

## **Использование вращающихся камер для построения панорамных снимков и многокадровой стереорекострукции**

### **Введение**

На сегодняшний день разработано много алгоритмов обработки одной стереопары изображений для трехмерного восстановления моделей объектов [1-5]. Однако алгоритмы восстановления пространственной конфигурации по одной стереопаре имеют ограничения на точность реконструкции или же размеры снимаемого объекта. Так, при малой базе между камерами, изображения стереопары слабо отличаются друг от друга, и точность реконструкции становится низкой. При обработке особо больших объектов невозможно захватить их целиком в поле зрения камер. Использование же нескольких стереокадров позволяет значительно повысить точность реконструкции и обрабатывать объекты без ограничения на их размеры [6].

В работе приведен пример пространственной реконструкции объекта по нескольким стереоизображениям. Особенностью распознающей системы является то, что положение левой камеры в пространстве остается неизменным, камера может лишь вращаться вокруг вертикальной и горизонтальной оси. Снимки, поступающие с левой камеры, используются для построения панорамного изображения [7,8]. Правая камера жестко закреплена относительно левой. Она необходима для вычисления дальности до точек трехмерной сцены.

Исходными данными для построения панорамных изображений и трехмерных моделей объектов будут последовательности изображений. Каждая последовательность получена в результате полного оборота левой камеры вокруг вертикальной оси при

неизвестном, но постоянном угле места. Благодаря использованию нескольких стереокадров повышается как разрешающая способность стереопары, так и точность восстановления трехмерной конфигурации объекта.

### Построения панорамных изображений по серии снимков с левой камеры

Пусть  $T = \{(i, j) \mid 0 \leq i < I, 0 \leq j < J\}$  – поле зрения камеры, элементами которого являются пиксели. Горизонтальный размер поля зрения  $I$ , а вертикальный размер  $J$ . Изображением  $F$  будем называть функцию, которая каждому пикселю ставит в соответствие целое число – значение яркости:

$$F : T \rightarrow [0..255].$$

Если ориентация камеры в момент съемки изображения задается двумя углами  $(\hat{\beta}, \hat{\varepsilon})$ , то направления пикселя  $(i, j)$  по азимуту и углу места определяются парой  $\langle bet_{\hat{\beta}, \hat{\varepsilon}}(i, j), eps_{\hat{\beta}, \hat{\varepsilon}}(i, j) \rangle$  (рис.1).

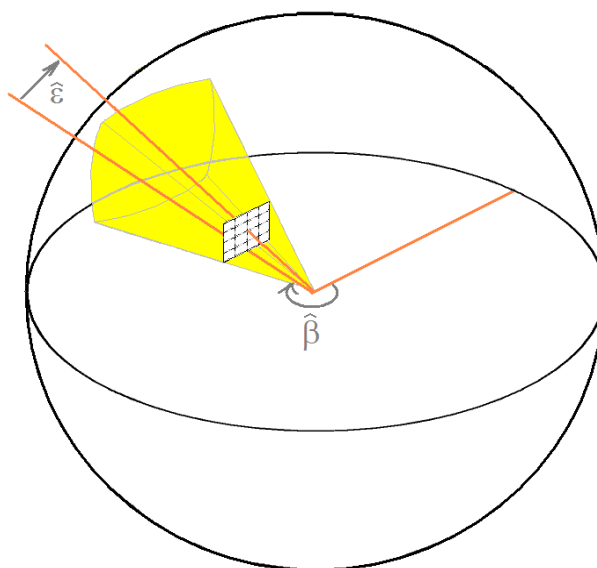


Рис.1. Пример ориентации камеры.

Пусть  $T_{pan} = \{(\beta, \varepsilon) \mid 0 \leq \beta < 360, -90 \leq \varepsilon < +90\}$  – поле зрения панорамы. Переменные  $\beta$  и  $\varepsilon$  принимают действительные дискретные значения.

