解 説

人間との共存の際の安全確保に関するビジョン技術

Computer Vision Technology for the Safety of Human with Symbiotic Robots

林 健太郎^{*1} 羽 下 哲 司^{*1} 竹 内 浩 一^{*1} 橋 本 学^{*2}

^{*1}三菱電機（株）先端技術総合研究所 ^{*2}中京大学情報理工学部

Kentaro Hayashi^{*1}, Tetsuji Haga^{*1}, Koichi Takeuchi^{*1} and Manabu Hashimoto^{*2}

^{*1}Advanced Technology R&D Center, Mitsubishi Electric Co. ^{*2}School of Information Science and Technology, Chukyo University

1. は じ め に

近年、ロボットとは、例えば生産現場で使用される溶接ロボットのような、いわゆる産業用ロボットアームの形状を持つものにとどまらず、電子制御されている様々な形態のシステムを含んだ広い概念であると考えられている。最近相次いで商品化された人間の形をした会話ロボットや夜間にビルを警備する巡回ロボットなどの非産業用（非製造用）ロボットを含めて、狭義のロボットと定義することにする。

一方、近年ではこの定義を拡張し、人の命令に従い、人の代わりになって特定のタスクを自動的・自律的にこなすものを広義のロボットと定義する考え方もある。この場合、例えばエレベータ、自動運転列車などの輸送機器や、全自動洗濯乾燥機など我々が日々接している機器もロボットに含め得る。RT[†]はこうした広義のロボットに共通する技術あるいは広義のロボットそのものを指す言葉として定着してきている [1]。

広義のロボットは、近代化の進んだ先進国において人々の生産活動や福祉、医療、生活、災害救助、エンターテインメントなどあらゆる分野で重要な役割を果たしていることは疑いようがない。今後もこうしたロボットはますます高度化や量産化するであろうし、加えて発展途上国等、世界的にも今後莫大な需要が発生するものと推測される。

しかしながらロボットが様々な場面で活用されていくに従い、人とロボットが接触する機会も増していく。そうするとロボットが逆に人間に不便を強いたり危害を加えたりなど、人間にとって危険な状況を生み出す可能性も高まる。例えば普段利用しているエレベータも人の呼ぶ指示に応じて自動配車し、行き先ボタンで指示する階床まで人を自動で運ぶというタスクをこなすロボットとみなすこともでき

る。全国で約 63 万台^{††}のエレベーターが稼働していると推定され、1 台あたりの安全性が高くても、どこかで事故が発生する確率がある。

このようにロボットと接触する機会が増えるに従って安全を確保するための技術や対策が重要になっていく。さらにロボットのタスクが複雑・高度化し、人との密なインタラクションが増せば安全確保に必要なとなる技術もまた必然的に高度化していかざるを得ない。そのため非接触で多くの情報を一度に得られるビジョンセンサは極めて有効な手段となりうる。また汎用のタスクをこなすために、いわゆる人型ロボットの研究開発が活発になされているが、こうした人型ロボットにビジョンセンサを採用するのは自然な流れであろう。

また、最初に述べた狭義のロボットと広義のロボットは、形態上の違いは少なくないものの、人間と機械の接点部分に安全確保のキーがあるという点では共通していることから、ロボットビジョン技術としても共通性も高いと考えられる。そこで、本稿では一般的なロボットの安全確保に必要なロボットビジョン技術について要件と技術要素を整理し、関連する技術開発事例を紹介する。

本解説では人間が様々なロボットと関わりを持つなかで、安全確保に必要なロボットビジョン技術について事例を交えながら述べる。まず、人間が危険にさらされる状況を分類する。“ロボット本体とそのタスクの危険性”と“人とロボットとの関係”の視点から分類を試みる。それを踏まえて、それぞれの状況においてどのような技術や対策が効果的であるかを示す。最後に安全確保のために実際に適用されたロボットビジョン技術の事例について紹介する。

2. 安全確保の必要性和現状

以下ではロボットと人間との様々な位置関係・状態における安全確保の必要性を一般論として述べる。また実際の規格例として産業用ロボットの安全性規格動向について述べる。

原稿受付 2009 年 3 月 30 日

キーワード: Extended Robots, Safety Standard of Industrial Robots, Surveillance Area, Human Acts

^{*1}〒 661-0001 尼崎市塚口本町 8-1-1

^{*2}〒 470-0393 豊田市貝津町床立 101

^{*1}Amagasaki-shi, Hyogo

^{*2}Toyota-shi, Aichi

[†]Robot Technology

^{††}2008 年 3 月末現在

2.1 ロボット本体とそのタスクの危険性

ロボット本体の危険性とは、そのロボットが動作する、もしくは存在するだけで人に危険が及ぶ場合を指す。例えば産業用に広く用いられている作業用ロボットアームはそれ自体が数十～数百キロ程度の重量を持つため、動作中のアームが人体に衝突すると危険である。

