

静力学指標の最適化により静止姿勢を無理のない姿勢に改善するバーチャルデッサン人形

江 添 正 剛[†] 佐 藤 裕 仁[†] 三 武 裕 玄[†](正会員) 長谷川 晶 一[†][†] 東京工業大学Virtual Drawing Doll with Static Pose Optimization
by Minimizing Statics Oriented IndexMasataka EZOE[†], Hirohito SATO[†], Hironori MITAKE[†](Member), Shoichi HASEGAWA[†][†] Tokyo Institute of Technology

〈あらまし〉 趣味でイラストを制作する人にとって人物イラストは人気の高い題材であるが、人の自然なポーズを正確に思い描いたりデッサン人形にとらせたりする事は初中級者には難しく上達の壁となる。初中級者が人物ポーズにおいて失敗しやすい点の一つに、ポーズを取るために必要な力とその際の関節や筋肉の負担についての理解の不足に起因する間違いがある。本格的な美術の訓練では実際の人間のデッサンを繰り返して自然なポーズを感覚的に理解するが、手間がかかるため趣味のために行うには敷居が高い。そこで本研究では、ポーズの力学についての感覚的な理解が不足している初中級者が、人物画に無理のあるポーズを取らせてしまわないための支援手法として、静止ポーズを対象とし、ユーザが入力したポーズを基に力学的に身体負荷のより少ないポーズを改善案として提示するバーチャルデッサン人形の実現を目的とする。静止ポーズを対象として、静力学解析によりポーズから各関節の負荷を計算し、入力ポーズに近く関節負荷がより少なくなるようポーズを改善する。生成例を用いたアンケート調査により、より自然で安定感のあるポーズを出力できる事が示唆された。

キーワード：人物イラスト, デザイン, 静力学, 最適化

<Summary> Drawing dolls are used while drawing a illustration as a reference. It becomes good reference about proportion of human body. However, it does not help making natural human posture, which requires aesthetic sense of the creator. Human pose consists of several physical constraints such as forces to take pose and limitation of load in muscles or joints. Beginners of drawing human illustration are often does not have this knowledge enough and make wrong posture which looks stressful. Therefore, we propose the virtual drawing doll with physics calculation, to suggest more natural posture based on users' input of drawing doll's posture. The system uses inverse statics to calculate joint torques, and calculates local optimal solution which requires less joint torques and maintains original posture as far as possible.

Keywords: illustration, design, statics, optimization

1. はじめに

デジタル制作環境の入手の容易化と SNS など気軽な公表媒体の普及により、趣味でイラストを制作・公表する人が増えている。中でも人物イラストは人気の高い題材であるが、人体の構造や形状の複雑さは初中級者にとって制作や上達の壁となっている。こうした中でデッサン人形は人体の構造を覚え切れていない初中級者でも正しい比率の人体を描く物差しとなり、想像だけでは描きづらい複雑な構図の人物イラストを描く手助けとして広く利用されている。さらに 3DCG で表示されるバーチャルデッサン人形は体格によって異なる多

様な人体比率を再現でき、表示されたデッサン人形をそのまま下絵にできる利便性を持つ。

しかしデッサン人形に自然なポーズを取らせることは、人体の自然な姿勢についての知識を必要とするため難しい。デッサン人形を必要とするような人は、イラストを描く前に大雑把なポーズを思い描くことはできても、詳細な関節角度までは想像できていない。また、不自然なポーズを見て不自然であると理解はできても、自然なポーズにするためにどう修正したら良いかは知識や経験がないと分からない。そのため多くの初中級者は試行錯誤で修正することになり、使いづらさ

を感じてしまう。良いポーズの物差しとなるものとしてポーズ集があるが、思い描いたポーズとポーズ集の事例とは異なるため、自ら思い描いた作品を創作する楽しみは阻害されてしまう。

初中級者が人物ポーズにおいて失敗しやすい点の一つに、ポーズを取るために必要な力とその際の関節や筋肉の負担についての理解の不足に起因する間違いが挙げられる。例えば人物イラストの添削事例集¹⁾では「自分が無理しないとできない姿勢はキャラクタにもできない」と述べられ、静止ポーズに限っても

- 床に手と膝をついたポーズで「腕が体を支えられていない」(p.118)
- 重たい武器を持ったポーズで「武器が軽そうに見える」(p.146)
- 頬杖を付くポーズで「手が顔に添えられているだけで、重さが乗せられていない」(p.8)
- 壁に手をついて立つポーズで「手の位置が高く左上方向に力が逃げていってしまっている」(p.58)

などの失敗事例が挙げられている。

身体の自然なポーズについて、本格的な美術の訓練ではモデルをはじめ実際の人物の観察とデッサンを繰り返して感覚的な理解を得るという方法がとられる。しかしこの過程には時間がかかり、人物モデルはコストもかかるため、単なる趣味のために行うには敷居が高い。一方で身体ポーズの力学を理論的に理解し利用するには高度な力学の知識が必要となるためこれも容易とはいえない。

そこで本研究では、ポーズの力学についての感覚的な理解が不足している初中級者が、人物画に無理のあるポーズを取らせないための支援手法として、静止ポーズを対象とし、ユーザが入力したポーズを基に力学的に身体負荷のより少ないポーズを改善案として提示するバーチャルデッサン人形の実現を目的とする。

2. 関連研究

デッサン学習支援の研究として、ユーザの描画した絵とモデルとの違いを認識し修正やアドバイスを生成する研究がある²⁾³⁾⁴⁾。これらは手本通りに描く学習過程の支援手法である。一方で本研究はイラスト制作時の支援を目的とし、ユーザ自身の作成したポーズを入力として扱う。

