

Chapitre 2 : Les approches classiques de modélisation des systèmes complexes

Abdelhak Merizig

Table des matières



| | |
|---------------------------------------|----|
| Objectifs | 3 |
| Introduction | 4 |
| I - Les approches classiques | 5 |
| 1. Le paradigme analytique | 5 |
| 1.1. Les méthodes linéaires | 6 |
| 2. Le paradigme systémique | 9 |
| 2.1. Les méthodes non linéaires | 10 |
| II - Évaluation du cours | 20 |
| III - Conclusion | 22 |
| Solutions des exercices | 23 |
| Références | 25 |

Objectifs



Objectifs : à la fin de ce cours l'étudiant sera capable de :

- Définir les paradigmes utilisés pour résoudre un système complexe.
- Décrire les outils informatiques pour l'exploration de systèmes complexes.
- Reconnaître la différence entre méthodes linéaires et non-linéaires.
- Formuler un phénomène réel par un modèle mathématique.

Pré requis : l'étudiant doit avoir :

- Des notions de base sur la résolution mathématiques des problèmes reliés à la dynamique.
- Des notions de base en programmation.

Introduction



L'augmentation exponentielle des informations dans le monde réel et spécialement dans les entreprises rend le processus de traitement de données très compliqué en terme de coût ou temps de calcul. Les approches classiques proposées sont basées sur des équations mathématiques dans l'analytique ou à base des systématique. De plus, les composants qui font partie du système complexe ont interagi en deux façons générales : linéaire et non-linéaire.

Les approches classiques



Le paradigme analytique
Le paradigme systémique

5
9

1. Le paradigme analytique

Les méthodes linéaires

6

Ce paradigme donne la possibilité de décomposer le système en éléments simples cela rend l'étude des interactions entre ses éléments simples. De plus, le changement d'une seule variable à la fois permet de déduire les propriétés quant au comportement du système.

p.25 ↗

1.1. Les méthodes linéaires

Pendule

6

Méthode simplexe

7

Exercice : Utilités des méthodes linéaires.

9

Ses méthodes sont basées sur l'utilisation des formules mathématiques pour modéliser un phénomène quelconque. Dans cette section nous exprimons deux méthodes afin de résoudre un système complexe.

1.1.1. Pendule

Le pendule représente un phénomène complexe qu'on peut le considérer complexe. De plus, il se peut classer comme un système linéaire et non-linéaire lorsqu'on entre des forces supplémentaires ^{p.26 ↗}. Le pendule simple consiste en une masse ponctuelle m à l'extrémité d'une tige sans masse de longueur l pouvant pivoter librement autour de son extrémité supérieure. La question est de déterminer la fréquence propre d'oscillation de ce pendule, on peut dire que le système de pendule est un Système Dynamique ^{p.25 ↗}, et on peut modéliser ce système par deux modèles (mathématique simple ou plus profond):

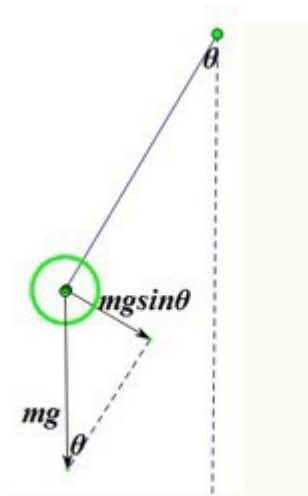


Figure 1. Pendule simple

a) Un modèle mathématique simple :

Ce modèle est utilisé pour décrire les petites oscillations ($\varphi \leq 10^\circ$), le pendule peut être représenté par l'équation suivante:

$$\varphi''(t) = \frac{-g}{l} \varphi(t)$$

b) un modèle plus profond :

Pour des oscillations plus importantes ($\varphi \geq 10^\circ$) on utilise un modèle plus précis :

$$\varphi''(t) = -\frac{g}{l} \sin(\varphi(t))$$

Le modèle représente le pendule de plus réalisme aurais il reste toujours théorique car ce modèle ne prend en considération les forces frictions qui mènent vers l'arrêt de pendule avec le temps.

c) Un modèle plus réaliste :

En prenant en compte les forces des frictions, le pendule peut être représenté par le modèle suivant :

$$\varphi''(t) = -\frac{g}{l} \sin(\varphi(t) - F(\varphi'(t)))$$

Où F : représente les forces de friction (une fonction non-linéaire de la vitesse angulaire).

Ce modèle est plus profond (plus complexe) mais il représente mieux la réalité d'un pendule.

