

**ĐẠI HỌC QUỐC GIA THÀNH PHỐ HỒ CHÍ MINH
TRƯỜNG ĐẠI HỌC KHOA HỌC TỰ NHIÊN**

TRẦN TRUNG KIÊN

**HỌC ĐẶC TRƯNG KHÔNG GIÁM SÁT
BẰNG AUTO-ENCODERS**

Chuyên ngành: Khoa Học Máy Tính

Mã số chuyên ngành: 60 48 01

LUẬN VĂN THẠC SỸ: KHOA HỌC MÁY TÍNH

NGƯỜI HƯỚNG DẪN KHOA HỌC:

PGS.TS LÊ HOÀI BẮC

Tp. Hồ Chí Minh, Năm 2014

LỜI CẢM ƠN

Trước tiên, em xin gửi lời tri ân sâu sắc đến Thầy Lê Hoài Bắc. Thầy đã rất tận tâm, nhiệt tình hướng dẫn và chỉ bảo em trong suốt quá trình thực hiện luận văn. Không có sự quan tâm, theo dõi chặt chẽ của Thầy chắc chắn em không thể hoàn thành luận văn này.

Em xin chân thành cảm ơn quý Thầy Cô khoa Công Nghệ Thông Tin - trường đại học Khoa Học Tự Nhiên, những người đã ân cần giảng dạy, xây dựng cho em một nền tảng kiến thức vững chắc.

Con xin cảm ơn ba mẹ đã sinh thành, nuôi dưỡng, và dạy dỗ để con có được thành quả như ngày hôm nay. Ba mẹ luôn là nguồn động viên, nguồn sức mạnh hết sức lớn lao mỗi khi con gặp khó khăn trong cuộc sống.

TP. Hồ Chí Minh, 3/2014

Trần Trung Kiên

MỤC LỤC

LỜI CẢM ƠN	i
MỤC LỤC	ii
DANH MỤC HÌNH ẢNH	iii
DANH MỤC BẢNG	iv
Chương 1 Giới thiệu	1
1.1 Các phương pháp Dịch máy	3
1.2 Dịch máy Nơ-ron	7
1.3 Cấu trúc của khóa luận	9
Chương 2 Kiến Thức Nền Tảng	11
2.1 Mạng nơ-ron hồi quy (Recurrent neural network)	11
2.1.1 Huấn luyện mạng nơ-ron hồi quy	15
2.1.2 Khó khăn trong việc huấn luyện RNN	19
2.2 Long short-term memory	19
2.3 Mô hình ngôn ngữ	20

DANH MỤC HÌNH ẢNH

1.1	Lịch sử tóm tắt của dịch máy	3
1.2	Ba phương pháp dịch máy dựa trên luật	4
1.3	Ví dụ về tập các câu song song trong hai ngôn ngữ	7
1.4	Ví dụ về Kiến trúc <i>bộ mã hóa - bộ giải mã</i> trong dịch máy nơ-ron . . .	8
1.5	Kiến trúc bộ mã hóa - bộ giải mã được xây dựng trên mạng nơ-ron hồi quy	8
1.6	Cơ chế Attention trong dịch máy nơ-ron	9
2.1	Mô hình RNN với kết nối vòng	13
2.2	Mô hình RNN dạng dàn trải	14
2.3	Một "LSTM cell"	20

DANH MỤC BẢNG

Chương 1

Giới thiệu

Nhờ vào những cải cách trong giao thông và cơ sở hạ tầng viễn thông mà giờ đây toàn cầu hóa đang trở nên gần với chúng ta hơn bao giờ hết. Trong xu hướng đó nhu cầu giao tiếp và thông hiểu giữa những nền văn hóa là không thể thiếu. Tuy nhiên, những nền văn hóa khác nhau thường kèm theo đó là sự khác biệt về ngôn ngữ, là một trong những trở ngại lớn nhất của sự giao tiếp. Một người phải mất rất nhiều thời gian để thành thạo một ngôn ngữ không phải là tiếng mẹ đẻ, và không thể nào học được nhiều ngôn ngữ cùng lúc. Cho nên, việc phát triển một công cụ để giải quyết vấn đề này là tất yếu. Một trong những công cụ như vậy là *Dịch máy*.

Dịch máy là quá trình chuyển đổi văn bản/tiếng nói từ ngôn ngữ này sang dạng tương ứng của nó trong một ngôn ngữ khác, được thực hiện bởi một chương trình máy tính nhằm mục đích cung cấp bản dịch tốt nhất mà không cần sự trợ giúp của con người.

Dịch máy có một quá trình lịch sử lâu dài. Từ thế kỷ XVII, đã có những ý tưởng về việc cơ giới hóa quá trình dịch thuật. Tuy nhiên, đến thế kỷ XX, những nghiên cứu về dịch máy mới thật sự bắt đầu. Vào những năm 1930, Georges Artsrouni người Pháp và Petr Troyanskii người Nga đã nộp bằng sáng chế cho công trình có tên "máy dịch" của riêng họ. Trong số hai người, công trình của Troyanskii có ý nghĩa hơn. Nó đề xuất không chỉ một phương pháp cho bộ từ điển tự động, mà còn là lược đồ cho việc mã hóa các vai trò ngữ pháp song ngữ và một phác thảo về cách phân tích và tổng hợp có thể hoạt động. Tuy nhiên, những ý tưởng của Troyanskii đã không được biết đến cho đến cuối những năm 1950. Trước đó, máy tính đã được phát minh.

Những nỗ lực xây dựng hệ thống dịch máy bắt đầu ngay sau khi máy tính ra đời.

Có thể nói, chiến tranh và sự thù địch giữa các quốc gia là động lực lớn nhất cho dịch máy thời bấy giờ. Trong Thế chiến thứ II, máy tính đã được quân đội Anh sử dụng trong việc giải mã các thông điệp được mã hóa của quân Đức. Việc làm này có thể coi là một dạng ẩn dụ của dịch máy khi người ta cố gắng dịch từ tiếng Đức được mã hóa sang tiếng Anh. Trong thời kỳ chiến tranh lạnh, vào tháng 7/1949, Warren Weaver, người được xem là nhà tiên phong trong lĩnh vực dịch máy, đã viết một bản ghi nhớ đưa ra các đề xuất khác nhau của ông trong lĩnh vực này. Những đề xuất đó dựa trên thành công của máy phá mã, sự phát triển của lý thuyết thông tin bởi Claude Shannon và suy đoán về các nguyên tắc phổ quát cơ bản của ngôn ngữ. Trong vòng một năm, một vài nghiên cứu về dịch máy đã bắt đầu tại nhiều trường đại học của Mỹ. Vào ngày 7/1/1954, tại trụ sở chính của IBM ở New York, thử nghiệm Georgetown-IBM được tiến hành. Máy tính IBM 701 đã tự động dịch 49 câu tiếng Nga sang tiếng Anh lần đầu tiên trong lịch sử chỉ sử dụng 250 từ vựng và sáu luật ngữ pháp [?]. Thí nghiệm này được xem như là một thành công và mở ra kỉ nguyên cho những nghiên cứu với kinh phí lớn về dịch máy ở Hoa Kỳ. Ở Liên Xô những thí nghiệm tương tự cũng được thực hiện không lâu sau đó.

