Научная статья
Original article
УДК 681.5.017

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ СИЛОВОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ РОБОТА НА ОСНОВЕ МАГНИТНОЙ СИЛЫ

RESEARCH OF POWER FEEDBACK TECHNOLOGY OF A ROBOT BASED ON MAGNETIC FORCE

Жэнь Гуаншэн, магистрант, МГТУ им. Н. Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Zhen' Guanshen, undergraduate, Moscow State Technical University. N. E. Bauman, Moscow, Russian Federation

Аннотация

Виртуальная реальность — это технология, которая объединяет компьютерное оборудование и программное обеспечение для всестороннего применения различных технологий, таких как компьютерная графика, взаимодействие человека с компьютером, мультимедиа и сетевое общение, чтобы предоставить пользователям виртуальный трехмерный мир. Технология управления на основе виртуальной реальности имеет широкий спектр перспектив промышленного применения. Благодаря постоянному развитию коммуникационных технологий была создана технология 5G, а скорость связи на уровне миллисекунд может вывести технологию виртуального дистанционного управления на более высокий уровень. В будущем требования к контролю будут все выше и выше, а рабочая среда еще хуже.Использование технологий виртуальной реальности и сверхдальнего управления может освободить персонал от ограничений рабочей среды. Управление роботом-манипулятором на основе

технологии виртуальной реальности может предоставить пользователям захватывающий опыт, моделируя реальную среду с помощью системы виртуальной реальности, сочетая человеческую субъективную инициативу с точной работой робота-манипулятора.Роботы работают.

В данной работе исследуются и проектируются кинематика манипулятора и система управления манипулятором на исполнительном конце, а также кинематика и динамика шестистепенного манипулятора в программе Matlab. Наконец, совмещая технологию виртуальной реальности с технологией дистанционного управления манипулятором, разработана предварительная схема управления манипулятором с дистанционным управлением через контроллер виртуальной реальности.

Это эталонное решение для дистанционного управления промышленными роботами-манипуляторами с помощью технологии виртуальной реальности в сложных и опасных условиях.

Annotation

Virtual reality is a technology that integrates computer hardware and software to comprehensively apply various technologies such as computer graphics, human-computer interaction, multimedia, and network communication to provide users with a virtual three-dimensional world. Virtual reality-based control technology has a wide range of industrial applications. With the continuous development of communication technology, 5G technology has been created, and the millisecond communication speed can bring virtual remote control technology to a higher level. In the future, control requirements will become higher and higher, and the work environment will become even worse. The use of virtual reality technology and ultra-long-range control can free personnel from the limitations of the work environment. The control of the robot arm based on virtual reality technology can provide users with an immersive experience by simulating the real environment through the virtual reality system, combining human subjective initiative with the precise operation of the robot arm. The robots work.

In this work, the kinematics of the manipulator and the manipulator control system at the executive end, as well as the kinematics and dynamics of a six-degree manipulator in the Matlab program, are investigated and designed. Finally, by combining the technology of virtual reality with the technology of remote control of the manipulator, a preliminary scheme for controlling the manipulator with remote control through the virtual reality controller has been developed.

It is the reference solution for remote control of industrial robotic arms using virtual reality technology in complex and hazardous environments.

Ключевые слова: Виртуальная реальность; Манипулятор; Взаимодействие человека с компьютером; Кинематика; Динамика.

Keywords: Virtual reality; Manipulator; Human-computer interaction; Kinematics; Dynamics.

Введение

Технология дистанционного управления роботом выполняет задачу управления роботом, собирая информацию о человеческом теле, которая включает в себя позу, изображение, ЭМГ, ЭЭГ и т. д., соответствующие различным интерактивным устройствам. С точки зрения интерактивных устройств традиционная телеоперация реализуется с помощью джойстиков и панелей управления.С течением времени и развитием технологий появилось множество интерактивных устройств, таких как носимые устройства, перчатки для передачи данных, камеры глубины и миоэлектрические руки. , устройства ЭЭГ, а также устройства виртуальной реальности и устройства дополненной реальности AR, появившиеся за последние два года, репрезентативными продуктами являются HTC vive pro и Hololens2.

Устройство виртуальной реальности может использовать ручку для сбора информации о положении конца человеческой руки, а затем завершить телеоперацию манипулятора.В то же время внешняя камера может использоваться для передачи процесса телеоперации в голову. установленный

дисплей устройства виртуальной реальности. Оборудование дополненной реальности может создавать виртуальные сцены в реальной среде для завершения ручного взаимодействия, отслеживания взгляда и других действий, что имеет большие перспективы развития в дистанционном управлении манипуляторами.

В статье предлагается схема роботизированной телеоперации, основанная на технологии виртуальной реальности. Используйте HTC Vive pro, новое устройство виртуальной реальности, выпущенное HTC, чтобы выполнить дистанционное управление роботизированной рукой с шестью степенями свободы. Системы виртуальной реальности (VR) позволяют пользователям интуитивно взаимодействовать с трехмерной средой. Используйте HTC vive pro для прямого сбора шестимерной информации о положении конца руки и реализации удаленного управления манипулятором с помощью решения обратной кинематики.

Общая конструкция рамы

Во-первых, информация о положении руки человека получается с помощью двух рукояток устройства HTC vive pro, а модель манипулятора создается на платформе моделирования Uniy3D.Состояние движения манипулятора можно наблюдать в режиме реального времени на головном дисплее устройство HTC vive pro. Затем разрабатывается преобразование данных из шестимерных данных об отношении конца руки оператора к манипулятору и предлагается метод сопоставления разностей на основе времени. Создайте рабочую область для среды ROS, отредактируйте

Напишите управляющую программу манипулятора для реализации высокоточного дистанционного управления манипулятором.

