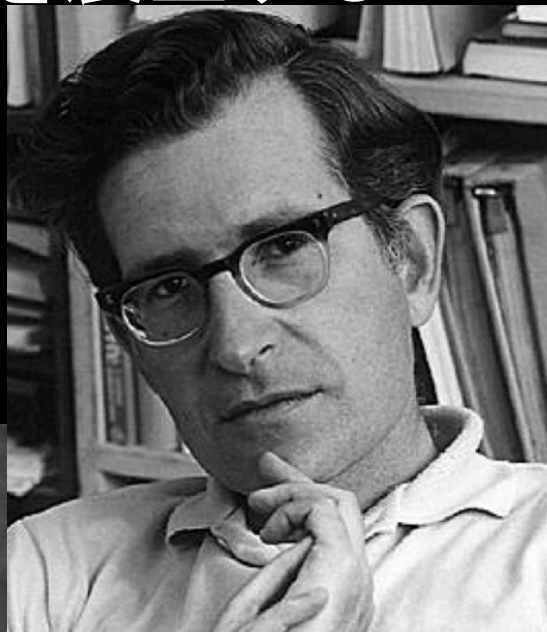


ポスト・ディープラーニングの 人工知能技術を展望する



Chomsky



Voevodsky



Turing

I propose to consider the question, "Can machines think?"

....

The original question, "Can machines think?" I believe to be too meaningless to deserve discussion. Nevertheless I believe that at the end of the century the use of words and general educated opinion will have altered so much that one will be able to speak of machines thinking without expecting to be contradicted.

-- Alan Turing

Why only us ?

What kind of creatures are we ?

-- Chomsky

In short, he (Voevodsky) was a genius akin to Cantor or Grothendieck, at times teetering on the brink of sanity, yet gripped by an immense desire for beauty and clarity, engaging in struggles that gripped his whole soul. From the fires of this volcano, truly original ideas emerge.

--- John Baez

こうした反省は、「知的機械」の限界・無能力として意識さるべきものが、実は正確に、我々自身の限界・到達点をさしめしている事を我々に告げるのである。なぜなら、機械の進化にとって、我々は万能の創造主に他ならない。

我々は、我々自身に似せて知的な機械を造ろうとしたが、我々が直面した壁は、我々があまりに自分自身を知らず、加えて、多くの問題に対して、あまりに貧弱な洞察力しか持っていないという事であった。

しかし、次の事を忘れてはならない。我々が、我々自身の創造力の全面的な開花の状態からへだたっているのなら、そのへだたりが、我々が、その進化をつかさどる機械の創造性を基本的に限界づけるのだと。

我々は、我々自身の前史を、とおり抜けねばならない。

--- 詠み人しらず

はじめに

はじめに

- 現在の「人工知能」技術の中核は、ディープ・ラーニング技術である。ディープ・ラーニング技術は、2012年以来、爆発的に発展・普及し、大きな成果を上げてきた。
- 現代のDeep Learning技術は、MLP, CNN, RNN(LSTM)、強化学習モデル、転移学習モデルといった多数のモデルを擁し、その応用は、画像認識、音声認識、自動運転・ロボットの制御、ゲーム、機械翻訳等々、広い範囲に及び、それぞれの分野で大きな成果をあげている。そうした応用分野の拡大と関心の高まりは、今後もさらに続くだろう。
- 小論では、最初に、今年のGoogle I/O, Facebook f8での、AIを巡る注目すべき動きを紹介する。

はじめに

- そうしたディープ・ラーニング技術の市場の拡大の見通しと同時に、筆者は、人間の「知能」の機械による代替という人工知能技術の大きな目標の中で、現時点でのディープ・ラーニング技術の達成をとらえかえす必要を感じている。
 - それは、「理想」のあるいは「強い」人工知能のビジョンを持つという主張と受け止められるかもしれないが、そうではない。それは、ディープラーニング・ブームの中で、人々が人工知能技術に対して抱いた期待に、現在の達成はどの程度応えているのかという、極めて現実的な問題意識だ。
-

はじめに

- 具体的な例を挙げよう。Amazon AlexaやGoogle Home等の、ボイス・アシスタント・システムの普及は、機械に、人間の自然な言語を正確に理解させることの難しさを気付かせたと考えることができると筆者は考えている。
 - この点で興味ふかいことは、ボイス・アシスタント・システムで「言語能力」を実装しようという試みは、現在は極めて萌芽的なのだが、文の構成規則や知識の利用など、ディープラーニングが扱わない分野に、実践的な関心を持ち始めているように見えることである。残念ながら、ディープ・ラーニング中心の視点では、こうした小さな変化はなかなか目に入ってこない。
-

はじめに

- ある意味、当然のことなのだが、「人工知能≠ディープ・ラーニング」である。人工知能技術は、ディープ・ラーニング技術を、重要な要素技術として含む技術の全体である。
-

はじめに

- ひるがえって考えれば、ディープ・ラーニング技術は、人間の「知能」の全体に対して有効というわけではなく、人工知能技術全体の中で、人間と動物に共通する「感覚＝運動能力」の機械による代替に、大きな可能性を開いたということに他ならないと筆者は考えている。
 - それには理由がある。ディープラーニングがよって立つ立場は、人間の（それは、脳を持つ他の動物とも同じなのだが）認知・運動能力は、基本的には脳のニューロンの結合状態に還元できるというものである。この「コネクショニズム」という還元主義は、強力なものだが、動物と人間の違いを考えようとする、あまり役には立たない。
-

はじめに

- 動物にはない人間固有の認知能力としては、言語的認知能力と数学的認知能力の二つが重要である。いずれ、人工知能技術は、これら二つの領域に本格的な挑戦を始めるだろう。現在は、いわばその「前史」なのだ。
 - 小論では、この二つの能力に、ディープ・ラーニング以外の陣営から、どのようなアプローチが行われているか紹介しながら、Post Deep Learningの潮流を探りたいと思う。
-

はじめに

- 小論は、人工知能技術の未来展望をテーマとしているのだが、「人間の知能」、「機械と人間」、「人工知能」のそれぞれの歴史の非常に大まかなスケッチを与えている。
 - 「人間」の誕生は生命史の、産業革命以降の「機械」の普及は文明史の、また「コンピュータ」の登場は現代産業社会の歴史の、それぞれの「画期」とあるという認識は、いわば常識的なものだが、それは人工知能技術の未来展望の基礎であると、筆者は考えている。
 - 同時に、それは、人間の自然認識の体系としての「科学」の未来展望の基礎でもある。筆者は、人工知能の未来を科学の未来と重ね合わせて考えている。
-

はじめに

- ❑ 残念ながら、現在のAIでは、機械は科学の主體的な担い手にはなれそうもないのだ。人間なしの機械の未来を考えるのは、意外と難しいことだ。
- ❑ 留意すべきことは、「機械と人間」の関係は、何も人工智能が話題になる現代に初めて生まれたものではないということである。「機械と人間」の関係史は、人間の運動能力と感覚能力それぞれの外的拡大器官としての役割を、機械が果たしてきたことを示している。
- ❑ それは、人工智能技術の中で「感覚＝運動能力の機械による代替」を推進する技術としてのディープ・ラーニング技術が果たすべき役割を示唆している。
- ❑ ただ、人間の認識能力は、現在の水準を超えて進むだろう。

Agenda

ポスト・ディープラーニングの
人工知能技術を展望する

Part I

AI技術の現在

Part II

歴史を振り返る

- 人工知能/人間の知能/機械と人間 の歴史

Part III

困難な二つの課題

- 言語能力と数学的認識能力

Part I

AI技術の現在

2018 Google I/O, f8 から

Google I/O 2018



Diagnosing diabetic retinopathy

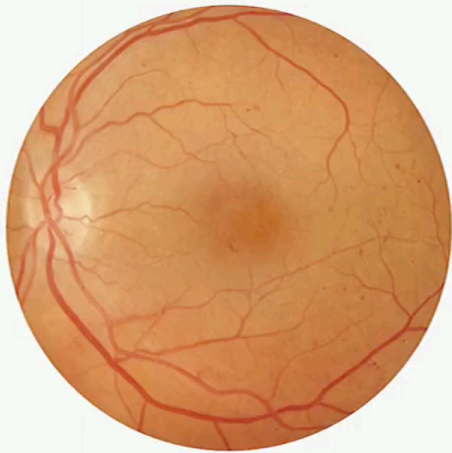


Image of retina



Predicting cardiovascular risk

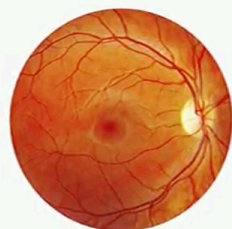
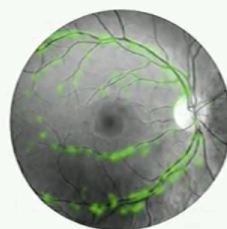


Image of retina



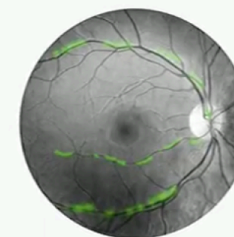
Age

Predicted: 59.1 years
Actual: 57.6 years



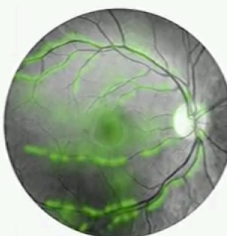
Biological sex

Predicted: Female
Actual: Female



Smoking

Predicted: Non-smoker
Actual: Non-smoker



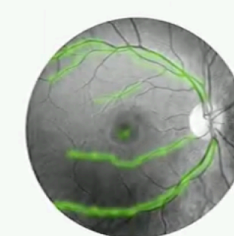
A1C

Predicted: Non-diabetic
Actual: Non-diabetic



BMI

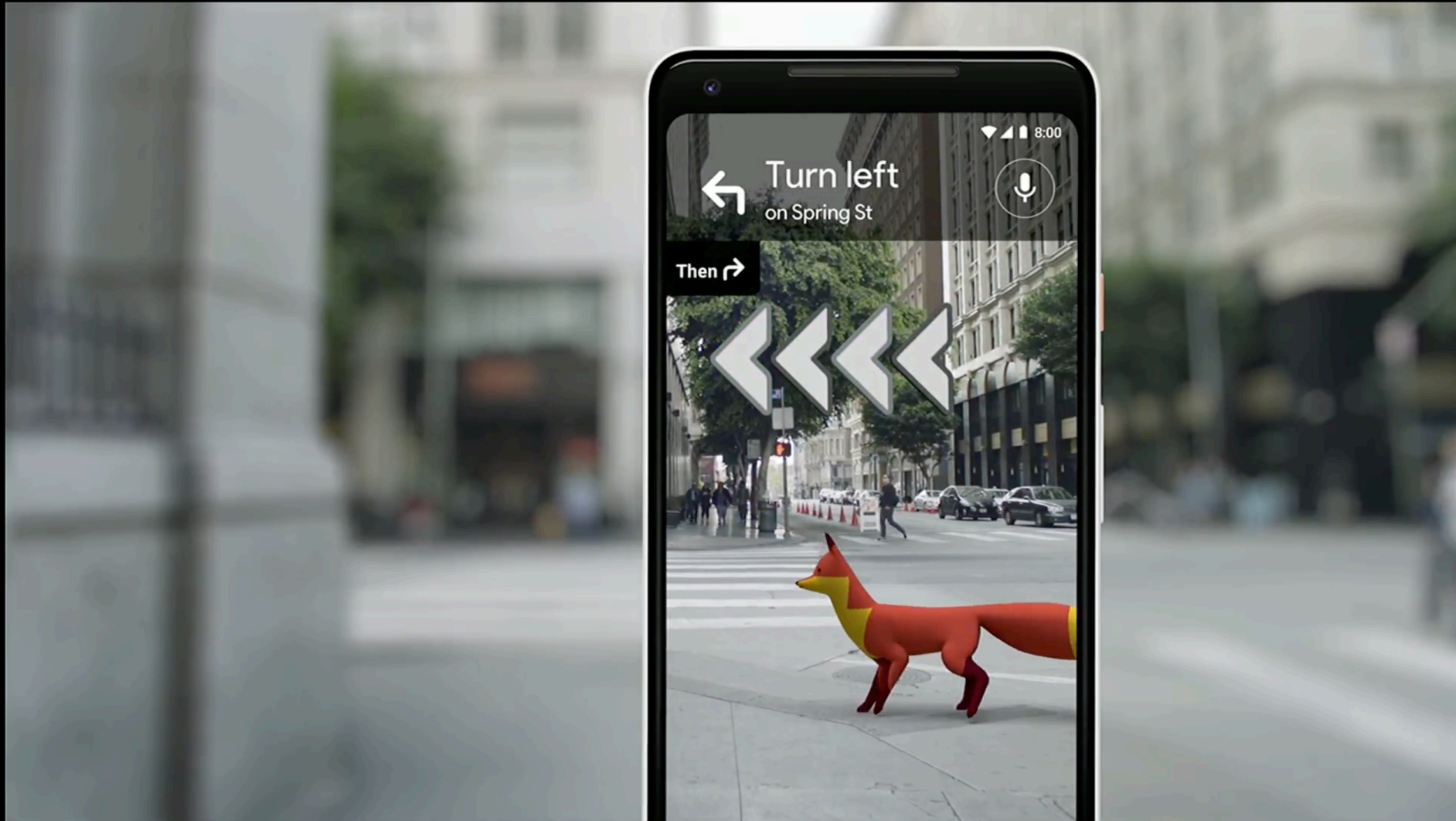
Predicted: 24.1 kg/m
Actual: 26.3 kg/m

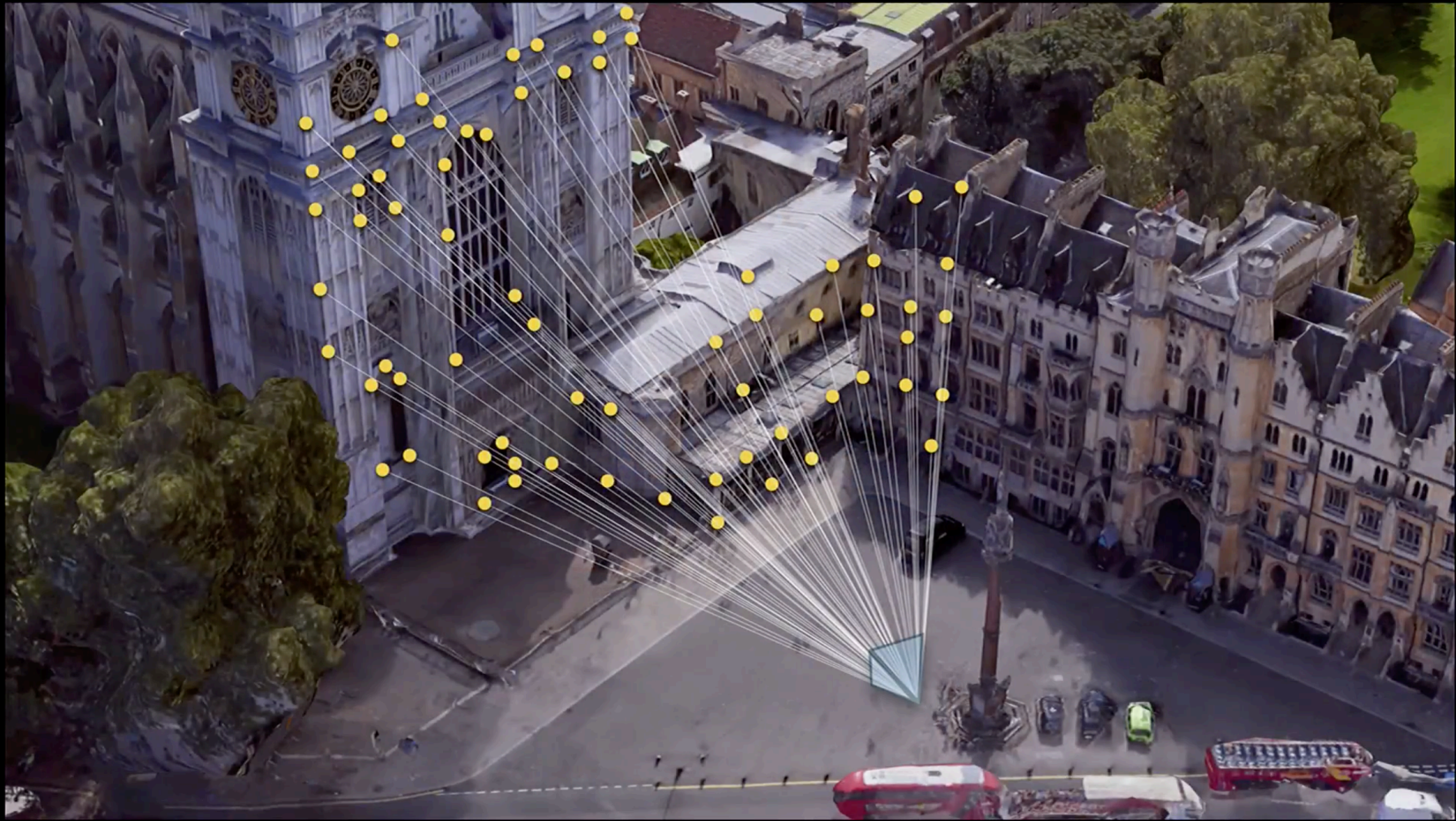


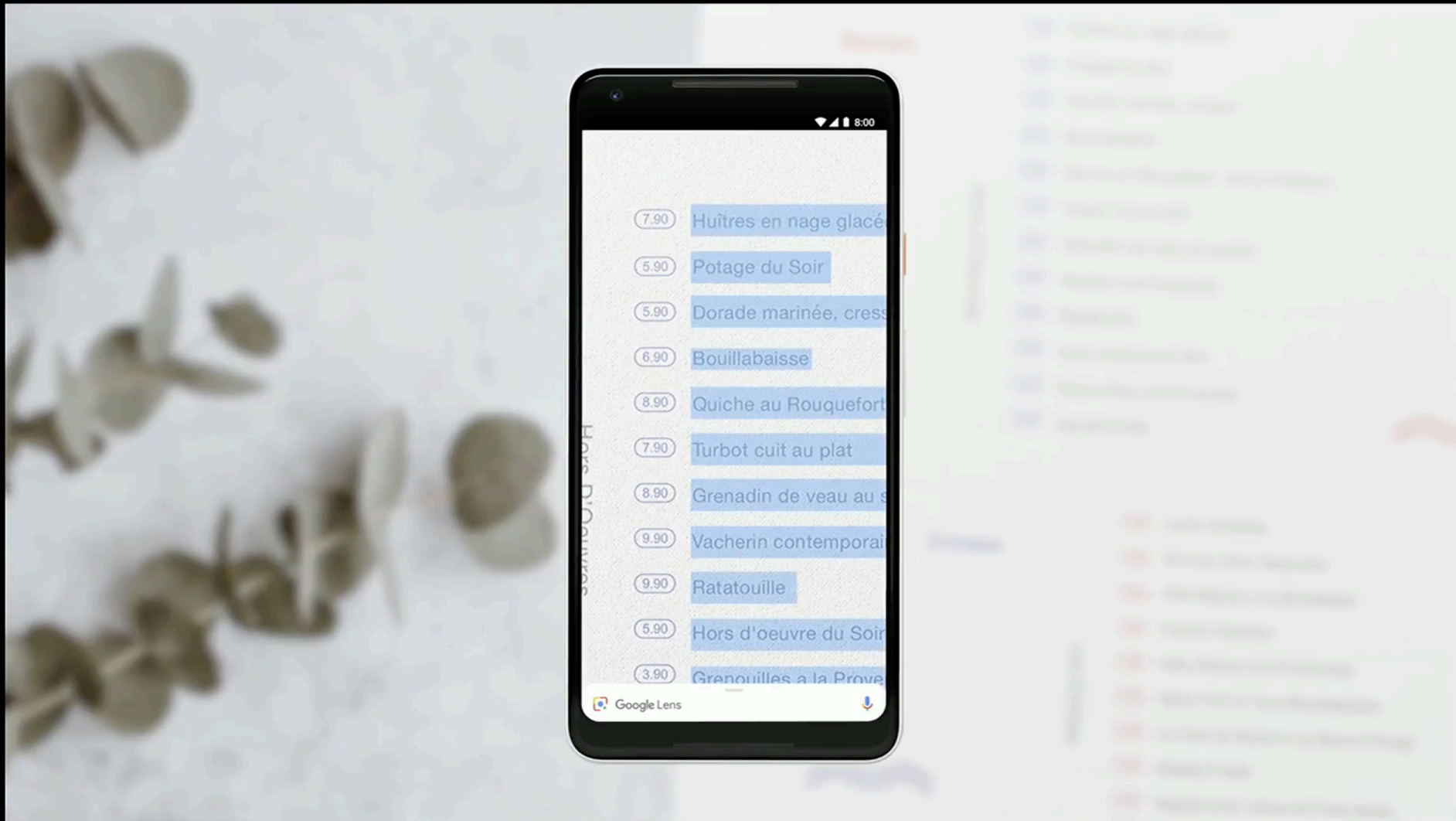
Systolic blood pressure

Predicted: 148.0 mmHg
Actual: 148.5 mmHg

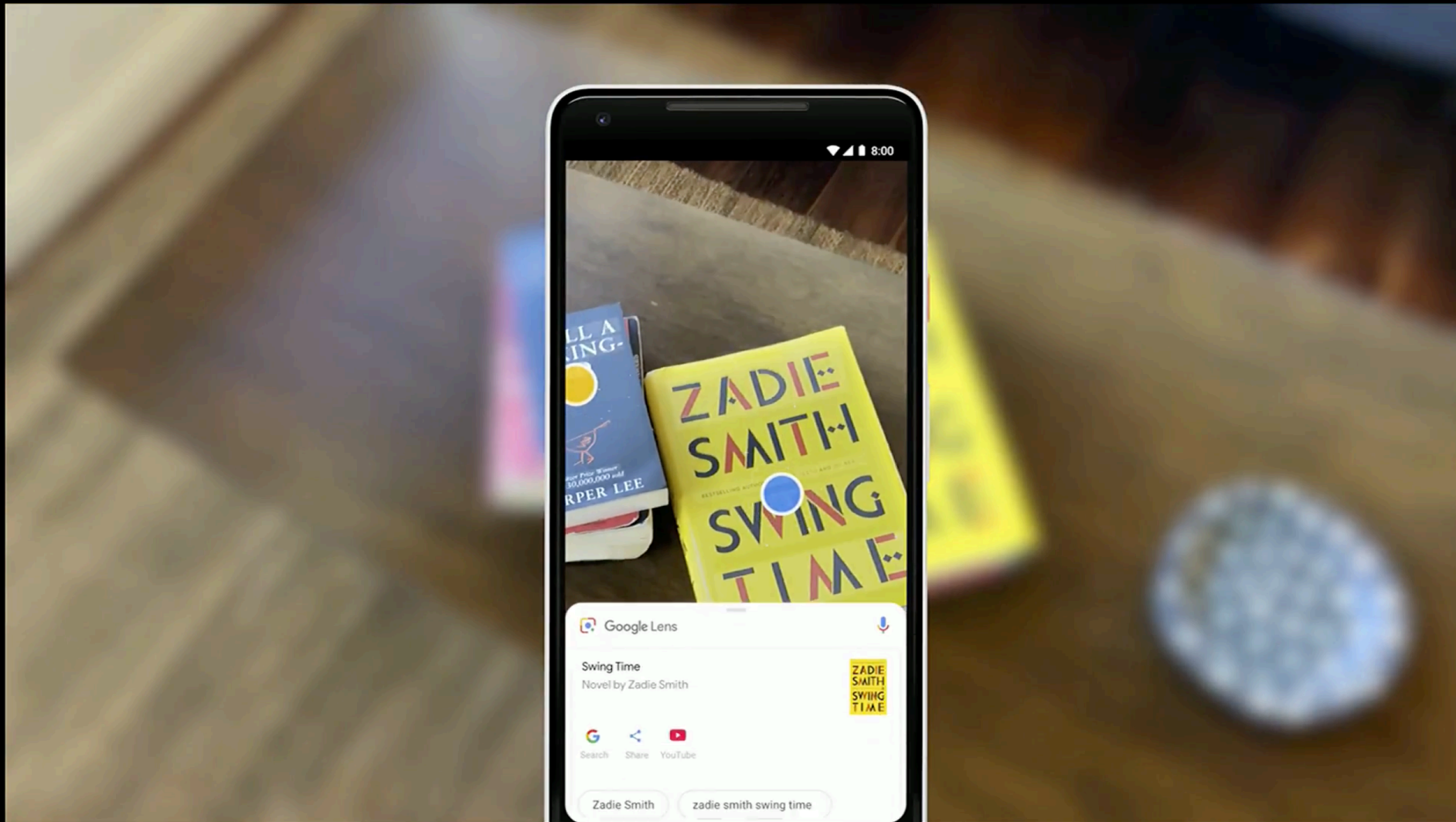
心臓血管症等様々な疾患の予防も網膜の診断で可能







Smart Text Selection



Keynote (Google I/O '18)



音声ロボットによる美容院の電話予約

ロボット



店側の人間



"Sure, what time are you looking for around?"



