

L I S P システムの開発と C A I への応用

最首和雄(*), 小沼正樹(**), 八島一也(*), 横田俊幸(*)

山形大学工学部(*), 松村製作所(**)

Lispによる数式照合を中心としたCAIプログラムの開発のために、処理速度と機能の点から優れており、手軽に利用でき、かつ安価なLispシステムをマイコン上に開発した。その上に数式照合機能を有するCAIプログラムを開発し、実験を行なっており、その概要を報告する。外部仕様はUtilispのサブセットとし、文法的にその仕様に従ったものを開発した。エディタも同等な機能を付した。CAI用を目的とするので、日本語入力が可能で、グラフ表示機能がある。複数の予想回答と学習者の回答を照合する数式照合法について検討した結果を述べる。その応用として、数式照合機能を利用したプロセス制御用と数式処理による確率統計用のCAIプログラムを開発している。その全体の構成、特徴について述べる。

Implementation of LISP System and its Application to CAI

Kazuo SAISHU(*), Masaki KONUMA(**), Kazuya YASINA(*), Iosiyuki YOKOTA(*)

Faculty of Engineering, Yamagata Univ. (*), Matumura Ltd. (**)

A Lisp system is implemented in micro-computer for the application to CAI. The Lisp is a subset of Utilisp in external specification. It can use Japanese (for symbols and strings) and graphic routines. We develop a program of pattern matching between one and the plural numerical formulas. As the applications, CAI programs of process control and probability are implemented in this system. The former uses pattern matching between an answer of students and prospective answers which include correct and incorrect ones. The latter uses the expansion of numerical formulas. Many students are impressed the computer based education favorably in the experimence for 30 students.

1 はじめに

Lispによる数式照合を中心としたCAIプログラムの開発のために、処理速度と機能の点から優れており、手軽に利用でき、かつ安価なLispシステムが必要であった。このためLisp処理系をマイクロコンピュータ上に開発した。その上に数式照合機能を有するCAIプログラムを開発し、実験を行なっている。今日までの使用実績から、このシステムが実用的であり、所期の目的を達成したと判断した。ここではその概要を報告する。

Lispインタプリタの外部仕様はUtilispのサブセットとし、文法的には可能な限りその仕様に従ったものを開発した。またCAI用なので、日本語入力が可能なものとした。グラフィック・ルーチンは市販のソフトウェアを用いた。デバッグ機能とエディタはUtilispと同等な機能を付した。また他のエディット方法としてLispからターミナルのOSに戻って、ファイルを修正する手法も利用している。このようにマイコンのLispとして使いやすい機能を具備し、かつCAIに必要な機能を備えたシステムを開発した。

CAIプログラムとしては数式照合機能を利用したプロセス制御用と数式処理による確率統計用とを開発している。ここではそれについても述べる。コンピュータの教育への利用としてCAI、CBEなどの用語があるが、ここではCAIをコンピュータによる学習支援のみならず、コンピュータを利用した一般の教育CBE(computer based education)の意味も含めて用いている。

2. Lispインタプリタの概要

このLispシステムの特徴としては、外部仕様はUtilisp⁽²⁾⁽³⁾のサブセットとし、文法的には可能な限りそのマニュアルに従った。ただし入出力に関する機能はCP/M-68Kに付属のC言語の実行時ライブラリを利用したため互換性がない。またコンパイラはインプリメントしていない。CPUはMC68000で、OSはCP/M-68K⁽¹⁾とした。

処理の高速化のためUtilispにみられる種々の柔軟な機能は完全には実現できなかったが、デバッグ関係の機能と構造エディタは同じに動作をするようにした。また高速化のためシステムの大部分をアセンブラにより記述し、実行速度に影響しない入出力などの部分をC言語で記述した。現在ターミナルとしてはPC9801F/Mを用いており、そのOSはCP/M-86であり、エディタ等でそのOSのソフトウェアを利用している。

