

МЕТОД УСТРАНЕНИЯ ЦВЕТОВОГО РАССОГЛАСОВАНИЯ В СИСТЕМЕ АКТИВНОГО ТРЕХМЕРНОГО СКАНИРОВАНИЯ

А. В. Кровопусков, А. А. Крыловецкий, А. А. Рындин

Воронежский государственный технический университет

Поступила в редакцию 8.10.2010 г.

Аннотация. В статье приведен вариант решения одной из наиболее важных задач, возникающих в системах активного трехмерного сканирования с использованием цветной структурированной подсветки, — проблемы определения исходных инструкций проектора по наблюдаемым камерой значениям интенсивности отраженного от объекта света. Для решения задачи был разработан алгоритм на основе трехмерной интерполяции функцией радиально-го базиса.

Ключевые слова: стереофотограмметрия, функция радиального базиса, трехмерное сканирование, цветокоррекция.

Abstract: The paper describes the way of solving one of the biggest problems in color pattern based active scanning systems — the problem of conversion between the reflected light intensities registered by a camera sensor and initial projector instructions. An algorithm based on radial-basis function interpolation was developed for solving this problem.

Key words: stereophotogrammetry, radial-basis function, 3D scanning, color correction.

Одной из проблем в системах активного трехмерного сканирования с использованием цветной структурированной подсветки является определение исходных инструкций проектора по регистрируемым сенсором камеры значениям интенсивности отраженного от объекта света проектора. Сложность решения данной задачи заключается в наличии значительных нелинейных цветовых искажений в системе камера-проектор, вызываемых следующими причинами: нелинейные цветовые искажения матриц камеры и проектора, нелинейные цветовые искажения оптики камеры, проектора и используемых световых фильтров, взаимовлияние цветовых каналов друг на друга в матрице проектора. Учитывая сложную природу цветовых искажений, а также их ярко выраженный нелинейный характер, авторами предлагается алгоритм цветовой калибровки и цветокоррекции на основе трехмерной таблицы подстановки.

Задача устранения цветового рассогласования заключается в нахождении преобразования $f: R^3 \rightarrow R^3$, которое бы переводило наблюдаемые камерой значения интенсивности $[\hat{r}, \hat{g}, \hat{b}]^T$ отраженного от объекта света проектора в

соответствующие исходные инструкции проектора $[r, g, b]^T$.

Пусть стереофотограмметрическая система состоит из цифрового проектора, проецирующего на объект набор цветных структурированных шаблонов, и цифровой фотокамеры, регистрирующей изображения объекта, освещенного соответствующими шаблонами. Проектор проецирует шаблоны на основании подаваемых на него инструкций в виде цветных изображений

$$P(u, v) = [P^R(u, v), P^G(u, v), P^B(u, v)]^T, \\ u, v \in R, \quad u \in [1; Wp], \quad v \in [1; Hp], \\ 0 \leq P^R(u, v), P^G(u, v), P^B(u, v) \leq 1,$$

где Wp и Hp соответствуют физическому разрешению матрицы проектора по ширине и высоте.

Аналогично, камера наблюдает изображение

$$I(\hat{u}, \hat{v}) = [I^R(\hat{u}, \hat{v}), I^G(\hat{u}, \hat{v}), I^B(\hat{u}, \hat{v})]^T, \\ \hat{u}, \hat{v} \in R, \quad \hat{u} \in [1; Wc], \quad \hat{v} \in [1; Hc], \\ 0 \leq I^R(\hat{u}, \hat{v}), I^G(\hat{u}, \hat{v}), I^B(\hat{u}, \hat{v}) \leq 1,$$

где Wc и Hc соответствуют рабочему разрешению фотокамеры.

Алгоритм состоит из двух этапов: *цветовая калибровка системы и цветокоррекция изображений*.

ражений, регистрируемых сенсором фотокамеры.

Суть цветовой калибровки заключается в получении двух наборов цветовых значений: эталонного набора цветовых инструкций и набора соответствующих значений интенсивности отраженного света, регистрируемых сенсором камеры.

