

DOI: 10.34031/article_5d4d77313d66b6.76823159

¹Савин С.И., ²*Ворочаева Л.Ю.¹ Университет Иннополис

Россия, 420500, г. Иннополис, ул. Университетская, д. 1

²Юго-Западный государственный университет

Россия, 305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94

*E-mail: mila180888@yandex.ru

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ УПРАВЛЕНИЯ ШАГАЮЩИМИ РОБОТАМИ С НЕЛИНЕЙНОСТЯМИ В СЕНСОРНОЙ СИСТЕМЕ

Аннотация. Работа посвящена вопросам управления двуногими шагающими роботами. Для разработки регулятора задача управления роботом сформулирована как задача квадратичного программирования, что позволяет учитывать односторонние механические связи в виде неравенств, обусловленные так называемыми конусами трения и ограничениями крутящих моментов приводов. Проведено сравнение трех типов регуляторов: CTC (от англ. Computed Torque Controller), линейного квадратичного регулятора с ограничениями CLQR (от англ. Constrained Linear Quadratic Regulator) и регулятора на основе квадратичного программирования NQPC (от англ. Nested Quadratic Programming-based Controller). Особое внимание уделено влиянию неточностей сенсорной системы на качество работы системы управления робота. Исследование охватывает случаи, когда для компенсации неточностей датчиков может использоваться динамический наблюдатель, а также случаи, когда накладываются ограничения на значения крутящего момента в шарнирах робота. В результате моделирования установлено, что существует область параметров датчиков, в которой качество работы исследуемых регуляторов робастно по отношению к малым изменениям нелинейных свойств датчиков, причем такие области параметров характерны для систем без наблюдателя и при его наличии, а также для систем с ограничениями на значения крутящего момента и без них.

Ключевые слова: двуногий шагающий робот, система управления, задача квадратичного программирования, CTC регулятор, CLQR регулятор, NQPC регулятор, наблюдатель.

Введение. Шагающие роботы имеют разнообразные конструкции и системы управления, но все они обусловлены спецификой шагающего режима движения. В частности, тот факт, что робот должен приобретать и терять контакт с опорной поверхностью, делает проблему планирования движения трудно решаемой [1]. Общий подход к ее решению заключается в разбиении на подзадачи, такие как генерирование последовательности шагов [2, 3], генерирование траектории центра масс [4, 5], решение обратной задачи кинематики и разработка системы управления с обратной связью. Данное разбиение позволяет решить ряд проблем управления, таких как ходьба по неровной местности [3, 6], преодоление лестничных пролетов [7, 8], обход препятствий [7, 9] и т.д. Следует отметить, что упомянутые отдельные подзадачи не являются тривиальными и остаются в центре внимания современных исследований.

Шагающие роботы часто проектируются в виде последовательностей незамкнутых кинематических цепей, что делает их похожими на манипуляторы. Это означает, что методы управления, разработанные и успешно внедренные для манипуляторов, могут использоваться и для шагающих роботов. Однако специфические проблемы, связанные с шагающими роботами, обусловлены тем фактом, что объект управления

представляет собой механическую систему с односторонними механическими ограничениями в виде конусов трения [1]. Наличие явных механических ограничений требует модификации методов управления, предназначенных для систем только с неявными ограничениями. Примером такой модификации является линейный квадратичный регулятор (LQR) для систем с механическими ограничениями, предложенный в [10].

Один из широко используемых подходов к разработке регулятора для шагающих роботов заключается в формулировке задачи управления как задачи квадратичного программирования [11, 12]. Это позволяет в явном виде использовать ограничения в виде неравенств, обусловленные ограничениями крутящего момента и конусов трения в задаче управления [13]. Такой подход требует существенных вычислительных мощностей, но может быть реализован на бортовых компьютерах двуногих шагающих роботов [14]. Доказать устойчивость и оптимальность регуляторов, предназначенных для систем с явными механическими ограничениями, сложно. На практике такие системы подвержены случайным возмущениям, имеют упругие звенья, люфт в шарнирах, также для них характерны неопределенность параметров модели и шумы в датчиках

[15]. Ввиду этого анализ таких систем часто выполняется численно или с помощью экспериментальных исследований [15].

В этой работе рассматриваются три регулятора для двуногих шагающих роботов, построенные на различных подходах к управлению: регулятор на основе LQR, СТС-регулятор [16] и NQPC-регулятор. Исследуются вопросы влияния шума в датчиках и вопросы квантования сигналов с них на работу трех вариантов регуляторов.

Математическая модель шагающего робота, движущегося в сагиттальной плоскости. Будем рассматривать шагающего робота, состоящего из корпуса и двух ног, каждая из которых образована тремя последовательно соединенными звеньями. Все шарниры робота являются вращательными и активными. Будем считать, что движение робота происходит в сагиттальной плоскости, что показано на рис. 1, где точки O_i соответствуют активным шарнирам. Ориентация каждого звена определяется углом φ_i . Положение шарнира O_1 задается координатами x_{O1} и y_{O1} . Таким образом, углы φ_i и координаты x_{O1}, y_{O1} образуют вектор обобщенных координат \mathbf{q} , определяющий положение и конфигурацию робота.

