РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК Ордена Ленина ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКИ им. М.В.Келдыша

А.А. Богуславский, В.В. Сазонов, С.М. Соколов, А.И. Смирнов, Х.У. Сайгираев

АВТОМАТИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ СТЫКОВКИ КОСМИЧЕСКОГО КОРАБЛЯ С ОРБИТАЛЬНОЙ СТАНЦИЕЙ ПО ВИДЕОИНФОРМАЦИИ

Mocквa - 2004

Аннотация

Описывается программный комплекс автоматического визуального мониторинга процесса сближения и стыковки космических кораблей «Прогресс» с Международной космической станцией. Исходной информацией служит видеосигнал, идущий от телекамеры на борту корабля. Получаемая последовательность кадров обрабатывается в реальном времени. В каждом кадре выделяются детали специальной мишени, размеры которых и геометрические параметры взаимного расположения используются как первичные измерения. По этим измерениям восстанавливается движение корабля относительно станции. Приводятся примеры обработки реальных видеоданных, полученных в процессе сближения и стыковки. Обсуждаются точность восстановления движения корабля и перспективы развития программного комплекса.

A.A. Boguslavsky, V.V. Sazonov, S.M. Sokolov, A.I. Smirnov, Kh. S. Saigiraev. Automatic vision-based monitoring of a spacecraft docking to the orbital station. The software package is described which intended for the automatic visual monitoring of a spacecraft Progress docking to International Space Station. Initial information for the software is a video signal received from the TV-camera, mounted on the spacecraft board. An obtained sequence of frames is processed in real time. In each frame, the software finds out the details of the special target and determines geometric parameters of their mutual arrangement. Values of those parameters are used as primary measurements for determining the spacecraft motion relative to the station. The examples are given for processing the real video data obtained during the spacecraft Progress docking to International Space Station. The accuracy of the estimation of the motion and perspectives of the use of the software are discussed.

1. Введение

Одной из наиболее трудных и важных стадий управления полетом космических кораблей «Союз» и «Прогресс» является их стыковка с орбитальной станцией. Радиотехнические средства управления стыковкой, используемые в течение многих лет в отечественной космической практике, очень дороги и не позволяют стыковаться с некооперируемой станцией. Применяются также ручные методы, в которых в качестве одного из оптических вспомогательных средств используется телекамера. В частности, при стыковках беспилотных кораблей «Прогресс» с орбитальной станцией «Мир» применялся так называемый телеоператорный режим управления в котором космонавт на станции управляет стыкующимся с ней кораблем руководствуясь телевизионным изображением станции, получаемым от телекамеры, установленной на корабле.

В Центре управления полетами имеются средства контроля параметров относительного движения объектов при стыковке (дальность, скорость, угловые отклонения). Применяются полуавтоматические средства, использующие телевизионные системы 60-х годов и не удовлетворяющие современным требованиям. В настоящее время имеются и технические средства получения видеоинформации и способы ее обработки, позволяющие проводить мониторинг стыковки на более высоком уровне. Ниже описывается программный комплекс автоматизированного визуального мониторинга процесса стыковки космических кораблей с Международной космической станцией (далее для краткости – комплекс), позволяющий в автоматическом режиме и реальном времени определять движение корабля относительно станции.

Комплекс реализован на ЭВМ типа IBM PC. Исходной информацией для комплекса служит передаваемое на Землю телевизионное изображение станции в ТВ-камере на борту корабля. ТВ-сигнал вводится в ЭВМ с помощью устройства ввода зрительных данных. Кроме того, предусмотрена возможность обработки уже оцифрованных последовательностей изображений формата AVI. Весь комплекс реализован в среде OC Windows 98-XP.

Конечная цель разработки комплекса состоит в полной автоматизации визуального слежения за процессом сближения корабля и станции, начиная с момента видимости станции в поле зрения ТВ-камеры (около 500 м) до окончания стыковки. Однако возможности используемой в настоящее время видеосистемы более скромные. На расстоянии менее 15 м от станции параметры положения корабля относительно нее, а именно, координаты фокуса камеры и ориентация связанной с камерой системы координат, полностью определяется по параметрам изображения специальной мишени. Мишень представляет собой окружность с внешним радиусом 0.4 м, образованную белыми метками в виде квадратов и прямоугольников. Окружность расположена рядом со стыковочным узлом на торце Служебного модуля. Плоскость мишени совпадает с плоскостью этого торца. В центре мишени перпендикулярно ее плоскости расположен стержень длиной 0.6 м. На конце стержня установлен прямой крест. Плоскость креста параллельна плоскости мишени, размах каждой его перекладины – 0.2 м. Видеоизображение мишени и креста показано на приводимом ниже рис. 2.

