

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 22 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23360107

研究課題名(和文)作業支援パートナーロボットの確率論的協調メカニズムに関する研究

研究課題名(英文) Research on the probabilistic cooperation mechanism for working support partner robot

研究代表者

小菅 一弘 (KOSUGE, Kazuhiro)

東北大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：30153547

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,900,000円、(間接経費) 4,170,000円

研究成果の概要(和文)：自動車等の組立作業ラインには、未だ産業用ロボットには困難な多くの作業がある。それらの作業では、作業者が自ら必要な部品や工具を取りに行き、選択し、作業場所に戻り、作業を行っており、作業者の負担増加と作業ミス誘発の原因となっている。そこで、本研究では、ロボットが困難な作業は人間が行い、人間の負担となる作業をロボットが支援することでこのような問題を解決することを目的として、作業者の行動を観察し、作業者の状態・意図・行動を推定・予測する確率論的協調メカニズムを構築するとともに、必要な部品や工具を必要な時に作業者に手渡すことができる作業支援ロボットを開発し、人間ロボット協調作業基盤技術の構築を行った。

研究成果の概要(英文)：The industrial robot plays a key role in achieving steady quality in a manufacturing industry. However, the industrial robot is poor at completing work for which the experienced adjustment of power is necessary, work for which skill is necessary, and work that varies in a less predictable manner. To improve the present situation, the expectation is sent to the partner robot which achieves the aimed work by doing the work that is difficult for the worker, and supporting the work which becomes a load of the worker. We have constructed a probabilistic coordination mechanism to observe the behavior of the worker, for estimating and predicting the state, intent and behavior of the worker. Moreover, we developed the working support partner robot which can deliver required parts/tools to a worker on time, and built a human robot cooperation working fundamental technology.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・知能機械学・機械システム

キーワード：人間機械システム 確率論的協調メカニズム パートナロボット インタラクション ロボットアーム
意図理解 意図推定 衝突安全システム

1. 研究開始当初の背景

1961年に世界初の産業用ロボットが発表されてから50年近くの年月が過ぎたが、全世界における産業用ロボットの総稼働台数は増加を続けている。これは、製造現場において安定した品質で効率的な生産を行うため、産業用ロボットを用いた作業の自動化が推進されてきた結果である。しかし一方で、状況に応じた判断が必要な作業など、複雑な作業が多く、自動化されていない工程が未だ多く残っている。特に自動車等の組立工程では人間による手作業に頼らざるを得ない作業が数多く残っている。これはロボットが高速での繰り返し動作や重いものの運搬作業などの単調作業が得意な反面、微妙な力加減が必要な作業、熟練が必要な作業、柔軟な対応が求められる作業などが困難であることが大きな原因である。

そこで、作業を完全に自動化するのではなく、ロボットが困難な作業は人間が行い、人間の負担となる作業をロボットが支援することを考えると、比較的安価なシステムで作業者の負担軽減や能率改善が可能である。このような人間協調型作業支援ロボットは、近年様々な研究が行われるようになってきており、宮脇らの器械出し看護師ロボット、石井らの食事支援ロボット、藤本らのウィンドウ搭載アシスト機等が開発されているが、人からの明示的な働きかけによって作業支援が実現されており、阿吶の呼吸で支援してくれるようなシステムは提案されていない。

2. 研究の目的

(1) 時々刻々変化する作業者の時系列情報を確率的に取り扱い、その動的モデルをロボット内に構築することで、これに基づき実時間で得られる情報だけでは推定困難な作業者の状態・意図・運動を推定・予測し協調運動を実現する「確立論的協調メカニズム」のフレームワークを構築する。

(2) 自動車組立ラインにおける部品の取付作業において、作業者の意図や状態を推定し理解・学習することで、明示的に操作しなくても必要な部品や工具を必要なタイミングで作業者に手渡す、人間協調型作業支援パートナーロボットの開発を行い、実作業における人間ロボット協調作業基盤技術の構築を行う。

3. 研究の方法

(1) 確率論的協調メカニズムの開発(A) 作業状態推定手法の開発：確率論的協調メカニズムの開発の第一段階として、作業位置・運動の統計データを蓄積し確率的に記述することで作業者の動的内部モデルを構築し、これに基づく作業進度推定と異常状態検知、また作業知識の更新を行う作業状態推定手法を開発する。

(2) 物理的インタラクションシステムの開発(A) 操作力意図理解手法の開発：物理的インタラクションシステムの開発の第一段階として、その中核機能である操作力意図理解手法を構築する。これは前述の作業状態推定手法と同様、操作力と作業者の意図の統計データを蓄積し確率的に記述した作業者の内部モデルを構築し、これに基づきアームに作業者が加えた操作力からその意図を推定するものである。

