УДК 681.513.3

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ КООРДИНАТ ОБЪЕКТА В СИСТЕМЕ АВТОНОМНОЙ НАВИГАЦИИ ПО ОПТИЧЕСКИМ МЕТКАМ

А. И. Калинкин, магистрант кафедры РТС РГРТУ; san_mozart@mail.ru
В. И. Кошелев, заведующий кафедрой РТС РГРТУ, д.т.н., профессор; koshelev.v.i@rsreu.ru
И. С. Холопов, к.т.н., доцент кафедры РТС РГРТУ; kholopov.i.s@rsreu.ru

Цель работы *– исследование погрешности оценивания декартовых и угловых координат объекта с реперными светоизлучателями/светоотражателями различной геометрической конфигурации, наблюдаемыми одной откалиброванной камерой. Показано, что при решении задачи Perspective-4-Point для оценивания декартовых координат объекта предпочтительнее размещение четырех реперных излучателей в виде ортоцентрического тетраэдра с основанием в форме правильного треугольника, а для оценивания угловых координат – в виде кластеров, используемых в системах автоматической стыковки.*

Ключевые слова: *алгоритмы PnP, кластер, SVD-разложение, аффинное преобразование, матрица поворота, углы Эйлера, геометрический фактор.*

DOI: 10.21667/1995-4565-2016-58-4-10-17

Введение

Трехмерная (3D) реконструкция объектов по их видеоизображениям является актуальной задачей технического зрения [1, 2] и решается в системах дополненной и виртуальной реальности [3-5], системах целеуказания [6, 7], медицинских приложениях [8], в дистанционной диагностике поверхностей [9] и инфраструктурных объектов [10], для контроля местоположения беспилотных летательных аппаратов [11] и др. Частным случаем задачи 3D реконструкции является определение координат подвижных объектов по изображениям нанесенных на их поверхность светоизлучающих либо светоотражающих реперов [5 7, 12]. Применение реперных излучателей [3 8, 12] или систем подсвета [1, 9, 13] является альтернативой наиболее универсальным алгоритмам 3D реконструкции, основанным на поиске особых точек [14], которые, однако, имеют низкую эффективность при наблюдении малоконтрастных и однородных объектов и/или в условиях низкой освещенности.

Геометрическая постановка задачи

Геометрические построения для решения задачи трехмерной реконструкции по совокупности реперных излучателей с априорной известной конфигурацией (в [7] для обозначения множества реперов используется термин «кластер») приведены на рисунке 1. Связь пространственных однородных 3D-координат n реперных точек объекта $\mathbf{M}_{одн i} = [X_i, Y_i, Z_i, 1]^{\mathrm{T}}$, $i = \overline{1,n}$, в системе координат камеры (СКК) OXYZ с фокусным расстоянием объектива f и однородными пиксельными координатами их образов в плоскости изображения $\mathbf{m}_i = [u_i, v_i, 1]^{\mathrm{T}}$ при использовании математической модели проективной камеры определяется матрицей проекции $\mathbf{P}$ [14]:

$$\mathbf{m}_i = w_i \mathbf{P} \mathbf{M}_{одн i}, \qquad (1)$$

где $w_i = \mathbf{P}^{<3>} \mathbf{M}_{одн i}$ – масштабный коэффициент, а символ $^{<3>}$ обозначает третью строку матрицы.

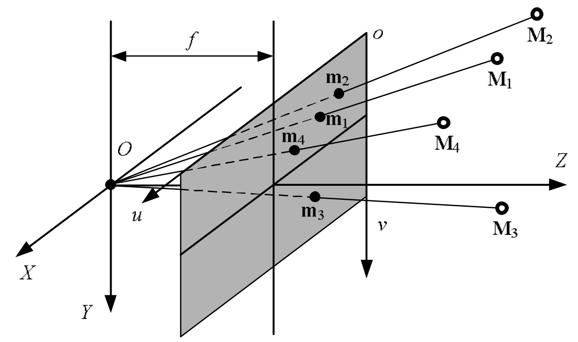

Рисунок 1 – Геометрическая постановка задачи

При отсутствии дисторсионных искажений матрица $\mathbf{P}$ представляется как произведение матрицы внутренних параметров камеры $\mathbf{K}$ и матрицы размерности 3x4, составленной из матрицы поворота СКК относительно внешней системы координат $\mathbf{R}$ и пристыкованного к ней справа вектора-столбца переноса (трансляции) начала СКК во внешнюю систему координат $\mathbf{t}$:

$$\mathbf{P}=\mathbf{K}[\mathbf{R}\,|\,\mathbf{t}]. \qquad (2)$$

При использовании СКК камеры в качестве основной $\mathbf{R}=\mathbf{I}$, $\mathbf{t}=\mathbf{0}$, поэтому (2) представимо в виде:

$$\mathbf{P}=[\mathbf{K}\,|\,\mathbf{0}],$$

где $\mathbf{I}$ – единичная матрица, $\mathbf{0}$ = [0, 0, 0]T.

Алгоритмы *P4P*

При компенсации дисторсионных искажений, характерных для объектива реальной камеры, решение задачи восстановления 3D-координат точек $\mathbf{M}_i=[X_i,Y_i,Z_i]^{\mathrm{T}}$ по их изображениям $\mathbf{m}_i$ (рисунок 2), $i=\overline{1,n}$, $n\geq 3$, обеспечивают алгоритмы Perspective-*n*-Point (*PnP*) [14]. Однозначное решение задачи 3D реконструкции существует [15] для $n\geq 6$ произвольно расположенных реперов и для $n=4$ реперов, лежащих в одной плоскости, если на одной прямой лежат не более чем два из них. Для $n=4$ не лежащих в одной плоскости реперов существует в общем случае [16] до $p=5$ решений задачи P4P с неотрицательной координатой Z для всех реперов (наиболее распространенной ситуацией является наличие $p=2$ решений [15]).

