С. И. Савин, канд. техн. наук, доц., e-mail: savinswsu@mail.ru,
Л. Ю. Ворочаева, канд. техн. наук, доц., e-mail: mila180888@yandex.ru,
А. В. Мальчиков, канд. техн. наук, доц., e-mail: zveroknnp@gmail.com,
А. В. Ворочаев, аспирант, e-mail: sasha-vorochaev@yandex.ru,
ФГБОУ ВО Юго-Западный государственный университет, г. Курск

Метод генерации последовательности шагов для шестиногого внутритрубного робота, перемещающегося по пространственноизогнутым трубам, с использованием развертки трубы

Представлен алгоритм генерации походок для шестиногого внутритрубного робота, перемещающегося по пространственно-изогнутым трубам, заключающийся в формировании последовательности точек на внутренней поверхности трубы, в которых контактные элементы робота должны взаимодействовать с этой поверхностью. Алгоритм выполняет развертку трубы на двумерную поверхность (ее отображение на карту высот), генерирует последовательность шагов на данной поверхности и переносит их обратно на трехмерную поверхность трубы (свертка трубы).

Ключевые слова: внутритрубный робот, генерация походок, пространственно-изогнутые трубы, карта высот, развертка и свертка трубы

Введение

В последние десятилетия происходит все более широкое использование внутритрубных роботов для решения различных инженерных задач, в том числе для мониторинга состояния труб, выявления участков трубопроводов, нуждающихся в ремонте, очистки труб и т. д. [1-4]. Значительная часть существующих трубопроводов имеет пространственно-изогнутые участки, ответвления и переменный диаметр. Задача перемещения по таким трубам в настоящее время актуальна и требует эффективного решения. Одним из вариантов ее решения является разработка роботов специально для трубопроводов определенной геометрии. Примеры таких разработок показаны в работах [5-8]. В [9-11] предложен робот с упругими элементами, предназначенный для перемещения по трубам с изменяющимся диаметром.

Одна из основных сложностей управления шагающими внутритрубными роботами заключается в генерации походки, т. е. в формировании последовательности точек, в которых робот должен контактировать с опорной поверхностью, что находит отражение в современных работах. В [12—13] представлен алгоритм генерации походки для девятизвенного шагающего робота, перемещающегося в изогнутых трубах, лежащих в одной плоскости. Данный алгоритм формирует последовательность шагов, расстояние между которыми зависит от радиуса изгиба трубы и базируется на специальном геометрическом описании трубопроводов, лежащих в одной плоскости.

В данной работе рассматривается более общая задача генерации походки для внутритрубного шагающего робота, перемещающегося в пространственно-изогнутых трубах. Предложено геометрическое описание трубы, позволяющее применять достаточно простые процедуры для генерации походки. Заметим, что данная работа ограничивается вопросами генерации последовательностей шагов робота и не затрагивает такие вопросы реализации этих походок, как решение обратной задачи кинематики, построение и настройка системы управления роботом, определение точного положения робота и формы трубопровода по данным бортовых датчиков и др. Часть этих задач была рассмотрена в предшествующих работах, например, в [12, 14] решена обратная задача кинематики для плоской и пространственной конструкций шагающего внутритрубного робота, а в [15] предложен регулятор, основанный на квадратичном программировании и позволяющий управлять нормальной реакцией между стопами робота и внутренней поверхностью трубы с учетом ограничений на момент, генерируемый электроприводами.

Описание шестиногого внутритрубного робота

В статье рассматривается шагающий внутритрубный робот с шестью ногами, каждая из кото-



Рис. 1. Конструктивная схема шагающего внутритрубного робота

рых состоит из трех звеньев, соединенных между собой активными вращательными шарнирами. Ноги расположены относительно корпуса таким образом, что они образуют две симметричных "тройки", одна за другой. Каждая "тройка" при полностью выпрямленных ногах имеет форму буквы Т. Звенья, периодически взаимодействующие с внутренней поверхностью трубы, оснащены контактными элементами. На рис. 1 показана конструктивная схема робота.

На рис. 1 точки F_i , E_i и D_i — активные шарниры, K_i — контактные элементы на концах ног робота, C — центр масс корпуса, Oxyz и $Cx_1y_1z_1$ неподвижная и связанная с корпусом робота системы координат. Кинематика данного робота была рассмотрена в работе [14], где дано аналитическое решение обратной задачи кинематики для каждой ноги робота и предложен аналитический способ нахождения одного из множества возможных решений этой задачи для всего робота.

