解 説

触 覚

References of References in Robotic Touch Sensing and Human Touch Sensation

山 田 陽 滋* *豊田工業大学

Yoji Yamada* *Toyota Technological Institute

1. は じ め に

本特集では、ロボットセンシングに関する解説記事として、「ビジョン」および「触覚」の二つが用意されている。そこで本稿では、ビジョンそのものを扱うテーマを除いて、触覚および触覚を含む複数の感覚情報の取得・処理方法論を取り上げ、さらにヒトの触覚に関わる研究にも言及する。

さて、ロボット工学分野において触覚情報は、ハンドによる把持・操りなどのロボット制御や、接触物体の形状などの識別に利用できるとされている。また近年は、より高次の認識を目指して他の感覚情報や行動モジュールとの統合を目指す研究分野や、新たに触覚メディアを創出しようとする VR 分野においてもその役割が一層重要になってきた。

以下、ロボット制御のための触覚から順に見ていくことにするが、研究分野の未成熟さ、あるいは筆者の浅学さゆえに当該分野の解説記事が見い出せない場合には、*印を付した上で通常の論文を掲載することにした。

2. ロボット制御のための触覚

この目的に対しては、ロボットが物体や外界と接したとき、センサから生成される信号に基づきどのようにして力や変位の情報を得るかという一次情報取得のための議論と、得られた一次情報に基づいてマニピュレータに接触作業を行わせたり、ハンドに物体を把持・操りさせるために有用な二次情報は何かという議論がある。

2.1 触覚センサ信号からの一次情報生成

触覚情報を得るためのセンサとしては、

- [1] 日本ロボット学会 編：II 要素技術編，1. センサ，ロボット工学ハンドブック，コロナ社，1990。
- にならって，(a) 集中形の触覚である単一接触点に作用する力/モーメントベクトルを検出する力覚センサと，(b) 接

触部位における，より多くの情報を得る目的で物体と面接触する分布形触覚，そしてこれら以外に，(c) 関節部に加わるトルクを検出する関節トルク覚も含めて調査することにしよう[†]。

接触点に作用する力/モーメントベクトルを精度よく検出することができる，いわゆる力覚センサと呼ばれているものが，近年，マニピュレータのリストあるいはロボットフィンガの先端に搭載するタイプの 6 軸力覚センサとしておおよそ定着した感を覚える。そこで，

- [2] 緒方浩二郎，柏木邦雄，小野耕三：“力覚センサ”，日本ロボット学会誌，vol.9, no.6, pp.759-765, 1991。

- [3] 内山勝：“ロボット力覚センサのシステム設計論”，システムと制御，vol.31, no.2, pp.103-112, 1987。

を，まず参照することにしよう。これらによって，一次情報として 3 軸の力およびモーメントを検出する原理から，キャリブレーション，センサ構造の評価からセンサの動的な信号処理システムの設計までの技術が理解できる。

他方，分布形触覚センサとしては，上述の 6 軸力覚センサやビジョンの場合の CCD カメラに相当するような成熟した技術に支えられたセンサデバイスがいまだに存在しない。したがって，何を取得すべき情報とするかの提案も含めて触覚センサを製作し，その情報の有用性をロボットの制御等に用いて検証するところまでをひとまとめに考えなくてはならない。そこで，分布形触覚センサ信号から触覚一次情報を取得するためのセンサの検出原理から見ておくことにする。これには，前述の文献 [1] に加えて，

- [4] John G. Webster: Tactile Sensors for Robotics and Medicine. John Wiley & Sons, 1984。

- [5] 木下源一郎：“触覚センサの開発現状”，日本ロボット学会誌，vol.2, no.5, pp.430-437, 1984。

- [6] P. Dario: Force and Tactile Sensing for Robots. P. Dario 編，Sensors and Sensory Systems for Advanced Robots, NATO ASI Series, vol.F43, Springer-Verlag, pp.153-185, 1988。

