

内的拘束条件の生成に基づくマルチロボットの 多様化と協調

向山 弘樹¹⁾ 三宅 美博²⁾ 清水 博¹⁾

Internal Constraints based Cooperativity and Diversity in Multiple Robots

Hiroki Mukaiyama¹⁾, Yoshihiro Miyake²⁾ and Hiroshi Shimizu¹⁾

In this paper, internal constraints based control is proposed as an autonomous control method to realize both cooperativity and diversity in multiple robots. We used a robot model composed of two subsystems. One is a physical system which self-organizes a dynamical coherence in mutual interaction between the robots and their environment. The other is an interpretational system, and it generates internal constraints from the coherent state and operates the physical system based on the constraints. The proposed method is realized through mutual constraint process between these two subsystems. To check the effectiveness of this method, a task that multiple robots carry one load was examined as an example of cooperative behavior.

Key Words: Internal Constraints, Autonomous Control, Multiple Robots, Cooperativity, Diversity

1. はじめに

生物集団に見られる協調様式の特徴は、その構成要素の多様性と集団としての統合性を積極的に両立させ、複雑な外部環境に対応できることにある。本研究では、マルチロボット系において、そのような生物的協調様式を実現するための一制御手法を提案する。

まず、そのような制御系に求められる必要条件から考えてみよう。外部環境が複雑である場合、構成要素が環境の局所的な状況に応じて、それぞれ多様化できることが有効である。そのためには、おのおのの構成要素が独自のダイナミクスを持つことが必要であり、結果的に、集団としては極めて複雑な内部ダイナミクスを持つ系となる。しかし、それだけでは集団としての統合性は得られないので、そのようなダイナミクスを制約するための内的拘束条件が生成されなければならない。ここで、内部ダイナミクスとは、系の外部から直接制御できない内部自由度に起因するダイナミクスのことであり、内的拘束条件とは、そのようなダイナミクスに基づいて系の内部で生成される拘束条件のことである。したがって、複雑な環境に対応できる協調制御系を実現するためには、多様な内部ダイナミクスを生成しうる内部自由度と、それを制約するための内的拘束条件を生成するはたらきの2点が必要と

考えられる。そこで本研究では、このような考察を踏まえて、マルチロボット系の協調制御の新しいクラスを確立することをめざす。

本研究の特徴を理解するために、まず、マルチロボット系における協調制御の従来研究をまとめておこう。一般に、マルチロボット系は大きい内部自由度を持つ可能性が高いが、従来は、この自由度を排除することで、系の外部から一義的に制御するための研究が進められてきた。その方法は大きく分けて二つある。一つは線形近似によって自由度間での相互作用を捨象し、系の局所的ダイナミクスを確定することであり、もう一方は、断熱近似によって自由度を圧縮し、系の大域的ダイナミクスを確定することである。

例えば、前者の方法は、系を構成する自由度間に線形性を仮定し、おのおのの自由度を独立に外部から制御しようとする方法である。つまり、ロボット間での相互作用を捨象し、個々のロボットの局所的ダイナミクスを確定した上で、その動作の加算平均としてロボット集団の機能を統計的に規定することになる。これは具体的には、衝突回避問題[1][2]のように、ロボット間での独立性を高める方向での制御に用いられてきた。一方、後者の方法は、自由度間での非線形性を利用し、自己組織系として制御しようとする方法である。このとき、系の秩序変数となる少数自由度に対して、残りの大自由度の時定数が十分小さいとする断熱近似が前提されており、そのとき秩序変数による残り自由度の圧縮(スレービング原理)が成立する。したがって、秩序変数のダイナミクスを支配する分岐パラメータや境界条件のような外的拘束条件の操作によって、残りの大自由度系は一方向的に制御される。

原稿受付 1998年10月1日

¹⁾ 金沢工業大学

²⁾ 東京工業大学

¹⁾ Kanazawa Institute of Technology

²⁾ Tokyo Institute of Technology

具体的には、シナジェティクス[3]を参考にした対流ロボットの研究[4]などがある。

本研究のめざす方向性は、明らかにこれらの従来研究とは逆である。系の内部自由度を排除することで系を外部から制御するのではなく、系の内部自由度を積極的に利用し、系自らが内的拘束条件を生成し内部自由度を制御するのである。それによって、複雑な環境に対応するための、構成要素の多様性と集団としての統合性が実現されると考える。このような状況は、系の局所および大域的ダイナミクスが分離できない状況に対応し、スレービング原理が成立しない状態である。そのため、系の外部から制御できない内部自由度を、系自身が内的拘束条件を生成することによって操作しなければならないのである。具体的には、御輿を担ぐような状況、つまり、複数の歩行ロボットが協力して一つの大きな荷物を運搬するモデルが提案される。そのとき、個々のロボットが、そのロボット集団の中で位置と状況に応じて、それぞれ内的拘束条件を生成し、歩行パターンを多様化することで、ロボット集団としての安定化が達成されることが示される。

2. 内的拘束条件の生成に基づく制御

このような自律的要素から構成される系における、拘束条件生成の枠組みとして、清水が提案する関係論的システム[5]がある。ここで、関係論的システムを構成する自律的要素は関係子と呼ばれ、関係子としての局所的ダイナミクス、および関係子集団としての大域的ダイナミクスを分離して確定できないところに特徴がある。そのため、関係子の相互作用を通して、関係子集団にコヒーレント状態の生成が試みられ、そのコヒーレント状態を関係の秩序として関係子が解釈することになる。そして、個々の関係子は、その関係的秩序に基づいて内的拘束条件を生成し、関係子のダイナミクスを多様化させる。さらに、その多様化した関係子に基づいて新たなコヒーレント状態が再生成される。このような関係子と関係的秩序の間での相互拘束サイクルを通して内部ダイナミクスを多様化し続けることになる。このような自己参照的な自律システムのことを関係論的システムと呼ぶ。

われわれは、この関係論的システムの枠組みを、マルチロボット系における内的拘束条件の生成に基づく協調制御に応用する。そのため、個々のロボットが相互作用を通してロボット間にコヒーレント状態を生成し、それを個々のロボットが関係の秩序として解釈するプロセスと、それに基づいてロボットにとっての内的拘束条件を規定し、個々のロボットのダイナミクスを多様化するプロセスの、少なくとも二つのはたらきが必要である。そして、そのプロセスを交互に繰り返すことで、ロボット集団として多様化し協調的にタスクを実現することをめざす。そこで、本研究では、Fig. 1に示すような、二つのサブシステムから構成されるロボットモデルを提案する。そして、ロボット間での相互作用を通してコヒーレント状態を生成するはたらきを身体系(Physical System)に、それを関係の秩序として解釈し内的拘束条件を生成するはたらきを解釈系(Interpretational System)に対応づける。すでに、三宅は本手法を、歩行ロボット集団におけるグループ編成という協調的機能分化の問題に応用し、その有効性を確認している[6][7]。

