

Управление движением мобильной колесной платформы

Епифанов Ростислав Юрьевич

Физический факультет. Кафедра автоматизации физико-технических исследований.

Группа №14305, 2017.

Научный руководитель:

Котов Константин Юрьевич, к.т.н. н.с. ИАиЭ СО РАН.

Аннотация

Механизм движения с помощью заноса (skid steering) является широко используемым для управления движением мобильных четырехколесных платформ. Для данного типа управления не предусмотрен рулевой механизм, что требует пересмотр кинематической модели по сравнению с рулевыми колесными платформами. По этому главное внимание в настоящей курсовой работе уделено четырехколесным платформам с возможностью независимого управления колесами. А именно, исследование возможностей улучшения кинематической модели мобильных платформ подобного типа в присутствии непренебрежимого колесного проскальзывания. В работе оценена степень устойчивости движения робота по заданной траектории в зависимости от соотношения угловых скоростей колесных пар и их абсолютных значений.

Ключевые слова: четырехколесные роботы, независимое управление колес, устойчивость траектории платформы.

Аннотация

Механизм движения с помощью заноса (skid steering) является широко используемым для управления движением мобильных четырехколесных платформ. Для данного типа управления не предусмотрен рулевой механизм, что требует пересмотр кинематической модели по сравнению с рулевыми колесными платформами. По этому главное внимание в настоящей курсовой работе уделено четырехколесным платформам с возможностью независимого управления колесами. А именно, исследование возможностей улучшения кинематической модели мобильных платформ подобного типа в присутствии непренебрежимого колесного проскальзывания. В работе оценена степень устойчивости движения робота по заданной траектории в зависимости от соотношения угловых скоростей колесных пар и их абсолютных значений.

Ключевые слова: четырехколесные роботы, независимое управление колес, устойчивость траектории платформы.

Оглавление

1 Введение	3
2 Теоретическая часть	3
2.1 Направление научных исследований лаборатории	3
2.2 Формулировка задачи	4
2.3 Описание структуры робота	5
2.4 Кинематическая модель робота	6
3 Экспериментальная часть	11
3.1 Экспериментальный стенд	11
3.2 Описание эксперимента	11
3.3 Результаты	12
4 Заключение	16
5 Литература	17

1 Введение

Механизм движения с помощью заноса (skid steering) является широко используемым для управления движением мобильных роботов. Для управляемых заносом роботов не предусмотрен рулевой механизм, а направление движения меняется за счет разности вращения левой и правой колесных пар. Согласно нетривиальному взаимодействию между колесами и поверхностью и кинематическим ограничениям возникают сложности в построении аккуратной кинематической и динамической модели для управляемых заносом роботов.

Колесное проскальзывание играет решающую роль в кинематической и динамической модели управляемого заносом робота. Способность оценивать информацию о колесном проскальзывании важна для навигационных задач. Навигационная точность робота снижается, когда проскальзывание колес становится непренебрежимым. Информация о колесном проскальзывании также играет важную роль в динамичности управления роботом. Взаимодействие между колесами и поверхностью также напрямую влияет на ускоряющие и тормозящие силы, что оказывает негативный эффект на стабильность движения и маневренность робота.

Целью данной работы являются анализ кинематики управляемых заносом роботов и применение аналитических результатов для оценки точности движения робота.

2 Теоретическая часть

2.1 Направление научных исследований лаборатории

Лаборатория разрабатывает системы управления сложными динамическими объектами. Разрабатываемые системы представляют собой стенды полунатурного моделирования систем управления роботами колесного, квадрокоптерного и самолетного типа и комплексы специального программного обеспечения. Реализуемые методы управления позволяют работать с нелинейными динамическими моделями объектов высокого порядка, нестационарными условиями окружающей среды, а также в условиях

необходимости действовать в заранее неизвестной обстановке, отсутствии внешней навигации. Последняя особенность связана с невозможностью использования ГЛОНАСС/GPS навигации при обследовании внутренних помещений, туннелей и недостаточная точность подобных систем при движении вблизи промышленных строений. Данные системы предназначены для создания и отработки универсальных методов управления и навигации автономными мобильными робототехническими комплексами, включающих управление траекторным движением, групповое децентрализованное управление, определение местоположения в пространстве и обход препятствий.

2.2 Формулировка задачи

В настоящее время мобильные роботы имеют достаточно широкую область применения, например, для решения таких задач, как: роботизированная уборка территории, беспилотная разведка местности и сбор данных, автоматическое перемещение товаров на складах, обследование и разминирование взрывоопасных предметов, исследование поверхности космических тел, и т.д. Различные вариации дифференциальных двухколесных (differential-driven) и управляемых заносом роботов нашли свое широкое применение в научных, образовательных и исследовательских задачах. На рынке получили распространение такие марки как: E-puck, Khepera, Polulo, Lynxmotion с возможностью установки дополнительных датчиков. Модели роботов товарных брендов E-puck и Khepera являются двухколесными дифференциальными роботами, нашедшие свое применение в образовательных и исследовательских задачах. Роботы Zumo производства фирмы Polulo являются гусеничными платформами на основе микроконтроллера Arduino. Бренд Lynxmotion имеет линейку роботов управляемых заносом, которые можно использовать в обширном классе задач.

