

平成 20 年 9 月 24 日現在

研究種目：基盤研究 (C)
 研究期間：2007～2008
 課題番号：19560272
 研究課題名 (和文) 拘束作業における人間らしい動作に関する制御原理の構築
 研究課題名 (英文) Trajectory formation and control principles of natural human-like movements in dynamically constrained tasks

研究代表者
 M・M S V I N I N
 独立行政法人理化学研究所，運動系システム制御理論研究チーム，研究員
 研究者番号：90274125

研究成果の概要：

本研究では 動的な環境下における人間らしいリーチング運動を表現する数学モデルを構築する。運動解析に関しては、通常と異なった動的環境に対する人間の運動技能の形成を調べるため、高自由度柔軟物体の移動を伴うリーチング運動の解析を行った。実験では、任意個数の質点からなる柔軟仮想物体の運動を模擬できかつ剛性と質量を任意に指定できるよう、ファントムを用いた接触インターフェースを構成した。柔軟物体を操る場合のヒトの腕の運動軌道を予測するために、手先加速度の運動時間区間にわたる二乗積分を最小化する一般的なモデルを考えた。柔軟物体操作におけるリーチング運動では、特に、高度に動的なタスクを実行するとき運動開始時に手先加速度のジャンプが観測されるが、これを従来から用いられている境界条件を課すことで再現することは困難であることを示した。この加速度のジャンプを説明するため、本研究では自然境界条件の概念を用いて問題を最定式化することにより、運動の予測精度を向上させることができることを明らかにした。次は、本研究の枠組みで、非ホロノミックシステムにおける生物学的にインスパイアされたスムーズな動作生成の解析を行いました。非ホロノミック拘束の下での巧みな運動を理解するために、平面上に置かれた半球の回転を利用した移動運動で、接触領域に制限がある場合についての運動計画を解析した。提案した計画アルゴリズムは、半球面上に書かれた滑らかな八の字を追跡するステップを繰り返すことによって構成される。非対称な八の字を生成するためにビビアニ曲線を一般化した。アルゴリズムの収束性を示すとともに、シミュレーションによって計算可能性を確かめた。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,500,000	450,000	1,950,000
2008年度	1,100,000	330,000	1,430,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,600,000	780,000	3,380,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・知能機械学，機械システム

キーワード：人間機械システム，モーションプランニング，バーチャルリアリティ，人間らしい動作，拘束運動，最適制御，ハプティックインターフェイス，非ホロノミックなシステム

1. 研究開始当初の背景

人との物理的な相互作用をともなうロボットシステムは、将来重要な役割を果たすと考えられる。また、将来のロボットは人間の運動を予測し、適応する能力を持つ必要があると考えられる。このことを可能にするため、我々は人間の運動の基礎原理を理解し、その原理を応用し、人間のような運動を予測することができる数理モデルを検討する必要がある。人間は物理的な拘束があるときとないときでは、基本的には異なる運動制御方法を利用しているように見受けられる。人間の制御システムはいかに外部環境の拘束に対処し、駆動力（筋肉）の冗長性の問題を解いているのであろうか？これらの問題に対する答えは、人間の運動の原理を理解するためでなく、外部環境と相互作用するマニピュレータのインテリジェント・ロボットシステムの開発にとっても重要な問題である。

2. 研究の目的

人間の腕の無拘束な到達運動には幾つかの不変的な特徴があることが良く知られている。しかし、腕が外部環境によって束縛されるとき、これらの特徴が保たれるかどうか、あるいは、変わるとしたらどのように変わるか、またはどのような最適規範で運動の特徴が表現できるかについては十分にはわかっていない。これらの疑問に答えることが、本研究の主要な目的である。このために、人間が身体的に拘束された環境において示す制御戦略のタイプを特定する。さらに、外部環境の制約によってもたらされる運動の冗長性を人がどのように解決しているかを明らかにする。最後に、人間の運動の生成モデルをシミュレーションソフトウェアや実ロボットシステムに実装する方法についても検討する。

3. 研究の方法

解析的研究、柔軟対象物の操作、実験条件の設定と最適規範分析。

4. 研究成果

本研究では 動的な環境下における人間らしいリーチング運動を表現する数学モデルを構築する。運動解析に関しては、通常と異なった動的環境に対する人間の運動技能の形成を調べるため、高自由度柔軟物体の移動を伴うリーチング運動の解析を行った。実験では、任意個数の質点からなる柔軟仮想物体の運動を模擬できかつ剛性と質量を任意に指定できるよう、ファントムを用いた接触インターフェースを構成した (Fig. 1)。被験者には、初期点で静止状態にある手と物体を、目標点に移動させ、目標点では手および柔軟物

