

空気圧衝突検知システムによる搭載型マニピュレータの対人安全性の向上

Improvement of human safety using Air-Pressure-Collision detecting-Sensor for mobile manipulator

○鄭 聖熹, 庄司 道彦, 王 志東, 高橋 隆行, 中野 栄二

○SeongHee Jeong, Michihiko Shoji, Zhi-dong Wang,
Tkayuki Takahashi, Eiji Nakano

東北大学

Tohoku University

キーワード: 接触センサ (tactile sensor), 衝撃力低減 (impact force suppression), MRクラッチ (MR clutch), 緩衝材 (shock absorber), 安全マニピュレータ (safety manipulator)

連絡先: 〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉01

東北大学大学院 情報科学研究科 システム情報科学専攻 中野研究室

鄭 聖熹, Tel.: (022)217-7025, Fax.: (022)217-7023, E-mail: jeong@robotics.is.tohoku.ac.jp

1. はじめに

工場等の生産現場で働いているロボットはそのワークスペースが人間のワークスペースと隔離されており, 人間とロボットマニピュレータが衝突を起こす可能性は低い。しかし, 最近, 人間の生活空間内で介護やサービスを行なうなど人間の手助けになるロボットが競って開発されている。そのようなロボットのワークスペースは人間の生活空間と重なり, 工場での隔離という安全装置はなくなってしまう。したがって, マニピュレータと人間または障害物との衝突の確率は増加し, 人間が痛み, 怪我等の身体的被害を受ける可能性が非常に高くなる。

安全マニピュレータを実現する方法は大きくfig.1のようにまとめることができる。

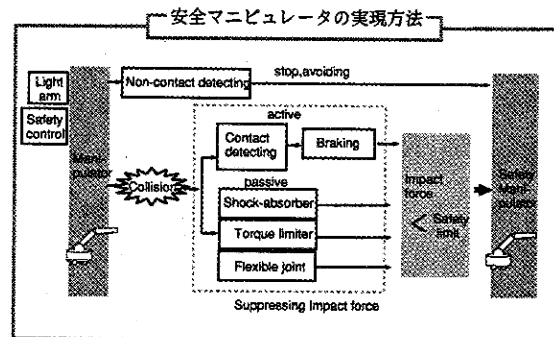


Fig. 1 安全マニピュレータの実現方法

マニピュレータとの衝突による被害を最小限にするためには, 何よりもそれ自体の慣性力を小さくしなければならない。このため, 全てのactuatorを根本側につけてワイヤで各関節を駆動する方法¹⁾が提案されている。また, vision, 超音波センサなどの非接触センサを利用し, 障害物との衝突を事前に検知する方法²⁾³⁾も提案されている。もち

ろん、人間を衝突から安全に守るためには、衝突を回避するのが一番良い方法である。しかし、人間の生活環境のように予測不可能な要素が多い状況、または、速い速度の衝突に対してはその安全性は保証できない。

これに対し、人間とロボットとの接触を前提とし、発生した衝撃力を低減することで人間の安全性を高めようとする方法が提案されている⁴⁾⁶⁾。この方法は大きく分けて衝撃力をactiveに低減させる方法とpassiveに低減させる方法に分けられる。activeな方法としては関節にブレーキを付けて衝突が終わる前にマニピュレータの慣性を減らし衝撃力を低減しようとする方法である³⁾。この方法の有効性は既に証明されているが、短い衝突時間の間に制動トルクを出せるブレーキが現在市販品では存在しないのが指摘されている。

また、この方法で重要な問題となるのは衝突の検知の問題である。マニピュレータ全体において接触検知が出来る方法として、感圧導電性ゴムを利用した方法⁵⁾や外乱observerによって接触を検知する方法⁶⁾等が提案されている。前者の方は6[ms]で接触を検知することができるが、センサ自体に緩衝効果がなく、衝突の際発生する衝撃力を低減するために厚い緩衝材をマニピュレータに装着しなければならない。また、感圧導電性ゴムはその特性のため関節には装着することはできないので、関節に対しての衝突検知は不可能である。外乱observerを用いたsensorless衝突検知の場合では接触を検知するのに50[ms]の時間を必要とし、そのため、緩衝材の厚さを厚くしなければならない。

