1712 回避不可能な衝突に対するヒューマノイドロボットの 腕部動作による衝撃力軽減手法

Impact force reduction method using humanoid robot arm for inevitable collision

○学 木持 優紀 (埼大) 学 畑山 純平 正 琴坂 信哉 正 程島 竜一
Yuuki KIMOTSU, Junpei HATAYAMA, Shinnya KOTOSAKA, Ryuuichi HODOSHIMA
Saitama University, Shimookubo255, Sakuraku, Saitama city, Saitama (10 point)

Recently, human and robots share working space. So it is important avoiding collision risk. This report proposes impact force reduction method using humanoid robot arm. We supposed to short impact time and to decrease impact velocity could reduce impact force. To achieve this approach we use "Reduction method based on the acceleration of a collision part". This method is developed type of the method using coupling inertia force. This method selects the motion that makes perpendicular ingredient of collision point acceleration maximum. Also, this method can make offline distribution too. So, computation time of reduction motion can be shorted. Several simulations and experiments using redundant manipulators are performed the effectiveness of this method.

Key Words: inevitable collision, Impact force, brake, humanoid robot

1. 緒言

近年、産業用や介護用など、人間と動作環境を共有するロボットが増加している。そのようなロボットは人との衝突の危険性が存在する。対策なしでは打撲や骨折など大きな被害が想定されるため、衝突に関する多くの研究がなされている。

衝突に関する研究のうち、衝突後のロボットの動作による能動的な対策に注目すると、緩衝材により衝突後の動作時間を確保した上で、衝突後の動作計画として、リンク間に発生する相互慣性力の利用により高角加速度での減速^[1]や、手先での加速度空間多角形(DAPB)を使用した衝突方向と逆向きに最高加速度で減速^[2]といった研究が衝撃力軽減を成し遂げている。しかし、相互慣性項の利用は手先に近づくにつれ効果が下がり、DAPBは衝突の予測が可能であることと衝突が手先で発生するという前提が必要になるなど、これらの手法は適用できる部分が限られており、単体ではロボットの全部位をカバーできず、対応していない部分での衝突においては衝撃力軽減効果が得られていない。

本研究では、衝突が免れない状況において、ヒューマノイドロボットのどの部分に衝突しても対応できる手法として、衝突リンク根元方向の関節角加速度による影響と、手先方向リンクの相互慣性の両方を考慮した“衝突部加速度基準離脱法”を提案する。この手法は衝突リンク重心の加速度を基準として、衝突リンクと衝突時の姿勢から衝突後の動作を決定する手法で、衝突リンクの同定が可能ならば使用できる。また、この手法の有効範囲を算出し、適用できない胴体関節近傍については、ベース反力の利用による衝撃力軽減動作を提案した。Fig.1に示すヒューマノイドロボットの上半身を模擬した平面双腕7リンクマニピュレータを用いて、これらの手法の効果を検証した。

2. 衝撃力軽減のアプローチ

2.1 衝撃力軽減のアプローチ

衝撃力の軽減には大きく分けて2種類のアプローチが考えられる。一つは被衝突物に与えられる衝突エネルギーを小さくするため、衝突前後の運動量変化を小さくする方

法で、衝突にかかわる質量減少、衝突相対速度減少、衝突時間短縮で、もう一つのアプローチは被衝突物に加わる力の最大値を小さくする方法で、衝突時間の延長と接触面積の増加により実現できる。

緩衝材を使用した上での衝突部の高加速度減速動作^[1]により、衝撃応力の最大値と衝突エネルギーの両方を小さくすることができる。この高加速度減速動作を衝突部加速度基準離脱法により実現する。

2.2 衝突部加速度基準高速離脱法の有効範囲

衝突部加速度基準高速離脱法はリンクの回転動作によるもののため、ベースと繋がる胴体中央部(Joint1)近傍では効果が得られない可能性が存在する。効果範囲の算出と、範囲外では別の衝撃力軽減動作が必要となる。

2.3 衝撃力軽減動作の必要条件

衝突の発生から衝撃力の第一ピークまでの時間は、緩衝材の効果を含めても多くて数10[ms]^[1]で、衝突検知には速くとも1[ms]は必要^[2]なため、軽減動作に使用できる時間は極めて短い。そこで本研究では、衝突検知後の計算時間短縮のため、衝突リンク、姿勢ごとの衝撃力軽減動作を実現する出力トルクの分布をオフラインで作成する。

Fig.1 7link manipulator

Fig.2 Reduction method based on the acceleration of a collision part

3. 衝突部加速度基準高速離脱法

3.1 衝突部加速度基準高速離脱法

Fig. 2 に示すように、マニピュレータ上のある点でのグローバル座標からみた角度が ϕ_c のとき、この点の速度 $\dot{x}_c$ と各関節角速度 $\dot{\theta}$ の関係は、その点のヤコビ行列を J_c として

$$\dot{x}_c = J_c \dot{\theta} \quad (1)$$

これを時間微分することである点の加速度と関節角速度、角速度の関係式が求まる。

$$\ddot{x}_c = J_c \ddot{\theta} + \dot{J}_c \dot{\theta} \quad (2)$$

マニピュレータの運動方程式を角加速度について変形し

$$\ddot{\theta} = M^{-1}(\theta) \cdot \{\tau - h(\theta, \dot{\theta}) - G(\theta)\} \quad (3)$$

