

Robotica: Sistemi Robotici Distribuiti, a.a. 2014-2015

Laurea Magistrale in Ingegneria Robotica e dell'Automazione

Lucia Pallottino

Centro di Ricerca "E. Piaggio"

Dipartimento di Ingegneria dell'Informazione

Università di Pisa

Tel.: 0502217057 Fax : 0502217051

Email: lucia.pallottino@unipi.it

Introduzione

Sistemi multi agente e multi robot

Intelligenza distribuita: sistemi di oggetti che lavorano insieme per organizzare, pianificare, risolvere problemi, apprendere etc.

Gli “oggetti” possono essere processori, sensori, attuatori, robot etc.

La internet del futuro: **“Internet of Things”**

Scopo: progettare e controllare sistemi di agenti autonomi in modo tale che siano in grado di portare a termine compiti complessi.

“An agent is a computer system that is situated in some environment and is capable of autonomous action in this environment in order to meet its design objective” M.J. Wooldridge, An Introduction to Multi-agent Systems, John Wiley, New York, USA, 2002.

Aspetti positivi:

- ▶ I sistemi multi agente sono in grado di risolvere sotto-problemi in parallelo riducendo il tempo per il completamento del compito dell'intero sistema e riducendo il costo computazionale (sotto-problemi più semplici del problema principale).
- ▶ L'assenza di un singolo centro decisionale rende il sistema complesso maggiormente robusto e affidabile ai guasti.
- ▶ Utilizzando un sistema multi agente è possibile progettare agenti diversi e specializzati possibilmente più semplici e meno costosi di un singolo agente complesso.



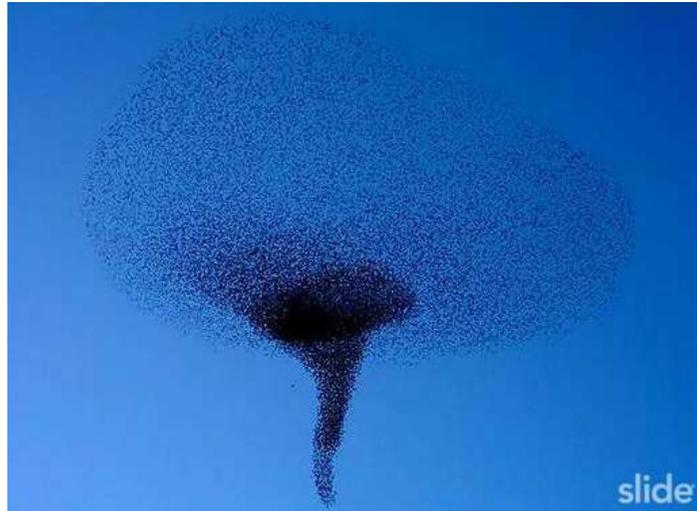
Figura 1: Immagine presa dalla pagina web del Prof. James McLurkin @MIT

L'obiettivo è quindi quello di ottenere delle **prestazioni** migliori rispetto all'uso di singoli agenti migliorando anche la **robustezza** e l'**affidabilità** del sistema.

L'uso di sistemi multi agente propone però nuovi problemi e difficoltà:

- ▶ Gestire (coordinare) un elevato numero di agenti.
- ▶ Gestire in modo uniforme agenti non omogenei.
- ▶ Gestire una informazione non centralizzata ma locale.
- ▶ Gestire l'elevata necessità di comunicazione.

Esempi di sistemi multi-agente e multi robot



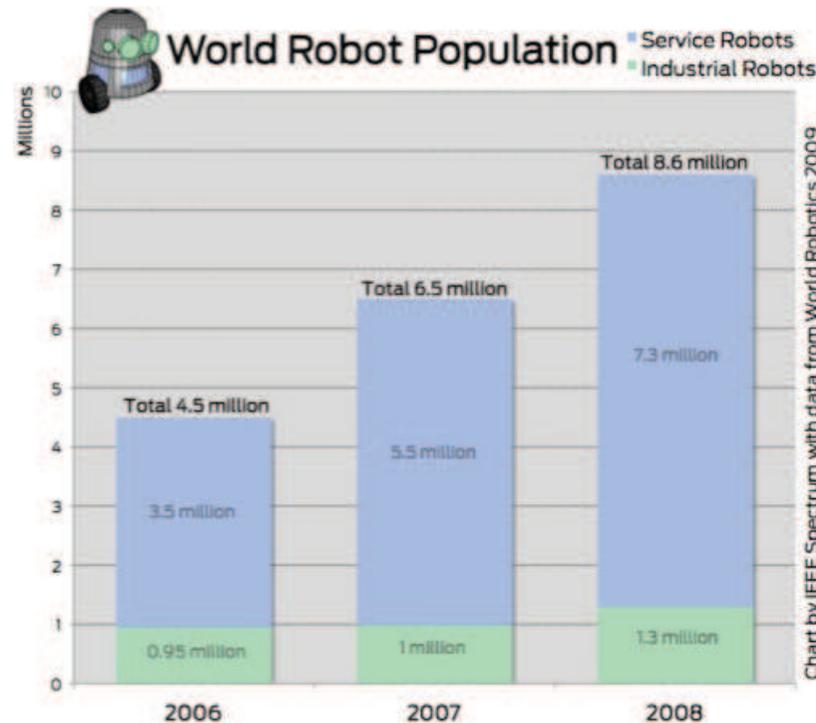


Internet of things - cooperating objects



Le Società dei Robot

I robot di servizio stanno entrando nelle nostre case e nella nostra quotidianità



E' stato stimato che tra il 2009 e il 2012 verranno venduti circa 49.000 robot di servizio professionali e 11.6 milioni di robot di servizio personali. In questo modo in questi anni si raggiungerà una popolazione di circa 13 milioni di robot.

