

6. 結 論

梅崎重夫*, 池田博康*

6. Conclusion

by Shigeo UMEZAKI* and Hiroyasu IKEDA*

Abstract; This specific research proposed new fundamental safety technologies for man-machine cooperative working systems. Results obtained from this research are summarized as follows.

(1) Clarification of the man-machine collaborate conditions and the inherent safe structure

In this subject, a pain tolerance was proposed as the dimension of force and the maximum deformation for examining the specifications of human-collaborative robots. The force output characteristics were defined the safe force output characteristics of robot actuators on the basis of the pain tolerance, which was a minimum of 57N.

According to the above result, a normally closed type clutch using magnetorheological suspension and rare-earth permanent magnets was proposed in this report (Chapter 2) as a safety device for human-collaborative robots. Examining the characteristics of this clutch under the various input current conditions, the experiment results showed sufficient control and safety performance.

(2) Development of mobile object follow-up techniques applied with environment recognition technology

In image recognition technology, one cause of failure in detection is error estimation of geometric features. The failure in detection is hardly acceptable to a vision system for safety. So object detection method without geometric features was developed. This method detects object zones with a volume intersection method using multiple omni-directional vision sensors. Another feature of this method is to estimate a larger zone than real area of target. It is considered that this method has safety side feature.

Besides, a normality confirmation of a vision system is required for safety. The confirmation includes calibration of camera, function of signal processing circuit and so on. So the confirmation method using a reference pattern created by a light source instead of the floor or a wall filled with a reference pattern described in IEC/TR 61496-4 was proposed. The normality of the camera system is verified by taking a picture of the pattern projected onto the monitor by timesharing and checking the image.

A communication method for mobile robots by image recognizing gestures was also discussed.

(3) Establishment of accident prevention strategy for hazardous point nearby operations

In this subject, it is clarified that 44% cases of fatal accidents are caused by accidents related to "hazardous points nearby operations" and 36% cases related to operations in large product lines.

A new risk reduction strategy which has new concept of the accident prevention division (0:restriction of energy, 1:separation and fixation of human and machine space, 2:machine stop in hazardous conditions, 3:limitation of speed of machine moving parts(3a) or human body(3b)) and risk reduction division (I:safe, II:uncertain or ALARP, III:hazardous) was proposed. This result can be used as a compliment of ISO12100-1. A new safety system for wood cutting machines which has new movable guard and human detection equipment using RFID was also proposed.

Results obtained from this research were applied to many safety standards such as ISO10218-1, ISO13855, IEC 61496-4 and article 28-2 of Japan industrial safety and health law.

Keywords; Man-machine system, Collaboration, Inherent safety, Environment recognition, Risk assessment, Protective measure, Safe design, Safety control

* 機械システム安全研究グループ Mechanical System Safety Research Group

1. 研究成果の要約

本研究では、人間と機械が共存・協調して作業を行なうシステムを対象に、基礎的安全技術の確立を目的とした技術開発を実施した。これらの成果は次のように要約できる。

1.1 人間と機械の共存・協調条件と本質安全構造の解明

本研究課題では、人体痛覚耐性限界の測定とその測定結果に基づく人間協調型ロボットの安全設計指標を提案するために、「人間と協調可能なロボットの本質的安全設計手法と設計指標の提案」(中間報告書の第2章)と「人間協調型ロボットの機械的刺激に対する人体痛覚耐性限界の測定」(中間報告書の第3章)を報告した。

このうち、前者では、協調型ロボットの安全設計指標とするために、力に関する指標として人体の痛覚耐性値(静的挾圧限界、動的衝撃限界)を提案するとともに、位置に関する指標として痛覚耐性値の別の表現である皮膚の最大許容変位量を提案した。

また、後者では、当研究所が独自に開発した挾圧力実験装置を利用して成人男子を対象に痛覚耐性値に関する実験を行い、最小値(最悪値)として57Nを得た。また、痛覚耐性値と許容最大変位量の関係を調べたところ、個人差によるばらつきが少なく、これらの値が協調型ロボットの安全性評価指標として妥当であることが判明した。

