

一种无方向剖析算法及其在波形识别中的应用

熊范纶

(中国科学院合肥智能机械研究所)

摘 要

本文阐述的无方向剖析算法是将作为结构模型的问题归约表示的求解变换为状态空间搜索,从而实现既能自上而下,又能自下而上,无左右顺序的无方向剖析。本算法用于心电图波形的剖析,取得了比运用国际上专用识别心电图的 IBM 程序分析更满意的结果。

一、引 言

句法模式识别由于是从描述模式的结构入手采用语言的句法进行分析,因此它在波形的识别与分析方面具有独到的长处,已有着比较广泛的应用^[1]。

在句法识别中,一维波形可以用由一组代表各个波形片段的基元组成的链来表示。这条链可用由一组再写规则以及起始、终止与非终止符组成的文法来识别,也可由找到的一棵导出树来产生。这一过程常称为句法分析或剖析。传统的剖析过程在导出树上是按照由左向右的顺序进行的,并局限于单纯的自上而下或单纯的自下而上的方向进行。这些方法往往效率不甚理想,为此出现了不少新的剖析方法^[1,3]。本文阐述的一种剖析方法是运用搜索方法加以实现的。

Hall 曾证明了与或图和上下文无关文法之间存在着等价性。一个与或图的某个解是相应的上下文无关文法中某个句子的导出树。找到一个解同义于在相应文法中用其导出树去找到一个句子^[4]。因此上下文无关文法的剖析可以运用与或图的求解来模拟。Chang 与 Slagle 将问题空间一组子问题定义为一个状态,这些子问题的解隐含着先辈问题的解,从而可将问题归约表示的与或图搜索问题变换为状态空间的搜索问题^[5]。这样,与或图的最佳解图可用状态空间的有序搜索算法来寻找。Stockman 基于这种思想将上下文无关文法的剖析变换成为状态空间的搜索^[3]。具体方法是将分别为自上而下和自下而上的两种搜索算法及博弈树的极小极大算法合并,使得从图空间的任何部位(顶、底或中间)开始进行搜索,均能得到一致的最佳解图,从而构成了一种既能自上而下,又能自下而上,无左右顺序的所谓无方向的剖析。这种剖析器方便灵活,在存储空间和搜索时间上有着较高的效率。

笔者运用这种无方向剖析方法,对心电图波形进行剖析,取得了满意的结果.

二、无方向剖析算法概述

一个问题归约表示可以用一个五元组 $\langle P, r, t, u, B \rangle$ 来描述. 其中, P 是一个问题描述的集合; B 是初始问题的集合; r 是问题归约表示的操作符, 产生问题 i 的有序子节点集; t 是节点类型, 是与节点还是或节点; u 是节点解的类型, 共有三种: $u(i) = 'S'$ (Solved) 表示问题 i 已解; $u(i) = 'D'$ (Dead) 表示问题 i 无解; $u(i) = 'L'$ (Live) 表示问题 i 正待求解. 在问题归约表示中, 问题 i 符合下列情况之一则为有解:

(1) $u(i) = 'S'$;

(2) $u(i) = 'L'$, 且存在或子节点中至少有一个已有解, 或者与子节点中所有子节点均已解.

一个状态空间表示可以用一个四元组 $\langle S, I, F, q \rangle$ 来描述. 其中 S 是一个状态描述的集合; I 是初始状态的集合; F 是最终状态的集合; q 是状态空间表示的操作符, 产生状态 i 的后继状态. 当某初始状态与某最终状态之间存在一条路径, 则表示该状态空间有解.

将问题归约搜索变换为状态空间搜索是将状态空间中一个状态表示为问题归约搜索图中的一条路径来实现的. 这可避免更加复杂的树(或图)结构, 可以并行搜索, 且能利用常用的状态空间有序搜索方法来寻找问题归约空间的最佳解图.

一个问题结构可以用一个有序偶 (i, j) 来标记, 它表示 i 是待求解问题, 它是上一级某问题例如 h 的第 j 个后继问题, 即 $r(h, j) = i$ (图 1).

