

実例からの帰納的学習による機械翻訳手法における 遺伝的アルゴリズムの有効性について

越前谷 博[†] 荒木 健治[†] 桃内 佳雄[†] 栃内 香次^{††}

[†]北海学園大学工学部

^{††}北海道大学工学部

我々は、従来より実例から翻訳ルールを学習し、その翻訳ルールを用いて翻訳を行う帰納的学習による機械翻訳手法の提案とその性能評価実験を行ってきた。その結果、問題点として、他の実例や用例に基づく学習型機械翻訳手法と同様に、翻訳ルールを獲得するためには大量のデータを必要とすることが明らかとなった。そこで、我々は与えられた実例を最大限に活用し、少量のデータからより多くの翻訳ルールを獲得するために、また、最適な翻訳結果をより高度に探索するために、そして、システム全体が良質な翻訳ルールの確保に向けてより良い学習型機械翻訳システムへと進化し続けるために、帰納的学習による機械翻訳手法へ遺伝的アルゴリズムの基本操作を適用した。本稿では、帰納的学習による機械翻訳手法における遺伝的アルゴリズムの有効性を確認するために行った、大量のデータを用いた評価実験及びその考察結果について述べる。

Effectiveness of Genetic Algorithms for Example-based Machine Translation Method Using Inductive Learning

Hiroshi Echizen-ya[†], Kenji Araki[†], Yoshio Momouchi[†] and Koji Tochinal^{††}

[†]Faculty of Engineering, Hokkai-Gakuen University

^{††}Faculty of Engineering, Hokkaido University

We have proposed the example-based machine translation method using inductive learning, and have evaluated this method. It became clear that this method needs a large amount of examples to get the translation rules, the same as other example-based machine translation method. Therefore, we applied the basic operations of genetic algorithms to the machine translation method using inductive learning to make the best use of given examples, get the translation rules from a little data, search for the good translation result and evolve the whole of this system to the example-based machine translation system with good quality translation rules. In this paper, we report the evaluation experiment using a large amount of data and the consideration to confirm the effectiveness of genetic algorithms for the machine translation method using inductive learning.

1. はじめに

国際社会の情報化が進むにつれ、実用的な機械翻訳システムの開発が強く望まれている。そうしたニーズに応えるべく、これまでに多くの機械翻訳手法の研究が行われている。また、その結果、問題点も明らかとなりつつある。文法解析に基づく解析型機械翻訳手法^{1, 2)}においては、多様な言語現象を有限個の文法規則で捉えきることの困難さや文法規則や辞書の巨大化に伴う、それらの作成・改良の困難さが問題点として挙げられる。また、この種の翻訳手法の問題点を解決する手法として、近年、盛んに研究されている用例や実例に基づく学習型機械翻訳手法^{3, 4, 5, 6)}においては、翻訳ルールを獲得するために大量のデータが必要となり、良質な翻訳を行うためにはあらかじめ十分な量の事例を学習させなければならない。

我々は学習型機械翻訳手法の一つとして、実例より翻訳ルールを抽出し、その翻訳ルールを用いて翻訳を行う帰納的学習による機械翻訳手法の提案⁷⁾とその性能評価実験⁸⁾を行ってきた。その結果、熟語や慣用句表現に順応した翻訳が可能となった。しかし、このような手法では、最適な翻訳を行うために不可欠となる多様かつ良質な翻訳ルールを得るには2つ以上の類似した事例を必要とするため、大量の学習データが必要となるのが問題となる。そこで、我々は従来の帰納的学習による機械翻訳手法の利点を損なうことなく、この問題点を克服するために、遺伝的アルゴリズムを適用することで、与えられた実例からより多くの翻訳ルールを抽出し、その翻訳ルールを用いて、最適な翻訳結果を効率良く生成することを試みた。

遺伝的アルゴリズム^{9, 10)}は、バラエティに富んだ個体を作り出しながら環境に適応するための世代交代を繰り返すことで進化して行くという生物の進化の過程を模倣したものであり、最適化問題や探索問題に対して最適解を速やかに得るための手法である。本稿では、実例を含む翻訳ルールを個体として位置づけ、翻訳ルールに対し交叉や突然変異、そして、適応度の決定と淘汰などの遺伝的操作を行うことで多様かつ良質な翻訳ルールの生成を図っている。更に、生成された翻訳ルールに対しても遺伝的アルゴ

