УДК681.31(075.8)

АЛГОРИТМЫ ВОССТАНОВЛЕНИЯ СБОРОЧНЫХ СВЯЗЕЙ ПРИ ПАРАМЕТРИЧЕСКОМ ИЗМЕНЕНИИ КОМПОНЕНТОВ СБОРОК

Сергей Борисович КОРШИКОВ родился в 1981 г. в деревне Обновленный Труд Истринского района Московской области. Ассистент МАИ. Основные научные интересы — в области систем геометрического моделирования, защиты информации. Автор трех научных работ.

Sergey B. KORSHIKOV, Ph.D., was born in 1981, in the Moscow Region. He is an Assistant Professor at the MAI. His major research interests are in geometric modeling systems and information protection. He has published 3 technical papers.

В статье рассматриваются сборочные связи в сборочных конструкциях и приводятся алгоритмы их восстановления в случае параметрических изменений геометрии компонентов сборок.

Проектирование сборок — важная часть процесса проектирования, так как основные производимые конструкции представляют собой сборки [1]. Известно, что процесс проектирования сборки имеет влияние на последующие этапы планирования процессов, инженерных расчетов, производства и т. д. Проектирование сборки представляет собой создание моделей сборок и указание относительного расположения и ориентации их компонентов.

Большинство используемых конструкций представляет собой совокупность деталей, расположенных относительно друг друга по определенным правилам. В системах геометрического моделирования такие конструкции называются сборками; правила расположения деталей (моделей деталей) — сборочными связями. Условимся называть *компонентами сборки* детали и сборки низшего уровня, входящие в структуру рассматриваемой сборки. Тогда сборка более низкого уровня по отношению к рассматриваемой сборке будет называться *подсборкой*. Условимся также, что подсборка состоит минимально из двух деталей [2].

Таким образом, важно выявить ограничения, которые накладывают сборочные связи на параметрические изменения компонентов сборочной единицы, для чего потребуется рассмотреть представление сборочных связей в модели изделия.

Связи обычно представляются в виде матриц преобразования [3]. Для получения матриц преобразования в настоящее время используется несколько методов. Подход, изложенный в работах [4, 5], основан на представлении сборочных связей системой одновременно решаемых нелинейных уравнений и использует метод Ньютона—Рафсона. Этот подход, базирующийся на числовых вычислительных процедурах, имеет недостатки: он не гарантирует получения решения, и оно часто зависит от начального приближения. Другой подход [6, 7, 8] основан на алгебраических процедурах, в которых каждая операция представляет собой последовательность вращений и перемещений для сокращения степеней свободы размещаемого компонента, а матрица преобразования представляет собой сумму матриц вращений и перемещений.

Обычно в структуре содержится информация о компонентах сборки и пространственном положении компонентов относительно друг друга (она представляет собой перечень сборочных связей, например [9]). В процессе параметрических изменений геометрии компонентов сборки возможны такие изменения, при которых сборочных связи этих компонентов нарушаются [10,11]. Рассмотрим варианты таких изменений и алгоритмы автоматического восстановления сборочных связей на примере системы геометрического моделирования Solid Edge компании UGS. Изложенный подход будет применим к любой СГМ, использующей механистическое представление сборочных связей.

Математическое описание сборочных связей

В СГМ Solid Edge используются следующие связи: *фиксирующие* (*ground*), *плоскостные* (*planar*), *осевые* (*axial*) и *касательные* (*tangent*) [12]. Плоскостную связь можно разделить на два подтипа — дистанционную и угловую (радианную). Для изменения положения компонентов относительно системы координат сборки используются матрицы перемещения и вращения.

Фиксирующие связи

В СГМ Solid Edge детали в сборке размещаются относительно друг друга, причем для размещения первой детали используется фиксирующая связь, совмещающая базовые плоскости компонента с соответствующими базовыми плоскостями сборки. Эта связь фиксирует компонент относительно системы координат сборки.

Пусть $x_a y_a z_a$ — система координат сборки, $x_c y_c z_c$ — система координат компонента. Тогда фиксирующая связь выражается следующим образом:

$$\begin{cases} x_a = x_c; \\ y_a = y_c; \\ z_a = z_c. \end{cases} \qquad (1)$$

Как видно из этой системы уравнений, фиксирующая связь не является параметрической и всегда сохраняется вне зависимости от изменения параметров компонента. Однако эта связь используется только для позиционирования первого компонента сборки, положение которого является «точкой отсчета» для определения положения остальных компонентов сборки.

