

и действительные степени свободы, геометрические характеристики элементов соединений, которые введены в кинематическую теорию графов. Выражается надежда, что путем введения этой дополнительной информации в структурные графы можно получить более точное описание параметров подвижности механизма реальной сложности. В качестве иллюстрации предлагаемого метода рассмотрена довольно трудная задача анализа структуры и функционирования пазово-шариковых шарниров. Авторы надеются, что результаты исследования представят определенный вклад не только в конструирование важных соединений валов с помощью пазово-шариковых шарниров, но и в дальнейшее исследование структуры и функционирования некоторого класса сложных механизмов.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Universal Joint and Driveshaft Design Manual*, Advances in Engineering Series no. 7, SAE Publication, 1979, pp. 99—171.
2. Roethlisberger J. M., Aldrich F. C., «The Tripot Universal Joint», SAE Paper No. 690257, 1967, 8 pp.
3. Дьюрам, «Кинематика пазово-шариковых шарниров», *Конструирование и технология машиностроения*, № 2, 1975, с. 201, изд-во «Мир».

4. Orain M., «Study of the Leading Law of a GI Joint», Glaenzer Spicer B285/201, France, 1962, 12 pp.
5. Orain M., «General Theory and Experiment of Homokinetic Joints», and excerpt from his doctoral dissertation, Université Pierre et Marie Curies, Paris, France (English translation by Glaenzer Spicer, France), pp. 95—145.
6. Hasegawa J., Matsunari F., Ikeda T., Futamura Y., «Kinematic Analysis of Tripode Joint», *Proceedings of Fourth International Conference on Vehicle Structural Mechanics*, Nov. 18—20, 1981, Detroit (SAE P-99), SAE Paper No. 811325.
7. Akbil E., Lee T. W., «On the Motion Characteristics of Tripode Joints. Part I: General Case», submitted to *ASME Journal of Mechanisms, Transmissions, and Automation in Design*.
8. Lee T. W., Akbil E., «On the Motion Characteristics of Tripode Joints. Part II: Applications», submitted to *ASME Journal of Mechanisms, Transmissions, and Automation in Design*.
9. Akbil E., *Kinematic Synthesis of Spatial Mechanisms With Prescribed Entire-Motion Characteristics*, PhD dissertation, Rutgers University, 1982.
10. Freudenstein F., Maki E. R., «The Creation of Mechanisms According to Kinematic Structure and Function», *Environment and Planning B*, Vol. 6, 1979, pp. 375—391.
11. Харрисберг, «Обзор методов структурного синтеза трехмерных механизмов», *Конструирование и технология машиностроения*, № 2, 1965, с. 129, изд-во «Мир».
12. Hartenberg R. S., Denavit J., *Kinematic Synthesis of Linkages*, McGraw-Hill, 1964, pp. 28—67.

УДК 621.7.077

Хант

(К. Н. Hunt)

Monash University Клейтон,
шт. Виктория, Австралия

Кинематические структуры манипуляторов с параллельным приводом

(Structural Kinematics of In-Parallel-Actuated Robot-Arms)

Предлагается замена преобладающих в настоящее время конструкций манипуляторов с последовательно расположенными двигателями (последовательный привод). Систематически изучены схемы с параллельно действующими двигателями, которые могут использоваться как для полных конструкций рук роботов и манипуляторов, так и отдельных частей рук, в остальных обладающих традиционным последовательным приводом. Подобное исследование невозможно без использования теории винтов. Установив способы перечисления возможных типов геометрии конструкций, мы снова обращаемся к теории винтов, чтобы в общих чертах обрисовать самые перспективные из этих конфигураций. Рассматриваются критерии отбрасывания нежелательных конфигураций руки и сравниваются некоторые рабочие характеристики традиционных роботов и роботов с параллельным приводом. Предполагается, что в пределах установленных границ (которые, по-видимому, достаточно реальны) данная обзорная работа является исчерпывающей, однако многие детали еще должны быть исследованы. Статья всего лишь приоткрывает дверь другим исследователям роботов с параллельным приводом.

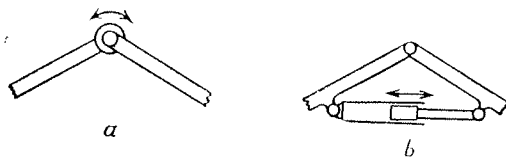
1. Введение

Большинство механических рук промышленных роботов и других манипуляторов более или менее напоминают человеческую руку и содержат последовательно расположенные двигатели, каждый из которых встроен в шарнир или связан с шарниром, имеющим одну степень свободы. На фиг. 1, а показан вращательный двигатель, расположенный в шарнире; на фиг. 1, б линейный двигатель «охватывает» шарнир. С геометрической точки зрения оба этих случая выполняют одну и ту же функцию, а именно управляют вращением

шарнира. Если необходимо управлять только перемещениями в парах скольжения, не используются линейные двигатели.

Расположение двигателя на фиг. 1, б действительно «антропоморфно», поскольку втягивание линейного двигателя точно соответствует сокращению мышцы, расположенной между соседними костями сустава. Например, такой мышцей является брахиалис, расположенный между локтевой и плечевой костями и охватывающий локтевой сустав. Однако существуют некоторые мускулы, которые охватывают два и более суставов человеческой руки; например, бицепс простирается от лопатки к лучевой кости предплечья, а мускул — продольный лучезапястный разгибатель — идет

Получено редакцией ASME в январе 1982 г.

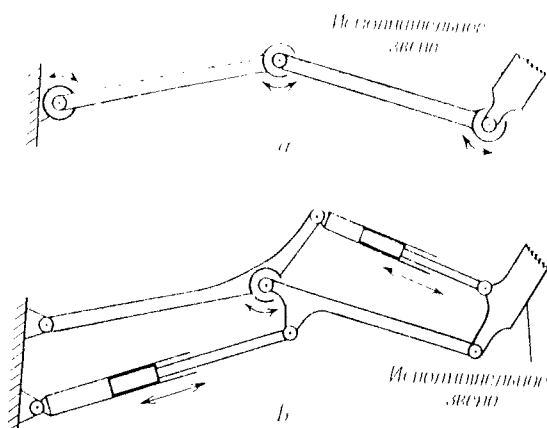


Фиг. 1. Схема управления вращением шарнира.
а — с помощью вращательного двигателя в шарнире; б — с помощью линейного двигателя, «охватывающего» шарнир.

