

ИНЖЕНЕРНЫЙ МЕТОД ПРЕСЛЕДОВАНИЯ-УКЛОНЕНИЯ ОБЪЕКТОВ ДЛЯ ЗАДАЧ АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ РОБОТАМИ СОВМЕСТНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ

М.М. Стебулянин¹, В.Н. Болдырев¹

¹ФГАОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН», г. Москва, Российская Федерация

Объектом исследования в статье является система «робот совместного использования (кобот) – человек», цель исследования – обеспечить отсутствие случайного контакта между коботом и человеком для безопасности их взаимодействия в общей рабочей зоне. Предложен подход к решению задачи преследования-уклонения объектов на основе закона управления по ускорению с переменными коэффициентами взаимным движением двух выбранных материальных точек. Приводится правило однопараметрической настройки коэффициентов для устойчивости целевого движения. Параметром настройки является частота свободных колебаний звена, описываемого линейным дифференциальным уравнением 2-го порядка с переменными коэффициентами. Управление параметром строится из условия убывания функции угла между векторами скорости рассматриваемых точек, которое было сведено к решению алгебраического неравенства. Показаны результаты моделирования разработанного алгоритма управления для транспортных степеней подвижности робота KUKA KR-30-3. Привод робота был выбран на основе трехконтурного привода с двигателем постоянного тока, замкнутого по положению при настройке на оптимум по модулю в рамках принципа подчиненного регулирования контуров.

Ключевые слова: адаптивное управление; устойчивость; коботы; задача преследования; задача уклонения.

Введение

В результате успешных внедрений робототехники в промышленные и специальные области, совершенствования управляющих и сенсорных систем роботов, систем их адаптивного программирования, становлению и развитию возможностей методов на основе искусственного интеллекта появился новый класс роботов, называемый роботами совместного использования, или сокращенно, коботами. Коботы проникают в области, в том числе непроизводственные, где требуется более гибкое функциональное взаимодействие с человеком, которое сложно или попросту невозможно осуществить на основе жесткого программирования робототехнических систем. Такое взаимодействие может иметь место при работах человека и кобота с объектами на общем транспортере, при обращениях к общему контейнеру-накопителю, при маркировочных разгрузочно-погрузочных или складских работах, при выполнении смешанной последовательности операций, часть из которых, особенно сложных с точки зрения манипуляций, выполняет человек (например, в лабораториях химико-биологического анализа), при работах по ассистированию человека в медицинской деятельности и т.д. [1–4].

В робототехнологических комплексах на основе коботов существует единое/общее рабочее пространство человека и робота, не ограниченное периметрами безопасности или защитными ограждениями. Это приводит к особенному требованию, а именно – безопасности для человека действий робота в этом пространстве на основе дополнительного функционала автоматической адаптации движений или их останова, а также ограничения их мощности. Удовлетворение этого требования возможно только на основе новых научных, практико-ориентированных разработок по совершенствованию алгоритмов адаптивного управления роботами на основе внедрения мультисенсорной информации, оперативной и/или обучающей [5–11].

1. Описание исследуемого вопроса

При построении алгоритмов управления роботами совместного использования могут оказаться инструментально полезными решения задач взаимного движения двух материальных точек A и B в следующих условиях: наблюдаемое движение точки A является задающим, а движение точки B является вынужденным движением в соответствии с некоторым

критерием, налагаемым на взаимное расположение точек. При этом управление радиус-вектором \mathbf{r}_b точки В в неподвижной декартовой системе $OXYZ$ производится изменением обобщенных координат $\mathbf{q} \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$ согласно уравнению:

$$\frac{d\mathbf{r}_b(t)}{dt} = \dot{\mathbf{r}}_b(t) = \mathbf{J}\mathbf{q}(t)\dot{\mathbf{q}}(t), \quad (1)$$

где $\mathbf{J} \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ – ограниченная невырожденная матрица с действительными коэффициентами, t – время.

В зависимости от поставленного критерия задачи совместного движения могут существенно различаться, но распространенной является задача «преследования-уклонения» объектов. В общетеоретическом (математическом) смысле эта задача достаточно исследована, и для нее предложены определенные решения [12–14]. Метод, рассматриваемый в данной статье, имеет практическую направленность и адресован именно роботам-манипуляторам, как инженерный, т.е. не требующий сложной вычислительной адаптации теоретических заключений. Однако, теоретические перспективы метода существуют и связаны, прежде всего, с задачами интегрирования вращательных движений в механических системах, в том числе, с кинематической избыточностью.

1.1. Постановка задачи 1 (задача преследования)

Движение точки А (радиус-вектор точки обозначим \mathbf{r}_a) происходит по априорно неизвестному для точки В закону с ограниченной скоростью $\|\dot{\mathbf{r}}_a\|$, но функция ошибки $\mathbf{e}(t) = \mathbf{r}_a(t) - \mathbf{r}_b(t)$, а также ее производная по времени $\dot{\mathbf{e}}(t)$ доступны мгновенному измерению, при этом вторая производная $\ddot{\mathbf{e}}(t)$ существует. Начальное положение точки В относительно точки А принадлежит обозримой сфере некоторого радиуса S .

Требуется построить управление движением точки В такое, что с течением времени модуль вектора ошибки расположения точек устойчиво попадает в трубку достаточно малого радиуса ε (радиус захвата цели).

Упростим задачу допущением того, что каждое обобщенное ускорение \ddot{q}_i , $i = 1, 2, 3$ может быть получено запрашиваемой (требуемой) величины, т.е. что мощность движения точки В достаточно большая. Последнее, разумеется, имеет смысл только в случае наличия ненулевой массы точки В.