Плоскостные связи

Плоскостные связи устанавливают отношения плоской грани размещаемого компонента и плоской грани базового компонента. Пусть S_b — оболочка базового компонента *B*; S_c — оболочка размещаемого компонента P; $\mathbf{r}_b(u,v) = \mathbf{P} + u\mathbf{i}_1 + v\mathbf{i}_2$ — плоскость, являющаяся носителем плоской грани $G_b \in S_b$; $\mathbf{r}_c(p,q) = \mathbf{O} + p\,\mathbf{j}_1 + q\,\mathbf{j}_2$ — плоскость, являющаяся носителем плоской грани $G_c \in S_c$. Пусть $\mathbf{n}_b$ — вектор нормали плоскости $\mathbf{r}_b(u,v)$; $\mathbf{n}_c$ — вектор нормали плоскости $\mathbf{r}_c(p,q)$. В общем случае плоскостная связь записывается так:

$$\mathbf{n}_b \times \mathbf{n}_c = 0. \qquad (2)$$

Для уточнения положения компонентов при наложении плоскостной связи используются условия параллельности и антипараллельности нормальных векторов. Связь, при которой

$$\begin{cases} \mathbf{n}_b \times \mathbf{n}_c = 0; \\ \mathbf{n}_b = \mathbf{n}_c \end{cases} \qquad (3)$$

(иначе говоря, $\cos\angle(\mathbf{r}_b, \mathbf{r}_c) = 1$), называется связью выравнивания, а связь, при которой

$$\begin{cases} \mathbf{n}_b \times \mathbf{n}_c = 0; \\ \mathbf{n}_b = -\mathbf{n}_c \end{cases} \qquad (4)$$

(иначе говоря, $\cos\angle(\mathbf{r}_b, \mathbf{r}_c) = -1$), называется связью совмещения.

Так как для этих связей не указано расстояние между плоскостями, то оно определяется другими связями, наложенными на компоненты, и их называют выравнивающей и совмещающей связями с плавающим смещением.

В случае, если указывается конкретное значение расстояния между плоскостями, эти связи называются связями с фиксированным смещением. Это смещение, фактически являющееся расстоянием между соответствующими плоскими гранями *d*, можно определить по известной формуле

$$d = \frac{\left|N_{bx}x_2 + N_{by}y_2 + N_{bz}z_2 + D_1\right|}{\sqrt{{N_{bx}}^2 + {N_{by}}^2 + {N_{bz}}^2}};$$

$$\mathbf{n}_b = \begin{bmatrix} N_{bx} \\ N_{by} \\ N_{by} \end{bmatrix}; \quad \mathbf{O}(x_2, y_2, z_2). \qquad (5)$$

Исходя из вышеизложенного, плоскостную связь можно задать набором

$$\Pi_d = \{\mathbf{n}_b, \mathbf{n}_c, K, F, d\},$$

где $K = \cos\angle(\mathbf{r}_b, \mathbf{r}_c)$;

$$F = \begin{cases} 1, \text{если смещение фиксировано;} \\ 0, \text{если смещение плавающее;} \end{cases}$$

$$d = \begin{cases} \text{значение смещения, если } F = 1; \\ \text{не используется (любое значение),} \\ \text{если } F = 0. \end{cases} \qquad (6)$$

Заметим также, что $d \in \mathbb{R}_+$, $K = 1$ и $d \in \mathbb{R}, K = -1$.

Плоскостные связи выравнивания и совмещения определяют параллельность плоских граней компонентов и расстояние (дистанцию) между плоскими гранями.