Идея алгоритмов *P4P* основана на решении системы из шести нелинейных уравнений:

$$\begin{gathered}
s_1^{\,2}+s_2^{\,2}-2\cos\alpha_{12}s_1s_2=R_{12}^{\,2},\\
s_1^{\,2}+s_3^{\,2}-2\cos\alpha_{13}s_1s_3=R_{13}^{\,2},\\
s_2^{\,2}+s_3^{\,2}-2\cos\alpha_{23}s_2s_3=R_{23}^{\,2},\\
s_1^{\,2}+s_4^{\,2}-2\cos\alpha_{14}s_1s_4=R_{14}^{\,2},\\
s_2^{\,2}+s_4^{\,2}-2\cos\alpha_{24}s_2s_4=R_{24}^{\,2},\\
s_3^{\,2}+s_4^{\,2}-2\cos\alpha_{34}s_3s_4=R_{34}^{\,2}.
\end{gathered} \qquad (3)$$

В системе (3) символами α_{ij} обозначены углы между векторами, проведенными из начала СКК в точки $\mathbf{M}_i$ и $\mathbf{M}_j$, s_i – декартово расстояние от начала СКК до точки $\mathbf{M}_i$ (если СКК на рисунке 1 принята за основную, то $s_i=\|\mathbf{M}_i\|$), $\cos\alpha_{ij}=\mathbf{m}_i\mathbf{m}_j/[\|\mathbf{m}_i\|\|\mathbf{m}_j\|]$, $R_{ij}=\|\mathbf{M}_{0i}-\mathbf{M}_{0j}\|$, $\mathbf{M}_{0i}=[X_{0i},Y_{0i},Z_{0i},1]^{\mathrm{T}}$ – априорно известные однородные 3D-координаты реперных точек 1-4 в системе координат кластера, i, $j=\overline{1,4}$, $i\neq j$, $\|\cdot\|$ – два-норма вектора.

Для поиска решений задачи *P4P* первоначально решается задача *P3P* [17-20] для комбинаций реперов 1-2-3, 1-2-4 и 1-3-4. Далее для *p* найденных решений задачи *P3P* относительно расстояния s_1 по уравнениям 1, 2 и 4 системы (3) находятся возможные значения расстояний $s_2^{(p)}-s_4^{(p)}$. Затем по известным расстояниям $s_i^{(p)}$, $j=\overline{1,4}$, в соответствии с геометрическими построениями рисунка 1 восстанавливаются пространственные координаты реперов $\mathbf{M}_i^{(p)}$:

$$\mathbf{M}_i^{(p)}=s_i^{(p)}[u_{нi},v_{нi},\,1]^{\mathrm{T}}/\|\mathbf{m}_{нi}\|, \qquad (4)$$

где вектор нормированных однородных координат $\mathbf{m}_{нi}=\mathbf{K}^{-1}\mathbf{m}_i$, из которых исключаются p^* решений, для которых Z-координата $\mathbf{M}_i^{(p)}$ меньше фокусного расстояния *f*, поскольку по постановке задачи *P4P* (рисунок 1) все реперы кластера должны располагаться перед камерой. Из оставшихся $(p-p^*)$ решений выбирается тот набор $\mathbf{M}_i^{(p)}$, который минимизирует либо два-норму вектора $\mathbf{\Delta}^{(p)}$,

$$\min\|\mathbf{\Delta}^{(k)},\ k=\overline{1,(p-p^*)},$$

$$\begin{gathered}
\mathbf{\Delta}^{(k)}=[\|\mathbf{M}_1^{(k)}-\mathbf{M}_2^{(k)}\|,\|\mathbf{M}_1^{(k)}-\mathbf{M}_3^{(k)}\|,\|\mathbf{M}_2^{(k)}-\mathbf{M}_3^{(k)}\|,\\
\|\mathbf{M}_1^{(k)}-\mathbf{M}_4^{(k)}\|,\|\mathbf{M}_2^{(k)}-\mathbf{M}_4^{(k)}\|,\|\mathbf{M}_3^{(k)}-\mathbf{M}_4^{(k)}\|]^{\mathrm{T}}-\\
-[R_{12},R_{13},R_{23},R_{14},R_{24},R_{34}]^{\mathrm{T}},
\end{gathered}$$

либо квадрат два-нормы ошибки репроекции:

$$\min_k\sum_{i=1}^{4}\left\|\mathbf{m}_i-\mathbf{P}_{3\times4}\mathbf{M}_{\text{одн}i}^{\ (k)}\right\|^2 \qquad (5)$$

Дальнейшее уточнение координат $\mathbf{M}_i$, $i=\overline{1,4}$, может выполняться с использованием нелинейных алгоритмов Гаусса – Ньютона [21] или Левенберга – Марквардта [22].

