

経験から学ぶロボットの動かし方 ～ロボット自身が試行錯誤する時代へ～

小林 泰介

国立情報学研究所／総合研究大学院大学
情報学プリンシプル研究系 助教

[mailto: kobayashi@nii.ac.jp](mailto:kobayashi@nii.ac.jp)

身近になってきたロボット

20年くらい前から家庭進出は始まったものの、富裕層・マニア向けの嗜好品...
-> 近年のAIの急発展で、ロボットも急激に賢く便利なものに!?



家電としても...

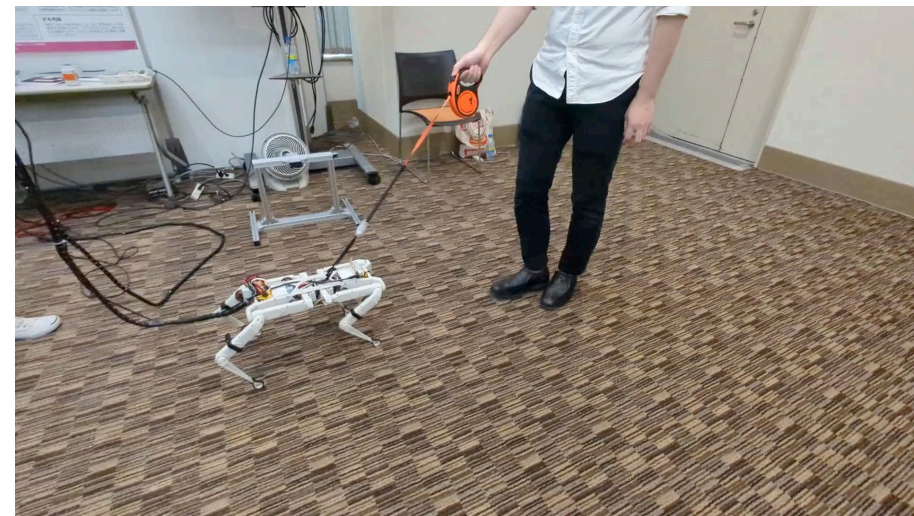


ペットとしても...

ロボットが「どうやって動いているのか？」≡「制御技術」について紹介！
-> これまでは人が試行錯誤，これからロボット自身が試行錯誤??