36:36 / 1:46:31



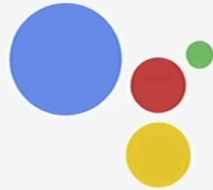
わかりました。何時ぐらいがよろしいですか？

Keynote (Google I/O '18)



音声ロボットによる美容院の電話予約

ロボット



"At 12 pm."

店側の人間



36:39 / 1:46:31



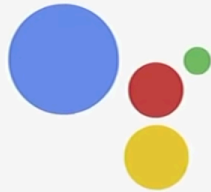
12時に

Keynote (Google I/O '18)



音声ロボットによる美容院の電話予約

ロボット



店側の人間



*"We do not have a 12 pm available.
The closest we have to that is a 1:15."*



36:41 / 1:46:31



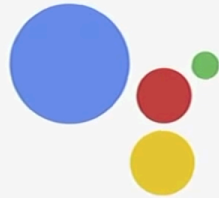
12時はいっぱいですね。一番近いのは、1時15分ですが。

Keynote (Google I/O '18)



音声ロボットによる美容院の電話予約

ロボット



*"Do you have anything between
10 am and 12 pm?"*

店側の人間



36:47 / 1:46:31



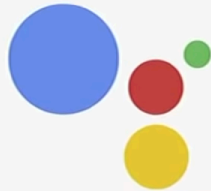
10時から12時の間をあいてますか？

Keynote (Google I/O '18)



音声ロボットによる美容院の電話予約

ロボット



店側の人間



*"Depending on what service she would like.
What service is she looking for?"*



36:52 / 1:46:31



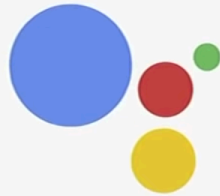
何をなさりたいかによりますね。何をご希望で？

Keynote (Google I/O '18)



音声ロボットによる美容院の電話予約

ロボット



"Just a women's haircut, for now."

店側の人間



36:56 / 1:46:31



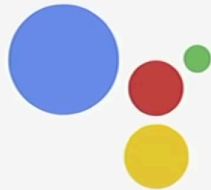
すぐに髪を切りたいんです。

Keynote (Google I/O '18)



音声ロボットによる美容院の電話予約

ロボット



店側の人間



"Okay, we have a 10 o'clock."



36:59 / 1:46:31



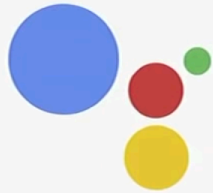
それなら、10時で大丈夫です。

Keynote (Google I/O '18)



音声ロボットによる美容院の電話予約

ロボット



"10 am is fine."

店側の人間



37:01 / 1:46:31



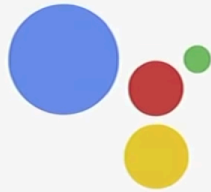
10時で大丈夫です。

Keynote (Google I/O '18)



音声ロボットによる美容院の電話予約

ロボット



店側の人間



"Okay, what's her first name?"

37:03 / 1:46:31



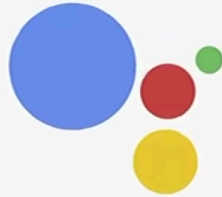
わかりました。お名前を伺えますか？

Keynote (Google I/O '18)



音声ロボットによる美容院の電話予約

ロボット



"The first name is Lisa."

店側の人間



37:05 / 1:46:31



リサです

Keynote (Google I/O '18)



音声ロボットによる美容院の電話予約

ロボット



店側の人間



*"Okay, perfect. So I will see Lisa
at 10 o' clock on May 3rd."*



37:07 / 1:46:31



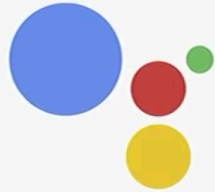
それでは、5月3日の10時に、リサ様をお待ちしています。

Keynote (Google I/O '18)



音声ロボットによる美容院の電話予約

ロボット



"Okay great, thanks."

店側の人間



37:11 / 1:46:31



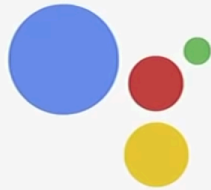
ありがとう

Keynote (Google I/O '18)



音声ロボットによる美容院の電話予約

ロボット



店側の人間



"Great. Have a great day. Bye."



37:12 / 1:46:31



よろしくお願いします。

Deep Learning ?

- この技術はディープ・ラーニングのSpeech2Text, Text2Speechの技術の上に成り立っているのだが、ディープ・ラーニング技術のみで出来上がっているわけではない。
 - ボイス・アシスタント系の技術は、もともと、基本的には、「ああ言われれば、こう言う」というシナリオを人間があらかじめ作っておくもの。ここでも、そうした枠組みに変化はないと思う。
 - Google DialogFlow の処理は、次のようなもの。
-



● Weather

Intent を作成

User saysの入力

SAVE



Contexts

User says

Search in user says



” Add user expression

” 一月三日の東京の雨の確率

パラメーターとエンティティの自動抽出

PARAMETER NAME

ENTITY

RESOLVED VALUE

date

@sys.date

一月三日の



geo-city

@sys.geo-city

東京



” 稚内の明日の天気

” 今日の天気は

Google DialogFlow



● Weather

IntentとEntity

SAVE



Action



Enter action name

エンティティの指定



REQUIRED ?	PARAMETER NAME ?	ENTITY ?	VALUE	IS LIST ?
☐	date	@sys.date	\$date	☐
☐	geo-city	@sys.geo-city	\$geo-city	☐
☐	Enter name	Enter entity	Enter value	☐

+ New parameter

Response ?



DEFAULT +

Google DialogFlow



Weather

IntentとResponseの入力

SAVE



geo-city

@sys.geo-city

\$geo-city



Enter name

Enter entity

Enter value



+ New parameter

Response ?

DEFAULT



Text response



- 1 わかりません
- 2 天気のこと、僕知らないの
- 3 情報検索できないの
- 4 Enter a text response variant

ADD MESSAGE CONTENT

Google DialogFlow

Deep Learning ?

- 今回のデモでの重要な進化は、会話の状態とその遷移を把握して、会話のコンテキストを理解する「知能」が新たにつけ加わろうとしていること。
 - それは、耳と口的能力を担当するディープ・ラーニング技術の「上に」、新しいモジュールを追加することで実現されているはず。
 - 実は、同じようなことが、Amazon Alexaでもできるのである。Alexa Multiturn Dialog を使う。
-

実は、同じようなことが
Alexaでもできるのである

Alexa Multiturn Dialog

Dialog ModelとDialog Directive

To use any of the Dialog directives, you must create a dialog model with the skill builder (beta). This structure identifies:

1. The slots that *must* be filled with valid values in order to fulfill the intent. These are considered *required slots*.
2. The prompts Alexa speaks to ask for required slot values and the utterances users can say in reply.
3. Whether any of the required slots must be also confirmed by the user before continuing.
4. Whether the entire intent must be confirmed by the user before continuing.
5. The prompts Alexa speaks to ask for slot and intent confirmations.

こんなロジック

```
// The intentRequest variable
// here is the IntentRequest object sent to the skill.
if (intentRequest.dialogState === "STARTED"){
    // Pre-fill slots: update the intent object with slot values for which
    // you have defaults, then return Dialog.Delegate
    // with this updated intent in the updatedIntent property.
} else if (intentRequest.dialogState !== "COMPLETED"){
    // return a Dialog.Delegate directive with no updatedIntent property.
} else {
    // Dialog is now complete and all required slots should be filled,
    // so call your normal intent handler.
    handlePlanMyTripIntent(intent, session, callback);
}
```

とても簡単なロジックだが、これが
あるだけで、急にマシンが「賢く」なる。 **Alexa Multiturn Dialog**

サンプル

□ User: Alexa, 「旅行計画」で、稚内行きの計画作って

- *Alexa sends the skill a PlanMyTrip intent with:*
dialogState: STARTED
fromCity: null
toCity: 稚内
travelDate: null
travelMode: null
activity: null
confirmationStatus: NONE
- *The skill returns a Dialog.Delegate directive with:*
updatedIntent.slots.fromCity: Seattle and the other slots unchanged (this defaults the fromCity to a value)

□ **Plan My Trip:** 東京からの出発でよろしいですか？

- *(Confirmation prompt for the fromCity slot, as defined in the dialog model.)*

□ **User:** そう

- *Alexa sends the PlanMyTrip intent with:*
dialogState: IN_PROGRESS
fromCity: 東京 (now with confirmationStatus: CONFIRMED)
toCity: 稚内
travelDate: null
travelMode: null
activity: null
confirmationStatus: NON
- *Skill returns a Dialog.Delegate directive.*

□ **Alexa:** いつ出発します？

- *(This elicitation prompt for travelDate comes from the dialog model.)*

□ User: 今週の金曜日

- *Alexa sends the PlanMyTrip intent with:
dialogState: IN_PROGRESS
fromCity: 東京 (confirmationStatus: CONFIRMED)
toCity: 稚内
travelDate: 2017-04-21
travelMode: null
activity: null
confirmationStatus: NONE*
- *Skill returns a Dialog.Delegate directive. (in this example, the travelMode and activity slots are not required, so Alexa does not prompt for them.)*

□ Alexa: 東京から稚内、4月21日の出発でよろしいですか？

- *(Intent confirmation prompt from the dialog model.)*

□ User: いいよ

- *Alexa sends the PlanMyTrip intent with:
dialogState: COMPLETED
fromCity: 東京 (confirmationStatus: CONFIRMED)
toCity: 稚内
travelDate: 2017-04-21
travelMode: null
activity: null
confirmationStatus: CONFIRMED*
- *Skill now has all needed information and can handle the PlanMyTrip intent.
Since the dialogState is COMPLETED, the skill can no longer return the Dialog.Delegate directive.*

□ User: ちがうよ

- *Alexa sends the PlanMyTrip intent with:
dialogState: COMPLETED
fromCity: 東京 (confirmationStatus: CONFIRMED)
toCity: 稚内
travelDate: 2017-04-21
travelMode: null
activity: null
confirmationStatus: DENIED*
- *The dialog is considered complete since all information was gathered.
Since the dialogState is COMPLETED, the skill can no longer return the Dialog.Delegate directive.*

ElicitSlot Directive Sample

```
{
  "version": "1.0",
  "sessionAttributes": {},
  "response": {
    "outputSpeech": {
      "type": "PlainText",
      "text": "From where did you want to start your trip?"
    },
    "shouldEndSession": false,
    "directives": [
      {
        "type": "Dialog.ElicitSlot",
        "slotToElicit": "fromCity",
        "updatedIntent": {
          "name": "PlanMyTrip",
          "confirmationStatus": "NONE",
          "slots": {
            "toCity": {
              "name": "toCity",
              "confirmationStatus": "NONE"
            }
          }
        }
      }
    ]
  }
}
```

```
    },
    "travelDate": {
      "name": "travelDate",
      "confirmationStatus": "NONE",
      "value": "2017-04-21"
    },
    "fromCity": {
      "name": "fromCity",
      "confirmationStatus": "NONE"
    },
    "activity": {
      "name": "activity",
      "confirmationStatus": "NONE"
    },
    "travelMode": {
      "name": "travelMode",
      "confirmationStatus": "NONE"
    }
  }
}
]
```

Alexa Multiturn Dialog

自動運転車でも同じようなコントロールが必要である

Deep Learning + ?

全画面表示を終了するには `esc` を押します



Deep Learning + ?

Keynote (Google I/O '18)



1:34:56 / 1:46:31



Deep Learning + ?

- アメリカでは盛んに公道実験されている自動運転カーでも、同様である。これらの車は、そのままでは、日本の公道を走ることとはできない。なぜって、それらは、道路の右側を走ろうとするからである。
 - 自動運転カーでは、目と反射的な運動能力を担当するディープ・ラーニング技術の「上に」、様々な(しかも、地域によって異なり、時々変更される)「交通ルール」に従って、かつ状況に応じて適切な「推論」を行なって、安全に車を運転させるモジュールが必須となる。
-

Deep Learning + ?

- 現在、AIの世界で進行していることは、まだ萌芽的なのだが、ディープ・ラーニング技術の「上に」、新たな「知的」なレーヤーが形成されつつあることだと僕は考えている。

AI = Deep Learning
ではないのだ。

- このことは、人工知能研究の歴史を振り返ってみても、当然予想されることである。本セミナーでは、こうした視点を確認しつつ、AI技術の変化の先にあるものを考えたいと思う。

- Facebook f8 では、別の話題が大きく取り上げられた。
-

Facebook f8 2018



AIを巡る新たな社会的問題



Cambridge Analytica社
による選挙干渉疑惑

The Atlantic

What Facebook Did to American Democracy

argument on Facebook Live

Protecting Election Integrity



AIを巡る新たな社会的問題



Protecting Election Integrity



Fighting Fake News



Data Privacy



AIを巡る新たな社会的問題

Fighting Fake News

Spam

Fake Accounts

Hoaxes

Built Defenses To Detect Click-Jacking

Fact Checkers Launched in France

AI Tools Took Down Thousands of Fake Accounts

Blocked Ads From Pages That Repeatedly Share Fake News

Launched Machine Learning To Help Detect and Take Action Against Fake Accounts

Related Articles Launched for Reliable Information

Launched Machine Learning To Help Detect and Take Action Against Fake Accounts

20,000 Security and Content Reviewers at Facebook

5/2011
5/2015

12/2016

1/2017

4/2017

8/2017

9/2017

12/2017
12/2017

2/2018

3/2018

3/2018

3/2018

4/2018

10/2018

Launched Sigma, Improved Spam and Abuse-Fighting System

Partnered With Fact-Checkers To Debunk Viral Hoaxes, Reducing Future News by 80%

Removed Monetization From Publishers That Repeatedly Share Fake News

Fact Checkers Launched in Italy

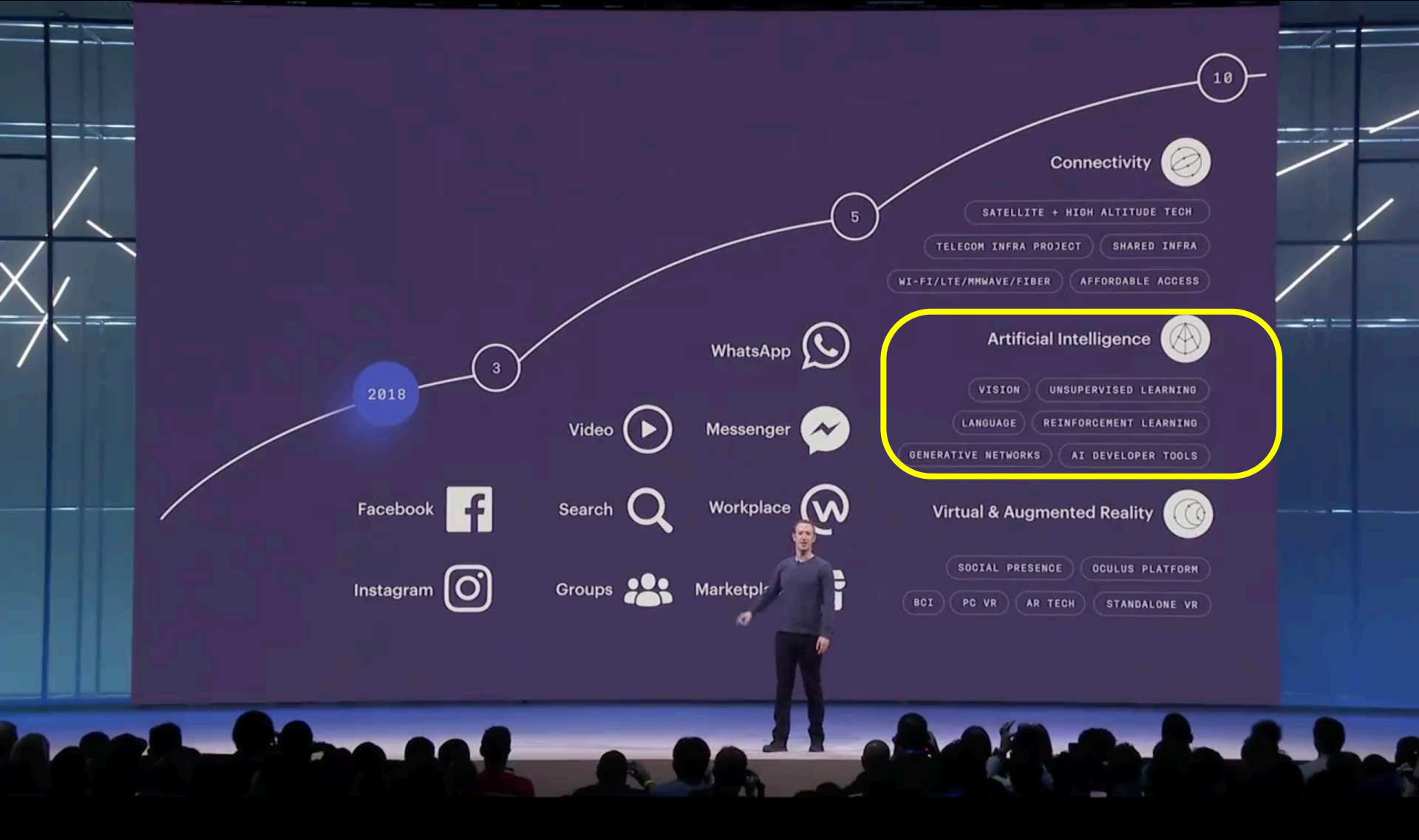
Fact Checkers Launched in India, Indonesia, the Philippines

Fact Checkers Launched in Mexico

Verifying Political and Issue Advertisers



AIを巡る新たな社会的問題



Digital Wellbeing

How we can help you



Understand
your habits



Focus on
what matters



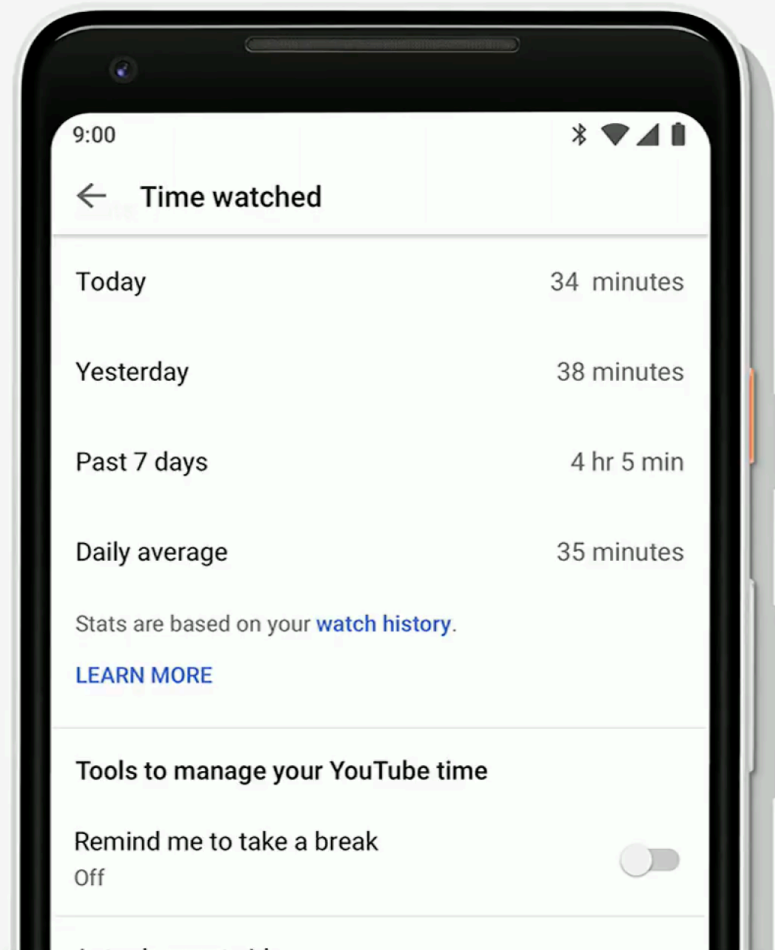
Switch off and
wind down



Find balance
for your family

AIを巡る新たな社会的問題

Dashboard



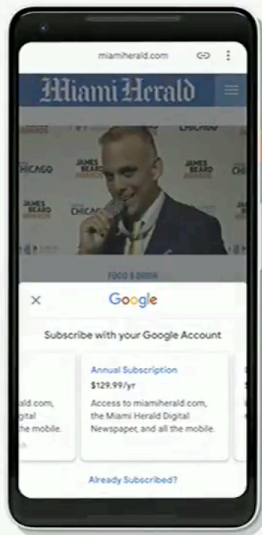
Google Android Dashboard

AIを巡る新たな社会的問題

Google News Initiative

Products

Help news organizations and journalists thrive on the web



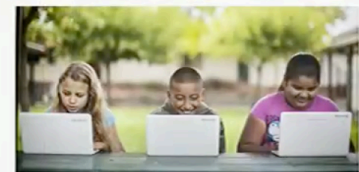
Partnerships

Create joint solutions to business and industry challenges



Programs

Tackle the biggest industry challenges together



AIを巡る新たな社会的問題

Everyone has access
to the **same information**

Google News Initiative



Apple's Tim Cook calls for more regulations on data privacy

<https://goo.gl/WVwDw1>

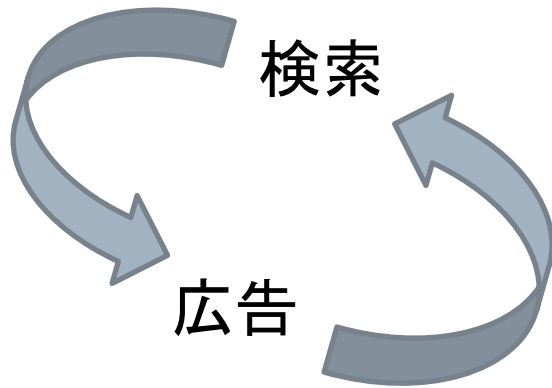
**Mark Zuckerberg on Tim Cook's criticism of Facebook:
It's "extremely glib and not aligned with the truth"**

