

М 498406

МОСКОВСКИЙ ОРДЕНА ЛЕНИНА, ОРДЕНА ОКТЯБРЬСКОЙ РЕВОЛЮЦИИ И ОРДЕНА
ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ Н.Э. БАУМАНА

На правах рукописи

Экс. № _____

УДК 621 .-38 01

ФАН ТХАНЬ НАМ

ГРУППОВАЯ РАБОТА РОБОТОВ ПРИ СБОРКЕ И ПОГРУЗКЕ

05.02.05 Роботы и манипуляторы и
РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

МОСКОВСКИЙ ОРДЕНА ЛЕНИНА, ОРДЕНА ОКТЯБРЬСКОЙ РЕВОЛЮЦИИ И ОРДЕНА
ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ Н.Э. БАУМАНА

На правах рукописи

Экз. № _____

УДК 621 . 38

ФАН ТХАНЬ НАМ

ГРУППОВАЯ РАБОТА РОБОТОВ ПРИ СБОРКЕ И ПОГРУЗКЕ

05.02.05 Роботы и манипуляторы

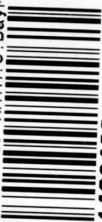
Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

МОСКВА - 1991

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана



1498406

Фан Т. Н. Групповая работа р

Работа выполнена в институте машиноведения им. А.А.Благонравова
АН СССР

Научный руководитель - доктор технических наук, профессор
Чиннов П.И.

Официальные оппоненты - доктор технических наук, профессор
Митрофанов В.Г.
- кандидат технических наук
Рыбкина Л.И.

Ведущая организация: Войсковая часть 26266

Защита состоится " 30 " 12 1991 г. в 10 часов

на заседании специализированного совета К053.15.06 в Московском
государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана по
адресу: г. Москва, 107005, 2-я Бауманская, д.5

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского
государственного технического университета им. Н.Э. Баумана

Автореферат разослан " 29 " 11 1991 г.

Ученый секретарь специализированного совета



Максимов А.И.

Рассматриваются вопросы группового применения роботов для выполнения операций сборки и погрузки. Выбор области исследования обусловлен, с одной стороны, насущными практическими потребностями современного производства, а с другой — недостаточной научной проработкой вопросов группового движения роботов, в первую очередь синхронизации и оптимизации. Одним из путей повышения эффективности функционирования и надежности робота является оснащение их высококачественными системами автоматического управления.

В настоящее время робототехника является обширной областью науки, включающей как различные разделы механики (кинематику, динамику), так и вопросы теории управления (устойчивость, точность, надежность и оптимальность). Теоретические основы динамики робототехнического комплекса (РТК) исследуются многими учеными в СССР и за рубежом. Отметим работы Волчкенича Л.И., Белянина П.Н., Чинаева П.И., Воробьева Е.И., Сосонкина В.Л..

Цель работы. Разработка методов анализа и синтеза управления группой роботов, выполняющих операции сборки и погрузки а также практических схем и программ, обеспечивающих оптимизацию процессов сборки и погрузки.

Научная новизна. Получены следующие научные результаты:

математические модели групповой работы роботов при выполнении операций сборки и погрузки;

алгоритмы распознавания типов деталей в процессе сборки, основанные на кодировании развертки и разложении сканирующего сигнала по производным;

модель и алгоритмы сборки пространственных конструкций (форм) и погрузочного мобильного комплекса.

Методы исследований. Использованы методы теории системного анализа, теоретической механики, математического моделирования, теории автоматического управления и оптимизации многомерных систем.

Достоверность результатов. Подтверждается математическим моделированием на ПЭВМ IBM PC/AT синтезированных конструкций и алгоритмов. Машинные эксперименты проводились с привлечением графических программ, что обеспечивало визуализацию полученных результатов и облегчало их анализ. Практическая проверка на реальных образцах

также подтвердила основные результаты исследования.

Публикации. По теме диссертации опубликованы две научные работы.

Реализация результатов. Результаты диссертационной работы внедрены и нашли практическое использование в Институте машиноведения им. А.А. Благонравова АН СССР, НПО "Автоэлектроника", МНИИМОЖ. Результаты использовались в народном хозяйстве Социалистической Республики Вьетнам на фирмах Ликсин, Вьеттроник, станкостроительном заводе г. Хошимин.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались на научно-технических семинарах Института машиноведения им. А.А. Благонравова АН СССР, НПО "Автоэлектроника", Всесоюзной конференции "Высокопроизводительное оборудование и прогрессивные технологии в машиностроении" (г. Красногорск, Московская обл., июнь 1991 г.).

Структура работы. Диссертация состоит из предисловия, четырех глав, заключения, списка литературы и приложения. Общий объем 120 стр.

