

Информационное обеспечение задач стыковки космических аппаратов (подготовка эталонов и отработка алгоритмов распознавания и измерения)

В. А. Гришин^{1,2}, А. В. Бережков¹

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*

Тенденция современных систем управления заключается в использовании всё более интеллектуальных методов управления. Это позволяет оптимизировать поведение управляемого объекта в соответствии с текущей ситуацией. Соответственно, возрастает роль датчиков внешней информации, которые способны предоставить большой объём данных о текущей ситуации и внешней среде. В число таких высокоинформативных датчиков входят системы технического зрения. Эти датчики обладают малыми габаритами, массой и потребляемой мощностью. Использование слова «системы» обусловлено тем, что выходной сигнал телевизионных камер, входящих в системы технического зрения, требует сложной многоэтапной обработки, причём методы обработки определяются как текущей ситуацией и условиями наблюдения, так и поставленными в каждый конкретный момент времени задачами. Сложность задач распознавания (идентификации) образов заданных объектов в сложных условиях наблюдения при высоких требованиях к надёжности вызывает, с одной стороны, формирование достаточно сложных эталонных изображений заданных объектов, а с другой — тщательный выбор и отработку алгоритмов распознавания, которые должны работать с этими эталонными изображениями. В процессе отработки алгоритмов должна быть подтверждена работоспособность и высокая надёжность процессов поиска, обнаружения и распознавания заданных объектов, а также хорошая точность измерения относительных координат, что важно для систем управления стыковкой космических аппаратов. В статье приведена информация о наиболее интересных системах, предназначенных для отработки процесса относительной навигации при стыковке космических аппаратов, а также о работе, которая проводится в этом направлении в Институте космических исследований РАН.

Ключевые слова: стыковка космических аппаратов, распознавание образов, эталонные изображения, измерение относительных координат

Одобрена к печати: 09.11.2020

DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-7-50-57

В настоящее время неуклонно расширяется использование средств технического зрения в системах управления различными объектами. Такие объекты могут функционировать в самых разнообразных средах. Это могут быть подводные, надводные, наземные аппараты, беспилотные летательные аппараты, а также космические аппараты.

Это объясняется, с одной стороны, потребностью информационного обеспечения автоматических аппаратов, которые способны работать в полуавтоматическом либо в полностью автоматическом режиме. Степень автономности таких аппаратов может изменяться в очень широких пределах. В простейшем случае это может быть просто выполнение последовательности заданных оператором команд. Более высокий уровень — решение заданных оператором задач. Следующий уровень — достижение заданных целей, которые аппарат самостоятельно преобразовывает в последовательность задач. Наиболее высокий уровень — это полностью автономный искусственный интеллект, способный формулировать себе цели и устанавливать между ними приоритеты.

С другой стороны, расширение использования средств технического зрения обусловлено такими их преимуществами, как малый вес, габариты, потребляемая мощность, а также высокая информативность. Естественно, эти системы обладают и недостатками, такими как потребность в источнике света (за исключением длинноволнового инфракрасного диапазо-

на), необходимость использования процессоров, обладающих значительной вычислительной мощностью для обработки больших потоков информации.

Если рассматривать такой узкоприкладной вопрос, как стыковка некооперируемых космических аппаратов, то здесь системы технического зрения решают следующие вопросы: поиск, обнаружение и распознавание заданного объекта (обслуживаемого космического аппарата), измерение относительных координат для информационного обеспечения процессов управления стыковкой космических аппаратов.

Далее мы ограничимся случаем распознавания с заданной моделью (*англ.* model-based recognition), поскольку сервисный космический аппарат направляется к вполне конкретному обслуживаемому аппарату. В этом случае задача распознавания трансформируется в задачу идентификации обнаруженного объекта. Задача идентификации, а также задача измерения относительных координат решается с использованием модели (эталонного изображения) того объекта, с которым осуществляется стыковка.

Подготовка и отработка эталонных изображений (моделей) — важнейший этап подготовки информационного обеспечения задач стыковки. Эталонные изображения могут включать в себя 2D-текстуры, упрощённые 3D-модели, наборы коэффициентов инвариантных моментов различного типа, наборы коэффициентов фурье-разложения контура видимого изображения, дескрипторы особых точек, а также другие формы представления эталонной информации, которые будут определены в дальнейшем.

