Наземная отработка взаимодействия лунного манипуляторного комплекса и служебной телевизионной системы

С. В. Воронков, А. В. Никитин, С. А. Прохорова, Я. Д. Эльяшев

Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия
E-mail: andvnik935@yandex.ru

В состав комплекса научной аппаратуры космического аппарата (КА) «Луна-Глоб» входят различные приборы и системы, в том числе лунный манипуляторный комплекс (ЛМК) и служебная телевизионная система (СТС-Л). Одной из задач СТС-Л является поддержка функционирования ЛМК при взятии образцов лунного грунта с целью их доставки в прибор ЛАЗМА-ЛР. Эта задача решается с помощью входящих в состав СТС-Л стереокамер КАМ-С, которые синхронно выполняют съёмку участка лунной поверхности и передают изображения в блок сбора данных. В дальнейшем эти изображения отправляются на Землю по радиоканалу, на Земле выполняется построение трёхмерной цифровой модели рабочей зоны манипулятора для определения пространственных координат цели с точностью до 15 мм. Для проведения наземной экспериментальной отработки в ИКИ РАН создан специальный стенд, состоящий из макета космического аппарата, технологического образца ЛМК и лабораторного макета СТС-Л. Стенд обеспечивает возможность отработки взаимодействия ЛМК и СТС-Л, а так же отладки наземного программного обеспечения, предназначенного для обработки получаемых стереоизображений и формирования управляющих воздействий для ЛМК при решения задачи наведения его грунтозаборного устройства на требуемую цель.

Ключевые слова: манипулятор, стереокамера, система координат, служебная телевизионная система, тест-объект, базисная система координат, внутренняя система координат камеры, грунтозаборное устройство, опорная система координат

Одобрена к печати: 19.11.2018
DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-6-180-187

На космическом аппарате (КА) «Луна-Глоб» размещены различные научные приборы и системы, в числе которых — лунный манипуляторный комплекс (ЛМК) (манипулятор) и служебная телевизионная система (СТС-Л). В состав СТС-Л входят: две посадочные стереокамеры КАМ-С, используемые для съёмки лунной поверхности во время посадки на Луну; четыре обзорные камеры КАМ-О, применяемые для съёмки окружающего пространства как во время посадки, так и при нахождении КА на поверхности Луны; а также две камеры КАМ-С, предназначенные для совместной работы с ЛМК.

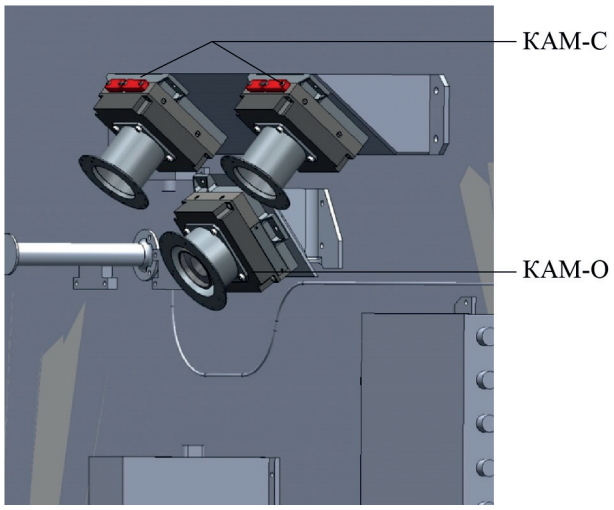

Рис. 1. Размещение стереокамер КАМ-С на КА «Луна-Глоб»

Перед ЛМК стоят задачи выведения грунтозаборного устройства в требуемую область, взятие образцов грунта, выгрузки его в приёмное окно прибора ЛАЗМА-ЛР, входящего в состав комплекса научной аппаратуры КА «Луна-Глоб».

Для решения поставленных задач манипуляторному комплексу требуется поддержка стереокамер из состава СТС-Л (*рис. 1*). Для этого две КАМ-С синхронно выполняют съёмку поверхности и элементов КА в зоне работы манипулятора с целью дальнейшей передачи полученных изображений на Землю по радиоканалу.

