

解説

人と触れ合うための柔軟機構とその制御 傷つけず壊れにくく触感のよいぬいぐるみでロボットを作る

Soft Mechanism and its Control for Mutual Touching
Making robots with harmless, robust and good feel stuffed toys

長谷川 晶 一* 三 武 裕 玄* *東京工業大学
Shoichi Hasegawa* and Hironori Mitake* *Tokyo Institute of Technology

1. はじめに

ヒューマンインタフェースとしてロボットは、人と直接触れ合うことができる、そこに実体が有ることによる存在感を持つという大きな利点を持つ。ロボットの触感の追求と力の人への提示は、触れ合うことができるという利点を活かすための必然的な課題だと言える。一方で、生活の中で老若男女と触れ合うことを考えると、不用意なインタラクションにおいても人を傷つけない安全性と人が力を加えても壊れない耐久性も望まれる。

人に触れられるための機械として力覚インタフェースが研究されてきたが、姿を視覚提示しつつ力覚提示できるようなロボットは Sekiguchi らの Robot-phone [1] や Minato らの CB² [2] など限られる。

我々は、人や動物を模した姿と動作が可能で、人に触れられ触感や力を提示することを目的に、糸の張力と綿の復元力による屈曲機構を用いた、可動部が芯まで柔らかいぬいぐるみロボットを提案してきた [3]。本稿では、原理的に安全で破損しにくい機構の条件を考え、そのような機構を用いて作成した前述のロボットとその制御について解説する。

2. 人を傷つけず、自らが壊れないロボット

生活の中で人と触れ合うロボットでは、想定を越えるインタラクションがなされた場合にも安全で破損しないことが望まれる。物や身体は限度を越える力が掛かると破壊する。逆に言えば、大きな力が集中して掛からなければ傷害や破損を防ぐことができる。

2.1 力や圧力を拡大する機構

梘子や楔、ネジ、歯車など動きを縮小して力を拡大する機構は、利用者の操作によって大きな力を発生させ得るので破壊を引き起こすことがある。また、針や釘のように固く鋭い部分を持つ物は、小さな面積に集中して力を加えら

れるため、大きな圧力による傷害や破損を起こし得る。

2.2 慣性力

運動方程式 $f = ma$ から、質量 m と加速度 a の積が大きくなると力 f が大きくなるのが分かる。梘子や鋭い部位がなくても、大きな質量 m を持つ物体が運動すれば、静止物体との間に大きな力が生じ得る。物体を急に加減速させる現象、例えば硬い物体の衝突は大きな加速度を発生させるので、質量が小さくても傷害や破損を起こし得る。逆に柔らかい素材を表面に貼り、衝突が時間を掛けた変形として起こるようにすれば、速度差が大きくても加速度は小さくなるので大きな力が働かない。Bicchi ら [4] は、弾性、質量と安全な速度の関係を解説している。

2.3 コンプライアンス性の高い関節、ロボット

慣性力の観点から安全性や協調作業性を考えると、重い機構をコンプライアンス性の低いアクチュエータで駆動するよりも、軽い機構をコンプライアンス性の高いアクチュエータで駆動するほうが良い。このため、関節コンプライアンスの調整機構 [5] や軽い機構の力制御によるロボットアーム [6] が提案されている。また、衝突力の低減と計測や触感を考慮してゴムで表面を柔軟にしたロボット [2] も提案されている。

2.4 全体が柔軟な機構

全体が柔軟な機構は、慣性力だけでなく、力や圧力の拡大を予防する観点からも安全性が高く、破損しにくい。硬いリンクと関節は梘子として働くが、全体が柔軟な機構では関節に掛かる力がリンクの柔軟性により制限される (図 1)。

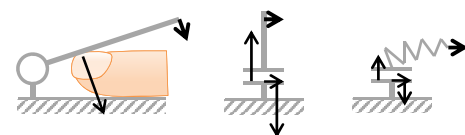


図 1 梘子になり傷害を起こし得る関節 (左)、安全だが破損し得る関節 (中) と破損しない関節 (右)