В этой статье используется пакет ROS # для связи в реальном времени между Unity и ROS. Сначала подключите HTC vive pro к компьютеру системы Windows, получите шестимерные конечные положения двух ручек устройства в среде

моделирования Unity, а затем используйте Wi-Fi для передачи полученных данных в систему ROS, и наконец завершите управление манипулятором.

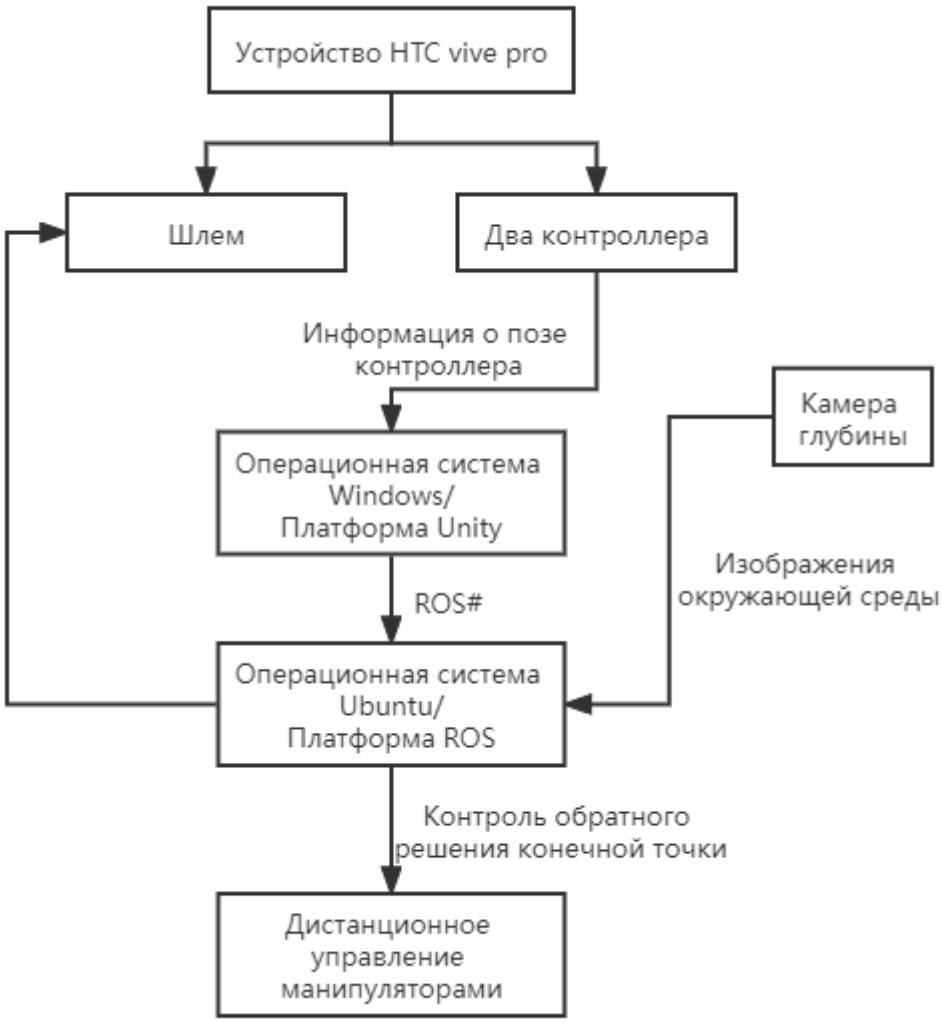

Рисунок 1 Общая конструкция рамы

Описание робота

Я выбрал манипулятор с шестью степенями свободы, модель его внешнего вида показана на рисунке ниже. Имя манипулятора - Niryo-one.



Рисунок 2 – Манипулятор Niryo-one

Это небольшой обучающий манипулятор, его конкретные параметры приведены в таблице ниже.

Технические Характеристики	Ценность
Количество осей	6
Масса	3.2 кг
Полезная нагрузка	300г
Максимальный охват	440мм
Базовый диапазон суставов	+/- 175°
Повторяемость	+/- 1 мм
Источник питания	11,1 В / 6А

Таблица 1 – Технические характеристики манипулятора

Моделирование роботов

После получения соответствующих параметров манипулятора его необходимо смоделировать в Matlab. Модель внешнего вида манипулятора дана официальным файлом в формате stl, по нему также необходимо провести кинематический анализ. Ниже представлена кинематическая схема манипулятора.

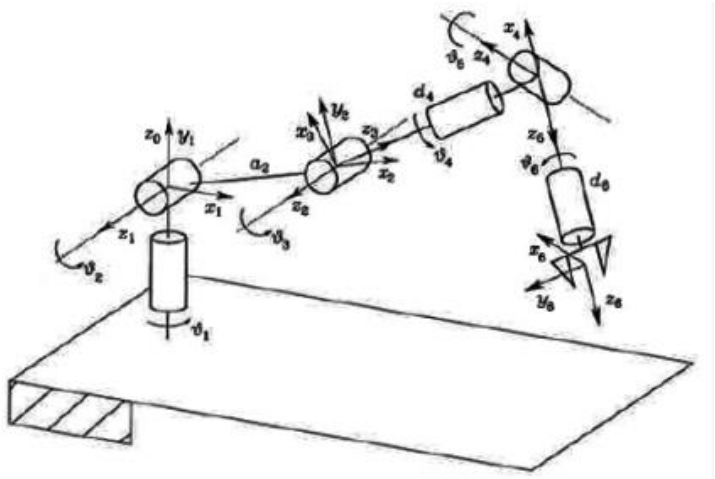

Рисунок 3 – Кинематическая схема манипулятора

В качестве манипулятора был выбран шестиступенной манилятор, чья кинематическая схема и расчет его кинематических параметров Денавита-Хартенберга представлены на ниже:

Звено, i	a_i	α_i	d_i	θ_i
1	0	$\frac{\pi}{2}$	0.08	θ_1
2	0	0	0.21	θ_2
3	0.03	$\frac{\pi}{2}$	0.0415	θ_3
4	0	$\frac{\pi}{2}$	0.18	θ_4
5	0	$-\frac{\pi}{2}$	0.164	θ_5
6	0	0	0.0073	θ_6

