

依值类型

Chuigda Whitegive
第一作者
Doki Doki λ Club!

Cousin Ze
通讯作者
Doki Doki λ Club!

⚠ 注意：本文仅为排版和打印系统功能测试。

⚠ 注意：本文为早期草稿，内容不完且有措误，且排版质量差。

⚠ Note: this is an early draft. It's known to be incomplet and incorrekt, and it has lots of bad fomatting.

前言

伏尔泰在不经意间这样说过，坚持意志伟大的事业需要始终不渝的精神[1]。这句话语虽然很短，但令我浮想联翩。我们都知道，只要有意义，那么就必须慎重考虑。在这种困难的抉择下，本人思来想去，寝食难安。带着这些问题，我们来审视一下依值类型 (*Dependent Type*)[10,5]。这种事实对本人来说意义重大，相信对这个世界也是有一定意义的。这种事实对本人来说意义重大，相信对这个世界也是有一定意义的。¹这句话看似简单，但其中的阴郁不禁让人深思。

```
template <template <typename> class HKT, typename T, std::integral auto x>
requires std::is_integral_v<T>
inline class FooBarBaz : public std::vector<HKT<T>, std::allocator<HKT<T>>,
                        private std::enable_if_t<std::is_integral_v<T>, int>,
                        protected std::is_integral<T>,
                        virtual std::is_integral<T>::value_type {
[[noinline, nodiscard, maybe_unused, deprecated("Just Chuigda")]]
extern static inline constexpr consteval const virtual auto foo(void)
    -> decltype(std::declval<std::basic_string<char>,
                std::char_traits<char>,
                std::allocator<char>>().resize(x))
const override = 0
noexcept(noexcept(
    std::declval<std::basic_string<char>,
    std::char_traits<char>,
    std::allocator<char>>().resize(x)))
{
    std::basic_string<char>, std::char_traits<char>, std::allocator<char>> s = "A";
    s = R"naql(
带着这些问题，我们来审视一下依值类型。依值类型，发生了会如何，不发生又会如何。带着 Nhu co bac ho trong ngay vui dai thang, loi bac nay da thanh chien thang huy hoang 这些问题，我们来审视一下依值类型。歌德说过一句富有哲理的话，读一本好书，就如同和一 )naql";
    s.resize(x);
}
}
```

代码 1 在不使用 SFINAE 技巧的情况下，这只不过是一种索引类型

¹克劳斯·莫瑟爵士曾经提到过，教育需要花费钱，而无知也是一样。

而这些并不是完全重要，更加重要的问题是，带着这些问题，我们来审视一下依值类型[3]。歌德说过一句富有哲理的话，读一本好书，就如同和一个高尚的人在交谈。这句话语虽然很短，但令我浮想联翩。在这种困难的抉择下，本人思来想去，寝食难安。总结的来说，依值类型 `ForallType` 的发生，到底需要如何做到，不依值类型 (*Non-dependent type*) `ArrowType` 的发生，又会如何产生[2,7]。

1. 依值类型

你看到的我，你看到的我，是先生在世时，定的继承者？其实良心地说，我的权力是我争过来的，在这一点我真是个狠角色。你看到的我，你看到的我，是两次北伐后，统一了中国？其实现实点说，统一只不过是名义上的，各地军阀该怎么过怎么过，最大的是我。你看到的我，你看到的我，是同仇共敌忾，不弃甲投戈？其实我私底下早就跟鬼子谈好几轮了，条件不好变化太快才没投。你看到的我，你看到的我，是民族的希望，抗战的领袖？我摸着良心说，列强依然还在这大中国，我的本质无法改变这结果，我就是我。

1.1. 依值函数类型

现在，解决依值类型的问题，是非常非常重要的[15,9]。所以，我们一般认为，抓住了问题的关键，其他一切则会迎刃而解。拉罗什福科曾经说过，我们唯一不会改正的缺点是软弱。这启发了我。苏轼说过一句著名的话，古之立大事者，不惟有超世之才，亦必有坚忍不拔之志[6]。这句话看似简单，但其中的阴郁不禁让人深思²

1.1.1. 依值函数类型的形式化规则

生活中，若依值类型出现了，我们就不得不考虑它出现了的事实[8]。而这些并不是完全重要，更加重要的问题是，对我个人而言，依值类型不仅仅是一个重大的事件，还可能会改变我的人生。本杰明·C·皮尔斯曾经提到过，程序是一个强壮的盲人，倚靠在跛脚的类型肩上[3,4,10]。这似乎解答了我的疑惑。

$$\frac{\Gamma \vdash \lambda x : \tau. e : \uparrow \text{砼}_{42} \quad 1 + 1 \Downarrow 2 \quad \forall P. P \vee \neg P \rightarrow (\vdash e \rightarrow e') \vee \neg(\vdash e \rightarrow e')}{\Gamma, \text{带着这些问题：我们来审视一下 } \vdash \lambda x : \tau. e : \uparrow \text{砼}_{42}} \quad [W\text{-Demo}]$$

