

УДК 528.854

В.Т. Тран, А.М. Коригов

Детектирование посадочной площадки и автоматическая посадка беспилотного летательного аппарата по её изображению

Решаются задачи для двухконтурной системы навигации и управления (СНУ) беспилотного летательного аппарата (БПЛА): детектирование (распознавание) посадочной площадки (ПП) для БПЛА с помощью сверточной нейронной сети; определение координат ПП в кадре камеры БПЛА; отслеживание ПП в кадре по каналам крена, рыскания и тангажа трёхосного карданного подвеса БПЛА; моделирование полета БПЛА в пространстве по заданной траектории и автоматической посадки БПЛА на детектированную ПП; синтез скользящего управления по позиционным и угловым координатам БПЛА. Для реализации разработанных алгоритмов решения перечисленных задач использовано программное обеспечение MATLAB SIMULINK. Созданные алгоритмы обеспечивают автоматическую посадку БПЛА на детектированную ПП.

Ключевые слова: навигация и управление, нейронная сеть, посадочная площадка, беспилотный летательный аппарат, детектирование, автоматическая посадка, моделирование.

DOI: 10.21293/1818-0442-2023-26-2-72-80

Беспилотные летательные аппараты (БПЛА) к настоящему времени имеют обширное применение в промышленности, сельском хозяйстве, транспорте, военных операциях и т.д. [1, 2]. Среди многих задач, возникающих при практическом применении БПЛА, особое место занимают задачи навигации и управления [1]. Для компенсации ошибок системы навигации и управления (СНУ) БПЛА в [3] предложена двухконтурная СНУ (рис. 1).

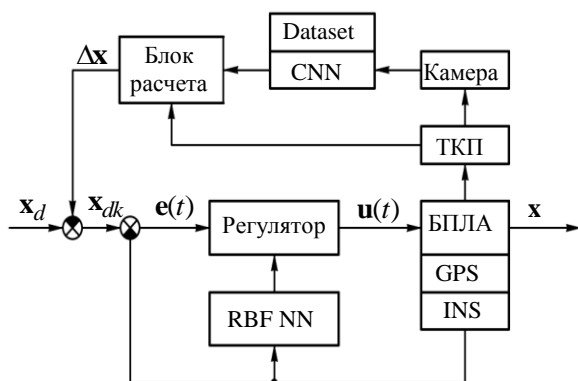


Рис. 1. Структурная схема двухконтурной СНУ БПЛА

На рис. 1 первый контур управления содержит БПЛА как объект управления, регулятор – скользящий регулятор и RBF NN – нейронную RBF-сеть. В качестве навигационных подсистем в первом контуре управления используются спутниковая навигационная система GPS и/или инерциальная навигационная система INS. Первый контур (уровень) СНУ БПЛА исследован в [4]. Дополнительный второй уровень (контур) управления представлен на рис. 1 следующими блоками: ТКП – трёхосный карданный подвес; камера (видеокамера); CNN – сверточная нейронная сеть (СНС) обеспечивает идентификацию ориентиров и создает расчетные данные (Dataset); Блок расчета определяет на основе расчетных данных из CNN и данных с ТКП рассогласование Δx фактических текущих координат БПЛА и расчетных координат БПЛА. Сигналы из Блока расчета используются в

СНУ БПЛА для коррекции траектории полета БПЛА (x). Камера наблюдения БПЛА размещается в ТКП, моделирование ТКП выполнено в [5], результаты этого моделирования используются в данной статье.

В [3] доказана возможность компенсации ошибок СНУ БПЛА нейронной сетью (НС) YOLOv2, которая детектирует (идентифицирует) ориентиры с известными координатами на земной поверхности. Результаты исследования в программной среде MATLAB доказывают, что СНС YOLOv2 работает эффективно, результаты детектирования фиксированных точек на земной поверхности имеют достаточную точность для коррекции положения БПЛА и вывода его на расчетную траекторию.

В [3] также отмечается, что возможно использование результатов проведенного исследования для решения задач автоматической посадки БПЛА. Проблема посадки БПЛА в автоматическом режиме является актуальной, так как в настоящее время посадка БПЛА выполняется в ручном и/или интерактивном режиме [1, 2] с участием наземного оператора, что сужает сферу применения и эффективность использования БПЛА.

Постановка задачи

На основе исследований, выполненных в [3–5], ставится задача разработки и исследования алгоритмов двухконтурной СНУ БПЛА для автоматической посадки БПЛА:

- алгоритма детектирования (распознавания) посадочной площадки (ПП) с помощью нейронной сети СНС (CNN);
- алгоритма определения координат ПП в кадре камеры;
- алгоритмов отслеживания ПП в кадре по каналам крена (КК), рыскания (КР) и тангажа (КТ) ТКП БПЛА;
- алгоритмов моделирования полета БПЛА в пространстве по заданной траектории и автоматической посадки БПЛА на детектированную ПП;
- алгоритмов скользящего управления по позиционным и угловым координатам БПЛА.

Разработанные алгоритмы для двухконтурной СНУ БПЛА реализуются в программной среде MATLAB SIMULINK.

Детектирование посадочной площадки

Задача детектирования (распознавания) ПП решается во втором контуре управления (рис. 1) с использованием камеры, установленной на ТКП, CNN (СНС) и блока расчета. Основная роль в процессе детектирования ПП принадлежит СНС. В настоящее время среди СНС особенно популярны СНС (CNN – Convolutional Neural Network) [3]. СНС предложены в [6, 7]. Они обладают двумерной структурой и обеспечивают обработку изображений с высокой степенью инвариантности к смещению, повороту, масштабированию и другим искажениям входных данных.

Для детектирования объектов на изображениях предпочтение отдается семейству моделей YOLO [8–10]. Это предпочтение объясняется следующим: адекватность структуры данной СНС обрабатываемым двумерным данным; связанность наслаивающихся друг на друга рецептивных полей с пространственно-зависимыми областями изображения; устойчивость СНС к аффинным и проекционным искажениям входных данных, изменению масштаба и шумам. Учитывая перечисленные достоинства этих моделей СНС, требования к навигации и управлению БПЛА и апробацию моделей YOLO [3, 8], для детектирования ПП предлагается использовать модель YOLOv2 со структурой и параметрами, исследованными в [3].

База данных для обучения СНС YOLOv2 представляет собой набор цветных RGB-изображений размером 128×128 пикселей. Набор содержит 1000 изображений для распознавания ПП. Модель СНС обучается с помощью алгоритмов trainYOLOv2-ObjectDetector [11] и stochastic gradient descent with momentum (SGDM) [12]. Скорость обучения равна 0,001, размер мини-выборки равен 5, эпоха равна 128.