以上の検討結果を踏まえた上で、本最終報告書では本質安全関節機構を備えたマニピュレータを考案し、その基礎的なトルク制御特性を「人間共存型ロボットの安全なトルク制御のための磁気粘性流体を用いたノーマルクローズ型クラッチの開発」(本最終報告書の第2章)として報告した。

この報告では、人間共存型ロボットの関節軸に必須の安全条件を明らかにし、これを達成するデバイスとして、可変トルクリミッタ及び保持ブレーキとして機能する希土類永久磁石と磁気粘性流体(MR流体)を用いたノーマルクローズ型(NC型)クラッチを開発した。このクラッチの実験結果とシミュレーション結果との比較から、所用の基本制御性能が実現されていることを確認するとともに、保護装置としての基本安全性能を評価した。

1.2 環境認識技術等を応用した移動体追跡手法の開発

本研究課題では、全方位視覚センサによる移動体存在領域検出手法とジェスチャー認識を用いたオペレータと移動ロボットとのコミュニケーション手法を提案するために、「全方位視覚センサによる移動体存在領域検

出手法」(中間報告書の第4章)と「オペレータのジェスチャー認識を利用した移動ロボットとのコミュニケーション手段」(中間報告書の第5章)を報告した。

このうち、前者では、画像処理技術を利用して移動体検出を行う場合の最大の問題であるオクルージョン(画像処理装置を用いて複数の移動体を検出する場合に、ある移動体が他の移動体の背後に隠れるなどして検出できなくなる現象)を考慮した新たな移動体検出アルゴリズムを提案した。また、後者では、作業者と移動ロボット間の新たなコミュニケーション手段として、16種類の基本ジェスチャー系からなるジェスチャー識別法を提案した。

以上の検討結果を踏まえた上で、本最終報告書では画像センサの機能正常性を確認する手法の基礎的検討を「人間と機械が混在する場での移動体検出手法と画像センサ正常性確認手段の検討」(本最終報告書の第3章)を報告した。また、ジェスチャーの誤認識に起因する災害を減少させるシステムの設計手法を「ジェスチャー認識を利用した移動ロボットとのコミュニケーション手法の提案-誤認識リスクを低減するための設計手法-」(本最終報告書の第4章)として報告した。

このうち、前者では、画像センサの機能正常性を確認するために、ビームスプリッタを用いてリファレンスボタン光と監視光を切り替え入力することで、安全確認と正常性確認と交互に実行する方法を提案した。

また、後者では、ジェスチャーの誤認識の減少に繋がる手法を基本設計、機能設計及びパラメータ設計の3ステップに分けて検討した。このうち、基本設計では本論文で提案する単純化原理が有効と考えられる。また、機能設計及びパラメータ設計では、ジェスチャーの数値化モデル及びジェスチャー間距離モデル(GDMと呼ぶ)が有効と考えられる。

1.3 危険点近接作業に対する災害防止対策の確立

本研究課題では、産業現場で多発している人間機械協調システムでの労働災害を防止するために、「産業機械の労働災害分析」(中間報告書の第6章)を実施した。また、この結果を基に、災害が特に多発していることが判明した作業の災害防止戦略を確立するために、「危険点近接作業の災害防止戦略に関する基礎的考察」(中間報告書の第7章)及び「複数作業者が大規模生産ライン内で行う作業を対象とした災害防止戦略の基礎的考察」(中間報告書の第8章)を報告した。

このうち、中間報告書の第6章では、産業機械で発生した死亡労働災害129件(挟まれ・巻き込まれ災害に限る)を対象に分析を行った。その結果、発生した災害は危険点近接作業に関連した災害が44%、大規模生産ラインなどの広大領域内で発生した災害が36%などであ

り、これらの作業に対する対策が重要であることが判明した。

このため、中間報告書の第7章では、危険点近接作業の災害防止戦略を検討した。この戦略では、リスク管理区分や災害防止区分などの新たな概念を導入することで、危険点近接作業を含む災害防止戦略の明確化を図った。また、中間報告書の第8章では、複数作業者が大規模生産ライン内で行う作業の災害防止戦略を提案した。この戦略では、作業者のクラス分け（作業指揮者、指名作業者、非指名者）と作業行動のタイプ分け（作業者のライン内への進入、作業者による再起動）のマトリックス表示によって、ハザードである人間挙動の影響を分析する方法などを提案した。

