

Мультиразрешение в оптических навигационных системах космических аппаратов

В. А. Гришин

*Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия
E-mail: vgrishin@iki.rssi.ru*

Работа посвящена анализу возможностей использования мультиразрешения в оптических навигационных системах. Такие системы применяются для информационного обеспечения процессов стыковки космических аппаратов в полностью автоматическом режиме. В статье отмечается определённая аналогия решения задач распознавания в системах технического зрения и в живой природе, в частности в системе зрения человека. Основное внимание уделено использованию режима мультиразрешения при решении задач распознавания космических аппаратов в широком диапазоне дальностей, а также при проведении измерений относительных координат. Мультиразрешение позволяет существенно уменьшить вычислительные затраты на обработку изображений в процессе распознавания, а самое главное — использование режима мультиразрешения позволяет значительно уменьшить количество эталонных изображений, необходимых для решения задач распознавания и измерения относительных координат. Это очень важно, так как подготовка эталонной информации для стыковки с некооперируемой космическими аппаратами, не оснащёнными специальными стыковочными мишенями, представляется весьма трудоёмким процессом. Поскольку мультиразрешение напрямую влияет на точность измерений относительных координат, выполнены численно-аналитические оценки влияния этого фактора на точность измерений. Оценки подтвердили, что ухудшение точности измерений на средних и малых дистанциях вполне допустимо. На больших расстояниях мультиразрешение никоим образом не ухудшает точность измерений.

Ключевые слова: навигация космических аппаратов, системы технического зрения, диапазон рабочих дальностей

Одобрена к печати: 04.05.2022

DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-3-105-113

В настоящее время происходит непрерывное расширение области использования систем технического зрения. Этот процесс обусловлен целым рядом причин, дать полный список которых не представляется возможным в короткой статье. Отметим только две, наиболее важные, по мнению автора, причины.

Во-первых, это сравнительно малый вес, габариты и потребляемая мощность систем технического зрения, их высокая прочность и надёжность. Данные свойства очень важны для бортовых систем, устанавливаемых на мобильных объектах.

Во-вторых, высокая информативность телевизионных датчиков. Это потенциально существенно расширяет возможности систем управления, что позволяет гибко менять цели, а также перестраивать планы и сценарии действий в зависимости от окружающей обстановки, что характерно для современных, а тем более для будущих систем управления на базе автономного искусственного интеллекта.

Далее будем рассматривать навигационные системы, используемые для относительной навигации при стыковке космических аппаратов (КА). В системах предыдущего поколения использовались одиночные камеры, что существенно ограничивало их возможности как со стороны больших расстояний, так и очень малых. Например, интервал дальности работы системы AVGS (*англ.* Advanced Video Guidance Sensor) составил 0,5–300 м (Howard et al., 2004). Более современная система NGAVGS (*англ.* Next Generation Advanced Video Guidance Sensor) рассчитана на приблизительно такой же интервал дальности (Lee et al., 2008). Видеомер (автоматическая стыковочная система) разработки компании EADS Sodern имеет интервал рабочих дальностей 1,25–300 м (Blarre et al., 2004). Более современная навигационная система Hydra (Granade, Roe, 2008) включает в себя AVGS в качестве подсистемы и поэтому имеет

приблизительно такой же интервал рабочих дальностей. Система Hydra включает в себя также технологию ULTOR Passive Pose and Position Engine (P3E). Эта корреляционная система решает навигационную задачу с использованием другой, чем AVGS, мишени, не содержащей ретрорефлекторы.

Следует отметить, что системы AVGS, NGAVGS и видеометр работают с мишенью, которая включает в себя мишень для больших дальностей и мишень для малых дальностей, имеющую существенно меньшие размеры. Это позволяет увеличить диапазон рабочих дальностей до указанных выше величин.

В более новых разработках систем относительной навигации, выполняющих измерения в более широком диапазоне дальностей, используются обычно несколько телевизионных камер, имеющих различные поля зрения. Примером может служить оптическая навигационная система VIBANASS (*англ.* VIsion BAsed NAvigation Sensor System) (Benningho, Boge, 2015; Mühlbauer et al., 2012, 2013). Она содержит два блока камер, в каждом из которых есть три камеры с различными полями зрения. Система предназначена для работы в интервале дальностей от 0,7 до 3000 м.

Рассмотрим вопросы, связанные с разрешением изображений, которые могут быть использованы для распознавания. Современные матрицы фотоаппаратов обеспечивают формирование изображений, содержащих десятки мегапикселей. Оставив пока без рассмотрения вопросы, связанные с радиационной стойкостью таких матриц, отметим, что использование матриц с высоким разрешением приводит, с одной стороны, к заметному ухудшению отношения «сигнал/шум» (особенно при недостаточной освещённости) из-за малой площади пикселей, а с другой — к существенному увеличению потока информации, поступающей от оптического датчика, и, соответственно, к существенному увеличению вычислительных ресурсов, необходимых для обработки этой информации. Это является достаточно серьёзной проблемой для систем управления, устанавливаемых на мобильных объектах, особенно для объектов, работающих в тяжёлых условиях (например, в космосе).

