通信和交通博弈論

Game Theory for Communication and Transportation

1

智財權保護聲明

- 本影片及教材之內容，僅供修課學生個人使用，未經授課教師同意，不得以任何形式轉載、重製、散布、公開播送、出版或發行本影片之內容。如有侵權行為，需自負法律上之責任。

2

轉發器困境

Forwarder’s Dilemma

3

轉發器困境

- 在物流和供應鏈管理(logistics and supply chain中)，當貨運轉發在製定平衡成本、服務品質和客戶滿意度的決策時面臨相互衝突的優先事項或挑戰時，就會出現貨運轉發的困境。

4

轉發器困境

- 當負責中繼資料的中間節點選擇丟棄資料包以節省自己的資源（例如電池壽命或頻寬）時，隨意網路中就會出現「轉發器困境」。
- 這種自私行為會降低整體網路效能和可靠性。為了解決這個問題，研究人員應用博弈論來設計鼓勵節點之間合作的激勵機制。

5

轉發者困境

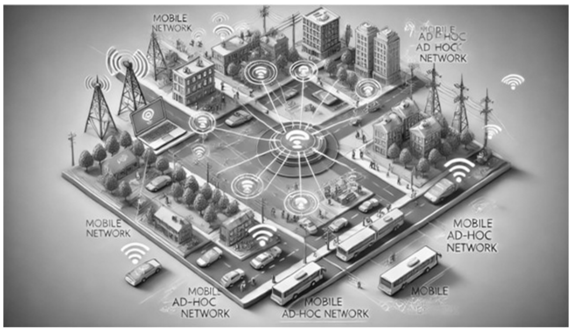
- 轉發者困境 是網路理論中的一個概念，它探討了在去中心化網路中轉送封包的決策過程，通常應用於隨意網路和點對點網路 (ad hoc and peer-to-peer networks)。

6

在一組用於會議的筆記型電腦之間建立的隨意網路，顯示沒有中央路由器的點對點連接

7

行動隨意網路
a Mobile Ad Hoc Network (MANET) system



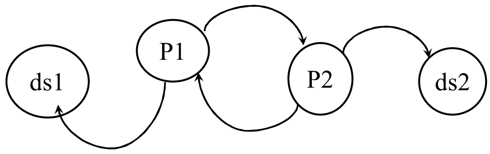
8

轉發器困境
Forwarder’s Dilemma

- 兩個設備 (devices)為玩家，p_1 和 p_2。
- 每個玩家都希望另一個玩家作為轉發器 (forwarder) 將數據封包分別發送到目的地 dst_1 和dst_2。

9

The Forwarder’s Dilemma



10

The Forwarder’s Dilemma

- 玩家 p_1 希望將數據封包發送 到的目的地 dst_2。
- 玩家 p_2 希望將數據封包發送到的目的地 dst_1。

11

The Forwarder’s Dilemma

- 數據封包到達目的地的報酬為1
- 數據封包轉發的成本為 c（$0 < c << 1$），
- c 代表用於轉發所需的能量和計算量。

12

The Forwarder's Dilemma

P1 \ P2	Forward	Drop
Forward	(1-c, 1-c)	(-c, 1*)
Drop	(1*, -c)	(0*, 0 *)

13

The Forwarder's Dilemma

- (Drop, Drop)是納許均衡
  - 每個玩家都傾向於丟棄他轉發的數據封包，因為這樣可以節省成本(能量和計算量)。

14

The ISP Routing Game

15

The ISP Routing Game

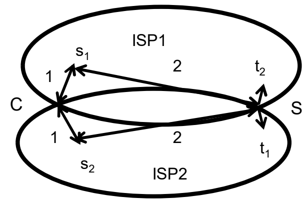
- 當透過 Internet 服務供應商 (ISP) 網路路由封包的過程中出現效率低下、衝突或挑戰時，就會出現 ISP 路由問題。