Таблица 2 – Определение параметров Денавита-Хартенберга для каждого звена шестистепенного манипулятора

Матрицы перехода будут выглядеть следующим образом:

$$A_i = \begin{bmatrix} cos(\theta_i) & -cos(\alpha_i)sin(\theta_i) & sin(\alpha_i)sin(\theta_i) & a_i cos(\theta_i) \\ sin(\theta_i) & cos(\alpha_i)cos(\theta_i) & -sin(\alpha_i)cos(\theta_i) & a_i sin(\theta_i) \\ 0 & sin(\alpha_i) & cos(\alpha_i) & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_1 = \begin{bmatrix} cos(\theta_1) & 0 & sin(\theta_1) & 0 \\ sin(\theta_1) & 0 & -cos(\theta_1) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} cos(\theta_2) & -sin(\theta_2) & 0 & 0 \\ sin(\theta_2) & cos(\theta_2) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_3 = \begin{bmatrix} cos(\theta_3) & 0 & sin(\theta_3) & a_3 cos(\theta_3) \\ sin(\theta_3) & 0 & -cos(\theta_3) & a_3 sin(\theta_3) \\ 0 & 1 & 0 & d_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_4 = \begin{bmatrix} cos(\theta_4) & 0 & sin(\theta_4) & 0 \\ sin(\theta_4) & 0 & -cos(\theta_4) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & d_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_5 = \begin{bmatrix} cos(\theta_5) & 0 & -sin(\theta_5) & 0 \\ sin(\theta_5) & 0 & cos(\theta_5) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & d_5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_6 = \begin{bmatrix} cos(\theta_6) & -sin(\theta_6) & 0 & 0 \\ sin(\theta_6) & cos(\theta_6) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_6 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

В виду того, что последующие матрицы перехода будут содержать длинные элеметны в виду множественоого перемножеия, я выпишу матрицы в общем виде:

$$T_1 = A_1\,, \quad T_2 = T_1 \cdot A_2\,, \quad T_3 = T_2 \cdot A_3,$$

$$T_4 = T_3 \cdot A_4, \quad T_5 = T_4 \cdot A_5, \quad T_6 = T_5 \cdot A_6$$

В результате мною были получены значения параметров Денавита-Хартенберга моего манипулятора.

Чтобы смоделировать динамику робота-манипулятора, также необходимо знать массу каждого ключа и его момент инерции.После параметров и расчетов, предоставленных официальным лицом, можно получить следующую таблицу.

Звено, i	Масса,кг	I_{xx}, кг*м^2	I_{xx}, кг*м^2	I_{zz}, кг*м^2
1	0.47	0.0015	0.0015	0.0015
2	0.51	0.0015	0.0015	0.0015
3	0.20	0.0015	0.0015	0.0015
4	0.20	0.0015	0.0015	0.0015
5	0.040	0.0015	0.0015	0.0015
6	0.015	0.0015	0.0015	0.0015

Таблица 3 – Масса и момент инерции

После расчета подробных параметров замените официально предоставленную модель внешнего вида и получите модель манипулятора, показанную на следующем рисунке, в Simspace.

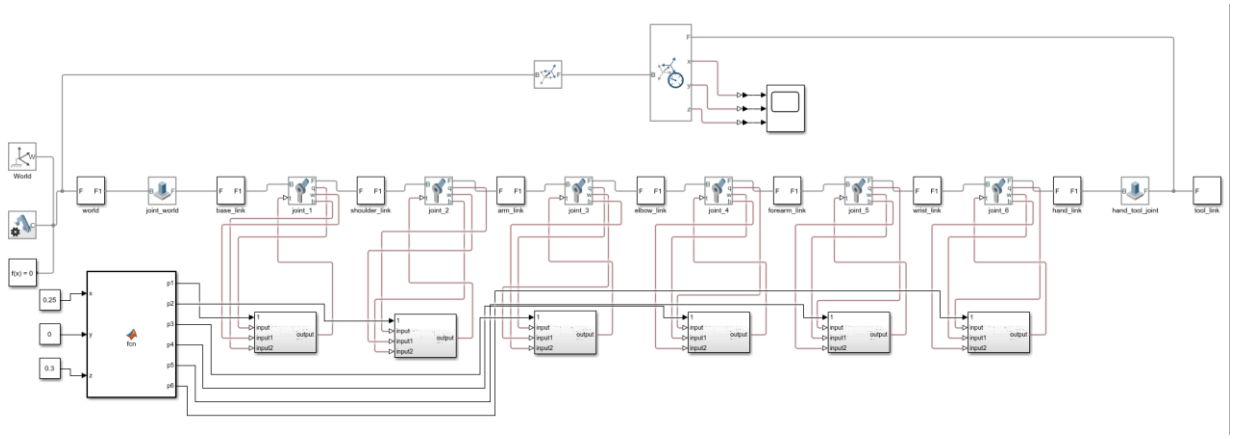

Рисунок 4 – Модель манипулятора в Simspce

Моделирование привода

После завершения моделирования в каждое звено для динамического анализа добавляется модель двигателя.Добавленная модель двигателя показана на рисунке ниже.