Trong một thập kỷ tiếp theo, nhiều nhóm nghiên cứu về dịch máy được thành lập. Một số nhóm chấp nhận phương pháp thử và sai, thường dựa trên thống kê với mục tiêu là một hệ thống dịch máy có thể hoạt động ngay lập tức, tiêu biểu như: nhóm nghiên cứu tại đại học Washington (và sau này là IBM) với hệ thống dịch Nga-Anh cho Không quân Hoa Kỳ, những nghiên cứu tại viện Cơ học Chính xác ở Liên Xô và Phòng thí nghiệm Vật lý Quốc gia ở Anh. Trong khi một số khác hướng đến giải pháp lâu dài với hướng tiếp cận lý thuyết bao gồm cả những vấn đề liên quan đến ngôn ngữ cơ bản như nhóm nghiên cứu tại Trung tâm nghiên cứu lý thuyết tại MIT, Đại học Havard và Đơn vị nghiên cứu ngôn ngữ Đại học Cambridge. Những nghiên cứu trong giai đoạn này có tầm quan trọng và ảnh hưởng lâu dài không chỉ cho Dịch máy mà còn cho nhiều ngành khác như Ngôn ngữ học tính toán, Trí tuệ nhân tạo - cụ thể là việc phát triển các từ điển tự động và kỹ thuật phân tích cú pháp. Nhiều nhóm nghiên cứu đã đóng góp đáng kể cho việc phát triển lý thuyết ngôn ngữ. Tuy nhiên, mục tiêu cơ bản của dịch máy là xây dựng hệ thống có khả năng tạo ra bản dịch tốt lại không đạt được dẫn đến một kết quả là vào năm 1966 bản báo cáo từ Ủy ban tư vấn xử lý ngôn ngữ tự động (Automatic Language Processing Advisory) của Hoa Kỳ, tuyên bố



Hình 1.1: Lịch sử tóm tắt của dịch máy, nguồn ảnh: Ilya Pestov trong blog [A history of machine translation from the Cold War to deep learning](#)

rằng dịch máy là đắt tiền, không chính xác và không mang lại kết quả hứa hẹn [?]. Thay vào đó, họ đề nghị tập trung vào phát triển các từ điển, điều này đã loại bỏ các nhà nghiên cứu Mỹ ra khỏi cuộc đua trong gần một thập kỷ.

Các phương pháp Dịch máy

Từ đó đến nay, đã có nhiều hướng tiếp cận đã được sử dụng trong dịch máy với mục tiêu tạo ra bản dịch có độ chính xác cao và giảm thiểu công sức của con người. Trong những năm đầu tiên, để tạo ra bản dịch tốt, các phương pháp thời bấy giờ đều hỏi hỏi những lý thuyết tinh vi về ngôn ngữ học. Hầu hết những hệ thống dịch máy trước những năm 1980 đều là *dịch máy dựa trên luật* (*Rule-based machine translation - RBMT*). Những hệ thống này thường bao gồm:

- Một từ điển song ngữ (ví dụ từ điển Anh - Đức)
- Một tập các luật ngữ pháp (ví dụ trong tiếng Đức, từ kết thúc bằng -heit, -keit, -ung là những từ mang giống cái)

Có ba cách tiếp cận khác nhau theo phương pháp dịch máy dựa trên luật. Bao gồm phương pháp dịch máy trực tiếp, dịch máy chuyển giao và dịch máy ngôn ngữ phổ



Hình 1.2: Kim tự tháp của Bernard Vauquois thể hiện ba phương pháp dịch máy dựa luật theo độ sâu của đại diện trung gian. Bắt đầu từ dịch máy trực tiếp đến dịch máy chuyển dịch và trên cùng là dịch máy ngôn ngữ phổ quát (Nguồn: http://en.wikipedia.org/wiki/Machine_translation)

quát. Mặc dù cả ba đều thuộc về RBMT, tuy nhiên chúng khác nhau về độ sâu của đại diện trung gian. Sự khác biệt này được thể hiện qua kim tự tháp Vauquois, minh họa trên hình 1.2

Dịch máy trực tiếp (Direct machine translation - DMT): Đây là phương pháp đơn giản nhất của dịch máy. DMT không dùng bất cứ dạng đại diện nào của ngôn ngữ nguồn, nó chia câu thành các từ, dịch chúng bằng một từ điển song ngữ. Sau đó, dựa trên các luật mà những nhà ngôn ngữ học đã xây dựng, nó chỉnh sửa để bản dịch trở nên đúng cú pháp và ít nhiều đúng về mặt phát âm.

Dịch máy ngôn ngữ phổ quát (Interlingual machine translation - IMT): Trong phương pháp này, câu nguồn được chuyển thành biểu diễn trung gian và biểu diễn này được thống nhất cho tất cả ngôn ngữ trên thế giới (interlingua). Tiếp theo, dạng đại diện này sẽ được chuyển đổi sang bất kỳ ngôn ngữ đích nào. Một trong những ưu điểm chính của hệ thống này là tính mở rộng của nó khi số lượng ngôn ngữ cần dịch tăng lên. Mặc dù trên lý thuyết, phương pháp này trông rất hoàn hảo. Nhưng trong thực tế, thật khó để tạo được một ngôn ngữ phổ quát như vậy.

Dịch máy chuyển giao (Transfer-based machine translation - TMT): dịch máy chuyển giao tương tự như dịch máy ngôn ngữ đại diện ở chỗ, nó cũng tạo ra bản dịch từ biểu diễn trung gian mô phỏng ý nghĩa của câu gốc. Tuy nhiên, không giống như IMT, TMT phụ thuộc một phần vào cặp ngôn ngữ mà nó tham gia vào quá trình dịch. Trên cơ sở sự khác biệt về cấu trúc của ngôn ngữ nguồn và ngôn ngữ đích, một

hệ thống TMT có thể được chia thành ba giai đoạn: i) Phân tích, ii) Chuyển giao, iii) Tạo ra bản dịch. Trong giai đoạn đầu tiên, trình phân tích cú pháp ở ngôn ngữ nguồn được sử dụng để tạo ra biểu diễn cú pháp của câu nguồn. Trong giai đoạn tiếp theo, kết quả của phân tích cú pháp được chuyển đổi thành biểu diễn tương đương trong ngôn ngữ đích. Trong giai đoạn cuối cùng, một bộ phân tích hình thái của ngôn ngữ đích được sử dụng để tạo ra các bản dịch cuối cùng.

Mặc dù đã có một số hệ thống RBMT được đưa vào sử dụng như PROMPT [?] và Systrans [?]. Tuy nhiên, bản dịch của hướng tiếp cận này có chất lượng thấp so với nhu cầu của con người và không sử dụng được trừ một số trường hợp đặc biệt. Ngoài ra chúng còn có một số nhược điểm lớn như:

- Các loại từ điển chất lượng tốt có sẵn là không nhiều và việc xây dựng những bộ từ điển mới là rất tốn kém.
- Hầu hết những luật ngôn ngữ được tạo ra bằng tay bởi các nhà ngôn ngữ học. Việc này gây khó khăn và tốn kém khi hệ thống trở nên lớn hơn.
- Các hệ thống RBMT gặp khó khăn trong việc giải quyết những vấn đề như thành ngữ hay sự nhập nhằng về ngữ nghĩa của các từ.