16

The ISP Routing Game

- ISP_1和ISP_2..需要同時完成兩個起點-目的地(s_1,t_1)和(s_2,t_2)的資料傳送
- 這兩個網路可以通過中轉站C和S交換資料流量

Nash 均衡
C 點交通壅塞
。



假設有沒有壅塞成本

17

ISP_1和ISP_2..需要同時完成兩個起點-目的地(s_1,t_1)和(s_2,t_2)的資料傳送

- $d(s_1,C) = 1$, $d(s_1,S) = 2$
- $d(s_2,C) = 1$, $d(s_2,S) = 2$
- $d(S, t_1) = 0$, $d(S, t_2) = 0$
- $d(C, t_1) = 3$, $d(C, t_2) = 3$

18

ISP_1和ISP_2..需要同時完成兩個起點-目的地(s_1,t_1)和(s_2,t_2)的資料傳送

- ISP_1有兩種策略S、C 傳送資料，由s_1 到 t_1
- ISP_2 有兩種策略S、C 傳送資料由s_2 到 t_2

19

ISP_1和ISP_2..需要同時完成兩個起點-目的地(s_1,t_1)和(s_2,t_2)的資料傳送

- $u_1(S,S) = 2+0=2$, $u_2(S,S)=2+0=2$
  - –ISP_1 選擇S策略，自己傳送資料由s_1 到 t_1 (成本2)
  - –ISP_2 選擇S策略，自己傳送資料由s_2 到 t_2 (成本2)

20

ISP_1和ISP_2..需要同時完成兩個起點-目的地(s_1,t_1)和(s_2,t_2)的資料傳送

- $u_1(C,C) = 1+3=4$, $u_2(C,C)=1+3=4$
  - –ISP_1 選擇C策略，傳送資料到 C之後(成本1)，再由ISP_2傳送資料由C 到s_2,由s_2 到 t_1 (成本3)
  - –ISP_2 選擇C策略，傳送資料到 C (成本1)之後，再由ISP_1傳送資料由C 到s_1,由s_1 到 t_2 (成本3)

21

ISP_1和ISP_2..需要同時完成兩個起點-目的地 (s_1,t_1)和(s_2,t_2)

- $u_1(C,S) = 1+0=1$, $u_2(C,S)=2+3=5$
  - –ISP_1傳送自己資料從s_1到C (成本1),之後， ISP_2幫ISP_1傳送資料,從 C 到 s_1,由s_1 到 t_2 (成本3)
  - –ISP_2傳送資料從 s_2到S， ISP_1成本 2

22

ISP_1和ISP_2..需要同時完成兩個起點-目的地 (s_1,t_1)和(s_2,t_2)

- $u_1(S,C) = 2+3=5$, $u_2(S,C)=1+0=1$
  - –ISP_1傳送自己資料從s_1到t_1(成本2)
  - – ISP_2傳送資料由 s_2 到C (成本1),，再由ISP_1 傳送資料從 C到s_1，再由s_1到t_2(成本3)

23

ISP_1和ISP_2..需要同時完成兩個起點-目的地 (s_1,t_1)和(s_2,t_2)

- $u_1(C,C) = 1+3=4$
- $u_2(C,C) =1+3=4$
- $u_1(C,S) = 1+0=1$, $u_2(C,S)=2+3=5$
- $u_1(S,C) = 2+3=5$, $u_2(S,C)=1+0=1$
- $u_1(S,S) = 2+0=2$, $u_2(S,S)=2+0=2$

24

納許均衡

- (C,C)是納許均衡
- ISP_1 和 ISP_2 在 C 點交通壅塞

路由賽局
Routing Game

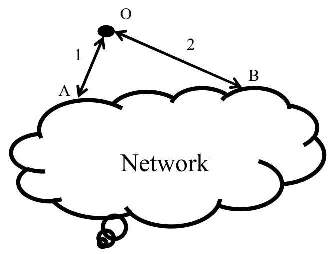
Routing Game (囚犯困局)

	C	S
C	(4*, 4*)	(1*, 5)
S	(5, 1*)	(2, 2)

