

2025 年度 横浜国立大学 理工学部 数理科学 EP 卒業研究

Homomorphic Expansions for Knotted Trivalent Graphs

2264246 宮路 宙澄

指導教員：野崎 雄太 准教授（2026 年 1 月 30 日）

指導教員印	受理印

Abstract

KTGs に対し a universal Vassiliev invariant が存在することは知られていた [MO97, CL07, Dan10]. KTGs において “edge unzip” という操作のみ準同型にならず, 補正項が現れる. dotted Knotted Trivalent Graphs において Z^{old} が準同型となるように Z を 2 通りで構成することが目的.

It has been known since old times [MO97, CL07, Dan10] that there exists a universal finite type invariant Z^{old} for Knotted Trivalent Graphs. While the behavior of Z^{old} under edge unzip is well understood, it is not plainly homomorphic as some “correction factors” appear.

In this paper we modify Z^{old} into a new expansion Z , defined on “dotted Knotted Trivalent Graphs”, which is homomorphic with respect to a large set of operations.

Contents

I	Introduction	3
II	Preliminaries	4
1	KTGs and Z^{old}	4
2	Algebraic structures and expansions	10

Part I

Introduction

結び目理論とは位相幾何学の分野の一つであり，物理学とも関係する分野である．その中でも，結び目同士が異なるかどうかを区別する際に手段として使われるものとして結び目の不変量というものがある．

Knotted Trivalent Graphs(Knots や links を含む) のなす空間には良い構造がある．次の4つの操作がある: orientation switch, edge delete, edge unzip, connected sum. KTGs は有限生成である [Thu02]. KTGs は Knot genus(ザイフェルト曲面?) や ribbon property(ribbon knot? 自己交差あり) などの良い代数構造をもつため，それらを使うことが出来る [BN].

Knots の Kontsevich integral は universal Vassiliev invariant に拡張できる．その中でも unzip 以外が準同型になる．

- unzip, delete, connected sum を “tree connected sums” と呼ばれるより一般の操作へ変える．
- unzip が出来る edge を制限する．

簡単に Z^{old} を dKTGs で準同型にすることができ，dKTGs は KTGs の良い性質をすべて保つことを示す．有限生成や close connection to Drinfel'd associators (知らん) など．

謝辞



Part II

Preliminaries

1 KTGs and Z^{old}

Definition 1.1. *Trivalent graph*(3価グラフ)とは、各頂点が3つの辺をもつようなグラフをいう。

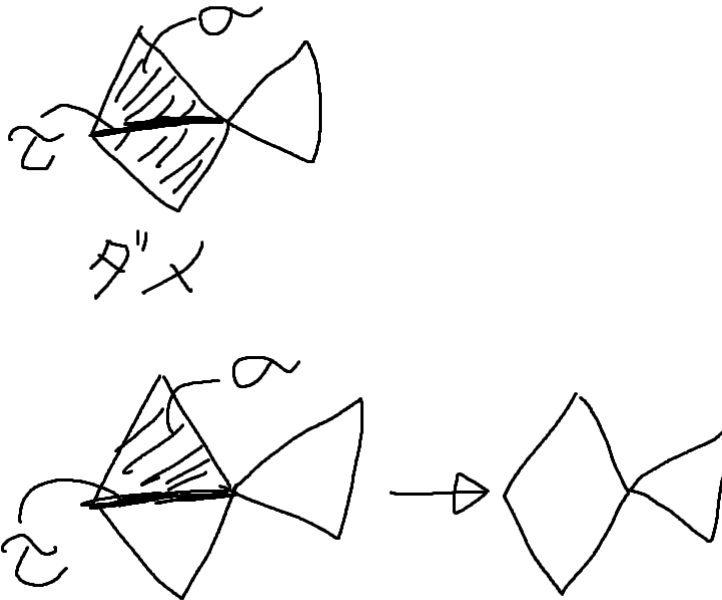
全ての辺は向きづけられているものとし、頂点は反時計回りに向きを与える。ループや円などの辺を許すこととする。

