

The PL package

Version 2.4.2

July 2014

Igor G. Korepanov
Alex I. Korepanov
Nurlan M. Sadikov

Nurlan M. Sadikov Email: ancleCharly@gmail.com

Copyright

© 2000-2014 by Igor G. Korepanov, Nurlan M. Sadykov and Alex I. Korepanov

UNKNOWNEntity(PL) is free sotware; you car redistribute it and/or modify it under the terms of the [GNU General Public License](#) as published by Free Software Foundation; either version 2 of the License, or (at any your options) any later version.

Contents

1	Шаровые комплексы.	5
1.1	Representation of a PL ball complex	5
1.2	Указывающие функции	6
1.3	Общая информация о шаровом комплексе	7
1.4	Работа с клетками	10
1.5	Изменение pl –разбиения (не изменяющие)	11
1.6	Непосредственное создание политопов	14
1.7	Топологические операции	15
1.8	Основные принципы перестроек шаровых комплексов	17
2	Подполитопы, вложения	20
2.1	Распознающие	20
3	Погружения и узлы	23
3.1	Классические узлы	23
3.2	Двумерные заузленные поверхности	27
4	Структуры рядом	33
4.1	Списки	33
4.2	Рациональные функции	34
4.3	Матрицы	35
4.4	Грассманнова алгебра	36
	References	38
	Index	39

Chapter 1

Шаровые комплексы.

Piecewise-linear, or simply PL, ball complexes are, at least at this moment, the central objects with which our package *PL* deals. First, a ball complex is, simply speaking, a kind of cell complex but such where all closed cells (= balls) are embedded. In particular, their boundaries are genuine spheres, not crumpled/folded. The formal definition of *PL* ball complex reads: A PL ball complex is a pair (X, U) , where X is a compact Euclidean polyhedron and U is a covering of X by closed PL-balls such that the following axioms are satisfied:

- the relative interiors of balls from U form a partition of X ,
- the boundary of each ball from U is a union of balls from U .

We also call PL ball complexes “polytopes”, for brevity, hence prefix “Pol” in the names of some of our functions.

1.1 Representation of a PL ball complex

A *PL*-ball complex is defined up to *PL*-homeomorphism only by the combinatorics of adjunctions of its balls. Due to this, we represent them combinatorially in the following way. First, we assume that all vertices in the complex are numbered from 1 to their total number N_0 . Hence, in this sense, the 0-skeleton of the complex is described. Next, assuming that the k -skeleton is already given, which implies (in particular) the numeration of all k -cells, we describe the $(k+1)$ -skeleton as the list of all $(k+1)$ -cells, each of which, in its turn, is the set of numbers of k -cells in its boundary. Then we compose the list of length n , where n is the dimension of the complex, whose elements are lists of 1-,..., n -cells. Thus, a three-dimensional ball B^3 can be represented by the following *PL* ball complex with two vertices 1 and 2:

Example

```
[
  [ [1,2], [1,2] ], # two one-dimensional simplexes, each with
                    # ends 1 and 2, of which the first is referred to
                    # in the next line as 1, the second - as 2;
  [ [1,2], [1,2] ], # two disks - bigons - bounded each by
                    # one-dimensional simplexes 1 and 2;
  [ [1,2] ]         # the three-ball bounded by bigons 1 and 2
]
```

ТУТ БЫ НАДО ВСТАВИТЬ КАРТИНКУ Actually, we add a list of vertices with their names or something like that in the beginning of the above ball complex representation. For instance, our function `ballAB(n)` calls them "A" and "B". So, our GAP representation of the ball in Figure~\ref{fig:B3} is the following record:

Example

```
gap> ballAB(3);
rec( vertices := [ "A", "B" ],
      faces := [ [ [ 1, 2 ], [ 1, 2 ] ], [ [ 1, 2 ], [ 1, 2 ] ], [ [ 1, 2 ] ] ]
    )
```

1.1.1 IsPolytope

▷ `IsPolytope(pol)` (function)

Функция проверяет формальные признаки структуры *pol* в соответствии с правилами задания политопов. Если данные построены корректным образом, то функция выдаст *true* и *false* в противном случае.

Example

```
gap> IsPolytope(T2);
true
```

Так как нет единого алгоритма распознавания n -мерной сферы, проверка того, что каждая клетка является шаром опущена. Это может породить ошибку когда данные удовлетворяют всем формальным признакам, но политоп не является шаровым. В данном случае программа, все равно выдаст *true* вместо положенного *false*.

1.2 Указывающие функции

В данном разделе представлены функции которые могут либо распознать многообразие по политопу, либо вычислить инвариант этого многообразия.

1.2.1 EulerNumber

▷ `EulerNumber(pol)` (function)

функция вычисляет число Эйлера для шарового комплекса. Данная функция полиморфна и способна принимать для вычислений данные типа политоп (`IsPolytope`), именнованные списки по размерностям в котором содержится структура политопа и именнованный список по размерностям элементами которого могут выступать количества клеток определенной размерности.

Example

```
gap> EulerNumber(T2);
0
gap> EulerNumber(sphereAB(4));
2
gap> EulerNumber(sphereAB(3));
0
```

1.2.2 FundGroup

▷ `FundGroup(pol)` (function)

Computes the fundamental group of the given polytope.

1.3 Общая информация о шаровом комплексе

1.3.1 LengthPol

▷ `LengthPol(pol)` (function)

В *resul.d* указывается мощность d -мерного остова в политопе *pol*.

Example

```
gap> LengthPol(T2);
total16
rec( 0 := 4, 1 := 8, 2 := 4 )
```

1.3.2 PolBoundary

▷ `PolBoundary(pol)` (function)

вычисляет границу политопа. На выход подает список в котором указаны только клетки размерности $(n - 1)$ составляющие границу.

Example

```
gap> PolBoundary(T2);
[ ]
gap> s1:=sphereAB(1);;
gap> d2:=ballAB(2);;
gap> ft2:=PolProduct(d2,s1);;
gap> PolBoundary(ft2);
[ 1, 2, 3, 4 ]
```

В данном примере *T2* является тором, *s1* - одномерная сфера, *d2* - двумерный диск и *ft2* - полноторие созданное как декартово произведение 2-диска и 1-сферы.

1.3.3 PolInnerFaces

▷ `PolInnerFaces(pol)` (function)

Build index of inner faces of given polytope complex *returned[i]* - set of inner faces of dimensions (i-1). Any face is outer if it has at most 1 adjacent face of higher dimension of if it lies in the boundary of such a face. And inner faces are not outer faces.

Example

```
gap> PolInnerFaces(T2);
[ [ 1 .. 4 ], [ 1 .. 8 ] ]
gap> PolInnerFaces(ft2);
[ [ ], [ ], [ 5, 6 ] ]
```

1.3.4 MaxTree

▷ `MaxTree(pol)` (function)

finds a maximal tree in the 1-skeleton of a polytope as a list of edges.

Пусть клетки a и b имеют размерности n и $n-1$ соответственно и клетка b содержится в клетке a , то есть $b \subset a$. Назовем ориентацию клетки которую клетка b наследует с клетки a индуцированной (обозначение $\varepsilon(b|a)$) если она удовлетворяет условию $\varepsilon(b_1|a)\varepsilon(c|b_1) = -\varepsilon(b_2|a)\varepsilon(c|b_2)$, где клетка c имеет размерность $n-2$ и $c = b_1 \cap b_2$. Считаем, что на ребре в вершине с меньшим индексом индуцируется отрицательная ориентация, на ребре с большим индексом – положительная.

1.3.5 CellOrient

▷ `CellOrient(pol)` (function)

Вычисляются индуцированные ориентации для клеток. Provides inductively some orientations for cells of dimensions $1..n = \dim(pol)$

Example

```
gap> dd;
rec(
  faces := [ [ 1, 3 ], [ 2, 3 ], [ 2, 4 ], [ 1, 4 ] ], [ [ 1, 2, 3, 4 ] ] ],
  vertices := [ 1 .. 4 ] )
gap> CellOrient(dd);
[ [ [ -1, 1 ], [ -1, 1 ], [ -1, 1 ], [ -1, 1 ] ], [ [ -1, 1, -1, 1 ] ] ]
```

1.3.6 PolOrient

▷ `PolOrient(pol)` (function)

If pol is orientable, gives a consistent orientation of n -faces ($n = \dim(pol)$), otherwise returns *fail*. Причем, ориентации клеток находятся в следующем отношении $\varepsilon(b|a_1)\varepsilon(a_1) = -\varepsilon(b|a_2)\varepsilon(a_2)$

1.3.7 OrientTriangulated

▷ `OrientTriangulated(pol)` (function)

Function computes consistent orientation on simplexes of greatest dimension on a given triangulated complex pol . Returns array of -1, 1-s which correspond to the orientation of simplexes of greatest dimension of pol .

1.3.8 dataPachner

▷ `dataPachner(dim, k)` (function)

Выводит информацию о указанном движении Пахнера размерности dim , один из кластеров которого содержит k - симплексов, все информация принадлежащая данному

кластеру условно обозначена буквой l (left). Второй кластер симплексов получающийся при преобразованиях Пахнера обозначен буквой r (right).

