第十九屆旺宏科學獎

創意說明書

參賽編號：SA19-224

作品名稱：機器人自動適應強化學習演算法

姓名：陳楚融

關鍵字：強化學習、自回饋、機器人

目錄

[目錄 2](#_Toc41860840)

[壹、 研究動機 3](#_Toc41860841)

[貳、 研究目的 4](#_Toc41860842)

[參、 文獻探討 4](#_Toc41860843)

[肆、 研究方法 5](#_Toc41860844)

[1. 理論背景 5](#_Toc41860845)

[2. 架構構想 6](#_Toc41860846)

[3. DDPG簡述 7](#_Toc41860847)

[4. 算法設計 8](#_Toc41860848)

[5. 實驗環境 10](#_Toc41860849)

[伍、 研究過程 13](#_Toc41860850)

[1. 正常機體訓練 13](#_Toc41860851)

[陸、 研究規劃 16](#_Toc41860852)

[柒、 參考資料 17](#_Toc41860853)

[1. 英文文獻 17](#_Toc41860854)

[2. 網路資源 17](#_Toc41860855)

[捌、 附錄 18](#_Toc41860856)

[1. Python程式碼 18](#_Toc41860857)

1. 研究動機

組裝、操控機器人一直是我平日的一大樂趣，二足機器人格鬥賽更是令我熱血沸騰。然而對於各種不同的機體，傳統上皆需人為編寫動作，儘管只是稍微修改結構也可能花上數小時甚至數天來修改動作，因此便有透過強化學習來讓機器人自行學會做出各種動作。



圖1：DeepMind訓練AI學會跑步(2017)

然而當機器人的零件故障或結構稍有改變時，訓練好的模型極有可能需要重新花費時間訓練。若與人類受傷時做比較，除了人類具有強大的推理能力外，若先前曾有類似的受傷經驗，便能更快速的適應。因此想到了若在訓練過程中讓機器人擁有損傷經驗，或許就能用來在未來的相似情況中達到幫助。

若能擁有適應損傷的能力，機器人便能在風險較大的環境中執行任務，例如遠距操作時，由於無法及時維修，機器便需要在有缺陷的情況下完成任務。

1. 研究目的

以往的算法中模型是固定，即模型針對一個機體訓練好後不容易處理不同情況，因此機體受損時很難即時適應，儘管有研究透過搜尋法，預先建立動作－價值對應關係，當機體複雜性增加時，仍會出現效率低落的現象。

因此本次研究希望運用人類在適應損傷時能活用經驗的能力來建立一套算法，使其能在機體損傷的狀況下利用過去經驗修正，避免重新訓練並以較短的時間適應。

1. 文獻探討

[Cully](https://arxiv.org/search/cs?searchtype=author&query=Cully%2C+A), [Clune](https://arxiv.org/search/cs?searchtype=author&query=Clune%2C+J), [Tarapore](https://arxiv.org/search/cs?searchtype=author&query=Tarapore%2C+D), & [Mouret](https://arxiv.org/search/cs?searchtype=author&query=Mouret%2C+J) (2015) 提出利用Performance Map建立特徵與模型表現對映表的算法 (以下稱之為Map算法)。當機體受損時，利用Bayesian Optimization在動作空間中搜索出新策略。例如使用六足蛛型機器人時，使用腿部與地面接觸時間建立Performance Map、多節機器手臂則使用關節角度等。

此方法需要對不同機型設計不同建立Performance Map的特徵，無法普遍適用在不同機型上。且關節要以何種方式做出特徵代表的狀態需要事先設計。

本研究提出使用強化學習(Reinforcement Learning，簡稱 RL) ，預先生成損傷經驗，待運作時受到損傷後，提取損傷經驗，並結合實際情況訓練的算法 (以下稱之為經驗適應算法)。經驗適應算法與Map算法比較有以下優勢：

表1：經驗適應算法與Map算法之比較

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | 經驗適應算法 | Map算法 |
| 適用性 | 可直接套用於任何機型 | 需為不同機型選擇特徵 |
| 人工設計動作 | 所有關節動作皆以RL直接控制，無須人工介入 | 若特徵的形成由多個關節參與，則需人工編寫動作 |

設計經驗適應算法主要有兩個問題需要解決：

* 1. 如何生成經驗並依據損傷經驗的價值保存樣本。
  2. 適應時如何結合現實狀況與經驗有效訓練模型。

1. 研究方法
   1. 理論背景

強化學習(Reinforcement Learning，簡稱 RL)是機器學習中的一個領域，與一般機器學習不同的是，其著重在如何與環境的互動以取得最大利益。由於RL具有普適性，因此在各種領域如博弈論、控制論、群體智能等皆有研究。在控制系統中，強化學習成功在複雜、多變的情境如機器人控制中取得突出的成果。

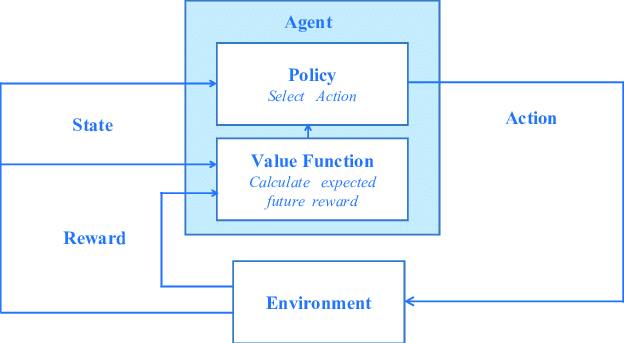


圖2：簡易強化學習算法架構

一個簡易強化學習模型包含：代理(Agent)、環境(Environment)。在每輪的學習中，Agent會執行一個動作(Action)，然後從Environment得到獎賞(Reward)與狀態(State)，接著透過價值函數(Value Function)估計未來回報，最後經策略(Policy)執行下一個Action。