Эталонный набор из N^3 цветов определяется как

$$[r_i, g_j, b_k]^T = \left[\frac{i-1}{N-1}, \frac{j-1}{N-1}, \frac{k-1}{N-1} \right]^T, \\ i, j, k \in [1; N],$$

или, переходя к одномерной индексации,

$$c(t) = [c_R(t), c_G(t), c_B(t)]^T = [r_i, g_j, b_k]^T, \\ t \in [1; N^3], \\ \hat{i} = \text{div}(t-1, N^2) + 1, \\ \hat{j} = \text{div}((t-1) - (\hat{i}-1) \cdot N^2, N) + 1, \\ \hat{k} = (t-1) - (\hat{i}-1) \cdot N^2 - (\hat{j}-1) \cdot N + 1,$$

где $\text{div}()$ — операция целочисленного деления.

На основе эталонного набора цветовых инструкций формируется двумерная таблица цветов T

$$T(x, y) = c((y-1) \cdot Wt + x), \\ x \in [1, Wt], \\ y \in [1, Ht],$$

где Wt, Ht — количество столбцов и строк таблицы соответственно.

Проектор последовательно проецирует на белую плоскую поверхность два изображения Pc и Pcw следующего вида:

$$Pc(u, v) = \\ = T \left(\text{div} \left(u-1, \frac{Wp}{Wt} \right) + 1, \text{div} \left(v-1, \frac{Hp}{Ht} \right) + 1 \right), \\ Pcw(u, v) = [1, 1, 1]^T, \\ u \in [1, Wp], v \in [1, Hp].$$

Камера регистрирует соответствующие изображения Ic , Icw белой плоскости. Согласно методу, описанному в работе [1], изображение, содержащее чистые значения интенсивности света проектора вычисляется как

$$\hat{Ic}(u, v) = \frac{Ic(u, v)}{Icw(u, v)} = \\ = \left[\frac{Ic^R(u, v)}{Icw^R(u, v)}, \frac{Ic^G(u, v)}{Icw^G(u, v)}, \frac{Ic^B(u, v)}{Icw^B(u, v)} \right]^T,$$

$$u \in [1, Wc], v \in [1, Hc],$$

На основании изображения $\hat{Ic}$ восстанавливается набор калибровочных цветов камеры

$$\hat{c}(t) = \underset{u \in [x_t-w, x_t+w], v \in [y_t-w, y_t+w]}{\text{mean}} (\hat{Ic}(u, v)), \\ t \in [1; N^3],$$

где $[x_t, y_t]$ — координаты точек замера калибровочных цветов, определяемые пользователем, w — размер окна замера, mean — функция вычисления среднего значения.

Совокупность эталонных цветовых инструкций $c(t)$ и значений интенсивностей $\hat{c}(t)$, регистрируемых сенсором камеры, образует данные цветовой калибровки. Эти данные могут быть представлены как совокупность из N^3 точек в трехмерном пространстве с координатами $\hat{c}(t) = [\hat{r}_t, \hat{g}_t, \hat{b}_t]^T$, каждой из которых поставлено в соответствие значение $c(t) = [r_t, g_t, b_t]^T$.

Задача цветокоррекции заключается в определении для каждого произвольного наблюдаемого камерой значения интенсивности $[\hat{r}, \hat{g}, \hat{b}]^T$ соответствующую исходную инструкцию проектора $[r, g, b]^T$. Поскольку совокупность точек $c(t)$ в общем случае не имеет пространственной упорядоченности, мы можем рассматривать данную задачу, как задачу трехмерной интерполяции по неравномерно распределенному в пространстве набору точек. В качестве метода трехмерной интерполяции авторами используется метод на основе функции радиального базиса или метод Харди, который обладает относительно небольшой вычислительной сложностью и хорошо подходит для случаев с небольшим набором исходных точек [2].

Метод на основе функции радиального базиса является примером глобального интерполяционного метода по неравномерно распределенному множеству точек. Принцип данного метода заключается в следующем: для каждой точки $[\hat{r}_t, \hat{g}_t, \hat{b}_t]^T$ исходных данных необходимо выбрать некоторую функцию $h_t(\hat{r}, \hat{g}, \hat{b})$ и определить коэффициент a_t , таким образом, чтобы функция $f(\hat{r}, \hat{g}, \hat{b}) = \sum_{t=1}^{N^3} a_t h_t(\hat{r}, \hat{g}, \hat{b})$ интерполировала данные.