Угловая плоскостная связь определяет угол между плоскими гранями компонентов и обычно применяется для уточнения положения компонента после наложения некоторого количества других связей. Для угловой плоскостной связи задается угол между двумя плоскими гранями компонент, а говоря более точно, угол между носителями плоских граней, так как в общем случае плоские грани могут не пересекаться, а пересекаться будут только их носители. В дополнение к двум плоским граням компонентов выбирается плоскость построения угла. Таким образом, угол между плоскими гранями является углом между проекциями этих плоских граней на выбранную плоскость построения угла $\mathbf{r}_\alpha$. Угол α принимает значение в диапазоне $[0, 2\pi]$. Таким образом, угловую плоскостную связь можно задать набором:

$$\Pi_\alpha = \{\mathbf{n}_b, \mathbf{n}_c, \mathbf{r}_\alpha, W, \alpha\}, \tag{7}$$

где $W = 1$, если угол отсчитывается от плоскости $\mathbf{r}_b$, и $W = -1$, если угол отсчитывается от плоскости $\mathbf{r}_c$;

$\alpha = \dfrac{\mathbf{n}_b \times \mathbf{n}_c}{\mathbf{n}_b \mathbf{n}_c}$.

Осевые связи

Осевые связи устанавливают коллинеарность осей цилиндрических поверхностей.

Пусть

$\mathbf{r}_b(u,v) = \mathbf{P} + r\cos u\mathbf{i}_x + r\sin u\mathbf{i}_y + hv\mathbf{i}_z$ — цилиндрическая поверхность, являющаяся носителем цилиндрической грани $G_b \in S_b$;

$\mathbf{r}_b(p,q) = \mathbf{D} + r\cos p\mathbf{i}_x + r\sin p\mathbf{i}_y + hq\mathbf{i}_z$ — цилиндрическая поверхность — носитель цилиндрической грани $G_c \in S_c$;

$\mathbf{o}_b$ — осевой вектор $\mathbf{r}_b(u,v)$;

$\mathbf{o}_b$ — осевой вектор $\mathbf{r}_c(p,q)$.

Тогда условие осевой связи имеет вид

$$\mathbf{o}_b \times \mathbf{o}_c = 0. \tag{8}$$

В отличие от плоскостных связей расстояние между осями всегда равно нулю, и эти векторы сонаправлены.

Осевая связь записывается следующим образом:

$$\mathrm{O} = \{\mathbf{o}_b, \mathbf{o}_c, A\};$$
$$A = \begin{cases} 0, \text{ вращение разрешено;} \\ 1, \text{ вращение запрещено.} \end{cases} \tag{9}$$

Параметр A определяет возможность вращения совмещаемого компонента вокруг оси.

Касательные связи

Касательная связь задает условие касания цилиндрической и плоской грани или цилиндрической и цилиндрической грани. Для определенности будем считать, что плоская грань принадлежит базовому компоненту, а цилиндрическая — совмещаемому компоненту.

Тогда

$\mathbf{r}_b(u,v) = \mathbf{P} + r\cos u\mathbf{i}_x + r\sin u\mathbf{i}_y + hv\mathbf{i}_z$ — носитель цилиндрической грани;

$\mathbf{r}_c(p,q) = \mathbf{O} + p\,\mathbf{j}_1 + q\,\mathbf{j}_2$ — носитель плоской грани.

Расстояние между поверхностями-носителями может быть нулевым (тогда существует точка касания) или ненулевым (в этом случае существуют проекции виртуальной точки касания на поверхности базового и совмещаемого компонентов). В связи касания участвуют нормальные векторы к граням базового и совмещаемого компонентов в точке (виртуальной точке) касания, которые, как и для плоскостной связи, могут быть коллинеарны и антиколлинеарны. Касательную связь можно задать таким же набором, как и плоскостную:

$$T = \{\mathbf{n}_b, \mathbf{n}_c, K, F, d\};$$
$$K = \cos\angle(\mathbf{r}_b, \mathbf{r}_c);$$
$$d = \begin{cases} \text{значение смещения, если } F = 1; \\ \text{не используется (любое значение),} \\ \text{если } F = 0; \end{cases} \tag{10}$$
$$F = \begin{cases} 1, \text{если смещение фиксировано;} \\ 0, \text{если смещение плавающее.} \end{cases}$$

Все рассуждения, применимые к плоскостной связи, определяющей расстояние, применимы и к касательной связи.

Программное представление сборочных связей

Так как все сборочные связи в современных СГМ базируются на вышеописанных принципах, то в качестве примера рассмотрим СГМ Solid Edge.

