

# HOAP-2 によるホワイトボードに書かれた 文字を消す作業の実現

佐藤 冬樹 (東京都市大学), 西井 達哉 (東京都市大学), 高橋 準 (東京都市大学),  
吉田 祐貴 (東京都市大学), 三橋 勝 (東京都市大学),  
Petar Kormushev (Italian Institute of Technology), 金宮 好和 (東京都市大学)

## Whiteboard Cleaning Task Realization with HOAP-2

Fuyuki SATO (TCU), Tatsuya NISHII (TCU), Jun TAKAHASHI (TCU),  
Yuki YOSHIDA (TCU), Masaru MITSUHASHI (TCU),  
Petar KORMUSHEV (IIT) and Yoshikazu KANAMIYA (TCU)

**Abstract**— The controller has a motion feedback control loop for the four arm joints and a force feedback control loop for the ankle joint. The desired motion/force trajectories are obtained via kinesthetic teaching by a human, followed by a learning phase. During skill demonstration, the arm joints are made compliant while the robot balances using ankle/hip strategies. Experimental data demonstrate the feasibility of the method.

**Key Words:** humanoid robot, motion/force control, position/torque control mode, ankle/hip strategy balance control, teaching

### 1. 緒言

人型ロボットの研究は, Honda humanoid robot<sup>1)</sup> が披露された時から, 著しく進歩している. 研究初期では, 歩行パターン生成と姿勢の安定性について取り扱ったものがほとんどであった. しかし最近では, 全身の運動生成と制御に関連した研究が次第に増えてきている. 例えば, 物体を押す動作<sup>2) - 4)</sup> や重量物を持ち上げたり運んだりする動作<sup>5)</sup>, 人間と協調して物体を運ぶ動作<sup>6)</sup>, 予期しない外乱に対する反応<sup>7)</sup> などがある.

人型ロボットにおいて十分に研究されていない分野に, ハイブリッド制御がある. この制御を必要とする作業の例としては, 壁や窓などの面の掃除をすることや, 壁をペイントする作業, 壁紙を貼る作業などが挙げられる. これらの作業は実用的であり, 人型ロボットは, それらの作業の専門家と同様に巧みに実行することが期待されている.

本稿では, 人型ロボットに新たな技能を獲得させる手法について述べる. 今回取り上げる作業は, ホワイトボードに書かれた文字を消すことである. この作業では, ホワイトボードの面に沿った方向には位置, 面に垂直な方向には力を制御する必要がある. したがってこの作業にはハイブリッド制御が必要となる. これら位置と力の軌道は人間が直接教示を行う. そして教示された軌道は学習<sup>8)</sup> によって滑らかな軌道に変換される. 学習された軌道はロボットが獲得した技能として扱い, 今回構築した人型ロボットのためのハイブリッド制御を適用し再生を行う.

これらすべての実験には富士通オートメーション社製小型人型ロボット HOAP-2 (Fig. 1) を用いる.

### 2. 人型ロボットの直接教示と学習

人型ロボットに新たな技能を獲得させる手法として, 我々は Fig. 2 に示す, 教示・学習・再生の3段階を用いる. 本節では, 教示と学習の段階について述べる.

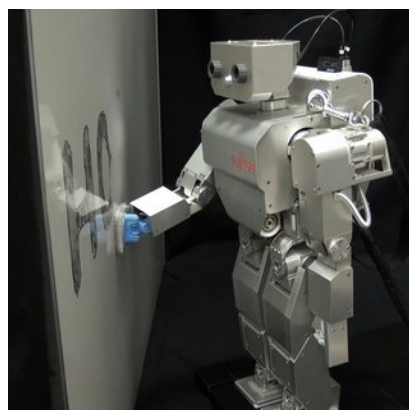


Fig.1 A HOAP-2 humanoid robot cleaning a whiteboard. The cleaning cloth is fixed to a two-DOF passive joint attachment to the end of the right arm. The robot is controlled under mixed position/torque control mode. Force feedback control is realized using foot moment information obtained via the ZMP position.