避免壅塞的Routing Game

- 假設兩個交通流(traffic streams)起源於代理節點(proxy node)O.
- 假設 O 是通過點 A 和 B 連接到交通網絡的其餘部分。
- 每個交通流 (traffic streams) 有兩種策略，通過連接點 A 和 B。

避免壅塞的Routing Game



假設有A和B的不同壅塞成本
交通網絡中的兩個交通流經過 A 和 B的成本中分別為 3 和 2，

避免壅塞的Routing Game

- 路由博弈是網路理論的一個概念，當多個使用者或代理人獨立選擇通過網路的路徑或路線以優化自己的目標（例如最小化旅行時間或成本）時，就會發生路由博弈。
- 這種類型的場景通常出現在涉及共享資源的情況下，其中每個用戶的操作都會影響整體網路效能，可能會導致所有用戶的結果不理想（這個概念稱為無政府狀態的價格）。

避免壅塞的Routing Game

- $u_1(A,A)$=1(player 1’s delay cost) +1(player 2’s delay cost) +3 (壅塞成本3)= 5
- $u_2(A,A)$=1+1+3 = 5 (壅塞成本3)
- $u_1(A,B)$=1 $u_2(A,B)$=2 (無壅塞成本)

31

避免壅塞的Routing Game

- $u_1(B,A)$=2 $u_2(A,B)$=1 (無壅塞成本)
- $u_1(B,B)$=2 (player 1’s delay cost) +2 (player 2’s delay cost) +2(壅塞成本2) = 6
- $u_2(B,B)$=2+2+2 = 6 (壅塞成本2)

32

避免壅塞的Routing Game

- 良好的結果會是兩個玩家以協調交通流 通過不同的連接點。

33

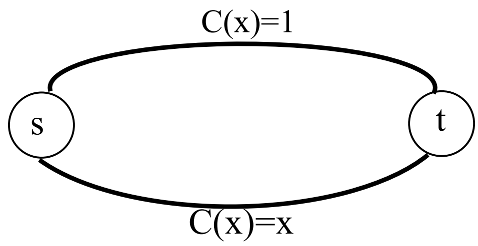
避免壅塞的路由

	A	B
A	(5, 5)	(1*, 2 *)
B	(2*, 1*)	(6, 6)

良好的結果會是兩個玩家以協調交通流 通過不同的連接點。

34

Routing Game



35

Routing Game

- 從 s 到 t 的兩個路徑
- 傳輸延遲（成本）為 C（x）
- x:傳輸的數據量
- 傳輸的數據總量為 1

36

Routing Game
0≤ x, y ≤1 are is sent from the lower path

	Upper road 上層路徑	Lower road 下層路徑 數據流 y
Upper road 上層路徑	(1, 1)	(1, c(y)*)
Lower road 下層路徑 數據流 x	(c(x)*, 1)	(c(x)*, c(y)*)

Routing Game

- 從 s 到 t 的第一條路徑的成本為1
- 從 s 到 t 的第二條路徑的成本為 c（x）= x，0≤x≤1

Routing Game

- (下層路徑,下層路徑) 是納許均衡
  - 每個位元將使用下層路徑進行傳輸，總成本= 1

Routing Game

- 假設從頂部路徑到節點 t 的數據量f 和從底部路徑到節點 t 的數據量（1-f）
- c(f) = 1 (頂部路徑),
- c(1-f)=1-f (底部路徑)
- 平均成本 $C_a = c(f)\ f+(1-f)c(1-f)$
- $= f + (1-f)^2$

Routing Game

- 最佳平均成本
- $d\ C_a /df = 1 - 2(1-f)=0$
- f = 1/2
- C_a= 0.75
  - 傳輸各1/2數據量於頂部路徑 及底部路徑為最佳

無政府狀態的代價（PoA）
The Price of Anarchy (PoA

- 在衡量納許均衡在特定博弈中的效率時，我們通常會談論無政府狀態的代價 (PoA)，即其中一個均衡的最差目標函數值與最佳結果的目標函數值之間的比率。
- 無政府狀態的代價 (Price of anarchy) = 1/0.75 = 4/3

