

ヒューマノイドを用いたアシスト機器支援効果の定量的評価

Qualitative Evaluation of Effect of Assistive Device by a Humanoid

正 吉田英一 三浦郁奈子 正 小林吉之 遠藤維 金広文男
本間敬子 梶谷勇 松本吉央 (以上産総研) 正 田中孝之 (北大)

Eiichi Yoshida¹ Kanako Miura¹ Yoshiyuki Kobayashi² Yui Endo² Fumio Kanehiro¹
Keiko Homma³ Isamu Kajitani³ Yoshio Matsumoto³ Takayuki Tanaka⁴

1 CNRS-AIST JRL (Joint Robotics Laboratory), UMI3218/CRT, AIST 2 Digital Human Research Center, AIST

3 Intelligent Systems Research Institute, AIST 4 Hokkaido University

Abstract – We presented a new application of humanoid robots as an evaluator of assistive devices, to reduce the burden of tests with human subjects. Taking the supportive wear "Smart Suit" designed to relieve the load at lower back as an example, we have conducted pilot experiments by using the humanoid robot HRP-4C. We showed the basic feasibility of this application as we observed a clear decrease of the torque at the torso joint with the wear.

Key Words: Humanoid, Assistive Device, Evaluation, Human motion imitation

1 はじめに

超高齢化社会を迎える日本では、人間動作を支援するアシスト機器が注目を集めており、歩行支援^{1, 2)}、作業負荷軽減³⁾、移乗⁴⁾などを中心に、民間企業でも開発が進んでいる。機器の安全性の評価は、「NEDO 生活支援ロボット実用化プロジェクト」⁵⁾で進められているが、利用性の評価は今後の課題である。多くの場合、被験者実験に頼っているのが現状だが、これには以下の問題がある。

- 性別、年齢、障害の程度などが異なる被験者を、十分な数集めるのが難しく、アンケートなどの主観評価などの信頼性にも課題がある。
- 評価のために行う動作を正確に再現することが困難である。
- 負荷の評価には、モーションキャプチャや筋電など間接的な測定が中心に用いられ、関節トルクなどの定量的な評価が難しい。
- 実験内容について、厳格な倫理的手続きが必要となる。

そこで本研究では、被験者に代わってヒューマノイドを用いたアシスト機器の評価に取り組む。この評価方法には、以下のような利点が想定される。

- 人間に近い形状と構造を持つため、実際の利用環境に近い形で機器の利用を模擬できる。
- 同じ動作を正確に何回でも再現でき、また関節のトルクや軌道、加えられた力などの物理指標を、センサにより定量的に測定することができる。
- リスクのある動作でも、倫理的な問題なしに実験可能である。

ヒューマノイドによる機器測定の従来研究として、高西らによる Wabian-2R による歩行器の評価がある^{6, 7)}。本研究では、人間により近い形状と構造を持つヒューマノイド HRP-4C⁸⁾を用いて人間の動作をできるだけ忠実に再現することで、従来では困難であった装着型のアシスト機器を評価する。ヒューマノイドによる再現のためには、ベースとなる最低限の人間動作のデータを測定し、これをロボット動作に変換する技術も必要となる。これらを統合し、将来的には、Fig. 1 に示すように、人間が使用する機器の設