(2) と (4) を用いると目標点の加速度と関節トルクの関係が以下のように導かれる。ここで $M(\theta)$ は慣性項、 $h(\theta, \dot{\theta})$ は摩擦などの非線形項、 $G(\theta)$ は重力項を示す。

$$\ddot{x}_c = J_c M^{-1}(\tau - h(\theta, \dot{\theta}) - G(\theta)) + \dot{J}_c \dot{\theta} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \ddot{x}_t &= \ddot{x} \cos \theta_t + \ddot{y} \sin \theta_t \\ &= -\ddot{x} \sin \phi_c + \ddot{y} \cos \phi_c \end{aligned} \quad (5)$$

(4) で求めた加速度から (5) を用いて目標方向成分を算出することができる。衝突部加速度基準離脱法では目標点を各リンクの重心位置、目標方向をリンクと垂直方向とする。関節最大トルクの組み合わせを代入し、加速度の目標方向成分が最大となった場合の組み合わせをそのリンク、姿勢での衝撃力軽減動作を実現するトルクとなる。

3.2 衝突部加速度基準高速離脱法検証実験

Fig.1 に示した 7 リンクマニピュレータの胴体(Link1)を厚さ 5[mm]の緩衝材を取り付けた状態で -10[rad./s] で被衝突物に接触させる。このとき、他の関節角度は全て 0[Rad.] とした。制御周期は 200[μs] とし、衝突の検知には双方に張り付けたアルミホイルの接触による通電を用いた。衝突後には回生ブレーキによる衝突位置での停止動作 a、衝突リンクのみの回避動作 b、衝突部加速度基準離脱法により決定した動作 c の 3 種類の動作を行わせ、衝撃用ロードセルを用いて衝撃力を計測、比較した。

それぞれの場合における衝撃力の時間変化にローパスフィルタをかけた結果を Fig.3 に示す。この結果より、衝突部加速度基準高速離脱法を用いた動作では、明らかに衝撃力の最大値と衝突時間の減少が確認でき、提案した衝撃力軽減動作が確かに効果を発揮することが検証された。

3.3 衝突部加速度基準高速離脱法の有効範囲

シミュレーションにより有効範囲を確認したところ、Joint1 から 0.002[m] の範囲では効果範囲外となったため、この範囲での衝突には別の手法が必要となる。

4. 胴体中央部衝突時のベース反力利用による衝撃力軽減

4.1 ベース反力利用法の提案

衝突部加速度基準高速離脱法の範囲外での衝突に対し、ロボットのベース部が移動可能な場合に、リンク動作により発生するベース反力を利用して衝撃力の軽減を行う。

マニピュレータの運動量方程式 (6) を時間微分してベース反力と関節角加速度の関係式 (7) を得る。

$$\begin{bmatrix} \dot{P} \\ \dot{L} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{M}_\theta \\ \dot{H}_\theta \end{bmatrix} \cdot \dot{\theta} \quad (6)$$

$$\begin{bmatrix} F \\ T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{M}_\theta \\ \dot{H}_\theta \end{bmatrix} \cdot \ddot{\theta} + \begin{bmatrix} M_\theta \\ H_\theta \end{bmatrix} \cdot \dot{\theta} \quad (7)$$

(3) と (7) によりベース反力とトルクとの関係 (8) が求まる。

$$\begin{bmatrix} F \\ T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{M}_\theta \\ \dot{H}_\theta \end{bmatrix} \cdot M^{-1}(\theta) \cdot \{\tau - h(\theta, \dot{\theta}) - G(\theta)\} + \begin{bmatrix} M_\theta \\ H_\theta \end{bmatrix} \cdot \dot{\theta} \quad (8)$$

この式を用いて衝突部加速度基準高速離脱法と同様に出力トルクの分布を作成する。

4.2 ベース反力利用法検証実験

3.2 と同様の制御周期、緩衝材、ロードセルを用いて、Joint1 に衝突物を 1.5[m/s] で衝突させ、回生ブレーキによる停止動作 A とベース反力利用動作 B の衝撃力の比較を行った。衝突時角度は Joint2=0.5[Rad.]、Joint5=-0.5[Rad.] で他はすべて 0[Rad.] とした。

結果を Fig.4 に示す。この結果より、ベース反力利用法を用いた動作では、停止動作より衝撃力の最大値と衝突時間の減少が確認でき、効果の検証がなされた。

5. 結言

人間とロボットの回避不可能な衝突の対策としてマニピュレータのどの部分で衝突しても対応できる衝突部加速度基準離脱法を提案し、それをもとに衝突状況ごとの出力トルクの分布をオフラインで作成した。また、手法の有効範囲を計算し、範囲外である Joint1 近傍における衝突対策としてベース反力の利用を提案した。実験により各手法の有効性の検証を行い、衝突時間の短縮と衝撃応力最大値の減少を確認した。

Fig.3 Impact force by collision at link1

Fig.4 Impact force by collision at body

参考文献

- [1]後藤大輔, 琴坂信哉, 大滝英正: “緩衝材と相互慣性項の利用によるマニピュレータ衝突時の衝撃力軽減動作”, 日本機械学会関東支部第 12 期総会講演会原稿
- [2]Jeong, Takahashi: “Impact Force Reduction of Manipulators Using a Dynamic Acceleration Polytope and Flexible Collision Detection Sensor”, Advanced Robotics 23, 2009