観察および明示的な情報の重み付け処理による システム評価を考慮した知的制御システム*

高橋 正樹^{*1}, 幡野 圭洋^{*2}
幡野 尚子^{*3}, 吉田 和夫^{*4}

Intelligent Control System Taking Account of System Evaluation Using Weighted Observational and Explicit Information

Masaki TAKAHASHI^{*5}, Keiyo HATANO,
Naoko HATANO and Kazuo YOSHIDA

^{*5} School of Science for OPEN and Environmental Systems, Keio University,
3-14-1 Hiyoshi, Kohoku-ku, Yokohama-shi, Kanagawa, 223-8522 Japan

This study considers an intelligent control system to integrate flexibly its components by using weighted information where the system evaluation is reflected. Such system evaluates the information flowing through the components and converts them by weighting depending on the degree of importance. Integration of components based on the system evaluation enables a system consisting of them to realize various, flexible and adaptive control. In this study, the intelligent control method is applied to a swing up and stabilization control problem of a number of cart and pendulum systems on a restricted straight guide. To stabilize the pendulum in a restricted environment, each system should realize not only a swing-up and stabilization control of the pendulum, but also a position control of the cart to avoid collision or deadlock. The experiment using a real apparatus demonstrated that the controller learning light interaction acquires egoistic character, the controller learning heavy interaction behaves altruistically, and the controller equally considering self cart and another cart becomes cooperative. In other words, these autonomous decentralized controllers can acquire various characters and flexibility for cooperation.

Key Words: Intelligent Control System, Autonomous Decentralized System, Cooperativeness, Inverted Pendulum

1. 緒言

近年, システムに要求される制御の多様化や高度化に伴い, 制御対象は線形系から複雑で非線形なシステムへ, 適用される環境は静的環境から動的環境へと移行しており, より開放的な環境下において高い制御性能が得られるシステムデザイン手法の必要性が高まっている. そのような動的な環境に対応可能な柔軟性・多様性・環境適応性を有する制御手法のひとつのアプローチとして, ファジィ, ニューロ, 遺伝的アルゴリズムなどの人工知能手法を特徴に応じて個別に適用するだけでなく, 統合・融合化することにより高次機能を持つ知的制御システムの実現をめざした研究が盛んに行われている⁽¹⁾⁻⁽⁴⁾. 知的制御を実現させようとする

研究の対象は, 非常に多岐に渡っている. 特に, 移動ロボットの分野では, 様々な制御システムが提案されており⁽⁵⁾⁻⁽⁷⁾, 近年では, 産業用ロボット⁽⁸⁾⁽⁹⁾, レスキューロボット⁽¹⁰⁾, 地雷撤去ロボット⁽¹¹⁾など実用化を目指した具体的な対象を用いて, 様々な知的ロボットの研究が行われている⁽¹²⁾. 知的ロボットは, 動的な環境や未知の環境において, 目的とするタスクを達成するために環境の変化を認識する能力, 意思決定能力, 新しい制御行動の生成能力が必要とされている⁽¹³⁾. そこで, 本研究では, 複数台のエージェントが同一環境下で行動する動的環境下において, 自己目的を達成するために, 自己の得た情報に従い自己の行動判断に基づいて自律的に行動するエージェントを考え, 観測に基づいた観察情報と通信による明示的な情報の重み付け処理による知的制御システムをその構造とともに提案する. 本システムでは, 観測に基づく観察情報よりシステムや環境の状態を評価し, 新たな目標値を生成し, 制御行動を決定する. また, 自己状態や行動を判断し, それらを表現した抽象化情報を生成し, 自己の内部情報を他エージェントに伝達するという明確な意図をもつ

* 原稿受付 2003年5月1日.

^{*1} 正員, 慶應義塾大学大学院理工学研究科(☎223-8522 横浜市港北区日吉3-14-1).

^{*2} (株)東芝(☎198-0025 青梅市末広町2-9).

^{*3} (株)野村総合研究所(☎240-0005 横浜市保土ヶ谷区神戸町134).

^{*4} 正員, フェロー, 慶應義塾大学理工学部.