от плечевой кости к костям запястья. Фиг. 2 иллюстрирует приблизительно аналогичный способ расположения двигателей, охватывающих два шарнира, при этом двигатели действуют частично параллельно друг другу и совершенно очевидно не соединены просто последовательно. Сходное расположение встречается иногда в землеройных машинах и используется в ряде конструкций роботов и шагающих машин.

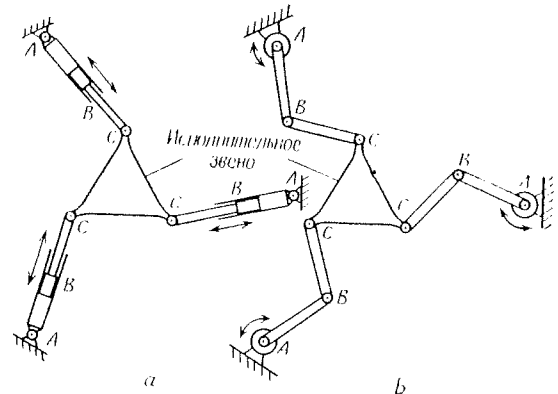
Существует более удобный и точный способ управления плоским движением исполнительного звена или стола. Две возможности, показанные на фиг. 3, симметричны; все три ведущие цепи действуют *полностью* параллельно. Такая схема представляет собой полную противоположность схемы обычного «последовательного» привода. Конструкция манипулятора, изображенного на фиг. 3, б, насколько известно автору, была исследована в Центре интеллектуальных машин и робототехники Университета шт. Флорида [12] с перспективой практического использования; такая же геометрия была использована при организации сферического (а не плоского) движения. Параметры ведущих цепей как при сферическом, так и при пластическом движении могут быть подобраны так, чтобы обеспечивать полный поворот исполнительного звена.

Ван Дийк и Рапкерс [1] обнаружили, что плоский двухстепенный робот с параллельно действующими двигателями хорошо подходит для выполнения операции окраски с помощью краскопульта; аналогично описанный в [2] шестистепенный авиатренажер «платформа Стюарта» в дальнейшем был приспособлен в работе [3] и других работах в качестве руки робота, причем эта конструкция,



Фиг. 2. Два плоских манипулятора с тремя степенями свободы.

а — три последовательно расположенных вращательных двигателя; б — два вращательных двигателя, замененные линейными двигателями, каждый из которых «охватывает» два шарнира.



Фиг. 3. Два трехстепенных плоских манипулятора.
а — с «параллельно действующими» линейными двигателями; б — с «параллельно действующими» вращательными двигателями в шарнирах А; однако с кинематической точки зрения вместо шарниров А двигатели могут быть размещены в шарнирах В или С.

по-видимому, более перспективна, чем предполагал автор в [2].

Рука с последовательно расположенными двигателями накапливает ошибки от плечевого шарнира к исполнительному звену. Кроме того, подобные конструкции часто не обладают достаточной жесткостью и нуждаются в компенсирующем воздействии и весьма усложненном управлении, чтобы уменьшить или устранить ошибки, обусловленные внешней нагрузкой. Они также склонны к низкочастотным колебаниям. Конечно, последовательно сочлененные звенья могут быть сделаны более жесткими, но это приведет к увеличению массы руки и, следовательно, к повышенным требованиям к приводу робота. При параллельном приводе, несмотря на большее количество двигателей, становится возможным создание как более жесткой и легкой руки (быть может, за счет большего ограничения рабочего пространства), так и размещения части или всех двигателей на стойке или вблизи нее. Иногда программирование движения исполнительного звена может оказаться более сложным, но при задании последовательности операций промышленного робота методом обучения задача может оказаться даже более легкой. Так как при параллельном приводе ошибки, обусловленные двигателями, не накапливаются, вероятно достижение большей точности без существенного усложнения управления.

В работе [2] (разд. 15.2) указывается на необходимость исследования кинематических структур манипуляторов. В настоящей статье такое исследование ведется применительно к конструкциям с параллельным расположением шарниров и двигателей, дающим от двух до шести степеней свободы. Некоторые из этих многосвязных структур вполне подходят для конкретных роботов и манипуляторов; другие могут работать вместе с добавочными последовательно действующими двигателями в комбинированных конструкциях (например, устройства, показанные на фиг. 3, могут быть дополнены механизмами с традиционным последовательным расположением двигателей). В настоящей статье под термином «исполнительное звено» имеется в виду также и промежуточный элемент, расположенный на концевой части руки, которая имеет параллельно действующие двига-

тели. На первый взгляд может показаться, что рабочее пространство и функциональные возможности устройств с параллельно действующими двигателями невелики, однако имеются доказательства того, что указанные трудности можно обойти, если правильно расположить двигатели и тщательно определить размеры. Более того, нет таких специализированных роботов и связанных с ними устройств, у которых главным требованием было бы требование по точности в ограниченных диапазонах движения.

2. Винтовые системы и подвижность

Основой любого систематического исследования роботов с параллельно действующими двигателями является теория винтов, в сочетании с понятием «связность» и общим критерием подвижности для систем сочлененных тел ([2], гл. 2, 12, 13). Только после того как определена конкретная винтовая система, может быть достигнут какой-то прогресс в качественном или количественном синтезе. (Под качественным синтезом понимается выбор типа механизма, под количественным — исследование связей и структурный анализ.) Здесь показано, что есть смысл несколько отойти от традиционных режимов движения, в которых реализуется качественный и количественный синтез, а именно плоского, сферического и общего пространственного движения.

Винтовая система, используемая для описания плоского движения рук на фиг. 2 и 3, представляет собой пятый частный случай системы третьего порядка ([2], разд. 12.7.5). В этом случае общий критерий подвижности записывается в виде

$$M = d(n - g - 1) + \sum_{i=1}^g f_i, \quad (1)$$

где M — подвижность или число относительных степеней свободы системы, n — число звеньев (включая стойку), g — число кинематических пар, f_i — число степеней свободы i -й пары; величина d — это порядок используемой винтовой системы (в данном случае равный трем), поэтому исполнительное звено должно иметь три степени свободы (связность 3) относительно стойки. К счастью в любой разумной геометрической конфигурации, эта связность может быть, по крайней мере в первом приближении, отождествлена с подвижностью; соответственно M должна быть равна трем. Каждый шарнир на фиг. 2 и 3 (с приводом или без него) имеет одну степень свободы, поэтому подстановка в уравнение (1) легко дает $M = 3$ в каждом случае. (Для фиг. 2, а: $n = 4$, $g = 3$; для фиг. 2, б, 3, а и б: $n = 8$, $g = 9$.)