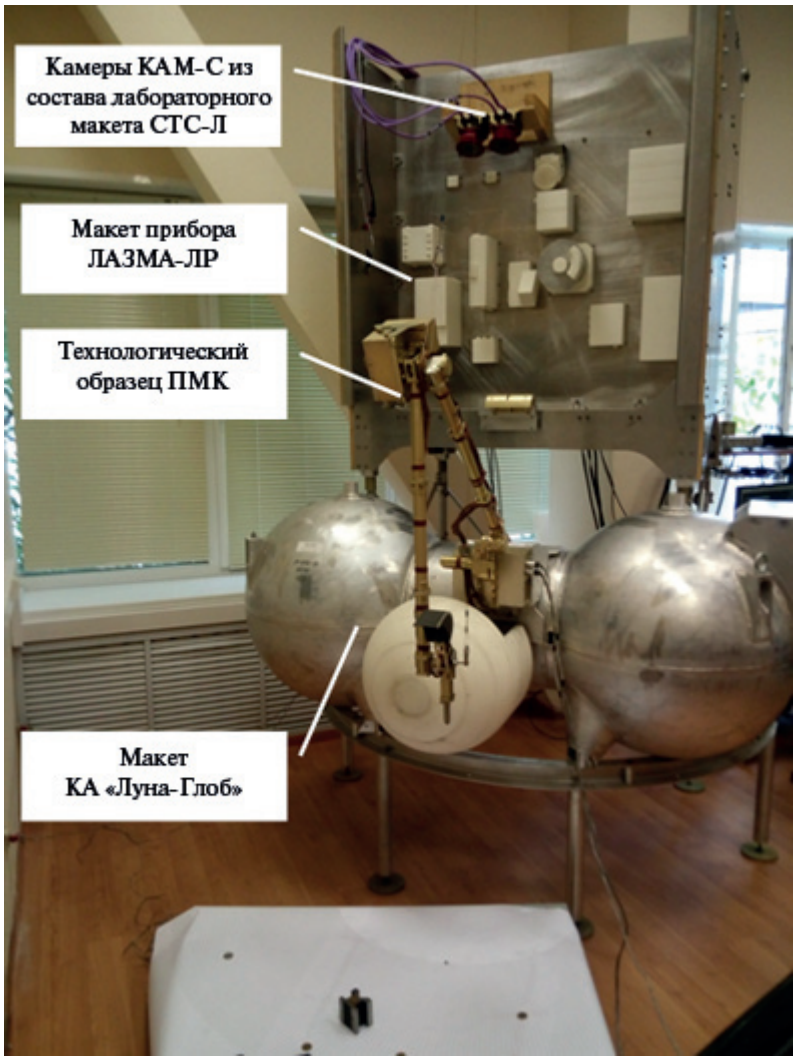

Рис. 2. Стенд для отработки взаимодействия ЛМК и СТС-Л

На Земле с помощью разработанного в ИКИ РАН программного обеспечения осуществляется построение трёхмерной цифровой модели рабочей зоны манипулятора для определения пространственных координат цели в системе координат ЛМК с точностью до 15 мм. Кроме того, с использованием информации, полученной от камер КАМ-С, осуществляется наведение грунтозаборного устройства ЛМК на приёмное окно прибора ЛАЗМА-ЛР из состава комплекса научной аппаратуры с ошибкой не более 4 мм для выгрузки образцов лунного грунта.

Для отработки взаимодействия СТС-Л и ЛМК в ИКИ РАН создан специальный стенд, позволяющий имитировать расположение научной аппаратуры на борту КА «Луна-Глоб» и включающий в себя макет космического аппарата, технологический образец ЛМК и лабораторный макет СТС-Л (*рис. 2*).

В ходе проведения совместных работ на стенде отрабатывалось решение следующих основных задач:

- определение параметров взаимного и внешнего ориентирования камер КАМ-С;
- определение взаимного положения систем координат камер и манипулятора;
- определение пространственных координат требуемого объекта в рабочей зоне манипулятора с использованием трёхмерной модели, построенной по кадрам КАМ-С;
- расчёт управляющих воздействий, перемещение манипулятора к требуемому объекту, взятие образцов грунта;
- переход к контрольной точке перед выгрузкой грунта;

- определение координат ЛАЗМА-ЛР и расчёт управляющих воздействий для перемещения манипулятора из контрольной точки к прибору ЛАЗМА-ЛР.

Рассмотрим системы координат (СК), используемые в статье.

