

Обзор методов поиска и сопровождения особых точек

Моисейцев Алексей

*Video Group
CS MSU Graphics & Media Lab*



Содержание

- **Введение**
- KLT
- IPAN
- Particle Video



Введение

- **Задача:**
 - Сопоставить каждому трехмерному объекту сцены набор точек, неподвижных относительно объекта, и отслеживать траектории этих точек.
- **Применение:**
 - Определение траекторий движения отдельных объектов
 - Восстановление движения камеры
 - Выделение информации о перспективе в сцене

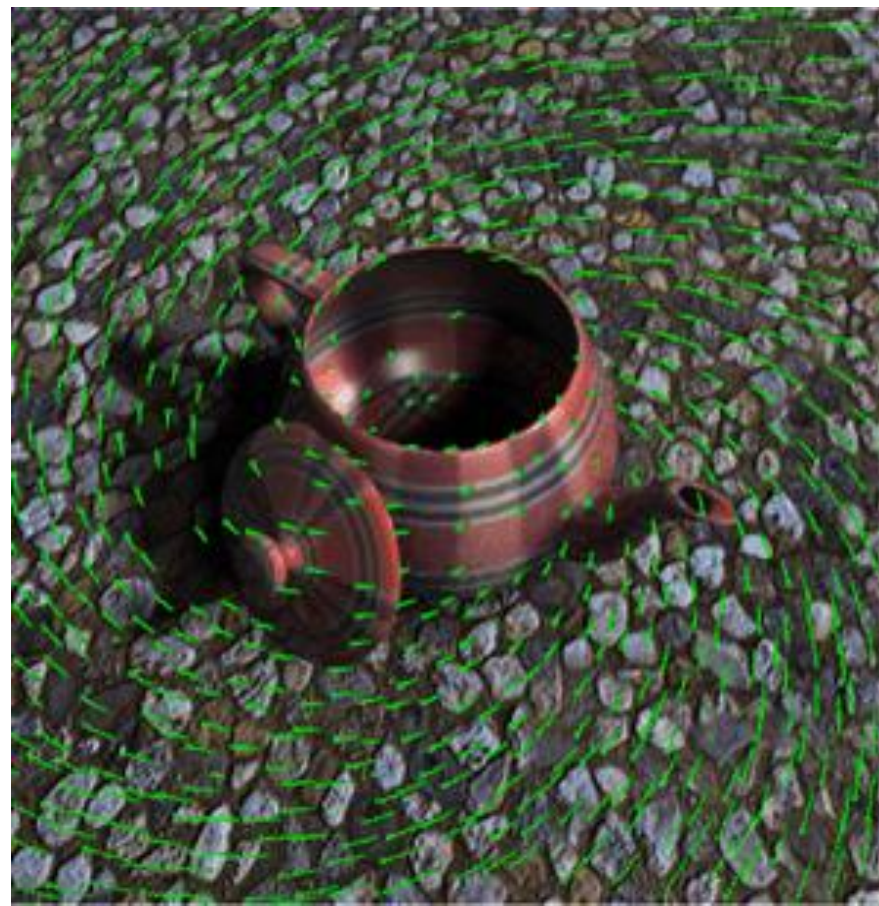


Введение

- **Точечная особенность** – точка сцены, окрестность которой можно отличить от всех окрестностей соседних точек сцены.
- **Траектория** – последовательность координат точечной особенности в видео.



Введение





Введение





Содержание

- Введение
- **KLT**
- IPAN
- Particle Video

KLT (Kanade-Lucas-Tomasi)

Модель движения

$$I(x, y, t + \tau) = I(x - \xi(x, y, t, \tau), y - \eta(x, y, t, \tau))$$

$$\delta = (\xi, \eta) \quad - \text{вектор смещения}$$

Аффинная модель движения:

$$\delta = D\mathbf{x} + \mathbf{d}$$

$$A = \mathbf{1} + D$$

$$D = \begin{bmatrix} d_{xx} & d_{xy} \\ d_{yx} & d_{yy} \end{bmatrix}$$

$$J(A\mathbf{x} + \mathbf{d}) = I(\mathbf{x})$$

KLT

Нахождение параметров движения

Минимизация функции

$$\epsilon = \int \int_W [J(A\mathbf{x} + \mathbf{d}) - I(\mathbf{x})]^2 w(\mathbf{x}) d\mathbf{x}$$

W – окно

$w(x)$ – весовая функция

I – предыдущий кадр

J – следующий кадр

KLT

Линейная модель

Симметричная запись:

$$\epsilon = \int \int_W [J(\mathbf{x} + \frac{\mathbf{d}}{2}) - I(\mathbf{x} - \frac{\mathbf{d}}{2})]^2 w(\mathbf{x}) d\mathbf{x}$$

Линеаризация:

$$J(\xi) \approx J(\mathbf{a}) + (\xi_x - a_x) \frac{\partial J}{\partial x}(\mathbf{a}) + (\xi_y - a_y) \frac{\partial J}{\partial y}(\mathbf{a})$$

Условие $\mathbf{x} + \frac{\mathbf{d}}{2} = \xi, \quad \mathbf{x} = \mathbf{a}$

$$J(\mathbf{x} + \frac{\mathbf{d}}{2}) \approx J(\mathbf{x}) + \frac{d_x}{2} \frac{\partial J}{\partial x}(\mathbf{x}) + \frac{d_y}{2} \frac{\partial J}{\partial y}(\mathbf{x})$$

$$I(\mathbf{x} - \frac{\mathbf{d}}{2}) \approx I(\mathbf{x}) - \frac{d_x}{2} \frac{\partial I}{\partial x}(\mathbf{x}) - \frac{d_y}{2} \frac{\partial I}{\partial y}(\mathbf{x})$$

KLT

Линейная модель

Производная ошибки:

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial \mathbf{d}} = 2 \int \int_W [J(\mathbf{x} + \frac{\mathbf{d}}{2}) - I(\mathbf{x} - \frac{\mathbf{d}}{2})] \left[\frac{\partial J(\mathbf{x} + \frac{\mathbf{d}}{2})}{\partial \mathbf{d}} - \frac{\partial I(\mathbf{x} - \frac{\mathbf{d}}{2})}{\partial \mathbf{d}} \right] w(\mathbf{x}) d\mathbf{x}$$

$$\approx \int \int_W [J(\mathbf{x}) - I(\mathbf{x}) + \mathbf{g}^T \mathbf{d}] \mathbf{g}(\mathbf{x}) w(\mathbf{x}) d\mathbf{x},$$

$$\mathbf{g} = \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{I+J}{2} \right) \quad \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{I+J}{2} \right) \right]^T$$

Условие минимума:

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial \mathbf{d}} = \int \int_W [J(\mathbf{x}) - I(\mathbf{x}) + \mathbf{g}^T(\mathbf{x}) \mathbf{d}] \mathbf{g}(\mathbf{x}) w(\mathbf{x}) d\mathbf{x} = 0$$

KLT

Линейная модель

Окончательный вид уравнения:

$$\begin{aligned} \int \int_W [J(\mathbf{x}) - I(\mathbf{x})] \mathbf{g}(\mathbf{x}) w(\mathbf{x}) d\mathbf{x} &= - \int \int_W \mathbf{g}^T(\mathbf{x}) d\mathbf{g}(\mathbf{x}) w(\mathbf{x}) d\mathbf{x}, \\ &= - \left[\int \int_W \mathbf{g}(\mathbf{x}) \mathbf{g}^T(\mathbf{x}) w(\mathbf{x}) d\mathbf{x} \right] \mathbf{d} \end{aligned}$$

Запись в виде СЛАУ:

$$Z\mathbf{d} = \mathbf{e}$$

$$Z = \int \int_W \mathbf{g}(\mathbf{x}) \mathbf{g}^T(\mathbf{x}) w(\mathbf{x}) d\mathbf{x}$$

$$\mathbf{e} = \int \int_W [I(\mathbf{x}) - J(\mathbf{x})] \mathbf{g}(\mathbf{x}) w(\mathbf{x}) d\mathbf{x}$$

KLT

Нахождение параметров движения

Решение СЛАУ:

$$Tz = a$$

$$z^T = [d_{xx} \quad d_{yx} \quad d_{xy} \quad d_{yy} \quad d_x \quad d_y] \quad - \text{искомое решение}$$

$$a = \int \int_W [I(\mathbf{x}) - J(\mathbf{x})] \begin{bmatrix} xg_x \\ xg_y \\ yg_x \\ yg_y \\ g_x \\ g_y \end{bmatrix} w d\mathbf{x}$$

KLT

Нахождение параметров движения

$$T = \int \int_W \begin{bmatrix} U & V \\ V^T & Z \end{bmatrix} w d\mathbf{x}$$

$$U = \begin{bmatrix} x^2 g_x^2 & x^2 g_x g_y & x y g_x^2 & x y g_x g_y \\ x^2 g_x g_y & x^2 g_y^2 & x y g_x g_y & x y g_y^2 \\ x y g_x^2 & x y g_x g_y & y^2 g_x^2 & y^2 g_x g_y \\ x y g_x g_y & x y g_y^2 & y^2 g_x g_y & y^2 g_y^2 \end{bmatrix}$$

$$V^T = \begin{bmatrix} x g_x^2 & x g_x g_y & y g_x^2 & y g_x g_y \\ x g_x g_y & x g_y^2 & y g_x g_y & y g_y^2 \end{bmatrix} \quad Z = \begin{bmatrix} g_x^2 & g_x g_y \\ g_x g_y & g_y^2 \end{bmatrix}$$

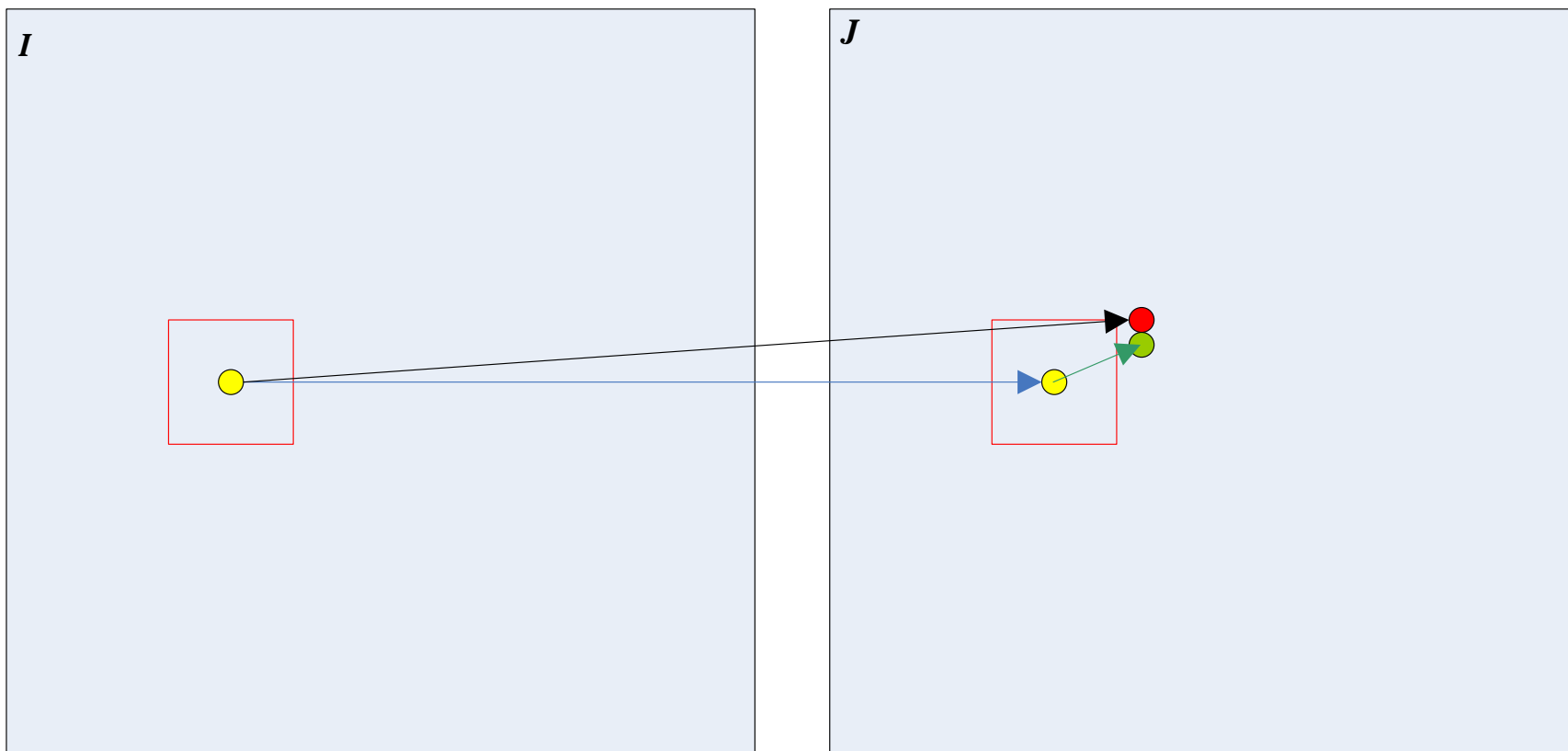
KLT

Нахождение параметров движения

- Уравнение $T\mathbf{z} = a$ дает лишь приближенную оценку на величину смещения \mathbf{d}
- Решение: Необходимо делать несколько итераций!