(3) 軽量広可動範囲アームの開発：実際に作業者に部品や工具を配送するロボットアームのハードウェアを開発する。

(4) 部品・工具供給システムの開発：前述のロボットアームのエンドエフェクタとして搭載され、作業者が実際にそこから部品と工具を受け取る受渡部、およびそれに対し短時間で部品と工具を供給する部品供給装置と工具交換装置を開発する。受渡部の機構・形状は作業者がとりだしやすいような機構を検討し、予備実験により評価と改良を行う。

(5) 定量的評価実験と改良：開発する各項目は、適宜研究室での予備実験を行い、必要に応じて実際の自動車組立ラインに試験導入することで評価を行い、改良を続ける。

(6) 確率論的協調メカニズムの開発(B) 協調的部品工具供給手法の開発：先に開発した作業状態推定手法による推定結果に基づき、明示的に操作しなくても思った通りに部品と工具を供給するアームと受渡機構の時間軌道・空間軌道を生成する協調的部品工具供給手法を開発する。

(7) 物理的インタラクションシステムの開発(B) 知的衝突安全システムの開発：先に開発した操作力意図理解手法は作業者が意図をもってアームに対し操作力を加えることを前提としているのに対し、作業者のアームへの偶発的衝突では作業者の意図を伴わない操作力が加わる。これを瞬時に検知、異常衝突と判断し直ちに衝撃力を低減する回避動作を行う知的衝突安全システムを開発する。

(8) 複数台ロボットへの拡張：これまでに開発するそれぞれの手法、システムを、複数台のアームもしくはロボットにより実現するためのフレームワークへと拡張する。

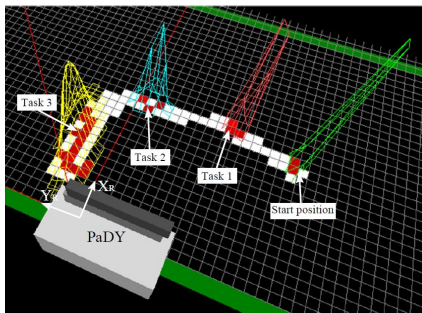
(9) 方法論の一般化：自動車組立ラインにおける小物部品取り付け工程での部品・工具の作業者の手元配送を題材として構築される、確率論的協調メカニズムと物理的インタラクションシステムとを構築する過程で得られる知見に基づき、実時間適応型協調メカニズムの一般化を行い方法論として実用に

足るレベルに一般化することを試み考察する。また他の工程から他のマン・マシンシステムまでの応用を検討し、より効果的な作業支援システムの実現を目指す。

4. 研究成果

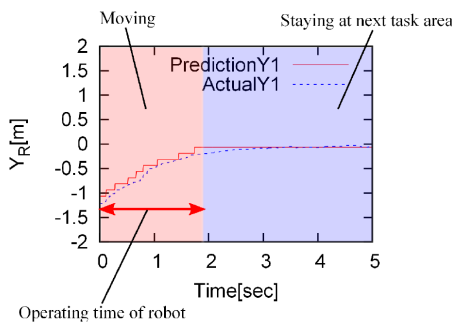
(1) 確率論的協調メカニズムの開発

作業者の行動履歴からマルコフモデルを用いて作業者の行動のモデル化を行い、それを基に作業者の行動を解析し、作業箇所の抽出および分類を行うことで作業者の状態を推定する手法を開発した。これにより、従来は事前に行っていた手作業による作業分析を行う必要がなくなり、実用性が格段に高まった。



行動のモデル化の例

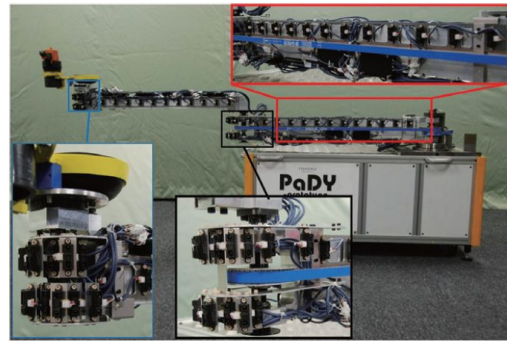
作業者の行動モデルと計測される作業者の位置から作業者の行動予測を行い、その予測を基に作業者に協調して部品と工具の供給を行う手法を開発した。この手法により作業に付随する待ち時間が短縮されることにより、作業効率の向上が認められた。また、部品・工具の受け渡しタイミングのずれがなくなり協調作業のミスがなくなった。



