

ЛЕСОЭКСПЛУАТАЦИЯ

УДК 630*371 : [517.941 + 531.15]

ПОСТРОЕНИЕ ПРОГРАММНОГО ДВИЖЕНИЯ
РОБОТА-МАНИПУЛЯТОРА ЛЕСОСЕЧНОЙ МАШИНЫ

В. А. АЛЕКСАНДРОВ, В. А. КОНОПЛЕВ, Ю. П. ЭПШТЕИН

Ленинградская лесотехническая академия
Ленинградский кораблестроительный институт
Петрозаводский государственный университет

В настоящее время в лесной промышленности с успехом применяют лесосечные машины, снабженные манипуляторами с захватно-срезающими устройствами (ЗСУ). Машины такого типа позволили полностью исключить ручной труд на основных лесосечных операциях, связанных с валкой и пакетированием деревьев, достаточно производительны. Основным недостатком серийно выпускаемых валочно-пакетирующих машин заключается в сравнительно небольшом вылете манипулятора, что практически не позволяет сохранять подрост, лесную среду, а также проводить выборочные рубки [2]. Опытные-конструкторские работы по созданию валочно-пакетирующей машины с вылетом манипулятора до 10 м (МВП-35, МВП-1), выполненные в НПО «Силава», показали, что такое увеличение вылета приводит к резкому росту металлоемкости технологического оборудования, снижению устойчивости и производительности машины. Производительность уменьшается в значительной мере из-за плохой видимости при наводке ЗСУ на дерево (удаленность оператора от предмета труда).

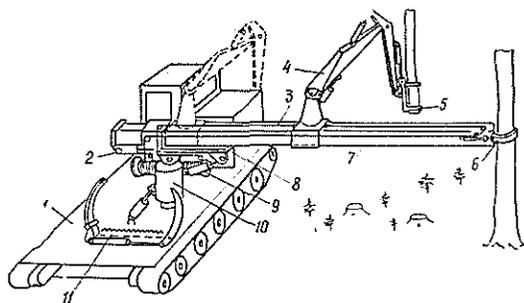


Рис. 1. Конструкция лесозаготовительной машины: 1 — самоходное шасси; 2 — канат; 3 — канатно-блочная система; 4 — манипулятор; 5 — захватно-срезающее устройство; 6 — гидрозахват; 7 — опорная балка; 8 — опорная плита; 9 — лебедка; 10 — колонка; 11 — накопитель

Таким образом, с одной стороны, валочно-пакетирующие машины с вылетом манипулятора 5... 8 м не обеспечивают сохранения подроста и лесной среды, не могут быть использованы на выборочных рубках, которым уделяется все большее внимание [5]; с другой, увеличение вылета приводит также к нежелательным явлениям. Встает вопрос о дальнейшем развитии конструкций лесосечных машин. На наш взгляд, одним из возможных путей совершенствования существующих конструкций валочно-пакетирующих машин для выборочных рубок может быть конструктивное решение, защищенное авторским свидетельством № 978783 (рис. 1) [1]. Подобная конструкция с установкой дополнительной опоры, выполненной в виде ведущей тележки, может быть применена и при сплошных рубках. Наличие опорной балки, по кото-