衝撃力をpassiveに低減する方法としてはマニピュレータに緩衝材を装着し、衝撃力を直接に吸収する方法⁴⁾や関節に柔軟性を持たせる方法⁷⁾、関節にトルクリミッタ⁸⁾⁹⁾を採用し、大きな力が発生するのを制限する方法がある。これらの方法が目標としている安全基準としては、菅野らによって提案されたSI値に基づいたもの⁴⁾と、杉本らに

よって提案された人間の痛覚耐性値を基準としたもの⁶⁾がある。菅野らは脳震とうを起こすSI値を人間の安全基準として採用し、杉本らは人間の身体中一番痛覚に対する耐性値が低い部分の痛覚耐性値である50[N]の衝撃力を人間の安全基準としている。本論文では介護ロボットのマニピュレータを目的としており、後者の安全基準を採用することにする。

2. 安全マニピュレータの実現方法

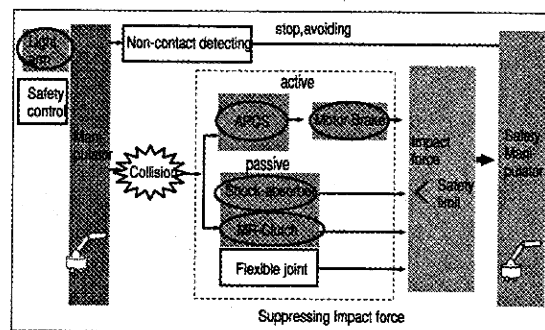


Fig. 2 提案する安全マニピュレータの実現方法

本研究では人間とロボットが衝突した場合を想定し、それによる衝撃力を安全基準以下に抑制する方法を提案する。その具体的な方法をfig.2に示す。本研究で提案するシステムには衝撃力を低減するactiveな要素とpassiveな要素が組み込まれている。これによって何らかの理由でactiveな要素による衝撃力の低減が出来なかった場合、passiveな要素でも安全性を保つフェイルセーフなシステムになっている。activeな要素としては、人間とロボット間衝突が起こった場合衝突を空気圧衝突検知システム(APCS)を用いてrealtimeで検知し、別のブレーキを用いることなくモータの制動力でマニピュレータの慣性を小さくし衝撃力を低減する方法を用いる。

passiveな要素としては、衝撃力の直接的吸収効果がある緩衝材とAPCSの弾性効果を利用して衝撃力を抑え、また、モータ側の慣性を数 μ sオーダーで

遮断するMRクラッチを用いて衝撃力及び押しつけ力に対しての安全性を向上させる。

3. モータブレーキによる衝撃力低減シミュレーション

3.1 緩衝材の粘弾性係数推定

衝突が始まってからモータブレーキによる制動トルクが出るまでに時間遅れが生じると、衝撃力にはどのような影響があるのかシミュレーションによって確認する。まず、マニピュレータの衝突モデルを選定する前に緩衝材のモデルを考える。fig.3に5要素Wiechertモデルを示す。このモデルで

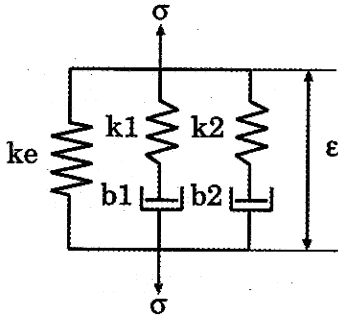


Fig. 3 5要素Wiechertモデル

の応力と歪みは(2)式で表され、歪みのステップ入力に対する応力の時間変化を測定し、(3)式によって各粘弾性要素の係数を求めることができる。

$$\sigma(t) = (k_e + \frac{k_1}{D + 1/\tau_1} D + \frac{k_2}{D + 1/\tau_2} D) \varepsilon(t) \quad (1)$$

$$\sigma(t) = (k_e + k_1 e^{(-t/\tau_1)} + k_2 e^{(-t/\tau_2)}) \varepsilon_0 \quad (2)$$