さらに、内視鏡等に用いられている糸で引かれて屈曲する機構や、流体で膨らんで屈曲する機構は、分散して屈曲

原稿受付

キーワード : Stuffed toy, Soft robot, Soft mechanism, String, Textile, Cotton wool

*神奈川県横浜市緑区長津田町 4259

*4259 Nagatsuta-cho, Midori-ku, Yokohama, Kanagawa, Japan

するので梃子として働かず力を拡大しない。また、糸や流体よる駆動は、動力源と可動部を離すことができるので、硬い動力源をロボットの中心に纏めることを可能にする。

これらの機構の原理 [7] [8] は昔から知られているが、近年全体が柔軟な機構が提案されている [9] [10]。生物の構造を模す研究 [11] だけでなく、安全で安価という観点から実用をめざす [12] [13] 動きもある。樹脂製網構造の直径を SMA アクチュエータで制御した上で糸で屈曲させるもの [11]、布やシリコンゴムを空気圧で膨らませて駆動するもの citeAnnanMozeika [13] [14] などが提案されている。

3. むいぐるみによる屈曲機構

我々は触感が良く安全で耐久性の高いロボットの機構としてむいぐるみに着目した。むいぐるみは綿が復元力を持つため、糸で引くだけで屈曲機構 [7] として働く。糸による屈曲機構には張力に対抗しつつ曲がる機構や素材が必要であり、内視鏡ではゴムチューブや蝶番を繋いだ機構が用いられている。むいぐるみロボットでは、綿を詰めた布の袋(綿袋)を用いる。綿袋の構造と働く力を図 2 に示す。

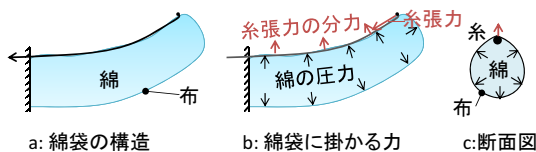


図 2 綿袋の構造

綿を詰め込むと復元力が圧力のように全方向に働き綿袋が膨らむ。糸を引くと糸張力により片側の綿が圧縮され綿袋が屈曲する。また、屈曲が起こると曲率に比例して張力 T の分力による線圧力 $N_T = rT$ [N/m] (r : 曲率) が布を引き、布袋を曲げる向きに働く。

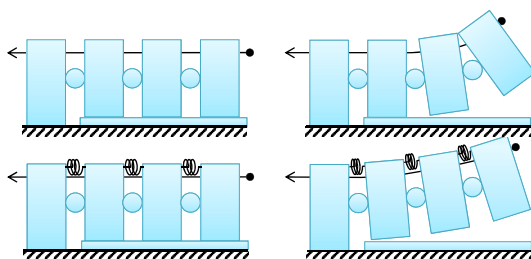


図 3 パネによる変位の均等化

この機構の動作は、図 3 のように綿をリンクとパネに置き換えて考えると、1本の糸により多数の関節を劣駆動していることがわかる。綿袋の綿はパネのように復元力を持つので、図 3 右下のようにパネが各関節の変位を均等するように働く。このため、外力が定まれば姿勢が定まる。

3.1 素材等の選定

機構としての機能、耐久性、触感を考えて次のように素材やアクチュエータを選定した。

綿

むいぐるみやクッションの中材には、ウレタンチップ、木綿の綿、ポリエステル綿、羽毛などが用いられるが、圧縮後の復元しやすさは中材によって異なる。本機構では復元力が強く、何度も圧縮しても元に戻る中材が望ましい。復元しやすいポリエステル綿を中心に様々な中材を試したところ、(株)アライ製のポリエステル特殊綿「つぶつぶ手芸わた」に行き着き用いている。手芸用の綿は、ポリエステル繊維をシリコンコーティングで潤滑してあり、摩擦が少なく復元率が高い。

糸

屈曲させるための糸には、破断強度に加え、プリーでの巻取りのためのしなやかさ、制御性のための低摩擦性と伸びの少なさが求められる。釣糸として市販されている超高分子量ポリエチレンの繊維を束ねた糸は、これらを満たす。質量あたりの破断強度は、鋼鉄やケブラーより強い。力覚インタフェース SPIDAR [15] でもこの糸を用いている。