Геометрическое описание трубопровода

Описание трубы с помощью центральной линии. Алгоритм генерации походки, описываемый в этой работе, основывается на геометрическом описании трубопровода, в котором происходит движение. Будем рассматривать трубопроводы круглого сечения без ответвлений. Данный тип труб можно описать, введя понятие центральной линии ξ , под которой будем понимать кривую, точки которой соответствуют центрам сечений трубы. На рис. 2 (см. четвертую сторону обложки) показано сечение прямого участка трубы.

Дадим определение понятию "трубопровод круглого сечения".

Определение 1. Пусть задана связная гладкая поверхность Ξ и гладкая (непрерывная и дифференцируемая) параметрически заданная пространственная кривая $\xi(s) = [\xi_x(s) \ \xi_v(s) \ \xi_z(s)]^T$, где $s \in [s_0 \ s_f)$ — параметр кривой ξ такой, что через произвольно выбранную точку $P \in \xi$ может быть построена нормальная плоскость $\Omega(P)$ к $\xi(s)$. Тогда будем называть поверхность Ξ *трубопроводом круглого сечения*, если выполняются следующие условия:

1) для $\forall P \in \xi$ можно построить круг К(P) $\in \Omega(P)$ с центром в точке P такой, что пересечение круга и поверхности $\Gamma = K \cap \Xi$ является окружностью с центром в точке P, и такая окружность называется *сечением трубы* в точке P;

2) если $P_1 = \xi(s)$ и $P_2 = \xi(s + \delta)$ и Γ_1 и Γ_2 — окружности с центрами в точках P_1 и P_2 , построенные указанным выше способом, то

$$\forall Q \in \Gamma_1, \exists \delta, B_{\varepsilon}(Q) \cap \Gamma_2 \neq \emptyset,$$

где B_{ε} — это ε -окрестность точки Q.

Наложим дополнительное ограничение на производную функции ξ(*s*):

$$\left\| d\xi/ds \right\| = 1. \tag{1}$$

Формула (1) позволяет рассматривать параметр *s* как расстояние вдоль осевой линии, при этом для прямых участков трубы пройденное роботом расстояние *s* будет равно пройденному им расстоянию в декартовом пространстве. Положение точки на внутренней поверхности трубы можно описать значениями *s* и φ , где $\varphi \in [0, 2\pi]$ угол, определяющий положение точки в заданном сечении трубы относительно локальной системы координат. Сама труба при этом полностью описывается функциями $\xi(s)$ и d(s), где последняя определяет диаметр трубы.

Преобразование поверхности трубы в карту высот. Выбранное геометрическое описание трубы позволяет выполнить преобразование, отображающее трубу на так называемую карту высот математический объект, применяемый для описания опорной поверхности как скалярной функции двух переменных при построении последовательностей шагов для двуногих роботов [16]. Будем задавать карту высот следующим образом:

$$h(s, \varphi) = -d(s). \tag{2}$$

Карта высот $h(s, \phi)$ является функцией двух переменных, которые используются в качестве локальных координат на поверхности трубы. В данном случае $h(s, \phi)$ не зависит от ϕ , потому что труба имеет круглое сечение.

Процедуру построения карты высот для заданной трубы можно представить как развертку трубы. На рис. 3 изображены труба и ее карта высот.

Рис. 3 иллюстрирует, как использование карты высот позволяет упростить геометрию трубо-



Рис. 3. Труба 1 и ее карта высот 2

провода. Сгенерированная на карте высот последовательность отображается обратно на исходную трубу с помощью другого преобразования, которое можно назвать сверткой трубы.

Для выполнения свертки необходимо ввести локальные системы координат в каждой точке центральной линии. Пусть $\mathbf{e}_1(s)$, $\mathbf{e}_2(s)$ и $\mathbf{e}_3(s)$ — ортогональные единичные векторы, образующие систему координат для заданной точки на центральной линии (определенной значением *s*), причем $\mathbf{e}_1(s)$ является касательным к центральной линии. Потребуем, чтобы $\mathbf{e}_1(s)$, $\mathbf{e}_2(s)$ и $\mathbf{e}_3(s)$ были непрерывными и дифференцируемыми функциями. На рис. 4 показана центральная линия трубы с локальными системами координат на ней.

Так как вектор $\mathbf{e}_1(s)$ — касательный к центральной линии, то $\mathbf{e}_2(s)$ и $\mathbf{e}_3(s)$ образуют систему координат на плоскости $\Omega(P)$, ортогональной к центральной линии $P = \xi(s)$. Сечение трубы Г(P) лежит в этой плоскости. Тогда точку Q на внутренней поверхности трубы можем записать как функцию s, φ и h:

$$Q(s, \varphi, h) = \xi(s) - h\mathbf{T}(\mathbf{e}_1, \varphi)\mathbf{e}_2, \qquad (3)$$



Рис. 4. Центральная линия 1 трубы с локальными системами координат 2 на ней

где **T**(\mathbf{e}_1 , ϕ) — матрица поворота на угол ϕ вокруг оси \mathbf{e}_1 ; h — высота точки (s, ϕ) на карте высот, определяемая выражением (2).