身体系における相互作用としては、非線形リズムの相互引き込

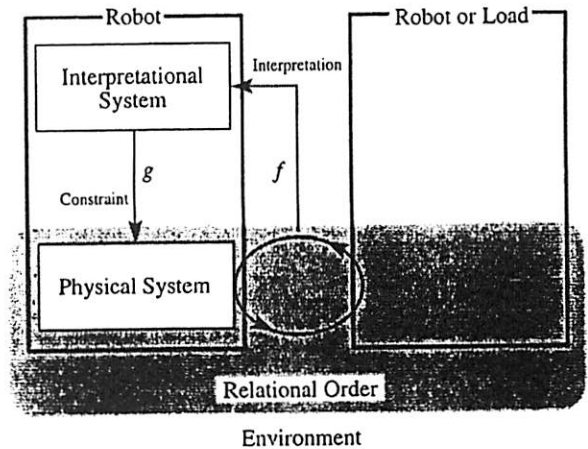


Fig. 1 Internal constraints based control

みに着目することになる。そして、このような相互作用を通して、時間領域におけるコヒーレント状態が身体系に生成されることになる。ここで、非線形リズムとは、非線形相互作用から構成される力学系において、ホップ分岐を経て生じるリミットサイクルのことである。また、相互引き込みとは、非線形リズムの相互作用において見られる自己組織化の一種であり、異なる振動数のリズムが相互に同調し、自発的に同一振動数となって振動する現象である。このようなリズムの引き込み現象は、人間の身体的コミュニケーション[8][9]や生物の細胞間コミュニケーション[10]など、広く生物学的な相互作用プロセスにおいて報告されており、生物学的な協調性において本質的な役割を果たしていると考えられている。

一方、解釈系では、身体系に生成されたコヒーレント状態を解釈し、それに基づいて内的拘束条件を生成し身体系を操作することになる。特に、コヒーレント状態は、それを解釈するロボットにとって自分のダイナミクスを一部分として含むものであり、そのロボットとロボット集団とを関係づける関係の秩序として解釈されなければならない。ただし、解釈系にとって、このような関係の秩序として解釈すること、さらに、それから内的拘束条件を生成することは一種の逆問題であり、そのための先行的知識としてのルールが必要となる。そこで、関係の秩序として解釈するためのルール f 、そして、それを用いて身体系のダイナミクスを多様化させるルール g の二つのルールを設定し、個々のロボットに埋め込むものとする。本来は、このようなルールを含めて内的拘束条件として生成することが必要であるが、本論文ではそのような方向へ向けての第一歩としてこのような前提を置いた。結果として、身体系と解釈系は循環的に拘束し合うことになり、内的拘束条件の生成に基づいてロボットが多様化し、協調的な機能分散を実現することになる。

3. モデル

3.1 タスク

タスクとしては御輿を担ぐ状況、つまり、複数の歩行ロボットが協力して一つの大きな荷物を運搬する状況を想定する。ロボッ

ト集団における協調的な荷物運搬では、荷物の運動状態に依存して個々のロボットの力学的負荷が時々刻々と変化する。しかも、個々のロボットにおける運動状態の変化が、逆に荷物の運動状態に影響を及ぼしてしまう。したがって、個々のロボットとロボット集団のダイナミクスを前もって分離することが困難であり、外部からの一義的な制御ができない内部自由度を持つ系となってしまう。したがって、このようなタスクは、本手法の有効性を検討するものとして妥当であろう。そこで本論文では、個々のロボットがそれぞれの置かれた状況に応じてダイナミクスをリアルタイムに多様化することで、ロボット集団としてより重い荷物を運搬することを具体的な目標とする。

これまでも協調的な荷物運搬を扱った研究は数多く行われてきた。例えば、脚ロボット[11]、リーダー・フォロワタイプの協調制御系[12]~[15]を用いた研究などがある。また、これと類似した研究として多脚歩行ロボットの自律分散的歩容を扱った研究[16]などもある。これらの研究ではロボット間の相互作用、あるいはロボットとその集団の相互作用を分離し、独立に制御する方向での研究であった。そのために多様化が必要とされる問題に対して、個々のロボットの機能をあらかじめ設定することによって固定的に機能分化させる方法が用いられてきた。それに対して本研究が対象とする問題領域は、相互作用に基づく相互干渉性が避けられず、リアルタイムの機能分化が必要とされる状況である。これらの点において本研究で扱うタスクは従来研究と重なっていない。

3.2 身体系

ロボットは身体系と解釈系から構成されるが、その身体系としては、多賀らにより提案されている2足歩行ロボットを用いた[17][18]。多賀らの2足歩行ロボットは、Fig. 2に示されるように複数の剛体セグメントから構成される筋骨格系 (Musculo-Skeletal System) と神経振動子系 (Neural Rhythm Generator) から構成されている。そして、それらの相互作用を通して引き込み状態を生成し、柔軟な歩行運動を行うことができる。また、神経振動子系に対する定常入力値 (Constant Input) を変化させることで、歩行運動の速度、周期を変えることができ、多様な歩行パターンを実現できる (詳細については付録Aを参照)。そこで本論文においては、身体系への定常入力値を、個々のロボットのダイナミクスを規定する内的拘束条件と対応づける。そして、その内的拘束条件を関係の秩序に基づいて自ら規定することによって、歩行パターンを多様化することになる。

一方、ロボットの身体系間における相互作用としては、2種類の作用関係を設定した。一つは荷物を介する力学的相互作用であり、Fig. 3に示すように、個々のロボットにおける腰の部分に荷物と力学的にリンクした (詳細については付録Bを参照)。もう一つは、脚輿担ぎにおける掛け声に相当する相互作用であり、隣接するロボット間で相互に歩行のタイミングを合わせるための相互作用である。具体的には、隣接ロボットの左右の足の接地タイミングをFig. 4(a)に従ってパルスに変換し、それをFig. 4(b)のように、自分の神経振動子系のhip oscillatorに入力させた (詳細については付録Cを参照)。これらのロボット間相互作用によって生成されるコヒーレント状態の一例をFig. 5に示す。同図は3体のロボットが荷物を運搬する際の3[sec]ごとの時間発展を示し