布

布は綿の圧力を受け止めるため円周方向に伸びてはならない。また屈曲を妨げないための柔軟性が必要になる。現在は薄手 ($120\text{g}/\text{m}^2$) の木綿の布を用いている。

外皮とクッション

ロボットには外皮をかぶせる。通常、むいぐるみは胴体と手足を別々に作り接合するが、むいぐるみロボットの場合はきぐるみのようなロボット全体を包む外皮にする。手足の綿袋の外径と外皮の内径には余裕を無くしてずれを防ぐ。ロボットの体幹部はアクチュエータや制御回路といった硬い物を格納する必要がある。体幹部を表面から離し、柔軟にするため、綿を布で包んだクッションを体幹部に巻きつけ、その外側に外皮がかぶさる構造にしている。

ロボットの動きを妨げないようにするため、外皮にはしなやかな布地を用いる必要がある。むいぐるみの外皮には、毛足の長いパイル織りのパイルを切断し、糸の撚りを解いて作られる、フェイクファーを用いることが多い。しかし、毛足が長く滑らかな触感のフェイクファーは、抜け毛を防ぐ加工のために裏地が固く伸縮しないものが多い。毛並みと布地の柔らかさ、伸縮性、毛の抜けにくさのバランスから、片面起毛で毛足 15mm 程度のプードルファーを用いた。プードルファーもフェイクファーの一種だが、毛になる糸が柔らかく太いため裏地から抜けにくい。ただし、汚れやすく洗濯すると毛が固まるという問題もある。

糸を巻き取るアクチュエータ

綿の復元力に対抗するため糸にはある程度大きな張力が必要になる。また、体幹部に収めるために小型軽量で、触

感や印象に悪影響を与えないために音や振動が少ない物が良い。そこで、Maxon 社製のギアードモータ (RE10 1.5W + 16:1 遊星減速機) を用いた。最大張力は 20N 程度になる。糸がはずれて絡まらないようプーリーをカバーで覆い、カバーの穴から糸を引き出す。

3.2 糸の組み合わせと配糸

綿袋の布に糸を通すとその向きに屈曲するので、3本の糸で任意向きの屈曲が実現できる。また、糸の通し方により先端だけを曲げることもできる (図 4)。さらに、綿袋の付け根まで糸をチューブで覆うことでモータを自由に配置できる。



図 4 複数糸を組み合わせた機構

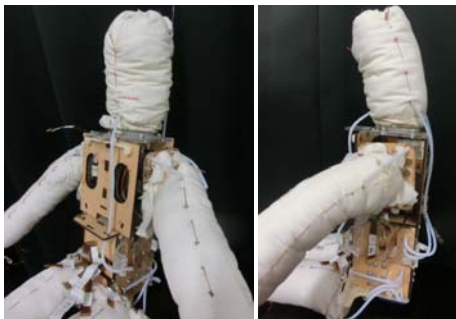


図 5 チューブを用いた配糸と首の機構

3.3 長軸回りの回転関節

首を振る動作のために、首の関節には綿袋長軸周りの回転が必要になる。複数糸を組み合わせても、綿袋を捻る動きを作り出すことは難しい。例えば、図 6 のように糸を張っても、捻りは作り出せない。複数の糸により無理に捻りを作り出すと、綿袋の容積を減じる変形となるため大きな力が必要なうえ、復元しなくなる。

一方、リンクの長軸回りに回転する関節は力を拡大しない。リンクが長く硬いと関節に掛かる力は拡大されるため破損し得るが、リンクが柔軟な場合は関節に掛かる力も拡大されない (図 1)。そこで、綿袋の根本を関節で回転させた (図 5)。

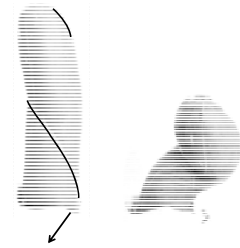


図 6 斜めに糸を張った場合の変形例。綿袋を捻る動きは僅かしか生じない。

3.4 繰り返し精度と提示可能な力の範囲

綿の変形や綿袋内部の摩擦により綿袋の屈曲にはヒステリシスが生じかねない。そこで同一の動作指令を繰り返し与えた場合の手先軌跡を計測した (図 7)。糸が緩む初期位置はばらつくが、糸を引く到達位置のばらつきは少ない。

