

信息学院人工智能专业方向

《脑与认知科学》

绪论

- 注：本课程部分内容整理自课程教材、参考书籍或公共资源，特此致谢！

任课老师：李骛

- 经历

- 95级科大本科、00级科大硕博
- 博士后：耶鲁大学
- 信息学院博导、6系副主任
- 信息处理与智能感知实验室（IPLab）负责人



- 研究方向：

- 计算机视觉与人工智能
- 医学图像处理
- 先进人机交互



- 联系方式：

- 办公室：西区电三楼804，Email: aoli@ustc.edu.cn
- 主页: <http://institution.ustc.edu.cn/IPlab>

课程助教

- 助教：
 - 高子玉, SA21023014@mail.ustc.edu.cn
 - 王威, weiwang2077@mail.ustc.edu.cn
 - 方玉林, fangyulin@mail.ustc.edu.cn



课程简介

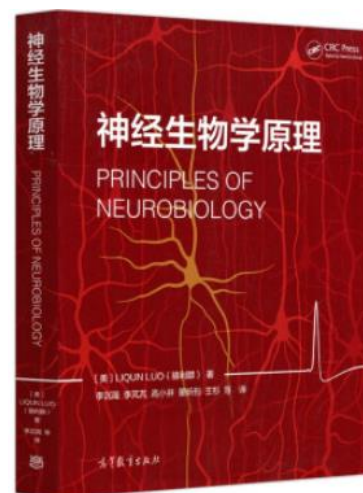
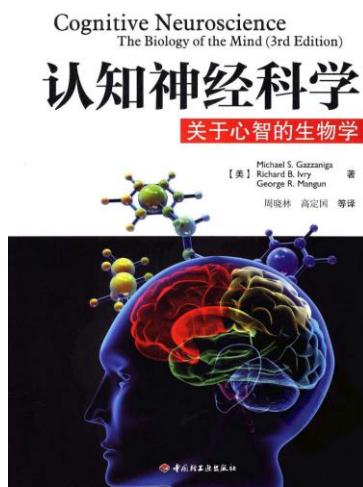
- 本课程重点介绍脑与认知科学的基本概念、知识及其在现实生活中的应用，在此基础上介绍人工大脑、认知计算等相关的智能科学技术，体现了脑科学、认知科学、人工智能及计算机和信息科学等多学科领域交叉的特点，为学生提供较为全面系统的知识框架，为进一步学习后续专业课程打下良好的基础

教学目标

- 脑认知及其相关的智能科学是人工智能专业的重要基础知识，通过对这门课程的学习，要求学生掌握脑与认知科学的基本概念和知识结构，熟悉认知相关的智能科学技术方法、原理与应用等，了解相关领域的研究现状和发展趋势，对已有成果展开分析与讨论，为今后进一步的学科探索打好基础

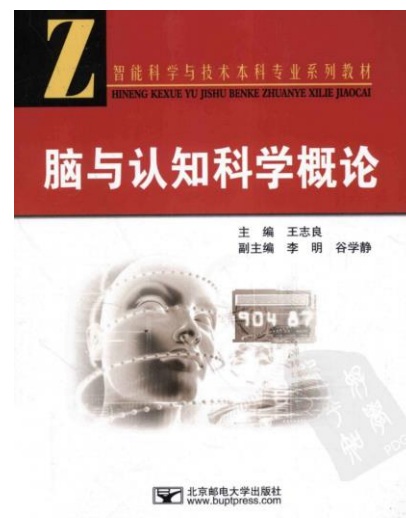
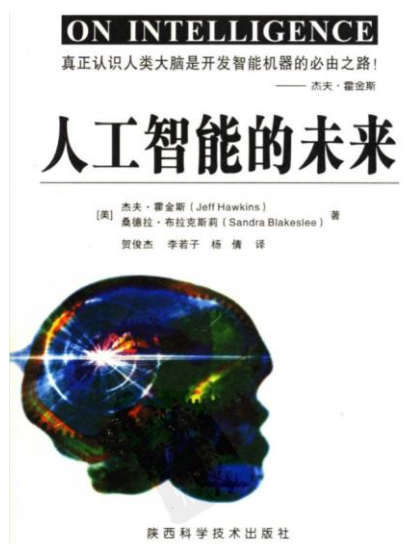
教材

- Michael Gazzaniga著，《认知神经科学》，中国轻工业出版社
- 骆利群著，《神经生物学原理》，高等教育出版社



参考书目

- 杰夫·霍金斯著，《人工智能的未来》，陕西科学技术出版社
- 王志良主编，《脑与认知科学概论》，北京邮电大学出版社



课程章节主要内容

I. 绪论及脑科学的发展历史

II. 脑科学基础

- 神经系统的细胞机制
- 人脑的基本结构和功能
- 大脑半球特异化

III. 认知神经科学基础

- 感觉和知觉
- 物体识别
- 记忆和注意

VI. 脑启发的神经计算

成绩

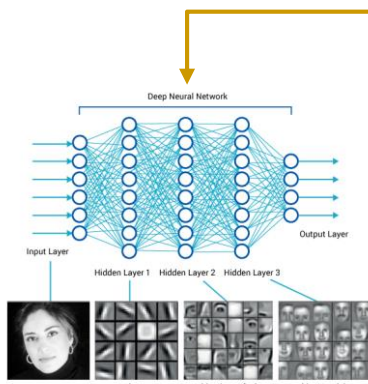
- 平时成绩：30%
 - Assignment/Project/Quiz
- 考试成绩：70%
 - Final Exam

本课程的特点

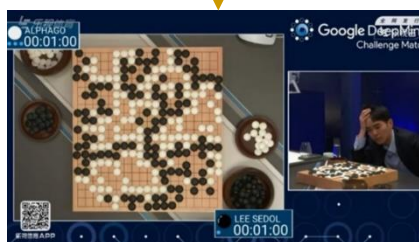
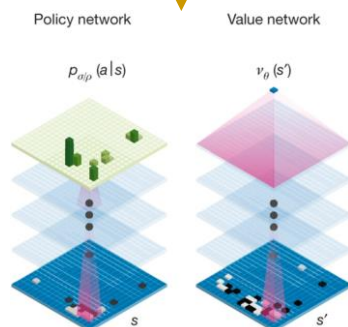
- 较多的知识性内容
- 涉及多个学科领域交叉
- 学习方法：
 - 上课听讲、记笔记
 - 针对性复习
- 课件将上传到本课程的QQ群

人工智能的颠覆性突破

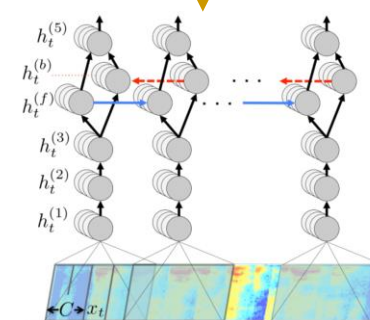
深度学习 (深度神经网络)



