

安全性と生産性を両立するための ロボットマニピュレータの軌道選択

○和田智博 亀崎允啓 坂本義弘 菅野重樹 (早大) 佐藤葉介 金天海 (岩手大学)
寧霄光 赤木哲也 (オムロン株式会社) 出澤純一 菅原志門 (株式会社 AISing)

1. はじめに

近年、作業者に近い場所で柵なしで安全に動作する協働ロボットが注目されている。2018年における産業ロボットに占める協働ロボットの設置台数の割合はわずか3%ほどだが、伸び率では前年比23%増と急速に増加した[1]。2016年にはISO/TS15066が公開され、一定の安全基準を満たせば人とロボットが従来より近い距離で作業を行うために必要な要件が示された。協働ロボットには作業を迅速にこなす生産性と、人と接触して傷害を起こすことがないよう安全性との両立が求められる。しかし現在工場稼働している協働ロボットは、人がロボットの作業領域に入った瞬間に速度を落としてしまったり、停止してしまうなど安全性の面で従来型の産業用ロボットよりも速度が遅く生産性が低いという課題を抱えている。この課題を解決していくためには人とロボットの距離に応じてロボットの動きをリアルタイムに変更させる必要がある。

ISO/TS15066では4つの共同作業シナリオが提示されている。その中の1つで「速度と間隔の監視」というものがある。これは協働作業空間内においてロボットとオペレータとの最小保護距離を規定し、この距離を下回った場合停止しなければならないというものである。Jeremy A. Marvelらは「速度と間隔の監視」を実装する際の考慮点や、現在の最小保護距離式では不必要に停止してしまう問題点などを提示した[2]。

本研究では近未来位置を用いた衝突判定により、不必要に停止することなく安全性と生産性を両立する軌道選択アルゴリズムの確立を目的としている。

そこで目的を実現させるため、複数の測距センサより人の軌道を取得し、人軌道予測システムにより作成された近未来人軌道予測を既定アームタスクと照らし合わせることで軌道調整を行う協調安全システムフレームワークを考案した(図1)。また干渉判定においては「速度と間隔の監視」における最小保護距離式を再定義した「瞬間安全距離」を作成し、これに基づいた軌道調整により、生産性を向上させる手法を提案する。以下、第2章で提案アルゴリズムについて説明し、第3章ではシミュレーションを用いた評価検証を示し、第4章で本論文の結論を述べる。

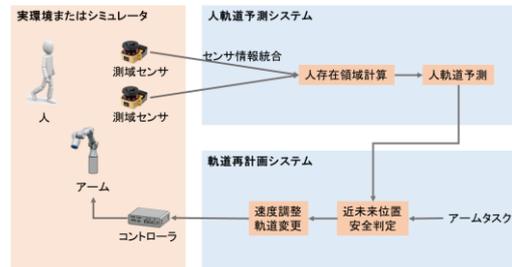


図1 システム全体像

2. 協調安全運転アルゴリズム

協調安全システムの全体像を図1に示す。実環境には人や複数の測域センサ、アームなどが存在している。はじめに複数の測域センサによって人の位置を取得し、人軌道予測システムに送信する。人軌道予測システムではセンサ情報を統合し、人軌道予測を行い軌道再計画システムに送信する。次に受け取った人軌道予測と事前に作成したアームタスクとを照らし合わせることで近未来位置での干渉判定を行う。もし干渉するようであれば、速度調整か軌跡変更を行うことにより、安全な軌道を実ロボットに送信する一巡のシステムとする。

また本実験では実機の制御やシミュレーション環境での制御のためにROS(Robot Operating System)を用いることにする。

次に各要素技術について説明する。

(1) 瞬間安全距離

協働作業空間内で人間が安全に作業を行うには十分な保護間隔を設定し、この距離よりも近づかないことが必要である。この保護間隔の決め方としてJIS B 9715に最小距離式の求め方が記されており、これを参考にしてISO/TS15066では保護間隔の距離 S_p が設定されている。本研究ではこの静的な保護間隔を近未来の位置まで拡張することにより、動的に安全検証を可能とするための瞬間安全距離 S_{pm} を定義した。瞬間安全距離の定義を式(1)に示す。

$$S_{pm}(t_0) = (r + R) + Z_r + Z_d + Z_h \quad (1)$$

ここで r はアームの存在領域を円で表現した時の領域円半径、 R は人の存在領域を円で表現した時の領域円半径、 Z_r はロボット制御位置誤差、 Z_d はセンサ測距誤差、 Z_h は人軌道予測精度誤差とする。これらを足し合わせたものを瞬間安全距離 S_{pm} とし、これはアームと人の領域円の中心間の確保すべき距離を示しており、アーム領域円と人領域円の中心間距離と比較することによって、干渉しているかどうかの判定を可能としている(図2)。

