

介護リフトのためのパワーアシスト技術の改善*

疋津 正利** 関 啓明** 神谷 好承** 吉本 智***

Development of Comfortable Power Assistance for Care Lift

Masatoshi HIKIZU, Hiroaki SEKI, Yoshitsugu KAMIYA and Satoshi YOSHIMOTO

Care lift is one of welfare machines. Most care lifts with power assistance lift up a handicapped person who has a disability in his legs like an industrial crane by applying the power of motor. However some care lifts bring the undesirable shock to a handicapped person because of the high-tension in its lift up motion. So the speed of lift up motion must be adjusted to decrease the power of shock. In this study, the method that can reduce the power of shock is proposed. It is suggested that the compliance control involved in the power assistance system of care lift can reduce the power of shock for the handicapped person at the moment of being raised.

Key words: care lift, compliance control, power assistant, reduction of shock, handicapped person

1. 序 論

福祉機器の一つとして介護リフトがある。介護リフトにおいては介助者が下肢の不自由な人を持ち上げる装置であるため、まず持ち上げ時において介助者にかかる重量負担をできるだけ小さくすることが求められる^{1)~3)}。こうした要求を満たすためにクレーンのようにモータの駆動力を応用して下肢の不自由な人を持ち上げるパワーアシスト付きの介護リフトの開発^{4)~6)}がこれまでは一般的であった。しかしこの方式には基本的に持ち上げられる人が持ち上がる瞬間に受ける衝撃力が考慮されていない。すなわち図1に示すように介護リフトにおいては持ち上げ以前には吊り上げロープがたるんだ状態であり、このため引き上げ動作時にそのロープのたるみがなくなった瞬間にロープが急に引っ張られ、その時に急激な衝撃力が発生してしまう。持ち上げられる人にとってはこうした不快な衝撃力は緩和されることが強く望まれる。早く速やかに引き上げることが可能な介護リフトであればあるほどこうした衝撃力が大きくなるため、これまでの装置においては引き上げスピードの調整によってこの衝撃力を小さくする必要があった。

本研究ではこうした問題に対してパワーアシスト装置の中

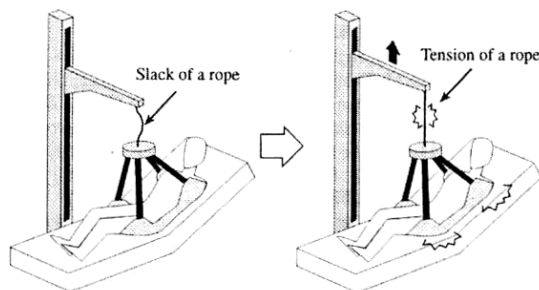


Fig. 1 Lift up motion by using a care lift

にコンプライアンス制御を実装し、引き上げ時の衝撃力を緩和する試みを行った。パワーアシスト装置の中にコンプライアンス制御を実装することによって吊り上げられる人が受ける衝撃力は小さくなると同時に下肢の不自由な人はゆりかごのようにソフトに動くことになり、パワーアシスト装置に快適性を与えることが期待できる。本研究では非常に柔らかいコンプライアンス制御を実現するために、計算機中に構成したコンプライアンスモデルからの出力をモータへの位置指令値とするサーボ系を開発した。

2. コンプライアンス制御を実装したパワーアシスト装置

2.1 制御系の構成方法

コンプライアンス制御を実装した本研究で提案するパワーアシスト装置のブロック線図を図2に示す。パワーアシスト用の操作レバーに取り付けられた歪ゲージにより介助者の意図である微小な操作力を検出し、制御装置へ入力する。制御装置の中では不感帯を通してこの操作力を積分する。計算機中にコンプライアンスモデルをばね質量系で構成し、操作力の積分値をコンプライアンスモデルへの入力とする。操作レバーにより検出された操作力に対して不感帯を通すことによりゼロ近傍でのノイズによるドリフトを取り除いている。また不感帯を通して操作力を積分することにより操作レバーを操作している間だけ持ち上げ動作が機能し、レバーが操作されていない間は吊り上げた状態を維持させている。コンプライアンスモデルにおける質量 (M_C) の運動を AC サーボモータへの位置制御入力とすることによってモータ軸に取り付けられたロープが巻き取られ、それに伴い負荷を持ち上げることができる。これだけの制御ではモータの駆動力を応用したクレーンによる持ち上げと大差なく、コンプライアンス制御の効果はなく、ロープのたるみがなくなった瞬間の衝撃を緩和できない。本研究ではコンプライアンス制御の効果を実感するために吊り上げ時に受けるロープ張力をセンサあるいはモータの電流値などで検出し、この値をコンプライアンスモデル部の質量 (M_C) に外乱力 (T_L) としてフィードバックすることによりコンプライアンス制御の効果を引き出すことにした。負荷荷重 (M) によりロープ張力 (T_L) が発生