1.1.2. Méthode simplexe

L'algorithme du simplexe est un algorithme de résolution des problèmes d'optimisation linéaire. Il a été introduit par George Dantzig à partir de 1947. C'est probablement le premier algorithme permettant de minimiser une fonction sur un ensemble défini par des inégalités. Cet algorithme été la méthode la plus utilisée pour résoudre les problèmes d'optimisation linéaire ^{p.25} ↵ .

- Algorithme de résolution :

Pour modéliser un système complexe par la méthode de simplexe on doit définir la forme standard ^{p.25} ↵ :

$$\max \sum_{j=1}^n c_j x_j \quad \text{s. c.} \begin{cases} \sum_{j=1}^n a_{ij} x_j \leq b_i & (i=1,2,\dots,m) \\ x_j \geq 0 & (j=1,2,\dots,n) \end{cases}$$

On applique les étapes suivantes :

1. Ajouter des variables d'écart x_{n+1}, \dots, x_{n+m} :

$$x_{n+i} = b_i - \sum_{j=1}^n a_{ij} x_j \quad (i=1,2,\dots,m) \quad z = \sum_{j=1}^n c_j x_j$$

2. première solution réalisable : créer variables de base et hors base

3. s'il existe un coefficient positif dans z, soit x_i la variable correspondante, sinon aller à 8.

4. calculer la valeur maximale de x_i de manière à ce que les variables de base restent positives ou nulles. Soit x_j une des variables de base qui s'annule

5. faire entrer x_i en base, faire sortir x_j de la base

6. exprimer les variables de base en fonction des variables hors base

7. retourner en 3.

8. on est à l'optimum. Les variables de base définissent la solution optimale

Exemple : Usine de fabrication des jouets

Une usine fabrique deux types de jouets en bois : des soldats et des camions. Les données de ce problème sont représentées dans le tableau suivant :

Par semaine l'usine dispose de toutes les matières premières nécessaires à la fabrication et ne dispose que de 100h de finition et 80h de menuiserie. La demande des camions et des soldats est illimitée. Déterminer le plan de production qui maximise le profit de l'usine.

| | P. vente | Mat. prem | Frais gén. | Menuiserie | Finition |
|----------|----------|-----------|------------|---------------|---------------|
| 1 soldat | 27 DA | 10 DA | 14 DA | 1h de travail | 2h travail |
| 1 camion | 21 DA | 9 DA | 10 DA | 1h de travail | 1h de travail |

solution :

X_1 = le nombre de soldats produits chaque semaine,

X_2 = le nombre de camions produits chaque semaine,

D'après les données, on a les contraintes suivantes :

$$X_1 + x_2 \leq 80$$

$$2x_1 + x_2 \leq 100$$

$$X_1 \geq 0, x_2 \geq 0$$

La fonction à maximiser est :

$$(27 - 10 - 14)x_1 + (21 - 9 - 10)x_2$$

Ce qui donne le programme linéaire suivant :

$$\text{Max } 3x_1 + 2x_2$$

$$X_1 + x_2 \leq 80$$

$$2x_1 + x_2 \leq 100$$

$$X_1 \geq 0, x_2 \geq 0$$

Le programme est de dimension deux, donc, on le résout graphiquement :

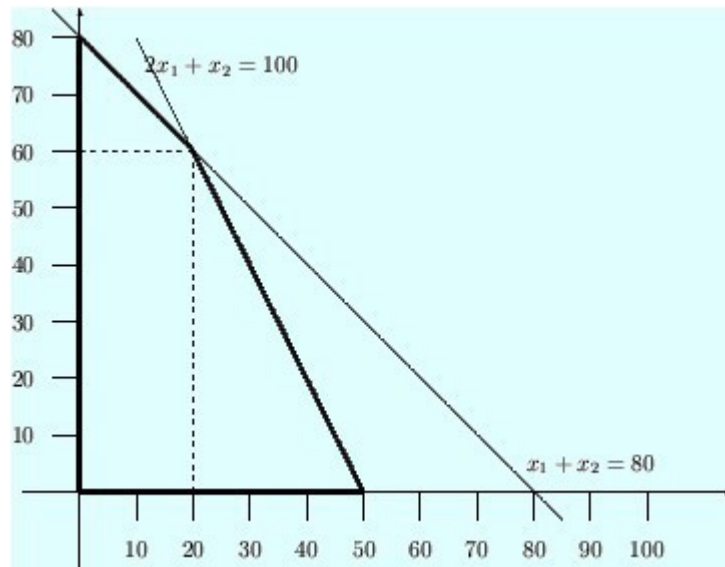


Figure 2. Solution graphique du système.

le sommet (0 80) donne une valeur égale à : $3 \times 0 + 2 \times 80 = 160$,

le sommet (20 60) donne une valeur égale à : $3 \times 20 + 2 \times 60 = 180$,

le sommet (50 0) donne une valeur égale à : $3 \times 50 + 2 \times 0 = 150$,

et le sommet (0 0) donne une valeur égale à : $3 \times 0 + 2 \times 0 = 0$.