Между тем, достаточно давно, ещё в 1958 г., были сделаны некоторые оценки числа элементов разрешения, которые считались бы достаточными для решения человеком задач обнаружения, определения ориентации, различения и опознания. В настоящее время эти оценки известны как критерий Джонсона (Johnson, 1958). Согласно этому критерию, для решения с вероятностью 50 % наиболее сложной задачи из этого списка (опознание) оказалось достаточно от $12,8_{-2,8}$ до $12,8^{+3,2}$ полупериодов штриховой мишени (что приблизительно соответствует такому же количеству пикселей изображения) для минимального видимого размера объекта, которые должна разрешать видеосистема. Как видим, для решения указанных задач требуется не так уж и много пикселей.

Следует, однако, отметить, что если требуется решать помимо перечисленных задач ещё и задачи относительной навигации, то это существенно повышает требования к необходимому количеству элементов разрешения. Это происходит просто из-за необходимости обеспечения приемлемой точности измерения. В качестве примера можно привести задачи относительной навигации в случае реализации кооперируемой стыковки КА. При кооперируемой стыковке пассивный КА оснащён специальной стыковочной мишенью, которая может содержать либо активные излучатели (светодиоды, лазерные диоды), либо пассивные ретрорефлекторы (например, уголковые отражатели оптического диапазона).

Если же речь идёт о некооперируемой стыковке, то здесь ситуация ещё более усложняется, поскольку необходимо уже распознавать отдельные малоразмерные элементы конструкции КА и использовать их для решения задачи относительной навигации. Малый размер этих элементов обусловлен тем, что для элементов больших размеров проблематично получить приемлемую точность навигации из-за неопределённости координат точки привязки больших элементов. Соответственно, и требования к числу элементов изображения в указанном случае существенно возрастают.

Рассмотрим, как решается противоречие между желательным большим разрешением изображения и нежелательными большими вычислительными затратами на обработку таких изображений применительно к биологическим системам.

По некоторым оценкам, разрешение человеческого глаза вблизи центральной ямки (*лат. fovea centralis*) приблизительно соответствует 10 мегапикселям (хотя в сетчатке каждого из наших глаз расположено примерно 100–140 млн светочувствительных клеток). Именно в области центральной ямки фокусируется изображение отдалённых объектов, которые мы хотим рассмотреть. В то же время на периферии поля зрения разрешение уменьшается приблизительно на два порядка. На *рис. 1* показана относительная острота зрения левого глаза человека (горизонтальный разрез) в градусах от центральной ямки (Gruesser, Gruesser-Cornehls, 1978).

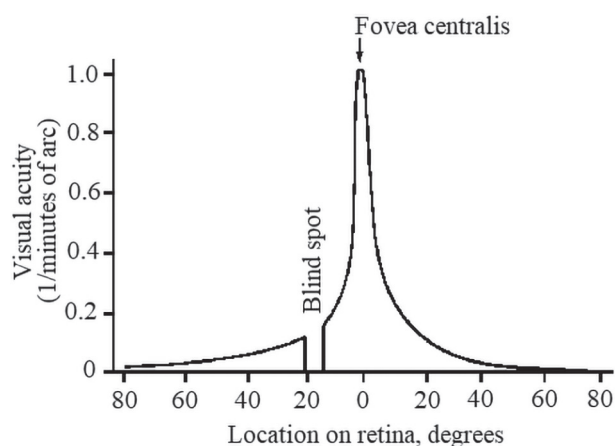


Рис. 1. Относительная острота зрения (Gruesser, Gruesser-Cornehls, 1978)

Из графика можно заключить, что уже на расстоянии порядка 25° от центральной ямки разрешение глаза падает приблизительно на порядок. Таким образом, высокое разрешение используется при рассмотрении малоразмерных удалённых объектов, а по мере приближения к ним среднее разрешение по площади изображения объекта значительно падает, что позволяет существенно уменьшать вычислительные затраты на обработку изображений. В центральной ямке каждая светочувствительная клетка имеет свой аксон. Аксоном называется отросток нервной клетки, по которому нервные импульсы передаются к другим нервным клеткам или мышцам, а в данном случае — к нервным клеткам мозга. В центральной ямке находятся так называемые колбочки, которые отвечают за цветное зрение. По мере отдаления от центральной ямки всё больше и больше колбочек, а также и палочек, отвечающих за сумеречное зрение, объединяются в рецептивные поля, которые имеют один аксон. На периферии зрения рецептивные поля могут содержать тысячи палочек или гораздо меньшее количество колбочек, имеющих один аксон на всех. За счёт такой группировки 100–140 млн рецепторов имеют всего порядка 1 млн аксонов, по которым видеоинформация передаётся в мозг. Таким образом, существенное понижение разрешения на периферии зрения реализуется путём объединения множеств палочек в рецептивные поля.

