

人間支援機器の高能率化のための触覚信号処理

Haptic Signal Processing for Streamlined Operation of Human Support Robot

1091016



研究代表者

埼玉大学大学院 理工学研究科

助 教

辻

俊 明

[研究の目的]

人間支援ロボットは特に生活分野等における今後の発展が期待されている。しかし人間-機械系の協調作業時に生じる強度の力学的干渉の処理方法が重要な課題となっている。特に実用化を想定した場合には安全性の確保が不可欠である。安全性確保のための衝撃力緩和制御においては力覚センサが実装されることが多いが、一般的な力覚センサの検知領域は限られている。人間との接触はロボットの全身あらゆる箇所が発生しうることから、安全性の確保には、ロボットの力検知領域を全身に拡張しなければならない。これを全身力覚化と呼ぶこととする。また、外力ベクトルのみでなく、外力の作用点の位置が計測できる場合には全身触覚化と呼ぶこととする。

近年では触覚センサアレイのように曲平面上の力分布を計測するメカニズムが広く応用されているが、センサデバイスや配線の数が増大となり、実用上の大きな課題となっている。筆者らは外殻にセンサおよび配線を配置する必要のない全身型触覚センサ「ハプティックアーマ」を開発し、力覚センサのみで接触情報を同定できることを示している。また、本センサでロボットを被覆することによって、全身あらゆる箇所において衝撃力緩和が可能な安全技術を開発している。ロボットが全身触覚化された場合には、ロボットの安全性が向上されるばかりで

なく、ロボット全身が触覚インタフェースとしての機能を持つ。

本研究課題では本技術に基づき、触覚センサが獲得する信号から人間の指令や操作力のみを確実に抽出・選別する信号処理技術を開発する。そして抽出された触覚情報を人間の命令認識に利用することにより、人間支援ロボットの操作性が画期的に向上されることを示す。触覚センサに基づく安全技術に、触覚インタフェースの高度化をもたらす信号処理技術を加えることによって、安心かつ高能率な人間支援機器の開発技術が築かれると期待される。

[研究の内容、成果]

実験機の構成

デバイスが外殻に配置される必要のない甲殻型触覚インタフェース、ハプティックアーマを搭載した移動ロボットの写真を図1に示す。本センサは甲殻状のエンドエフェクタとセンサデバイスで構成される。エンドエフェクタは成型



a) センサデバイスと骨格部



b) エンドエフェクタ

図1 ハプティックアーマを搭載した移動ロボット

プラスチック等の単なる部材であり、センサデバイスに外力を伝達するはたらきを持つ。また、甲殻形状で全身を覆うため全ての外力はここに作用する。エンドエフェクタはセンサデバイスを介してロボットに固定され、ロボット本体に直接触れない。すると全ての外力の総和がセンサデバイスに集約されて伝わることになる。本研究ではセンサデバイスに商用の6軸力覚センサを用いる。

エンドエフェクタは3mm厚の亚克力板5枚を接合したものであり、車輪の接地する床面方向以外を全て被覆する立方体形状となっている。ただし、必ずしも外殻形状を立方体に限定する必要はない。外殻部は支持部材を介して移動ロボット上の6軸力覚センサに固定されている。本機構はロボットを覆う甲殻の働きを持つ。そしてそれと同時に力検知の働きを兼ねることから「ハプティックアーマ (haptic armor)」と呼ばれる。

次に6軸力覚センサの応答値に基づいて接触情報(外力のベクトルおよびその作用点)を計算する方法を示す。まず、式(1)にエンドエフェクタに作用する力の平衡を表す。

$$\begin{aligned} F^e + F^s &= w^c \ddot{P}^o - w^c G \times \ddot{\phi} \\ G &= P^g - P^o \end{aligned} \quad (1)$$

ここで、 F^e は3軸の外力ベクトル、 F^s は力覚センサから支持点に作用した3軸の力ベクトルを表す。また、 $\ddot{P}^o, \ddot{\phi}$ はロボットの移動に伴い発生する支持点の加速度および角加速度ベクトルを表し、 P^g, P^o はそれぞれエンドエフェクタの重心と支持点の位置を表す。 w^c はエンドエフェクタの質量である。エンドエフェクタの質量 w^c と重心位置 G が既知であれば、センサで検出された $\ddot{P}^o, \ddot{\phi}, F^s$ に基づいて F^e がもとめられる。

次に力のモーメントの平衡式(2)を示す。

$$F^e \times (P^e - P^o) + M^s = w^c G \times \ddot{P}^o + I^e \ddot{\phi} \quad (2)$$

