

ПРОБЛЕМЫ МАШИННОГО ВИДЕНИЯ В РОБОТОТЕХНИКЕ И АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОИЗВОДСТВА

С.М. Соколов

В лекции рассматриваются проблемы комплексирования средств аппаратной поддержки и разработки математического обеспечения систем машинного зрения – *систем технического зрения* (СТЗ). Рассмотрение проводится на многочисленных примерах прикладных и исследовательских задач, востребованных отечественной наукой, техникой и промышленностью. Обсуждаются перспективные постановки задач в разработке и изготовлении СТЗ.

1. Основные составляющие машинного зрения.

Основные составляющие машинного зрения условно представлены на рис. 1. На этом рисунке изображены сразу все возможные комбинации элементов систем технического зрения. В практических задачах эти составляющие могут использоваться в различных сочетаниях. Собранные вместе элементы СТЗ показывают на те проблемы и задачи, которые должны быть решены при желании использовать машинное видение.

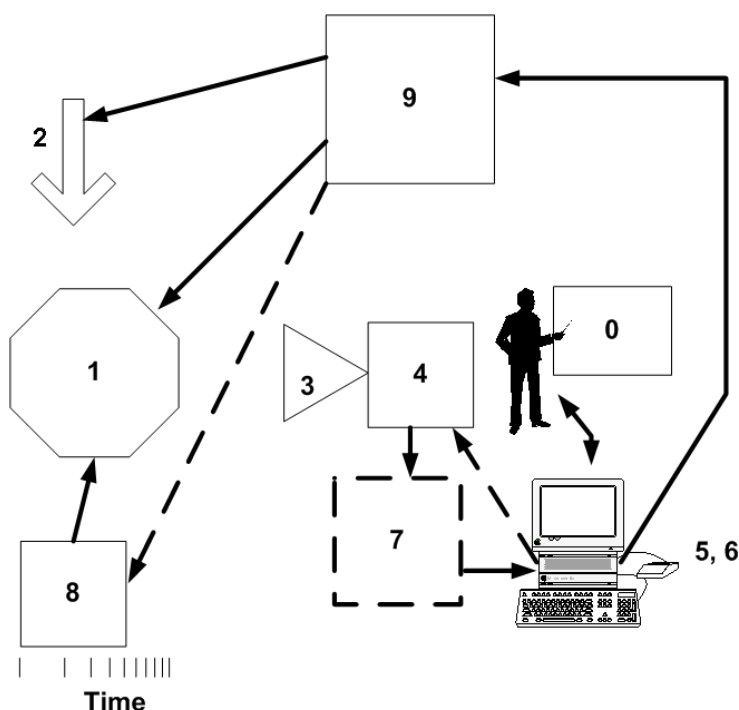


Рис. 1. Основные составляющие машинного зрения:

1 - объект интереса; 2 - освещение; 3 - оптическая система; 4 - преобразователь «свет-сигнал»; 5 - ЭВМ; 6 – математическое обеспечение; 7 - устройство ввода аналоговых данных; 8 - внешние устройства; 9 - исполнительные устройства

Объект интереса СТЗ – это тот или иной объект внешнего мира, информация о котором представляет интерес для использования в практической задаче. Такими объектами могут выступать как технические объекты (например, объекты инфраструктуры железной дороги или орбитальная космическая станция), так и объекты пищевой и медицинской промышленности: жидкости, порошки, поверхности тканей. Масштаб и размеры объектов

интереса могут быть самыми разными, как может различаться и та информация, которую требуется извлечь с помощью машинного зрения.

Освещение и отражающие свойства объектов это те процессы и явления, которые и позволяют бесконтактно получать информацию об освещаемых объектах. Выделим следующий принципиальный момент в этом элементе машинного зрения. Освещение может быть управляемым или специально организованным, либо внешним по отношению к системе машинного зрения.

Оптическая система – система линз, с помощью которой световой поток от интересующей области пространства проектируется на преобразователь «свет – сигнал». Наиболее часто в качестве такой системы используются стандартные фото, микро и телевизионные объективы.

Преобразователь «свет-сигнал» - устройство, преобразующее энергию падающего света в электрическую. Традиционно, в таких устройствах напряжение выходного сигнала пропорционально количеству падающих на соответствующий участок поверхности преобразователя фотонов.

ЭВМ или специальный вычислитель – аппаратура, реализующая алгоритмы сбора и обработки зрительных данных.

Математическое обеспечение – сердцевина рассмотрения, совокупность математических моделей, алгоритмов и реализующих их программ

Устройство ввода аналоговых данных - преобразователь аналоговых зрительных данных в цифровые; основная часть быстродействующий аналого-цифровой преобразователь и устройство сопряжения с шиной и памятью ЭВМ. Возможны варианты реализации как встроенных плат (фреймграберов или плат видео захвата), так и внешних устройств и устройств, встроенных в видеокамеры цифровые камеры. При использовании этого устройства необходимо учитывать масштаб реального времени, задаваемый преобразователем «свет-сигнал».

Внешние устройства – внешние по отношению к рассматриваемой СТЗ и воздействующие на объект интереса устройства, процессы в которых протекают в своей временной шкале, задающей реальное время.

Исполнительные устройства – те устройства, которые подключены к СТЗ, и с помощью которых можно воздействовать на наблюдаемую сцену и, в частности объект интереса.

2. ПРОБЛЕМЫ РАЗРАБОТКИ И ВНЕДРЕНИЯ СТЗ.

Принципиальным отличием машинного зрения от разнообразных устройств, использующих световой поток в качестве исходных данных является способность «понимать» - анализировать поступающие зрительные данные на предмет выделения информации, требующейся для решения той или иной задачи. На пути этого «понимания» стоит ряд проблем. Назовем их:

Неоднозначность и нарушение непрерывности при отображении 3-х мерного мира на 2-х мерный;

существенное влияние внешних (освещение, движение объектов, различные отражающие свойства материалов) и внутренних (самой системы формирования данных) факторов на изменчивость образов объектов.

Основным средством обработки зрительных данных в СТЗ являются ЭВМ или специальные вычислители, использующие подобные же средства математического обеспечения. Для решения практических задач необходимы инструментальные средства для описания и хранения в ЭВМ информации об объектах внешнего мира. К настоящему моменту времени не существует развитого математического аппарата, на который могла бы опираться общая объектно-ориентированная модель данных. Поэтому практически в

каждой конкретной разработке приходится создавать язык описания объектов внешнего мира применительно к рассматриваемой задаче.

Требования реального времени. Математическое и алгоритмическое обеспечение машинного видения в «понимании» или распознавании анализируемых сцен даже без учета проблем сбора исходных зрительных данных и без ограничений на время обработки представляет собой сложную задачу и им посвящено не мало публикаций. С дополнением ограничений, связанных с необходимостью сбора зрительных данных и обработке их в темпе, задаваемом внешними процессами, сложность формирования математического и алгоритмического обеспечения СТЗ возрастает многократно.

Технические и организационные трудности. Использование машинного видения является заманчивой перспективой во многих сферах человеческой деятельности, но количество мест с реальными возможностями внедрения СТЗ, определяемых экономической целесообразностью существенно меньше. Кратко перечислим те ограничения, которые возникают по этим соображениям.

Как правило, к машинному видению обращаются при желании дооснастить этим средством уже действующие механизмы или технологические процессы, значительно реже формируется система, в которую СТЗ закладывается как неотъемлемая часть.

И в том и в другом случае целесообразными признаются затраты на СТЗ от 10 до 30% от стоимости всего проекта, если не рассматривать отдельные исключения. Аппаратные же средства, используемые в машинном видении, делятся на две основных категории:

- существующие средства, разработанные и широко используемые в телевидении, ориентированном на человека как конечного потребителя зрительной информации;
- специализированные разработки, ориентированные на техническое использование.

Разница в стоимости средств из второй категории составляет порядок, а то и более, что в абсолютном выражении соответствует нескольким сотням - тысячи долларов США для первой категории и десяткам тысяч долларов – для второй.

Примерно такая же ситуация с вычислительными мощностями:

- ЭВМ традиционной архитектуры, оснащенные обычными операционными системами сравнительно дешевы (несколько сотен долларов США), а
- специальные видеопроцессоры и математическое обеспечение к ним или операционные системы реального времени – значительно дороже и требуют специальных навыков по их использованию.

Главным, как наиболее доступным направлением продвижения машинного видения к практическому использованию в сложившихся условиях, в группе СТЗ ИПМ РАН было выбрано разработка и совершенствование алгоритмической базы совместно с современной программной реализацией в различных средах.

3. Этапы развития элементов систем технического зрения (СТЗ)











На первых этапах развития СТЗ одной из основных сдерживающих проблем была проблема отсутствия адекватных потребностям (возможностям математического обеспечения обработки зрительных данных) аппаратных средств ввода и обработки. Поэтому приведем классификацию этапов развития СТЗ в ИПМ РАН на основе используемых средств получения, ввода и обработки зрительных данных.