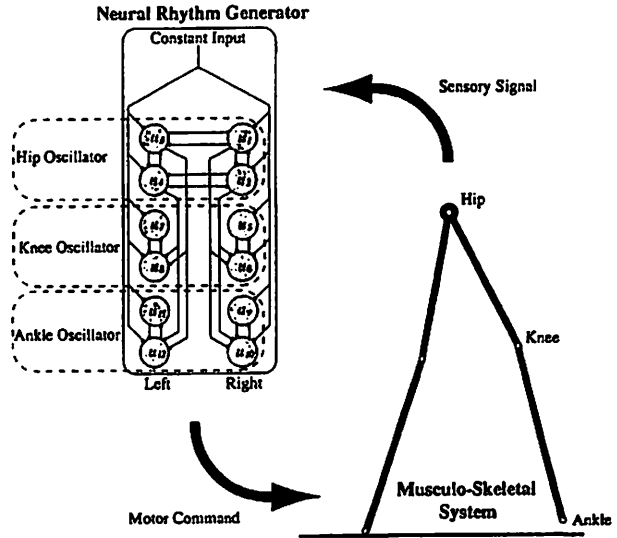


Fig. 2 Bipedal locomotion model [17]

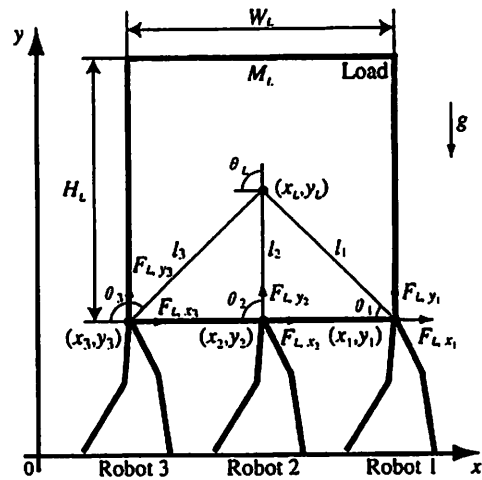


Fig. 3 Load carry model

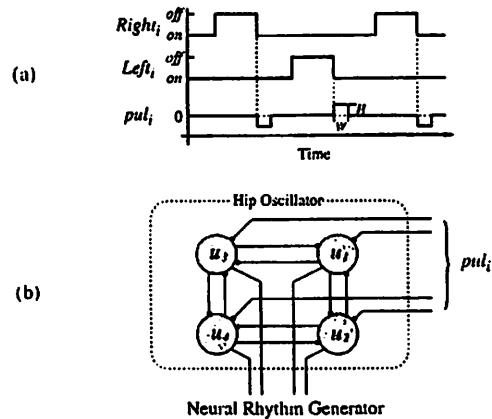


Fig. 4 Rhythm interaction

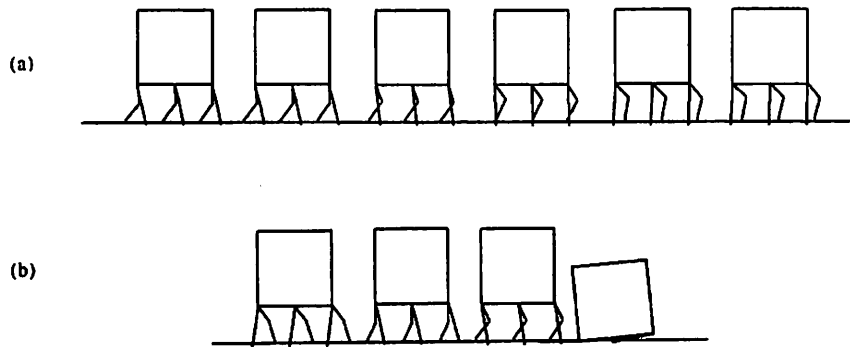


Fig. 5 Temporal development of load carry

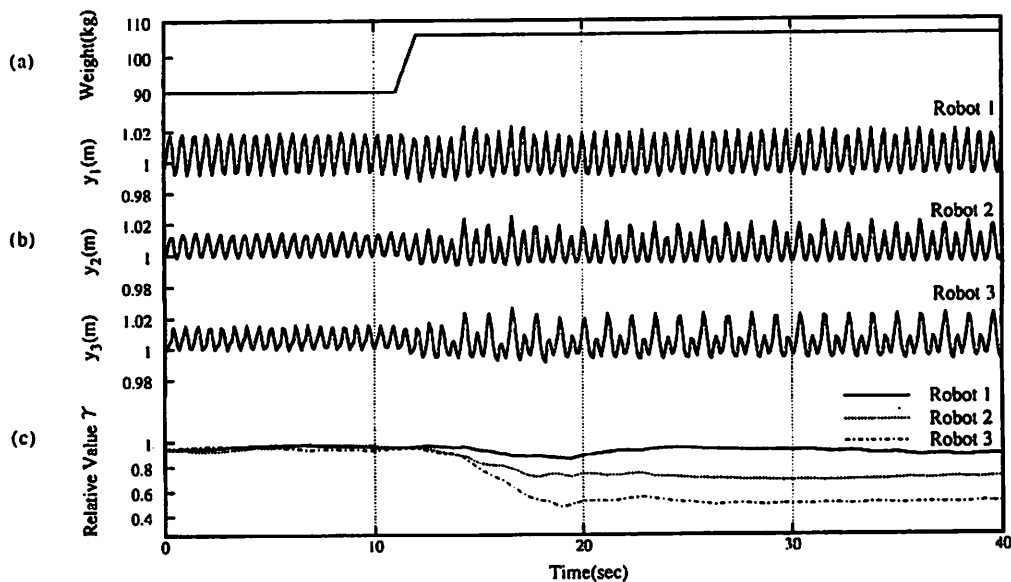


Fig. 6 Generation process of internal constraints

ている。荷物の重さが比較的重い場合には、Fig. 5(a)のように個々のロボットの歩行運動における足の接地リズムが相互に引き込まれ、歩行リズムと荷物の揺れとの引き込みも生じている。しかし、そのようなコヒーレント状態は必ずしも安定に生成せず、荷物が重くなるとFig. 5 (b)のように転倒してしまう。

3.3 解釈系

3.3.1 関係的顺序としての解釈

先にも述べたように、解釈系における生成ルールは、あらかじめ埋め込むことを本論文では前提としている。そこで、まず最初に、身体系の相互作用を通して生成されるコヒーレント状態を関係的顺序として解釈するためのルールを規定する必要がある。いま、ロボット集団にとっての目的は、それらが協力してより重い荷物を運搬することである。よって、ロボット集団にコヒーレント状態が生成される場合において、その荷重変動に対する依存性を調べるのがまず必要である。Fig. 6は、3体のロボットに対して、初期荷重を90[kg]として、そこから106[kg]まで荷重を増大させたときの結果を示している。Fig. 6 (a)は荷重の時間変化

を示しており、Fig. 6 (b)は各ロボットの腰座標の上下動を示している。荷重変動前では、すべてのロボットにおいて均質かつ安定した腰座標の上下振動の同調が見られる。このことは、比較的稳定したコヒーレント状態が生成されており、内部自由度が圧縮されていることを示している。しかし、荷重増大後ではそれが不安定化し、大きな振幅と小さな振幅が交互に現れ、しかも、それがロボットごとに不均質になっていることが分かる。このことは何らかの内部自由度が生成していることを予想させる。

