

Примак Д. Д.,

*аспирант кафедры «Технология машиностроения»
Омский государственный технический университет*

Россия, г. Омск

Волков И. А.,

*аспирант кафедры «Технология машиностроения»,
Омский государственный технический университет*

Россия, г. Омск

*Масягин В. Б. кандидат технических наук, доцент
профессор кафедры «Технология Машиностроения»
Омский государственный технический университет*

Россия, г. Омск

**ОБЗОР МЕТОДИК МОДЕЛИРОВАНИЯ СБОРОЧНОГО ПРОЦЕССА
ДЛЯ ДЕТАЛЕЙ С ПРОИЗВОЛЬНЫМИ УГЛОВЫМИ И
ГЕОМЕТРИЧЕСКИМИ ОГРАНИЧЕНИЯМИ**

Аннотация: Моделирование сборки, которое определяется геометрическими ограничениями, играет важную роль в проектировании изделия. В данной статье представлен обзор двух групп методик сборки основанных на: алгоритме наведения для деталей сложной формы и применении матриц вращения. Настоящая статья предлагает обзор решений проблем, во первых связанных с привязкой к отверстиям со сложной геометрией, успешное выполнение задач сборки связанных с привязкой к отверстиям зависит от геометрического подхода основанном на определении направления положения, точного управления движением контакта, и системы сил для центровки, а также процесса установки. Во вторых в данной статье представлен обзор методик, допускающих произвольные угловые ограничения, так как большинство ограничений решается методами, применимыми только для тех случаев, когда ограничения располагающиеся

между базовыми и сопрягаемыми компонентами либо совпадают, либо противоположны.

Ключевые слова: Моделирование сборки, геометрическое ограничение, матрица вращения, произвольное угловое ограничение, привязка к отверстию.

OVERVIEW OF THE METHODS FOR ASSEMBLY MODELING FOR PARTS WITH ARBITRARY ANGULAR AND GEOMETRIC CONSTRAINTS

Abstract: Assembly modeling, which is determined by geometric constraints, plays an important role in product design. This article presents an overview of two groups of assembly methods based on: the guidance algorithm for complex shape parts and the application of rotation matrices. This article offers an overview of solutions to problems that are first associated with peg in holes problems with complex geometry, the successful execution of peg in hole assembly tasks depends on the geometric approach based on determining the direction of the position, precise control of the movement of the contact, and the reference force for alignment and the insertion process. Secondly, this article provides an overview of methods that allow arbitrary angle constraints, since most constraints are solved by methods that are applicable only when the constraints between the base and mating components either coincide or against.

Keywords: Assembly modeling, geometric constraint, rotation matrix, arbitrary angle constraint, peg in hole.

Введение. Конструирование сборки является важным шагом для разработки изделия и сборки модели, которая является основой анализа свойств и моделирования изделия. Геометрическая точность является одним из важнейших показателей определяющих способность выполнения служебного назначения. От точности осуществляемого сборочного процесса и непосредственно самого сборочного узла зависят работоспособность, надежность, экономичность, уровень шума и вибрации, производительность

и качество изделия. С целью обеспечения данных требований разработаны соответствующие методики, описывающие сборочные процессы с различных позиций. Ниже представлен обзор двух групп методик:

1. В данную группу входят следующие методики:

- Методика сборки основанная на алгоритме слепого поиска;
- Методика сборки основанная на привязке к отверстию с использованием устройств удаленного управления (RCC);
- Методика сборки основанная на аналитической модели деталей сложной формы разработанная DLR (Германский аэрокосмический центр);
- Методика сборки, основанная на алгоритме наведения.

