

# An Artificial Intelligence Approach to Industrial Design Support Un Approccio di Intelligenza Artificiale a Sostegno del Disegno Industriale

Ming Xi Tang

School of Design, The Hong Kong Polytechnic University  
e-mail: sdtang@polyu.edu.hk

## Abstract

Il processo di Disegno Industriale si estende dalle analisi di mercato, dalla concettualizzazione, dalla generazione della forma alla formulazione di previsioni, all'analisi ingegneristica, all'analisi dell'utente ecc. Questo richiede un ampio raggio di conoscenza del design, e delle tecniche provenienti da discipline diverse. Il supporto al disegno industriale basato sul computer è limitato perchè la maggioranza dei sistemi CAD gestiscono solo modelli geometrici e rappresentazioni. Il recente sviluppo nelle tecniche generative utilizzando metodi di calcolo evolutivi, fornisce un'opportunità per lo studio di modi più creativi e sistematici per supportare il processo di disegno industriale. Tuttavia, uno dei problemi associati con le tecniche generative esistenti è la difficoltà nel valutare un elevato numero di soluzioni generate da un sistema generativo. Questa relazione affronta questo problema presentando una struttura di un possibile sistema per il supporto al disegno industriale attraverso un'applicazione integrata di tecniche di Intelligenza Artificiale.

## 1. Introduzione

La ricerca in tecnologie avanzate di progettazione affronta campi come la rappresentazione e la sistematizzazione della conoscenza e dell'informazione del design, il controllo intelligente del processo di design, il mantenimento costante delle basi della conoscenza del design, la documentazione della storia del

## Abstract

The process of Industrial Design extends from market analysis, conceptualization, form generation to performance prediction, engineering analysis and user analysis etc. This requires a wide range of design knowledge and techniques from different disciplines. Computer-based support to industrial design is limited because the majority of the CAD systems deal with only geometric models and representations. The recent advancement in generative techniques utilizing evolutionary computation methods provides an opportunity for the study of more creative and systematic ways of supporting the industrial design process. However, one of the problems associated with the existing generative techniques is the difficulty in evaluating a large number of solutions generated by a generative system. This paper addresses this problem by presenting a system framework for industrial design support through an integrated application of Artificial Intelligence techniques.

## 1. Introduction

Research in advanced design technology is concerned with representation and systematization of design knowledge and information, intelligent control of design process, consistent maintenance of design knowledge bases, documentation of design history, 3D graphical explanation of product and design exploration process, application of evolutionary computing and machine

design, la spiegazione grafica tridimensionale del prodotto e l'esplorazione del processo di design, l'applicazione dei sistemi di calcolo evolutivi e le tecniche di apprendimento della macchina [Smithers *et al* 1990 e 1993]. Tuttavia, i metodi e le tecniche sviluppati nell'Intelligenza Artificiale non sono stati sufficientemente resi operativi e sfruttati nel contesto del disegno industriale.

La progettazione industriale implica l'identificazione di una struttura di base per il problema di progettazione che sarà ulteriormente esplorato.

Qui la struttura di base può essere interpretata come il modello di un artefatto che dev'essere progettato. Le tecniche generative come gli Algoritmi Genetici sono particolarmente utili per l'esplorazione delle idee del progetto e dei concetti che definiscono la struttura del problema di progettazione, usando sia esempi di progettazioni passate sia blocchi metaprogettuali.

Lo sviluppo precedente che ho fatto a proposito del sistema di design generativo includeva un sistema sviluppato al Centro di Engineering Design (Ingegneria Progettuale) all'Università di Cambridge. Il sistema, chiamato Integrated Functional Modeling o IFM (sistema Integrato di Modellazione Funzionale), era un'applicazione integrata alle tecniche dell'AI (Intelligenza Artificiale) nel procedimento di progettazione Ingegneristica Meccanica.

Nel sistema IFM, una conoscenza progettuale di base contiene: una libreria di *componenti funzionali*; una gerarchia dell'oggetto progettuale rappresentante la relazione tra questi componenti funzionali; una serie di vincoli per l'assemblaggio degli stessi componenti funzionali e un database contenente modelli geometrici sempre di questi componenti funzionali. Questi ultimi sono descrizioni astratte di elementi progettuali di una macchina di base come *una leva, un albero, una vite* ecc. Possono essere definiti, immagazzinati, recuperati, modificati, visualizzati, e riutilizzati per la progettazione di nuovi prodotti. Alla fase di sviluppo concettuale, un approccio generativo è stato usato per la sintesi di

learning techniques [Smithers *et al* 1990 and 1993]. However, the methods and techniques developed in AI have not been sufficiently validated and exploited in an industrial design context.

Industrial design involves identifying a basic structure for the design problem that can be further explored. It is the most crucial stage in the design process where the basic solution to the design problem is discovered. Here this basic structure can be understood as the model of an artifact to be designed. Generative techniques such as Genetic Algorithms are particularly useful for the exploration of design ideas and concepts that define the design problem structure, using either past design examples or abstract building blocks of design.

Previous development on generative design systems by the author included a system developed at the Engineering Design Centre in Cambridge University. This system, called Integrated Functional Modeling (IFM) system, was an integrated application of AI techniques in Mechanical Engineering design process.

In the IFM system, a design knowledge base contains: a library of *functional components*; a design object hierarchy representing the relationships between these functional components; a set of constraints for the assembly of these functional components; and a database containing geometric models of these functional components. Functional components are abstract descriptions of basic machine design elements such as *lever, shaft, screw* etc. They can be defined, stored, retrieved, modified, visualized, and reused for the design of new products.