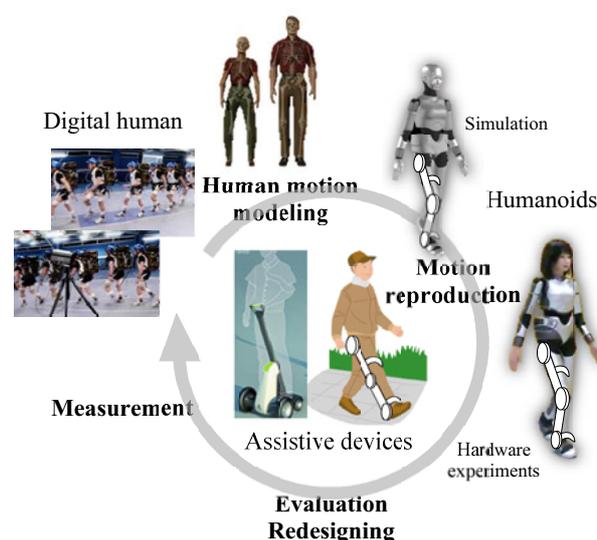


Fig. 1: Evaluation of assistive devices using humanoid

計ループにヒューマノイドによる評価を組み込んだ新たな枠組みを目指す。

本研究では、介護や農業、物流の分野で深刻な問題となっている、腰痛の防止を目的としたアシスト機器を評価対象とする。評価の実例として、弾性ゴムバンドを背中に配し、腰にかかる負担を軽減する目的で開発されたアシストウェア「スマートスーツ・ライト (SSL)」³⁾を取り上げる。以降では、人間動作のロボットへの変換について述べたのち、シミュレーションと実験により腰関節にかかる負荷トルクを指標とし、ヒューマノイドによるアシスト機器評価の有効性を検証する。

2 人間動作の移植

本節では、計測した人間動作をヒューマノイド動作に変換する手法について述べる。評価対象例とするアシストウェア「スマートスーツ・ライト (SSL)」(Fig. 2)は、物流や農業分野で屈曲動作を繰り返したり、長期にわたって行ったりした場合に負荷を低減し、腰痛を予防する目的で開発されたものである。そこで、評価対象の動作として、両手



Fig. 2: Assistive wear “Smart Suite Lite (SSL)”

による物体の持ち上げ動作を選択した。

本研究では、筆者らが提案した、運動学的・動力学的制約を満たしつつ、人間からロボットへ全身動作を変換する手法⁹⁾を用いる。被験者は両手にそれぞれ 3kg の重りをつけて、肩幅の位置に両足を置いて屈んだ姿勢から持ち上げる動作を行い、これをモーションキャプチャシステムで計測した。Fig. 3a は 55 のマーカを用いて VICON システムにより測定された動作中の一つの姿勢である。

キャプチャシステムから出力されるマーカの軌道データからロボットの動作データを導出するため、Fig. 3b に示すロボットのリンクの空間ベクトルを、Fig. 3a の 2 つのマーカを結ぶベクトルに対応させる。これに基づき、ロボット腕と腰の関節角を、マーカ間ベクトルとロボットのリンクベクトルの二乗誤差が最小となるように、繰り返し収束演算を行って計算する。この際、動作開始時には人間の上半身と腰姿勢が水平面に垂直であると仮定する。

ロボットの脚の関節角は、足位置と上半身の関節角から逆運動学を用いて計算する。上半身の垂直移動、キャプチャからの脚の関節角などは冗長自由度の零空間を用いて考慮する。動力学的安定性を保証するため、予見制御のダイナミクスフィルタ¹⁰⁾を使用する。動作中の床反力は計測していないため、目標 ZMP の値は、足中心よりも 5cm 前方に固定している。導出されたロボットの大腿と上半身の角度、また垂直面に関する上半身の角度を比較すると、人間動作に近く、この点で再現性が高いことが示されている¹¹⁾。

3 支援トルクのシミュレーション

ヒューマノイドによる動作シミュレーションと実験は、アシスト機器評価では相互補完的に活用することができる。

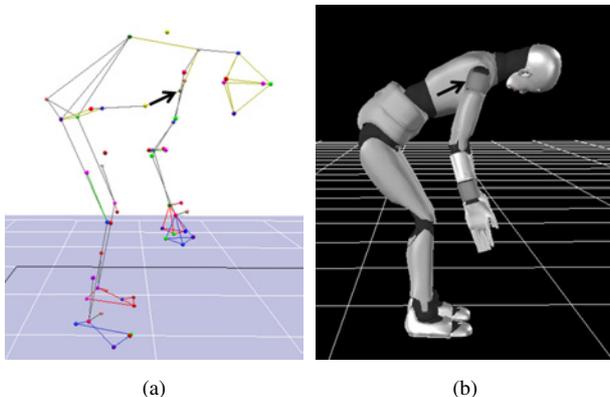


Fig. 3: A snapshot of captured motion: (a) View of captured markers. (b) Generated pattern of HRP-4C.

