

Control Architectures for Manufacturing Systems

Valentin Vlad, Adrian Graur, and Cristina Elena Turcu

Abstract—The control architecture of a system is of crucial importance for the efficient management of the system resources, and in achieving (for the system) properties like flexibility and re-configurability, which are becoming more and more important nowadays. This paper contains an overview of the main control architectures proposed for the automated manufacturing systems, being emphasized, in a comparative manner, their advantages and disadvantages.

Index Terms—control architecture, centralized control, hierarchical control, heterarchical control.

I. INTRODUCERE

ARHITECTURA de control a unui sistem definește fluxurile informaționale și de control dintre subsistemele componente, așa încât să se asigure integrarea diverselor funcții de planificare și control a producției [1]. După cum se poate observa și din Fig. 1, au fost propuse mai multe tipuri de arhitecturi, evoluția acestora fiind determinată în principal de creșterea complexității și totodată a cerințelor de flexibilitate pentru sistemele de fabricație.

O primă clasificare a arhitecturilor de control poate fi realizată în funcție de numărul de entități decizionale din cadrul sistemului. În baza acestui criteriu arhitecturile pot fi *centralizate* (există o singură entitate decizională) sau *distribuite* (procesul decizional este distribuit între mai multe entități). În funcție de modul de organizare al unităților de control, arhitecturile distribuite pot fi *ierarhice*, *heterarhice* sau *evolutive*.

În secțiunile următoare sunt prezentate în detaliu fiecare dintre aceste soluții, împreună cu avantajele și dezavantajele care le caracterizează.

II. CONTROLUL CENTRALIZAT VERSUS CONTROLUL DISTRIBUIT

Mediul industrial actual este caracterizat de o complexitate tot mai ridicată, datorată în principal numărului mare de dispozitive, sisteme și aplicații implicate în procesul de producție. Aceste dispozitive/sisteme sunt în general distribuite spațial în cadrul unei întreprinderi, suprafața acoperită putând ajunge uneori la dimensiuni considerabile.

Tendința inițială în controlul industrial a constat în introducerea de sisteme centralizate. Arhitectura unui sistem de control complet centralizat consta dintr-un punct central, unde era executată întreaga aplicație de control, și un set de dispozitive distribuite spațial, conectate la dispozitivul central prin legături de tipul *punct la punct*. Dezavantajul major al unei astfel de arhitecturi este reprezentat de costul foarte ridicat, constând în costul de cablare, costul de instalare și întreținere, precum și costul ridicat al resurselor necesare pentru dispozitivul central (putere de procesare, memorie) [2].

În scopul adresării costurilor de cablare au fost introduse rețelele de comunicație, care au permis înlocuirea legăturilor punct la punct cu o cablare de tip magistrală. Dezvoltarea rețelelor *fieldbus* a revoluționat mediul industrial, permițând interconectarea atât a echipamentelor din teren cât și a celor din atelierul de producție.

Introducerea rețelelor industriale nu numai că a condus la o reducere a costurilor de cablare, instalare și întreținere, ci, de asemenea, a permis distribuirea aplicațiilor de control. În locul unui punct de control central, echipat cu resurse de procesare costisitoare și în care era executată întreaga aplicație de control, au fost introduse mai multe controlere, fiecare având rolul de a gestiona o anumită parte din cadrul aplicației. În acest context *inteligenta* a fost de asemenea distribuită, mai întâi la nivelul dispozitivelor din atelierul de producție (PLC-uri, NC-uri, controlere de roboți, calculatoare industriale, etc.) și mai târziu la nivelul dispozitivelor din teren (senzori și actuatori inteligenți).

Această nouă arhitectură este astfel caracterizată de existența a diferite dispozitive, atât la nivelul atelierului de producție cât și în teren, care au încorporată o anumită inteligență, sunt interconectate printr-un tip special de rețea (cu un comportament deterministic) și permit distribuirea aplicației de control.

