

アセンブリ言語教育支援教材 Sim AI の設計と実装

小林晴紀† 和田幸一†

† 法政大学大学院

あらまし：本稿は法政大学応用情報工学科のアセンブリ言語教育を支援する CASL II シミュレータ「Sim AI」(CASL II Simulator for Applied Infomatics of Hosei University)の設計及び実装について述べる。提案シミュレータは指導者と学習者の双方を支援対象とする。提案シミュレータは指導者の講義解説や学習者の自学自習を支援する上で有効と考えられる計算機内部状態・プログラム動作の可視化機能や、プログラム記述負担を軽減する入力補助機能、OS の仕様に準じた主記憶における不定番地へのプログラムロード機能を有する。

1. はじめに

アセンブリ言語は機械語を人間が読みやすい短いニーモニックで表現した低水準言語である。一般的に、アセンブリ言語の教育はC言語やjava等の高水準言語と比較して難しいとされている。この問題は、アセンブリ言語が機械語に近い単純な命令語で構成されていることに起因する。複雑な命令系が備わっていないため、プログラム作成者はプログラム内で多くの定義をしなくてはならない。また、機械語が計算機内部でどのように処理されるかも把握している必要がある。これは、計算機アーキテクチャの仕組みの理解がなければ不可能である。このようにアセンブリ言語を教育する上では多くの障害がある。

一方で、近年IT分野における教育支援システムの構築が盛んに行われている。この流れの中、計算機アーキテクチャやアセンブリ言語の教材は多数あるにも関わらず、学習環境が充実しているとはいえない。

本研究ではアセンブリ言語教育を支援するためのシステムの開発をした。このシステムでは対象とするアセンブリ言語として CASL II,その仮想計算機として COMET II を採用する。CASL II は既存のコンピュータの本質の部分を抜き出して実装した仮想計算機 COMET II の機械語を記述するためのアセンブリ言語である。COMET II は仮想計算機であり実機と比較して、アーキテクチャが単純で分かりやすいという特徴がある。CASL II と COMET II は基本技術者試験にも採用されている。本研究ではアセンブリ言語教育を支援する CASL II シミュレータ「Sim AI」を設計,開発した。シミュレータは講義におけるワークフローの円滑化や学習者の自学自習の便宜を図ることを目標に開発を行う。提案シミュレータは視覚的理解を可能とする計算機内部状態とプログラム動作可視化やユーザの負担を軽減する入力補助機能、不定番地へのプログラムロード機能を実現している。

2 関連研究[1][2][3]

本稿における教育支援システムはアセンブリ言語と計算機アーキテクチャの教育において指導者と学習者のいずれをも支援するためのシステムとする。このシステムがサポートするものとして,学習者のアセンブリプログラミング・学習者同士の情報交換・学習者指導者間の質疑応答, 指導者の講義・問題生成・プログラム採点・プログラム評価が挙げられる。

関連研究として、教育用 MIPS プロセッサシミュレータシステム、計算機アーキテクチャ教育支援システム、初等アセンブラプログラミング評価支援システムがある。これらの支援システムの概要を以下に記す。

➤ 教育用 MIPS プロセッサシミュレータシステム[1]

会津大学が開発したプロセッサ内部の動作を可視化するシステム.複数の MIPS マイクロアーキテクチャに対応し, コンピュータ内部の動作や構造を視覚化できる. このシミュレータの課題として, データバスや制御部の定義を変更可能とすることが挙げられている.

➤ 計算機アーキテクチャ教育支援システム[2]

ノイマン型コンピュータ教材 VisuSim を用いた計算機アーキテクチャ教育支援環境. VisuSim は計算機内部の構造・動作の可視化やアセンブリ言語プログラミング支援などを支援する教材である. アプレットとしてもアプリケーションとしても起動可能という特徴を持ち, その特徴を利用したメール機能を組み込むことで学習者指導者間の質疑応答や学習者間の情報交換等の教育支援を円滑にしている.この教材を用いたシステムの課題として前述の基本機能を活かすための補助機能の開発や, LMS との統合が挙げられている.