KLT

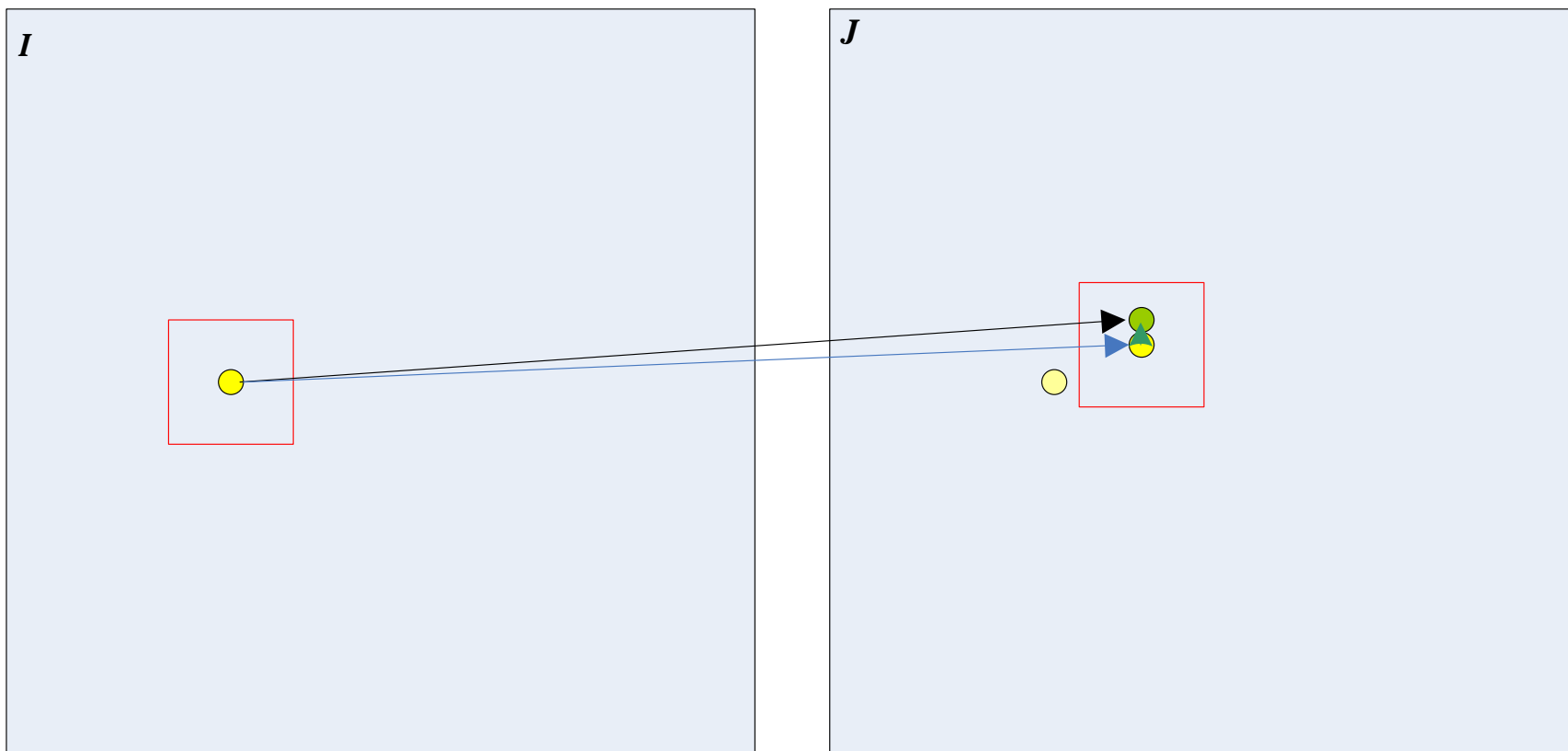
Итеративное решение



итерация 1

KLT

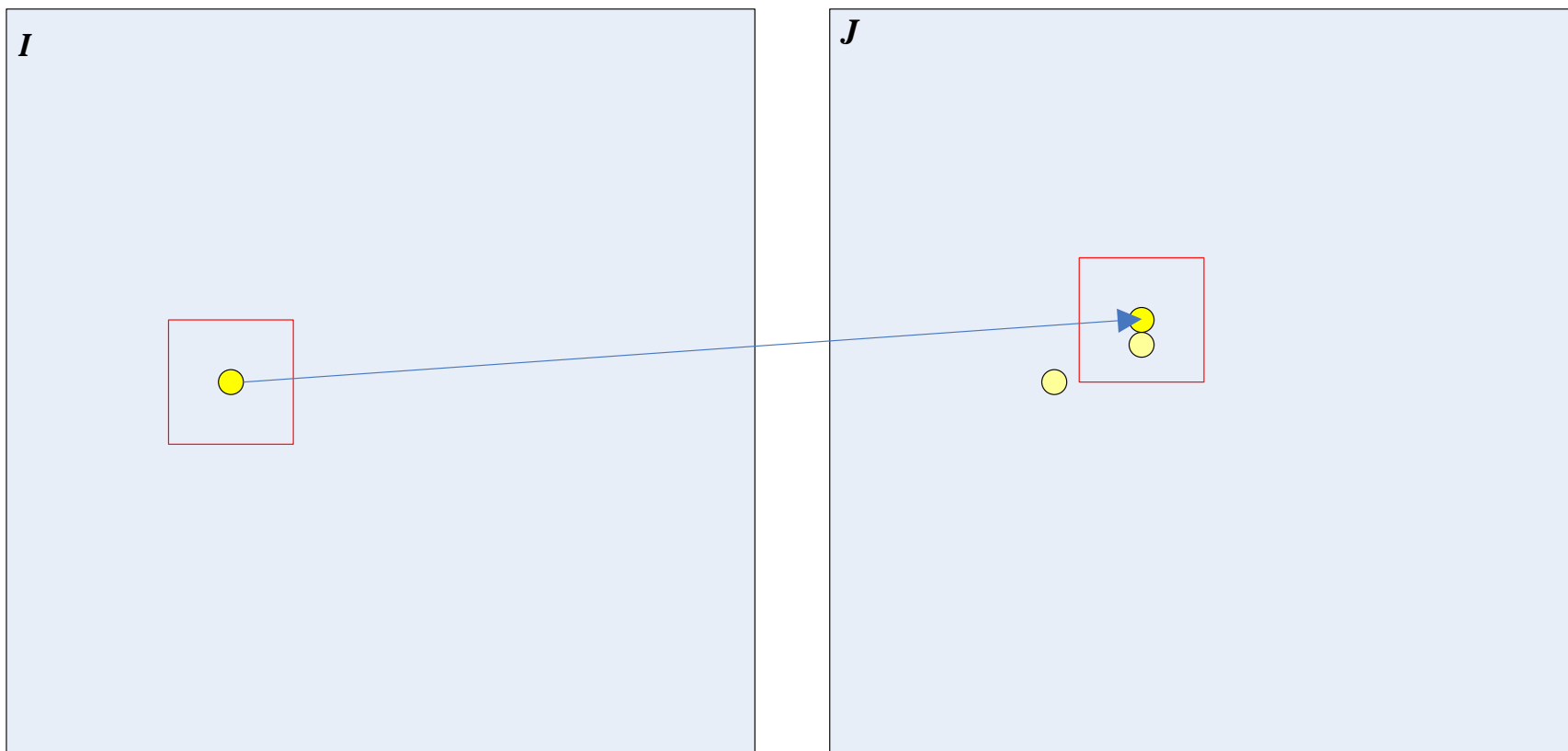
Итеративное решение



итерация 2

KLT

Итеративное решение

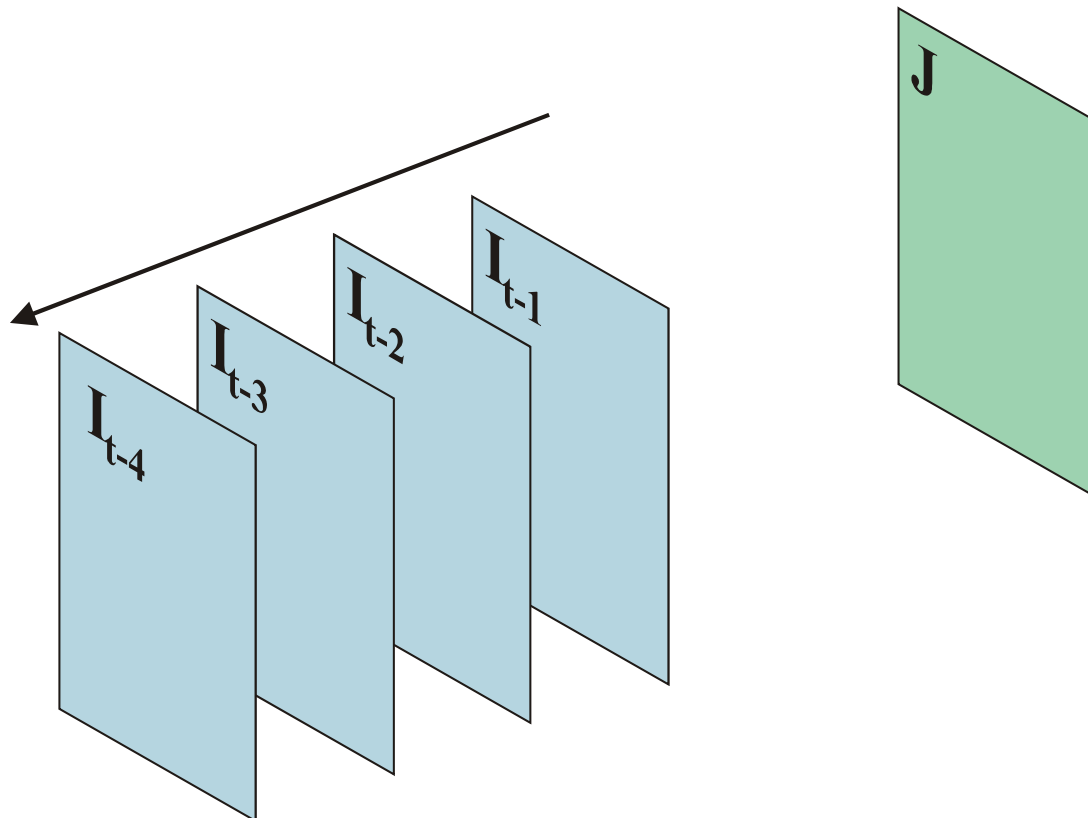


итерация 3

KLT

Итеративное решение

- Ошибки в D приводят к ошибкам в оценке величины смещения d
- Можно искать корни уравнения $Zd = e$
- Аффинные преобразования можно заменить историей областей



