

ロボットハンドによる把持・操り動作の階層的制御手法

Hierarchical Control Method for Manipulation/Grasping Tasks using Multi-fingered Robot Hands

非 今 関 一 飛 (慶大) 正 前 野 隆 司 (慶大)

Kazuto IMAZEKI, Keio Univ. 3-14-1, Hiyoshi, Kohoku-ku, Yokohama

Takashi MAENO, Keio Univ. 3-14-1, Hiyoshi, Kohoku-ku, Yokohama

In this paper, we propose a hierarchical method for manipulation/grasping tasks using multi-fingered robot hands. The hierarchical method imitates motion control of human. Motions of human are divided into two classes, reflex and voluntary movement. In reflex, a stimulus causes only one-pattern motion. In voluntary movement, a stimulus causes many candidacies of motion, and a real motion is selected in candidacies. Moreover, reflex is suppressed by voluntary movement. In the hierarchical method, grasping corresponds to reflex and manipulation corresponds to voluntary movement. We constructed controller that have manipulation controller, grasping controller and suppresser. Finally, we confirmed the validity of the hierarchical method by simulation.

Key Words : Multi-fingered Robot hands, Manipulation, Grasping, Hierarchical Control

1. 序論

人間が直接手を用いることができない状況下におけるロボットハンドの適用が近年期待されている。特に、精密性を要する作業においては、高機能かつ汎用性を有する人間の手のような多指ロボットハンドが求められている。多指ロボットハンドの実用化にはハードウェアの進歩と並び制御手法の確立が不可欠である。多指ロボットハンドの動作は物体を安定に支持し続ける把握動作または把持動作と、物体の位置または姿勢を変化させる、物体を持ち替えるといった操り動作の2つに大きく分類される。吉川らは指先が対象物体に与える指先力を操り力と握力に分解し、操り力と握力を別個に制御することを提案した[1]。これら操り力と握力の考え方に基づいた制御系が数多く提案されている。これらは、ロボットハンドを構成するすべての指と物体が接触を保つような把持・操り動作に対しては有効であると考えられる。特に握力を動的に決定しているものでは、外乱が加わった場合においても安定に把持および操り動作を続行することができる。しかし、これらの研究では指と物体が接触を保つことを前提にしているため、持ち替え動作のように指が物体から離れる場合の制御系の有効性については示されていない。一方、持ち替え動作の研究は数多く行われているものの、いずれの研究も持ち替え動作のための運指を計画する問題についてのものであり、ロボットハンドの制御系を含めた持ち替え動作に関する研究はなされていない。操り力、握力の考え方をを用いない制御手法としては中村らの反射行動の重ね合わせによる制御法がある[2]。しかしこの制御系では反射行動としてあらかじめ与えられた運動の重ね合わせ以外は実現できないという欠点があり任意の操り動作を実現できないと考えられる。

本研究では持ち替え動作と任意の操り動作を同時に実現する階層的制御手法を提案するとともに計算機シミュレーションにより手法の有効性を示す。

2. 階層的制御手法の提案

ロボットハンドに、ヒトのように高度な把持・操り動作を実現させるため、ヒトの運動に着目する。ヒトの運動は反射運動と随意運動に分けることができる。反射運動と随意運動の明確な分類は行われておらず、また反射運動と随意運動の中間にあたる運動も存在するが、本稿では刺激と反応の関係から以下のように分類するものとする。反射運動は刺激に対し一定の反応を示す運動である。反射運動は、単純な動作であるもののフィードバックが速い。一方、随意運動は、刺激に対し考えられる複数の反応から選択された反応を示す運動である。随意運動は、複雑な動作が可能であるもののフィードバックは遅い。また、ヒトの運動では多くの場合、随意運

動が反射運動を抑制するという階層性が存在することが知られている[3]。ヒトは随意運動と反射運動の協調により複雑かつ円滑な運動を行っているのである。

以上のようなヒトの運動制御に見られる階層性を模倣しロボットハンドの制御法に適用することにより、ヒトのように複雑かつ円滑な運動を実現できると考えられる。把持・操り動作において、単純な動作である把持動作を反射運動、複雑な動作である操り動作を随意運動に対応させ、操り動作が把持動作を抑制することにより把持動作と操り動作を協調させる。これを階層的制御手法とよぶ。提案する階層的制御手法のブロック図を Fig. 1 に示す。把持制御器は、指先と対象物体の接触を保ち指先と対象物体間に滑りを生じさせないためのトルクを発生する。このとき、把持制御器は合力が0になるように指先力を発生する。把持制御器のフィードバックループはフィードバック間隔が小さくなるように構成される。操り制御器は対象物体を操るためのトルクに加え指の姿勢を変化させるためのトルクを発生させる。また、フィードバック間隔が大きくなるように構成される。持ち替え動作では、指を対象物体から離す必要があり、この際、指を物体から離そうとする操り制御器の出力と指と物体を接触させ続けようとする把持制御器の出力が競合してしまうと考えられる。競