При идеальной стыковке центр креста на видеоизображении должен совпадать с центром мишени, а концы перекладин креста – находиться против выделенных меток в форме прямоугольников. В реальном процессе (ср. рис. 2) эта конфигурация нарушена. Оказывается, по размеру мишени, по горизонтальному и вертикальному смещениям ее центра относительно центра креста на видеоизображении можно найти положение фокуса камеры относительно станции. По смещениям центра мишени относительно центра кадра и по углу поворота креста относительно границ кадра можно найти три угла, задающие ориентацию связанной с камерой системы координат относительно системы координат станции. Таким образом, вблизи станции видеоизображение мишени и креста дает исчерпывающую информацию о положении корабля. Имея последовательность кадров с измерениями указанных смещений и углов, можно восстановить и движение корабля относительно станции.

На расстоянии более 15 м по видеоизображению достаточно надежно определяется только расстояние между кораблем и станцией. Такое определение выполняется по размеру окружности, являющейся изображением торца Служебного модуля, при дополнительном предположении, что этот торец расположен примерно перпендикулярно оптической оси камеры. Иными словами, продольные оси Служебного модуля и корабля параллельны. Раз уж такое предположение принято, то естественно принять, что соответствующие оси систем координат мишени и камеры параллельны. Анализ большого числа стыковок показывает, что такое предположение допустимо. В его рамках удается восстановить движение центра масс корабля относительно станции.

Опишем работу комплекса. Основные этапы сбора и обработки зрительных данных в комплексе реализованы подобно действиям оператора-человека.

В предъявленном поле зрения:

- выделяется объект интереса (в зависимости от дальности наблюдения им может быть либо вся станция целиком, либо стыковочный узел, либо специальная мишень для прицеливания);
- определяются его характерные элементы, образы которых хорошо различимы на изображении (измерительная часть);

на основе полученных данных:

- определяется положение этих элементов относительно системы координат, связанной с изображением; для оператора это перекрестие визира (измерительная часть);
- вычисляются параметры, характеризующие относительное расположение корабля и станции (расчетная часть).
- Дополнительно к действиям оператора-человека комплекс вычисляет и отображает в принятом для анализа виде параметры, характеризующие процесс стыковки.

Целью этой части комплекса является определение координат точек и характерных размеров объектов интереса на изображении. Достижение этой цели разбивается на четыре задачи:

- 1. выделение области интереса¹ в очередном цифровом изображении;
- 2. предобработка зрительных данных в области интереса;
- 3. выделение объектов интереса;
- 4. определение координат заданных точек на объектах интереса.

Решение перечисленных задач должно выполняться в реальном времени, задаваемом частотой смены кадров в ТВ-сигнале и потребностью получения результаты расчетов движения корабля не реже одного раза в секунду.

Обеспечение надежности. Для надежного выделения образов объектовориентиров на изображении используются следующие приемы:

- ≻ настройка яркости и контрастности анализируемого изображения оптимальных с точки зрения выделения интересующих объектов.
- > резервное дублирование и троирование ориентиров, выделение которых необходимо для надежной работы комплекса.
- ▶ самоконтроль системы на основе априорной информации.

Система координат изображения. Положение образов объектов интереса и их частей задаются в системе координат, связанной с изображением (рис. 1). В качестве единицы измерения длины берется расстояние между двумя соседними элементами цифрового изображения – пикселами.

Последовательность действий в процессе проведения определений координат и размеров. Первая из задач, указанных в начале данного раздела, решается двумя основными способами:

- заданием области интереса (Рис. 2) извне (на основе информации, полученной на предыдущих этапах решения задачи слежения или указанной оператором);
- вычислением координат и размеров области интереса на основе информации, полученной в ходе измерений на предыдущих кадрах видеоданных.

Вторая задача решается на основе анализа гистограммы, характеризующей распределение точек области интереса по уровням яркости. Ее вид должен допускать надежный переход к бинарному изображению. В рассматриваемой задаче это бимодальность. Управление видом гистограммы достигается с помощью регулировок яркости и контраста устройства ввода видеосигнала в ЭВМ. (Рис. 2, пример гистограммы области интереса).

¹ Область интереса – прямоугольный фрагмент изображения, описывающий часть всего кадра, в котором располагаются образы объектов, представляющих интерес в ходе обработки зрительных данных.

Третья задача. В качестве объектов интереса в процессе сближения корабля и станции выбраны внешний обвод станции, диск стыковочного узла, крест на стержне перед мишенью для прицеливания и сам мишень.

Характерными элементами – ориентирами, определяемыми на образах этих объектов на изображении, являются край станции, крест и деления мишени.

Четвертая задача – определение координат заданных точек на объектах интереса – представляет собой чисто техническую операцию выбора требуемых координат.