At the conceptual development stage, a generative approach was used for the synthesis of conceptual product data models at *function, orientation* and *direction* levels. A number of functional components are selected first by a designer. A complete set of configuration combination involving one or more selected functional components is generated by the computer using a generative algorithms described in [Chakrabart *et al* 1996]. Each in this complete set is evaluated

modelli di dati prodotti concettualmente, a livelli di *funzione*, di *direzione*, di *orientamento*. In primo luogo un numero di componenti funzionali veniva selezionato da un progettista. Una collezione completa di configurazioni di combinazioni che coinvolge uno o più componenti funzionali selezionati è generata dal computer usando un algoritmo generativo descritto nel testo di seguito citato [Chakrabarti *et al* 1996].” Ogni configurazione in questa collezione completa è considerata contro il criterio se trasmette la funzione di input intesa alla funzione di output. Diventano validi in questo test i concetti di soluzione funzionale, e vengono portati avanti per una sintesi di orientamento. Il processo di sintesi di orientamento usa la stessa strategia generata-e-testata per generare una serie di possibili soluzioni di orientamento per una soluzione funzionale scelta. Nello stesso modo, il processo di sintesi di direzione genera una serie di soluzioni di direzione per ogni soluzione di orientamento scelta. Il risultato finale di questi processi di sintesi è una larga serie di possibili concetti progettuali astratti. Ogni concetto astratto di progettazione identifica i componenti funzionali e la loro sistemazione topologica per soddisfare una determinata richiesta progettuale in termini di una funzione di input/output, di orientamento e di direzione” [Chakrabarti *et al* 1996].

Nella fase progettuale di concretizzazione, un concetto progettuale astratto è mappato in un modello di concretizzazione del prodotto contenente delle variabili progettuali e dei vincoli che descrivono le sue relazioni geometriche e cinematiche. Le variabili progettuali e i vincoli possono essere manipolate usando un *gestore di vincoli*. Quest'ultimo impiega metodi simbolici di calcolo e la progettazione euristica per definire uno spazio di possibili valori delle variabili progettuali. I programmi di ottimizzazione come gli Algoritmi Genetici vengono impiegati in questa fase come supporto all'esplorazione di questo spazio. Questo processo di esplorazione tratta un problema progettuale come una *ricerca diretta all'obiettivo*, dove quest'ultimo consiste nel minimizzare il numero di vincoli non soddisfatti.

against the criterion whether it transmits the intended input function to output function. Valid ones in this test become functional solution concepts and are put forward for orientation synthesis. The orientation synthesis process uses the same generate-and-test strategy to generate a set of all possible orientation solutions for one chosen functional solution. In the same way, the direction synthesis process generates a set of direction solutions for each chosen orientation solution. The final result of these synthesis processes is a large set of possible abstract design concepts. Each abstract design concept identifies the functional components and their topological arrangement to the satisfaction of a stated design requirement in terms of input/output function, orientation and direction [Chakrabarti *et al* 1996].

At the embodiment design stage, an abstract design concept is mapped into a product embodiment model containing design variables and constraints describing its geometric and kinematic relations. The design variables and constraints can be manipulated using a *constraint manager*. The constraint manager employs symbolic computation methods and design heuristics to define a space of possible design variable values. Optimization programs such as Genetic Algorithms are employed at this stage to support the exploration of this space. This exploration process treats a design problem as a *goal-directed search*, the goal being to minimize the number of unsatisfied constraints.

This generative approach produced good and unexpected conceptual design solutions [Chakrabarti *et al* 1996]. Unlike many other generative systems in which intermediate candidates are discarded during the process of evolution, in this approach all possible solutions were kept in the system and the designers played an important role in the evaluation, i.e., in choosing which design branch to follow during the process. However, the following problems with this generative approach were observed:

Questo approccio generativo produceva delle soluzioni progettuali concettuali buone ed inaspettate [Chakrabarti *et al* 1996]. Non come in molti altri sistemi generativi nei quali i candidati intermedi vengono scartati durante il processo di evoluzione: in questo approccio tutte le possibili soluzioni sono state prese nel sistema ed i progettisti giocavano un ruolo importante nella valutazione, nel scegliere che ramo del progetto seguire durante il procedimento. Tuttavia con questo approccio generativo sono stati osservati i seguenti problemi:

- I modelli concettuali generati dalla sintesi del programma sono troppo astratti.
- Un gran numero di modelli concettuali generati dal sistema non possono essere valutati facilmente e quindi specificati ulteriormente.
- Il gestore dei vincoli ha fallito nel trattare le relazioni complesse inerenti in un prodotto complesso.
- Gli algoritmi genetici come strumento di soddisfacimento dei vincoli non possono essere applicati facilmente a un problema generale di concretizzazione progettuale.

## 2. Un modello generativo di progettazione

Il disegno industriale conduce i giochi nel processo progettuale quando i fatti sono stabiliti, quando la conoscenza è raggruppata, quando i vincoli sono identificati, quando i problemi sono esplicitati e le soluzioni trovate. Le tecniche di apprendimento generative e della macchina giocano un ruolo importante nel sostenere questi compiti formando una struttura organizzata di conoscenza da diverse fonti (blocchi originali di costruzioni progettuali, concetti di dominio astratto ed euristiche progettuali) che possono essere esplorate per derivare delle utili soluzioni progettuali [Dietterich *et al* 1981, Stepp *et al* 1986, Duffy *et al* 1993, Quinlan 1986, e Reich 1993].

Per costruire una base teoretica per lo sviluppo di una struttura di supporto al disegno industriale, viene proposto un modello generativo di progettazione. Questo modello rappresenta un processo che si svolge in quat-

I The conceptual models generated by the synthesis program are too abstract.

I A large number of conceptual models generated by the system cannot easily be evaluated and further specialized.

I The constraint manager failed to deal with complex relations inherent in a complex product.

I Genetic Algorithms as a constraint satisfaction tool cannot be easily applied to a general embodiment design problem.

## 2. A generative model of design

Industrial design leads the way in the design process when facts are established, knowledge is gathered, constraints are identified, problems are realized and the solutions are found. Generative and machine learning techniques play an important role in supporting these tasks by forming an organized knowledge structure from different sources (original design building blocks, abstract domain concepts and design heuristics) that can be explored to derive useful design solutions [Dietterich *et al* 1981, Stepp *et al* 1986, Duffy *et al* 1993, Quinlan 1986, and Reich 1993].

