

С. Л. Зенкевич, д-р физ.-мат. наук, проф., zenkev@bmstu.ru,

Н. К. Галустян, аспирант, narekgalustyan@gmail.com,

Научно-учебный центр "Робототехника" МГТУ им. Н. Э. Баумана

Децентрализованное управление группой квадрокоптеров

Решается задача децентрализованного управления группой автономных квадрокоптеров при роевом и строевом движении. Решение этой задачи включило в себя следующие этапы: разработка нелинейной динамической модели движения квадрокоптера и ее линеаризация, синтез алгоритма управления по траектории одинарным квадрокоптером, разработка алгоритма децентрализованного управления квадрокоптерами в мультиагентной системе, построение моделей и компьютерная апробация разработанных алгоритмов. Приведены результаты моделирования применения алгоритма управления группой квадрокоптеров.

Ключевые слова: мультиагентная система, квадрокоптеры, динамическая модель, управление по траектории, групповое движение, строевое движение, роевое движение, децентрализованное управление

Введение

Растущая популярность мультикоптеров в классе мини-БПЛА объясняется достоинствами этих винтокрылых аппаратов. Обладая всеми преимуществами летательных аппаратов вертолетного типа (возможностями зависания в пространстве, вертикального взлета и посадки, высокой маневренности как в открытом, так и в закрытых помещениях), мультикоптеры в отличие от вертолетов имеют простой и экономичный механизм (оси пропеллеров зафиксированы), не требующий сложного технического обслуживания.

Прогрессирующая популярность наглядно подтверждает глобальный рост рынка БПЛА как в исторической ретроспективе, так и в прогнозе аналитических агентств. Интересным трендом является увеличение доли дронов гражданского назначения. Именно в этом секторе прогнозируется 19 % роста в год против 5 % беспилотников в военном секторе. Однако наиболее стремительный рост ожидается в сегменте мультикоптеров: 22 % в год. За 5 лет прогнозируется повышение спроса почти в 3 раза до 2,3 млрд долл.

В основе этого лежит расширение областей применения мультикоптеров, в первую очередь, в гражданском секторе. Сегодня мультикоптеры активно используются в кинопроизводстве и аэрофотосъемке, в инспекции инфраструктурных объектов, в сельском хозяйстве. Масштабным примером их коммерческого применения является процесс доставки мультикоптерами малогабаритных грузов до клиентов всемирно известным интернет-ритейлером Amazon.

Идея мультиагентной системы (МАС) на базе мультикоптеров начала развиваться совсем недавно и имеет перспективы для широкого применения.

Это обусловлено преимуществами МАС: расширенное знание окружающей среды за счет коммуникации внутри группы, взаимозаменяемость агентов, способность коллективно выполнять более сложные задачи быстрее и надежнее. В природе мы наблюдаем массу примеров роевого (стадного) поведения муравьев, рыб, птиц и других животных, что позволяет этим природным МАС эффективнее добывать пищу и выживать.

Анализ литературы показал, что много научных трудов посвящено системе управления движением одинарного квадрокоптера, которая может базироваться на линейно-квадратичных регуляторах [5], ПД или ПИД регуляторах [1–4], нечетких регуляторах [7] и нейросетевых регуляторах.

Тем не менее, можно отметить лишь несколько работ, направленных на создание и апробацию алгоритмов группового управления летающих агентов в трехмерном пространстве. В работе [4] профессора В. Кумара реализована и апробирована система управления группой из 20 квадрокоптеров. Однако в лаборатории действует система камер, а на летательных аппаратах установлены специальные маркеры, что позволяет с высокой точностью в любой момент определять положение в помещении. Кроме того, алгоритм управления является централизованным: управление квадрокоптерами происходит с центрального компьютера.

Следует отметить алгоритм децентрализованного управления группой квадрокоптеров на базе правил К. Рейнольдса [8]. Исследователи из Венгрии создали МАС из 10 полностью автономных квадрокоптеров, способных выполнять реальные коллективные задачи. В отличие от работы [4], квадрокоптеры получают данные о внешней среде лишь с помощью GPS-датчиков и обмениваются информацией о своем положении с соседними агентами

в зоне покрытия беспроводных радиомодулей связи. В упомянутой работе модель управления также была оптимизирована для реальной среды, включающей шумы, задержки сигналов и внешние воздействия, такие как ветер.

Интересный алгоритм управления квадрокоптером в МАС представлен в работе [9]. Модель управления на базе решения Нэша задачи о переговорах была апробирована в реальных условиях при групповом движении трех автономных квадрокоптеров в открытом пространстве. Одной из отличительных особенностей работы является сложная динамическая модель движения квадрокоптера, учитывающая ряд аэродинамических эффектов [6, 9].

В целом по принципу управления все подходы к управлению мультиагентными системами можно поделить на централизованные и децентрализованные [16]. Децентрализованное управление подразумевает отсутствие единого управляющего центра формирования координационных команд для каждого из элементов группы [12]. При этом групповое движение может быть "роевым" или строевым. Среди отечественных работ можно отметить статью [17], где решается строевая задача, при которой квадрокоптеры должны сохранять заданную геометрическую топологию (формацию).

В данной работе предлагается оригинальный способ децентрализованного управления квадрокоптерами в мультиагентной системе на базе модифицированных правил Рейнольдса в двух режимах полета: строевом и "роевом".

Динамическая модель движения квадрокоптера

Система координат и основные параметры движения. Движение квадрокоптера рассматривается с использованием двух систем координат: неподвижной системы координат (НСК), связанной с Землей, и подвижной системой координат (ПСК), связанной с квадрокоптером (рис. 1). Начало ПСК совпадает с центром масс квадрокоптера, ось X_B пересекает оси пропеллеров 1 и 3, и ось Y_B пересекает оси пропеллеров 2 и 4.

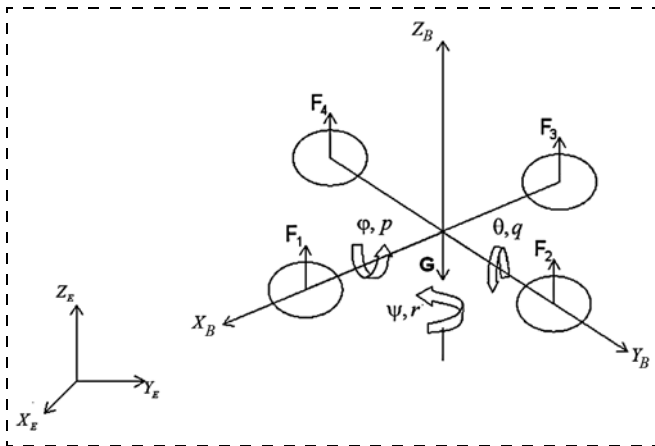


Рис. 1. Система координат и силы, действующие на квадрокоптер

Квадрокоптер имеет шесть степеней свободы: три угла и три линейные координаты центра масс. В движении квадрокоптера будем учитывать 12 параметров:

(φ, θ, ψ) — углы вращения;

$\Omega = (p \ q \ r)$ — вектор угловой скорости (проекции на оси ПСК);

$\mathbf{r} = (x \ y \ z)$ — вектор положения центра масс квадрокоптера;

$\dot{\mathbf{r}} = (\dot{x} \ \dot{y} \ \dot{z})$ — вектор линейной скорости.