"The reality here is that if you want to build a service that helps connect everyone in the world, then **there are a lot of people can't afford to pay,**" Zuckerberg said. "And therefore, as with a lot of media, having an **advertising-supported model is the only rational model that can support building this service to reach people.**"

<https://goo.gl/EJ9s8V>

2000年

リスティング広告
Page Rank
Hadoop

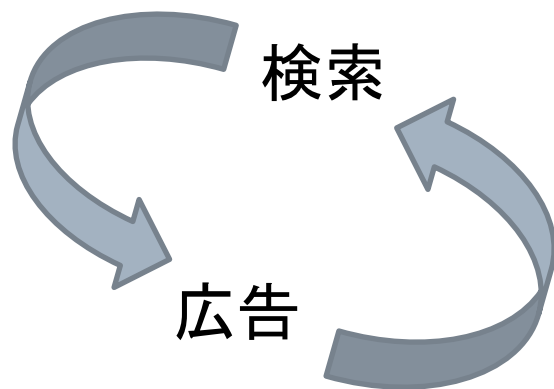


21世紀のIT技術を
大きく変えたのは、
Googleによる、検索
と広告を結びつけた
新しいビジネス・モデル
の成功だった。

Googleの登場
大規模分散システム

2000年

リスティング広告
Page Rank
Hadoop



Googleの
大規模分散システム

2010年

検索のリアルタイム化
Knowledge Graph
音声検索

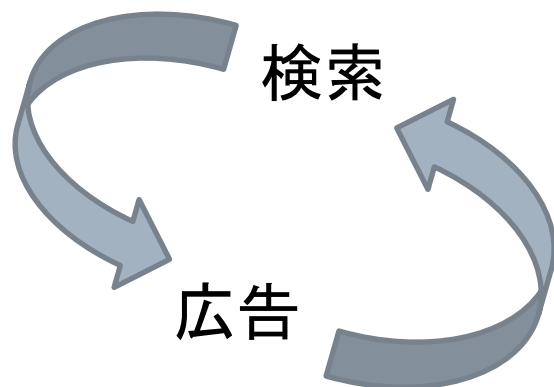


**SNS、
スマートフォン、
クラウドの登場**

Big 4
Google,
Apple,
Facebook,
Amazon
の覇権が
強まる

2000年

リスティング広告
Page Rank
Hadoop



Googleの
大規模分散システム

2010年

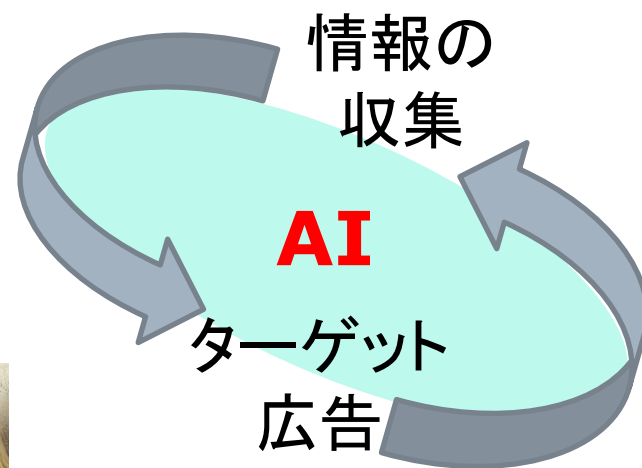
検索のリアルタイム化
Knowledge Graph
音声検索



SNS、
スマートフォン、
クラウドの登場

2020年

情報の収集・ターゲット
広告へのAIの利用



AI技術の利用の拡大

2000年

リスティング広告
Page Rank
Hadoop



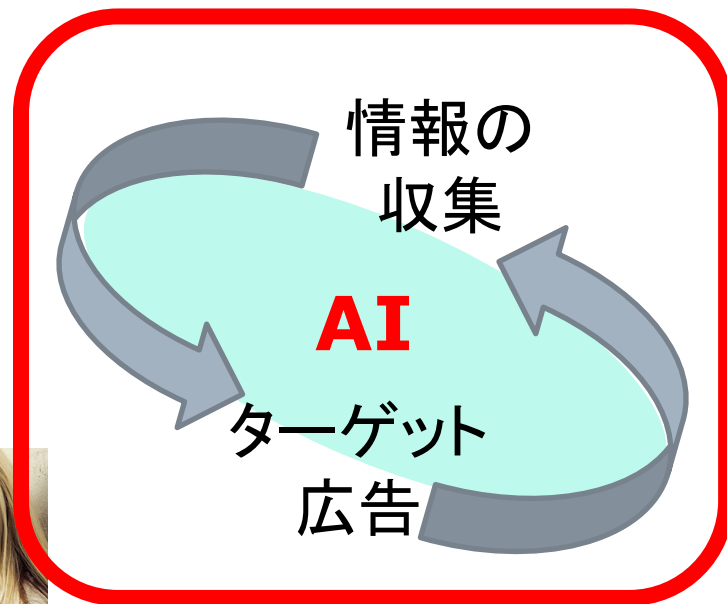
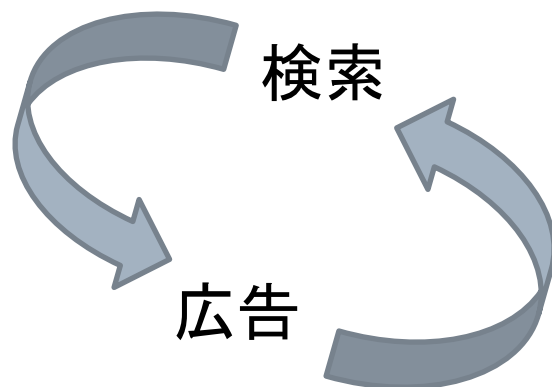
2010年

検索のリアルタイム化
Knowledge Graph
音声検索



2020年

情報の収集・ターゲット
広告へのAIの利用



Googleの
大規模分散システム



SNS、
スマートフォン、
クラウドの登場



AI技術の利用の拡大

Part II

歴史を振り返る

人工知能/人間の知能/機械と人間
の歴史を振り返る

Agenda Part II

歴史を振り返る

□ 人工知能の歴史を振り返る

- 計算主義の流れ
- コネクショニズムの流れ
- 知識・検索主義の流れ

□ 人間の知能と機械と人間の歴史を振り返る

- 生命の誕生と生物の感覚・運動能力の拡大
 - 機械による人間の運動能力の外的拡大
 - 機械による人間の感覚能力の外的拡大
 - 人間の言語能力の獲得
-

人工知能の歴史を振り返る

三つの主要な流れ

計算主義
コネクショニズム
知識・検索主義



計算主義の流れ

「計算主義」の流れ

- 「計算主義」の流れを追ってみよう。
- Turingの洞察は画期的なものだったが、彼は若くして死に、「考える機械」の実装に進む事はなかった。
- この時期の「計算主義」の取り組みでの最大の成果は、Chomskyによる文法の数学的特徴づけとその階層性の解明である。しかし、Chomskyの仕事は、当時は、「人工知能」の文脈の中では捉えられる事はなかった。
- この頃の「人工知能」では、SimonのGPSやLogical Theoristが目进行く。しかし彼のアプローチは、知能や論理についての洞察を欠く、徹底してヒューリスティックなものだった。それは、計算主義とは異なるものだ。そして、彼の楽観論は失敗する。

1930-40年 Church ラムダ計算

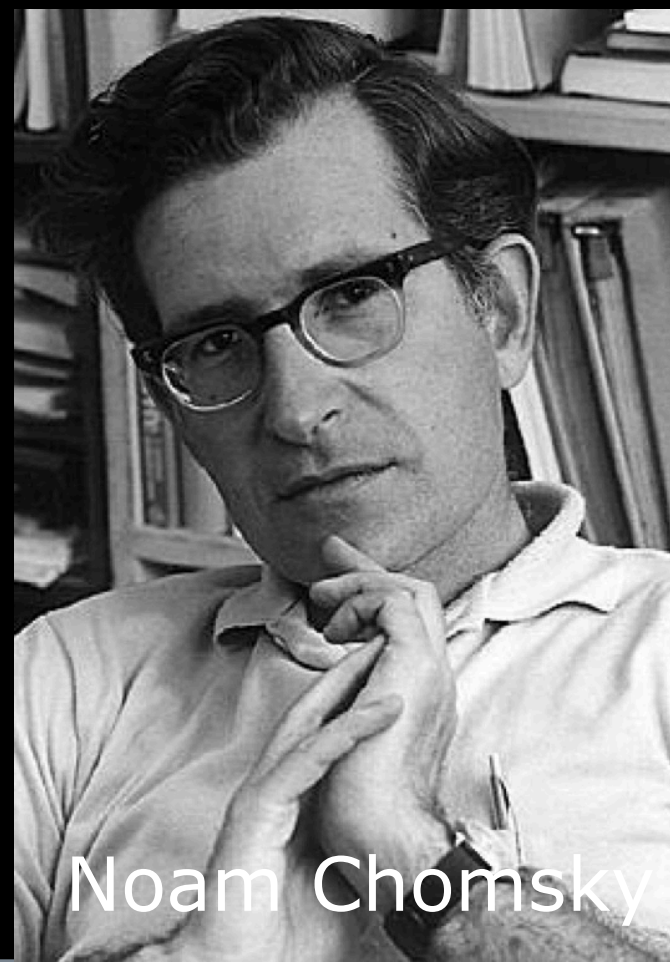


Aronzo Church

1950年 Turing



1955年 Chomsky 生成文法



Noam Chomsky

「計算主義」の流れの後退

- 「計算主義」の流れでは、1965年のRobinsonの Resolution Principalは、重要な成果である。それは一階の述語論理の証明をコンピュータ上で行うことに道を開き、論理型言語 Prologに基礎を与えた。
- 1970年代は、人工知能に対する失望が広がり、問題の難しさもあって、「計算主義」も後退を余儀無くされる。
- この時期の「計算主義」の流れを汲む取り組みの代表は、「論理」を「ルール」に変え、ヒューリスティックの要素を取り入れたFeigenbaumのExpert Systemである。
- 人工知能における「計算主義」の、ある意味(これまではという意味で)最後の代表例は、1980年代の日本の「第五世代コンピュータ」プロジェクトである。

1965年 Resolution Principal



John Alan Robinson

Expert System



Edward Feigenbaum

1982年 第五世代コンピュータ



淵一博

「計算主義」の新しい流れ

- 「計算主義」の流れは、日本のプロジェクトの終了後、人工知能の世界では、勢いを失う。ただ論理的推論の機械による実行の試みは、数学の「定理証明」の分野では生き続ける。また、そこで用いられた「型の理論」は、人工知能技術とは、現時点では、切り離されてはいるのだが、新しい発展を続けて行く。それについては、Part IVで触れることにする。
 - 「計算主義」の流れで特筆すべきなのは、Chomskyが、60年近く一貫して、この立場からの言語能力の解明に取り組んできたことである。それについては、Part IIIで触れたいと思う。
-

コネクショニズムの流れ

「コネクショニズム」の流れ

第一期 Perceptron

- 「コネクショニズム」の流れを振り返ろう。その流れも平坦なものではなかった。
 - 第一期のRosenblattのPerceptronは、大きな関心を集めるのだが、Minskyらの「線形分離ができない」という批判の前に、認識能力に限界あることを認めざるを得なかった。
-

1958年 Perceptron



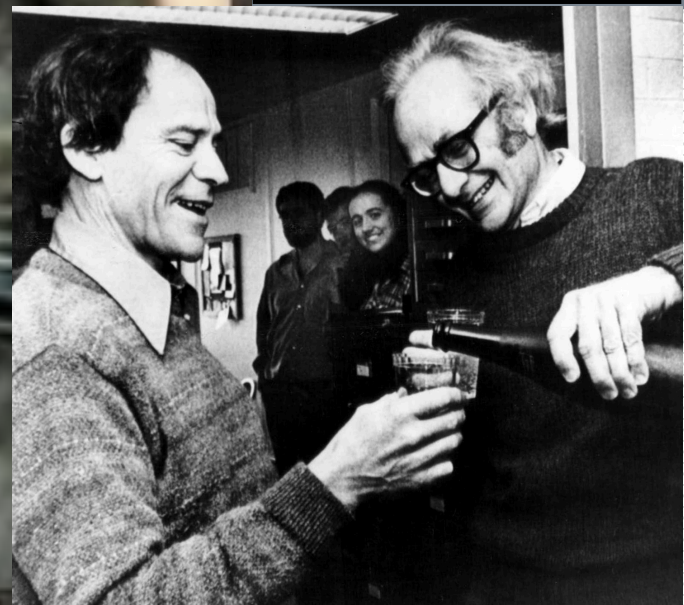
Frank Rosenblatt



1959年

David H. Hubel

Torsten Wiesel

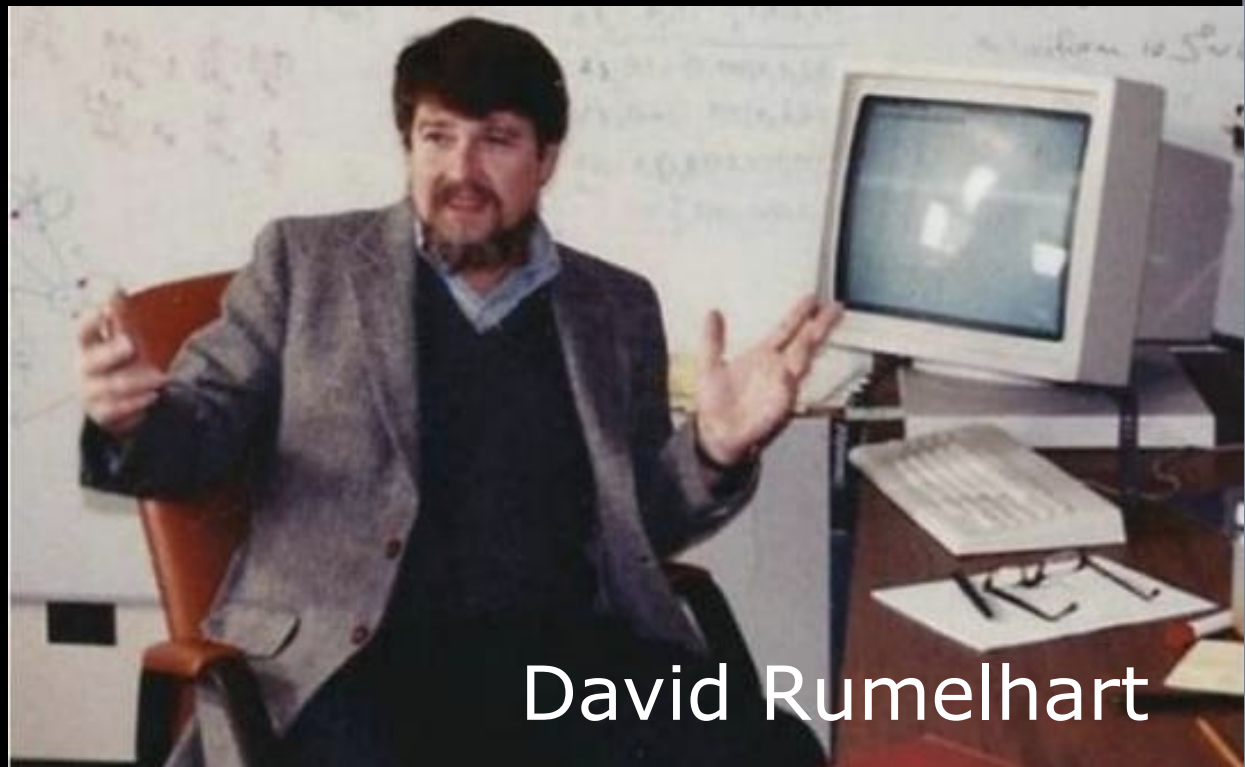


「コネクショニズム」の流れ

第二期 PDPとコネクショニズム

- 日本の「第五世代コンピュータ」に少し遅れて始まった第二期のRumelhartらの“PDP(parallel Distributed Processing)”モデルは、人工知能の分野での「計算主義」の衰退の中で、認知科学でも大きな影響力を持った。「コネクショニズム」という命名は、この時期からのものだ。
 - 若いHintonも参加した、Back Propagation等の手法は、今日のDeep Learningにも、そのまま引き継がれている。
-

1986年 Parallel Distributed Processing

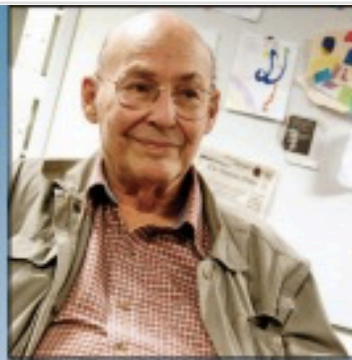


David Rumelhart

「コネクショニズム」の流れ

コネクショニズムの衰退

- 残念ながら、第二期の「コネクショニズム」では、理論的枠組みの深化はあったものの、そのモデルを実際に計算する計算パワーが、圧倒的に不足していた。そして、それは次第に衰えて行った。
-



人工知能の殿堂 by IEEE 2010年

H a l l o f F a m e

AI's Hall of Fame

2010年 IEEE特集

AI's Hall of Fame

- **Edward Feigenbaum**
Engineering Knowledge
- **John McCarthy**
Logic and Common Sense
- **Marvin Minsky**
Cognitive Science and AI
- **Douglas Engelbart**
AI and Interactive Computing
- **Tim Berners-Lee**
Collective Knowledge
- **Lotfi Zadeh**
Fuzzy Logic and Computational Intelligence
- **Noam Chomsky**
Computational Linguistics and Cognitive Science
- **Raj Reddy**
AI and Societal Impact
- **Judea Pearl**
Probability, Causality, and Intelligence
- **Nils J. Nilsson**
Problem Solving and Planning

「コネクショニズム」の流れ

第三期 Deep Learning

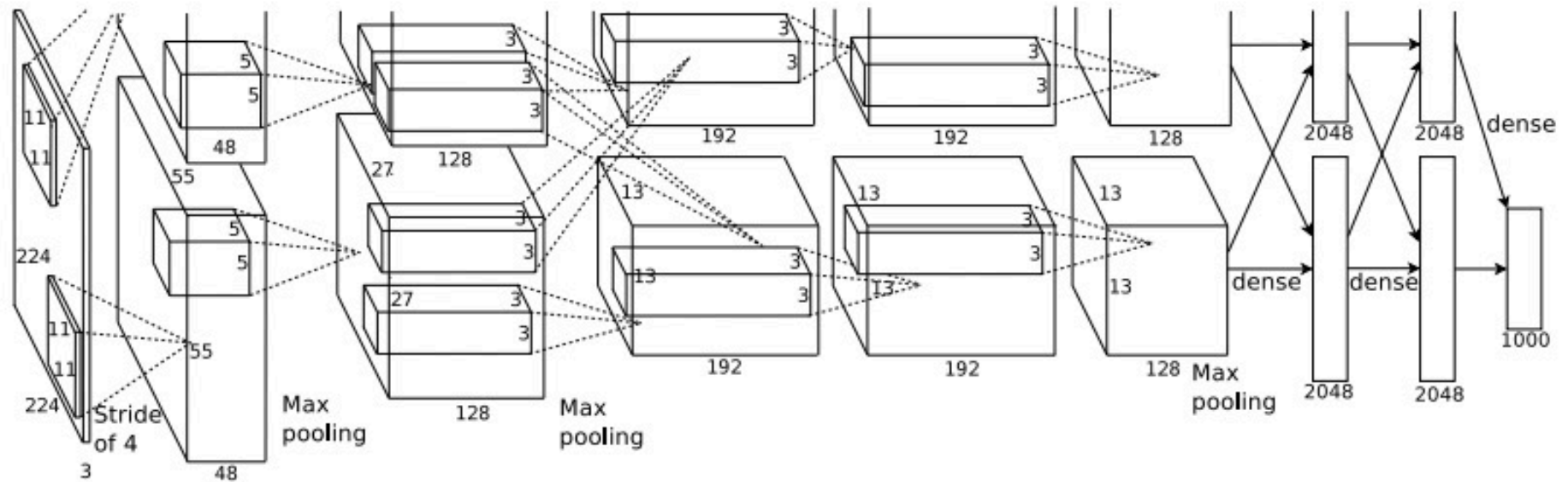
- 長い雌伏の期間をへて、第三期の「コネクショニズム」は、5年前の2012年に、爆発的に復活する。Google Distbeliefの「Googleの猫」、ImageNetでのCNNのAlexNetの優勝、さらに、Hintonらのチームによる音声認識の精度の飛躍的向上が、この年、同時に起きる。現在に続くDeep Learningブームの始まりである。
-



Geoffrey Hinton
Yann LeCun
Yoshua Bengio



AlexNet



“Deep Neural Networks for Acoustic Modeling in Speech Recognition” Geoffrey Hinton et al.

