На правах рукописи

ЧИСТЯКОВ Анатолий Юрьевич

РОБОТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ С МЕХАНИЗМАМИ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ НА ОСНОВЕ ПОДВЕСНЫХ ПЛАТФОРМ

Специальность 05.02.05 – Роботы,
мехатроника и робототехнические системы

Автореферат диссертации на соискание
ученой степени кандидата технических наук

Санкт-Петербург
2006

Работа выполнена в государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования "Иркутский государственный университет путей сообщения"

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент
Волков Андрей Николаевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Тисенко Виктор Николаевич

кандидат технических наук
Унтилов Александр Алексеевич

Ведущая организация: ОАО "Иркутский научно-исследовательский институт авиационной технологии и организации производства" (г. Иркутск).

Защита состоится 6 июня 2006 г в 16 часов на заседании диссертационного Совета Д 212.229.12 при ГОУ ВПО "Санкт-Петербургский государственный политехнический университет" по адресу: 195251, С-Петербург, Политехническая 29, 1-й учебный корпус, ауд. 41.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ГОУ ВПО "Санкт-Петербургский государственный политехнический университет".

Автореферат разослан _____ апреля 2006 г.

Ученый секретарь диссертационного совета Д 212.229.12
кандидат технических наук, доцент Евграфов А.Н.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации. В последние годы в робототехнике все более широкое применение находят механизмы параллельной структуры. Робототехнические системы, имеющие механизмы с параллельными кинематическими цепями (механизмы параллельной структуры), в первую очередь построенные по схеме шестистепенной платформы Стюарта, отличаются тем, что у любого из них выходное звено (платформа) имеет систему звеньев переменной (управляемой) длины, каждое такое звено одним концом шарнирно соединяется с неподвижным основанием, а другим – с перемещаемой платформой. Такие системы обладают рядом важных достоинств, таких как высокая жесткость, надежность, компактность. Платформа Стюарта является объектом многих научных исследований, в числе которых следует отметить в первую очередь работы А.Ш. Колискора, В.А. Глазунова, А.Ф. Крайнева, Л.И. Тывеса, М.З Коловского, А.В. Слоуща, А.Н. Волкова. В теории механизмов подобные механические системы рассматриваются как частные случаи пространственных многоконтурных рычажных механизмов, самые последние результаты в этой области преимущественно для небольшого числа контуров содержатся в монографии Э.Е. Пейсаха.

Имеются определенные достижения в этом направлении и на практике. Известны примеры удачных конструкций станков, стендов и другого оборудования различного назначения, построенных на механизмах параллельной структуры, краткие сведения об этом поступают из проспектов фирм, технических выставок и т.п.

Как основные недостатки механизмов параллельных структур в роботах и робототехнических манипуляционно-транспортных системах следует отметить малость рабочих зон по сравнению с общими габаритами вследствие большого числа геометрических ограничений и в первую очередь ограниченностью диапазонов длин приводных звеньев, т.е. ходов гидроцилиндров или других линейных приводов.

Между тем существуют возможности значительного совершенствования роботов с механизмами параллельной структуры. Один из путей расширения многообразия принципиальных и схемных решений механизмов параллельной структуры при увеличении рабочих зон связан с применением вместо жестких приводных звеньев (гидроцилиндров или линейных электромеханических приводов с винтовыми передачами) гибких звеньев в виде тросов переменной (управляемой) длины. Особенностью таких систем является то, что производится подвешивание объекта на определенном числе тросов управляемой длины, чтобы изменение длин тросов платформе можно было задавать определенные или произвольные в определенных диапазонах линейные и угловые перемещения. Подвешивание на достаточно больших высотах в свободном пространстве, где отсутствуют препятствия, предоставляет возможности перекрытия больших зон.