➤ 初等アセンブラプログラミング評価支援システム[3]

CASL を教材とした授業におけるプログラム評価支援システム. 評価対象のプログラムが提示した問題の題意を満たしているかどうかの判定とプログラムに対するアドバイスの作成を行う. このシステムの課題として, 冗長命令検出やアドバイス文の精度向上等が挙げられている. 教育支援システムの構成としては1章で列挙した関連研究[1][2][3]を参考とする. 完成システムの概要図を次頁に示す.

3. 提案シミュレータの設計方針 [4]

3-1. 先行調査

シミュレータを新規に開発する上で必要な機能を調査する. はじめに, 実際の教育現場で使用されている CASLII シミュレータの運用法である. ここでは, 例として法政大学のアセンブリ言語講義を挙げ, 現状を調査する. もう一つは Eclipse や Visual Studio など他言語の統合開発環境である. アセンブリ言語教育と比較して, 高水準言語教育においてデファクトスタンダードとして広く利用されている統合開発環境は数多い. ここでは, アセンブリ言語教育においても有意性を示す統合開発環境の機能及び運用法について調査する. 以上2つの調査によりシミュレーション使用環境及び求められている機能を明らかにする. 最後に, シミュレーション使用環境に基づき既存 CASLII シミュレータについて調査・比較を行う. 以下に比較対象である既存の CASLII シミュレータの一覧表を示す.

表1 既存の CASLII シミュレータ一覧

1	CasiBuilder	10	CASL & COMET Simulator
2	WCASL-II	11	CCasl II
3	CASL2 Visible Inside	12	CASL2000 for Windows95,98/NT4.0
4	CASL2シミュレータ	13	EduCasl
5	ドリームキャスル	14	Hello CASLII(1ライセンス版)
6	中身が見えるCaslxxxx	15	IPA公式シミュレータ
7	CASL2 cmd	16	InfoCASL version2.0.10
8	CASL2する?	17	Web版キャスルIIシミュレータ
9	キャスルシミュレーター	18	CASL2シミュレータ

既存シミュレータと他言語における統合開発環境の機能・運用法を調査して得られたシミュレーション使用環境及び必要と考えられる機能を表2にまとめる。

表2 先行調査で得られたシミュレーション使用環境

運用法	自学自習, 演習, 講義解説
主な学習者の特長	プログラムの理解作成に苦勞を要する 他分野(計算機アーキテクチャ、C 言語)の知識を有する
指導者	プログラムの視覚的解説
必須機能	計算機内部状態を可視化しつつプログラムをシミュレーションする機能 プログラム入力補助機能

調査の結果、計算機内部状態やプログラム動作可視化機能が効果的なこと、学習者の負荷を軽減する入力補助機能の提供が効率的学習の観点から望ましいなどの結論を得る。

既存シミュレータの中には計算機アーキテクチャとアセンブリ言語の協調学習を目的とするものがあった。(W-CASL II)また、サンプルプログラムを取得・シミュレートするシミュレータもあった。(Hello CASL II)しかし、いずれも可視化シミュレート機能が対象とするアーキテクチャが不十分であり、プログラム入力補助機能を有したものはドリームキャッスルのみであった。特に主記憶の可視化については、格納されているものの説明が不十分で、命令なのか参照している番地なのか分かり辛かった。先行調査の結果、既存シミュレータによって条件を満たすことは難しいと判断する。以上が、新規に CASL II シミュレータを開発するに至った要因である。

3-2. 設計方針

(1) 可視化シミュレート機能

計算機の内部状態を可視化シミュレーションするにも様々な表現方法が考えられる。表現方法を工夫することで指導者の手間を省き、学習者の理解度を高めることが可能となる。例えば、COMET II・CASL II ではプログラムがロードされる主記憶の領域は不定としている。但し、プログラム中のラベルに対応するアドレス値は OS によって実アドレスに補正される。この一連の仕様は主記憶内部をそれに準じた形(図1)に変形することで表現が可能となる。このような仕様に準じた表現方法を採用する。

