

時間の扱い、アルゴリズムの違い、事前知識の扱い、具体的な実現方法などに違いがある。また、処理のモデルとして事前に設定する内部モデルの機能にも依存するが、事前知識として内部モデルが存在する場合とそうでない場合とでは、処理が大きく違ってくる。

リアルタイムパラレルプロセッシング

一般的に、並列処理の実行とリアルタイム性の実現は、相容れない課題である。ネットワーク技術においても同様であり、並列の構造の中でハードリアルタイムを実現することはきわめて難しい技術と言える。加えて、ネットワークにおいては、伝送遅延の問題も発生し、その影響は小さくない。

ところが、センシングの構造の中では、センサ情報間の同期性やサンプリングの高速性や稠密性が求められている。山崎と石川らはこのことをリアルタイムパラレルプロセッシングの問題と称して早くから問題を提起している[3]が、現在のネットワークの基本構造からは実用的な回答はなかなか得られていない。

スケジューリングの問題としてはタイムスロットのような単純なモデルの採用も含め、再度検討する必要がある。ハードリアルタイムの実現が困難であれば、処理アルゴリズムが許す限りにおいて、プレディクタブル(タスク実行開始時に実行時間の最大値が予測できる)、あるいはリミッタブル(実行時間の最大値が設定できる)リアルタイムの実現が望まれる。あるいは、ハードウェアの問題としてハードリアルタイムを保証したタスクスイッチの実現が待たれている。

インテンショナルセンシング

多数のセンサ情報を前提とした内部モデルに基づくセンシング構造は、内部モデルのパラメータを最適化演算によって求めることを示唆している。もちろん、多くの場合、センサ情報と出力情報の関係はスパースであり、時として不良設定問題となりうるが、正則化のプロセスを含めて(非線形)最適化問題として定式化が可能である。

ところが、このパラメータ探索空間は、増加するセンサの数に伴い指数的に増大するため、何らかの手段を持って探索空間を狭めることが必要となる。一般に、アクティブセンシングは遠心性の情報をセンシングに利用するものであるので、この探索空間を狭めるのに、大きな役割を担っている。

このことを拡張すれば、次のような整理が可能である。

システムにおける処理の設計の観点から、処理の目的の設定が最適化処理のプロセスに有効に働くことになる。つまり、センシングには必ず、何をセンシング対象とするか、センサ情報をどう利用するかといった「センシングの意図」が存在し、その「センシングの意図」により、センシング構造を規定し、探索空間を狭めるという考え方であり、石川らはこの設計思想をインテンショナルセンシングと呼んだ[2][3]。また、文献[3]の中では、能動的な認識の思想的な背景と実現形態が論じられている。

インテンショナルセンシングの実現のためには、センシングの意図を明示的に記述でき、それをもとにセンシング構造や処理構造、ネットワーク構造が規定でき、可能ならばそれらが自律的に構成される仕組みが必要である。

タスク分割

階層的並列分散構造を基本として、リアルタイム性を維持したセンシングアーキテクチャを実現するためには、タスク分割の問題も解かねばならない。前述した階層的並列処理アーキテクチャの中では、Brooks がある程度言及しているが、それ以外のモデルでは、タスク分割は事前に既知のものであるとしている。

しかしながら、リアルタイム性の実現、階層性の実現には、タスク分割の手法が明示的に示される必要があり、ましてやプロセッシングモジュールのダイナミックな分割・配置を行うおうとすれば、避けて通れない課題である。

並木らは、リアルタイム性に向けた階層的タスク分解の問題に対して、直交分解という考え方を提案しロボットのセンサフィードバック制御に適用している[8]。ただし、この方法は、一般解を示したのではなく個別解を示したに過ぎない。

データセントリックな処理が叫ばれる中で、タスク分割の問題の解決は急務である。

ダイナミクス整合

対象となる現象や要求仕様、あるいはシステムに存在するモジュールはすべてダイナミクスを有している。これらのダイナミクスは、一部に不十分なものが存在すれば、それをもってダイナミクスに関連する情報に欠落が生じ、制御に予測を入れる必要が生じ、フィードバック制御の安定性に疑問が生じる。

そこで、Ishikawa らは、物理制約のある対象のダイナミクスに、設計可能なモジュールのダイナミクスを合わせるようにモジュールの設計を行うことを提案し、この設計思想をダイナミクス整合と呼んでいる[9]。この思想の元に、ロボットの視覚制御システムを根底から改革し、ビジョンチップと呼ばれる高速画像処理を用いて、ダイナミクス整合を実現した高速ロボットシステム等、多数のセンサ情報を用いた様々な応用システムを実現している[10]。

3. ネットワーク技術

これらに対して、ネットワーク技術の急速な進歩は、任意のノードから任意の情報が得られることを目標としており、データの時間的・空間的な構造よりは、データへのアクセスの時間多重化が図られてきた。このことは時間軸、空間軸の一部の機能を犠牲にすることにより、利便性やアクセシビリティの向上を優先していることになり、結果として多大な効果を生み出してきた。この中では、パケット通信を軸としてプロトコルベースの処理構造がその中心をなしてきた。

これらから見てくるネットワーク技術の課題を以下に挙

げる。

ネットワークダイナミクス

センサネットワークを考えたとき、上述の構造は、ネットワークが提供する処理・伝送にかかる最悪時間に比較して静的と見なせる対象に対しては効果的であるが、より高度な処理を想定したとき、時間的・空間的に稠密なセンサデータの扱いにおいては限界が存在し、その解消のためには、ネットワークの構造自体を根底から見直す必要がある。あるいは、対象の把握に必要なサンプリングを満たさないことを前提として、そのようなセンサデータに対してもロバストな処理アルゴリズムの開発が必要である。

データセントリックなネットワーク

従来、アプリケーションレベルの処理は利用者のノードで記述されていたのに対して、センサの知能化が進むにつれて、その記述がネットワークレベルにも降りてきているということもセンシングの構造からは未解決の問題となる。このことは、タスク分割をセンサの構造も含めて考える必要があることを意味しており、センシングの知能化の観点から大きな可能性が存在すると同時に、前述したようなセンシングの構造の実現がより困難になることも否定できない。現状のままでは、限られた用途や条件に限定して機能するネットワークとならねない。

さらに、今後予想されるセンサの数の増加は、ネットワークの負荷を指数的に増加させることとなり、伝送遅延を増加させ、タスク分解やスパースネスの把握を困難にする可能性が高い。このことは、ディペンダビリティの観点から、きわめて重要と思われるバックトラッカビリティの実現に対して、否定的な問題を含んでいる。