Для данных типов роботов не предусмотрен рулевой механизм, что требует пересмотр кинематической модели по сравнению с рулевыми колесными платформами. Главное внимание в настоящей курсовой работе уделено четырехколесным платформам с возможностью независимого управления колесами. А именно, исследование устойчивости траектории и возможно-

стей улучшения кинематической модели мобильных платформ подобного типа.

2.3 Описание структуры робота

Исполнительная система робота выполнена на основе микроконтроллера STM32-F103C6T8 и драйверов управления моторами L293D. Робот оснащен четырьмя шаговыми двигателями, каждый из которых подключен к своему драйверу управления для возможности асинхронного вращения.

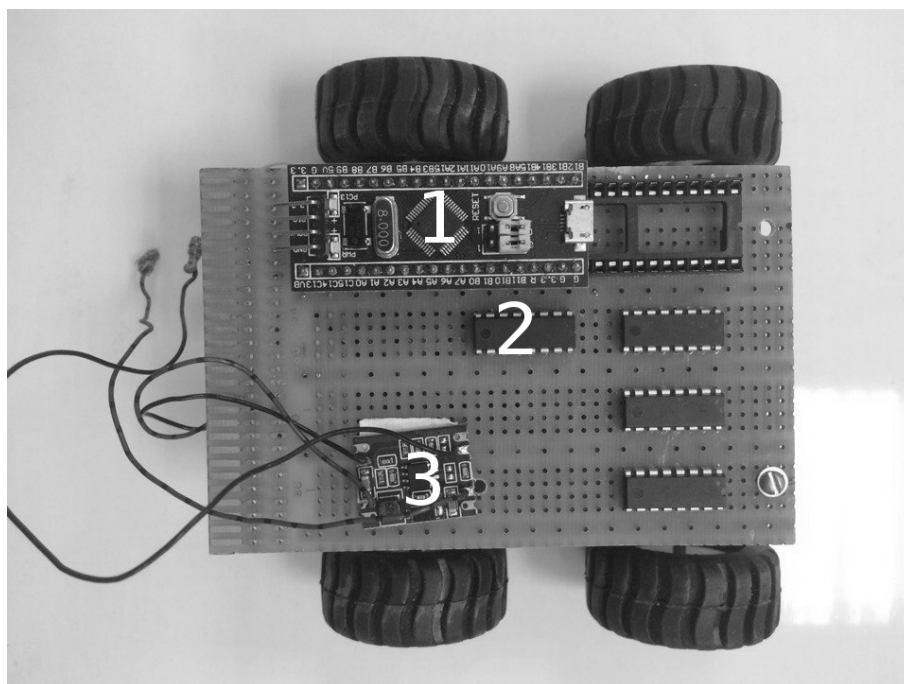


Рис. 1. Вид робота сверху. 1 - микроконтроллер STM32-F103C6T8, 2 - драйвер L293D, 3 - преобразователь напряжения

Управляющую систему предполагается сделать на основе одноплатного компьютера Raspberry Pi.

Описание алгоритмов управления роботом осуществлено на языке C в среде разработки для микроконтроллеров Keil. Программирование микроконтроллера робота произведено с помощью программатора ST-LINK v2.

Расстояние между правой и левой колесными парами составляет 10.5 см, а между передней и задней - 6.1 см. Эффективный радиус колес робота равен 2.1 см.

2.4 Кинематическая модель робота

Для составления кинематической модели робота, управляемого заносом, сделаем предположение, что движение происходит на ровной поверхности. Определим глобальную ($I(X_g, Y_g, Z_g)$) и локальную ($B(x, y, z)$) систему координат (с.к.), связанную с центром масс платформы робота (рис.2). Координаты центра масс обозначим через (X, Y, Z) , где $Z = const$ из-за предположения о планарности движения робота.