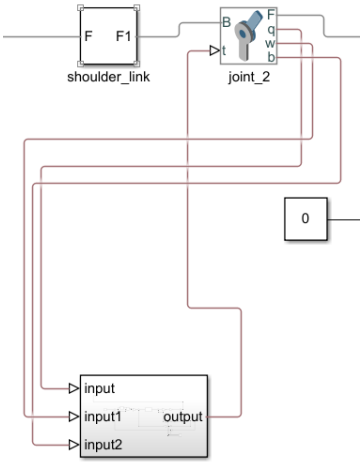

Рисунок 5 – Модель звена с мотором

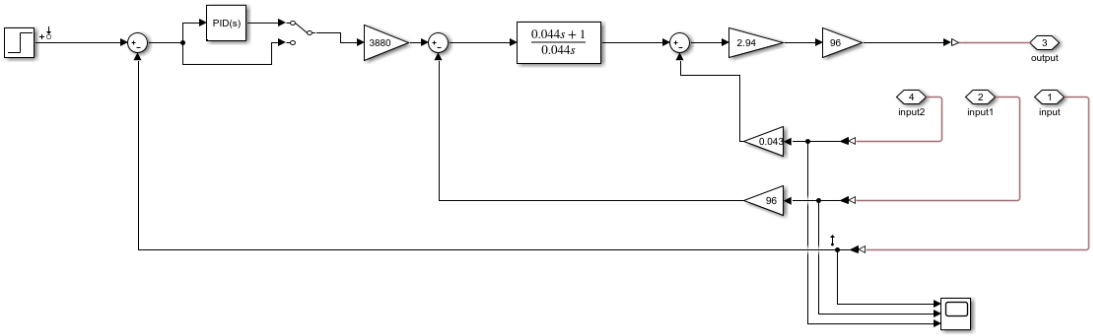

Рисунок 6 – Модель двигателя

Модель состоит из трех уровней обратной связи с обратной связью по положению, скорости и ускорению. Для этого звена установлен ступенчатый сигнал со значением 0,5, а результат вывода без какого-либо модуля настройки показан на рисунке ниже. Видно, что колебания ускорения при движении очень велики.

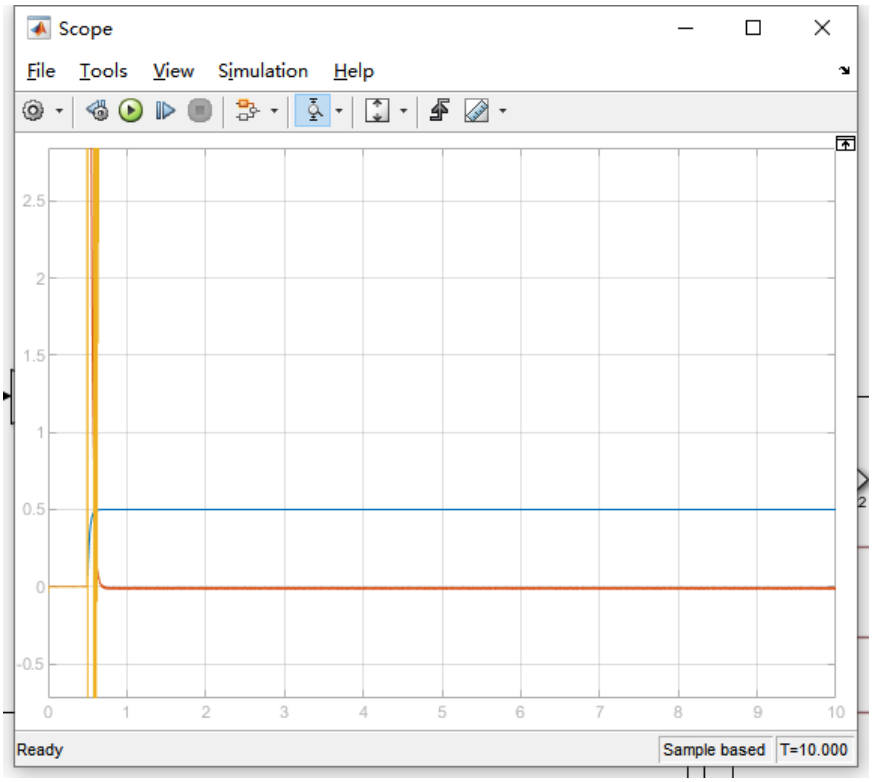

Рисунок 7 – Положение, скорость, ускорение звена

Для достижения более плавного движения в модель привода добавлена настройка ПИД-регулятора. Выходной результат, полученный после добавления ПИД-регулятора, показан на следующем рисунке.

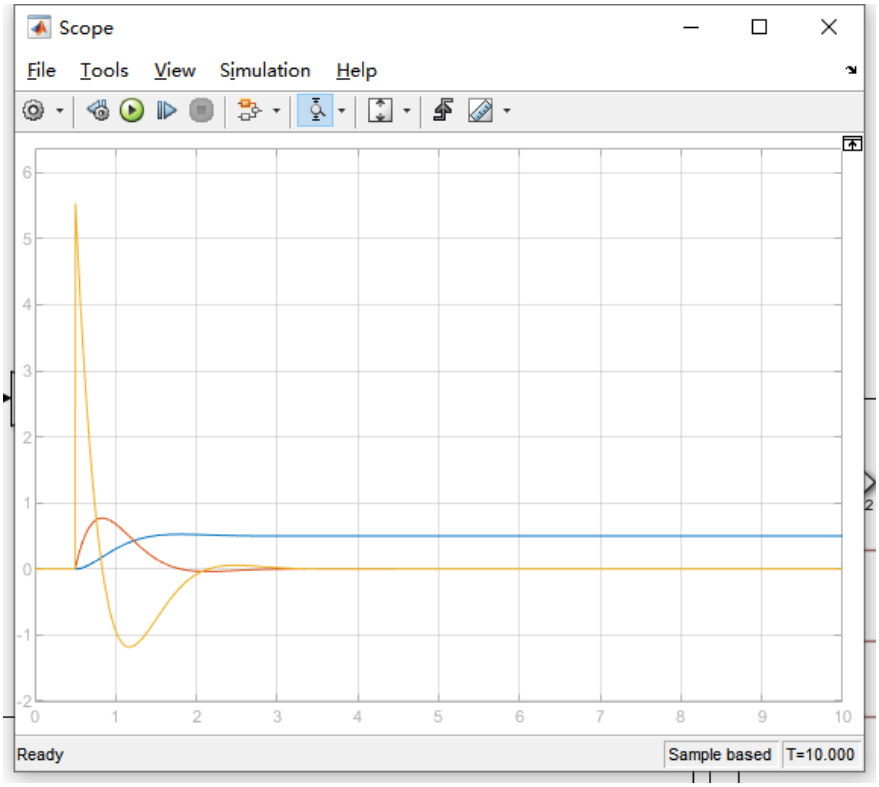

Рисунок 8 – Положение, скорость, ускорение звена с ПИД-регулятора

Инверсно-кинематическое решение модели

Часть, показанная на рисунке ниже, является частью решателя обратной кинематики манипулятора. Например, (x,y,z) = (0.25 , 0, 0.3) вводится на входе как целевое положение конца манипулятора. Результат его работы показан на рисунке 10.

