

УДК 620.178.153

**МЕТОДОЛОГИЯ БЛОЧНО-МОДУЛЬНОГО СТРУКТУРНО-
ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО СИНТЕЗА РЕГУЛИРУЕМЫХ
ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ МАНИПУЛЯЦИОННЫХ МЕХАНИЗМОВ**

Ю.Л. Саркисян, К.Г. Степанян, М.Г. Арутюнян, С.В. Верлинский

Национальный политехнический университет Армении

Представлены обобщенная методология и блок-схема структурно-параметрического синтеза регулируемых параллельных манипуляционных механизмов (РПММ) для приближенного воспроизведения двух и более заданных последовательностей конечноудаленных положений твердотельного объекта. Структурными модулями РПММ являются регулируемые двухзвенные подцепи (диады), соединяющие объект манипулирования (выходные звенья) со стойкой. Модульная структура РПММ позволяет разбить сложный процесс аппроксимационного параметрического синтеза на локальные процедуры синтеза их составных диад-модулей, которые выполняются параллельно.

Ключевые слова: манипуляционный механизм, структурно-параметрический синтез, аппроксимационный синтез, регулируемая диада, параллельный механизм.

Введение. Традиционные рычажные и другие механизмы с одной степенью подвижности, распространенные в основном в так называемых “жестких системах автоматизации”, обеспечивают высокую скорость, повторяемость движений и устойчивость при низкой стоимости. При этом они не обладают достаточной функциональной гибкостью и способностью к реконфигурации, что часто требуется при их производственных приложениях. Такие механизмы проектируются для выполнения лишь одной кинематической функции и могут быть использованы в задачах автоматизации, где предписанное задание воспроизведения движения рабочего органа в процессе работы не меняется. С другой стороны, в большинстве процессов автоматизации производства, даже при выполнении ограниченного числа периодически повторяемых простейших производственных операций, сегодня используются дорогостоящие универсальные производственные роботы со многими степенями свободы, что во многих случаях экономически не оправдано. В качестве компромиссного решения требуется новый класс механических устройств, которые совмещали бы высокое быстродействие, низкую стоимость и другие преимущества одноподвижных механизмов жесткой автоматизации с функциональной

гибкостью и способностью к реконфигурации, присущими многоподвижным манипуляторам. Именно такую возможность предоставляют регулируемые манипуляционные механизмы, которые за счет управляемого изменения своей структуры и одного-двух геометрических параметров (длин звеньев, координат опорных шарниров) могут перенастраиваться для выполнения изменяющихся кинематических заданий [1,2].

Основное преимущество таких механизмов – это их многофункциональность и реконфигурируемость, т.е. способность реализовывать несколько заданных движений или последовательностей заданных положений манипулируемого объекта посредством простого регулирования переменных геометрических параметров с сохранением исходной системы звеньев и всех желаемых характеристик базовых одноподвижных механизмов. Именно благодаря такой функциональной гибкости и способности адаптироваться к условиям нового кинематического задания одноподвижные регулируемые механизмы получили название “программируемые механизмы” и во многих случаях успешно заменяют производственные роботы [3–5].

Известные методы синтеза регулируемых манипуляционных механизмов берут свое начало от задач точного воспроизведения небольшого числа положений твердотельного объекта. Эти методы имеют ограниченную сферу применения, так как они адресованы к отдельным структурным вариантам плоских и пространственных механизмов [6–9], способным точно воспроизводить лишь 2...3 последовательности заданных положений объекта с не более чем четырьмя положениями в каждой. Однако современные приложения реконфигурируемых манипуляционных механизмов часто требуют, чтобы объект манипулирования в каждом режиме движения проходил через большее число фиксированных положений, которые могут быть реализованы не точно, а с допустимым для практики приближением (погрешностью). Подобная постановка задачи синтеза регулируемых манипуляционных механизмов предполагает применение методов и вычислительного аппарата аппроксимационного синтеза механизмов [10]. В синтезе РПММ подобные методы впервые были применены в работах [11,12] авторов настоящей статьи, где для достижения искомого приближения к заданным движениям использованы среднеквадратический и минимаксный критерии оценки точности искомого кинематического приближения.