ここで P^e は接触点の位置を、 M^s は力覚センサ

から作用した支持点周りの力のモーメントを表す。そして I^e はエンドエフェクタの慣性モーメントを表す。

本センサはセンサアレイを持たないため、圧力分布を計測することはできない。しかし、力の作用点を一つの圧力中心点で代表すれば、作用点を同定することが可能である。式(2)を展開すると以下の式が得られる。

$$\begin{aligned} p_z^e &= \frac{-M_x^s - F_z^e P_y^o}{F_y^e} + P_z^o + \frac{F_z^e}{F_y^e} P_y^e \\ &= \frac{M_y^s - F_x^e P_x^o}{F_x^e} + P_z^o + \frac{F_z^e}{F_x^e} P_x^e \end{aligned} \quad (3)$$

ここで添え字の x, y, z はデカルト座標系の各軸を表す。そして、式中の多くの変数のうち、 $F_x^e, F_y^e, F_z^e, M_x^s, M_y^s$ の5つが式(1)と式(2)に基づいて導出可能であり、 P_x^o, P_y^o, P_z^o の3つが位置計測のセンサから得られる。すると式(3)は、未知の情報である P^e を F^e に平行な直線上に拘束する式となる。力センサの外殻形状が既知であれば、外殻を構成する面と式(3)で得られる直線の交点を求めることによって接触点 P^e が同定可能となる。

以上の原理により、6軸力覚センサの応答値から接触点の位置が同定される。外力ベクトルのみならず外力の作用位置が同定可能であることから、ハプティックアーマは一点接触時には触覚インタフェースとしての機能を有することとなる。

命令認識の手法

本研究課題では、操作者がロボットの触覚インタフェースを指でなぞり、その軌跡から命令の内容を認識する方式を提案している。各命令を遂行するための規定の動作モードが実装されており、ロボットは命令認識後に該当のモードへ移行する。原理的にはエンドエフェクタの全ての面で認識が可能であるが、本稿では簡単化のため操作者が入力しやすい天板のみで検証を行う。本研究では6種類の動作モードを規定し

ており、それぞれのモードに移行するためには、各モードに対応して記号化された命令の入力パターンを与える必要がある。

図2に命令認識のフローチャートを示す。本アルゴリズムはなぞり動作の終了時に起動し、命令認識番号 N_{com} を出力し、命令実行用パラメータを計算して終了する。接触点の軌跡が直線か否かはなぞり動作の面積 S で、往復軌道か否かは軌道の長さ l と最大半径 r , R の値に基づいて判断する。また、軌跡の角度 ψ , 接触時間 t_s , 始点の位置 P_s を命令認識の判断基準としている。

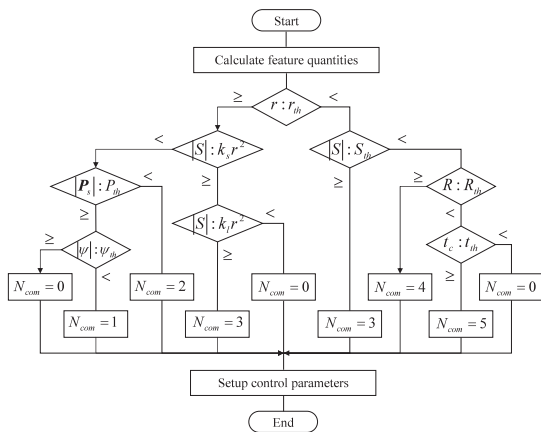


図2 命令認識のフローチャート

実験結果

実機における命令認識の結果を以下に述べる。なぞり動作によって直進の命令を2回入力したときの応答と接触点の軌道を図3に示す。図中上部の長方形の領域はハプティックアーマの天板に対応しており、その中に描かれた黒い線は接触点の軌跡を表す。また、グラフ中の鉛直点線は動作モードが切り替わった時間を表している。いずれの場合も進行方向へ接触点が移動するよう、なぞり動作を行ったが、2回目においては長い軌道を短い時間で与えたところ、直進距離が1回目に比べて長くなり、速度も高くなった。このことから、直進距離や速度をなぞり動作の軌道に基づいて調整できることが確認された。