一方でロボット本体が軽量・コンパクトであれば人間に危害が及ぶ可能性がなく、本質的に安全である。例えば屋内の床掃除を自動で行うアイロボット社[†]製の“ルンバ”は高さ92[mm]と低く、3.7[kg]の軽量であるためダンパーによる接触時自動停止の機能で十分安全である。また、愛玩動物の機能を実現する目的で開発されるロボットは、その目的から本質安全でなければならず、また実際にそのような設計製造されている。このようなロボットにSONY社製“アイボ”[‡]や、産業技術総合研究所が開発した“パロ”[‡]などがある。

このように特定のタスク向けのロボットを本質安全に設計するのが安全面においては最も望ましい。しかしながら、タスクの内容やロボットへの汎用性を求めると大型で重量も増し、危険な場合が発生する。

2.2 人とロボットの関係

ここでは人とロボットの関係とは互いの位置関係および内部、外部状態を指す。

互いの位置関係は人の位置で考えればロボットの内部か、ロボットの外部で近接か、遠隔かの大きく三つに分類することができる。前項で述べたように、ロボット本体が危険な場合は特にロボットの外部で近接にある場合に危険性が高まると考えられる。次いで危険なのがロボットの内部であり、ロボットの遠隔にあれば最も安全である。

ロボット本体が安全であっても、その状態が危険を伴う場合がある。例えば高所、高温、高圧等の環境でタスクを行うロボットは、本体が安全であってもタスクに伴う危険がある。この場合でもロボットの遠隔にいれば問題にはならない。しかし例えば前述のエレベータでは人や物を高所に移動させるというタスクであり、必然的に人はエレベータの中、すなわちロボットの内部に存在しなければならない。したがって万一ロープが切れた場合でも内部の人が安全であるために、機械式の非常止め装置が設けられており落下を防止する^[4]。しかしながらこうした状況はロボット本体の状態に依存するため、遠隔操作による安全確保や機械式の安全装置などの本質安全に準じる対策がなされることが多い。

また産業用、民生用を問わず人と共同で作業するロボットも存在する。例えば人と共同でパレット搬送を行う産業用ロボットや、家庭内で家事を行うロボット^{††}がある。こ

れらのタスクでは重量物の移動や汎用性が求められるため、本体をコンパクトにするような本質安全を追求することが現状では困難であり、かつ人がロボットの近接に居る可能性がある。したがってビジョンセンサを含むセンシング技術を応用し、人物がロボットの近接に居る場合はその安全を確保しなければならない。

2.3 産業用ロボットの安全性規格動向

現実にロボットが活用されているのは工場などの製造施設であり、そこには生産管理等の目的で常時作業者が存在していることから、人とロボットの接触による危険性が想定される。そこで、産業用ロボットの安全性に関する国際的な規格策定が、ISOによって進められている^{[5]～[7]}。文献^[7]によれば、すでにISO 10218-1:2006 (Robots for industrial environments—Safety requirements—Part1:Robot)が発行されており、Part2についても検討されている。

この規格では、ロボット単体およびそれを取り巻くロボットシステム全体を対象にするため、異常発生時のロボット停止機能、減速機能、エネルギー源の遮断など、規格の内容は多岐にわたっているが、そのなかにロボットと人の共存協調に関する規格がある。例えば、現行規格では、人がロボットの動作領域を共有する空間内に存在するときはロボットを保護停止しなければならない。また、人がロボットの作業空間から離れた場合にはロボットは自動運転によって再起動してもよいことになっている。

すなわち、ロボットが人との距離を監視し、その結果によってロボットを制御するようなインテリジェントな環境認識システムが求められているといえる。現状では、例えば多数の光センサ群によるライトカーテンによって人の接近を検知している^[6]、映像セキュリティの分野で研究されているカメラによる人物の位置や挙動の計測・認識システムを適用することができれば、装置コストや設置の簡便性の点から利点が多い。

3. 安全確保に有効なビジョン技術

2章で述べたように、ロボット本体が本質安全でなく、かつ人物が近接に居る可能性がある場合にセンシング技術を応用した安全確保の必要性が生じる。

安全機能と監視エリアに着目し、安全確保に応用可能な技術の定性的な分類を行ったものを図1に示す。(a)～(c)に記すエリアセンサとは二次元もしくは三次元空間上を計測するセンサを指し、カメラやスキャン型のレーザ測距センサなどが相当する。例えば、センサから対象までの距離が10[m]以上で、監視エリアの大きさが数十[m]四方の場合にエリアセンサが用いられる。また局所を観測するセンサを多数設置してエリアをカバーするようなセンサシステムであってもよい。(d)の人感センサやIDタグなどは局所領域の検知に特化したセンサを指す。(e)はセンサを特定し

