

内的拘束条件の生成によるマルチロボットの協調行動

金沢工業大学 ○向山 弘樹
東京工業大学 三宅 美博

Internal Constraints based Cooperative Behavior in Multiple Robots

○ Hiroki MUKAIYAMA Kanazawa Institute of Technology
Yoshihiro MIYAKE Tokyo Institute of Technology

Abstract: In this paper, internal constraints based control is proposed as a cooperative control method in multiple robots. We used a robot model composed of two subsystems. One is a physical system which self-organizes ordered state as 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 ordered state and operates the physical system based on the constraints. The proposed method is realized through mutual constraint process between these two subsystems. As an example of cooperative behavior, a task that multiple robots carry one load is examined. Experimental results showed effectiveness of this method.

1. はじめに

本研究では、複数の自律ロボットから構成されるマルチロボット系の協調制御手法として内的拘束条件の生成に基づく制御を提案する。このような系の制御が従来の中央管理的な制御に比べ難しくなっている最も大きな原因として、個々のロボットが独自のダイナミクスをもつために、結果的に集団全体として極めて複雑な内部ダイナミクスをもつ系になることがあげられる。つまり、系の外部から一義的に制御できない自由度が系内部に生成されるのである。

この問題に対する従来の協調制御研究では、その内部自由度を排除することによって、系の外部から一義的に系を制御する方向で研究が進められてきた。それらの研究は大きく2つの方法に分類されると考えられる。一つは系の自由度間に線形性を仮定し、各々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。これは、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規定する方法である。具体的には、衝突回避問題を扱った研究[1][2]などのように、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。もう一つは、断熱近似によって自由度を圧縮し、系の大局的ダイナミクスを確定するという方向での研究であり、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。ここでは、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を前提にすることにより、秩序変数による残り自由度の圧縮（スレービング原理）を可能にさせる。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り、残りの大自由度系を一方向的に制御することが可能となる。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。

本研究はこれらの研究のように系の内部自由度を排除し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、系自らがその内部ダイナミクスを規定するための内的拘束条件を生成することによって内部自由度を制御する方向をめざす。本手法の有効性を検討する具体的なモデルとして、御輿を担ぐような複数の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を提案する。そして、個々のロボットがそのロボット集団中での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させることで、ロボット集団としての安定な荷物運搬が達成されることを示す。

2. 内的拘束条件の生成による協調制御

本研究では、内的拘束条件の生成によるマルチロボット系の協調制御手法として、身体系(Physical System)と解

釈系(Interpretational System)の2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(Fig. 1)。ここで、身体系は個々のロボットの相互作用を通して、ロボット間におけるコヒーレント状態としての関係的秩序(Relational Order)を生成するはたらきをもつ。そして、解釈系はそれを個々のロボットが内的拘束条件として解釈し、ダイナミクスを多様化するはたらきをもつ。この両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。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分化の問題に応用し、その有効性を確認している[5][6]。

一方、ロボットの身体系間における相互作用としては、非線形リズムの相互引き込みに着目し、それを通して生成される時間領域の秩序状態を関係的秩序として利用することにした。一方、解釈系では身体系に生成された関係的秩序に基づき内的拘束条件を生成し身体系を操作する。ここで、解釈系において、関係的秩序から内的拘束条件を生成することは一種の逆問題となるため、先行的知識としてのルールを与える必要がある。またその関係的秩序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情報として解釈される必要がある。そこで、関係的秩序を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2つのルールを設定し、個々のロボットにあらかじめ埋め込むものとする。結果として、身体系と解釈系は循環的に拘束しあうことになり、内的拘束条件の生成によりロボットが多様化し、協調的な機能分散が実現されることになる。

3. モデル

3.1 タスク

ロボット集団に与えるタスクとして御輿を担ぐ状況を設定する。ロボット集団における協調的な荷物運搬では、荷物の運搬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、個々のロボットの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全体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る。よって、本手法の有効性を検討するうえでこのようなタスクは妥当であると思われる。そこで、本研究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。

