электронный журнал
МОЛОДЕЖНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК
Издатель ФГБОУ ВПО "МГТУ им. Н.Э. Баумана". Эл No. ФС77-51038.

УДК 621.865.8

Кинематика робота–змеи, имеющего 6 звеньев

Чжу Сяосяо, *аспирант*
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н. Э. Баумана,
кафедра «Робототехнические системы»

Научный руководитель: Назарова А.В., к.т.н, доцент
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н. Э. Баумана,
avn@bmstu.ru

В последние десятилетия в мире стремительно развивается робототехника и появляются разнообразные виды роботов. Большее число учёных обращают своё внимание на животных, поэтому бионика становится тенденцией к развитию робототехники последних лет. Разработка и создание мобильных роботов различного назначения требует новых подходов к механизмам, способным перемещаться в ограниченном пространстве со сложным рельефом.

Змеи, которые существовали ещё в эпоху динозавров, имеют свои особые способы движения, эволюционировавшие за миллион лет. Они умеют преодолевать препятствия и двигаться по любой поверхности. Ряд учёных исследовал движения этих древних животных и создал новый вид роботов – робота-змеи.

1. Способы движения змей и робота-змеи

Как известно, тело змеи длинное и мягкое, составленное из позвонков (200 – 400). Исследования показали, что змеи движутся по земле за счёт деформации тела, типичными видами движения змей являются: (а) Поступательное движение (*concertina motion*) – тело принимает форму буквы S, передняя часть продвигается вперёд, задняя часть сжимается. (б) Извилистое движение (*serpentine motion*) – змея двигается за счёт трения между

боковой поверхностью и землей. Сейчас большинство роботов-змей используют этот способ движения. (с) Боковое движение(*sidewinding motion*) – начиная с головы, части тела поднимаются над землей и поворачиваются. (д) Гусеничное движение (*rectilinear motion*) – змея двигается за счёт трения между «животом» и землей. На рис. 1 представлены типы движения змей[1].

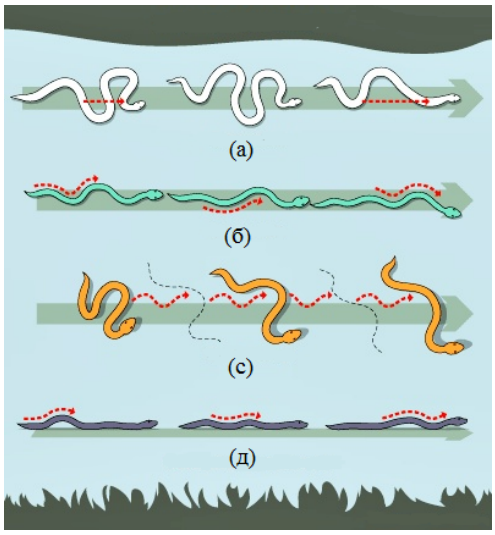


Рис. 1. Типичные виды движения змей

В бионической механике робот-змея, это мобильный робот с высокой избыточностью. Он может перемещаться в узком и маленьком пространстве. Робот-змея может получить широкое применение в будущем, поскольку может использоваться при ликвидации последствий землетрясений, аварий в шахтах, в боевых действиях, на космических кораблях, при исследовании других планет.

Как видно из рис.1, змеи извиваются за счёт деформации тела, и эта деформация, в основном, вызвана движениями позвонков. Именно поэтому конструкция змеи может рассматриваться как обычный шарнирный механизм. При таком подходе мы можем создать простую кинематическую модель. На рис.2. представлена схема первичной модели робота.

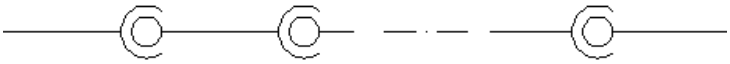


Рис. 2. Схема шаровой модели

Очевидно, что при использовании шаровых сочленений трудно обеспечить управление механизмом. Поэтому при сравнении нескольких известных роботов-змей мы можем разделить кинематические модели на две категории – модель с ортогональными осями вращения и модель с карданными осями вращения [8, 9].

