

無理のない姿勢を静力学指標の最適化により提案する

バーチャルデッサン人形

Virtual drawing doll which suggest natural posture by statics and optimization

江添 正剛†

三武 裕玄†

長谷川 晶一†

Masataka EZOE†, Hironori MITAKE† and Shoichi HASEGAWA†

† 東京工業大学 † Tokyo Insutitute of Technology

E-mail: †{ezoe,mitake,hase}@haselab.net

1 背景

人物イラストを補助する道具にデッサン人形があり、想像だけでは書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。

しかしデッサン人形に自然なポーズを取らせること自体、人体の自然な姿勢についての知識が必要で難しい。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。

ユーザが大雑把なイメージに基いて作成したポーズに対し、そのポーズに近くてかつより自然なポーズを提示できれば問題は解決する。例えば人物モデルはそうした役割も担っていると考えられるが、人物モデルはコストが高く、鏡を用いて自身をモデルにするにも限界がある。そこで計算機を利用して自動的にポーズの改善案を示す仕組みを考える。人は習熟に従って余分な力の抜けたポーズを取ることができるようになることから、与えられたポーズの要点は維持しつつ、より筋負荷の少ないポーズを提案することは効果的と考える。

以上より、本研究では力学・身体負荷の観点でより自然なポーズを提案するバーチャルデッサン人形の実現を目的とし、入力ポーズに近く力学的に静止可能で過大な筋負荷を要求しない改善ポーズを計算する手法を提案する。

2 関連研究

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 ([1] 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も発

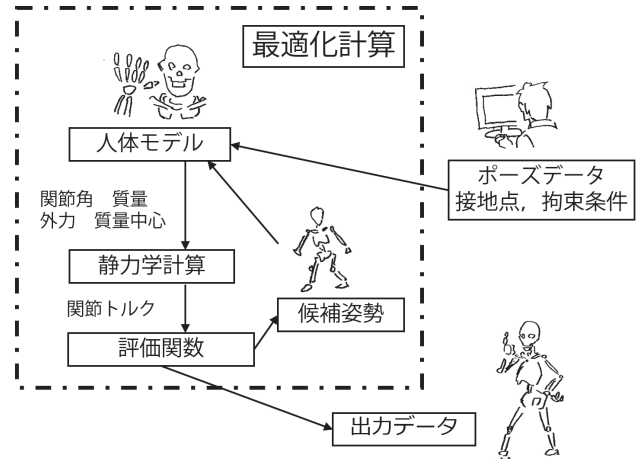


図 1: 提案システムの全体像

売された ([2]). 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 ([3] 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。

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 [4] 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 [5] も提案されている。本研究も同様に入力ポーズに対する最適化を行い、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

力学・身体負荷の観点でより自然なポーズを提案するため、ユーザが入力したポーズに近く、かつ力学的に静止可能で、より負荷の少ないポーズを計算して出力するバーチャルデッサン人形を提案する。提案システムの全体像を図 1 に示す。

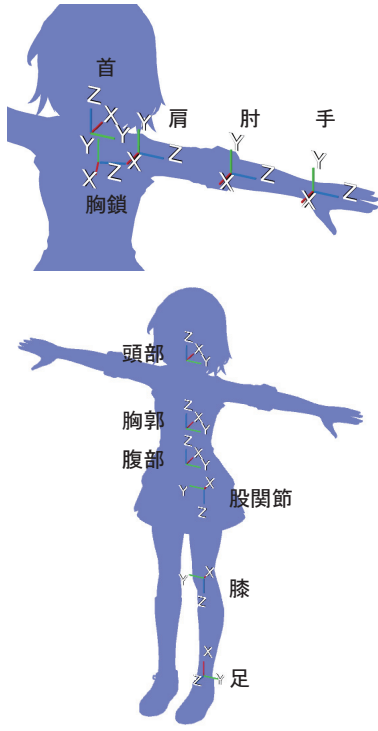


図 2: 関節の位置と基準座標系

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。

3.2 入力

ユーザの入力はポーズ（関節角度 θ_i ）、接地位置拘束、非接地位置拘束である。接地位置拘束 C は、床や壁などに接触している部位について接触剛体と接触面の法線の組 $(s_j, \mathbf{n}_j)$ を必要数だけ指定する。非接地位置拘束 P は、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る。入力は対象剛体と拘束座標軸の組 $(s_j, \mathbf{c}) | \mathbf{c} \in \{0, 1\}^3$ を必要数だけ指定する。

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 $\mathbf{p}_0$ および各関節角度 θ_i を最適化計算 (式 (1)) により求め

