KEG上におけるクロスキャップ数の計算

Kaito Yamada

2022-11-15

概 要

クロスキャップ数の計算効率化 (仮)

目 次

1　はじめに

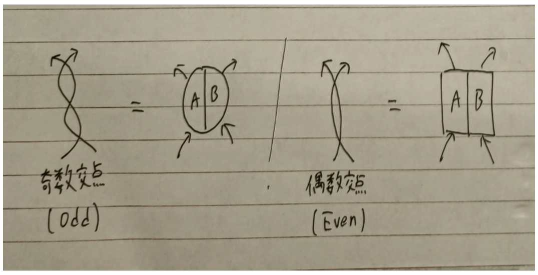
1.1　研究背景

1.1.1　S^+ とは

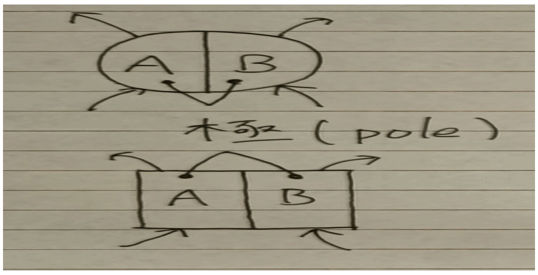
1.1.2　KEG とは

前論文 [2] で結び目をオイラーグラフとして解釈し、Knot Eulerian Graph(KEG) のデータ構造を提案した。今回のアルゴリズムは KEG に対して定義されているが、データ構造の細部について、より適切な変更と命名を施しておく。

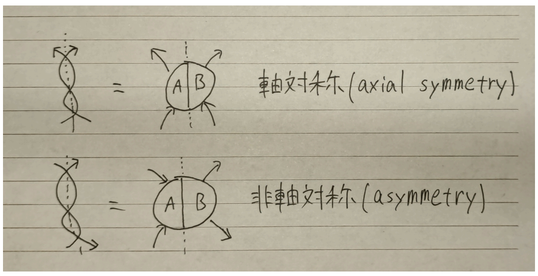
まず、視覚的な判別性の向上のため、奇数交点の頂点を円、偶数交点の頂点を正方形で表すこととした。



そして、ある頂点を軸で区切った際の左右を**極 (pole)** と呼ぶこととする。極は順序を気にせず A/B と命名され、頂点 X の極は $\mathrm{P_X}$ と表す。この時 $\mathrm{P_X} = \mathrm{A}$ あるいは $\mathrm{P_X} = \mathrm{B}$ である。また、空頂点の極は N(None) とする。



また、頂点に出入りする辺の向きについて、以下の 2 パターンをそれぞれ**軸対称 (axial symmetry)**、**非軸対称 (asymmtry)** とする。



1.2　先行研究

1.2.1　C(K) = 3 の場合

C(K) = 3 の場合については、伊藤昇先生の論文 [1] にて完全なリストが作成されている。ここでは結び目に対して手作業で網羅的に S^+ を施し、生成された結果のうち、結び目として同値なものを削除している。

1.2.2　KEG の同値判定

1.3　研究目的

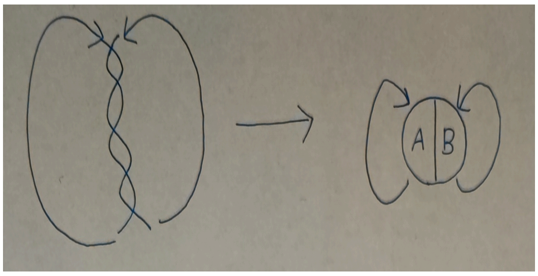
2　アルゴリズムと計算量

2.1　グラフの拡張

グラフを拡張して、S^+ の対象となりうる辺がすべて出てくるようにする。グラフを満足に”ほぐす”には、以下の 2 操作が必要となる。

- 頂点の分割
- RI^+

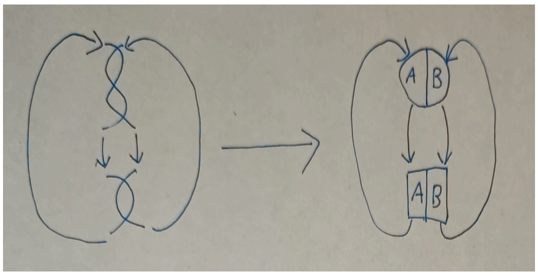
ここでは例として、以下の step1 の結び目を拡張していく。



2.1.1　頂点の分割のアルゴリズム

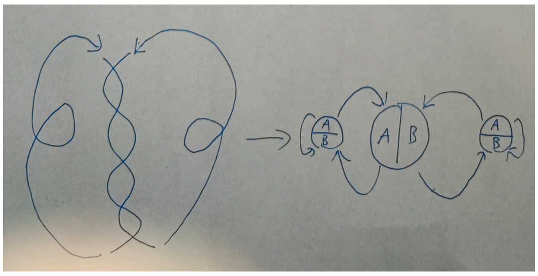
頂点内の領域に対して S^+ を適用するため、一つの頂点を明示的に分割し、間を繋ぐ 2 辺を追加する。繋ぐ辺の向きは二種類存在する (軸に対して垂直/平行)
頂点は、それぞれ以下のように分割できる