Внутренняя система координат камеры (ВСК) определяется узловой точкой объектива и плоскостью КМОП-матрицы камеры (*рис. 3*).

Точка S — задняя узловая точка объектива камеры.

Ось X направлена параллельно строкам КМОП-матрицы.

Ось Z направлена параллельно перпендикуляру, опущенному из задней узловой точки объектива на матрицу.

Ось Y дополняет систему координат до правой.

Базисная система координат (БСК) определяется двумя внутренними системами координат стереокамер.

Центр БСК находится в передней узловой точке ВСК левой камеры.

Ось X системы БСК направлена параллельно линии, соединяющей передние узловые точки объективов двух камер, и совпадает с линией базиса.

Ось Y системы БСК направлена по нормали к плоскости, построенной на оси Z левой камеры и оси X системы БСК.

Ось Z БСК дополняет систему координат до правой.

Текущая система координат тест-объекта (ТО). Тест-объект представляет собой три плоских планшета с нанесёнными круглыми метками (*рис. 4*). Входящие в состав тест-объекта планшеты расположены под углом 90° друг к другу в горизонтальной и двух вертикальных плоскостях. На каждом планшете нанесены метки через 50 мм вдоль осей абсцисс и ординат планшета, которые образуют равномерную сетку по всей его плоскости.

Ось X системы ТО направлена параллельно линии абсцисс горизонтального планшета.

Ось Y системы ТО направлена параллельно линии ординат горизонтального планшета.

Ось Z системы ТО дополняет систему координат до правой.

Опорная система координат тест-объекта (ОСК). При уточнении элементов внешнего и внутреннего ориентирования тест-объект устанавливается в рабочей области манипулятора последовательно: с левого края, в центре и с правого края полей зрения камер. Направление осей ОСК совпадает с направлением осей текущей системы координат тест-объекта при установке его в центре поля зрения камер.

Подвижная система координат манипулятора (ПСКМ) определяется его конструкцией. Центр ПСКМ находится в центре первого привода двигателя.

Ось X системы ПСКМ направлена от центра четвёртого привода двигателя к центру первого привода двигателя.

Ось Z системы ПСКМ направлена вдоль оси второго плеча манипулятора вертикально вниз.

Ось Y системы ПСКМ дополняет систему координат до правой.

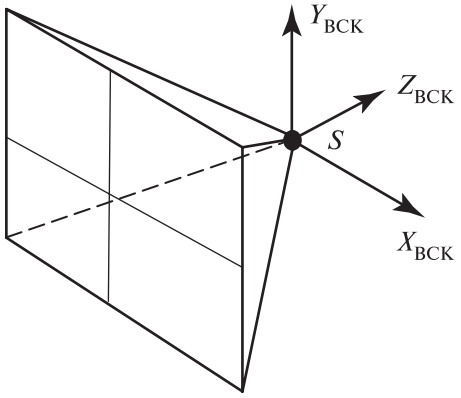

Рис. 3. Внутренняя система координат камеры

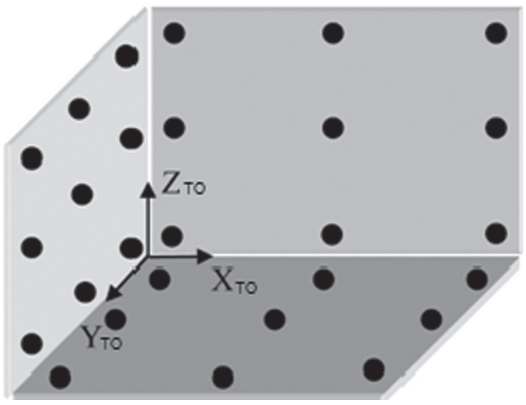

Рис. 4. Схематическое изображение тест-объекта

Опорная система координат манипулятора (ОСКМ). Задаётся расположением предполагаемой рабочей области и определяется управляющими воздействиями на манипулятор: азимутом, радиальным и вертикальным смещениями (Az, R, H).

Центр ОСКМ располагается в центре первого привода двигателя манипулятора.

Ось Z направлена вертикально вверх по нормали к рабочей области.

Ось Y направлена по проекции линии, соединяющей центр грунтозаборного устройства с центром ОСКМ, на горизонтальную плоскость и совпадает с начальным азимутальным углом.