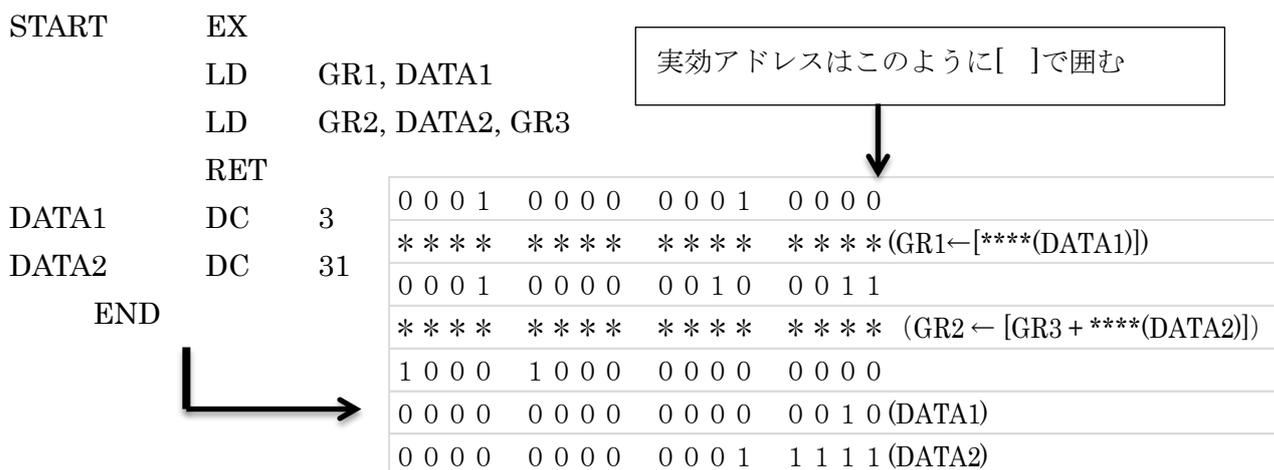


図1 主記憶内部の表現方法例

(2) プログラム入力補助機能

プログラム作成負担を軽減することで効率的な学習が期待できる。高級言語の統合開発環境では、シンタックスのハイライト明示や命令記述例の紹介を使用者の入力に即して動的に行うものが存在する。提案シミュレータに取り入れる主な機能例をまとめるとシンタックスハイライト、オートコンプリート、プリティプリンタ、スペルチェッカー等がある。これらの機能はプログラム作成負担を軽減する一方で、学習の妨げとなることも考えられる。自力でプログラムを記述する能力を身につけるために、これらの機能は切替できるようにする。

4. Sim AI の開発 [5]

4-1. シミュレータの概要

提案シミュレータは、アセンブリ言語CASL II を記述するためのエディタ・可視化機能を実現するためのプログラム動作表示画面、シミュレーション機能を実現するためのデバッガから構成される。尚、従来シミュレータに見習い、アセンブリ言語と関連性が高い計算機内部の動作や構造をJava Swingを利用して可視化シミュレーションを実現する。また、レジスタ内容の2進、10進、符号無し10進、16進、文字での提示も実現した。シミュレータは移植性を考慮してJavaを用いて実現した。

次に提案シミュレータのユーザインターフェース概要を図2に示す。図2は、制御画面であると同時にプログラム動作を可視化する。ユーザインターフェースは上部にファイル操作をはじめとするアクションコマンドが実行されるメニューバーやツールバーがあり、その下にエディタ画面(図2C)、主記憶表示画面(図2B)、レジスタ表示画面(図2A)、インフォメーション画面(図2D)がある。COMET II のシミュレート実行時には画面が制御部やALUなどCOMET II の内部情報を表示する画面に切り替わる。