Здесь можно усмотреть прямую аналогию с бинингом или бинированием — технологией объединения соседних пикселей в один пиксель большей площади. Однако эта аналогия будет неполной. Дело в том, что за счёт быстрых движений глаз (саккад) по информативным точкам изображения мозг синтезирует изображение высокого разрешения. Такой режим не характерен для систем технического зрения. Поэтому для технических систем не удастся реализовать такую большую степень изменения разрешения, которую реализует глаз.

Тем не менее даже при наблюдении удалённых объектов, изображение которых фокусируется в области центральной ямки (т. е. области максимального разрешения глаза), «на расстоянии 50–100 м человека не всегда можно узнать, при удалении на 1000 м трудно определить его пол, возраст и форму одежды; с расстояния 5 км его вообще не увидишь» (Шаронов, 1953). По этой причине для наблюдения удалённых объектов человек использует оптические приборы, такие как зрительные трубы, телескопы, бинокли. Здесь возникает прямая аналогия с оптической навигационной системой VIBANASS и ей подобными системами, использующими несколько телевизионных камер с различными фокусными расстояниями.

Отметим следующее важное обстоятельство, относящееся к случаю стыковки с некооперируемыми КА. Для решения задачи распознавания необходимо иметь на борту достаточно большое количество эталонов. При этом число всех возможных изображений трёхмерного объекта не просто бесконечно, но имеет мощность континуума, т. е. не является счётным множеством. Однако это бесконечно большое множество возможных изображений распадается на вполне конечное множество классов изображений. Каждый такой класс при этом содержит также несчётное множество изображений, но изображения из каждого класса уже

представляются топологически эквивалентными. Топологически эквивалентные изображения (синоним — гомеоморфные изображения) — это такие изображения, для которых существует взаимно однозначное и взаимно непрерывное отображение. Теоретически для решения задачи распознавания достаточно иметь число эталонов, совпадающее с числом классов топологически эквивалентных изображений. Однако ограниченность разрешения реальных изображений требует увеличения этого числа. К сожалению, видимое изображение зависит не только от ракурса наблюдения, но ещё и от расстояния, которое влияет как на масштаб изображения, так и на перспективные искажения.

Необходимо отметить, что при стыковке с кооперируемыми КА никаких проблем, связанных с изменением видимой структуры эталонов, а также с необходимостью масштабирования эталонов, как правило, не возникает. Это обусловлено простой структурой стыковочной мишени, используемой для измерений.

Современные эталоны изображений, основанные на использовании множества особых точек: SIFT (*англ.* Scale Invariant Feature Transform) (Lowe, 2004), SURF (*англ.* Speeded-Up Robust Features) (Bay et al., 2008) — и их всевозможные модификации способны работать при масштабировании изображения в пределах 2–2,5 раз. Поэтому для сокращения числа необходимых для распознавания и измерения эталонов целесообразно использовать приёмы мультиразрешения, в каком-то смысле подобные мультиразрешению естественных зрительных систем. Чисто аппаратно это целесообразно делать путём бинирования изображений. Естественно, это мультиразрешение не может иметь столь широкого диапазона, как в естественных системах.

Рассмотрим более подробно бинирование изображений на примере двух камер, имеющих существенно различающиеся поля зрения — 10° и 40°. Такие поля зрения имеют камеры в системе VIBANASS. В эту систему входят ещё камеры с промежуточным значением поля зрения, равным 30°, но мы их рассматривать не будем. В качестве примера КМОП-матрицы (комплементарная структура «металл–оксид–полупроводник», *англ.* CMOS, complementary metal-oxide-semiconductor) возьмём матрицу, специально разработанную для применения в условиях космического пространства, имеющую размер 2048×2048 пикселей и размер одного пикселя 10×10 мкм (Capella..., 2021).

На *рис. 2* показаны рубежи переключения режимов бинирования для камеры с полем зрения 10°. По горизонтальной оси графика отложено расстояние до КА. По вертикальной оси отложен видимый максимальный размер КА в пикселях. Условия переключения определяются максимальным размером наблюдаемого КА, которое принято равным 23,19 м, что соответствует размаху панелей солнечных батарей. Поскольку цель настоящей статьи — показать возможность использования метода мультиразрешения, то не будем анализировать вопросы, связанные с нежесткостью панелей солнечных батарей и влиянием этого фактора на точность измерений. Интервал допустимых размеров видимого изображения, в котором решаются задачи распознавания и измерения, задан равным 256–512 пикселей.

