

協調設計作業を実現するための設計者支援環境

鷹合 基行[†] 武田 英明[†] 西田 豊明[†]

Designers Supporting Environment for Cooperative Design

Motoyuki TAKAAI[†], Hideaki TAKEDA[†], and Toyoaki NISHIDA[†]

あらまし 設計者は設計対象に関する知識を収集し組み合わせることによって適しその過程で設計者自身の持つ設計知識を構造化して拡張する。複数人による協調設計はこの組織化された知識を他の設計者と共有することによって可能になる。我々は設計対象の専門領域に関する概念体系(オントロジー)を用いて組織化を設計情報を扱うことによって、設計者を支援する環境 Designers Amplifier を提案する。Designers Amplifier は個人情報空間を場として、情報組織化の働きをその空間内あるいは空間間で活動するエージェントとして実現し、設計知識の収集、組織化、加工および協調設計を支援する。また我々は試作した Designers Amplifier システムの構成と、その試作システムを用いて自転車荷台の設計を例題に行った実験について述べる。

キーワード 協調設計、設計知識の構造化、オントロジー、ソフトウェアエージェント

1. はじめに

設計行為は技術者による高度な知的生産行為でありその設計行為は設計を達成するための知識に支えられている。設計者は新しい要求が与えられたとき、経験や本やネットワークなどありとあらゆる手段で設計方法や設計対象に対する知識を収集する。そして現在の設計に役立つような物を組み合わせそれらをうまく適合させる。その過程で設計者の知識は組織化され拡張されてゆく。複数人による協調設計はこの組織化された知識を他の設計者と共有することによって可能になる。

本論文では設計対象に関する概念体系(オントロジー)を用いて設計知識を扱い、設計者を支援していく計算機環境 Designers Amplifier を提案する。Designers Amplifier において各設計者は自分のオントロジーと設計情報をおくための場が与えられる。Designers Amplifier はソフトウェアエージェントによって場に置かれた設計情報を洗練しより使いやすい形にする。具体的には Designers Amplifier は以下のような支援を目指す。1) 複数設計者間のコミュニケーションを支援する。特に複数の設計者でオントロジーを共有する

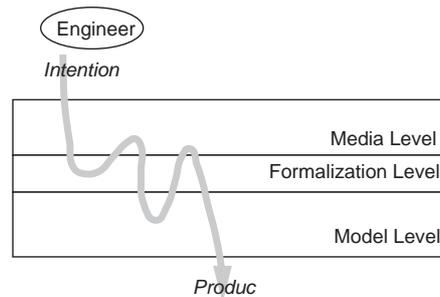


図1 情報表現の3レベル
Fig. 1 Levels of Information Representation

ことによって設計対象の知識の深い共有をめざす。2) 対象に関する知識を様々な方法で収集する。3) 設計メモや議事録など設計に関する断片的な情報をオントロジーを用いて組織化し再利用可能にする。

以下、第2章で設計知識の組織化について述べる。第3章で設計者の支援環境 Designers Amplifier の構成について述べる。第4章で Designers Amplifier を用いた実行例を取り上げる。

2. 設計知識の組織化

本章では設計知識の組織化を情報の表現形態から考察し、オントロジーに基づく組織化の方法について述べる。

[†] 奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科, 奈良県 Graduate School of Information Science, Nara Institute of Science and Technology, 8916-5 Takayama, Ikoma, Nara, 630-01 Japan

2.1 設計知識の表現形態

設計とは与えられた要求から人工物の製造に必要な仕様を生成することである。設計の過程においては、抽象的に表現された要求が具体的な仕様に变化してゆくが、その様子を情報表現のレベルとして捕えると図1のようになる。この図における上のレベルは人間による理解を目指した表現（メディアレベル）である。中央は形式表現レベルであり、計算機が処理可能な文法が与えられている。下のレベルはモデルレベルの表現であり、ある特定のモデルにしたがって記述され計算機が解釈するための意味論が与えられている。設計過程は図中の曲線のようにメディアレベルで表現された設計要求からモデルレベルで表現される生産に必要な手順を得ることであると見ることができる。