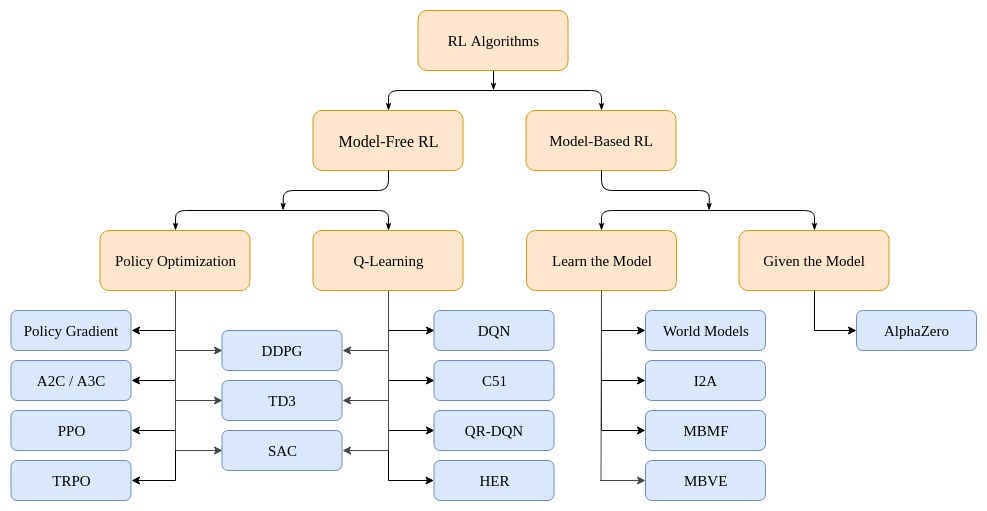


圖3：強化學習算法生態圖

RL算法主要可分為兩類：無關模型(Model-Free)、基於模型(Model-Based)

表2：Model-free/Model-based 比較表

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | Model-free | Model-based |
| 說明 | 算法本身不了解環境狀態可能如何轉移，透過長期與環境互動的收益，仍可以評估與預測不同動作的回報 | 在學習的過程可觀察與學習環境在不同動作下的變化機制，預測環境狀態如何轉移 |
| 優點 | 由於能在未知環境中學習，因此具有更好的普適性 | 充分了解環境，可利用動態規劃算法求出較好的動作 |
| 缺點 | 學習僅能透過探索評估動作好壞，通常需較多時間收斂 | 大多數情況下無法提供算法對於  環境的精確描述導致算法普適性較低 |

實際上面對複雜多變的環境難以用規劃法求解，因此多數RL算法Model-free的。而Model-free算法又可依據優化的對象的再區分為兩類：基於值(Value-based)、基於策略(Policy-based)

表3：Value-based/Policy-based 比較表

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | Value-based | Policy-based |
| 說明 | 學習如何正確評估動作的好壞，也就是優化Value Function | 學習如何做出最好的動作，也就是優化Policy |
| 舉例 | DQN、SARSA、QR-DQN | Policy Gradient、PPO、TRPO |

* 1. 架構構想
     1. 算法基礎

本研究採用DDPG(Deep Deterministic Policy Gradient)算法作為基礎，原因在於DDPG混和Value-based與Policy-based，能處理評價與選擇動作的複雜性；且DDPG能處理連續動作空間，適合馬達的運作。

* + 1. 經驗生成

在RL中，為了增加訓練效率與模型泛化性，使用經驗回放(Experience Replay)機制，將模型經歷過的經驗儲存起來作為訓練樣本。因此本研究利用此機制，在訓練階段預先在受損狀態下進行定量訓練，獲取相關樣本，以利在實際受損時幫助訓練。

* + 1. 適應訓練

通常實際運作時的環境不會與訓練完全相同，受損情況也會有差異，因此篩選出損傷經驗後，機器仍需同時進行探索，補充實際狀況的樣本。

* 1. DDPG簡述
     1. Actor-Critic

DDPG採用Actor-Critic來達到同時學習Policy與Value Function：

* + - 1. Critic

神經網路，作為Value Function使用，輸入為Action與State，輸出為，為網路參數。Critic用來評估未來回報：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (1) |

其中為折扣值，表示對於越遙遠的未來，重要性越低。

訓練時，根據的定義來設定更新目標並計算損失：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (2) |

* + - 1. Actor

神經網路，作為Policy使用，輸入為狀態，輸出為，為網路參數。

透過策略梯度更新Actor，令為評價策略的函數：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (3) |

策略梯度即為：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (4) |

兩個網路的交互關係為：時刻時，Actor根據作出決策，接收Reward後，用更新Critic，然後以Critic給出的更新Actor。

由於更新網路時，若使用網路本身來計算目標，會導致以自己為目標更新。因此Actor與Critic會另外使用Target Actor與Target Critic作為更新對象，網路參數分別為。

Target初始與原網路相同，訓練採Soft-Update：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (5) |

* + - 1. Experience Replay

令經驗庫為，其中儲存樣本，容量限制為。每個時間步從取出一個batch的樣本更新Actor與Critic。

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (6) |

對於Actor，沿策略梯度方向更新：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (7) |

然後將當前樣本存入，並使用時間差分誤差(TD-error)評估樣本值得不值得學習與保留：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (8) |