В работе для оценивания 3D-координат реперов использовались аналитические выражения источника [23], где задача *P4P* решается с использованием аффинно инвариантных барицентрических координат Мёбиуса, что позволяет повысить вероятность правильного выбора единственного решения задачи *P4P*:

$$\mathbf{M}_{0однс}=\lambda_1\mathbf{M}_{0одн1}+\lambda_2\mathbf{M}_{0одн2}+\lambda_3\mathbf{M}_{0одн3}+\lambda_4\mathbf{M}_{0одн4}, \qquad (6)$$

где $\mathbf{M}_{0однс}$ – однородные координаты точки, из которой наблюдаются реперы с априорно известными однородными координатами $\mathbf{M}_{0одн1}$, а символ «0» обозначает координаты точки в системе координат реперного кластера. Для барицентрических координат λ_i по определению справедливо равенство:

$$\lambda_1+\lambda_2+\lambda_3+\lambda_4=1.$$

В [23] приводится доказательство справедливости формул для λ_i применительно к решению задачи *P4P*:

$$\lambda_1=\sqrt{1+2c_{23}c_{24}c_{34}-(c_{23}^{\,2}+c_{24}^{\,2}+c_{34}^{\,2})},\ \delta/s_1,$$

$$\lambda_2=\pm\sqrt{1+2c_{13}c_{14}c_{34}-(c_{13}^{\,2}+c_{14}^{\,2}+c_{14}^{\,2})},\ \delta/s_2,$$

 ISSN 1995-4565. Вестник РГРТУ. 2016. № 58.

$$\lambda_3 = \pm\sqrt{1+2c_{12}c_{14}c_{24}-(c_{12}{}^2+c_{14}{}^2+c_{24}{}^2)},\ \delta/s_3 \quad (7)$$

$$\lambda_4 = \pm\sqrt{1+2c_{12}c_{13}c_{23}-(c_{12}{}^2+c_{13}{}^2+c_{23}{}^2)},\ \delta/s_4$$

$$\delta = s_1s_2s_3s_4/\Delta, \Delta =$$

$$= \det\{\mathbf{M}_{0одн1} \,|\, \mathbf{M}_{0одн2} \,|\, \mathbf{M}_{0одн3} \,|\, \mathbf{M}_{0одн4}\},$$

где для расчета значений $s_2 - s_4$ используются уравнения 3, 5 и 6 системы (3) и вспомогательные параметры $y_3 = s_3/s_2$ и $y_4 = s_4/s_2$; значения y_3 являются корнями уравнения 4-го порядка

$$C_4y_3^4 + C_3y_3^3 + C_2y_3^2 + C_1y_3 + C_0 = 0 \quad (8)$$

с коэффициентами полинома

$$C_4 = b_{23}(b_{34}-b_{23}-b_{24})^2 - a_{34}^2b_{23}^2b_{24},$$

$$C_3 = (b_{34}-b_{23}-b_{24})[a_{24}a_{34}b_{23}^2 + 2a_{23}b_{23}(b_{34}-b_{24})] +$$

$$+a_{34}b_{23}^2b_{24}(2a_{24}-a_{23}a_{34}),$$

$$C_2 = b_{23}[a_{23}^2(b_{34}-b_{24})^2 +$$

$$+(b_{34}-b_{23}-b_{24})(b_{23}+b_{34}-b_{24})] +$$

$$+a_{23}a_{24}a_{34}b_{23}^2(b_{24}+b_{34}) + a_{34}^2b_{23}^2(b_{23}-b_{24}) +$$

$$+a_{24}^2b_{23}^2(b_{23}-b_{24}),$$

$$C_1 = 2a_{23}b_{23}(b_{34}-b_{24})(b_{23}+b_{34}-b_{24}) +$$

$$+a_{24}a_{34}b_{23}^2(b_{34}+b_{24}-b_{23}) - a_{23}a_{24}^2b_{23}^2b_{34},$$

$$y_4 = [(b_{34}-b_{23}-b_{24})y_3^2 + a_{23}(b_{34}-b_{24})y_3 +$$

$$+b_{23}+b_{34}-b_{24}](a_{34}b_{23}y_3 - a_{24}b_{23})^{-1},$$

$$s_2 = \sqrt{b_{23}(1+y_3^2+a_{23}y_3)^{-1}},\ s_3 = s_2y_3,\ s_4 = s_2y_4;$$

значения s_1 являются корнями уравнения

$$B_2s_1{}^2 + B_1s_1 + B_0 = 0, \quad (9)$$

$$B_2 = 3,\ B_1 = a_{12}s_2 + a_{13}s_3 + a_{14}s_4,$$

$$B_0 = s_2{}^2 + s_3{}^2 + s_4{}^2 - (b_{23}+b_{24}+b_{34}),$$

$$c_{ij} = \cos\alpha_{ij},\ b_{ij} = R_{ij}{}^2,\ a_{ij} = -2c_{ij}, i,j=\overline{1,4},\ i \neq j.$$

Наборам действительных неотрицательных значений $\{s_1{}^{(p)}, s_2{}^{(p)}, s_3{}^{(p)}, s_4{}^{(p)}\}$, $p \leq 4$, ставятся в соответствие наборы барицентрических координат $\lambda_i{}^{(p)}$, $i=\overline{1,4}$, по (7). Из множества p возможных наборов действительных значений $\lambda_i{}^{(p)}$, полученных по (7)–(9), выбирается тот, при котором минимизируется

$$\min_p \left|\lambda_1{}^{(p)} + \lambda_2{}^{(p)} + \lambda_3{}^{(p)} + \lambda_4{}^{(p)} - 1\right|,$$

после чего в системе координат кластера определяются однородные координаты начала СКК по (8) и находятся расстояния s_i, $i=\overline{1,4}$, для подстановки в (4).

Поскольку из-за погрешностей при измерении пиксельных координат центров свечения реперов и расстояний R_{ij} корни уравнения (9) $s_1{}^{(k)}$ могут иметь малую (порядка $10^{-6}...10^{-4}$) мнимую составляющую, то в качестве решения в таких случаях принимается действительная часть комплексного числа – $\mathrm{Re}\{s_1{}^{(k)}\}$.

