

1. 序 論

池田博康*, 梅崎重夫*

1. Introduction

by Hiroyasu IKEDA* and Shigeo UMEZAKI*

Abstract; Recently, along with the technical innovation in robotics, human-collaborative robots, mobile robots and other similar robots have begun to be introduced in industrial sites. The introduction of these robots is expected to increase rapidly as the time passes. Since these robots require mutual approach and direct contact between humans and machines, the conventional safe measures, such as the isolation of humans and machines from each other with fences or enclosures, are no longer applicable and some new safety technology should be developed instead.

On the other hand, the conventional operation of processing, adjustment, trouble-shooting, maintenance, inspection, repairing, cleaning or other type operations that require humans to approach machines without stopping the machine moving parts (hazardous point nearby operation) are also important operations of the man-machine collaborative working system. However, since the conventional safe measures are not applicable, fatal industrial accidents occur frequently even today, and the development of new safety technology calls for urgent attention.

To meet the above needs, a project research under the theme of the "Research on Fundamental Safety Technologies for Man-Machine Cooperative Working Systems" started in 2002, promoting the following sub-themes:

- (1) Clarification of the man-machine collaborative conditions and the inherent safety structure.
- (2) Development mobile object follow-up techniques applied with environment recognition technology.
- (3) Establishment of accident prevention measures for the hazardous point nearby operation.

This midterm report describes experimental results and accident prevention strategies performed from 2002 to 2004 mainly. Chapter 2 and 3 are related to the research subject (1). Chapter 2 suggests a human pain tolerance as a safe design index for human-collaborative robots. An inherently safe design method based on its index is also suggested. Chapter 3 shows experimental results of the human pain tolerance. The worst limitation of pain tolerance is clarified to be 57.7N. Chapter 4 and 5 are related to research subject (2). Chapter 4 suggests an object zone detection algorithm considering the occlusion problem. Chapter 5 shows a gesture recognition method as a new type of human-robot communication.

From Chapter 6 to Chapter 8 are related to the research subject (3). Chapter 6 shows a result of fatal accident analysis caused by industrial machines. The result of this analysis is that 44.2% cases of fatal accidents are related to hazardous point nearby operations, 35.7% cases are related to operations in large production lines and 12.4% cases are related to a erroneous machine start of co-operators. Chapter 7 suggests an accident prevention strategy of the hazardous point nearby operation. A risk management division, an accident prevention division and a supporting protective device are suggested as a new concept of its strategy. Chapter 8 suggests an accident prevention strategy for the operation executed by multiple operators in large production lines. The matrix expression of operator's "CLASS" and human's action "TYPE" is suggested as a new method for the hazard analysis of human actions.

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 and System Safety Research Group

1. はじめに

近年、ロボット工学をはじめとする先端技術分野では、人間と連携して作業を行う協調型ロボットや移動ロボットなどの開発が進められている。この分野は将来の10兆円産業とも言われており、今後、これらのシステムの産業現場への急速な導入が見込まれる。しかし、現状では、安全技術に関する十分な研究開発が実施されていないため、これらのシステムの産業現場への導入に困難を生じている。

このため、産業安全研究所では、人間と機械が共存・協調して作業を行うシステム（以下、人間・機械協調型作業システムと呼ぶ）を対象に、安全方策の検討を進めてきた。しかし、これらのシステムでは、人間と機械の接近や直接接触を前提とするために、柵や囲いによって人間と機械を隔離するといった従来型の安全方策は適用できず、新しい安全技術を構築する必要がある。

一方、作業者が運転中の機械に近接して加工、調整、トラブル処理、保全、検査、修理、清掃などを行う作業（以下、危険点近接作業と呼ぶ）も、人間・機械協調型作業システムの重要な形態と考えられる。この作業でも、従来型の安全方策は適用できない場合があるために、依然として労働災害が多発しており、新しい安全技術の開発が急務となっている。

以上の理由から、プロジェクト研究「人間・機械協調型作業システムの基礎的安全技術に関する研究」が平成14年度から開始され、次のサブテーマについて研究を進めている。

- 1) 人間と機械の共存・協調条件と本質的安全構造の解明
- 2) 環境認識技術等を応用した移動体追跡手法の開発
- 3) 危険点近接作業に対する災害防止対策の確立