特にメディアレベルから形式表現言語レベルへの変換は設計知識の組織化と捉えることができる。そこで我々はメディアレベルで表現された情報をその専門領域に関するオントロジーを用いて組織化した情報を扱うことによって、設計者を支援する環境 Designers Amplifier を提案する。

2.2 オントロジー

本論文ではオントロジーを以下のような目的で用いる。

- 1) メディアレベルで表現された情報を組織化する。
- 2) 設計者の持つ概念を明確に定義し整理する。
- 3) 設計者間でオントロジーを共有し複数設計者間での概念の理解を促進する。
- 4) オントロジー上の概念間の関係を用いた検索などの知的な処理。

現在 Designers Amplifier ではこれらの機能を最低限実現可能なオントロジーとしてフレームに基づくオントロジー [1] を準備している。オントロジーの構成要素は以下のようになっている。

- Class：一般の概念を記述する。Class は名前とその概念がメディア中で現れる表現 (Expression) と属性 (Slot) をもつ。属性はその概念における属性名、その属性が属する Class、属性値の3つからなる。
- Super-Sub Class 関係：Class 間の継承関係を表す。
- 接続関係：Class 間で何らかの関係があることを示す。

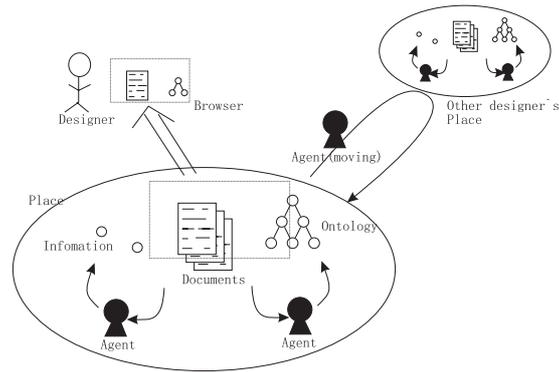


図2 Designers Amplifier の場とエージェント
Fig. 2 Place and agents of Designers Amplifier

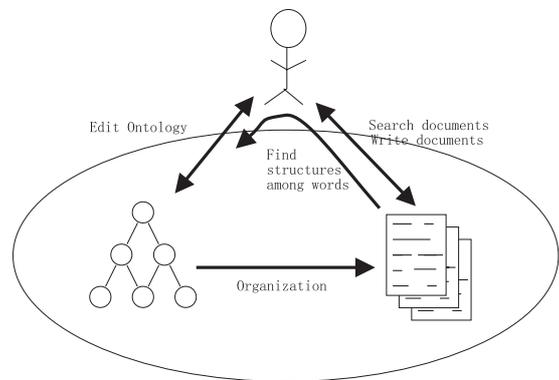


図3 設計者とオントロジーと設計情報の関係
Fig. 3 Relations among designer, ontology and design informations

文書などのメディアレベルの情報はオントロジー上の Class における Expression と結びつけられ組織化される。

3. 設計者支援環境 Designers Amplifier

2章で述べたように設計においてオントロジーは重要である。しかし設計においてオントロジーは固定的なものではなく必要に応じて構築されて行くものである。設計者支援環境 Designers Amplifier はこのオントロジー構築作業を支援することを目的としている。

オントロジー構築は個々の設計者による概念抽出と構造化によるその概念体系の共有化によって行われる。このようなオントロジー構築を実現するために、以下に述べるように個人情報空間を場として、情報組織化の働きをその空間内あるいは空間間で活動するエー

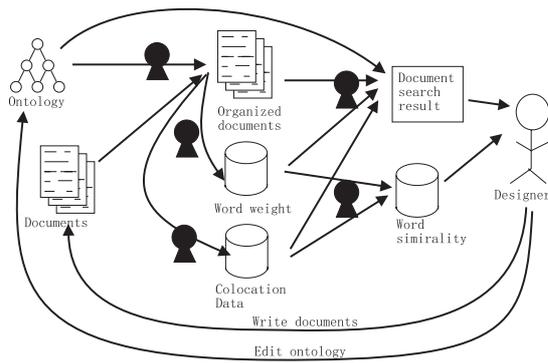


図4 設計文書の組織化エージェント群
Fig. 4 A set of document organization agents

エージェント [4] としてモデル化する。

3.1 Designers Amplifier における場とエージェント

Designers Amplifier は図2のように設計者ごとに場を配置しそこに設計情報やオントロジーやエージェントを保持することによって設計者に作業空間を提供する。

