

論文の内容の要旨

論文題目 四脚ロボットによる物体の協調搬送

氏 名 原 光博

本研究は、四脚ロボットによる物体の協調搬送システムを提案する。

脚型ロボットは車輪型に比べて、全方向移動や脚の接地点選択が可能であるなどの利点がある。特に四脚ロボットは、二脚ロボットより安定性に優れ、六脚以上の多脚ロボットより構造が簡単のため可搬重量の増大や移動速度の増加が見込めるため、作業志向型の脚型ロボットとして有効である。脚型ロボットが複数台で協調して作業を行うことにより、大きな物体の搬送など、単体のロボットではできない高度な作業が可能になる。

協調搬送を行う前提として、ロボットの歩容は静歩行の中でデューティ比が最小の波状歩容であるクロール歩容、環境は整地、搬送システムは2台の四脚ロボットによるリーダー・フォロワ型、通信は外界センサの処理による間接的な手法により行う。ロボットは搬送対象物の位置・姿勢を自己のセンサで測定することによって協調相手の動作を推定し、自己の動作を自律的に決定する。また、搬送対象物は長尺状の剛体とし、ロボットの上部に設置したエンドイフェクタを介してロボットに載せる。搬送システムをFig. 1 に示す。ただし、図中

のエンドイフェクタは線形フィードバックに基づく搬送システム（後述）のものである。

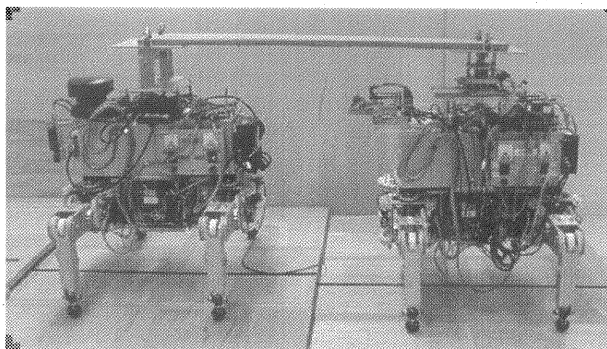


Fig. 1 Cooperative transportation by two quadruped robots

四脚ロボットは、静歩行を行う場合でも、安定性の変動により歩行時にロボット胴体が揺動するため、搬送対象物に揺動が生じる。搬送システムへの大きな外乱となる揺動を伴う協調搬送は、従来より行われてきた車輪型の移動ロボットによる協調搬送では考慮されていない問題である。したがって、四脚ロボットによる協調搬送の課題は、揺動への取り組みである。本研究では、実機では歩行時の揺動が完全には制御できないものとし、四脚ロボットは歩行時には胴体の揺動を伴うものとして扱う。

ここで、平均速度に対する各時刻の速度の変動としての振幅（エネルギー）を揺動とすると、ロボット胴体、搬送対象物の揺動は、それぞれ、ロボット胴体の速度と搬送対象物の速度で表わされる。車輪型の移動ロボットと異なり、脚型ロボットでは、実空間の速度は関節角空間の速度（モータの回転数）によって一意に決められない。本研究では、脚型ロボットの胴体速度を決めるパラメータとして、歩幅・デューティ比・歩行周期・歩行位相をとり、脚の冗長自由度を搬送対象物の姿勢変化に用いる。したがって、デューティ比と歩行周期が各ロボットの自己規定として定められているとすると、歩行時に揺動を伴うロボットによる協調搬送される搬送対象物の揺動は、歩幅 λ と歩行位相差 θ によって表わされる。

物体の搬送作業には、搬送システム全体の安定性を保ちつつ、搬送対象物を高速に搬送することが要求される。搬送対象物を高速に搬送するには、各ロボットの胴体速度を大きくすれば良いが、ロボットの胴体速度が大きくなると搬送対象物の揺動は大きくなる。そこで、本論文では、揺動への対処が異なる2通りの搬送システムを提案し、実機を用いた搬送実験による検証と搬送システムの評価を行う。

一方の搬送システムは、揺動をモデル化し、揺動を搬送対象物の変位として測定するエンドイフェクタを用い、線形フィードバックにより制御を行う。剛体の搬送対象物を協調搬送するためには、ロボット間の相対変位とロボット間の歩行位相差の制御が必要である。このとき、過渡応答と定常応答を分離して設計する。すなわち、ロボット間の相対変位の制御を過渡応答とし、ロボット間の歩行位相差の制御を定常応答として、2つの制御を分離し、まずロボット間の相対変位の制御を行い、続いてロボット間の歩行位相差の制御を行う。

車輪型の移動ロボットによる協調搬送に適応される手法を拡張したレギュレータを設計した上で、さらに揺動をモデル化することにより過渡特性・定常特性の改善をはかる。揺動を歩幅 λ に対してモデル化することにより、過渡特性が改善でき、揺動を歩行位相差 θ に対してモデル化することにより、定常特性が改善できることを提案する。

ロボット間の相対変位を制御するために、搬送対象物の位置・速度を測定し、ロボット胴体の平均速度を出力するレギュレータを設計する。このとき、ロボット胴体の平均速度は歩幅によって決める。

搬送対象物の揺動をロボット間の歩行位相差 θ によってモデル化することにより定常特性が改善できる。予め歩行位相差と揺動の関係をエンドイフェクタの吸収する内力の大きさによってモデル化しておき、ロボット間の相対変位が制御された状態で、すなわち、ロボットの平均速度一定のもとでロボット間の歩行位相差の制御を行うことで、搬送対象物の揺動の抑制が可能になる。