Матрица поворота $\mathbf{R}_{BE}$ между НСК и ПСК имеет следующий вид:

$$\mathbf{R}_{BE} = \begin{bmatrix} c_\psi c_\theta & c_\psi s_\theta s_\varphi - c_\psi s_\varphi & s_\psi s_\varphi + c_\psi c_\varphi s_\theta \\ c_\theta s_\psi & c_\theta c_\psi + s_\theta s_\psi s_\varphi & c_\theta s_\psi s_\varphi - c_\psi s_\varphi \\ -s_\theta & c_\theta s_\varphi & c_\psi c_\theta \end{bmatrix},$$

где для компактности выражения используется следующее обозначение: $\sin \alpha = s_\alpha$, $\cos \alpha = c_\alpha$.

Силы и моменты, действующие на квадрокоптер.

Пропеллеры квадрокоптера вращаются со скоростью ω_i (i — номер пропеллера). При вращении пропеллеров возникают подъемные силы F_i и моменты M_i (аналогично несущему винту вертолета), вращающие квадрокоптер вокруг собственной оси (рис. 1), модули которых равны:

$$F_i = K_F \omega_i^2, \quad M_i = K_M \omega_i^2,$$

где K_F и K_M — константы. Следует отметить, что на практике динамические изменения пропеллеров происходят значительно быстрее динамических изменений твердого тела и аэродинамических изменений [4]. Следовательно, в качестве допущения при синтезе системы управления принимается, что угловые скорости вращения пропеллеров можно изменять моментально, и управление квадрокоптером осуществляется с помощью четырех силомоментных параметров $(u_1 \ u_2 \ u_3 \ u_4)^T = (F_{Z_B} \ M_{X_B} \ M_{Y_B} \ M_{Z_B})^T$:

$$\mathbf{u} = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_F & K_F & K_F & K_F \\ 0 & K_F L & 0 & -K_F L \\ -K_F L & 0 & K_F L & 0 \\ K_M & -K_M & K_M & -K_M \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_1^2 \\ \omega_2^2 \\ \omega_3^2 \\ \omega_4^2 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где L — расстояние между центром масс и осями пропеллеров.

Следующие аэродинамические эффекты не будут приниматься во внимание в силу сложности их учета и незначительности воздействия при невысоких скоростях полета [6]: изменение подъемной силы за счет дополнительного набегающего воздуха при полете квадрокоптера; изменение вектора подъемных сил за счет эффекта биения лопастей; сопротивление воздуха; ветер; гироскопический момент; эффект Земли при посадке и взлете.

Система уравнений движения квадрокоптера.

Вывод динамической модели движения одинарного квадрокоптера приведен в предыдущей работе [11]. Система уравнений движения получается из совокупности (i) уравнения второго закона Ньютона, (ii) уравнения, устанавливающего взаимосвязь вектора угловой скорости с матрицей поворота, и (iii) уравнения Эйлера. В векторном виде она имеет следующий вид:

$$\begin{cases} m \begin{bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \\ \ddot{z} \end{bmatrix} = \mathbf{R}_{BE} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ u_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -mg \end{bmatrix}; \\ \dot{\hat{\Omega}} = \dot{\mathbf{R}} \mathbf{R}^T; \\ \mathbf{I}_B \dot{\Omega}_B = -\Omega_B \times \mathbf{I}_B \Omega_B + \begin{bmatrix} u_2 \\ u_3 \\ u_4 \end{bmatrix}, \end{cases} \quad (2)$$

где g — ускорение свободного падения; m — масса квадрокоптера; $\mathbf{I}_B$ — тензор момента инерции; Ω_B — вектор угловой скорости в ПСК; $\dot{\Omega}_B$ — относительная производная вектора угловой скорости (производная в ПСК). После проекции на оси координат система уравнений движений примет вид

$$\begin{cases} \ddot{x} = u_1/m(s_\varphi s_\psi + c_\varphi c_\psi s_\theta); \\ \ddot{y} = u_1/m(c_\varphi s_\psi s_\theta - c_\psi s_\varphi); \\ \ddot{z} = u_1/m(c_\varphi c_\theta) - g; \\ \dot{\varphi} = p + (s_\varphi \operatorname{tg} \theta)q + (c_\varphi \operatorname{tg} \theta)r; \\ \dot{\theta} = c_\varphi q + (-s_\varphi)r; \\ \dot{\psi} = (s_\varphi/c_\theta)q + (c_\varphi/c_\theta)r; \\ \dot{p} = (u_2 - qr(I_{ZZ} - I_{YY}))/I_{XX}; \\ \dot{q} = (u_3 + pr(I_{ZZ} - I_{XX}))/I_{YY}; \\ \dot{r} = u_4/I_{ZZ}, \end{cases} \quad (3)$$

где I_{XX} , I_{YY} , I_{ZZ} — осевые моменты инерции.

Синтез алгоритма управления по траектории

Зададим траекторию квадрокоптера четырьмя параметрами — $[\mathbf{r}_T(t) \ \psi_T(t)] = [x_T(t) \ y_T(t) \ z_T(t) \ \psi_T(t)]$ (три координаты положения квадрокоптера и углом поворота относительно вертикальной оси (углы тангажа и крена будут определяться автоматически)).

Зададим три уровня управления.

1. Управление положением на базе ПД регулятора:

$$\begin{cases} \ddot{\mathbf{r}}_d = \ddot{\mathbf{r}}_T - \mathbf{K}_p \varepsilon_p - \mathbf{K}_d \varepsilon_d; \\ \varepsilon_p = (\mathbf{r} - \mathbf{r}_T); \\ \varepsilon_d = (\dot{\mathbf{r}} - \dot{\mathbf{r}}_T), \end{cases} \quad (4)$$

где $\mathbf{K}_p$ и $\mathbf{K}_d$ — положительно определенные матрицы усиления.

2. Управление ориентацией:

$$\begin{cases} [u_2 \ u_3 \ u_4]^T = -\mathbf{K}_R \mathbf{e}_R - \mathbf{K}_\Omega \mathbf{e}_\Omega; \\ \mathbf{e}_R = 1/2(\mathbf{R}_d^T \mathbf{R} - \mathbf{R}^T \mathbf{R}_d)^\vee; \\ \mathbf{e}_\Omega = \Omega - \Omega_T, \end{cases} \quad (5)$$

где $\mathbf{R}^*$ — матрица поворота, рассчитанная на основе программных углов (8); $\mathbf{R}$ — матрица поворота, рассчитанная на основе обратных связей по текущим углам $[\varphi \ \theta \ \psi]$; $^\vee$ — оператор перевода кососимметрической матрицы в $\mathbb{R}^3$.

