

## 論文の内容の要旨

### Responsible Robots as a Novel Approach to Safe and Productive Human-Robot Collaboration

Audun Ronning Sanderud

本研究は、生産現場における産業用ロボットのより簡単に柔軟な利用を実現するための Responsible Robots を提案するものである。

近年のオープンイノベーションの広がりにとともに、産業界における中小企業の重要性が増している。大企業と異なり、中小企業には少量多品種な製品の生産が期待されることから、ロボット技術に対して容易に使えるだけでなく高い柔軟性を有することが求められる点に特徴がある。容易にかつ柔軟にロボットの使用を可能にするための重要なアプローチとして人と産業用ロボットの協同作業を実現することが挙げられるが、その実現には至っていない。

人とロボットによる協同作業における現状と課題を明らかにするため、人が行うような動的な意思決定をロボットが実現することを考え、筆者は人の動的な意思決定メカニズムに着目した。適切な意思決定のためには状況認識が特に重要である。現状の産業ロボットへの安全対策及び関連する先行研究での取り組みは状況認識モデルにおけるレベル 1 (要素の知覚) とレベル 2 (現状把握) での対応であり、危険な状況が観測されて初めて安全策を講じるものである。そのため、安全は確保できても生産性については考慮されておらず、協同作業を行う人への影響も全く考慮されていないといえる。一方、レベル 3 として位置づけられる現状から将来を予測し将来のリスクを推定する機能が実現されていないために、現状のロボットは危険な状態が発生する前に安全策を講じることができない。このことが安全でかつ生産性の高い人とロボットの協同作業を実現するための課題であると明らかにした。

本学位論文では安全と高い生産性を両立する人とロボットの協同作業を実現するための方策として、レベル 3 の状況認識を実現し、将来のリスク予測に基づいてロボットが危険の発生に先行的に動作計画を行う仕組みを提案し、それを実現する協同作業型ロボットの新しい概念として **Responsible robot** という概念を提案した。リスク推定の核となるのは人の観測結果から将来の見込みを推定する **likelihood analysis** と同じく人の動作状況から推定されるリスク要因に基づく **consequence analysis** である。**Likelihood analysis** において本手法が特徴的な点は、ロボットは人のタスク内容について事前知識を必要とせず、作業中の人の行動を観測し、観測データから人の行動モデルを構築する点である。作業者の身体がある微小領域を占有する時間と時間間隔を観測データとし、各領域に対して確率モデルを推定する。

提案する方策を産業用ロボットへ適用し、人の動作観測には距離画像センサを用いてシステムを構築した。複数の被験者にて評価実験を行い、作業の阻害回数、エラー回数、タスク達成数等の作業成績に基づく客観的評価及び作業者の主観的認知的負荷について定量的に評価を行った。その結果、提案したロボットの場合、96%の精度で危険の発生に対して先行的に動作を行い、従来ロボットと比べて作業の阻害回数を 81%軽減し、作業者の認知的負荷を 14.5%軽減することが確認された。さらに、提案ロボットは人と人との作業よりもエラー回数を削減し、提案ロボットとの協同作業により作業者の作業成績が向上することが示された。

## 論文審査の結果の要旨

本研究は、生産現場における産業用ロボットのより簡単に柔軟な利用を実現するための **Responsible Robots** を提案するものである。特に、観測に基づき作業者の行動モデルを構築し、将来のリスクを推定することにより、危険の発生に先行してロボットの動作計画を行い、高い安全性と高い生産性を両立した人とロボットの協同作業を実現することを目的とする。

第 1 章 **Introduction** では本研究の背景として産業界における産業用ロボットへ期待される役割、特にロボットのより簡単にかつ柔軟な利用を実現するため人と産業用ロボットの協同作業（HRC）に対する期待と課題について述べられている。

第 2 章 **Related Work** では多岐に渡る人とロボットの協同作業に関する関連研究をレビューし、自動化における信頼とは、現在工場で利用可能な HRC の現状と課題、HRC における安全あるいはタスク遂行に関する研究事例について文献調査を通じ課題を明らかにした。そして、安全性と高い生産性を実現する人とロボットの協同作業を実現しようとする本研究における 3 つの課題を明らかにした：PS1 提案システムは危険に対して先行的に動作すべきである。PS2 提案システムは生産性を維持するために必須なタスクを求められるべきである。PS3 提案システムは協同作業による作業者への影響を改善するよう設計されるべきである。