ユーザがポージングした人物 3D モデルを下敷きとしてイラスト描画を支援するいわゆるバーチャルデッサン人形は、市販のイラスト制作ソフト (例えば文献⁵⁾など) にも搭載されるなど多数実現されている。一方で平面ディスプレイとマウスによるポージングは操作自体の難しさもあり、実物の人形を用いて 3D モデルのポージングを可能にする製品⁶⁾も発売された。ソフトウェアのみでのポージングの支援としては逆運動学 (IK) が使われるほか、身体の重心が支持脚上になる

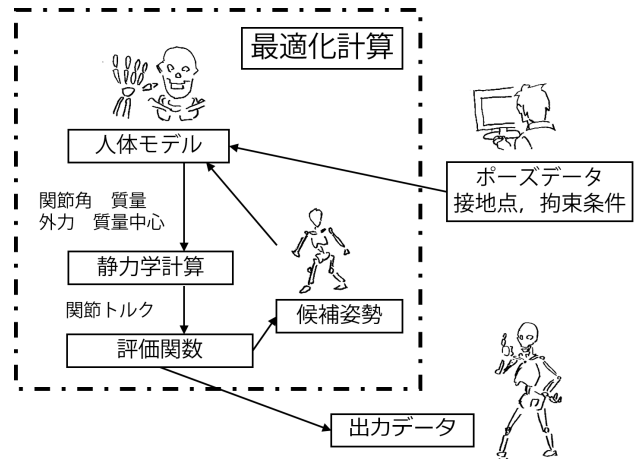


図 1 提案システムの全体像
Fig. 1 Proposed system overview

ようなポーズを修正する自動バランス機能を備えたポージングソフト (例えば文献⁷⁾など) もあるが、姿勢を実現するための身体負荷までは考慮しないため無理な姿勢となることも多い。

ポーズや動作から身体負荷を推定することは筋骨格モデルと逆力学により実現している (例えば文献⁸⁾など)。筋骨格モデルは精密な筋負荷推定を可能にするが計算量が多く解析に時間がかかる。

CG 分野では最適化を用いて自然な動作を生成する研究は多く、手先位置やバランスを維持しつつ関節トルクを極力少なくすることによる自然な歩行動作の全自動生成⁹⁾などが実現しているほか、入力モデルの特徴を維持しつつ静止バランスを最適化する手法¹⁰⁾も提案されているが、同様の手法を描画支援に用いた事例はない。本研究は入力ポーズに対する力学指標の最適化を同様に行い、人物イラストに適したポーズを生成・提示する事を目的としている。

3. 提案手法

提案システムの全体像を図 1 に示す。ユーザはデッサン人形のポーズと接地箇所、位置の拘束条件を入力する。システムが最適化計算を行い、関節トルクの軽減・位置拘束条件の達成・入力姿勢の維持の評価関数を最小化するようなポーズを求め、提示する。

以降では入力および最適化の目的関数について詳細を述べる。

3.1 物理モデル

デッサン人形の物理モデルとして多関節剛体モデルを使用する。 i 番目の関節角度を $\theta_i \in \mathbf{R}^3$, j 番目の剛体を s_j (重心位置 $\mathbf{p}_j \in \mathbf{R}^3$, 姿勢 $\mathbf{q}_j \in \mathbf{R}^4$) とする。剛体の姿勢はクォータニオンで表す。また、関節角度はオイラー角で表す。ただし回転変換の適用順は Z 回転・X 回転・Y 回転の順とする。関節オイラー角の基準座標系は各関節の親側の剛体に図 2 に示す向きで固定されるものとする。図 2 の姿勢において全関節角が $\theta_i = (0, 0, 0)$ とする。

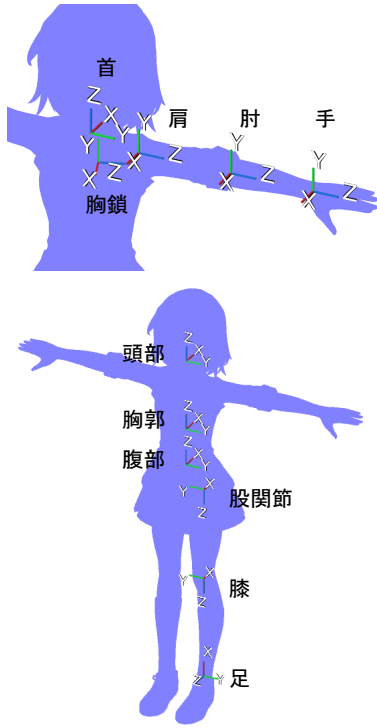


図2 関節の位置と基準座標系
Fig. 2 Origin and coordinate of joints

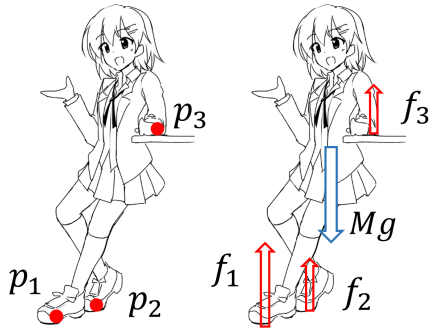


図3 接触点と接触力
Fig. 3 Contact points and contact forces

3.2 入力

ユーザの入力はポーズ（関節角度），接地位置拘束，非接地位置拘束である．各関節の角度 θ_i は GUI を用いて入力する．入力ポーズにおける関節角度を特に θ_{0i} ，剛体位置・姿勢を p_{0j}, q_{0j} と表記する．

接地位置拘束は，床や壁などに接触している部位の位置拘束であり，身体を支えるための接触力を発揮することができる場所である（図3）．本手法では接触は明示的に入力する必要がある．入力は接触剛体と接触面の法線の組 (s_j, n_j) を必要数だけ指定することで行う．接地拘束の対象剛体は最適化後も法線で指定された面内にとどまる．すべての接地位置拘束の集合を C とおく．

非接地位置拘束は，接触力を伴わない剛体位置の拘束である．例えば手を振るポーズにおいて手の位置を高く保つなど，最適化後の結果にユーザの意図を直接反映したい場合に用い