Example

```
gap> Print(dataPachner(3,2));
rec(
  l := rec(
    pol := rec(
      faces :=
        [
          [ [ 1, 2 ], [ 1, 3 ], [ 2, 3 ], [ 1, 4 ], [ 2, 4 ], [ 3, 4 ],
            [ 1, 5 ], [ 2, 5 ], [ 3, 5 ] ],
          [ [ 1, 4, 5 ], [ 1, 7, 8 ], [ 2, 4, 6 ], [ 2, 7, 9 ],
            [ 3, 5, 6 ], [ 3, 8, 9 ], [ 1, 2, 3 ] ],
          [ [ 1, 3, 5, 7 ], [ 2, 4, 6, 7 ] ] ],
      vertices := [ 1, 2, 3, 4, 5 ] ),
    sim := [ [ 1, 2, 3, 4 ], [ 1, 2, 3, 5 ] ],
    vnut := [ 7 ] ),
  r := rec(
    pol := rec(
      faces :=
        [
          [ [ 1, 2 ], [ 1, 4 ], [ 2, 4 ], [ 1, 5 ], [ 2, 5 ], [ 4, 5 ],
            [ 1, 3 ], [ 3, 4 ], [ 3, 5 ], [ 2, 3 ] ],
          [ [ 1, 2, 3 ], [ 1, 4, 5 ], [ 2, 7, 8 ], [ 4, 7, 9 ],
            [ 3, 8, 10 ], [ 5, 9, 10 ], [ 2, 4, 6 ], [ 3, 5, 6 ],
            [ 6, 8, 9 ] ],
          [ [ 1, 2, 7, 8 ], [ 3, 4, 7, 9 ], [ 5, 6, 8, 9 ] ] ],
      vertices := [ 1, 2, 3, 4, 5 ] ),
    sim := [ [ 1, 2, 4, 5 ], [ 1, 3, 4, 5 ], [ 2, 3, 4, 5 ] ],
    vnut := [ 7, 8, 9 ] ) )
```

В каждой из этих двух записей $.l$ или $.r$ содержатся структуры $.pol$ - задание кластера в виде шарового комплекса, $.sim$ - представление кластера в виде симплексов, то есть задание симплексов через набор вершин на которые они натянуты и $.vnut$ список внутренних $(n-1)$ -мерных клеток шарового комплекса.

Симплициальный комплекс может быть задан как набор симплексов, каждый из которых представлен списком вершин на которые он натянут. При задании симплициальных многообразий достаточно указать симплексы размерности n . При этом существенным условием является то, что все симплексы должны быть натянуты на различные наборы вершин. Например граница четырехмерного симплекса может быть представлена как

Example

```
gap> sim:=[ [ 1, 2, 3, 4 ], [ 1, 2, 3, 5 ], [ 1, 2, 4, 5 ],
           [ 1, 3, 4, 5 ], [ 2, 3, 4, 5 ] ];
```

1.3.9 FromSimplexToPolytope

▷ FromSimplexToPolytope(*simplex*)

(function)

преобразует список симплексов в шаровой комплекс.

Example

```
gap> FromSimplexToPolytope(sim);
rec(
  faces :=
    [ [ [ 1, 2 ], [ 1, 3 ], [ 2, 3 ], [ 1, 4 ], [ 2, 4 ], [ 3, 4 ], [ 1, 5 ],
        [ 2, 5 ], [ 3, 5 ], [ 4, 5 ] ],
      [ [ 1, 2, 3 ], [ 1, 4, 5 ], [ 2, 4, 6 ], [ 3, 5, 6 ], [ 1, 7, 8 ],
        [ 2, 7, 9 ], [ 3, 8, 9 ], [ 4, 7, 10 ], [ 5, 8, 10 ], [ 6, 9, 10 ] ]
    , [ [ 1, 2, 3, 4 ], [ 1, 5, 6, 7 ], [ 2, 5, 8, 9 ], [ 3, 6, 8, 10 ],
        [ 4, 7, 9, 10 ] ] ], vertices := [ 1, 2, 3, 4, 5 ] )
```

1.4 Работа с клетками

В данном разделе собраны все функции позволяющие узнать информацию связанную с какой-либо клеткой в pl -разбиении многообразия. Клетка в pl -многообразии указывается как пара чисел $[dim, ind]$, первое из которых dim есть размерность клетки, второе ind - позиция клетки в списке $pol.faces[dim]$. Такую пару в описании программ мы будем называть адресом клетки или клеткой, обозначение *adr*.

1.4.1 PolBnd

▷ `PolBnd(pol, adr)` (function)

Creating an index of boundary faces of face $adr = [dim, ind]$ of complex pol . $result[i]$ - index of $(i-1)$ -dimensional faces of pol which are in the boundary of adr .

Example

```
gap> PolBnd(T2, [2,3]);
[ [ 1, 2, 3, 4 ], [ 2, 4, 5, 7 ] ]
```

1.4.2 FaceComp

▷ `FaceComp(pol, adr)` (function)

функция аналогичная функции *PolBnd*, выходные данные в функции собраны по размерностям. Сама клетка тоже включена в вывод как составляющая часть самой себя.

Example

```
gap> FaceComp(T2, [2,3]);
rec( 0 := [ 1, 2, 3, 4 ], 1 := [ 2, 4, 5, 7 ], 2 := [ 3 ] )
```

Как видно из примера каждая именованное поле соответствует некоторой размерности.

1.4.3 StarFace

▷ `StarFace(pol, adr)` (function)

Вычисляет все клетки которые содержат клетку *adr* в политопе *pol*. Другими словами функция вычисляет звезду указанной клетки. `result.(i)` содержит индексы *i*–клеток входящих в состав звезды.

Example

```
gap> StarFace(T2, [0,3]);
rec( 1 := [ 2, 3, 6, 7 ], 2 := [ 1, 2, 3, 4 ] )
```

В данном примере 1-клетки с индексами 2, 3, 6 и 7 и 2-клетки с индексами 1, 2, 3 и 4 образуют звезду вершины 3 данного шарового разбиения.

1.4.4 PolCheckComb

▷ `PolCheckComb(pol, adr)` (function)

check if a face of given complex is combinatorial complex that is, whether every its subface of lower dimension is uniquely determined by its vertices (and dimension)

1.5 Изменение *pl*–разбиения (не изменяющие)

Функции которые изменяют представленное разбиение без изменения многообразия.

1.5.1 PolTriangulate

▷ `PolTriangulate(pol)` (function)

функция создает триангуляцию политопа *pol*. Заметим, что политоп после триангуляции может остаться не комбинаторным.

Example

```
gap> PolTriangulate(sphereAB(2));
rec(
  faces := [ [ 1, 2 ], [ 1, 2 ], [ 1, 3 ], [ 2, 3 ], [ 1, 4 ], [ 2, 4 ] ],
            [ [ 1, 3, 4 ], [ 2, 3, 4 ], [ 1, 5, 6 ], [ 2, 5, 6 ] ] ],
  vertices := [ "A", "B", "V1", "V2" ] )
```

Triangulating a polytope.

1.5.2 FirstBoundary

▷ `FirstBoundary(pol)` (function)

данная функция создает такое упорядочение клеток политопы, что клетки лежащие на границе имеют наименьшие индексы в списках `pol.faces[dim]`. Внутренний порядок клеток на границе остается неизменным (имеется в виду порядок клеток созданный индексацией внутри политопы).

1.5.3 PermFaces

▷ `PermFaces(pol, perm, dim)` (function)

производит переупорядочение клеток размерности dim в политопе pol по перестановке $perm$.

Клетку размерности d в шаровом комплексе называем минимальной, если ее граница содержит только две клетки размерности $(d - 1)$

1.5.4 ContractMiniFace

▷ `ContractMiniFace(pol, adr)` (function)

В политопе pol стягивается минимальная клетка adr . Образом стягивания при этом является граничная клетка с меньшим индексом.

Example

```
gap> s1:=sphereTriangul(1);
rec( faces := [ [ [ 1, 2 ], [ 1, 3 ], [ 2, 3 ] ] ], vertices := [ 1 .. 3 ] )
gap> s1:=ContractMiniFace(s1,[1,1]);
rec( faces := [ [ [ 1, 2 ], [ 1, 2 ] ] ], vertices := [ 1, 3 ] )
```

В некоторых случаях стягивание минимальной клетки невозможно, так как данные которые мы получим после стягивания могут не оказаться pl -комплексом. Программа проведет стягивание минимальной клетки в любом случае, даже если применение функции выведет нас из категории шаровых комплексов. По этому, применение этой функции требует доказательства того, что после стягивание не нарушится условие, что все клетки получившегося комплекса шары. Например, если в примере описанном выше попробовать стянуть в окружности $s1$ ребро, то получим следующее

Example

```
gap> s1:=ContractMiniFace(s1,[1,1]);
rec( faces := [ [ [ 1 ] ] ], vertices := [ 1 ] )
gap> IsPolytope(s1);
false
```

Как видим выходные данные не являются политопом. По этому проверка допустимости данной операции остается за пользователем.

1.5.5 DivideFace

▷ `DivideFace(pol, adr, set)` (function)

Пусть имеется клетка с адресом adr размерности $d = adr[1]$ и клетки set лежащие на границе клетки adr образуют $(d - 2)$ -мерную сферу S^{d-2} , тогда клетку adr можно разбить на две части натянув на сферу S^{d-2} диск D^{d-1} внутри клетки adr .

