

Методика повышения быстродействия  
сопоставления изображений с использованием  
модели системы зрительного внимания  
Мобильная робототехника

Пименов Виталий Юрьевич

Факультет прикладной математики — процессов управления  
Санкт-Петербургский государственный университет

26.04.10

## Задачи построения карты среды и локализации

- Система управления автономного мобильного робота должна обеспечивать возможность построения карты неизвестной заранее среды в процессе навигации, а также возможность определения положения робота на карте.
- Разработка методов построения карты среды и локализации является определяющим этапом создания множества приложений мобильной робототехники.

## Построение карты среды и локализация на основе зрения

- В задачах навигации на открытой местности и навигации без использования средств автоматического позиционирования системы технического зрения являются единственным приемлемым типом сенсоров.
- Ограничение на скорость обработки информации усложняет использование систем технического зрения.
- Необходима разработка специализированных высокопроизводительных методов решения задачи локализации и построения карты среды.

## Применение модели системы зрительного внимания

В настоящем исследовании предложена методика применения модели системы зрительного внимания с целью повышения быстродействия и качества процедур обработки изображений, выполняемых в процессе автономной навигации.

## Применение модели системы зрительного внимания

- 1 Задачи обработки изображений, решение которых необходимо в процессе автономной навигации.
- 2 Методы распознавания ориентиров среды и их недостатки
- 3 Методика повышения быстродействия сопоставления изображений
- 4 Модель системы зрительного внимания
- 5 Результаты экспериментов

## Задачи обработки изображений

- Решение задач локализации и построения карты среды строится на основе распознавания ориентиров среды. Ориентирами называются неподвижные объекты, допускающие повторное распознавание при возврате робота в окрестность ориентира.
- В общем случае для решения задачи применяются методы поиска, описания и сопоставления контрольных точек изображений. С помощью подобных методов производится распознавание точечных ориентиров среды и установление соответствий между ними.

## Проблема сопоставления изображений

- Изображения, полученные в последовательные моменты времени, могут существенно отличаться вследствие изменения ракурса съемки, освещенности, наличия движущихся объектов и пр.
- Ошибки распознавания, состоящие в установлении неверных соответствий между наблюдаемыми и известными ориентирами среды, могут привести к невозможности построения корректной модели среды.
- Требование обработки изображений в реальном времени приводит к необходимости использовать наиболее простые методы поиска контрольных точек.

## Процедура и методы обработки изображений

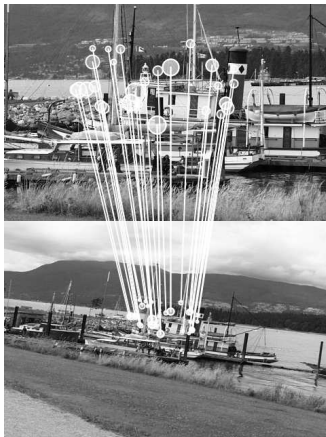
- Поиск контрольных точек (детекторы углов — Харриса, Ши–Томаси, FAST; DoG; Hessian–Affine), .
- Построение признаковых описаний контрольных точек (цветовые гистограммы, SIFT, SURF, GLOH).
- Сопоставление контрольных точек на основе их описаний (NN, LSH, RANSAC)



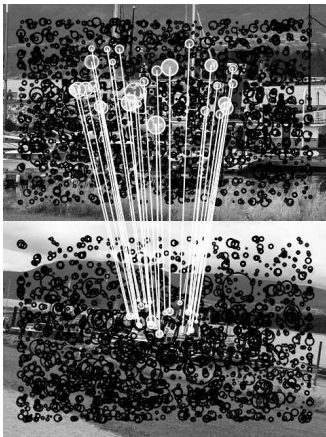
## Избыточность множеств контрольных точек

- Методы обработки изображений на каждом из этапов проектируются изолированно
- Множества контрольных точек обычно содержат подмножества точек, которые при определенных преобразованиях не могут быть поставлены в соответствие никаким контрольным точкам последующих изображений.
- Множества контрольных точек, рассчитанные известными численными методами для дискретных изображений размера  $640 \times 480$  содержат в среднем 1000 точек. На практике избыточность множеств контрольных точек приводит к потере быстродействия.

## Проблема сопоставления изображений



## Проблема сопоставления изображений



## Требование быстродействия

Возможные подходы к повышению быстродействия:

- Использование аппаратного обеспечения: ПЛИС, графические процессоры, кластерные системы.
- Разработка эффективных численных методов обработки изображений.
- Разработка новых математических методов анализа изображений.

