

Особенности проблемы распознавания образов применительно к задачам относительной навигации при стыковке космических аппаратов

В. А. Гришин^{1,2}, Б. С. Жуков¹

¹ *Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия*

² *Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана
Москва, 105005, Россия
E-mail: vgrishin@iki.rssi.ru*

Относительная навигация при стыковке космических аппаратов осуществляется в условиях космоса, что приводит к целому ряду особенностей, которые необходимо учитывать при выборе методов обработки изображений, а также методов распознавания. В космосе отсутствует атмосфера, которая осуществляет подсветку объектов за счёт рассеянного излучения. Поэтому типичной ситуацией становится наличие очень глубоких теней на изображении космического аппарата, которые создаются элементами конструкции этого же аппарата. Динамического диапазона реальных камер может оказаться недостаточно для формирования изображений в тенях. Часть поверхности космического аппарата покрыта экранно-вакуумной теплоизоляцией, которая может давать яркие блики на изображении. Также яркие блики могут возникать от поверхности солнечных батарей и параболических антенн. Космический аппарат может наблюдаться как на фоне чёрного неба, так и на фоне Земли. В первом случае контраст по сравнению с фоном очень велик, а во втором случае может быть относительно мал. Соответственно, для выделения космического аппарата на фоне неба и Земли должны использоваться разные алгоритмы. Произвольный ракурс наблюдения пассивного аппарата при некооперируемой стыковке порождает необходимость использования двухэтапной процедуры распознавания. На первом этапе производится грубое определение ракурса и расстояния. На втором — точное определение относительного положения и ориентации пассивного аппарата. Грубое определение ракурса и расстояния может осуществляться по инвариантным моментам бинаризованных изображений либо по их силуэтам. Структурно-лингвистические методы могут использоваться как для грубого определения ракурса и расстояния, так и для точного определения относительных линейных и угловых координат пассивного аппарата.

Ключевые слова: кооперируемая и некооперируемая стыковка космических аппаратов, распознавание образов, измерение относительных координат

Одобрена к печати: 17.11.2020

DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-7-58-66

Введение

При выполнении космических миссий может возникать задача проведения стыковки космических аппаратов (КА). Первая автоматическая стыковка КА была выполнена более полувека назад, а именно в 1967 г. аппаратами «Космос-186» и «Космос-188». Уже более 20 лет регулярно осуществляются стыковки с Международной космической станцией (МКС). Здесь решаются задачи смены экипажа, пополнения запасов топлива, воды, пищи, воздуха и других расходных материалов. Кроме того, осуществляется доставка новых приборов и аппаратов, а также замена вышедших из строя. На землю доставляются результаты экспериментов, носители с информацией.

В настоящее время происходит существенное расширение спектра задач, в которых целесообразно использовать стыковку КА. Такими задачами могут быть: заправка спутника топливом, необходимым для коррекции орбиты; коррекция орбиты с помощью другого КА; увод спутника, выработавшего свой ресурс, на орбиту захоронения; сборка КА на орбите и др. В принципе, возможно решение задачи восстановления работоспособности спутника заменой вышедших из строя компонентов на исправные. Рассмотрим некоторые приме-

ры. Аппаратом, предназначенным для ремонта и сервисного обслуживания, выступает КА Restore-L (Satellite..., 2018). В случае если спутник вышел из строя и не может быть отремонтирован, то становится актуальной задача увода спутника с орбиты и перемещение его или на орбиту захоронения (например, спутники с ядерной энергетической установкой), или на такую низкую орбиту, на которой спутник будет эффективно тормозиться в атмосфере и через непродолжительное время прекратит существование. В качестве примера можно привести КА для сближения и захвата тяжёлого (масса около 8 т) неисправного спутника Envisat (англ. Environmental Satellite) для увода его с орбиты (Telaar et al., 2017). Сейчас рассматриваются возможности проведения сборки КА на орбите из отдельных частей (блоков). Примером стал эксперимент CubeSats (Pirat et al., 2018). Дальнейшим развитием этого направления служит проект «Автономная сборка реконфигурируемого космического телескопа» (англ. Autonomous Assembly of a Reconfigurable Space Telescope — AAReST). Этот проект демонстрирует возможности сборки и реконфигурации уже собранных КА на орбите (Underwood et al., 2015).

