

Калибровка камер и вспомогательных датчиков для разноспектральной панорамной обзорной оптико-электронной системы с распределённой апертурой

И.А. Кудинов¹, М.Б. Никифоров¹, И.С. Холопов¹

¹Рязанский государственный радиотехнический университет, Гагарина 59/1, Рязань, Россия, 390005

Аннотация. Рассмотрены конструкции тест-объектов для калибровки камер видимого и инфракрасных диапазонов, входящих в состав панорамной обзорной оптико-электронной системы, а также алгоритмы калибровки вспомогательных инерциальных микроэлектромеханических датчиков для определения углового положения. Приведены результаты формирования изображения с виртуальной камеры, реализующей перенос центра формируемого панорамного видеоизображения в точку размещения наблюдателя. В ходе натурного эксперимента с камерами видимого и длинноволнового инфракрасных диапазонов показано, что в результате калибровки сенсоров панорамной системы с распределенной апертурой при известной дальности до объектов наблюдения достигается погрешность совмещения разноспектральных изображений не более 3'.

1. Введение

Качество видеопанорам, формируемых по информации от нескольких разнесенных камер с пересекающимися полями зрения, определяется качеством как оптических систем и фоточувствительных элементов камер, так и погрешностями оценивания параметров их математических моделей. При съемке разноудаленных объектов с подвижного носителя распределенной панорамной системы (РПС) погрешность сшивки изображений, составляющих панорамный кадр, также зависит от точности оценок дальности до объектов наблюдения и углов ориентации линий визирования камер относительно плоскости горизонта. Поэтому выполнение калибровки не только камер, но и вспомогательных датчиков РПС, является обязательным этапом разработки панорамных обзорных оптико-электронных систем.

2. Калибровка разноспектральных камер

2.1. Принципы построения тест-объектов для калибровки разноспектральных камер

Классическим способом калибровки системы камер для оценивания матриц внутренних параметров, векторов коэффициентов дисторсии объективов, матриц поворота систем координат (СК) камер и векторов параллельного переноса их оптических центров относительно СК опорной камеры является съемка с различных ракурсов тест-объектов (ТО) с априорно известными геометрическими характеристиками. Такими ТО могут выступать, например, сферы [1], а также планарные шаблоны с изображениями типа шахматного [2], сетчатого [3]

или точечного [4] поля либо с метками в форме концентрических окружностей с радиальными маркерами [5, 6].

Для калибровки разноточных камер, например, коротковолнового и длинноволнового инфракрасных (ИК), а также видимого диапазонов, требуется специальный ТО, изображения которого являются контрастными сразу во всех указанных диапазонах спектра. При изготовлении таких ТО применяются, как правило, либо конструкции с нагреваемой светлой плитой, на которую нанесены упорядоченные, не пропускающие тепловое излучение геометрические элементы [7, 8], либо конструкции, состоящие из двух плоскопараллельных плит, темной нижней и светлой верхней, содержащей упорядоченную совокупность отверстий, причем нижняя плита является нагреваемой [9]. Например, в данной работе, как и в [10], для калибровки телевизионных (ТВ) и тепловизионных (ТПВ) камер РПС применялся ТО первого типа с инверсией изображения ТПВ камеры длинноволнового ИК диапазона (рисунок 1).

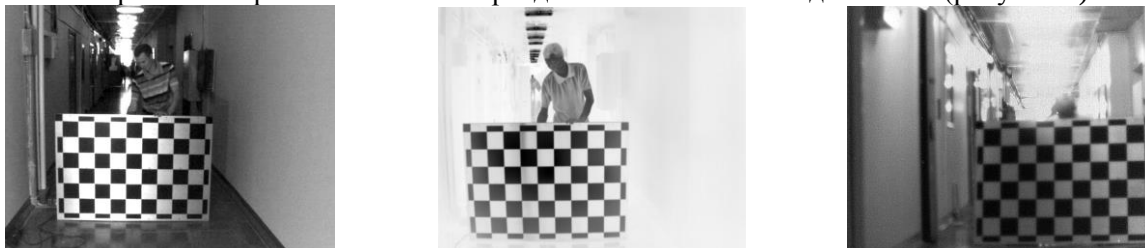


Рисунок 1. Изображения универсального ТО с шаблоном типа «шахматное поле»: слева – кадр ТВ камеры, по центру – кадр ТПВ камеры, справа – кадр камеры коротковолнового ИК диапазона.

Указанный ТО при формировании негатива изображения с ТПВ камеры позволяет выполнять калибровку разноточных камер, например, с использованием функций из библиотеки *OpenCV* или пакета *Camera calibration toolbox* для *MATLAB*.

2.2. Последовательность калибровки разноточных камер панорамной системы

При проектировании РПС, как правило, при ограниченном количестве камер стремятся получить наибольшее поле зрения панорамного кадра и минимальный оптический параллакс. Для этого угловой размер пересечения полей зрения камер следует минимизировать.

Для обеспечения низкой погрешности оценивания коэффициентов дисторсии объектива и матрицы внутренних параметров камеры съемка ТО выполняется с различных ракурсов; при этом его изображения должны располагаться как в центре кадра, так и по периферии (рисунок 2), обеспечивая тем самым для серии изображений приблизительно равномерное распределение особых точек по его полю [11].

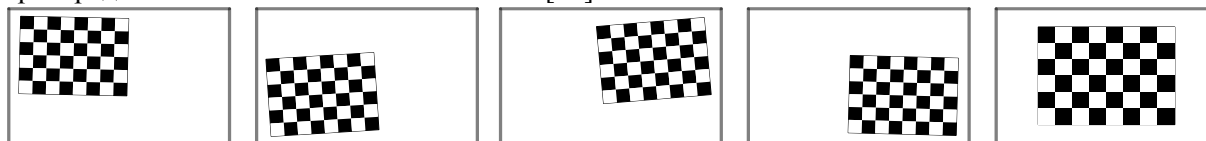


Рисунок 2. Рекомендуемые положения ТО с шаблоном «шахматное поле» в кадре.

При расположении изображений ТО преимущественно в одной части кадра (рисунок 3), характерном, например, для калибровки стереопар, отсутствие особых точек в другой его части приводит к увеличению дисперсии оценок элементов матрицы внутренних параметров (фокусное расстояние, координаты главной точки) и коэффициентов радиальной дисторсии по сравнению с их приблизительно равномерным распределением по полю кадра (рисунок 4). По этой причине авторы применяли следующую стратегию калибровки.