ここで、 σ は応力、 ε は歪量、 k_i は弾性係数[N/m²]、 b_i は粘性係数[Ns/m²]、 τ_i は b_i/k_i である。

3.2 モータ制動による急停止効果

1自由度アームの衝突モデルをfig.4に示す。衝突シミュレーションではsponge rubberをwiechertモデルに適用し、上記の方法で推定された粘弾性係数を用いることにする。

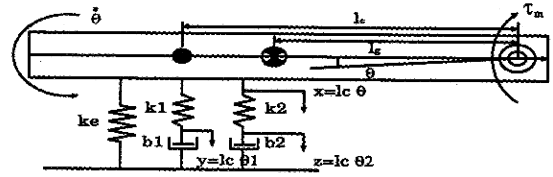


Fig. 4 1自由度衝突モデル

このモデルの運動方程式を求めると以下のようになる。

$$I\ddot{\theta} + b_a\dot{\theta} + k_e l_c^2 \theta + k_1 l_c^2 (\theta - \theta_1) + k_2 l_c^2 (\theta - \theta_2) = \tau_m \quad (3)$$

$$k_1 l_c^2 (\theta_1 - \theta) + b_1 l_c^2 \dot{\theta}_1 = 0 \quad (4)$$

$$k_2 l_c^2 (\theta_2 - \theta) + b_2 l_c^2 \dot{\theta}_2 = 0 \quad (5)$$

ここで、 I :システムの慣性質量、 b_a :システムの粘性係数、 τ_m :制動トルク、 k_i :緩衝材の弾性係数、 b_i :緩衝材の粘性係数、 l_c :衝突部位までの距離である。この運動方程式をRunge-Kutta法により解いて衝撃力の時間変化を求める。

表1. シミュレーション条件

armの質量	0.5[kg]	手先荷重	1[kg]
armの長さ	0.5[m]	衝突位置	0.4[m]
衝突面積	0.0003[m ²]	制動torque	6.9[Nm]
回転速度	90[deg/s]	ゴムの厚さ	0.01[m]

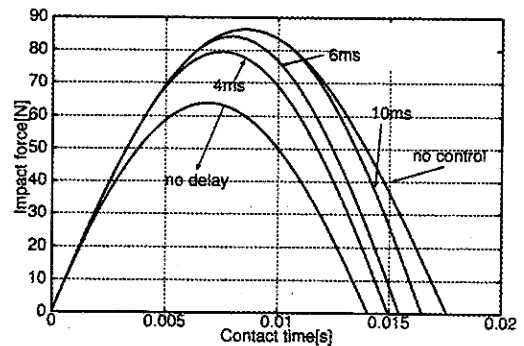


Fig. 5 制動トルクdelayによる衝撃力低減効果の消失

fig.5はモータの制動トルクのdelayによる衝撃力への影響を表すシミュレーション結果である。制御なしの場合に衝撃力のピーク値が87[N]でピークtimeが8[ms]となる衝突に対して6.9[Nm]の制動トルクをかける。その制御に遅れがない場合はピー

ク値が26[%]低減され64[N]となる。ただし、delay時間を4, 6, 10[ms]と大きくしていくと、制御の効果は減少する。

表2. シミュレーション条件

手先荷重	1[kg]	衝突面積	0.001[m ²]
緩衝材厚さ	0.01[m]	衝突位置	0.5[m]
回転速度	90[deg/s]		

