

ИСТОРИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СИСТЕМ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ПОСАДКИ НА ПЛАНЕТЫ И МАЛЫЕ ТЕЛА СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ

Е.В. Белинская

Институт космических исследований
Российской академии наук, Москва

В статье рассматриваются и анализируются примеры использования систем технического зрения в составе автоматических систем управления, обеспечивающих посадку на поверхность планет и малых тел Солнечной системы. Изначально системы технического зрения такого назначения были разработаны для лунных миссий, однако в настоящее время с их помощью осуществлены посадки как на поверхность Марса, так и на поверхность астероидов. За последнее десятилетие системы технического зрения зарекомендовали себя как надежные и недорогие датчики навигационной информации. Развитие и использование систем технического зрения обеспечит существенное повышение безопасности автоматической посадки, а, следовательно, успешности выполнения миссии по исследованию малоизученных или не изученных в настоящее время объектов Солнечной системы.

In this paper examples of computer vision systems (CVS) application were considered and analyzed. These systems are a part of autonomous navigation systems, providing landing on the planet surface and small bodies of the Solar system. Such CVS were developed initially for lunar missions. At present days such systems are used for landings both on the Mars and some asteroids surface. CVS proved to be a reliable and inexpensive navigation information sensor during the last decade. Development and application of CVS will ensure essential augmentation of autonomous landing safety and so mission implementation success for exploration of unknown objects of the Solar system.

Наибольшую сложность при полетах в космосе представляет управление и навигация летательного аппарата в реальном времени из-за неизбежно возникающих временных задержек при передаче сигнала с Земли. Именно поэтому сейчас актуальной является задача создания автоматической системы навигации, которая способна обеспечивать безопасную посадку и решать проблему определения горизонтальной ско-

рости аппарата относительно поверхности, а также составления топографической карты.

В настоящее время уже осуществлен ряд зарубежных миссий, в которых была успешно применена система, использующая принципы машинного зрения для осуществления посадки или стыковки, а также готовится ряд аналогичных миссий.

NEAR Shoemaker

17 февраля 1996 г. был запущен аппарат NEAR Shoemaker (рис. 1), в задачи которого входило изучение астероида Эрос с близкой орбиты в течение года. Основная цель — исследовать такие параметры астероида как форма, структура, минералогия, морфология поверхности, свойства магнитного поля и внутреннее распределение массы.

13 декабря 2000 г. NEAR вышел на низкую орбиту вокруг астероида (на высоте 35 км), где и оставался до 12 февраля 2001 г.

Изначально посадка на Эрос не была запланирована, однако, когда были выполнены все поставленные цели и еще остались топливо и ресурсы, было решено, что посадка на поверхность астероида, хотя и является чрезвычайно опасной, но вполне осуществима.

Сначала был совершен маневр и в результате получены снимки, на основании которых в лаборатории Jet Propulsion проведена оценка положения аппарата относительно астероида для выработки сигналов управления двигателями, позже переданных на аппарат.

До самой посадки на поверхность астероида с борта зонда на Землю поступали фотографические изображения. И, хотя посадка не была проведена в полностью автоматическом режиме, это был первый опыт посадки аппарата на астероид, использующий снимки, полученные камерой аппарата.

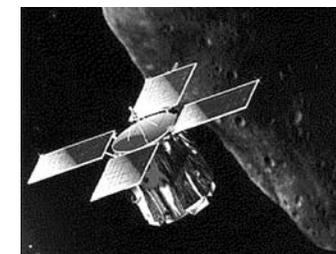


Рис. 1. Зонд на орбите астероида

MER-1 (Spirit) и MER-2 (Opportunity)

Одним из крупных проектов NASA по исследованию Марса является Mars Exploration Rover (рис. 2), в который входят два марсохода — Spirit (MER-1) и Opportunity (MER-2).

10 июня 2003 г. стартовал Spirit, вслед за ним 7 июля 2003 г. был выполнен запуск второго аппарата из этого проекта — Opportunity.



Рис. 2. Марсоход на поверхности планеты (моделирование)

Основными задачами, возложенными на аппараты, было исследование климата и геологических особенностей поверхности Марса с целью изучения наличия и активности воды на планете в прошлом.

После проведения исследований, которые показали, что ветер, действующий на аппарат в процессе его посадки на планету, может придавать ему дополнительную горизонтальную скорость относительно поверхности и привести к крушению аппарата, возникла необходимость создания специальной системы, способной определять возникающую горизонтальную скорость. Решено было использовать уже предусмотренную на аппарате навигационную камеру и разработанное специально для этих целей программное обеспечение — Dimes.

