解説

センシング技術

Sensing Technology for Outdoor Robotics

増田 良介* *東海大学

Ryosuke Masuda* *Tokai University

1. 屋外で活躍するロボットとセンサ

ロボットは今やあらゆる分野へ進展し、利用され始めている。新しい分野でロボットが安全にかつ効果的に活動するためには、自己状況認識、環境適応、学習、危険察知、情報交換、命令理解などの知的な機能が必要である。これらの機能は外界センサ情報を基にしたものであり、センサ素子・構成はもちろんその情報処理をあわせたセンシングがその鍵を握る技術である。

本稿ではロボットの知的な活動を支援するセンシング技術を、屋外で活動するロボットに利用される場合を中心にして解説する。まずはじめに、広く移動するロボットに対してその自己位置を検出するためのセンサとその情報処理の手法について述べ、次に環境や対象物体を認識するためのセンシング技術について述べる。また、作業時に有効になる効果器センサについて触れ、耐環境の問題についても言及する。なお、各応用で用いられる個別センサは、本特集のそれぞれの稿を参照されたい。

2. 自己位置、姿勢のセンシング

作業を行うときに移動を伴うロボットでは、まず自己の絶対的な位置や方向、姿勢を計測することが第一である。この自己位置センシング技術は、図1の概念図に示したように、内界センサにより推定する方法、外部環境から情報を受け取って認識する方法、環境画像やマークを取得して認識する方法、およびそれらを融合した方法に分けることができる[1]。

(1) 内界センサによって推定する方法

車輪移動の場合の基本的な位置センシング法として、車輪の回転速度または角度および操舵角度の情報から、走行方向と距離を積算して自己位置を求める方法が用いられる。さらに、不整地や凹凸面の移動の場合、空中や水中移動の場合には、ジャイロや加速度センサを各座標軸方向に対し

て用いて計測する。内界センサによる方法はデッドレコニング (dead reckoning) と呼ばれている。

ジャイロは、回転角速度を検出するセンサで、機械式その他、円弧状のファイバにおける右回転と左回転の光の位相ずれから回転速度を抽出する、光ファイバジャイロや、振動している素子が回転したときに働くコリオリの力によって発生する直交方向の振動から回転速度を抽出する、振動ジャイロが用いられる。

加速度センサは、基本的にはおもりとバネから構成され、ピエゾ抵抗素子や超小型コンデンサ素子を用いて慣性力から加速度をとりだす方法が利用されている。

加速度を2回積分すると位置になるが、ドリフトやノイズの累積誤差が問題になるため、GPSやランドマーク法との併用による補正が必要である。

(2) グローバルな座標情報を用いる方法

この方法は、地磁気や、複数の灯台からの情報による方法が発展してきたものである。現在、屋外ではGPS (Global Positioning System) を用いた位置計測方法が一般的である[2]。GPSは、図1に示したように、複数の衛星からの電波の到達時間から各衛星までの距離を求め、自己位置を

図1 DGPSと位置認識システム

原稿受付 2000年8月15日

キーワード: Robot Sensor, Position Sensing, Vision

*〒259-1292 平塚市北金目1117

*Hiratsuka-shi, Kanagawa

計算するものである。その精度は衛星の時計のずれ、軌道の変動、電離層や対流層などの伝搬路の状況、受信機のノイズやマルチパスなどの影響で数十メートルとなる。これに対して、基準となる位置の標準局での計測結果による補正情報を電波で与えるのが DGPS で精度が数メートルとなる。さらに二つの受信アンテナ間の受信信号の位相干渉データを解析する RTK (Real Time Kinematic)-DGPS によれば、数センチの精度で自己位置を求めることが可能になっている。このようなセンサは、農業用ロボットのナビゲーション、建設ロボットにおける測量、自律自動車、盲人ガイドロボットなどに有効である。

なお、屋外の移動体では、ビルの陰やトンネルなど電波が遮られるところがあり、そこでは、先に述べたジャイロや加速度センサなどの内界センサ情報との融合が必要である。

(3) ランドマークによる方法

建物の壁面や路面上に直線、十字路、T 字路などの情報をマークとしてつけておきこれをカメラによって観測し、あらかじめ記憶しておいたパターンとのマッチングに基づいてマークを判断し、その位置情報を取得する方法である。バーコードのようなパターン情報をレーザ光でスキャンして認識したり、標識や樹木などをランドマークと見なして処理する場合もある。