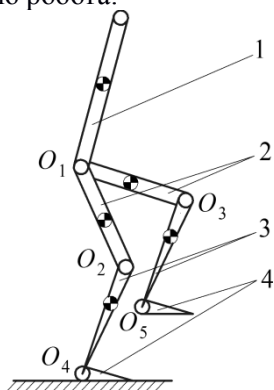


Рис. 1. Расчетная схема шагающего робота:
1 – корпус, 2 – бедра, 3 – голени, 4 – стопы

Общий вид уравнений динамики может быть записан следующим образом:

$$\mathbf{H}\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{c}_q = \mathbf{F}_q^T \boldsymbol{\lambda} + \mathbf{V}_q \mathbf{u}, \quad (1)$$

где \mathbf{H} – обобщенная матрица инерции, \mathbf{c}_q – вектор обобщенных инерциальных, гравитационных и диссипативных сил, \mathbf{F}_q – матрица Якоби механических связей, $\boldsymbol{\lambda}$ – коэффициенты Лагранжа, связанные с силами реакций, \mathbf{V}_q – матрица, связывающая моменты приводов с соответствующими обобщенными моментами, \mathbf{u} – вектор обобщенных моментов приводов.

Индексы q обозначают, что матрицы записаны в относительной системе координат, связанной с роботом. Выведение этих уравнений и их свойства описаны в работе [17]. Пусть $\mathbf{q}^*(t)$

представляет собой искомую временную функцию обобщенных координат \mathbf{q} , необходимую для описания желаемого движения робота. Тогда обратную задачу динамики для робота можно записать следующим образом:

$$[\boldsymbol{\lambda}^* \quad \mathbf{u}^*] = [\mathbf{F}_q^T \quad \mathbf{V}_q]^+ (\mathbf{H}\dot{\mathbf{q}}^* + \mathbf{c}_q), \quad (2)$$

где $(\cdot)^+$ – псевдообратная матрица Мура-Пенроуза.

Следует отметить, что это не единственная форма записи обратной задачи динамики для механических систем с явными ограничениями. Альтернативные варианты записи приведены в работах [18, 19]. Введем вектор абсолютных координат $\mathbf{x} = [\mathbf{q}^T \quad \dot{\mathbf{q}}^T]^T$. Движение робота может быть описано линеаризованной по заданной траектории $\mathbf{x}^*(t)$ системой уравнений:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u} + \mathbf{c} + \mathbf{F}\boldsymbol{\lambda}, \quad (3)$$

где \mathbf{A} , \mathbf{B} и \mathbf{F} – матрицы, \mathbf{c} – вектор аффинной модели динамики.

Виды исследуемых регуляторов. Будем рассматривать три метода управления движением шагающего робота: СТС-регулятор, линейный квадратичный регулятор с ограничениями (CLQR), регулятор на основе квадратичного программирования (NQPC). СТС представляет собой метод, который заключается в управлении по ошибке путем стабилизации динамики ошибки. Описание этого регулятора можно найти в работах [16, 20]:

$$\mathbf{u} = \mathbf{V}_q^+ \mathbf{H}(\mathbf{K}_p \mathbf{e} + \mathbf{K}_d \dot{\mathbf{e}}) + \mathbf{u}^*, \quad (4)$$

где \mathbf{K}_p и \mathbf{K}_d – положительно определенные диагональные матрицы коэффициентов регулятора, $\mathbf{e} = \mathbf{q}^* - \mathbf{q}$ – ошибка управления.

Настройка коэффициентов регулятора описана в работах [21, 22]. При последующем моделировании будем считать, что $\mathbf{K}_p = 1000\mathbf{I}$, $\mathbf{K}_d = 500\mathbf{I}$, где \mathbf{I} представляет собой единичную матрицу. Этот метод подходит для систем с достаточным числом параметров управления (fully actuated systems) без явных механических связей. Однако, используя обратную динамику (2), можно обобщить его на системы с дефицитом управляющих воздействий с явными механическими связями.

CLQR-регулятор описан в [10], в работе [23] представлено его применение для управления движением внутритрубного шагающего робота. Данный регулятор требует введения аддитивной квадратичной целевой функции J :

$$J = \int (\mathbf{x} - \mathbf{x}^*)^T \mathbf{Q}(\mathbf{x} - \mathbf{x}^*) + (\mathbf{u} - \mathbf{u}^*)^T \mathbf{R}(\mathbf{u} - \mathbf{u}^*) dt, \quad (5)$$

где \mathbf{Q} и \mathbf{R} – положительно определенные весовые матрицы.

Рассмотрим следующие ограничения, накладываемые на механическую систему:

$$\mathbf{G}\dot{\mathbf{x}} = \begin{bmatrix} \mathbf{F}_q & \mathbf{0} \\ \dot{\mathbf{F}}_q & \mathbf{F}_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{q}} \\ \ddot{\mathbf{q}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix}. \quad (6)$$

Пусть \mathbf{N} – матрица, представляющая базис в нуль-пространстве \mathbf{G} . Тогда можно ввести следующие обозначения:

$$\mathbf{A}_N = \mathbf{N}^T \mathbf{A} \mathbf{N}, \quad \mathbf{B}_N = \mathbf{N}^T \mathbf{B}, \quad \mathbf{Q}_N = \mathbf{N}^T \mathbf{Q} \mathbf{N}, \quad (7)$$

Подставляя введенные матрицы и векторы в уравнение Риккати и решая его, получаем матрицу усиления \mathbf{K}_N . Закон управления задается следующим выражением [10]:

$$\mathbf{u} = -\mathbf{K}_N \mathbf{N}^T (\mathbf{x} - \mathbf{x}^*) + \dot{\mathbf{x}}^*. \quad (8)$$

Этот метод управления с использованием CLQR регулятора подходит для линейной системы без ограничений, динамика которой аналогична динамике исходной системы. Поскольку исходная система линеаризуется вдоль траектории $\mathbf{x}^*(t)$, полученная линейная модель (3) изменяется во времени, поэтому матрица усиления \mathbf{K}_N периодически корректируется. В последующем моделировании будем полагать, что $\mathbf{Q} = 10^3 \mathbf{I}$ и $\mathbf{R} = 10^{-2} \mathbf{I}$.