エージェントは設計者や他のエージェントによる指示によって動作する。エージェントは場の上に存在し、場の間を移動することができる。また、同じ場にある情報を獲得し、配置することができる。これは設計者に代わって設計知識を様々な情報源から入手したり他の設計者と情報を共有したり場にある情報を加工するための基盤となる。

Designers Amplifier が設計者に配置する場には必ずオントロジーが配置される。場に置かれた情報は場に置かれたエージェントによってオントロジーを基に組織化される。また場を移動できるエージェントは他の場のオントロジーを獲得してきたり、他の場へオントロジーを伝搬させることができる。

設計者は場に置かれた設計情報やオントロジーをブラウザを用いて全体または部分的に見ることができる。また設計者のエージェントへの指示はブラウザを通して行われる。

以上に述べた枠組のうち、本稿では場の上での設計情報を組織化、発見を行う方法に焦点をあてて説明する。なおオントロジー統合については文献 [5] で幾つかの方法で試みている。

3.2 Designers Amplifier システムにおける場の上での設計知識の組織化と設計知識の発見

図3は設計者の場の上での設計者、オントロジー、設計情報の関係を表している。設計者はオントロジー上の概念を直接編集する。設計情報構造化エージェントはオントロジーを用いて設計情報を構造化する。一般にオントロジーを構築するのは容易ではない。しかし設計者は設計情報を参照するうちにこの概念体系を豊富にしている。そこで、我々は設計情報から設計者に情報の検索や、単語の類似性の発見を行うエージェントを通じて設計者によるオントロジーの構築を支援する。

図4は試作システムにおいて場に置かれた文書をエージェントが扱う様子を示している。場に置かれた文書集合に対し構造化エージェントは文書を構造化し、共起計算エージェントや単語の重要度計算エージェントによって共起情報と単語の重要度が付加される。それらの重要度を基に検索エージェントは文書の検索を行う。単語の類似性計算エージェントは主に共起データから単語の類似度を計算する。

設計者は検索結果や共起データ、単語の類似度から得た情報を設計やオントロジー構築に役立てる。

3.2.1 設計情報の構造化エージェント

設計情報の構造化エージェントはオントロジー上の概念が持つメディアにおける表現 (Expression) も持つ。試作システムではオントロジーにおける概念の単語表現を文書に見つけ出し、概念へのリンク付けを行う。現在は単語の変化形などをほとんど考慮せずに文字列のマッチングによって文書中に単語表現を見つけている。単純な方法であるが、日本語や英語など言語の種類に応じて特別なプログラムを用意することなくシステムが動作できるメリットがある。

3.2.2 単語の共起情報計算エージェント

文章中近くに出現した単語間に意味上の関係があると仮定すると、2つの単語語間の共起情報を調べることは意味がある。共起情報計算エージェントは構造化された文書からオントロジー上の概念と結び付いた単語に対して以下の計算に従って共起情報を計算する。

文書集合 D 内の文書 $d \in D$ において単語 w, w' がそれぞれ出現する位置の集合を $loc(d, w), loc(d, w')$ とし、 d における単語 w, w' 間の共起

$$M_{ww'} = \sum_d \sum_{l \in loc(d,w), l' \in loc(d,w')} m(w, l, w', l')$$

を成分に持つ行列 M を共起行列とする。ただし $m(w, l, w', l')$ は単語 w, w' が位置 l, l' で出現した場合の共起の重みである。試作システムでは m の計算は位置 loc を文単位 (第 l 文に単語 w が出現する) に用いて以下の式を用いている。

$$m(w, l, w', l') = \begin{cases} 0 & (|l - l'| > 10) \\ (10 - |l - l'|)/10 & (|l - l'| \leq 10) \end{cases}$$

