

语义指向的形式模型

于江生¹

北京大学计算语言学研究所, 北京 100871

E-mail: yujs@icl.pku.edu.cn

摘要: Frege 的组合性原则说, 一个复合表达式的语义是其组成部分语义的函项, 这说明一个词或词组 (甚至一个句子) 的语义与其所处的语境的语义是相互制约的. 本文提供了一个形式模型 (λ -DRT), 描述语义的这种制约关系从而改变过去孤立地刻画一个对象的语义的作法, 其中的主要想法就是去发现不依赖于句法分析的语义分析, 并形式地定义语义指向和语义指向分析. 基本工具为特征结构理论和篇章表述理论, 其中, 特征结构之间的匹配和偏序关系决定了语义指向的分类.

关键词: 篇章表述理论 (DRT), 篇章表述结构 (DRS), 语义指向

Formal Model of Semantic Pointer

Yu Jiangsheng

Institute of Computational Linguistics

Peking University, Beijing 100871

E-mail: yujs@icl.pku.edu.cn

ABSTRACT: Frege's Principle of Compositionality says that the meaning of a compound expression is a function of the meanings of its parts, which illuminates that the meaning of a word or a phrase (even a sentence) and the meaning of its context restrict each other. We provided a formal model called λ -DRT for the formalization of such restriction to avoid the isolated semantic description of an object, where the main idea is to find a semantic analysis independent of syntactic one and to define semantic pointer and its analysis mathematically. The primary tools are Feature Structure Theory and Discourse Representation Theory, in which the matching and the partial ordering of feature structures determine the classification of semantic pointers.

Keyword: Discourse Representation Theory (DRT), Discourse Representation Structure (DRS), semantic pointer

1 引言

首先必须认识到, 自然语言的形式语义学与词汇功能语法 (*Lexical Functional Grammar*, LFG) 等基于约束的语法是不同的: 形式语义学 (或称逻辑语义学) 的研究对象是语句的真值条件语义, 而不是具体地给出语义的功能描述. 自 Chomsky 的转换生成语法诞生以后, 自然语言的形式化 (即, 数学和逻辑结构的刻画) 已经成为计算语言学的主流. 著名逻辑学家 R. Montague 曾说过, 自然语言的句法学、语义学和语用学就如同几何或者数论一样, 是数学的分支而不是心理学的分支. 目前看, Montague 的期望可能过于乐观, 自然语言的形式化还远没能达到他的要求而成为数学的一个分支. Montague 语义学创立之后, 逻辑方法大量地应用于自然语言, 但逻辑并不是包治百病的良药, 也存在着很多的困难. 在传统形式语义学中, 有两个解释上的误区:

1. 无定名词词组 (indefinite noun phrase) 一般解释为具有存在量词的意义

(a) 例句: 一个男人摔倒了. 他站了起来.

(b) 错误的逻辑表达式: $\exists x(\text{MAN}(x) \wedge \text{FELL_DOWN}(x)) \wedge \text{STOOD_UP}(y)$

¹ 本文得到了国家自然科学基金 (中文信息提取技术研究) 的支持, 项目号: 69483003

(c) 正确的逻辑表达式: $\exists x(\text{MAN}(x) \wedge \text{FELL_DOWN}(x) \wedge \text{STOOD_UP}(x))$

传统形式语义学不能判定“他”的所指即为“摔倒”动作的主语。事实上,若按 Geach 的建议把存在量词的辖域扩至整个篇章,就会出现矛盾的语义逻辑表达式。有效的解释是把代词作为 E-类代词,视为有定摹状词 (definite description)[17] (“他”指代“摔倒”的 x)。

2. 无定名词词组的逻辑表达式变量常被全称量词约束

(a) If Geach _{i} owns a donkey _{j} ,he _{i} likes it;
 $\forall x(\text{DONKEY}(x) \wedge \text{OWNS}(\text{Geach}, x) \rightarrow \text{LIKES}(\text{Geach}, x))$