Задачи подготовки эталонных изображений для использования в режиме стыковки могут решаться специализированными системами подготовки полётных заданий (СППЗ). Эти системы должны включать в себя средства **высокоточного рендеринга** (визуализации) объекта, с которым будет осуществляться стыковка, средства визуализации результатов обработки изображений бортовыми алгоритмами, модификации алгоритмов и эталонов, а также средства записи подготовленных эталонов. Кроме того, весьма желательно дополнение этой системы подсистемой, моделирующей динамику маневрирования аппаратов в процессе сближения и алгоритмы управления этим процессом.

Таким образом, можно заключить, что широкое применение систем технического зрения ставит новые задачи, а именно задачи создания систем подготовки эталонных изображений и отработки алгоритмов обработки информации, использующих эти эталоны. Проблема в том, что те объекты, с которыми должна работать система технического зрения, даже в такой узкой области, как распознавание (идентификация) космических аппаратов и измерение относительных координат, весьма разнообразны по форме, структуре и размерам. А это, в свою очередь, порождает разнообразие не только эталонов (что вполне очевидно), но и методов работы с этими эталонами как в процессе распознавания, так и в процессе измерений. Создание специализированных СППЗ позволит оператору не только подготовить эталонные изображения, но и сделать выбор наиболее подходящих конкретным условиям методов распознавания и измерения. Выбор осуществляется из того числа методов, которые предварительно отобраны из методов, известных в настоящее время, и заложены в программный комплекс.

Для решения указанных задач СППЗ должна осуществлять синтез изображений объекта (пассивного аппарата) при различных условиях освещения, ракурсах наблюдения и расстояниях. Под условиями освещения понимается положение Солнца, Земли и, возможно, Луны, если её вклад нужно учитывать. Синтез изображений должен осуществляться под конкретную камеру с учётом параметров матрицы (включая размерность (количество пикселей), шумы, возможный блюминг и т. д.), параметров объектива, величины экспозиции и пр.

СППЗ должна позволять оператору выбирать участки изображений объекта, пригодные для распознавания и/или измерения. При этом необходимо, чтобы осуществлялась проверка структуры и параметров соответствующей корреляционной функции.

Кроме того, СППЗ должна предоставлять оператору возможность выбирать фрагменты 3D-структур объекта, пригодные для распознавания и/или измерения. При этом также необходима проверка структуры и параметров соответствующей корреляционной функции для трёхмерных объектов.

Выбор точек привязки на изображении (которые будут включены в эталон) должен производиться в полуавтоматическом режиме: программа предлагает информативные точки на изображении, оператор проверяет их на устойчивость при изменении ракурса и условий освещения и либо отвергает, либо вводит их в эталон.

При этом нужно, например, учитывать, что панели солнечных батарей вполне пригодны для идентификации объекта и грубого определения ракурса наблюдения и расстояния. В то же время для точных измерений относительных координат целесообразно использовать элементы конструкции, жёстко связанные с корпусом.

Далее проводится имитационное моделирование процессов сближения со всех возможных ракурсов и расстояний по всем возможным траекториям и при всех возможных условиях освещения. То есть система должна обеспечивать отработку алгоритмов поиска, обнаружения, распознавания и измерения во всём диапазоне дальностей и условий наблюдения.

По результатам моделирования производится выбор алгоритмов и при необходимости их модификация с тем, чтобы обеспечить устойчивое решение задач распознавания (идентификации) и измерения.

Финальной проверкой становится проведение имитационного моделирования процесса стыковки с включением динамики обоих объектов, двигательных установок, алгоритмов управления полётом и алгоритмов обработки видеоинформации, которые синтезируются в зависимости от относительного положения двух аппаратов. Естественно, что для этого требуется подготовленная модель объекта и алгоритмов управления его движением. Таким образом, проводится тестирование всех процессов управления, когда система технического зрения включена в контуры управления. При этом могут быть выявлены эффекты, которые не проявляются при раздельном тестировании алгоритмов управления и алгоритмов технического зрения.