Сборочные связи в СГМ Solid Edge являются коллекцией объектов, входящих в структуру *AssemblyDocument* [12]. Коллекция сборочных связей (*Relation3D*) расположена в коллекции *Occurences*, включающей в себя также документы деталей (*PartDocument*), которые могут, в свою очередь, являться документами деталей (*Part*), листовых деталей (*SheetMetal*) и подсборок (*Assembly*).

Сборочная связь создается соответствующим методом объекта *Relation3D*, например для создания дистанционной плоскостной связи используется метод

Relation3D.AddPlanar (Plane1, Plane2, NormalsAligned, ConstrainingPoint1, ConstrainingPoint2),

где *Plane1, Plane2* — плоскости для совмещения (выравнивания);

NormalsAligned принимает значения true, если используется совмещение, и false, если используется выравнивание;

ConstrainingPoint1, ConstrainingPoint2 — точки, принадлежащие плоскостям *Plane1, Plane2* соответственно, применяемые для отсчета расстояния между этими плоскостями. Элементы с индексом «1» принадлежат первому компоненту, с индексом «2» — второму компоненту.

Каждый объект сборочной связи содержит методы для получения породившей связь геометрии (*GetGeometry1* и *GetGeometry2*), точек (*GetElement1* и *GetElement2*) и компонентов (*Occurrence1* и *Occurrence2*). Объект сборочной связи имеет также признак *Status*:

если *Status* = *igRelation3dStatusSolved*, то связь не нарушена,

если *Status* = *igRelation3dStatusUnsolved*, то связь нарушена.

Схематическое изображение структуры документа сборки дано на рис. 1.

Условия нарушения и алгоритмы восстановления сборочных связей

При изменении параметров формы компонентов сборки *B* и *C* возможно нарушение любой из вышеперечисленных связей (за исключением связи фиксации). Обозначим символом ' компоненты связи после изменения параметров формы компонентов сборки. После изменения параметров компонентов сборки, участвующих в плоскостной связи, в общем случае уравнения связи не выполняются, и тогда требуется изменить параметры, входящие в систему уравнений связи.

Алгоритм обработки документа сборки

При параметрическом изменении геометрии сборки происходит автоматическое обновление сборочных связей и в случае нарушения сборочных связей их статус меняется на *igRelation3dStatusUnsolved*. Поэтому перед изменением геометрии компонентов необходимо сохранить информацию о сборочных связях. После изменения геометрии компонентов в процессе работы конструктора при нарушении сборочных связей необходимо рассмотреть каждую связь отдельно, восстановить эту связь на основе сохраненной информации и текущего изменения положения компонентов друг относительно друга и проверить соответствие изменения другим сборочным связям. Восстановление будем проводить до тех пор, пока в структуре сборки не останется ни