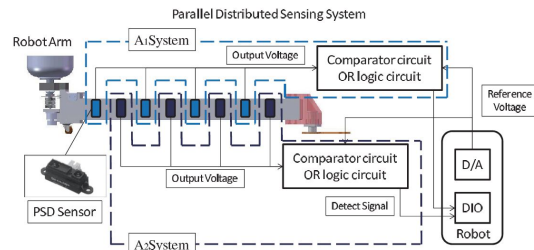
軌道予測結果の例

(2) 軽量広可動範囲アームの開発

これまでに開発してきた軽量高可動範囲ロボットアームに改良を加え、様々な状況に対応するために適切なロボットアームの機構・形態について検討を進めた。特に、物理的インタラクションシステムの研究開発を見据え、作業者からの物理的なインタラクションを検出するためのセンサシステムを追加した。実際の工程にシステムを導入するにあたってはシステムの信頼性が重要であるため、センシングシステムを2重系にすることで、十分なシステムの信頼性を確保した。



開発したロボットアームの外観



センシングシステム

(3) 部品・工具供給システムの開発

実際の製造ラインへの導入実験を行うに当たり欠かすことのできないロボットへの部品・工具を供給するためのシステムの開発を行った。本システムは、対象とする工程で使用する部品・工具をロボットアームのエンドエフェクタに搭載されたトレイに供給するパーツフィーダおよびツールチェンジャーで構成される。



トレイの外観



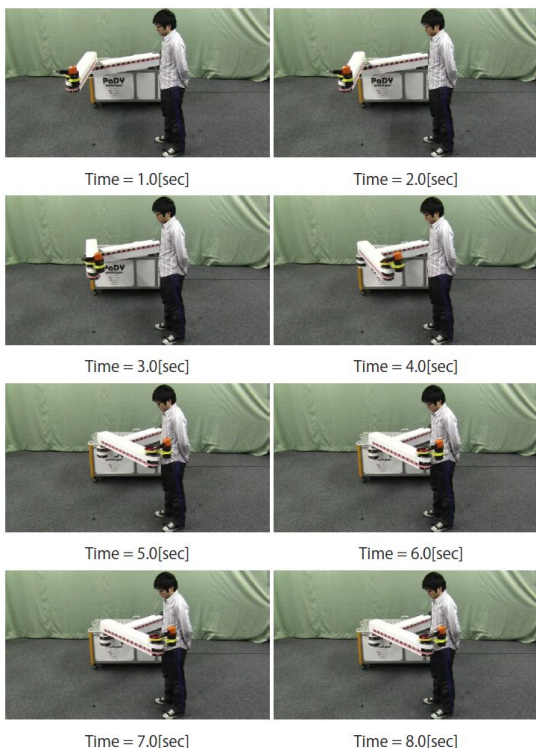
パーツフィーダの外観

(4) 物理的インタラクションシステムの開発

意図理解手法の研究開発と衝突安全システムを実現するための物理的インタラクションシステムの開発を行った。

(2)で開発したロボットアームに搭載されるセンサにより、作業者との接近および衝突を検出する。また、作業者からトレイに与えられる物理的なインタラクションを基に適応的にロボットの動作を生成することで、作業者の好みの動作を実現すると共に、作業

者のアームへの偶発的衝突を瞬時に検知して、異常衝突と判断し直ちに衝撃力を低減する退避動作を行う知的衝突安全システムを開発することで衝突時の安全性を向上させた。



実験の様子

(5) 複数台ロボットへの拡張

これまでに開発したそれぞれの手法およびシステムを、複数台のロボットにより実現するためのフレームワークへと拡張した。本年度は新規に移動ロボットの開発を行い、これまでに開発したロボットアームとの連携実験を行った。これは、昨年度までに開発を行った大型部品搬送システムや重量物搬送システムにも適用可能である。



複数システムの協調実験

(6) 定量的評価実験と改良

実際に生産現場に試験導入を行うには、ラインへの影響を考慮する必要があるため、入念な準備が必要となる。しかしながら、実験環境が異なると、適切な評価が行えない場合がある。そこで、実際の製造ラインで実験を行う前に原理確認を行うための模擬実験環境を整えた。これにより、実際のラインに影響を与えることなく、様々な評価実験が行える

ようになり、実験に伴う効率が格段に上がった。整備した実験環境において、システムの有効性の確認を行い、ハードウェアおよび制御アルゴリズムの改良を行った。

従来の手法と提案するシステムを導入した場合について実験を行った結果、作業時間の短縮効果と作業ミス未然防止効果を得られることが認められた。

(7) 方法論の一般化

本研究課題では、自動車組立ラインにおける小物部品取り付け工程での部品・工具の作業者の手元配送を題材として、確率論的協調メカニズムと物理的インタラクションシステムを構築したが、その研究開発過程で得られた知見に基づき、実時間適応型協調メカニズムの一般化を行い方法論として実用に足るレベルに一般化することを試みた。その一例として、小物部品取り付け工程以外の他の工程における他のマン・マシンシステムへの応用を検討し、開発を進めている。これにより、より効果的な作業支援システムを実現することが期待される。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 1件)