- Odd →Odd + Even / Even + Odd
- Even →Odd + Odd / Even + Even

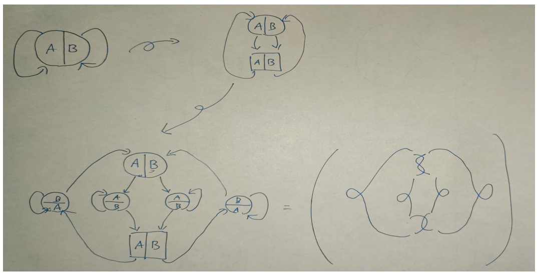


2.1.2 RI$^+$ のアルゴリズム

解消できる自己ループを持つ Odd を追加することで、RI$^+$ を表現する。
(u, v, P_u, P_v) という辺があるとき、その辺を削除し、Odd 頂点 O を追加し、辺 (u, O, P_u, A), (O, O, B, A), (O, v, B, T_v) という辺を追加する。



どちらの操作も施すと以下のようになる。この時、頂点の分割は頂点に対する操作、RI$^+$ は辺に対する操作であることから、頂点の分割 →RI$^+$ の順で行う必要がある。



2.1.3 計算量

頂点の分割は、ある分割の仕方 (O-OE, O-OO 縛り) で、頂点を 2 つに分割すると、辺の削除が 4 回、辺の追加が 6 回発生する。V 個の頂点すべてに分割を施すので、$O(V)$
愚直にやると、それぞれ 2 通りの分割の仕方があるため、2^V 通りのグラフが発生しうる。これは S$^+$ の際に補正を加えることで、E 通りに抑えることができる可能性がある。
RI$^+$ では、ある辺について、頂点追加が 1 回、辺の削除が 1 回、辺の追加が 3 回発生する。頂点の分割で頂点数が倍になっているので、2V 頂点に対して定数操作を行うため、$O(V)$
全体で $O(V)$ あるいは $O(2^V)$

2.2 S$^+$ の対象の列挙

2.2.1 列挙のアルゴリズム

S$^+$ はグラフへの操作だが、本質的にはオイラー閉路のうち二辺に対する操作である。あるグラフ G が与えられたとき、G に対応するオイラー閉路 (辺のリスト) が一つに定まるが、その閉路の中で S$^+$ の対象となりうる辺のペアは複数現れる。よってそのペア (操作対象) を列挙することが必要である。各ペアの列挙は、以下の操作で実現される。

1. グラフ G のオイラー閉路 C_e を求める。C_e の長さはグラフの辺の総数と等しいので、E。

2. C_e を 2 個連結する。

3. i=[0, E-1] をループし、e_s=C_e[i] とする。j=[1, E-1] とし、e_g=C_e[i+j] とする。

結果として生成されるペアは E(E-1) 組となる。

2.2.2　計算量

1. オイラー閉路の取得 →DFS なので $O(E+V)$
2. オイラー閉路の連結 → 長さ E のものを結合するので $O(E)$
3. ペアの列挙 → 各辺を e_s として、e_g の候補が E-1 通りなので $O(E^2)$

$E=2V \Rightarrow E+V=E+\frac{1}{2}E=\frac{3}{2}E$ であるため、$O(E+V)=O(E)$ とみなせる。

2.3　S^+ の適用

2.3.1　KEG における S^+ のアルゴリズム

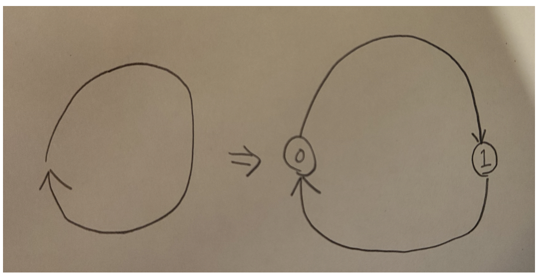
KEG を対象とした S^+ のアルゴリズムはいかに示す通りである。

1. Odd 頂点 O を追加する。
2. a, b から O に、O から c, d に繋がるように辺を追加する。この時 a と d, b と c がそれぞれ O の同じ側 (A/B) に繋がるようにする。即ち、(a, O, P_a, A), (b, O, P_b, B), (O, c, B, P_c), (O, d, A, P_d) の 4 辺を追加する。
3. C_e で e_s と e_g の間にある辺全てを逆向きにした辺を追加する。即ち、(u, v, P_u, P_v) を (v, u, P_v, P_u) にする。
4. $[e_s, e_g]$ の辺を削除する

