

平成 13 年度

卒業論文

痙縮患者上肢ダミーロボットの 制御方法の検討

(折りたたみナイフ反応の擬似的再現)

指導教員

井上 喜雄 教授

甲斐 義弘 助手

高知工科大学 知能機械システム工学科

1020146 戸次 亨式

目次

1. 緒言	1
2. 痙縮のモデル化	3
2.1 基礎制御式	4
2.2 二軸におけるインピーダンス制御式	5
3. 装置の仕様	6
4. 実験パラメータ	7
4.1 理論上のモデルでの動作実験	7
4.1.1 実験結果	8
4.1.2 (4.1)節での実験の考察	11
4.2 DD ロボットの運動方程式を見直しての動作実験	12
4.2.1 DD ロボットの運動方程式	12
4.2.2 基底パラメータ	13
4.2.3 同時同定法	14
4.2.4 同定実験	15
4.2.5 実験結果	15
4.2.6 動作実験	16
4.2.7 実験結果	18
4.2.8 (4.2.6)項での実験の考察	22
5. 結言	24
謝辞	25
参考文献	26
付録	

1. 緒言

近年,癌,心臓病とならんで脳卒中は,三大成人病(生活習慣病)及び,三大死因の一つに挙げられている.脳卒中の場合,たとえ死を免れたとしても,何らかの障害を残しているケースも少なくない.その障害の最もありふれた病気の一つとして,痙縮が挙げられる.痙縮とは,人間の中枢神経が損傷した後に起こる病気である.臨床的にも痙縮は受動動作に対する抵抗として特徴づけられ,この受動動作は筋肉が高い張力に達するまで伸展すればする程強度が増すといったものである⁽¹⁾.そのとき,筋肉は“折りたたみナイフ”をたたむ時のように突然弛緩する.受動動作に対するこの抵抗は位置ばかりでなく変化速度にも敏感で,手足がもっと早く伸展すればもっと早く生成される.また,痙縮の影響を受ける筋肉のパターンやそれらしい姿勢は神経系がどれだけ障害から免れたかによって決まる.

痙縮はとくに,脳卒中片麻痺患者において,患者の活動性が上がるにつれて一般に痙縮が進む傾向にあり,上肢ではとくに歩行時,「肩関節の内転・屈曲,肘関節の屈曲,前腕の回外,手関節の掌屈,手指関節の屈曲」というパターンとして発現する⁽²⁾.こうした痙縮はADL(Activities of Daily Living)の面では手指関節の極度の屈曲は汗・垢の清浄を妨げ衛生面で問題を起こす.また,手関節の過度の屈曲は長袖の衣服を着脱する際に妨げとなる.さらに,上肢全体が極度に屈曲パターンに陥ると手部が胸部を圧迫することとなり,痛みを生じることもある.

この痙縮の抑制方法として筋弛緩剤の投与が行われるが,投与量によっては時に全身の筋の弛緩が起こり,他の機能の障害となりかねない⁽²⁾.また,神経外科的,整形外科的な手法は筋肉に送られる電気信号(インパルス)が筋肉に到達するのを妨げるために神経を切断したり,腱がその付着部で力を及ぼすことができぬよう痙縮筋の腱を切断したりすることにより,痙縮を止めている⁽¹⁾.しかしこのような方法では,生理学的な改善をもたらすというよりは,患者の欠陥を助長させるような限られた結果しか得られない.その他に,治療的電気刺激(TES)も試みられており一定の効果をあげている⁽¹⁾とされているが,長期にわたって埋め込み電極を使用するなど患者にとっての負担も少なくないし,電気刺激が永久的に痙縮を除くという確証もない.

もう一つの治療方法として一般的に行われている理学療法的方法の連続的他動運動(Continuous Passive Range of Motion, CPROM)訓練がある.これは低速度で他動運動を繰り返すことで関節の癒着防止や,神経系の再結合などが期待できるため広く行われている.しかし,このリハビリテーション(以下リハビリ)を行うPT(理学療法士, Physical Therapist)が100床につき1人の割合⁽³⁾でしかなく,患者1人に対して細かなリハビリが行えない.そうした背景のもと,PTの負担を軽減させるべく自動化された機器が必要とされている.実際,製品化されている「下肢運動療法装置 T E M L X 1」(安川電機製)⁽⁴⁾はアーム,操作パネル,コントローラなどからなるシステムであり,力センサを用いたインピーダンス制御やダイレクトティーチング機能により理学療法士(PT: Physical Therapist)が行う訓練と同様な動作を再現している.

上肢においては本大学 大学院生 伊藤氏らが痙性麻痺にも対応したロボットアームによる上肢リハビリの実現を最終的な目標とし、研究を進めている。

しかし、実験段階において生身の人間が被験者となり、実験を行うのはロボットが暴走した際に非常に危険である。また、再現性の面を考えると人間ではまったく同じ状態を再現するには困難である。

そこで安全性、再現性を考慮し、被験者である人間の代わりにアームロボットを用いることが望まれた。本研究では痙縮のいわゆる“折りたたみナイフ”反応で筋が突然弛緩する状態を SICE-DD アームロボット（以下 DD ロボット）を用いて擬似的な再現をした。

以下では、痙縮の“折りたたみナイフ”反応を、擬似的に再現するための制御方法及び、動作実験、実験結果によって発生した問題点、その改良方法を述べる。

2. 痙縮のモデル化

痙縮のモデル化として,他研究⁽¹⁾では(2.0)式を定義している.

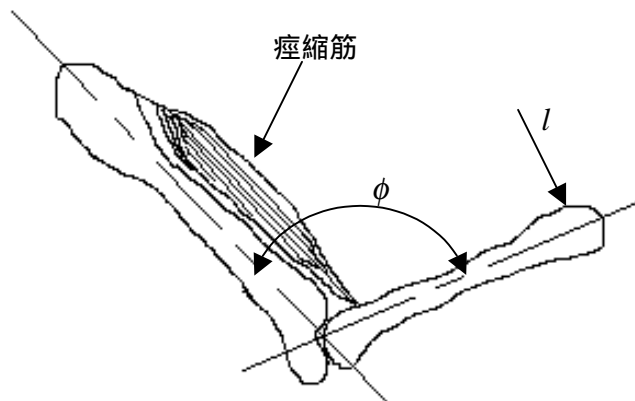


図.2.0

$$l = K_1\phi + K_2 \frac{d\phi}{dt} + K_3 \frac{d^2\phi}{dt^2} \quad (2.0)$$

(2.0)式は出力角と負荷あるいは外力との間の関係を論じた結果である.

まず,痙縮は伸展に対する抵抗を増加させる,という臨床観察に基づく事実を利用している.さらに,この抵抗は位置と速度に比例する.また人間の手足は質量あるいは慣性モーメントを持っているので,力もまた加速度に比例する.このようなことから(2.0)式が得られた.

ここで,定数 K_1, K_2, K_3 は測定結果から得たとある.また,健常の場合,受動動作に対する筋抵抗は痙縮肢に比べ,無視できる.それ故,痙縮では K_1 と K_2 は大きくなる,とある.

ここでもう一度(2.0)式を見てみると,これはインピーダンス制御の基礎式であることがわかる.そこでインピーダンス制御の制御式を2.1節で説明する.

2.1 基礎制御式

図 2.1 はインピーダンス制御の概念を 1 自由度で簡単に表したものである。環境からの外力は X 軸方向のみ働くものとする。インピーダンス制御では外力 F に従ってマニピュレータの位置 X が (2.1) 式に従うように制御されている。

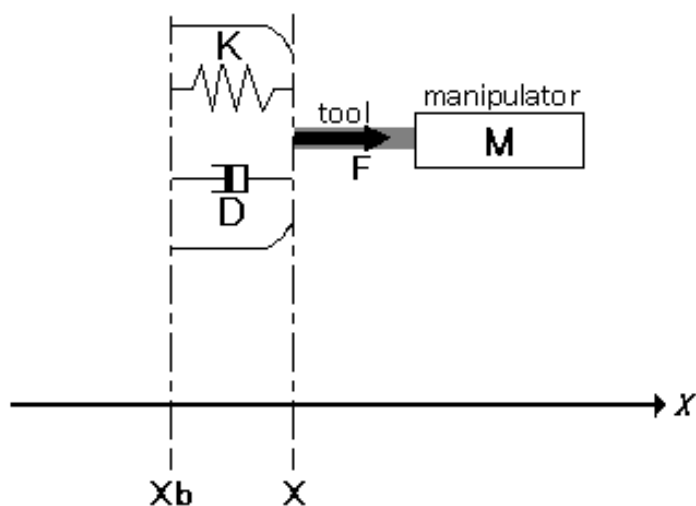


図.2.1

$$F = M(\ddot{X} - \ddot{X}b) + D(\dot{X} - \dot{X}b) + K(X - Xb) \quad (2.1)$$

ただし,

X : マニピュレータの手先位置	\dot{X} : 速度
\ddot{X} : 加速度	M : 仮想質量
F : マニピュレータが環境から受ける力	D : 仮想粘性係数 (ダンパ)
Xb : 仮想基準値	K : 仮想バネ係

仮想基準 Xb は仮想バネの基準である。

この仮想質量 M , 仮想粘性係数 D , 仮想バネ係数 K , の値を適度に設定することでインピーダンス制御の特徴である「バネ」と「ダンパ」が擬似的にロボットに組み込まれているかの様に動くのである。

2.2 二軸におけるインピーダンス制御式

(2.1) 式を水平二自由度で考えると,図3.2に示す様に変位は角度 q とするので (2.1) 式は (2.2) 式に置き換えられる.

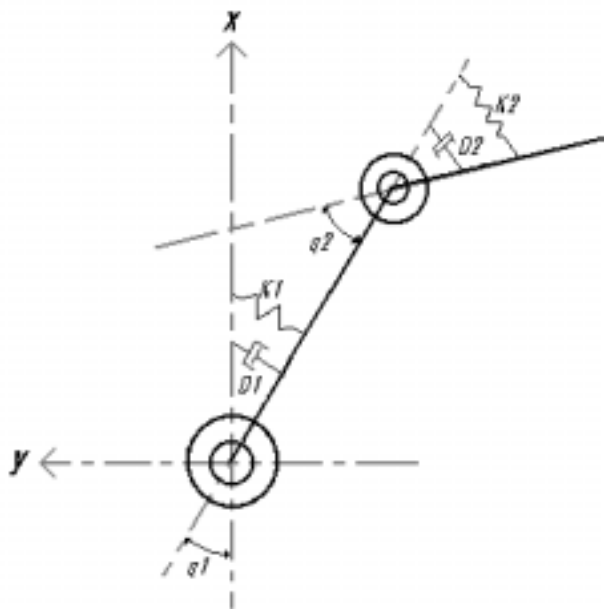


図.2.2

$$\tau = M(\ddot{q} - \ddot{q}b) + D(\dot{q} - \dot{q}b) + K(q - qb) \quad (2.2)$$

ただし,

q : 基準値からの変位角度

\dot{q} : 角速度

\ddot{q} : 角加速度

M : 慣性モーメント

τ : 外力 (トルク)

D : 仮想粘性係数 (ダンパ)

qb : 仮想基準値

K : 仮想バネ係数

仮想基準 qb は仮想バネの基準である.

また $q, \dot{q}, \ddot{q}, qb, \tau, \dot{q}b$ は 2次元ベクトルで, $q = [q_1, q_2]^T, \tau = [\tau_1, \tau_2]^T$ である. さらに, M, D, K は 2行2列の行列である.

$$\text{さらに, } \dot{q} = \frac{q_{n+1} - q_n}{dt} \quad (2.3)$$

$$\ddot{q} = \frac{\dot{q}_{n+1} - \dot{q}_n}{dt} \quad (2.4)$$

とする.