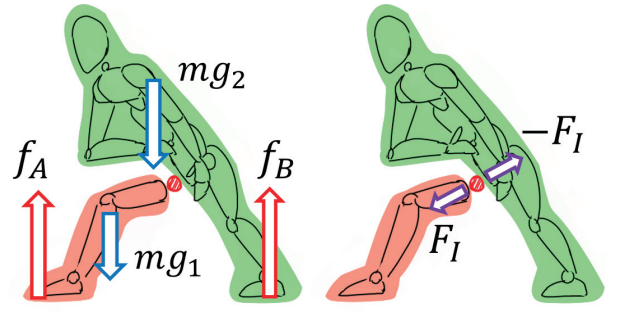


図 3: ある関節周りに働く力

ることで行う。実際の最適化計算はランダムサンプリングベースの最適化手法である CMA-ES[6] を用いた。

$$\begin{aligned} \underset{\mathbf{p}_0, \theta_1, \dots, \theta_n}{\text{minimize}} \quad & \{T(\mathbf{p}_0, \theta_1, \dots, \theta_n) \\ & + D(\mathbf{p}_0, \theta_1, \dots, \theta_n) + Q(\mathbf{p}_0, \theta_1, \dots, \theta_n)\} \quad (1) \end{aligned}$$

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

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よう最適化を行うことで、より少ない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

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 $\mathbf{f}_i$ 、接触力の作用点を $\mathbf{r}_i$ (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 $\mathbf{g}$ とすると接触力の条件は式 (2) となり、この最小自乗解を接触力とする。

$$\sum_{i=0}^n \mathbf{F}_i = M\mathbf{g}, \quad \sum_{i=0}^n \mathbf{r}_i \times \mathbf{F}_i = \mathbf{O} \quad (2)$$

図 3 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見なした釣り合いの式が成り立つ。剛体 A 全体の質量を M_A 、図 3 の A 側剛体に作用する i 番目の接触力を $\mathbf{f}_{Ai}$ 、関節中心から $\mathbf{f}_{Ai}$ の作用点までのベクトルを $\mathbf{r}_{Ai}$ 、関節中心から剛体 A 全体の重心までのベクトルを $\mathbf{r}_{gA}$ 、関節トルクを $\boldsymbol{\tau}$ とし、

剛体 B 側も同様に定める．また，剛体 A と剛体 B の間に作用する内力を $\mathbf{F}_I$ とする．釣り合いの式は式 (3)～(6) となる．

$$\sum_i \mathbf{f}_{Ai} + M_A \mathbf{g} + \mathbf{F}_I = 0 \quad (3)$$

$$\sum_i \mathbf{f}_{Bi} + M_B \mathbf{g} - \mathbf{F}_I = 0 \quad (4)$$

$$\sum_i (\mathbf{r}_{Ai} \times \mathbf{f}_{Ai}) + (\mathbf{r}_{gA} \times M_A \mathbf{g}) + \boldsymbol{\tau} = 0 \quad (5)$$

$$\sum_i (\mathbf{r}_{Bi} \times \mathbf{f}_{Bi}) + (\mathbf{r}_{gB} \times M_B \mathbf{g}) - \boldsymbol{\tau} = 0 \quad (6)$$

釣り合いの式に先に求めた $\mathbf{F}$ を代入し $\boldsymbol{\tau}$ を求める．

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 [7] 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間を式 (7) のように近似している．本手法ではこの知見を用いる．

$$T(\theta, k_1, k_2, k_3, k_4) = e^{k_1(\theta - k_2)} - e^{k_3(k_4 - \theta)} \quad (7)$$

[7] では各関節の屈伸・伸展・回旋・撓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 $\hat{\tau}_i$ を式 (8) のように求める (ただし $k_{x1}^i \sim k_{x4}^i$ は i 番目の関節の伸展方向 (X 軸) に対応する式 (7) の係数，回旋 (Z)・屈伸 (Y) も同様)．

$$\hat{\tau}_i = \begin{pmatrix} T(\theta_{ix}, k_{x1}^i, k_{x2}^i, k_{x3}^i, k_{x4}^i) \\ T(\theta_{iy}, k_{y1}^i, k_{y2}^i, k_{y3}^i, k_{y4}^i) \\ T(\theta_{iz}, k_{z1}^i, k_{z2}^i, k_{z3}^i, k_{z4}^i) \end{pmatrix} \quad (8)$$

3.4.3 評価関数

関節トルクの二乗 $|\boldsymbol{\tau}_i + \hat{\tau}_i|^2$ 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．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，関節ごとに最大発揮トルクに応じた重み 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，接触力が吸着力となった場合その姿勢は安定に静止できない姿勢であるので，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 (式 (9)， $k_{penalty}$ は十