1. Поскольку камеры РПС были сфокусированы на бесконечность, то физические размеры ТО выбирались исходя из условия обеспечения ширины изображения ТО не менее половины ширины кадра при его расположении на ближней границе резко изображаемого пространства каждой камеры. Для макета РПС размеры клетки шаблона ТО составили 15×15 см.

2. Для каждой i -й камеры РПС, $i = 1, 2, \dots, N_{\text{кам}}$, где $N_{\text{кам}}$ – количество камер, первоначально оценивались только матрицы внутренних параметров $\mathbf{K}_i$ и коэффициенты дисторсии объективов при расположении универсального ТО (рисунок 1) в различных частях кадра (рисунок 2); количество кадров с ТО равнялось 15. Полученные оценки далее учитывались при оценивании внешних параметров.

3. Ввиду малых угловых размеров пересечения полей зрения камер РПС внешние параметры (матрицы поворота $\mathbf{R}_i$ и векторы параллельного переноса $\mathbf{t}_i$ СК каждой камеры РПС относительно СК опорной камеры) оценивались с помощью предварительно откалиброванной вспомогательной камеры [12] (рисунок 5).

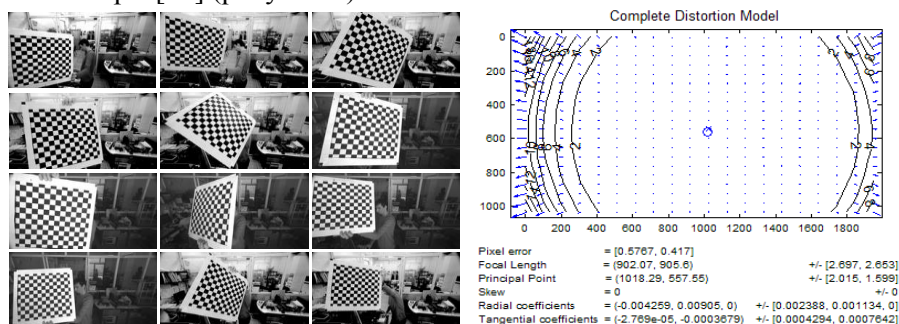


Рисунок 3. Кадры с изображениями ТО преимущественно в левой части кадра (слева) и векторное поле дисторсии, полученное в результате калибровки в *Camera calibration toolbox* для MATLAB (справа).

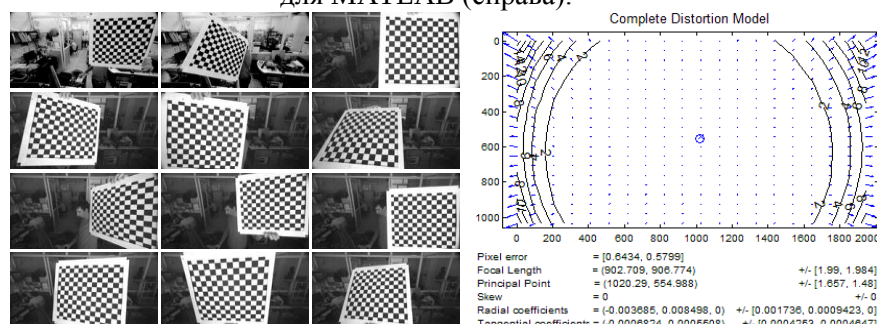


Рисунок 4. Кадры с изображениями ТО в различных частях кадра (слева) и векторное поле дисторсии, полученное в результате калибровки в *Camera calibration toolbox* для MATLAB (справа).

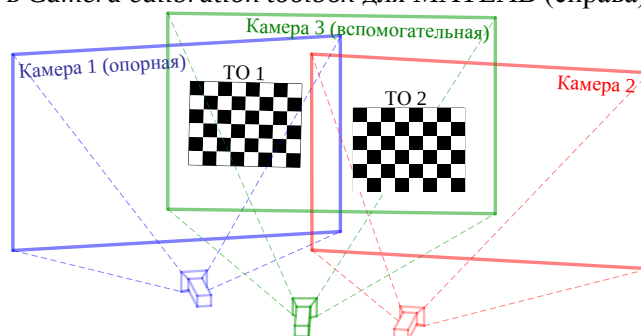


Рисунок 5. Идея калибровки с помощью вспомогательной камеры; ТО1 и ТО2 – положения ТО при взаимной калибровке камер 1 и 2.

По оцененным матрицам трансформации $\mathbf{T}_{31} = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_{31} & \mathbf{t}_{31} \\ \mathbf{0}^T & 1 \end{bmatrix}$ и $\mathbf{T}_{32} = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_{32} & \mathbf{t}_{32} \\ \mathbf{0}^T & 1 \end{bmatrix}$ оценивалась матрица $\mathbf{T}_{12} = \mathbf{T}_{31}^{-1} \mathbf{T}_{32}$, из которой далее извлекались внешние параметры $\mathbf{R}_{12}$ и $\mathbf{t}_{12}$.

3. Калибровка вспомогательных инерциальных датчиков

3.1. Калибровка микроэлектромеханических датчиков ускорения

Известно [10, 13], что при формировании сферических или цилиндрических панорам необходимо знание ракурса съемки: крена и тангажа СК камер РПС относительно плоскости горизонта. Указанные углы могут быть получены с помощью инерциальных навигационных модулей (ИНМ), построенных на микроэлектромеханических сенсорах (МЭМС) ускорения (трехосных акселерометрах, ТОА) и угловой скорости (трехосных гироскопах, ТОГ). Погрешность определения крена и тангажа по сигналам ИНМ во многом зависит от точности оценивания калибровочных параметров ТОА и ТОГ.

Упрощенная математическая модель сигналов МЭМС ТОА (не учитывающая неортогональности его осей чувствительности и температурной зависимости калибровочных параметров [14]) в состоянии покоя имеет вид [15, 16]:

$$\mathbf{a}_t = \mathbf{K}_a \mathbf{g}_t + \mathbf{b}_a + \mathbf{n}_{at},$$

где $\mathbf{K}_a = \text{diag}[k_{ax}, k_{ay}, k_{az}]$ – диагональная матрица масштабных коэффициентов, а $\mathbf{a}_t = [a_{xt}, a_{yt}, a_{zt}]^T$, $\mathbf{g}_t = [g_{xt}, g_{yt}, g_{zt}]^T$, $\mathbf{b}_a = [b_{ax}, b_{ay}, b_{az}]^T$ и $\mathbf{n}_{at} = [n_{axt}, n_{ayt}, n_{azt}]^T$ – соответственно векторы показаний акселерометра, проекций вектора ускорения свободного падения на оси чувствительности ТОА, постоянных смещений и собственных фликкер-шумов в момент времени t .