Для решения задач управления движением конструкция робота чем проще, тем лучше, поэтому мы решили использовать кинематическую модель на базе второго варианта. На рис. 3 представлена выбранная кинематическую модель.

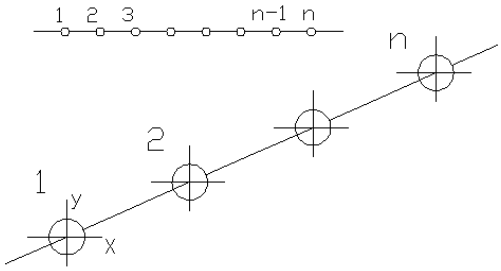


Рис. 3. Схема кинематической модели с карданными шарнирами

Самое важное - выбор числа звеньев. Реальная змея имеет почти 200 звеньев, а для робота обычно выбирают 8 - 20 , поскольку чем больше звеньев, тем труднее управлять. Мы взели за основу инспекционный внутритрубный многозвенный робот [2, 3] и его принцип движения, которые показаны на рис. 4, и решили выбрать механизм с 6 звеньями и паступательным движением, которое очень похоже на принцип движения инспекционных внутритрубных многозвенных роботов.

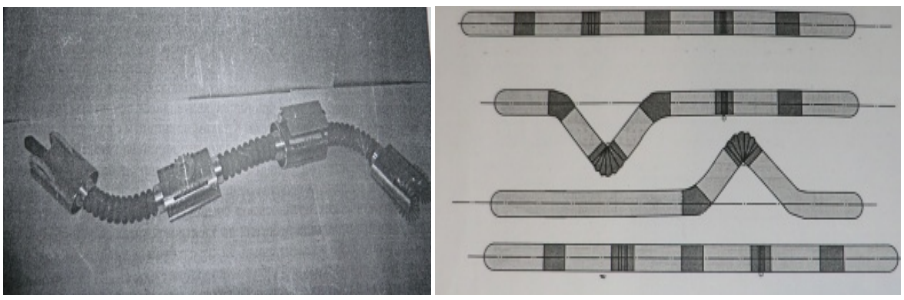


Рис. 4. Инспекционный внутритрубный робот и его принцип движения

2. Кинематика робота

При построении математической модели робота-змеи мы использовали аналогию с моделью манипулятора. Метод *Денавита-Хартенберга* является очень распространенным методом для анализа кинематики манипулятора [5, 6] и позволяет получать параметры положения и ориентации робота в процессе его движения.

С другой стороны, робот-змея фукционально является мобильным роботом , и при таком подходе можно получить однородные матрицы перехода для шестизвенного плоского механизмам от абсолютной системы координат к системе координат «хвоста».

При построении математической модели механизма необходимо определить основные параметры и описать положение и орентацию робота на плоскости. На рис. 5. представлена схема распределения относительных систем координат звеньев робота.

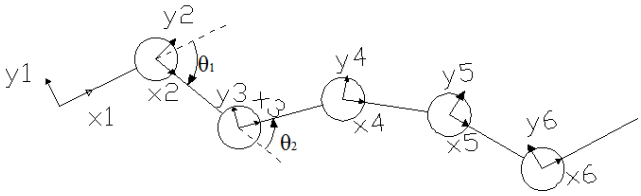


Рис.5. Схема распределения относительных систем координат робота

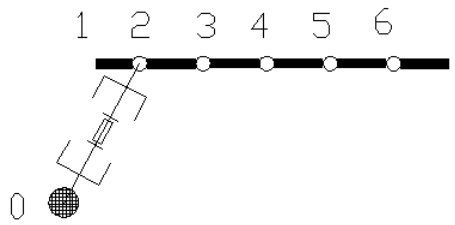
Матрица перехода от i+1-той к i-той системе координат [5, 6]:

$$A_i(\theta, d, a, \alpha) := \begin{pmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta)\cdot\cos(\alpha) & \sin(\theta)\cdot\sin(\alpha) & a\cdot\cos(\theta) \\ \sin(\theta) & \cos(\theta)\cdot\cos(\alpha) & -\cos(\theta)\cdot\sin(\alpha) & a\cdot\sin(\theta) \\ 0 & \sin(\alpha) & \cos(\alpha) & d \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \qquad (1)$$