4. 解くべき問題

以上の考察から、センサネットワークが解くべき問題を私見として以下に整理する。ただし、ここに挙げた問題は、課題のすべてを表現するものではなく、他にも解くべき問題は存在する。

- ① 従来のセンシング手法をネットワーク上に仮想的に実現することは可能か？ また、その効果は？
- ② センサネットワーク上で、ハードリアルタイム、プレディクタブルリアルタイム、あるいはリミッタブルリアルタイムを実効的な応用(1ms 以下のサンプリングを想定)に対して実現可能か？
- ③ 誤差を有するタイムスタンプを持つセンサデータに対して、ロバストな処理は実現可能か？ また、一部に無限のサンプリング間隔の可能性が存在するネットワークに対して、ロバストな処理は実現可能か？
- ④ 誤差を有するセンサの位置情報に基づく、対象の認識は可能か？ 少数の(センサ位置に関する)キャリブレーションノードから、アンキャリブレーションノードを含む

ネットワーク全体の精度を上げる効果的な方法は？

- ⑤ 既知のセンシングモデルに対して、階層的並列分散構造をもつネットワーク上で有効なタスク分解を実現する一般的手法は？
- ⑥ 未知のセンシングモデルに対して、アダプティブにモデルを変更可能な処理構造は可能か？
- ⑦ センサの数 n 、内部モデルのパラメータの数 m に対して、 $O(1)$ あるいは $O(n)$ 、 $O(m)$ の時間で解ける一般的なセンシングアーキテクチャは？
- ⑧ データセントリックな処理をオーバーヘッドなし(要求仕様を満たすという意味)で実現する方法は？
- ⑨ ネットワーク記述から、仕様を満たす範囲でサブネットワークモデルを自動抽出する方法は？
- ⑩ バックトラッカビリティを有するネットワークアーキテクチャ、特に事故やエラーが起こったときに原因の同定を可能とするアーキテクチャは？

5. おわりに

今後のセンサネットワークの方向性に対して、センシングの構造とネットワークの構造からその課題を整理し、両者の真の融合を実現するための解くべき問題を提起した。関連分野の今後の研究開発は、ここで提起された問題に対して実効的な解を与えるものであることを期待する。

文 献

- [1] 石川正俊: センサフュージョンシステム - 感覚情報の統合メカニズム -, 日本ロボット学会誌, Vol.6, No.3, pp.251-255, 1988
- [2] 石川正俊: センサフュージョンの課題, 日本ロボット学会誌, Vol.8, No.6, pp.735-742, 1990
- [3] センサフュージョン - 実世界の能動的理解と知的再構成 -, 山崎弘郎, 石川正俊(編), コロナ社, 1992
- [4] 鏡慎吾, 石川正俊: センサフュージョン - センサネットワークの情報処理構造 -, 電子情報通信学会論文誌 A, Vol.J88-A, No.12, pp.1404-1412, 2005
- [5] J.S.Albus: Brains, Behavior, and Robotics, McGraw-Hill, 1981
- [6] T.C.Henderson, W.S.Fai, and C.Hansen: MKS: A Multisensor Kernel System, IEEE Trans. Syst., Man, Cybern., Vol.SMC-14, No.5, pp.784-791, 1984
- [7] R.A.Brooks: A Robust Layered Control System for a Mobile Robot, IEEE J. Robotics and Automation, Vol.RA-2, No.1, pp.14-23, 1986
- [8] 並木明夫, 石井抱, 石川正俊: 高速センサフィードバックに基づく把握行動, 日本ロボット学会誌, Vol. 20, No.7, pp.707-716 (2002)
- [9] Masatoshi Ishikawa, Takashi Komuro, Akio Namiki, and Idaku Ishii: 1ms Sensory-Motor Fusion System, Robotics Research (J.M.Hollerbach and D.E.Koditschek eds.), pp.359-364, Springer, 2000
- [10] 石川正俊, 小室孝: デジタルビジョンチップとその応用, 電子情報通信学会論文誌 C, Vol.J84-C, No.6, pp.451-461, 2001

高感度初期滑り検出センサの研究開発 —検出条件に関する検討—

電気通信大学 ○勅使河原 誠一, 清水 智, 明 愛国, 下条 誠, 東京大学 石川 正俊

High Sensitive Initial Slip sensor using Pressure Conductive Rubber -A Study about Detection Condition-

○ Seichi TESHIGAWARA(UEC), Satoru SHIMIZU(UEC), Aiguo MING,
Masatoshi ISHIKAWA(Tokyo Univ.), Makoto SHIMOJO(UEC)

Abstract: By the recent research, we found that the electrical resistance change occurs because of the shear deformation of pressure conductive rubber. Therefore, we expect that can detect the object slippage by measuring the electrical resistance change of pressure conductive rubber when the object slips on the rubber. In this paper, we discuss the results of trial manufacture and of slip detection property testing of this sensor.

1. はじめに

人間の生活を支援・補助するロボットの研究開発が行われている。しかし、人間の生活空間にロボットが進出するためには、その環境に適応する必要がある。物体の把持動作について考えてみると、ロボットは多自由度なハンドを有し、かつそれを用いて多種多様な物体の把持、操りを実行できないといけない。ロボットがこのような動作を行うためには、接触位置や接触力、滑りなどの情報を取得するための触覚センサが必要である。特に、物体を破壊しない最小把持力で把持する場合や、物体の操りを行うためには滑り覚が重要な役割を果たす。

Johansson ら^[1]は、人の把持動作について研究を行い、人は滑りを生じる最小の把持力で物体を把持していることを明らかにした。また、その検出には、皮膚と把持物体との間の局所的な滑りが重要であることを示した。そこで、物体が滑る際の振動や応力の変化などを電気信号に変換することにより、物体の滑りを検知しようとする試みがなされている。Howe ら^[2]は“nib”と呼ばれる突起のついた球状シリコンゴム中に加速度センサを2個配置し、センサ表面で局所滑りが発生した際の振動を検出するセンサを開発した。Son ら^[3]は、半円筒のシリコンゴム内に PVDF フィルムを4枚配置し、同じく局所滑りが発生した際の振動を検出するセンサを開発した。しかし、物体との接触—非接触と滑りとの判別が困難であった。前野ら^[5]は Johansson らの知見に加え、人の指腹部構造を有限要素法によってモデル化し、個々の触覚受容器が持つ性質を明らかにした。そして、人の把持手法を模倣し、ひずみゲージを曲面状弾性体内に一定間隔で並べたセンサを開発した。これにより、重量および摩擦係数が未知の物体を把持可能であることを示した。しかし、一方向の滑りしか検出できず、ひずみゲージを多数配置する必要がある、配線数や小型軽量化の問題があった。篠田ら^[6]は音響共鳴型テンソルセル (ARTC) を用いた滑り覚センサを提案した。ARTC は弾性体内に共鳴空洞と超音波受信子から構成され超音波の共振周波数の変化から滑り方向応力を検出する。池田ら^[7]は弾性体と剛体平板間の接触面をカメラを用いて観測し、滑りを推定する手法を提案した。しかし、これらのセンサは検出素子をフィンガ内部に埋め込むなど、特殊な加工が必要であり、構造上複雑である。また、小型、軽量化の問題がある。下山ら^[8]は、MEMS 技術を用いて超小型のひずみゲージ素子を作成し、法線方向力、せん断力などの三分力を計測可能なセンサを提案した。これにより、