ただし, dt : サンプルング時間である.

3.装置の仕様

実験に使用した機材は,DD ロボット(東京エレクトロシステムズ株式会社製),トルク計算値と実測値を比較するための,フォース/トルクセンサ(ビー・エル・オートテック製),DA変換ボード DA12-8L(PC)(コンテック製),24ビットアップダウンカウンタボード CNT24-4(PC)(コンテック製),割り込み入力ボード IRT-16(PC)(コンテック製),非絶縁型双方向デジタル入出力ボード PIO-48W(PC)(コンテック製),AD変換ボード IBX-3133(インタフェース製)である.それぞれの仕様を付録の表 3.1~表 3.8 に示す.

また,DD ロボットの外形図,実物写真,制御入出力の信号系統図を付録の図 3.1,図 3.2,図 3.3 に示す.

4.実験パラメータ

安全性,再現性を考慮し,被験者である人間の代わりに DD ロボットをダミーロボットとして使用した.そして筋肉が高い張力に達するまで伸展すればする程強度が増し,ある時点で筋肉は“折りたたみナイフ”をたたむ時のように突然弛緩する,“折りたたみナイフ”反応の擬似的な再現を目標とした.

そこで,DD ロボットを痙性麻痺の患者の右上肢に見立て,2.2 節で述べたインピーダンス制御で制御している.

さらに,抵抗がある時点で急減するという特徴を再現するため,初期値から角偏差が $0.5236[\text{rad}]$ ($30[\text{deg}]$) に達した時点で関節トルクが 0 (ゼロ) となるよう設定した.また,第 2 軸を固定し,リンク長: $0.4[\text{m}]$ の 1 軸ロボットとした.

しかし,この DD ロボットはサーボロックがないため,第 1 軸,第 2 軸にそれぞれ独立したインピーダンス制御をし,さらに第 2 軸のインピーダンス制御における (2.2) 式の D と K の値を,第 1 軸の D と K の値の 2 倍とした.そうすることで同じ角偏差における第 2 軸のトルクは,第 1 軸のトルクよりも大きくなるので,第 2 軸に発生する反作用のモーメントが第 1 軸に発生するモーメントより大きくなる.よって,DD アームの手先位置(ここではフォース/トルクセンサ部)に外力を加えても第 2 軸の角偏差が増す前に第 1 軸の角偏差が増すこととなるので,見た目上,第 2 軸が固定されているとみなした.

以上のことをベースに動作実験を行った.動作実験の概要は基準位置から手先位置に手で力を加えていき,DD ロボットの力が「抜ける」(角偏差 $q_1 + q_2$ が $0.5236[\text{rad}]$ ($30[\text{deg}]$) に達する)まで力を加えて,その時までの偏差角,角速度,角加速度,計算によって出力されたトルク(以下出力トルク),出力トルクにリンク長 (0.4m) を除算した力(以下発生力),フォース / トルクセンサにより計測された力(以下外力)を見る.さらに,この実験の概要図を付録の図 4.0 に示す.

なお,実験においてのサンプル時間は $0.001[\text{sec}]$ である.

4.1 理論上のモデルでの動作実験

(2.2) 式の,仮想基準値を x 軸上とし 0 (ゼロ) とした.また,インピーダンス制御の理論上のモデルでの動作実験における,インピーダンス制御のプログラムのフローチャートを図 4.1.1 に示す.

なお,この時のインピーダンス制御における M, D, K の値は第 1 軸では $M=1.0, D=15.0, K=32.0$ で第 2 軸では $M=1.0, D=30.0, K=64.0$ である.この値は,角偏差が $0.5236[\text{rad}]$ で静止時,手先位置における力がほぼ 40N になるように逆算したものである.

ここで注意しなければならないことは,一般化座標における角度の正負の向きは反時計回りが正なのに対し,DD ロボットはプラス電圧では時計回りに動く,つまりトルクの正の向きは時計回りなので,角度の正負の向きと,実際に動くトルクの向きは逆である.

ゆえに,(2.2) 式の τ は外力ではなく,DD ロボットへの指令値のトルクに置き換えた.

4.1.1 実験結果

実験によって得られた角度,角速度,角加速度,出力トルク,発生力,外力のデータを(図4.1.1)~(図4.1.6)に示す.

なお、図中の棒線は角偏差が0.5236[rad]になった時を表している.

