

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВЕБ-КАМЕР В КАЧЕСТВЕ ИСТОЧНИКА ПОТОКА СТЕРЕОПАР

С. И. Протасов, С. Д. Кургалин, А. А. Крыловецкий

Воронежский государственный университет

Поступила в редакцию 25.10.2011 г.

Аннотация. Задачу формирования стерео-видеопотока в настоящий момент необходимо решать в большом спектре практических приложений. Кроме кино-индустрии, получение и обработка стереоизображений в реальном времени находит применение в промышленности, коммуникации, моделировании и т.д. В данной статье рассматривается подход к созданию гибкой системы захвата стерео-видеопотока на базе web-камер, которая может быть интегрирована в компактные персональные устройства.

Ключевые слова: стерео-зрение, синхронизация, стерео-калибровка камер, камеры.

Annotation. Nowadays problem of creating stereo-videostream should be solved in a wide range of practical applications. Not only cinema, but industry, communications, modelling etc. require real-time stereo-images creating and processing. In this abstract we introduce an approach to creating an adjustable stereo-capturing system based on web-cameras that can be used in both desktop and portable devices.

Keywords: stereo-vision, synchronization, stereo camera calibration, cameras.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время формирование и обработка стереоизображений являются очень популярным направлением в отрасли развлечений (фильмы и компьютерные игры в формате 3D, игровые сенсоры, расширенная реальность), образования (виртуальные стенды) и промышленности (компьютерное зрение в технологических процессах). Использование технологий трёхмерного видео (затворное, анаглифическое, поляризованное) позволяет наиболее близким к естественному способом сформировать у человека ощущение реальности виртуальных объектов [1]. Информация, содержащаяся в стереопаре, предоставляет возможность не только создавать эффект трёхмерности объектов при просмотре, но и формировать виртуальные трёхмерные модели, предназначенные для последующей обработки и передачи по каналам связи.

Кроме непосредственного использования стерео-изображений для визуализации псевдо-трёхмерных сцен, данные, получаемые при стереосъёмке, можно использовать для решения прикладных задач, базирующихся на алгоритмах стерео-сопоставления. Результатом работы таких алгоритмов являются дальнометрические данные, взаимно однозначно соответствующие

трёхмерным координатам точек наблюдаемой сцены. Работа алгоритмов стерео-сопоставления не привязана к стереобазе: величина стереобазы может существенно отличаться от принятого для стереосъёмки значения в районе 64мм [2], соответствующего среднему расстоянию между глазами человека, а оптические оси камер могут быть не коллинеарны.

Существенным ограничением при создании малобюджетных систем стереосъёмки является стоимость откалиброванных камер даже невысокого разрешения. Кроме того, данные решения, как правило, не являются гибкими в части управления стереобазой, так как оптическая калибровка требует высокой точности в технологии производства оборудования [3,4]. Использование пары обычных камер для стереосъёмки сопряжено с рядом проблем. Для того чтобы сформированные двумя камерами изображения можно было считать стереографическими, они должны пройти предварительную обработку. Для получения стереоизображений при помощи пары камер, необходимо пройти следующие этапы:

- синхронизация камер;
- калибровка каждой из камер (определение внутренних параметров камеры);
- стерео-калибровка камер (калибровка в общей системе координат);

- ректификация изображений;
- цветовая коррекция.

В представленной работе рассматриваются основные технические задачи, возникающие при прохождении пяти представленных выше этапов, приведены авторские алгоритмы синхронизации, цветовой калибровки и ректификации изображений, использующие возможности современных параллельных систем с общей памятью.

СИНХРОНИЗАЦИЯ

Задача программной синхронизации веб-камер является нетривиальной. С точки зрения качества получаемого результата очевидным кажется использование идентичных камер, однако это исключает возможность использование одной USB-шины. Кроме того, использование единой последовательной шины исключает возможность синхронизации и снижает суммарную пропускную способность системы. Нами предложена модель синхронизации идентичных веб-камер, использующих независимые USB-шины, позволяющая получать синхронизированные стереоизображения с высокой частотой.

