

Trí Tuệ Nhân Tạo

Nguyễn Nhật Quang

quangnn-fit@mail.hut.edu.vn

Viện Công nghệ Thông tin và Truyền thông

Trường Đại học Bách Khoa Hà Nội

Năm học 2009-2010

Nội dung môn học:

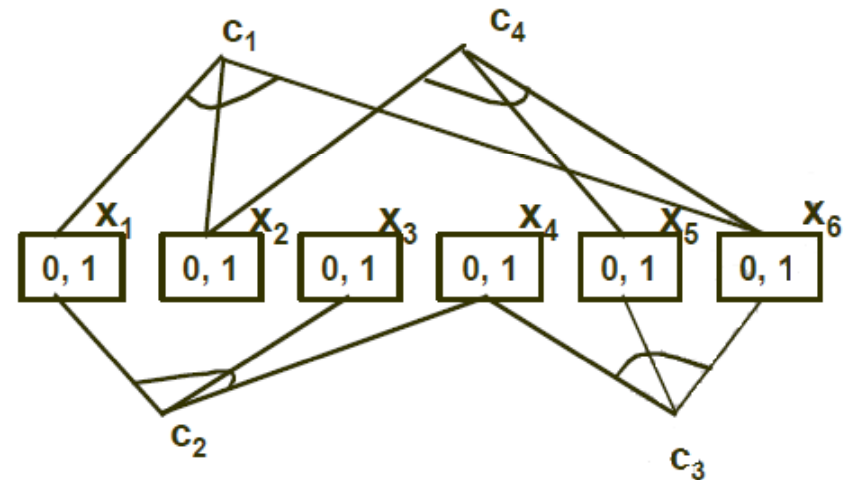
- Giới thiệu về Trí tuệ nhân tạo
- Tác tử
- **Giải quyết vấn đề:** Tìm kiếm, **Thỏa mãn ràng buộc**
- Logic và suy diễn
- Biểu diễn tri thức
- Suy diễn với tri thức không chắc chắn
- Học máy
- Lập kế hoạch

Ràng buộc

- Một **ràng buộc** (constraint) là một quan hệ trên một tập các biến
 - Mỗi biến có (gắn với) một tập các giá trị có thể nhận – gọi là miền giá trị (domain)
 - Trong môn học này, chúng ta chỉ xét các miền hữu hạn các giá trị rời rạc
- Một ràng buộc có thể được biểu diễn bằng
 - Một biểu thức (toán học / logic)
 - Một bảng liệt kê các phép gán giá trị phù hợp cho các biến
- Ví dụ về ràng buộc
 - Tổng các góc trong một tam giác là 180°
 - Độ dài của từ W là 10 ký tự
 - X nhỏ hơn Y
 - Tuần có thể tham dự buổi seminar vào thứ 4 sau 14h
 - ...

Bài toán thỏa mãn ràng buộc

- Một bài toán thỏa mãn ràng buộc (Constraint Satisfaction Problem – CSP) bao gồm:
 - Một tập hữu hạn các biến X
 - Miền giá trị (một tập hữu hạn các giá trị) cho mỗi biến D
 - Một tập hữu hạn các ràng buộc C
- Một lời giải (solution) của bài toán thỏa mãn ràng buộc là một phép gán đầy đủ các giá trị của các biến sao cho thỏa mãn tất cả các ràng buộc
- Một bài toán thỏa mãn ràng buộc thường được biểu diễn bằng một đồ thị (graph)



Ví dụ:

Các biến x_1, \dots, x_6 .

Miền giá trị $\{0, 1\}$.

Các ràng buộc:

- $x_1 + x_2 + x_6 = 1$
- $x_1 - x_3 + x_4 = 1$
- $x_4 + x_5 - x_6 > 0$
- $x_2 + x_5 - x_6 = 0$

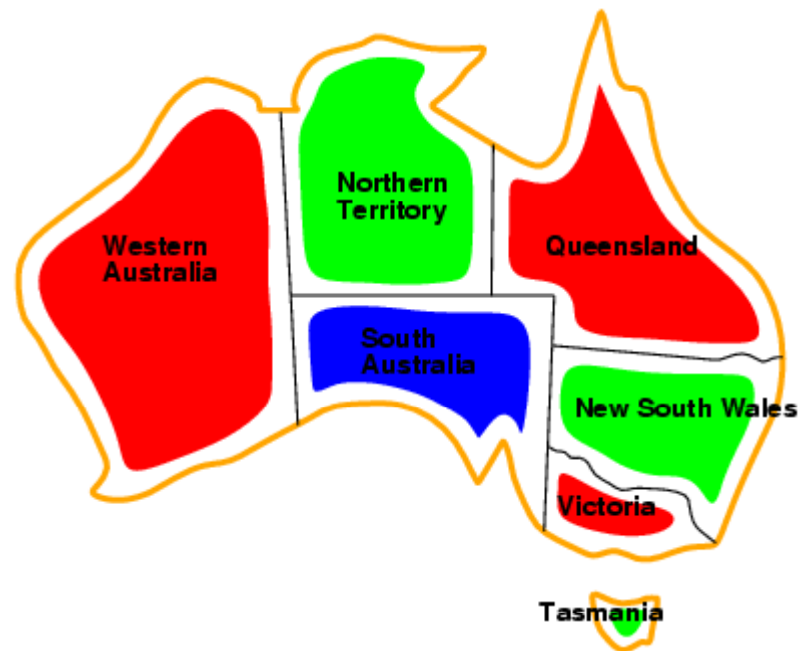
Ví dụ: Bài toán tô màu bản đồ (1)

- Các biến: WA, NT, Q, NSW, V, SA, T
- Các miền giá trị: $D_i = \{\text{red, green, blue}\}$
- Các ràng buộc: Các vùng liền kề nhau phải có màu khác nhau
- Ví dụ:
 - $WA \neq NT$
 - $(WA, NT) = \{(\text{red}, \text{green}), (\text{red}, \text{blue}), (\text{green}, \text{red}), (\text{green}, \text{blue}), (\text{blue}, \text{red}), (\text{blue}, \text{green})\}$



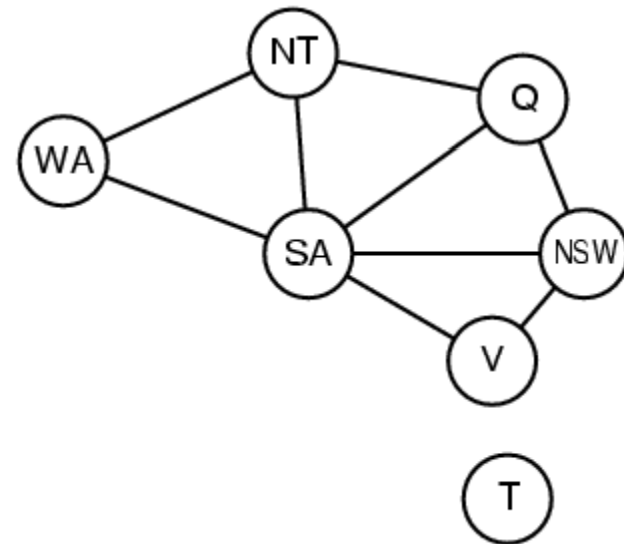
Ví dụ: Bài toán tô màu bản đồ (2)