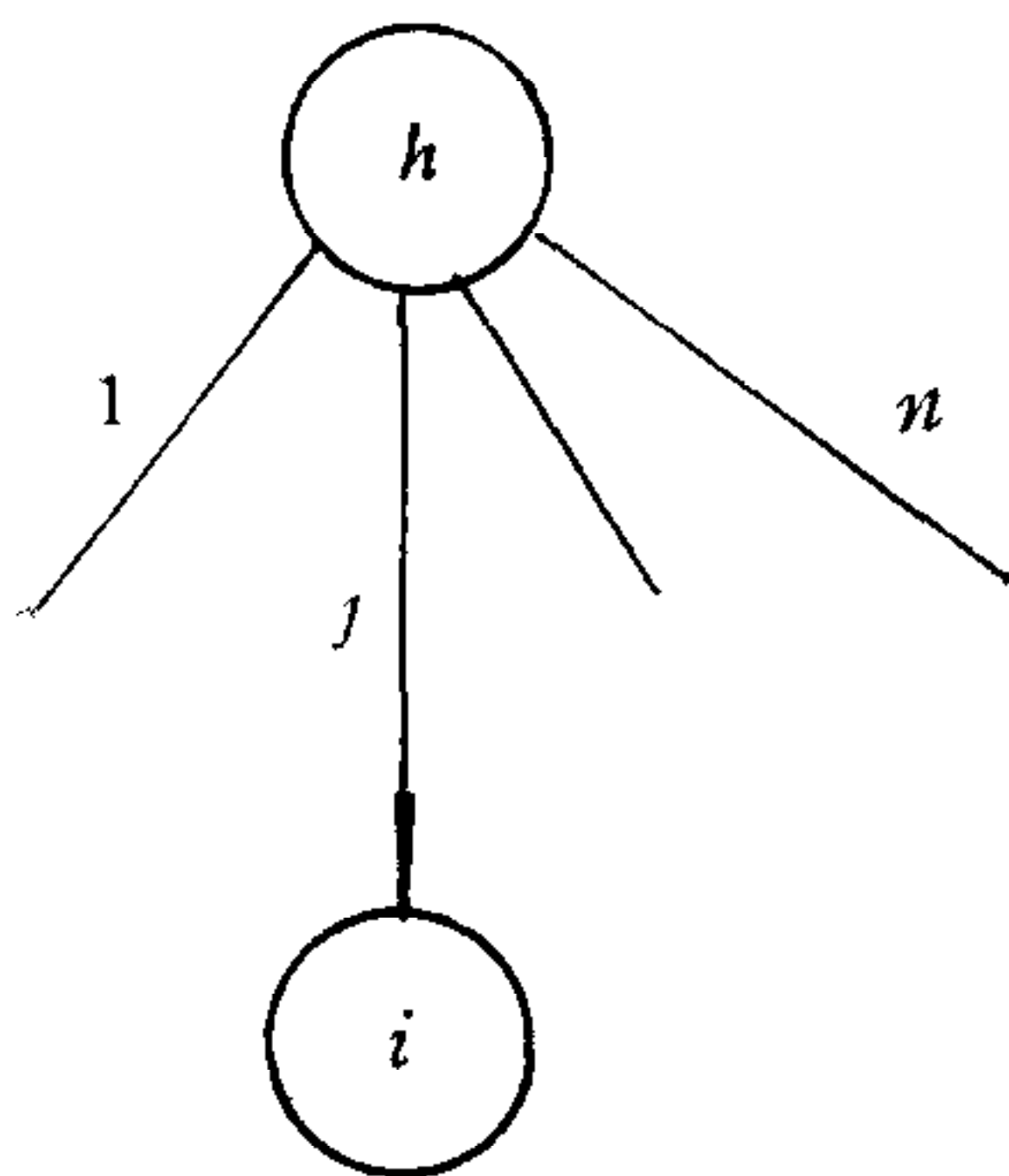


图 1

$[i, j]$ 标记一个问题的解结构, 表示 i 是一个已解问题.

一个状态可以用 $\# \alpha(i, j)$ 或 $\# \alpha[i, j]$ 形式来表式. α 代表一串有序偶, $\#$ 仅表示该状态编码的开始.