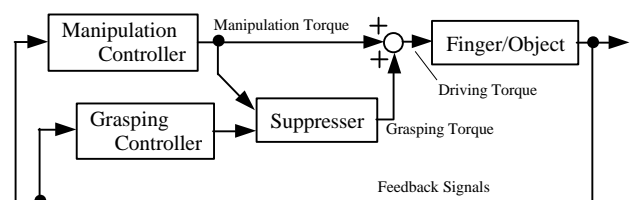


Fig. 1 Hierarchical control method

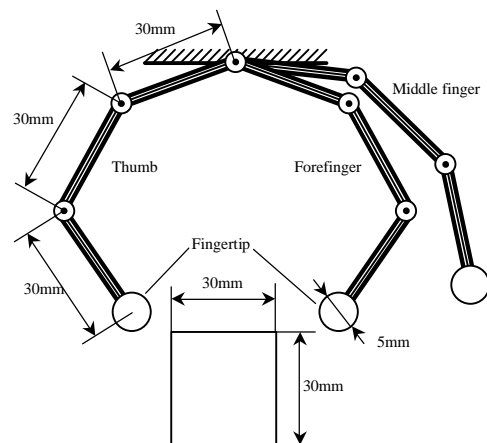


Fig. 2 Model of robot hand

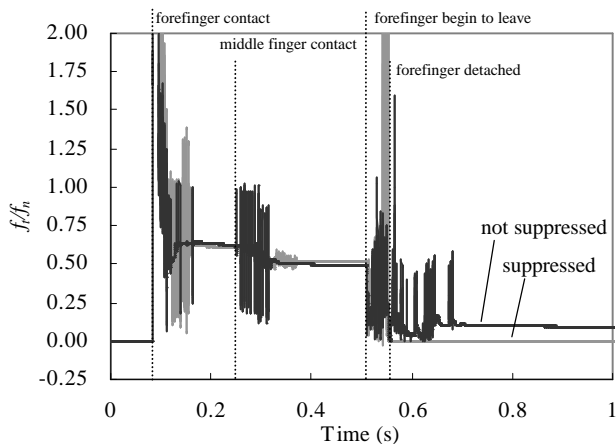


Fig. 3 History of f_i/f_n

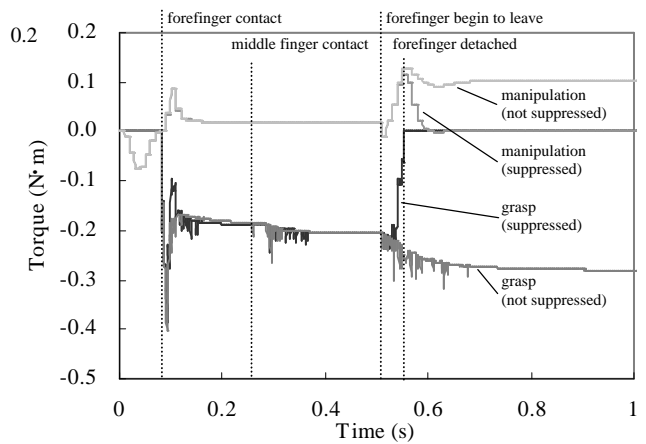


Fig. 4 History of manipulation torque and grasping torque

合を避けるために、本手法では抑制器を導入する。抑制器は、操り制御器の出力に応じて把持制御器の出力を抑制する。

本手法では、把持制御器の出力を抑制器が抑制することにより持ち替え動作が実現できると考えられる。また、操り制御器のフィードバックループが遅いことにより、計算に時間を要するような複雑な操り制御が可能となる。したがって任意の操り動作が実現できると考えられる。

3. モデルの構築

提案した制御手法の有効性を確認するため、計算機シミュレーションを行った。対象とするロボットハンドを Fig. 2 に示す。ロボットハンドは 1 指につき 3 自由度を有し円形の指先で物体に接触する。持ち替え動作を実現させるため指は 3 本とし、各指は同一形状とした。計算量を抑えるため計算は 2 次元で行うこととした。