Từ những năm 1980, dịch máy dựa trên *Ngữ liệu* (Corpus-based machine translation) được đề xuất. Điểm khác biệt lớn nhất và cũng là quan trọng nhất của hướng tiếp cận này so với RBMT là thay vì sử dụng các bộ từ điển song ngữ, nó dùng những tập câu tương đương trong hai ngôn ngữ làm nền tảng cho việc dịch thuật. Tập những câu tương đương này được gọi là ngữ liệu. So với từ điển, việc thu thập ngữ liệu đơn giản hơn rất nhiều. Ví dụ như ta có thể tìm thấy nhiều phiên bản trong các ngôn ngữ khác nhau của những văn bản hành chính hay các trang web đa ngôn ngữ. Trước khi dịch máy nở rộ ra đời, dịch máy dựa trên ngữ liệu bao gồm hai phương pháp: dịch máy dựa trên ví dụ và dịch máy thống kê.

Dịch máy dựa trên ví dụ (Example-based Machine Translation - EBMT):

Dịch máy thống kê (Statistical machine translation - SMT): ý tưởng của phương pháp này là thay vì định nghĩa những từ điển và các luật ngữ pháp một cách thủ công, SMT dùng mô hình thống kê để học các từ điển và các luật ngữ pháp này từ ngữ liệu. Những ý tưởng đầu tiên của SMT được giới thiệu đầu tiên bởi Warren Weaver vào năm

1949 bao gồm việc áp dụng lý thuyết thông tin của Claude Shannon vào dịch máy. SMT được giới thiệu lại vào cuối những năm 1980 và đầu những năm 1990 tại trung tâm nghiên cứu Thomas J. Watson của IBM. SMT là phương pháp được nghiên cứu rộng rãi nhất thời bấy giờ và thậm chí đến hiện tại, nó vẫn là một trong những phương pháp được nghiên cứu nhiều nhất về dịch máy.

Để hiểu rõ hơn về dịch máy thống kê, xét một ví dụ: ta cần dịch một câu f trong tiếng Pháp sang dạng tiếng Anh e của nó. Có nhiều bản dịch có thể có của f trong tiếng Anh, việc cần làm là chọn e sao cho nó là bản dịch "tốt nhất" của f . Chúng ta có thể mô hình hóa quá trình này bằng một xác suất có điều kiện $p(e|f)$ với e là những bản dịch có thể có với câu cho trước f . Một cách hợp lý để chọn bản dịch "tốt nhất" là chọn e sao cho nó tối đa xác suất có điều kiện $p(e|f)$. Cách tiếp cận quen thuộc là sử dụng định lý Bayes để viết lại $p(e|f)$:

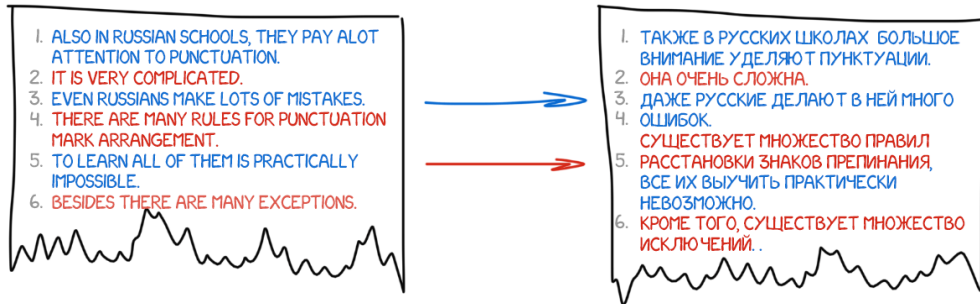
$$p(e|f) = \frac{p(f|e)p(e)}{p(f)} \quad (1.1)$$

Bởi vì f là cố định, tối đa hóa $p(e|f)$ tương đương với tìm e sao cho tối đa hóa $p(f|e)p(e)$. Để làm được điều này, chúng ta dựa vào một tập ngữ liệu là những câu song ngữ Anh - Pháp để suy ra các mô hình $p(f|e)$ và $p(e)$ và sử dụng những mô hình đó để tìm một bản dịch cụ thể \tilde{e} sao cho:

$$\tilde{e} = \arg \max_{e \in e^*} p(e|f) = \arg \max_{e \in e^*} p(f|e)p(e) \quad (1.2)$$

Ở đây, $p(f|e)$ được gọi là *mô hình dịch* (translation model) và $p(e)$ được gọi là *mô hình ngôn ngữ* (language model). Mô hình dịch $p(f|e)$ thể hiện khả năng câu e là một bản dịch của câu f . Những mô hình dịch ban đầu dựa trên từ (word-based) như các mô hình IBM 1-5 (IBM Models 1-5). Những năm 2000, những mô hình dịch dựa trên cụm từ (phrase based) xuất hiện giúp cải thiện khả năng dịch của SMT. Trong khi đó, mô hình ngôn ngữ $p(e)$ thể hiện độ trơn tru của câu e . Ví dụ $p(\text{"tôi đi học"}) > p(\text{"học tôi đi"})$ vì rõ ràng "tôi đi học" là có lý hơn "học tôi đi". Các mô hình ngôn ngữ cho SMT thường được ước lượng bằng các mô hình n-gram được làm mịn, cách làm này cũng là một nhược điểm của SMT. Mô hình ngôn ngữ là một chủ đề quan trọng và sẽ được chúng tôi đề cập lại một lần nữa trong chương Kiến thức nền tảng.

PARALLEL CORPUS



Hình 1.3: Ví dụ về tập các câu song song trong hai ngôn ngữ

Dịch máy Nơ-ron

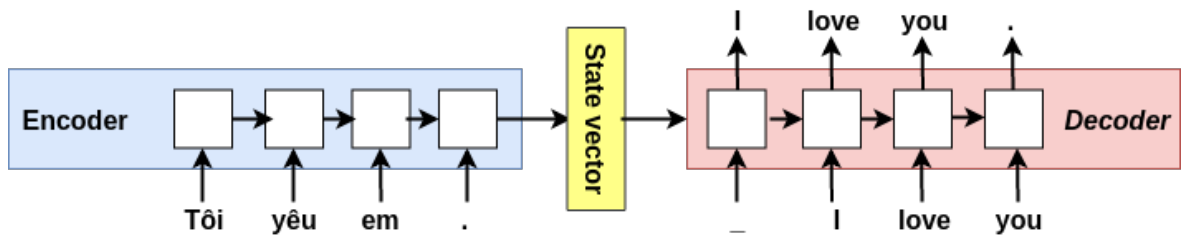
Mặc dù trên thực tế đã có nhiều hệ thống dịch máy được phát triển dựa trên dịch máy thống kê thời bấy giờ, tuy nhiên nó không hoạt động thực sự tốt bởi một số nguyên nhân. Một là việc những từ hay đoạn được dịch cục bộ và quan hệ của chúng với những từ cách xa trong câu nguồn thường bị bỏ qua. Hai là mô hình ngôn ngữ N-gram hoạt động không thực sự tốt đối với những bản dịch dài và ta phải tốn nhiều bộ nhớ để lưu trữ chúng. Ngoài ra việc sử dụng nhiều thành phần nhỏ được điều chỉnh riêng biệt như mô hình dịch, mô hình ngôn ngữ,.. cũng gây khó khăn cho việc vận hành và phát triển mô hình này.