Avantajele sistemelor distribuite în raport cu cele centralizate constau în costuri mai reduse, flexibilitate, deschidere pentru interconectare, modularitate, independență față de un anumit producător, interoperabilitate, configurare și întreținere mai facilă. Pe de altă parte, siguranța, fiabilitatea și robustețea unui astfel de sistem de control sunt parametri care depind de robustețea protocolului rețelei de interconectare și de dispozitivele care asigură realizarea comunicației [1].

Manuscript received December 6, 2010.

V. Vlad, A. Graur and C. E. Turcu are with the Electrical Engineering and Computer Science Faculty, Stefan cel Mare University of Suceava, Suceava, Romania. (e-mail: [vladv | adriang | cristina]@eed.usv.ro).

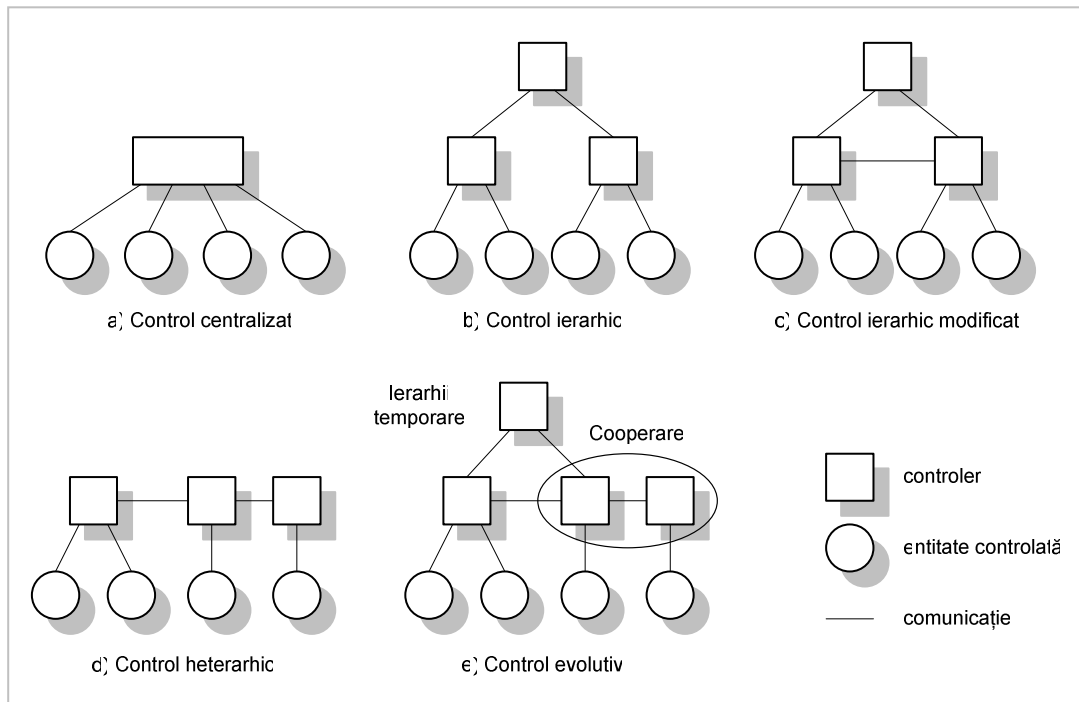


Fig. 1. Evoluția arhitecturilor de control (adaptat din [1]).

III. CONTROLUL IERARHIC

Modelul de control ierarhic (Fig. 1b) a fost introdus în scopul reducerii complexității controlului centralizat. Task-urile de planificare și control sunt descompuse în mod recursiv în subtask-uri, fiecare rulând pe un controler separat și gestionând o parte din aplicația de control. Subtask-urile (controlerele) sunt plasate pe mai multe niveluri ierarhice, între care există o relație rigidă de tipul master-slave.