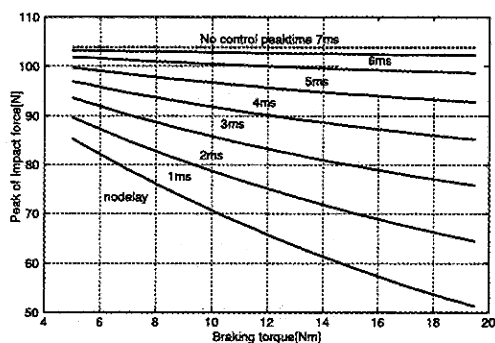


Fig. 6 制動トルクdelayによる衝撃力ピーク値低減効果の消失

fig.6は制動トルクの大きさとdelay時間による衝撃力のピーク値の変化を表したシミュレーション結果である。制御なしの場合、衝撃力のピーク値が103.88[N], ピークtimeが7[ms]の衝突に対し、制動トルク6[Nm]がdelayなしで作用すると20[%]程度衝撃力の低減ができる。これに3倍の制動トルクの18[Nm]をかけると48[%]のピーク値の低減が可能となるのが分かる。しかし、delay timeが大きくなって6[ms]になると制動トルクによる効果はほとんど見られなくなることがシミュレーション結果から分かる。これは、制動力を大きくしてもdelayによる制御効果の減少は補償出来ないことを示す。以上より衝突の低減のためには衝突瞬間から本来のピークtimeの50[%]程度の時間内に制御が出来るシステムが必要とされることが分かる。

4. 衝突検知システム

4.1 APCSの構成

空気圧衝突検知システム(Air Pressure Collision detecting System)の衝突検知方法をfig.7に示す。

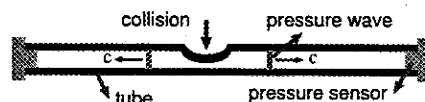


Fig. 7 空気圧衝突検知センサシステム

弾性のあるチューブの中に空気が入っており、チューブの両端または片方に圧力センサが付けてある。衝突が起こるとチューブが急激に変形し、その中には圧力波が生じる。発生した圧力波は音速でチューブ中を伝播して行き、圧力センサにはその圧力波による電圧の変化が生じる。この電圧を測定することによって衝突を検知することが可能である。

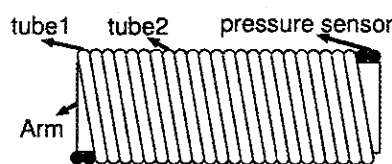


Fig. 8 巻き型APCS

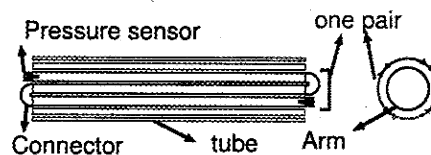


Fig. 9 並列型APCS

fig.8,9にAPCSの装着方法を示す。チューブを円筒型のアームにfig.8のように巻いたり、fig.9のようにアームの円周周りに並列に並べることでアーム全体の衝突検知が可能となる。fig.8のような巻き型はロボットの関節にも取り付けできるので関節を有するマニピュレータにも装着することができる。巻き型のメリットとしては一本のチューブがアームを片方から反対側までアームを巻きながら進むのでチューブがアームを覆う面積が広くなり、必要な圧力センサの数も少なくなる。しかし、衝突方向の判別が難しくなるデメリットが

ある。これに対し並列型は3本か5本の短いチューブの片方同士をコネクタで繋ぎ、最後に圧力センサを付ける形になるので、そのモジュールの数によって衝突の方向の識別が可能となる。しかし、巻き型よりは必要とされるセンサの数が多くなってしまふデメリットがある。