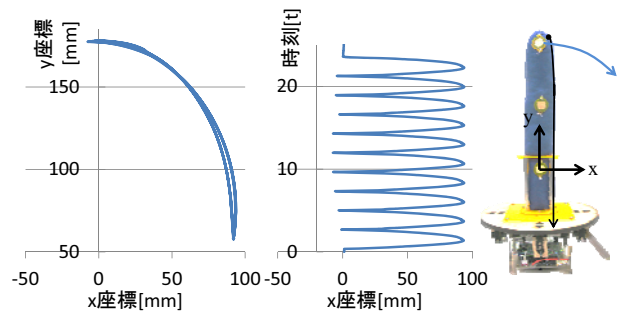


図 7 屈曲を繰り返した際の手先軌跡

また、負荷が掛かると繰り返し精度が悪化することが考えられる。図 8 右のように、直径 4cm の袋に 71kg/m^3 になるように綿を詰めて、負荷を加えた状態での手先軌道を計測した。270mm の綿袋を根本から 100mm の位置で支え、マーカの位置を計測した。その結果、60g, 90g の重りを付けた場合でも手先を動かすことはできるが、綿が復元しないため軌道が徐々にずれてしまうこと、30g の重り $= 0.3\text{N}$ 程度の負荷であれば、繰り返し動作が可能だと分かった。なお、機構が発揮できる力は、綿袋の太さと綿の詰め方で変化する。

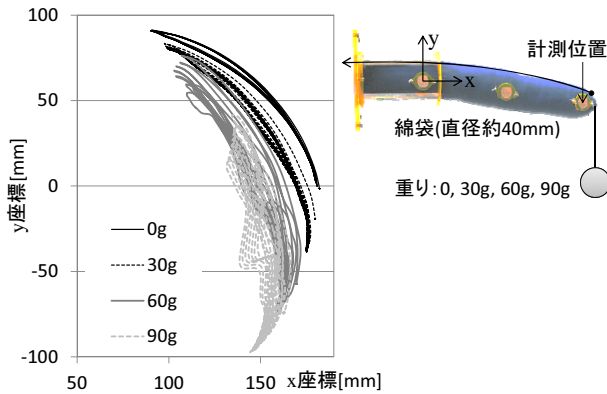


図 8 荷重を加えた場合の手先の軌跡

4. むいぐるみロボットの制御

3 節に記したように、綿がバネとして働き屈曲量を均等にするため、劣駆動機構ではなくコンプライアンスの高い全駆動機構と考えることができる。また、綿袋機構はある程度の繰り返し精度を持つ (3.4 節)。そのため、負荷が小さい状況であれば、運動学計算に基づいて制御できる。

4.1 計測データに基づく運動学・逆運動学計算

駆動自由度を手先座標に変換する順運動学は綿袋の変形に依存するため、機構から直接式を求めることは難しい。そこで、糸長に応じた手先位置を計測記録し、計測データを用いて順運動学計算を行う。

糸は引くことしかできないため、例えば綿袋を 2 自由度自由な向きに屈曲させるためには 3 本の糸が必要になり、最大 2 本を同時に引くことになる。3 本を同時に引くと綿袋を短くする動きになるが、綿が圧縮され戻らなくなる。また、不必要に綿を圧縮しないよう糸の巻取り量に応じて使用しない糸を緩める。糸長と手先位置の関係は、2 本の糸長を制御してそのときの手先位置を外界センサを用いて計測・記録する。

順運動学計算は指定された 2 本の糸長の近傍 4 点に対応する手先位置を補間することで行う。逆運動学計算は指定された手先位置を囲む 4 点を探索し、対応する糸長を補間することで行う。ヤコビ行列は運動学計算を複数回行い差分から求める。

4.2 力制御

力制御を行うことで、より柔らかい感触を提示したり、握手のような直接インタラクションの印象を変化させることができる。力制御には、バックドライバビリティの高いアクチュエータをで直接力を提示する方法と、力センサで外力を計測して外力が目標値となるように手先位置を制御する手法がある。綿袋機構では、糸と綿袋に摩擦があるため、直接力を提示する手法は適さない。そこで、外力を計測して位置制御する手法を用いる。