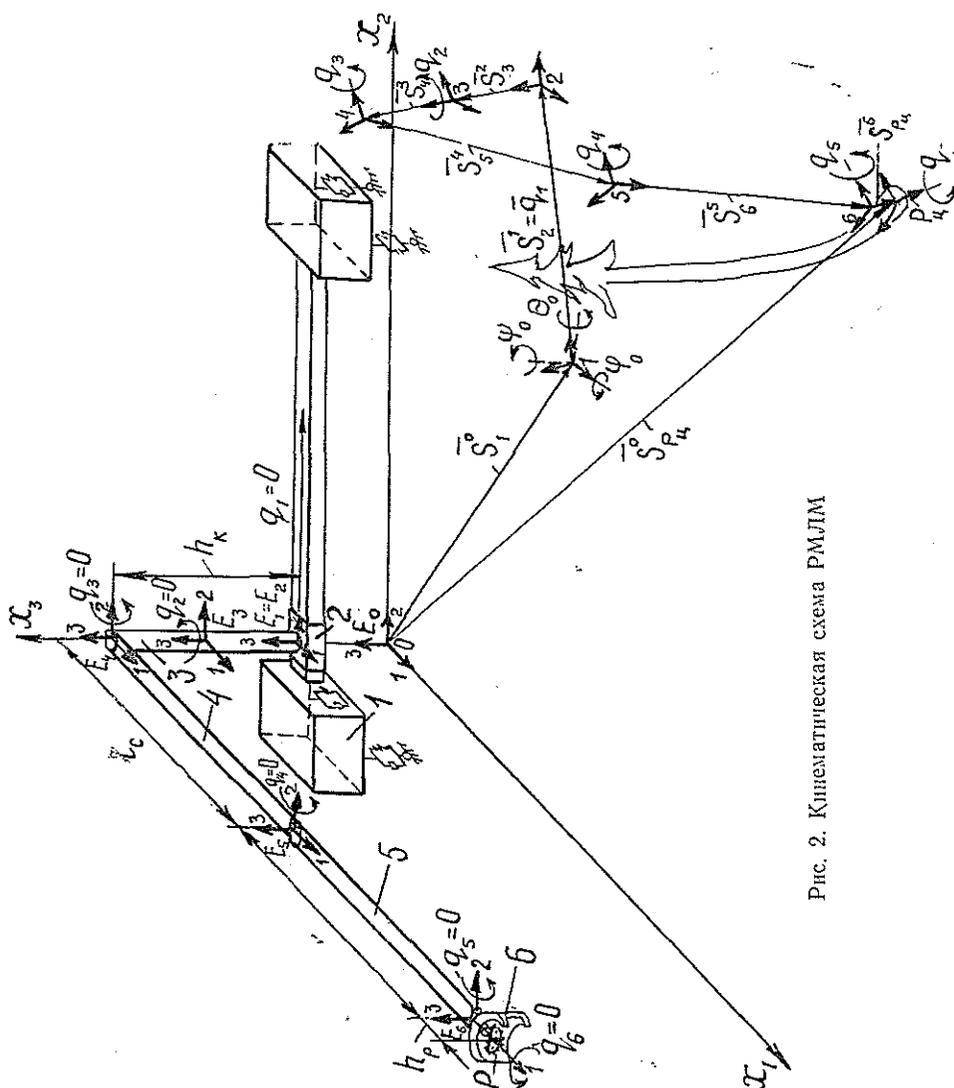


Рис. 2. Кинематическая схема РМЛМ

рой перемещается манипулятор, позволяет увеличить ширину обрабатываемой полосы до 15 м. В этих случаях, как будет показано ниже, можно обеспечить программное движение манипулятора-робота при наведении ЗСУ на дерево и пакетировании его, а функции оператора свести лишь к контролю за работой. Информацию о древостоях вводят в блок управления обзорно-информационным устройством.

Рассмотрим математическое описание кинематики робота-манипулятора лесосечной машины (РМЛМ) и решим задачу о наведении захватно-срезающего устройства на объект труда — дерево. Анализ кинематики манипулятора является начальным этапом решения более сложных задач динамики и управления их движением.

На рис. 2 приведена кинематическая схема возможного варианта РМЛМ. Механическая система манипулятора представляет разомкнутую кинематическую цепь на подвижном основании. Инерциальный базис отсчета E_0 связан с поверхностью лесосеки, ортонормированные базисы E_k ($k = 1, \dots, 6$) — соответственно, с основанием РМЛМ, основанием поворотной колонки, опорно-поворотным устройством, стрелой,

рукоятью и рабочим органом в виде ЗСУ. Точка P является характеристической точкой ЗСУ.

В качестве обобщенных координат q_1, \dots, q_6 , определяющих конфигурацию РМЛМ относительно его основания, принимаем линейное перемещение основания колонки, а также соответствующие углы поворота звеньев манипулятора. На рис. 2 показано «нулевое» положение звеньев манипулятора ($q_i = 0, i = 1, \dots, 6$). В свою очередь, движение основания РМЛМ относительно E_0 определяется параметрами: $x_{10}, x_{20}, x_{30}, \psi_0, \theta_0, \varphi_0$.

Таким образом, простейшими величинами, которые математически описывают поведение РМЛМ, являются декартовы координаты его точек в трехмерном пространстве (в частности, точки P — ЗСУ), перемещения в сочленениях (обобщенные координаты), параметры движения основания, а также скорости и ускорения всех этих величин. Управление кинематической моделью РМЛМ производится изменением обобщенных координат, т. е. его конфигурации. Задача о наведении ЗСУ на дерево связана с определением такого закона изменения обобщенных координат (конфигурации РМЛМ), при котором ЗСУ, отслеживая заданную траекторию, попадает в целевую точку. На рис. 2 приведена одна из возможных схем реализации наведения в общем случае, при движении основания РМЛМ. На рис. 3 представлены варианты наводки ЗСУ при неподвижном основании. P_0 — «нулевое» положение характеристической точки ЗСУ, определяемое «нулевой» конфигурацией РМЛМ. P_{11}, P_{12}, P_{13} — начальное (исходное), текущее и целевое положение точки P . Цифры 0, 1, ..., 6 обозначают базисы E_k .