4.2 APCSの衝突検知速度

APCSの衝突検知速度は圧力波の伝播速度とチューブの長さに依存する。圧力波の伝播速度は空気中での音速であり式(6)のように計算される。

$$c = \sqrt{\frac{\kappa}{\rho}} \quad (6)$$

ここで κ は空気の体積弾性率、 ρ は空気密度である。しかし、fig.10に示すように、大気中の音速より

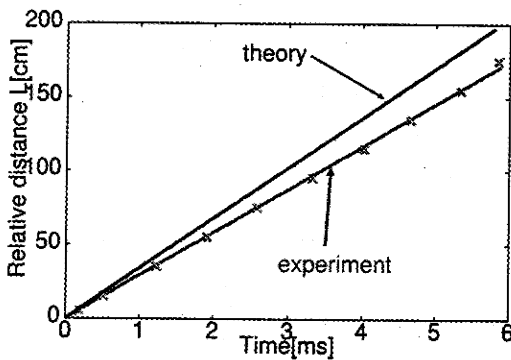


Fig. 10 圧力波の伝播速度

チューブ中の圧力波の伝播速度が遅いのが実験で確認された。この原因として、APCSでは空気の圧力波が弾性のあるチューブ中を通るので空気の体積弾性率がチューブの弾性の影響で小さくなったことが挙げられる。fig.11, fig.12は装着方法及び、空気温度の変化による伝播速度変化を測定したグラフである。図で分かるようにチューブ中の圧力波の伝播速度は装着方法には影響を受けず、空気温度に対しては(1)式で表されている音速の温度変化分程度の速度変化を見せている。

fig.13, 14, 15は実際に1自由度アームにAPCSを装着し、衝突検知時間を測定したものである。実

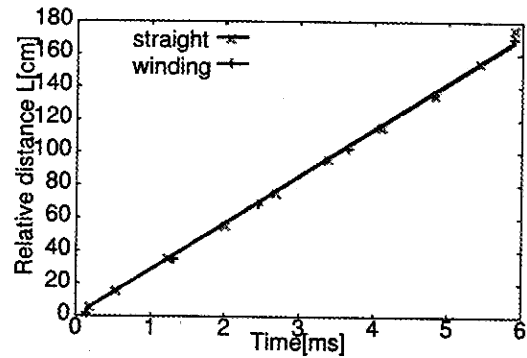


Fig. 11 装着方法による伝播速度比較

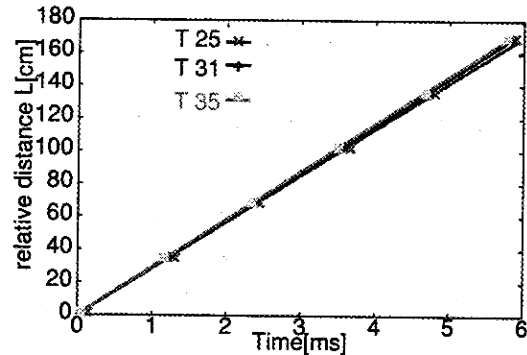


Fig. 12 空気温度の変化による伝播速度比較

験ではアームに硬さが異なる、長さ1[m]の三つのチューブ(Ame(低), Sorex(中), Baiton(高))を装着し、このアームが回転するとチューブの中央でload cellが衝突するように実験装置を配置した。アームを一定速度で回転させ、チューブをload cellに衝突させてloadcellから信号がでる時刻を衝突の始まりとした。