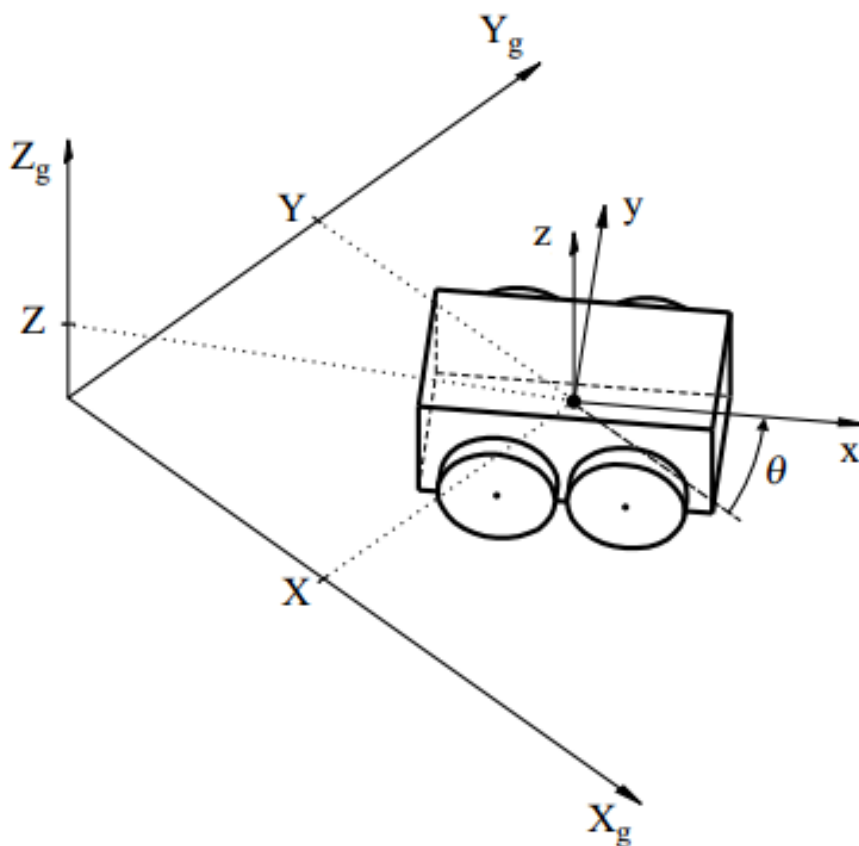


Рис. 2. Изображение робота в глобальной системе координат

Предположим, что скорость движения робота на плоскости в локальной с.к. $B(x, y, z)$ равна $v = (v_x, v_y, 0)^T$, а угловая скорость - $\omega = (0, 0, \omega)^T$. Назовем вектором обобщенных координат робота $q = (X, Y, \Theta)^T$, где X и Y - координаты центра масс робота, а Θ - поворот локальной с.к. B относительно глобальной с.к. I , тогда вектор $q' = (X', Y', \Theta')^T$ обозначает вектор обобщенных скоростей. Из рис. 3 можно легко понять, что скорости X' и Y' в глобальной с.к. I связаны со скоростями v_x и v_y в локальной с.к., как

$$\begin{pmatrix} X' \\ Y' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\Theta & -\sin\Theta \\ \sin\Theta & \cos\Theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_x \\ v_y \end{pmatrix} \quad (1)$$

Так как движение происходит в плоскости, легко понять, что $\Theta' = \omega$.

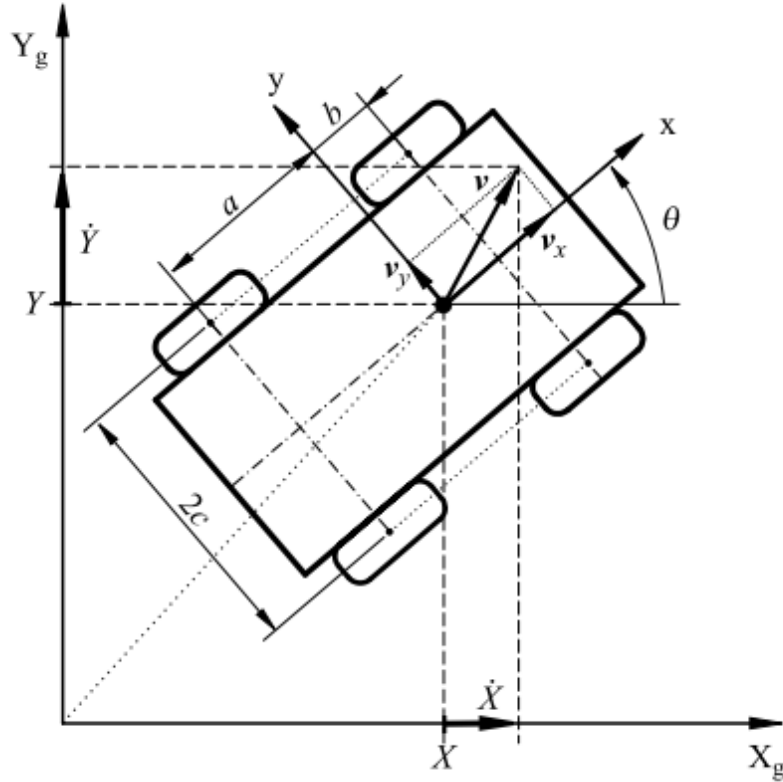


Рис. 3. Связь между скоростью платформы в глобальной и локальной системе координат

Очевидно, что уравнение 1 не накладывает никаких ограничений, связанных с конструкцией робота, а только описывает кинематику свободно движущегося тела. Следовательно, нужно установить кинематические соотношения, связанные с конструктивными особенностями.

Предположим, что i -ое колесо вращается с угловой скоростью $\omega_i(t)$, где $i = 1, \dots, 4$. Для упрощения модели предположим, что толщина колес пренебрежимо мала, и колесо касается поверхности в точке P_i , как показано на рис. 4. В общем случае, в противоположность большинству колесных платформ, поперечная скорость v_{iy} управляемого заносом робота не равна нулю. Эта особенность, появляющаяся из-за конструктивных особенностей платформы, позволяет роботу менять ориентацию в пространстве за счет поперечного скольжения.

