Linked Open Data e Semantic Web: Fondamenti e Linguaggi di Interrogazione Parte Prima

Cristiano Longo
longo@dmi.unict.it

Università di Catania, 2014-2015

Argomenti

Questa presentazione tratterà i seguenti argomenti:

- Motivazioni del Web Semantico
- Definizione formale di Ontologie
- Interrogazioni sulle Ontologie
- Vocabolari

World Wide Web Consortium

Le tecnologie del *Web Semantico* rispondono ad un insieme di standard e protocolli promossi e mantenuti dal *World Wide Web Consortium* (in breve *W3C*, vedi `http://www.w3.org`).

Il W3C è un consorzio di standardizzazione per il Web che conta 403 membri tra aziende e organizzazioni governative: CNR, Microsoft Corporation, Apple Inc., Intel Corporation, Facebook, Google Inc., ...

Altri standard sviluppati in seno al W3C sono: URL, HTTP, XML, HTML, CSS, SOAP, WSDL, Javascript.

Limiti del World Wide Web (1/4)

The Web was designed as an information space, with the goal that it should be useful not only for human-human communication, but also that machines would be able to participate and help. One of the major obstacles to this has been the fact **that most information on the Web is designed for human consumption**, *and even if it was derived from a database with well defined meanings (in at least some terms) for its columns, that* **the structure of the data is not evident to a robot browsing the web.**

Semantic Web Roadmap, Tim Berners-Lee, 1998.

Limiti del World Wide Web (2/4)

Alcuni problemi nell'interpretazione di testi derivano da:

Lingue Differenti e.g. *Parigi* e *Paris* possono indicare la stessa città.

Omonimie e.g. esistono svariate città chiamate *Paris* nel mondo (Arkansas, Idaho, Illinois, Kentucky, Maine, Michigan, Missouri, New York, ...);

Limiti del World Wide Web (3/4)

La situazione si complica in presenza di contenuti multimediali.

Limiti del World Wide Web (4/4)

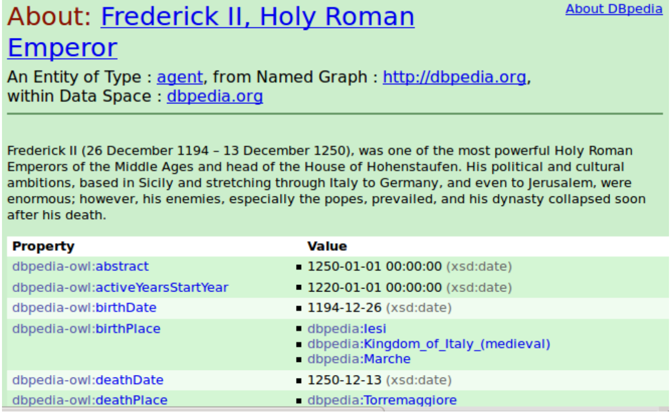
Come conseguenza, spesso è impossibile eseguire su web ricerche *complesse* ottenendo risultati accurati. Ad esempio, cercando sul web *"Federico II places"* non si ottengono risultati in prima pagina su Federico II, ma solo sull'omonima università:

1. Università degli Studi di Napoli "Federico II" — OPEN Places
2. AOU - Policlinico "Federico II" - Napoli, Italy - Hospital — Facebook
3. Federico II Ingegneria Via Claudio - College and University — Facebook
4. MARIA CATERINA FONTE - www.docenti.unina.it

Il Web Semantico (1/2)

> *[. . .] the Semantic Web approach instead develops languages for expressing information in a machine processable form.*

Semantic Web Roadmap, Tim Berners-Lee, 1998.



About: Frederick II, Holy Roman Emperor

About DBpedia

An Entity of Type : agent, from Named Graph : http://dbpedia.org, within Data Space : dbpedia.org

Frederick II (26 December 1194 – 13 December 1250), was one of the most powerful Holy Roman Emperors of the Middle Ages and head of the House of Hohenstaufen. His political and cultural ambitions, based in Sicily and stretching through Italy to Germany, and even to Jerusalem, were enormous; however, his enemies, especially the popes, prevailed, and his dynasty collapsed soon after his death.

Property	Value
dbpedia-owl:abstract	1250-01-01 00:00:00 (xsd:date)
dbpedia-owl:activeYearsStartYear	1220-01-01 00:00:00 (xsd:date)
dbpedia-owl:birthDate	1194-12-26 (xsd:date)
dbpedia-owl:birthPlace	dbpedia:Iesi dbpedia:Kingdom_of_Italy_(medieval) dbpedia:Marche
dbpedia-owl:deathDate	1250-12-13 (xsd:date)
dbpedia-owl:deathPlace	dbpedia:Torremaggiore

Figure : Federico II su dbpedia.org

Il Web Semantico (1/2)

I *linguaggi di rappresentazione* usati nel Web semantico hanno una *sintassi rigorosa* e sono dotati di una *semantica formale*.

Questo rende possibile effettuare interrogazioni complesse sui dataset, ottenendo dei risultati precisi anche se a volte parziali:

$$Q = \text{“Luoghi di nascita di Federico II e dei suoi parenti stretti”} .$$

Linked Open Data Cloud (1/2)

The Semantic Web is a web of data, in some ways like a global database.

Semantic Web Roadmap, Tim Berners-Lee, 1998.

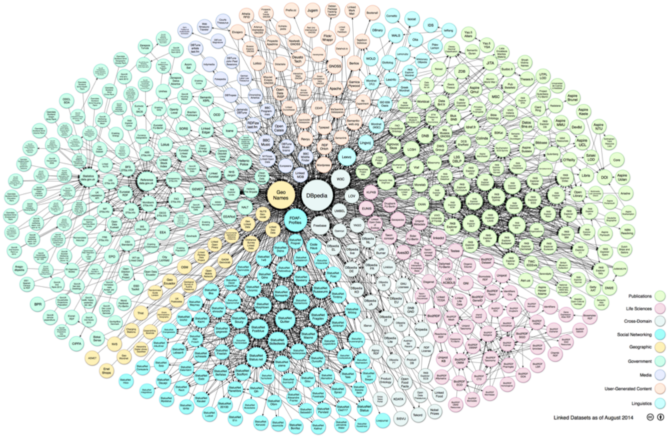


Figure : Linked Open Data Cloud

Linked Open Data Cloud (2/2)

Nel *Linked Open Data Cloud* sono presenti 365 dataset (fonte `http://stats.lod2.eu/`).

Alcuni dataset:

- *DBPedia* (`dbpedia.org`) corrispondente a `wikipedia.org`;
- *Linked Movie Database* (`http://linkedmdb.org/`) controparte sul Web Semantico di *Internet Movie Database* (`http://www.imdb.com/`);
- *Linked GeoData* (`http://linkedgeodata.org`) contiene i dati di *OpenStreetMap* (`http://www.openstreetmap.org/`);
- *AGROVOC* (`http://aims.fao.org/agrovoc`) è il dataset della FAO (`http://fao.org`);
- *Europeana* (`http://pro.europeana.eu/linked-open-data`) contiene dati su beni culturali e tradizioni Europee.

Linked Data (1/2)

I dataset nel Web Semantico possono essere *collegati* tra loro. Ad esempio, una stessa risorsa può essere descritta sotto diversi aspetti in dataset differenti.

Ad esempio, la città di Catania è presente:

- come pubblica amministrazione nel dataset del sistema pubblico di connettività e cooperazione[1] con la url `http://spcdata.digitpa.gov.it/Amministrazione/c_c351`;
- come divisione amministrativa nel dataset `http://www.geonames.org`;
- come area territoriale nel dataset dell'ISTAT `http://linkedstat.spaziodati.eu/`.

[1] `http://spcdata.digitpa.gov.it/`

Linked Data (2/2)

È possibile effettuare interrogazioni che coinvolgano diversi dataset (anche eterogenei).

Ad esempio, la seguente query può essere eseguita interrogando un data set contenente dati storici ed uno sulle strutture ricettive:

Q = "Strutture ricettive nei luoghi di nascita di Federico II e dei suoi parenti stretti."

Ontologie

I dataset del Web Semantico vengono spesso definiti *ontologie*.

Una *ontologia* è una descrizione *parziale* del mondo:

- descrive una porzione del mondo, spesso è limitata ad un'unico *dominio di conoscenza*;
- non si assume che i fatti non esplicitamente presenti nell'ontologia siano falsi (*Open World Assumption*).

Essa è costituita da un insieme finito di *affermazioni*. Ad esempio:

- Tutti gli esseri umani sono mortali;
- Socrate è mortale;
- Alice è la madre di Roberto.