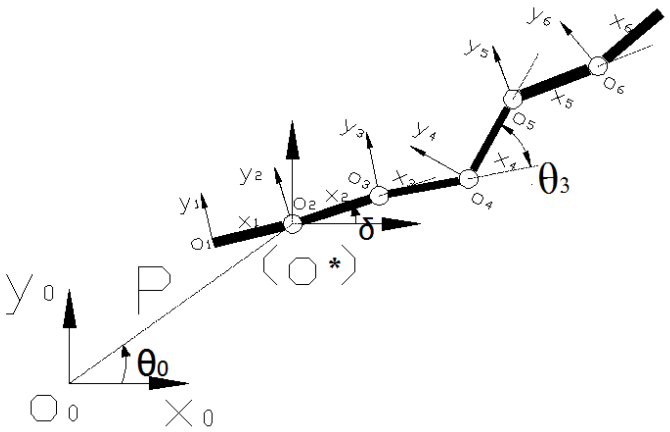
и однородная матрица, связывающая «голову» и «хвост» робота-змеи:

$$T_i := \prod_{n=1}^{i} A_n \qquad (i = 1,..,6) \qquad (2)$$

Основная разница между мобильным роботом и манипулятором заключается в наличии у манипулятора неподвижного основания, на котором строится абсолютная система координат. Робот двигается по земле, поэтому нельзя построить абсолютную систему координат на его «хвосте». Мы выбираем начальную точку на земле, как начало неподвижной системы координат, и предполагаем между ней и хвостом робота наличие ещё одного звена с телескопическим и вращательным шарнирами, как показано на рис.6. (а), (б)[4].



(а)



(б)

Рис. 6. Системы координат мобильного робота

На рис.6(б) показана, дополнительная система координат XO^*Y, которая совпадает с системой $X_2O_2Y_2$ «манипулятора».

Матрица перехода от системы O^* к абсолютной системе координат:

$$A_0 := \begin{pmatrix} \cos(\theta_0) & -\sin(\theta_0) & 0 & x \\ \sin(\theta_0) & \cos(\theta_0) & 0 & y \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

где точка $O^* = O_2 = (x, y)$.

Когда второе звено вращается вокруг оси O^* (O_2), его координаты определяет матрица перехода A_2 (см. рис. 6 (б)).

$$A_2 := A(\delta, 0, 0, 0) \rightarrow \begin{pmatrix} \cos(\delta) & -\sin(\delta) & 0 & 0 \\ \sin(\delta) & \cos(\delta) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

где δ – угол вращения второго звена «манипулятора».

тогда

$$T_i := A_0 \cdot \prod_{n=2}^{i} A_n \qquad (i = 2,3,...,6)$$

И для хвоста

$$T_1 := A_0 \cdot A_2 \cdot A_1$$

Параметры звеньев робота, показаны в таблице .

I	α_{i-1}	a_{i-1}	d_i	θ_i
1	0	L_1	0	θ_1
2	0	L	0	θ_2
3	0	L	0	θ_3
4	0	L	0	θ_4
5	0	L	0	θ_5

Отметим, что здесь θ_1 – это угол между звенями 1 и 2 в горизонтальной плоскости.

Таким образом, однородные матрицы для точки O_2 и «головы» робота

$$T_2 := A_2 \rightarrow \begin{pmatrix} \cos(\delta) & -\sin(\delta) & 0 & 0 \\ \sin(\delta) & \cos(\delta) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$T_6 := A_0 A_2 A_3 A_4 A_5 A_6 = \begin{bmatrix} \cos(\alpha) & -\sin(\alpha) & 0 & L\left(\cos(\delta+\theta_0+\theta_2)+\cos(\delta+\theta_0+\theta_2+\theta_3)+\cos(\delta+\theta_0+\theta_2+\theta_3+\theta_4)+\cos(\alpha)\right) \\ \sin(\alpha) & \cos(\alpha) & 0 & L\left(\sin(\delta+\theta_0+\theta_2)+\sin(\delta+\theta_0+\theta_2+\theta_3)+\sin(\delta+\theta_0+\theta_2+\theta_3+\theta_4)+\sin(\alpha)\right) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

(3)

В уравнении (3) $\alpha = \delta + \theta_0 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4 + \theta_5$.