In order to provide a theoretical basis for the development of a framework for industrial design support, a generative model of design is proposed. This model involves a four-phases process: generation, clustering, specialization and evaluation, as illustrated in Figure 1:

The first phase is generative in nature. In this phase, a set of abstract design concepts is generated by considering a limited set of plausible values for a chosen set of key design variables. This set of key design variables defines at an abstract level the structure of the design concepts that can be browsed by the designers.

The second phase involves an inductive learning process. In this phase, the abstract design concepts generated in the first phase are clustered and characterized according their common features. Inductive learning techniques utilizing design heuristics provided by the designers are used to build a *design*

tro fasi: generazione, raggruppamento, specializzazione e valutazione, come illustrato nella Figura 1.

La prima fase è di natura generativa. In questa fase, una serie di concetti progettuali astratti è generata considerando un numero limitato di valori plausibili per una serie scelta di variabili progettuali chiave. Questa serie di variabili progettuali chiave definisce a livello astratto la struttura dei concetti progettuali che possono essere letti dai progettisti.

La seconda fase coinvolge un processo di apprendimento induttivo. In questa fase, i concetti progettuali astratti generati nella prima fase sono raggruppati e caratterizzati in accordo con le loro caratteristiche comuni. Le tecniche induttive di apprendimento utilizzando le euristiche progettuali fornite dai progettisti vengono usate per co-

struire un *albero di concetti progettuali*. Ciascun nodo nell'albero dei concetti progettuali rappresenta un'importante caratteristica. L'albero dei concetti progettuali visto come un insieme rappresenta una struttura organizzata di conoscenza nella quale la conoscenza implicita concretizzata nei concetti progettuali originali viene esplicitata, tutto ciò aiutando i progettisti a valutare solo i concetti progettuali importanti piuttosto che tutti.

La terza fase affronta la specializzazione di particolari concetti progettuali selezionati dai progettisti. In questa fase, un concetto pro-

*concept tree*. Each node in the design concept tree represents one important feature. The design concept tree as a whole represents an organized knowledge structure in which implicit knowledge embodied in the original design concepts is made explicit, thus helping the designers to evaluate important

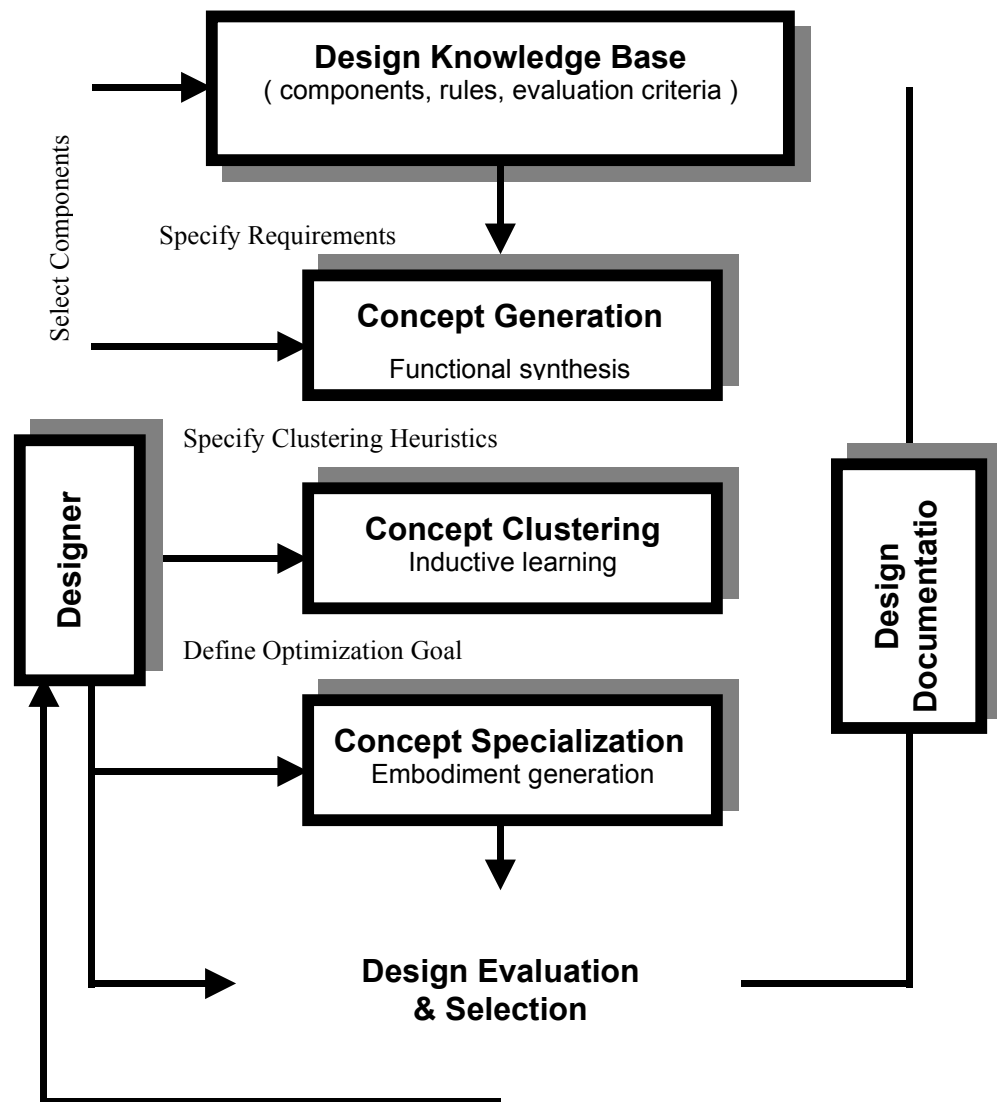


Figure 1: A Generative Model of Design

instead of all the design concepts.

