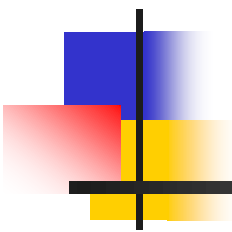


Построение карт глубины и сопоставление стерео



Сергей Матюнин

Video Group
CS MSU Graphics & Media Lab

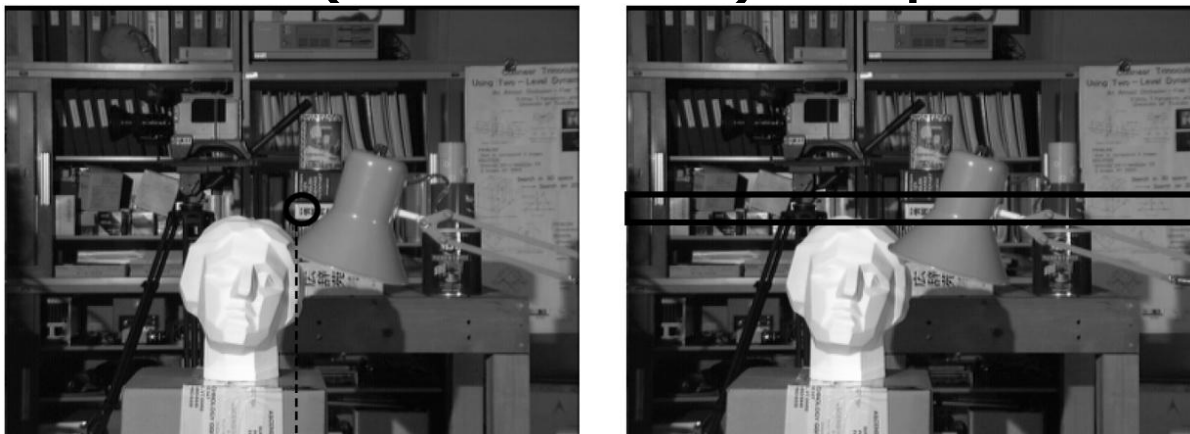


Содержание

- Введение
- Connectivity-slant
- AdaptingBP
- Cooperative Optimization
- Сравнение

Введение

- Вход: стерео-изображение
- Ищем функцию смещения $d(x,y)$ (disparity)
- $d(x,y) \sim 1/D(x,y)$, где $D(x,y)$ – глубина
- Очищенное (rectificated) стерео



Scharstein and Szeliski. A taxonomy and evaluation of dense two-frame stereo correspondence algorithms. IJCV 2002.

Введение

Схема алгоритма

- Вычисление функции стоимости
- Суммирование стоимости
- Вычисление/оптимизация карты смещения
- Уточнение

Scharstein and Szeliski. A taxonomy and evaluation of dense two-frame stereo correspondence algorithms. IJCV 2002.



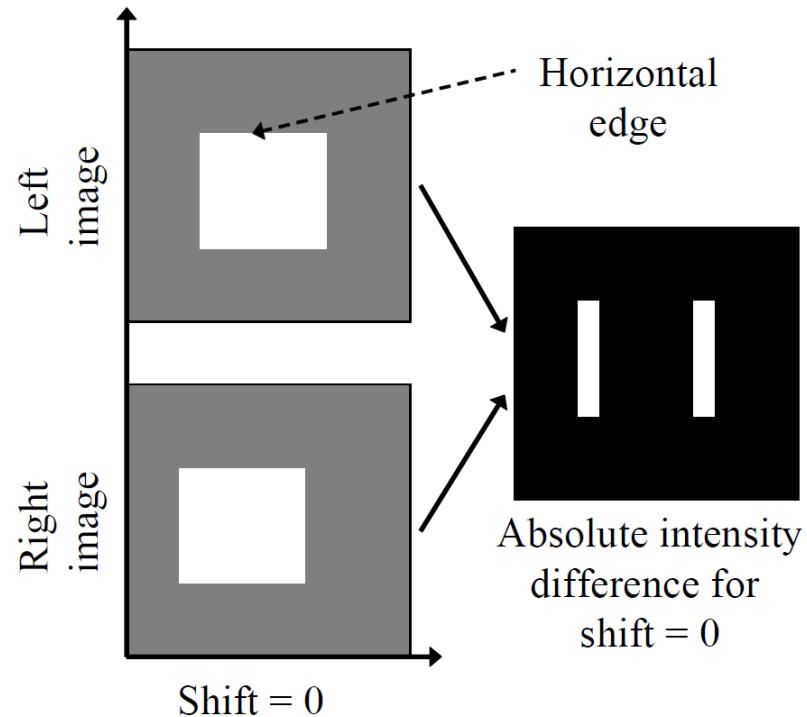
Содержание

- Введение
- **Connectivity-slant**
- AdaptingVP
- Cooperative Optimization
- Сравнение

Connectivity-slant

Плоский мир

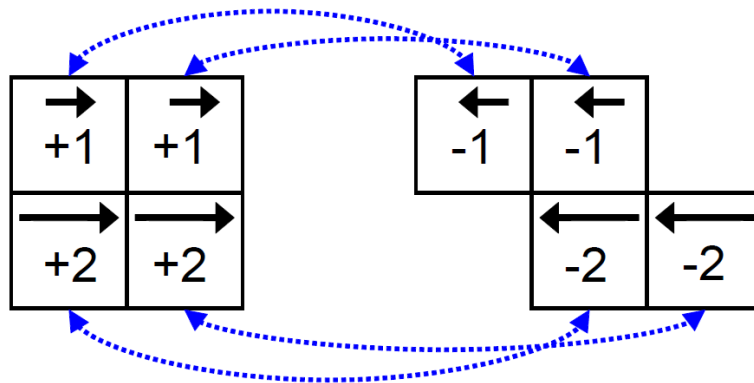
- Модель глубины: кусочно-постоянная функция
- Правильное смещение максимизирует площадь сегмента сопоставления и наоборот
- Сегментация и сопоставление – только совместное решение



Connectivity-slant

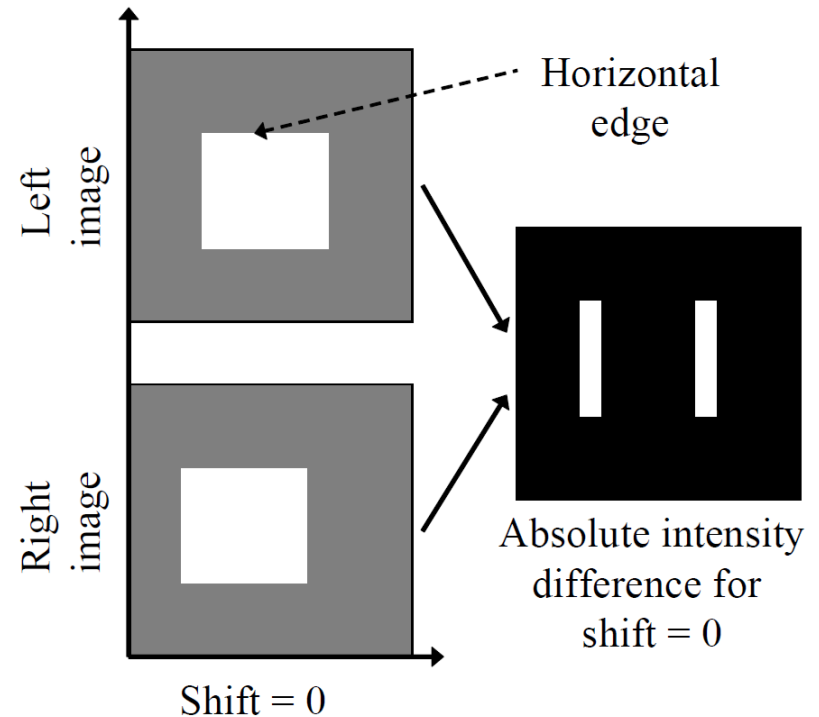
Плоский мир

Распространение
связности через
горизонтальные
границы



Left disparity map

Right disparity map



Connectivity-slant

Однозначность и наложения

- Соответствие «один к одному» для пикселей
- Если нашли соответствие $(I_{\text{left}}, I_{\text{right}})$ то пары $(I_{\text{left}}', I_{\text{right}})$ и $(I_{\text{left}}, I_{\text{right}}')$ отбрасываем
- Пиксели, которые не попали в какую-либо пару, помечаем как наложение