Example

```
gap> octahedron;
rec(
  faces :=
```

```

      [ [ [ 1, 2 ], [ 2, 3 ], [ 3, 4 ], [ 1, 4 ], [ 1, 5 ], [ 2, 5 ], [ 3, 5 ],
          [ 4, 5 ], [ 1, 6 ], [ 2, 6 ], [ 3, 6 ], [ 4, 6 ] ],
      [ [ 1, 5, 6 ], [ 2, 6, 7 ], [ 3, 7, 8 ], [ 4, 5, 8 ], [ 1, 9, 10 ],
          [ 2, 10, 11 ], [ 3, 11, 12 ], [ 4, 9, 12 ] ], [ [ 1 .. 8 ] ] ],
    vertices := [ 1 .. 6 ] )
gap> DivideFace(octahedron,[3,1],[1,2,3,4]);
rec(
  faces :=
    [ [ [ 1, 2 ], [ 2, 3 ], [ 3, 4 ], [ 1, 4 ], [ 1, 5 ], [ 2, 5 ], [ 3, 5 ],
        [ 4, 5 ], [ 1, 6 ], [ 2, 6 ], [ 3, 6 ], [ 4, 6 ] ],
      [ [ 1, 5, 6 ], [ 2, 6, 7 ], [ 3, 7, 8 ], [ 4, 5, 8 ], [ 1, 9, 10 ],
          [ 2, 10, 11 ], [ 3, 11, 12 ], [ 4, 9, 12 ], [ 1, 2, 3, 4 ] ],
      [ [ 1, 4, 2, 3, 9 ], [ 5, 6, 7, 8, 9 ] ] ],
    vertices := [ 1 .. 6 ] )

```

В случае когда разбивается одномерная клетка, указанная клетка дробится на две части новой вершиной, вместо множества *set* указывается имя новой вершины разбиения.

Example

```

gap> s1:=sphereAB(1);
rec( faces := [ [ [ 1, 2 ], [ 1, 2 ] ] ], vertices := [ "A", "B" ] )
gap> DivideFace(s1,[1,1],3);
rec( faces := [ [ [ 1, 3 ], [ 1, 2 ], [ 2, 3 ] ] ], vertices := [ "A", "B", 3 ] )

```

1.5.6 UnionFace

▷ UnionFace(*pol*, *kl1*, *kl2*)

(function)

На вход функции посылаются две клетки одной и той же размерности для объединения их в одну клетку. По сути данной функцией реализуется обратная операция к функции *DivideFace* разбивающей клетку на две части.

Example

```

gap> UnionFace(p3,[3,1],[3,2]);
rec(
  faces :=
    [ [ [ 1, 2 ], [ 1, 3 ], [ 2, 3 ], [ 1, 4 ], [ 2, 4 ], [ 3, 4 ], [ 1, 5 ],
        [ 2, 5 ], [ 3, 5 ], [ 4, 5 ] ],
      [ [ 2, 4, 6 ], [ 2, 7, 9 ], [ 4, 7, 10 ], [ 3, 5, 6 ], [ 3, 8, 9 ],
          [ 5, 8, 10 ], [ 1, 4, 5 ], [ 1, 7, 8 ] ],
      [ [ 1, 2, 4, 5, 7, 8 ], [ 3, 6, 7, 8 ] ] ],
    vertices := [ 1, 2, 3, 4, 5 ] )

```

Объединение двух клеток D_1^k и D_2^k в одну в политопе *pol* можно провести только в том случае если звезда пересечения этих клеток состоит только из D_1^k и D_2^k . Для проведения объединения функция проверяет, что данные клетки пересекаются по одному диску. Если после объединения указанных клеток комплекс перестанет быть шаровым разбиением, то функция не будет проводить объединение, на выход будет подан начальный политоп и информационная строка с пояснением почему функция отказывается работать.

Example

```
gap> UnionFace(T2, [2,1], [2,3]);
This faces intersected on some balls or not intersected.
I cannot union the faces in a polytope.
```

1.5.7 PolSimplify

▷ `PolSimplify(pol)` (function)

Проводит упрощение политопа *pol* функцией UnionFaces. Данная функция перебирает все возможности начиная с клеток максимальной размерности. Вновь появившиеся возможности функция не исследует. По этому функцию можно запускать несколько раз если целью стоит максимально упростить политоп.

Example

```
gap> a:=ballTriangul(3);
gap> PolSimplify(a);
rec( faces := [ [ [ 1, 2 ], [ 1, 2 ] ], [ [ 1, 2 ], [ 1, 2 ] ], [ [ 1, 2 ] ] ],
      vertices := [ 1, 2 ] )
```

1.6 Непосредственное создание политопов

Для создания n -мерного диска и сферы имеются стандартные функции включенные в библиотеку

1.6.1 ballAB

▷ `ballAB(dim)` (function)

Создает минимально возможное шаровое разбиение диска размерности *dim*.

1.6.2 sphereAB

▷ `sphereAB(dim)` (function)

Создает минимально возможное pl-разбиение сферы размерности *dim*.

Example

```
gap> sphereAB(3);
rec(
  faces := [ [ [ 1, 2 ], [ 1, 2 ] ], [ [ 1, 2 ], [ 1, 2 ] ],
    [ [ 1, 2 ], [ 1, 2 ] ] ], vertices := [ "A", "B" ] )
```

В библиотеку так же включена функция создающая задание диска и сферы в виде триангулированных шаровых комплексов

1.6.3 ballTriangul

▷ `ballTriangul(dim)` (function)

Создает симплекс размерности dim

Example

```
gap> ballTriangul(2);
rec( faces := [ [ [ 1, 2 ], [ 1, 3 ], [ 2, 3 ] ], [ [ 1 .. 3 ] ] ],
      vertices := [ 1 .. 3 ] )
```

1.6.4 sphereTriangul

▷ `sphereTriangul(dim)` (function)

Триангулированная сфера создается как граница $(dim + 1)$ -мерного симплекса

Example

```
gap> sphereTriangul(1);
rec( faces := [ [ [ 1, 2 ], [ 1, 3 ], [ 2, 3 ] ] ], vertices := [ 1 .. 3 ] )
```

1.7 Топологические операции

1.7.1 FreeUnionPol

▷ `FreeUnionPol(pol1, pol2)` (function)

Свободное объединение политопов.

Example

```
gap> FreeUnionPol(s1,s1);
rec( faces := [ [ [ 1, 2 ], [ 1, 2 ], [ 3, 4 ], [ 3, 4 ] ] ],
      vertices := [ [ 1, "A" ], [ 1, "B" ], [ 2, "A" ], [ 2, "B" ] ] )
```

Объединение происходит путем слияния соответствующих списков. При этом индексы второго политопа увеличиваются.

1.7.2 PolDoubleCone

▷ `PolDoubleCone(pol)` (function)

Make a double cone with vertices V1 and V2 over the given polytope pol .

Example

```
gap> PolDoubleCone(s1);
rec(
  faces := [ [ [ 1, 2 ], [ 1, 2 ], [ 1, 3 ], [ 2, 3 ], [ 1, 4 ], [ 2, 4 ] ],
             [ [ 1, 3, 4 ], [ 2, 3, 4 ], [ 1, 5, 6 ], [ 2, 5, 6 ] ] ],
  vertices := [ "A", "B", "V1", "V2" ] )
```

1.7.3 ConnectedSum

▷ `ConnectedSum(N, M)` (function)

Функция создает связную сумму двух политопов N и M одинаковой размерности.

Example

```
gap> s2:=sphereAB(2);;
gap> ConnectedSum(s2,s2);
rec(
  faces := [ [ [ 1, 2 ], [ 1, 2 ], [ 1, 2 ], [ 1, 2 ] ],
             [ [ 1, 3 ], [ 1, 2 ], [ 3, 4 ], [ 2, 4 ] ] ],
  vertices := [ [ 1, "A" ], [ 1, "B" ] ] )
```

1.7.4 PolProduct

▷ `PolProduct(pol1, pol2)` (function)

Функция вычисляет декартово произведение двух шаровых комплексов *pol1* и *pol2*. Декартово произведение для двух шаровых комплексов определяется как шаровой комплекс составленный из всевозможных шаров $D_i^s \times D_j^t$, где D_i^s и D_j^t клетки комплексов M и N , соответственно.

Example

```
gap> PolProduct(s1,s1);
rec(
  faces :=
    [ [ [ 1, 2 ], [ 1, 2 ], [ 3, 4 ], [ 3, 4 ], [ 1, 3 ], [ 2, 4 ], [ 1, 3 ],
        [ 2, 4 ] ],
      [ [ 1, 3, 5, 6 ], [ 2, 4, 5, 6 ], [ 1, 3, 7, 8 ], [ 2, 4, 7, 8 ] ] ],
  vertices := [ [ "A", "A" ], [ "A", "B" ], [ "B", "A" ], [ "B", "B" ] ] )
```

1.7.5 ImageInPolProduct

▷ `ImageInPolProduct(pol1, pol2, kl1xkl2)` (function)

Вспомогательная функция для декартова произведения, вычисляет адрес клетки составленной как произведение клеток *kl1* и *kl2* из политопов *pol1* и *pol2*, соответственно. На вход функции адреса клеток подаются объединенные в список.

Example

```
gap> t2:=PolProduct(s1,s1);;
gap> ImageInPolProduct(s1,s1,[[1,2],[1,1]]);
[ 2, 3 ]
```

В качестве входных данных функции могут поступить не только политопы *pol1* и *pol2*, но и именованные списки по размерностям, каждой размерности k в котором сопоставлена мощность клеток размерности k . Данная возможность позволяет не вычислять эту информацию, при частом вызове функции для одного и того же декартова произведения.