また、ランドマークがアクティブに信号を発信するときは、ローカル情報発信・受信による方法となる。この方法では、特定の場所に設置された発信源で位置情報を光や超音波でコード化して送信し、ロボットがこれを読みとる。また、タグあるいはトランスポンダと呼ばれるコード信号返信素子と返信を読みとるリーダから構成される、データキャリア (Data Carrier) システムを用いて、近づいたロボットの要求に応じてその場所に関する情報を伝達する方法も可能である。このローカル情報発信法は、比較的行動範囲が限定されている移動ロボットに有効である。

3. 環境と対象物体認識のための視覚センシング

外界計測センサによる環境認識と対象物あるいは障害物の検出・認識について説明する。

(1) 視覚センサ素子および構成

視覚センシングに用いられる素子としては、主に CCD (Charge Coupled Devices: 電荷結合素子により、光信号の強弱に応じた電荷を蓄積・伝送し画像データを出力する) カメラが用いられる。また、光点の計測には PSD (Position Sensitive Device: 光の当たった点の二次元位置情報をアナログで検出できる素子) が用いられる。

画像処理の高速化を図り認識を容易にするためのハードウェア的な工夫として、並列処理の可能なビジョンチップや、人間の目の特性を模擬した網膜チップが開発されている [3]。これは、受光部の中心に近いほど分解能あるいは感

図2 画像センサと視覚情報処理

度を高く製作したものであり、インテリジェントセンサとして各種フィルタリングにより輪郭強調、感度調整などの前処理も同時に実行できるようになっている。また、眼球運動を組み合わせることで目的とする物体を注視することができる。視覚センサおよびその各種構成の概念を図2に示す。

(2) 全方向観測と環境認識

移動ロボットで環境を認識するための視覚センシングにおいては、見る領域をどのように設定するかが問題で、なるべく広く観測する必要がある。全方向を見るためには、魚眼レンズを用いる方法や、球状の反射レンズを用いた方法がある。これらによる画像はひずみが大きいので、電子的に補正する方法が採られている。さらに機構的にカメラを回す方法も、インテンショナルセンシング (Intentional Sensing: 意図的に計画をしてセンシングすること) と併せると有効に活用できる。

一般的環境の認識では、移動しながら見える景色を蓄えていき、あらかじめ記憶している景色データとマッチングさせながら地図上の自己位置を認識していく。このとき、そのままでは画像データ量が膨大になるので、特定の線上のデータのみ取り扱ったり、特徴の強い部分のみ抽出して比較する処理が行われる。

アクティブな環境計測法として、レーザ光または超音波信号を発信してその反射信号から環境に対する相対の状態を認識する方法がある。基本的には幾何学的な三角測量法や反射波の到達時間差に基づくタイムオブフライト法で壁や障害物までの距離が測定される。この場合、対象物体にリフレクタをつけておくことで対象物体との相対関係を明確にすることができる。

これらの方法は、建設ロボットにおける壁面追従や探索ロボットの対象物や障害物の発見・計測、宇宙ロボットのターゲット捕捉などに用いられている [4]。

(3) 立体視と三次元情報

三次元情報を得るためには平面画像と距離情報を別の手段 (CCD カメラとレーザレンジファインダなど) で取得し合成する方法と、2 台のカメラを用いた両眼立体視による方法とがある。両眼立体視は基本的には 2 画面上の対応点の幾何学的関係で三次元情報を得るのであるが、一般的環境では左右の画像の間の対応関係が明確に決定できない場合があり、何らかの条件を与えて対応点問題を解決しなければならない。

単眼による立体視は、カメラを動かすことによって視差を作り出す方法で、モーションステレオ法と呼ばれている。この方法は、ロボットのアームに視覚を取り付けて制御するハンドアイカメラの形態となっている。

(4) 対象物体の認識

農林業やサービス業などの一般環境においては、対象物とそれ以外を識別しなければならないことが多い。この物体識別問題は、一般的にはなかなか難しい課題である。このような場合、あらかじめ識別すべき対象における特定の色の反射、赤外線透過などの光学的特性を明確にしておくことで対応することができる。例えば、果実収穫ロボットや雑草除去ロボットなどでは、近赤外光と可視光の両方を照射し、CCD でそれらの反射状態の違いを測定し、対象と背景の識別を行うことができる [5]。また、赤外光や超音波による果物や野菜の完熟状態の判定、糖度の測定、レスキューロボットでは被災者の発見、状態の判定などが行われている。