(b) Every farmer who owns a donkey _{i} beats it;
 $\forall x\forall y(\text{FARMER}(x) \wedge \text{DONKEY}(y) \wedge \text{OWNS}(x, y) \rightarrow \text{BEATS}(x, y))$

出现这样的缺憾是由于传统形式语义学在静态的层面上描述自然语言单一语句的语义,其能力必然受描述层面的局限。把语义分析提升到动态的层面—包含了对语境的描述,将有助于基于上下文理解的语义分析。八十年代初至九十年代初,出现了一些动态地描述自然语言的形式语义理论:

- 篇章表述理论 (*Discourse Representation Theory*,**DRT**)[8]
- 文本更新语义学 (*File Change Semantics*,**FCS**)[5]²
- 境况语义学 (*Situation Semantics*,**SS**)[3]
- 动态谓词逻辑 (*Dynamic Predicate Logic*,**DPL**)[6]
- 动态约束理论 (*Dynamic Binding Theory*,**DBT**)[4]

在计算语义学中,自然语言句子的形式化描述(或机器理解)依赖于该句子的上下文(或语境)的形式化描述和一个静态的知识表示。语言哲学家 C.G.Hempe 说过,“假使认知意义是能够赋予某种东西的,也只能够赋予表述在良好结构的语言中的整体理论系统。在这类系统中认知意义的决定性标准仿佛就是存在一种可用观察对象给出的该系统的解释。这种解释,例如说,可以用一些条件句或双向条件句表述的,这些句子联系着该系统的非观察词项与给定语言中的观察词项;后一类词项,正如起联系作用的句子一样,可以属于也可以不属于该理论系统”。本文试图在 **DRT** 的基础上引入特征结构来刻画句子在一定语境中的语义,作者认为逻辑与功能描述在一个大框架下相互补充与制约将有利于语义分析 ([19])。第一节介绍 λ -**DRT**; 第二节讨论语义指向的形式化。

2 λ -**DRT** — 语境描述语言

本节分作三个部分介绍: (1) 篇章表述结构 (*Discourse Representation Structure*,**DRS**), (2) 篇章表述逻辑 (*Discourse Representation Logic*,**DRL**), (3) λ -**DRT**。

2.1 篇章表述结构

定义 2.1 有限集合 $\text{REF} = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 和 $\{\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m\}$ 分别为所指集(set of referents) 或角色集(set of roles) 和初始条件集(set of initial conditions)。篇章表述结构集合(**DRS**) 和条件集**COND** 由且仅由下列规则递归生成:

1. 若 R^n 为一个 n 元关系, 则 $R^n(x_1, x_2, \dots, x_n) \in \text{COND}$

² 由于原理相似, 有时将 **FCS** 与 **DRT** 统称为 **DRT**。

2. $\forall x, y \in \mathbf{REF}, x = y$ 为一个条件
3. $\forall x \in \mathbf{REF}, \forall c \in \mathbf{REF} \cup \mathbf{COND}, x = c$ (或 $c = x$) 为一个条件
4. $\forall x_1, x_2, \dots, x_k \in \mathbf{REF}, \forall \alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_l \in \mathbf{COND}$, 下面的形式表示称为一个篇章表述结构:

$$\text{DRS} = \begin{array}{|c|} \hline x_1, x_2, \dots, x_k \\ \hline \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \vdots \\ \alpha_l \\ \hline \end{array}$$

5. 若 $S \in \mathbf{DRS}$, 则 $\neg S \in \mathbf{COND}$
6. 若 $S_1, S_2 \in \mathbf{DRS}$, 则 $S_1 \vee S_2 \in \mathbf{COND}$, 其中 $S_1 \vee S_2 = S_2 \vee S_1$
7. 若 $S_1, S_2 \in \mathbf{DRS}$, 则 $S_1 \rightarrow S_2 \in \mathbf{COND}$

例 2.1 设篇章 $D = \{\text{一个男人摔倒了。他站了起来。}\}$, D 的 DRS 为:

$$\text{DRS}(D) = \begin{array}{|c|} \hline x, y \\ \hline \text{MAN}(x) \\ \text{FELL_DOWN}(x) \\ \text{STOOD_UP}(y) \\ y = x \\ \hline \end{array}$$

