

УДК 004.932

АДАПТИВНАЯ СТАБИЛИЗАЦИЯ ЯРКОСТИ ИЗОБРАЖЕНИЯ В ТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ РАСПОЗНАВАНИЯ КРУПНЫХ ДВИЖУЩИХСЯ ОБЪЕКТОВ

© 2017 г. А. П. Гладков, Е. Г. Кузнецова, С. А. Гладилин, М. А. Грачева

*Институт проблем передачи информации им. А. А. Харкевича РАН
127051 Москва, Большой Каретный пер., 19
E-mail: gladkov.ap@iitp.ru*

Поступила в редакцию 03.03.2017 г.

Работа посвящена вопросу разработки алгоритмов управления параметрами чувствительности цифровой видеокамеры для адаптации к изменениям освещенности сцены по причине появления или исчезновения крупных объектов, являющихся целью распознавания. Описаны управляемые параметры чувствительности цифровой видеокамеры (время экспозиции, коэффициент усиления, апертура ирисовой ДС-диафрагмы) и особенности их регулировки. Приведены результаты экспериментальных исследований зависимости яркости регистрируемых камерой изображений от изменения величины управляющего сигнала диафрагмы, на основании которых предложен алгоритм управления ДС-диафрагмой. Предложен алгоритм совместного управления тремя параметрами чувствительности для регулирования яркости изображения и его модификация для случая крупных быстро движущихся объектов. Предложено обобщение этого алгоритма для управления параметрами чувствительности стереопары с целью выравнивания значений средней яркости кадров, поступающих одновременно с каждой из камер.

Ключевые слова: управление чувствительностью камеры, ДС-диафрагма, умная камера, адаптация к яркости, автокалибровка.

ВВЕДЕНИЕ

Для промышленных систем технического зрения одним из важнейших факторов, определяющих эффективность работы всей системы, является качество получаемых с видеокамеры изображений. Если система технического зрения осуществляет распознавание сцен реального мира в условиях естественного освещения, то для обеспечения качества дополнительно требуется компенсировать изменения освещенности регистрируемой сцены путем корректировки параметров чувствительности камеры. Это обуславливается тем, что динамический диапазон яркости, регистрируемый камерой, ограничен, поэтому необходимо обеспечить эффективный подбор параметров, приводящих его в соответствие с диапазоном яркости наблюдаемой сцены.

Существует три основных механизма управления чувствительностью камеры: управление временем выдержки камеры, изменение

коэффициента аналогового усиления регистрируемого камерой сигнала и регулирование размера диафрагмы объектива. Каждый из этих механизмов по-своему влияет на свойства получаемых с камеры изображений и имеет свои преимущества и ограничения применимости, поэтому разработка системы совместного управления этими механизмами требует понимания основных принципов их работы. Ниже мы подробно остановимся на их рассмотрении.

Современные промышленные камеры почти всегда имеют встроенные алгоритмы автоподстройки чувствительности. Как правило, их цель – поддерживать постоянную среднюю яркость в заданной области кадра. Для работы технических распознающих систем промышленного уровня, однако, использование стандартных алгоритмов автоподстройки зачастую неприемлемо. Во-первых, эти алгоритмы не обеспечивают функциональность управления диафрагмой. Системы же всепогодного круглосуточного

распознавания требуют управления диафрагмой, поскольку освещенность сцены даже при условии наличия ночного освещения меняется более чем на три десятичных порядка (Schlyter P., 2009) и не может быть скомпенсирована двумя другими механизмами. Во-вторых, целевой функцией алгоритма стабилизации яркости при распознавании не обязательно является поддержание постоянного среднего уровня. В данной работе будет показано, что при распознавании крупных быстро движущихся объектов адекватная целевая функция выглядит иначе. Здесь под крупными объектами мы понимаем такие, появление которых в сцене может существенно изменить ее яркость. Такая задача возникла при разработке АКТС – системы распознавания класса транспортного средства при въезде на платный участок дороги (Григорьев и др., 2017). Так, появление в зоне классификации АКТС крупных грузовиков существенно понижает яркость изображения при наблюдении “против солнца”. При этом средняя яркость изображения вне проезда для работы системы вовсе не критична, а продолжительность пребывания в кадре распознаваемого объекта (автомобиля) сравнима со временем адаптации. Отсюда следует, что постоянная стабилизация яркости видеопотока в этой задаче будет ошибкой.

В настоящей работе предлагается алгоритм автоматического управления параметрами чувствительности видеокамеры, обеспечивающий для системы распознавания быстро движущихся крупных объектов более подходящий профиль яркости регистрируемого видеопотока в сравнении с алгоритмом стабилизации средней яркости. Кроме того, рассматриваются дополнительные требования на параметры изображения, предъявляемые бинокулярными алгоритмами реконструкции формы объектов, и предлагается алгоритм управления яркостью стереоизображений.

Основные параметры цифровой видеокамеры

Цифровая видеокамера предназначена для фиксации и количественной оценки распределения яркости наблюдаемых поверхностей в сцене. Проективное изображение сцены формируется объективом на светочувствительной матрице, которая измеряет для каждого элемента его освещенность, преобразует и оцифровывает яркостный сигнал. Развертка этих сигналов во времени передается на внешний вычислитель в виде видеопотока.

Основным параметром объектива, интегральным с точки зрения стабилизации яркости

изображения, является его светосила. Это отношение освещенности матрицы камеры к яркости наблюдаемого объекта. Поскольку количество света, который достигает светочувствительной матрицы, определяется диаметром входного отверстия (зрочка) объектива, то светосила объектива может регулироваться устройством, называемым апертурной диафрагмой. Такая диафрагма часто реализуется в виде нескольких подвижных лепестков, положение которых и определяет размер входного зрочка. Некоторые из них (DC Auto Iris) имеют электронное управление, что обеспечивает возможность автоматического управления диафрагмой со стороны распознающей системы. Существуют диафрагмы с ручной регулировкой зрочка, а также – автоматические (P Iris), однако в данной работе они рассматриваться не будут.

Встроенный контур управления диафрагмой типа DC Auto Iris состоит из двух неподвижных катушек индуктивности, постоянного магнита, жестко связанного с подвижной частью диафрагмы, а также пружины, удерживающей диафрагму в закрытом положении. Первая катушка – управляющая – обеспечивает движение подвижной части ирисового механизма, на который действуют две противодействующие силы: сила упругости пружины, стремящаяся закрыть диафрагму, и сила магнитного поля, стремящаяся ее открыть. Вторая катушка отвечает за обратную связь – в ней индуцируется ток, характеризующий скорость движения лепестков ириса. Из-за присутствия механического трения, преодолеваемого при приведении ирисового механизма в движение, связь между управляющим сигналом и скоростью движения ириса нелинейна. Величина трения различается от объектива к объективу и зависит от таких факторов, как температура и степень износа механизма.