Все эти задачи требуют выполнения точных манёвров, управления полётом в непосредственной близости от другого КА, а также реализации алгоритмов терминального управления при сближении и стыковке КА. Для решения задачи управления необходимо располагать информацией о взаимном положении и ориентации двух стыкующихся аппаратов: сервисного КА и обслуживаемого КА, т.е. решать задачу относительной навигации. Для информационного обеспечения данной задачи могут использоваться приборы, работающие в различных диапазонах электромагнитных волн: в сантиметровом и миллиметровом, а также в различных участках спектра оптического излучения. В качестве примера можно привести радиотехнические системы «Игла» и «Курс» различных модификаций. При этом с уменьшением длины волны излучения уменьшаются вес, габариты и потребляемая мощность приборов. Мы будем рассматривать оптико-электронные системы, работающие в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах длин волн. Съёмочные системы этих диапазонов хорошо отработанны, имеют малый вес, габариты и энергопотребление.

Условия освещения на околоземной орбите и их влияние на изображения КА

При работе в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах основными источниками излучения являются Солнце и отражённое излучение Земли. Доля орбиты, на которой объект освещён, зависит от высоты, формы орбиты и ориентации её плоскости относительно Солнца. Например, на круговой орбите, когда Солнце лежит в плоскости орбиты, доля незатенённого Землёй участка равна 61 % на орбите МКС и 95 % на геостационарной орбите высотой 36 000 км. Если Солнце не лежит в плоскости орбиты, эта доля ещё больше, а на орбите, проходящей над терминатором, КА освещён всё время.

Среднегодовая яркость Солнца в диапазоне 0,4–1 мкм равна $1,23 \cdot 10^7 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ср}^{-1}$. Поток отражённого Землёй солнечного излучения через площадку, перпендикулярную направлению на центр Земли, получается интегрированием яркости Земли по телесному углу, в котором видна Земля. На рис. 1 (см. с. 60) показано отношение потоков излучения Земли (F_E) и Солнца (F_S) как функция высоты КА и зенитного угла Солнца θ_S в подспутниковой точке для случаев, когда Земля является диффузным отражателем с постоянным альбедо $A = 0,3$ (среднее альбедо Земли) и $A = 0,9$ (альбедо облаков — этот случай соответствует условиям сплошного покрытия видимого диска Земли облачностью). На орбитах высотой до 1000 км на дневной стороне при $\theta_S \leq 75^\circ$ поток отражённого излучения Земли может составлять от 5 до 85 % от солнечного в зависимости от альбедо и высоты. На геостационарной орбите даже при оптимальных условиях освещения (Солнце в зените, $A = 0,9$, т.е. сплошной облачный покров) он не превышает 2 %, а при увеличении зенитного угла Солнца может уменьшаться до нескольких десятых долей процента при $\theta_S = 90^\circ$ и далее (когда подспутниковая точка находится на ночной стороне) до сотых и тысячных долей процента.

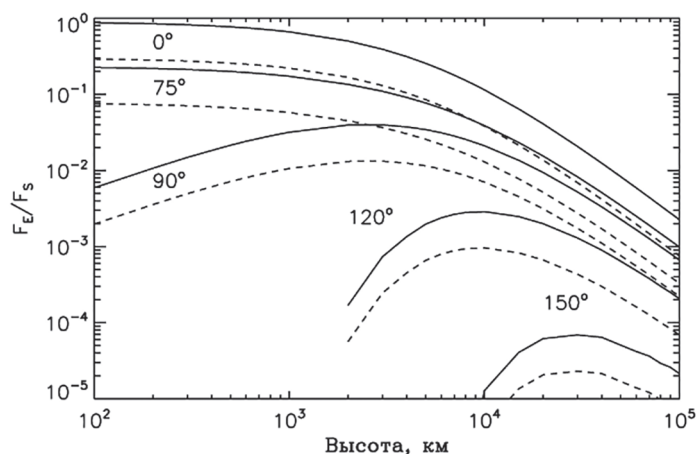


Рис. 1. Отношение потоков излучения Земли и Солнца в зависимости от высоты орбиты, зенитного угла Солнца в подспутниковой точке θ_S (см. цифры у кривых) для следующих значений среднего альбедо Земли: 0,9 (сплошная кривая) и 0,3 (штриховая кривая)



Рис. 2. Снимок КА «Прогресс МС-15» (программа 76-й миссии снабжения МКС) с борта МКС (<https://images.nasa.gov>)

Изображения космических аппаратов в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах характеризуются большими перепадами яркости между освещёнными и затенёнными участками (рис. 2).

