

Обработка астрометрических наблюдений

7. Алгоритмы отождествления в каталогах объектов, выделенных на кадре

Who? Семенцов В.Н.

When? 26 марта, 2021

дано	список объектов, выделенных в кадре, и позиционный каталог
знаем	время наблюдения
чаще всего	знаем место наблюдения
иногда	примерно знаем координаты центра кадра
надо	найти соответствие между объектами в двух списках

Требования к позиционным каталогам

- инерциальность:** в настоящее время инерциальность опорной системы достигается с помощью ее привязки к внегалактическим объектам;
- стабильность:** точность реализации опорной системы не должна существенно меняться с течением времени;
- доступность:** реализация опорной системы должна быть доступна типичным современным наземным и космическим телескопам, т.е. ее объекты должны регистрироваться в типичных полях зрения при типичных условиях наблюдения;
- равноточность:** точность реализации опорной системы в случайном и систематическом отношении не должна существенно зависеть ни от положения конкретных опорных объектов на небесной сфере, ни от блеска, цвета и других характеристик объектов.

Приведение (подмножества) объектов каталога на видимое место

- ICRS—?
- Видимое место:
 - 1 направление света в системе координат с началом в точке наблюдения, но с осями, || ICRF(1,2,3)
 - 2 это направление света в истинной экваториальной системе координат с эпохой на момент наблюдений. Точка наблюдений — центр \odot . Видимое место в этом понимании может быть вычислено, если учесть параметры вращения \oplus
 - 3 направление света для наблюдателя на поверхности \oplus . Отличается от предыдущего учётом суточного параллакса и суточной аберрации
 - 4 направление света с учётом рефракции в атмосфере. Зависит от состояния атмосферы в данный момент и от спектральных характеристик фотоприёмника
- для отождествления годится вариант 1, остальные преобразования не меняют конфигурации объектов

Типы алгоритмов отождествления

- абсолютные (lost-in-space),
отсутствие априорной ориентации
- итерационные (recursive),
примерно известная ориентация
- ◆ безразмерные (non-dimensional, неточно известные
параметры камеры) — встречаются в обеих
категориях

Обозначения:

- n число объектов в каталоге
- f число объектов в поле зрения
- b число объектов в выборке из каталога

Типы алгоритмов отождествления (2)

- формально в выборке b объектов есть $\frac{b(b-1)}{2}$ взаимных расстояний, но только $(2b-3)$ величин являются независимыми
- и абсолютные, и итерационные методы требуют перебора и тестирования конфигураций
- в абсолютных методах отождествления конфигурации предварительно рассчитываются **для всех объектов** опорного каталога

Рост асимптотической эффективности алгоритмов

Автор	Год	Расчеты	Размер базы	Поиск	Проверка	Исп.изм./ /Доступно
Junkins	1981	$O(b)$	$O(nf^3)$	$O(f^3)$	нет	3/3
Groth	1986	$O(b)$				
Liebe	1992	$O(f \log_2 b)$	$O(n)$	$O(n)$	нет	3/3
Baldini	1993	$O(f \log_2 b)$	$O(nb)$	$O(b(\Delta mn)^2)$	$O(a^b)$	9/12
Scholl	1995	$O(b \log_2 b)$	$O(nf^2)$	$O(nf^2)$	$O(k)$	6/6
Quine	1996	$O(f \log_2 b)$	$O(n)$	$O(\log_2 n)$	нет	6/6
Padgett	1997	$O(f)$	$O(n)$	$O(n)$	нет	2f/2f
Mortari	1997	$O(b)$	$O(nf)$	$O(k)$	$O(bk^2)$	6/6
Kolomenkin	2008	$O(b)$	$O(nf)$	$O(k)$	$O(kf^2)$	6/6

Напомним: n – число объектов в каталоге, f – число объектов в поле зрения, b – число объектов в выборке из каталога

Древнейшие четыре типа алгоритмов идентификации звезд

с середины 70-х годов

Методы прямого сопоставления, сопоставления угловых расстояний, фазового соответствия и дискретного изменения положения.

прямое сопоставление

метод отождествляет каждый наблюдаемый объект со звездой каталога, лежащей в пределах заданного допуска ее положения. Требуется, чтобы оценка приборных координат была очень близка к истинной системе отсчета. Бортовые компьютеры КА используют этот метод всякий раз, когда имеется хорошая оценка ориентации.