Отметим то обстоятельство, что, несмотря на большое разнообразие используемых средств аппаратной поддержки и весьма ограниченные вычислительные ресурсы, все приведенные задачи решались в условиях реального масштаба времени. Лозунг «Работа в реальном времени» является объединяющим началом всех разработок, проводимых в группе систем технического зрения ИПМ им. М.В. Келдыша РАН.

	Датчик зрительных данных	Устройство ввода	ЭВМ
1973-1983	матрица фоторезисторов, ТВ-камера Электроника 50	Оригинальные разработки	М6000
1983-1993	ТВ-камеры на видиконах, дефлектронах, ПЗС-матрицах	ОТ-10МТ, Оригинальный СВП	Электроника 60, ВУМС, ДВК, СВП
1993-2004	ТВ-камеры на ПЗС и CMOS матрицах	Коммерческие устройства	ПЭВМ

Кратко перечислим те задачи, которые были решены на каждом из этапов. Более подробную информацию об этих разработках можно найти в публикациях, приведенных в списке литературы [..., ...].

1973-1983
матрица фоторезисторов, Электроника 50, М6000

				
Эмулятор датчика зрительных данных малого разрешения (10x10)	СТЗ на основе матрицы фоторезисторов (10x10)	Цифровое изображение, полученное с матрицы фоторезисторов	СТЗ для информационной поддержки сборки масляного насоса	СТЗ для навигации мобильного робота
				
Устройство формирования цифрового (128x128x64) изображения (ИПМ – ИППИ)	СТЗ для контроля качества семян	СТЗ для контроля стрелочных измерительных приборов	Индивидуальная шкала прибора, выполненная по данным СТЗ	СТЗ для информационной поддержки сборки двигателя мопеда

1983-1993

видикон, дефлекtron, Электроника 60, ВУМС, ДВК, Специальный Видео Процессор (СВП)

			
OT-10MT – устройство ввода видеосигнала в ЭВМ типа «Электроника 60» (ИПМ – МНПО «Спектр» 1983 г.)	OT-10MB – устройство ввода видеосигнала в ЭВМ типа «Электроника 60» (ИПМ – МНПО «Спектр» 1985 г.)		Штриховые миры для аттестации СТЗ.
		СТЗ контроля линейных размеров в составе ГПС фрезерной обработки	
Установка для выходного контроля индикаторов на жидких кристаллах (ИЖК) на базе СВП	Пример изображения контролируемого ИЖК		Пример изображения контролируемого объекта

1993-2004

ПЗС, CMOS, ПЭВМ ХТ – PIV

- СТЗ для контроля чистоты и грансостава металлического порошка (ИПМ – ВИЛС)
- СТЗ для контроля объектов инфраструктуры железной дороги (ИПМ – ВНИИЖТ, Забайкальская ж.д., Октябрьская ж.д., Московская ж.д.)
- СТЗ для контроля чистоты жидкости в емкостях на конвейере (ИПМ – «Кристалл»)
- СТЗ для слежения за малоразмерной целью (ИПМ – «ТехноАС»)
- Многофункциональная информационная система для мобильных роботов (ИПМ – СКТБ МГТУ)
- СТЗ для автоматизации контроля процесса сближения и стыковки КК и МКС (ИПМ – НПО «Энергия»)

Эти задачи, решенные и решаемые в последнее десятилетие, рассмотрим более подробно.

4. Методы преодоления проблем машинного видения на примерах задач, решаемых в группе СТЗ в настоящее время

Естественно, что при решении этих задач используется весь опыт, накопленный предыдущими исследованиями и разработками.

Направления преодоления возникающих трудностей.

Устранение изменчивости образов объектов на изображении и неоднозначности их описания организацией сцены.

Добавление дальнометрической информации или изображений с различных точек зрения.

Управление/устранение внешних факторов.

Развитие техники объектно ориентированного моделирования и программирования применительно к СТЗ.

Наращивание «мощности» инструментальных (**программных** и аппаратных средств).

Использование существующих или разработка новых математических моделей наблюдаемых объектов и явлений. (Выход в новое измерение (среди 4-х) или изменение масштаба по одной из осей, выбор языка описания и метрики).

Суммирование сил и средств на узких местах в решении конкретной задачи.

Эти, кратко перечисленные пути преодоления проблем машинного видения, проиллюстрируем далее на примерах решения практических задач.

4.1. СТЗ для контроля чистоты и грансостава металлического порошка (ИПМ им. М.В. Келдыша РАН – Всероссийский институт легких сплавов (ВИЛС)).

Задача контроля состоит в том, чтобы проверить выбранную порцию гранул металлического порошка на предмет наличия среди них инородных частиц (чистоту порошка), а также подсчитать грансостав (распределение частиц по размерам). Если учесть, что размер частиц варьируется в пределах от 40 до 200 мкм, а возможная частота появления включений составляет порядка 10^{-5} , 10^{-6} , то становится понятно, что проведение «ручного» контроля в достаточно сжатые сроки, выделенные для принятия решения о годности всей партии порошка, является трудно выполнимой и достаточно ненадежной по своим результатам задачей. Её и удалось решить с помощью СТЗ.

Решение этой задачи хорошо иллюстрирует такой прием, как организация сцены и освещения. В данном примере способ контроля и устройство освещения зоны контроля удостоились патента РФ и позволяют успешно решать поставленную задачу, используя мощности универсальных ПС. Устройство формирования и подачи пробы порошка обеспечивает монослой порошка и такое его освещение, которое позволяет выделять инородные включения практически по одному признаку – перепаду яркости, в процессе непрерывного движения пробы в поле зрения ТВ-камеры.

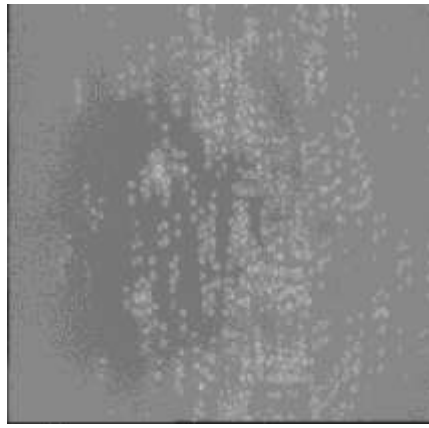


Рис. 2. Пример изображения поля зрения АСКГ при контроле включений.

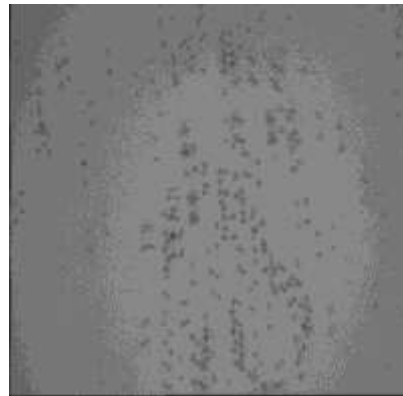


Рис. 3. Пример изображения поля зрения АСКГ при контроле грансостава

Одна из первых установок автоматизированного контроля гранул металлического порошка в 1996 году была приобретена Китайской Народной Республикой, где успешно эксплуатируется до сих пор.

<p>Образец автоматизированной системы контроля гранул (АСКГ-2), прошедший опытную эксплуатацию во всесоюзном институте легких сплавов в 1993.</p>	<p>Способ контроля инородных включений в массе металлических гранул. Авторское свидетельство СССР на изобретение №1805338 от 09.10.1992</p>	<p>Образец автоматизированной системы контроля гранул (АСКГ-3), эксплуатируемый в КНР с 1997 г.</p>

Рис. 4. Изображения установок для автоматизированного контроля гранул.

В настоящее время эта задача контроля порошков получила свое дальнейшее развитие. На повестку дня встал вопрос о классификации включений по цвету и исследовании порошковых структур, полученных на основе измельчения компонент на субмикронный уровень.

4.2. СТЗ для контроля объектов инфраструктуры железной дороги (ИПМ – ВНИИЖТ, Забайкальская ж.д., Октябрьская ж.д., Московская ж.д.)

Совместно со специалистами Забайкальской ж.д. и МНПО «Спектр» был сформирован мобильный контрольно-вычислительный диагностический комплекс для оперативного, бесконтактного контроля состояния объектов инфраструктуры железной дороги. В составе этого комплекса сотрудниками ИПМ РАН был разработан ряд модульных СТЗ для автоматизации выполнения инспекционно-измерительных операций.

Перечислим некоторые из них, а с некоторыми познакомимся подробнее.







		
<p>Контроль возникновения и продолжительности электрической дуги.</p>	<p>Определение положения контактного провода по высоте и в плане (<i>над пантографом электровоза – реальные условия эксплуатации</i>)</p>	<p>Верификация моделей колебательных процессов контактной сети на скоростных участках</p>
		
<p>Считывание технологических меток с шейки рельса</p>	<p>Контроль <i>плеча балластной призмы</i> — размера от внешнего края шпал до границы щебня.</p>	<p>Контроль надернутых когтылей, шпал и шпальных ящиков</p>

Рис. 5. Примеры полей зрения СТЗ для контроля объектов инфраструктуры железной дороги.