Le meilleur plan de production est donc : 20 soldats et 60 camions.

1.1.3. Exercice : Utilités des méthodes linéaires.

[solution n°1 p.23]

Pour quel but on utilise les méthodes linéaires ?

- Résoudre un problème mathématique.
- Modéliser un phénomène réel par des équations.
- Trouver la solution optimale.

2. Le paradigme systémique

Les méthodes non linéaires

10

Ce paradigme est basé sur les interactions entre les composants du système et s'appuie sur la perception globale. De plus, il modifie des groupes de variables simultanément, cette approche efficace lorsque les interactions sont non linéaires et fortes^{p.25 ↗}.

2.1. Les méthodes non linéaires

Réseaux Bayésiens

11

Les systèmes multi-agents

17

Ces méthodes ont conçu pour résoudre un problème complexe qui déroule de façon imprévisible lorsqu'on donne les mêmes valeurs le système il se peut donner de différents résultats. Dans cette section, nous présentons une méthode de résolution d'un système complexe donné comme suit :

2.1.1. Réseaux Bayésiens

| | |
|--|----|
| Les Réseaux Bayésiens combinent deux aspects | 11 |
| La d-séparation | 11 |
| Définition mathématique d'un Réseau Bayésien | 12 |
| Schéma d'inférence dans les RB | 12 |
| Apprentissage des réseaux Bayésiens | 14 |

Un réseau bayésien (RB) est un graphe orienté acyclique qui représente une certaine relation (relations de causalité) entre les variables d'une certaine connaissance domaine ; chaque nœud représente une variable aléatoire associée avec une table de probabilité conditionnelle caractérisant ses paramètres

p.26 ↗

a) Les Réseaux Bayésiens combinent deux aspects

| | |
|---------------------|----|
| Partie qualitative | 11 |
| Partie quantitative | 11 |

i Partie qualitative

Cette partie exprime les indépendances conditionnelles entre variables et des liens de causalité. Cela se fait grâce à un graphe orienté acyclique dont les nœuds correspondent à des variables aléatoires qui ne peuvent prendre qu'un ensemble fini de valeurs VRAI et FAUX.

ii Partie quantitative

constituée des tables de probabilités conditionnelles de chaque variable étant donnés ses parents dans le graphe.

b) La d-séparation

Les indépendances conditionnelles encodées par le graphe sont calculables grâce à un critère formel que l'on appelle la d-séparation. Dans un RB, tout nœud V est conditionnellement indépendant de ses non-descendants, sachant ses parents c'est-à-dire :

$$P(V | A(V), P(V)) = P(V/P(V))$$

Où $A(V)$: n'importe quel ensemble de nœuds qui ne sont pas des descendants de V , et $P(V)$ l'ensemble des parents de V .

→ L'ensemble des valeurs $P(V/P(V))$, avec V parcourant l'ensemble des nœuds du graphe suffit à déterminer complètement l'ensemble : de toutes les probabilités conditionnelles d'un RB compte tenu de la structure particulière du graphe

c) Définition mathématique d'un Réseau Bayésien

Définition

Un RB est un couple (G,P) tels que :

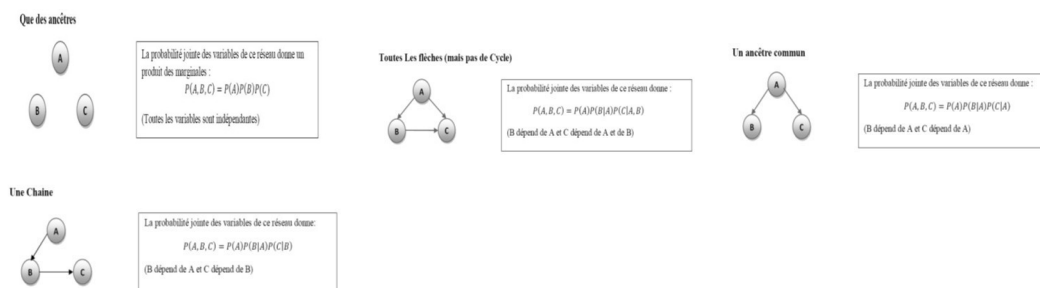
- G : un graphe orienté sans cycle, et chaque nœud dans le graphe est associée une variable aléatoire.
- V = {v1, ..., vk} l'ensemble des variables aléatoires telles que :

$$P(v_1, \dots, v_k) = \prod_{i=1}^k P(v_i | P(v_i))$$

- où P (vi) l'ensemble des variables associées aux parents du nœud vi.