#### 2.1 直接教示中の制御

我々は人型ロボットを立たせた状態で直接教示を行い, ホワイトボードに書かれた文字を消すために必要な手先軌道と手先の力を記録する. 手先の力を計測するために, Fig. 3 に示すように HOAP-2 のハンドを改造し, 2 自由度の受動関節と力覚センサを取り付けた. 今回用いている座標系を Fig. 4 (a) に示す. 座標系の添字はそれぞれ,  $\{b\}$ : ロボットのベース座標系,  $\{h\}$ : ロボットの手先座標系,  $\{e\}$ : 受動関節先端の座標系,  $\{w\}$ : ホワイトボード座標系を表す. 教示者は力覚センサの部分を持ち, 実際にホワイトボードに書かれた文字を消す作業を行う. センサ

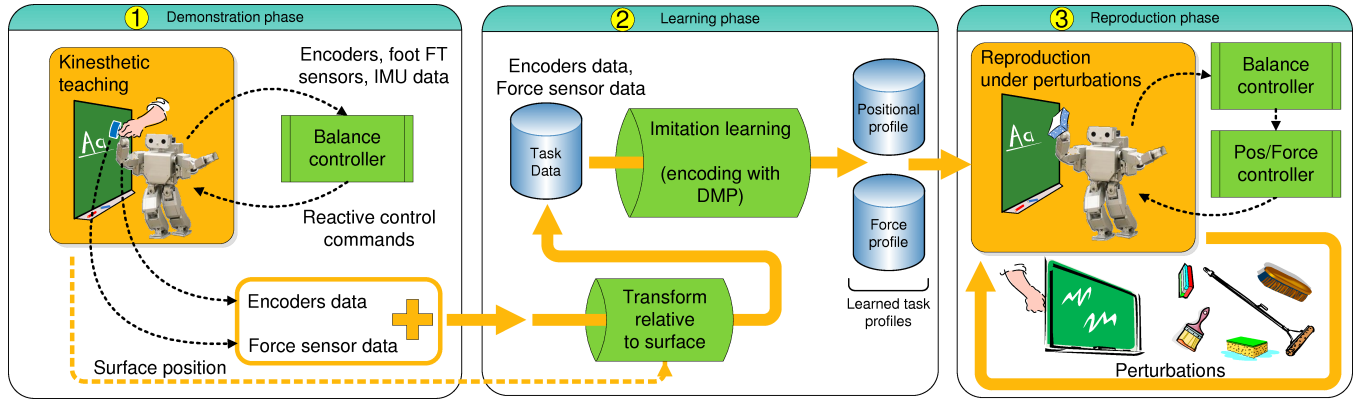


Fig.2 Flowchart of the proposed approach.

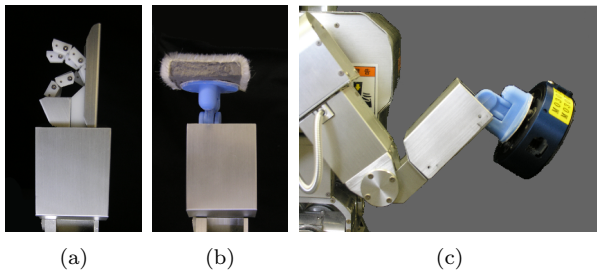


Fig.3 The original hand with RC servo (a) is replaced by an attachment with two passive R joints and cleaning cloth (b). For the demonstration, a F/T sensor is fixed to the attachment as shown in (c).

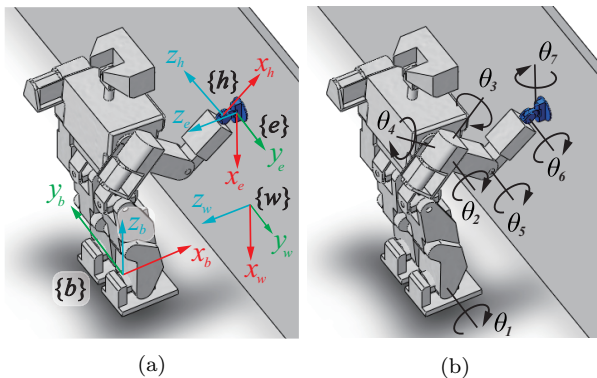


Fig.4 Coordinate frames (a), seven-DOF 3D model (b). Joint angles  $\theta_1$  through  $\theta_5$  are actively controlled,  $\theta_6$  and  $\theta_7$  are the passive joint coordinates resolved via kinematic loop closure.