例 2.2 设篇章 $D = \{\text{若一个农民有头驴，他就会打它。}\}$, D 的 DRS 为:

$$\text{DRS}(D) = \begin{array}{|c|} \hline \begin{array}{|c|} \hline x, y \\ \hline \text{FARMER}(x) \\ \text{DONKEY}(y) \\ \text{OWNS}(x, y) \\ \hline \end{array} \rightarrow \begin{array}{|c|} \hline z, w \\ \hline \text{BEATS}(z, w) \\ z = x \\ y = w \\ \hline \end{array} \\ \hline \end{array}$$

定义 2.2 给定两个篇章表述结构 S_1 和 S_2 , S_1 结构隶属于 $S_2 (S_1 \triangleleft S_2)$ 当且仅当:

1. $\neg S_1 \in \mathbf{COND}(S_2)$, 其中 $\mathbf{COND}(S_2)$ 表示篇章表述结构 S_2 的所有条件的集合
2. $\exists S \in \mathbf{DRS}$ s.t. $S_1 \vee S \in \mathbf{COND}(S_2)$
3. $\exists S \in \mathbf{DRS}$ s.t. $S_1 \rightarrow S \in \mathbf{COND}(S_2)$
4. $\exists S \in \mathbf{DRS}$ s.t. $S_2 \rightarrow S_1 \in \mathbf{COND}(S)$
5. $\exists S \in \mathbf{DRS}$ s.t. $S_1 \triangleleft S$ 且 $S \triangleleft S_2$

2.2 篇章表述逻辑

定义 2.3 下面, 我们给出 DRS 到一阶谓词逻辑 (FOL) 的翻译函数 $t: \mathbf{DRS} \rightarrow \mathbf{FOL}$

1. $\forall x_1, x_2, \dots, x_n \in \mathbf{REF}, t(R^n(x_1, x_2, \dots, x_n)) = R^n(x_1, x_2, \dots, x_n)$
2. $\forall x, y \in \mathbf{REF}, t(x = y) = x = y$
3. $\forall x \in \mathbf{REF}, \forall c \in \mathbf{C}, t(x = c) = x = c$ 或 $t(c = x) = c = x$

$$4. t \left(\begin{array}{|c|} \hline \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \vdots \\ \alpha_l \\ \hline \end{array} \right) = t(\alpha_1) \wedge t(\alpha_2) \wedge \dots \wedge t(\alpha_l)$$

$$5. t \left(\begin{array}{c} \boxed{x_1, x_2, \dots, x_k} \\ \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \vdots \\ \alpha_l \end{array} \right) = \exists x_1 \exists x_2 \dots \exists x_n (t(\alpha_1) \wedge t(\alpha_2) \wedge \dots \wedge t(\alpha_n))$$

$$6. \forall S_1, S_2 \in \mathbf{DRS}, t(S_1 \vee S_2) = t(S_1) \vee t(S_2)$$

$$7. \forall S \in \mathbf{DRS}, t(\neg S) = \neg t(S)$$

$$8. t \left(\begin{array}{c} \boxed{} \\ \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \vdots \\ \alpha_l \end{array} \rightarrow S \right) = (t(\alpha_1) \wedge t(\alpha_2) \wedge \dots \wedge t(\alpha_n)) \rightarrow t(S)$$

$$9. t \left(\begin{array}{c} \boxed{x_1, x_2, \dots, x_k} \\ \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \vdots \\ \alpha_l \end{array} \rightarrow S \right) = \forall x_1 \forall x_2 \dots \forall x_n (t(\alpha_1) \wedge t(\alpha_2) \wedge \dots \wedge t(\alpha_n) \rightarrow t(S))$$

例 2.3 利用定义 1.3 中的第 9 条, 例 1.2 的 DRS 翻译为 **FOL** 的表达式为:

$$t \left(\begin{array}{c} \boxed{\begin{array}{c} x, y \\ \text{FARMER}(x) \\ \text{DONKEY}(y) \\ \text{OWNS}(x, y) \end{array}} \rightarrow \boxed{\begin{array}{c} x, w \\ \text{BEATS}(x, w) \\ x = x \\ y = w \end{array}} \right) = \forall x \forall y (\text{FARMER}(x) \wedge \text{DONKEY}(y) \wedge \text{OWNS}(x, y) \rightarrow \text{BEATS}(x, y))$$