ディープラーニングを用いた
音声認識技術の飛躍

<https://goo.gl/GT6Bg9>

2012年



「コネクショニズム」の流れ

Deep Learning の現在と可能性

- 現代のDeep Learning技術は、MLP, CNN, RNN(LSTM)、強化学習モデルといった多数のモデルを擁し、その応用は、画像認識、音声認識、自動運転・ロボットの制御、ゲーム、機械翻訳等々、広い範囲に及び、それぞれの分野で大きな成果をあげている。そうした応用分野の拡大は、今後もさらに続くだろう。
 - 僕は、人工知能技術の未来展望のコンテキストの中で、“Post Deep Learning”という言葉を使っている。それは、人工知能技術には、まだまだ多くの解くべき課題があり、おそらくそれらは、Deep Learningの手法のみでは解けないだろうと感じているからである。
-

知識・検索主義の流れ

知識・検索主義の流れ

- 人工知能へのアプローチの大きな二つの立場、「計算主義」と「コネクショニズム」のこれまでの動きを概括してきた。ただ、振り返ってみると、この二つだけには収まらない、しかしながら、人工知能技術にとっては極めて重要な役割を持ちうる流れがあることに気づく。それは、「知識・検索主義」とでもいうべき流れである。
- 我々人間の知能では、「記憶と想起」のメカニズムが重要な役割を果たしている（「記憶と想起」の機能を持つのは、人間だけではないことに留意）。そのメカニズムの機械への置き換えを目指すものと考えていい。
- MinskyのFrame理論は、こうした流れの遠祖かもしれない。ただ、「知識の表現論」としては、MinskyのFrameは、内的な認知構造に注目したものだ。

知識・検索主義の流れ

Googleの登場

- 「知識・検索主義」の機械による実装の最初の成功者はGoogleである。そこでは、「知識」はWeb上のすべての文字情報で、「検索」は、その中から指定された文字列を見つけ出すことだ。繊細なFrame理論は、情報のWebスケールへの拡大と引き換えに、単純化され退化する。(確かに、「知識」の集積に、外的記憶として文字を使うのは人間だけである。人間の知識として、ネット上の文字情報の集積に注目したのは正しい。)
- GoogleのLarry Pageは、かつて次のように語っていた。人工知能とは、「Googleの最終バージョン」であり、「究極の検索エンジン」のことだと。ここでは、「人工知能」の主体は、個々の機械ではなく、ネットそのものになる。(これも、人工知能の未来像としては、ある意味で卓見かもしれない。)

2004年 Google



Larry Page

検索と人工知能: Larry Pageの人工知能観

- 「Googleの検索エンジンが、AIによって完全なものになったときにのみ、Googleのミッションは、完遂されるだろう。あなたたちは、それが何を意味するのか知っている。それが人工知能なのだ。」
 - 「人工知能は、Googleの最終バージョンになるだろう。Web上のすべてのものを理解するだろう究極の検索エンジンは、あなたが望むものを正確に理解するだろうし、あなたに正しいものを与えるだろう。我々は、今は、そうしたことをするのに、遠いところにいる。ただ、我々は、少しずつ、それに近づくことはできる。我々が取り組んでいることは、基本的には、そのことなのだ。」
 - 「検索における我々の大きな目標は、人が望むものを、実際に正確に理解し、世界のすべてのものを理解することである。コンピューター科学者として、我々は、それを人工知能と呼ぶ。」
-

2011年 IBM Watson



知識・検索主義の流れ

Googleの検索技術の変化

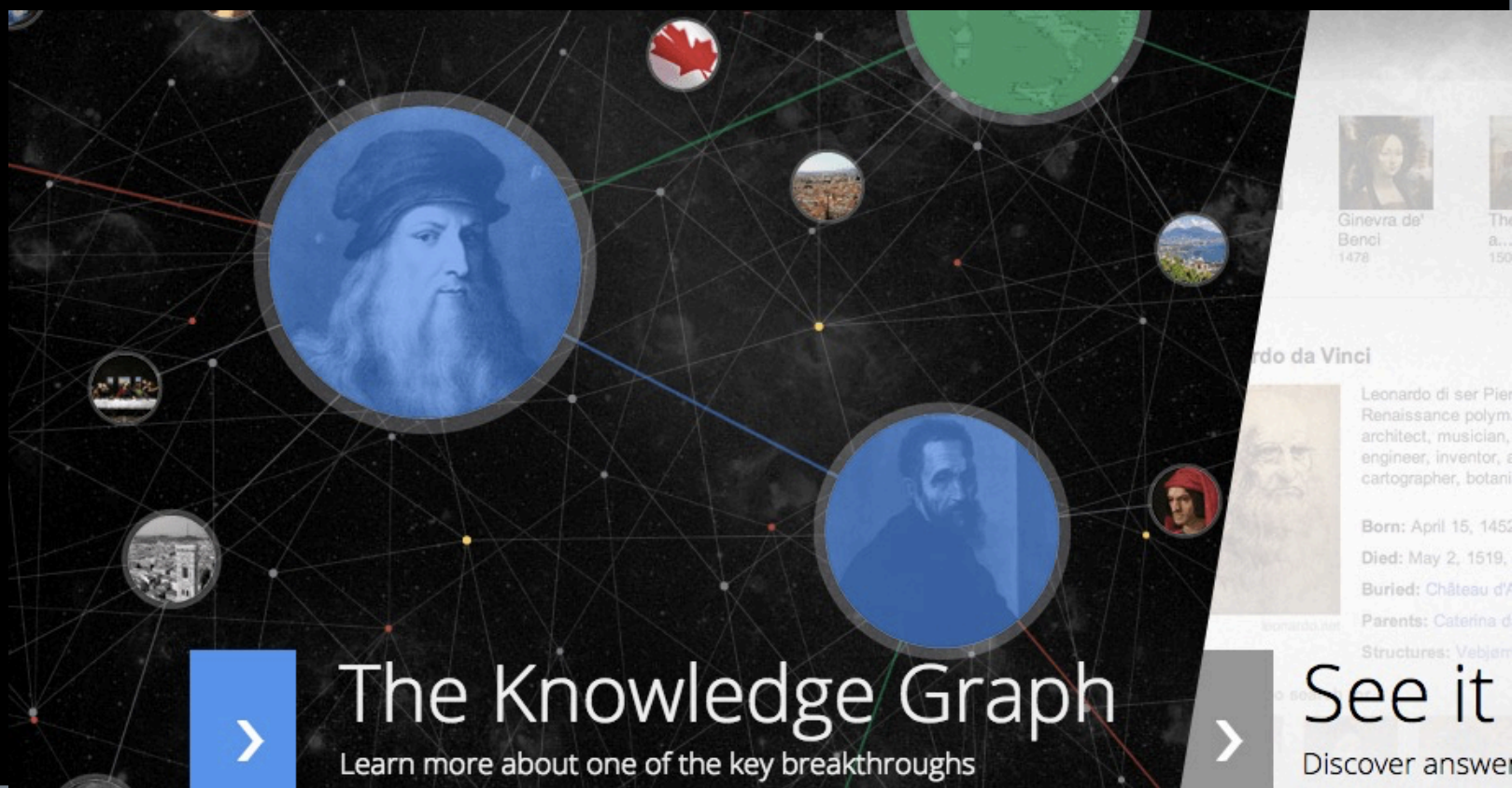
- Googleの検索技術は、2010年代に大きく変化する。文字列検索に代わって、大規模なEntityグラフ上の検索を利用する Knowledge Graph も投入される。
- Entityグラフ・モデルでのノードの検索技術は、音声検索には不可欠な技術となる。注意すべきなのは、こうしたEntityグラフの情報は、何らかの形で収集されたWeb上の文字情報から構成されたものだということである。
- 2011年、Googleが中心となって、EntityモデルのSchema定義を共有するSchema.orgが設立される。ネットワークからアクセスできる形での「知識の表現」(正確にいうと、「知識の表現」そのものではなく「知識の表現の形式」なのだが)が、動き始めたことになる。

2012年 Facebook

**He who controls the graph,
controls the world.**



2012年 Google Knowledge Graph



Ginevra de' Benci
1478

Leonardo da Vinci

Leonardo di ser Piero da Vinci
Renaissance polymath, architect, musician, engineer, inventor, astronomer, cartographer, botanist, geologist, and scientist.

Born: April 15, 1452

Died: May 2, 1519

Buried: Château d'Amboise

Parents: Caterina da Vinci

Structures: Vitruvian Man

>

The Knowledge Graph

Learn more about one of the key breakthroughs

>

See it

Discover answers

2011年 Schema.org

schema.org

人間の知能と機械と人間の 歴史を振り返る

- 生命の誕生と生物の感覚・運動能力の拡大
- 機械による人間の運動能力の外的拡大
- 機械による人間の感覚能力の外的拡大
- 人間の言語能力の獲得

人間の知能と機械と人間の歴史を振り返る

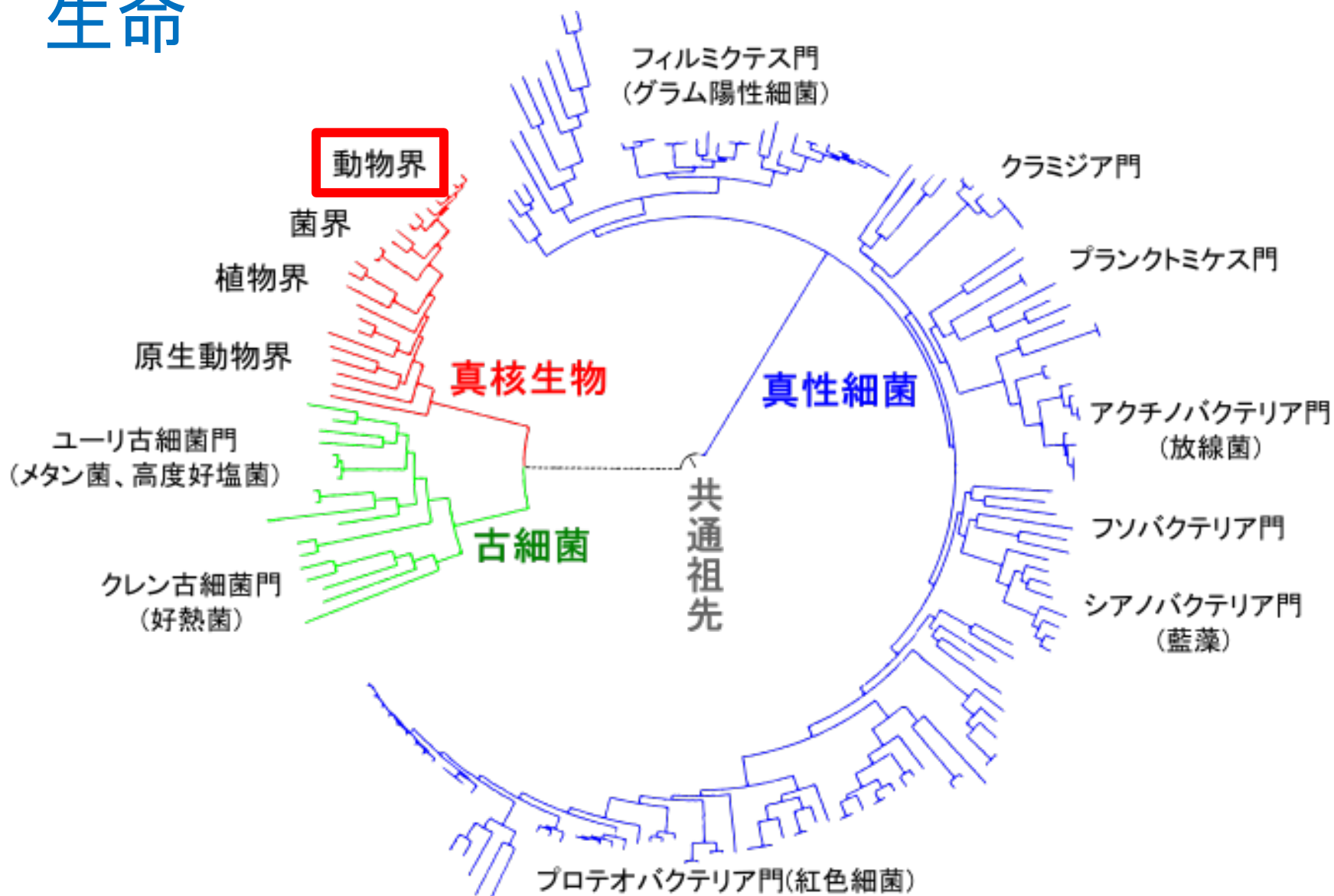
- 人工知能技術が、究極的には人間の知能の機械による代替を目指す技術であるなら、我々はまず、人間の知能がどのような特徴を持つものであるのかをよく知らなければならない。そのためには、人間の知能が辿った道を振り返るのは有効である。
- また、機械と人間の関係は、人工知能技術で初めて問われることになったわけではない。我々人間と機械との関係は、生命の長い歴史からみるとごく短いものでしかないが、近現代、特に産業革命以降に限ってみると、それは、人間の社会・経済に大きな影響を与え、また、人間の自然認識・技術を飛躍的に発展させてきた。こうしたダイナミズムは、日々、我々人間と機械の関係を密なものにしている。

生命の誕生と 生物の感覚・運動能力の拡大

生命の誕生

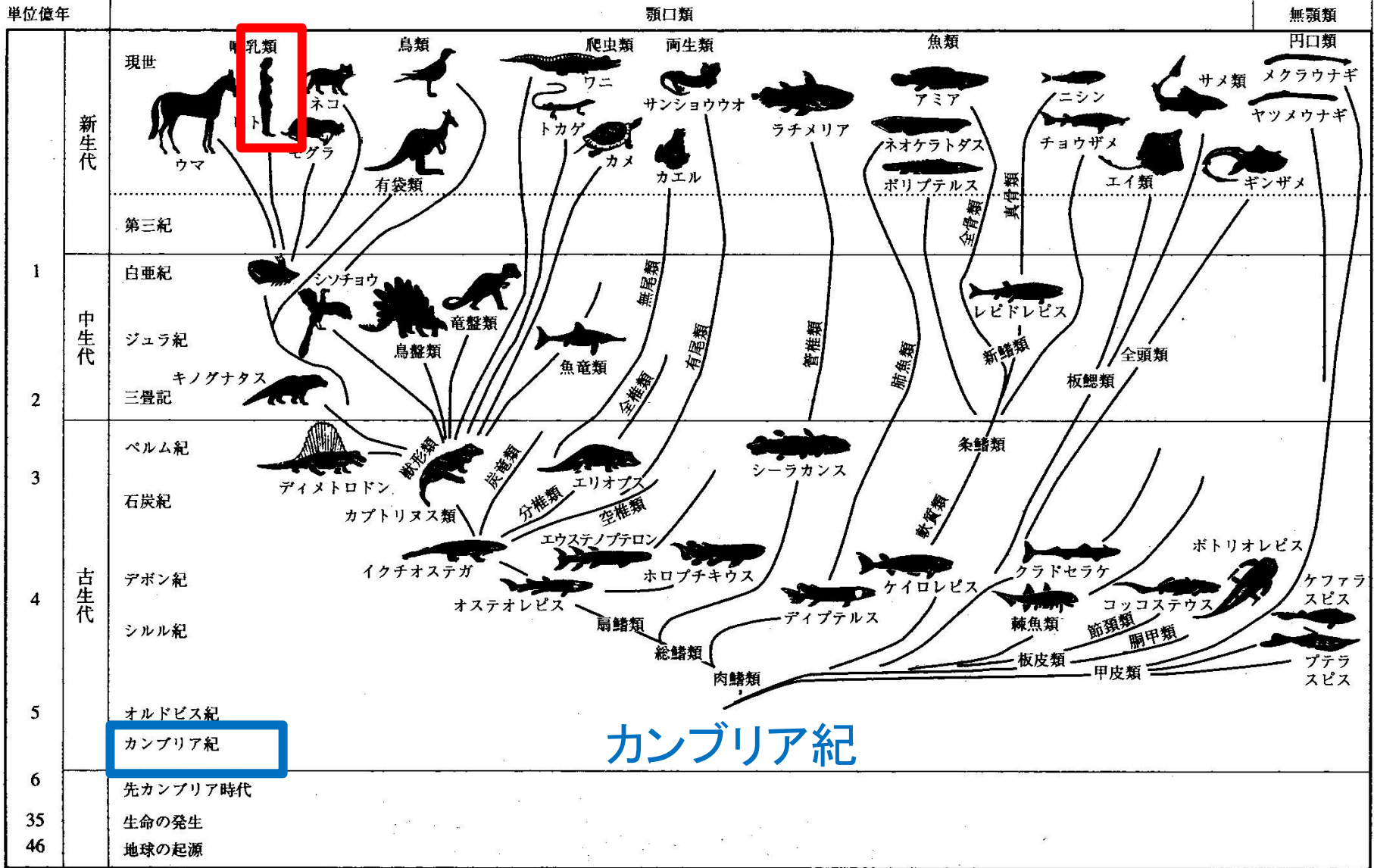
- 生命の誕生は、基本的には、エネルギー代謝過程と遺伝子情報による情報過程の二つの過程に支えられて、自己複製を可能とするシステムの誕生を意味する。プリミティブな生命の情報過程の基本的なミッションは、自己の情報を忠実に世代を超えて伝えることであり、「知的」な情報処理は、ほとんど行われていない。
- 今から5億年前のカンブリア紀に、生物の情報処理過程に大きな変化が起きる。眼が生まれたのだ。捕食し、あるいは、捕食者から逃れるために動物の感覚・運動能力は飛躍的に高まった。リアルタイムに環境に適応するため動物の情報処理システムは高度なものとなり、そのセンターとして中枢神経系が発達する。脊椎動物は、脳を持つようになる。

生命



脊椎動物

脊椎動物の進化



視覚の誕生と発展

- 生物の最も高度な知覚の器官は「眼」である。視覚は、今から5億年以上前のカンブリア紀に大きな進化を遂げたという。
 - 捕食者として当時の生態系の頂点に立ったアノマカリスは立派な眼を持っていた。視覚に生物学的な(視覚神経的な)共通の基礎があるのは当然のことだと思う。
 - 機械学習の最も基本的なモデルは視覚だといっていいと思う。
-



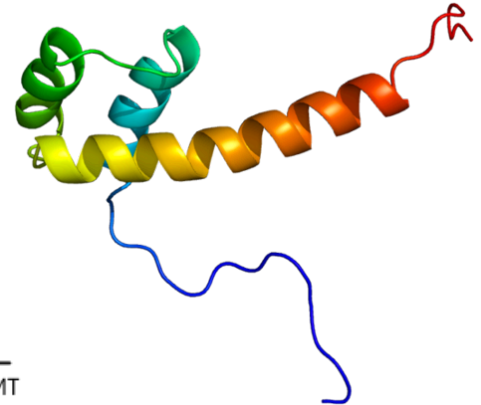
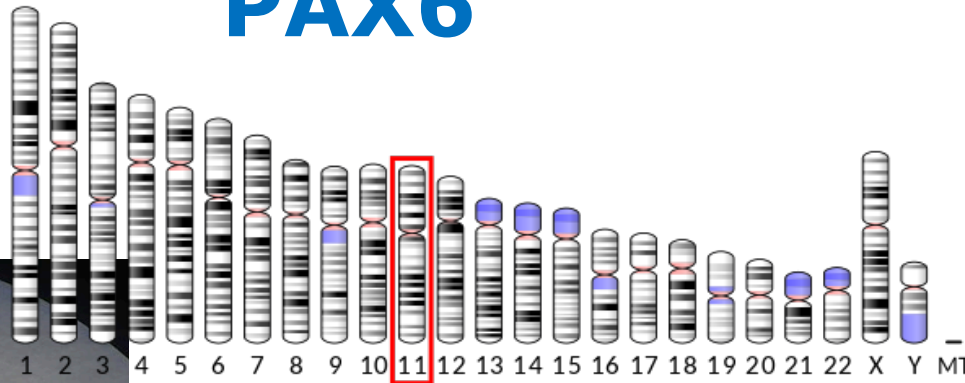
多くの生物は目を持っている



ゲーリングによる目の遺伝子Pax-6の発見

https://www.brh.co.jp/seimeishi/journal/012/ss_1.html

PAX6

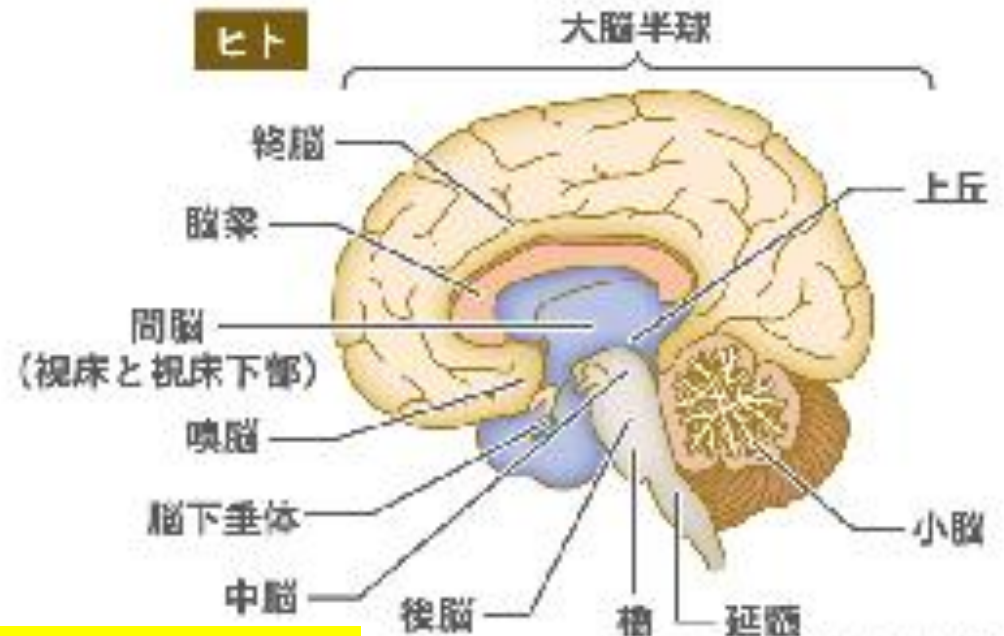
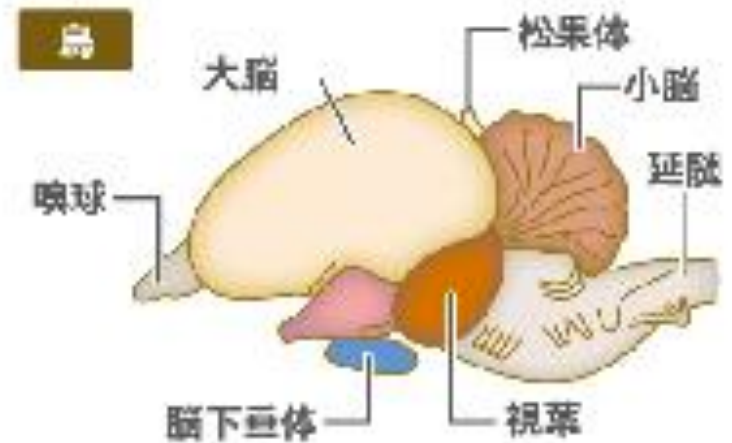
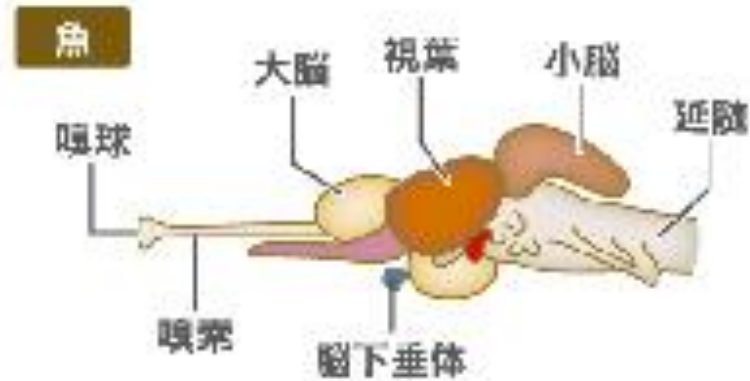