Dịch máy nơ-ron (Neural machine translation) là một hướng tiếp cận mới trong dịch máy trong những năm gần đây được đề xuất đầu tiên bởi [?], [?], [?]. Giống như dịch máy thống kê, dịch máy nơ-ron cũng là một phương pháp thuộc hướng tiếp cận dựa trên ngữ liệu, trong khi dịch máy thống kê bao gồm nhiều mô-đun nhỏ được điều chỉnh riêng biệt, Dịch máy nơ-ron cố gắng dùng một mạng nơ-ron như là thành phần duy nhất của hệ thống, mọi thiết lập sẽ được thực hiện trên mạng này.

Hầu hết những mô hình dịch máy nơ-ron đều dựa trên kiến trúc *Bộ mã hóa - Bộ giải mã* (Encoder-Decoder) ([?], [?]). Bộ mã hóa thường là một mạng nơ-ron có tác dụng "nén" tất cả thông tin của câu trong ngôn ngữ nguồn vào một vector có kích thước cố định. Bộ giải mã, cũng là một mạng nơ-ron, sẽ tạo bản dịch trong ngôn ngữ đích từ vector có kích thước cố định kia. Toàn bộ hệ thống bao gồm bộ mã hóa và bộ giải mã sẽ được huấn luyện "end-to-end" để tạo ra bản dịch, quá trình này được mô tả



Hình 1.4: Ví dụ về kiến trúc bộ mã hóa - bộ giải mã trong dịch máy nơ-ron

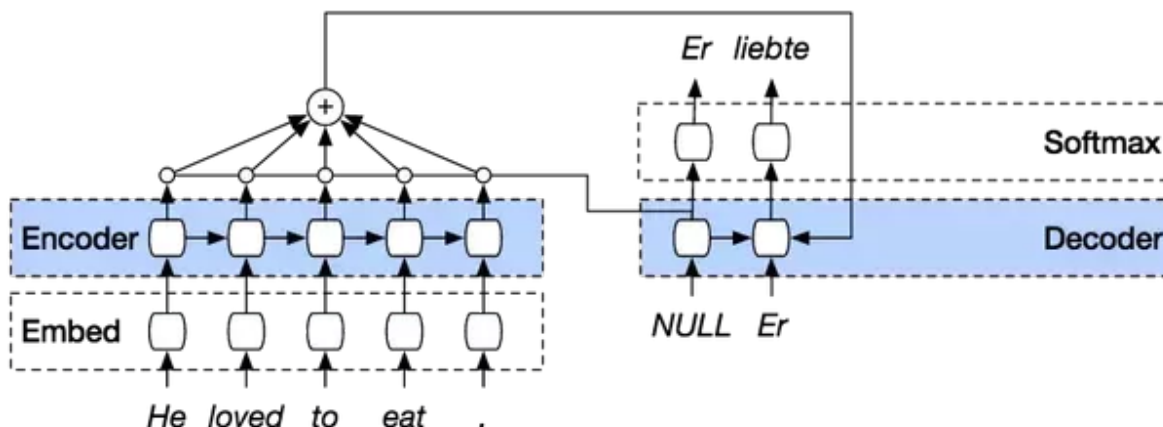


Hình 1.5: Kiến trúc bộ mã hóa - bộ giải mã được xây dựng trên mạng nơ-ron hồi quy

như hình 1.2.

Trong thực tế cả bộ mã hóa và giải mã thường dựa trên một mô hình mạng nơ-ron tên là *Mạng nơ-ron hồi quy* là một thiết kế mạng đặc trưng cho việc xử lý dữ liệu chuỗi. Mạng nơ-ron hồi quy cho phép chúng ta mô hình hóa những dữ liệu có độ dài không xác định, rất thích hợp cho bài toán dịch máy. Hình 1.3 mô tả chi tiết hơn về kiến trúc bộ mã hóa - giải mã sử dụng mạng nơ-ron hồi quy. Đầu tiên bộ mã hóa đọc qua toàn bộ câu nguồn và tạo ra một vector đại diện gọi là *vector trạng thái*. Điều này giúp cho toàn bộ những thông tin cần thiết hay quan hệ giữa các từ đều được tập hợp vào một nơi duy nhất. Bộ giải mã, lúc này đóng vai trò như một mô hình ngôn ngữ để tạo ra từng từ trong ngôn ngữ đích và sẽ dừng lại đến khi một ký tự đặc biệt xuất hiện.

Trong hình 2, có thể thấy rằng bộ giải mã tạo ra bản dịch chỉ dựa trên trạng thái ẩn cuối cùng, cũng chính là vector có kích thước cố định được tạo ra ở bộ mã hóa. Vector này phải mã hóa mọi thứ chúng ta cần biết về câu nguồn. Giả sử chúng ta có câu nguồn với độ dài là 50 từ, từ đầu tiên ở câu đích có lẽ sẽ có mối tương quan cao với từ đầu tiên ở câu nguồn. Điều này có nghĩa là bộ giải mã phải xem xét thông tin được mã hóa từ 50 "*time step*" trước đó. Mạng nơ-ron hồi quy được chứng minh là gặp khó khăn trong việc mã hóa những chuỗi dài [?]. Để giải quyết vấn đề này, thay vì dùng mạng nơ-ron hồi quy thuần, người ta sử dụng các biến thể của nó quy như



Hình 1.6: Cơ chế Attention trong dịch máy nơ-ron

Long short-term memory (LSTM). Trên lý thuyết, LSTM có thể giải quyết vấn đề mất mát thông tin trong chuỗi dài, nhưng trong thực tế vấn đề này vẫn chưa thể được giải quyết hoàn toàn. Một số nhà nghiên cứu đã phát hiện ra rằng đảo ngược chuỗi nguồn trước khi đưa vào bộ mã hóa tạo ra kết quả tốt hơn một cách đáng kể [?] bởi nó khiến cho những từ đầu tiên được đưa vào bộ mã hóa sau cùng, và được giải mã thành từ tương ứng ngay sau đó. Cách làm này tuy giúp cho bản dịch hoạt động tốt hơn trong thực tế, nhưng nó không phải là một giải pháp về mặt thuật toán. Hầu hết các đánh giá về dịch máy được thực hiện trên các ngôn ngữ như ngôn ngữ có trật tự câu tương đối giống nhau. Ví dụ trật tự dạng "chủ ngữ - động từ - vị ngữ" như tiếng Anh, Đức, Pháp hay Trung Quốc. Đối với dạng ngôn ngữ có một trật tự khác ví dụ "chủ ngữ - vị ngữ - động từ" như tiếng Nhật, đảo ngược câu nguồn sẽ không hiệu quả.