Например, возможно возникновение автоколебаний по углам, которые превышают допустимые пределы для системы технического зрения. Или появление выбросов по углам, которые выводят наблюдаемый объект за пределы поля зрения камер. Либо величина задержки, обусловленная временем обработки изображений и измерений, вызывает нестабильность алгоритмов управления. Также возможно возбуждение паразитных колебаний при наличии перекрёстных корреляционных связей между ошибками измерения в нескольких каналах управления (чаще всего — каналов управления по углам).

В принципе, подобные системы моделирования известны давно и используются в самых различных областях. Например, в публикации (Tran et al., 2011) описана система моделирования динамики колёсных объектов. В работах (Cremaschi et al., 2018; Weikert et al., 2012) представлена система ASTOS (*англ.* Analysis, Simulation and Trajectory Optimization Software for Space Applications), предназначенная для анализа миссий, оптимизации траекторий, оптимизации конструкции, имитационного моделирования, навигации и управления космическими аппаратами. Моделируется физика процесса, динамика, перегрузки, аэродинамические силы и моменты, деформации корпуса, расход топлива, различные датчики и многие другие параметры. Подобные системы предназначены для демонстрации поведения объектов для оператора. В этом случае высоких требований к визуализации не предъявляется, синтез изображений реализуется упрощённо. Достаточно лишь того, чтобы оператор считал синтезированные изображения реалистичными. В работе (Molina et al., 2005) описывается система LAREDO (*англ.* LAunching, REndezvous and DOcking Simulation Tool), которая используется для моделирования и оптимизации на этапах старта, сближения и стыковки. В этой системе также основное внимание уделяется моделированию динамики полёта. Задачи визуализации носят вспомогательный характер. В сети Интернет есть сайт <https://iss-sim.spacex.com>, который осуществляет визуализацию процесса стыковки с Международной космической станцией, что позволяет всем желающим потренироваться в управлении этим процессом.

Если же рассматривать системы визуализации (рендеринга), предназначенные именно для отработки систем технического зрения, используемых в задачах управления, то в этом случае требования к качеству синтезированных изображений многократно повышаются, поскольку небольшие упрощения алгоритмов синтеза изображений, совершенно незаметные

для человека, могут быть очень критичными для автоматического управления, особенно для точности измерений. Это может приводить к тому, что алгоритмы, протестированные на таких синтезированных изображениях, могут плохо работать на реальных изображениях.

Разумеется, натурное моделирование на специализированных стендах ничто не заменит. Однако разработка и изготовление подобных стендов требует больших финансовых затрат. В то же время возможности изменений обстановки и условий при использовании моделирующих программ значительно больше, чем при натурном моделировании на физическом стенде.

Как показывает практика, обычные системы визуализации слишком сложны, перегружены различными функциями, к тому же обладают низкой точностью синтеза. Более того, на синтезированных изображениях могут присутствовать различные артефакты.

Вероятно, одним из первых программных комплексов, нашедшим достаточно широкое практическое применение при разработке эталонных изображений для систем технического зрения, была рабочая станция DIWS (*англ.* Digital Imagery Workstation Suite, <https://www.globalsecurity.org/intell/systems/diws.htm>), предназначенная для формирования полётных заданий для беспилотных летательных аппаратов, а именно крылатых ракет Tomahawk (*рис. 1*). В число функций этой системы входит подготовка эталонных изображений для высокоточной оптической системы наведения на конечном участке полёта крылатой ракеты DSMAC (*англ.* Digital Scene Matching Area Correlation, <https://www.globalsecurity.org/intell/systems/diws.htm>). В настоящее время DIWS активно используется.