リズムの基本操作を適用することで、効率良く翻訳ルールを活用し最適な翻訳結果を導き出す。

このように学習型機械翻訳手法における知識獲得に遺伝的アルゴリズムの持つ環境に適応するための進化の過程を適用することで、システム全体が最適な翻訳の実現に向けて成長し続け、より良い機械翻訳システムを構築して行く。本稿では、帰納的学習による機械翻訳手法における遺伝的アルゴリズムの有効性を確認する。

2. 処理過程

2.1 概要

本手法に基づくシステムの処理過程を図1に示す。

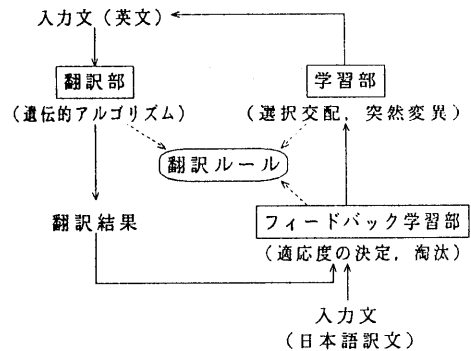


図1 処理過程

本システムは英日翻訳を行う学習型機械翻訳システムであり、原文として英文を入力する。その入力された英文に対し、翻訳部においてそれまでに生成された翻訳ルールへ遺伝的アルゴリズムの基本操作を適用することで、最適な翻訳結果を生成する。次いで、フィードバック学習部において利用者が与えた正しい日本語訳文を用い、翻訳部で使用された翻訳ルールに対する適応度の決定と淘汰を行う。そして、学習部において与えられた英文とその日本語訳文からなる翻訳例に対し、選択交配と突然変異を行うことで多様な翻訳ルールを生成し、以後の翻訳に活用する。

このような処理を繰り返すことで良質な翻訳ルールが生き残り、システムはより良い翻訳を行うために進化して行く。

2. 2 染色体と遺伝子

本節では遺伝的アルゴリズムを適用するにあたり個体の染色体と遺伝子をどのように位置づけているかについて述べる。図2に示すように染色体には翻訳例を、そして、染色体を構成している遺伝子には翻訳例を構成している単語を用いる。したがって、個々の個体は可変長の染色体を持つことになるが、これは進化の過程で高等生物になるにつれ、より長く複雑な染色体を持つということを模倣している。また、翻訳例は翻訳ルールを抽出した後、その翻訳例自体も翻訳ルールとして登録される。これを原文の翻訳ルールと呼ぶ。

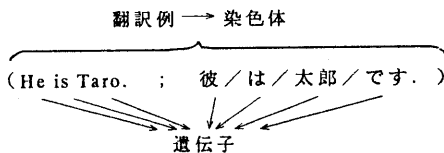


図2 染色体と遺伝子

2. 3 フィードバック学習部

フィードバック学習部では、利用者が与えた正しい日本語訳文に基づき、翻訳部で求められた翻訳結果に対する正誤の判定を行う。生成された翻訳結果が入力された正しい日本語訳文と一致する場合、使用された翻訳ルールの正翻訳度数を1増加させる。一致しない場合には、誤翻訳度数を1増加させる。その値より、翻訳部で使用された全ての翻訳ルールに対し適応度を決定する。その際の計算式を以下に示す。

$$\text{適応度 (\%)} = \frac{\text{正翻訳度数}}{\text{全翻訳度数}} \times 100$$

適応度は、各翻訳ルールにおける翻訳に使用された際の正翻訳率を表している。そして、決定された適応度により淘汰を行う。淘汰を行う場合には、ある程度の翻訳ルールに対する試用期間を必要とすることが予備実験より明らかとなった。これは、学習が十分に行われていない段階では、日本語訳文において「あなた」、「君」や「～です」、「～だ」等の表現の違いを認識できないために、使用された翻訳ルールに対し安易に誤りと判断してしまう場合が生じるためである。よって、淘汰の対象となる翻訳ルールは、全翻訳度数が5以上で、適応度が25%以下の

