

Станки с параллельной кинематикой

Введение. Постановка задач исследования

Актуальность данной темы характеризуется необходимостью автоматизации многих видов производства. Сейчас станкостроение в стране находится не на том уровне, что был раньше, и мы существенно отстаем от стран-лидеров в области станкостроения. Особенно важно создать такой станок, который при прочих равных мощности и точности, был бы дешевле зарубежных аналогов, в противном случае в разработке нет смысла. Такой альтернативой смог бы стать станок, основанный на принципе параллельной кинематики в силу относительной простоты своей конструкции, в сочетании с повышенными показателями скорости (в счет низкой массы) и, как следствие, производительности. Эти устройства отличает наличие нескольких кинематических цепей, каждая из которых либо содержит двигатель, либо налагает некоторое число связей на движение рабочего органа. Роботы с параллельной кинематикой, за последние пол века, успели хорошо зарекомендовать себя в области сортировки и до сих пор не имеют аналогов, способных выполнять эту задачу так же точно и быстро, так почему бы не использовать такие роботы в других областях производства. Ответу на последний вопрос и посвящена данная работа.

Целью данной работы является обзор теоретической и практической базы, наработанной со времени первых публикаций и создания первых роботов с параллельной кинематикой. Для достижения поставленной цели должны быть решены следующие задачи:

- Изучение предшествующих изобретений в данной области;
- Анализ устройства и конструктивных элементов станков гексаподов;
- Анализ ситуации, сложившейся между наукой и промышленностью;
- Изучение математического аппарата, необходимого для типовых расчетов моделей (математической, кинематической и динамической);

Исторические аспекты развития станков типа «гексапод»

Теоретические работы, касающиеся параллельных роботов в целом и гексаподов в частности возвращают нас более чем на столетие назад, когда английские и французские математики были одержимы многоугольниками.

Но за исключением любознательного профессора Манфреда Хасти, который первым нашел аналитический метод для расчета 40 решений прямой задачи кинематики гексапода, и любопытного доктора Жан-Пьера Мерле, автора первой книги о параллельных роботах не нашлось других столь же любопытных и любознательных разработчиков параллельных кинематических систем... Откуда же тогда появились параллельные роботы?

Когда я впервые познакомился с параллельными роботами, у меня сложилось впечатление, что это новая технология. Действительно, даже сегодня многие научные статьи и немногие учебники ссылаются на введение параллельных роботов как на «средство устранения» недостатков серийных роботов и на то, что привлекло «значительное внимание» в «последние несколько десятилетий». Это возвращает нас к концу 1950-х годов, когда Гоф построил «первый гексапод», который многие парадоксально называют «платформой Стюарта». Возникает вопрос: были ли параллельные роботы обновлением серийных?

Очевиден разрыв между промышленностью и научным сообществом. До сих пор то, что исследователи знали о происхождении параллельных роботов, в значительной степени основывалось на цепочке работ, спровоцированных одной публикацией - публикацией мистера Стюарта.

Кто бы ни думал в первую очередь о создании платформы для движения (обычно известной под оксюмороном «база движения») для индустрии развлечений, он был великим провидцем. Одно из первых подобных устройств для развлечения было разработано Джеймсом Э. Гвиннеттом, который подал заявку на патент в 1928 году.

Неизвестно, был ли это первый проект параллельной кинематической системы с несколькими степенями свободы (DOF), и не был ли когда-либо

создан симулятор. Но одно можно сказать наверняка: Джеймс Гвиннетт слишком сильно опередил свое время, и отрасль не была готова к сложности его изобретения.

Спустя десятилетие, и только через семнадцать лет после появления термина «робот», был изобретен новый параллельный робот для автоматической окраски распылением (Уиллард Л.В. Поллард).