まず、対象とするロボットハンドおよび対象物体をシミュレートする動力学シミュレータを構築した。動力学シミュレータは、物体モデル、指モデル、接触モデルより構成される。物体モデルは、指先力および外力から物体の動きをシミュレートするためのモデルである。指モデルは関節駆動トルクと指先力から指の動きをシミュレートするためのモデルである。指モデルの運動方程式はニュートン・オイラー法を用いて逐次数値的に求めた。物体モデルおよび指モデルの時間積分にはオイラー法を用いた。接触モデルは指・物体間に働く反力を計算するためのモデルである。反力の計算には、物体表面を離散近似したうえでパネ・ダンパモデルを用いた。

つぎに制御系を構築した。把持制御器としては、指・物体間の静止摩擦係数を既知として、物体と接触しているすべての指について指先力が摩擦円錐内に入るように、かつ把持制御器の発生する指先力の総和が 0 になるように制御する方法を用いた。センシング情報としては指の各関節の角度、指先力、指と対象物体の接触点の法線方向ベクトルを用いた。操り制御器としては、操り軌道を既知とし単純な軌道追従制御を行う方法を用いた。センシング情報としては指の各関節の角度を用いた。抑制器としては、操り制御器の出力に応じて把持制御器の出力に対する抑制の度合いが変化するように出力を計算した。また、把持制御器のフィードバックループは 1ms とし、操り制御器のフィードバックループは 10ms とした。

4. 計算機シミュレーションによる評価

構築したシミュレータにより階層的制御手法の評価を行った。タスクは母指と示指で把持した物体に中指を接触させた後、示指を離すという持ち替え動作とした。比較のために把

持制御器および操り制御器が同一であり抑制器を持たない制御系を用いた場合のシミュレーションもあわせて行った。物体の静止摩擦係数は 1.0、動摩擦係数は 0.9 とした。安全率を考慮し、指先力の接線方向成分 f_t と法線方向成分 f_n の比 f_t/f_n が 0.6 以下になるように把持制御器で制御した。動的操り制御器にはシーケンス的に目標関節角度を指令した。

抑制器がある場合とない場合の示指における f_i/f_n の履歴を Fig. 3 に示す。ただし、指先が接触していない場合、 f_i/f_n は 0 とした Fig. 3 を見ると、抑制がある場合は 0.55 秒付近で $f_i/f_n=0$ となり、示指が対象物体から離れたことがわかる。しかし、抑制がない場合は $f_i/f_n=0.1$ となり指が離れていないため持ち替えを実現できていない。抑制器がある場合とない場合の把持制御器と操り制御器が発生したトルクを Fig. 4 に示す。なお、Fig. 4 は示指の MP 関節についてのトルクである。Fig. 4 において、抑制器がない場合は操りトルクの増加にともない把持トルクが増加している。つまり、操り制御器の出力と把持制御器の出力が競合している。一方、抑制器がある場合は抑制により把持トルクが 0.54 秒あたりから 0 になり持ち替えが実現されていることがわかる。以上より、提案した階層的制御手法では抑制器の導入により操り制御と把持制御を協調させ、持ち替え動作を実現させることができたといえる。任意の操り動作は物体の任意軸回りの回転と物体の姿勢を保ったままの持ち替えで行え、前者は操り制御器に適切な指先軌道を与えることで実現可能であるため、本手法によれば任意の把持・操り動作が実現できると考えられる。

5. 結論

ロボットハンドに高度な把持・操り動作を実現させるための階層的制御手法を提案した。また、階層的制御手法では抑制器の存在により持ち替え動作を実現できることを、計算機シミュレーションにより確認した。以上より、把持・操り動作に対する手法の有効性を明らかにした。

参考文献

- [1] 吉川, 永井: “多指ハンドの操り力と握力”, 計測自動制御学会論文集中, Vol.23, No.11, pp.1206-1213, 1987
- [2] 中村, 山崎: “反射行動の重ね合わせ理論とその多指ハンドの反射的把握動作への応用”, 日本ロボット学会誌, Vol.15, No.3, pp.448-459, 1997
- [3] 渡辺, 森田, 伊藤, 天野: “神経科学講座 5 運動と制御”, 理工学社, 初版, pp.106-08, 1978