解 説

屋外ロボットの実用化と制御システム

Control System of Application for Out-door Robotics

大 道 武 生* *三菱重工株式会社

Takeo Oomichi* *Mitsubishi Heavy Industries, LTD.

1. 背 景

屋外ロボットは使用環境が様々であり、また、適用対象も様々であるため、いわゆる知的なロボットが活躍する格好の場とも言える。従って、ロボット研究者から見ると屋外ロボットは大変興味のある分野であり多くの研究が実施され、今日でも継続されている。一方、実用化研究の面で見るとカーネギーメロン大の Field Robotics Center [1], National Robotics Engineering Consortium [2], シドニー大の The Australian Center for Field Robotics [3] 等で継続的、かつ、大規模な研究開発が行われている。これらの成果は International Conference of Field Service and Robotics 等で熱心に討議されている。また、軍用ロボットのテーマは偵察や補給の機械化であり米軍を中心に精力的な研究が行われているようである。残念ながら日本の大学ではこのような観点での取り組みは非常に少ない。

この現象は日本国内には米国や豪州における大規模農業や鉱山がなく、屋外ロボットの活躍する直近のニーズが少ないこと、さらに、国土が狭くロボットの周辺環境がいつも複雑であることに起因する。また、屋外ロボットはセンシング、移動、作業の複雑なシステムを統合する必要がある、単なる要素技術の掘り下げでは実用にはならないため、予算規模も大きく、かつ、継続的、組織的開発が必要とされる。このような開発は本来企業で行うというのが一つの考え方であるが、上述のように屋外ロボットの市場が小さいため、現在のところ開発が本格化してない。

もちろん無人潜水船、宇宙ロボット、原子力等の防災ロボット分野は屋外ロボット活躍の場であるが、市場としてはそれほど大きくないため国主導の研究がほとんどである。

このような状況をかんがみると、制御要素技術の紹介というよりはロボット技術を屋外に適用していくときの制御システムについての分析が有用と考える。屋外ロボットそ

のものが確立していない状況のなかでの分析であるため、やや、一般性を欠くとは考えられるが、実用化を加速する何らかの参考になれば幸いである。また、実用性の観点からの制御システムについては本誌でもすでに解説したため、若干重複することを容赦願いたい。

一方で、21 世紀の機械が世界的に競争力を持つ大きな要因は、価格競争に優先する自動化、自律化、知能化といわれている。クレーンやフォークリフト等の搬送機械、各種の建設機械、メンテナンス用の機械は正に屋外作業ロボットと同一のものになっていくと想像される有望な分野でもある。

2. 屋外ロボットに求められる制御上の課題と方策提言

屋外ロボットの機能を論じるときに語られるのは不整地適応力や環境認識である。しかし、これまであまり研究されてこなかったけれども最も重要なのは信頼性である。

2.1 機能確保の信頼性

機能を確保するための信頼性を向上させるには、冗長システムが用いられる。その一つは情報の不確定さを補充するための冗長システムであり、代表的手法としてセンサフュージョンがある。ほかには制御機能を階層化して、各制御ブロックの出力を明瞭化し監視する方法である。この手法をさらに高めたものとして階層化した制御系の出力を量暈する方式があり、MIT Brooks [4] 教授によって提案されたサブサンプリング制御システムも大きくはこの分類に入れることができよう。これらを総合化した制御システムとして、距離情報で階層化し、それらを量暈化したシステム (図 1) が考えられる [5]。

このシステムではおのおののブロックの出力はすべて優先度付けが行われる (図 2)。なお、ここで優先度を零として取り扱うとサブサンプリングと類似のシステムを作ることができる。

また、各階層の制御出力は独立して生成後加重平均されるため、一つの階層のエラーが全体システムに及ぼす影響は軽減される。階層化が距離に基づいて行われるため、下位にいくほど測定長さは小さくなる (処理時間は短くする)