から得られる力の値は  $z_e$  の成分のみを使い、スポンジとボードとの間に生じる摩擦力は無視した。

直接教示を行っている間、我々は Fig. 5 に示す 2 種類の重要な制御を用いた。以下でそれらについて詳しく述べる。

#### 2.1.1 腕関節の摩擦補償

HOAP-2 の関節には大きな摩擦があり、腕のサーボを切った状態で直接教示を行った場合、腕を自由に動かさず足裏が動いてしまうなどの弊害が起きる。そこで我々は、HOAP-2 の腕の関節をトルク制御モードで動作させ、関節

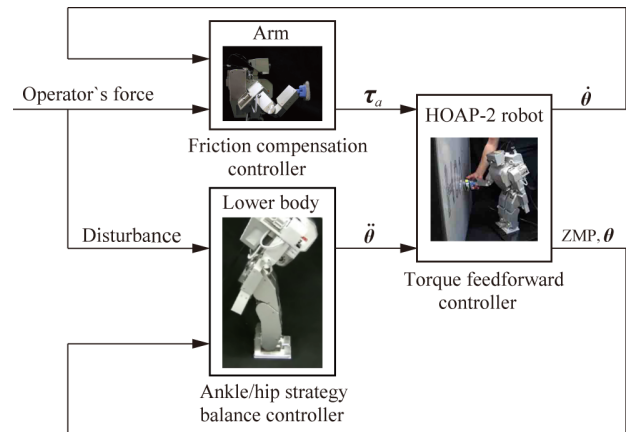


Fig.5 Block scheme of the controller used during the demonstration phase.

角速度に比例したトルクを出力し、粘性摩擦の補償を行った。これにより、HOAP-2 の腕を非常に滑らかに動かすことが可能になった。

#### 2.1.2 バランス制御

しかし、粘性摩擦の補償だけでは、直接教示中にロボットの足裏が動いてしまうことを避けられず、最悪の場合ロボットの転倒を引き起こす。その解決方法として、教示に使用していない下半身を使って ankle strategy と hip strategy の 2 種類<sup>7)</sup> のバランス制御を適用した。また、hip strategy を用いることで、作業範囲が拡大するという利点もある。Fig. 4 (b) には腰関節が含まれていないが、教示中は腰関節も考慮している。したがって、手先軌道は受動関節も含め、8 個の関節を使って順運動学を行っていることに注意されたい。

#### 2.2 学習

獲得した技能を再生する際に、ロボットが教示と同じ位置にいるとは限らない。したがって、ロボットは手先位置の軌道をホワイトボード座標系に変換して記録しなければならない。その際に必要となる、ロボットのベース座標系とホワイトボード座標系の関係は、ホワイトボード上の任意の原点と  $x_w, y_w$  軸に沿った点の計 3 点をロボットの手先で触れることで求めた。

次に、教示された位置と力の軌道に対して DMP 法を用いて学習<sup>8)</sup>を行った。学習を行う理由は、直接教示された位置と力の軌道が滑らかではないため、教示した軌道をそのまま再生した場合に振動が発生してしまうなどの影響が生じるからである。

### 3. 人型ロボットにおけるハイブリッド制御

学習された軌道を位置と力のハイブリッド制御により再生する。ここで示す「ハイブリッド」は、位置と力を同時に制御するという従来の意味を表している。さらに、手先位置を制御するために割り当てている腕の関節は位置制御モードで動作させ、手先の力を作り出すための足首関節はトルク制御モードで動作させる。つまり、制御量において位置とトルクの「ハイブリッド」という意味も含んでいる。今回、トルク制御を用いた理由として、力の制御系が位置の指令値を介さないことで、非常に単純に設計できるからである。具体的な制御については以下で述べる。

Fig. 4 (b) にハイブリッド制御の際のモデル図を示す。教示の際に使った腰関節が入っていないことに注意されたい。受動関節である  $\theta_6, \theta_7$  は、常に  $z_e$  と  $z_w$  が平行になるという条件より、角度が一意に決まる。したがって、ハイブリッド制御では逆運動学の計算に受動関節を含めない。また、受動関節先端の角速度  $\omega_{ex}, \omega_{ey}$  は制御する必要がなくなる。