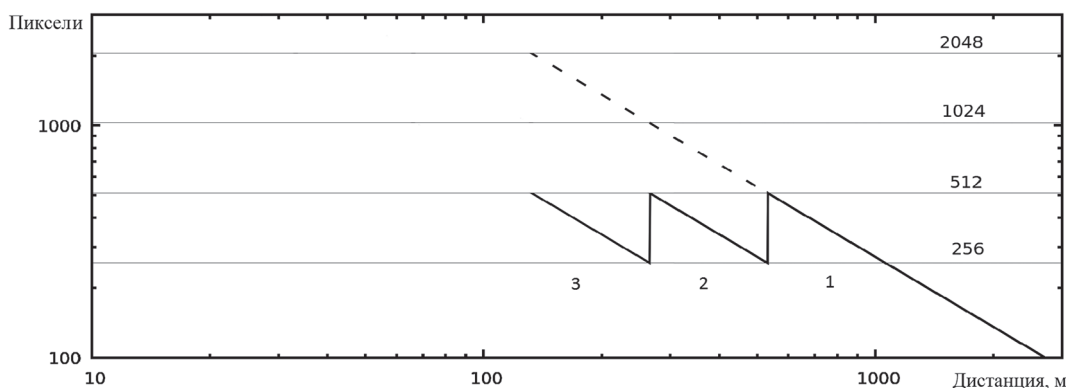


Рис. 2. Рубежи переключения бинирования камеры с полем зрения 10°:
1 — без бинирования, 2 — однократное бинирование, 3 — двукратное бинирование

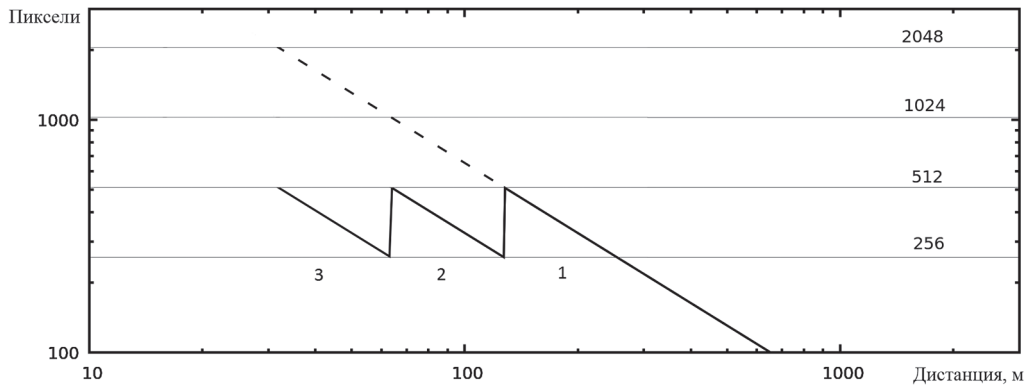


Рис. 3. Рубежи переключения бинирования камеры с полем зрения 40°:
 1 — без бинирования, 2 — однократное бинирование, 3 — двукратное бинирование

При этом на больших расстояниях (больше 531 м) используется максимальное разрешение матрицы камеры, что обеспечивает максимальную точность измерений. На меньших расстояниях используется бинирование, что не критично в плане точности измерений, поскольку с уменьшением дальности точность измерений возрастает. Исходя из условия, что видимый размер не должен быть менее 256 пикселей, можно определить максимальную дальность распознавания и измерения этой камерой в 1060 м. На расстояниях, превышающих 1060 м, возможно грубое распознавание и измерение углов ориентации пассивного КА с пониженной точностью. На предельной дальности (когда размер изображения составляет порядка 20 пикселей) возможна только очень грубая оценка дальности и измерение направления на пассивный КА. На расстояниях, меньших 133 м, приходится проводить измерения по наблюдаемым фрагментам КА, поскольку панели солнечных батарей выходят за границы кадра. То есть фактически уже будет использоваться другой эталон.

На рис. 3 показаны рубежи переключения режимов бинирования для камеры с полем зрения 40°. Также исходя из условия, что видимый размер не должен быть менее 256 пикселей, можно определить максимальную дальность распознавания и измерения этой камерой в 254 м. На расстояниях, меньших 32 м, приходится производить измерения по наблюдаемым фрагментам КА, поскольку панели солнечных батарей выходят за границы кадра. То есть также будет использован уже другой эталон.

Таким образом, для фиксированного ракурса требуется единственный эталон в диапазоне от 1060 до 32 м (т. е. при изменении расстояния в 33 раза) при использовании обеих камер с полями зрения 10 и 40°. На расстояниях, меньших 133 м, для камеры с полем зрения 10° и 32 м для камеры с полем зрения 40° потребуются другие эталоны из-за выхода части элементов КА из поля зрения и из-за нарастания перспективных искажений.

Поскольку бинирование непосредственно влияет на точность измерений, необходимо сделать оценку влияния этого фактора на точность измерений. Для этого используются численно-аналитические оценки, сделанные для обеих камер. Графики ошибок измерений построены для набора из $11 \times 11 = 121$ ракурса визирования с шагом 5°. Изображение КА для нулевых углов ракурса визирования представлено на рис. 4.