The TCP Users Game

43

TCP's Backoff Mechanism

- 如果您發送數據包的速率導致擁塞:
- 正確實現(correct implementation)：各自退讓(back off) 並降低速率(reduce the rate) ，直到擁塞消退。
- 缺陷實現(defect implementation)：不會退讓。

46

The TCP Users Game

- TCP 用戶遊戲發生在共享網路中，其中多個用戶使用 TCP 來調整其傳輸速率，每個用戶都旨在最大化自己的效能。
- 這種類似遊戲的互動可能會導致擁塞、資源分配不公平和整體效率低下，尤其是在頻寬有限和流量高的網路中。

44

The TCP Users Game

- 每個人都有2種可能的策略：
- C:使用退讓的正確實現(correct implementation)
- D: 使用不會退讓的缺陷實現(defect implementation)

47

The TCP Users Game

- 想像一下您和另一個同事是互聯網(Internet)上唯一的人。
- 互聯網通信由 TCP protocol 控制

45

The TCP Users Game

- 如果都使用C，則平均數據包延遲為1毫秒。
- 如果都使用D，則平均延遲為3毫秒。
- 如果您使用D，另一個人使用C，則使用D延遲為0，而使用C延遲為4 ms

48

The TCP Users Dilemma

	C (correct implementation)	D (defect implementation)
C(correct implementation)	(-1, -1)	(-4, 0*)
(defect implementation)	(0*, -4)	(-3*, -3*)

49

The TCP Users Dilemma

- (D , D) 是納許均衡，平均延遲為3毫秒。
- 設計者需避開納許均衡

50

布雷斯悖論

Braess's Paradox

51

布雷斯悖論 Braess's paradox

52

Braess's paradox

- Braess 的悖論是觀察到在道路網路中添加一條或多條道路會減慢通過它的整體交通流量。

53

布雷斯悖論 Braess's paradox

- 布雷斯悖論揭示了交通網絡違反直覺的本質，增加更多路線反而會加劇擁堵，這提醒我們，在複雜的互連系統網絡中，優化需要仔細考慮意想不到的後果。

54

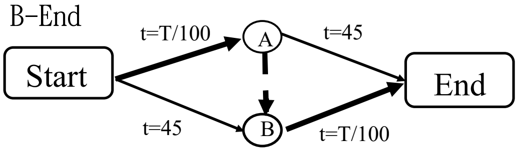
布雷斯悖論 Braess's Paradox (START-A-END, or START-B-END)

- 考慮一下所示的道路網絡，其中有4000名駕駛員希望從起點(Start) 到終點(END)行駛。
- 在Start-A道路上以分鐘為單位的行駛時間是行進人數（T）除以100，在Start-B道路上的行駛時間是恆定的45分鐘（同樣，對面的道路也是如此）。

55

布雷斯悖論 (Braess's Paradox)

- 如果不存在快速道路，納許均衡是2000位駕駛員走START-A-END, 2000位駕駛員走START-B-END
- 如果存在快速道路，納許均衡是 Start-A-B-End



56

4 條路線

- START-A-END
- START-B-END
- START-A-B-END
- START-B-A-END

57

布雷斯悖論 (Braess's Paradox)

- 布雷斯的悖論指出，當移動實體理性選擇其路線時，增加快速道路可能會降低整體效能。
- 這是因為納許均衡不是最優的路線。

58

Braess's Paradox (START-A-END, or START-B-END)

- 如果不存在虛線道路（因此交通網絡中總共有4條道路），則使用A司機駕駛 Start-A-End 路線所需的時間為 A / 100 + 45。
- 使用 B 司機駕駛 Start-B-End 路線所需的時間為 B / 100 + 45。

59

Braess's Paradox (START-A-END, or START-B-END)