E-mail: masaki55@2000.jukuin.keio.ac.jp

て通信する。本研究では、この抽象化情報を明示的な情報と呼ぶことにする。さらに、他エージェントとの通信による明示的な情報から自己と他エージェントの状態を評価し、最終的に自己の行動を決定する。このように、本システムは、システムを構成する要素間を伝達する観察情報と明示的な情報に対する判断機構を有しており、システムの構造を変えることなく、それらの情報に対する重み付けの調整のみで、創発的に多様な特性を生じるシステム構成となっている。これまでに、複数台の移動ロボット間の通信を用いた競合解消や共同作業など協調的な行動に関する研究が盛んに行われているが⁽¹⁴⁾⁻⁽¹⁷⁾、このような観点からの研究の報告例は見られない。

本報告では、提案手法の例証のため、制限のある直線上の複数台の台車-振子システムの振上げ・安定化制御問題を考える。本例題では、各台車が自己目的を達成するために自由に行動した場合、台車可動範囲に制限があるため、それぞれの台車は競合し、衝突する可能性がある。したがって、各台車間で何らかの協調ができるような情報処理の機構とそれに基づいた制御を行う機構を含んだ制御器の設計が必要となる。これらの機構をシステムの評価基準を反映させた重み付けにより統合し、その重み付けを変化させることで、システムとして多様性を獲得できることを実験的に検証する。特に、双方の情報に対して適度な重み付けがなされた場合に、他台車との相互作用の影響を考慮した協調的な行動が獲得されることを示す。

2. 観察および明示的な情報の重み付け処理によるシステム評価を考慮した知的制御システム

本研究では、観察情報および明示的な情報の重み付け処理による知的制御システムを提案する。その構造を図1に示す。提案する知的制御システムでは、システムを構成する受容処理要素、情報処理要素、通信処理要素、動作処理要素間を伝達する情報に対して、ある評価基準に基づいて重み付けを行い、重み付けされた情報が各要素に伝達されることによって、各要素間が補完された結果として多様な処理を実現する。システム内を伝達する情報に対する重み付けは、図2に示すように、各要素を結合する3つの情報経路内で行われる。ここで、受容処理要素 (Sensing elements) から情報処理要素 (Processing elements) へ伝達される観察情報に対して重み付け処理を行う経路を S. to P. 経路、受容要素から通信要素 (Communicating elements) へ伝達される観察情報と情報処理要素からの制御則情報に対して重み付け処理を行う経路を S. P. to C. 経路、通信

Fig.1 Structure of the proposed method

Fig.2 Information Channel between System Elements

処理要素から動作処理要素 (Activating elements) へ伝達される S. P. to C. 経路内の重み付けの結果得られた明示的な情報に対して重み付けを行う経路を S. P. to A. 経路と呼ぶ。これらの経路内において、各要素間を伝達する情報への重み付け処理は、図2に示すように、知識ベース推論、エキスパートシステム、ファジィ、ニューロ、GAなどの人工知能手法によって構成される。それぞれの経路の役割について以下に述べる。

2・1 観察情報処理 (S. to P. 経路) 動的な環境下でシステムが自己目的を達成するためには、状況に応じて柔軟な制御が実現できることが望まれる。しかし、情報処理要素における各制御器は、それぞれ局所的な目的を達成するために設計されており、入力され

た情報に対して限られた処理を行うため、状況に応じた柔軟な処理を実現することは困難である。そこで、S. to P. 経路における観察情報処理では、図2(a)に示すように、センサやカメラ等の受容要素で計測されたシステムや環境に関する観察情報の評価を行い、重要度に応じた重み付けがなされ、情報処理要素へ伝達される。つまり、重み付けの結果、重要な計測情報が優先され、制御器に入力される情報を適切に加工することで多様な処理を実現する。例えば、動的な環境下で観察情報に対して適切な重み付けがなされた場合、環境を含む全体とのバランスを考慮した柔軟な制御が実現される。

2・2 自己評価処理 (S. P. to C. 経路) 制約のある動的な環境下で複数のエージェントが自己目的達成のために他の影響を無視して自律的に行動すると何かしらの競合が生じる。また、他や全体の影響でスタック状態に陥ってしまい、自己の目的をいつまでも達成できない場合がある。各エージェントは、このような問題を回避し、自己目的を達成するために、相互作用の影響を考慮した何らかの協調を誘発するような手段が必要となる。このような場合、図2(b)に示すように、自己の内部状況を的確に他エージェントに伝達しなければならない。このとき自己の計測した情報やその情報処理の過程をすべて他者に伝達するのは、計算量や通信コストの面から良策であるとはいえない。そこで、S. P. to C. 経路における自己評価処理では、システムの内部状況を評価し、評価基準に基づいた重み付けを行い、システム内部情報を抽象化したコード情報を生成する。エージェント間で通信される情報は、状態量そのままでなく、評価基準との整合度が反映されたシステムの内部情報を代表するコード情報となる。ここでは、このコード情報をCommunication codeと呼ぶ。