以下、提案シミュレータの特長である計算機内部状態・プログラム動作の可視化機能やユーザ入力補助・主記憶における不定番地へのプログラムロードについて概要を述べる。

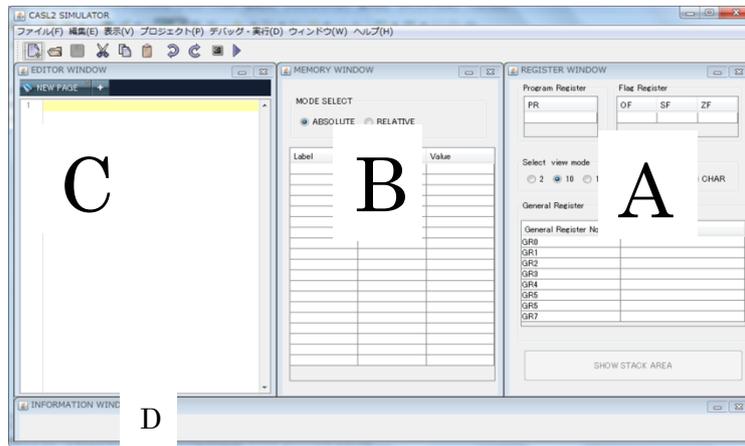


図2 提案シミュレータの GUI 画面

4-2. ユーザ入力補助機能

コピー、切取、貼付、検索、Undo、Redo 等のエディタとしての基本機能に加えて、プログラムの行番号の表示、オートコンプリート、命令セットの情報表示、スペルチェッカー、シンタックスハイライトを実装する。オートコンプリートに関しては、候補となる命令及び例題コードを表示し、命令を学習者に選択させる。この機能は学習者のコード記述負担を軽減するというメリットがある反面、命令セットの学習面では悪影響となる機能である。そのため、Ctrl + Space というショートカットキーを入力しない限りこの機能を無効状態となるよう設計した。シンタックスハイライトに関しては 命令系、リテラル、コメント、レジスタ、特殊文字によって、ハイライト色を場合わけして施すことによりプログラム構造を理解しやすいものとしている。以下にエディタの機能例を示す。

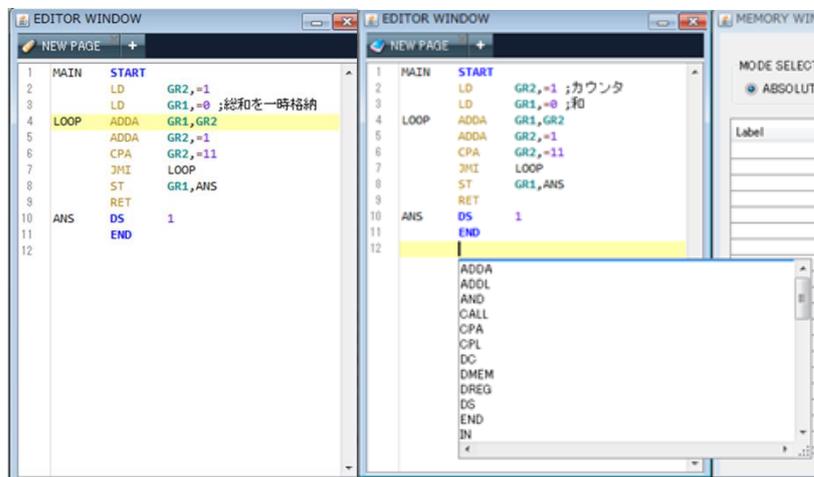


図3 エディタ画面(左はオートコンプリート無し、右はオートコンプリート有り)

4-3. 計算機内部状態・プログラム動作可視化機能

(1) レジスタ表示画面

汎用レジスタとスタックのデータは2進数や符号無10進数、符号付10進数、16進数の中からユーザが選択した形で提示する。さらに、学習者の理解を助けるため、1命令実行毎に次に参照されたレジスタを黄色に、更新されたレジスタ内容を赤色に変化させ、使用者の注意を喚起する。また、プログラム

内で文字列またはポインタとしてデータが設定された場合は文字列またはポインタとして提示する。汎用レジスタが指標レジスタとして使われた場合は(GRx + 番地)または(数 + 番地)と注釈する。これは従来の CASL II シミュレータにはない新たな機能である。