В главе I анализируется применение роботов в промышленно развитых странах, описаны направления развития промышленных роботов, робототехнических комплексов (РТК) и гибких производственных систем (ГПС), а также факторы, связанные с необходимостью обеспечения высокой эффективности использования одновременно групп различного технологического и вспомогательного оборудования, что обусловило необходимость исследования групповой работы (взаимодействия) роботов. Выделяются основные показатели, характеризующие эффективность совместной работы группы роботов.

В главе 2 анализируются исходные предпосылки исследования РТК, рассмотрены общие принципы построения кинематической, геометрической, динамической схем и автоматического управления роботов, сформулированы рассматриваемая задача и методы ее решения. Описана схема управления роботами, построенная на основе уравнений динамики звеньев одного робота. Динамические уравнения составлены с учетом кинетических уравнений, которые обычно выражают зависимость координат схвата от обобщенных координат $q_1 = \varphi_1, q_2 = \varphi_2, q_3 = \varphi_3$.

С точки зрения механики робот можно рассматривать как разомкнутую цепь, которая состоит из звеньев, последовательно соединенных вращательными или поступательными сочленениями, приводимыми в движение силовыми приводами. Для конкретного робота по известному вектору присоединенных углов $q(t)$ и заданным геометрическим параметрам звеньев можно найти векторы присоединенных переменных робота. Таким образом, робот представляет собой пространственный механизм с несколькими степенями подвижности. Трудность анализа таких систем общеизвестна.

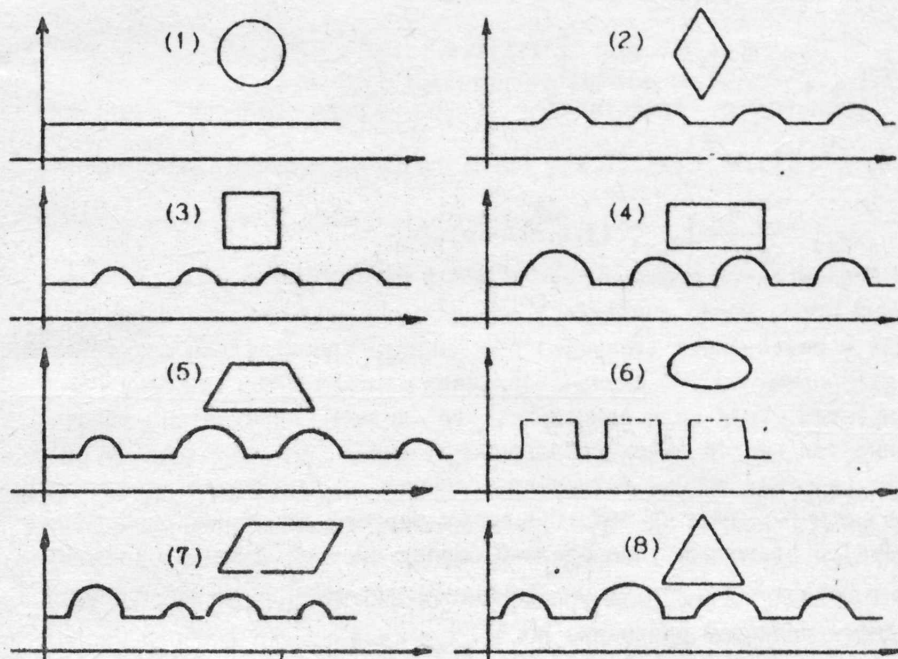


рис. 1

Технологический процесс сборки состоит из двух этапов: подготовительного и самого этапа сборки. На подготовительном этапе осуществляется распознавание деталей, расстановка их в соответствии с технологией и подготовка движений робота, сценарий его действий. Предлагается оригинальный способ распознавания деталей по изготовленному эталону. Собираемую деталь можно различать по

одной из поверхностей. Плоская поверхность должна быть развернута вокруг центра копирующим устройством и превращена в кривую. Для каждой из фигур будут свои копирующие графики, по которым можно распознавать разные фигуры (см. рис.1).

Основным различительным признаком является экстремум. Если применять корреляционные функции, то они в точках экстремума обращаются в нуль. Их можно принять за базовые точки при представлении кривых. Так формируется алгоритм распознавания.

1. Определяем точки экстремума $t, t-\tau_1, t-\tau_2, \dots, t-\tau_n$.

2. Вычисляем корреляционные функции

$$R(\tau_j) = \lim_{T \rightarrow \infty} \int_0^T X(t)X(t-\tau_j) dt.$$

3. Производные представляем в виде ряда базисных функций

$X^{(1)}(t), X^{(2)}(t), \dots, X^{(n)}(t)$ и находим требуемые коэффициенты

$$a_{ij} = \frac{d^j R}{dt^j} \Big|_{t_j} \quad (j=1, 2, \dots, n).$$

4. Решаем систему относительно любой переменной и их производных. Каждый образ можно выдавать в специальном коде. Можно записать в кодах и нестационарную (текущую) информацию. Сопоставляем текущий код с эталонами, и в случае сильного расхождения деталь заново кодируется. Если коды совпадают, то деталь передается роботам. Начинается второй этап - собственно сборки.