Exemple : Relations de dépendances dans un réseau bayésien.

Figure 3. Relations de dépendances dans un réseau bayésien.



Note: Si on ne tient pas compte des indépendances il faudra écrire la distribution jointe des probabilités selon la règle de chaînage des probabilités :

$$P(X_1, X_2, \dots, X_n) = \prod_{i=1}^n P(X_i | X_{i-1}, \dots, X_1)$$

d) Schéma d'inférence dans les RB

L'inférence bayésienne est particulièrement utile dans les problèmes d'induction, car se basant sur des cas particuliers et n'a de validité qu'en terme probabiliste. On cherche à induire sur un système bayésien aussi bien les conséquences que les causes, du graphe de dépendance.

Les règles de la logique des probabilités utilisées sont les suivantes :

- La règle d'addition :

$$P(A \cup B | C) = P(A | C) + P(B | C) - P(A \cap B | C)$$

- La règle de multiplication :

$$P(A \cap B) = P(A | B) P(B) = P(B | A) P(A)$$

Le théorème de Bayes peut être dérivé en mettant à profit la symétrie de la règle de multiplication

$$P(A | B) = \frac{P(B | A) P(A)}{P(B)}$$

Le théorème de Bayes permet d'inverser les probabilités :

- si l'on connaît les conséquences d'une cause, l'observation des effets permet de remonter aux causes, c'est l'effet d'induction « bottom-up ».
- l'induction « top-down » déduire les conséquences à partir des cause.

Schéma d'inférence causale (descendante):

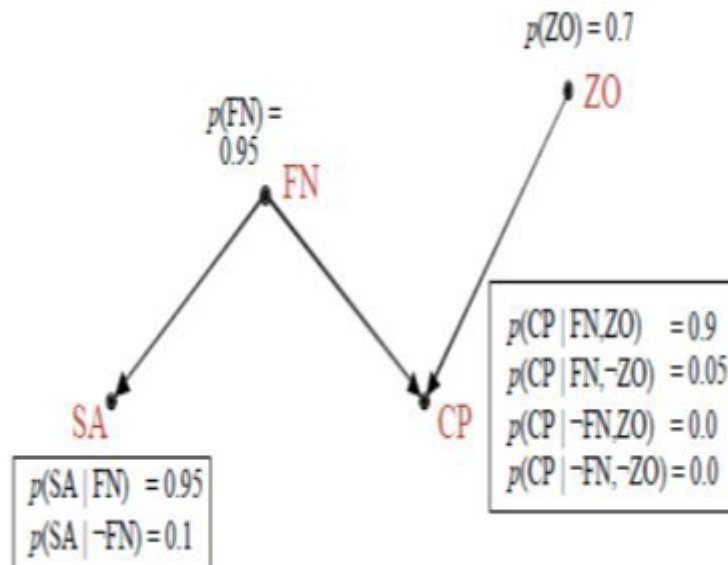


Figure 4. Relations de dépendances dans un réseau bayésien.

e) Apprentissage des réseaux Bayésiens

| | |
|--|----|
| Apprentissage avec structure connue et données complètes | 14 |
| Apprentissage en présence de données incomplètes et structure connue | 14 |
| Application des réseaux Bayésiens | 16 |
| Exercice : Modèle de Bayes | 16 |

Un réseau bayésien comprend à la fois une structure et des paramètres associés aux nœuds de cette structure (probabilités conditionnelles). L'apprentissage consiste à estimer les paramètres et parfois aussi la structure à partir de données et éventuellement de connaissances préalables (à priori).