ものとした。

2. 4 学習部

学習部では、翻訳例に対し選択交配と突然変異、そして、我々が先に提案した共通部分と差異部分を多段階に抽出する手法⁷⁾を用いることで多様な翻訳ルールの抽出を行う。学習部における翻訳ルール抽出の処理過程を図3に示す。

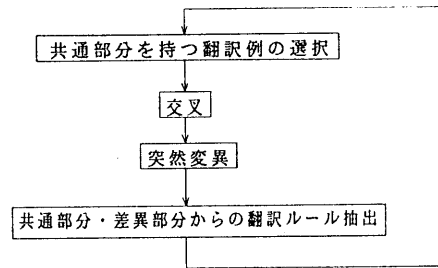


図3 翻訳ルール抽出の処理過程

選択交配は、それまでに入力された翻訳例から共通部分を持つ2つの翻訳例を選択し、英文とその日本語訳文のそれぞれにおいて、共通部分を交叉位置とする一点交叉を行う。図4にその具体例を示す。

(1) 既存の翻訳例からの選択

(He likes tennis. ; 彼/は/テニス/が/好き/です。)
(She likes tea. ; 彼女/は/お茶/が/好き/です。)

(2) 英文の交叉

He likes tennis. → He likes tea.
She likes tea. → She likes tennis.

(3) 日本語訳文の交叉

彼/は / テニス/が/好き/です。
彼女/は / お茶/が/好き/です。

彼/は/お茶/が/好き/です。
彼女/は/テニス/が/好き/です。

(4) 新たに生成された翻訳例

(He likes tea. ; 彼/は/お茶/が/好き/です。)
(She likes tennis. ; 彼女/は/テニス/が/好き/です。)

図4 選択交配の具体例

まず、既存の翻訳例から共通部分を持つものを選択する。この例の場合には、英文においては「is」日本語訳文においては「は」と「が/好き/です」が共通部分として抽出される。よって、英文においては「is」、日本語訳文において

は「は」を交叉位置とする一点交叉をそれぞれ行う。また、「が/好き/です」を交叉位置とする日本語訳文の交叉は、新たな日本語訳文を生成しないので翻訳ルールとしての登録は行わない。

次に、交叉より新たに生成された翻訳例を加え、共通部分と差異部分を多段階に抽出する。図5にその具体例を示す。

既存の翻訳例

(He likes tennis. ; 彼/は/テニス/が/好き/です.)

交叉により生成された翻訳例

(He likes tea. ; 彼/は/お茶/が/好き/です.)

共通部分の抽出

(He likes @0. ; 彼/は/@0/が/好き/です.)

差異部分の抽出

(tennis ; テニス)

(tea ; お茶)

図5 共通部分・差異部分の抽出

このような処理を行うことにより、2つの翻訳例から抽出される最終的な翻訳ルールを図6に示す。

(1) 変数を含まない翻訳ルール

①原文の翻訳ルール

(He likes tennis. ; 彼/は/テニス/が/好き/です.)

(She likes tea. ; 彼女/は/お茶/が/好き/です.)

(He likes tea. ; 彼/は/お茶/が/好き/です.)

(She likes tennis. ; 彼女/は/テニス/が/好き/です.)

②単語の翻訳ルール

(He ; 彼), (She ; 彼女), (tea ; お茶)

(tennis ; テニス)

(2) 変数1つの翻訳ルール

(He likes @0. ; 彼/は/@0/が/好き/です.)

(She likes @0. ; 彼女/は/@0/が/好き/です.)

(@0 likes tea. ; @0/は/お茶/が/好き/です.)

(@0 likes tennis. ; @0/は/テニス/が/好き/です.)

(3) 変数2つの翻訳ルール

(@0 likes @1. ; @0/は/@1/が/好き/です.)

図6 抽出された翻訳ルール

突然変異は、乱数を用い、突然変異率を2%とした翻訳例の単語に対するランダムな変更を行う。変更を使用する単語つまり遺伝子は、それまでに抽出された既存の単語の翻訳ルール又は変数とする。図7に翻訳例に対する突然変異の具体例を示す。

単語の翻訳ルール (fish ; 魚) による翻訳例の変更

(Do you like tea?)

↓ ; あなた/は/お茶/が/好き/ですか?)

(Do you like fish?)