Форма пятого частного случая системы третьего порядка, применимая к плоскому движению, охватывает винты с нулевым шагом вдоль всех прямых, перпендикулярных «плоскости движения», и винты с бесконечным шагом вдоль всех прямых, параллельных плоскости движения. Эта винтовая система включает все примеры фиг. 2 и 3 и определяется соответствующим выбором степеней свободы шарниров на этих фигурах. При этом плоскость движения лучше всего рассматривать как плоскость чертежа (ей перпендикулярны все вращательные оси, а все направления поступательно-

го движения ей параллельны). Более того, после некоторого конечного изменения относительного положения любого или всех шарниров (это изменение придает механизму новую конфигурацию) степеней свободы шарниров не-прекнемо принадлежат той же винтовой системе (и определяют ее). Такая инвариантность винтовой системы по отношению к конечному перемещению шарниров не является универсальной; например, когда четырехзвеновик является истинно пространственным, или перекошенным, он не обладает подвижностью, но может стать временно подвижным, если оси его шарниров будут удовлетворять весьма специальному условию принадлежности полуквадрике (семейству непересекающихся образующих) так называемого шагового гиперболоида общей винтовой системы третьего порядка. Более того, этот механизм можно еще больше специализировать, превратив его в механизм Беннета ([2], разд. 13.2). Тогда при движении этого механизма ориентация и форма шагового гиперболоида изменяются таким образом, что оси шарниров всегда принадлежат его полуквадрике. В ходе этого процесса изменения формы система третьего порядка далеко не инвариантна: как направления, так и шаг ее главных винтов непрерывно изменяются. Аналогичные рассуждения можно провести для многих других механизмов с избыточными связями, например для механизмов Брикара и Майяра и некоторых из механизмов Делассю ([2], гл. 13).

Рассуждения, относящиеся к механизмам типа Беннета, неприменимы при проектировании манипуляторов со многими степенями свободы, так как для механизмов с избыточными связями, винтовые системы которых не инвариантны по отношению к конечным перемещениям их кинематических пар, есть какая-то надежда получить полную подвижность [$d < 6$ в уравнении (1)], только если подвижность механизма равна 1. Поэтому необходимо сосредоточить внимание на тех винтовых системах, которые «гарантируют» полную подвижность, а именно на системах шестого порядка и тех системах, которые перечислены в табл. 13.1 ([2], разд. 13.2). В этих, и только этих, случаях можно попытаться выполнить качественный и количественный синтез; все иные винтовые системы позволяют лишь найти условия существования временной подвижности.

Возвращаясь к плоскому движению руки с параллельно действующими двигателями, укажем, что не следует ограничиваться только связностью 3 между исполнительным звеном и стойкой. На фиг. 4 показана двухстепенная рука, для которой уравнение (1) дает $M = 2$. Так как сумма степеней свободы шарниров должна быть равна пяти, невозможно сохранить симметрию фиг. 3; одна из соединительных цепей имеет на одну кинематическую пару больше, чем другие, но, разумеется, каждая цепь содержит один шарнир с двигателем.

Обобщим этот подход. Некоторые особые классы манипуляторов при этом, однако, игнорируются, а именно те, в которых исполнительное звено представляет собой не твердое тело, а элемент, который сводится к точке прямой или их комбинации. Для таких классов не возникает проблем, которые не могли бы быть решены с помощью некоторого изменения теории, излагаемой ниже.

Кроме того, ни одна из рассмотренных рук не является настолько асимметричной, чтобы различным контурам этих механизмов соответствовали различные значения d в уравнении (4) (см., например, последний абзац разд. 13.2 в [2]). Проектирование манипулятора, имеющего в своем составе контуры с различными d , не дает видимых практических преимуществ.

3. Перечисление кинематических структур

При анализе структур с параллельно действующими двигателями системой первого порядка (связность 1) можно пренебречь, так как неизменный результат — один двигатель, приводящий в движение одну кинематическую пару, — тривиален.

Легко составить табл. 1 для величины d в интервале $2 \leq d \leq 6$, выбирая в каждом случае значения M , такие, что $2 \leq M \leq d$. Ни одно число в четвертом столбце не может быть больше порядка d винтовой системы (первый столбец); действительно, если бы число последовательных степеней свободы соединительной цепи было больше, чем d , то при всех заблокированных двигателях исполнительное звено все еще сохраняло бы одну или более степеней свободы, при условии что ни одно число в четвертом столбце не меньше соответствующего числа во втором столбце колонки. Но это недопустимо, так как число степеней свободы исполнительного звена было бы тогда меньше числа двигателей (т. е. его связность была бы ниже, чем указано во втором столбце).

Вместо уравнения (4) (определяющего значение подвижности M для второго столбца и требующего подсчета полного числа звеньев n) может быть использовано уравнение (13.2) из [2], которое следует изменить, чтобы в него входило

Таблица 1. Перечисление всех соединительных цепей для «параллельного» привода

Порядок винтовой системы, которой принадлежит все степени свободы шарниров (d)	Число соединительных цепей (равное как связности исполнительного звена, так и числу параллельно действующих двигателей) (M)	Сумма степеней свободы всех шарниров (приводных и неподвижных) ($\sum f_i$), полученная из уравнений (1) или (2)	Число шарниров с одной степенью свободы в каждой соединительной цепи (каждая сумма равна числу в третьем столбце)
2	2	4	2, 2
3	2	5	3, 2
	3	9	3, 3, 3
4	2	6	3, 3/4, 2
	3	11	4, 4, 3
	4	16	4, 4, 4, 4
5	2	7	4, 3/5, 2
	3	13	5, 4, 4/5, 5, 3
	4	19	5, 5, 5, 4
	5	25	5, 5, 5, 5, 5
6	2	8	4, 4/5, 3/6, 2
	3	15	5, 5, 5/6, 5, 4/6, 6, 3
	4	22	6, 6, 5, 5/6, 6, 6, 4
	5	29	6, 6, 6, 6, 5
	6	36	6, 6, 6, 6, 6, 6

Строка с $d = 5$ исключена только для полноты; однако, указав из схем четвертого столбца для $d = 5$ не допускает более чем бесконечно малое перемещение исполнительного звена. См. табл. 2, строка $d = 5$.