Nivelurile ierarhice corespund de regulă cu structura departamentală a companiei. Există un controler la nivelul întreprinderii, pentru planificarea generală și agregată a producției. Urmează apoi controlerele de la nivelul departamentelor, controlerele de la nivelul stațiilor de lucru și în final controlerele echipamentelor fizice. Planificările (generale) realizate de controlerul de pe cel mai înalt nivel sunt trimise către controlerele de pe nivelurile inferioare, unde sunt rafinate prin adăugare de detalii; planificările finale sunt trimise către controlerele echipamentelor fizice, pentru a fi executate. În scopul reducerii fluxului vertical de date dintre nivelurile de control, anumiți cercetători au propus *arhitectura ierarhică modificată* (Fig. 1c) în cadrul căreia anumite probleme sunt rezolvate prin comunicația dintre controlerele de pe același nivel, fără consultarea nivelului superior [3], [4].

Modelul de control ierarhic este atât un model distribuit, prin rularea aplicației de control pe mai multe controlere, cât și unul centralizat, atunci când relația dintre controlere este în mod strict de tipul master-slave [5], [6], [1]. În mod similar controlului centralizat cu un singur controler, modelul ierarhic permite obținerea unui optim global în funcționarea sistemului.

Principalul dezavantaj al sistemelor de control ierarhice este

legat de dificultatea modificării acestora. Creșterea complexității fizice a sistemului conduce la o complexitate ridicată a software-ului de control și ca urmare modificarea acestuia, atunci când se dorește extinderea sau reconfigurarea sistemului, devine în un proces îndelungat și costisitor. Un alt dezavantaj este reprezentat de posibilitatea deteriorării informației odată cu urcarea spre nivelurile superioare (pentru raportare) sau coborârea spre nivelul echipamentelor fizice (pentru control), datorită diverselor abstractizări, realizate de fiecare nivel. De asemenea, o problemă frecvent întâlnită în cadrul modelelor ierarhice și centralizate este legată de inconsistența dintre planificări și realitatea din atelierul de producție. Planificările sunt realizate ca o activitate *off-line*, înainte de începerea producției, și în majoritatea cazurilor sunt valide doar pentru o fracțiune din perioada planificată, după care sunt invalidate prin diferite evenimente neprevăzute cum ar fi defectarea unei mașini, o greșeală a unui operator sau întârzieri în livrarea materiilor prime [7], [8]. Reactualizarea unui plan nu este întotdeauna posibilă, dat fiind timpul mare de planificare și diseminare caracteristic modului centralizat [9].

În scopul rezolvării acestor probleme, anumiți cercetători au propus modelul de control *heterarhic* (Fig. 1d), caracterizat de o structură arhitecturală complet descentralizată [10], [8], [11].

IV. CONTROLUL HETERARHIC

Controlul heterarhic elimină orice formă de coordonare superioară, plasând toate entitățile de control din cadrul unui sistem pe același nivel ierarhic. Orice entitate poate fi atât *master* cât și *slave*. Programarea execuției task-urilor nu mai revine în sarcina unui planificator centralizat (cum este în

cazul arhitecturilor centralizate și ierarhice) ci este obținută ca rezultat al unei interacțiuni dintre controlerile sistemului. Entitățile de control (aparținând de regulă echipamentelor fizice) sunt interconectate prin rețele de comunicație, și sunt caracterizate de *autonomie* și *cooperare*. Principiul de bază în coordonarea acestor entități (denumite și noduri) este reprezentat de *metafora negocierii*, introdusă în [12]. Conform acestui principiu, distribuția task-urilor în cadrul sistemului se realizează printr-un proces de negociere (în forma licitațiilor din domeniul economic) dintre anumite noduri, care dețin task-uri de executat, și noduri capabile să le execute. Un rol important în procesul negocierii îl deține protocolul de comunicație, care în cele mai multe cazuri este o variantă a protocolului "Contract Net", definit în [13].