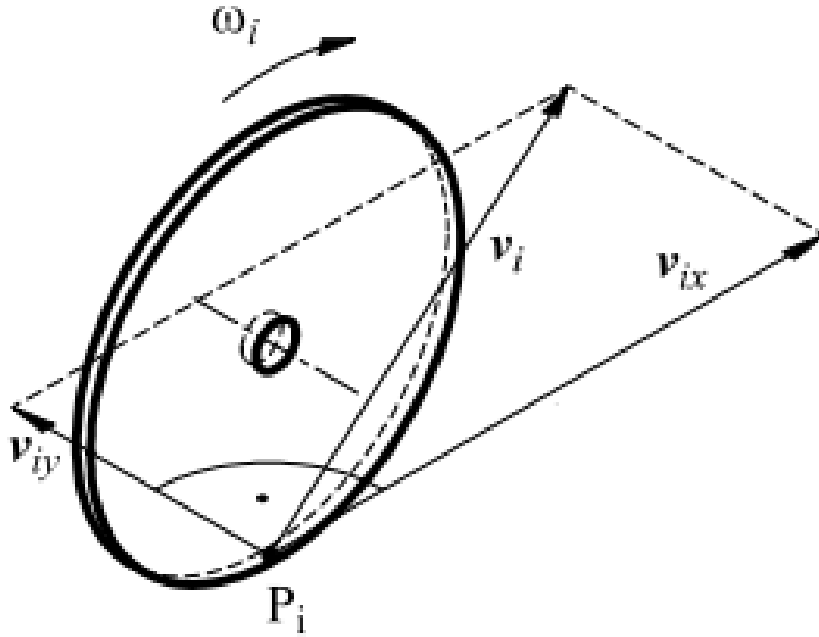


Рис. 4. Компоненты скорости колеса в локальной системе координат

В данной модели предполагается описать только самый простой случай перемещения робота, управляемого заносом, в котором продольное проскальзывание между колесами и поверхностью пренебрежимо. Согласно этому предположению можно получить, что:

$$v_{ix} = r\omega_i, \quad (2)$$

где v_{ix} продольная компонента скорости в локальной системе координат, а r - эффективный радиус колеса.

Для составления кинематической модели необходимо учитывать вращения каждого колеса робота. Определим радиус-вектора $d_i = (d_{ix}, d_{iy})^T$ и $d_C = (d_{Cx}, d_{Cy})^T$, как показано на рис. 5. Используя простые геометрические соотношения, изображенные на рис. 5 легко получается

$$\frac{\|v_i\|}{\|d_i\|} = \frac{\|v\|}{\|d_C\|} = \|\omega\| \quad (3)$$

или в другой форме:

$$\frac{v_{ix}}{-d_{iy}} = \frac{v_x}{-d_{Cy}} = \frac{v_{iy}}{d_{ix}} = \frac{v_y}{d_{Cx}} = \omega. \quad (4)$$

Определяя координаты мгновенного центра вращения в локальной с.к.

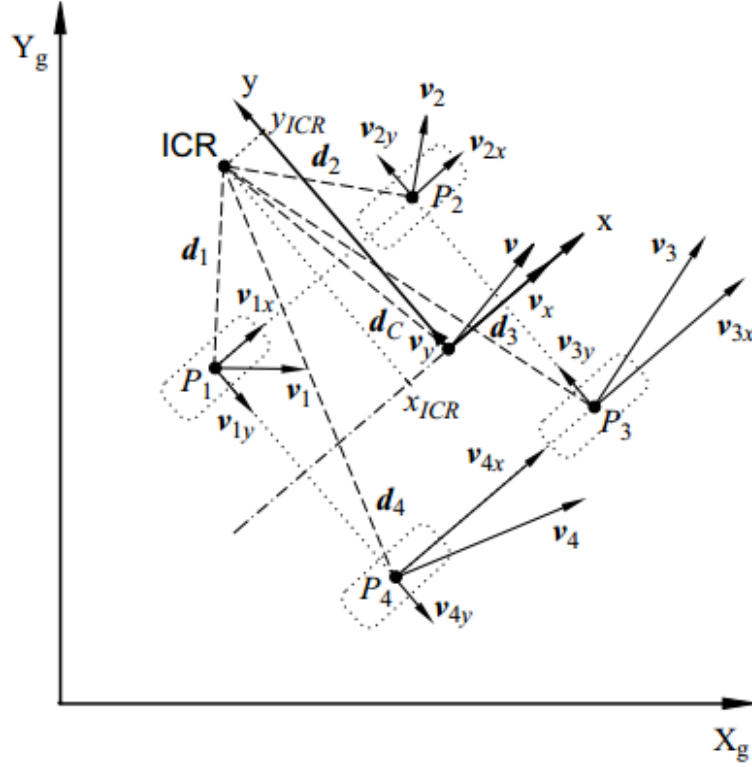


Рис. 5. Конструктивные связи робота

В как

$$ICR = (x_{ICR}, y_{ICR})^T = (-d_{xC}, d_{yC})^T \quad (5)$$

мы можем переписать уравнение 4

$$\frac{v_x}{y_{ICR}} = -\frac{v_y}{x_{ICR}} = \omega \quad (6)$$

Из рис. 5 очевидно, что координаты вектора d_i удовлетворяют следующим равенствам:

$$\begin{aligned} d_{1y} &= d_{2y} = d_{Cy} + c \\ d_{3y} &= d_{4y} = d_{Cy} - c \\ d_{1x} &= d_{4x} = d_{Cx} - a \\ d_{2x} &= d_{3x} = d_{Cx} + b, \end{aligned} \quad (7)$$

где a, b, c - положительные параметры, определенные на рис. 3. Комби-

нированием уравнений 7 и 4 получаются следующие равенства на скорости:

$$\begin{aligned}
 v_L &= v_{1x} = v_{2x} \\
 v_R &= v_{3x} = v_{4x} \\
 v_F &= v_{1y} = v_{4y} \\
 v_B &= v_{2y} = v_{3y},
 \end{aligned} \tag{8}$$

где v_L и v_R обозначают продольную скорость правой и левой пары колес, а v_F и v_B поперечную скорость передней и задней пары колес, соответственно.