Управление DC-диафрагмой требует аналогового контроллера, как правило, не входящего в состав камеры. В настоящее время такие контроллеры не выпускаются, а их конструкция очень слабо освещена в литературе, и авторам удалось найти лишь несколько схем, управляющих диафрагмой на основе аналогового видеосигнала, получаемого с камеры. На основе одной из таких схем (Орлов, 2007) была реализована управляющая плата, принимающая на вход ШИМ-сигнал, формируемый камерой.

Собственно же в камере используются два механизма управления чувствительностью: время экспозиции и коэффициент усиления. Рассмотрим первый из них. Кадр видеопотока несет информацию о том, какая величина световой

энергии попала на каждый из элементов матрицы от начала кадра за время экспозиции (выдержки). Время экспозиции, как правило, не совпадает с кадровым интервалом, не может его превышать и является регулируемым параметром. Оптимальное время экспозиции определяется особенностями сцены. Яркая сцена требует небольшого времени выдержки, поскольку динамический диапазон фотоэлементов ограничен, и насыщение элементов приводит к возникновению засветки на изображении и потере информации. Темная сцена, напротив, требует длительной выдержки, чтобы избежать потери сигнала на фоне шума и уменьшить искажения, связанные с квантованием значений при оцифровке. Помимо яркостных характеристик сцены, важным фактором является динамика происходящих в ней изменений — например, если в сцене присутствует быстрое движение, время экспозиции должно быть малым, чтобы изображение не было смазанным.

Механизм управления коэффициентом усиления используется для повышения яркости темных изображений в условиях низкой освещенности. В цифровых камерах может быть реализовано как аналоговое, так и цифровое усиление. Цифровое усиление эквивалентно программному контрастированию кадра видеопотока, а аналоговое реализуется усилителем, установленным на светочувствительной матрице. Основным недостатком использования механизма увеличения коэффициента усиления для повышения яркости является одновременное усиление шума на изображении.

Интересно то, что описанные механизмы управления чувствительностью видеокамеры полностью аналогичны известным механизмам адаптации зрительной системы человека, хотя возникали вне всякой связи с бионикой.

Как оптическая система глаз обладает возможностью сужения и расширения зрачка, что регулирует количество входящего в глаз света в пределах 1 лог. ед. Скорость реакции зрачка зависит от общей яркости сцены (Laurens, 1923), диапазон размеров зрачкового отверстия является индивидуально вариабельным и зависимым от возраста (Birgen, 1950; Winn et al., 1994). Сужение происходит немного быстрее, чем расширение, так как управляются два этих процесса разными группами мышц (Шамшинова, 1999; Кравков, 1932). Данная асимметрия кажется логичной, так как сетчатка при чрезмерной интенсивности света может быть повреждена, поэтому зрачковая реакция выступает не только как контроллер качества изображения, но и как защитный механизм для

предотвращения нарушений. Зрачковая реакция двух глаз синхронизирована: при засвете одного глаза сужаются оба зрачка, хотя, по некоторым данным, реакция происходит медленнее, чем при засвете обоих глаз (Reeves, 1920; Кравков, 1932). Помимо этого, у человека наблюдаются зрачковые реакции не только на уровень яркости воспринимаемой сцены: существует связь аккомодации, конвергенции и зрачковой реакции, в связи с чем при переводе взгляда на более близкие объекты зрачки сужаются; показаны также изменения размеров зрачка под влиянием различных эмоций (Кравков, 1932; Sirois, Brisson, 2014). Существуют индивидуальные отклонения, при которых размеры зрачков несколько различаются; в пределах 1 мм такое различие считается вариантом нормы (Lam, 1987). Несмотря на указанные приводящие факторы, влияющие на размер зрачка, восприятие зрительной сцены при этих колебаниях размера остается эффективным за счет наличия и других механизмов адаптации к освещенности, функционирующих в гораздо более широких диапазонах.

В сетчатке глаза человека существуют два класса фоторецепторов: колбочки, работающие в условиях более высокой освещенности, и палочки, работающие в условиях освещенности сниженной. Переход от одного типа рецепторов к другому происходит в диапазоне от 10^{-3} до 3 кд/м^2 , такое зрение называют сумеречным или мезопическим (диапазон более 3 кд/м^2 , в котором функционируют только колбочки, называют диапазоном фотопического зрения, а диапазон функционирования только палочковых фоторецепторов, менее 10^{-3} кд/м^2 — диапазоном скотопического зрения).

При длительной световой экспозиции истощается запас не выгоревших пигментных молекул и везикул нейротрансмиттера в пресинаптической мембране ганглиозных клеток, и процесс темновой адаптации, т.е. полного включения в работу механизмов палочкового зрения и восстановления пигментных клеток, занимает по разным данным 20–40 мин (Шамшинова, 1999; Lamb, 1993; Howard, 2012). Полный переход к палочковому зрению является самым медленным из механизмов адаптации к освещенности, при этом снижается острота зрения и пропадает цветоразличение, однако существенно повышается чувствительность к слабым источникам света (в сотни миллионов раз по сравнению с колбочковой чувствительностью).

В экспериментах на животных также были показаны адаптационные структурные изменения сетчатки под воздействием света, такие

как перемещение клеток пигментного эпителия в слой колбочек и палочек, изменение длины сегментов колбочек и палочек. Данные процессы пока что не были обнаружены в сетчатке человека, однако нельзя исключать, что и в ней существуют дополнительные механизмы адаптации.

Исследования абсолютной пороговой чувствительности зрительной системы показали, что восприятие очень слабых источников света зависит не только от яркости источника, но и от его площади и времени предъявления. В психофизиологии зрения существуют эмпирические законы полной и частичной временной суммации, в которых описывается зависимость порога восприятия от указанных величин, однако нужно понимать, что пространственная и временная суммация являются сложными взаимосвязанными явлениями и пока что не полностью поддаются описанию.