越大表示模型對該狀態未能準確評估，越值得學習。

* 1. 算法設計

基於DDPG算法與具有優先級別的經驗回放，本研究設計出一套算法並試驗是否能達到利用經驗加速適應損傷之目的：

* + 1. 訓練階段

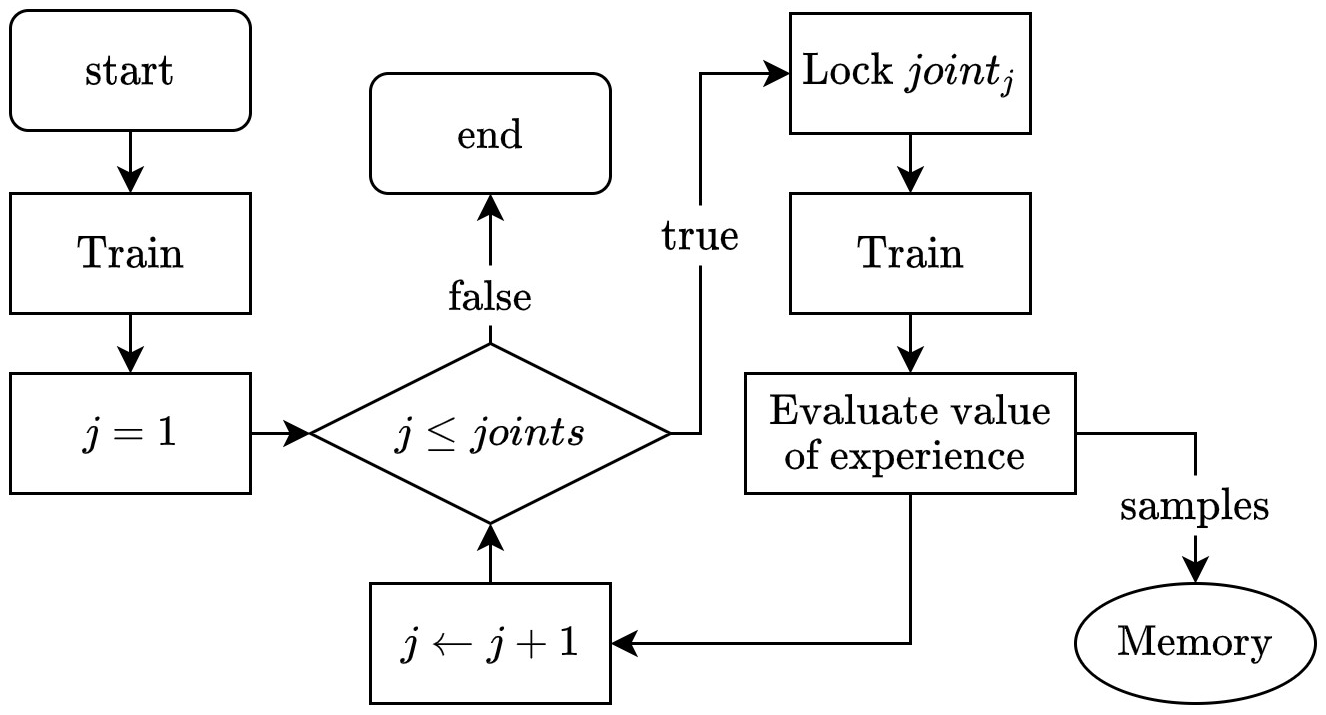


圖4：訓練階段流程

* + - 1. 訓練(Train)