число соединительных цепей, а не число независимых контуров. Элемент третьего столбца может быть легко получен как

$$\sum f_i = (\text{Столбец } 2) + (\text{Столбец } 1) [(\text{Столбец } 2) - 1]. \quad (2)$$

Табл. 2 получена из табл. 13.4 [2] добавлением описания (последний столбец). Полную подвижность гарантируют только эти винтовые системы. С точки зрения кинематической структуры (которая отличается от практической точки зрения) имеется много возможностей, совместных с совместными требованиями табл. 1 и 2, даже хотя система пятого порядка должна быть исключена — причины ее отсутствия в табл. 2 и последующего исключения см. в [2, гл. 12, 13].

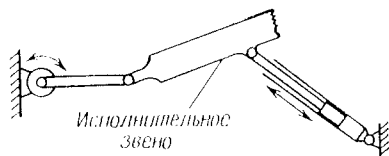
4. Интерпретация случаев $d=2, 3, 4$

Два практических примера, соответствующие $d = 3, M = 3$ (табл. 1) и пятому частному случаю системы третьего порядка, уже представлены на фиг. 3. Существует гораздо больше конфигураций этого типа, которые для краткости обозначаются здесь как 3/3/V. На фиг. 4 показана конфигурация при 3/2/V.

Эти интерпретации можно естественным образом обобщить. Например, три линейных двигателя B на фиг. 3, а практически могут представ-

Таблица 2. Винтовые системы, «гарантирующие» конечное перемещение

Порядок винтовой системы (d)	Обозначение в соответствии с классификацией [2]	Описание винтов, входящих в систему
2	Третий частный случай (разд. 12.5.3) Пятый частный случай (разд. 12.5.5)	Винты бесконечного шага вдоль всех прямых, параллельных данной плоскости Винты любого шага вдоль данной прямой вместе с винтами бесконечного шага вдоль всех параллельных ей прямых
3	Второй частный случай (разд. 12.7.2), исключая винты с нулевым шагом Третий частный случай (разд. 12.7.5)	Винты нулевого шага вдоль всех прямых, проходящих через точку, т. е. система, применяемая к описанию сферического движения Винты бесконечного шага вдоль всех прямых, параллельных данной плоскости вместе с винтами заданного конечного или нулевого шага вдоль всех прямых, перпендикулярных плоскости. Эта система включает в себя системы, применяемые к описанию плоского движения
4	Шестой частный случай (разд. 12.7.6) Третий частный случай (разд. 12.9.3)	Винты бесконечного шага вдоль всех прямых во всех направлениях Винты бесконечного шага вдоль всех прямых во всех направлениях вместе с винтами любого шага вдоль всех прямых, параллельных данному направлению
5	Не общий и не частный случай	
6		Все винты любого шага вдоль всех прямых во всех направлениях



Фиг. 4. Двухсуставной плоский манипулятор с одним вращательным и одним линейным двигателями.

лять собой цилиндрические пары, допускающие относительное вращение и поступательное движение. При условии что остальные шесть шарниров A и C допускают только чистые компланарные вращения, вращательные степени свободы линейных двигателей не используются, но тогда исполнительное звено при нагружении, вероятно, будет менее устойчивым. Можно, однако, стол исполнительного звена совершенно независимо опереть на плоский подшипник или каким-нибудь другим аналогичным способом, чтобы ни один из шарниров A, B, C не требовался для обеспечения плоского движения. Аналогичная форма опирания исполнительного звена, применима, конечно, и для конфигураций фиг. 3, b и 4, а также для обобщения фиг. 3, b на случай сферического движения, обозначаемый $3/3/II$.

Все шесть вращательных пар A и C на фиг. 3, a (или соответствующие им четыре вращательные пары на фиг. 4) могут быть заменены винтовыми парами с одним и тем же ненулевым конечным шагом (см. курсив *конечный* в табл. 2). Тогда при движении исполнительное звено будет иметь составляющую перемещения, перпендикулярную плоскости чертежа и зависящую от ориентации звена, и сохранять правильную связность относительно стойки. Если подобную замену осуществить в схеме фиг. 4, то *вращательный* двигатель превратится в *винтовой* — отнюдь не бессмысленная операция, хотя, может быть, и необычная. Если все девять вращательных пар на фиг. 3, b заменить винтовыми с одинаковым шагом, то будут получены те же результаты, и все три двигателя обязательно окажутся винтовыми. Этот переход от вращательных пар к винтовым, хотя и кинематически допустимый в случае $3/3/V$, с первого взгляда, может не понравиться конструктору хотя иногда и рассматривался при проектировании робототехнических устройств. Такая замена, однако, недопустима в случае $2/3/II$, соответствующем сферическому движению; здесь (табл. 2) все действующие совместно винты должны иметь нулевой шаг, так как при ненулевом, пусть даже одинаковом, шаге после некоторого конечного изменения конфигурации манипулятора они, вообще говоря, окажутся несовместимыми.

На фиг. 5, a и b показаны два двухсуставных манипулятора с параллельно действующими двигателями, относящиеся соответственно к случаям $2/2/II$ и $2/2/V$. Плоский механизм на фиг. 5, a содержит четыре поступательные пары (две из них приводные), причем исполнительное звено обладает двумя поступательными степенями свободы и не имеет вращательных. На фиг. 5, b изображен хорошо известный дифференциальный винт с дополнительным винтовым двигателем, а исполнительное звено может вращаться относительно

оси, общей для трех винтовых пар и перемещаться поступательно параллельно этой оси. Ни одна из схем на фиг. 5 (или их варианты) не представляет интереса; во-первых, они проявляют тенденцию к заклиниванию, а кроме того, при последовательном расположении двигателей те же результаты могут быть получены гораздо проще.