受動関節を除く関節角度  $\theta_1$  から  $\theta_5$  までを、 $\theta_{ankle} = \theta_1, \theta_{arm} = [\theta_2 \ \theta_3 \ \theta_4 \ \theta_5]^T$  と置き換える。そのとき、人型ロボット全身のヤコビ行列を、 $\dot{\theta}_{ankle}$  に関する行列  $j_{ankle} \in \mathbb{R}^{4 \times 1}$  と  $\theta_{arm}$  に関する行列  $J_{arm} \in \mathbb{R}^{4 \times 4}$  に分けて考える。

ロボットのベース座標系から見た受動関節先端の速度および角速度  $\nu_e = [v_e^T \ \omega_{ez}]^T$  の指令値は Eq. (1) で求める。

$$\nu_e^{ref} = S_P [\nu_e^d + K_{ep}(\xi_e^d - \xi_e) - j_{ankle}\dot{\theta}_{ankle}] \quad (1)$$

なお、 $\xi_e^d - \xi_e$  は目標から現在の受動関節先端の位置・姿勢誤差を、 $K_{ep}$  は位置・姿勢の比例ゲイン行列を、添字である  $(\circ)^d, (\circ)^{ref}$  は目標値と指令値を示す。また、 $S_P = \text{diag}(0, 1, 1, 1)$  である。

よって関節角速度の指令値  $\dot{\theta}_{arm}^{ref}$  は腕に関するヤコビ行列の逆行列  $J_{arm}^{-1}$  と Eq. (1) を用いて Eq. (2) より求める。

$$\dot{\theta}_{arm}^{ref} = J_{arm}^{-1} \nu_e^{ref} \quad (2)$$

一方、足首関節トルクの指令値は Eq. (3) より求める。

$$\tau_{ankle}^{ref} = -\{k_f^F \dot{f}_{ez}^d + k_p^F (f_{ez}^d - f_{ez}) - k_d^F \dot{\theta}_{ankle}\} \quad (3)$$

なお、 $f_{ez}$  は受動関節先端  $z$  軸方向の力を、 $k_f^F$  は力の微分ゲインを、 $k_p^F$  は力の比例ゲインを、 $k_d^F$  は足首関節角速度に対する微分ゲインを示す。

受動関節先端の力に関しては、CoM $x$  方向の位置  $r_{cx}$  と ZMP $x$  方向の位置  $p_x$  を用いて、Eq. (4) より求める。

$$f_{ez} = \frac{mg(r_{cx} - p_x)}{r_{ez}} \quad (4)$$

なお、 $m$  はロボット全体の質量を、 $g$  は重力加速度を、 $r_{ez}$  は床面から受動関節先端までの高さを表す。

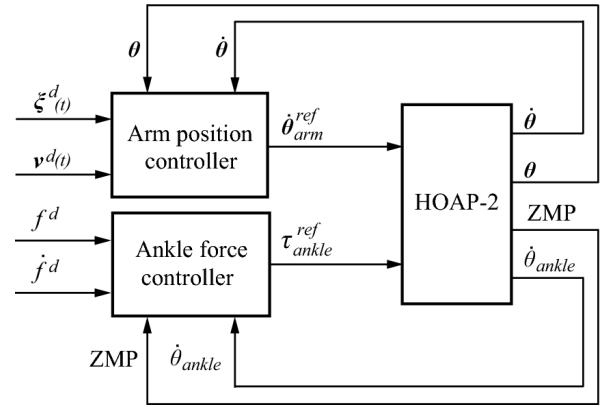


Fig.6 Motion/force controller realization with mixed position/torque control mode.

### 4. 再生

学習された軌道を第3節で述べたハイブリッド制御を用いて再生した。壁からの反作用によって、ロボットの足裏が滑ることを防ぐために、床面とロボットの足裏にはテープを貼り、摩擦係数を増加させた。また、ロボットの手先は Fig. 3 (b) に交換した。ロボットの位置は、教示の際と違う位置に置いてあるため、第2.2節で述べた方法で、軌道をホワイトボード座標系からロボットのベース座標系に変換した。実験で用いたゲインはそれぞれ、 $K_{ep} = \text{diag}(0, 10, 10, 0) \text{ s}^{-1}$ ,  $k_f^F = 0.5 \text{ m} \cdot \text{s}$ ,  $k_p^F = 15 \text{ m}$ ,  $k_d^F = 5 \text{ kgm} \cdot \text{s}^{-1}$  である。