На освещённых участках возможны большие перепады яркости между участками с различными отражательными характеристиками и характером отражения (диффузным или зеркальным). Участки, затенённые от прямых солнечных лучей, могут подсвечиваться Землёй и другими освещёнными элементами конструкции.

Отношение яркостей диффузно отражающей поверхности, освещённой Солнцем и Землёй, можно в первом приближении считать равным отношению освещённости поверхности этими источниками, которая в случае Земли намного меньше. Тем не менее даже на геостационарной орбите участки, затенённые от Солнца, но освещённые Землёй, попадают в динамический диапазон телевизионных систем (хотя и с низким отношением «сигнал – шум»), если КА находится на дневной стороне.

На экранно-вакуумной теплоизоляции (ЭВТИ), солнечных панелях, параболических антеннах и других локально гладких поверхностях (т.е. с размером микронеровностей значительно меньше длины волны) происходит зеркальное отражение солнечных лучей, т.е. возникают «блики» (рис. 3).

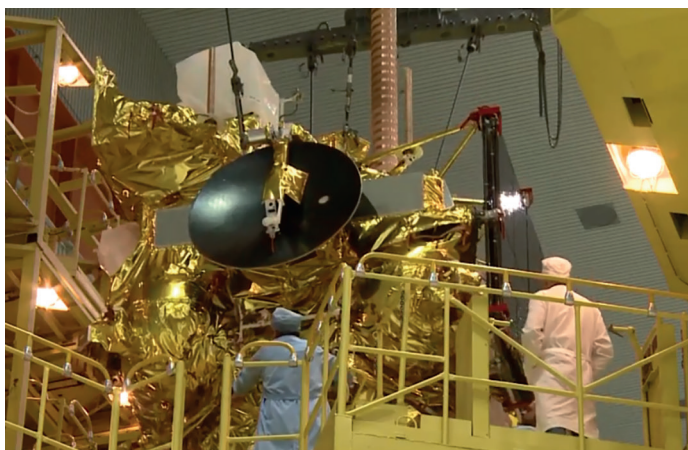


Рис. 3. КА «Электро-Л»: ЭВТИ, покрывающая значительную часть КА, а также солнечные панели и антенна дают яркие блики (www.laspace.ru)

Яркость солнечного блика равна яркости источника — Солнца, умноженной на коэффициент зеркального отражения. Фактически на зеркальной поверхности наблюдается изображение Солнца, искажённое неровностями поверхности. Солнечный блик от ровной поверхности наблюдается в направлении зеркального отражения в пределах угла расходимости излучения Солнца — 32 угл. мин. Поскольку поверхность ЭВТИ неровная, зеркальное отражение от неё может идти в различных направлениях. В результате угловой размер блика на изображении может расширяться, при этом он имеет вид ярких пятен. Яркость солнечного блика на ровной поверхности примерно в 50 000 раз больше яркости поверхности, отражающей солнечное излучение диффузно даже при нормальном падении на неё солнечного излучения. Однако усреднённая по пикселю яркость блика уменьшается, если блик занимает не всю площадь пикселя. В частности, в случае неровностей ЭВТИ играет роль доля поверхности, на которой происходит отражение в направлении наблюдения. Тем не менее даже с учётом этих факторов в области солнечных бликов следует ожидать сильной пересветки изображения.

На ЭВТИ и других зеркалящих поверхностях может также происходить зеркальное отражение излучения Земли. Как и в случае Солнца, на такой поверхности фактически формируется искажённое неровностями ЭВТИ изображение Земли.