由此, 可将问题归约表示 $\langle P, r, t, u, B \rangle$ 变换为状态空间表示 $\langle S, I, F, q \rangle$: 初始状态集 $I = \{\#(i, 0) / i \in B\}$; 最终状态集 $F = \{\#[i, 0] / i \in B\}$; 操作符 q 由下列情况确定:

情况 1. 状态 S 为 $\# \alpha(i, j)$ 形式, 即问题 i 待求解.

a) 若 $u(i) = 'S'$, 则 $q(\# \alpha(i, j)) = \# \alpha[i, j]$, 即如问题 i 有解, 则状态用一个解结构来代替.

b) 若 $u(i) = 'D'$, 则 $q(\# \alpha(i, j)) = 0$, 即问题 i 不可解, 则状态空间中产生死的路径.

c) 若 $u(i) = 'L'$, 且 (1) 若子节点为与节点, 则 $q(\# \alpha(i, j)) = \# \alpha(i, j)(r(i, 1), 1)$, 去搜索第一个与子问题, 见图 2(a); (2) 若子节点为或节点, 则

$$q(\# \alpha(i, j)) = \{\# \alpha(i, j)(r(i, k), k)\}, k = 1, \dots, n.$$

即扩展所有或子问题, 见图 2(b).

情况 2. 状态 S 为 $\# \beta(k, l)[i, j]$ 形式, 即问题 i 已解.