СНС YOLOv2 исследована при распознавании ПП. Видеокадры ПП извлекались из видеопотока с кадровой частотой 30 FPS (Frames per Second (FPS) – количество обрабатываемых за одну секунду кадров). Из результатов детектирования ПП следует, что 128 итераций обучения модели СНС вполне достаточно для обнаружения детектируемого объекта в реальном масштабе времени, при этом среднеквадратичная ошибка мини-пакета (RMSE) [13] достигает значения 0,06, потеря мини-партии Mini-batch Loss [14] – 0,005. В результате детектирования определяются также координаты и размеры ограничительной рамки. Данные величины необходимы для расчета углов поворота ТКП, которые используются для определения координат ПП для автоматической посадки БПЛА.

Отслеживание ПП в кадре и определение координат ПП с использованием ТКП

Математическое описание и моделирование ТКП БПЛА выполнено в [5]. Используем результаты этого исследования для решения задачи определения координат ПП в кадре камеры. Структура ТКП и его координатные оси представлены на рис. 2. На рис. 2

введены следующие координатные системы: $O_Bx_By_Bz_B$ – система координат, связанная с БПЛА; $O_Ax_Ay_Az_A$ – система координат, связанная с рамкой движения КР (РДКР); $O_Rx_Ry_Rz_R$ – система координат, связанная с рамкой движения КК (РДКК); $O_Px_Py_Pz_P$ – система координат, связанная с рамкой движения КТ (РДКТ).

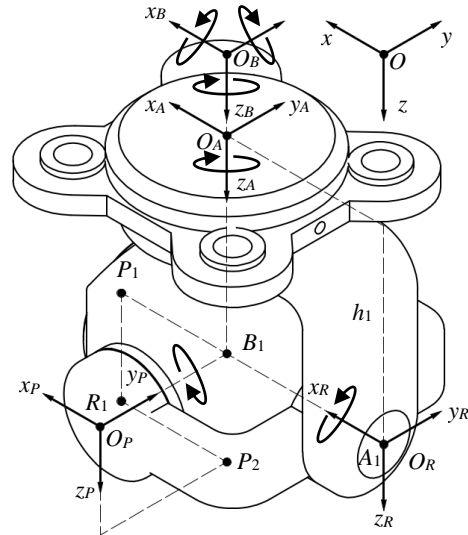


Рис. 2. Структура ТКП и его координатные оси

Используем введенные в [5] обозначения для углов поворота подвижных звеньев ТКП: α – угол поворота системы координат $O_Ax_Ay_Az_A$ относительно системы координат $O_Bx_By_Bz_B$ вокруг оси O_Az_A (угол поворота РДКР вокруг оси O_Az_A , здесь $O_Az_A \equiv O_Bz_B$); β – угол поворота системы координат $O_Rx_Ry_Rz_R$ относительно системы координат $O_Ax_Ay_Az_A$ вокруг оси O_Rx_R (угол поворота РДКК вокруг оси O_Rx_R , здесь $O_Rx_R \equiv O_Ax_A$); γ – угол поворота системы координат $O_Px_Py_Pz_P$ относительно системы координат $O_Rx_Ry_Rz_R$ вокруг оси O_Py_P , здесь $O_Py_P \equiv O_Ry_R$.

Точка B_1 – центр вращения ТКП (пересечение трех осей Oz_A, Ox_R, Oy_P), B_1 имеет координаты (0, 0, 1) в системе координат $O_Bx_By_Bz_B$; точка A_1 , лежащая на РДКР, имеет координаты (–1, 0, 0) в системе координат $O_Ax_Ay_Az_A$; точка R_1 лежит на РДКК и имеет координаты (0, –1, 0) в системе координат $O_Rx_Ry_Rz_R$; точка P_1 на РДКТ имеет координаты (1, 0, 0) в системе координат $O_Px_Py_Pz_P$.

Из рис. 2 видно, что ТКП сконструирован так, что оси вращения O_Az_A, O_Rx_R, O_Py_P всегда пересекаются в точке B_1 в процессе работы ТКП. Точку B_1 называют центром вращения ТКП.

Для определения координат ПП необходимо вращение камеры в разных направлениях (справа вверх,

слева вниз) для поиска ПП. При появлении ПП в кадре поиск ПП прекращается, ТКП переходит в режим отслеживания ПП в кадре. Фиксация ПП в кадре означает, что выполнены повороты ТКП на углы α, β, γ так, что изображение ПП находится в центре кадра. Для выполнения процесса съемки при поиске ПП и выполнения процесса фиксации ПП в кадре необходимо поддержание камеры в равновесии в горизонтальной плоскости (необходима стабилизация камеры в горизонтальной плоскости).

Стабилизация камеры в горизонтальной плоскости

Для стабилизации камеры в горизонтальной плоскости необходимо вычислить такие значения углов поворота β , чтобы линия B_1R_1 была параллельна горизонтальной плоскости или, иначе, нужно найти значения углов поворота β , удовлетворяющие условию $z_{R_1} = z_{B_1}$.

Пусть ϕ, θ, ψ – углы поворота БПЛА вокруг осей $O_{Bx_B}, O_{By_B}, O_{Bz_B}$, тогда β определяется по следующей формуле [5]:

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{r_{B_{31}} \sin \alpha - r_{B_{32}} \cos \alpha}{r_{B_{33}}}, \quad (1)$$

где $r_{B_{31}} = \sin \theta$; $r_{B_{32}} = -\cos \theta \sin \phi$; $r_{B_{33}} = \cos \phi \cos \theta$.

Построение алгоритмов слежения за объектом в кадре

Если СНС распознает ПП в кадре и она находится не в центре кадра, то появляются ошибки определения угловых координат ПП по КР и КТ. Для слежения за ПП в кадре необходимо построить две системы: систему слежения за ПП по углу КР и систему слежения за ПП по углу КТ.

Система слежения за ПП по углу КР

Система слежения за ПП по углу КР (ССКР), структура которой представлена на рис. 3, работает в двух режимах. Для пояснения режимов работы ССКР обратимся к рис. 4.

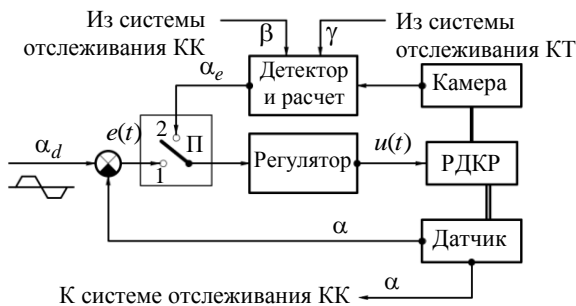


Рис. 3. Структура ССКР

Из рис. 4 видно, что камера закреплена на РДКТ ТКП и вращается в любом направлении. Точки C, F, G и B находятся на плоскости изображения камеры, плоскость изображения камеры зафиксирована на РДКТ, которая смещается при вращении камеры. Отслеживаемые объекты – это объекты и их изображения, используемые для обучения детектора (СНС).