↓ ; あなた/は/魚/が/好き/ですか?)

図7 突然変異の具体例

共通部分と差異部分を多段階に抽出することで得られる翻訳ルールは、類似した翻訳例の組を必要とするため、その出現頻度の低さが従来より大きな問題点となっていた。よって、遺伝的アルゴリズムの基本操作の適用が多くの翻訳例を作り出し、この問題を解決する有効な手段になると考えられる。

2.5 翻訳部

翻訳部では、それまでに抽出された翻訳ルールを用いて入力文に対する最適な翻訳結果を導き出す。そのために、翻訳部のみで一つの完結した遺伝的アルゴリズムのシステムを構築し、高度な探索を実現する。図8に翻訳部における処理の流れを示す。

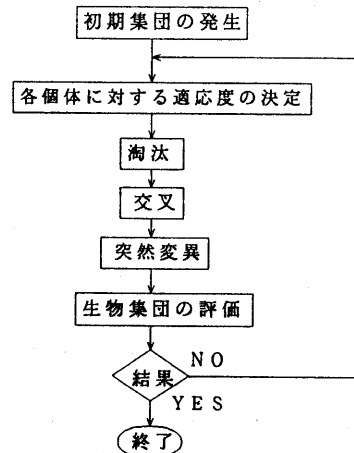


図8 翻訳部の処理過程

以下にそれぞれの個々の処理の詳細を述べる。

(1) 初期集団の発生

それまでに抽出された翻訳ルールから選択した、入力文に対し基礎的な構造を表現している、文の翻訳ルールの集団を初期集団とする。

(2) 各個体に対する適応度の決定

フィードバック学習部で使用した計算式を

用いて各翻訳ルールに対する適応度を決定する。

(3) 淘汰

フィードバック学習部と同様に、全翻訳度数が5以上、適応度が25%以下の翻訳ルールに対して淘汰を行う。

(4) 交叉の実行

学習部で用いた手法と同様に、共通部分を持つものを選択し、その共通部分を交叉位置とする一点交叉を行う。

(5) 突然変異の実行

学習部と同様に、突然変異率を2%とした翻訳ルールに対するランダムな変更を行う。

(6) 生物集団の評価

文の翻訳ルールの変数部分に既存の単語の翻訳ルールを代入し、入力文と一致するものが存在するかどうかを調べる。一致するものが存在すれば入力文に対する翻訳結果が得られたとして翻訳部における処理を終了する。図9に翻訳部における具体例を示す。

(1) 原文

I am a student.

(2) 初期集団の発生

{(I am @0.; 私/は/@0/です.),
(@0 am a @1.; @0/は/@1/です.), ...}

(3) 交叉により生成された翻訳ルール

(I am a @1.; 私/は/@1/です.)

(4) 生物集団の評価

単語の翻訳ルール (student ; 学生)

(I am a @1.; 私/は/@1/です.)

(I am a student.; 私/は/学生/です.)

(5) 翻訳結果

私は学生です。

図9 翻訳部における翻訳結果生成の具体例

2.6 ヒューリスティックスの導入

これまでに行った実験^{11, 12)}より、学習部において全ての翻訳例に遺伝的アルゴリズムの基本操作を適用することは、膨大な処理時間を必要とすることが明らかとなった。そこで、この問題点を解決するためにヒューリスティックスを導入した。

人間が翻訳を行う場合、それまでに学習した

全ての事例を覚えているわけではなく、最近に学習した事例を重点的に活用して行きながら最適な翻訳を行っていると考えられる。よって、学習部において使用する事例をごく最近に学習したもののみとする制限を加えた。このようなヒューリスティックスの導入は処理時間の短縮をもたらすと考えられる。

3. 性能評価実験

3.1 実験方法

最初に翻訳ルールを抽出するために中学1年生用教科書ガイド・ワンワールド¹³⁾に掲載されている英文とその日本語訳文1,010組を学習データに用い、辞書を全く持たない状態から翻訳と学習を1文ずつ繰り返し行った。その結果抽出された翻訳ルールを、逐次、初期辞書に登録した。

次いで、翻訳評価データとして中学1年生用教科書ガイド・ニューホライズン¹⁴⁾に掲載されている英文800文を用いて翻訳を行った。翻訳結果が出力された後には初期辞書作成時と同様に、翻訳結果に対し正しい日本語訳文を与え学習させた。