a) 若子节点为或节点, 则 $q(\# \beta(k, l)[i, j]) = \# \beta[k, l]$, 即某或问题 i 有解, 其

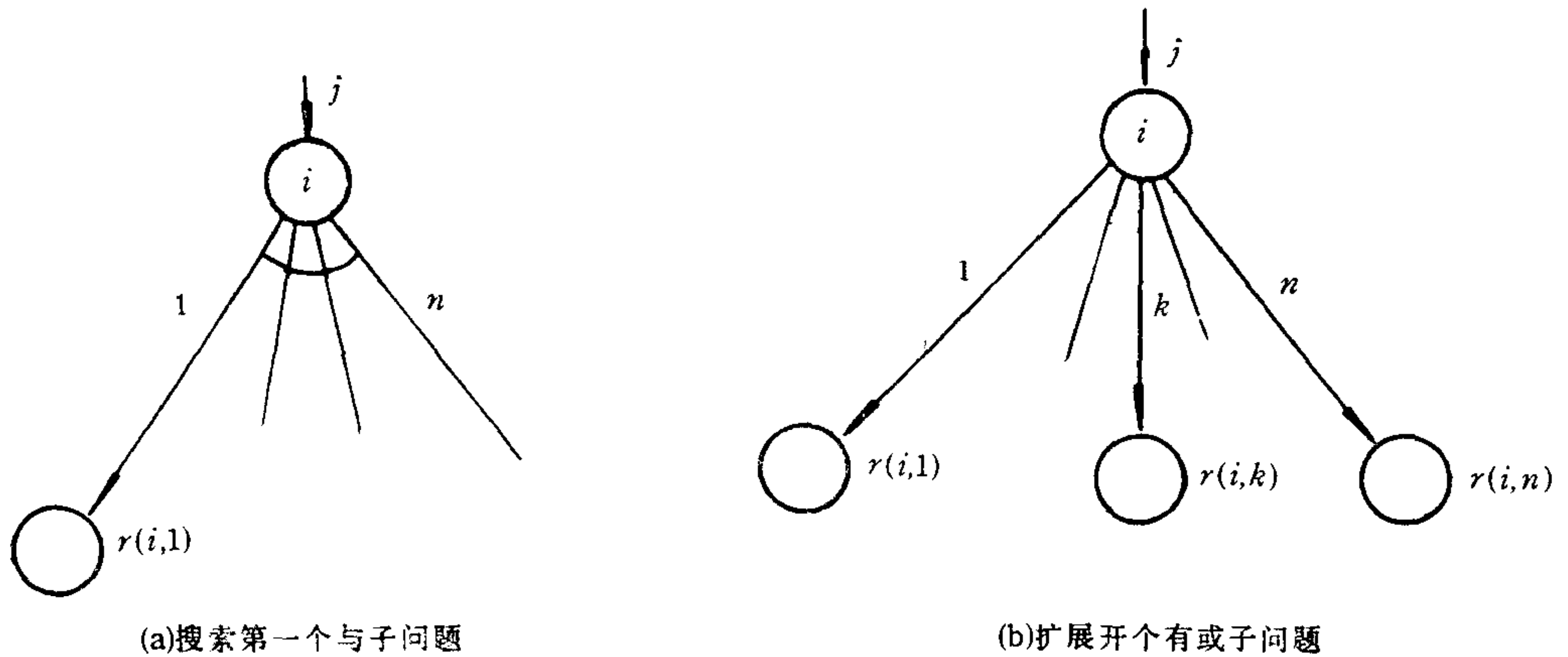


图 2

父问题 k 定有解。

b) 若子节点为与节点，且(1)若它不是最后一个与子问题，则去搜索父问题 k 的下一相邻与子问题；(2)若它已是最后一个与子问题，即 k 问题的所有与子问题均已有解，则 k 问题有解，即 $q(\# \beta(k, l)[i, j]) = \# \beta[k, l]$ 。

情况 1 与 2 为自上而下的问题求解，下述情况 3 则是自下而上的问题求解过程。

情况 3. 状态 S 为 $\# [i, 1]$ ，且 $i \notin B$ (若 $i \in B$ ，则整个问题求解完成了)。

a) 若此节点为或节点，则问题 i 的父问题有解。

b) 若此节点为与节点，则它的解结构前放置其父问题结构，然后按情况 2b 去扩展它相邻的与子问题。

将自上而下与自下而上搜索算法加以合并，引入博弈树极小极大估值方法，构成最佳优先有序搜索算法。这样，使得与或图中问题的求解可以从任何一个部位，不论是由起始节点开始由上而下，还是由终节点开始由下而上，甚至由中间部位节点开始进行剖析，或者由不同部位同时开始，均能保证得到相同的最佳解路^[3]。这就构成无方向的剖析，灵活而效率高。

三、在波形分析中的应用

笔者以上述算法为核心建立的一个实用波形剖析系统，对颈动脉脉冲波和心电图波形样本进行了研究与实验。有关颈动脉波形的实验结果，Stockman 已有过报道，已被认为是句法模式识别在形状分析中的成功应用之一^[1]。笔者也取得了同样结果。下面着重阐述心电图波形分析的工作过程与实验结果。

分析心电图是心血管疾病诊断的一个重要辅助手段。由于由人观察分析十分麻烦，常伴带主观因素，加之每个被检查者需测量十二个导联的波形，使得分析测量相当辛苦且耗时较多。因此，从六十年代起人们就开始研究利用电子计算机来自动分析心电图波形。许多学者为此作出了贡献。

本文阐述的剖析方法与其它句法模式识别方法相同，要求建立一个文法。图 3 是以与或图形式建立的心电图剖析文法。它是通过对训练样本的综合分析，经反复训练与测试实验获得的。它是一个上下文无关文法。图中节点的扩展相当于产生式规则。例如：

- $\langle \text{EKG} \rangle \rightarrow \langle \text{R} \rangle \quad \langle \text{EKG1} \rangle$
- $\langle \text{R} \rangle \rightarrow \text{UPSLOP} \quad \text{LN}$
- $\langle \text{EKG1} \rangle \rightarrow \langle \text{NXTR} \rangle \quad \langle \text{END} \rangle$
- $\langle \text{NXTR} \rangle \rightarrow \langle \text{R} \rangle \quad \langle \text{S-Q} \rangle$
- $\langle \text{END} \rangle \rightarrow \langle \text{EKG2} \rangle$
- $\langle \text{END} \rangle \rightarrow \text{LAMDAP}$
- $\langle \text{EKG2} \rangle \rightarrow \langle \text{EKG1} \rangle$
- $\langle \text{S-Q} \rangle \rightarrow \langle \text{S} \rangle \quad \text{HR2} \quad \langle \text{T} \rangle \quad \text{HR3} \quad \langle \text{P} \rangle \quad \text{HR1} \quad \langle \text{Q} \rangle$
- ⋮