(2) 主記憶表示画面

サポート機能として、二語で構成される命令語(第二語がアセンブラ命令(DC DS)やマクロ命令(IN, OUT, RPUSH, RPOP), ラベル, リテラルに割り当てられた番地となる命令)に対しては、二語目の番地の内容を注釈する。スタック領域と定数領域, リテラル領域, プログラム領域は、ユーザがみて区別がつくように提示する。尚、番地の内容もレジスタ表示画面と同様の表示形式を選択できるようにする。

(3) シミュレーション機能

プログラム全体を実行した後の値を観察するだけでは、学習者がプログラムの振る舞いを理解する上で不十分な場合がある。その対策として以下の機能を実装した。尚、これらの機能は図 6 上部メニューバーの「デバッグ・実行(D)」から選択可能である。

▶ トレース実行

プログラムの実行履歴を別画面で表示する。実行履歴は上から実行順番に従ってソートされる。表示内容はPR, FR, GR, SPの内容・メモリ番地及び内容・命令である。ループ文やサブルーチンの箇所は、ループの繰り返し回数やサブルーチンの実行回数等を横に注釈して表示される。そうすることにより、ループ文やサブルーチンの構造や振る舞いの理解するのを手助けする。

▶ ステップ実行

プログラムを1ステップ毎に実行する。ユーザの設定によって繰り返し処理を構成する部分を1ステップごとに実行したり1行ずつ実行したりできるようにする。以下で述べるレジスタ・メモリ内容変更機能と組み合わせることにより、学習者-シミュレータ間のインタラクティブなやり取りを可能とする。また繰り返し処理の回数や初期値を変数と仮定して、レジスタの値等を関数として提示する。

▶ 手戻り実行

ステップ実行を行ったプログラムを命令文一行単位で手戻りする。

▶ ブレークポイントの設定/解除

ユーザが選んだ任意の行でプログラムを停止する。また、ユーザが指定した範囲内を実行できる。この機能をエラー表示があるときでも可能な限り行えるようにすることでエラーの原因究明の手助けをすることが可能である。

▶ 停止条件文の追加

レジスタ・変数・アドレスの値や命令の実行回数を用いて作った停止条件文をプログラムに対して設定する。条件式が真の時や偽の時、式の値が変化した時に実行を中断する。

▶ レジスタ・メモリ内容変更

ステップ実行・手戻り実行・ブレークポイント・停止条件文のようなデバッガによるプログラムの動作停止の際呼び出される。シミュレータ使用者は任意のレジスタ・メモリ内容の値を書き換えることが可能。何も入力しない場合、実行終了となるか、ステップ実行、手戻り実行モードに復帰するか選択可能。尚、ここで書き換えた値はプログラムの記述内容を書き換えるものではないので注意が必要である。

▶ 命令の実行回数表示

各行やユーザが指定した一定範囲の各命令実行回数を表示する。分岐命令やサブルーチンコールを含むプログラムの理解の手助けをする。

▶ クロスリファレンス

クロスリファレンステーブルを出力する。プログラムで定義したラベルやサブルーチンの定義された番地や参照している番地を表にまとめて出力する。整列順序としては定義した名前のアルファベット順や定義された番地の若い順から選択可能。

4-3. ユーザ入力補助機能

コピー、切取、貼付、検索、Undo、Redo 等のエディタとしての基本機能に加えて、プログラムの行番号の表示、オートコンプリート、命令セットの情報表示、スペルチェッカー、シンタックスハイライトを実装する。オートコンプリートに関しては、候補となる命令及び例題コードを表示し、命令を学習者に選択させる。この機能は学習者のコード記述負担を軽減するというメリットがある反面、命令セットの学習面では悪影響となる機能である。そのため、Ctrl + Space というショートカットキーを入力しない限りこの機能を無効状態となるよう設計した。シンタックスハイライトに関しては 命令系、リテラル、コメント、レジスタ、特殊文字によって、ハイライト色を場合わけして施すことによりプログラム構造を理解しやすいものとしている。以下にエディタの機能例を示す。