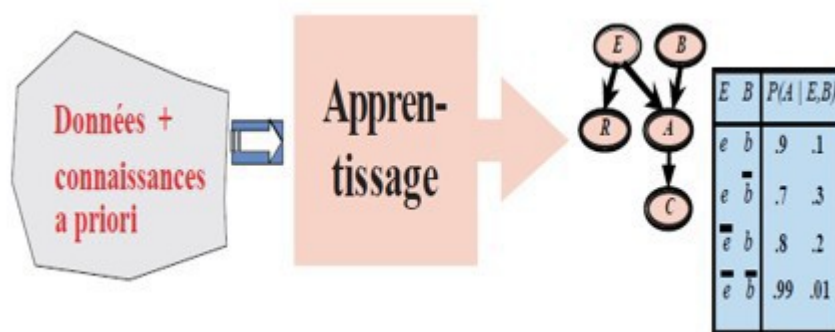


Figure 5. Étape d'apprentissage des réseaux Bayésiens.

i Apprentissage avec structure connue et données complètes

- On dispose d'un certain nombre d'observations sur les variables (exemples du comportement de la structure du réseau)
- On cherche à estimer les probabilités conditionnelles nécessaires

La méthode la plus utilisée est l'estimation statistique de la probabilité d'un événement par la fréquence d'apparition de l'événement dans la base de données.

ii Apprentissage en présence de données incomplètes et structure connue

L'algorithme EM s'applique à la recherche des paramètres en répétant jusqu'à convergence les deux étapes Espérance (Expectation) et Maximisation décrites ci-dessous :

- Initialiser θ
- Répéter :

→ Espérance : estimation des $N_{i,j,k}$ manquants en calculant leur moyenne conditionnellement (par rapport) aux données et aux paramètres courants du réseau :

→ Maximisation : remplacer les $N_{i,j,k}$ manquants par leur valeur moyenne calculée précédemment et calculer les nouveaux paramètres θ_{t+1} par maximum de vraisemblance :

Jusqu'à : différence entre les θ_{t+1} et θ_t inférieure ϵ

Exemple

soit le réseau bayésien et la base d'exemples définis ci-dessous (où «?» représente une donnée manquante) :

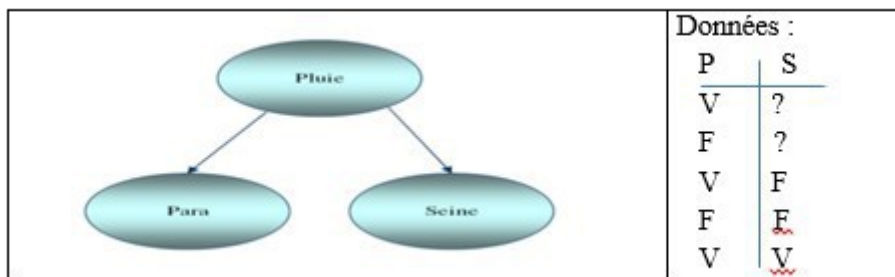


Figure 6. Exemple illustratif.

Pluie (P) = «il pleut à Rouen»

Seine (S) = «la Sein déborde»

Para (Pr) = «j'ai sorti mon parapluie»

Considérons l'estimation des paramètres $P(S|P)$ et $P(S|\neg P)$ avec l'algorithme EM en utilisant respectivement $P(\neg S|P)$ et $P(\neg S|\neg P)$

Initialisation : Les valeurs initiales des paramètres sont choisies aléatoirement

$$P_0(S|P) = \theta_{S,P}, \theta_{\neg S,P} = 0.3$$

$$P(S|\neg P) = \theta_{S,\neg P}, \theta_{\neg S,\neg P} = 0.4$$

| p S | P(S P) | P(!S P) | P(S !P) | P(S !P) |
|------|--------|---------|---------|---------|
| V ? | 0.3 | 0.7 | 0 | 0 |
| F ? | 0 | 0 | 0.4 | 0.6 |
| V V | 0 | 1 | 0 | 0 |
| F F | 0 | 0 | 0 | 1 |
| V V | 1 | 0 | 0 | 0 |
| N*ij | 1.3 | 1.7 | 0.4 | 1.6 |

M_step :

$$\theta_{1S,P,V} = (1.3/(1.3+1.7)) = 0.433$$

$$\theta_{1S,-P,V} = (0.4/(0.4+1.6)) = 0.2$$

Après quelques itérations l'algorithme converge vers $P(S|P)=0.5$ et $P(S|\neg P)=0$ avec $\epsilon = 0.001$.