Attention là cơ chế giải phóng kiến trúc bộ mã hóa - bộ giải mã khỏi nhược điểm chỉ sử dụng một vector có chiều dài cố định làm đại diện cho câu đầu vào. Ý tưởng chính của cơ chế này là ở mỗi thời điểm phát sinh các từ trong bản dịch, bộ giải mã sẽ "nhìn" vào các phần khác nhau của câu nguồn trong quá trình mã hóa. Quan trọng hơn, cơ chế này cho phép mô hình học được cách chọn những phần cần thiết để tập trung vào dựa trên câu nguồn và những gì mà bộ giải mã đã giải mã được.

Cấu trúc của khóa luận

Trong khóa luận này, chúng tôi quyết định tập trung nghiên cứu về dịch máy nơ-ron và cơ chế Attention dựa trên nghiên cứu của nhóm tác giả tại đại học Stanford bao gồm

Minh-Thang Luong, Hieu Pham, Christopher Manning trong bài báo *Effective Approaches to Attention-based Neural Machine Translation* [?]. Các phần còn lại trong luận văn được trình bày như sau:

- Chương 2 trình bày về những thành nền tảng của kiến trúc bộ mã hóa - giải mã
- Chương 3 trình bày về cơ chế Attention, đây là phần chính của luận văn. Trong phần này gồm có hai phần nhỏ:
 - *Global attention*: là cơ chế tập trung vào tất cả các trạng thái ở câu nguồn
 - *Local attention*: tập trung vào một tập các trạng thái ở câu nguồn tại một thời điểm
- Chương 4 trình bày về các thí nghiệm và các phân tích về kết quả đạt trên hai tập dữ liệu Anh-Đức, Anh-Việt.
- Kết luận và hướng phát triển của luận văn.

Chương 2

Kiến Thức Nền Tảng

Trong chương này, chúng tôi sẽ trình bày những kiến thức nền tảng trên ba chủ đề bao gồm mạng nơ-ron hồi quy, mô hình ngôn ngữ nơ-ron và mô hình dịch máy nơ-ron. Mạng nơ-ron hồi quy (RNN) là xương sống của dịch máy nơ-ron. Nó được sử dụng để làm cả bộ mã hóa lẫn bộ giải mã. Ứng với mỗi vai trò, RNN sẽ có một thiết kế riêng. Một phiên bản cải tiến của RNN là *Long short-term memory* cũng được chúng tôi trình bày, phiên bản này giúp cho việc huấn luyện RNN trở nên dễ dàng hơn. Sau đó, dựa trên những kiến thức về mạng nơ-ron hồi quy, chúng tôi nói về khái niệm *mô hình ngôn ngữ* với chức năng tạo ra từ trong bộ giải mã, là bước quan trọng trong dịch máy nơ-ron. Cuối cùng, chúng tôi cũng trình bày về mô hình dịch máy nơ-ron theo kiến trúc bộ mã hóa - bộ giải mã với RNN và mô hình ngôn ngữ hồi quy là những thành phần nền tảng.

Mạng nơ-ron hồi quy (Recurrent neural network)

Trong tự nhiên, dữ liệu không phải lúc nào cũng được sinh ra một cách ngẫu nhiên. Trong một số trường hợp, chúng được sinh ra theo một thứ tự. Xét trong dữ liệu văn bản, ví dụ ta cần điền vào chỗ trống cho câu sau "*Paris là thủ đô của nước ____*". Để biết được rằng chỉ có duy nhất một từ phù hợp cho chỗ trống này, đó là "*Pháp*". Điều này có nghĩa là mỗi từ trong một câu không được tạo ra ngẫu nhiên mà nó được tạo ra dựa trên một liên hệ với những từ đứng trước nó. Các loại dữ liệu khác như những khung hình trong một bộ phim hoặc các đoạn âm thanh trong một bản nhạc cũng có

tính chất tương tự. Những loại dữ liệu mang thứ tự này được gọi chung là dữ liệu chuỗi (sequential data).

Trong quá khứ, một số mô hình xử lý dữ liệu chuỗi bằng cách giả định rằng đầu vào hiện tại có liên hệ với một số lượng xác định đầu vào trước đó, nhiều mô hình tạo ra một cửa sổ trượt để nối mỗi đầu vào hiện tại với một số lượng đầu vào trước đó nhằm tạo ra sự mô phỏng về tính phụ thuộc. Cách tiếp cận này đã được sử dụng cho mô hình *Deep belief network* trong xử lý tiếng nói [?]. Nhược điểm của những cách làm này là ta phải xác định trước kích thước của cửa sổ. Một mô hình với kích thước cửa sổ với chiều dài bằng 6 không thể nào quyết định được từ tiếp theo trong câu "*Hổ là loài động vật ăn ___*" sẽ là "*thịt*" hay "*cỏ*". Trong ví dụ này, từ tiếp theo của câu phụ thuộc mật thiết vào từ "*Hổ*" cách nó đúng 6 từ. Trên thực tế, có rất nhiều câu đòi hỏi sự phụ thuộc với nhiều từ xa hơn trước đó. Ta gọi những sự phụ thuộc kiểu như vậy là những *phụ thuộc dài hạn* (long term dependency).

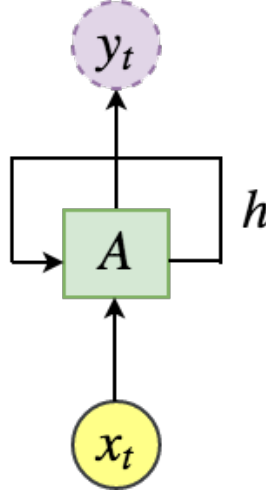
Mạng nơ-ron hồi quy (recurrent neural network) [?] gọi tắt là *RNN* là một nhánh của mạng nơ-ron nhân tạo được thiết kế đặc biệt cho việc mô hình hóa dữ liệu chuỗi. Khác với những mô hình đã đề cập giả định sự phụ thuộc chỉ xảy ra trong một vùng có chiều dài cố định. RNN, trên lý thuyết, có khả năng nắm bắt được các phụ thuộc dài hạn với chiều dài bất kỳ. Để làm được điều đó, trong quá trình học, RNN lưu giữ những thông tin cần thiết cho các phụ thuộc dài hạn bằng một vec-tơ được gọi là *trạng thái ẩn*.

Xét một chuỗi đầu vào $x = x_1, x_2, \dots, x_n$. Ta gọi h_t là trạng thái ẩn tại *bước thời gian* (timestep) t , là lúc một mẫu dữ liệu x_t được đưa vào RNN để xử lý. Trạng thái ẩn h_t sẽ được tính toán dựa trên mẫu dữ liệu hiện tại x_t và trạng thái ẩn trước đó h_{t-1} . Có thể thể hiện h_t như một hàm hồi quy với tham số là đầu vào hiện tại và chính nó ở thời điểm trước đó:

$$h_t = f(h_{t-1}, x_t) \quad (2.1)$$

trong đó hàm f là một ánh xạ phi tuyến. Có thể hình dung h_t như một đại diện cho những đầu vào mà nó đã xử lý từ thời điểm ban đầu cho đến thời điểm t . Nói một cách khác, RNN sử dụng trạng thái ẩn như một dạng bộ nhớ để lưu giữ thông tin từ một chuỗi. Hình 2.1 thể hiện định nghĩa hồi quy của RNN.