## Поиск контрольных точек

### Определение

Операция  $\Phi : \{I\} \rightarrow 2^{\tilde{\mathcal{X}}}$ , переводящая изображение  $I$  в подмножество  $\tilde{\mathcal{X}}$  точек области его определения называется операцией поиска контрольных точек, если выполнены условия:

- Для любого изображения  $I \in \{I\}$  множество  $\tilde{\mathcal{X}} = \Phi(I)$  конечно, но содержит по крайней мере  $N$  точек.
- Для любых изображений  $I_1$  и  $I_2$  множества  $\tilde{\mathcal{X}}_1$  и  $\tilde{\mathcal{X}}_2$  состоят из соответственных точек:  $\forall \mathbf{X}_1 \in \tilde{\mathcal{X}}_1 \exists ! \mathbf{X}_2 \in \tilde{\mathcal{X}}_2$  и  $\forall \mathbf{X}_2 \in \tilde{\mathcal{X}}_2 \exists ! \mathbf{X}_1 \in \tilde{\mathcal{X}}_1$  такие, что  $\mathbf{X}_2 = \mathbf{F}(\mathbf{X}_1)$ , где  $\mathbf{F}(\mathbf{X})$  — допустимое преобразование, связывающее  $I_1$  и  $I_2$ .

## Описание контрольных точек

- После того, как для изображений  $I_1$  и  $I_2$  построены множества контрольных точек  $\bar{\mathbf{x}}_1$  и  $\bar{\mathbf{x}}_2$ , необходимо решить задачу сопоставления точек этих множеств, т.е. для каждой точки  $\mathbf{X}_1 \in \bar{\mathbf{x}}_1$  найти такую точку  $\mathbf{X}_2 \in \bar{\mathbf{x}}_2$ , что  $\mathbf{X}_2 = \mathbf{F}(\mathbf{X}_1)$ .
- Вопрос о том является ли пара точек  $(\mathbf{X}_1, \mathbf{X}_2)$  парой соответственных точек разрешается на основе понятия *описания контрольной точки*.

## Описание контрольных точек

Рассмотрим метрическое пространство  $D$  с метрикой  $\rho_D$ .

### Определение

Операция  $\Psi : \{I\} \times X \rightarrow D$  называется операцией описания контрольных точек, если выполнено следующее условие:

- 1 Существует число  $\varepsilon_D \geq 0$ , такое что для любых изображений  $I_1$  и  $I_2$  и любых соответственных контрольных точек  $\mathbf{X}_1 \in \tilde{\mathbf{x}}_1$  и  $\mathbf{X}_2 \in \tilde{\mathbf{x}}_2$  с необходимостью справедливо соотношение:  $\rho_D(\Psi(I_1, \mathbf{X}_1), \Psi(I_2, \mathbf{X}_2)) \leq \varepsilon_D$ , а его невыполнение исключает соответствие между точками.

Значение  $\Psi(I, \mathbf{X}) \in D$  называется описанием контрольной точки  $\mathbf{X}$  изображения  $I$ .

# Методика повышения быстродействия

Содержание методики:

- 1 Формализация понятия избыточности контрольных точек.
- 2 Постановка и решение задачи классификации контрольных точек.
- 3 Поиск соответствий только между неизбыточными контрольными точками.



## $\lambda$ -корректные операции поиска контрольных точек

### Определение

Пусть задано  $\lambda \geq 0$ . Операция  $\Phi_\lambda : \{I\} \rightarrow 2^{\mathbb{X}}$ , переводящая изображение  $I$  в подмножество  $\tilde{\mathbb{X}}_\lambda$  области его определения, называется  $\lambda$ -корректной операцией поиска контрольных точек, если выполнены условия:

- ① для любого изображения  $I$  множество  $\tilde{\mathbb{X}}_\lambda$  состоит из конечного числа точек;
- ② для любого допустимого преобразования  $\mathbf{F}(\mathbf{X}) \in \mathfrak{F}$  и  $\forall \mathbf{X}' \in \Phi(I(\mathbf{X}))$  существует точка  $\mathbf{X}'' \in \Phi(I(\mathbf{F}(\mathbf{X})))$  такая, что выполнено неравенство  $\|\mathbf{F}(\mathbf{X}') - \mathbf{X}''\| \leq \lambda$ .