* 原稿受付 平成 16 年 10 月 21 日
 ** 正 会 員 金沢大学大学院自然科学研究科
 (金沢市小立野 2-40-20)
 *** 金沢大学大学院自然科学研究科

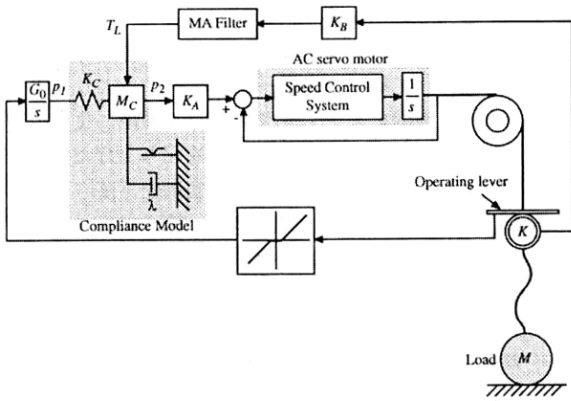


Fig. 2 Block diagram of power assistance with compliance control

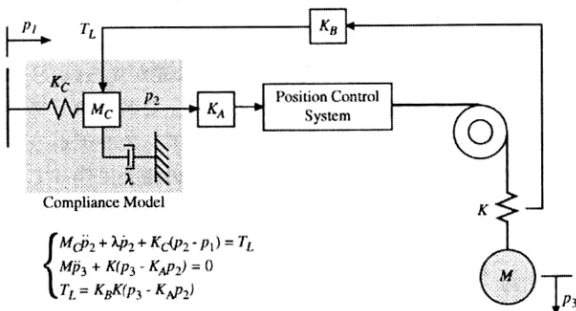
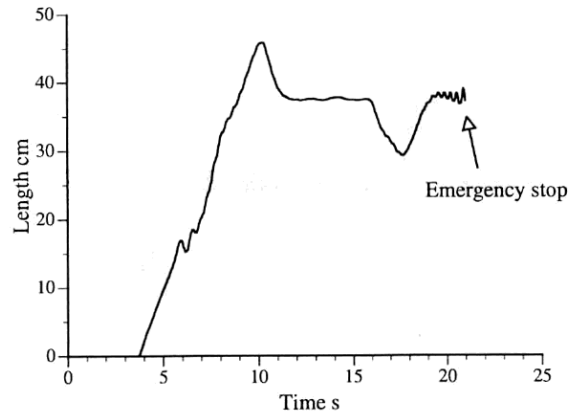


Fig. 3 Evaluation of the stability

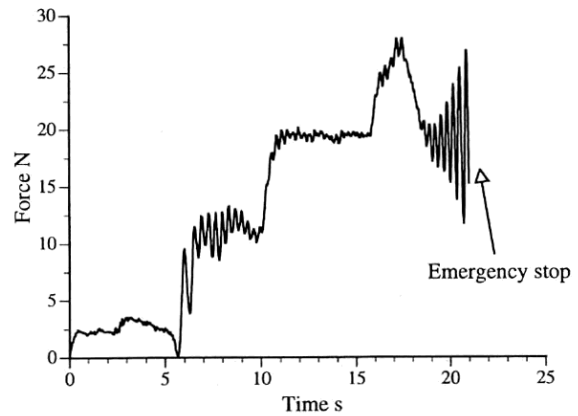
すればコンプライアンスモデル内の質量 (M_C) は動き、結果としてロープにかかる張力を大きくしない方向にモータを動かすことができる。ロープ張力である外力 (T_L) がコンプライアンスモデル中のばね (K_C) による復元力と釣り合う時点まで質量 (M_C) の移動は止まり、その後に負荷 (M) が持ち上げられ始めることになる。こうした運動をモータに発生させることによって吊り上げロープのたるみがなくなってロープが引っ張られた瞬間に発生する負荷 (M) への急激な衝撃力を緩和することができる。計算機中に仮想的に設定したばね・質量系で構成するコンプライアンスモデルのばね定数を小さくすればそれだけコンプライアンスの効果は大きく、従って持ち上げられる人が受ける衝撃力は緩和され、また重力方向にソフトに動くことにもなる。本研究ではコンプライアンスモデルの固有周期を約 1Hz に、そして系の減衰比を 1.0 に設定した。この値はほぼ乗用車のサスペンションに設定されている値に近いものである。他方、図 2 中のコンプライアンスモデル中には固体摩擦も含まれている。この固体摩擦を付加した意味とその効果は後述する。