- Các lời giải là các phép gán **đầy đủ** và **chính xác** (thỏa mãn tất cả các ràng buộc)
- Ví dụ: WA=red, NT=green, Q=red, NSW=green, V=red, SA=blue, T=green



Đồ thị các ràng buộc

- Đối với bài toán thỏa mãn ràng buộc nhị phân (binary CSP): Mỗi ràng buộc chỉ liên quan đến 2 biến
- Đồ thị các ràng buộc (constraint graph)
 - Các nút biểu diễn các biến
 - Các cạnh biểu diễn các ràng buộc



Các kiểu bài toán thỏa mãn ràng buộc

■ Các biến rời rạc

□ Các miền giá trị hữu hạn

- Với n biến và kích thước miền giá trị d , thì số lượng các phép gán đầy đủ giá trị cần xét là $O(d^n)$
- Ví dụ: Các bài toán thỏa mãn ràng buộc nhị phân (Boolean CSPs)

□ Các miền giá trị vô hạn

- Miền giá trị các số nguyên, các chuỗi, ...
- Ví dụ: Trong bài toán xếp lịch công việc, các biến là các ngày bắt đầu và kết thúc đối với mỗi công việc
- Cần một ngôn ngữ biểu diễn ràng buộc (constraint language), ví dụ:
 $StartJob_1 + 5 \leq StartJob_3$

■ Các biến liên tục

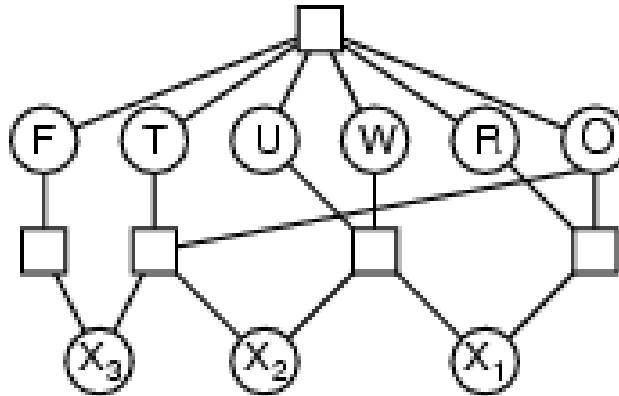
- Ví dụ: Các mốc thời gian bắt đầu và kết thúc đối với các quan sát bằng kính viễn vọng không gian Hubble
- Bài toán các ràng buộc tuyến tính có thể giải quyết được ở mức chi phí thời gian đa thức bằng phương pháp lập trình tuyến tính

Các kiểu ràng buộc

- **Ràng buộc đơn** (unary constraint) chỉ liên quan đến 1 biến
 - Ví dụ: $SA \neq \text{green}$
- **Ràng buộc nhị phân** (binary constraint) liên quan đến 2 biến
 - Ví dụ: $SA \neq WA$
- **Ràng buộc bậc cao** (higher-order constraint) liên quan đến *nhiều hơn 2 biến*
 - Ví dụ: Các ràng buộc trong bài toán mật mã số học (trình bày ở slide tiếp theo)

Ví dụ: Bài toán mật mã số học

$$\begin{array}{r} T W O \\ + T W O \\ \hline F O U R \end{array}$$



- Các biến: $F T U W R O \ X_1 X_2 X_3$ (các nhớ của các phép +)
- Miền giá trị: $\{0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9\}$
- Các ràng buộc: Giá trị của các biến (F, T, U, W, R, O) khác nhau
 - $O + O = R + 10 * X_1$
 - $X_1 + W + W = U + 10 * X_2$
 - $X_2 + T + T = O + 10 * X_3$
 - $X_3 = F$
 - $T \neq 0$
 - $F \neq 0$

Các bài toán CSP trong thực tế

- Các bài toán giao nhiệm vụ
 - Ví dụ: Giáo viên nào dạy lớp nào?
- Các bài toán lập thời khóa (gian) biểu
 - Ví dụ: Lớp học nào được dạy vào thời gian nào và ở đâu?
- Các bài toán lập lịch vận tải (giao hàng) của các công ty
- Các bài toán lập lịch sản xuất của các nhà máy
- Lưu ý: Nhiều bài toán thực tế liên quan đến các biến có giá trị thực (liên tục)

Tìm kiếm bằng kiểm thử (1)

- Là phương pháp giải quyết vấn đề tổng quát nhất
- Phương pháp giải quyết bằng kiểm thử (Generate and Test)
 - Sinh ra một khả năng (candidate) của lời giải
 - Kiểm tra xem khả năng này có thực sự là một lời giải
- Áp dụng phương pháp kiểm thử đối với bài toán CSP
 - Bước 1. Gán các giá trị cho tất cả các biến
 - Bước 2. Kiểm tra xem tất cả các ràng buộc được thỏa mãn hay không
 - Lặp lại 2 bước này cho đến khi tìm được một phép gán thỏa mãn

Tìm kiếm bằng kiểm thử (2)

- Điểm yếu nghiêm trọng của phương pháp tìm kiếm bằng kiểm thử là việc phải xét *quá nhiều các khả năng gán (hiển nhiên) không thỏa mãn các ràng buộc*
- Ví dụ
 - Các biến X, Y, Z lấy các giá trị $\{1, 2\}$
 - Các ràng buộc: $X=Y$, $X \neq Z$, $Y > Z$
 - Các phép (khả năng) gán: $(1, 1, 1)$; $(1, 1, 2)$; $(1, 2, 1)$; $(1, 2, 2)$; $(2, 1, 1)$; $(2, 1, 2)$; $(2, 2, 1)$

Tìm kiếm bằng kiểm thử (3)

- Làm thế nào để cải thiện phương pháp kiểm thử?
 - Sinh ra các khả năng (các phép gán giá trị) một cách thông minh hơn
 - Không theo thứ tự tuần tự
 - Sử dụng các kết quả (thông tin) thu được từ bước kiểm tra (bước 2)
 - Phát hiện sớm (từ trước) các mâu thuẫn
 - Các ràng buộc được kiểm tra ngay sau khi mỗi biến được gán giá trị (chứ không phải đợi đến khi tất cả các biến được gán giá trị)

Tìm kiếm quay lui (1)

- **Tìm kiếm quay lui (backtracking)** là giải thuật tìm kiếm được sử dụng phổ biến nhất trong CSP
 - Dựa trên giải thuật tìm kiếm theo chiều sâu (depth-first search)
 - Mỗi lần gán, chỉ làm việc (gán giá trị) cho một biến
 - (Tìm kiếm bằng kiểm thử: mỗi lần gán xác định các giá trị cho tất cả các biến)
- Phương pháp tìm kiếm quay lui đối với bài toán CSP
 - Gán giá trị lần lượt cho các biến – Việc gán giá trị của biến này chỉ được làm sau khi đã hoàn thành việc gán giá trị của biến khác
 - Sau mỗi phép gán giá trị cho một biến nào đó, kiểm tra các ràng buộc có được thỏa mãn bởi tất cả các biến đã được gán giá trị cho đến thời điểm hiện tại – Quay lui (backtrack) nếu có lỗi (không thỏa mãn các ràng buộc)