В сообществе параллельной кинематики параллельный робот Pollard известен как первый промышленный параллельный робот. Это гениальное изобретение представляет трехразветвленного параллельного робота с пятью степенями свободы. В этом параллельном роботе три проксимальных плеча поворачиваются с помощью вращающихся двигателей, прикрепленных к основанию, и три дистальных плеча соединяются с тремя проксимальными плечами через универсальные шарниры. Два дистальных плеча соединены с третьим с помощью шаровых шарниров, а головка инструмента соединена с третьим дистальным рычагом через универсальный шарнир. Таким образом, три двигателя определяют положение головки инструмента, в то время как ее ориентация контролируется двумя другими двигателями, закрепленными на основании и передающими движение к головке инструмента через гибкие вращающиеся кабели. Параллельный робот Полларда был предназначен для окраски распылением, но, к сожалению, так и не был построен.

Первый построенный промышленный робот был спроектирован инженером Уиллардом Л.Г. Поллардом – сыном Уилларда Л.В. Полларда, который 29 октября 1934 года подал патент на машину для окраски распылением. Патент состоит из двух частей: электрическая система управления и механический манипулятор. Система управления состоит в основном из перфорированных пленок, плотность отверстий в которых прямо пропорциональна скорости каждого двигателя. Механический манипулятор, с другой стороны, представляет собой параллельного робота на основе пантографа, приводимого в действие двумя вращающимися двигателями в основании. Патент Полларда-младшего был в конечном итоге

выдан 16 июня 1942 года, но ранее лицензия была предоставлена компании DeVilbiss в 1937 году. В 1941 году DeVilbiss, впоследствии ставшая первым поставщиком промышленных роботов, завершила разработку первого прототипа под руководством Гарольда Розелунда. Робот Розелунда для окраски распылением, позже запатентован в 1944 году.

Пару лет спустя, в 1947 году, на другой стороне Атлантики, был изобретен новый параллельный робот - тот, который стал самым популярным, тот, который изменил индустрию, и тот, который был воспроизведен более тысячи раз - восьмигранный шестнадцатеричный гексапод со штангами переменной длины.

Доктор Эрик Гоф, который построил этот первый восьмигранный шестипод, был выдающимся автомобильным инженером в Dunlop Rubber Co., Бирмингем, Англия. Вопреки тому, что было заявлено в литературе, он был английского происхождения, родился в Сметвике, Стаффордшир, Англия, 16 октября 1906 года. Универсальная машина для тестирования шин, или универсальная установка, которую доктор Гоф назвал своим детищем, была изобретена для решения проблем аэродинамических нагрузок. Требовалась универсальная машина для определения свойств шин при комбинированных нагрузках. Но восьмигранный гексапод не был изобретен с нуля. В то время, как доктор Гоф упоминает в своей ключевой статье, системы с шестью гнездами (шестигранниками) уже были известны! Это подтверждают другие источники (см. следующий раздел), шестнадцатеричные системы с тремя вертикальными гнездами и тремя горизонтальными гнездами были настолько распространены, что их происхождение было давно забыто. Системы этого типа (или слегка модифицированные) известны под аббревиатурой MAST, что означает Многоосевой симулятор. Они до сих пор производятся многочисленными компаниями.

Новым в платформе Gough стало расположение шести стоек. Поскольку Эрик Гоф нуждался в относительно больших диапазонах движения, он

выбрал симметричное расположение, образующее октаэдр. Машина была построена в начале 1950-х годов и была полностью введена в эксплуатацию в 1954 году. Хотя первоначальный дизайн предполагал использование общих универсальных шарниров на базе и мобильной платформе, домкраты были окончательно закреплены отдельно. Вначале растяжимые стойки регулировались вручную винтовыми домкратами. Вторая конструкция шестигранника, установленная под мобильной платформой, включала в себя тензодатчики. Таблицы с предварительно рассчитанными данными использовались для проведения сложных преобразований сил и корректировки поз. Десять лет спустя машина была модернизирована с помощью приводов с цифровым управлением и электронной записи тензодатчиков.

По словам господина Майка Бизона из Dunlop Tyres, универсальная установка сыграла важную роль в зарождении науки о каучуке. К сожалению, доктор Эрик Гоф скончался в декабре 1973 года, как раз в то время, когда восьмигранные шестнадцатеричные гексаподы становились все более популярными.