Thông thường, hàm f là một hàm phi tuyến như hàm σ hay hàm tanh. Xét một



Hình 2.1: Mô hình RNN đơn giản với kết nối vòng, h được xem như bộ nhớ được luân chuyển trong RNN. Chú ý rằng đường nét đứt ở đầu ra thể hiện rằng tại một thời điểm t , RNN có thể có hoặc không có một đầu ra.

RNN với công thức cụ thể như sau:

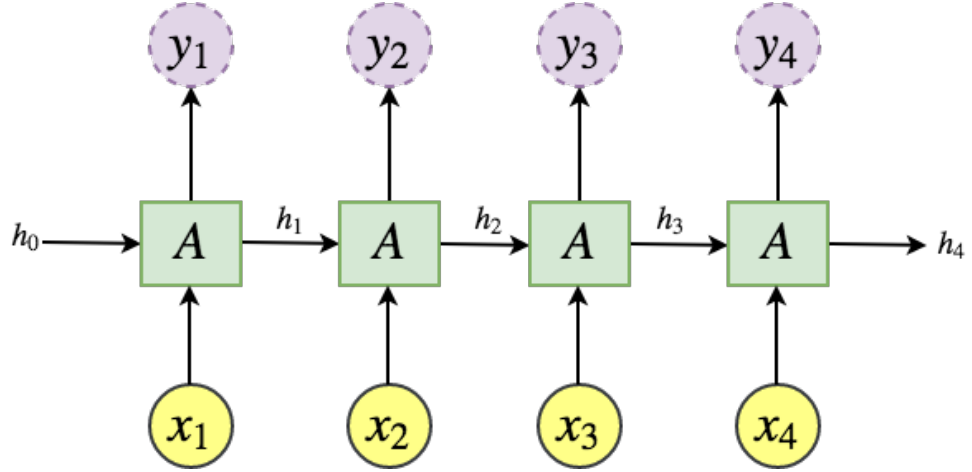
$$h_t = \phi (W_{xh}x_t + W_{hh}h_{t-1} + b_h) \quad (2.2)$$

Trong đó:

- ϕ là một hàm kích hoạt (ví dụ: sigmoid, tanh hay ReLU).
- $h_t \in \mathbb{R}^n$ là trạng thái ẩn tại bước thời gian hiện tại.
- $x_t \in \mathbb{R}^m$ là đầu vào hiện tại.
- $h_{t-1} \in \mathbb{R}^n$ là trạng thái ẩn tại bước thời gian trước đó.
- $W_{xh} \in \mathbb{R}^{m \times n}$, $W_{hh} \in \mathbb{R}^{n \times n}$ và $b_h \in \mathbb{R}^n$ lần lượt là hai ma trận trọng số và vec-tơ "bias".

Ma trận W_{xh} là làm nhiệm vụ kết nối giữa đầu vào và trạng thái ẩn, W_{hh} kết nối trạng thái ẩn với chính nó trong các bước thời gian liên tiếp. Vec-tơ b_h dùng để điều chỉnh giá trị của h_t . Tại thời điểm bắt đầu, trạng thái ẩn h_0 có thể được khởi tạo bằng 0 hoặc là một vector chứa tri thức có sẵn như trường hợp của bộ giải mã như chúng tôi đã đề cập trong chương 1.

Tại mỗi bước thời gian t , tùy vào mục tiêu cụ thể của quá trình học mà RNN có thể có thêm một đầu ra y_t . Trong ngữ cảnh bài toán dịch máy nơ-ron, đầu ra của RNN



Hình 2.2: Mô hình RNN được dàn trải (unrolled), ví dụ trong 4 bước thời gian.

trong quá trình giải mã chính là một từ trong ngôn ngữ đích hay nói chung là một đầu ra dạng rời rạc. Với mục tiêu đó, đầu ra dự đoán của RNN \hat{y}_t sẽ có dạng là một phân phối xác suất trên tập các các lớp ở đầu ra. Phân phối này nhằm dự đoán vị trí xuất hiện của \hat{y}_t .

$$\hat{y}_t = \text{softmax}(W_{hy}h_t + b_y) \quad (2.3)$$

Trong đó:

- softmax là một hàm kích hoạt với $\text{softmax}(v_j) = \frac{e^{v_j}}{\sum_{k=1}^K e^{v_k}}$, $j = 1, \dots, K$, K là độ dài của vec-tơ v .
- $h_t \in \mathbb{R}^n$ là trạng thái ẩn tại bước thời gian hiện tại.
- $W_{hy} \in \mathbb{R}^{L \times n}$ và $b_y \in \mathbb{R}^L$ lần lượt là hai ma trận trọng số và vec-tơ "bias". L là số lượng lớp cần phân biệt ở đầu ra.

Trong công thức trên, hàm softmax đóng vai trò là một hàm chuẩn hóa để \hat{y}_t thể hiện một phân phối xác suất trên các lớp ở đầu ra. Ma trận W_{hy} kết nối đầu ra với trạng thái ẩn, b_y dùng để điều chỉnh giá trị của kết quả tính toán trước khi đưa qua hàm softmax.

Để ý rằng các ma trận trọng số W_{xh} , W_{hh} , W_{hy} và các vector bias b_h , b_y là các tham số học của mô hình và chúng là duy nhất. Có nghĩa là khi những tham số này được học, bất kỳ một đầu vào nào cũng đều sử dụng chung một bộ tham số. Điều này chính là sự chia sẻ tham số (parameters sharing) trong mạng nơ-ron hồi quy. Chia sẻ tham

số khiến cho mô hình học dễ dàng hơn, nó giúp cho RNN có thể xử lý chuỗi đầu vào với độ dài bất kỳ mà không làm tăng độ phức tạp của mô hình. Quan trọng hơn, nó giúp ích cho việc tổng quát hóa. Đây chính là điểm đặc biệt của RNN so với mạng nơ-ron truyền thẳng.

Với một số lượng hữu hạn các bước thời gian, mô hình RNN trên hình 2.1 có thể được dàn trải ra (unrolled). Dạng dàn trải này được miêu tả trực quan như trên hình 2.2. Với cách thể hiện này, RNN có thể được hiểu như là một mạng nơ-ron sâu với một tầng cho mỗi bước thời gian và các tham số học được chia sẻ giữa các bước thời gian đó. Dạng dàn trải cũng thể hiện rằng RNN có thể được huấn luyện qua nhiều bước thời gian bằng thuật toán lan truyền ngược (backpropagation). Thuật toán này được gọi là "Backpropagation through time" (BPTT) [?]. Thực chất đây là chỉ thuật toán "Backpropagation" khi áp dụng cho RNN dưới dạng dàn trải để tính "gradient" cho các tham số ở từng bước thời gian. Hầu hết cả các mạng nơ-ron hồi quy phổ biến ngày nay đều áp dụng thuật toán này vì tính đơn giản và hiệu quả của nó.

