

## АЛГОРИТМ НАХОЖДЕНИЯ СООТВЕТСТВИЙ НА ИЗОБРАЖЕНИЯХ НА ОСНОВЕ ПОДХОДА МИНИМИЗАЦИИ ЭНЕРГИИ

<sup>1</sup>Тужилкин А.Ю., <sup>1</sup>Захаров А.А., <sup>1</sup>Яшков В.С.

<sup>1</sup>*Муромский институт (филиал) Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых, Муром, e-mail: ay-tuzhilkin@ya.ru, aa-zaharov@ya.ru*

---

В работе рассматривается алгоритм нахождения плотных стереосоответствий на изображениях с использованием подхода минимизации энергии. Алгоритм может применяться для реконструкции трехмерных сцен, определения положения и ориентации объектов в пространстве. Алгоритм основан на полигональном разбиении изображения. Сегментация изображения осуществляется на основе спектральной теории графов. Основная идея алгоритма состоит в нахождении диспаратета между регионами на основе метода суммы квадратов разностей. Это позволяет получить более гладкую карту глубины по сравнению с точечными методами. Применяется метод минимизации энергии. Функция энергии представляет сумму компонентов: меры цветового сходства примитивов, меры связности примитивов, меры перекрытия областей. Для минимизации энергии задаются исходные параметры наблюдаемой сцены. Параметры сцены итеративно оптимизируются. Приведены результаты работы алгоритма на тестовых изображениях.

---

Ключевые слова: минимизация энергии, стереосоответствия, обработка изображений.

## ALGORITHM FOR FINDING CORRESPONDENCES IN IMAGES BASED ON ENERGY MINIMIZATION APPROACH

<sup>1</sup>Tuzhilkin A.Y., <sup>1</sup>Zakharov A.A., <sup>1</sup>Yashkov V.S.

<sup>1</sup>*Murom Institute (Branch) of Vladimir State University named after Alexander G. and Nicholas G. Stoletovs, Murom, e-mail: ay-tuzhilkin@ya.ru, aa-zaharov@ya.ru*

---

Dense stereo correspondence algorithm for finding the images using the energy minimization approach is considered in the work. The algorithm can be used for the reconstruction of three-dimensional scenes, determining the position and orientation of objects in space. The algorithm is based on the polygon partition image. Image segmentation is based on spectral graph theory. The main idea of the algorithm is to find the disparity between regions on the basis of the sum of squares of the differences. This enables to obtain more smooth depth map compared with point methods. Energy minimization method is used. The energy function is the sum of the components: color similarity measures primitives, measures of connectivity primitives, measures the overlap regions. The initial parameters of the observed scene are set to minimize energy. Scene parameters iteratively optimized. The results of the algorithm on test images are shown.

---

Keywords: energy minimization, stereo correspondence, image processing

Нахождение соответствий на изображениях является актуальной задачей в таких областях, как реконструкция трехмерных сцен, автономная навигация, визуальный контроль и т.д. Для этого часто используются стереоизображения. Два изображения одной области пространства, полученные с двух различных точек зрения, называются стереоскопической парой снимков (стереопарой). На основе вычисленных соответствий по стереопаре можно определить трехмерные координаты сцены. Для вычислений используется понятие эпиполярной конфигурации. В простейшем случае две одинаковые плоскости изображений параллельны базе стереосистемы (рис. 1).