実験は実際ホワイトボードに書かれた文字を消す作業を想定し、以下の手順で動作させた。

Phase I ホワイトボードに手先を近づけて接触させる

Phase II その場で3 s 静止する

Phase III 現在の力から学習された力の軌道の初期値までを、5 s の5次補間で出力させる

Phase IV 現在の位置から学習された位置の軌道の初期値までを、5 s の5次補間で出力させる

Phase V 学習された軌道を再生し、ホワイトボードに書かれた文字を消す

その結果を Fig. 7 に示す。Fig. 7 (d) より位置を制御する方向の目標との誤差は  $\pm 4.0 \text{ mm}$  程度であった。また、手先の力の目標との誤差は Fig. 7 (f) より、 $\pm 0.30 \text{ N}$  程度であった。そして、ホワイトボード上の文字は綺麗に消せていた。したがって、我々は今回用いたハイブリッド制御がホワイトボードに書かれた文字を消す作業に対して有用であり、その作業に求められる精度が確保できていると判断した。

### 5. 結言と今後の課題

我々は人型ロボットの全身を使った作業生成の方法を提案した。まず、人型ロボットを立たせた状態で直接教示する際の問題点と、その解決方法を示した。次に、人型ロボットにおけるハイブリッド制御の構築を行った。そして、ホワイトボードに書かれた文字を消す作業に適用し、その有

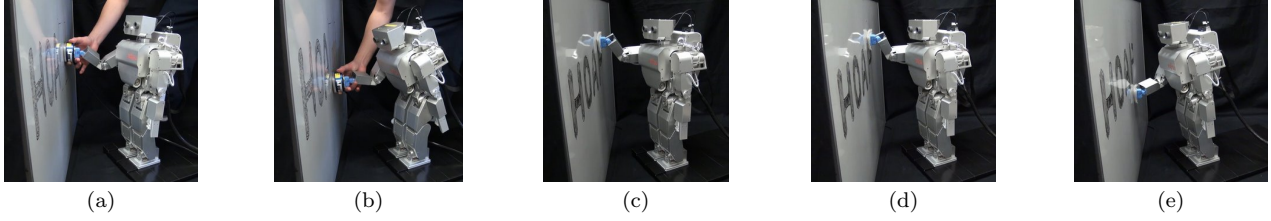


Fig.8 Sequence of video frames showing demonstration and reproduction of a whiteboard cleaning task, performed with a self-balancing HOAP-2 robot. (a) At the demonstration phase, the human teacher is only holding the F/T sensor at the end-effector with one hand. The whole body of the robot is controlled by the proposed method providing compliance for the arm and reactive balance control for the whole body; (b) The hip-strategy balance controller allows the robot to increase the size of the working space and reach further; (c) Before executing a standalone reproduction, the robot extends its arm and touches the surface without exerting any force on it. (d) At the beginning of a standalone reproduction, the robot leans forward and uses the ankle torque controller to exert the required force on the surface. (e) Execution of the trajectory while applying the desired force.