在機體完整的狀態下訓練模型。

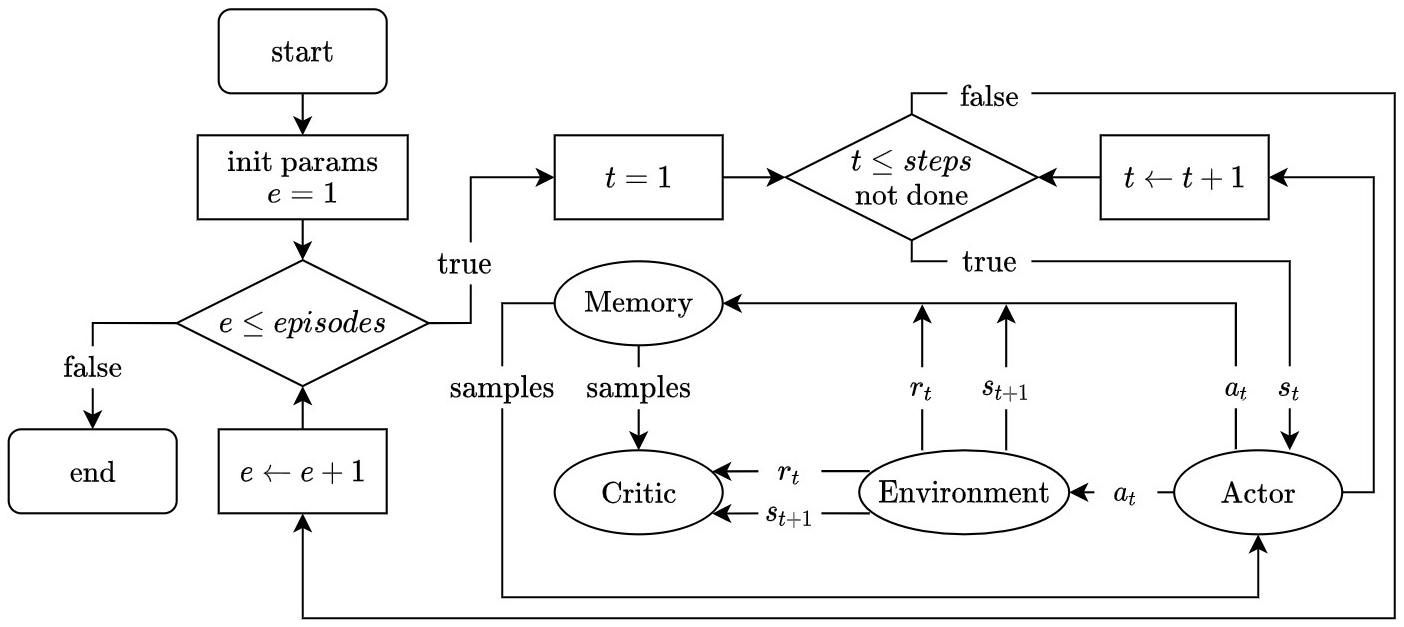


圖5：Train模塊流程

* + - 1. 施加損傷(Lock joint)

分別鎖定關節，並以正常模型參數為初始狀態訓練。

* + - 1. 評估適應難度(Evaluate value of experience)

評估損傷的適應難度，低則保留少量樣本；高則保留較多樣本。若訓練後平均回報高、回報波動幅度低則適應難度低；若平均回報低、回報波動幅度高則適應難度低。

波動幅度計算時，先透過計算回報的時間差分序列消除原序列趨勢，再計算整體標準差，令總數為，每個總回報：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (9) |

令平均回報為，回報可為負值，故減去最小值後再計算其指標，令總數為：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (10) |

適應難度

* + - 1. 分配樣本

依據適應難度分配樣本，令為鎖定的損傷樣本數：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (11) |

* + 1. 運作階段

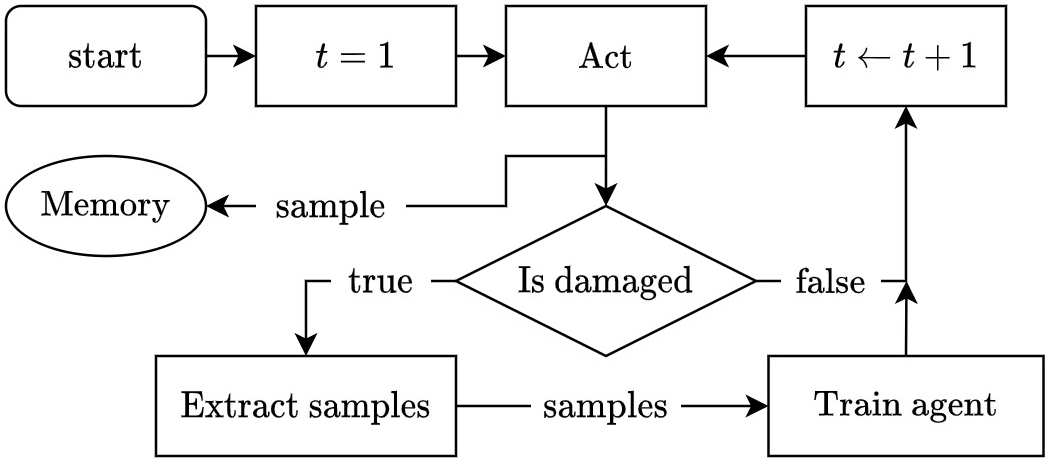


圖6：運作流程

* + - 1. 執行(Act)

執行任務並儲存運作時的樣本。

* + - 1. 提取樣本(Extract samples)

若機體受損，從經驗庫提取損傷用於訓練Agent適應。

* 1. 實驗環境

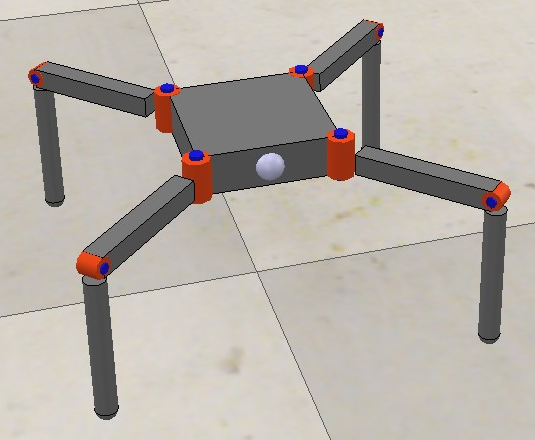
利用CoppeliaSim的遠端API給Python語言進行操作，再用TensorFlow建立模型與訓練。

表4：實驗環境

|  |  |
| --- | --- |
| 作業系統 | Windows 10 Home |
| 雲端運算環境 | TWCC 臺灣 AI 雲 |
| 程式語言 | Python 3.6.8 |
| 模型框架 | TensorFlow 2.0 |
| 機器人模擬器 | CoppeliaSim V4.0.0 |

* + 1. 機體設計

考慮本次研究希望觀察正常狀態至損傷狀態的適應情形，因此挑選容易訓練、損傷影響大的四足機器人。共有8個關節：



7

5

6

4

2

3

1

軀幹

0

圖7：模擬用四足機器人

表5：機體狀態、動作資訊

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | 維度 | 資料 |
| State | 25 | 軀幹：座標、速度、傾角  馬達：角度、角速度 |
| Action | 8 | 馬達：輸出力矩 |

