



# Verteilte Künstliche Intelligenz – Verteile Problemlösung und Planung I

Ingo J. Timm, Jörn Witte

VAK 03-710.03  
Universität Bremen



# Gliederung

- Rückblick KI 1: *Planen* und *Planen und Agieren*
- Kooperative Problemlösung und Planen in der VKI
- Formale Definitionen auf der Basis von LORA
- Das „Model of Cooperation“ von Wooldridge
- Resumeé

# Was war das mit Planen (KI-1)?

- Repräsentation von Plänen
  - STRIPS
  - ADL
  - PDDL
- Algorithmik
  - Vorwärtssuche
  - Rückwärtssuche
  - Zustandsbasierte Suche
  - Partial-Order-Planning
  - Graphplan
  - Hierarchical Task Networks



# Working Together – Zwei Gedanken von Wooldridge

- Agents in a multiagent system may have been designed and implemented by different individuals, with different goals. They therefore may not share common goals, and so the encounters between agents in a multiagent system more closely resemble *games*, where agents must act strategically in order to achieve the outcome they most prefer.
- Because agents are assumed to be acting autonomously (and so making decisions about what to do at *run time*, rather than having all decisions hardwired in at design time), they must be capable of *dynamically* coordinating their activities and cooperating with others. In traditional distributed and concurrent systems, coordination and cooperation are typically hardwired in at design time.



# Was bedeutet Planen in der VKI?

- Was ist das besondere an der VKI?
  - Skalierbarkeit
  - Verteilung von Expertise
  - Adäquatere Abbildung der Realität
  
- Welche Konsequenzen ergeben sich darauf für die Planung in Multiagentensystemen?
  - Load-Balancing (bzgl. Skalierbarkeit)
  - Planen von Aktionen und Aktionssequenzen, die in Gruppen durchgeführt werden müssen (bzgl. verteilter Expertise)
  - Verteilte Auslösung gemeinsamer Ziele und Entwicklung von Plänen (Abbildung der Realität)



# Kooperatives Problemlösen

*Cooperative Distributed Problem Solving (CDPS) studies how a loosely-coupled network of problem solvers can work together to solve problems that are beyond their individual capabilities. Each problem-solving node in the network is capable of sophisticated problem-solving and can work independently, but the problems faced by the nodes cannot be completed without cooperation. Cooperation is necessary because no single node has sufficient expertise, resources, and information to solve a problem, and different nodes might have expertise for solving different parts of the problem.*



# Historische Entwicklung von CDPS

- Früher ist man davon ausgegangen (cooperative problem solving), dass
  - die Agenten benevolent sind,
  - die Agenten implizit ein gemeinsames Ziel teilen und
  - kein Konfliktpotential zwischen den Agenten besteht.
- Daher wurden Systeme entwickelt, in denen
  - Agenten nach Möglichkeit immer kooperiert haben,
  - auch wenn sie dabei „Schaden“ nehmen (vgl. Individual Rationality)
- Heute geht man vermehrt davon aus (distributed problem solving), dass
  - Multiagentensysteme eine Gesellschaft von „Self-Interested“ Agenten sind,
  - nicht angenommen werden kann, dass diese gemeinsame Ziele teilen und
  - eine Kooperation bzw. Koordination ausgehandelt werden muss.



# Die Sichtweise vom Problem aus: CDPS

## ■ Vorgehen

- ☐ Problem Decomposition
- ☐ Subproblem solution
- ☐ Answer synthesis

## ■ Hieraus resultierende Fragen:

- ☐ Wie kann ein Problem in kleinere Aufgaben zerlegt werden, die verteilt werden können?
- ☐ Wie kann eine Problemlösung effektiv von Teilaufgabenlösungen synthetisiert werden?
- ☐ Wie können die übergreifenden Problemlösungsaktivitäten der Agenten so optimiert werden, dass die Lösung das maximal effiziente Zusammenspiel der Agenten widerspiegelt?
- ☐ Welche Techniken können genutzt werden, um die Aktivitäten der Agenten zu koordinieren, so dass keine destruktiven und ggf. nutzlosen Interaktionen entstehen sowie die Effizienz maximiert wird?





# Die Sichtweise von den Agenten aus

- Model for Cooperation [Wooldridge 2000]
  - Recognition  
Ein Agent erkennt, dass es die Notwendigkeit oder die Möglichkeit zur Kooperation gibt – Repräsentationsproblem!
  - Team formation  
Im System werden die möglichen Akteure identifiziert und es werden Vereinbarungen zur Lösung getroffen – Koordinationsproblem!
  - Plan formation  
Verhandlung über einen „joint plan“ – Planungsproblem!
  - Team action  
Koordinierte Durchführung des Plans – Koordinationsproblem!



