

作業支援のための力覚インタフェース (仮想クーロン摩擦特性の利用とその拡張)

菊 植 亮*・武居 直行*・佐野 明人*・望 山 洋*・藤本 英雄*

*名古屋工業大学 名古屋市昭和区御器所町
*Nagoya Institute of Technology, Gokiso-cho, Showa-ku, Nagoya, Japan
*E-mail: kikuuwe@nitech.ac.jp

キーワード：作業支援 (task assistance)、クーロン摩擦 (Coulomb friction)、スライディングモード (sliding mode).
JL 0005/06/4505-0419 © 2006 SICE

1. はじめに

近年の産業現場では自動化・知能化が進む一方で、人間と機械が協調して作業を行う手法も見直されつつある。これは、多品種少量生産の生産現場においては、作業工程の全自動化にはいまだに技術的な課題が多いということが理由としてあげられよう。また、たとえ全自動化が技術的に可能であっても、高出力なアクチュエータを搭載したロボットは、安全のため、人間から隔離する必要がある。したがって、全自動化には大きな敷地面積が必要となる。さらには、その作業工程が自動化しにくい副次的な作業（たとえば人間による点検作業など）を伴う場合、人間とロボットを隔離してしまうことは効率が悪い。あるいは、ロボットによる自動作業が完全には信頼できない場合には、人間がいつでもロボットの動作に介入できるようにする必要もある。

人間とロボットが協調作業する場合、それぞれの強みと弱みを補完しあう分業体制が必要であろう。人間は状況に応じた柔軟な判断を得意とするが、発生できるパワーは限られている。この観点に基づいて、人間のパワーを増幅するロボットの開発は古くから行われている。一方で、人間の運動はあまり正確ではないが、ロボットは正確で精密な動作が得意である。その点から、人間は主にパワーを担当し、ロボットは作業の正確性を保つような補助を行うという分業も考えられる。

筆者らの研究グループではおもに、後者のタイプの作業支援に関して研究を行ってきた。そのなかでも、たとえば図1のように、軌道追従作業あるいは位置決め作業を支援するロボットの開発をおもなターゲットとしてきた。この種の作業の例としては、所定の軌跡に沿った切断、溶接、あるいは塗布作業などが考えられる。これらの比較的単純な作業を支援するためには、知能的に人間と協調するロボットよりも、単純な制御則で道具として振舞うロボットのほうが有利である。このとき作業支援ロボットは一種の力覚インタフェースとして振舞うことになり、作業の正確さを維持するのに都合がよく、なおかつ人間の随意的な動作を阻害しない力学的拘束を作り出す必要がある。安全上・機構上の制約をもつ力覚インタフェースでこのような特性を

実現する問題は、古典的な線型のインピーダンス制御や位置制御では単純には対処できない問題を数多く含んでいる。

筆者らが作業支援ロボティクスに関するプロジェクトを立ち上げたとき、最初に着目したのはクーロン摩擦特性であった。これはわれわれの日常生活において、ある意味、粘性や慣性よりも身近な動特性であるともいえる。それに関わらず、デジタル制御と力覚インタフェースの分野では積極的な利用対象とみなされることは多くない。適切な大きさのクーロン摩擦特性によって手や腕の動きを拘束して作業を行うと、手ぶれなどの不随意的運動が抑えられ、随意的な作業動作を正確に行いやすくなる。このことをわれわれは、日常生活の経験則として知っている。筆者らはこの点に着目し、離散時間で制御される力覚インタフェースに、仮想的なクーロン摩擦特性を実装するための計算モデルを提案した。また、適切な大きさの仮想クーロン摩擦特性を、作業支援のために用いることを提案した。

クーロン摩擦は古典的でありふれた物理現象であるが、筆者らの当初の予想と反して、その数学的表現はさまざまな応用と拡張の可能性をもっていた。その際立った特徴としては、受動的であること、発生力（すなわち摩擦力）に上限があること、そして、静止摩擦状態では高剛性（理論上は零アドミタンス）であることがあげられる。力覚インタフェースがクーロン摩擦特性に従って振舞っている限り、それは受動的であり、作業者にとっても安全である。また、発生力に上限があるので、アクチュエータの発生力に制限がある力覚提示装置への実装に都合が良い。また、静止摩擦状態における高剛性は、先にも述べたように、手ぶれを抑えこむための適切な拘束を作業者に与えることになる。