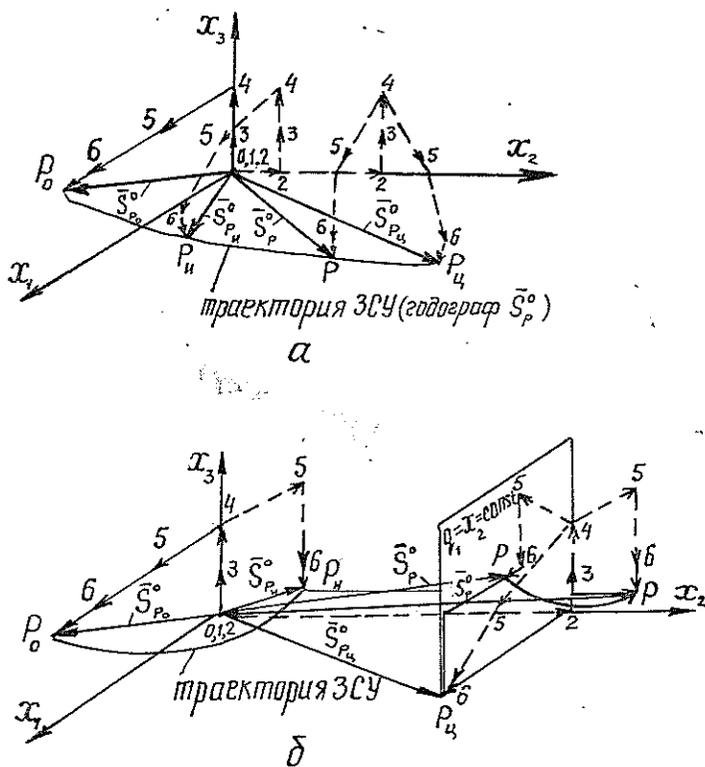


Рис. 3. Варианты наводки ЗСУ: а — наведение из точки при неподвижном основании; б — наведение при подвижном основании

Математическое описание кинематики роботов-манипуляторов требует применения компактного и экономичного метода вычисления на ЭВМ характеристик перемещения, абсолютных линейных и угловых скоростей и ускорений твердого тела (звена манипулятора), участвующего в n относительных движениях, характеристики которых известны.

В работе используются матричные формулы для вычисления указанных кинематических характеристик. Формулы компактны в записи и удобны для оформления вычислительных процедур на ЭВМ с развитым матобеспечением. Методика прошла успешные испытания [3, 4, 6]. Уравнение кинематики РМЛМ получаем из условия, что вектор

наведения ЗСУ \vec{S}_p^0 в любой момент является замыкающим системы векторов \vec{S}_{k+1}^k ($k = 0, 1, \dots, 6$), определяющих относительное положение связанных базисов E_k (рис. 3). В базисе E_0 это условие замкнутости векторного многоугольника имеет вид

$$S_p^{00} = \sum_{k=0}^6 C_k^0 S_{k+1}^{kk}, \quad (1)$$

где $C_k^0 = C_1^0, C_2^0, \dots, C_k^0$ — матрицы направляющих косинусов, которые являются матрицами преобразования координат векторов при переходе к базису E_0 ;

$C_{k+1}^k = C_i(q)$ ($i = 1, 2, 3$) — простейшие матрицы вращения с единицей на месте (i, i) на угол, равный соответствующей обобщенной координате.

Уравнение (1) в развернутом виде запишется как

$$S_p^{00} = S_1^{00} + C_1^0 (S_2^{11} + S_3^{22} + C_3(q_2)(S_4^{33} + C_2(q_3)(S_5^{44} + C_2(q_4)(S_6^{55} + C_2(q_5)C_1(q_6)S_p^{66}))))). \quad (2)$$

С учетом принятых обозначений матрицы координат векторов равны

$$\begin{aligned} S_p^{00} &= (x_1 x_2 x_3)^T; & S_4^{33} &= (0 \ 0 \ 0,5h_k)^T; \\ S_1^{00} &= (x_{10} x_{20} x_{30})^T; & S_5^{44} &= (l_c \ 0 \ 0)^T; \\ S_2^{11} &= (0 \ q_1 \ 0)^T; & S_6^{55} &= (l_p \ 0 \ 0)^T; \\ S_3^{22} &= (0 \ 0 \ 0,5h_k)^T; & S_p^{66} &= (h_p \ 0 \ 0)^T. \end{aligned} \quad (3)$$