图像处理



智能竞技



语音识别

人工智能的广泛应用

? 谷歌的人工智能除了可以下围棋、识别面孔和翻译语言之外，还能做什么？



36大数据 大数据第一平台

首页 千页教程 大数据动向

打败李世石后 DeepMind 下一挑战是防止失明

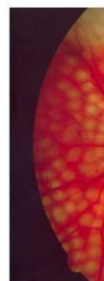
打造医疗界的AlphaGo?DeepMind

2016-07-06 09:59:56 来源: 网易科技报道

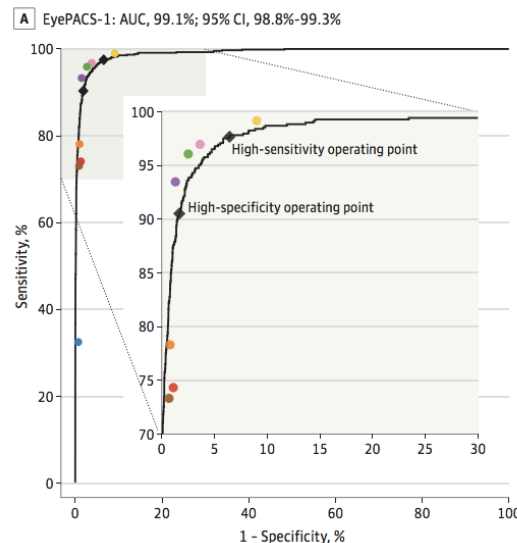
分享到: 微信 微博



5月4日，据国外媒体报道，谷歌(微博)旗下英国国家医疗服务系统(NHS)的约160万: 统AlphaGo，并战胜了顶尖职业棋手李世

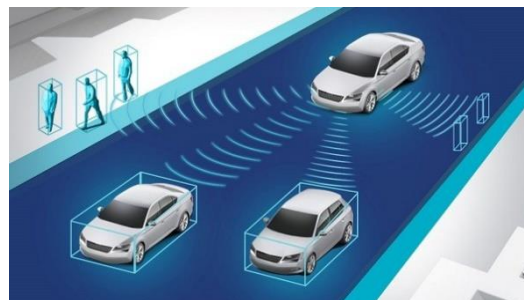


网易科技讯 7月6 谷歌旗下的人工智能能 国国家卫生服务体系， 发现常见的眼部疾病。



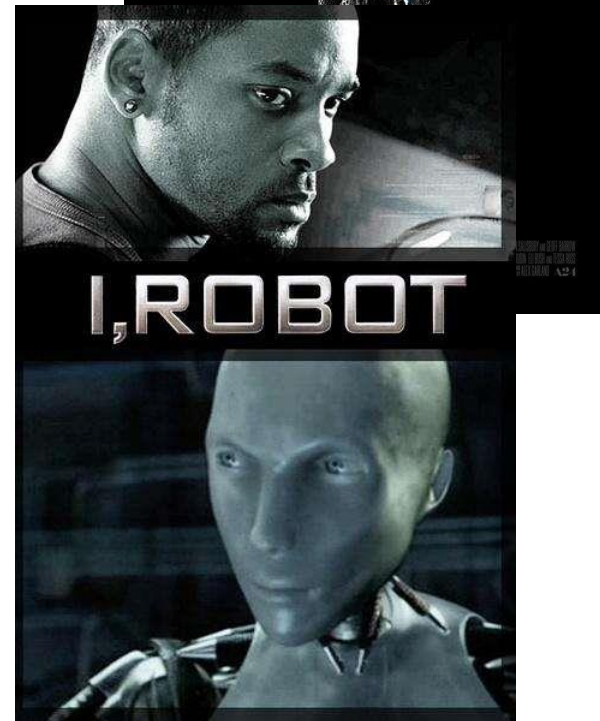
人工智能的广泛应用

- 依靠车内的以人工智能技术实现无人驾驶的目标，是未来交通出行的一场技术革命
- 不仅极大地解放了人的双手和大脑，而且有效提高出行效率和安全
- 无人驾驶是汽车共享的未来，将对现有的网约车、分时租赁等共享经济模式将产生深刻的影响



人工智能的终极目标

- 通用人工智能的目标是制造出真正能推理和解决问题的智能机器
 - 有知觉和自我意识，可以独立思考问题并制定解决问题的最优方案，有自己的价值观和世界观体系
 - 有和生物一样的各种本能，比如生存和安全需求
 - 在某种意义上可以看作一种新的文明



脑认知与人工智能的未来



**对人脑功能的认知是启发通用人工智能
研究的重要途径！**

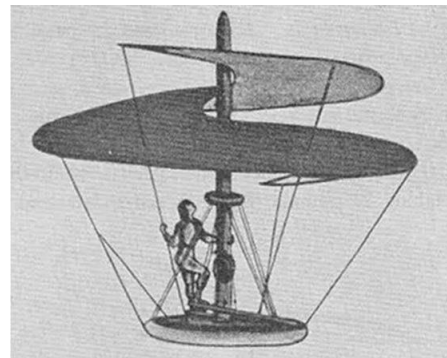


飞机发明的历史

- 飞机概念、原理的产生
 - 空气动力学研究：重于空气的飞行需要提供气动升力和推力
 - 工程技术：动力、材料等方面极为落后



达·芬奇



飞机发明的历史

- 飞机工程技术的发展期
 - 蒸汽机：无法在重量与功率之间达到飞机所需要的水平
 - 材料技术：机翼等材料技术差



“作为一架1.4吨的飞机，它的发动机功率只有可怜的37kw。这种情况下需要较好的气动设计才能让飞机飞行。而且她46米的翼展相对于那个时代的材料水平也实在是太脆弱了点”

<https://www.zhihu.com/question/22786802/answer/33603486>

飞机发明的历史

- 飞机工程技术的突破期
 - 动力技术：汽油机的发明，大幅度提高了发动机的功率密度
 - 材料技术：铝材、桁架结构等技术保证机身重量和结构稳定
- 空气动力学研究存在不足
 - 尾翼设计存在严重缺陷
 - 难以维持飞行和操纵



戈特利布·戴姆勒

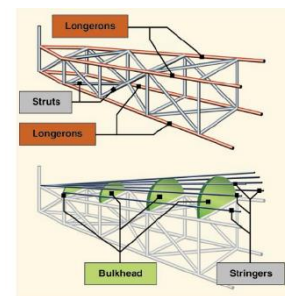
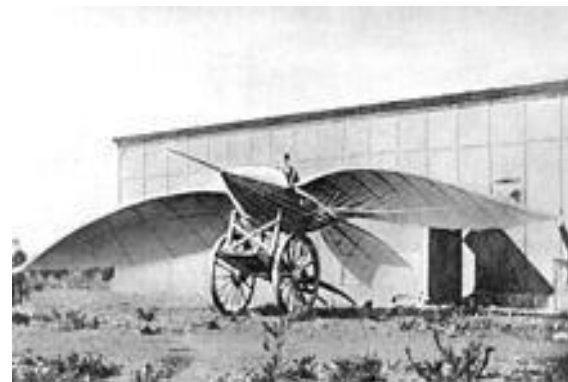


Figure 2-5. Truss-type fuselage structure.



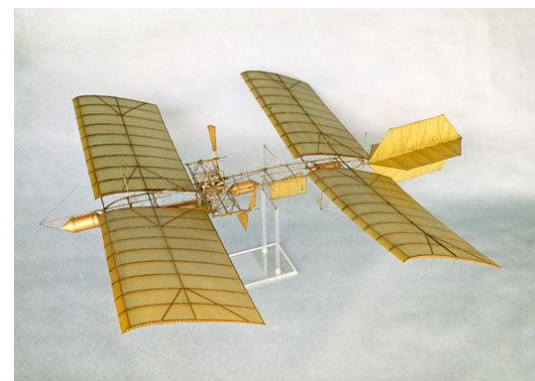
19世纪的早期飞机

飞机发明的历史

- 空气动力学研究的长足发展
 - 合理的尾翼构型在**19**世纪中期出现
 - 到了**19**世纪末期，气动设计和飞行力学的进展使飞机的出现成为可能
- **1902**年出现了无人飞机的首次持续飞行



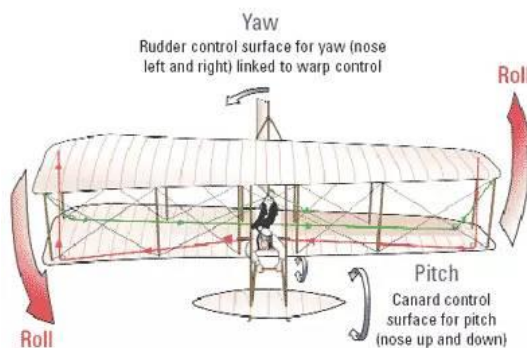
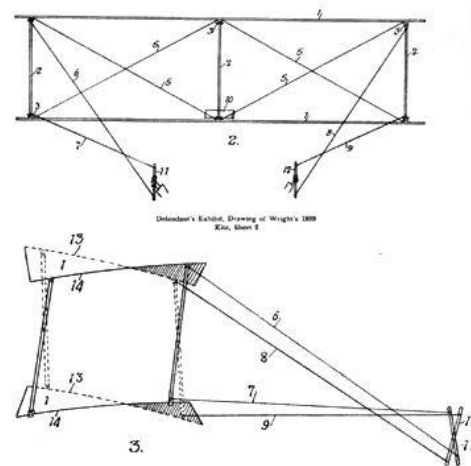
1871年的法国动力滑翔机