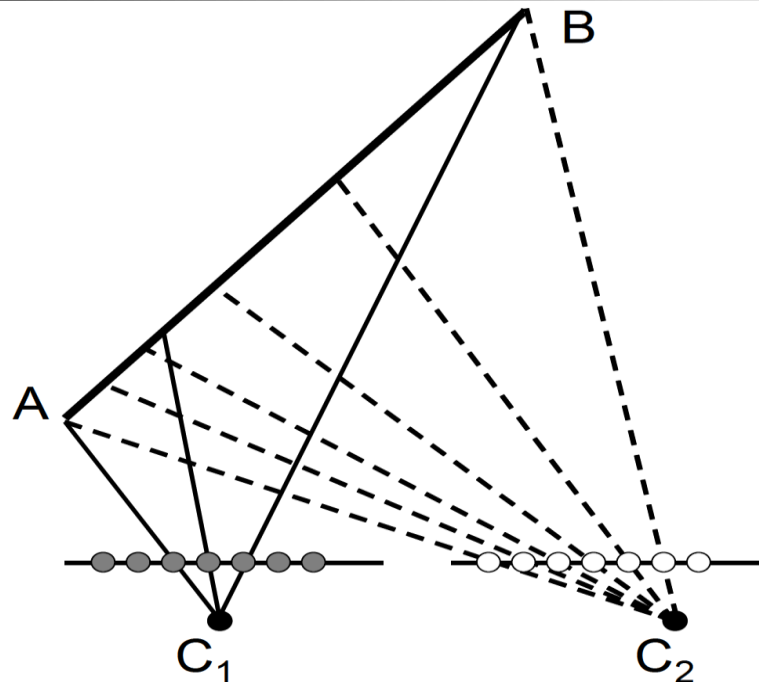
Connectivity-slant

Алгоритм для плоского мира

- Построчная обработка
- Для всех возможных значений δ_x :
 - Сдвигаем I_L на δ_x . Полученное I'_L сопоставляем с I_R
 - Если есть горизонтальная граница, разрываем связность с предыдущей строкой
 - Строим связанные компоненты
 - Находим веса
 - Обновляем карту смещений, учитывая ограничения единственности

Connectivity-slant

Алгоритм для не плоского мира



- N пикселей одного изображения соответствуют M пикселям другого
- Нужно сопоставлять не точки, а интервалы

Connectivity-slant

Алгоритм для не плоского мира



Сначала растянуть изображение, потом
искать соответствие

Connectivity-slant

Горизонтальный наклон

- Рассматриваем линейную зависимость между точками левого и правого изображений

$$x_R = m_L(x_L) \cdot x_L + d_L(x_L)$$

$$x_L = m_R(x_R) \cdot x_R + d_R(x_R)$$

$$m_R(x_R) = 1/m_L(x_L)$$

$$d_R(x_R) = -d_L(x_L)/m_L(x_L)$$

$$\Delta_L(x_L) = x_R - x_L = (m_L(x_L) - 1) \cdot x_L + d_L(x_L)$$

$$\Delta_R(x_R) = x_L - x_R = (m_R(x_R) - 1) \cdot x_R + d_R(x_R)$$

- m_L и m_R характеризуют горизонтальный наклон
- Максимизируем длину сегмента, содержащего точку

Connectivity-slant

Birchfield and Tomasi method

$$I_L(x_L - \frac{1}{2}), I_L(x_L + \frac{1}{2}), I_R(x_R - \frac{1}{2}), I_R(x_R + \frac{1}{2})$$

$$I_L^{\min} = \min \{ I_L(x_L - \frac{1}{2}), I_L(x_L), I_L(x_L + \frac{1}{2}) \}$$

$$I_L^{\max} = \max \{ I_L(x_L - \frac{1}{2}), I_L(x_L), I_L(x_L + \frac{1}{2}) \}$$

$$I_R^{\min}, I_R^{\max} \text{ – аналогично}$$

$$d_L = \max \{ 0, I_L(x_L) - I_R^{\max}, I_R^{\min} - I_L(x_L) \}$$

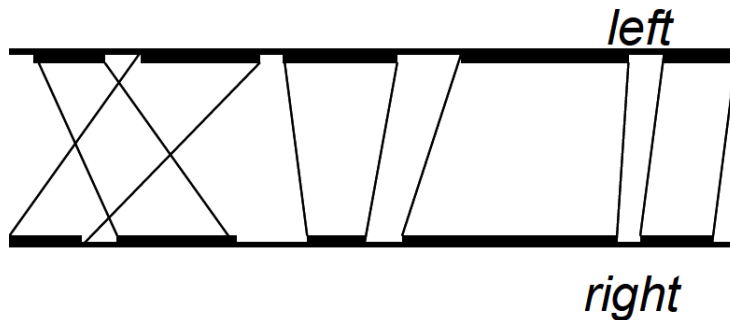
$$d_R = \max \{ 0, I_R(x_R) - I_L^{\max}, I_R^{\min} - I_R(x_R) \}$$

$$d = \min \{ d_L, d_R \} \text{ – разность между } x_L \text{ и } x_R$$

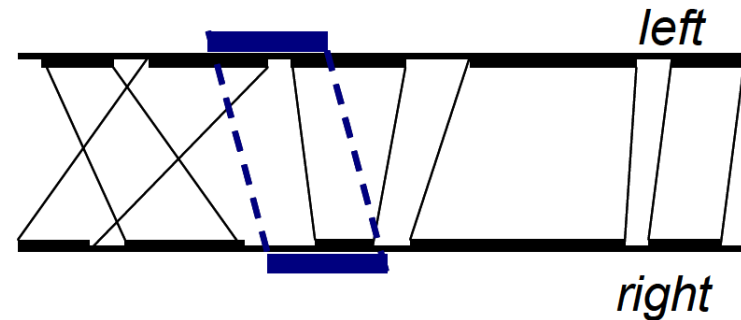
Connectivity-slant

Однозначность

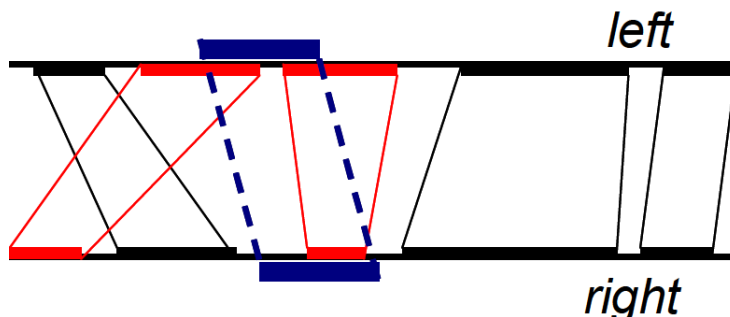
(a) Initial correspondence



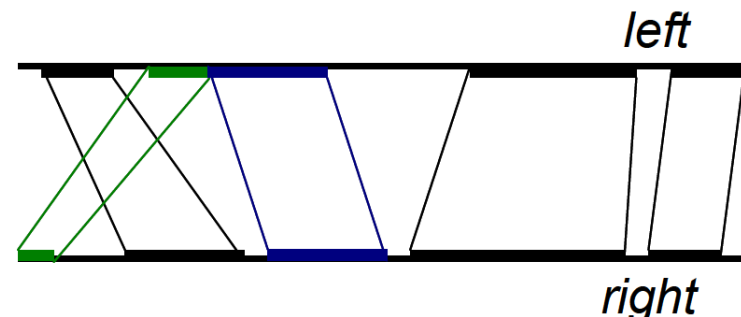
(b) Insert new pair of matching intervals



(c) Enforce uniqueness constraint



(d) Final correspondence



Connectivity-slant

Горизонтальный наклон



- Построчное сопоставление
- Максимизация связности по строке
- Сопоставление интервалов
- Ограничения единственности и наложений

Connectivity-slant

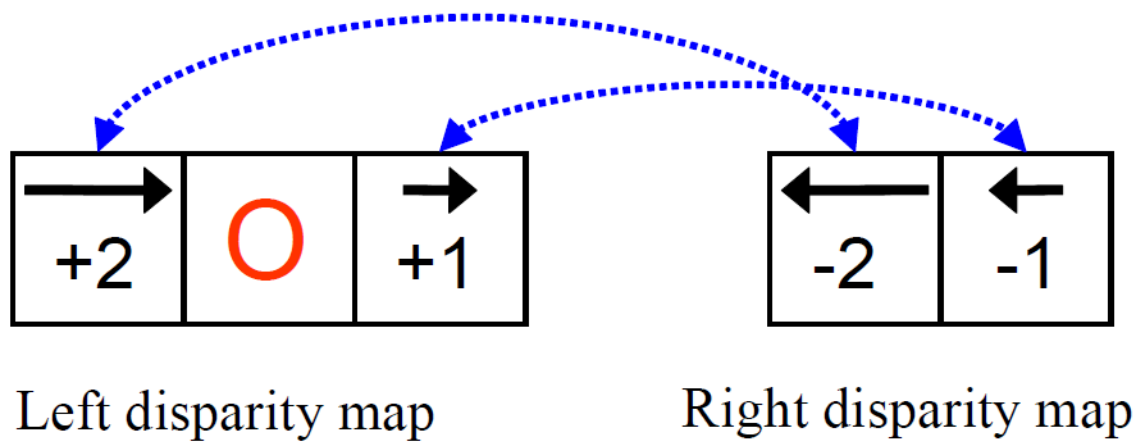
Алгоритм

- Для всех возможных коэффициентов растяжения m_L и смещений Δ_L :
 - Растянуть I_L на m_L . Получить I'_L
 - Найти d_L по Δ_L из уравнения
$$\Delta_L = (m_L - 1) x_L + d_L$$
 - Сопоставить I'_L с $I_{R'}$ используя d_L
 - Найти связанные сегменты и их веса
 - Обновить карту смещений, учитывая ограничения единственности
- Аналогично для коэффициентов m_L и Δ_L