Ось X дополняет систему координат до правой.

Рассмотрим методику определения параметров взаимного и внешнего ориентирования камер КАМ-С. Под элементами взаимного ориентирования камер обычно понимаются углы разворота камер относительно базисной системы координат: два угла разворота — для левой камеры и три угла — для правой.

Под элементами внешнего ориентирования принято понимать три угла разворота базисной системы координат относительно опорной (внешней) системы координат, три координаты центра БСК и масштабный коэффициент.

При определении параметров взаимного и внешнего ориентирования отдельно классическим способом возникает проблема их точного определения в связи с большим процентом перекрытия (более 90 %) между камерами. Поэтому следует определить элементы внешнего ориентирования совместно с элементами взаимного ориентирования, что достигается съёмкой пространственного тест-объекта, располагаемого в трёх местах рабочей зоны манипулятора. Съёмка тест-объекта в каждом положении ведётся двумя камерами; полученные изображения передаются на компьютер КИА СТС-Л с целью дальнейшего выполнения корреляционной обработки.

В результате обработки определяются координаты центров изображений меток на двух снимках (x_1, y_1, x_2, y_2). Затем в программном обеспечении, используемом для обработки изображений, указывают для каждой пары точек их пространственные координаты. Для каждого положения тест-объекта имеется своя система координат, для связи которой с опорной системой координат тест-объекта используются шесть параметров. В единой системе координат, принимаемой в качестве опорной (ОСК), используется система координат тест-объекта, находящегося в центральном положении. Таким образом, для получения параметров перехода от плоских координат точек на КМОП-матрицах камер к их пространственным координатам в ОСК тест-объекта необходимо уточнить 5 + 6×2 + 6 = 23 параметра. Три положения тест-объекта обеспечивают получение достаточного количества пространственных меток для уточнения значений параметров.

Направляющие косинусы векторов на изображения точек поверхности с двух камер в их внутренних системах координат (*рис. 5*) определяются по формулам:

$$\left.\begin{aligned} l_i &= \frac{x_i - x_0}{\|r_i\|}, \\ m_i &= \frac{y_i - y_0}{\|r_i\|}, \\ n_i &= \frac{-f_i}{\|r_i\|}. \end{aligned}\right\} \qquad (1)$$

Длина векторов направлений на изображения:

$$\|r_i\| = \sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 + f^2}, \qquad (2)$$

где $i = 1, 2$.

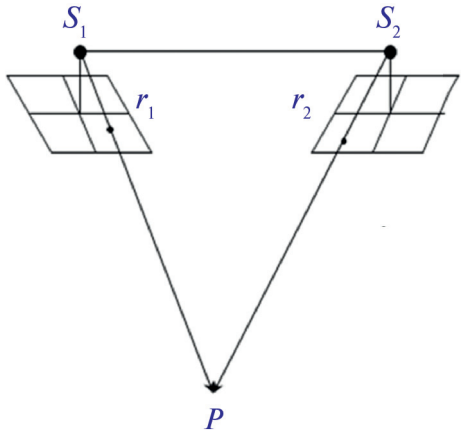

Рис. 5. Схема определения пространственных координат точек, изобразившихся на матрицах двух камер

Перейдём к направляющим косинусам векторов из задних узловых точек объективов камер на точки поверхности в базисной системе координат.

$$\begin{pmatrix} l_i \\ m_i \\ n_i \end{pmatrix}_{\text{БСК}} = A_i \begin{pmatrix} l_i \\ m_i \\ n_i \end{pmatrix}_{\text{СКК}_i}, \tag{3}$$

где A_i — матрица перехода от системы координат камер (ВСК) к базисной системе координат (БСК).

Масштабный коэффициент вектора точки t_1 в базисной системе координат:

$$t_1 = \frac{Bn_2}{(l_1 n_2 - l_2 n_1)}, \tag{4}$$

где B — базис съёмки; l_i, m_i, n_i — направляющие косинусы во внутренней системе координат i-й камеры на изображение метки $i = 1, 2$.