1902年的飞机场号飞机

飞机发明的历史

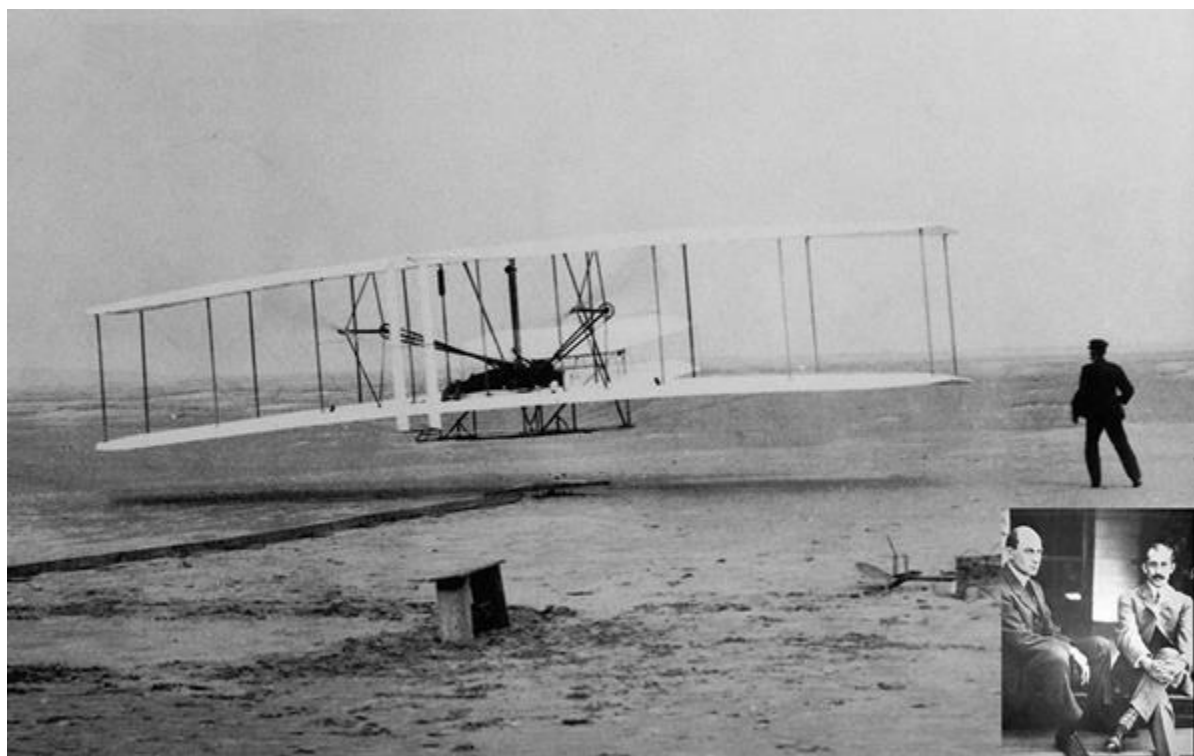
- 飞机发明的最后难题：控制技术
 - 1899年，莱特兄弟率先想到了使用翘曲机翼的方法实现对飞机的控制
 - 通过控制索拉动机翼或水平尾翼的末端，使之变形的方式改变升力，从而改变飞机的姿态



The Wright Brothers 3-axis control system - 1902 glider

飞机发明的历史

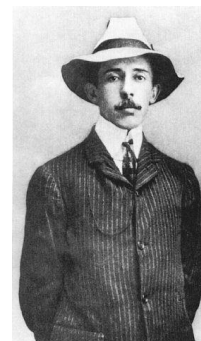
- 莱特兄弟制造的第一架飞机“飞行者一号”



1903年，莱特兄弟第一次实现人类的动力飞行之梦

飞机发明的历史

- 飞机发明的理论和工程技术
 - 理论方面：空气动力学研究成果
 - 工程方面：发动机技术、材料工程技术、飞行控制技术
- 绝大多数的科技突破都是在相关理论和工程技术成熟后自然发生



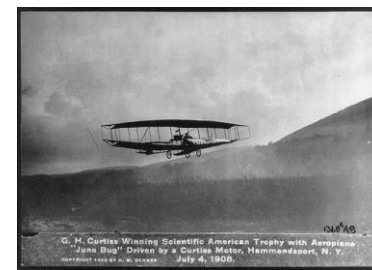
阿尔伯特·桑托斯·杜蒙



格伦·寇蒂斯

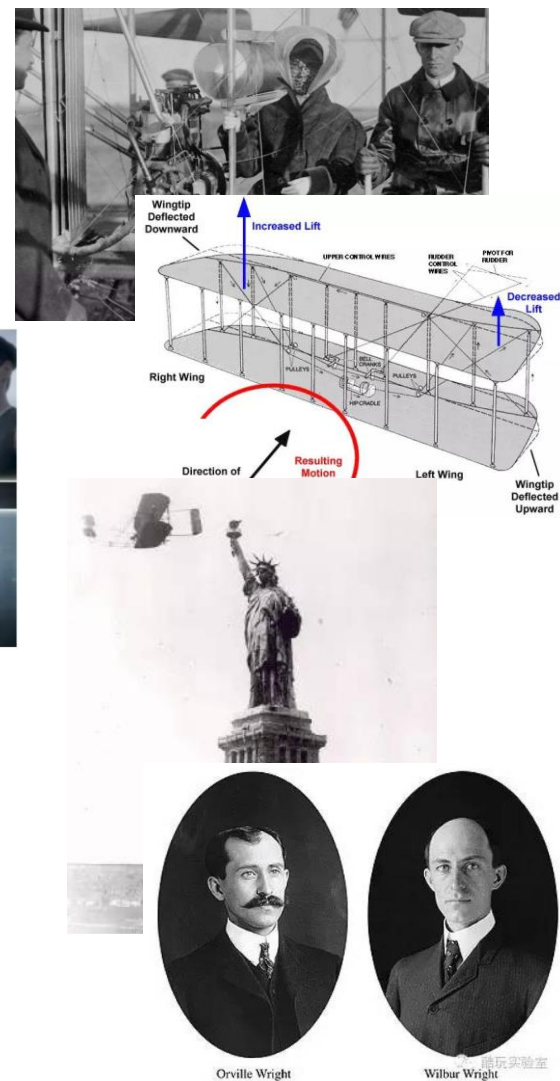
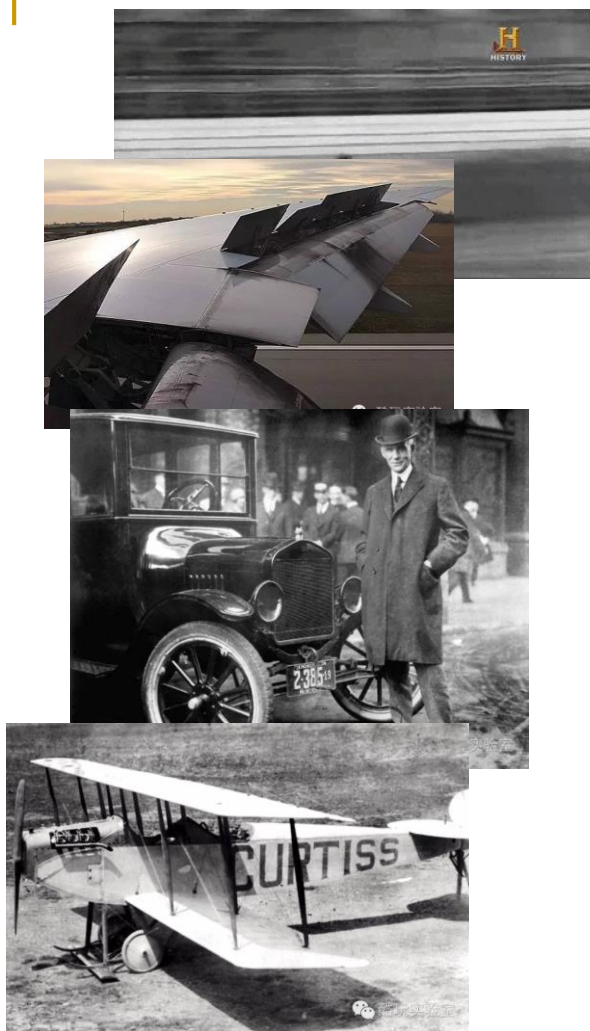


1906年腾空而起的14.bis



1908年的金甲虫号

飞机发明的黑历史



研究鸟类飞行的意义

- 质疑：
 - “对鸟的详细研究不可能对如何制造飞机提供更多启示，对飞机的真正理解是来自飞行的研究”
 - “对鸟类飞行方式的直接复制并不能造出飞机”
- 答案：
 - 鸟类可以在天空中飞行的现实启发了人类，从而提出让人飞起来的设想，“提出问题往往比解决问题本身更为重要”
 - 通过几个世纪的空气动力学研究，终于让人们理解了鸟能够起飞和控制飞行的原理
 - 人类没有复制鸟类的飞行方式，这是基于自身的生理条件、工程技术和远程运输的实际需求而做出的客观选择，并不能说明从鸟类飞行启发的原理性研究意义不大

研究鸟类飞行的意义

“从计算科学和工程学观点看，类脑计算是一门以仿生学为基础的，但又超越仿生学的工程研究。研究类脑智能计算并非复制人的大脑，而是模拟人类大脑的功能，**仅研究**人的思维活动或记录脑中所有神经元不可能研制出真正的智能机器。”-郑南宁院士



人工智能的发展历史



神经元模型

• M-P 神经元模型 [McCulloch and Pitts, 1943]

- 输入：来自其他 n 个神经元传递过来的输入信号
- 处理：输入信号通过带权重的连接进行传递，神经元接受到总输入值将与神经元的阈值进行比较
- 输出：通过激活函数的处理以得到输出