Huấn luyện mạng nơ-ron hồi quy

Xét một chuỗi đầu vào $x = x_1, x_2, \dots, x_n$ với đầu ra tương ứng $y = y_1, y_2, \dots, y_n$. Trong quá trình lan truyền tiến, tại mỗi bước thời gian t ứng mẫu dữ liệu (x_t, y_t) , công thức tính toán đầu ra dự đoán có dạng:

$$h_t = \tanh(W_{xh}x_t + W_{hh}h_{t-1} + b_h) \quad (2.4)$$

$$s_t = W_{hy}h_t + b_y \quad (2.5)$$

$$y_t = \text{softmax}(s_t) \quad (2.6)$$

Ta xác định hàm độ lỗi độ lỗi giữa đầu ra dự đoán \hat{y}_t và đầu ra thật sự y_t . Gọi V là số lượng lớp của y , lúc này có thể thấy \hat{y}_t là một vec-tơ phân phối xác suất có độ dài V . Để so sánh với \hat{y}_t , y_t được chuẩn hóa thành một vec-tơ dạng "one hot" có nghĩa là một vec-tơ với độ dài V có giá trị bằng 0 trừ vị trí ứng với lớp của y_t có giá trị 1. Như vậy để so sánh hai phân phối xác suất y và \hat{y} ta sử dụng hàm độ lỗi *negative log-likelihood* hay còn gọi là *cross entropy*:

$$E_t = -y_t \log(\hat{y}_t) \quad (2.7)$$

trong đó E_t là độ lỗi tại một bước thời gian t . Độ lỗi của toàn bộ quá trình học E là tổng của độ lỗi tại của tất cả các bước thời gian.

$$E = \sum_t E_t = - \sum_t y_t \log(\hat{y}_t) \quad (2.8)$$

Mục tiêu của quá trình học là cực tiểu hóa độ lỗi tổng hợp E . Thuật toán "back-propagation" với *gradient descent* sẽ được áp dụng để huấn luyện RNN. Trên thực tế, người ta sẽ sử dụng một phiên bản của "gradient descent" là "mini-batch gradient descent" cho việc huấn luyện. Tập dữ liệu ban đầu sẽ được chia thành nhiều "mini-batch", mỗi "mini-batch" là một tập con với số lượng khoảng vài chục đến vài trăm mẫu thuộc tập dữ liệu ban đầu. Với mỗi lần duyệt (iteration), việc tính toán gradient để cập nhật các tham số học của mô hình được thực hiện lần lượt trên tất cả các mini-batch này.

Mục tiêu của việc học là tìm bộ tham số $\theta = (W_{hy}, W_{hh}, W_{xh}, b_y, b_h)$ sao cho cực tiểu hóa hàm độ lỗi E . Theo thuật toán "gradient descent", bộ tham số được cập nhật theo công thức :

$$\theta \leftarrow \theta - \eta \frac{\partial E}{\partial \theta} \quad (2.9)$$

Ở đây, $\frac{\partial E}{\partial \theta}$ là "gradient" của hàm độ lỗi ứng với các tham số của mô hình. η được gọi là hệ số học (learning rate) là một siêu tham số quyết định rằng θ nên thay đổi nhiều bao nhiêu khi "gradient" ứng với tham số thay đổi.

Trong phần dưới đây, chúng tôi sẽ trình bày việc tính toán "gradient" của hàm độ lỗi theo các bộ số học $\theta = (W_{hy}, W_{hh}, W_{xh}, b_y, b_h)$. Bộ tham số này có thể được chia làm hai nhóm, bao gồm: (W_{hy}, b_y) và (W_{hh}, W_{xh}, b_h) .

Gradient theo W_{hy} và b_y

Bởi vì W_{hy} và b_y chỉ hiện diện trong hàm \hat{y} . Với $s_t = W_{hy}h_t + b_y$ và $\hat{y}_t = \text{softmax}(s_t)$, sử dụng công thức nhân trong tính đạo hàm ta được:

$$\frac{\partial E_t}{\partial W_{hy}} = \frac{\partial E_t}{\partial \hat{y}} \frac{\partial \hat{y}}{\partial s_t} \frac{\partial s_t}{\partial W_{hy}} \quad (2.10)$$

Từ công thức 2.7 ta có:

$$\frac{\partial E_t}{\partial \hat{y}} = -\frac{y_t}{\hat{y}_t} \quad (2.11)$$

Hàm \hat{y} là một hàm softmax nên nó có đạo hàm:

$$\frac{\partial \hat{y}_t}{\partial s_t} = \begin{cases} -\hat{y}_{t_k} \hat{y}_{t_l}, & k \neq l \\ \hat{y}_{t_k} (1 - \hat{y}_{t_k}), & k = l \end{cases} \quad (2.12)$$

Kết hợp 2.11 và 2.12 ta có được:

$$-\frac{y_{t_l}}{\hat{y}_{t_l}} \hat{y}_{t_l} (1 - \hat{y}_{t_l}) + \sum_{k \neq l} \left(-\frac{y_{t_k}}{\hat{y}_{t_k}} \right) (-\hat{y}_{t_k} \hat{y}_{t_l}) = -y_{t_l} + y_{t_l} \hat{y}_{t_l} + \sum_{k \neq l} y_{t_k} \hat{y}_{t_l} \quad (2.13a)$$

$$= -y_{t_l} + \hat{y}_{t_l} \sum_k y_{t_k}. \quad (2.13b)$$

Lưu ý rằng y_t là "one-hot" vec-tơ nên tổng trong công thức trên bằng 1, cho nên:

$$\frac{\partial E_t}{\partial s_t} = \hat{y}_t - y_t \quad (2.14)$$

Bởi vì W_{hy} được chia sẻ trên toàn bộ chuỗi, do đó đạo hàm hàm độ lỗi tổng hợp E theo W_{hy} sẽ là tổng đạo hàm của các E_t theo W_{hy} . Từ công thức 2.14 ta có được:

$$\frac{\partial E}{\partial W_{hy}} = \sum_t \frac{\partial E_t}{\partial s_t} \frac{\partial s_t}{\partial W_{hy}} = \sum_t (\hat{y}_t - y_t) \otimes h_t \quad (2.15)$$

trong đó \otimes là "outer-product" của hai vec-tơ.

Tương tự với đạo hàm của E theo b_y , ta cũng có:

$$\frac{\partial E}{\partial b_y} = \sum_t \frac{\partial E_t}{\partial s_t} \frac{\partial s_t}{\partial b_y} = \sum_t \hat{y}_t - y_t \quad (2.16)$$

Gradient theo W_{hh} , W_{xh} và b_h

Tham số W_{hh} tồn tại ở cả trạng thái ẩn h_t và đầu ra dự đoán \hat{y}_t , để tính "gradient" theo W_{hh} . Chúng ta cũng để ý rằng \hat{y}_t cũng dựa trên W_{hh} trực tiếp và gián tiếp (thông qua

h_{t-1}). Đặt $p_t = W_{hx}x_t + W_{hh}h_{t-1}$ và $h_t = \tanh(p_t)$:

$$\frac{\partial E_t}{\partial W_{hh}} = \frac{\partial E_t}{\partial \hat{y}} \frac{\partial \hat{y}}{\partial s_t} \frac{\partial s_t}{\partial h_t} \frac{\partial h_t}{\partial W_{hh}} \quad (2.17)$$