KLT

Выбор особенностей

- Выбор текстурированных областей или областей с уголками не гарантирует возможность их отслеживания
- Для решения уравнения $Zd = e$ желательно иметь хорошо обусловленную матрицу Z

$$Z = \begin{bmatrix} g_x^2 & g_x g_y \\ g_x g_y & g_y^2 \end{bmatrix}$$

KLT

Выбор особенностей

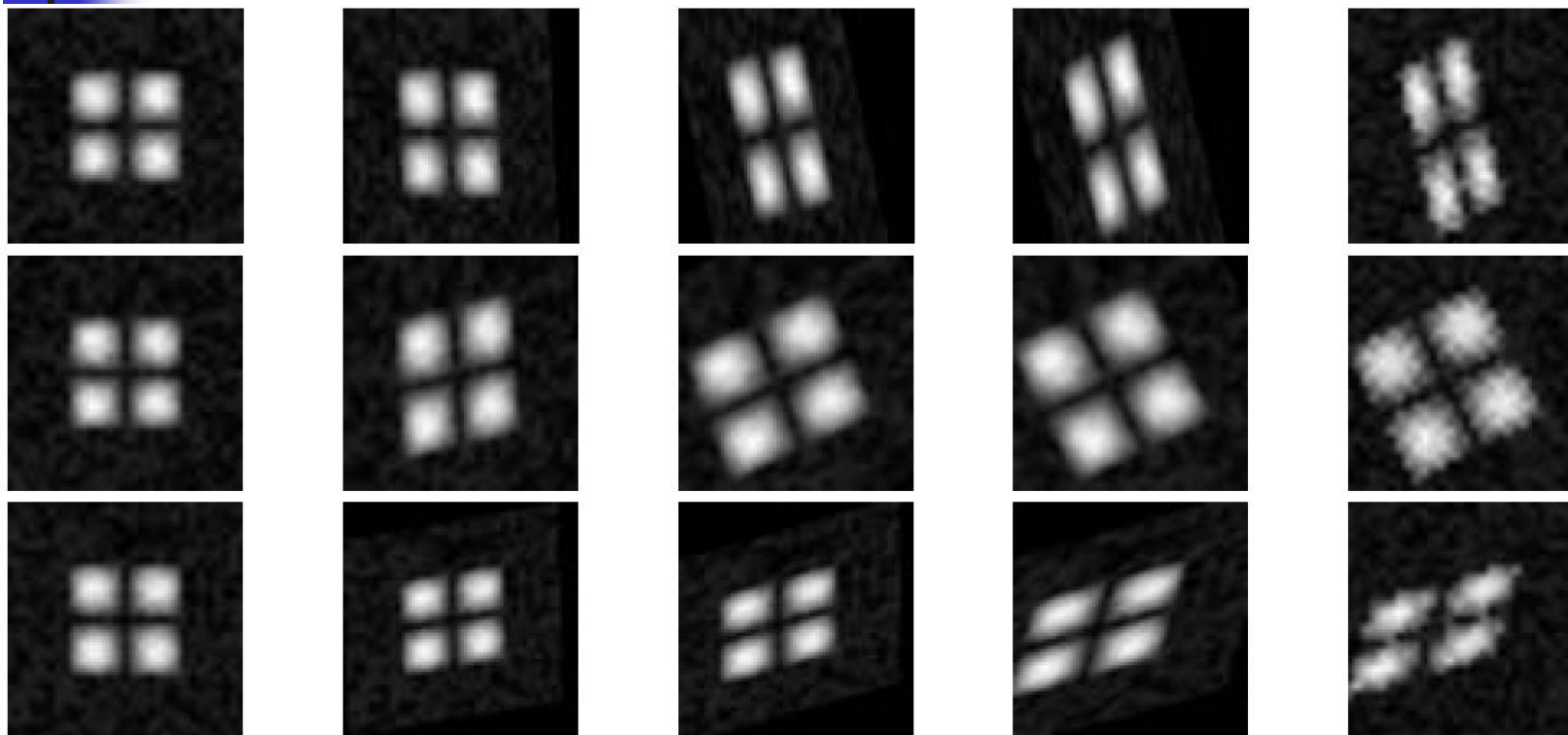
- λ_1, λ_2 – собственные значения Z

$$Z = \begin{bmatrix} g_x^2 & g_x g_y \\ g_x g_y & g_y^2 \end{bmatrix}$$

- $\lambda_1, \lambda_2 < \lambda_{th}$ – гладкие области
- $\lambda_1 < \lambda_{th} < \lambda_2$ – границы
- $\lambda_{th} < \lambda_1, \lambda_2$ – углы

KLT

Пример работы



оригинальное
изображение

4-я итерация

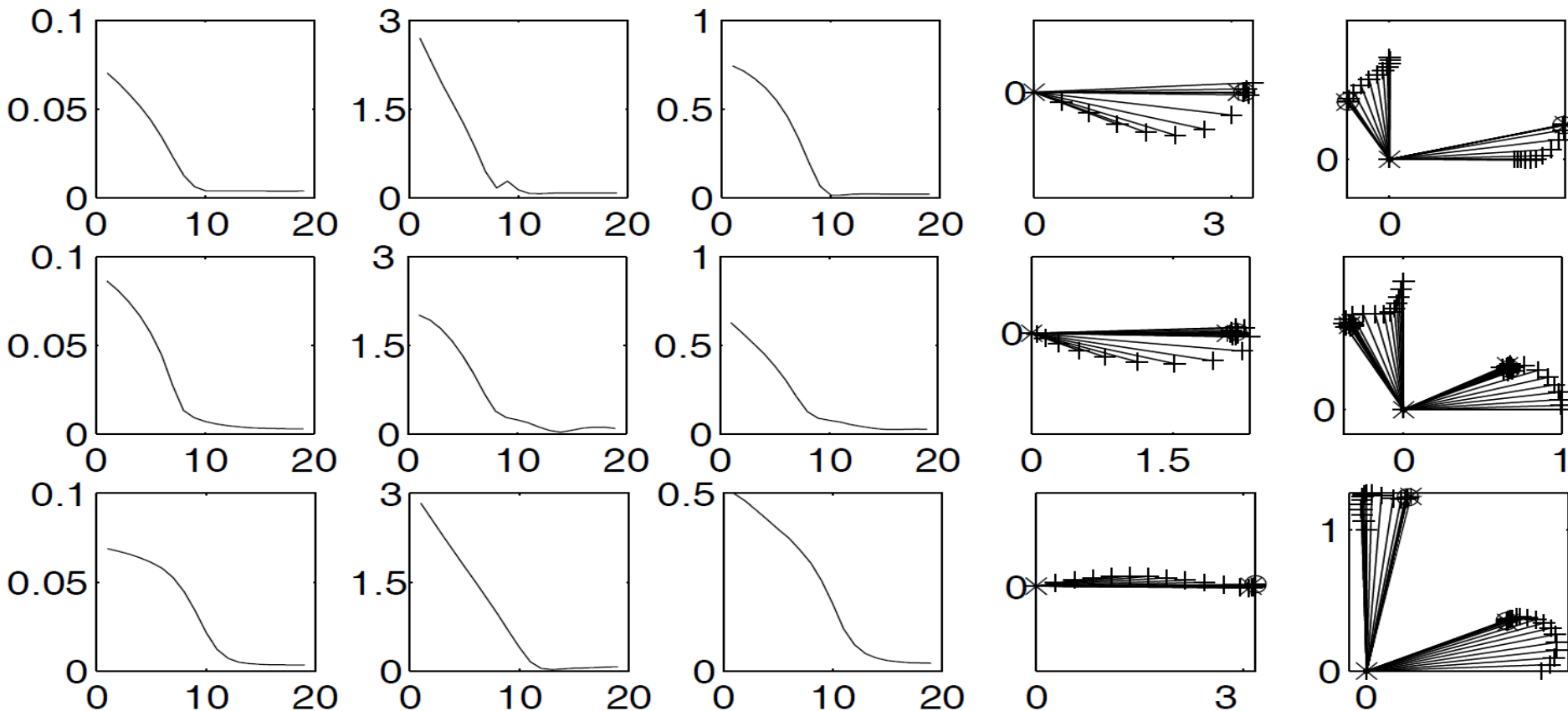
8-я итерация

19-я итерация

целевое
изображение

KLT

Пример работы



различие

d_{error} ,
ошибка
смещения

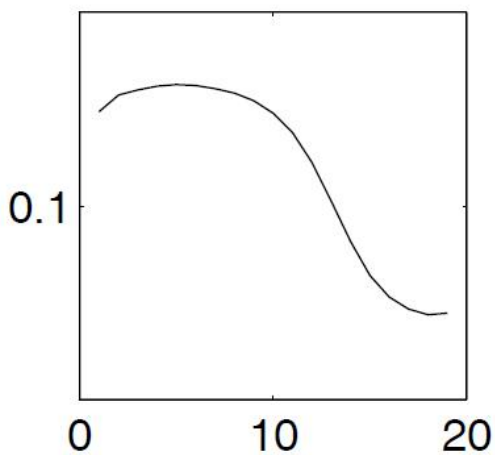
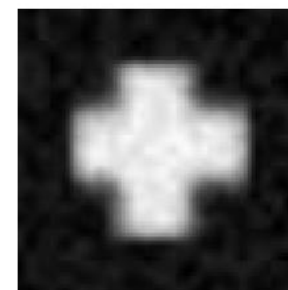
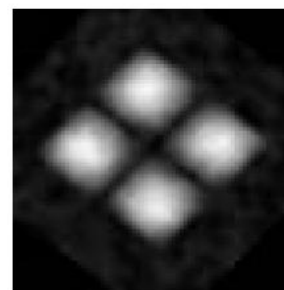
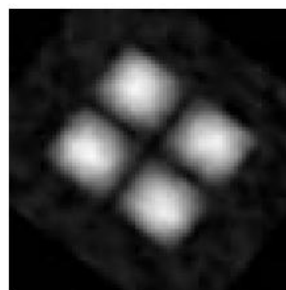
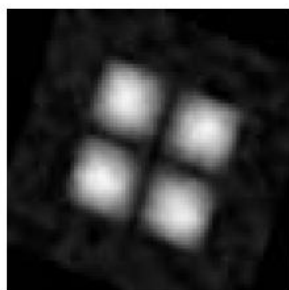
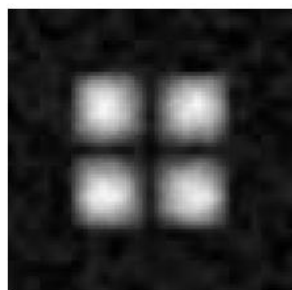
A_{error} ,
ошибка
деформации