Connectivity-slant

Вертикальный наклон

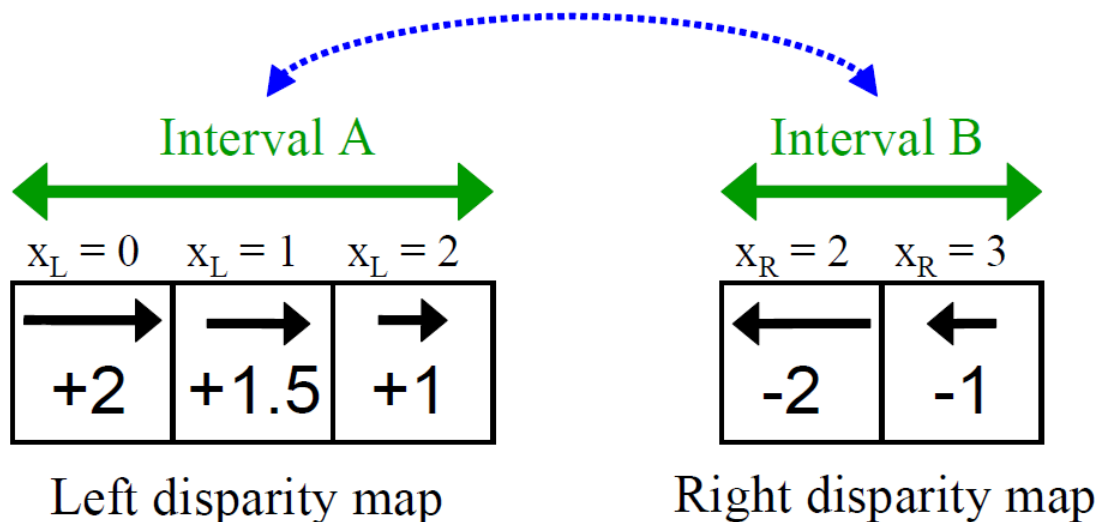
- Изменения по горизонтали
- Есть наложение
- Нет горизонтального наклона



Connectivity-slant

Вертикальный наклон

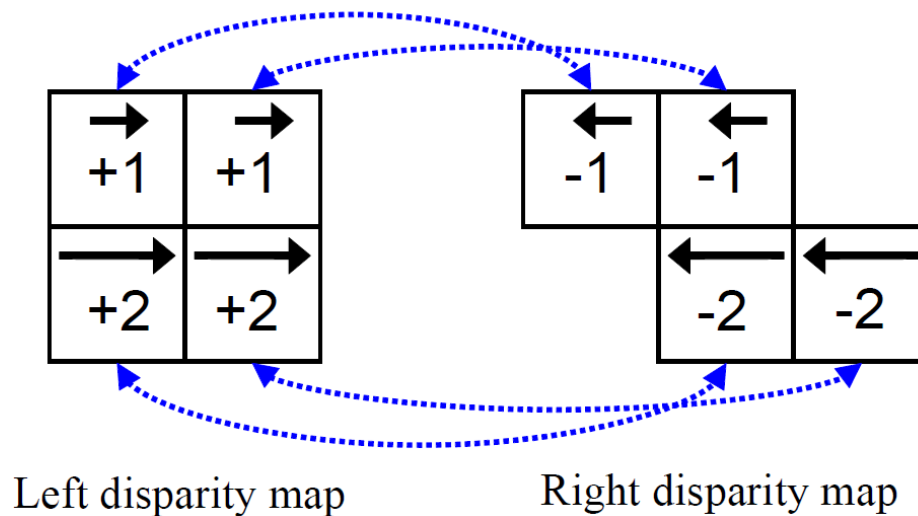
- Изменения по горизонтали
- Нет наложения
- Есть горизонтальный наклон



Connectivity-slant

Вертикальный наклон

- Изменения по вертикали
- Есть вертикальный наклон или разрыв



Connectivity-slant

Вертикальный наклон



- Для надежности можно считать, что горизонтальная граница всегда признак разрыва
- Если нет границы, то разрыв тоже может быть
- Нужно использовать восстановление формы по текстуре, освещению и т. д.

Connectivity-slant

Реализация



- Скрипт для MATLAB
- CPU Celeron 1.8 GHz
- Cones – ~ 5 с

Connectivity-slant

Оригинал



Ogale, Aloimonos. Shape and the stereo correspondence problem. IJCV 2005.

Connectivity-slant

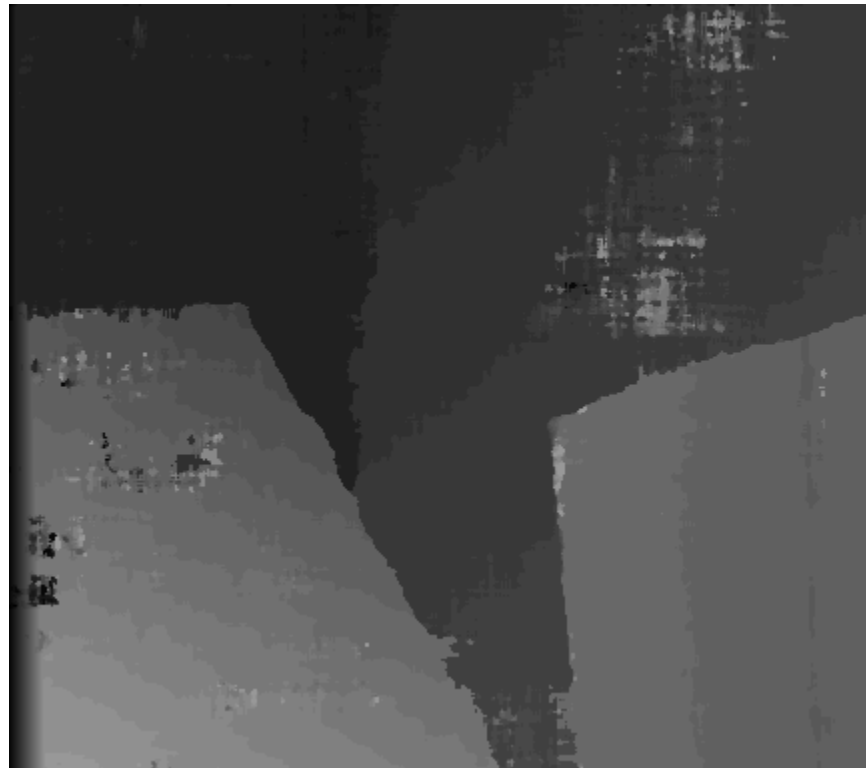
Ground truth



Ogale, Aloimonos. Shape and the stereo correspondence problem. IJCV 2005.

Connectivity-slant

Результат



Ogale, Aloimonos. Shape and the stereo correspondence problem. IJCV 2005.