このときの荷物の揺れの時間発展をFig. 7に示す。同図は、ロボットの腰が固定されている荷物の底辺の揺れを表しており、図中の番号は、揺れの時間発展を0.1[sec]ごとに示している。また、Fig. 7 (a)は荷重変動前、Fig. 7(b)は変動後を示している。図より、荷重変動前においては、ロボットの位置によらず、荷物の揺れはほぼ均等に分布している。そのため、個々のロボットにおける腰座標の上下動はおおむね同調している。それに対して荷重変動後では、変動前と同様に揺れが均等に分布する時間帯（実線）と、最後尾のRobot 3において揺れが下方領域に偏り、そこが支

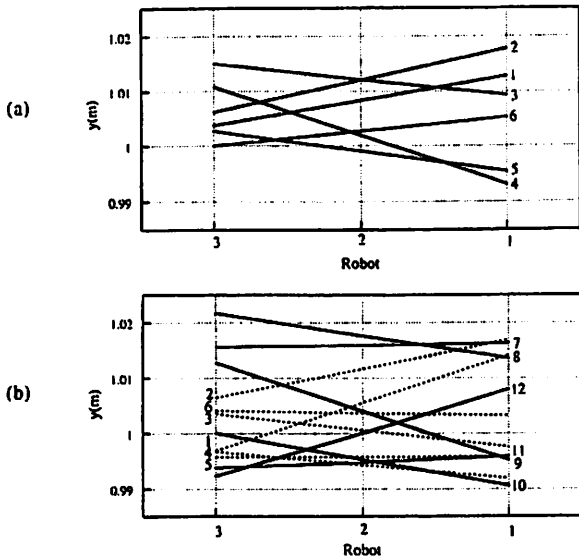


Fig. 7 Dynamics of load

点となり荷物が回転運動する時間帯(点線)が交互に繰り返されていることが分かる。つまり、回転運動に関する自由度が内部自由度として新たに生成したことが分かる。また、このシミュレーションにおいて観察されたコヒーレント状態の変化は、荷物の並進運動から回転運動への変化に伴うものであることを考慮すると、ロボットの種類に依存した現象ではなく、タスクに依存する普遍的な現象であると考えられる。

したがって、このようなコヒーレント状態から個々のロボットとロボット集団の関係および、ロボット集団と荷物の関係に関する情報を関係的秩序として解釈することが可能になるとと思われる。その可能性を検討するために、まず、各ロボットの腰の上下動を Fig. 8 のように位相平面に表示してみた。左から、Robot 1, Robot 2, Robot 3 を示している。また、上段は荷重変動前で、下段が荷重変動後を示している。この図より、荷重変動後では変動前に比べて2倍周期のアトラクターになっていることが分かる。また、このアトラクターをロボットの位置ごとに比較してみると、二つの振幅の比はロボットの置かれる位置に依存して、それぞれ異なっていることも確認できる。そこで、Fig. 9 のように、各ロボットにおける腰の上下動の隣り合う振幅において小さい方を α 、大きい方を β とし、その相対値 γ を式 (1) に従って定義した。ただし、添字 i はロボット番号を示しており、これ以降本論文で用いられる添字 i はすべてロボット番号を示すものとする。

$$\gamma_i = \alpha_i / \beta_i \quad (1)$$

このようにして求めた相対値 γ (Relative Value γ) の時間変化を Fig. 6 (c) に示す。図より、荷重変動前には、すべてのロボットの相対値 γ が 1 に近い値を取っているのに対して、荷重変動後には、先頭から後方のロボットに向かって単調減少していることが分かる。そこで、さまざまな荷重を付加したときの相対値 γ の分布を Fig. 10 (a) に示す。グラフ中の数値は荷重を表しており、ロボット集団は 108 [kg] までの荷物を運ぶことができた。図より、

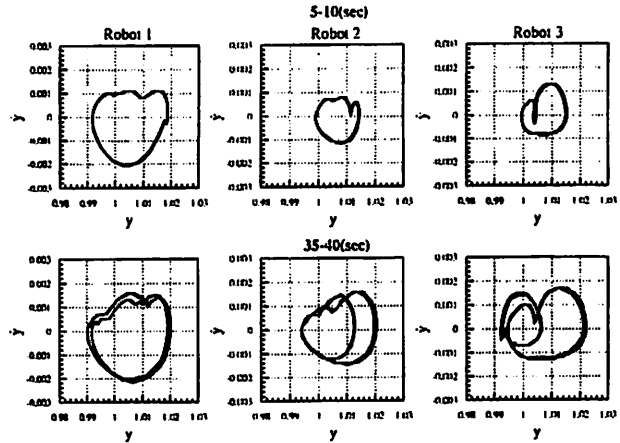


Fig. 8 Dynamics in phase space

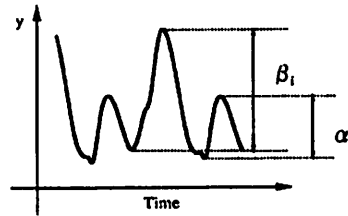


Fig. 9 Definition of α_i, β_i

荷重が 97 ~ 104 [kg] のときは、すべてのロボットで相対値 γ が 1 に近い値で均質に分布している。荷重が 97 [kg] より軽い場合にはすべてこれと同じ均質な分布となった。また、荷物が運搬不可能となる直前の 105 ~ 108 [kg] では、相対値 γ が Robot 1 から 3 に向かって単調に減少する不均質な分布になった。この変化は 104 [kg] から 105 [kg] の間で不連続に起こっている。さらに、Fig. 10 (b) に示すように、異なるロボット数においても同様な結果が得られた。ここで、すべてのロボットの相対値 γ が 1 に近い均質な状態を A 状態、相対値 γ が単調に減少する不均質な状態を B 状態と呼ぶことにする。

上記のシミュレーションでは、個々のロボットの歩行パターンを規定する定常入力値を均質としていた。そこで、次に、Table 1 のように不均質な定常入力値の分布、つまり、個々のロボットの歩行パターンが異なる場合の相対値 γ の空間分布も調べた。その結果、Fig. 11 のように、どの歩行パターンの組み合わせから始めた場合においても、荷重の増加に伴って、先と同様に A 状態から B 状態に不連続に遷移した。また、定常入力値の分布に依存して、A 状態から B 状態に転移する領域が異なっていることも分かる。

以上の結果を踏まえて、身体系におけるコヒーレント状態を個々のロボットが関係的秩序として解釈するためのルールを設定しなければならない。その場合、コヒーレント状態を式 (1) に従って相対値 γ として定量化することが最初の段階である。それ