Рис. 1. Изображение подсистемы системы подготовки полётных заданий для крылатых ракет Tomahawk, обеспечивающей работу высокоточной оптической системы наведения DSMAC (<https://www.globalsecurity.org/intell/systems/diws.htm>)

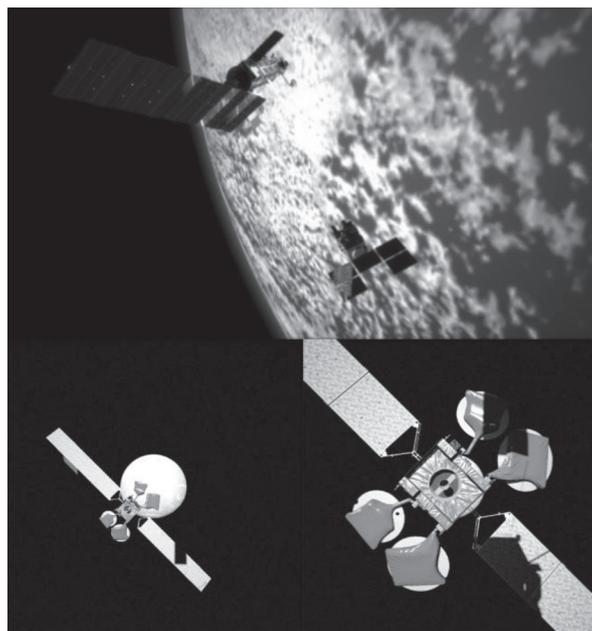


Рис. 2. Спутники SPOT 5 и ENVISAT, изображение которых было получено после рендеринга программой SurRender (*верхняя часть изображения*); симуляция сценария стыковки SpaceTug с коммуникационным спутником (*нижняя часть изображения*) (Brochard et al., 2018)

Современные космические аппараты имеют достаточно сложную структуру, включающую в себя корпус аппарата с установленными на нём приборами и служебными системами, солнечные батареи, большое количество антенн. Отличия условий наблюдения в космическом пространстве и очень высокие требования по точности синтеза изображений, которым обычные системы визуализации не удовлетворяют, вынуждают разрабатывать специализированные системы рендеринга для космических условий. В частности, фирма

AIRBUS (Brochard et al., 2018) разработала систему SurRender, которая способна работать с текстурами очень большого объёма, использует двухлучевые функции отражения поверхности и технологию трассировки лучей при синтезе изображений. Система способна работать с очень большим диапазоном дальностей, а имеющиеся модели камер учитывают значительное количество параметров, описывающих их «неидеальность». Примеры синтезированных изображений приведены на *рис. 2* (см. с. 53). Тем не менее, судя по представленным иллюстрациям, нельзя с уверенностью утверждать, что синтезированные изображения, показанные на этом рисунке, — фотометрически верные.

Программный пакет фирмы BD Systems под названием SPARTAN (*англ.* Simulation Package for Autonomous Rendezvous Test and Analysis) предназначен для высококачественного моделирования и синтеза изображений космических объектов (Turbe et al., 2007). Этот пакет способен комплексировать информацию, поступающую от радиотехнических средств стыковки, лазерных сканеров, телевизионных камер. Он также позволяет включать датчики и алгоритмы обработки информации, поступающей от них, в контуры управления и анализировать поведение системы в целом в процессе стыковки. Это становится главным преимуществом данного пакета. Однако, насколько можно судить по публикациям, качество рендеринга этого пакета существенно хуже, чем у системы SurRender.

В настоящее время в Институте космических исследований РАН разрабатывается программный комплекс, предназначенный для отработки алгоритмов и математических моделей системы относительной навигации при сближении с кооперируемыми и некооперируемыми космическими аппаратами. Упрощённая структура комплекса приведена на *рис. 3*.