Example

```
gap> ls1:=rec(0:=2, 1:=2);
rec( 0 := 2, 1 := 2 )
gap> ImageInPolProduct(ls1,ls1,[[1,2],[1,1]]);
[ 2, 3 ]
```

Обратим внимание, что функция вычисляет клетку только в комплексе составленном функцией `PolProduct`. Если произошло какое-либо изменение комплекса, указанный адрес может оказаться не корректным.

1.7.6 PreimageInPolProduct

▷ `PreimageInPolProduct(pol1, pol2, imageface)` (function)

По заданному образцу в декартовом произведении политопов `pol1` и `pol2` указываем из каких клеток была составлена данная клетка `imageface`.

1.7.7 PolProductSyms

▷ `PolProductSyms()` (function)

Cartesian product of two polytopes with symmetries of multipliers transferred to it. First go the symmetries of the first multiplier, then - the second.

1.7.8 PolProductSymsDict

▷ `PolProductSymsDict()` (function)

Cartesian product of two polytopes with symmetries of multipliers transferred to it. First go the symmetries of the first multiplier, then - the second. Also returns the face dictionary.

1.7.9 PolFactorInvolution

▷ `PolFactorInvolution(pol, invol)` (function)

`pol` is polytope with symmetries, `invol` is such a list of some of its symmetries (repetitions possible) that it is known that the product of symmetries in `s` is an involution returns the factored polytope.

1.8 Основные принципы перестроек шаровых комплексов

В данном разделе рассказывается об основных принципах перестройки шаровых комплексов связанных с изменением индексации клеток. Изменение индексации клеток является одной из основных трудностей для быстрого и удобного построения программ. Во второй версии пакета *PL* мы пользовались следующей идеей. По возможности адреса клеток которые не участвуют в операции должны остаться неизменными. Тем не менее это не всегда возможно, когда, например, клетка удаляется из политопа. Если не удастся

избежать смещение индексов, то по возможности необходимо сделать так, что бы индексы изменились у минимального количества индексов. Та особенность, что все построение политопов привязана к позиции соответствующих клеток в списках `pol.faces[k]` осложняет работу связанную с перестройкой комплексов. Начиная с третьей версии пакета *PL* будет организована возможность жесткой индексации клеток, когда позиция клетки в списке `pol.faces[k]` является одновременно и именем этой клетки. Это, например, будет означать, что в списках `pol.faces[k]` могут присутствовать пустые адреса. На данный момент присутствуют следующие функции позволяющие корректно изменять структуру политопов и прикрепленную к нему информацию.

1.8.1 DelFace

▷ `DelFace(pol, adr)` (function)

клетка *adr* корректным образом исключается из политопов *pol*. После проведения данной операции корректность данных может быть нарушена.

Example

```
gap> pol:=DelFace(t2,[1,2]);;
gap> IsPolytope(pol);
false
```

Функция содержит наиболее часто встречающийся код в функциях который позволяет корректно удалить все упоминания о данной клетке и подготовить данные для дальнейшей работы алгоритма.

1.8.2 wasDelFace

▷ `wasDelFace(pol, adr)` (function)

Функция корректирует сопутствующую информацию прикрепленную к политопу *pol* которая должна была измениться после удаления одной из клеток. На вход функции подается политоп и адрес той клетки которая была удалена. Напомним, что после удаления клетки индексы больших клеток данной размерности понижаются на единицу, это изменение индексации должно быть отображено в той информации которая сопутствует данному шаровому комплексу. Если из какой-либо сопутствующей информации была удалена клетка, то будет выведено соответствующее сообщение, но изменения будут проведены. При обработке информации по 2-узлу в политопе будет, в случае если удаляется 2-клетка, будет выведено соответствующее сообщение, индекс 2-клетки будет удален из списка `.2knot.sheets`, если на данную 2-клетку есть ссылка в `.2knot.dpoints.(1kl)`, то соответствующая позиция будет очищена.

Для упрощения перестройки политопов в дальнейших версиях будет поддерживаться следующий принцип. Индекс *k*-клетки в списке `pol.faces[k]` является одновременно идентификатором клетки. Это позволяет нам создавать такие списки (остовы) `pol.faces[k]` в которых имеются не заполненные позиции. При удалении клетки из остова соответствующая позиция в списке `pol.faces[k]` опустошается. Такой принцип перестройки позволит упростить вычисления связанные с пересчетом индексов клеток при преобразованиях политопов. Этот принцип будет поддерживаться начиная с третьей

версии пакета *PL*, начиная с четвертой версии поддерживаться будет только данный способ перестройки.

Chapter 2

Подполитопы, вложения

Множество *subpol* клеток размерности k будем называть подполитопом, если они задают некоторое вложенное многообразие $N \subset M$. Самый простой пример подполитопом это список из одного элемента любой размерности, который задает диск внутри политопом *pol*. Тем не менее мы не будем создавать какой либо жесткой структуры обозначающей подполитоп, так как его использование будет ясным из контекста программ.

2.1 Распознающие

2.1.1 SetOfFacesBoundary

▷ `SetOfFacesBoundary(pol, subpol, dim)` (function)

Функция выводит границу подполитопом *subpol*. На выходе будут указаны клетки внутри политопом *pol* образующие границу подполитопом *subpol*. Размерность указанных клеток равняется $dim - 1$.

Example

```
gap> SetOfFacesBoundary(t2, [2, 1], 2);  
[ 1, 2, 3, 4 ]
```

2.1.2 SubPolytope

▷ `SubPolytope(pol, subpol, dim)` (function)

выделяем указанный подполитоп как самостоятельный. Отношение порядка клеток в создаваемом политопом наследуется из объемлющего политопом *pol*.

Example

```
gap> SubPolytope(t2, [1, 2], 1);  
rec( faces := [ [ 1, 2 ], [ 1, 2 ] ],  
      vertices := [ [ "A", "A" ], [ "A", "B" ] ] )
```

2.1.3 ParallelSimplify

▷ `ParallelSimplify(pol, subpol, dim)` (function)

В политопе *pol* производится упрощение с помощью функции `UnionFaces`, параллельно с этим упрощается подполитоп *subpol* размерности *dim*. Информация о клетках подполитопа помещается в список `.subpol`. Функция работает только для подполитопов чья размерность меньше размерности объемлющего пространства. Если вложенное подмногообразие *A* той же размерности, что и политоп *M*, можно провести параллельное упрощение с пересечением $C = A \cap \overline{(M)}$.

2.1.4 PolMinusFace

▷ `PolMinusFace(pol, adr)` (function)

cuts out a neighborhood of a face with given address from polytope. Функция построена таким образом, что после вырезания клетки позиции старых клеток в списках `pol.faces[i]` и `pol.vertices` не изменяются.

2.1.5 PolMinusFaceDoublingMethod

▷ `PolMinusFaceDoublingMethod(pol, adr)` (function)

Допустим, некоторая окрестность *k*-клетки *a* в *pl*-комплексе *M* обладает окрестностью эквивалентной нескольким копиям *n*-дисков D_i^n склеенных по представленной клетке *a*. Тогда можно осуществить разрез по данной клетке в *pl*-многообразии более экономичным способом, создав для каждого *n*-диска D_i^n свою копию клетки *a*. В качестве примера приведем букет трех отрезков, склеенный по вершине $[0,1]$.

Example

```
gap> buket:=rec( vertices := [ 1, 2, 3, 4 ],
faces := [ [ [ 1, 2 ], [ 1, 3 ], [ 1, 4 ] ] ] );
gap> PolMinusFaceDoublingMethod(buket,[0,1]);
rec( vertices := [ 1, 2, 3, 4, 5, 6 ],
faces:=[ [ [ 1, 2 ], [ 3, 5 ], [ 4, 6 ] ] ] )
```

Каждый диск D_i^n может иметь свое подразбиение внутри *pl*-многообразия *M*. При этом очевидно, что в *pl*-комплексе существует такое подразбиение шарового комплекса, что линк клетки *a* распадается на несколько связных компонент (по числу дисков D_i^n). Именно это свойство взято в качестве критерия нахождения и разделения дисков D_i^n . Данное вырезание не затрагивает границу клетки, оставляя ее на месте, при этом индексы не участвующих в разрезании клеток не изменяются.

2.1.6 PolMinusPol

▷ `PolMinusPol(pol, subpol, dim)` (function)

Функция вырезает подполитоп *subpol* из политопа *pol*. По возможности выбирается такой способ вырезания, который будет более экономичным.

2.1.7 GlueFaces

▷ `GlueFaces(pol, face1, face2)` (function)

Склеить две клетки в многообразии у которых общая граница. Замечание: функция не проверяет действительно ли у клеток одинаковая граница. Так же проверку, что после склейки получаются корректные данные возлагаем на пользователя. Например, функция будет работать в следующем случае некорректно:

Example

```
gap>d2:=ballAB(2);;
gap>GlueFaces(d2,[1,2],1);
rec(faces:=[ [ [1,2] ], [ [1] ] ],
      vertices:= ["A","B"]
```

Как мы видим из примера полученные данные уже не являются *pl*-разбиением.

2.1.8 VerticesRullGlueFace

▷ `VerticesRullGlueFace(pol, para, dim)` (function)

Производится склейка двух клеток политопа. Клетки индексы клеток помещаются в список `para`, размерность `dim` клеток указывается отдельно.