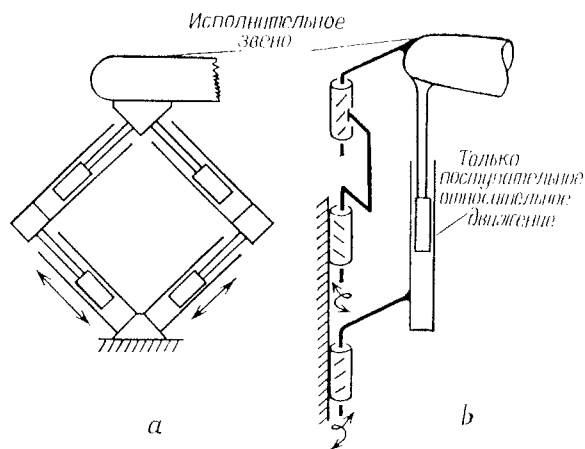
Ясно, что схема $3/3/VI$ тем более не представляет практического интереса. Этот пространственный вариант схемы фиг. 5, a с девятью поступательными парами, в трех из которых имеются двигатели. По сравнению с ней преимущество схемы с тремя последовательно действующими (взаимно ортогональными) двигателями является очевидным.

Более того, кажется, что ни одна из схем типа $4/2/III$, $4/3/III$, $4/4/III$ не могут дать какого-либо полезного устройства. Свойства третьего частного случая системы четвертого порядка описаны в [2], ее применение в механизмах рассматривается, например, в [2], разд. 13.2, а также в [4, 5]. Имеется множество возможных схем манипуляторов, в которых используются винтовые пары с различными шагами вдоль параллельных осей и поступательные пары с различными направлениями скольжения, но трудно заметить, чтобы какая-нибудь из них создавала хорошие перемещения исполнительного звена при разумных передаточных характеристиках независимо от того, какие средства служат для привода каждой соединительной цепи.

Пока обзор не привел к каким-либо действительным сюрпризам; практически приемлемыми оказываются только схемы $3/2/II$, $3/2/V$, $3/3/III$ и $3/3/V$. Так как эти схемы обеспечивают лишь обычное сферическое или плоское движение, проектирование по ним является относительно простым.

5. Интерпретация случая $d=6$

Табл. 1 обнаруживает много возможностей в области пространственного движения общего вида ($d=6$). Хотя колонка 4 допускает огромное разнообразие расположений кинематических пар, необходимо рассматривать схемы со единичным степеней свободы в одном сочленении, в частности в



Фиг. 5. Двухсуставной манипулятор с параллельным приводом.

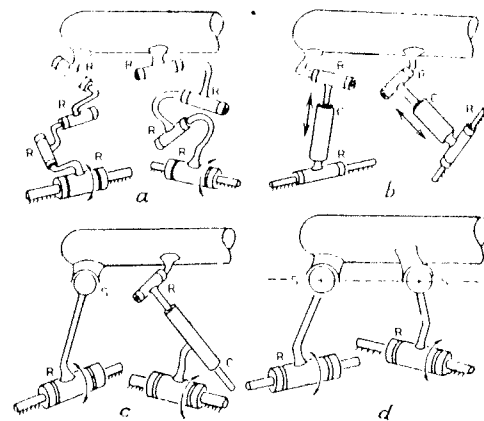
a — с двумя чисто поступательными линейными двигателями (стрелит частный случай системы второго порядка); b — с двумя винтовыми двигателями (винтит частный случай системы второго порядка).

сферическом шарнире S (шаровое сочленение, эквивалентное трем совмещенным вращательным степеням свободы R) или цилиндрический шарнир C , который представляет собой обычную форму линейного двигателя (вращательная R и параллельная оси вращения поступательная P степени свободы). Кроме того, полезен бывает шарнир Гука (или универсальный шарнир, состоящий из двух пересекающихся вращательных пар R), обозначаемый через $[RR]$. (Винтовой двигатель здесь больше не рассматривается, хотя известно, что бывают случаи, когда он с полным основанием мог бы заменить вращательный двигатель.) Упрощение, достигаемое благодаря слиянию, весьма желательно и с практической точки зрения даже необходимо. Основания для этого вывода аналогичны (см., например, [2], разделы 2.6, 11.4.2, 12.1) тем, из которых следует, что чем более общей является геометрия манипуляторов с последовательно действующими двигателями, тем сложнее управление ими. (Фактически основания указанных утверждений связаны, так сказать, соотношением взаимности, см., например, [2], разд. 2.6, 11.4.2, 12.1). Этот вопрос рассматривается несколько глубже в разд. 6 и 7.

В качестве примера рассмотрим общий вид первого манипулятора с обозначением согласно 6/2 в табл. 1, имеющего четыре степени свободы в каждой из двух соединительных цепей. Предположим, что исполнительное звено, связанное со стойкой двумя соединительными цепями, каждая из которых содержит вращательный двигатель и три следующие за ним вращательные пары, переходит в требуемое положение, после чего оба двигателя стопорятся. Шесть неприводных вращательных пар образуют теперь $6R$ -контур, для которого обычно $M = 0$. Однако, эти шесть вращательных степеней свободы могут оказаться линейнозависимыми; хуже того, шесть вращательных пар могут удовлетворять условию, которое обеспечивает $6R$ -контур полную подвижность. Кроме того, положения исполнительного звена оказываются плохо обусловленными, когда конфигурация «почти» линейно зависима. Во всем диапазоне ∞^2 положений исполнительного звена наверняка имеются области конфигураций, которых необходимо избегать, хотя найти такие конфигурации визуально практически невозможно; чтобы их обнаружить, необходимо непрерывно следить за координатами осей вращательных пар ([2], гл. 11—13) и проводить анализ возможно методами линейной алгебры, как, например, в [6].

Учтем также, что уравнение, описывающее связь тангенсы половинных углов, связь входа с выходом произвольного $7R$ -контура, имеет степень 32 [7]. Это означает, что для каждого расположения двух двигателей могут существовать ни много ни мало 32 конфигурации $6R$ -контура. Соответственно нельзя исключить возможность и даже вероятность того, что заданная программа управления двигателями не сможет обеспечить требуемое движение исполнительного звена из-за того, что контур будет принимать непривиденную форму.