Используя уравнения 4 - 8 возможно получить следующее преобразование, описывающее взаимосвязь между скоростью колес и скоростью робота:

$$\begin{pmatrix} v_L \\ v_R \\ v_F \\ v_B \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & -c \\ 1 & c \\ 0 & -x_{ICR} + b \\ 0 & -x_{ICR} - a \end{pmatrix}, \tag{9}$$

Предполагая эффективный радиус для каждого из колес r_i равным r , в соответствии с 2 и 8, можем написать

$$\omega_\omega = \begin{pmatrix} \omega_L \\ \omega_R \end{pmatrix} = \frac{1}{r} \begin{pmatrix} v_L \\ v_R \end{pmatrix} \tag{10}$$

где ω_L и ω_R - угловые скорости левой и правой пары колес, соответственно.

Совместив 9 и 10, могут быть получены следующие равенства между угловыми скоростями колесных пар платформы и скоростью робота:

$$\begin{pmatrix} v_x \\ \omega \end{pmatrix} = r \begin{pmatrix} \frac{\omega_L + \omega_R}{2} \\ \frac{-\omega_L + \omega_R}{2c} \end{pmatrix} \tag{11}$$

3 Экспериментальная часть

3.1 Экспериментальный стенд

Экспериментальный стенд выполнен в виде столешницы с плоской поверхностью размером три метра в ширину и три метра в длину, над которой расположены шесть камер компании Logitech. Все камеры подключены к управляющему компьютеру, на который передают видеопоток. Для выделения из видеопотока положений роботов используется программа Swistrack.

При первом запуске установки требуется настройка камер, чтобы определить их ориентацию в пространстве и связь реальных координат платформы с положением на кадрах видеопотока. Для начальной калибровки установки реализована программа Calibration procedure на языке Python. Процедура настройки заключается в размещении калибровочной линейки в заранее выбранных точках столешницы; для каждой камеры набирается статистика по пяти точкам, после чего полученные данные обрабатываются программой Calibration procedure, и определяются положения камер в пространстве. Процедура калибровки считается завершенной.

3.2 Описание эксперимента

Проведенные серии экспериментов по исследованию устойчивости траектории робота включали измерения: на круговой траектории при разных угловых скоростях колесных пар, при движении робота по прямой траектории вперед-назад. Во время движения платформы по круговой траектории были выбраны соотношения скоростей 2:1 и 3:1 для значений $1,57 \text{ c}^{-1}$, $1,25 \text{ c}^{-1}$, $1,04 \text{ c}^{-1}$ в качестве опорных. Для измерений движения робота по второй траектории была выбрана угловая скорость $1,57 \text{ c}^{-1}$. Отдельно был рассмотрен случай движения по круговой траектории с заблокированной одной из колесных пар, скорость другой равнялась $1,57 \text{ c}^{-1}$.

3.3 Результаты

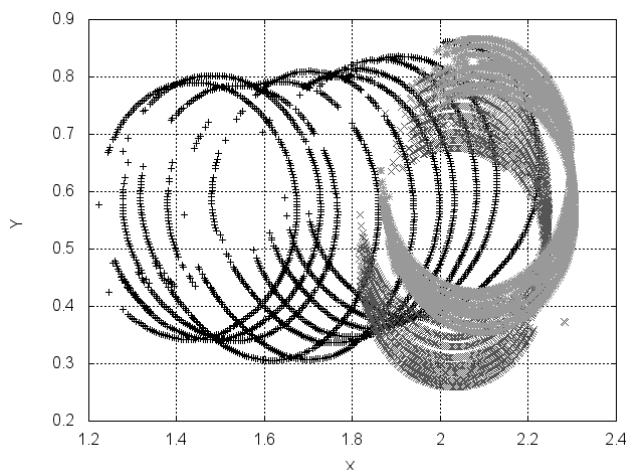


Рис. 6. Траектории платформы при программировании движения по кругу. Соотношение скоростей колесных пар 2:1. Опорные скорости равны: для черной $1,57 \text{ c}^{-1}$, для темно-серой $1,25 \text{ c}^{-1}$, для светло-серой линий $1,04 \text{ c}^{-1}$. Значения координат приведены в метрах

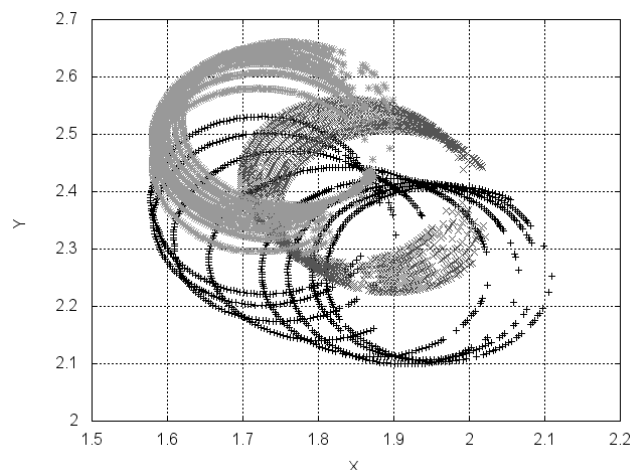


Рис. 7. Траектории платформы при программировании движения по кругу. Соотношение скоростей колесных пар 2:1. Опорные скорости равны: для черной $1,57 \text{ c}^{-1}$, для темно-серой $1,25 \text{ c}^{-1}$, для светло-серой линий $1,04 \text{ c}^{-1}$. Значения координат приведены в метрах

По полученным экспериментальным данным были построены траектории движения робота (рис. 6, 7, 15) и рассчитаны отклонения экспериментально полученных данных от теоретических.