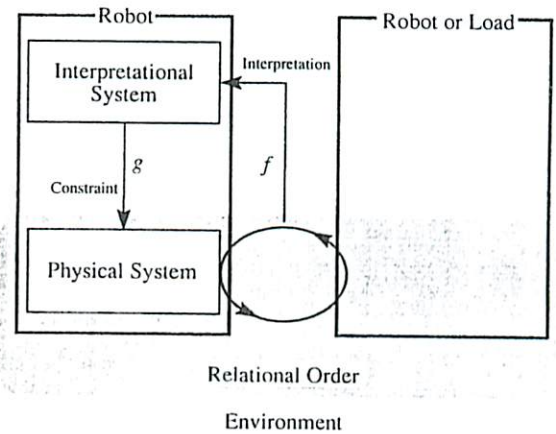


Fig. 1 内的拘束条件の生成に基づく制御

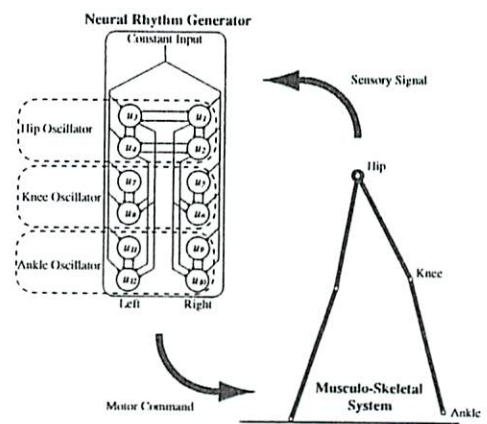


Fig. 2 多賀らの二足歩行ロボット(文献[7]より引用)

3.2 身体系

各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Fig. 2に示されるような多賀らにより提案されている二足歩行ロボット[7][8]を使用した。多賀らの二足歩行ロボットは複数の剛体で構成される筋骨格系と神経振動子系から構成されており、神経振動子系に対する定常入力値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る。本研究では、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に対応づけた。

また、個々のロボットの身体系間における相互作用として2種類の相互作用を設定した。一つは荷物を介する力学的相互作用であり、個々のロボットの腰の部分に荷物と力学的にリンクした。もう一つは御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、隣接するロボットの左右の足の接地タイミングをパルスに変換し、それを自分の神経振動子系のHip Oscillatorに入力した。これらの身体系間相互作用

用を通して生成される関係的秩序の例を Fig. 3 に示す。Fig. 3(a)は荷重が比較的軽い場合であり、個々のロボットの歩行運動における足の接地リズム、およびその歩行リズムと荷物の揺れのリズムが相互に引き込むことによって荷物運搬を行っていることがわかる。しかし、荷物が重い場合には Fig. 3(b)に示されるように安定な関係的秩序を生成することができず転倒してしまう。

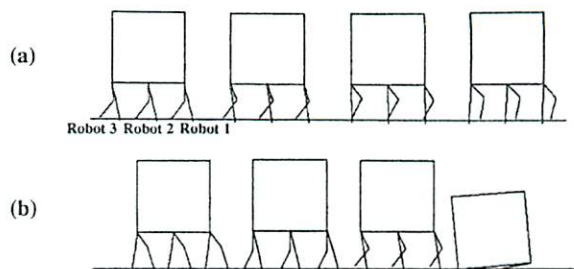


Fig. 3 荷物運搬の時間発展

3.3 解釈系

3.3.1 関係的秩序の解釈

先にも述べたように、身体系の相互作用を通して生成される関係的秩序を解釈するためのルールを規定する必要がある。ここでのロボット集団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、関係的秩序の生成が荷重変動に対してどのような依存性をもつかを調べる必要がある。Fig. 4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.4(a)は荷重の時間変化、Fig.4(b)は各ロボットの腰座標の上下動をそれぞれ示している。この図より、荷重変動前では全てのロボットにおいて均質かつ安定した腰座標の上下動の同調が見られる。このことは、比較的安定した関係的秩序が生成されており、内部自由度が圧縮されていることを示している。しかし、荷重変動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わかる。このような変化は何らかの内部自由度が新たに生成していると考えられる。