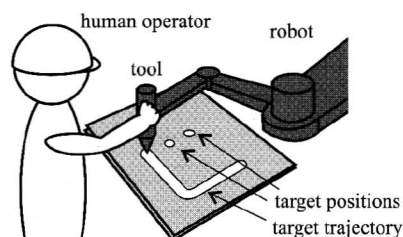


図1 軌道追従作業／位置決め作業の作業支援

本稿では、クーロン摩擦特性を出発点とし、古典的なインピーダンス制御や位置制御とは異なる視点に基づいて、作業支援のための力覚インタフェースについて解説する。まず第2章において、空間的に等方的な仮想クーロン摩擦特性の実装とその効果について概説する。つぎに第3章では、仮想クーロン摩擦の拡張である「摩擦壁」を用いた作業支援について解説する。これは、高剛性な仮想ガイドであるが、作業者の判断による逸脱を許容し、かつ、常に受動的に振舞う。さらに第4章では、仮想クーロン摩擦のもう1つの拡張である「プロクシベースト・スライディングモード制御」を用いた作業支援について解説する。これは、高剛性でありながら人間の動作と同程度の滑らかさで人間の動作を誘導する手法である。最後に第5章でまとめと今後の展望を述べる。

2. 等方的なクーロン摩擦特性による随意作業の支援

まず図1のように、ロボットと作業者が1つのツールを操作する作業において、目標軌道や目標位置がロボットには与えられていない状況を考える。このとき作業者は、自らの判断に基づいて、自らがイメージした軌道に沿って動作する必要がある。しかし、人間の動作は自らの意図に対して正確ではなく、神経系のノイズなどによって常に低周波のゆらぎが存在する。このゆらぎはわれわれの日常生活でさえ無視できるものではなく、たとえば写真を撮るときなどでも空中で手を静止させることは難しい。そもそも随意運動の軌道は、ノイズの影響を統計学的に最小化するように生成されているという仮説もある²⁾。

このとき作業支援ロボットは、作業者が自らのイメージどおりに正確に効率よく動作できるように、適切な力学的拘束を作り出す必要がある。筆者らはこの目的のために、クーロン摩擦特性に着目した。クーロン摩擦力は日常の環境の至る所に存在し、日常の手作業にも不可欠のものである。たとえば紙に字を書くときにも、手首を机に置いて手ぶれを抑える必要がある。また、紙を半分に折って角と角を合わせる作業を考えてみても、紙面と紙面との間の摩擦力がなければ位置合わせがしにくい。あるいは摩擦が少ないプラスチック板の上にボールペンで字を書くような状況を考えると、ペン先と対象物との間にも適度な摩擦が必要であることがわかる。このように考えると、正確な位置決め作業や軌道追従作業のためには、適度な大きさのクーロン摩擦力が必要であるということがわかる。ただしこのとき、静止摩擦係数と動摩擦係数の差が大きい場合は、作業のパフォーマンスが落ちるという実験結果もある³⁾。したがって作業支援の目的のためには、最大静止摩擦力と動摩擦力の差がないクーロン摩擦特性が適していると考えられる。

平面内での作業においては、たとえばなめらかな紙面のように、等方的で、適度な大きさで、最大静止摩擦力と動

摩擦力に差がないクーロン摩擦特性が適していると考えられる。しかし、このような特性を、ブレーキやダンパなどの受動的なハードウェアを用いて作ることは非常に難しい。たとえば、同程度に摩擦がある2つのスライダを直交させれば、2次元のクーロン摩擦特性を作ることができる。しかしこの場合、摩擦力は2つのスライダからの摩擦力の合力となり、等方的にはならない。すなわち、受動リンク機構の関節摩擦を利用して多次元空間で等方的なクーロン摩擦特性をつくることは技術的に困難であるといえる。

