Снятое изображение необходимо подвергнуть гамма-коррекции, чтобы компенсировать воздействие инверсной гамма-кривой при передаче и отобразить его в линейной прогрессии на мониторе.

2.5 Калибровка цветов на практике

В последнем поколении камер используются предварительно заданные параметры калибровки цветов (коррекция баланса белого, коррекция матрицы и шестикоординатный оператор). Эти параметры можно заранее настроить для работы в рамках определенных сценариев (вольфрамовая лампа 2800 К, дневной свет 5000 К, дневной свет 6500 К), благодаря чему камеры будут сразу готовы к работе. Если же пользователь хочет самостоятельно выполнить калибровку цветов для своей системы машинного зрения и условий освещения, всего несколько производителей камер, в том числе Basler, предоставляют для этих целей необходимое программное обеспечение.

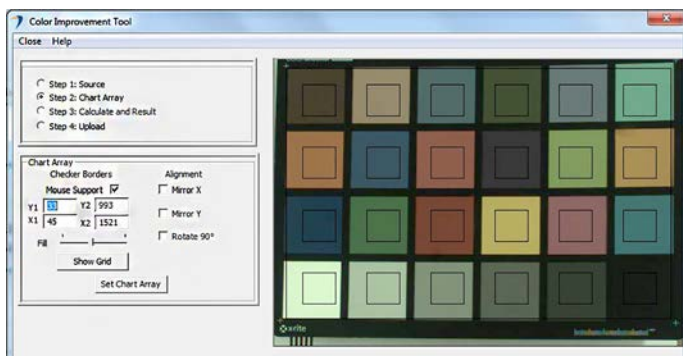


Рис. 11. Инструмент цветокоррекции. На входе с камеры получено некалиброванное изображение шкалы ColorChecker. Затем выполняется вычисление цветовой ошибки, после чего оптимизируются параметры баланса белого, коррекции матрицы и шестикоординатных операторов для минимизации этой ошибки. Наконец, скорректированные параметры можно передать на камеру.

Значение цветовой ошибки в промышленных камерах до выполнения цветокоррекции обычно находится в диапазоне от 10 до 20. После калибровки цветов это значение в современных камерах (Basler) доходит до ΔE от 3 до 4, что соответствует высоким требованиям, предъявляемым камерам в медицине.

Краткие выводы

- Ключевыми факторами для точности цветовоспроизведения являются освещение, сенсор и калибровка цвета.
- Предварительная обработка данных, например дебайеризация, коррекция баланса белого, гамма-коррекция, коррекция матрицы и применение шестикоординатного оператора, помогает минимизировать цветовые ошибки или адаптировать цвета к использовавшимся ранее цветовым профилям (например, при замене прежней системы машинного зрения на новую).
- Измерения помогают определить цветовую ошибку (ΔE), при этом значение ΔE 3–4 считается более чем приемлемым.
- Предварительная калибровка камер под определенные цветовые температуры сокращает затраты на интеграцию при стандартных условиях эксплуатации камер.

- При использовании камер в нестандартных условиях пользователь может выполнить калибровку цветовой матрицы самостоятельно.
- Дебайеризация средствами программируемой вентиляционной матрицы помогает сэкономить вычислительные ресурсы на стороне ПК.

3. Переход от камер с технологией ПЗС на КМОП-камеры Подробнее



На рынке предлагаются два типа светочувствительных сенсоров для промышленных камер: с технологией ПЗС и технологией КМОП. В то же время в последние годы наблюдается отчетливая тенденция в пользу выбора сенсоров с технологией КМОП. Это неудивительно: КМОП-сенсоры были значительно усовершенствованы по двум важным для матричных и линейных камер характеристикам, а именно кадровой частоте и уровню шума. Кроме того, КМОП-сенсоры дешевле в производстве, что позволяет сэкономить еще больше на фоне постоянно снижающихся цен на системы.

3.1 Каково различие между этими двумя типами сенсоров?