угловое разделение

метод сопоставляет угловые расстояния между наблюдаемыми объектами с угловыми расстояниями между звездами каталога и используется, когда наблюдения находятся в кадре, который лишь слегка искажен, но первоначальная оценка положения не является достаточно точной, чтобы позволить использовать метод прямого сопоставления.

фазовое соответствие

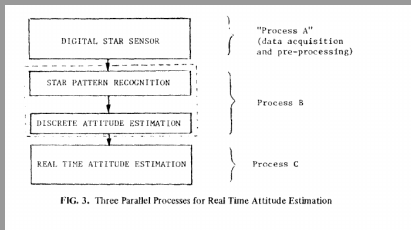
является одномерной версией метода углового разделения. Известные азимуты звезд сравниваются с наблюдаемыми звездными долготами, так как фаза между расчетным и истинным кадрами проходит через 360° . Это может быть использовано, когда наблюдения находятся в кадре, который только слегка искажен, и когда, например, положение оси вращения космического аппарата хорошо известно, а фазовый угол вокруг оси вращения известен плохо.

дискретный перебор

— метод работает, когда все остальные терпят неудачу, он использует прямой перебор значений в допустимом диапазоне изменений.

J.E.Junkins

1978–1981



- Процесс В оперирует выходными данными процесса А (временем, координатами звездного изображения и величинами) и априорной оценкой ориентации космического аппарата, чтобы определить обновленную апостериорную оценку ориентации.
- Процесс В, реализованный на борту в специальном микропроцессоре, использует метод распознавания звездных образов для идентификации двух или более измеренных звезд как конкретных звезд, хранящихся в каталоге; и после идентификации звезд определяется ориентация космического аппарата, которая переводит смоделированные координаты звезды в наилучшее (в смысле МНК) соответствие с измеренными координатами.

J.E.Junkins (2)

- координаты i -й звезды в 1-м поле зрения (F — фокус):

$${}^1x_i = -F \sum_{k=1}^3 C_{1k} L_{ki} / \sum_{k=1}^3 C_{3k} L_{ki}, \quad {}^1y_i = -F \sum_{k=1}^3 C_{2k} L_{ki} / \sum_{k=1}^3 C_{3k} L_{ki} \quad (1)$$

где направляющие косинусы звезды:

$$L_{1i} = \cos \alpha_i \cos \delta_i; L_{2i} = \sin \alpha_i \cos \delta_i; L_{3i} = \sin \delta_i; \quad (2)$$

а матрица направляющих косинусов центра 1-го поля зрения:

$$[C] = \begin{bmatrix} \cos \psi & \sin \psi & 0 \\ -\sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & -\sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \phi & \sin \phi \\ 0 & -\sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix} \quad (3)$$

- для наземного телескопа (где есть очевидная вертикаль) достаточно одного поля зрения, для КА необходимо будет второе поле зрения с аналогичными соотношениями:

$${}^2x_j = -F \sum_{k=1}^3 D_{1k} L_{kj} / \sum_{k=1}^3 D_{3k} L_{kj}, \quad {}^2y_j = -F \sum_{k=1}^3 D_{2k} L_{kj} / \sum_{k=1}^3 D_{3k} L_{kj} \quad (4)$$

- матрицы ориентации полей зрения будут связаны:

$$[D] = [M][C], \quad (5)$$

где $[M]$ в идеале — матрица поворота на 90° относительно оси z , а практически рассчитывается по конкретной конструкции и обмерам КА.

J.E. Junkins (3)

- Основная трудность в приведенном выше процессе решения заключается в том, что необходимо правильно идентифицировать каждую измеряемую звезду и звезду в каталоге, чтобы α_i и δ_i стали известны.

Метод тыка

в этой проблеме состоит в использовании пробных оценок ϕ, ψ, θ и расчета по (1, 4) координат смоделированного звездного изображения всех каталожных звезд в прогнозируемом поле зрения для каждого испытания.