Подводя итоги, следует ожидать, что получаемые изображения объекта будут очень контрастными и состоять из освещённых, диффузно отражающих участков с разным коэффициентом яркости, солнечных бликов и теней. Земля может частично подсвечивать затенённые участки.

Космический аппарат может наблюдаться как на фоне чёрного неба (когда контраст между КА и фоном очень велик), так и на фоне Земли, когда контраст в среднем может быть небольшим (средняя яркость КА и средняя яркость Земли сравнимы). В первом случае выделение объекта можно производить по яркости, а во втором случае — по движению относительно фона.

Проблема затенения может быть решена на близких расстояниях дополнительной подсветкой обслуживаемого КА со стороны сервисного КА.

При формировании дальностных (времяпролётных) изображений, полученных лазерными сканерами и ToF-камерами (*англ.* Time-of-Flight), может происходить искажение измерений дальности на зеркалящих поверхностях (ЭВТИ) за счёт многократных отражений или потеря измерений, когда падающий луч отражается «в космос».

Задачи распознавания и навигационных измерений при стыковке космических аппаратов

При стыковке космических аппаратов необходимо решать задачу распознавания образов по двумерным (телевизионным) или трёхмерным (дальностным) изображениям. Методы распознавания образов активно развиваются по меньшей мере на протяжении последних шестидесяти лет. Тем не менее данная задача далека от окончательного решения. Особенно это относится к распознаванию двумерных изображений. Дело в том, что при построении плоского изображения реального трёхмерного объекта теряется большой объём важной информации, что существенно повышает вычислительную сложность процесса распознавания и снижает его надёжность. По этой причине стараются дополнительно использовать либо лазерные сканеры, которые измеряют не только яркость поверхности, но и расстояние до неё, либо различные методы реконструкции профиля наблюдаемой поверхности по нескольким изображениям, полученным с разных точек (фотограмметрия). В последнее время большой интерес проявляется к использованию ToF-камер, формирующих дальностное изображение без сканирования по углам. Следует, однако, отметить, что радиус действия таких камер существенно меньше, чем у лазерных сканеров.

Все случаи стыковки можно разделить на два больших класса:

- стыковка с кооперируемым объектом;
- стыковка с некооперируемым объектом.

В случае стыковки с кооперируемым объектом пассивный объект (обслуживаемый КА), с которым производится стыковка активного объекта (сервисного КА), оснащён специальным оборудованием (мишенью), приборами или системами, которые облегчают процесс измерения и увеличивают точность измерения параметров движения активного объекта относительно пассивного. Это могут быть оптические ретрорефлекторы, маяки, запросно-ответные системы, специальная контрастная разметка на корпусе пассивного объекта и т.д. Подобная ситуация характерна для уникальных КА очень высокой стоимости, когда главный и определяющий фактор заключается в требовании высокой надёжности и отказоустойчивости. Особенность таких систем состоит в сравнительно скромных требованиях к вычислительной мощности процессоров обработки изображений и довольно простых алгоритмах работы. Простые алгоритмы имеют очень серьёзное преимущество, а именно, они могут быть достаточно эффективно отработаны на различных стендах и имитаторах, при этом обеспечивают надёжное функционирование в реальных условиях. Как правило, указанное оборудование (мишень) в процессе сближения наблюдается в достаточно ограниченном интервале ракурсов, который определяется коридором сближения. Это существенно упрощает задачу распознавания мишени.

В случае стыковки с некооперируемым объектом пассивный аппарат, с которым производится стыковка активного аппарата, не оснащён специальным оборудованием, которое способствует проведению стыковки. Как частный случай это может быть и кооперируемый объект, у которого вследствие отказа не функционирует оборудование, обеспечивающее стыковку (например, полный отказ систем питания запросно-ответных систем или маяков), или если подлёт к кооперируемому объекту происходит в нештатном режиме, т.е. со стороны, откуда мишень не видна. В любом случае активный объект должен иметь возможность производить все измерения самостоятельно при отсутствии какой-либо поддержки со стороны пассивного объекта. Мы будем рассматривать главным образом стыковку с **некооперируемым** объектом как представляющую наибольшую сложность.

