

令和元年6月6日現在

機関番号：12612

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2018

課題番号：15H02713

研究課題名(和文)ベクトル空間モデルによる計算モデリング手法の深化と言語の意味の諸問題の認知的解明

研究課題名(英文) Distributional semantic models: Deepening the methodology of cognitive modeling and exploring cognitive processes in human semantic memory

研究代表者

内海 彰 (Utsumi, Akira)

電気通信大学・大学院情報理工学研究科・教授

研究者番号：30251664

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 10,700,000円

研究成果の概要(和文)：ベクトル空間モデル(単語の意味を多次元ベクトルとして数値的に表現する手法)が、人間の意味記憶(心の中の単語辞書)のモデルとして妥当であることをネットワーク分析を通じて明らかにするとともに、人間の語彙獲得過程が意味的分化(新しい単語が既知の単語の意味を細分化する過程)と経験的共起(新しい単語の意味が既知の単語が表す概念と経験的に共起する過程)の2つの過程から、より適切に説明できることを示した。さらに、抽象語は具象語から間接的に実世界に対応付けられるという仮説を反映したマルチモーダル(言語と画像の両方を利用した)ベクトル空間を提案して、抽象語の間接的接地仮説の妥当性を計算論的に実証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

単語の意味とは何か、それはどのように表現・処理・獲得されるのか、といった言語の意味に関する諸問題は、人間の知の解明を目指す認知科学などの学術分野の中心課題であり、本研究で得られた結果はそのさらなる解明に向けて、ベクトル空間モデルが認知的に妥当な計算モデリング手法であることを実証した。ベクトル空間モデルによるシミュレーションを行うことで、人間の意味記憶に関する仮説検証が可能になる点で学術的に意義がある。さらに、近年の人工知能の基盤である深層学習では、基盤技術として単語ベクトルが用いられているため、深層学習の内部構造の解明や学習手法の発展にも寄与する点で社会的意義も大きい。

研究成果の概要(英文)：In this research project, using the technique of network analysis, we demonstrated that a vector space model or a distributional semantic model, in which the meaning of words is represented as a multi-dimensional vector, is plausible as a cognitive model of human semantic memory or mental lexicon. In addition, it was found from a simulation experiment of network growth that human lexical acquisition process can be better explained by the following two processes: semantic differentiation (i.e., a process of adding some kind of variation on the meaning of existing words by a new word) and experiential correlation (i.e., a process of relating a new word to existing words by experiential correlation). Furthermore, we proposed a novel multimodal distributional semantic model in which abstract words are represented indirectly through grounded representations of their semantically related concrete words, and provided computational evidence for the indirect grounding view of abstract words.

研究分野：認知科学

キーワード：ベクトル空間モデル 単語の意味 記号接地 意味記憶 抽象語 ベクトル意味論 意味ネットワーク

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

言語の意味とは何か、それはどのように表現・処理・獲得されるのか、といった言語の意味に関する諸問題は、人間の知の解明を目指す認知科学などの学術分野の中心課題である。意味という抽象的な対象を扱うには計算に基づくアプローチが有効であり、主に単語の意味表現の研究が行われている。しかし、当初の期待に比べて計算アプローチがもたらした知見は多くなく、単語の意味の獲得・処理過程の解明が進んでいない、単語の意味の計算モデルが文や句の計算モデルに生かされておらず心理的妥当性に欠けるなどの問題点がある。

これらの問題を解決するための計算パラダイムとして、その高い柔軟性ゆえに**ベクトル空間モデル**(近年では、単語埋め込みモデルや分散意味モデルとも呼ばれる)が適切である。ベクトル空間モデルは文書中の語彙分布情報を用いて語彙の意味を多次元ベクトルとして表現するモデルであり、それらの表現に代数的・確率的操作を施すことによって様々な言語単位の意味の理解過程をモデル化することが可能となる。ベクトル空間モデルは、モデル化に際してコネクション主義モデルの創発原理のような強い前提を置かないため、高い柔軟性を有するのが特徴である。しかしながら、言葉の意味(人間の意味記憶、心内辞書)に関する認知科学研究では、ベクトル空間モデルの柔軟性が十分に利用されているとは言い難い。

2. 研究の目的

以上で述べた研究背景をふまえて、本研究では、ベクトル空間モデルを用いて、単語・語彙の意味記憶の構造やその獲得・処理機構を解明することを主な目的とする。また、それに付随して、ベクトル空間モデルの改良や評価データの構築なども行う。具体的には、以下の6つの研究課題を本研究の期間内で主に実施する。