d ,
смещение

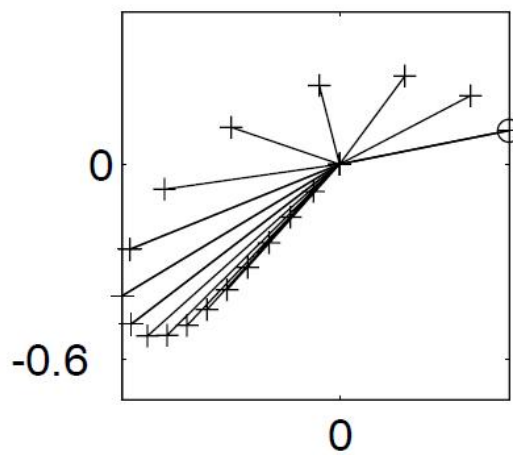
A ,
деформация

KLT

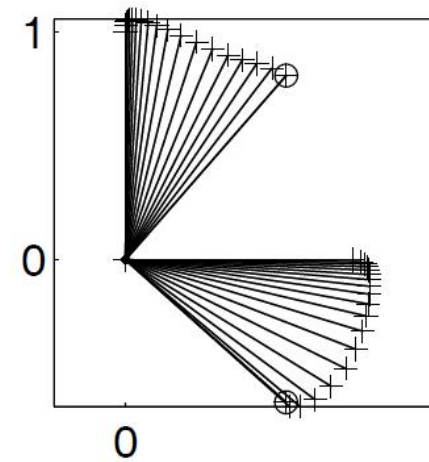
Пример работы



различие



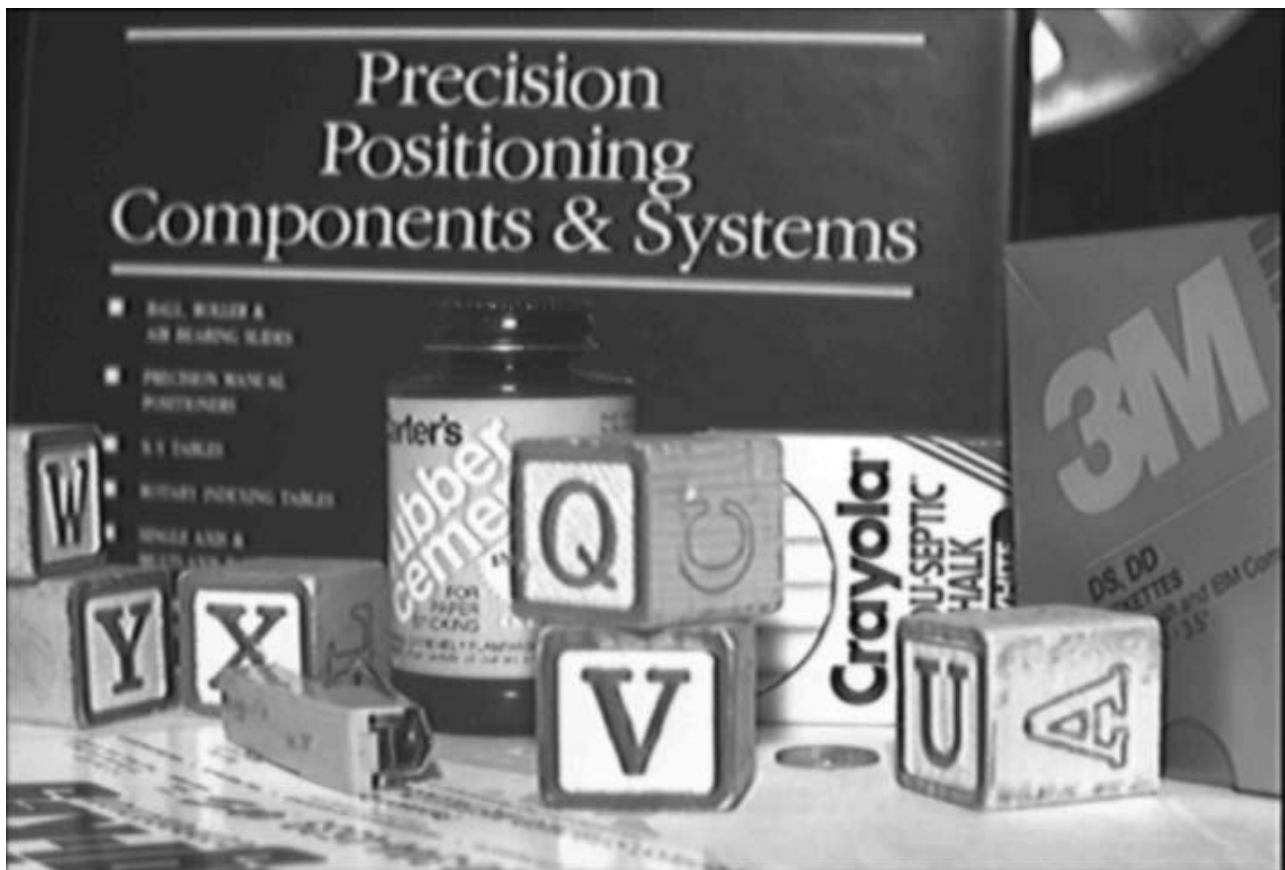
d ,
смещение



A ,
деформация

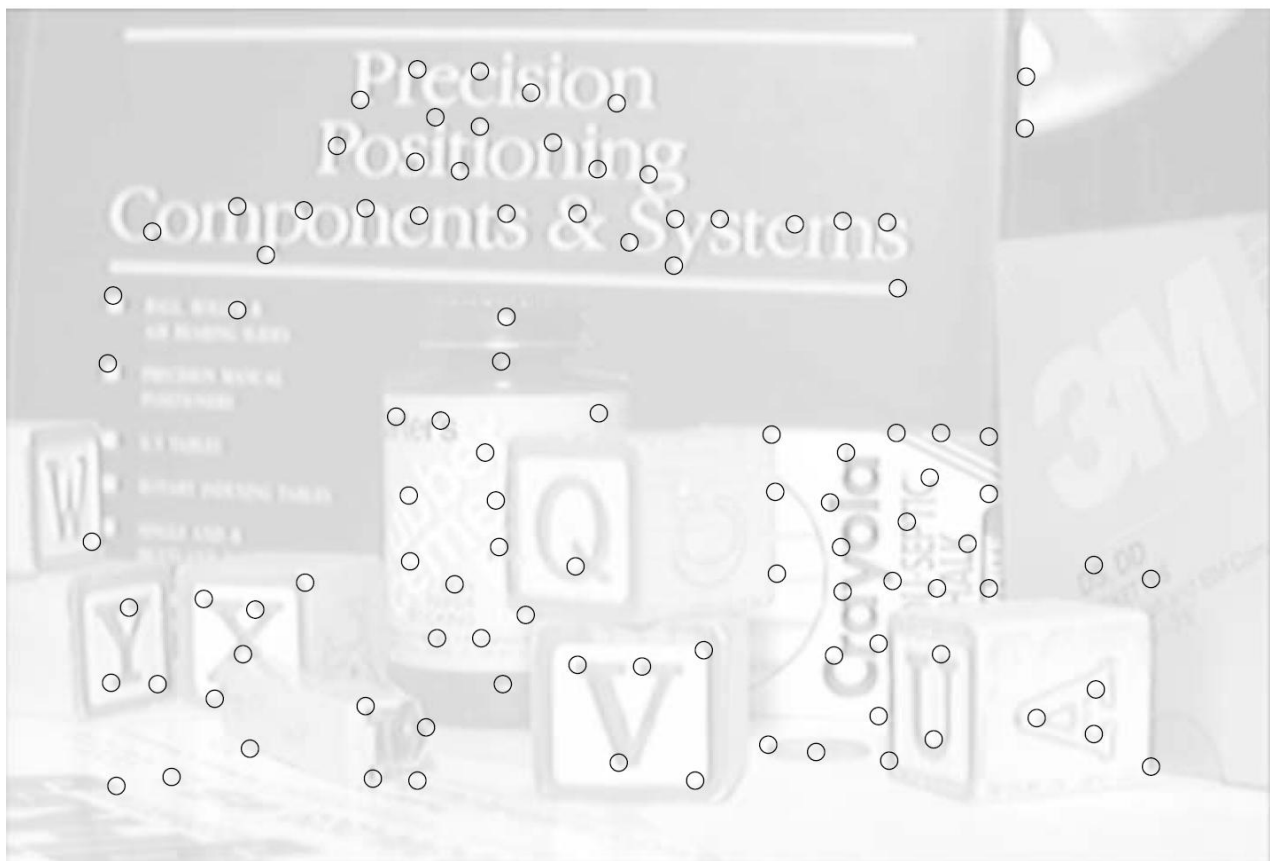
KLT

Пример работы



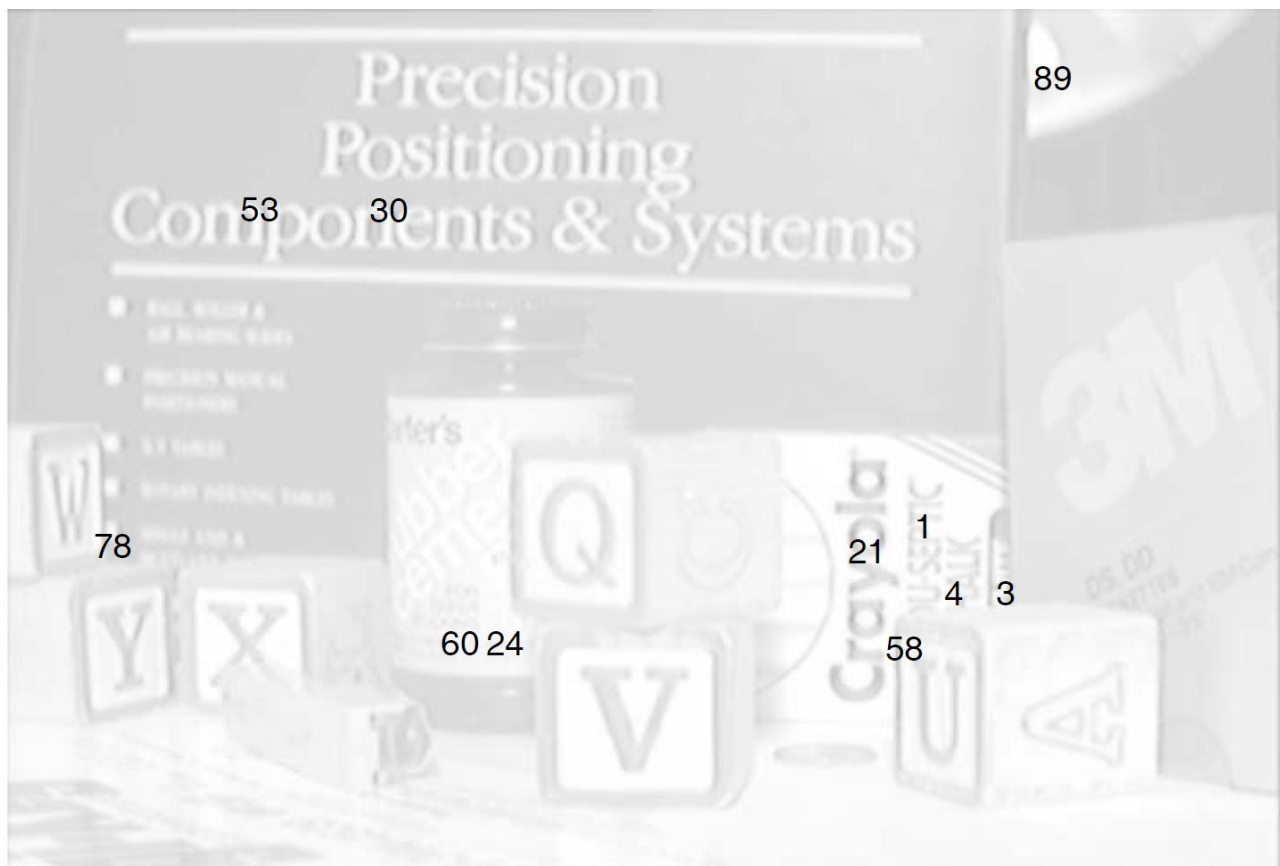
KLT

Пример работы



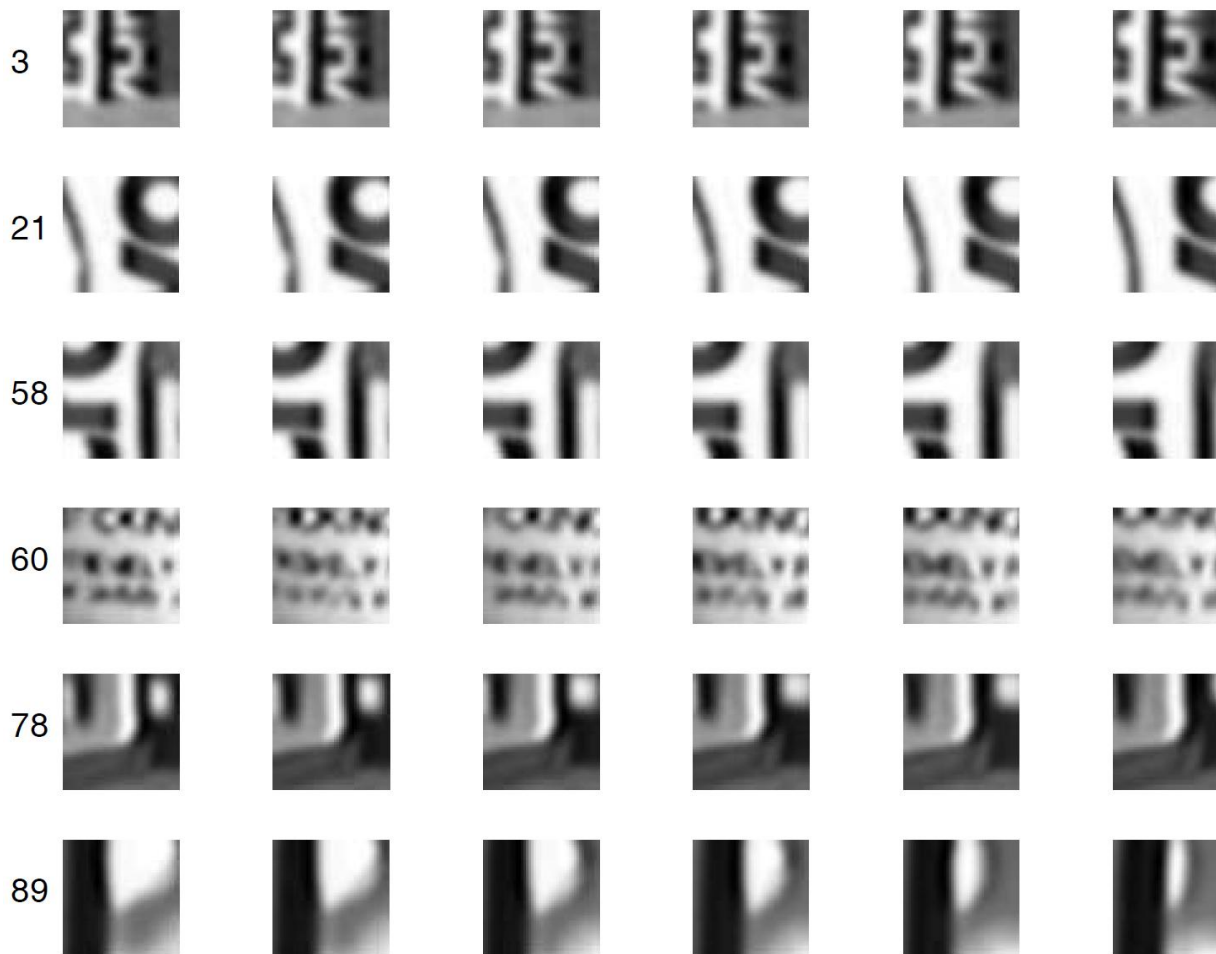
KLT

Пример работы



KLT

Пример работы



кадра →

1

6

11

16

21

26



KLT

- Достоинства
 - Учет аффинных преобразований
 - GPU-реализации

- Недостатки
 - Подвержен накоплениям ошибок



Содержание

- Введение
- KLT
- **IPAN**
- Particle Video

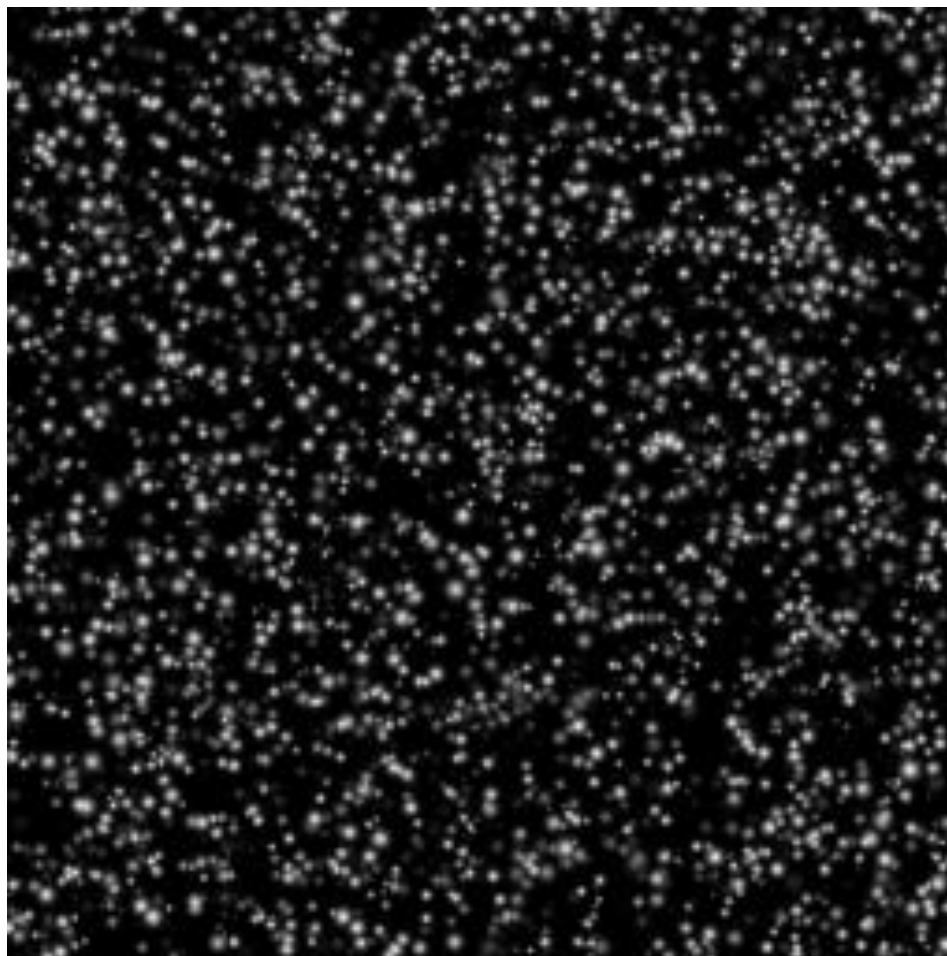


IPAN

- Недостаток предыдущего метода:
 - Точки могут перекрываться, что приводит к разрыву траекторий
- Предположения:
 - Неразличимость точек
 - Гладкое движение
 - Ограниченная скорость
 - Короткие по времени перекрытия



Неразличимость точек





IPAN

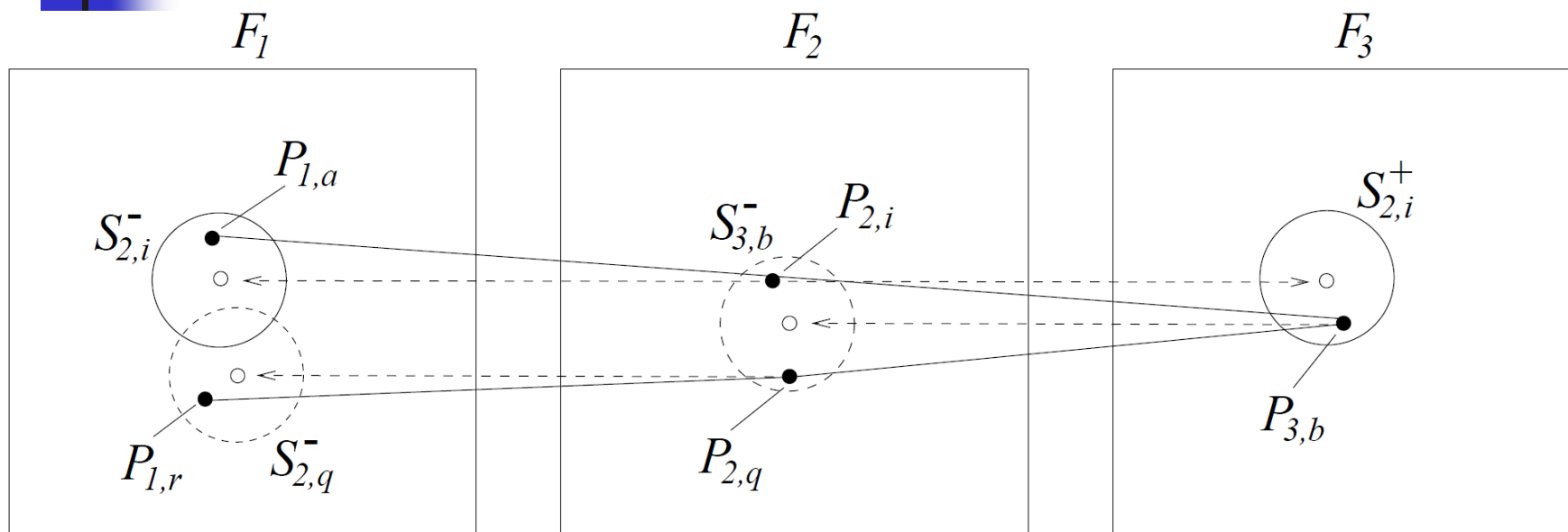


