冗長多リンクロボットを用いたマッサージシステムの開発と制御

Development and Control of a Massage System Using a Redundant Multi-link Robot

○ 佐藤 順亮 (電通大) 田中 基康 (電通大) 正 田中 一男 (電通大) 正 松野 文俊 (京大)

Junsuke SATO, The University of Electro-Communications, junsuke.sato@rc.mce.uec.ac.jp

Motoyasu TANAKA, The University of Electro-Communications

Kazuo TANAKA, The University of Electro-Communications

Fumitoshi MATSUNO, Kyoto University

This paper introduces a newly developed massage system using the redundant multi-link robot. The position of the wheel is designed to be easy to control of the position of the contact points, and the position controller to make multiple contacts with the subject is proposed. The controller can accomplish the collision avoidance between the subject and the body except the controlled contact points by using redundancy. Simulations and experimental results show the effectiveness of the proposed robot and controller.

Key Words: Massage robot, Motion control, Collision avoidance, Redundancy

1. 緒論

近年、少子高齢社会の到来とともに薬による副作用の恐れがないマッサージの需要が高まっている。しかしながら、人間が行うマッサージには施術者の負担、施術者の不足、時間的制約、施術者の技術不足といった問題がある。これらの問題を解決するため、人間に代わってマッサージを行うマッサージロボットに関する研究が盛んに行われている [1-7]。人間が行うマッサージでは同時に多点を刺激するため、マッサージロボットは多点を同時に接触する多点同時接触制御が必要となる。従来のマッサージロボット研究としては、冗長マニピュレータの手先で対象物に接触を行う研究がある [1,2]。これは対象物との接触箇所が1点であるため、多点同時接触を行うためには複数の冗長マニピュレータを用意する必要があり、システム全体としてはコスト増加と装置サイズの大規模化が問題となる。これに対し、文献 [3-7] ではロボットハンドの複数の指の先端で対象に接触することにより、多点同時にマッサージ動作を行っている。しかしながら、ロボットハンドでは同時に接触できる範囲が狭い領域に限られてしまう。

以上の課題に対し、本研究では冗長多リンクロボットを用いて多点接触させることでマッサージ動作を行うことを考える。細長い冗長多リンクロボットの末端部分だけでなく、体幹における複数の部分を対象物に接触することで、より広い領域に対して多点同時接触を行うことができる。また、用いるロボットが冗長多リンクロボット1体であるため、複数の冗長マニピュレータを用いる場合よりも装置を小型化できると考えられる。

冗長多リンクロボットによる多点接触制御の例として包み込み把握がある。この手法は大きく分けて、接触位置を既知とする場合 [8] と、接触位置を検出する場合 [9] とに分けられる。前者は包み込み把握の安定性、対象物の持ち上げ、離脱の解析が目的であり、接触位置の制御

を目的としていない。包み込み把握は対象物との接触をリンクの腹で行うため、後者に関しても接触位置を直接制御するものはない。

本研究では多様なマッサージ動作を行う新たなマッサージシステムの実現を目指し、冗長多リンクロボットを用いたマッサージシステムの開発と多点同時接触位置制御方法の提案を行う。具体的には、制御が容易になるロボット機構の提案、2つの接触点の位置制御および冗長性を利用した干渉回避方法の提案を行い、シミュレーションおよび実験により制御則の有効性を検証する。

2. 冗長多リンクマッサージロボット

冗長多リンクロボットに対して、包み込み把握 [8,9] と同様にリンクの任意の中間点で接触する場合、Fig.1(a)に示すように、接触を維持するためにはリンクの位置と姿勢を連動させて転がり接触させる必要がある。これは、接触点位置とリンク姿勢を独立に制御することができないことを意味する。対象物への干渉の問題を考えると、接触点位置とリンク姿勢は独立に制御できることが望ましい。

そこで、Fig.1(b)に示すように冗長多リンクロボットの関節の同軸上に車輪を設置する機構を提案する。この機構により、接触位置およびリンク姿勢を独立に制御することができる。

Fig.1: A redundant robot and a contact point

Fig.2: A 2-D redundant multi-link robot and a subject

3. モデル化

本研究では, Fig.2 に示すようにリンク数が n リンクからなる 2 次元冗長多リンクロボットが円形の対象物に 2 箇所接触する場合について考える. 対象物の位置および大きさは既知であるとする. 対象物と接触する車輪を接触車輪, 接触車輪の間にある車輪を接触間車輪, 先頭側の接触車輪を第 n 車輪, ベース側の接触車輪を第 m 車輪とする. 第 i 関節の x, y 座標位置を x_i, y_i , 絶対角を θ_i とし, 接触車輪である第 n, m 車輪の位置・姿勢を $\boldsymbol{w} = [x_n, y_n, \theta_n, x_m, y_m, \theta_m]^T$, 関節角を $\boldsymbol{q} = [q_1, q_2, \dots, q_n]^T$ とすると, 幾何学関係より,

$$\boldsymbol{w} = \boldsymbol{f}(\boldsymbol{q}) \quad (1)$$

となる. 式 (1) を時間微分することで, 運動学モデルは次式のように求められる.

$$\dot{\boldsymbol{w}} = \boldsymbol{J}(\boldsymbol{q})\dot{\boldsymbol{q}} \quad (2)$$

ここで, ロボットを冗長システムとするために行列 $\boldsymbol{J}$ は横長, すなわち $6 < n$ とする. また, ベースから第 m 車輪までの関節数および第 m 車輪から第 n 車輪までの関節数は十分大きい数であるとする.