[†]<http://www.irobot-jp.com/>

^{††}<http://www.irt.i.u-tokyo.ac.jp/news/pressrelease081024.pdf>

図1 安全機能と監視エリアに着目した安全確保に応用可能な技術の分類

ていないが、カメラや携帯機器に組み込まれたセンサ等が相当する。ここではセンサから対象までの距離が数[m]以内、監視エリアの大きさが数[m]四方程度の場合を想定している。

この分類は筆者らの提案に過ぎないが、物理セキュリティを含む広い意味での安全技術の分類に役立つ[8]。特に監視エリアによる分類軸は、技術のみならずセンサそのものの適用範囲の制約も受けることから、重要な軸であると考えられる。

このなかでビジョン技術が特に有効なのは、(a)～(c)のエリアセンサによる人物検知、人物追跡、人物行動検知であると考えられる。また観測が局所であっても人物の状態検知などより高度な判断が必要な場合にはビジョン技術が有効となる可能性がある。

(d)の局所検知に関してもビジョン技術が有効である場合があるが、(d)の分類では緊急度が高く即時性、例えば数[ms]以内の反応が求められたり、確実な認識が求められる場合がある。ビジョン技術の応答性、認識精度は研究開発により日々向上しているが、これに比して専用に設計されたセンサは応答性、精度およびコスト面で優れていることが多い。

このように今後も適材適所で様々なセンサシステムが適用されていくものと考えられる。ビジョン技術はエリアセンサを必要とする場合に有効となる技術で、広域や、予測予防が必要となる場合に必要とされる。今後ロボットが広く普及していくに従い、ビジョン技術がますます必要となることが予想される。

4. ビジョン技術の適用例

これまでに、どのような状況で安全確保が必要か、また有効なビジョン技術の範囲について述べた。ここでは実際のビジョン技術の適用例を示す。

4.1 エリアセンサによる人物追跡・行動検知

リアルタイム処理で画像中の移動物体の軌跡を解析するためには限られた演算リソースの中で精度の高い移動物体の抽出と追跡が必要とされる。最もよく用いられる方法は、動きのある領域を抽出し、ノイズを除去して移動物体を領域統合

図2 人物の追跡、およびその行動の検知例

し、フレーム間に対応付けて追跡する、というものである。

混合正規分布モデルを用いた適応型背景差分処理と移動物体セグメント内部の色ヒストグラムを用いた Mean-shift 追跡処理[9]を組み合わせて物体を追跡した結果の例を示す。図2は駐車場における人物追跡結果の例である。監視領域の範囲はおよそ20[m]四方であり、この程度の監視領域サイズではカメラによる物体追跡が有効な手段となる。

さらに検出された軌跡の情報を分析して、対象物のまわりをうろろしていたり、本来入ってはならない領域への進入を検知したりといった行動の検知が可能である[10]。図2では、自動車のまわりをうろろする人物の様子を示している。

このようにビジョン技術を用いることで、広域での人物追跡や人物行動検知が可能となる。

4.2 人物状態検知

先に述べたようにエレベータの落下危険性については機械式の落下防止装置を含む様々な装置で対応できる。一方で、昇降中のエレベータは扉が閉ざされて密室状態になることから、犯罪を誘発したり病人が一人で倒れたままになったりする可能性があった。エレベータという局所エリア、かつ内部の人物や物体の状態検知が必要であることから、この問題は図1(e)に属する。

この問題を解決するため、エレベータかご内に設置した監視カメラ画像から、その定常状態を学習してそこから逸脱する暴力的動作などの突発的な非定常動作（以下暴れと記す）や、かご内に必要以上に長時間滞在する人物や物体をリアルタイムに検知する技術が開発されている[11][12]。突発的な非定常動作は定常時のオプティカルフローを学習して、そこからの逸脱の度合いを独自の指標で求めて検出する。また長時間滞在はテクスチャ背景差分[13]により前景物体を抽出し、その存在時間から検出する。かご内画像の解析の様子を図3に示す。本手法では実際の暴れシーンの80%を検知し、暴れでないシーンの過剰検知率は10%以下である。また人物や物体の長時間滞在を99%で検知し、人物・物体不在時の過剰検知率は1%以下である。

図3 エレベータかご内画像解析例。左下の半透明マスク領域がテキストチャ背景差分による前景，右上がオプティカルフロー解析結果，右下が非正常動作の大きさを時系列で示すグラフ

その後同様の目的で CHLAC 技術[14]を応用し，かご内の暴れを検出する技術が開発されている[†]。

これらはエレベータという局所エリア内の，暴れや長時間滞在という異常状態を検知して，乗降者の安全・安心を向上させるビジョン技術の適用例である。

5. おわりに

本解説では自動運転の輸送機器などを含む広義のロボットを対象に，ロボットに必要な安全確保の状況，規格動向，およびそれらに対応する技術を概観し，そのなかでビジョン技術の役割について述べた。またビジョン技術の実際の適用例を示しながら，今後の方向性について述べた。