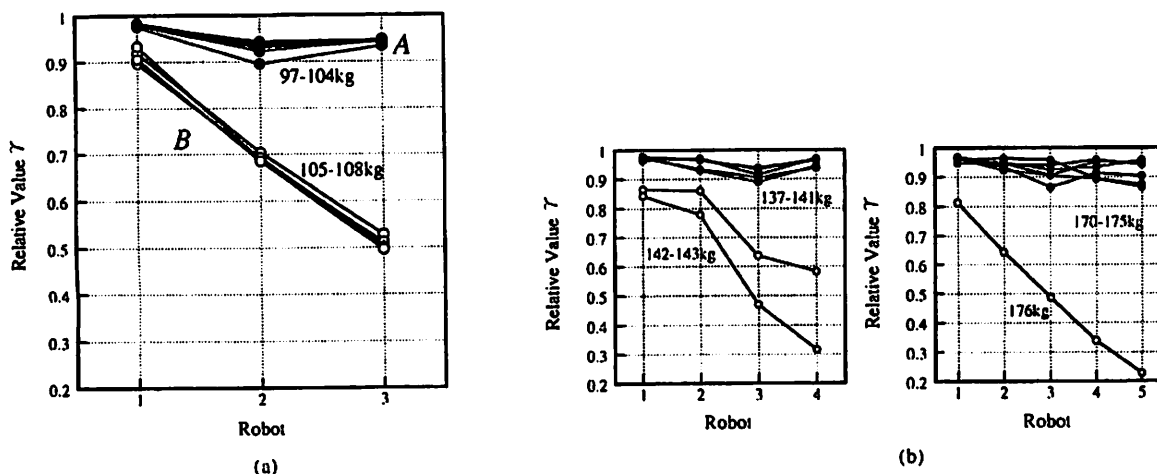


Fig. 10 Spatial pattern of γ for various load weight

が、A状態とB状態のいずれにあるかによって、ロボット集団としての荷物運搬における安定性に関する情報が解釈可能となる。さらに、B状態においては、相対値 γ から個々のロボットのロボット集団における相対位置に関する情報を解釈することもできる。さらに、それらの情報はロボット数や、定常入力値の分布にも依存しない。そこで、個々のロボットにおける解釈ルール f を以下の式(2)(3)のように設定した。

$$stability_i = \begin{cases} \text{stable} & (\Gamma_1 \leq \gamma_i \leq 1) \\ \text{substable} & (0 \leq \gamma_i \leq \Gamma_1) \end{cases} \quad (2)$$

$$position_i = \begin{cases} \text{front} & (\Gamma_2 \leq \gamma_i \leq 1) \\ \text{rear} & (0 \leq \gamma_i \leq \Gamma_2) \end{cases} \quad (3)$$

ここで、 $stability$ はそれぞれロボット集団と荷物の力学的関係における安定性を、 $position$ は個々のロボットの相対的位置関係を表している。 $stable$, $substable$ は安定状態、準安定状態を、 $front$, $rear$ はロボット集団における前部、後部をそれぞれ表している。また、 Γ_1 , Γ_2 は閾値であり、本論文におけるシミュレーションでは0.9, 0.6を用いた。ただし、相対位置に関する解釈ルールは準安定状態のときのみ有効であることとする。

3.3.2 内的拘束条件の規定

最後に、個々のロボットにおいて、関係の秩序から内的拘束条件を生成し歩行パターンを多様化させるためのルールを設定する必要がある。すでに、Fig. 7に示されたように、荷物運搬タスクにおいて荷重が増加した後では、ロボットごとに置かれる力学的状況が異なるため、その相対位置に応じて歩行パターンを多様化し、機能分化することが協調的に荷物運搬する上で有効であると予想される。そこで、上記の解釈ルールから得られる関係の秩序に基づいて、個々のロボットが内的拘束条件としての定常入力値を自ら変化させ、歩行パターンを多様化させるためのルールを設定する必要がある。このとき、Fig. 11によれば、ロボット集団の中において、相対的に後部に位置するロボットの定常入力値を他のロボットより低くした場合には、最も重い荷重領域まで運搬していることが分かる。このことは、Fig. 7に示される荷物の揺れの

Table 1 Spatial pattern of constant input

No.	Robot1	Robot2	Robot3
1	C_2	C_2	C_2
2	C_2	C_2	C_1
3	C_2	C_1	C_1
4	C_1	C_1	C_2
5	C_1	C_2	C_2
6	C_1	C_1	C_1

Constant input $C_1=4.0, C_2=5.0$

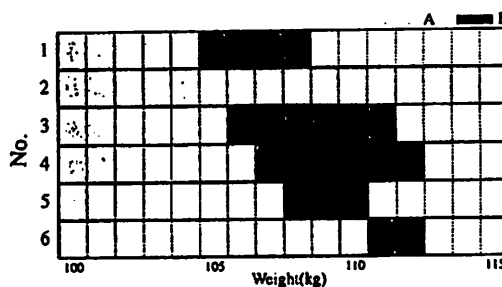


Fig. 11 γ for various constant input

時間発展からも妥当である。そこで、ロボット集団の中で相対的に後部に位置するロボットの定常入力値を低くすることが、より重い荷物を運搬する上で有効であると予想される。よって、内的拘束条件を規定するルール g を式(4)のように設定した。

$$w_i = \begin{cases} C_1 & \text{for } stability_i = \text{substable} \wedge position_i = \text{rear} \\ C_2 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