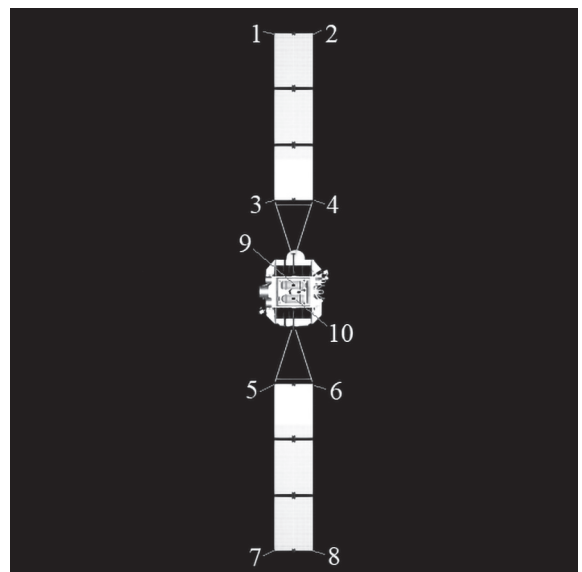


Рис. 4. Положение десяти точек привязки

Там же цифрами отмечены точки привязки (они же информативные или особые точки), использованные для измерений. В расчётах используется информация о трёхмерных координатах этих точек.

Ошибки навигации оцениваются в системе координат, связанной с камерой. При этом ось OX направлена по оси объектива, ось OY — вверх, ось OZ — вправо. Углы α , β и γ соответствуют поворотам вокруг осей OX , OY и OZ соответственно. Оценка точности измерений производилась по методике, описанной в работе (Grishin, 2010).

В качестве примера приведены графики результатов расчёта ошибок измерения углов ориентации (рис. 5) и ошибок измерения координат (рис. 6) на расстоянии 32 м. При расчётах было принято, что среднее квадратическое отклонение (СКО) ошибок локализации особых точек равно 1 пикселю. В случае стыковки с кооперируемым КА, имеющим специальную стыковочную мишень, ошибки локализации могут быть значительно меньше указанной величины. В табл. 1 и 2 приведены максимальные ошибки для данного диапазона углов ракурса наблюдения (углов λ и φ) для разных расстояний и режимов бинирования для камер с полем зрения 10 и 40° .

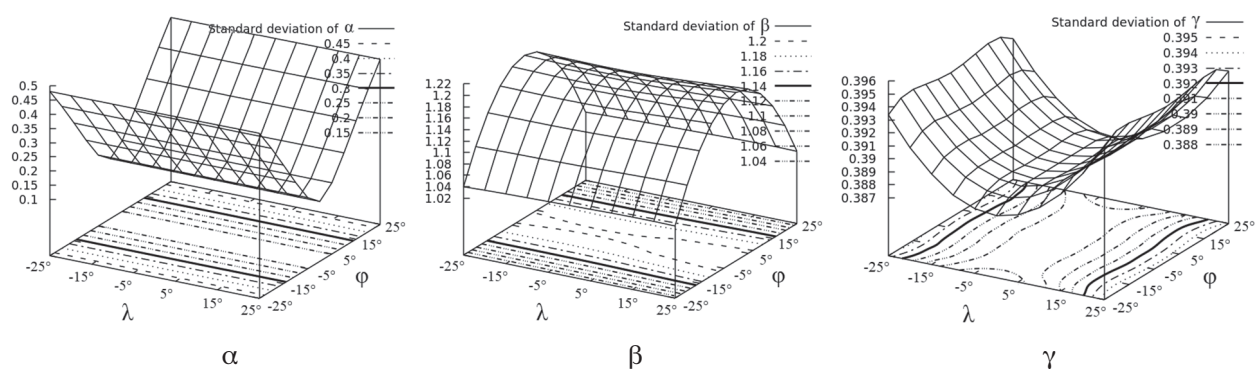


Рис. 5. СКО ошибок измерения углов (в градусах) в зависимости от значений углов λ и φ