原稿受付 1998 年 8 月 1 日

キーワード：Robot Touch Sensing, Human Touch Sensation, Tactile Sensing, Force/torque Sensing, Robot Control, Object Recognition

*〒468-8511 名古屋市天白区久方 2-12-1

*Tempaku-ku, Nagoya-shi, Aichi

[†]これらは，ヒトでいうところの機械受容器や深部受容器からの情報である体性感覚に相当するものと捉えることができよう。4.1 節文献 [31] 参照。

を参照するのが良からう。力や変位に伴う電気信号を得るためのトランスデューサの候補や検出原理, さらに人工触覚の黎明期にあたる 1970 年代および 1980 年代の触覚センサの研究開発動向を把握することができる。[5] の日本ロボット学会誌 2 巻 5 号は、「触覚センサ」の特集号である。

触覚に関する研究は, その後, どのように情報処理すべきかという触覚センシングの方向に関心が集まるようになり, ヒトの機械受容器, 触知覚心理学をも研究背景として捉え, かつタスク指向の触覚情報処理までを広く議論するようになった。このような動向は

[7] Howard R. Nicholls: Advanced Tactile Sensing for Robotics. World Scientific, 1993.

[8] R.D. Howe and M.R. Cutkosky: "Touch Sensing for Robotic Manipulation and Recognition," O. Khatib, J. Craig and T. Lozano-Pérez 編: The Robotics Review 2. MIT Press, pp.55-112, 1992.

によって, 理解できよう。

さらに, 関節トルクセンサにも言及しておくことにするが, 残念ながら, 関節トルクセンシングに関する広範な研究事例が列挙された解説記事を見ない。しかし, 回転関節マニピュレータの場合には, 関節部にモーメントが作用したときの関節部そのもののひずみや減速器部のひずみをもとにモーメントを検出する提案がある。そのあたりは,

[9] *橋本稔 ほか: "ハーモニクドライブトルクセンサの原理と特性", 第 3 回ロボティクスシンポジア, pp.101-106, 1993.

の緒言において多くの研究事例が紹介されている。他方, ワイヤ駆動方式が多いロボットハンドの場合は, ワイヤ張力から関節トルクを検出する。この技術については, 例えばすぐ次に述べる文献 [11] を参照されたい。

2.2 把持・操り制御や接触作業への応用

ハンドによる物体の把持や操り, あるいは接触作業という観点で捉えた場合に, どのような触覚情報が有用かという議論も,

[10] 増田良介: "触覚を用いたロボットアームハンドの制御", 日本ロボット学会誌, vol.2, no.5, pp.457-461, 1984.

などのように早くから行われていた。多指ハンドの制御を目的とした解説としては,

[11] 前川仁: "把握中のセンシング戦略その 2: 安定把握とセンシング—力覚と触覚を中心として—", 日本ロボット学会誌, vol.11, no.7, pp.966-972, 1993.

[12] 中村仁彦: "物体把握とあやつりのための情報検出", 計測と制御, vol.26, no.2, pp.117-121, 1987.

が参考となろう。[11] では, 安定把持制御について触れた後, ハンド搭載形の力覚, 触覚 (接触点検出), 関節トルク覚用各センサの具体例を紹介している。また, [12] では,

さらに物体を操る上では, 通常 2 本の指に接触点の速度が検出できるセンサを装着する必要があることと結論づけている。

それではより具体的に, まず**定位覚**, すなわちロボットの基準座標系に関して, 物体の接触部位 (点や面) の位置/姿勢を求める機能について調査する。この目的では, 前記 [11] で紹介されているように直接位置検出センサを構成する研究のほか, 同じ日本ロボット学会誌 11 巻 7 号の「センサベストロボットハンド」特集において数多くの手法がまとめられている。すなわち,

[13] 金子真: "把握までのセンシング戦略その 1: 接触点及び形状検出", 日本ロボット学会誌, vol.11, no.7, pp.953-958, 1993.