	Human	Mouse	Zebrafish	Drosophila
WT				
mut				
EQs	<i>PAX6</i> ^{+/-} cornea opaque iris absent retina degenerate lens opaque aqueous humor of eyeball increased pressure	<i>Pax6</i> ^{-/-} eye decreased size lens fused_to cornea iris morphology absent anterior chamber absent	<i>pax6b</i> ^{-/-} eye decreased size lens decreased size retina malformed	<i>ey</i> ^{-/-} eye absent

Fruitflies without the *PAX6* gene have no eyes

<https://goo.gl/MqpDzQ>

中枢神経系の発達



<https://goo.gl/pi6fMN>

言語能力の獲得、文字とメディア

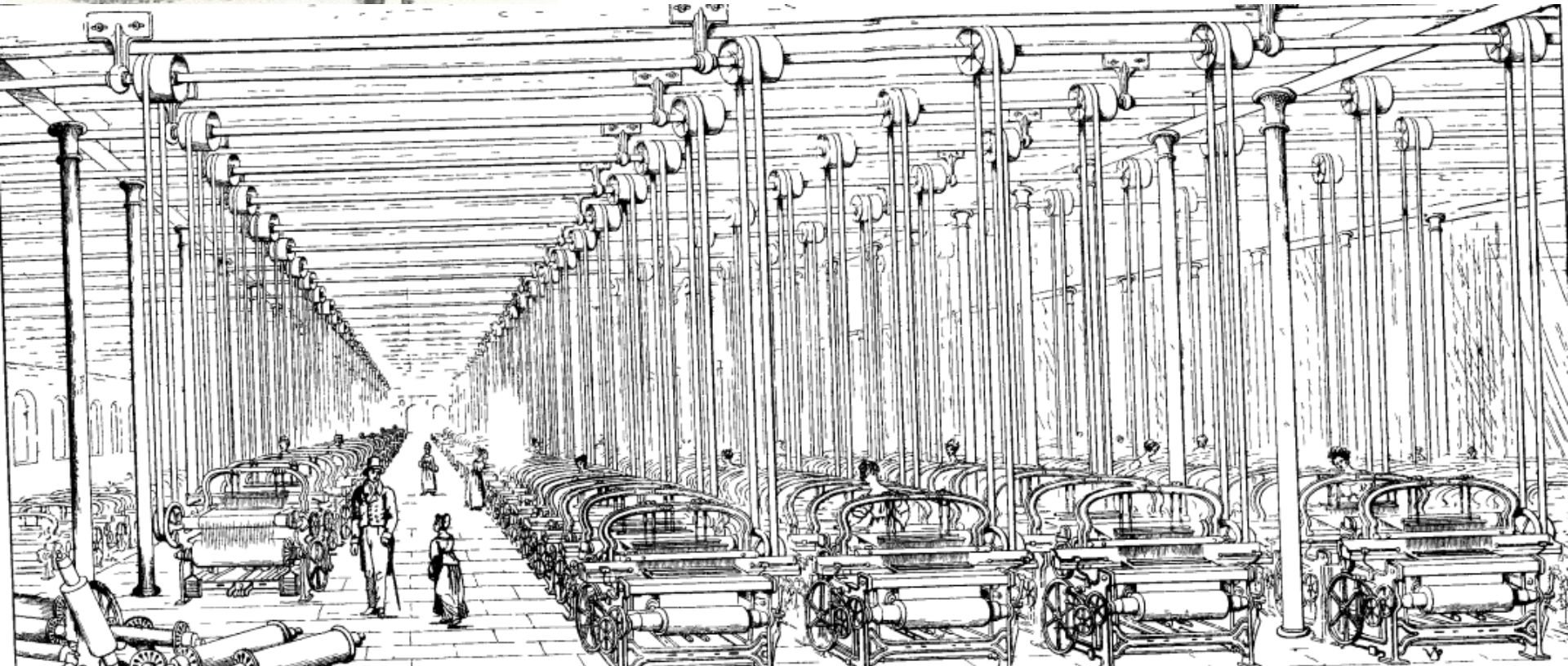
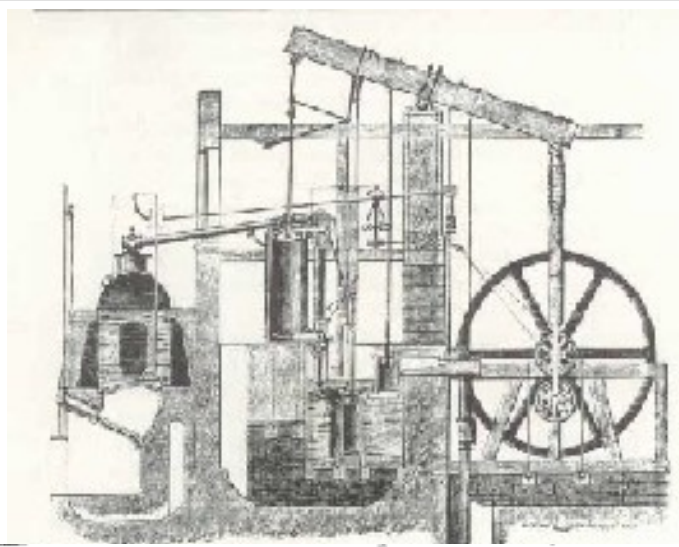
- 高度な脳を持つ類人猿から人類が進化してくる。人類を他の類人猿とを区別する最大の特徴は、人類が言語能力を持ったことであった。言語能力は、人類に、世界の把握の仕方を他の動物たちとは、全く異なるものにした。宗教と芸術と技術と科学が、もちろんプリミティブな形ではあるが、同時に生まれた。
- 人類は、やがて文字を発明する。言語能力は、個体・集団間の共時的なコミュニケーションを可能にしていたのだが、世代を超えた情報の伝達は、記憶能力に頼った口伝えでしかできなかった。印刷技術の発明は、情報の蓄積・伝搬のスタイルを大きく変える。文字無しには、今日のインターネットもSNSも、プログラミングも成り立たないのだ。

数学の成立

- 文字の発明に少し遅れて、実践的に量を扱う技術として、数学が登場する。それは古代ギリシャで体系化され、中世イスラム世界を通じて、近世のヨーロッパに逆輸入される。ニュートンは、新しい数学「微分・積分」の発見者でもあるがゆえに、産業革命に先行した「科学革命」の完成者となりえたのである。
-

機械による 人間の運動能力の外的拡大

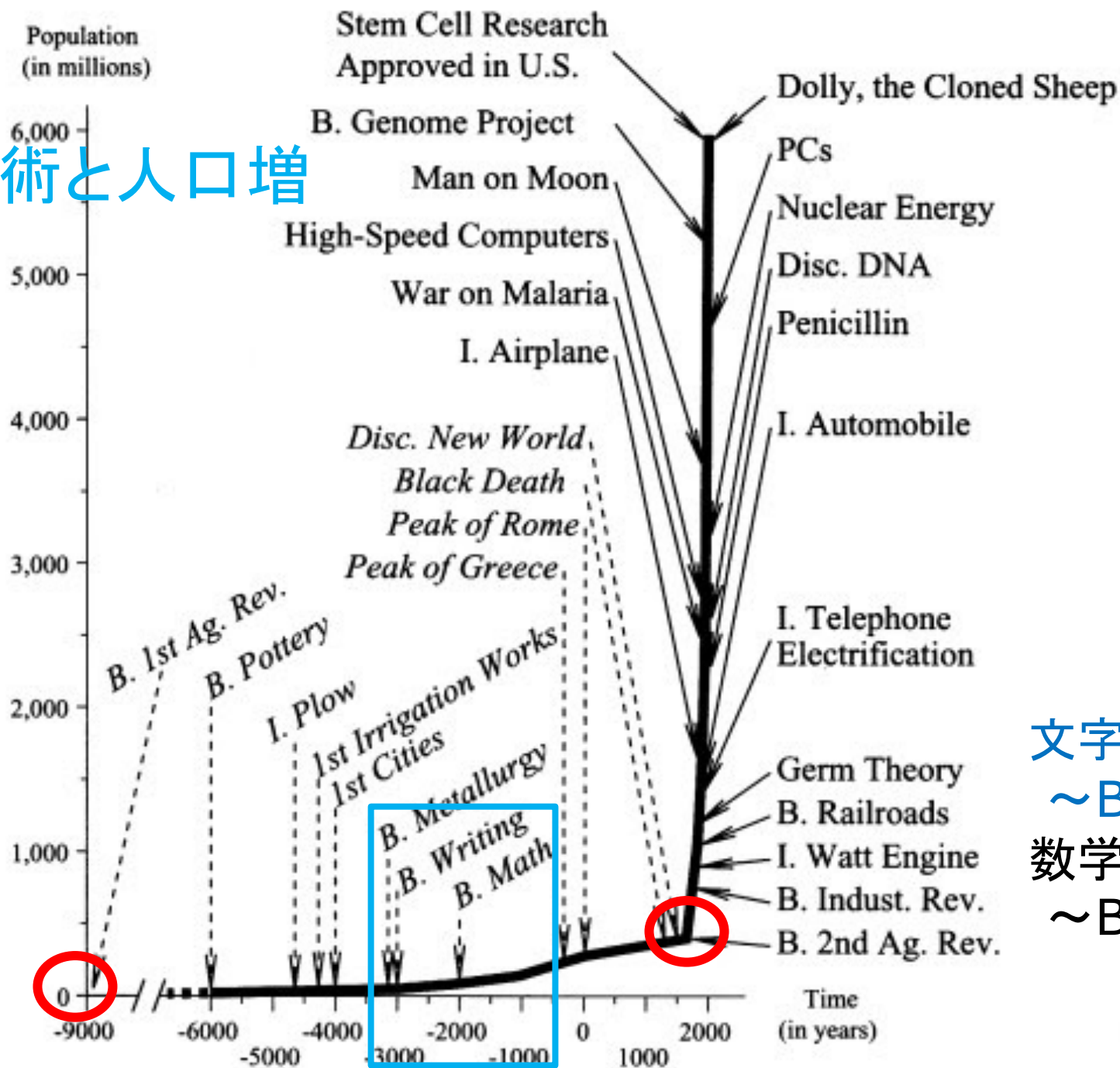
機械



機械による運動能力と感覚能力の拡大

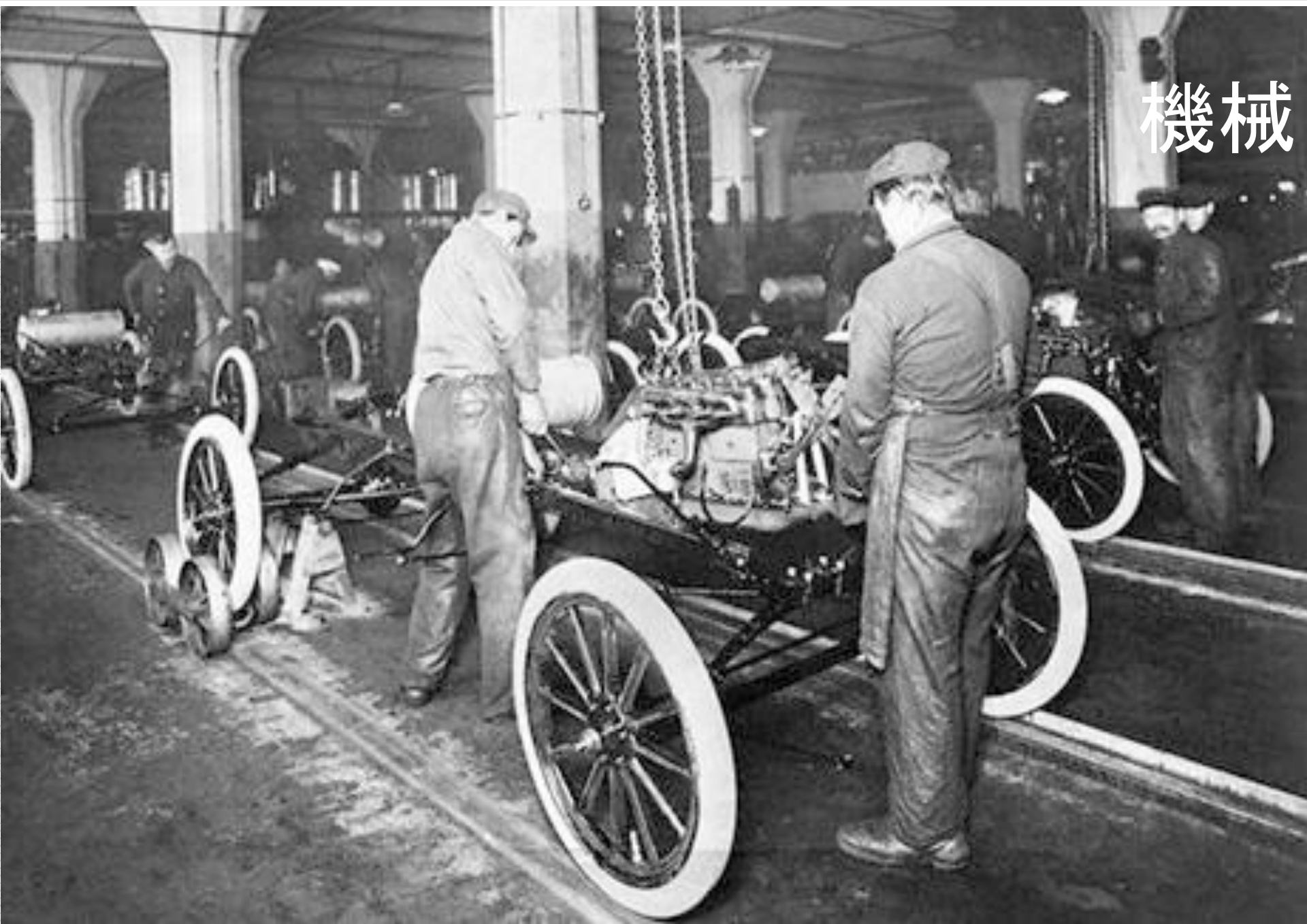
- 機械は、人間の運動能力を拡大する。飛行機・自動車・ブルドーザーを使えば、我々は、鳥のように空を飛び、チーターより早く走り、象より大きな力を出せる。それは、飛行機・自動車・ブルドーザーといった機械の力なのだが、それは人間の力になる。
 - 運動能力だけではない。機械は人間の感覚能力も拡大する。顕微鏡や望遠鏡やCERNの加速器やLIGOの観測装置は、人間の感覚能力を拡大するものだと考えることができる。そうした能力の拡大は、機械の助け無しには不可能なのだが、それは、人間の力として現れる。
-

技術と人口増



文字の誕生
~BC3000年
数学の誕生
~BC2000年

機械





Response









機械による 人間の感覚能力の外的拡大

感覚能力の拡大

- 顕微鏡や望遠鏡は、我々の視覚能力の拡大である。同様に、光学的な原理に基づくものではないにしろ、電子顕微鏡や電波望遠鏡も、我々の視覚の拡張と考えていい。レントゲンやCT, MRIも同様である。
 - ガスクロマトグラフィー・質量分析器・分光分析器も、嗅覚・味覚に代わる、我々の対象認識の拡張手段である。対象は限られているが、DNAシーケンサーは、我々の生物学的基礎に対する、最も重要な認識手段である。
 - 素粒子物理の分野での巨大な加速器も、我々の感覚能力の拡張と考えることが出来る。
-



TELESCOPIUM GALILEI INVENTUM ET PRIMUM A GALILEO
ET POSTERIORIUS A MONTE ET A SOCIIS SATELLITIBUS ET NUNC A
RADIO UNIVERSITATE PRIMUM INVENTUM A MONTE.



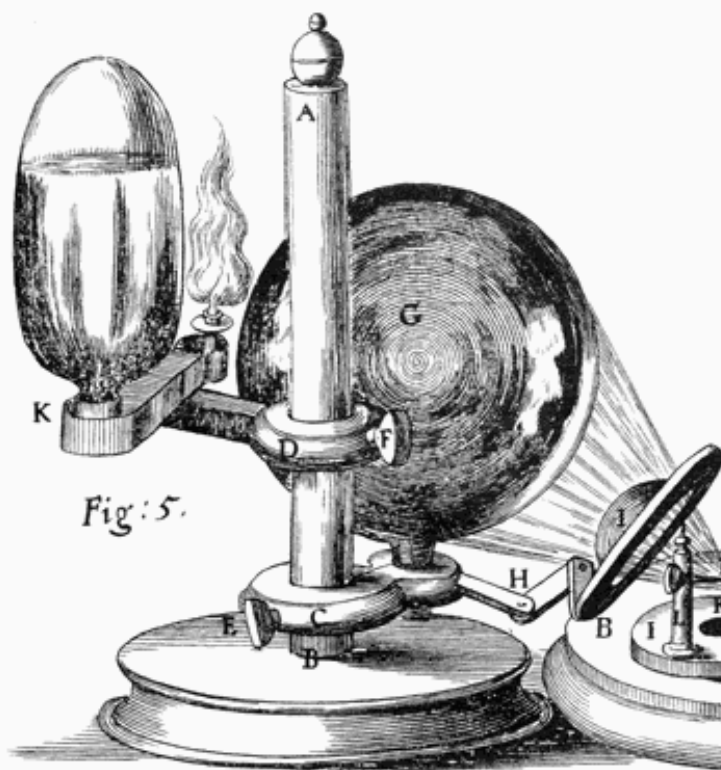


Fig: 5.

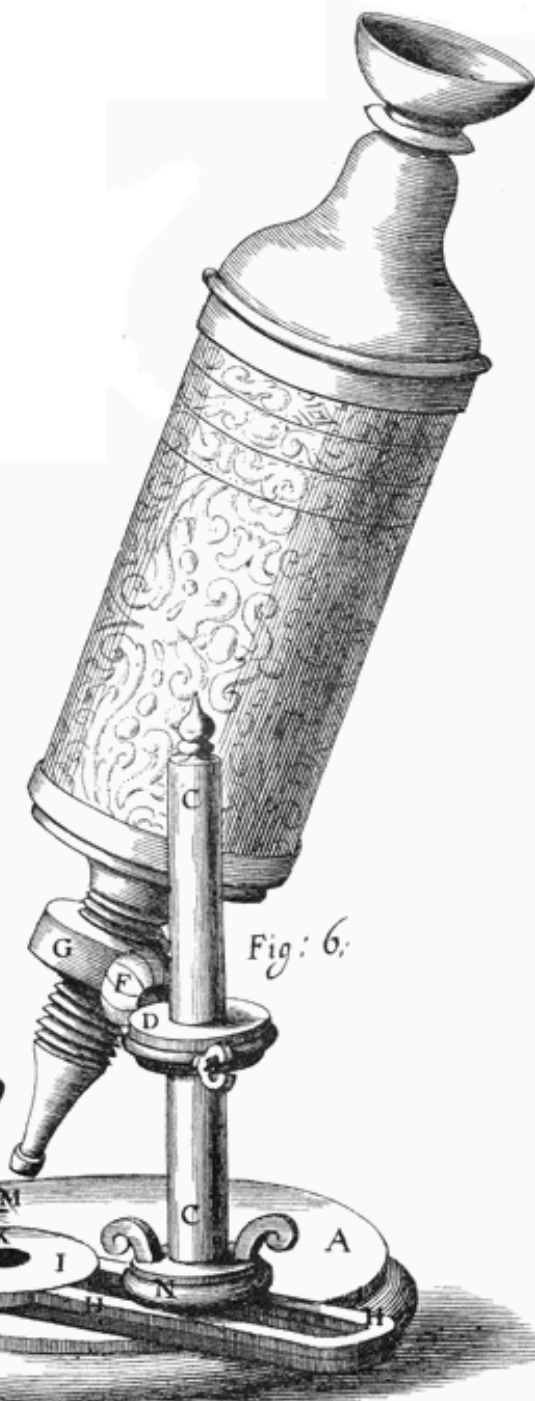
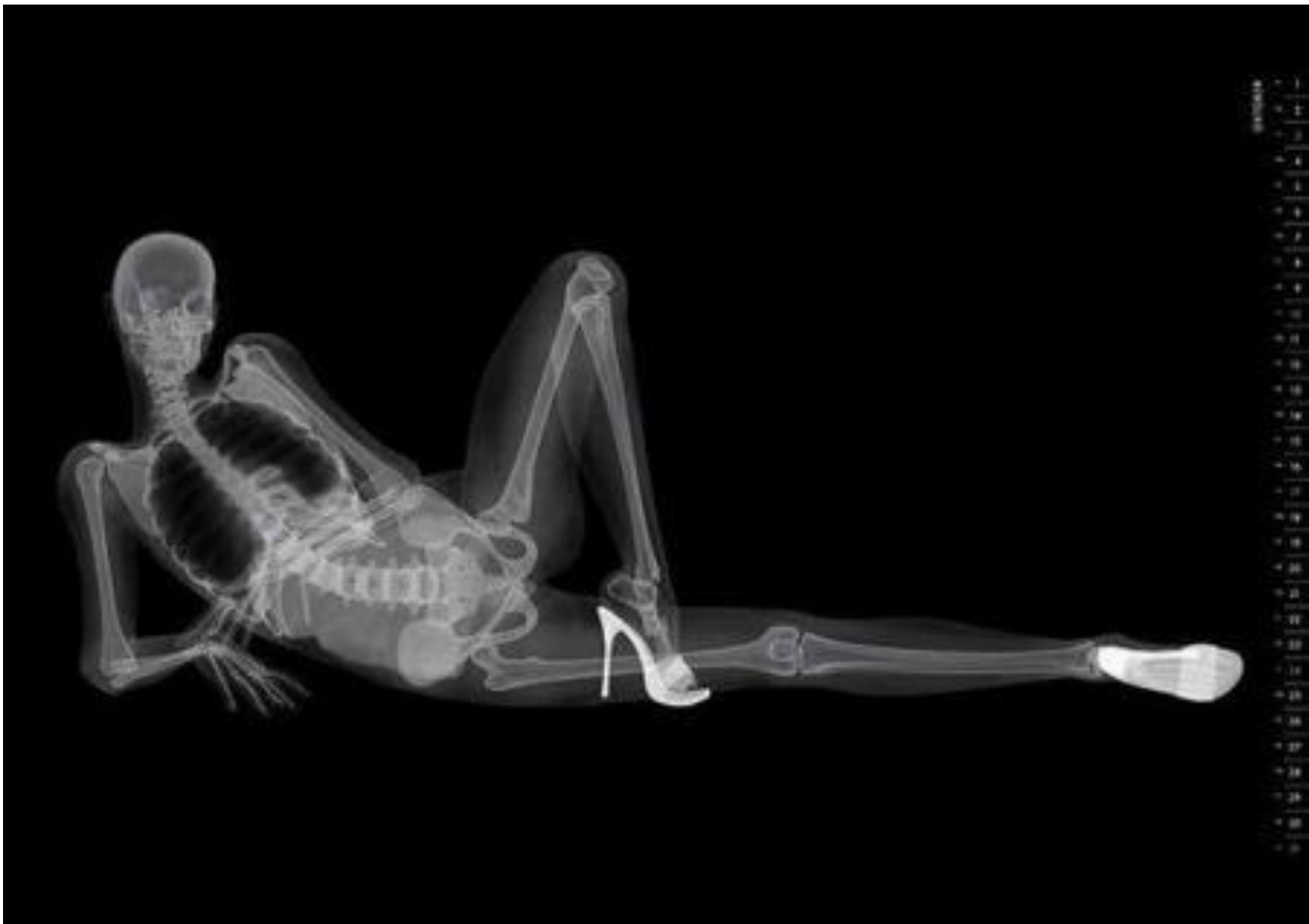