2.1.9 VerticesRullGluePol

▷ `VerticesRullGluePol(pol, subpol1, subpol2, dim)` (function)

В политопе указывается два набора связанных подполитопов, которые необходимо склеить. Правила склейки подполитопов указываются в именах вершин (вершины с одинаковыми именами склеиваются в одну), далее все это индуцируется на клетки большей размерности. Для работы данного алгоритма необходимо, что бы у подполитопов были одинаковые *pl*-разбиения, а также, что бы в этом *pl*-разбиении содержалась хоть одна *n*-клетка натянутая на хотябы на $(n+1)$ вершин.

Chapter 3

Погружения и узлы

Пакет *PL* предоставляет возможность работы с одномерными узлами и двумерными заузленными поверхностями.

3.1 Классические узлы

В пакете *PL* имеется возможность задания диаграммы узла двумя различными способами каждый из которых имеет свои плюсы и свои минусы.

3.1.1 Способы задания диаграммы узла.

Первый способ основан на том, что диаграмме узла сопоставляются атрибуты которые однозначно характеризуют диаграмму. Для этого присвоим имена каждой двойной точке, которые назовем образующими и выберем на узле произвольным образом начальную точку и положительное направление, причем диаграмму можно построить так, что бы отмеченная точка не стала при проекции двойной точкой. При обходе диаграммы начиная от отмеченной точки по выбранному направлению можно составить слово по следующему правилу: на начальном этапе имеем пустое слово, далее каждая встреченная двойная точка приписывается к слову справа в степени -1 если мы пришли в эту точку снизу и в степени 1 если пришли сверху. Когда мы вернемся в начальную точку, создание слова заканчивается. Дополнительно, каждая двойная точка имеет свою ориентацию которую образует выбранное нами направление. Ориентацию двойной точки предлагается строить так. В двойной точке строится два вектора v_1 и v_2 , где v_1 — касательный вектор к верхней дуге диаграммы на плоскости, v_2 — к нижней. В качестве ориентации этой точки выбирается знак построенного репера. Воспользуемся данным описанием и составим необходимые атрибуты для задания узла трилистника. Для трилистника будет составлено слово $ac^{-1}ba^{-1}cb^{-1}$ и для каждой двойной точки диаграммы каждая двойная точка этой диаграммы имеет отрицательную ориентацию. Если данные ориентации заменить на противоположные, то будет создана зеркальная диаграмма к указанной. Ниже представлена диаграмма узла трилистника включенная в библиотеку пакета *PL*.

Example

```
gap> Trefoil;  
rec( kod := [ [ "a", 1 ], [ "c", -1 ], [ "b", 1 ],  
              [ "a", -1 ], [ "c", 1 ], [ "b", -1 ] ],
```

```
orient := [ [ "a", -1 ], [ "b", -1 ], [ "c", -1 ] ] )
```

Как видно из примера вся необходимая информация собрана в списках `.kod` и `.orient`. Слово которое составляется при обходе узла представлено списком `.kod` который содержит двухэлементные списки, первым элементом которого является имя двойной точки, вторым ± 1 в зависимости от степени соответствующей образующей в слове. Сравните слово $ac^{-1}ba^{-1}cb^{-1}$ составленное по трилистнику со списком `Trefoil.kod`. Далее, список `.orient` составлен из списка пар, первый элемент пары — имя двойной точки, второй ориентация. Задание таким образом зацеплений несколько усложняется тем, что необходимо отдельно указывать компоненты зацепления. В случае, если стоит необходимость вручную задать диаграмму обычного узла данный способ является лучшим поскольку информация легко проверяется. Предполагается, что данная диаграмма лежит на двумерной плоскости, отсюда мы будем называть этот способ задания — плоским, что бы различать два способа описания диаграмм узлов. Второй способ задания диаграммы узла основан на той идее, что диаграмма узла естественным образом создает разбиение двумерной плоскости, а следовательно аналогичное разбиение можно выбрать и на сфере S^2 после одноточечной компактификации. Отсюда, для удобства, этот способ далее будем называть сферическим. Итак, этот способ описания диаграммы заключается в создании такого шарового разбиения двумерной сферы по клеткам которого проходят дуги диаграммы узла. То есть дополнительно к *pl*-разбиению присоединяется информация о дугах диаграммы узла и о том как ведут себя дуги в районе двойной точки. В случае классических узлов достаточно указать все 1-клетки по которым проходят клетки узла. Двойные точки вычисляются уже из представленной информации, но для каждой двойной точки необходимо знать какая дуга выше, какая ниже.

Example

```
rec(
  1knot :=
    rec(
      dpoints := rec( 1 := [ 6, 1, 3, 4 ], 2 := [ 2, 3, 5, 6 ],
        3 := [ 4, 5, 1, 2 ] ), sheets := [ 1 .. 6 ] ),
  faces := [ [ [ 1, 3 ], [ 2, 3 ], [ 1, 2 ], [ 1, 3 ], [ 2, 3 ], [ 1, 2 ] ],
    [ [ 1, 3, 5 ], [ 1, 4 ], [ 2, 4, 6 ], [ 2, 5 ], [ 3, 6 ] ] ],
  vertices := [ "a", "b", "c" ] )
```

В данном примере приведена диаграмма узла трилистника расположенная на двумерной сфере. Сначала, обратим внимание, что вся информация касающаяся узла помещена в именованный список `.1knot`, в котором содержатся списки `.sheets` всех 1-клеток *pl*-разбиения по которому проходит диаграмма и `.dpoints` который в качестве именованных полей содержит индексы вершин, а в качестве соответствующих объектов списки из четырех элементов в которых первая пара элементов это индексы 1-клеток входящих в верхнюю дугу диаграммы в этой точке, последняя пара — индексы 1-клеток входящих в нижнюю дугу диаграммы в данной точке. Данная конструкция неудобна для описания ее напрямую по диаграмме узла поскольку содержит излишнюю информацию, но с другой стороны предложенный способ обладает двумя преимуществами. Во-первых, это задание может напрямую работать с диаграммами зацеплений узлов. Во-вторых,

такое задание легко обобщается на двумерные заузленные поверхности, о чем будет рассказано ниже.

3.1.2 Knot1OnSphere2

▷ `Knot1OnSphere2(knot)` (function)

По диаграмме узла создается двумерная сфера S^2 , в разбиении которой указана данная диаграмма. Узел содержится в прикрепленном именованном списке `.1knot`, который построен в стиле задания диаграмм двумерных заузленных поверхностей.

Example

```
gap> Knot1OnSphere2(Figure8);
rec(
  1knot :=
    rec(
      dpoints := rec( 1 := [ 8, 1, 4, 3 ], 2 := [ 4, 5, 8, 7 ],
        3 := [ 2, 3, 5, 6 ], 4 := [ 6, 7, 1, 2 ] ), sheets := [ 1 .. 8 ] ),
  faces :=
    [ [ [ 1, 4 ], [ 3, 4 ], [ 1, 3 ], [ 1, 2 ], [ 2, 3 ], [ 3, 4 ], [ 2, 4 ],
      [ 1, 2 ] ],
      [ [ 1, 3, 6 ], [ 1, 4, 7 ], [ 2, 5, 7 ], [ 2, 6 ], [ 3, 5, 8 ], [ 4, 8 ]
      ] ], vertices := [ "a", "b", "c", "d" ] )
```

3.1.3 KnotInS3

▷ `KnotInS3(knot)` (function)

Создает трехмерную сферу в которую вложен узел. Клетки узла указаны в `result.knot`.

3.1.4 Reidemeister10Everywhere

▷ `Reidemeister10Everywhere(knot)` (function)

Проверяет диаграмму узла на наличие в ней свободных петель, которые можно убрать первым движением Райдемайстера R_0^{-1} . Число 10 в названии обозначает, что применяется движение Райдемайстера, которое берет локально одну вершину и создает из него ноль вершин, если такое движение применимо.

3.1.5 ZeroLinkFromKnot

▷ `ZeroLinkFromKnot(knot)` (function)

Не изменяя самого узла, данная функция создает такую диаграмму, которая будет иметь нулевой коэффициент зацепления с диаграммой составленной следующим образом. Для узла создается трубчатая окрестность в трехмерном пространстве. Проекция узла параллельно оси Oz на трубчатую окрестность создает новый узел (по сути дела тот же самый). Два узла созданных по предложенной диаграмме образуют зацепление с нулевым коэффициентом.

3.1.6 KnotGroup

▷ `KnotGroup(knot)` (function)

Вычисляется фундаментальная группа узла, которая определяется как фундаментальная группа дополнения узла в трехмерной сфере S^3 . Для создания группы используются соотношения Виртингера.

3.1.7 TorusKnot

▷ `TorusKnot(q, p)` (function)

Создается диаграмма торического узла (q, p) , если q и p взаимнопростые, если это не так, то будет создано соответствующее зацепление. Параметр $q > 0$ соответствует количеству нитей, а параметр p соответствует количеству оборотов.

Example

```
gap> k:=TorusKnot(2,3);
rec( kod := [ [ 1, 1 ], [ 2, -1 ], [ 3, 1 ], [ 1, -1 ], [ 2, 1 ], [ 3, -1 ] ],
    orient := [ [ 1, 1 ], [ 2, 1 ], [ 3, 1 ] ] )
```

3.1.8 ZeifertSurface

▷ `ZeifertSurface(knot)` (function)

создает поверхность Зейферта узла, вложенную в трехмерную сферу. Все 2-клетки отвечающие поверхности Зейферта собраны в списке `.zeifert` прикрепленному к политопу.