# Formale Definitionen (1/5)

## ■ Mentale Kategorien

- Agent  $i$  hat Überzeugung  $\varphi$  (Beliefs)  
( $Bel\ i\ \varphi$ )
- Agent  $i$  hat Absicht  $\varphi$  (Intentions)  
( $Int\ i\ \varphi$ )
- Agent  $i$  hat Ziel  $\varphi$  (Desires)  
( $Des\ i\ \varphi$ )

## ■ Aktionen

- Aktion  $\alpha$  hat stattgefunden  
( $Happens\ \alpha$ )
- Aktion  $\alpha$  hat NICHT stattgefunden  
( $Doesn't\ \alpha \equiv A\Box\neg (Happens\ \alpha)$ )
- Aktion  $\alpha$  ist möglich, d.h. es gibt mindestens einen möglichen Folgezustand, in dem ( $Happens\ \alpha$ ) gültig ist und nach Anwendung von  $\alpha$  gilt  $\varphi$   
( $Achvs\ \alpha\ \varphi$ )
- Genau die Gruppe  $g$  von Agenten ist notwendig, um die Aktion  $\alpha$  durchzuführen  
( $Agts\ g\ \alpha$ )
- Genau der Agent  $i$  ist notwendig, um die Aktion  $\alpha$  durchzuführen  
( $Agt\ i\ \alpha$ )



## Formale Definitionen (2/5)

- Überzeugungen für Gruppen werden so definiert, dass jeder Agent  $i$  einer Gruppe  $g$  die Überzeugung  $\varphi$  teilt (everyone-believe).

$$(E - Bel\ g\ \varphi) \equiv \forall i \cdot (i \in g) \Rightarrow (Bel\ i\ \varphi)$$

$$(E - Bel^k\ g\ \varphi) \equiv \begin{cases} (E - Bel\ g\ \varphi) & \text{if } k = 1 \\ (E - Bel\ g\ (E - Bel^{k-1}\ g\ \varphi)) & \text{otherwise} \end{cases}$$



## Formale Definitionen (3/5)

- Dieses führt zu der Einführung von gemeinsamen Überzeugungen (mutual-beliefs)

$$(M - Bel\ g\ \varphi) \equiv \bigwedge_{k>0} (E - Bel^k\ g\ \varphi)$$

- oder

$$\begin{aligned} (M - Bel\ g\ \varphi) \equiv \forall i \cdot (i \in g) \Rightarrow \\ & (Bel\ i\ \varphi) \wedge \\ & (Bel\ i\ (E - Bel\ g\ \varphi)) \wedge \\ & (Bel\ i\ (E - Bel\ g\ (E - Bel\ g\ \varphi))) \wedge \\ & \dots \end{aligned}$$



## Formale Definitionen (4/5)

- Gemeinsame Absichten sind wie folgt definiert (mutual-intentions):

$$\begin{aligned}(M - Int \ g \ \varphi) \equiv & (E - Int \ g \ \varphi) \wedge \\ & (E - Int \ g \ (E - Int \ g \ \varphi)) \wedge \\ & (E - Int \ g \ (E - Int \ g \ (E - Int \ g \ \varphi))) \wedge \\ & \dots\end{aligned}$$



## Formale Definitionen (5/5)

- Interne Interpretation gemeinsamer Absichten:

$\forall i \in g :$

$(Int\ i\ \varphi) \wedge$

$(Int\ i\ (E - Int\ g\ \varphi)) \wedge$

$(Int\ i\ (E - Int\ g\ (E - Int\ g\ \varphi))) \wedge$

...

- *Zusätzlich können noch Konventionen und Teams realisiert werden aber dazu mehr in „Organisation und Gesellschaft“*

# Recognition (1/3)

- Der Agent ist der Überzeugung, dass eine Lösung durch eine Gruppe von Agenten der Lösung durch den Agenten selbst überlegen ist.
- Definitionen von Fertigkeiten (*Abilities*) von Agenten und Gruppen
- First-order ability

$$(\text{Can}^0 i \varphi) \equiv \exists \alpha \cdot (\text{Bel } i (\text{Agt } i \alpha) \wedge (\text{Achvs } \alpha \varphi)) \wedge (\text{Agt } i \alpha) \wedge (\text{Achvs } \alpha \varphi)$$