3. Управление высотой:

$$u_1 = m(\ddot{z}_d + g)/c_\varphi c_\theta. \quad (6)$$

Схема управления представлена на рис. 2. Подробное описание алгоритма приведено в статье [11].

Децентрализованное управление группой квадрокоптеров

Рассмотрим МАС из автономных квадрокоптеров, способных обмениваться с соседними агентами в зоне слышимости информацией о своем положении и угле рыскания (внутренняя коммуникация может быть технически реализована на базе радио-

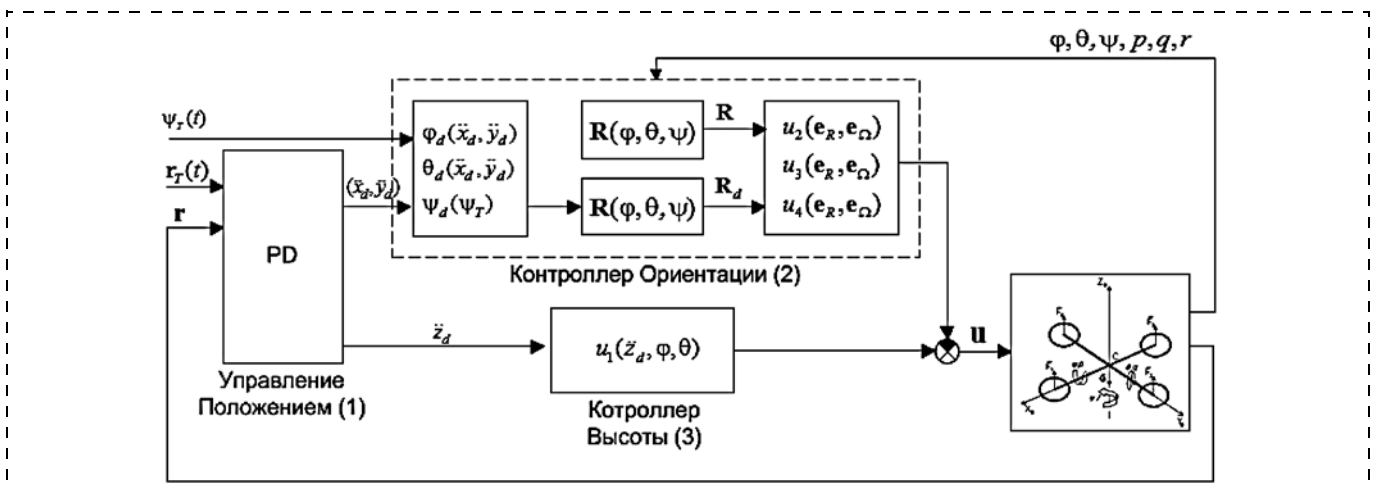


Рис. 2. Схема управления

модулей Xbee [8]). Вместе с этим, каждый квадрокоптер оснащен GPS- и IMU-датчиками для обратной связи по положению и угловой ориентации.

Требования к алгоритму. Зададим требования к алгоритму децентрализованного управления квадрокоптером в МАС. Во-первых, квадрокоптеры должны быть способны осуществлять групповой полет в трехмерном пространстве в двух режимах:

1) режим строевого движения — группа агентов стремится сохранить заданную геометрическую топологию (клин, сетка, цепочка) с двухуровневой иерархией — лидер и ведомые агенты;

2) режим "роевого движения" — коллективное движение происходит без необходимости выдерживать определенную геометрическую топологию, подобно стайному движению птиц.

К тому же, алгоритм должен соответствовать ряду критериев (см. таблицу).

Набор критериев для оценки качества группового движения

	Критерий	Определение
1	Безопасность	Агенты держатся на безопасном расстоянии друг от друга
2	Сплоченность	Двигаются на относительно близких и схожих дистанциях
3	Локальность	Агенты получают лишь локальную информацию в зоне слышимости, которая определяется дальностью связи
4	Масштабируемость	Алгоритм работает вне зависимости от числа агентов
5	Децентрализованность	Каждый агент имеет свою независимую систему управления
6	Взаимозаменяемость	Агенты взаимозаменяемы. Допускается потеря или приобретение новой связи

За основу алгоритма децентрализованного управления квадрокоптером в МАС были взяты плавила Криса Рейнольдса.

Три правила Рейнольдса. Наблюдение за птицами вдохновило Рейнольдса на создание модели Birds для имитации поведения стаи птиц [10]. Он запрограммировал поведение каждого в отдельности агента на основе трех простых правил. Первое правило "Сплоченность" заключается в том, что агенты стараются держаться как можно ближе друг к другу. Второе правило "Разделение" обеспечивает, чтобы агенты стремились разойтись и сохранить безопасное расстояние друг от друга. Третье правило "Выравнивание скоростей" заключается в том, что агенты из одной группы стремятся двигаться с одинаковой скоростью (рис. 3, см. третью сторону обложки).

Четвертое правило. Модель Рейнольдса применима в случаях, когда допустимо "роевое" поведение группы. При задаче движения агентов с заданной геометрической топологией требуется модификация алгоритма. В требованиях мы указали, что группа автономных квадрокоптеров также должна быть способна двигаться строем. Добавим четвертое правило "Формация" для обеспечения

строевого движения, подобно системе из материальных точек, связанных упругими пружинами (рис. 4, см. третью сторону обложки). В такой модели при отклонении материальной точки возникают силы, возвращающие его в исходную позицию, сохраняя геометрическую топологию. Четвертое правило будет замещать правило "Сплоченности" при режиме полета строем.

Разработку децентрализованного алгоритма управления группой автономных квадрокоптеров в трехмерном пространстве осуществим эволюционным способом, начав с решения менее сложной плоской кинематической задачи.

Плоская кинематическая задача. Рассмотрим МАС, состоящую из идентичных агентов треугольной формы со следующим вектором состояния и управляющим воздействием:

$$\begin{cases} \mathbf{x} = [x \ y \ \varphi]; \\ \mathbf{u} = [V_X \ V_Y \ \omega], \end{cases}$$

где x и y — координаты агента, V_X и V_Y — проекции скорости агента, φ и ω — угол и угловая скорость вокруг собственной оси. Уравнение движения для агента имеет следующий вид:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{u}.$$

Каждый агент получает информацию о положении других агентов, находящихся в его зоне слышимости. На основе этого агент регулирует скорость движения по модифицированному алгоритму Рейнольдса (рис. 5).