Отметим, что здесь $\theta_2 = \theta_2(t_1)$ является углом между звеньями 2 и 3 в момент времени t_1.

Координаты «головы» робота в основной системе *XOY* могут быть определены из последнего столбца матрицы T_6. поскольку координаты «головы» робота в системе координат «6» $P_6 = (L_1\ 0\ 0\ 1)^T$,

Вектор столбец положения «головы» P определяется как

$$p := \begin{bmatrix} L\left(\cos(\delta+\theta_0+\theta_2)+\cos(\delta+\theta_0+\theta_2+\theta_3)+\cos(\delta+\theta_0+\theta_2+\theta_3+\theta_4)+\cos(\alpha)\right)+L_1+x \\ L\left(\sin(\delta+\theta_0+\theta_2)+\sin(\delta+\theta_0+\theta_2+\theta_3)+\sin(\delta+\theta_0+\theta_2+\theta_3+\theta_4)+\sin(\alpha)\right)+y \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \qquad (4)$$

2.1 Модель движения робота-змеи как манипулятора

Рассмотрим перемещения «головы» робота из точки M в точку N при неизменном положении «хвоста». Используем подход к модели робота-змеи как к манипулятору. (рис.7)

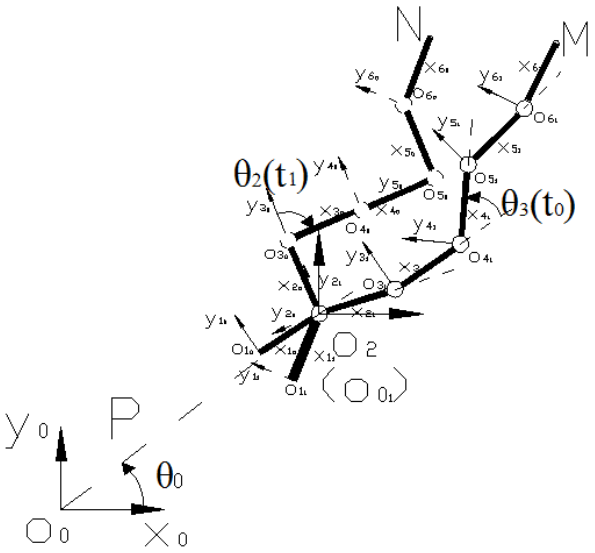


Рис. 7. Робот двигается из точки *M* в точку *N*

Здесь важно, что «хвост» робота рассматривается как основание «манипулятора». При этом положение самого звена может меняться, но точка O_2 остаётся неподвижной.

Если мы знаем координаты «головы» робота в пересчёте в абсолютную систему координат, то обратная задача может быть решена, но она может иметь более одного решения из-за избыточности робота. Не существует общего метода решения этой задачи в явном виде, что является желательным. Чтобы уменьшить энергозатраты робота, нужно выбрать решение, исходя из принципа минимальных изменений углов ($\sum|\theta_i| = \min$). Однако, этот принцип действует только теоретически.

Чтобы робот мог выполнять разные задачи (например, лазить по лестнице), необходимо обеспечить движения подъёма головы (рис.8), что будет предпосылкой для перемещения робота в пространстве.