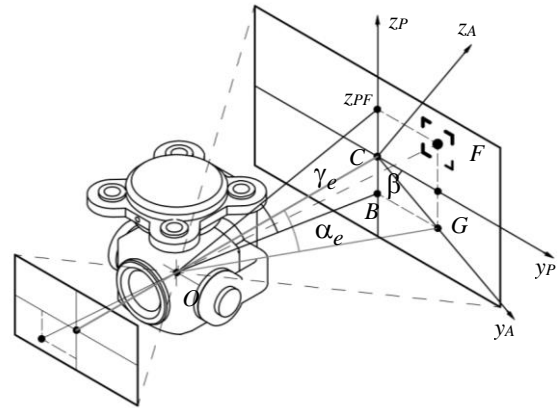


Рис. 4. Слежение ТКП с камерой за ПП в кадре по КР

На начальном этапе ССКР работает в режиме поиска объектов в пространстве. В этом режиме, как показано на рис. 3, переключатель П установлен в положение 1, входной сигнал ССКР может быть синусоидальной, ступенчатой или пилообразной формы. Этот сигнал управляет РДКР для перемещения вправо, влево при поиске объекта.

При появлении объекта слежения (ПП) в кадре процесс его поиска прекращается, СНС распознает ПП и определяет положение и размер ПП в кадре. Затем переключатель П автоматически переключается в положение 2. ССКР переходит в режим сопровождения цели в кадре. Задача состоит в определении таких значений α, β, γ , чтобы изображение объекта в кадре находилось в его центре (точка C должна совпадать с точкой F на рис. 4).

При появлении ПП в кадре СНС выдает её координаты в системе координат Ox_{PzPzP} . Из рис. 4 следует, что для сопровождения объекта по КР необходимо рассчитать ошибку сопровождения для вращения РДКР вокруг оси Oz_A в системе координат $Ox_Ay_Az_A$ так, чтобы точка C сместилась и совпала с точкой G . Другими словами, мы выполняем вращение РДКР так, чтобы $\alpha_e \rightarrow 0$. Значение угла поворота α_e определяется формулой

$$\operatorname{tg} \alpha_e = \frac{CG}{OC \cos \gamma} = \frac{CG}{f \cos \gamma}, \quad (2)$$

где OC – расстояние от начала координат O (центра вращения ТКП) до плоскости изображения CFG , $OC = f$.

Длина отрезка CG вычисляется по формуле

$$CG = \frac{y_{PF}}{\cos \beta}, \quad (3)$$

где β – угол поворота РДКК вокруг оси Ox_R в системе координат $Ox_Ry_Rz_R$.

Комбинируя (2) и (3), получим

$$\operatorname{tg} \alpha_e = \frac{CG}{f \cos \gamma} = \frac{y_{PF}}{f \cos \beta \cos \gamma}. \quad (4)$$

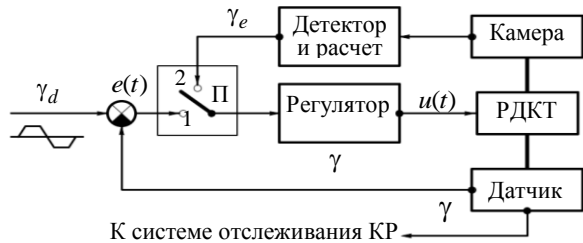
Если точка C совпадает с точкой G , т.е. $\alpha_e = 0$, то процесс сопровождения по КР останавливается. В случае движения БПЛА или ПП вновь появляется

ошибка сопровождения α_e и процесс сопровождения ПП продолжается. Если в процессе слежения ПП, подлежащая отслеживанию, исчезает из кадра, то переключатель автоматически возвращается в положение 1 и поиск ПП возобновляется.

Система слежения за ПП по углу КТ

Система слежения по углу КТ (ССКТ) управляет камерой при слежении за ПП в кадре по КТ. ССКТ (рис. 5) также работает в двух режимах: поиск ПП и слежение за ПП в кадре.

Поиск ПП по КТ – это процесс, при котором камера поворачивается вниз и/или вверх под фиксированным углом γ_0 для поиска ПП.



К системе отслеживания КР

Рис. 5. Структурная ССКТ

Из рис. 5 видно, что в режиме поиска ПП переключатель Π находится в положении 1, входной сигнал ССКТ представляет собой константу γ_0 , которая также может быть сигналом синусоидальной, ступенчатой или пилообразной формы.

При появлении ПП в кадре срабатывает детектор, подтверждается появление ПП в кадре и поиск ПП прекращается. Переключатель Π переходит в положение 2. При появлении ошибки отслеживания γ_e РДКТ начинает вращаться вокруг оси $O_{ур}$ в системе координат $Ox_{ур}z_{ур}$.

Из рис. 6 следует, что ошибка слежения γ_e по КТ определяется следующей формулой:

$$\text{tg } \gamma_e = \frac{z_{PF}}{OC} = \frac{z_{PF}}{f}, \tag{5}$$

где C – точка в центре кадра на оси $Ox_{ур}$ в системе координат $Ox_{ур}y_{ур}z_{ур}$.

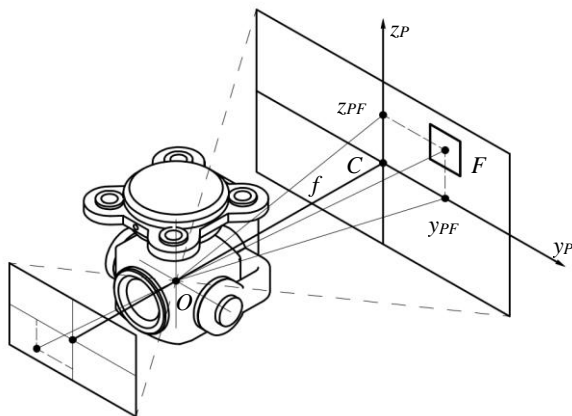


Рис. 6. Слежение ТКП с камерой за ПП в кадре по КТ

При вращении РДКТ вокруг оси $O_{ур}$ объект в кадре движется к центру кадра, т.е. $\gamma_e \rightarrow 0$. Если

отслеживаемый объект находится в центре кадра, то $\gamma_e = 0$ и, следовательно, цель слежения достигнута.