Разработана точная технология сборки. Эталонная траектория схватов передается на ЭВМ. Сравнивая текущее состояние (координаты схвата) с эталонным, определяем ошибку системы. Обычно уравнение роботов задано, выбираем траекторию сборки $\Phi(X_v, X_j, u, t) = 0$.

Дифференцируем уравнение по t :

$$\frac{\partial \Phi}{\partial X_v} \frac{dX_v}{dt} + \frac{\partial \Phi}{\partial X_j^*} \frac{dX_j^*}{dt} + \frac{\partial \Phi}{\partial u} \frac{du}{dt} + \frac{\partial \Phi}{\partial t} = 0$$

Если система стационарная, то $\partial \Phi / \partial t = 0$. Если вместо dX_v / dt и dX_j^* / dt подставить уравнения роботов, получим уравнение, которое "связывает" движение обоих роботов и их эталонные траектории.

При погрузке необходима синхронизация взаимодействия в группе. Два робота на тележке берут груз, поднимают его и передают

третьему роботу в вагоне. Автоматизация процесса сводится к синхронизации действий двух нижних роботов и передаче груза на высоту (на полки вагона). Здесь для двух роботов приняты пространственные координаты, а для третьего - угловые координаты.

Уравнения координат схвата первого робота (на тележке):

$$X_{11} = R_1 \cos(\varphi_1 + \beta_1),$$

$$X_{12} = R_1 \sin(\varphi_1 + \beta_1),$$

$$X_{13} = l_1 - l_2 \cos \varphi_2 - l_3 \cos \beta_3 - l_4,$$

где $R_1 = R_0 + R_2$, $R_0 = l_2 \sin \varphi_2$, $R_2 = l_3 \sin \beta_3$, $\beta_3 = \varphi_2 + \varphi_3$;

$$X_{11} = [l_2 \sin \varphi_2 + l_3 \sin(\varphi_2 + \varphi_3)] \cos(\varphi_1 + \beta_1),$$

$$X_{12} = [l_2 \sin \varphi_2 + l_3 \sin(\varphi_2 + \varphi_3)] \sin(\varphi_1 + \beta_1),$$

$$X_{13} = l_1 - l_2 \cos \varphi_2 - l_3 \cos \beta_3 - l_4.$$

В обобщенных координатах

$$X_{11} = [l_2 \sin q_2 + l_3 \sin q_3] \cos q_1,$$

$$X_{12} = [l_2 \sin q_2 + l_3 \sin q_3] \sin q_1,$$

$$X_{13} = l_1 - l_2 \cos q_2 - l_3 \cos q_3 - l_4.$$

Продифференцируем эти уравнения.

Уравнения координат второго и третьего робота определяются аналогично.

Зададим начальное состояние схватов первого робота:

$X_{1j}(0) = X_{1j0}$, $j = 1, 2, 3$. Установим координаты груза (ручки для второго и третьего роботов): a_2, b_2, c_2 и a_3, b_3, c_3 . Учтывая кинематику второго и третьего роботов, рассчитаем траектории их схватов при начальных значениях. Траектория движения

обоих роботов одинаковая: $m_G \ddot{X}_G = F_2 + F_3$. Центр тяжести груза перемещается в конечную точку: $a_{ГК}, b_{ГК}, c_{ГК}$. Координаты штабелера до склада, где разгружается груз, $(X, Y, Z)_{шт}$. Кинематика штабелера

$$m_{шт} \ddot{X}_{шт} = F_{шт}$$

На втором этапе распределение груза с помощью штабелера по стеллажам вагона осуществляется системой управления, координирующей номер груза с местом в стеллаже. Робот в вагоне должен

передать на штабелер любой груз, а дальше через местный диспетчер установить программу терминального управления с размещением груза в гнезде стеллажа. Представим угловую скорость ω_s s-го звена робота относительно базовой системы координат как сумму относительных угловых скоростей звеньев с меньшими номерами:

$$\omega_s = \sum_{j=1}^s \dot{\phi}_j Z_{j-1}$$

где Z_{j-1} - ось вращения j-го сочленения, заданная в базовой системе координат.