Полностью избавиться от рассинхронизации камер не представляется возможным, это связано с многозадачностью современных операционных систем и функционированием планировщика заданий, однако её можно минимизировать. Экспертная оценка допускает величину рассинхронизации камер не выше 10 мс.

Нами для экспериментальной проверки предлагаемых моделей синхронизации создана программно-аппаратная система формирования стерео-изображений в реальном времени на базе двух камер Logitech C270, одной камеры HP Webcam и ноутбука с процессором Intel Core i7 под управлением ОС Windows 7.

Программная часть реализована для платформы .NET 4.0 с использованием параллельных вычислений и unsafe-кода.

На рис. 1 представлена выборка интервалов между последовательным захватом кадров тремя различными камерами экспериментальной системы. Величины интервалов кластеризуются вокруг значений, кратных некоторой величине, в данном случае 16 мс, что связано с устройством веб-камер, использующих последовательную шину. Разброс значений в кластере обусловлен запаздываниями, вызванными работой планировщика заданий операционной системы, полностью избавиться от которых не представляется возможным [5]. Попадание интервала в доминирующие кластеры около частоты 96 мс для камеры «camera 2» в нашем случае имеет вероятности 0.555. Таким образом, можно построить аналитическую модель производительных характеристик веб-камеры, использующей универсальную последовательную шину, опираясь на следующие значения (i – порядковый номер камеры):

- время инициализации камеры S_i (от начала инициализации до первого кадра);
- интервалы T_i , которым кратны середины кластера;
- доминирующие кластеры интервалов $\{K_j\}$ (обычно не более двух, $j = 1..2$), и их вероятности $\{P_{K_j}\}$, а также разброс значений $\pm\delta$ в кластере.

Получены эмпирические результаты, показывающие, что при искусственном простое в захвате камеры величина простоя также будет кратна T_i . Также установлено, что время инициализации S_i не является постоянным и прогнозированию не поддаётся: так для конкретной модели Logitech C270 оно составляло 435–590 мс.

Предложенная модель позволяет предсказывать время появления очередного кадра и

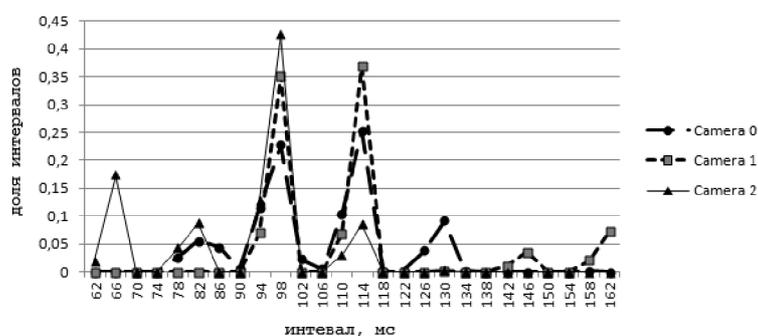


Рис. 1. Выборка интервалов между последовательными кадрами и распределение их вероятностей

принимать меры по восстановлению синхронности захвата. Мы предлагаем следующий поправочный алгоритм для поддержания синхронности захвата изображений двумя камерами:

1. Перед началом работы алгоритма собрать данные для выявления значений кратных интервалов T_i и доминирующие кластеры $\{K_j\}$.

2. В случае если камеры имеют различные доминирующие кластеры, предлагается использовать искусственный простой с величиной $|\{K_j\}_1 - \{K_j\}_2|$ на каждом шаге для более быстрой камеры.

3. В случае запаздывания одной из камер на величину t , превышающую $\frac{T_i}{2}$, инициировать искусственный простой опережающей камеры на один (или более) интервал T_i . С вероятностью $\{P_{K1}\}_1 \cdot \{P_{K2}\}_1$ рассинхронизация следующих кадров будет иметь величину $(T_i - t) \pm \delta$, не превышающую $\frac{T_i}{2}$.

На рис.2 можно видеть наглядную иллюстрацию предлагаемого решения для синхронизации посредством внесения корректирующих поправок.