Тем не менее, обобщая всё вышеописанное, можно сказать, что зрительная система человека обладает несколькими механизмами, позволяющими эффективно функционировать в различных зрительных условиях: (1) изменение размера зрачка, (2) изменение чувствительности рецепторов, (3) временная и пространственная суммация слабых стимулов и (4) использование двух наборов рецепторов с существенно различной чувствительностью. Можно провести аналогию между первыми тремя механизмами зрительной системы человека и, соответственно, (1) регулировкой размера диафрагмы, (2) варьированием коэффициента усиления в светочувствительной матрице и (3) контролем длительности выдержки. Механизм (4) аналогичен использованию в светочувствительной матрице элементов с повышенной чувствительностью, как это реализовано, например, в технологии RGBW (Hamilton, Compton, 2007). Впрочем, эффективность технологии RGBW в современных камерах многократно ниже, чем у палочкового зрения.

Управление параметрами чувствительности камеры

Как было уже сказано выше, целью автоматического управления параметрами чувствительности камеры является адаптация к изменениям яркости регистрируемой сцены. В качестве оценки яркости обычно используется средняя или медианная яркость изображения, доля насыщенных (т.е. близких к предельным значениям яркости изображения) пикселей и другие порядковые статистики гистограммы распределения яркости. Оценки могут вычисляться по целому

изображению сцены или по ключевым зонам, как фиксированным заранее, так и детектируемым распознающей системой (Cvetkovic et al., 2010). В данной работе будет использоваться оценка средней яркости заранее заданной контрольной зоны на регистрируемых камерой кадрах.

Время экспозиции (выдержки) и коэффициент усиления являются достаточно стабильными и быстрыми механизмами управления (изменение параметров происходит уже на следующем кадре). Управление этими параметрами осуществляется по значению и обычно реализуется на основе пропорционального (П) или пропорционально-интегрального (ПИ) регулятора (Nourani-Vatani, Roberts, 2007; Hyden, Wilhelmsson, 2011).

Зависимость между значениями времени экспозиции и коэффициента усиления и средней яркостью изображений сцены различается для разных типов камер, однако при управлении может считаться линейной (с погрешностями, возникающими в результате аналогово-цифровых преобразований, дискретностью шагов изменения параметров или других аппаратных особенностей).

В отличие от времени экспозиции и коэффициента усиления, из-за описанных выше особенностей реализации DC-диафрагмы, а также необходимости использования нестандартного аналогового контроллера, зависимость между управляющим сигналом и яркостью неизвестна и различается от объектива к объективу. Для разработки алгоритма управления диафрагмой авторы провели экспериментальное исследование этой зависимости на объективе Fujinon YV2.7 × 2.2SA-SA2. Изучали, как меняется яркость изображения в зависимости от управляющего сигнала, подаваемого на контроллер. Для этого было проведено несколько серий экспериментов.

В первой серии проверяли, задает ли управляющий сигнал промежуточные положения диафрагмы. Перед началом каждого измерения диафрагму переводили в начальное состояние, после этого в течение значительного времени (120 с) подавали постоянный управляющий сигнал и измеряли среднюю яркость изображения. Каждый эксперимент ставили дважды, первый раз в качестве начального использовали полностью открытое, во второй — полностью закрытое положение диафрагмы. Результаты измерения представлены на рис. 1. График показывает, что при подаче управляющего сигнала со значением меньше 0.35 (весь диапазон допустимых значений — это интервал [0, 1]) диафрагма полностью закрывается, со значением больше 0.55 — полностью открывается,

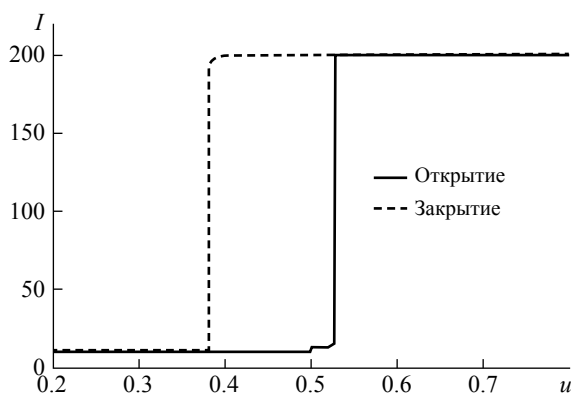


Рис. 1. Зависимость средней яркости изображения I от постоянного управляющего сигнала u , подаваемого на диафрагму.

Сплошная кривая соответствует начальному состоянию, когда диафрагма полностью закрыта (в процессе эксперимента происходило ее открытие), прерывистая кривая – состоянию, когда диафрагма полностью открыта (в процессе эксперимента происходило ее закрытие).

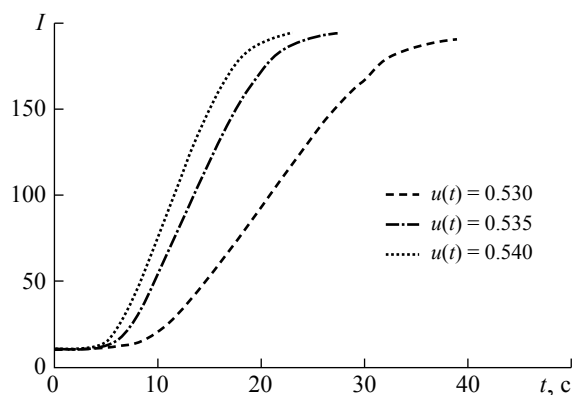


Рис. 2. Зависимость средней яркости изображения I при открытии диафрагмы от времени t при различных постоянных сигналах управления.

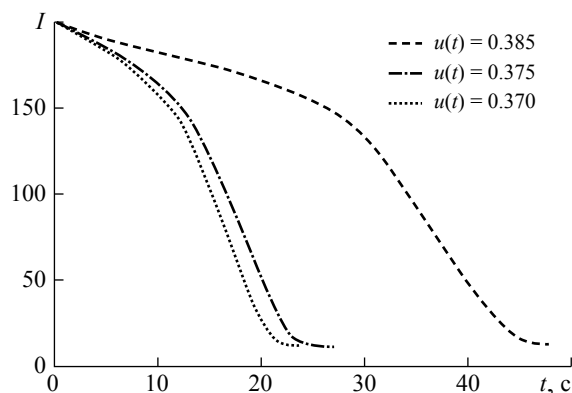


Рис. 3. Зависимость средней яркости изображения I при закрытии диафрагмы от времени t при различных постоянных сигналах управления.

а в диапазоне 0.35–0.55 наблюдается широкая петля гистерезиса.

Во второй серии экспериментов исследовали зависимость скорости открытия и закрытия диафрагмы от управляющего сигнала. В эксперименте с открытием диафрагмы на полностью закрытую диафрагму подавали постоянный сигнал и с промежутками в 1 с фиксировали среднюю яркость изображения, эксперимент с изначально открытой диафрагмой проводили аналогично. Кривые скорости изменения яркости для разных управляющих значений показаны на рис. 2 и 3.