- 因為有A + B = 4000 位司機，平衡狀態的每條路線花費:

2000/100 + 45 = 65分鐘。

60

Braess's Paradox (START-A-B-END)

- 現在，假設虛線是一條非常短的行駛時間（大約為 0 分鐘）的道路。
- 在這種情況下，所有駕駛員將選擇 Start-A 路線而不是 Start-B 路線，因為 Start-A 在最壞的情況下只會花費4000/100 = 40分鐘，而 Start-B肯定會花費45分鐘。

61

Braess's Paradox (START-A-B-END)

- 到達 A 點後，每個有理性的駕駛員將選擇走"快速道路（大約為 0 ）"到 B，
- 然後從 B 繼續到終點(End) ，因為A-End 需要 45分鐘，而 B-End 最多需要 4000/100 = 40分鐘。

62

Braess's Paradox (START-A-B-END)

- 納許均衡是 Start-A-B-End
- 每個駕駛員的旅行時間為4000/100＋4000/100＝80分鐘，比不存在快速A-B道路時所需的65分鐘有所增加。
- 駕駛員沒有動機切換道路，因為兩條原始路線（Start-A-End和Start-B-End）現在都為85分鐘。

63

布雷斯悖論 (**Braess's Paradox)**

- 如果不存在快速道路，納許均衡是2000位駕駛員走START-A-END, 2000位駕駛員START-B-END (65分鐘)
- 如果存在快速道路，納許均衡是每位駕駛員都走 Start-A-B-End (80分鐘)

64

Brasse's Paradox

- 駕駛員決定走新快速道路導致交通擁擠，從而降低他人的收益。

65

Braess's Paradox

- 1969年投資於德國斯圖加特（Stuttgart)的道路網絡後，直到重新封閉了部分新建道路後，交通狀況才有所改善。
- 1990年，紐約市第42條街道的關閉，減少了該地區的交通擁堵。
- 在韓國首爾，清溪川修復工程中拆除了一條高速公路後，看到了城市周圍交通加速。

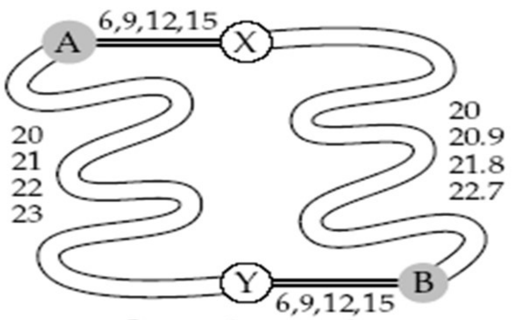
66

經過舊路從 A 到 B的納許均衡

- 四個人必須同時從 A 開車到 B。
- 有兩條路線可用，一條通過 X，一條通過 Y。
- 從 A 到 X，從 Y 到 B 的道路既短又窄
- 一輛汽車需要 6分鐘，而每增加一輛汽車會使行駛中的汽車增加 3分鐘。

67

經過舊路從 A 到 B的納許均衡



Original network.

68

經過舊路從 A 到 B的納許均衡

- 玩家：四人
- 策略：每人行駛經過 X 或 Y
- 每個玩家的收益是其旅行時間的負數

69

經過舊路從 A 到 B的納許均衡

- 納許均衡是兩人經過 X，兩人經過 Y。
- 兩人經過 X : 29.9 = 9 + 20.9
- 兩人經過 Y: 30 = 9 + 21

70

經過舊路從 A 到 B的納許均衡

- 因為在修建新路(快速道路）之前唯一的平衡是每一路線都有兩人。
- A-X-B（2人）= 9 + 20.9 = 29.9
- A-Y-B（2人）= 21 +9 = 30