The third phase deals with the specialization of particular design concepts selected by the designers. In this phase, a design concept is further analyzed by making plausible changes to parts of it in an attempt to explore its more detailed performances or desired behavior (or properties) that is not represented by those key design variables defined in the first phase. In this specialization phase, different assumptions/changes on key design variables can be made in order to obtain

gettuale è analizzato in profondità facendo dei cambiamenti plausibili a parti di esso, nel tentativo di esplorare le sue prestazioni più dettagliate o il suo comportamento desiderato (o le sue proprietà) che non è rappresentato da quelle variabili progettuali chiave definite nella prima fase. In questa fase di specializzazione, differenti assunzioni/cambiamenti sulle variabili progettuali chiave possono essere fatte per ottenere risultati progettuali multipli. Delle nuove variabili progettuali possono essere aggiunte ad un concetto progettuale attraverso una struttura gerarchica della conoscenza rappresentante diversi livelli di complessità in termini di funzione di prodotto, di comportamento dinamico, di assemblaggio ecc. Un sistema di supporto progettuale viene usato in questa fase per supportare le derivazioni di qualsiasi assunzione/cambiamento.

La quarta fase è la valutazione, che agisce considerando i concetti progettuali specializzati a fronte della descrizione progettuale richiesta per scoprire se un particolare concetto progettuale è accettabile. Se una soluzione progettuale è accettabile, viene quindi trasferita alla base di conoscenza progettuale come un nuovo esempio per un uso futuro. Diversamente, vengono esplorati concetti progettuali alternativi.

In questo modello, le attività di concettualizzazione, di apprendimento e di progettazione vengono supportate da un numero di metodi di Intelligenza Artificiale in maniera cooperativa ed integrata. Questo modello generativo è appropriato per i compiti del disegno industriale nel momento in cui, nella fase di progettazione industriale, poco si conosce a proposito dei problemi di progettazione e delle loro soluzioni.

118

### 3. Implementazione ed integrazione

La realizzazione di cui abbiamo parlato sopra che descriveva un modello generativo di progettazione coinvolge l'integrazione dei seguenti componenti di calcolo: una base di conoscenza progettuale, un sistema di apprendimento del concetto progettuale, ed un'ambiente integrato di supporto alla progettazione industriale.

multiple design results. New design variables can be added to a design concept through a hierarchical knowledge structure representing different levels of complexity in terms of product function, dynamic behavior and assembly etc. A design support system is used in this phase to support the derivations of any assumptions/changes.

The fourth phase is the evaluation, which involves matching the specialized design concepts against the design requirement description to find out whether a particular design concept is acceptable. If a design solution is acceptable, then it is transferred to the design knowledge base as a new example for future use. Otherwise alternative design concepts are explored.

In this model, conceptualizing, learning, designing activities are supported by a number of Artificial Intelligence methods in a co-operative and integrated manner. This generative model is suitable for industrial design tasks in that at the industrial design stage, little is known about the design problem and its solutions.

### 3. Implementation and integration

The implementation of above described generative model of design involves the integration of following computational components: a design knowledge base, a design concept learning system, and an integrated industrial design support environment.

#### 3.1 The design knowledge base

A *design knowledge base* provides design knowledge in a *behavioral*, *functional* and *structural* vocabulary in a computer-based design system. In such a knowledge base, a structural relationship between design objects determines how objects are geometrically or physically related to each other. For example, the characteristics of a power train can be derived from its constituent components such as piston, crank pin, crank web, crank, shaft, bearing etc. A functional relationship between design objects relates objects in terms of their performances or behavior such as input/output transmission, or their

### 3.1 La base di conoscenza progettuale

Una *base di conoscenza progettuale* fornisce una conoscenza progettuale ad un vocabolario *comportamentale, funzionale e strutturale* in un sistema progettuale basato sul computer. In una base conoscitiva come questa, una relazione strutturale tra gli oggetti progettuali determina il come gli oggetti sono relazionati geometricamente e fisicamente tra di loro. Per esempio, le caratteristiche di un treno potente possono essere derivate dai suoi componenti costitutivi come un pistone, l'albero principale, la manovella, il sistema di manovelle, il cuscinetto ecc. Una relazione funzionale tra gli oggetti progettuali li mette in relazione in termini di prestazioni o di comportamento come una trasmissione di input/output, o mette in relazione la loro attinenza a particolari richieste progettuali e agli obiettivi progettuali. Una relazione casuale tra due oggetti progettuali decide come loro

relevance to a particular design requirement and design task. A causal relationship between two design objects decides how they depend on each other and what the consequences are of a change in either of them.

The design knowledge base contains predefined product data models. A product data model contains the relevant product description information such as *specification, function, attributes, behavior, documentation, geometry, history, and its associated sizing methods* etc.

Figure 2 illustrates an object-oriented representation of a general product data model. In this representation a product has an assembly and a document. A product assembly consists of parts. Each part has sub-parts. A sub-part is itself an instance of another part. A sub-assembly is itself an instance of another assembly. The *recursive* use of parts and assemblies allows the