図4に荷物を搭載したときのパワーアシスト

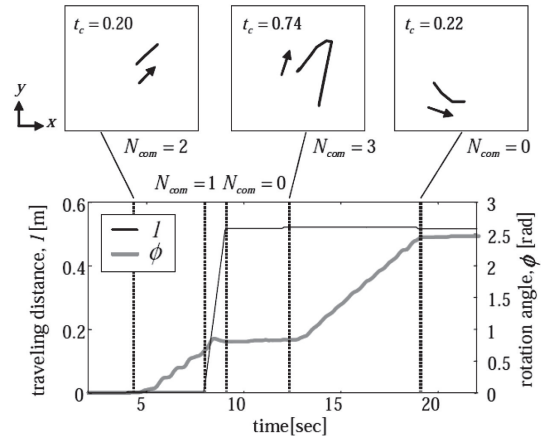


図3 直進の命令入力時の応答

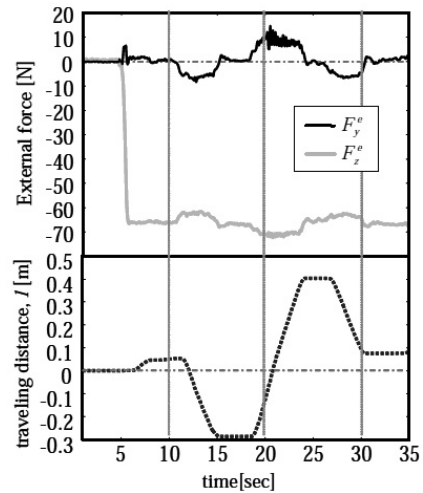


図4 パワーアシストの実験結果

の実験結果を示す。ロボットは約 6.7 kg の荷物を搭載して 0.1 sec 経過後にパワーアシストのモードへ移行し、その結果前後方向の外力に倣って前後に移動した。小さい操作力でロボットが前後に移動していることからパワーアシスト動作が実現されていることが確認された。また、外力センサと命令認識インタフェースとしての特性を両立していることが確認された。

全ての命令の入力パターンについて、認識率の評価を行った。その結果を表1, 2に示す。表1は初心者4名、熟練者3名による試験結果であり、表2はそのうち熟練者の結果のみを抽出したものである。ここで熟練者とは、本触覚インタフェースによる命令認識を20分間練習した者を指す。初心者に対しては命令の入力方

法について説明を行い、1回ずつ命令入力を試行させた後に評価試験を行った。

2番の巡回後直進以外の命令に関しては極めて高い認証率が得られており、ある程度操作法に習熟した操作者であれば能率の高いインタフェースとして利用できることが確認された。

表1 命令認識率（初心者4名，熟練者3名）

input command	recognized result						recognition rate [%]
	0	1	2	3	4	5	
0	159	0	3	0	0	0	98.2
1	17	78	0	0	0	0	82.1
2	31	0	64	0	0	0	67.4
3	3	0	0	91	0	1	95.8
4	4	0	4	5	82	0	86.3
5	5	1	0	0	3	86	90.5

表2 命令認識率（熟練者3名）

input command	recognized result						recognition rate [%]
	0	1	2	3	4	5	
0	81	0	0	0	0	0	100.0
1	1	49	0	0	0	0	98.0
2	10	0	40	0	0	0	80.0
3	0	0	0	50	0	0	100.0
4	0	0	0	1	49	0	98.0
5	0	0	0	0	0	50	100.0

[今後の研究の方向，課題]

本提案課題では触覚に基づく命令認識技術を開発し、高い能率が実現されることを確認した。今後の更なる汎用化のためには一般的な環境で汎用的に用いるための精緻な理論的・実験的検

証を今後実施する必要がある。そして触覚コミュニケーションの帯域がどの程度向上されるかを実験で定量的に評価する必要がある。

触覚コミュニケーションは視聴覚に次ぐ新たなモダリティとして注目されているが、他のモダリティと異なり、作用反作用の法則に代表されるように入出力が同時に発生する双方向性という制約を有する。双方向性により触覚制御系の解析は複雑になるため、触覚情報を用いた認識技術は未確立である。今後の研究により触覚認識技術が確立され、ロボットの動作との相関が明らかになれば、触覚モダリティの統一的設計論への発展が期待される。

[成果の発表，論文等]

- [1] 伊藤達也，辻俊明：“低次元化された全身触覚センサを用いたロボットの命令認識,” 電気学会産業応用部門誌, Vol.130-D, No.3, pp.293-299 (2010)
- [2] T. Tsuji, T. Ito: “Command Recognition by Haptic Interface on Human Support Robot,” Proc. of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS'2009), pp.3178-3183 (2009.10)
- [3] 辻俊明，伊藤達也：“触覚インタフェースを用いた命令認識によるロボット操作の能率化,” 平成21年電気学会産業応用部門全国大会講演論文集, Vol.2, pp.453-458 (2009)
- [4] 伊藤達也，辻俊明：“全身触覚センサに基づく命令認識と安全化処理の実装,” 第27回日本ロボット学会学術講演会, 3C2-05 (2009)