Методика сборки, основанная на алгоритме наведения для деталей сложной формы, представляет собой роботизированную методику привязки к отверстиям, которая может работать с произвольными прецизионными деталями сложной формы, также в данной методике предусмотрено геометрически ориентированное направление положения и методика точного управления движением контакта.[1] Одним из исследований касательно силового управления методики привязки к отверстиям является алгоритм слепого поиска, он применим для круглых деталей, без системы видения. Однако это может оказаться менее успешным в задачах сборки, связанных со сложной геометрией. Существуют также методики сборки с привязкой к отверстию с использованием устройств удаленного управления (RCC). [2] Устройства удаленного управления полезны для высокоскоростных сборочных задач, но они требуют настройки используемого приложения и наличие фасок на собираемых деталях. Чтобы решить эти проблемы, методика привязки к отверстию должна учитывать комбинацию геометрической информации о собираемых деталях и силы контакта. Существует аналитический подход к сборке деталей сложной формы в DLR (Германский аэрокосмический центр)[3]. Были отмечены положительные результаты этого исследования с использованием аналитической модели

деталей сложной формы и оптимальной области соединения с заданным отверстием, но для предлагаемой методики необходимо, чтобы контур собираемых деталей был выражен непрерывной и дважды дифференцируемой функцией. Поэтому его трудно реализовать в промышленных приложениях из-за сложности данного процесса и возможности того, что детали не будут соответствовать этим ограничениям. Рассматриваемая методика сборки, основанная на алгоритме наведения, предполагает выбор правильного направления сборки и требуемой силы для процесса выравнивания и вставки, который определяется в экспериментах, предметом наблюдения в которых являются люди, выполняющие аналогичные движения. Этот алгоритм с использованием 6 DOF-манипулятора, оборудованного шести осевым датчиком сила/крутящий момент, ценен для произвольных деталей сложной формы. Способ выбора направления сборки основан на геометрической информации, полученной из деталей сложной формы, и пространственном расположении между привязкой и отверстием. Порог силы извлекается из профилей силы, создаваемых Гауссовой смесью нормальных распределений (GMM) и регрессией гауссовой смеси (GMR) [4]. В задаче осуществления сборки рассматривается методика процесса привязки на основе управления силой, которая может обеспечить устойчивое контактное движение при сборке и преодолеть небольшие ошибки позиционирования/положения. Система видения (камера в руке) используется для оценки начального значения позиционирования для деталей сборки и распознавания формы между различными частями. Кроме того, для определения угла поворота между выбранной точкой привязки и желаемым отверстием используется алгоритм согласования с итеративной ближайшей точкой (ICP) [5].

2. Во вторую группу входят следующие методики:

- Методика сборки основанная на применении матриц вращения;
- Метод комбинированного сопряжения;

- Дифференцированный метод, предполагающий использование символьного вывода для описания геометрических ограничений;
- Метод итерации Ньютона-Рафсона.

Методика сборки основанная на применении матриц вращения заключается в установлении относительного положения и ориентации сопрягаемого компонента к базовому компоненту через их геометрические ограничения.[6] Эти положение и ориентация могут быть описаны как 4×4 преобразованная матрица, которая содержит матрицу 3×3 вращения и вектор сдвига 3×1 . Как правило, весь процесс можно указать в два этапа: классификация и анализ ограничения сборки и решение проблемы ограничения. На первом этапе обычно применяются два подхода: метод геометрического сопряжения[7,8] - это способ описывающий взаимодействие ограничений одним или несколькими геометрическими элементами (поверхность, цилиндр и т. д.) между сопряженными и базовыми компонентами. Метод комбинированного сопряжения [9], напротив, описывает связь ограничений между компонентами. При таком подходе обычно требуется ручная классификация и анализ с учетом данной проблемы ограничений, что приводит к дополнительной работе. Помимо указанных выше, Anantha et al. [10] представили дифференцированный метод, который предполагает использование символьного вывода для описания геометрических ограничений. Следует заметить, что эти подходы касаются только тех ситуаций, в которых условия сопряжения расположений либо противоположны, либо совпадают. Это означает, что угол двух расположенных векторов равен 0 или 180 °. Исследование общей ситуации не проводилось. На этапе вычисления, процесс также можно разделить на два типа: численное решение или алгебраическое решение. Численный способ основан на наборе нелинейных уравнений ограничений и обычно решается методом итерации Ньютона-Рафсона [11], который имеет относительно низкую эффективность и не гарантирует приемлемого решения.