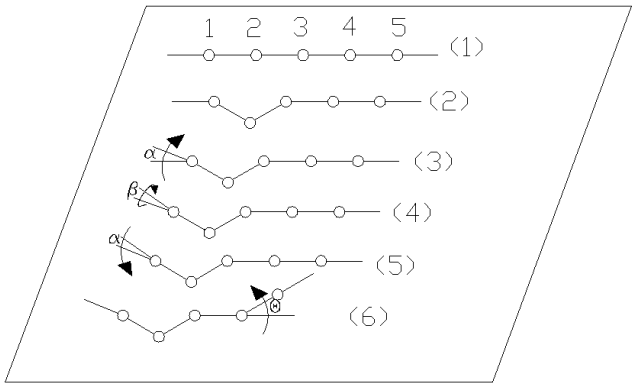


Рис. 8. Фазы подъёма головы робота-змеи

В схеме α и θ – углы в вертикальной плоскости, β – угол в горизонтальной плоскости. Чтобы обеспечить устойчивость робота, в начале движения голова и хвост остаются на плоскости, а изгибаются промежуточные звенья (см. фазу 2).

2.2 Модель движения робота-змеи как мобильного робота

Вернёмся к ситуации, когда модель робота-змеи строится по аналогии с мобильными роботами, что является основной задачей исследования. Из-за наличия нескольких звеньев для перемещения робота его звенья должны двигаться в определенной последовательности. На рис.9. показаны фиксированные положения фазы прямолинейного движения робота по горизонтальной плоскости[7]. Предполагается, что один «шаг» робот-змея выполняет за время T, тогда каждое из промежуточных состояний должно выполняться за 1/8T.

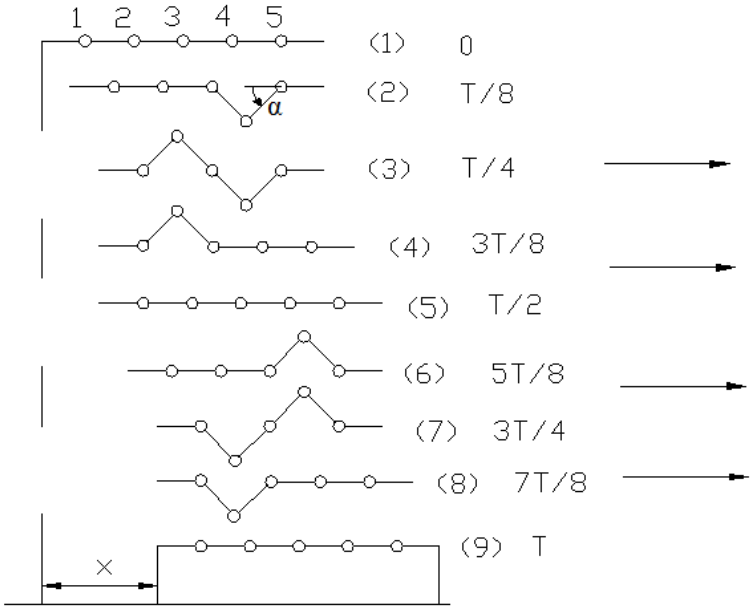


Рис. 9. Фазы прямолинейного движения робота по горизонтальной плоскости

Эта схема позволяет сделать 2 вывода:

1) Робот-змея двигается за счёт изгибов звеньев, направление головы и хвоста остаётся неизменным. Чтобы выполнять разные задачи, например, обход препятствий, необходимо изменять направления движения отдельных звеньев робота.

2) Когда робот двигается по плоскости прямолинейно, последовательные фазы обладают рядом особенностей. Из схемы видно, что в конфигурациях 1, 2, 3 и 5, 6, 7

остаётся неизменным положением «головы», а в конфигурациях 3, 4, 5 и 7, 8, 9 фиксируется положение «хвоста» робота.

При помощи рис.9 нетрудно найти отношение между перемещениемточки O_2 (первое сочление) и время . т.е. перемещение F и времени – t.

$$\begin{cases} F(\alpha, t) = x \cdot n + d_f \\ t = n \cdot T + \tau \end{cases} \qquad (5)$$

Где x – перемещение робота за один цикл (за время T),

$$x = 8L(1 - cos\,\alpha)$$

n – Число целых циклов;

d_f – перемещение робота внутри одного цикла.