センサの小型化に成功し、有用性の高いセンサとなっている。しかしながら、検出面積を広げる場合、素子数を増やす必要があるため、センサの個数に応じて配線数が増加してしまう。また、センサ保護のため、厚い被覆材を表面にカバーする必要がある。指一本一本について最適なセンサ数とセンサの配置を検討する必要があり、センサを装着する段階で、やや扱いにくい部分がある。

一方、本研究室では、厚さ 0.5mm の薄型かつ柔軟な感圧導電性ゴムを用いた滑り覚センサを提案している^[9]。本稿では、本滑り覚センサによる滑り検出の検出手法について述べた後、法線方向力、物体の表面状態等が変化した際の影響について考察した結果について報告する。また、最後の章では並行グリップを用いた把持力調整実験の結果について述べる。

2. 滑り覚センサの構成と検出手法

本センサの構成を Fig.1 に示す。本センサは滑り検出エレメントと、PC などの演算処理部によって構成されている。滑り検出エレメントは正負の電極と感圧導電性ゴム (イナバゴム社製) を基本構造としている。感圧導電性ゴムは、シリコンゴム内に導電性粒子を均一に分布させた構造を有し、圧力が加わり変形すると、内部の導電粒子の接触状態により、抵抗値が変化する機能性材料である。本滑り覚センサはガラスエポキシ基板上に図のような渦を巻いた電極パターンを形成し、この上に感圧導電性ゴム (イナバゴム社製) を貼り付けた構成となっている。実験用に製作した滑り検出エレメントのサイズは 6mm×6mm で、厚さは 2mm である。電極をフレキシブル基板等で作成すれば、柔軟なセンサを構成でき、円筒面への配置も可能である。この電極に 1k Ω の抵抗を介して 5V の電源を与えている。渦巻き電極の電位差 (V_{out}) を計測し、AD ボードを用いて PC にデータを取り込む。

演算処理部では、物体の滑り変位が発生する直前に生じる特徴的な電圧変化を抽出する処理が行われる。Fig.2 に示すように、滑り検出エレメント上で物体を滑らせると、滑り変位発生直前において、複雑な電圧変化が発生する。この複雑な電圧変化に含まれる 1kHz 以上の周波数成分を、離散ウェーブレット変換 (以下: DWT) のハイパスフィルタとしての機能を利用して抽出し、滑り判定を行う^[10]。本滑り判定のフローチャートを Fig.3 に示した。滑り検出エレメントの電圧計測を行い、取得したデータについて DWT を実行し、最大値最小値の差に対して閾値を設け、滑り判定を

行う。今回は最もシンプルな処理を行っている。ここではデータのサンプリング周波数を 10KHz とし、64 点サンプリングを行った後、高速演算が可能な Haar のウェーブレットを用いてレベル 1 の DWT を実行することにした。

Slip detection element

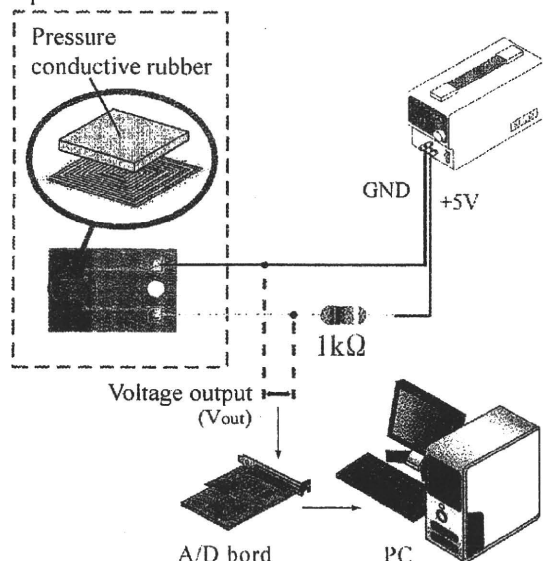


Fig.1: Structure of slip sensor system

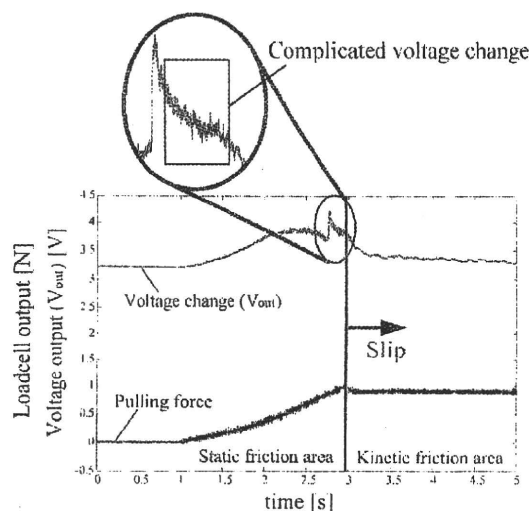


Fig.2: Voltage change just before object slip : We put the object on the surface of slip sensor and slid it.