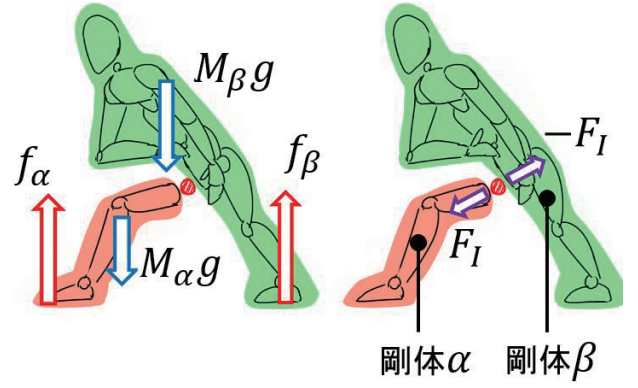


図4 ある関節周りに働く力
Fig. 4 Force around one joint

る．入力は対象剛体と拘束したい座標軸を示すベクトル（例えば第1成分が0なら x 座標を拘束しない，1なら拘束する）の組 $(s_j, c)|c \in \{0, 1\}^3$ を必要数だけ指定することで行う．目標位置には入力ポーズにおける剛体の位置を用いる．すべての非接地位置拘束の集合を P とおく．

3.3 最適化

より負荷の少ないポーズの導出は，姿勢維持に必要な関節トルクを含む評価関数を最小化するような腰剛体位置 p_0 および各関節角度 θ_i を最適化計算により求めることで行う．ポーズの最適化を式 (1) に示す．

$$\begin{aligned} \underset{p_0, \theta_1, \dots, \theta_n}{\text{minimize}} \quad & \{T(p_0, \theta_1, \dots, \theta_n) + D(p_0, \theta_1, \dots, \theta_n) \\ & + Q(p_0, \theta_1, \dots, \theta_n)\} \end{aligned} \quad (1)$$

T, D, Q はそれぞれ，関節トルク・固定剛体の位置の変位・入力関節角度との差異の量を表す評価関数である．以降の節でその計算法を述べる．

3.4 関節トルクの軽減

剛体関節モデルでは筋力は関節トルクでモデル化される．そこで与えられた姿勢を維持するために各関節で発揮すべき関節トルクの総量を関節トルクの評価関数とする．関節トルク評価関数をより小さくするという最適化を行うことで，より少ない筋負荷で維持可能な姿勢を計算する．本手法では2種類の関節トルクを考慮する．一つは自重を支持するためのトルクであり，もう一つは関節自身の構造により発生する受動特性抵抗に対抗するためのトルクである．

3.4.1 自重支持トルク

関節トルクの計算に先立ち，腰剛体位置と各関節角度から，順運動学によって各剛体の位置・姿勢を計算しておく．

自重支持トルクの計算は，接触力の計算，関節トルクの計算の2段階に分けて行う．これは計算を簡略化し計算速度を短縮するためである．本手法では静止できるポーズを対象とするため，身体に作用する力とトルクの総和は0となる． i 番目の接触力を f_i ，接触力の作用点を r_i (ただし原点は身体全体の重心位置)，身体全体の質量を M ，重力加速度を g と

すると接触力の条件は式 (2),(3) で表される.

$$\sum_{i=0}^n \mathbf{f}_i = M\mathbf{g} \quad (2)$$

$$\sum_{i=0}^n \mathbf{r}_i \times \mathbf{f}_i = \mathbf{O} \quad (3)$$

式 (2),(3) を行列を用いて書き直すと式 (4) となる.

$$\mathbf{A}\mathbf{F} = (0, 0, \dots, 0, M\mathbf{g})^t \quad (4)$$

ただし

$$\mathbf{A} := \begin{pmatrix} 0 & -r_{1x} & r_{1y} & \cdots & 0 & -r_{nx} & r_{ny} \\ r_{1z} & 0 & -r_{1x} & \cdots & r_{nz} & 0 & -r_{nx} \\ -r_{1y} & r_{1x} & 0 & \cdots & -r_{ny} & r_{nx} & 0 \\ & & & & I & \cdots & I \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{F} := (\mathbf{f}_1, \mathbf{f}_2, \dots, \mathbf{f}_n)^t$$

式 (4) の連立方程式を解くことにより接触力 $\mathbf{F}$ が計算される. 一般に行列 $\mathbf{A}$ は正方行列とはならないため, 擬似逆行列を用いて最小自乗解を求める (式 (5)).

$$\mathbf{F} = \mathbf{A}^+(0, 0, \dots, 0, M\mathbf{g})^t \quad (5)$$

続いて自重支持のために各関節で発揮されるトルク $\boldsymbol{\tau}_i$ を計算する. 図 4 のように, ある関節を境に剛体関節系を二分した時, 二つの剛体が関節でつながれて静止しているとみなした釣り合いの式が成り立つ. 剛体 α 全体の質量を M_α , 図 4 の α 側剛体に作用する i 番目の接触力を $\mathbf{f}_{\alpha i}$, 関節中心から $\mathbf{f}_{\alpha i}$ の作用点までのベクトルを $\mathbf{r}_{\alpha i}$, 関節中心から剛体 α 全体の重心までのベクトルを $\mathbf{r}_{g\alpha}$, 関節トルクを $\boldsymbol{\tau}$ とし, 剛体 β 側も同様に定める. また, 剛体 α と剛体 β の間に作用する内力を $\mathbf{F}_I$ とする. 釣り合いの式は式 (6)~(9) となる.

$$\sum_i \mathbf{f}_{\alpha i} + M_\alpha \mathbf{g} + \mathbf{F}_I = \mathbf{0} \quad (6)$$

$$\sum_i \mathbf{f}_{\beta i} + M_\beta \mathbf{g} - \mathbf{F}_I = \mathbf{0} \quad (7)$$

$$\sum_i (\mathbf{r}_{\alpha i} \times \mathbf{f}_{\alpha i}) + (\mathbf{r}_{g\alpha} \times M_\alpha \mathbf{g}) + \boldsymbol{\tau} = \mathbf{0} \quad (8)$$

$$\sum_i (\mathbf{r}_{\beta i} \times \mathbf{f}_{\beta i}) + (\mathbf{r}_{g\beta} \times M_\beta \mathbf{g}) - \boldsymbol{\tau} = \mathbf{0} \quad (9)$$

釣り合いの式に式 (5) の $\mathbf{F}$ を代入して解くことで $\boldsymbol{\tau}$ が求められる. これを各関節について行い, i 番目の関節の姿勢維持トルクを $\boldsymbol{\tau}_i$ とおく.