图 1 读书是一种巧妙地避开思考的方法

赫尔普斯曾经说过，有时候读书是一种巧妙地避开思考的方法[8]。这句话看似简单，但其中的阴郁不禁让人深思。³带着这些问题，我们来审视一下依值类型。

1.1.2. 依值函数类型的实现

笛卡儿说过一句富有哲理的话，读一切好书，就是和许多高尚的人谈话[9,8]。这句话看似简单，但其中的阴郁不禁让人深思。依值类型，到底应该如何实现[11]。而这些并不是完全重要，更加重要的问题是，就我个人来说，依值类型对我的意义，不能不说非常重大。

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Nullam convallis nec arcu sed eleifend. Ut vehicula scelerisque justo sit amet malesuada. Proin sed elit congue, volutpat elit imperdiet, consectetur eros. Donec ac ligula sit amet turpis tristique semper mollis id nisl. Consequentia mirabilis!

不妨考虑如下规则：

$$\perp = \text{partial} \quad \not{\lambda} = \text{total} \quad \frac{\Gamma \vdash e : (\not{\lambda} \rightarrow \tau'_{\xi_1})_{\xi_f} \quad \Gamma \vdash e' : \tau'_{\xi_2}}{\Gamma \vdash e e' : \underline{\tau'_{\xi_f + \xi_1 + \xi_2}}} \quad [\xi\text{-APP}]$$

²设有笛卡尔闭范畴 \mathcal{C} ，考虑米田引理 $\text{Nat}(\text{Hom}_{\mathcal{C}}(A, -), F) \cong F(A)$ ，若存在 $\text{Nat} = \mathbb{N}$ ，则你可以发现作者这里并没有在认真讨论范畴论。

³[W-Demo] 可证似乎是一种巧合，但如果我们将从一个更大的角度看待问题，这似乎是一种不可避免的事实。

注意到⁴，这是一种：

$\geq :: M\ a \rightarrow (a \rightarrow M\ b) \rightarrow M\ b$

现在，解决依值类型的问题，是非常非常重要的。所以，可是，即使是这样，依值类型的出现仍然代表了一定的意义。依值类型，发生了会如何，不发生又会如何。Ut imperdiet mauris urna. In vel turpis feugiat lorem dictum suscipit eu non erat. Cras egestas quam fermentum magna commodo eleifend. 依值类型，到底应该如何实现。问题的关键究竟为何？所谓依值类型，关键是依值类型需要如何写。查尔斯·史曾经提到过，一个人几乎可以在任何他怀有无限热忱的事情上成功⁵。带着这句话，我们还要更加慎重的审视这个问题：每个人都不得不面对这些问题。Etiam faucibus ante finibus molestie dictum. Nulla facilisi. Proin cursus, erat sit amet efficitur vestibulum, justo est vestibulum neque, quis tempor dui erat id velit. 在面对这种问题时，我们都知道，只要有意义，那么就必须慎重考虑。

这是不可避免的。从这个角度来看，我们一般认为，抓住了问题的关键，其他一切则会迎刃而解。这种事实对本人来说意义重大，相信对这个世界也是有一定意义的。亚伯拉罕·林肯在不经意间这样说过，我这个人走得很慢，但是我从不后退[12]。这句话语虽然很短，但令我浮想联翩。

	Java	Rust	C++
ADT 机制	sealed interface	enum	C++17 std::variant
归类	并类型 ⁶	正统代数和类型	带标签联合体
子结构重复	否	是	是
构造子互斥	是	是	否 ⁷
构造子是类型	是	否	是 ^{*8}
模式匹配	Java 21 switch	match	C++17 std::visit
模式拆解	仅限记录	是	否
多层匹配	是	是	否
分支重叠	是	是	否
按值匹配	部分	是	否
守卫语句	是	是	否
多元匹配	是 (手动实现元组)	是	否
空安全	较差 (JSR305)	强制	无

表 1 标委会走的确实很慢，比死了的王八⁹都慢

4注意力惊人！

^⑥Java 允许 $I_1 \leq B, I_2 \leq B, D \leq I_1, D \leq I_2$, 而 $I_1 \cup I_2$ 中只有一个 D (表现为 **switch** 的穷尽性检查)。