В данной диссертации применительно к робототехническим системам с программным автоматическим или автоматизированным управлением прорабатывается указанный способ подвешивания переносимых объектов на системе непараллельных тросов. У подвешенного объекта отнимается определенное число степеней свободы; имеется в виду, что каждый трос, если он натянут, у подвешенного объекта отнимает одну степень свободы. Перемещения платформы осуществляются за счет того, что длины тросов изменяются с помощью управляемых лебедок. Подвешивание только на трех тросах управляемой длины позволяет задавать требуемое положение одной точки объекта, но для задания также и угловой ориентации необходимо использовать другие тросы или иные средства. Подвешивание на шести тросах при правильном их расположении, когда обеспечивается их натяжение, в принципе достаточно для возможности задания требуемых значений всем шести геометрическим параметрам, полностью определяющим положение, поступательные и угловые перемещения объекта подобно тому, как это имело место в шестистепенном механизме платформы Стюарта с жесткими звеньями. Этот принцип однозначного задания на подвесе всех параметров позиционирования и углового ориенти-

рования подвижных платформ был предложен и предварительно проработан применительно к техническому оснащению сцен театров А.Н. Волковым, основные результаты этих исследований изложены в серии опубликованных им работ. До этого подобные робототехнические системы на базе подвесных шестистепенных платформ не использовались и не исследовались.

Функции, которые могут выполнять подобные робототехнические системы разнообразны: перенос грузов в свободных зонах под потолком в закрытых помещениях, наблюдение, охрана открытых территорий и т.п. Причем размеры рабочих зон могут быть большими, порядка многих десятков метров. Отсюда вытекает что тема данной диссертации, посвященной анализу возможностей практического применения и разработке методик расчета и проектирования робототехнических систем на основе подвесных шестистепенных платформ с управляемыми длинами тросов подвеса, является актуальной.

Целью работы является построение математических моделей многоцелевых роботов, имеющих механизмы параллельной структуры на базе многостепенных платформ на подвесах, анализ их свойств и определение путей расширения их рабочих зон применительно к использованию в роботизированных комплексах различного назначения.

Для достижения указанной цели в диссертации ставятся и решаются следующие **основные задачи:**

- формулировка предложений и обоснование перспектив использования робототехнических манипуляционно-транспортных систем параллельной структуры на основе подвесных платформ, позиционируемых и ориентируемых изменением длин тросов путем управления лебедками;

- формулирование и анализ требований к робототехническим манипуляционным системам рассматриваемого типа в зависимости от решаемых прикладных задач и условий функционирования;

- геометрический анализ, решение прямой и обратной задач для типовых схем с шестью степенями подвижности;

- исследование распределений нагрузок на тросы робототехнических систем рассматриваемого типа в статических режимах в зависимости от параметров линейных перемещений и углов поворота;

- формулирование и формализация условий натяжения всех тросов подвеса и определение, исходя из этих условий, областей возможных положений и углов ориентации платформы;

- разработка и обоснование рекомендаций по размещению лебедок, исходя из требований обеспечения заданных рабочих зон и диапазонов углов поворота; выработка и обоснование предложений по расширению областей возможных положений и диапазонов углов поворота платформы;

- определение влияния растяжимости и провисания тросов подвеса платформ робототехнических систем рассматриваемого типа на точность задания линейных перемещений и углов поворота;

- постановка и формализация некоторых задач динамики робототехнических систем рассматриваемого типа;

- проверка на макете новых принципиальных и схемных решений робототехнических манипуляционно-транспортных систем параллельной структуры на основе подвесных платформ.

На защиту выносятся следующие **основные положения:**

- показано, что робототехнические манипуляционные системы параллельной структуры на основе шестистепенных подвесных платформ, жестко фиксируемых в любых положениях в пределах области возможных положений, при размещении всех приводов на неподвижных основаниях позволяют осуществлять в определенных пределах линейные перемещения по трем координатам и вращения вокруг трех осей;

- определены возможности манипуляционных механизмов робототехнических систем параллельной структуры на основе подвесных платформ последовательно с шестью и меньшим числом степеней подвижности, для ряда типовых случаев определены рабочие зоны;

- показано, что для робототехнических манипуляционных систем параллельной структуры на основе подвесных платформ важны выбор мест

расположения лебедок, сформулированы и обоснованы предложения по выбору вариантов схем;

- предложена методика силовых расчетов робототехнических систем параллельной структуры для статических и динамических режимов работы;

- обоснован выбор критериев, которые нужно использовать при выборе параметров робототехнических систем рассматриваемого типа и сформулированы конкретные предложения по численному решению этих задач.