NQPC регулятор является одним из возможных вариантов регулятора на основе квадратичного программирования. Он был предложен в работе [24] для управления внутритрубными шагающими роботами. В отличие от двух ранее рассмотренных схем управления, данный регулятор позволяет явно учитывать ограничения, обусловленные контактным взаимодействием, а также предельными значениями крутящих моментов приводов. Здесь рассмотрена упрощенная версия NQPC, в которой в явном виде не учитываются ограничения, накладываемые на производные обобщенных координат. При такой формулировке управляющие воздействия вычисляются путем решения следующей задачи квадратичного программирования (QP):

$$\begin{aligned} & \text{minimize} \quad w_1 \mathbf{u}^T \mathbf{u} + w_2 \boldsymbol{\lambda}^T \boldsymbol{\lambda}, \\ & \text{subject to} \quad \begin{cases} \mathbf{B}_q \mathbf{u} + \mathbf{F}_q^T \boldsymbol{\lambda} = \boldsymbol{\tau}^*, \\ \mathbf{A}_0 \begin{bmatrix} \mathbf{u} \\ \boldsymbol{\lambda} \end{bmatrix} \leq \mathbf{b}_0, \end{cases} \end{aligned} \quad (9)$$

где w_1, w_2 – положительные скалярные весовые функции, $\mathbf{A}_0, \mathbf{b}_0$ – матрица и вектор линейных ограничений типа неравенств, накладываемых на QP, $\boldsymbol{\tau}^*$ – значение крутящего момента, продуцируемого задающим регулятором.

Использование задающего регулятора для генерирования $\boldsymbol{\tau}^*$ находит свое отражение в названии процедуры. Задающий регулятор может представлять собой CLQR или СТС, сгенерированный для системы без учета механических ограничений или ограничений крутящего момента. Подходы к эффективному решению задачи QP обсуждаются в работе [25]. В последующих моделированиях в качестве задающего регулятора используется СТС, причем $\mathbf{A}_0 = \mathbf{0}, \mathbf{b}_0 = \mathbf{0}, w_1 = 1$ и $w_2 = 10^{-3}$.

Для определения производительности каждого регулятора введем следующую целевую функцию:

$$\sigma = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \frac{\|\mathbf{x}(t_f) - \mathbf{x}^*(t_f)\|}{\|\mathbf{x}_j(t_0) - \mathbf{x}^*(t_0)\|}, \quad (10)$$

где t_0 – момент времени, соответствующий началу движения, t_f – момент времени, соответствующий завершению движения, $\mathbf{x}_j(t_0)$ – j -ое начальное положение робота.

Таким образом, σ представляет собой отношение норм ошибки управления в начале и в конце движения.

Нелинейная модель сенсоров шагающего робота. В данной работе рассмотрим датчики с аддитивным случайным шумом и квантованием:

$$\bar{\mathbf{q}} = s \cdot \left\lfloor \frac{\mathbf{q} + \boldsymbol{\eta}}{s} \right\rfloor, \quad (11)$$

где s – разрешающая способность датчика (шаг квантования), $\boldsymbol{\eta}$ – случайный вектор, элементы которого принимают значения в диапазоне $[-\eta, \eta]$, $\lfloor \cdot \rfloor$ – функция округления к меньшему целому числу, применяемая поэлементно к входному вектору.

Таким образом, для каждого датчика есть два параметра, которые определяют его поведение: η и s . Будем считать, что каждый датчик положения и ориентации характеризуется параметрами η_q и s_q , а каждый датчик скорости описывается параметрами η_v и s_v .

На рис. 2, а показана зависимость σ от параметров шума датчика η_q и η_v при использовании СТС регулятора, $s_q = s_v = 0.001$. По данному рисунку видно, что существует область, в которой $\sigma < 1$. Это означает, что система управления уменьшает значение ошибки управления. Также можно заметить, что поведение σ зависит от параметров η_q и η_v аналогичным образом. На рис. 2, б показана зависимость σ от параметров квантования датчика s_q и s_v . Поверхность построена для случая, когда $\eta_q = \eta_v = 0.001$. На рис. 2 горизонтальные оси построены в логарифмическом масштабе.