Целью настоящей статьи является разработка обобщенной методологии модульного структурно-параметрического синтеза РПММ для воспроизведения двух и более заданных движений объекта манипулирования и постановка ассоциированных аппроксимационных задач параметрического синтеза их типовых модулей.

Блочно-модульный принцип и блок-схема проблемно ориентированного структурно-параметрического синтеза РПММ. Реконфигурируемые параллельные манипуляторы, применяемые в гибких производственных системах и других областях, в основном строятся по модульному принципу, когда механизм формируется из заданного набора автономно проектируемых структурных единиц-модулей, которые могут быть собраны в различных сочетаниях, образуя альтернативные конфигурации с различными кинематическими характеристиками и динамическим поведением. При создании таких систем преобладает проблемно ориентированный подход, когда выбор структуры манипулятора обусловлен требованиями конкретного кинематического задания [13,14]. Подобный подход нами был удачно применен при синтезе реконфигурируемого параллельного манипуляционного устройства для прямого искусственного массажа сердца [15].

Предлагаемую методологию проблемно ориентированного блочно-модульного синтеза РПММ можно представить в виде обобщенной блок-схемы (см. рис.), инвариантной к объекту проектирования. Исходные данные синтеза РПММ, определяемые техническим заданием на их проектирование, содержат требования к функционированию регулируемого манипуляционного механизма, его заданные структурные характеристики, входные параметры, критерии и ограничения синтеза. Критерии синтеза представляют собой выходные функции (показатели) математической модели синтезируемого механизма и критериальных ограничений в виде числовых значений, которым должны удовлетворить эти показатели. При оптимизационной постановке одна из этих функций может быть переведена в ранг целевой.

Процесс синтеза РПММ по описанной методологии можно представить в виде последовательности следующих этапов-операций:

1) Образуется множество альтернативных структур механизма, соответствующих исходным функциональным и структурным требованиям технического задания. Это множество назовем структурным базисом синтеза. В случае РПММ этот базис формируется из набора структурных модулей-подцепей с постоянными и изменяемыми размерами, соединяющих выходное звено (платформу) со стойкой. Правила соединения этих подцепей в кинематической цепи манипуляционного механизма для обеспечения заданного числа степеней свободы описываются известными структурными формулами для параллельных механизмов.

2) Для одной из допустимых схем, выбранной в структурном базисе синтеза, составляется математическая модель механизма, описывающая зависимости выходных показателей (критериев) синтеза от геометрических параметров схемы.

3) На базе этой модели осуществляется параметрический синтез манипулятора выбранной структуры, в процессе которого определяются числовые значения искомых параметров манипулятора, удовлетворяющие заданной совокупности условий синтеза. При синтезе РПММ по двум и более заданным наборам положений объекта манипулирования процесс синтеза разбивается на автономно выполняемые блоки синтеза составных модулей-подцепей с возможностью применения эффективных итерационных методов аппроксимационного синтеза механизмов [10].

4) Блок анализа осуществляет проверку соответствия найденных значений выходных показателей заданным условиям синтеза. Если внутри выбранной структуры не находится приемлемых решений, то производится переход к другой структуре в рамках структурного базиса синтеза, причем для каждой новой структуры вновь осуществляется процедура параметрического синтеза. Если после перебора всех структурных вариантов решение не находится, то изменяются критерии синтеза, т.е. меняются числовые значения критериальных ограничений, и далее процедуры структурного и параметрического синтеза циклически повторяются.



Рис. Обобщенная блок-схема структурно-параметрического синтеза РПММ

Таким образом, синтез РПММ может рассматриваться как совокупность двух циклически повторяемых итерационных процессов: формирование и редактирование исходной структуры и параметрический синтез механизма выбранной структуры.

Структурный синтез РПММ. Лежащий в основе синтеза РПММ их структурный базис представляет собой набор подцепей-модулей с постоянными и регулируемыми геометрическими параметрами, связывающих объект манипулирования (выходное звено) со стойкой, и структурные варианты (альтернативные структурные схемы) РПММ, соответствующие функциональным и структурным требованиям, предписанным техническим заданием на проектирование. В зависимости от разновидностей кинематических пар и числа звеньев этих подцепей, а также вариантов их соединения в кинематической цепи проектируемого механизма число структурных РПММ, отвечающих заданным функциональным и структурным требованиям, может быть слишком большим, что затрудняет реализацию предлагаемого алгоритма поиска оптимального структурного варианта РПММ.