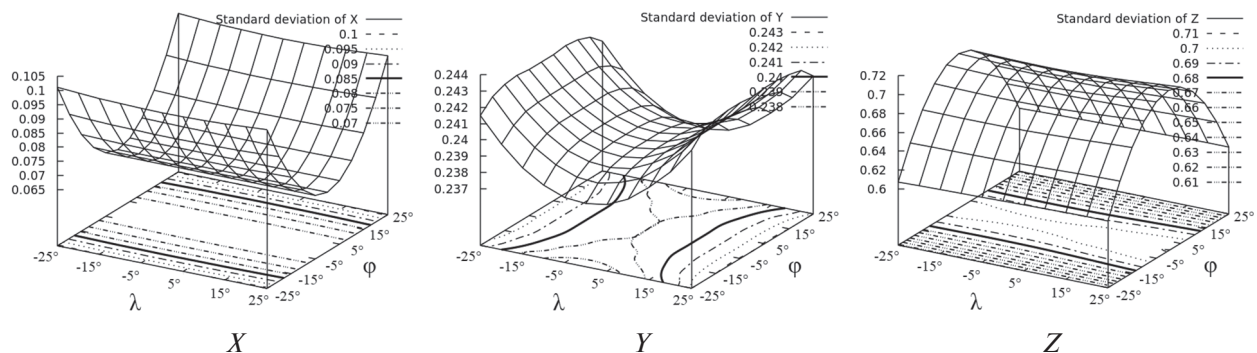


Рис. 6. СКО ошибок измерения линейных координат (в метрах) в зависимости от значений углов λ и φ

Таким образом, несмотря на то что бинирование, естественно, уменьшает точность измерений, при однократном и двукратном бинировании ошибки измерений остаются вполне приемлемыми. В частности, ошибка измерения дальности изменяется в пределах 0,3–1,6 %. Разумеется, эта ошибка зависит от количества точек привязки, их пространственного расположения и точности их локализации на изображении.

Широкий диапазон дальностей работы системы технического зрения обеспечивается за счёт следующих мер:

- использования камер с различными полями зрения и фокусными расстояниями;
- использования дескрипторов особых точек, частично инвариантных к изменению масштаба изображения (в 2–2,5 раза). В частности, таким свойством обладают дескрипто-

ры алгоритмов SIFT, SURF и им подобные. Имеются возможности дальнейшего расширения этого диапазона и увеличения надёжности установления соответствия точек по дескрипторам их окрестностей;

- использования мультиразрешения, когда на больших расстояниях используется полное разрешение камер, а при уменьшении расстояния изображение подвергается бинированию — одно- или двукратному.

Таблица 1. Максимальные ошибки измерения для разных расстояний и режимов бинирования в указанном выше диапазоне углов λ и φ для камеры с полем зрения 10°

Бинирование	Дальность, м	Размер в пикселях	Ошибки измерений					
			α , град	β , град	γ , град	X, м	Y, м	Z, м
Нет	1060	256	0,95	2,47	2,36	17,04	43,68	45,65
	531	511	0,48	1,23	1,13	4,13	10,44	11,43
Однократное	530	256	0,95	2,46	2,25	8,22	20,81	22,78
	266	510	0,47	1,23	1,02	1,92	4,74	5,71
Двукратное	265	256	0,95	2,45	2,04	3,81	9,41	11,34
	133	510	0,47	1,22	0,85	0,83	1,97	2,84

Таблица 2. Максимальные ошибки измерения для разных расстояний и режимов бинирования в указанном выше диапазоне углов λ и φ для камеры с полем зрения 40°

Бинирование	Дальность, м	Размер в пикселях	Ошибки измерений					
			α , град	β , град	γ , град	X, м	Y, м	Z, м
Нет	254	257	0,95	2,46	2,02	3,63	8,95	10,88
	128	510	0,47	1,23	0,84	0,79	1,87	2,73
Однократное	127	257	0,94	2,43	1,65	1,55	3,67	5,38
	64	510	0,47	1,21	0,60	0,30	0,68	1,36
Двукратное	63	259	0,92	2,36	1,15	0,55	1,28	2,58
	32	510	0,48	1,22	0,40	0,10	0,24	0,71

Остаётся открытым вопрос об оптимальном выборе размеров полей зрения камер в оптоэлектронных навигационных системах с мультиразрешением. Как уже отмечалось, максимальная кратность бинирования определяется допустимым уменьшением точности измерений навигационных параметров. Поэтому сначала рассчитывается точность измерения навигационных параметров для заданных параметров камеры в зависимости от расстояния. Как только при уменьшении расстояния до пассивного КА становится невозможным удовлетворить требования по точности измерений первой камерой, необходимо использовать вторую камеру с более широким полем зрения, при котором реализуется полное разрешение камеры. Далее определяется зависимость точности измерений для второй камеры таким же образом, как и для первой камеры, но для меньших расстояний. То есть процесс повторяется. На очень малых расстояниях требуется учитывать расфокусировку камеры. При необходимости может быть использована и третья камера с ещё более широким полем зрения.

В общем случае целесообразно выбирать поля зрения камер кратным образом, т.е. они должны отличаться в 2, 4 или 8 раз. Однако с целью увеличения надёжности работы оптоэлектронной системы в случае отказа одной из камер можно выбирать и меньшую кратность с учётом наиболее «критичных» для управления дальностей либо с целью повышения точности измерений за счёт использования измерительной информации от двух камер с различными полями зрения.