Tìm kiếm quay lui (2)

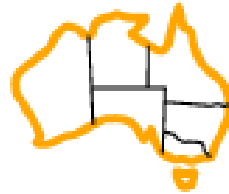
- Các yếu tố ảnh hưởng đến phương pháp tìm kiếm quay lui
 - Thứ tự được xét của các biến?
 - Ưu tiên xét trước các biến có ít giá trị (miền giá trị nhỏ)
 - Ưu tiên xét trước các biến tham gia vào nhiều ràng buộc
 - Ưu tiên các biến quan trọng hơn (được định nghĩa tùy vào bài toán cụ thể)
 - Với mỗi biến, thứ tự được xét của các giá trị?
 - Thứ tự ưu tiên của các giá trị với mỗi biến được định nghĩa tùy thuộc vào bài toán cụ thể

Giải thuật tìm kiếm quay lui

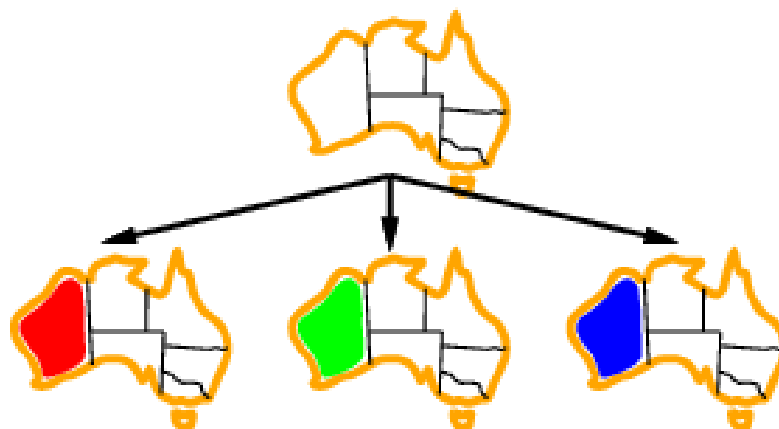
```
function BACKTRACKING-SEARCH(csp) returns a solution, or failure
  return RECURSIVE-BACKTRACKING({}, csp)

function RECURSIVE-BACKTRACKING(assignment, csp) returns a solution, or failure
  if assignment is complete then return assignment
  var ← SELECT-UNASSIGNED-VARIABLE(Variables[csp], assignment, csp)
  for each value in ORDER-DOMAIN-VALUES(var, assignment, csp) do
    if value is consistent with assignment according to Constraints[csp] then
      add { var = value } to assignment
      result ← RECURSIVE-BACKTRACKING(assignment, csp)
      if result ≠ failure then return result
      remove { var = value } from assignment
  return failure
```

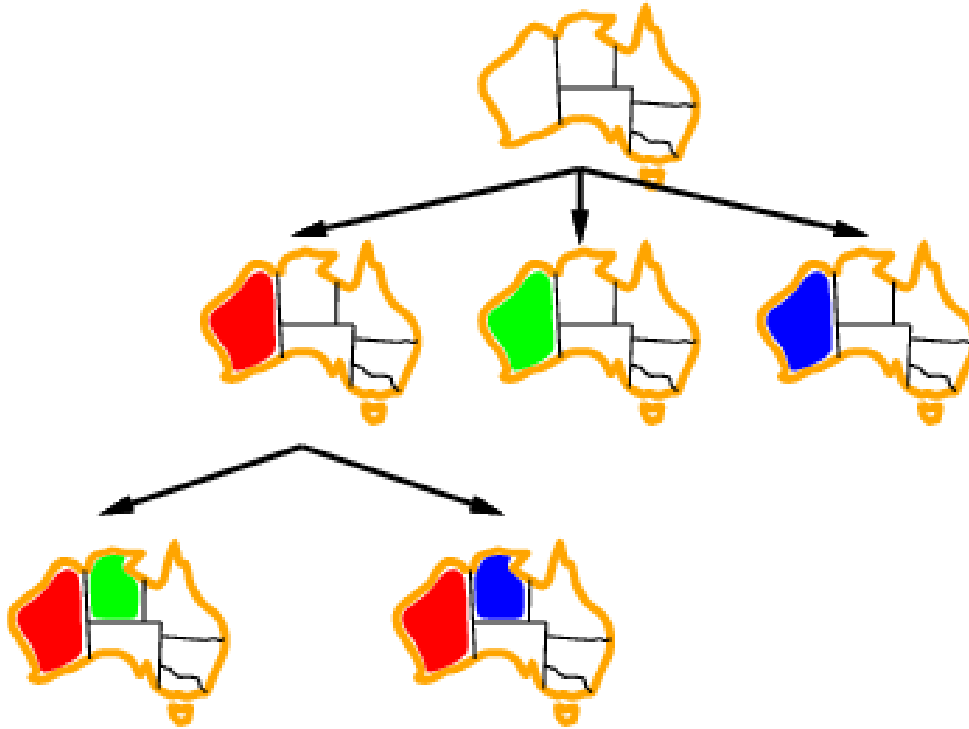
Tìm kiếm quay lui – Ví dụ (1)



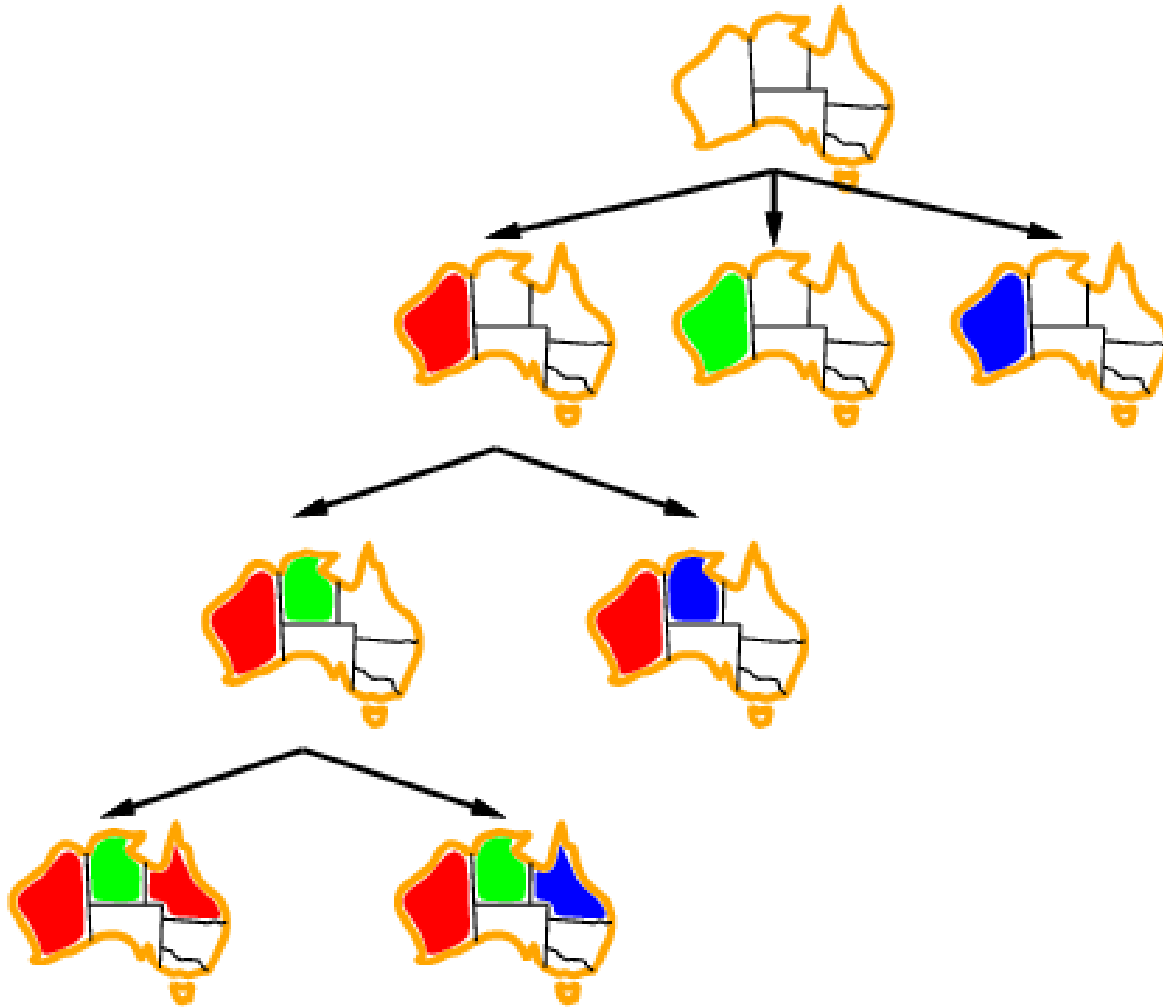
Tìm kiếm quay lui – Ví dụ (2)



