

論文審査の結果の要旨および担当者

報告番号	※ 甲 第 13615 号
------	---------------

氏 名 KIM Eugene

論文題目

A study on robust speed and separation monitoring for risk estimation of human hand intrusion
(人間の手の侵入のリスク見積もりのためのロバストな速度と分離のモニタリングに関する研究)

論文審査担当者

主査	名古屋大学	教授	山田 陽滋
委員	名古屋大学	准教授	岡本 正吾
委員	名古屋大学	教授	鈴木 達也
委員	名古屋大学	教授	村瀬 洋

論文審査の結果の要旨

KIM Eugene君提出の論文「A study on robust speed and separation monitoring for risk estimation of human hand intrusion（人間の手の侵入のリスク見積もりのためのロバストな速度と分離のモニタリングに関する研究）」は、人間とロボットが協調して組み立て作業を行う生産システムを対象として、速度と分離間隔の監視機能（Speed and separation monitoring：以下SSM）を利用する中で、人間とロボットの干渉する確率を定量的に評価できるようにし、またロボットの潜在的な暴走を考慮した上で人間との配置関係を論じた上で、新たに開発した3次元センサを導入して生産性を高めることができることを検証した研究に関するものである。本論文は5つの章で構成されている。

第1章では、研究背景と関連研究を説明している。現在、製造現場では人間とロボットが協調作業を行うことができるような柔軟な生産システムが要求されている。この主な理由は、従来の生産現場では、作業者の安全を確保するために、人間からロボットを隔離するための安全柵等を施さざるを得ず、空間的な無駄が増えて生産性の向上が制約を受けるためである。人間とロボットの協調作業システムでは、この安全柵を取り除くために国際安全規格に準拠し、適切なSSM機能を要求される安全度水準で構築すべきであり、多様な研究が展開されてきている。本章では、非接触の検知機能として、人間の速度と分離監視機能について説明し、関連する研究を紹介する。そして、これらと比較した本研究の独創的な点を研究目的とともに述べた上で、第2章以降の各章の構成について説明する。

第2章では、干渉理論と保護間隔距離（Protective Separation Distance：以下PSD）を用いて、人間の手の干渉確率を3次元的に見積もる方法を紹介している。干渉理論を使用すると、二つの確率分布の重なる部分の確率を計算することができる。従来の干渉理論と異なり、時間を考慮した干渉理論を適用し、人間の手の干渉確率を推定する方法を紹介する。次に、10人の被験者を対象としてバッテリー組み立て作業を人間とロボットが協調して作業する実験を実施し、干渉理論を用いて人間の手の干渉確率を見積もった。結果として、PSDへの人間の手の干渉を定量的に評価することができた。これは、従来、SSM機能を用いるときにはPSDとして安全な距離が維持できなかった場合、ロボットを単純に停止する必要があったが、干渉確率を評価ができるようになったため、リスクに基づいて、ロボットの運転状態を変えることができるようになるということの意味する。したがって、より生産性の高い協調作業が期待されるようになる。

第3章では、ロボットの暴走距離と接触エネルギーを考慮したPSDを説明している。まず、人間とロボットが近い距離で作業する場合、ロボットの急な暴走による加速性能も考慮されるべきであるが、現在の関連安全規格には、これが示されていない。本章では、可操作性楕円体を用いて作業空間における潜在暴走空間を計算し、ロボットの急な加速度成分を推定する方法を構築する。はじめに、バッテリーを組み立てる作業の実験において、ロボットと人間の相対位置、とくに、ロボットの正面方向と、横に置いた方向に対してそれぞれのロボットの暴走距離を比較した。結果として、両者の暴走距離が無視できないこと、そして正面方向が垂直方向より暴走距離が大きいたということが明らかになった。つぎに、ロボットの先端の有効質量を計算することにより、ロボットと人間の手の干渉時に想定される接触エネルギーを計算した。その結果、実際に安全距離を維持できなかった場合でも、接触エネルギーは大きくないことが判明し、ある運転条件の下で接触が許容できる可能性が示された。

第4章では、準ミリ波を媒体として使用した非接触人間検出用の安全関連用途を目指した電波センサの適用時に、検出データに大量に生じる一時的な外れ値にも対応可能な新たなカルマンフィルタを提案している。ノイズの多い環境に効果的でロバストなカルマンフィルタについて論じた研究は多数存在するが、とくに誤報の原因となる電波センサ特有の一時的な外れ値について、分析やモデリング、設計論に焦点を当てた研究報告は類例がない。外れ値の種類に対して、安全側か危険側かで異なる対応をするために、補償か拒否戦略を使い分ける非対称な挙動を示す安全関連センサを開発した。実験では、人間の手を模擬したテストピースを使用し、その高速な動作と低速動作とで外れ値がどれだけ除去されるかについて比率を評価し比較を行った。その結果、提案するフィルタでは、測定中の検出誤差によって定まる包含区間の短縮および一時的な外れ値の効果的な除去という点で、従来の方法よりも格段に高い性能を示した。

第5章では、本論文において、人間とロボットで構成される協調作業システムによる生産性を向上させる目的で提案、開発された干渉理論による両者の干渉確率の算出方法、潜在暴走空間を考慮した両者の配置の仕方に依存した生産性の評価方法、さらに3次元的に保護間隔距離を求める上で極めて有用な人間を検出できる安全関連センサについて総括し結言を行うとともに、今後の課題を示した。

以上のように本論文では、人間とロボットが協調して組み立て作業を行う生産システムにおいて、人間の安全性を確保しつつ生産性を高めるための要素技術およびシステムの評価方法を明らかにしている。これらの評価方法並びに得られた結果は、安全性と生産性を両立できる人間機械系の構築への展開を実現するために重要であり、工学の発展に寄与するところが大きいと判断できる。よって、本論文の提出者であるKIM Eugene君は博士（工学）の学位を受けるに十分な資格があると判断した。