Метод предполагает, что каждой исходной точке ставится в соответствие одно интерполируемое значение, таким образом, мы будем рассматривать набор из трех функций $f^R(\hat{r}, \hat{g}, \hat{b})$,

$f^G(\hat{r}, \hat{g}, \hat{b})$, $f^B(\hat{r}, \hat{g}, \hat{b})$ и три набора коэффициентов a_t^R , a_t^G , a_t^B .

Оригинальный метод Харди предполагает, что с каждой точкой $[\hat{r}_t, \hat{g}_t, \hat{b}_t]^T$ ассоциируется квадратичная функция вида

$$h_t(\hat{r}, \hat{g}, \hat{b}) = [(\hat{r} - \hat{r}_t)^2 + (\hat{g} - \hat{g}_t)^2 + (\hat{b} - \hat{b}_t)^2 + c^2]^{1/2}.$$

Мультиквадратичная поверхность определяется суммой

$$z = \sum_{t=1}^{N^3} a_t [(\hat{r} - \hat{r}_t)^2 + (\hat{g} - \hat{g}_t)^2 + (\hat{b} - \hat{b}_t)^2 + c^2]^{1/2},$$

где c — значение константы, определяемой пользователем.

Подставляя координаты $[\hat{r}_t, \hat{g}_t, \hat{b}_t]^T$ и значения r_t , g_t , b_t исходных точек в предыдущее выражение, получим три системы из N^3 линейных уравнений с N^3 неизвестными коэффициентами a_t . Так для r_t :

$$\begin{aligned} r_1 &= a_1^R [(\hat{r}_1 - \hat{r}_1)^2 + (\hat{g}_1 - \hat{g}_1)^2 + (\hat{b}_1 - \hat{b}_1)^2 + c^2]^{1/2} + \dots \\ &\quad + a_{N^3}^R [(\hat{r}_1 - \hat{r}_{N^3})^2 + (\hat{g}_1 - \hat{g}_{N^3})^2 + (\hat{b}_1 - \hat{b}_{N^3})^2 + c^2]^{1/2} \\ &\quad \vdots \\ r_{N^3} &= a_{N^3}^R [(\hat{r}_{N^3} - \hat{r}_1)^2 + (\hat{g}_{N^3} - \hat{g}_1)^2 + (\hat{b}_{N^3} - \hat{b}_1)^2 + c^2]^{1/2} + \dots \\ &\quad + a_{N^3}^R [(\hat{r}_{N^3} - \hat{r}_{N^3})^2 + (\hat{g}_{N^3} - \hat{g}_{N^3})^2 + (\hat{b}_{N^3} - \hat{b}_{N^3})^2 + c^2]^{1/2} \end{aligned}$$

или в матричном виде

$$\mathbf{R} = \mathbf{M} \mathbf{A}^R.$$

Решение данной системы уравнений определяется формулой

$$\mathbf{A}^R = \mathbf{M}^{-1} \mathbf{R}.$$

Аналогично вычисляются значения $\mathbf{A}^G$ и $\mathbf{A}^B$. Вычисление коэффициентов может быть вынесено, как предварительный этап алгоритма. Таким образом, цветокоррекция изображений $\hat{I}$ определяется выражением

$$\tilde{I}(u, v) = f(\hat{I}) = \begin{bmatrix} f^R(\hat{I}^R(u, v), \hat{I}^G(u, v), \hat{I}^B(u, v)) \\ f^G(\hat{I}^R(u, v), \hat{I}^G(u, v), \hat{I}^B(u, v)) \\ f^B(\hat{I}^R(u, v), \hat{I}^G(u, v), \hat{I}^B(u, v)) \end{bmatrix}.$$

Поскольку для получения коэффициентов интерполяционной функции требуется предварительное вычисление решения трех систем из N^3 линейных уравнений с таким же количеством неизвестных, данный метод подходит лишь для случаев с небольшим набором исходных точек (нескольких сотен), что вполне приемлемо для решаемой задачи.