では, まず接触部から離れた位置の力/モーメント情報やシリアルリンクの関節トルク情報を利用する手法が示されているほか, 能動的に接触点や物体形状を検出する研究事例も紹介されている。また,

[14] 永田和之: "把握中のセンシング戦略その 2: 把握物体の把握位置・姿勢推定", 日本ロボット学会誌, vol.11, no.7, pp.973-979, 1993.

では, 把握姿勢候補の探索から姿勢推定, さらにハンドと把持物体両者間の座標変換パラメータを求める問題までを議論している。さらに, ロボットが把持したワークやツールが環境と接した点の検出は, 作業状態を認識する上で重要な情報であり,

[15] 武藤伸洋, 下倉健一郎: "把握中のセンシング戦略その 4: 作業中の接触点検出", 日本ロボット学会誌, vol.11, no.7, pp.985-991, 1993.

を参照すると, 接触位置やその点における法線ベクトルの検出とその高精度化手法の解説のほか, 接触状態遷移の検出や接触状態の同定に関する研究が紹介されている。

他方, **滑り覚**もロボットハンドによる物体の安定把持制御に有用な情報であるとされており,

[16] 山田陽滋: "把握前のセンシング戦略その 2: 滑りと静摩擦係数の検出—表面粗さ情報の取得", 日本ロボット学会誌, vol.11, no.7, pp.959-965, 1993.

では, 滑りや静摩擦係数の意味するところとその取得法, 摩擦限界や初期局所滑りなど物体を落とさないための議論に関わる話題を提供している。

さらに, 把持した物体の**質量・重心覚**もまた, 把握状態の改善に有用な情報である。

[17] *橋本秀紀, 堀越眞一, 原島文雄: "Dextrous Hand による物体のパラメータ抽出", 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'93 講演論文集, pp.286-289, 1993.

3. 物体の認識のための触覚

3.1 物体の認識

さて、触覚センサが注目を集め始めて以来、圧力センサ素子分布形のセンサによる接触物体の形状覚が視覚とのアナロジーから盛んに議論されて来ている。その主たる目的は接触した物体の識別である。そして、これが達成されると、接触部位が同定され、物体の接触位置姿勢も検出できるようになるという点で、前節の把持・操りにも重要な役割を果たすと考えられてきた。

[18] 尾崎弘明, 毛利明: “触覚による形状認識”, 日本ロボット学会誌, vol.2, no.5, pp.467-471, 1984.

は、早くからこの分野の研究を取り上げており、シミュレーションながら識別関数の導入等を解説している。また、

[19] William E.L. Grimson: Object Recognition by Computer. MIT Press, 1990.

は、対象物の認識問題を、視覚・触覚のセンシングメディアにとらわれることなく、候補群の中での同定問題および対象物の位置・姿勢の決定問題として一般に捉えようとする立場をとった成書である。実際の触覚データに基づいた議論としては、

[20] 木下源一郎: “把握中のセンシング戦略その3: 触覚像の取得と対象物の認識”, 日本ロボット学会誌, vol.11, no.7, pp.980-984, 1993.

で分布形触覚センサによって得られた触覚像から、物体表面への作用力・モーメントや物体表面の特徴を抽出する研究例が解説されている。

次に、把持物体のさまざまな属性を捉えるという立場から、硬さ覚や材質感覚が論じられている。硬さ覚は、より一般には物体の粘弾性を求めること[†]に通ずる問題であるが、ロボットの分野では硬さの測定として、

[21] 尾股定夫: “硬さ測定触覚センサ”, 日本ロボット学会誌, vol.9, no.7, pp.908-909, 1991.

のように、物体接触時の振動検出素子の共振周波数解析から剛性を検出する研究事例があるほか、文字通り物体を押さえて硬さを調べる研究も始まった。

[22] *江村暁, 舘 暉: “形状とインピーダンスの同時測定法”, 日本ロボット学会誌, vol.15, no.7, pp.997-1003, 1997.

他方、材質覚については、複数センサからの情報処理が前提となって議論される。

[23] 伊福部達: 材質感の検査, 検査の自動化・システム化ハンドブック, 尾上守夫 監. pp.639-642, フジ・テクノシステム, 1990.