На фиг. 6, b и c предлагаются упрощения геометрии манипулятора. Конфигурация фиг. 6 не приемлема: дело не только в том, что двигатели

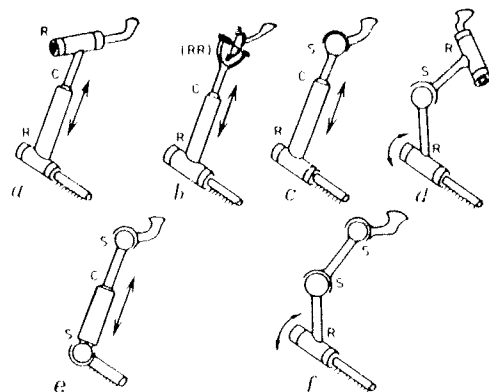


Фиг. 6. Двухступенные манипуляторы, $d = 2$.

a — общая $8R$ -схема, две вращательные пары — приводные; b — упрощенная, с двумя линейными двигателями, допускающими вращение относительно своих осей; c — $RSRCR$ -схема, две вращательные пары — приводные; d — неработающая $RSSR$ -схема.

не могут функционировать независимо (исполнительное звено всегда может вращаться относительно оси SS).

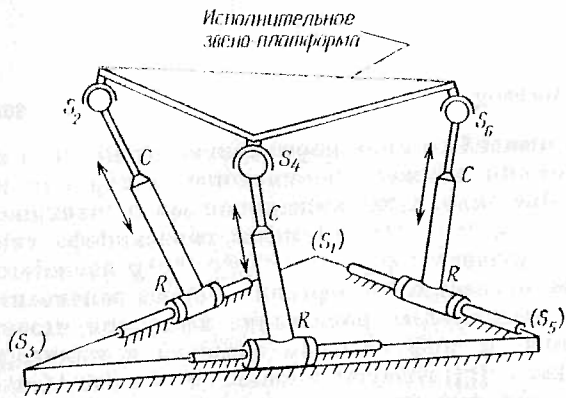
Соединительные цепи второго и третьего манипуляторов типа 6/2 в табл. 1 «асимметричны» в том смысле, что обладают различными степенями свободы. Это безусловно может сделать их менее привлекательными, чем рука фиг. 6, b . В любом случае все схемы типа 6/2 представляются малообещающими, при наличии всего двух соединительных цепей незначительное преимущество в виде большей жесткости по сравнению с последовательным расположением двигателей несколько не компенсирует ни усложнения конструкции руки, ни трудностей, связанных с возможными движениями исполнительного звена. В качестве составной части руки с последовательным действием остальных двигателей кажутся предпочтительными механизмы, обеспечивающие плоское и сферическое движение ($d = 3$). Однако доводы в пользу слияния кинематических пар (приводные, скажем, от фиг. 6, a к фиг. 6, b) применимы к манипулятору с $d = 6$ и связностью исполнительных звеньев выше 2; эти четыре группы схем содержат ряд важных примеров, которые описаны ниже.



Фиг. 7. Шесть возможных приводных соединительных цепей.

a — с четырьмя степенями свободы; b, c, d — с пятью степенями свободы; e, f — с шестью степенями свободы.

Приводная степень свободы отмечена двойной стрелкой, $[RR]$ обозначает шарнир Гука (универсальный шарнир).



Фиг. 8. Возможная трехстепенная компонента манипулятора с тремя линейными двигателями и соединительными цепями типа фиг. 7, *с*.

На фиг. 7 показаны некоторые соединительные цепи, которые, как мы полагаем, являются полезными. Схема фиг. 7, *а* уже приводилась на фиг. 6, *б*. Линияная степень свободы схемы *с* по сравнению со схемой *б* не имеет значения при условии, что сферический шарнир располагается точно по оси линейного двигателя. Схема *д* может быть реализована в виде $R-[RR]-[RR]$. Схема *е* имеет две «спиновые» вращательные степени свободы (соответствующие вращению вокруг оси звена), схема *ф* — одну. Сферический шарнир всегда может быть заменен на шарнир Гука при условии, что «спиновая» ось сохраняется. Такая замена весьма благоприятна, так как приводит к уменьшению люфта и, возможно, использованию более доступных узлов. На фиг. 7, *е* оба сферических шарнира можно заменить на $[RR]$, причем с сохранением шести степеней свободы. Интересные возможности представляет вариант 5, 5, 5 схемы 6/3. Три соединительные цепи, аналогичные показанным на фиг. 7, *с*, могут образовать устойчивый «треугольник» для исполнительного звена в виде треугольной платформы (фиг. 8). Могут быть также использованы цепи фиг. 7, *д*, одинаково расположенные вокруг основания и исполнительного звена — треугольной платформы и реализующие применительно к трехстепенному манипулятору известный принцип поступательной связи двух валов с постоянным передаточным отношением (см. [2], фиг. 13.8 и разд. 13.5). Аналогичным образом можно приспособить один вид для той же цели «трепажной» связи двух валов с постоянным передаточным отношением, применив три закрепленных на стойке линейных двигателя с параллельными осями (см., например, [8]). Все эти расположения могут быть практически использованы, скажем, в качестве сочетания плечо — локтевой шарнир. Симметричность варианта 5, 5, 5 делает его более привлекательным, чем 6, 5, 4 и 6, 6, 3, но возможны аргументы и против отбрасывания этих вариантов. В работе [2], разд. 15.2, отмечается, что шестистепенной манипулятор мог бы состоять из двух последовательных трехстепенных (т. е. как на фиг. 8) манипуляторов с параллельно действующими двигателями.

В то время как не существует «симметричных» соединительных цепей, соответствующих схемам 6/4 и 6/5 в табл. 1, возможно, что вариант 6.6.5 схемы 6/4 представляет интерес. Ей соответству-

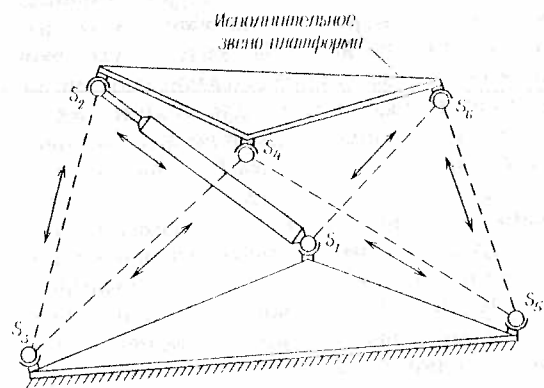
ют, например, механизмы с двумя ведущими шестистепенными цепями типа фиг. 7, *е* и чередующиеся (по «квадратной» схеме) с двумя степенными цепями типа фиг. 7, *с*. Вариант 6.6.5 схемы 6/5 здесь не исследуется, хотя, возможно, и заслуживает некоторого внимания.