Рассмотрим работу алгоритма на примере цветных структурированных шаблонов, исполь-

зуемых в работе [3], интенсивности в каждом цветовом канале которых представляют собой треугольные волны с фазовым сдвигом $2\pi / 3$ относительно друг друга

$$P(u, v, \phi) = \begin{bmatrix} \text{sawtooth}(u / \phi) \\ \text{sawtooth}(u / \phi - 2\pi / 3) \\ \text{sawtooth}(u / \phi + 2\pi / 3) \end{bmatrix},$$

где sawtooth — функция треугольной волны с периодом 2π , такая что

$$\begin{aligned} \text{sawtooth}(x) &= \\ &= \begin{cases} \text{mod}(x, \pi) / \pi, & \text{если } \text{mod}(\text{div}(x, \pi) + 1, 2) \neq 0, \\ \text{mod}(-x, \pi) / \pi, & \text{если } \text{mod}(\text{div}(x, \pi) + 1, 2) = 0, \end{cases} \end{aligned}$$

где mod — операция деления по модулю.

Экспериментальная стереофотограмметрическая система активного трехмерного сканирования состоит из цифрового LCD-проектора “Epson EB-X6” и цифровой фотокамеры “Canon EOS 500D”. Для цветовой калибровки системы был использован набор из $4^3 = 64$ калибровочных цветов, проецируемый на белый лист бумаги.

Для проведения эксперимента через проектор было последовательно спроецировано на поверхность объекта два шаблона: $P(u, v, \phi)$, при $\phi = 1 / 17$, и $P(u, v) \equiv [1, 1, 1]^T$. Камерой были получены два соответствующих изображения объекта $I(u, v)$ и $Iw(u, v)$, и вычислено изображение, содержащее чистые значения интенсив-

ности отраженного света проектора $\hat{I} = \frac{I}{Iw}$. На

основе проведенной цветовой калибровки была выполнена цветокоррекция $\tilde{I} = f(\hat{I})$ со значением константы $c = 0$. На рис. 1 показаны увеличенные области изображений P , I и $\tilde{I}$. На рис. 2 показаны трехмерные представления наборов цветов одной строки каждого из изображений P , I и $\tilde{I}$.

Результаты эксперимента показали, что метод устранения цветового рассогласования на основе функции радиального базиса позволяет достаточно точно воссоздать цветовое преобразование, отображающее наблюдаемые камерой интенсивности отраженного света в исходные инструкции проектора.

ЛИТЕРАТУРА

1. Wan-Chun Ma A framework for capture and synthesis of high resolution facial geometry and performance, PhD Thesis, National Taiwan University, 2008.

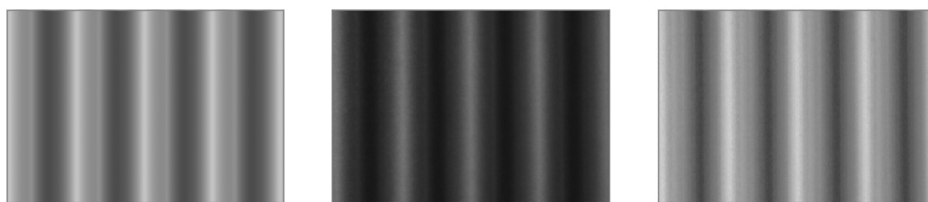


Рис. 1. Пример применения алгоритма устранения цветового рассогласования на основе интерполяции функций радиального базиса. Слева на право: исходные инструкции проектора P , наблюдаемое камерой изображение I , восстановленные инструкции проектора $\tilde{I}$