Как видно из приведенных графиков (особенно – кривых закрытия диафрагмы), даже небольшие изменения управляющего сигнала могут приводить к существенному изменению скорости движения. Даже для отдельного экземпляра объектива не существует постоянного соответствия между управляющим сигналом и скоростью движения диафрагмы. При этом ширина и положение петли гистерезиса заметно различаются для разных экземпляров объективов одной и той же модели и изменяются в зависимости от температуры и других факторов. В настоящей работе предлагается эвристический алгоритм управления диафрагмой, основанный на подборе значений управляющих сигналов, обеспечивающих открытие, закрытие и неподвижное состояние диафрагмы. Попытки построить теоретически обоснованный алгоритм для подобной задачи ранее предпринимались, например, в работе (Hyden, Wilhelmsson, 2011), но и в ней авторы в конце концов столкнулись с необходимостью использования эвристик, корректирующих управление.

Алгоритм управления параметрами чувствительности камеры

Алгоритм управления положением диафрагмы

Отсутствие датчика положения лепестков ириса делает невозможным управление апертурой диафрагмы по отклонению. По той же причине невозможно и управление по отклонению чувствительностью камеры. Поэтому обратная связь строится непосредственно по освещенности матрицы (и, соответственно, яркости изображения).

Нелинейная зависимость скорости движения лепестков ириса от управляющего сигнала, а также разброс параметров для различных объективов и устройств управления делает неприменимыми общеизвестные типы регуляторов. Поэтому нами был разработан эвристический алгоритм,

учитывающий описанные выше особенности конструкции диафрагмы и ее контроллера.

Для упрощения дальнейшего изложения будем считать, что два других механизма управления чувствительностью зафиксированы.

Алгоритм основан на следующих соображениях:

- реакция системы на управление характеризуется широкой петлей гистерезиса (ширина слабо меняется в процессе эксплуатации);

- границы петли гистерезиса неизвестны и могут динамически меняться;

- управляющий сигнал, находящийся вне петли гистерезиса, приводит диафрагму в движение, чем ближе он к границе, тем ниже скорость;

- управляющий сигнал в зоне гистерезиса поддерживает диафрагму в неподвижном состоянии;

- вне зоны гистерезиса зависимость скорости движения от управляющего сигнала монотонна.

Предлагаемую стратегию управления можно описать следующим образом. Будем рассматривать задачу открытия диафрагмы из некоторого исходного состояния. Будем считать, что в этом состоянии диафрагма не движется, а управляющий сигнал находится внутри петли гистерезиса. Для открытия диафрагмы нужно последовательно увеличивать управляющий сигнал, пока диафрагма не начнет двигаться. После того, как диафрагма начнет двигаться, нужно следить за яркостью изображения, и когда она попадет в заданный интервал, медленнодвигающуюся диафрагму нужно будет остановить, снова задав управляющее значение, принадлежащее внутреннему отрезку петли гистерезиса.

С точки зрения теории управления такой алгоритм не является оптимальным, зато он является адаптивным, что позволяет ему без перенастройки работать с различными объективами, и, что важно для отладки, является простым.

Далее перейдем к описанию алгоритма. Введем обозначения:

I – текущий кадр, полученный с камеры;

Ω – контрольная зона изображения, по которой определяется средняя яркость;

\tilde{I} – средняя яркость изображения по области Ω ;

\tilde{I}_{prev} – значение \tilde{I} , полученное на предыдущем кадре;

T – целевая яркость для области Ω ;

Δ – допустимое отклонение \tilde{I} от T ;

Таблица 1. Интерфейсная функция регулировки яркости изображения при помощи диафрагмы.

Номер строки	AdjustLuminance(I)
–	Вход:
–	I
–	Используемые глобальные переменные:
–	$\tilde{I}_{prev}, \tilde{I}, i_{is_moving}$
–	Заданные константы:
–	Ω, T, Δ
1	$\tilde{I}_{prev} := \tilde{I}$
2	$\tilde{I} := Mean(I, \Omega)$
3	if $ \tilde{I} - T > \Delta$:
4	if $\tilde{I} > T$:
5	DecreaseLuminance()
6	else:
7	IncreaseLuminance()
8	else:
9	if $i_{is_moving} = true$:
10	StopIris()

i – значение управляющего сигнала, подаваемого на плату управления диафрагмой;

i_{base} – базовое значение i ;

i_{step} – шаг изменения i ;

$i_{reverse_jump}$ – величина шага, на который изменяется i при смене направления (нужен для перехода к противоположной кривой гистерезиса);

i_{stop_jump} – величина шага, на который изменяется i для остановки диафрагмы (приводит управляющий сигнал в середину петли гистерезиса);

i_{max} – максимальное значение i (приводит диафрагму в полностью открытое состояние);

i_{min} – минимальное значение i (приводит диафрагму в полностью закрытое состояние);

$i_{direction}$ – направление движения диафрагмы (“1” – открывается, “-1” – закрывается);

i_{is_moving} – логический индикатор состояния диафрагмы в текущий момент времени (движется – “true”, не движется – “false”).

Функция *AdjustLuminance* (табл. 1) является интерфейсной. Она получает на вход изображение I , вычисляет среднюю яркость \tilde{I} по области Ω ,

Таблица 2. Функция увеличения яркости изображения при помощи диафрагмы.

Номер строки	IncreaseLuminance()
–	Используемые глобальные переменные:
–	$i, i_{base}, i_{direction}, i_{is_moving}, \tilde{I}, \tilde{I}_{prev}$
–	Заданные константы:
–	$i_{reverse_jump}, i_{step}, i_{min}, i_{max}$
–	Выход:
–	флаг, сигнализирующий об успешном завершении операции
1	if $i < i_{max}$:
2	if $i_{direction} < 0$:
3	$i_{base} := i + i_{reverse_jump}$
4	if $i_{direction} > 0$:
5	if $\tilde{I} \leq \tilde{I}_{prev}$:
6	$i_{base} := i_{base} + i_{step}$
7	$i_{base} := \min(\max(i_{min}, i_{base}), i_{max})$
8	$i := i_{base}$
9	$i_{direction} := 1$
10	SetIrisSignal(i)
11	$i_{is_moving} := true$
12	return $true$
13	return $false$

Таблица 3. Функция уменьшения яркости изображения при помощи диафрагмы.