共起情報計算エージェントはこのように計算された共起行列を場の上に保存する。

3.2.3 単語の重要度計算エージェント

単語の重要度計算エージェントは構造化された文書からベクトル空間モデル [2] による単語の重み付けを計算する。単語の重み付けは、出現する文書におけるその単語の相対出現頻度 tf (term frequency) と文書の集合におけるその単語の逆文献頻度 idf (inverse term frequency) の積によって与えられる。すなわち

$$tf_{dw} \cdot idf_d$$

ここで、 tf_{dw} は文書 d における単語 w の出現頻度、 idf_d は文書集合 D において単語 w が出現した文書の逆数である。 idf_d は一般的に次式で与えられる。

$$idf_d = \log(N/n_w)$$

ここで、 N は文書集合 D の大きさであり、 n_w は単語 w を含む文書数である。

3.2.4 設計文書の検索エージェント

設計文書の検索エージェントは場の上にある複数の文書から目的の文書を探し出すエージェントである。試作システムでは次の 2 種類の検索方式に基づく検索エージェントを用意している。1) 単語の共起情報を用いた検索、2) オントロジーを用いた検索。これらは共にユーザから入力された検索語に関係あると思われる語を含めて検索語とし、与えられた検索語のみによる検索より知的で幅のある検索を目的としている。

1. 共起情報を用いた検索

文書の検索を与えられた検索語集合に共起される語を加えて行うため与えられた検索語集合にとらわれないう幅のある検索が可能である。つまり検索語集合のベクトル Q (第 w 成分は w が検索語なら 1、 w が検索語でないなら 0) から計算される次のベクトル

$$\sum_w Q_w \cdot M_w (M_w \text{ は共起行列 } M \text{ の第 } w \text{ 列ベクトル})$$

を Q に加えたベクトルを新たな検索語のベクトルとする。さらに単語の重みをこの検索語のベクトルの各要素に掛けることによって重要でない単語に惑わされない検索を行う。文書 d から得られる

ーワードベクトル (文書中に出現する単語の頻度から求められる) $V(d)$ と検索ベクトルとの余弦が大きい文書を検索結果とする。

2. オントロジーを用いた検索

検索語の概念とオントロジー上関係を持つ概念を利用して検索を行う。試作システムでは検索語の概念の下位概念 (Sub Class) を全て検索語の概念と同様に扱い検索を行う。つまり、検索語の集合 W に対応する概念集合を C 、概念から下位概念への関数を $sub(c) (c \in C)$ としたとき C の全ての下位概念の集合

$$\{sub(C), sub \circ sub(C), \dots\}$$

を C に加えて新しい検索語として用いる。さらに共起による検索と同様にベクトル空間モデルによる単語の重み付けを行ない文書の検索を行う。

3.2.5 単語の類似度計算エージェント

同じような単語が周辺に出現する単語は似た概念であると仮定し、2 つの単語の共起の類似度を単語の類似度としている。つまり単語 w_1, w_2 間の類似度を共起ベクトル M_{w_1}, M_{w_2} の余弦とする。重要な単語の共起関係を用いることによって精度が上がると仮定できるので、実際の試作システムでは共起ベクトルのそれぞれの成分に対応する単語の重要度を掛けたものを用いている。

4. Designers Amplifier 実行例

ここでは、例題として自転車荷台の設計に関するプロトコル [3] 用いた Designers Amplifier 試作システムの実験について述べる。自転車荷台の設計に関するプロトコルは設計会議の会話をテキストデータとしたものであり構造化されていない。この実験の目的は、Designers Amplifier 試作システムによる、

- 1) プロトコルデータの構造化
- 2) プロトコルデータからの設計知識の抽出
- 3) プロトコルデータの検索による再利用性を調べることである。

661 G because you have .. your backpack frame now has the fitting on it for the seat tubing so you don 't have everything in this bracket part of the backpack frame has like a a metal clip y'know wire em .. that type of thing
 662 H ahha ahha
 663 G y'know just thin gauge metal that snaps .. a broomhandle holder
 664 H yeah ahha
 665 F ohh
 666 G any justice here
 667 H and that will live permanently with your backpack
 668 G yeah .. and you can make that wide enough
 669 F and that to be just a holder while you're (?) or part of the integral fastening system
 670 G it keeps it attached to your seat tube
 671 F at all times .. structural (inaudible) OK (inaudible)
 672 G maybe there's a little hook here that you fasten after you snap it on just to make sure it doesn 't come off
 673 F ahha yeah yeah that sounds
 674 G then you .. these wires come down here right clip on .. clip on
 675 X sorry could I interrupt could I ask you to put the bike on the table when you're talking specifically about the bike
 676 G sure yeah
 677 X OK sorry to interrupt
 678 G so .. clip on those tubes and that pivoting over here
 679 H mm mm
 680 H and they actually don't have to pivot there .. and it rocks up .. and clicks in