$$\delta_o(P_{k-1,n}, P_{k,i}, P_{k+1,m}) = w_1 \left(1 - \frac{\overline{P_{k-1,n} P_{k,i}} \cdot \overline{P_{k,i} P_{k+1,m}}}{\| \overline{P_{k-1,n} P_{k,i}} \| \cdot \| \overline{P_{k,i} P_{k+1,m}} \|} \right) + w_2 \left(1 - \frac{2 \left[\| \overline{P_{k-1,n} P_{k,i}} \| \cdot \| \overline{P_{k,i} P_{k+1,m}} \| \right]^{\frac{1}{2}}}{\| \overline{P_{k-1,n} P_{k,i}} \| + \| \overline{P_{k,i} P_{k+1,m}} \|} \right)$$

- Первое слагаемое отвечает за изменение направления движения
 - $w_1 \sim 0.1$
- Второе слагаемое отвечает за изменение скорости
 - $w_2 \sim 0.9$

IPAN

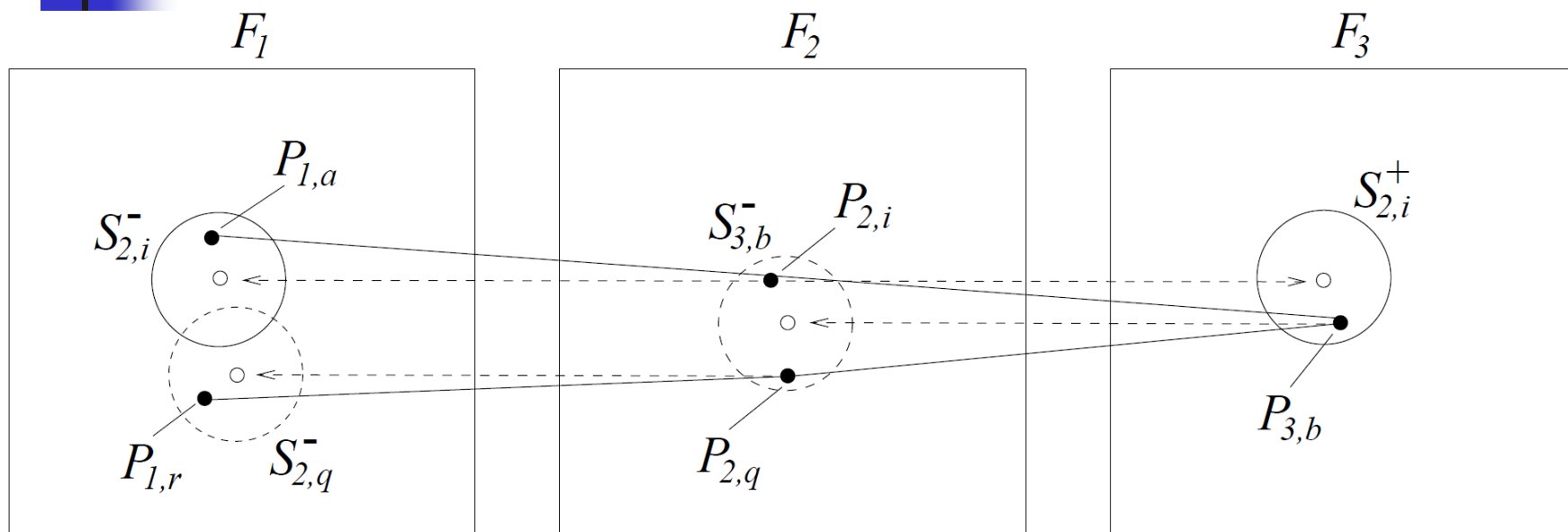
Инициализация



- $P_{f,i}$ – точечные особенности
- $S_{f,i}^+$ – область достижимости для ТО i из кадра f

IPAN

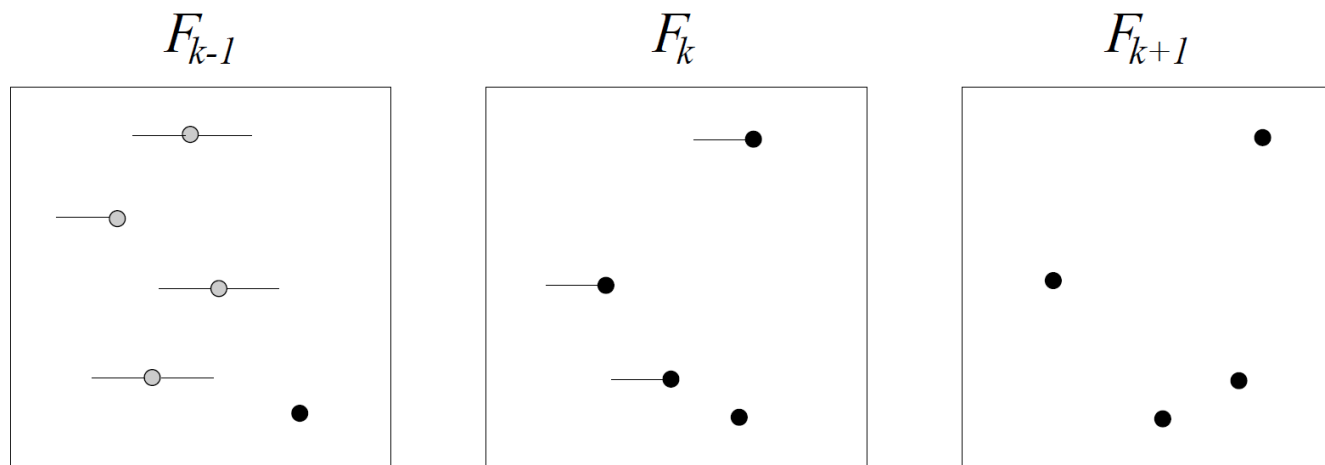
Инициализация



- Для всех $P_{2,i}$
 - Перебор всех троек $(P_{1,a}, P_{2,i}, P_{3,b})$
 - Подсчет функции стоимости $\delta(P_{1,a}, P_{2,q}, P_{3,b})$
 - Поиск лучшего приближения при фиксированном $P_{3,b}$
 - Поиск лучшего приближения при фиксированном $P_{1,a}$
 - Отсечение плохих приближений: $\delta(P_{1,a}, P_{2,q}, P_{3,b}) < \delta_{\max}$