2.3.2　操作例

ここでは単純な例を二つ上げ、他の例については付録にて示す。

2.3.2.1　step0 →step1 の例

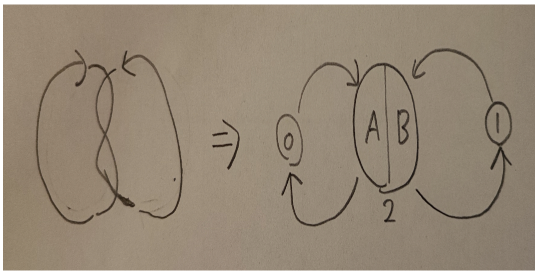


[(0, 1, N, N), (1, 0, N, N)]

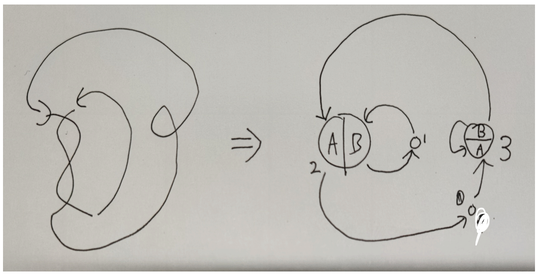
区間 $[0, 1]$ を対象に S^+ を行う。

1. Odd 頂点 2 を追加。
2. a=0, P_a=N, b=1, P_b=N, c=1, P_c=N, d=0, P_d=N として、頂点 2 と繋がる辺を追加。(0, 2, N, A),(1, 2, N, B),(2, 1, B, N),(2, 0, A, N) の 4 辺。
3. (0, 1, N, N), (1, 0, N, N) を消去。

最終的に残る辺は [(0, 2, N, A),(1, 2, N, B),(2, 1, B, N),(2, 0, A, N)] の 4 辺。



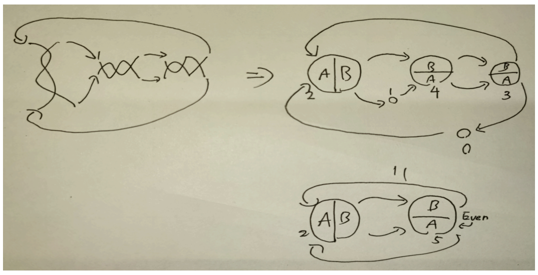
2.3.2.2 step1 →step2-2 の例 step1 に RI^+ を行い、Odd 頂点 3 が追加され以下の状態になる。



[(1, 2, N, B), (2, 0, A, N), (0, 3, N, A), (3, 3, B, A), (3, 2, B, A), (2, 1, B, N)]
区間 $[0, 3]$ を対象に S^+ を行う。

1. Odd 頂点 4 を追加
2. a=1, P_a=N, b=2, P_b=B, c=3, P_c=B, d=3, P_d=A として、頂点 3 と繋がる 4 辺を追加。(1, 4, N, A), (2, 4, B, B), (4, 3, B, B), (4, 3, A, A) の 4 辺。
3. (1, 2, N, B), (3, 3, B, A) を消去。
4. (2, 0, A, N), (0, 3, N, A) を反転して (0, 2, N, A), (3, 0, A, N) にする。

[(3, 2, B, A), (2, 1, B, N), (1, 4, N, A), (2, 4, B, B), (4, 3, B, B), (4, 3, A, A), (0, 2, N, A), (3, 0, A, N)]
頂点 3, 4 は Odd+Odd→Even に統合でき、Even 頂点 5 の追加と空頂点の削除をすると以下の通りになる。
[(2, 5, B, B), (5, 2, B, A), (2, 5, B, A), (5, 2, A, A)]



2.3.3 計算量

ある KEG において、任意の 2 辺に対する S^+ の結果を得るのに必要な計算量を考えていく。

1. 頂点追加 $\rightarrow O(1)$
2. Odd 頂点への 4 辺の追加 $\rightarrow$ 定数なので $O(1)$
3. e_s と e_g の間の辺を逆にする $\rightarrow$ 最大 E-2 辺に行われるので $O(E)$
4. 逆転前の辺を削除する $\rightarrow$ 最大 E-2 辺に行われるので $O(E)$

2.2 節で列挙したペアのそれぞれについて S^+ を適用するため、各計算ステップの最大次数を見ると E^2 回のループで $O(E)$ の操作をするためトータルで $O(E^3)$

3 まとめ

研究のまとめ。なんやかんや

謝辞

本論文を作成するにあたり、—- みなさまに感謝の意を表します.

参考文献

[1] Noboru Ito and Yusuke Takimura. Crosscap number three alternating knots. J. Knot Theory Ramifications, 31(4):2250026–1–2250026–11, 6 2022.

[2] Noboru Ito and Kaito Yamada. Plumbing and computation of crosscap number. JP Journal of Geometry and Topology, 26(2):103–115, 11 2021.