Если в процессе слежения за ПП в кадре по какой-либо причине ПП исчезает из кадра, то переключатель Π вновь переводится в положение 1 и процесс поиска ПП повторяется.

Определение координат ПП

После фиксации ПП в кадре ТКП работает в режиме слежения за ПП, поэтому ПП всегда находится в центре кадра. Выполним расчет координат ПП в прямоугольной системе координат $O_Gx_Gy_Gz_G$ (рис. 7), привязанной к земной поверхности и ПП.

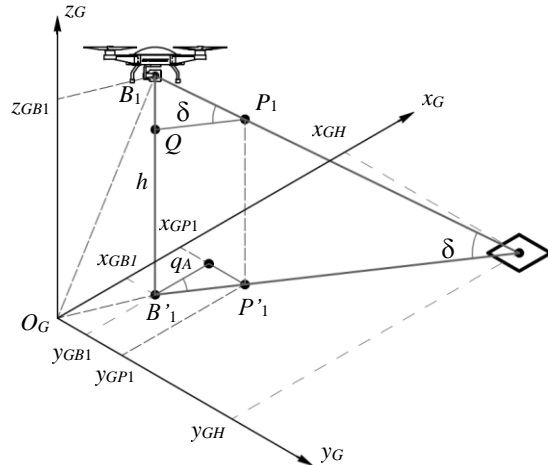


Рис. 7. Система координат, привязанная к ПП

Пусть на рис. 7 B_1H – линия, соединяющая центр вращения B_1 ТКП и центр H ПП. Так как ТКП работает в режиме слежения ПП, то точка P_1 РДКТ лежит на линии B_1H и координаты точки P_1 в системе координат $Ox_{ур}z_{ур}$ (см. рис. 2) определяются по формуле

$$P_1 = \begin{bmatrix} r_{B11}a_1 + r_{B12}a_2 + r_{B13}a_3 \\ r_{B21}a_1 + r_{B22}a_2 + r_{B23}a_3 \\ r_{B31}a_1 + r_{B32}a_2 + r_{B33}a_3 \end{bmatrix}, \tag{6}$$

где $a_1 = \cos \alpha \cos \gamma + \sin \alpha \sin \beta \sin \gamma$;

$a_2 = \cos \gamma \sin \alpha - \cos \alpha \sin \beta \sin \gamma$; $a_3 = \cos \beta \sin \gamma$;

$r_{B11} = \cos \psi \cos \theta$; $r_{B12} = \cos \phi \sin \psi + \cos \psi \sin \phi \sin \theta$;

$r_{B13} = \sin \phi \sin \psi - \cos \phi \cos \psi \sin \theta$; $r_{B21} = -\cos \theta \sin \psi$;

$r_{B22} = \cos \phi \cos \psi - \sin \phi \sin \psi \sin \theta$;

$r_{B23} = \cos \psi \sin \phi + \cos \phi \sin \psi \sin \theta$.

На рис. 7 предполагается, что в момент обнаружения и сопровождения ПП БПЛА находился на высоте h , поэтому имеем

$$\text{tg } \delta = \frac{h}{B_1'H} \rightarrow B_1'H = \frac{h}{\text{tg } \delta}. \tag{7}$$

С другой стороны, имеется и соотношение

$$\text{tg } \delta = \frac{B_1'Q}{QR_1} = \frac{z_{P1} - z_{B1}}{QR_1}, \tag{8}$$

где

$$QR_1 = B_1'P_1 = \sqrt{x_{P1}^2 + y_{P1}^2}. \tag{9}$$

Комбинируя (7)–(9), получим

$$B_1 H = \frac{h \sqrt{x_{P1}^2 + y_{P1}^2}}{z_{P1} - z_{B1}}. \quad (10)$$

Итак, координаты ПП в системе координат $O_G x_G y_G z_G$ вычисляются по следующей формуле:

$$\begin{cases} x_{GH} = x_{GB1} + B_1 H \cos q_A = x_{GB1} + \frac{h \sqrt{x_{P1}^2 + y_{P1}^2}}{z_{P1} - z_{B1}} \cos q_A; \\ y_{GH} = y_{GB1} + B_1 H \sin q_A = y_{GB1} + \frac{h \sqrt{x_{P1}^2 + y_{P1}^2}}{z_{P1} - z_{B1}} \sin q_A, \end{cases} \quad (11)$$

где

$$\cos q_A = \frac{x_{P1}}{\sqrt{x_{P1}^2 + y_{P1}^2}}; \quad \sin q_A = \frac{y_{P1}}{\sqrt{x_{P1}^2 + y_{P1}^2}}. \quad (12)$$

В (11) x_{GB1} , y_{GB1} – координаты БПЛА (координаты центра вращения ТКП) в системе координат $O_G x_G y_G z_G$, привязанной к ПП.

Объединяя (11) и (12), получим

$$\begin{cases} x_{GH} = x_{GB1} + \frac{h \sqrt{x_{P1}^2 + y_{P1}^2}}{z_{P1} - z_{B1}} \frac{x_{P1}}{\sqrt{x_{P1}^2 + y_{P1}^2}} = x_{GB1} + \frac{x_{P1} h}{z_{P1} - z_{B1}}, \\ y_{GH} = y_{GB1} + \frac{h \sqrt{x_{P1}^2 + y_{P1}^2}}{z_{P1} - z_{B1}} \frac{y_{P1}}{\sqrt{x_{P1}^2 + y_{P1}^2}} = y_{GB1} + \frac{y_{P1} h}{z_{P1} - z_{B1}}. \end{cases} \quad (13)$$

Из системы уравнений (13) определяются координаты ПП, позволяющие выполнить автоматическую посадку БПЛА.