3.2 評価方法

生成された翻訳結果に対し、どのような評価方法を用いているのかについて述べる。有効な翻訳は、未登録語を持たない正翻訳と未登録語を持つ正翻訳を含む。ここで、未登録語は名詞句又は形容詞など未登録語を与えることで容易に正翻訳を導き出せるものである。無効な翻訳は、未登録語を持たない誤翻訳と未登録語を持つ誤翻訳、そして、翻訳が全く行えなかった翻訳不能を含む。図10にそれぞれの具体例を示す。

3.3 実験結果

表1に遺伝的アルゴリズムを適用しなかった場合、表2に遺伝的アルゴリズムを適用した場合の実験結果を示す。

また、本実験における有効な翻訳率の推移を図11に示す。破線で表したものが遺伝的アルゴリズムを適用しなかった場合、実線で表したものが遺伝的アルゴリズムを適用した場合の有効な翻訳率である。

・有効な翻訳

①正翻訳

入力文 : He is my teammate.
 翻訳結果 : 彼は私のチーム仲間です。
 彼は僕のチーム仲間だ。

②未登録

入力文 : You play baseball.
 翻訳結果 : あなたは@0をします。
 @0は野球をします。

・無効な翻訳

①誤翻訳

入力文 : That is my book.
 翻訳結果 : あれは私の本ではない。

②未登録

入力文 : I don't like tea.
 翻訳結果 : 私は@0が好きです。

③翻訳不能

図 1 0 翻訳結果の評価方法

表 1 遺伝的アルゴリズムを適用しない手法

		翻訳率	合計
有効な翻訳	正翻訳	41.7%	54.8%
	未登録	13.1%	
無効な翻訳	誤翻訳	7.6%	45.2%
	未登録	26.8%	
	翻訳不能	10.8%	

表 2 遺伝的アルゴリズムを適用した手法

		翻訳率	合計
有効な翻訳	正翻訳	49.8%	65.3%
	未登録	15.5%	
無効な翻訳	誤翻訳	11.6%	34.7%
	未登録	16.5%	
	翻訳不能	6.6%	

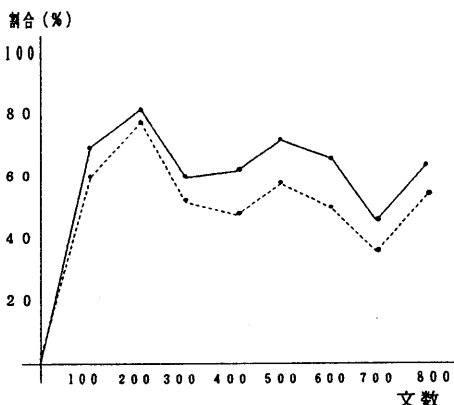


図 1 1 有効な翻訳率の推移

3. 4 考察

3. 4. 1 本手法の有効性

実験の結果、遺伝的アルゴリズムを適用することにより有効な翻訳率が10.5ポイント向上した。それに伴い、従来では良質な翻訳ルールの不足が原因で未登録語を持った誤翻訳や翻訳不能となっていたものが14.5ポイント減少した。これは、遺伝的アルゴリズムを適用することで多様かつ良質な翻訳ルールの抽出が可能となったためと考えられる。図12に遺伝的アルゴリズムを適用することで可能となった翻訳の具体例を示す。

(1) 入力文

We are playing tennis.

(2) 既存の翻訳例

(Akira and Yumi are playing tennis.
 ; 明/と/由美/は/テニス/を/しているところです.)
 (They are on the stage.
 ; 彼ら/は/ステージ/の/上/に/います.)

(3) 交叉の実行

Akira and Yumi are playing tennis.
 They are on the stage.
 Akira and Yumi are on the stage.
 They are playing tennis.
 明/と/由美/は/テニス/を/しているところです。
 彼ら/は/ステージ/の/上/に/います。
 明/と/由美/は/ステージ/の/上/に/います。
 彼ら/は/テニス/を/しているところです。

(4) 交叉を行うことで生成された翻訳例

(Akira and Yumi are on the stage.
 ; 明/と/由美/は/ステージ/の/上/に/います.)
 (They are playing tennis.
 ; 彼ら/は/テニス/を/しているところです.)