Tìm kiếm quay lui – Ví dụ (3)



Tìm kiếm quay lui – Ví dụ (4)



Tìm kiếm quay lui – Các vấn đề (1)

- Lặp đi lặp lại lỗi
 - Lý do: Bỏ đi (không khai thác) lý do của mâu thuẫn
 - Ví dụ:
 - Các biến A,B,C,D,E lấy các giá trị trong miền 1..10
 - Ràng buộc: $A > E$
 - Phương pháp tìm kiếm quay lui thử tất cả các khả năng gán giá trị cho các biến B,C,D cho đến khi phát hiện ra rằng $A \neq 1$
 - Giải pháp: Phương pháp Backjumping (chuyển đến xét từ chỗ sinh ra lỗi)

Tìm kiếm quay lui – Các vấn đề (2)

- Các thao tác (kiểm tra) không cần thiết
 - Lặp lại các kiểm tra ràng buộc không cần thiết
 - Ví dụ:
 - Các biến A,B,C,D,E lấy các giá trị trong miền 1..10
 - Các ràng buộc: $B+8 < D$; $C=5 \cdot E$
 - Khi gán giá trị cho các biến C,E, thì các giá trị 1..9 được kiểm tra (lặp đi lặp lại) đối với biến D
 - Giải pháp: Phương pháp Backchecking (lưu giữ / nhớ lại các phép gán tốt và không tốt)

Tìm kiếm quay lui – Các vấn đề (3)

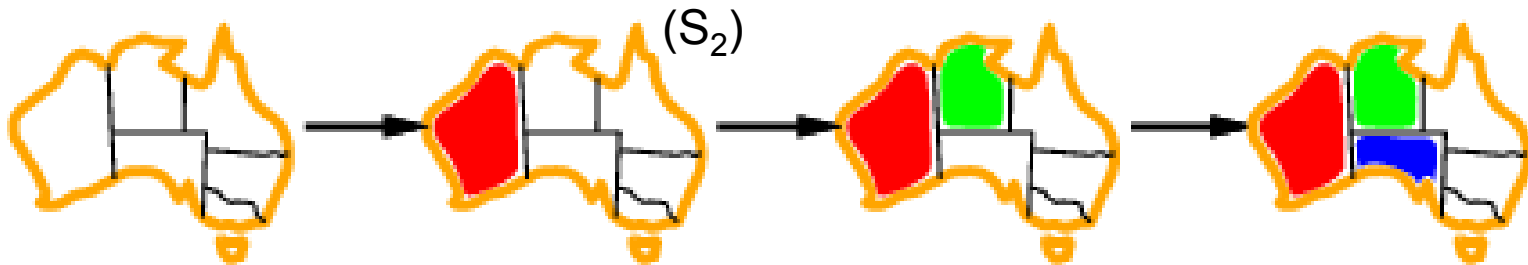
- Phát hiện muộn các mâu thuẫn (vi phạm ràng buộc)
 - Các vi phạm ràng buộc chỉ được phát hiện sau khi các giá trị được gán
 - Ví dụ:
 - Các biến A,B,C,D,E lấy các giá trị trong miền 1..10
 - Ràng buộc: $A=3 \cdot E$
 - Chỉ đến khi gán giá trị cho biến E thì mới phát hiện ra rằng $A > 2$
 - Giải pháp: Phương pháp Forward checking (kiểm tra trước các ràng buộc)

Tìm kiếm quay lui – Cải thiện

- Hiệu quả của phương pháp tìm kiếm quay lui trong CSP có thể được cải thiện bằng
 - Thứ tự xét các biến (để gán giá trị)
 - Thứ tự xét (gán) các giá trị đối với mỗi biến
 - Phát hiện sớm các lỗi (vi phạm ràng buộc) sẽ xảy ra

Biến bị ràng buộc nhiều nhất

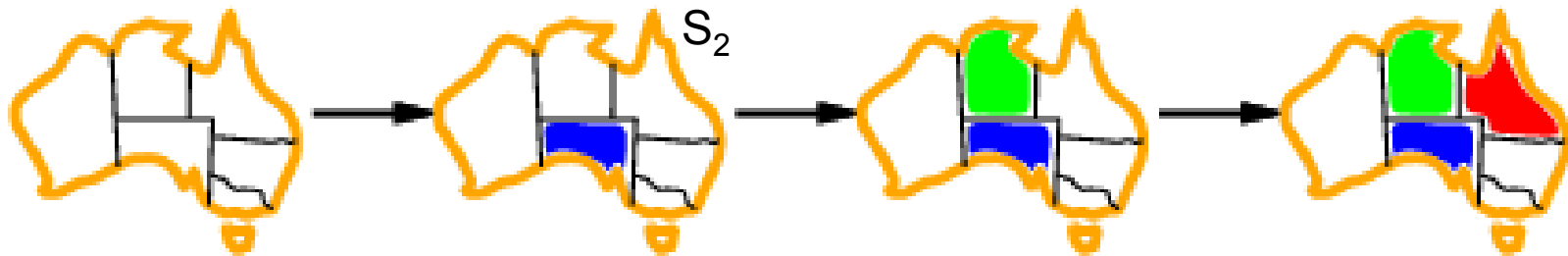
- Quy tắc lựa chọn thứ tự xét các biến: Ưu tiên biến bị ràng buộc nhiều nhất (most constrained variable)
 - Chọn biến có số lượng các giá trị hợp lệ ít nhất
 - Ví dụ: Tại bước S_2 , biến NT được chọn vì nó có số lượng các giá trị hợp lệ ít nhất (2)