- k-order ability

$$(\text{Can}^k i \varphi) \equiv (\text{Can}^{k-1} i (\text{Can}^0 i \varphi)) \quad \forall k > 0$$

$$(\text{Can}^1 i \varphi) \equiv (\text{Can}^0 i (\text{Can}^0 i \varphi))$$

$$(\text{Can}^2 i \varphi) \equiv (\text{Can}^0 i (\text{Can}^0 i (\text{Can}^0 i \varphi)))$$

- ability simpliciter as k order ability

$$(\text{Can } i \varphi) \equiv \bigvee_{k \geq 0} (\text{Can}^k i \varphi)$$



## Recognition (2/3)

- Definition von Nicht-Fertigkeiten

$$(Can't\ i\ \varphi) \equiv \neg(Can\ i\ \varphi)$$

- Definition von Gruppenfertigkeiten

$$(J - Can^0\ g\ \varphi) \equiv \exists \alpha \cdot (M - Bel\ g\ (Agts\ g\ \alpha) \wedge (Achvs\ \alpha\ \varphi)) \wedge (Agts\ g\ \alpha) \wedge (Achvs\ \alpha\ \varphi)$$

$$(J - Can^k\ g\ \varphi) \equiv (J - Can^{k-1}\ g\ (J - Can^0\ g\ \varphi))\ \forall k > 0$$

$$(J - Can\ g\ \varphi) \equiv \bigvee_{k \geq 0} (J - Can^k\ g\ \varphi)$$



## Recognition (3/3)

- Potential für Kooperation, mit desire  $\varphi$  des Agenten  $i$ 
  - es gibt eine Gruppe  $g$ , so dass  $i$  überzeugt ist,  $g$  kann gemeinschaftlich  $\varphi$  erreichen
  - $i$  kann alleine  $\varphi$  nicht erreichen, oder
  - $i$  ist der Überzeugung, dass für jede Aktion  $\alpha$ , die  $i$  anwenden könnte, um  $\varphi$  zu erreichen,  $i$  ein desire hat, die Aktion  $\alpha$  nicht zu nutzen
- Potential for Cooperation

$$\begin{aligned} (PfC\ i\ \varphi) \equiv & (Des\ i\ \varphi) \wedge \\ & (Bel\ i\ \neg\varphi) \wedge \\ & \exists g \cdot (Bel\ i\ (J - Can\ g\ \varphi)) \wedge \\ & \left[ \begin{array}{l} (Can't\ i\ \varphi) \vee \\ (Bel\ i\ \forall \alpha \cdot (Agt\ i\ \alpha) \wedge (Achvs\ \alpha\ \varphi) \Rightarrow (Int\ i\ (Doens't\ \alpha))) \end{array} \right] \end{aligned}$$



# Team Formation (1/3)

- Der Identifikation von Kooperationspotential folgt die Teambildung
- Ziel des Teams folgt dem Prinzip von *Joint Actions*
- Team Formation ist ein Verfahren, dass nicht garantiert erfolgreich ist. Ein Agent kann dies nur „versuchen“.
- Erster Ansatz: *Joint Action*, nicht Bildung von *Joint Intentions*
- Ein Agent  $i$ , der die Überzeugung hat, dass es ein Potential für kooperative Aktion in Bezug auf das Ziel  $\varphi$  gibt, wird versuchen, einer Gruppe  $g$  (die seiner Überzeugung nach gemeinsam  $\varphi$  erreichen kann) folgendes durchzusetzen:
  - die gemeinsame Absicht  $\varphi$  zu erreichen
  - die gemeinsame Überzeugung, dass  $g$  wirklich  $\varphi$  erreichen kann



## Team Formation (2/3)

- Die Umsetzung im Agentensystem erfolgt durch
  - Der Agent  $i$  sendet ein *request* an die Gruppe  $g$ , mit der Bitte  $\varphi$  durchzuführen
  - Der Agent  $i$  sendet ein *inform* an die Gruppe  $g$ , um ihr mitzuteilen, dass diese in der Lage ist,  $\varphi$  zu erreichen
  - ! Implizite Annahme von Wooldridge hierbei ist, dass die Agenten ihre Ziele wahrheitsgemäß mitteilen
- Das Commitment (= die Vereinbarung) der Agenten wird durch *PreTeam* wie folgt formuliert
  - Es gibt die gemeinsame Überzeugung von  $g$ , dass  $g$  gemeinsam  $\varphi$  erreichen kann
  - $g$  hat gemeinsam die Absicht,  $\varphi$  zu erreichen

$$(PreTeam\ g\ \varphi) \equiv (M - Bel\ g\ (J - Can\ g\ \varphi)) \wedge (M - Int\ g\ \varphi)$$