iii Application des réseaux Bayésiens

- Filtrage du pourriel concept initialisé par l'utilisation des réseaux bayésiens pour le filtrage du courrier indésirable s'est popularisée et figure parmi les applications les plus réussies et populaires des réseaux bayésiens.
- Assistance aux handicapés PAM-AID est un système d'assistance au déplacement en intérieur à destination des personnes à mobilité réduite. Concrètement, le système consiste en un déambulateur motorisé pouvant détecter les obstacles (murs, objets,...) lors du déplacement.
- L'assistance au pilotage C'est le cas pour la NASA avec le système VISA servant au diagnostic des systèmes de propulsion.
- Décisions tactiques SAIP (Semi-Automated IMINT Processing) est un programme du DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency) visant à fournir au commandement militaire une information tactique à partir d'images haute définition. Des systèmes tels que les réseaux bayésiens interviennent dans le pré-traitement des images afin de déterminer les priorités tactiques des éléments sur le terrain.
- Aide à l'interaction Plus récent, le programme Genoa II , issu lui aussi de la recherche au DARPA, a pour objectif l'amélioration des interactions homme-machine dans le cadre de la lutte anti-terroriste et emploie à ces fins divers outils bioinformatiques ainsi que la modélisation bayésienne.

iv Exercice : Modèle de Bayes

[solution n°2 p.23]

Combien de termes sont nécessaires pour construire un modèle bayes?

2.1.2. Les systèmes multi-agents

| | |
|--|----|
| Notion d'agent | 17 |
| Système multi agent | 18 |
| Exercice : Les moyens de perception dans les systèmes multi agents | 19 |

Les SMAs sont représentés comme étant des organisations conçues pour simuler les systèmes ou des comportements complexes qui se base sur un phénomène réel. De plus, ils ont connues comme des systèmes qui travaillent de façon collectives afin d'arriver à une solution globale.

a) Notion d'agent

Définition

Ce concept est connu depuis longtemps et est utilisé dans plusieurs domaine tel que : l'industrie, la médecine, l'éducation. Dans la littérature, il existe plusieurs définitions de l'agent. Parmi ces définitions on a choisi :

p.25 ↗

D'après (Hamza et al., 2012), un agent est défini comme une entité autonome qui s'efforce d'atteindre les objectifs qu'on conçoit

p.25 ↗

Selon (Maes, 1994), un agent est un système informatique qui se trouve dans un environnement complexe et dynamique, et qui aperçoit et réagit de façon autonome, afin de réaliser les buts pour lesquels il a été créé

p.25 ↗

En outre, on peut voir le concept d'agent en plusieurs formes selon les besoins des applications.

Parmi ces formes nous citons *p.25 ↗* :

- *Autonomie* : un agent peut agir sans intervention extérieur (humaines ou machines) afin de prendre des décisions.
- *Comportement social* : un agent à la possibilité de communiquer et d'interagir avec les autres éléments de son environnement.
- *Réactivité* : un agent peut apercevoir et ensuite il peut réagir aux différents événements sur son environnement.
- *Proactivité* : un agent capable de prendre des initiatives afin de s'adapter au changement de son environnement.
- *Persistance* : un agent doit suivre son but sans interruption jusqu'à l'achèvement de ce dernier.
- *Raisonnement et rationalité* : un agent capable de raisonner rationnellement afin de choisir les meilleures actions à entreprendre pour optimiser sa productivité.
- *Mobilité* : un cas particulier d'agent logiciel est l'agent mobile qui a la possibilité de se déplacer

d'une machine à une autre, afin d'exécuter des tâches de natures distribuées.

b) Système multi agent

Définition

Un système multi-agent (SMA) est un système composé par une collection d'agents qui coopère entre eux afin d'arriver à résoudre un problème commun. Ces agents interagissent entre eux indirectement (en agissant sur l'environnement) ou directement (à travers la communication et la négociation). Les agents peuvent décider de coopérer pour un objectif commun ou ils peuvent travailler séparément pour servir leurs propres intérêts.