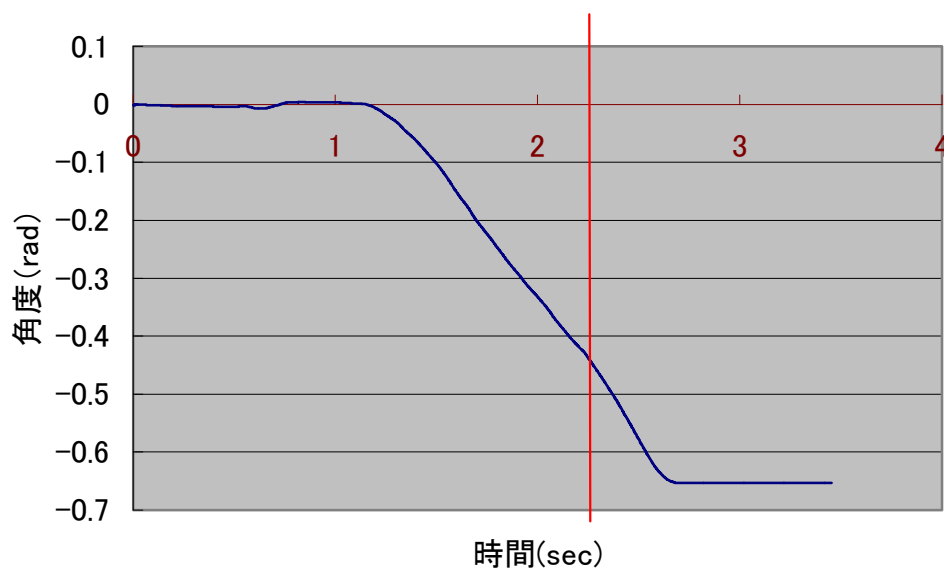


図 4.1.1 角度変化

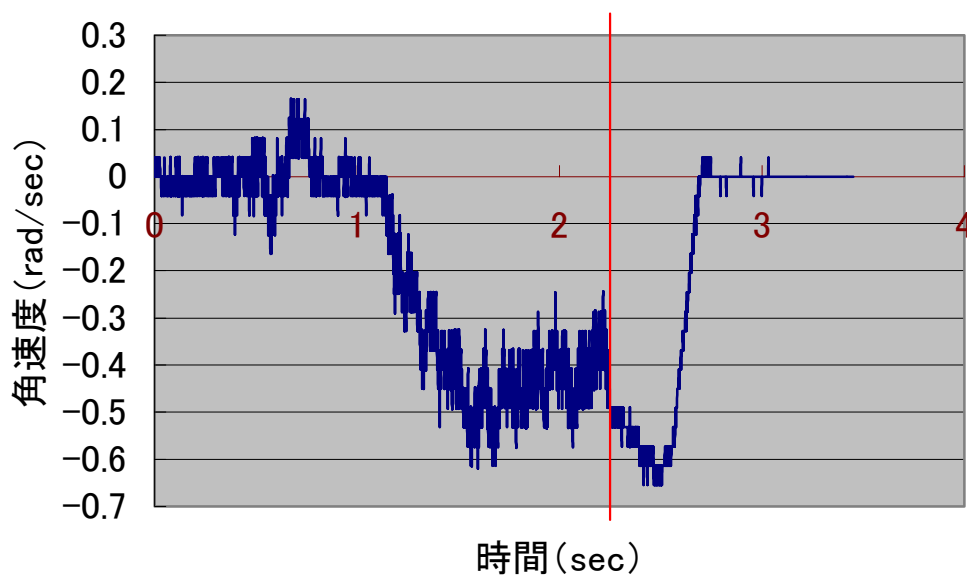


図 4.1.2 角速度変化

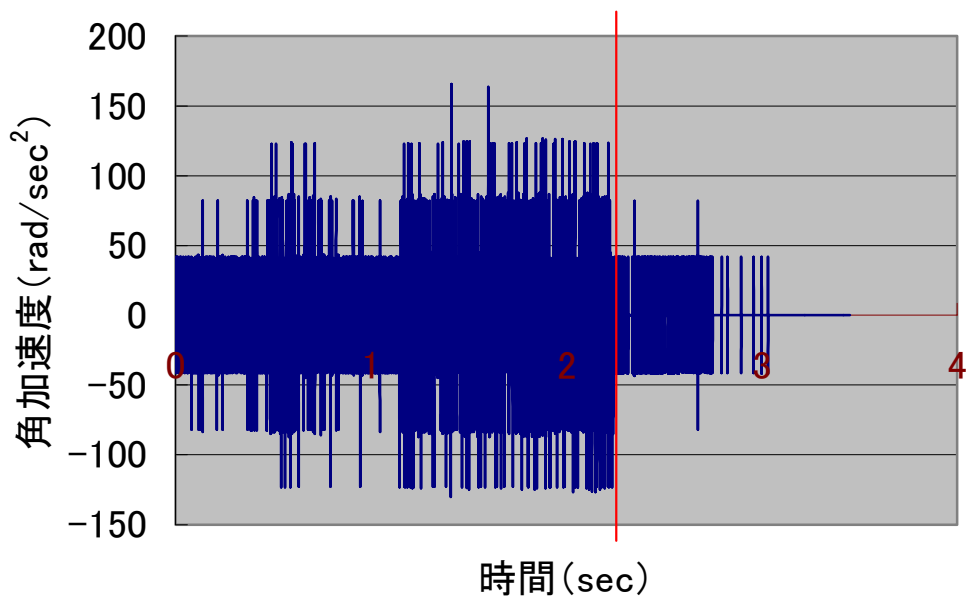


図 4.1.3 角加速度変化

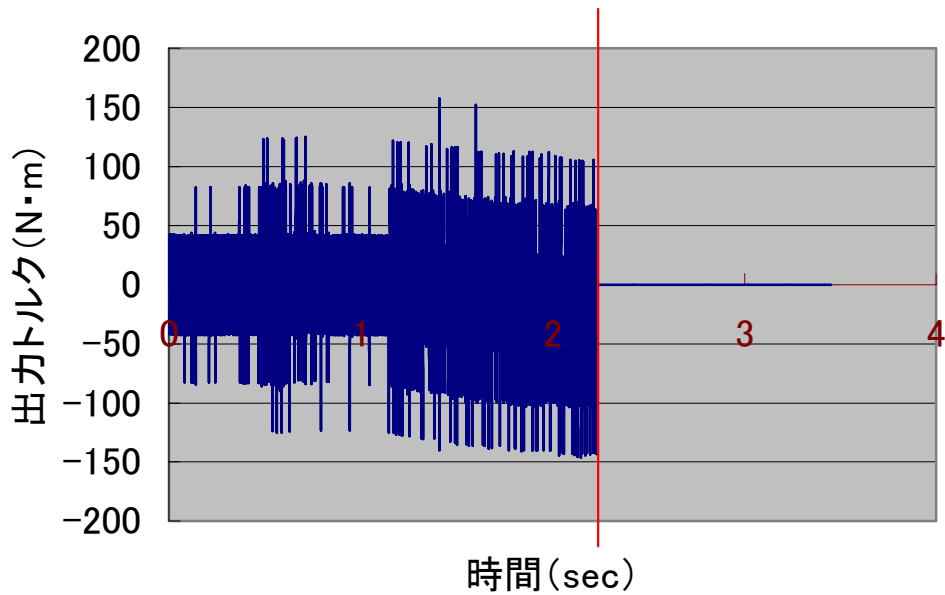


図 4.1.4 出力トルク

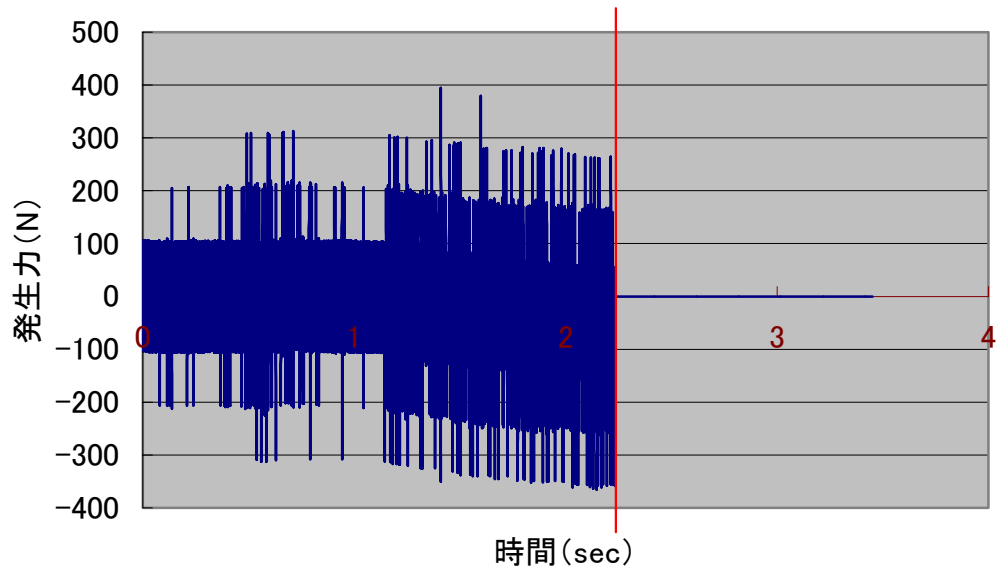


図 4.1.5 発生力

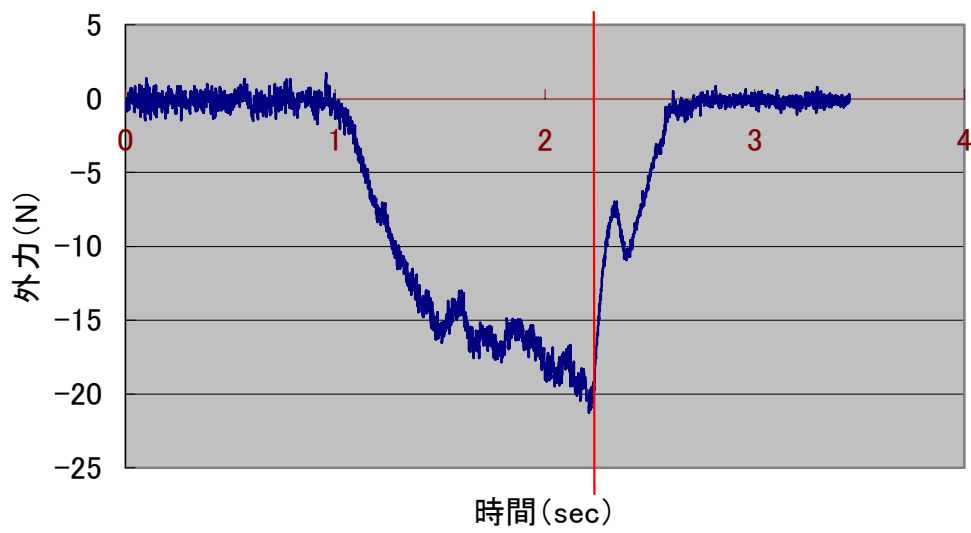


図 4.1.6 外力

4.1.2 (4.1)節での実験の考察

制御開始直後から、まだ外力を与えていないにもかかわらず、左右に小刻みに振動した。さらに力を加えても暴れるだけで、インピーダンス制御の特徴の1つである「バネ」のように変位が大きくなるほど力が増す、といったものが感じられなかった。ゆえに痙縮の「抜ける」といった感じもなかった。

また、実験によって得られたデータを見てみると、図 4.1.1 の角度変化は明確にとれているが、図 4.1.2 の角速度変化では、確かに波形が出ているがノイズがひどい。そのため図 4.1.3 の角加速度変化では、ノイズとみられるものしか現れていない。図 4.1.4 の出力トルク、図 4.1.5 の発生力とともにノイズの影響で全く変化が現れていない。本来、図 4.1.5 の出力力のグラフと図 4.1.6 の外力のグラフは、ほぼ一致してなければならない。しかし実際に比べてみてもまるで違う。

角度変化を細かく見てみたところ、外力を与えていない時でも角度の小数第 3 位以降が既に変動していた。これにより (2.3) 式からこの時の角速度を出す際に、サンプリング時間は 0.001[sec]なので、小数第 3 位以降も敏感にこの時の角速度を出す。角加速度を出す際にも同様に (2.4) 式から角速度のノイズ部分まで角速度の変化として角加速度に影響を及ぼしている。さらに、インピーダンス制御での D, M にこの角速度、角加速度を乗算することで、出力トルク、発生力に大いに影響を与えていることがわかった。

以上のことから、角加速度の影響から、結果的に振動するということが考えられた。また、図 4.1.7 の様に摩擦等の影響で本来の出力 (M, D, K で定めた時の計算された出力) すべきトルクと実際のトルクは異なることが推測される。

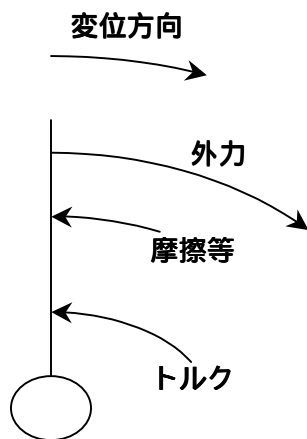


図 4.1.7

4.2 DD ロボットの運動方程式を見直しての動作実験

4.1 節の動作実験から考察した、「角加速度の影響から、結果的に振動する」ということで、今回は角加速度の影響を受ける慣性項 M の値を 0(ゼロ)とした。また、「摩擦等の影響で本来の出力 (M, D, K で定めた時の計算された出力) すべきトルクよりも実際のトルクと異なることが推測される」といったことから、ならばトルクの誤差分は何かを考え、運動方程式をもう一度見直した。そこで、今まで無視していた遠心力・コリオリ力、粘性摩擦力、動摩擦力を考慮して、その値を同定により推定値を求める。さらに制御系の理論上の運動方程式に摩擦等をキャンセルするように追加し、ロボットを動かした後、全体のトルクから追加した分を除く。そうすると、 $D\dot{q} + Kq$ の計算値から、動力学補償される前の実際に負荷がかかる値を見ることが出来る。

そのため、まず 4.2.1 項で DD ロボットの運動方程式を新たに示し、4.2.2 項で同定すべきパラメータ (基底パラメータ) を明確にし、4.2.3 項でその同定の原理を述べる。

4.2.1 DD ロボットの運動方程式

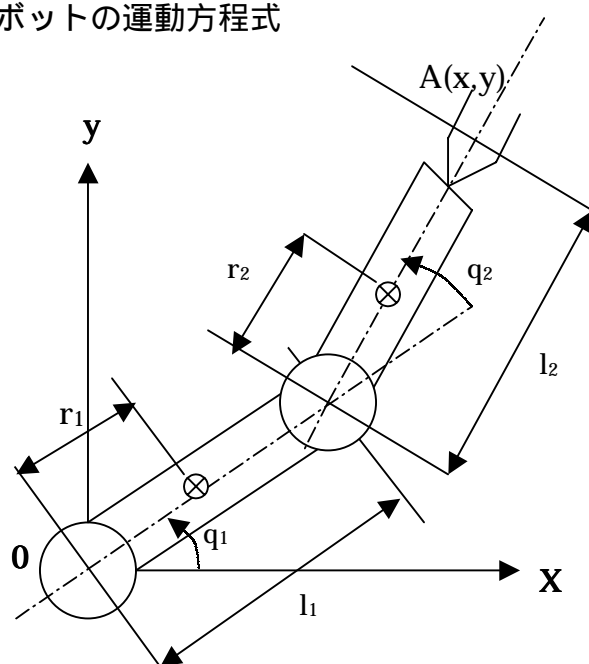


図 4.2.1 DD ロボットのモデル

DD ロボットは図 4.2.1 の様に表わせる。 m_i , $I_i (=I_{zzgi})$ ($i=1, 2$)をそれぞれ、リンク i の質量、リンク i の重心まわりの慣性モーメント、 l_i , r_i ($i=1, 2$)をそれぞれ、リンク i の長さ、第 i 関節の中心からリンク i の重心までの長さとする。また、 q_i ($i=1, 2$)を第 i 関節の角度、 τ_i ($i=1, 2$) を第 i 関節に加えられるトルクとする。さらに、図 4.2.1 のように、第 1 関節の中心から直角座標系 (x, y) とする (水平面内の運動に限る)。

この時、運動方程式は(4.2.1)式で表される。

$$\hat{M}(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q}) + B\dot{q} + \hat{D}(q) = \tau \quad (4.2.1)$$

ただし, $q = [q_1, q_2]^T$, $\tau = [\tau_1, \tau_2]^T$ であり, $\hat{M}(q)\ddot{q}$ は慣性力項を表わし, $C(q, \dot{q})$ は遠心
力コリオリ力項, $B\dot{q}$ は粘性摩擦項, $\hat{D}(\dot{q})$ は動摩擦項を表わし, 以下のようなになる.

$$\hat{M}(q) = \begin{bmatrix} \hat{M}_1 + 2R \cos q_2 & \hat{M}_2 + R \cos q_2 \\ \hat{M}_2 + R \cos q_2 & \hat{M}_2 \end{bmatrix} \quad (4.2.2a)$$

$$C(q, \dot{q}) = \begin{bmatrix} -2R\dot{q}_1\dot{q}_2 \sin q_2 - R\dot{q}_2^2 \sin q_2 \\ R\dot{q}_1^2 \sin q_2 \end{bmatrix} \quad (4.2.2b)$$

$$B = \begin{bmatrix} B_1 & 0 \\ 0 & B_2 \end{bmatrix} \quad (4.2.2c)$$

$$\hat{D}(\dot{q}) = \begin{bmatrix} \hat{D}_1 \operatorname{sgn}(\dot{q}_1) \\ \hat{D}_2 \operatorname{sgn}(\dot{q}_2) \end{bmatrix} \quad (4.2.2d)$$

$$\hat{M}_1 = I_1 + I_2 + m_1 r_1^2 + m_2 (l_1^2 + l_2^2) \quad (4.2.2e)$$

$$\hat{M}_2 = I_2 + m_2 r_1^2 \quad (4.2.2f)$$

$$R = m_2 r_2 l_1 \quad (4.2.2g)$$

4.2.2 基底パラメータ

ここで, 運動方程式 (4.2.1) 式を得るために必要でありかつ十分なパラメータが何かを明確にする.

まず, 明らかに, 個々のリンクごとに属するパラメータの集合

$$P = \{I_1, I_2, m_1, m_2, r_1, r_2, B_1, B_2, \hat{D}_1, \hat{D}_2\} \in R^{10} \quad (4.2.3)$$

がすべて既知であれば (ここで長さ l_1, l_2 は既知とする) 運動方程式は一意に決定できる. P を知ることは運動方程式を決定するための十分条件となる.