4. 制御設計

2 つの接触車輪の中心位置と姿勢 $\boldsymbol{w}$ を制御することをメインタスクとし, サブタスクは対象物と接触間車輪の干渉回避とする. 制御入力 $\dot{\boldsymbol{q}}$ を次式のように設定する.

$$\dot{\boldsymbol{q}} = \boldsymbol{J}^\dagger \left(\dot{\boldsymbol{w}}_d + \boldsymbol{K}_P \boldsymbol{w}_e + \boldsymbol{K}_I \int \boldsymbol{w}_e dt \right) + (\boldsymbol{I} - \boldsymbol{J}^\dagger \boldsymbol{J}) \boldsymbol{K}_V \left(\frac{\partial V}{\partial \boldsymbol{q}} \right) \quad (3)$$

ここで, $\boldsymbol{w}_d$ は被制御量 $\boldsymbol{w}$ の目標値, $\boldsymbol{w}_e$ は被制御量の偏差 ($\boldsymbol{w}_e = \boldsymbol{w}_d - \boldsymbol{w}$), $\boldsymbol{K}_P$, $\boldsymbol{K}_I$ は比例ゲインおよび積分ゲイン, $\boldsymbol{K}_V$ は冗長性に関するゲイン, $\boldsymbol{J}^\dagger$ は $\boldsymbol{J}$ の疑似逆行列, $\boldsymbol{I} \in \mathbb{R}^{n \times n}$ は単位行列, V は評価関数である. 入力を (3) 式のように与えることで $\boldsymbol{w}$ は $\boldsymbol{w}_d$ に収束する. 入力 (3) における右辺第 2 項は運動学的冗長性に起因する項であり, 被制御量の運動には影響を与えない.

サブタスクである対象物と接触間車輪の干渉回避を行うため, 評価関数は次式のように設定する.

$$V = \sum_{i=m+1}^{n-1} \frac{1}{(x_i - X)^2 + (y_i - Y)^2 - (R + r)^2} \quad (4)$$

ここで, X, Y は対象物の中心位置, R, r は対象物および接触車輪の半径である. V は対象物と接触間車輪の距離が小さいほど大きな値をとる. V の時間微分は

$$\begin{aligned} \dot{V} &= \left(\frac{\partial V}{\partial \boldsymbol{q}} \right)^T \dot{\boldsymbol{q}} \\ &= \left(\frac{\partial V}{\partial \boldsymbol{q}} \right)^T \boldsymbol{J}^\dagger \left(\dot{\boldsymbol{w}}_d + \boldsymbol{K}_P \boldsymbol{w}_e + \boldsymbol{K}_I \int \boldsymbol{w}_e dt \right) + \left(\frac{\partial V}{\partial \boldsymbol{q}} \right)^T (\boldsymbol{I} - \boldsymbol{J}^\dagger \boldsymbol{J}) \boldsymbol{K}_V \left(\frac{\partial V}{\partial \boldsymbol{q}} \right) \end{aligned} \quad (5)$$

となる. ここで, $(\boldsymbol{I} - \boldsymbol{J}^\dagger \boldsymbol{J}) > 0$ である. よって, $\boldsymbol{K}_V < 0$ とすることで式 (5) の右辺第 2 項が常に負となり V が減少化され, 干渉リスクを低減できる.

5. シミュレーション

制御則の有効性を検証するため, シミュレーションを行う. ロボットに関するパラメータは後述する実験と合わせ, $n = 16, m = 6, l_i = 0.067[\text{m}]$ とした. 干渉回避の検証を行うため, 評価関数を使用した場合 (case1, $\boldsymbol{K}_V \neq 0$) と評価関数を使用しなかった場合 (case2, $\boldsymbol{K}_V = 0$) についてシミュレーションを行った.

case 1 および case 2 における接触車輪の位置・姿勢の時間応答を Fig.3 に示す. ここで, 実線は時間応答, 破線は目標値を表している. Fig.3 より, 接触車輪の位置・姿勢が目標値に収束していることがわかる. なお, 被制御量の運動に影響を与えない冗長性を利用して干渉回避を行っているため, シミュレーションにおいては干渉回避の有無に関わらず被制御量 $\boldsymbol{w}$ は同じ応答となる. また, シミュレーションにおけるロボット動作の様子を Fig.4 に示す. 赤色の “+” は目標位置, 赤い車輪は接触車輪, 青い車輪は接触間車輪を表している. case 2 では接触間車