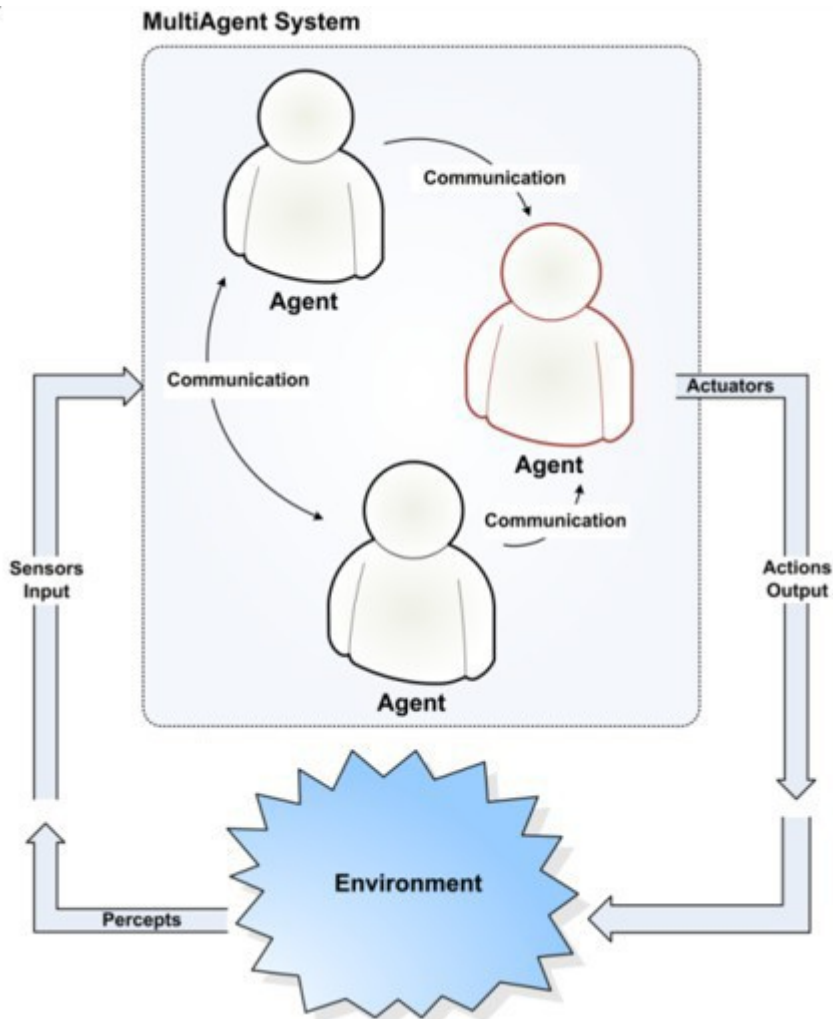


Figure 7. Système multi agents

Exemple : Système de composition de services

Dans notre exemple, le but principal est de simuler le processus de composition de services par un ensemble d'agents ; pour cela chaque agent est représenté par un comportement et caractéristique de services donnés comme suit

p.25 ↗ :

- Chaque agent à un URL, les valeurs d'entrées, valeur(s) de sortie(s), une description plus les valeurs de qualité services (QoS) ; temps de réponse, le coût, la réputation, la fiabilité, la pertinence, et la disponibilité de service.
- On suppose qu'on a trois types de services pour un package touristique qui sont (service de hôtellerie, restaurant et un service de location de voiture), et chaque type contient 10 services, on associe un agent pour chaque service.
- Pour arriver aux résultats final (service composite) chaque agent se doivent communiquer avec ses voisins afin de choisir les services qui rendre l'ensemble de composition efficace en terme de temps et de coût.

O b j e c t i v e :

trouver la meilleure composition à travers des valeurs de QoS, pour cela chaque agent envoi des propositions aux toutes les voisins (agents) qu'ont les services qui lui s'intéresse. Ses demandes peuvent retourner un accord ou un refus de l'offre initiale à base des connaissances sur les services (expertise) et à base l'un intervalle de confiance

p.25 ↗ .

Où X représente la moyenne, t multiplier entre 1.5 et 2, s valeur courante, n nombre de données.

En cas de conflit entre les choix d'agent on applique la relation de dominance donnée comme suit :

Où '>' signifie la relation de dominance, X et Y sont des services, xi et yi représentent les valeurs QoS.

c) Exercice : Les moyens de perception dans les systèmes multi agents

[solution n°3 p.23]

Quels sont les instruments utilisés pour percevoir et agir sur l'environnement ?

- Capteurs et actionneurs
- Capteurs
- Percevoir
- Aucun des mentionnés

Évaluation du cours



Exercice

[solution n°4 p.23]

Combien de types d'agents existe-t-il en intelligence artificielle ?

Exercice

[solution n°5 p.24]

Pour simuler un Système Complexe quel est le meilleur type d'agent ?

- Réactif.
- Cognitif.
- On ne peut pas dire qu'un type mieux que l'autre.

Exercice

[solution n°6 p.24]

Quand on peut dire le problème du pendule est non-linéaire ?

- Lorsqu'on inclure des forces de friction.
- Le cas des petits angles.
- Dépend de matière du fil.