2・3 明示的な情報処理 (S. P. to A. 経路) 図2(c)に示すように、各エージェントは、自己目的を達成するために、自己の得た情報に従い、自己の行動判断に基づいた自律的な行動だけでなく、他エージェントの行動を判断し、他または全体を考慮した行動も要求される。P. C. to A. 経路では、通信処理要素において自己の発信したCommunication codeや他エージェントから受信したCommunication codeに対して、評価基準に基づいた重み付けを行い、その評価を反映した制御器を選択し、動作処理要素に伝達する。これにより、他エージェントとの整合性を動作に反映することが可能となる。つまり、他者の情報が単なる外乱ではなく意味のある情報として捉えられるとき、情報の重み付けの結果として、各エージェントに協調的な行動が誘発される。このように、システム内では常に各要素間を

伝播する情報を評価し、その重要度に応じた重み付けを行う。

3. 複数の台車－振子系の振上げ・倒立制御問題

3・1 問題設定 提案する知的制御システムを制約条件のある台車－振子システムの振上げ・倒立制御問題に適用する。本例題は、図3に示すように同一レール上に、自律的に動く複数の台車を配置し、限られた可動範囲内で自己の振子をできるだけ倒立状態で保つような制御器を設計する問題である。各台車は、自己の振子を振上げて倒立させるために左右に動かなければならないが、全台車の可動範囲には制約があるため、他台車を無視して振上げ制御を行った場合、図4(a)に示すように衝突する可能性がある。また、図4(b)のような場合、左側の台車が振上げ制御を行うと倒立状態にある右側の台車と衝突してしまう。このとき、左側の台車が倒立目的を達成するためには、十分な可動範囲を確保したあとに振上げ制御を行うことが望ましい。そのため、その意図を他台車に伝え、振上げ制御を達成できるだけの可動範囲が確保できるまで、その場に留まるような行動も必要となる。一方、右側の台車は、観察情報や明示的な情報から他台車の行動による衝突の危険性を感知し、一度振子を倒してでも右側の空いているスペースに移動し、再度倒立状態に至ることが望ましい。これは、倒立のための局所的な目的を破棄して、積極的に不安定な要素を利用するものであり、従来の制御にはない方法論が必要とされる。さらに、図4(c)のように、振子の運動が同調するような状態により、台車可動範囲の競合を避けるような場合も考えられる。このため、本例題では、単なる衝突回避機能を各台車に組み込むだけではなく、各台車間で何らかの協調ができるような情報処理の機構とそれに基づいた制御を行う機構を含んだ制御器の設計が必要とされる。

Fig.3 Schematic View of Experimental Equipment

Fig.4 Control Problem

3・2 システム構成 本研究の制御対象である台車-単振り子システムの実験装置の構成を図5に示す。受容処理要素は、台車駆動モータ軸と振り子のふたつの計測部に設置されたエンコーダにより、台車変位 x と振り子角度 θ を計測し、台車の左右の間隔 R, L を算出する。情報処理要素は、台車位置を目標位置に収束させる制御器 (Position controller) と振り子倒立のための振り子角度に関する制御器 (Angle controller) から構成される。Position controllerは、目標位置と現在位置との誤差に関する調整器を最適制御理論により設計する。Angle controllerは、振り子の安定平衡点近傍での不安定化器 (Unstabilizer) と不安定平衡点近傍での安定化器 (Stabilizer) を各平衡点近傍での線形近似モデルに基づいて設計する。Unstabilizerは、線形モデルとその制御器を含む閉ループ系を不安定な極配置にすることで不安定化を実現する。Stabilizerは、最適制御理論による線形な状態フィードバックコントローラとする。それらの制御器を統合することによって任意の状態からの振上げ・倒立制御を実現する⁽¹⁸⁾。設計した各制御器の統合方法は図6に示すインテグレータニューラルネットワーク (Integrator) に獲得される。このニューラルネットワークの結合重みの獲得は遺伝的アルゴリズム (GA) を用いて行う。複数の初期状態からシミュレーションを行い、

$$J = \frac{1}{\sum_{i=0}^n \{|\theta(i)| + 1\}} \quad (1)$$

Fig.5 Controlled Object

Fig.6 Integration of Stabilizer and Unstabilizer

で表される評価関数を計算し、最も適応度が高い個体を探索する。ここで、 $n = t_e/dt$ とし、シミュレーションタイム $t_e = 10s$ 、サンプリングタイム $dt = 5ms$ とした。情報処理に関して完全な分散型とはなっていないが、DSP内部で仮想的に並列な処理を行なっている。また、通信処理要素についても、台車間の通信はDSP内で行なうため、遅れやノイズなどの問題のない理想的な通信を想定している。各台車は、搭載したDCサーボモータのトルクを回転式ナットと固定ボールねじで直線運動に変換することにより駆動し、台車上に設置された剛体振り子を振上げて倒立させる。