Методы исследования. Геометрические, кинематические, силовые и динамические характеристики манипуляторов исследовались с использованием методов аналитической геометрии, теории механизмов и машин, теоретической и аналитической механики. При составлении программ расчета были использованы пакеты математических вычислений *«Maple»* и «*MathCad»*.

Научная новизна диссертации заключается в следующем:

- проработан новый принцип построения робототехнических манипуляционно-транспортных систем на основе шестистепенных подвесных платформ, управление положением которых осуществляется изменением длин тросов подвеса;

- сформулированы и формализованы условия, при выполнении которых желаемые положения платформы реализуемы;

- разработана и обоснована методика построения границ рабочих областей с учетом ограничений по ходам приводов и непересечения тросов и исключения особых положений;

- предложен и обоснован способ ортогонализации схем робототехнических систем рассматриваемого типа, при которых допускается упрощение систем управления при малых перемещениях и малых углах поворота;

- применительно к задаче позиционирования платформы разработана методика учета растяжимости и определения погрешности позиционирования при провисании тросов подвеса платформы.

Практическая ценность работы.

1. Разработана инженерная методика определения координат размещения лебедок робототехнических систем параллельной структуры на основе подвесных платформ, исходя из необходимости перекрытия заданных зон.
2. Получены аналитические зависимости для построения управляющих программ приводов систем лебедок для получения требуемых положений платформы.
3. Разработана методика определения точности позиционирования и углового ориентирования платформы.
4. Разработана классификация основных компонентов робототехнических систем данного типа, которая может быть положена в основу специализированных баз данных.

Апробация работы и публикации. Основные положения диссертационной работы докладывались на ряде научно-технических конференций в Иркутске, на семинаре кафедры «Автоматы» СПбГПУ а также на IV международной научно-практической конференции в г.Пенза. По результатам диссертационной работы опубликовано 6 печатных работ.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка использованной литературы. Список использованной литературы содержит 111 наименований. Общий объем диссертации 139 страниц, в тексте имеется 39 рисунков.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** обосновывается актуальность темы диссертации, формулируются цель и задачи исследования, а также основные положения, выносимые на защиту, дается краткий обзор содержания диссертации по главам. Основной материал диссертации распределен по пяти главам.

В **первой главе** сначала определяется специфика робототехнических систем на основе подвесных платформ. Научным руководителем данной диссертационной работы А.Н. Волковым предложено вместо модулей приводных звеньев переменной (управляемой) длины с жесткими звеньями использовать модули с гибкими звеньями в виде тросов (рис. 1). Предполагается, что длины свободных участков которых изменяется по программам с помощью автоматически управляемых лебедок.