衣川潤, 川合雄太, 菅原雄介, 小菅一弘, 組立作業支援パートナロボット PaDY (第1報, コンセプトモデルの開発とその制御), 日本機械学会論文集 C 編, 査読有, 77 巻, 783 号, 2011, pp.4204-4217, https://www.jstage.jst.go.jp/article/kikaic/77/783/77_783_4204/_pdf

[学会発表](計 6件)

田中泰史, 衣川潤, 小菅一弘, 生産現場における人間協調・共存型作業支援パートナロボット - PaDY - (第12報, 作業者の予測移動軌道を利用したロボットの動作計画), 第18回ロボティクスシンポジア(ROBOSYM2013)予稿集, pp. 42-47(1B2), 2013年3月14日~15日, 日本の宿 古窯 (山形県)

Y. Tanaka, J. Kinugawa, K. Kosuge, "Motion Planning with Worker's Trajectory Prediction for Assembly Task Partner Robot", Proceedings of the 2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS2012), pp. 1525-1532, 2012/10/7-12, Vilamoura, Algarve, Portugal

田中泰史, 衣川潤, 小菅一弘, 生産現場における人間協調・共存型作業支援パートナロボット - PaDY - (第11報 部品・工具取り損ね未然防止のための作業進捗状況に合わせたロボットの動作計画手

法), 第 30 回日本ロボット学会学術講演会(RSJ2012)予稿集, p. 86 (2H1-3), 2012 年 9 月 17 日~20 日, 札幌コンベンションセンター(北海道)

J. Kinugawa, Y. Kawaai, Y. Tanaka, Y. Sugahara, K. Kosuge, "Collision Risk Reduction System for Assembly Task Partner Robot", Proceedings of the 2012 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM2012), pp. 280-285, 2012/7/12-14, Kaohsiung, Taiwan

田中泰史, 衣川潤, 菅原雄介, 小菅一弘, 生産現場における人間協調・共存型作業支援パートナロボット - PaDY - (第 10 報, マルコフモデルと混合ガウス分布を利用した作業同定手法), 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2012 (ROBOMECH2012)予稿集, p. 86 (1A2-V09), 2012 年 5 月 27 日~29 日, アクトシティ浜松(静岡県)

田中泰史, 衣川潤, 川合雄太, 菅原雄介, 小菅一弘, 生産現場における人間協調・共存型作業支援パートナロボット - PaDY - (第 9 報, マルコフモデルを利用した作業者の移動軌道予測手法), 第 29 回日本ロボット学会学術講演会(RSJ2011), 2011 年 9 月 7 日~9 日, 芝浦工業大学豊洲キャンパス(東京都)

〔産業財産権〕

出願状況(計 2 件)

名称: 作業支援システム

発明者: 小菅一弘, 菅原雄介, 衣川潤, 川合雄太, 田中泰史, 伊藤昭芳

権利者: 東北大学, 関東自動車工業株式会社

種類: 特許

番号: 特願 2011-194394

出願年月日: 2011 年 9 月 6 日

国内外の別: 国内

名称: 作業支援システム

発明者: 杉山博紀, 角舘史也, 小菅一弘, 菅原雄介, 衣川潤, 田中泰史

権利者: 同上

種類: 特許

番号: 特願 2011-117493

出願年月日: 2012 年 7 月 19 日

国内外の別: 国内

〔その他〕

ホームページ等

2013 年 1 月 24 日, 日刊工業新聞, 深層断面欄「ロボットと人間 共生で新たな雇用創出(ロボ活用で国際競争力)」

2012 年 12 月 27 日, 日刊工業新聞, 科学技術・大学欄「予測機能搭載ロボ 東北大学 作業効率 2 割アップ」, <http://www.nikkan.co.jp/news/nkx0120>

121227eaax.html

2012 年 6 月 1 日, 日刊工業新聞ロボットポータルサイト robonable 「東北大、作業支援ロボットに向け現在の作業内容を推定する手法を提案」, <http://www.robonable.jp/news/2012/06/pady-0601.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小菅 一弘 (KOSUGE, Kazuhiro)

東北大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号: 30153547

(2) 研究分担者

菅原 雄介 (SUGAHARA, Yusuke)

東北大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号: 60373031

(平成 23 年度まで研究分担者)

衣川 潤 (KINUGAWA, Jun)

東北大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号: 90612523

(平成 24 年度より研究分担者)