Для ограничения числа структурных вариантов РПММ, участвующих в описанных выше итерационных циклах структурного и параметрического синтеза, примем следующие упрощающие допущения.

1) В качестве структурных модулей нами будут рассмотрены лишь двузвенные подцепи-диады.

2) Модули-диады соединяются с выходным звеном трехподвижными сферическими (С) и двухподвижными цилиндрическими (Ц) парами, что уменьшает число пассивных пар, а следовательно, и движущиеся массы синтезируемых механизмов.

3) Средняя пара диад, выполняющая регулируемую функцию, может быть поступательной (П) или вращательной (В). Она активна лишь в режиме реконфигурации (переналадки) механизма, когда устанавливаются новые значения межцентровых или межосевых расстояний крайних пар диады. В рабочих режимах манипуляционного механизма средние пары диад фиксируются, превращая диады в двухэлементные (бинарные) звенья, накладывающие определенные связи на движение объекта манипулирования.

4) В качестве опорных кинематических пар, связывающих диады-модули со стойкой, могут быть использованы вращательные (В) и поступательные (П) или же двузвенные кинематические соединения с вращательными и поступательными парами, кинематически эквивалентные плоскостным (Пл), цилиндрическим и сферическим парам.

5) Нами рассматриваются лишь РПММ, которые в рабочих режимах функционируют как системы с одной степенью подвижности, следовательно, они имеют лишь одну активную кинематическую пару (один привод). Однако по

данной методологии могут быть синтезированы также механизмы с большим числом степеней подвижности.

В соответствии с этими условиями для построения РПММ выбраны следующие структурные разновидности диад-модулей: СПС, ПлПС, Ц⁺ПС, Ц⁻ПЦ, В⁺ПЦ, В⁺ПС, В[×]ВС, ППЦ. В условных обозначениях диад индекс “ \times ” указывает на пересечение осей смежных пар, а “ \perp ” – на их перпендикулярность.

Задача структурного синтеза РПММ состоит в формировании множества их структурных вариантов с заданной степенью подвижности, полученных разными сочетаниями однотипных или структурно различных диад-модулей. Обладая одинаковым числом степеней свободы, альтернативные структурные схемы, собранные в структурном базисе синтеза, способны обеспечить различные уровни точности реализации заданных движений и других функциональных характеристик.

Как отмечалось, рассматриваемые нами РПММ в рабочих режимах действуют как одноподвижные (одноприводные) механизмы. Это означает, что при фиксации срединных регулирующих пар суммарное число условий связи, вводимых присоединяемыми диадами-модулями, равно пяти. Так, например, для построения одноподвижного РПММ с использованием только модулей типа СПС надо иметь 5 таких модулей.

Параметрический аппроксимационный синтез РПММ. Чтобы определить, отвечает ли какой-либо структурный вариант РПММ заданным критериям проектирования, согласно блок-схеме на рис., надо сначала составить его математическую модель, далее осуществить процедуру параметрического синтеза и только после определения всех неизвестных метрических параметров провести анализ синтезированного механизма на соответствие этим критериям. Прямой подход к параметрическому синтезу, когда путем перебора искоемых параметров в итерационном цикле модель (механизм) усовершенствуется для удовлетворения критериев синтеза, в данном случае приводит к громоздким вычислительным процессам из-за сложности математических моделей кинематики параллельных механизмов. С другой стороны, модульная структура РПММ позволяет при их параметрическом синтезе использовать широко распространенный в системном проектировании декомпозиционный подход и разбить сложный вычислительный процесс определения параметров на автономные процедуры синтеза отдельных диад-модулей, которые могут быть выполнены параллельно. Эти модули, присоединяемые к объекту манипулирования, накладывают определенные ограничения (связи) на его движение.

В зависимости от структуры модулей налагаемые ими связи описываются системами эквидистантных кривых, поверхностей и других геометрических форм, генерируемых концевыми точечными или линейными элементами диад-модулей при различных значениях варьируемой линейной или угловой координаты

срединой регулирующей пары диад. Соответственно, задачи параметрического синтеза диад-модулей сводятся к поиску характеристических точек или линий объекта, траектории которых наиболее точно аппроксимируют указанные геометрические формы в заданных последовательностях положений объекта.