2.1 内部データ構造

2.1.1 データ型

本システムにインプリメントされているデータ型は以下のとおりである。

CONS、整数、浮動小数点数、ストリング、シンボル、ベクタ
リファレンス、ストリーム、コードピース

Lispオブジェクトの内部表現は1記憶単位を32ビットとした。データを目指すポインタはMC68000の全記憶空間16Mバイトを利用できるように24ビット長である。セル領域においてはガーベジコレクション時のマークとして1ビット、タグは7ビットとした。浮動小数点数は54ビットで表わされる。

2. 1. 2 メモリレイアウト

主記憶が512Kバイトの場合のメモリレイアウトを図1に示す。

シンボル表

シンボルはシンボル表領域の連続した16バイトに登録される。最初から登録されているシンボル(389個)とその印字名はデータ領域に存在する。束縛、関数、属性のポインタが各々4バイト、印字名のポインタ3バイト、関数の型1バイトからなる。

フルワード領域

文字列の入る領域を“フルワード領域”とし、連続な記憶領域として使用する。ここには文字列とベクタが入る。

スタック (3本のスタックを使用)

制御スタック：サブルーチンの戻り番地、通常の関数の引数渡しに使用

束縛スタック：変数束縛および、Lispオブジェクトの一時退避用。

関数スタック：Lisp関数の履歴を保存する。

2. 2 評価過程

Lispのフォームの評価過程はUtilispと同一としてある。

本システムでは関数を20種類に分類している。EXPR、FEXPR、LEXPR、およびMACROがユーザ定義関数で、その他はシステム組み込みである。

2. 3 変数束縛とガーベジコレクション (GC)

このシステムでは、変数束縛は shallow binding である。ガーベジコレクションの対象となるのは、セル領域とフルワード領域である。セル領域については、普通のマークスイープ法を、フルワード領域については移動法(コピー型)を採用している。ガーベジコレクタは2つ用意されている。ひとつは、セル領域が足りなくなった時に起動されるもので、これはフルワードについてはなにも行なわない。もうひとつは、フルワード領域が足りなくなった時、および関数GCが呼ばれた時に起動されるもので、セル領域とフルワード領域の両方のガーベジを回収する。

2. 4 性能評価

本システムと同じく、CP/M-68K上で動いている“Lisp 68K”(4)(5)と同じベンチマークプログラムを実行した。結果は表1のとおりである。このように本システムは他のシステムと比較しても遜色がないことが確かめられた。

テキスト領域	約43KB
データ領域	
ワーク領域	
obvector(2K要素)	8KB
シンボル表 (512要素)	8KB
関数スタック	2KB
束縛スタック	8KB
制御スタック	約8KB
フルワード領域	64KB
セル領域	256KB (32K cell)

図 1. Memory Layout

高速化のために、(1)関数の型の細分、(2)シンボルに関数の型を表すタグを付し、そのタグを高速処理出来る値とした、(3)再帰呼出しで定義されてる関数を可能なループにした、などの工夫を行った。Utilispとの比較は付録に記す。

2.5 具備している機能

このLispシステムには構造エディタが組み込んである。このほか、端末装置のディスク上のファイルを扱う機能などがLisp自身により記述できる。またLispから直接CP/M-86を呼べる。

また本システムはCAIシステムを構築することを目的

としているので日本語を扱えるように構成されている。また市販のグラフィクルーチンを利用して図形表示を行っている。これまでの実験からCAIシステムの開発およびCAIによる学習にはこの程度の機能で十分対応できるといえた。

	Lisp*	Lisp68K(4)	Lisp68K(5)
(nqueen 6)	1.6	3.0	
(nqueen 8)	25.5	52.6	39.586
(tarai 8 4 0)	6.4	11.6	8.623
(tarai 10 5 0)	167.6		234.778

表1. プログラム実行時間 (単位:秒)

Lisp*	本システム
Lisp68K(4)	文献(4)のシステム
Lisp68K(5)	文献(5)のシステム

3. プロセス制御用と確率統計用CAIの概要

3.1 数式照合について

数式を次のような分類方法で扱った。

(1)等式、等号のない式 (その他の関係演算子は含まないとする)

