

人間共存型ロボットの衝突安全性向上に関する研究 Robot Safety for Human-Friendly Robot

プロジェクト代表者：琴坂信哉（理工学研究科・准教授）
Shinya Kotosaka, Graduate School of Science & Engineering,
Associate professor

1. 緒言

近年、家庭向けのロボットなどの人間との活動環境の共有を前提としたロボットが開発され利用されるようになってきた。それに伴い、人間とロボットが衝突を起こす事故が増加する可能性が高いと考えられる。従来、ロボットの安全対策としては、ロボットの動作範囲には原則として人間が立ち入らない、あるいは衝突を避けるための回避動作を行わせる、衝突を検知すると緊急停止を行う等の手法が用いられてきた。もちろん、ロボットが衝突を避けられるのであれば、それが最善であるが、実際には衝突を完全に回避する事は不可能であると考えられる。そのため、衝突を前提とした安全対策の開発が急務であると考えられる。

そこで本研究では、衝突が避けられない状況を想定し、衝突が予測された場合に単にマニピュレータを停止させるのではなく積極的に動作させることにより衝撃力を軽減するための手法の提案を行う。

2. マニピュレータ衝突時の安全対策のアプローチ

通常、剛体同士の衝突現象は非常に短時間の現象であり、衝撃エネルギーの大きさはマニピュレータの慣性のみ依存する。そのため、剛性の高いリンクで構成されたマニピュレータの関節にインピーダンス制御等で制御によるコンプライアンスを持たせても、高速動作中の衝突安全性向上には効果が薄い事になる。

そこで、マニピュレータリンクの慣性により生じる衝撃力に注目すると、安全確保の手段は大きく分けて二つに分類される。一つは、衝突前後のマニピュレータの運動量変化を小さくする方法である。これは、被衝突物に与えられる衝突エネルギーが軽減されるため、被衝突物へ与えるダメージを抑えられる。もう一つは、衝突時に衝突対象物に加わる力の大きさを小さくする事である。こちらは、被衝突物が衝突時に変形し弾性限界を超える事により壊れる事を避ける事ができる。例えば、人間を被衝突物と考えるのであれば、ロボットに強く押されることにより押しのけられるが、怪我はしなかったといった場合が相当する。

以下の章では、この2種類を衝突安全を実現するための手段として捉え、どのような安全のためのアプローチがあり得るかを議論していく。なお、前者に関しては、衝突前後の運動量変化が全て力積に変わり、衝撃力は力積に比例すると仮定している。

3. 衝突前後の運動量変化を小さくする手法

3.1 衝突エネルギーに関わる質量を小さくする衝突安全アプローチ

質量 m [kg]、重心周りの慣性モーメントが I である棒が偏心衝突を起こした場合を考える。重心 G から距離 l だけ離れた点 P が衝突を起こし、重心の並進速度 v_g [m/sec] が v_g' [m/sec] になり、重心 G 周りの角速度が ω から ω' になったとする。このとき、

衝突前後の重心の並進運動による力積 S と重心周りの角衝撃量 Sl は、

$$S = m(v_g' - v_g) \quad (1)$$

$$Sl = I(\omega' - \omega) \quad (2)$$

となる。よって、物体の衝突前後の力積 S は、

$$S = \frac{ml}{I + ml^2}(v' - v) \quad (3)$$

式[3]を見るとわかるように、質量 m を小さくするか、重心からの距離 l を大きくすれば換算質量を小さくする事ができ、最終的に衝撃力を小さくする事が可能となる。実際のマニピュレータで実現するためには、マニピュレータ自身を軽量に製作する事が考えられる。また、衝突前にマニピュレータの軌道を制御し、衝突する位置を変化させる事が考えられる。換算質量は、式[4]より重心位置からの2乗に反比例している。よって、多関節から構成されるマニピュレータにおいても、衝突位置を変更する事により衝撃力を軽減できる可能性が十分にある。