4.2.1. СТЗ для определения СИЛЫ ВЗАМОДЕЙСТВИЯ КОНТАКТНОГО ПРОВОДА И ТОКОПРИЕМНИКА ЭЛЕКТРОПОДВИЖНОГО СОСТАВА

Новым, перспективным направлением машинного зрения применительно к контролю объектов инфраструктуры железной дороги является определение кинематических и даже динамических свойств объектов на основе сбора и анализа зрительных данных об их движении. В качестве одной из первых показательных задач рассмотрим задачу оценки силы взаимодействия токоприемников электроподвижного состава с контактным проводом.

Зрительная информация о колебаниях токоприемника электроподвижного состава (ЭПС) позволяет, в принципе, определить основные динамические характеристики этих колебаний, в частности, найти силу, с которой токоприемник прижимается к контактному проводу. Такое определение выполняется в результате обработки временных рядов числовых данных, полученных оцифровкой видеофильма, снятого ТВ-камерой, установленной рядом с токоприемником. Камера фиксировала колебания токоприемника во время движения ЭПС. Числовые данные представляют собой выраженные в условных единицах вертикальные координаты рамы и полоза токоприемника. Анализ полученных временных рядов позволяет восстановить реальную зависимость указанных координат от времени, найти соответствующие скорости и ускорения и, подставив найденные величины в уравнения движения полоза и рамы, вычислить искомую силу в функции времени.

Чтобы результаты расчетов такого рода признать достаточно точными, необходимо быть уверенным в правильной реконструкции движения токоприемника и адекватности используемой математической модели, в том числе, в правильном выборе числовых значений ее параметров.

Реконструкция (аппроксимация) фактического движения токоприемника выполнялась с использованием дискретных рядов Фурье. Ее верификация выполнялась средствами гармонического анализа. Были выбраны отрезки временных рядов, на которых рама и полз совершали довольно значительные и регулярные колебания. Учитывая механическую природу таких колебаний, можно утверждать, что они должны описываться суммой небольшого числа гармоник. Эти гармоники были найдены, и соответствующие аппроксимации выбранных отрезков данных построены. Затем строилась аппроксимация тех же отрезков рядами Фурье. При этом наибольшая частота выбиралась так, чтобы обе аппроксимации, а также их первые и вторые производные по времени достаточно точно совпадали. Найденное значение наибольшей частоты (или близкое ему) использовалось затем при аппроксимации рядами Фурье всех имеющихся данных.

Лежащие в основе математической модели токоприемника дифференциальные уравнения являются общепринятыми, однако числовые значения некоторых их параметров неизвестны. Эти значения выбирались из общих соображений, а также из условия, что искомая сила должна лежать в известных пределах. Выбор параметров модели – узкое место данной работы, но следует отметить, что проведение с токоприемником ряда простых специальным образом организованных экспериментов и оцифровка видеозаписи о них позволили бы выполнить идентификацию математической модели во всем необходимом объеме.

Предлагаемый метод изложен на примере данных, полученных при контрольных заездах ЭПС с новым токоприемником на полигоне в Щербинке.

2. Математическая модель колебаний токоприемника. Примем простейшую двухмассовую модель токоприемника [1]. Будем считать, что он состоит из полоза, рамы и двух невесомых пружин. Полз прижат к контактному проводу и соединен пружиной с рамой, вторая пружина соединяет раму с основанием – крышей локомотива. Рама и полз

могут совершать поступательные движения по вертикали, но вертикальные перемещения основания отсутствуют. Теорему об изменении количества движения токоприемника в проекции на вертикаль запишем следующим образом

$$m_1 \frac{d^2 x_1}{dt^2} + m_2 \frac{d^2 x_2}{dt^2} + b_1 \frac{dx_1}{dt} + c_1(x_1 - l) = F. \quad (1)$$

Здесь m_1 и m_2 – приведенные массы рамы и полоза, x_1 и x_2 – координаты рамы и полоза, отсчитываемые вверх по вертикали от основания, c_1 – коэффициент жесткости пружины между рамой и основанием, l – значение x_1 , при котором эта пружина не деформирована, b_1 – коэффициент демпфирования рамы, F – вертикальная компонента силы, действующей на полоз со стороны контактного провода.

Обработка зрительных данных о колебаниях токоприемника позволяет получить значения координат x_1 и x_2 , выраженные в пикселах, в некоторые дискретные моменты времени $t_0 < t_1 < t_2 < \dots < t_N$. Эти значения, пересчитанные в метры, будем считать измерениями величин x_1 и x_2 . Данные измерений обозначим $x_i^{(n)}$ ($i = 1, 2; n = 0, 1, \dots, N$): $x_i^{(n)} \approx x_i(t_n)$. По этим данным методом наименьших квадратов построим сглаживающие выражения

$$X_i(t) = \alpha_i + \beta_i(t - t_0) + \sum_{m=1}^M a_{im} \sin \frac{\pi m(t - t_0)}{t_N - t_0} \quad (i = 1, 2). \quad (2)$$

Каждое выражение – сумма линейной функции и отрезка ряда Фурье по синусам. Выражения такого вида удобно использовать для аппроксимации произвольных гладких функций, заданных на отрезке $t_0 \leq t \leq t_N$ [2]. Функция $X_i(t)$ сглаживает измерения $x_i^{(n)}$. Имеют место соотношения $x_i^{(n)} \approx X_i(t_n)$, но разности $x_i^{(n)} - X_i(t_n)$ в отличие от разностей $x_i^{(n)} - x_i(t_n)$ содержат заметные высокочастотные составляющие. Варьируя число гармоник M , этими составляющими можно в известных пределах управлять.

Подставив выражения (2) в соотношение (1), найдем силу

$$F = F_0 + m_1 \frac{d^2 X_1}{dt^2} + m_2 \frac{d^2 X_2}{dt^2} + b_1 \frac{dX_1}{dt} + c_1 X_1. \quad (3)$$

Здесь $F_0 = c_1 l$. Величины m_1 , m_2 , b_1 , c_1 и l – параметры принятой математической модели. Их значения известны с разной точностью. Наибольшие ошибки содержатся в c_1 и l , поэтому величину F_0 ниже всегда будем выбирать так, чтобы среднее значение выражения (3) на отрезке $t_0 \leq t \leq t_N$ равнялось нулю. В этом случае задаваемая этим выражением сила будет представлять собой отклонение силы от ее среднего на рассматриваемом отрезке значения.

4.3. СТЗ для контроля чистоты жидкости в ёмкостях на конвейере.

Описываемая задача состоит в выходном контроле чистоты жидкости в уже закупоренных бутылках. Примечательной чертой предлагаемой системы технического зрения является то, что она работает в составе существующих бракеражных автоматов, не требует переделки конвейера. Автоматически, бесконтактно настраивается на скорость конвейера. СТЗ получает и обрабатывает зрительные данные с 4-х ТВ-камер, установленных вдоль конвейера. Использует две ПЭВМ с ОС Windows 2000.



Рис. 6. СТЗ для контроля чистоты жидкости в ёмкостях, установленная на действующем конвейере.

Укажем на особенности решаемой задачи с точки зрения проблем математического обеспечения:

- распределенная система (две ЭВМ с двумя ТВ-камерами каждая, работающие синхронно в реальном времени) – решено за счет обмена сигналами по линии связи СОМ портов и использования обоих полей в структуре ТВ-кадров;
- разнообразные проявления инородных включений (направление движения, контраст, форма) – преодолевается за счет использования наращиваемой модели объекта (включения) в процессе обработки зрительных данных;
- отладка в составе действующего производства – решено за счет формирования специальных AVI файлов и дополнительной отладочной информации о времени выполнения каждой из операций.

4.4. СТЗ для слежения за малоразмерной целью

Задача, решаемая СТЗ в этом приложении, состоит в следующем. Пятно целеуказателя перемещается по поверхностям объектов, расположенных на расстоянии от 1,5 м до 15 м от видеокамеры. На поверхностях этих объектов выполняются дальнометрические или иные измерения. СТЗ должна выполнять отслеживание траектории пятна целеуказателя для последующего отображения этой траектории поверх изображения поля зрения СТЗ, в котором присутствует объект измерений.

Изображения в рассматриваемой СТЗ формируются с помощью цветной или черно-белой камеры. Местоположение и направление камеры перед началом сеанса измерений настраиваются таким образом, чтобы в ее поле зрения целиком попадал объект или часть объекта, в пределах поверхности которого в течение сеанса измерений будет выполняться

перемещение целеуказателя. Образ пятна лазерного целеуказателя на обрабатываемых изображениях не имеет постоянного цвета. Этот образ содержит пиксели различных оттенков красного цвета, пиксели белого и серого цветов. Так как цвет в данной задаче слежения за малоразмерным объектом не является устойчивым признаком, то для обработки были выбраны полутоновые изображения.

Таким образом, основная особенность зрительных данных, обрабатываемых в данной задаче, состоит в том, что в поле зрения СТЗ на постоянном фоне движется одна малоразмерная цель, характеризующаяся локальным контрастом с фоном. Относительно структуры фона сложно сделать строгие предварительные допущения. В поле зрения СТЗ могут присутствовать произвольные искусственные и естественные объекты.