Матрицы преобразований имеют вид

$$C_1^0 = C_3(\psi_0) C_2(\theta_0) C_1(\varphi_0) = \begin{vmatrix} C_{\psi_0} C_{\theta_0}; & -S_{\psi_0} C_{\varphi_0} + C_{\psi_0} S_{\theta_0} S_{\varphi_0}; & S_{\psi_0} S_{\varphi_0} + \\ & + C_{\psi_0} S_{\theta_0} C_{\varphi_0} & \\ S_{\psi_0} C_{\theta_0}; & C_{\psi_0} C_{\varphi_0} + S_{\psi_0} S_{\theta_0} S_{\varphi_0}; & -C_{\psi_0} S_{\varphi_0} + \\ & + S_{\psi_0} S_{\theta_0} C_{\varphi_0} & \\ -S_{\theta_0}; & C_{\theta_0} S_{\varphi_0}; & C_{\theta_0} C_{\varphi_0} \end{vmatrix};$$

$$C_3(q_2) = \begin{pmatrix} C_{q_2} & -S_{q_2} & 0 \\ S_{q_2} & C_{q_2} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}; \quad C_2(q_3) = \begin{pmatrix} C_{q_3} & 0 & S_{q_3} \\ 0 & 1 & 0 \\ -S_{q_3} & 0 & C_{q_3} \end{pmatrix}; \quad C_2(q_4) = \quad (4)$$

$$= \begin{pmatrix} C_{q_4} & 0 & S_{q_4} \\ 0 & 1 & 0 \\ -S_{q_4} & 0 & C_{q_4} \end{pmatrix};$$

$$C_2(q_5) = \begin{pmatrix} C_{q_5} & 0 & S_{q_5} \\ 0 & 1 & 0 \\ -S_{q_5} & 0 & C_{q_5} \end{pmatrix}; C_1(q_6) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & C_{q_6} & -S_{q_6} \\ 0 & S_{q_6} & C_{q_6} \end{pmatrix}.$$

В (4) приняты сокращенные обозначения C_{ψ_0} , C_{θ_0} , C_{φ_0} и C_{q_i} для $\cos \psi_0$, $\cos \theta_0$, $\cos \varphi_0$ и $\cos q_i$; S_{ψ_0} , S_{θ_0} , S_{φ_0} и S_{q_i} для $\sin \psi_0$, $\sin \theta_0$, $\sin \varphi_0$ и $\sin q_i$ соответственно.

Подставляя (3) и (4) в (2), после тригонометрических преобразований получим уравнение кинематики РМЛМ в координатной форме:

$$\begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_{10} \\ x_{20} \\ x_{30} \end{pmatrix} + C_1^0 \begin{pmatrix} [l_c \cos q_3 + l_p \cos(q_3 + q_4) + h_p \cos(q_3 + q_4 + q_5)] \cos q_2 \\ q_1 + [l_c \cos q_3 + l_p \cos(q_3 + q_4) + h_p \cos(q_3 + q_4 + q_5)] \sin q_2 \\ h_r - [l_c \sin q_3 + l_p \sin(q_3 + q_4) + h_p \sin(q_3 + q_4 + q_5)] \end{pmatrix}. \quad (5)$$

Уравнения (5) устанавливают зависимость между обобщенными координатами, параметрами движения основания РМЛМ и декартовыми координатами характеристической точки ЗСУ. На основе этих уравнений возможно решение прямой и обратной кинематических задач. Прямая задача связана с определением положения и ориентации ЗСУ по заданной конфигурации РМЛМ и движению его основания. Решение обратной кинематической задачи связано с задачей о наведении ЗСУ на дерево.