- Сравнивая смоделированные и фактические координаты измеренного изображения, можно определить набор ϕ, ψ, θ , который заставляет смоделированные изображения наилучшим образом накладываться на измеренные изображения, по крайней мере в принципе.
- Такой подход, однако, может быть чрезвычайно требовательным в вычислительном отношении и станет еще более громоздким, если его модифицировать для учета ложных изображений и того факта, что набор наблюдаемых и каталожных звезд не будет идентичен.

Разумная альтернатива

— расширение метода корреляции звездных пар, когда измеренные звезды отождествляются со звездами каталога путем сравнения углов между парами измеренных звезд с углами между парами каталожных звезд.

- Случайное совпадение таких углов маловероятно.

J.E. Junkins (4)

I. Распознавание изображений звезд

/Предварительная оценка ориентации

- A Сортировка измеренных звезд в FOV1 и FOV2 в порядке увеличения углового расстояния от центров поля зрения.
- B На основе априорных оценок ориентации выбрать из каталога звезды в смоделированных полях зрения плюс 3σ . Тогда, выборка звезд C1 (C2) будет содержать звезды, соответствующие априорным оценкам положения полей зрения с учетом погрешностей $3\sqrt{\sigma_\delta^2 + \sigma_\alpha^2 \cdot \cos^2 \delta}$.
- C Сортировка выборок C1 и C2 в порядке увеличения углового расстояния от их соответствующих наилучших оценок центров полей FOV1 и FOV2.
- D Используя эвристическую процедуру упорядочения по специальной таблице, косинусы углов между последовательностью измеренных (i, j) пар звезд сравниваются с косинусами углов между последовательностью каталожных пар звезд (I, J) , где косинусы измеренных пар звезд определяются скалярными произведениями:

$$\cos \theta_{mij} = \frac{l_i \cdot l_j}{|l_i||l_j|} \quad (6)$$

где

$$l_i = \text{измерений } i\text{-й звезды в FOV1} = \begin{bmatrix} {}^1x_i \\ {}^1y_i \\ -F_1 \end{bmatrix}, \quad (7)$$
$$l_j = \text{измерений } j\text{-й звезды в FOV2} = \begin{bmatrix} l_{xj} \\ l_{yj} \\ l_{zj} \end{bmatrix} = [M] \begin{bmatrix} {}^2x_j \\ {}^2y_j \\ -F_2 \end{bmatrix},$$

где $\{{}^1x_i, {}^1y_i\}$, $\{{}^2x_j, {}^2y_j\}$ — центры изображений звезд, $[M], F_1, F_2$ — определяются при начальной калибровке датчиков.

J.E. Junkins (5)

I. Распознавание изображений звезд

/Предварительная оценка ориентации (2)

D (cont'd)

Направляющие косинусы звезд выборки из каталога определены через скалярные произведения:

$$\cos \theta_{cIJ} = L_I \cdot L_J, \quad (8)$$

где

$$L_I = \text{ед. в-р в напр. звезды подкаталога в FOV1} = \begin{bmatrix} \cos \alpha_I \cos \delta_I \\ \sin \alpha_I \cos \delta_I \\ \sin \delta_I \end{bmatrix}$$

$$L_J = \text{ед. в-р в напр. звезды подкаталога в FOV2} = \begin{bmatrix} \cos \alpha_J \cos \delta_J \\ \sin \alpha_J \cos \delta_J \\ \sin \delta_J \end{bmatrix}$$

Упорядочение по таблице I для сравнений косинусов оказалось на несколько порядков более эффективным, чем полный перебор, но доказательств оптимальности нет. Сравнение косинусов гораздо эффективнее, чем сравнение углов, так как обратные тригонометрические функции не нужны. Если угол (i, j) -го измеренного косинуса находится в пределах $10''$ от угла (I, J) -го косинуса каталожной пары, то наблюдаемая пара предварительно идентифицируется как звездная пара из каталога. Уравнения (1) и (4) обращаются для оценки направляющих углов через процедуру дифференциальной коррекции:

E

$$\begin{Bmatrix} \phi \\ \theta \\ \psi \end{Bmatrix}^{(k+1)} = \begin{Bmatrix} \phi \\ \theta \\ \psi \end{Bmatrix}^{(k)} + [(A^T A)^{-1} A^T]^k \begin{Bmatrix} 1x_i - 1x_i^{(k)} \\ 1y_i - 1y_i^{(k)} \\ 2x_j - 2x_j^{(k)} \\ 2y_j - 2y_j^{(k)} \end{Bmatrix} \quad (9)$$