В наблюдаемой сцене обычно присутствует неуправляемое освещение. Это может быть естественное освещение при выполнении измерений на открытом воздухе, или искусственное освещение в процессе измерений внутри помещений. В случае выполнения измерений внутри помещений возможно влияние солнечного света, попадающего сквозь окна помещений. В наихудшем случае возможно наблюдение целеуказателя внутри помещения «в контрсвете» напротив окон. Относительно съемки при естественном освещении возможно принятие допущения, заключающегося в том, что это освещение «преимущественно рассеянное». При сильном прямом солнечном освещении наблюдаемой поверхности пятно целеуказателя становится затруднительно обнаружить даже оператору-человеку.

С предположениями относительно имеющегося в сцене освещения и структуры фона связан вопрос классификации цели по контрасту с фоном. В работах [21, 23] рассматриваются «слабоконтрастные» цели. «Слабоконтрастность» цели означает, что ее не удастся надежно выделить по величине контраста после вычитания изображений, относящихся к различным промежуткам времени. В рассматриваемой задаче цель является «преимущественно контрастной», что позволяет применять метод вычитания изображений при обнаружении кандидатов на цели. Контраст может снижаться при попадании пятна целеуказателя на светлые поверхности и при засветке поля зрения направленным освещением. В целом, относительно видимости цели будем принимать обычное в задачах выделения малоразмерных целей допущение о локальной однородности фона в пределах области, по размерам в несколько раз превышающей описывающий прямоугольник цели.

Траектория пятна целеуказателя может отличаться от прямолинейной, пятно целеуказателя может совершать отклонения от преобладающего направления движения. Например, кратковременные отклонения от прямолинейного фрагмента траектории наблюдаются в случае попадания пятна целеуказателя на поверхности различных объектов, когда дальность до поверхности, на которую попадает пятно целеуказателя, меняется скачкообразно. Кроме того, измерения могут проводиться вдоль траектории, состоящей из нескольких фрагментов, близких к прямолинейным, но расположенных относительно друг друга под углом порядка 90 градусов. Таким образом, можно заключить, что в данной задаче цель может двигаться вдоль траектории с переменной скоростью, может совершать кратковременные отклонения от преимущественно прямолинейных участков траектории, а также резко менять направление траектории.

4. 5.1. Структура Про СТЗ

Применительно к разработке систем слежения за малоразмерными целями можно заключить, что в процессе разработки СТЗ для решения конкретной прикладной задачи необходимо с учетом особенностей этой задачи выполнить проектирование процедуры обнаружения кандидатов на цели, выбрать способ хранения информации об этих кандидатах, разработать алгоритм первоначального формирования траекторий по данным о кандидатах, накопленным за некоторый промежуток времени, а также алгоритм слежения за целью в соответствии с построенной траекторией. К подзадаче первоначального обнаружения цели будем относить этапы обнаружения кандидатов, сохранения информации о

них в форме структуры данных, удобной для использования в алгоритме формирования траекторий, а также процедуру первоначального формирования траектории. Подзадача прослеживания цели заключается в согласовании информации, полученной на очередных изображениях, с данными о ранее сформированных траекториях целей. Таким образом, цель в задаче слежения можно представить в виде набора кандидатов с их характеристиками и временными метками, которые образуют корректную траекторию, удовлетворяющую требованиям решаемой прикладной задачи.

Проектирование ПрО СТЗ выполнялось на основе объектно-ориентированного подхода. В результате анализа требований к ПрО СТЗ был выделен набор объектов ПрО, обеспечивающих решение задачи слежения. Функционирование ПрО СТЗ в режиме реального времени поясняется на рис. 1.



Рис. 7. Диаграмма состояний СТЗ в процессе выполнения цикла реального времени.

4. 5.2. Результаты экспериментов

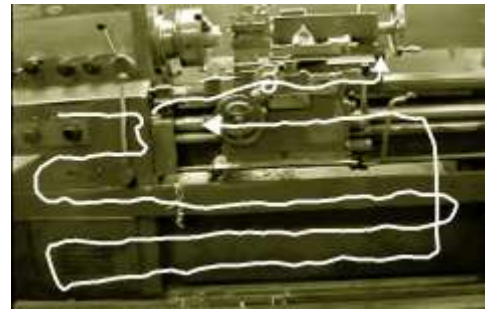
Рассмотрим примеры результатов слежения за пятном целеуказателя на нескольких видеопоследовательностях, выполненных внутри помещений. Расстояние до освещаемых целеуказателем поверхностей объектов было выбрано в интервале 3-5 м.

На рис. 2, 3(а) показаны первые кадры использовавшихся видеопоследовательностей. На рис. 2, 3(б) показаны те же самые кадры с наложенными эталонными траекториями пятна целеуказателя. В случае если траектория содержит существенные разрывы, то на изображении она представлена в виде нескольких непрерывных фрагментов. Конечная точка каждого непрерывного фрагмента траектории на рис. 2, 3(б) обозначена треугольным маркером.

Рассматриваемым видеопоследовательностям были присвоены условные названия. Все видеопоследовательности имеют длительность порядка 50 с. Размеры отдельных кадров составляют 640x480 пикселей, используются 256 градаций яркости.



(a)



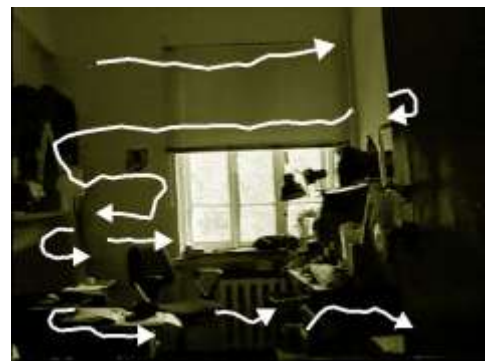
(б)

Рис. 8. Тестовая видеопоследовательность «Станок».

На видеопоследовательности «Станок» (рис. 2) представлено движение цели на фоне поверхностей с диффузным и зеркальным отражением. Окрашенные поверхности токарного станка характеризуются преимущественно диффузным отражением, а неокрашенные полированные поверхности имеют значительную зеркальную составляющую отраженного света. При попадании на зеркально отражающие поверхности образ цели либо пропадает из поля зрения, либо (когда оптическая ось зрительного датчика и направление луча целеуказателя удовлетворяют условию зеркального отражения) имеет яркость, превышающую яркость образа на диффузной поверхности примерно в 2 раза при аналогичном контрасте. При зеркальном отражении площадь образа цели на изображении может увеличиваться более чем в 2 раза. При движении цели на данной видеопоследовательности наблюдается разрыв длительностью примерно 0.4 с и с промежутком порядка 70 пикселей на изображении. Траекторию цели можно представить в виде двух непрерывных фрагментов. На втором фрагменте траектории имеется кольцевая петля. Добавление этой особенности объясняется тем, что при выполнении дальнометрических измерений образ целеуказателя может останавливаться или двигаться в небольшой окрестности поля зрения.



(a)



(б)

Рис. 9. Тестовая видеопоследовательность «Окно».

На видеопоследовательности «Окно» (рис. 3) представлена съемка движения цели внутри помещения в условиях контрсвета. При переходе между боковой и фронтально расположенной стенами образ цели исчезает из поля зрения. В процессе движения контраст и форма образа цели непостоянны. Длительность временных промежутков исчезновения цели достигает 1,3 с, а расстояние между местоположением образа цели на изображении до и после исчезновения составляет 60–100 пикселей. Исчезновение цели часто наблюдается при движении пятна целеуказателя по поверхностям предметов, расположенных на разном расстоянии от зрительного датчика (в нижней половине поля зрения). Существенные промежутки исчезновения цели не позволяют считать траекторию цели на данной видеопоследовательности непрерывной. Отдельные фрагменты траектории, которые удалось обнаружить по данным зрительного наблюдения, показаны на рис. 3(б).

Образы целей с нескольких различных кадров разных видеопоследовательностей показаны на рис. 4.

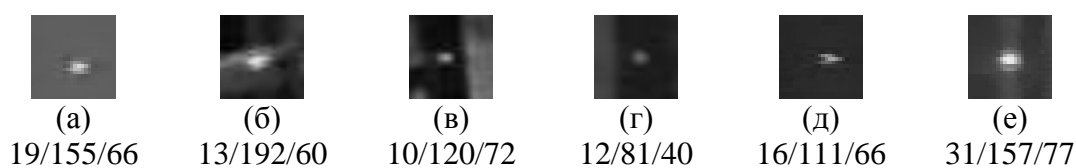


Рис. 10. Несколько типичных изображений образа цели на кадрах тестовых видеопоследовательностей (показаны в увеличенном виде). Для каждого образа в формате S/B/C приведены значения площади (в пикселях), средней яркости и среднего контраста с окружающим фоном.

Контраст и размеры цели нельзя считать постоянными в пределах одной видеопоследовательности. Контраст и яркость образа цели может меняться при движении по светлым поверхностям объектов и при попадании на поверхности с различными отражающими свойствами. Примеры образов цели различной яркости и контраста приведены на рис. 5.