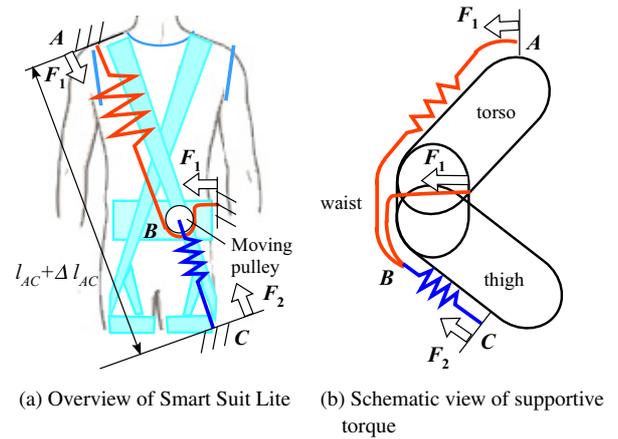


Fig. 4: Mechanism of “Smart Suit Lite”³⁾

実験ではシミュレーション結果の物理的妥当性を保証し、そのうえでシミュレーションで身体形状などや動作のパラメータをさまざまに変えて試験することができる。

本研究で評価対象とする SSL (Fig. 2) は、Fig. 4a に示すように肩 (A) と大腿部 (C) に固定されたゴムバンドが伸びることで、腰にかかるトルクを低減する効果を目指している。この効果を評価するため、シミュレーションでは、バンドを取り回すプリー状の腰支持部 B と、腰関節・股関節の 2 関節を仮定した Fig. 4b に示すモデル³⁾により、支援トルクを計算する。バンドの AC 間の伸びによる弾性力 $f(\Delta l_{AC})$ は、肩・大腿の固定部それぞれ以下の力 F_1 、 F_2 を発生させる。

$$F_1 = \frac{2}{5}f(\Delta l_{AC}), \quad F_2 = \frac{4}{5}f(\Delta l_{AC}). \quad (1)$$

ゴムバンドは特殊な構造を持っており、測定により以下の非線形特性を持つことが分かっている。

$$f(\Delta l_{AC}) = k\sqrt{\Delta l_{AC}}. \quad (2)$$

シミュレーションでは、ヒューマノイド HRP-4C⁸⁾ が SSL を着用した際に、持ち上げ動作で支援効果が最も作用すると考えられる腰関節・股関節のピッチ軸 (Fig. 5b の y 軸) 周りに発生する支援トルクを計算する。HRP-4C は、エンタテインメントを主な用途として開発されたもので、その寸法は日本人青年女性の平均から誤差 10% 以内に収まるように設計され、身長は 1.58m、体重は 43kg である。

以下の計算では、ロボットの身体形状に基づいてゴムバンドの伸長と支援トルクを計算しているが、デジタルヒューマンモデルに適用することも可能である。ゴムバンドは、凹部は通過して身体に巻き付く紐としてモデル化する。これは常に凸形状であるので、Fig. 5a に示すように、バンドの 2 つの固定部を通る平面と、バンドが接触する身体部分の 3 次元凸包との交線として求めることができる。固定部を通る平面は任意に選択できるが、ここでは前顔面と垂直な面とする。

ゴムバンドによる発生力は、バンド固定部の身体表面の接線方向に発生すると仮定する。上記の手法で計算された AC の長さからゴムバンドの伸び Δl_{AC} を式 (1) が求められ、固定部 A、C に加えられる力 F_1 と F_2 が求められる。腰関節・股関節のピッチ軸周りに発生する支援トルクをそ

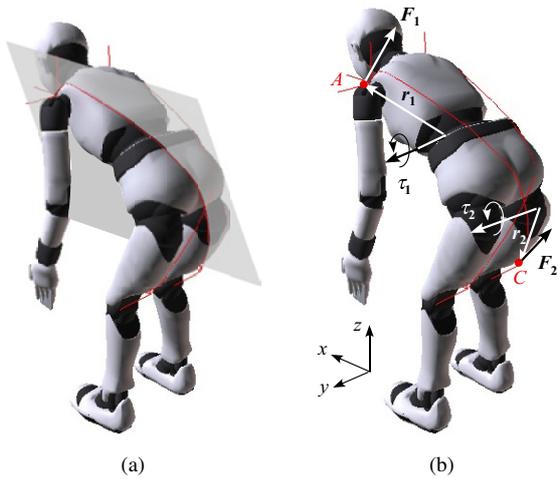


Fig. 5: Computing length of elastic bands. (a) The elastic band computed as the intersection between the convex hull and the plane (b) computation of torque at torso and hip pitch joints

それぞれ τ_1 と τ_2 とすると、関節からのモーメントアームを r_i ($i = 1, 2$) とし、 $\tau_i = r_i \times F_i$ と求められる。(Fig. 5b).