Поскольку запуск сервисного КА производится для обслуживания конкретного КА и предусматривает предварительную подготовку, то мы предполагаем, что сервисный (активный) аппарат имеет на борту модель обслуживаемого (пассивного) аппарата, включающую в себя геометрию объекта, при необходимости его текстуры, а также иные характеристики. Установив соответствие между наблюдаемым изображением и этим эталоном, всю информацию, необходимую для управления (а именно информацию о своём относительном положении и форме пассивного объекта), можно извлекать из модели объекта. Вообще говоря, существуют методы, которые позволяют осуществлять навигацию и при отсутствии достаточного объёма информации о пассивном объекте. Но мы будем рассматривать тот случай, когда имеется точная модель пассивного аппарата на борту активного (рис. 4).

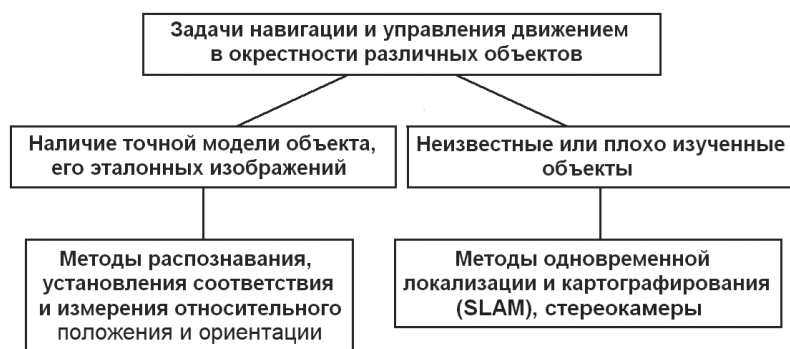


Рис. 4. Используемые методы относительной навигации в зависимости от объёма априорной информации

При стыковке с **некооперируемым** аппаратом резко возрастает удельный вес задачи распознавания во всей цепочке «поиск – обнаружение – распознавание – слежение – измерение».

Это существенно усложняет задачу относительной навигации, что обусловлено следующими причинами:

- ракурс, с которого наблюдается обслуживаемый КА, может быть произвольным. Аппарат может быть даже не стабилизирован, например вследствие полного отказа системы электропитания, отказа системы стабилизации и т.п. Это существенно затрудняет процесс распознавания, поскольку необходимо анализировать каждый из возможных ракурсов наблюдения;
- отсутствие специально разработанной мишени, которая обладает высоким контрастом по отношению к корпусу КА, существенно затрудняет распознавание, а самое главное — процесс измерения параметров относительного положения и ориентации КА.

Следствием этого в случае стыковки с некооперируемым объектом получается необходимость гораздо больших вычислительных ресурсов, а также предварительной подготовки эталонных изображений. Кроме того, стыковка с некооперируемым объектом отличается меньшей надёжностью, что обусловлено проблемами верификации существенно более сложных алгоритмов, которые приходится использовать для распознавания, а также значительным ухудшением условий распознавания и измерения по сравнению со специально разработанной мишенью кооперируемого аппарата.

Искусственные объекты, такие как КА и спутники, характеризуются большим количеством элементов, имеющих «правильную», «симметричную» форму. Сравните, например, изображение любого КА с изображением любого астероида. Кроме того, часть поверхности КА покрыта ЭВТИ, которая может давать сильные блики, что делает эти участки непригодными для точной привязки. По этим причинам алгоритмы распознавания КА будут существенно отличаться от алгоритмов распознавания (наведения, корреляционно-экстремальной навигации) для естественных объектов.

Необходимо отметить, что помимо отличий в условиях наблюдения и в характере самих объектов задачи распознавания при стыковке КА имеют ряд существенных отличий от классических задач распознавания. Во-первых, на самом деле должна выполняться не задача распознавания объекта, а задача его **идентификации**. То есть требуется определить не класс, к которому принадлежит наблюдаемый объект, а что это именно тот объект, с которым и предстоит работать. Во-вторых, необходимо установить взаимно однозначное **соответствие** между наблюдаемыми элементами объекта и его эталонным изображением. Это не характерно для классических задач распознавания, в которых решается задача определения принадлежности объекта к тому или иному классу объектов. В данном случае требуется также и **анализ структуры** наблюдаемого объекта. В-третьих, исходя из установленного взаимно однозначного соответствия элементов структуры наблюдаемого объекта и его эталона необходимо провести процесс **измерения** искомых параметров относительного положения. И это становится принципиально новым по сравнению с классическими задачами распознавания.