本研究のパワーアシストにおいては持ち上げ動作とコンプライアンス制御とは別々に機能する。操作レバーを操作している間だけ持ち上げあるいは下降の動作が機能し、レバーを操作していない間は吊り上げた状態を保つことになる。他方コンプライアンス制御の効果によりロープ張力がコンプライアンスモデル部のばねの伸びを与えている。本研究では負荷 (M) を吊り上げたとき、その自重によりばねの自然長が約 25cm 伸びるような張力フィードバック係数 (K_B) を与えている。

$$p_3 = \frac{K K_C K_A}{M M_C [s^4 + \frac{\lambda}{M_C} s^3 + (\frac{K_C}{M_C} + \frac{K}{M} + \frac{K_A K_B K}{M_C}) s^2 + \frac{\lambda}{M_C} \cdot \frac{K}{M} s + \frac{K_C}{M_C} \cdot \frac{K}{M}]} \cdot p_1 \quad (1)$$



(a) Amount of lift

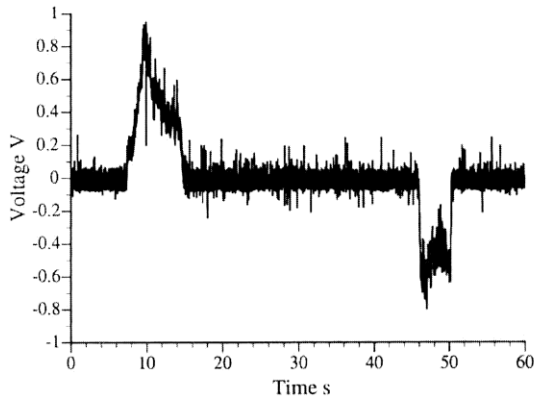


(b) Rope tension

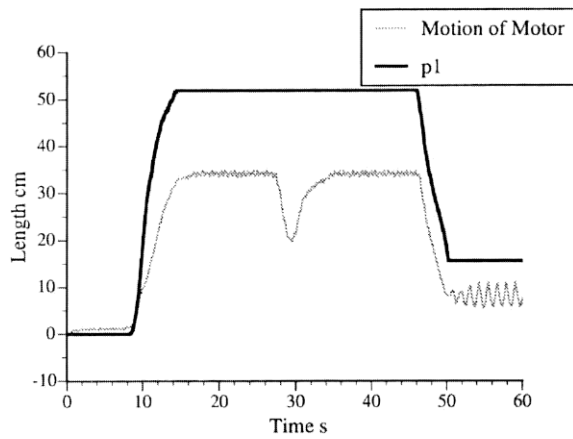
Fig. 4 Unstable phenomena of a care lift with compliance control