1.1.1. Решение задачи преследования

Продифференцировав уравнение

$$\mathbf{J}^{-1}(\mathbf{q}(t))\dot{\mathbf{r}}_b(t) = \dot{\mathbf{q}}(t), \quad (2)$$

получим закон изменения обобщенных ускорений, соответствующий движению $\mathbf{r}_a(t)$ (зависимость величин от времени опустим для сокращения записи):

$$\ddot{\mathbf{q}} = \mathbf{J}^{-1}(\mathbf{q})(\ddot{\mathbf{r}}_a - \ddot{\mathbf{e}}) + \left(\frac{d}{dt}\mathbf{J}^{-1}(\mathbf{q}) \right) (\dot{\mathbf{r}}_a - \dot{\mathbf{e}}). \quad (3)$$

Закон управления ошибкой $\mathbf{e}(t)$, обеспечивающий решение (3), зададим в виде уравнения собственного движения устойчивого колебательного звена (4):

$$\ddot{\mathbf{e}} + k_1\dot{\mathbf{e}} + k_2\mathbf{e} = \mathbf{0}, \quad k_1 = 2\nu\lambda, \quad k_2 = \lambda^2, \quad 0 < \nu < 1. \quad (4)$$

С учетом (4) преобразуем (3) к виду:

$$\ddot{\mathbf{q}} = \mathbf{J}^{-1}(\mathbf{q})(\ddot{\mathbf{r}}_a + k_1\dot{\mathbf{e}} + k_2\mathbf{e}) + \left(\frac{d}{dt}\mathbf{J}^{-1}(\mathbf{q}) \right) (\dot{\mathbf{r}}_a - \dot{\mathbf{e}}). \quad (5)$$

Параметром настройки движения точки В в соответствии с (5) является λ – угловая частота свободных колебаний звена (4). Управление величиной λ построим из условия монотонного убывания функции $\theta(t)$ – угла между векторами скоростей точек $\dot{\mathbf{r}}_a(t)$ и $\dot{\mathbf{r}}_b(t)$,

которое необходимо для астатизма удержания точки А в движении. Для этого потребуем выполнение условия

$$\frac{d}{dt}(\cos \theta(\lambda(t))) \geq 0, \quad (6)$$

причем равенство достигается только при $\theta = 0$.

Поскольку

$$\cos \theta = \frac{\dot{\mathbf{r}}_a^T \mathbf{J} \dot{\mathbf{q}}}{\|\dot{\mathbf{r}}_a\| \|\mathbf{J} \dot{\mathbf{q}}\|}$$

нетрудно установить на основании правила дифференцирования дроби, что (6) эквивалентно условию:

$$\frac{d}{dt}(\dot{\mathbf{r}}_a^T \mathbf{J} \dot{\mathbf{q}}) - (\dot{\mathbf{r}}_a^T \mathbf{J} \dot{\mathbf{q}}) \frac{d}{dt}(\ln(\|\dot{\mathbf{r}}_a\| \|\mathbf{J} \dot{\mathbf{q}}\|)) \geq 0. \quad (7)$$

Продифференцируем первое слагаемое, используя цепочку преобразований с учетом (5):

$$\begin{aligned} \ddot{\mathbf{r}}_a^T \mathbf{J} \dot{\mathbf{q}} + \dot{\mathbf{r}}_a^T \dot{\mathbf{J}} \dot{\mathbf{q}} + \dot{\mathbf{r}}_a^T \mathbf{J} \ddot{\mathbf{q}} &= \ddot{\mathbf{r}}_a^T \mathbf{J} \mathbf{J}^{-1}(\dot{\mathbf{r}}_a - \dot{\mathbf{e}}) + \dot{\mathbf{r}}_a^T \dot{\mathbf{J}} \mathbf{J}^{-1}(\dot{\mathbf{r}}_a - \dot{\mathbf{e}}) + \\ &+ \dot{\mathbf{r}}_a^T \mathbf{J} \mathbf{J}^{-1}(\ddot{\mathbf{r}}_a + k_1 \dot{\mathbf{e}} + k_2 \mathbf{e}) + \dot{\mathbf{r}}_a^T \mathbf{J} \left(\frac{d}{dt} \mathbf{J}^{-1} \right) (\dot{\mathbf{r}}_a - \dot{\mathbf{e}}) = \\ &= \dot{\mathbf{r}}_a^T \mathbf{e} \lambda^2 + 2\lambda \dot{\mathbf{r}}_a^T \dot{\mathbf{e}} + 2\ddot{\mathbf{r}}_a^T \dot{\mathbf{r}}_a - \ddot{\mathbf{r}}_a^T \dot{\mathbf{e}}. \end{aligned} \quad (8)$$

Здесь учтено, что

$$\mathbf{J} \mathbf{J}^{-1} + \mathbf{J} \left(\frac{d}{dt} \mathbf{J}^{-1} \right) = \frac{d}{dt} (\mathbf{J} \mathbf{J}^{-1}) = \frac{d \mathbf{E}}{dt} = \mathbf{0},$$

где \mathbf{E} – единичная матрица.

С учетом (8) выражение (7) запишем в виде неравенства:

$$m\lambda^2 + n\lambda + p \geq 0, \quad (9)$$

где

$$m = \dot{\mathbf{r}}_a^T \mathbf{e}, \quad n = 2\dot{\mathbf{r}}_a^T \dot{\mathbf{e}}, \quad p = 2\ddot{\mathbf{r}}_a^T \dot{\mathbf{r}}_a - \ddot{\mathbf{r}}_a^T \dot{\mathbf{e}} - (\dot{\mathbf{r}}_a^T \mathbf{J} \dot{\mathbf{q}}) \frac{d}{dt}(\ln(\|\dot{\mathbf{r}}_a\| \|\mathbf{J} \dot{\mathbf{q}}\|))$$

Необходимым условием существования тривиального решения $\mathbf{e}(t) = \mathbf{0}$ при управлении, заданным соотношениями (5) и (9) будет, как нетрудно заметить, неравенство:

$$L(\mathbf{r}_a(t)) = 2\ddot{\mathbf{r}}_a^T \dot{\mathbf{r}}_a - (\dot{\mathbf{r}}_a^T \dot{\mathbf{r}}_a) \frac{d}{dt}(\ln(\|\dot{\mathbf{r}}_a\| \|\mathbf{J} \dot{\mathbf{q}}\|)) \geq 0. \quad (10)$$