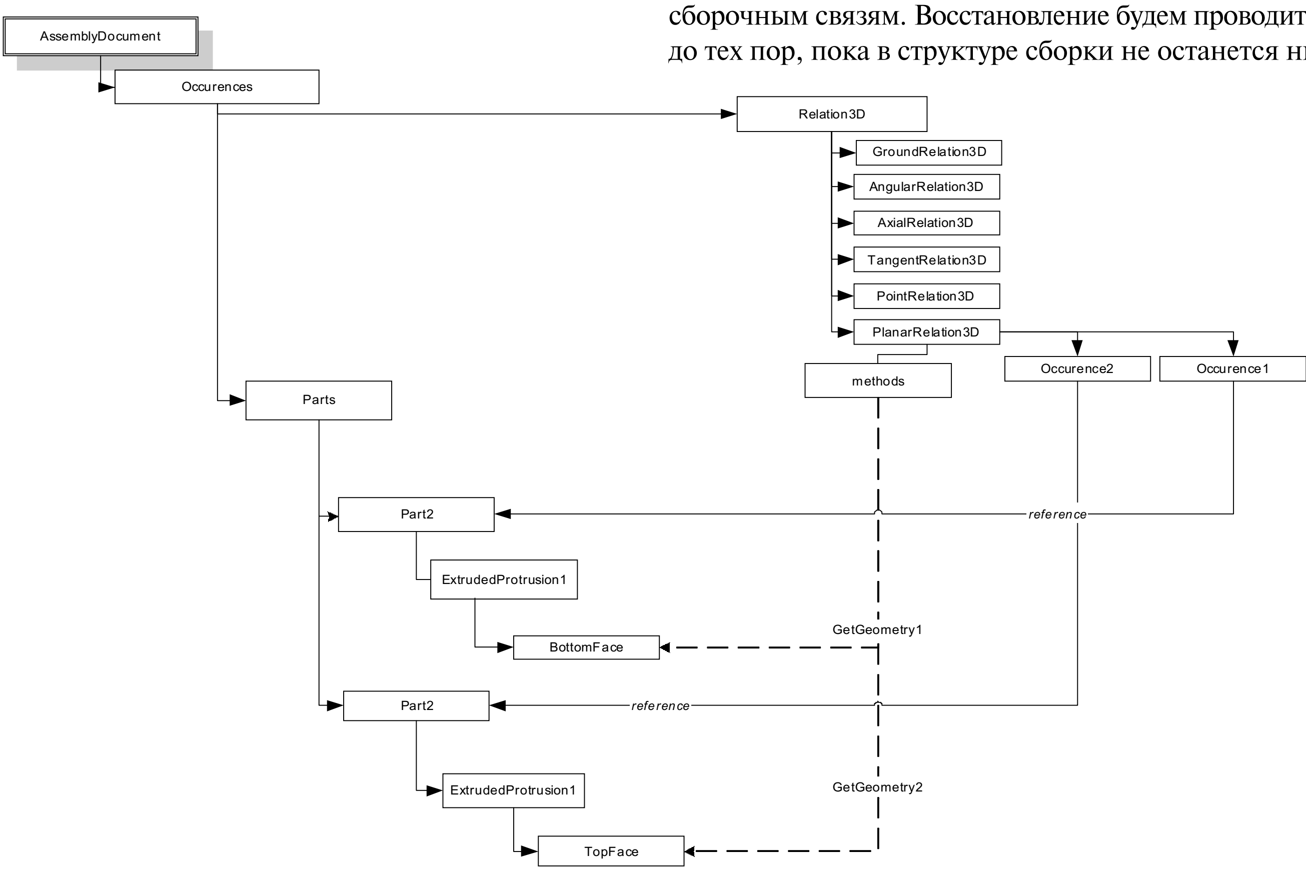

Рис. 1. Структура сборочных связей (раскрыта ветвь для связи *PlanarRelation3D*)

одной связи со статусом *igRelation3dStatusUnsolved* (Алгоритм 1).

Будем считать, что параметрическое изменение геометрии компонентов проведено так, что граничные представления исходных и измененных компонентов совпадают.

Алгоритм 1. Укрупненный алгоритм восстановления сборочных связей.

```
Сохранение сборочных связей
Изменение геометрии компонентов.
Пока R3Dun  повторять
    Для I от 1 до Relation3D.Count делать
        Если Relation3D(i).status = igRelation3dStatusUnsolved то
            Определить тип связи
            Восстановить связь
        Конец если
    R3Dun = false
    Конец делать
    Для I от 1 до Relation3D.Count делать
        Если Relation3D(i).status = igRelation3dStatusUnsolved то
            R3Dun = true
    Конец делать
Конец повторять
```

Восстановление сборочных связей проводится в порядке их следования в условиях совмещения деталей и является итерационным процессом для учета взаимовлияния сборочных связей друг на друга.

Восстановление плоскостных связей

Расстояние

Наиболее простым будет являться случай, когда $\Pi' = \{\mathbf{n}_b', \mathbf{n}_c', \pm 1, 0, d'\}$, $\mathbf{n}_b' = \mathbf{n}_b$, $\mathbf{n}_c' = \mathbf{n}_c$. Здесь расстояние d' между плоскими гранями рассчитывается на основании остальных сборочных связей автоматически СГМ.

Пусть имеет место случай

$$\Pi' = \{\mathbf{n}_b', \mathbf{n}_c', \pm 1, 1, d'\},\ \mathbf{n}_b' = \mathbf{n}_b,\ \mathbf{n}_c' = \mathbf{n}_c.$$

При фиксированном расстоянии между плоскими гранями $d' = d$ может возникнуть пересечение тел компонентов плоскостной связи $S_b \cap S_c \neq \varnothing$. Тогда необходимо вычислить текущее расстояние между гранью базового компонента $G_b \in S_b$ и ближайшей к ней гранью $G_{c1} \in S_c$ (в плоскости нормальных векторов) d_{c1} и сформировать текущее расстояние между плоскими гранями связи как $d' = d + |d_{c1}|$. На расстояние d_{c1} влияет не только изменение параметров объектов связи, но и остальные сборочные связи.