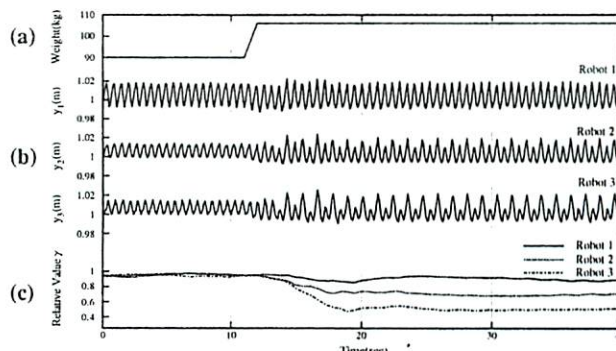


Fig. 4 内的拘束条件の生成プロセス

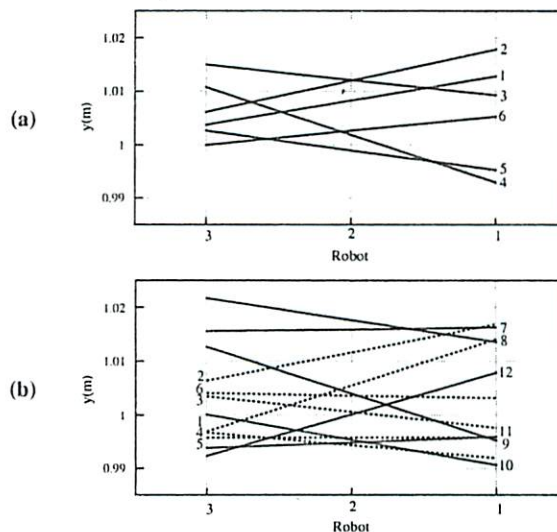


Fig. 5 荷物のダイナミクス

このときの荷物の揺れの時間発展を Fig.5 に示す。同図は、ロボットの腰が固定されている荷物の底面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.5(a)は荷重変動前、Fig.5(b)は荷重変動後を表している。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。そのために、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。一方荷重変動後では、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、そこが支点となって荷物が回転運動をする時間帯(点線)が交互に繰り返されていることがわかる。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わかる。また、このシミュレーションにおいて観察された関係的秩序の変化が、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、これは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、このような関係的秩序から個々のロボッ

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生成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. 6 のように位相表面に表示してみた。左から、Robot 1、Robo 2、Robot 3 を示している。また、上段は荷重変動前であり、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わかる。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、2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わかる。そこで、Fig. 7 のよう

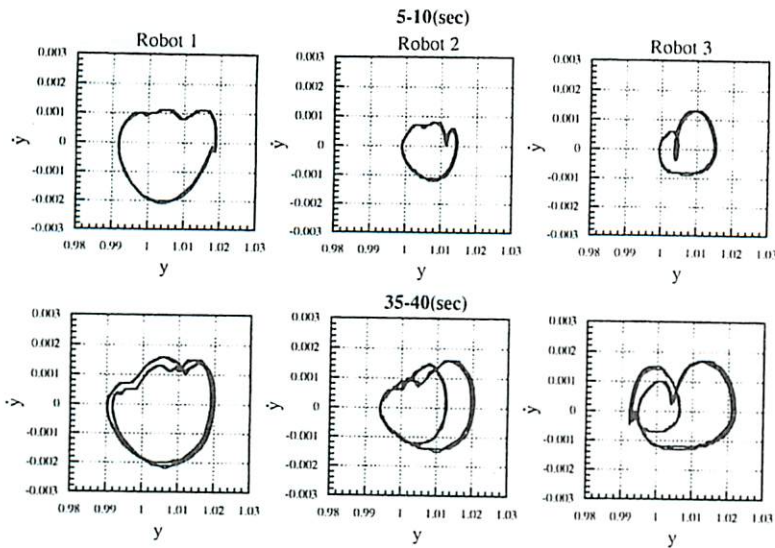


Fig. 6 位相空間におけるダイナミクス

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ほうを α 、大きいほうを β として、その相対値 γ を式(1)に従って定義した。ただし、添え字 i はロボット番号を示しており、これ以降用いられる i は全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)の時間変化をFig. 4(c)に示す。図より、荷重変動前には全てのロボットの相対値 γ が1に近い値をとっているのに対し、変動後で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に対する相対値 γ の分布をFig. 8(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]までの荷物を運搬することができた。図より、荷重が97-104[kg]のときは、全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Robot 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。このような現象は3体から構成されるロボット集団だけではなく、Fig. 8(b)に示すように異なるロボット数においても生じた。ここで、全てのロボットの相対値が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。

また、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の値を均質にしていたが、Table 1のように定常入力値の分布を不均質にした場合、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 の分布も調べた。その結果、Fig. 9に示す