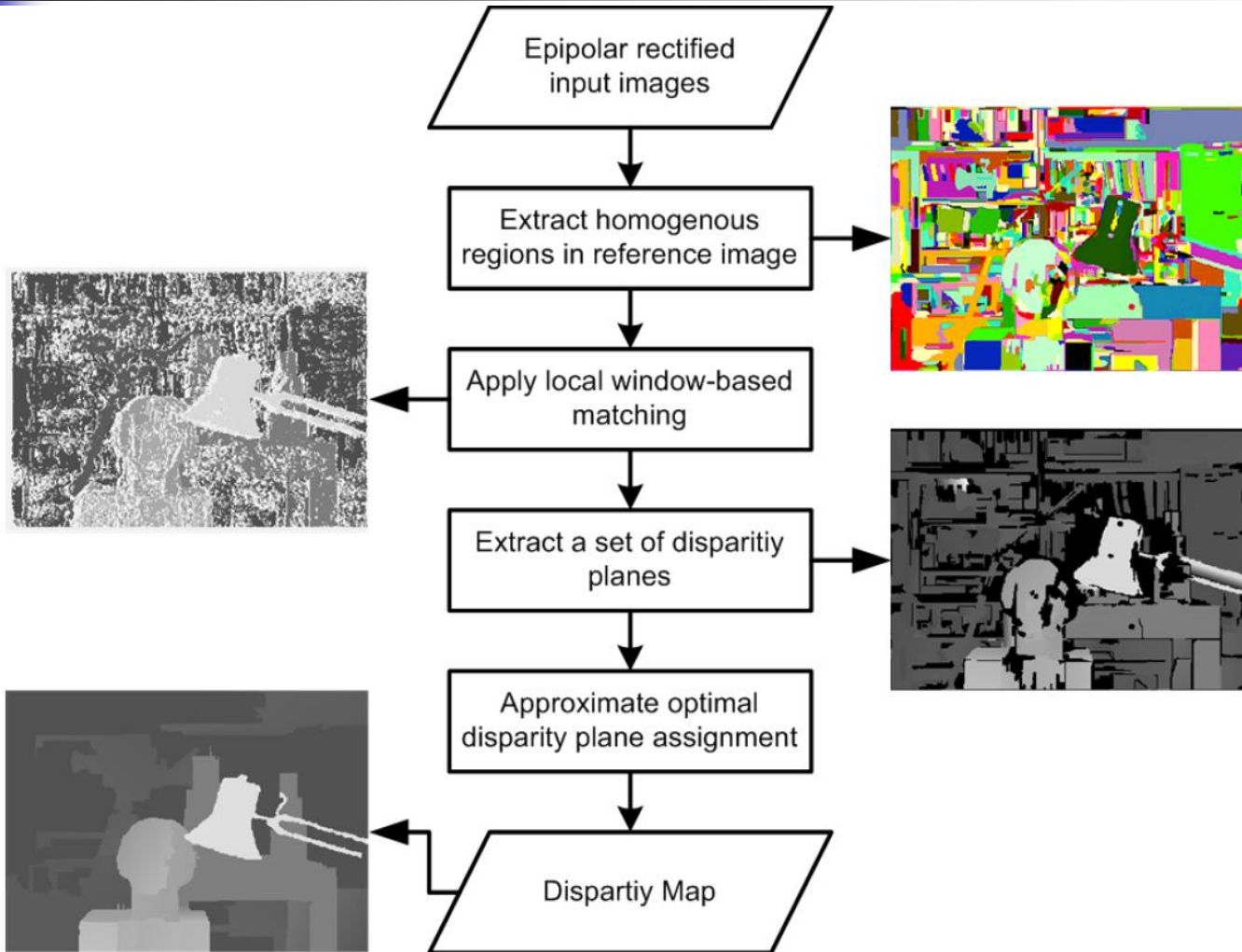


Содержание

- Введение
- Connectivity-slant
- **AdaptingVP**
- Cooperative Optimization
- Сравнение

AdaptingBP

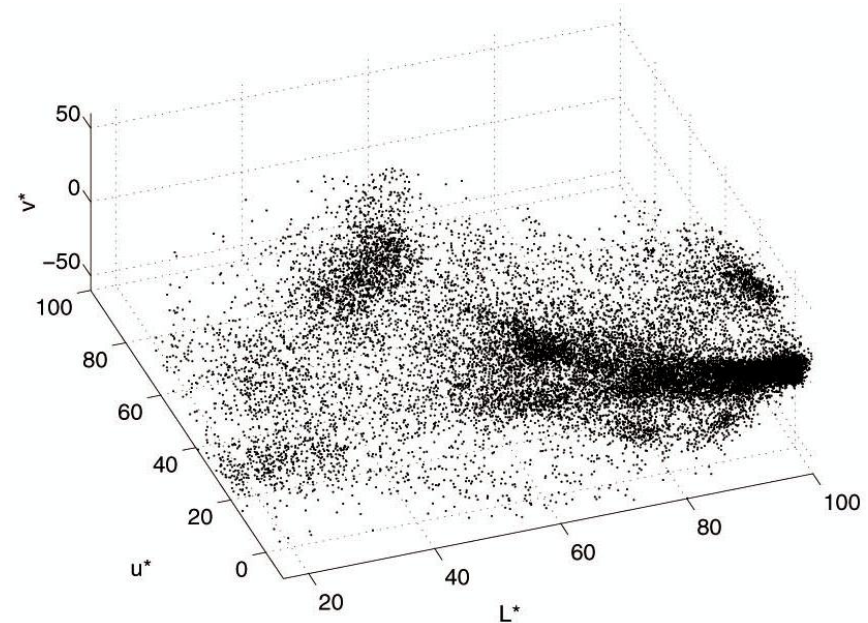
Схема метода



AdaptingBP

Color segmentation

- Mean shift color segmentation
- Излишняя сегментация предпочтительна



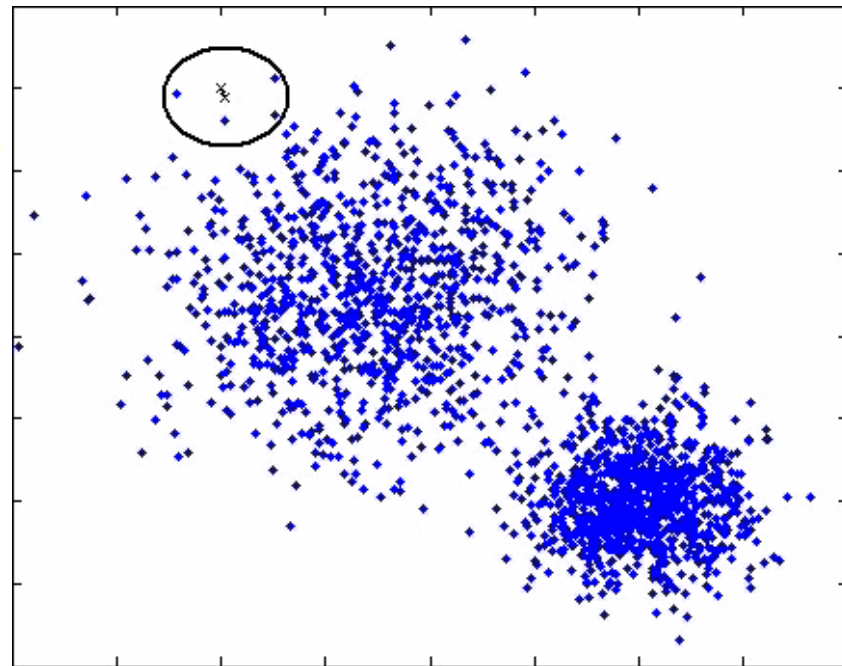
C.Yang et al. Mean-shift analysis using quasi-newton methods. ICIP 2003.

AdaptingBP

Mean Shift

$$\mathbf{m}(\mathbf{x}) = \frac{\sum_{i=1}^n \mathbf{x}_i g\left(\left\|\frac{\mathbf{x}-\mathbf{x}_i}{h}\right\|^2\right)}{\sum_{i=1}^n g\left(\left\|\frac{\mathbf{x}-\mathbf{x}_i}{h}\right\|^2\right)} - \mathbf{x}$$

$$\mathbf{x}^{k+1} = \mathbf{x}^k + \mathbf{m}(\mathbf{x}^k)$$



AdaptingBP

Self-adapting dissimilarity measure

$$C_{SAD}(x, y, d) = \sum_{(i,j) \in N(x,y)} I_1(i, j) - I_2(i + d, j)$$

$$C_{GRAD}(x, y, d) = \sum_{(i,j) \in N_x(x,y)} |\nabla_x I_1(i, j) - \nabla_x I_2(i + d, j)| +$$
$$\sum_{(i,j) \in N_y(x,y)} |\nabla_y I_1(i, j) - \nabla_y I_2(i + d, j)|,$$

- $N(x, y)$ – окно 3×3
- $N_x(x, y)$ – окно без правого столбца
- $N_y(x, y)$ – окно без нижней строки

A. Klaus, M. Sormann and K. Karner. Segment-based stereo matching using belief propagation and a self-adapting dissimilarity measure. ICPR 2006.

AdaptingBP

Self-adapting dissimilarity measure

- Итоговая метрика

$$C(x, y, d) = (1 - \omega) * C_{SAD}(x, y, d) + \omega * C_{GRAD}(x, y, d)$$

- ω определяется максимизацией количества надежных соответствий (проверка left-to-right и right-to-left)
- По надежным соответствиям можно определить уровень шума

Adapting VP

Аппроксимация плоскостями



- Используем только надежные соответствия
- Нужна устойчивость к выбросам
- Оценка проводится последовательно
 - по горизонтальным линиям
 - по вертикальным линиям
 - для всего сегмента

A. Klaus, M. Sormann and K. Karner. Segment-based stereo matching using belief propagation and a self-adapting dissimilarity measure. ICPR 2006.