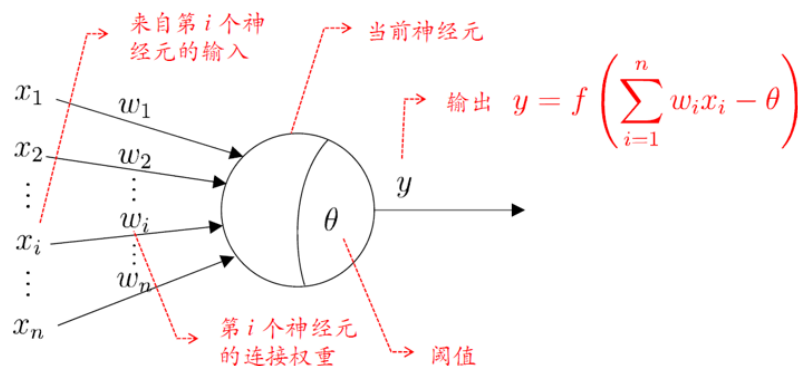
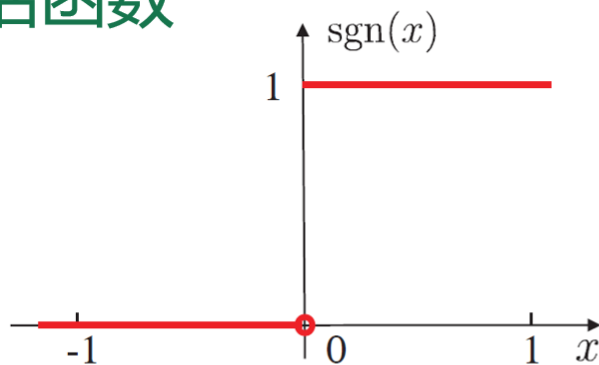


图 5.1 M-P 神经元模型

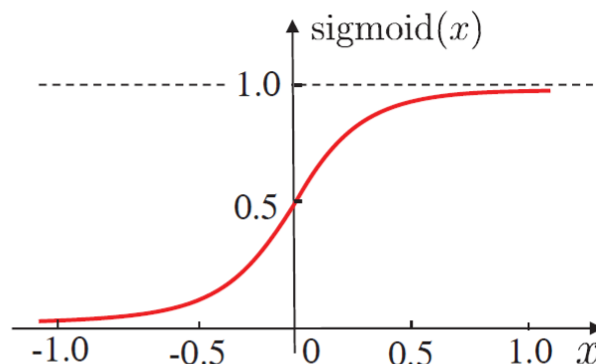
神经元模型

• 激活函数



$$\text{sgn}(x) = \begin{cases} 1, & \text{if } x \geq 0; \\ 0, & \text{if } x < 0. \end{cases}$$

(a) 阶跃函数



$$\text{sigmoid}(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}}$$

(b) Sigmoid 函数

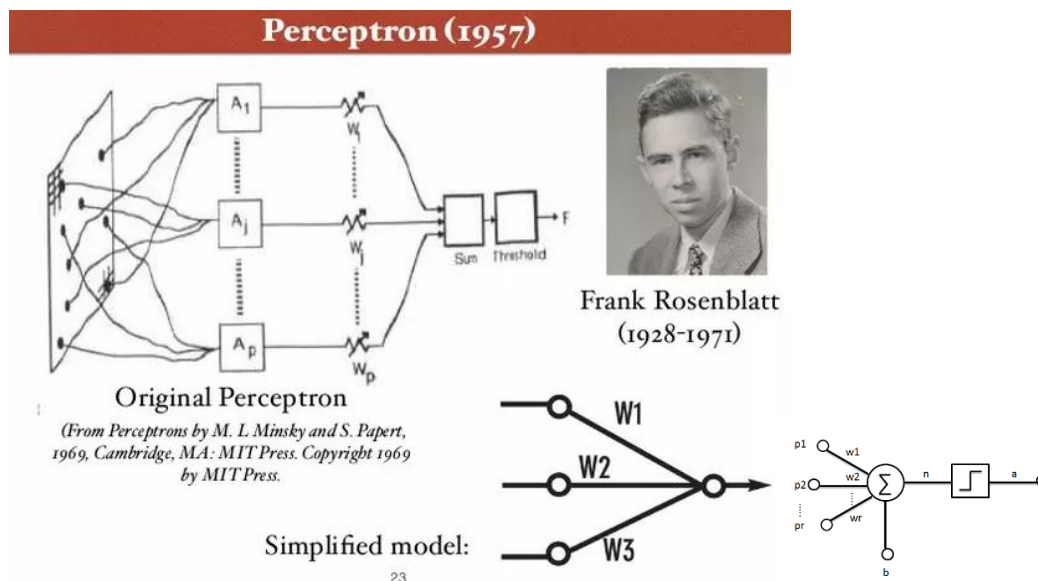
图 5.2 典型的神经元激活函数

- 理想激活函数是阶跃函数, **0**表示抑制神经元而**1**表示激活神经元
- 阶跃函数具有不连续、不光滑等不好的性质, 常用的是 **Sigmoid** 函数

《机器学习》，周志华著

感知机 (Perceptron)

- 由Frank Rosenblatt 1957年提出，是第一个用算法来精确定义的神经网络，也是第一个具有自组织自学习能力的数学模型



23

感知机 (Perceptron)

• 感知机学习

□ 给定训练数据集, 权重 $w_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 与阈值 θ 可以通过学习得到

□ 感知机学习规则

对训练样例 (\mathbf{x}, y) 若当前感知机的输出为 \hat{y} , 则感知机权重调整规则为:

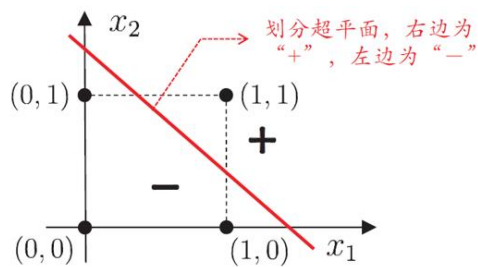
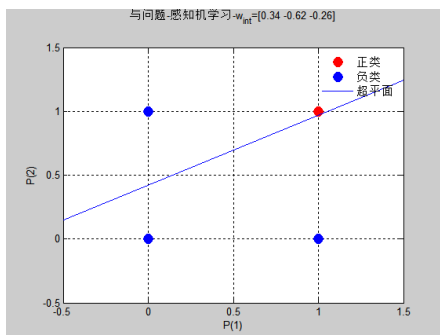
$$\begin{aligned} w_i &\leftarrow w_i + \Delta w_i \\ \Delta w_i &= \eta(y - \hat{y})x_i \end{aligned}$$

其中 $\eta \in (0, 1)$ 称为学习率

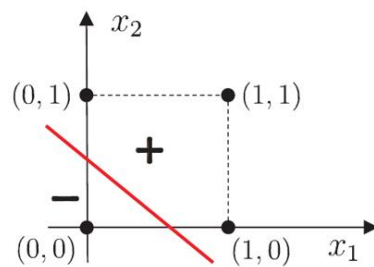
若感知机对训练样例 (\mathbf{x}, y) 预测正确, 则感知机不发生变化; 否则根据错误程度进行权重的调整.

感知机 (Perceptron)

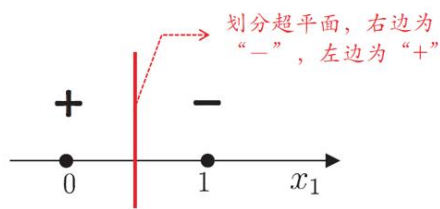
- 感知机存在以下缺点：
 - 单层感知器无法解决非线性可分的问题
 - 当时缺乏模型所需的超大计算量



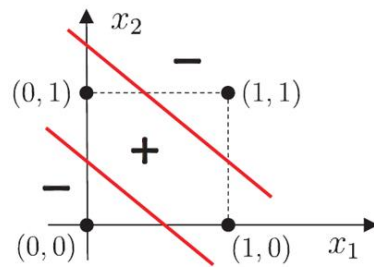
(a) “与”问题 ($x_1 \wedge x_2$)



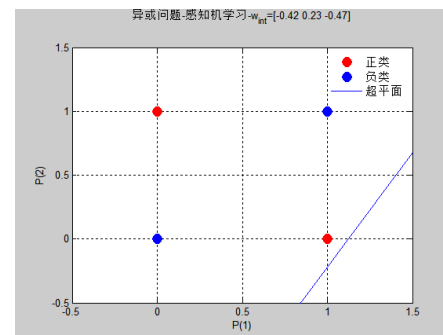
(b) “或”问题 ($x_1 \vee x_2$)



(c) “非”问题 ($\neg x_1$)



(d) “异或”问题 ($x_1 \oplus x_2$)