- Còn được gọi là quy tắc ưu tiên các biến có tập giá trị hợp lệ nhỏ nhất (Minimum Remaining Values – MRV)

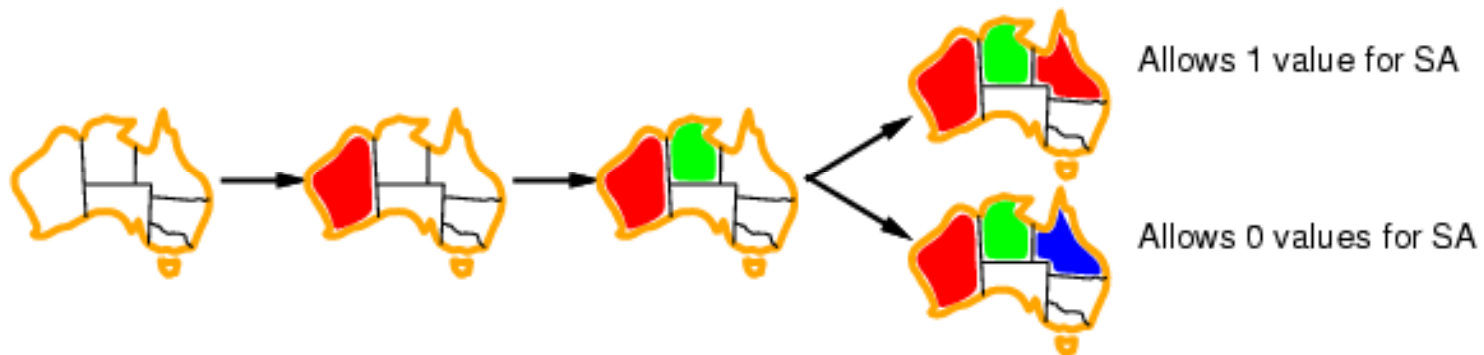
Biến ràng buộc các biến khác nhiều nhất

- Khi có ≥ 2 biến có như nhau số lượng giá trị hợp lệ ít nhất, thì chọn biến nào?
 - Ví dụ: Trong ví dụ trước, 2 biến NT và SA có cùng số lượng giá trị hợp lệ ít nhất (2)
- Chọn biến ràng buộc (khống chế) các biến khác (chưa được gán giá trị) nhiều nhất
 - Ví dụ: Tại bước S_2 , tuy cùng mức độ bị ràng buộc, nhưng biến SA nên được xét trước biến NT – vì SA ràng buộc 5 biến khác, còn NT chỉ ràng buộc 3 biến khác



Giá trị ràng buộc các biến khác ít nhất

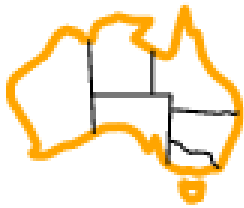
- Đối với một biến, các giá trị được xét (để gán) theo thứ tự nào?
- Chọn giá trị ràng buộc (khổng chế) các biến khác (chưa được gán giá trị) ít nhất
 - Giá trị này gây ra hạn chế tối thiểu đối với các khả năng gán giá trị của các biến khác



Kiểm tra tiến (Forward checking)

- Mục đích: Tránh các thất bại, bằng kiểm tra trước các ràng buộc
- Kiểm tra tiến đảm bảo sự phù hợp (consistency) giữa biến đang được xét gán giá trị và các biến khác **có liên quan (ràng buộc) trực tiếp** với nó
- Ý tưởng:
 - Ở mỗi bước gán giá trị, theo dõi các giá trị hợp lệ (có thể được gán) đối với các biến chưa được gán giá trị
 - Loại bỏ (dừng) hướng tìm kiếm hiện tại khi có bất kỳ một biến (chưa được gán giá trị) nào đó không còn giá trị hợp lệ

Kiểm tra tiến – Ví dụ (1)



WA

NT

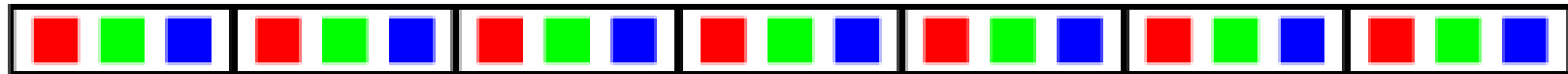
Q

NSW

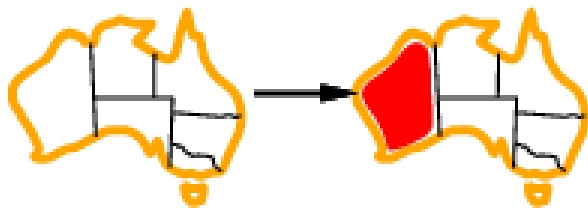
V

SA

T

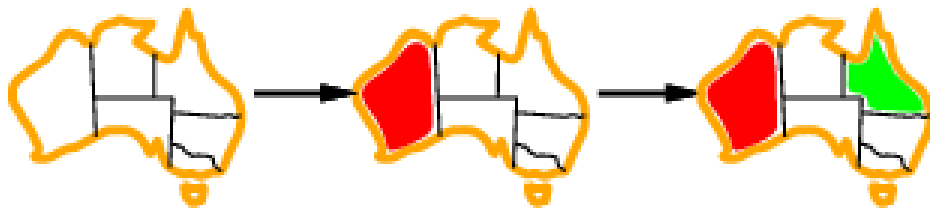


Kiểm tra tiến – Ví dụ (2)