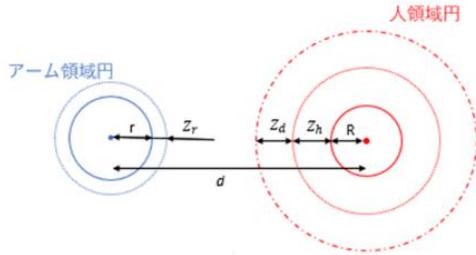


図2 瞬間安全距離の定義

(2) 速度調整

次にオンラインで速度調整を行う手法について説明する。はじめにオフライン上でロボットの軌跡を生成する。コンフィグレーション空間（以下C空間）において始点と終点を設定し、その間に一定間隔で区切った基準ポイントを設定する。そしてロボット周期は一定なので、どの程度基準ポイントを間引いてロボットコントローラに送信するかによって速度の調整を可能とする。このロボットコントローラに送信する間引いた点を間引きポイントとする。この手法によりオンラインで俊敏な速度調整を可能とする。

しかしこの速度調整手法では基準ポイントを間引く数が多ければ多いほどパス生成のための経路が粗くなるため滑らかなパス生成は難しくなる。従ってこの手法が使えるのはピックアップレースのような軌道がもとから直線の場合に限定される。

また瞬間安全距離を用いることによって近未来位置での干渉が予測できる。第3章で検証するシミュレーションでは近未来において干渉が予測された瞬間に停止する手法と、どの程度近未来で干渉が予測されたかによって速度を減速していく重み付き速度調整手法を用いて検証を行った。

(3) 軌跡変更

次にオンラインで軌跡変更を行う手法について説明する。本研究では人の軌道予測と設定されたロボットタスクとのタイムスタンプを整合することにより、近未来での人とロボットの間隔距離を計測することが出来る。そこで現在地点から近未来地点までの各ポイントでの瞬間安全距離判定を行う。そして干渉が予測された場合、ロボットの手先座標とロボットの基軸とを結ぶ直線においてC空間上で1次元上のグリッドサーチを行い、安全なポイントの探索を行う。このとき、安全な軌道点を探索出来た場合は新たな軌道点として設定し、安全な軌道点を探索できなかった場合は最も接触リスクの低いポイントに移動し、停止することによって安全性を担保していく。

3. 評価実験

(1) 実験内容

本研究の目的は近未来位置に基づいた干渉判定により安全性と生産性を両立させる軌道選択アルゴリズムを確立することである。そこで評価実験では、近未来位置を用いて干渉判定した場合と、近未来位置を用いずに現在位置のみで干渉判定を行った場合とで安全性または生産性がどのように変化したのかを比較検証した。

評価実験を行うために作成した工場の模擬環境の俯瞰図を図3に、協働作業空間内での2人の作業員の作業タスクを表1, 2に示す。

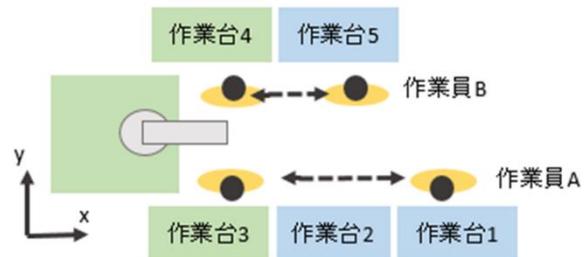


図3 実験環境俯瞰図

表1 作業員Aのタスク

1	ワークが入り作業台1で作業を行う (3秒)
2	作業台2に移動し作業を行う (5秒)
3	作業台3に移動しワークをセットする
4	作業台1へ戻る

表2 作業員Bのタスク

1	作業台5でワークが作業台4に来るまで待機
2	作業台4からワークを取り出す
3	作業台5に移動し作業を行う (5秒)
4	作業台5で待機

実験は2つの評価実験を行った。1つ目は近未来の予測を用いて速度調整を行った場合、生産性がどのように変化するのかを検証した。2つ目は近未来の予測を用いて軌跡変更を行った場合、生産性と安全性がどのように変化するのかを検証した。生産性の評価として協働作業空間においてロボットが一定回数のピックアップレース作業に要する時間を比較した。安全性の評価では人とロボットの十分な間隔距離が確保されているかどうかを瞬間安全距離を用いて比較した。