力計測

糸張力から外力を計測することも試みたが、糸の摩擦が無視できず難しかった。杉浦ら [16] の綿の変形を直接計測する手法もあるが、駆動と計測の自由度が対応するよう外力を直接力センサで計測した。図 9 のように、綿袋とモータを合わせた腕全体に掛かる外力を、腕と体幹の接合部に力センサ (トルクセンサ) を組み込んで計測する。センサはフォトフレクタとジュラルミンの起歪体で構成した。

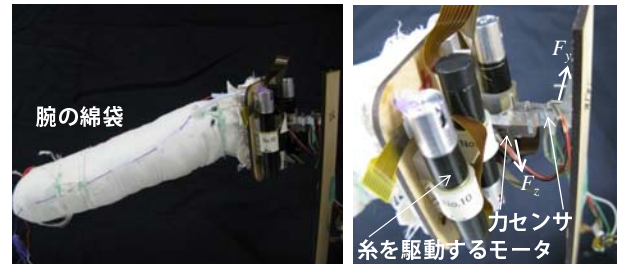


図 9 腕の根本での外力計測

制御計算の分散処理

力制御では、計測した力に基づいて手先位置の制御を行う。この制御ループは機構の時定数に対して十分速い必要があり、綿袋機構は軽量なため高速制御を要する。一方、4.1 節の計測データによる運動学・逆運動学には、計測データを保持するためのメモリとそれを検索・補間する計算が必要なため、ロボットに組み込む制御用マイコンには荷が重い。そこで、マイコン上で動作する高速更新の力制御ループからは運動学計算を排し、ヤコビ行列を用いて力制御を行う。ヤコビ行列の更新はロボット外部の計算サーバを用いて低い更新速度で行う。計算サーバとロボットの通信は、無線 LAN(802.11a) 上で UDP プロトコルを用いて行う。

目標の力を F_t 、力センサで計測した力を F_c 、現在の手先位置 p_c 、糸長の現在値 q_c 、力制御のゲインを k 、ヤコビ行列を J とおくと、糸長の制御目標 q_t は、

$$q_t = q_c + kJ(F_t - F_c) \quad (1)$$

と求まるので、これを高速更新する。一方、ヤコビ行列 J は、4.1 節の方法で低速更新する。

5. むいぐるみロボットの動作生成

ロボットを動作させるためには、動作データを再生したり、インタラクションに応じて生成したりして、制御目標を与える必要がある。

5.1 キーフレームの再生

糸長を記録、再生することで、逆運動学計算をせずに動作の記録・再生を行うことができる。糸長を制御してロボットに望みの姿勢をとらせてその時の糸長を記録することで

キーフレームを作成し、複数のキーフレームを時系列に並べて補間しながら再生することで滑らかな動作を再生できる。

5.2 外界センサ入力に応じた動作生成

ぬいぐるみロボットを見ると、手を振るなどしてロボットの注意を引き、反応をみる人が多い。そこで、動きに反応してロボットが顔を向けたり手を伸ばしたりするデモを作成した [17]。ロボットの触感を損なうことがないように、人の行動を計測するセンサは内蔵せず、深度付きカメラ (Microsoft Kinect) をロボットの背後に設置し、ロボットの位置と人の関節と手先の位置速度を取得する。動きの速い対象に視線を向けたり手を伸ばしたりする動作を、手先位置や首の向きの到達運動軌道により生成する [18]。図 10 にデモの様子を示す。