3. センサの性能評価

本滑り覚センサシステムによって物体の滑り検出を行う際の問題点として、滑りが発生した時の電圧出力変化に類似した変化が生じた場合、これを物体の滑りと誤認してしまう可能性がある。特に、法線方向力負荷による影響を受けやすい。したがって、2. 章で提案した手法により、法線方向力が変化した際の電圧変化と滑りが発生した際の電圧変化について、それぞれを判別可能か調べる。具体的には、それぞ

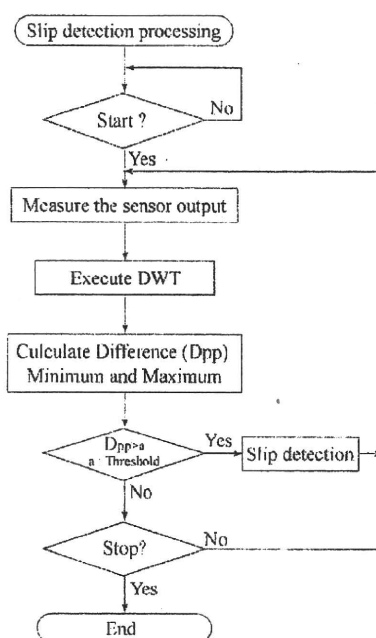


Fig.3: Chart of Slip detection algorithm

れの電圧変化に対して離散ウェーブレット変換を行い、これらと比較することによって、その影響について考察する。また、滑らせる物体の表面性状や、与荷重によって滑り発生時における周波数成分に変化が生じ、滑り検出が行えなくなる可能性がある。したがって、これらのパラメータを変化させた際の電圧出力についても離散ウェーブレット変換を行い、その影響について検討する。

3.1 実験装置

本実験では、センサ表面で物体を滑らせるタイプの実験装置と、センサ表面に対して垂直荷重を加えるタイプの実験装置の2タイプを用いる。それぞれの概観を Fig.4 および Fig.5 に示す。Fig.4 の実験装置は滑り覚センサ上で物体を滑らせるための装置である。滑り覚センサは水平面上に配置されており、この上にプレート状の物体をのせ、加圧子にて上から与荷重を与えた後、横荷重を加えて滑りを発生させることができる。加圧子は自動Zステージに固定されており、位置制御により任意の押し付け力を加えることができる。物体を滑らせる際の動力には、左手に配置している自動ステージを用い、ロードセルによってその引張力を計測可能である。

Fig.5 は、センサ表面に対して垂直荷重を加える実験装置である。水平面上に配置された滑り覚センサ上にアクリルプレートを乗せた後、上から半球状の加圧子にて負荷と除荷を行う。この加圧子は、上下方向に駆動する自動ステージに取り付けられており、送り量や速度をコントロールすることにより、様々な荷重を負荷することが可能である。

3.2 法線方向力変化の影響

本滑り覚センサは原理上、法線方向力の変化が発生した場合においても、電圧変化が発生する。すなわち、法線方向力変化が生じている際と、滑りが発生した場合の電圧変化を判別できなければ、滑り覚センサとして機能しない。ここでは、物体の滑りが発生した場合と法線方向力が変化した際の

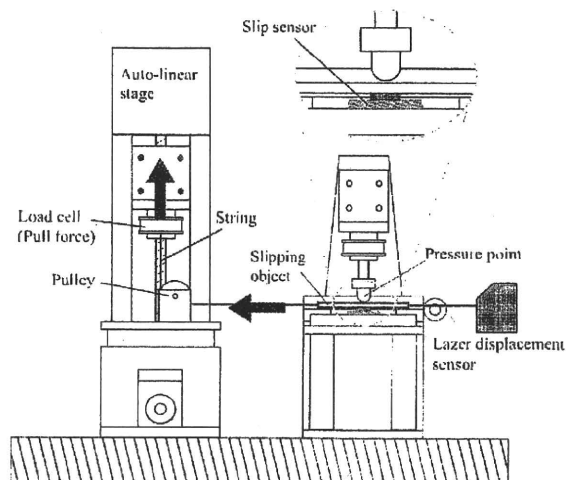


Fig.4: Experimental apparatus : object slip generator

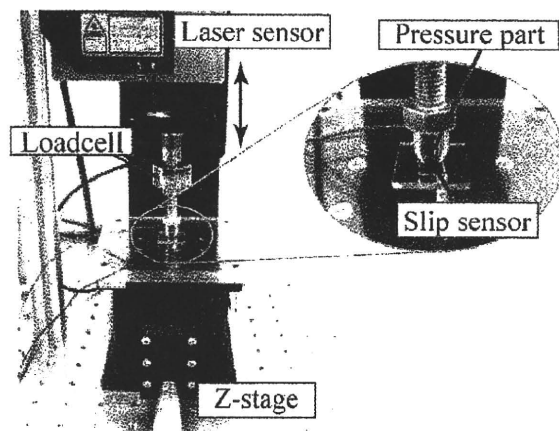


Fig.5: Experimental equipment : Additional normal force

電圧変化に対してDWTを実行し、本手法により、両者の分離が可能であることを示す。すなわち、法線方向力の影響をほとんど受けないことを示す。

まず、Fig.4の実験装置を用いて、センサ表面で物体を滑らせる実験を行った。滑らせる物体はアクリルプレートとし、初期法線力を2Nに調節した。自動ステージの送り速度は1mm/sに設定し、このときの電極間電位の出力をサンプリング周波数10kHzで計測した。本実験の結果をFig.8に示した。上段のグラフは滑り検出エレメントの電圧変化を示し、これに対してDWTを行った結果が下段のグラフである。これより、滑り変位が発生する直前付近において、DWTの結果が閾値をこえ、物体の初期滑りを検出できていることを示している。

次に、センサ表面に法線方向力（負荷→除荷）を行う実験をFig.5の装置を用いて行った。本センサはロボットハンドの指先に装着して使用することを想定しているため、ハンドの指先が物体に触れる際または物体を離す際など、ステップ状の垂直荷重に対して抗外乱である必要がある。そこで、Fig.5の実験装置を用い、数パターンのステップ荷重を与え、その影響について検討した。Fig.7には、本実験装置で実現しうる、最も厳しい条件下における結果を示した。左のグラフはセンサ表面に対して荷重を負荷した場合の変化、右のグ

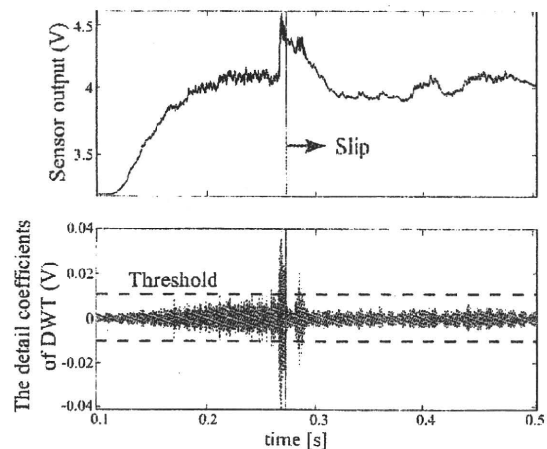


Fig.6: Analysis results : Discrete Wavelet Transform for the object slip. Initial normal force is 2N

ラフは荷重を除荷した際の出力変化に対してそれぞれDWTを実行した結果となっている。これを見ると、いずれも設定している閾値の半分にも満たない程度の大きさとなっている。以上より、本手法により、法線方向力変化の影響をほとんど受けずに物体の初期滑り検出が可能であることがわかった。