2.2 本制御系の安定性

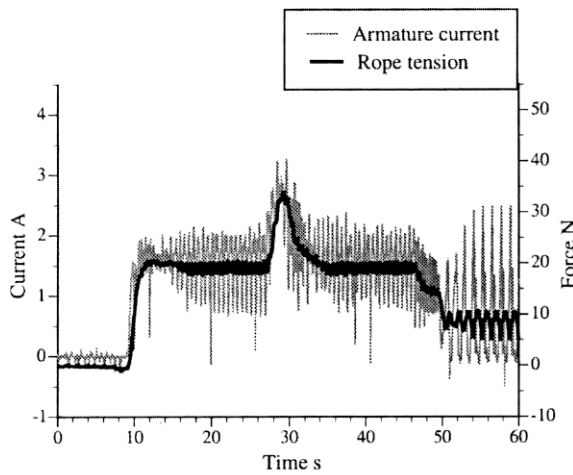
位置制御系を構成する AC サーボモータ制御系のゲインが十分大きい場合には本研究のパワーアシスト制御系は近似的に図 3 のように表される。コンプライアンスモデルへの入力を p_1 とし、負荷の位置 p_3 を出力とすると本研究で提案するパワーアシスト系の伝達関数は式 (1) のように与えられる。コンプライアンスモデルにおけるパラメータ (固有周期 1Hz, 減衰比 1) と吊り上げロープの剛性 (M と K で構成される固有周期約 5Hz) を考慮した場合、任意の張力フィードバック係数 (K_B) において式 (1) で表される本研究の制御系はおおむね安定であることを確認できるが、実際の系にはモデル化されない伝達要素が内在することにより場所によりわずかに不安定な制御系を構成してしまっている。図 4 にロープ張力をコンプライアンスモデルに外力として直接フィードバックしたときの応答波形の一例を示す。図 4(a) はモータが吊り上げた負荷の位置であり、図 4(b) はそのときのロープ張力の様子である。全体的にはほぼ安定であるが、吊り上げて約 20 秒後にロープ張力が発散的な振動状態を示し、吊り上げた負荷も不安定な上下運動を始めてしまっている様子がわかる。他方、ロープ張力をフィードバックしない場合にはどんな場所でも安定であり、不安定性の要因はロープ張力のフィードバックにあることを確認している。これよりロープ張力に 1 秒間の移動平均を施すことにより系の安定性を高めることにした。



(a) Voltage of force which the strain gauge detects



(b) Input of compliance model and amount of lift



(c) Armature current and rope tension

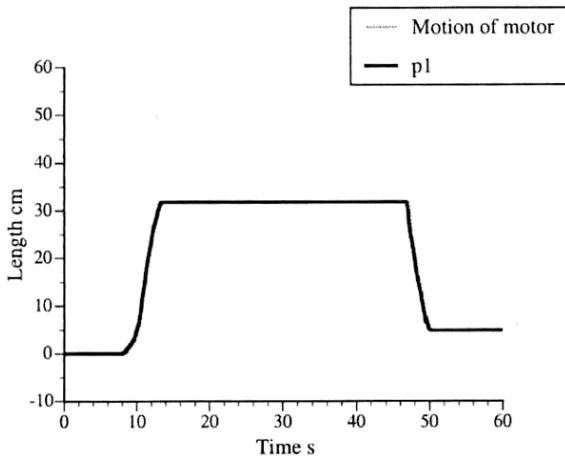
Fig. 5 Power assistance with rope tension feedback

コンプライアンスモデルの固有周期は 1Hz であり、1 秒間の移動平均の遅れを外乱力として加えても系全体の応答に与える遅れの影響はそれほど大きくはなく、不安定要因である外乱力を遅らせて系の安定性を高めることの方が重要であると判断した。