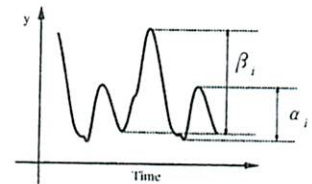


Fig. 7 α_i 、 β_i の定義

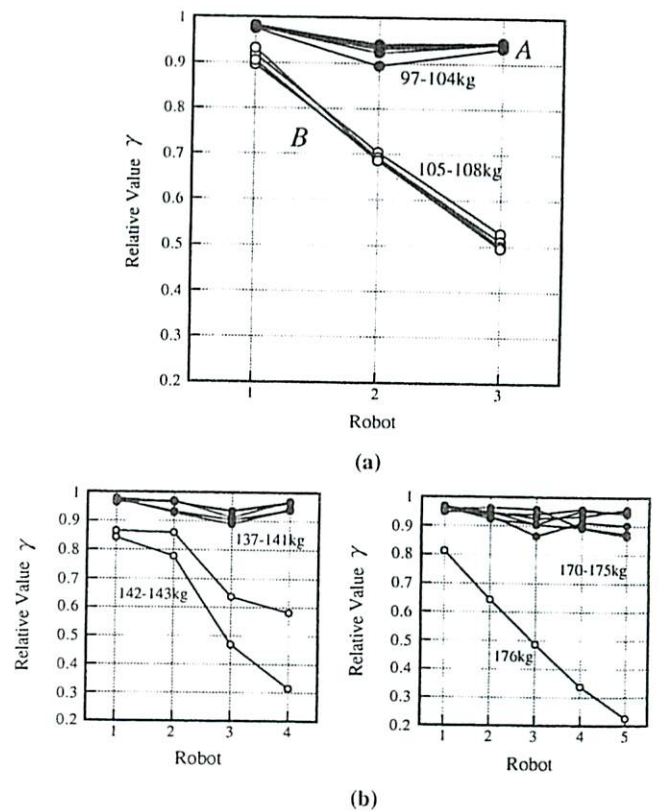


Fig. 8 荷重に対する γ の分布

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、荷重の増加に伴い、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状態に遷移する領域が異なっていることもわかる。

以上の結果を踏まえ、関係の秩序を個々のロボットが

解釈するためのルールを設定する。そこで、まず秩序状態を式(1)にしたがって相対値 γ として定量化することにする。それが、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、個々のロボットにとっての解釈ルール f を以下の式(2)(3)のように設定した。

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

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

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位置関係を表している。 $stable$ 、 $substable$ は安定状態、準安定状態を表し、 $front$ 、 $rear$ 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 は閾値である。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にのみ有効であるとする。

3.3.2 内的拘束条件の規定

次に、個々のロボットにおいて、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.5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な荷物運搬において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的信息に基づき、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規定する。このとき、Fig.9によれば、ロボット集団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、最も重い荷重領域まで運搬できることがわかる。この結果は荷物の揺れの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。

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

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

Table 1 定常入力値の分布

| 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 $C_1=4.0, C_2=5.0$

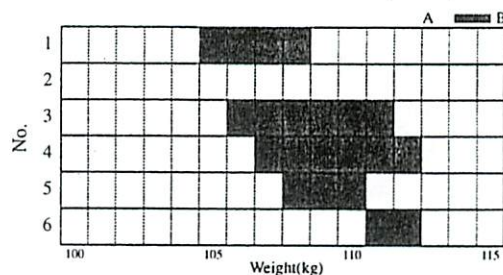


Fig. 9 定常入力値に対する相対値 γ の分布

入力値を示している。また、 C_1 、 C_2 は定常入力値を示している。

4. シミュレーション結果

上記のルールが設定された身体系、解釈系から構成されるロボットを用い、それら3体による荷物運搬中に荷重を変化させた場合のロボット集団の対応を調べた。Fig. 10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。図より、生成された関係の秩序に基づいて、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ことがわかる。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し、相対値 γ の分布が均質なA状態に復帰している。そして、荷物運搬を再び安定に継続できていることがわかる。

また、その他の環境変動への対応として、5体のロボット集団による荷物運搬中に荷重変動を行った場合(Fig. 11)と、4体のロボット集団において最後部と最前部のロボットを除去した場合(Fig. 12)の実験を行った。その結果、3体の荷重変動のときと同様に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、協調的な荷物運搬が実現できた。以上の結果は、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に依存するものではなく、内部自由度の生成に起因する問題のより広いクラスに応用できる可能性を示唆している。