Соответствие трубопровода и карты высот. В предыдущем разделе был представлен практический алгоритм для нахождения соответствия между точками на карте высот и на поверхности трубы. В этом разделе дадим формальное обоснование соответствия трубопровода Ξ и его карты высот $h(s, \varphi)$.

Согласно определению 1, для произвольно выбранных $P_1 = \xi(s)$ и $P_2 = \xi(s + \delta)$ можем получить сечения $\Gamma(P_1)$ и $\Gamma(P_2)$, являющиеся окружностями. Выберем на окружности $\Gamma(P_1)$ *п* точек $G_{1, i}$, разбивающих окружность на *п* равных частей. Согласно определению, в сколь угодно малой окрестности каждой из точек $G_{1, i}$ есть точки, принадлежащие $\Gamma(P_2)$. Тогда выберем на $\Gamma(P_2)$ *п* точек $G_{2, i}$ так, чтобы в окрестности точки $G_{1, 2}$ находилась точка $G_{2, 2}$ и т. д. Таким же образом можем построить набор из *n* точек $G_{3, i}$ на окружности $\Gamma(P_3)$, где $P_3 = \xi(s + 2\delta)$ и т. д. Указанным способом можем получить решетку из $n \times m$ точек на поверхности Ξ .

Аналогичную решетку можно задать на карте высот, разбив прямоугольную область определения функции $h(s, \phi)$ на нужное число одинаковых прямоугольников. На рис. 3 на трубе и ее карте высот показаны эти решетки. Ячейке с номером *i*, *j* на карте высот (назовем ее $\Xi_{i, j}$) можем сопоставить ячейку с аналогичным номером на поверхности трубопровода (назовем ее H_{i, i}). Для того чтобы установить изоморфизм этих ячеек, спроецируем $\Xi_{i, j}$ на касательную плоскость к поверхности Ξ в точке $G_{i, j}$. При $n \to \infty$ и $\delta \to 0$ указанная проекция $\Xi_{i, j}$ будет стремиться к прямоугольнику, который обозначим $\tilde{\Xi}_{i,j}$. Заметим, что между $\Xi_{i, i}$ и $\tilde{\Xi}_{i, j}$ имеется взаимно однозначное соответствие. Следующее выражение устанавливает взаимно однозначное отображение между ячейкой Н_{i, i} и некоторым прямоугольником в пространстве параметров *s*, ϕ :

$$H(s, \varphi) = [s \quad \varphi]^{\mathrm{T}}.$$

Тогда можем задать карту между этим прямоугольником и $\tilde{\Xi}_{i,j}$ и получить биекцию между ячейками $H_{i,j}$ и $\Xi_{i,j}$ (рис. 5). Проделав указанные операции со всеми парами ячеек, получим биективное отображение между трубопроводом и его картой высот.

Заметим, что ячейка $\Xi_{i, n}$ будет граничить с ячейкой $\Xi_{i, 1}$, тогда как ячейки $H_{i, n}$ и $H_{i, 1}$ не граничат, таким образом карта высот не полностью сохраняет структуру поверхности Ξ . Также заме-



Рис. 5. Биективное отображение между ячейками трубопровода и карты высот

тим, что на практике для нас достаточно иметь однозначное соответствие между описанными выше ячейками $H_{i, j}$ и $\Xi_{i, j}$ в связи с тем, что перемещение робота осуществляется с конечной точностью, и задание желаемого положения его стоп возможно "с точностью до ячейки".

Генерация походки

Алгоритм генерации походок формирует последовательность шагов ног робота и определяет положение точек контакта в начале каждого шага. Для простоты будем рассматривать генерацию походок для передней "тройки" ног, так как генерация походок для задней "тройки" осуществляется аналогичным образом.

Пусть \mathbf{p}_{A0} , \mathbf{p}_{B0} и \mathbf{p}_{C0} — начальные положения точек контакта K_1 , K_2 и K_3 , а \mathbf{k}_{A0} , \mathbf{k}_{B0} и \mathbf{k}_{C0} — их отображения на карту высот, представленные через *s*, φ и *h*:

$$\boldsymbol{\kappa}_{A0} = [s_{A0} \quad \boldsymbol{\varphi}_{A0} \quad \boldsymbol{h}_{A0}]^{\mathrm{T}},$$

где s_{A0} , φ_{A0} и h_{A0} выбираются таким образом, чтобы при их подстановке в формулу (3) правая часть выражения стала равной \mathbf{p}_{A0} . Выражения для \mathbf{k}_{B0} и \mathbf{k}_{C0} задаются аналогичным образом.