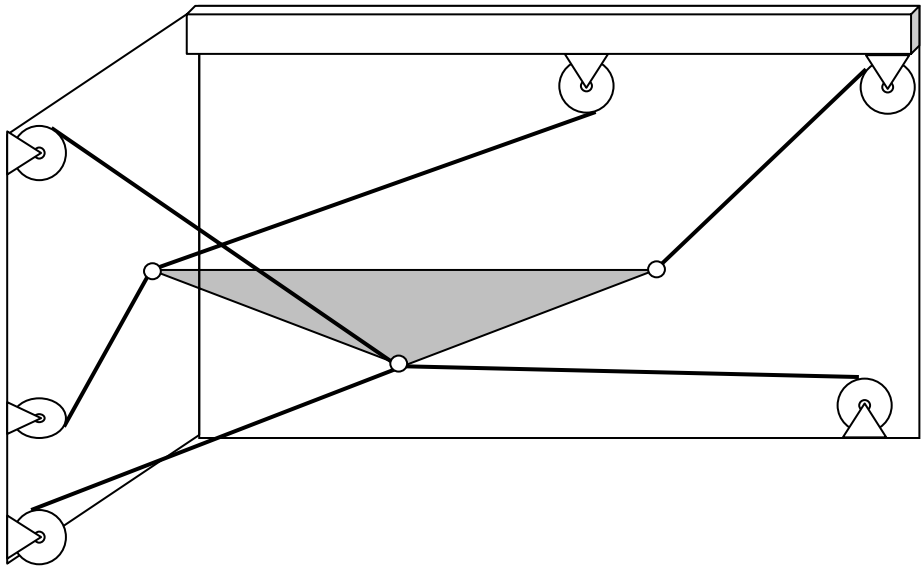

Рис. 1.Схема многостепенного механизма с гибкими звеньями

Очевидно, что схемы многостепенных механизмов при использовании такого принципа могут быть только параллельной структуры. Для упорядочивания многообразия рассматриваемых робототехнических систем на основе подвесных платформ необходима их фасетная (многоаспектная) классификация. Классификационные признаки подобных устройств с их расшифровкой приведены на рис. 2.

Далее в первой главе подробно анализируются перспективные области применения робототехнических систем на основе многостепенных подвесных платформ, устанавливается специфика конкретных приложений: для погрузо-разгрузочных работ в нерасчлененных закрытых помещениях (типа больших ангаров, крытых стадионов) и на открытых пло-

щадках (дворах), окруженных стенами, при монтаже на открытых площадках временных сооружений, состоящих из большого числа громоздких, но не очень тяжелых фрагментов, например в виде ферм или плоских щитов, для контроля или наблюдения за обстановкой или поиска определенных объектов и т.д.

Рис.2. Классификационные признаки робототехнических систем на основе подвесных платформ

Предлагается также использовать робототехнические системы рассматриваемого типа для анализа состояния строительных конструкций на большой высоте. Конкретная специфика может быть учтена при использовании подвесных платформ для наблюдения за транспортными потоками на перекрестках, а также в местах большого скопления людей на малых пространствах. Одна из возможных областей применения в местах, заранее не подготовленных – осмотр в очень ответственных случаях мест аварий и других нештатных ситуаций, в том числе с опасным химическим и радиоактивным загрязнением, когда зона с большим запасом может быть огоро-

жена, необходимо снимать детально карту распределения интенсивности и локализовать пятна загрязнений и когда полностью исключается участие как персонала, так и роботов-разведчиков на колесных или гусеничных шасси. Для этих ситуаций требуется иметь мобильные комплексы рассматриваемого типа с быстро устанавливаемыми высокими опорами.

В серии публикаций А.Н. Волкова применительно к техническому оснащению сцен оперно-балетных театров обсуждается проблематика имитации свободного полета на платформе актеров над планшетом сцены. На выставках и в развлекательных парках для общего обзора сверху с разных точек наряду с монорельсовыми и подвесными дорогами могут быть использованы подвесные робототехнические системы рассматриваемого типа; при этом возможно произвольное, в том числе и управляемое самими пассажирами задание траекторий и, возможно, угловых ориентаций, опускание и подъемы, а также повороты вокруг вертикальной оси. В заключение первой главы формулируются задачи исследования в данной диссертации.

Первая часть **второй главы** посвящена определению места рассматриваемых задач механики робототехнических систем на основе многостепенных подвесных платформ в общей теории роботов с механизмами параллельной структуры. Кратко рассматривается и анализируется метод *l*-координат А.Ш. Колискора, отмечаются присущие ему ограничения (совмещение шарниров). Предлагается новый метод составления геометрических соотношений при произвольном расположении точек закрепления тросов на платформе. Значительное внимание обращено на разработку математического аппарата для геометрического и силового анализа подвесных платформ. Рассматривается такая робототехническая система, у которой лебедки располагаются на неподвижных опорах на разных уровнях, а места закрепления тросов на подвижной платформе произвольны и попарное совмещение этих точек закрепления не требуется.