В [24] показано, что решение задачи *P4P* с использованием барицентрических координат (6) также может быть сведено к решению СЛАУ из $2n$ линейных алгебраических уравнений с 12 неизвестными (3D-координатами точек $\mathbf{M}_{0i}$, $i=\overline{1,4}$) путем нахождения собственных векторов, соответствующих 1, 2, 3 или 4 минимальным собственным числам матрицы коэффициентов СЛАУ, и выбора единственного решения по критерию (5).

Типы реперных кластеров

Погрешность оценивания координат в алгоритмах *P4P*, как и погрешность оценивания координат в спутниковых радионавигационных системах (СРНС) [25], зависит от взаимного пространственного положения опорных точек, т.е. для систем оптической навигации по аналогии с СРНС можно ввести понятие геометрического фактора γ – коэффициента, показывающего увеличение погрешности по сравнению с оптимальным расположением опорных точек: навигационных спутников для СРНС и реперных излучателей – для оптических навигационных систем (ОНС) соответственно.

Если максимальное расстояние между реперами кластера ОНС с априорно известной геометрической конфигурацией фиксировано, то наименьшая погрешность оценивания декартовых и угловых координат объекта обеспечивается при использовании кластера в форме правильного тетраэдра. Поскольку при нанесении таких кластеров на поверхность объектов, координаты которых предполагается оценивать, наличие репера в вершине тетраэдра приводит к увеличению габаритных размеров объекта (а для легких малогабаритных объектов – еще и к смещению центра тяжести), это вносит ограничение на их практическое применение. Поэтому на практике применяют кластеры с меньшей высотой вершины тетраэдра относительно плоскости основания.

В системах автоматической стыковки *Advanced Video Guidance Sensor* (AVGS) [26] и *Next Generation Advanced Video Guidance Sensor* (NGAVGS) [27] используется кластер в форме тетраэдра из 4-х светоотражателей, в котором репер вершины 4 проецируется на грань основания 1-2 (рисунок 2, а), причем его высота *H* меньше, чем длина ребер основания тетраэдра. Такое расположение позволяет в начальный момент времени выполнить автоматическую сортировку изображений реперов (поиск соответствий $\mathbf{m}_i \leftrightarrow \mathbf{M}_i$, $i=\overline{1,4}$) при произвольной их ориентации.

В системах дополненной и виртуальной реальности [4, 5], а также в системах целеуказания [7] чаще используется иной тип реперных кластеров – с таким расположением излучателей (рисунок 2, *б*), при котором вершина 4 проецируется в точку центра масс треугольника основания 123. При этом полагают, что в начальный момент времени ориентация тетраэдра всегда такова, что позволяет по полученному изображению однозначно идентифицировать его реперные точки: для рисунка 2, *б* можно условно выделить «центральный» 4, «верхний» 3, «левый» 1 и «правый» 2 реперы.

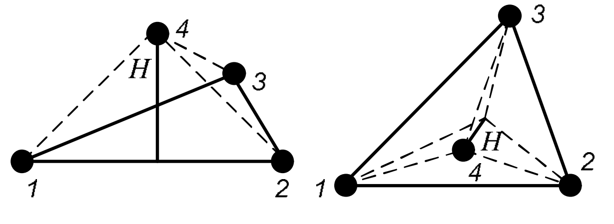

Рисунок 2 – Варианты взаимного расположения реперов в кластере:
а – кластер систем AVGS и NGAVGS;
б – кластер в форме ортоцентрического тетраэдра

После первоначальной оценки 3D-координат реперов автоматический поиск соответствий выполняется по критерию минимума ошибки репроекции (5) [12, 13, 15].

Оценка угловых и декартовых координат объекта

По априорно известным 3D-координатам $\mathbf{M}_{0i} = [X_{0i}, Y_{0i}, Z_{0i}]^{\mathrm{T}}$ и оцененным по алгоритму *P*4*P* координатам $\mathbf{M}_i = [X_i, Y_i, Z_i]^{\mathrm{T}}$, $i = \overline{1,4}$, можно оценить матрицу поворота **R** и вектор трансляции **t**, используя критерий минимума квадрата ошибки результата аффинного преобразования [28, 29]. В работе для оценивания **R** и **t** использовался подход [29], основанный на использовании SVD-разложения, согласно которому

$$\mathbf{R} = \mathbf{U}\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \det(\mathbf{U}\mathbf{V}^{\mathrm{T}}) \end{pmatrix}\mathbf{V}^{\mathrm{T}}, \qquad (10)$$

$$\mathbf{t} = \overline{\mathbf{M}}_0 - \mathbf{R}\overline{\mathbf{M}},$$

где $\overline{\mathbf{M}}_0 = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\mathbf{M}_{0i}$, $\overline{\mathbf{M}} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\mathbf{M}_i$, а матрицы **U** и **V** получаются в результате SVD-разложения матрицы $\mathbf{H} = \sum_{i=1}^{n}\mathbf{M}_{0ci}\mathbf{M}_{ci}^{\mathrm{T}}$:

$$\mathbf{H} = \mathbf{U}\mathbf{S}\mathbf{V}^{\mathrm{T}},$$

где $\mathbf{M}_{0ci} = \mathbf{M}_{0i} - \overline{\mathbf{M}}_0$, $\mathbf{M}_{ci} = \mathbf{M}_i - \overline{\mathbf{M}}$ – центрированные 3D-координаты.