Тогда можем записать функцию шага, в которой в качестве аргумента используется положение точки контакта в начале шага и которая определяет положение точки контакта после выполнения шага: $\kappa_{A,i+1} = f_{step}(\kappa_{A,i})$, где *i* — номер шага. Данная функция имеет вид

$$\mathbf{\kappa}_{A,i+1} = \begin{bmatrix} s_{A,i} + \Delta s \\ \varphi_{A,i} + \Delta \phi \\ h(s_{A,i} + \Delta s, \varphi_{A,i} + \Delta \phi) \end{bmatrix},$$
(4)

где Δs и $\Delta \phi$ — постоянные, характеризующие последовательность шагов, а $h(s, \phi)$ — функция, вычисляемая по формуле (2). После этого можем перейти к формированию последовательности шагов для точек контакта K_1 , K_2 и K_3 с помощью этой функции, как показано на рис. 6.

Будем использовать выражение (3) для отображения этих последовательностей с карты высот на реальную трехмерную трубу (выполнения свертки трубы). В итоге получим последовательности положений требуемых точек контакта ног робота K_1 , K_2 и K_3 с внутренней поверхностью трубы (рис. 7, см. четвертую сторону обложки).

На основании анализа результатов работы алгоритма генерации походок можно отметить, что он формирует последовательности шагов на карте высот трубы, определяемые функцией желаемого шага (4), в которой можно варьировать значения параметров Δs и $\Delta \phi$. Однако при отображении этих последовательностей на трехмерную поверхность трубы видно, что расстояние между соседними контактными точками зависит от геометрии трубы. В частности, при преодолении L-образных и U-образных поворотов расстояние между соседними точками контакта будет больше для ноги, расположенной на стороне трубы, более удаленной от оси поворота. Благодаря этому одна нога не будет "опережать" другие. Этот эффект является естественным следствием генерации последовательностей шагов на карте высот, а затем использования выражения (3) для их отображения обратно на трубу. Похожий эффект был отмечен в работе [13], где рассматривается аналогичная последовательность генерации походок для плоских труб.

Отметим, что алгоритмы походки, описанные в этой статье, справедливы для широкого диапазона конструкций шагающих роботов и могут быть легко адаптированы для роботов с разным числом ног.



Рис. 6. Карта высот с последовательностью шагов на ней: 1 — поверхность, заданная функцией (2); 2 — точки контакта

Выбор шага с учетом геометрических свойств робота

Рабочая область стопы. Предложенный способ генерации походки позволяет изменять длину шага, варьируя параметры Δs и $\Delta \phi$. Выбор длины шага должен осуществляться исходя из геометрических характеристик робота (длин его звеньев), его конструктивных особенностей (ограничений на относительные углы повтора отдельных пар звеньев), особенностей работы системы управления, режимов движения робота, особенностей взаимодействия с опорной поверхностью. В этом разделе остановимся на первых двух факторах, влияющих на выбираемую длину шага робота. Для упрощения дальнейших рассуждений предположим, что параметр $\Delta \phi$ равен нулю, и робот движется "прямо вдоль трубы". Тогда длину шага определяет параметр Δs .

Допустимая длина шага непосредственно связана с геометрией двухзвенного механизма $E_i D_i K_i$ (см. рис. 1 и рис. 8).

На рис. 8 l_1 и l_2 — длины звеньев $E_i D_i$ и $D_i K_i$ соответственно, c_i — расстояние от шарнира E_i до стенки трубы, а θ_i и ψ_i — углы, определяющие ориентацию звеньев ноги.

Введем понятие рабочей области стопы как множества всех точек, достижимых для контактного элемента K_i . Пусть на углы θ_i и ψ_i наложены ограничения: $\theta_i \in [\theta_{\min} \ \theta_{\max}]$ и $\psi_i \in [\psi_{\min} \ \psi_{\max}]$. Заметим, что ориентация корпуса робота будет оказывать влияние на форму рабочей области стопы. На рис. 9 (см. четвертую сторону обложки) показана рабочая область этого механизма при $\theta_i \in [\pi/4 \ 3\pi/4]$ и $\psi_i \in [-2\pi/3 \ 2\pi/3]$, $l_1 = l_2 = 0,25$ м для случая, когда корпус робота направлен параллельно стенке трубы.