**Панорамным изображением**  $F_{pan}$  будем называть функцию, которая для каждой пары  $(\beta, \varepsilon) \in T_{pan}$  определяет целое число – значение яркости в этом направлении:

$$F_{pan} : T_{pan} \rightarrow [0..255].$$

Если изображение  $F$  было получено при ориентации камеры  $(\hat{\beta}, \hat{\varepsilon})$ , то потери  $q(F, \hat{\beta}, \hat{\varepsilon}, F_{pan})$  при наложении его на панораму  $F_{pan}$  вычисляются как сумма квадратов разностей яркостей панорамы и яркостей изображения:

$$q(F, \hat{\beta}, \hat{\varepsilon}, F_{pan}) = \sum_{(i,j) \in T} (F(i,j) - F_{pan}(bet_{\hat{\beta}, \hat{\varepsilon}}(i,j), eps_{\hat{\beta}, \hat{\varepsilon}}(i,j)))^2.$$

**Задан набор изображений**  $\{F_k\}, k = 0..K$ , которые поступили с камеры. Необходимо для каждого изображения  $F_k$  **найти направления**  $(\hat{\beta}_k, \hat{\varepsilon}_k)$  камеры, при котором это изображение получено, и **указать цвета** на панорамном изображении  $F_{pan}(\beta, \varepsilon)$  так, чтобы суммарные потери были минимальны:

$$\sum_{k=0..K} q(F_k, \hat{\beta}_k, \hat{\varepsilon}_k, F_{pan}) \rightarrow \min_{(\hat{\beta}_k, \hat{\varepsilon}_k), F_{pan}}. \quad (1)$$

## Алгоритм построения панорамных изображений

Если бы яркости на панораме  $F_{pan}(\beta, \varepsilon)$  были известны, и необходимо было бы найти только ориентацию камеры  $(\hat{\beta}_k, \hat{\varepsilon}_k)$  для каждого изображения, минимизация функции (1) свелась бы к минимизации каждого из слагаемых  $q(F_k, \hat{\beta}_k, \hat{\varepsilon}_k, F_{pan})$  в отдельности. Тогда

$$(\hat{\beta}_k, \hat{\varepsilon}_k) = \arg \min_{\beta, \varepsilon} q(F_k, \beta, \varepsilon, F_{pan}) = \arg \min_{\beta, \varepsilon} \sum_{(i,j) \in T} (F_k(i,j) - F_{pan}(bet_{\beta, \varepsilon}(i,j), eps_{\beta, \varepsilon}(i,j)))^2.$$

То есть, для каждого изображения  $F_k$  необходимо было бы найти его наилучшее наложение на панорамный снимок путем перебора всех возможных ориентаций камеры.

Если бы ориентация камеры  $(\hat{\beta}_k, \hat{\varepsilon}_k)$  для каждого снимка  $F_k$  была известна, и необходимо было бы найти изображение  $F_{pan}(\beta, \varepsilon)$ , которое минимизируют функцию (1), то значения яркостей в пикселях панорамы вычислялись независимо друг от друга. Формула (1) записывается в следующем виде:

$$\sum_{k=0..K} q(F_k, \hat{\beta}_k, \hat{\varepsilon}_k, F_{pan}) = \sum_{k=0..K} \sum_{(i,j) \in T} (F_k(i,j) - F_{pan}(bet_{\hat{\beta}_k, \hat{\varepsilon}_k}(i,j), eps_{\hat{\beta}_k, \hat{\varepsilon}_k}(i,j)))^2 = \sum_{\beta, \varepsilon} \left[ \sum_{i,j,k} (F_{pan}(\beta, \varepsilon) - F_k(i,j))^2 \cdot I\{bet_{\hat{\beta}_k, \hat{\varepsilon}_k}(i,j) \equiv \beta \& eps_{\hat{\beta}_k, \hat{\varepsilon}_k}(i,j) \equiv \varepsilon\} \right] \rightarrow \min_{F_{pan}(\beta, \varepsilon)}. \quad (2)$$

Значения яркостей на панорамном изображении, которые минимизируют выражение (2) вычисляются по формуле:

$$F_{pan}(\beta, \varepsilon) = \frac{\sum_{i,j,k} F_k(i,j) \cdot I\{bet_{\hat{\beta}_k, \hat{\varepsilon}_k}(i,j) \equiv \beta \& eps_{\hat{\beta}_k, \hat{\varepsilon}_k}(i,j) \equiv \varepsilon\}}{\sum_{i,j,k} I\{bet_{\hat{\beta}_k, \hat{\varepsilon}_k}(i,j) \equiv \beta \& eps_{\hat{\beta}_k, \hat{\varepsilon}_k}(i,j) \equiv \varepsilon\}}.$$