Третья глава посвящена решению задачи разработки методики определения для шестистепенной платформы на тросовом подвесе области

возможных положений (ОВП) в общем случае в шестимерном пространстве составляющих линейных перемещений и углов поворота. Эта область определяется в этом общем случае как шестимерное тело в шестимерном пространстве любых шести обобщенных координат, чаще всего трех составляющих радиуса-вектора, трех координат x, y, z центра платформы и трех углов поворота (например, углов Эйлера-Крылова ψ, θ, φ). Сначала отмечается, что нужно исключать особые положения платформы, исследованию свойств которых посвящена обширная литература, формулируются конкретные рекомендации. Однако основными являются условия сохранения натяжения (положительности усилий) всех тросов подвеса платформы, именно они преимущественно определяют границы области возможных положений.

В рассматриваемых в данной диссертации задачах на передний план выходят уравнения статики, поскольку именно из них находятся условия неотрицательности усилий $\boldsymbol{S}_{\mathrm{i}}$ в тросах. Число тросов произвольно, но позиционирующих тросов шесть. Дополнительные тросы задают усилия, которые расширяют рабочую зону. При действии только силы тяжести уравнения статики платформы приобретают вид:

$$\Sigma_0 \boldsymbol{S}_{\mathrm{i}} + \Sigma_1 \boldsymbol{S}_{\mathrm{j}} + \boldsymbol{P} = 0 \qquad (1)$$

$$\Sigma_0 \boldsymbol{r}_{\mathbf{i}} \times \boldsymbol{S}_{\mathbf{i}} + \Sigma_1 \boldsymbol{r}_{\mathrm{j}} \times \boldsymbol{S}_{\mathrm{j}} + \boldsymbol{r}_{\mathrm{c}} \times \boldsymbol{P} = 0 \qquad (2)$$

где $\boldsymbol{r}_{\mathrm{c}}$ – радиус-вектор центра масс, а $\boldsymbol{r}_{\mathbf{i}}$ – радиус-вектор точки закрепления i-го троса, $\boldsymbol{P}$ - суммарная сила тяжести, $\boldsymbol{S}_{\mathrm{i}}$ - векторы сил реакций тросов, приложенная к центру масс, сумма с индексом i относится к позиционирующим тросам, а с индексом j - к дополнительным.

Разработанная методика определения границ области возможных положений основывается на следующих соображениях. Выход на границу ОВП при перемещениях происходит тогда, когда по крайней мере одно из усилий обращается в нуль. Фиксирование одного из усилий S_i (в данном случае – приравнивание нулю: S_i =0) означает выход точки на пятимерную гиперповерхность в шестимерном пространстве усилий. Поскольку возможных независимых условий S_i =0 шесть, то в шестимерном пространст-

ве усилий выделяется шестигранник, ограниченный шестью гиперповерхностями. В общем случае для получения замкнутой области возможных положений необходимо дополнительно учитывать ограничения сверху на усилия S_i, обусловленные ограниченностью моментов приводов лебедок.

На этом построена подробно описанная в диссертации методика аналитического или численного определения границ ОВП. Сначала задаются такие параметры положения платформы, при которых усилие в первом тросе обращается в нуль, т.е. $S_1 = 0$, а в остальных тросах усилия положительны, получается первый участок границы ОВП. Затем аналогичным образом, задается требование $S_2 = 0$, проверяется положительность остальных усилий, и отсюда получается уравнение второго участка границы. После перебора и приравнивания нулю последовательно всех усилий (i =1, 2, 3, 4, 5, 6) получаются уравнения всех участков границы, шести гиперповерхностей. В заключение главы на основе принципа кинетостатики рассматриваются задачи динамики подвесных многостепенных платформ при наложении тех же условий неотрицательности усилий натяжения всех тросов. Для получения границ ОВП требуется решение задач геометрии подвесных платформ. При этом исходными являются приведенные ниже соотношения. В соответствии с векторными выражениями, определяющими положение точки подвижной платформы в базовой системе координат в векторной форме, i-ое уравнение имеет вид:

$$\boldsymbol{\rho} + \boldsymbol{r}_{\mathrm{i}} = \boldsymbol{R}_{\mathrm{i}} + \boldsymbol{l}_{\mathrm{i}} \qquad (3)$$