В наши дни можно приобрести светочувствительные сенсоры с технологией ПЗС (прибор с зарядовой связью) и КМОП (комплементарная структура металл–оксид–полупроводник). Их задача заключается в преобразовании световых лучей (фотонов) в электрические сигналы (электроны). Однако способы и средства передачи полученной информации сенсором каждого типа различаются, как и сами сенсоры принципиально различаются в техническом исполнении.

3.2 Устройство ПЗС-сенсора

В ПЗС-сенсоре заряды, образовавшиеся в светочувствительных элементах (пикселях), перемещаются и преобразуются в сигналы. Заряды, накопленные в пикселях под воздействием полупроводникового электрода, передаются на центральный аналого-цифровой преобразователь посредством множества мелких операций сдвига с участием параллельных («вертикальных») и последовательных («горизонтальных») регистров сдвига. Это аналогично передаче ведер с водой по цепочке при тушении пожара. Перенос зарядов обеспечивается с помощью электрических полей, которые создаются электродами в сенсорах.

Перенос заряда в ПЗС-сенсоре занимает много времени. Это становится ощутимым недостатком в случае сенсоров с высоким разрешением, в которых заряд передается на центральный усилитель посредством множества операций сдвига в связи с огромным количеством пикселей. В результате накладывается ограничение на максимальную возможную частоту кадров.

3.3 Устройство КМОП-сенсора

В КМОП-сенсорах, для хранения заряда, параллельно с каждым пикселем находится конденсатор. Этот конденсатор заряжается от пикселя фототоком, который образуется в результате его экспозиции. Напряжение в конденсаторе пропорционально яркости света и продолжительности экспозиции. В отличие от ПЗС-сенсоров, электроны, захваченные конденсаторами в результате воздействия на сенсор света, не передаются на единый выходной усилитель, а преобразуются в измеримое напряжение непосредственно на месте с помощью электронных схем, ассоциированных с каждым пикселем. Полученные значения напряжения затем могут быть переданы на процессор аналоговых сигналов. С помощью дополнительных электронных схем информация может считываться с каждого пикселя независимо, без необходимости перемещения заряда, как в ПЗС-сенсорах. Как следствие, считывание информации изображения осуществляется гораздо быстрее по сравнению с ПЗС-сенсорами, а такие артефакты, связанные с чрезмерной экспозицией, как «вуаль» и «размытие», возникают гораздо реже либо не возникают вовсе. Недостаток заключается в том, что дополнительная площадь, необходимая для размещения электронной схемы каждого пикселя, не относится к светочувствительной области. Светочувствительная область на поверхности сенсора (определяется коэффициентом заполнения), таким образом, будет меньше, чем у ПЗС-сенсора. Теоретически, по этой причине сенсор способен аккумулировать меньшее количество фотонов для преобразования в информацию изображения. Тем не менее, существуют методы компенсации этого недостатка.

КМОП-сенсоры отличаются более высокой полной емкостью потенциальной ямы или емкостью насыщения, что определяет максимальное количество электронов на пиксель. Во многих случаях это значение искусственно привязано к более низкому порогу насыщения.

Поэтому несмотря на то, что пороговая чувствительность ПЗС-сенсора выше, это преимущество полностью компенсируется КМОП-сенсором за счет широкого динамического диапазона, обусловленного более высокой емкостью насыщения. По сути, КМОП- и ПЗС-сенсоры демонстрируют практически одинаковую производительность по динамическому диапазону.

Несмотря на то, что КМОП-сенсоры основаны на более «молодой» технологии, чем ПЗС-сенсоры, они являются, на сегодняшний день, более зрелым в технологическом отношении продуктом, создавая ПЗС-сенсорам конкуренцию во многих областях.