Покажем, что неравенство (10) выполняется. Движение точки А будем рассматривать на последовательности достаточно малых интервалов времени $(t_{i1}; t_{i2}], i = 1, 2, \dots$ с начальными условиями $\mathbf{r}_a(t_{i1})$, $\dot{\mathbf{r}}_a(t_{i1}) = \mathbf{R}_i$, на каждом из которых движение точки А можно рассматривать, как прямолинейное с вектором мгновенной скорости $\dot{\mathbf{r}}_a(t) = \mathbf{R}_i e^{\alpha(t)}$, где $\alpha(t)$ – некоторая дифференцируемая на $(t_{i1}; t_{i2}], i = 1, 2, \dots$ функция. Подставив это выражение в (10), получим непротиворечащее ему на каждом интервале равенство:

$$\begin{aligned} L_i(\mathbf{r}_a(t)) &= 2\|\mathbf{R}_i\|^2 \dot{\alpha}(t) e^{2\alpha(t)} - \|\mathbf{R}_i\|^2 e^{2\alpha(t)} \frac{d}{dt} \left(\ln \left(\|\mathbf{R}_i\|^2 e^{2\alpha(t)} \right) \right) = \\ &= 2\|\mathbf{R}_i\|^2 \dot{\alpha}(t) e^{2\alpha(t)} - 2\|\mathbf{R}_i\|^2 e^{2\alpha(t)} \frac{d}{dt} (\ln \|\mathbf{R}_i\| + \alpha(t)) = 0. \end{aligned}$$

При анализе (9) рекомендуется учесть следующие замечания. Завышение величины λ приведет к увеличению требуемой мощности движения точки В, если бы речь шла о движении материального объекта, имеющего массу, на котором эта точка расположена. С другой стороны занижение λ приведет к большой ошибке в начале преследования, что существенно затруднило бы задачу, если бы опять же речь шла о движении технического объекта.

Поэтому нет сомнения, что управление величиной λ это весьма ответственный процесс, который, будучи успешным, приведет к эффективному, вплоть до робастного, управлению движением точки В в реальном мире. Результаты компьютерного моделирования, описанного ниже, позволяют утверждать, что весьма эффективным решением для λ является следующее:

$$\lambda = \begin{cases} \min \left(\max \left(k \frac{-n+\sqrt{D}}{2m}, \lambda_{\min} \right); \lambda_{\max} \right), & \text{если } m > 0 \cap D > 0, \\ \lambda_0 = \text{const} \in [\lambda_{\min}; \lambda_{\max}], & \text{иначе} \end{cases} \quad (11)$$

где $D = n^2 - 4mp$, $0 < \lambda_{\min} < \lambda_{\max}$ – постоянные границы некоторого интервала, $k = \text{const}$. Значения постоянных λ_{\min} , λ_{\max} , λ_0 , k подбираются в процессе вычислительного эксперимента.

1.1.2. Численное моделирование. Анализ результатов

Моделирование проводилось для ситуации, когда под точкой понимался полюс эффектора (концевого звена) манипулятора с кинематической схемой и геометрическими параметрами транспортных степеней подвижности робота KUKA KR-30-3 [15]. При этом точка А понималась как точка некоторого объекта работы. Моделируемая ситуация возникает, например, при захватах роботом объектов, движущихся на ленте транспортера.

Привод робота представляет собой следящий трехконтурный привод на основе двигателя постоянного тока, замкнутый по положению при настройке на оптимум по модулю в рамках принципа подчиненного регулирования контуров [16]. Известно, что при этом привод может быть описан передаточной функцией эквивалентного колебательного звена:

$$W(s) = \frac{K}{T^2 s^2 + 2ETs + 1}, \quad (12)$$

где T – постоянная времени, E – коэффициент демпфирования, K – коэффициент усиления, s – переменная в преобразовании Лапласа.

Для моделирования системы трех приводов был использован, как наиболее неблагоприятный для получения желаемого результата, принцип самого медленного звена, когда передаточные функции всех приводов принимаются равными функции самого медленного из них. При этом постоянная времени T считалась неизменной при движениях звеньев робота, что справедливо при наличии в приводах редукторов с большими передаточными отношениями, при которых взаимовлиянием звеньев допустимо пренебречь [17].

Блок-схема системы, управляемой по описанному алгоритму, представлена на рис. 1, на котором введены следующие обозначения:

- «path_control» – блок расчета обобщенных ускорений;
- «Jacobian» и «jacobian_int_derivative» – блоки расчета якобиана и производной по времени его обратной величины для трех первых звеньев робота KUKA KR-30-3 с учетом их геометрических параметров;
- «Matrix Multiply» – блок умножения матриц;
- «FK» блок решения прямой задачи кинематики;
- «lambda_control» – блок расчета λ в соответствии с формулой (11);
- «norm» – блок вычисления модуля вектора входных сигналов;
- W_1, W_2, W_3 – блоки моделирования влияния динамических свойств приводов на отработку задания по обобщенным координатам, описываемых соотношением (12).

Ниже представлены значения параметров компьютерной модели рассматриваемой задачи:

$$T = 0,18, \quad E = 0,55, \quad \lambda_{\min} = 3, \quad \lambda_{\max} = 15, \quad \lambda_0 = 5, \quad K = 1, \quad k = 1, 2.$$

Также были предъявлены требования к значению радиуса захвата цели: $\varepsilon < 4$ мм.

Для проведения вычислительных экспериментов была разработана программная реализация на языке Python, воспроизводящая описанную логику управления. С целью расширения возможностей анализа динамики работы системы в программный код была интегрирована функция визуализации библиотеки Pygame+OpenGL. Реализация проводилась с применением современных инструментов и методологий программирования, обеспечивающих высокую точность и наглядность результатов. Численные оценки матриц Якоби, ее

производной, а также оценки положений манипулятора методами прямой кинематики были получены с использованием функций библиотеки NumPy.