Fig. 6 は 2 本のゴムバンド長の時間変化を示しており、屈曲動作により最大で 15cm 程度伸長していることがわかる。左右での違いは、もととなった人間動作が完全に対称でないことが原因と考えられる。Fig. 7 には、腰関節・両股関節に加えられる支援トルクの絶対値を示す(これらは実際には反対方向である)。動作開始時には与圧としてす

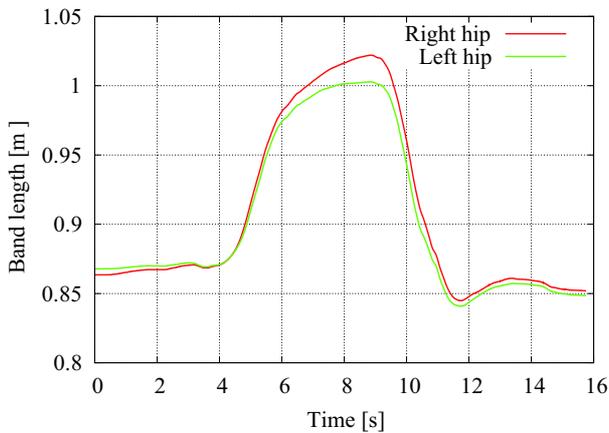


Fig. 6: Simulated length of elastic bands.

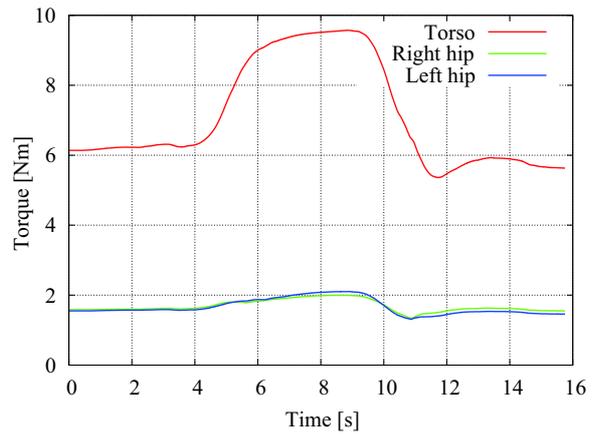


Fig. 7: Estimated supportive torque.

で 0.1m バンドが伸長した状態で装着しており、式 (2) では、実験的に測定したバネ定数は $k=69.7$ を使用した。支援トルクは、屈曲時に上半身の重量を支える効果を生じることになるが、Fig. 7 より、股関節よりも腰関節での効果が大きいことが観察される。これは、SSL が腰にかかる負荷を低減する目的で設計されていること、また股関節ではモーメントアームが小さいことに起因すると考えられる。

4 アシスト効果検証実験

2 節で導出した動作を、SSL を装着した HRP-4C により、ロボットの両手首には 1kg の重りを取り付けた状態で再現し、アシスト効果検証の基礎実験を行った。Fig. 8 に実験の様子を示す。実験では、屈んだ際に背中と大腿裏のゴムバンド (白色) が伸長している様子が観察できる。負荷低減効果の評価のため、SSL 装着・非装着の状態で 5 回の試行を行い、腰関節・股関節の関節トルクを測定し、比較した。関節トルクはモータの電流値とロータイナーシャと減速比から推定した。

一つの試行で得られた腰関節の出力トルクに対し、高周波の雑音をフィルタリングで除去した結果を Fig. 9 に示す。また、Table 1 には、5 回の試行の最大支援トルクの平均をまとめた。3 節のシミュレーションで予測された通り、腰関節トルクに関しては顕著な負荷低減効果が見られた。Table 1 に見られる通り、試行間の違いは小さく、一貫した結果であることも示された。股関節に関しては、Table 1 から、多少の支援効果は見られるものの、シミュレーション