しかし, 運動方程式 (4.2.1) 式において P に含まれるパラメータは一意に決定できず, (4.2.4) のパラメータのみ決定できる.

$$\rho = \{\hat{M}_1, \hat{M}_2, R, B_1, B_2, \hat{D}_1, \hat{D}_2\} \in R^7 \quad (4.2.4)$$

なお, 注意すべきことは, P の第 1~6 成分と ρ の第 1~3 成分である. 運動方程式を一意に

決定できる必要最小限のパラメータ集合は各リンクがもっている物理パラメータ (I_i, m_i など)そのものではなく,それらのいくつかが結合されたものである.つまり,物理パラメータ自体は同定実験などを行っても,一意に決定できないのである.

4. 2.3 同時同定法

4.2.2 項から (4.2.4) のパラメータ ρ を同定すれば運動方程式を得ることができる.そこで同時同定法により ρ を同定した.

同時同定法⁽⁵⁾とは,与えられたマニピュレータの全関節を同時に運動させ,一挙に同定しようとする方法である.基本的には運動方程式 (4.2.1) 式が ρ に関して線形代数方程式であると見なせることから,運動方程式 (4.2.1) 式を書きかえると (4.2.5) となる.

$$\begin{aligned} & \hat{M}(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q}) + B\dot{q} + \hat{D}(\dot{q}) \\ &= \begin{bmatrix} \ddot{q}_1 & \ddot{q}_2 & 2\ddot{q}_1 \cos q_2 + \ddot{q}_2 \cos q_2 - 2R\dot{q}_1\dot{q}_2 - \dot{q}_2^2 \sin q_2 & \dot{q}_1 & 0 & \text{sgn } \dot{q}_1 & 0 \\ 0 & \ddot{q}_1 + \ddot{q}_2 & \ddot{q}_1 \cos q_2 + \ddot{q}_2 \sin q_2 & 0 & \dot{q}_2 & 0 & \text{sgn } \dot{q}_2 \end{bmatrix} \\ & \times \begin{bmatrix} \hat{M}_1 \\ \hat{M}_2 \\ R \\ B_1 \\ B_2 \\ \hat{D}_1 \\ \hat{D}_2 \end{bmatrix} \\ &= \tau \end{aligned} \tag{4.2.5}$$

時刻 $t=t_1, \dots, t_N$ におけるすべての運動データ

$$\{q_i(t), \dot{q}_i(t), \ddot{q}_i(t), \tau_i(t)\} \quad (i=1,2) \tag{4.2.6}$$

が測定できるならば, (4.2.5) 式より (4.2.7) 式を得る

$$A_N \rho = y_N \tag{4.2.7}$$

ただし,

$$A_N = \begin{bmatrix} \ddot{q}_1(t_1) & \ddot{q}_2(t_1) \\ 0 & \ddot{q}_1(t_1) + \ddot{q}_2(t_1) \\ \vdots & \vdots \\ \ddot{q}_1(t_N) & \ddot{q}_2(t_N) \\ 0 & \ddot{q}_1(t_N) + \ddot{q}_2(t_N) \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned} & 2\ddot{q}_1(t_1) \cos q_2(t_1) + \ddot{q}_2(t_1) \cos q_2(t_1) - 2R\dot{q}_1(t_1)\dot{q}_2(t_1) - \dot{q}_2^2(t_1) \sin q_2(t_1) \\ & \quad \ddot{q}_1(t_1) \cos q_2(t_1) + \ddot{q}_1(t_1) \sin q_2(t_1) \\ & \quad \vdots \\ & 2\ddot{q}_1(t_N) \cos q_2(t_N) + \ddot{q}_2(t_N) \cos q_2(t_N) - 2R\dot{q}_1(t_N)\dot{q}_2(t_N) - \dot{q}_2^2(t_N) \sin q_2(t_N) \\ & \quad \ddot{q}_1(t_N) \cos q_2(t_N) + \ddot{q}_1(t_N) \sin q_2(t_N) \end{aligned}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{q}_1(t_1) & 0 & \text{sgn } \dot{q}_1(t_1) & 0 \\ 0 & \dot{q}_2(t_1) & 0 & \text{sgn } \dot{q}_2(t_1) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \dot{q}_1(t_N) & 0 & \text{sgn } \dot{q}_1(t_N) & 0 \\ 0 & \dot{q}_2(t_N) & 0 & \text{sgn } \dot{q}_2(t_N) \end{bmatrix}$$

$$y_N = \begin{bmatrix} \tau_1(t_1) \\ \tau_2(t_1) \\ \vdots \\ \tau_1(t_N) \\ \tau_2(t_N) \end{bmatrix}$$

これより、の最小 2 乗法推定値 $\hat{\rho}$ (4.2.8) 式が計算される

$$\hat{\rho} = (A_N^T A_N)^{-1} A_N^T y_N \quad (4.2.8)$$

4. 2. 4 同定実験

以上のことから同定実験を行った。

まず,DD ロボットの第 1, 第 2 関節にランダムにそれぞれトルクを出力させ,その時の角度,角速度,角加速度,トルクを計測する.ただしランダムに発生させた時の最大のトルクは設定できるものとした.また角度はエンコーダから計測し,角速度,角加速度は差分によって求め,トルクは計算によって出力される際のデータである.なおこの時の計測時間は 0.013[sec] である.

4.2.5 実験結果

ランダムに発生させた時の最大トルクの入力値をそれぞれ変えて、この同定実験を4回行った。表4.2.1に示すものは実験によって得られた $\rho = \{\hat{M}_1, \hat{M}_2, R, B_1, B_2, \hat{D}_1, \hat{D}_2\}$ の値で、4回分とその平均値である。

表4.2.1 同定実験結果

	1回目	2回目	3回目	4回目	平均値
\hat{M}_1	0.005249	0.035383	0.074488	-0.00138	0.028435
\hat{M}_2	0.002155	0.008208	0.018195	-0.00055	0.007003
R	-0.00255	-0.01441	-0.03196	0.000701	-0.01205
B_1	-0.0749	-0.68964	-0.14777	-0.06106	-0.24334
B_2	-1.49727	-4.12142	-0.40708	-5.04107	-2.76671
\hat{D}_1	-0.17855	-0.87169	-0.53567	-0.89316	-0.61977
\hat{D}_2	-0.07496	-0.25349	-0.99498	-1.27351	-0.64924

ここで $R, B_1, B_2, \hat{D}_1, \hat{D}_2$ の値がマイナスなのは変位角度の正負の方向と、DD ロボットのトルクの正負方向が逆向きのためマイナスとなった。

4.2.6 動作実験

4.1節での実験同様、(2.2)式の仮想基準値をx軸上とし、0(ゼロ)とした。また、この動作実験におけるインピーダンス制御のプログラムのフローチャートを図4.2.2に示す。

粘性摩擦力、動摩擦力等を考慮し、同定実験により求められた値を(2.2)式に追加するにあたり、ここで少し説明を加える。

まず、 $\hat{\tau}$ を一般化座標のトルクとし、正負の向きは角度と同様、反時計回りを正とし、DD ロボットにおけるトルクの指令値を τ とすると、(4.2.9)式の関係であることがわかる。

$$\tau = -\hat{\tau} \quad (4.2.9)$$

また、(4.2.1)式は一般的に、

$$\hat{M}(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q}) + B\dot{q} + \hat{D}(\dot{q}) = \hat{\tau} \quad (4.2.10)$$

となる。

そこで、この反作用の力を求めるには、

$$-\hat{M}(q)\ddot{q} - C(q, \dot{q}) - B\dot{q} - \hat{D}(\dot{q}) = \hat{\tau}$$

となり,

$$\hat{M}(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q}) + B\dot{q} + \hat{D}(\dot{q}) = -\hat{\tau} \quad (4.2.11)$$

となる.そこで(4.2.9)の関係式から

$$\hat{M}(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q}) + B\dot{q} + \hat{D}(\dot{q}) = \tau \quad (4.2.12)$$

となる.つまり(4.2.6)項の同定実験で得られた結果は,摩擦等の反作用の力における,基底パラメータを推定したこととなる.よって,

$$\hat{\tau} = \hat{M}(q)\ddot{q} + h(q, \dot{q})'$$

$$\text{ただし, } h(q, \dot{q})' = C(q, \dot{q})' + B'\dot{q} + \hat{D}'(\dot{q}) \quad (4.2.13)$$

とするならば,

$$\tau = \hat{M}(q)\ddot{q} + h(q, \dot{q})$$

$$\text{ただし, } h(q, \dot{q}) = C(q, \dot{q}) + B\dot{q} + \hat{D}(\dot{q}) \quad (4.2.14)$$

とし,その関係式は

$$\begin{aligned} \hat{M}(q) &= -\hat{M}'(q) \\ h(q, \dot{q}) &= -h'(q, \dot{q}) \end{aligned} \quad (4.2.15)$$

となる.

ここでインピーダンス制御の(2.2)式にロボットアームの環境の特性を運動方程式に表わすと,

$$\hat{\tau} = \hat{M}'(q)\ddot{q} + h'(q, \dot{q}) - D\dot{q} - Kq \quad (4.2.16)$$

となり,

$$-\hat{\tau} = -\hat{M}'(q)\ddot{q} - h'(q, \dot{q}) + D\dot{q} + Kq$$

と変形する.ここで関係式(4.2.9),(4.2.15)より,

$$\tau = \hat{M}(q)\ddot{q} + h(q, \dot{q}) + D\dot{q} + Kq \quad (4.2.17)$$

ただし,

$$\hat{M}(q) = \begin{bmatrix} \hat{M}_1 + 2R \cos q_2 & \hat{M}_2 + R \cos q_2 \\ \hat{M}_2 + R \cos q_2 & \hat{M}_2 \end{bmatrix}$$

$$h(q, \dot{q}) = C(q, \dot{q}) + B\dot{q} + \hat{D}(\dot{q})$$

$$= \begin{bmatrix} -2R\dot{q}_1\dot{q}_2 \sin(q_2) - R\dot{q}_2^2 \sin(q_2) \\ R\dot{q}_1^2 \sin(q_2) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_1 & 0 \\ 0 & B_2 \end{bmatrix} \dot{q} + \begin{bmatrix} \hat{D}_1 \operatorname{sgn}(\dot{q}_1) \\ \hat{D}_2 \operatorname{sgn}(\dot{q}_2) \end{bmatrix}$$

を得た.

なお,前回同様,第1軸の仮想粘性係数 D の値を 15,仮想ばね係数 K の値を 32 とし,第2軸の D の値を 30,K の値を 64 とした.

さらに, $\rho = \{\hat{M}_1, \hat{M}_2, R, B_1, B_2, \hat{D}_1, \hat{D}_2\}$ の値は 4 回の同定実験によって得られた値の平均値である.

4.2.7 実験結果

実験によって得られた角度,角速度,角加速度,出力トルク, $[D\dot{q} + Kq/\text{リンク長}]$ (以下純発生力) と [外力] の力比較, [発生力] と [外力] の比較等を (図 4.2.3) ~ (図 4.2.9) に示す.

なお, 図中の棒線は角偏差が 0.5236[rad] になった時を表している.