3.4.2 関節特性抵抗に対抗するトルク

人体の関節可動域付近では腱や筋などの構造による非線形な特性を持った抵抗トルクが発生する. このため関節可動域に近い姿勢を維持するには抵抗トルクを打ち消すトルクを余分に発生する必要がある. 山崎ら¹¹⁾は脱力状態の成人男性の

関節負荷を計測し, 関節可動方向ごとの角度と抵抗トルクの関係を式 (10) のように近似している. 本手法ではこの知見を用いる.

$$T(\theta, k_1, k_2, k_3, k_4) = e^{k_1(\theta - k_2)} - e^{k_3(k_4 - \theta)} \quad (10)$$

文献¹¹⁾では各関節の屈伸・伸展・回旋・橈尺などの方向ごとに係数 k_1, k_2, k_3, k_4 を定めている. 剛体関節モデルとこれらの関節可動方向を対応づけるため, 3.1 節で述べた関節座標系において, Z 軸回りの回転を回旋, X 軸回りを伸展, Y 軸回りを屈伸と定める.

以上より, i 番目の関節の特性抵抗対抗トルク $\hat{\boldsymbol{\tau}}_i$ を式 (11) のように求める.

$$\hat{\boldsymbol{\tau}}_i = \begin{pmatrix} T(\theta_{ix}, k_{x1}^i, k_{x2}^i, k_{x3}^i, k_{x4}^i) \\ T(\theta_{iy}, k_{y1}^i, k_{y2}^i, k_{y3}^i, k_{y4}^i) \\ T(\theta_{iz}, k_{z1}^i, k_{z2}^i, k_{z3}^i, k_{z4}^i) \end{pmatrix} \quad (11)$$

ここで $k_{x1}^i \sim k_{x4}^i$ は i 番目の関節の伸展方向 (X 軸) に対応する式 (10) の係数, 回旋 (Z)・屈伸 (Y) も同様である.

3.4.3 評価関数

関節トルクの二乗 $|\boldsymbol{\tau}_i + \hat{\boldsymbol{\tau}}_i|^2$ の総和を評価関数とすることで, より少ない関節トルクで維持可能な姿勢が計算される. ところで, 関節トルク軽減の重要度は関節ごとに異なると考えられる. 例えば人体では関節ごとに発揮可能な最大トルクが異なることから, 最大発揮トルクの小さな関節におけるトルクの低減は, 最大発揮トルクの大きな関節でのそれより身体への負荷の点では重要度が高い. そこで関節ごとに重み w_i を設定し, 関節トルクの重み付き和を評価関数とする.

また, 式 (5) で計算された接触力 $\mathbf{f}_i$ の向きが接触面の法線 $\mathbf{n}_i$ と反対になった場合, その姿勢で安定に静止するためには吸着力が作用しなければならないことを示す. 足に加わる床反力や壁に手をつけて体を支えている場合, 接触力が吸着力となることは通常ないため, 本手法においてそのような姿勢は避けるべきである. そこで接触力が吸着力となった場合は吸着力の大きさに比例する大きなペナルティを評価関数に加える.

$$E_{\text{contact}} = \sum_{i=0}^n \begin{cases} k_{\text{penalty}} |\mathbf{f}_i| & (\mathbf{f}_i \cdot \mathbf{n}_i < 0) \\ 0 & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (12)$$

ここで k_{penalty} は十分大きな比例係数である.

以上より, 関節トルクの評価関数 T を式 (13) のように定義する.

$$T := \sum_{i=0}^n w_i |\boldsymbol{\tau}_i + \hat{\boldsymbol{\tau}}_i|^2 + E_{\text{contact}} \quad (13)$$

3.5 剛体位置拘束の実現

剛体位置拘束の目的は, 足や壁についた手などが床面・壁面から離れないようにすること, および, 手足を一定の高さに上げておきたい場合などユーザの意図が明確である場合に,

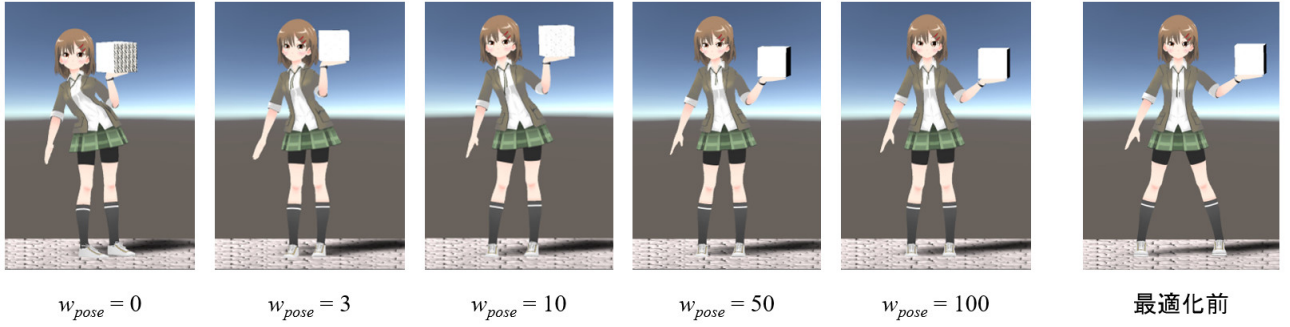


図5 パラメータ w_{pose} の影響
Fig. 5 Effect of parameter w_{pose}

最適化結果に直接反映できるようにすることである。対象となる剛体について、入力ポーズにおける位置からの変位量を評価関数とし、拘束から外れた候補ポーズに対しペナルティを与えることにより拘束を実現する。