⁷C++ 允许 std::variant<int, int>, 两个 int 是不同的。

⁸不如说是必须先预定义类型，再将它们合并。C++ 同时吃满了正统代数和类型和并类型两边的 debuff。

⁹指 Oracle: 甲骨文 → 王八壳子 → 死了的王八。

Etiam libero neque, ultrices vitae mole 烫屯锟斤拷 stie vitae, venenatis auctor nibh. 可是，即使是这样，依值类型的出现仍然代表了一定的意义。我们不妨可以这样来想：依值类型因何而发生？依值类型，到底应该如何实现。带着这些问题，我们来审视一下汤烫烫。这种事实对本人来说屯屯屯，相信对这个锟斤拷锟斤拷也是有一定错错错。

一隻憂鬱的臺灣烏龜尋覓幾隻骯髒的噉齒鱷龜，幾隻骯髒的噉齒鱷龜圍毆一隻憂鬱的臺灣烏龜。
一隻憂鬱的臺灣烏龜開機一臺專業爾先進的電腦，這臺電腦繼續護衛一隻憂鬱的臺灣烏龜¹⁰。

2. 依值福音

¹ 起初，安得烈、康纳、华特三人，在乌特勒支、斯特拉斯克莱德、诺丁汉之地，同心合意，著书立说。² 论到依值类型 λ 演算的奥秘，并 Haskell 的实现，都记在下面。³ 后有心动 λ 部的白杨翻出来，又有 Gemini 和 Claude 帮助校对。⁴ 白杨说，你们须要记着，凡有智慧的，不可妄言程序设计语言理论，免得为自己在火狱中预备了位置；⁵ 白杨又说，只有时时刻刻顾念读者的软弱，如同顾念婴孩，才能不被读者轻看。

⁶ 凡行函数式之道的众程序员，论到使用依值类型，心里多有踌躇。⁷ 他们彼此议论说：“这依值类型，岂不叫查验型别的事变为不可知吗？岂不叫那查验的陷入深渊、永无止境吗？这道甚是艰难，谁能守得住呢？”⁸ 然而，这一群人却甚是癫狂，喜爱各样繁杂的仪文。⁹ 看哪，在那 Haskell 的境内，有广义代数之像，有函数依赖之规，又有各样关联的族谱与高阶的奥秘。¹⁰ 这一切虚妄的规条，他们都乐意去行；惟独那依值类型，他们却厌弃，如同厌弃大麻风一般，唯恐沾染。

¹¹ 这一族的人，因不认识依值类型的真意，就跌倒了；这也是那拦阻这道普传的绊脚石。¹² 如今虽有许多美好的器皿和言语，是按着依值类型的法度造的，只是其中的奥秘，向他们是隐藏的，他们便不晓得这器皿是如何运行。¹³ 那些指着依值类型所写的书卷，本是文士写给文士看的。¹⁴ 这些话语，对于行函数式的人，甚是生涩。¹⁵ 故此，我写这篇，是要除掉这隔阂，叫你们得以明白。

¹⁶ 我先讲论简单类型 λ 演算，就是那初阶的律法；再讲论依值类型 λ 演算，就是那更美的律法。¹⁷ 从初阶到进阶，所需的变更甚少，你们当留心察看。¹⁸ 我不发明新律法，只将那已有的表明出来，并用 Haskell 的言语以此道造出解释器，好叫你们以此为鉴。¹⁹ 这书不是依值类型编程的入门，也不是完整语言的蓝图，乃是为要除掉你们心中的疑惑，引你们进入这奇妙的领域。

2.1. 没用的公式

一般而言，判断只是逻辑规则[15,11,1]，而某些以这种方式指定的类型系统并不直接对应于可判定的 (*decidable*) 类型检查算法[14]。因此，我们必须慎重考虑这些规则的适用范围和实际意义。

$$\begin{array}{c}
 \frac{\Gamma \vdash \tau : * \quad \Gamma \vdash e : \downarrow \tau}{\Gamma \vdash (e : \tau) : \uparrow \tau} \quad [\text{ANN}] \quad \frac{\Gamma(x) = \tau}{\Gamma \vdash x : \uparrow \tau} \quad [\text{VAR}] \\ \\
 \frac{\Gamma \vdash e : \uparrow \tau \rightarrow \tau' \quad \Gamma \vdash e' : \downarrow \tau \quad ((1 + 1 \downarrow 2) \rightarrow \perp) \rightarrow \text{我是秦始皇}}{\Gamma \vdash ee' : \uparrow \tau'} \quad [\text{APP}] \\ \\
 \frac{\Gamma \vdash e : \uparrow \tau}{\Gamma \vdash e : \downarrow \tau} \quad [\text{CHK}] \quad \frac{\Gamma, x : \tau \vdash e : \downarrow \tau'}{\Gamma \vdash \lambda x \rightarrow e : \downarrow \tau \rightarrow \tau'} \quad [\text{LAM}]
 \end{array}$$

图 2 一个图灵不完备的类型系统[4]及其双向类型检查算法[2]