Линейная скорость s-го звена в базовой системе координат

$$V_s = \sum_{k=1}^{s-1} \left[\left[\sum_{j=1}^k \dot{\phi}_j Z_{j-1} \right] P_k^* \right] + \left[\left[\sum_{j=1}^s \dot{\phi}_j Z_{j-1} \right] \bar{c}_s \right],$$

где $\bar{c}_s$ - вектор относительного положения центра масс s-го звена и начала (1-1)-й системы координат;

Кинетическая энергия s-го звена $K_s = (K_s)_\Pi + (K_s)_B$,

$$\frac{d}{dt} \left[\frac{\partial (K_s)_\Pi}{\partial \dot{\phi}_1} \right] - \frac{\partial (K_s)_B}{\partial \phi_1} = \frac{d}{dt} \left[m_s V_s \frac{\partial V_s}{\partial \dot{\phi}_1} \right] - m_s V_s \frac{\partial V_s}{\partial \phi_1}.$$

Потенциальная энергия робота: $PE = \sum_{s=1}^n P_s$ где P_s - потенциальная энергия s-го звена.

$$P_s = g m_s r_s - g m_s (p_{1-1} + p_1^* + \dots + c_s).$$

Момент робота:

$$\tau_1 = \frac{d}{dt} \left[\frac{\partial (KE)_\Pi}{\partial \dot{\phi}_1} \right] - \frac{\partial (KE)_B}{\partial \phi_1} + \frac{d}{dt} \left[\frac{\partial (KE)_s}{\partial \dot{\phi}_1} \right] - \frac{\partial (KE)_s}{\partial \phi_1} - \frac{\partial (EP)}{\partial \phi_1}.$$

Ввиду наличия нелинейных элементов точные аналитические методы применить нельзя. Поэтому для анализа группового движения роботов предлагается применять графоаналитический метод, в частности метод Д.А. Башкирова.

В главе 3 многомерные задачи группового управления роботами рассматриваются на примере роботов, осуществляющих операции доения на специализированных автоматизированных фермах.

Кинематика роботов описывается уравнением в матричном виде

$$U_a = A \dot{A}_a, U_b = B \dot{A}_b.$$

Для звена робота в режиме вращения применим уравнение Д'Аламбера

$$J_a \frac{d^2 \Delta \varphi_a}{dt^2} + \nu \frac{d \Delta \varphi_a}{dt} + c_a \Delta \varphi_a = \Delta M_{вр} - \Delta M_{сопр},$$

где $J_a \frac{d^2 \varphi_a}{dt^2}$ - инерционная сила, $\nu \frac{d \varphi_a}{dt}$ - демпфирующая сила;

$c_a \varphi_a$ - сила упругости, $M_{вр}(\varphi_a, U_a)$ - вращающий момент;

$M_{сопр}(\varphi_a, f_a)$ - момент сопротивления.

Исследования устойчивости проводится на основе уравнений обоих роботов. Предположим, что роботы работают независимо. Соединим их посредством ЭВМ, которую будем считать регулятором. Тогда векторные компоненты U_a , U_b будут связаны с дискретной передаточной матрицей ЭВМ M следующими соотношениями:

$$\begin{bmatrix} \Delta U_a \\ \Delta U_b \end{bmatrix} = M \begin{bmatrix} \Delta \Delta_a \\ \Delta \Delta_b \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} U_a \\ U_b \end{bmatrix} = K \begin{bmatrix} \Delta \Delta_a \\ \Delta \Delta_b \end{bmatrix}.$$

Качество процесса, выполняемого с помощью роботов, определяется согласно теории устойчивости по формуле

$$D(1)(E + W)^{-1}W = 0.$$

Предлагается гибкая система управления роботом-сортировщиком (рис.2). Изделия движутся по конвейеру и сортируются по направлению. Накопитель каждого направления связан с конвейером

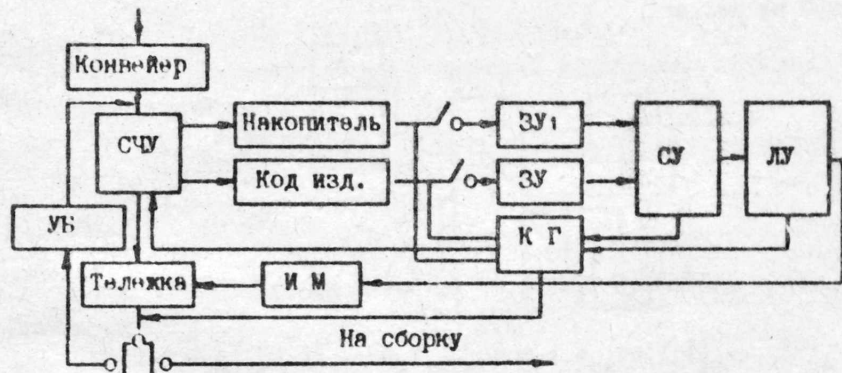


Рис.2

тележкой, и транспортерами. Каждое изделие снабжено специальной карточкой с кодом направления.