Controlul heterarhic este strâns legat de cercetările din domeniul fabricației bazată pe agenți (eng. *agent-based manufacturing*) [14], [6], [7], [8], [15], [16], [17]. Un agent reprezintă o entitate autonomă, hardware sau (mai ales) software, care deține o reprezentare parțială a mediului în care operează și este condusă de obiective proprii. Un *sistem multiagent* este un sistem care constă din cel puțin doi agenți inteligenți capabili să interacționeze între ei în vederea realizării unor scopuri individuale sau comune, și care partajează același mediu de lucru [18]. Într-un sistem de fabricație multi-agent fiecare entitate din sistem (incluzând echipamentele de producție și chiar produsele) este reprezentată printr-un agent software. Acțiunile de planificare și control sunt subiectul unor negocieri între agenți, ceea ce conferă sistemului de control o adaptabilitate ridicată în prezența perturbațiilor sau în cazul unor reconfigurări.

Există mai multe abordări pentru realizarea controlului heterarhic, funcție de modul de planificare și control a operațiilor asociate produselor. În [11] este prezentată o soluție pentru un atelier de prelucrare automatizat în care procesul de producție este controlat de însuși produsul care trebuie realizat. La intrarea în sistem, semifabricatul (care în final va deveni produs final) este fixat pe un palet, care are atașat un computer de dimensiuni reduse, echipat cu un procesor, memorie, și o interfață de comunicație radio. Sistemul de control al producției încarcă în memoria computerului planul de realizare a produsului final. Urmează apoi un proces de negociere dintre „produsul inteligent” și mașinile de prelucrare din sistem pentru determinarea mașinii optime în a executa prima operație. Procesul de negociere, ilustrat în Fig. 2, constă în (1) difuzarea unui mesaj cu operația de executat către toate mașinile din sistem, (2) primirea de oferte de la acestea și, în final, (3) selectarea mașinii cu cea mai bună ofertă.

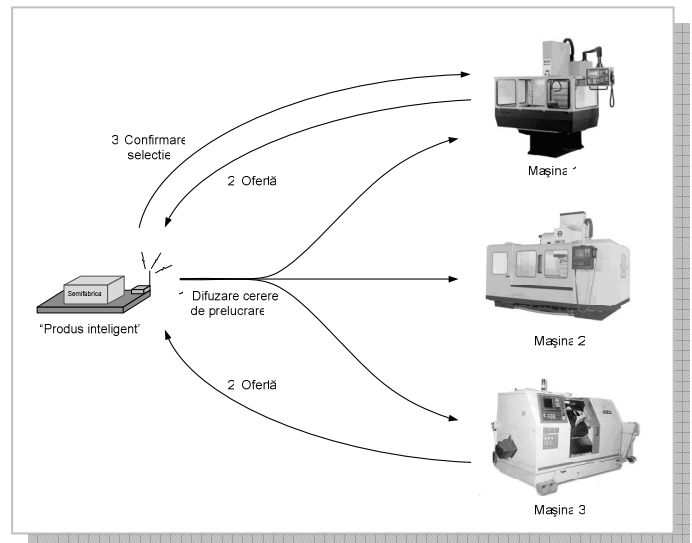


Fig. 2. Procesul de negociere dintre "produsul inteligent" și mașinile de prelucrare.

După alegerea mașinii urmează găsierea unei soluții de transport către aceasta, care poate lua diverse forme: vehicule automate, roboți de manipulare sau benzi de conveier. Odată ajuns în coada de așteptare a mașinii de prelucrare, produsul va întreprinde negocieri pentru contractarea următoarei operații din planul său de realizare. În acest mod sunt aranjate succesiv toate prelucrările, într-o manieră distribuită, fără prezența unui calculator de control central. O abordare similară este prezentată în [6]. În [19] procesul de realizare a unui produs este condus de un agent software, asociat produsului, dar care rulează pe un sistem de calcul obișnuit. Conexiunea dintre agent și produs este realizată cu ajutorul tehnologiei Auto ID (*Automatic Identification*), bazată pe utilizarea unor etichete RFID (*Radio Frequency Identification*) [20], [21], [22], care sunt atașate produselor, și a unui sistem de colectare automată și în timp real a datelor de pe acestea. În [14] contractarea succesivă a mașinilor de prelucrare nu revine în sarcina produsului, ci este realizată de mașina care a executat ultima operație.