Отличия в поведении считывания для ПЗС- и КМОП-пикселей:

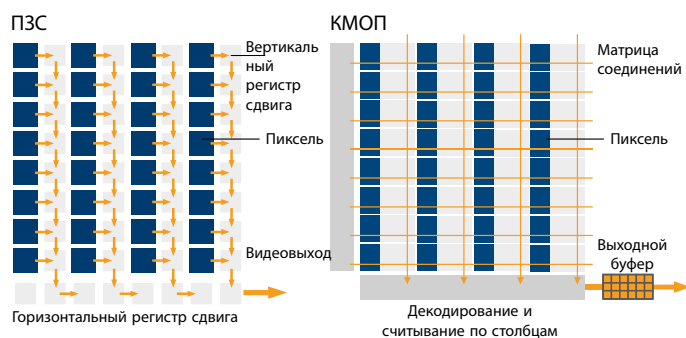


Рис. 12. Устройство ПЗС-сенсора (слева) и КМОП-сенсора (справа). В ПЗС-сенсоре заряд передается последовательно по пикселям. В КМОП-сенсоре, напротив, заряд каждого пикселя непосредственно преобразуется в напряжение и считывается, благодаря чему КМОП-сенсор работает существенно быстрее.

3.4 Преимущества технологии КМОП для использования в медицине и биологических науках

Как показано выше, технология КМОП за последние годы претерпела значительные изменения, и сенсоры с этой технологией сегодня во многом превосходят сенсоры на основе ПЗС. Высокая скорость съемки (частота кадров) и разрешение (количество пикселей), низкое энергопотребление и другие оптимизированные недавно характеристики, среди которых коэффициент шума и квантовая эффективность, теперь позволяют использовать КМОП-сенсоры в областях, в которых ранее доминировали ПЗС-сенсоры.

Благодаря усовершенствованию технологии КМОП и выгодному соотношению цены и технических характеристик привлекательность сенсоров с этой технологией продолжает расти, и они все чаще используются в медицине и биологических науках.

КМОП-сенсоры обладают целым рядом преимуществ:

- Высокая скорость съемки

Благодаря своей архитектуре КМОП-сенсоры отличаются гораздо более высокой частотой кадров. Улучшенная чувствительность в совокупности с новейшей технологией глобального затвора от CMOSIS, Sony или ON Semiconductor обеспечивают съемку серии изображений на очень высокой скорости. Это, в свою очередь, подразумевает более высокую производительность при решении тех или иных задач, как, например, оптический контроль большого количества компонентов за одну секунду.

- Беспрепятственное изучение образцов в микроскопии
- Моментальная фокусировка для использования в автоматизированных лабораторных системах.

■ Высокое разрешение (число пикселей)

Благодаря своей архитектуре КМОП-сенсоры способны выполнять съемку на очень высокой скорости с очень высоким разрешением. Именно поэтому сенсоры с высоким разрешением обычно создаются на базе этой технологии.

- Достаточный резерв разрешающей способности для автоматизированного сканирования препаратов
- Высокие разрешения и большие значения в мегапикселях все более востребованы в микроскопии.

■ Расширенный динамический диапазон

Полная емкость потенциальной ямы или емкость насыщения соответствует максимальному числу электронов на пиксель. Соотношение полной емкости потенциальной ямы и пороговой чувствительности определяет динамический диапазон сенсора. Поэтому несмотря на то, что пороговая чувствительность ПЗС-сенсора выше, это преимущество полностью компенсируется КМОП-сенсором за счет широкого динамического диапазона, обусловленного более высокой емкостью насыщения. По сути, КМОП- и ПЗС-сенсоры демонстрируют практически одинаковую производительность по динамическому диапазону. Сенсор Sony IMX174 – отличный пример КМОП-сенсора, который в динамическом диапазоне превосходит сопоставимые ПЗС-сенсоры.

- Повышенная производительность воспроизведения изображения на камерах для микроскопии

■ Низкое энергопотребление

- Благодаря низкому уровню тепловыделения и энергопотребления КМОП-сенсоры идеально подходят для применения в портативном и мобильном медицинском оборудовании.
- Порты интерфейса, например USB 3.0, также могут использоваться для подачи питания на камеру. Простота интеграции позволяет сократить затраты.

■ Улучшенные шумовые характеристики

- Сниженное тепловыделение КМОП-сенсоров значительно понижает уровень шума в сигнале. Проверено на практике: повышение температуры на 8°C удваивает уровень шума в сигнале.

■ Повышенная квантовая эффективность

Несколько лет назад можно было с уверенностью сказать, что для съемки в условиях слабой освещенности более оправданным будет выбор ПЗС-сенсора, тогда как КМОП-сенсоры превосходили их по производительности при ярком освещении. За последнее время качество изображений, получаемых КМОП-сенсорами, возросло настолько, что сегодня их можно смело выбирать, в том числе, для работы при слабом освещении.