I robot saranno:

- ▶ Tanti
- ▶ Veloci
- ▶ Diversi
- ▶ Autonomi
- ▶ Non coordinati
- ▶ Competitivi
- ▶ Entrano ed escono dal sistema
- ▶ Possibilment si “comportano bene” ...

Autostrade Automatiche: progetti PATH (USA, 1994) SARTRE (EU, 2011)



Veicoli Autonomi su strade urbane: DARPA CHALLENGE (USA, 2007)

Vincitori Carnegie Mellon University, Pittsburgh, Pennsylvania Velocità media:
22.53 km/h (durata circa 4 ore)



Starting March 1st, A Red License Plate in Nevada Means the Driver is a Robot!

by Aaron Saenz February 22nd, 2012 | [Comments \(3\)](#) [Mi place](#) [+7](#) [15](#)

406 123 [Share by email](#)
[Share](#) [Tweet](#) [Send Email](#) [Import Addresses](#)

[Ads by Google](#) [Robot Vision](#) [Robot](#) [Robot Control](#)



An extended campaign in Nevada by Google has led to a new host of provisions which will allow automated cars to legally drive in the state. Starting March 1st, 2012 innovators like Google can officially apply for a new kind of robot driver's license that will give them permission to openly test their cars on the road. Automated vehicles will be able to travel the same streets and highways as human drivers, with only a red license plate marking them as robots. Once research on







Classificazione di sistemi multi-robot

Tipi di interazione tra robot

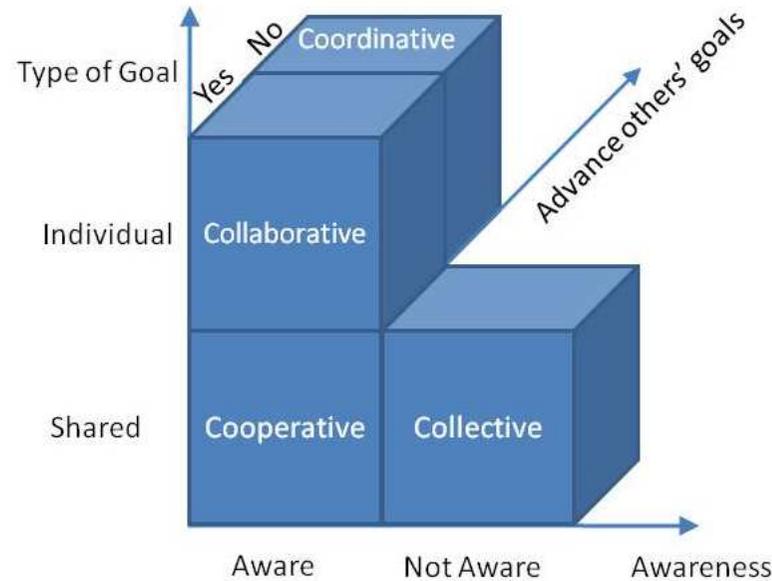
- ▶ Tipologia di Obiettivi (**Type of goals**)
 - ▷ Individuale
 - ▷ Condiviso
- ▶ Consapevolezza degli altri (**Awareness**)
 - ▷ Aware: i robot sono in grado di “ragionare” sulle azioni e gli obiettivi degli altri
 - ▷ Not Aware: i robot possono “percepire” la presenza degli altri ma non sono in grado di capirne gli intenti o i piani futuri.
- ▶ Contributo del singolo agli obiettivi altrui (**Advance the goal of others**)
 - ▷ Yes: i robot con la propria azione contribuiscono anche al raggiungimento dell’obiettivo altrui (es. pulizia di un pavimento)
 - ▷ No

A seconda delle tipologie di interazione tra robot si possono identificare tre tipologie di comportamento.

- ▶ **Collective:** Not Aware, Shared Goals, Actions beneficial to teammates (es. Swarm Robotics: creare sistemi di robot che siano in grado di compiere compiti biologicamente rilevanti come l'approvvigionamento di cibo, formazione di sciami, stormi, greggi, branchi etc, mantenimento di formazioni). I robot implementano semplici leggi di controllo locali che combinate insieme risultano nel raggiungimento di un obiettivo globale (emergent behaviour).
- ▶ **Cooperative:** Aware, Shared Goals, Actions beneficial to teammates (es. spostamento di grandi materiali, pulizia di ambienti, esplorazione di ambienti impervi e non noti, missioni di ricerca e recupero). Lavorare insieme per raggiungere un obiettivo comune.