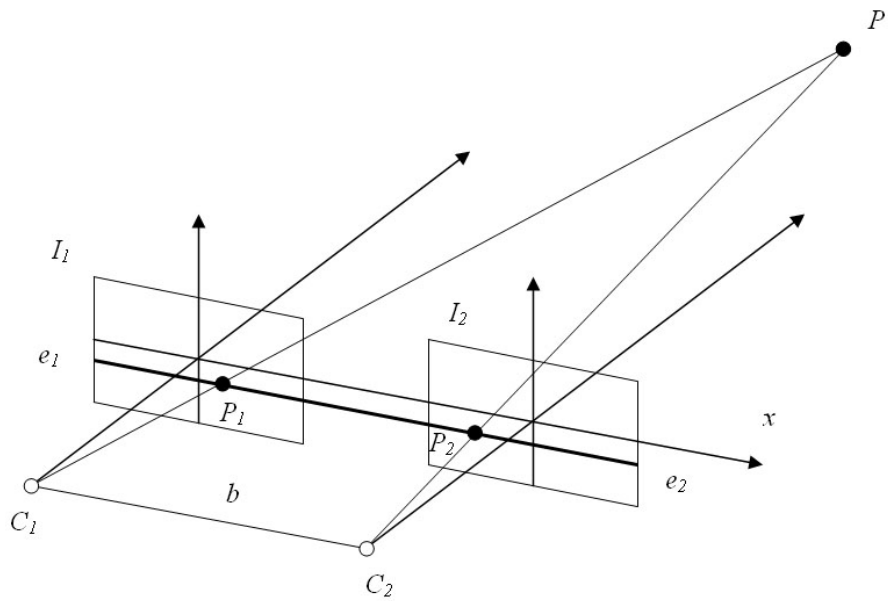


Рис. 1. Эпикулярная конфигурация нормальной пары изображений

Эпикулярной плоскостью называется плоскость, которой принадлежит трехмерная точка  $P$ , оптические центры двух камер  $C_1$  и  $C_2$ , две проекции  $P_1$  и  $P_2$  точки  $P$  на плоскости изображений. Эпикулярными прямыми называются две прямые  $e_1$  и  $e_2$ , которые являются прямыми пересечения эпикулярной плоскости с двумя плоскостями изображений  $I_1$  и  $I_2$ . Расстояние между оптическими центрами камер называется базой  $b$ .

Диспаратет (диспаратность) – угловая невязка положений изображения некоторого объекта для двух снимков. Процесс измерения стереоскопического диспаратета состоит в выборе некоторой позиции на первом изображении, нахождении этой же позиции на втором изображении, измерении расстояния между этими позициями (рис. 2). Изображения считаются ректифицированными, если точки, между которыми существует соответствие, находятся на строках изображений с одинаковыми номерами.

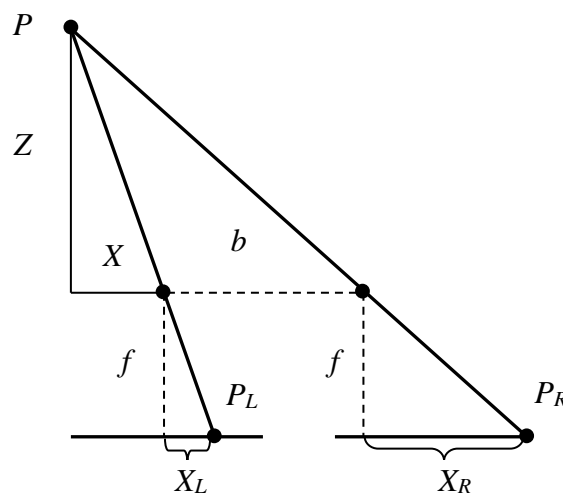


Рис. 2. Схема измерения диспаратета

Из рис. 2 можно получить следующие соотношения.

$$\frac{X_L}{f} = \frac{X}{Z};$$
$$\frac{X_R}{f} = \frac{X + b}{Z},$$

где  $X_L$ ,  $X_R$  – значения координат  $X$  точки  $P$  на левом и правом изображениях;

$f$  – фокусное расстояние (расстояние от оптического центра до плоскости изображения);

$X$  – координата  $X$  точки  $P$ ;

$Z$  – координата  $Z$  точки  $P$ ;

$b$  – расстояние между оптическими центрами камер (база).

Из полученных соотношений можно вычислить значение диспаратета  $d$ :

$$d = X_R - X_L = \frac{f * b}{Z}.$$

Задача вычисления диспаратета осложняется присутствующими на изображениях шумами и бликами, наличием слаботекстурированных областей, взаимными перекрытиями объектов, резкими перепадами глубины в сценах. Кроме того, для приложений реального времени необходимо обеспечить компромисс между качеством нахождения стереосоответствий и вычислительной сложностью алгоритмов.

### **Обзор методов стереосопоставления**

Выделяют методы нахождения плотного и разреженного стереосоответствий [1, 6]. Методы нахождения плотных соответствий вычисляют диспаратет для каждой точки изображения. Методы нахождения разреженных соответствий вычисляют диспаратет только между выделенными особенностями изображений.

Стереоалгоритмы бывают локальными и глобальными [6]. Локальные алгоритмы используют для вычисления диспаратета в каждой точке информацию о части пикселей изображения, находящихся в окрестности данной точки. Глобальные алгоритмы стремятся найти решение, при котором каждый пиксель изображения оказывает влияние на решение во всех остальных пикселях. Локальные алгоритмы требуют меньше вычислительных затрат. Однако, глобальные алгоритмы формируют более точные дальнометрические данные. Существуют также полуглобальные методы, которым присущи особенности локальных и глобальных методов [3].