3. Расчетная часть

Измерительная информация, полученная в результате обработки одного телевизионного полукадра кадра, имеет вид:

Т – время привязки полукадра (в секундах от начала видеоклипа);

X_C, *Y_C* – координаты центра креста (действительные числа);

N₁ – количество точек на верхней/нижней горизонтальной стороне креста (целое число);

 X_i, Y_i $(i = 1, 2, ..., N_1)$ – координаты точек на верхней горизонтальной стороне креста (целые числа X_i, Y'_i $(i = 1, 2, ..., N_1)$ – координаты точек на нижней горизонтальной стороне креста (целые числа);

*N*₂ – координаты точек);

на левой/правой вертикальной стороне креста (целые числа);

 U_i, V_i $(i = 1, 2, ..., N_2)$ – координаты точек на левой вертикальной стороне креста и их координаты (целые числа);

 U_i, V'_i (*i* = 1, 2, ..., N_2) – координаты точек на правой вертикальной стороне креста (целые числа);

X_O, *Y_O*, *R* – координаты центра окружности мишени и ее радиус (действительные числа);

 N_3, A_i, B_i (*i* = 1, 2, ..., N_3) – количество точек на окружности мишени и их координаты (целые числа);

 X_{S}, Y_{S}, R_{S} – координаты центра внешнего обода станции (окружности) и ее радиус (действительные числа).

Здесь все координаты выражены в пикселах. Некоторые из чисел N_1 , N_2 и N_3 могут быть нулевыми. Например, равенство $N_1 = 0$ означает отсутствие данных X_i , Y_i . Несмотря на то, что результаты обработки кадра – величины X_C, Y_C и X_O, Y_O, R – в указанных данных имеются, в процедуре определения движения эти величины, если имеется возможность (при положительных соответствующих N_k), находятся независимо по исходной информации. Описываемые ниже вычисления параметров креста и мишени относятся к случаю, когда в исходных данных соответствующие $N_k > 0$ и $X_S = Y_S = R_S = 0$. Последние соотношения служат ключами к анализу входной информации.

Определение координат центра креста. После преобразования данных

$$\frac{Y_i + Y'_i}{2} \to Y_i, \quad \frac{U_i + U'_i}{2} \to U_i \quad (i = 1, 2, \dots)$$

точки (X_i, Y_i) лежат на средней линии горизонтальной полосы креста, точки (U_i, V_i) – на средней линии вертикальной полосы креста. Уравнения этих линий запишем в виде: $ax + y = c_1$ (горизонтальная), $x - ay = c_2$ (вертикальная). Здесь a, c_1 и c_2 – коэффициенты. На самом деле угол между средними линиями полос креста отличен от прямого, но это отличие – эффект второго порядка, который при имеющемся качестве изображения незаметен. Значения коэффициентов a, c_1 и c_2 находятся методом наименьших квадратов из условия

$$\Phi_1 = \sum_{i=1}^{N_1} (aX_i + Y_i - c_1)^2 + \sum_{j=1}^{N_2} (U_j - aV_j - c_2)^2 \to \min \ \pi o \ a, c_1, c_2.$$

Для определения этих коэффициентов получаем линейную систему. Центр креста – точка пересечения указанных средних линий – имеет координаты

$$X_C^* = \frac{ac_1 + c_2}{1 + a^2}, \quad Y_C^* = \frac{c_1 - ac_2}{1 + a^2}.$$

Как правило, рассогласования $|X_C - X_C^*|$ и $|Y_C - Y_C^*|$ не превышают 1.5 пикселов. При определении движения используются величины *a*, X_C^* и Y_C^* .

Определение координат центра окружности мишени и ее радиуса. Рассматривается множество $G = \{(A_1, B_1), (A_2, B_2), ..., (A_{N_3}, B_{N_3})\}$ точек мишени. Ни. Находится пара точек $P_1 \in G$ и $P_2 \in G$, на которой реализуется диаметр этого множества. Находится вторая пара точек $P_3 \in G$ и $P_4 \in G$, на которой реализуется диаметр множества, являющегося проекцией множества G на прямую, перпендикулярную отрезку P_1P_2 . Отрезки P_1P_2 и P_3P_4 рассматриваются как хорды одной и той же окружности. Через центр каждой хорды проводится перпендикуляр, и находится точка пересечения этих перпендикуляров – первое приближение центра окружности мишени. Координаты последней точки обозначим (X'_O, Y'_O) . Первое приближение радиуса окружности мишени находится по формуле

$$R' = \frac{|O'P_1| + |O'P_3|}{2}.$$

Окончательные значения координат центра окружности и ее радиуса находятся методом наименьших квадратов из условия

$$\Phi_2 = \sum_{i=1}^{N_3} \left[\sqrt{(A_i - X_O)^2 + (B_i - Y_O)^2} - R \right]^2 \to \min \ \pi o \ X_O, Y_O, R.$$

Сформулированная задача решается по схеме Гаусса-Ньютона [1]. Ее решение обозначим X_O^* , Y_O^* и R^* . Как правило, рассогласования $|X_O - X_O^*|$, $|Y_O - Y_O^*|$ и $|R - R^*|$ не превышают 1.5 пикселов. При определении движения используются величины R^* , X_O^* и Y_O^* . Ниже для простоты записи звездочки у перевычисленных параметров изображения не указываются.