(2) 実験結果

表3に速度調整を行った際の生産性の比較を示す。生産性に関しては予測を行わず、人とロボットが干渉した瞬間に停止した方が生産性が高く、干渉を予測して前もって減速を行う方が生産性は低いことがわかった。

表 3 速度調整における生産性の比較結果

	予測なし [s]	予測あり [s]	予測重み [s]
1回目	49.5	67.3	58.1
2回目	46.8	73.4	55.0
3回目	47.4	71.7	56.6
4回目	50.3	74.3	57.9
5回目	48.3	72.2	57.2
6回目	46.6	70.9	55.6
7回目	49.1	73.0	55.0
8回目	47.2	71.2	58.7
9回目	47.1	73.4	55.6
10回目	47.0	71.7	55.3
平均	47.9	71.9	56.5

表 4 に軌跡変更を行った際の生産性の比較を示す。生産性に関しては予測の有無で影響は小さく、その差は 3.7% しかないことがわかる。

図 4 に軌跡変更を行った際の安全性の比較を示す。青色の折れ線は予測を行わなかった場合の瞬間安全距離の値で、橙色の折れ線は予測を行った場合の瞬間安全距離の値である。予測なしの場合では 1019 ステップ目には瞬間安全距離が最大で、 $-0.3456[m]$ ほど侵されている。一方予測ありの場合では予測なしで最もアームと人が干渉していた 1019 ステップ目では $-0.078[m]$ であった。予測の有無を比較することにより、本来予測がなければ危険であった状態においても予測を用いることによって安全性が大きく向上していることがわかる。

なお本来であれば瞬間安全距離は 0 よりも小さくなることはないように制御する必要があるが、本シミュレーションでは実環境と違い、人モデルはロボットに関係なく動作することにより干渉してしまう場合が発生する。そのような場合はロボットを停止することにより安全性を担保している。

表 4 軌跡変更における生産性の比較結果

	予測なし	予測あり
1回目	43.4	47.9
2回目	46.4	46.3
3回目	46.4	48.5
4回目	46.5	46.9
5回目	46.6	46.6
6回目	46.5	49.0
7回目	45.1	48.0
8回目	46.6	46.6
9回目	45.3	46.6
10回目	46.7	49.5
平均	45.9	47.6



図 4 軌跡変更における安全性の比較

(2) 考察

はじめに速度調整に関する考察を行っていく。今回の実験では生産性において、予測を行わず、瞬時に急停止・再開の方が生産性が高いという結果が得た。しかしロボットマニピュレータが把持物をもっていたり、人と隣接するような作業空間上でそのような作業を行うと協働する人は安心してロボットと作業を行うことは難しい。人がロボットと安心して協調作業を行っていくためには今回用いた重みづけ手法のように干渉予測に基づいて速度調整を行う必要があると考える。

次に軌跡変更に関しては予測を行うことにより、本来であれば干渉リスクがあった場合においても生産性を損なわず安全性を担保していることが確認できた。

4. まとめ

本研究では近未来予測に基づいた干渉判定により安全性と生産性を両立させる軌道選択アルゴリズムを確立することを目的としていた。そこで ISO/TS15066 で定められている安全距離の考え方を発展させ、近未来位置においても判定できる「瞬間安全距離」という手法を再定義した。またこの瞬間安全距離を用いた速度調整や軌跡変更などの軌道再計画手法を考案した。これをシミュレーション環境で検証し、生産性と安全性の両立を確認した。

参考文献

- [1] “Industrial Robots: Robot Investment Reaches Record 16.5 billion USD - International Federation of Robotics.” <https://ifr.org/ifr-press-releases/news/robot-investment-reaches-record-16.5-billion-usd> (accessed Jul. 27, 2020).
- [2] J. A. Marvel and R. Norcross, “Implementing speed and separation monitoring in collaborative robot workcells,” *Robot. Comput. Integr. Manuf.*, vol. 44, pp. 144–155, 2017, doi: 10.1016/j.rcim.2016.08.001.