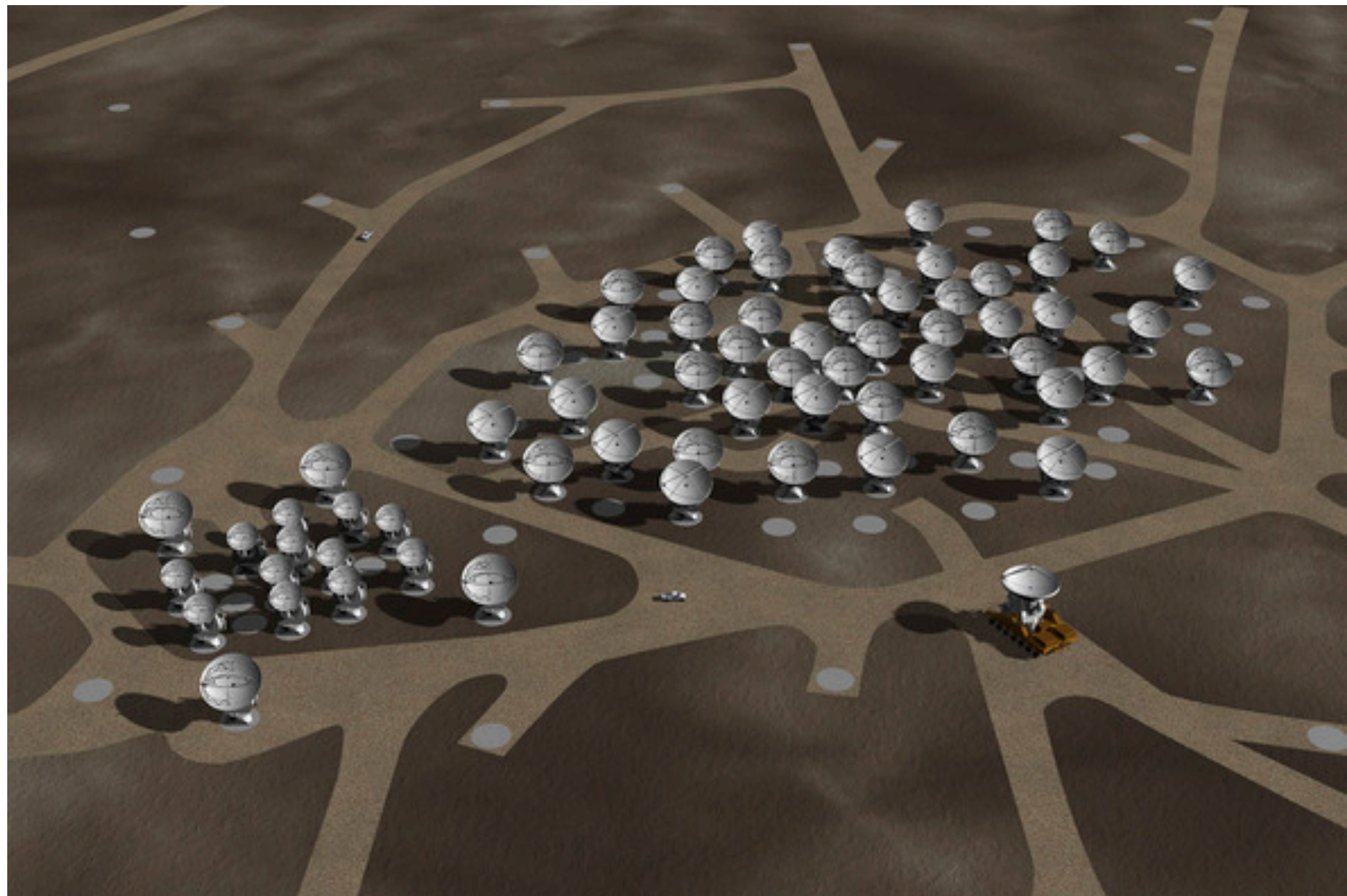
Fig: 6.













0309 102640 STS109 730, 040

自然認識の拡大

- 自然認識の拡大に関していえば、こうした運動・感覚能力の機械による外的拡大のみが全てではない。我々の感覚的能力は、我々が生存する世界の事象の認識に最適化するように進化してきた。極微の世界を対象とする量子論にしろ、宇宙の巨大な時空を対象にする相対論にしろ、自然の全貌は、我々の感覚的直感では、むしろ捉えられない。
- こうした時に、数学を使った認識が有効になる。ある時代以降、我々の「知」の少なくない部分が、そして科学的認識の多くの部分が、数学的形式で記述されるようになる。その意味では、数学的認識能力は、言語能力のように生得的なものではないのだが、人類が作り上げてきた新しい認識器官なのかもしれない。

人間の認識の発展と知の階層

数学的・科学的な自然と自己の認識

科学と
技術



文字による知識の集積

諸メディア



言語能力による認識の飛躍

音声言語

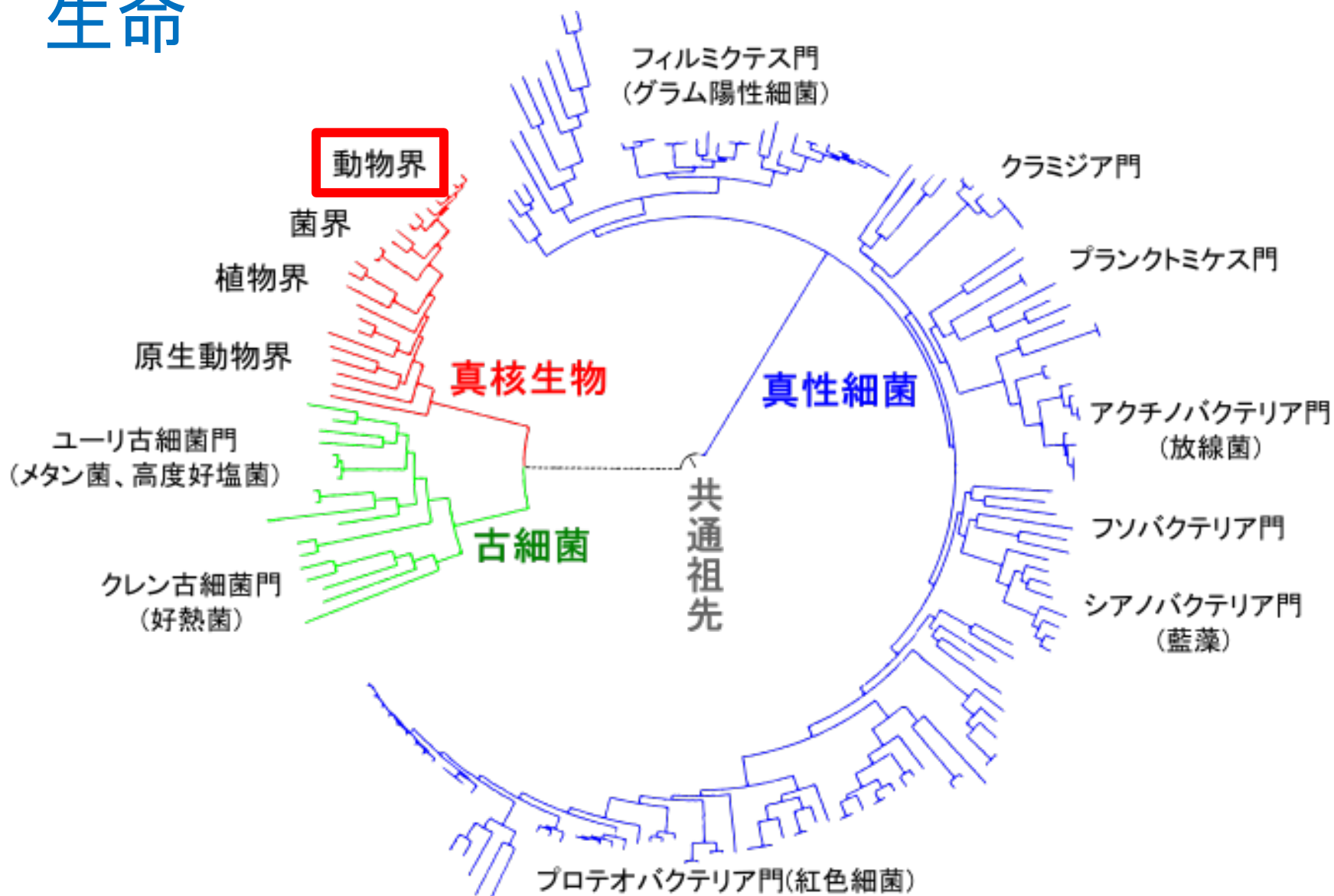
思考の言語



感覚・運動的外界の把握

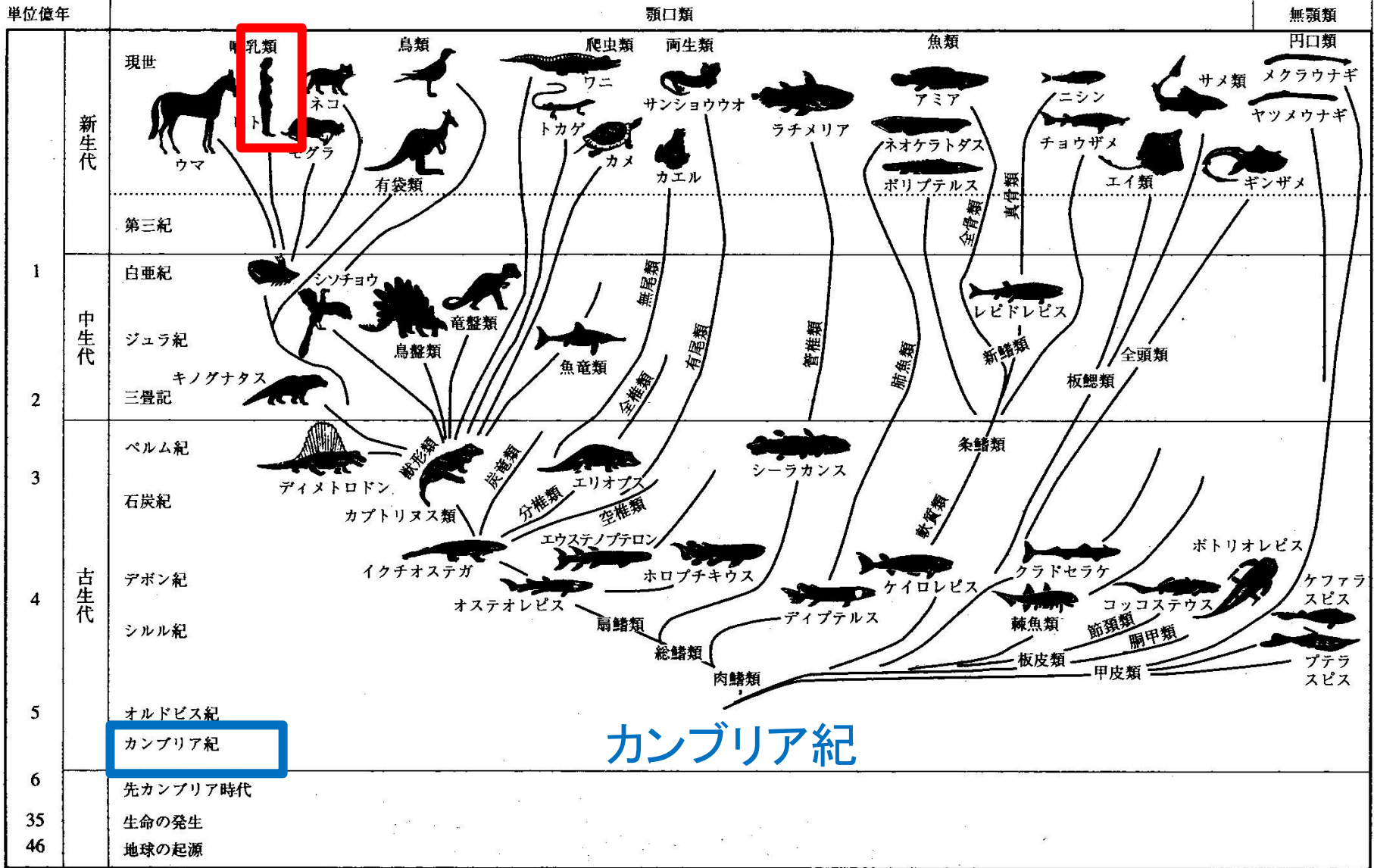
人類の言語能力の獲得

生命

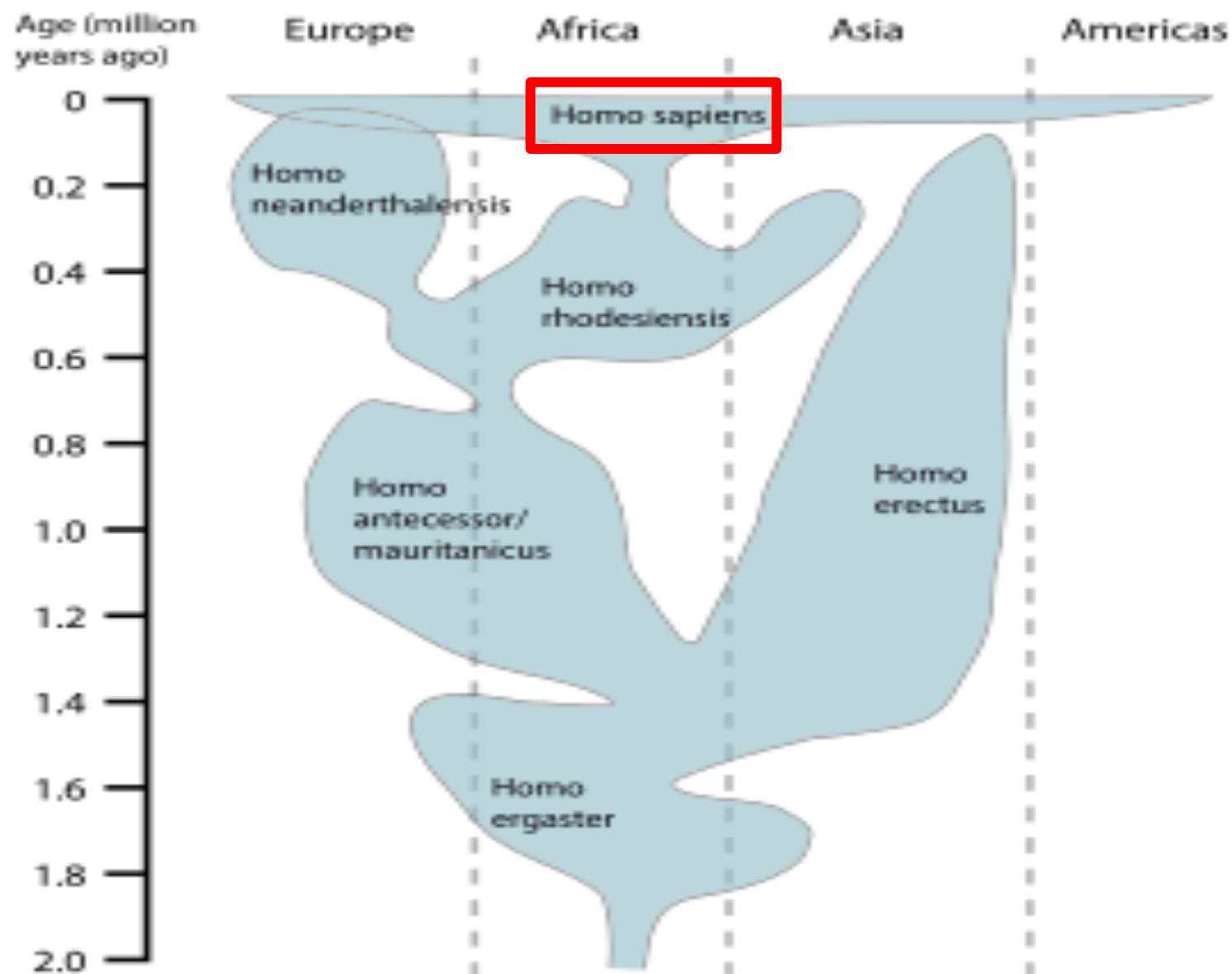


脊椎動物

脊椎動物の進化



人類





言語能力の獲得と生物学的基礎

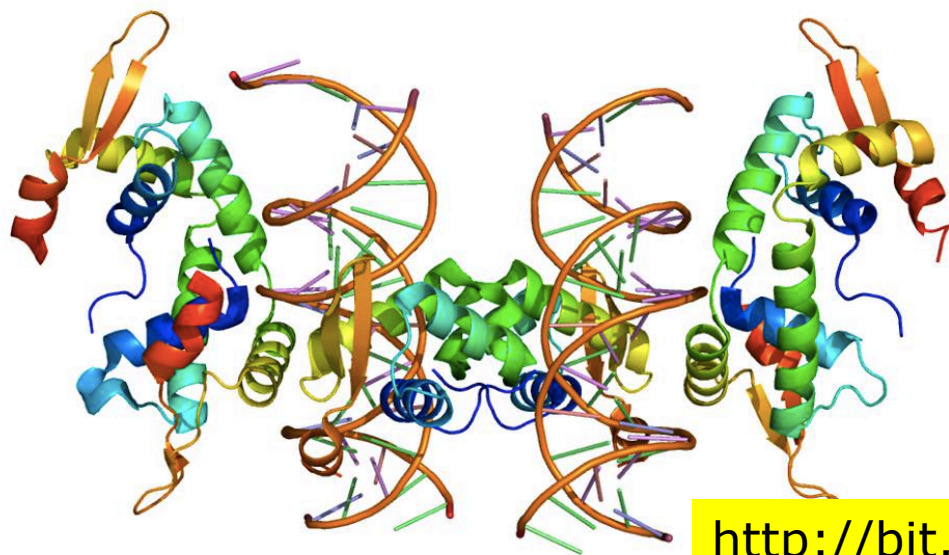
言語能力に関する遺伝子の発見 Simon Fisher 2001年



<http://bit.ly/1oCw2AI>

言語能力に関係する遺伝子 FOXP2

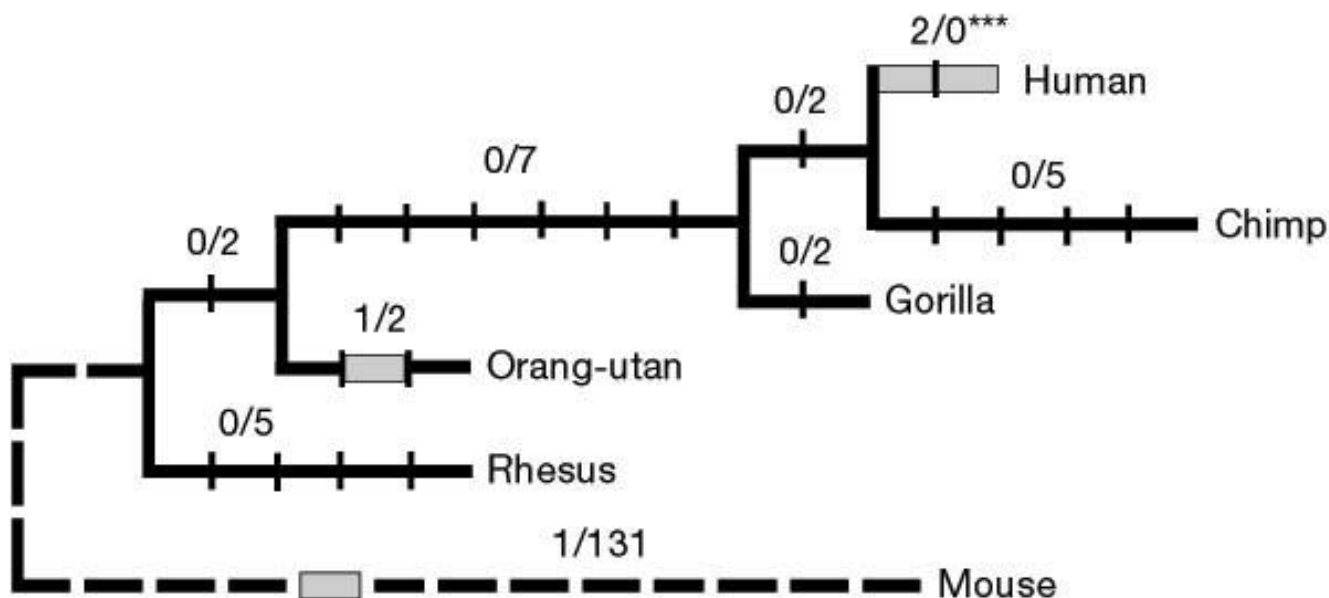
Simon E. Fisherらによって発見された人間の言語能力に関係する遺伝子FOXP2 は、は虫類にも鳥類にも存在する。面白いことに、FOXP2はさえずりを学ぶ鳥やコウモリの音響定位の能力とも関係しているらしい。



<http://bit.ly/1tgaQ5o>

言語能力に関する遺伝子 FOXP2

ゴリラやチンパンジーと人間のFOXP2はアミノ酸配列で2カ所違っているだけ。(ネズミとは3カ所違う)
この変化は、**約30万年前**におきたという。ネアンデルタール人のFOXP2は僕らと同じだと言う。



マックス・プランク研究所

"Language and Genetics"