Используемый в системе алгоритм (рис. 3) основан на процедуре вычисления горизонтальной скорости по перемещению определенной характерной точки на паре снимков.



Рис. 3. Алгоритм работы Dimes

При посадке аппарата на поверхность камера делала три снимка — на высоте 2000, 1700 и 1400 м над поверхностью.

Алгоритм состоит из нескольких этапов:

- *Сжатие полученного изображения до разрешения 256×256 пикселей.*
- *Поиск области перекрытия снимков и обнаружение характерных точек.* При осуществлении поиска исключается область тени, отбрасываемой аппаратом при посадке, так как возникает эффект нелинейного увеличения интенсивности изображения вблизи тени, что может привести к неверному определению значения скорости.
- *Сглаживание изображения — уменьшение разности интенсивности между снимками.*
- *Исправление изображения, в результате чего снимки приводятся к одному углу зрения.*

- *Измерение горизонтальной скорости аппарата.* После проведенных корректировок различие в снимках заключается именно в горизонтальном смещении, которое и определяет горизонтальную скорость аппарата, т. е. любое горизонтальное перемещение будет отображаться на снимке как перемещение рассматриваемой точки, по которому вычисляется горизонтальное смещение аппарата в метрах.

Программа Dimes была успешно применена при посадке обоих аппаратов и зарекомендовала себя как надежная и относительно недорогая система.

MUSES-C (Hayabusa)

9 мая 2003 г. стартовал КА MUSES-C (рис. 4). MUSES-C — это проект японского Института космических и астронавтических наук (ISAS). Цель проекта — открытый в 1998 г. астероид 25143 Itokawa, который относится к потенциально опасным астероидам, так как может проходить на расстоянии менее 0,05 а.е. (7,5 млн км) от Земли.

Задача — исследование геологических особенностей, структуры и состава поверхности астероида.

19 ноября 2003 г. аппарат начал посадку на поверхность с высоты 1 км. Однако, из-за сигнала об ошибке, посадку пришлось остановить.

Вторая попытка посадки и сбора образцов была осуществлена 25 января 2004 г.

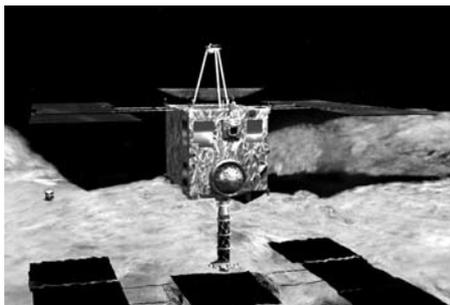


Рис. 4. Моделирование процесса посадки аппарата

В течение месяца КА MUSES-C вел съемку и другие измерения поверхности астероида с расстояния около 20 км, в результате чего составлялась топографическая карта поверхности с дальнейшим поиском безопасного места для посадки.

Процесс посадки можно разделить на следующие основные этапы (рис. 5):

- *Фаза посадки.* На этом этапе в поле зрения камер при съемке попадает весь астероид. Здесь определяются такие особенности рельефа как кратеры и осуществляется захват найденных особенностей на снимке, что дает возможность определить относительное положение КА над поверхностью и его горизонтальную скорость.
- *Финальная фаза посадки.* Так как сила тяжести на поверхности астероида такого размера очень мала, для забора грунта был применен следующий метод. Перед самым касанием аппарат «выстреливает» по поверхности специальной «пулей» массой 10 г со скоростью 200...300 м/с, собирает грунт, выбитый ею с поверхности, в воронку диаметром 40 см и затем в контейнер в составе посадочной капсулы. Для безопасного и успешного выполнения данной операции необходимо осуществлять контроль вертикальной и горизонтальной скоростей аппарата на малой высоте. Для этой цели на высоте 100 м был сброшен искусственный маркер вблизи предполагаемого места посадки, захват которого был осуществлен камерой КА на высоте 50 м. Для наилучшего распознавания маркер покрыт отражателями и КА подсвечивал место посадки (рис. 6).



Рис. 5. Алгоритм работы Dimes

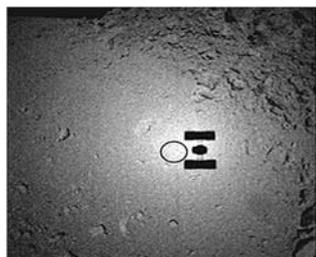


Рис. 6. Снимок области посадки КА с подсвеченным искусственным маркером

• *Касание поверхности.* Аппарат был переведен в режим вертикального снижения, совершая посадку на поверхность, при этом горизонтальная скорость

аппарата поддерживалась постоянной. Затем КА начал свободное падение и совершил касание поверхности с целью сбора грунта.