Умножение на вспомогательную диагональную матрицу в (10) необходимо для того, чтобы матрица **R** являлась матрицей поворота и, в соответствии с ее свойствами, имела определитель $\det\{\mathbf{R}\} = 1$ (матрица $\mathbf{U}\mathbf{V}^{\mathrm{T}}$ с определителем $|\mathbf{U}\mathbf{V}^{\mathrm{T}}| = -1$ [28, 29] описывает, помимо вращения, не аффинное преобразование зеркального отражения относительно оси *Z*, т.е. не является матрицей поворота по определению). Из матрицы поворота **R** могут быть извлечены углы Эйлера:

$$\varphi = \mathrm{atan2}(-r_{31}, r_{11}),$$
$$\theta = \arcsin(r_{21}),$$
$$\psi = \mathrm{atan2}(-r_{23}, r_{22}),$$

где φ, θ и ψ – соответственно курс, тангаж и крен, а r_{ij}, $i, j = \overline{1,3}$, – элементы матрицы **R**. В особых точках ($\theta = \pm\pi/2$) курс вычисляется по формуле:

$$\varphi = \mathrm{atan2}(-r_{13}, r_{33}).$$

Результаты модельного эксперимента

Для исследования погрешности оценивания угловых и пространственных координат в пакете Mathcad была составлена математическая модель, в которой задавались геометрические размеры кластера (точки $\mathbf{M}_{0i}$), матрица внутренних параметров камеры **K**, случайная ошибка оценивания пиксельных координат центра светового пятна репера на изображении $\boldsymbol{\varepsilon}_{uv} = [\delta u, \delta v]^{\mathrm{T}}$, где δu и δv – ошибки определения пиксельных координат по горизонтали и вертикали соответственно, и аффинные преобразования над кластером (поворот и перенос), определяемые соответственно матрицей поворота $\mathbf{R}_0$ и вектором трансляции $\mathbf{t}_0$.

Результаты моделирования для камеры с матрицей внутренних параметров $\mathbf{K} = \begin{bmatrix} 1920 & 0 & 960 \\ 0 & 1080 & 540 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$, приведенные на рисунках 3–5, получены путем усреднения результатов $N = 100$ статистически независимых экспериментов для кластера в форме правильного тетраэдра с длиной ребра $L = 5$ дм (далее – кластер 1), кластера с основанием в форме правильного треугольника (рисунок 2, а) с длиной стороны $L = 5$ дм и высотой $H = 0{,}25L$ (далее – кластер 2) и ортоцентрического тетраэдра (рисунок 2, б) с основанием в виде правильного треугольника с длиной стороны $L = 5$ дм и высотой центрального репера $H = 0{,}25L$ (далее – кластер 3). Компоненты вектора $\boldsymbol{\varepsilon}_{uv}$ моделировались как случайные величины с равномерным законом распределения на интервале $\pm\Delta\varepsilon$. Дисторсия объектива камеры в модели не учитывалась (предполагалась скомпенсированной). Нелинейная оптимизация [21, 22] для уточнения 3D-координат, рассчитанных по (3)-(9), не использовалась.

На рисунке 3 показана зависимость абсолютной погрешности оценивания расстояния Δd до центра масс кластеров 1-3 в зависимости от линейного расстояния между камерой и кластером d. Моделирование выполнено для значения $\Delta\varepsilon = 0{,}5$ пикселя (как показано в [22], для объектива реальной камеры с шириной поля зрения менее 90° указанная ошибка коррекции дисторсии характерна более чем для 80 % пикселей кадра). Как следует из результатов моделирования, геометрический фактор на расстояниях $d < (20...30)L$ для кластеров 2 и 3 (абсолютная погрешность оценивания дальности до центра масс кластера 1 принята за эталонную) составляет $\gamma_d = 1{,}1...1{,}25$ $\gamma_d = 1{,}2...1{,}8$. В то же время на больших расстояниях ($d > 30L$) для кластера 3 наблюдается наибольшая дисперсия оценки дальности из-за большей вероятности взаимного перепутывания пиксельных координат реперов вершины и основания.

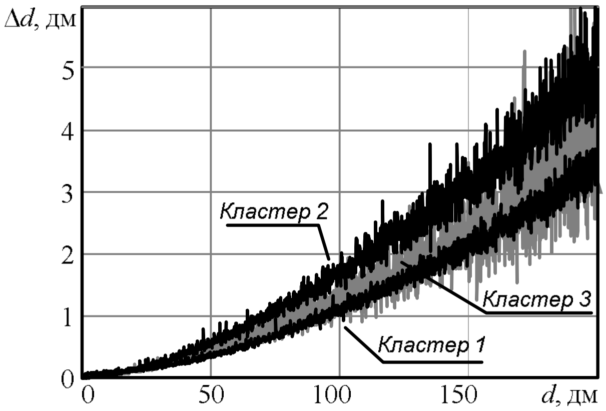

Рисунок 3 – Абсолютная ошибка оценивания дальности до центра кластера

На рисунке 4 приведена абсолютная погрешность суммарной ошибки оценивания угловых координат кластера $\Delta\beta$ в зависимости от расстояния d до его центра масс: геометрические факторы для кластеров 2 и 3 составляют соответственно $\gamma_\beta \approx 1{,}5$ и $\gamma_\beta = 2...2{,}5$. Из полученных зависимостей видно, что оценка угловых координат с погрешностью порядка единиц градусов возможна только при $d < (3...5)L$, что, как правило, выполняется для систем целеуказания и дополненной реальности [3-7]. С увеличением высоты H погрешность $\Delta\beta$ для кластеров 2 и 3 стремится к погрешности, обеспечиваемой кластером 1, однако это приводит к необходимости увеличения габаритных размеров объекта-носителя кластера.

Зависимость погрешности оценивания дальности до объекта Δd, удаленного на $d = 20L$, по кластеру 3 от погрешности оценивания пиксельных координат центров свечения его реперов $\Delta\varepsilon$ имеет нелинейный характер (рисунок 5).