Рис. 11. Увеличенный фрагмент кадра с наложенными образами цели, соответствующими 7-ми кадрам видеопоследовательности (с интервалом 80 мс). Относительно изображения цель движется слева направо. Контраст образов этих целей непостоянен и равен (в порядке перечисления образов цели в направлении движения) 50, 36, 35, 40, 43 58 и 56 градаций яркости.

Сформированные алгоритмы обработки изображений рассчитаны на использование в СТЗ недорогих портативных персональных компьютеров общего назначения с процессорами класса Intel Celeron 800-1500 МГц под управлением операционной системы Microsoft Windows 2000. В качестве устройства ввода зрительных данных предполагается использование универсальных видеокамер с интерфейсом IEEE-1394 (FireWire). Программное обеспечение СТЗ разработано на языке Си++ с использованием среды программирования Microsoft Visual C++ 6.0.

Результаты экспериментов демонстрируют, что разработанная СТЗ позволяет надежно обнаруживать и прослеживать пятно целеуказателя при его перемещении по поверхностям различных объектов, в т.ч. таких, у которых имеются участки поверхностей с зеркальным отражением. В проведенных экспериментах слежение за пятном лазерного целеуказателя осуществлялось с расстояния 3–5 м, угловая скорость перемещения до 10 об/мин. Условия освещения – естественные в производственных помещениях.

4.5. Многофункциональная информационная система для мобильных роботов (ИПМ – СКТБ МГТУ)

Кратко сформулируем современный уровень требований к информационной системе для обеспечения *автоматизированного дистанционного* управления автономным мобильным роботом и вытекающие из них задачи.

	<i>Требования</i>		<i>Задачи</i>
А	Помимо традиционного ТВ-изображения необходимы 3-х мерные координаты определенных точек пространства. Дифференцированная степень подробности.	⇒	<ol style="list-style-type: none"> 1 Использование стереосистем, лазерных дальномеров, методов триангуляции. 2 Интеграция сенсоров; сочетание выборочного и непрерывного сканирования сцены.
В	Необходимо обеспечение возможности участия человека-оператора на всех этапах организации управления функционированием АМР	⇒	<ol style="list-style-type: none"> 1 Предоставление традиционного ТВ-изображения 2 Автономный контур управления и сбора информации с интерфейсными точками для обеспечения интерактивного или по внешнему прерыванию взаимодействия с оператором. 3 Навигация по ориентирам понятным и оператору и АМР. Взаимный контроль.
С	Связь между отдельными информационно-управляющими модулями комплекса (борт, пункт наблюдения, пункт управления) беспроводная.	⇒	<ol style="list-style-type: none"> 1 Организация информационного обмена по правилам беспроводной сети. 2 Резерв информационной надежности при нарушении связи.
D	АМР должен обладать автономностью на уровне возможности вернуться в одну из точек пройденного маршрута.	⇒	<ol style="list-style-type: none"> 1 Автономная навигация в изученном районе. Построение пути назад.
Е	Стоимость МИСАМР должна составлять экономически целесообразную долю от стоимости АМР (10-60 % в зависимости от основного назначения АМР транспортный - разведчик)	⇒	<ol style="list-style-type: none"> 1 Цена реализации А+В+С+D в рассматриваемых приложениях порядка 5 т.у.е.

Один из возможных вариантов решения поставленных задач был предложен в группе СТЗ ИПМ РАН.

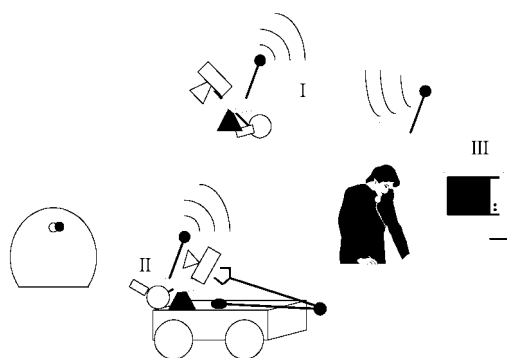


Рис. 12.Схема многофункциональной системы информационного обеспечения мобильного робота:

- I – выносной пульт наблюдения, использующий лазерный целеуказатель на малом сферическом приводе прямого управления (СППУ) в паре с ТВ- камерой;
- II – бортовая часть информационной системы, использующая минидалномер – целеуказатель на базе большого СППУ;
- III – стационарный пульт управления мобильным роботом.

Основные аппаратные составляющие многофункциональной системы информационного обеспечения мобильного робота показаны на следующем рисунке.

<p>«Малый» сферический привод прямого управления (СППУ) с установленным лазерным целеуказателем</p>	<p>Общий вид выносного пульта наблюдения с микропроцессорной реализацией системы управления сферическим приводом прямого управления.</p>	<p>«Большой» сферический привод прямого управления с установленным лазерным целеуказателем - дальномером</p>

Рис. 13. Аппаратные составляющие многофункциональной системы информационного обеспечения мобильного робота

ТВ-камера и минидалномер-целеуказатель или просто целеуказатель устанавливаются на известном расстоянии друг от друга и имеют общую зону осмотра, что позволяет помимо целеуказания и прямого измерения дальности производить измерение дальности на основе триангуляции.

Приводы минидалномера-целеуказателя и целеуказателя обеспечивают сферическую зону осмотра в 50 и 70 угловых градусов соответственно. Перемещения выполняются со скоростями 500-700 угловых градусов в секунду и точностью до 0,3 % от диапазона перемещений.

Кроме того, предполагается, что мобильный робот (МР) может быть оснащен системой безопасности - датчиком препятствий в ближайшем окружении (один-три корпуса АМР).

Основные задачи, на обеспечение которых ориентируется предлагаемая система информационного обеспечения МР:

- осмотр, разведка (сбор данных);
- движение (целенаправленное перемещение к указанной цели);
- манипулирование или эквивалентная работа специальными инструментами с объектами;
- восстановление – описание с указанной точностью формы поверхности (или ее частей) объекта интереса (манипулирования или «обработки»).

Перечисленные задачи МР решает *последовательно или* в режиме, когда *одно действие* является *фоновым* (простое движение (постоянное, без информационных действий)), а *другое* (манипулирование или сбор информации) - *основным* или *главным*.

Структура прикладных программ для обеспечения функционирования информационной системы автономного мобильного робота.

Серверная часть – центральный пульт управления содержит БД с описаниями маршрутов передвижения (карта местности) и описания типов объектов манипулирования. Клиентская часть ПО: программа бортового вычислителя и выносного пульта наблюдения в свою очередь подразделяется на драйверы устройств, БД – отдельные фрагменты основной БД и программа, реализующая логику управления МР в автономном режиме. И серверная и клиентская части ПО снабжены интерпретатором языка информационно-двигательных действий, на котором описываются все возможные действия мобильного робота и его механизмов. В отдельный комплекс программ выделены программы обслуживания информационных обменов, ими снабжаются все составные части МСИОМР.

Технология программирования – компонентная. Инструментальный язык С++.

4.6. Система для автоматизации визуального мониторинга процесса сближения и стыковки космического корабля и международной космической станции.

Одним из самых сложных и ответственных этапов в управлении полетами космических аппаратов является процесс их сближения и стыковки. Цена неудачи при выполнении этого процесса чрезвычайно велика. Безопасность экипажа, станции и космических аппаратов также во многом зависит от успеха его выполнения.

Радиотехнические средства сближения, которые в течение многих лет используются при стыковках российских космических аппаратов, очень дороги и не позволяют обеспечить стыковку к некооперируемой станции.

В качестве резервных методов управления сближением применяются ручные методы, для которых в качестве визиров используются оптические и телевизионные средства. Для сближения беспилотных кораблей «Прогресс» к орбитальной станции «Мир» неоднократно использовался режим телеоператорного ручного управления (ТОРУ), при реализации которого экипаж станции, получая с корабля ТВ изображение мишени станции, осуществлял ручное сближение. Информации, содержащейся в ТВ изображении, вполне достаточно для успешного выполнения режима. В центре управления полетом должен осуществляться контроль за параметрами относительного движения объектов (дальность, скорость, угловые отклонения).

Полуавтоматические методы ТВ контроля, применявшиеся до сих пор, уже не удовлетворяют современным требованиям, а появившиеся в настоящее время средства и методы селекции и обработки изображений вселяют уверенность в возможность успешного решения задачи полностью автоматического определения и контроля параметров относи-

тельно движения космических аппаратов. Этой цели и посвящена настоящая «публикация».

Дальнейшим развитием темы является разработка методов автоматического управления сближением по ТВ изображению.

В основных укрупненных шагах – этапах сбора и обработки зрительных данных комплекс действует подобно оператору – человеку.

В предъявленном поле зрения:

- выделяется объект интереса (в зависимости от дальности наблюдения им может быть либо вся станция целиком, либо стыковочный узел, либо специальная мишень для прицеливания);
- определяются его характерные элементы, образы которых хорошо различимы на изображении (измерительная часть);

на основе полученных данных:

- определяется положение этих элементов относительно системы координат, связанной с изображением (для оператора это перекрестие визира) (измерительная часть);
- вычисляются параметры, характеризующие относительное расположение КК и МКС (расчетная часть).