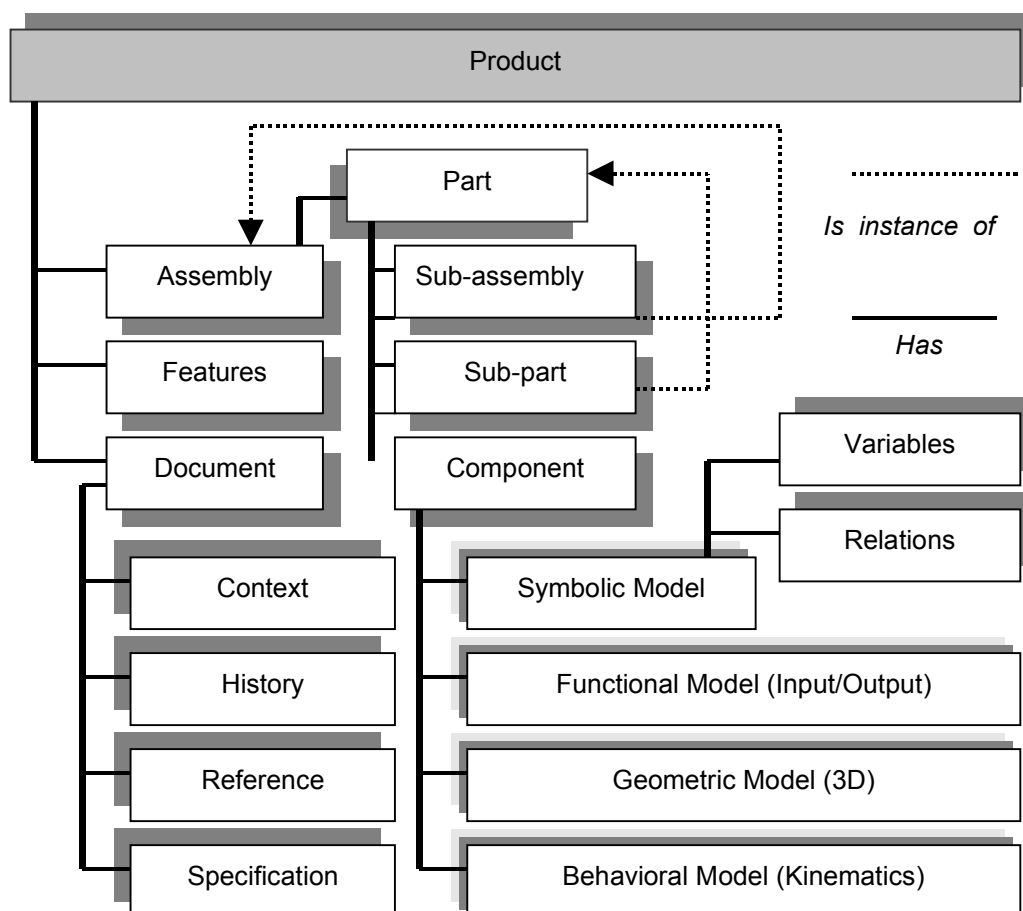


Figure 2: A product data model for industrial design support

dipendono l'uno dall'altro e quali sono le conseguenze di un cambiamento in ognuno di loro.

La base di conoscenza progettuale contiene dei data-modelli di prodotti predefiniti. Un data-modello di un prodotto contiene un'informazione descrittiva attinente al prodotto come la sua *specificazione*, la sua *funzione*, i suoi *attributi*, il suo *comportamento*, la sua *documentazione*, la sua *geometria*, la sua *storia* ed i suoi *metodi associati di grandezza* ecc.

La Figura 2 illustra una rappresentazione di orientamento di un oggetto, di un data-modello di un prodotto generale. In questa rappresentazione un prodotto ha un'assemblaggio ed un documento di riferimento. L'assemblaggio di un prodotto consiste di parti. Una sotto-parte è essa stessa un'istanza per un'altra parte. Un sotto-assemblaggio è esso stesso un'istanza per un altro assemblaggio. L'uso *ricursivo* di par-

development of uniform computer programs capable of manipulating complex product data models.

Each sub-part has components, each of which has symbolic, functional, geometric, and behavioral models. For example, the function of a shaft is to transform an input torque to an output torque. The shaft has variables such as diameter and length to define its geometry, and speed, bearing force, torque, power and mass to define its dynamic behavior.

Functional, geometric and behavioral models can be more easily understood by designers, and more effectively associated with domain dependent contexts for the purpose of design analysis and product data visualization. These models, however, need to be mapped into a symbolic model consisting of variables and relations for effective and efficient computer manipulation using AI-based methods such as Genetic



ti e di assemblaggi permette lo sviluppo di programmi per computer uniformi, capaci di manipolare data-modelli di prodotti complessi.

Ogni sotto-parte ha dei componenti, ognuno dei quali ha dei modelli simbolici, funzionali, geometrici, e comportamentali. Per esempio, la funzione di un albero è di trasformare una coppia di entrata in una coppia di uscita. L'albero possiede delle variabili come il diametro e la lunghezza per definire la sua geometria, e variabili come la velocità, la coppia, la forza del cuscinetto, la potenza e la massa per definire il suo comportamento dinamico.

I modelli funzionali, geometrici e comportamentali, possono essere capiti più facilmente dai progettisti, ed associati in maniera più efficace ai contesti dipendenti dal dominio, per uno scopo di analisi progettuale e di visualizzazione di dati del prodotto. Questi modelli, tuttavia, necessitano di essere mappati in un modello simbolico, che consiste in variabili e relazioni, usando metodi basati sull'AI come gli Algoritmi Genetici, per una manipolazione al computer effettiva ed efficiente, per un'ottimizzazione e per una gestione migliore dei vincoli [Frazer 1995].

### 3.2 Il sistema di apprendimento del concetto progettuale

Il Sistema di Apprendimento del Concetto Progettuale (o DCLS - Design Concept Learning System) adotta un approccio di apprendimento non controllato dall'alto per raggruppare i concetti progettuali astratti generati dal sistema di sintesi. La struttura di base del DCLS è illustrata nella Figura 3. I dati di input del DCLS sono una serie di concetti progettuali astratti. Ogni concetto ha un numero di scomparti che rappresentano entrambi i singoli attributi di valori nominali e numerici.

Tre diverse strategie di apprendimento vengono assunte dal DCLS:

- un approccio non incrementale;
- un approccio incrementale e di divisione;
- un approccio euristico.

La prima strategia adotta un algoritmo agglomerativo perfezionato per raggruppare

Algorithms for constraint management and optimization [Frazer 1995].