Алгебраическим способом является вычисление матрицы вращения и трансляционной матрицы непосредственно из ограничений. Рассматриваемая методика базируется на методе геометрического сопряжения и алгебраическом вычислении, для того чтобы непосредственно выразить матрицу вращения с общим случаями, в которых ограничения расположения могут быть произвольными углами. Аналитическое решение этого метода дается непосредственно через алгебраический способ вычисления, таким образом можно избежать итерации Ньютона-Рафсона.

Детальный анализ отобранных методик с точки зрения теоретических положений.

1. Из первой групп методик наиболее перспективной является методика сборки, основанная на алгоритме наведения. Для автоматизации сборки деталей сложной формы требуются следующие процедуры:

- Получение геометрической информации о собираемых деталях из CAD модели (эталонная модель);
- Оценка положения штифта и отверстия с использованием системы видения (алгоритм согласования);
- Выбор направления, в котором деталь должна быть перемещена для результативной сборки (выбор направления сборки);
- Выбор порога силы для процесса выравнивания и вставки с использованием силового управления (порог силы).

Поэтому основными проблемами среди вышеперечисленных процедур, являются определение направления сборки и порога силы путем наблюдения людей в действии. Обычно люди интуитивно выбирают соответствующее направление сборки деталей сложной формы для различных пространственных связей между штифтами и отверстиями. Они также ощущают требуемые диапазоны сил во время сборки. Таким образом необходимо запрограммировать схемы для эффективной автоматизации задач сборки.

Выбор наиболее разумного направления сборки требует получение геометрической информации и распознавание контура точек деталей, используемых в процессе сборки. Геометрическая информация деталей сборки может быть получена путем извлечения контуров из CAD моделей, хранящихся в предопределенной справочной базе данных.[12] Затем позиционирование собираемых деталей определяется их центроидами, которые вычисляются на основе выделенных точек контура.[13] Результат вычисления контуров и расчета центра тяжести из CAD-модели детали показан на рисунке 1.

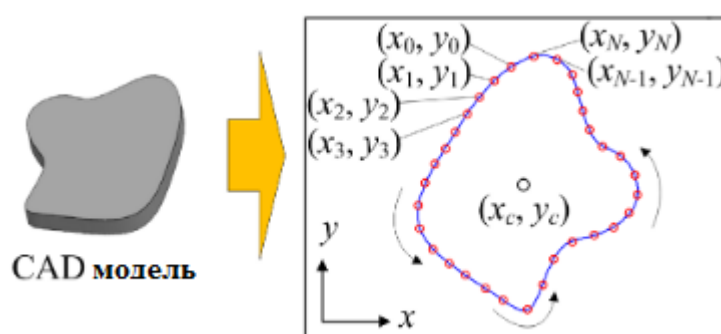


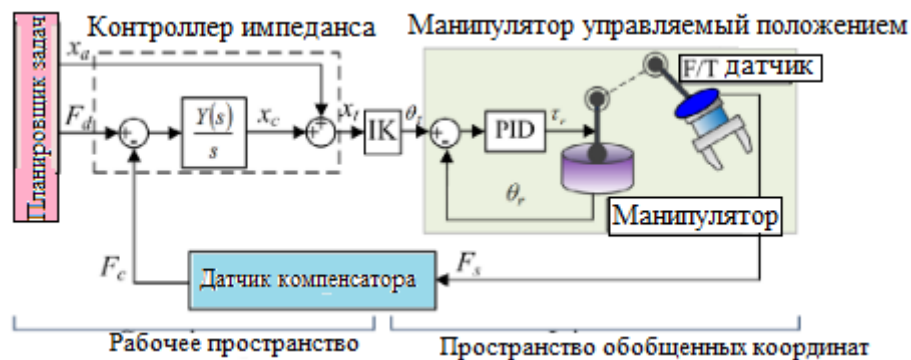
Рисунок 1. Получение информации о контуре из CAD-модели.