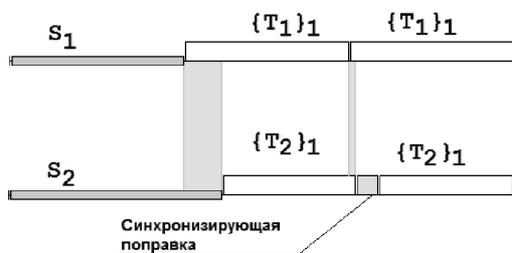


Рис. 2. Иллюстрация алгоритма синхронизации, основанного на внесении систематических и несистематических поправок в ходе захвата кадров

Таким образом, при использовании идентичных камер можно гарантировать, что рассинхронизация между кадрами с обеих камер не будет превышать $\frac{T_i}{2} = 8$ мс с вероятностью $\{P_{K1}\}_1 \cdot \{P_{K2}\}_1$. Среднюю частоту получения кадров достаточно хорошо синхронизированного видео-потока, то есть такого, для которого рассинхронизация всех кадров не превышает $\frac{T_i}{2}$, в дальнейшем будем называть *полезной производительностью алгоритма синхронизации*. Оценочные данные для полезной производи-

тельности согласуются с экспериментом. В ходе эксперимента были получены следующие величины: средняя частота обновления кадров для каждой камеры составила 14.9 fps, а вероятности попадания в доминирующий кластер для первой и второй камеры составила, 0.555 и 0.357 соответственно. Таким образом, верхняя оценка предельной производительности может быть рассчитана как предельная частота одной из камер, умноженная на вероятность того, что следующий интервал обеих камер попадет в доминирующий кластер, то есть $FPS_{sup} \cdot \{P_{K1}\}_1 \cdot \{P_{K2}\}_1 = 14.9 \cdot 0.555 \cdot 0.357 \approx 2.95$ fps. Предел реальной полезной производительности составил 1.934 fps.

Следует сравнить показатели работы данного алгоритма с наивным подходом. Наивный подход состоит в поиске наиболее близких по времени кадров при асинхронной съёмке за некоторый интервал времени наблюдения τ . Следует отметить, что полезная производительность наивного алгоритма не может превышать $\frac{1}{\tau}$, однако с увеличением τ вероятность рассинхронизации кадров на величину, не превышающую $\frac{T_i}{2}$, стремится к единице, что подтверждают экспериментальные данные на рис.3.

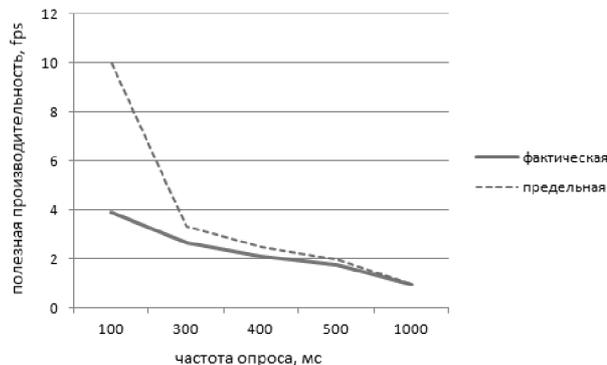


Рис. 3. Полезная производительность наивного алгоритма синхронизации

В случае же подхода, использующего корректирующие поправки, на частоту формирования полезных кадров существенно влияют вероятности попадания очередного интервала в доминирующий кластер. Кроме того, производительность поправочного алгоритма является неуправляемой величиной, в то время как производительность наивного подхода может быть отрегулирована за счёт изменения величины интервала времени наблюдения τ .

В качестве вывода можно утверждать, что выбор алгоритма синхронизации сильно зависит от фактических характеристик используемых камер. При наличии у каждой из камер доминирующего кластера с достаточно высокой вероятностью очередного интервала, обеспечивающей достаточную предельную полезную производительность, лучшим решением будет выбор поправочного алгоритма синхронизации. В противном случае, если вероятности доминирующих кластеров для камер таковы, что верхняя оценка полезной производительности поправочного алгоритма сопоставима с полезной производительностью наивного алгоритма, то лучше выбирать наивный алгоритм синхронизации. Следует отметить, что, так как наивный алгоритм является частью поправочного алгоритма на этапе сбора информации о доминирующих кластерах, то принятие решения о выборе стратегии поведения можно возложить непосредственно на алгоритм.