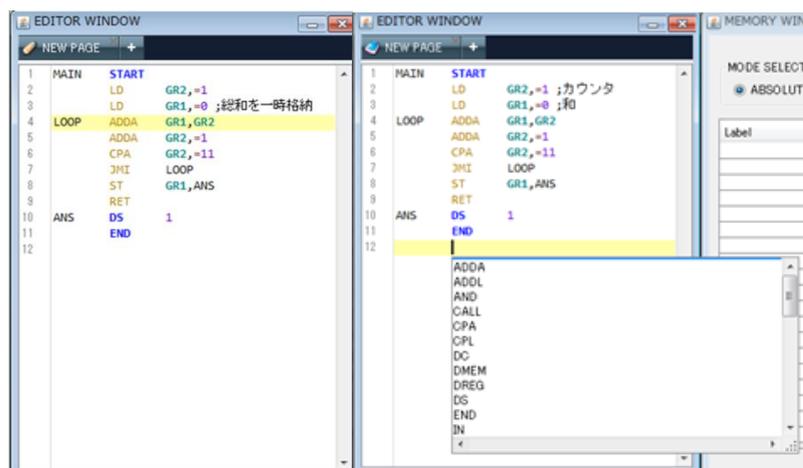


図3 エディタ画面(左はオートコンプリート無し、右はオートコンプリート有り)

4-4. 主記憶における不定番地へのプログラムロード機能

COMETII・CASLII ではプログラムがロードされる主記憶の領域は不定としている。但し、プログラム中のラベルに対応するアドレス値は OS によって実アドレスに補正される。このような番地を本稿では不定番地と呼ぶ。主記憶のプログラムロード及び GUI 画面ではこの要件を実現している。ロードされる主記憶の領域が不定の時、機械語のビットパターンに変化が生じる可能性がある箇所は、オペランドであり、命令コードは変化しない。また、オペランドの中でもビットパターンは変化しない箇所は 2 つある (I. レジスタ部(第一, 第二オペランド), II. 実効アドレスの絶対番地指定箇所)。よって, I, II とそれ以外のオペランドを分けて提示する。はじめに, 初期画面として番地の中身を提示する。左部の番号は主記憶にロードされる順番を表している。提示する際は, その内容を I II のオペランド, I II 以外, 命令コードの 3 色に分けて提示する。オペランドにおいて, 不定となるビットパターンは **** と提示する。そして, **** には説明を加える。例(****[LABEL]) 絶対番地指定された箇所に対応するビットパターンは自明なのでそのまま提示する。(例: #1FFF 番地に 2 を格納 [1FFF]←2)

5. 今後の課題

未実装のシミュレーション機能と COMETII におけるプログラム動作を可視化する機能を実装する。そして 提案シミュレータを実際の教育現場で運用し評価を行う。また, 他の教育システムへの適用も考えられる。

参考文献

- [1]. 西牧悠二, 北道教司, 宮崎敏明, “内部動作を視覚化した教育用 MIPS プロセッサシミュレータシステムの開発” 電子情報通信学会論文誌 Vol. J96 - D No.10 (2013)
- [2]. 今井慈郎, 金子敬一, 中川正樹, “計算機アーキテクチャ教育支援システムの開発と強調学習への適用” 電子情報通信学会論文誌 D Vol. J91- D No.2 pp.188-199(2008)
- [3]. 渡辺博芳, 荒井正之, 武井恵雄 “事例に基づく初等アセンブラプログラミング評価支援システム” 情報処理学会論文誌 Vol.42 No.1(2001)
- [4]. 小林, 上村, 和田 アセンブリ言語教育のための CASLII シミュレータ調査と比較, 第 9 回情報科学ワークショップ(WTCS2013)予稿集, pp.31-34, (2013 - 09) .
- [5]. 小林, 林, 和田 アセンブリ教育支援システムにおける学習用 CASLII シミュレータの提案 - CASLII & COMETII シミュレータ仕様書, 法政大学理工学部応用情報工学科計算機科学研究室 テクニカルレポート TR14-6, 1-16, (2014 - 06) .