

Управление роботами-манипуляторами лесных машин

Ю. П. Эпштейн¹

Петрозаводский государственный университет

В статье рассмотрены решения прямой и обратной задач кинематики для многозвенного манипулятора лесной машины. Приводятся результаты численного моделирования, которые могут быть использованы при выборе законов управления, оценке качества кинематической схемы и конструкции робота-манипулятора.

Ключевые слова : *манипулятор, кинематика, моделирование на ЭВМ.*

ВВЕДЕНИЕ

Совершенствование систем управления многооперационными лесозаготовительными машинами манипуляторного типа, в частности, автоматизация ряда технологических операций, таких как наведение на цель и перемещение захватно-срезающего устройства, пакетирование предмета труда, дает возможность снизить психофизиологические нагрузки на оператора и тем самым повысить производительность труда.

Автоматизация управления манипуляторами, т. е. создание на их базе роботов, требует преодоления ряда специфических трудностей, характерных для лесозаготовок: широкое варьирование размерных и весовых характеристик предмета труда, неопределенность его положения в рабочей зоне манипулятора. Поэтому, вероятно, автоматизация пойдет по пути уменьшения доли ручного труда и повышения производительности, но управление процессом и принятие решений останутся за человеком. Различные вопросы, связанные с созданием интерактивных роботов-манипуляторов лесных машин, отражены в работах [1-6].

РЕШЕНИЕ ПРЯМОЙ ЗАДАЧИ КИНЕМАТИКИ

Для построения кинематической модели манипулятора использовался хорошо известный матричный метод однородных преобразований [7]. На рис. 1 приведена кинематическая схема с указанием связанных систем координат для последовательно расположенных звеньев, а в табл. 1 приведены параметры звеньев и сочленений робота-манипулятора лесной машины.

Таблица 1

Параметры звеньев и сочленений
робота-манипулятора лесной машины

Сочленение <i>i</i>	Θ_i	α_i	a_i	d_i
1	Θ_1	-90°	0	d_1
2	Θ_2	0°	a_2	0
3	Θ_3	0°	a_3	0
4	Θ_4	90°	0	0
5	Θ_5	0°	0	d_5

Матрица состояния рабочего органа манипулятора T , задающая его положение и ориентацию относительно базовой системы координат, определяется как произведение матриц :

$$T = \begin{bmatrix} nsap \\ 0001 \end{bmatrix} = {}^0A_1 {}^1A_2 {}^2A_3 {}^3A_4 {}^4A_5, \quad (1)$$

где n , s и a - единичные вектора, определяющие ориентацию рабочего органа, а вектор p - его положение; ${}^{i-1}A_i$ - матрица размера 4×4 однородных преобразований, определяющая положение и ориентацию системы координат i -го звена относительно системы координат $(i-1)$ -го звена [7].

С учетом значений кинематических параметров из табл. 1 были определены пять матриц ${}^{i-1}A_i$. В результате их последовательного перемножения в соответствии с (1) получены выражения для элементов матрицы T , необходимые для решения прямой задачи кинематики:

$$\begin{aligned} n_x &= C_1 C_{234} C_5 - S_1 S_5, \\ n_y &= S_1 C_{234} C_5 + C_1 S_5, \\ n_z &= -S_{234} C_5, \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} s_x &= -C_1 C_{234} S_5 - S_1 C_5, \\ s_y &= -S_1 C_{234} S_5 + C_1 C_5, \\ s_z &= S_{234} S_5, \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} a_x &= C_1 S_{234}, \\ a_y &= S_1 S_{234}, \\ a_z &= C_{234}, \end{aligned} \quad (4)$$

¹ Автор - доцент кафедры механики
© Ю. П. Эпштейн, 1999

$$\begin{aligned} p_x &= C_1(a_2C_2 + a_3C_{23} + d_5S_{234}), \\ p_y &= S_1(a_2C_2 + a_3C_{23} + d_5S_{234}), \\ p_z &= d_1 - a_2S_2 - a_3S_{23} + d_5C_{234}, \end{aligned} \quad (5)$$

где для краткости использованы следующие обозначения: $c_i = \cos\Theta_i$, $s_i = \sin\Theta_i$, $c_{ij} = \cos(\Theta_i + \Theta_j)$, $s_{ij} = \sin(\Theta_i + \Theta_j)$, $c_{ijk} = \cos(\Theta_i + \Theta_j + \Theta_k)$ и $s_{ijk} = \sin(\Theta_i + \Theta_j + \Theta_k)$.

