

ヒトの腕運動を再現するヒューマノイドロボットの開発とその評価

Development and evaluation of humanoid robots to reproduce human arm movements

○苫小牧工業高等専門学校専攻科 佐藤 仁是, 苫小牧工業高等専門学校 加島 正, 苫小牧工業高等専門学校 菅原 啓太

要 旨

ヒューマノイドロボットの重要な特徴の一つはヒトの腕運動を再現することである。そこで本研究では、動作開始と終了の位置及び動作時間が与えられたとき、ヒトの運動を再現できるロボットの開発を目標とし、ヒトの上肢に類似した機能を備えるロボットの開発及びヒトの運動原理に基づいた動作をするための制御アルゴリズムの開発を行った。さらにロボットの動作シミュレーションを行って、この制御法における工学的利点を評価した。

1. はじめに

工業立国である日本は、製品コストの多くを占める労働力の確保のため生産拠点の多くを発展途上国で担っている。ここで、ヒトのような動作が可能なロボットという労働力があれば、国内で低コストでの生産や生産性の安定も見込まれる。また、ヒトの腕運動軌道は滑らかでかつ工学的にも優位性があるので生産活動以外の分野でもヒトの腕運動を再現できるロボットの開発が期待されている。

ヒトの運動を再現するために、その動作原理が活発に研究されている¹⁾。この中でダイナミクスを考慮した軌道計画では限られた条件のもとでヒトに近い運動を再現できるが軌道計算が複雑になる。一方、運動学的視点から計画される軌道は、軌道生成が容易でしかもヒトの腕運動の特徴を表現することが可能である。

本研究では、始めにヒトの腕を模したロボットを設計・開発する。次に運動学的な見地から、肩と肘関節の軌道を関節角躍度最小規範を用いて生成する。ただし、肘関節については研究報告²⁾を参考にして、その動作時間を調節する。この軌道生成手法を用いてロボットの制御アルゴリズムを構築して、ロボットがヒトの腕運動を再現することを確認する。最後に、ロボットでヒトの腕運動を再現した時のエネルギー消費特性など工学的利点を定量的に評価する。

2. ロボットの構造と制御アルゴリズム

2.1 ロボットの構造

本研究では、3次元空間でヒトの上肢運動における軌道の特性を表現できるヒューマノイドロボットを開発した。図1に示すのは開発したロボットの外観で、肩や肘の関節部には、ヒトの関節運動を再現するサーボモータを配置しており、フレーム以外の構成部品をベストテクノロジー社製の製品で構成している。ヒトの上腕構造で負担のかかる肩関節には駆動トルクが大きいサーボモータRX-64を2つ、また肘関節には駆動トルクが小さいRX-28を1つ用い、計3自由度の運動を再現可能である。ロボットの動作は、提供されたC言語による開発環境ソフトで開発をしておき、サーボモータにマイコン(AT91SAM7S256, SAM7S I/Oボード(BTC065))を接続し、RS232Cを介して送信し、動作させる。なお、定格電圧を確保するため15Vの安定化電源を用いた。入力には主に関節角度の入力で動作するロボットであり、必要に応じて、トルクや速度などの設定も可能である。

2.2 ロボットの軌道計画

本研究で開発したロボットの運動モデルを図2に示す。図で、 θ_1 と θ_2 は肩、そして θ_3 は肘の関節角度を表す。また、 l と m はそれぞれ各部の長さや質量を表す。ヒトの上肢運動について、主に平面運動における多くの研究成果よ

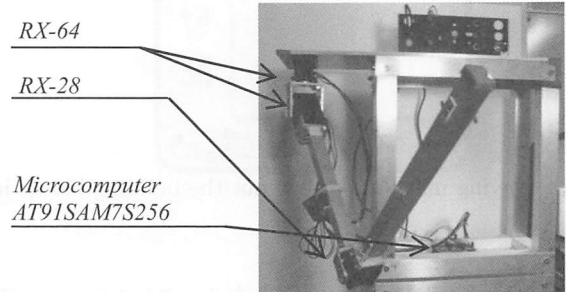


Fig.1 Humanoid robot

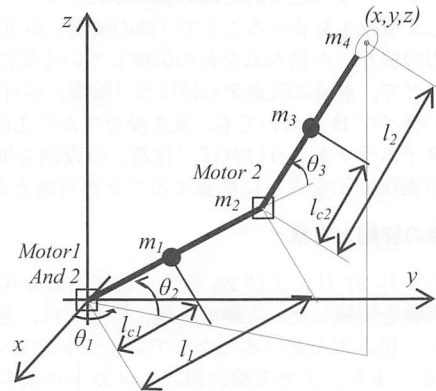


Fig.2 Arm model

り、手先経路は肩を中心とした凸状および直線的になり、手先速度がベル状になるというヒトの上肢運動の特徴が報告されている^{1,2)}。このような特徴を持つ軌道は運動学的に生成できる³⁾。例えば、手先の躍度最小軌道は2点間を結ぶ直線経路となり、かつベル状の手先速度パターン軌道を生成する。しかし、2点間の曲線経路は再現できない。そこで本研究では、よりヒトに近い手先経路を描き、かつ手先の速度パターンも再現できる関節角躍度最小規範に着目した。まず、各関節角の躍度を規範に軌道計画を行う。評価関数は3自由度を有する場合、