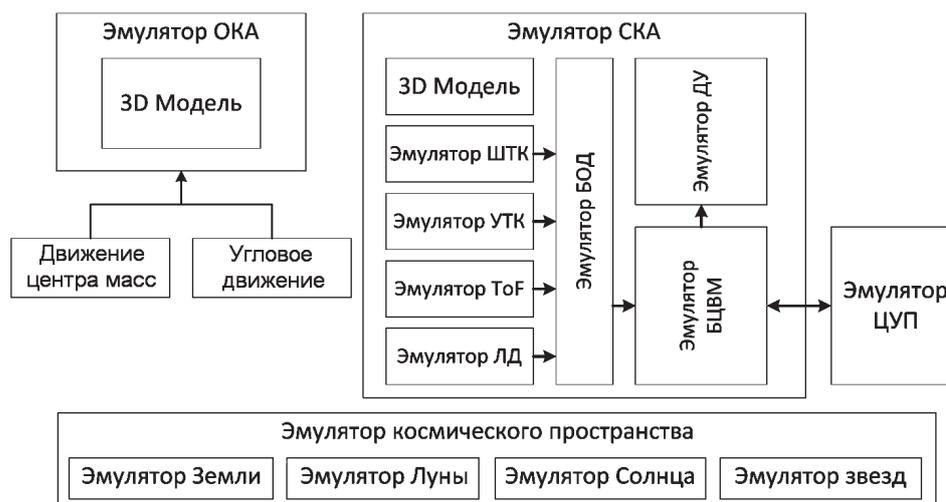


Рис. 3. Программный комплекс отработки алгоритмов и математических моделей системы относительной навигации при сближении с кооперируемыми и некооперируемыми космическими аппаратами

Как следует из рисунка, в моделирующий комплекс включены модели источников света — Солнца, а также источников отражённого света — Луны, Земли. Кроме того, формируются фоновые изображения Земли, Луны и звёздного неба.

В модель сервисного космического аппарата (СКА) включены такие датчики, как широкоугольная телевизионная камера (ШТК), узкоугольная телевизионная камера (УТК), камера Time-of-Flight, формирующая 3D-изображение объекта (ТоF), и лазерный дальномер (ЛД). Эмулятор блока обработки данных (БОД) выполняет анализ сформированных видеоизображений и в случае успешного поиска, обнаружения и распознавания образа обслуживаемого космического аппарата (ОКА) переходит в режим измерения и выдаёт параметры его радиус-вектора и ориентации. Эмулятор бортовой цифровой вычислительной машины (БЦВМ) выполняет алгоритм сближения и стыковки с ОКА. Эмулятор двигательной установки формирует соответствующие линейные и угловые ускорения, воздействующие на СКА в вирту-

альном пространстве в соответствии с выданными управляющими командами от эмулятора БЦВМ. При этом само перемещение эмулируется в упрощённом режиме по осям X , Y , Z . Эмулятор Центра управления полётом выдаёт высокоуровневые команды (начать стыковку, остановить стыковку и т. п.) на эмулятор БЦВМ.

В программный комплекс включены трёхмерные модели ОКА, модели движения их центров масс и модели углового движения. На *рис. 4* приведено в качестве примера изображение трёхмерной модели космического аппарата. На *рис. 5* показаны отключаемые элементы модели в режиме кооперируемого объекта: стыковочная мишень (*слева*) и стыковочный узел (*справа*).