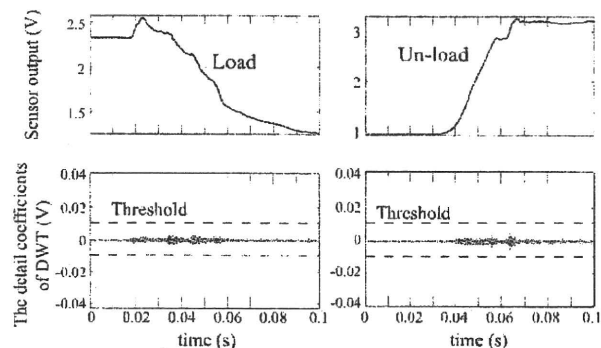


Fig.7: Analysis results : Discrete Wavelet Transform for the loading and release

3.3 初期法線力および物体の表面性状の影響

ここでは、センサ表面に作用する与荷重（初期法線力）や、物体の表面性状を変化させ、これらが変化した場合においても滑りを検出可能であることを示す。まず、与荷重を3N、4Nと変化させ、アクリルプレートを滑らせた際の出力に対してDWTを行った結果をFig.8およびFig.9に示した。これより、与荷重が変化しても、DWTを行った結果に大きな差異はなく、設定した閾値を越えている。すなわち、法線力の大きさの影響は極めて小さいことがわかった。すなわち、ハンドの把持力がどのような値であっても、同じ閾値を用いて物体の滑り検出が可能である。

次に、滑らせる物体の表面性状を木、紙、布、ステンレスと変化させた場合について実験を行った。取得したデータに対してDWTを行った結果をFig.10～Fig.13に示した。DWTの結果を見ると、木材とステンレスの場合はほとんど影響がないことがわかった。一方、布と紙の場合はDWTの

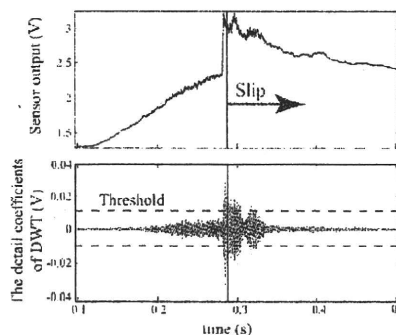


Fig.8: Analysis results : Discrete Wavelet Transform for the object slip. Initial normal force is 3N

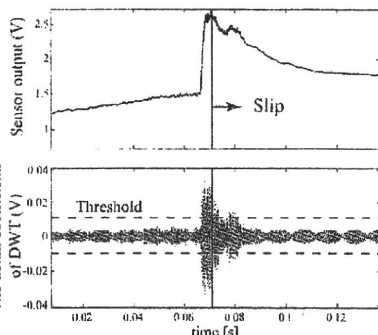


Fig.9: Analysis results : Discrete Wavelet Transform for the object slip. Initial normal force is 4N

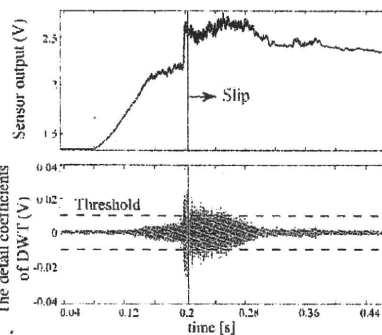


Fig.10: Analysis results : Discrete Wavelet Transform for the object slip. Surface property is stainless steel.

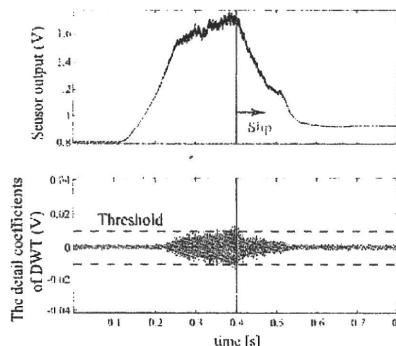


Fig.11: Analysis results : Discrete Wavelet Transform for the object slip. Surface property is cloth.

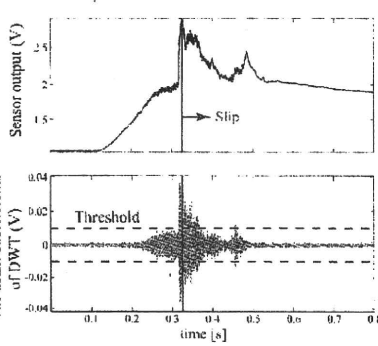


Fig.12: Analysis results : Discrete Wavelet Transform for the object slip. Surface property is wood.

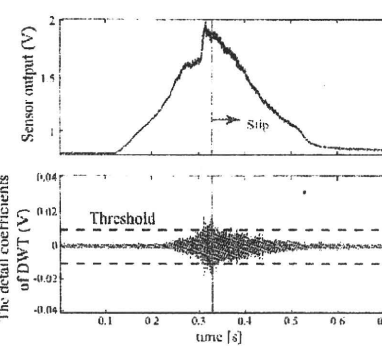


Fig.13: Analysis results : Discrete Wavelet Transform for the object slip. Surface property is paper.

値が少し小さくなっている。これは、表面性状が変化した場合で摩擦係数が変化したためと考えられる。しかしながら、今回設定している閾値 (± 0.01 [V]) の値は超えているため、これらの滑り検出も可能である。

以上より、本滑り検出センサは、与荷重および滑らせる物体の表面性状の影響を受けにくく、非常に高感度に物体の初期滑りを検出できることが明らかになった。

4. まとめ

本稿では、我々が提案する感圧導電性ゴムを用いた滑り検出センサについて、最も簡単な情報処理手法を利用した滑り検出方法について解説した。この処理手法を用いて、滑り検出時に外乱となる法線方向力との分離性能について確認を行った。次に、与荷重および滑らせる物体の表面性状を変化させ、本手法による滑り検出の性能について検証した。その結果、シンプルな構成、簡単な演算であるにもかかわらず、物体の初期滑りを高感度に検出できることがわかった。

今後はセンサ表面にインパルス荷重が負荷された場合などの影響、モーターなどの電磁ノイズの影響、物体表面がより滑らかであった場合などの影響などについて、より詳細な検討を行っていく。

参考文献

[1] R.S. Johanson, G. Westling, *Roles of glabrous skin receptors and sensorimotor memory in automatic control of precision grip when lifting rougher or more slippery objects*, Exp Brain Res, Vol.56, pp. 550-564, 1984