### 3.2 The design concept learning system

The Design Concept Learning System (DCLS) adopts an unsupervised learning approach for clustering abstract design concepts generated by the synthesis system. The basic structure of DCLS is illustrated in Figure 3. The input data to the DCLS is a set of abstract design concepts. Each concept has a number of slots representing either single attribute of nominal or numeric values.

Three different learning strategies are employed by the DCLS:

- I non-incremental approach;
- I incremental and divisive approach; and
- I heuristic-based approach.

The first strategy adopts an improved agglomerative algorithm to cluster design examples into a design concept tree. In this approach, attributes of design concepts can be selected by the user for the system to generate clusters, each of which can be classified further using another set of selected attributes, thus forming the so-called nested clusters reflecting designer's views. This strategy is suitable for organizing data or past designs into a hierarchical or nested structure during the design knowledge acquisition stage.

The second strategy builds a design concept tree in an incremental and divisive manner so that design concepts can be added to or deleted from the design concept tree, allowing the designers to observe the influence of particular design concepts to the features represented by the design concept tree. This strategy is necessary because of the incremental nature of the conceptual design process. Compared with the first strategy, this one cannot generate nested structures, but it allows design concepts to be processed incrementally.

The third strategy uses design heuristic knowledge as background knowledge to sort design concepts through a pre-defined or user specified specialization structure. In this approach, the levels of concept represented

gli esempi progettuali in un albero del concetto progettuale. In questo approccio, gli attributi dei concetti progettuali possono essere selezionati dall'utente per il sistema, per generare raggruppamenti, ognuno dei quali può essere classificato successivamente usando un'altra serie di attributi selezionati, che formano i cosiddetti raggruppamenti nidificati che rispecchiano i punti di vista del progettista. Questa strategia è appropriata per organizzare dati o progetti passati in una struttura gerarchica o nidificata durante la fase di acquisizione della conoscenza progettuale.

La seconda strategia costruisce un albero del concetto progettuale in maniera articolata ed incrementale così che i concetti progettuali possano essere aggiunti o cancellati dall'albero, permettendo al progettista di osservare l'influenza di particolari concetti progettuali sulle caratteristiche rappresentate dall'albero. Questa strategia è necessaria a causa della natura incrementale del processo di progettazione concettuale. Comparata con la prima strategia, la seconda non può generare strutture nidificate, ma permette ai concetti progettuali di essere trattati in maniera incrementale.

La terza strategia usa la conoscenza euristica progettuale come conoscenza di fondo per ordinare i concetti progettuali attraverso una struttura predefinita o di specializzazione specificata dall'utente. In questo approccio, i livelli di concetto rappresentati dall'albero del concetto progettuale sono influenzati usando i concetti del dominio e le loro relazioni che già appartengono ad un sistema come *conoscenza di fondo*. Questo fornisce un modo di accertare l'attinenza di una serie di concetti progettuali generati dal sistema con un concetto progettuale esistente conosciuto al sistema o con un concetto progettuale suggerito dal progettista. Mentre le prime due strategie sono puramente guidate da dati, la terza è guidata sia da dati, sia dalla conoscenza. E' così più flessibile, in termini di integrazione del dominio di conoscenza nel processo di apprendimento.

Il risultato dell'apprendimento è un albero del concetto progettuale strutturato gerarchica-

by the design concept tree is influenced using the domain concepts and their relations already held in the system as *background knowledge*. This provides a way for assessing the relevance of a set of design concepts generated by the system to an existing design concept already known to the system or a design concept suggested by a designer. Whilst the first two strategies are purely data driven, the third strategy is both data driven and knowledge driven. It is therefore more flexible in terms of integrating domain knowledge into the learning process.

The result of the learning is a hierarchically structured design concept tree in which each node has a concept description associated with a subset of instances, as well as a performance evaluation score indicating the quality of that concept description. Nodes higher in the hierarchy represent more general (or more abstract) concepts. A set of domain independent rules has been identified to generalize or specialize the concept nodes in the design concept tree when new examples are supplied or an existing example is deleted from the training set [Tang 1996].

### 3.3 The integration environment

The previous implementation of the IFM system involved a Lisp-based expert system development tool called GoldWorks III and ACIS3D Toolkit via a scheme interface. The library of functional components and synthesis rules were implemented using GoldWorks III. A library of 3D mechanical components was implemented using ACIS3D Toolkit. This environment was considered difficult for the development of a general framework for industrial as well as engineering design [Tang 1997].

A new environment for industrial design is being implemented in the School of Design in the Hong Kong Polytechnic University. This knowledge-based environment, as illustrated in Figure 4, integrates a number of AI and commercial CAD tools for the development of a number of support systems for the design tasks throughout the industrial and engineering design process. A symbolic