図5 自転車荷台の設計に関するプロトコルの一部
 Fig.5 Protocols of the bicycle rack design experiment

4.1 自転車荷台の設計に関するプロトコル

このプロトコルは、3人の設計者(あまり自転車設計に詳しくない)にテーマと時間と資料を与えて議論してもらい、そこで行われた設計に関する会話をテキストデータ(約1500行)としたものである。テーマはリュック(backpack)をマウンテンバイクに取り付けることが可能な荷台または金具の設計であった。

図5はそのプロトコルの一部である。議論のあらすじは以下のものであった。

- (1) おおまかな設計方針
- (2) 問題点の洗い出し
- (3) 固定方法の議論
- (4) さまざまな使い方の検討
- (5) おおまかなプロトタイプ完成
- (6) 問題点の洗い出しと対策
- (7) バッグ・フレーム・取り付け部の詳細な設計

を3人で分担

(8) まとめ・確認

この実験では約1500行あるプロトコルを20行ずつ分けそれぞれを1つの文書とした。そして、このプロトコルを基に手作業で約240のClass概念を抜きだしSuper-Sub Class関係を付加してオントロジーを作成した。

4.2 Designers Amplifier 試作システムによるオントロジーの編集

図6はDesigners Amplifier 試作システムのブラウザを用いてオントロジーを編集しているところである。

右のウィンドウはオントロジーウィンドウであり、ユーザーはこの画面を通して場にあるオントロジーの一部または全体を参照しながら編集する。アイコンはClass概念を表し、青の矢印はSuper-sub Class関係、緑の線(ここでは用いていない)は接続関係を表している。右下のポップアップウィンドウは概念編集ウィンドウであり概念の詳細な定義が表示されている。ここでは概念clipが文書中にclipと表現され、costスロット(クラスはmoney)を持つと定義されている。

4.3 Designers Amplifier 試作システムによる構造化された文書のブラウズ・検索

図6はDesigners Amplifier 試作システムを用いた検索の結果も示している。設計者は右のオントロジー編集ウィンドウで検索したい概念(clip)を選択し、検索エージェントに検索を依頼することによって検索結果を左のウィンドウで得ることができる。左上のウィンドウには検索結果の文書のリストがその評価値とともに表示されている。左下のフレームは検索結果の文書の一つを表示している。この文書は組織化されている。つまり文書中に出現する概念がオントロジーと結び付いている。設計者は表示された文書中の概念に付けられたボタンを押すことによってすぐに右側のウィンドウでその概念を確認することができる。この図の例では、文書中の単語clipはオントロジー上の概念clipによって構造化され結び付いている。この検索では共起情報に基づく検索エージェントを用いている。次のセクションでは今回の検索で用いたclipに関する共起情報を説明する。