То есть, для каждого элемента  $(\beta, \varepsilon)$  поля зрения панорамы вычисляется среднее значение яркостей на изображениях  $F_k$  в таких пикселях  $(i, j)$ , направления которых  $bet_{\hat{\beta}_k, \hat{\varepsilon}_k}(i, j)$  и  $eps_{\hat{\beta}_k, \hat{\varepsilon}_k}(i, j)$  равны  $\beta$  и  $\varepsilon$  соответственно.

Ниже будет сформулирован алгоритм решения задачи (1). Он основывается на последовательном приближенном вычислении траектории вращения камеры и яркостей панорамного изображения. По очереди ищутся то траектория вращения камеры при фиксированных яркостях на панораме, то значения яркостей в пикселях панорамы по изображениям с известной ориентацией.

Для снимка  $F_0$  ориентация камеры по азимуту  $\hat{\beta}_0$  и по углу места  $\hat{\varepsilon}_0$  указывается оператором. После этого определяются яркости на части панорамного изображения  $F_{pan}$  исходя из известных яркостей в направлениях  $\langle bet_{\hat{\beta}_0, \hat{\varepsilon}_0}(i, j), eps_{\hat{\beta}_0, \hat{\varepsilon}_0}(i, j) \rangle$  изображения  $F_0$ .

Далее алгоритм работает циклически. На каждом цикле увеличивается количество изображений, для которых известна ориентация камеры. Поиск ориентаций происходит с помощью панорамного изображения, цвета которого определены лишь на некотором фрагменте. В том же цикле определяются цвета фрагмента панорамы исходя из всех изображений, для которых ориентация камеры вычислена.

Переменная  $K'$  означает число первых изображений в последовательности  $F_0..F_K$ , для которых известна ориентация камеры. Переменные  $aperturX$  и  $aperturY$  определяют углы зрения камеры в горизонтальном и вертикальном направлении.

Шаг 1. Выбор ориентации камеры для нулевого снимка и определение яркостей в части пикселей панорамы исходя из ориентации нулевого снимка;

$Vвод(\hat{\beta}_0, \hat{\varepsilon}_0);$

$K' := 0;$

$$F_{pan}(\beta, \varepsilon) = \frac{\sum_{(i,j) \in T} F_0(i,j) \cdot I\{bet_{\hat{\beta}_0, \hat{\varepsilon}_0}(i,j) \equiv \beta \ \& \ eps_{\hat{\beta}_0, \hat{\varepsilon}_0}(i,j) \equiv \varepsilon\}}{\sum_{(i,j) \in T} I\{bet_{\hat{\beta}_0, \hat{\varepsilon}_0}(i,j) \equiv \beta \ \& \ eps_{\hat{\beta}_0, \hat{\varepsilon}_0}(i,j) \equiv \varepsilon\}};$$

Шаг 2. Пусть для первых  $K'$  изображений  $F_0..F_{K'}$ , известна ориентация камеры. Известны также цвета на части панорамы, которые вычислены исходя из изображений  $F_0..F_{K'}$ .

Выполняется поиск ориентаций  $(\hat{\beta}_k, \hat{\varepsilon}_k)$  для подпоследовательности изображений  $F_{K'+1}..F_{K''}$ ;

$k := K';$

*do*

$k := k + 1;$

$(\hat{\beta}_k, \hat{\varepsilon}_k) = \arg \min_{\beta, \varepsilon} q(F_k, \beta, \varepsilon, F_{pan});$

*while*  $(|\hat{\beta}_k - \hat{\beta}_{K'}| < 0.5 \cdot apertureX) \ \& \ (|\hat{\varepsilon}_k - \hat{\varepsilon}_{K'}| < 0.5 \cdot apertureY) \ \& \ (k < K);$

