1X-7

多関節モデルにおけるモーションデータの生成・利用・制御に関する研究

松田 洋和 † 鈴木 寿 ††
† 中央大学大学院理工学研究科情報工学専攻 †† 中央大学理工学部

1 はじめに

多関節構造を持つキャラクタの姿勢は, インバースキネマティクス (Inverse Kinematics, IK, 逆運動学) を解くことにより, 直観的な操作で作成することができる. しかし一般に, 多自由度を有する多関節構造においては, その解は複数, もしくは無限に存在し, その制御は難しい. 多関節構造をヒューマノイドモデルに限定して体の各部分における IK を解析的に解き, それらを統合することで体全体の姿勢を制御する手法 [1] や, 角度制限が無いものの, バネモデルを用いた IK 解法によって柔軟な姿勢の制御が可能な手法 [2] などが提案されている.

本研究では, ヒューマノイドに限定しない一般的な多関節構造に対して角度制限を考慮した上で IK を解き, 直観的な操作によって自然なキャラクタの姿勢を対話的かつ実時間での生成が可能なシステムの開発をおこなう. また作成した姿勢を用いて, 角速度変化最小モデルによるモーション生成をおこなう.

2 インバースキネマティクス

ロボットアームなどの多関節構造において, 手先の位置が与えられたときにそれを満たす各関節の角度を求めることをインバースキネマティクス (Inverse Kinematics, IK, 逆運動学) と呼ぶ. IK の解法はいくつか提案されているが, 本研究では比較的シンプルな解法である, CCD 法 (Cyclic-Coordinate Descent) と呼ばれる反復解法 [3] を用いる. これは, 最初に手先の親である関節に着目し, 手先へのベクトルが目標位置へのベクトルと一致するように関節を回転させる. 同様の操作を親の関節に対して適用していくことで, 手先の位置を目標位置へ近づけていく手法である.

これは三次元空間において, 四元数を用いることで実現できるが, そのまま適用すると先端の関節から向きを求めていくことになるので, 姿勢を制御する際に先端に近いほどよく動くような印象を与える結果となり, 幾分不自然である.

そこで, 姿勢の変化が手先に偏らないような自然な姿勢を求めるために, 各関節において次のような重みを設定し, 各関節の反復処理において求めた回転をその重みによって減衰させる:

$$w_i = \frac{\sum_{j=i}^{n} l_j}{\sum_{k=0}^{n} l_k}. \tag{1}$$

ここで, w_i, l_i $(i = 0, \cdots, n)$ はそれぞれ, i 番目における関節の重みと骨 (ボーン) の長さを表し, $i = 0$ は根元の関節, $i = n$ は先端の関節を表している. 式 (1) の分母はボーンの長さの総和である.

3 角度制限

実際の関節の可動範囲には制限がある. 本研究で開発したシステムでは, ユーザが設定した 3 つのオイラー角における $-180° \sim 180°$ の範囲を用いて, その範囲を超えていた場合に角度を戻す処理によって実現している.

しかし単純に戻すだけでは問題が生じる. 姿勢を四元数もしくは行列によって表現しているので, それを 3 つのオイラー角に変換する必要があり, 変換によって 2 番目の角度が $-90° \sim 90°$ に写像されることになるからである. 具体的には, 2 番目の角度を $-90° \sim 90°$ の範囲外に設定した場合, 変換によって $-90° \sim 90°$ に写像され, 残り 2 つのオイラー角が $180°$ 反転してしまう. 変換前と変換後の 2 通りのオイラー角表現は同じ姿勢を表しているが, 角度制限を施す際に問題となる.

この場合, 以下のように制限範囲を複数考えることで解決する. まず 3 つのオイラー角をそれぞれ θ, ϕ, ψ とし, それぞれの最大値, 最小値を $\overline{\theta}$, $\underline{\theta}$, $\overline{\phi}$, $\underline{\phi}$, $\overline{\psi}$, $\underline{\psi}$ とすると, それぞれの角度の制限範囲は,

$$\underline{\theta} \le \theta \le \overline{\theta},\ \underline{\phi} \le \phi \le \overline{\phi},\ \underline{\psi} \le \psi \le \overline{\psi}$$

となる. 変換によって得られるオイラー角をそれぞれ θ', ϕ', ψ' とすると, 制約条件は 4 つに増え,

1. $\underline{\theta} \le \theta' \le \overline{\theta}$, $\underline{\psi} \le \psi' \le \overline{\psi}$,
   $\max(-90°, \underline{\phi}) \le \phi' \le \min(90°, \overline{\phi})$
2. $-180° \le \theta' \le -180° + \overline{\theta}$
   または $180° + \underline{\theta} \le \theta' \le 180°$,
   $-90° \le \phi' \le \max(-90°, -180° - \underline{\phi})$
   または $\min(90°, 180° - \overline{\phi}) \le \phi' \le 90°$,
   $-180° \le \psi' \le -180° + \overline{\psi}$
   または $180° + \underline{\psi} \le \psi' \le 180°$

Study on Generation, Utilization, and Control of Motion Data in Multi-Joint Model
† Hirokazu MATSUDA
†† Hisashi SUZUKI
Graduate School of Science and Engineering, Chuo University (†)
Faculty of Science and Engineering, Chuo University (††)

3. $\underline{\theta}+\underline{\psi} \le \theta' \le \overline{\theta}+\overline{\psi},\ \underline{\phi} \le -90°$
4. $\underline{\theta}-\overline{\psi} \le \theta' \le \overline{\theta}-\underline{\psi},\ 90° \le \overline{\phi}$

となる. これらのうち少なくとも 1 つを満たしている場合に, 角度は制約条件を満たしていることになる.