IPAN

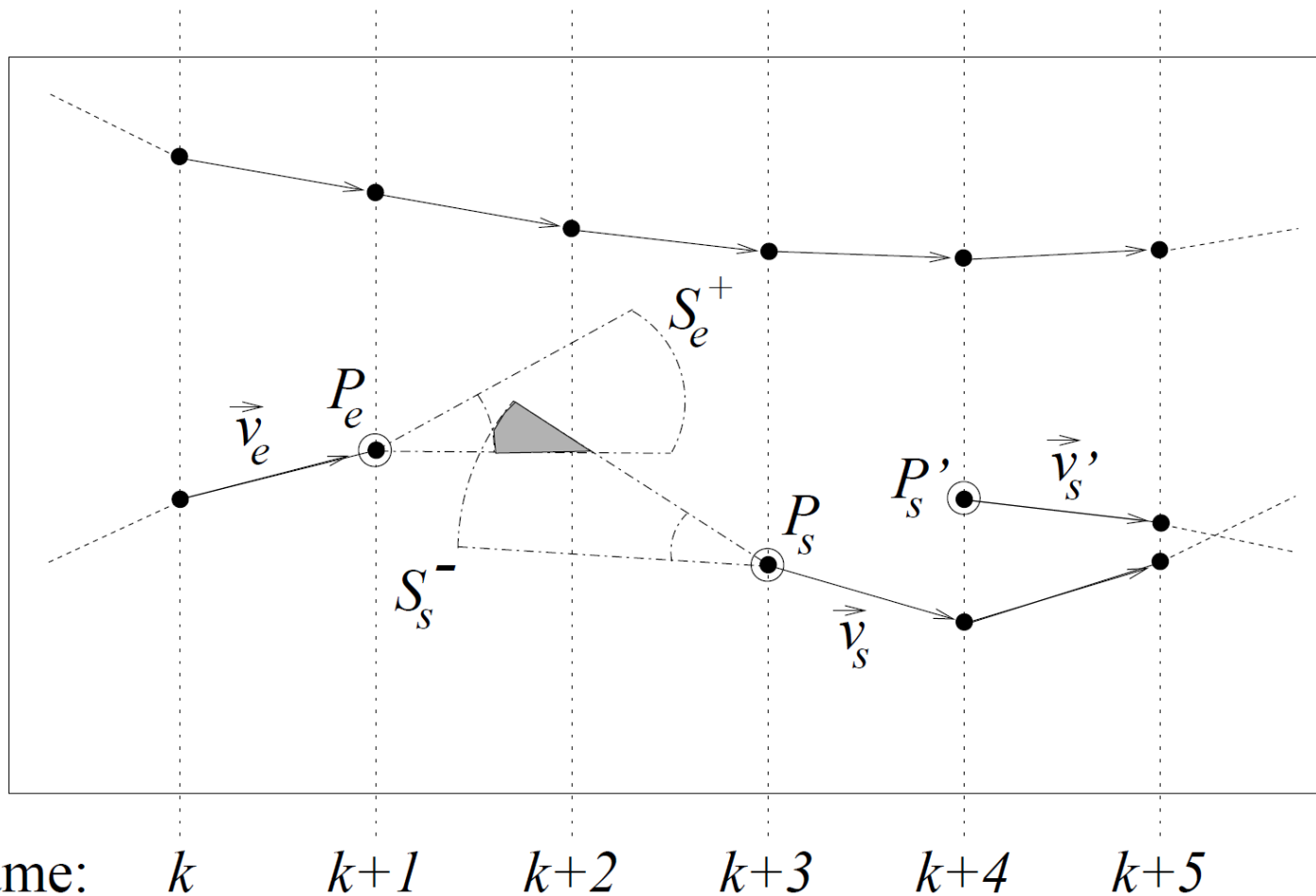
Обработка последовательных кадров



- Z-точки – точки без связей на F_{k-1}
- В-точки – точки на F_{k-1} , связанные только с F_{k-2}
- Рассматриваются только Z-точки
- Обработка аналогична инициализации, но существующие связи не разрушаются

IPAN

Постобработка



$$\theta_{1,2} = \theta_e \mp \arccos(1 - \delta_{max}),$$

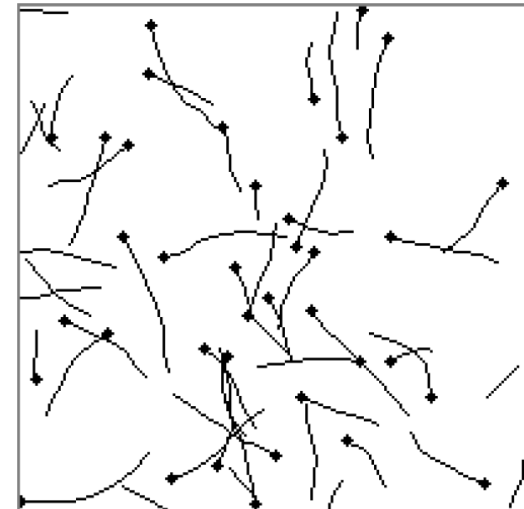
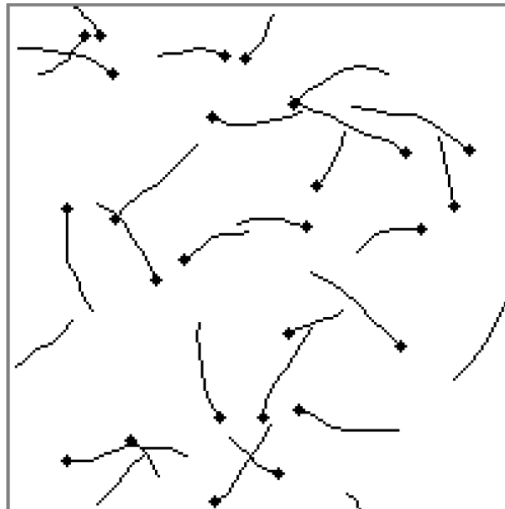
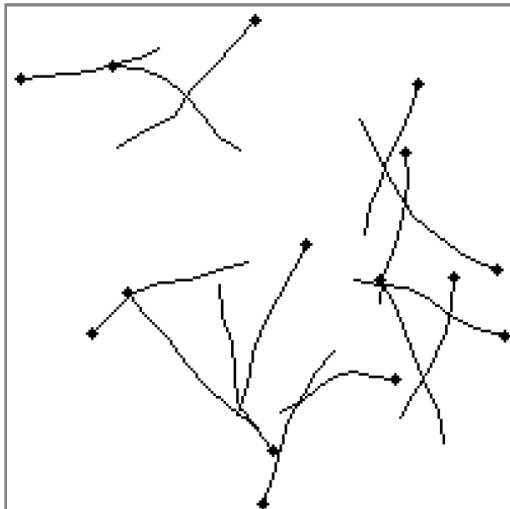
$$v_{1,2} = \frac{v_e \left(1 \mp \sqrt{\delta_{max}(2 - \delta_{max})}\right)^2}{(1 - \delta_{max})^2}.$$

v_e – скорость движения в предыдущем кадре

θ_e – угол направления в предыдущем кадре

IPAN

Результат работы



Alg.	Self-init.	Occl.	Low speed			High speed		
			$T = 20$	$T = 40$	$T = 60$	$T = 20$	$T = 40$	$T = 60$
IP97	+	+	95.35	92.07	89.98	82.70	67.55	54.56
IP97	+	-	95.60	92.92	91.20	85.70	74.02	62.45
IP97	-	+	97.50	94.10	92.28	83.95	72.05	61.26
RS91	-	+	98.50	95.52	94.58	81.15	59.47	16.61



IPAN

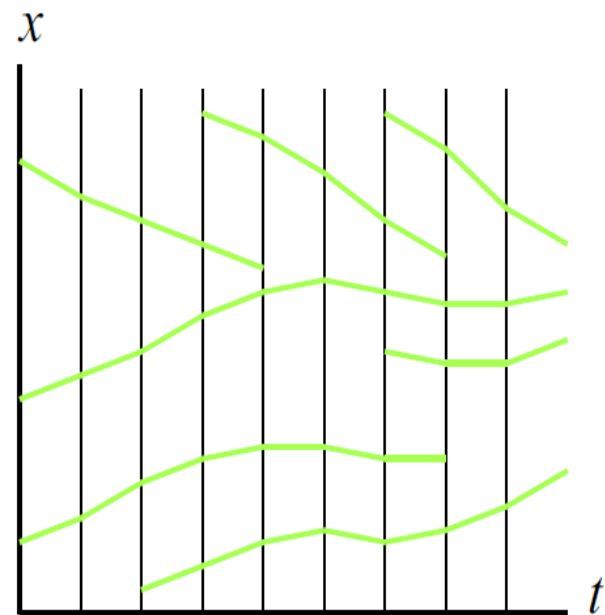
- Достоинства
 - Нахождение открытий/закрывтий
 - Сопровождение частично перекрывающихся траекторий
- Недостатки
 - Требуется высокая точность выделения особенностей



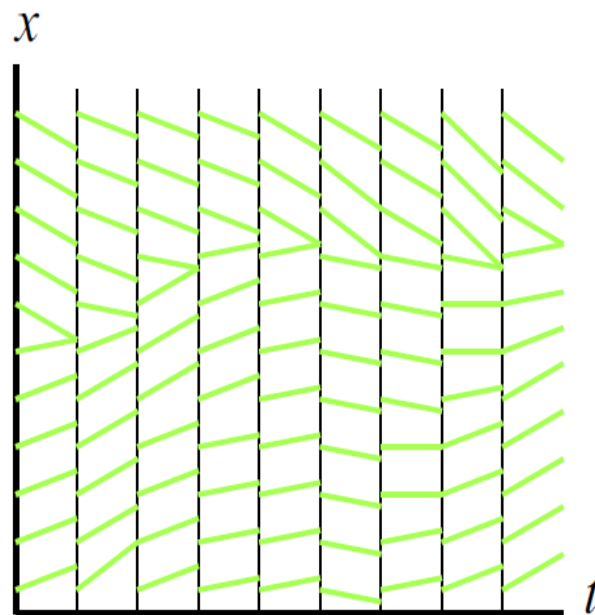
Содержание

- Введение
- KLT
- IPAN
- **Particle Video**

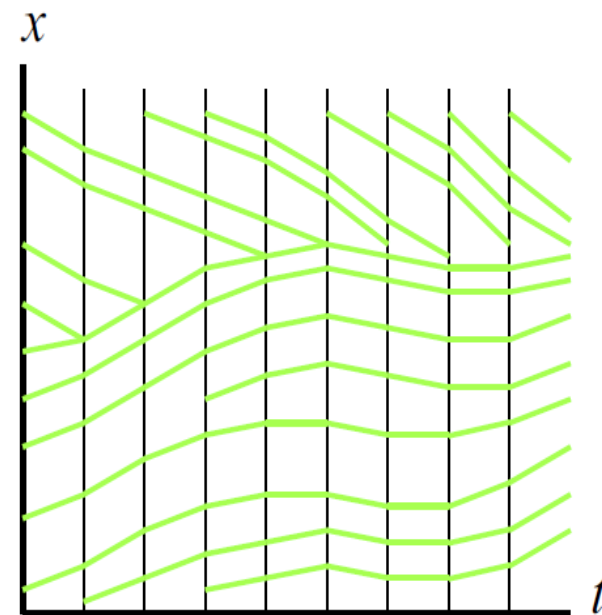
Particle Video



Feature Tracking



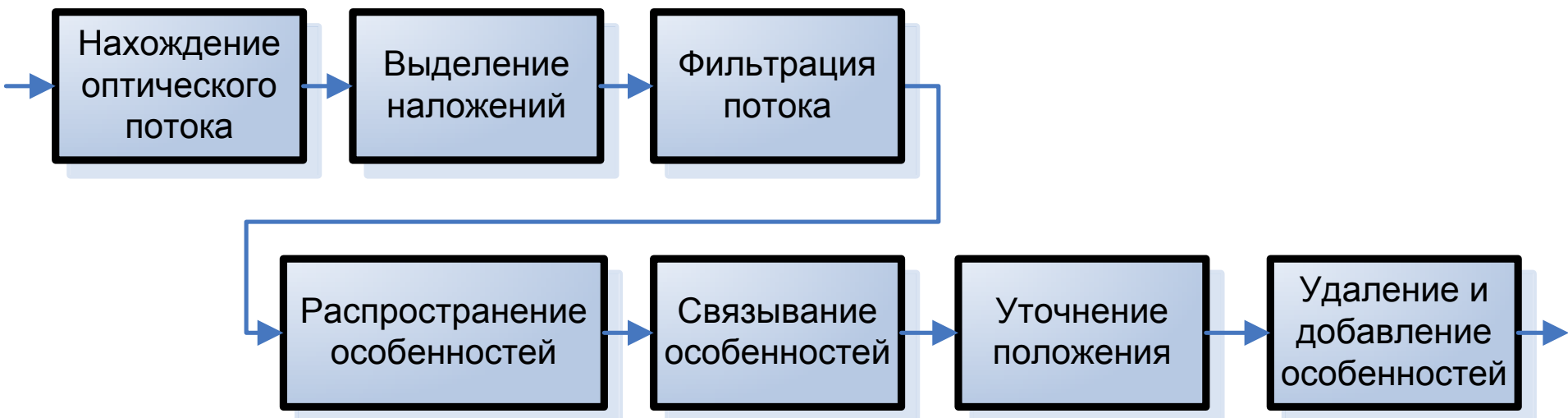
Optical Flow



Particle Video

Particle Video

Схема алгоритма



Particle Video

Оптический поток

- Алгоритм нахождения оптического потока – «Черный ящик»
- Пары последовательных кадров сравниваются независимо
- Используется пирамида изображений

Particle Video

Оптический поток

$$E_{FlowData}(\bar{u}, \bar{v}, t) =$$

$$\sum_{x,y,k} r(x, y, t) \Psi([I^{[k]}(x + \bar{u}, y + \bar{v}, t + 1) - I^{[k]}(x, y, t)]^2)$$

$$\Psi(s^2) = \sqrt{s^2 + \epsilon^2}; \quad \epsilon = 0.001$$

\bar{u}, \bar{v} — поле потока

I — изображение

k — номер компоненты изображения

r — функция видимости

Particle Video

Оптический поток

$$b(x, y, t) = N(\sqrt{I_x(x, y, t)^2 + I_y(x, y, t)^2}; \sigma_b),$$

$$E_{FlowSmooth}(\bar{u}, \bar{v}, t) =$$

$$\sum_{x, y} (\alpha_g + \alpha_l \cdot b(x, y, t)) \cdot \Psi(\bar{u}_x^2 + \bar{u}_y^2 + \bar{v}_x^2 + \bar{v}_y^2)$$

