DOI: 10.17117/na.2016.05.03.218

<http://ucom.ru/doc/na.2016.05.03.218.pdf>

Поступила (Received): 24.05.2016

Кощеев А.А., Адамов Б.И
Задача поддержания требуемой ориентации объекта,
переносимого роботом-манипулятором

Koshcheev A.A., Adamov B.I.
The task of maintaining a desired orientation of the object,
carried by the robot manipulator

В статье дается кинематическая постановка задачи поддержания ориентации объекта в захвате робота-манипулятора; кинематика мобильной роботизированной платформы youbot с последующим заданием программной ориентации схвата с помощью углов Эйлера. Приводится вывод уравнений алгоритма стабилизации программной ориентации схвата

Ключевые слова: робот-манипулятор, кватернион, матрица направляющих косинусов, углы Эйлера

In the article the problem of maintaining the desired orientation of the object, carried by the robot manipulator; kinematics of a mobile robotic platform youbot followed by the task software in the orientation of the gripper with the help of Euler angles. The output of the stabilization algorithm of the software orientation of the grip

Key words: robot manipulator, quaternion, guides cosines matrix, Euler angles

Кощеев Артем Александрович

Студент

Московский энергетический институт
г. Москва, ул. Красноказарменная, 14

Koshcheev Artem Aleksandrovich

Student

Moscow power engineering institute
Moscow, Krasnokazarmennaya st., 14

Адамов Борис Игоревич

Магистр, ассистент

Московский энергетический институт
г. Москва, ул. Красноказарменная, 14

Adamov Boris Igorevich

Master, Assistant

Moscow power engineering institute
Moscow, Krasnokazarmennaya st., 14

Задача поддержания требуемой ориентации переносимого объекта или некоторого звена робота-манипулятора возникает в сферах промышленной (роботы, выполняющие некоторые виды сварки), военной (роботы-сапёры, переносящие взрывоопасные предметы), бытовой робототехники (робот-официант, робот-кулинар [4]).

Для задания пространственной ориентации тела можно использовать либо три пространственных угла поворота (углы Эйлера, самолётные углы), либо матрицу направляющих косинусов [1;6], с помощью которой выполняется преобразование компонент вектора при переходе из системы отсчёта, связанной с телом, к неподвижной системе отсчёта, либо с помощью кватерниона ориентации [1;3;6]. В первом случае можно наглядно представить положение тела

в пространстве, однако, при некоторых значениях углов пространственного поворота, кинематические соотношения могут вырождаться. Во втором случае вырождения уравнений кинематики не происходит, но возникает необходимость использовать матрицы, состоящие из девяти элементов, из которых независимых только три. В отличие от матрицы направляющих косинусов, кватернион задаётся четырьмя компонентами, удовлетворяющим условию нормировки на единицу.

1. Кинематика робота манипулятора

Задача поддержания требуемой ориентации предмета ставится для манипулятора мобильной роботизированной платформы *youBot* [5]. Кинематическая схема этого манипулятора приведена на рисунке 1.

Рис. 1. Кинематическая схема манипулятора

Ориентацию переносимого в схвате объекта будем определять через положение системы координат $x_5y_5z_5$, жёстко связанной с манипулятором, относительно базовой системы координат $x_0y_0z_0$, связанной с платформой.

Преобразование компонент некоторого вектора $\vec{r}$ при переходе из системы координат $x_5y_5z_5$ в $x_0y_0z_0$ осуществляется матрицей направляющих косинусов Γ_{05} : $r^{x_0y_0z_0} = \Gamma_{05} \cdot r^{x_5y_5z_5}$, где $r^{x_iy_iz_i} = (r_{x_i} \ r_{y_i} \ r_{z_i})^T$ – столбец компонент вектора $\vec{r}$ в системе координат $x_iy_iz_i$, а символ T обозначает операцию транспонирования. Здесь матрица направляющих косинусов имеет вид:

$$\Gamma_{05} = \begin{pmatrix} C_1C_{2+3+4}C_5 - S_1S_5 & -C_1C_{2+3+4}S_5 - S_1C_5 & C_1S_{2+3+4} \\ S_1C_{2+3+4}C_5 - C_1S_5 & -S_1C_{2+3+4}S_5 + C_1C_5 & S_1S_{2+3+4} \\ -C_1S_{2+3+4} & S_{2+3+4}S_5 & C_{2+3+4} \end{pmatrix},$$

где $C_i = \cos \varphi_i$, $S_i = \sin \varphi_i$, $S_{2+3+4} = \sin(\varphi_2 + \varphi_3 + \varphi_4)$, $C_{2+3+4} = \cos(\varphi_2 + \varphi_3 + \varphi_4)$;

φ_1 – угол поворота стрелы манипулятора в отношении вертикальной оси

z_0 ;

$\varphi_2, \varphi_3, \varphi_4$ – относительные углы поворота звеньев в плоскости манипулятора;

φ_5 – угол поворота схвата относительно четвёртого звена вокруг оси $z_4 = z_5$ (рис. 1).