Example

```
gap> pol:=ZeifertSurface(Knot7_7);;
gap> zeif:=SubPolytope(pol, pol.zeifert, 2);;
gap> PolOrient(zeif);
[ 1, 1, 1, -1, 1, -1, 1, -1, 1, -1, 1, -1, 1, -1, 1, 1 ]
```

В данном примере мы создали сферу с указанной в ней поверхностью Зейферта, выделили ее как самостоятельный политоп и проверили является ли эта поверхность ориентируемой. Тем самым мы проиллюстрировали ориентируемость полученного объекта.

3.1.9 ZeifertSurfaceWithSimplyBoundary

▷ `ZeifertSurfaceWithSimplyBoundary(knot)` (function)

создает поверхность Зейферта узла *knot*, чья граница состоит только из двух 1-клеток (соответственно по которым и проходит сам узел).

Example

```
gap> pol:=ZeifertSurfaceWithSimplyBoundary(Knot7_7);;
gap> SetOfFacesBoundary(pol, pol.zeifert, 2);
[ 49, 159 ]
```

3.2 Двумерные заузленные поверхности

Под заузленной двумерной поверхностью (surface-knot) мы понимаем связную или не связную поверхность помещенную в четырехмерное евклидово пространство \mathbb{R}^4 . Проекция $\pi : \mathbb{R}^4 \rightarrow \mathbb{R}^3$ общая (is generic) для заузленной поверхности T если образ $\pi(T)$ из \mathbb{R}^3 локально гомеоморфен 1) простому диску 2) двум трансверсально пересекающимся дискам 3) трем трансверсально пересекающимся дискам или 4) зонтику Уитни. Точки имеющие окрестности с 2) по 4) называются двойными точками, тройными точками и точками ветвления общей проекции, соответственно. Множество всех точек типа 2), 3) и 4) называется графом двойных точек (singularity set). Диаграммой поверхности T называют образ $\pi(T)$ с добавлением информации пересечения на графе двойных точек. Для каждой линии двойных точек должно быть определено отношение высот для листов которые входят в это ребро.

3.2.1 Задание двумерных заузленных поверхностей

Аналогично одномерным узлам, диаграммы двумерных заузленных поверхностей могут быть рассмотрены уже внутри разбиения трехмерной сферы S^3 . В качестве такой диаграммы мы понимаем шаровое разбиение трехмерной сферы по клеткам которой проходят листы двумерной заузленной поверхности. Вся информация о диаграмме внутри политопа собирается в прикрепленном именованном списке `.2knot`. Список `.2knot` содержит список `.sheets` в котором собраны индексы всех 2-клеток шарового разбиения по которым проходит диаграмма заузленной поверхности и именованный список `.dpoints` в котором именами выступают ребра двойных точек. В списке `.2knot.dpoints` каждому двойному ребру поставлен в соответствие четырехэлементный список индексов 2-клеток диаграммы лежащих в звезде данного двойного ребра. На четырехэлементном списке выбрано следующее упорядочение, первые два индекса соответствуют 2-клеткам в звезде ребра лежащие на верхнем листе, последние два это индексы 2-клеток на нижнем. Данной информации о диаграмме двумерной заузленной поверхности достаточно чтобы вычислить тройные точки и точки ветвления. Внутри программ мы не будем проводить четкого разделения между двумерными заузленными поверхностями и двумерными узлами. Вся информация о данных структурах будет собираться в прикрепленном списке `.2knot`.

3.2.2 PolSimplifyWith2Knot

▷ `PolSimplifyWith2Knot(pol)` (function)

Упрощает политоп содержащий 2-узел. В качестве упрощающей функции была выбрана функция `UnionFaces`, которая объединяет два шара в политопе. Так же как и функция `PolSimplify` данная функция не проверяет возможны ли дальнейшие упрощения политопа `pol`. Для этой проверки необходимо еще раз запустить эту функцию на вновь полученных данных.

3.2.3 SingularitySet2Knot

▷ `SingularitySet2Knot(pol)` (function)

Singularity set — граф двойных точек диаграммы 2-узла. В графе перечислены все 1-клетки объемлющего политопа *pol* которые содержат описываемый граф. Так же в соответствии каждой вершине сопоставлен список. Данный список строится из звезды $Star(v)$ в описываемом графе упорядоченной таким образом. Первая пара элементов принадлежит верхней линии двойных точек в этой вершине (получаемая на пересечении верхнего и среднего листов), вторая пара элементов принадлежит средней линии двойных точек (пересечение верхнего и нижнего листов) и третья пара принадлежит нижней линии двойных точек (пересечение среднего и нижнего листов). Таким образом соответствующие списки для тройной точки будут состоять из шести элементов, для двойной точки из двух и для точки ветвления из одного.

Example

```
gap> SingularitySet2Knot(TurnKnot(Trefoil,2));
...
rec( graf := [ 7, 4, 5, 6, 19, 20, 21, 22, 17, 18, 23, 8, 9, 10, 12, 45, 32,
  31, 25, 26, 51, 54, 55, 64, 112, 113, 114, 115, 134, 136, 137, 138,
  131, 130, 129, 119, 109, 118, 127, 106, 124, 105, 123, 104, 122, 102,
  99, 98, 79, 97, 78, 53, 94, 52, 59, 93, 92, 57, 73, 56, 72, 90, 70, 69,
  68, 67, 66, 65 ],
  order := rec( 1 := [ 137, 92 ], 10 := [ 12, 102 ], 11 := [ 10, 12 ],
    13 := [ 4 ], 14 := [ 22, 17, 19, 20, 104, 97 ],
    15 := [ 19, 18, 21, 22, 105, 98 ], 16 := [ 20, 21, 18, 23, 106, 99 ],
    19 := [ 25 ], 2 := [ 138, 94 ], 20 := [ 32, 31, 25, 26, 109, 102 ],
    21 := [ 23, 26 ], 23 := [ 17, 32 ], 24 := [ 31, 112 ],
    25 := [ 113, 104 ], 26 := [ 114, 105 ], 27 := [ 115, 106 ],
    30 := [ 45, 109 ], 34 := [ 45, 112 ], 36 := [ 113, 118 ],
    37 := [ 115, 119 ], 40 := [ 51, 56, 54, 53, 118, 122 ],
    41 := [ 53, 52, 55, 56, 114, 123 ], 42 := [ 54, 55, 52, 57, 119, 124 ],
    45 := [ 127, 59 ], 46 := [ 59, 57 ], 48 := [ 51 ],
    49 := [ 64, 69, 67, 66, 129, 122 ], 5 := [ 4, 9, 7, 6, 97, 92 ],
    50 := [ 66, 65, 69, 68, 130, 123 ], 51 := [ 68, 67, 70, 65, 131, 124 ],
    54 := [ 72 ], 55 := [ 79, 78, 73, 72, 134, 127 ], 56 := [ 73, 70 ],
    58 := [ 64, 79 ], 59 := [ 136, 78 ], 6 := [ 5, 6, 8, 9, 98, 93 ],
    60 := [ 137, 129 ], 61 := [ 130, 93 ], 62 := [ 138, 131 ],
    64 := [ 134, 90 ], 67 := [ 136, 90 ], 7 := [ 7, 8, 5, 10, 99, 94 ] ) )
```

3.2.4 TripleDoubleBranchPoints

▷ TripleDoubleBranchPoints(*pol*)

(function)

Для шарового разбиения многообразия, внутри которого указана диаграмма заузленной поверхности вычисляются те вершины политопа, которые являются тройными точками, двойными точками или точками ветвления. По возможности для каждой точки указываются 2-клетки диаграммы группированные по принадлежности различным листам. Функция выводит именованный список с полями *.triple*, *.double* и *.branch*. В именованном списке *result.triple* каждой вершине *v* под списком поля *.u* можно узнать 2-клетки звезды на верхнем листе в тройной точке *v*, под списком *.m* — 2-клетки на среднем листе и под списком *.d* — на нижнем. Для двойной точки указываются только списки *.u* и *.d*. Для точки ветвления указан только список 2-клеток узла лежащих в звезде этой вершины.