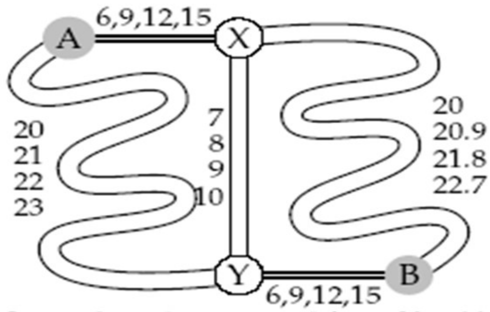
71

經過舊路從 A 到 B的納許均衡

- 如果某人通過 X 路線轉到了Y路線，則其旅行時間為 22 + 12 = 34分鐘；
- 如果通過 Y 路線的人切換到 X 路線，則其旅行時間為 12 + 21.8 = 33.8分鐘
- 沒有人會切換路線

72

從 A 到 B經過新路X-Y 的納許均衡



Network with new road from X to Y.

73

從 A 到 B經過新路X-Y的納許均衡

- 行駛在 X 和 Y 之間的新快速道路，一輛車需要7分鐘，而每增加一輛車，每輛車的旅行時間就會增加1分鐘。
- 現在考慮從 X 到 Y 的道路建成後的情況。

74

從舊路轉向新路的暫態 (Transient State)

- 如果行駛A–X–B的人在X處轉向快速道路，然後行駛Y–B，則總旅行時間為 A-X-Y-B（1人）= 9 + 7 + 12 = 28分鐘
- 他將從A–X–B 切換到A-X-Y-B

75

從 A 到 B經過新路的納許均衡

- 在任何納許均衡中，一個人行駛A–X–B，兩個人行駛A–X–Y–B，一個人行駛A–Y–B。
- A-X-B（一個人）= 12 + 20 = 32
- A-X-Y-B（兩個人）= 12 + 8 + 12 = 32
- A-Y-B（一個人）= 20 +12 = 32
- 每個人的旅行時間為32分鐘。

76

沒有人可以改變納許均衡

- 如果A–X–B的人切換到A–X–Y–B，則其旅行時間將增加為12+ 9 + 15 = 36分鐘；
- 如果她切換到A–Y–B，則旅行時間將增加至21 + 15 = 36分鐘。
- 沒有人可以改變她的路線並減少她的旅行時間。

77

沒有人可以改變納許均衡

- 如果A–X–Y–B的人之一切換到A–X–B，她的旅行時間將增加為12 +20.9 = 32.9分鐘；
- 如果她切換到A–Y–B，則旅行時間將增加到21 + 12 = 33分鐘。
- 沒有人可以改變路線並減少旅行時間。

78

沒有人可以改變納許均衡

- 如果A–Y–B的人切換為A–X–B，則其旅行時間將增加為15 + 20.9 = 35.9分鐘；
- 如果她切換到A–X–Y–B，則旅行時間將增加為15 + 9 +12 = 36分鐘
- 沒有人可以改變她的路線並減少她的旅行時間。

79

沒有人可以改變納許均衡

- 一個人從A-Y-B切換到A-X-B = 15 + 20.9 = 35.9（非理性）
- 一個人從A-Y-B切換到A-X-Y-B = 15 + 9 + 12 = 36（非理性）
- 沒有人可以改變她的路線並減少她的旅行時間。

80

沒有人可以改變納許均衡

- 一個人從A-X-B切換到A-X-Y-B = 12 + 9 + 15 = 36（非理性）
- 一個人從A-X-B切換到A-Y-B = 21 + 15 = 36（非理性）
- 沒有人可以改變她的路線並減少她的旅行時間。

81

沒有人可以改變納許均衡

- 一個人從A-X-Y-B切換到A-X-B = 12 + 20.9 = 32.9（非理性）
- 一個人從A-X-Y-B切換到A-Y-B = 21 +12 = 36（非理性）
- 沒有人可以改變她的路線並減少她的旅行時間。

82

The Braess Paradox

- The Braess Paradox: How Closing Roads Can Speed Up Traffic
- https://www.youtube.com/watch?v=ZiauQXIKs3U
- How Closing Roads Could Speed Up Traffic - The Braess Paradox
- https://www.youtube.com/watch?v=8mlH9bnvWVE

83