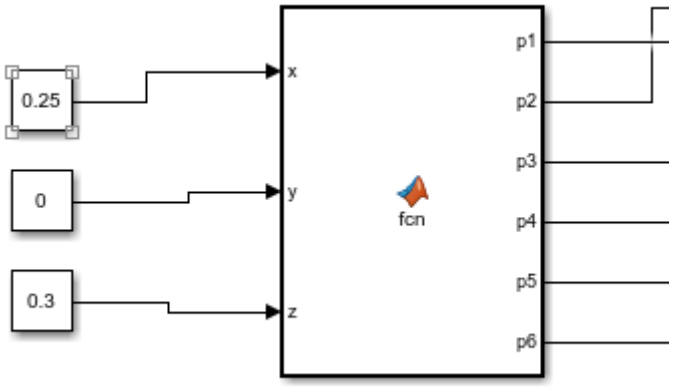

Рисунок 9 – Решатель обратной кинематики

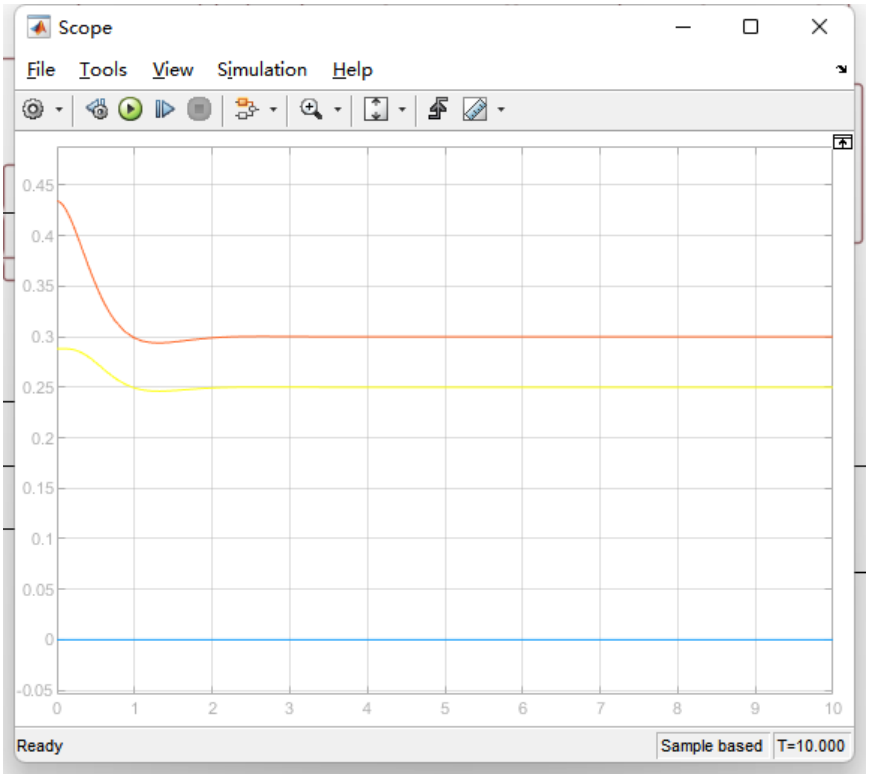

Рисунок 10 – Поза конца манипулятора

Передача данных и преобразование контроллера HTC vive pro

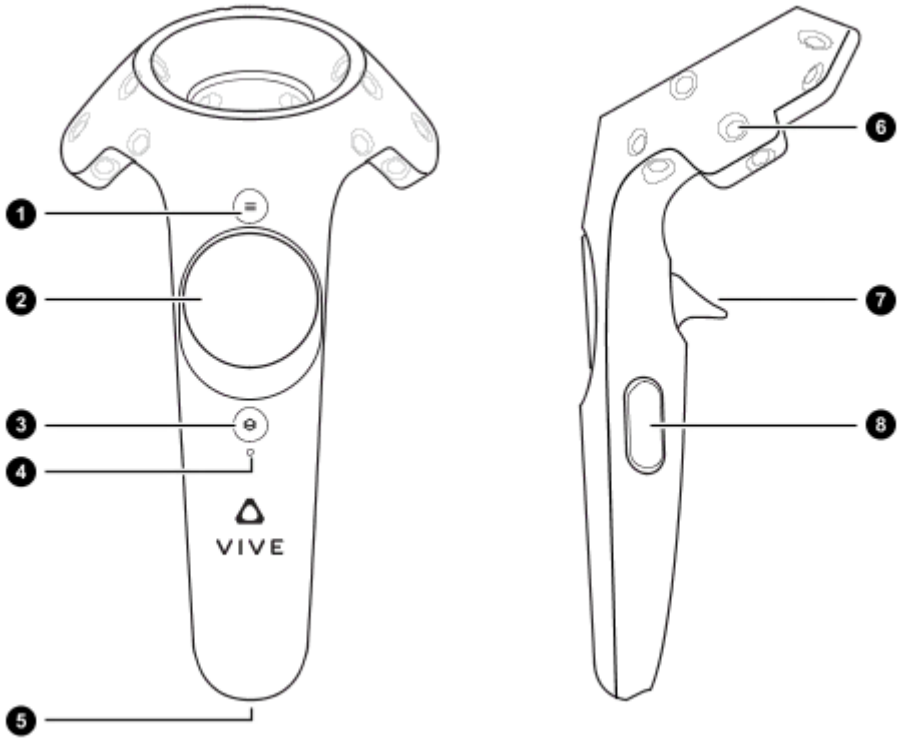

Рисунок 11 – Контроллер HTC vive pro

Контроллер HTC VIVE PRO показан на рисунке 11. Его компоненты следующие: 1 - кнопка меню; 2 - тачпад; 3 - системная кнопка; 4 - Индикатор состояния; 5 - порт микро-USB; 6 - датчик слежения; 7 - спусковой крючок; 8 - Кнопка захвата.