* + 1. 場景設計

讓機器人沿著正方向移動至目標處，如圖：



1公尺

圖8：CoppeliaSim模擬訓練場景

* + 1. Reward Function

實驗中的Reward Function期望使機器人達成以下目標：

* + - 1. 行走平穩

向前移動，故應保持正值；盡量沿著直線移動，故應接近零；減少方向上的晃動，故應接近零。得出機體姿態對Reward的貢獻值：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (12) |

其中為正權重。

* + - 1. 動作精簡

希望使機器人能以較有效率的輸出達成目標，因此對馬達總輸出加入懲罰項：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (13) |

其中為正權重

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (14) |

* + 1. Agent神經網路結構

Actor輸入State，經兩層隱藏輸出：

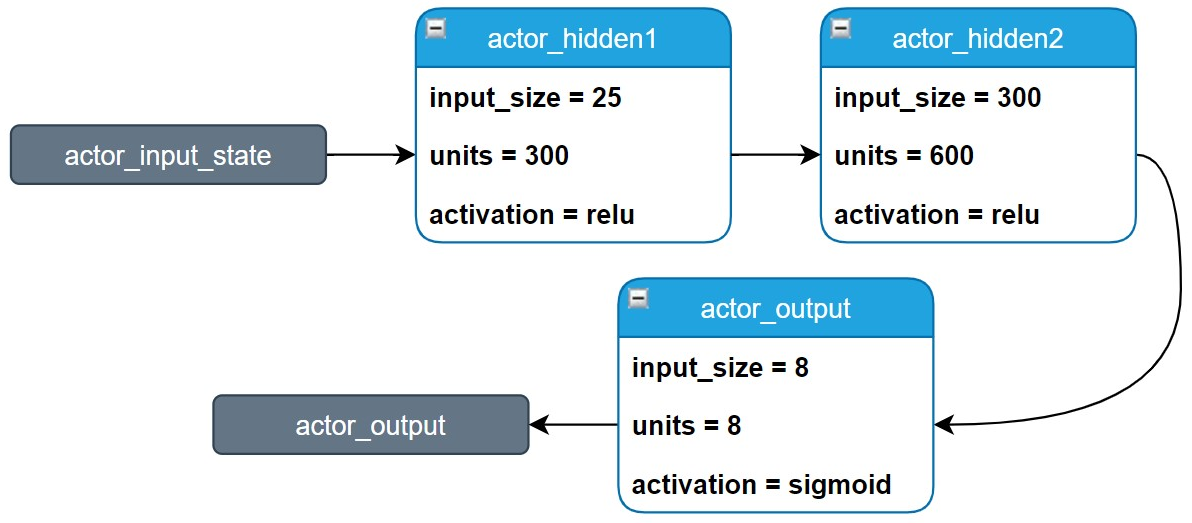


圖9：Actor神經網路結構

Critic輸入State與Action，分別經一層隱藏層後加總，再經一層隱藏輸出：

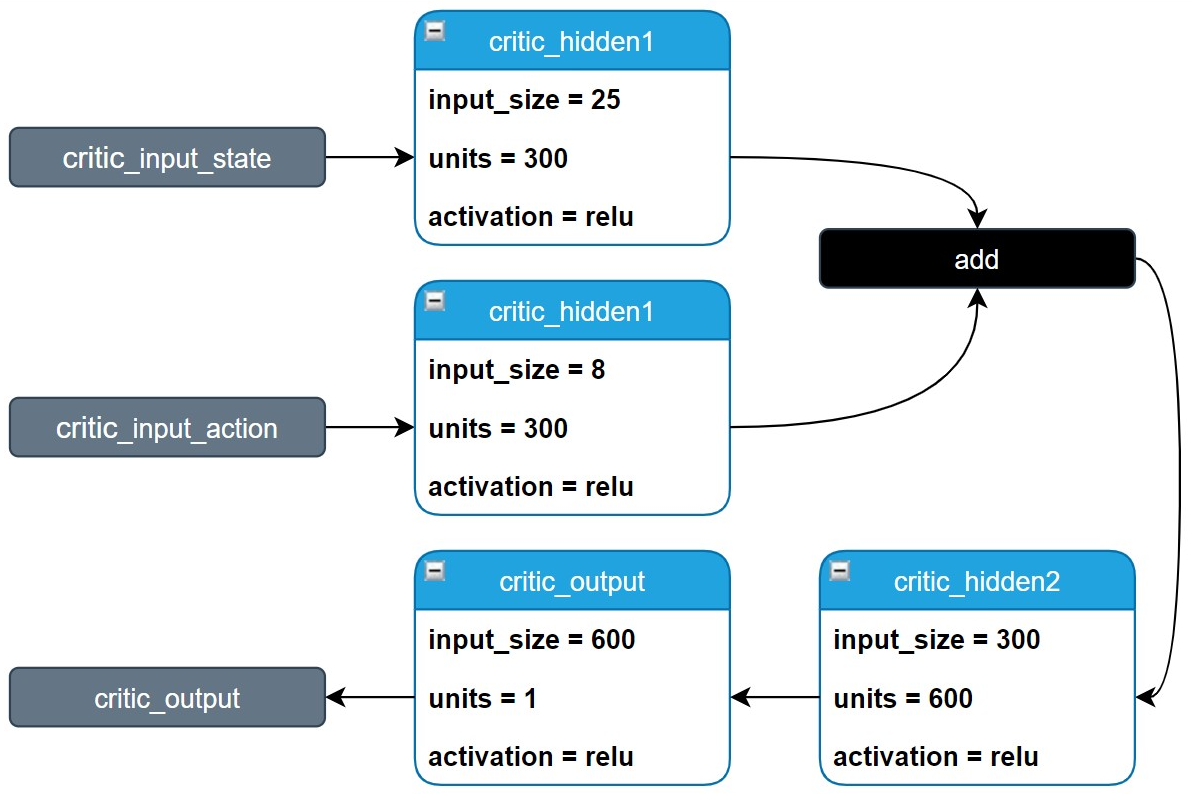


圖10：Critic神經網路結構

1. 研究過程
   1. 正常機體訓練

影響RL模型表現的最大要素在於Reward Function的設計，以下為對Reward Function進行調整的過程：

* + 1. Reward Function測試

表6：基礎參數設置

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 模型參數 | Network Size | |  |  | Memory Size |
| Actor | Critic | 0.99 | 0.001 | 1000000 |
| (300, 600) | (300, 600) |
| 訓練參數 | Learning Rate | | Batch Size | Episodes | Steps/Episodes |
| Actor | Critic | 128 | 200 | 200 |
| 0.001 | 0.01 |

* + - 1. 測試1.1.1

表7：測試1.1.1參數設置

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|  |  |  |  |
| 20 | 15 | 5 | 0.05 |

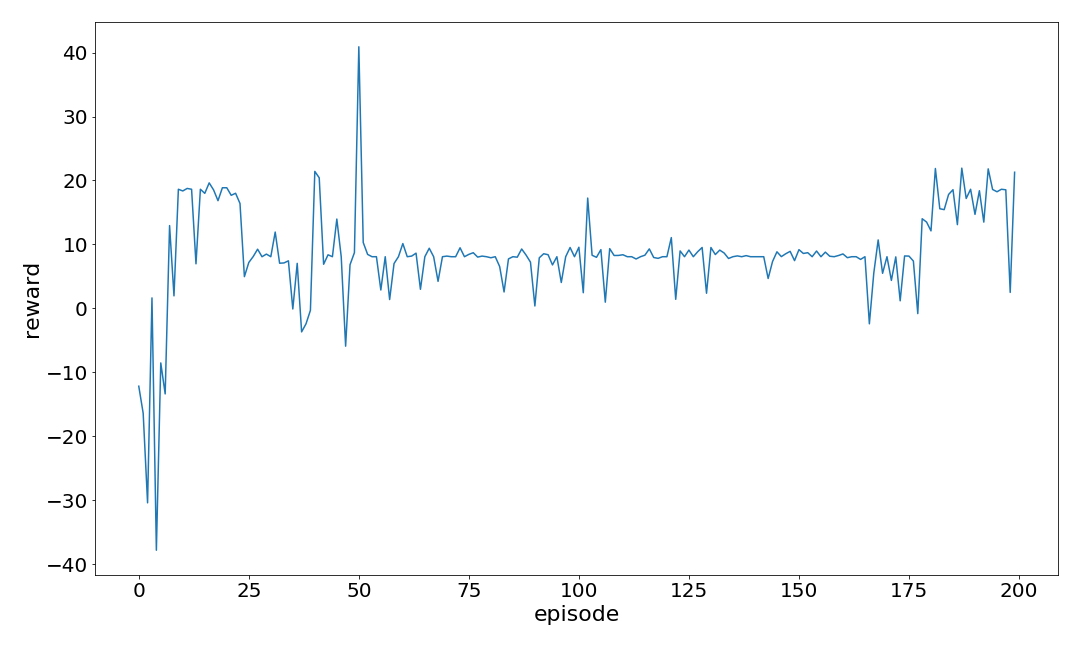


圖11：測試1.1.1結果

由此次結果注意到模型發現保持不動能維持Reward在微小正值，因此放棄行動，儘管在Action上加入了雜訊來增加探索，效果仍然有限。

* + - 1. 測試1.1.2

根據測試1.1.1，發現應該將Reward修改為：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (15) |