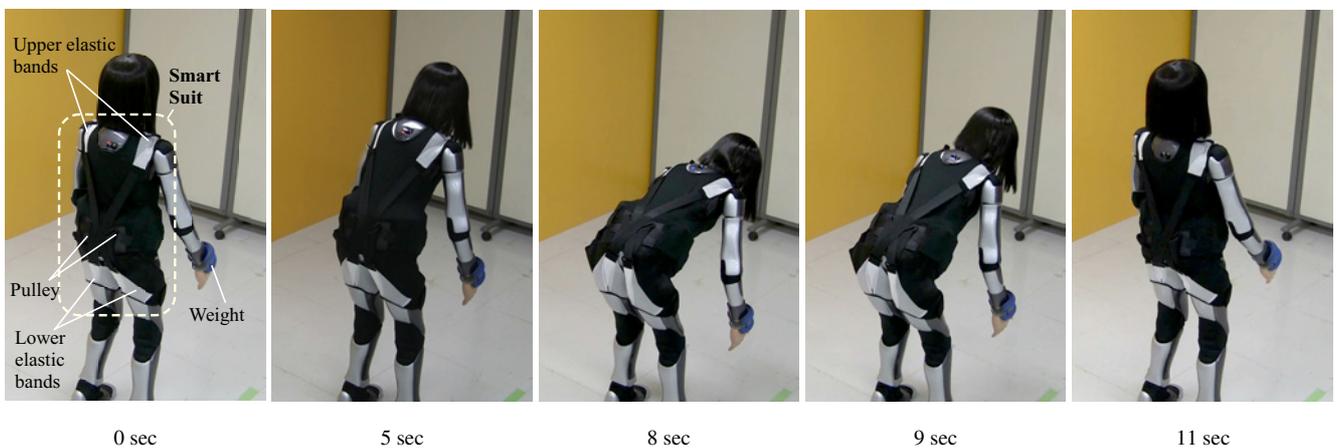


Fig. 8: Experiments of lifting motion by HRP-4C

Table 1: maximum absolute torques during motion

		torso pitch		hip pitch	
			right	left	
With Smart Suite	Mean	68.9	60.3	64.8	
	Std. dev.	1.0	1.6	1.7	
Free Motion	Mean	92.2	65.5	69.4	
	Std. dev.	4.4	1.3	1.9	

Unit: [Nm]

での予測の通り、腰関節に比較して小さいことが認められた。また、ロボットは位置制御されており、その関節軌道はSSL装着・非装着では変化がないことを確認した。これにより、同じ動作を行ったときにモータの出力が低減されていることが検証された。

Fig. 10には、Fig. 9から計算された支援トルクを示す。腰関節のほうが大きな支援効果がある点でFig. 7と一致している。また、腰関節トルクを見ると、開始4秒にトルクが立ち上がり、9秒で急激に減少する傾向も一致している。さらに、実験では、腰関節トルクの実験結果を見ると、シミュレーションで予測されたよりも大きな支援トルクが得られている。これは、式(2)のゴムバンドの弾性特性のモデルが、より大きな変形の際には実際と一致していない可能性が原因として考えられる。別の容易として、バンドの発生力が固定点の身体表面の接線方向に働くという仮定が必ずしも正しくない可能性もあり、今後検討が必要である。

このように、モデルの精密化など今後改善の余地はあるものの、ヒューマノイドをアシスト機器評価に使用するための基本的な実現可能性は示すことができた。特に、人間による測定では困難であった支援効果の定量的評価を、関節トルクを用いて具体的に示したことが、本研究の中心的な成果である。

5 おわりに

本研究では、被験者に代わってアシスト機器を評価するというヒューマノイドの新しい応用を示し、その実現可能性を実験的に示した。負荷低減を目的としたサポートウェア Smart Suit Lite (SSL) を評価対象の例として用い、ヒューマノイド HRP-4C により負荷低減効果を評価した。人間で測定したデータをロボットに変換する手法を示し、重りの持ち上げ動作に適用した。背中と大腿裏に配したゴムバンドが伸長することにより支援力を発生する SSL の機構をモデル化し、まずシミュレーションにより支援トルクを推定した。SSL を装着したヒューマノイド HRP-4C を用いた

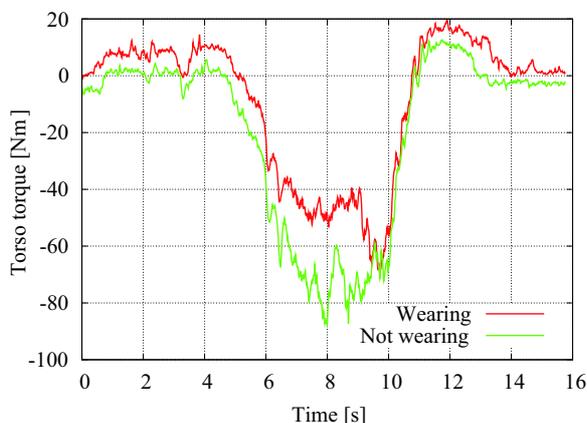


Fig. 9: Measured torso torque with and without Smart Suit.