【課題1】単語の意味記憶の構造とその獲得・処理過程の解明

- (1) ネットワーク分析を用いて、人間の意味記憶・心内辞書の計算モデルとしてのベクトル空間モデルの妥当性を検証する。また意味記憶と同じ特性を持つ意味ネットワークを生成するためのモデルを新たに提案し、語彙獲得の認知過程を解明する。
- (2) 単語・語彙という記号が、(身体性を通じた経験から得られる)実世界との対応付けを通じて、どのように意味を獲得するかという記号接地問題(symbol grounding problem; Harnad, 1990)を解明するために、新たなマルチモーダル意味空間モデルを提案して、その妥当性を検証する。
- (3) 多言語ベクトル空間を用いて、バイリンガル話者の意味獲得過程を解明する。

【課題2】ベクトル空間モデルの性質の解明と改良

- (4) ベクトル空間モデルによって生成される単語ベクトルが、様々な種類の意味知識をどれだけ反映しているかを解明する。
- (5) 単語の語義ごとに意味ベクトルを自動的に生成するようなベクトル空間モデルを提案する。
- (6) 日本語単語ベクトルの評価用データとして、日本語単語類似度・関連度データセットを構築する。

なお、紙面の都合から省略するが、この他にも(7)階層的関連性伝搬を用いて、特定の意味知識を反映させるように学習済のベクトル空間を改良する手法の開発、(8)ベクトル空間モデルを用いた文脈を考慮した比喻表現の自動生成、(9)ベイズ推論とベクトル空間モデルを用いたアイロニー解釈モデルの提案、(10)ベクトル空間モデルを用いた読書におけるジャンルの違いと語彙力の関係の分析、などの研究課題を実施した。

3. 研究の方法

上記2の研究目的で述べた6つの研究課題に対して、以下に述べる方法で研究を実施した。

- (1) 人間の意味記憶を反映したデータとして、英語の単語連想データ University of South Florida word association norm の刺激語・連想語対から生成した意味ネットワークを用いる。また、単語・文脈行列の種類(単語・文脈行列, 単語共起行列), 重み付け手法(tf-idf, PPMI), 次元圧縮の有無の全組み合わせの8種類のベクトル空間モデルによって、British National Corpus から単語ベクトルを計算する。これらの8種類の単語ベクトルを用いて単語対のコサイン類似度を計算し、その値に基づく意味ネットワークを用いる。これらのネットワークに対して、スモールワールド性(クラスタリング係数, 平均最短経路長), スケールフリー性(ノードの次数分布), および階層性(ノードの局所クラスタリング係数分布)の3種類の指標によってネットワーク特性を求め、これらの特性を比較することで、ベクトル空間モデルの意味記憶のモデルとしての妥当性を検証する。意味的分化と経験的共起の2種類の語彙獲得プロセスを反映した新たなネットワーク生成モデルを提案して、シミュレーション実験で生成されたネットワークが単語連想に基づく実際のネットワークと同じ特性を有するかどうかを検証する。

- (2) 具象語の意味は身体性に基づく感覚情報を通じて実世界に直接接地される(directly grounded in the world)のに対して、抽象語の意味は実世界と直接接地された具象語を介して間接的に接地されるという近年の認知科学における仮説を反映した新たなマルチモーダル意味空間モデルを提案する。具体的には、具象語の画像ベクトルはその単語概念を表現した画像か

ら計算される特徴ベクトルを用いるのに対して、図1に示すように、抽象語(winter)の画像ベクトルはその単語と意味的に関連するn個の具象語(snow, rainy, snowstorm)の画像ベクトルの重心ベクトルとする。これらの画像ベクトルと、言語コーパスから得られる通常の単語ベクトルを組み合わせ、各単語のマルチモーダルベクトルとする。これらのマルチモーダルベクトルによる単語間類似度と、人間の評価による単語間類似度の相関を見ることで、それらのモデルの妥当性を検証する。