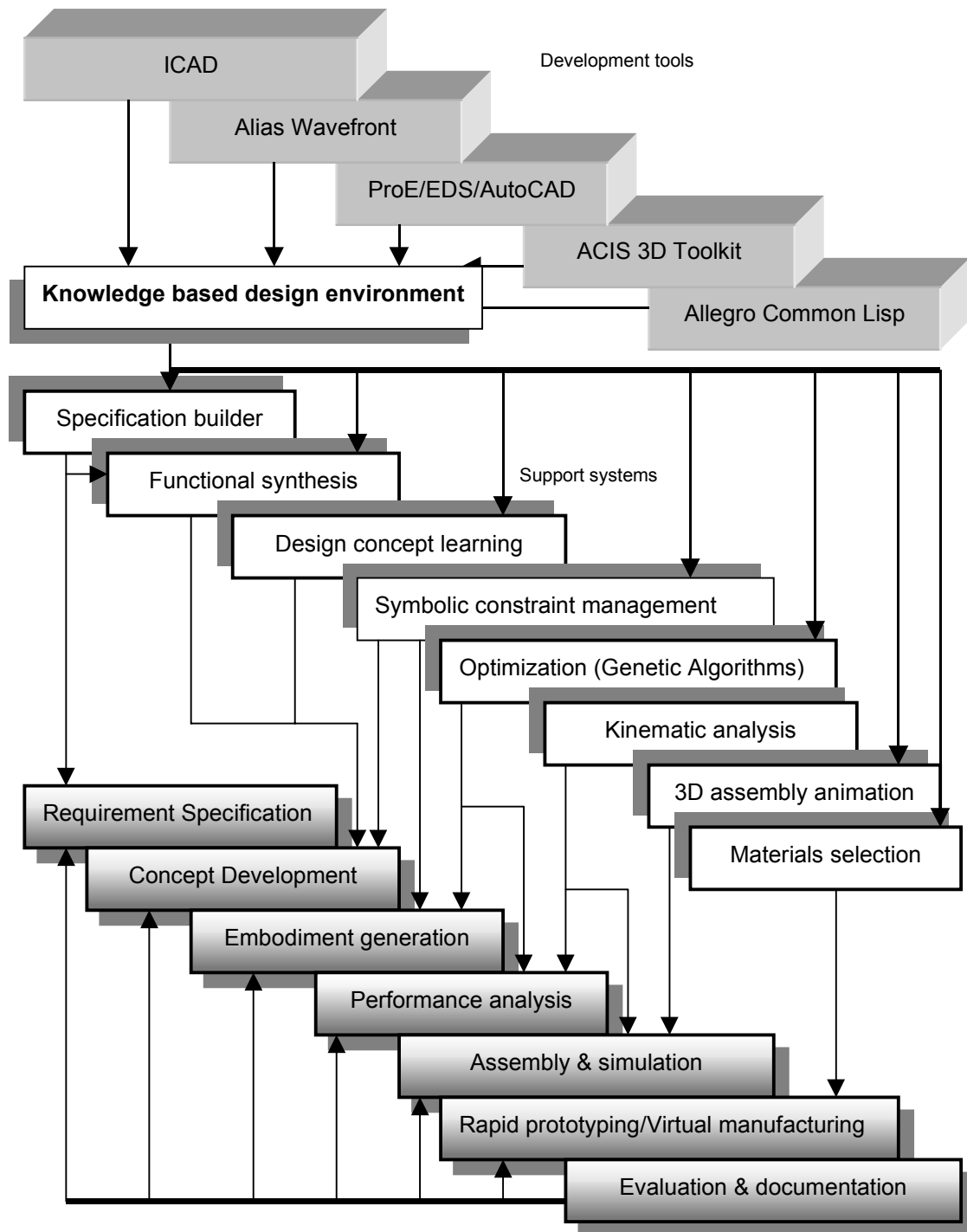


Figure 4: A knowledge-based environment for industrial design

mente nel quale ogni nodo ha una descrizione concettuale associata con una sotto-serie di istanze, così come un punteggio di valutazione prestazionale che indica la qualità di quella descrizione del concetto. I nodi più in alto gerarchicamente rappresentano i concetti più generali (o più astratti). Una serie di regole indipendenti del dominio sono state identificate

constraint management system is a core system in this environment. The facilities of this symbolic constraint manager include: the mapping from a 3D product data model to a symbolic constraint network, the simultaneous satisfaction of a sufficient number of constraints, partitioning and simplification of a large constraint network

per generalizzare o specificare i nodi di concetto nell'albero del concetto progettuale quando dei nuovi esempi vengono aggiunti o un esempio esistente viene cancellato dalla serie trainante [Tang 1996].

### 3.3 L'ambiente d'integrazione

La precedente implementazione del sistema IFM ha portato a sviluppare un sistema specifico basato sul linguaggio informatico Lisp chiamato GoldWorks III e ACIS3D Toolkit (cioè un insieme di strumenti) attraverso un'interfaccia schematica. La libreria dei componenti funzionali e delle regole di sintesi era implementata con l'uso di GoldWorks III. Una libreria di componenti meccanici tridimensionali era implementata usando ACIS3D Toolkit. Questo ambiente fu considerato difficile per lo sviluppo di una struttura generale per la progettazione industriale così come per quella ingegneristica [Tang 1997].

Si sta perfezionando un ambiente nuovo per la progettazione industriale alla School of Design della Hong Kong Polytechnic University. Questo ambiente basato sulla conoscenza, come illustrato nella Figura 4, integra un numero di strumenti CAD e di AI per lo sviluppo di un numero di sistemi di supporto per dei compiti progettuali per tutto il processo progettuale industriale ed ingegneristico. Un sistema simbolico di gestione del vincolo risulta centrale in questo ambiente. Questo simbolico gestore di vincoli include: la mappatura da un data-modello di un prodotto tridimensionale ad una rete simbolica di vincoli, il simultaneo soddisfacimento di un numero sufficiente di vincoli, la partizione e la semplificazione di una larga rete di vincoli rappresentante un prodotto complesso. Gli Algoritmi genetici, in questo processo, sono usati per un'ottimizzazione del vincolo, mentre gli strumenti del gestore simbolico di vincoli sono usati per permettere di manipolare con una facile interazione con i progettisti i vincoli progettuali.

representing a complex product. Genetic Algorithms are used in this process for constraint optimization while symbolic constraint management facilities are used to allow design constraints to be manipulated with easy interaction with the designers.

### 4. Conclusions

An integrated system is needed in order to support the process of industrial design using Artificial Intelligence techniques. This system should support the specification of industrial design requirements, the synthesis of abstract industrial design concepts from elementary design components, 3D visualization of the design concepts, exploration and evaluation of alternative design concepts. In this way, this integrated system can be seen as a bridge that links generative and AI-based design techniques with commercial CAD systems. This paper has identified the role of inductive learning in the development of generative design systems. The paper has proposed a generative model of design upon which inductive learning techniques are integrated to support conceptual design tasks.