分大きな比例係数)．

$$E_{contact} = \sum_{i=0}^n \begin{cases} k_{penalty} |\mathbf{f}_i| & (\mathbf{f}_i \cdot \mathbf{n}_i < 0) \\ 0 & (otherwise) \end{cases} \quad (9)$$

以上より，関節トルクの評価関数 T を式 (10) のように定義する．

$$T := \sum_{i=0}^n w_i |\boldsymbol{\tau}_i + \hat{\tau}_i|^2 + E_{contact} \quad (10)$$

3.5 剛体位置拘束の実現

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．

$$D := \sum_{(s_j, \mathbf{n}) \in C} \{a_j (\mathbf{p}_j - \mathbf{p}_{0j}) \cdot \frac{\mathbf{n}}{|\mathbf{n}|}\} + \sum_{(s_j, \mathbf{c}) \in P} \{a_j (\mathbf{p}_j - \mathbf{p}_{0j}) \cdot \mathbf{c}\} \quad (11)$$

3.6 入力ポーズの維持

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．入力ポーズ維持の度合いは重み w_{pose} で調整できるようにする．

$$Q := w_{pose} \sum_{i=0}^n |\theta_{0i} - \theta_i|^2 \quad (12)$$

3.7 パラメータ

各剛体の質量は表 3.7 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 ([8][9])．関節トルク評価関数における各関節の重み w は表 3.7 のように設定した．また，CMA-ES のパラメータとして，個体数 16，初期分布 $\sigma = 0.3$ ，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．

3.8 結果

入力 (姿勢，拘束パラメータ) の例と，それに対するポーズ出力結果の例を図 4 に示す．最適化計算にかかった時間

ポーズ1 計算時間 21.5秒

接地拘束: (左/右手), 机, a=10000, (左/右足), 床, a=1000)



最適化前



最適化後

ポーズ2 計算時間 102.6秒

接地拘束: (左/右足), 床, a=1000) ※箱の重さは10kg



最適化前



最適化後

ポーズ3 計算時間 16.7秒

接地拘束: (左/右足), 床, a=1000) 非接地拘束: (右手, z軸, a=1000)



最適化前



最適化後

ポーズ4 計算時間 59.6秒

接地拘束: (右手, 壁, a=1000), (左/右足), 床, a=1000)



最適化前



最適化後

ポーズ5 計算時間 35.7秒

接地拘束: (右足, 床, a=1000) 非接地拘束: (左足, {x,y,z}軸, a=10000)



最適化前



最適化後

ポーズ6 計算時間 16.7秒

接地拘束: (右肘, 椅子, a=1000), (左/右大腿, 左/右下腿), 椅子, a=1000)



最適化前



最適化後

図 4: ポーズ最適化結果

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 1: 各部位の質量

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 2: 各関節の重み

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 Professional 64bit, メモリ: 8Gbyte）。

4 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。ポーズ改善システムとしては，入力よりも自然なポーズが出力されることが望ましい。また，静力学的な釣り合いに基づくポーズ最適化を行うため，姿勢のバランスや安定感が向上することが期待できる。一方で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意図せず脱力

しだらけた印象のポーズになってしまう危険もある。これらの仮説をアンケート調査により検証した。

4.1 方法

図 4 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。被験者は A・B の画像を見た上で，「自然である」「安定感がある」「躍動感がある」「バランスがとれている」「元気がある」「だらけている」「凛々しい」「かわいい」の 8 種類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。