Комплекс дополнительно (по отношению к человеку-оператору) вычисляет и отображает в принятом для анализа виде параметры, характеризующие процесс стыковки.

4.6.1. Измерительная часть.

Целью этой части комплекса является измерение координат точек и характерных размеров объектов интереса на изображении. Достижение этой цели разбивается на пять задач:

1. выделение области интереса¹ в очередном цифровом изображении;
2. предобработка зрительных данных в области интереса;
3. бинаризация области интереса или выделение краев;
4. описание объектов бинарного изображения или определение направления найденных краев, выделение объектов интереса;
5. измерение координат заданных точек на объектах интереса.

Решение всех этих задач должно выполняться в масштабе реального времени, задаваемого частотой смены кадров в ТВ сигнале и потребностью получать результаты расчетов движения КК не реже 1 раза в секунду.

4.6.2. Последовательность действий в процессе проведения измерений.

¹ Область интереса – прямоугольный фрагмент изображения, описывающий часть всего кадра, в котором располагаются образы объектов, представляющих интерес в ходе обработки зрительных данных.

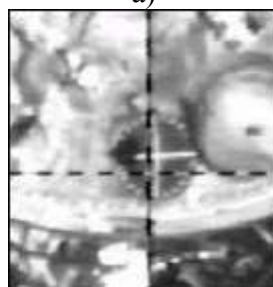
Первая задача решается двумя основными способами:

- заданием области интереса (Рис. 14.) извне (на основе информации, полученной на предыдущих этапах решения задачи слежения или указанной оператором);
- вычислением координат и размеров области интереса на основе информации, полученной в ходе измерений на предыдущих кадрах видеоданных.

Вторая задача решается на основе анализа гистограммы, характеризующей распределение точек области интереса по уровням яркости. Ее вид должен допускать надежный переход к бинарному изображению. В рассматриваемой задаче это бимодальность. Управление видом гистограммы достигается с помощью регулировок яркости и контраста устройства ввода видеосигнала в ЭВМ. (Рис. 15. Пример гистограммы области интереса).



а)



б)

Рис. 14. Пример выделения области интереса в поле зрения ТВ-камеры на КК. а) – все поле зрения; б) – область интереса.

Третья задача представляет собой чисто технический прием классификации точек полутонового изображения на основе сравнения с порогом, выбираемым по гистограмме. (Рис. 2., Рис. 3)

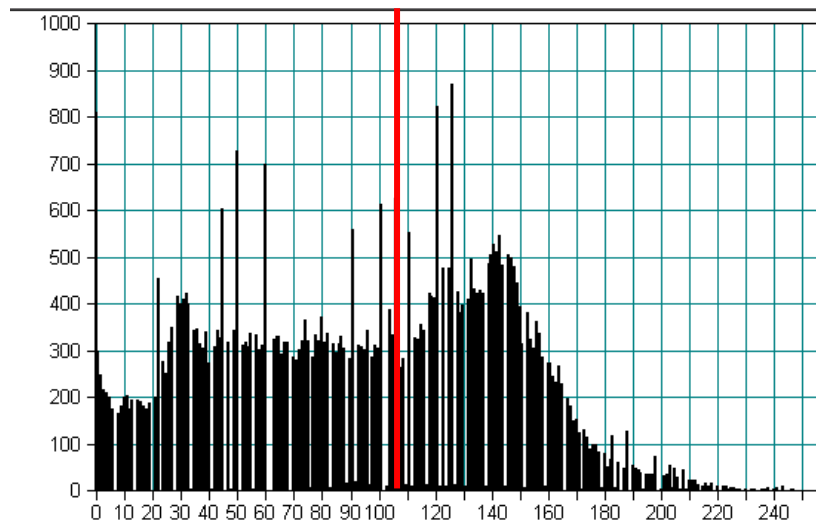


Рис. 15. Пример гистограммы области интереса. Красной линией отмечен порог для бинаризации.

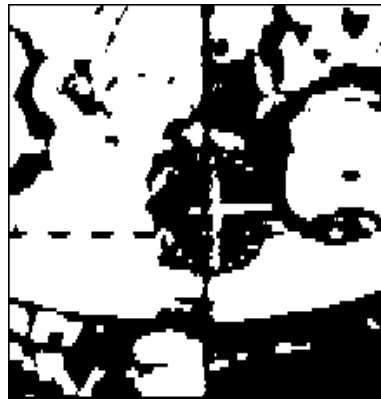


Рис. 16. Результат бинаризации области интереса.

При решении **четвертой задачи** сначала производится маркировка связных областей бинарного изображения, определяется площадь каждой из выделенных компонент и ее характерные размеры², далее используется априорная информация о форме объектов интереса (Рис. 17).

В качестве объектов интереса на рассматриваемом этапе сближения КК и МКС выбран внешний обвод станции, диск стыковочного узла, крест на стержне перед мишенью и сам мишень для прицеливания.

Характерными элементами – ориентирами, определяемыми на образах этих объектов на изображении являются край станции, крест и деления мишени.

² Размеры описанного прямоугольника.

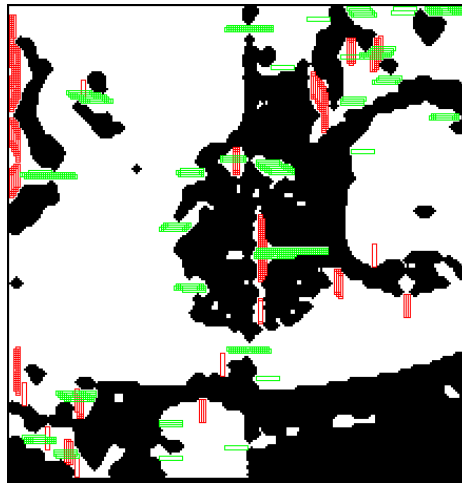


Рис. 17. Выделение компонент бинарного изображения «похожих» на элементы креста – горизонтальных (зеленые) и вертикальных (красные) планок.

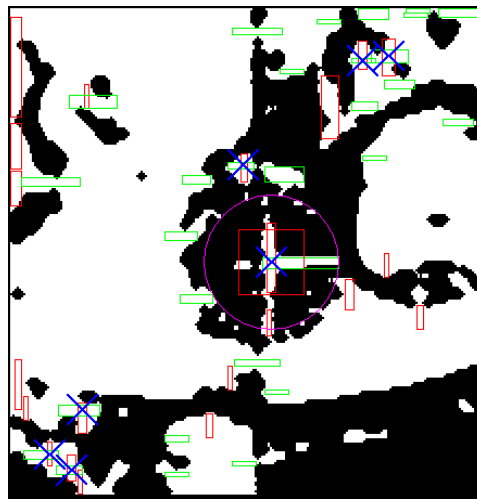
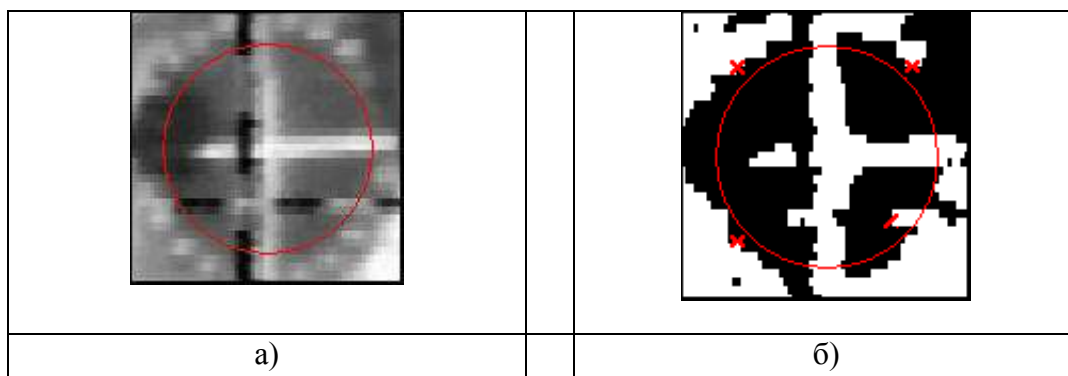


Рис. 18. Выделение креста (в красном квадрате) из всех кандидатов (рис. 4) на основе априорной информации: размеров планок креста и их взаимного пересечения.