Ontologie - Affermazioni

Le affermazioni contenute in una ontologia sono di tre tipi:

Constraints: impongono dei vincoli *semantici* sul dominio di conoscenza che si va a rappresentare. La notazione richiama quella insiemistica;

$$HumanBeing \sqsubseteq Mortal$$

Property Assertions: impongono una relazione tra due elementi del dominio;

$$Alice\ motherOf\ Bob$$

Class Assertions: indicano l'appartenenza di un elemento ad un insieme.

$$HumanBeing(Socrate)$$

Ontologie - Reasoning

Con il termine *reasoning* si intende l'attività di estrazione di conoscenza *implicita* in una ontologia.

$$\left\{ \begin{array}{l} HumanBeing \sqsubseteq Mortal, \\ HumanBeing(Socrate) \end{array} \right\} \implies Mortal(Socrate)$$

Le attività di reasoning sono rese possibili dalle *semantiche formali* associate ai linguaggi di rappresentazione utilizzati.

Ontologie - Definizione

Siano N_C, N_P, N_I tre insiemi infiniti, numerabili e a due a due disgiunti di nomi di *classe*, *proprietà* e *individuo*, rispettivamente.

Una *ontologia* è un insieme finito di asserzioni dei seguenti tipi:

	Sintassi	*Semantica*
Constraints	$C \sqsubseteq D$ $R \sqsubseteq S$ $\mathrm{dom}(R) \sqsubseteq C$ $\mathrm{range}(R) \sqsubseteq C$	$(\forall x)(x \in C \rightarrow x \in D)$ $(\forall x, y)([x, y] \in R \rightarrow [x, y] \in S)$ $(\forall x, y)([x, y] \in R \rightarrow x \in C)$ $(\forall x, y)([x, y] \in R \rightarrow y \in C)$
Class Assertions	$C(a)$	$a \in C$
Property Assertions	$a\, P\, b$ (equivalente $P(a, b)$)	$[a, b] \in P$

dove $C, D \in N_C$, $R, S \in N_P$ e $a, b \in N_I$.

Ontologie - Esempio

Riportiamo un esempio di ontologia. Siano $HumanBeing, Mortal \in N_C$, $teacherOf \in N_P$, $Socrate, Platone \in N_I$.

$$\begin{aligned}\mathcal{O} = \quad & \{HumanBeing \sqsubseteq Mortal, \\ & \text{range}(teacherOf) \sqsubseteq HumanBeing, \\ & HumanBeing(Socrate), \\ & Socrate\ teacherOf\ Platone\}\end{aligned}$$

Ontologie - Esempio

Riportiamo un esempio di ontologia. Siano $\mathit{HumanBeing}, \mathit{Mortal} \in N_C$, $\mathit{teacherOf} \in N_P$, $\mathit{Socrate}, \mathit{Platone} \in N_I$.

Mediante *reasoning* è possibile esplicitare ulteriori affermazioni.

$$\mathcal{O} = \begin{array}{l} \{\textbf{HumanBeing} \sqsubseteq \textbf{Mortal}, \\ \text{range}(\mathit{teacherOf}) \sqsubseteq \mathit{HumanBeing}, \\ \textbf{HumanBeing}(\textbf{Socrate}), \\ \mathit{Socrate}\ \mathit{teacherOf}\ \mathit{Platone}\} \end{array} \Longrightarrow \mathcal{O}' = \begin{array}{l} \{\textbf{Mortal}(\textbf{Socrate}), \\ \qquad\qquad\qquad\qquad\qquad\} \end{array}$$

Ontologie - Esempio

Riportiamo un esempio di ontologia. Siano $HumanBeing, Mortal \in N_C$, $teacherOf \in N_P$, $Socrate, Platone \in N_I$.

Mediante *reasoning* è possibile esplicitare ulteriori affermazioni.

$$\mathcal{O} = \begin{array}{l} \{HumanBeing \sqsubseteq Mortal, \\ \text{range}(\textbf{teacherOf}) \sqsubseteq \textbf{HumanBeing}, \\ HumanBeing(Socrate), \\ \textbf{Socrate teacherOf Platone}\} \end{array} \implies \mathcal{O}' = \begin{array}{l} \{Mortal(Socrate), \\ \textbf{HumanBeing}(\textbf{Platone}), \\ \} \end{array}$$

Ontologie - Esempio

Riportiamo un esempio di ontologia. Siano $HumanBeing, Mortal \in N_C$, $teacherOf \in N_P$, $Socrate, Platone \in N_I$.

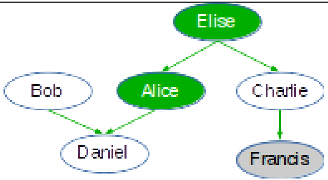
Mediante *reasoning* è possibile esplicitare ulteriori affermazioni.

$$\mathcal{O} = \begin{array}{l}\{\textbf{HumanBeing} \sqsubseteq \textbf{Mortal} \\ \text{range}(teacherOf) \sqsubseteq HumanBeing, \\ HumanBeing(Socrate), \\ Socrate\ teacherOf\ Platone\}\end{array} \Longrightarrow \mathcal{O}' = \begin{array}{l}\{Mortal(Socrate), \\ \textbf{HumanBeing}(\textbf{Platone}) \\ \textbf{Mortal}(\textbf{Platone})\}\end{array}$$

Interrogazioni

Il metodo più immediato per ottenere informazioni da una ontologia è il *Conjunctive Query Answering*. Consideriamo ad esempio la seguente ontologia:

$$\mathcal{O} = \{Female(Elise), Female(Alice), Male(Bob), Male(Charlie), Male(Daniel), Alice\ childOf\ Elise, Charlie\ childOf\ Elise, Daniel\ childOf\ Alice, Daniel\ childOf\ Bob, Francis\ childOf\ Charlie\}$$



Alcune interrogazioni che è possibile effettuare con il conjunctive query answering sono:

- "Trova tutti gli individui maschi."
- "Chi sono gli individui con almeno un figlio maschio?"
- "Chi sono i figli di *Alice*?"
- "Chi sono gli individui con almeno un figlio maschio ed una femmina?"
- "Chi sono gli individui maschi con almeno un figlio maschio?"

Formule Atomiche

Per definire in maniera rigorosa le query congiuntive è necessario definire preliminarmente l'insieme delle *formule atomiche*.

Sia $V = \{x, y, z, \ldots\}$ l'insieme infinito, numerabile e disgiunto da N_C, N_P e N_I delle *variabili*. Le *formule atomiche* sono espressioni dei due seguenti tipi:

$$C(x), \quad P(x, y)$$

con $x, y \in N_I \cup V$, $C \in N_C$ e $P \in N_P$.

Esempi di formule atomiche sono:

- $HumanBeing(x)$,
- $x\ childOf\ Alice$,
- $Bob\ childOf\ x$,
- $x\ childOf\ y$,
- $Mortal(Socrate)$,
- $Alice\ childOf\ Elise$

con $HumanBeing, Mortal \in N_C$, $childOf \in N_P$, $Alice, Bob, Elise \in N_I$ e $x, y \in V$.

Formule Atomiche Chiuse

Una formula atomica nella quale non compaiano variabili si dice *chiusa*.

Negli esempi che seguono sono evidenziate le formule atomiche chiuse:

- $HumanBeing(x)$,
- $x\ childOf\ Alice$,
- $Bob\ childOf\ x$,
- $x\ childOf\ y$,
- $Mortal(Socrate)$,
- $Alice\ childOf\ Elise$

con $HumanBeing, Mortal \in N_C$, $childOf \in N_P$, $Alice, Bob, Elise \in N_I$ e $x, y \in V$.

Formule Atomiche Chiuse

Una formula atomica nella quale non compaiano variabili si dice *chiusa*.

Negli esempi che seguono sono evidenziate le formule atomiche chiuse:

- $HumanBeing(x)$,
- $x\ childOf\ Alice$,
- $Bob\ childOf\ x$,
- $x\ childOf\ y$,
- $\mathbf{Mortal}(\mathbf{Socrate})$,
- $\mathbf{Alice\ childOf\ Elise}$

con $HumanBeing, Mortal \in N_C$, $childOf \in N_P$, $Alice, Bob, Elise \in N_I$ e $x, y \in V$.

Le asserzioni presenti nelle ontologie sono formule atomiche chiuse.

Query Congiuntive

Una *query congiuntiva* è una congiunzione finita di formule atomiche $T_1 \wedge \ldots \wedge T_n$.

Alcuni esempi di query congiuntive:

- "Trova tutti gli individui maschi."

$$Male(x)$$

- "Chi sono gli individui con almeno un figlio maschio?"

$$y \; childOf \; x \; \wedge \; Male(y)$$

- "Chi sono i figli di *Alice*?"

$$x \; childOf \; Alice$$

con $x, y \in V$, $Male, Female \in N_C$, $childOf \in N_P$ e $Alice \in N_I$.

Sostituzioni (1/2)

Per definire le *soluzioni* (risposte) delle query congiuntive introduciamo la nozione di *sostituzione*.

Una *sostituzione* $\sigma = [x_1 \to a_1, \ldots, x_n \to a_n]$ ($x_1, \ldots, x_n \in V$, $a_1, \ldots, a_n \in N_I$) è una mappa finita che associa nomi di individui a variabili.