(2)同値性について

単純な同値集合: 交換則、配分則、結合則、加減乗除による変形により同値関係にある式の集合

比による同値類: 同値集合 F_i, F_j の比が F_i, F_j に独立に定まる同値集合 F_j の集合 $\{F_j | \text{同値集合 } F_i, F_j \text{ の比が } F_i, F_j \text{ に独立に定まる}\}$ なる同値類を F_i の比による同値類と呼ぶ。

式 f_i が加減乗除による変形でより単純にならなければ、それを単純な式とよぶ。

(3)同値集合の2要素(式) f_i と f_j の順序関係

交換則と加減乗除による変形で式 f_i から式 f_j が得られる場合、 $f_i = f_j$ と表す。交換則、配分則、加減乗除による変形で式 f_i から式 f_j が得られる場合、 $f_i \geq f_j$ と表し、 f_i は f_j より上位の式と呼ぶ。この定義に従うと単純な同値集合は半順序集合といえる。

予想回答の表現方法と照合

(1)予想回答が単純な同値集合とならないとき、1個の予想回答式を用意する。

この式をある一意に定まるパターンに変換する方法があれば、数式処理の手法でそのパターンに変換して、照合する。

(2)予想回答が単純な同値集合なら、複数個の予想回答を用意する。各式 f_i は単純な式とし、その同値集合 $\{f_j | f_j \geq f_i\}$ の比による同値類を代表する。この予想回答に同値な式 f_i, f_j が含まれ、 $f_i \geq f_j$ の関係があれば、 f_i はそれより上位の式の集合の同値類を代表し、 f_j はその他を代表する。 f_i と f_j に順位関係がな

いときは $fk \geq fi$ 、 $fk \geq fj$ なる式 fk が回答されたとき、照合では fi と fj の何れかと一致すると判断すればよいこととする。

類似性について（予想回答との距離）

柔軟なCAIシステムとするため、学習者の回答と予想回答の簡単な距離も利用している。これについてはプロセス制御用CAIの照合方法についての(6)に簡単に述べた。柔軟なCAIシステムの構築には重要なことなので今後さらに類似性判定機能の改良をしたい。

3.2 数式照合機能

プロセス制御用CAI

予想回答:複数個(同値な式を含む)、単純な同値類を代表する式からなる対象とする式:等式 および 等号のない式

照合方法:比による単純な同値類(比は定数)の判定

学習者への設問は一定の順序で微分方程式をたてるのが中心である。

照合方法について

(1)予想回答の表現

予想回答からそれに含まれる全変数のリスト(変数リストと呼ぶ)を作成し、各変数に番号を付す。予想回答の式またはその括弧で括られた式の乗除と巾乗のみでなる部分を項とよぶ。項から係数を除いた部分を半項とよぶ。項でない式とは2項以上が加減算で連結した式を意味する。式は項と項でない式からなる。ある半項を予想回答に含まれるすべての変数の巾乗数のリストで表す。変数リストを(S D F G H)とすると、項 $D^{-2} / H * G^4$ は(0 -2 0 4 -1)となる。このようなリストを巾乗リストと呼ぶ。巾乗リストに番号を付す。巾乗リストの全リストを項リストとよぶ。それを(kou1 kou2 kou3)とする。式はそれをすべての項の係数のリストで表す。このリストを係数リストという。 $4 * kou5 - 6 * kou2$ の係数リストは(0 -6 0 0 4 0. . .)となる。

(2)項の照合I(照合可能な場合)

学習者の回答は項に分割され、各項は巾乗リストと照合される。回答の半項kouは次のようにしてその照合すべき項の総数を減らした。

照合する項の初期値を項リスト(kou1 kou2 kou3)とする。kouに変数Rが含まれれば、その変数を含まない項を照合する項から除去する。kouに含まれるすべての変数についてこの処理をおこい、照合の対象とする項を減らした。照合によりこの半項がk番目の項なら、係数リストのk番目の要素にこの半項の係数を加算する。

(3)式の中の括弧で括られた項でない式の照合

式の中の括弧で括られた項でない式は式の照合が行われ、予想回答にそれと定数倍で一致する式があれば、その式を表す変数の定数倍に置き換える。

(4)項の照合II(照合不能な場合)