体を滑らかに停止させるよう指示した。

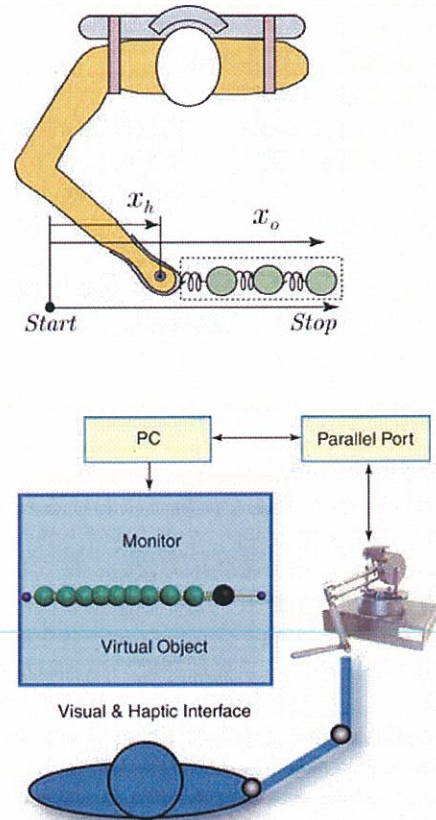


Fig. 1. Reaching movement (top) and experimental setup (bottom).

その結果、移動速度の時間変化プロファイルは、自由空間の場合に共通して見られるベル型とは異なり、本実験では質量と合成の組み合わせによっては二つの山を有する型になることが観測された (Fig. 2)。このような移動パターンを理論的に予測するために、ここでは、手の最小ジャーク移動モデルを解析的に定式化し、実験結果と合うことを確かめた。本モデルは、一つの質点だけからなる柔軟物体の場合について最近脳の計算理論の分野で提案された物体の最小クラックルモデルによる予測結果とほぼ一致する。しかし、多数の質点からなる柔軟物体の場合には明らかに異なった予測結果を与えている。この結果は、人は環境の動的な性質を考慮しつつ、手座標の空間で腕の運動計画をしていることを示唆するものである。

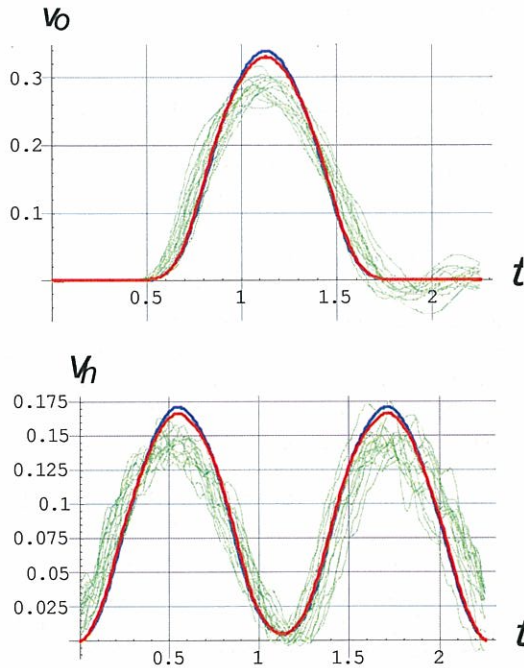


Fig.2. Object (top) and hand (bottom) velocity profiles.

次にリーチング運動について最適制御の観点から解析し、境界条件の役割について調べた。あるリーチング運動では、通常用いられる境界条件では実験データを十分に再現することができない。このため代わりに、重み係数を用いた形での新たな境界条件を提案した。提案した条件を用いることで、十分に正確に実験データを再現することができる (Fig.3)。

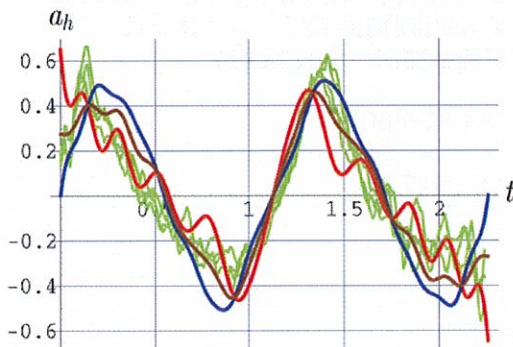


Fig.3. Hand acceleration profiles.