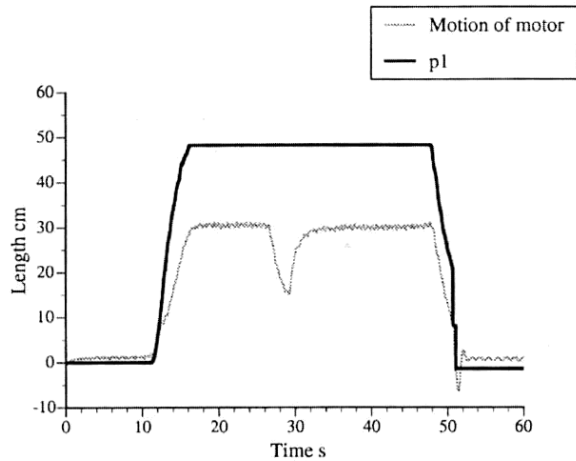
3. ロープ張力をフィードバックしたときの パワーアシスト性能の評価

ロープ張力に 1 秒間の移動平均を施し、その出力をコンプライアンスモデルの質量 (M_C) に外乱力 (T_L) としてフィー

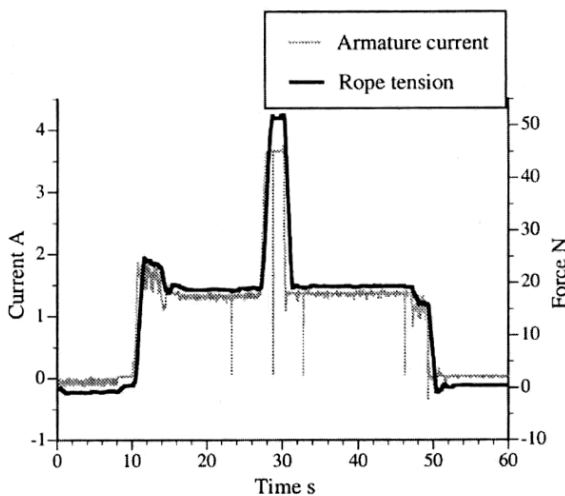
ドバックする図 2 に示す系を用いてパワーアシストを機能させた負荷 (M) の持ち上げ制御実験を行った。図 5(a) は人が操作レバーを操作しているその様子を歪ゲージにより検出したデータである。制御をスタートさせて約 6 秒後に負荷の持ち上げ動作を約 10 秒間行い、その後負荷を吊り上げた状態を約 30 秒間維持している。次の約 5 秒間で負荷を下降させ元の床の位置に着地させている。負荷の持ち上げ動作時間の方が下降に要する時間より長いのは最初にロープがたるんでおり、その分のロープをモータが巻き取らなければならないためである。図 5(b) は操作レバーで検出された操作力の積分値であるコンプライアンスモデルへの入力値 (p_1) と実際にモータが巻き取ったロープ長の様子を示す。持ち上げ動作をスタートさせてから負荷を吊り上げるまでにモータが巻き取ったロープ長と負荷を下降させて元の床上に着地させたときのロープ長には差が見られる。この差がロープの初期たるみ量である。制御スタート時点ではコンプライアンスモデルへの入力値 (p_1) とモータが巻き取ったロープ長には大きな差は見られないが、約 10 秒後からその差が次第に大きくなる。これはロープの初期たるみ量がなくなった後にコンプライアンスモデルの質量 (M_C) に働く外乱力としてのロープ張力の増大に伴ってコンプライアンスモデル中のばね (K_C) が次第に引き伸ばされていることを示している。この間のロープを巻き取るモータの運動は p_1 である操作力の積分値の運動に比べ比較的ゆっくりとした運動になっている。こうした運動が制御系中のコンプライアンスの効果であり、ロープが急に引っ張られることによって生ずる衝撃力を緩和してくれることになる。図 5 に示す負荷の持ち上げ実験においては、実験のスタート後約 30 秒後に負荷 (M) を故意に 5 秒間ほど重力方向に引っ張っている。そのときのロープ長の変化の様子も図 5(b) には含まれている。操作力の積分値 (p_1) の方には変化はないが、引っ張られたことで重力方向に負荷が動いていることがわかる。負荷を引く力を除けば再び元の位置まで戻っている。図 5(b) 中のデータに含まれているように約 45 秒後に負荷を下降させ床上に着地させている。その動作において約 50 秒後以降に望ましくない振動現象の発生が見られている。こうした望ましくない振動の原因とその対策については次節で述べる。図 5(c) にはロープ張力とモータの電機子電流の様子を示す。ロープ張力とモータの電機子電流はよく対応している。ロープの初期たるみがなくなったときのロープ張力の増大の様子、負荷を重力方向に引っ張ったときのロープ張力の様子、負荷の下降及び床上に着地したときの振動の様子がそのまま現れている。比較のためにロープ張力をフィードバックしない場合について図 5 と同様な負荷の持ち上げ制御実験を行った。その結果を図 6 に示す。図 6(a) は操作力の積分値 (p_1) とモータによるロープの巻き取り長さを示す。操作力の積分値とロープ長の変化にその差はほとんどない。負荷を重力方向に引っ張ってもロープ張りはまったく変化しない。負荷を吊り上げるまでにモータが巻き取ったロープ長と負荷を下降させて元の床上に着地させたときのロープ長の差であるロープの初期たるみ量はこのデータからも読み取ることができる。図 6(b) はロープ張力とモータの電機子電流の様子を示す。ロープ張力が急激に増加していることと、負荷の慣性力によって自重以上のロープ張力が発生している様子が伺える。図 6(b) には吊り上げてある負荷を重力方向に故意に引っ張ったときのロープ張力の増大の様子が含まれている。