J.E. Junkins (6)

I. Распознавание изображений звезд

/Предварительная оценка ориентации (3)

E (cont'd)

где $\mathbf{1} ({}^1x_i, {}^1y_i, {}^2x_j, {}^2y_j)$ — измеренные координаты из FOV1, FOV2;

$\mathbf{2} ({}^1x_i^{(k)}, {}^1y_i^{(k)}, ({}^2x_j^{(k)}, {}^2y_j^{(k)}))$ — посчитанные по (1), (4) в зависимости от

$\phi^{(k)}, \theta^{(k)}, \psi^{(k)}, \alpha_j, \delta_j$ и $F(k)$ -е итерации координат;

$\mathbf{3}$ а матрица частных производных:

$$A^{(k)} = \begin{bmatrix} \frac{\partial {}^1x_i^{(k)}}{\partial \phi^{(k)}} & \frac{\partial {}^1x_i^{(k)}}{\partial \theta^{(k)}} & \frac{\partial {}^1x_i^{(k)}}{\partial \psi^{(k)}} \\ \frac{\partial {}^1y_i^{(k)}}{\partial \phi^{(k)}} & \frac{\partial {}^1y_i^{(k)}}{\partial \theta^{(k)}} & \frac{\partial {}^1y_i^{(k)}}{\partial \psi^{(k)}} \\ \frac{\partial {}^2x_j^{(k)}}{\partial \phi^{(k)}} & \frac{\partial {}^2x_j^{(k)}}{\partial \theta^{(k)}} & \frac{\partial {}^2x_j^{(k)}}{\partial \psi^{(k)}} \\ \frac{\partial {}^2y_j^{(k)}}{\partial \phi^{(k)}} & \frac{\partial {}^2y_j^{(k)}}{\partial \theta^{(k)}} & \frac{\partial {}^2y_j^{(k)}}{\partial \psi^{(k)}} \end{bmatrix}$$

получается прямым дифференцированием (1) и (4) и вычислением с аргументами ${}^1x_i^{(k)}, {}^1y_i^{(k)}, {}^2x_j^{(k)}, {}^2y_j^{(k)}$. Обычно итерации (9) сходятся не более, чем за 5 шагов.

F

По достижении сходимости оценок $\phi^{(k)}, \theta^{(k)}, \psi^{(k)}$ в (9) просчитываются модельные координаты для всех звезд выборки из каталога в двух полях зрения. Затем эти предсказанные координаты изображения сравниваются с измеренными координатами изображения звезд. Если одна или несколько оставшихся измеренных звезд (кроме пары (ij) , используемой в шаге I-E), накладываются на предсказанное изображение с точностью до $20''$, то предварительные оценки (ϕ, θ, ψ) шага I-E принимаются как действительные. Если ни одна из оставшихся измеренных звезд не предсказана с точностью до $20''$, то (i, j) -я пара отклоняется как ложное отождествление.

J.E. Junkins (7)

I. Распознавание изображений звезд

/Предварительная оценка ориентации (4)

E (cont'd)

Затем рассматривается следующий набор индексов пар звезд $[(i, j), (I, J)]$ из таблицы I (обсуждается на шаге I-D) до тех пор, пока не будет достигнуто успешное отождествление пары звезд, за которым следует успешное предсказание одного или нескольких дополнительных местоположений изображения звезд. Если все пары звезд исчерпаны или среднее время цикла превышено, берется новый набор данных из кадра (Процесс A), и управление возвращается на шаг I-A.