Фреймворк использует две операционные системы, Windows и Linux. Информация о шестимерном положении контроллера, полученная через платформу Unity в системе Windows, передается на платформу ROS в системе Linux, а затем используется встроенный в ROS решатель IK для поиска решения для завершения управления робот. ROS и Unity используют разные системы координат, поэтому в процессе связи необходимо выполнить следующие преобразования системы координат:

$$x_{unity} = -x_{ros}$$

$$y_{unity} = -z_{ros} \tag{3-1}$$

$$z_{unity} = -y_{ros}$$

Кватернион：

$$qx_{unity} = qx_{ros}$$

$$qy_{unity} = -qz_{ros} \tag{3-2}$$

$$qz_{unity} = qy_{ros}$$

$$qw_{unity} = qw_{ros}$$

Передача данных осуществляется из Unity в ROS, поэтому преобразование текущего положения и направления из Unity в ROS можно получить по приведенным выше формулам (3-1), (3-2), а угол поворота получается по формуле операция кватерниона, как формула (3-3).

$$(qx, qy, qz, qw)_{ros} = (qx, qz, -qy, qw)_{unity} * (0,1,0,0) \tag{3-3}$$

Расчет относительного угла каждого сустава реализует преобразование из мировых координат в координаты робота, а затем получает точное численное решение моторного угла каждого сустава манипулятора, которое может быть дополнительно обработано на основе кватерниона, считанного из данные контроллера.

Задайте мировую систему координат N и систему координат B носителя контроллера. Среди них фиксируется мировая система координат N. В начале N и B совпадают, а система координат носителя B меняется при перемещении контроллера.В это время системы координат N и B уже не совпадают. Тогда отношение системы B относится к взаимосвязи относительного вращения между системой N и системой B. Координата положения начала системы B в системе N представляет собой позиционное соотношение между системой N и системой B. Для описания этого соотношения вращения обычно используются углы Эйлера(α, β, γ), матрица ориентации T и кватернион$\mathrm{Q} = (\mathrm{q0}, \mathrm{q1}, \mathrm{q2}, \mathrm{q3})\mathrm{T}$.

Поскольку три оси несущей системы координат не являются независимыми в процессе вращения, разные последовательности вращения приведут к разным

результатам.В инерциальной навигации часто используются углы Эйлера авиационного порядка, а порядок вращения - ось z, y- ось, ось x , углы поворота α, β и Y — это угол рыскания, угол тангажа и угол крена соответственно. В этой статье также используется авиационная последовательность. Направление x — это направление вперед, направление y — это левое направление направления вперед, а направление Z — направление вперед вверх Направление, соответствующее манипулятору робота, показано на рисунке 12 ниже.

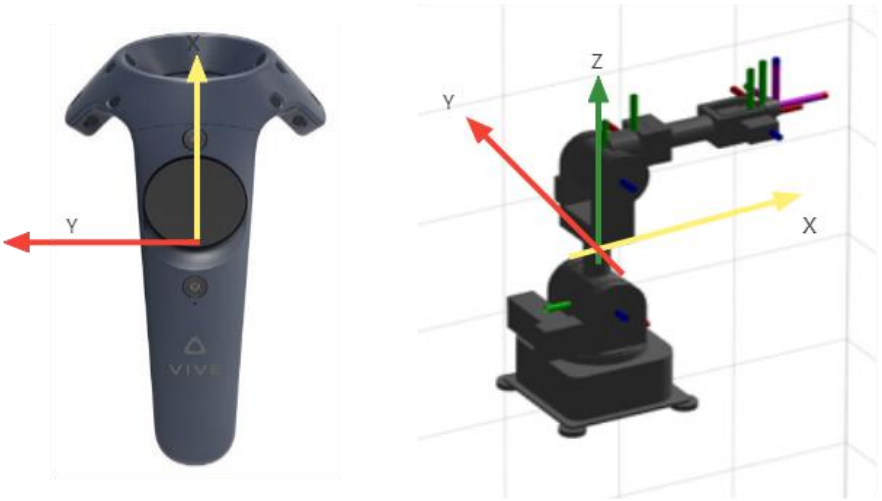

Рисунок 12 – Система координат, соответствующая контроллеру и манипулятору

Кватернионы определяются как :

$$q \equiv \begin{pmatrix} Q \\ q_4 \end{pmatrix} \tag{3-4}$$

$$Q \equiv (q_1, q_2, q_3)^T = esin\frac{\alpha}{2} \tag{3-5}$$

$$q_4 = cos\frac{\alpha}{2} \tag{3-6}$$

где e — единичный вектор вдоль оси вращения, α — угол поворота. Кватернион удовлетворяет ограничениям.