Что касается стыковки с кооперируемым объектом, то здесь также решается задача распознавания по известному эталону. Но в данном случае эта задача относительно простая. И эталон жёстко «встроен» в алгоритмы распознавания и измерения.

Можно отметить, что распознавание 2D-образов значительно более сложная задача, чем распознавание 3D-образов, поскольку на формирование 2D-изображений влияют условия освещения, отражающая способность поверхности, геометрические искажения, возникающие при формировании изображения камерой. Мешающими факторами выступают, например, вариации отражающей способности, солнечные блики от экранно-вакуумной изоляции. Сильные блики может давать также поверхность солнечных батарей.

Процесс распознавания существенно затрудняется тем, что ракурс наблюдения спутника, с которым планируется осуществить стыковку, может быть произвольным. Эту неопределённость можно устранить покрытием области неопределённости сеткой гипотез с некоторым шагом, зависящим от допустимых трансформаций изображений объекта. Реально необходимо строить сетку гипотез в четырёхмерном пространстве (ракурс визирования — две координаты, дальность — одна координата, поворот относительно оси объектива — одна

координата). Ещё два измерения (направление на спутник в поле зрения камеры) не требуют построения гипотезной сетки, поскольку они в большинстве случаев легко определяются по наблюдаемому изображению.

На *рис. 5* приведена обобщённая структура алгоритмов относительной навигации при сближении с некооперируемым объектом.

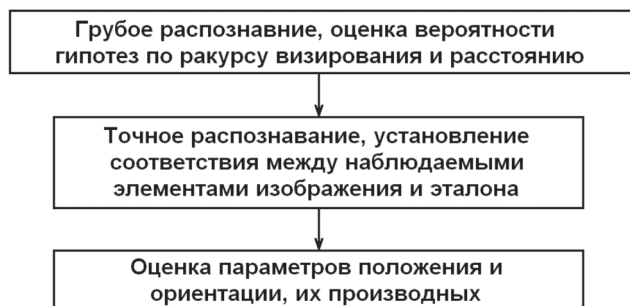


Рис. 5. Этапы процесса относительной навигации

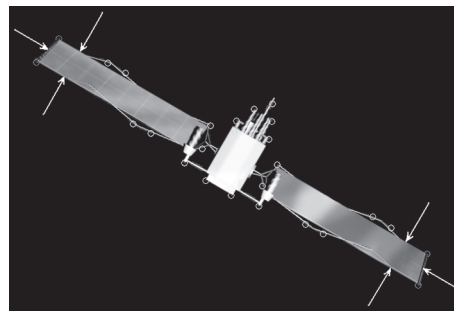


Рис. 6. Структурный метод распознавания и измерения; в данном случае распознаются солнечные батареи с целью грубого определения ракурса и расстояния

Очень часто грубое распознавание требует большую часть вычислительных ресурсов. Поэтому реально используются различные методы сокращения вычислительных затрат. Все эти методы направлены на достижение двух результатов: уменьшение объёма обрабатываемой информации и получение в какой-то степени инвариантных к условиям наблюдения и/или условиям освещения оценок. Инвариантность позволяет сократить число измерений в 4–6-мерном пространстве, в котором осуществляется поиск экстремума функции соответствия наблюдаемого изображения эталону. Благодаря частичной инвариантности при той же самой размерности пространства поиска можно резко уменьшить плотность сетки гипотез по той размерности, где получена частичная инвариантность. Всё это позволяет значительно сократить количество анализируемых (сравниваемых) гипотез об условиях наблюдения и/или условиях освещения объекта.