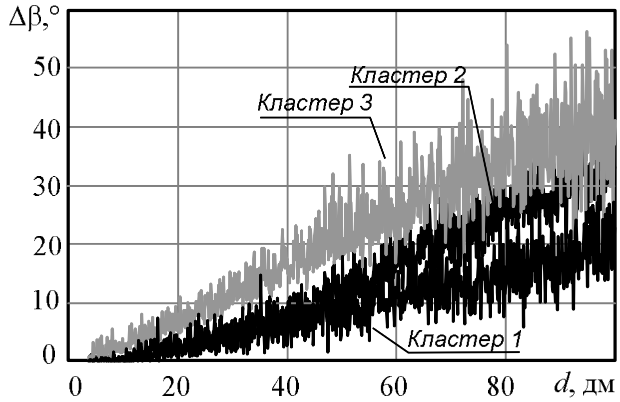

Рисунок 4 – Сумма абсолютных ошибок оценивания угловых координат кластера

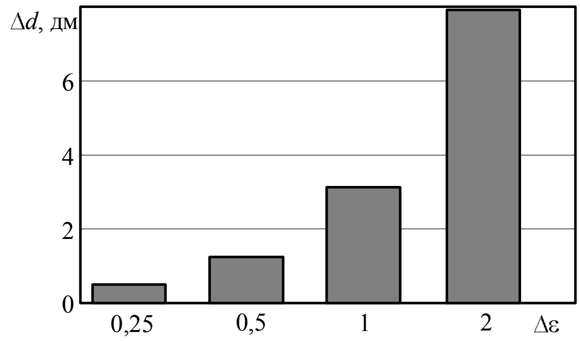

Рисунок 5 – Зависимость абсолютной ошибки оценивания дальности от погрешности оценивания пиксельных координат центра репера

Из результатов моделирования следует, что для камер с разрешением кадра не более 2 Мп на дальностях $d < 20L$ и при погрешности оценивания пиксельных координат реперов $\Delta\varepsilon \le 0{,}5$ пикселя применение алгоритмов *P4P* (без процедур нелинейной оптимизации) позволяет оценивать декартовы координаты объекта с погрешностью не более единиц сантиметров.

Заключение

Сравнительный анализ реперных кластеров из четырех светоизлучающих элементов показал, что при автономной навигации по реперным меткам с использованием камеры разрешением 2 Мп и алгоритма *P4P* для оценки дальности предпочтительным является использование кластера в форме ортоцентрического тетраэдра (геометрический фактор $\gamma_d \le 1{,}25$), а для оценки угловых координат – кластер, используемый в системах стыковки AVGS (геометрический фактор $\gamma_\beta \leq 1{,}5$).

Проведенный анализ позволил оценить дальности (относительно геометрических размеров кластера), на которых оптические системы локальной навигации подвижных объектов, в том числе беспилотных наземных транспортных средств, обеспечивают погрешность оценивания декартовых координат порядка единиц сантиметров: $d < (10...20)L$. Поэтому установка кластеров со светоизлучателями, например, на инфраструктурных объектах по пути следования транспортного средства с применением средств *Vehicle-to-Infrastructure* (*V2I*) [30] для их включения/отключения может являться одним из способов решения задач автоматической парковки и маневрирования крупногабаритных автономных автомобилей в условиях ограниченного пространства и высотной застройки.

Библиографический список

1. **Dvorak R., Drahansky M., Orsag F.** Object Surface Reconstruction from One Camera System // International Journal of Multimedia and Ubiquitous Engineering. 2010. Vol. 5, No. 2. P. 27-37.

2. **Pollefeys M., Nister D., Frahm J.-M. at al.** Detailed Real-Time Urban 3D Reconstruction from Video // International Journal of Computer Vision. 2008. Vol. 78, Is. 2-3. P. 143-167.

3. **Auer T., Pinz A**. The Integration of Optical and Magnetic Tracking for Multi-User Augmented Reality // Computers and Graphics. 1999. Vol. 23. P. 805-808.

4. Handbook of Augmented Reality / edited by B. Furth. New York: Springer, 2011. 745 p.

5. **Azuma R., Bishop G.** Improving Static and Dynamic Registration in an Optical See-through HMD // SIGGRAPH'94: Proc. of the 21th annual conference on Computer graphics and interactive techniques. New York: ACM, 1994. P. 197-204.

6. **Алпатов Б. А., Балашов О. Е., Степашкин А. И.** Измерение угловых координат линии визирования в оптических системах позиционирования // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2013. № 3 (45). С. 19-23.

7. **Larsson J., Blömqvist T.** The Cobra Helmet Mounted Display System for Gripen // Head- and Helmet-Mounted Displays XIII: Design and Applications: Proc. of SPIE, Vol. 6955. Orlando, 2008. P. 1-9.

8. Image-Guided Interventions: Technology and Applications / edited by T. Peters and K. Cleary. New York: Springer Science+Business Media, 2008. 557 p.

9. **Rövid A.** Machine Vision-based Measurement System for Vehicle Body Inspection // Acta Polytechnica Hungarica. 2013. Vol. 10, No. 5. P. 145-158.

10. Computer Vision – ACCV 2014 Workshops. Part III / edited by C. V. Javahar and S. Shan. Singapore: Springer, 2014. 715 p.

11. Vision-Based Pose Estimation of Quadcopters using UKFs. Режим доступа: http://www.mit.edu/~shayegan/files/vision_based_pose_estimation_of_quads.pdf (дата обращения: 05.03.16).

12. **Зейналов Р. Ш., Якубенко А. А., Конушин А. С.** Оценка траектории движения объекта с использованием инфракрасных маркеров: материалы 14-й междунар. конф. «Цифровая обработка сигналов и ее применение – DSPA-12», Т. 2. М.: ИПУ РАН, 2012. С. 267-271.