Adapting VP

Аппроксимация плоскостями



- Оценка горизонтального наклона:
 - Надежные соответствия внутри одного сегмента на одной горизонтальной линии
 - Гистограмма $\delta d/\delta x$
 - Сглаживание гистограммы
 - Выбор максимума («голосование»)
- Оценка вертикального наклона
 - Аналогично
- Используем наклон плоскости для устойчивой оценки смещения сегмента

A. Klaus, M. Sormann and K. Karner. Segment-based stereo matching using belief propagation and a self-adapting dissimilarity measure. ICPR 2006.

AdaptingBP

Уточнение



- Для каждого сегмента и плоскости вычисляем стоимость:

$$C_{SEG}(S, P) = \sum_{(x,y) \in S} C(x, y, d)$$

d – смещение для плоскости P

- Для каждого сегмента выбираем плоскость с наименьшей стоимостью
- Группируем сегменты по плоскостям
- Повторяем оценку плоскостей для полученных групп

A. Klaus, M. Sormann and K. Karner. Segment-based stereo matching using belief propagation and a self-adapting dissimilarity measure. ICPR 2006.

AdaptingBP

Устойчивая оценка плоскостей

- Ищем разметку сегментов $f(s)$

$$E(f) = E_{data}(f) + E_{smooth}(f)$$

$$E_{data}(f) = \sum_{s \in R} C_{SEG}(s, f(s))$$

$$E_{smooth}(f) = \sum_{(\forall (s_i, s_j) \in S_N \mid f(s_i) \neq f(s_j))} \lambda_{disc}(s_i, s_j)$$

- S_N – множество соседних сегментов
 $\lambda_{disc}(s_i, s_j)$ – штраф (длина общей границы и похожесть цветов)
- Loopy Belief Propagation

AdaptingVP

Реализация



- CPU Athlon64 2.21GHz
- 14 – 25 с
- Большая часть – сегментация

A. Klaus, M. Sormann and K. Karner. Segment-based stereo matching using belief propagation and a self-adapting dissimilarity measure. ICPR 2006.

Adapting VP

Оригинал



A. Klaus, M. Sormann and K. Karner. Segment-based stereo matching using belief propagation and a self-adapting dissimilarity measure. ICPR 2006.

AdaptingBP

Ground truth



A. Klaus, M. Sormann and K. Karner. Segment-based stereo matching using belief propagation and a self-adapting dissimilarity measure. ICPR 2006.

AdaptingBP

Результат



A. Klaus, M. Sormann and K. Karner. Segment-based stereo matching using belief propagation and a self-adapting dissimilarity measure. ICPR 2006.

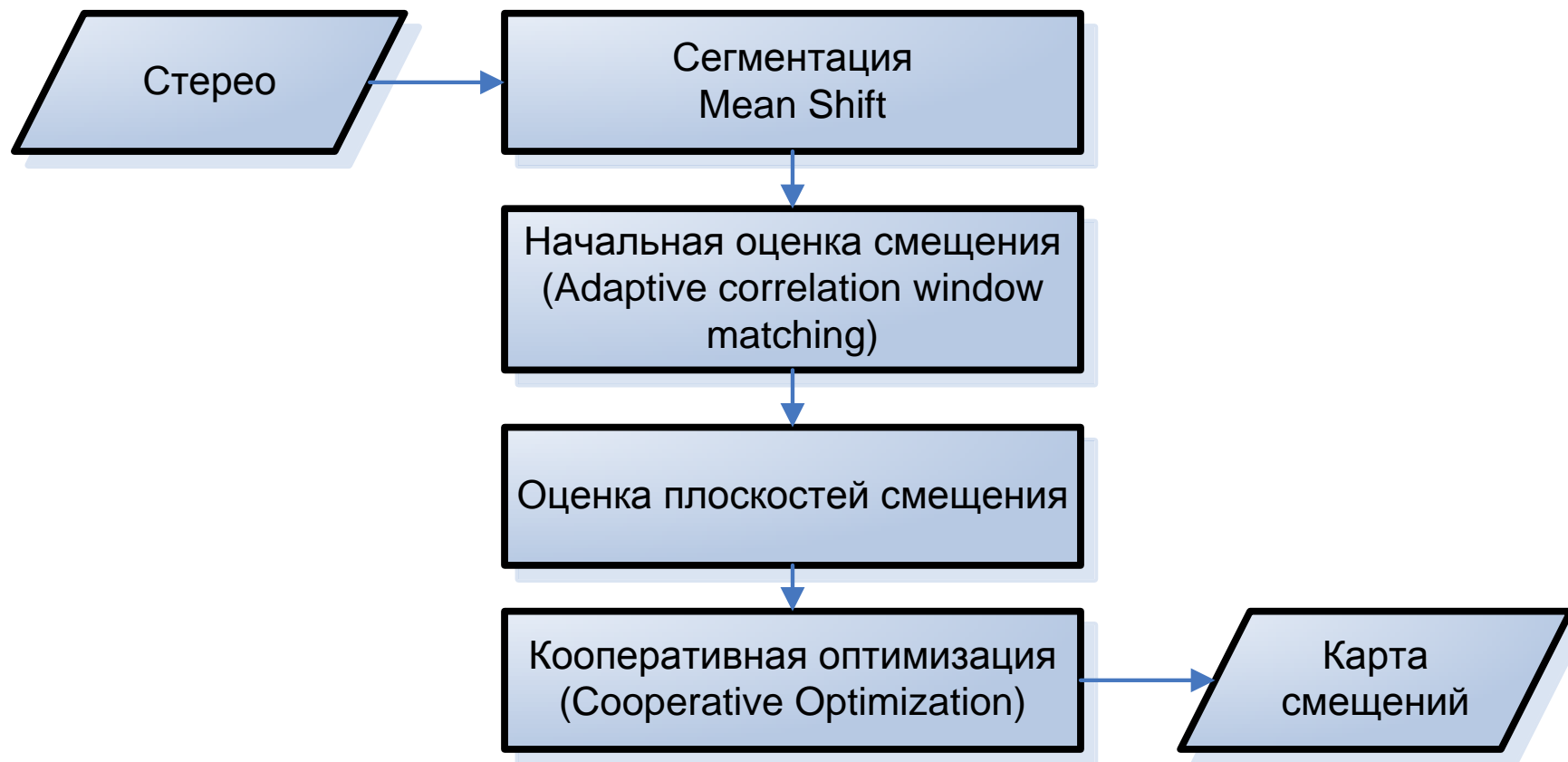


Содержание

- Введение
- Connectivity-slant
- AdaptingVP
- Cooperative Optimization
- Сравнение

Cooperative Optimization

Схема алгоритма



Z. Wang, Z. Zheng. A Region Based Stereo Matching Algorithm Using Cooperative Optimization. CVPR 2008.

Cooperative Optimization

Начальное приближение



- Суммирование функции стоимости в окрестности с весами
- Вес зависит от принадлежности к текущему сегменту
- Для соседних сегментов вес ненулевой

Z. Wang, Z. Zheng. A Region Based Stereo Matching Algorithm Using Cooperative Optimization. CVPR 2008.

Cooperative Optimization

RANSAC



- Повторяем заданное количество раз:
 - Выбираем k случайных элементов из n исходных
 - Строим по ним модель
 - Считаем количество элементов, удовлетворяющих модели (inlier)
- Модель с наибольшим количеством inlier будет результатом