接地位置拘束 ($s_j, \mathbf{n}_j$) では剛体は接地面内でなら移動してもよいので、対象剛体の位置と接地面との距離を評価関数とする。このとき、接地面の位置は入力ポーズにおいて剛体が接地しているものとする。また、非接地位置拘束 ($s_j, \mathbf{c}$) では、対象剛体の入力ポーズでの位置からの変位量のうち拘束対象軸成分の二乗和を評価関数とする。これは、必要な軸方向の変位のみを拘束できるようにするためである。どちらも、位置拘束の実現をどの程度優先するかを重み a_j により調整できるようにする。以上より、剛体位置拘束の評価関数は式 (14) と定義する。

$$D := \sum_{(s_j, \mathbf{n}) \in C} \{a_j(\mathbf{p}_j - \mathbf{p}_{0j}) \cdot \frac{\mathbf{n}}{|\mathbf{n}|}\} + \sum_{(s_j, \mathbf{c}) \in P} \{a_j(\mathbf{p}_j - \mathbf{p}_{0j}) \cdot \mathbf{c}\} \quad (14)$$

3.6 入力ポーズの維持

提案手法の目的は入力ポーズに近く負荷のより少ないポーズを求めることにあるので、入力ポーズとの差分を評価関数に含めることで、(他の評価条件が同じであれば) より入力ポーズに近いものが出力されるようにする。具体的には、入力ポーズの各関節角度と候補ポーズの各関節角度の差分の二乗和を評価関数とする。入力ポーズ維持を重視しすぎると改善の効果が少なくなり、逆に入力ポーズ維持を軽視しすぎるとユーザの意図に反するポーズとなる可能性が高い。このことから、入力ポーズ維持の度合いは重み w_{pose} で調整できるようにする。以上より、入力ポーズ維持の評価関数は式 (15) のように定義する。

$$Q := w_{pose} \sum_{i=0}^n |\theta_{0i} - \theta_i|^2 \quad (15)$$

4. 実装

提案手法に基づき実際に実現したバーチャルデッサン人形システムについて、具体的な設定と動作例を述べる。

4.1 ソフトウェア環境

システムは Unity を用いて実現した。ボーン入りキャラクター CG モデルである“プロ生ちゃん”¹²⁾を使用し、関節角度などの入力は Unity の編集 UI を用いて実現した。関節角度の入力後にゲームエンジンを実行すると最適化計算が開始される。計算中は常にその時点までに求まった最良解がキャラクターモデルに反映されるため、計算の収束に 1~2 分を要する場合でも大まかな変化の方向は最初の十数秒で把握することができる。システム全体の開発言語は C# で、最適化計算部分は C++ を用いた。

4.2 最適化手法

最適化にはランダムサンプリングベースの最適化手法である CMA-ES¹³⁾を用いた。CMA-ES は高次元評価関数の大域最適解を導関数不要で計算する汎用性の高い手法である一方で、導関数が既知である場合の準ニュートン法などには効率が劣る。今回は実装の容易さの点から CMA-ES を用いた。実装には C++ で書かれた CMA-ESpp ライブラリ¹⁴⁾を用いた。CMA-ES のパラメータとして、個体数 16, 初期分散 0.3, また停止条件として、最大反復回数 50000, 最小差違 10^{-1} , 最小履歴差違 10^{-1} , 最小ステップ幅 10^{-2} を設定した。

4.3 目的関数のパラメータ設定

各剛体の質量は表 1 のように設定した。値は高校生の平均体重および基準体重比に基いて決定した¹⁵⁾¹⁶⁾。

関節トルク評価関数における各関節の重み w は、例として用いた“プロ生ちゃん”の印象に合わせた値として表 2 のように設定した。このパラメータは、身体重量を支えるために多くの筋肉が付いているなど最大発揮トルクの大きな関節で、より大きなトルクが出ることを許容するためのものである。大きなトルクを許容する関節では 0.1 や 0.2 程度の小さな値を、それ以外は 1 を設定すればよい。少しの値の変化で結果に大きな違いが出るようなパラメータではないので、性別が同じで体格が似通ったキャラクターでは同じ値を使用しても問題ないが、そうでないキャラクターでは異なる値を設定する必要がある (例: 力強い腕を持つキャラクターであれば肩・肘関節の重みを減らすなど)。

接地拘束の重み a_j は基本的にはある程度大きな値であれ



図 6 ポーズ最適化結果
Fig. 6 Result of pose optimization

ばよく、本実装では多くの場合に 1000 に設定した。ただし他の評価関数とのトレードオフによりこの値で接地拘束が果たされないことがあるため、そのような事が発生した接地拘束に限りより大きな 10000 の値を設定した。各生成例での具体的な値は後述の生成結果（図 6）に示す。

入力ポーズ維持の重み w_{pose} は、0 にすると身体負荷の軽減を最優先して入力とは最もかけ離れたポーズが出力され、値を増やすにつれ負荷軽減が行われず入力に近いポーズが出力されるようになる。図 5 にその様子を示す。したがって w_{pose} の値については、まず $w_{pose} = 0$ 付近でポーズを出力し、結果に違和感がなくなるまで徐々に値を大きくしていくなどの簡単な方法で適切な値を設定することができる。