Экспериментальное значение радиуса при отношений угловых скоростей 2:1 составило 21 см. Измеренное значения линейной скорости робота равняется 2,73 см/с, 2,23 см/с, 1,81 см/с при опорных скоростях $1,57 \text{ c}^{-1}$, $1,25 \text{ c}^{-1}$, $1,04 \text{ c}^{-1}$. Для соотношения 3:1 соответствующие значения для радиуса составляет 15,5 см, для скоростей 2,45 см/с, 1,87 см/с, 1,66 см/с.

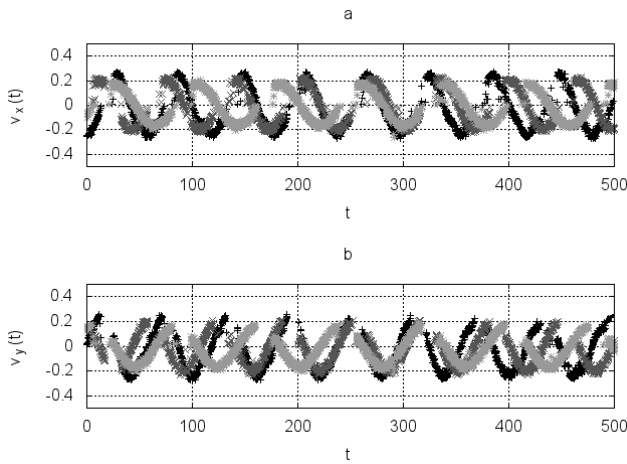


Рис. 8. Компоненты скорости робота в глобальной системе координат при соотношении скоростей 2:1. Скорость измерена в 10^{-1} см/с. Время указано в секундах

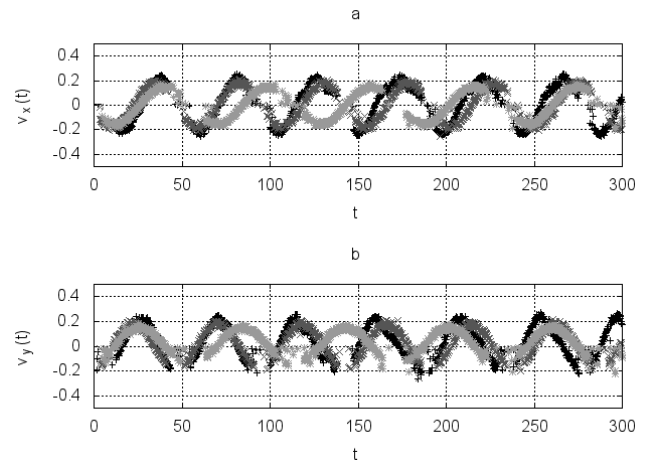


Рис. 9. Компоненты скорости робота в глобальной системе координат при соотношении скоростей 3:1. Скорость измерена в 10^{-1} см/с. Время указано в секундах

Проанализируем рис. 9 и рис. 8, для круговой траектории при соотношении угловых скоростей колес 2:1 и опорных скоростей $1,57 \text{ c}^{-1}$, $1,25 \text{ c}^{-1}$, $1,04 \text{ c}^{-1}$ процентное отклонение экспериментально посчитанной скорости робота от теоретической составляет 12,34%, 13,19%, 9,39% соответственно. В то время как отклонение значения радиуса равняется 33,33%. Для соотношения скоростей 1:3 составляет 11,87%, 6,85%, 13,69%, а радиуса 47,6%. Это вызвано тем, что реально центр масс робота находился не на оси симметрии платформы, что требует в дальнейшем внесение в модель робота соответствующих поправок.

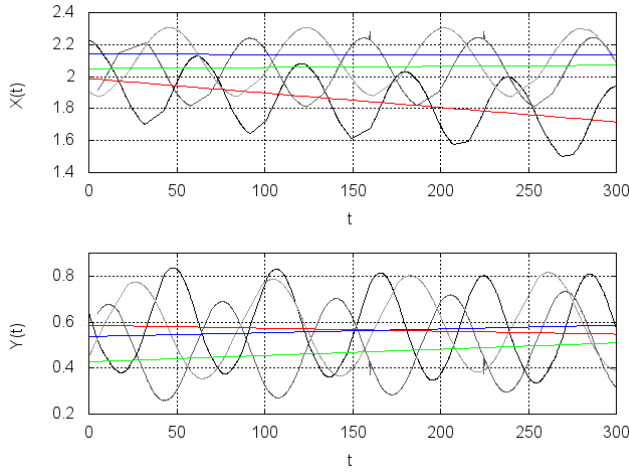


Рис. 10. Траектории смещения центров вращения. Соотношение скоростей колесных пар 2:1. Опорные скорости равны: для красной $1,57 \text{ c}^{-1}$, для зеленой $1,25 \text{ c}^{-1}$, для синей линий $1,04 \text{ c}^{-1}$. Значения координат приведены в метрах. Время указано в секундах