На рис. 9 синими кружками обозначены точки, достигаемые, когда шарнир D_i "выгнут влево", а красными квадратами — достигаемые, когда шарнир D_i "выгнут вправо". Точка E_i помещена в начало координат.



Рис. 8. Схема двухзвенного механизма ноги: 1 — стенка трубы; 2 — корпус робота

В начале и конце выполнения шага точка K_i касается внутренней стенки трубы. Таким образом, максимально возможная длина шага σ_{max} определяется формой рабочей области стопы робота и расстоянием от точки E_i до трубы c_i . Фактически пересечение внутренней поверхности трубы и рабочей области стопы задает пространство возможных положений точки K_i в конце шага. На рис. 9 это пространство показано красной штриховой линией для случая, когда $c_i = 0,4$ м.

Наконец, максимально возможный шаг для робота также зависит от положения точки K_i относительно шарнира E_i в начале совершения шага. Так, если $E_iK_i = [0, 2, 0, 4]$, то максимально возможный шаг в положительном направлении вдоль оси Ox, согласно рис. 9, составит 0,1 м несмотря на то, что пространство возможных положений точки K_i для $c_i = 0,4$ м является отрезком длиной 0,6 м. На практике допустимая длина шага может быть дополнительно ограничена в связи с тем, что при перемещении точки K_i к границе рабочей области стопы нога робота переходит в особое положение.

Рассмотренный подход к определению максимальной длины шага не учитывает подвижности в шарнире F_i (см. рис. 1). Рабочую область стопы робота в трехмерном пространстве можно получить вращением рабочей области двухзвенного механизма с учетом ограничения подвижности в шарнире F_i . Пространство возможных положений точки K_i будет получено тем же образом и будет представлять собой двухмерную поверхность.

Изгиб трубопровода. В предшествующем разделе было показано, как максимально возможная длина шага σ_{max} для шагающего робота может быть найдена путем анализа рабочей области стопы робота. При этом алгоритм использует параметр Δs для задания длины шага. В этом разделе мы укажем, каким образом может быть выбрано максимально допустимое значение параметра Δs исходя из σ_{max} с учетом геометрических свойств трубопровода.

В случае, когда робот движется по прямому участку трубы, величина Δs равна получаемой длине шага σ робота (рис. 10, *a*). Длина шага σ будет отличаться от величины Δs , если центральная линия трубы имеет кривизну на участке, по которому происходит перемещение (рис. 10, δ).

Заметим, что отличия между σ и Δs будут тем больше, чем ближе к центральной линии трубы располагается ее центр кривизны. Наиболее значительные отличия между σ и Δs будут достигнуты, когда центр кривизны центральной линии лежит на внутренней поверхности трубы. Он не может находиться внутри трубы в связи с ограничениями, накладываемыми определением 1. Также отличия между σ и Δs зависят от того, вдоль какой линии на внутренней поверхности



Рис. 10. Связь между длиной шага и параметром Δs : a — для прямого участка трубы, δ — для криволинейного участка трубы

трубы "шагает" робот. На рис. 10, δ показаны два возможных шага σ_1 и σ_2 , соответствующих одному значению Δs , при этом $\sigma_1 > \Delta s > \sigma_2$.

Пусть радиус кривизны на некотором участке трубопровода является постоянным и равен R, а диаметр трубы равен d. Тогда можем найти такие линии, что соответствующие им длины шага σ_1 и σ_2 будут удовлетворять условиям

$$\begin{cases} \Delta s = R \Delta \alpha; \\ \sigma_1 = (R + d/2) \Delta \alpha; \\ \sigma_2 = (R - d/2) \Delta \alpha, \end{cases}$$
(5)

где $\Delta \alpha$ — шаг вдоль центральной линии в радианах. При условии, что центр кривизны центральной линии трубы располагается на внутренней поверхности трубы, т. е. R = d/2, величины $\sigma_1 = 2\Delta s$ и $\sigma_2 = 0$. Таким образом, возможен случай, когда шаг робота оказывается вдвое большим, чем заданное значение Δs . Если о геометрии трубы нет никаких данных, можно использовать этот факт для задания дополнительных ограничений на величину шага робота, требуется чтобы Δs_{max} было вдвое меньше σ_{max} . Если известен минимальный радиус кривизны R, то можно непосредственно найти соотношение между Δs_{max} и σ_{max} , используя (5).