3.2 衝突時の相対速度を小さくする衝突安全アプローチ

二つの物体が衝突するとき、運動量保存法則から衝撃力は衝突時の相対速度に比例する事が知られている。よって、相対速度を小さくする事により衝撃力を軽減する事が考えられる。衝突時の相対速度を小さくするためには、2種類の方策がある。一つは、単純に減速する事により相対速度を小さくする方法であり、もう一つは、衝突角度を鋭角にすることにより、衝突が予想される被衝突物との衝突方向成分の相対速度を小さくする方法である。

一般的なマニピュレータの安全方策は、この方法が用いられていると言える。ただし、単に各関節を減速するだけでは、被衝突物方向への速度が本当に低下するのか、あるいは手先軌道がどうなるのかは、その時の状況に依存しており、場合によっては危険な場合も考えられる。

3.3 衝突時間を短くする衝突安全アプローチ

衝突時に時間的に変化する衝撃力 $F(t)$ による力積変化 S は、物体が時刻 t_1 から t_2 まで接触していたとき、

$$S = \int_{t_1}^{t_2} F(t) dt \quad (4)$$

と表される。すなわち、衝突時間が短くすれば衝撃エネルギーを小さくできると考えられる。また、柔軟物体との衝突の場合、衝撃力 $F(t)$ は、一定ではなく衝突開始からある傾きを持って増加していく。そのため、衝突時間を短くする事により、衝撃力の最大値を F_{max} から F'_{max} まで小さくする効果もある。これらを実際のマニピュレータで実現するためには、衝突前後にマニピュレータの軌道を変更し、被衝突物方向への速度を可能な限り素早く反転させる事が必要である。通常は、マニピュレータの高加速度での減速が必要となる。

4. 衝突時の被衝突物に与えられる力を小さくする手法

4.1 衝突時間を長くする衝突安全アプローチ

力積は、式[4]により表される。衝突では、短時間に大きな運動量変化を生じ、そのために被衝突物に対して大きな力が加えられる。ここで、衝突前後に同じ量のエネルギー交換があると仮定すると、衝突が終るまでの時間を延長する事ができれば、被衝突物に加わる衝撃力の最大値 F_{max} を小さくすることができることになる。

実際のマニピュレータでは、緩衝材などの被覆を用いる場合が、この手法に相当する。また、関節剛性を低くする事によって、衝突リンク以外のリンクからの影響を延長する事によって、緩衝材と同様の効果を得られる可能性がある。

4.2 接触面積を大きくする衝突安全アプローチ

被衝突物に衝撃力 F が加わる場合を考える。被衝突物の衝突時の破損、破壊は、衝撃荷重 F による衝撃応力 σ が被衝突物の弾性限界を超えるために起こると考えられる。衝突時の接触面積を A とすると、衝撃力による単位面積当たりの衝撃応力 σ は、

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (5)$$

となるため、衝突時に接触する面積が大きい方が応力が小さくなる事がわかる。よって、衝突時の接触面積を大きくする事で被衝突物に与える衝撃応力を小さくし、被害を抑える事が可能となる。

実際のマニピュレータでの実現には、緩衝材による被覆、丸みを帯びた形状にすることが考えられる。また、衝突時の姿勢を制御する事により、衝突時の接触面積を大きくする事も可能である。

5. 相互慣性力を用いた高加速度減速法

5.1 衝突後の衝撃力軽減動作の提案

本研究では、衝突後の衝撃力軽減手法の一つとして、緩衝材を用いる事により 4.1 節、4.2 節で述べた効果を期待し、延長した衝突時間内で 3.3 節で述べた衝突時間を短くするというアプローチを提案する。本手法では、マニピュレータの途中リンクが衝突する場合を考慮して、相互慣性力を利用して、単に停止させるよりも高加速度で衝突リンクを減速させる。