КАЛИБРОВКА И СТЕРЕО-КАЛИБРОВКА

Для решения задач, связанных с калибровкой, существуют готовые алгоритмические и программные решения (Matlab Camera Calibration Toolbox, библиотека OpenCV). Как правило, для достаточно точного приближения применяют модель камеры-обскуры, использующую мировые (однородные) координаты [6]:

$$z_c \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = A \cdot Dist \left(\begin{bmatrix} R & T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix} \right), \quad (1)$$

где A – параметры внутренней калибровки камеры, R – матрица $\mathbb{R}^3 \times \mathbb{R}^3$ поворота, T – вектор переноса, $Dist(X)$ – функция применения дисторсии объектива (в некоторых практических ситуациях ею можно пренебречь, положив $Dist(X) = I_3 \cdot X$), $[x_w \ y_w \ z_w \ 1]^T$ – мировые координаты точки сцены, $[u \ v \ 1]^T$ – однородные координаты проекции точки на картинную плоскость, z_c – нормирующий коэффициент. Результатом использования алгоритмов калибровки являются внутренняя и внешняя калибровочная матрица [7], и вектор значений дисторсии.

Данные калибровки для каждой из камер чрезвычайно важны, однако не являются исчерпывающими для подготовки системы к функционированию. Необходимо также описать связь между координатными системами

камер. Такой связью может служить матрица G_{LR} , такая что $P_R = G_{LR} \cdot P_L$, описывающая преобразование координат точки P_L в системе первой камеры в координаты P_R второй камеры. При использовании сторонних средств стереокалибровки, как правило, мы получаем для одной из камер $R = I_3$ и $T = \Theta_3$, то есть для подобных случаев $G_{LR} \equiv [R \ T]$.

Рассмотрим частный случай калибровки, не учитывающий влияние дисторсии. Матричная функция дисторсии $Dist(X)$ вырождается в умножение на единичную матрицу $Dist(X) = I_3 \cdot X$. Тогда формула (1) примет в данном частном случае следующий вид:

$$z_c \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = A \cdot [R \ T] \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

В дальнейшем при рассмотрении данного частного случая переобозначим произведение матриц внутренних и внешних калибровочных параметров как некоторую обобщённую калибровочную матрицу $M = A \cdot [R \ T]$.

РЕКТИФИКАЦИЯ

Получив матрицу M для каждой из камер, а также матрицу G_{LR} , мы можем перейти к ректификации изображений. Под ректификацией обычно понимают проецирование двух или более изображений на одну плоскость [8] обычно так, чтобы строки изображений соответствовали эпиполярным линиям [9]. Дополнительное требование вводится для того, чтобы изображения легче обрабатывались алгоритмами стереосопоставления. Программная реализация ректификации может быть хорошо распараллелена на произвольное количество независимых потоков, что позволяет максимально использовать тенденции в области архитектуры современных центральных и графических процессоров. Технически под ректификацией в данном случае подразумевается установление соответствий между эпиполярными линиями на стереопаре, вдоль которых будет выполняться поиск в ходе работы алгоритма стереосопоставления. Для нахождения этих сечений мы использовали следующий метод. Исходя из общей особенности матрицы M , все точки P_L , лежащие на некоторой прямой L , проходящей через центр линзы, будут иметь в проекции на изображение одни и те же координаты K . Этим, в частности, объяс-