(5) 既存の翻訳例と生成された翻訳例から抽出された翻訳ルール

(@0 are playing tennis.
 ; @0/は/テニス/を/しているところです.)

(6) 翻訳結果の生成

既存の翻訳ルール (We; 私達) を代入
 (@0 are playing tennis.)
 ; @0/は/テニス/を/しているところです.)
 翻訳結果 : 私達はテニスをしているところです。

図 1 2 遺伝的アルゴリズムの適用による翻訳

良質な翻訳ルールの増加を明確にするために、翻訳に使用された翻訳ルールについての調査を行った。表3に、その結果である有効な翻訳と

無効な翻訳における正翻訳ルールと誤翻訳ルールの使用率を示す。

表3 使用翻訳ルールの内訳

		割合
有効な翻訳	正翻訳ルール	95.8%
	誤翻訳ルール	4.2%
無効な翻訳	正翻訳ルール	79.5%
	誤翻訳ルール	20.5%

調査結果より、有効な翻訳の約96%が正翻訳ルールを使用していることから、遺伝的アルゴリズムを適用することで多くの良質な翻訳ルールの抽出が可能になったといえる。

また、図11より、有効な翻訳率が全般的に向上していることがわかる。これは、遺伝的アルゴリズムの適用が文章の文法構造に依存することなく、多様な文章に対して有効であることを示している。有効な翻訳率の上下の動きは、初めて与えられた名詞句又は形容詞以外の未登録語の数に比例していることから、学習量を反映しているといえる。

そして、ヒューリスティックスの導入により学習部における翻訳ルールの抽出処理が局所性を持ち、処理時間が約94%減少した。

未登録語については、多くの翻訳例を作り出すことで、一度出現した単語に対する早い段階での抽出が可能となった。これは、有効な翻訳において、未登録語を持つ正翻訳が2.4ポイントの増加であったのに対し、未登録語を持たない正翻訳が8.1ポイント増加していることに表れている。

更に、翻訳部に対し遺伝的アルゴリズムの基本操作を適用することで、効率良く翻訳結果を生成することが可能となった。図13にその具体例を示す。従来は、個々の文の翻訳ルールの変数部分へ単語の翻訳ルールを単に代入していたため、翻訳結果として「@0はアルバムです。」が得られるだけであった。しかし、遺伝的アルゴリズムの適用により、他の翻訳ルールを効率良く活用し、最適な翻訳結果「これはアルバムです。」の生成が可能となった。

また、フィードバック学習部における淘汰された翻訳ルールの精度についての調査を行った。表4にその結果を示す。

(1) 原文

This is an album.

(2) 初期集団の発生

{(This is @0.; これは/@0/です.),
(@0 is an @1.; @0は/@1/です.), ...}

(3) 交叉により生成された翻訳ルール

(This is an @1.; これは/@1/です.)

(4) 生物集団の評価

単語の翻訳ルール(album; アルバム)を代入
(This is an album.; これは/アルバム/です.)

図13 翻訳部における遺伝的アルゴリズムの有効性

表4 淘汰された翻訳ルールの精度

	割合 (誤翻訳ルール / 淘汰数)
変数なし	97.4% (2361 / 2425)
変数1つ	97.4% (1444 / 1483)
変数2つ	96.8% (638 / 659)
変数3つ	71.4% (20 / 28)
合計	97.1% (4463 / 4595)

この結果、淘汰された翻訳ルールに対しては、正確に評価されていることが明らかとなった。

3.4.2 問題点

問題点として誤った翻訳ルールの使用による誤翻訳の増加が挙げられる。誤翻訳は、遺伝的アルゴリズムを適用しない場合に比べ4ポイント増加した。これは、遺伝的アルゴリズムを適用することで誤った翻訳ルールの抽出が行われる場合が生じるためである。図14にその具体例を示す。

図14に示すような誤った翻訳例の生成は、英文の交叉において継承される文の性質と日本語訳文の交叉において継承される文の性質が対応していないために生じる。この例の場合、英文では否定文としての継承が行われているが、日本語訳文では肯定文としての継承が行われている。もう一方では、英文においては肯定文、日本語訳文においては否定文の性質が継承されている。このような問題を解決するためには、英文とその日本語訳文の対応関係における語の並びを考慮した交叉手法を取り入れることが必要である。

(1) 翻訳例

(She is not my sister.
; 彼女/は/私の/姉/ではありません.)
(You are my classmate.
; あなた/は/私の/級友/です.)