これまで
人がロボットの運動を設計



これから
ロボット自身が運動を獲得

これまで：
実験的・数理的なモデル化

Q. 人はどうやって歩いている？

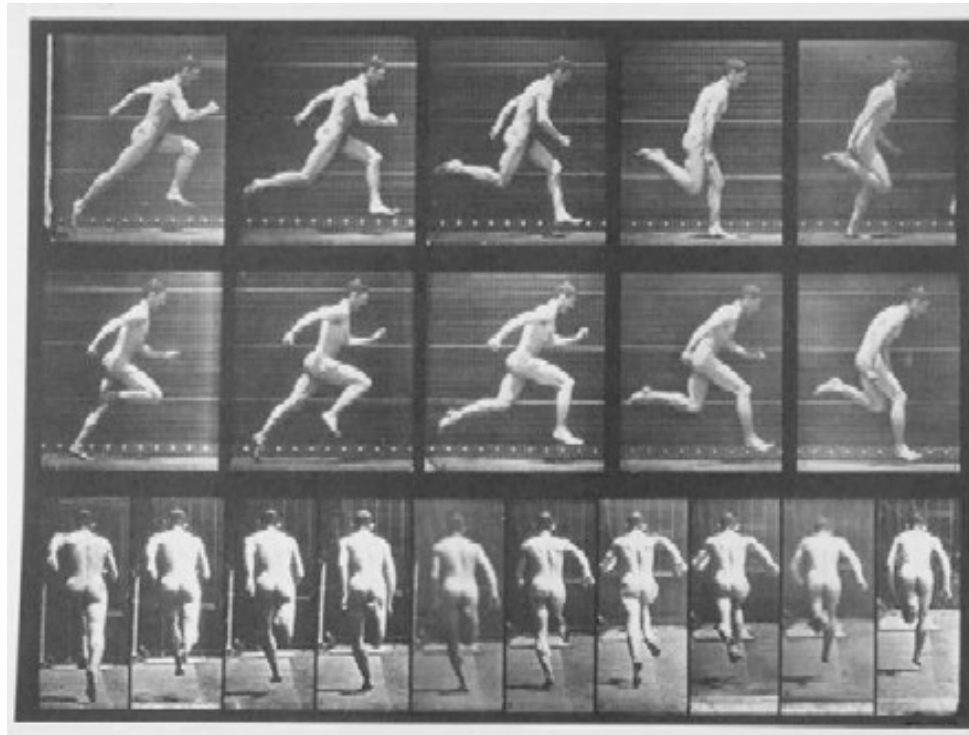
※ 筋肉を動かして～～より踏み込んだ回答で

1. 重力で倒れつつ倒れ切る前にもう一方の脚を上手く着いて
2. 左右の脚を交互にタイミング良く前に出して

A. どちらも正解！

人の歩行・走行は何に例えられる？≡モデル化

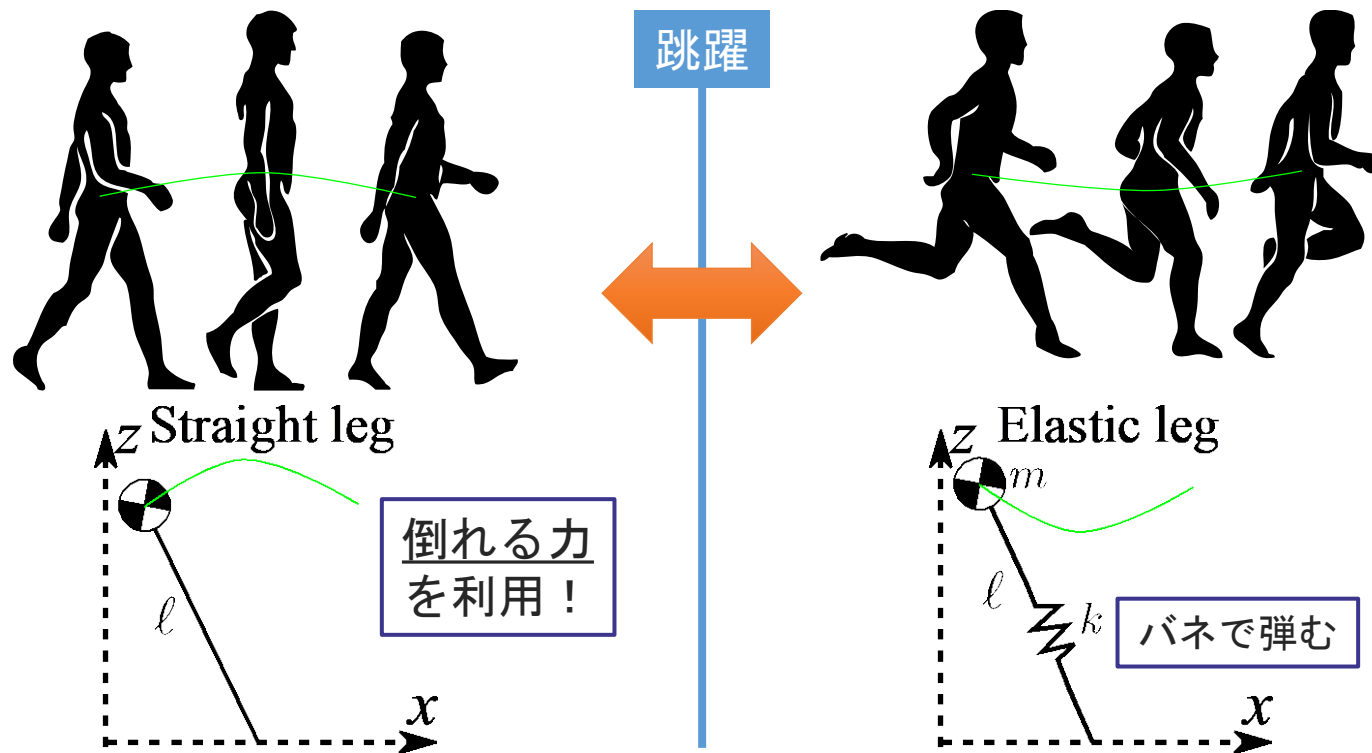
実際に、人の歩行・走行時の運動の様子を記録して解析すると...



<https://en.wikipedia.org/wiki/Bipedalism>

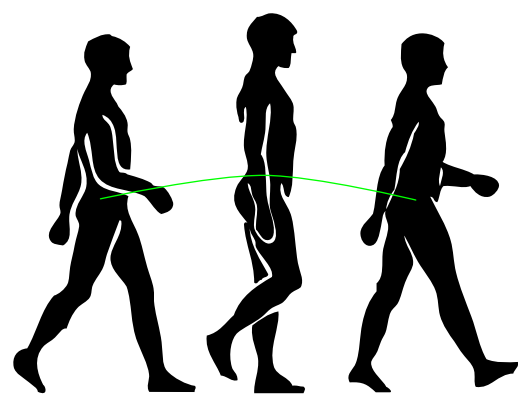
倒立振子モデル

人（ロボット）の全身運動を単質点の運動で簡潔に表現・一般化
->倒れ始めの位置・速度がわかると、その後の動作が予測できる！



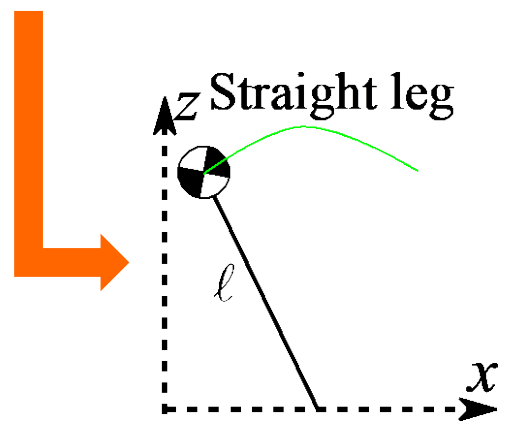
ちなみに、数式で表すと...

一応、高校物理の範囲で全身運動も表せるが、時間発展を解析的に得られない...
-> モデル化すると、 $x(t) = C_1 e^{\omega t} - C_2 e^{-\omega t}$ と求まる (微分方程式で大学レベル?)



全身運動を表す数式：難しすぎ...

$$\begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{q}_0 \\ \ddot{\theta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} G_1 \\ G_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \tau \end{bmatrix} + \sum_{k=1}^N \begin{bmatrix} K_{k11} & K_{k12} \\ K_{k21} & K_{k22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_k \\ n_k \end{bmatrix}$$



モデルの数式：だいぶ簡単？

$$m \begin{bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \\ \ddot{z} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ mg \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \frac{f}{l} \text{ const.}$$