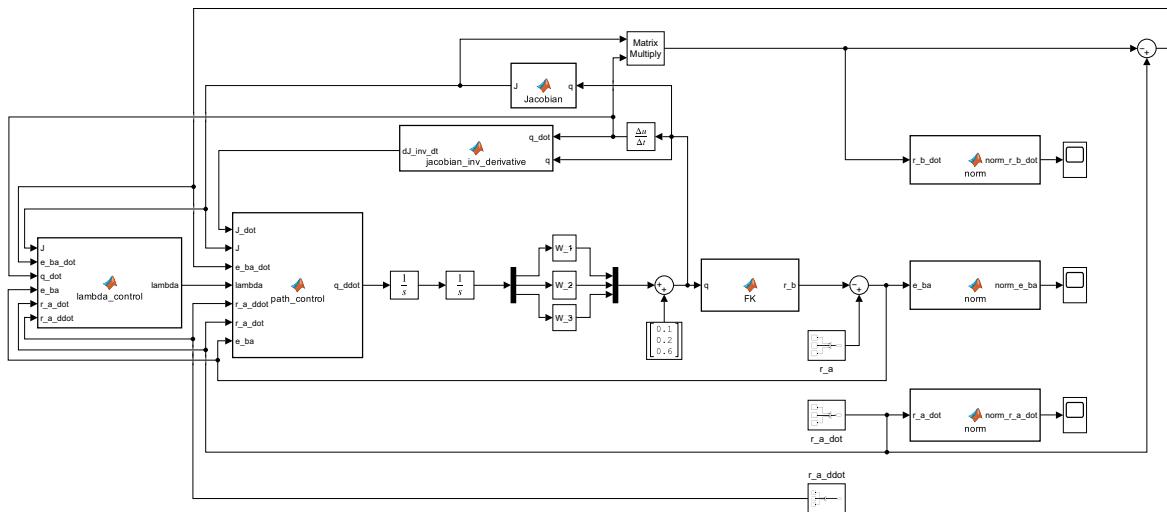


Рис. 1. Блок-схема управления движением преследования

Данный подход позволяет не только верифицировать корректность работы системы управления, но и проводить детальный анализ ее поведения в различных режимах, что соответствует требованиям, предъявляемым к исследованиям в данной предметной области.

На рис. 2 показаны результаты эксперимента, который проводился с произвольным выбором начального положения эфектора робота при траектории движения точки А, задаваемой следующими уравнениями:

$$\begin{cases} x_a(t) = 0,5 \sin(0,5t) + 1, \\ y_a(t) = 0,5 \sin(0,3t), \\ z_a(t) = 0,4. \end{cases}$$

Радиус захвата цели составил $\varepsilon = 0,004$ м при начальном расстоянии между точками $r_0 = 0,8$ м.

На рис. 3 представлены положения моделируемых объектов в фиксированные последовательные моменты времени, на которых точки А показана синим цветом, а точки В – красным; показаны траектории движения точек. Оси системы координат обозначены цветом: ось Z – синим цветом, OY – зеленым, OX – красным.

Результаты моделирования также позволили определить предельное значение \dot{r}_l скорости движения точки А, обуславливающее снижение эффективности алгоритма для динамики приводов, определяемой постоянной времени $T \geq 0,18$ с, что совершенно закономерно для инерционных систем. В данном случае предельное значение скорости $\dot{r}_l = 1,5$ м/с, после которого наблюдается существенный рост радиуса захвата цели.

1.2. Постановка задачи 2 (задача уклонения)

Точка А начинает быстрое движение в неподвижную позицию P , в которой в данный момент находится точка В, провоцируя столкновение с ней ударом, при этом с изменением положения точки В движение точки А не меняется. Под столкновением точек будем понимать ситуацию, когда при некотором назначенному расстоянии разделения точек d наступит момент времени t_d такой, что выполнится условие:

$$\|\mathbf{r}_a(t_d) - \mathbf{r}_b(t_d)\| < d. \quad (13)$$

Момент времени, когда точка А попадает в P , обозначим t_a .

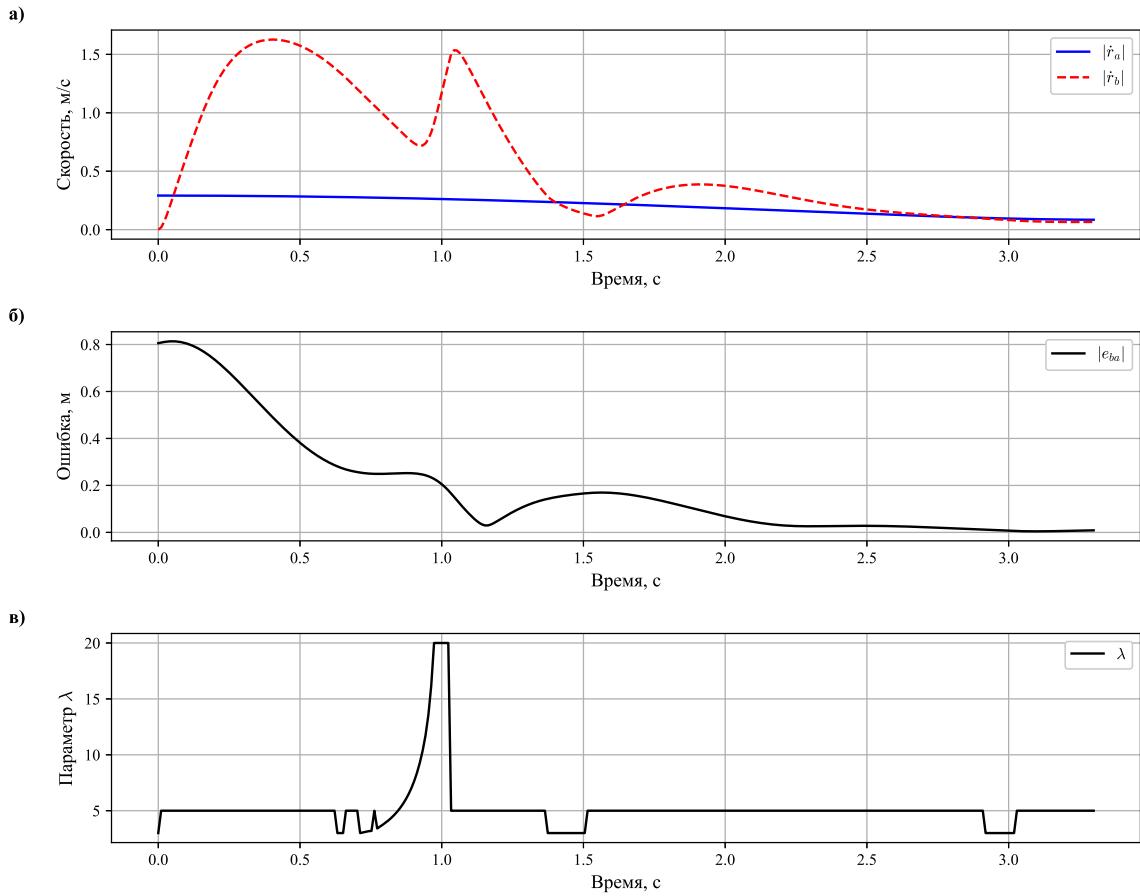


Рис. 2. Графики модулей векторов скорости точек объектов а), расстояния между объектами б), значения параметра λ настройки алгоритма преследования в)