4. 自律分散型コントローラの設計

制約条件のある台車-振り子システムの振上げ・倒立制御問題の競合と協調に対して有効に機能する自律分散型コントローラの具体的な設計手法の一例を提示する。その構造を図7に示す。

4・1 情報経路 各要素間を伝播する情報に対して重み付けを行う情報経路を図8に示す。

S. to P. 経路では、受容要素において計測された振り子角度情報と台車の左右の間隔に関する情報に対して重み付けを行い、情報処理要素の制御器に入力する情報を生成する。ここでの重み付けはルールベースによるものとした。その概要を以下に示す。

- (a) 台車間隔が左右均等で十分広い場合、台車変位情報を軽視する。
- (b) 台車間隔が十分であるが左右で偏りがある場合、台車変位の原点がその中点となるようにする。
- (c) 台車間隔が十分取れない場合、全情報がシャットダウンされるような重み付けをする。

S.P. to C. と P.C. to A. 経路はニューラルネットワークで構成した。本例題では、S. P. to C. 経路では、台車間の相互作用を行う基本的な処理要素として非線形発振器 (Oscillator) の相互引込現象を利用する⁽¹⁹⁾⁽²⁰⁾。具体

Fig.7 Structure of the proposed method

的には、台車上の振子にリミットサイクル振動を生じさせるような操作量を持つ Oscillator として、不安定平衡点近傍における線形モデルを用いて、極が安定限界になるような制御器を設計した。各台車にはこの Oscillator が出力する操作量を相互作用させることにより、操作量がお互いに引込現象を起こし、結果として図 4(c) に示すように振子が同調する。本研究では、この発振器は制御時に振子を同時に発振させるものとしてではなく、台車間で Oscillator の操作量を比較することで同調の程度を示す指標として利用する。さらに、台車の内部状態を示す計測情報、制御則情報に対して評価基準を反映した重み付けを行い、2bit で表現される抽象化情報を生成し、他の台車へ伝達する。

P.C. to A. 経路では、自己で発信した Communication code と他の台車から受信した Communication code の情報に対して最終的に評価基準に基づいた重み付けを行い、情報処理要素から与えられる操作量に反映する。

4・2 S.P. to C. と P.C. to A. の学習 ニューラルネットワークで構成される S.P. to C. 経路と P.C. to A. 経路は、評価基準に基づいた自己の倒立目的と他台車との整合性が学習により獲得される。このとき、これらは互いに他方の出力結果の影響を受けるため、別々に学習することはできず、ふたつのニューラルネットワークを結合させて考え、同時に獲得する。その結合重みを遺伝子とし、数パターンの初期状態からシミュ

レーションを行ない、振子の角度情報と台車の左右の間隔情報で表現された評価関数を計算し、適応度を最大にする結合重みを GA により探索的に獲得する。

$$J = \frac{1}{\sum_{i=0}^n [a \{|\theta_i(t)|\} + b \{penalty(R_i(t), L_i(t))\}] + 1} \quad (2)$$

$$penalty(R_i(t), L_i(t)) = \begin{cases} 0.5 & (|\theta_i(t)| < 0.4 \text{ or } |L_i(t)| < 0.4) \\ 0 & (\text{else}) \end{cases} \quad (3)$$

ここで、 R_i 、 L_i はそれぞれ右側、左側の障害物との距離を示し、添字 i はそれぞれ台車 A、台車 B を表す。定数 a, b は、この評価関数において振子角度と台車変位のどちらを重視するかを示す。台車変位を考慮するということは、他の台車の影響をどれだけ考慮するかということになる。 a, b の設定は、他台車の影響からの評価の大・中・小により、次に示す 3 タイプを考える。

TYPE-1 他の台車情報を軽視 ($a=1, b=0$)

TYPE-2 他の台車情報を重視 ($a=0, b=1$)

TYPE-3 自他の台車情報を対等視 ($a=1, b=1$)