$K' := k;$

Шаг 3. Определяются цвета на панораме исходя из первых  $K'$  изображений, для которых ориентация камеры уже вычислена:

$$F_{pan}(\beta, \varepsilon) = \frac{\sum_{k=0}^{K'} \sum_{(i,j) \in T} F_k(i,j) \cdot I\{bet_{\hat{\beta}_k, \hat{\varepsilon}_k}(i,j) \equiv \beta \ \& \ eps_{\hat{\beta}_k, \hat{\varepsilon}_k}(i,j) \equiv \varepsilon\}}{\sum_{k=0}^{K'} \sum_{(i,j) \in T} I\{bet_{\hat{\beta}_k, \hat{\varepsilon}_k}(i,j) \equiv \beta \ \& \ eps_{\hat{\beta}_k, \hat{\varepsilon}_k}(i,j) \equiv \varepsilon\}};$$

Шаг 4. Если  $K' < K$  (найдена ориентация не для всех изображений), то перейти к шагу 2, иначе завершить работу.

## Стереореконструкция объектов по кадрам, которые поступают с вращающихся камер

Предложенный в предыдущем параграфе алгоритм может быть применен для обеспечения пространственной реконструкции объектов по многим стереопарам. При построении трехмерных моделей объектов по их стереоизображениям используется система из двух камер. Взаимная ориентация камер постоянна. Вертикальная ось вращения проходит через оптический центр левой камеры, горизонтальная ось вращения соединяет оптические центры обеих камер (рис. 2). Вся система имеет две степени свободы.

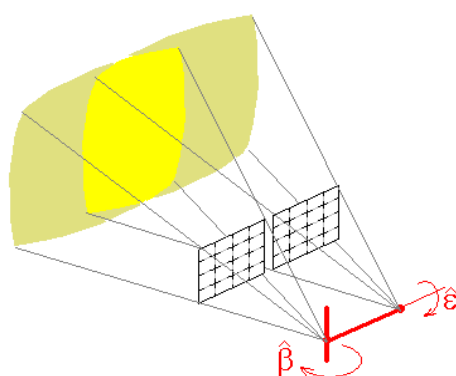


Рис. 2. Пример конфигурации системы из двух вращающихся камер.

Расстояние от оптического центра левой камеры до точки пространства, которая, будучи спроецирована на изображение  $F_k^L$ , имеет координаты  $(i, j)$ , обозначим  $D_k(i, j)$ .

Изображением панорамной дальности  $D_{pan}$  обозначим функцию над полем зрения панорамы, которая для каждой пары углов  $(\beta, \epsilon) \in T_{pan}$  определяет дальность от точки трехмерной модели, которая лежит на луче с направлением  $(\beta, \epsilon)$  до оптического центра левой камеры:

$$D_{pan} : T_{pan} \rightarrow [0.. \infty).$$

Для каждого изображения  $F_k^L$  известна ориентация  $(\hat{\beta}_k, \hat{\varepsilon}_k)$  камеры, при котором это изображение было получено. Известны также значения дальности  $D_k(i, j)$  [1,2,4]. Необходимо **найти** значения функции панорамной дальности  $D_{pan}(\beta, \varepsilon)$ , при которых суммарные потери будут минимальны:

$$D_{pan} = \arg \min_{D'_{pan}} \sum_{k=0..K} q(D_k, \hat{\beta}_k, \hat{\varepsilon}_k, D'_{pan}). \quad (3)$$

Значения яркостей на панорамном изображении, которые являются решением задачи (3), вычисляются по формуле:

$$D_{pan}(\beta, \varepsilon) = \frac{\sum_{i,j,k} D_k(i, j) \cdot I\{bet_{\hat{\beta}_k, \hat{\varepsilon}_k}(i, j) \equiv \beta \ \& \ eps_{\hat{\beta}_k, \hat{\varepsilon}_k}(i, j) \equiv \varepsilon\}}{\sum_{i,j,k} I\{bet_{\hat{\beta}_k, \hat{\varepsilon}_k}(i, j) \equiv \beta \ \& \ eps_{\hat{\beta}_k, \hat{\varepsilon}_k}(i, j) \equiv \varepsilon\}}.$$