Definition 1.2. *Surface*(曲面)とは第2可算公理¹を満たす2次元多様体をいう。

Definition 1.3. K を単体複体、 $\sigma, \tau \in K$ を以下の条件を満たすとする。

- $\tau \not\preceq \sigma$,
- σ は K の最大の面単体で、他の最大面単体は τ を含まない。このような τ を *free face* という。

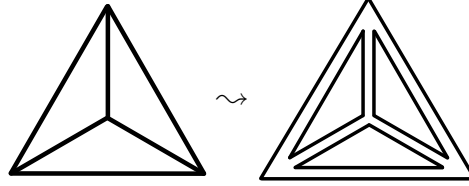
このとき、 K の *collapse* とは、 $\tau \preceq \gamma \preceq \sigma$ となる γ をすべて取り除くことをいう。



¹高々可算な開基を持つ。

Definition 1.4. 単体複体 K における *spine*(スパイン) とは, K の部分単体複体 K' であって, K を collapse して K' となるものをいう.

Definition 1.5. graph Γ に対し *framed graph* (枠付きグラフ) $\mathbf{\Gamma}$ とは, Γ と, Γ を spine として曲面 Σ へ埋め込む²写像 $\Gamma \hookrightarrow \Sigma$ の組をいう. 特に Γ が Trivalent graph のとき, $\mathbf{\Gamma}$ を *framed trivalent graph*³という.



Definition 1.6. *Knotted trivalent graph (KTG)* を, framed trivalent graph γ から \mathbb{R}^3 への埋め込み, KTG の *skeleton* を trivalent graph Γ とする. (framed knots や links も含む)

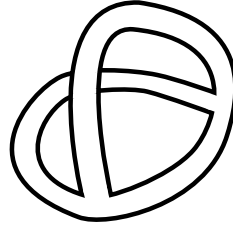


Figure 1: Knotted Trivalent Graph の例

KTGs において, skeleton が isotopy で移りあうものを同一視する. 特に, framed knots や links は KTGs の特別な場合である. Trivalent graph Γ に対し, すべての KTG の集合を $\mathcal{K}(\Gamma)$ と書き, $\mathcal{K} := \bigcup_{\Gamma} \mathcal{K}(\Gamma)$ とする.

Proposition 1.7. Framed knots と, framed knot の diagrams で 3 つの Reidemeister 変形 $R1', R2, R3$ の操作で移りあうものを同一視したものは 1 対 1 に対応する.

²グラフを 1 次元 CW 複体とみなす.

³論文では thickened trivalent graph と書いてある.

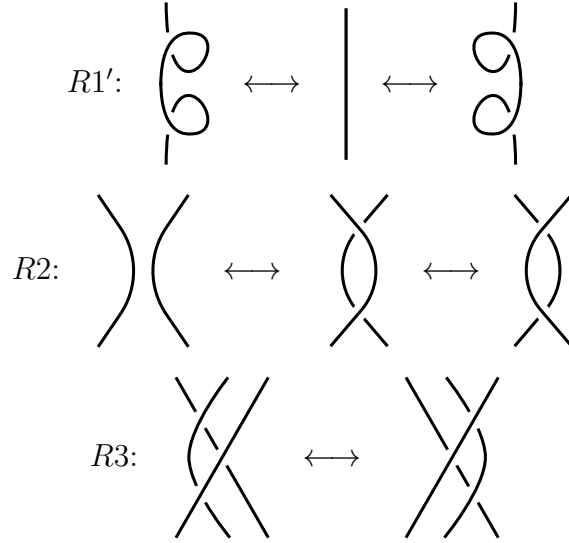


Figure 2: Framed knots における 3 種類の Reidemeister 変形

Proof. [Oht02] P15 Theorem 1.8 □

Proposition 1.8. KTGs の isotopy class と graph diagrams (交点の上下の情報を残した射影) で $R1', R2, R3, R4$ で移りあうものは 1 対 1 に対応する.