$$d_f = \begin{cases} 2L(1 - \cos(\omega\tau)) & 0 \le \tau \le \frac{T}{8} \\ 2L(1 - \cos\alpha) + 2L\left(1 - \cos\left(\omega(\tau - \frac{T}{8})\right)\right) & \frac{T}{8} < \tau \le \frac{T}{4} \\ 4L(1 - \cos\alpha) & \frac{T}{4} < \tau \le \frac{T}{2} \\ 4L(1 - \cos\alpha) - 2L\left(1 - \cos\omega\left(\tau - \frac{T}{2}\right)\right) & \frac{T}{2} < \tau \le \frac{5T}{8} \\ 6L(1 - \cos\alpha) - 2L\left(1 - \cos\omega\left(\tau - \frac{5T}{8}\right)\right) & \frac{5T}{8} < \tau \le \frac{3T}{4} \\ 4L(1 - \cos\alpha) & \frac{3T}{4} < \tau \le T \end{cases}$$

τ – время, за которое выполняется перемещение d_f.

ω – угловая скорость звена робота.

Из рисунка.9 видно, что робот при этом способе может двигаться только вперёд, что недостаточно для мобильного робота.

Возможность изменения направления движения робота-змеи обеспечивает ему доступ к любой точке в горизонтальной плоскости. На рис.10 представлены фазы изменения напрвления (вид сверху). В схеме α – угол в вертикальной плоскости, β – угол в горизонтальной плоскости. На шаге «6» мы считаем робот трёхзвенным с тремя зафиксированными шарнирами.

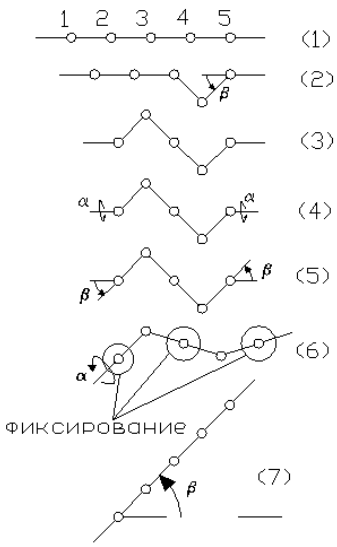


Рис. 10. Фазы изменения направления движения робота-змеи (вид сверху)

Для изменения направления движения робота-змеи необходимо задать функцию времени *G(β)*.

Пусть поворот робота на угол $\beta = 45\,°$ выполняется за время T_H ($T_H = \sum_{i=1}^{6} T_i$, где T_i является временем на переход из фазы i в i+1).

Тогда *G(β)* – время, необходимое на изменение направления движения на произвольный угол β.

$$G(\beta) = \sum t_i \quad (i = 1,\ldots,6) \qquad (6)$$

Рассмотрим последовательно каждый переход.

Смена фаз 1-2, 2-3 и 4-5 – время пропорционально углу при одинаковой угловой скорости звена. $\frac{\beta}{t_i} = \frac{45}{Ti}$ $(i = 1,2,4)$; смена фаз 3-4, 5-6 связана с углом α – $t_3 = T_3$; смена фаз 6-7 – $\frac{2\beta}{t_5} = \frac{90}{T_5}$.

Таким образом, если заданы параметры α, β и t, то из формул (4), (5) и (6) можно определить значения линейных и угловой координат «головы» робота.

$$\begin{bmatrix} P_x \\ P_y \\ \varphi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L(cos(\delta + \theta_0 + \theta_2) + \ldots + cos(\alpha)) + L_1 + x \\ L(sin(\delta + \theta_0 + \theta_2) + \ldots + 2\,sin(\alpha)) + y \\ \alpha \end{bmatrix}$$

где

(x, y) – координаты «головы» робота,

T_M – время движения робота как мобильного робота,

$$\begin{cases} x = \cos\beta_1 F(\alpha_1, t_1) + \cdots + \cos\left(\sum \beta_i\right) F(\alpha_i, t_i) \\ y = \sin\beta_1 F(\alpha_1, t_1) + \cdots + \sin\left(\sum \beta_i\right) F(\alpha_i, t_i) \\ \text{т}_\text{м} = \sum t_i + \sum G(\beta_i) \end{cases}$$

Отметим, что если бы робот сначала двигался вперёд, то $\beta_1 = 0$.