《机器学习》，周志华著

人工神经网络

● 多层感知机

□ 解决异或问题的两层感知机

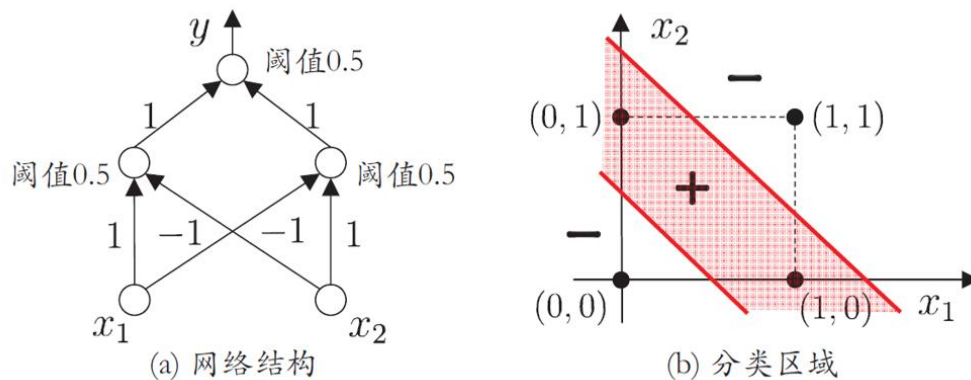


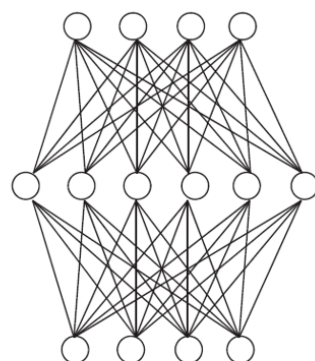
图 5.5 能解决异或问题的两层感知机

- 输出层与输入层之间的一层神经元, 被称之为**隐层或隐含层**, 隐含层和输出层神经元都是具有激活函数的功能神经元

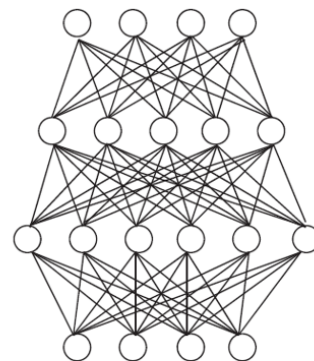
人工神经网络

• 多层前馈神经网络

- **定义**：每层神经元与下一层神经元全互联，神经元之间不存在同层连接也不存在跨层连接
- **前馈**：输入层接受外界输入，隐含层与输出层神经元对信号进行加工，最终结果由输出层神经元输出
- **学习**：根据训练数据来调整神经元之间的“**连接权**”以及每个功能神经元的“**阈值**”
- **多层网络**：包含隐层的网络



(a) 单隐层前馈网络



(b) 双隐层前馈网络

《机器学习》，周志华著

人工神经网络

- 神经网络的泛逼近定理：只需要一个包含足够多神经元的隐层，多层前馈神经网络就能以任意精度逼近任意复杂度的连续函数

人工神经网络的训练

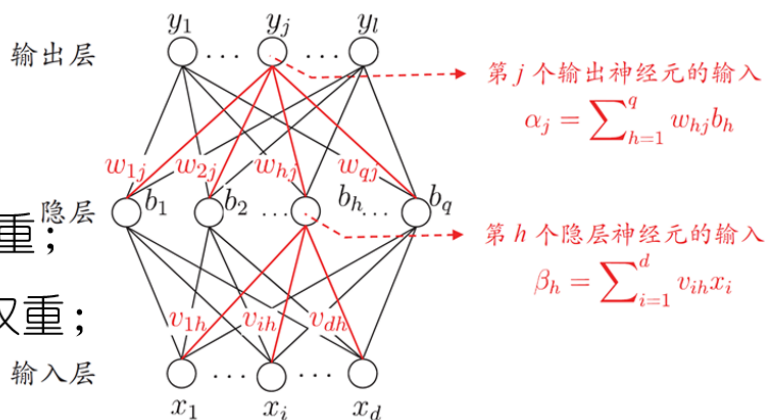
- **误差逆传播算法** (Error BackPropagation, 简称BP) 是最成功的训练多层前馈神经网络的学习算法。
- 给定训练集 $D = \{(\mathbf{x}_i, \mathbf{y}_i)\}$, $\mathbf{x}_i \in R^d$, $\mathbf{y}_i \in R^l$, ($i = 1, 2, \dots, m$), 即输入示例由 d 个属性描述, 输出 l 维实值向量。
- 为方便讨论, 给定一个拥有 d 个输入神经元, l 个输出神经元, q 个隐层神经元的多层前向前馈网络结构。
- 记号:

θ_j : 输出层第 j 个神经元阈值;

γ_h : 隐含层第 h 个神经元阈值;

v_{ih} : 输入层与隐层神经元之间的连接权重;

w_{hj} : 隐层与输出层神经元之间的连接权重;



《机器学习》，周志华著

人工神经网络的训练

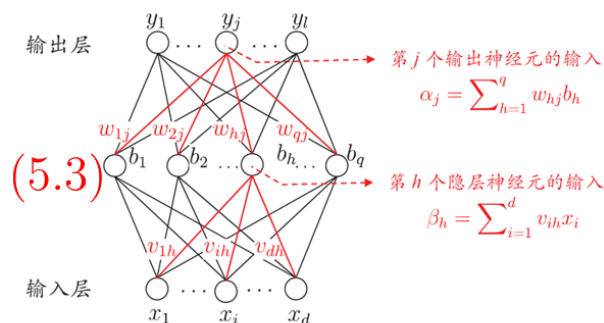
- 对于样例 $(\mathbf{x}_k, \mathbf{y}_k)$, 假设网络的实际输出为 $\hat{\mathbf{y}}_k$

前向计算

step1: $b_h = f(\beta_h - \gamma_h), \beta_h = \sum_{i=1}^d v_{ih} x_i$

step2: $\hat{y}_j^k = f(\alpha_j - \theta_j), \alpha_h = \sum_{i=1}^q w_{hj} b_h$

step3: $E_k = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^l (\hat{y}_j^k - y_j^k)^2$



参数数目

权重: v_{ih}, w_{hj} 阈值: θ_j, γ_h ($i = 1, \dots, d, h = 1, \dots, q, j = 1, \dots, l$)

因此网络中需要 $(d + l + 1)q + l$ 个参数需要优化

参数优化

BP是一个迭代学习算法, 在迭代的每一轮中采用广义的感知机学习规则对参数进行更新估计, 任意的参数 v 的更新估计式为

$$v \leftarrow v + \Delta v.$$

《机器学习》, 周志华著

人工神经网络的训练

• BP 学习算法

- BP算法基于梯度下降策略，以目标的负梯度方向对参数进行调整。对误差 E_k ，给定学习率 η

$$\Delta w_{hj} = -\eta \frac{\partial E_k}{\partial w_{jk}}$$

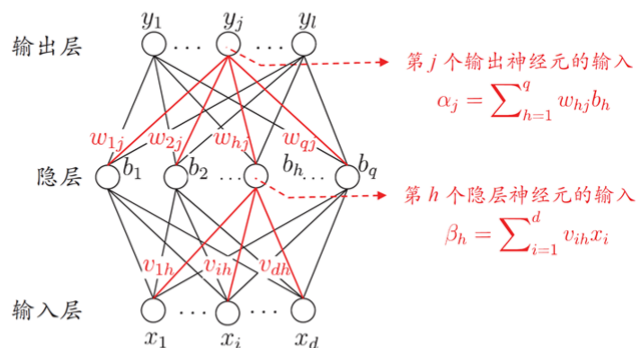
$$\frac{\partial E_k}{\partial w_{hj}} = \frac{\partial E_k}{\partial \hat{y}_j^k} \cdot \frac{\partial \hat{y}_j^k}{\partial \beta_j} \cdot \frac{\partial \beta_j}{\partial w_{hj}}$$

$$g_j = -\frac{\partial E_k}{\partial \hat{y}_j^k} \cdot \frac{\partial \hat{y}_j^k}{\partial \beta_j}$$

$$= -(\hat{y}_j^k - y_j^k) f'(\beta_j - \theta_j)$$

$$= \hat{y}_j^k (1 - \hat{y}_j^k) (y_j^k - \hat{y}_j^k) \quad (5.10)$$

$$\Delta w_{hj} = \eta b_j g_h \quad (5.11)$$



《机器学习》，周志华著

人工神经网络的训练

• BP 学习算法

- 类似的可以推导出：

$$\Delta \theta_j = -\eta g_j, \quad (5.12)$$

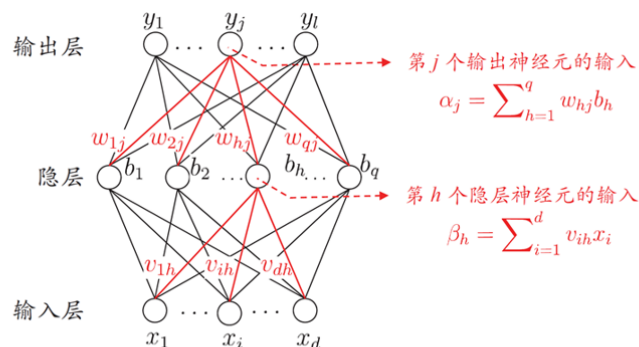
$$\Delta v_{ih} = \eta e_h x_i, \quad (5.13)$$

$$\Delta \gamma_h = -\eta e_h, \quad (5.14)$$

其中

$$e_h = -\frac{\partial E_k}{\partial b_h} \cdot \frac{\partial b_h}{\partial \alpha_h}$$

$$= -\sum_{j=1}^l \frac{\partial E_k}{\partial \beta_j} \frac{\partial b_h}{\partial \beta_j} f'(\alpha_h - \gamma_h)$$



$$\begin{aligned} &= \sum_{j=1}^h w_{hj} g_j f'(\alpha_h - \gamma_h) \\ &= b_h(1 - b_h) \sum_{j=1}^h w_{hj} g_j. \end{aligned} \quad (5.15)$$

- 学习率 $\eta \in (0, 1)$ 控制着算法每一轮迭代中的更新步长, 若太长则让容易震荡, 太小则收敛速度又会过慢.