Z. Wang, Z. Zheng. A Region Based Stereo Matching Algorithm Using Cooperative Optimization. CVPR 2008.

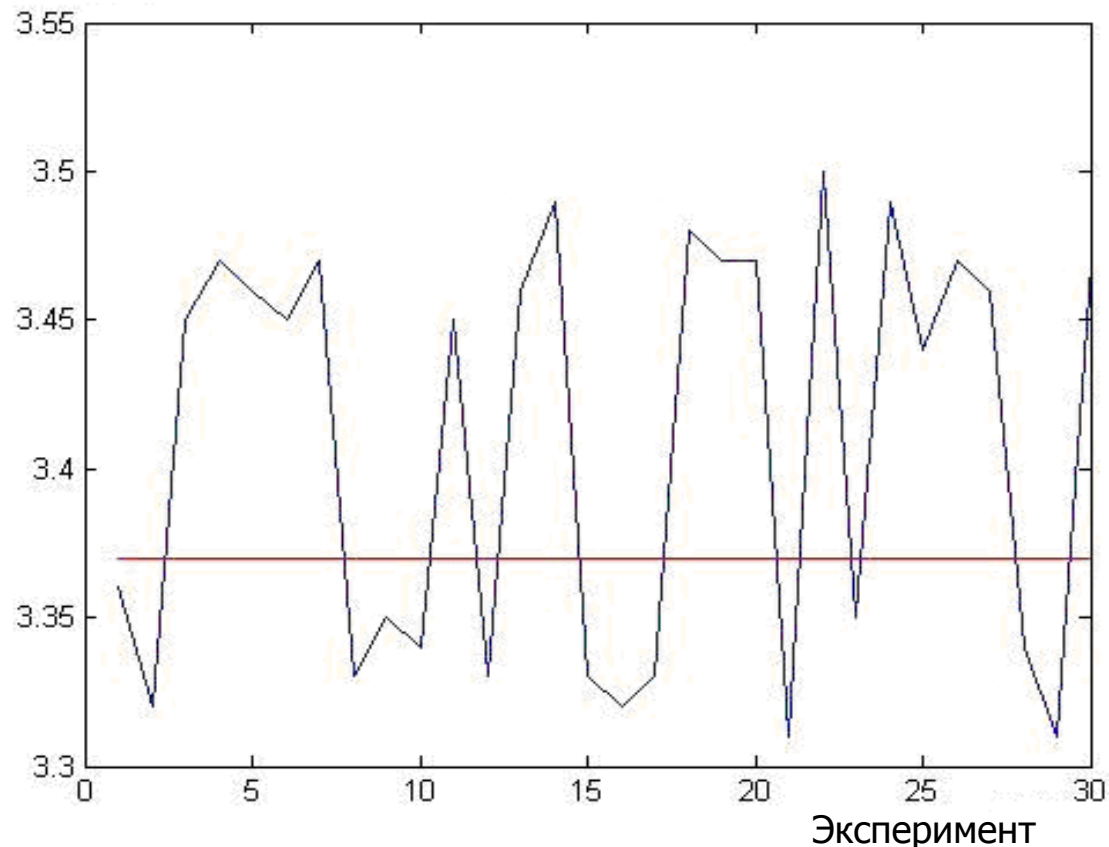
Cooperative Optimization

Устойчивость к выбросам



- Сравнение RANSAC и алгоритма голосования
- Голосование более устойчиво

Количество ошибок



Z. Wang, Z. Zheng. A Region Based Stereo Matching Algorithm Using Cooperative Optimization. CVPR 2008.

Cooperative Optimization



Идея

- Разбиваем задачу на подзадачи
- Оптимизируем отдельно
- Поддерживаем постоянными общие параметры
- Повторяем до сходимости

Z. Wang, Z. Zheng. A Region Based Stereo Matching Algorithm Using Cooperative Optimization. CVPR 2008.

Cooperative Optimization

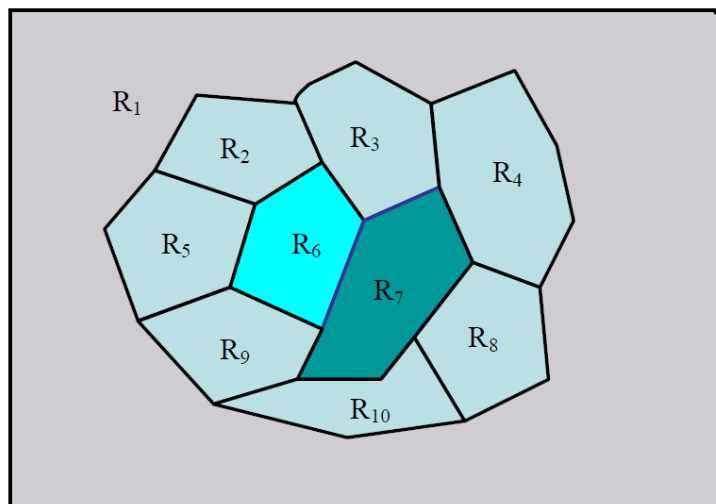


Представляем энергию в виде суммы по сегментам:

$$E(x) = E_1(x) + E_2(x) + \dots + E_n(x)$$

Оптимизация ддл каждого сегмента

$$E'_i(x) = \min_x ((1 - \lambda_i) \cdot E_i(x) + \lambda_i \sum_{j \neq i} w_{ij} E_j(x))$$



Z. Wang, Z. Zheng. A Region Based Stereo Matching Algorithm Using Cooperative Optimization. CVPR 2008.

Cooperative Optimization

Функционал энергии



$$E_i = E_{data} + E_{occlude} + E_{smooth}$$

$$E_{data} = \max_{p \in V_l \text{ and } q \in V_r} (|r(p) - r(q)|, |g(p) - g(q)|, |b(p) - b(q)|)$$

V_l и V_r – множества видимых пикселей

q и p – сопоставленные пиксели

Если смещение не целочисленное, интерполируем

Cooperative Optimization

Наложения



$$E_i = E_{data} + E_{occlude} + E_{smooth}$$

$$E_{occlude} = |Occ| \lambda_{occ}$$

λ_{occ} – штраф за наложение

$|Occ|$ – количество пикселей с наложением

Cooperative Optimization

Гладкость



$$E_i = E_{data} + E_{occlude} + E_{smooth}$$

$$E_{smooth} = \sum_{p \in B_c} \begin{cases} \lambda_s & \text{if } |d(p) - d(q)| \geq 1 \\ 0 & \text{Otherwise} \end{cases}$$