Поскольку, обычно люди используют зрение для взаимодействия со своей средой, разумно предположить, что при манипулировании объектами в реальном мире они используют какой-то процесс извлечения визуальных признаков и сопоставления. Если целью является симметричная квадратная деталь, вершины детали обычно являются контуром для сопоставления частей. Таким образом точки образующие контур определяются как выпуклые участки контуров деталей сложной формы. Эти точки могут быть обнаружены алгоритмом сегментации линии, который основан на алгоритме Дугласа-Пьюкера [14], и аналогичен тому, который используется для поиска путевых точек вдоль пути мобильного робота. [15] В данном случае путь и путевые точки соответствуют контуру и точкам образующим контур собираемой детали. Функция этого алгоритма заключается в обнаружении

самых дальних точек на заданном пути из линии сгенерированной начальной точкой и конечной точкой.

Учитывая то, как люди осуществляют процесс сборки, им не нужно выбирать только одно направление, потому что они могут без труда определить лучшее направление для различных пространственных расположений между штифтами и отверстиями. Чтобы имитировать это, робот должен иметь возможность выбирать соответствующее направление сборки, основанное на пространственном расположении между положением штифта и отверстия. Чтобы найти подходящее направление для вставки штифта в отверстие, прежде чем начать процесс сборки, основанный на силовом управлении, необходимо определить пустое пространство отверстия, когда штифт установлен в исходном положении. Необходимо, чтобы по меньшей мере одна выпуклая часть штифта была параллельна соответствующей части отверстия, а соответствующая точка контура-точке на штифте помещена внутрь отверстия.

Поскольку погрешность калибровки камеры и точность положения робота ограничены, задача сборки требует точного контактного движения при сопряжении штифта с отверстием. Система управления состоит из манипулятора управляемого положением, контроллера импеданса и датчика компенсатора(рисунок 2).



Обозначения:

- | | |
|--|---|
| x_d : Желаемое положение в рабочем пространстве; | F_d : Необходимая сила; |
| x_c : Корректируемое положение в рабочем пространстве; | F_s : Определяемая сила; |
| x_t : Целевая позиция в рабочем пространстве; | F_c : сила контакта; |
| ИК: Обратная кинематика; | θ_t : Целевая поз. В обобщенных координатах; |
| Y: Фильтр допуска; | θ_r : Позиция в обобщенных координатах. |
| τ_r : Крутящий момент; | |

Рисунок 2. Структурная схема управления положением робота.

Сначала желаемое положение и сила в рабочем пространстве задаются планировщиком задач. Затем желаемое положение воспроизводится контроллером импеданса в целевое положение и преобразуется в целевое положение в пространстве обобщенных координат с использованием обратных кинематических решений в команде ввода манипулятора. Датчик F/T измеряет силу, включающую полезную нагрузку и силу контакта. Датчик Компенсатора извлекает только усилие контакта из этой комбинированной силы, используя идентификацию нагрузки и компенсацию силы тяжести. Таким образом, мы можем распознать контакт между штифтом и отверстием и установить предел для защиты робота или частей сборки от чрезмерной силы, используя информацию о контактном усилии, извлеченную датчиком F/T.