Управляющее воздействие по скорости для произвольного i -го агента зададим как сумму четырех компонент, соответствующих четырем правилам:

$$\begin{cases} u_1 = k_V V_{C_i x} + k_C \sum_{|r_{ij}| < l_{\min}, |x_{ij}| < l_{\min}} \left(-\frac{x_{ij}}{|x_{ij}|} (l_{\min} - |x_{ij}|) \right) + \\ + k_{P_1} (1 - \gamma) r_{C_i x} + k_{P_2} \gamma \varepsilon_{P_x}; \\ u_2 = k_V V_{C_i y} + k_C \sum_{|r_{ij}| < l_{\min}, |y_{ij}| < l_{\min}} \left(-\frac{y_{ij}}{|y_{ij}|} (l_{\min} - |y_{ij}|) \right) + \\ + k_{P_1} (1 - \gamma) r_{C_i y} + k_{P_2} \gamma \varepsilon_{P_y}; \\ u_3 = k_\varphi ((1 - \gamma)(\bar{\varphi} - \varphi_i) + \gamma \varepsilon_\varphi), \end{cases}$$

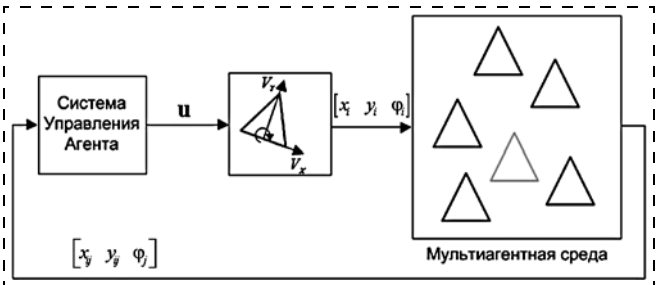


Рис. 5. Кинематическое управление агентом при двумерном групповом движении

где $k_V, k_C, k_{P_1}, k_{P_2}$ — коэффициенты усиления компонент, соответствующие порядку "Выравнивание скорости", "Разделение", "Сплоченность" и "Формация"; $\mathbf{r}_{C_i}$ и $\mathbf{V}_{C_i}$ — векторы положения и скорости центра масс группы агентов в зоне слышимости и системе координат i -го агента; x_{ij} и y_{ij} — проекции расстояния до соседнего j -го агента; $l_{\min}$ — минимально безопасное расстояние между агентами; γ — режим полета (0 — роевое движение, 1 — строевое движение); ε_p — ошибка текущего положения агента относительно заданного. Способ управления угловой скоростью также зависит от режима полета: $\bar{\varphi}$ — среднее значение угла поворота среди агентов в зоне слышимости, ε_φ — ошибка текущего угла поворота агента относительно заданного. Заданная относительная позиция и угол поворота определяются выбранной геометрической топологией строя (например, клин, колонна, цепочка). Здесь $r_{C_{ix}}, r_{C_{iy}}, V_{C_{ix}}, V_{C_{iy}}, \varepsilon_{Px}, \varepsilon_{Py}$ — проекции соответствующих векторов в подвижной системе координат рассматриваемого i -го агента.

Примеры компьютерной апробации алгоритма можно найти по ссылке [21].

Плоская динамическая задача. Теперь рассмотрим МАС, состоящей из идентичных агентов треугольной формы со следующим вектором состояния и управляющим воздействием:

$$\begin{cases} \mathbf{x} = [x \ y \ \varphi \ V_x \ V_y \ \omega]; \\ \mathbf{u} = [F_x \ F_y \ L_z], \end{cases}$$

где F_x и F_y — проекции силы управления; L_z — момент управления. Уравнение движения агента будет иметь вид:

$$\begin{cases} \ddot{x} = (1/m)F_x; \\ \ddot{y} = (1/m)F_y; \\ \ddot{\varphi} = (1/I_{zz})L_z, \end{cases}$$

где m — масса агента, I_{zz} — момент инерции вокруг собственной оси вращения.

Управляющее воздействие по ускорению будем вычислять аналогичным образом:

$$\begin{cases} u_1 = m \left(k_V V_{C_{ix}} + \right. \\ \left. + k_C \sum_{|r_{ij}| < l_{\min}, |x_{ij}| < l_{\min}} \left(-\frac{x_{ij}}{|x_{ij}|} (l_{\min} - |x_{ij}|) \right) + \right. \\ \left. + k_{P_1} (1 - \gamma) r_{C_{ix}} + k_{P_2} \gamma \varepsilon_{Px} \right); \\ u_2 = m \left(k_V V_{C_{iy}} + \right. \\ \left. + k_C \sum_{|r_{ij}| < l_{\min}, |y_{ij}| < l_{\min}} \left(-\frac{y_{ij}}{|y_{ij}|} (l_{\min} - |y_{ij}|) \right) + \right. \\ \left. + k_{P_1} (1 - \gamma) r_{C_{iy}} + k_{P_2} \gamma \varepsilon_{Py} \right); \\ u_3 = m k_\varphi ((1 - \gamma)(\bar{\varphi} - \varphi_i) + \gamma \varepsilon_\varphi). \end{cases} \quad (7)$$

Каждое правило выражено в виде искусственной силы упругости. На рис. 6 представлена схема управления, где $\mathbf{P}_{2 \times q_N}^B = [r_{ij}^B]_{2 \times q_N}$ — положение соседних агентов в зоне слышимости в системе координат рассматриваемого агента.

Общая схема управления на базе модифицированных правил Рейнольдса представлена на рис. 7.

Примеры компьютерной апробации алгоритма можно найти по ссылке [22].

Задача группового управления квадрокоптерами в трехмерном пространстве. Рассмотрим МАС, состоящую из идентичных квадрокоптеров с управляющим воздействием (1), уравнением движения (2) и вектором состояния $\mathbf{x} = [z \ y \ z \ \dot{x} \ \dot{y} \ \dot{z} \ \varphi \ \theta \ \psi \ p \ q \ r]$.

Оператор выбирает режим поведения квадрокоптера (рис. 8): при $\gamma = 1$ включается режим лидера, тогда управление по скорости или по траектории выполняется оператором; при $\gamma = 0$ включается режим ведомого, тогда агент полностью автономен и регулирует свое движение в соответствии с мо-