次は、本研究の枠組みで、非ホロノミックシステムにおける生物学的にインスパイアされたスムーズな動作生成の解析を行いました。非ホロノミック拘束の下での巧みな運動を理解するために、平面上に置かれた半球の回転を利用した移動運動で、接触領域に制限

がある場合についての運動計画を解析した。提案した計画アルゴリズムは、半球面上に書かれた滑らかな八の字を追跡するステップを繰り返すことによって構成される (Fig.4)。非対称な八の字を生成するためにビビアニ曲線を一般化した。アルゴリズムの収束性を示すと同時に、シミュレーションによって計算可能性を確かめた。

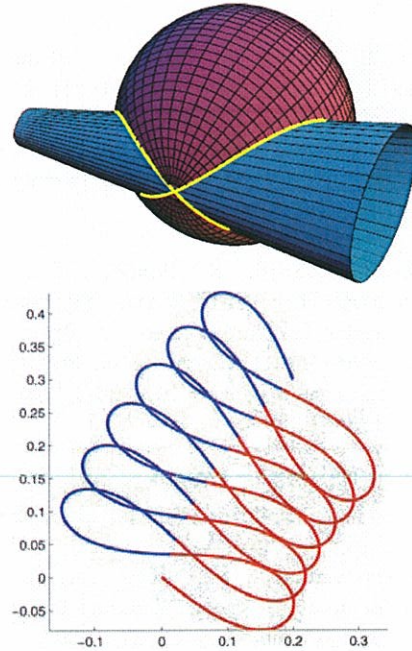


Fig.4. Figure 8-based planning.

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 2 件)

(1) I. Goncharenko, M. Svinin, S. Hosoe, "Dynamics Model, Haptic Solution, and Human-Inspired Motion Planning for Rolling-Based Manipulation," ASME Journal of Computing and Information Science in Engineering, Vol. 9, No. 1, March, 2009 (in press).

(2) M. Svinin, S. Hosoe, "Motion Planning Algorithms for a Rolling Sphere with Limited Contact Area," IEEE Transactions on Robotics, Vol. 24, No. 3, 2008, pp. 612-625.

[学会発表] (計 11 件)

(1) M. Svinin, I. Goncharenko, S. Hosoe, "On the Boundary Conditions in Modeling of Human-Like Reaching Movements," Proc. IEEE/RSJ Int. Conference on Intelligent Robots and Systems, IROS' 2008, September 22-26, 2008, Nice, France, Vol. 1, pp. 1193-1200.

The paper received Best Conference Paper Award.

(2) M. Svinin, S. Hosoe, "Planning of Smooth Motions for a Ball-Plate System With Limited Contact Area," Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation, May 19-23, 2008, Pasadena, CA, Vol. 1, pp. 1193-1200.

(3) M. Svinin, S. Hosoe, "On Motion Planning for Ball-Plate Systems with Limited Contact Area" Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation, April 10-14, 2007, Rome, Italy, pp. 1820-1825.

(4) M. Svinin, I. Goncharenko, S. Hosoe, Y. Kanou, "Modeling and Motor Learning of Reaching Movements in Virtual Environments" IEEE/ICME International Conference on Complex Medical Engineering, Beijing, China, May 23-27, 2007, Vol. 2, pp. 1298-1305.

(5) I. Goncharenko, M. Svinin, Y. Kanou, S. Hosoe, "Skilful Motion Planning with Self- and Reinforcement Learning in Dynamic Virtual Environments," The 4th International INTUITION Conference, "Virtual Reality and Virtual Environments," Athens, Greece, October 4-5, 2007, pp. 237-239.

(6) M. Svinin, S. Hosoe, "On the Dynamics and Motion Planning for a Rolling System With Variable Inertia," Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, IROS' 2007, October 29-November 2, 2007, San Diego, USA, Vol. 3, pp. 3315-3320.

(7) I. Goncharenko, M. Svinin, Y. Kanou, S. Hosoe, "Haptic Solutions and Bio-Mimetically Inspired Motion Planning Strategy for Rolling-Based Locomotion," 16th IEEE Symposium on Haptic Interfaces For Virtual Environment and Teleoperator Systems, Reno, Nevada, USA, March 13-14,

2008, pp. 153-160.

(8) I. Goncharenko, M. Svinin, Y. Kanou, S. Hosoe, "Customizing applications with RAMSIS API and case study of skillful human motion," 2nd RAMSIS User Meeting, Yokohama, Japan, June 20-21, 2007.

(9) I. Thorson, M. Svinin, S. Hosoe, F. Asano, K. Taji, "Stability metrics, design methods, and a variable stiffness actuator for use in passive-dynamic robots," Dynamic Walking III: Principles and concept of legged locomotion, 24-30 June 2007, Mariehamn, Finland.

(10) I. Thorson, M. Svinin, S. Hosoe, F. Asano, K. Taji, "Design Considerations for a Variable Stiffness Actuator in a Robot that Walks and Runs," 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会論文集, 秋田拠点センター, 2007年5月10~12日, Paper IP1-F01.

(11) I. Thorson, M. Svinin, S. Hosoe, F. Asano, K. Taji, "Quantifying Gait Robustness of Passive Dynamic Robots," 第8回 システムインテグレーション部門学術講演会論文集, 広島国際大学, 2007, paper No. 1G4-5, Vol. 1, pp. 265-266.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

M・M S V I N I N

独立行政法人理化学研究所, 運動系システム制御理論研究チーム, 研究員
研究者番号: 90274125

(2) 研究分担者

(3) 連携研究者