Sia T una formula atomica e $\sigma = [x_1 \to a_1, \ldots, x_n \to a_n]$ una sostituzione. L'*applicazione* $T\sigma$ di σ a T è la formula atomica che si ottiene sostituendo in T ad ogni occorrenza della variabile x_i il corrispondente nome di individuo a_i, per ogni $1 \leq i \leq n$.

Alcuni esempi:

$$
\begin{array}{lcl}
Male(x)[x \to Bob] & = & Male(Bob) \\
Male(x)[y \to Bob] & = & \\
(x\ childOf\ y)[x \to Alice] & = & \\
(x\ childOf\ y)[x \to Alice, y \to Elise] & = &
\end{array}
$$

con $x, y \in V$, $Male \in N_C$, $childOf \in N_P$ e $Alice, Bob, Elise \in N_I$.

Sostituzioni (1/2)

Per definire le *soluzioni* (risposte) delle query congiuntive introduciamo la nozione di *sostituzione*.

Una *sostituzione* $\sigma = [x_1 \to a_1, \ldots, x_n \to a_n]$ ($x_1, \ldots, x_n \in V$, $a_1, \ldots, a_n \in N_I$) è una mappa finita che associa nomi di individui a variabili.

Sia T una formula atomica e $\sigma = [x_1 \to a_1, \ldots, x_n \to a_n]$ una sostituzione. L'*applicazione* $T\sigma$ di σ a T è la formula atomica che si ottiene sostituendo in T ad ogni occorrenza della variabile x_i il corrispondente nome di individuo a_i, per ogni $1 \leq i \leq n$.

Alcuni esempi:

$$
\begin{array}{lcl}
Male(x)[x \to Bob] & = & Male(Bob) \\
Male(x)[y \to Bob] & = & Male(x) \\
(x\ childOf\ y)[x \to Alice] & = & \\
(x\ childOf\ y)[x \to Alice, y \to Elise] & = &
\end{array}
$$

con $x, y \in V$, $Male \in N_C$, $childOf \in N_P$ e $Alice, Bob, Elise \in N_I$.

Sostituzioni (1/2)

Per definire le *soluzioni* (risposte) delle query congiuntive introduciamo la nozione di *sostituzione*.

Una *sostituzione* $\sigma = [x_1 \to a_1, \ldots, x_n \to a_n]$ ($x_1, \ldots, x_n \in V$, $a_1, \ldots, a_n \in N_I$) è una mappa finita che associa nomi di individui a variabili.

Sia T una formula atomica e $\sigma = [x_1 \to a_1, \ldots, x_n \to a_n]$ una sostituzione. L'*applicazione* $T\sigma$ di σ a T è la formula atomica che si ottiene sostituendo in T ad ogni occorrenza della variabile x_i il corrispondente nome di individuo a_i, per ogni $1 \leq i \leq n$.

Alcuni esempi:

$$\begin{array}{lcl} Male(x)[x \to Bob] & = & Male(Bob) \\ Male(x)[y \to Bob] & = & Male(x) \\ (x\ childOf\ y)[x \to Alice] & = & Alice\ childOf\ y \\ (x\ childOf\ y)[x \to Alice, y \to Elise] & = & \end{array}$$

con $x, y \in V$, $Male \in N_C$, $childOf \in N_P$ e $Alice, Bob, Elise \in N_I$.

Sostituzioni (1/2)

Per definire le *soluzioni* (risposte) delle query congiuntive introduciamo la nozione di *sostituzione*.

Una *sostituzione* $\sigma = [x_1 \rightarrow a_1, \ldots, x_n \rightarrow a_n]$ ($x_1, \ldots, x_n \in V$, $a_1, \ldots, a_n \in N_I$) è una mappa finita che associa nomi di individui a variabili.

Sia T una formula atomica e $\sigma = [x_1 \rightarrow a_1, \ldots, x_n \rightarrow a_n]$ una sostituzione. L'*applicazione* $T\sigma$ di σ a T è la formula atomica che si ottiene sostituendo in T ad ogni occorrenza della variabile x_i il corrispondente nome di individuo a_i, per ogni $1 \leq i \leq n$.

Alcuni esempi:

$$\begin{array}{lcl}
Male(x)[x \rightarrow Bob] & = & Male(Bob) \\
Male(x)[y \rightarrow Bob] & = & Male(x) \\
(x\ childOf\ y)[x \rightarrow Alice] & = & Alice\ childOf\ y \\
(x\ childOf\ y)[x \rightarrow Alice, y \rightarrow Elise] & = & Alice\ childOf\ Elise
\end{array}$$

con $x, y \in V$, $Male \in N_C$, $childOf \in N_P$ e $Alice, Bob, Elise \in N_I$.

Sostituzioni (2/2)

L'applicazione di sostituzioni a query congiuntive si definisce come segue.

Sia $\sigma = [x_1 \to a_1, \ldots, x_n \to a_n]$ una sostituzione e siano $T_1, \ldots, T_m$ formule atomiche. Allora

$$(T_1 \wedge \ldots \wedge T_m)\sigma \;=_{\text{Def}} T_1\sigma \wedge \ldots \wedge T_m\sigma.$$

Alcuni esempi:

$$\begin{array}{ll}
(y \; childOf \; x \; \wedge \; Male(y))[x \to Alice] & =_{\text{Def}} \\
(y \; childOf \; x \; \wedge \; Male(y))[x \to Alice, z \to Bob] & =_{\text{Def}} \\
(y \; childOf \; x \; \wedge \; Male(y))[x \to Alice, y \to Bob] & =_{\text{Def}}
\end{array}$$

Sostituzioni (2/2)

L'applicazione di sostituzioni a query congiuntive si definisce come segue.

Sia $\sigma = [x_1 \to a_1, \ldots, x_n \to a_n]$ una sostituzione e siano $T_1, \ldots, T_m$ formule atomiche. Allora

$$(T_1 \wedge \ldots \wedge T_m)\sigma \;=_{\text{Def}}\; T_1\sigma \wedge \ldots \wedge T_m\sigma.$$

Alcuni esempi:

$$\begin{array}{lcl}
(y\ \mathit{childOf}\ x \wedge \mathit{Male}(y))[x \to \mathit{Alice}] & =_{\text{Def}} & y\ \mathit{childOf}\ \mathit{Alice} \wedge \mathit{Male}(y) \\
(y\ \mathit{childOf}\ x \wedge \mathit{Male}(y))[x \to \mathit{Alice}, z \to \mathit{Bob}] & =_{\text{Def}} & \\
(y\ \mathit{childOf}\ x \wedge \mathit{Male}(y))[x \to \mathit{Alice}, y \to \mathit{Bob}] & =_{\text{Def}} &
\end{array}$$

Sostituzioni (2/2)

L'applicazione di sostituzioni a query congiuntive si definisce come segue.

Sia $\sigma = [x_1 \to a_1, \ldots, x_n \to a_n]$ una sostituzione e siano $T_1, \ldots, T_m$ formule atomiche. Allora

$$(T_1 \wedge \ldots \wedge T_m)\sigma \;=_{\text{Def}}\; T_1\sigma \wedge \ldots \wedge T_m\sigma.$$

Alcuni esempi:

$$\begin{array}{lll}
(y\ \mathit{childOf}\ x \wedge \mathit{Male}(y))[x \to \mathit{Alice}] & =_{\text{Def}} & y\ \mathit{childOf}\ \mathit{Alice} \wedge \mathit{Male}(y) \\
(y\ \mathit{childOf}\ x \wedge \mathit{Male}(y))[x \to \mathit{Alice}, z \to \mathit{Bob}] & =_{\text{Def}} & y\ \mathit{childOf}\ \mathit{Alice} \wedge \mathit{Male}(y) \\
(y\ \mathit{childOf}\ x \wedge \mathit{Male}(y))[x \to \mathit{Alice}, y \to \mathit{Bob}] & =_{\text{Def}} &
\end{array}$$

Sostituzioni (2/2)

L'applicazione di sostituzioni a query congiuntive si definisce come segue.

Sia $\sigma = [x_1 \to a_1, \ldots, x_n \to a_n]$ una sostituzione e siano $T_1, \ldots, T_m$ formule atomiche. Allora

$$(T_1 \wedge \ldots \wedge T_m)\sigma \; =_{\text{Def}} T_1\sigma \wedge \ldots \wedge T_m\sigma.$$

Alcuni esempi:

$$\begin{array}{lcl}
(y\ \mathit{childOf}\ x \wedge \mathit{Male}(y))[x \to \mathit{Alice}] & =_{\text{Def}} & y\ \mathit{childOf}\ \mathit{Alice} \wedge \mathit{Male}(y) \\
(y\ \mathit{childOf}\ x \wedge \mathit{Male}(y))[x \to \mathit{Alice}, z \to \mathit{Bob}] & =_{\text{Def}} & y\ \mathit{childOf}\ \mathit{Alice} \wedge \mathit{Male}(y) \\
(y\ \mathit{childOf}\ x \wedge \mathit{Male}(y))[x \to \mathit{Alice}, y \to \mathit{Bob}] & =_{\text{Def}} & \mathit{Bob}\ \mathit{childOf}\ \mathit{Alice} \wedge \mathit{Male}(\mathit{Bob})
\end{array}$$

Soluzioni per una Query

Siano $\sigma = [x_1 \to a_1, \ldots, x_n \to a_n]$ una sostituzione, $Q = T_1 \wedge \ldots \wedge T_m$ una query congiuntiva e $\mathcal{O}$ una ontologia.