## Взаимосвязь описания и поиска контрольных точек

### Определение

Будем говорить, что операция описания контрольных точек  $\Psi$  непрерывна по  $\mathbf{X}$ , если  $\forall \mathbf{F} \in \mathfrak{F}$  и  $\forall \varepsilon > 0 \exists \delta = \delta(\varepsilon) > 0$  такое, что

$$\forall \mathbf{X}', \mathbf{X}'', \|\mathbf{F}(\mathbf{X}') - \mathbf{X}''\| < \delta : \rho_D(\Psi(I, \mathbf{X}'), \Psi(I \circ \mathbf{F}, \mathbf{X}'')) < \varepsilon. \quad (1)$$

## Неизбыточные соответствия

### Определение

Пусть заданы изображения  $I_1, I_2$ , связывающее их допустимое преобразование  $\mathbf{F}$  и непрерывная операция описания контрольных точек  $\Psi$ . Множеством  $\Psi$ -неизбыточных соответствий  $\lambda$ -корректной операции поиска контрольных точек  $\Phi_\lambda$  назовем множество

$$\mathcal{R}_{\Phi_\lambda}(I_1, I_2) = \{(\mathbf{X}_1, \mathbf{X}_2) \mid \mathbf{X}_i \in \Phi(I_i), \|\mathbf{F}(\mathbf{X}_1) - \mathbf{X}_2\| < \delta(\varepsilon_D)\}.$$

## Неизбыточные соответствия

### Определение

Операции поиска контрольных точек  $\Phi_{\lambda_1}$  и  $\Phi_{\lambda_2}$  называются  $\Psi$ -эквивалентными:  $\Phi_{\lambda_1} \sim_{\Psi} \Phi_{\lambda_2}$ , если для любых двух изображений  $I', I''$  справедливо равенство

$$\mathfrak{K}_{\Phi_{\lambda_1}}(I', I'') = \mathfrak{K}_{\Phi_{\lambda_2}}(I', I'') \quad (2)$$

# Теорема существования

## Теорема

*Для всякой  $\lambda$ -корректной операции поиска контрольных точек  $\Phi_\lambda$  и всякой непрерывной операции описания контрольных точек  $\Psi$  существует  $\Phi_\Psi$  —  $\delta_D$ -корректная операция поиска контрольных точек, такая что  $\Phi_\Psi \underset{\Psi}{\sim} \Phi_\lambda$ .*

## Модель системы зрительного внимания

Одним из способов решения задачи классификации контрольных точек на избыточные и неизбыточные является использование модели системы зрительного внимания.

Компоненты модели:

- Функция заметности в точке
- Признаковое представление изображения

## Функция заметности

Заметность характеризует отличие структуры изображения в рассматриваемой точке от ее окрестности.

## Связь с признаковым представлением

Рассмотрим случайную величину

$$e_{(x,y)} = \begin{cases} 1, & \text{если точка } (x, y) \text{ — «заметная» (неизбыточная)} \\ 0, & \text{в противном случае} \end{cases}$$

Тогда заметность можно определить на основе признакового представления изображения  $F(x, y)$ :

$$s(x, y) = P(e_{(x,y)} = 1 | F(x, y)).$$



## Признаковое представление изображения

Для каждой точки изображения определяются значения следующих признаков

- Контраст яркости: вычисляется с помощью разности гауссианов
- Контраст цвета: вычисляется с помощью разности гауссианов в пространстве LAB
- Ориентация направленного отрезка, содержащего точку: вычисляется с помощью фильтров Габора

## Функция заметности

- Для вычисления совокупной заметности используется линейная комбинация значений признаков
- Значения признаков предварительно нормализуются для усиления наиболее существенных признаков

## Карта заметности



## Решающая функция

- Значение решающей функции вычисляется сравнением значения функции заметности с пороговым значением.
- Контрольные точки, заметность которых ниже порогового значения считаются избыточными.
- Альтернативный подход: выбор фиксированного числа наиболее заметных контрольных точек.

## Сопоставление избыточных контрольных точек

- 1 Поиск контрольных точек базовым методом
- 2 Расчет заметности контрольных точек
- 3 Избыточные контрольные точки исключаются из анализа
- 4 Для оставшихся точек производится расчет описаний
- 5 Производится сопоставление контрольных точек

## Экспериментальная оценка эффективности

Распознавание и ассоциация пространственных ориентиров.