Методика привязки пошагово состоит из трех этапов: состыковка, выравнивание и вставка. Шаги, ориентированные на человека, такие как выбор направления сборки и определение порога силы, в основном используются на этапе выравнивания. После того, как штифт расположен очень близко к отверстию при помощи системы видения, можно осуществлять процесс вставки. На шаге подхода манипулятор перемещает штифт по направлению к отверстию до тех пор, пока они не соприкоснутся. Контакт может быть обнаружен датчиком F/T, установленным на концевом эффекторе. После обнаружения контактного усилия робот слегка наклоняет штифт и перемещает его в направлении сборки до тех пор, пока он не достигнет внутренней поверхности отверстия, после чего обнаруживается другой контакт. В это время привязка с отверстием должна быть выровнена автоматически. Для круглого штифтового отверстия угол наклона рассчитывается из условия одноточечного контакта и зависит от диаметра деталей и допусков на сборку. Однако для сложных форм невозможно измерить точный диаметр деталей. Поэтому первоначально вычисляется угол наклона в зависимости от среднего диаметра деталей. После этого расчетный угол наклона корректируется путем проб и ошибок с помощью нескольких экспериментов. После того, как ошибки позиционирования/положения устранены, на этапе шага выравнивания штифт выпрямляется. В итоге, штифт вставлен в отверстие с некоторыми колебаниями, что позволяет избежать замятия и заклинивания.

2. Из второй групп методик наиболее перспективной является методика основанная на применении матрицы вращения, данная методика базируется на методе геометрического сопряжения и алгебраическом вычислении, для того чтобы непосредственно выразить матрицу вращения с общим случаями, в которых ограничения расположения могут быть произвольными углами. Далее применение данного метода будет рассмотрено на конкретном примере. На рисунке 3 представлены два компонента: треугольная призма

является базовым компонентом, а полуцилиндр - сопрягаемым компонентом. Геометрические данные компонентов приведены в таблице 1. Необходимо определить матрицу вращения для сопрягаемой составляющей при геометрических ограничениях $\angle(n_1^b, n_1^m) = 90^\circ$, $\angle(n_2^b, n_2^m) = 45^\circ$.

Таблица 1.

Геометрические данные.

	Базовый компонент	Сопрягаемый компонент
Вектор	$n_1^b = (0 \ 0 \ 1)^r$ $n_2^b = (0 \ 1 \ 0)^r$	$n_1^m = (0 \ -1 \ 0)^r$ $n_2^m = (0 \ 0 \ 1)^r$

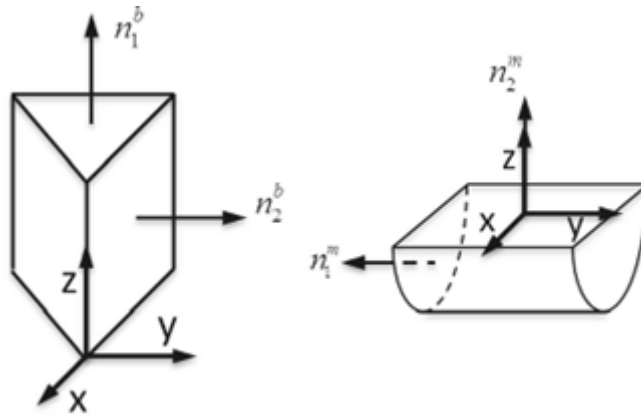


Рисунок 3. Пример расположения компонентов.

Этот пример можно представить как две пары векторов, как показано на рисунке 4. Векторы n_3 обоих компонентов являются векторным произведением n_1 и n_2 .

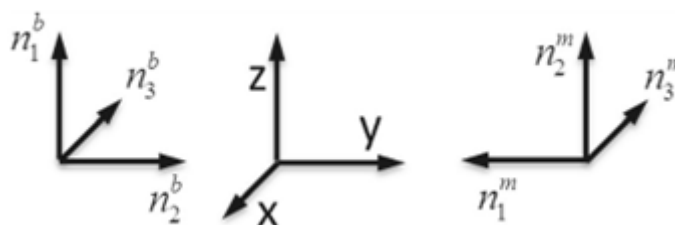


Рисунок 4. Пример абстракции матрицы вращения.

Прежде всего, векторы двух компонентов должны быть объединены в справочную систему координат, так чтобы остальные операции вращения могли выполняться на стандартной платформе, см. рисунок 5 (1). Их матрицы вращения можно вычислить по формулам 1 и 2.