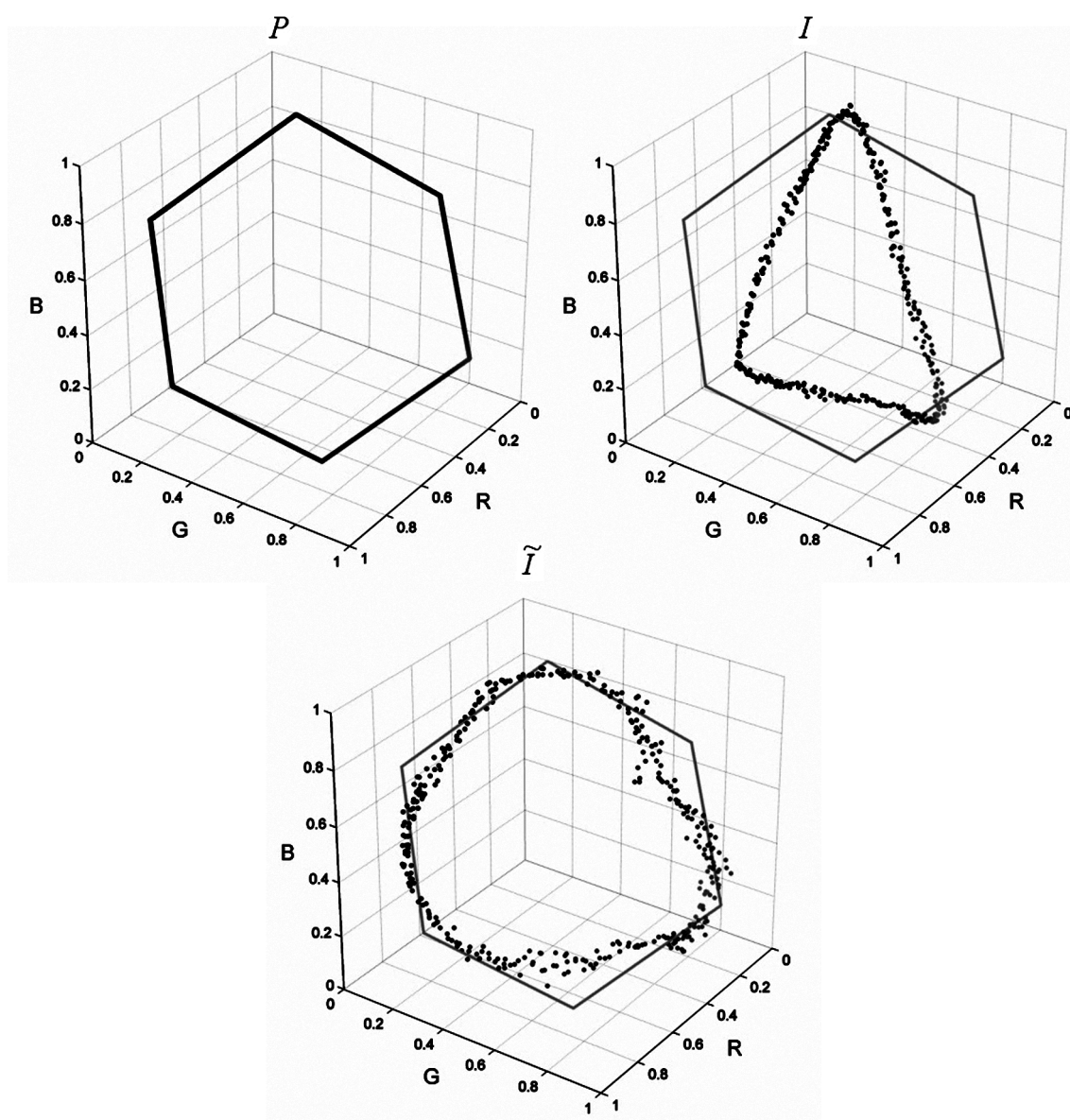


Рис. 2. Трехмерное представление набора цветов одной строки для: исходных инструкций проектора P , наблюдаемого камерой изображения I , восстановленных инструкций проектора $\tilde{I}$

2. Amidror I. Scattered data interpolation methods for electronic imaging systems: a survey — *Journal of Electronic Imaging* — 2002, Т. 11(2), — С. 157—176.

Кровопусков Андрей Вячеславович — аспирант, Воронежский государственный технический университет

Тел. 8 910 343 72 52

E-mail: Neo307@yandex.ru

Крыловецкий Александр Абрамович — к.ф.-м.н., доцент, Воронежский государственный университет

Тел. (4732) 30-46-39

Рындин Александр Алексеевич — доктор техн. наук, профессор, Воронежский государственный технический университет

Тел. (4732) 77 45 24

3. Кровопусков А.В. Система трехмерного сканирования лиц для биометрического пропускного контроля // Информатика: проблемы, методология, технологии: X международная научно-методическая конференция — Воронеж: 2010, Т. 1, — С. 379—384.

Krovopuskov A. V. — Postgraduate student, VSTU

Tel. 8 910 343 72 52

E-mail: Neo307@yandex.ru

Krylovetsky A. A. Ph.D. in Physics and Mathematics, Associate Professor, Voronezh State University

Tel. (4732) 30-46-39

Ryndin A. A. Doctor of Engineering, Professor, VSTU

Tel. (4732) 77 45 24