図 10 体験者の行動に応じた動作生成の様子

6. ぬいぐるみロボットの機能と性能

綿袋機構の機能、性能を示すため、デモや実験結果について記す。

6.1 運動性能と力制御の効果

綿袋機構を 4 個取り付け、4 足歩行をさせたところ、バッテリーを内蔵した状態でカーペットの上を歩行できた (図 11)。ロボットの自重は約 1kg になった。

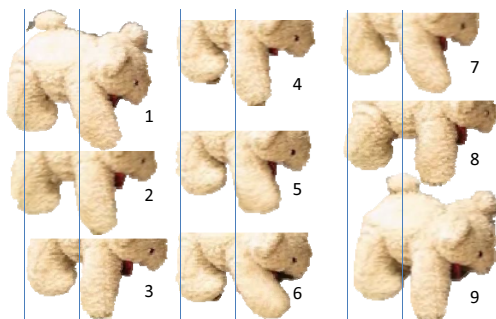


図 11 歩行の様子：復元力を増すため綿を多く詰め、軽量化のため頭部の駆動機構を外しているが、配線なしで歩行ができる。

また、握手の際に力制御のゲインを変えてアンケートを

行ったところ、好ましい - 好ましくない、心が通じる - 通じない、喜んで握手している - いやいや握手しているの 4 項目で有意差が得られた [19]。ただし、歩行と力制御は設計の異なるロボットで行った。

6.2 耐久性

我々は 5 年前からぬいぐるみロボットを作成してデモを行ってきた。当初は糸の絡まりや断線などのために短時間しか動作しなかったが、現在は 1 日メンテナンスなしで動作する。

綿袋機構がデモ中に破損したことはないが、糸の巻取り部分や減速機は、腕を素早く曲げたり、ロボットが腕を曲げている最中に素早く伸ばしたりといった無理なインタラクションにより破損することもあった。これらには糸長や力の制御により回避できる部分もあるが、トルクリミッタなど機構での対策が望まれる。

糸の絡まりは、使用しない糸を緩めすぎないことと糸を必要最小限の長さにするにより改善した。その他、糸の固定点の補強が足りず綿袋から糸が抜けたり、チューブの切断部の固定が悪くチューブが糸により縦に切れたりといった細かな対策は数多く必要であった。また、ぬいぐるみは熱がこもるため、制御回路やモータの排熱のためにファンを用いている。

7. 今後の展望

人と共に働くロボットを安全にするために、手先や関節の柔軟化、軽量化が行われてきた。人と触れ合うことを目的としたロボットでは、触り心地や安全性、耐久性から、機構全体が柔軟になるのではないかと思う。柔軟な動力源 [20] や回路やエネルギー源も研究されており、全体が柔軟なロボットが利用されるようになるかもしれない。

一方で我々は、綿袋による屈曲機構とその力制御だけでも、様々な用途があると考えている。そこで、機構を安価なモジュールとして頒布し、オープンイノベーションにのせることを目指している。安価な減速機を用いるとギアの振動や動作音が大きく、触感、ぬいぐるみの印象を損ねてしまう。振動が少なく安価な減速機を開発し、モジュールの頒布を実現したい。

謝辞 本稿執筆の機会をくださった編集者、編集委員会に感謝する。また、ぬいぐるみ作成の経験を活かして、外皮やクッション、頭部の構造を考案、作成して下さった西野朋加氏に深く感謝する。これまでぬいぐるみロボットの研究に携わった、または現在携わっている、椎名美奈氏、石川達也氏、山下洋平氏、高瀬裕氏、黎圓圓氏、Nutnaree Kleawsirikul 氏、佐藤大貴氏に感謝する。本研究は JSPS 科研費 24656164 の助成を受けた。