《机器学习》，周志华著

人工神经网络的训练

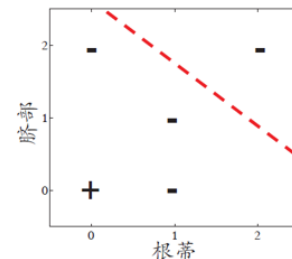
• BP 学习算法

输入：训练集 $D = \{(\mathbf{x}_k, \mathbf{y}_k)\}_{k=1}^m$;
学习率 η .

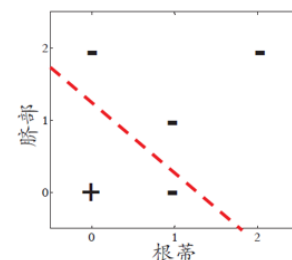
过程：

- 1: 在(0, 1)范围内随机初始化网络中所有连接权和阈值
- 2: **repeat**
- 3: **for all** $(\mathbf{x}_k, \mathbf{y}_k) \in D$ **do**
- 4: 根据当前参数和式(5.3) 计算当前样本的输出 $\hat{\mathbf{y}}_k$;
- 5: 根据式(5.10) 计算输出层神经元的梯度项 g_j ;
- 6: 根据式(5.15) 计算隐层神经元的梯度项 e_h ;
- 7: 根据式(5.11)-(5.14) 更新连接权 w_{hj} , v_{ih} 与阈值 θ_j , γ_h
- 8: **end for**
- 9: **until** 达到停止条件

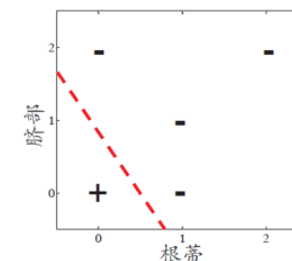
输出：连接权与阈值确定的多层前馈神经网络



(a) 第 25 轮



(b) 第 50 轮



(c) 第 100 轮

《机器学习》，周志华著

人工神经网络的缺点

- 需要大量数据和计算资源，隐含层过多会导致模型复杂、训练困难
- 由于表示能力强大，经常遭遇过拟合，即训练误差持续降低，但测试误差却可能上升
- 神经网络的结构设计依赖经验，缺乏理论指导和依据

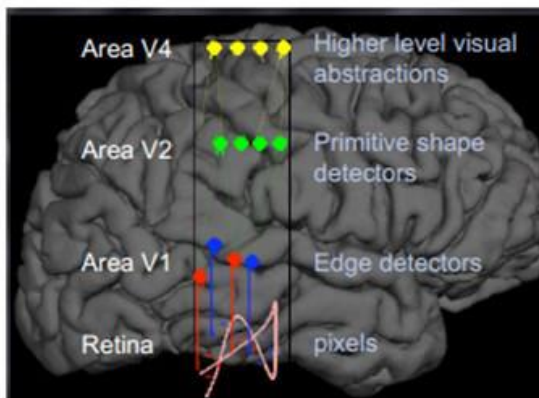
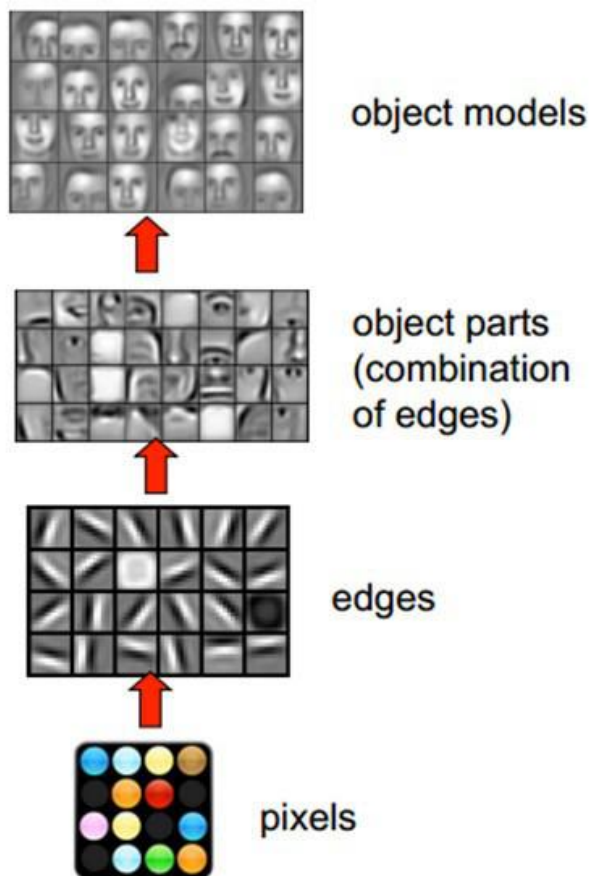