倒れ切る前にもう一方の脚を上手く着いて？ ≡ 制御

順問題： 倒れ始めの位置・速度に合わせたタイミングでもう一方の脚を着地させる！

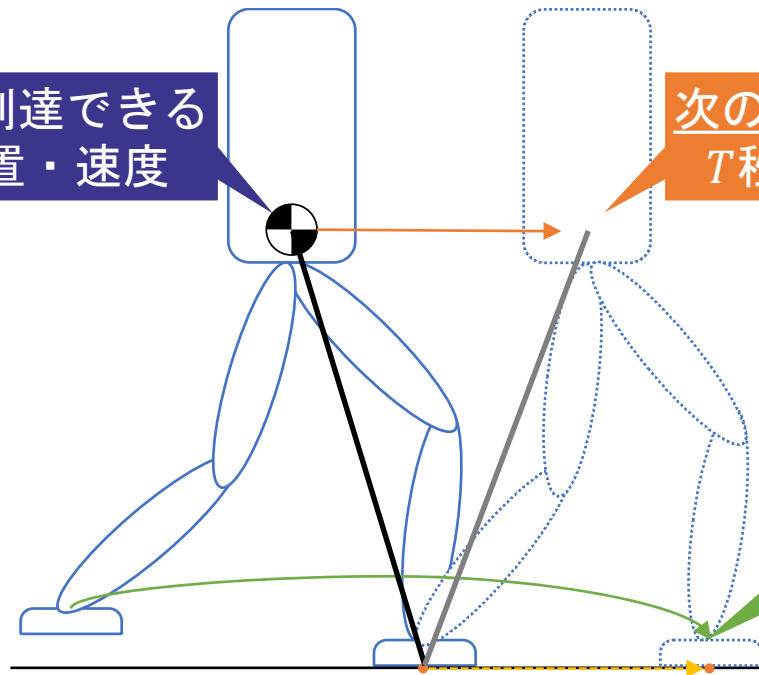
OR

逆問題： 指定タイミングで着地できるように，望ましい位置・速度で倒れ始める！

T 秒後に目標に到達できる
倒れ始めの位置・速度

次の一歩を繰り返せる
 T 秒後の位置・速度

着地したい歩を
位置・時刻着地位置



倒立振り子モデルを用いたロボットの歩行例

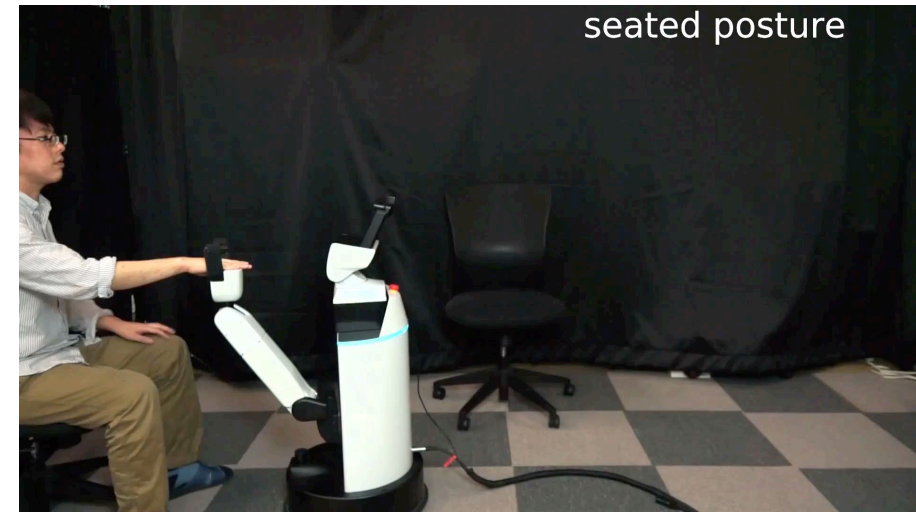
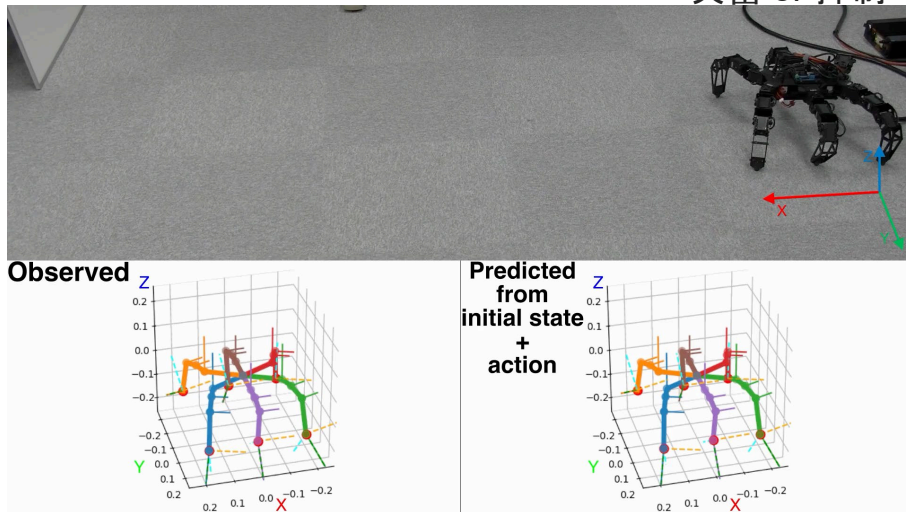
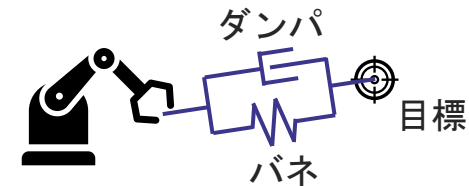
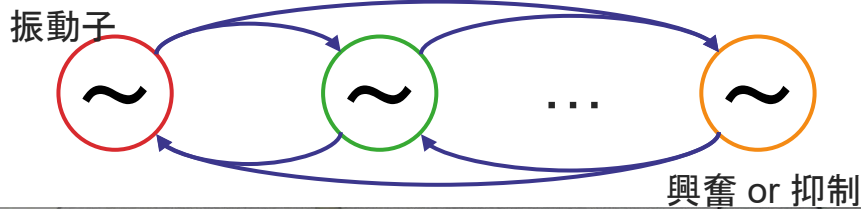
ヒューマノイドロボットの開発初期から未だに主流の歩き方！
(HondaのASIMOなどもこのアプローチ)



狙ったステップを実現できるように歩行軌道（倒れ始めの位置・速度）を計画
+人からの接触力で変化した将来の到達地点を予測して着地を修正！

他のモデル・応用例

ロボットを目的に合わせてモデルに当てはめれば、
細かいロボットの差異を気にせずに動かせる！



Central Pattern Generatorモデル
各脚・各関節を周期的に動かせば良い、
を振動子の相互作用で表現！

インピーダンスモデル
手先を柔らかく・目標に向かって動かせるように、
仮想的なバネ・ダンパでの接続を想定！

◆ ロボットを動かすには...