Основные геометрические соотношения. С мишенью свяжем правую декартову систему координат $Cy_1y_2y_3$. Точка C – центр мишени, ось Cy_3 направлена перпендикулярно плоскости мишени в сторону от станции, т. е. параллельна продольной оси Служебного модуля, ось Cy_2^+ пересекает ось стыковочного узла Служебного модуля.

С камерой корабля свяжем правую декартову систему координат $Sx_1x_2x_3$. Плоскость Sx_1x_2 совпадает с картинной плоскостью камеры, ось Sx_3 совпадает с оптической осью камеры и направлена по движению корабля, ось Sx_2^- пересекает ось стыковочного узла корабля. Матрицу перехода от системы $Sx_1x_2x_3$ к системе $Cy_1y_2y_3$ обозначим $||a_{ij}||_{i,j=1}^3$, где a_{ij} – косинус угла между осями Cy_i и Sx_j . Формулы перехода между этими системами координат имеют вид

$$y_i = d_i + \sum_{j=1}^3 a_{ij} x_j$$
 (*i*=1,2,3), $x_j = \sum_{i=1}^3 (y_j - d_j) a_{ij}$ (*j*=1,2,3).

Здесь d_1, d_2, d_3 – координаты точки *S* в системе $Cy_1y_2y_3$.

Идеальная стыковка характеризуется матрицей $||a_{ij}|| = \text{diag}(1, -1, -1)$. При реальной стыковке матрица перехода представляется следующим образом

$$\|a_{ij}\| = \begin{vmatrix} 1 & -\varphi_3 & \varphi_2 \\ -\varphi_3 & -1 & \varphi_1 \\ \varphi_2 & -\varphi_1 & -1 \end{vmatrix}.$$

Здесь $\varphi, \varphi_2, \varphi_3$ – компоненты вектора бесконечно малого поворота системы $Sx_1x_2x_3$ относительно ее положения при идеальной стыковке. Полагаем, что отклонения от идеальной стыковки малы.

Если некоторая точка имеет в системе $Sx_1x_2x_3$ координаты (x_1, x_2, x_3) , то координаты изображения этой точки в картинной плоскости камеры будут

$$\xi_1 = \frac{fx_1}{x_3}, \qquad \xi_2 = \frac{fx_2}{x_3}.$$

Здесь f – фокусное расстояние камеры. Именно координаты ξ_1 и ξ_2 , выраженные в пикселах, имелись в виду при описании обработки отдельного кадра видеоизображения (см. выше). Пусть координаты той же точки в системе $Cy_1y_2y_3$ будут (y_1, y_2, y_3) . Тогда

$$\xi_{i} = f \frac{(y_{1} - d_{1})a_{1i} + (y_{2} - d_{2})a_{2i} + (y_{3} - d_{3})a_{3i}}{(y_{1} - d_{1})a_{13} + (y_{2} - d_{2})a_{23} + (y_{3} - d_{3})a_{33}} \qquad (i = 1, 2).$$

Координаты центра мишени – точки C – в системе $Cy_1y_2y_3$ составляют (0,0,0), поэтому

$$\begin{split} X_O &= f \, \frac{d_1 a_{11} + d_2 a_{21} + d_3 a_{31}}{d_1 a_{13} + d_2 a_{23} + d_3 a_{33}} \approx f \, \frac{d_1 - d_2 \varphi_3 + d_3 \varphi_2}{d_1 \varphi_2 + d_2 \varphi_1 - d_3}, \\ Y_O &= f \, \frac{d_1 a_{12} + d_2 a_{22} + d_3 a_{32}}{d_1 a_{13} + d_2 a_{23} + d_3 a_{33}} \approx -f \, \frac{d_1 \varphi_3 + d_2 + d_3 \varphi_1}{d_1 \varphi_2 + d_2 \varphi_1 - d_3}, \end{split}$$

При стыковке $|d_1|\!<\!\!<\!\!d_3,\,|d_2|\!<\!\!<\!\!d_3,$ и можно использовать упрощенные выражения

$$X_{O} = -\frac{fd_{1}}{d_{3}} - f\varphi_{2}, \quad Y_{O} = \frac{fd_{2}}{d_{3}} + f\varphi_{1}$$

Центр креста в системе $Cy_1y_2y_3$ имеет координаты (0,0,b). В этом случае, делая аналогичное упрощение, получаем

$$X_{C} = -\frac{fd_{1}}{d_{3}-b} - f\varphi_{2}, \quad Y_{C} = \frac{fd_{2}}{d_{3}-b} + f\varphi_{1}.$$