原稿受付 2000 年 8 月 14 日

キーワード: Control System, Out-door Robot, Teleoperation, Navigation

*〒 676-8686 高砂市荒井町新浜 2-1-1

*Takasago-shi, Hyogo

図 1 Basical control system of out-door robot

図 2 Method of velocity estimation in the hierarchical compound control

が計測の絶対精度は高くなる。ここで、優先度を下位にいくほど高くとると下位レベルが正常に動く限り高精度な制御が可能となる。また、ある階層が機能しなくなれば制御精度は劣るが他の階層のみで動作する。上記によれば信頼性の高いシステムを簡素に組むことができる。なお、各階層におけるセンシング、制御手法については多くの発表があるのでそれらを活用するとよい。

2.2 安全性の確保

一般産業の機械が無人化されない最大の問題は人に対する安全性の確保である。この問題の解決なしに屋外ロボットを導入することは不可能で、これまでの屋外ロボットが人のいない環境（宇宙、水中、極限環境下等）を対象とせざるを得ない状態にある大きな理由である。

(1) フェールセーフ制御系

安全を確保するフェールセーフの一般解は物体接近を検出してロボットを停止させることである。このときの問題はフェールセーフを高めすぎるとロボットが頻繁に停止し、ロボット導入の実効が失われてしまうことである。これらの

図 3 Image of container transportation system in Rotterdam

参考となるシステムは列車運行の ATS (Automatic Train Stop) や ATC (Automatic Train Control) である。これらのシステムは極めて単純な検知システムで定められたゾーン内に接近した列車を停止したり、減速させたりする制御システムで、センサ誤動作に対して高い頑強性を持っている。上記提案のシステムにはセンサフュージョンで得られたセンサ情報を用いた ATC が導入されている。このような方式を導入した実用システムにロッテルダムの港湾コンテナ搬送システムがある（図 3）。このシステムの AGV は地面に埋設された複数トランスポンダの検出装置を有する。そして面分布するトランスポンダの情報（重心等）から自己位置を同定し、制御システムに送る。制御システムではこの AGV 位置を参照して、接近不可能ゾーンを設定し、他の AGV の接近を禁止することで確実な衝突防止を行っている。

(2) 人への安全性

人への安全性の基本もフェールセーフである。ロボティクスの重要分野の一つに人の認識があるが、本種手法は 100% の認識精度を有することはない。人の検出において誤認識はともかく、検出の失敗は重大な事故を引き起こすため、センシング等のほかに他の方法、例えば非接触 ID カード (IDC: Intelligent Data Carrier) の活用等を併用することが必要である。

(3) マッピング

ロボットが自分の位置を同定することは屋外、特に移動ロボットにおいては非常に重要なことである。ここでもセンシングが重要な役割を果たすが、GPS や IDC を通信手段として活用することによって、自己位置同定精度を上げることができる。これらを地図上にプロットするとロボットどうしの衝突や、人の接近（人に IDC を持たせる）による減速、人の運転する車両の接近（車両に IDC を持たせる）をあらかじめ知ることができる。これらの情報を活用することによってシステムの安全性を向上することができる。

(4) 例外時、異常時

実用ロボットと実験ロボットの最大の違いは例外や異常処理に対する対処があるか否かである。すなわち、実用ロ

図4 Error recovery using fusion control of autonomous and teleoperation system

ロボットでは例外，異常処理は制御システムの中に初めから組み込んでおく必要がある．特に，屋外ロボットは想定できない状況が高い確率で発生すること，また，処理方法もあらかじめ想定できないことが多いため，人の介入と修正を容易にしておくことが不可欠である．有用手段の一つは，電総研で開発された自律遠隔融合制御 [6] をシステムのベースにすることである．このシステムでは前述されるような信頼性の高い自律制御を主として運用されるが，ロボットの制御系に処理不可能な状況が発生した場合には操作者が介入する方式である．本方式の特徴は