В таблице приводятся геометрические формы, моделирующие связи, введенные типовыми диадами-модулями РПММ.

Таблица

Геометрические формы, моделирующие связи диад-модулей РПММ

Условное обозначение диады	Схема диады	Моделирующая геометрическая форма
СПС		концентрические сферы
ПлПС		параллельные плоскости
Ц+ПС		соосные прямые цилиндры
Ц+ПЦ		соосные линейные конгруэнции
В+ПЦ		соосные гиперboloиды вращения
В+ПС		соосные концентрические окружности
В×ВС		концентрические окружности на одной сфере
ППС		компланарные параллельные прямые

Таким образом, параметрический синтез любого структурного варианта РПММ можно свести к совокупности автономно решаемых задач аппроксимационного синтеза диад-модулей, входящих в его состав. В обобщенной форме эти задачи можно сформулировать следующим образом: в неподвижной системе отсчета OXYZ задано m упорядоченных наборов e_{ji} ($j = 1, 2, \dots, m, i = 1, 2, \dots, N_j$) конечноудаленных положений твердотельного объекта e с N_j положениями в каждом j -ом наборе. В подвижной системе координат $oxuz$, жестко связанной с e , требуется определить такую точку B (прямую α), которая в заданных последовательностях положений тела e , в смысле выбранной нормы приближения, наименее отклоняется от семейства F_j ($j = 1, 2, \dots, m$) кривых, поверхностей или других геометрических форм (см. табл.), которые описывают связи, налагаемые на движение e синтезируемой диадой.

Приведенная ниже методология параметрического аппроксимационного синтеза представляет собой последовательность процедур, обеспечивающих направленный поиск числовых значений искомых параметров синтезируемой диады, которые удовлетворяют заданным условиям синтеза.

1) *Выбор функций отклонения, характеризующих расстояние рассматриваемых положений точки B (прямой α) от геометрических форм семейства F_j ($j = 1, 2, \dots, m$), моделирующих связи рассматриваемой диады.* Ввиду сложности функции геометрического (ортогонального) отклонения от искомых параметров в теории аппроксимационного синтеза механизмов принято использовать так называемое алгебраическое отклонение или “взвешенную разность”, выражения которой получаются на базе неявных уравнений рассматриваемых геометрических форм, если подставлять в них переменные координаты точки B (прямой α) в системе OXYZ:

$$\Delta q_{ji} = F_{ji}(\mathbf{a}, b_j, \mathbf{u}_{ji}), \quad j = 1, 2, \dots, m, \quad i = 1, 2, \dots, N_j, \quad (1)$$

где \mathbf{a} – вектор постоянных параметров диады; b_j ($j = 1, 2, \dots, m$) – значения переменной линейной координаты срединной регулирующей пары диады, подлежащие определению в процессе синтеза; \mathbf{u}_{ji} – переменный вектор, определяющий положение точки B_{ji} (прямой α_{ji}) в системе OXYZ.

2) *Выбор нормы (меры) приближения, т.е. целевой функции задачи аппроксимационного синтеза диады.* В аппроксимационном синтезе механизмов обычно используются два критерия оценки погрешности приближения – среднеквадратическое значение алгебраических отклонений (1) или же их

наихудшее (наибольшее) значение для заданного множества $N = \sum_{i=1}^m N_j$ положений объекта e :

$$S_1(P) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^{N_i} \Delta_{q_{ji}}^2(P)}, \quad (2)$$

$$S_2(P) = \max_{j \in [1:m]} \max_{i \in [1:N]} \Delta_{q_{ji}}(P), \quad (3)$$

где P – вектор совокупности всех искомых параметров аппроксимационной задачи, объединяющий a, b_j ($j = 1, 2, \dots, m$), а также координаты точки B (прямой α) в системе охуз.

3) *Определение искомых параметров диады.* Указанные выше искомые параметры диады определяются по условию минимума функции (2) или (3):

$$S_i(P^*) = \min_{(P)} S_i(P), \quad S_2(P^*) = \min_{(P)} S_2(P). \quad (4)$$

Вычислительные алгоритмы решения задач (4) применительно к синтезу РПММ представлены в [11, 12 и 16].