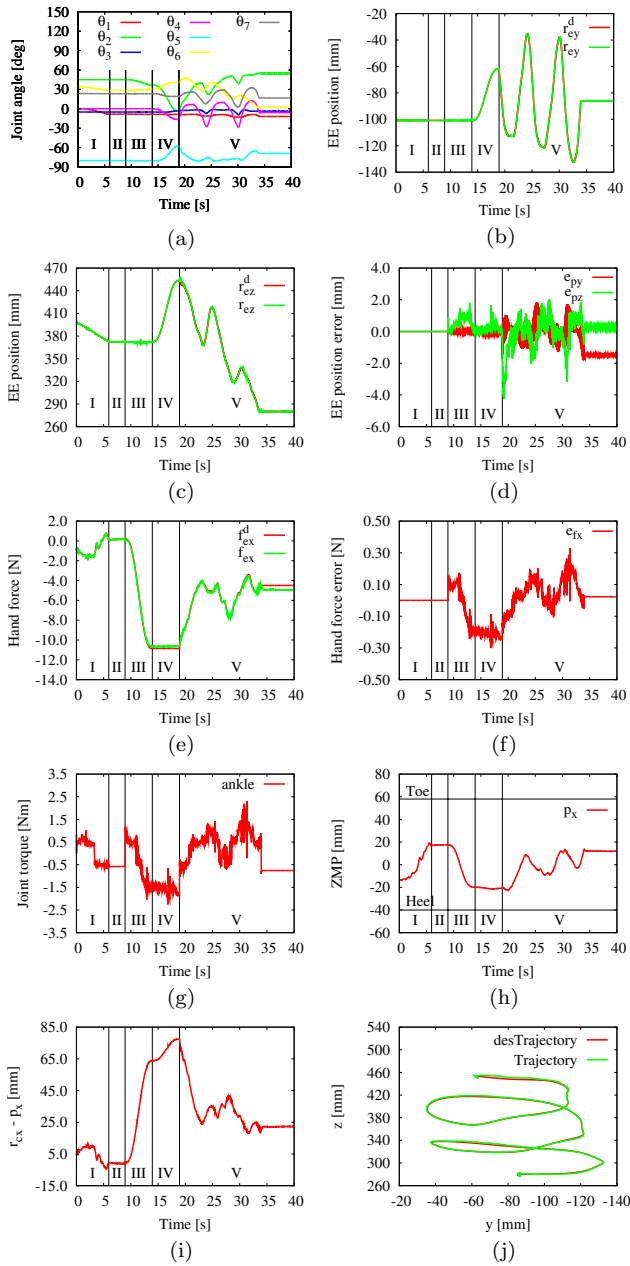


Fig.7 Experimental data from the reproduction phase.

用性を示した．最後に，Fig.8 に，教示を行っている場合と再生を行っている場合のロボットを動作を示しておく．

今後の課題としては，ロボットの足を左右1本ずつモデル化を行い，再生する際にロボットの足の位置を自由に決められることを目指す．それを歩行動作と組み合わせて，作業範囲の拡大に繋げていく．

## 6. 謝辞

本研究は文部科学省 科学研究費補助金（基礎研究（B）, 課題番号 20300072）と外務省・日伊科学技術協力・イタリア外務省のエグゼキュティブ・プログラム（EP）（2010-2011 年）の助成を受けたものである．また，資料の準備に協力して頂いた高橋昌大君に感謝する．

## 参考文献

- 1) K. Hirai, M. Hirose, Y. Haikawa, T. Takenaka: "The development of Honda humanoid robot," in *Proc. of the 1998 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, Leuven, Belgium, 1998, pp. 1321–1326.
- 2) K. Harada, S. Kajita, K. Kaneko and H. Hirukawa, "Pushing manipulation by humanoid considering two-kinds of ZMPs," in *Proc. of the 2003 IEEE/RSJ Int. Conf. on Robotics and Automation*, Taipei, Taiwan, 2003, pp. 1627–1632.
- 3) Y. Hwang, A. Konno and M. Uchiyama: "Whole body cooperative tasks and static stability evaluations for a humanoid robot," in *Proc. of the 2003 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, Las Vegas, Nevada, 2003, pp. 1901–1906.
- 4) T. Takubo, K. Inoue, K. Sakata, Y. Mae and T. Arai, "Mobile manipulation of humanoid robots -Control method for CoM position with external force-, in *Proc. of the 2004 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, Sendai, Japan, 2004, pp. 1180–1185.
- 5) K. Harada, S. Kajita, H. Saito, M. Morisawa, F. Kanehiro, K. Fujiwara and H. Hirukawa: "A humanoid robot carrying a heavy object," in *Proc. of the 2005 IEEE/RSJ Int. Conf. on Robotics and Automation*, Barcelona, Spain, 2005, pp. 1712–1717.
- 6) Y. Hayashibara, T. Takubo, Y. Sonoda, H. Arai, K. Tanie: "Assist system for carrying a long object with a human-analysis of a human cooperative behavior in the vertical direction," in *Proc. of the 1999 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, Kyongju, South Korea, 1999, pp. 695–700.
- 7) Y. Kanamiya, S. Ota, and D. Sato: "Ankle and hip balance control strategies with transitions," in *Proc. of the 2010 IEEE/RSJ Int. Conf. on Robotics and Automation*, Alaska, USA, May 2010, pp. 3446–3451.
- 8) S. Schaal, P. Mohajjerian, and A. J. Ijspeert: "Dynamics systems vs. optimal control a unifying view," *Progress in Brain Research*, vol. 165, pp. 425–445, 2007.