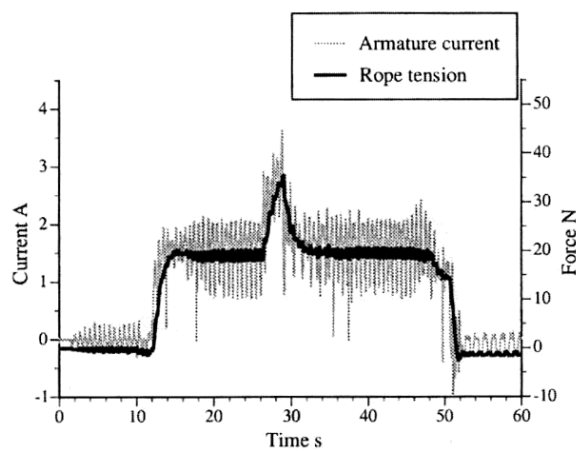
(a) Input of compliance model and amount of lift



(a) Input of compliance model and amount of lift



(b) Armature current and rope tension



(b) Armature current and rope tension

Fig. 6 Power assistance without rope tension feedback

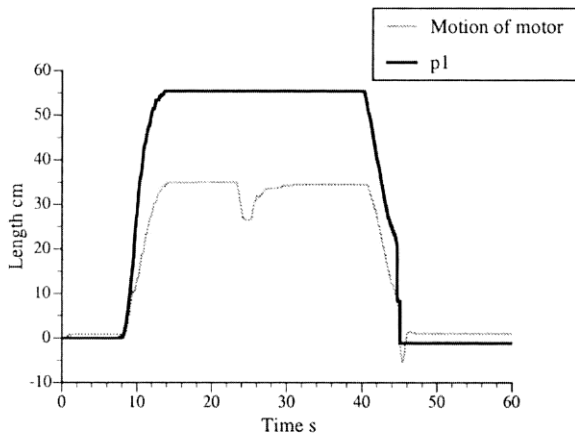
4. 吊り上げた負荷の安定性の向上

ロープ張力をコンプライアンス部にフィードバックする制御系において、負荷を下降させ床上に着地させたときに発生してしまう異常振動についてその原因と対策を考察する。ロープ張力の測定は負荷と吊り上げロープの間で行っている。負荷が床上よりわずかでも浮いていればロープ張力は負荷の全荷重に等しい。負荷 (M) が床上に着地すればロープ張力はその瞬間にほぼゼロになってしまう。すなわち負荷の着地においてロープ張力は負荷の全荷重かほぼゼロかのどちらかを与えるものとみなせる。ロープ張力をモータの電流値で推定することとしても結果は同じである。一方、負荷が床上より浮いている間はコンプライアンス部のばねはロープ張力により荷重分だけ伸びており、このとき負荷の着地が起こりロープ張力がゼロになればコンプライアンス部のばねは自然長まで縮もうとしてしまい、そのとき負荷は床上より浮き上がることになる。この現象が負荷の着地時に繰り返して起こり、これが異常振動になっていることが実験を通して明らかになった。他方、負荷の持ち上げ時にはばねは自然長であるためこの異常振動は起こらないことがわかる。従って本研究ではこうした異常振動を防止するために負荷が着地したその瞬間、すなわちロープ張力がゼロになった瞬間にコンプライアンス部