Координаты точки в базисной системе координат:

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}_{\text{БСК}} = A_i \begin{pmatrix} l_1 \\ m_1 \\ n_1 \end{pmatrix}_{\text{БСК}} \cdot t_1. \tag{5}$$

Координаты точки в опорной системе координат (тест-объект в центре):

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}_{\text{ОСК}} = \begin{pmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{pmatrix}_{\text{БСК в ОСК}} + A_{\text{БСК в ОСК}} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}_{\text{БСК}}, \tag{6}$$

где $\begin{pmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{pmatrix}_{\text{БСК в ОСК}}$ — координаты центра базисной системы координат в опорной системе координат.

Переход из текущей системы координат (тест-объект на краю) к опорной (тест-объект в центре) производится для каждой точки крайнего тест-объекта:

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}_{\text{ОСК}} = \begin{pmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{pmatrix}_{\text{ТО}_i \text{ в ОСК}} + A_{\text{ТО}_i \text{ в ОСК}} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}_{\text{ТО}_i}, \tag{7}$$

где $i = 1, 2$ — координаты центра системы координат тест-объекта в опорной системе координат; $A_{\text{БСК в ОСК}}$ — матрица перехода от БСК к ОСК; $A_{\text{ТО}_i \text{ в ОСК}}$ — матрица перехода от ТО в i-м положении к опорной системе координат.

Уточняемыми параметрами являются:

1) $\alpha_{\text{БСК}}$, $\omega_{\text{БСК}}$, $\varkappa_{\text{БСК}}$ — углы поворота матрицы перехода от БСК к ОСК;
2) $\alpha_{\text{ТО1}}$, $\omega_{\text{ТО1}}$, $\varkappa_{\text{ТО1}}$ — углы поворота матрицы перехода от СК тест-объекта в левом положении (ТО1) к ОСК;
3) $\alpha_{\text{ТО2}}$, $\omega_{\text{ТО2}}$, $\varkappa_{\text{ТО2}}$ — углы поворота матрицы перехода от СК тест-объекта в правом положении (ТО2) к ОСК;
4) $\{X_0, Y_0, Z_0\}_{\text{БСК в ОСК}}$ — пространственные координаты начала БСК в ОСК;
5) $\{X_0, Y_0, Z_0\}_{\text{ТО1 в ОСК}}$ — пространственные координаты начала ОСК в левом положении тест-объекта (ТО1) в опорной системе координат;
6) $\{X_0, Y_0, Z_0\}_{\text{ТО2 в ОСК}}$ — пространственные координаты начала ОСК в правом положении тест-объекта (ТО2) в опорной системе координат;
7) $\{\alpha_1, \varkappa_1, \alpha_2, \omega_2, \varkappa_2\}$ — элементы взаимного ориентирования камер.

В итоге уточняются 23 параметра по всем точкам тест-объекта.

В качестве рабочих параметров для вычисления координат выбираемых точек в опорной системе координат используются 1-я, 4-я и 7-я группы вышеуказанных параметров.

Для определения параметров связи опорной системы координат тест-объекта и опорной системы координат манипулятора следует использовать три метки, нанесённые на узлах манипулятора: первая — на узле грунтозаборного устройства, вторая — вблизи третьего привода двигателя и третья — у первого привода двигателя, задающего азимутальный поворот. По трём меткам можно определить ориентацию подвижной системы координат манипулятора в опорной системе координат тест-объекта.

В ходе подготовительных работ центр грунтозаборного устройства калибруется в неподвижной опорной системе координат манипулятора. При помощи азимутального поворота, радиального и вертикального смещений грунтозаборное устройство перемещается в пределах рабочей области в заданную точку. Снимая три метки манипулятора одновременно двумя камерами, можно определить их пространственные координаты в опорной системе координат тест-объекта. Зная пространственные координаты меток в подвижной системе координат манипулятора (по конструкторской документации), можно определить параметры перехода от ПСКМ к ОСК, с использованием которых рассчитываются координаты центра грунтозаборного устройства в опорной системе координат тест-объекта. Тогда может быть использована следующая схема определения параметров перехода от ОСК к ОСКМ:

1. Последовательное перемещение манипулятора в пять положений рабочей зоны по *Az*, *R*, *H*.
2. Проведение в каждом положении съёмки двумя камерами трёх меток манипулятора.
3. Обработка результатов съёмки в каждом положении манипулятора:
   - определение координат трёх меток манипулятора в ОСК,
   - определение координат трёх меток в ПСКМ,
   - определение текущих параметров перехода от ОСК к ПСКМ,
   - определение координат центра грунтозаборного устройства (ГЗУ) манипулятора в ОСКМ (по *Az*, *R*, *H*).
4. Определение координат центра ГЗУ в ОСК для каждого положения манипулятора по координатам центра ГЗУ в ПСКМ с использованием текущих параметров перехода от ОСК к ПСКМ.
5. Определение шести параметров перехода от ОСК в ОСКМ по пяти пространственным координатам центра ГЗУ в ОСК и ОСКМ методом Гаусса – Ньютона.