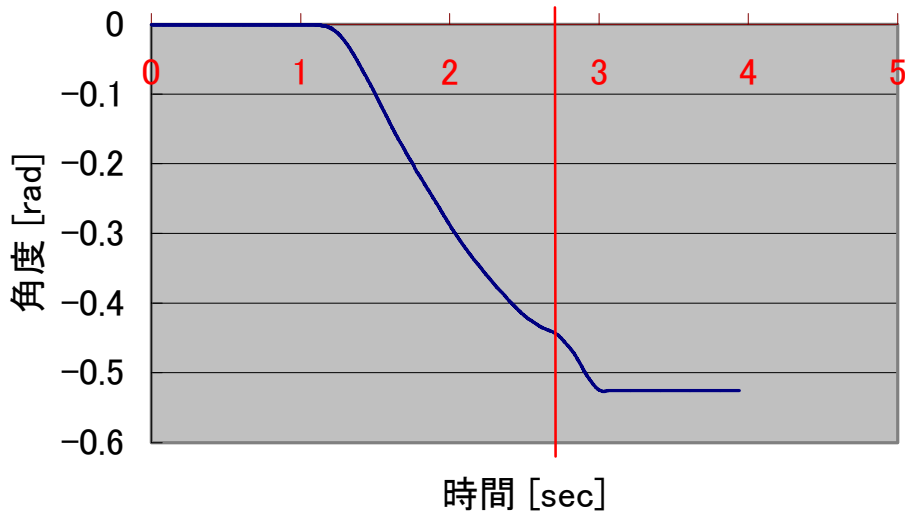


図 4.2.3 角度変化

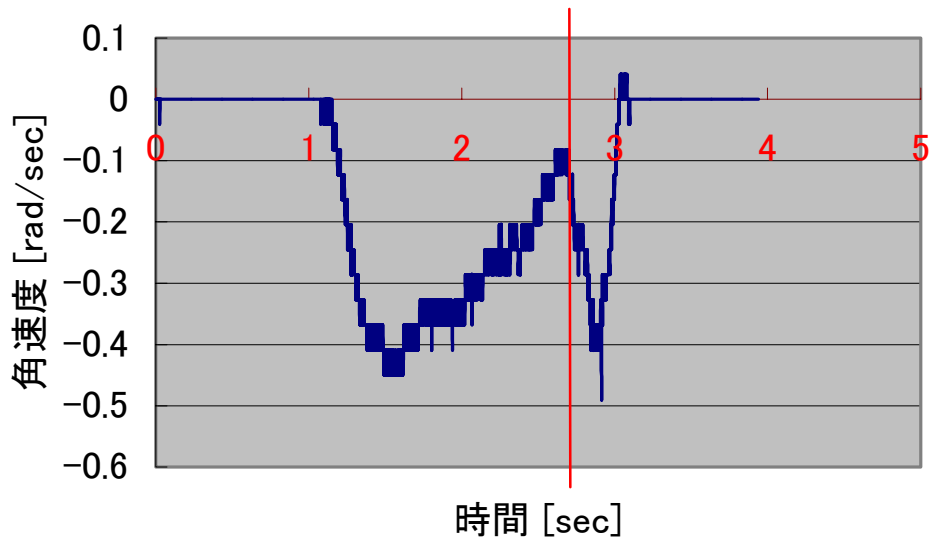


図 4.2.4 角速度変化

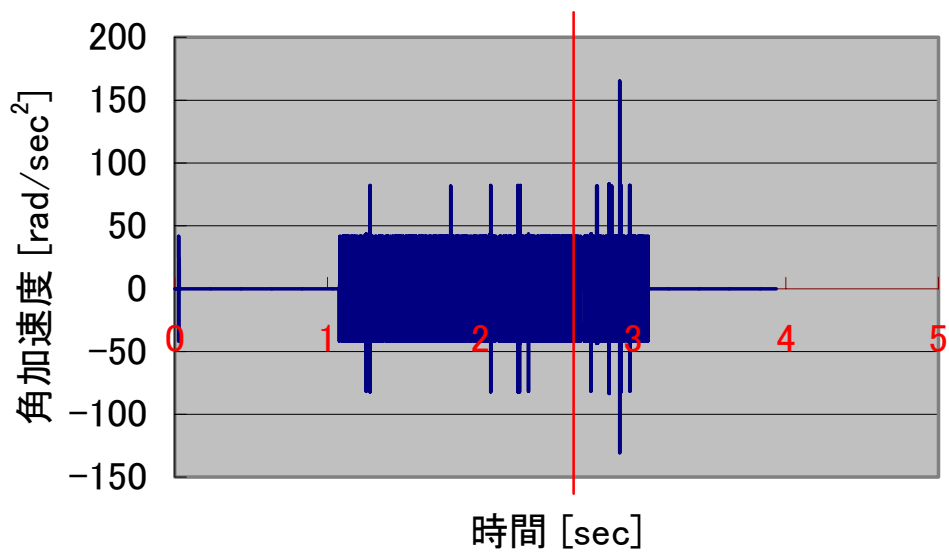


図 4.2.5 角加速度変化

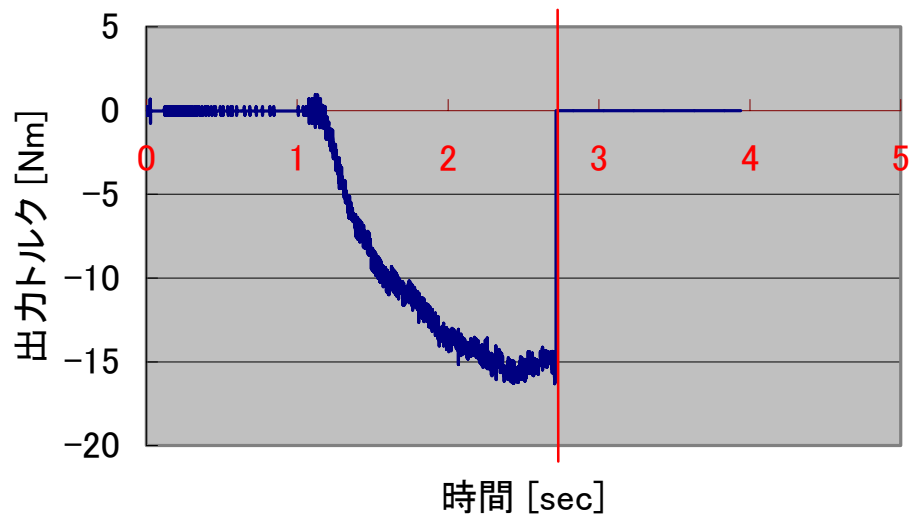


図 4.2.6 出力トルク

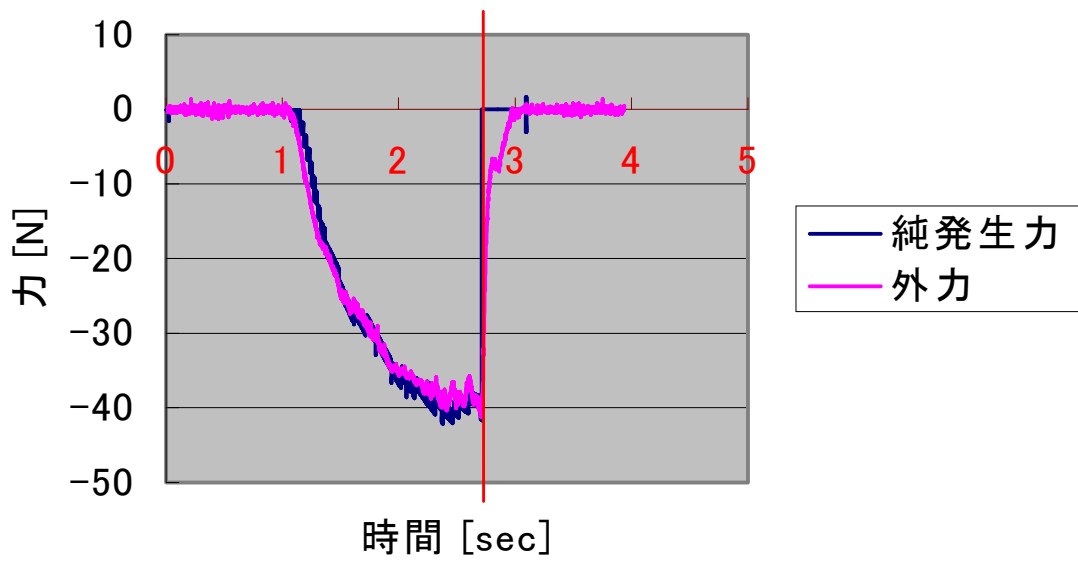


図 4.2.7 純発生力と外力の比較

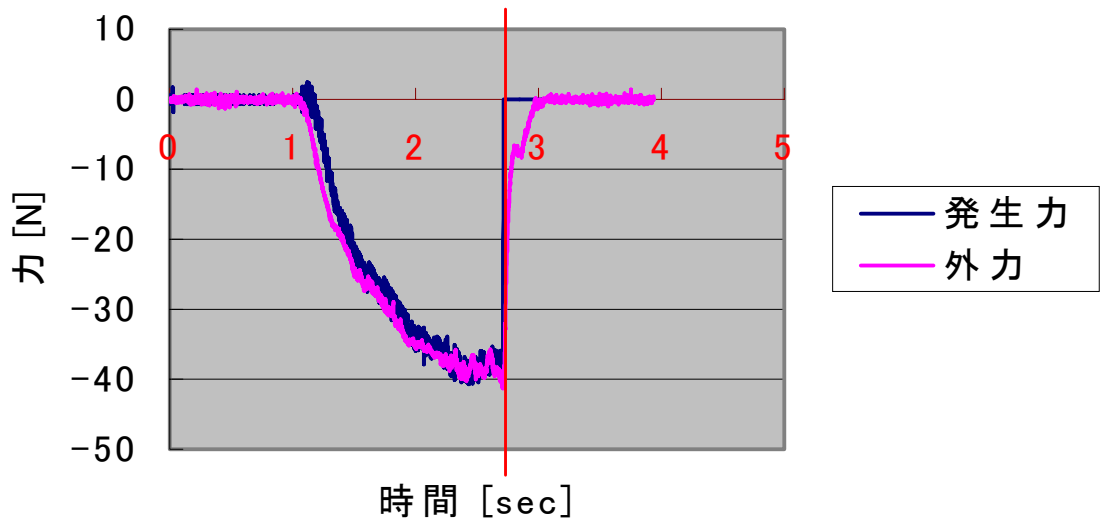


図 4.2.8 発生力と外力の比較

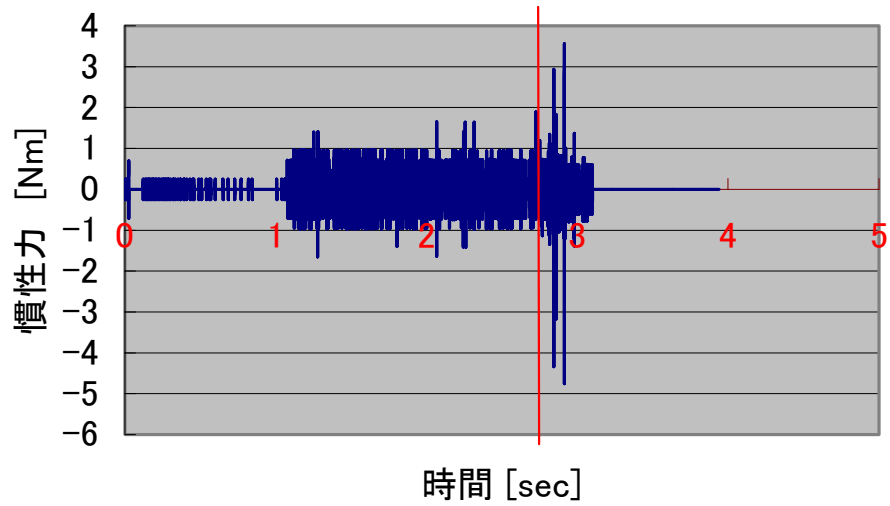


図 4.2.9 慣性力 $\hat{M}(q)\ddot{q}$

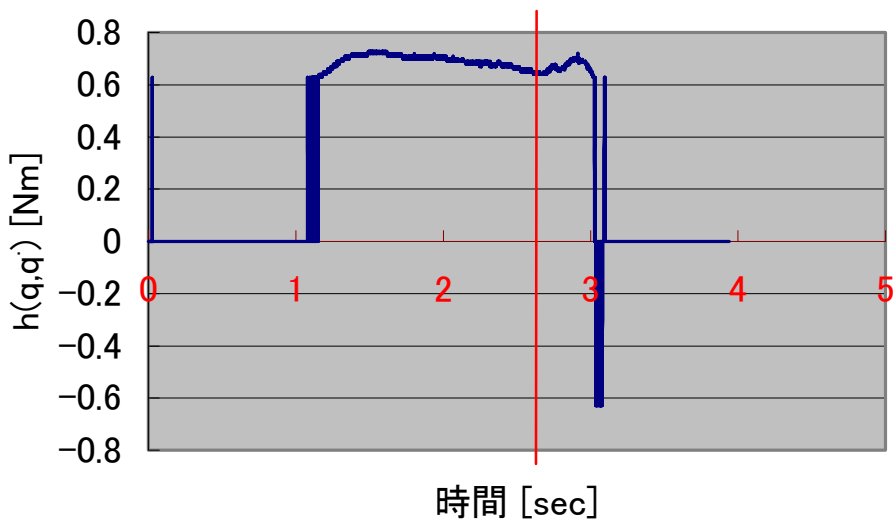


図 4.2.10 $h(q, \dot{q})$

4.2.8 (4.2.6)項での実験の考察

理論上のモデルでの実験で見られた,実験開始直後の左右に小刻みに振動するといった現象は見られなかった.ゆえに絶えず安定した状態で,力を加えて変位を大きくすればするほど,DD ロボットが出すトルクも大きくなって,「バネ」の特徴が顕著に表れていた.また角偏差が $0.5236[\text{rad}]$ になった時も「抵抗がある時点で急減する」という特徴を擬似的に再現出来ていた.

動作実験によって得られたグラフを見てみると,図 4.2.3 の角度変化は理論上のモデルでの実験の時と同様,明確にグラフ化されている.図 4.2.4 の角速度変化を見てみると,理論上のモデルでの実験の図 4.1.2 の角速度変化を比べてみても分かるように,ノイズが大幅に抑えられている.図 4.2.5 の角加速度変化を見てみると,理論上のモデルでの実験の図 4.1.3 の角加速度変化と同様,ノイズの影響を受けて本来の変化は見られなかったが,比べてみると若干収まっている.図 4.2.6 の出力トルク,図 4.2.7 の発生力ともに,理論上のモデルでの実験の図 4.1.4 の出力トルク,図 4.1.5 の発生力と比べて,後者はノイズしか見られなかったのに対し,前者は鮮明に変化が表わされている.また,図 4.2.8 の発生力と外力の比較をすると,ほぼ同じ波形となっており,実測値と計算値がほぼ同一となっていることがわかる.

また,慣性項 $\hat{M}(q)$ を同定により推定したが,同定した際にも角加速度のノイズの影響でうまく同定できなかったと思われる.しかし,図 4.2.9 の慣性力を見てみると,振幅は $-1 \sim 1 [\text{Nm}]$ の範囲のため今回はあまり影響を及ぼさなかった.このことから分かるように,ノイズの原因は角加速度にあり,差分により求めたことが一番の原因であることがわかった.

また,図 4.2.7 のグラフの,動力学補償される前の,実際に負荷がかかる値を見ると,今回は

摩擦等の影響が少なかったので,実際の外力と $D\dot{q} + Kq$ のトルクをリンク長で割った値とがほぼ同じ結果となった.しかしこのことで, D と K の値に対して,ロボットに「バネ」と「ダンパ」が擬似的に効いているかのように制御されていることが示された.

また摩擦等を考慮し,動力学補償をすることで,計測値と算出されたトルク値の誤差を,ほぼキャンセルすることが出来ることから,トルクセンサ,及び力センサとしての役割を果たすことも期待される.しかしその為には,やはり角加速度のノイズの問題を解決しなければ,センサとしての精度が問われるという結果を残した.

5 結言

人間の上肢において伊藤らの研究の中で、その実験においての安全性、再現性を考慮し、本研究では、被験者である人間の代わりに、ロボットアームを用いて、痙縮の上肢における“折りたたみナイフ”反応で筋が突然弛緩する状態を擬似的に再現することを試みた。

そして、その制御法の検討及び、動作実験を行い、以下の事を得た。

- 1) 結果として、インピーダンス制御の基本的な運動方程式のみでの動作実験では、制御開始直後から、まだ外力を与えていないにもかかわらず、左右に小刻みに振動した。また、データを見てもノイズにより実験の変化が見られなかった。原因として、角加速度の影響から、結果的に振動するということが考えられた。また、図 4.1.7 の様に摩擦等の影響で本来の出力 (M, D, K で定めた時の計算された出力) すべきトルクと実際のトルクは異なることが推測される。
- 2) 結果は、角加速度変化はノイズの影響を受けているものの、慣性力項の値が微小なため、また粘性摩擦等を考慮にいれた結果、実際のトルクの値と計算によって出されたトルクの値がほぼ同一となっていた。

ゆえに、振動の一番の原因は角加速度のノイズであるとわかった。

慣性項 $\hat{M}(q)$ を同定により推定した時も、同定した際にも角加速度のノイズの影響でうまく同定できなかつたと思われる。

さらに動力学補償される前の、実際に負荷がかかる値を見ると、今回は摩擦等の影響が少なかったが、(4.1.2)節での考察で推測した通り、実際の外力と $D\dot{q} + Kq$ のトルクをリンク長で割った値と異なることがわかる。しかしこのことで、 D と K の値に対して、ロボットに「バネ」と「ダンパ」が擬似的に効いているかのように制御されていることがわかった。

本研究において当初から、ダミーロボットとして求められていたことの1つである、再現性の面で、角加速度変化が乱れてもロボットが安定し、出力されたトルクがほぼ目標値に近ければ問題はない。

しかし、角加速度のノイズの問題がある以上、完全であるとは言い難い。事実、算出されたトルクは動作上変化こそ見られなかったが、グラフを見ると微小に変動している。そこで今後の課題として、ノイズ対策としてフィルタを導入するなどをし、さらにロボットの安定化をめざす必要がある。