Вычислительная сложность и точность позиционирования

Формально выражение (3) может быть использовано для задания желаемого положения стопы робота на внутренней поверхности трубопровода с произвольной точностью. При этом, как было указано в разделе "Соответствие трубопровода и карты высот", на практике можно задавать это положение "с точностью до ячейки". Пусть каждая ячейка на карте высот имеет размеры δs на $\delta \phi$, а функция $\xi(s)$ представлена в виде таблицы (с шагом δs), и каждому значению функции сопоставлен базис $\mathbf{e}_1(s)$, $\mathbf{e}_2(s)$, $\mathbf{e}_3(s)$. В таком случае можно показать, что для вычисления положения точки на внутренней поверхности трубы достаточно выполнить 46 операций умножения, 32 сложения, найти значения двух тригонометрических функций и выполнить одну операцию поиска в отсортированной таблице. Последний имеет сложность $O(\log(n))$, где *n* в данном случае — длина таблицы, задающей $\xi(s)$.

Используя рассуждения, аналогичные приведенным в разделе "Изгиб трубопровода", можно показать, что при задании положения на карте высот с точностью δs и δφ ошибка на поверхности трубы составит 2δs в продольном, $R\delta\varphi$ в поперечном направлениях и $\sqrt{(R\delta\varphi)^2 + (2\delta s)^2}$ в абсолютном выражении при условии, что ячейки достаточно малы, чтобы их кривизной можно было пренебречь.

Заключение

В статье представлен алгоритм генерации последовательности шагов для шестиногого шагающего робота, основанный на специальном описании трубы, в которой происходит движение. Данное геометрическое описание позволяет отобразить трубу на карту высот с более простой геометрией (провести "развертку" трубы) и использовать достаточно простую процедуру генерации последовательности шагов на карте высот, а затем отобразить карту высот со сформированной походкой обратно на трубу (провести "свертку" трубы). Таким образом, возможна генерация последовательностей шагов ног робота в пространственно изогнутых трубах с использованием относительно простых вычислений. Это важно в связи с тем, что на практике данный алгоритм выполняется на бортовом компьютере внутритрубных роботов, не обладающем высокой вычислительной мощностью. Заметим, что для оценки вычислительной сложности алгоритма требуется провести анализ вычислительной сложности методов распознавания формы трубопровода на основе данных, получаемых сенсорной системой робота. Это составляет самостоятельную задачу, которая будет рассмотрена в дальнейших работах авторского коллектива.

В статье рассмотрены ограничения, накладываемые на длину шага робота с учетом геометрии робота и конструктивных ограничений подвижности в его шарнирах. Также был предложен способ использования данных о геометрии трубопровода при выборе максимальной допустимой длины шага. При этом выработка практических рекомендаций по выбору длины шага и других, не рассмотренных в этой работе параметров походки робота, является частью дальнейшей работы коллектива и требует исследования динамики описанного механизма. Исследование выполнено за счет средств гранта Президента Российской Федерации МК-2577.2017.8, договор № 14.Z56.17.2577-MK.

Список литературы

1. Roh S. G., Choi H. R. Differential-drive in-pipe robot for moving inside urban gas pipelines // IEEE transactions on robotics. 2005. Vol. 21, N 1. P. 1–17.

2. Mirats Tur J. M., Garthwaite W. Robotic devices for water main in-pipe inspection: A survey // Journal of Field Robotics. 2010. Vol. 27, N. 4. P. 491–508.

3. Roslin N. S., Anuar A., Jalal M. F. A., Sahari K. S. M. A review: hybrid locomotion of in-pipe inspection robot // Procedia Engineering. 2012. Vol. 41. P. 1456–1462.

4. Roman H. T., Pellegrino B. A., Sigrist W. R. Pipe crawling inspection robots: an overview // IEEE transactions on energy conversion.1993. Vol. 8, N. 3. P. 576–583.
5. Roh S. G., Ryew S., Yang J. H., Choi H. R. Actively

5. Roh S. G., Ryew S., Yang J. H., Choi H. R. Actively steerable in-pipe inspection robots for underground urban gas pipelines // Proc. IEEE International Conference In Robotics and Automation, ICRA. 2001. Vol. 1. P. 761–766.

6. Horodinca M., Doroftei I., Mignon E., Preumont A. A simple architecture for in-pipe inspection robots // Proc. Int. Colloq. Mobile, Autonomous Systems. 2002. P. 61–64.

7. Scholl K. U., Kepplin V., Berns K., Dillmann R. An articulated service robot for auton..omous sewer inspection tasks // Proc. IEEE/RSJ International Conference Intelligent Robots and Systems, IROS'99. 1999. Vol. 2. P. 1075–1080.

8. Choi H. R., Ryew, S. M. Robotic system with active steering capability for internal inspection of urban gas pipelines // Mechatronics. 2002. Vol. 12, N. 5. P. 713–736.