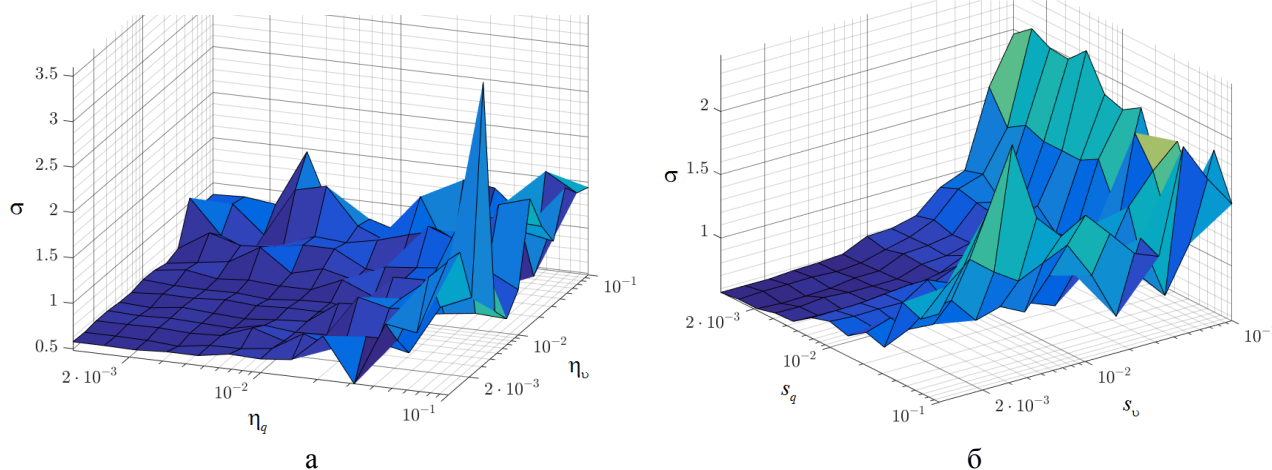


Рис. 2. Зависимости: а – $\sigma(\eta_q, \eta_v)$, б – $\sigma(s_q, s_v)$

Поверхность, приведенная на рис. 2, б, имеет свойства, аналогичные свойствам ранее описанной поверхности. Это означает, что пары аргументов η_q, η_v и s_q, s_v оказывают схожее воздействие на качество системы управления, что измерено с помощью целевой функции (10). Это наблюдение используется в дальнейшем для упрощения сравнительного анализа.

Сравнительный анализ методов управления на основе результатов моделирования. Рассмотрим влияние шума и квантования датчика на производительность системы управления, измеренную с помощью целевой функции (10). Будем считать, что $\eta_q = \eta_v = \eta$ и $s_q = s_v = s$. На рис. 3, а показана зависимость $\sigma = \sigma(\eta)$ для СТС, CLQR и NQPC регуляторов, а на рис. 3, б представлена зависимость $\sigma = \sigma(s)$ для этих же регуляторов.

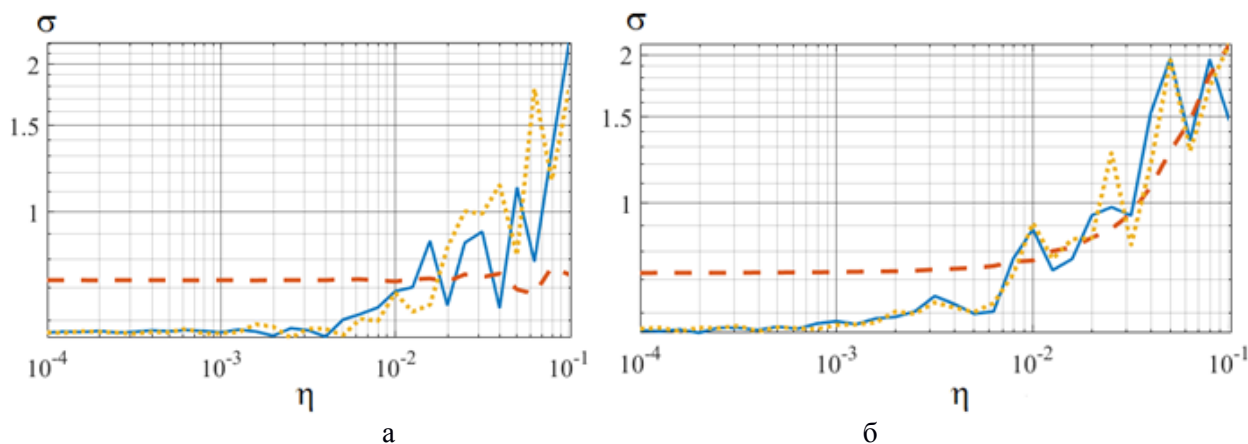


Рис. 3. Зависимости: а – $\sigma(\eta)$, б – $\sigma(s)$ для — СТС, - - CLQR и ... NQPC регуляторов

По рис. 3, а видно, что CLQR регулятор является лучшим при обработке больших значений шума датчика. При этом он работает хуже, чем другие регуляторы, при низких уровнях шума. Это свойство CLQR описано в [23] и заключается в обнулении ошибки управления для систем с дефицитом управляющих воздействий. Графики рис. 3, б иллюстрируют, что производительность всех методов управления зависит от квантования датчика аналогичным образом.

Влияние ограничения крутящих моментов приводов на качество работы системы управления робота. Рассмотрим, как ограниче-

ния, накладываемые на значения крутящего момента в шарнирах робота, могут изменить графики рис. 3. В предыдущих экспериментах наблюдались мгновенные пики крутящего момента величиной 1500 Нм при постоянных значениях крутящих моментов порядка 200 Нм. Для следующего эксперимента ограничим крутящие моменты приводов значением 150 Нм.

На рис. 4 показаны зависимости $\sigma = \sigma(\eta)$ и $\sigma = \sigma(s)$ для случая, когда значения крутящих моментов ограничены. Причем NQPC регулятор не имел явной информации об ограничениях крутящего момента, как это было сделано в работе [24].