アクチュエータをもつアクティブな力覚インタフェースにクーロン摩擦特性を実装する問題も単純ではない。速度 v で固定面上を滑っている質点に働く摩擦力 f は

$$f = -Fv/\|v\| \quad (1)$$

とあらわされる。ここで F は動摩擦力の大きさをあらわす正の定数である。この定義は $\|v\| = 0$ において不定であるが、このとき摩擦力は、外力と平衡して速度を零に保つように働く。(1) 式の定義は零速度において速度に対して不連続であるので、離散時間系にそのまま使用すると、零速度近傍での切替の繰り返しによってチャタリング(高周波振動)が発生する。これを防ぐための最も一般的な方法は、速度に閾値を設けてその閾値以下の速度は零とみなし、そのときに限って外力と平衡するように摩擦力 f を決定する方法である。この手法の代表例は Karnopp モデル⁴⁾ とよばれ、いくつかのバリエーションもある^{3), 5)}。ただし、この閾値には物理的な意味がなく、閾値の設定の仕方によってはチャタリングを除去できなかったり、閾値以下の低い速度でドリフトしたりすることになる。

筆者らは既報において、2つの離散時間摩擦モデルを提案している。これらは連続時間のクーロン摩擦モデルの後退(陰的) Euler 近似に基づいており、チャタリングもドリフトも生じない。そのうち1つのアドミッタンス型(力入力/運動出力型)摩擦モデル^{6), 7)}は、図2のような構造をもつ。これは、外力 h と摩擦力 f が加わる質点 M の速度 v を決定するモデルであり、外力 h を入力とし、速度 v を出力とする。図2中のフィードバックには時間遅れが存在しないと仮定し、Euler 近似に基づいてこのシステムを表現すると、下式のようになる。

$$f(k) = -Fv(k)/\|v(k)\| \quad (2a)$$

$$M(v(k) - v(k-1))/T = f(k) + h(k) \quad (2b)$$

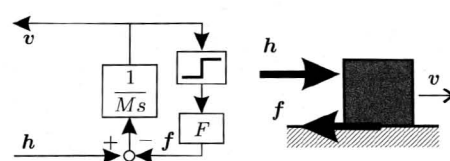


図2 アドミッタンス型クーロン摩擦モデル^{6), 7)}

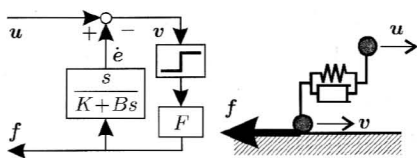


図3 インピーダンス型クーロン摩擦モデル^{7), 8)}

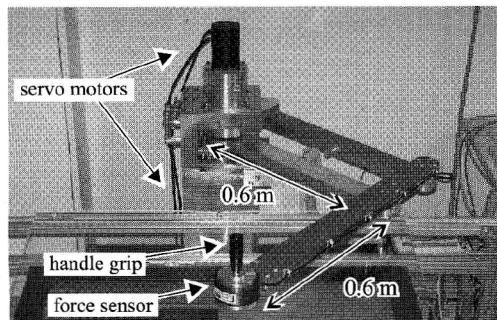


図4 実験に用いた力覚インタフェース

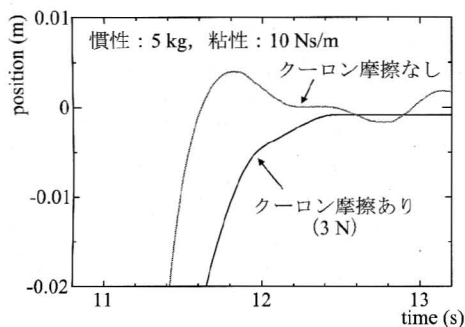


図5 位置決め作業⁹⁾

ここで変数の添え字は離散時間のインデックスをあらわす。この式は2つの未知数 $f(k)$ および $v(k)$ についての代数方程式であり、簡単な計算手順によって解くことができる。力覚インタフェースの力センサで計測された力の値を $h(k)$ に代入し、(2)式を満たす速度 $v(k)$ を計算し、それを力覚インタフェースの速度制御器へ目標速度として指令することで、仮想クーロン摩擦特性を実現することができる。同様の手法で、図3に示すようなインピーダンス型（運動入力／力出力型）の摩擦モデルも提案しているが、詳細については既報^{7), 8)}を参照されたい。