4 角速度変化最小モデル

人が物をとるときに手を近づける自然な動作などのような, 人の上肢多関節運動の軌跡を予測, 再現するためのモデルがいくつか提案されている [4]. ここでは角速度の変化の大きさが全体でなるべく小さくなるようにすることで滑らかな動作を実現するものとする.

関節角を $\theta(t)$ とし, $\theta(t)$ の時間微分（角速度）を ω と置く. 時間 T をかけて変化させる関節角度を α とし, 最初と最後で手は止まっているものとする.

$$\theta(0)=\theta_0,\ \theta(T)=\theta_0+\alpha, \tag{2}$$

$$\omega=\omega(t)\equiv\frac{d\theta}{dt},\ \omega(0)=\omega(T)=0. \tag{3}$$

評価関数は次のようになる:

$$E=\int_0^T\left(\frac{d\omega}{dt}\right)^2 dt. \tag{4}$$

以上より, 条件 $\omega(0)=\omega(T)=0, \int_0^T \omega dt=\alpha$ の下で $E=\int_0^T\left(\frac{d\omega}{dt}\right)^2 dt$ を最小にする $\theta(t)$ を求める問題となる. この問題を解くと唯一の解が得られ,

$$\theta(t)=\theta_0+\frac{\alpha}{T^3}t^2(3T-2t) \tag{5}$$

となる.

4.1 経由点を通る軌道

初期点と目標点との間に経由点を設定し, その経由点を通るような軌道を考える. 時刻 S において経由点を通り, 時刻 T において目標点に到達するものとする. 時刻 $0, S, T$ における角速度をそれぞれ a, b, c とし, 時刻 0 から時刻 S までに動くべき関節角度を α, 時刻 S から時刻 T までに動くべき関節角度を β とする. また, 2 つの時間領域における軌道を滑らかにつなげるために, 時刻 S における角加速度を m とおくと,

$$0 \le S \le T, \tag{6}$$

$$\omega(0)=a,\ \omega(S)=b,\ \omega(T)=c,\ \omega'(S)=m, \tag{7}$$

$$\int_0^S \omega(t)dt=\alpha,\ \int_S^T \omega(t)dt=\beta \tag{8}$$

という条件の下で, 2 つの評価関数

$$E_1 = \int_0^S\left(\frac{d\omega}{dt}\right)^2 dt, \tag{9}$$

$$E_2 = \int_S^T\left(\frac{d\omega}{dt}\right)^2 dt \tag{10}$$

を最小にするような $\theta(t)$ を求める問題となる. これを変分法を用いて解くと次のようになる:

$$\begin{aligned}\theta'(S) = b &= \frac{6(T-S)}{S(4T+S)}\alpha+\frac{6S}{(T-S)(4T+S)}\beta \\ &\quad -\frac{2(T-S)}{(4T+S)}a-\frac{S}{(4T+S)}c.\end{aligned}$$

$0 \le t \le S$ の場合:

$$\begin{aligned}\theta(t) &= \left(\frac{1}{S^2}(a+b)-\frac{2}{S^3}\alpha\right)t^3 \\ &\quad +\left(-\frac{1}{S}(2a+b)+\frac{3}{S^2}\alpha\right)t^2+at+\gamma.\end{aligned}$$

$S \le t \le T$ の場合:

$$\begin{aligned}\theta(t) &= \gamma+\alpha+\frac{1}{(T-S)^2}\left(\left((b+c)-\frac{2\beta}{(T-S)}\right)t^3\right. \\ &\quad +\left(-b(2T+S)-c(T+2S)+\frac{3(T+S)}{(T-S)}\beta\right)t^2 \\ &\quad +\left(bT(T+2S)+cS(2T+S)-\frac{6\beta ST}{(T-S)}\right)t \\ &\quad \left.+\frac{\beta S^2}{(T-S)}(3T-S)-ST(bT+cS)\right).\end{aligned}$$

以上の式を, 姿勢を表す 3 つのオイラー角に対して適用することで滑らかな軌道を生成できる.

5 おわりに

本研究では, 重み付けした関節に対して角度制限のある IK を解くことで自然な姿勢を直観的に作成でき, 対話的かつ実時間でのモーション作成をおこなえるシステムを開発した.

参考文献

[1] 南城 康之, “Inverse Kinematics を用いたヒューマンフィギュアの動作決定に関する研究,” 筑波大学大学院システム情報工学研究科修士論文, 2004.

[2] 佐々木 優理, “Web3D キャラクタエージェント構築アプリケーションの開発,” 2002 年度 IPA 成果報告集 (http://www.ipa.go.jp/SPC/report/02fy-pro/report/1298/paper.pdf), 2003.

[3] Wang and Chen, “A Combined Optimization Method for Solving the Inverse Kinematics Problem of Mechanical Manipulator,” IEEE Transactions on Robotics and Applications, 1991.

[4] 宇野 洋二, 川人 光男, 鈴木 良次, “上肢運動における最適軌道の生成とその制御–トルク変化最小モデル,” 信学技報, MBE 86-76, 1987.