ここで、 w_i はロボット i に与える境界条件としての定常入力値を示している。また、 C_1 , C_2 はTable 1で与える定常入力値に対応している。

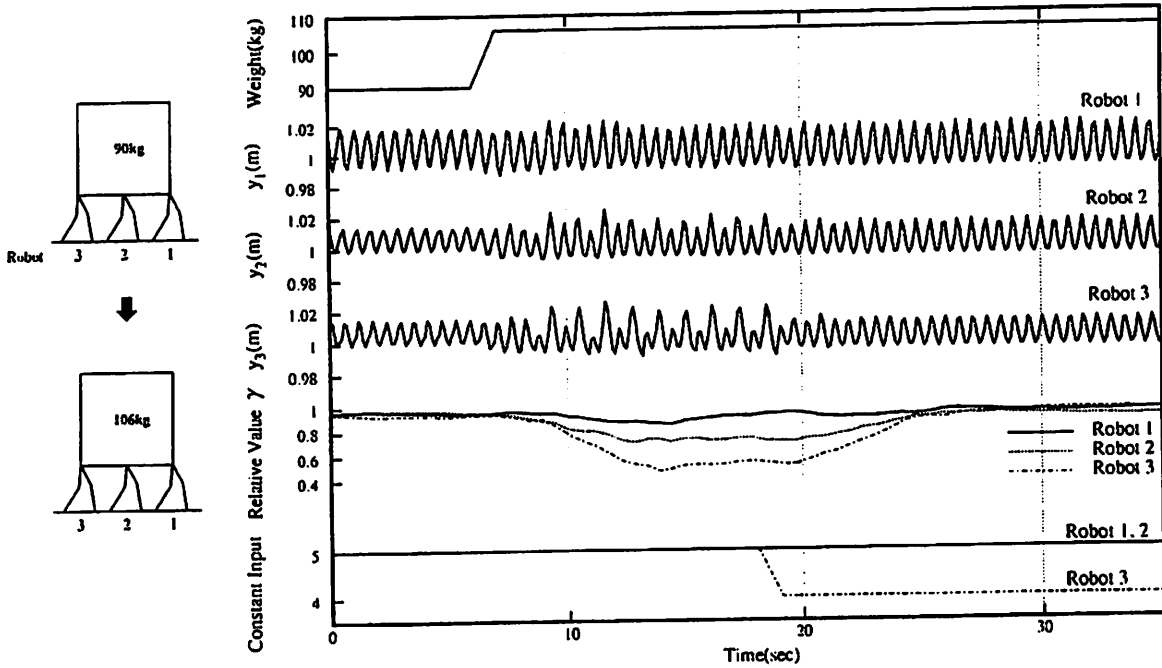


Fig. 12 Temporal development under load weight change

4. シミュレーション結果

4.1 荷重変動への対応

最初に設定したタスクに基づいて、3体のロボットが荷物を運搬中に荷重変化させた場合のロボット集団の対応を調べた。ここでロボットは、身体系と解釈系から構成されており、解釈系には上記のルールが設定されている。Fig. 12にその結果を示す。図の上から、荷重変化、個々のロボットの腰の上下動、相対値 γ の変化、定常入力値の変化を表している。荷重は90[kg]から106[kg]に変化させている。このとき、荷重の増加によってコヒーレント状態が不安定化し、相対値 γ の分布が均質なA状態から不均質なB状態に変化していることが分かる。さらに、このような関係的秩序としての解釈に基づいて、内的拘束条件を生成し個々のロボットの定常入力値が規定されていく。結果として、最後部のRobot 3の定常入力値が減少させられ、ロボット集団としての歩行パターンが多様化することで、相対値 γ の分布が均質なA状態に復帰した。そして、荷物運搬を再び安定に継続できている。

さらに比較実験として、荷重変動を与えた後、さらに荷重を増加させてみた。その結果、Fig. 13のように、本制御手法を用いて多様化したロボット集団では、荷重がさらに重くなってもコヒーレント状態が安定であり荷物運搬が継続できている。しかし、Fig. 13 (b)のように、本手法を用いず、ロボットの歩行パターンを規定する定常入力値を均質なままにしたロボット集団ではコヒーレント状態が生成できず、同じ荷重変動に対しても転倒してしまっている。以上の結果から分かるように、荷重の変動に対しては、個々のロボットがそれぞれの置かれた状況に応じて、コヒーレント状態を関係的秩序として解釈し、それに基づいて内的

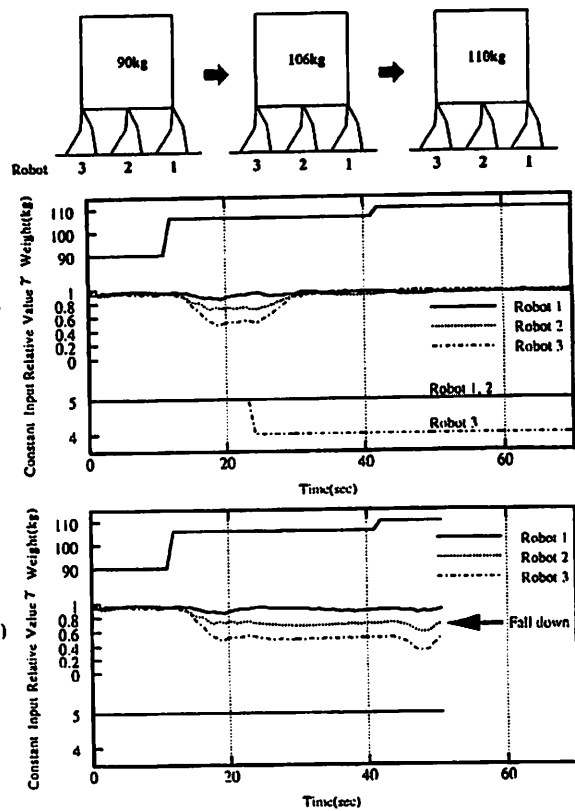


Fig. 13 Response to load weight change

拘束条件を生成し多様化することによって、ロボット集団として協調的にタスクを実現していることが示された。

4.2 その他の環境変動への対応

上記の荷重変動は3体のロボット集団に対するものであったが、5体のロボット集団の場合をFig. 14に示す。荷重は150[kg]から176[kg]に変化させている。その結果、3体のときと同様に、荷重の増加によってコヒーレント状態が不安定化し、相対値 γ の空間分布がA状態からB状態に変化していることが分かる。そして、関係の秩序としての解釈に基づいて、個々のロボットにおいて内的拘束条件としての定常入力値が変化させられている。その結果、ロボット集団の相対的な後部に位置するRobot 3, Robot 4, Robot 5の定常入力値が減少させられ、ロボット集団としての歩行パターンが多様化することでA状態に回復した。

さらに、ロボット数を4体とし、最後部と最前部のロボットを除去した場合の結果をFig. 15に示す。このとき荷重は一定にしている。このように、荷重変化ではなくロボットの除去のような環境変動に対しても、同一のルールのもとでロボット集団の歩行パターンが多様化し、協調的な荷物運搬を実現できている。この場合には、Robot 3の定常入力値が減少させられている。これらの結果は、内的拘束条件の生成に基づく協調制御という枠組みが、本論文において設定されたタスクを越えて、多様化が要求される問題のより広いクラスに適用できる可能性を示唆している。

5. 他のタスクへの適用可能性

以上のシミュレーション結果から、個々のロボットがそれぞれの置かれた状況に応じて多様化し、リアルタイムに機能分化することで協調的に荷物運搬できることが示された。このときの大きな前提として、本手法では式(1)~(4)のようなルールを設定した。特にこのルールは、荷物運搬や多脚ロボットに限定すればかなり広いクラスに適用可能と予想される。それはFig. 7に見られたように、生成される関係の秩序はロボットの種類に依存したのではなく、タスクに依存した普遍的な現象と考えられるからである。