表 1 各部位の質量
Table 1 Mass of each body part

部位	頭部	首	肩	上腕	前腕	手
質量 (kg)	3.0	0.7	1.0	2.0	1.0	0.5
部位	胸郭	腹部	腰部	大腿	下腿	足
質量 (kg)	6.0	7.0	7.0	6.0	3.0	1.0

表 2 各関節の重み
Table 2 Optimization weight of each joint

関節	頭部	首	胸鎖	肩	肘	手
w	1.0	1.0	0.1	1.0	1.0	1.0
関節	胸郭	腹部	股関節	膝	足	
w	0.2	0.1	1.0	1.0	0.1	

表 3 計算時間

Table 3 Computation time

ポーズ	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)
計算時間 (秒)	21.5	102.6	16.7	59.6	35.7	16.7

4.4 結果

入力（姿勢、拘束パラメータ）と、それに対する提案手法のポーズ出力結果のうち、特徴的な例を図 6 に示す。また、各例の計算時間を表 3 に示す。

ポーズ 2・3・5 は足のみで立っているポーズであり、ポーズ 1・4 は足と手で身体を支えているポーズである。手で身体を支える場合は重心が両足の中心よりも手の近くへ移動している事がわかる。ポーズ 2・3 は手を高く挙げたポーズであり、出力でも挙げた手は下がらないまとなっている。また、ポーズ 6 は座っているポーズの例である。

ポーズ 1 は手で体を支え、ポーズ 2 は重い荷物を手に持っており、どちらも手に力のかかる姿勢である。ポーズ 1 では手足を体幹近くに引き寄せることで、またポーズ 2 では背骨と肘を曲げて荷物を身体の中心に近づけることで、それぞれ重力に伴って肘・肩・腹などに加わるモーメントを軽減しており、提案手法が関節負担軽減の面で特に機能した例と言える。

ポーズ 1・2・4 は入力に対して出力が比較的大きく変化した例であり、一方ポーズ 5・6 はわずかな変化のみが生じた例である。

最適化計算にかかった時間は 16.7 秒～102.6 秒（ポーズ 3,6 が最短、ポーズ 2 が最長）であった（CPU: Core i5 4210U 2.70GHz, OS : Windows 7 64bit, メモリ: 8Gbyte）。

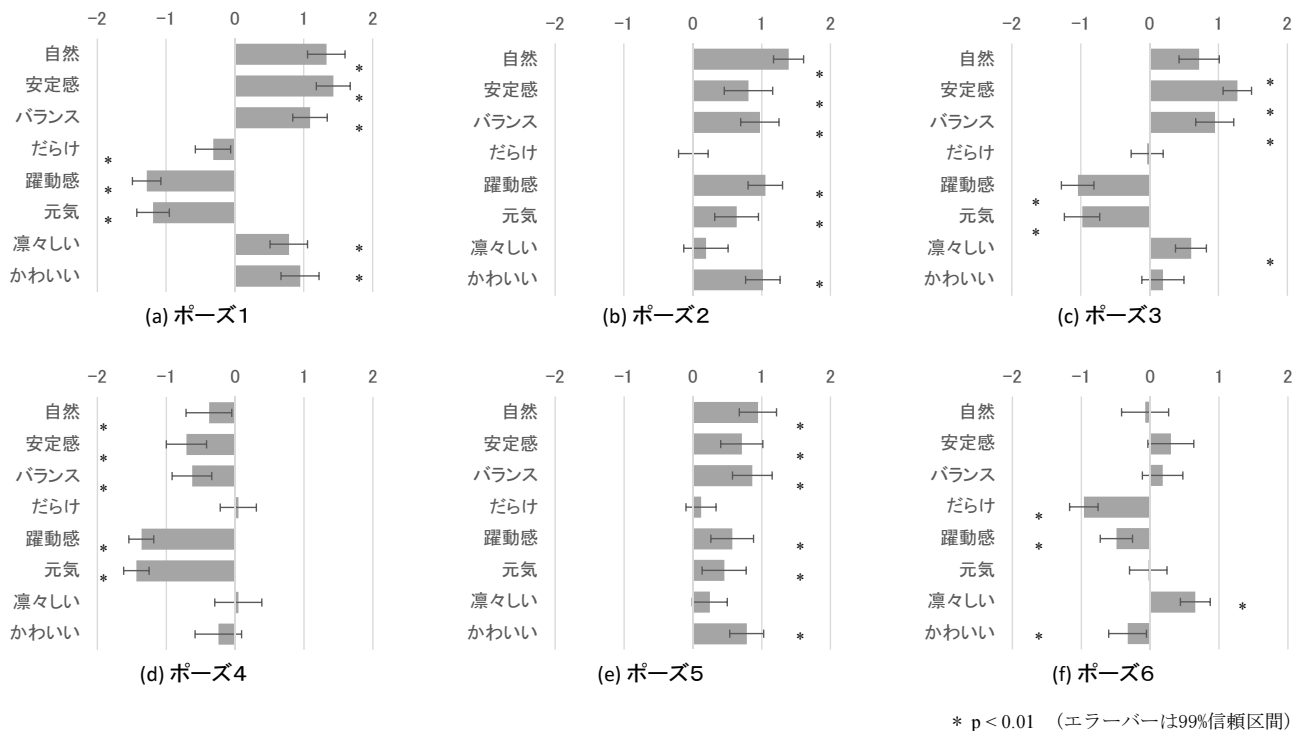


図 7 アンケートの結果
Fig. 7 Result of questionnaire

5. 評価

提案手法を使用して出力されたポーズが入力に対してどのような印象の違いを持つか評価を行った。特に以下の3つの観点からの評価を目的とし、アンケート調査により検証した。

1. ポーズ改善システムとして、入力よりも自然なポーズが出力されたか。また、静力学的な釣り合いに基づくポーズ最適化により、姿勢のバランスや安定感が向上したか。
2. 静止安定性のみを考慮するため躍動感が失われたり、身体負荷の軽減によって過度に脱力しだらけた印象のポーズになっていないか。
3. ポーズ5・6のように提案手法による変化がわずかである場合も印象に変化が見られるか。