謝辞

本研究にあたり,丁寧なご指導を賜りました井上喜雄教授, 甲斐義弘助手,に深く感謝し御礼申し上げます。また本研究を行うに伴いご助言,お手伝いいただいた院生の伊藤禅氏, 学部生の中浜昌文氏,そして,実験を行うに当たりご協力頂いた知能機械力学研究室の皆様にも深く感謝致します。

参考文献

- (1)加藤他：“続人間の手足の制御”学献社（1973）, P460~P472
- (2)宮崎信次他：“上肢の反射抑制肢位が上肢の筋緊張および下肢の痙性に与える影響の定量化”：バイオメカニズム学会誌：Vol.24, No.3(2000)
- (3)厚生省大臣官房統計調査部：“平成 11 年 医療施設（静態, 動態）調査・病院報告の概況”,(2000)
- (4)岡島康友他：“関節可動域訓練装置:柔らかさを与える機構の検討”：総合リハ:Vol26, No4号（1998）,P363~P369
- (5)社団法人計測自動制御学会 編：“ロボット制御の実際” コロナ社

・付録

図 3.1 DD ロボットアーム機構部仕様 (設計値)

自由度		2(スカラ)
駆動方式		DD モータ
寸法	アーム長	200+200 mm
	全高	約 250 mm
本体重量		約 40 kg
動作範囲	1軸	± 90°
	2軸	± 120°
最大先端力 (伸長時)		71N
最大動作速度	1軸	720° /s
	2軸	864° /s
最大合成速度 (無負荷時)		8.0 m/s

D/A で ±6V 以内の電圧を出力する

出力電圧に応じてアームの回転方向,回転速度が変化する

+ 出力で時計方向, - 出力で反時計方向になる

表 3.2 モーター部仕様 (カタログ値)

		1 軸	2 軸
型名		DR1070E	DR1050B
最大出力トルク	Nm	7.0	1.5
最大回転数	rps	2.0	2.4
定格回転数	rps	1.5	2.0
エンコーダ分解能	p/rev	614,400	507,904
ロタイーナーシヤ	kgm	8.5×10^{-3}	2.1×10^{-3}
重量	kg	2.2	8

表 3.3 フォース /トルクセンサ仕様 (カタログ値)

規定荷重 力 kgf	5
トルク kgf・cm	50
許容過負荷	規定の 500%まで
許容温度範囲 動作時	0~55°C
保存時	0~70°C
許容湿度範囲	5~95% (結露なきこと)
重量 g	260

表 3.4 DA12-8L(PC)の仕様

出力チャンネル数	8 チャンネル
出力レンジ	非絶縁出力 [電圧出力時] ±10V , ±5V , 0~+10V (±5mA Max.) [電流出力時] 4~20mA (8ch 中 1ch のみ選択使用)
分解能	12bit
変換速度	最大 10 μ sec/ch
変換精度	非直線性誤差: ±3LSB (注 1)
出力インピーダンス	[電圧出力時]1Ω 以下
デジタル入力	非絶縁 TTL レベル 4 点(正論理)
デジタル出力	非絶縁 TTL レベル 4 点(正論理)
I/O アドレス	8 ビット×4 ポート占有
消費電流	DC+5V 830mA Max.
使用条件	0~50°C , 20~90%
外形寸法(mm)	163.0(L) × 122.0(H)

注 1)非直線性誤差は周囲温度が 0°C、50°Cのとき最大レンジの誤差が生じることがある。

表 3.5 PIO-48W(PC)の仕様

入出力形式	非絶縁 TTL レベル入出力(正論理)
入力抵抗	10kΩ
出力定格	DC 5V 1mA (2LS-TTL 負荷)
入出力点数	48 点 (入力、出力設定可能)
割り込み	最大 4 点 [IRQ3~7.9(ただし、XT バスは IRQ2~7)]
応答速度	200nsec
信号延長可能距離	1.5m 程度 (配線環境に依存する)
I/O アドレス	8 ビット×16 ポート占有
消費電流	DC5V 430mA Max.
使用条件	0~50°C,20~90%(ただし結露しないこと)
外形寸法(mm)	187.0(L) × 107.0(H)
ボード本体の質量	130g

表 3.6 CNT24-4(PC)の仕様

■カウンタ入力部	
チャンネル数	4 チャンネル
カウント方式	アップダウンカウント
最大カウント数	FFFFFFH(バイナリデータ)
入力形式	フォトカプラ絶縁入力または TTL レベル入力
入力記号	A 相/UP 1 点 × 4 チャンネル
	B 相/DOWN 1 点 × 4 チャンネル
	Z 相/CLR 1 点 X4 チャンネル
	汎用入力 1 点 × 4 チャンネル
入力抵抗	220Ω(フォトカプラ絶縁)以上、1TTL 負荷(TTL レベル)
入力保護回路	なし
応答周波数	フォトカプラ絶縁入力 , Max.500kHz デューティ 50% , TTL レベル入力 , Max.1MHz デューティ 50%
割り込み	各チャンネルカウント一致、またはタイマのタイムアップにより発生 IRQ3~15(ただし、IRQ8,IRQ13 は使用不可)
外部電源	DC5V~12V±10%Min.400mA(フォトカプラ絶縁入力の場合に必要な) (フォトカプラ絶縁入力の場合に必要な)
フォトカプラへの入力電流	フォトカプラ 1 次側電流 15~25 mA
デジタルフィルタ	0.1 μ sec~1056.1 μ sec(各チャンネル独立設定可)
タイマ	1msec~120sec
■一致信号出力部	
出力点数	1 点 × 4 チャンネル
出力形式	フォトカプラ絶縁オープンコレクタ出力
出力定格	最大 DC35V,50mA(1 点当たり)
信号出力幅	0~104.45msec(全チャンネル共通)
出力保護回路	なし
外部電源	DC5V~12V±10%
■共通部	
I/O アドレス	8 ビット × 2 ポート占有
消費電流	DC5V300mAMax.
使用条件	0~50°C,20~90%(ただし、結露しないこと)
外形寸法(mm)	163.0(L)X122.0(H)