Example

```

gap> pol:=TurnKnot(Trefoil,1);;
...
gap> TripleDoubleBranchPoints(pol);
rec( branch := rec( 13 := [ 2, 6, 22, 30 ], 19 := [ 13, 16, 37, 44 ] ),
double :=
  rec( 1 := rec( d := [ 24, 25, 41, 57 ], u := [ 22, 57, 51, 27 ] ),
    10 := rec( d := [ 28, 37, 38 ], u := [ 2, 30, 7 ] ),
    11 := rec( d := [ 28, 36, 38 ], u := [ 2, 6, 7 ] ),
    2 := rec( d := [ 23, 28, 55, 52, 55 ], u := [ 25, 41, 26 ] ),
    21 := rec( d := [ 36, 38, 43 ], u := [ 8, 12, 14 ] ),
    23 := rec( d := [ 30, 39, 48 ], u := [ 8, 12, 16 ] ),
    24 := rec( d := [ 7, 46, 47 ], u := [ 13, 44, 14 ] ),
    25 := rec( d := [ 24, 40, 41 ], u := [ 27, 39, 51 ] ),
    26 := rec( d := [ 26, 42, 27 ], u := [ 23, 24, 40 ] ),
    27 := rec( d := [ 23, 43, 52 ], u := [ 26, 42, 41 ] ),
    30 := rec( d := [ 47, 48, 51, 57 ], u := [ 19, 44, 20, 43 ] ),
    34 := rec( d := [ 46, 54, 57, 47 ], u := [ 14, 20, 19, 44 ] ) ),
triple :=
  rec(
    14 := rec( d := [ 32, 33, 40, 41 ], m := [ 27, 30, 35, 39 ],
      u := [ 8, 9, 11, 12 ] ),
    15 := rec( d := [ 27, 34, 35, 42 ], m := [ 23, 31, 32, 40 ],
      u := [ 9, 10, 11, 12 ] ),
    16 := rec( d := [ 23, 31, 36, 43 ], m := [ 33, 34, 41, 42 ],
      u := [ 8, 9, 10, 12 ] ),
    20 := rec( d := [ 37, 38, 43, 44 ], m := [ 7, 30, 47, 48 ],
      u := [ 8, 13, 14, 16 ] ),
    5 := rec( d := [ 24, 25, 32, 33 ], m := [ 22, 27, 30, 35 ],
      u := [ 2, 3, 5, 6 ] ),
    6 := rec( d := [ 26, 27, 34, 35 ], m := [ 23, 24, 31, 32 ],
      u := [ 3, 4, 5, 6 ] ),
    7 := rec( d := [ 23, 28, 31, 36 ], m := [ 25, 26, 33, 34 ],
      u := [ 2, 3, 4, 6 ] ) ) ) )

```

3.2.5 IsDiagrammOf2Kont

▷ IsDiagrammOf2Kont(pol)

(function)

Проверяет диаграмму 2-узла вложенную в трехмерное многообразие. Для этого проверяются: 1) корректность всех ссылок на клетки политопа, 2) граф двойных точек, 3) отсутствие точек самокасания.

Example

```

gap> pol:=TurnKnot(Figure8,-1);;

All good!

gap> IsDiagrammOf2Kont(pol);
true

```

3.2.6 SurfaceOf2Knot

▷ `SurfaceOf2Knot(M3)` (function)

Для заузленной поверхности указанной внутри некоторого 3-многообразия M^3 создается прообраз этой поверхности с указанием прообразов двойных ребер, тройных точек и точек ветвления. Прообраз создается как `pl`-комплекс, к которому прикреплен дополнительная информация содержащаяся в именованном списке `.preimage`, который является списком дублированных прообразов. В него входят список `.1` и `.0`. Список `.1` это список пар содержащий прообразы для каждого двойного ребра, первым элементом пары является ребро-прообраз лежащее на нижнем листе, вторым, соответственно, ребро-прообраз лежащее на верхнем листе образа в диаграмме. Список `.0` состоит из списков длины 1 и 3, которые являются списками прообразов точек ветвления и тройных точек, соответственно. Причем, для тройных точек прообраз точки, лежащий на верхнем листе будет третьим в списке, на среднем - вторым и на нижнем, соответственно, первым.

Example

3.2.7 TurnKnot

▷ `TurnKnot(knot, number)` (function)

Создается диаграмма 2-узла вложенная в трехмерную сферу S^3 с помощью алгоритма `SpunTwist` на основании диаграммы одномерного узла `knot`. Число `number` задает количество оборотов данной диаграммы при осуществлении `twist`-движения, при этом отрицательный знак данного числа задает обращение узла в противоположном направлении, при этом если `number` указать равным нулю, тогда `twist`-оборотов в диаграмме не будет и мы получим простую `spun`-диаграмму.

Example

```
gap> TurnKnot(Trefoil,0);
I'm trying simplify a polytope.

...

All good!

rec(
  2knot :=
    rec( dpoints := rec( 11 := [ 12, 7, 9, 10 ], 12 := [ 8, 9, 11, 12 ],
      13 := [ 10, 11, 13, 8 ], 14 := [ 18, 7, 15, 16 ],
      15 := [ 14, 15, 17, 18 ], 16 := [ 16, 17, 13, 14 ] ),
      sheets := [ 7, 8, 14, 9, 15, 10, 16, 11, 17, 12, 18, 13 ] ),
  faces :=
    [ [ [ 2, 3 ], [ 1, 2 ], [ 1, 3 ], [ 2, 3 ], [ 1, 2 ], [ 5, 6 ], [ 4, 5 ],
      [ 4, 6 ], [ 5, 6 ], [ 4, 5 ], [ 1, 4 ], [ 2, 5 ], [ 3, 6 ],
      [ 1, 4 ], [ 2, 5 ], [ 3, 6 ] ],
      [ [ 1, 3, 5 ], [ 1, 4 ], [ 2, 5 ], [ 6, 8, 10 ], [ 6, 9 ], [ 7, 10 ],
      [ 11, 14 ], [ 1, 6, 12, 13 ], [ 2, 7, 11, 12 ], [ 3, 8, 11, 13 ],
      [ 4, 9, 12, 13 ], [ 5, 10, 11, 12 ], [ 13, 16 ], [ 1, 6, 15, 16 ],
      [ 2, 7, 14, 15 ], [ 3, 8, 14, 16 ], [ 4, 9, 15, 16 ],
```

```

      [ 5, 10, 14, 15 ] ],
    [ [ 7, 10, 13, 16 ], [ 1, 4, 8, 10, 12 ], [ 2, 5, 8, 11 ],
      [ 3, 6, 9, 12 ], [ 1, 4, 14, 16, 18 ], [ 2, 5, 14, 17 ],
      [ 3, 6, 15, 18 ] ] ],
    vertices := [ [ 1, "a" ], [ 1, "b" ], [ 1, "c" ], [ 2, "a" ], [ 2, "b" ],
      [ 2, "c" ] ] )

```

3.2.8 2KnotInS4

▷ 2KnotInS4(*pol*)

(function)

По трехмерному политопу *pol* в котором содержится диаграмма заузленной двумерной поверхности T создается вложение этой поверхности T в четырехмерную сферу S^4 .

3.2.9 OrientBrockenDiagramm

▷ OrientBrockenDiagramm(*s3*)

(function)

Функция построит разорванную диаграмму для ориентируемой линейно связной заузленной поверхности. Для ориентируемого 2-узла вычисляется информация о данной диаграмме в которую входят разорванная диаграмма 2-узла и граф двойных. На выход подается именованный список. Список *rez.manifold* содержит прообраз двумерной заузленной поверхности. В списках *rez.images* и *rez.preimages* содержатся образ и прообраз двойных линий и сингулярных точек (тройных и точек ветвления), соответственно. Считается, что на двойных ребрах введена нумерация которая отображается в списках *rez.images.1* и *rez.preimages.1*, то есть *rez.images.1[i]* и *rez.preimages.1[i]* это образ и прообраз i -того двойного ребра. На тройных точках и на точках ветвления введена общая нумерация которая так же отображается в списках *rez.preimages.0* и *rez.images.0*. Граф сингулярных точек заузленной поверхности состоит из набора точек соответствующих тройным точкам и точкам ветвления, при этом дуги графа могут проходить по нескольким ребрам шарового разбиения. На дугах графа двойных точек введена нумерация. Список *rez.colines* i -тому двойному ребру сопоставляет дугу которая графа двойных точек которая проходит по данному ребру. В *rez.cosheets* для i -той 2-клетки заузленной поверхности указывает какому листу разорванной диаграммы эта 2-клетка принадлежит. Так как по условию прообраз заузленной поверхности является ориентируемым многообразием, то дуги графа двойных точек можно ориентировать, а так же присвоить ориентации вершинам графа. Эти ориентации содержатся в списках *rez.coorient.dim*, где $dim = 0$ или 1 . Заметим, что ориентации в *rez.coorient.1* сопоставляются не по дугам и по двойным ребрам. Список *rez.cofaces.0* на i -том месте содержит список дуг графа двойных точек которые содержат i -тую вершину графа. Причем если вершина является тройной точкой, то соответствующий список состоит из шести элементов. Первая тройка списка *rez.cofaces.0[i]* это дуги входящие в i -тую тройную точку, оставшаяся тройка это дуги которые исходят из указанной вершины. Список *rez.cofaces.1* для каждой дуги графа двойных точек указывает список из трех элементов в котором первым указывается

номер верхнего листа, вторым индекс нижнего листа по направлению нормали нормали верхнего листа, третьим – индекс нижнего листа против направления нормали верхнего листа.

Chapter 4

Структуры рядом

4.1 Списки

Следующие списки являются полезными при работе с политопами.

4.1.1 ConnectedSubset

▷ `ConnectedSubset(lists)` (function)

Пусть список `list` состоит из списков. Функция `ConnectedSubset` выведет все индексы внутренних элементов, которые пересекаются или могут быть соединены цепочкой пересекающихся элементов с первым элементом списка `lists`.

Example

```
gap> ConnectedSubset(T2.faces[1]);  
[ 1, 4, 5, 8, 2, 6, 3, 7 ]
```

Наиболее частое применение данная функция находит в разделении на связные компоненты многообразий, отсюда и название этой функции.

4.1.2 SortCircle

▷ `SortCircle(list)` (function)

Входной список `list` должен состоять из двухэлементных списков которые можно рассматривать как ребра графа. Функция *SortCircle* проведет сортировку списка *list* исходя из предположения, что описываемый им граф является циклом.