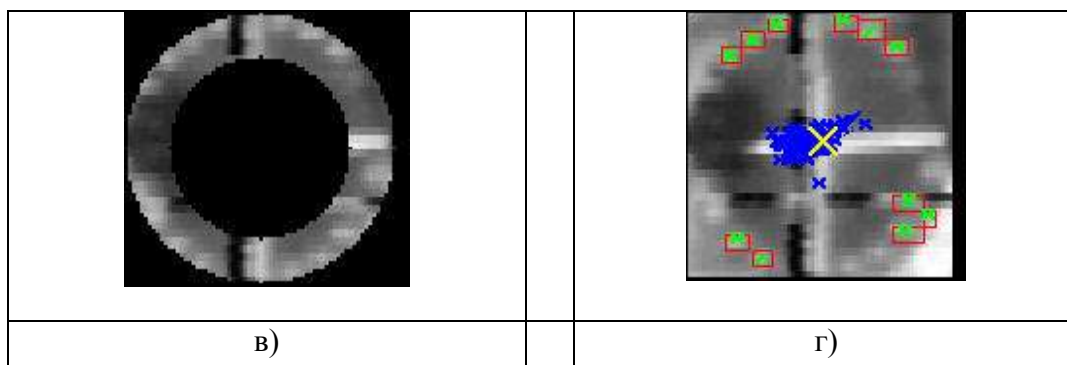


Рис. 19. Пример выделения образа мишени на основе найденных координат креста и априорной информации о расположении меток мишени. а) – определение области интереса на основе априорной информации и найденного положения центра креста; б) – уточнение области мишени диагональными пробниками ; в) – область интереса для поиска меток мишени; г)- результат выделения меток мишени.

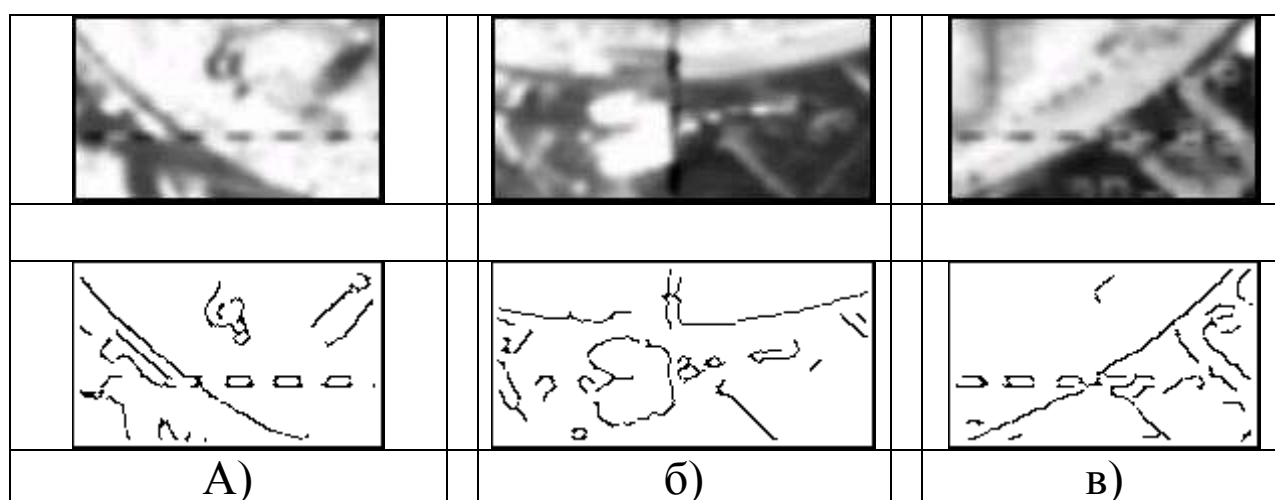


Рис. 20. Пример выделения края внешнего обвода станции.
а) - слева; б) – по центру; в) – справа.

Пятая задача - измерение координат заданных точек на объектах интереса представляет собой чисто техническую операцию выбора требуемых координат.

4.6.3. Алгоритм определения движения корабля.

Движение КК определяется в реальном времени в результате пошаговой обработки последовательности кадров ТВ изображения креста и мишени. Данные обрабатываются отдельными порциями. Порции либо имеют фиксированный объем, либо состоят из данных, полученных на отрезках времени фиксированной длины. При обработке второй и последующих порций учитываются результаты обработки предыдущих порций.

Каждая порция обрабатывается в два этапа. На первом этапе определяется движение центра масс корабля, на втором этапе – его движение относительно центра масс. Математическая модель движения корабля принимается в виде

$$d_1 = z_1 + z_2 t, \quad d_2 = z_3 + z_4 t, \quad d_3 = z_5 + z_6 t + \frac{1}{2} z_7 t^2,$$

$$\varphi_1 = v_1 + v_2 t, \quad \varphi_2 = v_3 + v_4 t, \quad \varphi_3 = v_5 + v_6 t.$$

Здесь t – время, отсчитываемое от начала обработки последовательности кадров, z_i и v_j – постоянные коэффициенты. Выписанные соотношения имеют прозрачный кинематический смысл. Значения коэффициентов модели, полученные после обработки порции данных с номером n , обозначим $z_i^{(n)}$, $v_j^{(n)}$. Отвечающие таким коэффициентам функции $d_i(t)$ и $\varphi_i(t)$ будем обозначать $d_i^{(n)}(t)$ и $\varphi_i^{(n)}(t)$.

Определение движения выполняется следующим образом. Пусть имеется последовательность успешно обработанных кадров, отвечающих моментам времени $t_1 < t_2 < t_3 < \dots$. Моменту t_k соответствует кадр с номером k . Значения величин X_C , Y_C , a , X_O , Y_O , R , найденные в результате обработки k -го кадра, обозначим $X_C^{(k)}$, $Y_C^{(k)}$, $a^{(k)}$ и т. д. Эти величины с индексами $k = 1, 2, \dots, K_1$ составляют первую порцию данных, с индексами $k = K_1 + 1, K_1 + 2, \dots, K_2$ – вторую порцию, с индексами $k = K_{n-1} + 1, K_{n-1} + 2, \dots, K_n$ – n -ую порцию.

Первая порция данных обрабатывается обычным методом наименьших квадратов. На первом этапе рассматривается функционал

$$\Psi_1(z) = \sum_{k=1}^{K_1} \left\{ w_1 \left[X_C^{(k)} - X_O^{(k)} + \frac{f b d_1(t_k)}{d_3(t_k)[d_3(t_k) - b]} \right]^2 + w_2 \left[Y_C^{(k)} - Y_O^{(k)} - \frac{f b d_2(t_k)}{d_3(t_k)[d_3(t_k) - b]} \right]^2 + w_3 \left[R^{(k)} - \frac{f r}{d_3(t_k)} \right]^2 \right\}.$$

Здесь $z = (z_1, z_2, \dots, z_7)^T$ – вектор коэффициентов, задающих функции $d_i(t)$, w_i – положительные постоянные (веса). Минимизация этого функционала выполняется методом Гаусса-Ньютона (см., например, Й. Бард. Нелинейное оценивание параметров. М., «Статистика», 1979). Оценка $z^{(1)}$ вектора z и ковариационная матрица P_1 этой оценки рассчитываются по формулам

$$z^{(1)} = [z_1^{(1)}, z_2^{(1)}, \dots, z_7^{(1)}]^T = \arg \min \Psi_1(z), \quad P_1 = \sigma^2 B_1^{-1}, \quad \sigma^2 = \frac{\Psi_1[z^{(1)}]}{3K_1 - 7},$$

где B_1 – вычисленная в точке $z^{(1)}$ матрица системы нормальных уравнений, возникающих в процессе минимизации Ψ_1 .

На втором этапе вычисляются величины

$$\alpha_1^{(k)} = \frac{1}{f} \left[Y_O^{(k)} - \frac{f d_2^{(1)}(t_k)}{d_3^{(1)}(t_k)} \right], \quad \alpha_2^{(k)} = -\frac{1}{f} \left[X_O^{(k)} + \frac{f d_1^{(1)}(t_k)}{d_3^{(1)}(t_k)} \right]$$

и решаются три однотипные задачи линейной регрессии

$$\alpha_1^{(k)} \approx v_1 + v_2 t_k, \quad \alpha_2^{(k)} \approx v_3 + v_4 t_k, \quad a^{(k)} \approx v_5 + v_6 t_k \quad (k = 1, 2, \dots, K_1).$$

Результаты обработки n -ой порции данных представляются числами $d_i^{(n)}(t_{K_n})$, $\varphi_i^{(n)}(t_{K_n})$ ($i = 1, 2, 3; n = 1, 2, \dots$).

Для более удобного представления движения вычисляются также величины

$$\rho = \sqrt{d_1^2 + d_2^2 + d_3^2}, \quad \frac{d\rho}{dt}, \quad \alpha = \arctan \frac{d_2}{\sqrt{d_1^2 + d_3^2}}, \quad \beta = \arctan \frac{d_1}{d_3}.$$

Угол α называется пассивным углом тангажа, угол β – пассивным углом рысканья. Угол φ_1 – это активный угол тангажа, φ_2 – активный угол рысканья, угол φ_3 – активный угол крена.

5. Литература.