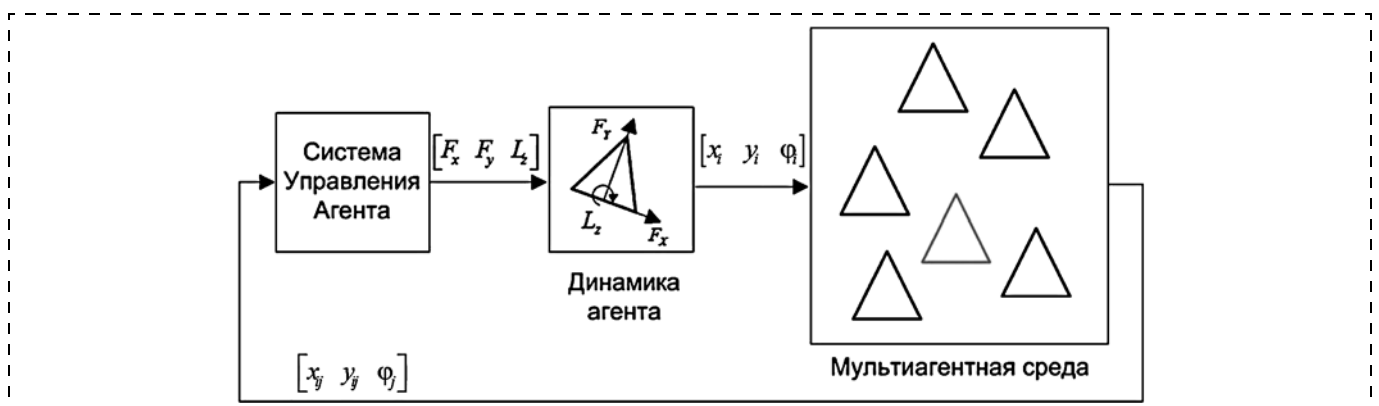


Рис. 6. Динамическое управление агентом при двумерном групповом движении

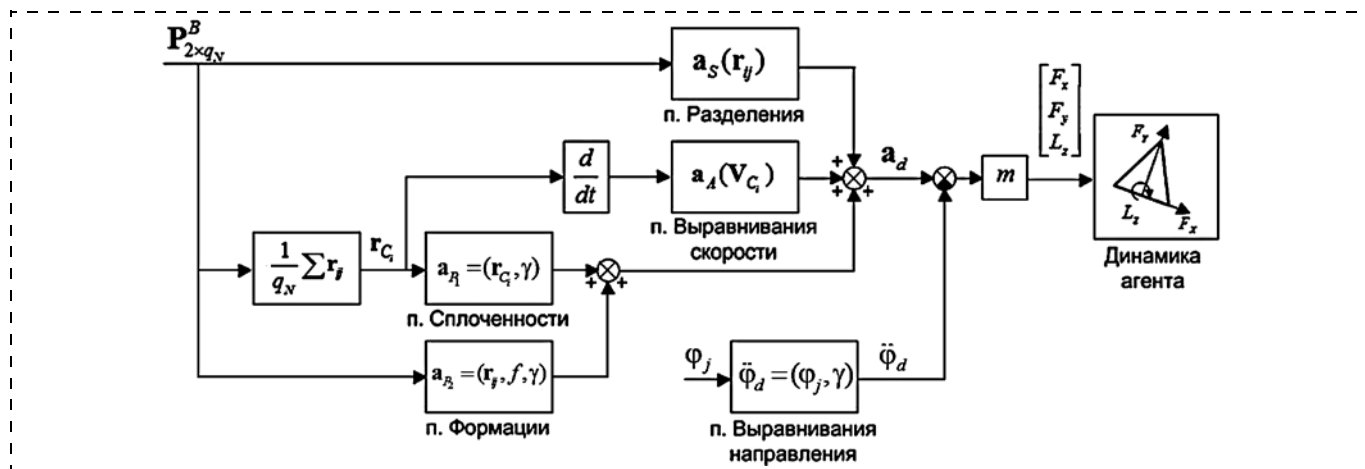


Рис. 7. Схема управления по ускорению на базе модифицированных правил Рейнольдса

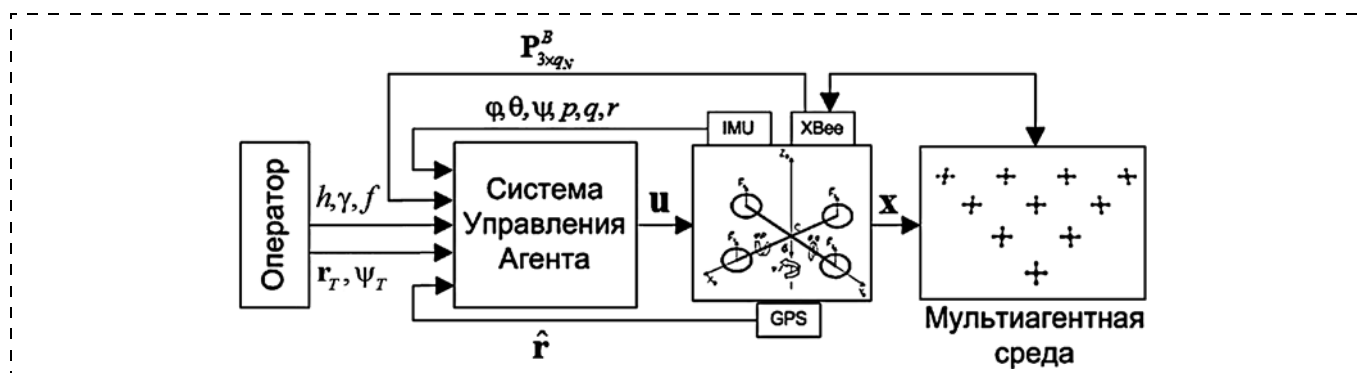


Рис. 8. Взаимодействие квадрокоптера с мультиагентной средой

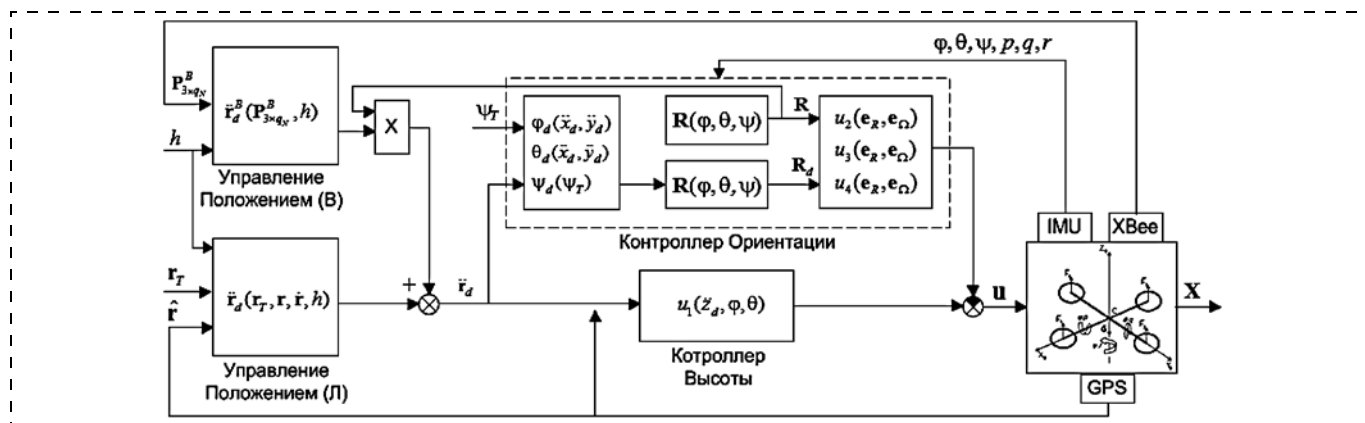


Рис. 9. Схема управления квадрокоптером в МАС

модифицированными правилами Рейнольдса, состоянием мультиагентной среды и режимом движения группы. Оператор также выбирает режим полета группы h (строевое или роевое) и номер заранее заданных форм строя f .