I_x, I_y - производные яркости по x и y

N - ядро гауссиана

$\alpha_l = 10$ - локальное сглаживание

$\alpha_g = 5$ - глобальное сглаживание

$\sigma_b = 1.5$

Particle Video

Выделение наложений

- Дивергенция потока

$$\text{div}(x, y, t) = \frac{\partial}{\partial x} \bar{u}(x, y, t) + \frac{\partial}{\partial y} \bar{v}(x, y, t)$$

- Условие открытия

$$d(x, y, t) = \begin{cases} \text{div}(x, y, t) & \text{div}(x, y, t) < 0 \\ 0 & \text{otherwise.} \end{cases}$$

- Изменение яркости

$$e(x, y, t) = I(x, y, t) - I(x + \bar{u}(x, y, t), y + \bar{v}(x, y, t), t + 1)$$

- Карта наложений

$$r(x, y, t) = N(d(x, y, t); \sigma_d) \cdot N(e(x, y, t); \sigma_e)$$

$$\sigma_d = 0.3$$

$$\sigma_e = 20$$

Particle Video

Фильтрация потока

- Билатеральный фильтр

$$\bar{u}'(x, y) = \frac{\sum_{x_1, y_1} \bar{u}(x_1, y_1) w(x, y, x_1, y_1)}{\sum_{x_1, y_1} w(x, y, x_1, y_1)}$$

- Весовая функция

$$w(x, y, x_1, y_1) = N(\sqrt{(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2}; \sigma_x) \cdot N(I(x, y) - I(x_1, y_1); \sigma_i) \cdot N(\sqrt{(\bar{u} - \bar{u}_1)^2 + (\bar{v} - \bar{v}_1)^2}; \sigma_m) \cdot r(x_1, y_1)$$

$$\sigma_x = 4, \sigma_i = 20, \sigma_m = 1$$

Particle Video

Фильтрация потока

- Билатеральный фильтр

$$\bar{u}'(x, y) = \frac{\sum_{x_1, y_1} \bar{u}(x_1, y_1) w(x, y, x_1, y_1)}{\sum_{x_1, y_1} w(x, y, x_1, y_1)}$$

- Ограничения:

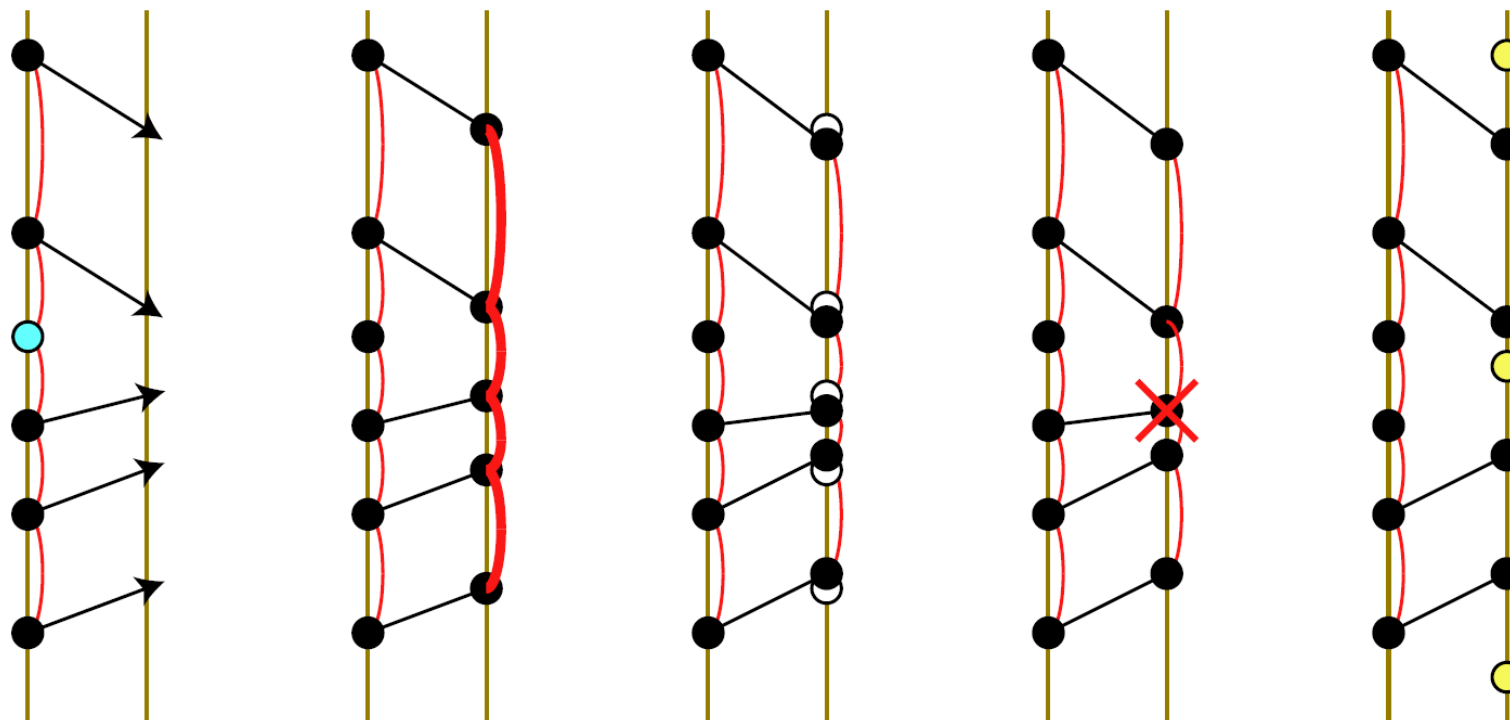
- $(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 < \rho^2$
- Работа только рядом с границами

$$g(x, y, t) = \sqrt{\bar{u}_x^2 + \bar{u}_y^2 + \bar{v}_x^2 + \bar{v}_y^2}$$

$$\hat{g}(x, y, t) = N(g(x, y, t); 3) > 0.05$$

Particle Video

Второй проход



Распространение
особенностей

Связывание
особенностей

Уточнение
положения

Удаление
особенностей

Добавление
особенностей

Particle Video

Распространение особенностей

$$x_i(t) = x_i(t-1) + u(x_i(t-1), y_i(t-1), t-1)$$

$$y_i(t) = y_i(t-1) + v(x_i(t-1), y_i(t-1), t-1)$$

\bar{u}, \bar{v} — поле потока

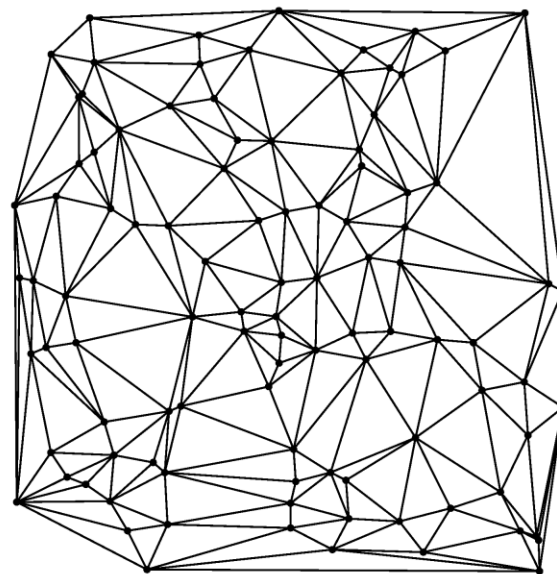
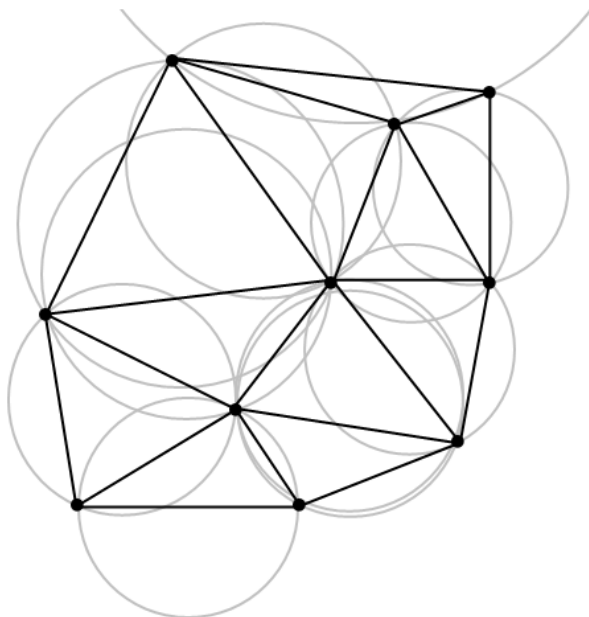
x_i, y_i — координаты частицы i

Particle Video

Связывание особенностей

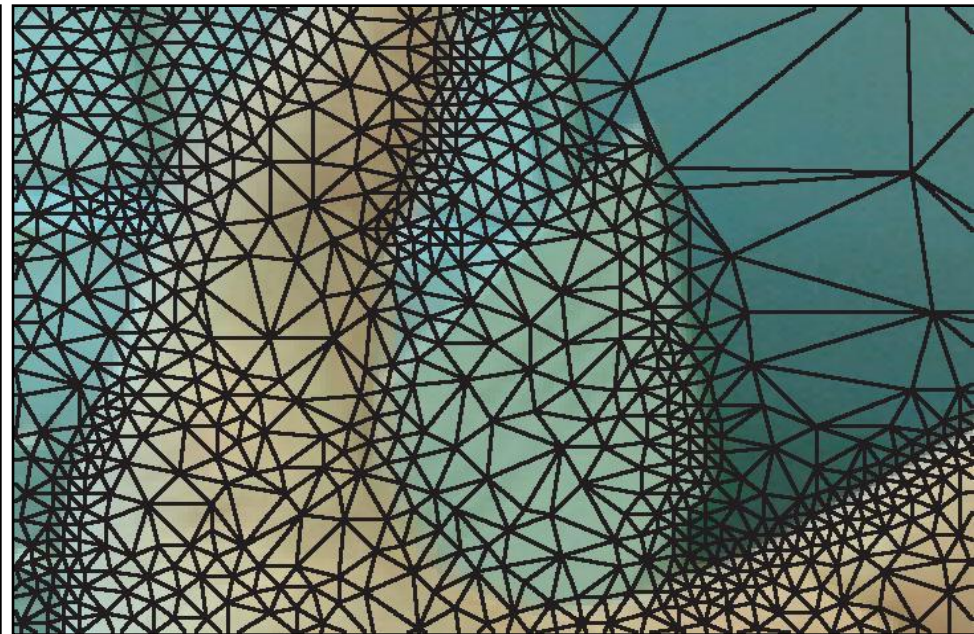
Триангуляция Делоне:

$DT(S)$ – триангуляция Делоне для множества точек S , если никакая точка A из S не содержится внутри окружности, описанной вокруг треугольника из $DT(S)$, такого, что ни одной из вершин его не является точка A .