Особо следует отметить возможность существенного сокращения за счёт мультиразрешения числа эталонных изображений, которые необходимо готовить для широкого диапазона дальностей. Это важно, поскольку подготовка эталонных изображений для случая некооперируемой стыковки представляется достаточно трудоёмким процессом.

Литература

1. Шаронов В. В. Наблюдение и видимость. М.: Военное изд-во Министерства обороны Союза ССР, 1953. 98 с.
2. Bay H., Ess A., Tuytelaars T., Gool L. V. Speeded-Up Robust Features (SURF) // Computer Vision and Image Understanding. 2008. V. 110. P. 346–359. DOI: 10.1016/j.cviu.2007.09.014.
3. Benningho H., Boge T. A Novel Navigation and Sensor Strategy for Far, Mid and Close Range Rendezvous to a Cooperative Geostationary Target Spacecraft // Proc. AIAA SPACE Conf. and Exposition. Pasadena, CA, USA, 2015. AIAA 2015-4481. DOI: 10.2514/6.2015-4481.
4. Blarre L., Perrimon N., Moussu C., Da Cunha P., Strandmoen S. ATV Videometer Qualification // Proc. 55th Intern. Astronautical Congress. Vancouver, Canada, 2004. IAC-04-A.3.07. DOI: 10.2514/6.IAC-04-A.3.07.
5. Capella LN/LS: 4M Pixel General Purpose CMOS Image Sensor, Back Illuminated, Low Noise, High Full Well Capacity and Digital Output // www.teledyneimaging.com. 18 Jan. 2021. 2 p. URL: <https://www.teledyneimaging.com/download/2130fe5a-ff06-4abf-a74b-a35d135399fc>.
6. Granade S. R., Roe F. D. Ground Testing the Hydra AR&D Sensor System // Proc. SPIE Defense and Security Symp. Orlando, FL, USA, 2008. V. 6958. Sensors and Systems for Space Applications II. 69580R. DOI: 10.1117/12.777245.
7. Grishin V. A. Precision Estimation of Camera Position Measurement Based on Docking Marker Observation // Pattern Recognition and Image Analysis. 2010. V. 20. No. 3. P. 341–348. DOI: 10.1134/S1054661810030107.
8. Gruesser O.-J., Gruesser-Cornehls U. Physiology of vision // Fundamentals of Sensory Physiology / ed. Schmidt R. F. N. Y.: Springer-Verlag, 1978.
9. Howard R., Johnston A., Bryan T., Book M. Advanced Video Guidance Sensor (AVGS) development testing // Proc. SPIE Defense and Security Simp. Orlando, FL, USA, 2004. V. 5418. 11 p. DOI: 10.1117/12.542475.
10. Johnson J. Analysis of image forming systems // Proc. Image Intensifier Symp. U. S. / Army Research and Development Laboratories. Ft. Belvoir, VA, 1958. P. 249–273. URL: <https://home.cis.rit.edu/~cnspci/references/johnson1958.pdf>.
11. Lee J., Carrington C., Spencer S., Bryan T., Howard R., Johnson J. Next Generation Advanced Video Guidance Sensor: Low Risk Rendezvous and Docking Sensor // Proc. AIAA Space Conf. San Diego, CA, USA, 2008. 11 p. DOI: 10.2514/6.2008-7838.
12. Lowe D. G. Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints // Intern. J. Computer Vision. 2004. V. 60. P. 91–110. DOI: 10.1023/B:VISI.0000029664.99615.94.
13. Mühlbauer Q., Richter L., Kaiser C., Hofmann P. Robotics Space Systems and Subsystems for Advanced Future Programmes // Proc. Intern. Symp. Artificial Intelligence, Robotics and Automation in Space (i-SAIRAS). European Space Agency. Turin, Italy, 2012. 8 p. URL: http://robotics.estec.esa.int/i-SAIRAS/isairas2012/Papers/Session%20B/02B_04_muehlbauer.pdf.
14. Mühlbauer Q., Rank P., Kaiser C. On-Ground Verification of VIBANASS (Vision Based Navigation Sensor System): Capabilities and Results // 12th Symp. Advanced Space Technologies in Robotics and Automation. ESA/ESTEC. Noordwijk, 2013. 26 p. URL: http://robotics.estec.esa.int/ASTRA/Astra2013/Presentations/Muehlbauer_2811222.pdf.

Multiresolution in optical navigation systems of space vehicles

V. A. Grishin

Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia
E-mail: vgrishin@iki.rssi.ru

The work is devoted to an analysis of the possibilities to use multiresolution in optical navigation systems. Such systems are used to provide information support for spacecraft docking processes in a completely automatic mode. The article notes a certain analogy of solving recognition problems in techni-

cal vision systems and in wildlife, in particular, in the human vision system. The main attention is paid to the use of multiresolution mode in solving problems of spacecraft recognition in a wide range of distances, as well as in measuring relative coordinates. Multiresolution can significantly reduce the computational costs of image processing in the recognition process and, most importantly, the amount of reference images needed to solve recognition and relative coordinate measuring problems. This is very important since the preparation of reference images information for docking with uncooperative spacecrafts that are not equipped with special docking targets is a very laborious process. Since the multiresolution directly affects the accuracy of the measurements of relative coordinates, numerical and analytical estimates of the influence of this factor on the measurement accuracy are made. The evaluations confirmed that the deterioration in the accuracy of the estimates at medium and short distances is quite acceptable. At large distances, multiresolution does not degrade measurement accuracy in any way.