また、本手法を荷物運搬以外の他のタスクへ適用することを考えた場合、新たにルールを設定しなければならないが、そのルールを生成する上で考慮すべき点としては以下の3点が挙げられる。まず、ロボット間での引き込み的な相互作用を通してコヒーレント状態が自己組織されることが必要である。そして、そのコヒーレント状態は状況に応じて空間的に均質な状態から不均質な状態へ分岐できることが必要とされる。さらに、その生成されたコヒーレント状態を位相や波形などの関係量に基づいて関係の秩序として定量化し、それに基づいて内的拘束条件を生成するためのルールとして規定することが必要と考えられる。

6. ま と め

本研究においては、マルチロボット系の協調制御を実現するための一手法として、内的拘束条件の生成に基づく制御を提案した。この方法が対象としている問題領域は、マルチロボット系における内部自由度の生成によって、系の外部からの一義的な制御が困難となる状況である。そして、この問題に対して、個々のロ

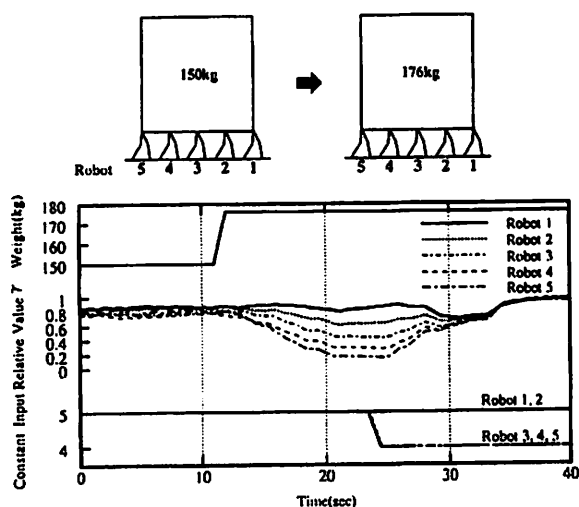


Fig. 14 Response to load weight change

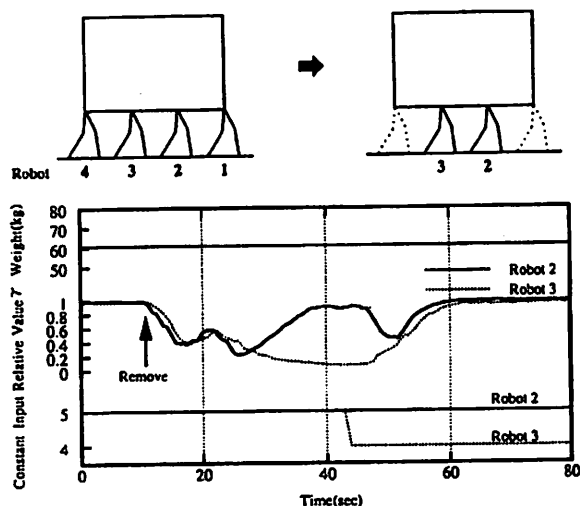


Fig. 15 Response to removing robots

ット側から内的拘束条件の生成をもって、内部自由度を操作する自律制御の新しいクラスを提案したことになる。具体的には、複数の歩行ロボットが協力して一つの大きな荷物を運搬するタスクが取り上げられた。このとき、ロボット間の相互作用を通して生成されるコヒーレント状態を関係の秩序として解釈すること、それに基づいて個々のロボットが内的拘束条件を生成し歩行パターンを多様化すること、そして、これら二つのプロセスの相互拘束によってロボット集団がリアルタイムに機能分化し協調的に荷物運搬できることを示した。

謝辞 本研究を進めるにあたり、計算機環境の整備およびシミュレーション実験の遂行に精力的に協力してくれた鈴木清晴君、守田泰史君に深く感謝する。

参考文献

[1] S. Yuta and S. Premvuti: "Cooperating Autonomous and Centralized Decision Making to Achieve Cooperative Behaviors Between Multiple Mobile Robots," Proc. Int. Symp. on Distributed Autonomous Robotic Systems, pp.173-181, 1992.
 [2] 尾崎, 浅間, 石田, 松元, 速藤: "通信を用いた複数自律移動ロボットの相互衝突回避", 日本ロボット学会誌, vol.14, no.7, pp.961-967, 1996
 [3] H. ハーケン: シナプティックスの基礎, 東海大学出版会, 1986.
 [4] 大野, 湯浅: "群ロボットに関する相転移", 第8回自律分散システム・シンポジウム資料, pp.331-336, 1996.
 [5] 清水: 生命と場所, NTT出版, 1992.
 [6] 三宅: "知的マルチエージェントの機能分散と自己普及", 計測と制御, vol. 35, no. 7, pp.540-544, 1996.
 [7] Y. Miyake, G. Taga, Y. Ohto, Y. Yamaguchi and H. Shimizu: "Mutual-entrainment-based-communication-field in distributed autonomous robotic system," In: Distributed Autonomous Robotic Systems (Asama H., eds), Springer-Verlag, pp.310-321, 1994.
 [8] W. S. Condon and L. W. Sander: "Neonate Movement Is Synchronized with Adult Speech: Interactional Participation and Language Acquisition," Science, vol.183, no.4120, January 11, 1974.
 [9] 渡辺, 大久保: "コミュニケーションにおける引き込み現象の生理的側面からの分析評価", 情報処理学会論文誌特集号「次世代ヒューマンインターフェース・インタラクション」, vol.39, no.5, pp.1225-1231, 1998.
 [10] C. M. Gray, P. Koenig, A. K. Engel and W. Singer: "Oscillatory responses in cat visual cortex exhibit inter-columnar synchronization which reflects global stimulus properties," Nature, vol.338, pp.334-337, 1989.
 [11] Y. Aiyama, M. Hara, T. Yabuki, J. Ota and T. Arai: "Cooperative Transportation by Two 4-legged Robots with Implicit Communication," Distributed Autonomous Robotics Systems 3, Eds. Lueth, T., Dillmann, R., Dario, P., Worn, H., Springer, pp.131-140, 1998.
 [12] Stilwell, D.J. and J. S. Bay: "Toward the development of a material transport system using swarms of ant-like robots," proc. 1993 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.766-771, 1993.
 [13] 橋本, 銭谷, 江口, 大場: "並進リンク機構を有する連結器を用いた群構成移動ロボットシステムの協調搬送制御", 第11回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.99-102, 1993.
 [14] 太田, 武術, 新井, 大隅, 岡山: "2台の移動ロボットの協調による搬送制御", 日本ロボット学会誌, vol.14, no.2, pp.263-270, 1996.
 [15] 小菅, 大住, 千葉: "単一物体を操る複数移動ロボットの分散協調制御", 日本ロボット学会誌, vol.16, no.1, pp.87-95, 1998.
 [16] 小田島, 湯浅, 伊藤: "均質モジュールから成る自律分散型多脚歩行ロボットシステム—機能とアルゴリズム—", 日本ロボット学会誌, vol.16, no.7, pp.957-964, 1998.
 [17] G. Taga: "Emergence of bipedal locomotion through entrainment among the neuromusculo-skeletal system and the environment," Physica D 75, 190-208, 1994.
 [18] G. Taga, Y. Yamaguchi and H. Shimizu: "Self-organized control of bipedal locomotion by neural oscillators in unpredictable environment," Biol Cybern, 65, pp.147-159, 1991.
 [19] 多賀: "生命システムのデザイン原理をさぐる—人間の歩行運動から—", 数理科学, no.394, pp.5-13, 1996.