На фиг. 9 показана упрощенная кинематическая схема «платформы Стюарта». Из практических соображений, изложенных в [3], совмещенные связи в углах треугольников, вероятно, требуют разнесения, чтобы избежать попарной концентричности сферических шарниров (или их $[RR]$ -заменителей). Конечно, шесть соединительных цепей можно разместить на стойке и исполнительном звене по шестиугольнику, однако размещение, близкое к октаэдру с ребрами переменной длины, показанное на фиг. 9, имеет важные преимущества (разд. 6 и 7). На фиг. 10 показан еще один вариант шестистепенной руки, в котором использованы соединительные цепи типа фиг. 7, *ф*, имеются причины, оправдывающие дальнейшее изучение этой схемы, которая представляет собой пространственный вариант схемы фиг. 3, *б*. На фиг. 10 каждая пара соединительных цепей (полностью показана только одна из них) приводится соосно, причем все шесть нижних сферических шарниров лежат попарно на близко расположенных окружностях. Верхние сферические шарниры попарно концентричны. Ни одно из этих геометрических условий не является необходимым, однако желательно, чтобы схема была сравнительно простой (разд. 6 и 7). Расположение двигателей может отличаться от показанного на фиг. 10 так, чтобы исполнительное звено было полноповоротным.

Хотя в границах, которые считаются здесь реалистическими, табл. 1 должна быть исчерпывающей, этот раздел ни в коем случае не охватывает все возможные схемы с шестью степенями свободы. Однако читатель легко может набросать другие схемы, среди которых могут оказаться и заслуживающие исследования для определения подходящего расположения двигателей и других размеров. Автор полагает, что он указал в общих чертах более вероятные направления дальнейших разработок.

6. Взаимность и особые конфигурации

В особой конфигурации руки с *последовательно* действующими двигателями приводные степени свободы, временно сообщаемые, теряют свою ли-



Фиг. 9. Шестистепенной манипулятор «платформа Стюарта» (схема); шесть соединительных цепей типа фиг. 7, *е*.

ное представление задачи и тем вероятнее попадание на особую конфигурацию или в неприятную близость к ней. В качестве примера наглядного геометрического представления вернемся к фиг. 9. Если октаэдр S_1S_2, \dots, S_6 остается выпуклым во всех своих вершинах, то структура устойчива. Однако если в результате изменения состояния двигателей его форма станет вырожденной, так что четыре треугольника с общей вершиной станут компланарными (например, если S_2, S_3, S_4, S_5, S_6 все окажутся в одной плоскости), то возникнет особая конфигурация. Шесть прямых S_1S_2 и т. д. будут тогда принадлежать особому линейному комплексу, центральная ось которого (взаимный винт с нулевым шагом) направлена по прямой S_2S_6 ([2], разд. 11.4.2). Соответственно исполнительное звено временно приобретет вращательную степень свободы относительно оси S_2S_6 . Переход через эту конфигурацию соответствует потере выпуклости в одной вершине S_4 октаэдра, а вогнутость приводит к возможности возникновения не только временно, но и постоянно присутствующих особых конфигураций [10]. Впрочем, вогнутый октаэдр вряд ли подходит для реального манипулятора. По-видимому, нетрудно будет спроектировать манипулятор, точно или приближенно соответствующий геометрии фиг. 9 с рабочими диапазонами всех шести линейных двигателей, ограниченными таким образом, чтобы после соответствующей начальной сборки механизм не мог слишком близко подойти к какой-либо особой конфигурации.

Особые конфигурации для рук, имеющих $d < 6$ (табл. 1), также обнаруживаются путем рассмотрения соотношений взаимности, которые часто приводятся к весьма простым формам. На фиг. 3, *b*, например, единственное условие, которого следует избегать, — это совпадение (или параллельность) трех прямых BC .

7. Сборочные формы манипуляторов

Когда расположение исполнительного звена (фиг. 9) относительно стойки задано, все шесть длин S_1S_2 и т. д. определены. Поэтому для каждого из шести линейных двигателей есть только одно соответствующее положение. Это же рассуждение применимо и к плоскому манипулятору фиг. 3, *a*, у которого положения трех линейных двигателей определяются расположением исполнительного звена относительно стойки. Напротив, если на фиг. 3 заранее задать определенные длины трех линейных двигателей, то может реализоваться шесть расположений исполнительного звена или шесть сборочных форм манипулятора в целом. Этот результат легко получить из следующих соображений. При разрыве одной соединительной цепи исполнительное звено сохраняет одну степень свободы, и его точка описывает шатуновую кривую, которая, как известно, представляет собой трехциркулярную кривую шестого порядка ([2], гл. 7). Эта кривая имеет самое большее шесть действительных точек пересечения с окружностью. Тот же результат относится к манипулятору на фиг. 3, *b*, но если его рассматривать с точки зрения сферического движения, то здесь могут существовать уже восемь сборочных

форм, поскольку при сферическом движении шатунный конус имеет порядок 8 и его сечение четырехциркулярно [11]. Будем считать, что как сферическая, так и произвольная «спиновая» ([2], гл. 10) поверхности шестнадцатого порядка цепи $RSSR$ восемь раз содержат минимую сферическую окружность (хотя точное определение циркулярностей таких поверхностей автору не известно). Тогда для манипуляторов фиг. 8—10 с двигателями, застопоренными в заданных положениях, может существовать 16 сборочных форм. Если циркулярность спиновой поверхности $RSSR$ -цепи окажется меньше 8, то сборочных форм может быть еще больше. И все же геометрия манипулятора фиг. 9 достаточно проста; любое отступление от простоты в сторону общности ограничивается увеличением числа сборочных форм, возможно, до очень больших значений.

Замечания предыдущего абзаца приводят на мысль о другом проявлении «взаимности» между манипуляторами с параллельно и последовательно действующими двигателями, подчеркивающим их противоположность. При последовательном приводе, когда все двигатели застопорены в заданных положениях, существует только одно положение исполнительного звена. Напротив, для данного расположения исполнительного звена может быть несколько, даже много конфигураций манипулятора; число их прямо связано с количеством сборочных форм одноконтурной кинематической цепи. Эту тему можно было бы развить, если бы не ограниченность места. (Предоставляем читателю самостоятельно рассмотреть, например, до какой степени применимы предыдущие замечания к фиг. 3, *b* и 4.).