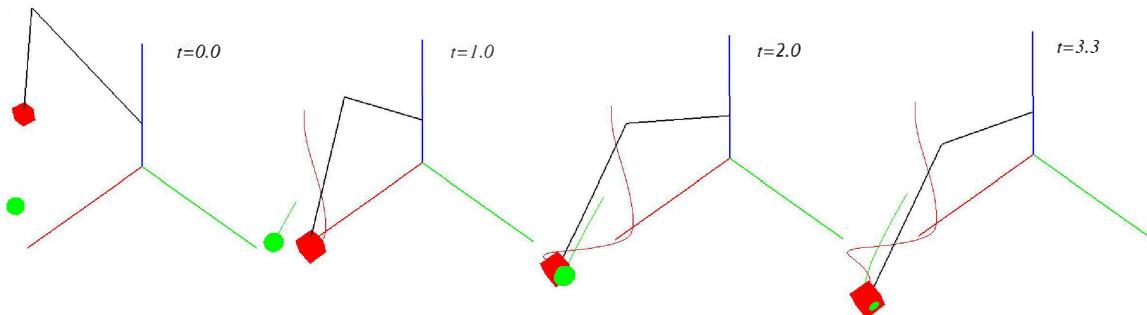


Рис. 3. Положения точек объектов преследования в моменты времени t_i

Требуется построить управление движением точки В такое, чтобы начиная с некоторого t_0 при $t_0 \leq t \leq t_a$ выполнялось условие:

$$\|\mathbf{r}_a(t) - \mathbf{r}_b(t)\| = \|\mathbf{r}_a(t_0) - \mathbf{r}_p\| \geq d. \quad (14)$$

Таким образом, требуется избежать столкновения точек эквидистантным уклонением точки В. Для сформулированной таким образом задачи производственной ситуацией является та, при которой человек, находясь в одном рабочем пространстве с роботом, совершает случайное непреднамеренное движение в сторону эфектора робота, что угрожает травмой. Поэтому робот должен совершить адаптивное движение, чтобы избежать столкновения.

1.2.1. Решение задачи уклонения

Будем придерживаться подхода, рассмотренного в предыдущем разделе. Считаем, что в перпендикулярном направлении к вектору $\mathbf{r}_a(t_0) - \mathbf{r}_P$ в горизонтальной плоскости OXY от P движется точка A^* – целевая точка для преследования точкой B (мнимая цель). Положение точки A^* (радиус-вектор обозначим \mathbf{r}_a^*) определим зависящим от положения точки A согласно формуле:

$$\begin{aligned}\mathbf{r}_a^*(t) &= \mathbf{r}_p + \sqrt{\|\mathbf{r}_a(t_0) - \mathbf{r}_p\|^2 - \|\mathbf{r}_a(t) - \mathbf{r}_p\|^2} \mathbf{u}(t), \\ \mathbf{u}(t) &= \frac{\mathbf{r}_a(t) - \mathbf{r}_p}{\|\mathbf{r}_a(t) - \mathbf{r}_p\|} \times \mathbf{v}, \quad \mathbf{v} \text{ – орт оси } OZ.\end{aligned}\quad (15)$$

Таким образом, движение точки A генерирует движение мнимой цели A^* , которую будет преследовать точка B при управлении согласно (5) и (9) и (11), вследствие чего произойдет уклонение от столкновения с A .

Заметим, что задача существенно бы усложнилась, если бы точки A , изменяя направление, перемещалась в позицию мгновенного (текущего) положения точки B , т.е. осуществляла бы преследование точки B . Но, поскольку для такой задачи трудно найти пример производственной ситуации, в данной статье эта задача не рассматривается.

1.2.2. Численное моделирование. Анализ результатов

В случае решения задачи уклонения были выбранные следующие модельные параметры:

$$T = 0,18, \quad E = 0,55, \quad \lambda_{min} = 3, \quad \lambda_{max} = 15, \quad \lambda_0 = 10, \quad K = 1, \quad k = 1, 2.$$

Для реализации алгоритма уклонения на основе уже существующей схемы, приведенной на рис.1, необходимо добавить блок «*avoidance_controller*», структурная схема которого представлена на рис. 4.

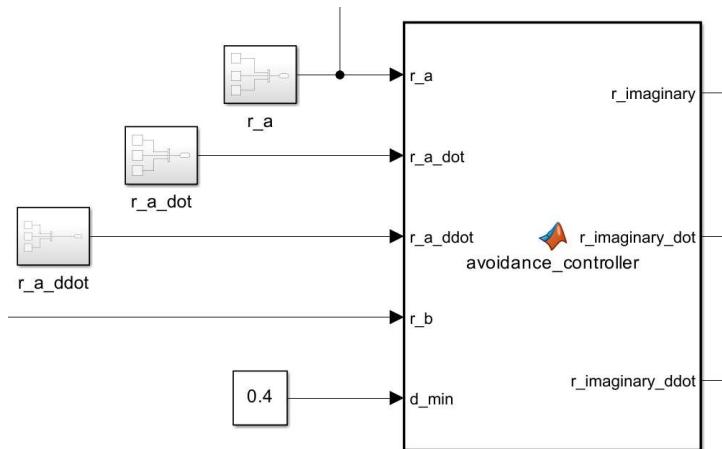


Рис. 4. Блок генерации движения мнимой цели

Он получает на вход данные о положении, скорости и ускорении точки A (r_a , r_a_dot , r_a_ddot), а также данные о положение эффеектора (r_b) и радиуса безопасного расстояния (d_min). Далее на основании этих данных блок формирует мнимую точку преследования для точки B , расположенной на эффеекторе робота. Для этого на выходе блок «*avoidance_controller*» формирует положение, скорость и ускорение мнимой точки ($r_imaginary$, $r_imaginary_dot$, $r_imaginary_ddot$) соответственно. Эти данные поступают на вход схемы алгоритма преследования (см. рисунок 1) вместо r_a , r_a_dot , r_a_ddot . Конечная структурная схема представлена на рис. 5.