箭头右方无括号者是基元，即文法图中的终节点。

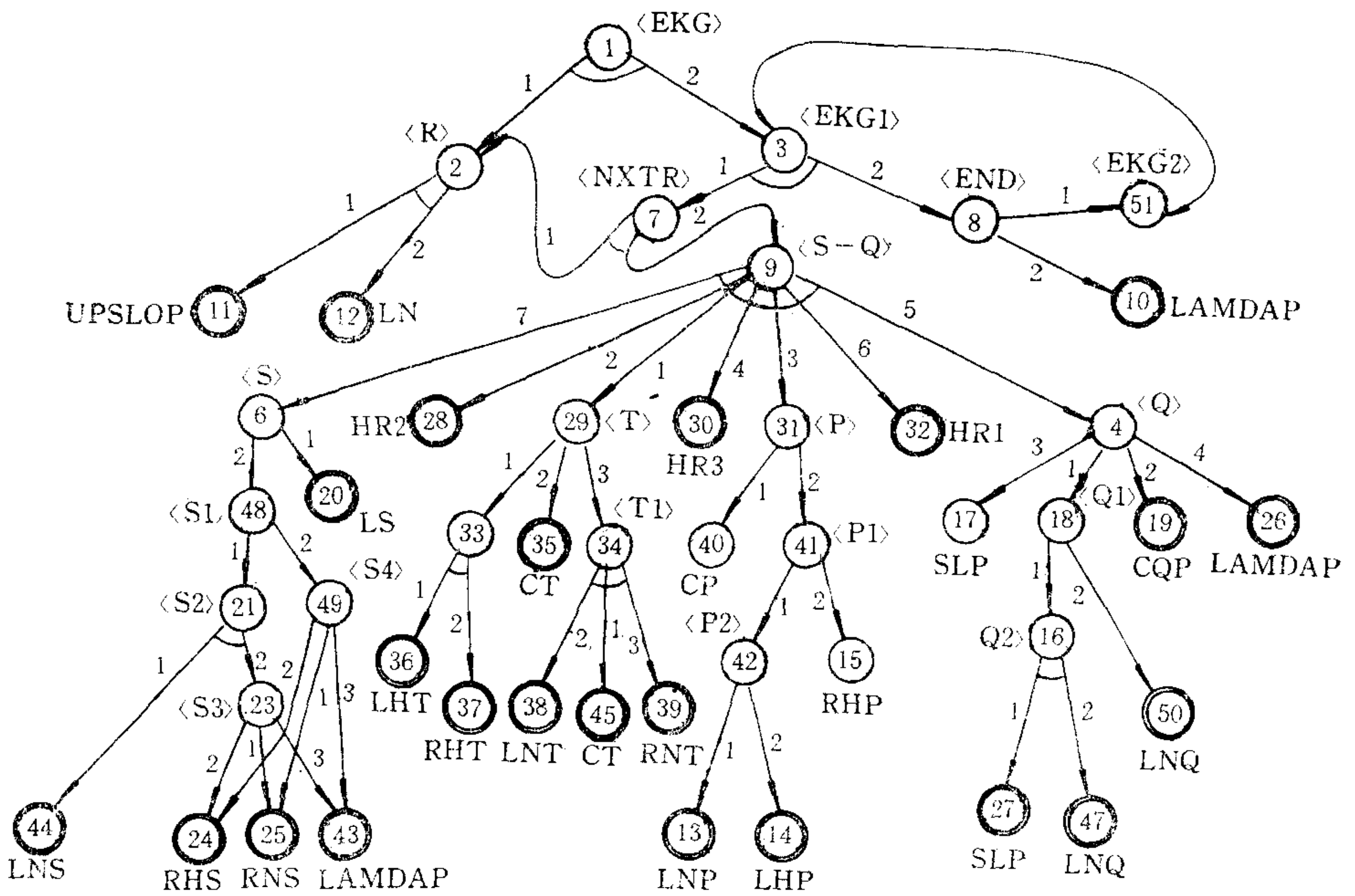


图 3

根据心电图波形的特点，基元采用五种最基本的形态：直线、帽型曲线、杯型曲线、左肩型及右肩型曲线。后四种均为二次曲线。这些基元采用具有约束的最小二乘拟合方法抽取得到。抽取基元时，为了在一数据区间 $[l, r]$ (称约束区间) 寻找到在某一子区间 $[a, b]$ (称匹配区间) 上存在某一特定形态的最佳拟合，常常要作多次扫描。本系统采用两种扫描方式：一是当区间 $[l, r]$ 不大，采用穷尽式扫描；二是当区间 $[l, r]$ 较大时，如采用穷尽式扫描工作量太大，则采用启发式搜索方法。