TABLE I. Heuristic Ordering of Star Pair Interangle Cosine Comparisons

Level	Index sum	Measured* (i, j)	Compared to	Cataloged pair* (I, J)
1	4	(1, 1)		(1, 1)
	5	(2, 1)		(1, 1)
	5	(1, 2)		(1, 1)
2	5	(1, 1)		(2, 1)
	5	(1, 1)		(1, 2)
	6	(3, 1)		(1, 1)
	6	(2, 2)		(1, 1)
	6	(1, 3)		(1, 1)
	6	(2, 1)		(2, 1)
3	6	(1, 2)		(2, 1)
	6	(1, 1)		(3, 1)
	6	(2, 1)		(1, 2)
	6	(1, 2)		(1, 2)
	6	(1, 1)		(1, 3)
4	7	(4, 1)		(1, 1)
	7	(3, 2)		(1, 1)
	7	(2, 3)		(1, 1)
	7	(1, 4)		(1, 1)
	7	(3, 1)		(2, 1)
	:	:		:
	:	:		:
	7	(1, 1)		(1, 4)

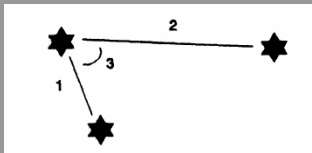
* i th measured star from FOV₁; j th measured star from FOV₂; I th cataloged star from sub-catalog C₁; J th cataloged star from sub-catalog C₂.

J.E. Junkins (8)

II. Уточнение ориентации

- A Если достаточно $10''$ точности и проверка I-F прошла — процесс завершается.
- B Если нужна бóльшая точность, итерации шага I-E продолжаются, пока проверку I-F не пройдут все объекты в кадрах. (У автора считалось, что таких объектов в поле зрения ~ 6 .)

Отождествление по треугольникам



- 1 сортировка объектов по блеску
- 2 выбор ярчайшего (из оставшихся) треугольника в обоих списках
- 3 поиск преобразования
(4 параметра — два сдвига, поворот и масштаб)
- 4 отбраковка по параметрам
- 5 тестирование остальных объектов в кадре
- 6 если неудачно — отбрасывание первой * и переход к п. 2

Отождествление по треугольникам – 2

- 1 один из древнейших алгоритмов
- 2 быстрый
- 3 требует знания фокусного расстояния и приблизительных координат
- 4 плохо работает в однородных плотных звездных полях
- 5 плохо работает при сильном различии фотометрических систем каталога и приемника
- 6 надежность на уровне $\sim 95 \div 98\%$

Groth алгоритм

$$R = r_3/r_2, \quad (10)$$

$$r_3 = \sqrt{\Delta x_3^2 + \Delta y_3^2}, \Delta x_3 = x_3 - x_1, \Delta y_3 = y_3 - y_1 \quad (11)$$

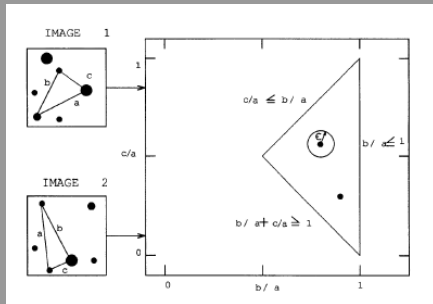
$$r_2 = \sqrt{\Delta x_2^2 + \Delta y_2^2}, \Delta x_2 = x_2 - x_1, \Delta y_2 = y_2 - y_1 \quad (12)$$

$$\text{tolerance } t_R^2 = 2R^2\varepsilon \left(\frac{1}{r_3^2} - \frac{C}{r_2r_3} + \frac{1}{r_2^2} \right) \quad (13)$$

$$C = \frac{\Delta x_3\Delta x_2 + \Delta y_3\Delta y_2}{r_2r_3} \quad (14)$$

$$t_C^2 = 2(1 - C^2)\varepsilon^2 \cdot \left(\frac{1}{r_3^2} - \frac{C}{r_2r_3} + \frac{1}{r_2^2} \right) + 3C^2\varepsilon^4 \cdot \left(\frac{1}{r_3^2} - \frac{C}{r_2r_3} + \frac{1}{r_2^2} \right)^2 \quad (15)$$

FOCAS



- faint-object classification and analysis system
- сопоставление списков ярчайших объектов
- ищется 25% совпадений и строится преобразование (сдвиг, поворот, масштаб и отражение)
- все списки приводятся в систему одного (опорного) каталога

алгоритмы отождествления, устойчивые к изменениям фокуса

в то время, как расстояния между звездами линейно зависят от фокуса/температуры, внутренние углы треугольника сохраняются.

