9日（ダイナミクスの予測）の演習課題

片山正純

１．演習の目的

講義テキストでも書きましたように，生体運動制御系では，神経伝達や感覚器の遅れなどにより生ずる大きな時間遅れが存在します．そこで，フィードバック制御系における時間遅れやゲインの値を変更して制御結果（実現した腕軌道）を調べることにより，30 msec 程度での時間遅れでさえ制御結果に大きく影響することを実感してください．そして，フィードバック制御だけでは正確に制御できないため，制御対象の内部モデル（逆動力学モデル，順動力学モデル）を用いることにより，制御性能が向上することを実感してほしいと考えています．

最後に，「制御」という言葉を聞いただけで，避けてしまう人は多いのではないでしょうか．そこで，簡単な制御に関する演習課題をMATLABを用いて解くことにより，制御の問題に少しでも慣れていただきたいと考えています．

２．演習課題

付録およびプログラムの補足説明を参考にして，下記演習課題に取り組んでください．

2.1 フィードバック制御

前述のように，フィードバック制御による制御結果は，時間遅れに影響されます．そこで，時間遅れを４種類（0 sec, 0.03 sec, 0.06 sec, 0.1 sec）に設定して，それぞれの時間遅れに対応した最適なゲインを（可能な限り）決定し，制御結果（関節角度，手先軌道）と目標軌道とを比較することにより、0.03sec 程度の時間遅れでも制御結果に影響することを調べてください。また、これらの時間遅れは、手首関節に変位を与えた場合に記録される前腕の筋活動（M1，M2&M3、随意反射）を参考に決めてある（講義テキスト参照)。

2.2 逆モデルを用いたフィードフォワード制御

講義テキストで説明した逆モデルを用いたフィードフォワード制御を行ってください．さらに，制御入力に外乱（例えば，ある時刻から小さな関節トルクを一定期間付加する）を加えた場合、制御結果が目標軌道から徐々に離れてｓまうことを調べてください。また，このフィードフォワード制御系にフィードバック制御を付加することにより、外乱による影響を低減できることを確認してください。

2.3 順モデルを用いたフィードフォワード制御(内部ループ制御)

スミス補償（付録参照）は時間遅れの存在する場合に有効な制御方法です．時間遅れを 0.06sec に設定して、スミス補償を用いた場合にはフィードバックゲインを大きくできることを確かめてください。また、フィードバックループの時間遅れとスミス補償内での時間遅れに差がある場合について調べてください。さらに，上記のような外乱、および順モデルのモデル化誤差に対する影響も調べてください。また、この結果から、スミス補償による制御と講義で紹介した順モデルを用いた単純な制御（内部ループ制御）の場合について考察してみてください。

(応用課題)

1. フィードバック誤差学習により逆モデルを学習する。

2. 順モデルを学習する。

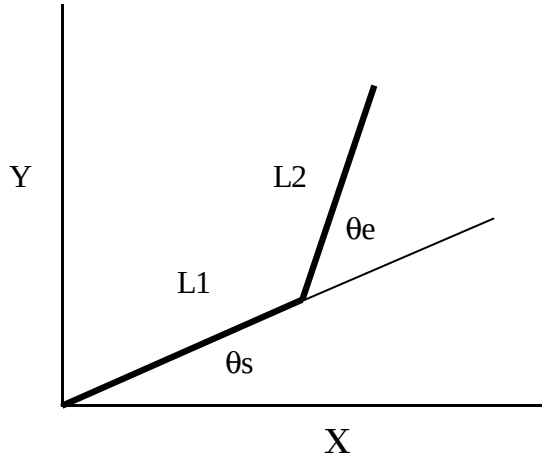
上記の応用課題において，制御性能，汎化特性，などについて，比較検討してください．なお、フィードバック誤差学習は川人光男（「脳の計算理論」産業図書、1996）を参考にしてください。

付録

（1）準備

制御対象：

制御対象は２リンクのマニピュレータとし，重力の影響を受けない水平面内での運動に限定する．



２リンクマニピュレータ

この場合の運動方程式は一般に下記のように記述できる．

$$\begin{bmatrix} I_1 + I_2 + 2W_2 L_1 L_{g2} \cos(q_e) + W_2 L_1^{\,2} & I_2 + W_2 L_1 L_{g2} \cos(q_e) \\ I_2 + W_2 L_1 L_{g2} \cos(q_e) & I_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{q}_s \\ \ddot{q}_e \end{bmatrix}$$

$$+ W_2 L_1 L_{g2} \sin(q_e) \begin{bmatrix} -2\dot{q}_e & -\dot{q}_e \\ \dot{q}_s & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{q}_s \\ \dot{q}_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_s \\ t_e \end{bmatrix} + \mathbf{J}(\mathrm{q})^T \mathbf{F}_{ext}$$