При наличии специальной оснастки, позволяющей устанавливать ТОА в $N \geq 6$ фиксированных положений с априорно известными проекциями $\mathbf{g}_t$ [16], для оценивания неизвестных $\mathbf{K}_a$ и $\mathbf{b}_a$ решают переопределенную систему уравнений:

$$\mathbf{G} \mathbf{p}_a = \mathbf{a}, \quad (1)$$

где $\mathbf{p}_a = [k_{ax}, b_{ax}, k_{ay}, b_{ay}, k_{az}, b_{az}]^T$ – вектор калибровочных коэффициентов, матрица $\mathbf{G} = [\mathbf{G}_1, \mathbf{G}_2, \dots, \mathbf{G}_N]^T$ составлена из априорных значений проекций вектора ускорения свободного

падения на оси чувствительности ТОА в t -м положении, $\mathbf{G}_t = \begin{bmatrix} g_{xt} & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & g_{yt} & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & g_{zt} & 1 \end{bmatrix}$,

$t = 1, 2, \dots, N$, а $\mathbf{a} = [\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2, \dots, \mathbf{a}_N]^T$ – вектор показаний ТОА.

Линейным псевдорешением (1) является вектор

$$\mathbf{p}_a = \mathbf{G}^+ \mathbf{a}, \quad (2)$$

где $\mathbf{G}^+ = (\mathbf{G}^T \mathbf{G})^{-1} \mathbf{G}^T$ – псевдообратная матрица Мура – Пенроуза.

При отсутствии специальной оснастки параметры $\mathbf{K}_a$ и $\mathbf{b}_a$ оцениваются по методу наименьших квадратов из переопределенной системы N нелинейных уравнений при произвольных положениях ТОА [17]:

$$\{[(a_{xt} - b_{ax})/k_{ax}]^2 + [(a_{yt} - b_{ay})/k_{ay}]^2 + [(a_{zt} - b_{az})/k_{az}]^2\}^{0.5} = g_0$$

где g_0 – модуль ускорения свободного падения (для большинства ТОА с цифровыми интерфейсами его значение нормировано: $g_0 = 1$).

3.2. Калибровка микроэлектромеханических датчиков угловой скорости

Упрощенную математическую модель сигналов МЭМС ТОГ (по аналогии с МЭМС ТОА не учитывающую неортогональности осей чувствительности) можно представить в виде [18]:

$$\mathbf{w}_t = \mathbf{K}_g \mathbf{w}_{0t} + \mathbf{b}_g(t, T) + \mathbf{n}_{gt}, \quad (3)$$

где $\mathbf{K}_g = \text{diag}[k_{gx}, k_{gy}, k_{gz}]$ – диагональная матрица масштабных коэффициентов, а $\mathbf{w}_t = [w_{xt}, w_{yt}, w_{zt}]^T$, $\mathbf{w}_{0t} = [w_{0xt}, w_{0yt}, w_{0zt}]^T$, $\mathbf{b}_g(t, T) = [b_{gx}(t, T), b_{gy}(t, T), b_{gz}(t, T)]^T$ и $\mathbf{n}_{gt} = [n_{gxt}, n_{gyt}, n_{gzt}]^T$ – соответственно векторы показаний ТОГ, истинных угловых скоростей, постоянных смещений и дрейфа нуля, зависящих от времени t и температуры T [14], и собственных фликкер-шумов. Дрейф нуля ТОГ (ARW, от англ. – *angle random walk*, градусов / $\sqrt{\text{час}}$) характеризуют вариациями Аллана [19] – зависимостью усредненной дисперсии угловой скорости от интервала усреднения.

В предположении о том, что за время калибровки величиной ARW можно пренебречь, а температура является неизменной, параметр $\mathbf{b}_g(t, T)$ из (3) можно исключить и оценить $\mathbf{K}_g$, если калибровочная трехосная поворотная платформа устанавливается на горизонтальную поверхность и выполняются последовательные вращения ТОГ вокруг каждой из ее осей в направлениях по (+) и против (–) часовой стрелки с одинаковой угловой скоростью w_0 и возвратом в исходное положение:

$$k_{gi} = 0,5(|M\{w_{it}^+\}| + |M\{w_{it}^-\}|)/w_0, i = \{x, y, z\},$$

где $M\{\cdot\}$ обозначает математическое ожидание.

3.3. Оценка угловых координат по сигналам ИНМ

При известных параметрах $\mathbf{K}_a$ и $\mathbf{b}_a$ в состоянии покоя по сигналам МЭМС ТОА можно выполнить выставку – определить начальные крен φ_0 и тангаж θ_0 по формулам:

$$\varphi_0 = \text{atan2}(g_y, g_z), \theta_0 = -\text{atan2}(g_x, [g_y^2 + g_z^2]^{0,5}), \quad (4)$$

где $\mathbf{g} = \mathbf{K}_a^{-1}(\mathbf{a} - \mathbf{b}_a)$, а усреднением показаний ТОГ – оценить текущие значения вектора параметров $\mathbf{b}_g(t, T)$. Последующие значения φ_t и θ_t можно оценивать, например, по алгоритму Махони [20], в котором дрейф сигналов угловой скорости компенсируют по показаниям ТОА, либо по алгоритму, основанному на применении автоковариационного метода наименьших квадратов [21].

4. Компенсация поворота систем координат вспомогательных датчиков относительно системы координат опорной камеры

4.1. Определение поворота системы координат ИНМ относительно системы координат опорной камеры

При монтаже ИНМ в корпус опорной камеры РПС необходимо дополнительно учитывать неколлинеарность осей их СК. Определение матрицы поворота $\mathbf{R}_{\text{кам-ИНМ}}$ между СК камеры и ИНМ может быть основано на съемке с опорной камеры серии кадров планарного ТО в априорно известных $n = 1 \dots M, M \geq 1$, угловых положениях:

$$\mathbf{R}_{\text{ИНМ}n} = \mathbf{R}_{\text{кам-ИНМ}} \mathbf{R}_{\text{кам}n}^{-1} \mathbf{R}_{\text{ТО}n} = \mathbf{R}_{\text{кам-ИНМ}} \mathbf{R}_{\text{кам}n}^T \mathbf{R}_{\text{ТО}n}, \quad (5)$$

где $\mathbf{R}_{\text{кам}n}$ – оцениваемая в ходе калибровки по ТО матрица поворота СК камеры относительно

$$\text{СК ТО в положении } n, \mathbf{R}_{\text{ИНМ}n} = \begin{bmatrix} \cos \varphi_n & -\sin \varphi_n & 0 \\ \sin \varphi_n & \cos \varphi_n & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_n & -\sin \theta_n \\ 0 & \sin \theta_n & \cos \theta_n \end{bmatrix} - \text{матрица поворота,}$$

вычисленная по сигналам ИНМ, $\mathbf{R}_{\text{ТО}n}$ – матрица поворота, характеризующее n -е положение ТО при калибровке.

