

平成 22 年 6 月 10 日現在

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2007～2009

課題番号：19500499

研究課題名（和文） 体性感覚による運動制御機構の解明と運動計測システムの開発

研究課題名（英文） Analysis of motor control based on somatosensory information and development of measurement system

研究代表者

太田 憲（OHTA KEN）

独立行政法人日本スポーツ振興センター国立スポーツ科学センター・スポーツ科学研究部・研究員

研究成果の概要（和文）：我々が日常行う運動の運動スキルがどのような原理に基づいてプランニングされているのかを、ヒトによる心理物理実験と最適化モデルとの比較によって明らかにした。本研究では特に、どのように体性感覚（皮膚感覚と深部感覚）の情報を利用して適切なプランを立てているのかに注目し、腕の運動の軌道計画が手先や筋の力覚情報に基づいてなされていたことを明らかにした。

研究成果の概要（英文）： When we manipulate tools or objects, the central nervous system receive force information from tactile sensors in hand and from proprioceptive signals in muscles. Such somatosensory information is crucial not only for predicting states of our movements but also for motor planning. To control tools dexterously we must execute our movements in interaction with the physical environment resulting in an appropriate force trajectory. Here we focus on the role of force sense information on planning a force interactive task. To test the claim that human use tactile information of palm and fingers for planning, we conducted comparisons between experimental and simulated data using a crank-rotation task. Our results show a close matching between the measured and predicted data.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	1,900,000	570,000	2,470,000
2008 年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2009 年度	400,000	120,000	520,000
年度			
年度			
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：健康・スポーツ科学

キーワード：運動制御，最適化，体性感覚，運動計測

1. 研究開始当初の背景

ある位置から目標位置まで手先を移動させることを考えると、取りうる軌道は無数に

存在する。しかし、随意的に運動させると、ヒトは概ねただ一つの軌道を選択する。そこで、この運動軌道がどのような原理（評価関

数, 運動規範) に基づいて決定されているのか議論する問題が運動のプランニング問題である. 運動のプランニングを検討する際には, 通常, 最適化の方法を用いるが, 本研究でも運動規範を最小にする軌道を「最適制御問題」として計算し, ヒトによる心理物理実験と比較することによって検討する.

2. 研究の目的

本研究の目的は, 我々が日常行う運動の運動スキルの解明にあり, その運動スキルがどのような原理に基づいてプランニングされているのかを, ヒトによる心理物理実験と最適化モデルとの比較によって明らかにすることにある. ここでは特に, どのように体性感覚(皮膚感覚と深部感覚)の情報を利用して適切なプランを立てているのかに注目した. また, この実験を遂行するための汎用な運動計測システムを開発する.

3. 研究の方法

(1) 心理物理実験による力覚変化最小規範モデルの検討

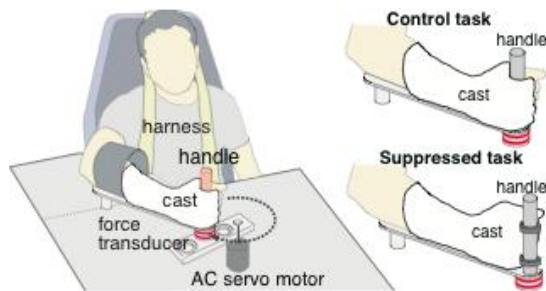


図1 片手クランクタスク

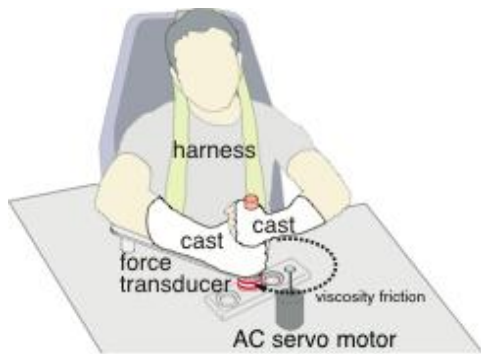


図2 両手協調タスク

クランク回転実験装置を用いて, ヒトによる片手(図1)と両手協調タスク(図2)の心理物理実験を行い, 実験結果を運動規範として「力覚変化最小規範」を用いた最適制御モデルを使ったシミュレーションによって比較検討した. 「力覚変化最小規範」がクランク回転運動のみならず, 他の一部のタスクでも運動軌道を良く再現できることをシミ

ュレーションによって確認し, 生体実験とシミュレーションによって他のタスクでも再現できることを確認した. これにより「力覚変化最小規範」が汎用的な運動規範となりうることを証明した.