- (a) 人の高度な判断が活用できるため，高度な作業が実現できる．
- (b) 自律ベースのため，人の介入後の自律への復起が容易である．
- (c) 人の介入比率が少なければ複数台のロボットを操作できる．

ことである．自律遠隔融合制御はマニピュレータの遠隔操作作用に開発されたものであるが，多くの機能を持つ屋外ロボットのような多機能ロボット等での活用性が高い [7] (図4)．

3. 実用を目指した屋外ロボット

図5に実用を目指したロボットの例と制御システムの特徴を示す．

(a) A・UT マシン

A・UT マシンは，原子炉压力容器の超音波探傷ロボットで探傷壁面への対応をセンシングと運動制御で実現した．センサ精度に応じた制御システムと絶対・相対位置同定システムを導入した．人との干渉は考慮する必要はない．

(b) 道路白線補修装置

人の運転と画像処理とサーボ制御を組み合わせたシステムである．既存の白線をなぞって新しい線を上塗りする．画像処理の信頼性の確保が重要である．人の介入の容易化を図った．

(a) AUT machine

(b) Re-painting machine

(c) Cleaning robot for the sewage plant

(d) Blasting robot for oil tank floor

(e) Out-door vehicle with hierarchy control system

図5 Application example of out-door robot system

(c) 下水場排藻装置

機械的拘束を活用した簡易制御方式であるが，制御システムは階層化することで拡張性を持たせている．

(d) 石油タンク底板ブラスト装置

自律遠隔融合制御でブラストラインのナビゲーションを行う．また，手動との併用を容易化した．

(e) 環境知覚型屋外移動ロボット（管理された環境下での応用）

上述の統合型制御系を導入した。信頼性、安全性を有する。また、周辺物体、人に対するフェールセーフ制御系を導入し、実用的システムを実現した。本格的なシステム実証試験が待たれる。

4. あ と が き

屋外移動ロボットの制御系の解説としては、いささか片寄ったものとなった気もする。しかし、研究の長さのわりに実用例が少ない状況に危機意識を持つとすれば、何か新しい提案が必要である。ここでは、屋外ロボットの実用性は人、物、特に人に対する安全性を作りこむことが最も重要であるとの観点で解説してみた。批判があればそれ自身が本稿の意図することでもある。今後とも実用屋外ロボットの実現に努力していくことが責務であると思う。

参 考 文 献

- [1] Field Robotics Center: <http://www.frc.ri.cmu.edu/>
- [2] National Robotics Engineering Consortium: <http://www.rec.ri.cmu.edu>

- [3] The Australian Center for Field Robotics: <http://www.acfr.usyd.edu.au>
- [4] P. Maes and R.A. Brooks: "Learning to Coordinate Behaviors," AAAI, 1990.
- [5] T. Oomichi et al: "Hierarchy control system for vehicle navigation based on information of sensor fusion perception depending on measuring distance layer," FSR'99 Proc. of the International Conference on Field Service Robotics, 1999.
- [6] 佐藤, 平井: "LARTS/T を用いた言語主導型マスタスレーブマニピュレーション法", 日本ロボット学会誌, vol.2, no.6, pp.526-535, 1984.
- [7] 大道 他: "マルチメディア活用による AGV 遠隔操作装置の開発", 日本機械学会第 75 期通常総会講演会講演論文集 (IV), pp.380-381, 1998.

大道武生 (Takeo Oomichi)

1947 年 8 月 18 日生。1972 年九州大学大学院工学研究科 (動力機械工学専攻) 修士課程修了。同年三菱重工業 (株) 入社。高砂研究所・機器・自動化装置研究室に所属し、原子力用遠隔操作装置を手掛ける。以来、格納容器内移動式軽作業ロボット、極限作業ロボットマニピュレータ等の開発等、知能ロボットの設計開発に従事。日本機械学会、日本原子力学会会員。(日本ロボット学会正会員)