σ è detta essere una *soluzione* per Q rispetto ad $\mathcal{O}$ se e solo se $T_1\sigma, \ldots, T_2\sigma$ compaiono in $\mathcal{O}$.

Consideriamo l'ontologia $\mathcal{O}$ e la query Q definite come segue:

$$\begin{aligned}\mathcal{O} = \quad & \{Female(Elise), Female(Alice), Male(Bob),\\ & Male(Charlie), Male(Daniel),\\ & Alice\ childOf\ Elise, Charlie\ childOf\ Elise,\\ & Daniel\ childOf\ Alice, Daniel\ childOf\ Bob,\\ & Francis\ childOf\ Charlie\}\end{aligned}$$

$$Q = \quad y\ childOf\ x \wedge Male(y).$$

Sia $\sigma_1 = [x \to Alice, y \to Daniel]$. σ_1 è una soluzione per Q rispetto ad $\mathcal{O}$?

Soluzioni per una Query - Esempio 1

Siano $\sigma = [x_1 \rightarrow a_1, \ldots, x_n \rightarrow a_n]$ una sostituzione, $Q = T_1 \wedge \ldots \wedge T_m$ una query congiuntiva e $\mathcal{O}$ una ontologia.

σ è detta essere una *soluzione* per Q rispetto ad $\mathcal{O}$ se e solo se $T_1\sigma, \ldots, T_2\sigma$ compaiono in $\mathcal{O}$.

Consideriamo l'ontologia $\mathcal{O}$ e la query Q ("Chi sono gli individui con almeno un figlio maschio?") definite come segue:

$$\begin{aligned} \mathcal{O} = \quad & \{Female(Elise), Female(Alice), Male(Bob), \\ & Male(Charlie), \mathbf{Male(Daniel)}, \\ & Alice\ childOf\ Elise, Charlie\ childOf\ Elise, \\ & \mathbf{Daniel\ childOf\ Alice}, Daniel\ childOf\ Bob, \\ & Francis\ childOf\ Charlie\} \\ Q = \quad & y\ childOf\ x \wedge Male(y). \end{aligned}$$

Sia $\sigma_1 = [x \rightarrow Alice, y \rightarrow Daniel]$. σ_1 è una soluzione per Q rispetto ad $\mathcal{O}$? **SI**.

$$Q\sigma_1 = Daniel\ childOf\ Alice \wedge Male(Daniel).$$

Soluzioni per una Query - Esempio 2

Siano $\sigma = [x_1 \rightarrow a_1, \ldots, x_n \rightarrow a_n]$ una sostituzione, $Q = T_1 \wedge \ldots \wedge T_m$ una query congiuntiva e $\mathcal{O}$ una ontologia.

σ è detta essere una *soluzione* per Q rispetto ad $\mathcal{O}$ se e solo se $T_1\sigma, \ldots, T_2\sigma$ compaiono in $\mathcal{O}$.

Consideriamo l'ontologia $\mathcal{O}$ e la query Q definite come segue:

$$\begin{aligned}\mathcal{O} = \quad & \{Female(Elise), Female(Alice), Male(Bob),\\ & Male(Charlie), Male(Daniel),\\ & Alice\ childOf\ Elise, Charlie\ childOf\ Elise,\\ & Daniel\ childOf\ Alice, Daniel\ childOf\ Bob,\\ & Francis\ childOf\ Charlie\}\\ \\ Q = \quad & y\ childOf\ x\ \wedge\ Male(y).\end{aligned}$$

Sia $\sigma_2 = [x \rightarrow Alice, y \rightarrow Bob]$. σ_2 è una soluzione per Q rispetto ad $\mathcal{O}$?

Soluzioni per una Query - Esempio 2

Siano $\sigma = [x_1 \rightarrow a_1, \ldots, x_n \rightarrow a_n]$ una sostituzione, $Q = T_1 \wedge \ldots \wedge T_m$ una query congiuntiva e $\mathcal{O}$ una ontologia.

σ è detta essere una *soluzione* per Q rispetto ad $\mathcal{O}$ se e solo se $T_1\sigma, \ldots, T_2\sigma$ compaiono in $\mathcal{O}$.

Consideriamo l'ontologia $\mathcal{O}$ e la query Q ("Chi sono gli individui con almeno un figlio maschio?") definite come segue:

$$\begin{aligned} \mathcal{O} = \quad & \{Female(Elise), Female(Alice), Male(Bob), \\ & Male(Charlie), Male(Daniel), \\ & Alice\ childOf\ Elise, Charlie\ childOf\ Elise, \\ & Daniel\ childOf\ Alice, Daniel\ childOf\ Bob, \\ & Francis\ childOf\ Charlie\} \\ \\ Q = \quad & y\ childOf\ x\ \wedge\ Male(y). \end{aligned}$$

Sia $\sigma_2 = [x \rightarrow Alice, y \rightarrow Bob]$. σ_2 è una soluzione per Q rispetto ad $\mathcal{O}$? **NO**.

$$Q\sigma_2 = \textbf{Bob childOf Alice}\ \wedge\ Male(Bob).$$

Soluzioni per una Query - Esempio 3

Siano $\sigma = [x_1 \to a_1, \ldots, x_n \to a_n]$ una sostituzione, $Q = T_1 \wedge \ldots \wedge T_m$ una query congiuntiva e $\mathcal{O}$ una ontologia.

σ è detta essere una *soluzione* per Q rispetto ad $\mathcal{O}$ se e solo se $T_1\sigma, \ldots, T_2\sigma$ compaiono in $\mathcal{O}$.

Consideriamo l'ontologia $\mathcal{O}$ e la query Q definite come segue:

$$\begin{aligned} \mathcal{O} = \quad & \{Female(Elise), Female(Alice), Male(Bob), \\ & Male(Charlie), Male(Daniel), \\ & Alice\ childOf\ Elise, Charlie\ childOf\ Elise, \\ & Daniel\ childOf\ Alice, Daniel\ childOf\ Bob, \\ & Francis\ childOf\ Charlie\} \end{aligned}$$

$$Q = \quad y\ childOf\ x \wedge Male(y).$$

Sia $\sigma_3 = [x \to Charlie, y \to Francis]$. σ_3 è una soluzione per Q rispetto ad $\mathcal{O}$?

Soluzioni per una Query - Esempio 3

Siano $\sigma = [x_1 \to a_1, \ldots, x_n \to a_n]$ una sostituzione, $Q = T_1 \wedge \ldots \wedge T_m$ una query congiuntiva e $\mathcal{O}$ una ontologia.

σ è detta essere una *soluzione* per Q rispetto ad $\mathcal{O}$ se e solo se $T_1\sigma, \ldots, T_2\sigma$ compaiono in $\mathcal{O}$.

Consideriamo l'ontologia $\mathcal{O}$ e la query Q ("Chi sono gli individui con almeno un figlio maschio?") definite come segue:

$$\begin{aligned} \mathcal{O} = \quad & \{Female(Elise), Female(Alice), Male(Bob), \\ & Male(Charlie), Male(Daniel), \\ & Alice\ childOf\ Elise, Charlie\ childOf\ Elise, \\ & Daniel\ childOf\ Alice, Daniel\ childOf\ Bob, \\ & Francis\ childOf\ Charlie\} \\ \\ Q = \quad & y\ childOf\ x\ \wedge\ Male(y). \end{aligned}$$

Sia $\sigma_3 = [x \to Charlie, y \to Francis]$. σ_2 è una soluzione per Q rispetto ad $\mathcal{O}$? **NO**.

$$Q\sigma_3 = Francis\ childOf\ Charlie\ \wedge\ \mathbf{Male(Francis)}.$$

Soluzioni per una Query - Esempio 4

Siano $\sigma = [x_1 \to a_1, \ldots, x_n \to a_n]$ una sostituzione, $Q = T_1 \wedge \ldots \wedge T_m$ una query congiuntiva e $\mathcal{O}$ una ontologia.

σ è detta essere una *soluzione* per Q rispetto ad $\mathcal{O}$ se e solo se $T_1\sigma, \ldots, T_2\sigma$ compaiono in $\mathcal{O}$.

Consideriamo l'ontologia $\mathcal{O}$ e la query Q definite come segue:

$$\begin{aligned} \mathcal{O} = \quad & \{Female(Elise), Female(Alice), Male(Bob), \\ & Male(Charlie), Male(Daniel), \\ & Alice\ childOf\ Elise, Charlie\ childOf\ Elise, \\ & Daniel\ childOf\ Alice, Daniel\ childOf\ Bob, \\ & Francis\ childOf\ Charlie\} \\ \\ Q = \quad & y\ childOf\ x\ \wedge\ Male(y). \end{aligned}$$

Sia $\sigma_4 = [y \to Daniel]$. σ_4 è una soluzione per Q rispetto ad $\mathcal{O}$?