Samaan

объекты в каталоге сортируются по меньшему/большому внутренним углам, значит, время выборки $O(\lg b)$, при поиске в базе данных используется метод k -вектора Mortari, затраты $O(k)$, (согласно моделированию) надо отождествить более 5 звезд, утилита кросс-отождествления потребляет $O(bk^2)$.

Rousseau

аналогичная методика, однако используются только 2 ближайшие звезды, значит размер каталога $O(n)$, время выборки $O(f \lg 2)$, поиск треугольников в каталоге — двоичное дерево, сложность $k \lg n$

поиск методом Mortari

- быстрый и надежный метод идентификации звезд (который не использует фазу поиска)
- алгоритм идентифицирует звезды в большом звездном каталоге, используя только угловое разделение звезд, и состоит из двух процессов идентификации:
 - метода идентификации звездных пар (SPIT), который для любого наблюдаемого углового разделения выбирает при помощи K -вектора допустимый набор звездных пар из каталога;
 - и последующий Метод идентификации соответствия звезд эталонной звезде (SMIT), который выполняет процесс идентификации на основе подмножества всех допустимых пар звезд
- K -вектор для SPIT, которая использует соответствующий разработанный вектор целых чисел, не требует фазы поиска

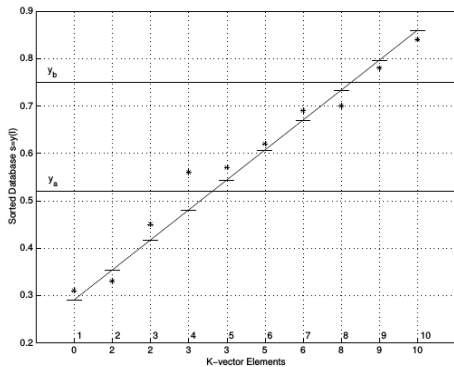
поиск методом Mortari

2

- Задача интервального поиска состоит в выборе из большой ($n \gg 1$) базы данных \mathbf{y} подмножества элементов данных $\mathbf{y}(i)$, попадающих в диапазон $[y_a, y_b]$, где $y_a < y_b$. Обычно применяется двоичный поиск, требующий $\sim 2 \lg n$ сравнений.
- Пусть, \mathbf{s} — отсортированный по возрастанию \mathbf{y} , значит $\mathbf{y}(\mathbf{I}(i)) = \mathbf{s}(i)$, где \mathbf{I} — вектор перестановок. В частности, $y_{min} = \mathbf{s}(1)$, $y_{max} = \mathbf{s}(n)$
- прямая линия, соединяющая точки $[1, y_{min}]$ и $[n, y_{max}]$, содержит в среднем $n/(n-1)$ элемент на каждом интервале $d = \frac{y_{max} - y_{min}}{n - 1}$
- проведем чуть более крутую линию между точками $[1, y_{min} - \xi]$ и $[n, y_{max} + \xi]$,

поиск методом Mortari

3



поиск методом Mortari

4

- где $\xi = \varepsilon \times \max(y_{min}, y_{max})$
- это гарантирует, что $\mathbf{k}(1) = 0$, $\mathbf{k}(n) = n$, где вектор мы сейчас определим
- уравнение прямой будет $z(x) = mx + q$, где
$$m = \frac{y_{max} - y_{min} + 2\xi}{n - 1}, q = y_{min} - m - \xi$$
- практически $\mathbf{k}(i) = j$ дает число элементов $\mathbf{s}(j)$ меньше $z(i)$

Kolomenkin

1

Представлен алгоритм восстановления ориентации спутниковой камеры. Алгоритм сопоставляет звезды на снимке, сделанном камерой, со звездами в звездном каталоге.

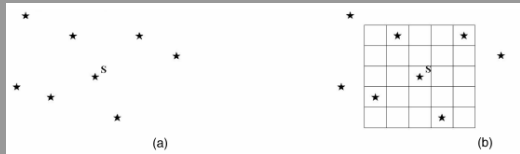
- Алгоритм основан на геометрической схеме голосования, в которой пара звезд в каталоге голосует за пару звезд в каталоге изображений, если угловое расстояние между звездами обеих пар одинаково.
- Поскольку угловое расстояние является симметричной зависимостью, каждая из двух звезд каталога голосует за каждую из звезд изображения.
- Звезды на изображении отождествляется со звездой каталога, которая набрала наибольшее количество голосов.