(2)により照合し照合できない場合、この項に式を表す変数が含まれれば、それを展開して、生成される複数の項について照合を行う。そうでない場合この項を照合不能な項として登録する。

(5)式の照合

回答から項の照合により係数リストと照合不能な項のリストが得られる。この

係数リストを予想回答の係数リストと照合する。係数リストの対応する要素間の比のリストを（係数比リスト）を作り、同一比となる要素が最大数となる予想回答と最も類似するとして処理する。この比を照合比とよぶこととする。

(6)類似性について

回答と照合した予想回答との距離として、次式を用いた。

(回答の展開式の項数) - (係数比リストで照合比になる要素数)

照合結果は(照合比 距離)のリストで与える。

確率統計用CAI

予想回答:単純でない1個の同値集合を代表する式

対象とする式:等号のない式

照合方法:ある一意に定まるパターンに変換する手続きを開発し、それで照合

ある事象(複数個の根元事象からなる)の確率をそれに含まれる根元事象の積事象の確率の加減算で表現するパターンに変換する手続きにより照合する。

照合方法について

(1)回答の表現と取る属性

予想回答と学習者の入力是一定のソートされた標準形式に変換される。

(例) $P(a \cup b) * P(c) = P(a) * P(c) + P(b) * P(c) - P(a \cap b) * P(c)$

$\rightarrow (((c)(a).1)((c)(b).1)((a \cap b)(c).-1))$

事象には排反な事象の組、独立な事象の組を指定できる。

(2)(1)の形式に変換する手順

学習者の回答を接頭辞記法に変換する。

事象の演算($U \cap$ - 否定)を行う。(以下の操作を含む)

否定はド・モルガンの法則を適用する。生成された事象の簡略化を行う。

差をその他の演算子に置換する。

$P((a \cup b) \cup (c \cup d))$ を $P(a \cup (b \cup (c \cup d)))$ に変換する。

確率の演算($U -$)を行う。(以下の操作を含む)

$P(a \cup b) = P(a) + P(b) - P(a \cap b)$ 、 $P(\text{not } a) = 1 - P(a)$

確率間の加減算、乗算を標準形に変換

排反な事象に対して式の簡略化を行う。

独立な事象に対して式の簡略化を行う。

結果のソートを行う。

(3)この方法の利用できる範囲

ある事象の確率の展開、同値性の判定、事象の独立、排反の場合の確率

条件付確率、ある事象を表現する問題、ベーズの定理

照合における前処理について

不適切な学習者の回答の排除を行う。次のような例がある。

式として正しくない。使用できない変数名の使用。

等号の有無という条件を満たさない。

3.3 CAIとしてのその他の機能

入力、式展開の自己診断、ヒント、変数定義等の機能、学習者の応答データ収集について付した機能などを列挙する。

入力方法: 前回の回答の数式の一部を転写する機能

help機能: 数式回答入力以外の使用方法を表示

学習者が以前の設問に対して回答した式の表示
学習者が変数にある式を束縛させる機能（回答にその変数を利用）
設問に対するヒントを要求する機能
問題を解くのを中止する機能
問題に付随するグラフ表示機能、日本語の使用は可能
学習者の回答をファイルに記憶する機能
< 確率統計用に付した機能 >
問題のレベルを変更する機能
学習者が式を設定し、それと等価な式を入力し、その正誤を確かめる機能
複数の学習者が並行して利用する機能

数人の学生が1台の計算機を利用して、ある学生の入力中には、他の学生は問題を筆算で解いているという形態で使用できるようにシステムが構成されている。

学習の流れについて

(1) プロセス制御について

1 問題には複数の設問を設け、それを順次解くことで学習させる方法
プログラム学習法に従った学習指導法である。

(2) 確率統計について（ある事象の確率を展開する C A I）

レベルを設定し、各レベルの問題を指定題数解いたら終了するとした。
最低レベルの問題には要求があれば、正解に導く手順を表示する。
ある確率式の展開式を学習者自身で確認する手段を用意した。