Avantajele adoptării controlului heterarhic includ:

- Distribuția efortului computațional la nivelul controlerilor echipamentelor fizice, ceea ce permite creșterea capacității sistemului (prin activități concurente) și elimină necesitatea unui calculator central, cu un software complex și resurse costisitoare;
- Posibilitatea extinderii (reconfigurării) facile a sistemului prin eliminarea rigidității structurilor de control ierarhice. Adăugarea unei noi mașini în sistem poate fi realizată chiar fără oprirea funcționării acestuia. Mașina trebuie doar „învățată” regulile de negociere, după care poate fi conectată în sistem, devenind parte din acesta.
- Tratarea cu ușurință a perturbațiilor generate de defectarea unui echipament. O mașină defectă pur și simplu nu va mai participa la negocieri, în acest fel

rezolvându-se problema alocării de operații unei mașini nefuncționale. Produsele aflate deja în bufferul mașinii pot renegocia cu alte mașini prelucrarea lor, dacă timpul de așteptare pentru repararea mașinii este prea mare. Odată reparată, mașina poate participa din nou în procese de negociere.

- Flexibilitate în tratarea comenzilor urgente. Comenzile urgente pot fi integrate rapid în procesul de producție întrucât nu există o planificare globală, pentru o perioadă de timp mai îndelungată (cum este în cazul modelului centralizat sau ierarhic), care ar putea fi invalidată și ar necesita reactualizare. Planificările se realizează pentru fiecare comandă în parte, în momentul în care acestea sunt emise. Planificarea unei comenzi urgente ar putea totuși influența planificările altor comenzi (aflate deja în execuție), determinând, în anumite cazuri, replanificarea activităților lor [23].

Dezavantajul major al arhitecturilor heterarhice este reprezentat de dificultatea garantării unor performanțe optime sau cel puțin mulțumitoare în funcționarea sistemului. Acest lucru se datorează comportamentului „miopic” al sistemelor heterarhice, rezultat ca urmare a distribuirii controlului și informației, și ca urmare a inexistenței unei entități de coordonare superioară [17]. Alte dezavantaje includ lipsa predictibilității detaliate, posibilitatea amplificării perturbațiilor (în anumite situații) sau chiar a ajungerii sistemului în stări de blocare [9], [11].

V. CONTROLUL EVOLUTIV

Arhitecturile de control evolutive (Fig. 1e) pot fi privite ca un compromis între arhitecturile ierarhice și cele heterarhice, încercând să îmbine flexibilitatea soluțiilor heterarhice cu predictibilitatea și optimizarea caracteristică controlului ierarhic [25]. Elementul definitoriu este reprezentat de caracterul *dinamic* al ierarhiilor, prin care se elimină rigiditatea structurilor din controlul ierarhic. Modul de planificare și programare a task-urilor este în general unul centralizat (specific modului ierarhic), în plus existând posibilitatea cooperării între unitățile de control pentru dezvoltarea de soluții alternative, în cazul în care planificările existente devin suboptimale sau irealizabile.

Abordările propuse pentru implementarea controlului evolutiv includ sistemele de fabricație bionice [27], [28], fractale [29], multi-agent [30], [31], [32] și holonice. Sistemele multi-agent sunt aplicate în controlul industrial atât în mod direct (cazul *sistemelor de fabricație multi-agent*), cât și indirect, ca o tehnologie suport pentru implementarea altor concepte (holonic, bionic, etc.) [33], [34], [35].

VI. CONCLUZII

Domeniul sistemelor de producție este într-o permanentă schimbare, caracterizată de o creștere continuă a complexității și a cerințelor de flexibilitate. Complexitatea apare ca urmare ca urmare a integrării unui număr tot mai mare de componente

(de ex. senzori și actuatori inteligenți) în cadrul sistemelor, cumulată cu diversificarea funcționalităților echipamentelor de producție (mașini cu comandă numerică, roboți etc.). Complexitatea fizică favorizează apariția frecventă de defecte, conducând la necesitatea unor mecanisme care să asigure toleranță la erori. Nevoia de flexibilitate este alimentată de cerințele variate ale clienților, de ciclul de viață redus al produselor și de progresul tehnologic. Sistemele trebuie să asigure realizarea unor game variate de produse și totodată să permită extinderea sau reconfigurarea lor cu costuri minime.