5. おわりに

本研究では、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よる制御を提案した。この制御手法は系の外部からの制御が困難となる内部自由度をもつ系を対象としており、この問題に対して、個々のロボ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。そして、ロボット間の相互作用を通して生成さ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を生成し、それに基づき歩行パターンを多様化し、機能分化することで協調的に荷物運搬が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、守田康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, 遠藤: "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: "シナジェティクスの基礎", 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] 三宅: "知的マルチエージェントの機能分散と自己言及", 計測と制御, Vol. 35, No. 7, pp.540-544, 1996.
- [6] Y. Miyake, G. Taga, Y. Ohto, Y. Yamaguchi, 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.
- [7] G. Taga: "Emergence of bipedal locomotion through entrainment among the neuromusculo-skeletal system and the environment," Physica D 75, 190-208, 1994.
- [8] 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.

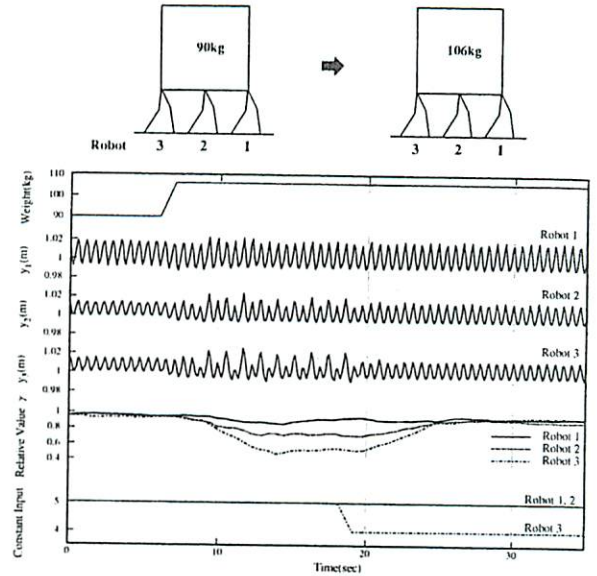


Fig. 10 荷重変動における時間発展(3体)

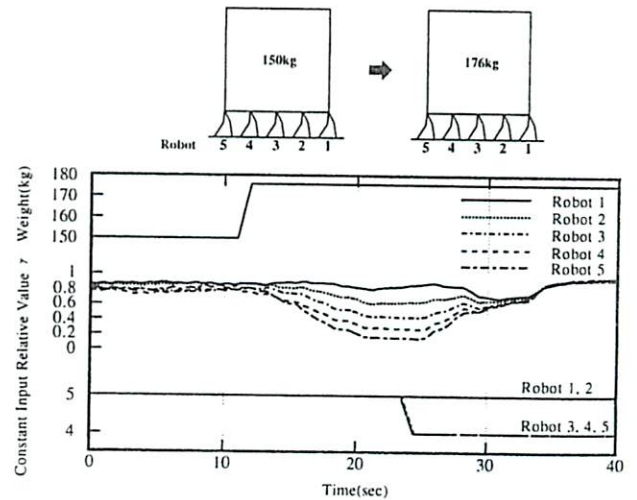


Fig. 11 荷重変動における時間発展(5体)

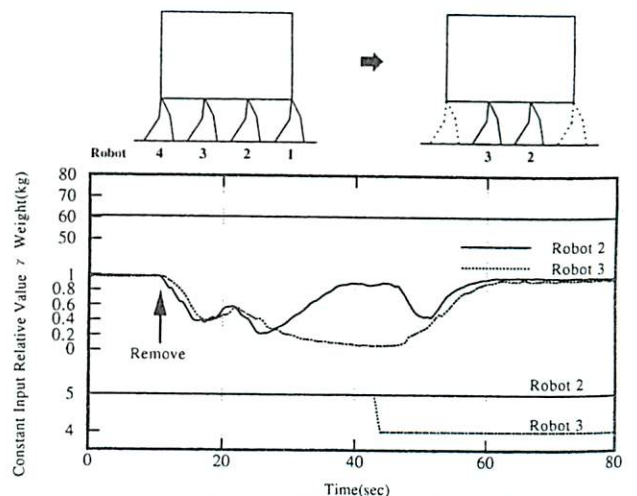


Fig. 12 ロボットの除去における時間発展