- ▶ **Collaborative:** Aware, Individual Goals, Actions beneficial to teammates (e. collaborazione tra umani). I robot si aiutano a vicenda per raggiungere obiettivi individuali ma compatibili. In questo caso tipicamente ogni robot ha una sua capacità che mette a disposizione degli altri.
- ▶ **Coordinative:** Aware, Individual Goals, Actions not helpful to other robots (es. pianificazione del moto, controllo del traffico)

Esistono anche sistemi multi-robot in cui alcuni robot con le proprie azioni condizionano negativamente gli obiettivi altrui. In questo caso si parla di “avversari”.



Infine è anche importante considerare le diverse possibili composizioni del sistema multi robot:

Omogeneità: proprietà di un gruppo formato da robot identici da un punto di vista sia hardware che software.

Eterogeneità: proprietà di un gruppo formato da robot che possono avere differenze sia sui dispositivi hardware che sulle procedure di controllo (software).

Paradigmi classici per sistemi intelligenti distribuiti

Esistono diversi paradigmi per ottenere una astrazione dei sistemi intelligenti distribuiti. La scelta del paradigma dipende dal particolare problema che si vuole risolvere e dalle interazioni presenti nel sistema.

Paradigma basato sulle osservazioni della natura

Gli animali sono la prova che è possibile ottenere risultati complessi senza necessariamente utilizzare architetture complesse come quella umana (es. voli in formazione, raggruppamento in stormi etc. etc.)

Molti animali hanno comportamenti innati che producono reazioni ricorrenti e convenzionali a stimoli particolari (in etologia noti come schemi di azione fissa):

- ▶ Uno scoiattolo allevato in gabbia che riceve una noce per la prima volta inizia a grattare con le zampe il pavimento della gabbia, come se volesse scavare una buca. Successivamente mette la noce nel punto in cui ha “scavato” e con il muso fa il gesto di ricoprirla di terra.

- ▶ I piccoli dei mammiferi quando nascono cercano istintivamente il capezzolo della madre da cui succhiare il latte.
- ▶ Uccelli e ragni costruiscono il nido e le tele con tecniche ben precise, anche se non hanno mai visto prima un modello da seguire.



- ▶ I protozoi si muovono verso una fonte di cibo risalendo gradienti di concentrazione delle sostanze in cui sono immersi.
- ▶ I pulcini rompono col becco il guscio dell'uovo per uscire.

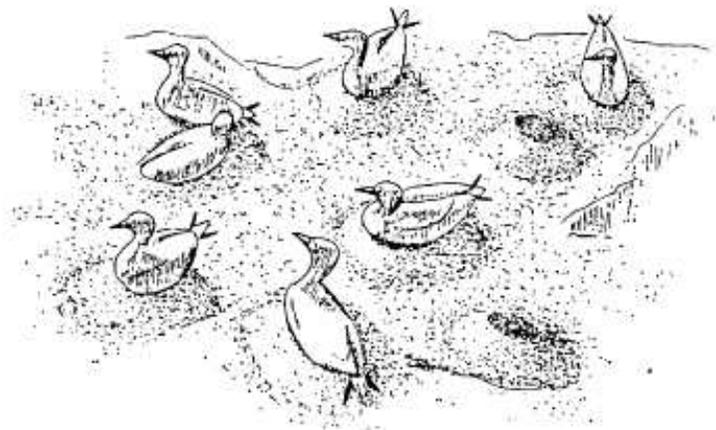
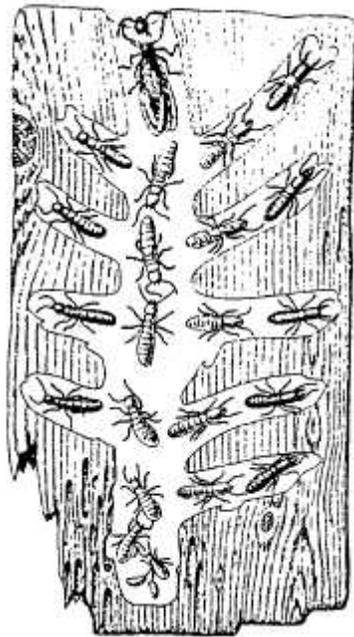


- ▶ In generale molti animali hanno reazioni istintive di fuga dai predatori, di presa del cibo, di scavo e costruzione, di corteggiamento, di accoppiamento e di cure parentali

Imparare come varie specie animali operano in gruppo può essere utile per progettare squadre di robot cooperativi.