Кинематическая модель БПЛА

Описание системы и моделирование

Геометрическая модель БПЛА, представленная на рис. 8, описывается системой уравнений [4]:

$$\begin{cases} m\ddot{x} = (\cos \phi \sin \theta \cos \psi + \sin \phi \sin \psi) U_1 - K_x \dot{x}; \\ m\ddot{y} = (\cos \phi \sin \theta \sin \psi + \sin \phi \cos \psi) U_1 - K_y \dot{y}; \\ m\ddot{z} = (\cos \phi \cos \theta) U_1 - mg - K_z \dot{z}; \\ I_x \ddot{\phi} = \dot{\theta} \psi (I_y - I_z) - J_r \dot{\theta} \Omega_{md} - K_\phi \dot{\phi}^2 + U_2; \\ I_y \ddot{\theta} = \dot{\phi} \psi (I_x - I_z) - J_r \dot{\psi} \Omega_{md} - K_\theta \dot{\theta}^2 + U_3; \\ I_z \ddot{\psi} = \dot{\phi} \dot{\theta} (I_x - I_y) - K_\psi \dot{\psi}^2 + U_4. \end{cases} \quad (14)$$

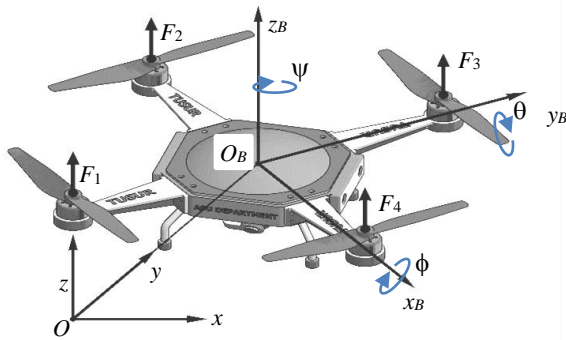


Рис. 8. Геометрическая модель БПЛА

В этой системе уравнений использованы следующие обозначения: m – масса квадрокоптера; U_1 , U_2 ,

U_3 , U_4 – сигналы управления; ϕ – угол крена; θ – угол тангажа; ψ – угол рыскания; J_r – инерция ротора; K_x , K_y , K_z – коэффициенты аэродинамического трения; K_ϕ , K_θ , K_ψ – коэффициенты поступательного сопротивления; I_x , I_y , I_z – инерция по осям x , y , z .

Перепишем систему уравнений (14) в следующем виде:

$$\begin{cases} m\ddot{x} = F_x - K_x \dot{x}, \\ m\ddot{y} = F_y - K_y \dot{y}, \\ m\ddot{z} = F_z - K_z \dot{z}, \end{cases} \quad (15)$$

где

$$\begin{cases} F_x = (\cos \phi \sin \theta \cos \psi + \sin \phi \sin \psi) U_1, \\ F_y = (\cos \phi \sin \theta \sin \psi + \sin \phi \cos \psi) U_1, \\ F_z = (\cos \phi \cos \theta) U_1 - mg. \end{cases}$$

Скользящий закон управления для позиционного управления

Введем переменные состояния на основе системы уравнений (15):

$$x_1 = x; \quad \dot{x}_1 = x_2; \quad x_3 = y; \quad \dot{x}_3 = x_4; \quad x_5 = z; \quad \dot{x}_5 = x_6.$$

В этих обозначениях скользящий закон управления для позиционного управления БПЛА имеет вид [4]

$$\begin{cases} F_x = (K_x - mk_1)x_2 - K_1 m |S_x| \text{sign}(S_x), \\ F_y = (K_y - mk_2)x_4 - K_2 m |S_y| \text{sign}(S_y), \\ F_z = (K_z - mk_3)x_6 - K_3 m |S_z| \text{sign}(S_z), \end{cases} \quad (16)$$

где

$$\begin{cases} S_x = x_2 + k_1(x_1 - x_d), \\ S_y = x_4 + k_2(x_3 - y_d), \\ S_z = x_6 + k_3(x_5 - z_d). \end{cases}$$

В (16) F_x , F_y , F_z – управляющие силы, действующие по направлениям Ox , Oy , Oz (см. рис. 2) для перемещения БПЛА в различные положения в пространстве; S_x , S_y , S_z – уравнения поверхности скольжения, k_1 , k_2 , k_3 – константы, выбранные таким образом, чтобы характеристический многочлен уравнения $S(x, y, z) = 0$ удовлетворял критерию устойчивости Гурвица.

Скользящий закон управления для управления по угловым координатам

Из системы уравнений (14) задаем переменные состояния:

$$x_7 = \phi; \quad \dot{x}_7 = x_8; \quad x_9 = \theta; \quad \dot{x}_9 = x_{10}; \quad x_{11} = \psi; \quad \dot{x}_{11} = x_{12}.$$

Угловые координаты ϕ , θ и сигнал управления U_1 определяются по формулам

$$\begin{aligned} \theta &= \arctg \left(\frac{x_1}{F_z + mg} \right); \\ \phi &= \arctg \left(\frac{x_2}{\sqrt{m^2 g^2 + 2mgF_z + F_z^2 + x_1^2}} \right); \\ U_1 &= F_1 + F_2 + F_3 + F_4 = \frac{mg + F_z}{\cos \theta \cos \phi}, \end{aligned} \quad (17)$$

где

$$a = \cos \psi; b = \sin \psi; x_1 = \frac{aF_x + bF_y}{a^2 + b^2}; x_2 = \frac{bF_x - aF_y}{a^2 + b^2};$$

F_1, F_2, F_3, F_4 – силы, создаваемые четырьмя бесщеточными двигателями БПЛА.

Согласно скользящему закону управления уравнения для определения сигналов управления БПЛА по углам имеют вид

$$\begin{cases} U_2 = -f_1(x) - K_4 I_x |S_\phi| \text{sign}(S_\phi), \\ U_3 = -f_2(x) - K_5 I_y |S_\theta| \text{sign}(S_\theta), \\ U_4 = -f_3(x) - K_6 I_z |S_\psi| \text{sign}(S_\psi). \end{cases} \quad (18)$$

Здесь $f_1(x) = (I_y - I_z)x_{10}x_{12} - x_{10}J_r O_{md} - K_\phi x_8^2 + I_x k_4 x_8$;

$$f_2(x) = (I_z - I_x)x_8 x_{12} - J_r O_{md} x_8 - K_\theta x_{10}^2 + I_y k_5 x_{10}$$

$$f_3(x) = (I_x - I_y)x_8 x_{10} - K_\psi x_{12}^2 + I_z k_6 x_{12}$$

$$S_\phi = x_8 + k_4(x_7 - \phi_d); S_\theta = x_{10} + k_5(x_9 - \theta_d);$$

$$S_\psi = x_{12} + k_6(x_{11} - \psi_d).$$

В (18) через U_2, U_3, U_4 обозначены крутящие моменты, приводящие БПЛА к вращению вокруг осей Ox_B, Oy_B, Oz_B ; S_ϕ, S_θ, S_ψ – уравнения поверхности скольжения; k_4, k_5, k_6 – константы, выбранные таким образом, что характеристический многочлен уравнения $S(\phi, \theta, \psi) = 0$ удовлетворяет критерию устойчивости Гурвица.