- 人がロボットの運動を簡潔に表す「モデル」を試行錯誤的に発見！
※ 倒立振子・CPGモデルのように、同じ運動でも複数のモデルが存在
- モデルに合わせた制御器を設計！

◆ 何が問題？

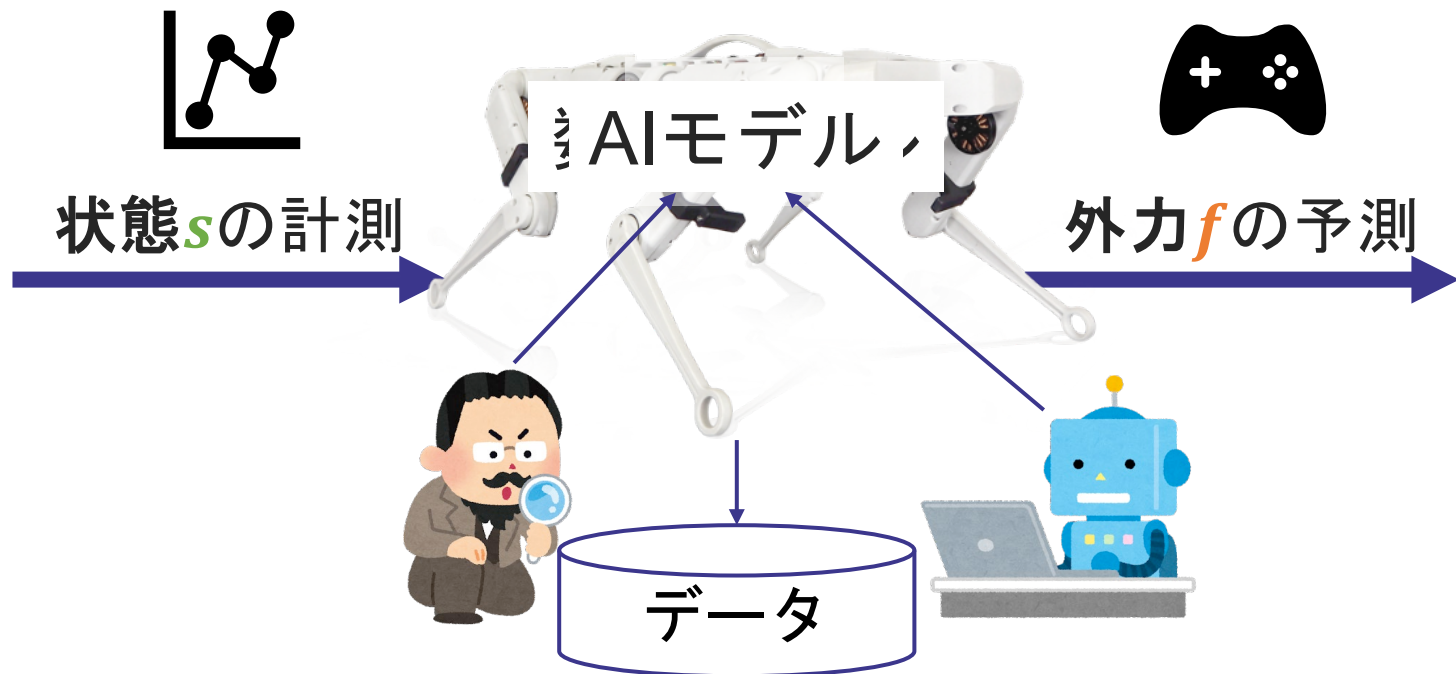
- モデルを簡潔にしすぎると、想定外の誤差が蓄積・悪影響に...
- 制御器を設計可能なモデルに限定してしまいがち...

これから：
AIによる経験からの学習

正直、モデルを編み出すのは難しい...

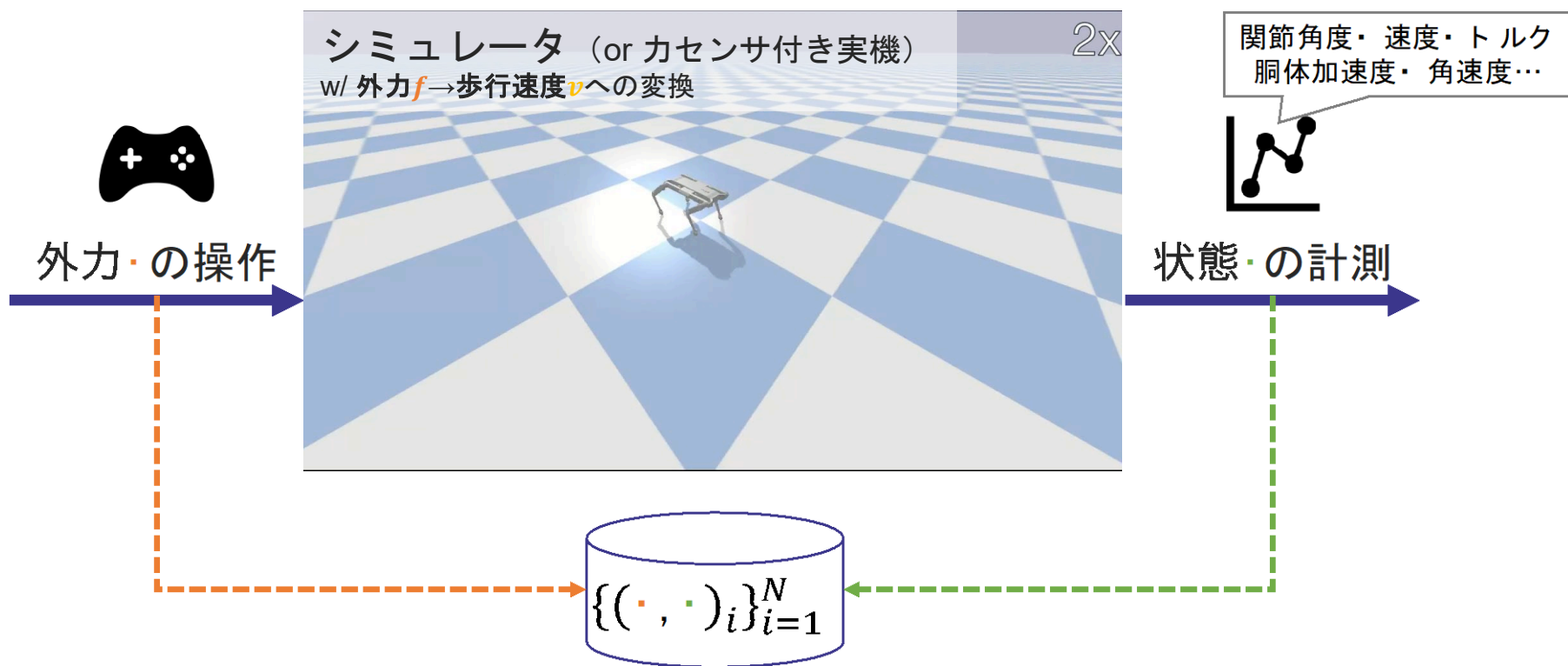
「どう動かしたら何が起こるのか」データはロボットを動かせば得られるので...
-> 賢い人が考える代わりに、AIでモデルを学習してしまおう！