Командный генератор (КГ) подает команду считывающему устройству

(СЧУ), которое считывает код изделия, и одновременно команду остановки конвейера. Считанные коды записываются в запоминающие устройства (ЗУ1 и ЗУ2). Далее коды сравниваются в сравнивающем устройстве (СУ). Если коды накопителя и изделия совпадают, КГ дает команду исполнительному механизму (ИМ), который связан с механизмом управления движением тележки и устройством включения транспортера. Параллельно ИМ дает сигнал КГ, который контролирует работу логического устройства (ЛУ) и устройства.

Если код накопителя не совпадает с кодом изделия, то ИМ дает подтверждение ЛБ, а КГ - команду ЛУ на запись в ЗУ2 следующего кода накопителя.

Запоминающие устройства, сравнивающее устройство и генератор можно "спрятать" в робот, а исполнительный механизм представляет собой этот самый робот. Конвейер, изделия и накопитель играют роль объекта.

Если применить принципы инвариантности и адаптации, уравнения преобразуются в систему уравнений, которой соответствует схема на рис. 3.

$$\Delta \dot{\omega} = \rho + \Gamma, \quad \rho = \frac{1}{P} \Omega; \quad W_P \Omega = k_P u; \quad W_{np} u = k_{np} \Delta u;$$

$$\Delta \dot{u} = \Delta \omega + \eta, \quad \Delta \omega = \omega^* - \omega + a\Gamma; \quad \eta = C_{np} (\Delta \omega)^2.$$

Составим уравнение движения первого робота в соответствии со схемой на рис. 4:

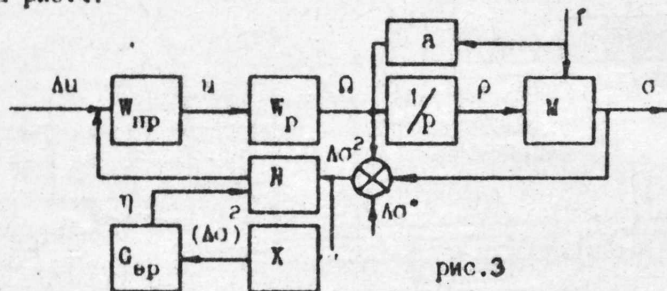


рис. 3

$$X_{11} = [1_2 \sin q_2 + 1_3 \cos q_3 + 1_4 \cos q_4] \cos q_1,$$

$$X_{12} = [1_2 \sin q_2 + 1_3 \cos q_3 + 1_4 \cos q_4] \sin q_1,$$

$$X_{13} = 1_1 + 1_2 \cos q_2 + 1_3 \sin q_3 + 1_4 \sin q_4.$$

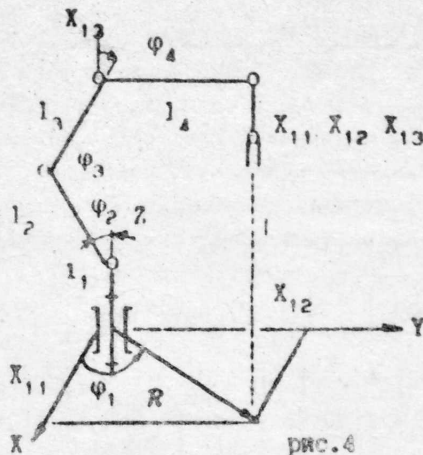


рис. 6

Обозначив

$$b_{11} = [l_2 \sin \varphi_2 + l_3 \cos \varphi_3 + l_4 \cos \varphi_4] (-\sin \varphi_1),$$

$$b_{12} = l_2 \cos \varphi_2 \cos \varphi_1, \quad b_{13} = -l_3 \cos \varphi_3 \cos \varphi_1, \quad b_{14} = -l_4 \sin \varphi_4 \cos \varphi_1,$$

после дифференцирования уравнений получим

$$\frac{dX_{11}}{dt} = b_{11} \dot{q}_1 + b_{12} \dot{q}_2 + b_{13} \dot{q}_3 + b_{14} \dot{q}_4.$$

...

$$\frac{dX_{13}}{dt} = b_{31} \dot{q}_1 + b_{32} \dot{q}_2 + b_{33} \dot{q}_3 + b_{34} \dot{q}_4.$$

Уравнения движения второго робота аналогичны. Теперь имеем исходные уравнения

$$\frac{dX_{11}}{dt} = f_1, \quad \frac{dX_{12}}{dt} = f_2, \quad \frac{dX_{13}}{dt} = f_3 \quad \text{для первого робота,}$$

$$\frac{dX_{21}}{dt} = f_4, \quad \frac{dX_{22}}{dt} = f_5, \quad \frac{dX_{23}}{dt} = f_6 \quad \text{для второго робота.}$$

Введем сопряженные координаты: $P_{11}, P_{12}, P_{13}, P_{21}, P_{22}, P_{23}$ и гамильтонианы

$$H_1 = f_1 P_{11} + f_2 P_{12} + f_3 P_{13}, \quad H_2 = f_4 P_{21} + f_5 P_{22} + f_6 P_{23}.$$