Soluzioni per una Query - Esempio 4

Siano $\sigma = [x_1 \to a_1, \ldots, x_n \to a_n]$ una sostituzione, $Q = T_1 \wedge \ldots \wedge T_m$ una query congiuntiva e $\mathcal{O}$ una ontologia.

σ è detta essere una *soluzione* per Q rispetto ad $\mathcal{O}$ se e solo se $T_1\sigma, \ldots, T_2\sigma$ compaiono in $\mathcal{O}$.

Consideriamo l'ontologia $\mathcal{O}$ e la query Q ("Chi sono gli individui con almeno un figlio maschio?") definite come segue:

$$\begin{aligned} \mathcal{O} = \quad & \{Female(Elise), Female(Alice), Male(Bob), \\ & Male(Charlie), Male(Daniel), \\ & Alice\ childOf\ Elise, Charlie\ childOf\ Elise, \\ & Daniel\ childOf\ Alice, Daniel\ childOf\ Bob, \\ & Francis\ childOf\ Charlie\} \\ \\ Q = \quad & y\ childOf\ x \wedge Male(y). \end{aligned}$$

Sia $\sigma_4 = [y \to Daniel]$. σ_2 è una soluzione per Q rispetto ad $\mathcal{O}$? **NO**.

$$Q\sigma_4 = \textbf{Daniel childOf x} \wedge Male(Daniel).$$

Affinchè una sostituzione σ sia una soluzione per una query Q (a prescindere dall'ontologia) è necessario che in σ compaiano tutte le variabili di Q.

Soluzioni per una Query - Esempio 5

Siano $\sigma = [x_1 \to a_1, \ldots, x_n \to a_n]$ una sostituzione, $Q = T_1 \wedge \ldots \wedge T_m$ una query congiuntiva e $\mathcal{O}$ una ontologia.

σ è detta essere una *soluzione* per Q rispetto ad $\mathcal{O}$ se e solo se $T_1\sigma, \ldots, T_2\sigma$ compaiono in $\mathcal{O}$.

Consideriamo l'ontologia $\mathcal{O}$ e la query Q definite come segue:

$$\begin{aligned}
\mathcal{O} = \quad & \{Female(Elise), Female(Alice), Male(Bob), \\
& \ Male(Charlie), Male(Daniel), \\
& \ Alice\ childOf\ Elise, Charlie\ childOf\ Elise, \\
& \ Daniel\ childOf\ Alice, Daniel\ childOf\ Bob, \\
& \ Francis\ childOf\ Charlie\} \\
\\
Q = \quad & y\ childOf\ x\ \wedge\ Male(y).
\end{aligned}$$

Sia $\sigma_5 = [x \to Elise, y \to Charlie, z \to Francis]$. σ_5 è una soluzione per Q rispetto ad $\mathcal{O}$?

Soluzioni per una Query - Esempio 5

Siano $\sigma = [x_1 \to a_1, \ldots, x_n \to a_n]$ una sostituzione, $Q = T_1 \wedge \ldots \wedge T_m$ una query congiuntiva e $\mathcal{O}$ una ontologia.

σ è detta essere una *soluzione* per Q rispetto ad $\mathcal{O}$ se e solo se $T_1\sigma, \ldots, T_2\sigma$ compaiono in $\mathcal{O}$.

Consideriamo l'ontologia $\mathcal{O}$ e la query Q ("Chi sono gli individui con almeno un figlio maschio?") definite come segue:

$$\begin{aligned} \mathcal{O} = \quad & \{Female(Elise), Female(Alice), Male(Bob), \\ & \mathbf{Male(Charlie)}, Male(Daniel), \\ & Alice\ childOf\ Elise, \mathbf{Charlie\ childOf\ Elise}, \\ & Daniel\ childOf\ Alice, Daniel\ childOf\ Bob, \\ & Francis\ childOf\ Charlie\} \\ \\ Q = \quad & y\ childOf\ x \ \wedge\ Male(y). \end{aligned}$$

Sia $\sigma_5 = [x \to Elise, y \to Charlie, z \to Francis]$. σ_5 è una soluzione per Q rispetto ad $\mathcal{O}$? **SI**.

$$Q\sigma_5 = Charlie\ childOf\ Elise\ \wedge\ Male(Charlie).$$

Soluzioni Minimali per una Query

Siano $\sigma = [x_1 \rightarrow a_1, \ldots, x_n \rightarrow a_n]$ una sostituzione, Q una query congiuntiva e $\mathcal{O}$ una ontologia.

σ è una *soluzione minimale* per Q rispetto a $\mathcal{O}$ se e solo se:

1. σ è una soluzione per Q rispetto ad $\mathcal{O}$ e inoltre
2. tutte le variabili $x_1, \ldots, x_n$ che compaiono in σ compaiono anche in Q (criterio di minimalità).

Consideriamo ad esempio

$$\begin{aligned}
\mathcal{O} = \quad & \{Female(Elise), Female(Alice), Male(Bob),\\
& Male(Charlie), Male(Daniel),\\
& Alice\ childOf\ Elise, Charlie\ childOf\ Elise,\\
& Daniel\ childOf\ Alice, Daniel\ childOf\ Bob,\\
& Francis\ childOf\ Charlie\}\\
\\
Q = \quad & y\ childOf\ x \wedge Male(y).
\end{aligned}$$

$\sigma_5 = [x \rightarrow Elise, y \rightarrow Charlie, z \rightarrow Francis]$ è una soluzione minimale per Q rispetto a $\mathcal{O}$?

Soluzioni Minimali per una Query

Siano $\sigma = [x_1 \rightarrow a_1, \ldots, x_n \rightarrow a_n]$ una sostituzione, Q una query congiuntiva e $\mathcal{O}$ una ontologia.

σ è una *soluzione minimale* per Q rispetto a $\mathcal{O}$ se e solo se:

1. σ è una soluzione per Q rispetto ad $\mathcal{O}$ e inoltre
2. tutte le variabili $x_1, \ldots, x_n$ che compaiono in σ compaiono anche in Q (criterio di minimalità).

Consideriamo ad esempio

$$\begin{aligned}
\mathcal{O} = \quad & \{Female(Elise), Female(Alice), Male(Bob),\\
& Male(Charlie), Male(Daniel),\\
& Alice\ childOf\ Elise, Charlie\ childOf\ Elise,\\
& Daniel\ childOf\ Alice, Daniel\ childOf\ Bob,\\
& Francis\ childOf\ Charlie\}\\
\\
Q = \quad & y\ childOf\ x \ \wedge\ Male(y).
\end{aligned}$$

$\sigma_5 = [x \rightarrow Elise, y \rightarrow Charlie, \mathbf{z} \rightarrow Francis]$ è una soluzione minimale per Q rispetto a $\mathcal{O}$? **NO**.

$\sigma_6 = [x \rightarrow Elise, y \rightarrow Charlie]$ è una soluzione minimale per Q rispetto a $\mathcal{O}$? .

Soluzioni Minimali per una Query

Siano $\sigma = [x_1 \to a_1, \ldots, x_n \to a_n]$ una sostituzione, Q una query congiuntiva e $\mathcal{O}$ una ontologia.

σ è una *soluzione minimale* per Q rispetto a $\mathcal{O}$ se e solo se:

1. σ è una soluzione per Q rispetto ad $\mathcal{O}$ e inoltre
2. tutte le variabili $x_1, \ldots, x_n$ che compaiono in σ compaiono anche in Q (criterio di minimalità).

Consideriamo ad esempio

$$\begin{aligned} \mathcal{O} = \quad & \{Female(Elise), Female(Alice), Male(Bob), \\ & Male(Charlie), Male(Daniel), \\ & Alice\ childOf\ Elise, Charlie\ childOf\ Elise, \\ & Daniel\ childOf\ Alice, Daniel\ childOf\ Bob, \\ & Francis\ childOf\ Charlie\} \\ \\ Q = \quad & y\ childOf\ x \wedge Male(y). \end{aligned}$$

$\sigma_5 = [x \to Elise, y \to Charlie, \mathbf{z} \to Francis]$ è una soluzione minimale per Q rispetto a $\mathcal{O}$? **NO**.

$\sigma_6 = [x \to Elise, y \to Charlie]$ è una soluzione minimale per Q rispetto a $\mathcal{O}$? **SI**.

Conjunctive Query Answering

Il problema del *Conjunctive Query Answering* consiste nel trovare tutte le soluzioni minimali di una query congiuntiva rispetto ad una ontologia.

Esse sono sempre in numero finito, infatti:

- le variabili che compaiono nelle soluzioni sono esattamente quelle che compaiono nella query,
- i nomi di individui che compaiono nelle soluzioni sono un sottoinsieme di quelli che compaiono nell'ontologia.