Успехи в области стереосопоставления были достигнуты с развитием таких методов оптимизации, как разрезы на графах [5] и распространение доверия [4]. Основным недостатком этих методов являются высокие вычислительные затраты.

Для дальнейшего совершенствования методов исследователи уделяли больше внимания проблемам перекрытий и слаботекстурированных областей. В последнее время стали популярны методы определения соответствий на основе регионов [7]. Эти методы позволяют получить хорошие результаты, когда поверхности объектов имеют однородную закраску.

В представленном алгоритме предлагается использовать информацию о сегментах изображения для вычисления значений диспаратетов. Определение диспаратета используется для каждого региона в отдельности на основе метода суммы квадратов разностей.

### **Функция энергии**

Цель плотной реконструкции по стереоизображениям состоит в восстановлении глубины каждого пикселя. Предполагается, что стереопара ректифицирована. Каждому диспаратету точки сопоставима функция энергии, которая количественно описывает степень соответствия. Цель алгоритма – минимизировать значение функции для нахождения наилучшего соответствия. Функцию энергии  $i$ -ого региона определим следующим образом:

$$E_i = E_{data} + E_{smooth} + E_{occl} ,$$

где  $E_{data}$  – штраф за несоответствие цветовых свойств сопоставляемых пикселей;

$E_{smooth}$  – штраф за несоответствие свойств соседних пикселей изображения диспаратета (разрыв диспаратета). Обычно к таким областям относятся участки изображения, для которых ошибочно найдены значения диспаратета.

$E_{occl}$  – штраф за перекрытие области изображения. Это участки изображения, для которых не найдены соответствия на стереопарах.

Составляющая функционала энергии  $E_{data}$  определяется на основе метода суммы квадратов разностей (SSD- Sum of Squared Differences) для каждого региона:

$$E_{data} = \sum_{x,y} (I_R(x,y) - I_L(x+d,y))^2 ,$$

где  $d$  – значение диспаратета между соответствующими пикселями правого и левого изображений;

$I_R(x,y)$ ,  $I_L(x+d,y)$  – яркости пикселей правого и левого изображений с координатами  $(x,y)$  и  $(x+d,y)$ .

Составляющая функционала энергии  $E_{smooth}$  определяется следующим образом:

$$E_{smooth} = \sum_{p \in B, q \in N} \begin{cases} \lambda_s, & \text{если } |d(p) - d(q)| \geq 1; \\ 0, & \text{в остальных случаях,} \end{cases}$$

где  $B$  – множество граничных пикселей текущего региона;

$N$  – множество соседних пикселей с приграничными пикселями региона. Пиксели  $p \in B$

и  $q \in N$  – два 4-связанных пикселя на правом изображении;

$d(p)$  и  $d(q)$  – значения диспаратета для пикселей  $p$  и  $q$ ;

$\lambda_s$  – константа штрафа за несоответствие свойств соседних пикселей.

Составляющая функционала энергии  $E_{occl}$  определяется следующим образом:

$$E_{occl} = \sum_{s \in W} \begin{cases} \lambda_{occl}, & \text{если } d(s) = d_{max}; \\ 0, & \text{в остальных случаях,} \end{cases}$$

где  $W$  – множество пикселей текущего региона;

$d(s)$  – значение диспаратета в пикселе  $s$ ;

$d_{max}$  – максимальное значение диспаратета на всем диапазоне проверяемых значений;

$\lambda_{occl}$  – константа штрафа за перекрытие областей изображения.

### **Алгоритм нахождения стереосоответствий**

Шаг 1. Выполнение сегментации изображения на основе спектральной теории графов [2].

Шаг 2. Вычисление значения диспаратета каждого региона на основе SSD-алгоритма. Определение пикселей региона осуществляется на основе четырехсвязной заливки областей. Формируется изображение, интенсивность которого в каждой точке представляет собой значения диспаратета.

Шаг 3. Выполнение минимизации энергии путем последовательного сканирования изображения диспаратетов. Осуществляется замена значений пикселей, обладающими наибольшими значениями  $E_{smooth}$  и  $E_{occl}$  на значения диспаратетов соседних регионов.