Example

```
gap> list:=T2.faces[1]{T2.faces[2][3]};  
[ [ 2, 3 ], [ 1, 4 ], [ 1, 2 ], [ 3, 4 ] ]  
gap> SortCircle(list);  
[ [ 2, 3 ], [ 1, 2 ], [ 1, 4 ], [ 3, 4 ] ]  
gap> list;  
[ ]
```


4.1.3 LineOrdering

▷ `LineOrdering(list)` (function)

Пусть имеется некоторое разбиение отрезка на интервалы, которое записано в список *list*. Каждый интервал представлен либо парой своих элементов - концов данного интервала. На таком множестве можно ввести линейный порядок. Функция возвращает список индексов, который задает линейный порядок внутри списка *list* под именем *.order* и ориентации каждого пары под именем *.orient*.

Example

```
gap> list:=[ [ 2, 3 ], [ 4, 1 ], [ 2, 4 ], [ 15, 1 ], [ 15, 5 ] ];;
gap> LineOrdering(list);
rec( order := [ 5, 4, 2, 3, 1 ], orient := [ 1, -1, 1, -1, 1 ] )
```

Список *list* может представлять из себя цикл.

Example

```
gap> circ:=[[1,2],[3,4],[4,2],[1,3]];;
gap> LineOrdering(circ);
rec( order := [ 3, 1, 4, 2 ], orient := [ 1, -1, 1, 1 ] )
```

4.2 Рациональные функции

Для удобств преобразований было решено рациональные функции хранить в виде именованного списка содержащего три поля. Первые два поля для рациональной функции *f* это поля *f.numerator* и *f.denominator* соответствующие числителю и знаменателю рациональной функции. Каждое из этих полей является разложением на неприводимые множители числителя и знаменателя соответственно. Третье поле это *f.coef* которое содержит числовой коэффициент рациональной функции составленный как отношение коэффициента при старшей степени числителя к коэффициенту при старшей степени знаменателя. Для неизвестных *x, y, ...* используется лексикографическое упорядочение. Например, для функции $f = \frac{2x^2 - 8y^2}{3x^2 + 2y^3}$ получим следующее представление

Example

```
gap> SimplifyRationalFunction(f);
rec( coef := 2/3, denominator := [ x_1^2+2/3*x_2^2 ],
      numerator := [ x_1-2*x_2, x_1+2*x_2 ] )
```

Для работы с данным форматом рациональных функций реализованы основные арифметические операции с использованием следующего принципа. Функции могут примать на вход как стандартный формат записи функций, так и разложенный на неприводимые множители, на выход будет подан только формат предлагаемый нами. Так как такое представление потенциально занимает много компьютерной памяти по возможности все данные всегда упрощаются.

4.2.1 SimplifyRationalFunction

▷ `SimplifyRationalFunction(f)` (function)

Функция переводит в формат неприводимых множителей и одновременно упрощает функцию f .

4.2.2 GcdPolynomial

▷ `GcdPolynomial(f, g)` (function)

Находится наибольший общий делитель для двух полиномов. Результат выдается в виде списка неприводимых многочленов.

Example

```
gap> a:=x^5+y^5;;
gap> b:=(x^7+y^7)*(x+y)^2;;
gap> GcdPolynomial(a,b);
[ x_1+x_2 ]
```

4.2.3 LcmPolynomial

▷ `LcmPolynomial(f, g)` (function)

Находится наименьшее общее кратное для двух полиномов. Результат выдается в виде списка неприводимых многочленов.

Example

```
gap> a:=x^5+y^5;;
gap> b:=(x^7+y^7)*(x+y)^2;;
gap> LcmPolynomial(a,b);
[ x_1+x_2, x_1+x_2, x_1+x_2, x_1^4-x_1^3*x_2+x_1^2*x_2^2-x_1*x_2^3+x_2^4,
  x_1^6-x_1^5*x_2+x_1^4*x_2^2-x_1^3*x_2^3+x_1^2*x_2^4-x_1*x_2^5+x_2^6 ]
```

4.2.4 ProductRationalFunctions

▷ `ProductRationalFunctions(f, g)` (function)

▷ `DivideRationalFunction(f, g)` (function)

Операции умножения и деления над рациональными функциями.

4.3 Матрицы

4.3.1 Pfaffian

▷ `Pfaffian(mat)` (function)

Вычисляется пфаффиан кососимметрической матрицы mat . Для вычисления используется модифицированный аналог алгоритма Гаусса.

Example

```
gap> PrintArray(mat);
[ [ 0, -3, -1, 1 ],
  [ 3, 0, -1, 2 ],
  [ 1, 1, 0, 3 ],
  [ -1, -2, -3, 0 ] ]
gap> Pfaffian(mat);
-8
```

4.4 Грассманнова алгебра

На данный момент не реализовано какой либо формальной структуры с помощью которой можно объявить грассмановы переменные как таковые. Тем не менее для задания мономов и функций на грассмановых переменных используется следующая структура. Предполагается, что грассмановы переменные нумерованы и любое упорядочение описываемое ниже является лексикографическим, если не оговорено обратное. Простой моном на грассмановых переменных задается как двухэлементный список первым элементом которого является список индексов грассмановых переменных образующих моном, вторым коэффициент этого монома над некоторой алгеброй (полем). Функция на грассмановых переменных $f(x_1, x_2, \dots, x_k) = \sum a_{i_1, \dots, i_s} x_{i_1} \cdots x_{i_s}$ описывается в как именованный список с двумя полями `f.monomials` и `f.coeffs` которые содержат слово из грассмановых переменных и коэффициент данного слова, соответственно, при этом коэффициент `f.coeffs[j]` принадлежит слову `f.monomials[j]`.

4.4.1 GrassmannMonomialsProduct

▷ `GrassmannMonomialsProduct(mon1, mon2)` (function)

Вычисляется произведение двух грассмановых мономов. Проиллюстрируем функцию на следующих примерах. $(2 a_1 a_2) * (3 a_5 a_4 a_6) = -6 a_1 a_2 a_3 a_4 a_5 a_6$ и $(2 a_1 a_2) * (3 a_5 a_2 a_6) = 0$.

Example

```
gap> GrassmannMonomialsProduct([ [1,2], 2 ], [ [5,4,6], 3 ] );
[ [ 1, 2, 4, 5, 6 ], -6 ]
gap> GrassmannMonomialsProduct([ [1,2], 2 ], [ [5,2,6], 3 ] );
[ [ ], 0 ]
```

4.4.2 GrassmannProduct

▷ `GrassmannProduct(f, g)` (function)

Произведение грассмановых функций f и g .

4.4.3 GrassmanSum

▷ `GrassmanSum(f, g)` (function)

Сложение грассмановых функций f и g .

4.4.4 BerezinIntegral

▷ `BerezinIntegral(f , a)` (function)

Вычисляется интеграл Березина от функции f по грассмановой образующей a (на вход функции поступает индекс соответствующей грассмановой образующей).

4.4.5 BerezinMultipleIntegral

▷ `BerezinMultipleIntegral(f , $list$)` (function)

Вычисляется кратный интеграл Березина от функции f по некоторому набору грассмановых переменных указанных в списке $list$. Порядок следования индексов грассмановых переменных в списке $list$ определяет порядок интегрирования.

References

Index

2KnotInS4, 80

ballAB, 27

ballTriangul, 28

BerezinIntegral, 96

BerezinMultipleIntegral, 97

CellOrient, 11

ConnectedSubset, 86

ConnectedSum, 29

ContractMiniFace, 20

dataPachner, 12

DelFace, 36

DivideFace, 22

DivideRationalFunction, 93

EulerNumber, 8

FaceComp, 16

FirstBoundary, 19

FreeUnionPol, 28

FromSimplexToPolytope, 15

FundGroup, 9

GcdPolynomial, 92

GlueFaces, 47

GrassmannMonomialsProduct, 95

GrassmannProduct, 96

GrassmanSum, 96

ImageInPolProduct, 30

IsDiagrammOf2Kont, 75

IsPolytope, 6

Knot1OnSphere2, 60

KnotGroup, 63

KnotInS3, 61

LcmPolynomial, 92

LengthPol, 9

License, 2

LineOrdering, 88

MaxTree, 10

OrientBrockenDiagramm, 80

OrientTriangulated, 12

ParallelSimplify, 43

PermFaces, 20

Pfaffian, 93

PolBnd, 16

PolBoundary, 9

PolCheckComb, 18

PolDoubleCone, 29

PolFactorInvolution, 33

PolInnerFaces, 10

PolMinusFace, 44

PolMinusFaceDoublingMethod, 44

PolMinusPol, 46

PolOrient, 12

PolProduct, 30

PolProductSyms, 33

PolProductSymsDict, 33

PolSimplify, 26

PolSimplifyWith2Knot, 70

PolTriangulate, 18

PreimageInPolProduct, 32

ProductRationalFunctions, 93

Reidemeister10Everywhere, 61

SetOfFacesBoundary, 42

SimplifyRationalFunction, 91

SingularitySet2Knot, 71

SortCircle, 87

sphereAB, 27

sphereTriangul, 28

StarFace, 17

SubPolytope, 42

SurfaceOf2Knot, [76](#)

TorusKnot, [63](#)

TripleDoubleBranchPoints, [73](#)

TurnKnot, [78](#)

UnionFace, [24](#)

VerticesRullGlueFace, [48](#)

VerticesRullGluePol, [48](#)

wasDelFace, [37](#)

ZeifertSurface, [64](#)

ZeifertSurfaceWithSimplyBoundary, [65](#)

ZeroLinkFromKnot, [62](#)