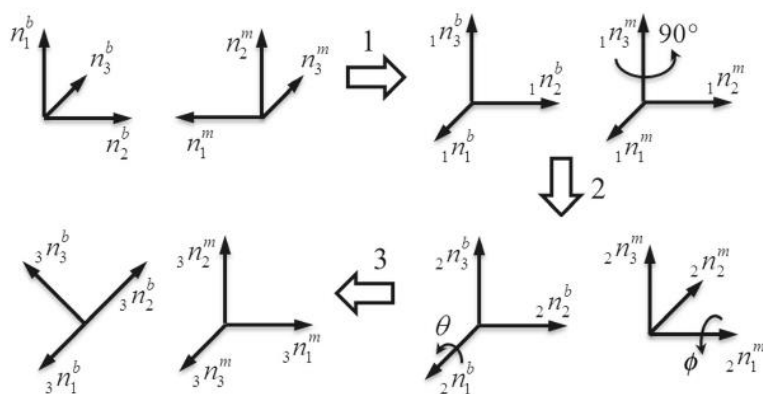


Рисунок 5. Процесс вращения.

$$\begin{aligned}
 {}_1R_b &= (n_1^b \ n_2^b \ n_3^b) = {}_1R_b \cdot N_b = I \\
 \Rightarrow {}_1R_b &= I \cdot N_b^{-1} = N_b^T = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (1)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 {}_1R_m &= (n_1^m \ n_2^m \ n_3^m) = {}_1R \ 1 \cdot N_m = I \\
 \Rightarrow {}_1R_m &= I \cdot N_m^{-1} = N_m^T = \begin{pmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (2)
 \end{aligned}$$

Обратная матрица N является транспонированной, так как N является ортонормированной матрицей.

Для того, чтобы удовлетворить первому ограничению $\angle(n_1^b \ n_1^m) = 90^\circ$, сопрягаемый компонент можно вращать на 90° вокруг ${}_1n_3^m$, см. рисунок 5 (2). Фактически, нет никакого влияния на результат, если сопрягаемый или базовый компоненты вращаются вокруг ${}_1n_2^m$, но поворот от n_1 до n_2 предпочтительнее установить в качестве наивысшего приоритета. До сих пор, создавалась матрица вращения

$$\begin{aligned}
{}_2R_m \cdot N_m = R_{m,z} \times I &\Rightarrow {}_2R_m = R_{m,z} \cdot N_m^T = \begin{pmatrix} 0 & 0 & -1 \\ 0 & -1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \end{pmatrix} \\
R_{m,z} = \begin{pmatrix} \cos 90^\circ & -\sin 90^\circ & 0 \\ \sin 90^\circ & \cos 90^\circ & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (3)_-
\end{aligned}$$

Следующим шагом будет вращение обоих компонента до удовлетворения второго ограничения $\angle(n_2^b, n_2^m) = 45^\circ$. На этом этапе нельзя изменять ориентацию ${}_2n_1^b$ и ${}_2n_1^m$. Таким образом, каждый компонент вращается вокруг своего первого вектора с углом θ и φ , см. рисунок 5(3). Новые матрицы вращения каждого компонента

$$\begin{aligned}
{}_3R_m \cdot N_m = R_{m,z} \cdot R_{m,x} &\Rightarrow {}_3R = R_{m,z} \cdot R_{m,x} \cdot N_m^T = \begin{pmatrix} -\sin\varphi & 0 & -\cos\varphi \\ 0 & -1 & 0 \\ -\cos\varphi & 0 & \sin\varphi \end{pmatrix} \\
{}_3R_b \cdot N_b = R_{b,x} &\Rightarrow {}_3R_b = R_{b,x} \cdot N_b^T = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 \\ -\cos\theta & \sin\theta & 0 \end{pmatrix} \\
R_{m,x} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\varphi & -\sin\varphi \\ 0 & \sin\varphi & \cos\varphi \end{pmatrix} \\
R_{b,x} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta & -\sin\theta \\ 0 & \sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix} \quad (4)
\end{aligned}$$

С учетом второго ограничения

$$({}_3R_b \cdot n_2^b)^T \cdot ({}_3R_m \cdot n_2^m) = \cos 45^\circ \Rightarrow \sin\theta \sin\varphi = \frac{\sqrt{2}}{2} \quad (5)$$

Область θ и φ в данном случае ограничена $[-90^\circ, 90^\circ]$, что является диапазоном функции $\arcsin(x)$. Результат уравнения 5 показан на рисунке 6.