На рис. 6, 7 показаны результаты моделирования ситуации, когда точка A движется равномерно со скоростью 0,3 м/с. При визуализации оси системы координат и точки B

отмечены тем же цветом, что и в предыдущей задаче. Точка показана красным цветом, а мнимая цель – синим. Для выбранного значения безопасного расстояния $d_{min} = 0,4$ м и постоянной времени приводов движения не быстрее 0,18 с критическая скорость точки А, после которой уклонение точки В не выполняется, составила $\dot{r}_l = 1,05$ м/с.

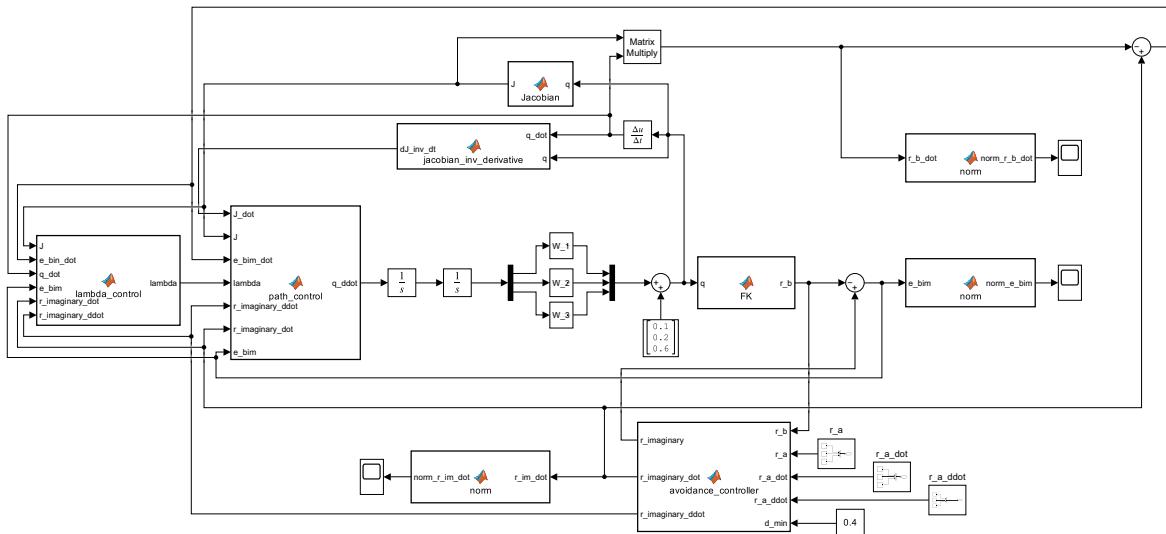


Рис. 5. Блок-схема алгоритма уклонения

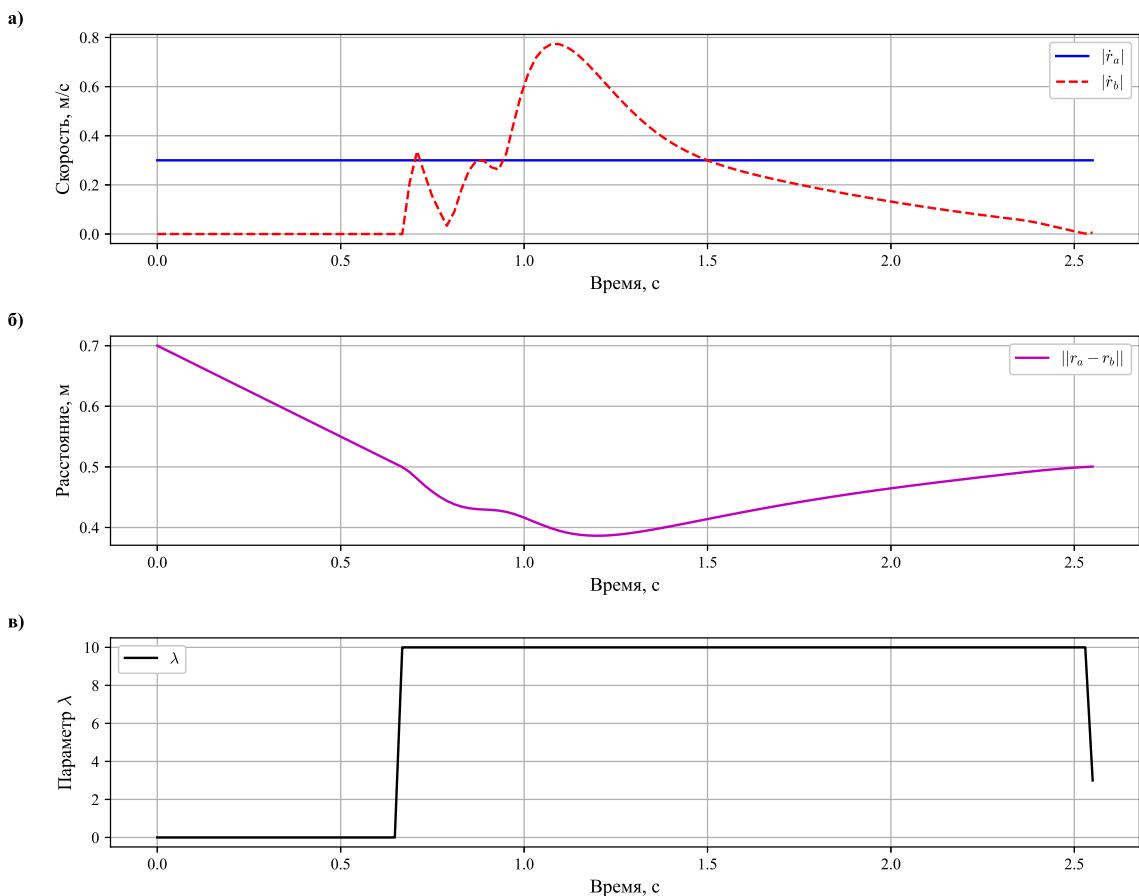
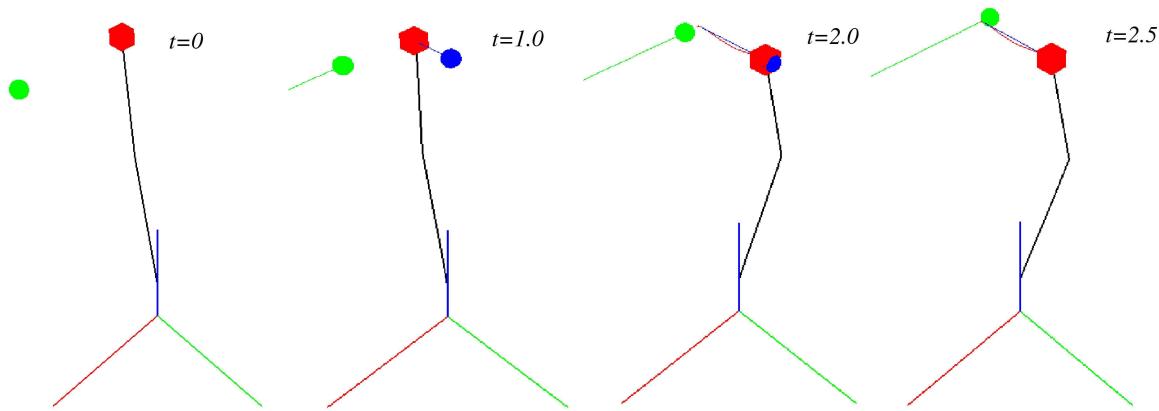