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}_{\text{ОСКМ}} = \begin{pmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{pmatrix}_{\text{ОСКМ}} + A \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}_{\text{ОСК}}, \tag{8}$$

где A — матрица перехода от ОСК к ОСКМ.

Построение трёхмерной модели снимаемой поверхности в системе координат камер осуществляется обработкой полученных со стереокамер изображений на компьютере КИА СТС-Л. При построении цифровой модели в стереоскопическом режиме с помощью манипулятора-мыши осуществляется набор точек в пределах снимаемой поверхности.

По координатам пары точек на плоскости вычисляются:

- пространственные координаты снимаемой поверхности в базисной системе координат по пяти элементам взаимного ориентирования камер;
- пространственные координаты снимаемой поверхности в опорной системе координат по шести параметрам связи ОСК с БСК;
- пространственные координаты снимаемой поверхности в опорной системе координат манипулятора по шести параметрам связи ОСКМ с ОСК.

Пространство точек цифровой модели разбивается на фрагменты вдоль осей X и Y базисной системы координат, для центров каждого из которых рассчитывается значение высоты

методом билинейной интерполяции. Выбирается изображение левой или правой камеры для отображения на цифровой модели. Для каждого фрагмента модели определяется положение четырёхугольника на выбранном изображении с использованием элементов ориентирования выбранной камеры относительно базисной системы координат. Фрагмент изображения в пределах четырёхугольника отображается в качестве пространственной текстуры при помощи средств OpenGL. Пример построения трёхмерной поверхности представлен на *рис. 6*.