5.2 緩衝材と相互慣性力を用いた衝撃力軽減動作実験

実験には、3 自由度を持つ平面マニピュレータを用いた。衝突実験では、肩関節及び手首関節にそれぞれ -2.0 [rad.], 0.0 [rad.] の目標角度を与えた。肘関節に角度 $1.9 \sim 0.0$ [rad.] まで、 -5.0 [rad./sec.] の等角速度運動軌道を与え、下腕リンクをマニピュレータ正面に置かれた被衝突物に取り付けた衝撃用ロードセル (200B03, 480E09, PCB 社製) に衝突させた。下腕リンクの衝突部位には、緩衝材 (セルスポンジ、厚さ 20 [mm]) を取り付けている。緩衝材表面には、電極が取り付けられており、衝撃用ロードセルとの通電によって衝突が検出できるようにした。実験では、衝突検出後、以下の 3 通りの動作を実行させ、衝突時の衝撃力の大きさを比較した。

- (1) 回生ブレーキにより、マニピュレータを停止。
- (2) 下腕リンクが被衝突物から離れる方向にトルクを発生させ、被衝突物からの離脱動作を行う。
- (3) 肘関節による下腕リンクの離脱動作に加えて、手首関節を駆動させ、手首リンクの相互慣性力により下腕リンク

を高加速度で減速する。

なお、肘関節による離脱動作、手首関節による相互慣性力の生成の際には、それぞれの関節の最大出力トルクによって駆動を行った。

被衝突物に加わった衝撃力を図 1 に、加速度センサ (Type8704B5000, KISTLER 社製) により計測された下腕リンクの加速度を図 2 に示す。それぞれ、破線が動作(1)の停止動作、実線が動作(2)の離脱動作、一点鎖線が動作(3)の衝撃力軽減動作の結果を表している。衝突を検出した時刻を 0 [sec.] として時間をそろえてプロットした。なお、図 5 の縦軸は、被衝突物に対する減速方向 (あるいは、離れる方向への加速) が正方向になっている。

図 1 より被衝突物に加わった最大衝撃力は、動作(1)が 64.0 [N]、動作(2)が 65.3 [N]、動作(3)が 45.3 [N] であった。これより、衝撃力軽減動作を行った場合は、他の動作に比べ衝撃力が約 30% 軽減できている事がわかる。また、被衝突物との接触時間は、動作(2)が 47.7 [msec.]、動作(3)が 26.5 [msec.] であった。これは、衝撃力軽減動作を行う事で、衝突した下腕リンクが高加速度で減速し、速やかに被衝突物から離脱できた事を示している。

また、図 2 から動作(3)が他の動作に比べて下腕リンクを高加速度で減速できている事が確認できた。

以上より、緩衝材と相互慣性力を利用した衝突後の衝撃力軽減動作の有効性を確認する事ができた。

6. 結言

本報告では、衝突が避けられない状況を想定したマニピュレータの衝突安全性について議論を行い、力学的に見てどのような安全性向上のアプローチがあるかを考察した。また、本研究で提案した緩衝材と相互慣性力を用いた衝撃力軽減手法の実験結果を示し、先に検討を行った安全性向上のアプローチの中での位置づけについての考察を述べた。

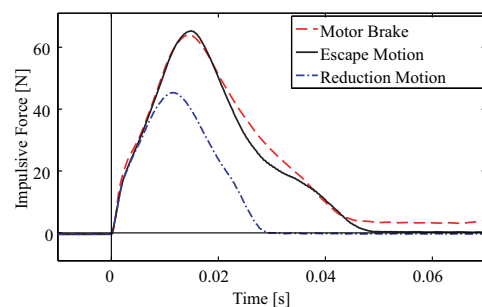


Fig. 4 Impulsive force of the impact target at collision

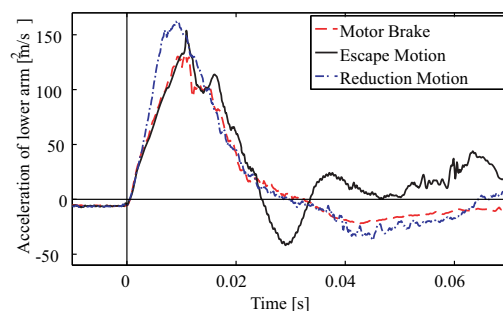


Fig. 5 Acceleration of the lower arm at collision