参 考 文 献

- [1] D. Sekiguchi, M. Inami, N. Kawakami, I. Kawabuchi and S. Tachi: "Robot-phone", US Patent, US 20050078816 A1 (2002).
- [2] T. Minato, Y. Yoshikawa, T. Noda, S. Ikemoto, H. Ishiguro and M. Asada: "Cb2: A child robot with biomimetic body for cognitive developmental robotics", IEEE-RAS Intl Conf on Humanoid Robots, pp. 557-562 (2007).
- [3] 高瀬, 三武, 山下, 石川, 椎名, 長谷川: "多様な身体動作が可能な芯まで柔らかいぬいぐるみロボット", 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, **18**, 3, pp. 327-336 (2013).
- [4] A. Bicchì and G. Tonietti: "Fast and "soft-arm" tactics [robot arm design]", Robotics Automation Magazine, IEEE, **11**, 2, pp. 22-33 (2004).
- [5] 森田, 菅野: "メカニカルソフトネスとコンプライアンス調節", 日本ロボット学会誌, **17**, 6, pp. 790 - 794 (1999).
- [6] K. Salisbury: "Whole arm manipulation", Proc. of the 4th intl symp on Robotics Research, Santa Cruz, CA, USA, pp. 183-189 (1987).
- [7] M. M. Paul: "Gastrointestinal tube", US Patent, US2498692 A (1949).
- [8] I. Gaiser, R. Wiegand, O. Ivlev, A. Andres, H. Breitwieser, S. Schulz and G. Bretthauer: "Compliant robotics and automation with flexible fluidic actuators and inflatable structures", Smart Actuation and Sensing Systems - Recent Advances and Future Challenges (2012).
- [9] C. Laschi and M. Cianchetti: "Soft robotics: new perspectives for robot bodyware and control", Frontiers in Bioengineering and Biotechnology, **2**, 3 (2014).
- [10] S. Kim, C. Laschi and B. Trimmer: "Soft robotics: a bioinspired evolution in robotics", Trends in Biotechnology, **31**, 5, pp. 287 - 294 (2013).
- [11] C. Laschi, M. Cianchetti, B. Mazzolai, L. Margheri, M. Follador and P. Dario: "Soft robot arm inspired by the octopus", Advanced Robotics, **26**, 7, pp. 709-727 (2012).
- [12] A. Mozeika: "Inflatable robot arm deployed from packbot", <http://annanmozeika.com/wordpress/archives/1699> (2013).
- [13] Otherlab: "Solve for x: Saul griffith on inflatable robots", <https://www.youtube.com/watch?v=tqP3IpEqkk4> (2013).
- [14] R. F. Shepherd, F. Ilievski, W. Choi, S. A. Morin, A. A. Stokes, A. D. Mazzeo, X. Chen, M. Wang and G. M. Whitesides: "Multigait soft robot", Proceedings of the National Academy of Sciences, **108**, 51, pp. 20400-20403 (2011).
- [15] Y. Cai, M. Ishii and M. Sato: "A human interface device for cave: size virtual workspace", IEEE Intl Conf on Systems, Man, and Cybernetics, Vol. 3, pp. 2084-2089 vol.3 (1996).
- [16] Y. Sugiura, G. Kakehi, A. Withana, C. Lee, D. Sakamoto, M. Sugimoto, M. Inami and T. Igarashi: "Detecting Shape Deformation of Soft Objects Using Directional Photorefectivity Measurement", 24th annual ACM symposium on User interface software and technology, pp. 509-516 (2011).
- [17] Y. Takase, H. Mitake, Y. Yamashita and S. Hasegawa: "Motion Generation for the Stuffed-Toy Robot", Proceedings of SICE Annual Conference 2013 (2013).
- [18] 三武, 青木, 長谷川, 佐藤: "精緻なフィジカルインタラクションにおいて生物らしさを実現するバーチャルクリーチャの構成法", 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, **15**, 3, pp. 449-458 (2010).
- [19] Y. Li, N. Kleawsirikul, Y. Takase, H. Mitake and S. Hasegawa: "Intention expression of stuffed toy robot based on force control", Advances in Computer Entertainment Technology Conference (2014).
- [20] 安積: "人工筋肉へのソフトマテリアルの応用", 日本ロボット学会誌, **31**, 5, pp. 448-451 (2013).

長谷川 晶一 (Shoichi Hasegawa)

1974年6月10日生。1999年東京工業大学大学院知能システム科学専攻修士終了。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。2007年電気通信大学知能機械科准教授。2010年東京工業大学精密工学研究所准教授現在に至る。日本バーチャルリアリティ学会, 日本ロボット学会, 計測自動制御学会, 情報処理学会各会員。バーチャルリアリティ, 物理エンジン, 力触覚, ヒューマンインタフェース, エンタテインメント工学の研究に従事。博士(工学)。(日本ロボット学会正会員)

三武裕玄 (Hironori Mitake)

1984年1月12日生。2011年東京工業大学大学院知能システム科学専攻博士修了。2008年4月より2011年3月まで日本学術振興会特別研究員。2011年より東京工業大学精密工学研究所助教, 現在に至る。日本バーチャルリアリティ学会, 日本ロボット学会, 情報処理学会各会員。キャラクター動作生成, バーチャルリアリティの研究に従事。博士(工学)。(日本ロボット学会正会員)