[2] J.S. Son, E.A. Monteverde and R.D. Howe, *A Tactile Sensor for Localizing Transient Events in Manipulation*, Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.471-476, 1994

[3] J.S. Son, E.A. Monteverde and R.D. Howe, *A Tactile Sensor for Localizing Transient Events in Manipulation*, Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.471-476, 1994

[4] 山田陽滋, 森田裕之, 梅谷陽二, “ロボットハンドのための指紋を備えた高周波微振動検出式滑り検出センサ”, 計測自動制御学会論文集, vol.36, No.6, pp.473-480, 2000

[5] 藤本 勲, 山田 陽滋, 前野 隆司, 森園 哲也, 梅谷 陽二: “PVDF フィルムを用いたヒトの指に学ぶ静摩擦検出を有するフィンガス キンの開発”, 日本ロボット学会誌 Vol.22 No.6, pp.806~814, 2004

[6] 吉海, 但馬, 加賀美, 篠田, 稲葉, 井上: “音響共振型テンソルセル触覚センサによる滑り予知と把持動作への応用”, 日本ロボット学会誌, Vol.20, No.8, pp.868-875, 2002

[7] 池田, 栗田, 上田, 松本, 小笠原: “初期滑り時の接触面偏心率に基づく弾性体の把持力制御”, 日本ロボット学会誌, vol.23, no.3, pp.337-343, 2005.

[8] K. Noda, I. Shimoyama, *A Shear Stress Sensing for Robot Hands -Orthogonal arrayed Piezoresistive Cantilevers standing in Elastic Material-*, pp.63-66, HAPTICS' 06

[9] 勅使河原誠一, 清水智, 多田隼建二郎, 明愛国, 石川正俊, 下条誠, “感圧導電性ゴムの特性を用いた滑り検出センサの研究開発—抵抗値変化の高周波成分について—”, JSME ロボティクス・メカトロニクス講演会, pp.2P1-K06, 2009

[10] 勅使河原誠一, 清水智, 多田隼建二郎, 明愛国, 石川正俊, 下条誠: “感圧導電性ゴムを用いた高感度型滑り検出センサの研究開発”, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2009, pp.311-04

指先にネット状近接覚センサを装着したロボットハンドの研究 — 高速な把持動作の実現のための制御系の構築 —

○長谷川浩章（電通大） 多田隈建二郎（電通大） 明愛国（電通大）
石川正俊（東京大） 下条誠（電通大）

The robot hand whose fingertip is covered with thin proximity sensor sheet
 – Construction of control system that enables fast grasping motion –

*Hiroaki HASEGAWA (UEC), Kenjiro TADAKUMA (UEC), Aiguo MING (UEC),
Masatoshi ISHIKAWA (Univ. Tokyo), Makoto SHIMOJO (UEC)

Abstract— In this paper we present the robot hand control system based on proximity sensing. As background, because of occlusion, around several millimeters from grasping object it was difficult for the method based on vision sensor to detect relational position between grasping object and the fingers of robot hand. Therefore, introduction of proximity sensor which senses the distance of the object is very effective. In order to realize this concept, we integrated our proximity sensor sheet into three fingered robot hand. Then we built its controller that maintains distance between the fingertip and grasping object.

Key Words: Robot hand, Proximity sensor, Sensor based control, Pre-touch

1. 諸言

ロボットハンドの把持動作においては、従来よりカメラ等の視覚センサを用いた物体位置・姿勢の検出手法が一般に用いられている。これら視覚センサは、空間上の一点から観測を行うという性質から、把持直前の段階のようにロボットが把持対象物に極めて接近すると、オクルージョンによりロボットと物体間の位置・姿勢関係を的確に把握することができない、このことが、把持における確実な動作の妨げとなっていた。

この問題に対しては、各種近接覚センサを搭載し、数 cm の領域で物体との位置関係を計測することが有効であると考えられる。近接覚センサを指先に搭載することで、物体表面との位置関係もとに把持動作を行うハンドシステムの開発も行われているが [1][2]、動的環境への対応能力に問題を残している。

また、筆者らはこれまでに、触覚・近接覚を備えたインテリジェントロボットハンドを提案し、未知対象物・設置位置・姿勢誤差の存在下での pick-and-place タスクの実装によりその有用性検証を行っているが [6]、指先での近接覚センシングについては 1 素子のみ埋設する構成であったため、センサの指向性による誤検出や情報量の少なさが問題であった。

2. 研究目的

そこで本研究では、把持動作の非接触相におけるセンシング機能を拡張し、指先と目標物体との間の位置・姿勢関係をリアルタイムに検出し指先の動作を調節することにより、例えば、

- 把持対象物体の形状や寸法
- 物体とハンドの間の位置・姿勢の関係
- 物体とハンドの間の相対速度

に対する適応能力を持つハンドシステムの開発を目的とする。

そのために、素子数の複数化・分散配置を踏まえネット状近接覚センサ [4] に着目、ハンド指先に搭載可能なように小型・薄型化を図った近接覚センサシート [5] をロボットハンド実機に統合し、センサ出力情報をもとに指先を駆動する制御手法を構築する。

これにより把持対象物が動的に移動する場合であっても、各指先が物体表面からの距離を一定に保ったまま動くことができ、物体位置の誤差吸収や多指間での接触タイミングの一致など、非接触相における各種調節的動作を行うことを可能とし、把持の確実性向上を目指す。

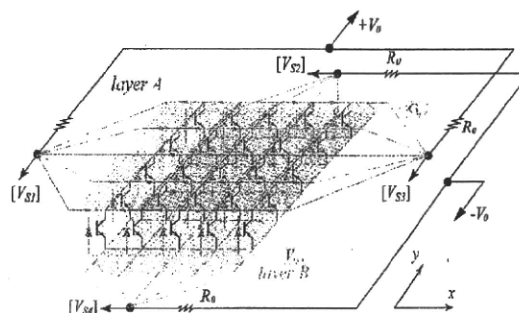


Fig.1 ネット状近接覚センサの構造

3. ネット状近接覚センサシート

3.1 検出原理

ネット状近接覚センサは、2層の格子状の抵抗ネットワークの間をフォトトランジスタで接続することで構成される (Fig.1)。このとき各フォトトランジスタに流れる電流は、隣接する赤外 LED から物体に向けて照射した赤外線が物体表面での反射量により決まり、物体との距離に応じて変化する。

これにより回路内に生じた電流分布の中心位置を、回路端部の電圧を測定することで求めることができることから、物体の位置と距離を検出する。この方式は、センサ素子数によらず配線数が6本のみであること、アナログ演算により ms オーダーの高速応答が可能といった特長を備えており、サイズ制約が厳しいハンドへの搭載や、物体の動きなどに素早く反応する必要のある非接触相でのセンシングに適していると考えられる。