3. 3 実験結果

プロセス制御用 C A I により約 30 名の学生が学習した。

用意した問題は 3 題、1 題は 5 ~ 8 個の質問からなる。予想回答は 10 ~ 30 個の式からなる。1 式は 2 ~ 3 項からなる。予想回答は簡単な微分方程式が多い。

学習者の回答入力から応答文表示の間に要する時間は 35 式の予想回答で予想回答に近い回答が入力された場合、1.6 秒要している。この学習では 1 問題についての回答時間は 30 分から 90 分である。このように回答するのにある程度時間を要するので、数式照合時間は学習に支障とならなかった。

学習者は入力した回答が誤りの場合、システムからヒントを得るが、それと同時に分からない場合は参考書をもみること認めて学習させた。このように演習問題のある程度時間を使って、個々の学生に解かせる場合の学生の進捗状況の管理、回答データ収集に使用することを主な目的としている。その点からは C A I というより、C B E と呼ぶのがよいであろう。

4 おわりに

この L i s p システムでは、大きい L i s p プログラムをマイクロコンピュータ上で高速で、手軽に処理できるようにする、という所期の目標をある程度実現できた。本システムは最近良く使用されているマイクロコンピュータをターミナルとして、M C 6 8 0 0 システムをホストとしており、I / O 関係の機能はターミナルに任せる構成なので、安価にシステムを構成できる。C A I 用として日本語処理とグラフィックルーチンの利用が可能となっている。このような特徴を

持ったLispシステムの開発をした。

数式照合のプログラムをこのシステム上に開発した。これにより学習者の回答と予想回答との照合を行うプロセス制御用CAIを開発し、数式処理を用いた照合方法で確率統計用のCAIを開発した。これにより実験した結果、学習者はこのような学習に対して好意的な反応を示した。この実験からLispのCAIへの利用が有効であり、大学等の高等教育機関の教育にも受け入れられる可能性があると考えている。

本システムのハードウェアはTALOS-68K(Wave corp.)を利用している。

数式照合法について京都大学 長尾真教授の御指導を心から感謝する。プログラム開発にあたってくれた日製ソフトウェア 玉手健久氏に感謝する。山形大学工学部原健一教授、赤塚孝雄教授の励ましを感謝する。このシステム開発には「大学教育等改善経費」を利用させて頂いた。

参考文献

- 1) "CP/M-68K Operating System Manual":Digital Research
- 2) Chikayama,T.: "Utilisp Manual", Math. Eng. Tech. Rep, 81-6.
Dept. of Meth. Eng, Univ. of Tokyo (1981)
- 3) 近山隆: "Utilisp システムの開発" 情報処理学会論文誌
vol.24, No.5(Sept.1983) pp.599-604
- 4) 小林、山本、青木: "CP/M-68K用STANDARD LISPの開発" 情報処理学会
記号処理研資料、29-9, 1984-10
- 5) 山本、戸島、村田: "パーソナル数式処理システム/Lisp68Kの開発と
REDUCEの移植" bit, 85-3, pp.340-358
- 6) 最首: "式の同一性の判定の一手法" 信技報 ET84-4,
Vol.84, No.115, 1984-8
- 7) 最首、小沼: "知的CAIのためのLispシステムの開発"
山形大紀要(工学) Vol.19, No.1, 1986-1

*** 付録 ***

Utilisp との主な相違点

* 大文字小文字を区別し、標準の関数名などは小文字とした。

* ストリームを扱う関数の仕様。

* 浮動小数点数の精度。Utilispは64ビット、本システムでは56ビット。

* 記憶領域の管理方法。

* 他のLispシステムとの互換性のため、関数型 FEXPRとLEXPR を用意した。

* Utilispにある以下の機能はない。

・コンパイラおよびコンパラに関連した機能 ・リードマクロおよび一文字オブジェクト
・バックオート機能 ・ガーベジコレクタを除く記憶領域管理機能
・外部プログラムの呼出しおよびTSSに関する機能 ・TIME, DATE-TIMEなどの時間を扱う関数
・ARCSIN, ARCCOS, ARCTAN