Здесь $\boldsymbol{\rho}$ - радиус-вектор центра подвижной платформы, $\boldsymbol{r}_{\mathrm{i}}$ - радиус-вектор точки закрепления i–го троса на платформе относительно ее центра, $\boldsymbol{R}_{\mathrm{i}}$ - радиус-вектор размещения на неподвижном основании i–ой лебедки. Направление вектора i–го троса $\boldsymbol{l}_{\mathrm{i}}$ от каждой точки закрепления троса на платформе к соответствующей точке закрепления на основании характеризуется единичным вектором $\boldsymbol{e}_{\mathrm{i}}$. Отсюда искомый единичный вектор $\boldsymbol{e}_{\mathrm{i0}}$ определяется следующим образом:

$$\boldsymbol{e}_{i0} = \boldsymbol{l}_i \,|\, \boldsymbol{l}_i \,|^{-1} = (\boldsymbol{\rho} + \boldsymbol{r}_i - \boldsymbol{R}_i) \,|\, \boldsymbol{\rho} + \boldsymbol{r}_i - \boldsymbol{R}_i \,|^{-1} \qquad (4)$$

Чтобы перейти к скалярной форме, нужно использовать матричное уравнение:

$$\rho + \Gamma\, r_i = R_i + l_i \qquad (5)$$

Решение задач геометрии осуществляется в направляющих косинусах векторов $\boldsymbol{e}_i$, что является новым для теории многостепенных платформ. В заключение главы оценено влияние фактора провисания тросов и их растяжения на точность позиционирования, сформулированы предложения по уменьшения влияния этих факторов.

В **четвертой главе** по преимуществу исследуются типовые, представляющие наибольший интерес, варианты подвешивания платформы. Подробно рассмотрен ряд схем подвески, имеющих определенные преимущества. Сначала охарактеризованы признаки, определяющие геометрию ОВП, рабочей зоны, рабочего пространства, возможности расположения лебедок и особенности конфигураций рабочих зон. Затем сформулированы общие подходы к выбору вида и параметров схем систем подвешивания подвижных платформ. Во всех случаях за основу принят такой подход, при котором по тем или иным критериям для номинального положения (среднего в рабочей зоне) осуществляется оптимизация. В качестве одного из критериев выбирается принцип близости к диагональной матрицы преобразования длин тросов к обобщенным координатам платформы. Как наиболее перспективная рассматривается ортогонализованная схема. Показано, что для подобной ортогонализованной схемы натяжение всех тросов обеспечивается только в прямоугольной системе координат, повернутой по часовой стрелке относительно плоскости горизонта.

Путь получения одного из рекомендуемых вариантов подвешивания представлен на рис. 3.