図4のような力覚インタフェースにアドミタンス型クーロン摩擦モデルを実装し、位置決め作業を行った⁹⁾。このときの作業者の動作を図5に示す。仮想クーロン摩擦特性を用いたときには、目標位置近傍に達した後、完全な停止ができていた。しかし、クーロン摩擦特性を含まない慣性と粘性のみのアドミタンス制御（位置制御ベースのインピーダンス制御）を行った場合には、到達した後も小さな動きが持続している。

なお、仮想クーロン摩擦特性は従来のインピーダンス制

御と組み合わせることが容易である。通常、インピーダンスは剛性、粘性、および慣性の線型和として表現されるが、これに「塑性 (plasticity)」を追加したインピーダンスがデジタル制御によって実現できることになる。作業支援のために、さまざまな形態の可変インピーダンス制御が考案されているが^{10)~13)}、これらは比較的大きい動作の行いやすさに寄与するものといえる。ここで紹介した仮想クーロン摩擦特性は特に停止時や小さい動作を行うときの、ゆらゆらとした頼りない操作感をなくし、ドリフトを防ぐことに寄与するものであるといえる。したがって作業支援の目的のためには、仮想クーロン摩擦特性は各種可変インピーダンス制御と組み合わせて用いると有効であると期待できる。

3. 「摩擦壁」による既知軌道追従作業の支援

つぎに、図1のような作業において、ツールを動かすべき目標軌道や目標位置がロボットにあらかじめ与えられている状況を考える。目標軌道の情報をロボットに与えるためには、ワーク（作業の対象物）の位置決めや位置測定が必要となるが、これらの技術的課題がクリアできれば、前章の問題設定よりも正確な作業の遂行が可能となる。このような状況でも、たとえば、ロボットの出力が制限されていてロボット単独では作業が遂行できない場合、信頼性が確保できずに作業者の介入が随時必要である場合、あるいは、並進運動は自動化できるが回転運動については作業者の操作が必要な場合などは、作業の全自動化は難しい。

目標軌道がロボットの制御器に与えられている場合の作業支援は一見簡単に見える。たとえば紙の上に直線を描くときの定規のような、高い剛性の仮想ガイドを作る方法が考えられよう。このためには、高剛性の位置制御を用いるのが最も単純である。ただし、この方法にはいくつかの問題がある。まず、仮想ガイドはできるだけ高剛性であるほうが作業が正確になるが、作業者はときに自らの判断によって、仮想ガイドに逆らった行動をとる必要がある。すなわち、仮想ガイドは高剛性でありながら逸脱を許容するものでなければならない。そして、作業者の判断による動作を妨害しないために、仮想ガイドから働く力はいかなる場合でも受動的であることが望ましい。この問題は、古典的なインピーダンス制御や位置制御では対処しにくい。

作業者の判断による逸脱を許容するためには、高剛性だが反力がある大きさに飽和してしまう仮想ガイドを考えることができる。図4の力覚インタフェースにこのタイプの仮想ガイドを実装したときのデータを図6（上）に示す。作業者は、ある力以上の力でツールを押すことによって、目標軌道から逸脱することができる。ただしこの間、ツールには常に一定の力が加わり続けることになり、仮想ガイドは受動的ではなくなる。ツールが仮想ガイドから逸脱したときには、ガイド上へ誘導するための別のガイドを動的に

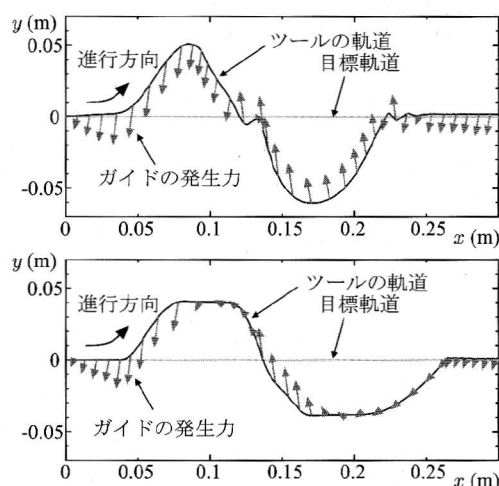


図6 飽和・剛性型仮想ガイド(上)と「摩擦壁」(下)からの反力

生成するという方法も提案されている¹⁴⁾が、アルゴリズムが複雑になるという欠点もある。

筆者らは前節の仮想クーロン摩擦特性を数学的に拡張して、常に受動的な仮想ガイド「摩擦壁 (frictional wall)」を作る手法を提案している¹⁵⁾。これは一種の異方性のクーロン摩擦特性である。「摩擦壁」の法線方向および接線方向をあらわす単位ベクトルをそれぞれ $\mathbf{n}$ および $\mathbf{t}$ とすると、「摩擦壁」からの反力 $\mathbf{f}$ は下記の式で与えられる。