$$J = \frac{1}{2} \int_0^{t_f} \sum_{i=1}^3 \ddot{\theta}_i^2 dt \quad (1)$$

と定義される。上記の評価関数を最小とする軌道は、各関節を独立して計算することが可能であり、

$$\theta_i(s) = \theta_i^{st} + (\theta_i^{st} - \theta_i^{sp})(15s^4 - 6s^5 - 10s^3), i=1,2,3 \quad (2)$$

となる。ここで、 s は $s=t/t_f$ であり、 st と sp はそれぞれ動作開始と終了時を意味する。全関節を(2)式で計画したとき、必ずしもヒトの運動軌道を再現しない²⁾。しかし、Hollerbach と Atkeson²⁾は平面運動の軌道を解析し、(2)式

に示すような関節角間の線型関係をもとに肘関節の動作時間を調整することで、ヒトの手先とほぼ同一な経路が生成できることを示した。本研究ではこの結果をさらに発展させることで軌道を計画する。肩関節は(2)式で軌道を計画し、肘関節に関しては作業座標系における手先速度のピークが動作時間の中心にくるように、動作時間を調節する。いま、肘の動作開始及び終了時間が正規化した時間 s に対して d だけずれたときの軌道を考察する。肘関節の軌道を表現する新しい時間変数を p とし、動作開始が遅れる場合は p_a 、そして動作終了を早める場合は p_b とすると、(2)式の変数である s をそれぞれ、

$$p_a = \begin{cases} 0, & 0 \leq s < d \\ \frac{s-d}{1-d}, & d \leq s \leq 1 \end{cases}, p_b = \begin{cases} \frac{s}{1-d}, & 0 \leq s < 1-d \\ 1, & 1-d \leq s \leq 1 \end{cases} \quad (3)$$

と置き換えることで軌道が生成できる。結局(2)式と(3)で腕の運動経路が決定できるので、手先速度 v は s と d の関数となり手先位置 (x, y, z) より、

$$v(s, d) = \sqrt{\dot{x}(s, d)^2 + \dot{y}(s, d)^2 + \dot{z}(s, d)^2} \quad (4)$$

と表現できる。そこで、手先速度のピークを動作の中心とするために、

$$\left[\frac{dv(s)}{ds} \right]_{s=0.5} = 0 \quad (5)$$

を満たす拘束時間 d をニュートン法で数値計算する。

3. 結果と考察

開発した制御アルゴリズムを用いてロボットを動作させ、ヒトの運動軌道の再現性を確認する。ただし、ヒトの軌道計画の検討は主に平面運動で行われ、3次元空間での検討は極めて少なく、有益なデータがない。そこで、本研究では図2に示す関節角のうち θ_1 を固定し、 θ_2 と θ_3 を変数とする平面、すなわち矢状面での運動を解析する。

ロボットの制御は、一般的に用いる角度入力のみではPTP制御となる。そのため、マイコンの割込み機能を用いて0.1秒の間隔でその動作時間での速度を入力し、近似的に軌道を制御した。動作は、ヒトの軌道の特徴を再現する2種類の動作条件のもとで行った(それぞれ Mov1, Mov2 と呼ぶ)。この条件で、開発したロボットを制御した時の手先軌道と本研究で提案する手法で生成した手先軌道を図3に示す。図3aから大きな振上げ動作では、肩を中心とした凸状の経路でヒトの特徴を表現し、ロボットの経路と生成軌道はほぼ一致している。また横方向の動作では、手先は幾分湾曲した直線的な経路でヒトと同じ特徴を示している³⁾。ロボットの手先経路は多少の差は認められるものの、ヒトの経路の特徴を表現できている。そして、図3bより速度についてもヒトの特徴を再現していることがわかる。これらの結果から、本研究で提案する制御法を適用することでヒトの腕運動軌道を再現できることがわかる。