2.3 λ -DRT

在 DRS 中, 条件是从语境中来的。自然语言语义的具体分析过程包括了对可能世界的选取, 不同的可能世界将诱导不同的语言信息模型 ([19])。当然, 在具体的语料中情况可以很复杂, 例如一篇童话的语料可能包含对科学事实的陈述, 所以可能世界的切换需要有动态的条件来实现——这个问题非常复杂, 不属于本文讨论的范围。在本文中, 作者试图从功能描述 (即, 特征结构 [15]) 出发, 解决 **DRT** 中的所指问题: 利用特征结构之间的偏序关系 (i.e., “信息包含于” — \sqsubseteq), 对 DRS 中出现的角色作判断, 从而得出缺省的言语成分之间的关系。如果用 λ 标记所缺的信息, 则我们可以赋予给定的包含量化名词词组 (NP) 的语句一个组合语义。

定义 2.4 两个 DRS 的合并运算定义为:

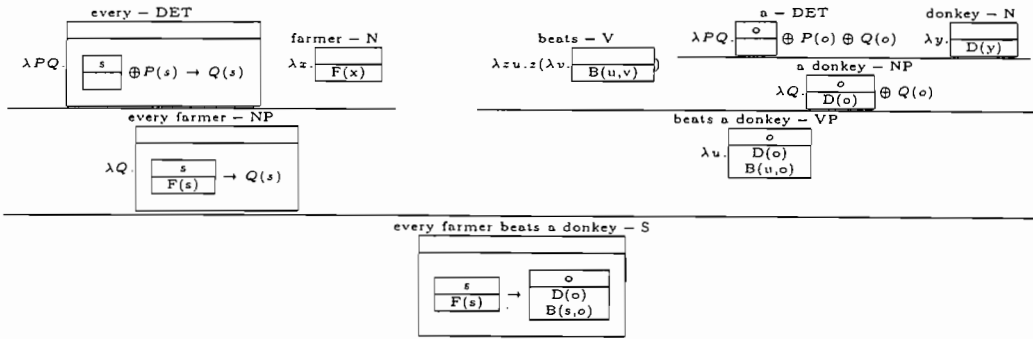
$$\begin{array}{c} \boxed{x_1, x_2, \dots, x_k} \\ \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \vdots \\ \alpha_l \end{array} \oplus \begin{array}{c} \boxed{y_1, y_2, \dots, y_m} \\ \beta_1 \\ \beta_2 \\ \vdots \\ \beta_n \end{array} = \begin{array}{c} \boxed{x_1, x_2, \dots, x_k} \\ y_1, y_2, \dots, y_m \\ \alpha_1 \\ \vdots \\ \alpha_l \\ \beta_1 \\ \vdots \\ \beta_n \end{array}$$

例 2.4 下面是 λ -DRS 的例子:

$$1. \text{famer} = \lambda x. \boxed{\text{FARMER}(x)}, a = \lambda PQ. \boxed{x} \oplus P(x) \oplus Q(x)$$

$$2. \text{every} = \lambda PQ. \boxed{\boxed{x} \oplus P(x) \rightarrow Q(x)}, \text{beat} = \lambda zx. z(\lambda y. \boxed{\text{BEATS}(x, y)})$$

例 2.5 分析语句 every farmer beats a donkey :