Номер строки	DecreaseLuminance()
–	Используемые глобальные переменные:
–	$i, i_{base}, i_{direction}, i_{is_moving}, \tilde{I}, \tilde{I}_{prev}$
–	Заданные константы:
–	$i_{reverse_jump}, i_{step}, i_{min}, i_{max}$
–	Выход:
–	флаг, сигнализирующий об успешном завершении операции
1	if $i > i_{min}$:
2	if $i_{direction} > 0$:
3	$i_{base} := i - i_{reverse_jump}$
4	if $i_{direction} < 0$:
5	if $\tilde{I} \geq \tilde{I}_{prev}$:
6	$i_{base} := i_{base} - i_{step}$
7	$i_{base} := \min(\max(i_{min}, i_{base}), i_{max})$
8	$i := i_{base}$
9	$i_{direction} := -1$
10	SetIrisSignal(i)
11	$i_{is_moving} := true$
12	return $true$
13	return $false$

предварительно сохраняя значение \tilde{I} , полученное на предыдущем кадре, в переменной \tilde{I}_{prev} , и в случае, если эта яркость отличается от целевой яркости T больше, чем на Δ , в зависимости от знака отклонения вызывает функцию либо понижения яркости, либо повышения.

Рассмотрим теперь функцию увеличения яркости *IncreaseLuminance* (табл. 2). В первой строке осуществляется проверка текущего значения управляющего сигнала i , если оно равно максимальному значению i_{max} , то на диафрагму уже подается максимальный открывающий сигнал, поэтому работа функции завершается (со значением “false”). Если значение i меньше i_{max} , то проверяется, в каком направлении диафрагма двигалась во время предыдущей операции регулировки. Если направление отличается от текущего, то к текущему значению i_{base} добавляется $i_{reverse_jump}$. Это нужно для того, чтобы за один

шаг приблизиться к противоположной границе петли гистерезиса. Если же направление совпадает с текущим, проверяется, произошло ли изменение яркости в нужном направлении по сравнению с предыдущим кадром. Если произошло, то никаких изменений вносить не нужно, а если нет, то нужно увеличить значение i_{base} на величину шага i_{step} и убедиться, что полученное значение находится в допустимых границах. Далее следует применение измененного i_{base} и обновление переменных $i_{direction}$ и i_{is_moving} . На этом работа функции завершается (со значением “true”).

Функция уменьшения яркости (табл. 3) аналогична рассмотренной функции увеличения яркости.

Последняя функция управления диафрагмой, которую осталось рассмотреть, – это функция остановки диафрагмы (табл. 4). Она вычисляет

Таблица 4. Функция остановки диафрагмы.

Номер строки	StopIris()
–	Используемые глобальные переменные:
–	$i, i_{base}, i_{direction}, i_{is_moving}$
–	Заданные константы:
–	$i_{min}, i_{max}, i_{stop_jump}$
1	$i := i_{base} - i_{direction} \cdot i_{stop_jump}$
2	$i := \min(\max(i_{min}, i), i_{max})$
3	SetIrisSignal(i)
4	$i_{is_moving} := false$

останавливающее значение (т.е. попадающее во внутреннюю область петли гистерезиса) на основе текущего значения i_{base} и направления движения диафрагмы. Это значение определяется как значение i_{base} , сдвинутое на величину i_{stop_jump} с учетом направления движения. Вычисленное значение приводится к интервалу $[i_{min}, i_{max}]$. Переменная i_{is_moving} выставляется в значение “false”.

Приведем значения констант, подобранные нами экспериментально для объективов Fujinon YV2.7 × 2.2SA-SA2 и YV2.7 × 2.2SR4A-SA2 для камеры, кодирующей значения яркости в 8-битной шкале (от 0 до 255):

$$T = 125;$$

$$\Delta = 5;$$

$$i_{step} = 0.01;$$

$$i_{reverse_jump} = 0.075;$$

$$i_{stop_jump} = 0.05;$$

$$i_{max} = 0.7;$$

$$i_{min} = 0.3.$$

При работе с высокоскоростной камерой предполагается, что функция *AdjustLuminance* вызывается не на каждом кадре, а с определенным периодом, определяющим скорость адаптации к изменениям яркости (длительность периода должна быть достаточной для отслеживания компенсации этих изменений).

Так, для рассматриваемой модели объектива при работе камеры под открытым небом рекомендуемая частота – 8–10 вызовов в секунду (средняя длительность адаптации к изменениям яркости при такой частоте составляет 1–5 с).

Алгоритм управления параметрами чувствительности камеры

Далее рассмотрим модификацию описанного алгоритма для совместного управления тремя параметрами чувствительности камеры (значение сигнала управления диафрагмой i , коэффициент усиления g и время выдержки e).

Оптимальная последовательность регулировки параметров для управления чувствительностью определяется спецификой решаемой задачи. Например, в работе (Hyden, Wilhelmsson, 2011) предлагалась следующая последовательность: для повышения яркости сначала увеличивается время выдержки, а при достижении максимального значения времени выдержки увеличивается коэффициент усиления. Такой подход объясняется тем, что в рассматриваемой авторами работы задаче наиболее существенным требованием при адаптации чувствительности камеры к яркости сцены является отсутствие шума на изображениях, при этом быстрые изменения являются нехарактерными для регистрируемой сцены, поэтому использование больших значений времени экспозиции камеры не порождает смазанности изображений. Для решения рассматриваемой задачи использование механизма увеличения времени выдержки, напротив, представляется наиболее нежелательным, так как смазывание может существенно снизить качество работы системы, осуществляющей распознавание быстро движущихся объектов. По этой причине увеличение времени экспозиции для повышения яркости изображения предлагается осуществлять только в том случае, если диапазона допустимых значений двух других управляемых параметров недостаточно для получения требуемой яркости. В первую очередь для повышения яркости предлагается использовать открытие апертуры диафрагмы, а увеличение коэффициента усиления использовать только в том случае, если при полностью открытой диафрагме яркость изображения недостаточна, так как этот механизм (в отличие от управления диафрагмой) одновременно усиливает шум на изображении, что также может влиять на качество работы распознающей системы. Исходя из тех же соображений, для уменьшения яркости изображения управляющие механизмы предлагается использовать в обратном порядке.

Таким образом, предлагается следующая модификация функции увеличения яркости изображения на текущем кадре I :

Если $i < i_{max}$, то используется алгоритм открытия диафрагмы, описанный выше.

Иначе, если $i = i_{\max}$ и $g < g_{\max}$, то увеличивается текущее значение коэффициента усиления g .