В основе алгоритма управления квадрокоптером в МАС лежат ранее разработанные модули управления одинарным квадрокоптером (4)–(6) и

модуль управления агентом в МАС в плоской динамической задаче (7).

Квадрокоптер в зависимости от режима поведения переключает блок управления положением. Если квадрокоптер является лидером, то включен блок управления положением (Л) (рис. 9), где выходной сигнал формируется согласно системе (4).

Если квадрокоптер является ведомым, то включен блок управления положением (В), и желаемое

ускорение формируется по аналогии с системой (7) с коррективкой на трехмерное пространство:

$$\begin{cases} \ddot{\mathbf{r}}_d^B = \mathbf{a}_V + \mathbf{a}_C + \mathbf{a}_{P_1} + \mathbf{a}_{P_2} + \mathbf{K}_d \varepsilon_d; \\ \mathbf{a}_V = \mathbf{K}_V \mathbf{V}_C; \\ \mathbf{a}_C = \mathbf{K}_C \sum_{|r_{ij}| < l_{\min}} \left(-\frac{\mathbf{r}_{ij}}{|r_{ij}|} (l_{\min} - |r_{ij}|) \right); \\ \mathbf{a}_{P_1} = \mathbf{K}_{P_1} (1 - \gamma) \mathbf{r}_C; \\ \mathbf{a}_{P_2} = \mathbf{K}_{P_2} \gamma \varepsilon_P. \end{cases} \quad (8)$$

Компьютерная апробация алгоритма управления по траектории

Для апробации алгоритма децентрализованного управления квадрокоптером в MAC использовалась связка (рис. 10) программных пакетов MATLAB и Universal Mechanism (UM) [20]. Квадрокоптеры в UM задаются как система из идентичных тел с одинаковыми масс-инерционными характеристиками. Для разработки модели системы управления использовали пакет MATLAB, у которого была установлена двухсторонняя связь с UM для осу-

ществления динамического и кинематического моделирования. Каждый агент имеет свою независимую систему управления в MATLAB. При этом из UM в MATLAB передаются такие параметры, как координаты, скорость и угловые параметры агента, а также координаты и угол рыскания соседних агентов в ЛСК искомого агента. В MATLAB проводится расчет управляющего воздействия (1) и передается в UM (рис. 10).

Для компьютерного моделирования использовали единый существующий прототип квадрокоптера со следующими масс-инерционными и геометрическими характеристиками:

$$\mathbf{I} = \begin{bmatrix} 0,002352 & 0 & 0 \\ 0 & 0,002352 & 0 \\ 0 & 0 & 0,004704 \end{bmatrix};$$

$m = 0,32 \text{ кг}; L = 0,209 \text{ м}.$

Как уже было отмечено ранее, модель системы управления была построена в MATLAB, где управляющие сигналы генерируются на основе формул (4)–(6) и (7). Матрицы усиления подобраны экспериментально и равны

$$\begin{aligned} \mathbf{K}_p &= \begin{bmatrix} 2 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 2 \end{bmatrix}; \mathbf{K}_d = \begin{bmatrix} 2 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 2 \end{bmatrix}; \mathbf{K}_R = \begin{bmatrix} 20 & 0 & 0 \\ 0 & 20 & 0 \\ 0 & 0 & 20 \end{bmatrix}; \\ \mathbf{K}_\Omega &= \begin{bmatrix} 5 & 0 & 0 \\ 0 & 5 & 0 \\ 0 & 0 & 5 \end{bmatrix}; \mathbf{K}_V = \begin{bmatrix} 2 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 2 \end{bmatrix}; \mathbf{K}_C = \begin{bmatrix} 2 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 4 \end{bmatrix}; \\ \mathbf{K}_{P_1} &= \begin{bmatrix} 2 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \mathbf{K}_{P_2} = \begin{bmatrix} 2 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; l_{\min} = 1. \end{aligned}$$

На графиках на рис. 11 представлены результаты моделирования группового движения квадрокоптеров в режиме полета строем. Лидеру задана плоская синусоидальная траектория:

$$\begin{cases} x_L = 5\sin(0,5t); \\ y_L = 0,5t; \\ z_L = 0. \end{cases}$$

Лидер выполняет плоское движение при средней скорости 3,5 м/с и описывает синусоиду вдоль оси X. Группа из 10 квадрокоптеров демонстрирует сплоченное коллективное движение: среднеарифметическое расстояние между агентами колеблется около $\bar{d}_{ij} = 1,8 \text{ м}$ при стандартном отклонении в пределах $\sigma = 1 \text{ м}$. Сближение агентов происходит на поворотах.

Критерий безопасности также соблюдается: минимальная дистанция между парой агентов $\min d_{ij} > 1,4 \text{ м}$.

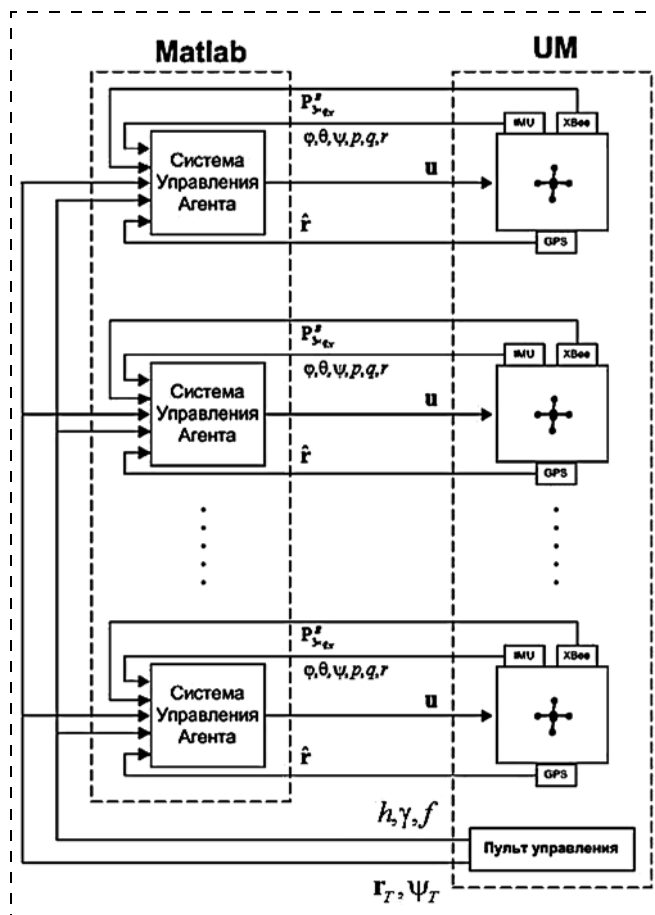


Рис. 10. Схема подключения "Matlab" и "Universal Mechanism"