付録A. 2足歩行ロボットの力学系

多賀らにより提案されている2足歩行ロボットの一般式[19]を式(5)(6)に示す.

$$\dot{x} = p(x, T(u, x), F(x, a)) \quad (5)$$

$$\ddot{u} = q(u) + S(x, F) + u_0 \quad (6)$$

式(5)は筋骨格系の運動方程式であり, ニュートン・オイラー方程式で記述している. ここで, x は剛体セグメントの位置, 速度, 角度, 角速度の一般化座標を表し, T は関節におけるトルク

を表している. また, F は環境との相互作用により受ける力を表している. 式(6)は神経振動子系の時間発展の方程式であり, u は神経活動を表し, その出力は筋骨格系におけるトルク T を与える. 一方, 筋骨格系における x , F が感覚情報 S として逆に神経振動子系に入力される. a , u_0 はそれぞれ環境に関するパラメータ, 歩行速度や周期を変えるパラメータになっている. 本研究では, この u_0 を定常入力(Constant Input)と呼び, ロボットの歩行運動を変化させるのに用いた.

この2足歩行ロボットを身体系の基本構造として用いたが, Fig. 3に示されるように各ロボットは荷物と力学的に相互作用するために, ロボットの腰の部分における筋骨格系の運動方程式は式(7)(8)のように変更される.

$$M\ddot{x}_i = F_x - F_{Lx} \quad (7)$$

$$M\ddot{y}_i = F_y - Mg - F_{Ly} \quad (8)$$

ここで, x_i, y_i はロボット i の腰の位置座標を表し, M はその腰の部分の重さ, g は重力加速度を表している. また, F_x, F_y はロボット i の腰と, その腰にリンクされている両足間の拘束力, F_{Lx}, F_{Ly} はロボット i の腰と荷物間の拘束力を表している.

付録B. 荷物との相互作用

荷物の運動方程式は式(9)~(12)のように表される(Fig. 3).

$$M_L \ddot{x}_L = F_{Lx} + F_{Lx,1} + \dots + F_{Lx,n} \quad (9)$$

$$M_L \ddot{y}_L = F_{Ly} + F_{Ly,1} + \dots + F_{Ly,n} - M_L g \quad (10)$$

$$I_L \ddot{\theta}_L = -F_{Lx,1} l_1 \sin \theta_1 - F_{Ly,1} l_1 \cos \theta_1 - F_{Lx,2} l_2 \sin \theta_2 - F_{Ly,2} l_2 \cos \theta_2 - F_{Lx,n} l_n \sin \theta_n - F_{Ly,n} l_n \cos \theta_n \quad (11)$$

$$I_L = M_L \frac{H_L^2 + W_L^2}{12} \quad (12)$$

ここで, M_L, H_L, W_L はそれぞれ荷物の重さ, 高さ, 幅を表し, x_L, y_L は荷物の重心座標を表している. また, I_L は慣性モーメントを表している

また, 荷物とロボットがリンクされていることにより, 式(13)(14)のような幾何学的な拘束条件が存在する.

$$x_L = x_i - l_i \cos \theta_i \quad (13)$$

$$y_L = y_i + l_i \sin \theta_i \quad (14)$$

付録C. ロボット間相互作用

隣接するロボットの足の接地タイミングをFig. 4(a)に示すようにパルスに変換する. Fig. 4(a)において, Right, Leftはそれぞれロボット i の右足, 左足の接地状態を表す. ここで, onは足が接地している状態を表し, pul _{i} はパルスを表している. それを式で表すと式(15)のようになる. そして, そのパルスを式(16)(17)に従ってhip oscillatorに入力する(Fig. 4(b)). ここで, H, W はそれぞれパルスの振幅の大きさ, 持続時間を示している. y_{ri}, y_{li} はロボット i のankleの右足, 左足の位置座標を表している. また, t_{ri}, t_{li} は右足, 左足が接地してから経過時間を表している. $k_{ri}, k_{li}, k_{xi}, k_{yi}$ は $u_{ri}, u_{li}, u_{xi}, u_{yi}$ に対するパルスの

入力値を示している。これらの値は定常入力値と同様な形で入力される。

$$\text{pul}_i = \begin{cases} -H & \text{for } y_{r,i} < 0 \wedge t_{r,i} < W \\ H & \text{for } y_{l,i} < 0 \wedge t_{l,i} < W \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (15)$$

$$k_{l,i} = k_{d,i} = \begin{cases} \text{pul}_{i+1} & (i=1) \\ (\text{pul}_{i-1}/2) + (\text{pul}_{i+1}/2) & (i=2,3,\dots,n-1) \\ \text{pul}_{i-1} & (i=n) \end{cases} \quad (16)$$

$$k_{2,i} = k_{3,i} = \begin{cases} -\text{pul}_{i+1} & (i=1) \\ -(\text{pul}_{i-1}/2) - (\text{pul}_{i+1}/2) & (i=2,3,\dots,n-1) \\ -\text{pul}_{i-1} & (i=n) \end{cases} \quad (17)$$



向山弘樹 (Hiroki Mukaiyama)

1971年3月7日生。1992年金沢工業大学工学部情報工学科卒業。1994年同大学大学院情報工学専攻修士課程修了。同年同大学場の研究所助手。自律分散システム、および場の研究に従事。神経回路学会、計測自動制御学会の会員。

(日本ロボット学会正会員)



三宅美博 (Yoshihiro Miyake)

1959年6月8日生。1983年東京大学薬学部卒業。1989年同大学大学院博士課程修了。金沢工業大学情報工学科助手、講師、助教授を経て、1996年より東京工業大学大学院総合理工学研究科知能システム科学専攻助教授。薬学博士。生命的自律性の研究に従事。生物物理学会、計測自動制御学会などの会員。

(日本ロボット学会正会員)



清水 博 (Hiroshi Shimizu)

1932年11月12日生。1956年東京大学医学部薬学科卒業。1961年同大学大学院博士課程修了。1976年東京大学薬学部教授。1993年金沢工業大学工学部情報工学科教授。同年同大学場の研究所所長。薬学博士。生命関係学、および場の研究に従事。生物物理学会などの会員。