$$q^T q = 1 \tag{3-7}$$

Кватернион и матрица позы имеют следующие отношения:

$$A_q = (q_4^2 - \|Q\|^2) I_{3\times 3} + 2QQ^T - 2q_4[Q\times] = \boldsymbol{\Xi}^T(q)\boldsymbol{\Psi}(q)$$

$$= \begin{pmatrix} q_1^2 - q_2^2 - q_3^2 + q_4^2 & 2(q_1q_2 + q_3q_4) & 2(q_1q_3 - q_2q_4) \\ 2(q_1q_2 - q_3q_4) & -q_1^2 + q_2^2 - q_3^2 + q_4^2 & 2(q_2q_3 + q_1q_4) \\ 2(q_1q_3 + q_2q_4) & 2(q_2q_3 - q_1q_4) & -q_1^2 - q_2^2 + q_3^2 + q_4^2 \end{pmatrix} \quad (3\text{-}8)$$

где $I_{3\times3}$ - единичная матрица 3x3

$$\boldsymbol{\Xi}(q) \equiv \begin{pmatrix} q_4 I_{3\times3} + [Q\times] \\ -Q^T \end{pmatrix} \quad (3\text{-}9)$$

$$\boldsymbol{\Psi}(q) \equiv \begin{pmatrix} q_4 I_{3\times3} - [Q\times] \\ -Q^T \end{pmatrix} \quad (3\text{-}10)$$

$$[Q\times] = \begin{pmatrix} 0 & -q_3 & q_2 \\ q_3 & 0 & -q_1 \\ -q_2 & q_1 & 0 \end{pmatrix} \quad (3\text{-}11)$$

Связь между мировой системой координат и несущей системой координат может быть выражена следующей формулой

$$\boldsymbol{b} = \boldsymbol{Ar} \quad (3\text{-}12)$$

Где b и r представляют собой представления вектора в несущей системе координат и мировой системе координат соответственно, а выражение A выглядит следующим образом:

$$A = \begin{pmatrix} cos\vartheta cos\psi & sin\vartheta & -cos\vartheta sin\psi \\ -sin\vartheta cos\psi cos\gamma + sin\psi sin\gamma & cos\vartheta cos\gamma & sin\vartheta sin\psi cos\gamma + cos\psi sin\gamma \\ sin\vartheta cos\psi sin\gamma + sin\psi cos\gamma & -cos\vartheta sin\gamma & -sin\vartheta sin\psi sin\gamma + cos\psi cos\gamma \end{pmatrix} \quad (3\text{-}13)$$

Кватернионное представление угла ориентации можно получить, сравнивая уравнения 3-8 и 3-13:

$$\begin{cases} \psi = -arctan\frac{A_{q13}}{A_{q11}} = -arctan\frac{2(q_1q_3 - q_2q_4)}{q_1^2 - q_2^2 - q_3^2 + q_4^2} \\ \theta = arcsinA_{q12} = arcsin2(q_1q_2 + q_3q_4) \\ \phi = -arctan\frac{A_{q32}}{A_{q22}} = -arctan\frac{2(q_2q_3 - q_1q_4)}{-q_1^2 + q_2^2 - q_3^2 + q_4^2} \end{cases} \quad (3\text{-}14)$$

Кватернион q также может быть представлен ориентационным углом, то есть

$$q = (cos\frac{\psi}{2} + sin\frac{\psi}{2}j)\otimes(cos\frac{\theta}{2} + sin\frac{\theta}{2}j)\otimes(cos\frac{\phi}{2} + sin\frac{\phi}{2}j) \quad (3\text{-}15)$$

где $\otimes$ представляет кватернионное умножение. Уравнения 3-14 и 3-15 могут быть выражены как

$$\begin{cases} q_1 = sin\frac{\psi}{2}sin\frac{\theta}{2}cos\frac{\phi}{2} + cos\frac{\psi}{2}cos\frac{\theta}{2}sin\frac{\phi}{2} \\ q_2 = sin\frac{\psi}{2}cos\frac{\theta}{2}cos\frac{\phi}{2} + cos\frac{\psi}{2}sin\frac{\theta}{2}sin\frac{\phi}{2} \\ q_3 = cos\frac{\psi}{2}sin\frac{\theta}{2}cos\frac{\phi}{2} - sin\frac{\psi}{2}cos\frac{\theta}{2}sin\frac{\phi}{2} \\ q_4 = cos\frac{\psi}{2}cos\frac{\theta}{2}cos\frac{\phi}{2} - sin\frac{\psi}{2}sin\frac{\theta}{2}sin\frac{\phi}{2} \end{cases} \quad (3\text{-}16)$$

Система напрямую получит три значения угла Эйлера на датчике контроллера. Здесь углы Эйлера преобразуются в кватернионы для точного решения.

$$q = \begin{bmatrix} w \\ x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\varphi/2)\cos(\theta/2)\cos(\psi/2) + \sin(\varphi/2)\sin(\theta/2)\sin(\psi/2) \\ \sin(\varphi/2)\cos(\theta/2)\cos(\psi/2) - \cos(\varphi/2)\sin(\theta/2)\sin(\psi/2) \\ \cos(\varphi/2)\sin(\theta/2)\cos(\psi/2) + \sin(\varphi/2)\cos(\theta/2)\sin(\psi/2) \\ \cos(\varphi/2)\cos(\theta/2)\sin(\psi/2) - \sin(\varphi/2)\sin(\theta/2)\cos(\psi/2) \end{bmatrix} \quad (3\text{-}17)$$

где ψ, θ и φ — углы поворота вокруг оси Z, оси Y и оси X соответственно.