表 3.7 IRT-16(PC)の仕様

入力点数	16 点
割り込み	IRQ3~7,9 のうち 8 点を 1 レベルとして 2 点、およびタイマのタイムアップ
入力仕様	<p>フォトカプラ絶縁入力または TTL レベル非絶縁入力(ジャンパ切り換え)</p> <p><フォトカプラ絶縁入力時></p> <p>入力抵抗 2kΩ</p> <p>外部回路電源 DC12~24V</p> <p>応答速度 1msec 以内</p> <p><TTL レベル非絶縁入力時></p> <p>プルアップ抵抗 10kΩ</p> <p>応答速度 200nsec 以内</p>
タイマ	1 μ sec~2min(57 段階)
信号延長可能距離	<p><フォトカプラ絶縁入力時></p> <p>50m 程度(配線環境に依存する)</p> <p><TTL レベル非絶縁入力時></p> <p>1.5m 程度(配線環境に依存する)</p>
I/O アドレス	8 ビット X2 ポート占有
消費電流	DC5V 1000mA Max.
使用条件	0~50 $^{\circ}$ C、20~90% (ただし、結露しないこと)
外形寸法(mm)	252.0(L) X 107.0(H)

表 3.8 IBX-3133 の仕様

デ ジ タ ル	割り込み機能	AD 変換終了割り込み タイマ割り込み 外部割り込み (JP にて設定)
	タイマ	使用素子 : 8254 (相当品) 基準クロック : 8MHz タイマ割り込み AD 変換スタート
	汎用入出力	入力 : 2 点 (TTL) 出力 : 2 点 (TTL)
部	外部制御入力	AD サンプル制御入力 : 1 点 外部割り込み入力 : 1 点

表 3.9 IBX-3133 の仕様の続き

ア	入力仕様	接続方法：シングルエンド入力 / 差動入力 切り替え使用可能 チャンネル切り替え方式：マルチプレクサ切り替え方式
	入力チャンネル数	シングルエンド入力時：16 チャンネル 差動入力時：8 チャンネル
	絶縁方式	非絶縁入力
ナ	入力レンジ	バイポーラ：- 2.5~+ 2.5V ユニポーラ：0~+ 5V - 5~+ 5V 0~+ 10V - 10~+ 10V (JP にて設定)
	分解能	12 ビット
	入カインピーダンス	10M Ω 以上
ロ	入力保護	POWER ON 時 $\pm 35V$ POWER OFF 時 $\pm 20V$
	AD 変換器	使用素子：ADS774K (相当品) 分解能：12 ビット 変換時間：8.5 μ sec
グ	相対精度	$\pm 1LSB$ (at 25 $^{\circ}C$)
	誤差(最大)	$\pm 0.15\%$ (0~50 $^{\circ}C$) : 0~+10V, $\pm 5V$, $\pm 10V$ $\pm 0.2\%$ (0~50 $^{\circ}C$) : 0~+ 5V, $\pm 2.5V$
	変換時間	10 μ sec(チャンネル固定時) 60 μ sec(チャンネル切り替え時)
共	I/O ポートアドレス	16 ビットフルデコード設定可能 (RWS にて設定) 占有ポート数:16 ポート
	外部電源出力	+ 12V, - 12V(負荷電流 10 mm A 以下) + 5V, - 12V(負荷電流 100 mm A 以下)
	供給電源	DC+ 5V ($\pm 5\%$) DC+12V ($\pm 5\%$): 入力レンジ 0~+ 10V, $\pm 10V$ 使用時、 $\pm 5\%$ DC - 12V ($\pm 5\%$): 入力レンジ 0~+ 10V, $\pm 10V$ 使用時、 $\pm 5\%$
通	消費電流	+ 5V 0.5A (TYP) + 12V 40mA (TYP) - 12V 20mA (TYP)
	使用条件	温度:0~50 $^{\circ}C$ 湿度:20~90%(非結露)
	使用コネクタ	PCR-E50LMDA (相当品)