$$f_n = \begin{cases} -F_w(\mathbf{n}^T \mathbf{v})/|\mathbf{n}^T \mathbf{v}| & \text{if } (\mathbf{n}^T \mathbf{x})(\mathbf{n}^T \mathbf{v}) > 0 \\ -F(\mathbf{n}^T \mathbf{v})/|\mathbf{n}^T \mathbf{v}| & \text{if } (\mathbf{n}^T \mathbf{x})(\mathbf{n}^T \mathbf{v}) < 0 \end{cases} \quad (3a)$$

$$f_t = -F(\mathbf{t}^T \mathbf{v})/|\mathbf{t}^T \mathbf{v}| \quad (3b)$$

$$\mathbf{f} = f_n \mathbf{n} + f_t \mathbf{t} \quad (3c)$$

ただし、 $F_w \gg F \geq 0$ である。この「摩擦壁」は、前章と同様の手法で、離散時間系に実装することができる。図4の力覚インタフェースに「摩擦壁」方式の仮想ガイドを実装したときのデータを図6(下)に示す。この方法を用いると、作業者が「壁」(ガイド)から遠ざかる方向に進むときには、それを妨げる方向に抵抗力(大きさ F_w の摩擦力)が働く。一方、ガイドへ近づく方向へ進むときには、ガイド方向への復元力ではなく、小さな摩擦力(大きさ F の摩擦力)のみが働く。これはいわば、消極的な作業支援であるといえる。いずれの場合も摩擦力は速度と反対方向に加わるので、「摩擦壁」は常に受動的である。

4. スライディングモード制御による既知軌道追従作業の支援

受動的な「摩擦壁」の方法とは別に、筆者らは、既知軌道追従作業を能動的に支援する方法についても研究を行っている。この問題は一見、前章の問題よりもさらに簡単に見

える。前節では受動性を保つために、自然界には存在しない特殊なクーロン摩擦特性を用いたが、今回の問題設定ではロボットが能動的に振舞うことが許される。一見したところ、古典的な位置制御で対処できる問題のように見える。

ただしここでも、目標軌道から外れた際のロボットの応答特性には注意を払う必要がある。筆者らは現在、作業者自身が自らの意思で軌道に追従しようとする動きと、ロボットが制御によって目標軌道へ到達しようとする動きは、同程度に「滑らか」である必要があると考えている。具体的には、位置制御の時定数(微分ゲインと比例ゲインの比)が人間とロボットとの間で同程度である必要があるのではないかと考えている。

現在のところ、この仮説の理論的な正当化はできていない。しかし、たとえば、ロボットの位置制御の時定数が人間の位置制御の時定数よりも小さい(すなわち、ロボットのほうが速応性が高い)場合を考えてみよう。この場合、ロボットは作業者にとって急な加減速を繰り返すことになるので、作業者はロボットに振り回されるような作業感覚を受けると想像できる。特にロボットの力が人間の力を下回る場合は、ロボットは人間の緩慢で不正確な動きをうまく誘導することができず、結局オーバーシュートが生じてしまうことになると思える。

人間の随意運動の滑らかさに関しては、周波数特性に着目した研究報告がいくつかある。Mann ら¹⁶⁾は日常生活の手首動作の支配的な周波数成分は1 Hzであり、エネルギーの75%は5 Hz以下であると報告している。Hollerbach¹⁷⁾は文字を書く際の人間の手の動きを計測している。その計測データによると手の動きの周波数はおよそ7 Hz以下である。Riviere ら¹⁸⁾は、訓練された眼科外科医が行う模擬眼科手術における手の動きを計測し、随意運動の総パワーの98.9%は2 Hz以下であると結論づけている。人間は折点周波数が2 Hzの一次遅れ系であるという若干乱暴な仮説を立てると、人間の位置制御の時定数は $1/(2\pi \times 2) \approx 0.1 \text{ sec}$ 程度と考えることができる。