Trong công thức trên, ta đã biết $\frac{\partial E_t}{\partial \hat{y}}$ và $\frac{\partial \hat{y}}{\partial s_t}$ trong phần trước, công thức tính $\frac{\partial s_t}{\partial h_t}$ khá đơn giản:

$$\frac{\partial s_t}{\partial h_t} = W_{hy} \quad (2.18)$$

Cuối cùng, để tính được $\frac{\partial h_t}{\partial W_{hh}}$ ta có quan sát rằng có một sự phụ thuộc giữa h_t và W_{hh} thông qua trạng thái ẩn trước đó h_{t-1} . Ta biết rằng nếu $f(x, y)$ với $x, y \in \mathbb{R}^N$, giả sử x, y là những hàm số của r sao cho $x = x(r); y = y(r)$ thì ta có:

$$\frac{\partial f}{\partial r} = \frac{\partial f}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial r} + \frac{\partial f}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial r} \quad (2.19)$$

Áp dụng công thức trên để tính $\frac{\partial h_t}{\partial W_{hh}}$ ta được:

$$\frac{\partial h_t}{\partial W_{hh}} = \frac{\partial h_t}{\partial W_{hh}} + \frac{\partial h_t}{\partial h_{t-1}} \frac{\partial h_{t-1}}{\partial W_{hh}} \quad (2.20)$$

Tuy nhiên, ta có thể áp dụng công thức trên một lần nữa với $\frac{\partial h_{t-1}}{\partial W_{hh}}$:

$$\frac{\partial h_t}{\partial W_{hh}} = \frac{\partial h_t}{\partial W_{hh}} + \frac{\partial h_t}{\partial h_{t-1}} \frac{\partial h_{t-1}}{\partial W_{hh}} + \frac{\partial h_t}{\partial h_{t-1}} \frac{\partial h_{t-1}}{\partial h_{t-2}} \frac{\partial h_{t-2}}{\partial W_{hh}} \quad (2.21)$$

Quá trình này tiếp tục cho đến khi chúng kết thúc ở h_0 là trạng thái ẩn khởi tạo. Có thể thấy

$$\frac{\partial h_t}{\partial h_{t-1}} \frac{\partial h_{t-1}}{\partial h_{t-2}} \frac{\partial h_{t-2}}{\partial W_{hh}} = \frac{\partial h_t}{\partial h_{t-2}} \frac{\partial h_{t-2}}{\partial W_{hh}} \quad (2.22)$$

và:

$$\frac{\partial h_t}{\partial W_{hh}} = \frac{\partial h_t}{\partial h_t} \frac{\partial h_t}{\partial W_{hh}} \quad (2.23)$$

Như vậy, có thể rút gọn 2.21 thành một công thức duy nhất:

$$\frac{\partial h_t}{\partial W_{hh}} = \sum_{r=0}^t \frac{\partial h_t}{\partial h_r} \frac{\partial h_r}{\partial W_{hh}} \quad (2.24)$$

Kết hợp các công thức từ 2.17 suy ra:

$$\frac{\partial E_t}{\partial W_{hh}} = (\hat{y}_t - y_t) W_{hy} \sum_{r=0}^t \frac{\partial h_t}{\partial h_r} \frac{\partial h_r}{\partial W_{hh}} \quad (2.25)$$

Đạo hàm hàm độ lỗi tổng hợp E theo W_{hh} sẽ là tổng đạo hàm của các E_t theo W_{hh}

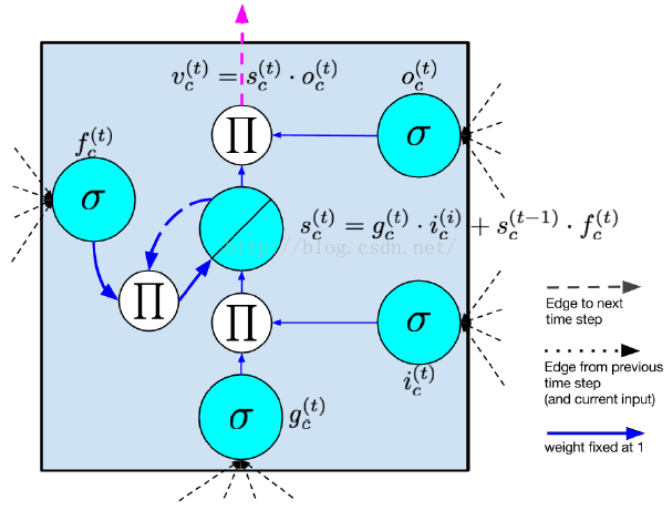
$$\frac{\partial E}{\partial W_{hh}} = \sum_{t=0}^T \sum_{r=0}^t (\hat{y}_t - y_t) W_{hy} \frac{\partial h_t}{\partial h_r} \frac{\partial h_r}{\partial W_{hh}} \quad (2.26)$$

Khó khăn trong việc huấn luyện RNN

Mặc dù "gradient" của RNN dễ tính toán, nhưng RNN cơ bản là khó huấn luyện. Những vấn đề này bao gồm gradient bùng nổ (exploiting gradients) và gradient biến mất (vanishing gradients) được đề cập trong các nghiên cứu [?] [?]. Nếu gradient bùng nổ, mô hình không thể học được. Nếu gradient biến mất, việc học những phụ thuộc dài hạn trở nên khó khăn.

Long short-term memory

Hochreiter và Schmidhuber [1997] đã giới thiệu mô hình LSTM chủ yếu ở để khắc phục vấn đề biến mất gradient. Mô hình này tương tự với mô hình RNN một lớp ẩn, nhưng mỗi "RNN cell" (được ký hiệu "A" trong hình 2.2) được thay thế bằng một "memory cell" (Hình 2.3). Giống như "RNN cell", "memory cell" cũng chứa một kết nối hồi quy nhằm để kết nối thông tin từ các bước thời gian với nhau. Tuy nhiên, trong "LSTM cell" kết nối hồi quy này có trọng số cố định là một. Điều này nhằm bảo đảm "gradient" được luân chuyển qua các bước thời gian mà không bị bùng nổ hay biến mất.



Hình 2.3: Mô hình RNN đơn giản với kết nối vòng, h được xem như bộ nhớ được luân chuyển trong RNN. Chú ý rằng đường nét đứt ở đầu ra thể hiện rằng tại một thời điểm t , RNN có thể có hoặc không có một đầu ra.

Mô hình ngôn ngữ

Như chúng tôi đã đề cập trong chương 1, *mô hình ngôn ngữ* (language model) là một bộ phận quan trọng trong cả dịch máy thống kê và dịch máy nơ-ron. Cụ thể hơn, mô hình ngôn ngữ là một phân phối xác suất trên một chuỗi các từ. Cho trước một chuỗi w_1, w_2, \dots, w_m (ký hiệu $w_{1:n}$), mô hình ngôn ngữ gán cho nó một xác suất $P(w_{1:n})$ đại diện cho độ "trơn tru" của chuỗi đó. Sử dụng quy tắc dây chuyền (chain rule) trong xác suất, ta có:

$$P(w_{1:n}) = P(w_1)P(w_2|w_1)P(w_3|w_{1:2})P(w_4|w_{1:3})\dots P(w_n|w_{1:n-1}) \quad (2.27)$$