4.4 共起情報計算

図7は自転車プロトコルの文書から計算された共起情報から概念clipに共起する概念を取り出したもので

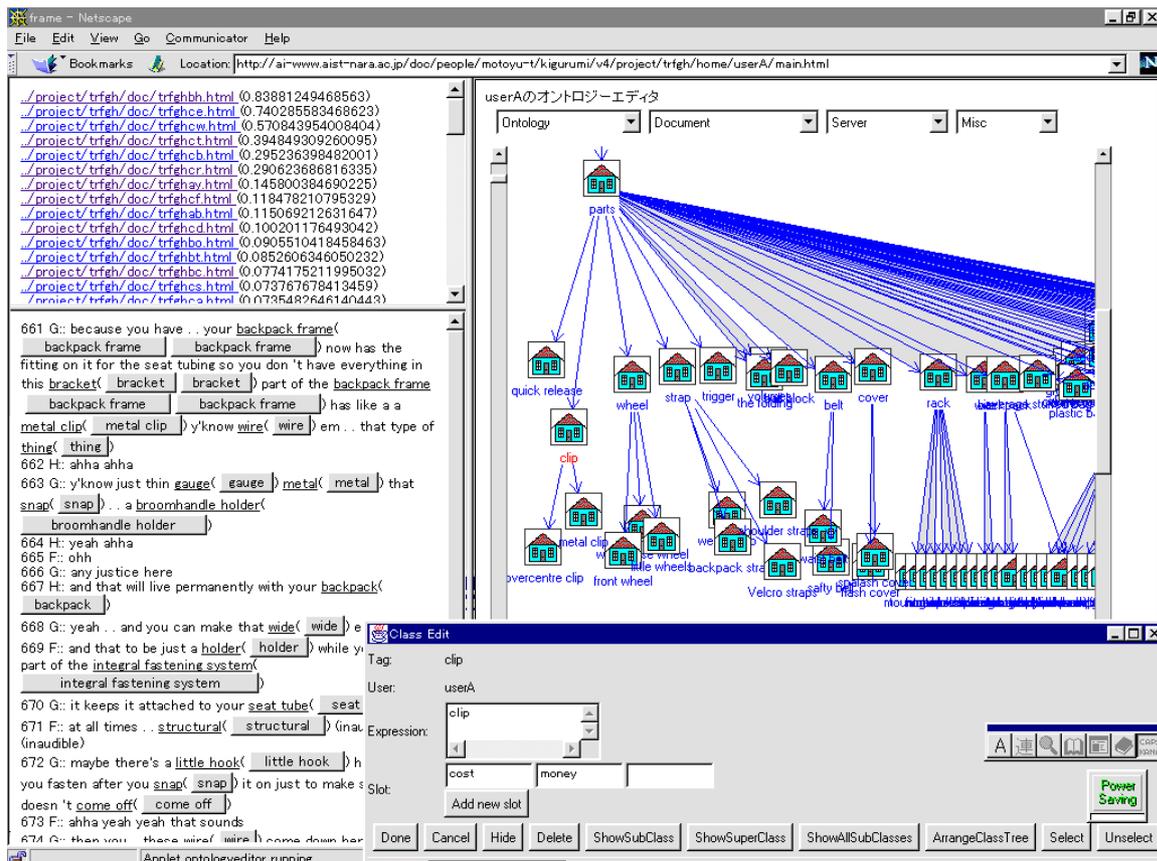


図 6 Designers Amplifier のブラウザの実行画面
Fig. 6 Browser of Designers Amplifier

ある。左の単語は clip に共起される概念名を表し右の数は 3.2.2 節で述べた方法で計算された共起の値を表している。上位の多くの単語は clip に対して何らかの関係を持つことがわかる。特に wire, strap, little hook など他の取り付け方法に関する単語が数多く存在し、設計者のオントロジー構築の支援に有効であることを示している。

4.5 試作システムにおけるプロトコル利用の実験

我々は試作システムが設計プロトコルの構造化および共起情報によって設計者に有効な情報を提供できるか実験した。

実験のためのシナリオとして荷台の自転車への取り付け方法について議論している部分を探し、取り挙げられている取り付け方法について調べることにした。被験者として同じ設計題目(自転車荷台の設計)における別のプロトコルを熟知している者を準備し、プロト

コルの生データを unix の less コマンドで見てもらう方法と試作システムを用いた方法と比較した。

実験方法を以下に述べる。

1. 制限時間は 1 時間
2. 被験者は荷台の自転車への取り付け方法について議論している部分を探しその部分を 6~7 つ答える
3. こちらが用意した解答は 3 箇所

実験結果は、less による方法では 1 箇所のみ正解したのに対し、試作システムを用いた場合 3 箇所全ての正解を答えていた。被験者が試作システムを用いて検索を行った代表的な手法は以下のものであった。1) 取り付けに関する単語たとえば strap の共起関係を調べ、同様に取り付けに関する単語 (clip, screw, bracket) を発見する。2) オントロジー上関係する単語のうち検索に適したものを発見する。3) 発見したこれらの単語で検索した結果の上位 3、4 までの文書を読み、取り付

frame 10.9	rigidity 1.9
bag 10.0	rotate 1.8
pack 5.6	belt 1.7
thing 5.0	structural 1.7
bike 5.0	narrow 1.6
wire 2.6	bracket 1.6
outside 2.4	pivot 1.6
strap 2.4	click 1.6
back 2.4	rock up 1.6
slip 2.3	cover 1.5
tube 2.2	seat tube 1.4
snap 2.0	rack 1.4
come off 2.0	wide 1.2
little hook 2.0	original 1.1
connectors 2.0	integral fastening system 1.1