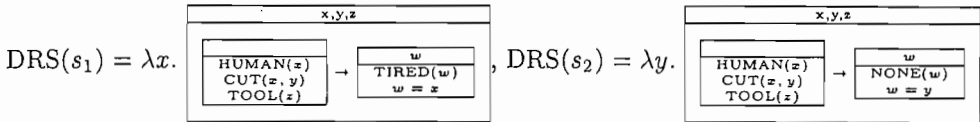


上面的例子中，句法分析树是先验的，与 LFG 类似，整个语句的语义描述依附于句法描述。Chomsky 将句法的地位提到一个相当的高度，原因是句法分析树从结构上看是严格的、清晰的。事实是，语义与句法的界限一直是语言学家讨论的焦点。抛开句法的强制约性，语义在某种程度上也有决定性。例如，GB 理论认为，“苹果阿 Q 吃了”和“阿 Q 苹果吃了”是“阿 Q 吃了苹果”的移位结果，其特征结构描述都是：

S		
Subj	aQ =	$\left[\begin{array}{ll} \text{NP}_1 & \\ \text{Head} & \text{human} \\ \text{Sex} & \text{male} \\ \text{Num} & 3s \end{array} \right]$
Obj	apple =	$\left[\begin{array}{ll} \text{NP}_2 & \\ \text{Head} & \text{food} \\ \text{Num} & 3s \end{array} \right]$
Pred	eat =	$\left[\begin{array}{ll} \text{NP}_1 \backslash \text{S} / \text{NP}_2 & \\ \text{Head} & \text{ingestion} \\ \text{Tense} & \text{past} \end{array} \right]$

语序问题部分地归结为特征结构的匹配：给定一个二元组 $\langle F, V \rangle$ ，其中 F 和 V 分别是源于某个本体论的特征集合和特征值集合，在 V 上定义一个偏序关系，则全体特征结构集合 S 上的偏序关系除了在结构上有表现外，在 V 上也有表现 ([19])。

例 2.6 s_1 = “砍累了”和 s_2 = “砍光了”从表象上都是 V+Adj 的结构，但其语义结构是截然不同的：



3 语义指向的形式化

自然语言语句的结构为什么一定要是树状的？Chomsky 片面地将语言的潜在无穷性归结为短语结构的递归性而忽视了语义组合的无穷能力，事实上，对一个词串 $w_1 w_2 \dots w_n$ 而言，只要能听懂就是合法的。而在一个形式系统中，“听懂”意味着 $w_1 w_2 \dots w_n$ 对应到一个表达式 e 使得 e 在这个形式系统中有一个解释。与 Chomsky 的理论相反，范畴语法在得到语句的语义表示的同时得到其深层结构，深层结构是合法语义表示的一个产物——树状结构被弱化，远距依存关系被凸现。³ 八十年代，汉语句法形式分析的不成功导致语言学家转而注意语义指向分析，并于九十年代初期开始应用于语法分析中。[18] 对汉语描写语法学中的语义指向分析方法作了一个综述，其中有关语义指向的定义如下：

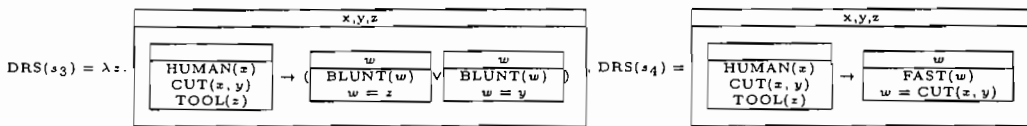
定义 3.1 所谓语义指向就是指句中某一成分在语义上跟哪个成分直接相关，通过分析句中某一成分的语义指向来揭示、说明、揭示某一语法现象，这种分析手段就称为语义指向分析。

³ 感谢北大中文系的詹卫东博士，在与他持久的友好的讨论中作者学到了许多语言学的知识。

语义指向问题由语言中的远距依存、代词所指、角色缺省、移位等导致。陆先生在文章中从句法成分的语义指向作了如下方面的考察：(1) 指前还是指后？(2) 指向句内还是句外？(3) 指向何种成分？(4) 指向一个名词性成分，是指向施事、受事还是工具等等？(5) 被指向的成分有什么特殊要求？这里所说的“语义指向”，或者是副词性成分的辖域，或者是句法成分间的搭配关系，或者是名词性成分的语义角色。其中，前者可以通过副词的特性和语序分析得到，而搭配关系和名词性成分的语义角色（包括代词所指）却需要引入新的描述手段获得（这里我们用 λ -DRT+ 特征结构）。由于缺少必要的数学和逻辑的形式工具，语义指向分析至今仍仅仅作为句法分析的一个补充而没有独立出来。产生式规则在不引起结构歧义的前提下被用来得到短语集合，然后是在语义指向分析的指导下得到深层结构和语义表示。