Sono state identificate due tipologie di società animali:

- ▶ Società che differenziano: l'individuo appartiene al gruppo per il bene della società e dipende totalmente dalla società per la sua esistenza (esempi: api, formiche e termiti). *Stay together*.
- ▶ Società che integrano: l'individuo appartiene al gruppo per proprio interesse (es. branchi di lupi o colonie di uccelli). In questo caso la società esiste per il bene dell'individuo. *Andare Insieme. Come Together*



Nei sistemi multi-robot si ha una categorizzazione parallela a quella delle società animali:

- ▶ **Emergent behaviour:** studio di interazioni emergenti da colonie di robot. Si usa un elevato numero di robot omogenei che singolarmente hanno capacità limitate ma che combinati insieme possono generare comportamenti intelligenti e complessi. Il tipo di interazione è l'interazione di tipo collective. Questo tipo di paradigma è utilizzato in problemi come flocking, schooling e formations, foraging, coverage, target tracking, target observation, etc. in cui semplici protocolli di azione (leggi di controllo) identiche per ogni agente forniscono il comportamento desiderato dell'intero sistema (società).
- ▶ **Intentional cooperation or collaboration.** In questo caso i robot sono più "intelligenti" e hanno maggiori capacità, lo scopo è quello di usare questi robot in modo tale da compiere compiti complessi che singolarmente non sarebbero in grado di compiere (es. costruzione di mappe di ambienti estesi).

Paradigma sociale e organizzativo

Questo paradigma si basa sulle teorie organizzative dei sistemi umani. In questo tipo di approcci l'interazione tra robot viene progettata modellizzando dinamiche individuali e di gruppo come parte di una organizzazione.

Tipicamente sono approcci utilizzati per tipologie di interazione cooperative e collaborative. Tre esempi di teorie organizzative per sistemi multi-robot sono

- ▶ **Ruoli**: teoria usata spesso per dividere l'applicazione in parti di lavoro gestibili che possono essere facilmente assegnate ai singoli robot in base alle loro capacità (es. calcio giocato da squadre di robot).
- ▶ **Economie di mercato**: teoria usata spesso per applicazioni di tipo “task allocation” (problema di assegnamento di compiti ai vari robot in modo da assegnare un compito al robot più adatto a compierlo garantendo che ogni compito venga portato a termine in maniera soddisfacente). I metodi di tipo “Market economies” si preoccupano di gestire le “puntate”, le “puntate” in parallelo etc.
- ▶ **Modelli di lavoro di squadra**: teoria usata nel caso in cui i robot siano in grado di “ragionare” su coordinamento e comunicazione in modo tale da consentire una riorganizzazione della squadra (es. ambienti dinamici).

Paradigma basato su semantica e sulla conoscenza

Questo tipo di approcci si basano sulla conoscenza condivisa tra robot eterogenei con lo scopo di consentire una facile condivisione e comprensione della conoscenza da diverse tipologie di “sorgenti”. Per questo tipo di paradigmi è necessario un vocabolario e una semantica comune e condivisa per descrivere la conoscenza del sistema.

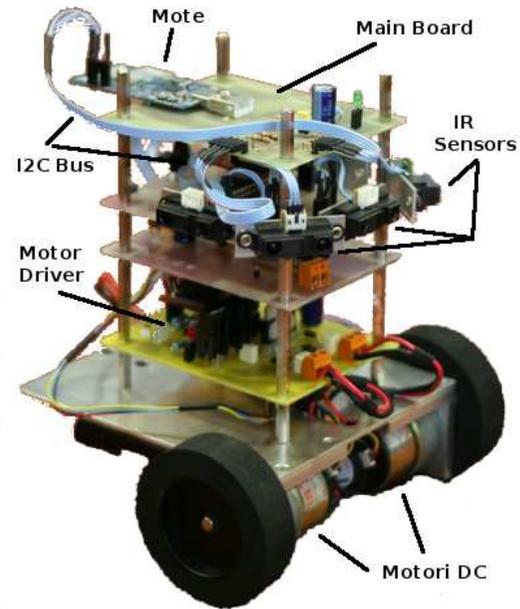
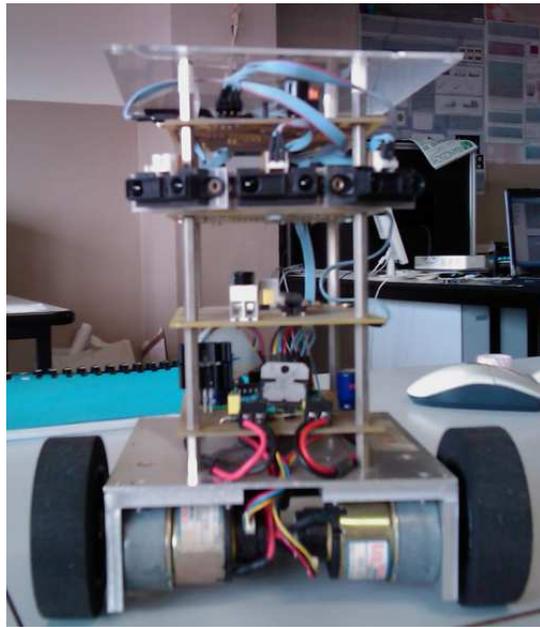
Il paradigma è usato per interazioni di tipo “cooperative”, “collaborative” e “coordinative”. È un paradigma utilizzato soprattutto nei sistemi multi-agente, meno nei sistemi multi-robot. Infatti questo tipo di sistemi risentono dei problemi di rumore e incertezza nella sensorizzazione e nell’attuazione, di comunicazioni a banda limitata, di autonomia e capacità di calcolo limitate. Tali problemi sono prioritari e più complessi della gestione di un linguaggio condiviso.