例：外力の予測モデル



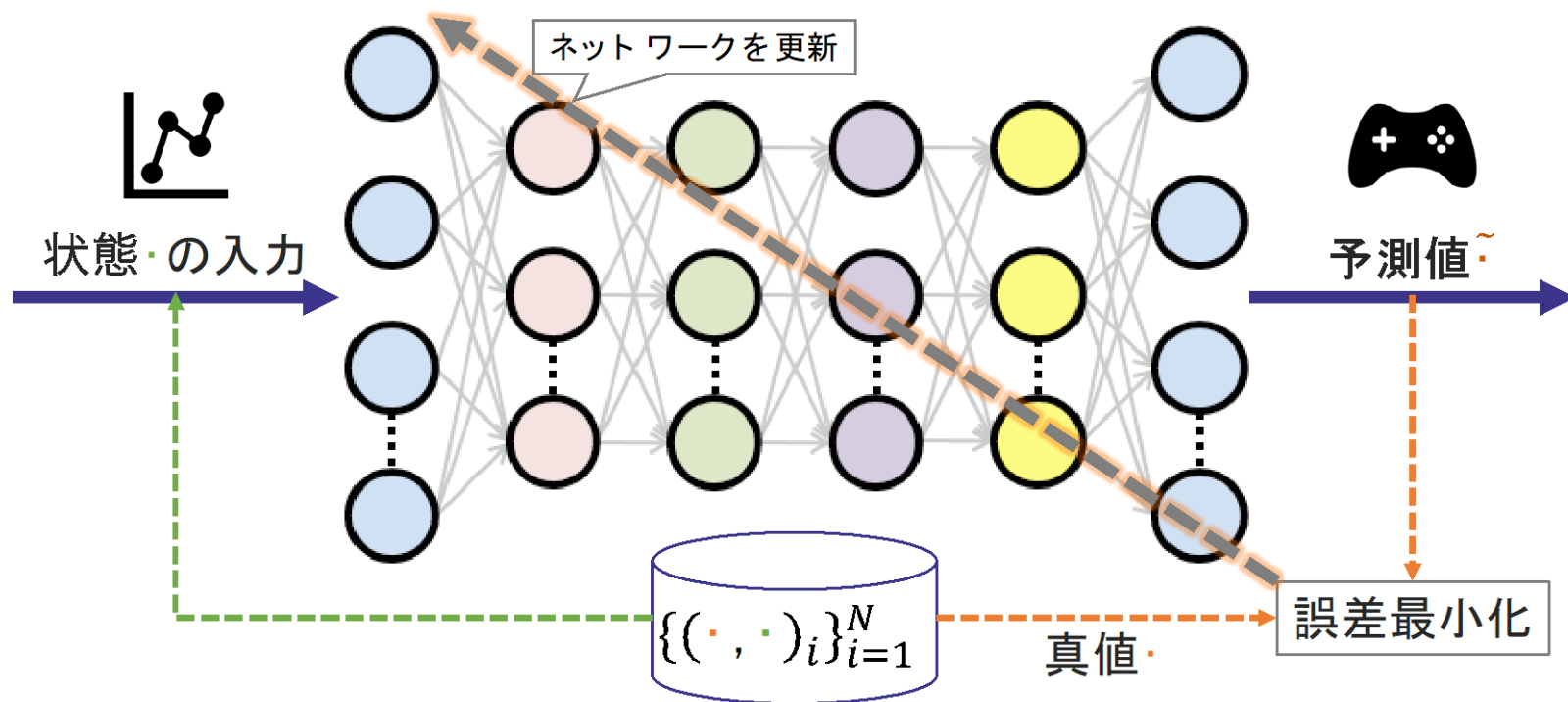
AIモデル獲得の2ステップ：1. データの収集

予測したい出力と対応する入力のペアを大量に収集！
(予測したい出力は本来わからないので、どうにかしてわかるようにする)

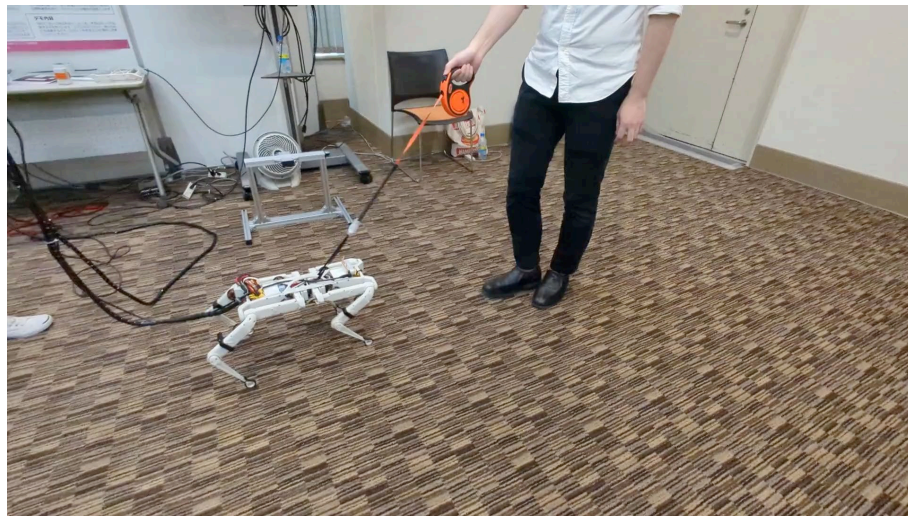


AIモデル獲得の2ステップ：2. データからの学習

入力に応じた予測値が実際に対応する値と一致するようにAIを更新！
(完全一致は無理なので、あくまで誤差を最小化する)