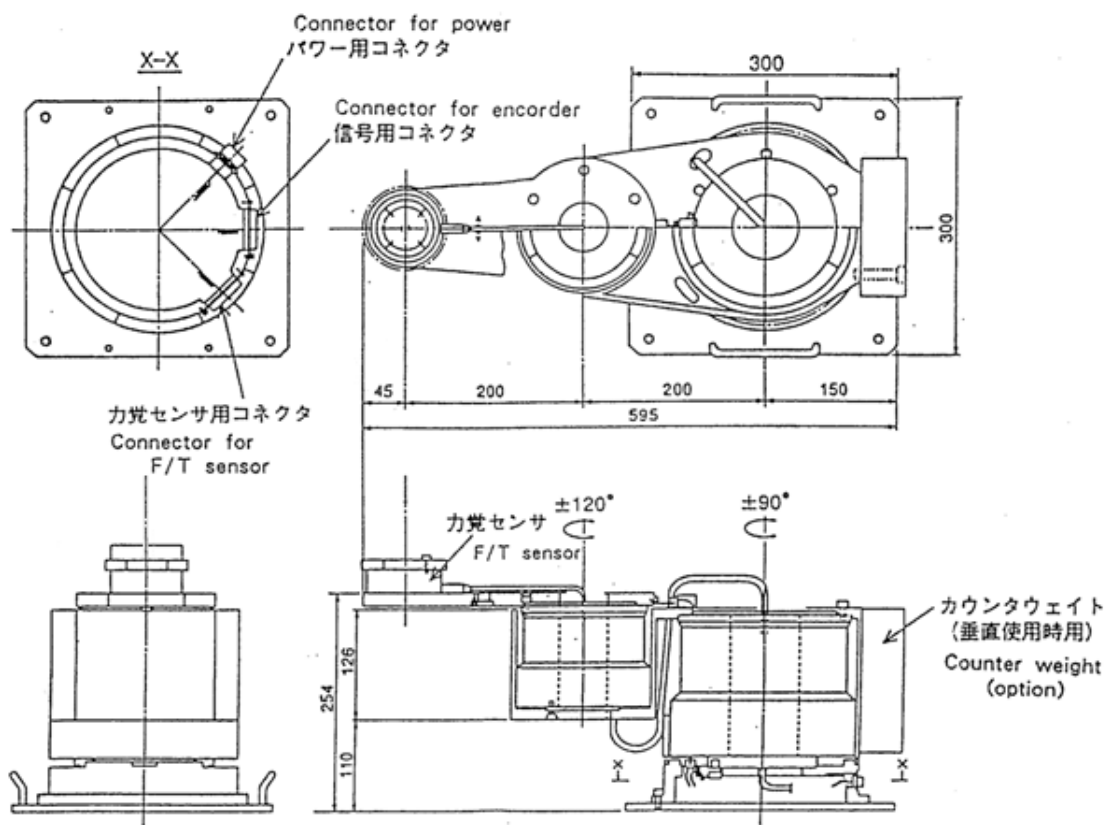


図 3.1 SICE-DD アーム外形図



図 3.2 SICE-DD アーム

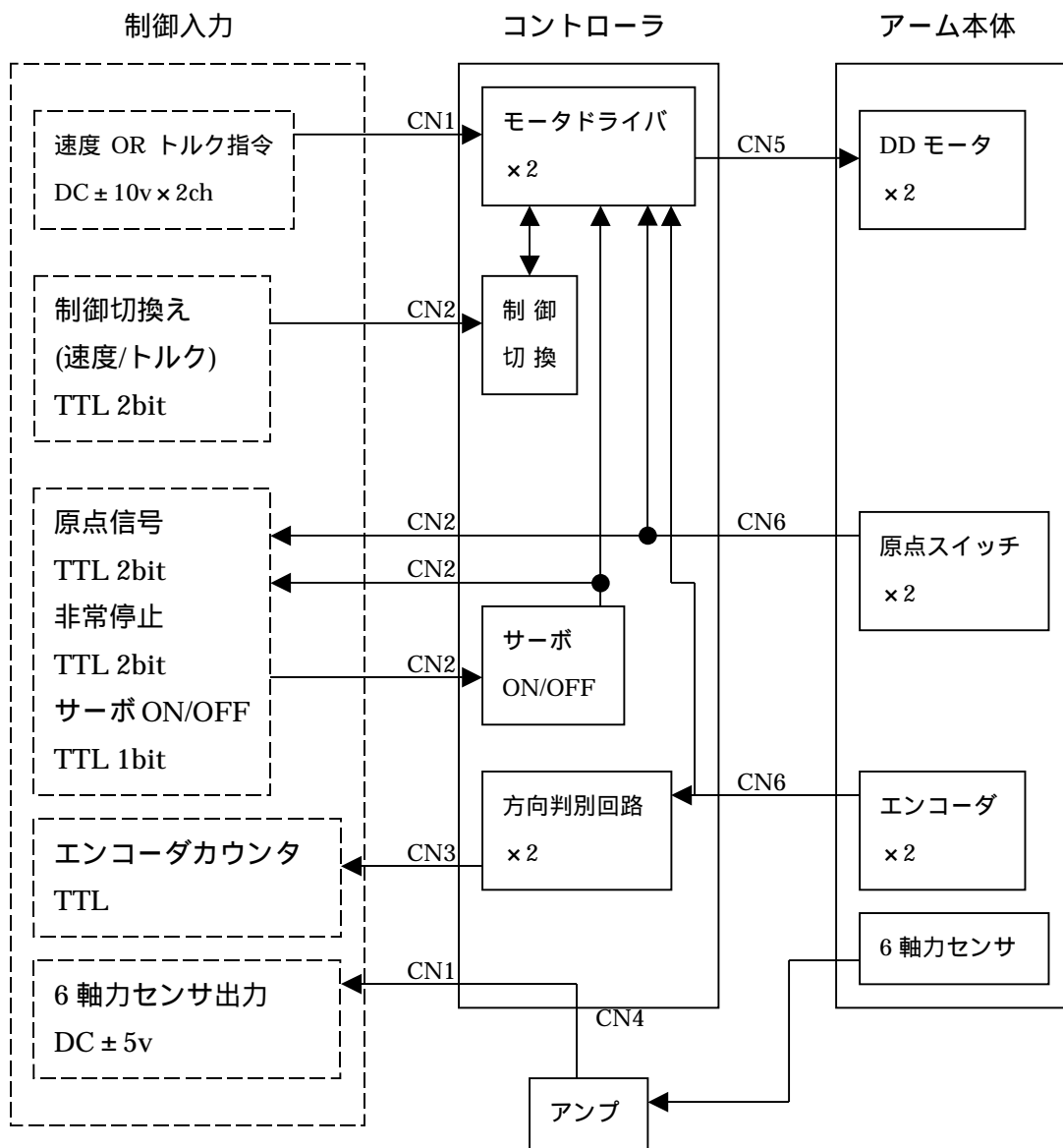


図 3.3 制御入出力の信号系統図

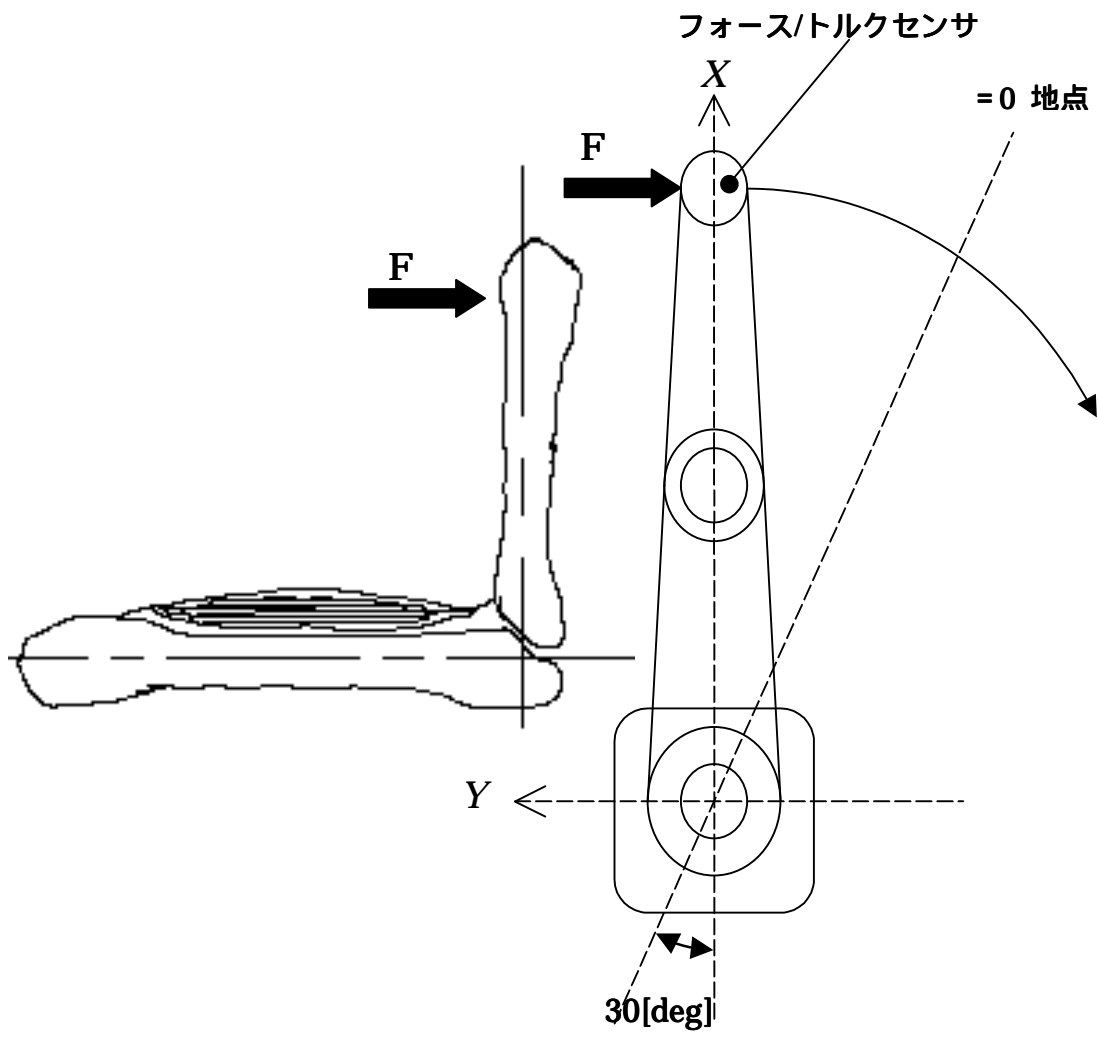


図 4.0 実験概要図

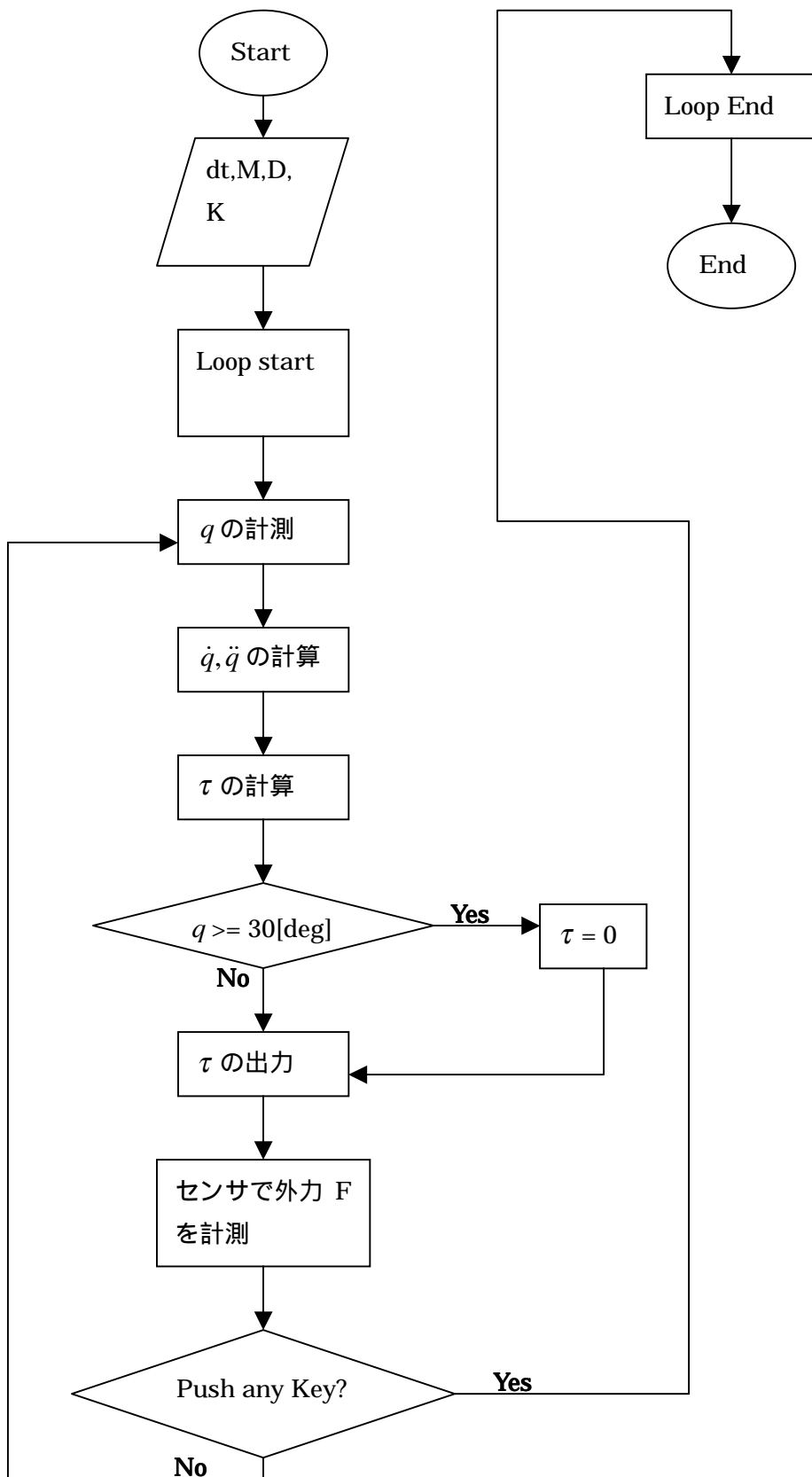


図 4.1.1 理論上のモデルでのフローチャート

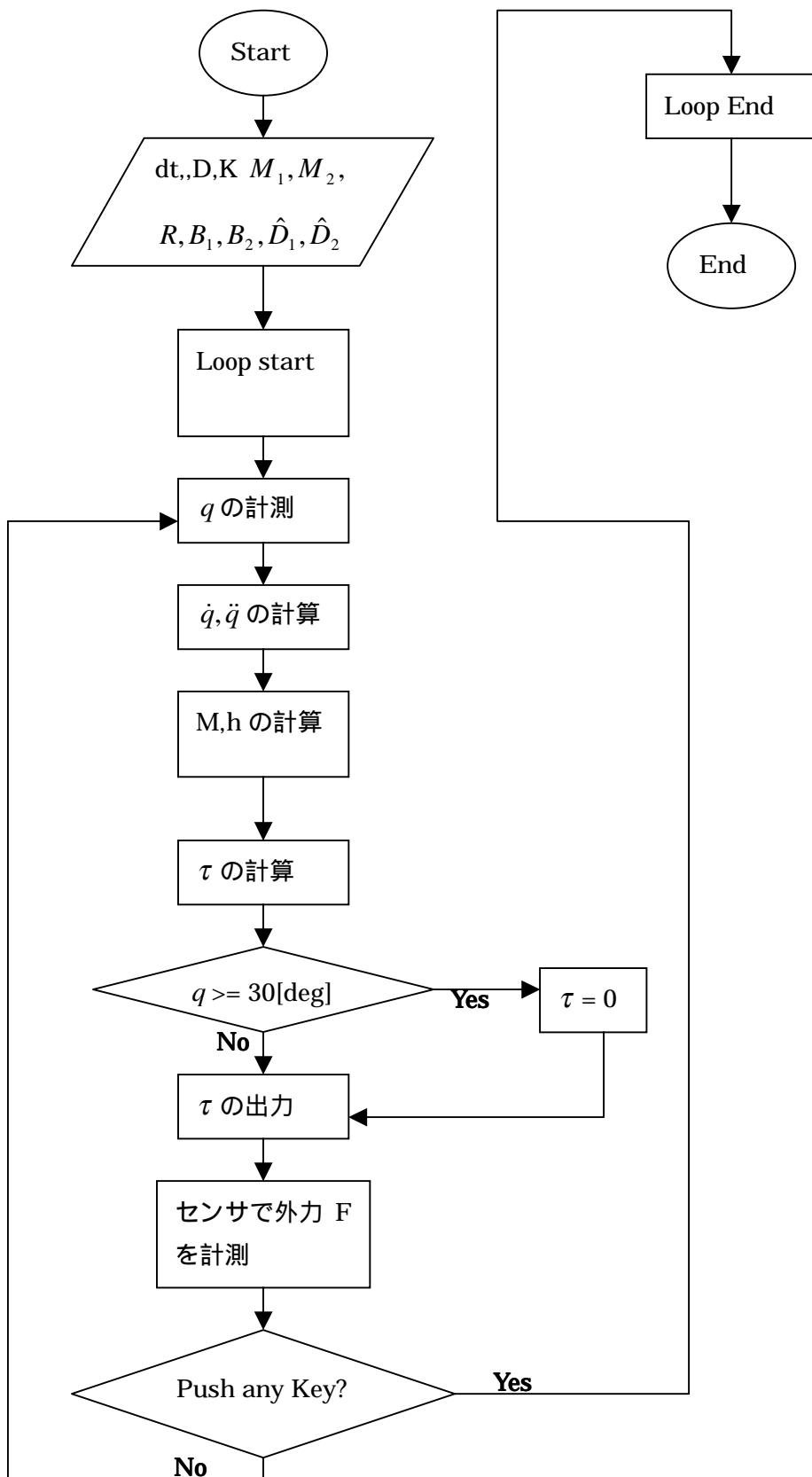


図 4 .2.2 運動方程式を見直した動作実験のフローチャート