Иначе, если $i = i_{\max}$, $g = g_{\max}$ и $e < e_{\max}$, то увеличивается значение времени выдержки e .

Здесь g_{\max} и e_{\max} – соответственно максимальные допустимые значения коэффициента усиления и времени выдержки камеры.

Значения коэффициента усиления и времени выдержки предлагается изменять (по аналогии с алгоритмом управления диафрагмой) малыми фиксированными шагами на каждом кадре. Медленное изменение управляющего сигнала применяется для фильтрации кратковременных изменений яркости, обусловленных, в частности, мерцанием фонарей, используемых для искусственного освещения сцены в ночное время суток. Для них характерно мерцание с частотой 50 Гц (частота электрической сети), и такое мерцание, соответственно, регистрируется видеокамерой как периодическое повышение и понижение яркости. Если значения g и e на каждом кадре будут существенно изменяться (например, путем мгновенной установки оптимальных значений этих параметров, определяемых, например, из предварительно вычисленных таблиц экспозиции (Hyden, Wilhelmsson, 2011)), попытка системы идеально компенсировать эти изменения может привести к удвоению амплитуды наблюдаемых колебаний яркости, так как управление окажется в противофазе с возмущением.

Алгоритм автоматической калибровки камеры для распознавания крупных быстро движущихся объектов

Далее рассмотрим задачу управления параметрами чувствительности цифровой видеокамеры для распознающей системы, работающей при следующих ограничениях:

- Система осуществляет распознавание крупных объектов, своим появлением существенно меняющих яркость наблюдаемой сцены.
- Распознаваемые объекты появляются в кадре достаточно редко; большую часть времени система проводит в режиме ожидания.
- Распознаваемый объект присутствует в кадре в течение короткого (сопоставимого со временем установления параметров камеры) интервала времени.

Для корректной работы алгоритмов распознавания объектов в такой системе требуется регулировать яркость изображений сцены, содержащей



Рис. 4. Пример изменения яркости сцены, анализируемой АКТС, в результате появления распознаваемого объекта (ТС).

эти объекты. Предложенный выше алгоритм управления параметрами чувствительности на каждом кадре оказывается неприменимым для решения этой задачи, так как, во-первых, из-за изменения освещенности сцены в результате появления целевого объекта значения параметров чувствительности, полученные в результате работы управляющего алгоритма на основе оценок яркости изображений во время отсутствия целевого объекта, оказываются неоптимальными; во-вторых, времени присутствия объекта в кадре недостаточно для осуществления процесса корректировки значений этих параметров и последующего распознавания объекта.

Так, в упомянутой выше системе АКТС стоит задача детекции колес и определения габаритов транспортных средств (ТС), которые, въезжая в поле зрения камеры, могут заслонять источники света и тем самым снижать освещенность сцены или, наоборот, отражать лучи света и тем самым повышать освещенность (рис. 4). При этом автомобиль появляется в кадре на непродолжительное время (типичное время – 1–5 с) и быстро выезжает из поля зрения, всё время нахождения ТС в кадре должно использоваться для работы системы распознавания. В то же время вне проезда ТС распознавание системой технического зрения не осуществляется (за исключением детекции факта начала проезда), т.е. требования оптимальности настроек яркости изображения не предъявляются, а интервалы между проездами велики. В связи с этим возникает задача такой настройки параметров камеры, чтобы во время отсутствия автомобиля в кадре яркость изображения не обязательно была оптимальной, но при этом позволяла

Таблица 5. Интерфейсная функция регулировки яркости изображения, корректирующая целевое значение по наблюдаемой яркости крупных быстродвижущихся объектов.

Номер строки	AdjustLuminanceOnBigObjects ($I, object_is_present$)
–	Вход:
–	$I, object_is_present$
–	Используемые глобальные переменные:
–	T_b, T_b^*
1	if $object_is_present = true$:
2	$T_b^* := ProcessObjectFrame(I)$
3	else:
4	$T_b := T_b^*$
5	ProcessBackgroundFrame(I)

Таблица 6. Функция корректировки целевого значения по яркости крупного быстродвижущегося объекта.

Номер строки	ProcessObjectFrame(I)
–	Вход:
–	I
–	Используемые глобальные переменные:
–	$\Omega_o, T_o, \Delta_o, T_b$
–	Заданные константы:
–	$\Delta_{T_b}, T_b^{min}, T_b^{max}$
–	Выход:
–	T_b^*
1	$\tilde{I}_o := Mean(I, \Omega_o)$
2	if $ \tilde{I}_o - T_o > \Delta_o$:
3	if $\tilde{I}_o > T_o$:
4	$T_b^* := \max(T_b - \Delta_{T_b}, T_b^{min})$
5	else:
6	$T_b^* := \max(T_b + \Delta_{T_b}, T_b^{min})$

надежно детектировать начала проезда, а получающаяся (в результате изменения освещенности в присутствии автомобиля) в процессе проезда яркость была как можно ближе к оптимальной.

Для решения задачи управления чувствительности камеры при описанных ограничениях предложен модифицированный алгоритм, осуществляющий настройку параметров камеры во

время отсутствия объекта на основе статистик средней яркости контрольной зоны, собранных за участки времени, когда объекты присутствовали в поле зрения.

Введем обозначения:

I – текущий кадр, полученный с камеры;

Ω_b – область фона, по которой определяется средняя яркость изображения во время отсутствия объекта;

\tilde{I}_b – средняя яркость изображения по области Ω_b ;

T_b – целевая яркость для области Ω_b ;

T_b^* – целевая яркость для области Ω_b , скорректированная по объекту;

Δ_{T_b} – шаг изменения T_b ;

T_b^{max} – максимально допустимое значение T_b ;

T_b^{min} – минимально допустимое значение T_b ;

Δ_b – допустимое отклонение \tilde{I}_b от T_b ;

Ω_o – область изображения, соответствующая объекту;

\tilde{I}_o – средняя яркость изображения по области Ω_o ;

T_o – целевая яркость для области Ω_o ;

Δ_o – допустимое отклонение \tilde{I}_o от T_o ;

$object_is_present$ – флаг присутствия объекта в кадре (“true” – присутствует, “false” – отсутствует).

Рассмотрим реализацию алгоритма в виде псевдокода. Функция *AdjustLuminanceOnBigObjects* (табл. 5) принимает на вход изображение и флаг присутствия объекта. Если объект присутствует, вызывается функция *ProcessObjectFrame*, если отсутствует – вызывается функция *ProcessBackgroundFrame*. Перед вызовом *ProcessBackgroundFrame* переменной T_b , задающей целевую яркость для сцены без объекта, присваивается значение переменной T_b^* – скорректированной по объекту целевой яркости для сцены без объекта.