Сопряженные уравнения:

$$\frac{dP_{11}}{dt} = -\frac{\partial H_1}{\partial X_{11}} = -\frac{\partial (f_1 P_{11} + f_2 P_{12} + f_3 P_{13})}{\partial X_{11}} = -\frac{\partial H_1}{\partial q_1} \frac{dq_1}{\partial X_{11}} = -P_{11} \frac{\partial H_1}{\partial q_1}.$$

...

$$\frac{dP_{13}}{dt} = -\frac{\partial H_1}{\partial X_{13}} = -\frac{\partial (f_1 P_{11} + f_2 P_{12} + f_3 P_{13})}{\partial X_{13}} = \frac{\partial H_1}{\partial q_3} \frac{dq_3}{\partial X_{13}} = -P_{13} \frac{\partial H_1}{\partial q_3}.$$

$$\frac{dP_{11}}{P_{11}} = -\frac{\partial H_1}{\partial q_1} dt, \quad \frac{dP_{12}}{P_{12}} = -\frac{\partial H_1}{\partial q_2} dt, \quad \frac{dP_{13}}{P_{13}} = -\frac{\partial H_1}{\partial q_3} dt.$$

Принтегрировав эти уравнения, получим:

$$P_{11} = e^{2(l_2 \sin q_1 \sin q_2 + l_3 \sin q_1 \cos q_3 + l_4 \sin q_1 \cos q_4)} \Big|_0^{t_k},$$

$$P_{12} = e^{2l_2 \sin q_1 \cos q_2} \Big|_0^{t_k}, \quad P_{13} = e^{l_3 \cos q_3} \Big|_0^{t_k},$$

следовательно,

$$H_1 = (e^{2\theta_1 t_k} - 1)(A_{11}X_{11} + B_{11}U_{11}) + (e^{2\theta_2 t_k} - 1)(A_{12}X_{12} + B_{12}U_{12}) +$$

$$+ (e^{2\theta_3 t_k} - 1)(A_{13}X_{13} + B_{13}U_{13}),$$

где $\theta_1 = l_2 \sin q_1 \sin q_2 + l_3 \sin q_1 \cos q_3 + l_4 \sin q_1 \cos q_4$,

$$\theta_2 = l_2 \sin q_1 \cos q_2, \quad \theta_3 = l_3 \cos q_3;$$

$$\frac{\partial H_1}{\partial U_{11}} = (e^{2\theta_1 t_k} - 1) B_{11} U'_{11},$$

$$\dots$$

$$\frac{\partial H_1}{\partial U_{13}} = (e^{2\theta_3 t_k} - 1) B_{13} U'_{13}.$$

В главе 4 динамика робототехнических комплексов рассматривается на примере сборки пространственных форм. Рассмотрим куб в исходном состоянии рис.5. Уравнение прямой AB в пространстве:

$$\frac{X - X_a}{X_b - X_a} = \frac{Y - Y_a}{Y_b - Y_a} = \frac{Z - Z_a}{Z_b - Z_a}.$$

Точка B перемещается в точку C, одновременно точка D - в точку A. Уравнение прямой AD в пространстве:

$$\frac{X - X_a}{X_d - X_a} = \frac{Y - Y_a}{Y_d - Y_a} = \frac{Z - Z_a}{Z_d - Z_a}.$$

Вследствие перемещений точек B и D наблюдаются перемещения точек C, G, E, F и K. Используя уравнение прямых, на которых находятся вершины куба, можем определить новые значения всех

вершин, за исключением закрепленной вершины А.

Кинематика куба в целом определяется постепенно, и мы можем рассчитать новое положение куба $A, B_1, C_1, D_1, E_1, F_1, G_1, K_1$. Новых точек будет семь (21 координата). Следовательно, для их определения нужно 21 уравнение. Уравнение каждой линии в пространстве дает три уравнения. Так будут найдены новые координаты точки В, которая перейдет в С или G.

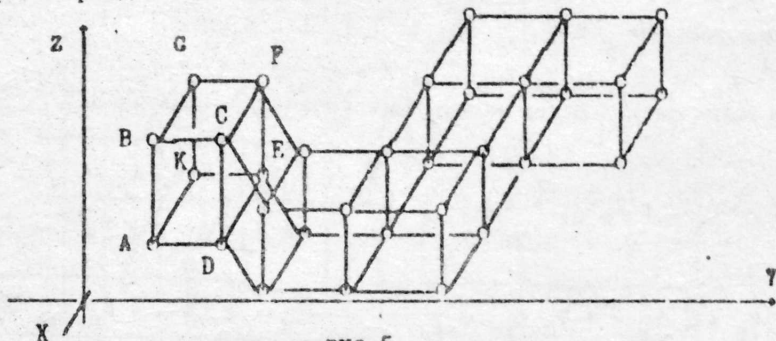


рис. 5

Находим координаты X_{b1}, Y_{b1}, Z_{b1} точки B_1 . Аналогично находим точку D. Сложнее, когда точка (например, C) участвует в двух уравнениях за счет перемещения прямых BC и DC. В этом случае решаем каждое уравнение по той же схеме. Теперь остается найти новое суммарное перемещение $\bar{X}_0, \bar{Y}_0, \bar{Z}_0$. Поскольку все происходит в пространстве, то составляющие будут находиться на одних и тех же осях. Их можно складывать как скаляры:

