Мультиреляционные графы, такие как социальные сети и базы знаний, имеют множество применений, и методы эмбеддинга этих графов особенно важны для этих приложений. Например, внедрение мультиреляционных графов было применено для анализа социальных сетей (Krohn Grimberghe et al., 2012) и заполнения базы знаний (Bordes et al., 2013). Мультиреляционный граф состоит из объектов V, набора R типов отношений и набора троек, где каждая тройка (h, r, t) ∈ V × R × V представляет sнекоторое отношение r ∈ R между головной сущностью h ∈ V и хвостовой сущностью t ∈ V. Эмбеддинг мультиреляционного графа приводит к отображению объекта и отношения, установленного в некотором пространстве. Математические операции в этом пространстве позволяют выполнять множество задач, включая кластеризацию объектов и составление, прогнозирование или шумоподавление троек. Действительно, задачи по составлению для баз знаний привлекают значительное внимание, поскольку известно, что базы знаний далеки от завершения, как обсуждалось в (West et al., 2014) (Krompaß et al., 2015). Эмбеддинг мультиреляционного графа может помочь составить её и повысить производительность приложений, использующих граф. Именно по этой причине большая часть работы сосредоточена на эмбеддинге мультиреляционных графов. На рисунке 1 показан пример мультиреляционного графа и задача составления.

При эмбеддинге мультиреляционных графов уменьшение количества параметров является важной проблемой в эпоху больших данных. Многие параметры необходимы для методов, основанных на тензорной факторизации, таких как байесовская кластерная тензорная факторизация (BCTF) (Sutskever et al., 2009), RESCAL (Nickel et al., 2011) и нейронная тензорная сеть (NTN) (Socher et al., 2013), где каждое отношение имеет плотную матрицу или тензоры (O (D) или более параметров, где D - размерность пространства). Таким образом, TransE (Bordes et al., 2013) было предложено сократить количество параметров, чтобы преодолеть эту проблему. В TransE каждый объект сопоставляется с точкой в евклидовом пространстве, и каждое отношение представляет собой не более чем векторное сложение (O (D) параметров), а не матричную операцию. Преемники TransE, TransH (Wang et al., 2014) и TransD (Ji et al., 2016), также используют лишь небольшое количество параметров. Некоторым методам удалось уменьшить параметры с использованием диагональных матриц вместо плотных матриц: например, DIST MULT (Yang et al., 2015), ComplEx (Trouillon et al., 2016), HolE (с помощью преобразования Фурье) (Nickel et al., 2016) и ANALOGY (Liu et al., 2017). В этих методах все отношения используют одно пространство для представления, но каждое отношение использует свой собственный критерий различия. Успех этих методов подразумевает, что в основе всех данных лежит одно общее пространство, и каждое отношение можно рассматривать как критерий различия в пространстве.

В то время как эти методы используют расстояния или внутренние произведения в евклидовом пространстве в качестве критериев различия, недавняя работа показала, что использование неевклидова пространства может еще больше сократить количество параметров. Одним из типичных примеров является эмбеддинг Пуанкаре (Nickel & Kiela, 2017) для иерархических данных, где в качестве пространства для встраивания используется гиперболическое пространство. Здесь древовидная структура иерархических данных имеет хорошую совместимость с экспоненциальным ростом гиперболического пространства. Напомним, что окружность с радиусом r задается 2π\*sinh R (≈ 2π exp R) в гиперболической плоскости. В результате эмбеддинг Пуанкаре достиг хорошей точности составления графа даже при низкой размерности, такой как 5 или 10. С другой стороны, сферы (окружность: 2π sin R) совместимы с циклическими структурами. Начиная с эмбеддинга Пуанкаре, было предложено несколько методов для встраивания однореляционного графа в неевклидово пространство (например, (Ganea et al., 2018b), (Nickel & Kiela, 2018)) и показали хорошие результаты. Успех этих методов предполагает, что соответствующий выбор многообразия (т.е. пространства) может сохранять низкую размерность, хотя эти методы ограничены эмбеддингом однореляционных графов.

В соответствии с успехом TransE, его выводом и эмбеддингом Пуанкаре, при эмбеддинге в мультиреляционного графа разумно предположить существование единой структуры, совместимой с неевклидовым пространством. Например, мы можем рассмотреть единую древовидную структуру, которая содержит несколько иерархических структур, где выбор корня дает несколько иерархических структур из одного дерева, что совместимо с гиперболическими пространствами (см. рис. 2). Следовательно, эмбеддинг в одно общее неевклидово пространство с множеством критериев различия, используемых в TransE, является многообещающим. Принимая во внимание успех внедрения Пуанкаре с низкой размерностью, этот метод должен хорошо работать (например, в задачах составления графа) с небольшим количеством параметров. Это основная идея данной статьи.

В таблице 2 приведены результаты для задачи тройной классификации в каждой размерности. В WN11 основанные на сфере римановы преобразования достигли хорошей точности. Точность не ухудшалась резко даже при низкой размерности. С другой стороны, в FB13 римановы преобразования, основанные на гиперболическом пространстве, были более точными, чем другие методы. Более того, для каждой размерности эти результаты с помощью предложенного риманова преобразования были, по крайней мере, сопоставимы с результатами базовых линий. Точность методов, основанных на евклидовом пространстве (например, исходный TransE и евклидов TransE) в большинстве случаев находятся между римановыми трансами, основанными на сфере, и римановыми трансами, основанными на гиперболическом пространстве. Обратите внимание, что эти результаты совместимы с кривизной каждого пространства (т.е. Сфера: положительная, евклидово пространство: 0, гиперболическое пространство: отрицательное). Обратите внимание, что евклидовы методы иногда лучше, чем неевклидовы методы. В приложении мы также сообщаем о результатах задачи тройной классификации в FB15k, где евклидов TransE, а также базовые методы превзошли римановы TransE, но не всегда превосходили базовые методы. Таким образом, пространства положительной кривизны были хороши в WN11, пространства отрицательной кривизны были хороши в FB13, а пространства нулевой кривизны были хороши в FB15k. Эти результаты показывают, что риманов транс может достичь хорошей точности при небольшой размерности при условии выбора соответствующего многообразия. Что определяет соответствующий коллектор? Сферы совместимы с циклической структурой, а гиперболические пространства совместимы с древовидной структурой. Одно из возможных объяснений заключается в том, что WN11 имеет циклическую структуру, а FB13 имеет древовидную структуру, а структура FB15k находится между ними. Однако дальнейшее обсуждение остается вопросом будущей работы.

Мы предложили риманов TransE, новую структуру для вложения мультиреляционных графов, путем добавления TransE к риманову TransE. Численные эксперименты показали, что риманов транс превосходит базовые методы в малой размерности, хотя его производительность в значительной степени зависит от выбора многообразия. Следовательно, будущие исследования должны прояснить, какие многообразия хорошо работают с конкретными типами данных, и разработать методологию выбора подходящего многообразия. Это важная работа не только для задач завершения графа, но и для дальнейшего понимания глобальных характеристик графа. Другими словами, наблюдение за тем, какое многообразие эффективно, может помочь нам понять глобальное “поведение” графа. Другая важная работа связана с использованием “подпространств” в неевклидовом пространстве. Хотя понятие подпространства в неевклидовом многообразии нетривиально, возможно, наш метод имеет преимущества перед TransH и TransD, которые используют линейные подпространства.