Contenuti del Corso e Programma

Di recente la tendenza è stata quella di sviluppare un elevato numero di dispositivi a basso costo in modo tale da garantire una certa robustezza del sistema.

Dal punto di vista del controllo questa scelta porta a dover mettere in conto limitazioni sulla sensoristica, sulla capacità computazionale e sul sistema di attuazione e di comunicazione.

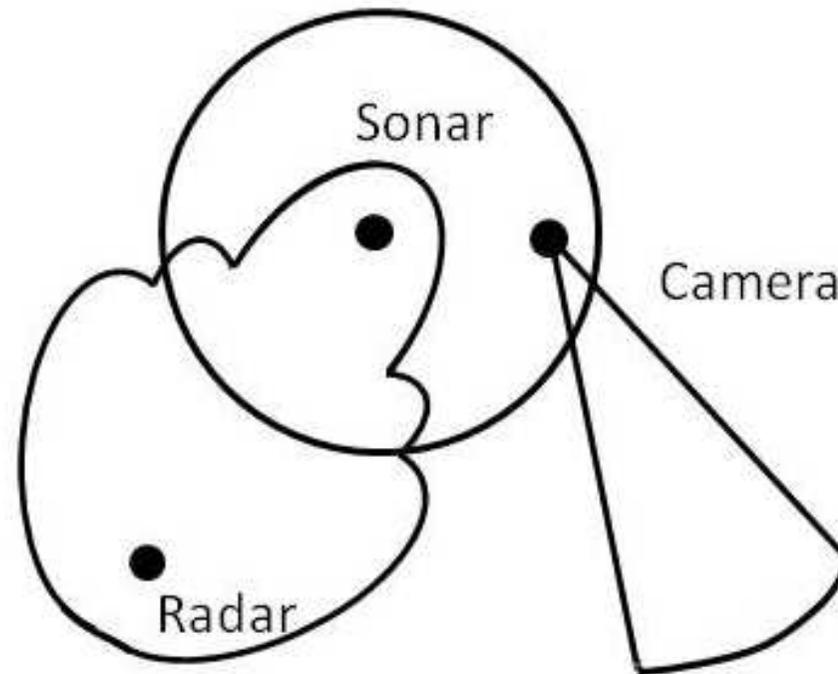
L'elevato numero di agenti in gioco forza una scelta di algoritmi e metodi che siano scalabili. Ad esempio, gli algoritmi di controllo dovrebbero avere costo computazionale dell'ordine del numero di agenti e devono tenere in considerazione che le informazioni sono limitate o locali.



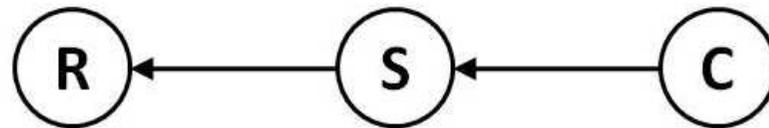
E' però necessario formalizzare il problema che si intende risolvere e magari trovare un unico formalismo che ben modella e che consenta di risolvere più problemi.

Lo scopo è quello di determinare il corretto livello di astrazione per ottenere un formalismo in grado di modellare un problema e di fornire tecniche risolutive efficaci.

Nel caso di robot eterogenei si possono avere diversi tipi di sensori



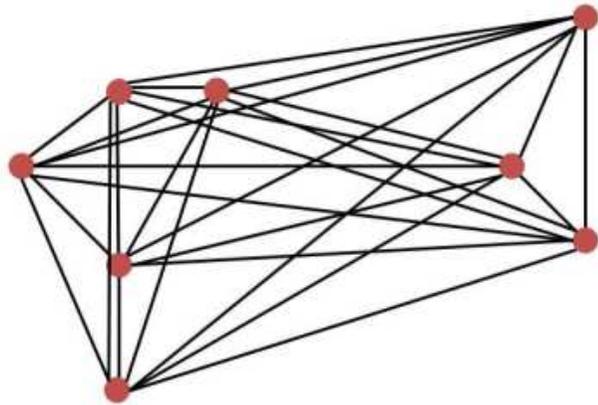
Modellare la geometria di tali sensori può essere molto complesso. Ci possiamo però accontentare di modellizzare chi può “vedere” chi.