няется эффект наложения (occlusion effect). Используя выражение (2) и считая координаты K какого-либо пикселя изображения известными, мы можем восстановить уравнение прямой L , такой, что

$$\forall (P: \lambda K = M \cdot P) [P \in L]. \quad (3)$$

Выберем линию поиска (scanline) на левом изображении. Обычно для удобства и ускорения работы алгоритма выбирают прямую, совпадающую с горизонтальной строчкой пикселей изображения [10]. Далее для двух точек K_1 и K_2 , принадлежащих этой прямой $N(K_1; K_2)$ рассчитаем уравнения соответствующих им прямых L_1 и L_2 . Используя матрицу G_{LR} , повернём эти прямые в координатную систему правой камеры. Описанная полученными прямыми плоскость, сечет плоскость правого изображения по прямой $N(K_3; K_4)$. Эта прямая и будет искомым линией поиска для правой камеры. Получив уравнения соответствующих прямых для стереопары, мы можем построить дискретную функцию $E: N^2 \rightarrow N$, определяющую для каждой пары $(x_R; y_L)$ значение y_R . Получившуюся прямоугольную матрицу можно рассчитать однократно и использовать для быстрой ректификации изображений.

ЦВЕТОВАЯ КОРРЕКЦИЯ

Большинство современных камер могут работать в режиме автоматического подбора яркости и баланса белого и в режиме ручной установки этих же параметров. Для задачи стереосъёмки не следует использовать автоматический подбор параметров: различная яркость и баланс белого могут не очень сильно сказаться на результатах стерео-сопоставления, однако губительны при стерео-визуализации. Различная интенсивность компонент цвета может су-

щественные искажения восприятия вплоть до потери эффекта трёхмерности.

В режиме ручной установки параметров предполагается абсолютная идентичность камер и совпадение условий освещённости сцен, видимых для обеих камер. Абсолютно точно определить параметры и создать условия освещения невозможно, однако возможно программно исправлять баланс белого и яркость изображений непосредственно в ходе стереосъёмки. Кроме того, ручная фиксация параметров делает стереосъёмку зависимой от интенсивности и типа освещения, таким образом, необходимо иметь несколько предварительных настроек для различных типов освещения. Предлагаемый алгоритм подходит для автоматической корректировки цвета при съёмке удалённых объектов камерами с небольшой стереобазой. Преимуществом данного алгоритма является то, что он позволяет корректировать параметры съёмки как при ручном, так и при автоматическом определении параметров.

Положим одно из изображений базовым и примем баланс белого и яркость этого изображения за эталон. Другое изображение будем считать зависимым, и в процессе съёмки будем корректировать компоненты цвета этого изображения. Для обоих изображений выберем прямоугольные области S_{base} и S_{ref} видимой сцены с учётом смещения бесконечно удалённой точки. Для каждой из областей построим гистограмму распределения RGB-компонент цвета (рис. 4). Интегрирование каждой из компонент по областям S позволяет найти текущее значение баланса белого в виде пропорции $R:G:B$. Соответственно, зная данные отношения для обоих изображений, мы можем сформировать поправочные коэффициенты баланса белого для зависимого изображения (4) [11]. На рис. 4

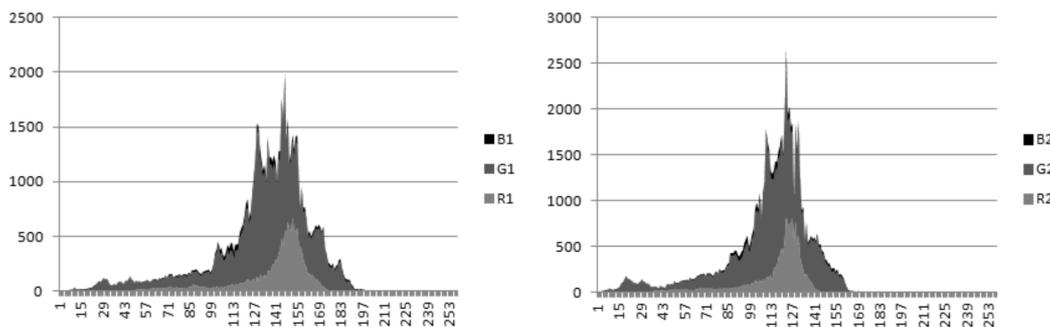


Рис. 4. Цветовые профили изображения с учётом коэффициентов для яркости и интегральная яркость изображения

можно видеть различные цветовые профили изображений, полученных при стереосъёмке:

$$k_R = \frac{R_{base}}{R_{ref}}, k_G = \frac{G_{base}}{G_{ref}}, k_B = \frac{B_{base}}{B_{ref}}. \quad (4)$$

Следует отметить, что изображения отличаются не только балансом белого, но и интегральной яркостью.