より根本的なレベルで、発話と言語は、人間である条件の諸特徴、我々人類という種の中心的な諸相を定義している。

ただ、我々は、遺伝子が言語に対応出来る脳をいかにして構成出来るのかについては、いまだ、ほとんど何も知っていない。また、我々に最も近い親類たちでさえも、この領域では、人間の能力にかなうことが、全く出来ないように見えるのは何故かについても、ほとんど何も知らない。

Part III

困難な二つの課題

言語能力と数学的認識能力

Agenda Part III

困難な二つの課題

- 言語能力への言語学的アプローチ
 - 生物学的言語学
 - Chomskyの観察と立場
 - Minimalist Programの言語モデル
 - 数学的認識能力への数学的アプローチ
 - 数学的認識の基礎をめぐって
 - 数学の「証明」の問題
 - 数学でのコンピュータの利用
 - Categorical Grammar
-

言語能力への言語学的アプローチ

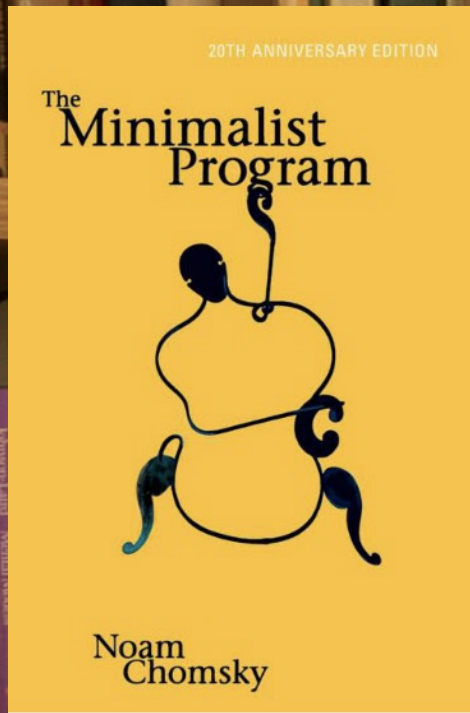
言語への言語学的アプローチ

- 言語と人間の言語能力についての探求は、何も「人工知能研究」の側からだけ行われているわけではない。ここでは、言語学からの言語に対するアプローチを紹介する。
 - Chomskyの、有限の言葉から無限の文を生成する言語の創造性、また、それを可能にする帰納的な能力を持つ文法の役割という視点とその生得的普遍性の主張は、それだけでも十分に、機械による言語アプローチの初期の誤りを、明確にする上で有効な理論的枠組みを提供する。
-

生物学的言語学

- また、言語能力は、人間という種に固有の生得的なものであるという主張は、biolinguisticという立場と相まって、脳研究や進化理論等、多方面の研究と連携して、「人間の知能」の本質に迫っていくことの重要性を、あらためて我々に示す。
 - 「言語能力は認識の器官」という主張も、「人間の知能」研究における、言語研究の重要性を明確に示すものだ。同時に、この能力は、幅広い認知能力に支えられている。こうした問題意識なしには、「人工知能研究」サイドからの言語へのアプローチは、表面的なものになるだろう。
-

言語への言語学からのアプローチ



SCHEDULE D
(Form 1040)
Department of the Treasury
Internal Revenue Service (99)
Organization

Noam Chomsky

Political Activist

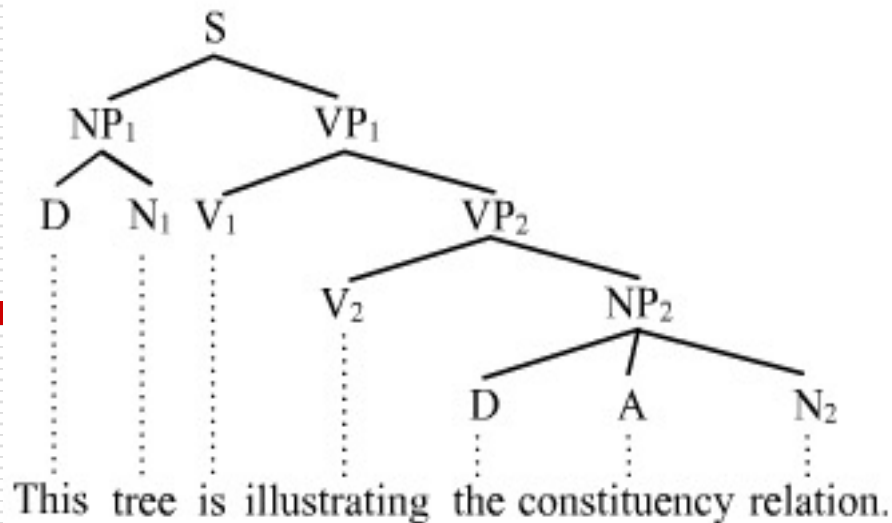
Chomskyの観察（1）

言語能力の創造性

- 人間の言語能力の最大の特徴は、その創造性である。いままで聞いたこともしゃべったことも無い全く新しい文章を、理解し発話出来る。
- 人間は、有限個の単語から、可能的には無限の文を生成しうる。それが可能なのは、文を生成する文法が帰納的(recursive)な構造を備えているからである。
- 文の生成は、文法に基づく計算システムとして理解できる。

可能的には無限の文法の帰納性

- I ate a banana
- I know I ate a banana
- I think I know I ate a banana
- I declare I think I know I ate a banana
- What do you declare I think I know I ate?
- This is the banana I declare I think I know I ate
- There are more bananas I declare I think I know I ate than bananas that still grow on the tree
- This is the cat that caught the rat that ate the cheese that...



Chomskyの観察（2）

言語の獲得をめぐる

- 世界の言語は極めて多様だが、幼児は、生まれ落ちたところの言語を、どの言語でも、短い期間で習得できる。その能力は一生消えることがない。
- 幼児の言語の獲得に、可能な文型を全てカバーする**大量のデータが必要な訳ではない**。
- こうした言語獲得の際立った特徴は、すべての言語に共通な「**普遍文法**」と「**言語獲得装置**」とも言うべきものが、すべての人間に、生まれつき備わっていると考えることで初めて説明がつく。
- 人間の言語能力は、遺伝子でコードされた、生物学的基礎を持つ。

Chomskyの立場（1）

Biolinguistic

- Biolinguistic は、人間の言語を、音・意味・構造といったそのすべての側面において、人間のこころ (Mind) の、ある構成要素の状態とみなす。
- 精神的なものは、まさに、こころも、脳から立ち現れた諸特性である。それを還元不能なものとはみなしてはいけない。それは基本的な原理から生み出されたものだ。ただ、その原理を、我々はまだよく理解していない。
- 言語は、我々人間という生物にとって、中心的な「思考の器官」である。

Chomskyの立場（2）

Minimalist Program

- Biolinguisticが登場する以前の、1950年代の「生成文法理論」にさかのぼる、言語についての絶え間のない連続した探求をさす。完成した「理論」ではなくて「プログラム」。
- 特に、当初の中心的な関心は、「**もっとも単純な文法**」という概念を明確にし、すべての言語に対して、「**もっとも単純な文法**」をいかに選択するかを決定することに置かれていた。
- これは、自然は単純なものであり、それを示すことが科学者の仕事であるという、ガリレオ以来の、自然科学の方法と同じものである。

What Kind of Creatures Are We?

Why Only Us?

- しかし、言語とはなんであるかをはっきりと決定しようと試みるのには、もっと多くの基本的な理由がある。その理由は、我々がどのような生き物なのであろうかといった種類の疑問に、明確に結びついている。
- ダーウィンは、次のように結論付けた最初の人ではない。「下等な動物と人間とを区別するものは、人間のみが、もっとも多様な音やアイデアを、ほとんど無限の大きな力で、一つに結びつけるという点にある。」ただ、ダーウィンは、この伝統的な考えを、人間の進化という新しい説明の枠組みの中で、初めて述べた。

WHY ONLY US

LANGUAGE AND EVOLUTION



Robert C. Berwick • Noam Chomsky

<https://goo.gl/fdFz6q>

What
Kind
of
Creatures
Are
We?



NOAM CHOMSKY

Minimalist Programの 言語モデル

Minimalist

- Chomskyの新しい言語理論であるMinimalist Programで、僕が注目するのは、彼が計算システムとして捉えている言語能力の中核である「普遍文法」を、ボトムアップから構成しようという志向を表明していることだ。こうした方向は、明らかに、コンピュータによる言語能力の実現の道と重なってくるであろう。
 - 一方、こうした言語理論に基づく、実際の計算システムの構築は、大きく遅れている。それでは、説得力を持てない。
-

Minimalist Programでの 言語モデル

重要なことは、特に
概念-思考インター
フェースの先に、
言語能力を支える、
「概念のリソース」
とでもいうべきもの
が存在していること
である。

感覚-運動
インターフェース

Phonetic form

I-Language

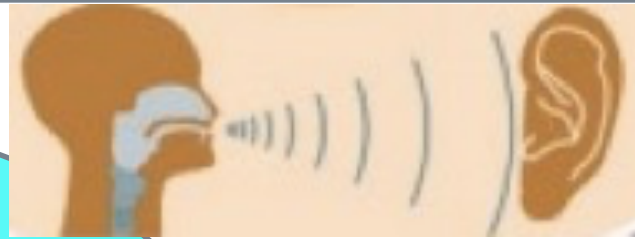
帰納的計算

Logical Form

概念-思考
インターフェース

外部化
Externalization

概念
Semantics



Principal & Parameter

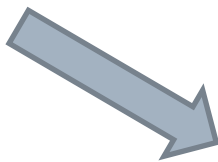


計算システムの
初期状態としての
普遍文法

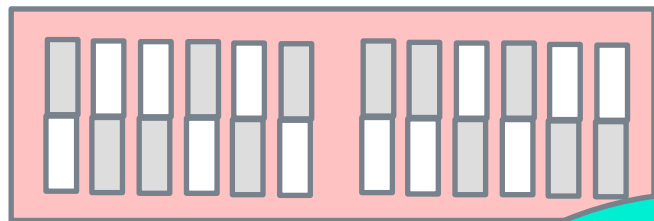
**Computing
System**

Lexicon

パラメーターの
スイッチは入って
おらず、辞書も
空のままである。



Principal & Parameter



後天的な経験で
パラメーターの
スイッチが入り、
文法は各国語化
する。

辞書も各国語の
語彙で満たされる。



**Computing
System
Merge**

Lexical Item

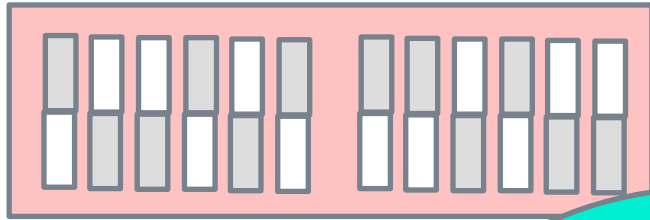
各語彙項目は、語彙記載項
(lexical entry)の集合と
語形成規則(word formation
rule)などの規則の束から成る
語彙目録(lexicon)によって、
音韻・統語・意味などの情報が
規定されている。

<https://goo.gl/eJZMGv>

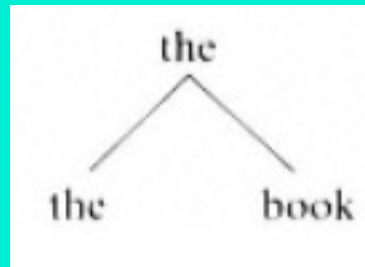
Lexicon

Lexical Item	Lexical Item	Lexical Item	Lexical Item
Lexical Item	Lexical Item	Lexical Item	Lexical Item
Lexical Item	Lexical Item	Lexical Item	Lexical Item
Lexical Item	Lexical Item	Lexical Item	Lexical Item
Lexical Item	Lexical Item	Lexical Item	Lexical Item

Principal & Parameter



Merge



Merge

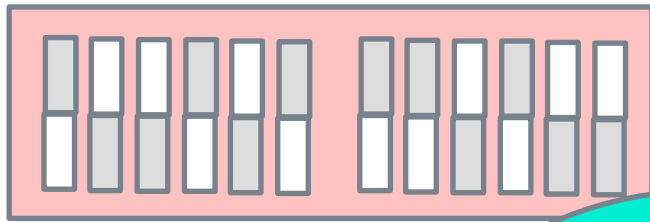
Lexiconから、二つの
Lexical Item である
“the”と“book”が取り
出され、Mergeされた
ところ。

Lexicon

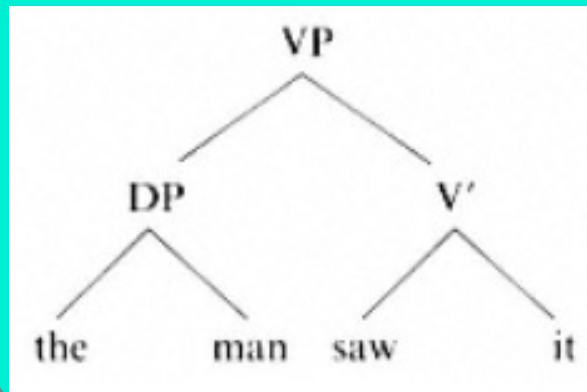
the
book
man
eat

it	Lexical Item
girl	Lexical Item
mama	Lexical Item
see	Lexical Item
apple	Lexical Item
a	Lexical Item

Principal & Parameter



Merge



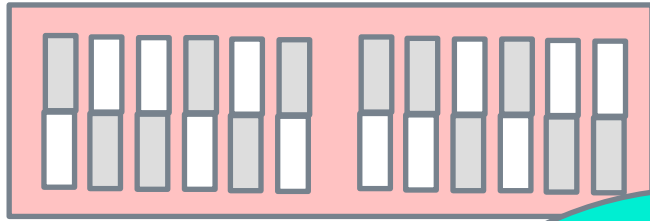
Merge

Mergeの対象は、
Lexical Itemだけ
とは限らない。
既に形成された句も、
Mergeの対象になる。

Lexicon

the	it	Lexical Item
book	girl	Lexical Item
man	mama	Lexical Item
eat	see	Lexical Item
	apple	Lexical Item
	a	Lexical Item

Principal & Parameter



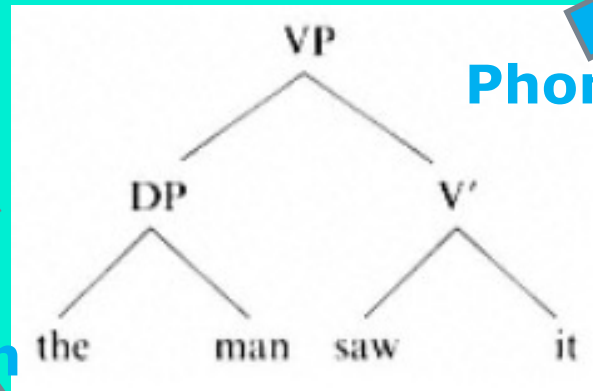
Sensory-Motor

SMインターフェースに
対しては、Phonetic
formが生成される。

Merge

Phonetic form

Logical Form

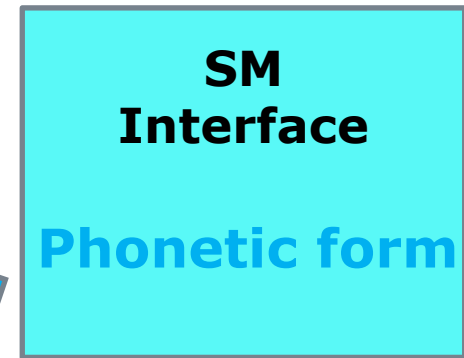
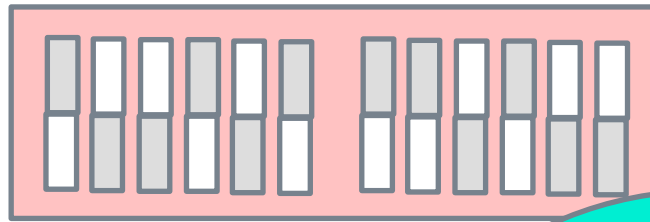


Lexicon

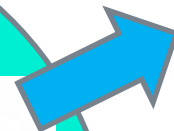
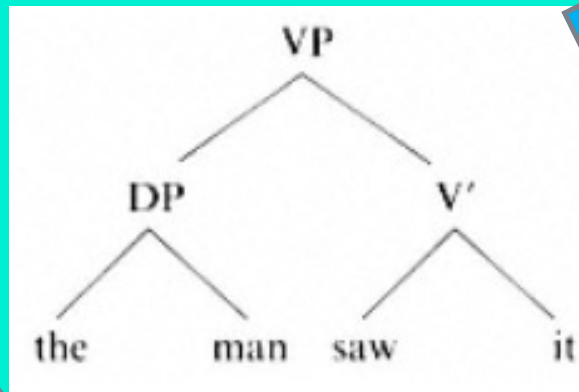
it	Lexical Item
girl	Lexical Item
mama	Lexical Item
see	Lexical Item
apple	Lexical Item
a	Lexical Item
the	
book	
man	
eat	

Conceptual-Intentional
CIインターフェースに
対しては、Logical
formが生成される。

Principal & Parameter



Merge



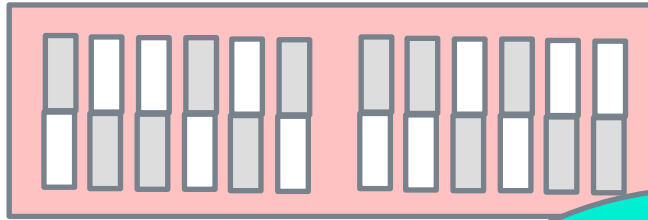
**CI
Interface**

Logical Form

Lexicon

	it	Lexical Item
	girl	Lexical Item
the	mama	Lexical Item
book	see	Lexical Item
man	apple	Lexical Item
eat	a	Lexical Item

Principal & Parameter



**SM
Interface**

Phonetic form

Merge

**CI
Interface**

Logical Form

Lexicon

the
book
man
eat

it	Lexical Item
girl	Lexical Item
mama	Lexical Item
see	Lexical Item
apple	Lexical Item
a	Lexical Item



Merge

- Minimalist Programの中核的概念である Merge は、とても興味ふかいものだ。「二つのものを一つにする」というMergeは、文の構成の原理であるだけではなく、人間の認識能力の最もプリミティブな特徴をも捉えていると言える。そうした意味で、Mergeは、認識能力と言語能力とその上に立つ言語的認識能力という三者の関係を考える上で重要な役割を果たしうる。
 - 言語能力は生得的なものだが、数学的認識能力は生得的な能力ではない。ただ、言語能力無しには、数学的認識能力は生まれなかった。Mergeは、また、言語能力と数学的認識能力の橋渡しをしうる。
-

ボイス・アシスタントと計算言語モデル

- 現在のボイス・アシスタントの開発モデルの変化も、Chomskyらの計算言語モデルと、かすかな対応関係を見ることができる。
- AlexaのSystem Slot Typeの導入は、語彙項目の獲得に対応する。パラレル・コーパスがデータの中心であるニューラル機械翻訳技術ではほとんどモデル化されないのだが、我々は、内部に膨大な辞書データを持っているのは確かだと思う。
- AlexaのIntent Signatureは、文にある種の構成された型を与えようとする点で、文法の萌芽である。また、それが、Entity中心ではなくAction中心のものであるのは、文の中心が名詞ではなく動詞であるという言語学的知見と一致するのである。

数学的認識能力への 数学的アプローチ

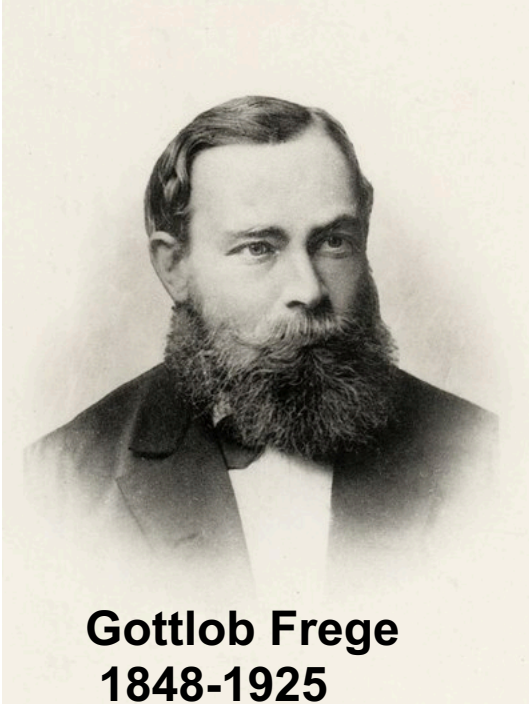
数学的認識の基礎をめぐって

数学的認識能力への数学的アプローチ

- ここでは、数学的認識の特徴について、数学自身の側からのアプローチを中心に、いくつかのトピックを取り上げる。
- まず、数学の基礎では、「計算可能性」の問題や、数学自身が数学自身をどのように基礎づけようとしてきたのかという問題がある。前者の問題では、ゲーデルの不完全定理が有名であるが、この定理は数学ではあまり役には立たないものである。ゲーデルの仕事で数学的に重要なのは、後者の問題での集合論とカントールの連続体仮説の無矛盾性証明だと僕は思っている。
- 短い紙面で説得的な説明は難しいのだが、数学固有の特徴とされていた形式性だけでは、数学の基礎づけには不十分で、むしろ物理世界と数学との関係性への注目が強まっているのが、大きな流れだと思う。



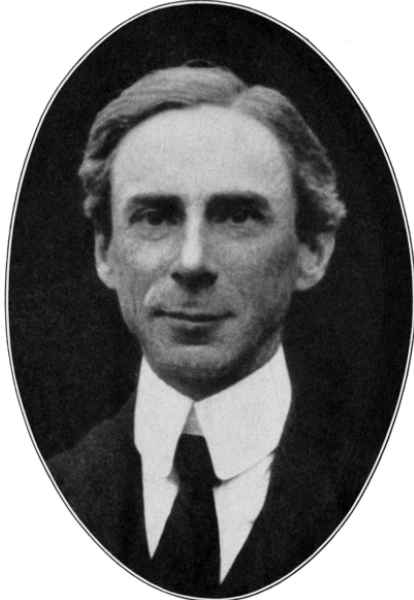
Georg Cantor
1845-1918



Gottlob Frege
1848-1925



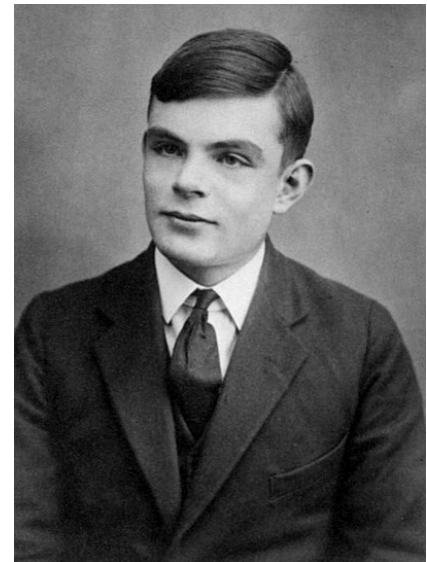
David Hilbert
1862-1943



Bertrand Russell
1872-1970



Kurt Gödel
1906-1978



Alan Turing
1912-1954



Alonzo Church
1903-1995



Alexander Grothendieck
1928-2014



Paul Cohen
1934-2007



William Lawvere
1937-



Per Martin-Löf
1942-



Vladimir Voevodsky
1966-2017

数学の基礎をめぐって

□ 計算可能性

- ゲーデルの不完全性定理 $\leftrightarrow$ ゲンツェンの無矛盾性証明
- チャーチ・チューリングによる帰納関数論による計算可能性の定式化
→ 計算可能性のドイッチュによる拡大
- 量子情報理論での計算の複雑性の認識