Geoffrey Hinton



Yann Lecun

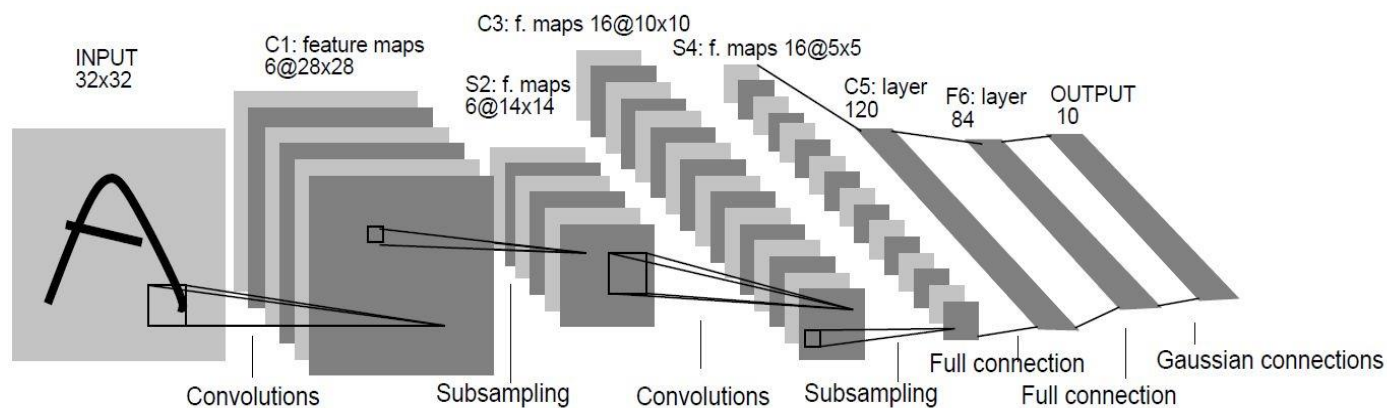
视觉系统信息处理机制



大卫·休伯尔
1981年诺贝尔医学生理学奖



卷积神经网络



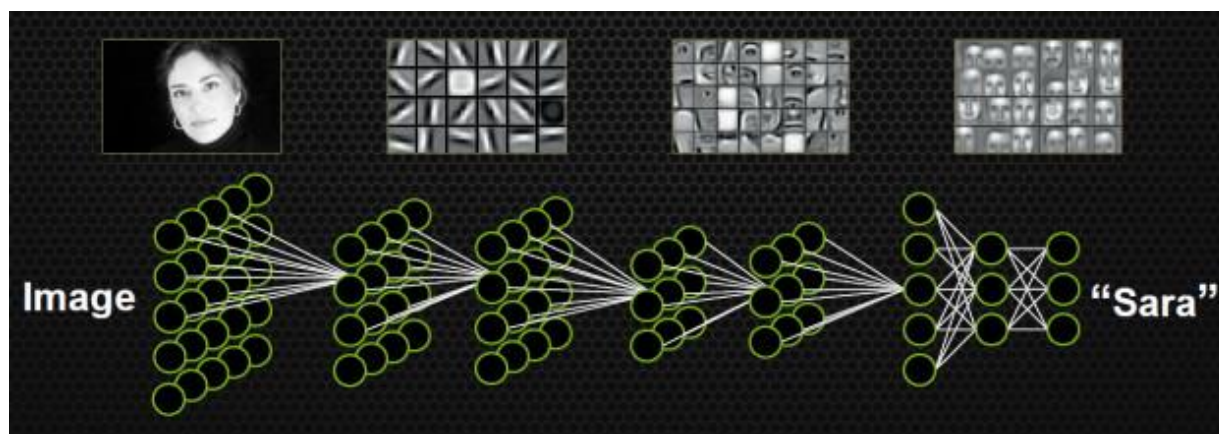
1998年Lecun提出的LeNet



深度神经网络



近年来**算法 (A)**、**大数据 (B)** 和 **计算能力 (C)** 等理论和技术的不断进步，深度神经网络出现了革命性突破！



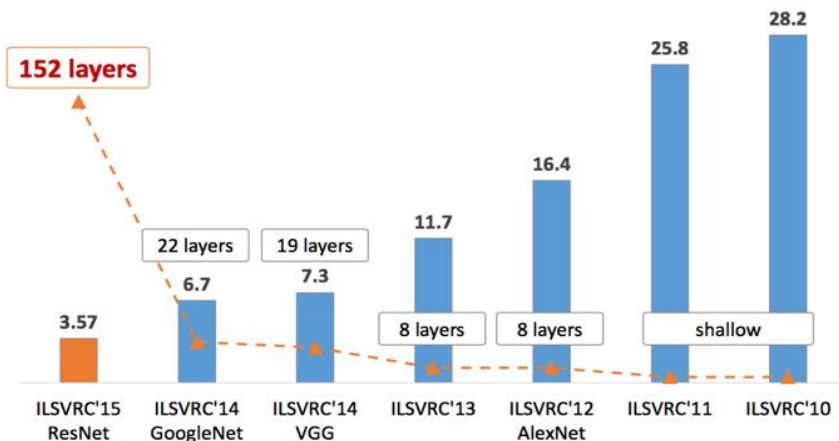
ImageNet大规模视觉识别挑战赛

ImageNet Dataset 14,197,122 images, 21841 synsets indexed



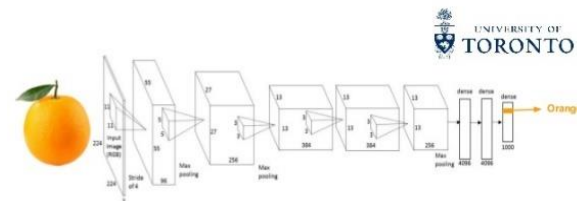
李飞飞

Russakovsky, O., Deng, J., Su, H., Krause, J., Satheesh, S., Ma, S., ... & Fei-Fei, L. (2015). [Imagenet large scale visual recognition challenge](#). *arXiv preprint arXiv:1409.0575*. [\[arXiv\]](#)



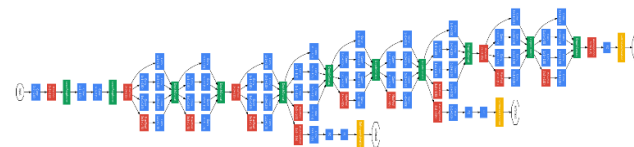
ImageNet历年的Top-5错误率

AlexNet (Supervision)

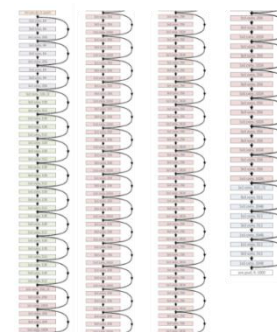


A Krizhevsky, I Sutskever, GE Hinton "Imagenet classification with deep convolutional neural networks" *Neural Information Processing Systems 25 (NIPS 2012)*
 Slide credit: Junting Pan, "Visual Saliency Prediction using Deep Learning Techniques" (ETSE)

AlexNet



GoogleNet



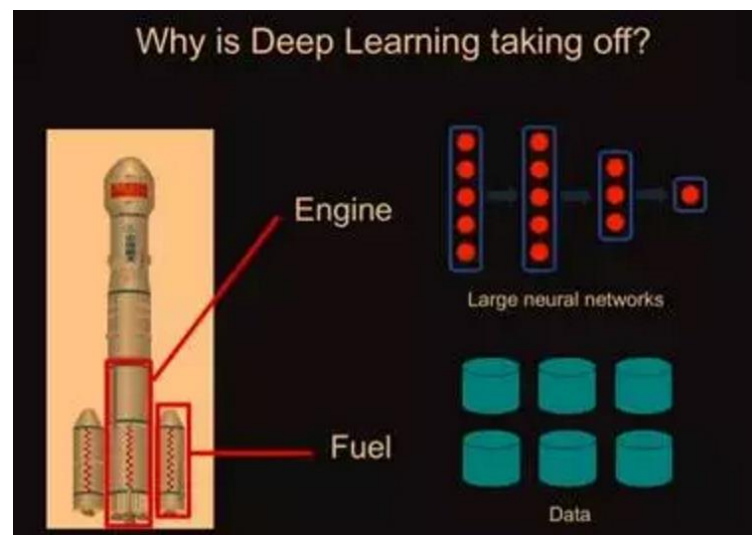
ResNet

深度神经网络成功的关键要素

“我觉得人工智能就像是去构建一艘火箭船。你需要一个巨大的引擎和许多燃料。如果你有了一个大引擎，但燃料不够，那么肯定不能把火箭送上轨道；如果你有一个小引擎，但燃料充足，那么说不定根本就无法成功起飞。

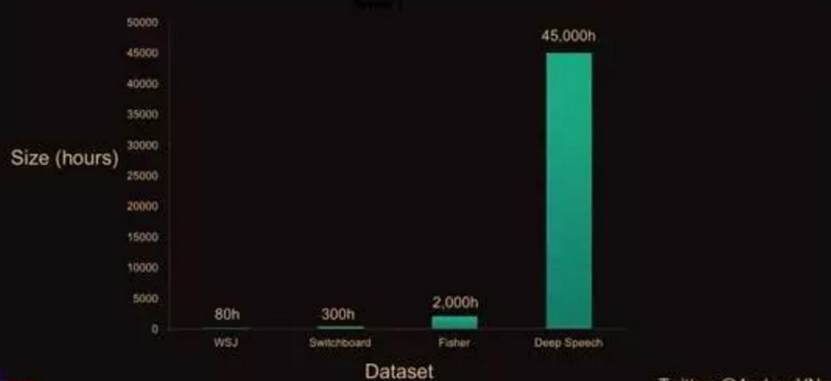
所以，构建火箭船，你必须要有个巨大的引擎和许多燃料。深度学习（创建人工智能的关键流程之一）也是同样的道理，火箭引擎就是深度学习模型，而燃料就是海量数据，这样我们的算法才能应用上。”

— 吴恩达（在线教育平台Coursera的联合创始人、斯坦福大学计算机科学系和电子工程系副教授、百度公司首席科学家）有关人工智能中深度学习的“火箭理论”



深度神经网络成功的关键要素

Speech dataset (Rocket fuel)



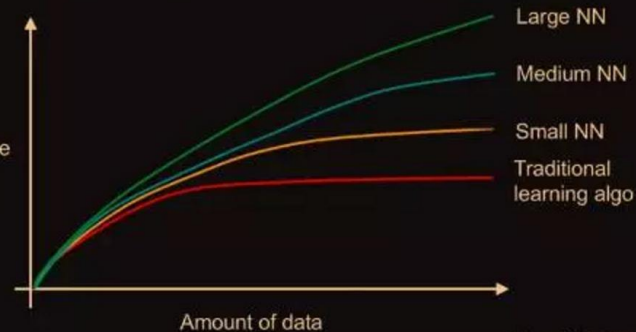
火箭燃料：语音数据的改变

未来趋势：神经网络大小和数据的多
少对人工智能发展的影响

Major trend #1: Scale drives AI progress



Performance



Twitter: @AndrewYNg

2018年图灵奖：深度神经网络的发明者



Yoshua Bengio



Geoffrey Hinton



Yann LeCun



LSTM之父Jürgen Schmidhuber



Peter Seeborg @seeborg_peter · 3月28日

Why maybe Geoffrey Hinton, Yoshua Bengio, and Yann LeCun and not Jürgen Schmidhuber received the Turing Award.



Abhinav Bhardwaj @codealchemistab · 3月27日

Yann LeCun, Geoffrey Hinton and Yoshua Bengio won the Turing Award which is also known as the "Nobel Prize for Computing" for conceptual and engineering breakthroughs that have made deep neural networks a critical component of computing.

Cool, but what about Juergen Schmidhuber?