では、皮膚と同程度の柔らかさや力学的・熱的性質が要求されるとして温度覚を含む研究事例が紹介されている。

また、

[24] *信太克規: “多機能センシングの新しい試み” ほか, 第14回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.1071-1074, 1996.

では、センサ信号から物体の物理特性を求める問題が、互いに干渉する多入力—多出力情報処理系として一般に捉えられ、逆問題を解くことでこの物理特性が求められるとする多機能センシングが説かれている。さらに、

[25] 坂口豊: “触知覚における感覚統合と能動的認識”, 電子情報通信学会誌, vol.76, no.11, pp.1222-1227, 1993.

では、対象の材質を識別するというターゲットを Bayes の定理と相互情報量に基づく逐次実験計画問題として捉え、その認識アルゴリズムが提案されている。これは、次の3.2節で述べるセンサフュージョンの研究でもある。

3.2 センサ統合・センサフュージョン

本節では、センサ統合・センサフュージョンなる研究分野に触れる。まず、

[26] 石川正俊: “センサフュージョン”, 日本ロボット学会誌, vol.8, no.6, pp.735-742, 1993.

[27] 山崎弘郎, 石川正俊 編著: センサフュージョン. コロナ社, 1992.

[28] Ren C. Luo and Michael G. Kay 編著: Multisensor Integration and Fusion for Intelligent Machines and Systems. Ablex, 1995.

によって、これらの分野に対する全般的な理解を深めておくことにしよう。[26][27]において、センサフュージョンは、システムの意図に沿ったセンシングとこれを支援するハードウェアとしてのリアルタイム並列アーキテクチャの実現を企図しているものと位置づけられている。また、[26]の掲載されている学会誌11巻7号は、全体がセンサフュージョンの特集号になっている。他方、[28]では、センサのモデリングやセンサの選択、その他の機能から世界モデルの構築までを含めてセンサ統合処理の範疇に捉え、そのなかにセンサフュージョンを位置づけている。

この分野は、そもそも確率論を中心とするセンサ情報の統合処理に関する研究が主流となって始まっている。その理論的研究動向は、

[29] Hugh F. Durrant-Whyte: Integration, Coordination and Control of Multi-Sensor Robot Systems. Kluwer Academic, 1987.

[30] Mongi A. Abidi and Rafael C. Gonzalez 編: Data Fusion in Robotics and Machine Intelligence. Academic Press, 1992.

等によって、把握することができる。また、触覚の分野ではとくに能動触が重要であり、

[†]典型的な問題として人間の皮膚のインピーダンスの測定がある。
4.1 節文献 [34] 参照。

- [31] 下条誠:触覚とアクティブセンシング, 高橋清, 佐々木昭夫 編, アドバンスドセンサハンドブック. pp.432-436, 培風館, 1994.

をインテンショナルセンシングと関連付けておこう.

4. ヒトの触覚

4.1 ヒトの触覚に関する感覚・知覚特性

ヒトの触覚に関する感覚・知覚特性について広く知見を得るには, まず,

- [32] 大山正, 今中省吾, 和気典二 編: 感覚・知覚ハンドブック, 第 IV 部皮膚感覚・自己受容感覚. 誠信書房, 1994.

を参考にしよう. また, 生体の触覚センサである機械受容器に関するより詳しい研究知見は,

- [33] 岩村吉見: “ヒト触覚受容器の構造と特性”, 日本ロボット学会誌, vol.2, no.5, pp.438-444, 1987.

- [34] Jiřina Zelená: Nerves and Mechanoreceptors. CHAPMAN & HALL, 1994.

によって求めることができる. ついでに, ヒトの皮膚の力学的挙動については, 古くから医学・レオロジー・バイオメカニズム等の分野で研究されてきている. ここでは,

- [35] 岡久雄: “皮膚力学特性の計測とその評価”, バイオメカニズム学会誌, vol.16, no.3, pp.181-187, 1992.