В апреле 2007 г. аппарат взял обратный курс к Земле. Расчетное время возвращения — июнь 2010 г.

Стыковка грузового корабля «Жюль Верн» (Jules Verne) с Международной космической станцией (МКС)

«Жюль Верн» — первый европейский грузовой автоматический корабль, разработанный для стыковки с МКС. Стыковка была успешно осуществлена 3 апреля 2008 г.

На корабле установлена высокоточная система навигации нового поколения, которая была рассчитана для управления траекторией и процессом стыковки с МКС при помощи оптических сенсоров и технологии GPS.

Система GPS использовалась для того, чтобы корабль с расстояния 30 км смог сблизиться с МКС на расстояние 249 м, после чего применялась лазерная система навигации, основу которой составляют ретрорефлекторы, расположенные в передней части Российского модуля. При этом расположенная на корабле лазерная система формирует лазерные лучи, которые отражаются от ретрорефлекторов. Анализ картины отражения позволил вычислить относительное положение и ориентацию корабля, после чего «Жюль Верн» смог приблизиться и состыковаться с модулем. Моделирование стыковки грузового корабля с Российским модулем МКС показано на рис. 7.

Корабль оснащен двумя такими устройствами, один из которых — резервный.

Рис. 7. Моделирование стыковки «Жюль Верна» с Российским модулем МКС



На «Жюль Верне» также использовался вторичный сенсор — телегониометр, который определял его угловое положение.

Таким образом, аппарат впервые использовал систему лазерного наведения.

Aurora program

«Аврора» — это долгосрочная программа ЕКА по исследованию Марса.

Одним из самых крупных проектов этой программы на сегодняшний день является аппарат ExoMars, запуск которого планируется на 2013 г.

В задачи, решаемые аппаратом, будет входить:

- поиск следов жизни на Марсе (как в прошлом, так и в настоящем);
- исследование биологической среды.

Для обеспечения безопасной посадки на поверхность и уменьшения остаточной скорости при посадке была разработана система визуальной навигации для посадки — NPAL (Navigation for Planetary Approach and Landing), а также система LiGNC, основанная на лазерной технологии Lidar.

Принцип действия систем состоит в следующем.

Система NPAL предназначена для контроля за скоростью посадки и обнаружения препятствий размером ~10 см.

Визуальная система обрабатывает ряд снимков с целью захвата и обнаружения на них характерных точек.

Затем осуществляется сопоставление одноименных точек на различных изображениях, и далее величина перемещения найденных точек от одного снимка к другому (в пикселах) передается на специальный навигационный фильтр,

в задачи которого входит не только определение положения и скорости аппарата, но и 3D-позиции каждой характерной точки.

Данный процесс требует большой вычислительной мощности, так как количество одновременно обрабатываемых точек может достигать 200 при частоте изображений 20 Гц.

Система же LiGNC является сканирующей и непосредственно формирует 3D-изображение, что предпочтительнее локальной обработки отдельных кадров как в предыдущей рассматриваемой системе. Первая задача обработки — сформировать карту оценки поверхности вблизи места посадки конвертированием сферических координат в декартовы. Вторая задача — определение перемещения характерных точек между двумя кадрами.

Таким образом, для обоих случаев система контроля посадки становится адаптивной, что дает возможность изменять траекторию посадки в зависимости от текущей скорости, положения аппарата и поверхностных условий посадки.

Первичное изменение траектории будет осуществляться после отделения парашютов, а конечная корректировка проводится на высоте порядка 150 м, при этом будет осуществляться и промежуточная корректировка. В настоящее время продолжают исследование, разработка и тестирование описанных систем и методов.

Mercury sample return mission

Основная сложность в данной миссии — это то, что Меркурий является мало изученной планетой, и известны его основные, «глобальные» параметры. Однако свойства поверхности Меркурия таковы, что приближенно их можно рассматривать схожими со свойствами лунной поверхности.

Перед системой автоматической посадки в данной миссии стоит задача определения самого безопасного места для посадки аппарата.

При решении данная проблема разделяется на несколько задач или этапов.

- *Составление карты риска.* Объединение набора изображений в одно, на котором обозначены области риска (рис. 8).