Particle Video

Связывание особенностей



Particle Video

Связывание особенностей

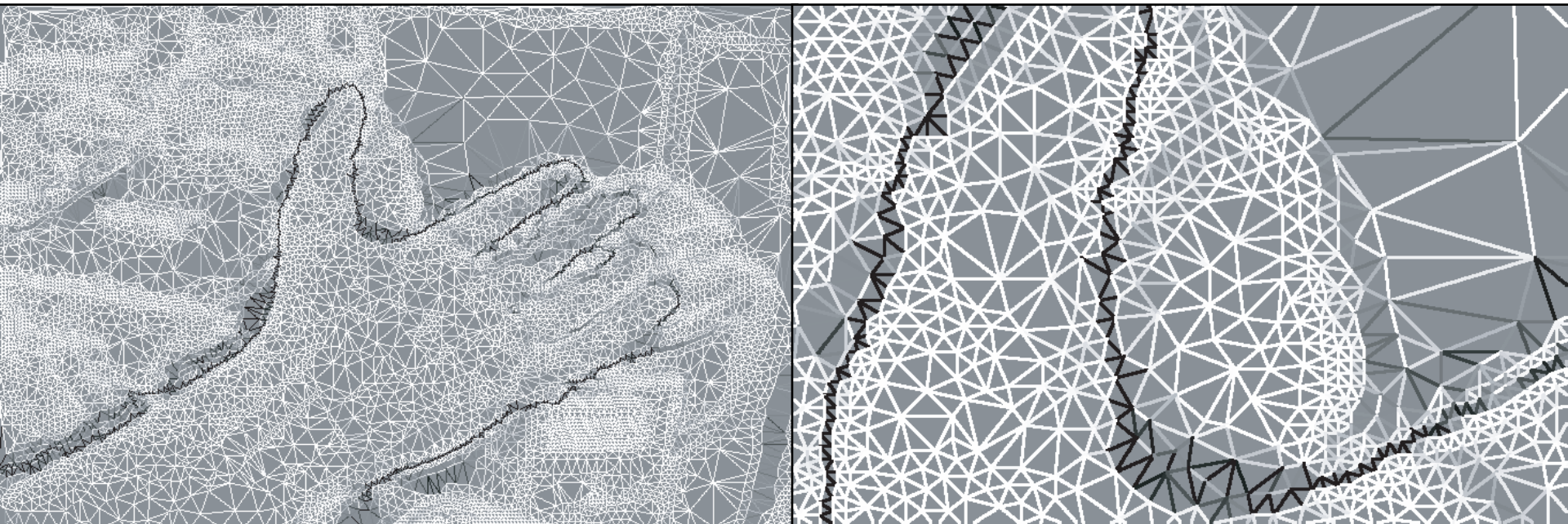
Вычисление весов ребер:

$$D(i, j, t) = (\bar{u}(x_i(t), y_i(t), t) - \bar{u}(x_j(t), y_j(t), t))^2 + (\bar{v}(x_i(t), y_i(t), t) - \bar{v}(x_j(t), y_j(t), t))^2$$

$$l_{i,j} = \sqrt{D(i, j)} \quad \text{- вес ребра}$$

Particle Video

Связывание особенностей



Particle Video

Связывание особенностей

- Вычисление весов особенностей:

$$p_i(t) = N(\hat{g}(x_i(t), y_i(t), t); \sigma_p^2)$$

$$\sigma_p = 0.05$$

- Сохранение окна:

$$\{c_i^{[k]}\}$$

Particle Video

Уточнение положения

- Условие на совпадение окон:

$$E_{Data}^{[k]}(i, t) = \Psi([I^{[k]}(x_i(t), y_i(t), t) - c_i^{[k]}]^2)$$

- Условие на движение соседей:

$$E_{Distort}(i, j, t) = l_{ij}(t) \Psi([u_i(t) - u_j(t)]^2 + [v_i(t) - v_j(t)]^2)$$

- Условие на гладкость траектории:

$$E_{Flow}(i, t) = p_i(t) \Psi([\bar{u}(x_i(t-1), y_i(t-1), t-1) - u_i(t)]^2 + [\bar{v}(x_i(t-1), y_i(t-1), t-1) - v_i(t)]^2).$$

Particle Video

Уточнение положения

$$\begin{aligned} E(i, t) &= \sum_{k \in K_i(t)} E_{Data}^{[k]}(i, t) \\ &+ \alpha_d \sum_{j \in L_i(t)} E_{Distort}(i, j, t) \\ &+ \alpha_f E_{Flow}(i, t). \end{aligned}$$

$$\alpha_d = 4, \alpha_f = 0.5$$

$$E = \sum_{i \in P, t \in F} E(i, t)$$

Particle Video

Уточнение положения

- Необходимое условие минимума:

$$\left\{ \frac{\partial E}{\partial dx_i(t)} = 0, \frac{\partial E}{\partial dy_i(t)} = 0 \mid i \in P, t \in F \right\}$$

- Линеаризация:

$$I_z^{[k]} = I_x^{[k]} dx_i(t) + I_y^{[k]} dy_i(t) + I^{[k]} - c_i^{[k]}$$

$$\frac{\partial E_{Data}^{[k]}(i, t)}{\partial dx_i(t)} \approx 2\Psi'([I_z^{[k]}]^2) I_z^{[k]} I_x^{[k]}$$

Particle Video

Уточнение положения

$$\frac{\partial E_{Distort}(i, j, t)}{\partial dx_i(t)} =$$

$$2l_{ij}(t)\Psi'([u_i(t) + du_i(t) - u_j(t) - du_j(t)]^2$$

$$+ [v_i(t) + dv_i(t) - v_j(t) - dv_j(t)]^2)$$

$$\cdot (u_i(t) + du_i(t) - u_j(t) - du_j(t))$$

$$U = \bar{u}_x dx_i(t-1) + \bar{u}_y dy_i(t-1) + \bar{u} - (u_i(t) + du_i(t)),$$

$$V = \bar{v}_x dx_i(t-1) + \bar{v}_y dy_i(t-1) + \bar{v} - (v_i(t) + dv_i(t)),$$

$$\frac{\partial E_{Flow}(i, t)}{\partial dx_i(t)} \approx 2p_i(t)\Psi'(U^2 + V^2)U$$

Particle Video

Уточнение положения

Решение уравнений относительно dx_i, dy_i :

1. $dx_i, dy_i = 0$
2. Вычисление Ψ'
3. Решение СЛАУ
4. Переход к п.2
5. $x_i = x_i + dx_i$
6. $y_i = y_i + dy_i$

Particle Video

Удаление особенностей

- Если $E(i,t) > th$, особенность помечается как найденная неверно
- Если особенность i найдена верно менее чем на трех кадрах подряд, то она удаляется.

Particle Video

Добавление особенностей

- Нахождение степени текстурирования

$$\sigma(x, y) = \arg \max_{\sigma} \left(\|I(x, y) - N(I(x, y); \sigma)\| < 10 \right)$$

- Если расстояние от пикселя (x, y) до ближайшей особенности больше $\sigma(x, y)$, то добавить (x, y) в список особенностей

Particle Video

Добавление особенностей



Particle Video

Добавление особенностей



$$\sigma(x, y)$$

Particle Video

Добавление особенностей



Particle Video

Пример работы



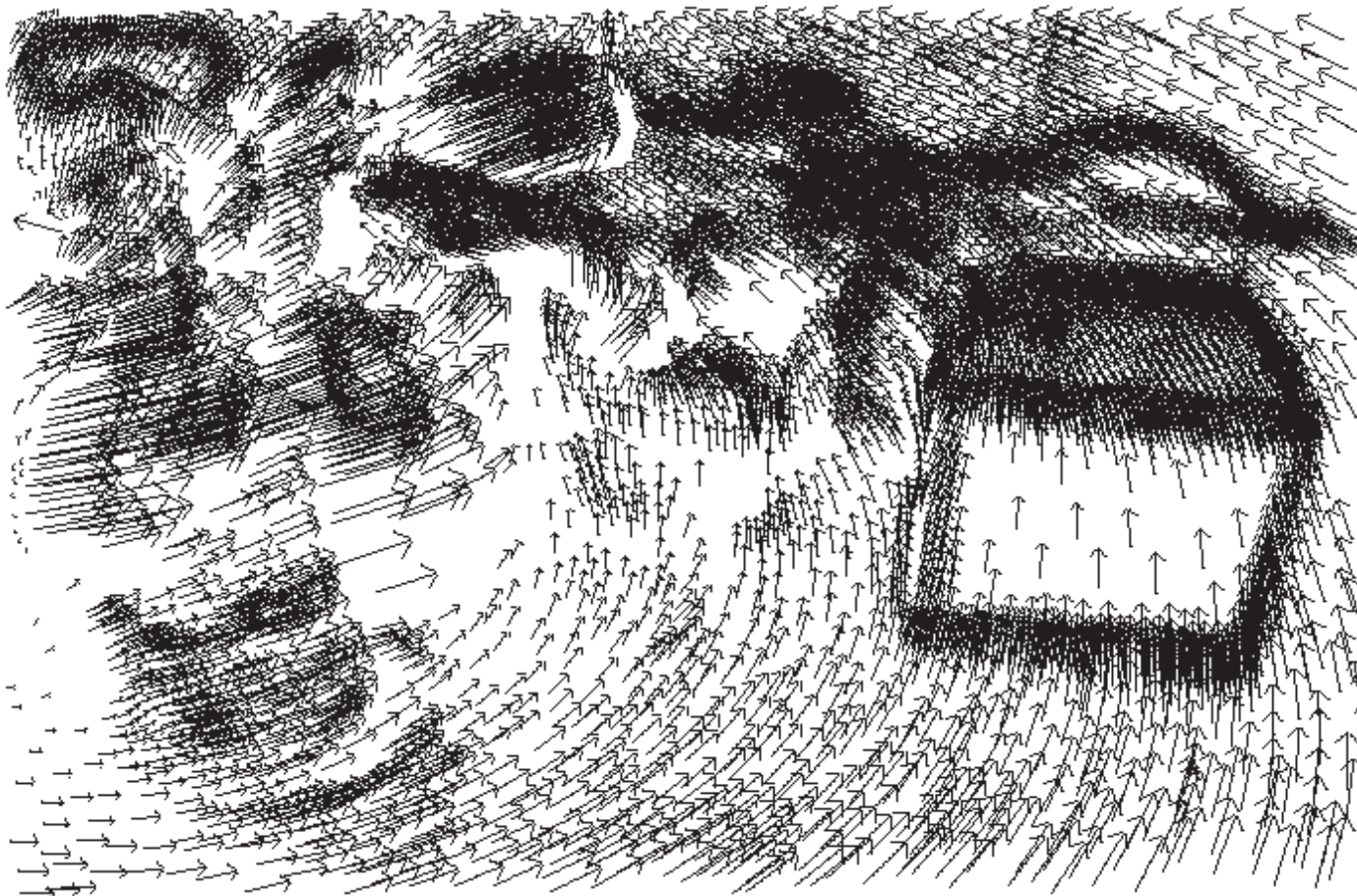
Particle Video

Пример работы



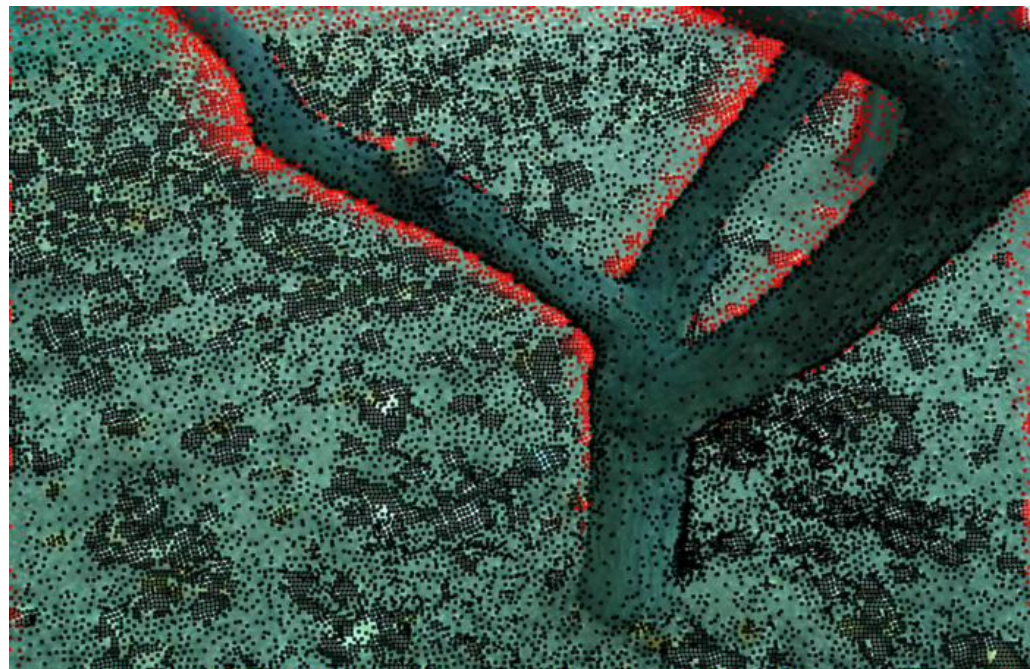
Particle Video

Пример работы



Particle Video

Пример работы



<http://rvsn.csail.mit.edu/pv/>

Particle Video

Пример работы



<http://rvsn.csail.mit.edu/pv/>



Particle Video

- Достоинства:
 - Высокая точность
 - Обработка закрытий/открытий

- Недостатки:
 - Очень низкая скорость работы
 - Выделение недостоверных особенностей

Литература

- Particle Video: Long-Range Motion Estimation using Point Trajectories, Peter Sand, Seth Teller, CVPR, 2006, IEEE
- Good Features to Track, Jianbo Shi, Carlo Tomasi, IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 1994
- Derivation of Kanade-Lucas-Tomasi Tracking Equation, Stan Birchfield, 1997
- Feature Point Tracking for Incomplete Trajectories, D. Chetverikov, J. Verestói, 1998, International Conf. on Pattern Recognition
- Stable 2D Feature Tracking for Long Video Sequences, Jong-Seung Park, Jong-Hyun Yoon, Chungkyue Kim, 2008, International Journal of Signal Processing, Image Processing and Pattern Recognition,
- Combining local and global motion models for feature point tracking, Aeron Buchanan, Andrew Fitzgibbon, CVPR, 2007
- High Accuracy Optical Flow Estimation Based on a Theory for Warping, Thomas Brox, Andr ´es Bruhn, Nils Papenberg, and Joachim Weickert, 2004, 8th European Conference on Computer Vision



Вопросы