1. Соколов С.М. Система обработки фотометрической информации в комплексе интегрального робота. Кандидатская диссертация, ИПМ им. М.В. Келдыша АН СССР, 1980.
2. Платонов А.К., Соколов С.М. Система сбора и алгоритмы первичной обработки фотометрической информации. Препринт ИПМ им. М.В. Келдыша АН СССР, № 87, 1979.34 стр.
3. Соколов С.М. Использование фотометрической информации для обеспечения сборки промышленных деталей манипуляторами.-В кн: VIII Всесоюзное совещание по проблемам управления. Таллин, 1980. Тезисы докладов. ВИНТИ.
4. Соколов С.М. Сбор и обработка фотометрической информации в комплексе интегрального робота. -В кн: Механика и управление движением роботов с элементами искусственного интеллекта. ИПМ им. М.В. Келдыша АН СССР, 1980. 14 стр.
5. Соколов С.М. Система обработки изображений с малым разрешением в комплексе сборочного робота. -В кн: Проблемы машинного зрения в робототехнике. ИПМ им. М.В. Келдыша АН СССР, 1981.13 стр.
6. Вахлин В.В., Волков А.В., Гримайло С.И., Донцов В.Е., Кугушев, Е.И.Смолянов Ю.П., Соколов С.М. Лабораторный макет сборочного робота. Препринт ИПМ им. М.В. Келдыша АН СССР, № 91, 1982, 28 стр.
7. Андреев В.П., Соколов С.М. Устройство сопряжения промышленной телевизионной установки с ЭВМ и его программное обеспечение. Препринт ИПМ им. М.В. Келдыша АН СССР, № 181, 1982, 29 стр.
8. Соколов С.М. Использование фотометрической информации в комплексе интегрального локомационного робота. -В кн: Управление робототехническими системами и их ощущение. Москва, Наука, 1983, 14 стр.
9. Гримайло С.И., Камынин С.С., Кугушев Е.И., Соколов С.М. Использование системы технического зрения в комплексе сборочного робота. -В кн: Роботизация сборочных операций, М., Наука, 1985. 14 стр.
10. Sokolov S.M. An Information-Control Technical Vision System for the Adjustment and Check of the Measuring Needle Instruments. Computers and artificial intelligence, V 5 No 2, Bratislava, VEDA, 1986, 8 стр.
11. Kugushev Ye.I., Sokolov S.M. Inspection and measuring vision. Artificial intelligence and Information-Control System of Robots-87 I.Plander (editor) Elsevier Science Publishers B.V.(North-Holand), 1987, 6 стр.
12. Соколов С.М. Система технического зрения для обеспечения автоматизации операций настройки, нанесения шкалы и контроля стрелочных измерительных приборов. -В кн: Проблемы создания гибких автоматизированных производств М, Наука, 1987, 11 стр.
13. Андреев В.П., Соколов С.М. Устройство для ввода информации. а.с. №1282106 по заявке 3828829 Решение о выдаче а.с. от 24.12.1984 1 стр.
14. Охоцимский Д.Е., Кугушев Е.И., Соколов С.М., Трескунов А.С. Программное обеспечение систем технического зрения для автоматического контроля правильности функ-

- ционирования индикаторов на жидких кристаллах. Препринт ИПМ им. М.В. Келдыша АН СССР, №69, 1989г., 26 стр.
15. Александров Е.И., Жданов А.А., Лямина Э.С., Кольцов В.Н., Панков С.И., Росфельдт М.А., Соколов С.М., Хусточка В.В. Исследование возможности использования ПЗС-камер в системах технического зрения для измерения линейных размеров. – В кн.: Системы технического зрения, Москва, Наука, 1991г., с 5-10.
 16. Соколов С.М., Трескунов А.С. Система технического зрения для контроля линейных размеров в ГПС фрезерной обработки. – В кн.: Системы технического зрения М.: Наука, 1991г., с. 159-165
 17. Горелов А.В., Руцков М.В., Соколов С.М., Соколов К.Ю., Трескунов А.С. Специальнопроцессор для систем технического зрения промышленного применения. – В кн.: Системы технического зрения М.: Наука, 1991г., с. 196-198
 18. Охоцимский Д.Е., Соколов С.М., Трескунов А.С. Система технического зрения для автоматического контроля индикаторов на жидких кристаллах. – В кн.: Системы технического зрения М.: Наука, 1991г., с. 107-116
 19. Касаткин В.В., Соколов С.М., Трескунов А.С. Система технического зрения для контроля неметаллических включений и гранулометрического состава металлического порошка. – В кн.: Системы технического зрения. Ижевск, “Полиграфия”, 1991, с.47-51.
 20. Касаткин В.В., Воронин Ф.В., Александров Е.И., Белов С.А., Ходкин В.И., Кольцов В.Н., Лямина Э.С., Соколов С.М. Способ контроля инородных включений в массе металлических гранул. а.с. СССР № 1805338 от 9 октября 1992 г.
 21. Sokolov S.M., Treskunov A.S. Automatic Vision System for Final Test of Liquid Crystal Displays. Proceedings of the 1992 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Nice, France, 1992, v.2. 6 pg.
 22. Богуславский А.А., Соколов С.М., Сербенюк Н.С. СТЗ для навигации подвижного робота по маякам на основе анализа конической проекции окружающего пространства на ТВ камеру. Препринт ИПМ РАН им. М.В. Келдыша №..., 2001, 21 с.
 23. Кирильченко А.А., Платонов А.К., Соколов С.М. Теоретические аспекты организации интерпретирующей навигации мобильного робота. Препринт ИПМ РАН им. М.В. Келдыша №5, 2002, 40с.
 24. Boguslavsky A.A., Sokolov S.M., Trifonov O.V., Yaroshevsky V.S. Intellectual information system for mobile robot control. Proc. of the Intern. Conf. SCI2002, July 14-18, Orlando, Florida, USA, 2002. 6 pg.
 25. Boguslavsky A.A., Sazonov V.V., Sokolov S.M., Smirnov A.I., Saigiraev K.S. Automatic vision-based monitoring of the spacecraft docking approach with the international space station. Proceedings of the first international conference on informatics in control, automation and robotics. ICINCO 2004, Setúbal, Portugal, august 25-28, 2004, v.2, pg. 79-86.
 26. Max D.P., Sokolov S.M., Wallace R.S. Simple multi function vision system for 3D data acquisition. Proceedings of ICAR95, 7th International Conference on Advanced Robotics, Barcelona, Spain, 1995, v 2., pp. 674-678.
 27. Sokolov S.M. Vision System for Inspection of Railroad Electric Power Supply Equipment. Proceedings of 9th International Conference on CAD CAM, Robotics&Factories of the Future, 1993, Newark, New Jersey
 28. Proceedings of 11th International Conference on CAD CAM, Robotics & Factories of the Future, august 1995, Colombia
 29. Запускалов В.Г., Редькин В.И., Рябцев В.К., Егиазарян А.В., Соколов С.М., Туробов Б.В., Ковалевский В.М. Мобильный контрольно-вычислительный комплекс. Патент РФ № 2066645, 20.09.1996.
 30. Богуславский А.А., Соколов С.М. Автоматизация контроля объектов контактной сети железной дороги. 14-я Всероссийская НТК “Неразрушающий контроль и диагностика”. Тезисы докладов. М., 1996, с.514

31. Okhotsinsky D. E., Platonov A. K., Belousov I. R., Boguslavsky A.A., Borovin G. K., Yemeljanov S.N., Komarov M. M., Sazonov V. V., Sokolov S.M. Vision system for automatic capturing a moving object by the robot manipulator. Proc. of the Intern. Conf. IROS'97, Sep. 8-12, Grenoble, France, 1997.
32. Okhotsinsky D. E., Platonov A. K., Belousov I. R., Boguslavsky A.A., Borovin G. K., Yemeljanov S.N., Komarov M. M., Sazonov V. V., Sokolov S.M. Real Time Hand-Eye System: Interaction with Moving Objects. Proc. of the Intern. Conf. ICRA'98, May 16-20, Leuven, Belgium, 1998, pp. 1683-1688.
33. Blostein S., Huang T. Detecting small, moving objects in image sequences using sequential hypothesis testing. IEEE Trans. on Signal Processing, 39(7), 1991, pp. 1611–1629.
34. Cohen I., Medioni G. Detecting and Tracking Moving Objects in Video from an Airborne Observer. In Proc. IEEE Image Understanding Workshop, 1998, pp. 217–222.
35. Davies D., Palmer P., and Mirmehdi M. Detection and Tracking of Very Small Low Contrast Objects. Proc. of the Ninth British Machine Vision Conference (BMVC'98), University of Southampton, UK, 1998, pp. 599-608.
36. Davies D., Palmer P., and Mirmehdi M. Robust Tracker of Small, Fast-moving Low-contrast Targets. In Proc. of IX European Signal Processing Conference, Volume III, September 1998, pages 1545–1548.
37. Huttenlocher D.P., Noh J.J., Rucklidge W.J. Tracking non-rigid objects in complex scenes. In Proc. ICCV, Berlin, Germany, May 1993, pp. 93–101.
38. Tweed D., Calway A. Tracking Many Objects Using Subordinated CONDENSATION, Proc. of the 13th British Machine Vision Conference, BMVA Press, 2002, pp. 283-292.
39. Zabih R., Woodfill J. Non-parametric local transforms for computing visual correspondence. European Conference on Computer Vision, Stockholm, Sweden, May 1994.
40. Введение в контурный анализ и его приложения к обработке изображений и сигналов./Я.А. Фурман, А.В. Кревецкий, А.К. Передреев, А.А. Роженцов, Р.Г. Хафизов, И.Л. Егошина, А.Н. Леухин; под ред. Я.А. Фурмана. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2002. – 592 с.