В задачах грубого распознавания КА можно считать перспективными две группы методов. Во-первых, это методы, работающие с бинаризованными изображениями (*англ.* Shape-based Object Recognition) либо с их силуэтами (Toshev et al., 2009). Такие методы интересны тем, что по сравнению с синтезом полного эталонного изображения синтезировать бинаризованное изображение или его силуэт (контур) существенно проще в вычислительном плане, поскольку не требуется определять точную яркость каждого пиксела изображения с учётом положения Солнца, Земли, текстур объекта и т. д., что особенно важно в условиях сильных контрастов и бликов на изображениях КА. Для описания формы бинаризованных объектов могут быть использованы различные системы инвариантных моментов. Подобных систем известно довольно много. Для описания контуров таких изображений может быть использовано фурье-разложение по различным системам ортогональных функций. При грубом распознавании соответствующие коэффициенты и/или моменты наблюдаемого изображения могут сравниваться с коэффициентами и/или моментами, заранее рассчитанными для разных ракурсов. Таким образом определяется ракурс наблюдения.

Во-вторых, это структурно-лингвистические методы, которые базируются на выделении некоторых элементов или структур на изображении и установлении соответствия между ними (*рис. 6*). Кружочки на изображении отмечают обнаруженные на нём особенности. Из этого множества точек алгоритм выбрал четыре точки, принадлежащие углам солнечных батарей. Они соединены отрезками. На рисунке стрелками показаны те относительные размеры изображения, которые использованы для определения ракурса наблюдения и расстояния.

Подобные методы активно используются в зрительной системе человека. При использовании структурно-лингвистических методов обычно производится выделение частично инвариантных элементов структуры. Выделенные элементы структуры могут снабжаться численными параметрами, которые учитываются в процессе распознавания. Например, описаниями размеров, формы, ориентации, гистограммами, спектральными признаками и иными дескрипторами. В качестве элементов могут быть использованы углы, границы, области, а также более сложные объекты: параболические антенны, прямоугольные корпуса, цилиндрические и конусообразные элементы. После обнаружения этих элементов проверяются структурные соотношения между ними. В нашем случае очень неприятной особенностью структурно-лингвистических методов распознавания является то, что они не универсальны (в отличие от 3D-методов), а ориентированы на **конкретный объект** или узкий класс объектов, требуют создания специальных описаний объекта, их тестирования, а также задания границ «толерантности» наблюдаемых топологических преобразований.

В задачах точного распознавания также используется установление соответствия между особенностями изображения (чаще всего — угловыми точками) и особенностями эталона, и на их основе уточняются относительные линейные и угловые координаты обслуживаемого КА и их производные.

Лазерные сканеры и ТоF-камеры не требуют внешнего освещения и способны получать 3D-изображения в том числе и затенённых элементов конструкции. Для решения задач распознавания дальностных изображений предполагается использовать анализ гистограммы нормалей и анализ кривизны поверхности на этапе грубого распознавания и итерационно синтезировать трёхмерные изображения по модели с дроблением шага по искомым координатам на этапе точного распознавания и измерения параметров положения и ориентации обслуживаемого КА.

Заключение

Относительная навигация при стыковке космических аппаратов имеет целый ряд особенностей, которые необходимо учитывать при выборе методов обработки изображений, а также методов распознавания. В настоящее время накоплен большой набор (*англ.* tool-box) методов распознавания образов, который позволяет успешно решать как задачи идентификации объекта, так и задачи установления соответствия между наблюдаемыми элементами изображения и эталона, в том числе и для условий стыковки КА. Задача дальнейших исследований заключается в оптимизации параметров алгоритмов распознавания (идентификации) космических аппаратов и измерения их относительных линейных и угловых координат применительно к задачам относительной навигации в условиях космического пространства.