Рис. 6. Графики модулей векторов скорости точек объектов а), расстояния между объектами б), значения параметра λ настройки алгоритма уклонения в)

Рис. 7. Положения точек объектов уклонения в моменты времени t_i

Заключение

Рассмотрен инженерный метод решения задачи преследования-уклонения объектов в варианте движения материальных точек. При априорно неизвестном законе движения в пространстве ведущей точки управление ведомой точкой осуществляется по ускорению с переменными коэффициентами с однопараметрической настройкой. Предложено и обосновано правило настройки коэффициентов.

Построены математическая модель алгоритма управления и представлена программная реализация на языке Python с 3D-визуализацией результатов моделирования на примере роботехнической системы KUKA KR-30-3.

Установлено, что область устойчивости тривиального решения для величины ошибки положения точек существует в ограниченном интервале скоростей движения, что обусловлено влиянием постоянных времени контуров положения исполнительного привода робота.

Работа проводилась при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект FSFS-2024-0012).

Литература

- Старовойтова, О.В. Внедрение коллаборативных роботов (коботов) на производство: перспективы и вызовы / О.В. Старовойтова, Я.С. Исламгереева, Ф.Х. Дзамихова // Экономика и управление: проблемы, решения. – 2024. – Т. 8, № 12(153). – С. 3–11.
- Акопян, А.А. Применение коллаборативных роботов в различных отраслях производства / А.А. Акопян, Н.В. Дмитриев // Мехатроника, автоматика и робототехника. – 2023. – № 11. – С. 43–46.
- Спасский, Б.А. Мягкая робототехника в кооперативных задачах: состояние и перспективы развития / Б.А. Спасский, В.В. Титов, И.В. Шардыко // Робототехника и техническая кибернетика. – 2018. – № 1(18). – С. 14–25.
- Галин, Р.Р. Подход к распределению задач технологического процесса среди неоднородных участников КРТС с учетом их состояния / Р.Р. Галин, М.В. Мамченко, С.Б. Галина, В.А. Зорин // Управление большими системами: сборник трудов. – 2024. – № 112. – С. 233–256.
- Чикрин, Д.Е. Стандарты безопасности для коллаборативных роботов / Д.Е. Чикрин, К.Р. Смольникова, И.Г. Галиуллин // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2025. – № 1(51). – С. 20–27.
- Топорин, А.А. Система предотвращения столкновений человека и кобота в процессе работы производственной колаборативной ячейки сборки / А.А. Топорин // Мехатроника, автоматика и робототехника. – 2023. – № 11. – С. 50–57.
- Амосов, О.С. Нейросетевое прогнозирование положения человека по непрерывному видеопотоку при совместной работе человека и кобота / О.С. Амосов, С.Г. Амосова // Датчики и системы. – 2023. – № 2(267). – С. 59–64.
- Чикрин, Д.Е. Основные риски и способы их минимизации в системе «кобот-человек» посредством использования технологий искусственного интеллекта / Д.Е. Чикрин, К.Р. Смольникова // Экстремальная робототехника. – 2024. – № 1(34). – С. 295–300.
- Сини Чжоу. Анализ безопасности и проектирование систем совместной работы робота и человека / Чжоу Сини, Тан Цзе, Вэнь Жэньцзе // Оригинальные исследования. – 2025. – Т. 15, № 2. – С. 128–133.

10. Грабарь, Д.М. Гибридный подход к распознаванию действий человека-оператора в колаборативных роботизированных средах с использованием больших языковых моделей и компьютерного зрения / Д.М. Грабарь, Ю.С. Иванов // Мехатроника, автоматика и робототехника. – 2025. – № 15. – С. 62–64.
11. Галин, Р.Р. Эффективное функционирование колаборативной робототехнической системы в едином пространстве / Р.Р. Галин, С.Б. Камешева // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. – 2021. – № 1(99). – С. 5–14.
12. Шориков, А.Ф. Алгоритм адаптивного минимаксного управления процессом преследования-уклонения в дискретных динамических системах с несколькими преследованиями / А.Ф. Шориков // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. – 2005. – № 5. – С. 96–112.
13. Золодуев, А.Ю. Адаптивная непрерывная задача преследования / А.Ю. Золодуев, Б.М. Соколов // Труды 12-го Всероссийского совещания по проблемам управления (ВСПУ-2014). – 2014. – № 2052. – 7 с.
14. Дубанов, А.А. Моделирование методов погони и параллельного сближения в задачах преследования: монография / А.А. Дубанов. – М.: РИОР, 2021.
15. Kuka Robotics Project Book. Version 6.5. Kuka Robotics Corporation. – URL: https://www.kuka.com/-/media/kuka-corporate/documents/ir/reports-and-presentations/en/annual-report/annual-report_2021_new.pdf (дата обращения 20.02.2025)
16. Башарин, А.В. Управление электроприводами / А.В. Башарин, В.А. Новиков, Г.Г. Соколовский. – Л.: Энергоиздат, Ленинградское отделение, 1982.
17. Казмиренко, В.Ф. Автоматизированное проектирование следящих приводов и их элементов / В.Ф. Казмиренко, М.В. Баранов, Ю.В. Илюхин. – М.: Энергоатомиздат, 1984.