Универсальная установка Gough продолжала работать на фабрике Dunlop до наступления нового тысячелетия. После слияния Dunlop Tyres и Goodyear в 1998/1999 году завод был в конечном итоге закрыт и разрушен. В попытке спасти свое любимое испытательное оборудование от факела, Майк Бисон связался с Сэмом Эвансом из Британского национального музея науки и промышленности и договорился о том, чтобы машину взяли, за два дня до прибытия команды по сносу. После преданной службы почти полвека первый восьмигранный шестнадцатеричный выехал из форта Данлоп 9 августа 2001 года на большом грузовике для своего нового дома в Музее науки в Роутоне около Суиндона, примерно в 120 км к западу от Лондона.

Симуляторы движения.

В 1965 году знаменитая статья Стюарта появилась в трудах (британского) IMechE. В этой статье г-н Стюарт описывает платформу

движения для использования в качестве имитатора полета с шестью степенями свободы. Предложенный параллельный механизм, однако, отличается от восьмигранного гексапода, который, как это ни парадоксально, часто называют «платформой Стюарта». В том же процессе статья Стюарта сопровождается пылкими дискуссиями ученых и инженеров, одним из которых был доктор Гоф, который напомнил о существовании его машины для испытания шин.

Нет сомнений в том, что превосходная работа Стюарта оказала большое влияние на последующее развитие в области параллельной кинематики. Были сделаны различные предложения по использованию гексапода, многие из которых были точными предсказаниями будущего. К сожалению, больше ничего не известно о Д. Стюарте.

Вернувшись в Америку, американский инженер Клаус Каппел столкнулся с серьезной проблемой. Это был 1962 год, и работодатель г-на Каппеля, исследовательская лаборатория Института Франклина в Филадельфии, попросил его улучшить существующую обычную вибрационную систему с 6 степенями свободы на основе шестигранника. MAST вмещал не три горизонтальных исполнительных механизма, а четыре в циклическом порядке, пытаясь уменьшить необходимые горизонтальные реакционные массы. Однако избыточность конфигурации с семью стойками была слишком сложной, чтобы ее контролировать, и в результате антагонистические силы в конечном итоге ее сломали таблицу. Наблюдая за этим, мистер Каппель придумал ту же восьмигранную схему, которая была предложена доктором Гоффом [3].

Возможно трудно поверить, но в 1971 году Бюро по патентам и товарным знакам США выдало Клаусу Каппелю патент на его изобретение и его использование в качестве имитатора движения. Патент был подан 7 декабря 1964 года, когда г-н Каппель не знал об изобретении Гофа (или о работе Стюарта, которая еще не была опубликована). Фактически, патентная заявка и идея имитатора движения возникли в результате запроса со стороны

корпоративного офиса Sikorsky Aircraft Division United Technologies на проектирование и конструирование имитатора полета вертолета с 6 степенями свободы. И, таким образом, был изготовлен первый в мире симулятор полета на основе восьмигранного гексапода.

Первая лицензия была предоставлена в конце 1960-х годов Link, тогдашнему главному производителю авиационных тренажеров. Первое нарушение произошло в начале 1970-х годов со стороны CAE, нынешнего лидера в авиасимуляторах. Иск был успешным для Института Франклина, что привело к штрафу и лицензии. Позже другие компании вышли на рынок и должны были соблюдать патент Carpel. Между тем, два других тренажера были построены непосредственно Институту Франклина. Первым был симулятор вертолета для Арсенала Рок-Айленда, построенный в перевернутой конфигурации и прикрепленный к подвесной системе 2-DOF. Вторым был симулятор вождения, проданный бывшему Daimler-Benz, а затем установленный на рельсах.

Клаус Каппель разработал различные другие параллельные кинематические системы для вибрационных испытаний. Он работал техническим консультантом в Team Corporation, производителе вибрационного оборудования, и изобрел их параллельную кинематическую CUBE. Дизайнер с самым большим опытом работы с шестигранниками по-прежнему активен в этой области, но немногие пользуются его ценным опытом.