Функция *ProcessBackgroundFrame*, вызываемая в строке 5, аналогична рассмотренной ранее однорежимной функции калибровки яркости *AdjustLuminance*.

Рассмотрим функцию *ProcessObjectFrame* (табл. 6). Она вычисляет среднюю яркость \tilde{I}_o по области Ω_o , соответствующей объекту, и если эта яркость отличается от заданной яркости T_o больше, чем на Δ_o , корректирует целевую яркость для сцены без объекта T_b^* , добавляя или вычитая шаг Δ_{T_b} (и проверяя при этом, что значение остается в заданном интервале $[T_b^{min}, T_b^{max}]$).

Таким образом, целевое значение яркости T_b сглаживается во времени, что обеспечивает фильтрацию выбросов яркости, связанных с возможными различиями отдельных регистрируемых объектов.

Алгоритм управления яркостью стереоизображений

Теперь рассмотрим задачу совместного управления параметрами чувствительности пары камер для распознающей стереосистемы, осуществляющей реконструкцию пространственной формы распознаваемых объектов.

Такая задача возникла при разработке прототипа наземной робототехнической платформы, оснащенной парой камер для распознавания объектов и восстановления трехмерной наблюдаемой сцены (рис. 5). Для последней задачи был использован алгоритм плотного стереосопоставления пары изображений, поступающих со стереопары, осуществляющий поиск сопоставления, минимизирующего сумму отклонений средней яркости между окрестностями сопоставляемых пикселей изображений.

Результаты экспериментов показали, что использование описанного выше алгоритма для независимой настройки каждой из камер не обеспечивает требуемого для корректной работы используемого алгоритма стереосопоставления сходства средней яркости сопоставляемых изображений (рис. 6).

Это связано с тем, что интервал допустимых значений $[T - \Delta; T + \Delta]$ в предыдущем алгоритме был выбран достаточно широким с целью обеспечения стабильности системы, изображения с разных камер, яркости которых принадлежат этому интервалу, могут заметно различаться.

Для решения задачи управления параметрами чувствительности стереопары с одновременным выравниванием яркости между изображениями предлагается следующий подход.

Настройка параметров одной из камер (базовой, C_0) осуществляется на каждом кадре согласно описанному выше алгоритму на основе яркости поступающего с нее изображения I_0 . Параметры другой (зависимой, C_1) камеры при этом регулируются с использованием того же алгоритма таким образом, чтобы яркость изображения I_1 была максимально близкой к I_0 . В качестве метрики близости при этом используется медиана взвешенных разностей медиан i -х строк изображений I_0 и I_1 . Медианные значения используются



Рис. 5. Робот, оснащенный бинокулярной системой зрения.



Рис. 6. Пример рассогласования яркости изображений с левой (а) и правой (б) камер.

с целью повышения робастности алгоритма к недостаточной освещенности и к засветке. В качестве весов в этой метрике используются оценки долей пикселей, яркость которых принадлежит заданному интервалу $[I_{\min}, I_{\max}]$. Остаточное рассогласование яркостей, связанное с тем, что яркость второй камеры I_1 подстраивается к I_0 с точностью $\pm \Delta$, компенсируется домножением цифрового изображения на поправочный коэффициент r , который определяется отношением медиан.

Перейдем к подробному описанию вычисления оценки рассогласования яркостей изображений $d(I_0, I_1)$, используемой для регулировки параметров чувствительности камеры C_1 .

Для каждой камеры $k = 0, 1$ по каждой строке изображения i вычисляется медиана яркости m_i^k и ее вес w_i^k . Вес строки определяется как

$$w_i^k = w_{\min} + (1 - w_{\min}) \cdot q_i^k,$$

где w_{\min} — минимальное значение весового коэффициента, $0 \leq w_{\min} < 1$; q_i^k — доля пикселей i -й строки изображения с k -й камеры, яркость которых находится в интервале $[I_{\min}, I_{\max}]$ (w_{\min} , I_{\min} и I_{\max} — параметры алгоритма).

Следующим шагом для каждой i -й пары строк вычисляются разность d_i и отношение r_i медианных яркостей m_i^0 и m_i^1 , а также соответствующий им весовой коэффициент w_i :

$$\begin{aligned}d_i &= m_i^0 - m_i^1, \\r_i &= m_i^0/m_i^1, \\w_i &= \min(w_i^0, w_i^1).\end{aligned}$$

Далее по наборам \bar{d} и \bar{r} с учетом весов \bar{w} вычисляются медианные значения d и r .

Значение d используется для регулирования параметров чувствительности камеры C_1 (если $|d|$ превышает пороговое значение d_{thresh} , то в зависимости от знака d вызывается функция повышения или понижения яркости). Значение r используется для программной компенсации рассогласования яркостей текущей пары кадров I_0 и I_1 (изображение I_1 домножается на коэффициент r). На рис. 7 показан пример такой компенсации.

Заключение

Предложенный алгоритм управления параметрами чувствительности камеры для систем распознавания крупных быстро движущихся объектов был реализован в АКТС, эксплуатируемом в режиме реального времени в кругло-суточном и круглогодичном режиме.

В АКТС осуществляется распознавание видеопотока, поступающего с камер, расположенных сбоку от контролируемого участка дороги. Используются ИК-чувствительные черно-белые камеры со светочувствительной матрицей CMOS-типа (модель UI-5221SE-M-GL) и широкоугольным объективом с управляемой DC-ирисовой диафрагмой (Fujinon YV2.7x2.2SA-SA2L). Для работы в темное время суток под камерами также закреплены ИК-прожекторы мощностью от 10 Вт.

На протяжении нескольких лет (2011–2016 гг.) разработка системы осуществлялась параллельно с ее эксплуатацией в промышленных условиях.

На ранних стадиях разработки АКТС для адаптации параметров чувствительности камеры к освещению использовались стандартные (встроенные в камеры) методы, возможность управления диафрагмой объектива, соответственно, не использовалась. В результате экспертного анализа работы системы было выявлено, что на получаемых с камер видеоданных невозможно обеспечить среднее качество работы распознающей системы более 99%. Согласно



Рис. 7. Пример программной компенсации рассогласования яркости изображений с левой (а) и правой (б) камеры.