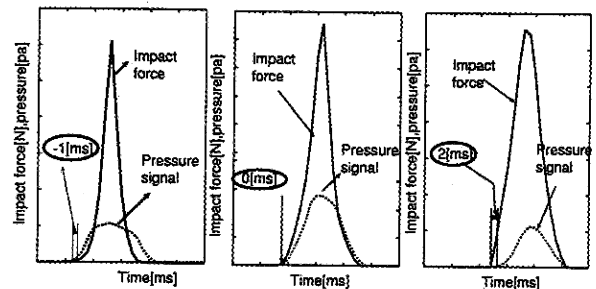


Fig. 13 Ame Fig. 14 Sorex Fig. 15 Baiton

実験結果を見ると、チューブの硬さが硬いほど衝撃力出現時間から遅れて圧力センサから信号が出ている。これは圧力波の速度に関係があるので

はなく、チューブの硬さが硬いBaitonの場合、まず、チューブによって衝撃力が発生し、その後変形が始まるからである。反対に硬さが低いAmeの場合は変形初期はloadcellに荷重が加わらず、ある程度チューブが変形してからload cellに荷重が加わることになるので圧力センサの出力信号が衝突信号より速く出る。結果的にマニピュレータが人間と衝突する際、人間側が衝撃力を受け始める時間を衝突開始時間だと考えると、硬さが低いチューブを使えば衝突前に衝突検知が可能になる。しかし、硬さが低いチューブを使うとチューブの弾性による接触時間延長効果が減るデメリットがある。

5. 緩衝材による衝撃力低減効果

安全マニピュレータを実現するためには衝突検知センサと急停止制御によるactiveな衝撃力低減方法以外に、passiveな低減方法でも安全性を保つ必要がある。そのため、passiveな方法として緩衝材による衝撃力のピーク低減効果及び安全基準を満たすための緩衝材の厚さを求めるためのシミュレーションを行った。シミュレーションでは前述通り緩衝材としてsponge rubberを使用した。fig.16にシミュレーション条件と結果を示す。

表3.シミュレーション条件

手先荷重	1[kg]	制動torque	6.9[Nm]
回転速度	90[deg/s]	衝突位置	0.5[m]
衝突面積	0.001[m ²]		

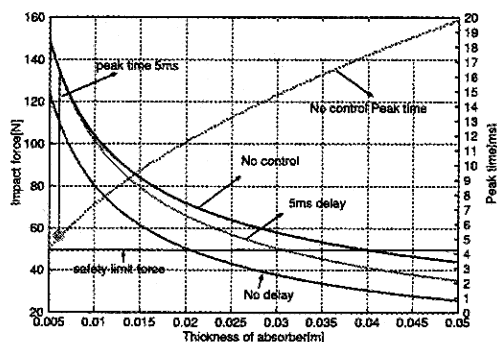


Fig. 16 緩衝材の厚さによる衝撃力の低減

グラフで右下がりの曲線は緩衝材の厚さの変化による衝撃力のピーク値の変化を表しており、緩衝材の厚さが厚くなればなるほど衝撃力のピーク値が減少するのが分かる。ここで、前に述べた人間の痛覚耐性値の50[N]を安全基準として採用すると、制御なしの場合は厚さ40[mm]、制動トルクdelay5[ms]の場合は30[mm]、制動トルクdelayがない場合は20[mm]のsponge rubberが必要になるのが分かる。

6. 緩衝材、急停止、APCSによる衝撃力低減実験

以上の衝撃力低減要素を用いて1自由度アームの衝突による衝撃力の低減効果を確認するための衝突実験を行った。fig.17に緩衝材のみ、緩衝材とチューブ弾性、緩衝材とチューブ弾性とAPCSの衝突検知による急停止の条件で行った衝撃力の低減効果実験結果を示す。

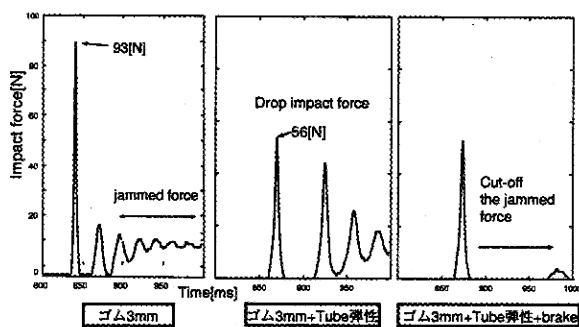


Fig. 17 緩衝材,APCS,急停止による衝撃力低減実験

まず、緩衝材としてsponge rubber 3[mm]を装着し、衝突させると衝撃力のピーク値は93[N]まで減り、緩衝材を使用しない場合より低減されるが2次ピーク以降は残ってしまう。次にsponge rubberの上にAPCSに用いられているチューブを並列型で装着して衝突させた。このとき、APCSとしての衝突検知は行わない。その結果、前よりピークが37[N]減っていることが分かる。しかし、2次ピーク