Рис. 8. Карта риска оценки поверхности

При решении в задаче можно выделить две подзадачи: определение угла посадки (между вертикальной осью аппарата и поверхностью) и неровностей рельефа. Предварительные исследования показали, что предел значения угла посадки для аппарата составляет 20° , а разность высоты различных участков поверхности в месте посадки не должна превышать 25 см.

Значение угла посадки может быть получено путем оценки уровня яркости каждого пиксела. Для точного результата необходимы такие параметры как альbedo поверхности, уровень освещенности и известная отображающая способность поверхности.

При решении задачи исследования рельефа используется текстурная сегментация, которая позволяет выделить безопасную область, а также обнаружить на изображении области теней.

Таким образом, описанная система позволяет кластеризовать изображение предполагаемой области посадки, вычисляя угол относительно поверхности, препятствия и тени при выборе координат посадки.

- *Управление (пилотирование).* Управление осуществляется посредством системы искусственного интеллекта.

Например, одним из решающих факторов является предварительный выбор возможных вариантов на основании только карты риска, где выбираются потенциальные области,

2D-координаты которых преобразуются в 3D. При этом вычисляется количество топлива, необходимое для достижения заданных координат с текущей позиции аппарата.

Аппарат будет придерживаться выбранного курса до тех пор, пока не возникнет опасная для аппарата ситуация. В этом случае будут определены новые координаты и проведена корректировка траектории.

В настоящее время помимо рассмотренных в статье миссий готовится еще ряд проектов, использующих для автоматической посадки систему технического зрения: Europa Astrobiology Lander (исследование Европы — спутника Юпитера; планируется на 2035 г.), Titan Explorer (исследование химического состава поверхности Титана и атмосферного давления; запуск запланирован на 2017–2018 гг.), Rosetta (запущен ЕКА 2 марта 2004 г; цель полёта — исследование кометы 67P/Чурюмова–Герасименко; посадка планируется в 2014 г.).

Интерес представляет то, что камеры, разработанные для программы ЕКА Rosetta, было предложено использовать для текущего проекта «Фобос-Грунт» для используемых телевизионных систем (обзорной телевизионной камеры, стереокамеры и камеры-микроскопа). В этих камерах используются твердотельные матричные приемники фирмы Томпсон (статья в настоящем сборнике *А.В. Бондаренко* и др. Телевизионные системы манипуляторного комплекса проекта «Фобос-Грунт», с. 314).

Очевидно, что развитие и использование систем технического зрения для решения задач автоматической посадки предоставит огромные возможности по исследованию малоизученных или не изученных в настоящее время объектов Солнечной системы.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект № 06-08-01497-а.

АЛГОРИТМЫ ИЗМЕРЕНИЯ ВЫСОТЫ И КОМПОНЕНТ СКОРОСТИ ПО ТЕЛЕВИЗИОННЫМ ИЗОБРАЖЕНИЯМ ПРИ ПОСАДКЕ НА ФОБОС

В.А. Гришин

Институт космических исследований
Российской академии наук, Москва

В статье рассматриваются бортовые алгоритмы измерения высоты и компонент скорости в процессе посадки на Фобос. Высота измеряется по стереопарам. Для этого используются две узкоугольные и две широкоугольные камеры. Для измерения компонент скорости производится слежение за выделенными особенностями на парах кадров в монокулярном режиме. Алгоритмы работают в режиме реального времени в условиях жестких ограничений на вычислительную мощность процессоров. При разработке алгоритмов значительное внимание уделялось вопросам снижения вычислительной сложности и повышению надежности измерений в этих условиях.

There are considered on-board algorithms for measurement of altitude and descending velocity components during the landing on Phobos surface. Stereo-pairs used for altitude measurement. There are two narrow-angle cameras and two wide-angle cameras for stereo-pairs taking. Selection of features and its tracing in monocular mode is used for descending velocity components measurement. The algorithms operate in real-time in condition of strict processing power limitation. During algorithms development great attention has been paid to computational complexity reduction and measurement reliability increasing in these conditions.

Посадка на поверхность планет и малых тел Солнечной системы — заключительный, наиболее ответственный и опасный этап полета. Большие расстояния и, соответственно, большие задержки передачи сигналов исключают возможность дистанционного управления процессом посадки с Земли. Поэтому в настоящее время активно исследуются возможности использования систем технического зрения для решения задач управления посадкой автоматических космических аппаратов. В качестве примера можно сослаться на работу [1], где рассмотрена система MER-DIMES, использовавшаяся для оценки горизонтальной скорости при посадке марсоходов Spirit и Opportunity. В работе [2] описана система