Conjunctive Query Answering - Esempio 1

"Trova tutti gli individui maschi."

$$Q = Male(x)$$

$$\begin{aligned}\mathcal{O} = \quad & \{Female(Elise), Female(Alice), Male(Bob),\\ & Male(Charlie), Male(Daniel),\\ & Alice\ childOf\ Elise, Charlie\ childOf\ Elise,\\ & Daniel\ childOf\ Alice, Daniel\ childOf\ Bob,\\ & Francis\ childOf\ Charlie\}\end{aligned}$$

x

Conjunctive Query Answering - Esempio 1

"Trova tutti gli individui maschi."

$$Q = Male(x)$$

$$\mathcal{O} = \{Female(Elise), Female(Alice), \mathbf{Male(Bob)}, Male(Charlie), Male(Daniel), Alice\ childOf\ Elise, Charlie\ childOf\ Elise, Daniel\ childOf\ Alice, Daniel\ childOf\ Bob, Francis\ childOf\ Charlie\}$$

x
Bob

Conjunctive Query Answering - Esempio 1

"Trova tutti gli individui maschi."

$$Q = Male(x)$$

$$\mathcal{O} = \{Female(Elise), Female(Alice), Male(Bob), \mathbf{Male}(\mathbf{Charlie}), Male(Daniel), Alice\ childOf\ Elise, Charlie\ childOf\ Elise, Daniel\ childOf\ Alice, Daniel\ childOf\ Bob, Francis\ childOf\ Charlie\}$$

x
Bob
Charlie

Conjunctive Query Answering - Esempio 1

"Trova tutti gli individui maschi."

$$Q = Male(x)$$

$$\mathcal{O} = \{Female(Elise), Female(Alice), Male(Bob), Male(Charlie), \mathbf{Male(Daniel)}, Alice\ childOf\ Elise, Charlie\ childOf\ Elise, Daniel\ childOf\ Alice, Daniel\ childOf\ Bob, Francis\ childOf\ Charlie\}$$

x
Bob
Charlie
Daniel

Conjunctive Query Answering - Esempio 2

"Chi sono gli individui con almeno un figlio maschio?"

$$Q = y \; childOf \; x \wedge Male(y)$$

$$\mathcal{O} = \{Female(Elise), Female(Alice), Male(Bob), Male(Charlie), Male(Daniel), Alice \; childOf \; Elise, Charlie \; childOf \; Elise, Daniel \; childOf \; Alice, Daniel \; childOf \; Bob, Francis \; childOf \; Charlie\}$$

x	y

Conjunctive Query Answering - Esempio 2

"Chi sono gli individui con almeno un figlio maschio?"

$$Q = y\ \mathit{childOf}\ x \wedge \mathit{Male}(y)$$

$$\begin{aligned}\mathcal{O} = \{&\mathit{Female}(\mathit{Elise}), \mathit{Female}(\mathit{Alice}), \mathit{Male}(\mathit{Bob}),\\ &\mathbf{Male}(\mathbf{Charlie}), \mathit{Male}(\mathit{Daniel}),\\ &\mathit{Alice\ childOf\ Elise}, \mathbf{Charlie\ childOf\ Elise},\\ &\mathit{Daniel\ childOf\ Alice}, \mathit{Daniel\ childOf\ Bob},\\ &\mathit{Francis\ childOf\ Charlie}\}\end{aligned}$$

x	y
Elise	**Charlie**

Conjunctive Query Answering - Esempio 2

"Chi sono gli individui con almeno un figlio maschio?"

$$Q = y \; childOf \; x \; \wedge \; Male(y)$$

$$\begin{aligned}\mathcal{O} = \; & \{Female(Elise), Female(Alice), Male(Bob), \\ & Male(Charlie), \mathbf{Male(Daniel)}, \\ & Alice \; childOf \; Elise, Charlie \; childOf \; Elise, \\ & \mathbf{Daniel \; childOf \; Alice}, Daniel \; childOf \; Bob, \\ & Francis \; childOf \; Charlie\}\end{aligned}$$

x	*y*
Elise	*Charlie*
Alice	**Daniel**

Conjunctive Query Answering - Esempio 2

"Chi sono gli individui con almeno un figlio maschio?"

$$Q = y\ childOf\ x \wedge Male(y)$$

$$\mathcal{O} = \{Female(Elise), Female(Alice), Male(Bob), Male(Charlie), \mathbf{Male(Daniel)}, Alice\ childOf\ Elise, Charlie\ childOf\ Elise, Daniel\ childOf\ Alice, \mathbf{Daniel\ childOf\ Bob}, Francis\ childOf\ Charlie\}$$

x	y
Elise	*Charlie*
Alice	*Daniel*
Bob	**Daniel**

Conjunctive Query Answering - Esempio 3

"Chi sono i figli di *Elise*?"

$$Q = x\ childOf\ Elise$$

$$\begin{aligned}\mathcal{O} = \quad & \{Female(Elise), Female(Alice), Male(Bob),\\ & Male(Charlie), Male(Daniel),\\ & Alice\ childOf\ Elise, Charlie\ childOf\ Elise,\\ & Daniel\ childOf\ Alice, Daniel\ childOf\ Bob,\\ & Francis\ childOf\ Charlie\}\end{aligned}$$

x

Conjunctive Query Answering - Esempio 3

"Chi sono i figli di *Elise*?"

$$Q = x\ childOf\ Elise$$

$$\mathcal{O} = \{Female(Elise), Female(Alice), Male(Bob), Male(Charlie), Male(Daniel), \mathbf{Alice\ childOf\ Elise}, Charlie\ childOf\ Elise, Daniel\ childOf\ Alice, Daniel\ childOf\ Bob, Francis\ childOf\ Charlie\}$$

x
Alice

Conjunctive Query Answering - Esempio 3

"Chi sono i figli di *Elise*?"

$$Q = x \; childOf \; Elise$$

$$\begin{aligned}\mathcal{O} = \quad & \{Female(Elise), Female(Alice), Male(Bob), \\ & Male(Charlie), Male(Daniel), \\ & Alice\ childOf\ Elise, \mathbf{Charlie\ childOf\ Elise}, \\ & Daniel\ childOf\ Alice, Daniel\ childOf\ Bob, \\ & Francis\ childOf\ Charlie\}\end{aligned}$$

x
Alice
Charlie

Conjunctive Query Answering - Esempio 4

"Chi sono gli individui con almeno un figlio maschio ed una femmina?"

$$\mathcal{O} = \{Female(Elise), Female(Alice), Male(Bob), Male(Charlie), Male(Daniel), Alice\ childOf\ Elise, Charlie\ childOf\ Elise, Daniel\ childOf\ Alice, Daniel\ childOf\ Bob, Francis\ childOf\ Charlie\}$$

x	y	z

Conjunctive Query Answering - Esempio 4

"Chi sono gli individui con almeno un figlio maschio ed una femmina?"

$$Q = y\ childOf\ x \wedge z\ childOf\ x \wedge Male(y) \wedge Female(z)$$

$$\begin{aligned}\mathcal{O} = \quad & \{Female(Elise), Female(Alice), Male(Bob),\\ & Male(Charlie), Male(Daniel),\\ & Alice\ childOf\ Elise, Charlie\ childOf\ Elise,\\ & Daniel\ childOf\ Alice, Daniel\ childOf\ Bob,\\ & Francis\ childOf\ Charlie\}\end{aligned}$$

x	y	z

Conjunctive Query Answering - Esempio 4

"Chi sono gli individui con almeno un figlio maschio ed una femmina?"

$$Q = y\ childOf\ x \wedge z\ childOf\ x \wedge Male(y) \wedge Female(z)$$

$\mathcal{O} =$ $\{Female(Elise)$, $\mathbf{Female(Alice)}$, $Male(Bob)$,
$\mathbf{Male(Charlie)}$, $Male(Daniel)$,
Alice childOf Elise, **Charlie childOf Elise**,
Daniel childOf Alice, *Daniel childOf Bob*,
Francis childOf Charlie$\}$

x	y	z
Elise	*Charlie*	*Alice*

Conjunctive Query Answering - Esempio 5

“Chi sono gli individui maschi con almeno una figlia femmina?”

$$
\begin{aligned}
\mathcal{O} = \quad & \{Female(Elise), Female(Alice), Male(Bob),\\
& Male(Charlie), Male(Daniel),\\
& Alice\ childOf\ Elise, Charlie\ childOf\ Elise,\\
& Daniel\ childOf\ Alice, Daniel\ childOf\ Bob,\\
& Francis\ childOf\ Charlie\}
\end{aligned}
$$

x	y

Conjunctive Query Answering - Esempio 5

"Chi sono gli individui maschi con almeno una figlia femmina?"

$$Q = Male(x) \wedge y \; childOf \; x \wedge Female(y)$$

$$\begin{aligned}\mathcal{O} = \quad & \{Female(Elise), Female(Alice), Male(Bob), \\ & Male(Charlie), Male(Daniel), \\ & Alice \; childOf \; Elise, Charlie \; childOf \; Elise, \\ & Daniel \; childOf \; Alice, Daniel \; childOf \; Bob, \\ & Francis \; childOf \; Charlie\}\end{aligned}$$

x	y

Conjunctive Query Answering - Esempio 5

“Chi sono gli individui maschi con almeno una figlia femmina?”

$$Q = Male(x) \wedge y\ childOf\ x \wedge Female(y)$$

$$\mathcal{O} = \{Female(Elise), Female(Alice), Male(Bob), Male(Charlie), Male(Daniel), Alice\ childOf\ Elise, Charlie\ childOf\ Elise, Daniel\ childOf\ Alice, Daniel\ childOf\ Bob, Francis\ childOf\ Charlie\}$$

Nessuna Soluzione

Vocabolari

Classi e proprietà vengono raggruppati in *vocabolari* che trattano specifici domini di conoscenza (eg. organizzazioni, pubblica amministrazione, biologia, commercio, etc.).