Как только звезды идентифицированы, положение камеры вычисляется с помощью метода, основанного на кватернионах.

Kolomenkin-2

Классификация методов идентификации

- Наиболее распространенный подход — рассматривать известные звезды как вершины в неориентированном графе G , причем угловое расстояние между каждой парой звезд служит весами ребер. Набор наблюдаемых звезд служит неориентированным графом G_s . Затем задача ставится как поиск подграфа G , который изоморфен G_s . Первые алгоритмы этой группы использовали базы данных предварительно скомпилированных расстояний между звездами в различных звездных триплеттах, где целью было найти подграф в каталоге с похожими расстояниями.
- Еще один популярный подход — алгоритмы поиска по образцу. Каждая звезда связана с паттерном, описывающим ее собственное положение и положение ее соседей, как показано на рисунке



Пример звездного рисунка. (а) Часть карты неба вокруг звезды S . Сетка с заданным шагом, центрированная на S . (б) Сетка представляет собой разреженную матрицу с нулями в пустых ячейках и единицами в ячейках со звездами. Каждой звезде в каталоге сопоставляется такая матрица.

- Предлагаемый метод похож на некоторые более ранние, где сопоставлялись попарные расстояния

Kolomenkin-3

Стартовый алгоритм

LIS algorithm — Preprocessing

1

for $i = 1$ to $i = N$ do

2

for $j = i + 1$ to $j = N ; 1$ do

3

расчет углового расстояния $D_{ij} = |S_i - S_j|$

4

if $D_{ij} < D$ then

5

добавить строку (i, j, D_{ij}) в таблицу $T(\text{ID1}, \text{ID2}, d)$.

6

end if

7

end for

8

end for

9

Отсортировать таблицу T по расстояниям d .

Kolomenkin-4

Рабочий алгоритм

LIS algorithm — Runtime

- 1 выделить на кадре n предполагаемых звезд S_i , $1 \leq i \leq n$
- 2 for всех предполагаемых звезд do
- 3 оценить положение P .
- 4 оценить погрешность положения e .
- 5 end for
- 6 for $i = 1$ to $i = n$ do
- 7 for $j = i + 1$ to $j = n - 1$ do
- 8 вычислить расстояние $d_{ij} = |P_i - P_j|$
- 9 if $d_{ij} < D$ then
- 10 рассчитать область неопределенности расстояния $R_{ij} = [d_{ij} - e_{ij}, d_{ij} + e_{ij}]$
- 11 найти в T строки k , такие что $T(k).d \in R_{ij}$
- 12 for all строк $T(k)$ do
- 13 к спискам для голосования за вероятные звезды S_i и S_j , соответственно, V_i и V_j добавить номера звезд каталога $T(k) : ID1$ и $T(k) : ID2$.
- 14 end for
- 15 end if
- 16 end for
- 17 end for

Kolomenkin-5

Рабочий алгоритм

- 18 for all вероятных звезд S_i do
- 19 назначить $St(i)$ звезде каталога, за которую подан максимум голосов
- 20 end for
- 21 for $i = 1$ to $i = n$ do
- 22 for $j = i + 1$ to $j = n$ do
- 23 if $|S_{St(i)} - S_{St(j)}| \in R_{ij}$ then
- 24 добавить голос за совпадение $(S_i, S_{St(i)})$ и добавить голос за совпадение $(S_j, S_{St(j)})$
- 25 end if
- 26 end for
- 27 end for
- 28 все возможные звезды, чьи голоса сгруппированы вместе, считаются правильными.
- 29 оцените ориентацию с помощью метода наименьших квадратов на основе кватернионов.

Повышение надежности

- опорный каталог с системе фотоприемника (заказчика)
- фотометрические изыски (перевод стандартной системы в систему фотоприемника и т.п.)
- увеличение размера отождествляемой конфигурации

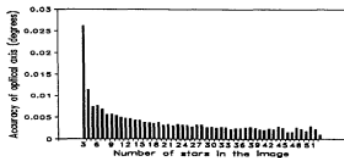


Fig. 18. Accuracy of Optical Axis as a Function of Number of Stars in Field of View. The Average is 14.6 Arc Sec.