В представлении через параметры Родрига – Гамильтона [22, 23] уравнение (5) примет вид:

$$\mathbf{q}_{\text{ИНМ}n} = \mathbf{q}_{\text{кам-ИНМ}} \bullet \mathbf{q}_{\text{кам}n}^* \bullet \mathbf{q}_{\text{ТО}n}, \quad (6)$$

где элементы кватернионов $\mathbf{q} = [q_w, q_x, q_y, q_z]^T$,

$$q_w = \cos(0,5\psi)\cos(0,5\theta)\cos(0,5\varphi) + \sin(0,5\psi)\sin(0,5\theta)\sin(0,5\varphi),$$

$$q_x = \cos(0,5\psi)\sin(0,5\theta)\cos(0,5\varphi) - \sin(0,5\psi)\cos(0,5\theta)\sin(0,5\varphi),$$

$$q_y = \sin(0,5\psi)\cos(0,5\theta)\cos(0,5\varphi) + \cos(0,5\psi)\sin(0,5\theta)\sin(0,5\varphi),$$

$$q_z = \cos(0,5\psi)\cos(0,5\theta)\sin(0,5\varphi) - \sin(0,5\psi)\sin(0,5\theta)\cos(0,5\varphi),$$

ψ, θ и φ – соответственно курс, тангаж и крен, связаны с элементами $R_{ij}, i, j = 1..3$, матриц поворота $\mathbf{R}$ выражениями:

$$q_w = 0,5[1 + R_{11} + R_{22} + R_{33}]^{0,5}, \quad q_x = 0,25[R_{32} - R_{23}]/q_w,$$

$$q_y = 0,25[R_{13} - R_{31}]/q_w, \quad q_z = 0,25[R_{21} - R_{12}]/q_w,$$

q_w и $[q_x, q_y, q_z]^T$ – соответственно скалярная и векторная части кватернионов, а « $\bullet$ » и « $*$ » – соответственно знаки кватернионного умножения и сопряжения.

Псевдорешением переопределенной системы из M уравнений (6) является (см. приложение А) состоящий из элементов кватерниона $\mathbf{q}_{\text{кам-ИНМ}}$ вектор

$$\mathbf{v}_{\text{кам-ИНМ}} = (\mathbf{Q}_{\text{ИНМ}}^T \mathbf{Q}_{\text{ИНМ}})^{-1} \mathbf{Q}_{\text{ИНМ}}^T \mathbf{v}, \quad (7)$$

и соответствующая ему матрица поворота

$$\mathbf{R}_{\text{кам-ИНМ}}(\mathbf{q}) = \begin{bmatrix} 1 - 2(q_y^2 + q_z^2) & 2(q_x q_y - q_w q_z) & 2(q_x q_z + q_w q_y) \\ 2(q_x q_y + q_w q_z) & 1 - 2(q_x^2 + q_z^2) & 2(q_y q_z - q_w q_x) \\ 2(q_x q_z - q_w q_y) & 2(q_y q_z + q_w q_x) & 1 - 2(q_x^2 + q_y^2) \end{bmatrix}, \quad (8)$$

Вектор $\mathbf{v}$ в (7) получен состыковкой векторов $\mathbf{v}_n = [q_{wn}, q_{xn}, q_{yn}, q_{zn}]^T$, составленных из элементов кватернионов $\mathbf{q}_n = \mathbf{q}_{\text{ТО}n}^* \bullet \mathbf{q}_{\text{кам}n}$,

$$\mathbf{v}_{\text{ТО-ИНМ}} = [\mathbf{v}_1^T, \mathbf{v}_2^T, \dots, \mathbf{v}_M^T]^T.$$

Матрица $\mathbf{Q}_{\text{ИНМ}}$ получена состыковкой матриц $\mathbf{Q}_{\text{ИНМ}n}$ по вертикали, а каждая из них в свою очередь составлена из элементов кватерниона $\mathbf{q}_{\text{ИНМ}n}^*$ по правилу [22, 23]:

$$\mathbf{Q} = f(\mathbf{q}^*) = \begin{bmatrix} q_0^* & -q_1^* & -q_2^* & -q_3^* \\ q_1^* & q_0^* & -q_3^* & q_2^* \\ q_2^* & q_3^* & q_0^* & -q_1^* \\ q_3^* & -q_2^* & q_1^* & q_0^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} q_0 & q_1 & q_2 & q_3 \\ -q_1 & q_0 & q_3 & -q_2 \\ -q_2 & -q_3 & -q_0 & q_1 \\ -q_3 & q_2 & -q_1 & q_0 \end{bmatrix}. \quad (9)$$

4.2. Взаимная калибровка измерителя дальности и опорной камеры РПС

Известно, что при формировании панорамного кадра в РПС при съемке разноудаленных объектов необходима информация о дальности до них. Такая информация может быть получена по данным от лидара [24, 25] или, при его отсутствии, по данным от стереопары и источника лазерного подсвета, формирующего сетку из точек [26]. Если опорной камерой стереопары выступает опорная камера РПС, то СК измерителя дальности и РПС совпадают. В случае применения лидара необходимо выполнять его взаимную калибровку с опорной камерой РПС для оценки матрицы поворота $\mathbf{R}_L$ и вектора параллельного переноса $\mathbf{t}_L$ СК лидара относительно СК опорной камеры [27-29].

5. Алгоритм формирования панорамного изображения по информации от распределенных камер, ИНМ и лазерного дальномера

В [10, 30] рассмотрены алгоритмы формирования персональной области интереса (ОИ) наблюдателя по информации от камер РПС, в которых расстоянием между главными точками камер пренебрегают, а учитывают только матрицы поворота их СК. При наличии дальномерной информации от лидара или источника, формирующего поле точек лазерного подсвета, качество сшивки изображений в ОИ повышается [25].

Пусть по результатам измерений лазерного дальномера (ЛД) получены N_L угловых направлений (α_j, β_j) , для которых известна дальность D_j , $j = 1, 2, \dots, N_L$. Алгоритм формирования изображения в ОИ, учитывающий дальномерную информацию до N_L точек сцены, содержит следующие этапы.