第 3 章 **Situation Awareness and Risk Analysis in safe HRC** では、ロボットに対する人からの安心、信頼を得るためにはロボットシステムは人のような属性を有するべきだという知見に基づき、人の動的な意思決定メカニズムについて述べ、特に適切な意思決定のためには状況認識が重要であることを示した。人のような動的な意思決定メカニズム及び状況認識レベルを有し、リスクを推定し危険に対して先行的に行動設計を行う、安全でかつ高い生産性を実現するロボットの新しい概念として **Responsible robots** を提案した。リスク推定のための評価項目及び評価プロセスを示し、参照した人の動的な意思決定メカニズムの構成を参照して **Responsible robots** を実現するモデルを示した。

第 4 章 **Development of Model for Realizing Responsible Robots** では第 3 章にて示した **Responsible robots** 実現のためのモデルを構築するための各要素の設計及び実装について述べられている。特に現状に基づく将来のリスク推定が課題の達成のためには必須である。そのため、人の作業観測に基づく人の動作に関する確率モデルを構築することが述べられている。人の動作観測には距離画像センサを用い、作業者の身体がある微小領域を占有する時間と時間間隔を観測データとし、各領域に対して確率モデルを推定する **Likelihood analysis** 手法が提案されている。また身体部位によってリスクは異なる。これをリスク分析へ反映する **Consequence analysis** 手法として身体部位の種類および部位の動作速度によるリスク分析手法が提案された。

第 5 章 Skill and Performance of the Likelihood Analysis では、提案する likelihood analysis 手法の予測性能について検証されている。人と産業用ロボットにそれぞれタスクを設定し、観測データに基づき作業領域が人に占有される時間と時間間隔に関する確率モデルを推定する。ロボットの実行タスクが決定し、その完了時間が決定されたとき、その対応するタスクの実行時間内に人がその与えられた共有作業空間に侵入あるいは占有するかを予測する。Brie Score を用いて予測結果の精度について検証を行い、提案手法は未学習の予測器よりも高い精度で予測できることを示し、提案手法の有効性を明らかにした。

第 6 章 Performance of the Responsible Robot Based HRC では、提案するロボットシステムの人ととの協同作業について、複数の被験者にて評価実験を行い、作業の阻害回数、エラー回数、タスク達成数等の作業成績に基づく客観的指標に基づく評価を行った。実験は、他の作業者との協同作業（HHC）、実行タスクを予めプログラミングしたロボット（preprogrammed robot）との協同作業（PP-HRC）、提案する Responsible robot との協同作業（RR-HRC）の 3 つの作業条件において試行を行い、結果を比較した。その結果、提案する Responsible robot の場合、96%の精度で危険の発生に対して先行的に動作を行い、従来ロボット（PP-HRC）と比べて作業の阻害回数を 81%軽減し、さらに平均 1.4 タスク分達成タスク数が多い結果となった。これらの差は統計的に有意であることが示され、提案するシステムの有効性を実証した。

第 7 章 Effects of working with a Responsible Robot in a HRC では第 6 章にて示した実験設定においてヒューマンファクタに注目し、作業におけるエラー回数及び作業者の主観的認知的負荷について定量的に評価を行った。その結果、提案する Responsible robot は人と人との協同作業時あるいは従来ロボットとの協同作業（PP-HRC）時よりもエラー回数を削減し、さらに、作業者の認知的負荷を 14.5%軽減することが確認された。これらの差は統計的に有意であることが示され、提案するロボットとの協同作業により作業者の作業成績が向上することが示された。

産業用ロボットのより簡便でより柔軟な活用を実現するため、人とロボットの協同作業を実現することが重要な課題である。作業者の安全を守るだけでなく、高い生産性を維持すること、さらには、ロボットとの協同作業が作業者の作業を阻害せず、作業者の精神的負荷を増大させないことが課題となる。作業者の動作観測と作業者動作のモデル化、観測データに基づく将来のリスク推定手法、リスク推定に基づきタスク選択を行う動的意思決定メカニズムの実現、これらの機能を統合し、危険な状況に対して先行的にロボットが動作設計を行い高い安全性と高い生産性を両立するという Responsible robot という新たな概念の提案及びその実現は人-ロボット協同作業を達成するための重要なアプローチであり、ロボット工学研究としての独創性、有用性も大いに認められる。よって、本論文は、博士（工学）の学位請求論文として優れた研究成果として認められ、十分な水準を有するものと判断できる。