Для того, чтобы изображения комфортно воспринимались при стереовоспроизведении, необходимо скорректировать яркость изображения I . Для этого нужно рассчитать интегральную яркость I^* видимых областей S . Это можно сделать, просуммировав яркость каждого пикселя области или воспользовавшись свойством линейной зависимости яркости от компонент цвета (5). Каждый цветовой компонент входит в формулу яркости с определённым коэффициентом, который является следствием особенности функционирования человеческого глаза [12]:

$$\begin{aligned} I &= c_1 R + c_2 G + c_3 B = 0.2126 \cdot R + \\ &+ 0.7152 \cdot G + 0.0722 \cdot B \\ I^* &= \iint_S I(s) ds = \\ &= \iint_S (c_1 R(s) + c_2 G(s) + c_3 B(s)) ds = \quad (5) \\ &= c_1 \iint_S R(s) ds + c_2 \iint_S G(s) ds + c_3 \iint_S B(s) ds = \\ &= 0.2126 \cdot \iint_S R(s) ds + 0.7152 \times \\ &\times \iint_S G(s) ds + 0.0722 \cdot \iint_S B(s) ds. \end{aligned}$$

Покажем, что применение корректировки баланса белого позволяет дополнительно не проводить корректировку яркости. Следует иметь в виду, что цвета в модели RGB представлены, как правило, 256 градациями. Дискретное представление цвета приводит к неизбежному округлению значений компонент цвета после корректировки. Так, например, значение одного из компонентов цвета будет отличаться от ожидаемого значения не более чем на 0.5

$$\begin{aligned} R_{ref}^* &= [R_{ref} \cdot k_R] \in \\ &\in \left(R_{ref} \cdot k_R - \frac{1}{2}; R_{ref} \cdot k_R + \frac{1}{2} \right). \quad (6) \end{aligned}$$

Введём константу $\varepsilon = \iint_S 1 ds$, тогда значение интегральной яркости откорректированного изображения с использованием константы ε можно выразить следующим образом:

$$\begin{aligned} I_{ref}^{*'} &= \iint_S I_{ref}(s) ds = \\ &= \iint_S (c_1 R_{ref}^*(s) + c_2 G_{ref}^*(s) + c_3 B_{ref}^*(s)) ds = \\ &= \iint_S ([c_1 R_{ref}(s) k_R] + \\ &+ [c_2 G_{ref}(s) k_G] + [c_3 B_{ref}(s) k_B]) ds = \\ &= I_{ref}^* \pm \left(c_1 \frac{\varepsilon}{2} + c_2 \frac{\varepsilon}{2} + c_3 \frac{\varepsilon}{2} \right) = I_{ref}^* \pm \frac{\varepsilon}{2}. \quad (7) \end{aligned}$$

Имея в виду, что интегральная яркость тестируемого изображения составила 0.497 от максимально, равной $255 \cdot \varepsilon$, можно рассчитать относительное отклонение интегральной яркости после корректировки баланса белого $I_{ref}^{*'}$ от ожидаемой яркости I_{ref}^* . Найденное значение будет менее одного процента:

$$\begin{aligned} \delta &= \frac{|I_{ref}^* - I_{ref}^{*' }|}{I_{ref}^*} \cdot 100\% = \\ &= \frac{|\pm \varepsilon|}{I_{ref}^*} \cdot 100\% \approx 0.395\%. \quad (8) \end{aligned}$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование дешёвых, широко доступных оптических датчиков для создания систем стереозрения позволяет расширить границы нынешнего применения стереосъёмки. Алгоритмический характер всех этапов позволяет говорить о создании программного-аппаратного комплекса низкой стоимости. В рамках рассмотрения задачи стереовидеосъёмки средствами веб-камер были предложены различные алгоритмические решения технических подзадач. На этапе синхронизации при съёмке с использованием независимых USB-шин предлагается использовать два алгоритма, позволяющих снизить время рассинхронизации получаемых изображений до величины, не превышающей 10 мс; применение того или иного алгоритма зависит от характеристик конкретных используемых камер, выбор алгоритма может проводиться адаптивно в непосредственно в ходе съёмки. На этапе калибровки предлагается использовать классическую модель камеры-обскуры, а для связи координатных систем использовать матрицу преобразования координатной системы левого изображения к системе правого путём поворота и переноса $G_{LR} = [R \ T]$. В ходе ректификации изображений предлагается использовать предварительно однократно