13. **Саблина В. А., Беляева К. А.** Отслеживание точек лазерного подсвета на последовательности изображений калибровочного объекта // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2015. № 2 (54). С. 39-44.

14. **Prince S.** Computer vision: models, learning and inference. Cambridge: Cambridge University Press, 2012. 665 p.

15. **Fischler M. A., Bolles R. C.** Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography // Communications of the ACM. 1981. Vol. 24, No. 6. P. 381-395.

16. **Hu Z. Y., Wu F. C.** A Note on the Number of Solutions of the Noncoplanar P4P Problem // IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 2002. Vol. 24, Is. 4. P. 550-555.

17. **Haralick R. M., Lee C.-N., Ottenberg K., Nölle M.** Review and analysis of solutions of the three point perspective pose estimation problem // International Journal of Computer Vision. 1994. Vol. 13, No. 3. P. 331-356.

18. **Finsterwalder S., Scheufele W.** Das Rückwätseinschneiden im Raum // Verlag Herbert Wichmann. 1937. P. 86-100.

19. **Quan L., Lan Z.** Linear N Point Camera Pose Determination // IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 1999. Vol. 21, No. 8. P. 774-780.

20. **Linnainmaa S., Harwood D., Davis L. S.** Pose Estimation of a Three-Dimensional Object Using Triangle Pairs // IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine intelligence. 1988. Vol. 10, No. 5. P. 634-647.

21. **Lowe D. G.** Three-Dimensional Object Recognition from Single Two-Dimensional Image // Artificial Intelligence. 1987. Vol. 31. P. 355-395.

22. **Кудинов И. А., Павлов О. В., Холопов И. С.** Реализация алгоритма определения пространственных координат и угловой ориентации объекта по реперным точкам, использующего информацию от одной камеры // Компьютерная оптика. 2015. Т. 39. № 3. С. 413-419.

23. **Grafarend E., Shan J.** Closed-form Solution of P4P or the Three-dimensional Resection Problem in terms of Möbius barycentric coordinates // Journal of Geodesy. 1997. Vol. 71. P. 217-231.

24. **Lepetit V., Moreno-Noguer F., Fua P.** EPnP: An Accurate O(n) Solution to the PnP Problem // International Journal of Computer Vision. 2009. Vol. 81, No. 2. P. 155-166.

25. **Бакулев П. А., Сосновский А. А.** Радионавигационные системы. М.: Радиотехника, 2005. 224 с.

26. **Howard R. T., Johnston A. S., Bryan T. C., Book M. L.** Advanced Video Guidance Sensor (AVGS) development testing // Spaceborne Sensors: Proc. of SPIE, Vol. 5418. Bellingham, 2004. P. 50-60.

27. **Bryan T. C. Howard R. T., Johnson J. E.** Next Generation Advanced Video Guidance Sensor // Aerospace Conference: Proc. of IEEE-AIAA. Big Sky, 2008. P. 1-8.

28. **Lorusso A., Eggert D., Fisher R.** A Comparison of Four Algorithms for Estimating 3-D Rigid Transformations: Proc. of the 4th British Machine Vision Conference. Birmingham, 1995. P. 237-246.

29. **Umeyama S.** Least-Squares Estimation of Transformation Parameters Between Two Point Patterns // IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 1991. Vol. 13, Is. 4. P. 376-380.

30. **McNamara D. A.** Michigan's Connected Vehicle Test Bed // Mission critical. 2013. Vol. 3, No. 2. P. 22-24.

UDC 681.513.3

THE RESEARCH OF OBJECT COORDINATE MEASUREMENT ACCURACY BY THE OPTICAL MARKS IN AUTONOMOUS NAVIGATION SYSTEM

A. I. Kalinkin, master, RSREU, Ryazan; san_mozart@mail.ru
V. I. Koshelev, PhD (technical sciences), full professor, Head of the Department, RSREU, Ryazan; koshelev.v.i@rsreu.ru
I. S. Kholopov, PhD (technical sciences), associate professor, RSREU, Ryazan; kholopov.i.s@rsreu.ru

The aim of the work *is the investigation of the potential achievable estimating error of the object coordinates on the information from a single calibrated camera for different configurations of reference light emitters, placed on the object. It is shown that solving Perspective-4-Point problem for estimating object Cartesian coordinates is preferable to placing four reference optical marks in the form of an orthocentrical tetrahedron with a base in the shape of an equilateral triangle, and for estimation of the angular coordinates – in the form of clusters, used in automatic docking systems.*

Key words: *PnP algorithms, cluster, SVD-decomposition, affine transformation, rotation matrix, Euler angles, geometric dilution of precision.*

DOI: 10.21667/1995-4565-2016-58-4-10-17

References

1. **Dvorak R., Drahansky M., Orsag F.** Object Surface Reconstruction from One Camera System. International Journal of Multimedia and Ubiquitous Engineering., 2010. Vol. 5, no. 2. pp. 27-37.

2. **Pollefeys M., Nister D., Frahm J.-M. at al.** Detailed Real-Time Urban 3D Reconstruction from Video. International Journal of Computer Vision, 2008. Vol. 78, Is. 2-3, pp. 143-167.

3. **Auer T., Pinz A**. The Integration of Optical and Magnetic Tracking for Multi-User Augmented Reality. Computers and Graphics, 1999. Vol. 23. pp. 805-808.

4. Handbook of Augmented Reality / edited by B. Furth, New York, Springer, 2011, 745 p.

5. **Azuma R., Bishop G.** Improving Static and Dynamic Registration in an Optical See-through HMD: in SIGGRAPH'94 Proc. of the 21th annual conference on Computer graphics and interactive techniques, New York, ACM, 1994. pp. 197-204.