Рациональное сотрудничество науки и промышленности

Доктор Гоф был первым, кто изобрел и построил популярный восьмигранный гексапод. Тем не менее, именно Клаус Каппель позже самостоятельно разработал тот же самый гексапод, запатентовал его, лицензировал его первым компаниям, имитирующим полеты, и создал первые коммерческие симуляторы движения восьмигранных гексаподов. Тем не менее, именно Стюарт непреднамеренно сделал концепцию Гоф популярной и вновь предложил идею симуляторов полета, на этот раз для

научных кругов. Но тогда неоктаэдрические гексаподы существовали задолго до октаэдрических. И большинство "октаэдрических" на самом деле не октаэдрические, а лишь довольно близки к таковым. Чтобы быть политически корректным, распорка переменной длины (почти) восьмигранная шестнадцатеричная, ее не следует называть ни Gough, ни Carrel, ни платформой Стюарта. Вклад всех трех инженеров должен быть должным образом признан.

При изучении исторического опыта изобретений, явно прослеживается разрыв между промышленностью и научным сообществом, индивидуализме, поверхностности исследований предшествующего уровня техники. О гексапode было написано множество публикаций, но никто никогда не обращался к Данлопу, где первый в истории восьмигранный гексапод функционировал анонимно в течение десятилетий. Клаус Каппел лицензировал и создавал большинство имитаторов движения до начала 1980-х, но никто даже не знал о нем.

Существует огромное количество информации и опыта, связанных с параллельными роботами, но лишь немногие в отрасли используют это в своих интересах. С другой стороны, исследователи продолжают изобретать новые механизмы, в которых промышленность не обязательно нуждается сейчас. В то время как Гоф, Стюарт и Каппель сделали свои изобретения будучи неосведомленными друг о друге в эпоху «почты улиток», но в прямой реакции на потребности промышленности, теперь, когда мы на расстоянии одного клика, не пора ли нам прекратить изобретать велосипед и объединить наши усилия вместе.

Станки-гексаподы в настоящее время.

Конструктивно различные схемы гексаподов похожи между собой, но при этом имеют и некоторые различия. Самый очевидный вариант для реализации удлинения стоек гексапода – использование пневмо или гидроцилиндров, также возможен вариант с использованием пар типа винт-гайка или использовать шатунный механизм.

Конструкции станков-гексаподов могут быть как вертикальные, так и горизонтальные.

Механизмы с параллельной кинематикой (МПК) не обязательно должны иметь шесть штанг. Их может быть и три и восемь. Важно, что пространственные движения платформе передают путем изменения длин штанг.

Механизм гексапода наиболее распространенный среди станков с параллельной структурой и обеспечивает 6 степеней свободы. Он состоит из соединенных между собой шестью стойками фиксированной верхней платформой, которая имеет форму шестиугольника и подвижной треугольной платформы. К неподвижной платформе устанавливается при помощи шарниров каждая пара стоек и сходится вместе в общем шарнире, стоящий в одном из трех узлов подвижной опоры.

Передвижение подвижной опоры достигается за счет обобщенного между собой изменения длины стоек, а именно: когда все стойки в одно время удлиняются или уменьшаются с одинаковой скоростью, таким образом, платформа совершает движение вертикально в вверх или вниз при неизменном своем горизонтальном положении, когда одни стойки увеличиваются, а другие, уменьшаются тем, самым меняют ориентацию, платформа движется в прямом направлении, до тех пределов пока не превысит разрешенное гексаподом горизонтальное перемещение.

Когда происходят изменения длины и ориентации всех стоек, платформа имеет наклон относительно координатных осей, до предела, пока допустимый угол поворота не будет превышен [4].

Можно утверждать, что вследствие осевых и угловых перемещений стоек подвижная платформа имеет возможность достичь любой точки рабочего пространства, на основании этого можно назвать гексапод отличным позиционирующим устройством.

Существует несколько вариаций в базовой конструкции гексаподов, которая различается используемым числом шарниров. Самая известная

компоновка гексапода, как гексапод 6-6, представлен на рисунке 6 слева. Число узлов, в которых стойки, крепятся с базовой платформой, соответствует первой цифре, аналогично вторая цифра обозначает число узлов, в которых стойки соединяются с рабочей платформой. В середине изображения показан гексапод 6-3, который характеризуется наличием шарниров, как на базовой платформе, так и в количестве трех шарниров на подвижной платформе. Справа показан гексапод 3-3, который собрал в себе по три шарнира на двух платформах.