Процесс автоматической посадки БПЛА реализуется по схеме, представленной на рис. 9, и осуществляется следующим образом. Переключатель П на первом (начальном) этапе полета БПЛА находится в положении 1 и БПЛА летит по заданному входному сигналу x_d . Камера наблюдения осуществляет поиск ПП. При появлении ПП отображается в кадре, происходит процесс отслеживания ПП в кадре с помощью ТКП, затем переключатель П автоматически переключается в положение 2. В этом положении вычисляются величины $\Delta x, \Delta y$ и высота h с использованием регулятора и выполняется процесс автоматической посадки БПЛА.

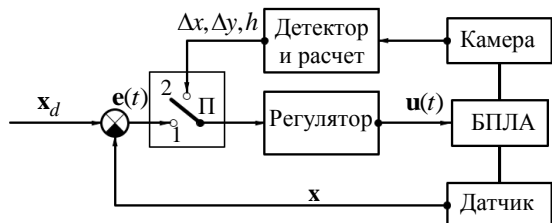


Рис. 9. Структура системы автоматической посадки БПЛА

Из (13) величины $\Delta x, \Delta y$ определяются в виде

$$\begin{cases} \Delta x = x_{GH} - x_{GB1} = \frac{h \cdot x_{P1}}{z_{P1} - z_{B1}}, \\ \Delta y = y_{GH} - y_{GB1} = \frac{h \cdot y_{P1}}{z_{P1} - z_{B1}}. \end{cases} \quad (19)$$

Моделирование процессов детектирования ПП и посадки БПЛА

Результаты экспериментов по оценке эффективности процесса детектирования СНС Yolov2 ПП в кадре представлены на рис. 10 и 11.



Рис. 10. Результат детектирования и определения координат ПП при вводе видеоизображения

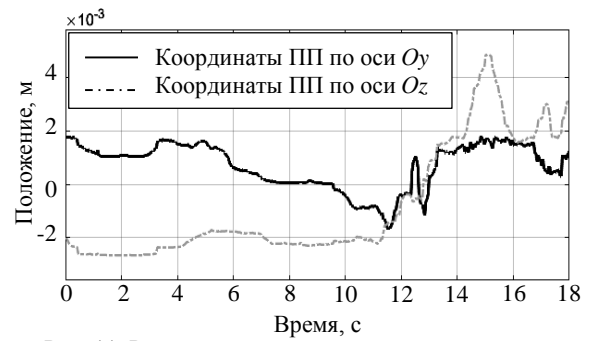


Рис. 11. Результат детектирования и определения координат ПП при вводе видеопотока

Из рис. 10 видно, что 25-слойная структура СНС-детектора Yolov2 выдает следующие параметры: тип объекта (Helipad), вероятность правильного детектирования (Confidence = 0,87941), координаты ПП (387px, 168px) и размеры ПП (486px, 435px). Эти параметры достаточны для идентификации ПП и автоматической посадки БПЛА. Рисунок 11 иллюстрирует результаты детектирования и определения координат ПП при вводе видеопотока длительности 18 с и скорости видео 25 к/с.

Результаты моделирования процессов поиска и сопровождения ПП камерой, установленной на ТКП, представлены на рис. 12–15. Рисунок 12 иллюстрирует результат построения 3D-модели ТКП в программе MATLAB для оценки устойчивости камеры в горизонтальной плоскости со значением β , определенным из уравнения (10). На рис. 13 представлена оценка устойчивости ТКП в горизонтальной плоскости на основе сравнения координаты Oz точки R_1 на РДКК и координаты по оси Oz точки B_1 на БПЛА.

Из рис. 12 и 13 видно, что в трехмерном пространстве в процессе поиска и сопровождения ПП ось Oy_R всегда параллельна горизонтальной плоскости, т.е. координата z_{R1} всегда равна координате z_{B1} , что доказывает стабильность положения камеры в горизонтальной плоскости.

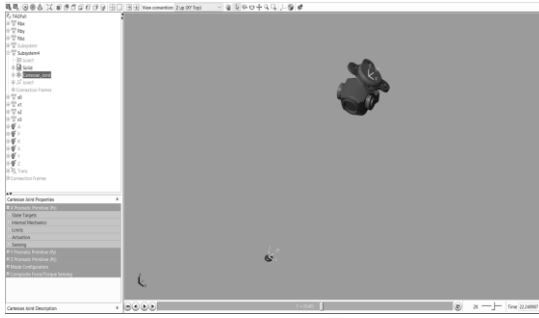


Рис. 12. Модель камеры, установленной на ТКП

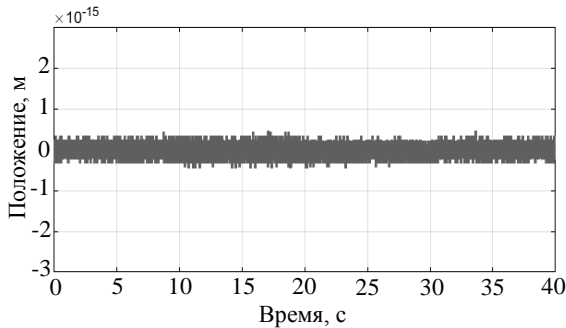
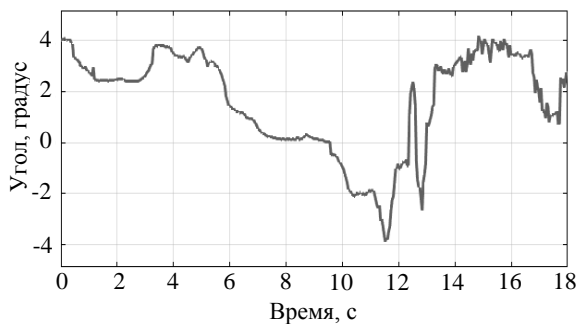
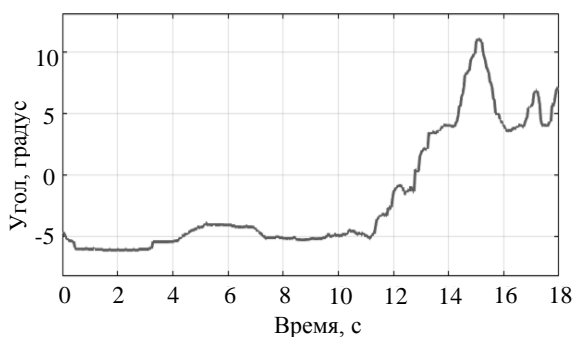


Рис. 13. Оценка устойчивости ТКП по горизонту

Рис. 14. Угловая ошибка α в ССКРРис. 15. Угловая ошибка γ в ССКТ

На рис. 14 и 15 представлены результаты расчета погрешности ССКР и ССКТ. Значения α и γ рассчитаны при фокусном расстоянии камеры $f = 0,025$ м.