以上の研究の実施によって、人間・機械協調型作業システムを対象とした基礎的安全技術の確立を目指す。

2. 研究概要

本研究では、平成14年度から18年度の5年間で、以下の課題について研究を実施することとしている。

1) 実態調査

製造業などで使用されている人間・機械協調型作業システムを対象に、労働災害の発生態様、安全技術の現状、安全方策実施上の問題点などについて調

査を行う。

2) 人間と機械の共存・協調条件と本質的安全構造の解明

人間と機械との直接接触を伴う共存・協調作業を対象に、人間と機械が直接接触しても災害を生じることのない人体挟圧限界値を実験的に解明する。

また、この結果を協調型ロボットの安全設計指標として利用する戦略を提案する。さらに、人間と機械の直接接触を前提とした本質的安全構造を提案する。

3) 環境認識技術等を応用した移動体追跡手法の開発

広大な領域内を移動する移動型機械設備を対象に、全方位視覚センサを用いた移動体の存在領域検出手法、及び移動体追跡を目的としたパターン認識手法を提案する。

また、多様な作業環境に適用可能な環境認識用ソフトウェアを開発するとともに、監視カメラの配置方法について検討を行い、移動体追跡装置を開発する。

さらに、移動型機械設備におけるマンマシン・インターフェースの改善手法として、オペレータのジェスチャ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を検討する。

4) 危険点近接作業に対する災害防止対策の確立

災害の多発している危険点近接作業と複数作業者が大規模生産ライン内で行う作業を対象に、災害防止戦略とリスクアセスメント手法を提案する。

また、木材加工用機械などで行われている危険点近接作業を対象に、最新の計測制御技術を応用した安全装置を開発する。

3. 本報告書の構成

本中間報告書は、主に平成14年度から平成16年度に実施した研究の中から、産業現場で活用できる実験結果や災害防止手法をまとめたものである。なお、中間報告では実験結果や災害防止手法を中心に報告し、最終報告では産業現場への応用を目的とした開発と安全性評価を中心に報告する。

3.1 人間と機械の共存・協調条件と本質的安全構造の解明

本報では、前記2)に該当する研究として、「人間協調型ロボットの本質的安全設計手法と安全設計指標の提案」(第2章)及び「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」(第3章)を報告した。

このうち、第2章では、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を提案し、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、第3章では、当研究所が独自に開発した挟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57.7Nを得た。さらに、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。

3.2 環境認識技術等を応用した移動体追跡手法の開発

本報では、前記3)に該当する研究として、「全方位視覚センサによる移動体存在領域検出手法」（第4章）と「オペレータのジェスチャ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」（第5章）を報告した。

このうち、第4章では、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。この方法では、複数の全方位視覚センサを利用して各センサが検出した存在方位角度を重ね合わせることで、オクルージョンの発生を防止する。本章では、この方法でオクルージョンの発生が防止できることをシミュレーションにより示し、安全性を検証した。

また、第5章では、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、3次元数値モデル表現による基本ジェスチャ系を提案した。

以上の提案は、移動ロボットだけでなく、災害の多発しているクレーンや荷役運搬機械などの移動式機械設備にも応用できると考えられる（たとえば、荷役運搬機械が走行する領域の安全確認や、クレーン作業が行う合図の確認など）。

3.3 危険点近接作業に対する災害防止対策の確立

本報では、前記4)に該当する研究として、「産業機械の労働災害分析」（第6章）、「危険点近接作業の災害防止戦略に関する基礎的考察」（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」（第8章）を報告した。

このうち、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・巻き込まれ災害と激突され災害に限る）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44.2%、大規模生産ラインなどの広大領域内で発生した災害が35.7%、他の作業者が誤って機械を起動したために発生した災害が12.4%であり、これらのおのいずれかに関連した災害で全体の3分の2（65.1%）を占めていることが判明した。

第7章では、死亡労働災害の44.2%を占めている危険点近接作業の災害防止戦略を提案した。この戦略では、リスク管理区分、災害防止区分、及び支援保護装置という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、不確定性を考慮したリスク概念の再構築や、機械作業を対象とした演繹的災害防止対策も併せて提案した。この結果は、ISO12100を補完する戦略としても活用できると考えられる。

第8章では、死亡災害の39.5%に関連する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、指名作業員、非指名者）と作業行動のタイプ分け（作業員のライン内への進入、作業員による再起動）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を提案した。また、レーザー装置などを利用した直接監視方式の有効性と、キー・プラグなどを利用した間接監視方式の問題点も考察した。この結果は、現在検討が進められているISO11161などにも応用可能と考えられる。

今後は、産業現場への応用を目的とした開発と安全性評価を中心に研究を進めていく予定でいる。

以上の成果が、人間・機械協調型作業システムの災害防止対策に広く活用されることを期待する。

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、北九州市立大学の 杉本旭 教授、長岡技術科学大学の 蓬原弘一 教授、および中央労働災害防止協会の 条川壮一 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支援研究員の 小林茂信 氏に深く感謝致します。

（平成17年11月14日受理）