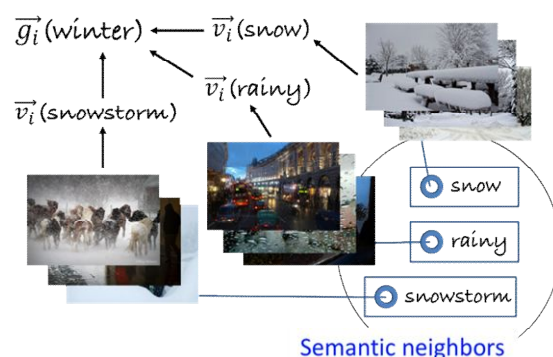


図1：抽象語の間接的接地に基づくモデル化

(3) 単語共起行列を計算する際の共起

単語を、対訳辞書を用いてどちらかの言語に合わせることで、単言語コーパスから2つの言語の単語を同一のベクトル空間で表現するモデルを開発する。連続二言語使用者(sequential bilingual)の意味記憶モデルとしての提案モデル(第一言語L1=共起単語の言語)の妥当性を、二言語間の単語類似度評価データ(Allen & Conklin, 2014)を用いて検証する。

(4) 脳科学の知見に基づく多様な属性から構成される、535個の英単語に対する概念ベクトル表現(Binder et al, 2016)をベクトル空間モデルで模倣するシミュレーション実験を行う。まず2種類のコーパス(COCA, Wikipedia)からSGNS(skip-gram with negative sampling), GloVe, PPMIの3種類のベクトル空間モデルを用いて単語ベクトルを学習する。そして、これらの単語ベクトルからBinderらの概念ベクトルへの写像を二種類の手法(3層ニューラルネットワークMLP, 線形変換LT)で学習する。シミュレーション実験によって推定された概念ベクトルにおいて、どのような種類の概念属性をより精度良く模倣できるかを見ることで、ベクトル空間モデルに内在する情報を特定する。

(5) 各単語の語義をその個数とともに自動推定して、語義ごとの意味ベクトルを求める手法を開発する。具体的には、コーパス中から各単語が出現する前後の文脈(前後10単語)を抽出し、BoW(Bag of Words)に基づく文脈ベクトルを作成する。次に、各単語ごとに、文脈ベクトルに対する階層型クラスタリングを行い、新たに提案する修正UpperTail法によってクラスタ集合を求める。そして各クラスタを語義とみなして従来のベクトル空間モデルの手法を適用し、各単語の各語義ごとの意味ベクトルを求める。得られた各単語の語義ベクトルを用いて、文脈付きの単語対類似度データとの相関係数を算出して性能を評価する。

(6) 形態素辞書UniDicから低頻度語を除く名詞、動詞、形容詞を抽出する。次に、日本語WordNetとBCCWJコーパスから計算したPPMIを用いて、類似度と関連度が広く分布するように2145個の単語対を選定する。インターネット調査を用いて2145個の単語対に対する類似度と関連度の7段階評価データを収集する。参加者は幅広い年齢(20代~60代)から均等に選定するとともに、男女数もおおよそ同数とする。収集した評価データに対してスクリーニングを行った後に、各単語対の類似度、関連度それぞれの評価平均を算出したデータを「日本語単語類似度・関連度データセット(JWSAN)」として公開する。

4. 研究成果

上記3で述べた方法で研究を実施して、以下の研究成果を得た。

(1) 単語連想データとベクトル空間モデルから生成された全ての意味ネットワークはスモールワールド性を示した。スケールフリー性に関しては、ノードの次数分布の形状を4種類に分類でき、単語連想データと同じ形状の次数分布を示したのは、単語共起行列に対してPPMI(正自己相互情報量)で重み付けをして、次元圧縮は行わないというベクトル空間モデルとなった。さらに、このベクトル空間モデルは階層性に関しても単語連想データと同じ性質を持つことがわかった。これらの結果から、単語共起行列+PPMIによるベクトル空間モデルは、人間の意味記憶の計算モデルと最も妥当性が高いと結論づけられる。意味的分化のみを考慮した先行研究のネットワーク生成モデル(Steyvers & Tenenbaum, 2005)に比べて、意味的分化と経験的共起の両方を考慮した提案モデルのほうが、単語連想データのノード次数分布により近いネットワークを生成できることを示した。この結果は、意味的分化と経験的共起という2種類の認知機構が人間の語彙獲得プロセスに関与することを示している。

(2) WordSim-353とSimLex-999の2種類のデータにおける単語対ごとの類似度評価平均と、ベクトル空間モデルに基づく単語対のコサイン類似度の相関係数を求めた。WordSim-353については、言語コーパスのみを用いた単語ベクトルでは0.525、既存のマルチモーダルベクトルでは0.476であったのに対して、提案手法によるマルチモーダルベクトルでは0.535(抽象語の割合0.80, n=5), 0.551(抽象語の割合0.95, n=2)となった。同様に、SimLex-999では、