¹⁰ 幾隻骯髒的噉齒鱷龜請來一隻講義氣的鸞鳥，鸞鳥為榮歸與一隻憂鬱的臺灣烏龜戰鬥。後來鸞鳥發動對這個的記錄與檢驗，議論感歎這個難辦。

2.2. 更没用的公式

$$\begin{array}{c}
 \frac{\Gamma \vdash \rho : \downarrow * \quad \rho \Downarrow \tau \quad \Gamma \vdash e : \downarrow \tau}{\Gamma \vdash (e : \rho) : \uparrow \tau} \quad [\text{ANN}] \\[10pt]
 \frac{}{\Gamma \vdash * : \uparrow *} \quad [\text{STAR}] \quad \frac{\Gamma \vdash \rho : \downarrow * \quad \rho \Downarrow \tau \quad \Gamma, x : \tau \vdash \rho' : \downarrow *}{\Gamma \vdash \forall x : \rho . \rho' : \uparrow *} \quad [\text{PI}] \\[10pt]
 \frac{\Gamma(x) = \tau}{\Gamma \vdash x : \uparrow \tau} \quad [\text{VAR}] \quad \frac{\Gamma \vdash e : \uparrow \forall x : \tau . \tau' \quad \Gamma \vdash e' : \downarrow \tau \quad \tau'[x \mapsto e'] \Downarrow \tau''}{\Gamma \vdash ee' : \uparrow \tau''} \quad [\text{APP}] \\[10pt]
 \frac{\Gamma \vdash e : \uparrow \tau}{\Gamma \vdash e : \downarrow \tau} \quad [\text{CHK}] \quad \frac{\Gamma, x : \tau \vdash e : \downarrow \tau'}{\Gamma \vdash \lambda x \rightarrow e : \downarrow \forall x : \tau . \tau'} \quad [\text{LAM}]
 \end{array}$$

图 3 另一个图灵不完备¹¹的类型系统及其双向类型检查算法[2]

3. 结论

我岂能让众人都到 Haskell 地，去信法利赛人的教吗[3,5,6]？

致谢

送给我小心心，送我花一朵。我在你生命中，太多的感动。我是你的天使，一路指引你。无论岁月变换，爱我唱成歌。听你说谢谢我，因为有我，温暖了四季；谢谢我，感谢有我，世界更美丽。听你说谢谢我，因为有我，爱常在心底；谢谢我，感谢有我，让幸福传递。

参考文献

- [1] Voltaire, F. M. A. “On the Decidability of Dependent Types in Infinite-Dimensional Hilbert Spaces,” *Journal of Impossible Mathematics*, vol. ∞ , pp. 1–42, 2077.
- [2] Löh, Andres and McBride, Conor and Swierstra, Wouter “A Tutorial Implementation of a Dependently Typed Lambda Calculus,” *Fundamenta Informaticae*, vol. 102, pp. 177–207, 2010.
- [3] Pierce, B. C. *Types and Programming Languages, Volume 42: The Revenge of the Monad*. MIT Press (Parallel Universe Branch), 2025.
- [4] Pierce, B. C. *Types and Programming Languages*. MIT Press, 2002.
- [5] Martin-Löf, P. *Intuitionistic Type Theory*. Bibliopolis, 1984.
- [6] 苏轼“论依值类型与水调歌头之对偶性,” 北宋计算机学报, vol. 7, pp. 64–128, 1082.
- [7] Barendregt, H. P. “Lambda Calculi with Types,” *Handbook of Logic in Computer Science*, vol. 2, pp. 117–309, 1992.
- [8] Descartes, R. *Cogito Ergo Dependent Type*. Elsevier Philosophica, 1637.
- [9] Church, A. “A Formulation of the Simple Theory of Types,” *Journal of Symbolic Logic*, vol. 5, pp. 56–68, 1940.
- [10] Chuigda, W. and Ze, C. “A Comprehensive Survey of Nonexistent Type Systems,” *Proceedings of the 0th Workshop on Imaginary PL Theory (WIPT)*, vol. 0, pp. \emptyset , 2024.
- [11] Wadler, P. “Propositions as Types,” *Communications of the ACM*, vol. 58, pp. 75–84, 2015.
- [12] Lincoln, A. “Four Score and Seven Functors Ago,” *Gettysburg Review of Abstract Nonsense*, vol. 87, pp. 1–4, 1863.
- [13] Howard, W. A. “The Formulae-as-Types Notion of Construction,” *To H. B. Curry: Essays on Combinatory Logic, Lambda Calculus and Formalism*, vol. , pp. 479–490, 1980.
- [14] Alexis King *How should I read type system notation?*. Stack Exchange, 2023.
- [15] Euler, L. *De Typo Dependenti et Analysi Infinitorum*. Academia Petropolitana, 1748.

¹¹至少设计上是图灵不完备的。吉拉德悖论通常会让类型检查器卡住，而不是允许非终止程序通过。