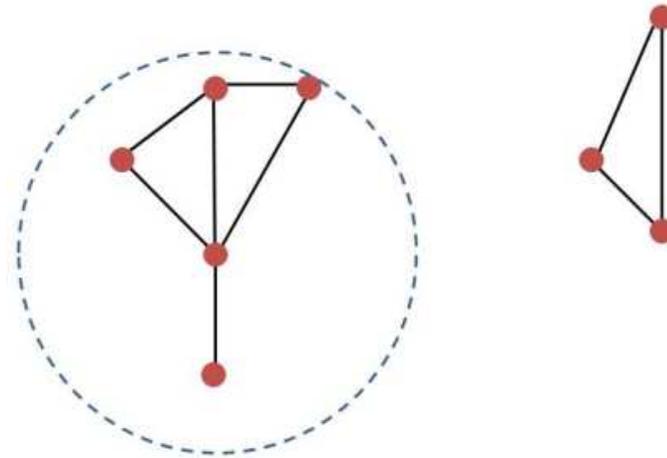
In questo modo si perdono molte informazioni sulla geometria del problema ma è possibile definire più facilmente delle leggi di controllo. Tali leggi si baseranno sulle proprietà topologiche della rete.

Leggi di controllo decentralizzate si basano sul fatto che la decisione di ogni singolo robot viene presa sulla base delle informazioni raccolte da un numero limitato di robot “vicini”.

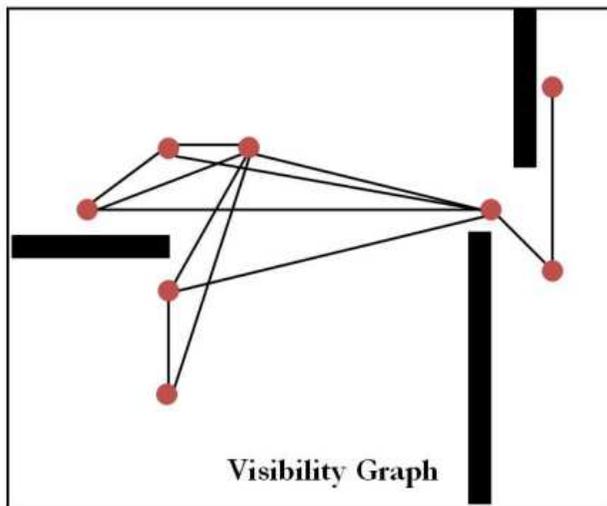
Il concetto di vicinanza varia a seconda del problema che si intende risolvere.



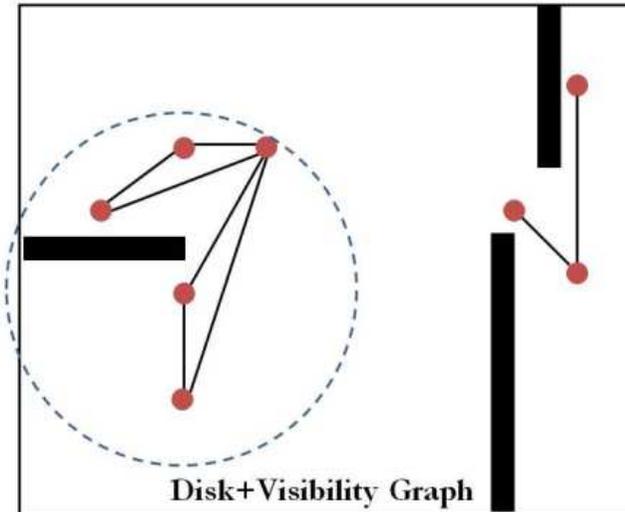
Complete Graph



Disk Graph



Visibility Graph



Disk+Visibility Graph

Gli archi dei grafi rappresentano un flusso di informazioni tra un robot e l'altro, il flusso può essere anche unidirezionale.

Il movimento dei robot od ostacoli mobili possono cambiare la topologia della rete in quanto possono bloccare un flusso di informazioni.

- ▶ **Reti statiche:** la topologia della rete è tempo invariante (es. reti di comunicazioni statiche).
- ▶ **Reti dinamiche:** la topologia della rete è tempo variante, gli archi possono apparire e scomparire (es. reti di robot mobili con sensori a raggio limitato).
- ▶ **Reti random:** la topologia della rete è tempo variante, gli archi sono presenti nella rete non a causa di condizioni fisiche ma secondo delle distribuzioni di probabilità (es. reti di comunicazioni con canali di comunicazione probabilistici).

Lo scopo finale per la progettazione di sistemi multi robot è, da un punto di vista di coordinamento, quello di garantire un “comportamento” desiderato dell’intero sistema in base a regole di interazione locali.

- ▶ **Consensus:** fare in modo che tutti gli agenti della rete si trovino d’accordo sul valore dello stato (es. temperatura della stanza).
- ▶ **Formations:** fare in modo che i robot si muovano mantenendo una figura geometrica desiderata.
- ▶ **Assignments:** fare in modo che l’assegnamento dei compiti ai membri della squadra non sia penalizzante per i singoli agenti
- ▶ **Coverage:** fare in modo di massimizzare la copertura della rete mantenendone la connettività.
- ▶ **Flocking, Swarming:** fare in modo che i robot mobili si muovano così come si osserva fare agli animali in natura (es. stormi di uccelli, branchi di pesci e aggregazioni di insetti)