Михаил Михайлович Стебулянин, доктор технических наук, профессор, кафедра «Робототехника и мехатроника», ФГАОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН» (г. Москва, Российская Федерация), mmsteb@rambler.ru.

Валерий Николаевич Болдырев, магистр, кафедра «Робототехника и мехатроника», ФГАОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН» (г. Москва, Российская Федерация), valeriyboldyrev@yandex.ru.

Поступила в редакцию 20 августа 2025 г.

MSC 70E60, 93C05, 93C85

DOI: 10.14529/mmp250411

ENGINEERING METHOD OF PURSUIT-EVASION OF OBJECTS FOR ADAPTIVE CONTROL TASKS OF COLLABORATIVE ROBOTS

M.M. Stebulyanin¹, V.N. Boldyrev¹

¹Moscow State University of Technology «STANKIN», Moscow, Russian Federation
E-mail: mmsteb@rambler.ru, valeriyboldyrev@yandex.ru

The object of study in this article is the “sharing robot (cobot)–human” system, the aim of the research is to ensure the absence of accidental contact between the cobot and the human, thereby guaranteeing the safety of their interaction within a shared workspace. A new approach is proposed for solving the pursuit–evasion problem based on an acceleration control law with variable coefficients governing the relative motion of two selected material points. A rule for one-parameter tuning of the coefficients to ensure the stability of the target motion is introduced. The tuning parameter is the natural frequency of a link described by a second-order linear differential equation with variable coefficients. The control of this parameter is derived from the condition of decreasing the angle function between the velocity vectors of the considered points, which is reduced to the solution of an algebraic inequality. Simulation results of the developed control algorithm are presented for the translational degrees of freedom of the KUKA KR-30-3 robot. The robot drive was selected based on a three-loop DC motor drive with position feedback, tuned to a modulus optimum within the framework of the principle of subordinate loop regulation.

Keywords: adaptive control; stability; cobots; pursuit problem; avoidance problem.

References

1. Starovoitova O.V., Islamgereeva Ya.S., Dzamikhova F.Kh. Implementation of Collaborative Robots (Cobots) in Manufacturing: Prospects and Challenges. *Economics and Management: Problems, Solutions*, 2024, vol. 8, no. 12 (153), pp. 3–11. DOI: 10.36871/ek.up.p.r.2024.12.08.001.
2. Akopyan A.A., Dmitriev N.V. Application of Collaborative Robots in Various Industries. *Mechatronics, Automation and Robotics*, 2023, no. 11, pp. 43–46. DOI: 10.26160/2541-8637-2023-11-43-46
3. Spassky B.A., Titov V.V., Shardiko I.V. Soft Robotics in Cooperative Tasks: Current State and Development Prospects. *Robotics and Technical Cybernetics*, 2018, no. 1 (18), pp. 14–25.
4. Galin R.R., Mamchenko M.V., Galina S.B., Zorin V.A. Task Distribution Approach in Technological Processes Among Heterogeneous CRSS Participants Considering Their State. *Control of Large-Scale Systems: Proceedings*, 2024, no. 112, pp. 233–256. DOI: 10.25728/ubs.2024.112.11
5. Chikrin D.E., Smol'nikova K.R., Galiullin I.G. Safety Standards for Collaborative Robots. *Measurement. Monitoring. Control*, 2025, no. 1 (51), pp. 20–27. DOI: 10.21685/2307-5538-2025-1-3
6. Toporin A.A. Collision Avoidance System Between Human and Cobot in the Production Collaborative Assembly Cell. *Mechatronics, Automation and Robotics*, 2023, no. 11, pp. 50–57. DOI: 10.26160/2541-8637-2023-11-50-57
7. Amosov O.S., Amosova S.G. Neural Network Prediction of Human Position Based on Continuous Video Stream in Human-Cobot Collaboration. *Sensors and Systems*, 2023, no. 2 (267), pp. 59–64. DOI: 10.25728/datsys.2023.2.10
8. Chikrin D.E., Smol'nikova K.R. Major Risks and Their Mitigation in Human-Cobot Systems Using Artificial Intelligence Technologies. *Extreme Robotics*, 2024, no. 1 (34), pp. 295–300.
9. Zhou Xinyi, Tan Jie, Wen Renjie. Safety Analysis and Design of Human-Robot Collaboration Systems. *Original Research*, 2025, vol. 15, no. 2, pp. 128–133.
10. Grabar D.M., Ivanov Yu.S. Hybrid Approach to Recognizing Human-Operator Actions in Collaborative Robotic Environments Using Large Language Models and Computer Vision. *Mechatronics, Automation and Robotics*, 2025, no. 15, pp. 62–64. DOI: 10.26160/2541-8637-2025-15-62-64
11. Galin R.R., Kamesheva S.B. Efficient Functioning of Collaborative Robotic Systems in a Shared Space. *Bulletin of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 2021, no. 1(99), pp. 5–14. DOI: 10.35330/1991-6639-2021-1-99-5-14
12. Shorikov A.F. Adaptive Minimax Control Algorithm for Pursuit-Evasion Process in Discrete Dynamic Systems with Multiple Pursuers. *Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Theory and Control Systems*, 2005, no. 5, pp. 96–112.
13. Zoloduev A.Yu., Sokolov B.M. Adaptive Continuous Pursuit Problem. *Proceedings 12th All-Russian Conference on Control Problems*, 2014, no. 2052, 7 p.
14. Dubanov A.A. *Modeling of Pursuit and Parallel Convergence Methods in Pursuit Problems: Monograph*. Moscow, RIOR, 2021. DOI: 10.29039/02071-5.
15. Kuka Robotics Project Book. Version 6.5. Kuka Robotics Corporation. Available at: https://www.kuka.com/-/media/kuka-corporate/documents/ir/reports-and-presentations/en/annual-report/annual-report_2021_new.pdf (accessed on 20.02.2025)
16. Basharin A.V., Novikov V.A., Sokolovskii G.G. *Upravlenie elektoprivodami* [Control of Electric Drives]. Leningrad, Energoizdat, 1982. (in Russian)
17. Kazmirenko V.F., Baranov M.V., Ilyukhin Yu.V. *Avtomatizirovannoe proektirovaniye sledyashchikh privodov i ikh elementov* [Computer-Aided Design of Servo Drives and Their Components]. Moscow, Energoatomizdat, 1984. (in Russian)

Received August 20, 2025