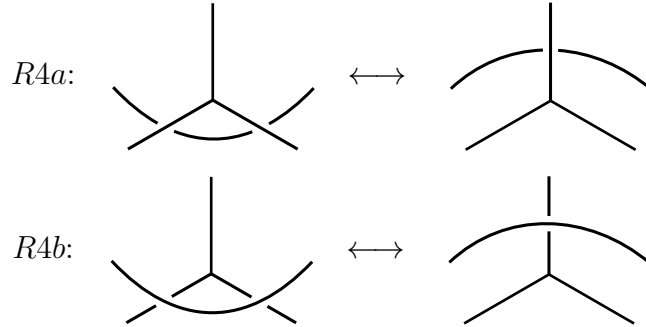


Figure 3: Framed knots における 3 種類の Reidemeister 変形

Proof. □

KTGs には以下の 4 つの操作がある.

Definition 1.9. Trivalent graph を Γ , KTG を $\gamma \in \mathcal{K}(\Gamma)$ とし, Γ の edge を e とする. e の *switch the orientation* を, 向きを変えるものとして定め, $S_e(\gamma)$ と書く.

$$S_e: \mathcal{K}(\Gamma) \rightarrow \mathcal{K}(S_e(\Gamma)); \gamma \mapsto S_e(\gamma)$$



Definition 1.10. Γ の edge であって、両端に接続されている edge の向きが一致している e を *delete* するとは、 e を削除し、三価性を保つように e の両端の頂点を削除することをいう。

$$d_e: \mathcal{K}(\Gamma) \rightarrow \mathcal{K}(d_e(\Gamma)); \gamma \mapsto d_e(\gamma)$$



Definition 1.11. Γ の edge e を *unzip* するとは、 e を “限りなく近い” 2 つの edges に分け、端点をなくすことをいう。端点をなくしたとき、edge の向きが合っていることが必要である。同様の議論で framed graph Γ に対し、unzip を定義できる。

$$u_e: \mathcal{K}(\Gamma) \rightarrow \mathcal{K}(u_e(\Gamma)); \gamma \mapsto u_e(\gamma)$$



Definition 1.12. 2 つの trivalent graph とその edge のペア $(\Gamma, e), (\Gamma', f)$ の *connected sum* $\Gamma \#_{e,f} \Gamma'$ とは e, f をつなぐ edge を新たに作る。well-defined であるために、新たな edge の向きは Γ から Γ' への向きとし、KTGs においてはねじれを許さず、辺を付ける場合は e, f の右側に付けるとする。(2 次元では自由に動かせないため左右が重要)

$$\#_{e,f}: \mathcal{K}(\Gamma) \times \mathcal{K}(\Gamma') \rightarrow \mathcal{K}(\Gamma \#_{e,f} \Gamma')$$

KTGs の finite type invariants は、links におけるものと同様に定義する。同じ skeleton の KTGs の形式和を許し、得られたベクトル空間を特異点の解消によってフィルター分けする。

$$\mathcal{F}_0(\Gamma) := \left\{ \sum_{i=1}^m a_i \gamma_i \mid m \in \mathbb{N}, a_i \in \mathbb{Q}, \gamma_i \in \mathcal{K}(\Gamma) \right\}$$

を KTGs の有限な形式和全体がなす \mathbb{Q} -ベクトル空間とする。



Definition 1.13. n -singular KTG とは, n の特異点を持つ trivalent graph の \mathbb{R}^3 へのはめ込み. 各特異点は横断的な 2 重点か, “ F ” と書かれた線上の点である.