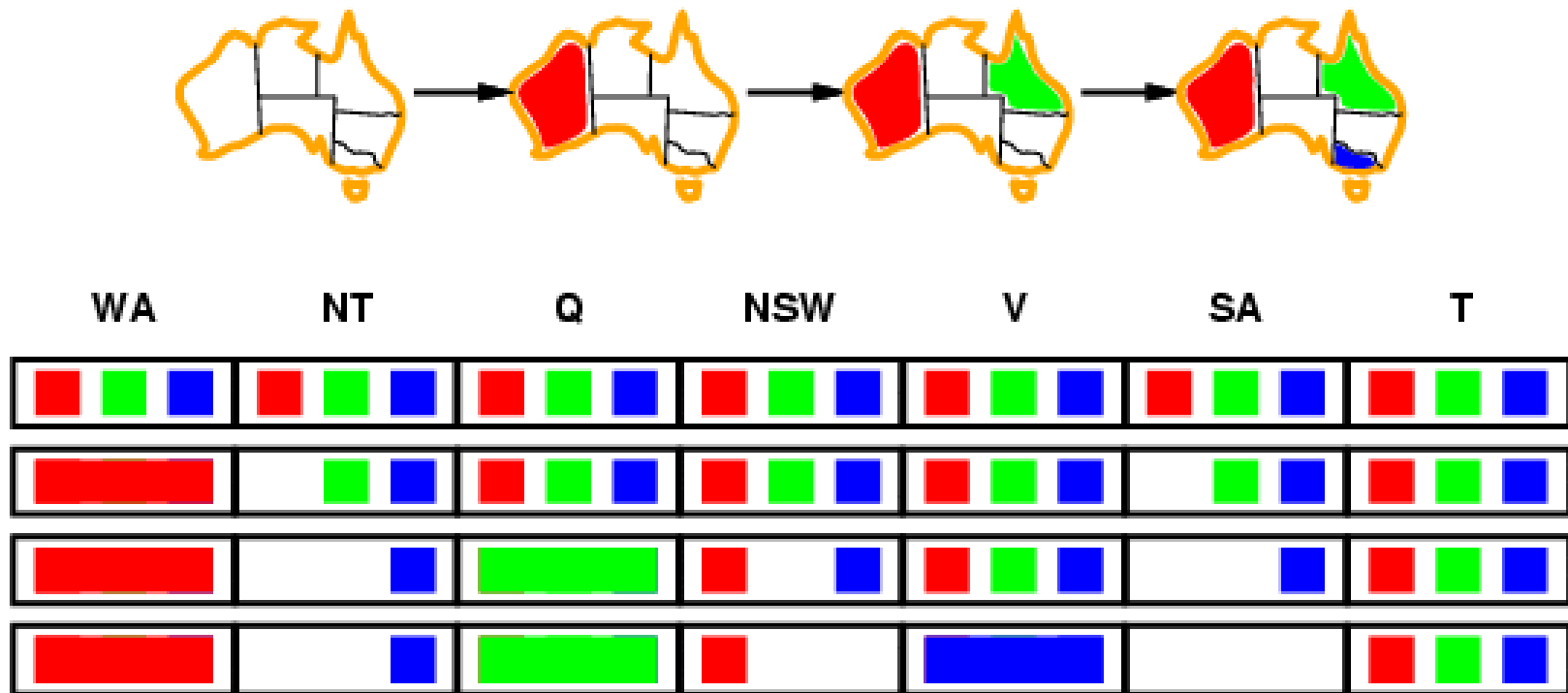
WA	NT	Q	NSW	V	SA	T
<div><div></div><div></div><div></div></div>	<div><div></div><div></div><div></div></div>	<div><div></div><div></div><div></div></div>	<div><div></div><div></div><div></div></div>	<div><div></div><div></div><div></div></div>	<div><div></div><div></div><div></div></div>	<div><div></div><div></div><div></div></div>
<div><div></div><div></div><div></div></div>	<div><div></div><div></div><div></div></div>	<div><div></div><div></div><div></div></div>	<div><div></div><div></div><div></div></div>	<div><div></div><div></div><div></div></div>	<div><div></div><div></div><div></div></div>	<div><div></div><div></div><div></div></div>

Kiểm tra tiến – Ví dụ (3)



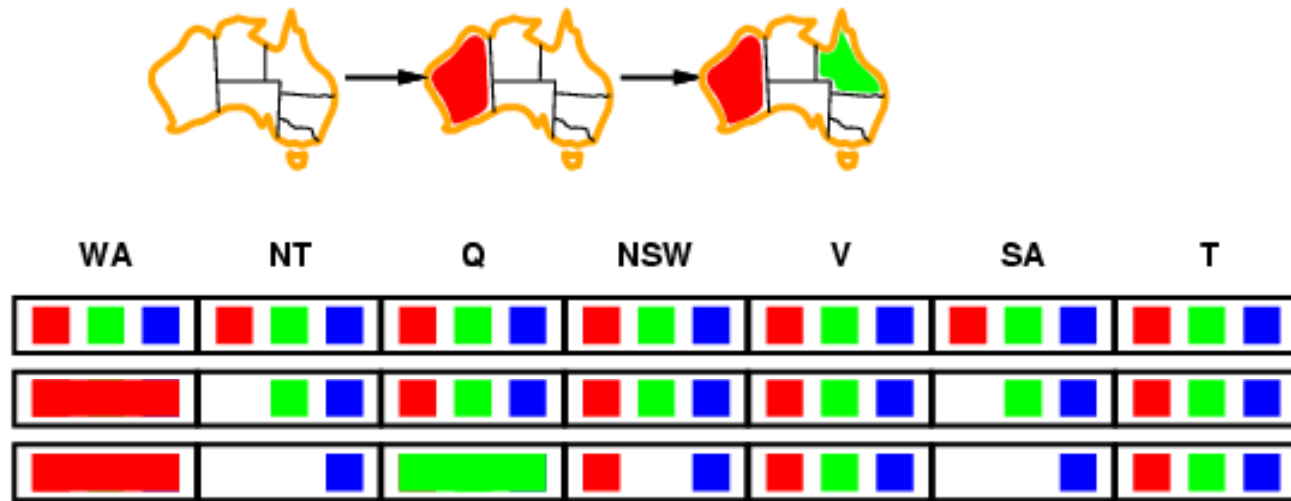
WA	NT	Q	NSW	V	SA	T
<div><div></div><div></div><div></div></div>	<div><div></div><div></div><div></div></div>	<div><div></div><div></div><div></div></div>	<div><div></div><div></div><div></div></div>	<div><div></div><div></div><div></div></div>	<div><div></div><div></div><div></div></div>	<div><div></div><div></div><div></div></div>
<div><div></div><div></div><div></div></div>	<div><div></div><div></div><div></div></div>	<div><div></div><div></div><div></div></div>	<div><div></div><div></div><div></div></div>	<div><div></div><div></div><div></div></div>	<div><div></div><div></div><div></div></div>	<div><div></div><div></div><div></div></div>
<div><div></div><div></div><div></div></div>	<div><div></div><div></div><div></div></div>	<div><div></div><div></div><div></div></div>	<div><div></div><div></div><div></div></div>	<div><div></div><div></div><div></div></div>	<div><div></div><div></div><div></div></div>	<div><div></div><div></div><div></div></div>

Kiểm tra tiến – Ví dụ (4)



Lan truyền các ràng buộc

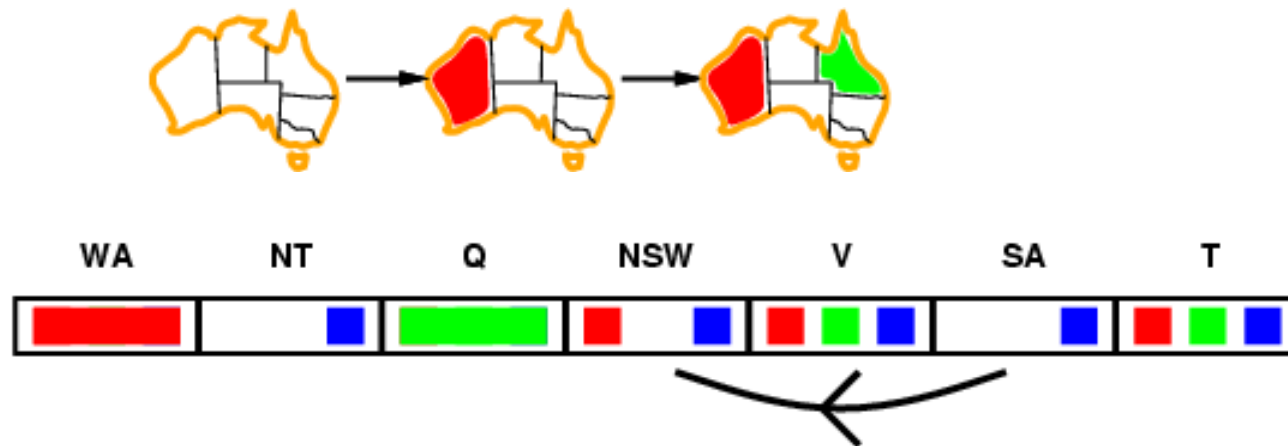
- Kiểm tra tiền giúp lan truyền thông tin (ràng buộc) từ các biến đã được gán giá trị đến các biến chưa được gán giá trị
- Nhưng: Phương pháp kiểm tra tiền không thể phát hiện trước (ngăn chặn) được tất cả các thất bại
 - Ví dụ: NT và SA không thể cùng là màu xanh!