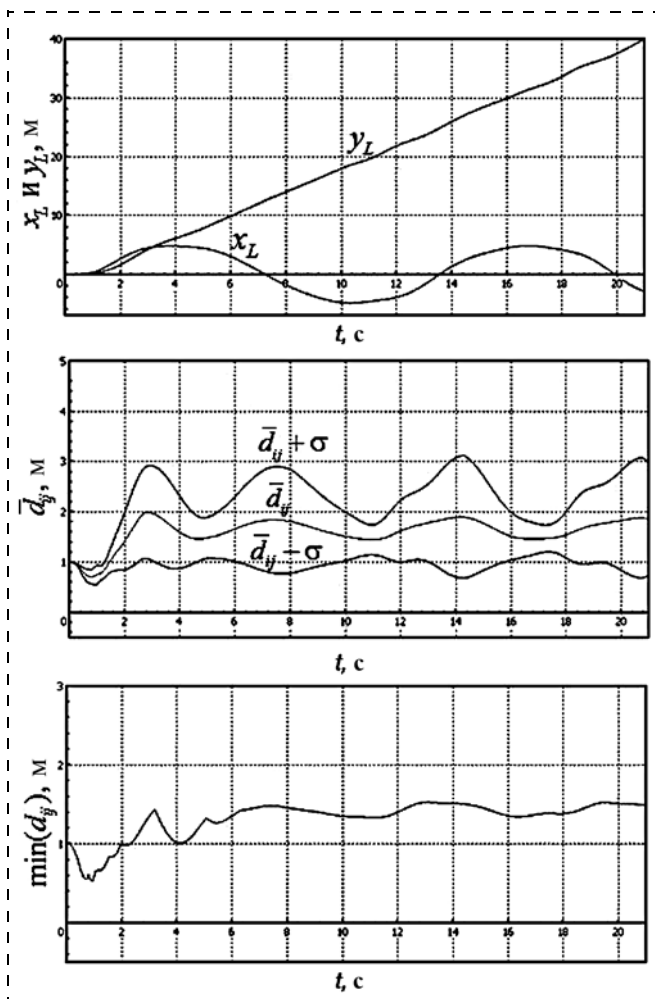


Рис. 11. Оценка критериев сплоченности и безопасности группового движения квадрокоптеров

Примеры компьютерной апробации алгоритма можно найти по ссылке [23].

Заключение

В работе получена динамическая модель движения одинарного квадрокоптера и алгоритм управления по траектории. На базе модифицированных правил Рейнольдса разработан децентрализованный алгоритм управления квадрокоптеров в мультиагентной системе для полета в двух режимах в трехмерном пространстве, отвечающий шести ключевым критериям согласованного и безопасного движения в группе.

С помощью компьютерного моделирования верифицирована работоспособность алгоритма управления квадрокоптерами в MAC.

Список литературы

1. Cutler M., How J. P. Actuator Constrained Trajectory Generation and Control for Variable-Pitch Quadrotors // AIAA Guidance,

Navigation, and Control Conference (GNC). Minneapolis, Minnesota, August 2012.

2. Lee T., Leok M., McClamroch N. H. Geometric Tracking Control of a Quadrotor UAV on SE(3) // 49th IEEE Conference on Decision and Control. 2011.

3. Mellinger D., Kumar V. Minimum Snap Trajectory Generation and Control for Quadrotors. GRASP Lab., University of Pennsylvania, 2011.

4. Kushleyev A., Mellinger D., Kumar V. Towards A Swarm of Agile Micro Quadrotors. GRASP Lab, University of Pennsylvania, 2013.

5. Thorhallur Tomas Buchholz, Dagur Gretarsson. Construction of a Four Rotor Helicopter Control System // S. M. Thesis. Technical University of Denmark, February 2009.

6. Hoffman G. M., Huang H., Waslander S. L., Tomlin C. J. Quadcopter Helicopter Flight Dynamics and Control: Theory and Experiment // AIAA Guidance, Navigation and Control Conference and Exhibit, August 2007, Hilton Head, South Carolina.

7. Hong S. K. Fuzzy logic based closed-loop strap down attitude system for unmanned aerial vehicle (UAV). Department of Aerospace Engineering, Sejong University, 2005.

8. Vasarhelyi G., Virágh Cs., Somorjai G., Tarcai N., Szőrényi T., Nepusz T., Vicsek T. Outdoor flocking and formation flight with autonomous aerial robots. Department of Biological Physics, Eotvos University, Hungary, 2014.

9. Hoffmann G., Huang H., Waslander S., Tomlin C. Precision flight control for a multi-vehicle quadrotor helicopter testbed // Control engineering practice. 2011. Vol. 19 (9). P. 1023–1036.

10. Reynolds C. Flocks, birds, and schools: A distributed behavioural model // Comput. Graph. 1987. Vol. 21, N. 4. P. 25–34.

11. Зенкевич С. Л., Галустян Н. К. Синтез и апробация алгоритма управления движением квадрокоптера по траектории // Мехатроника, автоматизация, управление. 2015. № 8. С. 530–535.

12. Морозова Н. С. Управление движением строя для мультиагентной системы, моделирующей автономных роботов // Вестник московского университета. Сер. 15. Вычислительная математика и кибернетика. 2015. № 4. С. 23–31.

13. Иванов Д. Я. Построение формаций в группах квадрокоптеров с использованием виртуального строя // XII Всероссийское совещание по проблемам управления ВСПУ. Москва, 2014.

14. Зенкевич С. Л., Ющенко А. С. Основы управления манипуляционными роботами. М.: Изд-во МГТУ, 2004.

15. Голубев Ю. Ф. Основы теоретической механики. М.: Изд-во МГУ, 2000.

16. Каляев И. А., Гайдук А. Р., Капустян С. Г. Модели и алгоритмы коллективного управления в группах роботов. М.: Физматлит, 2009.

17. Иванов В. А., Медведев В. С. Математические основы теории оптимального и логического управления. М.: Изд-во МГТУ, 2011.

18. Бесекерский В. А., Попов Е. П. Теория систем автоматического управления. СПб.: Профессия, 2007.

19. Белоконов С. А., Золотухин Ю. Н., Мальцев А. С., Нестеров А. А., Филиппов М. Н. Управление параметрами полета квадрокоптера при движении по заданной траектории // Автометрия. 2012. № 5. С. 32–41.