在剖析算法中，须加入这些区间的数据。约束区间出现在问题结构的状态中，即问题

表 1 心电图问题归约表达表

节点号	节点名	最小区间	最大区间	曲线拟合方式	节点类型	子节点
1	<EKG>	50	1272		与	2 3
2	<R>	50	180		与	11 12
3	<EKG1>	50	378		与	7 8
4	<Q>	0	20		与	17 18 19 26
6	<S>	0	20		与	48 20
7	<NXTR>	50	280		与	2 9
8	<END>	0	370		与	51 10
9	<S-Q>	50	280		与	6 28 29 30 31 32 4
10	LAMDAP	0	1	点	或	
11	UPSLOP	3	10	直 线	与	
12	LN	3	10	直 线	与	
13	LNP	5	10	直 线	或	
14	LHP	5	10	抛 物 线	或	
15	RHP	4	12	抛 物 线	与	
16	<Q2>	5	150		或	27 47
17	SLP	3	14	直 线	或	
18	<Q1>	5	150		或	16 50
19	CQP	4	10	抛 物 线	或	
20	LS	6	15	直 线	或	
21	<S2>	3	30		或	
23	<S3>	0	150		与	24 25 43
24	RHS	4	12	抛 物 线	或	
25	RNS	4	8	抛 物 线	或	
26	LAMDAP	0	1	点	或	
27	SLP	3	14	直 线	与	
28	HR2	10	55	直 线	与	
29	<T>	10	200		与	33 35 34
30	HR3	30	100	直 线	与	
31	<P>	5	150		与	40 41
32	HR1	5	22	直 线	与	
33	<T2>	10	200		或	36 37
34	<T1>	10	200		或	38 45 39
35	CT	15	28	抛 物 线	或	
36	LHT	10	25	抛 物 线	与	
37	RHT	8	20	抛 物 线	与	
38	LNT	5	22	直 线	与	
39	RNT	5	15	直 线	与	
40	CP	12	20	抛 物 线	或	
41	<P1>	5	150		或	42 15
42	<P2>	5	150		或	13 14
43	LAMDAP	0	1	点	或	
44	LNS	3	5	直 线	或	
45	CT	12	25	抛 物 线	与	
47	LNQ	3	8	直 线	与	
48	<S1>	3	30		或	21 49
49	<S4>	0	30		或	24 25 43
50	LNQ	3	8	直 线	或	
51	<EKG2>	60	350		或	3

空间中那些非终节点上;匹配区间出现在解结构的状态中,即问题空间的那些终节点上。

约束条件的建立是由训练与测试两个阶段来实现的。在训练阶段,将用于训练的所有样本按各个波形片段列出相应的基元名称和匹配空间,建立一个训练文件。然后训练子程序系统按训练文件中的次序调用相应样本,在没有约束条件下只根据所列区间进行拟合,得到有关参数,例如直线的斜率与截距;二次曲线为方程的各个系数,以及拟合质量、噪声容许值等。然后把所有训练样本中各基元的这些参数的统计值选为这些基元的约束条件。对基元的挑选和约束参数值的选取可以进行人工干预,然后由测试子程序系统对这些基元自动进行辨认。这是在一个扩大了约束区间中测定所选基元是否合宜。训练与测试阶段在实际过程中是反复进行的。语法中各节点的配置即产生式的构成,均经过训练与测试的反复试验后得到。

由此确定的约束条件放入问题归约表达表(表 1)。该表是根据语法结构和约束条件构成的。表中只列出部份约束条件,未列出终节点拟合后的有关参数统计值。真正输入计算机的问题归约表达表包括了整个语法结构和全部约束条件。