- Lan truyền các ràng buộc chỉ đảm bảo tính **phù hợp cục bộ (local consistency)** của các ràng buộc

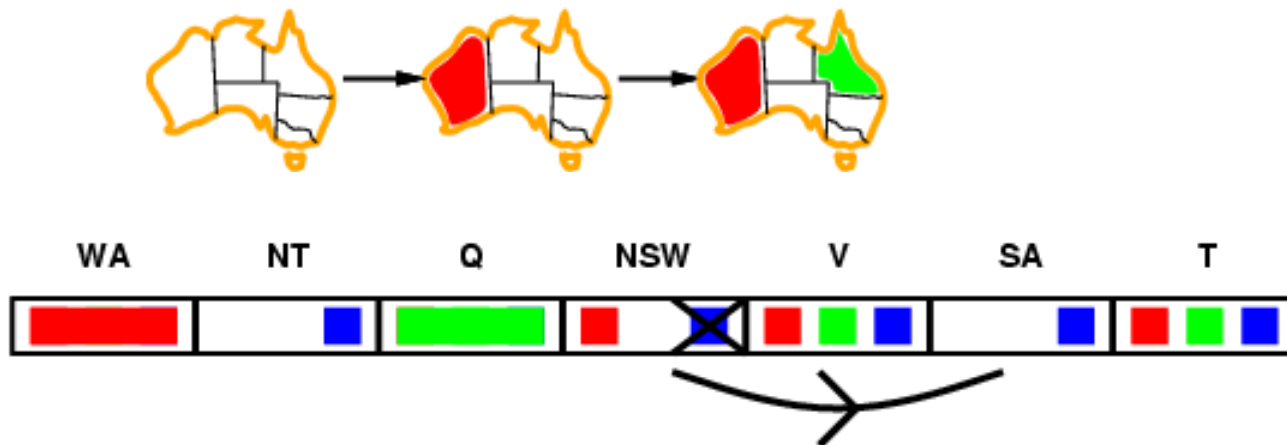
Phù hợp cạnh trong đồ thị ràng buộc (1)

- Trong đồ thị ràng buộc, một cạnh ($X \rightarrow Y$) được gọi là phù hợp (consistent) về ràng buộc, khi và chỉ khi đối với **mỗi** giá trị x của biến X đều có **một** giá trị y của biến Y sao cho ràng buộc giữa 2 biến X và Y được thỏa mãn
- Định nghĩa về phù hợp cạnh không có tính đối xứng
 - ($X \rightarrow Y$) là phù hợp không có nghĩa là ($Y \rightarrow X$) là phù hợp!
 - Ví dụ: ($SA \rightarrow NSW$) là phù hợp, nhưng ($NSW \rightarrow SA$) không



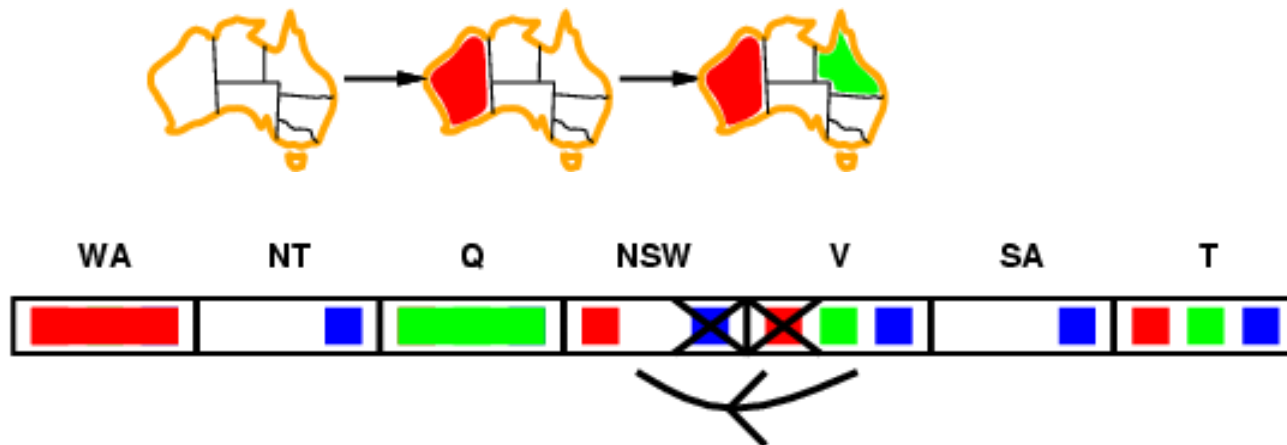
Phù hợp cạnh trong đồ thị ràng buộc (2)

- Để cạnh $(X \rightarrow Y)$ là phù hợp ràng buộc, thì cần **loại bỏ bất kỳ giá trị x của biến X** mà không có giá trị y nào của biến Y làm cho ràng buộc giữa 2 biến X và Y được thỏa mãn
- Để cạnh $(NSW \rightarrow SA)$ là phù hợp ràng buộc, thì cần phải loại bỏ giá trị màu xanh (blue) khỏi danh sách các giá trị hợp lệ đối với biến NSW



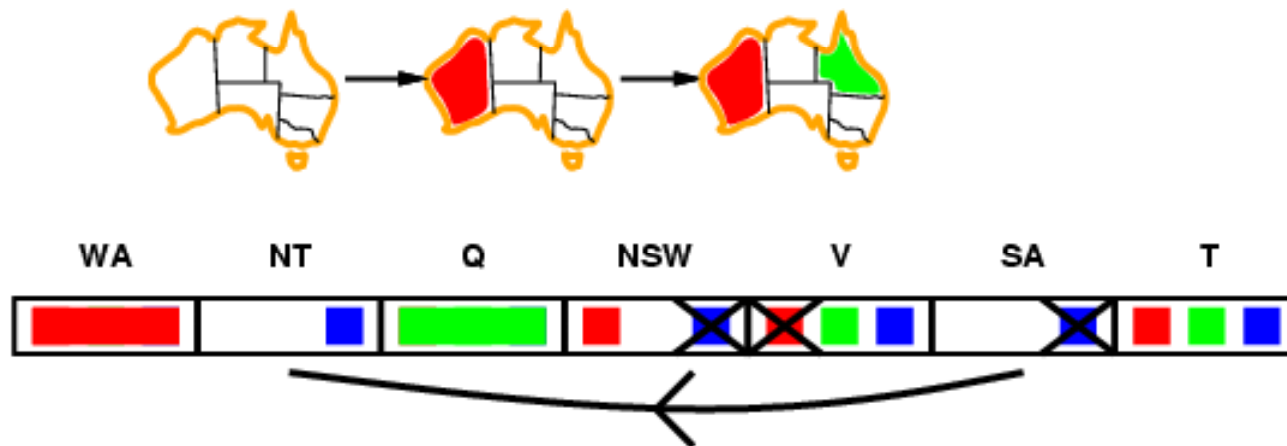
Phù hợp cạnh trong đồ thị ràng buộc (3)