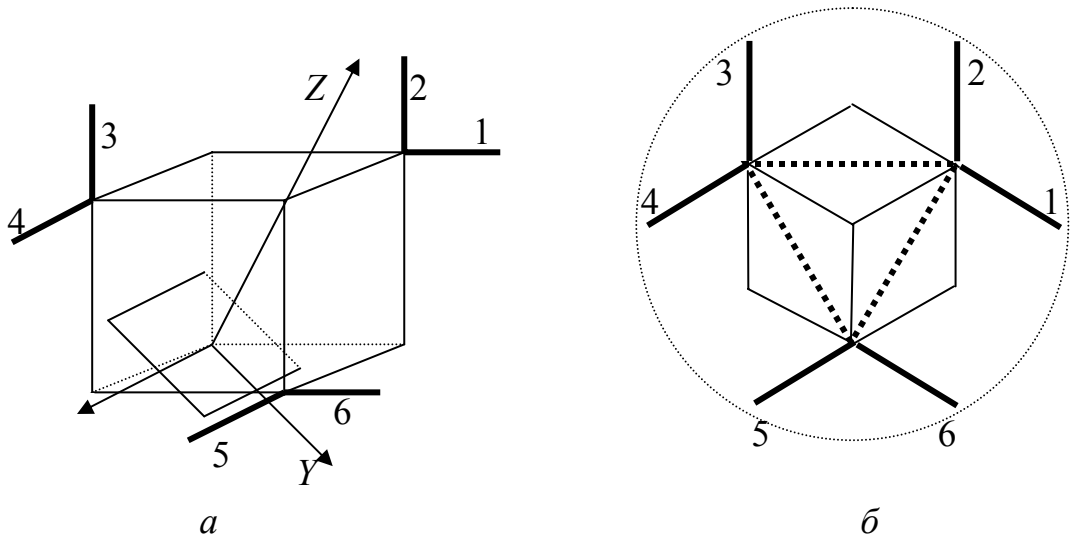

Рис. 3. Схемы построения конфигурации подвешивания на кубе

Здесь рис. 3 *а* иллюстрирует способ построения конфигурации подвешивания на кубе в исходных ортогональных осях, а рис. 3 *б* – вид сверху в рекомендуемом повернутом положении, когда диагональ *Z* куба направлена по вертикали. Данная схема отнесена к специальной категории ортогональных, поскольку в номинальном положении тросы направлены по осям ортогональной (но повернутой) системы координат.

Очевидным достоинством схем с подвешиванием является возможность использования тросов большой длины (порядка десяти метров и более), допустимость разнесения в пространстве позиций установки лебедок и поэтому обеспечение возможностей получения больших перемещений платформы при определенным образом задаваемых длинах тросов посредством управления (автоматизированного или даже автоматического, без участия человека-оператора) углами поворота барабанов лебедок.

Недостатки предлагаемого построения схем подвижных платформ, подвешенных на гибких звеньях – тросах, очевидны: невысокая точность задания длин натянутых участков тросов (аналогов жестких приводных звеньев) пониженная жесткость, возможность относительно низкочастотных поперечных колебаний тросов, возбуждаемых при движении, а главное – необходимость обеспечения натяжения во всех положениях плат-

формы. Однако могут быть получены большие размеры ОВП и это основное.

В **пятой главе** обсуждаются принципы и способы управления манипуляционными системами рассматриваемого типа, предлагается алгоритм автоматического управления, не требующий больших вычислительных ресурсов. Особое внимание уделено анализу использования в системах автоматического управления датчиков различных типов и принципов действия, измеряющих непосредственно координаты, их приращения или усилия натяжения в тросах. Формулируются задачи введения поправок в управляющие программы на растяжения тросов и другие влияющие факторы для корректировки положения платформы. В заключение главы приводятся сведения о созданном макете и результатах его испытаний. Предварительные испытания макета подтвердили правильность предлагаемых принципиальных и схемных решений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты, полученные в диссертации, можно формулировать следующим образом.

1. Предложена многоаспектная классификация робототехнических систем на основе подвесных платформ, которая может быть использована как основа специализированной базы данных о робототехнических системах рассматриваемого типа.

2. Показано, что рассматриваемые робототехнические системы могут быть использованы для погрузо-разгрузочных работ в нерасчлененных закрытых помещениях и на открытых площадках, для охраны, наблюдения и контроля. При этом в зависимости от конкретного назначения могут быть использованы различные рабочие органы, датчики или информационно-измерительные системы. В качестве сил, обеспечивающих натяжение тросов, в открытых пространствах обычно выступают силы веса, но могут быть использованы аэростатические или гидростатические подъемные силы.

3. Установлено, что основные характеристики робототехнических систем рассматриваемого типа определяются четырьмя группами факторов: требованиями к заданию положения центра платформы, углов ее ориентации, возможностями использования для позиционирования и ориентирования сил тяжести, областями возможных положений объекта.