2.3 Движение робота в вертикальной плоскости[8]

Рассмотрим задачу движения робота в ограниченном пространстве, когда невозможно реализовать движение робота по горизонтальной плоскости. Выберём новый способ движения робота-змеи – движение в вертикальной плоскости или аналог движения гусеницы (рис.12).

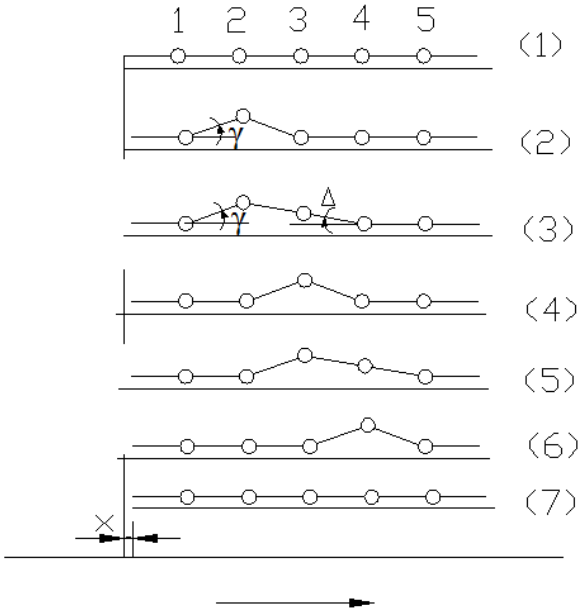


Рис. 12. Движение робота в вертикальной плоскости

Кинематика робота с разделением на фиксированные фазы похожа на кинематику робота при движении по горизонтальной плоскости. Отметим, что здесь робот двигается в плоскости *XOZ*.

3. Заключение

В статье рассмотрены кинематические модели робота-змеи, которые позволяет создать новый змеевидный робот благодаря особенностям принципов движения.

Из-за небольшого числа звеньев робот-змея двигается не так свободно как живые змеи в природе, поэтому мы планируем использовать более разнообразные способы движения. Для всех представленных способов движения выполнено математичское моделирование в пакете matlab, результаты показали эффективность предложенных подходов.

Список литературы

1. Chen Li, Wang Yue-chao, Li Bin Present State and Future Direction towards Snake-Robot Research // Robot. 2002. Vol. 24. No. 6. P. 559-563. DOI: 1002-0446(2002)06-055905.
2. Чащухин В.Г. Движение миниатюрного робота в ограниченном пространстве: автореф. дис. … канд. техн. наук. М., 2008. 21 с.
3. Князьков М.М. Исследование управляемых движений миниатюрных многозвенных роботов для действий в ограниченных пространствах: дис. … канд. физ-мат.наук. М., 2007. 98 с.
4. Guo Xu-hong, Rui Yan-nian, Wang Xiang, Zhu Sheng-ling Motion Planning and Expermient Research of a New Kind of Periodical Moving Snake-Like Robot // Mechanical science and technology. 2005. Vol. 24. No. 7. P. 785-787. DOI: 1003-8728(2005)07-0785-03.
5. Craig J.J. Introduction to Robotics: Mechanics and Control. New Jersey: Prentice Hall, 2005. 321 p.
6. Зенкевич С.Л., Ющенко А.С. Основы управленния манипуляционными роботами / под ред. С.Л. Зенкевича, А.С. Ющенко. 2-е изд., исправ. и доп. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. 480 с.
7. Li Xiu-li Locomotion Capability of Snake-like Modular Robots Based On GZ-I Module. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2011. 81 p.
8. Поезжаева Е.В., Юшков В.С. Робот–змея для технической диагностики и ремонта трубопроводов. Режим доступа: http://science-bsea.bgita.ru/2011/mashin_2011_14/poezjaeva_robot.htm (дата обращения 11.07.2014)

9. Snake-Like Locomotion using Smart Materials. Available at: http://academic.uprm.edu/pcaceres/Undergrad/Snake/id3.htm, accessed 11.19.2014.