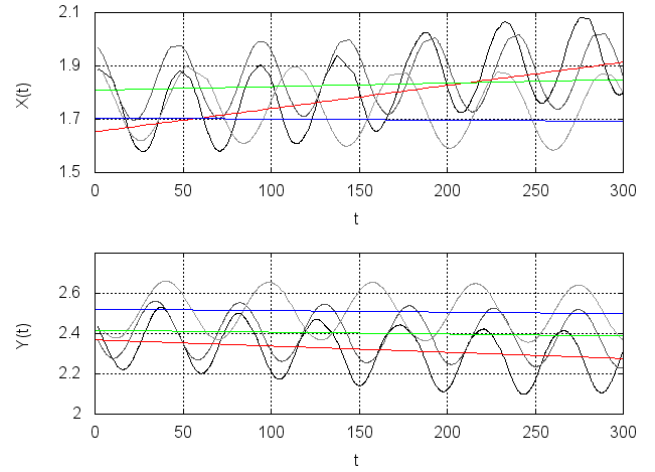


Рис. 11. Траектории смещения центров вращения. Соотношение скоростей колесных пар 3:1. Опорные скорости равны: для красной $1,57 \text{ c}^{-1}$, для зеленой $1,25 \text{ c}^{-1}$, для синей линий $1,04 \text{ c}^{-1}$. Значения координат приведены в метрах. Время указано в секундах

Для того чтобы описать устойчивость траектории робота проанализируем перемещение центра вращения (рис. 10, 11). Проведя линейную аппроксимацию его смещения по координате X и Y , получим для соотношения скоростей 2:1

$$\begin{aligned}
 X_{1,57c^{-1}}(t) &= -0,000901 * t + 1,99 \\
 Y_{1,57c^{-1}}(t) &= -0,000128 * t + 0,59 \\
 X_{1,25c^{-1}}(t) &= -0,000071 * t + 2,05 \\
 Y_{1,25c^{-1}}(t) &= -0,000273 * t + 0,43 \\
 X_{1,04c^{-1}}(t) &= -0,000025 * t + 2,14 \\
 Y_{1,04c^{-1}}(t) &= -0,000163 * t + 0,54
 \end{aligned} \tag{12}$$

для соотношения скоростей 3:1

$$\begin{aligned}
X_{1,57c^{-1}}(t) &= -0,000869 * t + 1,65 \\
Y_{1,57c^{-1}}(t) &= -0,000301 * t + 2,37 \\
X_{1,25c^{-1}}(t) &= -0,000132 * t + 1,81 \\
Y_{1,25c^{-1}}(t) &= -0,0000967 * t + 2,42 \\
X_{1,04c^{-1}}(t) &= -0,0000415 * t + 1,70 \\
Y_{1,04c^{-1}}(t) &= -0,0000759 * t + 2,52
\end{aligned}
\tag{13}$$

Тогда скорость изменения координаты центра равна $\mathbf{v} = (\frac{dX}{dt}, \frac{dY}{dt})$. Модуль скорости смещения положения центра вращения составляет 0,091 см/с, 0,0282 см/с, 0,0164 см/с для соотношения 1:2 и 0,0921 см/с, 0,0179 см/с, 0,0086 см/с для соотношения 1:3.

Интересно рассмотреть предельный случай, когда одна из колесных пар заблокирована (рис. 12). В этом случае отклонение экспериментальной от теоретической скорости равняется 14,63% при абсолютном значении теоретической 1,64 см/с, а радиуса 4,76 % при теоретическом значении 5,25 см. Скорость смещения центра вращения в данном случае равна 0,05 см/с.

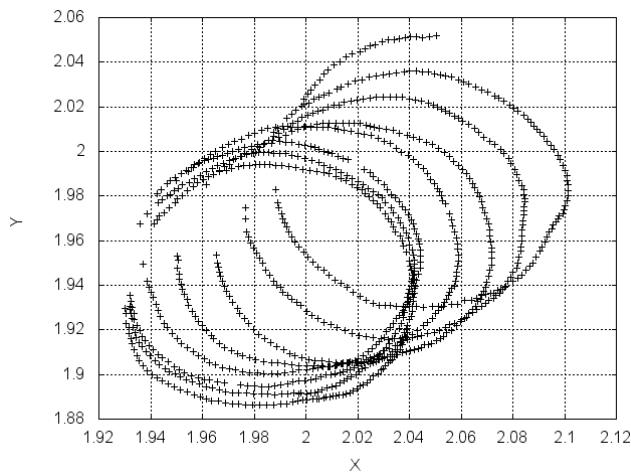


Рис. 12. Траектория робота при скорости правой колесной пары $1,57 \text{ c}^{-1}$ и заблокированной левой. Координаты указаны в метрах

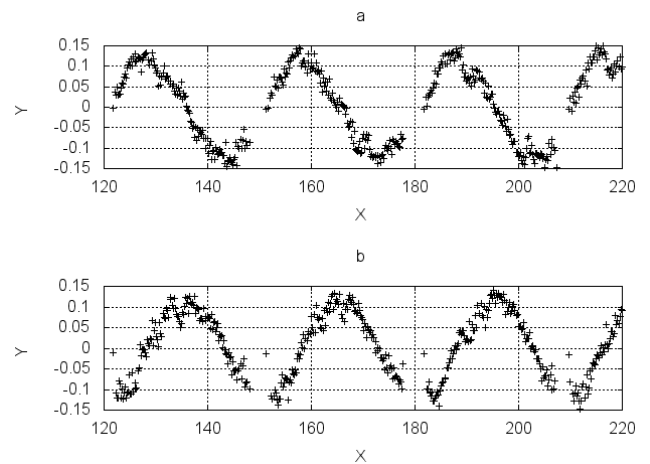


Рис. 13. Компоненты скорости робота в глобальной системе координат. Скорость измерена в 10^{-1} см/с . Время указано в секундах