Для моделирования процесса посадки БПЛА и оценки качества этого процесса использованы значения параметров БПЛА из таблицы.

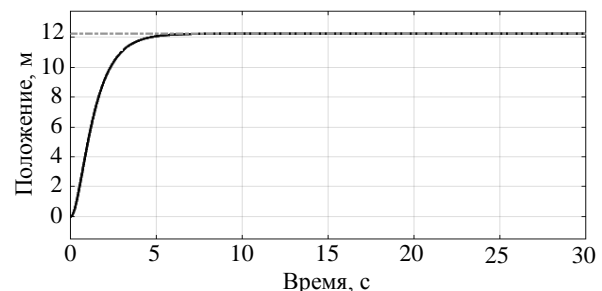
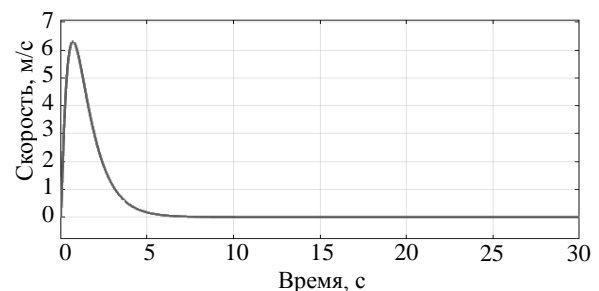
Моделирование процесса посадки БПЛА выполнено в предположении, что в этот момент ПП находится в центре кадра, БПЛА находится на высоте

$h = 10$ м в состоянии равновесия с параметрами $\phi, \theta, \psi = 0$, ТКП имеет состояние $\alpha = 45^\circ$, $\beta = 0$, $\gamma = 30^\circ$. По формуле (6) вычисляются координаты точки $P_1(0,6124; 0,6124; 0,5)$, точка P_1 лежит на прямой B_1H . По формуле (19) рассчитываются ошибки посадки $\Delta x = 12,2474$, $\Delta y = 12,2474$.

Параметры модели

Символ	Значения	Ед. изм.
m	0,5	кг
g	9,81	м/с ²
J_x	0,005	кгм ²
J_y	0,005	кгм ²
J_z	0,01	кгм ²
J_r	2,838e-05	кгм ²
k_1, k_2, k_3	4	–
k_4, k_5, k_6	4	–
K_1, K_2, K_3	6	–
K_4, K_5, K_6	6	–
$K_x, K_y, K_z, K_\phi, K_\theta, K_\psi$	0,01	–

На основе уравнений (13)–(19) проведено моделирование в программной среде MATLAB SIMULINK со значениями параметров моделирования из таблицы. Получены результаты моделирования процессов посадки БПЛА по координатным осям Ox , Oy и Oz . Качественного различия результатов моделирования по различным трем осям не наблюдается, поэтому рассмотрим результаты моделирования посадки БПЛА только на примере его посадки по направлению оси Ox (рис. 16, 17).

Рис. 16. Процесс посадки БПЛА по координате Ox Рис. 17. Скорость посадки по оси Ox

Из рис. 16 и 17 следует, что разработанные алгоритмы и программы обеспечивают устойчивое решение задачи автоматической посадки БПЛА.

Заключение

Разработан и исследован метод автоматической посадки БПЛА, базирующийся на применении свер-

точной нейронной сети для детектирования (распознавания) посадочной площадки и следующих алгоритмах: алгоритме определения координат ПП в кадре камеры; алгоритмах отслеживания ПП в кадре по каналам крена, рыскания и тангажа камеры, установленной в трёхосном карданном подвесе; алгоритмах скользящего управления по позиционным и угловым координатам БПЛА; алгоритме автоматической посадки БПЛА на детектированную ПП.

Выполнено моделирование разработанных алгоритмов в программной среде MATLAB SIMULINK. В этой же программной среде исследованы полеты БПЛА в пространстве по заданной траектории и автоматическая посадка БПЛА на выбранную ПП. Применение исследованного метода автоматической посадки БПЛА эффективно в условиях отказа и/или неустойчивой работы традиционных навигационных систем (INS, GPS и т.п.).

Литература

1. Системы управления беспилотными космическими и атмосферными летательными аппаратами // Тезисы докладов V Всерос. науч.-техн. конф., Москва, 8–10 ноября 2022 г. – Тамбов: ООО «Юлис», 2022. – 148 с.
2. Беспилотные летательные аппараты [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://habr.com/ru/post/65627/>, свободный (дата обращения: 26.06.2023).
3. Кориков А.М. Нейросетевой анализ видеопотока, поступающего с камеры беспилотного летательного аппарата, для компенсации ошибок системы навигации и управления БПЛА / А.М. Кориков, В.Т. Тран // Телекоммуникации. – 2023. – № 7. – С. 13–23.
4. Тран В.Т. Синтез адаптивного скользящего режима управления полетом квадрокоптера в условиях переменной нагрузки и помех / В.Т. Тран, А.М. Кориков // Доклады ТУСУР. – 2022. – Т. 25, № 2. – С. 37–44.
5. Кориков А.М. Кинематическая модель стабилизации и управления ориентацией подвесной аппаратуры беспилотного летательного аппарата / А.М. Кориков, В.Т. Тран // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2023. – Т. 24, № 7. – С. 382–390.
6. Lawrence S. Face recognition: a convolutional neural network approach / S. Lawrence, C.L. Giles, A.C. Tsoi, A.D. Back // IEEE Transactions on Neural Networks, Special Issue on Neural Networks and Pattern Recognition. – 1997. – Vol. 8, No. 1. – P. 98–113.
7. LeCun Y. Gradient-Based Learning Applied to Document Recognition / Y. LeCun, L. Bottou, Y. Bengio, P. Haffner // Proceedings of the IEEE. – 1998. – Vol. 11. – P. 2278–2324.
8. Куликин А.Б. Нейросетевое детектирование объектов в условиях ограниченного времени / А.Б. Куликин, Е.А. Смирнов // Процессы управления и устойчивость. – 2016. – Т. 3.1. – С. 419–424.
9. Redmon J. You Only Look Once: Unified, Real-Time Object Detection / J. Redmon, S. Divvala, R. Girshick, A. Farhadi [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://arxiv.org/pdf/1506.02640> (дата обращения: 26.06.2023).
10. Redmon J. YOLO9000: Better, Faster, Stronger / J. Redmon, A. Farhadi [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://arxiv.org/pdf/1612.08242>, свободный (дата обращения: 26.06.2023).
11. Abas Shakir Mahmood. A YOLO and convolutional neural network for the detection and classification of leukocytes in leukemia / Abas Shakir Mahmood, A.M. Abdulazeez, D.Q. Zeebaree // Indones. J. Electr. Eng. Comput. – 2021. – Sci 25.1.
12. Yanli L. An improved analysis of stochastic gradient descent with momentum / L. Yanli, Y. Gao, W. Yin // Advances in Neural Information Processing Systems 33. – 2020. – P. 18261–18271.
13. Hodson Timothy O. Root-mean-square error (RMSE) or mean absolute error (MAE): when to use them or not // Geoscientific Model Development 15.14. – 2022. – P. 5481–5487.
14. Li Mu. Efficient mini-batch training for stochastic optimization / Li Mu et al // Proceedings of the 20th ACM SIGKDD international conference on Knowledge discovery and data mining. – 2014. – P. 661–670.
15. Dorf R.C. Modern control systems / R.C. Dorf, R.H. Bishop. – Prentice Hall. – 2011. – 1110 p.