言語ベクトルで 0.248, 通常のマルチモーダルベクトルで 0.235 であるのに対して, 提案手法のマルチモーダルベクトルでは 0.278 (抽象語の割合 0.80, n=5), 0.260 (抽象語の割合 0.95, n=2) となった。いずれの結果も, 提案手法で計算した単語対類似度が類似度評定と最も高い相関を示しており, 具象語の間接的接地という仮説の心理学的実在性が示されたと言える。

(3) L1 (第一言語) が日本語で L2 (第二言語) が英語である連続二言語使用者による日本語単語と英語単語の類似度評定データと, 提案した二言語ベクトル空間によるコサイン類似度との相関係数は, 0.342 (共起単語が日本語), 0.328 (共起単語が英語) となり, L1=「共起単語の言語」とする二言語ベクトル空間モデルの妥当性が示された。さらに, 連続二言語使用者を対象としたプライミング実験では, L1 単語がプライムで L2 単語がターゲットのときにはプライミング効果が得られるが, L2 単語がプライムで L1 単語がターゲットのときにはプライミング効果が得られにくいという先行研究における経験的知見を, 二言語ベクトル空間による単語類似度順位を用いて説明できることを明らかにした。

(4) ベクトル空間モデルから模倣された概念ベクトル表現の予測精度として, 元のベクトルと予測ベクトル間の属性ごとの順位相関係数と単語ごとの順位相関係数を算出したところ, SGNS が最も予測精度が高かったが, 全体の傾向には違いが見られなかった。図 2 に示すように, 属性ごとの相関係数では, 因果(Causal), 認知(Cognition) 社会(Social)に関わる属性に関しては SGNS+COCA+MLP の組み合わせで 0.7 以上の相関が得られたのに対して, 感情(Emotion)に関する属性ではそれほど高い相関は得られなかった。また, 抽象語・概念を特徴づけるこれらの抽象属性と比較して, 感覚・運動に関わる属性や時空間的属性の相関係数は有意に低くなった。さらに, 単語ごとの相関係数でも, 心的, 社会的, 感情的な概念を表す単語の相関係数は概して高くなったのに対して, 具象語の相関係数は低くなった。これらの結果は, 実世界との直接的な接地が必要な単語については, コーパスに基づく言語情報だけから概念表現を推測するには限界があるのに対して, 抽象語・抽象属性に関する情報・概念知識はベクトル空間モデル, つまり言語情報のみから十分に獲得可能であることを示している。さらに, 感情に関する情報の推定精度が他の抽象的な情報に比べて低くなったという結果は, 感情に関する情報の獲得には, 感情に関わる経験が不可欠であると解釈することができる。

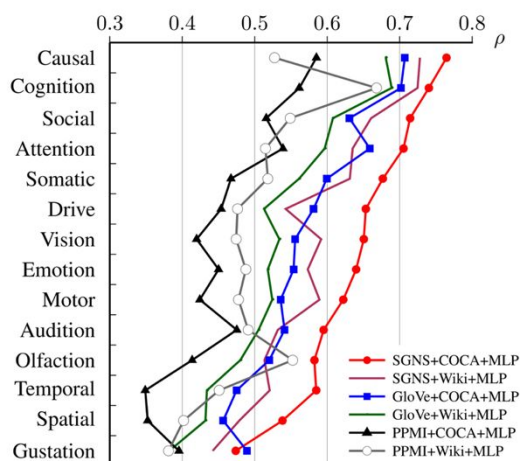


図 2: 属性ごとの相関係数の平均

(5) Stanford Contextual Word Similarity というデータセットにおける文脈つきの単語対類似度評定との相関係数を求めたところ, 先行研究における語義数を固定したベクトル空間モデルの相関係数が 0.508 (語義数 3 に固定) に対して, 提案手法の相関係数が 0.541 となった。この結果から, 本研究で提案した手法の有効性を確認できた。