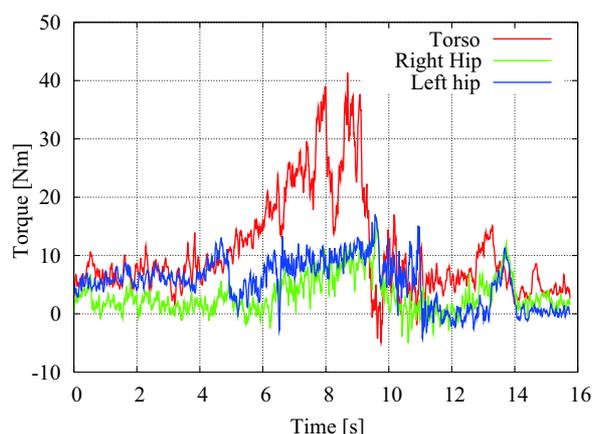


Fig. 10: Experimental result of supportive torque.

実験により、支援トルクが腰関節を中心に作用し、負荷を低減していることが定量的に示された。これは、SSLが目的とする腰痛予防のために腰関節の負担軽減に合致する結果である。

適用された動作は一種類で、まだ基礎的な結果しか得られていないが、ヒューマノイドによる機器評価の今後の発展性を示すことができた。定量的な評価が可能であるという本手法の特色を活かし、これらの評価結果を設計にフィードバックして、より研究開発を効率的に進められる枠組みの確立に貢献することを目指す。また今後は、対象とする動作についても、捻りを含む複雑な動作、また歩行などのダイナミックな動作にも評価対象を広げていく予定である。

謝辞

本研究の実験を行うにあたり、多大なご協力をいただいた産業技術総合研究所 ヒューマノイド研究グループ 梶田秀司氏、森澤光晴氏にこの場を借りて謝意を表す。

- 1) http://www2.toyota.co.jp/jp/news/11/11/nt11_040.html, 2011.
- 2) Y. Sankai, "Hal: Hybrid assistive limb based on cybernetics," in *Robotics Research, Springer Tracts in Advanced Robotics*, M. Kaneko and Y. Nakamura, Eds. Springer, 2011, 25–34.
- 3) Y. Imamura *et al.*, "Motion-based-design of elastic material for passive assistive device using musculoskeletal model," *Journal of Robotics and Mechatronics*, vol. 23, no. 6, 978–990, 2011.
- 4) Y. Kume and H. Kawakami, "Control technology of RoboticBed[®] for supporting independent life," *Panasonic Tech. Report*, vol. 56, no. 3, 32–34, 2010.
- 5) 貞本敦史, "Nedo 生活支援ロボット実用化プロジェクトの概要," *日本ロボット学会誌*, vol. 29, no. 9, 760–764, 2011.
- 6) Y. Ogura *et al.*, "Development of a new humanoid robot WABIAN-2," in *Proc. of 2006 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, 2006, 76–81.
- 7) A. M. Omer *et al.*, "Development of walking support system based on dynamic simulation," in *Proc. 2008 IEEE Int. Conf. on Robotics and Biomimetics*, 2008, 137–142.
- 8) K. Kaneko *et al.*, "Cybernetic human HRP-4C," in *Proc. 2009 IEEE-RAS Int. Conf. on Humanoid Robots*, 2009, 7–14.
- 9) K. Miura *et al.*, "Robot Motion Remix based on Motion Capture Data - Towards Human-like Locomotion of Humanoid Robots -," in *Proc. 2009 IEEE-RAS Int. Conf. on Humanoid Robots*, 2009, 596–603.
- 10) S. Kajita *et al.*, "Biped Walking Pattern Generation by using Preview Control of Zero-Moment Point," in *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, 2004, 840–845.
- 11) K. Miura *et al.*, "Humanoid robot as an evaluator of assistive devices," in *Proc. 2013 IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, 2013, to appear.