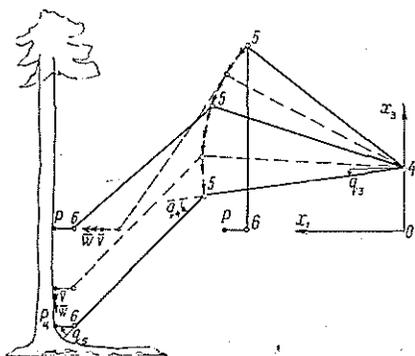


Рис. 4. Наводка ЗСУ в плоскости

В качестве примера рассмотрим решение этой задачи для схемы наводки, показанной на рис. 3, б. В этом случае основание РМЛМ неподвижно: $x_{i_0} = 0$ ($i = 1, 2, 3$), $\psi_0 = \theta_0 = \varphi_0 = 0$ и $C_1^0 = E$. Основание поворотной колонки перемещается до плоскости $q_1 = x_2 = \text{const}$, в которой расположено дерево. В этой плоскости и происходит наводка ЗСУ (рис. 4). Считая, что в процессе наводки ЗСУ перемещается поступательно, параллельно оси x_1 , из (5) получим уравнение кинематики:

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_c \cos q_3 + l_p \cos (q_3 + q_4) + h_p \\ q_1 \\ h_k - [l_c \sin q_3 + l_p \sin (q_3 + q_4)] \end{bmatrix}. \quad (6)$$

Построить программное движение — это значит решить уравнения (6) относительно неизвестных углов наведения. Получаем следующие законы наведения ЗСУ в плоскости:

$$\begin{aligned} (x_1 - h_p - l_c \cos q_3)^2 + (h_k - x_3 - l_c \sin q_3)^2 &= l_p^2; \\ q_4 &= \arccos [(x_1 - h_p)^2 + (h_k - x_3)^2 - l_c^2 - l_p^2] / 2l_c l_p; \\ q_5 &= -(q_3 + q_4). \end{aligned} \quad (7)$$

Движение ЗСУ к целевой точке — к комлю дерева можно разбить на два этапа: первый — движение к дереву, второй — движение вниз по дереву. Задаваясь на первом этапе законом движения ЗСУ: $x_1(t)$, $x_3 = 0$ (отслеживается ось x_1), получаем из (7) законы изменения обобщенных координат:

$$\begin{aligned} q_{3,2} &= \arcsin (-P/2 \pm \sqrt{P^2/4 - q}); \\ q_4 &= \arccos [(x_1 - h_p)^2 + h_k^2 - l_c^2 - l_p^2] / 2l_c l_p, \end{aligned} \quad (8)$$

где

$$\begin{aligned} P &= -h_k [(x_1 - h_p)^2 + h_k^2 + l_c^2 - l_p^2] / l_c [h_k^2 + (x_1 - h_p)^2]; \\ g &= [[(x_1 - h_p)^2 + h_k^2 + l_c^2 - l_p^2]^2 / 4l_c^2 - (x_1 - h_p)^2] / (x_1 - h_p)^2 + h_k^2. \end{aligned}$$

Для РМЛМ с параметрами: $h_k = 2$ м, $l_c = 3,5$ м; $l_p = 2,25$ м и $h_p = 0,5$ м имеем:

$$\begin{aligned} p &= -0,6 \frac{(x_1 - 0,5)^2 + 11,2}{(x_1 - 0,5)^2 + 4}; \\ g &= \frac{1}{(x_1 - 0,5)^2 + 4} \left[\frac{[(x_1 - 0,5)^2 + 11,2]^2}{49} - (x_1 - 0,5)^2 \right]; \\ q_4 &= \arccos [(x_1 - 0,5)^2 - 13,3] / 15,75. \end{aligned}$$

На втором этапе ЗСУ движется по закону: $x_1 = \text{const} = x_{1g}$, $x_3(t)$ (отслеживается ствол дерева). Из (7) можно получить необходимый закон наведения для этого этапа.

ЛИТЕРАТУРА

[1]. А. с. 978783 СССР, МКИЗ А 01 G 23/08. Лесозаготовительная машина / В. А. Александров, В. Н. Меньшиков (СССР).— № 3305499/29-15; Заявлено 19.06.81, Бюл. № 45.— С. 9. [2]. Бобров Р. Защитные леса // Сельская жизнь.— 1980.— 8 авг. [3]. Коноплев В. А. Адаптивное программное управление антенной установкой судна космической навигации // Теория адаптивных систем и ее применение: Тез. докл. Всесоюз. науч.-техн. конф.— Л.: Наука, 1983.— С. 61. [4]. Коноплев В. А. Исследование кинематики сложного движения тела с помощью матричных методов // Прикладная механика.— 1984.— Т. 20, № 9.— С. 130—131. [5]. Мороз П. И. Выборочные рубки в таежных лесах.— М.: Лесн. пром-сть, 1982.— 127 с. [6]. Организация технического зрения транспортных роботов / В. А. Веселов, О. А. Кононов, В. А. Коноплев, В. Г. Кузнецов // IX Всесоюз. науч.-техн. конф.— Ереван, 1983.— С. 230.