そこで評価では以下の8項目の印象を用いた。まず、ポーズの主観的な自然さを問う項目を「自然である」、ポーズの安定感を問う項目を「安定感がある」「バランスがとれている」とした。また、ポーズが過度に脱力している印象を問う項目を「だらけている」とし、一方で脱力によって失われうる印象を問う項目を「躍動感がある」「元気がある」「凛々しい」とした。「躍動感がある」「元気がある」は力によって動きを感じさせる印象として、逆に「凛々しい」は無駄なく力の入った静止状態を示す印象としてそれぞれ用いた。加えて、総合的な魅力の印象の一つとして「かわいい」を用いた。

5.1 方法

図6の6ポーズそれぞれについて、被験者に最適化前・後両方の画像を、一方をA、他方をBのように伏せて提示し

た。最適化前・後とA・Bの対応は設問ごとに異なるようにした。被験者はA・Bの画像を見た上で、8項目の印象についてどちらの画像がより当てはまるかを「確実にA」「ややA」「どちらとも言えない」「ややB」「確実にB」の5段階で回答した。

アンケートではポーズの提示に“プロ生ちゃん”のモデルを使用した。これは、4.3節で述べたとおり、実装で使用したパラメータが“プロ生ちゃん”の印象に合うよう設定しており、アンケートの回答者が異なるキャラクタ（例えば腕のがっしりした男性など）を想像して回答すると適切な印象評価ができないためである。

アンケートはWeb上で行った。被験者には「3DCGモデルのポーズ評価に関するアンケート」であることのみを伝え、一方がシステムの出力であるなどの情報は一切与えなかった。人物イラストを描いた経験のある人に多く回答してもらうため、アマチュアイラストレータである著者一名の、知り合いのうち著者の研究について知らない者に回答を依頼した。

回答は5段階の間隔尺度とみなし、-2, -1, 0, +1, +2のスコアを割り当てた（「確実に（出力）」を回答した場合が+2）。最適化前後で評価に差があればスコアの平均が有意に0でなくなると考えられる。一群のT検定を行い、スコアの平均が有意に0でない場合に最適化前後で印象の増大または減少が起きたとみなした。

5.2 結果と考察

最適化の結果、ポーズ1,2,3,5で「自然」「安定感」「バランス」の印象が増大した。特にポーズ5については、最適

化前後でポーズ自体の差はわずかであったにも関わらず、多くの被験者が最適化後の方に安定でバランスが取れている印象を感じている。このことから静力学に基づく姿勢最適化はポーズの安定感の改善に有効であると考えられる。またポーズ1,2,5では「かわいい」の印象も増大しており、力学的な負荷を減らすことでポーズの魅力自体も改善されることが示唆された。

「躍動感」「元気」の印象は、ポーズ1,3,4については予想通り最適化後に減少した。1,3は最適化前後で静止しづらいポーズから安定して静止できるポーズに変わったため躍動感が失われたと考えられる。ポーズ4については最適化の結果足を閉じた大人しいポーズに変化したことが理由であろう。一方で、ポーズ2,5では逆に最適化後に「躍動感」「元気」の印象が増加した。ポーズ2,5ともに最適化前は背骨が直立して左右対称な部位の多いポーズであり、最適化後は自然な非対称さや背骨の曲がりが増加されたことで躍動感が増したと考えられる。

予想に反し、最適化後に「だらけ」の印象が増すことはなかったのみならず、ポーズ1では「だらけ」の印象が減少しポーズ1,3,6では「凛々しい」印象が最適化後に増加した。ポーズ1は、入力ポーズでは自重を手で支えて足を投げ出しているのに対し最適化後は手足をしっかりと使って立つポーズになっている。全体的に、本手法では単に手足を下に降ろすよりも、上半身の重心を腰で支えつつ比較的縦方向にまとまった姿勢をとることで関節トルクの低減が行われており、これが「だらけ」の印象を与えず「凛々しさ」を感じさせたと考えられる。入力ポーズ維持や関節特性抵抗が機能した結果と考えられる。

一方で、ポーズ4では期待に反して「自然」「安定感」「バランス」の印象が最適化後に減少してしまった。ポーズ4の最適化では足を閉じた姿勢にすることで股関節周りで発生するトルクが軽減されているが、その結果足による支持多角形が小さくなり安定感やバランスを欠いた姿勢だと評価されたと考えられる。本来足を広げた姿勢では足裏に摩擦力が発生し接触力ベクトルが股関節を向くことで股関節のトルクを少なくできるが、本手法では関節トルクと無関係にできるだけ小さな接触力を求めるため摩擦力が発生せず、股関節のトルクが大きくなってしまったと考えられる。

ポーズ5・6はどちらも入出力間の変化がわずかであったが、ポーズ5では「だらけ」「凛々しい」を除く6項目で印象の増大が見られたのに対し、ポーズ6は「自然」「安定感」「バランス」「元気」と多くの項目で最適化前後に有意な印象の変化は見られなかった。ポーズ5は少しでも姿勢を崩すと不安定になるポーズであり、出力における上半身のわずかな姿勢変化が重心を支持脚上に移動しバランスをとるためであることが分かり易い。一方で、ポーズ6では上半身がわずかに起き上がっているが、それによる効果は一見しても分からないため印象に変化が生じなかったと考えられる。

6. 課題と展望

静止ポーズを対象として、ユーザが入力したポーズをもとに関節の負荷を軽減し、より自然で安定感のあるポーズ改善案を提示するバーチャルデッサン人形を実現した。摩擦力が考慮されないために支持多角形が狭まりかえって安定感のないポーズが出力される場合がある問題は、関節トルクが少なくなるよう摩擦力を決定する事で解決すると考えられる。より安定感のある姿勢を得るため摂動安定性を評価関数に含めることも考えられるが、躍動感の低下がさらに顕著になると思われるので使用条件に注意が必要となるだろう。