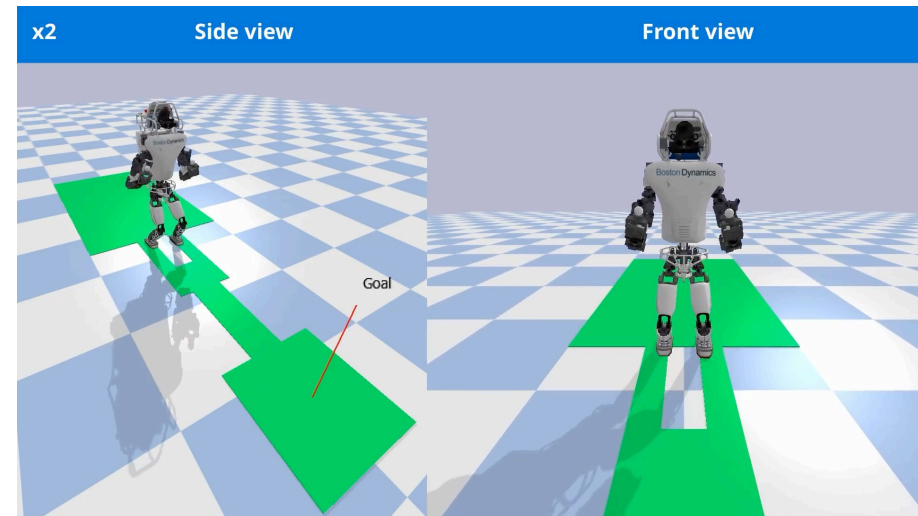


データさえ集められれば、複雑な関係性もAIモデルで予測可能に！
-> 予測結果に基づいて望ましい動作も選べる！



外力の予測モデル

-> 予測した外力に応じた歩行速度を指定

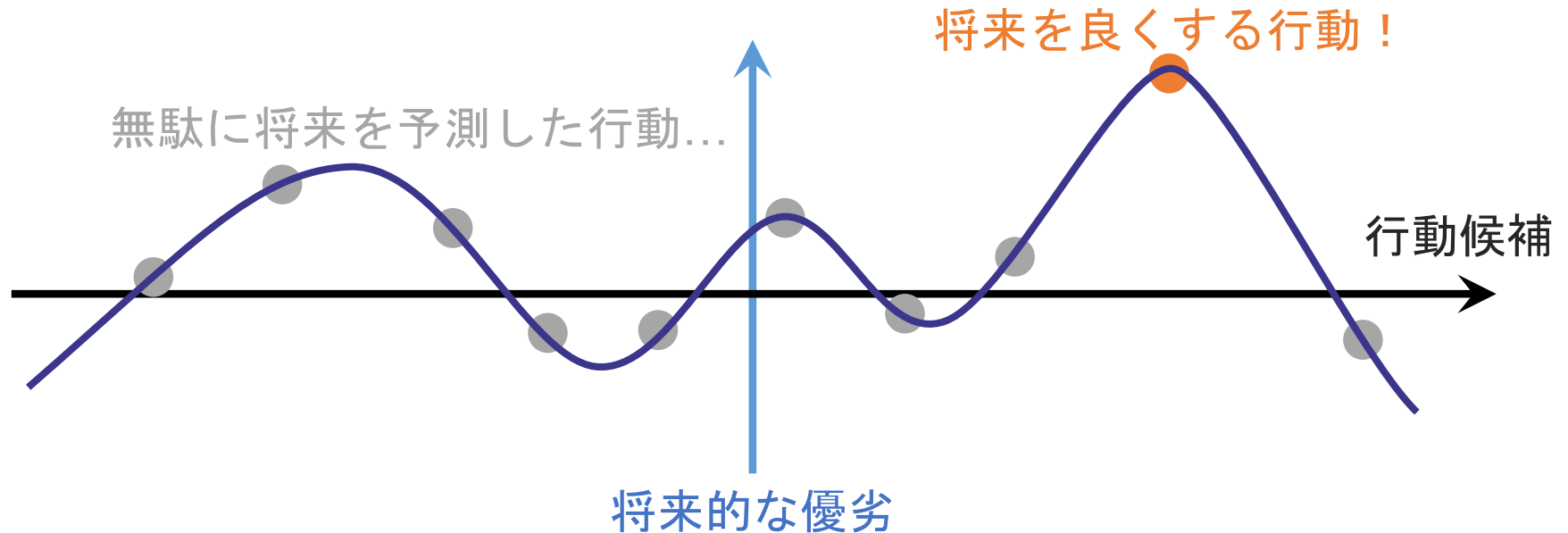


倒れ始めの位置・速度や転倒の予測モデル

-> 最も予測結果が良くなる行動を選択

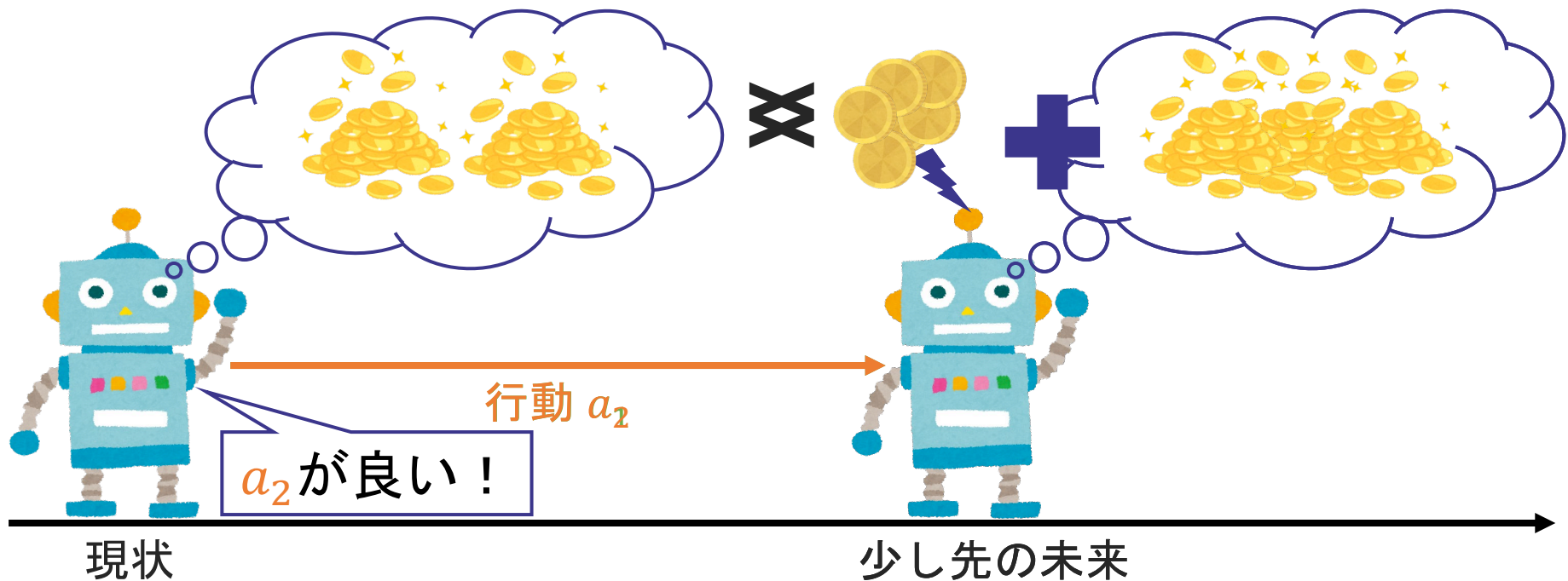
生物のような直感が欲しい