Arhitectura de control a unui sistem joacă un rol decisiv în gestionarea eficientă a componentelor acestuia și în asigurarea proprietăților de flexibilitate și reconfigurabilitate. În cadrul acestui articol au fost prezentate câteva modele arhitecturale (existente în practică sau doar propuse) pentru controlul sistemelor de fabricație, fiind evidențiate avantajele și dezavantajele care le caracterizează. Arhitecturile de control evolutive par să reprezinte o soluție de control superioară arhitecturilor precedente, prin îmbinarea avantajelor soluțiilor heterarhice (flexibilitate, robustețe etc.) cu cele ale soluțiilor ierarhice (predictibilitate, optimizare etc.).

REFERENCES

- [1] PABADIS Consortium. “State of the Art in Factory Control and Requirement Specification for most advanced, most flexible, and most adaptable control of manufacturing systems”, Deliverable 1.1, 2006.
- [2] Anderson, C., Bartholdi, J.J. “Centralized versus decentralized control in manufacturing: lessons from social insects”, *Proceedings of Complexity and Complex Systems in Industry*, 19-20 Septembrie, 2000, Warwick, UK, Pagini: 92-108.
- [3] Arentsen, A.L. *A generic architecture for factory activity control*, Teză de doctorat, University of Twente, Enschede, 1995.
- [4] Choi, K., Lee, S. “Hybrid Shop Floor Control System for Computer Integrated Manufacturing (CIM)”, *KSME International Journal*, Vol. 15(8), 2001, Pagini: 544-554.
- [5] Kimemia, J., Gershwin, S.B. An Algorithm for the Computer Control of a Flexible Manufacturing System, *IIE Transactions*, Vol. 15(4), 1983, Pagini: 353-362.
- [6] Krothapalli, N.K.C., Deshmukh, A.V. Design of negotiation protocols for multi-agent manufacturing systems, *International Journal of Production Research*, Vol. 37, 1999, Pagini: 1601-1624.
- [7] Parunak, V.H. “Manufacturing experience with the Contract Net, In Huhns, M.N. (ed.) *Distributed Artificial Intelligence*, Pitman, London, 1987, Pagini: 285-310.
- [8] Parunak, V.H. A practitioners' review of industrial agent applications, *Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*, Vol. 3(4), 2000, Pagini: 389-407.
- [9] Brennan, R., Norrie D.H., “From FMS to HMS”, In Deen, S.M. (ed.), *Agent Based Manufacturing: Advances in the Holonic Approach*, Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag, 2003, Pagini: 31-49.
- [10] Duffie, N. Synthesis of heterarchical manufacturing systems, *Computers in Industry*, Vol. 14, 1990, Pagini: 167-174.
- [11] Upton, D.M. “A flexible structure for computer-controlled manufacturing systems”, *Manufacturing Review*, 1992, Vol. 5(1), Pagini: 58-74.
- [12] Davis, R., Smith, R. “Negotiation as a metaphor for distributed problem solving”, *Artificial Intelligence*, 20, 1983, Pagini: 63-109.
- [13] Smith, R. “The Contract Net Protocol: High-Level Communication and Control in a Distributed Problem Solver”, *IEEE Transactions on Computers*, 29(12), 1104-1113, 1980.
- [14] Hahndel, S., Fuchs, F., Levi, P. Distributed Negotiation-based Task Planning for a Flexible Manufacturing Environment, *Distributed Software Agents and Applications (MAAMAW-94)*, Lecture notes in artificial intelligence, Vol. 1069, 1996, Pagini: 179-190.