- Sau khi loại bỏ một giá trị x khỏi danh sách các giá trị hợp lệ của biến X , thì cần xét lại tất cả các cạnh ràng buộc trực tiếp tới biến X : xét lại mọi cạnh ($\dots \rightarrow X$)
 - Ví dụ: Sau khi loại bỏ giá trị màu xanh (blue) của biến NSW , thì cần xét lại các cạnh ($V \rightarrow NSW$), ($SA \rightarrow NSW$) và ($Q \rightarrow NSW$)
... Để cạnh ($V \rightarrow NSW$) là phù hợp ràng buộc, thì cần loại bỏ giá trị màu đỏ (red) của biến V



Phù hợp cạnh trong đồ thị ràng buộc (4)

- Phương pháp phù hợp cạnh (Arc consistency) phát hiện được các thất bại sớm hơn so với phương pháp kiểm tra tiến (Forward checking)
- Kiểm tra phù hợp cạnh có thể được sử dụng trước hoặc sau mỗi phép gán giá trị của một biến



Giải thuật phù hợp cạnh AC-3

function AC-3(*csp*) **returns** the CSP, possibly with reduced domains

inputs: *csp*, a binary CSP with variables $\{X_1, X_2, \dots, X_n\}$

local variables: *queue*, a queue of arcs, initially all the arcs in *csp*

while *queue* is not empty **do**

$(X_i, X_j) \leftarrow \text{REMOVE-FIRST}(\textit{queue})$

if RM-INCONSISTENT-VALUES(X_i, X_j) **then**

for each X_k **in** NEIGHBORS[X_i] **do**

 add (X_k, X_i) to *queue*

function RM-INCONSISTENT-VALUES(X_i, X_j) **returns** true iff remove a value

removed \leftarrow false

for each x **in** DOMAIN[X_i] **do**

if no value y in DOMAIN[X_j] allows (x, y) to satisfy constraint(X_i, X_j)

then delete x from DOMAIN[X_i]; *removed* \leftarrow true

return *removed*

Tìm kiếm cục bộ cho CSP (1)

- Mục đích: Để sử dụng các phương pháp tìm kiếm cục bộ (ví dụ: hill-climbing, simulated annealing) cho bài toán thỏa mãn ràng buộc
- Mỗi trạng thái (của không gian tìm kiếm) ứng với một phép gán *đầy đủ* giá trị cho *tất cả* các biến
 - Không gian tìm kiếm bao gồm cả các trạng thái trong đó các ràng buộc bị vi phạm
 - Dịch chuyển trạng thái = Gán giá trị mới cho các biến
- Trạng thái đích = Trạng thái trong đó tất cả các ràng buộc được thỏa mãn

Tìm kiếm cục bộ cho CSP (2)

- Quá trình tìm kiếm

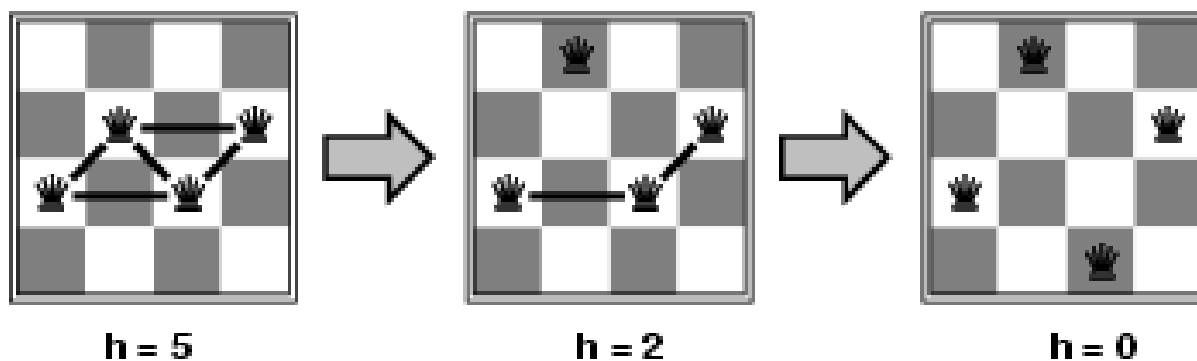
- Lựa chọn biến để gán giá trị mới? → Chọn *ngẫu nhiên một biến mà giá trị của nó vi phạm các ràng buộc*
- Đối với một biến, lựa chọn giá trị mới? → Dựa theo chiến lược **min-conflicts**: chọn giá trị mà nó *vi phạm ít nhất các ràng buộc*

- Ví dụ: Áp dụng phương pháp tìm kiếm cục bộ Hill-climbing, với hàm ước lượng $h(n)$ = tổng số các ràng buộc bị vi phạm

- Trạng thái (lân cận) tiếp theo chuyển đến (được xét) là trạng thái ứng với giá trị hàm $h(n)$ tốt hơn (=ít ràng buộc bị vi phạm hơn)

Ví dụ bài toán 4 quân hậu

- Các trạng thái: ứng với vị trí của 4 quân hậu nằm ở 4 cột
 - Chỉ có duy nhất một quân hậu ở mỗi cột
 - Không gian trạng thái gồm tổng cộng $(4 \times 4 \times 4 \times 4 =)$ 256 trạng thái
- Các hành động: di chuyển của một quân hậu (nào đó) trong một cột (của nó)
- Trạng thái đích: không có quân hậu nào ăn nhau
- Hàm ước lượng: $h(n)$ = tổng số các cặp hậu ăn nhau



Thỏa mãn ràng buộc – Tổng kết

- Trong một bài toán thỏa mãn ràng buộc (CSP) :
 - Mỗi trạng thái tương ứng với một phép gán giá trị cho các biến
 - Kiểm tra trạng thái đích = Kiểm tra tập các ràng buộc đối với các giá trị của các biến
- Phương pháp quay lui (Backtracking) = Tìm kiếm theo chiều sâu (Depth-first search) với mỗi nút tương ứng với một phép gán giá trị cho một biến
- Các chiến lược chọn thứ tự xét các biến và thứ tự xét các giá trị đối với một biến sẽ ảnh hưởng quan trọng đến hiệu quả của quá trình tìm lời giải
- Phương pháp tìm kiếm tiến (Forward checking) cho phép ngăn chặn các phép gán giá trị đưa đến các thất bại sau đó
- Lan truyền ràng buộc (ví dụ: phương pháp phù hợp cạnh – Arc consistency) cho phép giới hạn hơn nữa các giá trị hợp lệ và cho phép phát hiện các mâu thuẫn
- Phương pháp tìm kiếm cục bộ sử dụng chiến lược Min-conflicts thường hiệu quả trong nhiều bài toán thực tế