$n \geq 1$ に対し以下のようなベクトル空間を考える.

$$\mathcal{F}'_n(\Gamma) := \left\{ \sum_{i=1}^m a_i \gamma_i \mid m \in \mathbb{N}, a_i \in \mathbb{Q}, \gamma_i: \Gamma \text{ を骨格とし少なくとも } n \text{ の特異点を持つ KTG} \right\}$$

特異点を解消する写像として,

$$\rho: \mathcal{F}'_* \rightarrow \mathcal{F}_0,$$

であって, 以下のように定めるものを考える: \mathcal{F}_n ($n \geq 1$) に対し, ρ で送ると,



$$\mathcal{F}_0 \supset \rho(\mathcal{F}_1) \supset \rho(\mathcal{F}_2) \cdots$$

という filtration が得られる. この filtration に対する associated graded space として,

$$\mathcal{A}(\Gamma) := \prod_{i=0}^{\infty} \mathcal{F}_i(\Gamma) / \mathcal{F}_{i+1}(\Gamma)$$

とする.

$\mathcal{A}(\Gamma)$ は chord diagram を用いて表すことができる.

Definition 1.14. skeleton graph Γ 上の n 次の chord diagram とは, Γ の辺上の $2n$ の点のペアからなる組み合わせ的なものであり, 辺の向きを保つ同相写像で移りあうものを同一視する. 特に, 次数 n の chord diagram を基底とする \mathbb{Q} 上のベクトル空間を $\mathcal{D}_n(\Gamma)$ と書く.

Proposition 1.15. $\pi: \mathcal{D}(\Gamma) \rightarrow \mathcal{A}(\Gamma)$ は well-defined であり surjective.

Proof. この論文だけ $\mathcal{A}(\Gamma)$ の構成法が違うので一旦パス. (結局は {Chord diagrams}/(VI, 4T) $\cong \mathcal{A}$ のはず) \square



上記の写像の kernel に含まれる 2つの関係式がある. (要証明← goodnote と Alge Knot Theory のノートでできたはず)(Ker が一致するとはまだ言っていない)

- (4T) Four term relation
- (VI) Vertex invariance relation



図に描かれていない部分には graph があるが, それらは全て同じでなければならない. 4T では反時計回りの向きを与える (これ必要?). VI において, $(-1)^{\rightarrow}$ は, chord の付いた edge が外向きなら -1, 内向きなら 1 をかける (つまり式は 8 つある).

4T, VI の relations が存在することは分かったが, これ以上の relation が存在 “しない” ことを示すのは困難である. これを示すには, universal finite type invariant $\mathbb{Q}\text{KTG} \rightarrow \mathcal{A}$ を構成するのが最善である (ここでは定義しないが, 後で一般の文脈で定義する). これは, T.Le, H.Murakami, J. Murakami, T.Ohtsuki の結果をもとに, また Drinfeld の associator の理論を用いて [KO, CD],[BN] での Kontsevich integral を拡張する形で [MO97] で初めて得られた.

KTGs の各 operation は \mathcal{A} 上の operation を誘導する. (\mathcal{A} は $\mathcal{K}(\Gamma)$ の associated graded space である.)

- orientation switch
- edge delete
- edge unzip
- connected sum well-defined である. Introduction to Vassiliev knot invariants(Chmutov) の Lemma 4.2.9

定理 1.16. KTGs は trivially embedded tetrahedron と twisted tetrahedron の列により有限生成.

2 Algebraic structures and expansions

\mathcal{K} において, orientation switch, edge delete, edge unzip, connected sum を linear に拡張し, \mathbb{Q} 係数の形式和を許すように拡張することで, \mathcal{K} は vector space となる.

Definition 2.1. Γ を KTG とする. $\mathcal{K}(\Gamma)$ において, 係数の和が 0 となるような形式和全体から生成される集合を $\mathcal{I}(\Gamma)$ と書き, $\mathcal{I} := \bigcup_{\Gamma} \mathcal{I}(\Gamma)$ とする.

例 2.2. Let $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$ be KTGs with skeleton Γ . Then, $\gamma_1 - \gamma_2, \gamma_1 - \frac{1}{2}\gamma - \frac{1}{2}\gamma_3 \in \mathcal{I}(\Gamma)$.