Математическая модель гексапода включает в себя обратную и прямую кинематическую задачу. Решение обратной кинематической задачи для гексапода завязано на вычислении длины стоек и расположении шарниров при данном положении подвижной платформы. Разработка типовой кинематической модели платформы в общем случае имеет такие допущения:

- все шарниры считаются идеальными, в силу того что их оси строго перпендикулярны друг другу и пересекаются в одной точке;
- ось каждого линейного привода проходит через соответствующие центры шарниров;
- удлинение любой стойки можно определить без погрешностей;
- платформа собрана таким способом, что ориентация на ней шарниров точно известно.

Из большого множества описанных динамических моделей самой удобной для описания динамики гексапода является модель Д'Аламбера. В его смысл заложен принцип, в котором говорится, что для получения уравновешенной системы сил, воздействующих на подвижную механическую систему, ко всем ее материальным точкам нужно, кроме фактически действующих на них активных сил и реакций связей, также условно приложить силы инерции точек.

Заключение.

Таким образом, исследование взаимодействия научных изобретений и практического применения этих изобретений в промышленности. Оказалось,

что, не смотря на достаточно разработанную теоретическую базу, многие изобретения, хоть и нашли свое практическое применение в промышленности, но не снискали достаточной популярности и, в итоге, оказались незаслуженно забыты. Однако, станки-гексаподы имеют ряд преимуществ по сравнению со станками с последовательной кинематикой.

Основные преимущества гексаподных машин:

- сокращение времени подготовки производства и повышение его рентабельности за счет объединения обрабатывающих, разметочных и измерительных функций в единой мехатронной системе;

- высокая точность измерений и обработки, которая обеспечивается повышенной жесткостью стержневых механизмов (до 5 раз), применением прецизионных датчиков обратной связи и лазерных измерительных систем, использованием компьютерных методов коррекции (например, тепловых воздействий);

- повышенная скорость движений (скорость быстрых перемещений достигает 10 м/с, рабочих движений – до 2,5 м/с);

- отсутствие направляющих (в качестве несущих элементов конструкции используются приводные механизмы), отсюда улучшенные массогабаритные характеристики и материалоемкость;

- высокое качество управления движением благодаря малой инерционности механизмов благодаря применению линейных мехатронных модулей движения как объектов управления и использованию методов автоматизированной подготовки и исполнения в реальном времени управляющих программ.

Исходя из вышесказанного, можно сделать вывод: наиболее перспективной областью применения станков-гексаподов является прецизионное станкостроение. Результаты структурного анализа систем параллельной кинематики могут быть использованы при проектировании нового типа автоматизированных технологических систем.

Список использованных источников

1. Гвиннет Д.Е., "Машины для развлечений" Патент США № 1,789,680, Январь 20, 1931.
2. Поллард В.Л.Г., "Устройство для окраски распылением" Патент США № 2,2213,108, Июнь 16, 1942
3. Каппел К.Л., "Симулятор движения" Патент США № 3,295,224, Январь 3, 1967
4. Каменев С.В., Основы построения станков с параллельной кинематикой: учебное пособие / Каменев С.В.; Оренбургский гос. ун-т. – Оренбург: ОГУ, 2017.- 33-41, 80-91 с.
5. Базров Б.М., Основы технологии машиностроения: Учебник для вузов. М.: Машиностроение, 2005. – 736с.
6. Афонин В.Л., Крайнев А.Ф., Ковалев В.Е. Обрабатывающее оборудование нового поколения. Концепция проектирования / Под ред. Афолина В.Л. М: Машиностроение, 2001.-256 с.
7. Зеленков Д.А., Астапов В.Н. новые технологии механической обработки на станках с параллельной кинематикой // Международный студенческий научный вестник. – 2018. – № 6.: <http://www.eduherald.ru/ru/article/view?id=19350>