При движении платформы по прямому отрезку вперед-назад отношение длины участка движения к разбегу траектории составляет 15,69% при проезде маршрута 12 раз. На рис. 14 видно, что при движении платформы по

прямому участку происходит изгиб первоначально заданной траектории на 0,02%. Этот негативный эффект вызван неполной идентичностью моторов. Кроме того, в момент смены направления движения происходит поворот платформы на небольшой угол, что в дальнейшем разрушает первоначально заданную траекторию движения (рис. 15). Отклонение реальной скорости от запрограммированной равно 6%, при абсолютном значениях теоретической 3,24 см/с.

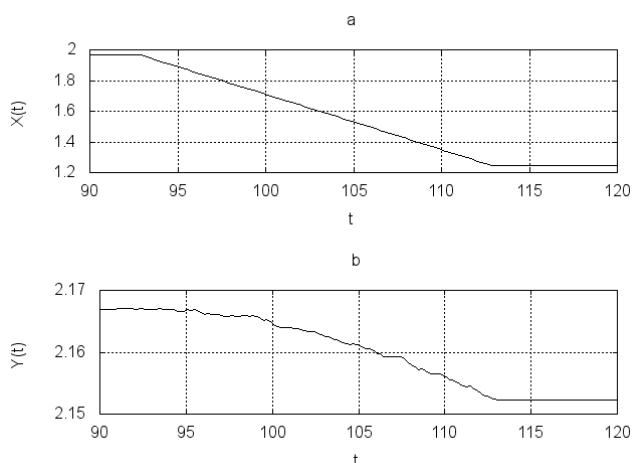


Рис. 14. Изменение глобальных координат платформы при движении по прямой линии длины 68,2 см. Координаты указаны в метрах. Время в секундах.

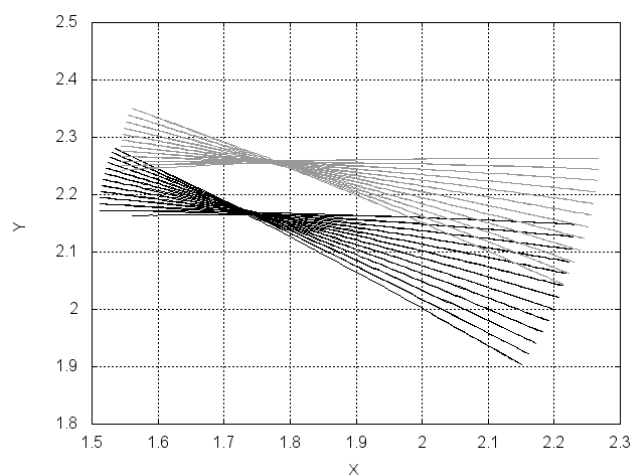


Рис. 15. Траектории платформы при программировании движения вперед-назад. Координаты указаны в метрах

4 Заключение

Управляемые с помощью заноса мобильные платформы нашли в настоящее время широкое применение в различных аспектах человеческой деятельности. Как следствие, стали востребованны исследования по усовершенствованию и исследованию аккуратности описания существующих кинематических и динамических моделей для данного типа роботов. В настоящей работе проведено исследование устойчивости траектории робота для кинематической модели планарного движения с учетом только кинематических и конструктивных связей. Получено, что степень отклонения (отношение смещения точки разворота от первоначальной к длине отрезка движения) для движения вперед-назад составляет 0,02%, а скорость смещения центра вращения для круговой траектории платформы равняется

0,91 см/с, 0,282 см/с, 0,164 см/с при соотношении скоростей 2:1 и 0,921 см/с, 0,179 см/с, 0,086 при соотношении скоростей 3:1 для опорных скоростей $1,57 \text{ c}^{-1}$, $1,25 \text{ c}^{-1}$, $1,04 \text{ c}^{-1}$, при заблокированной левой колесной паре и угловой скорости вращения правой $1,57 \text{ c}^{-1}$ равно 0,05 см/с. Стало понятно, что расположение центра масс оказывает сильное влияние на степень достоверности теоретической модели, что требует в дальнейшем внесение в кинематическую модель соответствующих поправок.

5 Литература

1. Krzysztof Kozlowski. Dariusz Pazderski. Modeling and control of four-wheeled skid-steering mobile robot. *Math. Comput. Sci.*, 2004, Vol. 14, No. 4, 477–496
2. Jingang Yi, Senior Member. Hongpeng Wang, Member. Junjie Zhang, Student Member. Dezhen Song, Member. Suhada Jayasuriya, Senior Member. Jingtai Liu, Member. Kinematic Modeling and Analysis of Skid-Steered Mobile Robots With Applications to Low-Cost Inertial-Measurement-Unit-Based Motion Estimation. *IEEE Transactions on Robotics* (Volume: 25, Issue: 5, Oct. 2009)
3. G. Anousaki. K. J. Kyriakopoulos. A dead-reckoning scheme for skid-steered vehicles in outdoor environments. *Robotics and Automation*, 2004. Proceedings. ICRA '04. 2004 IEEE International Conference on.