透過設置最低速度，確保模型能學習加速。

Reward Function參數設置延續測試1.1.1。

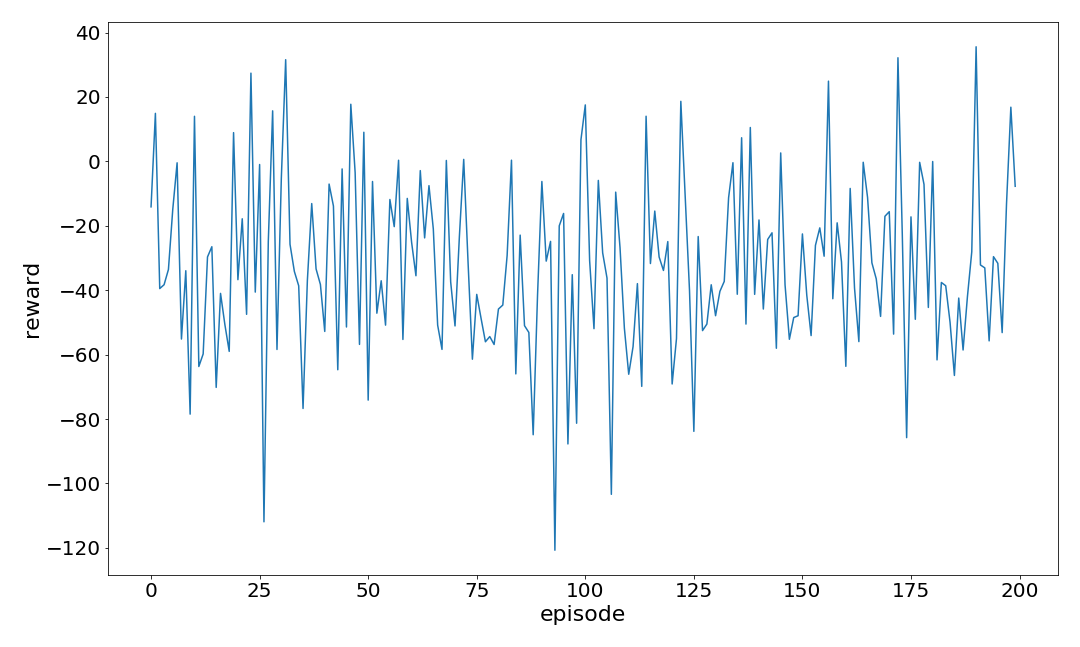


圖12：測試1.1.2結果

不再陷入到靜止不動的狀態。

* + 1. Learning Rate調整
       1. 測試1.2.1

模型中兩個神經網路有不同的學習率，觀察測試1.1.2結果，發現可能是Learning Rate需要調整，因此延續測試1.1.2，紀錄Actor與Critic每個Episode中的神經元平均梯度大小：