Definition 2.3. \mathcal{I}^m を, \mathcal{I} の元を少なくとも m 個含むようなものの演算の合成で生成される \mathcal{K} の部分空間とする. つまり,

$$\mathcal{I}^m := \left\{ \gamma \in \mathcal{K} \left| \begin{array}{l} \text{There exist } n, f: \prod_{i=1}^n \mathcal{K} \rightarrow \mathcal{K}, x_1, \dots, x_n \in \mathcal{K} \\ \text{such that } \gamma = f(x_1, \dots, x_n), \#\{i \mid x_i \in \mathcal{I}\} \geq m \end{array} \right. \right\}.$$

\mathcal{I}^m は明らかに filtration の構造をもつ.

Lemma 2.4. $\mathcal{I}(\Gamma) = \{\sum_i c_i(\gamma_{1_i} - \gamma_{2_i}) \mid \gamma_{1_i}, \gamma_{2_i}: \text{generators of } \mathcal{K}(\Gamma), c_i \in \mathbb{Q}\}$.

Proof. (⊃) This is obvious.

(⊂) For any element of \mathcal{I} , it can be written as $\sum_{i=1}^n c_i \gamma_i$. Since $\sum_{i=1}^n c_i = 0$, we have $c_n = -\sum_{i=1}^{n-1} c_i$. Thus

$$\sum_{i=1}^n c_i \gamma_i = c_1 \gamma_1 + c_2 \gamma_2 + \dots + \left(-\sum_{i=1}^{n-1} c_i \right) \gamma_n = \sum_{i=1}^{n-1} c_i (\gamma_i - \gamma_n).$$

□

定理 2.5. $\mathcal{I}^n(\Gamma) = \mathcal{F}_n(\Gamma)$ for all $n \geq 0$ and skeleton Γ .

Proof. (i) ($\mathcal{I}^1(\Gamma) = \mathcal{F}_1(\Gamma)$)

(⊃) 任意の $\mathcal{F}_1(\Gamma)$ の元は少なくとも 1 つの double point を持つような 1-singular KTG の交点の正負の差を元に持ったため, $\mathcal{F}_1(\Gamma) \subset \mathcal{I}(\Gamma) \subset \mathcal{I}^1(\Gamma)$.

(⊂) 任意の $\mathcal{I}(\Gamma)$ の元は, $\sum_i c_i(\gamma_i - \gamma'_i)$ と書ける. $\mathcal{F}_1(\Gamma)$ において, 同じ skeleton を持つ任意の 2 つの KTG は crossing change により移りあうため, $\gamma_i - \gamma'_i$ を 1 点における正負の交差の差 $\tilde{\gamma}_i - \tilde{\gamma}'_i$ となるようにできる. よって

$$\sum_i c_i(\gamma_i - \gamma'_i) = \sum_i c_i(\tilde{\gamma}_i - \tilde{\gamma}'_i) \in \mathcal{F}_1(\Gamma).$$

□

References

- [BN] D Bar-Natan. Algebraic knot theory-a call for action. 898(10.1016):0040–9383.
- [CL07] Dorin Cheptea and Thang TQ Le. A tqft associated to the lmo invariant of three-dimensional manifolds. *Communications in mathematical physics*, 272(3):601–634, 2007.
- [Dan10] Zsuzsanna Dancso. On the kontsevich integral for knotted trivalent graphs. *Algebraic & Geometric Topology*, 10(3):1317–1365, 2010.
- [MO97] Jun Murakami and Tomotada Ohtsuki. Topological quantum field theory for the universal quantum invariant. *Communications in Mathematical Physics*, 188(3):501–520, 1997.
- [Oht02] T. Ohtsuki. *Quantum Invariants: A Study of Knots, 3-manifolds, and Their Sets*. K & E series on knots and everything. World Scientific, 2002.
- [Thu02] Dylan P Thurston. The algebra of knotted trivalent graphs and turaev ’s shadow world. *Geometry & Topology Monographs*, 4:337–362, 2002.