Exercice : Associer les définitions au groupe qui lui correspond

[solution n°7 p.24]

Réseaux Bayésiens

Méthode simplexe

Méthodes linéaires

Modèle de Markov caché

Pendule

Systemes multi-agents

| Paradigme analytique | Paradigme systémique |
|----------------------|----------------------|
| | |

Conclusion



Ce chapitre donne un survol sur les méthodes utilisées pour simuler résoudre problèmes classés comme complexes en utilisant les machines à l'aide des approches classiques qui était présentées dans ce chapitre. En outre, ses approches facilitent les tâches de comprendre la nature des systèmes dans les différentes situations. Par contre ses méthodes prennent un temps de calculer très important afin d'éviter ce problème nous devons réduire l'espace de recherche.

Solutions des exercices



> Solution n° 1

Exercice p. 9

Pour quel but on utilise les méthodes linéaires ?

- Résoudre un problème mathématique.
- Modéliser un phénomène réel par des équations.
- Trouver la solution optimale.

> Solution n° 2

Exercice p. 16

Combien de termes sont nécessaires pour construire un modèle bayes ?

3

Les trois termes requis sont une probabilité conditionnelle et deux probabilités inconditionnelles.

> Solution n° 3

Exercice p. 19

Quels sont les instruments utilisés pour percevoir et agir sur l'environnement ?

- Capteurs et actionneurs
- Capteurs
- Percevoir
- Aucun des mentionnés

Un agent est tout ce qui peut être perçu comme percevant et agissant sur l'environnement à travers les capteurs et les actionneurs.



> **Solution n°4**

Exercice p. 20

Combien de types d'agents existe-t-il en intelligence artificielle ?

4

Les quatre types d'agents sont les agents Simple réflexe, Modèle, Objets et Utilitaire.

> **Solution n°5**

Exercice p. 20

Pour simuler un Système Complexe quel est le meilleur type d'agent ?

- Réactif.
- Cognitif.
- On ne peut pas dire qu'un type mieux que l'autre.

Tout dépend type de problème traité.

> **Solution n°6**

Exercice p. 20

Quand on peut dire le problème du pendule est non-linéaire ?

- Lorsqu'on inclure des forces de friction.
- Le cas des petits angles.
- Dépend de matière du fil.

> **Solution n°7**

Exercice p. 21

| Paradigme analytique | Paradigme systémique |
|----------------------|------------------------|
| Pendule | Modèle de Markov caché |
| Méthode simplexe | Réseaux Bayésiens |
| Méthodes linéaires | Systèmes multi-agents |

Références

Bitam, 2012

Bitam. S., "Modélisation et simulation Cours master 1", Université de Biskra, 2012.

Christophe Gonzales

Christophe Gonzales, algorithme du simplexe, support de cours LIP6 – Université Paris 6, France.

Dantzig, 1990

G.B. Dantzig (1990). Origins of the simplex method. In G. Nash, éditeur, A History of Scientific Computing, ACM Press Hist. Ser., pages 141–151. ACM Press, Reading, MA, États-Unis.

Frédéric Lasfargues,

Christophe Dalin ., 2007

Frédéric Lasfargues, Christophe Dalin, «Une introduction à l'approche systémique- Appréhender la complexité », certu : les rapports d'étude. 2007

Hamza et al., 2012

Hamza, S., Aïcha-Nabila, B., Okba, K., & Youssef, A. (2012). "A Cloud computing approach based on mobile agents for Web services discovery". September 2012, In Second International Conference on Innovative Computing Technology (INTECH), (pp. 297-304). IEEE.

Hamza et Okba, 2015

Hamza, S. Okba, K. "Découverte de services web via le Cloud computing à base d'agents mobiles", thèse de doctorat, Université de Biskra, 2015.

Maes, 1994

Maes, P. (1994) "Agents that reduce work and information overload", Communications of the ACM, Vol. 37, No. 7, pp. 30-40.

Merizig, A et al., 2018

Merizig, A., Kazar, O., Lopez-Sanchez, M.: A dynamic and adaptable service composition architecture in the cloud based on a multi-agent system. Int. J. Inf. Technol. Web. Eng.13(1), 50–68 (2018).

Mlungisi, 2008

Mlungisi, d. (2008) "Agents, Agent architectures and Multi-agent systems", Master of science, Ehlers, E. M., Oosthuizen, O.L., Johannesburg, 143 p

Simon ,Weber 2007

Simon, C., Weber, P., & Levrat, E. (2007). Bayesian networks and evidence theory to model complex systems reliability. *Journal of Computers (JCP)*, 2(1), 33-43.

Sontag., 1981

Sontag, E. (1981). Nonlinear regulation: The piecewise linear approach. *IEEE Transactions on automatic control*, 26(2), 346-358.