次に、ヒトの運動軌道のエネルギー消費特性を検討するためにシミュレーションを行った。矢状面内でのロボットの動作中の消費エネルギーは、主にモータのジュール熱と関節の粘性抵抗を用いて、

$$E = \int_0^t \sum_{i=2}^3 ((\tau_i / k_{\tau,i})^2 R + c_i \dot{\theta}_i^2) dt \quad (6)$$

となる。ここで τ は動作トルク、 c はモータの粘性係数、 k_{τ} はトルク定数そして R はモータの内部抵抗である。ここで、トルク定数とモータの内部抵抗はモータ資料が入手できなかったため、同程度の出力のモータの諸元から推測した。また、動作トルクと関節角速度は生成した軌道より計算した。設定した2種類の動作条件での動作時間に対する消費エネルギーを図4に示す。ここでは、本研究で提案す

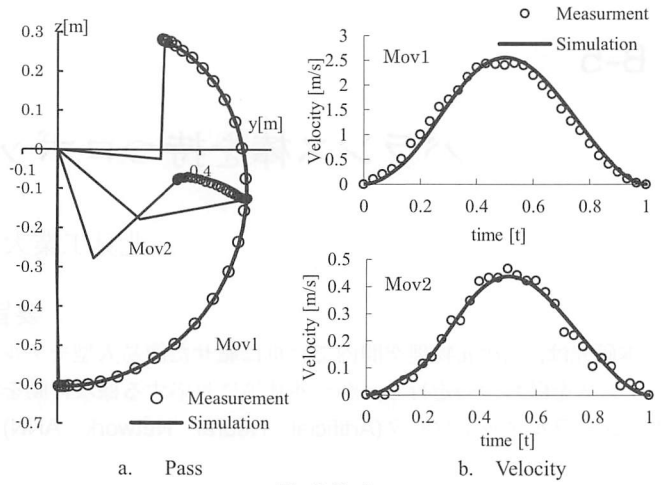


Fig.3 Trajectory

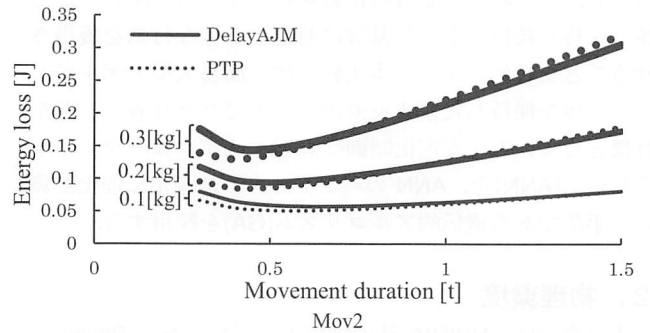
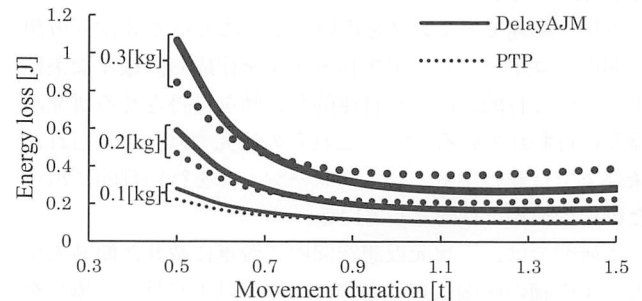


Fig.4 Energy dissipation

る制御法に加え、一般的に用いられるPTPで制御した時の消費エネルギーを、保持質量を変化させて計算した。図より、短い動作時間だと提案する制御法での消費エネルギーはPTP制御に比べ大きいことがわかる。しかし、動作時間が長くなるに従って提案する制御法での消費エネルギーは低く、この現象は保持質量によらず認められる。また全ての動作で消費エネルギーが最小となる動作時間の存在が確認できる。

4. 結論

本研究では、ヒトの上肢運動を再現する3自由度ヒューマノイドロボットを開発した。次に、ヒトの運動軌道を再現するための制御アルゴリズムを開発した。そして、ロボットを実際に動作させ、軌道が安定して容易に生成できることを確認した。また、生成した軌道を解析して、ヒトの腕運動を再現する軌道はPTP制御に比べて、特に動作時間が長い動作で消費エネルギーを低減できることが確認できた。

参考文献

- [1] 川人 光男:“脳の計算理論”, 産業図書, p.240, 1996.
- [2] J. Hollerbach and C. Atkeson: “Deducing Planning Variables from Experimental Arm Trajectories: Pitfalls and Possibilities”, Biol. Cybern 56, pp.279-292, 1987.
- [3] T. Kashima: “Trajectory Formation of biomimetic Robot Arms with Redundancy”, Nova Science Publishers, Inc., Focus on Biomimetics Research, pp.133-149, 2013.