(5) 移動体のトラッキング

動いている物体の追従には、トラッキングビジョンと呼ばれる画像データ処理回路が利用される。これは、画像中の特定点の移動をリアルタイムで観測する、オブティカルフロー技術の応用である。他の複数のロボットあるいは移動する障害物の検出や、自分自身の相対的な動きを同定することが可能となる。オブティカルフローのパターンとトラッキングの概念を図 2 に示す。

なお、オブティカルフローは自分自身が動いているときにも観測されるので、環境の中で相対的にどのようにロボット自身が動いたかを認識することも可能である。この方法は、複数の移動ロボットや人間の動きの監視、空中・水中ロボットの制御、自律移動ロボットの移動体追跡、衝突回避などに用いられている。

4. 作業センシングとセンサ情報の提示

さて、屋外でロボットが対象物体や環境の状態に応じた動作を行うためには、触覚や力覚、近接覚などの効果器センサが重要である。効果器センサには多様な種類のものがあり、その応用については、例えば力覚情報のフィードバックによるバイラテラル制御、インピーダンス制御、協調制

御など多岐にわたっている。

本稿では、遠隔地でオペレータがロボットを操作する場合に用いられる触覚センシング技術のみを取り上げることにする。触覚情報をフィードバックすることは、力フィードバックに比べて難しい点が多い。すなわち、多次元的な接触表面情報の検出とその情報をいかにオペレータの手に自然に与えるかということが課題となっているのである。

(1) 多次元触覚センシング

多次元的な触覚情報のセンシングは、接触面における接触力ベクトルと接触分布 (位置) を明確にすることであり、多次元センサでは押しつけ力のほかにハンド表面での剪断力も検出できる。多次元触覚センサの課題は、柔軟性を保ちつつ高感度、高分解能の検出を行うことである [6]。その形態として、図 3 に示したような弾性歪みの超音波伝搬に与える影響を利用して接触状況を推定する弾性体テンソルセル型センサ [7]、ゴムの突起や硬さの違うゴムの組み合わせを用いた光型触覚センサなどが構成されている。この剪断力検出機能により、物体の形状だけでなく、接触点の移動やすべり運動が検知できる。

(2) ハプティックインターフェース

離れたところで作業中のロボットの、ハンド面における触覚情報をオペレータに提示するための機器を、ハプティックインターフェース (haptic interface) と呼んでいる。触覚情報をオペレータに伝えるには、図 3 のような導電ゴムと液晶表示を組み合わせた分布表示センサで画面表示するか、分布配置したピエゾ素子などによる振動子の振動で人間の指に直接フィードバックする方法がとられる [8]。粘弾性体、布などの触感が伝えられるので、救助ロボットやサービスロボット、農業ロボットの作業現場で、オペレータに判断をゆだねる場合に用いることができる。

図 3 多次元型触覚センシングと情報提示

表 1 センサの耐環境性グレード [10]

	通常環境		特殊環境		
	グレード0	グレード1	グレード2	グレード3	グレード4
センサ エレ メント	温度	-10~40° C	-25~70° C	~-65° C ~ 250° C	~-190° C 500° C~
	振動	~0.1G rms なし	~1.0G rms	~4.0G rms	~10G rms 10G rms~
	衝撃	~15G なし	~100G (10ms)	~500G (1ms)	~2000G (0.5ms) 2000G~ (0.2ms)
ケー シ ン グ	圧力	大気圧	630mb ~1200mb	~10 ⁻³ Torr ~2 kg/cm ²	~10 ⁻⁶ Torr 5 kg/cm ² ~
	耐薬品	なし	油 水	塩水 弱酸 弱アルカリ 溶剤	強酸 強アルカリ 腐食性物質
	固形 異物	12 mm より大	2.5 mm より大	1.0 mm より大	防塵
	防水	平均 75%	防滴	防沫	耐水