定义 3.2 给定一个 DRS，其中 $R = \{r_1, r_2, \dots, r_n\}$ 为角色集合且 $C = \{\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m\}$ 为关系集合。定义广义角色集合 $R' = R \cup C$ 上的一个划分 (partition) $\{P_1, P_2, \dots, P_k\}$ 满足 $\forall i(\forall a, b \in R_i \rightarrow [a] \sqcup [b] \neq \emptyset)$ ，其中 $[x]$ 表示 x 的类型化了的特征结构。该划分定义了 R' 上的一个等价关系 \sim ，有 $R'/\sim = \{P_1, P_2, \dots, P_k\}$ 。 $\forall \bar{r} \in R'/\sim, \forall x \in \bar{r}$ ，在包含 x 的条件中加入 $x = r$ 的限制后所得到的 DRS 仍是合法的，则 \bar{r} 称为 r 的语义指向，得到这个划分（或等价关系）的过程称为语义指向分析。已知二元谓词 $P(x, y)$ 是给定 DRS 的一个条件，该谓词的施事 (agent) 是 \bar{x} ，受事 (patient) 是 \bar{y} 。

例 3.1 $s_3 =$ “砍钝了”的广义角色集合 $R' = \{x, y, z, w, \text{HUMAN}(x), \text{CUT}(x, y), \text{TOOL}(z), \text{BLUNT}(w)\}$ 满足 $w \sim z$ 或者 $w \sim y$ （且 $y \not\sim z$ ，于是这个语句有歧义）。同理， $s_4 =$ “砍快了”中的条件 $\text{FAST}(w)$ 中变元的类型只与 $\text{CUT}(x, y)$ 相同且 $[\text{CUT}(x, y)] \sqcup [w] \neq \emptyset$ ，所以 $w \sim \text{CUT}(x, y)$



之所以引入广义角色的概念，是因为一个 n 元关系也可以充当被谈论的对象（即角色），有时候甚至一个 DRS 也可以成为一个角色（例如，“他来晚了，这很不好”中，这 \sim 他来晚了）。[18] 中对语义指向分析在发现歧义中的应用也有描述，⁴ 见下面的例子：

例 3.2 $s_5 =$ “老张有个女儿，很骄傲”从 λ -DRT 的角度看，由于 [老张] \neq [女儿]，所以广义角色有两个不同的划分，分别有“老张 $\sim z$ ”和“女儿 $\sim z$ ”，其中 z 满足条件 $\text{PRIDE}(z)$ ：

1. 老张 $_i$ 有个女儿 $_j$ ，老张 $_i$ 很骄傲
2. 老张 $_i$ 有个女儿 $_j$ ，那女儿 $_j$ 很骄傲

除此之外，陆先生还论述了语义指向在解释句法结构的语法意义、发现语言单位的语法功能以及发现语法现象等方面的应用。其中，“解释句法结构的语法意义”暗示了语义指向分析在发现深层结构中的决定性地位，即语义指向分析直接导出逻辑形式。例如，“你的衣服买贵了”，从 λ -DRT 的角度看“你的衣服”是“买”的受事，并且 $[\text{你的衣服}] \sqcup [z] \neq \emptyset$ ，其中 z 满足 $\text{EXPENSIVE}(z)$ ，所以“你的衣服 $\sim z$ ”。

4 结论

自然语言语句的句法分析，其目的无非是得到该语句的语义表示（当然也包括逻辑表达式）。在很多情况下，语义分析不一定必须经过句法分析，这二者之间没有必然的先后关系⁵，所

⁴ 发现歧义是消歧的第一步。对机器而言一个语句存在歧义意味着分析系统得出两个或两个以上的结果，这为我们继续选择提供了可能——发现歧义的机制与消解歧义的机制的分离有利于得到正确的结果。