Рассчитайте кватернион в соответствии с информацией каждого датчика, например, по формуле 3-18.

$$\begin{aligned} {}^{A}\boldsymbol{R}_B &= {}^{A}\boldsymbol{R}_o \cdot {}^{O}\boldsymbol{R}_B \\ {}^{A}\boldsymbol{R}_B &= ({}^{O}\boldsymbol{R}_A)^{-1} \cdot {}^{\circ}\boldsymbol{R}_B \end{aligned} \quad (3\text{-}18)$$

Наконец, используйте кватернион для расчета угла тангажа, угла рыскания и угла крена каждого шарнира, как показано в уравнении 3-19.

$$\begin{bmatrix} \varphi \\ \theta \\ \psi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \arctan\frac{2(wx+yz)}{1-2(x^2+y^2)} \\ \arcsin(2(wy-zx)) \\ \arctan\frac{2(wz+xy)}{1-2(y^2+z^2)} \end{bmatrix} \quad (3\text{-}19)$$

Заключение

Виртуальная реальность доступна все большему количеству пользователей, поскольку аппаратные платформы продолжают сокращать расходы. Эти системы также демонстрируют интуитивно понятный интерфейс для управления роботом. В этой статье представлено решение для удаленного манипулятора виртуальной реальности, но у этого решения много недостатков. С одной стороны, задержка будет относительно большой, потому что есть дополнительный процесс сетевой

связи, который требует, чтобы два компьютера взаимодействовали друг с другом для завершения передачи информации.Больше времени работы. В будущем применение разработки 5G к связи значительно уменьшит задержку, и новый алгоритм обратного решения также может уменьшить задержку.

Список литературы

1. [1] Цзоу Сянцзюнь. Эволюция и перспективы технологии виртуальной реальности.// Журнал системного моделирования - 2004 - №8.
2. [2] Кот. Т, Новак. С. Применение виртуальной реальности в телеуправлении военной мобильной робототехнической системой TAROS.// Международный журнал перспективных робототехнических систем. -2018.
3. [3] Ding Guofu. Investigation of Excavator Remote Operation Simulation Based on Natural Reality.// Journal of the Southwestern Jiaotong Society. - 2002 - No. 2.
4. [4] Э. Баклути, М. Джаллули, Л. Амури и Н. Бен Амор. Дистанционное управление мобильным роботом через трехмерную среду виртуальной реальности.// Международная конференция по индивидуальному и коллективному поведению в робототехнике (ICBR) - 2013 - с. 9-14.
5. [5] Чжан Синьи. Построение тестовой среды моделирования поля боя на основе технологий Unity3D и VR. // Сидянский университет - 2020 - с.12-17.
6. [6] Джен И, Таха. Z, & Vui, L. Система программирования и моделирования роботов на основе виртуальной реальности для промышленного робота. // Международный журнал промышленной инженерии: теория, приложения и практика. - 2008 - 15(3) - 314-322.
7. [7] Ван Минюй. Виртуальная система вождения на базе Unity3D и технологии VR // Сидянский университет - 2020 - с.4-6.
8. [8] Ван Хан ,Чжан Ихонг , Ван Шаоди. Unity AR / VR Development: практический тренинг для мастеров // Опубликовано Machinery Industry Press - 2021.

9. [9] Тан Ин, Тан Чанжуй, Сян Илинь.Проектирование и реализация обучающего экзамена по вождению в виртуальной реальности на основе Unity3D и HTC VIVE [J] // Высокие технологии Китая, 2020(07):49-50.DOI:10.13535/j .цнки .10-1507/н.2020.07.015.
10. [10] Чжан Ци.Прикладное исследование метода жестового взаимодействия на базе HTC Vive [D] // Пекинский технологический университет, 2019. DOI: 10.26935/d.cnki.gbjgu.2019.000054.
11. [11] Ши Шаовей, Ши Шаоминь, Интеллектуальная система мониторинга рабочего состояния робота на основе виртуальной реальности [J],// Автоматизация и приборостроение, 2021(12):172-175+180. DOI:10.14016/j.cnki.1001-9227.2021 .12.172 .

Literature

1. [1] Zou Xianjun. Evolution and technologies of the future of reality.// Journal of system modeling - 2004 - No. 8.
2. [2] Kot. T, Nov'ak. P. Application of virtual reality in teleoperation of the military mobile robotic system TAROS.// International Journal of Advanced Robotic Systems. -2018.
3. [3] Ding Guofu. Investigation of Excavator Remote Operation Simulation Based on Natural Reality.// Journal of the Southwestern Jiaotong Society. - 2002 - No. 2.
4. [4] E. Baklouti, M. Jallouli, L. Amouri and N. Ben Amor. Remote control of mobile robot through 3D virtual reality environment.// International Conference on Individual and Collective Behaviors in Robotics (ICBR) - 2013 - c. 9-14.
5. [5] Zhang Xinyi. Building a battlefield simulation test environment based on Unity3D and VR technologies. // Sidian University - 2020 - c.12-17.
6. [6] Jen Y, Taha. Z, & Vui, L. VR-Based Robot Programming and Simulation System for an Industrial Robot.// International Journal Of Industrial Engineering: Theory, Applications And Practice. - 2008 - 15(3) - 314-322.
7. [7] Wang Mingyu. Virtual driving system based on Unity3D and VR technology // Sidian University - 2020 - p.4-6.

8. [8] Wang Han, Zhang Yihong, Wang Shaodi. Unity AR/VR Development: Hands-On Training for Craftsmen // Published by Machinery Industry Press - 2021.
9. [9] Tan Ying, Tan Changrui, Xiang Yilin. Designing and Implementing a Virtual Reality Driving Training Test Based on Unity3D and HTC VIVE [J]. // China High Tech, 2020(07):49-50.DOI:10.13535/j .tsnki .10-1507/n.2020.07.015.
10. [10] Zhang Qi. Applied Research on HTC Vive Gesture Interaction Method [D], Beijing University of Technology, 2019.
11. [11] Shi Shaowei, Shi Shaomin, Virtual Reality-Based Intelligent Robot Operating Condition Monitoring System [J]//Automation and Instrumentation, 2021(12):172-175+180.DOI:10.14016/j.cnki.1001-9227.2021.12.172 .

© Жэнь Гуаншэн, 2022 Научно-образовательный журнал для студентов и преподавателей «StudNet» №4/2022.

Для цитирования: Жэнь Гуаншэн Исследование технологии силовой обратной связи робота на основе магнитной силы// Научно-образовательный журнал для студентов и преподавателей «StudNet» №4/2022.