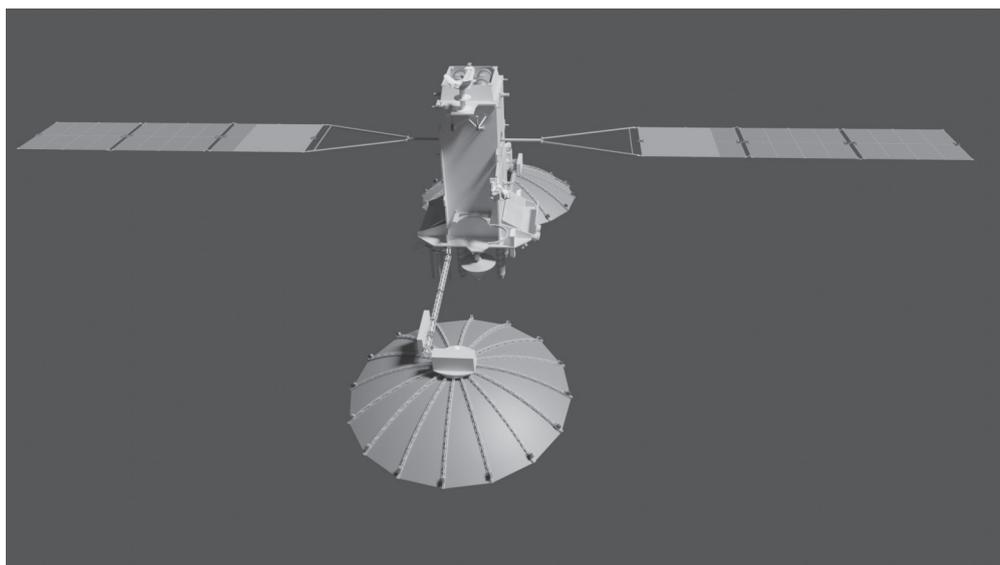


Рис. 4. Трёхмерная модель космического аппарата

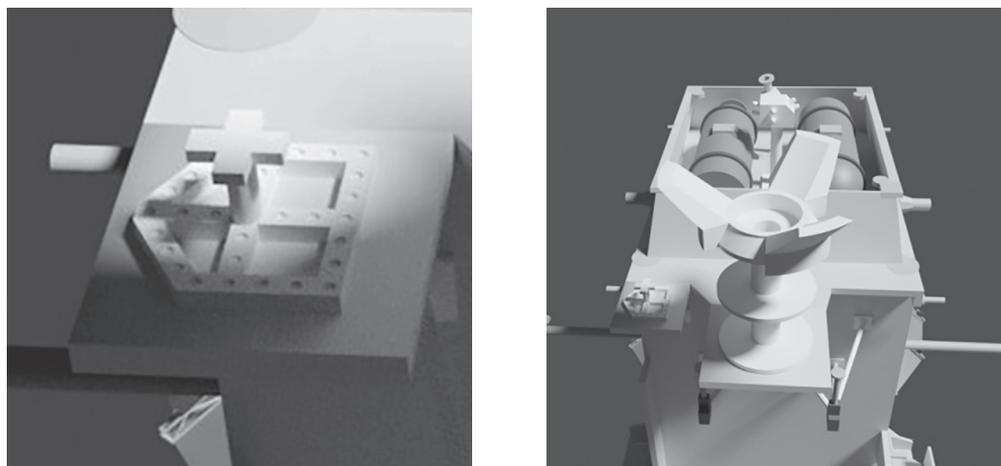


Рис. 5. Отключаемые элементы модели в режиме кооперируемого объекта: стыковочная мишень (*слева*) и стыковочный узел (*справа*)

Подводя итоги, можно заключить, что использование систем технического зрения в системах управления реальными физическими объектами, включая такие дорогостоящие и уникальные изделия, как космические аппараты, требует разработки специализированных систем подготовки полётных заданий, необходимой составной частью которых выступает подсистема высокоточной визуализации (рендеринга). Это необходимое условие для создания высоконадёжных систем управления, в которых используются системы технического зрения.

Литература

1. *Brochard R., Lebreton J., Robin C., Kanani K., Jonniaux G., Masson A., Despré N., Berjaoui A.* Scientific image rendering for space scenes with the SurRender software // Proc. 69th Intern. Astronautical Congress (IAC). 1–5 Oct. 2018, Bremen, Germany. 2018. arXiv: 1810.01423v1 (accessed 28.10.2020).
2. *Cremaschi F., Weikert S., Schäff S., Wiegand A.* ASTOS, a reconfigurable software for design of mega constellations, operation of Flying Laptop and end-of-life disposal // Proc. 15th Intern. Conf. Space Operations. Marseille, France. 28 May – 1 June 2018. DOI: 10.2514/6.2018-2496.
3. *Molina M., Prieto J., Garcia G., Beech T.* LAREDO: LAunching, REndezvous and DOcking Simulation Tool // Integration of Space-Based Assets within Full Spectrum Operations: Meeting Proc. Neuilly-sur-Seine, France. 2005. RTO-MP-SCI-150. Paper 11. 16 p.
4. *Tran L., Hennessey M., Abraham J.* Simulation and Visualization of Dynamic Systems Using MATLAB, Simulink, Simulink 3D Animation, and SolidWorks // Proc. ASME 2011 Intern. Mechanical Engineering Congress and Exposition (IMECE2011). 12–18 Nov. 2011, Denver, CO, USA. 2011. Paper IMECE2011-62704. P. 335–344.
5. *Turbe M., McDuffie J., DeKock B., Betts K., Carrington C.* SPARTAN: A High-Fidelity Simulation for Automated Rendezvous and Docking Applications // Proc. AIAA Modeling and Simulation Technologies Conf. and Exhibit. 20–23 Aug. 2007, Hilton Head, South Carolina. 2007. Document ID 20070038369. 21 p.
6. *Weikert S., Wiegand A., Fichter W., Saage R.* Coupled Mission and GNC Analysis for Space Robotic Missions // Proc. 63rd Intern. Astronautical Congress 2012 (IAC 2012). 1–5 Oct. 2012, Naples, Italy. 2012. V. 1. Paper IAC-12-C1.1.7. P. 5216–5225.