⁵ [7] 是对组合性原则的一个很好的综述报告。另外，[16] 中的第一部分 (Labeled Tree) 对由标记树诱导出语义表达式提出质疑，第二部分 (Principle of Compositionality and Feature Structure) 对组合性原则提出新的解释。

以我们可以把语言分析划分为三个部分：(1) 完全不依赖于句法分析的语义指向分析，(2) 完全不依赖于语义指向分析的句法分析，(3) 句法分析与语义指向分析相互通信的“中间地带”（这三个部分的能力依具体语言而定）。为了实现第一部分，本文在 λ -DRT 的框架下给出了语义指向的一个形式定义：类型化的特征结构描述了角色的语义，DRS 描述了角色之间的关系，其中语义指向的确定靠的是特征结构间的匹配和偏序关系。未来的工作可以在 λ -DRT 的最小模型论以及如何由范畴语法诱导出 DRS 等问题上继续深入。

References

- [1] J.van Benthem, *The Logic of Semantics*. in Landman and Dordrecht (eds.), 1984, pp55-80
- [2] J.van Benthem and A. ter Meulen (eds), *Compositionality in Handbook of Logic and Language*, The Mit Press, 1997
- [3] J.Barwise and J.Perry, *Situations and Attitudes*. MIT Press, 1983
- [4] G.Chierchia, *Dynamics of Meanings: Anaphora, Presupposition, and the Theory of Grammar*. the University of Chicago Press, 1985
- [5] I.Heim, *The Semantics of Definites and Inderfinites*. Doctoral Dissertation. University of Massachusetts, Amherst, 1982
- [6] J.Groenendijk and M.Stokhof, *Dynamic Predicate Logic*. in Linguistics and Philosophy, 1991, Vol.14. pp39-100
- [7] T. M.V.Janssen, *Compositionality* in J.van Benthem and A. ter Meulen (eds), pp417-473
- [8] H. Kamp, *A Theory of Truth and Semantic Representation*. in J.Groenendijk, T.Janssen and M.Stokhof (eds.), Truth, Interpretation and Information. Dordrecht: Foris. 1981, pp1-41
- [9] D.K.Lewis, *General Semantics*. in Semantics of Natural Language. Davidson&Harman(eds.), Reidel, Dordrecht, 1972, pp169-218
- [10] R.Montague, *English as a Formal Language*. in Formal Philosophy.R.Thomasom(ed.). Yale, New Haven. 1974, pp188-221
- [11] R.Montague, *Universal Grammar*. in Formal Philosophy.R.Thomasom(ed.). Yale, New Haven. 1974, pp222-246
- [12] R.Montague, *The Proper Treatment of Quantification in Ordinary English*. in Formal Philosophy.R.Thomasom(ed.). Yale, New Haven. 1974, pp247-270
- [13] B.H.Partee, A.ter Meulen and R.E.Wall, *Mathematical Methods in Linguistics*. Kluwer Academic Publishers. 1990
- [14] V.R.Pratt, *Semantic Considerations on Floyd-Hoare Logic*. Proc. 17th IEEE Symp. on Foundations of Computer Science, 1976, pp109-121
- [15] J.S. Yu and M.D. Cheng, *Multiple-Valued Feature Structure Description* in ACTA SCIENTIARUM NATURALIUM UNIVERSITATIS PEKINENSIS, 1999, Vol.35 No.5 pp.589-601
- [16] J.S. Yu, *Algebraic Structures in Linguistics*, series of reports in ICL-Salon of Linguistics, 2001
- [17] 蒋严, 潘海华, 《形式语义学》. 中国社会科学出版社, 1998
- [18] 陆俭明, 关于语义指向分析. 《当代中国语言学》总第一期, 1996
- [19] 于江生, 《语义学的数学基础》. 北京大学数学科学学院博士论文, 1999
- [20] 邹崇理, 《逻辑、语言和蒙太格语法》. 社会科学文献出版社, 1995
- [21] 邹崇理, 《自然语言逻辑研究》. 北京大学出版社, 2000