ただし，L は各リンクの長さ，W は各リンクの質量，I は各リンクの慣性モーメント，Lg は重心までの長さ， は関節角度， は関節トルクを表し，s と e の添え字は肩と肘を表す．さらに，J はヤコビアン，Fext は外力を表す．この運動方程式を用いてシミュレーションを行うためには，この運動方程式を数値積分（オイラー法やルンゲクッタ法など）により解く必要がある．

運動学：

手先位置 $X=(x\ y)^T$ は関節角度から次式により求めれる．

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_1 \cos q_s & L_2 \cos(q_s + q_e) \\ L_1 \sin q_s & L_2 \sin(q_s + q_e) \end{bmatrix}$$

さらに，関節角速度と手先速度はヤコビアンを用いて関係づけることができる.

$$\mathbf{J}(\mathrm{q}) = \frac{\partial \mathbf{X}}{\partial \mathrm{q}} = \begin{bmatrix} -L_1 \sin q_s - L_2 \sin(q_s + q_e) & -L_2 \sin(q_s + q_e) \\ L_1 \cos q_s + L_2 \cos(q_s + q_e) & L_2 \cos(q_s + q_e) \end{bmatrix}$$

$$\dot{\mathbf{X}} = J(\mathbf{q})\dot{\mathbf{q}}$$

逆運動学：

手先位置から関節角度を求める問題を逆運動学と呼ぶ．逆運動学では，上記の式から、手先位置から関節角、および手先位置速度から関節角速度を求めることができる。.

目標軌道：

目標軌道は，滑らかな軌道の１つであるジャーク最小軌道を用いる。ジャーク最小軌道は，軌道全体でのジャーク（加速度の１回微分）の加算値が最小になる軌道をである。つまり，初期位置（x(0),y(0))から目標位置（(x(t_f),y(t_f))まで t_f 時間で到達する軌道を考えると、

$$C = \frac{1}{2}\int_0^{t_f} \left\{ \left(\frac{d^3 x}{dt^3} \right) + \left(\frac{d^3 y}{dt^3} \right) \right\} dt$$

の評価値Cを最小にする軌道を求めることであり、上記Cが最小になる軌道をジャーク最小軌道と呼ぶ。２点間運動の場合，この軌道は初期位置と目標位置で静止していることを境界条件として，下記のように求められる。

ただし、$t_s = t/t_f$ を表す。この軌道は加速度が滑らかに変化する軌道であり，２点間軌道の場合には直線軌道となり，

$$x(t) = x(0) + \{x(0) - x(t_f)\}(15t_s^4 - 6t_s^5 - 10t_s^3)$$
$$y(t) = y(0) + \{y(0) - y(t_f)\}(15t_s^4 - 6t_s^5 - 10t_s^3)$$

り，接線速度はベル型になる.

参考文献：川人光男「脳の計算理論」産業図書（1996）

ロボット工学一般では,

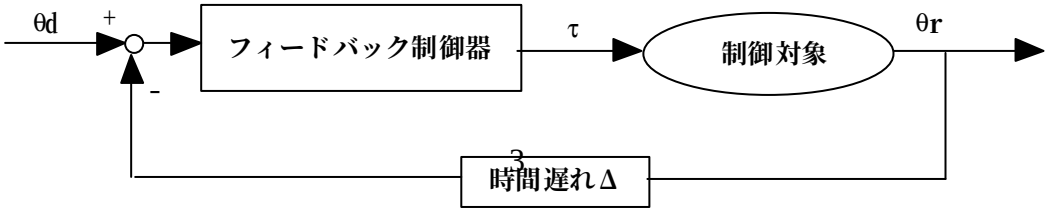
三浦・下山訳「ロボティクス」共立出版

吉川恒夫「ロボット制御基礎論」コロナ社

などを参考にしてください.

（2）フィードバック制御

以下に基本的なフィードバック制御系を示す.



d：目標軌道（関節角），　r：実現軌道（関節角），　：制御入力（関節トルク）

PID制御の場合の制御入力τは

$$t(t) = K_p e(t) + K_d \dot{e}(t) + K_i \sum_{t=0}^{t} e(t)$$

$$e(t) = q_d(t) - q_r(t - \Delta)$$

となる。ただし、K_p, K_d, K_i はフィードバックゲインであり、ｔは制御ループのループ回数を表す。ただし、プログラムでは、Ki=0（ＰD制御）としてある。フィードバックゲインは大きければ大きいほど制御の性能（軌道追従性能）が良くなるが、制御対象のダイナミクスや時間遅れなどによって大きすぎるゲインは振動的（不安定）にさせる。そこで、安定に制御するためには適切なゲインを設定する必要があるが，非線形性や時間遅れなどが大きい場合にはゲインを設定するのが難しく，目標軌道への追従性は悪くなる．

（3）スミス補償

スミス補償では，順モデルを用いた内側のループで出力の予測制御を行い，外側のループで時間遅れ後の実際の軌道を相殺し予測制御への影響をなくし，外乱やモデル誤差の補償を行っている．

参考文献：渡辺慶二「むだ時間システムの制御」計測自動制御学会編，コロナ社.