将来どうなるのかを詳細に予測して、一番良い結果となる行動を選ぶのは面倒...
-> 現状から将来を良くする行動の法則性をAIで学習できる？



将来に渡っての優劣を予測＝強化学習

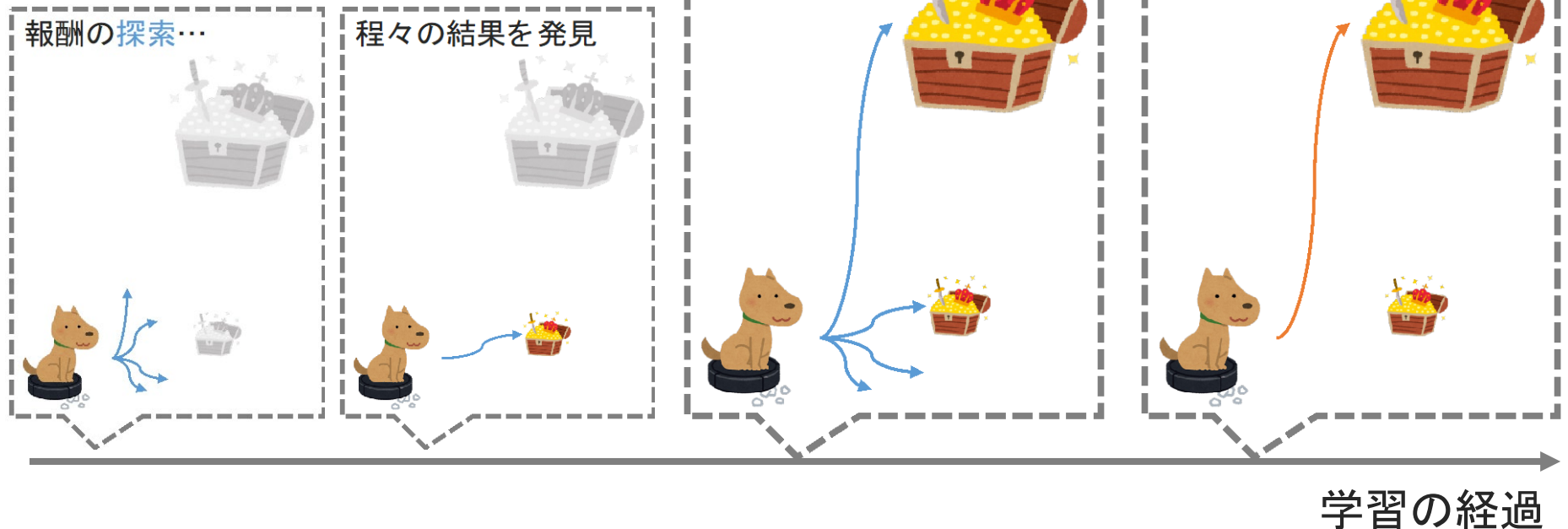
現状での行動がもたらす将来的な優劣さえ予測できれば、ベストな行動は選べる！
-> 時間が経過すると、予測の一部が現実になることを利用



様々な経験を積みたい vs 良い結果を得たい

探索と知識利用のジレンマは強化学習の永遠の課題？！
(探索の仕方も受動的・能動的と色々ある)