Отсюда

$$X_C - X_O = -\frac{fbd_1}{d_3(d_3 - b)}, \quad Y_C - Y_O = \frac{fbd_2}{d_3(d_3 - b)}$$

Радиус *г* окружности мишени и радиус *R* ее изображения в картинной плоскости связаны соотношением

$$R = \frac{fr}{d_3}.$$

Последние три соотношения позволяют выразить d_3 , d_1 и d_2 через R, $X_C - X_O$ и $Y_C - Y_O$. Затем можно найти φ_1 и φ_2 , разрешив относительно этих углов выражения для X_O, Y_O или X_C, Y_C . Что же касается угла φ_3 , то можно показать, что для него в рамках рассматриваемого приближения имеет место соотношение $\varphi_3 = a$.

Обработка кадра считается успешной, если удалось найти все перечисленные выше параметры изображений креста и мишени. В результате успешной обработки одного кадра можно определить положение корабля относительно станции. Обработав последовательность кадров, можно определить движение корабля относительно станции. Для определения движения используются только успешно обработанные кадры.

Определение движения корабля. Это движение определяется в реальном времени в результате пошаговой обработки последовательности кадров ТВ-изображения креста и мишени. Данные обрабатываются отдельными порциями. Порции либо имеют фиксированный объем, либо составляются из данных, полученных на отрезках времени фиксированной длины. При обработке второй и последующих порций учитываются результаты обработки предыдущих порций.

Каждая порция обрабатывается в два этапа. На первом этапе определяется движение центра масс корабля, на втором этапе – его движение относительно центра масс. Математическая модель движения корабля принимается в виде

$$d_1 = z_1 + z_2 t, \quad d_2 = z_3 + z_4 t, \quad d_3 = z_5 + z_6 t,$$

$$\varphi_1 = v_1 + v_2 t, \quad \varphi_2 = v_3 + v_4 t, \quad \varphi_3 = v_5 + v_6 t.$$

Здесь t – время, отсчитываемое от начала обработки видеоклипа, z_i и v_j – постоянные коэффициенты. Выписанные соотношения имеют прозрачный кинематический смысл. Значения коэффициентов модели, полученные после обработки порции данных с номером n, обозначим $z_i^{(n)}$, $v_j^{(n)}$. Отвечающие таким коэффициентам функции $d_i(t)$ и $\varphi_i(t)$ будем обозначать $d_i^{(n)}(t)$ и $\varphi_i^{(n)}(t)$.

Определение движения выполняется следующим образом. Пусть имеется последовательность успешно обработанных кадров, отвечающих моментам времени $t_1 < t_2 < t_3 < ...$ Моменту t_k соответствует кадр с номером k. Значения величин X_C , Y_C , a, X_O , Y_O , R, найденные в результате обработки k-го кадра, обозначим $X_C^{(k)}$, $Y_C^{(k)}$, $a^{\{k\}}$ и т. д. Эти величины с индексами $k = 1, 2, ..., K_1$ составляют первую порцию данных, с индексами $k = K_1 + 1, K_1 + 2, ..., K_2$ – вторую порцию, с индексами $k = K_{n-1} + 1, K_{n-1} + 2, ..., K_n - n$ -ую порцию.

Первая порция данных обрабатывается обычным методом наименьших квадратов. На первом этапе рассматривается функционал

$$\Psi_{1}(z) = \sum_{k=1}^{K_{1}} \left\{ w_{1} \left[X_{C}^{(k)} - X_{O}^{(k)} + \frac{f b d_{1}(t_{k})}{d_{3}(t_{k})[d_{3}(t_{k}) - b]} \right]^{2} + w_{2} \left[Y_{C}^{(k)} - Y_{O}^{(k)} - \frac{f b d_{2}(t_{k})}{d_{3}(t_{k})[d_{3}(t_{k}) - b]} \right]^{2} + w_{3} \left[R^{(k)} - \frac{f r}{d_{3}(t_{k})} \right]^{2} \right\}.$$

Здесь $z = (z_1, z_2, ..., z_6)^T$ – вектор коэффициентов, задающих функции $d_i(t)$, w_i – положительные постоянные (веса). Минимизация этого функционала выполняется методом Гаусса-Ньютона [1]. Оценка $z^{(1)}$ вектора z и ковариационная матрица P_1 этой оценки рассчитываются по формулам

$$z^{(1)} = \begin{bmatrix} z_1^{(1)}, z_2^{(1)}, \dots, z_6^{(1)} \end{bmatrix}^T = \arg\min\Psi_1(z), \quad P_1 = \sigma^2 B_1^{-1}, \quad \sigma^2 = \frac{\Psi_1[z^{(1)}]}{3K_1 - 6},$$

где B_1 – вычисленная в точке $z^{(1)}$ матрица системы нормальных уравнений, возникающих в процессе минимизации Ψ_1 .