Рост асимптотической эффективности алгоритмов

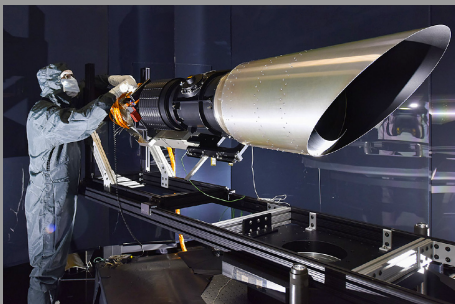
перспективы

Автор	Год	Расчеты	Размер базы	Поиск	Проверка	Исп.изм./Доступно
Junkins	1981	$O(b)$	$O(nf^3)$	$O(f^3)$	нет	3/3
Groth	1986	$O(b)$				
Liebe	1992	$O(f \log_2 b)$	$O(n)$	$O(n)$	нет	3/3
Baldini	1993	$O(f \log_2 b)$	$O(nb)$	$O(b(\Delta mn)^2)$	$O(a^b)$	9/12
Scholl	1995	$O(b \log_2 b)$	$O(nf^2)$	$O(nf^2)$	$O(k)$	6/6
Quine	1996	$O(f \log_2 b)$	$O(n)$	$O(\log_2 n)$	нет	6/6
Padgett	1997	$O(f)$	$O(n)$	$O(n)$	нет	2f/2f
Mortari	1997	$O(b)$	$O(nf)$	$O(k)$	$O(bk^2)$	6/6
Kolomenkin	2008	$O(b)$	$O(nf)$	$O(k)$	$O(kf^2)$	6/6

Напомним: n – число объектов в каталоге, f – число объектов в поле зрения, b – число объектов в выборке из каталога

Высокоточные звездные датчики

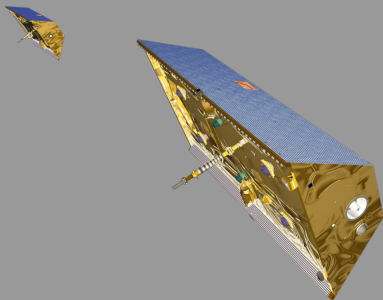
Ball Aerospace & Technologies Corp



- Sensitivity: MI = 4.8 at a 100 Hz CCD frame rate.
MI = 5.8 at a 60 Hz. MI = 6.5 at 40 Hz
- Instrument magnitude (MI) estimates:
 $\Delta MI = \pm 0.25, 1 \sigma$
- FOV: 8.0 x 8.0 deg
- Power requirements: Entire system designed to use 28 V of spacecraft power, ranging from 22 to 36 VDC under steady-state conditions
- Debris & proton rejection: Rejects small debris and proton bombardment up to 10,000 protons/sec/cm²
- Temperature range: SSH: -1 to 32 °C, Shutter: -26 to 27 °C, SSEU: -15 to 52 °C, Sunshade: -60 to 27 °C
- Performance characteristics (per star, per axis):
 - Random 0.110 arcsec 1 σ
 - Spatial 0.140 arcsec 1 σ

Высокоточные звездные датчики (3)

запрос на точность



GRACE



GOCE

Литература по спецкурсу

дополнительная 6

- Groth, E.J. *A pattern-matching algorithm for two-dimensional coordinate lists*, 1986, *AJ*, **91**, 1244
- Liebe, C.C., 1993, *Pattern recognition of star constellations for spacecraft applications*, *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, **8**, 33–39.
- Spratling, B.B., Mortari, D., 2009, *A survey on star identification algorithms*, *Algorithms*, **2**, pp. 93–107. doi:10.3390/a2010093
- Valdes, F.G., Campusano, L.E., Velasquez, J.D., Stetson, P.B., *FOCAS Automatic Catalog Matching Algorithms*, 1995, *PASP*, **107**, 1119

Задания к семинару

ESO <http://www.eso.org/sci/software/esomidas/>

CDS <http://cdsxmatch.u-strasbg.fr/xmatch>

Google <http://astrometry.net>

IAP <http://www.astromatic.net/about>

- 1** Алгоритмы выделения объектов
- 2** Алгоритмы отождествления

Спасибо за внимание