### **Результаты работы алгоритма**

Для оценки полученных результатов были использованы тестовые изображения (рис .3). Время работы программы в среде MATLAB на компьютере с процессором Pentium T2390 и оперативной памятью 2 Gb составило 28 с.

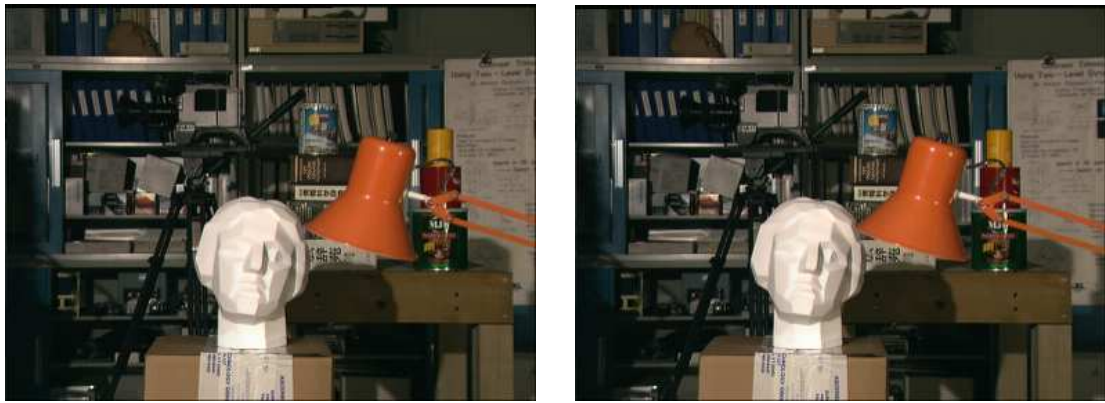


Рис. 3. Тестовые стереоизображения

В результате сегментации правого снимка тестовой стереопары было получено изображение (рис. 4).



Рис. 4. Сегментация изображения на основе спектральной теории графов



а)

б)

Рис. 5. Изображения диспаратитета: а) эталонное изображение диспаратитета, б) изображение диспаратитета, полученное на основе представленного алгоритма

### **Заключение**

В работе был представлен алгоритм нахождения стереосоответствий на основе минимизации энергии. Алгоритм использует предварительную сегментацию изображения на

основе спектральной теории графов. Алгоритм позволяет получать хорошие результаты для слаботекстурированных областей. Недостатком алгоритма является достаточно большое время работы, так как выполняется четырехсвязная заливка областей. Для ускорения работы алгоритма в дальнейшем предлагается использовать построчную заливку.

*Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 13-07-97523, задания №2014/13 на выполнение государственных работ в сфере научной деятельности в рамках базовой части государственного задания Минобрнауки России.*

### Список литературы

1. Захаров А.А. Автоматический синтез протяженных трехмерных сцен с использованием системы компьютерного зрения// Известия ВУЗОВ. Приборостроение. – 2012. – Т.55, № 2. – С. 24-27.
2. Cour T., Shi J., Gogin N. Learning Spectral Graph Segmentation// Tenth International Workshop on Artificial Intelligence and Statistics (AISTATS). – 2005. – pp. 65-72.
3. Hirschmuller, H. Accurate and Efficient Stereo Processing by Semi-Global Matching and Mutual Information// Computer Vision and Pattern Recognition. – 2005. – Vol.2 – P. 807-814.
4. Klaus A., Sormann M., Karner K. Segment-Based Stereo Matching Using Belief Propagation and a Self-Adapting Dissimilarity Measure// Proceedings of the 18th International Conference on Pattern Recognition. – 2006. – Vol. 3. – pp. 15-18.
5. Li Hong Chen G. Segment-based stereo matching using graph cuts // Computer Vision and Pattern Recognition. – 2004. – Vol.1. – P. 74-81.
6. Scharstein D., Szeliski R. A taxonomy and evaluation of dense two-frame stereo correspondence algorithms// International Journal of Computer Vision. – 2002. – Vol. 47, №. 1 – pp. 7-42.
7. Wang F. Stereo Matching Using Iterative Dynamic Programming Based on Color Segmentation of Images// Journal of Computers, 2014. – Vol. 9, № 6. – pp. 1491-1496.

### Рецензенты:

Жизняков А.Л., д.т.н., профессор, первый зам. директора, МИ (ф) ВлГУ, г. Муром;

Орлов А.А., д.т.н., доцент, зав. кафедрой физики и прикладной математики, МИ (ф) ВлГУ, г. Муром.