B_c – множество пикселей границы $p \in B_c$

q – соседний пиксель с

$d(p)$ и $d(q)$ – смещение p и q

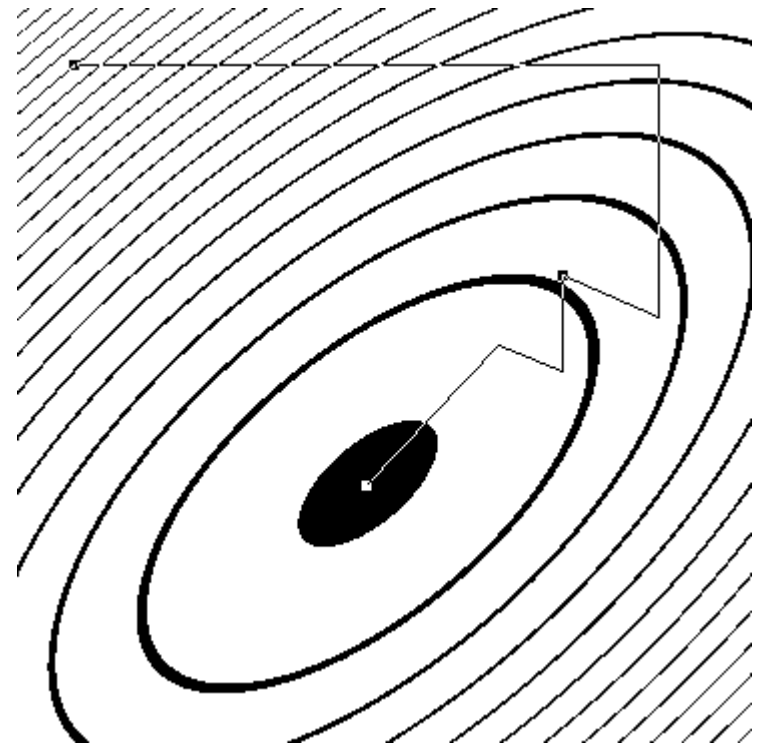
λ_s – константа-штраф

Cooperative Optimization

Функционал энергии



- На каждой итерации находим локальный минимум
- Метод Пауэлла



Z. Wang, Z. Zheng. A Region Based Stereo Matching Algorithm Using Cooperative Optimization. CVPR 2008.

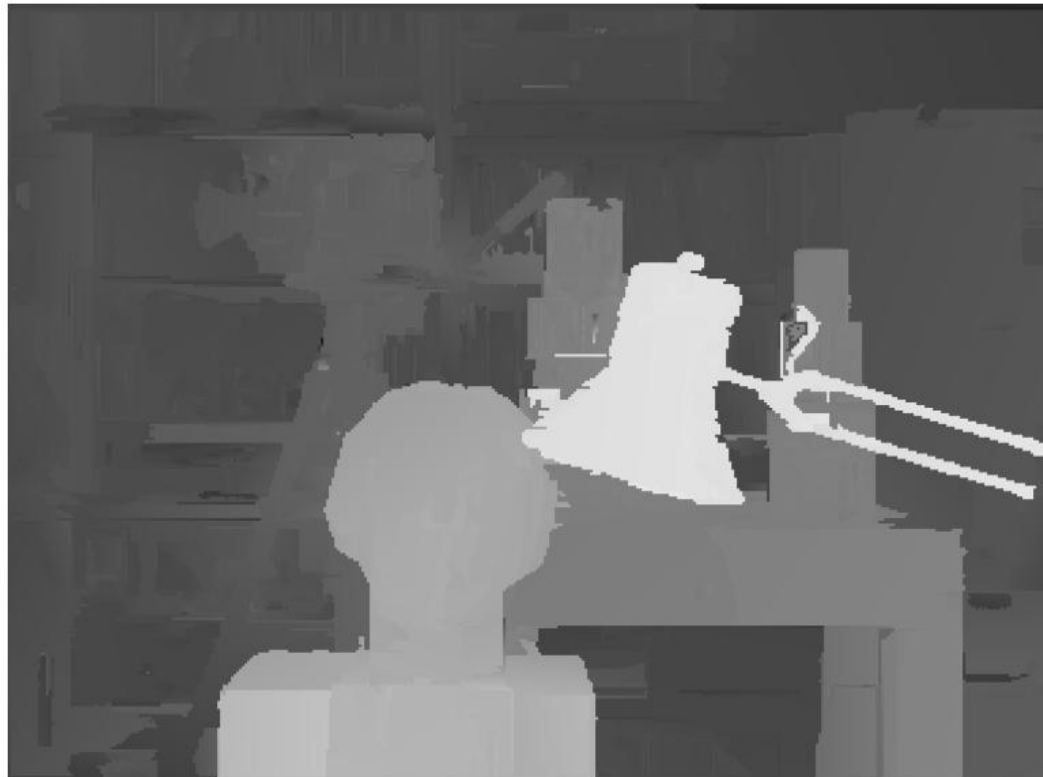
Cooperative Optimization

Оригинал



Cooperative Optimization

1-я итерация: $e=516622.0$



Cooperative Optimization

4-я итерация: $e=467576.0$



Cooperative Optimization

Ground Truth



Cooperative Optimization

Реализация



- VC8.0
- CPU PM1.6G
- Tsukuba – ~20 с
- 4 итерации
- Сегментация – 8 с

Z. Wang, Z. Zheng. A Region Based Stereo Matching Algorithm Using Cooperative Optimization. CVPR 2008.



Содержание

- Введение
- Connectivity-slant
- AdaptingBP
- Cooperative Optimization
- Сравнение