図7 単語 clip の共起情報 (上位 30)
Fig. 7 The colocation of a word 'clip'

け方法について議論しているか調べる。

この実験は、Designers Amplifier による設計情報の構造化が設計情報の再利用において有効であることを示している。

5. おわりに

本論文では、場とソフトウェアエージェントの技術を枠組に協調設計と個人の設計行為を統合的に支援する設計者支援環境 Designers Amplifier システムについて述べた。

我々は場にオントロジーを導入しソフトウェアエージェントを用いることによって個人的な情報源である設計知識やオントロジーを設計者間で交換・共有する方法を示した。またオントロジーを用いて設計知識の構造化を図ることが、設計情報の柔軟な検索と設計知識の抽出を可能にし設計情報の再利用およびオントロジーの構築の点で設計者を支援することを示した。

文 献

- [1] T. R. Gruber. Ontolingua: A mechanism to support portable ontologies. Technical Report KSL 91-66, Stanford University, Knowledge Systems Laboratory, 1992.
- [2] G. Salton. *Introduction to Modern Information Retrieval*. MacGraw-Hill, 1983.
- [3] H. Takeda, M. Yoshioka, T. Tomiyama, and Y. Simomura. Analysis of design processes by functional evaluation process. In *Nigel Cross, Henri Christaans, and Kees Dorst, editors, Analysing Design Activity*, pp. 187-209. Chichester, 1995. John Wiley & Sons.
- [4] J. White. Mobile Agents White Paper. <http://www.genmagic.com/agents/Whitepaper/whitepaper.html>
- [5] M. Takaai, H. Takeda, and T. Nishida. Distributed

Ontology Development Environment for Multi-agent Systems. Working Notes for AAAI-97 Spring Symposium Series on Ontological Engineering, pp. 149-153, 1997.

(平成年月日受付, 月日再受付)

鷹合 基行

平 5 大阪府立大学工学部数理工学科卒業. 平 7 奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科博士前期課程修了. 現在 同博士後期課程在学中

武田 英明

昭 61 東大・工・精密機械卒. 昭 63 同大学院修士課程修了. 平 3 同大学院博士課程修了. 平 3 財団法人日本システム開発研究所嘱託研究員. 平 4 ノルウエー工科大学 doctoral fellow. 平 5 奈良先端科学技術大学院大学 情報科学研究科 助手. 平 7 年 同助教授, 現在に至る. 平 4-5 ノルウエー王立科学技術研究会 research fellow. 東京大学工学博士. 知識の共有と再利用, 設計学, 知的 CAD などの研究に従事. 平 7 人工知能学会全国大会優秀論文賞. 人工知能学会, 精密工学会, AAAI 各会員.

西田 豊明 (正員)

昭 52 京大・工・情報卒. 昭 54 同大学院修士課程修了. 昭 55 同大学院博士課程退学, 同年より, 京大・工助手. 昭 63 助教授. 平 5 奈良先端科学技術大学院大学教授, 現在に至る. 京大工学博士. 昭 59 から 1 年間 Yale 大学客員研究員. 知識の共有と再利用, 知識メディア, 定性推論などの研究に従事. 昭 63, 平 1, 平 7 人工知能学会全国大会優秀論文賞. 昭 63 人工知能学会論文賞. 平 2 情報処理学会創立 30 周年記念論文賞. 著書「自然言語処理入門」(オーム社), 「定性推論の諸相」(朝倉書店) など. 人工知能学会, 情報処理学会, 認知科学会, 日本ソフトウェア科学会, 電子情報通信学会, 日本言語処理学会, AAAI, ACL, IEEE 各会員. 人工知能学会担当編集委員. 電子情報通信学会英文誌編集委員. Journal of Artificial Intelligence Research Associate Editor, QR '94 Co-Chair.