(6) ベクトル空間モデルの評価データとしての妥当性を確かめるために, 2145 個の単語対に対する類似度と関連度の評定平均と, ベクトル空間モデル (SGNS) によるコサイン類似度の順位相関係数を求めたところ, 類似度との相関係数 0.68, 関連度との相関係数 0.75 と, いずれも高い相関となった。英語における先行研究では, 類似度との相関係数は関連度との相関係数に比べてかなり低くなる (つまり, 単語間類似度の予測のほうが難しいタスクである) ことが知られているので, 2145 単語対をそのまま用いると評価データとしてはやや不適切であることがわかった。そこで, 類似度と関連度が均等に分布するように単語対を 1400 個に厳選したデータセットを作成した。このデータに対する相関係数は類似度で 0.50, 関連度で 0.64 と, 全データの評価用に用いたときよりも適切なデータセットであることを確認した。

以上の研究成果は, ベクトル空間モデルが人間の意味記憶の構造や獲得・処理の認知機構に関する幅広い現象を説明可能であることを示している。特に, ベクトル空間モデルによって学習された単語ベクトルに内在する意味情報を明らかにした点や, 抽象語・概念の表現・処理という近年ホットトピックとなっている課題に対して, 抽象語の間接的接地仮説の計算論的基盤を与えた点などは, 国内外においてインパクトの高い研究成果である。

< 引用文献 >

Allen, D. and Conklin, K. Cross-linguistic similarity norms for Japanese-English translation equivalents, *Behavior Research Methods*, 46:540-563 (2014).
 Binder, J.R. et al. Toward a brain-based componential semantic representation, *Cognitive Neuropsychology*, 33:130-174 (2016).

Harnad, S. The symbol grounding problem, *Physica D*, 42:335-346 (1990).
Steyvers, M. and Tenenbaum, J.B. The large-scale structure of semantic network: Statistical analyses and a model of semantic growth. *Cognitive Science*, 29:41-78 (2005).

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計2件)

内海 彰: 単語の意味の計算論的探求 記号, 身体, そして比喩, *人工知能学会誌*, 31(1):82-90 (2016). 査読なし.

Akira Utsumi. A complex network approach to distributional semantic models, *PLoS ONE*, 10(8):e0136277 (2015). 査読あり. doi:10.1371/journal.pone.0136277

[学会発表](計13件)

Akira Utsumi. Refining pretrained word embeddings using layer-wise relevance propagation, *Proc. of the 2018 Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing (EMNLP)*, pp.4840-4846 (2018).

Akira Utsumi. A neurobiologically motivated analysis of distributional semantic models, *Proc. of the 40th Annual Conference of the Cognitive Science Society (CogSci2018)*, pp.1147-1152 (2018).

猪原 敬介, 内海 彰: 日本語類似度・関連度データセットの作成, *言語処理学会第24回年次大会発表論文集*, pp.1011-1014 (2018).

Shintaro Konno and Akira Utsumi. Estimating the number of word senses to improve multi-prototype vector space models, *Proc. of the 2nd International Workshop on Language Sense on Computer*, pp.59-64 (2017).

Keisuke Inohara and Akira Utsumi. Computational explanation of "fiction text effectivity" for vocabulary improvement: Corpus analyses using latent semantic analysis, *Proc. of the 38th Annual Conference of the Cognitive Science Society (CogSci2016)*, p.3035 (2016).

Katsumi Takano and Akira Utsumi. Grounded distributional semantics for abstract words, *Proc. of the 38th Annual Conference of the Cognitive Science Society (CogSci2016)*, pp.2171-2176 (2016).

Akira Utsumi. Multilingual distributional semantic models: Toward a computational model of the bilingual mental lexicon, *Proc. of the EuroAsianPacific Joint Conference on Cognitive Science (EAP CogSci 2015)*, pp.270-275 (2015).

[図書](計3件)

鍋島 弘治朗, 楠見 孝, 内海 彰(編): *メタファー研究1*, ひつじ書房, 272頁 (2018). (全体の編集および第5章の執筆を担当)

AIX(人工知能先端研究センター)監修, 栗原 聡, 長井 隆行, 小泉 憲裕, 内海 彰, 坂本 真樹, 久野 美和子著: *人工知能と社会: 2025年の未来予想*, オーム社, 256頁 (2018).

[その他]

内海 彰, 猪原 敬介: 日本語単語類似度・関連度データセット JWSAN (<http://www.utm.inf.uec.ac.jp/JWSAN>)

6. 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名: 猪原 敬介

ローマ字氏名: (INOHARA, Keisuke)

所属研究機関名: くらしき作陽大学

部局名: 子ども教育学部

職名: 講師

研究者番号(8桁): 10733967

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。