требованиям к производительности АКТС, этот показатель является неудовлетворительным, что и послужило мотивацией к разработке описанных в работе алгоритмов и реализации модуля управления параметрами чувствительности камеры в АКТС на их основе. Благодаря внедрению данного модуля команде разработчиков АКТС удалось поднять среднее качество работы до 99.7%, т.е. более чем с трехкратным выигрышем в качестве преодолеть порог достижимости качества предыдущей версии системы.

Заметим, что полностью решить проблему засветки прямым солнечным светом за счет регулировки параметров чувствительности камеры с использованием предложенного алгоритма не удалось. Это объясняется тем, что в условиях эксплуатации АКТС даже во время проезда сцена, в которой камера засвечивалась прямым солнечным светом, может смениться сценой, в которой источник света заслоняется крупным объектом, и наоборот. В такой ситуации получается, что динамического диапазона камеры физически не хватает, и его смещение не позволяет решить проблему. Поэтому при проектировании системы АКТС было принято решение устанавливать камеры с обеих сторон дороги и автоматически переключаться между ними в соответствии с рассчитываемым при помощи астрономической модели положением Солнца относительно камер (Khanipov et al., 2015).

В настоящее время АКТС эксплуатируется более чем на 300 полосах платных участков дорог России, ежедневно системой осуществляется классификация более чем 0.5 млн проезжающих автомобилей (Visillect service LLC, 2017).

Работа поддержана Фондом содействия инновациям (проект “Разработка и реализация алгоритмов управления камерой для систем распознавания и наблюдения”).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Григорьев А.С., Гладиллин С.А., Ханипов Т.М., Коптелов И.А., Бочаров Д.А., Мацнев Д. Н. Архитектура системы детекции и классификации автомобилей средствами технического зрения в естественных условиях // Сенсорные системы. 2017. Т. 31. № 1. С. 72–84 (Grigoryev A., Gladilin S., Khanipov T., Koptelov I., Bocharov D., Matsnev D. Architecture of a system for computer vision-based vehicle detection and classification under natural conditions // Sensory systems. 2017. V. 31. № 1. P. 72–84 [in Russian]).
- Кравков С. В. Глаз и его работа М.: Медицина, 1932. 245 с. (Kravkov S. Glaz i ego rabota. M.: Medicina, 1932. 245 p. [in Russian]).
- Орлов В.В. Схема управления диафрагмой камеры по постоянному току. 2007. URL: <http://msevm.com/md/703/02/sc.htm> (дата обращения: 18.01.2017) (Orlov V. Shema upravleniya diafragmoi po postoyannomu toku. 2007. URL: <http://msevm.com/md/703/02/sc.htm> (accessed: 18.01.2017) [in Russian]).
- Шамшинова А.М., Волков В. В. Функциональные методы исследования в офтальмологии: М.: Медицина, 1999. 416 с. (Shamshinova A., Volkov V. Functional methods of examination in ophthalmology. M.: Medicine, 1999. 416 p. [in Russian]).
- Birren J.E., Casperson R.C., Botwinick J. Age changes in pupil size // J. Gerontology. 1950. V. 5 (3). P. 216–221.
- Cvetkovic S., Jellema H., de With N.H.P. Automatic level control for video cameras towards hdr techniques // EURASIP J. Image Video Process. 2010. ID 197194. P. 1–30.
- Hamilton J.F., Compton J.T. Processing color and panchromatic pixels. U.S. Patent 0,024,879 A1, to Eastman Kodak Co., Patent and Trademark Office, Washington D.C. Feb. 2007.
- Howard I.P. Perceiving in depth, vol. 1: basic mechanisms. Oxford University Press. 2012, 664 p.
- Hyden H., Wilhelmsson P. Automatic exposure control in network video cameras // MSc Theses. 2011. 57 p.
- Khanipov T., Koptelov I., Grigoryev A., Kuznetsova E., Nikolaev D. Vision-based industrial automatic vehicle classifier // Proc. SPIE. 7th Int. Conf. Machine Vision. 2015. V. 9445, 944511. P. 1–5.
- Lam B.L., Thompson H.S., Corbett J.J. The prevalence of simple anisocoria // Am. J. Ophthalmol. 1987. V. 104 (1). P. 69–73.
- Lamb T.D. The role of photoreceptors in light-adaptation and dark-adaptation of the visual system // Vision: Coding and efficiency / Ed. Blakemore C. Cambridge Univ. Press, 1993. Ch. 15. P. 161–168.
- Laurens H. Studies on the relative physiological value of spectral lights III. The pupillomotor effects of wavelengths of equal energy content // Am. J. Physiol. 1923. V. 64. P. 97–119.
- Nourani-Vatani N., Roberts J. M. Automatic camera exposure control // Proc. Australasian Conf. Robot. Automat. 2007. P. 1–6.
- Reeves P. The response of the average pupil to various intensities of light // JOSA. 1920. V. 4 (2). P. 35–43.
- Sirois S., Brisson J. Pupillometry // Wiley Interdisciplinary Reviews: Cognitive Science. 2014. V. 5 (6). P. 679–692.
- Schlyter P. Radiometry and photometry in astronomy. 2009. URL: stjarnhimlen.se/comp/radfaq.html (accessed: 18.01.2017).
- Visillect service LLC Automatic Vehicle Classifier – Visillect. URL: <http://visillect.com/en/avc> (accessed: 18.01.2017).
- Winn B., Whitaker D., Elliott D.B., Phillips N.J. Factors affecting light-adapted pupil size in normal human subjects // Invest. Ophthalmol. Vis. Sci. 1994. V. 35 (3). P. 1132–1137.

Adaptive image brightness stabilization for the industrial system of large moving object recognition

A. P. Gladkov, E. G. Kuznetsova, S. A. Gladilin, M. A. Gracheva

*Institute for Information Transmission Problems RAS
127051 Moscow, Bolshoi Karetny per., 19*

In this paper we investigate the task of developing algorithms for digital video camera sensitivity parameters control to adjust for scene brightness change caused by appearance and disappearance of large objects to be detected. We describe these controllable parameters (exposure, gain, DC-iris aperture) and the specifics of adjusting them. We provide the experimental results of dependency between the obtained image brightness and the iris control signal value and propose a DC-iris control algorithm based on them. We introduce the algorithm to simultaneously control three sensitivity parameters for brightness adjustment and its modification for the case of large fast moving objects. A generalization of the algorithm is proposed to control the sensitivity parameters of a stereo-pair for the purpose aligning mean brightness of frames from both cameras.

Key words: camera sensitivity control, DC-iris, smart camera, brightness adaptation, autocalibration.