Во втором случае

$$\Pi' = \{\mathbf{n}_b', \mathbf{n}_c', \pm 1, 1, d'\},\ \mathbf{n}_b' = \mathbf{n}_b,\ \mathbf{n}_c' \neq \mathbf{n}_c.$$

Это означает, что плоская грань совмещаемого компонента перестает существовать при изменении его параметров формы. В этом случае потребуется выполнить поиск в оболочке S_c такой плоской грани $G_{c2} \in S_c$, что $\cos\angle(\mathbf{r}_{c2}, \mathbf{r}_c') = 1$, и выполнить замену на эту грань и ее нормальный вектор, после чего вычислить заново расстояние, как это было рассмотрено в предыдущем пункте. Если такая плоская грань не находится, то восстановление связи невозможно и ее необходимо пометить как разрушенную в структуре связей сборки. (При необходимости такую связь в дальнейшем можно заменить на угловую.)

Алгоритм, осуществляющий восстановление этой сборочной связи, приведен ниже (Алгоритм 2).

Угол

Нарушение плоскостной связи «угол» происходит при повороте хотя бы одной из плоских граней-

Алгоритм 2. Восстановление плоскостной дистанционной связи.

Если ($\mathbf{n}_b{}' \neg \| \mathbf{n}_c{}'$), то

Если ($\exists \mathbf{n}_{c1} : \mathbf{n}_{c1} \| \mathbf{n}_c, \mathbf{n}_{c1} \in G_c{}', \mathbf{n}_c \in G_c$) то

Заменить $\mathbf{n}_c{}'$ на $\mathbf{n}_{c1}$

иначе Если ($\exists \mathbf{n}_{b1} : \mathbf{n}_{b1} \| \mathbf{n}_b, \mathbf{n}_{b1} \in G_b{}', \mathbf{n}_b \in G_b$) то

Заменить $\mathbf{n}_c{}'$ на $\mathbf{n}_{c1}$

иначе Запросить изменение

конец если

конец если

конец если

Если $((K = 1)\, u\, (d \neq d'))$ то

$d' := d$

конец если

Если ($(K = -1)\, u\, (S_b \cap S_c \neq \varnothing)$)

Запросить значение d'

конец если

участников связи. Поэтому необходимо вначале осуществить поиск в измененной модели детали грани, параллельной грани-участнику связи, и при успешном поиске заменить ее найденной гранью. Если такая грань не находится, то необходимо просто пересчитать значение угла. Примерный алгоритм приведен ниже (Алгоритм 3).

Осевая связь

Нарушение осевой связи происходит при повороте хотя бы одной из цилиндрических граней-участников относительно ее оси или при смещении осей относительно друг друга. СГМ восстанавливает осевую связь в случае поворота автоматически, а если восстановление невозможно, то такую связь необходимо отключить.

Касательная связь

Восстановление касательной связи аналогично восстановлению плоскостной связи, только с учетом того, что одна грань—участник или обе они могут быть цилиндрическими.

Выводы

Рассмотренные алгоритмы позволяют автоматически восстанавливать сборочные связи при пара-

Алгоритм 3. Восстановление плоскостной угловой связи.

Если ($\alpha' \neq \alpha$), то

Если ($\exists \mathbf{n}_{c1} : \measuredangle(\mathbf{n}_{c1}, \mathbf{n}_b) = \alpha, \mathbf{n}_{c1} \in G_c{}', \mathbf{n}_b \in G_b{}'$) то

Заменить $\mathbf{n}_c{}'$ на $\mathbf{n}_{c1}{}'$

иначе Если ($\exists \mathbf{n}_{b1} : \measuredangle(\mathbf{n}_{b1}, \mathbf{n}_c) = \alpha, \mathbf{n}_{b1} \in G_b{}', \mathbf{n}_c \in G_c{}'$) то

Заменить $\mathbf{n}_b{}'$ на $\mathbf{n}_{b1}{}'$

иначе

Вычислить новое значение α'

конец если

конец если

конец если

метрическом изменении геометрии компонентов сборки в СГМ Solid Edge. Такое восстановление связей — итерационный процесс, который может занять продолжительное время. Связи и способы их восстановления приведены в сводной таблице.