Programma indicativo

- ▶ Introduzione al corso (3 Ore)
- ▶ Strumenti per il corso: La teoria dei grafi (6 Ore)
 - ▷ Grafi connessi, sotto-grafi, grafi pesati, grafi orientati. (1.5 Ore)
 - ▷ Grafi bilanciati, Matrici associate ai grafi: matrice del grado, matrice di adiacenza, matrice di incidenza, Laplaciano (1.5 Ore)
 - ▷ Analisi spettrale del Laplaciano di grafi non orientati, Teorema connettività di grafi non orientati. (1.5 Ore)
 - ▷ Taglio di un grafo. Analisi spettrale del Laplaciano di grafi orientati e pesati, Teorema connettività di grafi orientati. (1.5 Ore)
- ▶ Pianificazione del moto (discreta) (7 Ore)
 - ▷ Esplorazione in avanti
 - ▷ Esplorazione all'indietro
 - ▷ Programmazione dinamica discreta (Pianificazione con feedback)
 - ▷ Pianificazione ottima discreta
- ▶ Pianificazione del moto (continua) (15 Ore)
 - ▷ Modelli Geometrici

- ▷ Trasformazioni del piano
- ▷ Lo spazio delle configurazioni (C-Obs, C-free)
- ▷ Pianificazione combinatorica (Decomposizioni e RoadMaps)
- ▷ Pianificazione basata su campionamento (RDT-RRT-RRT*)
- ▷ Pianificazione basata su campi potenziali
- ▷ Altre tecniche di pianificazione, es. Navigation function
- ▷ Programmazione dinamica discreta (Pianificazione con feedback)
- ▷ Pianificazione ottima singolo agente e multi agente
- ▶ ~~Ottimizzazione convessa.~~
- ▶ Algoritmi distribuiti su grafo: (3 Ore)
 - ▷ Reti sincrone, algoritmi distribuiti, misure di complessita', Algoritmo di Leader Election (1.5 Ore)
 - ▷ Algoritmi di ricerca su grafo, Algoritmo Breadth-First, Spedizione messaggi in broadcast (1.5 Ore)
- ▶ Protocollo del Consenso: (4 Ore)
 - ▷ Introduzione al Protocollo del Consenso, Consenso su reti statiche non orientate, Problema del Rendezvous (1 Ora)

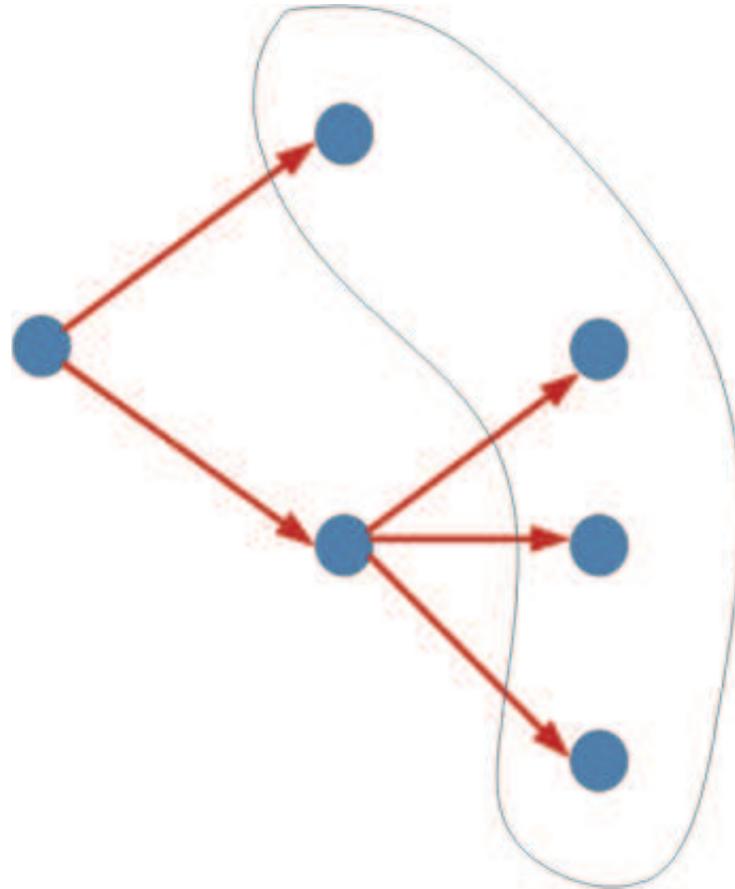
- ▷ Consenso per reti statiche orientate e pesate. Teoremi di convergenza. (1 Ora)
- ▷ Consenso per reti statiche orientate e pesate. Consenso in tempo discreto (1 Ora)
- ▷ Consenso Discreto, scelta del passo di campionamento, teoremi di convergenza. Consenso su reti dinamiche, reti connesse e costanti a tratti, Consenso su reti con ritardo (1 Ora)
- ▶ **Pianificazione distribuita (3 ore)**
 - ▷ **Introduzione (1 Ora)**
 - ▷ **Esempi (2 Ore)**
- ▶ **Controllo distribuito per formazioni di veicoli: (7 Ore)**
 - ▷ Introduzione al controllo in formazione, Grafi Persistenti, Configurazioni relative, Controllo lineare di formazioni: shape formation, Caso statico e caso dinamico (3 Ore)
 - ▷ Formazioni con configurazioni relative, caso singolo integratore. Formazioni di squadre di unicycli: configurazioni bilanciate e sincronizzate. Stato e potenziali di ordine m . Legge di controllo distribuita. (2 Ore)