(2) 体性感覚のフィードバックの検討

運動のプランニングに, 手先に働く力を実際に利用しているのかを検討した. これは, タスクを行っている最中に, 被験者の手先に働く力の体性感覚信号を抑制する実験で検討される. 具体的には, 手で直接ハンドルを握ることをできなくして, 手先からの力覚情報を抑制した. 「力覚変化最小規範」は, 「(運動指令+手先力)変化最小」の形で表現されるが, 実験結果が「力覚変化最小」ではなく, 「運動指令変化最小」で予測された軌道に近づくなら, 手先の力情報が得られないときには, 駆動入力(関節トルク又は筋力)だけを滑らかにするように運動を実現していることを意味する.

(3) 両手協調タスク

両手協調タスクでは, 両手に作用する内力の分配問題を, 「力覚変化最小規範」から導かれた以下の二つの規範の仮説より考察した. (I) 物体に働く総和の力を滑らかにする規範, (II) 個々の左右の手に働く力をそれぞれ滑らかにする規範, の二つで比較検討した.

4. 研究成果

(1) 心理物理実験による力覚変化最小規範モデルの検討

拘束運動の中でも, ドアの開閉やコーヒーマイル回しのようなタスクは幾何学的拘束下の運動であり, 手先に内力が発生する. この他に, 両手で行うタスクや多指ハンドによる把持タスクなどでも, 手先や指先に内力が発生する. この内力は冗長な力であり, 一見すると無駄な力であるが, ヒトは内力を巧みに利用してタスクを行っていた. したがって, ヒトらしい運動を再現するため, または力制御の観点からも, 運動軌道だけでなく内力も含めた適切な手先力の軌道を予測する運動規範を考える必要がある.

最適規範によって予測された軌道と, 実験で計測された被験者の軌道を比較することによって, 力覚変化最小規範の妥当性を検討した. 片手タスクの場合の実験結果と, 手先力変化最小規範, 力覚変化最小規範, 筋張力変化最小規範の予測する軌道と比較した. 手先には粘性抵抗が作用し, ヒトが行う運動では手先にとって押しやすい方向と押しにくい方向があるため, 角速度波形には押しにくい方向で力を発揮する場所でローカルミナムが生じた. また, 内力である手先力の法線方向成分にも大きな力が生じている(図3).

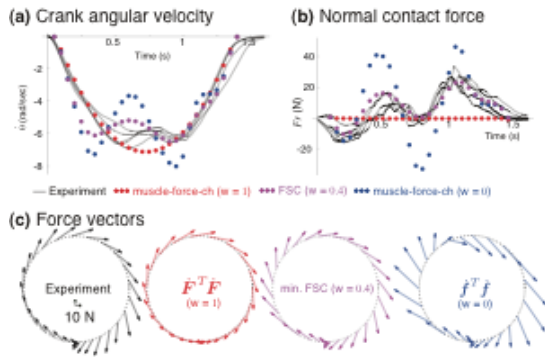


図3 片手タスク実験結果

手先力変化最小規範は手先に作用する内力を最小化しようとするため、実験結果とは大きく異なり、また角速度もベル型に近い波形を予測しており、実験で観察されるローカルミニマムを再現できなかった。一方、筋張力変化最小規範は筋力空間で滑らかな運動を予測するため、過大な内力を予測し、角速度にも非常に大きなローカルミニマムが生じてしまう。ところが、筋空間と手先空間の両空間の滑らかさを要求する力覚変化最小規範は運動をよく再現したことから、両空間での滑らかさが必要であると考えられる。

(2) 体性感覚のフィードバックの検討

手先力情報が得にくい手先力抑制実験と対照実験の結果を比較検討した。力覚変化最小規範が予測した結果との比較を図4 (a)に示した。力覚変化最小規範を用いた最適計算においては、通常、被験者やタスクが異なっても、手先力変化と筋張力変化の割合を決定する重み係数は一定の値である。しかしながら、ハンドルを直接握ることができない手先力抑制実験の場合は、手先力の感覚情報が弱まり、手先力を滑らかにすることができないと考えられ、重み係数が変化していると考えられる。そこで、重み係数 $w=0.35$ として予測した運動軌道と力軌道を、手先力抑制実験の結果として図4 (b) (d)に示した。手先力抑制実験の場合は、手先力が手のひらから直接感覚ことができず、手先力情報が得にくいため、重み係数を低くした結果とよく一致した。このことから手先力の感覚情報が最適軌道に影響を与えているということが示唆される。