## Эксперименты

Для построения панорамных изображений использовался цифровой фотоаппарат, который мог выполнять съемку последовательности изображений с частотой 15 кадров в секунду. Угол зрения фотоаппарата 48 градусов по горизонтали и 36 градусов по вертикали. Размеры исходных изображений 320 на 240 пикселей. Для построения панорамы были использованы несколько серий изображений. При получении каждой серии фотоаппарат имел фиксированное направление по углу места и двигался вокруг вертикальной оси, выполняя один полный оборот за 16 секунд. Общее число изображений для построения панорамы составляло несколько сотен. Время построения панорамного изображения на персональном компьютере с тактовой частотой процессора 2 ГГц не превышало 5 минут.

В верхней части рис. 3 приведен пример исходных изображений для построения панорамы. В нижней части рисунка представлено панорамное изображение, которое охватывает углы места в диапазоне  $-45 \dots +45$  градусов и азимутальное направление вкруговую.



*Рис. 3. Пример построения панорамного изображения Софиевской площади в г. Киеве.*

На рис. 4 приведены исходные изображения и панорама, которая охватывает углы места в диапазоне  $-30 \dots +30$  градусов и все возможные азимутальные направления.

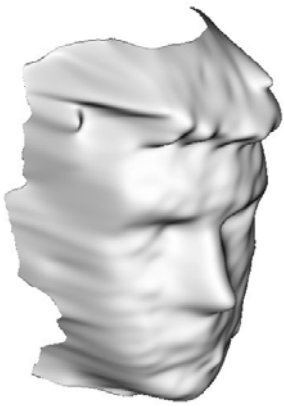


*Рис. 4. Пример построения панорамного вида с Владимирской горки в г. Киеве.*

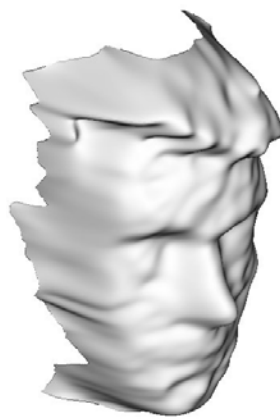


*а*

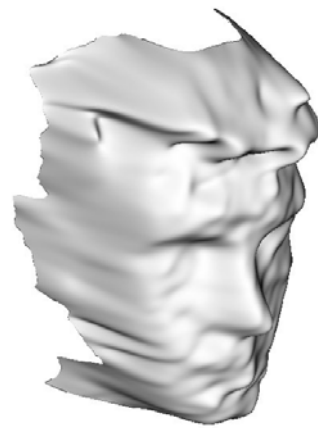
*б*



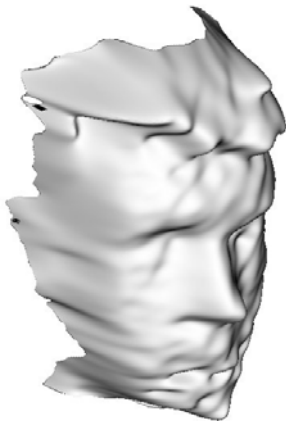
*в*



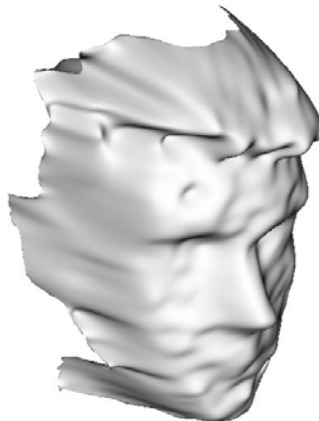
*г*



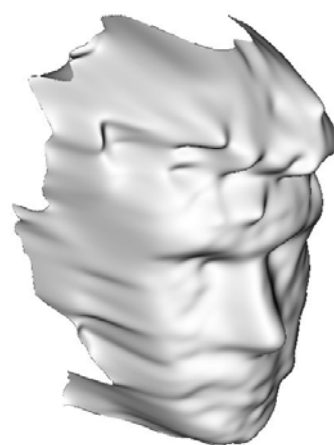
*д*



*е*



*ж*



*з*



*и*

*Рис. 5. Пример многокадровой стереорекострукции.*

На рис. 5. приведен пример восстановления пространственной конфигурации человеческого лица по последовательности шести стереокадров. Первый стереокадр последовательности изображен на рис. 5а и 5б. Остальные пять стереокадров не изображены. Результат независимой обработки шести стереокадров приведен на рис. 5в-5з. На основании результатов реконструкции шести стереокадров и учета траектории вращения стереокамер создана трехмерная модель, содержащаяся на рис 5и.