Инициализация

1. Вычисление кватернионов $\mathbf{q}_{uv0}$, задающих начальные угловые направления на пиксели ОИ с координатами (u, v) [30]:

$$\mathbf{q}_{uv0} = [\cos(0,5\alpha_u)\cos(0,5\beta_v), \cos(0,5\alpha_u)\sin(0,5\beta_v), \sin(0,5\alpha_u)\cos(0,5\beta_v), \sin(0,5\alpha_u)\sin(0,5\beta_v)]^T, \\ \alpha_u = \arctg(x_{uv}), \quad \beta_v = \arcsin[y_{uv}/(x_{uv}^2 + y_{uv}^2 + 1)^{0,5}], \\ x_{uv} = (2u/W - 1)\text{tg}(\Delta\phi_w/2), \quad y_{uv} = -(2v/H - 1)\text{tg}(\Delta\phi_h/2),$$

где W и H – соответственно ширина и высота ОИ в пикселях, $\Delta\phi_w$ и $\Delta\phi_h$ – его угловые размеры по горизонтали и вертикали, α_u и β_v – азимут и угол места линии, проведенной из центра виртуальной сферы единичного радиуса (ВСЕР) к пикселю (u, v) .

2. Вычисление кватернионов $\mathbf{q}_{lj}$, $j = 1, 2, \dots, N_L$, задающих угловые направления на точки лазерного подсвета или направления сканирования ЛД:

$$\mathbf{q}_{lj} = [\cos(0,5\alpha_j)\cos(0,5\beta_j), \cos(0,5\alpha_j)\sin(0,5\beta_j), \sin(0,5\alpha_j)\cos(0,5\beta_j), \sin(0,5\alpha_j)\sin(0,5\beta_j)]^T.$$

Основной цикл

1. Оценка текущего углового положения СК опорной камеры, соответствующей ему матрицы поворота относительно плоскости горизонта $\mathbf{R}_{\varphi\theta} = \begin{bmatrix} \cos \varphi & -\sin \varphi & 0 \\ \sin \varphi & \cos \varphi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & -\sin \theta \\ 0 & \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix}$ и кватерниона $\mathbf{q}_{\varphi\theta}$ по формулам (4), (7) и (8).

2. Вычисление кватерниона поворота для заданного углового положения центра ОИ $\mathbf{q}_{\text{виз}}$,
 $\mathbf{q}_{\text{виз}} = [\cos(0,5\alpha)\cos(0,5\beta), \cos(0,5\alpha)\sin(0,5\beta), \sin(0,5\alpha)\cos(0,5\beta), \sin(0,5\alpha)\sin(0,5\beta)]^T$,
 где α и β – азимут и угол места линии визирования, и кватернионов

$$\mathbf{q}_{uv} = \mathbf{q}_{\text{виз}} \bullet \mathbf{q}_{uv0},$$

задающих направление радиус-векторов, проведенных от центра ВСЕР к пикселям ОИ (u, v).

3. Заполнение i -го слоя ОИ пикселями с камер (с учетом дисторсии их объективов):

$$\mathbf{x}_{uvi} = \mathbf{P}_i [\text{rot}(\mathbf{M}_{uv}^{3D}, \mathbf{q}_{\text{кам-ИНМ}} \bullet \mathbf{q}_{\varphi\theta})] / \{\mathbf{P}_i^{(3)} [\text{rot}(\mathbf{M}_{uv}^{3D}, \mathbf{q}_{\text{кам-ИНМ}} \bullet \mathbf{q}_{\varphi\theta})]\}, \quad (10)$$

где i – номер камеры РПС, $\mathbf{P}_i$ – матрица проекции,

$$\mathbf{P}_i = \mathbf{K}_i [\mathbf{R}_i | \mathbf{t}_i], \quad (11)$$

$\mathbf{M}_{uv}^{3D}$ – пространственные координаты точки, проецируемой на пиксель (u, v),

$$\mathbf{M}_{uv}^{3D} = \{\mathbf{T}_l [(\hat{D}_{uv} \mathbf{M}_{uv})^T, 1]^T\}^{<1..3>},$$

$\mathbf{T}_l = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_l & \mathbf{t}_l \\ \mathbf{0}^T & 1 \end{bmatrix}$ – матрица трансформации для перехода от СК лидара к СК опорной камеры,

$\mathbf{0} = [0, 0, 0]^T$, $\mathbf{M}_{uv}$ – точка пересечения ВСЕР и радиус-вектора, проведенного из ее центра к пикселю с координатами ОИ (u, v),

$$\mathbf{M}_{uv} = [2(q_x q_z + q_w q_y), 2(q_y q_z - q_w q_x), q_w^2 + q_z^2 - (q_x^2 + q_y^2)]^T,$$

где q_w и $[q_x, q_y, q_z]^T$ – соответственно скалярная и векторная части кватерниона $\mathbf{q}_{uv}$, $\hat{D}_{uv}$ – оценка дальности до объекта, формирующего яркость пикселя ОИ с координатами (u, v), а символы «⁽³⁾» и «^{<1..3>}» означают выбор соответственно 3-й строки матрицы и первых трех элементов вектора. Оператор $\text{rot}(\mathbf{v}_{uv}, \mathbf{q})$ в (10) означает поворот вектора $\mathbf{v}_{uv}$, представленного через параметры Родрига – Гамильтона, на угол, определяемый кватернионом $\mathbf{q}$:

$$\text{rot}(\mathbf{v}_{uv}, \mathbf{q}) \rightarrow [0, \mathbf{v}_{uv}^T]^T = \mathbf{q} \bullet [0, \mathbf{v}_{uv}^T]^T \bullet \mathbf{q}^*.$$

Оценку дальности $\hat{D}_{uv}$ получают как расстояние до точки, в которой прямая с вектором направляющих косинусов $\mathbf{M}_{uv}^{3D} = \mathbf{M}_{uv}^{3D} / \|\mathbf{M}_{uv}^{3D}\|$ пересекает плоскость, проходящую через три точки $\mathbf{M}_k = D_k \text{rot}([0, 0, 1]^T, \mathbf{q}_{lk})$ с известными дальностями D_k , $k \in [1, N_L]$, а точка пересечения принадлежит треугольнику с вершинами $\mathbf{M}_k$ (одним из эффективных алгоритмов проверки принадлежности точки треугольнику в трехмерном пространстве является метод барицентрических координат [31]). Точки для построения плоскости выбираются по критерию минимума угла между направлениями, определяемыми вектором $\mathbf{M}_{uv}^{3D}$ и тремя векторами $\mathbf{v}_{lk} = \text{rot}([0, 0, 1]^T, \mathbf{q}_{lk})$. Данный критерий может быть записан в виде:

$$\mathbf{M}_{uv}^{3D} \bullet \mathbf{v}_{lk} \rightarrow \max,$$

где « $\bullet$ » – символ скалярного произведения векторов.