下面介绍本系统剖析心电图的过程。根据一维波形的特点,系统自上而下地对整个波形进行剖析,首先寻找左部最突出的波形——R 波的上升沿,这在心电图中最容易找到的基元特征,可由语法预先安排好,即起始节点扩展的第一个子节点是节点 2($\langle R \rangle$),节点 2 的第一个子节点是终节点 11(即 R 波的上升沿 UPSLOP 基元)。寻找到第一个 R 波上升沿后,扩展同节点 11 相与的终节点 12(即 LN 基元)可找到 R 波的下降沿。这就寻找到了第一个 R 波。此时调用一语义子系统。该子系统是根据心电图各子波幅度、宽度等测量参数的计算与测量方法编制的程序。这时语义子系统测得 R 波的幅值。然后依次扩展节点 3→节点 7→节点 2→节点 11→节点 12,得到第 2 周期的 R 波,由语义子系统计算出第一周期的间隔及基线漂移。接着扩展节点 9,对两个 R 波之间各波 T, P, Q, S 及它们之间的水平线 HR1, HR2, HR3 基元进行搜索与参数测量,获得 T、P、Q、S 各波波幅及波宽, QRS 复合波总宽度以及 P-R、Q-T 波间距等。此时节点 9、7 先后有解,去扩展节点 8→节点 51→节点 3,再去寻找下一 R 波,进行第二周期的剖析与测量,重复以上步骤,逐个周期剖析测量,直至整个波形处理完,扩展节点 8→节点 10,然后节点 8、3、1 先后有解。节点 1 有解标志着整个剖析完成。这时计算出整个心电图各参数的平均值等。

四、实验结果

实验是利用美国国家卫生院(NIH)提供的心电图典型样本集进行的。文献[2]介绍了实验的具体结果。图 4 是样本 012 的剖析结果。计算机除了输出和记录各个测量参数外,还输出剖析的最终状态结果,记录完整的求解路径及各子波形拟合的参数。剖析结果与利用 IBM EKG 心电图分析专用程序识别上述样本所得结果相比,除了取得相同结论外,本系统测量的波宽比较精确,并能识别 IBM 程序未能识别出的某些波形特征,例如幅值较低的 Q, S 波等。这表明本文的结构分析算法与所用的基元检测方法等是有效的。本系统对于不同的波形对象,在改写语义子系统,建立自己的语法后,便可用于对这些对象的识别。