Такое преобразование компонент вектора $\bar{r}$ можно осуществить с помощью кватерниона γ_{05} по формуле:

$$r^{x_0 y_0 z_0} = \gamma_{05} \circ r^{x_5 y_5 z_5} \circ \tilde{\gamma}_{05} \quad (1)$$

где символ $\circ$ обозначает кватернионное умножение [1,6];

$\tilde{\gamma}_{05}$ – сопряженный кватернион ориентации.

Кватернион γ_{05} можно представить в виде четырёхмерного столбца:

$$\gamma_{05} = \begin{pmatrix} \gamma_0^{05} \\ \gamma_1^{05} \\ \gamma_2^{05} \\ \gamma_3^{05} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{2} \left(\cos \frac{\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 + \varphi_4 + \varphi_5}{2} + \cos \frac{\varphi_1 - \varphi_2 - \varphi_3 - \varphi_4 + \varphi_5}{2} \right) \\ \frac{1}{2} \left(\cos \frac{\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 + \varphi_4 - \varphi_5}{2} - \cos \frac{\varphi_1 - \varphi_2 - \varphi_3 - \varphi_4 - \varphi_5}{2} \right) \\ \frac{1}{2} \left(\sin \frac{\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 + \varphi_4 - \varphi_5}{2} - \sin \frac{\varphi_1 - \varphi_2 - \varphi_3 - \varphi_4 + \varphi_5}{2} \right) \\ \frac{1}{2} \left(\sin \frac{\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 + \varphi_4 + \varphi_5}{2} + \sin \frac{\varphi_1 - \varphi_2 - \varphi_3 - \varphi_4 + \varphi_5}{2} \right) \end{pmatrix},$$

где γ_0^{05} – скалярная часть кватерниона;

$\gamma_{1,2,3}^{05}$ – компоненты векторной части кватерниона γ_{05} .

По определению сопряжённый кватернион имеет вид:

$$\tilde{\gamma}_{05} = (\gamma_0^{05} \quad -\gamma_1^{05} \quad -\gamma_2^{05} \quad -\gamma_3^{05})^T.$$

Столбец $r^{x_i y_i z_i}$ в формуле (1) рассмотрим как кватернион с нулевой скалярной частью: $r^{x_i y_i z_i} = (0 \quad r_{x_i} \quad r_{y_i} \quad r_{z_i})^T$. Применяя векторно-матричный формализм, произведение кватернионов можно записать в виде [1]:

$$\gamma_{05} \circ r^{x_5 y_5 z_5} = \tilde{\gamma}_{05} \cdot r^{x_5 y_5 z_5}, \quad \tilde{\gamma}_{05} = \begin{pmatrix} \gamma_0^{05} & -\gamma_1^{05} & -\gamma_2^{05} & -\gamma_3^{05} \\ \gamma_1^{05} & \gamma_0^{05} & -\gamma_3^{05} & \gamma_2^{05} \\ \gamma_2^{05} & \gamma_3^{05} & \gamma_0^{05} & -\gamma_1^{05} \\ \gamma_3^{05} & -\gamma_2^{05} & \gamma_1^{05} & \gamma_0^{05} \end{pmatrix};$$

Компоненты вектора угловой скорости схвата относительно платформы $\bar{\omega}_{05}$ могут быть найдены по векторно-матричной форме, которая имеет вид:

$$\omega_{05}^{x_0 y_0 z_0} = J \cdot \dot{\Phi}, \quad \omega_{05}^{x_0 y_0 z_0} = \begin{pmatrix} \omega_{x_0}^{05} \\ \omega_{y_0}^{05} \\ \omega_{z_0}^{05} \end{pmatrix}, \quad \dot{\Phi} = \begin{pmatrix} \dot{\Phi}_1 \\ \dot{\Phi}_2 \\ \dot{\Phi}_3 \\ \dot{\Phi}_4 \\ \dot{\Phi}_5 \end{pmatrix}. \quad (2)$$

J - матрица Якоби.