- Подходят для использования с флуоресцентными источниками света.

■ Выгодное соотношение цены и технических характеристик

- Сокращение затрат на медицинское оборудование и системы.

Учитывая важнейшие характеристики современной технологии КМОП, можно с уверенностью сказать, что она еще долго будет удерживать на рынке лидирующую позицию.



Автор

Петер Берингер (Peter Behringer)
менеджер по продукции

С 2016 г. Петер Берингер (Peter Behringer) занимает должность менеджера по продукции и отвечает за камеры Basler для встраиваемых систем в сегменте рынка медицины и биологических наук.

До прихода в Basler Петер получил степень магистра медицинских технологий в Университете Любека. Еще во время обучения в университете он прошел стажировку во многих известных организациях, включая Берлинский клинический комплекс Шаритэ (Charité), Лабораторию планирования хирургических операций и Гарвардскую медицинскую школу.

Петер Берингер (Peter Behringer) опубликовал большое количество научных работ, касающихся обработки изображений в медицине.

Контактные данные

Петер Берингер (Peter Behringer) – менеджер по продукции

Тел.: +49 4102 463 662
Факс: +49 4102 463 46662
Эл. почта: peter.behringer@baslerweb.com

Basler AG
An der Strusbek 60-62
22926 Ahrensburg
Германия

Basler AG

Компания Basler является ведущим производителем цифровых камер для различных областей применения, включая промышленность, медицину, ритейл и дорожно-транспортные системы. При разработке камер учитываются современные промышленные требования. Камеры Basler отличаются простотой интеграции, компактными размерами, высоким качеством изображения и выгодным соотношением цены и технических



Автор

Денис Деттмер (Denis Dettmer)
менеджер по продукции

Денис Деттмер (Denis Dettmer) занимает должность менеджера по продукции в Basler AG. Ранее он работал в сфере продаж и маркетинга в компании, занимающейся производством торговых терминалов и автоматизацией банковских систем, а также в крупной немецкой банковской ассоциации на должности менеджера по продукции в подразделении систем самообслуживания. В своей карьере он также занимал позицию инженера по обеспечению соответствия сертификационным требованиям и выступал руководителем проектов в компании, занимающейся аутсорсингом ИТ-услуг.

На текущей должности он щедро делится своим пониманием процессов и опытом с клиентами Basler по всему миру, выступая авторитетным источником информации и предоставляя консультации по бескорпусным камерам для медицины и биологических наук.

В роли менеджера по продукции в Basler Денис координирует технические требования к бескорпусным камерам с интерфейсом USB и требования со стороны клиентов, с точки зрения возможности их воплощения в реальность в аспекте управления продукцией. В его обязанности входит краткосрочная и перспективная разработка камер для вертикально интегрированного рынка медицины и биологических наук.

Контактные данные

Денис Деттмер (Denis Dettmer) – менеджер по продукции
Тел.: +49 4102 463 375
Факс: +49 4102 46 46375
Эл. почта: denis.dettmer@baslerweb.com

характеристик. Компания Basler была основана в 1988 году, и вот уже более 25 лет работает в области обработки изображений. Компания насчитывает 500 сотрудников в своем головном офисе, расположенном в Аренсбурге (Германия), а также в международных филиалах и представительствах в Европе, Азии и Америке.

©Basler AG, 11/2016

Дополнительную информацию о политике конфиденциальности и об исключении ответственности можно получить по ссылке www.baslerweb.com/disclaimer-ru

Basler AG
Головной офис в Германии
Тел. +49 4102 463 500
Факс +49 4102 463 599
sales.europe@baslerweb.com
www.baslerweb.com

Basler, Inc.
США
Тел. +1 610 280 0171
Факс +1 610 280 7608
sales.usa@baslerweb.com

Basler Asia Pte Ltd.
Сингапур
Тел. +65 6367 1355
Факс +65 6367 1255
sales.asia@baslerweb.com

BASLER
the power of sight