を掲げておこう. 他方, 心理物理学的な知覚特性に関しては, まず, 触覚について, 文献 [31] のほか,

- [36] 清水豊: “機械的刺激による触覚の心理物理特性”, 日本ロボット学会誌, vol.2, no.5, pp.445-450, 1987.

において, 空間的な 2 点弁別閾や定位能, パターン識別能についての解説がある. また, 触運動知覚に関しては, 文献 [7] の第 9 章において, ‘ロボットのハプティックセンシングのために’ という観点で述べられている. さらに, 材質感覚は温度の影響を中心に研究が始まっている.

- [37] *井野秀一, 伊福部達, 和田親宗 ほか: “触覚の材質感提示システムのための基礎研究”, 電気学会論文誌 C, vol.117, no.8, pp.1062-1068, 1993.

今後は, 次の 4.2 節で触れる種々の触覚ディスプレイの設計や開発に関わって, 新たな触覚のモダリティが心理物理学ほか様々な観点から研究されるであろう.

それから, 生体に固有の触覚でありながら, 今後ロボティクスでも重要な視点になるとと思われるものに痛覚がある.

- [38] 赤松幹之: “痛みと評価”, バイオメカニズム学会誌, vol.14, no.3, pp.151-159, 1990.

では, 痛み刺激・痛み反応の計測手法に関する解説が与えられている.

4.2 VR 分野での触覚の展開

前の 3 章までは, 触覚情報をロボットにフィードバック

しその制御に利用することによって, 情報の有用性を議論するものであった. しかしながら触覚情報を直接触覚ディスプレイによって人間の体性感覚に訴えることによりその有用性を評価する, VR を典型とする分野が存在する. 触覚・力覚ディスプレイを主に, 触覚センサを従にして豊富な研究事例を掲げた成書に

- [39] Burdea, Grigore C.: Force and Touch Feedback for Virtual Reality, Chapter 6. John Wiley & Sons, 1996.

がある. また, 次の特集号が待たれる.

- [40] 日本バーチャルリアリティ学会論文集「ハプティックインタフェース」特集号, vol.3, no.3, 1998.

5. おわりに

以上, 触覚情報処理に関わる references of references を論じた. 本分野が盛んに議論される場として, ICRA, IROS, ISRR, ICAR, VRAIS の国際会議のほかに,

- [41] IEEE International Conference on Multi Sensor, Fusion and Integration for Intelligent Systems

- [42] The Winter Annual Meeting of the ASME, Annual Symposium on HAPTIC INTERFACES for Virtual Environment and Teleoperator Systems

を掲げておこう. [41] は第 1 回大会が 1994 年に開催され, 隔年開催になっている. センサデバイスからそれらの情報処理まで幅広く扱われる. [42] は, 1992 年以来毎年開催されている. 触覚センサ, 触覚ディスプレイから触知覚の心理物理特性まで様々な観点が議論される.

このように, 解説記事や成書を連ねてくると, 触覚・力覚研究分野の変遷を把握することができると同時に, 方法論が確立されないままに残されている研究領域も判明してくる. 例えば, ロボットによる触運動知覚の実現や視覚・触覚情報の有効な統合処理が明快に解説されるような展開が期待される.

また, 触覚分野に対する日本ロボット学会誌の貢献度の高さも再認識された. 今後も, 本学会誌を中心にこの分野の研究動向に注目し続けたい.

山田陽滋 (Yoji Yamada)

1956 年 7 月 13 日生. 1983 年名古屋大学工学研究科修士課程修了. 同年より豊田工業大学助手勤務. 1993 年助教授. 同年, Stanford University 客員研究員. 工学博士. ロボットのセンサ・通信・情報処理・知能システムなどの研究に従事. 1998 年第 3 回ロボティクスシンポジウム優秀論文賞, IEEE ROMAN'96 Best Paper Award 等受賞. IEEE 等の会員. (日本ロボット学会正会員)