

京都大学	博士 (工学)	氏名	松岡 諒
論文題目	意味情報に基づくエラーリカバリー機能を有する FA ロボットの資源制約下での合理的意思決定に関する研究		

(論文内容の要旨)

近年の産業界では労働力不足を解消する手段として FA ロボットの導入が急速に進んでいる。特に変種変量生産のニーズに応えるため、熟練作業者に代わって複数の工程をこなすロボットセルの安定稼働が求められている。こうしたロボットの作業環境では、多様なワークの個体差や毎回のハンドとの位置合わせ誤差によって、ロボットが事前に教示された通りに動作を完了できずエラー停止する“チョコ停”がしばしば発生し、機器に精通する人が駆け付けてリセット処理を行わなければならないことが FA の現場の課題となっている。これを解決するためにロボットが備えるべき能力は、作業中に検知されたエラーの情報から、実行に失敗した行動が当初の行動計画に及ぼす影響の意味を解釈して、正常系への復帰に必要な行動を推論し、自律的判断で実行に移す能力である。さらに FA ロボットの意思決定に際しては、実際のシステムが備える限られた情報資源や、収集された情報に基づく推論ならびに実行に費やすことが許される時間資源の制約の下で、合理性が担保された行動をとることが要請される。本論文は、エラーの意味情報に基づいて行動計画の修正を伴うリカバリー機能を有する FA ロボットシステムの構築および FA の現場での行動計画の生成と実行に向けての資源制約下での合理的意思決定方式についての提案を行うもので、以下の全 7 章から構成される。

第 1 章は緒言であり、産業界で高まる持続可能な生産の自動化のニーズと、チョコ停という課題に対して、これまでに実現されている自動リカバリーは事前に組み込まれたコマンドの再試行程度の反応的な対応に留まる一方、多様な環境でワークを操作するこれからの FA ロボットには行動計画の推論を伴う熟考的な対応が必要になることを述べている。近年のロボットの行動計画のスキームや異常検知のための機械学習技術を以てしても解決には至れないエラーリカバリーの実現に不可欠な要素として、エラーを引き起こす作業要素を切り出し、エラー状態からの復帰に導くための修正戦略を確立すること、そして 2 つ目として、当初の計画を修正して実行に移す際の当該現場に固有なリスクまで考慮した合理的意思決定手法の定式化、の 2 点を掲げている。そして FA の限定合理性として、FA ロボットシステムに投入される資源制約下での合理性を扱うことについてまとめ、変動する生産状況の中で適切な意思決定モデルの基準を定めるメタレベル意思決定の体系化が必要になることを述べている。

第 2 章では、提案するリカバリー行動計画システムの構成について説明している。まず、複数台のロボットの作業中に行動計画を修正するために、行動計画の半順序構造を管理・修正するプランナと、A\*アルゴリズムによって順序制約の下でロボットの最適な実行手順を決定するスケジューラを備える階層型アーキテクチャを構築している。次に、作業環境でエラーが検知されてからエラー要因の評価値に基づいてプランナを駆動し作業再開に至るまでの処理フローを示している。

第 3 章では、ロボット動作が引き起こすエラーからのリカバリー行動計画策定のために、自然言語の格の関係に則って述語概念の意味を表現する Conceptual Graph (CG) を導入し、格の構造によって類型化されたエラー要因に対する修正戦略を構築している。作業環境の状態を遷移させるロボットの汎用動作として、ロボット自身が移動する“Move”、ロボットが物体をつかむ“Grasp”、ロボットが物体に力を加える“Apply”の 3 つを抽出し、これらに付随するエラー要因となり得る格関係を網羅した CG のフレームを構築している。このフレームに含まれる概念ノードと失敗した動作の情報を照合することでエラー要因の格関係を抽出し、プランナに入力される目標状態の同定を可能にし

ている。すなわち、それぞれの汎用動作でエラーが生じる状況と対応する述語概念の格関係に基づき、エラーからの復帰に必要な修復すべき格関係を特定し、修正戦略として体系化している。

第4章では、ロボットシステムが備えるセンサ情報の不確実性の管理手法について述べている。CGから導出されるエラー状態と作業環境の実際の状態の間に乖離が存在する場合に、誤った修正戦略を採用することによる復帰遅れのリスクが存在するために、CGの格関係と入手可能なセンサ情報を結び付けてエラー要因の尤もらしさを評価するベイジアンモデルを構築している。ここでは、失敗した動作のCGに含まれるエラー要因の複数候補に対して、そのエラー要因とセンシングの計測結果との不確実性を内包する依存関係を表現したベイジアンネットワークを用いた推論により、新たな情報を計測する度にエラー要因の尤もらしさの評価値を事後確率として計算する。