以上の検討結果を踏まえた上で、本最終報告書では中間報告書で不十分であった危険点近接作業固有の災害防止条件の解明を進めた。また、この知見を利用して、危険点近接作業の典型例である丸のこ盤で行なう作業を対象とした保護装置を提案した。これは、当所で新たに考案した回転式の接触防止ガードと、RFID技術を活用した人体検知装置を備えている。以上の結果は「危険点近接作業の災害防止戦略に関する基礎的考察－危険点近接作業の災害防止条件の解明と木材加工用機械への適用－」（本最終報告書の第5章）としてまとめた。

以上の成果は、日本機械学会論文集を初めとして国内外の論文誌に22編が採用された。また、国内の学会発表85件、海外の学会発表33件、著書2件、解説等31件を公表し、特許5件が登録された。

2. 研究成果の活用

本研究の成果は次のような項目に活用された。

1) ISO/IECなどの国際安全規格への反映

人間と機械の共存・協調条件と本質安全構造の解明に関する成果が、ISO10218-1（産業用マニピュレーティングロボット－安全要求事項）、ISO13855（機械の安全性－人体各部の接近速度に対応した保護機器の位置決め）に反映された。

また、環境認識技術等を応用した移動体追跡手法の開発に関する成果が、IEC61496-4（機械類の安全性－電氣的検知保護設備－第4部：映像利用保護装置VBPDを用いる設備に対する要求事項）に反映された。

2) 労働安全関係法令と労働災害防止計画への反映

危険点近接作業を対象とした災害防止対策の確立に関する成果が、2006年の労働安全衛生法の改正（法第28条の2の制定）とこれに伴う機械の包括的安全基準の改定作業に反映された。

また、この研究で得られた労働災害の分析結果は、第10次及び第11次労働災害防止計画の基礎データとして

活用された。

3) 安全化推進のための基盤技術としての活用

本研究で公表した痛覚耐性限界値、本質安全間接機構を備えたマニピュレータ、環境認識に基づく移動体検出と正常性確認手法、危険点近接作業のリスク低減戦略、丸のこ盤の保護装置などは、現場の安全化を推進する際の重要な基盤技術として活用できると考えられる。

また、本研究で提案した危険点近接作業の災害防止戦略はISO12100-1（機械の安全性－基本概念、設計の一般原則－第1部：基本用語、方法論）を補完する戦略としても活用できると考えられる。

3. 今後の課題

今後は、本研究で得られた成果の高度化を図るとともに、現在、産業安全分野で話題となっている様々な安全関連技術を対象に引き続き研究開発を推進して行きたい。

このうち、人間機械協調システムに関連する今後の技術課題として特に重要と考えられるのが、サービスロボットや統合生産システム（IMS）を対象とした安全技術の確立である。特に、これらのシステムでは複雑なソフトウェアやサーボドライブによる制御を伴っており、これらを対象とした機能安全技術の高度化が不可欠である。

また、今後、本研究で開発した安全技術が社会で広く活用されるためには、労働災害防止と国際競争力の強化という両方の視点を踏まえた対応が必要である。特に、後者では、安全技術の標準化による国際規格提案の促進、安全技術の活用に熱心な事業者などに対する経済的インセンティブの付与、認証制度の整備などが不可欠であり、これらの点も踏まえて今後の研究開発を推進して行く必要がある。

本研究で得られた成果が、現場の労働災害防止に取り組まれる方々の参考になることを期待する。

謝 辞

本研究の実施にあたって御指導戴いた明治大学の 向殿政男 教授、日本大学の 中村英夫 教授、長岡技術科学大学の 杉本旭 教授と蓬原弘一 教授、NPO安全工学研究所の 加部隆史 氏、及び平成19年度まで中央労働災害防止協会 国際安全衛生センターに所属していた糸川壮一 氏に深く感謝致します。

また、本研究の試作に御協力戴いた前重点研究支援協力員の 小林茂信 氏、ロックウェルオートメーション・ジャパンの三平律雄 氏に深く感謝致します。

（平成20年11月17日受理）