4) *Анализ на соответствие синтезированного механизма заданным условиям синтеза.* После параметрического синтеза всех составных диад-модулей рассматриваемого структурного варианта РПММ проводится анализ его соответствия заданным условиям синтеза, в число которых входят как допустимая точность воспроизведения предписанных m наборов положений e , так и ограничения, характеризующие непрерывность движения и другие функциональные требования к проектируемому механизму. Проверка выполнения заданных условий синтеза завершает процесс параметрического синтеза РПММ выбранной структуры.

Заключение. Предлагаемая методология структурно-параметрического синтеза РПММ представляет собой последовательность двух циклически повторяемых итерационных процедур: формирование структурной схемы РПММ по заданному числу степеней свободы и другим структурно-функциональным требованиям технического задания и определение неизвестных параметров построенной схемы по критерию точности воспроизведения заданных последовательностей положений объекта манипулирования. Модульный принцип образования РПММ позволяет проводить декомпозицию параметрического синтеза любого структурного варианта рассматриваемых механизмов на автономные аппроксимационные задачи параметрического синтеза его составных диад-модулей. Эти задачи, в свою очередь, сводятся к поиску характеристических точек и линий объекта, которые в заданных последовательностях положений объекта, в смысле наименьших квадратов или минимакса, аппроксимируют геометрические формы, моделирующие связи, налагаемые присоединяемыми к объекту диадами-модулями. Таким образом, реализация представленной методологии параметрического синтеза РПММ требует развития эффективных алгоритмических решений аппроксимационных задач синтеза диад-модулей различной структуры.

Работа выполнена в рамках проекта 15Т-2D044, финансируемого Госкомитетом по науке при Министерстве образования и науки Республики Армения.

Литература

1. **Sarkissyan Y.L., Kharatyan A.G., Eghishyan K.M., Parikyan T.F.** Synthesis of mechanisms with variable structure and geometry for reconfigurable manipulation systems // Proc. of ASME/ IFToMM Int. Conf. on Reconfigurable Mechanisms and Robots. – Re Mar, London, UK, 2009. – P. 195-199.
2. **Kuo C.H., Yan J.S.** Reconfiguration principles and strategies for reconfigurable mechanisms // Proc. of ASME / IFToMM Int. Conf. on Reconfigurable Mechanisms and Robots. – Re Mar, London, UK, 2009. – P. 1-7.
3. **Kota S., Chuenchom T.** Adjustable robotic mechanisms for low-cost automation // ASME Design Technical Conferences. – Chicago, IL, USA, 1990. – Vol. 26. – P. 297-306.
4. **Kota S.** Arms for low-cost semi-flexible automation // Robotics Today. – 1991. – 4(1). – P. 1-2.
5. **Larochelle P. and Venkataramanujam V.** A new concept for reconfigurable planar motion generators // Proc. of the ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition (IMECE). – ASME Press, 2013. – P. 1-8.
6. **Russell K., Sodhi R.S.** Kinematic synthesis of adjustable RRSS mechanisms for multi-phase motion generation // Mechanisms and Machine Theory. – 2001. – 36. – P. 939-952.
7. **Russell K., Sodhi R.S.** Kinematic synthesis of adjustable RRSS mechanisms for multi-phase motion generation with tolerances // Mechanism and Machine Theory. – 2002. – 37. – P. 279-294.
8. **Russell K., Sodhi R.S.** Kinematic synthesis of adjustable RRSS-SS mechanisms for multi-phase finite and multiply separated positions // ASME Journal of Mechanical Design. – 2003. – 125. – P. 847-853.
9. **Peng C., Sodhi R.S.** Optimal synthesis of adjustable mechanisms generating multi-phase approximate paths // Mechanisms and Machine Theory. – 2010. – 45. – P. 989-996.
10. **Саркисян Ю.Л.** Аппроксимационный синтез механизмов. – М.: Наука, 1982. – 304 с.
11. **Саркисян Ю.Л., Харатян А.Г., Парикян Т.Ф.** Аппроксимационный синтез реконфигурируемых манипуляционных механизмов с регулируемыми диадами // Известия НАН РА и ГИУА. Серия ТН. – 2009. – Т. 62, № 3. – С. 251-261.
12. **Саркисян Ю.Л., Степанян К.Г., Верлинский С.В.** Аппроксимационный синтез реконфигурируемых параллельных манипуляторов с ограниченной подвижностью по минимаксному критерию точности // Известия НАН РА и ГИУА. Серия ТН. – 2014. – Т. LXVII, № 2. – С. 119-128.
13. **Kumar A., Chen I., Yeo S., Yang G.** Task-based configuration design for 3 legged modular parallel robots simplex methods // Proc. of IEEE Int. symposium on computational intelligence in robotics and automation. – Japan, 2003. – P. 998-2003.
14. **Chen D., Pai W.** A methodology for conceptual design of mechanisms by parcing design specifications // Journal of Mechanical design. – 2005. – Vol. 27, No 6. – P. 1039-1044.