4. Выполнение процедуры коррекции перепадов яркости (блендинга) в различных слоях, соответствующих одному спектральному диапазону [32].

При необходимости динамического изменения поля зрения ОИ перерасчет кватернионов $\mathbf{q}_{uv0}$ выполняется в теле основного цикла [30].

Поскольку для каждого пикселя ОИ обработка по приведенному алгоритму является однородной, это позволяет применить процедуру распараллеливания вычислений, например, с использованием ресурсов GPU.

В ряде приложений, например, при маловысотном полете пилотируемого летательного аппарата (ЛА), на котором РПС является обзорной оптико-электронной системой, необходимо учитывать, что ракурсы сцены, наблюдаемой из точки расположения головы пилота (ТРГП) ЛА, и изображения, сформированного в ОИ, могут различаться. При известном векторе параллельного переноса $\mathbf{t}_{\text{ТРГП}}$ для перехода от ТРГП к главной точке опорной камеры его необходимо

дополнительно учитывать при вычислении матриц проекции $\mathbf{P}_i$ (11). Если оси СК опорной камеры параллельны строительным осям ЛА, то

$$\mathbf{P}_i = \mathbf{K}_i[\mathbf{R}_i | (\mathbf{t}_i + \mathbf{t}_{\text{ТРГП}})], i = 1, 2, \dots, N_{\text{кам}}. \quad (12)$$

Такой подход эквивалентен формированию ОИ как изображения, формируемого виртуальной камерой, главная точка которой совпадает с ТРГП, а не с главной точкой опорной камеры РПС.

6. Результаты экспериментов

Экспериментальные результаты получены на макете РПС, состав которого описан в [10, 30]. Камеры макета и ИНМ на основе отладочной платы с МЭМС датчиком MPU-9150 были предварительно откалиброваны по методикам, рассмотренным в пп. 2-4.

Полунатурный эксперимент по формированию видеопанорамы был поставлен следующим образом: с помощью лазерного дальномера Leica Disto D2 были выполнены измерения дальностей D_j от торца объектива опорной камеры до опорных точек – углов оконных проёмов ближайших зданий, а также нижних кромок и коньков их крыш (рисунок 6); положение точек лазерного луча при этом контролировалось с помощью телеобъектива. Указанным точкам были вручную найдены соответствующие пиксели на изображении вспомогательной камеры и по ним получены угловые направления (α_j, β_j) для опорной камеры, а также сделано допущение, что $\mathbf{R}_i = \mathbf{E}$ и $\mathbf{t}_i = [0, 0, 0]^T$, где $\mathbf{E}$ – единичная матрица размерности 3×3 . Пикселям ОИ (u, v) , которым не были поставлены в соответствие оценки дальности $\hat{D}_{uv}$, ставились в соответствие точки пространства с $\|\mathbf{M}_{uv}^{3D}\| = 10000$ м (имитировалась бесконечность).

На рисунке 6 показаны результаты совмещения в ОИ кадров от трех ТВ камер с учетом дальномерной информации (для наглядности режим блендинга отключен). Анализ участков изображения в ОИ при масштабе 800 % позволяет сделать вывод о достигнутой абсолютной ошибке совмещения почти для всего поля ОИ не более 1 пикселя. Для параметров ОИ $W \times H = 1024 \times 768$ и $\Delta\varphi_w \times \Delta\varphi_h = 40^\circ \times 30^\circ$ это значение соответствует угловой ошибке около 2,6' (т.е. даже с предварительной калибровкой ошибка совмещения, достигнутая на настоящий момент авторами, приблизительно в 3 раза превышает разрешающую способность глаза человека). Аналогичное значение погрешности справедливо и при совмещении слоев ОИ как от ТВ, так и от ТПВ каналов РПС (рисунок 7).

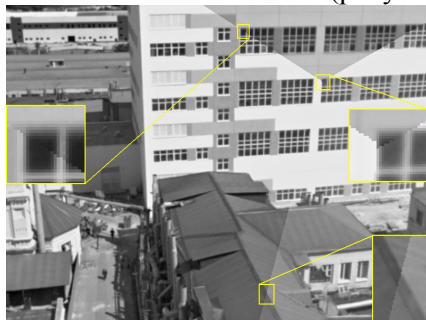


Рисунок 6. Результат формирования ОИ по информации от ТВ каналов.

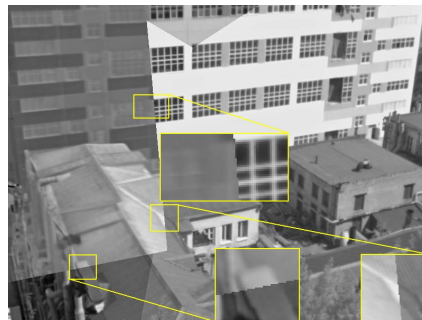


Рисунок 7. Результат формирования ОИ по информации от ТВ и ТПВ каналов (совмещение с приоритетом ТПВ).



Рисунок 8. Результат формирования ОИ без учета информации о дальности до объектов сцены.



Рисунок 9. Результат формирования ОИ с учетом информации о взаимном расположении ТРГП и опорной камеры РПС при $\mathbf{t}_{\text{ТРГП}} = [0, 2, 2]^T$; $\mathbf{P}_i$ рассчитываются по (12).



Рисунок 10. Результат формирования ОИ без учета перемещения ТРГП относительно опорной камеры РПС; $\mathbf{P}_i$ рассчитываются по (11).

В секторах ОИ, для которых оценки дальности отсутствуют, предположение об отнесении всех объектов сцены к бесконечности приводит к абсолютным ошибкам совмещения в ближней зоне (до 100 метров) до 8-10 пикселей (в левой части рисунка 8 вдоль границы сшивки кадров центральной и левой нижней камер), что при приведенных выше параметрах ОИ соответствует угловым ошибкам уже в 20-25'.

На рисунках 9 и 10 показано изменение ракурсов съемки при смещении ТРГП относительно главной точки опорной камеры РПС на 2 метра выше и на 2 метра назад при $\Delta\varphi_w \times \Delta\varphi_h = 60^\circ \times 45^\circ$ (режим блендинга включен). По субъективным ощущениям авторов, визуально наблюдавших объекты ближней зоны из ТРГП, ОИ рисунка 9 ближе к субъективному восприятию высоты над поверхностью съемки, чем ОИ рисунка 10 (например, изображение здания в правой части ОИ).