A new software tool called Intelligent CAD (a Lisp-based system) is being used to integrate generative techniques, machine learning techniques with commercial CAID/CAD tools such as Alias Wavefront, ProEngineer and ACIS3D Toolkits. This integration attempts to combine symbolic and geometric representations of product data models to deal with the complexity inherent in engineering design process, thus helping to develop an integrated system for intelligent design support. A key factor for success will be an integrated application of AI techniques on a knowledge-based product data model representing both product and process information required to solve complex design problems. This data structure combines design knowledge (in terms of rules, objects, procedures and constraint networks) with 3D models of functional components, parts and assemblies to allow maximum utilization of designers' expertise and easy interaction with the designers for exploration and

## 5. Conclusioni

Un sistema integrato risulta necessario per supportare il processo di progettazione industriale usando le tecniche dell'Intelligenza Artificiale. Questo sistema sosterrrebbe le richieste della progettazione industriale, la sintesi di concetti astratti della progettazione industriale da componenti progettuali elementari, la visualizzazione tridimensionale dei concetti progettuali, l'esplorazione e la valutazione di concetti progettuali alternativi. In questo modo, questo sistema integrato può essere visto come un ponte che lega le tecniche generative e quelle basate sull'AI con i sistemi commerciali CAD. Questa relazione ha identificato il ruolo dell'apprendimento induttivo nello sviluppo di sistemi progettuali generativi. Questa relazione ha proposto un modello generativo di progettazione sul quale le tecniche di apprendimento induttive sono integrate per supportare gli obiettivi progettuali concettuali. Un nuovo strumento software chiamato CAD intelligente (un sistema basato sul linguaggio informatico Lisp) sta per essere usato per integrare le tecniche generative, e le tecniche di apprendimento della macchina con gli strumenti commerciali CAID/CAD come Alias Wavefront, ProEngineer e ACIS3D Toolkits. Questa integrazione tenta di combinare le rappresentazioni simboliche e geometriche dei data-modelli del prodotto per trattare con la complessità inerente al processo progettuale ingegneristico, aiutando così lo sviluppo di un sistema integrato per un supporto progettuale intelligente. Un fattore chiave per il successo potrà essere un'applicazione integrata di tecniche di AI sul data-modello del prodotto basato sulla conoscenza, rappresentante sia il prodotto sia l'informazione del processo richiesta per risolvere i problemi progettuali complessi. Questa struttura di dati combina la conoscenza progettuale (in termini di regole, oggetti, procedure e reti di vincoli) con i modelli tridimensionali di componenti funzionali, di parti e di assemblaggi per permettere il massimo utilizzo dell'abilità dei progettisti ed un'interazione facile con i progettisti nell'esplorare e modificare.

modification.

## 6. Acknowledgements

Part of the work presented in this paper was carried out at the Engineering Design Centre in Cambridge University, UK. Our current research team is supported by: several grants from the Hong Kong University Grant Committee (UGC); a grant from the British Council for a joint UK/HK project developing a web-based product data modeling environment on the Internet; and a grant from the Hong Kong Polytechnic University for the application of machine learning techniques for conceptual design.

## 7. Riconoscimenti

Parte del lavoro presentato in questa relazione è stato eseguito al Centro di Ingegneria Progettuale dell'Università di Cambridge, UK. La nostra squadra attuale di ricerca è sostenuta da: molti finanziamenti dalla Hong Kong University Grant Committee (UGC); un finanziamento dal British Council per un progetto tra UK/HK che sviluppa un ambiente di modellazione di dati di un prodotto basato sulla rete Internet, ed un finanziamento dalla Hong Kong Polytechnic University per le applicazioni di tecniche di apprendimento delle macchine per la progettazione concettuale.

## 8. References

[Chakrabarti, *et al* 1996] Chakrabarti, A., and Tang, M., 1996, "Generating Conceptual Solutions on FuncSION: the Evolution of a Functional Synthesiser", 4th International Conference on Artificial Intelligence in Design, Stanford, USA, June 1996.

[Dietterich *et al* 1981] Dietterich, T. G. and Michalski, R. S., 1981, "Inductive Learning of Structural Description", *Artificial Intelligence*, (1981) 257-294.

[Duffy *et al* 1993] Duffy, A. H. B. and Kerr, S. M., 1993, "Customised Perspectives of Past Designs from Automated Group Rationalisations", Special Issue on Machine Learning and Design, International Journal of Artificial Intelligence in Engineering, Vol. 8, 1993.

Frazer, John., 1995, "An Evolutionary Architecture", Architecture Association, London.

[Quinlan 1986] Quinlan, J. R., 1986, "Learning from noisy data", *Machine Learning*, Volume 2. J. Carbonell and T. Mitchell (Eds.), Tioga, Palo Alto, USA, 1986.

126 [Reich 1993] Reich, Y., 1993, "The Development of Bridger: A Methodological Study of Research on the Use of Machine Learning in Design", Special Issue on Machine Learning and Design, International Journal of Artificial Intelligence in Engineering, Vol. 8, 1993.

[Smithers *et al* 1990] Smithers, T., Conkie, A., Doheny, J., Logan, B., Millington, K. and Tang, M., 1990, "Design as Intelligent Behaviour: An AI in Design Research Programme", International Journal of Artificial Intelligence in Engineering, 5.

[Smithers *et al* 1993] Smithers, T., Tang, M., Ross, P. and Tomes, N., 1993, "An Incremental Learning Approach for Indirect Drug Design", International Journal of Artificial Intelligence in Engineering, Special Issue on Design and Machine Learning, Vol. 8, 1993.

[Stepp *et al* 1986] Stepp, R. E., Michalski, R. S., 1986, "Conceptual Clustering of Structured Objects: A Goal-Oriented Approach", *Artificial Intelligence*, 28, 43-69.

Tang, Ming Xi, 1997, "A Knowledge-based Architecture for Intelligent Design Support", Knowledge Engineering Review, Vol. 12, No. 4, 1997.