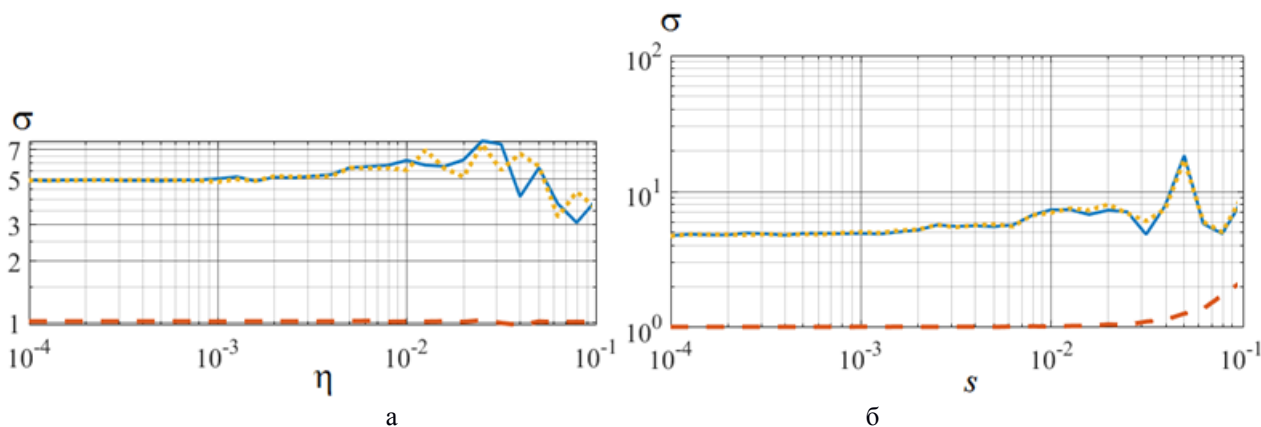


Рис. 4. Зависимости: а – $\sigma(\eta)$, б – $\sigma(s)$ для — STC, - - CLQR и ... NQPC регуляторов при ограничении крутящих моментов

Можно заметить, что в обоих случаях CLQR регулятор работает лучше, чем STC или NQPC. Сходство между работой STC и NQPC регуляторов частично объясняется тем, что NQPC использует STC в качестве задающего регулятора. Во всех случаях ошибка управления не уменьшается, а в экспериментах с STC и NQPC значительно возрастает. Это свидетельствует о том, что данные регуляторы нежелательно использовать при наложении ограничений на значения крутящих моментов.

Введение наблюдателя в систему управления роботом. Для исправления неточности датчика часто используется наблюдатель, который для системы с явными механическими ограничениями (3) может быть сформулирован следующим образом [26]:

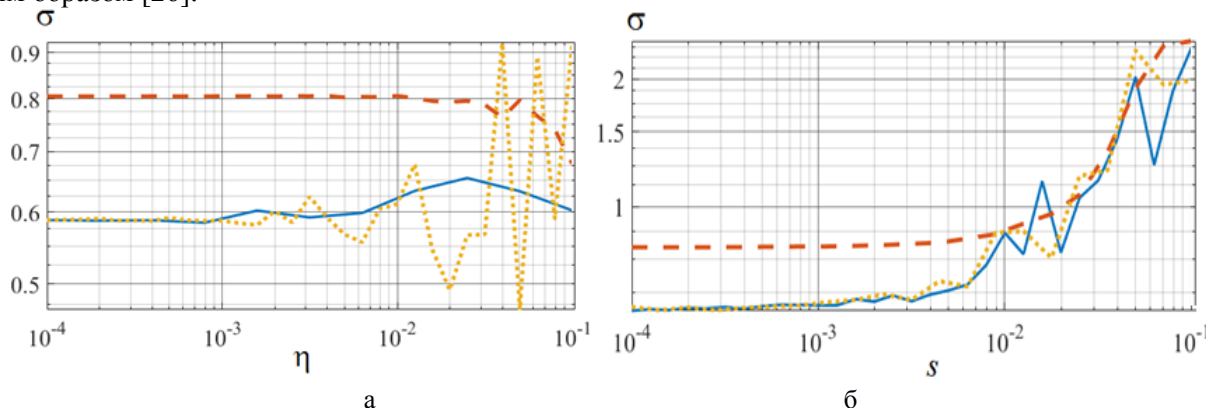


Рис. 5. Зависимости: а – $\sigma(\eta)$, б – $\sigma(s)$ для — STC, - - CLQR и ... NQPC регуляторов при использовании наблюдателя

Сравнивая графики на рис. 3, а и рис. 5, а, можно заметить, что использование наблюдателя для STC и NQPC регуляторов делает их менее чувствительными к шуму датчика, при этом на CLQR регулятор существенного влияния не оказывается. Также введение наблюдателя повышает устойчивость STC регулятора к малым изменениям шума датчика. При сравнении графиков на рис. 3, б и рис. 5, б значительных улучшений от применения наблюдателя не заметно.

$$\dot{z} = \mathbf{A}z + \mathbf{B}u + \mathbf{F}^T \lambda + \mathbf{c} + \mathbf{L}(x - z), \quad (12)$$

где z – вектор предсказания координат состояния, \mathbf{L} – оптимальная матрица коэффициентов усиления.

Матрица коэффициентов усиления может быть найдена путем решения линейного уравнения Риккати для системы (12), аналогичный пример можно найти в [26]. Так же, как CLQR, наблюдатель описывается целевой функцией (5). Здесь использовались весовые коэффициенты $\mathbf{Q}=10^3\mathbf{I}$ и $\mathbf{R}=\mathbf{I}$. На рис. 5, а показана зависимость $\sigma=\sigma(\eta)$, а на рис. 5, б – $\sigma=\sigma(s)$ для случая, когда используется наблюдатель (12).

Выводы. В статье проведен сравнительный анализ работы трех типов регуляторов: STC, CLQR и NQPC для управления движением двуногого робота во время шага. Цель исследования заключалась в установлении влияния нелинейных свойств датчиков на производительность этих регуляторов. Полученные результаты свидетельствуют о том, что существует область параметров датчиков, в которой производительность регуляторов устойчива по отношению к малым

изменениям этих параметров. Это является желательным свойством систем управления, разработанных с использованием моделирования. Такие области параметров характерны для систем без наблюдателя и при его наличии, а также для систем с ограничениями на значения крутящего момента и без них.