6. **Alpatov B. A., Balashov O. E., Stepashkin A. I.** Izmerenie uglovykh koordinat linii vizirovanija v opticheskikh sistemakh pozitsionirovanija. Vestnik Rjazanskogo gosudarstvennogo radiotehnicheskogo universiteta, 2013, no. 45, pp. 19-23 (in Russian).

7. **Larsson J., Blömqvist T.** The Cobra Helmet Mounted Display System for Gripen: in Proc of SPIE Head- and Helmet-Mounted Displays XIII: Design and Applications, Orlando, 2008. pp. 1-9.

8. Image-Guided Interventions: Technology and Applications / edited by T. Peters and K. Cleary, New York, Springer Science+Business Media, 2008, 557 p.

9. **Rövid A.** Machine Vision-based Measurement System for Vehicle Body Inspection. Acta Polytechnica Hungarica. 2013. Vol. 10, no. 5. pp. 145-158.

10. Computer Vision – ACCV 2014 Workshops. Part III / edited by C. V. Javahar and S. Shan, Singapore, Springer, 2014, 715 p.

11. Vision-Based Pose Estimation of Quadcopters using UKFs. URL: http://www.mit.edu/~shayegan/files/vision_based_pose_ estimation_of_quads.pdf (time of request: 05.03.16).

12. **Zeynalov R. Sh., Yakubenko A. A., Konushin A. S.** Otsenka traektorii dvijeniya ob'ekta s ispol'zovaniem infrakrasnyh markerov: matirealy 14th mezhdunarodnoy konferentsii "Tsifrovaya obrabotka signalov i ee primenenie – DSPA-12", Vol. 2, Moscow, IPU RAN, 2012, pp. 267-271 (in Russian).

13. **Sablina V. A., Belyaeva K. A.** Otslezhivanie tochek lazernogo podsveta na posledotel'nosti izobrajeniy kalibrovochnogo ob'ekta. Vestnik Rjazanskogo gosudarstvennogo radiotehnicheskogo universiteta. 2015, no. 54, pp. 39-44 (in Russian).

14. **Prince S.** Computer vision: models, learning and inference, Cambridge, Cambridge University Press, 2012, 665 p.

15. **Fischler M. A., Bolles R. C.** Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography. Communications of the ACM, 1981, Vol. 24, no. 6, pp. 381-395.

16. **Hu Z. Y., Wu F. C.** A Note on the Number of Solutions of the Noncoplanar P4P Problem. IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2002, Vol. 24, Is. 4, pp. 550-555.

17. **Haralick R. M., Lee C.-N., Ottenberg K., Nölle M.** Review and analysis of solutions of the three point perspective pose estimation problem. International Journal of Computer Vision, 1994. Vol. 13, no. 3, pp. 331-356.

18. **Finsterwalder S., Scheufele W.** Das Rückwätseinschneiden im Raum. Verlag Herbert Wichmann, 1937, pp. 86-100.

19. **Quan L., Lan Z.** Linear N Point Camera Pose Determination. IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1999, Vol. 21, no. 8, pp. 774-780.

20. **Linnainmaa S., Harwood D., Davis L. S.** Pose Estimation of a Three-Dimensional Object Using Triangle Pairs. IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine intelligence, 1988, Vol. 10, no. 5, pp. 634-647.

21. **Lowe D. G.** Three-Dimensional Object Recognition from Single Two-Dimensional Image. Artificial Intelligence, 1987, Vol. 31, pp. 355-395.

22. **Kudinov I. A., Pavlov O. V., Kholopov I. S.** Realizatsija algoritma opredelenija prostranstvennykh koordinat i uglovoy orientatsii ob'ekta po repernym tochkam, ispolzujuschego informatsiju ot odnoy kamery. Kompjuternaja optika, 2015, Vol. 39, no. 3, pp. 413-419 (in Russian).

23. **Grafarend E., Shan J.** Closed-form Solution of P4P or the Three-dimensional Resection Problem in terms of Möbius barycentric coordinates. Journal of Geodesy, 1997, Vol. 71, pp. 217-231.

24. **Lepetit V., Moreno-Noguer F., Fua P.** EPnP: An Accurate O(n) Solution to the PnP Problem. International Journal of Computer Vision, 2009, Vol. 81, no. 2, pp. 155-166.

25. **Bakulev P. A., Sosnovskiy A. A.** Radionavigatsionnye sistemy, Moscow, Radiotekhnika, 2005, 224 p. (in Russian).

26. **Howard R. T., Johnston A. S., Bryan T. C., Book M. L.** Advanced Video Guidance Sensor (AVGS) development testing. Spaceborne Sensors: Proc. of SPIE, Vol. 5418, Bellingham, 2004, pp. 50-60.

27. **Bryan T. C. Howard R. T., Johnson J. E.** Next Generation Advanced Video Guidance Sensor. Aerospace Conference: Proc. of IEEE-AIAA, Big Sky, 2008, pp. 1-8.

28. **Lorusso A., Eggert D., Fisher R.** A Comparison of Four Algorithms for Estimating 3-D Rigid Transformations: Proc. of the 4th British Machine Vision Conference, Birmingham, 1995, pp. 237-246.

29. **Umeyama S.** Least-Squares Estimation of Transformation Parameters Between Two Point Patterns. IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1991, Vol. 13, Is. 4, pp. 376-380.

30. **McNamara D. A.** Michigan's Connected Vehicle Test Bed. Mission critical, 2013, Vol. 3, no. 2, pp. 22-24.