搬送対象物の揺動を歩幅 λ によってモデル化することにより、過渡特性（立ち上がり）が改善できる。歩幅による揺動モデルを作成し、測定値と揺動モデ

ルの差をとることにより，ロボットの搬送対象物への追従動作が向上する．また，歩幅によるモデル化により，ロボットの目標状態が速度 0 のときの定常特性，すなわち，搬送停止までの速度収束判定（立ち下がり）も改善することができる．歩幅による揺動モデルを用いることにより，ロボット速度の不感帯領域を定めることができ，搬送対象物の安定性を悪化させるロボットの無駄な動作を除去することが可能になる．歩幅による揺動のモデル化は，歩幅に対する安定余裕の大きさからの類推を基に，エンドイフェクタによる搬送対象物変位の測定値に基づいて作成した．提案手法の有効性は実機実験により示した．

もう一方の搬送システムは，搬送対象物の揺動をモデル化せず，できるかぎり単純な機構と単純な動作手法により構成する．搬送対象物の変位を仔細に測定できるような高度なエンドイフェクタを設置せずに，搬送対象物を把持せずに載せる箱型の台をエンドイフェクタとして用いる．搬送中の各時刻における測定値には大きなノイズが含まれるので，エンドイフェクタは，搬送対象物の変位を離散値として測定する．離散化された入力に対して，出力であるロボット速度も離散化し，離散化された入力と出力をルールとして割り当てたルールに基づく動作手法を提案する．すなわち，各ロボットの動作状態を 9 個に分け，搬送対象物の速度はフィードバックせず，変位のみをフィードバックする動作ルールとする．リーダとフォロワの設定速度の差を 2 倍，初期歩行位相差を 1/4 に設定した状態で 2 台のロボットによる協調搬送実験を行い，提案手法の有効性を示した．また，各ロボットの動作はエンドイフェクタの測定値のみによって定まるため，1 台のロボットを人間に置き換え，ロボットの動作手法を変えずにロボットと人間との協調搬送が実現できることを示した．

提案する 2 つの搬送システムに関して，搬送システムの作業性と搬送対象物の安定性をそれぞれ搬送システムの搬送効率 ϵ と搬送対象物のエネルギー E_N という評価指標によって評価する．ただし，搬送対象物のエネルギー E_N は，搬送対象物の平均運動エネルギーで正規化した値である．

線形フィードバックに基づく搬送システムでは，ロボットの相対変位が制御されロボット速度が等しくなれば，搬送システムの搬送効率 ϵ は 1 と見なせる

のに対して、動作ルールに基づく搬送システムでは、リーダーとフォロワの設定速度によらず搬送システムの搬送効率 ϵ は約 0.5 となる。これは、動作ルールに基づく搬送システムでは、エンドイフェクタの機構とロボットの動作手法の単純化を追求したことにより搬送対象物の測定能力(測定値の分解能)とロボット動作(速度出力の分解能)がともに低くなっているためであり、搬送対象物の揺動を許容する搬送システムであることとの交換条件である。動作ルールに基づく搬送システムは、線形フィードバックに基づく搬送システムより搬送対象物のエネルギー E_N が 1 桁大きい。これは、揺動を外乱とする動作ルールに基づく搬送システムでは、搬送対象物の安定性が悪くなるが、外乱に強い搬送システムであることを示す。線形フィードバックに基づく搬送システムは、ロボット間の歩行位相差の制御を行うことにより搬送対象物のエネルギー E_N を半減させることができる。

また、エンドイフェクタに関しては、ロボット自重に対するエンドイフェクタの重量の割合 W_{eN} は、動作ルールに基づく搬送システムでは線形フィードバックに基づく搬送システムの半分以下である。また、搬送対象物の位置決め制度の要求仕様は、動作ルールに基づく搬送システムでは線形フィードバックに基づく搬送システムに比べて 1 桁大きく、搬送システムへの搬送対象物の取り付けが容易である。これは、搬送作業を搬送対象物の取り付け工程まで含めて自動化しようとするときに大きな利点となる。搬送システムの評価を Table 1 にまとめる。

上述のように、本論文では、脚型ロボットの移動特性である歩行時の揺動を考慮して四脚ロボットによる協調搬送システムを構築した。実機を用いた搬送実験による検証と搬送システムの評価を行うことにより、脚型ロボットによる協調搬送システムを構築するための問題を明らかにした。

Table 1 Evaluation of transporting system

	Transporting system based on linear feedback	Transporting system based on motion rules
Approach to vibration of the robot's body	Model the vibration for walking parameter	Allow the vibration as disturbance
Efficiency of the system Transporting efficiency ϵ	Good $\epsilon = 1$	Bad $\epsilon = 0.5$
Stability of the object Object's energy E_N E_N 's fluctuation	Good $E_N \doteq 10^1$ Decrease by phase control	Bad $E_N \doteq 10^3$ Increase by motion change
Robustness for vibration as disturbance to the system	Strong for the disturbance	Weak for the disturbance
Weight of end-effector W_{eN}	Large $W_{eN} = 9.6$	Small $W_{eN} = 4.2$
Mechanism of end-effector	Complicated mechanism to measure object's deviation	Simple interface with object because not to grasp it
Requirement precision to place a object on the end-effector	10^0 [mm] (Precise)	10^1 [mm] (Rough)