第5章では、時々刻々と変動する生産現場で、どこまでの不確実性を許容して判断を行うべきかという問題に対して、期待効用に基づく意思決定モデルの考え方と、FAの因子によって熟考度合いの異なる意思決定モデルを選択してリカバリーシステムを運用する方法についてまとめている。提案システムにおける利得とは、所定の生産性を発揮するために要求されるデッドラインから実際にリカバリー完了までに費やされた時間コストを差し引いた残り時間の大きさと考えることができ、判断を先送りしている間の時間経過によっても利得が減少することになる。エラー状態の不確実性を低減するための新たなセンサ情報の取得にも時間が費やされることから、あらゆる不確実性低減策を取り入れた慎重な行動をとることが必ずしも合理的とは言えないことを時間依存効用の理論から説明している。時間選好とリスク選好の二重性を持つ意思決定において、現場での利得に対する満足度を反映した時間依存効用関数の同定は、一定の時間の経過後において、ある確率で利得が得られ残る確率で利得が得られないという不確実性を内包した“くじ”を想定し、このくじと等価（無差別）になるような確実に得られる利得（“確実性等価”）がいくらになるかについて意思決定者の評価を求めることで同定される。提案システムでは、このように同定された特定の生産現場に固有な価値を表現する効用関数に従って、複数のエラー要因の候補を考慮すべきか否かと、その判断に先立って追加のセンシングを実施すべきか否か、までを含めた評価を行うための定式化を行っている。さらに、FAシステムに適した意思決定モデルの熟考度合いを決めるメタレベル意思決定について、時間的猶予に関わる対象作業のサイクルタイムと、失敗時の損失の大きさに関わる製品の価格という2軸で整理し、合理的なエラーリカバリー方策についてまとめている。

第6章では、提案システムの有効性を、2台のロボットによる組立作業のシミュレーション結果を通してまとめている。ここでは、複数台協調セルを模擬した環境においてFAロボットが作業を進める途中でエラーを発生させる。これに対して提案手法が、エラー要因が異なる複数のリカバリー事例を作成し、時間圧のパラメータを変化させることで、提案手法で導出される作業完了に至るまでの熟考的対応の結果がどのように変化するかについて比較している。その結果、修正戦略の不適合によるリカバリー動作の失敗のリスクが小さい事例では、不確実性低減のための新たなセンシングは実行すべきでないという方策が合理的であるものの、一方同じ時間コストでも失敗のリスクの大きい事例では追加センシングを実行すべきとする方策が合理的であるとの結果が得られた。また、リスク回避的な効用関数で評価する場合とリスク志向的な効用関数で評価する場合とで、時間圧の変化に対して採用されるべき合理的行動計画が変容することが示された。さらに、複数のエラー要因が同時に発生する場合やリカバリー動作中にエラーが発生する場合のような複合的なエラーの発生時においても、正常系に至るまで段階的にリカバリーが可能になることを検証している。

最後に第7章では結論として、本論文の内容をまとめたあと、今後の展望について述べている。

氏名	松岡 諒
----	------

(論文審査の結果の要旨)

本論文は, FA ロボットの動作の意味情報に基づくエラーリカバリー行動計画システムの構築に関する内容である. すなわち, FA システムの時間資源や情報資源の制約下で合理的な意思決定モデルを構築し, 行動計画の修正を伴うエラーリカバリー機能を実現する方法についてまとめており, 得られた成果は以下の通りである.

FA ロボットの作業中に検知されるエラーに対して, 行動計画のレベルまでさかのぼってエラー要因を解消するための行動を導出し, 自律的に作業を再開することを可能にする階層型アーキテクチャを構築した. エラー状態から当初想定していた正常系への復帰を目指す逆方向の行動計画問題において, 半順序プランの自由度を活用し, 複数台のロボットでの作業時間を最小化する最適スケジューリングを組み合わせることで, リカバリーの目標に応じてロボットが実行可能な行動計画を更新できることを示した.

エラー状態におけるフレーム問題を克服してリカバリーの目標を定めるための, エラーの意味情報に基づく修正戦略の構築では, 失敗したロボットの動作すなわち述語概念の意味的役割を示す自然言語の格の構造に則ってエラー要因を類型化できることに着目し, Conceptual Graph(CG)の格フレームを提案した. すなわち, 上位概念化されたロボットの汎用動作に付随するエラー要因を格フレームで網羅できることを示し, 修正戦略を体系化できることを示した.

実際のロボットシステムが備えるセンサの値から CG を例示化する際の不確実性の評価方法の構築では, FA ロボットの標準的なセンシング手段と, CG で抽出されるエラー要因の候補の因果関係を表すベイジアンネットワークを提案した. 複数のエラー要因の候補に対する信念を更新するベイジアンネットワークを情報資源に応じて動的に構成することで, それらのエラー要因の事後確率を計算し, 尤もらしいエラー要因に対する修正戦略を選択できることを明らかにした.

FA の資源制約下で生産状況の変動に応じて合理的な意思決定を実現する熟考モデルの構築では, 時間の経過とともに減少するリカバリー利得に対する生産現場の固有な価値を定式化した時間依存効用関数に基づき, どこまでの不確実性要因を考慮するのが合理的であるかを導出できるモデルを提案した. これにより, サイクルタイムと製品価格という FA の因子によって, 熟考度の異なるアプローチを選択してリカバリーシステムを運用できることを示した. 提案システムを組み込んだ複数台ロボットによる組立作業で時間圧を変化させたときに, 追加センシングの付加的価値まで考慮した上で行動計画を実行できることを検証した.

以上要するに, 本論文は FA ロボットの資源制約下での合理性を担保した自律的エラーリカバリーについて有用な知見を与えたものであり, その成果は学術上, 實際上寄与するところが少なくない. よって, 本論文は博士(工学)の学位論文として価値あるものと認める. また, 令和4年1月19日, 論文内容とそれに関連した事項について試問を行って, 申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し, 合格と認めた.