Fig.3: Time responses of $\boldsymbol{w}$ in simulation

Fig.4: Motion of the robot in simulation

輪である第7車輪と対象物との間に干渉が生じているのに対して、case 1 では干渉を回避していることがわかる。

6. 実機実験

制御則およびシミュレーション結果の妥当性を検証するため、実機を用いた実験を行う。実験環境を Fig.5 に示す。シミュレーションと同様にリンク数は $n = 14$ ，各リンク長さは $l_i = 0.067[\text{m}]$ ，ロボットの全長はおよそ $1[\text{m}]$ であり， $m = 6$ とした。アクチュエータは ROBOTIS の Dynamixel AX-18A を使用した。なお，現在値 w は内界センサにより検出された関節角 q を幾何学関係式 (1) に代入することで算出した。

シミュレーションと同様に，評価関数を使用した場合

Fig.5: Experimental system

(a) case 1

(b) case 2

Fig.6: Experimental results of interference avoidance

(case 1, $K_V \neq 0$) と評価関数を使用しなかった場合 (case 2, $K_V = 0$) で実験を行った。ロボットの動作の様子を Fig.6 に示す。評価関数を使用しなかった case 2 ではロボットの第7車輪と対象物が干渉しているのに対し，case 1 では干渉を回避できていることがわかる。case 1 の接触車輪の位置・姿勢の時間応答を Fig.7 に示す。ここで，実線は位置・姿勢の時間応答，破線は目標値を表している。接触車輪の位置・姿勢が目標値に収束していることがわかる。しかしながら，実世界における目標位置には収束していないことを目視にて確認した。本実験ではサーボの内界センサから受信した関節角の値から幾何学的に各車輪の位置を求めており，角度誤差の累積によって実世界との間に誤差が生じたことが原因であると考え

Fig.7: Time responses of w (experiment, case 1) Fig.9: Time responses of w (experiment, case 3)

Fig.8: Experimental results of time-varying reference (case 3)

られる。

さらに case 3 として、評価関数を使用し、目標値を時間変化させた場合のロボットの動作の様子と被制御量の応答を Fig.8, 9 に示す。時変の目標値に対しても、接触車輪が干渉回避しながら対象物の側面に沿って目標値通りに動作していることがわかる。

7. 結論と今後の課題

本研究では多様なマッサージ動作を行う新たなマッサージシステムの実現を目指し、制御が容易になるロボット機構の提案、2つの接触車輪の位置制御と冗長性を利用した干渉回避方法の提案を行い、シミュレーションおよび実機実験により制御則の有効性を確認した。

今後は接触位置および接触力の制御、モーションキャプチャ等の外界センサを用いた制御、対象を人にした場合の実機検証およびマッサージ動作の実現を行う。

参考文献

- [1] J.Wang and Y.Li, "Massaging Human Feet by a Redundant Manipulator Equipped with a Tactile Sensor," Proc. IEEE/ASME Int. Conf. on Advanced Intelligent Mechatronics, pp.7-12, 2010.
- [2] K.C.Jones and W.Du, "Development of a Massage Robot for Medical Therapy," Proc. IEEE Int. Conf. on Advanced Intelligent Mechatronics, Vol.2, pp.1096-1101, 2003.
- [3] P.Min Yong, K.Mouri, H.Kitagawa, T.Miyoshi and K.Terashima, "Hybrid Impedance and Force Control for Massage System by Using Humanoid Multi-fingered Robot Hand," Proc. IEEE Int. Conf. on Systems, Man and Cybernetics, pp.3021-3026, 2007.
- [4] R.C.Luo and C.C.Chang, "Electromyographic Evaluation of Therapeutic Massage Effect Using Multi-finger Robot Hand," Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.2431-2436, 2011.
- [5] M.Kume, Y.Morita, Y.Yamauchi, H.Aoki, M.Yamada and K.Tsukamoto, "Development of a Mechanotherapy Unit for Examining the Possibility of an Intelligent Massage Robot," Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, Vol.1, pp.346-353, 1996.
- [6] Y.Xiaoqin and X.Yonggen, "Design and Simulation of Chinese Massage Robot Based on Parallel Mechanism," Proc. Int. Conf. on Mechanic Automation and Control Engineering (MACE), pp.2512-2512, 2010.
- [7] K.Mouri, K.Terashima, P.Min Yong, H.Kitagawa and T.Miyoshi, "Identification and Hybrid Impedance Control of Human Skin Muscle by Multi-fingered Robot Hand," Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp.2895-2900, 2007.
- [8] 金子 真, 東森 充, 辻 敏夫, "包み込み把握の遷移安定性", 日本ロボット学会誌, No.16, No.5, pp.712-720, 1998.
- [9] K.Harada and M.Kaneko, "A Sufficient Condition for Manipulation of Envelope Family," IEEE Trans. on Robotics and Automation, Vol.18, No.4, pp.597-607, 2002.