- [15] Parunak, V.H. "Autonomous agent-architecture: a non-technical introduction", *Industrial Technology Institute Report*, 1993.
- [16] Parunak, V.H. "Applications of Distributed Artificial Intelligence in industry", *Foundations of Distributed Artificial Intelligence*, John Wiley & Sons, 1996, Pagini: 139-164.
- [17] Trentesaux, D. "Distributed Control of Production Systems", *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, Vol. 22, 2009, Pagini: 971-978.
- [18] Alexandru, L., *Agenți inteligenți. Sisteme multiagent*, Universitatea Tehnică "Gh. Asachi" Iași, 2004.
- [19] McFarlane, D., Sarma, S. Chirn, J.L., Wong, C.W., Ashton, K. "The intelligent product in manufacturing control", *Journal of EAIA*, Iulie 2002.
- [20] RFID Journal – Website. <http://www.rfidjournal.com>
- [21] Finkeneller, K. *RFID Handbook: Fundamentals and Applications in Contactless Smart Cards and Identification, 2nd Edition*, Wiley & Sons LTD, 2003.
- [22] Hodges, S., McFarlane, D. "Radio frequency identification: technology, applications and impact", White Paper, Auto-ID Lab, Cambridge University, UK, 2005.
- [23] Brennan, R., O., W. "A simulation test-bed to evaluate multi-agent control of manufacturing systems", *Procs. of the 2000 Winter Simulation Conference*, 10-13 Decembrie, 2000, Orlando, FL, USA, Pagini: 1747-1756.
- [24] Valckenaers, P., Van Brussel, H. "Holonc Manufacturing Execution Systems", *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, Vol. 54(1), 2005, Pagini: 427-432.
- [25] Brennan, R.W., Norrie D.H. "The performance of partial dynamic hierarchies for manufacturing", *Proceedings of the 2nd International Workshop on Intelligent Manufacturing Systems*, 22-24 Septembrie, 1999, Leuven, Belgium, Pagini: 5-13.
- [26] Bousbia, S., Trentesaux, D. "Self-organization in distributed manufacturing control: State-of-the-art and future trends", *IEEE Conference on Systems, Man and Cybernetics*, Vol. 5, 2002.
- [27] Okino, N. "Bionic Manufacturing Systems", In Peklenik, J. (ed.) *Flexible Manufacturing Systems: past-present-future*, Faculty of Mechanical Engineering, Ljubljana, Slovenia, 1993, Pagini: 73-95.
- [28] Ueda, K., Vaario, J., Ohkura, K. "Modelling of biological manufacturing systems for dynamic reconfiguration", *Ann. CIRP*, 46 (1997), 343-346.
- [29] Warnecke, H.J. *The Fractal Company*, Springer, Berlin, 1993.
- [30] Bousbia, S., Trentesaux, D. "Self-organization in distributed manufacturing control: State-of-the-art and future trends", *IEEE Conference on Systems, Man and Cybernetics*, Vol. 5, 2002.
- [31] Maturana, F., Norrie, D. "Multi-agent mediator architecture for distributed manufacturing", *Journal of Intelligent Manufacturing*, Vol. 7, 1996, Pagini: 257-270.
- [32] Shen, W., Maturana, F., Norrie, D.H. "MetaMorph II: an agent-based architecture for distributed intelligent design and manufacturing", *Journal of Intelligent Manufacturing*, Vol. 11(3), 2000, Pagini: 237-251.
- [33] Bussman, S. "An agent-oriented architecture for Holonic Manufacturing Control", *First Open Workshop IMS Europe*, 15-17 Aprilie, 1998, Laussane, Switzerland, Pagini: 1-12.
- [34] Babiceanu, R.F., Chen, F.F. "Development and applications of holonic manufacturing systems: a survey", *Journal of Intelligent Manufacturing*, Vol. 17, 2006, Pagini: 111-131.
- [35] Giret, A., Botti, V. "Analisis and design of holonic manufacturing systems", *18th International Conference on Production Research*, 31 Iulie – 4 August, 2005, Fisciano, Italia.