РЕШЕНИЕ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ КИНЕМАТИКИ

В данной работе искомое решение было получено на основе метода обратных преобразований с использованием уравнений (2) - (5). В табл. 2 приведены соотношения для решения обратной задачи кинематики, а также указаны области допустимых значений углов в сочленениях манипулятора. Расчетные параметры α , β , k и n определяются по формулам:

$$\begin{aligned} \alpha &= d_1 + d_5C_{234} - p_z, \\ \beta &= C_1p_x + S_1p_y - d_5S_{234}, \\ k &= \alpha / \beta, \\ n &= (\alpha^2 + \beta^2 + a_2^2 - a_3^2) / 2a_2\beta. \end{aligned} \quad (6)$$

Используя соотношения из табл. 2 можно перейти от заданной матрицы T к вектору углов в сочленениях манипулятора Θ .

РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

На основе решения прямой задачи кинематики исследовалось изменение во времени параметров движения захвата манипулятора лесной машины в процессе пакетирования предмета труда из начального положения в его конечное, при двух системах гидравлического управления: релейного и пропорционального.

На рис. 2 приведены результаты такого моделирования в среде пакета MathCAD для частного случая - двухзвенного манипулятора ($\Theta_1 = 0$, $d_1 = d_5 = 0$, $a_2 = 3,8$ м и $a_3 = 2,2$ м). На рис. 2а изображены начальная и конечная конфигурации манипулятора, а также траектория перемещения его рабочего органа, которая практически не зависит от вида системы управления. На рис. 2б показано изменение в процессе движения манипулятора угловых скоростей его звеньев: при пропорциональной системе управления (сплошная линия) и при релейной системе (пунктирная линия). При этом параметры управления подбирались из условия, чтобы за одно и то же время ($t = 5$ с)

звенья манипулятора перешли из начального в конечное положение.

На рис. 2в показано изменение во времени модуля скорости захвата при двух системах управления. При пропорциональном управлении время разгона захвата равно 2,75 с (участок траектории A_0A_1 на рис. 2а). Скорость захвата достигает максимальной величины 2,275 м/с. При релейном управлении время разгона увеличивается до 4,5 с (участок траектории A_0A_2). К этому моменту времени скорость захвата достигает максимальной величины 1,645 м/с. При этом наблюдается характерная особенность: при равномерном вращении звеньев захват продолжает увеличивать скорость за счет изменения конфигурации манипулятора (увеличение угла поворота рукоятки относительно стрелы Θ_3).

На рис. 2г представлено изменение во времени модуля ускорения рабочего органа манипулятора. Если пропорциональное управление обеспечивает плавное начало движения захвата и его плавное торможение, то для релейного управления характерны перегрузки (толчки) как в начале движения (ускорение равно 0,946 м/с²), так и в конце (замедление равно 3,32 м/с²).

Как видно, переход от релейного управления к пропорциональному в гидравлических приводных системах позволяет устранить пускотормозные перегрузки на технологическое оборудование, что сказывается на повышении надежности лесных машин.

На основе решения обратной задачи кинематики может быть построен алгоритм управления по вектору скорости для сообщения рабочему органу манипулятора заданных векторов линейной и угловой скоростей. Для оценки оптимальности параметров управления можно использовать результаты моделирования на ЭВМ.