15. Саркисян Ю.Л., Степанян К.Г., Мелкоян С.Т. Методология проблемно-ориентированного синтеза реконфигурируемых параллельных манипуляторов с примером медицинского приложения // Труды XVIII Международной научно-технической конференции “Машиностроение и техносфера в XXI веке”. – Севастополь-Донецк, 2011. – С. 78-81.
16. Sarkissyan Y.L. Rigid body points approximating concentric spheres in alternating sets of its given positions // Reports, NAS RA. – 2015. – Vol. 115, issue 2. – P. 110-118.

*Поступила в редакцию 11.04.2016.
Принята к опубликованию 13.05.2016.*

ԿԱՐԳԱՎՈՐՎՈՂ ԶՈՒԳԱՇԵՌ ՄԱՆԻՊՈՒԼՅԱՑԻՈՆ ՄԵԽԱՆԻԶՄՆԵՐԻ ԲԼՈԿ-ՍՈՂՈՒԼԱՅԻՆ ԿԱՌՈՒՑՎԱԾՔԱՅԻՆ-ՊԱՐԱՄԵՏՐԱԿԱՆ ՍԻՆԹԵԶԻ ՄԵԹՈԴԱԲԱՆՈՒԹՅՈՒՆԸ

Յու.Լ. Սարգսյան, Կ.Գ. Ստեփանյան, Մ.Գ. Հարությունյան, Ս.Վ. Վերլինսկի

Ներկայացվում են պինդմարմնային օբյեկտի վերջավոր դիրքերի 2 և ավելի տրված հաջորդականությունների մոտավոր վերարտադրության համար նախատեսված կարգավորվող զուգահեռ մանիպուլյացիոն մեխանիզմների (ԿՁՄՄ) կառուցվածքային-պարամետրական սինթեզի ընդհանրացված մեթոդաբանությունը և բլոկ-սխեման: Որպես ԿՁՄՄ կառուցվածքային մոդուլներ օգտագործվում են մանիպուլացման օբյեկտը (ելքի օղակ) հենոցին միացնող տարբեր կառուցվածքներով երկօղակ ենթաշղթաները (դիադներ): ԿՁՄՄ զուգահեռ կառուցվածքը թույլ է տալիս տրոհել դրանց ապրոքսիմացիոն պարամետրական սինթեզի բարդ հաշվարկային պրոցեսը դիադ-մոդուլների սինթեզի զուգահեռաբար իրականացվող լոկալ բլոկների:

Առանցքային բաներ. մանիպուլյացիոն մեխանիզմ, կառուցվածքային-պարամետրական սինթեզ, ապրոքսիմացիոն սինթեզ, կարգավորվող դիադ, զուգահեռ մեխանիզմ:

METHODOLOGY OF BLOCK-MODULAR STRUCTURAL-PARAMETRIC SYNTHESIS OF ADJUSTABLE PARALLEL ROBOTIC MECHANISMS

Yu.L. Sarkissyan, K.G. Stepanyan, M.G. Harutyunyan, S.V. Verlisnki

A generalized methodology and a flowchart for the structural-parametric synthesis of adjustable parallel robotic mechanisms (APRM) are introduced to generate two and more given ordered sets of finitely separated positions of a rigid body object. As structural modules of APRM, we use adjustable two-link subchains connecting the object (output link) with the frame. The modular structure of APRM allows to break up the compound process of their approximate parametric synthesis into the local synthesis procedures for dyad-modules which are implemented in parallel.

Keywords: robotic mechanism, structural-parametric synthesis, approximation synthesis, adjustable dyad, parallel mechanism.