На втором этапе вычисляются величины

$$\alpha_1^{(k)} = \frac{1}{f} \left[Y_O^{(k)} - \frac{f d_2^{(1)}(t_k)}{d_3^{(1)}(t_k)} \right], \quad \alpha_2^{(k)} = -\frac{1}{f} \left[X_O^{(k)} + \frac{f d_1^{(1)}(t_k)}{d_3^{(1)}(t_k)} \right]$$

и решаются три однотипные задачи линейной регрессии

$$\alpha_1^{(k)} \approx v_1 + v_2 t_k, \quad \alpha_2^{(k)} \approx v_3 + v_4 t_k, \quad a^{(k)} \approx v_5 + v_6 t_k \quad (k = 1, 2, ..., K_1).$$

Решение находится методом наименьших квадратов [1, 2]. Ограничимся описанием оценивания пары параметров v_1 , v_2 – оценивание пар v_3 , v_4 и v_5 , v_6 выполняется аналогично. Для удобства записи параметры v_1 , v_2 объединим в вектор $v = (v_1, v_2)^T$.

Оценки $v_1^{(1)}$ и $v_2^{(1)}$ доставляют минимум квадратичной форме

$$F_1(v) = \sum_{k=1}^{K_1} \left[\alpha_1^{(k)} - v_1 - v_2 t_k \right]^2.$$

Матрицу этой квадратичной формы обозначим Q_1 . Ковариационная матрица вектора $v^{(1)} = [v_1^{(1)}, v_2^{(1)}]^T$ имеет вид $s^2 Q_1^{-1}$, где $s^2 = F_1[v^{(1)}]/(K_1 - 2)$.

Обработка второй порции выполняется так. На первом этапе рассматривается функционал

$$\Psi_{2}(z) = \left[z - z^{(1)}\right]^{T} C_{2}\left[z - z^{(1)}\right] + \sum_{k=K_{1}+1}^{K_{2}} \left\{ w_{1} \left[X_{C}^{(k)} - X_{O}^{(k)} + \frac{fbd_{1}(t_{k})}{d_{3}(t_{k})[d_{3}(t_{k}) - b]}\right]^{2} + w_{2} \left[Y_{C}^{(k)} - Y_{O}^{(k)} - \frac{fbd_{2}(t_{k})}{d_{3}(t_{k})[d_{3}(t_{k}) - b]}\right]^{2} + w_{3} \left[R^{(k)} - \frac{fr}{d_{3}(t_{k})}\right]^{2} \right\}.$$

Здесь $C_2 = qB_1$, q – параметр, $0 \le q \le 1$. Оценка $z^{(2)}$ и ковариационная матрица P_2 этой оценки рассчитываются по формулам

$$z^{(2)} = \arg\min\Psi_2(z), \quad P_2 = \sigma^2 B_2^{-1}, \quad \sigma^2 = \frac{\Psi_2[z^{(2)}]}{3(K_2 - K_1) - 6},$$

где B_2 – вычисленная в точке $z^{(2)}$ матрица системы нормальных уравнений, возникающих в процессе минимизации Ψ_2 .

На втором этапе вычисляются величины

$$\alpha_1^{(k)} = \frac{1}{f} \left[Y_O^{(k)} - \frac{f d_2^{(2)}(t_k)}{d_3^{(2)}(t_k)} \right], \quad \alpha_2^{(k)} = -\frac{1}{f} \left[X_O^{(k)} + \frac{f d_1^{(2)}(t_k)}{d_3^{(2)}(t_k)} \right],$$

и решаются линейные регрессионные задачи дляопределения оценок $v_j^{(2)}$. Оценка $v^{(2)}$ доставляет минимум квадратичной форме

$$F_{2}(v) = q' \left[v - v^{(1)} \right]^{T} Q_{1} \left[v - v^{(1)} \right] + \sum_{k=K_{1}+1}^{K_{2}} \left[\alpha_{1}^{(k)} - v_{1} - v_{2}t_{k} \right]^{2}.$$

Здесь q' – параметр, $0 \le q' \le 1$. Матрицу этой квадратичной формы обозначим Q_2 . Ковариационная матрица вектора $v^{(2)}$ имеет вид $s^2 Q_2^{-1}$, где $s^2 = F_2[v^{(2)}]/(K_2 - K_1 - 2)$.

Обработка третий и последующих порций данных выполняется по той же схеме, что и обработка второй порции. Формулы обработки порции с номером n получаются из формул для обработки второй порции заменой индексов, выражающих номера порций: $1 \rightarrow n-1$, $2 \rightarrow n$.