Keywords: spacecraft navigation, vision systems, operating range

Accepted: 04.05.2022

DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-3-105-113

References

1. Sharonov V.V., *Nablyudenie i vidimost'* (Observation and visibility), Moscow: Voennoe izdatel'stvo Ministerstva Oborony Soyuza SSR, 1953, 98 p. (in Russian).
2. Bay H., Ess A., Tuytelaars T., Gool L.V., Speeded-Up Robust Features (SURF), *Computer Vision and Image Understanding*, 2008, Vol. 110, pp. 346–359, DOI: 10.1016/j.cviu.2007.09.014.
3. Benningho H., Boge T., A Novel Navigation and Sensor Strategy for Far, Mid and Close Range Rendezvous to a Cooperative Geostationary Target Spacecraft, *Proc. AIAA SPACE Conf. Exposition*, Pasadena, CA, USA, 2015, AIAA 2015-4481, DOI: 10.2514/6.2015-4481.
4. Blarre L., Perrimon N., Moussu C., Da Cunha P., Strandmoe S., ATV Videometer Qualification, *Proc. 55th Intern. Astronautical Congress*, Vancouver, Canada, 2004, IAC-04-A.3.07, DOI: 10.2514/6.IAC-04-A.3.07.
5. Capella LN/LS: 4M Pixel General Purpose CMOS Image Sensor, Back Illuminated, Low Noise, High Full Well Capacity and Digital Output, *www.teledyneimaging.com*, 18 Jan. 2021, 2 p., available at: <https://www.teledyneimaging.com/download/2130fe5a-ff06-4abf-a74b-a35d135399fc>.
6. Granade S.R., Roe F.D., Ground Testing the Hydra AR&D Sensor System, *Proc. SPIE Defense and Security Symp.*, Vol. 6958, Sensors and Systems for Space Applications II, 69580R, Orlando, FL, United States, 2008, DOI: 10.1117/12.777245.
7. Grishin V.A., Precision Estimation of Camera Position Measurement Based on Docking Marker Observation, *Pattern Recognition and Image Analysis*, 2010, Vol. 20, No. 3, pp. 341–348, DOI: 10.1134/S1054661810030107.
8. Gruesser O.-J., Gruesser-Cornehls U., Physiology of vision, In: *Fundamentals of Sensory Physiology*, Schmidt R. F. (ed.), New York: Springer-Verlag, 1978.
9. Howard R., Johnston A., Bryan T., Book M., Advanced Video Guidance Sensor (AVGS) development testing, *Proc. SPIE Defense and Security Simp.*, Orlando, FL, USA, 2004, Vol. 5418, 11 p., DOI: 10.1117/12.542475.
10. Johnson J., Analysis of image forming systems, *Proc. Image Intensifier Symp.*, U.S. Army Research and Development Laboratories, Ft. Belvoir, VA, 1958, pp. 249–273, available at: <https://home.cis.rit.edu/~cnspci/references/johnson1958.pdf>.
11. Lee J., Carrington C., Spencer S., Bryan T., Howard R., Johnson J., Next Generation Advanced Video Guidance Sensor: Low Risk Rendezvous and Docking Sensor, *Proc. AIAA Space Conf.*, San Diego, CA, USA, 2008, 11 p., DOI: 10.2514/6.2008-7838.
12. Lowe D.G., Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints, *Intern. J. Computer Vision*, 2004, Vol. 60, pp. 91–110, DOI: 10.1023/B:VISI.0000029664.99615.94.
13. Mühlbauer Q., Richter L., Kaiser C., Hofmann P., Robotics Space Systems and Subsystems for Advanced Future Programmes, *Proc. Intern. Symp. Artificial Intelligence, Robotics and Automation in Space (i-SAIRAS)*, European Space Agency, Turin, Italy, 2012, 8 p., available at: http://robotics.estec.esa.int/i-SAIRAS/isairas2012/Papers/Session%202B/02B_04_muehlbauer.pdf.
14. Mühlbauer Q., Rank P., Kaiser C., On-Ground Verification of VIBANASS (Vision Based Navigation Sensor System): Capabilities and Results, *12th Symp. Advanced Space Technologies in Robotics and Automation*, ESA/ESTEC, Noordwijk, 2013, 26 p., available at: http://robotics.estec.esa.int/ASTRA/Astra2013/Presentations/Muehlbauer_2811222.pdf.