9. Jatsun S., Yatsun A., Savin S. Pipe inspection parallellink robot with flexible structure // Proc. of the 15th International Conference on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines. 2012. Vol. 23. P. 26.

10. Яцун С. Ф., Савин С. И. Экспериментальные исследования вертикального перемещения робота для мониторинга трубопроводных систем // Известия Юго-Западного государственного университета. 2012. № 5 (44). Ч. 2. С. 199—202.

11. Савин С. И., Яцун С. Ф., Рублев С. Б. Экспериментальные исследования управляемого движения робота с внешними актуаторами для мониторинга трубопроводов малого диаметра // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2012. Т. 14. № 4 (5). С. 1277–1279.

12. Савин С. И., Ворочаева Л. Ю., Ворочаев А. В. Моделирование движения четырехногого шагающего робота в трубопроводах с изменяющимся диаметром и изгибами // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2017. № 1 (321). С. 39—46.

13. Савин С. И., Ворочаева Л. Ю., Ворочаев А. В. Алгоритм генерации походок для робота, осуществляющего движение в трубопроводах // Известия Юго-Западного государственного университета. Сер. "Техника и технологии". 2017. Т. 7, № 1 (22). С. 90—97.

14. Savin S., Jatsun S. and Vorochaeva L. Trajectory generation for a walking in-pipe robot moving through spatially curved pipes // In MATEC Web of Conferences, EDP Sciences, 2017, Vol. 113. P. 1-5.

15. Savin S., Vorochaeva L. Yu. Nested Quadratic Programming-based Controller for In-pipe Robots, In Proceedings of the International Conference On Industrial Engineering 2017, Saint Petersburg (препринт).

16. Gutmann J. S., Fukuchi M., Fujita, M. A floor and obstacle height map for 3D navigation of a humanoid robot // Proc. of the IEEE International Conference In Robotics and Automation, ICRA 2005. 2005. P. 1066–1071.

S. I. Savin, PhD, Associate Professor, e-mail: savinswsu@mail.ru,
L. Yu. Vorochaeva, PhD, Associate Professor, e-mail: mila180888@yandex.ru,
A. V. Malchikov, PhD, Associate Professor, e-mail: zveroknnp@gmail.com,
A. V. Vorochaev, Postgraduate Student, e-mail: sasha-vorochaev@yandex.ru,

Southwest State University, Kursk

An Approach to Step Sequence Generation Problem for an In-Pipe Robot with Six Legs Designed to Move in Spatially-Curved Pipes, Based on Unwrapping of the Pipe

The paper discusses the step sequence generation algorithm for a in-pipe walking robot moving in spatially curved pipes with circular cross section. The robot consists of a body and six legs, each of which includes two links connected to each other and to the body via an actuated pin joint. The legs are connected to the body in the following way: four legs are installed on the sides of the robot (two legs for each side), and the remaining two are installed on the bottom of the robot's body. There are two leg triplets (formed by one leg from each side of the robot), the frontal triplet and the backside triplet. When the legs are stretched out each triplet assumes a T shape.

The proposed in the paper step sequence generation algorithm determines the positions of the points on the inner surface of the pipe where the contact elements on the end of each of the robot's legs come in contact with it. The algorithm consists of three parts. First, an unwrapping of the pipe takes place, converting the pipe into a two-dimensional height map (a scalar function of two variables). Then, suing the height map the algorithm generates a sequence of steps on it. The last step is wrapping the height map back into the pipe, effectively mapping the generated step sequence back onto the inner surface of the original pipe. We assume that the inverse kinematics algorithm can then generate a sequence of robot's poses that would allow the robot to take all these steps.

The algorithm is based on a particular geometric description of the pipe, that describes its centerline and diameter as scalar functions of one variable. This variable has an interpretation as a distance that the robot travels through the pipe to arrive at the current cross section. The main advantage of the algorithm is that it uses simple numerical operations and it does not produce excessive computational load, which means it can be successfully implemented on an on-board computer of the in-pipe robot, even if that computer has very moderate computational capabilities.

Keywords: in-pipe robot, generation of gaits, spatial-curved tube, height map, unfolding and folding of pipe

References

1. Roh S. G., Choi H. R. Differential-drive in-pipe robot for moving inside urban gas pipelines, *IEEE transactions on robotics*, 2005, vol. 21, no. 1, pp. 1–17.

2. Mirats Tur J. M., Garthwaite W. Robotic devices for water main in-pipe inspection: A survey, *Journal of Field Robotics*, 2010, vol. 27, no. 4, pp. 491–508.