$$\bar{X}_0 = X_{01} + X_{02}, \bar{Y}_0 = Y_{01} + Y_{02}, \bar{Z}_0 = Z_{01} + Z_{02}.$$

Так определяются новые точки B_1, D_1 и C_1 .

Постепенное решение позволяет определить статические состояния и кинематику куба. Перемещение стержней, связанных между собой, происходит путем поворота их вокруг определенного угла. При этом важно знать массу, момент инерции, расположение центра масс.

Уравнение динамики куба :

$$J \Delta \ddot{\varphi} + \nu \Delta \dot{\varphi} + C \Delta \varphi = F_{пр} R \pm F_{тр}.$$

Введя $\Delta \varphi = \omega t$ и разделив на коэффициент ν , получим безразмерное уравнение динамики куба

$$T \frac{d\omega}{dt} + \omega = -K_{\phi} \Delta \phi + K_r \Delta \dot{X}, \quad \frac{d\Delta \phi}{dt} = \omega.$$

Пусть требуется соединить два куба. Тогда к динамике двух кубов, каждое движение которых описывается своим уравнением, следует добавить динамику поступательного движения $\ddot{x} = F$. Если конструкция состоит из n кубов и роботов, то система будет состоять из $2n + m$ уравнений.

$$\begin{aligned} \text{Общие решения: } X &= K_{rx} \phi_{ox}^2 t^2 + \dot{X}_n t + X_n, \\ Y &= K_{ry} \phi_{oy}^2 t^2 + \dot{Y}_n t + Y_n, \quad Z = K_{rz} \phi_{oz}^2 t^2 + \dot{Z}_n t + Z_n. \end{aligned}$$

В каждом случае решая квадратные уравнения, получаем:

$$t_{Ax} = \frac{K_{rx} \phi_{ox}^2 t_{kx}^2 + \dot{X}_n t_{kx} + X_n - X_n}{2 K_{rx} \phi_{ox}^2} = \frac{-X_n + \sqrt{\dot{X}_n^2 - 4 X_n K_{rx} \phi_{ox}^2}}{2 K_{rx} \phi_{ox}^2},$$

$$t_{ky} = \frac{-Y_n + \sqrt{\dot{Y}_n^2 - 4 Y_n K_{ry} \phi_{oy}^2}}{2 K_{ry} \phi_{oy}^2}, \quad t_{kz} = \frac{-Z_n + \sqrt{\dot{Z}_n^2 - 4 Z_n K_{rz} \phi_{oz}^2}}{2 K_{rz} \phi_{oz}^2}.$$

Так как были заданы различные значения ϕ_o , K_p и скорости, получаем различные время достижения точки А по различным осям. Тактически узел перемещается как единое целое, и поэтому в качестве t_k следует взять t_{kmax} .

Что касается динамики восстановления каждого куба, то при их тождественности можно считать t_b одинаковым. Время всего процесса t будет $t = t_{ot} + 2t_b$.

Для исследования устойчивости и синтеза параметров применим метод пространственных логарифмических частотных характеристик.

Наиболее важный показатель качества РТК - точность сборки.

$$e^2 = e_1^2 + e_2^2 + e_3^2, \quad e_1 = X - X^*, \quad e_2 = Y - Y^*, \quad e_3 = Z - Z^*.$$

Уравнения системы управления робота (рис.6)

$$\Omega \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \Phi_1(\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3) \text{ или}$$

$$X = \Phi_{1x}(\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3); \quad Y = \Phi_{1y}(\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3); \quad Z = \Phi_{1z}(\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3);$$

$$\omega_1 = T_1 \frac{d\varphi_1}{dt}; \quad \omega_2 = T_2 \frac{d\varphi_2}{dt}; \quad \omega_3 = T_3 \frac{d\varphi_3}{dt};$$

$$W_p \omega = U \text{ или } U_1 = W_{p1} \omega_1; \quad U_2 = W_{p2} \omega_2; \quad U_3 = W_{p3} \omega_3;$$

$$U = K \Delta U \text{ или } U_1 = K_1 \Delta U_1; \quad U_2 = K_2 \Delta U_2; \quad U_3 = K_3 \Delta U_3;$$

$$W_{\text{внм}} \Delta U = \Delta \Omega \text{ или } \varepsilon_1 = W_{\text{внм1}} \Delta U_1; \quad \varepsilon_2 = W_{\text{внм2}} \Delta U_2; \quad \varepsilon_3 = W_{\text{внм3}} \Delta U_3.$$

Исключив лишние переменные, найдем выражение для ошибок через передаточные функции.