Компоненты угловой скорости найдены по рекуррентным соотношениям, приведённым в работе [2]. Отметим, что угловую скорость схвата можно получить, используя кинематическое уравнение для кватерниона ориентации [6]:

$$\omega_{05}^{x_0 y_0 z_0} = 2\dot{\gamma}_{05} \circ \tilde{\gamma}_{05}. \quad (3)$$

2. Задание программной ориентации схвата с помощью углов Эйлера

Положение системы координат $x_5 y_5 z_5$ относительно $x_0 y_0 z_0$ опишем с помощью углов Эйлера: прецессии Ψ , нутации Θ , собственного вращения Φ (см. рисунок 2).

Рис. 2. Углы Эйлера

Зададим требуемые законы изменения углов $\Psi = \Psi^*(t)$, $\Theta = \Theta^*(t)$, $\Phi = \Phi^*(t)$. Эти три функции времени определяют требуемую ориентацию схвата. Выражение для кватерниона требуемой ориентации γ_{05}^* имеет вид:

$$\gamma_{05}^* = \begin{bmatrix} \cos \frac{\Psi^* + \Phi^*}{2} \cos \frac{\Theta^*}{2} \\ \cos \frac{\Psi^* - \Phi^*}{2} \sin \frac{\Theta^*}{2} \\ \sin \frac{\Psi^* - \Phi^*}{2} \sin \frac{\Theta^*}{2} \\ \sin \frac{\Psi^* + \Phi^*}{2} \cos \frac{\Theta^*}{2} \end{bmatrix}.$$

3. Алгоритм стабилизации программной ориентации схвата

Обеспечим изменение углов в сочленениях манипулятора таким образом, чтобы ошибка кватерниона ориентации $\Delta\gamma_{05} = \gamma_{05} - \gamma_{05}^*$ затухала. Организуем движение системы так, чтобы

$$\Delta\dot{\gamma}_{05} = -k\Delta\gamma_{05}, \quad (4)$$

где $k > 0$ – постоянный скалярный коэффициент.

Решение уравнения (4) экспоненциально затухает: $\Delta\gamma_{05}(t) = \gamma_{05}(0) \cdot e^{-kt}$.

Умножим обе части уравнения (4) на $2\tilde{\gamma}_{05}$ и применим формулу (3):

$$\omega_{05}^{x_0 y_0 z_0} - \dot{\gamma}_{05}^* \circ \tilde{\gamma}_{05} = -k\Delta\gamma_{05} \circ \tilde{\gamma}_{05}.$$

Выразим угловую скорость через обобщённые скорости $\dot{\varphi}_i$ по формуле (2) и перегруппируем слагаемые:

$$J\dot{\varphi} = 2\left(\dot{\gamma}_{05}^* - k\Delta\gamma_{05}\right) \circ \tilde{\gamma}_{05}, \quad (5)$$

здесь γ_{05} рассчитывается по измеренным углам φ_i в сочленениях манипулятора, а $\dot{\gamma}_{05}^*$ является заданной функцией времени.

Решив обратную задачу о скоростях избыточного манипулятора, используя, например, соотношение [7] $\dot{\varphi} = 2\left(JJ^T\right)^{-1} J^T \cdot \left(\dot{\gamma}_{05}^* - k\Delta\gamma_{05}\right) \circ \tilde{\gamma}_{05}$, получаем соотношения для обобщённых скоростей $\dot{\varphi}_i$, проинтегрировав которые, находим закон изменения φ_i ($i = \overline{1,5}$), при которых поддерживается требуемая ориентация схвата.

Выводы

Получены кинематические соотношения для задания и определения пространственной ориентации схвата робота *youBot*. Построен кинематический алгоритм управления этим манипулятором для реализации и стабилизации требуемой ориентации переносимого объекта.

Список используемых источников:

1. Губаренко С.И. Механика инерциальных навигационных систем. М., 1993.
2. Корецкий А.В., Осадченко Н.В. Статический и кинематический анализ манипуляционных роботов на базе теории винтов // Автоматическое управление и интеллектуальные системы. М.: МИРЭА, 1996.
3. Осадченко Н.В. Моделирование динамики систем взаимосвязанных твёрдых тел средствами программного комплекса DYANA // Труды Московского Энергетического Института, 1982. Вып. 573. С. 81–86.
4. Корецкий А.В., Созинова Е.Л. Обратная задача кинематики и прямая задача динамики о вертикальном подъёме груза четырехзвенным манипулятором // Trends in Applied Mechanics and Mechatronics. М.: ИНФРА-М, 2015. Т. 1. С. 90–99.
5. URL: <http://www.youbot-store.com/>
6. Журавлев В.Ф. Основы теоретической механики: учебник. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. 304 с.
7. Гантмахер Ф.Р. Теория матриц. М.: Наука, 1968. 576 с.