クがかえって高くなっており、また、その後も押しつけ力が対象物に加わっている。最後にAPCSによる衝突検知を行い、衝突を検知した瞬間モータに制動力をかけた。その結果、第一ピーク値には変わりがないが、それ以降はほとんど取り除かれているのが分かる。APCSによって衝突の瞬間、制動力をかけても第1次ピークに低減効果がないのは、モータの慣性がある程度の遅れ時間を持って現れるからだと思われる。つまり、実際のマニピュレータの衝突においては、衝撃力の第一ピークの発生源はマニピュレータの慣性力で、急停止制御では第一ピークの低減には間に合わず、第二ピークの発生源であるモータの慣性力がおもな低減対象となっていることを意味している。

しかし、マニピュレータの衝突によるピークtimeを緩衝材で送らせることが出来ればマニピュレータによる第一ピークにも急停止制御効果が現れる可能性が高くなると思われる。

7. MRクラッチによる安全性の向上

7.1 MRクラッチ

MR流体は磁場によって粘度が変化する磁性流体の一種で、降伏応力が磁場の強さに比例して決まる。MR流体に降伏応力を超えるせん断力が加わると数 μ sで降伏し、降伏するとずり速度とは関係なく磁場の強さで決められたせん断応力が誘起される特性を持っている。

現在、MR流体を使った機構としてはMRブレーキ(LORD社製 MRB-2107)が市販されており、これをクラッチとして利用する。fig.18にその構造を示す。コイルに電流を流すとそれに比例してMR流体の粘度が変化し、MR流体と軸に固定されているロータの間にトルクの伝達が行なわれ、ハウジングを回転させる。MR流体に誘起された降伏応力以上のせん断力が加わるとMR流体とロータの間に

スリップが生じ、伝達トルクは制限される。fig.19にMRクラッチのトルク伝達特性を示す。

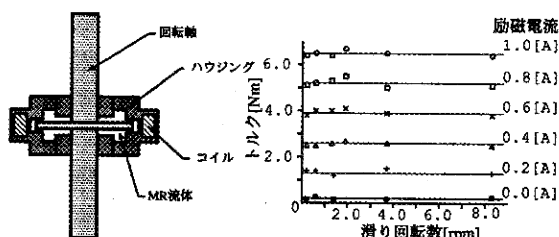


Fig. 18 MRclutch Fig. 19 励磁電流-トルク関係

7.2 衝撃力低減効果

fig.20は衝撃力に対するMRクラッチの低減効果を示すものである。実験ではMRクラッチの励磁電流を0[A]から1.0[A]まで0.2[A]ずつ変化しながらマニピュレータをload cellに衝突させてload cellの出力から衝撃力を求めるようにした。結果を見るとマニピュレータによる第一次ピークの低減はない。一方、モータの慣性力を表す第二ピークはMRクラッチの励磁電流によって決められるlimit torqueによって制限されていることがわかる。

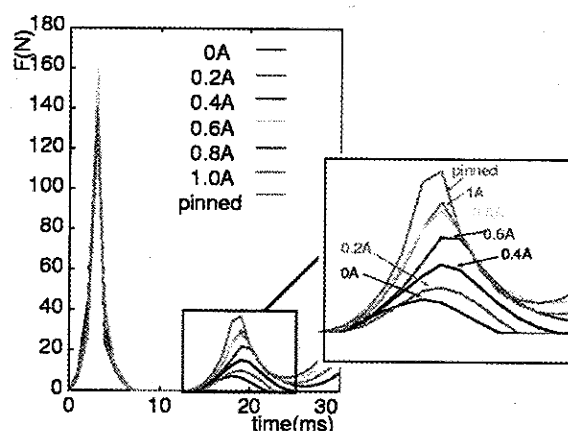


Fig. 20 衝撃力の低減

7.3 押しつけ力制限効果

fig.21は衝突が終って、マニピュレータが止まってからモータの出力による押しつけ力に対するMRクラッチの制限効果を表すものである。モータの出力はMRクラッチの励磁電流によるlimit torque