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見なした。

4.2 結果と考察

110 名から回答を得た。結果を図 5 に示す。

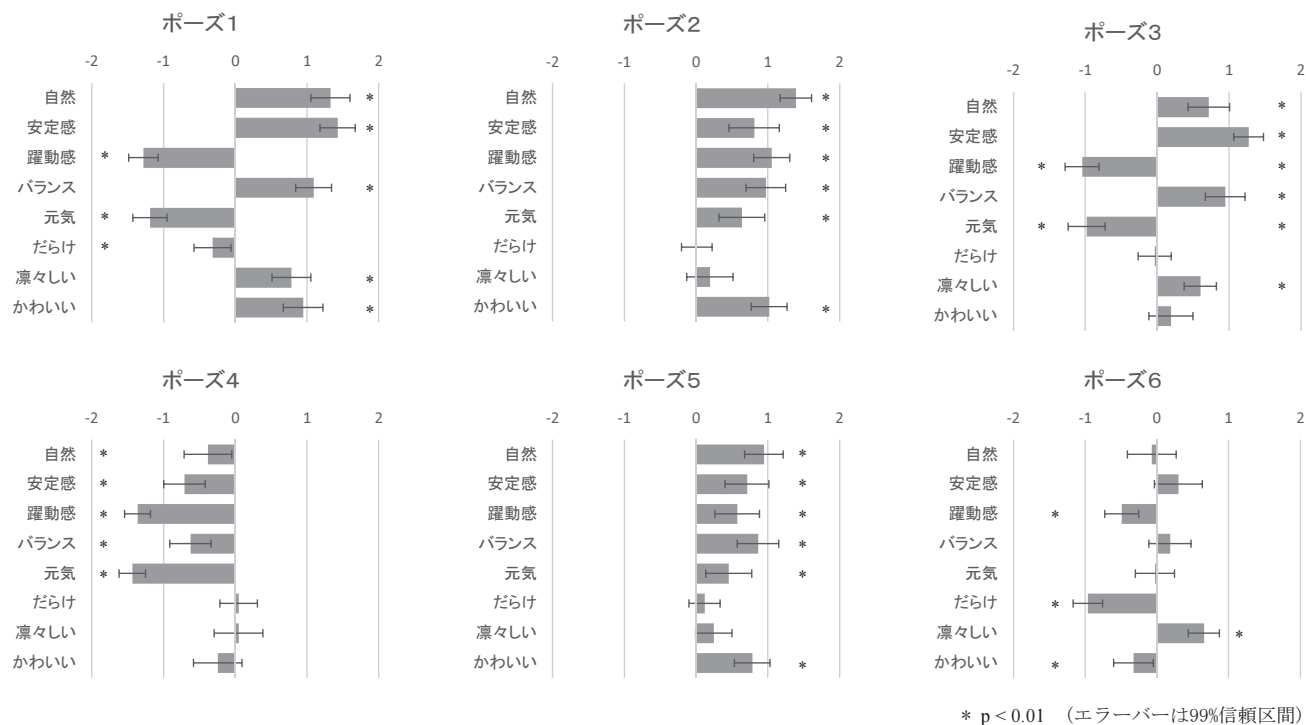


図 5: アンケートの結果

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。さらにポーズ 1,2,5 では「かわいい」の印象も増大した。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かかわらず、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がポーズの印象改善に有効であることが示唆される。

「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付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」「躍動感」「バランス」「元気」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。

また、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。右肘と大腿を固定したことで最適化後も上半身がわずかに起き上がった程度の変化しかなく、印象に影響を及ぼす変化が少なかったと考えられる。

5 課題と展望

ユーザが入力したポーズをもとに、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。

今回は最適化前後のポーズでユーザの意図がどの程度維持されたかは評価しなかった。創作の過程では最初から意図する結果があるのではなく、試行錯誤の過程で徐々に生み出されることが多い。提案システムが実際にイラストのポーズを試行錯誤で創作する過程の効率化に貢献するのか、イラスト描画に使用してもらい評価することも今後の課題である。そのためには UI の整備や最適化手法の高速化を行って人物描画支援システムとして展開することが望ましく、今後注力していく。

参考文献

- [1] Inc. CELSYS. イラスト・マンガ制作ソフト CLIP STUDIO PAINT — CLIP STUDIO.NET. <http://www.clipstudio.net/>. (参照 2016-3-6).
- [2] Inc. CELSYS. QUMARION — 人型入力デバイス. <http://www.clip-studio.com/quma/>. (参照 2016-3-6).
- [3] Smith Micro Software. Poser. <http://www.poser.jp/>. (参照 2016-3-6).
- [4] Martin de Lasa, Igor Mordatch, and Aaron Hertzmann. Feature-Based Locomotion Controllers. *ACM Transactions on Graphics*, Vol. 29, No. 3, 2010.
- [5] Romain Prévost, Emily Whiting, Sylvain Lefebvre, and Olga Sorkine-Hornung. Make it stand: Balancing shapes for 3d fabrication. *ACM Trans. Graph.*, Vol. 32, No. 4, pp. 81:1–81:10, July 2013.
- [6] N. Hansen and A. Ostermeier. Adapting arbitrary normal mutation distributions in evolution strategies: the covariance matrix adaptation. In *Evolutionary Computation, 1996., Proceedings of IEEE International Conference on*, pp. 312–317, May 1996.
- [7] 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, sep 2006.
- [8] 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/afielddfile/2015/03/27/1356103.1.pdf. (参照 2016-3-6).
- [9] American Society for Parental and Eterna. *The A.S.P.E.N. Nutrition Support Practice Manual 1998*. Kendall Hunt Pub Co, 10 2001.