Кориков Анатолий Михайлович

Д-р техн. наук, проф. каф. автоматизированных систем управления (АСУ) Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)

Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050

Тел.: +7-913-869-96-37

Эл. почта: anatolii.m.korikov@tusur.ru

Тран Ван Трук

Аспирант каф. АСУ ТУСУРа

Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050

Тел.: +7-923-428-02-82

Эл. почта: att82glass@gmail.com

Tran V.T., Korikov A.M.

Detection of the landing site and development of algorithms for automatic landing of an unmanned aerial vehicle

In the article, for a dual-circuit navigation and control system (NKS) of an unmanned aerial vehicle (UAV), the following tasks are solved: detection (recognition) of a landing pad (LP) for a UAV using a convolutional neural network; determining the coordinates of the LP in the frame of the UAV camera; tracking the LP in the frame through the channels of roll, yaw and pitch of the UAV triaxial gimbal; simulation of the UAV flight in space along a given trajectory and automatic landing of the UAV on the detected LP; synthesis of sliding control by the positional and angular coordinates of the UAV. MATLAB SIMULINK software was used to implement the developed algorithms for solving these problems. The created algorithms provide automatic landing of the UAV on the detected LP.

Keywords: navigation and control, neural network, landing pad, unmanned aerial vehicle, detection, automatic landing, simulation.

DOI: 10.21293/1818-0442-2023-26-2-72-80

References

1. *Sistemy upravleniya bespilotnymi kosmicheskimi i atmosferynymi letatel'nymi apparatami* [Control systems for unmanned space and atmospheric aircraft]. *Abstracts of the V All-Russian Scientific and Technical Conference*, Moscow, November 8–10, 2022. Tambov, «Yulis» LLC, 2022, 148 p. (in Russ.).
2. *Bespilotnyye letatel'nyye apparaty* [Unmanned aerial vehicles]. Available at: <https://habr.com/ru/post/65627/> free (Accessed: June 26, 2023) (in Russ.).

3. Korikov A.M., Tran V.T. *Neyrosetevoy analiz videopotoka, postupayushchego s kamery bespilotnogo letatel'nogo apparata, dlya kompensatsii oshibok sistemy navigatsii i upravleniya BPLA* [Neural network analysis of the video stream coming from the camera of an unmanned aerial vehicle to compensate for errors in the navigation and control system of the UAV]. *Telecommunications*, 2023, no. 7, pp. 13–23.
 4. Tran V.T., Korikov A.M. *Sintez adaptivnogo skol'zyashchego rezhima upravleniya poletom kvadrokoptera v usloviyakh peremennoy nagruzki i pomekh* [Synthesis of an adaptive sliding mode of quadcopter flight control under conditions of variable load and interference]. *Proceedings TUSUR University*, 2022, vol. 25, no. 2, pp. 37–44 (in Russ.).
 5. Korikov A.M., Tran V.T. *Kinematicheskaya model' stabilizatsii i upravleniya oriyentatsiyey podvesnoy apparatury bespilotnogo letatel'nogo apparata* [Kinematic model for stabilization and orientation control of the suspended equipment of an unmanned aerial vehicle]. *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2023, vol. 24, no. 6, pp. 382–390.
 6. Lawrence S., Giles C.L., Tsoi A.C., Back A.D. Face recognition: a convolutional neural network approach. *IEEE Transactions on Neural Networks, Special Issue on Neural Networks and Pattern Recognition*, 1997, vol. 8, no. 1, pp. 98–113.
 7. LeCun Y., Bottou L., Bengio Y., Haffner P. Gradient-Based Learning Applied to Document Recognition. *Proceedings of the IEEE*, 1998, vol. 11, pp. 2278–2324.
 8. Kulinkin A.B., Smirnov E.A. *Neyrosetevoye detektirovaniye ob'ektov v usloviyakh ogranichennogo vremeni* [Neural network detection of objects under limited time conditions]. *Management Processes and Sustainability*. – 2016, vol. 3.1, pp. 419–424 (in Russ.).
 9. Redmon J., Divvala S., Girshick R., Farhadi A. You Only Look Once: Unified, Real-Time Object Detection. Available at: <https://arxiv.org/pdf/1506.02640>, free (Accessed: June 26, 2023) (in Russ.).
 10. Redmon J., Farhadi A. YOLO9000: Better, Faster, Stronger. Available at: <https://arxiv.org/pdf/1612.08242>, free (Accessed: June 26, 2023) (in Russ.).
 11. Abas Shakir Mahmood, A.M. Abdulazeez, D.Q. Zeebaree. A YOLO and convolutional neural network for the detection and classification of leukocytes in leukemia. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, 2021, Sci 25.1.
 12. Liu Yanli, Yuan Gao, Wotao Yin. An improved analysis of stochastic gradient descent with momentum. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 33, 2020, pp. 18261–18271.
 13. Hodson Timothy O. Root-mean-square error (RMSE) or mean absolute error (MAE): when to use them or not. *Geoscientific Model Development* 15.14, 2022, pp. 5481–5487.
 14. Li Mu et al. Efficient mini-batch training for stochastic optimization. *Proceedings of the 20th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*, 2014, pp. 661–670.
 15. Modern control systems. Twelfth Edition by R.C. Dorf, R.H. Bishop, Prentice Hall, 2011, 1110 p.
-

Anatoly M. Korikov

Doctor of Science in Engineering, Professor,
Department of Automated Control Systems,
Tomsk State University of Control Systems
and Radioelectronics (TUSUR)
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050;
Phone: +7-913-869-96-37
Email: anatolii.m.korikov@tusur.ru

Van Truc Tran

Postgraduate student,
Department of Automated Control Systems, TUSUR
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7-923-428-02-82
Email: att82glass@gmail.com