7. Заключение

Таким образом, предварительная калибровка камер и вспомогательных датчиков РПС при наличии информации о дальностях до объектов сцены позволила обеспечить абсолютную угловую ошибку совмещения в окне интереса не более трех угловых минут. Режим виртуального ОИ, в котором учитывается смещение наблюдателя относительно опорной камеры РПС, позволяет сформировать изображения с ракурсом съемки, соответствующим субъективному визуальному восприятию.

8. Литература

- [1] Agrawal, M. Camera calibration using spheres: A semi-definite programming approach / M. Agrawal, L.S. Davis // Proc. of IEEE Int. Conf. on Computer Vision. – Nice, France, 2003. – P. 782-789. DOI: 10.1109/ICCV.2003.1238428.
- [2] Zhang, Z. A flexible new technique for camera calibration / Z. Zhang // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 2000. – Vol. 22(11). – P. 1330-1334. DOI: 10.1109/34.888718.
- [3] Коваленко, В.П. Методика оценки дисторсии современных инфракрасных систем / В.П. Коваленко, Ю.Г. Веселов, И.В. Карпиков // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия «Приборостроение». – 2011. – Т. 1. – С. 98-107.
- [4] Hartley, R. Multiple View Geometry in Computer Vision / R. Hartley, A. Zisserman. – Cambridge: Cambridge University Press, 2003. – 656 p. DOI: 10.1017/CBO9780511811685.
- [5] Knyaz, V.A. Method for on-line calibration for automobile obstacle detection system / V.A. Knyaz // Proc. of ISPRS Commission V Symposium «Close-Range Imaging, Long-Range Vision». – 2002. – Vol. XXXIV(5). – P. 48-53.
- [6] Knyaz, V.A. The Development of New Coded Targets for Automated Point Identification and Non-Contact 3D Surface Measurements / V.A. Knyaz, A.V. Sibiryakov // The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. – 1998. – Vol. 32(5). – P. 80-85.

- [7] Ramegowda, D. Patent US 9621823B2, Int. Cl. H04N5/33, H04N17/00. Thermal Camera Calibration / D. Ramegowda, M.I. Mohideen, L.R. Boregowda, B. Sai, Z. Holland, G. Venkoparao // Honeywell International Inc. – US 20120069193; prior publication data: 22.03.2012; date of patent: 11.04.2017.
- [8] Wu, H. Patent CN 204695399U, Int. Cl. G01J5/00, G01M11/00. Camera Calibration Template / H. Wu, J. Zhang, Y. Zhao, X. Yu, B. He // Harbin University of Science and Technology. – US 20120069193; priority date: 29.06.2015; date of patent: 07.10.2015.
- [9] Jia, X. Patent CN 204301863U, Int. Cl. G01J5/00, G01M11/00 Novel Parameter Combined Calibration Board for Visible Light Camera and Infrared Thermal Imager Camera / X. Jia, W. Zhang, H. Zhong, S. Qi, C. Di, D. Yongfei, C. Ming, L. Guojun, W. Fengyang, H. Jian // State Grid Corporation, Zhengzhou Aipu Shi Technology Co., Ltd., Zhengzhou Power Supply Company. – CN 201420686148; priority date: 17.11.2014; date of patent: 29.04.2015.
- [10] Кудинов, И.А. Формирование видеопанорамы по информации от разноспектральных камер / И.А. Кудинов, О.В. Павлов, И.С. Холопов, М.Ю. Храмов // Информационные технологии и нанотехнологии (ИТНТ-2018): сборник трудов IV международной конференции и молодежной школы. – Самара: Новая техника, 2018. – С. 568-575.
- [11] Лазарева, Н.С. Калибровка неметрических малоформатных камер с целью применения их для решения некоторых задач фотограмметрии / Н.С. Лазарева // Фотограмметрия и дистанционное зондирование. – 2011. – Т. 1. – С. 80-91.
- [12] Широков, Р.И. Увеличение углов поля зрения составной веб-камеры методом склеивания изображений / Р.И. Широков, В.И. Алехнович // Электронный научно-технический журнал «Контенант». – 2014. – Т. 4. – С. 10-23.
- [13] Szeliski, R. Image alignment and stitching: a tutorial / R. Szeliski // Foundations and trends in computer graphics and vision. – 2006. – Vol. 2(1). – P. 1-104. DOI: 10.1561/06000000009.
- [14] Попова, И.В. Термостатирование микромеханических инерциальных датчиков / И.В. Попова, Н.В. Моисеев, Я.А. Некрасов, А.А. Семенов // Нано- и микросистемная техника. – 2001. – Т. 5. – С. 22-24.
- [15] Лукьянов, А.Д. Идентификация параметров преобразующей системы MEMS – акселерометра ADXL-345 методом наименьших квадратов / А.Д. Лукьянов, К.И. Горянина, Д.Т. Фам // Электроника и электротехника. – 2016. – Т. 2. – С. 38-45. DOI: 10.7256/2453-8884.2016.2.21242.
- [16] Hung, J.C. Calibration of accelerometer triad of an IMU with drifting Z -accelerometer bias / J.C. Hung, J.R. Thacher, H.V. White // Proc. of the IEEE National Aerospace and Electronics Conference. – 1989. – Vol. 1. – P. 153-158. DOI: 10.1109/NAECON.1989.40206.
- [17] Шаврин, В.В. Калибровка микроэлектромеханических датчиков ускорений и угловых скоростей в бесплатформенных инерциальных навигационных системах / В.В. Шаврин, А.С. Конаков, В.И. Тисленко // Доклады ТУСУРа. – 2012. – Т. 1, № 25, Ч. 2. – С. 265-269.
- [18] Bekkeng, J.K. Calibration of a novel MEMS inertial reference unit / J.K. Bekkeng // IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement. – 2009. – Vol. 58(6). – P. 1967-1974. DOI: 10.1109/TIM.2008.2006126.
- [19] Allan, D.W. Statistics of Atomic Frequency Standards / D.W. Allan // Proceedings of the IEEE. – 1966. – Vol. 54(2). – P. 221-230. DOI: 10.1109/PROC.1966.4634.
- [20] Mahony, R. Complementary filter design on the special orthogonal group SO(3) / R. Mahony, T. Hamel, J.-M. Pflimlin // Proc. of the IEEE Conference on Decision and Control (CDC'05). – Seville, Spain, 2005. – P. 1477-1484. DOI: 10.1109/CDC.2005.1582367.
- [21] Белокуров, В.А. Применение автоковариационного метода наименьших квадратов в инвариантной схеме угловой ориентации / В.А. Белокуров // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – 2018. – Т. 64. – С. 9-16.
- [22] Челноков, Ю.Н. Кватернионные и бикватернионные модели и методы механики твердого тела и их приложения. Геометрия и кинематика движения / Ю.Н. Челноков. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. – 512 с.
- [23] Kuipers, J.B. Quaternions and rotation sequences / J.B. Kuipers. – New Jersey: Princeton University, 1998. – 400 p.