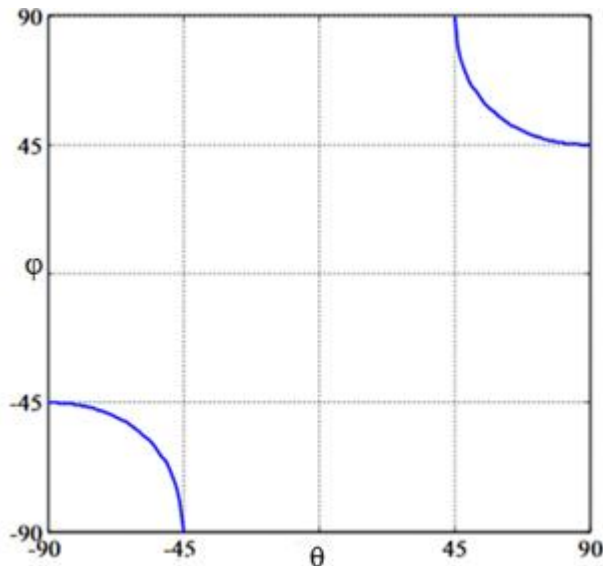


Рисунок 6. Результат уравнения 5.

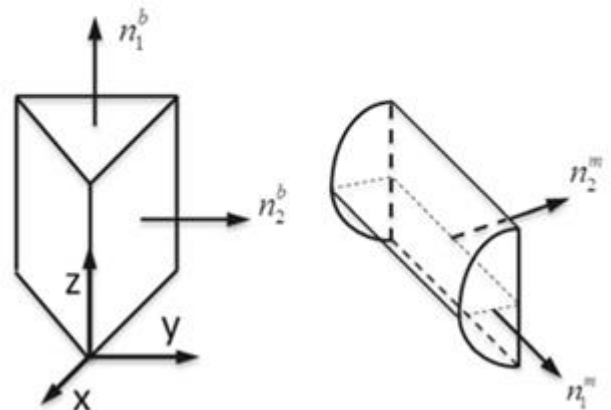


Рисунок 7. Сопрягаемый компонент после вращения.

Можно выбрать один из результатов этой диаграммы: $\theta=45^\circ$ и $\varphi=90^\circ$, таким образом матрицы вращения ${}_3R_m$ и ${}_3R_b$ можно вычислить при помощи уравнения 4.

$${}_3R_m = \begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{pmatrix} \quad {}_3R_b = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 \\ \frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} & 0 \\ -\frac{\sqrt{2}}{2} & -\frac{\sqrt{2}}{2} & 0 \end{pmatrix} \quad (6)$$

В итоге матрица вращения сопрягаемого компонента равна

$$R_m = {}_3R_b^{-1} \cdot {}_3R_m = {}_3R_b^T \cdot {}_3R_m = \begin{pmatrix} 0 & -\frac{\sqrt{2}}{2} & -\frac{\sqrt{2}}{2} \\ 0 & -\frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} \\ -1 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (7)$$

Уравнение 7 показывает, что оба компонента повернуты в особое положение, в котором все угловые ограничения выполнены, а затем повернуты назад к начальному положению базового компонента. Вращающийся сопрягаемый компонент показан на рисунке 7.