これら 3 タイプの評価を基に設計された重みを持つニューラルネットワークによって構成される自律分散型コントローラを獲得した。

5. 制御実験

前章で示した 3 タイプの評価に基づいて設計された各自律分散型コントローラの特性を検証するために、2 台の台車-振子システムの振上げ・倒立制御問題に適用し、制御実験を行った。図 9 に 2 台の台車が中央付近で接近した初期状態からの制御実験結果を示す。どちらの台車も他台車との競合を解決するような行動が必要となる。制御実験結果は、上から順に、各台車の台車位置（実線）および振子先端位置（破線）、S.P. to C. の出力、P.C. to A. の出力の時刻歴を示す。P.C. to A. の出力は、1 は Position controller、2 は Angle controller からの出力を示す。

5・1 他の台車情報を軽視した重みによる結果

TYPE-1 の評価を反映した重みの情報経路を持つ自律分散型コントローラでは、図 9(a) に示すように、各台車が自己の振子倒立のために自律的に行動した結果、衝突してしまい、両台車とも倒立状態に至ることができていない。内部の情報経路の出力に着目してみると、衝突の危険性がある場合にも Communication Code に変化が見られず、その情報に対して重み付けを行った結果から、他の台車の情報は無視され、Angle Controller による振子角度制御のみが行われている。TYPE-1 の評価に基づいて獲得された自律分散型コントローラは、結果として利己的な特性を示した。

Fig.8 Information Channel between System Element

Fig.9 Experimental result

5・2 他の台車情報を重視した重みによる結果

図9(b)に示すように、TYPE-2の評価を反映した重みの情報経路を持つ台車では、他台車の影響を重視した結果、内部情報経路では、P. C. to A. 経路の重み付けは Communication Code に関係なく Position Controller に偏っている。そのため、台車衝突の危険性はないが、両台車とも倒立状態に至っていない。重み付けの結果として、お互いがお互いを譲り合うという利他的な特性が獲得されている。

5・3 自他の台車情報を対等視した重みによる結果

TYPE-3の評価を反映した重みの情報経路を持つ台車では、図9(c)に示す制御実験結果より、協調的に振る舞うという特性が獲得されたといえる。内部情報経路では、両台車とも S. P. to C. 経路からの Communication Code を状況に応じて切り替えている。そして、S. P. to A. 経路において自台車と他台車の Communication Code に重み付けをした結果、常に Angle Controller により振子角度制御を行っているが、状況に応じて Position Controller を用いて台車位置制御を行っている。結果としてその和の指令値が協調関係となり、衝突することなく倒立に至っていると考えられる。

2台の台車が全体的にレールの端に偏った初期状態から制御実験を行った。図10に示すように、制御器の切

Fig.10 Experimental result
TYPE-3 (Cooperative controller)

Fig.11 Experimental result TYPE-3 (Cooperative controller)

換えの結果として、衝突することなく2台とも倒立に至っている。

さらに、制御開始後2台とも倒立状態に至り、その状態を保持しているときに、台車Bに外力を加えた場合の制御実験結果を図11に示す。制御開始からおよそ8秒後に外力を加えられた台車Bは不安定となり、両台車が接近するが、台車Aがスペースに余裕があるほうに移動し、衝突を避けている。そして、台車Bも一度倒立状態を放棄して、空いたスペースに移動し、その後振子を振上げ、再び倒立状態に至っている。どちらの台車も発信するCommunication Codeを頻繁に変化させ、Position ControllerとAngle Controllerを状況に応じて切替えた結果として、自己の倒立を実現するための協調的な行動を実現している。

5・4 協調的自律分散型コントローラによる3台の台車-振子システムの振上げ・倒立制御問題 協調的自律分散型コントローラをさらに厳しい制約条件下の3台の台車-振子システムの振上げ・倒立制御問題に適用した。その制御実験結果を図12に示す。3台ともに中央付近で密集した初期状態からは、左右の台車が空いたスペースに移動した後、振上げ制御を行い、

それに伴って中央付近にできたスペースを利用して中央の台車が振上げ制御を開始し、3台ともに倒立状態に至っている。また、3台ともにレールの端に偏った初期状態からは、スペースに余裕がある台車がまずそのスペースに移動し、そのことにより空いたスペースを利用して他の台車が振子の振上げ制御を行う。このときも基本的にはPosition controllerとAngle controllerの両方に重み付けがされており、結果としてその和の指令値が協調関係を引き出している。