Un vocabolario può contenere anche alcuni vincoli sulle classi e le proprietà del vocabolario stesso.

Definizione di Vocabolario

Una definizione di vocabolario può essere la seguente:

$$V = (C, P, \Omega)$$

dove

1. C è un sottoinsieme finito di N_C,
2. P è un sottoinsieme finito di N_P,
3. Ω è un insieme finito di vincoli che coinvolgano solo nomi di classi in C e nomi di proprietà in P.

Vocabolari condivisi

L'utilizzo di vocabolari condivisi (ben noti) favorisce la scalabilità orizzontale delle applicazioni.

Ad esempio, una applicazione sviluppata sull'ontologia di un comune che utilizzi i vocabolari standard per le pubbliche amministrazioni (vedi le *Linee Guida per la Valorizzazione del Patrimonio Informativo Pubblico* dell'*Agenzia per l'Italia Digitale*) può essere estesa senza sforzi aggiuntivi per utilizzare i dati provenienti dalle ontologie di tutti i comuni.

Il Vocabolario FOAF

Uno dei primi e più utilizzati vocabolari definiti nell'ambito del Web semantico è *Friend OF A Friend* (*FOAF*, vedi `http://foaf-project.org`).

> *FOAF is a project devoted to linking people and information using the Web.*

In questa sede ci limiteremo solo alla parte *Core*.

> **Core** - *These classes and properties form the core of FOAF. They describe characteristics of people and social groups that are independent of time and technology; as such they can be used to describe basic information about people in present day, historical, cultural heritage and digital library contexts. In addition to various characteristics of people, FOAF defines classes for Project, Organization and Group as other kinds of agent. Related work:*

(tratto da *FOAF Vocabulary Specification 0.99*, Namespace Document 14 January 2014, Paddington Edition, `http://xmlns.com/foaf/spec/`)

FOAF Core

Il vocabolario *Foaf Core* è definito come segue:

$$
\begin{aligned}
\texttt{FOAFCore} &=_{\text{Def}} (C_{foaf}, P_{foaf}, \Omega_{foaf}) \\
C_{foaf} &=_{\text{Def}} \{Agent, Person, Project, Organization, Group, Document, Image\} \\
P_{foaf} &=_{\text{Def}} \{name, title, img, depiction, depicts, familyName, givenName, \\
&\quad , based\_near, age, made, maker, primaryTopic, primaryTopicOf, member\} \\
\Omega_{foaf} &=_{\text{Def}} \{Person \sqsubseteq Agent, Group \sqsubseteq Agent, Organization \sqsubseteq Agent, \\
&\quad Image \sqsubseteq Document, \mathrm{dom}(title) \sqsubseteq Document, \\
&\quad \mathrm{range}(depiction) \sqsubseteq Image, img \sqsubseteq depiction, \mathrm{dom}(img) \sqsubseteq Person, \\
&\quad \mathrm{dom}(knows) \sqsubseteq Person, \mathrm{range}(knows) \sqsubseteq Person, \ldots\}
\end{aligned}
$$

Descrizioni Intuitive degli Elementi dei Vocabolari

Le classi e le proprietà di un vocabolario vengono spesso fornite di una descrizione intuitiva nel documento che descrive il vocabolario. Ad esempio, le classi *Agent* e *Person* vengono descritte come segue in `http://xmlns.com/foaf/spec/`

> **Agent** - *The Agent class is the class of agents; things that do stuff. A well known sub-class is Person, representing people. Other kinds of agents include Organization and Group.*
> *The Agent class is useful in a few places in FOAF where Person would have been overly specific. For example, the IM chat ID properties such as jabberID are typically associated with people, but sometimes belong to software bots.*
>
> **Person** - *The Person class represents people. Something is a Person if it is a person. We don't nitpic about whether they're alive, dead, real, or imaginary. The Person class is a sub-class of the Agent class, since all people are considered 'agents' in FOAF.*

Descrizioni Rigorose degli Elementi dei Vocabolari

Tuttavia, già nei vincoli di un vocabolario si trovano indicazioni importanti sulla *semantica* dei nomi di classe e di proprietà del vocabolario stesso.

$$
\begin{array}{l}
\mathit{Person} \sqsubseteq \mathit{Agent} \\
\mathrm{range}(\mathit{depiction}) \sqsubseteq \mathit{Image} \\
\mathit{img} \sqsubseteq \mathit{depiction}, \\
\mathrm{dom}(\mathit{img}) \sqsubseteq \mathit{Person}, \\
\mathrm{dom}(\mathit{knows}) \sqsubseteq \mathit{Person}, \\
\mathrm{range}(\mathit{knows}) \sqsubseteq \mathit{Person}, \\
\ldots
\end{array}
$$

Vocabolari Compositi

È possibile costruire un vocabolario *estendendone* un'altro. Ad esempio, il vocabolario *Organization Ontology* (in breve *ORG*, vedi `http://www.w3.org/TR/vocab-org/`) estende FOAF con classi e proprietà, per modellare in dettaglio le strutture organizzative di aziende, associazioni e tutte le forme di organizzazioni.

Formalmente, dati due vocabolari

$$\begin{array}{lll} V & =_{\text{Def}} & (C, P, \Omega) \\ V' & =_{\text{Def}} & (C', P', \Omega') \end{array}$$

si dice che V' *importa* (o *estende*) V se e solo se

$$\begin{array}{ccc} C & \subseteq & C' \\ P & \subseteq & P' \\ \Omega & \subseteq & \Omega' \end{array}$$

Il Vocabolario Organization Ontology

Organization Ontology, in breve *ORG*,[2] estende FOAF con classi e proprietà, per modellare in dettaglio le strutture organizzative di aziende, associazioni e tutte le forme di organizzazioni.

Il vocabolario è disponibile alle URL

`http://www.w3.org/ns/org.rdf`

`http://www.w3.org/ns/org.ttl`

Il namespace del vocabolario ORG è

`org : http://www.w3.org/ns/org#`

$$
\begin{aligned}
\mathtt{ORG} &=_{\text{Def}} (C_{org}, P_{org}, \Omega_{org}) \\
C_{org} &=_{\text{Def}} C_{foaf} \cup \{\mathit{FormalOrganization}, \mathit{OrganizationalUnit}, \mathit{Site} \\
&\qquad \mathit{Post}, \mathit{Role}, \ldots\} \\
P_{org} &=_{\text{Def}} P_{foaf} \cup \{\mathit{basedAt}, \mathit{classification}, \mathit{hasPost}, \mathit{hasPrimarySite}, \\
&\qquad \mathit{hasRegisteredSite}, \mathit{hasSite}, \mathit{hasSubOrganization}, \\
&\qquad \mathit{hasUnit}, \mathit{headOf}, \mathit{heldBy}, \mathit{holds}, \mathit{location}, \mathit{postIn}, \\
&\qquad \mathit{purpose}, \mathit{role}, \mathit{siteAddress}, \mathit{siteOf}, \mathit{unitOf}, \\
&\qquad \mathit{subOrganizationOf}, \mathit{transitiveSubOrganizationOf}, \ldots\} \\
\Omega_{org} &=_{\text{Def}} \Omega_{foaf} \cup \{\mathit{FormalOrganization} \sqsubseteq \mathit{Organization},
\end{aligned}
$$

Il Vocabolario Organization Ontology

Organization Ontology,in breve *ORG*,[2] estende FOAF con classi e proprietà, per modellare in dettaglio le strutture organizzative di aziende, associazioni e tutte le forme di organizzazioni.