Выводы:

1. По результатам обзора первой группы методик более детально рассмотрена методика привязки к деталям сложной формы с использованием алгоритма наведения и управлением импедансом. Данный метод реализован на промышленном роботе 6 DOF с датчиком F/T для выполнения задач роботизированной сборки для произвольных деталей сложной формы. Сделаны следующие выводы:

- Рассмотренный метод нахождения направления сборки требует только использования контуров с любыми дополнительными ограничениями на геометрию детали и значительно проще в выполнении, чем существующие методы.

- Оставшиеся небольшие ошибки позиционирования/положения могут быть эффективно устранены за счет использования методики привязки в соответствии с силовым управлением.

- При допустимых ошибках достигается высокая вероятность успеха в практических задачах сборки.

- Сокращение тактового времени в процессе сборки и преодоление ошибок позиционирования/положения следует учесть в будущем.

2. Для второй группы методик характерным является то, что, рассмотренный метод решения геометрического углового ограничения, принимает два произвольных угловых ограничения двух векторных пар, между сопрягаемым и базовым компонентами в качестве входных данных, и создает матрицу вращения для сопрягаемого компонента в качестве выхода. В вычислительной части уравнения связи заданы нелинейно, представлена аналитическая формула решения, с помощью которой можно рационально рассчитать матрицу вращения, вместо использования менее рационального метода итераций. При помощи решения угловых ограничений, может быть достигнута более эффективная работа по моделированию сборки.

Библиографический список:

1. Hee-Chan S., Young-Loul K., Jae-Bok S. Guidance algorithm for complex-shape peg-in-hole strategy based on geometrical information and force control // *Advanced Robotics*.- 2016.- vol. 30, no. 8.- P.552–563
2. Whitney DE. *Mechanical assemblies* // Oxford University Press.- 2004.- P.253–292.
3. Stemmer A, Albu-Schaffer A, Hirzinger G. An analytic method for the planning of robust assembly tasks of complex shaped planar parts // In: *IEEE International Conference on Robotics and Automation*.- 2007.- P. 317–323.
4. Calinon S. *Robot programming by demonstration: a probabilistic approach* // Boca Raton (FL): EPFL/CRC Press.- 2009.- P. 31–73.
5. Béarée R, Dieulot JY, Rabaté P. An innovative subdivision-ICP registration method for tool-path correction applied to deformed aircraft parts machining // *Int. J. Adv. Manuf. Technol*.- 2011.- P. 463–471.
6. Zheng S., Alexandru D., Alexander V. Generation of rotation matrix for assembly models with arbitrary angle constraints // *Int J Adv Manuf Technol* .- 2014 .- P. 563–568.
7. Holland W, Bronsvoof WF (2000) Assembly features in modeling and planning // *Robot Comput Integr Manuf* 16(4).- P.277–294.
8. Kim J, Kim K, Lee J, Choi K (2000) Solving 3D geometric constraints for assembly modeling // *Int J Adv Manuf Technol* 16(11).- P.843–849.
9. Kim J, Kim K, Lee J, Jeong J (2005) Generation of assembly models from kinematic constraints // *Int J Adv Manuf Technol* 26(1–2).- P.131–137.
10. Anantha R, Kramer GA, Crawford RH (1996) Assembly modeling by geometric constraint satisfaction // *Comput Aided Des* 28(9).- P.707–722.
11. Rocheleau D, Lee K (1987) System for interactive assembly modeling // *Comput Aided Des* 19(2).- P.65–72.

12. Song HC, Song JB. Precision robotic deburring based on force control for arbitrarily shaped workpiece using CAD model matching // Int. J. Precis. Eng. Manuf.- 2013.- P.85–91.
13. Bourke P. Calculating the area and centroid of a polygon; 1988. Available from: <http://paulbourke.net/geometry/polygonmesh/>
14. Bradski G, Kaebler A. Learning OpenCV. O'Reilly Media.- 2008. - P.251–262.
15. Pfister ST, Roumeliotis SI, Burdick JW. Weighted line fitting algorithms for mobile robot map building and efficient data representation // In: IEEE International Conference on Robotics and Automation. Vol. 1; Taipei.- 2003.- P.1304–1311.