(3) 両手タスクによる検討

2種類の運動規範 (I) (II) を仮定し、比較検討した。規範 (I) は道具に作用する総和の力を滑らかにするように、規範 (II) は総和ではなく、左右の各手先力を独立に滑らかにする運動規範である。重み係数 $w=0.5$ としたときの、二つの運動規範が予測した運動軌道と手先力と、実験結果を比較した結果を図5に示す。

手先力の接線方向のダイナミクスは、クラ

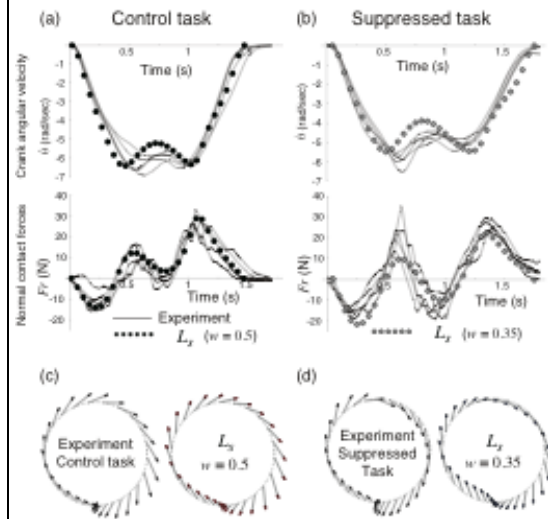


図4 片手タスク (抑制実験)

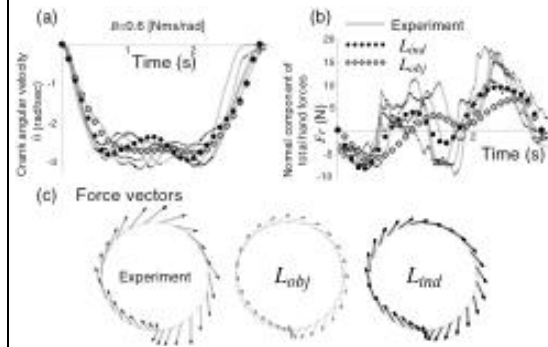


図5 両手タスク

ンクの粘性抵抗が支配的であるので、接線方向の手先力は、ほぼ角速度に比例する。そこでここでは、内力である法線方向の力成分を比較する (図5 (b)). 規範 (I) が予測する手先力の法線方向成分は内力自身を滑らかにするように予測するために、規範 (II) が予測する内力よりも滑らかな力軌道を予測するが、実験結果はそれほど滑らかではなく、規範 (II) を支持する結果を得た。また、これらの結果より、ヒトは道具に作用する総和の力を滑らかにしようとするのではなく、左右の各手先力を滑らかにするように道具を動かしていると考えられ、左右の手の力感覚情報が独立に計算され、その力を滑らかにするように学習が進んでいると考えられる。ヒトは物体を操作するとき、各手に作用する力を中枢神経系が推定していると考えられるが、運動規範 (II) を用いる場合は、中枢神経系で総和の力を推定するような複雑な計算をしなくても、左右の手の力覚を滑らかにするだけでよいので、計算論的にもヒトは合理的な方法を選択していると考えられる。

また、この運動規範がおおよそ筋力パターンを再現できることも明らかにした。

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)

[学会発表] (計5件)

- ①. K. Ohta, R. Laboissière and C. Miyaji, On the Use of Somatosensory Information for Force Interactive Task. 17th Annual Meeting of Neural Control of Movement, 査読有, Poster Abstract 0-8, Seville, Spain, Mar. 2007
- ②. K. Ohta, R. Laboissière and C. Miyaji, Force Control Trajectory Planning for Force Interactive Task. (IMEKO/SICE) The 3rd International Symposium on Measurement, Analysis and Modeling of Human Functions (ISHF2007), 査読有, 87-92, Cascais, Portugal, June. 2007
- ③. 太田 憲, R. Laboissière, 環境と相互作用する運動を予測する力覚情報に基づいた運動規範, 第1回 Motor Control 研究会, 査読無, 岡崎, 2007.6
- ④. 太田 憲, 拘束下のリーチング運動を予測する力覚変化最小規範, 計測自動制御学会システム・情報部門学術講演 (SSI2008), 査読有, pp.193-198, 姫路, 2008.11
- ⑤. 太田 憲, 幾何学的拘束下で行うリーチング運動の運動規範, 運動と健康に関する研究会, 査読無, 神戸, 2009.2

6. 研究組織

(1) 研究代表者

太田 憲 (OHTA KEN)

独立行政法人日本スポーツ振興センター
国立スポーツ科学センター・スポーツ科学
研究部・研究員

研究者番号: 10281635