Установлено, что CLQR регулятор работает хуже, чем другие типы регуляторов при отсутствии ограничений крутящего момента и высокой точности датчиков. Также CLQR регулятор наиболее устойчив по отношению к малым изменениям параметров датчиков. При введении ограничений на значения крутящего момента CLQR регулятор работает лучше, чем другие регуляторы. Также можно сделать вывод о том, что СТС и NQPC, использующий СТС в качестве задающего регулятора, ведут себя схоже во всех экспериментах. При этом вычислительная нагрузка при работе NQPC регулятора в несколько раз выше. Это свидетельствует о том, что NQPC следует использовать только тогда, когда для управления роботом необходимы его специфические свойства, такие как возможность в явном виде интегрировать конусы трения и вводить ограничения на значения крутящего момента. В противном случае предпочтительно использовать СТС регулятор. Если существуют строгие ограничения крутящего момента, то лучшим вариантом регулятора является CLQR.

Источники финансирования. Грант Президента МК-1537.2019.8, РФФИ, проект №18-38-00140/18.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Caron S., Kheddar A. Multi-contact walking pattern generation based on model preview control of 3d com accelerations // Humanoid Robots (Humanoids): Proc. IEEE-RAS 16th Intern. Conf., Cancun, Mexico. 2016. Pp. 550-557.
2. Chestnutt J., Lau M., Cheung G., Kuffner J., Hodgins J., Kanade T. Footstep planning for the Honda Asimo humanoid // ICRA: Proc. of the IEEE Intern. Conf. on Robotics and Automation, Barcelona, Spain, Spain. 2005. Pp. 629-634.
3. Jatsun S., Savin S., Yatsun A. Walking pattern generation method for an exoskeleton moving on uneven terrain // Climbing and Walking Robots and Support Technologies for Mobile Machines (CLAWAR): Proc. of the 20th Intern. Conf., Panama city, PA. 2017. P. 13-20.
4. Kuindersma S., Permenter F., Tedrake R. An efficiently solvable quadratic program for stabilizing dynamic locomotion // Robotics and Automation (ICRA): Proc. IEEE Intern. Conf., Hong Kong, China. 2014. Pp. 2589-2594.
5. Jatsun S., Savin S., Yatsun A. Motion control algorithm for a lower limb exoskeleton based on iterative LQR and ZMP method for trajectory generation // Medical and Service Robots: Proc. Intern. Workshop. – Springer, Cham. 2016. Pp. 305-317.
6. Dai H., Tedrake R. Planning robust walking motion on uneven terrain via convex optimization // Humanoid Robots (Humanoids): Proc. IEEE-RAS 16th Intern. Conf., Cancun, Mexico. 2016. Pp. 579-586.
7. Jatsun S., Savin S., Yatsun A. Footstep planner algorithm for a lower limb exoskeleton climbing stairs // Interactive Collaborative Robotics: Proc. Intern. Conf. Springer, Cham. 2017. Pp. 75-82.
8. Nguyen Q., Agrawal A., Da X., Martin W.C., Geyer H., Grizzle J.W., Sreenath K. Dynamic Walking on Randomly-Varying Discrete Terrain with One-step Preview // Robotics: Science and Systems: Proc. Intern. Conf., Cambridge, MA, USA. 2017. Pp. 1-9.
9. Deits R., Tedrake R. Footstep planning on uneven terrain with mixed-integer convex optimization // Humanoid Robots: Proc. IEEE-RAS Intern. Conf., Madrid, Spain. 2014. Pp. 279-286.
10. Mason S., Rotella N., Schaal S., Righetti L. Balancing and walking using full dynamics LQR control with contact constraints // Humanoid Robots (Humanoids): Proc. IEEE-RAS 16th Intern. Conf., Cancun, Mexico. 2016. Pp. 63-68.
11. Galloway K., Sreenath K., Ames A.D., Grizzle J.W. Torque Saturation in Bipedal Robotic Walking Through Control Lyapunov Function-Based Quadratic Programs // IEEE Access. 2015. Vol. 3. Pp. 323-332.
12. Atkeson C.G., Babu B.P.W., Banerjee N., Berenson D., Bove C.P., Cui X., Gennert M. No falls, no resets: Reliable humanoid behavior in the DARPA robotics challenge // Humanoid Robots (Humanoids): Proc. IEEE-RAS 15th Intern. Conf., Seoul, South Korea. 2015. Pp. 623-630.
13. Kuindersma S., Deits R., Fallon M., Valenzuela A., Dai H., Permenter F., Tedrake R. Optimization-based locomotion planning, estimation, and control design for the atlas humanoid robot // Autonomous Robots. 2016. Vol. 40(3). Pp. 429-455.
14. Atkeson C.G., Benzun P.B., Banerjee N., Berenson D., Bove C.P., Cui X., Gennert M. What happened at the DARPA Robotics Challenge finals // DARPA Robotics Challenge Finals: Humanoid Robots To The Rescue: Springer, Cham. 2018. Pp. 667-684.
15. Johnson M., Shrewsbury B., Bertrand S., Calvert D., Wu T., Duran D., Smith J. Team IHMC's lessons learned from the DARPA Robotics Challenge: Finding data in the rubble // J. of Field Robotics. 2017. Vol. 34(2). Pp. 241-261.
16. Ortega R., Spong M.W. Adaptive motion control of rigid robots: A tutorial // Automatica.

1989. Vol. 25(6). Pp. 877–888.

17. Featherstone R. Rigid Body Dynamics Algorithms // Boston, MA: Springer US. 2014. 271 p.

18. Mistry M., Buchli J., Schaal S. Inverse dynamics control of floating base systems using orthogonal decomposition // Robotics and Automation: Proc. IEEE Intern. Conf., Anchorage, AK, USA. 2010. Pp. 3406–3412.

19. Righetti L., Buchli J., Mistry M., Schaal S. Inverse dynamics control of floating-base robots with external constraints: A unified view // Robotics and Automation: Proc. IEEE Intern. Conf., Shanghai, China. 2011. Pp. 1085–1090.