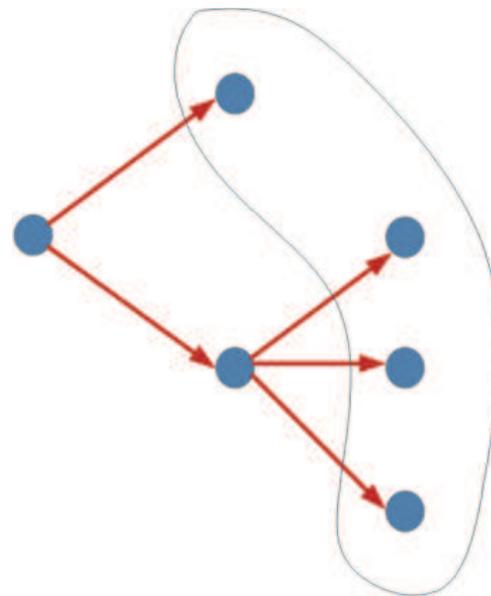
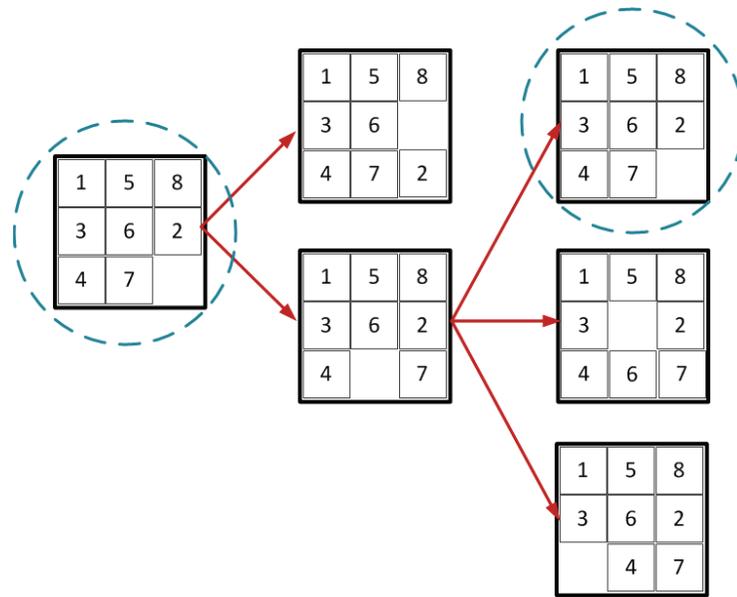
- ▷ Problema dello spacing di unicicli, controllo non lineare per il mantenimento della connessione del grafo, il problema del Coverage, grafi di Gabriel e Partizioni di Voronoi (2 Ore)
- ▶ **Swarm, Flocking e Coverage: (2 Ore)**
 - ▷ Introduzione ed esempi
- ▶ ~~Ottimizzazione distribuita.~~
 - ▷

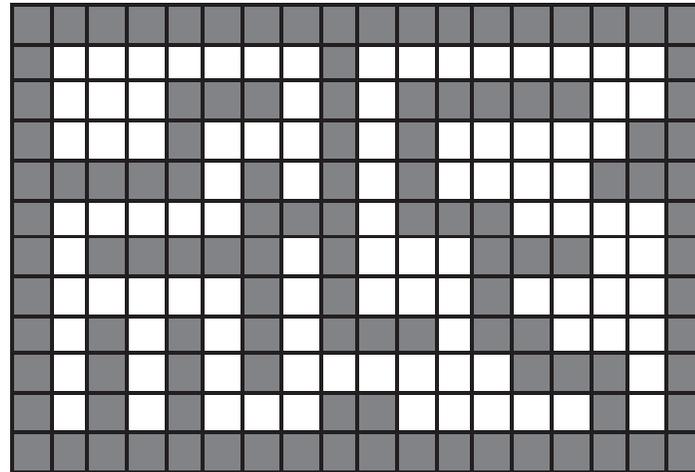
In artificial intelligence, the terms planning and AI planning take on a more discrete flavor. Instead of moving a piano through a continuous space, as in the robot motion planning problem, the task might be to solve a puzzle, such as the Rubik's cube or a sliding-tile puzzle, or to achieve a task that is modeled discretely, such as building a stack of blocks. Although such problems could be modeled with continuous spaces, it seems natural to define a finite set of actions that can be applied to a discrete set of states and to construct a solution by giving the appropriate sequence of actions.

1	13	8	3
9	6	11	15
4	14	2	10
7	12	5	

1	5	8
3	6	2
4	7	







Il problema della pianificazione del modo in ambienti strutturati può essere modellizzata come pianificazione sul grafo in base alla tassellazione dell'ambiente.