Для использования алгоритма построения панорамных изображений необходимо соблюдение некоторых технических ограничений. Камера должна иметь две степени свободы. Ее вращение должно происходить в горизонтальной плоскости (азимутальное вращение) и вертикальной (вращение по углу места). Оси вращения должны пересекаться в оптическом центре камеры. Если же расстояние между оптическим центром камеры и точкой пересечения осей вращения ненулевое, то построение панорамных изображений возможно только для таких сцен, где объекты расположены далеко от камеры. Ориентацию камеры для съемки начального кадра  $F_0$  необходимо выбирать так, чтобы ее можно было указать алгоритму в начале его работы. Скорость горизонтального вращения камеры следует выбирать так, чтобы в соседние моменты времени направления камеры отличались не более чем на горизонтальный угол зрения камеры.

## **Выводы**

Алгоритм построения трехмерной модели по множеству стереопар, поступающих с системы вращающихся камер, применим для таких объектов, каждая часть которых может быть реконструирована с помощью методов обработки одной стереопары [4]. Например, для объектов, каждая часть которых является непрерывной поверхностью.

Для проверки результатов многокадровой стереорекострукции выполнены эксперименты по восстановлению пространственной модели человеческого лица. Очевидно, что точность построения пространственной модели по многим стереокадрам значительно выше, чем при обработке одной стереопары. Для объективного сравнения результатов восстановления рельефа разными алгоритмами следует сопоставлять такие характеристики как доверительные интервалы восстановленного рельефа или его отклонение от реального рельефа в модельном эксперименте. Оценка точности восстановления рельефа поверхности является предметом дальнейших исследований автора.

Методы пространственной реконструкции будут применены в рамках научно-исследовательской работы по программе «Образный компьютер» для идентификации личности человека по его стереоизображениям, а также для построения трехмерных моделей жилых помещений по последовательности изображений, которые поступают с камеры.

## **Литература**

1. *Гимельфарб Г.Л.* Симметричный подход к задаче автоматических стереоскопических измерений в фотометрии // Кибернетика. – 1979. – №2. – С. 73-82.
2. *Гимельфарб Г.Л., Марченко В.Б., Рыбак В.И.* Автоматическое отождествление идентичных точек стереоснимков с учетом неравномерных фотометрических искажений // Кибернетика. – 1976. – №4. – С. 107-112.
3. *Савчинський Б.Д.* Порівняльний аналіз алгоритмів стереозору в рамках байєсівської теорії прийняття рішень // П'ята Всеукраїнська міжнародна конференція оброблення сигналів та розпізнавання образів (УкрОБРАЗ 2000). – Київ, 2000. – С. 25-28

- [4] Рябоконт Д.І. “Створення тривимірних моделей об’єктів за стереопарами зображень для електронних музеїв.” *Електронні зображення та візуальні мистецтва EVA 2002, праці конференції. 22-24 травня 2002 р., Київ.*
- [5] Schlesinger M.I. , Flach B. “Analysis of optimal labeling problems and their application to image segmentation and binocular stereovision”. *Шоста Всеукраїнська міжнародна конференція оброблення сигналів та розпізнавання образів (УкрОБРАЗ 2002).*
- [6] Werner T. “Practice of 3D Reconstruction from Multiple Uncalibrated Unorganized Images”. *Czech Pattern Recognition Workshop 2000.*
- [7] Shmuel Peleg and Moshe Ben-Ezra, *Stereo Panorama with a Single Camera, CVPR'99, Ft. Collins, June 1999, pp. 395-401.*
- [8] C. Sun and S. Peleg, *Fast Panoramic Stereo Matching using Cylindrical Maximum Surfaces, IEEE Trans. on SMC, 2003, In Press.*