Описанный алгоритм обработки весьма похож на нелинейный калмановский фильтр [3]. В нелинейном фильтре Калмана матрица C_n рассчитывается по формуле $C_n = (P_{n-1} + D_n)^{-1}$, где D_n – ковариационная матрица той части разности $z^{(n)} - z^{(n-1)}$, которая обусловлена ошибками математической модели при переходе от отрезка времени $t_{K_{n-2}+1} \le t \le t_{K_{n-1}}$ к отрезку $t_{K_{n-1}+1} \le t \le t_{K_n}$. Такой выбор C_n и вид функционала $\Psi_n(z)$ подразумевают, что ковариационная матрица ошибок в измерениях величин $X_C - X_O$, $Y_C - Y_O$ и R равна

diag
$$(w_1^{-1}, w_2^{-1}, w_3^{-1})$$
.

Как нетрудно видеть, $C_n < B_{n-1}$, т.е. матрица $B_{n-1} - C_n$ положительно определена. Введение матрицы D_n обеспечивает уменьшения вклада оценки $z^{(n-1)}$ в обновленную оценку $z^{(n)}$. К сожалению, матрица D_n неизвестна. В такой ситуации естественно принять $C_n = qB_{n-1}$. При q < 1 имеем $C_n < B_{n-1}$. Описанный способ выбора C_n означает, что при обработке n-ой порции данных учитываются данные предыдущих порций, причем n-ой порции приписывается вес 1, (n-1)-ой порции – вес q, (n-2)-ой порции – вес q^2 и т. д.

Результаты обработки *n*-ой порции данных представляются числами $d_i^{(n)}(t_{K_n}), \varphi_i^{(n)}(t_{K_n})$ (*i*=1,2,3; *n*=1,2,...). Для более удобного представления движения вычисляются также величины

$$\rho = \sqrt{d_1^2 + d_2^2 + d_3^2}, \quad u = \frac{d\rho}{dt}, \quad \alpha = \arctan \frac{d_2}{\sqrt{d_1^2 + d_3^2}}, \quad \beta = \arctan \frac{d_1}{d_3}.$$

Угол α называется пассивным углом тангажа, угол β – пассивным углом рысканья. Если стыковка близка к идеальной (рассматриваемый случай), то $|d_1| << d_3$, $|d_2| << d_3$ и

$$\alpha = \frac{d_2}{d_3}, \quad \beta = \frac{d_1}{d_3}.$$

Угол φ_1 – это активный угол тангажа, φ_2 – активный угол рысканья, угол φ_3 – активный угол крена. Напомним, что эти углы также малы по абсолютной величине.

Характеристки точности определяемого движения рассчитываются в рамках обычных допущений метода наименьших квадратов. Например, выше была введена ковариационная матрица P_n вектора $z^{(n)}$. С помощью этой матрицы ковариационная матрица $C_w(t)$ вектора

$$w(t) = \left(z_1 + z_2 t, z_2, z_3 + z_4 t, \dots, v_5 + v_6 t, v_6\right)^T \in \mathbb{R}^{12}$$

рассчитывается по формулам

$$C_{w} = \frac{\partial w}{\partial z} P_{n} \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^{T} \qquad \frac{\partial w}{\partial z} = \text{diag}(U, U, U), \qquad U = \left\| \begin{array}{cc} 1 & t \\ 0 & 0 \end{array} \right\|$$

Эти формулы относятся к движению, найденному в результате обработки *n*-ой порции данных.

Зная $C_w(t)$, можно рассчитать стандартные отклонения $\sigma_{\rho}(t)$, $\sigma_u(t)$, $\sigma_{\alpha}(t)$ и $\sigma_{\beta}(t)$ величин $\rho(t)$, u(t), $\alpha(t)$ и $\beta(t)$. Стандартное отклонение $\sigma_{\rho}(t)$ имеет вид

$$\sigma_{\rho} = \frac{\partial \rho}{\partial w} C_{w} \left(\frac{\partial \rho}{\partial w}\right)^{T}, \quad \frac{\partial \rho}{\partial w} = \left(\frac{d_{1}}{\rho}, 0, \frac{d_{2}}{\rho}, 0, \frac{d_{3}}{\rho}\right)^{T}$$

аналогичными формулами определяются остальные стандартные отклонения. На экран выводятся значения ρ , σ_{ρ} , u, σ_{u} и т. п. величины, относящиеся к последним моментам времени обрабатываемых порций данных.