20. Jatsun S., Savin S., Lushnikov B., Yatsun A. Algorithm for motion control of an exoskeleton during verticalization // ITM Web of Conferences: EDP Sciences. 2016. Vol. 6. Pp. 1–5.

21. Jatsun S., Savin S., Yatsun A. Comparative analysis of global optimization-based controller tuning methods for an exoskeleton performing push recovery // System Theory, Control and Computing (ICSTCC): Proc. 20th IEEE Intern. Conf., Sinaia, Romania. 2016. Pp. 107–112.

22. Jatsun S., Savin S., Yatsun A. Parameter optimization for exoskeleton control system using sobol sequences // Symposium on Robot Design, Dynamics and Control. Springer, Cham. 2016. Pp. 361–368.

23. Savin S., Jatsun S., Vorochaeva L. Modification of constrained LQR for control of walking in-pipe robots // Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics): Proc. IEEE Intern. Conf., Omsk, Russia. 2017. Pp. 1–6.

24. Savin S., Vorochaeva L. Nested quadratic programming-based controller for pipeline robots // Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM): Proc. IEEE Intern. Conf., St. Petersburg, Russia. 2017. Pp. 1–6.

25. Boyd S., Vandenberghe L. Convex optimization // Cambridge university press: Cambridge, UK. 2004. 725 p.

26. Savin S., Jatsun S., Vorochaeva L. State observer design for a walking in-pipe robot // MATEC Web of Conferences: EDP Sciences. 2018. Vol. 161. 03012.

Информация об авторах

Савин Сергей Игоревич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории мехатроники, управления и прототипирования. E-mail: s.savin@innopolis.ru. Университет Иннополис. Россия, 420500, г. Иннополис, ул. Университетская, д. 1.

Ворочаева Людмила Юрьевна, кандидат технических наук, доцент кафедры механики, мехатроники и робототехники. E-mail: mila180888@yandex.ru. Юго-Западный государственный университет. Россия, 305040, Курск, ул. 50 лет Октября, д. 94.

Поступила в мае 2019 г.

© Савин С.И., Ворочаева Л.Ю., 2019

¹Savin S.I., ^{2,*}Vorochaeva L. Yu.

¹Innopolis University

Russia, 420500, Innopolis, Universitetskaya st. 1

²Southwest State University

Russia, 305040, Kursk, 50 let Oktyabrya, 94

*E-mail: mila180888@yandex.ru

ANALYSIS OF CONTROL METHODS AND ALGORITHMS FOR WALKING ROBOTS TAKING INTO ACCOUNT THE NONLINEAR PROPERTIES OF THE ROBOT SENSOR SYSTEM

Abstract. The work is focused on the control of two-legged walking robots. The robot control task for two-legged walking robots is formulated as a quadratic programming task, which allows consideration of unilateral mechanical constraints in the form of inequality constraints caused by the friction cones and torque limitations of the drives. However, in order to assess the quality of such control approach it is important to analyze this system relative to the alternative methods. Three types of regulators are compared: CTC (Computed Torque Controller), linear quadratic regulator with constraints CLQR restrictions (Constrained Linear Quadratic Regulator) and the controller based on the quadratic programming NQPC (Nested Quadratic Programming-based Controller). Particular attention is paid to the impact of inaccuracies of the sensor system on the quality of the robot control system. The study covers cases where a dynamic observer can be used to compensate for inaccuracies of sensors, as well as cases where restrictions are imposed on the torque values in the robot joints. The simulation results show there is a sensor parameter area in which the quality of the

regulator operation is robust with respect to small changes in the nonlinear properties of sensors, and such parameter areas are characteristic for systems with and without an observer, as well as for systems with restrictions on the torque values and without them.

Keywords: *two-legged walking robot, control system, quadratic programming task, CTC controller, CLQR controller, NQPC controller, observer.*