プログラムの補足説明

（1）運動方程式におけるパラメータ：

プログラム中では、上記運動方程式におけるパラメータの値は、人腕の値を用いるために、五味さんにより計測された値に設定しています。ただし、プログラム中で使用されているパラメータ（Z1_sim, Z2_sm, Z3_sim）と上記運動方程式におけるパラメータ（L, Lg, W）の関係は以下のようになっています。値を変更したい場合には、ファイル（arm.m）のパラメータ（Z1_sim, Z2_sm, Z3_sim）の値を変更してください。

$$\mathrm{Z1\_sim} = m_1 l_{g1}^{\ 2} + m_2 \left(l_1^{\ 2} + l_{g2}^{\ 2} \right) + \tilde{I}_1 + \tilde{I}_2,$$

$$\mathrm{Z2\_sim} = m_2 l_1 l_{g2}$$

$$\mathrm{Z3\_sim} = m_2 l_{g2}^{\ 2} + \tilde{I}_2$$

参考文献：Gomi, H., & Kawato, M. (1997). Human arm stiffness and equilibrium-point trajectory during multi-joint movement. *Biological Cybernetics*, **76**, 163-171.

（2）制御系の切り替え

本プログラムでは、フィードバック制御器、逆モデル、スミス補償器、のそれぞれの出力を組み合わせることによりいろいろな制御系を実現できるようにしてあります。

ファイル（armSim.m）の中の tau_fb、tau_smith、tau_ff をいろいろ組み合わせてください。

tau = tau_fb + tau_smith + tau_ff

tau_fb：フィードバック制御器の出力

tau_ff：逆モデルの出力

tau_smith：スミス補償器の出力

（3）時間遅れの設定

時間遅れはファイル（arm.m）の delay_t（および delayP_t）で設定してください。

delay_t：フィードバックループの時間遅れ（フィードバック制御系の時間遅れ、およびスミス補償による制御系の右上の時間遅れ）

delayP_t：スミス補償における時間遅れ（スミス補償による制御系の中央下の時間遅れ）

（4）フィードバックゲイン

フィードバックゲインの設定はファイル（arm.m）の FbGain の値を変更してください。

FbGain=[肩の Kp, 0, 肩の Kd, 0;

0, 肘の Kp, 0, 肘の Kd]

（5）各課題におけるパラメータの設定例

各課題におけるパラメータの設定例を参考にして、いろいろな値で試してみてください。

課題 2.1：

フィードバックゲインの設定例

時間遅れ 0 sec：[170, 0, 10, 0; 0, 200, 0, 20]

時間遅れ 0.03 sec：[8, 0, 2, 0; 0, 10, 0, 2.5]

時間遅れ 0.06 sec：[2.5, 0, 0.7, 0; 0, 2.5, 0, 0.7]

課題 2.2：

時間遅れ：0.03 sec

外乱：運動開始から 0.15sec から 0.2sec までの間、関節トルク tau に[0, 2]'を加える。

課題 2.3：

時間遅れは、まず 0.06sec の場合について調べてみてください。

操作方法

ファイルの説明：

arm.m

main routine

ここで指定するもの

フィードバックゲインパラメータ

feedforward 補償器のパラメータ

観測時間遅れ

スミス補償の時間遅れ

pos_specify.m

hand start and end positions を指定するルーチン。

armSim.m

trajectory formation, arm dynamics, cotroller　の処理ルーチン。

anim.m

animation を表示するルーチン。

d2.m

arm dynamics

アームのダイナミクスのパラメータはここで指定

d2P.m

smith predictor のための arm dynamics.

スミス補償器のためのアームのダイナミクスのパラメータはここで指定

操作手順：

1. arm.m を走らせると手先のスタート位置を指定しろと
言ってくるので、マウスで Fig1 上に指定する。
この時、腕の動ける範囲を考えて指定すること。

２．終点も同様に指定する。

３．計算

手先の min jerk 軌道を生成し、指定した制御方式で制御する。

４．計算後腕の動きのアニメーションを表示する。

５．繰り返すかどうか聞いてくるので、指定する。

６。繰り返さないと、１にもどる。(10 回繰り返すように指定されている)

＊演習課題のプログラムは五味さんにより作成していただきました．この場をお礼申し上げます。