□ 数学の基礎付け

- ゲーデルの集合論(ZFC)と連続体仮説の無矛盾性証明
→ コーエンによる連続体仮説の独立性証明
＝非カントールの集合論の発見
 - ローバールのトポスによるカテゴリー論的数学の基礎づけ
 - VoevodskyのUnivalent Theoryでの Homotopy Type による数学の基礎付け
-

数学の「証明」の問題

誤っていた「証明」

- 「フェルマーの定理」は、最終的には、1995年の Andrew Wiles の論文によって証明されたが、フェルマー自身は、この定理を証明出来たと信じていた。それが、誤った「証明」であったのは確かである。
- Wiles 自身も、95年の論文以前に一度、「証明した」とする発表を行うが、誤りが見つかり、それを撤回している。
- 世紀の難問である「リーマン予想」は、何度か「証明」が発表されている。今までのところ、それは誤って「証明」だった。

正しいことの判定が難しい証明

- Grigory Perelmanは、2002年から2003年にかけて arXiv に投稿した論文で、「三次元のポアンカレ予想」を解いたと主張した。
- arXivは、学会の論文誌とは異なり、掲載の可否を決める査読が基本的にないので、発表の時点では、彼の論文以外に、彼の証明が正しいという裏付けはなかった。
- 彼の証明の検証は、複数の数学者のグループで取り組まれ、最終的に彼の証明の正しさが「検証」されたのは、2006年のことだった。

非常に膨大な証明

- 「有限単純群の分類問題」は、Daniel Gorensteinをリーダーとする数学者の集団によって解決され、20世紀の数学の大きな成果の一つと呼ばれている。
 - ただ、その「証明」は、100人以上の数学者が、50年のあいだに数百の論文誌に発表した、膨大な量の「証明」の総和である。そのページ数は一万ページを超えられている。（「全部を読んでも数学者は、1人もいない。」というのがジョークなのか本当なのか、分からない。）
-

数学でのコンピューターの利用

数学的証明へのコンピュータの利用

- 数学の「証明」というプロセスは、今の所、もっぱら人間によって担われている。しかし、人間による「証明」には、いくつかの困難がある。
 - 現在の人工知能の話題の中では、数学の問題解決(数値計算では無い)に、コンピューターを利用しようというトピックは、ほとんど出てこない。それは少し奇妙なことだ。
 - 数学における証明は、人工知能技術の重要な応用分野である。数学の証明でのコンピュータの利用では、ディープ・ラーニングや自然言語処理や検索技術とは、全く異なる技術が必要になる。
-

なぜ、数学の証明にコンピュータが必要なのか？

- フェルマーの定理を証明したワイルズが、謙遜して自分は「巨人の肩の上の小人だ」と言ったように、数学は、先行した無数の人たちの業績の蓄積の上に成り立っている。
 - ピタゴラスの「教団」は、いくつかの発見を「秘教」にしていたらしいのだが、もしも、ピタゴラスの子孫が生きていたとしても、ピタゴラスの定理を使うのに、彼らに著作権料を払う必要はない。また、その「証明」を自分で繰り返す必要はない。
 - 少なくとも現代の数学では、情報の共有は、学問自体の前提でさえある。
-

「四色問題」のコンピュータによる解決

- 1974年、イリノイ大学のKenneth AppelとWolfgang Hakenは、当時の最先端のコンピュータを使って、「四色問題」を解いた。
- コンピュータの稼働時間は、1200時間に及び、夜間の空き時間しか利用が認められなかったので半年がかりの計算だったと言う。
- コンピュータが人手にはあまる膨大な計算を行ったのは事実だが、当時、その計算の正しさの検証しようのないことを理由に、こうした「証明」を疑問視する声も一部にはあった。

「四色問題」「Feit-Thompsonの定理」 のCoqによる証明

- 2004年、Georges Gonthierは、Coqを使って「四色問題」を解いた。
 - Georges Gonthierは、また、2013年、有限群分類の重要な定理である、「Feit-Thompsonの定理」のCoqによる形式的証明を与えた。
 - 15,000の定義、4,300の定理、17万行のソースからなるこの証明を、彼はチーム作業で、6年かけて完成させた。
-

Univalent TheoryでのCoqの利用

- 先にも見たように、Voevodskyは、Univalent Theoryという数学理論を、Coqのプログラムの形で、GitHubで公開している。

<https://github.com/vladimirias/Foundations/>

計算結果を印刷すると、マンハッタン島ぐらいのサイズになる

Mathematicians Map E_8

Mathematicians have mapped the inner workings of one of the most complicated structures ever studied: the object known as *the exceptional Lie group E_8* . This achievement is significant both as an advance in basic knowledge and because of the many connections between E_8 and other areas, including string theory and geometry. **The magnitude of the calculation is staggering: the answer, if written out in tiny print, would cover an area the size of Manhattan.** Mathematicians are known for their solitary work style, but the assault on E_8 is part of a large project bringing together 18 mathematicians from the U.S. and Europe for an intensive four-year collaboration.

<http://www.aimath.org/E8/>

人間の遺伝子情報は、1ギガ以下。
E8の計算結果は60ギガ。

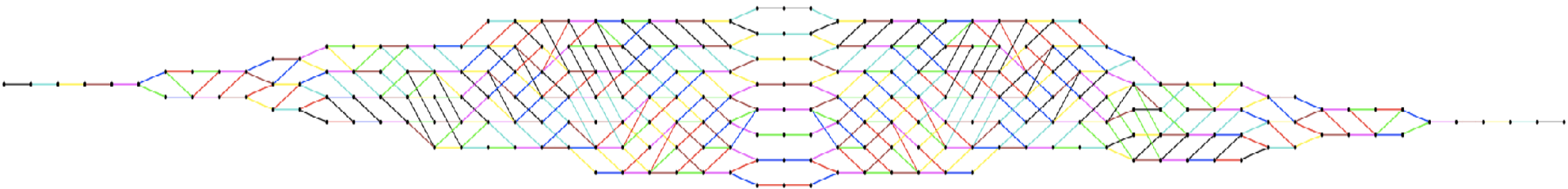
E_8 Map: Bigger than the Human Genome

The magnitude of the E_8 calculation invites comparison with the Human Genome Project. The human genome, which contains all the genetic information of a cell, is less than a gigabyte in size. **The result of the E_8 calculation, which contains all the information about E_8 and its representations, is 60 gigabytes in size.** That is enough space to store 45 days of continuous music in MP3 format. While many scientific projects involve processing large amounts of data, the E_8 calculation is very different: the size of the input is comparatively small, but the answer itself is enormous, and very dense.

E_8 Dynkin diagram

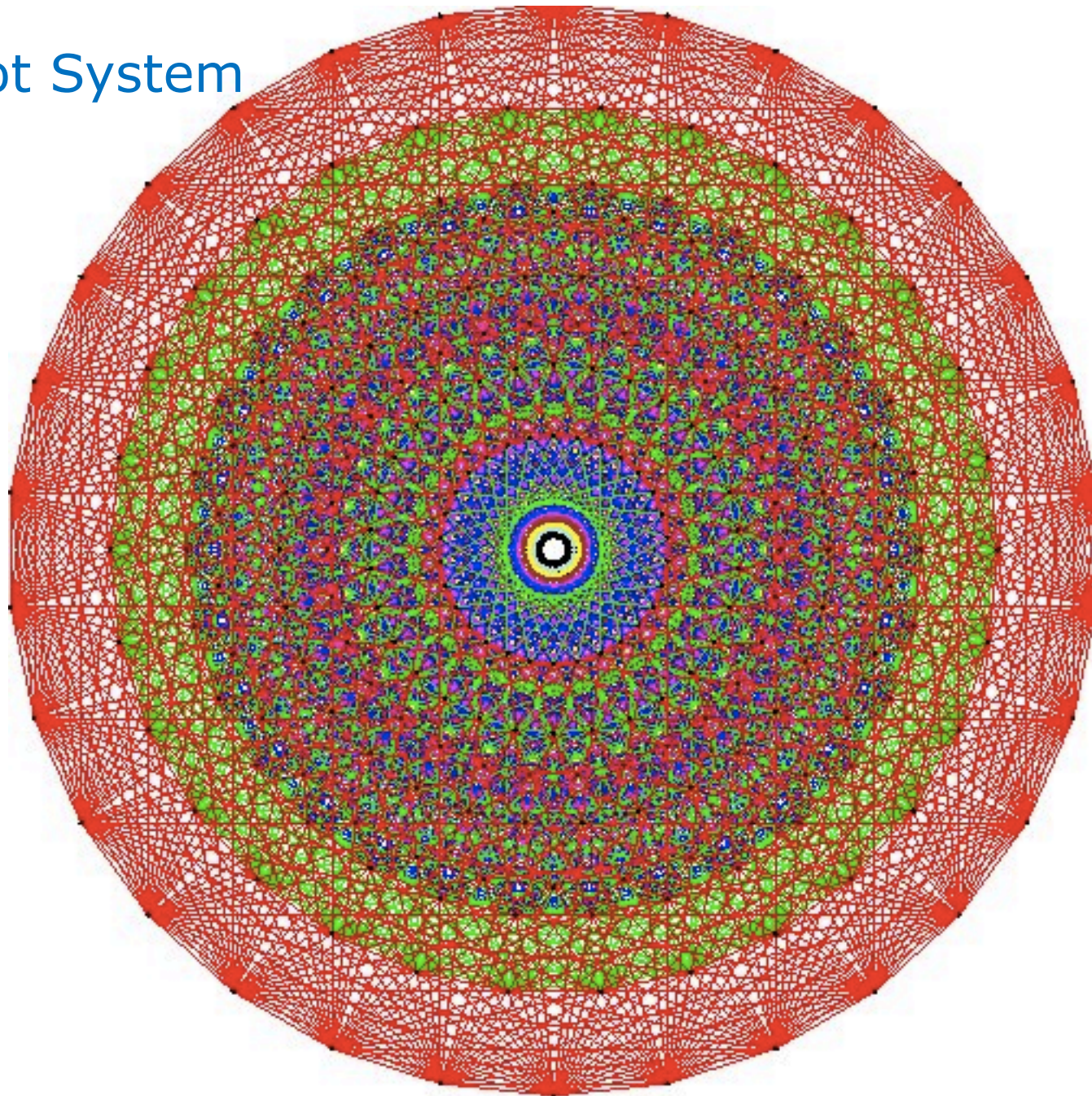


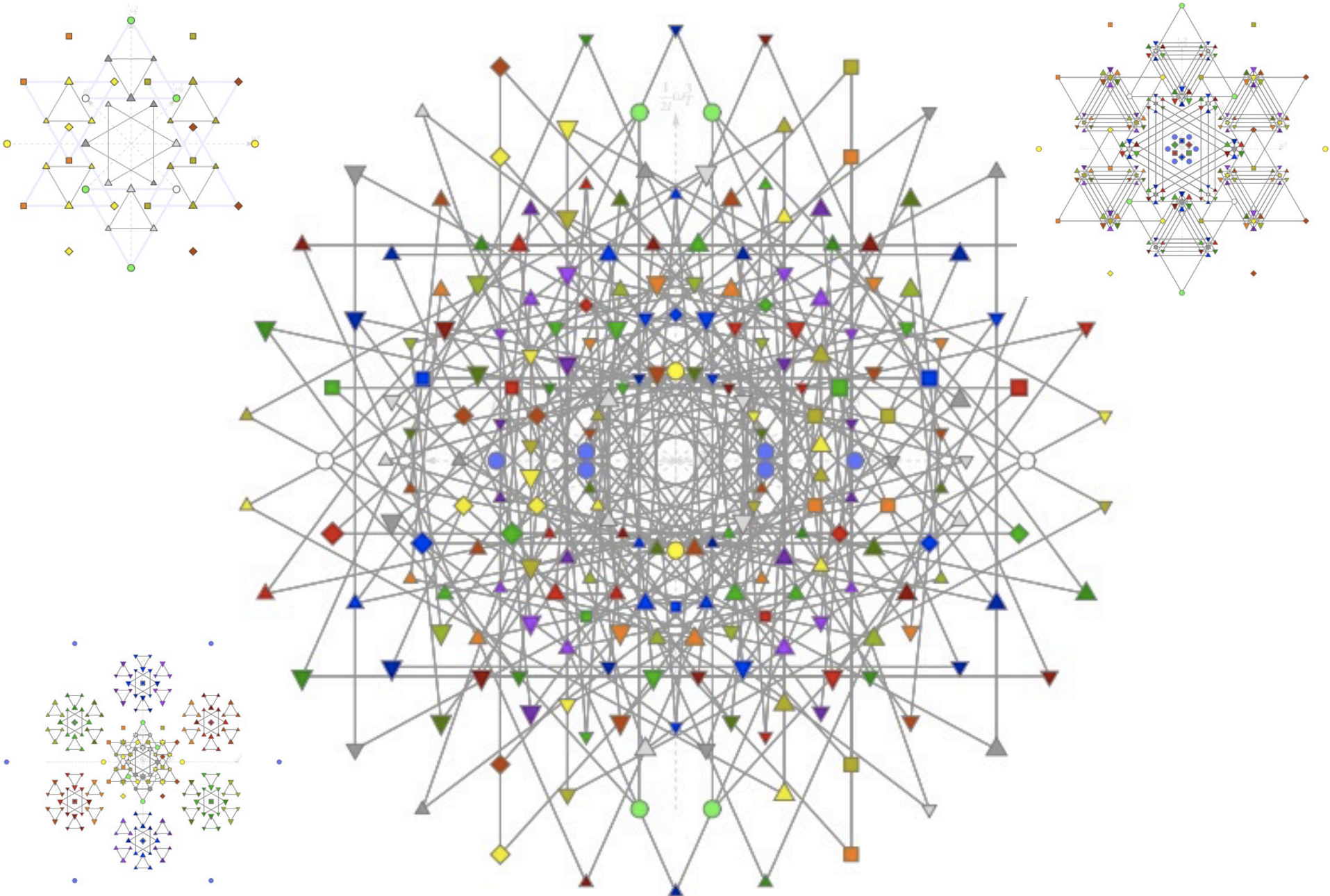
picture of the 248-dimensional Lie algebra of E_8



The Lie algebra E_8 is generated by 16 elements $X_{\text{red}}, Y_{\text{red}}, X_{\text{blue}}, Y_{\text{blue}}, \dots, X_{\text{black}}, Y_{\text{black}}$ corresponding to the nodes in the Dynkin diagram.

E_8 Root System





Garrett Lisi: An Exceptionally Simple Theory of Everything
<https://goo.gl/bmfwxj>

Churchのラムダ計算 再び

- Churchのラムダ計算に対する関心が、ふたたび活発化するののは、20年近くたった1960年代からである。理由ははっきりしている。コンピュータが現実動き出したからである。
 - この時期の代表的な成果は、HowardのCurry-Howard対応の研究である。Howardは、30年代のCurryの仕事を「再発見」する。Curry-Howard対応は、論理と型の理論との間の、驚くべき対応関係を明らかにした。
 - すなわち、型を持つラムダ計算の、「型 σ から型 τ への関数は、型 $\sigma \rightarrow \tau$ を持つ。」に登場する矢印 $\rightarrow$ が、論理式で、「Aならば Bである。」の含意を意味する “ $A \rightarrow B$ ” の中に出てくる矢印 $\rightarrow$ との間に、対応関係があるというのである。
-

Curry-Howard対応

- すなわち、論理における命題は、型の理論の型に対応し、論理における証明は、型の理論でのある型の要素に対応する。Curry-Howard対応は、“Proposition as Type” “Proof as Term” の頭文字をとって、PATと呼ばれることがある。
 - Martin-LöfのDependent Type Theoryは、Churchの型を持つラムダ計算の拡張として、ML, Haskell等の現在の関数型言語に理論的基礎を与えた。同時に、それは、Curry-Howard対応によって、Coq, Agda等の証明システムの理論的な基礎をも与えることになった。
-

証明支援システム

- Coqは、Dependent Type Theoryに基づく、関数型言語であると同時に、証明支援システムとして広く利用されている。
 - 「証明支援システム」は、人間の証明をコンピュータが支援するシステムである。ただ見方を変えれば、それは、コンピュータの証明を人間が支援しているシステムだと考えることも出来る。
 - コンピュータの進化が進んでいる方向の先には知性を持つ機械の実現があると筆者は考えている。「証明支援システム」での人間と機械の、証明をめぐる双対的な「共生」は、それに至る一つの段階なのだと思う。
-

Categorial Grammar

Combinatory Categorical Grammars

- 筆者が注目している言語理論の一つに、Combinatory Categorical Grammarsがある。それは、Dependent Type Theoryの枠組みを利用して、文の生成と意味(論理式で表現される)の導出を、同時に行おうとする試みである。それは、ChomskyのMinimalist Programとも接点を持っている。

Lambek calculus

the bad boy made that mess
 $NP/N, N/N, N, (NP \backslash S)/NP, NP/N, N$

書き換えルール

$X \leftarrow X/Y, Y$

型 X/Y と型 Y の並びは、型 X に置き換わる

$X \leftarrow Y, Y \backslash X$

型 Y と型 $Y \backslash X$ の並びは、型 X に置き換わる

$NP/N, N/N, N, (NP \backslash S)/NP, \underbrace{NP/N, N}_{NP}$

NP: that mess

$NP/N, N/N, N, \underbrace{(NP \backslash S)/NP, NP}_{NP \backslash S}$

NP \ S: made that mess

$NP/N, \underbrace{N/N, N}_{N}, (NP \backslash S)$

N: bad boy

$\underbrace{NP/N, N}_{NP}, (NP \backslash S)$

NP: the bad boy

$\underbrace{NP, (NP \backslash S)}_S$

S: the bad boy made that mess

Combinatory Categorical Grammars

square	blue	or	round	yellow	pillow
ADJ	ADJ	C	ADJ	ADJ	N
$\lambda x.square(x)$	$\lambda x.blue(x)$	$disj$	$\lambda x.round(x)$	$\lambda x.yellow(x)$	$\lambda x.pillow(x)$
N/N	N/N		N/N	N/N	
$\lambda f.\lambda x.f(x) \wedge square(x)$	$\lambda f.\lambda x.f(x) \wedge blue(x)$		$\lambda f.\lambda x.f(x) \wedge round(x)$	$\lambda f.\lambda x.f(x) \wedge yellow(x)$	
N/N	N/N		N/N	N/N	
$\lambda f.\lambda x.f(x) \wedge square(x) \wedge blue(x)$			$\lambda f.\lambda x.f(x) \wedge round(x) \wedge yellow(x)$		
$<\Phi>$					
N/N					
$\lambda f.\lambda x.f(x) \wedge ((square(x) \wedge blue(x)) \vee (round(x) \wedge yellow(x)))$					
N					
$\lambda x.pillow(x) \wedge ((square(x) \wedge blue(x)) \vee (round(x) \wedge yellow(x)))$					

ある意味で、ルールベース翻訳の現代版 Chomsky の言語理論とも接点がある。

<https://goo.gl/PZE9oA>

show	me	flights	to	Boston
S/N		N	PP/NP	NP
$\lambda f.f$		$\lambda x.flight(x)$	$\lambda y.\lambda x.to(x, y)$	$BOSTON$
			$\xrightarrow{PP}$	
			$\lambda x.to(x, BOSTON)$	
			$\xrightarrow{N \setminus N}$	
			$\lambda f.\lambda x.f(x) \wedge to(x, BOSTON)$	
			$\xleftarrow{N}$	
			$\lambda x.flight(x) \wedge to(x, BOSTON)$	
			$\xrightarrow{S}$	
			$\lambda x.flight(x) \wedge to(x, BOSTON)$	

行の上は、Syntax
行の下は、Semantics

SyntaxとSemanticsを
同時に扱うことができる

go	to	the	chair
S	AP/NP	NP/N	N
$\lambda a.move(a)$	$\lambda x.\lambda a.to(a, x)$	$\lambda f.\iota x.f(x)$	$\lambda x.chair(x)$
		NP $\iota x.chair(x)$	
		AP $\lambda a.to(a, \iota x.chair(x))$	
		$S \setminus S$ $\lambda f.\lambda a.f(a) \wedge to(a, \iota x.chair(x))$	
		S $\lambda a.move(a) \wedge to(a, \iota x.chair(x))$	

行の上は、Syntax
行の下は、Semantics

SyntaxとSemanticsを
同時に扱うことができる

**Curry-Howard-(Lambek)
correspondence**

<https://goo.gl/PZE9oA>

VoevodskyとHomotopy Type Theory

- 数学の基礎に関連して、HoTT(Homotopy Type Theory)と呼ばれる新しい型の理論とそれを基礎付ける Univalent Theoryと呼ばれる新しい数学理論が、関心を集めている。
 - Univalent Theoryは、数学者のVladimir Voevodskyが、論理学者Per Martin-Löfの型の理論を「再発見」したことに始まる。
 - この新しい分野は、21世紀の数学とコンピュータサイエンスの双方に、大きな影響を与えていくだろう。
 - 残念なことに、Voevodskyは、2017年9月、急逝した。
-

おわりに

-
- 人工知能に対する「期待」を「幻想」として切り捨てるのは、やさしい。逆に、根拠もなく「幻想」に振り回されるのも芸がない話だ。人工知能技術の未来についての筆者の基本的な立場は、冒頭の日本語epigramと同じものだ。
 - 現在の到達点にも関わらず、困難な領域である言語的認識能力においても数学的認識能力においても、人間と機械に可能なことの理解は、いつか大きく変化して、人間と機械との新しい関係が生まれるだろうと、筆者は確信している。
-

マルレク2018 開催予定

「ポスト・ディープラーニングの人工知能技術を展望する」

第一回 5月 「ポスト・ディープラーニングの
人工知能技術を展望する」

第二回 6月 「量子コンピューティングの現状と課題」

第三回 8月 「文法を計算する –
Lambek Categorical Grammar 入門」

第四回 9月 「量子コンピューティングの
機械学習への応用」

第五回 11月 「意味の形式的理論」

第六回 1月 「量子暗号と量子通信」

第七回 3月 「数学的推論の自動化は可能か？」