比例ゲイン(剛性)が κ で時定数が H のPD位置制御則は下記の式で与えられる。

$$\mathbf{f} = \kappa(\mathbf{p}_d - \mathbf{p}) + \kappa H(\dot{\mathbf{p}}_d - \dot{\mathbf{p}}) \quad (4)$$

ここで、 $\mathbf{p}$ は現在位置、 $\mathbf{p}_d$ は目標位置、 $\mathbf{f}$ はアクチュエータ出力である。剛性 κ をシステムの安定限界近くまで大きく設定し、時定数 H を0.1 sec程度に設定すると、微分ゲイン κH が非常に大きくなってしまふ。これは、速度信号に通常含まれている観測ノイズを増幅してしまい、望ましくない。筆者らはこの難点を回避するために、擬似的なスライディングモード制御の適用を提案している²⁰⁾。(4)式において剛性 κ を無限に大きくし、アクチュエータ出力 $\mathbf{f}$ の大きさの上限 F を考慮すると、制御則は下式のように

なる。

$$f = Fs/\|s\|, \quad s = p_d - p + H(\dot{p}_d - \dot{p}) \quad (5)$$

これは、 $s = \mathbf{0}$ であらわされる超平面を拘束超平面とするスライディングモード制御則である。つまり、高剛性で適度に滑らかな誘導のために理想的な制御則は、結局のところ、(5) 式のスライディングモード制御則であるということになる。

スライディングモード制御の(5)式は、クーロン摩擦特性の(1)式と同様に、不連続な切り替えを有している。したがって、離散時間のクーロン摩擦モデルを拡張することによって、スライディングモード制御則を離散時間系への実装に適した形に改変することができる。筆者らはこの擬似的なスライディングモード制御則を「プロクシベースト・スライディングモード制御」¹⁹⁾と呼んでいる。その構造を図7に示す。これは図3のインピーダンス型クーロン摩擦モデルの拡張でもあり、アクチュエータ出力に上限を設けたPID制御の拡張でもある。(5)式と同等の制御則をプロクシベースト・スライディングモード制御を用いて実装すると、システムの限界に近い高いサーボ剛性と、大きい時定数 H で目標軌道へ収束する滑らかな動特性とを両立することができる。

図4の実験装置にプロクシベースト・スライディングモード制御の制御則を実装し、8の字運動の目標軌道の追従作業支援を行った²⁰⁾。図8はその結果である。「支援なし」のときはアクチュエータは力を発生せず、作業者はロボットの関節摩擦（およそ 10 Nm）に逆らって追従作業を行う必要がある。一方「支援あり」の場合は、アクチュエータはプ

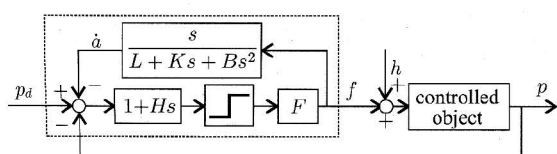


図7 プロクシベースト・スライディングモード制御¹⁹⁾

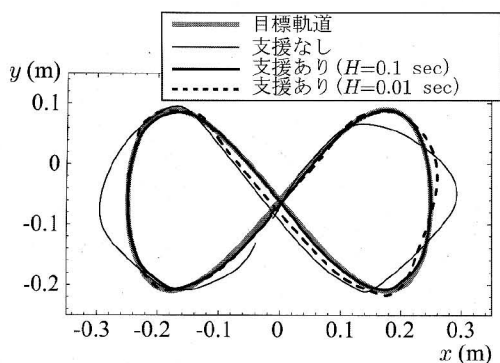


図8 プロクシベースト・スライディングモード制御による軌道追従作業の支援²⁰⁾

ロクシベースト・スライディングモード制御に基づいて最大 7 Nm のトルクを発生している。図8から明らかなように、アクチュエータからの支援によって追従が正確になっている。また、時定数 H が 0.1 sec のときに最も正確に追従できている。それに対して、時定数 H を小さい値 0.01 sec に設定したとき（すなわち速応性が高いとき）には、目標軌道の交差（オーバーシュート）の繰り返しによって、追従性能がかえって低下しているのが見て取れる。すなわちこの実験結果は、軌道追従作業の支援には適度な滑らかさが必要であるということを示している。