Постановка эксперимента:

- Тестовая коллекция testseq-monoslam: 1000 изображений
- Показатели быстродействия: время поиска, описания и сопоставления контрольных точек, среднее время обработки кадра, среднее число последовательных кадров повторного распознавания, средняя доля ошибочных ассоциаций между контрольными точками последовательных кадров.
- Метод поиска построен с помощью методики повышения быстродействия на основе метода SURF

## Результаты экспериментов

- Среднее время сопоставления сокращается в 6 раз
- Среднее время обработки кадра сокращается 4.4 раза
- Время поиска и расчета описаний контрольных точек сократилось в 1.5 раза.
- Среднее число последовательных кадров, в которых происходит повторное распознавание выросло на 8%
- Средняя доля ошибок ассоциации сократилась на 20%

## Результаты экспериментов

**Table:** Средняя точность и средняя полнота сопоставления изображений.

Показатель	SURF	SURF+
Обработка кадра	0.4 с	0.09 с
Поиск и описание контрольных точек	0.06 с	0.04 с
Сопоставления контрольных точек	0.3 с	0.05 с
Повторное распознавание	1.94 кадра	2.11 кадра
Доля ошибочных ассоциаций	5%	4%



## Основные результаты

- 1 Методика повышения быстродействия сопоставления изображений.
- 2 Модель системы зрительного внимания.
- 3 Математический аппарат  $\lambda$ -корректных операций поиска контрольных точек.
- 4 Экспериментальное подтверждение эффективности методики повышения быстродействия, полученное в практических приложениях.

## Направления дальнейшего исследования

- Усовершенствование модели системы зрительного внимания
- Развитие аппарата  $\lambda$ -корректных операций поиска контрольных точек и разработка новых методов поиска контрольных точек
- Сравнительный экспериментальный анализ программно-аппаратных методов повышения быстродействия сопоставления изображений

Спасибо за внимание

Спасибо за внимание

# Сопоставление изображений тестовой коллекции

## Постановка эксперимента

- Тестовая коллекция Inria: 8 групп изображений, для которых известны связывающие преобразования
- Показатели качества: точность и полнота сопоставления
- Показатели быстродействия: время поиска и сопоставления контрольных точек
- Методы сопоставления построены с помощью методики повышения быстродействия на основе 9 известных методов

## Результаты оценки быстродействия

**Table:** Быстродействие сопоставления изображений (мс).

Метод	$t_{desc} \Phi_\lambda$	$t_{match} \Phi_\lambda$	$t_{desc} \Phi_\Psi$	$t_{match} \Phi_\Psi$
dog	848	1454	187	222
har	1463	4050	328	594
hes	1785	8073	184	1431
har-aff	1155	2871	187	387
hes-aff	1132	3382	157	625
har-m	4538	27485	750	4457
hes-m	5927	49170	500	9485
har-aff-m	2471	12235	407	1870
hes-aff-m	1023	2410	130	570

## Поиск изображений по содержанию

Постановка эксперимента:

- Тестовая коллекция РОМИП: 38 000 изображений
- Показатели качества: точность и полнота кластеризации коллекции, уровень ошибок первого и второго рода
- Показатели быстродействия: время поиска и сопоставления контрольных точек
- Метод оценки: экспертная оценка
- Метод поиска построен с помощью методики повышения быстродействия на основе метода SURF

## Результаты оценки

**Table:** Результаты оценки качества и быстродействия кластеризации.

Показатель	Эталонный метод	Модифицированный метод
Ошибки первого рода	$1.97 \times 10^{-4}$	$8.42 \times 10^{-5}$
Ошибки второго рода	0.430	0.462
Точность	0.721	0.739
Полнота	0.569	0.537
Время поиска	205	194
Время сопоставления	25	0.5

## Результаты оценки качества

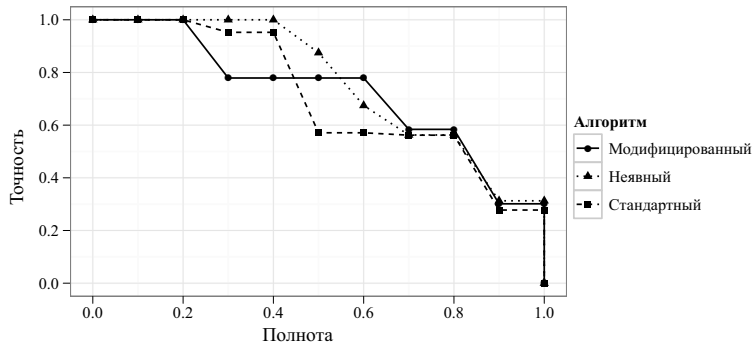


Figure: 11-точечный график TREC.  $\Phi_\lambda$  — оригинальный метод.  $\Phi_\Psi$  — модифицированный метод.  $\bar{\Phi}_\Psi$  — неявный метод.



# Результаты оценки быстродействия