今後ロボットは，様々な形態をとりながら人間と共生していくものと思われる。ロボットの複雑化，汎用化，知能化が進むにつれ，ロボットの本質的な安全とは何かをより

明確にしていく必要があるとともに，効果的かつ効率的な対策が必要となると考えられる。

参考文献

- [1] 田所諭：“レスキューロボットの現状と未来”，電子情報通信学会誌，vol.92，no.3，2009。
- [2] 久保明教：“媒介としてのテクノロジー：エンターテインメント・ロボット「アイボ」の開発と受容の過程から”，文化人類学，vol.71，no.4，pp.518-539，2007。
- [3] 柴田崇徳：“人はロボットに癒されるか—アザラシ型ロボット「パロ」の開発と評価”，人間生活工学，vol.3，no.4，pp.16-20，2002。
- [4] 船井潔：“エレベーターの安全・快適技術”，JATSS Review，vol.27，no.2，pp.31-39，2002。
- [5] 日本ロボット工業会：平成19年度サービスロボット運用時の安全確保のためのガイドライン策定に関する調査研究報告書，2008。
- [6] 橋本秀一：“産業用ロボットおよびロボットシステムの国際安全規格の動向”，日本機械学会誌，vol.110，no.1067，pp.30-33，2007。
- [7] 橋本秀一：“第19回 iso10218（ロボットの安全性）プロジェクトチーム会議報告”，ロボット，vol.186，pp.59-64，2009。
- [8] 林健太郎，羽下哲司，関真規人，笹川耕一：“映像監視における人物位置行動検出技術”，情報処理学会論文誌 コンピュータビジョンとイメージメディア，vol.47，no.SIG9（CVIM14），pp.12-20，2006。
- [9] R. Collins：“Mean-shift blob tracking through scale space,” IEEE Computer Vision and Pattern Recognition, 2003。
- [10] 羽下哲司，佐藤和也，橋本学：“移動物体の軌跡情報に基づく監視映像のオンライン，オフライン同時検索”，電気学会論文誌 C，vol.127，no.9，pp.1366-1374，2007。
- [11] 関真規人，林健太郎，谷口博康，橋本学，笹川耕一：“リアルタイム人物暴れ検出システム”，画像センシングシンポジウム講演論文集，pp.273-278，2004。
- [12] K. Hayashi, M. Seki, T. Hirai, K. Takeuchi and K. Sasakawa: “Violent action detection for elevator,” Journal of Robotics and Mechatronics, vol.18, no.6, pp.772-778, 2006。
- [13] M. Seki, T. Wada, H. Fujiwara and K. Sumi: “Background subtraction based on cooccurrence of image variations,” Intl. Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition, vol.2, pp.65-72, 2003。
- [14] 南里卓也，大津展之：複数人物画像からの異常動作検出，Technical Report PRMU2004-77，電子情報通信学会技術研究報告，2004。

林健太郎 (Kentaro Hayashi)

1995 年大阪大学工学部電子制御機械学科卒業，1999 年同大学大学院工学研究科博士課程修了。博士（工学）。同年三菱電機（株）入社。現在先端技術総合研究所にてセキュリティ用センサ，動態管理システム技術などの研究開発に従事。2006 年電機工業技術功績者表彰発達賞受賞。電子情報通信学会会員。

竹内浩一 (Koichi Takeuchi)

1985 年大阪大学工学部応用物理学科卒業，1987 年同大学大学院工学研究科修士課程修了。同年三菱電機（株）入社。現在先端技術総合研究所にてデジタル放送システム，セキュリティシステムなどの研究開発に従事。映像情報メディア学会会員。

羽下哲司 (Tetsuji Haga)

1989 年大阪大学基礎工学部制御工学科卒業，1991 年同大学大学院基礎工学研究科修士課程修了。同年三菱電機（株）入社。現在先端技術総合研究所にてセキュリティ監視用画像処理システムの研究開発に従事。博士（情報科学）。電子情報通信学会，情報処理学会各会員。

橋本 学 (Manabu Hashimoto)

1987 年大阪大学大学院（溶接工学）前期課程修了。同年三菱電機（株）入社。先端技術総合研究所等にてロボットビジョン，三次元認識，パターン認識，ヒューマン認識などの研究に従事。2008 年より中京大学情報理工学部教授。1998 年度日本ロボット学会実用化技術賞ほか受賞。電子情報通信学会，IEEE 等各会員。

（日本ロボット学会正会員）

[†]http://www.hbs.co.jp/solution/security_up/security_up06.html