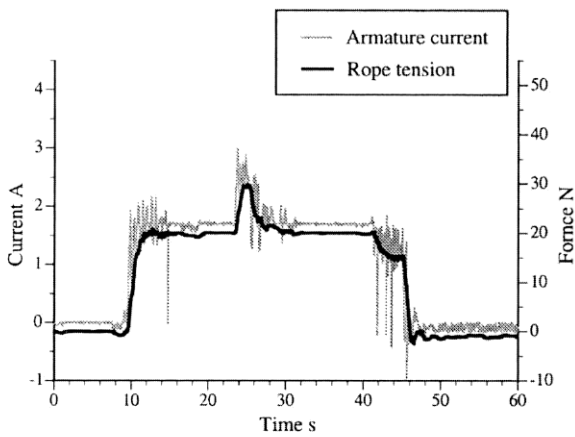
Fig. 7 Power assistance when the expansion length of spring is reset at the moment of touch down

のばねを自然長に戻すことにより着地時の望まない異常振動を防止することとした。負荷が着地し、ロープ張力がほぼゼロになった瞬間にコンプライアンス部のばね (K_C) を自然長に戻した場合の実験結果を図7に示す。図7に示されるように負荷の着地時の異常な振動は抑えられていることがわかる。そのときのロープ張力も振動的ではなくなっており、負荷は安定して床上に着地できている。

他方、図5と図7に示す実験結果に現れているように、吊り上げられた負荷にはロープ張力をフィードバックすることによる微振動が観察される。これはロープ張力の微小なノイズまでフィードバックされてしまうことによるものである。こうした負荷の微振動も吊り上げられる人には不安感を与えるものであり、できるだけ小さくすることが望ましい。本研究ではばねダンパで構成されるコンプライアンスモデルに非線形要素としての固体摩擦をあえて追加する試みを行った。固体摩擦は小さい力には動きにくい性質があるためより高い安定性が期待できる。固体摩擦のような非線形要素をコンプライアンスモデルの中に含ませることは本来考えにくいだが、時にはそうした効果も期待できる。図8は、図7で行った制御系のコンプライアンス部に固体摩擦を付加した場合の実験結果である。予想通りに吊り上げ物体の微振動を取り除くことができています。



(a) Input of compliance model and amount of lift



(b) Armature current and rope tension

Fig. 8 Power assistance with solid friction in the compliance model

5. 結 論

本研究ではパワーアシスト装置にコンプライアンス制御を実装する提案を行った。コンプライアンス制御を実現する方法として、モータ軸の変位と速度のフィードバックゲインを調整することにより実現する方法も考えられるが、実際には減速機等に含まれる固体/粘性摩擦等の外乱力の影響を強く受け、1Hz以下の非常に柔らかいコンプライアンスを実現することは現実的には困難である。このため本研究では、サーボゲインを大きくした位置制御系を用いて外乱に対して強いモータ軸の回転を得るその一方でコンプライアンスモデルを計算機中に構成し、ロープ張力以外の不必要な外乱のないコンプライアンスモデルからの出力をACサーボモータへの位置指令値として与えることによりパワーアシストのためのコンプライアンス制御を実現した。この結果非常に柔らかいコンプライアンス制御が実現できることを示した。そして、こうしたコンプライアンス制御の効果として、ロープの初期たるみがなくなったときに生じる衝撃力を緩和できることを示すとともに、それがパワーアシスト装置に求められる付加価値をより高められるものであることを明らかにした。

参 考 文 献

- 1) 垣本映: 高齢者の移動支援のための制御技術, 計測と制御, **40**, 5, (2001) 357.
- 2) 早津昌樹, 山田学, 田川泰敬, 山田大助: 懸垂機構を用いた多自由度型パワーアシスト吊搬装置の開発(第1報 実規範試験装置の試作と制御手法の検討), 日本機械学会論文集(C編), **68**, 671, (2002) 83.
- 3) 藪下英典, 平田泰久, 小菅一弘: パワーアシスト自転車の走行抵抗可変型制御, 日本機械学会論文集(C編), **69**, 680, (2003) 195.
- 4) 原進: パワーアシスト制御のロバスト性向上を目的とした制御系設計法, 日本機械学会論文集(C編), **70**, 690, (2004) 95.
- 5) 原進: サーボ搬送制御とインピーダンス制御のなめらかな切り換えによる台車の位置決め, 日本機械学会論文集(C編), **70**, 689, (2004) 127.
- 6) 舟久保昭夫, 谷城博幸, 福井康裕: パワーアシスト介助用リフト, 計測と制御, **40**, 5, (2001) 391.