5. おわりに

本稿では、古典的なインピーダンス制御や位置制御とは異なる視点から、作業支援のための力覚インタフェースについて解説した。われわれの日常生活で身近な存在であるクーロン摩擦特性を用いた制御則と、それを拡張してできた制御則は、作業支援ロボティクスにおいてさまざまな用途をもちうることを示した。

なお、本稿で紹介した手法は、生産現場での作業支援以外にも応用できると考えられる。たとえば、第2章で解説した摩擦特性による手ぶれの抑制は、微細手術の支援²¹⁾にも用いることができよう。また、第3章や第4章で解説した既知軌道への追従作業の支援手法は、手術のナビゲーション¹⁴⁾や、リハビリテーション²²⁾、あるいは人間に対する動作教示や技能訓練^{23), 24)}などへの応用も期待できる。これらの応用の可能性を探ることは今後の課題である。

(2006年2月9日受付)

参考文献

- 1) H. Kazerooni: Human-robot interaction via the transfer of power and information signals, *IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics*, **20**-2, 450/463 (1990)
- 2) C. M. Harris and D. M. Wolpert: Signal-dependent noise determines motor planning, *Nature*, **394**, 780/784 (1998)
- 3) C. Richard and M. R. Cutkosky: The effects of real and computer generated friction on human performance in a targeting task, In *Proc. of the 2000 Symp. on Haptic Interfaces for Virtual Environments and Teleoperator Systems*, 1101/1108 (2000)
- 4) D. Karnopp: Computer simulation of stick-slip friction in mechanical dynamic systems, *Trans. of ASME: Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, **107**-1, 100/103 (1985)
- 5) D. D. Quinn: A new regularization of Coulomb friction, *Trans. of ASME: Journal of Vibration and Acoustics*, **126**-3, 391/397 (2004)
- 6) 菊植, 武居, 佐野, 望山, 藤本: 有限時間で零速度に収束する不連続摩擦モデル, 第10回ロボティクスシンポジウム予稿集, 215/220 (2005)
- 7) R. Kikuuwe, N. Takesue, A. Sano, H. Mochiyama and H. Fujimoto: Fixed-step friction simulation: From classical Coulomb model to modern continuous models, In *Proc. of the 2005 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, 3910/3917 (2005)
- 8) 菊植, 藤本: インピーダンス型離散時間摩擦モデル, 日本ロ

ロボット学会学術講演会講演論文集, 3A13 (2005)