5. センサの耐環境条件

屋外ロボットで最も大切なのは、耐環境性である。センサに関する環境条件は、表 1 に示したようなグレードで表されている [10]。

(1) 通常環境（人間が通常行動できる環境）

グレード 0＝快適な通常環境で、センサとして無保護で対応できる範囲

グレード 1＝通常環境のうち特定の条件・特定の場所に存在する環境で構造・材料に少し対策をすることにより対応できる範囲

(2) 特殊環境（人間がほとんど行動できない環境）

グレード 2＝機器の構造・材料に耐久性の高いものを使用することにより比較的容易に対応できる範囲

グレード 3＝機器の構造・材料に特殊なものを採用しないと対応できない範囲

グレード 4＝極限に近い状況で、構造・材料に最も適した特殊なものを採用しないと対応できない範囲

実際に応用する場合、これらの数値範囲や各種規格 [13] を考慮して触覚や視覚のセンシングシステムを設計する必要がある。現状の実用化センサは、グレード 1 までの対応がほとんどであり、特殊用途としてグレード 2 までが対応できるだろう。グレード 3 以上はセンサエレメントおよびケーシングともに新しい技術が要求される。

6. まとめとセンシング技術の課題

新しい応用に向けてのロボットのセンシング技術を概観した。一般的には、視覚は各種のビジョンチップによる処理の高速化と専門化が要求され、触覚・力覚ではその柔軟化と情報の多様化とともに、よりシンプルなセンサ構造が

求められている。

さらに、屋外で用いられるロボットにおいては、ほとんどが複数種類のセンサあるいは同一種類のセンサが多数用いられ、マルチセンサシステムが構成されている。そしてこれらのセンサ情報に対しては、座標変換、重み付き平均、カルマンフィルタや統計的推定法などに基づくセンサ融合・統合処理が行われ、必要な情報を正確にかつ安定に抽出することが可能となる。この、センサ融合・統合の技術体系の確立も重要な課題である [11] [12]。

一方、屋外ロボットは状況が多様であるため、汎用センサという考え方が通用せず、原理としては一般的のものであっても環境条件をもとに特別に設計していかなければならない面もあると考えられる。今後ますますロボットが外に出て活躍することを期待したい。

参 考 文 献

- [1] 日本ロボット工業会：プラント点検作業ロボットの標準化に関する調査研究成果報告書，1996。
- [2] 計測自動制御学会：特集「GPS（衛星測位システム）技術の今後の展開」，vol.36，1997。
- [3] 亀田，八木：“人工網膜を用いた実時間画像処理：輪郭検出および衝突時間予測”，日本機械学会 ROBOMEC 2A1-67-092，2000。
- [4] N. Inaba and M. Oda: “Robot Vision Techniques to Approach and Capture a Failed Satellite,” Proc. 9 th ICAR, pp.355-360, 1999。
- [5] 日本ロボット工業会：特集「農業用ロボット」，ロボット，no.135，2000。
- [6] H.L. Mark: “Tactile Sensing: New Directions, New Challenges,” The Int. J. Robotics Research, vol.19, no.7, pp.636-643, 2000。
- [7] H. Shinoda et al.: “Ultrasonic Emission Tactile Sensor for Contact Localization and Characterization,” Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, pp.2536-2543, 1994。
- [8] 岩田：“ハプティクインターフェース”，ミニ特集「人と機械の知的協調システム」，計測と制御，vol.38, no.6, 1999。
- [9] 昆陽ほか：“布の手探り感覚を対象とした触感ディスプレイの研究”，第 5 回ロボティクスシンポジウム，13A5, 2000。
- [10] プラントメンテナンス協会：設備診断用センサ技術研究部会調査研究報告書，1990。
- [11] 李，橋本：“グローバルセンサとローカルセンサの融合による移動体の走行”，ROBOMEC'00, 2A1-71-095, 2000。
- [12] 原，梅田：“距離情報と画像情報の融合による移動体物体の運動追跡”，ROBOMEC'00, 2A1-71-096, 2000。
- [13] ロボット，センサ，電子機器の環境条件等の規格。JISB8438(付 3)，B8433, C0110～C0118, IEC60721-1 等。

増田良介 (Ryosuke Masuda)

1946 年 5 月 26 日生。1971 年東京工業大学大学院制御工学専攻修了。1974 年東京工業大学工学部助手。1982 年東海大学工学部電気工学科講師，助教授を経て現在教授。工学博士。この間ロボットセンサとセンサ制御，ロボットの応用システムに関する研究に従事。計測自動制御学会，バイオメカニズム学会，ヒューマンインターフェース学会，IEEE 等の会員。（日本ロボット学会正会員）