3. Roslin N. S., Anuar A., Jalal M. F. A., Sahari, K. S. M. A review: hybrid locomotion of in-pipe inspection robot, *Procedia Engineering*, 2012, vol. 41, pp. 1456–1462.

4. Roman H. T., Pellegrino B. A., Sigrist, W. R. Pipe crawling inspection robots: an overview, *IEEE transactions on energy conversion*, 1993, vol. 8, no. 3, pp. 576–583.

5. Roh S. G., Ryew S., Yang J. H., Choi H. R. Actively steerable in-pipe inspection robots for underground urban gas pipelines, *Proc. IEEE International Conference In Robotics and Automation, ICRA*, 2001, vol. 1, pp. 761–766.

6. Horodinca M., Doroftei I., Mignon E., Preumont A. A simple architecture for in-pipe inspection robots, *Proc. Int. Colloq. Mobile, Autonomous Systems*, 2002, pp. 61–64.

7. Scholl K. U., Kepplin V., Berns K., Dillmann R. An articulated service robot for autonomous sewer inspection tasks, *Proc. IEEE/RSJ International Conference Intelligent Robots and Systems, IROS'99,* 1999, vol. 2, pp. 1075–1080.

8. Choi H. R., Ryew, S. M. Robotic system with active steering capability for internal inspection of urban gas pipelines, *Mechatronics*, 2002, vol. 12, no. 5, pp. 713–736.

9. Jatsun S., Yatsun A., Savin S. Pipe inspection parallellink robot with flexible structure, *Proc. of the 15th International Conference on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines*, 2012, vol. 23, P. 26.

10. Jatsun S. F., Savin S. I. Jeksperimental'nye issledovanija vertikal'nogo peremeshhenija robota dlja monitoringa trubopro-

vodnyh system (Studying of the vertical movements of an inpipe inspection robot), *Izvestija Jugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta*, 2012, no. 5 (44), part 2, pp. 199–202 (in Russian).

11. Savin S. I., Jatsun S. F., Rublev S. B. Jeksperimental'nye issledovanija upravljae mogo dvizhenija robota s vneshnimi aktuatorami dlja monitoringa truboprovodov malogo diametra (Experimental researches of operated movement at robot with external actuators for monitoring the small diameter pipelines), *Izvestija Samarskogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk*, 2012, vol. 14, no. 4 (5), pp. 1277–1279 (in Russian).

12. Savin S. I., Vorochaeva L. Yu., Vorochaev A. V. Modelirovanie dvizhenija chetyrehnogogo shagajushhego robota v truboprovodah s izmenjajushhimsja diametrom i izgibami (Modelling of the movement quadruped walking robot in pipelines with the changing diameter and bends), *Fundamental'nye i prikladnye problemy tehniki i tehnologii.* 2017, no. 1 (321), pp. 39–46 (in Russian).

13. Savin S. I., Vorochaeva L. Yu., Vorochaev A. V. Algoritm generacii pohodok dlja robota, osushestvljajushego dvizhenie v truboprovodah (Algorithm to generate gaits for robots moving in pipelines), *Izvestija Jugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta.* Ser. "Tehnika i tehnologii", 2017, no. 1 (22), pp. 90–97 (in Russian).

14. Savin S., Jatsun S., Vorochaeva L. Yu. Trajectory generation for a walking in-pipe robot moving through spatially curved pipes, *In MATEC Web of Conferences, EDP Sciences*, 2017, vol. 113, pp. 1–5.

15. Savin S. I., Vorochaeva L. Yu. Nested Quadratic Programming-based Controller for In-pipe Robots, *In Proceedings* of the International Conference On Industrial Engineering 2017, Saint Petersburg (preprint).

16. Gutmann J. S., Fukuchi M., Fujita M. A floor and obstacle height map for 3D navigation of a humanoid robot, *Proc.* of the IEEE International Conference In Robotics and Automation, *ICRA 2005*, 2005, pp. 1066–1071.

Адрес редакции:

107076, Москва, Стромынский пер., 4

Телефон редакции журнала **(499) 269-5510** E-mail: it@novtex.ru

Технический редактор Е. В. Конова. Корректор Е. В. Комиссарова. Сдано в набор 10.01.2018. Подписано в печать 21.02.2018. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 8,86. Заказ ІТЗ18. Цена договорная. Журнал зарегистрирован в Министерстве Российской Федерации по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций. Свидетельство о регистрации ПИ № 77-15565 от 02 июня 2003 г. Оригинал-макет ООО "Адвансед солюшнз". Отпечатано в ООО "Адвансед солюшнз". 119071, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 19, стр. 1.