4. Для механизма робототехнической системы на основе шестистепенной платформы предложен и проработан новый метод составления исходных геометрических соотношений, при котором в отличие от известного метода *l*–координат допускается произвольное пространственное распределение точек закрепления тросов на подвижной платформе и произвольное расположение лебедок.

5. Важнейшей характеристикой многостепенной робототехнической системы рассматриваемого типа является область возможных положений платформы в шестимерном пространстве линейных координат и углов поворота для пространственной задачи и в трехмерном пространстве – для плоской задачи.

6. При определении областей возможных положений систем на основе подвесных платформ учитываются условия неотрицательности усилий (натяжений) тросов, условия непересечения приводных звеньев, требования исключения особых положений.

7. Показано, что условия неотрицательности натяжений тросов получаются из уравнений статики, при составлении которых в качестве основных геометрических параметров целесообразно рассматривать направляющие косинусы. Участки границ области возможных положений получаются из условий поочередного обращения в нуль усилий в тросах.

8. Как наиболее перспективные выделены следующие виды схем подвешивания: близкие к осесимметричным, ортогонализованные, плоские; для них проведены самостоятельные исследования геометрии.

9. Получены обоснованные рекомендации по схеме подвешивания платформы, размеры которой малы по сравнению с рабочей зоной, целесообразно начинать с выбора ориентации направлений тросов в номиналь-

ном положении; при этом свойства подвеса определяются матрицей связи приращений длин тросов и обобщенных координат платформы.

10. Установлено, что при построении схем подвеса, ортогонализованных в горизонтально-вертикальной системе координат, всегда необходимы дополнительные тросы; но дополнительные тросы можно не вводить, если использовать ортогональность осей в прямоугольной системе координат, оси которой наклонены к плоскости горизонта.

11. Показано, что достаточно практичными являются схемы подвешивания, близкие к осесимметричным; возможности изменения углов поворота платформы зависят от углов расхождения тросов подвеса.

12. Для автоматического управлении движением платформы предложена типовая блок-схема. При компьютерном управлении основной объем вычислений приходится на тригонометрические преобразования.

ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Чистяков А.Ю. Структура, схемы и математические модели робототехнических систем с механизмами параллельной структуры. // Современные технологии, системный анализ, моделирование. Научный журнал. / Иркутск: ИрГУПС. - 2005, вып. 4. - С.68-76 (0,8 п.л.).

2. Чистяков А.Ю. Возможности и перспективы применения робототехнических систем на основе подвесных многостепенных платформ. // Современные технологии, системный анализ, моделирование. Научный журнал. / Иркутск: ИрГУПС. - 2006, вып. 1. - С.18-26 (0,8 п.л.).

3. Чистяков А.Ю. Схемы подвеса платформ многостепенных робототехнических систем с механизмами параллельной структуры. // Современные технологии, системный анализ, моделирование. Научный журнал. / Иркутск: ИрГУПС. - 2006, вып. 1. - С.27-33 (0,7 п.л.).

4. Мархадаев Б.И., Чистяков А.Ю. Полициклоидные мехатронные системы: компоновочные структуры, топология структур и траекторий, механика, управление и применение. // Современные технологии, систем-

ный анализ, моделирование. Научный журнал. / Иркутск: ИрГУПС. - 2004, вып. 4. - С.25-34 (всего 0,81 п.л., в т.ч. авторских 0,2 п.л.).

5. Мархадаев Б.И., Чистяков А.Ю. Манипуляционные мехатронные устройства при обслуживании высокопроизводительного оборудования. // Современные технологии, системный анализ, моделирование. Научный журнал. / Иркутск: ИрГУПС. - 2004, вып. 4. - С.35-40. (всего 0,5 п.л., в т.ч. авторских 0,16 п.л.).

6. Чистяков А.Ю. Роботизированные системы с механизмами параллельной структуры на основе подвесных платформ. // Материалы IV Международной научно-практической конференции «Совершенствование управления научно-техническим прогрессом в современных условиях». / Пенза: Изд-во РИО ПГСХА, 2006, - С.51-53 (0,3 п.л.).