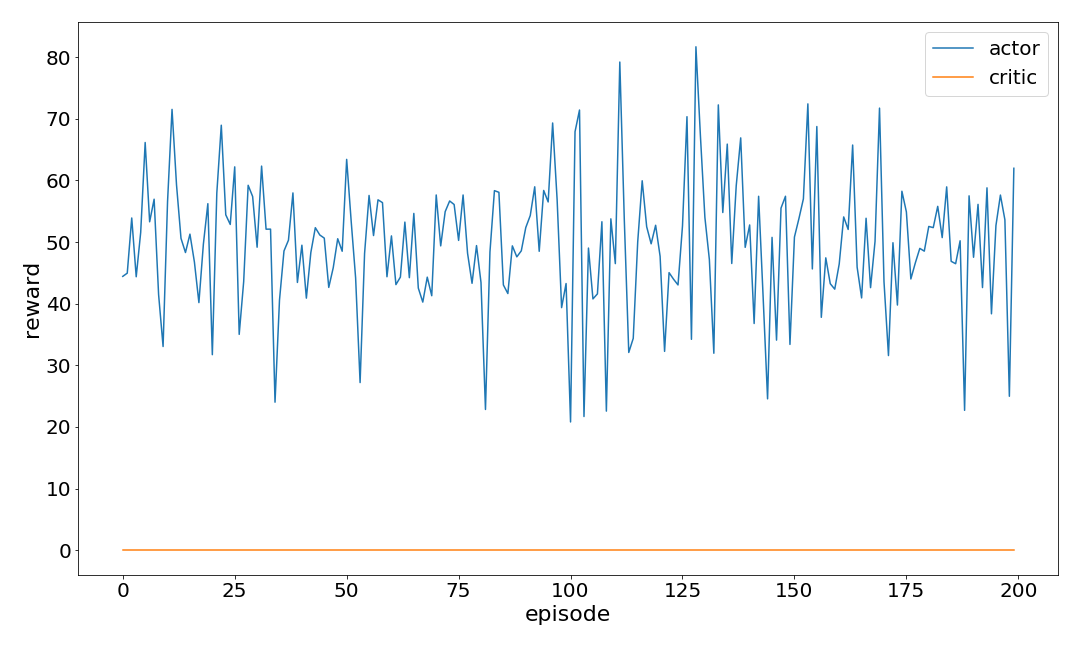


圖13：測試1.2.1 神經元平均梯度量值

Actor平均梯度量值乘上學習率後數量級約為，在可接受範圍。然而Critic平均梯度量值乘上學習率後數量級約為，收斂速度極慢。因此設置新的學習率為：

表8：修正後學習率

|  |  |
| --- | --- |
| Actor | Critic |
| 0.001 | 5 |

* + - 1. 測試1.2.2

延續測試 1.2.1，利用修正過的學習率重新訓練得：

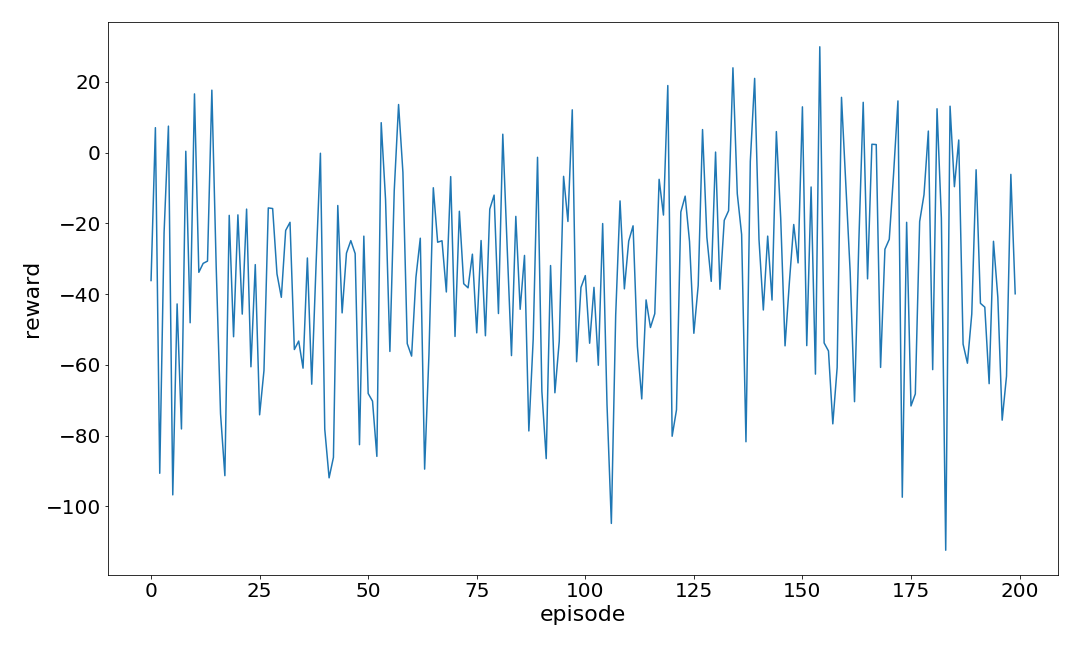


圖14：測試1.2.2

1. 研究規劃

初步研究結果如下：

表9：初步研究結果

|  |  |
| --- | --- |
| 演算法建構 | 確立生成經驗之方法 |
| 完成演算法流程設計 |
| 完成模型架構 |
| 建構評估經驗價值之方法 |
| 模型訓練 | 分析Reward Function之影響並修正 |
| 分析Learning Rate之影響並修正 |

研究階段規劃如下：

表10：研究階段規劃

|  |  |
| --- | --- |
|  | 階段研究內容 |
| 正常訓練 | 分析神經網路結構之影響並修正 |
| 經驗生成 | 分析生成經驗時各參數之影響並修正 |
| 分析經驗價值評估法之影響並修正 |
| 適應訓練 | 測試適應效果 |

1. 參考資料
   1. 英文文獻

1. [Tom Schaul](https://arxiv.org/search/cs?searchtype=author&query=Schaul%2C+T), [John Quan](https://arxiv.org/search/cs?searchtype=author&query=Quan%2C+J), [Ioannis Antonoglou](https://arxiv.org/search/cs?searchtype=author&query=Antonoglou%2C+I), & [David Silver](https://arxiv.org/search/cs?searchtype=author&query=Silver%2C+D), Prioritized Experience Replay, 2015. URL <https://arxiv.org/abs/1511.05952>

1. [Timothy P. Lillicrap](https://arxiv.org/search/cs?searchtype=author&query=Lillicrap%2C+T+P), [Jonathan J. Hunt](https://arxiv.org/search/cs?searchtype=author&query=Hunt%2C+J+J), [Alexander Pritzel](https://arxiv.org/search/cs?searchtype=author&query=Pritzel%2C+A), [Nicolas Heess](https://arxiv.org/search/cs?searchtype=author&query=Heess%2C+N), [Tom Erez](https://arxiv.org/search/cs?searchtype=author&query=Erez%2C+T), [Yuval Tassa](https://arxiv.org/search/cs?searchtype=author&query=Tassa%2C+Y), [David Silver](https://arxiv.org/search/cs?searchtype=author&query=Silver%2C+D), & [Daan Wierstra](https://arxiv.org/search/cs?searchtype=author&query=Wierstra%2C+D), Continuous control with deep reinforcement learning, 2015. URL <https://arxiv.org/abs/1509.02971>