20. Universal Mechanism — the software for modeling of dynamics. URL: <http://www.universalmecanismo.com>

21. Примеры компьютерной апробации алгоритма для плоской кинематической задачи. URL: www.youtube.com/watch?v=TM123zxiNso, www.youtube.com/watch?v=1kr6sEvJ6Ek

22. Примеры компьютерной апробации алгоритма для плоской динамической задачи. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=yuidxOUM-o8>

23. Примеры компьютерной апробации алгоритма управления квадрокоптером в MAC. URL: www.youtube.com/watch?v=8a3Bgpg3Vas, www.youtube.com/watch?v=aORtggl1aNk

Decentralized Control of a Quadcopter Swarm

S. L. Zenkevich, zenkev@bmstu.ru, **N. K. Galustyan**, narekgalustyan@gmail.com✉,
Robotic Center for Education and Research at Bauman Moscow State Technical University

Corresponding author: **Galustyan N. K.**, Postgraduate Student,
Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russian Federation,
e-mail: narekgalustyan@gmail.com

Received on July 05, 2016

Accepted on July 20, 2016

In this article the authors propose a decentralized control algorithm for a swarm consisted of quadcopters, which are unmanned aerial vehicles (UAV) lifted and propelled by four rotors. The first step was derivation of a quadcopter flight dynamic (math) model and its further linearization. The math model was derived on the basis of Newton and Euler equation of motion. The next step was to design a trajectory control algorithm by using PD regulator for the trajectory error minimization. After designing and approbation of the control algorithm of a unit quadcopter, the authors proceeded further with the task of a group control. Originally, the authors set several requirements to the control algorithm of the quadcopter for a group flight, e.g. cohesion and safety of the flights, decentralization and scalability of the control algorithm. As a ground algorithm they selected C. Reynolds rules designed for "boids". In order to make it possible to switch a quadcopter group flight from the swarm mode to the formation mode, in addition to Reynolds rules the authors developed the forth rule called "Formation". Before designing of the decentralized control for a quadcopter swarm, the authors solved similar tasks related to the kinematic control and dynamic control of the agents moving in 2D. The authors set several experiments in a "Universal Mechanism" and "Matlab" of the quadcopter group flight of 10 agents with independent control systems. The above-mentioned experiments proved the efficiency of the designed decentralized control algorithm. The modeling details and experiment results are also presented in the paper.

Keywords: Swarm, multiagent system, flocking, quadcopter, dynamics, attitude control, trajectory control, formation flight, outdoor flocking, decentralized control, PD regulator, MATLAB, universal mechanism

For citation:

Zenkevich S. L., Galustyan N. K. Decentralized Control of a Quadcopter Swarm, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2016, vol. 17, no. 9, pp. 774–782.

DOI: 10.17587/mau.17.774-782

References

1. **Cutler M., How J. P.** Actuator Constrained Trajectory Generation and Control for Variable-Pitch Quadrotors, *AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference (GNC)*, Minneapolis, Minnesota, August 2012.
2. **Lee T., Leok M., McClamroch N. H.** Geometric Tracking Control of a Quadrotor UAV on SE(3), *49th IEEE Conference on Decision and Control*, 2011.
3. **Mellinger D., Kumar V.** Minimum Snap Trajectory Generation and Control for Quadrotors, *GRASP Lab., University of Pennsylvania*, 2011.
4. **Kushleyev A., Mellinger D., Kumar V.** Towards A Swarm of Agile Micro Quadrotors, *GRASP Lab, University of Pennsylvania*, 2013.
5. **Thorhallur Tomas Buchholz, Dagur Gretarsson.** Construction of a Four Rotor Helicopter Control System, *S. M. Thesis, Technical University of Denmark*, 2009.
6. **Hoffman G. M., Huang H., Waslander S. L., Tomlin C. J.** Quadcopter Helicopter Flight Dynamics and Control: Theory and Experiment, *AIAA Guidance, Navigation and Control Conference and Exhibit, Hilton Head, South Carolina*, 2007.
7. **Hong S. K.** Fuzzy logic based closed-loop strap down attitude system for unmanned aerial vehicle (UAV), *Department of Aerospace Engineering, Sejong University*, 2005.
8. **Vasárhelyi G., Virágh Cs., Somorjai G., Tarcai N., Szőrényi T., Nepusz T., Vicsek T.** Outdoor flocking and formation flight with autonomous aerial robots, *Department of Biological Physics, Eotvos University, Hungary*, 2014.
9. **Hoffmann G., Huang H., Waslander S., Tomlin C.** Precision flight control for a multi-vehicle quadrotor helicopter testbed, *Control engineering practice*, 2011, no. 19 (9), pp. 1023–1036.
10. **Reynolds C.** Flocks, birds, and schools: A distributed behavioral model, *Comput. Graph.*, 1987, vol. 21, no. 4, pp. 25–34.
11. **Zenkevich S. L., Galustyan N. K.** *Sintez i aprobatsiya algoritma upravleniya dvizheniem kvadrokoptera po traektorii* (Quadcopter trajectory control design and flight modeling), *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2015, no. 8, pp. 530–535 (in Russian).
12. **Morozova N. S.** *Upravlenie dvizheniem stroja dlja mul'tiagentnoj sistemy, modelirujushhej avtonomnyh robotov* (Formation control of multiagent group of autonomous robots), *Vestnik MSU, Vychislitel'naja Matematika i Kibernetika*, 2015, no. 4, pp. 23–31 (in Russian).
13. **Ivanov D. Ya.** *Postroenie formacij v gruppah kvadrokopteroj s ispol'zovaniem virtual'nogo stroja* (Control of quadcopter groups based on virtual formation), *XII Vserossijskoe Soveshhanie po Problemam Upravlenija VSPU, Moscow*, 2014 (in Russian).
14. **Zenkevich S., Yuschenko A.** *Osnovy upravlenija manipulacionnymi robotami* (Basics of manipulator control), *BMSTU*, 2004 (in Russian).
15. **Golubev Ju.** *Osnovy teoreticheskoy mehaniki* (Basics of theoretical mechanics), *MSU*, 2000 (in Russian).
16. **Kaljaev I. A., Gajduk A. R., Kapustjan S. G.** *Modeli i algoritmy kollektivnogo upravlenija v gruppah robotov* (Models and algorithms of collective control in robot groups), *Moscow, Fizmatlit*, 2009 (in Russian).
17. **Ivanov V., Medvedev V.** *Matematicheskie osnovy teorii optimal'nogo i logicheskogo upravlenija* (Mathematical basics of optimal and logic control theory), *BMSTU*, 2011 (in Russian).
18. **Besekerskij V., Popov E.** *Teorija sistem avtomaticheskogo upravlenija* (Theory of autonomous control), *Proffesija*, 2007 (in Russian).
19. **Belokon' S., Zolotuhin Ju., Mal'cev A. S., Nesterov A. A., Filippov M. N.** *Upravlenie parametrami poljota kvadrokoptera pri dvizhenii po zadannoju traektorii* (Control of flight main parameters in case of trajectory control), 2012, no. 5, pp. 32–41 (in Russian).
20. **Universal Mechanism**, the software for modeling of dynamics, available at: <http://www.universalmecanism.com>
21. **Link** on computer experiment of group control for 2D kinematic task, available at: www.youtube.com/watch?v=TM123x1Nso, www.youtube.com/watch?v=lkr6sEvJ6Ek
22. **Link** on computer experiment of group control for 2D dynamic task, available at: <https://www.youtube.com/watch?v=yiidxOUm-o8>
23. **Link** on computer experiment of quadcopter group control, available at: www.youtube.com/watch?v=8a3Bgpg3Vas, www.youtube.com/watch?v=aORtg11aNk