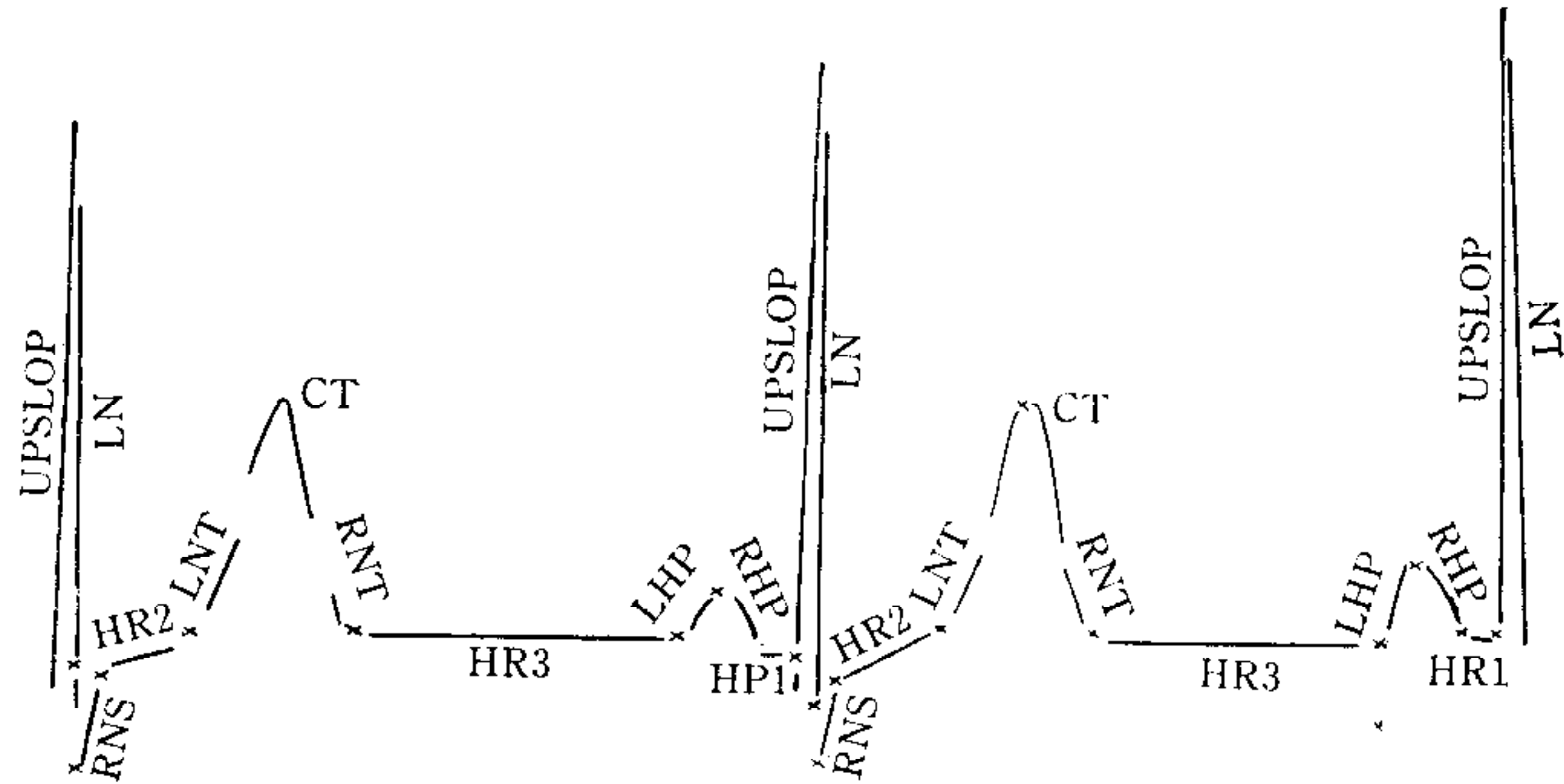


图 4

本研究与实验是在美国马里兰大学计算机科学系模式分析实验室 L. N. Kanal 教授指导下进行的, 得到 B. Lambird 的帮助; 美国国家卫生院计算机研究技术部 (NIH DCRT) 的 J. Bailey 博士与 Horton 提供了心电图样本与 IBM BKG 程序分析结果, 并在测量方法上给予帮助, 在此表示感谢。

参 考 文 献

- [1] 傅京孙著, 模式识别及其应用, 戴汝为、胡启恒翻译整理, 科学出版社, 1983年。
- [2] 熊范纶, 运用一个波形剖析系统识别心电图, 医药学信息处理学报, 1985年第1期, 32—38。
- [3] Stockman, G. C., A Problem-reduction Approach to the Linguistic Analysis of Waveforms, PhD Dissertation, University of Maryland, May 1977.
- [4] Hall, P. A. V., Equivalence between AND/OR Graphs and Context-free Grammars, *CACM*, 16(1973), 444—446.
- [5] Chang, C. L. and Slagle, J. R., An Admissible and Optimal Algorithm for Searching AND/OR Graphs, *Artificial Intelligence*, 2(1971), 117—128.
- [6] Xiong, F. L., Lambird, B. A. and Kanal, L. N., An Experiment in Recognition of Electrocardiograms Using a Structural Analysis Algorithm, Proceeding of 1983 IEEE International Conference on System, Man and Cybernetics, India, 382—387.

A NONDIRECTIONAL PARSING ALGORITHM AND ITS APPLICATION TO RECOGNITION OF WAVEFORM

XIONG FANLUN

(Hefei Institute of Intelligent Machines, Chinese Academy of Sciences)

ABSTRACT

A nondirectional parsing algorithm is that the solution of a problem reduction representation of a structural model is converted to state-space search, and can be realized in either top-down or bottom-up direction and do not need left-right processing. The research result has been used in analyzing the EKG waveforms. Parsing results of EKG waveform using this algorithm are at least as good as the corresponding results of IBM special-purpose program for EKG recognition.