探索と知識利用のバランスが良いと…



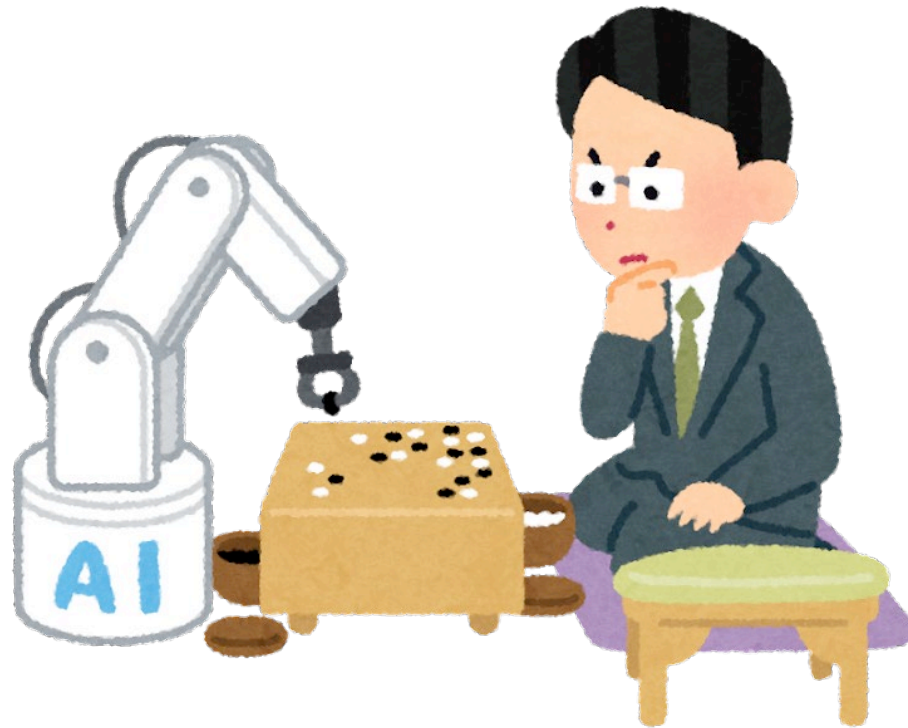
生物も強化学習している？

人に限らない生物の意思決定を説明する原理としても注目
-> 強化学習と脳活動を対応付けることで、病気の解明・治療へ応用！

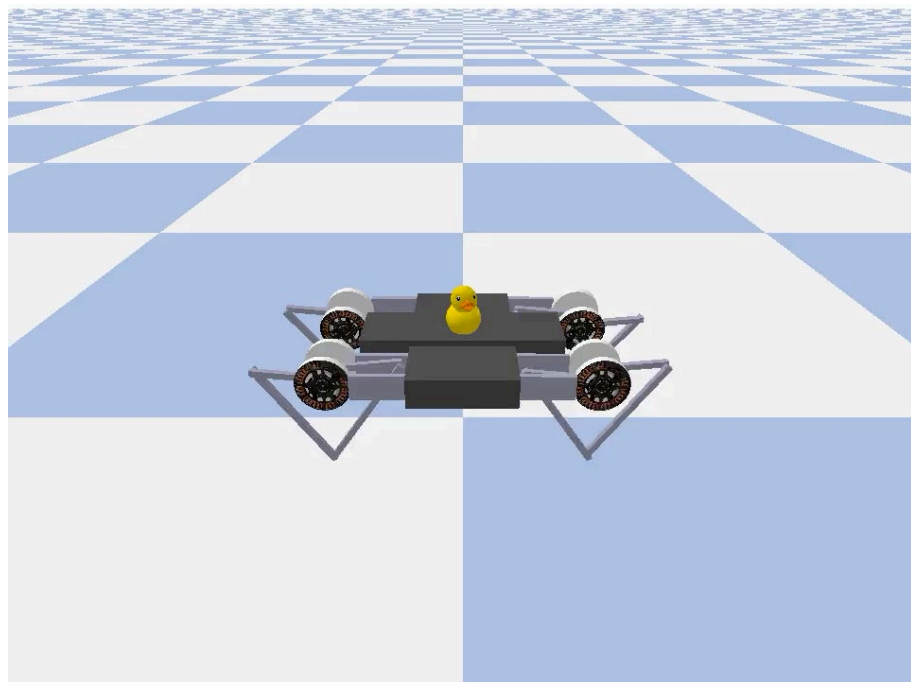


有名になったきっかけ？

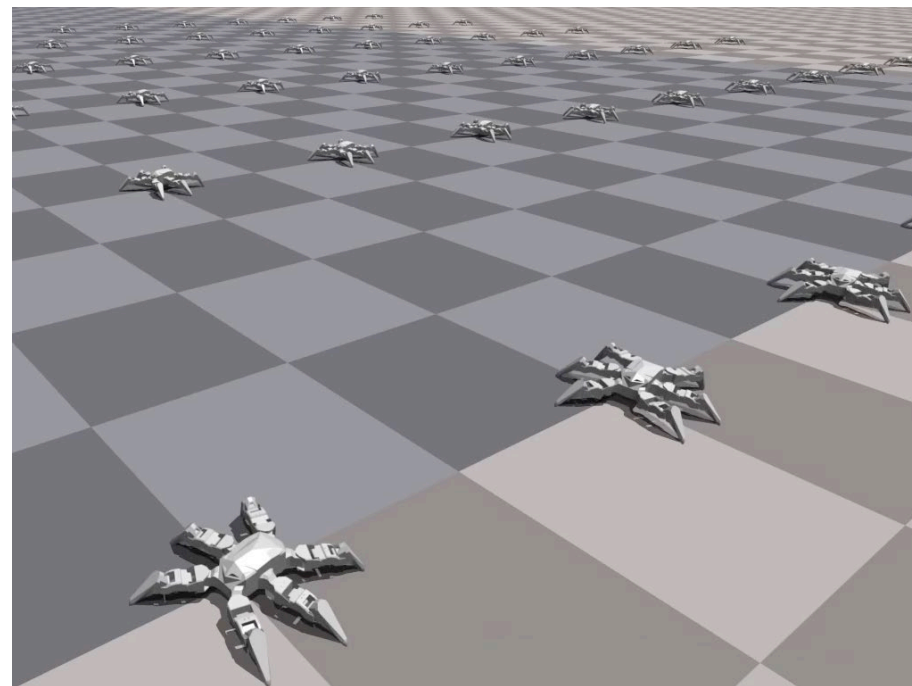
2015年に某社の囲碁AI（強化学習＋予測モデル）が世界のトッププロに勝利！
-> 状況が天文学的にある囲碁でAIが勝つのは当分先の話だと思われていたのに...



強化学習の次なる目標になったのが、ロボットの制御！
-> 連続値の扱い方やデータ収集の困難さが課題ながらも、着実に解決中...



連続値を出力する関数の平滑化
-> ノイズに強くなり動作が安定！



並列シミュレーションの活用
-> 膨大なデータを効率的に収集！

◆ 人が難しく考えずにロボットを動かすには...

- ロボット自身が試行錯誤して様々なデータを収集！
※ AIモデルなら入出力のペア，強化学習なら状態・行動・報酬のセット， ...
- データの関係性をAIで学習して，より良い予測をもたらす行動を選択！

◆ 何が問題？

- 学習したAIモデルをロボットで試すまで上手くいくかわからない...
- データの優劣の付け方が曖昧なケースが良くある...

◆ これまで

- 人がロボットの運動を実験的・数理的に解析して，扱いやすいモデルを設計
+モデルに合わせた制御器を設計

◆ これから

- ロボット自身が試行錯誤して将来に渡ってのデータを収集
+データの優劣に沿って制御器を学習

◆ さらなる未来は...

- 数値化が難しいデータの優劣を経験的に判断
- ロボット自身が「（人の為に）何をすべきか？」まで経験的に判断??

ご清聴ありがとうございました！

Appendix