На рис. 3 приведены результаты такого моделирования в среде пакета MathCAD для манипулятора лесной машины с пятью вращательными парами. Параметры звеньев: $a_2 = 3,8$ м, $a_3 = 2,2$ м, $d_1 = 1,58$ м и $d_5 = 1,28$ м.

Центр захвата должен отслеживать заданную прямолинейную траекторию из положения с координатами 4,721, 0,0, - 2,969 м в положение с координатами 0,0, 2,0, 1,401 м (рис. 1). Начальная и конечная ориентации захвата задавались соответственно: $\mathbf{n}_0 = (-0,259, 0,966, 0,0)^T$, $\mathbf{n}_f = (-0,966, 0,259, 0,0)^T$ и $\mathbf{a}_0 = \mathbf{a}_f = (0,0, 0,0, -1,0)^T$. Время движения $t_f = 5$ с.

На рис. 3а показано программное изменение во времени модуля линейной скорости захвата, т. е. требуется обеспечить плавный разгон захвата по прямолинейной траектории так, чтобы к концу разгона ($t = 2,5$ с) максимальная величина скорости была равна 2,526 м/с, а затем осуществить плавное торможение.

Используя соотношения из табл. 2 и применяя численное дифференцирование в среде пакета MathCAD, определяем необходимые законы изменения угловых скоростей звеньев манипулятора (рис. 3б и 3в). Если в кинематических парах реализовать эти законы, то захват будет двигаться заданным образом. Программная прямолинейная траектория рабочего органа формируется совместными скоординированными движениями поворотной колонки, стрелы и рукоятки манипулятора с угловыми скоростями ω_1 , ω_2 и ω_3 .

Как видно из рис. 3б, управление достаточно сложное: если поворотной колонке приходится за время движения один раз разогнаться, то стрела и рукоятка это делают дважды. К тому же движение рукоятки знакопеременно - вначале, за время 3,4 с, осуществляется подтягивание, а затем - кратковременный вынос. На рис. 3в показаны законы изменения угловых скоростей наклона ω_4 и вращения ω_5 рабочего органа, удовлетворяющие его заданной ориентации.

При численном моделировании необходимо учитывать также, что при движении манипулятора возможна сингулярность - вырождение его кинематической конфигурации (совмещение осей стрелы и рукоятки при $\theta_3=0^\circ$ и $\theta_3=180^\circ$). Это накладывает ограничение на расчетные параметры α и β :

$$(a_2 - a_3)^2 (\alpha^2 + \beta^2) < (a_2 + a_3)^2. \quad (7)$$

При выполнении этого условия будет отсутствовать кинематическая сингулярность.

Таким образом, на основе решения обратной задачи кинематики по результатам моделирования на ЭВМ можно уточнить требования к приводам и системе управления.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Эффективным средством при разработке систем управления является имитационное моделирование на ЭВМ движений механической системы, которое базируется на построении соответствующей математической модели. В данной статье это было показано на примере построения и анализа кинематической модели многозвенного манипулятора лесной машины.

ЛИТЕРАТУРА

1. Афанасьев О. П., Илюхин Ю. В., Лобачев В. И. О некоторых путях расширения функциональных возможностей системы оператор-манипулятор применительно к лесным машинам // Научные проблемы робототехники. М.: Наука, 1980. С. 76-83.
2. Алферов Н. И., Виногоров Б. Г. Манипуляторы и роботы на лесозаготовках // Лесная пром-сть. 1984. №4. С. 16-17.
3. Александров В. А., Коноплев В. А., Эпштейн Ю. П. Построение программного движения робота-манипулятора лесосечной машины // ИВУЗ: Лесной журнал. 1987. №6. С. 38-43.
4. Эпштейн Ю. П. Моделирование на ЭВМ движений гидроманипуляторов лесных машин // Обоснование параметров и технических решений машин и оборудования лесной промышленности и лесного хозяйства / ЛТА. Л., 1988. С. 88-91.
5. Эпштейн Ю. П. Анализ систем управления манипуляторов лесных машин на основе имитационного моделирования // ИВУЗ: Лесной журнал. 1995. №1. С. 76-81.
6. Эпштейн Ю. П. Построение кинематических алгоритмов управления для манипуляторов лесных машин // ИВУЗ: Лесной журнал. 1996. №6. С. 67-72.
7. Фу К., Гонсалес Р., Ли К. Робототехника. М.: Мир, 1989. 624 с.