Связи и способы их восстановления

Название связи	Уравнение связи	Возможное нарушение	Способ устранения
Фиксирующая	$\begin{cases} x_a = x_c \\ y_a = y_c \\ z_a = z_c \end{cases}$	Не нарушается	Не требуется
Плоскостная (расстояние)	$\Pi_d = \{\mathbf{n}_b, \mathbf{n}_c, K, F, d\}$	Отсутствие грани	Геометрический поиск подобной грани; перерасчет расстояния
Плоскостная (угол)	$\Pi_\alpha = \{\mathbf{n}_b, \mathbf{n}_c, \mathbf{r}_\alpha, W, \alpha\}$ $\alpha = \dfrac{\mathbf{n}_b \times \mathbf{n}_c}{\mathbf{n}_b \mathbf{n}_c}$	Изменение угла и отсутствие грани	Так же, как и для плоскостной (расстояние)
Осевая	$\mathrm{O} = \{\mathbf{o}_b, \mathbf{o}_c, A\}$ $\mathbf{o}_b \times \mathbf{o}_c = 0$	Несовпадение осей	Восстанавливается СГМ автоматически поворотом компонента
Касательная	$T = \{\mathbf{n}_b, \mathbf{n}_c, K, F, d\}$	См. плоскостную связь	См. плоскостную связь

Summary

Assembly links are considered for assembly structures. Algorithms are suggested to recover these links after parametrical changes in geometry of assembly components.

Библиографический список

1. Sugimura, N., 2002, «ISO/CD 10303-109, Product data representation and exchange: Integrated application resource: Kinematic and geometric constraints for assembly models», ISO, Geneva, CH.

2. Camelio, J., Hu, J. S. Modeling Variation Propagation of Multi-Station Assembly, Journal of Mechanical Design, Vol. 125, pp. 673-681, 2003.

3. Chiyokura, H. Solid Modeling with DESIGNBASE: Theory and Implementation, Addison-Wesley, Reading, MA, 1988.

4. Ambler A. P. and Popplestone R. J., Inferring the position of bodies from specified spatial relationships, Artificial Intelligence, 6, pp. 157-174, 1975.

5. Rocheleau D. and Lee K. , System for interactive assembly modeling, Computer-Aided Design, 19(2), pp. 65-72, 1987.

6. Tomas F. and Torras C., A group-theoretic approach to the computation of symbolic part relations, IEEE Transactions on Robotics and Automation, 4(6), pp. 622-634, 1988.

7. Haynes L. S. and Morris G. H. , «A formal approach to specifying assembly operations», International Journal of Machine Tools and Manufacture, 28(3), pp. 281-298, 1988.

8. Kramer G. A., «Solving geometric constraint system: A case study in kinematics», MIT Press, 1992.

9. Solid Edge v17. Справочная система [Электронный ресурс] — электр. опт. диск. Solid Edge Released Demo CD, (c) 2005 UGS Corp.

10. Rajan V. N., Lyons K. W. and Sreerangam R., Generation of component degrees of freedom from assembly surface mating constraints, Proceedings of ASME Design Engineering Technical Conference, DETC97/DTM-3894, September 1997.

11. Kim J. , Kim K., Choi K., Lee J. Y. Solving 3D Geometric Constraints for Assembly Modeling. The International Journal Advanced Manufacturing Technology (2000) 16: 843-849.

12. Programming with Solid Edge [Электронный ресурс]- электр. опт. диск. Solid Edge Released Demo CD, (c) 2005 UGS Corp.

Московский авиационный институт
Статья поступила в редакцию 17.03.2008

Сдано в набор 29.05.08. Подписано в печать 30.06.08.
Бумага офсетная. Формат 60´84 1/8. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 25,57. Уч.-изд. л. 27,5. Тираж 120 экз.
Заказ 3986/109.

Издательство МАИ-ПРИНТ
(МАИ), Волоколамское ш., д. 4, Москва, А-80, ГСП-3 125993
Типография Издательства МАИ
(МАИ), Волоколамское ш., д. 4, Москва, А-80, ГСП-3 125993