3.2 センサシートの設計

近接覚センサをハンド指先へ搭載するにあたっては、

1. 限られたスペースに搭載可能
2. 表面装着によりハンドの内部機構と干渉しない
3. 指先という細長い形状に対応可能
4. 触覚センサと共存可能

といった特徴を備えていることが望ましい。これらの条件を満たすため、実際のセンサ設計では、外形寸法 $2.7 \times 3.2 \times 1.4$ [mm] の小型フォトリフレクタを使用し、4素子 $\times$ 2列という素子配置に対応できるよう部品定数の設定を行った後、フレキシブル基板上に作製することで、指表面に装着できるセンサシート (幅 $25 \times$ 長さ 80 [mm]) を実現した。

4. センサ搭載指

4.1 指先への実装

試作した指先とその構成を Fig.2 に示す。まず、使用する多指ハンドの寸法諸元を考慮し、指先部の形状・寸法は長さ $40 \times$ 幅 $25 \times$ 厚さ 20 [mm]、先端 $R=15$ [mm] とし (a)、この部材表面に近接覚センサシートを装着する (b)。

接触相で使用する触覚センサとしては、当研究室で開発した CoP (Center of Pressure) センサを使用する。これは感圧導電性ゴムを上下2層の抵抗膜で挟み込む構造からなり、センサ内部の圧力分布の中心を4辺の電圧から求めることが可能な触覚センサである。

これまでの研究でセンサ面に開口部を設けた場合にも機能が保たれることが確認できており [3]、指先の同一面上への近接覚・触覚センサの実装のため、CoP センサに設けた開口部を通じてフォトリフレクタを露出させる (c)。

この構成により単一の指先で触覚・近接覚の2種のセンシングを行うことが可能となる。

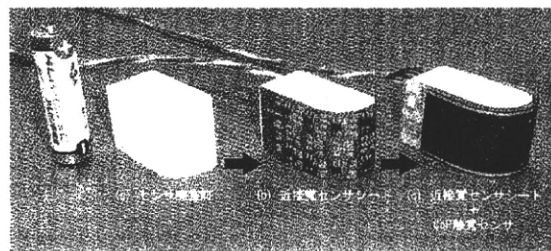


Fig.2 試作指先の構造

4.2 基礎特性試験

試作した指先について、近接覚センサの位置・距離検出特性の評価試験を行った。Kodak 90% グレーカードに対し指先を正対させ、仰角と距離を変化させたとき、Fig.3, 4 のように各出力値が得られた。

1mm 前後に存在する距離出力のピーク値以降は、位置出力についてはほぼ角度に応じて一定の値を示している。その一方で、距離出力については角度変化の影響を受けて2倍近く変動が生じている。

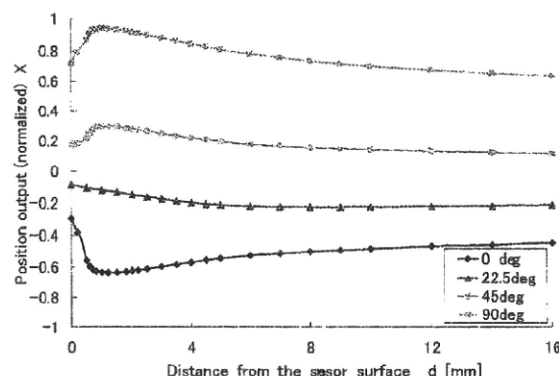


Fig.3 センサ位置出力特性

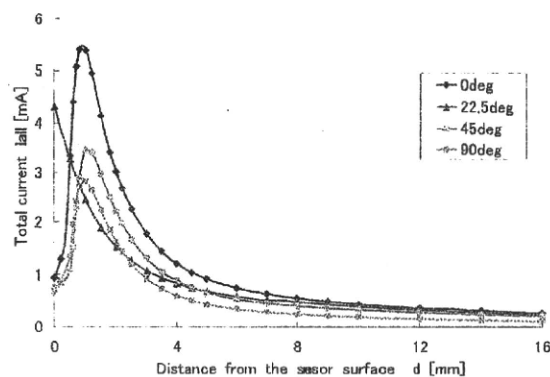


Fig.4 センサ距離出力特性

この特性は、仰角 0 [deg] で位置出力が -0.5 付近を示すことと合わせると、今回のセンサ素子配置では検出

対象物に正対するセンサ素子の個数が仰角により変化していることに起因すると考えられる。

この問題は、センサ位置出力を利用して距離出力を補正することで解決可能と考えられる。簡易的には、指尖部のセンサ個数は指腹部の半分と考え、仰角 90 度で 2 倍となり、位置出力に対応して線形に倍率を変化させればよい。

また、距離出力は 1[mm] 前後にピークを持つことが読み取れる。この際反射板までの距離は近接覚センサ素子のパッケージ表面からの距離を指しており、素子表面から 1[mm] 以内に物体が入り込まないようにすることで、センサ出力が距離に応じて単調に減少する領域のみを使用する。具体的な手段としては、近接覚センサシートと触覚センサの間にシリコンゴムシートを配置し、その厚みをセンサ素子が指先表面から 1[mm] 程度窪んで配置されるように調節した。

5. ハンドシステムの構築

Fig.5 に構築したハンドシステムの概要を示す。3 指 8 自由度 (屈曲 2 自由度 × 3 指、加えて第 2, 3 指には旋回 1 自由度) ハンドと 2 自由度直交ステージから構成され、Fig.6 のように各指の指先部に試作した近接覚センサシートを装着している。センサ出力と各関節のアクチュエータの制御信号は dSPACE 社製リアルタイムハードウェアに接続し、内蔵するプロセッサ上で MATLAB/Simulink で作成した制御モデルを実行する。これにより、制御アルゴリズムの実装や調整、実験データの収集を効率的に行える環境を構築した。