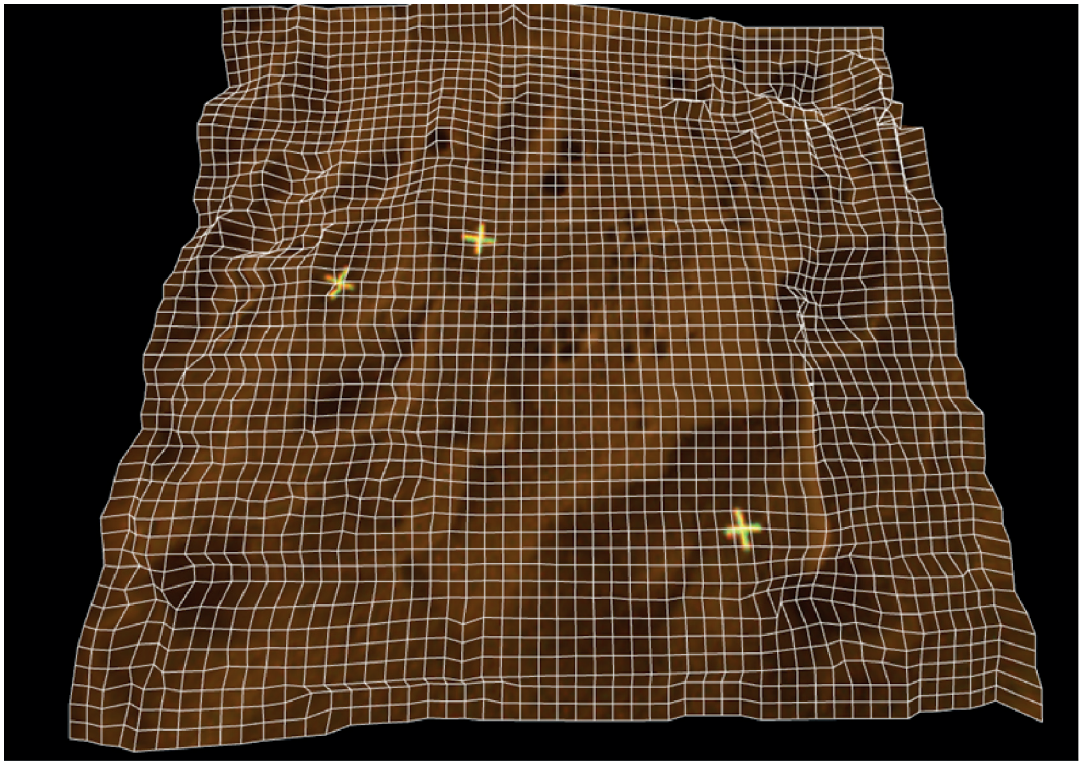

Рис. 6. Пример трёхмерного отображения рабочей поверхности

По изображению, наложенному на карту высот в ОСКМ, определяются координаты цели, на которые требуется направить манипулятор, чтобы выполнить взятие грунта. Также цель можно выбрать по двум изображениям рабочей области. По паре координат при помощи специального программного обеспечения вычисляются:

- пространственные координаты цели в базисной системе координат с учётом пяти элементов взаимного ориентирования камер;
- пространственные координаты цели в опорной системе координат с учётом шести параметров связи ОСК с БСК;
- пространственные координаты цели в опорной системе координат манипулятора с учётом шести параметров связи ОСКМ с ОСК.

По трёхмерным координатам цели вычисляются: угол поворота манипулятора, радиальное и вертикальное смещения, которые считаются параметрами движения. После передачи трёх параметров движения в систему управления манипулятора осуществляется его перемещение в требуемую область и взятие грунта.

После этого манипулятор переходит к контрольной точке и останавливается в непосредственной близости от ЛАЗМА-ЛР так, чтобы в результате ошибок перемещения не повредить другую аппаратуру КА. Левая камера КАМ-С делает снимок, на котором одновременно отображаются манипулятор, находящийся в контрольной точке, и приёмное окно ЛАЗМА-ЛР. Затем проводится сравнение полученного изображения с эталонным, на котором грунтозаборное устройство находится над центром приёмного окна ЛАЗМА-ЛР. Измеряются координаты

на плоскости одинаковых элементов грунтозаборного устройства на текущем и эталонном изображениях. С использованием значения высоты грунтозаборного устройства в ОСКМ вычисляют смещения в горизонтальной плоскости и соответствующие параметры перемещения: азимутальный угол и радиальное смещение, при этом перемещение по высоте не предусматривается. Вычисленные параметры движения закладываются в систему управления манипулятором, и осуществляется завершающее движение и выгрузка грунта.

В течение 2017–2018 гг. в рамках выполнения ОКР «Луна-Глоб» в ИКИ РАН была проведена отработка описанной в статье методики решения задачи наведения лунного манипуляторного комплекса на цель по информации, получаемой от камер КАМ-С из состава СТС-Л. При этом были разработаны алгоритмы калибровки камер КАМ-С и ЛМК, создано программное обеспечение, реализующее описанные алгоритмы, отработано совместное взаимодействие лабораторного образца СТС-Л и технологического образца ЛМК и подтверждена возможность решения задачи по взятию и доставке грунта с требуемой точностью.

On-ground testing of interaction between the lunar manipulator system and the housekeeping TV system

S. V. Voronkov, A. V. Nikitin, S. A. Prokhorova, Ya. D. Elyashev

Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia
E-mail: andvnik935@yandex.ru

The scientific instrumentation of the Luna-Glob spacecraft consists of different sensors and complexes, in particular, the lunar manipulator system (LMK) and the housekeeping TV system (STS-L). One task of the STS-L is support of LMK when taking soil samples and their further delivery in the LAZMA-LR. This task is solved by using stereo cameras, which synchronously obtain the images of lunar area and then send the images to unit of data collection. Further, the obtained images are transferred to Earth for making a three-dimensional digital model of the manipulator working area to determine the spatial coordinates of the target with 15 mm accuracy. A special test bench has been created in the IKI RAS. The test bench consists of a spacecraft scale model, LMK- and STS-L' engineering models. The bench allows to test the interaction of the LMK and STS-L, develop and debug a software for stereo images processing to solve the task of soil intake device LMK guidance on the desired goal.

Keywords: manipulator, stereocamera coordinate system, housekeeping TV system, test-object, basic coordinate system, internal coordinate system of the camera, soil intake device, reference coordinate system

Accepted: 19.11.2018
DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-6-180-187