(2) 英文の交叉

She is not my sister.
You are my classmate.
She is not my classmate.
You are my sister.

(3) 日本語訳文の交叉

彼女/は/私の/姉/ではありません。
あなたは/私の/級友/です。
彼女/は/私の/級友/です。
あなたは/私の/姉/ではありません。

(4) 生成された誤った翻訳例

(She is not my classmate.
; 彼女/は/私の/級友/です.)
(You are my sister.
; あなた/は/私の/姉/ではありません.)

(5) 抽出された誤った翻訳ルール
文の翻訳ルール

(She is not my @0.; 彼女/は/私の/@0.)
(@0 my sister.; @0/は/私の/姉/ではありません.)
(You are my @0.; あなた/は/@0.)
単語の翻訳ルール
(sister; 姉/ではありません)
(She is not; 彼女)

図14 誤った翻訳例と翻訳ルールの生成

4. おわりに

本報告では、帰納的学習による機械翻訳手法へ遺伝的アルゴリズムを適用することの有効性について、大量のデータを用いて行った性能評価実験の結果に基づき述べた。遺伝的アルゴリズムの適用が、少量のデータからの多様な翻訳ルールの抽出と効率の良い最適な翻訳結果の生成を可能とし、学習能力を向上させるために有効であることが確認できた。その結果として、有効な翻訳率が10.5ポイント、特に未登録語を持たないものが8.1ポイント増加した。また、無効な翻訳の約47%がそれまでに与えられていない名詞句又は形容詞以外の単語の出現によるものであった。よって、学習を十分に行うことで、翻訳率を向上させることが可能である。そして、ヒューリスティックスの導入により処理時間が約94%減少した。今後は、更により多くの実用レベルの文章の翻訳を可能

にするための研究を進めて行く予定である。

参考文献

- 1) 長尾真：機械翻訳サミット, オーム社(1989).
- 2) 野村浩郷(編)：言語処理と機械翻訳, 講談社(1991).
- 3) 佐藤理史：MBT2：実例に基づく翻訳における複数翻訳例の組み合わせ利用, 人工知能学会誌, Vol.6, No.6, pp75-85(1991).
- 4) 野美山浩：事例の一般化による機械翻訳, 情報処理学会論文誌, Vol.34, No.5, pp905-912(1993).
- 5) 古瀬蔵, 隅田英一郎, 飯田仁：経験的知識を活用する変換主導型機械翻訳, 情報処理学会論文誌, Vol.35, No.3, pp414-425(1994).
- 6) 赤間清：帰納的学習システムLS/1による翻訳の学習, 人工知能学会誌, Vol.2, No.3, pp341-349(1987).
- 7) 荒木健治, 柄内香次：多段階共通パターン抽出法を用いた翻訳例からの帰納的学習による翻訳, 情報処理北海道シンポジウム'91, pp.47-49(1991).
- 8) 内山智正, 荒木健治, 宮永喜一, 柄内香次：帰納的学習による機械翻訳手法の評価実験, 情報処理学会研究報告, NL93-4, pp.23-30(1993).
- 9) 北野宏明：遺伝的アルゴリズム, 産業図書(1993).
- 10) 安居院猛, 長尾智晴：ジェネティックアルゴリズム, 昭晃堂(1993).
- 11) 越前谷博, 荒木健治, 桃内佳雄：帰納的学習による機械翻訳手法への遺伝的アルゴリズムの適用, 情報処理学会第49回全国大会講演論文集, 2K-1(1994).
- 12) 越前谷博, 荒木健治, 桃内佳雄：遺伝的アルゴリズムを用いた帰納的学習による機械翻訳手法, 平成6年度電気関係学会北海道支部連合大会講演論文集, No.162.
- 13) 教科書ガイド教育出版版ワンワールド1, 日本教材, 東京(1991).
- 14) 教科書ガイド東京書籍版ニューホライズン1, あすろ出版, 東京(1991).