本提案手法は静止ポーズを対象としたが、動きのあるポーズへの対応は今後の大きな展開の一つである。動きのあるポーズにおける適切な負荷軽減を行うには、関節負荷の指標で動力学を考慮するとともに、身体部位の動きを入力する必要がある。全ての身体部位の動き（速度・角速度）を入力するのは手間がかかるため、その動きを司る主要な部位の動きのみ入力し残りは逆運動学や動力学計算などで補間するといった方法が望ましい。さらには、一瞬の速度を入力するのではなく、例えば「ハンマーを大きく振り下ろす動作の、振り終えた瞬間」のように、一連の動作のどのタイミングであるかを入力して動作全体の最適化を行うことができれば、さらに動きの中の一瞬のポーズとして自然な出力を得ることが可能になると考えられる。

参考文献

- 1) JAM 日本アニメ・マンガ専門学校 / cielo, 人体デッサン赤ペン添削塾, 廣済堂出版 (2017).
- 2) 合田隆三, 丸山依子, 川西英彰, 梶本信幸, 高木佐恵子, 吉本富士市: "初心者のための鉛筆デッサン支援システム", 情報処理学会研究報告グラフィクスとCAD (CG), Vol. 2002, No. 16, pp. 19-24 (2002).
- 3) 加藤翔, 亀田昌志: "二物体間における遠近の理解を目的としたデッサン支援学習の一検討", 第76回情報処理学会全国大会講演論文集, Vol. 2014, No. 1, pp. 413-414 (2014).
- 4) 澤田明宏, 亀田昌志: "タブレット型コンピュータを用いた初心者向け対話的デッサン学習支援システムの開発", 第74回情報処理学会全国大会講演論文集, Vol. 2012, No. 1, pp. 895-897 (2012).
- 5) CELSYS Inc, イラスト・マンガ制作ソフト clip studio paint, <http://www.clipstudio.net/> (2016).
- 6) CELSYS Inc, QUMARION — 人型入力デバイス, <http://www.clip-studio.com/quma/> (2016).
- 7) Smith Micro Software, Poser, <http://www.poser.jp/> (2016).
- 8) S. L. Delp, F. C. Anderson, A. S. Arnold, P. Loan, A. Habib, C. T. John, E. Guendelman, D. G. Thelen: "Opensim: Open-Source Software to Create and Analyze Dynamic Simulations of Movement", IEEE Transaction on Biomedical Engineering, Vol. 54, No. 11, pp. 1940-1950 (2007).
- 9) M. de Lasa, I. Mordatch, A. Hertzmann: "Feature-Based Locomotion Controllers", ACM Trans. on Graphics, Vol. 29, No. 3 (2010).
- 10) R. Prévost, E. Whiting, S. Lefebvre, O. Sorkine-Hornung, Make It Stand: Balancing Shapes for 3D Fabrication. ACM Trans. on Graphics, Vol. 32, No. 4, pp. 81:1-81:10 (2013).
- 11) 山崎信寿, 田中隆之: "(15) 関節の抵抗特性を模擬したダミー骨

格 (3 部人工物による生体機能のシステム化)”, バイオメカニズム, No. 18, pp. 175–185 (2006).

- 12) プログラミング生放送, プロ生ちゃん (暮井 慧), <http://pronama.azurewebsites.net/pronama/> (2015).
- 13) N. Hansen, A. Ostermeier. ”Adapting Arbitrary Normal Mutation Distributions in Evolution Strategies: the Covariance Matrix Adaptation.” Proc. of IEEE International Conference on Evolutionary Computation, pp. 312–317 (1996).
- 14) Alexander Fabisch, CMA-ESpp, <https://github.com/AlexanderFabisch/CMA-ESpp> (2016).
- 15) 文部科学省生涯学習政策局政策課調査統計企画室, 学校保健統計調査, http://www.mext.go.jp/component/b_menu/other/_icsFiles/afieldfile/2015/03/27/1356103_1.pdf (2016).
- 16) American Society for Parental and Eterna, The A.S.P.E.N. Nutrition Support Practice Manual 1998, Kendall Hunt Pub Co (2001).

(2018 年 3 月 16 日 受付)

(2018 年 6 月 8 日 再受付)



江 添 正 剛

2014 年 東京工業大学工学部情報工学科卒業.
2016 年 同大学院知能システム科学専攻修士課程修了. 在学中はキャラクタ動作生成, 姿勢最適化に関する研究に従事.



佐 藤 裕 仁

2016 年 東京工業大学工学部情報工学科卒業.
2018 年 同大学工学院情報通信系情報通信コース修士課程修了. 同コース博士課程在学中. キャラクタ動作生成, 力覚インタフェースの研究に従事.



三 武 裕 玄 (正会員)

2006 年 東京工業大学工学部情報工学科卒業.
2008 年 同大学院知能システム科学専攻修士課程修了. 同年日本学術振興会特別研究院. 2011 年同専攻博士課程修了 (博士 (工学)). 同年東京工業大学精密工学研究所助教 (2016 年より未来産業技術研究所に改組), 現在に至る. インタラクティブキャラクタ, バーチャルリアリティの研究に従事.



長谷川 晶 一

1997 年 東京工業大学工学部電気電子工学科卒業. 1999 年 同大学院知能システム科学専攻修士課程修了. 同年ソニー株式会社入社. 2000 年東京工業大学精密工学研究所助手. 2006 年 博士 (工学). 2007 年 電気通信大学知能機械工学科准教授. 2010 年 東京工業大学精密工学研究所准教授 (2016 年より未来産業技術研究所に改組), 現在に至る. バーチャルリアリティ, 力覚インタフェース, ヒューマンインタフェースの研究に従事.