6. 結言

本研究では、システムの構成要素間を伝播する観察情報および明示的な情報の重み付け処理による知的制御システムを提案し、その構造を提示した。本稿では、制約のあるレール上に配置された複数の台車-振子システムの振上げ・倒立制御問題に適用し、自律分散型コントローラの具体的な設計手法の一例を提示し、獲得された制御器の特性について実験的に検証した。実験結果より、提案する自律分散型コントローラでは、評価基準を変化させることで、重み付けの結果として得られるコントローラの特性が利己的、利他的、協調

Fig.12 Experimental result TYPE-3 (Cooperative controller)

的などの多様性を有することを確認した。また、振り子角度情報と台車左右の間隔情報を対等視した評価により獲得された協調的自律分散型コントローラでは、移動制限のあるレール上に配置された2台および3台の台車—振り子システムの振上げ・倒立制御を実験的に達成した。さらに、外力を加えた実験結果より、制御系設計時に想定していない事態に対しても柔軟な対応が可能であることを確認した。以上の結果より、提案する知的制御システムは、制御系の構造を変えることなく、評価基準を反映した内部情報伝達経路の重み付けの結果として、多様な処理が獲得されることを示した。

文献

- (1) Tsoukalas, L. H., Neurofuzzy Approaches to Anticipation: A New Paradigm for Intelligent Systems, IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics, 28-4, (1998) 573-582.
- (2) Su, S. F. and Hsieh, S. H., Embedding Fuzzy Mechanisms and Knowledge in Box-Type Reinforcement Learning Controllers, IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics, 32-5, (2002) 645-653.
- (3) Lazzerini, B., Reyneri, L. M. and Chiaberge, M., A Neuro-Fuzzy Approach to Hybrid Intelligent Control, IEEE Trans. on Industry Applications, 35-2, (1999) 413-425.
- (4) Chen, L. H. and Chiang, C. H., New Approach to Intelligent Control Systems with Self-Exploring Process, IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics, 33-1, (2003) 56-66.
- (5) Shibata, T. and Fukuda, T., Hierarchical Intelligent Control for Robot Motion, IEEE Trans. on Neural Networks, 5-5, (1994) 823-832.
- (6) 石黒章夫・内川嘉樹, 免疫システムに基づくロボット制御と創発, 日本ロボット学会誌, 15-5, (1997) 28-32.
- (7) Fukuda, T. and Kubota, N., Learning, Adaptation and Evolution of Intelligent Robotic System, Proc. IEEE Int. Symp. on Intelligent Control, (1998) 2-7.
- (8) 米本完二, 産業用ロボットの今後の技術動向, 日本ロボット学会誌, 11-1, (1993) 7-13.
- (9) 花井嶺郎・土屋総二郎・日比均・中斎龍美・寺田宏幸, 市場の不確実性に順応する生産システム(APS)の開発—自動車用スタートラインへの適用—, 精密工学会誌, 65-8, (1999) 1087-1091.
- (10) 田所諭・大須賀公一・天野久徳, レスキューロボット, 日本ロボット学会誌, 19-6, (2001) 685-688.
- (11) 広瀬茂男・福島E. 文彦・加藤恵輔, 人道的対地雷撤去作業の自動化技術, 日本ロボット学会誌, 19-6, (2001) 722-727.
- (12) 井上博允, 重点領域研究「知能ロボット」, 日本ロボット学会誌, 16-5, (1998) 2-9.
- (13) 浅香俊一・石川繁樹, 動的な環境における自律移動ロボットの行動制御, 日本ロボット学会誌, 12-4, (1994) 583-589.
- (14) 浅間一, マルチエージェントロボットシステム研究の動向と展望, 日本ロボット学会誌, 10-4, (1992) 428-432.
- (15) 油田信一, 複数の自律移動ロボットの協調行動, 日本ロボット学会誌, 10-4, (1992) 433-438.
- (16) 福田敏男・関山浩介, ネットワーク型ロボットシステム—インテリジェントコミュニケーションを目指して—, 日本ロボット学会誌, 12-6, (1994) 780-784.
- (17) 加藤晋・武野純一, 複数の移動ロボットの協調, 日本ロボット学会誌, 12-6, (1994) 785-790.
- (18) 木通秀樹・吉田和夫, 統合化キュービクニューラルネットワークによる知的制御 振り子の振上げから倒立に至る非線形制御の知的化, 機論, 63-613, C(1997) 3160-3167.
- (19) 佐藤力, 非線形振動論, 朝倉書店, (1970) 44-72.
- (20) 戸田盛和・渡辺慎介, 非線形力学, 共立出版, (1984) 82-85.