## Team Formation (3/3)

- *Formale Bemerkung:* Interessant ist nun, dass aus einer Vereinbarung eine gemeinsame Überzeugung abgeleitet werden kann

$$\models_s (PreTeam\ g\ \varphi) \Rightarrow (M - Bel\ g\ E \textcircled{1} \varphi)$$

- Sprechakt zur Durchführung von Team Formation

$$\{FormTeam\ i\ g\ \alpha\ \varphi\} \equiv \{Inform\ i\ g\ \alpha\ (J - Can\ g\ \varphi)\}; \{Request\ i\ g\ \alpha\ \varphi\}$$

- Team Formation als Konsequenz der Identifikation von PfC

$$\models_s \forall i \cdot (PfC\ i\ \varphi) \Rightarrow A \exists g \cdot \exists \alpha \cdot (Happens\ \{FormTeam\ i\ g\ \alpha\ \varphi\})$$



## Plan Formation (1/3)

- Es gibt eine gemeinsame Absicht
- Es ist mindestens eine Aktion bekannt, die die Gruppe „näher“ an ihr Ziel bringt
- Es ist möglich, dass mehrere Agenten Aktionen kennen, die die Gruppe durchführen kann (in Hinblick auf die Absicht)
- Es ist daher notwendig, dass sich das Kollektiv auf eine konkrete Aktionssequenz einigt (Negotiation!)
- Eine Verhandlung hat dann stattgefunden, wenn mindestens ein Agent eine Aktionssequenz vorgeschlagen hat (Minimalanforderung!)
- Nutzung der Definition von Versuchen

# Formale Seitenbemerkung: Versuche

- Single-Agent Attempt
- Ein Agent  $i$  versucht unter Ausführung der Aktion  $\alpha$   $\varphi$  zu erreichen - mindestens  $\psi$  soll erreicht werden

$$\{\text{Attempt } i \ \alpha \ \varphi \ \psi\} \equiv \left[ \begin{array}{c} (\text{Bel } i \ \neg\varphi) \wedge \\ (\text{Agt } i \ \alpha) \wedge \\ (\text{Des } i \ (\text{Achvs } \alpha \ \varphi)) \wedge \\ (\text{Int } i \ (\text{Achvs } \alpha \ \psi)) \end{array} \right] ?; \alpha$$

## Plan Formation (2/3)

- Verallgemeinerung der Single-Agent-Attempts auf Gruppen von Agenten

$$\{J - \text{Attempt } i \ \alpha \ \varphi \ \psi\} \equiv \left[ \begin{array}{c} (M - \text{Bel } i \ \neg\varphi) \wedge \\ (A\text{gts } g \ \alpha) \wedge \\ (M - \text{Des } g \ (A\text{chvs } \alpha \ \varphi)) \wedge \\ (M - \text{Int } g \ (A\text{chvs } \alpha \ \psi)) \end{array} \right] ?; \alpha$$

- was ist denn nun *M-Des*?  
→ Definition analog zu *M-Int* und *M-Bel*



## Plan Formation (3/3)

- Zusammenfassend ergibt sich *plan formation* wie folgt:

$$\models_s (PreTeam\ g\ \varphi) \Rightarrow A\ \exists \alpha \cdot (Happens\ \{J - Attempt\ g\ \alpha\ \psi\ \chi\})$$

mit

$$\psi \equiv (Team_{soc}\ g\ \varphi\ \psi_{soc})$$

und

$$\chi \equiv \exists j \cdot \exists \alpha \cdot (j \in g) \wedge (M - Bel\ g\ (Bel\ j\ (Agts\ g\ \alpha) \wedge (Achvs\ \alpha\ \varphi)))$$

- Was ist denn jetzt *Team*???
- Vorlesung über Team, Gruppen und Organisation





# Team Action

- Undokumentiert !
- Abgesprochene Durchführung des Plans.
- Dynamische Umplanung bei veränderten Situation (Intention Reconsideration)
- *More research needed !*



# Zusammenfassung: Model of Cooperation [Wooldridge 2000]

- Klar strukturiertes und formales Modell
- Viele implizite Annahmen  
(z.B. Wissen über Fähigkeiten anderer Agenten)
- Wenig Berücksichtigung von Dynamik
- KEINE Planung enthalten !