REFERENCES

1. Caron S., Kheddar A. Multi-contact walking pattern generation based on model preview control of 3d com accelerations. Humanoid Robots (Humanoids): Proc. IEEE-RAS 16th Intern. Conf., Cancun, Mexico. 2016. Pp. 550–557.
2. Chestnutt J., Lau M., Cheung G., Kuffner J., Hodgins J., Kanade T. Footstep planning for the Honda Asimo humanoid. ICRA: Proc. of the IEEE Intern. Conf. on Robotics and Automation, Barcelona, Spain, Spain. 2005. Pp. 629–634.
3. Jatsun S., Savin S., Yatsun A. Walking pattern generation method for an exoskeleton moving on uneven terrain. Climbing and Walking Robots and Support Technologies for Mobile Machines (CLAWAR): Proc. of the 20th Intern. Conf., Panama city, PA. 2017. Pp. 13–20.
4. Kuindersma S., Permenter F., Tedrake R. An efficiently solvable quadratic program for stabilizing dynamic locomotion. Robotics and Automation (ICRA): Proc. IEEE Intern. Conf., Hong Kong, China. 2014. Pp. 2589–2594.
5. Jatsun S., Savin S., Yatsun A. Motion control algorithm for a lower limb exoskeleton based on iterative LQR and ZMP method for trajectory generation. Medical and Service Robots: Proc. Intern. Workshop. – Springer, Cham. 2016. Pp. 305–317.
6. Dai H., Tedrake R. Planning robust walking motion on uneven terrain via convex optimization. Humanoid Robots (Humanoids): Proc. IEEE-RAS 16th Intern. Conf., Cancun, Mexico. 2016. Pp. 579–586.
7. Jatsun S., Savin S., Yatsun A. Footstep planner algorithm for a lower limb exoskeleton climbing stairs. Interactive Collaborative Robotics: Proc. Intern. Conf. Springer, Cham. 2017. Pp. 75–82.
8. Nguyen Q., Agrawal A., Da X., Martin W.C., Geyer H., Grizzle J.W., Sreenath K. Dynamic Walking on Randomly-Varying Discrete Terrain with One-step Preview. Robotics: Science and Systems: Proc. Intern. Conf., Cambridge, MA, USA. 2017. Pp. 1–9.
9. Deits R., Tedrake R. Footstep planning on uneven terrain with mixed-integer convex optimization. Humanoid Robots: Proc. IEEE-RAS Intern. Conf., Madrid, Spain. 2014. Pp. 279–286.
10. Mason S., Rotella N., Schaal S., Righetti L. Balancing and walking using full dynamics LQR control with contact constraints. Humanoid Robots (Humanoids): Proc. IEEE-RAS 16th Intern. Conf., Cancun, Mexico. 2016. Pp. 63–68.
11. Galloway K., Sreenath K., Ames A.D., Grizzle J.W. Torque Saturation in Bipedal Robotic Walking Through Control Lyapunov Function-Based Quadratic Programs. IEEE Access. 2015. Vol. 3. Pp. 323–332.
12. Atkeson C.G., Babu B.P.W., Banerjee N., Berenson D., Bove C.P., Cui X., Gennert M. No falls, no resets: Reliable humanoid behavior in the DARPA robotics challenge. Humanoid Robots (Humanoids): Proc. IEEE-RAS 15th Intern. Conf., Seoul, South Korea. 2015. Pp. 623–630.
13. Kuindersma S., Deits R., Fallon M., Valenzuela A., Dai H., Permenter F., Tedrake R. Optimization-based locomotion planning, estimation, and control design for the atlas humanoid robot. Autonomous Robots. 2016. Vol. 40(3). Pp. 429–455.
14. Atkeson C.G., Benzun P.B., Banerjee N., Berenson D., Bove C.P., Cui X., Gennert M. What happened at the DARPA Robotics Challenge finals. DARPA Robotics Challenge Finals: Humanoid Robots To The Rescue: Springer, Cham. 2018. Pp. 667–684.
15. Johnson M., Shrewsbury B., Bertrand S., Calvert D., Wu T., Duran D., Smith J. Team IHMC's lessons learned from the DARPA Robotics Challenge: Finding data in the rubble. J. of Field Robotics. 2017. Vol. 34(2). Pp. 241–261.
16. Ortega R., Spong M.W. Adaptive motion control of rigid robots: A tutorial. Automatica. 1989. Vol. 25(6). Pp. 877–888.
17. Featherstone R. Rigid Body Dynamics Algorithms. Boston, MA: Springer US. 2014. 271 p.
18. Mistry M., Buchli J., Schaal S. Inverse dynamics control of floating base systems using orthogonal decomposition. Robotics and Automation: Proc. IEEE Intern. Conf., Anchorage, AK, USA. 2010. Pp. 3406–3412.
19. Righetti L., Buchli J., Mistry M., Schaal S. Inverse dynamics control of floating-base robots with external constraints: A unified view. Robotics and Automation: Proc. IEEE Intern. Conf., Shanghai, China. 2011. Pp. 1085–1090.
20. Jatsun S., Savin S., Lushnikov B., Yatsun A. Algorithm for motion control of an exoskeleton during verticalization. ITM Web of Conferences: EDP Sciences. 2016. Vol. 6. Pp. 1–5.
21. Jatsun S., Savin S., Yatsun A. Comparative analysis of global optimization-based controller tuning methods for an exoskeleton performing push recovery. System Theory, Control and Computing (IC-STCC): Proc. 20th IEEE Intern. Conf., Sinaia, Romania. 2016. Pp. 107–112.

22. Jatsun S., Savin S., Yatsun A. Parameter optimization for exoskeleton control system using sobol sequences. Symposium on Robot Design, Dynamics and Control. Springer, Cham. 2016. Pp. 361–368.

23. Savin S., Jatsun S., Vorochaeva L. Modification of constrained LQR for control of walking in-pipe robots. Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics): Proc. IEEE Intern. Conf., Omsk, Russia. 2017. Pp. 1–6.

24. Savin S., Vorochaeva L. Nested quadratic

programming-based controller for pipeline robots. Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM): Proc. IEEE Intern. Conf., St. Petersburg, Russia. 2017. Pp. 1–6.

25. Boyd S., Vandenberghe L. Convex optimization. Cambridge university press: Cambridge, UK. 2004. 725 p.

26. Savin S., Jatsun S., Vorochaeva L. State observer design for a walking in-pipe robot. MATEC Web of Conferences: EDP Sciences. 2018. Vol. 161. 03012.

Information about the authors

Savin, Sergey I. PhD, Assistant professor. E-mail: s.savin@innopolis.ru. Innopolis University. Russia, 420500, Innopolis, st. Universitetskaya, 1.

Vorochaeva, Lyudmila Yu. PhD, Assistant professor. E-mail: mila180888@yandex.ru. South-West State University. Russia, 305040, Kursk, st. 50 let Oktyabrya, 94.

Received in May 2019

Для цитирования:

Савин С.И., Ворочаева Л.Ю. Сравнительный анализ методов управления шагающими роботами с нелинейностями в сенсорной системе // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2019. № 8. С. 136–144. DOI: 10.34031/article_5d4d77313d66b6.76823159

For citation:

Savin S.I., Vorochaeva L.Yu. Analysis of control methods and algorithms for walking robots taking into account the nonlinear properties of the robot sensor system. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2019. No. 8. Pp. 136–144. DOI: 10.34031/article_5d4d77313d66b6.76823159