- 9) 武居, 菊植, 佐野, 望山, 藤本: 力学的作業アシストアプローチ, 精密工学会生産自動化専門委員会研究例会講演前刷集, No. 2005-2, 1/10 (2005)
- 10) T. Tsumugiwa, R. Yokogawa and K. Hara: Variable impedance control based on estimation of human arm stiffness for human-robot cooperative calligraphic task, In *Proc. of the 2002 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, 644/650 (2002)
- 11) 山田, 鴻巣, 森園, 梅谷: 自動車組立工程における搭載作業のためのスキルアシストの提案, 日本機械学会論文集 C 編, 68-666, 509/516 (2002)
- 12) 加藤, 池浦, 中村, 水谷: パワーアシスト装置のインピーダンス制御とパラメータ推定, 日本機械学会東海支部三重地区講演会講演論文集, 156/157 (2003)
- 13) 武居, 澤田, 菊植, 佐野, 望山, 藤本: 位置決め作業における可変インピーダンス制御手法, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2005 講演論文集, 1P2-N-064 (2005)
- 14) A. Bettini, P. Marayong, S. Lang, A. M. Okamura and G. D. Hager: Vision-assisted control for manipulation using virtual fixtures, *IEEE Trans. on Robotics*, 20-6, 953/966 (2004)
- 15) N. Takesue, R. Kikuuwe, A. Sano, H. Mochiyama and H. Fujimoto: Tracking assist system using virtual friction field, In *Proc. of the 2005 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, 2134/2139 (2005)
- 16) K. A. Mann, F. W. Wernere and A. K. Palmer: Frequency spectrum analysis of wrist motion for activities of daily living, *Journal of orthopaedic research*, 7-2, 304/306 (1989)
- 17) J. M. Hollerbach: An oscillation theory of handwriting, *Biological Cybernetics*, 39, 139/156 (1981)
- 18) C. N. Riviere, R. S. Rader and P. K. Khosla: Characteristics of hand motion of eye surgeons, In *Proc. the 19th Annual Conf. of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, 4, 1690/1693 (1997)
- 19) R. Kikuuwe and H. Fujimoto: Proxy-based sliding mode control for accurate and safe position control, In *Proc. of the 2006 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation* (2006) (in press)
- 20) R. Kikuuwe, T. Yamamoto and H. Fujimoto: Low-force kinesthetic guidance for accurate positioning and tracking, In *Proc. of the 14th Symp. on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems*, 491/498 (2006)
- 21) R. Taylor, P. Jensen, L. Whitcomb, A. Barnes, R. Kumar, D. Stoianovici, P. Gupta, Z. Wang, E. deJuan and L. Kavoussi: A Steady-Hand Robotic System for Microsurgical Augmentation, *International Journal of Robotics Research*, 18-12, 1201/1210 (1999)
- 22) B. T. Volpe, H. I. Krebs, N. Hogan, L. Edelstein, C. Diels and M. Aisen: A novel approach to stroke rehabilitation: Robot-aided sensorimotor stimulation, *Neurology*, 54, 1938/1944 (2000)
- 23) Y. Yokokohji, R. L. Hollis, T. Kanade, K. Henmi and T. Yoshikawa: Toward machine mediated training of motor skills—skill transfer from human to human via virtual environment—, In *Proc. of the 1996 IEEE Int. Workshop on Robot and Human Interactive Communication*, 32/37 (1996)
- 24) B. Forsyth and K. E. MacLean: Predictive haptic guidance: Intelligent user assistance for the control of dynamic tasks, *IEEE Trans. on Visualization and Computer Graphics*, 12-1, 103/113 (2006)

[著者紹介]

菊 植 亮 君(正会員)



2003 年京都大学大学院工学研究科博士後期課程研究指導認定退学。現在, 名古屋工業大学寄附講座助手。博士(工学)。触覚センシング, 作業支援ロボティクスなどの研究に従事。日本ロボット学会, 日本機械学会, IEEE の会員。

武 居 直 行 君(正会員)



2000 年大阪大学大学院工学研究科電子制御機械工学専攻博士後期課程修了。現在, 名古屋工業大学寄附講座助教授。博士(工学)。ロボットの運動制御, 触覚テクノロジー, 人間・機械系などの研究に従事。日本機械学会, 日本ロボット学会, 電気学会, 精密工学会, IEEE の会員。

佐 野 明 人 君(正会員)



1987 年 3 月岐阜大学大学院工学研究科精密工学専攻修士課程修了。現在, 名古屋工業大学大学院工学研究科教授。触覚テクノロジー, 人間・機械系, 受動歩行の研究に従事。2004 年度日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス部門一般表彰(ROBOMEC 表彰), 2005 年度本会論文賞・友田賞などを受賞。2005・2006 年度本会会誌編集委員。日本機械学会(フェロー), 日本ロボット学会等の会員。博士(工学)。

望 山 洋 君(正会員)



1998 年北陸先端科学技術大学院大学情報科学研究科情報システム学専攻博士後期課程修了。現在, 名古屋工業大学寄附講座助教授。博士(情報科学)。触覚情報処理メカニズムの研究に従事。日本ロボット学会, 日本機械学会, IEEE の会員。

藤 本 英 雄 君(正会員)



1970 年名古屋大学工学部機械学科卒業。現在, 名古屋工業大学教授。ものづくりテクノセンター長。医学工学や感性の工学, ロボティクスなどに興味をもつ。ASME 最優秀論文賞, 2004 年度グッドデザイン賞など多数受賞。スケジューリング学会会長, 文科省科学技術・学術審議会文化資源委員会委員, 本会常務理事部門協議会議長, 本会中部支部支部長など歴任。現在, 愛知県ものづくり人材育成協議会座長, 日本機械学会フェロー・評議員。工学博士。