Чрезвычайно важно знать возможные сборочные формы, так как переход от одной формы к другой всегда происходит через особую конфигурацию, которая обычно представляет собой «стационарную конфигурацию», а иногда «неопределенную конфигурацию» ([2], разд. 13.3 и 14.3). В самых общих чертах мы заключаем, что для манипулятора, обладающего большим количеством сборочных форм, легче получить и труднее избежать особой конфигурации, чем в случае манипулятора с меньшим числом форм. Во время любой последовательности действий по управлению исполнительным звеном манипулятора с параллельным приводом важно сохранить непрерывность множества конфигураций в рамках того, что может быть названо «областью непрерывности сборочной формы»; это утверждение (*a*) усиливает сказанное в разд. 6 об особой важности сохранения выпуклой формы октаэдра фиг. 9 и (*b*) служит важным и более общим предупреждением при рассмотрении манипуляторов с другой геометрией, особенно тех, для которых конфигурации, соответствующие переходам между сборочными формами, не следуют очевидным образом из обычных здравых рассуждений.

8. Заключение

Можно надеяться, что эта попытка развития идеи, росток которой содержится в [2], разд. 15.2, и систематизация манипуляторов с параллельным приводом послужит стимулом для исследований и разработок в области робототехники. В разд. 6

и 7 мы всего лишь коснулись проблем особых конфигураций, указав, однако, пути к их прояснению на основе установленных принципов теории винтов и кинематической геометрии в сочетании с известными методами линейной алгебры. Возможности дальнейшего исследования общих принципов представляются ограниченными. Дальнейший критический поиск может обнаружить перспективность некоторых конкретных схем из широкого набора возможностей, предоставляемых табл. 1, — схем, не включенных в приводимые здесь иллюстративные примеры. Робототехнические устройства с параллельно действующими двигателями, безусловно, имеют будущее. Кроме того, изложенное здесь систематическое исследование может оказаться полезным для теории шагающих машин, совместно действующие ноги которых аналогичны соединительным цепям манипуляторов с параллельно действующими двигателями.

ЛИТЕРАТУРА

1. van Dijk A., Rankers H., «Entwurf eines Manipulators, Kinematik und Dynamik», *VDI-Berichte*, No. 321, 1979, pp. 17—26.

2. Hunt K. H., *Kinematic Geometry of Mechanisms*, Clarendon Press, Oxford, 1978.
3. Fichter E. F., McDowell E. D., «A Novel Design for a Robot Arm», *Proc. Internat. Computer Technology Conference*, New York, ASME, 1980, pp. 250—256.
4. Waldron K. J., «A Family of Overconstrained Linkages», *Journal of Mechanisms*, Vol. 2, 1967, pp. 201—211.
5. Hunt K. H., «Prismatic Pairs in Spatial Linkages», *Journal of Mechanisms*, Vol. 2, 1967, pp. 213—230.
6. Sugimoto K., Duffy J., Hunt K. H., «Special Configurations of Spatial Mechanisms and Robot Arms», *Mechanism and Machine Theory*, Vol. 17, 1982, pp. 119—132.
7. Duffy J., Crane C., «A Displacement Analysis of the General Spatial 7-Link, 7R Mechanism», *Mechanism and Machine Theory*, Vol. 15, 1980, pp. 153—169.
8. Дьюрам, «Кинематика пазово-шариковых шарниров», *Конструирование и технология машиностроения*, № 2, 1975, с. 201, изд-во «Мир».
9. Ball R. S., *The Theory of Screws*, Cambridge University Press, 1900.
10. Bricard R., «Mémoire sur la Théorie de l'Octaèdre Articulé», *Journal of Math. Pures Appl.*, Vol. 3, 1897, pp. 113—150.
11. Примроуз, Фрейденштейн «Движение пространственных механизмов. Часть 1. Трасектории точек механизма с четырьмя или меньшим числом звеньев», *Конструирование и технология машиностроения*, № 1, 1969, с. 111, изд-во «Мир».

УДК 621.833 : 621.89

Эйкин

(L. S. Akin)

California State University,
Лонг-Бич, шт. Калифорния

Таунсенд

(D. P. Townsend)

Lewis Research Center, Кливленд, шт. Огайо

Смазка зоны зацепления прямозубых цилиндрических зубчатых передач при произвольном смещении сопла системы принудительной подачи масла. Часть 1. Скорость струи масла меньше или равна окружной скорости зубчатого колеса

(Into Mesh Lubrication of Spur Gears With Arbitrary Offset Oil Jet. Part 1: For Jet Velocity Less Than or Equal to Gear Velocity)

Выполнено исследование условий смазки зоны зацепления зубчатых передач при различных удалениях от полюса зацепления и угле наклона сопла системы принудительной подачи масла и скорости струи масла, равной или меньшей окружной скорости зубчатого колеса. Рассматривали случай, когда струя смещена от полюса зацепления в направлении к шестерне и направлена так, что она проходит через полюс зацепления. Выведены формулы для расчета минимальной скорости струи масла, необходимой для омывания шестерни и колеса, и оптимальной скорости для достижения максимальной глубины омывания. Обнаружено, что оптимальным в отношении смазки и охлаждения является режим работы, при котором скорость струи масла равна окружной скорости колес, причем охлаждаться должны обе стороны зуба. Если скорость струи несколько меньше окружной скорости, охлаждаются ведущая сторона зуба шестерни и неподвижная сторона зуба колеса. Если скорость струи значительно меньше окружной скорости, глубина омывания очень мала, и шестерня может оказаться без смазки.

Обозначения

$a = 1/P_d$ или $(1 \pm \Delta N/2)/P_d$ — высота головки;
 b_p, b_g — доля бокового зазора, отнесенная соответственно к шестерне и колесу;

B_p, B_g — суммарный боковой зазор шестерни и колеса при $P_d = 1$;
 d_p, d_g — глубина омывания, измеренная по радиусу;
 L_p, L_g — расстояние до точки, где достигается полная глубина омывания, для зуба шестерни и колеса;
 L_{ig} — промежуточное расстояние при расчете глубины омывания;

Представлено на ежегодную зимнюю конференцию ASME, 15—19 ноября 1982 г., Феникс, шт. Аризона; получено редакцией 31 мая 1983 г.