“深度学习不是在母语为英语的地方被发明的”

<https://zhuanlan.zhihu.com/p/91380529>

深度神经网络的不足

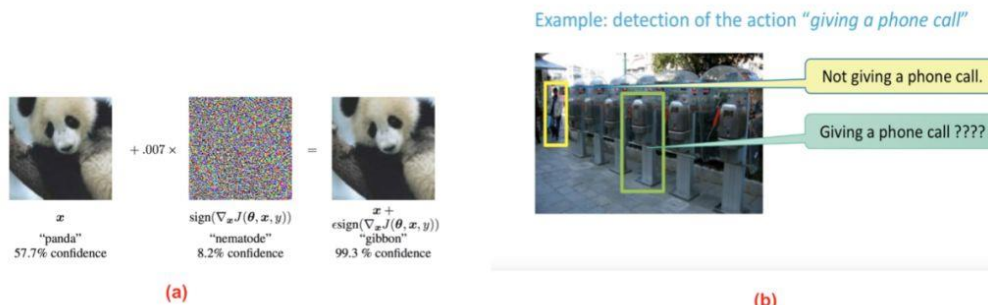
- 与人类相比，深度神经网络需要大量的训练数据或时间
 - 驾驶车辆：人类则可以在平均20小时内学会驾驶且不易发生事故，尽管消耗比人类多几个数量级的训练数据和时长，目前还没有可以完全自动驾驶的汽车

Game	Learning Time
57 Atari Games [Hessel arXiv: 1710.02298]	83 hours equivalent real-time (18 million frames) to reach performance that humans reach in 15 minutes of play
Elf OpenGo v2 [Tian arXiv: 1902.04522]	20 million self-play games (2000 GPU for 14 days)
StarCraft: AlphaStar [Vinyal's blog post 2019]	200 years of equivalent real-time play
OpenAI single-handed Rubik's cube	10,000 years of simulation

<https://mp.weixin.qq.com/s/EkMalHO5xGmWRFZlfs0h0g>

深度神经网络的不足

- 深度神经网络会犯人类不会犯的常识性错误



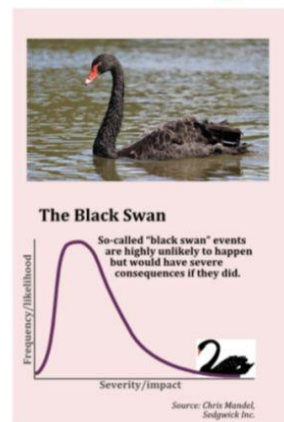
FROM IID TO OOD

Classical ML theory for iid data

Artificially shuffle the data to achieve that?

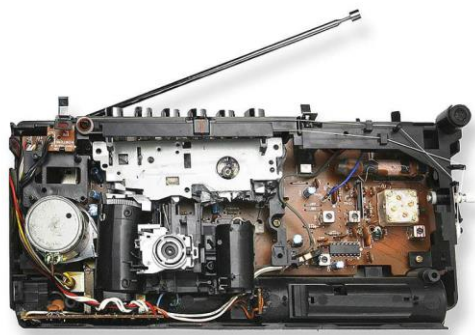
Out-of-distribution generalization

No free lunch: need new assumptions to replace iid assumption, for ood generalization



<https://mp.weixin.qq.com/s/EkMalHO5xGmWRFZlfs0h0g>

深度神经网络的不足



- 假设一个外星人仔细研究关于收音机里的音乐产生的机制，TA注意到如果把内部一根电线拔出来音乐就停止了，而放回去时音乐又开始播放
- TA仔细研究了所有的组合，最后得出结论：音乐的产生，完全依赖于电子线路的连接，连接破坏了音乐就没了。因此，TA得到了一种理论：某种特定组合的电子线路创造了魔术般的音乐

上述理论的局限性：缺乏电磁场、电路理论等基本科学原理的根基！

深度神经网络的未来发展



Yoshua Bengio



Geoffrey Hinton



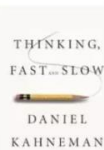
Yann LeCun

SYSTEM 1 VS. SYSTEM 2 COGNITION

2 systems (and categories of cognitive tasks):

System 1

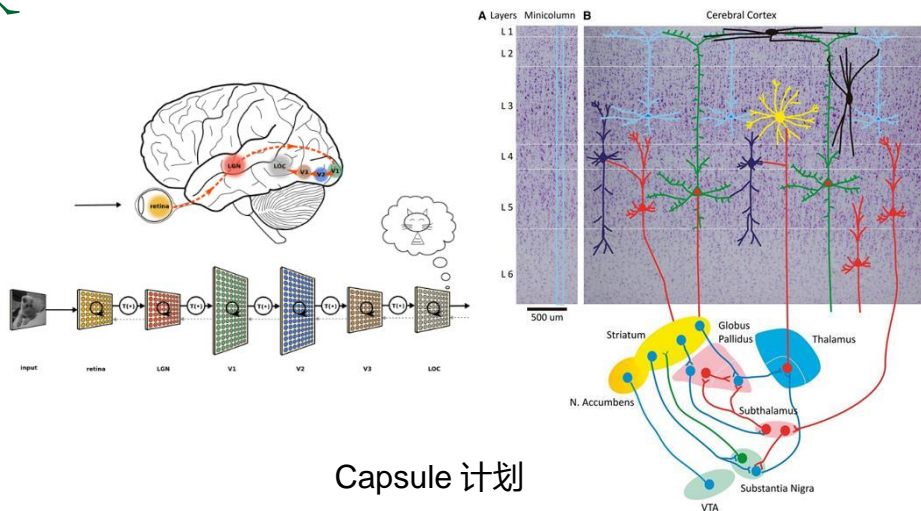
- Intuitive, fast, **UNCONSCIOUS**, non-linguistic, habitual
- Current DL



System 2

- Slow, logical, sequential, **CONSCIOUS**, linguistic, algorithmic, planning, reasoning
- Future DL

Manipulates high-level / semantic concepts, which can be recombined combinatorially



Capsule 计划

Babies learn how the world works by observation

Y. LeCun

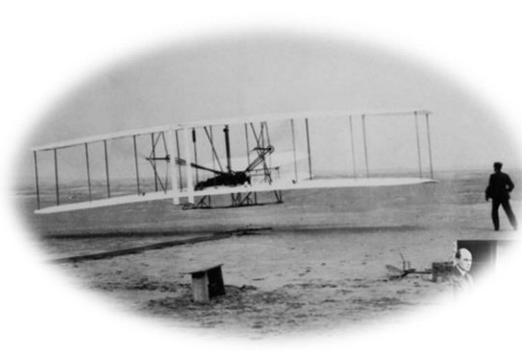
- Largely by observation, with remarkably little interaction.



Photos courtesy of Emmanuel Dupoux

https://mp.weixin.qq.com/s/rxS5kVRi_kMbvmGTksVY6Q

脑认知启发的下一代人工智能技术



中国移动 7.6K/s 中午12:57

Python不能帮你找到...

一.选对行业，少奋斗十年

最近一则视频火了，中国科技大学的几名人工智能专业的学生接受了采访，这些毕业生个个手拿五六个offer，当谈起薪资时，他们表示年薪三四十万只是起步价，更有人一毕业就达到了两百万的年薪。



采访视频的部分截图

279

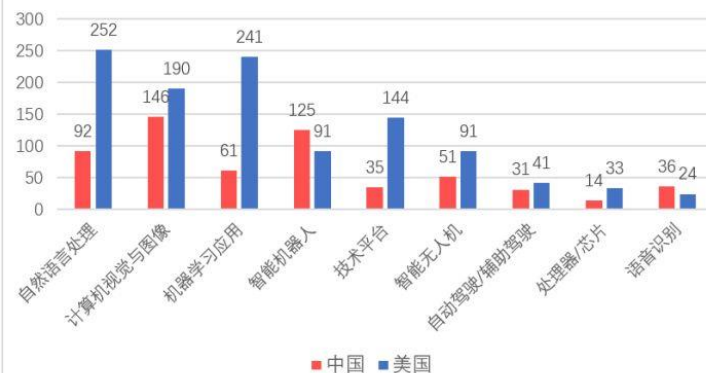
收藏

4

人工智能领域的国际竞争

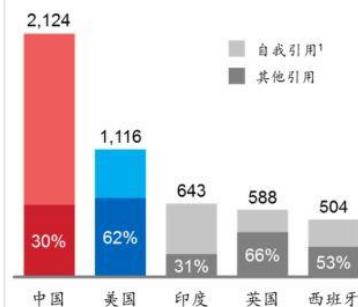


中美两国人工智能九大热点领域企业数量



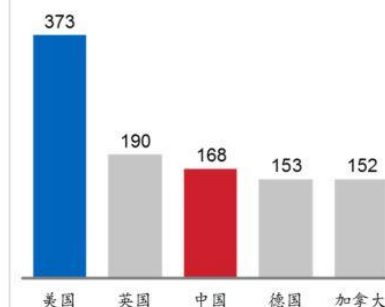
尽管中国论文的引用量排名第一，但如果去除自我引用，美国占据领先

人工智能论文引用量排名前5的国家引用次数



在论文影响力方面，中国仍落后于英美

H指数²中排名前5的国家



<https://www.zhihu.com/question/267301072/answer/325433266>