Таблица 2

Соотношения для решения обратной задачи кинематики

Сочле- нения	Решения	Допустимые значения углов
1	$\theta_1 = \operatorname{arctg}\left(\frac{p_y}{p_x}\right)$	$-180^\circ \leq \Theta_1 \leq 180^\circ$
2	$\theta_2 = \arcsin\left(\frac{kn \mp \sqrt{1+k^2-n^2}}{1+k^2}\right)$	$-90^\circ \leq \Theta_2 \leq 90^\circ$
3	$\theta_3 = \arccos\left(\frac{\alpha^2 + \beta^2 - a_2^2 - a_3^2}{2a_2a_3}\right)$	$0^\circ \leq \Theta_3 \leq 180^\circ$
4	$\theta_4 = \arccos(a_z) - \theta_3 - \theta_2$	$-90^\circ \leq \Theta_4 \leq 270^\circ$
5	$\theta_5 = \operatorname{arctg}\left(\frac{-s_z}{n_z}\right), \text{ если } S_{234} \neq 0$ $\theta_5 = \pm\theta_1 + \operatorname{arctg}\left(\frac{-s_x}{n_x}\right), \text{ если } S_{234} = 0$	$-180^\circ \leq \Theta_5 \leq 180^\circ$

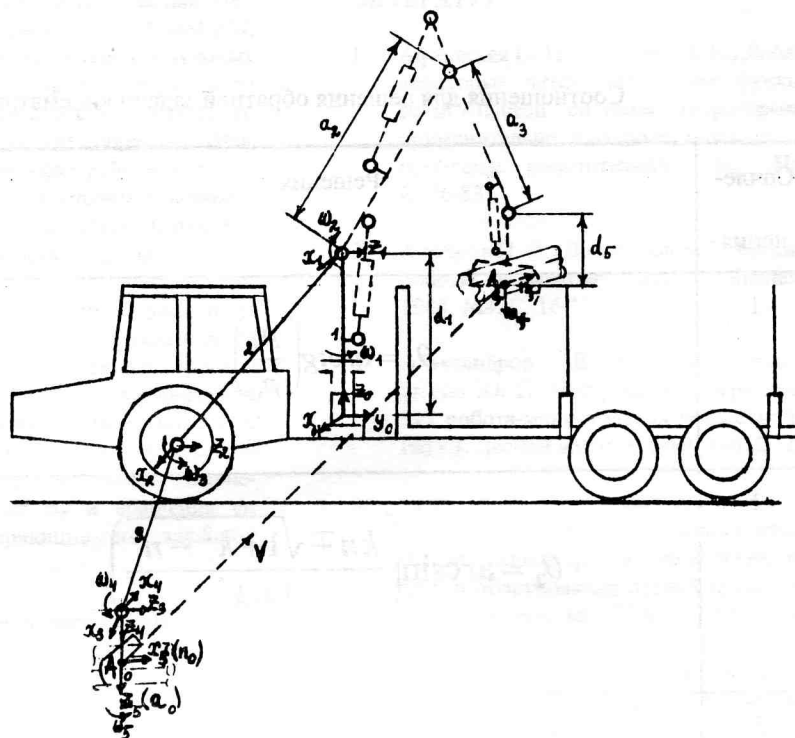


Рис. 1.