Il vocabolario è disponibile alle URL

`http://www.w3.org/ns/org.rdf`

`http://www.w3.org/ns/org.ttl`

Il namespace del vocabolario ORG è

`org : http://www.w3.org/ns/org#`

$$\begin{aligned}
\mathtt{ORG} &=_{\text{Def}} (C_{org}, P_{org}, \Omega_{org}) \\
C_{org} &=_{\text{Def}} C_{foaf} \cup \{FormalOrganization, OrganizationalUnit, Site \\
&\qquad Post, Role, \ldots\} \\
P_{org} &=_{\text{Def}} P_{foaf} \cup \{basedAt, classification, hasPost, hasPrimarySite, \\
&\qquad hasRegisteredSite, hasSite, hasSubOrganization, \\
&\qquad hasUnit, headOf, heldBy, holds, location, postIn, \\
&\qquad purpose, role, siteAddress, siteOf, unitOf, \\
&\qquad subOrganizationOf, transitiveSubOrganizationOf, \ldots\} \\
\Omega_{org} &=_{\text{Def}} \Omega_{foaf} \cup \{FormalOrganization \sqsubseteq Organization,
\end{aligned}$$

Il Vocabolario Organization Ontology

Organization Ontology,in breve *ORG*,[2] estende FOAF con classi e proprietà, per modellare in dettaglio le strutture organizzative di aziende, associazioni e tutte le forme di organizzazioni.

Il vocabolario è disponibile alle URL

`http://www.w3.org/ns/org.rdf`

`http://www.w3.org/ns/org.ttl`

Il namespace del vocabolario ORG è

org : `http://www.w3.org/ns/org#`

$$
\begin{aligned}
\mathtt{ORG} &=_{\mathrm{Def}} (C_{org}, P_{org}, \Omega_{org}) \\
C_{org} &=_{\mathrm{Def}} C_{foaf} \cup \{FormalOrganization, OrganizationalUnit, Site\\
&\qquad Post, Role, \ldots\} \\
P_{org} &=_{\mathrm{Def}} P_{foaf} \cup \{basedAt, classification, hasPost, hasPrimarySite,\\
&\qquad hasRegisteredSite, hasSite, hasSubOrganization,\\
&\qquad hasUnit, headOf, heldBy, holds, location, postIn,\\
&\qquad purpose, role, siteAddress, siteOf, unitOf,\\
&\qquad subOrganizationOf, transitiveSubOrganizationOf, \ldots\} \\
\Omega_{org} &=_{\mathrm{Def}} \Omega_{foaf} \cup \{FormalOrganization \sqsubseteq Organization,
\end{aligned}
$$

Il Vocabolario Organization Ontology

Ad esempio, il vocabolario *Organization Ontology* (in breve *ORG*, vedi `http://www.w3.org/TR/vocab-org/`) estende FOAF con classi e proprietà, per modellare in dettaglio le strutture organizzative di aziende, associazioni e tutte le forme di organizzazioni.

$$\mathtt{ORG} =_{\mathrm{Def}} (C_{org}, P_{org}, \Omega_{org})$$

$$C_{org} =_{\mathrm{Def}} C_{foaf} \cup \{FormalOrganization, OrganizationalUnit, Site, Post, Role, \ldots\}$$

$$P_{org} =_{\mathrm{Def}} P_{foaf} \cup \{basedAt, classification, hasPost, hasPrimarySite, hasRegisteredSite, hasSite, hasSubOrganization, hasUnit, headOf, heldBy, holds, location, postIn, purpose, role, siteAddress, siteOf, unitOf, subOrganizationOf, transitiveSubOrganizationOf, \ldots\}$$

$$\Omega_{org} =_{\mathrm{Def}} \Omega_{foaf} \cup \{\mathbf{FormalOrganization} \sqsubseteq \mathbf{Organization}, \mathbf{OrganizationalUnit} \sqsubseteq \mathbf{Organization}, headOf \sqsubseteq memberOf, \mathrm{dom}(hasUnit) \sqsubseteq Organization, \mathrm{range}(hasUnit) \sqsubseteq OrganizationalUnit, \ldots\}$$

NOTA: I vincoli semantici esplicitano la relazione tra i due vocabolari.

Vocabolari e Ontologie - Struttura del Comune di Catania

È buona norma definire ontologie facendo riferimento a vocabolari ben noti.

Definiamo ad esempio una ontologia per descrivere la struttura organizzativa del *comune di Catania* (vedi `http://www.dmi.unict.it/~longo/comunect/`) a partire dal vocabolario ORG.

Il sindaco del comune di Catania è *Enzo Bianco*

$$\mathcal{O}_{CT} = \quad \{ EnzoBianco\ headOf\ ComuneCT$$

Vocabolari e Ontologie - Struttura del Comune di Catania

È buona norma definire ontologie facendo riferimento a vocabolari ben noti.

Definiamo ad esempio una ontologia per descrivere la struttura organizzativa del *comune di Catania* (vedi `http://www.dmi.unict.it/~longo/comunect/`) a partire dal vocabolario ORG.

Fanno direttamente capo al comune il *gabinetto del sindaco*, la *polizia municipale* e la *direzione affari legali*.

$$\begin{aligned} \mathcal{O}_{CT} = \Sigma_{org} \cup \quad & \{EnzoBianco\ headOf\ ComuneCT, \\ & ComuneCT\ hasUnit\ GabinettoDelSindaco, \\ & ComuneCT\ hasUnit\ PoliziaMunicipale, \\ & ComuneCT\ hasUnit\ AffariLegali, \end{aligned}$$

Vocabolari e Ontologie - Struttura del Comune di Catania

È buona norma definire ontologie facendo riferimento a vocabolari ben noti.

Definiamo ad esempio una ontologia per descrivere la struttura organizzativa del *comune di Catania* (vedi `http://www.dmi.unict.it/~longo/comunect/`) a partire dal vocabolario ORG.

Il comune comprende inoltre diverse *direzioni*, raggruppate in due macro-aree.

$$
\begin{aligned}
\mathcal{O}_{CT} = \Sigma_{org} \cup \quad & \{ \mathit{EnzoBianco\ headOf\ ComuneCT}, \\
& \mathit{ComuneCT\ hasUnit\ GabinettoDelSindaco}, \\
& \mathit{ComuneCT\ hasUnit\ PoliziaMunicipale}, \\
& \mathit{ComuneCT\ hasUnit\ AffariLegali}, \\
& \mathit{ComuneCT\ hasUnit\ Area1}, \\
& \mathit{ComuneCT\ hasUnit\ Area2},
\end{aligned}
$$

Vocabolari e Ontologie - Struttura del Comune di Catania

È buona norma definire ontologie facendo riferimento a vocabolari ben noti.

Definiamo ad esempio una ontologia per descrivere la struttura organizzativa del *comune di Catania* (vedi `http://www.dmi.unict.it/~longo/comunect/`) a partire dal vocabolario ORG.

Il comune comprende inoltre diverse *direzioni*, raggruppate in due macro-aree.

$$\begin{aligned}\mathcal{O}_{CT} = \Sigma_{org} \cup \quad & \{EnzoBianco\ headOf\ ComuneCT,\\ & ComuneCT\ hasUnit\ GabinettoDelSindaco,\\ & ComuneCT\ hasUnit\ PoliziaMunicipale,\\ & ComuneCT\ hasUnit\ AffariLegali,\\ & ComuneCT\ hasUnit\ Area1,\\ & ComuneCT\ hasUnit\ Area2,\\ & Area1\ hasUnit\ RisorseUmane,\\ & Area1\ hasUnit\ Istruzione,\\ & Area1\ hasUnit\ Famiglia,\\ & Area1\ hasUnit\ Ecologia,\\ & Area1\ hasUnit\ Manutenzione,\\ & Area1\ hasUnit\ LavoriPubblici,\end{aligned}$$

Vocabolari e Ontologie - Struttura del Comune di Catania

È buona norma definire ontologie facendo riferimento a vocabolari ben noti.

Definiamo ad esempio una ontologia per descrivere la struttura organizzativa del *comune di Catania* (vedi `http://www.dmi.unict.it/~longo/comunect/`) a partire dal vocabolario ORG.

Il comune comprende inoltre diverse *direzioni*, raggruppate in due macro-aree.

$$
\begin{aligned}
\mathcal{O}_{CT} = \Sigma_{org} \cup \quad & \{EnzoBianco\ headOf\ ComuneCT, \\
& ComuneCT\ hasUnit\ GabinettoDelSindaco, \\
& ComuneCT\ hasUnit\ PoliziaMunicipale, \\
& ComuneCT\ hasUnit\ AffariLegali, \\
& ComuneCT\ hasUnit\ Area1, \\
& ComuneCT\ hasUnit\ Area2, \\
& Area1\ hasUnit\ RisorseUmane, \\
& Area1\ hasUnit\ Istruzione, \\
& Area1\ hasUnit\ Famiglia, \\
& Area1\ hasUnit\ Ecologia, \\
& Area1\ hasUnit\ Manutenzione, \\
& Area1\ hasUnit\ LavoriPubblici, \\
& Area2\ hasUnit\ Patrimonio, \\
& Area2\ hasUnit\ ServiziDemografici, \\
& Area2\ hasUnit\ Turismo, \\
& Area2\ hasUnit\ Urbanistica, \\
& Area2\ hasUnit\ AttivitaProduttive, \\
& Area2\ hasUnit\ Economato\}
\end{aligned}
$$