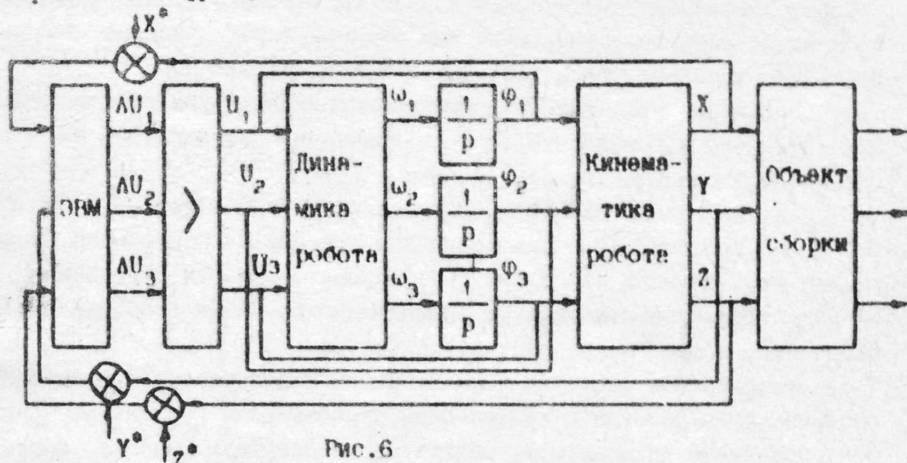


Рис. 6

При групповом движении важно оценить устойчивость совместного движения роботов. Для этого предлагается использовать критерий Гурвица. Более общим показателем является эффективность работы, выраженная как отношение полезной работы к затраченной энергии. Воспользуемся динамическими характеристиками

$$(H W_{\text{пр}} W_p M a p^3 + k_p k_{\text{пр}}) \Delta \sigma + k_{\text{пр}} k_p G_{\text{вр}} (\Delta \sigma) = \\ = H W_{\text{пр}} W_p M a p f - H W_{\text{пр}} W_p p f.$$

$$A(\Delta \sigma)^2 + B(p)\Delta \sigma = C p^3 f - D p f, \text{ где } A = k_{\text{пр}} k_p G_{\text{вр}}.$$

$$B(p) = H W_{\text{пр}} W_p M p^3 + k_p k_{\text{пр}}, \quad C = H W_{\text{пр}} W_p M a, \quad D = H W_{\text{пр}} W_p.$$

Решая уравнение нелинейное относительно σ , получаем:

$$\Delta \sigma = \frac{-B(p) \mp \sqrt{B^2(p) - 4 A (D p f - C p^3 f)}}{2 A}$$

Как видно, точность $\Delta\delta$ зависит от A , $B(p)$ и f . Так как один из показателей качества - это время, то, построив $\sigma(t)$, найдем

$$t = \frac{1}{h} \frac{\ln(\sigma_{20} - \sigma_{10})}{\varepsilon},$$

где h - мнимый корень (расстояние от мнимой оси); σ_{20} и σ_{10} - начальное и конечное запаздывание σ ; ε - заданная точность.

В результате проведенных исследований можно сделать следующие выводы.

1. Разработаны математические модели совместного функционирования нескольких роботов, учитывающие как механические принципы взаимодействия отдельных подсистем, так и законы управления.

2. Повышение эффективности функционирования групп роботов (технологического и вспомогательного назначения) достигается за счет оптимальной синхронизации их работы.

3. Синтезированы алгоритмы оптимального управления группами роботов, построенные на основе принципа максимума Понтрягина. Проведенные исследования позволяют синтезировать области устойчивости, оценить эффективность законов управления группами роботов оптимальность, общее быстродействие, качество.

4. Разработаны средства компьютерного моделирования функционирования групп роботов с графическим отображением различных режимов управления на мониторе, облегчает экспертную оценку корректности результатов.

6. Полученные результаты апробированы и практически использованы в промышленных разработках при проектировании комплексов сборки ферменных пространственных конструкций и электрооборудования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фан Тхань Нам. Групповая работа роботов при сборке и погрузке // Высокопроизводительное оборудование и прогрессивные технологии в машиностроении. Тезисы докл. Всесоюзной конференции - М., 1991.
2. Фан Тхань Нам. Групповая работа роботов при сборке. - М.: ИМАШ АН СССР, 1990. - 132 с.

Подписано к печати _____, Объем 1,0 п.л. Зак. 9 Тир. 100 экз.

Типография ИПО "Автоэлектроника"