рассчитанную целочисленную прямоугольную матрицу $E : N^2 \rightarrow N$, позволяющую быстро находить вертикальное смещение пикселя. Цветовую калибровку предлагается проводить совместно с ректификацией, поскольку оба этих этапа затрагивают одно и то же изображение, не изменяя при этом базового изображения. В ходе цветовой калибровки происходит подстройка баланса белого для одного изображения. Было показано, что корректировка баланса белого одновременно исправляет яркость изображения с погрешностью, не превышающей одного процента.

Использование предлагаемых алгоритмов является независимым и позволяет заместить любой из них на аналогичное решение. Кроме того, алгоритмы синхронизации обладают высоким уровнем абстракции и могут быть использованы для широкого спектра задач.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рожков С.Н. Стереоскопический кинематограф в цифровом формате // Сборник докладов научно-практической конференции «Современные технологии кинематографа» (апрель 2006 г.). СПбГУКиТ, 2006.

2. Stereo camera. URL: http://en.wikipedia.org/wiki/Stereo_camera.

Протасов Станислав Игоревич – аспирант кафедры цифровых технологий Воронежского государственного университета, e-mail: stanislav.protasov@gmail.com

Кургалин Сергей Дмитриевич – д.ф.-м.н., заведующий кафедрой цифровых технологий Воронежского государственного университета, e-mail: kurgalin@bk.ru

Крыловецкий Александр Абрамович – к.ф.-м.н., доцент каф. цифровых технологий Воронежского государственного университета, e-mail: aakryl@cs.vsu.ru

3. Первая цифровая серийная стереокамера: FinePix Real 3D W1. URL: <http://www.open3d.ru/?p=3994>.

4. Point Grey. Products and Services: Stereo Vision Products. URL: <http://www.ptgrey.com/products/stereo.asp>.

5. Танненбаум Э. Архитектура компьютера. 5-е изд. – СПб.: Питер, 2007. – 844 с.

6. Форсайт Дэвид А. Компьютерное зрение. Современный подход: учебное пособие / Дэвид А. Форсайт, Жан Понс – пер. с англ. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2004. – С. 66–67.

7. Вахитов А.Т. Обзор алгоритмов стереозрения / А.Т. Вахитов, Л.С. Гуревич, Д.В. Павленко. Стохастическая оптимизация в информатике, Вып. 4 / Под ред. О.Н. Граничина – СПб.: Издательство Санкт-Петербургского университета 2008. – 299с.

8. Linda G. Shapiro and George C. Stockman (2004). Computer Vision. Prentice Hall. pp. 580.

9. Стереорекострукция / А. Коношин [и др.] // МГУ, ВМиК. – 2008. URL: <http://courses.graphicon.ru/main/vision2008>.

10. Геометрические свойства нескольких изображений. URL: <http://cgm.computergraphics.ru/content/view/141>.

11. James D. Foley, et al. (1995). Computer Graphics: Principles and Practice, 2nd ed. Redwood City, CA: Addison-Wesley.

12. Хьюбел Д. Глаз, мозг, зрение / под ред. А. Л. Бызова. // М.: Мир, 1990. – 172 с.

Protasov S. I. – Postgraduate student of Department of Digital Technologies, Voronezh State University, e-mail: stanislav.protasov@gmail.com

Kurgalin S. D. – Doctor of Physics and Mathematics, Head of the Department of Digital Technologies, Voronezh State University, e-mail: kurgalin@bk.ru

Krylovetsky A. A. – Ph.D. in Physics and Mathematics, Associate Professor of Department of Digital Technologies, Voronezh State University, e-mail: aakryl@cs.vsu.ru