4. Пример работы комплекса

Пример работы описанного алгоритма оценивания движения корабля приведен на рис. 6, 7. Рис. 6 содержит графики функций $\rho(t)$, u(t), $\alpha(t)$ и $\beta(t)$ и $\varphi_i(t)$ (i = 1,2,3), на рис. 7 изображены фазовый портрет движения в плоскости ($\rho, u = d\rho/dt$) и графики стандартных отклонений $\sigma_{\rho}(t)$, $\sigma_{u}(t)$, $\sigma_{\alpha}(t)$ и $\sigma_{\beta}(t)$. Значения всех указанных функций вычислены в последние моменты времени обрабатываемых порций данных и отмечены маркерами. Порции содержали по 10 моментов времени с измерениями: $K_n - K_{n-1} = 10$. Для наглядности маркеры соединены отрезками прямых, поэтому представленные графики суть ломаные. Смысл имеют только вершины ломаных, а их звенья – (не всегда точная) интерполяция, служащая для удобства визуализации. Как видно из рис. 7, на заключительном этапе сближения движение корабля определялось достаточно точно.

В приведенном примере описанный алгоритм в полной мере был исползован, начиная примерно с 68 с, когда появились отличные от нуля значения угла φ_3 . До этого момента, пока расстояние до мишени было более 12.5 м, работал упрощенный алгоритм (см. предыдущий раздел), не определявший поворота креста мишени относительно сторон кадра. В этом случае принималось $\varphi_3 = 0$. Во входной информации в этом случае было $N_1 = N_2 = N_3 = 0$, $X_S = Y_S = R_S = 0$, и уточнение выданных характеристик креста и мишени не выполнялось.

На расстояниях до мишени более 25 м мишень и ее размеры не удается определить надежно. Это случай распознается по признаку, что X_S, Y_S, R_S отличны от нуля. В таком случае принимается $\varphi_1 = \varphi_2 = \varphi_3 = 0$ и

$$X_{S} = -\frac{fd_{1}}{d_{3}}, \quad Y_{S} = \frac{fd_{2}}{d_{3}}, \quad R_{*} = \frac{fR_{S}}{d_{3}}.$$

Здесь R_* — радиус обода станции. Выписанные соотношения позволяют определить только движение центра масс корабля. Это определение выполняется по описанной выше схеме. Фактически три последних соотношения умножаются на ненулевые множители, чтобы без изменения можно было использовать процедуры, используемые алгоритмом, рассмотренным выше.

Пример определения движения на расстоянии от станции, превышающем 25 м, приведен на рис. 8 – 11. Рис. 8, 9 построены по порциям данных с 10 моментами времени, рис. 10, 11 – по порциям с 40 моментами. Как видим, результаты оказались близкими.

5. Заключение

Описанная система в настоящее время используется как средство, позволяющее наземным операторам получать информацию о параметрах движения стыкующегося корабля в реальном времени. Наиболее существенная часть этой информации передается на Землю (и всегда передавалась) по телеметрическому каналу. Она также высвечивается на дисплее. Однако эта так называемая штатная информация относится к текущему моменту времени и без дополнительной обработки не может дать целостной картины процесса стыковки. Такая дополнительная обработка организационно гораздо сложнее и дороже обработки видеоизображения. Следует отметить, что определение параметров движущихся объектов по видеоизображению в настоящее время становится наиболее доступным и универсальным средством решения задач такого рода в ситуациях, когда цена отказа сравнительно невелика. Оно находит широкое применение в быту и технике, в частности, в автоматическом мониторинге скоростей автомобилей, автоматическом управлении роботами и т. п. В ближайшем будущем можно ожидать вовлечения в сферу применения этого подхода задач, решение которых требует определенной надежности.

Данная работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты 04-01-00475, 02-01-00671, 02-07-90425).

Литература

- 1. Бард Й. Нелинейное оценивание параметров. М., «Статистика», 1979.
- 2. Себер Дж. Линейный регрессионный анализ. М., «Мир», 1980.
- 3. Эльясберг П.В. Определение движения по результатам измерений. М., «Наука», 1976.









Рис. 2. Пример выделения области интереса в поле зрения ТВ-камеры, расположенной на корабле; а) – все поле зрения; б) – область интереса.

K



Рис. 3. Выделение креста из всех кандидатов на основе априорной информации: размеров планок креста и их взаимного пересечения.



Рис. 4. Пример выделения образа мишени на основе найденных координат креста и априорной информации о расположении меток мишени: а) определение области интереса на основе априорной информации и найденного положения центра креста; б) уточнение области мишени диагональными пробниками; в) область интереса для поиска меток мишени; г) результат выделения меток мишени.



Рис.5. Пример выделения края внешнего обвода станции. а) - слева; б) – по центру; в) – справа.



Рис. 6. Результаты определения движения корабля вблизи станции.



Рис. 7. Фазовый портрет и оценки точности определения движения корабля вблизи станции.



Рис. 8. Результаты определения движения корабля вдали от станции.



Рис. 9. Фазовый портрет и оценки точности определения движения корабля вдали от станции.



Рис. 10. Результаты определения движения корабля вдали от станции.



Рис. 11. Фазовый портрет и оценки точности определения движения корабля вдали от станции.