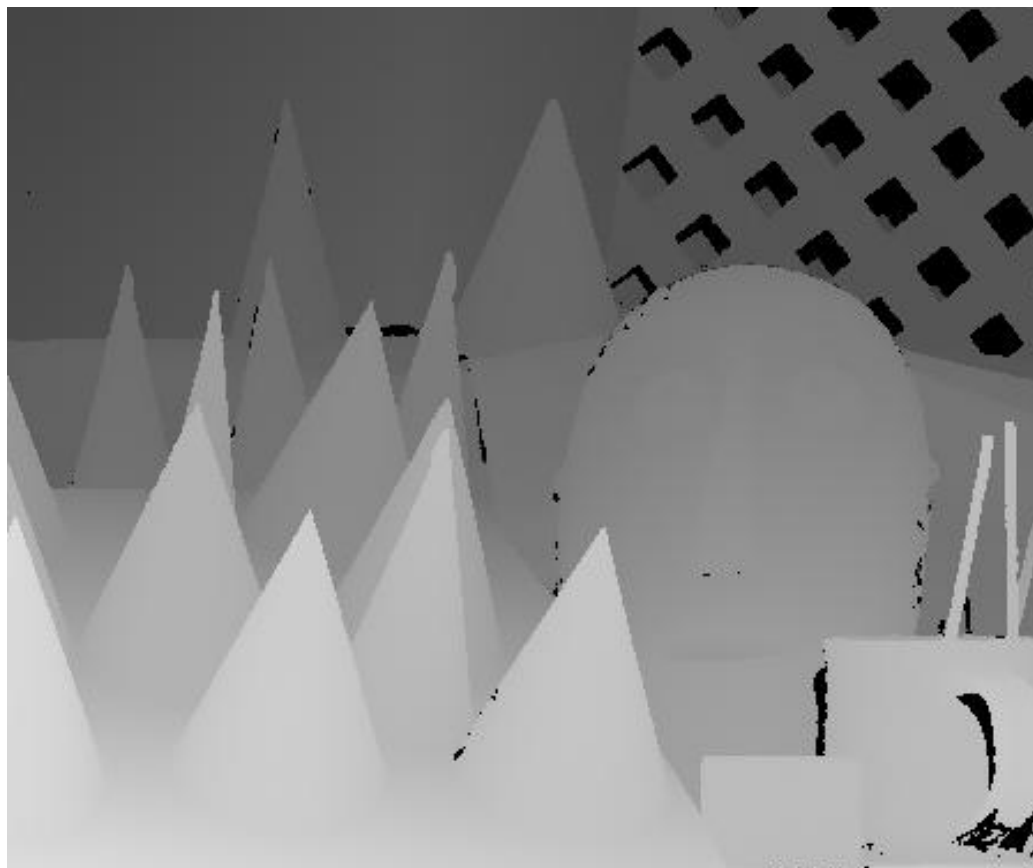
Сравнение

Оригинал



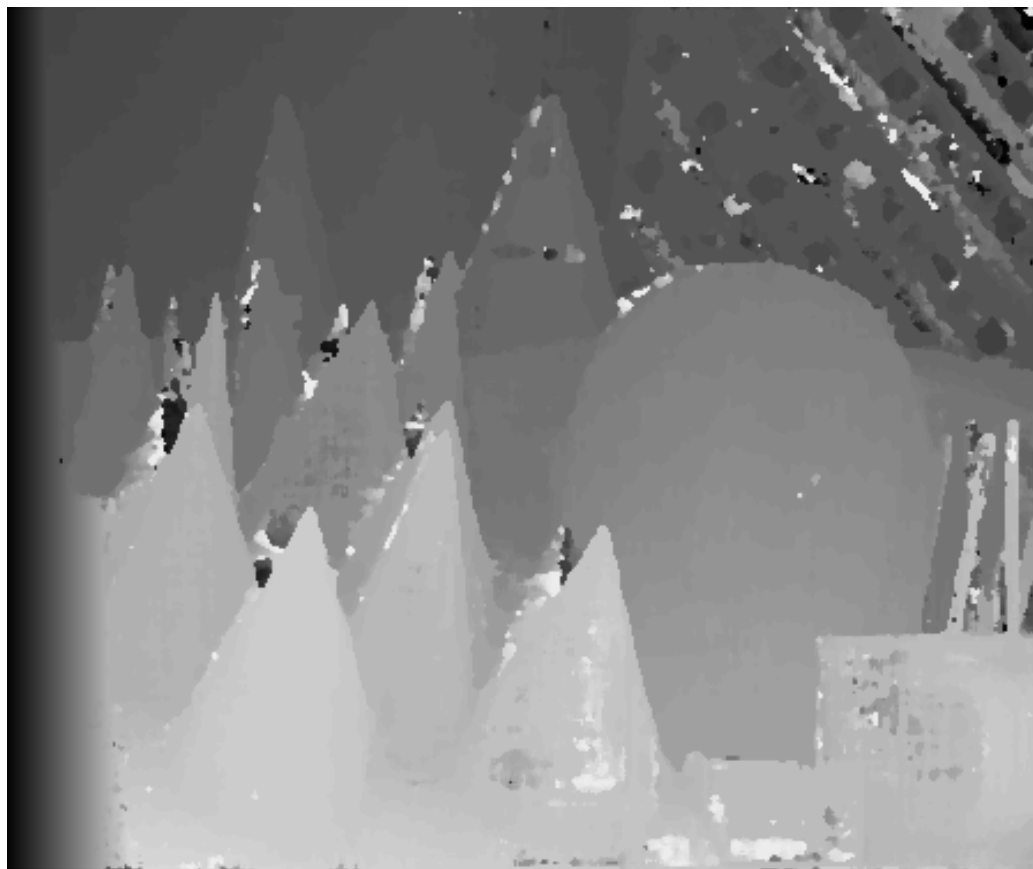
Сравнение

Ground truth



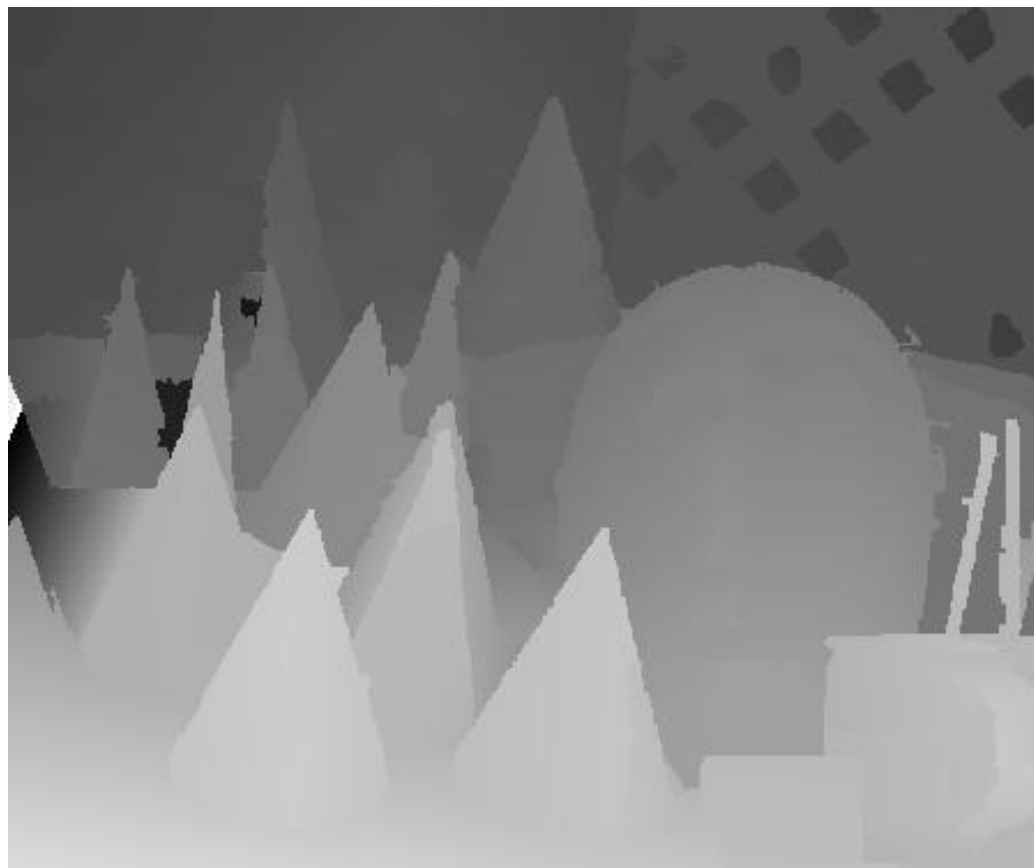
Сравнение

Connectivity-slant



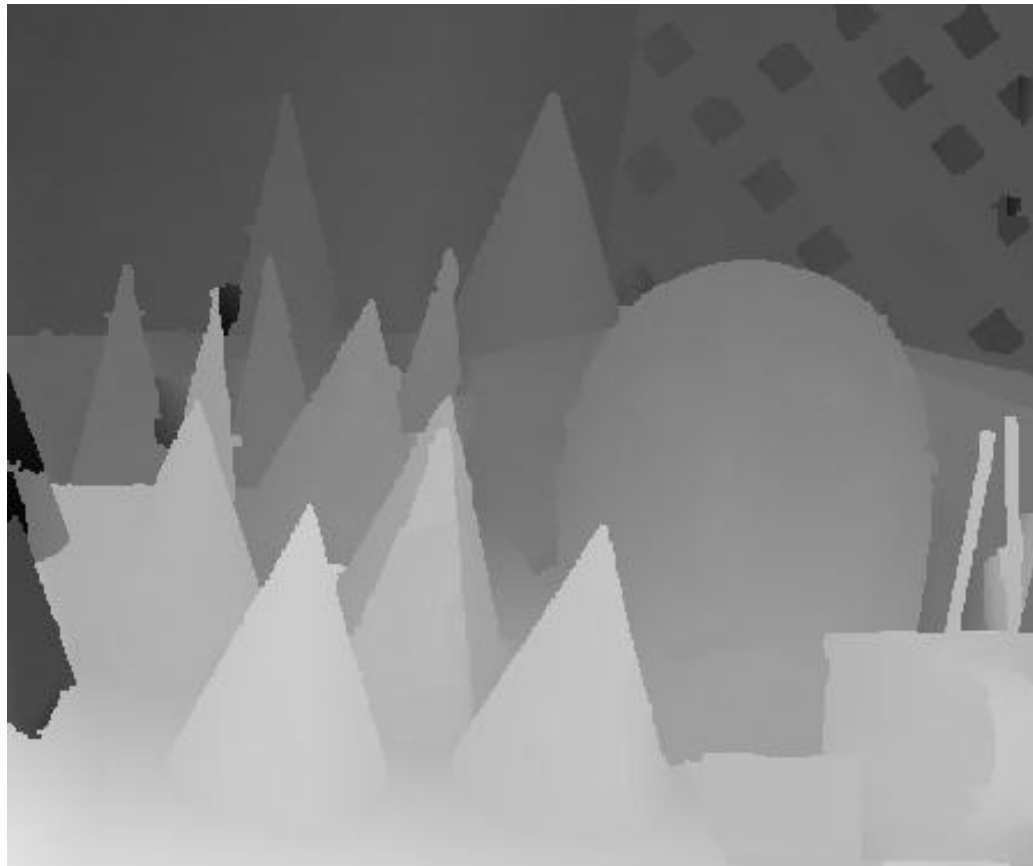
Сравнение

Adapting VP



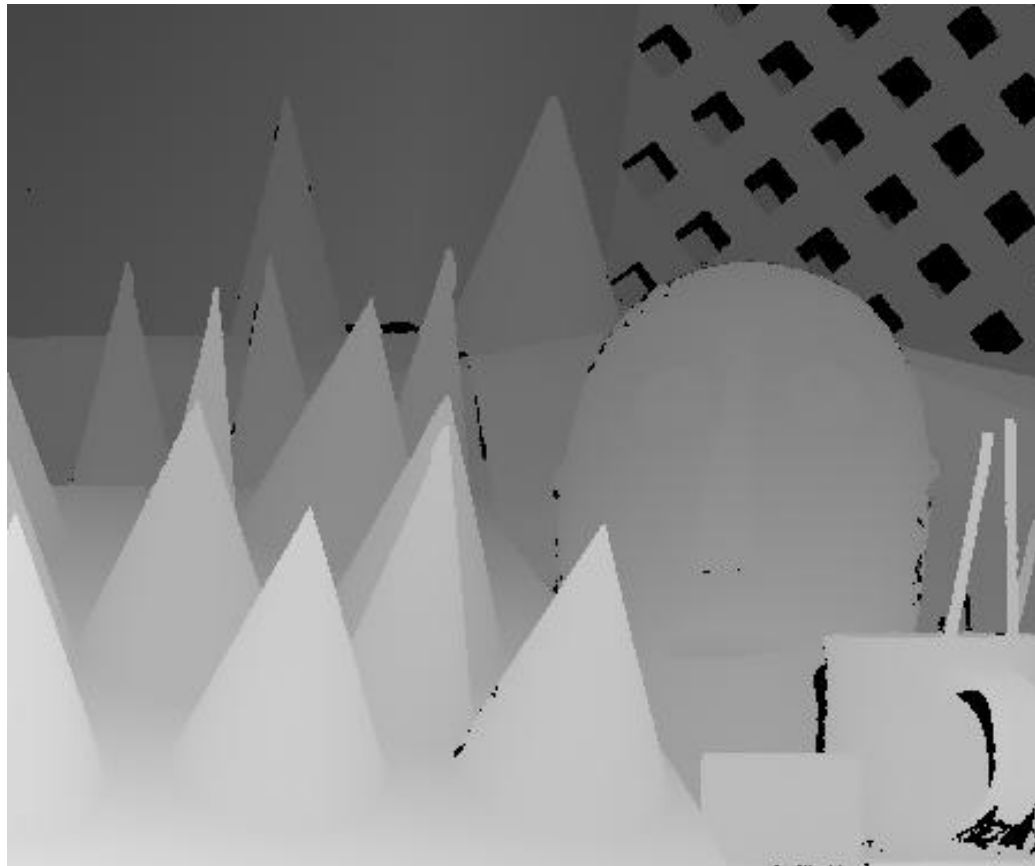
Сравнение

CoopRegion



Сравнение

Ground truth



Сравнение

Алгоритм	Ошибка					Время работы
	Tsukuba	Venus	Teddy	Cones	Среднее	
AdaptingBP	1.11	0.10	4.22	2.48	4.23	14–25 с (осн. – сегментация)
CoopRegion	0.87	0.11	5.16	2.79	4.41	20 с (8 с – сегментация)
DoubleBP	0.88	0.13	3.53	2.90	4.19	
GC+occ	1.19	1.64	11.2	5.36	8.26	
Connectivity-slant	1.77	3.00	-	-	-	5 с

Список литературы

- Z. Wang, Z. Zheng. A Region Based Stereo Matching Algorithm Using Cooperative Optimization. CVPR 2008.
- A. S. Ogale, Y. Aloimonos. Shape and the stereo correspondence problem. International Journal of Computer Vision, vol. 65, no. 3, 147-162, 2005.
- D. Scharstein and R. Szeliski. A taxonomy and evaluation of dense two-frame stereo correspondence algorithms. International Journal of Computer Vision, 2002.
- A. Klaus, M. Sormann and K. Karner. Segment-based stereo matching using belief propagation and a self-adapting dissimilarity measure. ICPR 2006.
- C. Yang et al. Mean-shift analysis using quasi-newton methods. ICIP 2003.
- Scharstein and Szeliski. Middlebury Stereo Evaluation. <http://vision.middlebury.edu/stereo/eval/>



Вопросы

?