Литература

1. Pirat C., Ankersen F., Walker R., Gass V. Vision Based Navigation for Autonomous Cooperative Docking of CubeSats // *Acta Astronautica*. 2018. V. 146. P. 418–434.
2. Satellite Servicing. Solutions for Commercial Space and Other Applications / National Aeronautics and Space Administration. 2018. 8 p. URL: https://nexus.gsfc.nasa.gov/documents/SSPD_Pamphlet4_FINAL.pdf (accessed 21.10.2020).
3. Telaar J., Ahrens I., Estable S., Rackl W., De Stefano M., Lampariello R., Santos N., Serra P., Canetri M., Ankersen F., Gil-Fernandez J. GNC Architecture for the e.Deorbit Mission // *Proc. 7th European Conf. Aeronautics and Space Sciences (EUCASS 2017)*. Milan, Italy. 2017. 15 p. DOI: 10.13009/EUCASS2017-317.
4. Toshev A., Makadia A., Daniilidis K. Shape-Based Object Recognition in Videos Using 3D Synthetic Object Models // *Proc. 2009 IEEE Conf. Computer Vision and Pattern Recognition*. Miami, FL. 2009. P. 288–295.
5. Underwood C., Pellegrino S., Lappas V., Bridges C., Baker J. Using CubeSat/Micro-Satellite Technology to Demonstrate the Autonomous Assembly of a Reconfigurable Space Telescope (AAReST) // *Acta Astronautica*. 2015. V. 114. P. 112–122.

Specific features of pattern recognition problems in relation to the tasks of relative navigation during spacecraft docking

V. A. Grishin^{1,2}, B. S. Zhukov¹

¹ *Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia*

² *Bauman Moscow State Technical University, Moscow 105005, Russia*

E-mail: vgrishin@iki.rssi.ru

Relative navigation during docking is carried out in space environment, which leads to a number of specific features that must be taken into account when selecting image processing and recognition methods. In space, there is no atmosphere that produces diffuse illumination of objects due to scattered radiation. Therefore, a typical situation in space is the presence of very deep shadows in spacecraft images, which are created by structural elements of the same spacecraft. The dynamic range of real cameras is usually completely insufficient to produce reasonable images in the shadows. Part of the spacecraft's surface is covered with screen-vacuum thermal insulation, which can give bright blinks in the image. Also bright glare can be produced by the surface of solar panels. The spacecraft can be observed against the background both of the black sky and of the Earth. In the first case, the contrast is very high compared to the background, and in the second case it can be relatively low. Accordingly, different algorithms should be used to distinguish the spacecraft against the background of the sky and the Earth. An arbitrary angle of observation of a passive spacecraft during uncooperative docking necessitates the use of a two-stage recognition procedure. At the first stage, a rough definition of the spacecraft aspect angles and distance is made. The task of the second step is to accurately determine the spacecraft relative pose (position and orientation). A rough definition of the angle and distance can be carried out by invariant moments of binarized images, or by their silhouettes. Structural-linguistic methods can be used both to roughly determine the angle and distance and to accurately determine the spacecraft relative position and orientation.

Keywords: cooperative and non-cooperative docking of spacecraft, pattern recognition, measurement of relative position and orientation

Accepted: 17.11.2020

DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-7-58-66

References

1. Pirat C., Ankersen F., Walker R., Gass V., Vision Based Navigation for Autonomous Cooperative Docking of CubeSats, *Acta Astronautica*, 2018, Vol. 146, pp. 418–434.
2. *Satellite Servicing, Solutions for Commercial Space and Other Applications*, National Aeronautics and Space Administration, 2018, 8 p., available at: https://nexus.gsfc.nasa.gov/documents/SSPD_Pamphlet4_FINAL.pdf (accessed 21.10.2020).
3. Telaar J., Ahrns I., Estable S., Rackl W., De Stefano M., Lampariello R., Santos N., Serra P., Canetri M., Ankersen F., Gil-Fernandez J., GNC Architecture for the e.Deorbit Mission, *Proc. 7th European Conf. Aeronautics and Space Sciences (EUCASS 2017)*, Milan, Italy, 2017, 15 p., DOI: 10.13009/EUCASS2017-317.
4. Toshev A., Makadia A., Daniilidis K., Shape-Based Object Recognition in Videos Using 3D Synthetic Object Models, *Proc. 2009 IEEE Conf. Computer Vision and Pattern Recognition*, Miami, Florida, 2009, pp. 288–295.
5. Underwood C., Pellegrino S., Lappas V., Bridges C., Baker J., Using CubeSat/Micro-Satellite Technology to Demonstrate the Autonomous Assembly of a Reconfigurable Space Telescope (AAReST), *Acta Astronautica*, 2015, Vol. 114, pp. 112–122.