- [24] Обработка изображений в авиационных системах технического зрения / под ред. Л.Н. Костяшкина и М.Б. Никифорова. – М.: Физматлит, 2016. – 234 с.
- [25] Coombe, G. Patent US8681151B2, Int. Cl. G06T17/00, G06T17/20, G06T19/00. Rendering and navigating photographic panoramas with depth information in a geographic information system / G. Coombe, D. Barcay, G. Varadhan, B. Francois // Google LLC. – US20120299920A1; prior publication data: 24.11.2010; date of patent: 25.03.2014.
- [26] Муратов, Е.Р. Вычисление дальности до точек лазерного подсвета на изображениях / Е.Р. Муратов, М.Б. Никифоров, Д.И. Устюков // Динамика сложных систем – XXI век. – 2016. – Т. 2. – С. 39-43.
- [27] Geiger, A. Automatic Camera and Range Sensor Calibration using a Single Shot / A. Geiger, F. Moosmann, O. Car, B. Schuster // Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA'2012). – Saint Paul, Minnesota, USA, 2012. – P. 3936-3943. DOI: 10.1109/ICRA.2012.6224570.
- [28] Pandey, G. Extrinsic Calibration of a 3D Laser Scanner and an Omnidirectional Camera / G. Pandey, J. McBride, S. Savarese, R. Eustice // IFAC Proceedings. – 2010. – Vol. 2010(43). – P. 336-341. DOI: 10.3182/20100906-3-IT-2019.00059.
- [29] Mirzaei, F.M. 3D LIDAR-camera intrinsic and extrinsic calibration: Identifiability and analytical least-squares-based initialization / F. M. Mirzaei, D.G. Kottas, S.I. Roumeliotis // The International Journal of Robotics Research. – 2012. – Vol. 31(4). P. 452-467. DOI: 10.1177/0278364911435689.
- [30] Кудинов, И.А. Алгоритм формирования видеопанорамы и его программная реализация с применением технологии CUDA / И.А. Кудинов, О.В. Павлов, И.С. Холопов, М.Ю. Храмов // Информационные технологии и нанотехнологии (ИТНТ-2017): сборник трудов. – Самара: Новая техника, 2017. – С. 1580-1586.
- [31] Akenine-Möller, T. Real-Time Rendering / T. Akenine-Möller, E. Haines, N. Hoffman. – Wellesley: A.K. Peters, 2008. – 1045 p.
- [32] Канаева, И.А. Методы коррекции цвета и яркости при создании панорамных изображений / И.А. Канаева, Ю.А. Болотова // Компьютерная оптика. – 2018. – Т. 42, № 5. – С. 885-897. DOI: 10.18287/2412-6179-2018-42-5-885-897.

Приложение А

Поскольку все кватернионы в (6) являются единичными, $\|q\| = 1$, то кватернион, обратный q , будет комплексно сопряжен с ним: $q^{-1} = q^*$.

Выразим из уравнения (6) кватернион $q_{\text{кам-ИНМ}}$. Для этого умножим обе части уравнения (6) слева на $q_{\text{ИНМ}n}^*$ и справа – на $(q_{\text{кам}n}^* \bullet q_{\text{ТО}n})^{-1} = q_{\text{ТО}n}^{-1} \bullet (q_{\text{кам}n}^*)^{-1} = q_{\text{ТО}n}^* \bullet q_{\text{кам}n}$:

$$q_{\text{ИНМ}n}^* \bullet q_{\text{кам-ИНМ}} = q_{\text{ТО}n}^* \bullet q_{\text{кам}n}. \quad (\text{П.1})$$

Представим произведение кватернионов в правой части (П.1) как произведение матрицы $Q_{\text{ИНМ}n}$, составленной из элементов $q_{\text{ИНМ}n}^*$ согласно (9), а кватернионы $q_{\text{кам-ИНМ}}$ и $q_{\text{ТО}n}^* \bullet q_{\text{кам}n}$ – в виде соответствующих им четырехэлементных векторов $v_{\text{кам-ИНМ}n}$ и v_n :

$$Q_{\text{ИНМ}n} v_{\text{кам-ИНМ}} = v_n. \quad (\text{П.2})$$

В системе (П.2) число уравнений равно числу неизвестных, поэтому, если матрица $Q_{\text{ИНМ}n}$ является невырожденной, то

$$v_{\text{кам-ИНМ}} = Q_{\text{ИНМ}n}^{-1} v_n. \quad (\text{П.3})$$

Однако, поскольку в каждом n -м калибровочном положении угловые ориентации ТО, камеры относительно ТО и ИНМ оцениваются с ошибкой, то следует решать не каждое из $n = 1..M$ уравнений (6), а переопределенную систему уравнений для всех положений n :

$$Q_{\text{ИНМ}} v_{\text{кам-ИНМ}} = v, \quad (\text{П.4})$$

где матрица $Q_{\text{ИНМ}}$ получается состыковкой матриц $Q_{\text{ИНМ}n}$ по вертикали, а вектор $v = [v_1^T, v_2^T, \dots, v_M^T]^T$. Псевдорешением (П.4) является вектор:

$$v_{\text{кам-ИНМ}} = Q_{\text{ИНМ}}^+ v,$$

где $Q_{\text{ИНМ}}^+ = (Q_{\text{ИНМ}}^T Q_{\text{ИНМ}})^{-1} Q_{\text{ИНМ}}^T$ – псевдообратная матрица Мура – Пенроуза.

Calibration of Cameras and Auxiliary Sensors for a Multispectral Panoramic Vision System with a Distributed Aperture

I.A. Kudinov¹, M.B. Nikiforov¹, I.S. Kholopov¹

¹Ryazan State Radio Engineering University, Gagarina street 59/1, Ryazan, Russia, 390005

Abstract. The constructions of test objects for calibrating cameras of the panoramic technical vision system in the visible and infrared ranges, as well as calibration algorithms for auxiliary inertial microelectromechanical sensors for determining the angular position are considered. The results of image forming from a virtual camera that realizes the transfer of the centre of the generated panoramic video image to the observer's placement point are presented. During the field experiment with cameras of the visible and long-wave infrared ranges it was shown that calibration of sensors of the panoramic system with a distributed aperture at a known distance to the objects of observation results in an error of combining multi-spectral images of not more than 3 angular minutes.