Information support for spacecraft docking missions (preparation of reference images and development of recognition and measurement algorithms)

V. A. Grishin^{1,2}, A. V. Berezhkov¹

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

² *Bauman Moscow State Technical University, Moscow 105005, Russia*
E-mail: vgrishin@iki.rssi.ru

The trend of modern control systems is to use more and more intelligent control methods. This allows the behavior of the controlled object to be optimized according to the current situation. Accordingly, the role of external information sensors, which are able to provide a large amount of data about the current situation and the external environment, is increasing. These highly informative sensors include vision systems. Such sensors have small dimensions, weight and power consumption. The use of the word “systems” is due to the fact that the output signal of television cameras included in the vision systems requires complex multi-stage processing. These processing methods are determined both by the current situation, observation conditions, and the tasks set at each specific moment in time. The complexity of the tasks of given objects images recognition (identification) in complicated observation conditions with high requirements for reliability leads to two results. Firstly, the formation of rather complex reference images of specified objects is required. Secondly, careful selection and development of recognition algorithms that should work with these reference images is required too. In the process of developing the algorithms, the efficiency and high reliability of the search, detection and recognition of specified objects should be confirmed. The good accuracy in measuring relative coordinates, which is important for control systems for docking of spacecraft, should also be confirmed. The paper provides information on the most interesting systems intended for testing the process of relative navigation during docking of spacecraft, as well as on the work being carried out in this direction at the Space Research Institute RAS.

Keywords: docking of spacecraft, pattern recognition, reference images, measurement of relative coordinates

Accepted: 09.11.2020

DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-7-50-57

References

1. Brochard R., Lebreton J., Robin C., Kanani K., Jonniaux G., Masson A., Despré N., Berjaoui A., Scientific image rendering for space scenes with the SurRender software, *Proc. 69th Intern. Astronautical Congress (IAC)*, 1–5 Oct. 2018, Bremen, Germany, 2018, arXiv: 1810.01423v1 (accessed 28.10.2020).
2. Cremaschi F., Weikert S., Schäff S., Wiegand A., ASTOS, a reconfigurable software for design of mega constellations, operation of Flying Laptop and end-of-life disposal, *Proc. 15th Intern. Conf. Space Operations*, Marseille, France, 28 May – 1 June 2018, DOI: 10.2514/6.2018-2496.
3. Molina M., Prieto J., Garcia G., Beech T., LAREDO: LAunching, REndezvous and DOcking Simulation Tool, *Integration of Space-Based Assets within Full Spectrum Operations*, Meeting Proc., Neuilly-sur-Seine, France, 2005, RTO-MP-SCI-150, Paper 11, 16 p.
4. Tran L., Hennessey M., Abraham J., Simulation and Visualization of Dynamic Systems Using MATLAB, Simulink, Simulink 3D Animation, and SolidWorks, *Proc. ASME 2011 Intern. Mechanical Engineering Congress and Exposition (IMECE2011)*, 12–18 Nov. 2011, Denver, CO, USA, 2011, Paper IMECE2011-62704, pp. 335–344.
5. Turbe M., McDuffie J., DeKock B., Betts K., Carrington C., SPARTAN: A High-Fidelity Simulation for Automated Rendezvous and Docking Applications, *Proc. AIAA Modeling and Simulation Technologies Conf. and Exhibit*, 20–23 Aug. 2007, Hilton Head, South Carolina, 2007, Document ID 20070038369, 21 p.
6. Weikert S., Wiegand A., Fichter W., Saage R., Coupled Mission and GNC Analysis for Space Robotic Missions, *Proc. 63rd Intern. Astronautical Congress 2012 (IAC 2012)*, 1–5 Oct. 2012, Naples, Italy, 2012, Paper IAC-12-C1.1.7, pp. 5216–5225.