によって制限されていることがよく分かる。

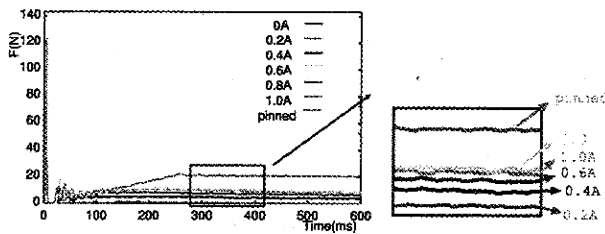


Fig. 21 押しつけ力の低減

8. まとめ

人間とマニピュレータとの衝突の際、人間側はマニピュレータが持っているエネルギーを短い時間内で受けてしまい、このとき発生する衝撃力によって大きな身体的被害を受ける。本論文では空気圧衝突検知システム(APCS)により衝突を素早く検知し、モータに制動力をかけることで衝撃力を低減し、さらに衝突後起こり得る危険な状況を回避する方法を提案した。しかし、センサによるactiveな低減方法は信頼性が100[%]に及ばず衝撃力の低減に失敗する可能性がある。このため、さらに、APCSの弾性、緩衝材、MRクラッチによるpassiveな衝撃力低減要素をシステムに入れることによってフェイルセーフなマニピュレータシステムを実現する方法を提案した。

9. 課題

3次元空間で動くマニピュレータにおいては衝突の方向を判別するのは重要な問題であるので、今後APCSで衝突方向判別を実現する予定である。また、APCSをマニピュレータの関節に取り付け、マニピュレータ全体での衝突検出を行う予定である。急停止においては一次ピーク低減のためモータロータの慣性が衝突の際遅れる原因を解析する必要がある。また、MRクラッチの励磁電流を制御することにより安全性を高める方針である。

参考文献

- 1) 広瀬茂男, 馬 書根: ワイヤ干渉駆動型多関節マニピュレータの開発, 計測自動制御学会論文集, 26-11, 1291/1298 (1990)
- 2) Broke, O. and Khatib: Elastic strips: Real-time path modification for mobile manipulation. In Proc. of the Int. Symp. of Robotics Research, pp. 117-122. Preprints.
- 3) 森善一, 川崎美希, 中村達也: 衝突における衝撃力抑制のためのロボットの運動操作, 第17回日本ロボット学会学術講演会(1999)
- 4) 森田寿郎, 鈴木雄一朗, 川崎 毅彦, 菅野重樹: 人間共存ロボットマニピュレータの衝突安全設計と制御, 日本ロボット学会誌, 16-1, 102/109 (1998)
- 5) 山田陽滋, 土田縫夫, 上田貫: 円筒形アームのための障害物検出用近接覚-触覚センサ, 日本ロボット学会誌, 6-4, 24/31 (1987)
- 6) 山田陽滋, 吹田和嗣, 今井孝二, 池田博康, 杉本旭: 痛覚耐性値に基づく安全な人間の接触検出及び停止機能を有するロボットシステム, 日本機械学会論文集(C編), 63-614, 232/237 (1997)
- 7) 川口順央, 阿部幸勇, 内山勝: 6自由度柔軟関節ロボットアームの高精度高速位置決め制御, 第17回日本ロボット学会学術講演会(1999)
- 8) 佐藤剛, 杉本旭: 安全ロボットの基礎的要件と構成に関する研究, 日本機械学会ロボティクスメカトロニクス講演会(VOL.A)95-17, 287/290(1995)
- 9) 橋野肇, 渡辺肇, 佐藤剛, 杉本旭: 本質安全アクチュエータの条件とMR流体の適用, 第17回日本ロボット学会学術講演会(1999)