2. Shixiang Gu, Ethan Holly, Timothy Lillicrap, & Sergey Levine1, Deep Reinforcement Learning for Robotic Manipulation with Asynchronous Off-Policy Updates, 2016. URL <https://arxiv.org/abs/1610.00633>

1. [Volodymyr Mnih](https://arxiv.org/search/cs?searchtype=author&query=Mnih%2C+V), [Koray Kavukcuoglu](https://arxiv.org/search/cs?searchtype=author&query=Kavukcuoglu%2C+K), [David Silver](https://arxiv.org/search/cs?searchtype=author&query=Silver%2C+D), [Alex Graves](https://arxiv.org/search/cs?searchtype=author&query=Graves%2C+A), [Ioannis Antonoglou](https://arxiv.org/search/cs?searchtype=author&query=Antonoglou%2C+I), [Daan Wierstra](https://arxiv.org/search/cs?searchtype=author&query=Wierstra%2C+D), & [Martin Riedmiller](https://arxiv.org/search/cs?searchtype=author&query=Riedmiller%2C+M), Playing Atari with Deep Reinforcement Learning, 2013. URL <https://arxiv.org/abs/1312.5602>

1. [Hao Yi Ong](https://arxiv.org/search/cs?searchtype=author&query=Ong%2C+H+Y), [Kevin Chavez](https://arxiv.org/search/cs?searchtype=author&query=Chavez%2C+K), & [Augustus Hong](https://arxiv.org/search/cs?searchtype=author&query=Hong%2C+A), Distributed Deep Q-Learning, 2015. URL <https://arxiv.org/abs/1508.04186>

1. [Antoine Cully](https://arxiv.org/search/cs?searchtype=author&query=Cully%2C+A), [Jeff Clune](https://arxiv.org/search/cs?searchtype=author&query=Clune%2C+J), [Danesh Tarapore](https://arxiv.org/search/cs?searchtype=author&query=Tarapore%2C+D), & [Jean-Baptiste Mouret](https://arxiv.org/search/cs?searchtype=author&query=Mouret%2C+J), Robots that can adapt like animals, 2015. URL <https://arxiv.org/abs/1407.3501>
   1. 網路資源
2. <Wikipedia. Reinforcement learning>, URL <https://en.wikipedia.org/wiki/Reinforcement_learning>
3. 附錄
   1. Python程式碼
      1. DDPG







* + 1. Actor





* + 1. Critic





* + 1. Environment