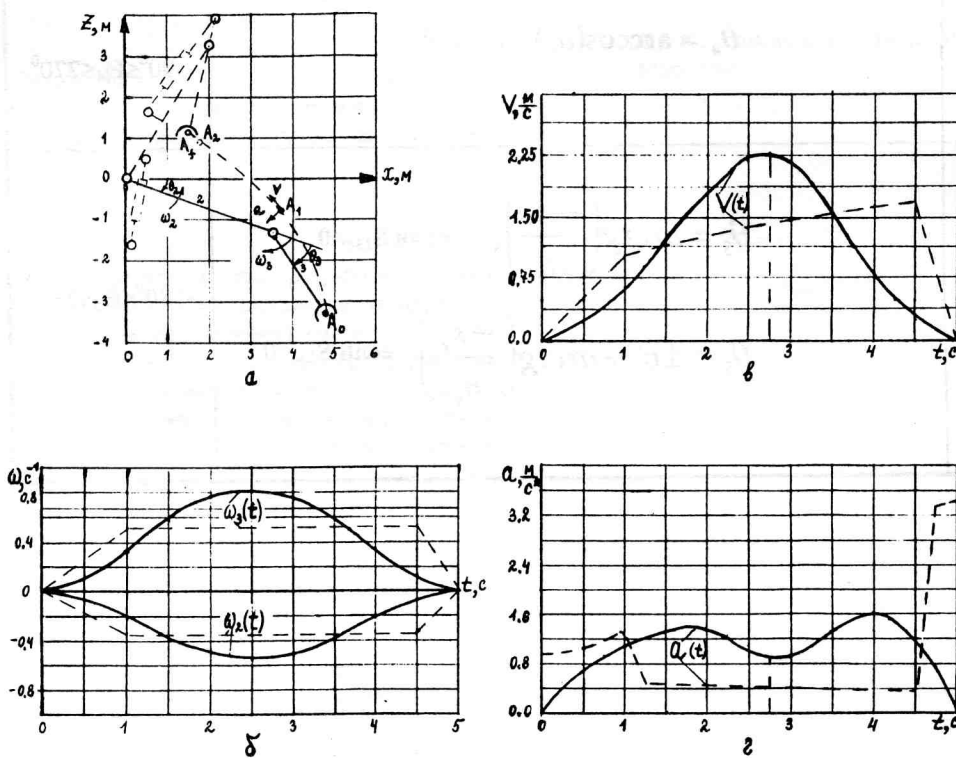
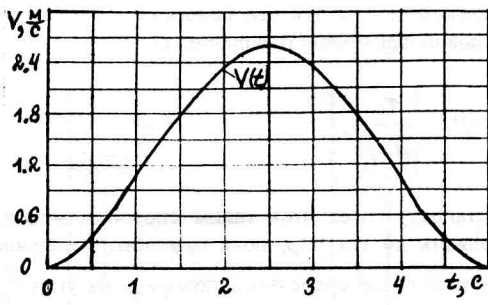
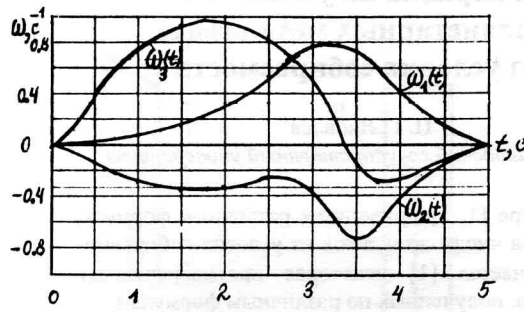


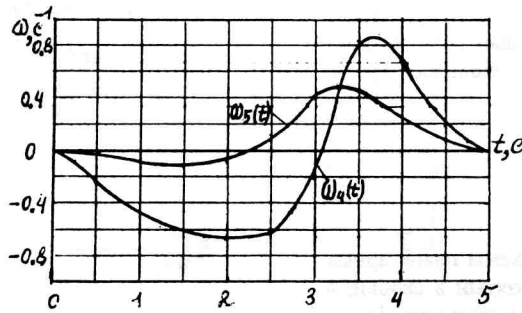
Рис. 2.



а



б



б

Рис. 3.