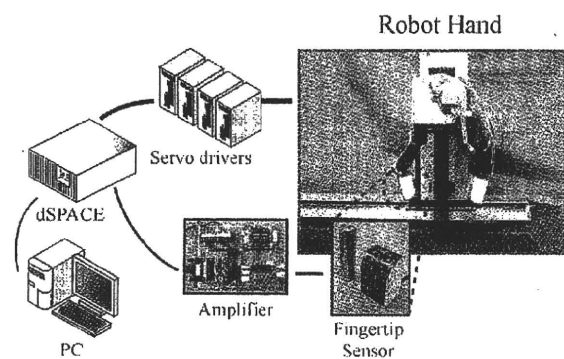


Fig.5 システム構成

6. 近接覚情報を用いた指の制御

今回開発したネット状近接覚センサシートにより、ロボットハンド指先部において、多数の近接覚センサ素子を配置することが可能となった。

これにより、これまでの単一素子による近接覚センシングと比較すると、

- 距離情報を取得可能な領域が拡大
- 位置情報により、物体の存在する方向が取得可能



Fig.6 多指ロボットハンドへの実装

- 位置情報を利用し、物体表面の法線方向が検出可能等の検出能力の向上が期待できる。

6.1 指先距離制御

これらの出力情報のうち、今回は距離情報の利用に着目し、物体からの距離を一定に保つための制御を行った。

具体的には、近接覚センサの距離出力、すなわち検出素子の光電流の総和と、指定した目標値の差分を元に、指先の移動速度を比例制御的に決定することとした。

第 1 段階として、まず単一の指に対して実装を行ったが、3 指それぞれをこの手法で制御した上で、各々に対し共通の目標値を与えることで、把持対象物体に対して均等にアプローチを行う動作の実装を計画している。

6.2 実験結果

以上の手法をハンド実機により実行した結果、以上の制御手法を実装し、ハンド実機を用いて動作させた様子を Fig.7、その際のセンサ出力と指先の変位の時間変化を Fig.8 に示した。

物体の移動により生じたセンサ出力の変化に対して、センサ出力を一定値に保つように指先の移動が行われており、その結果、物体が急に移動しても衝突することなく一定距離を置いて指先が追従している。

この動作試験により、10[mm] 程度までの距離での反応、特に物体が接近した際の接触回避については十分な応答性能が得られた。しかし物体が遠ざかる場合や遠方に存在する場合には接近速度が遅く、追従性に問題があることがわかった。

この問題は、Fig.4 に示したように、近接覚センサの距離出力が距離に反比例することにより生じているものと考えられる。この特性により、単純に現在の距離出力と目標値の差分を元にした制御では、近距離・物体接近時と離脱時で速度指令の大きさに非対称が生じてしまう。また、遠距離では距離出力値の変化幅が

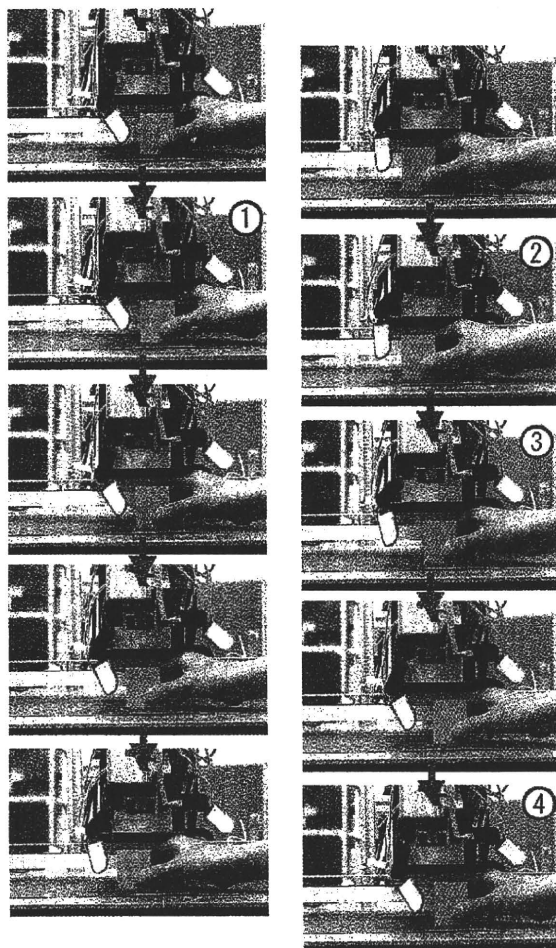


Fig.7 距離調節動作の様子

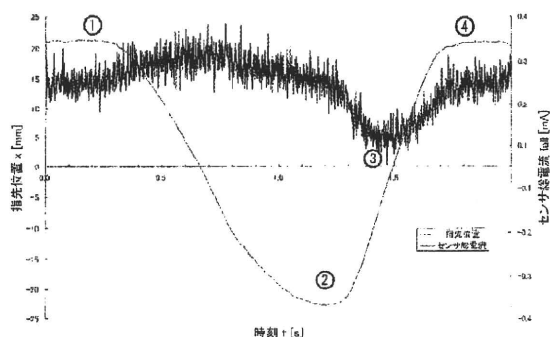


Fig.8 センサ出力変化

小さく、速度指令そのものが小さくなる問題も生じた。これらの問題は、いずれも非線形性の強いセンサ距離出力をそのまま用いたことにあると考えられる。

7. 結言

小型・薄型化を図った近接覚センサシートについて基礎的な検出特性を確認し、3指ロボットハンドの各指の指先部に搭載し、近接覚センシングの機能を持たせた。その上でハンド制御システムを構築し、近接覚情報を用いた物体-指先間の距離制御が行えることを確認した。

今後は、距離出力-実距離の変換による追従特性の改善、位置情報を利用した指先配置の最適化動作の実装、3指全てに対するセンサベース制御の適用を進め、即応性・ロバスト性の高い把持動作の実現を目指す。

参考文献

- [1] Kaijen Hsiao ほか: "Reactive Grasping Using Optical Proximity Sensors", 2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.2098-2105, 2009.
- [2] Ryan Wistort, Joshua R. Smith: "Electric Field Servoing for Robotic Manipulation", Proceedings of IEEE/RSJ 2008 International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.494-499, 2008.
- [3] 溝口ほか: "インテリジェントロボットハンドの研究開発", 第26回日本ロボット学会学術講演会'08 講演論文集, 2008.
- [4] 天本, 下条: "2次元状に配置した近接覚センサによる対象物の中心位置検出方式", 第24回日本ロボット学会学術講演会'06 講演論文集, 2006.
- [5] 長谷川ほか: "ロボットハンド指先に搭載可能な薄型ネット状近接覚センサシートの開発", 第9回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会 講演論文集, 2008.
- [6] 溝口ほか: "インテリジェントロボットハンドの研究開発 - Pick & Place の達成 -, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2009 講演論文集, 2A2-J04, 2009.

360°特異点の無いネット状近接覚センサの構成法

○寺田一貴(電通大) 多田隈建二郎(電通大) 石川正俊(東大) 下条誠(電通大)

Constitution Method of the Net Structure Proximity Sensor without Singular Point

*Kazuki TERADA (UEC), Kenjiro TADAKUMA(UEC),

Masatoshi ISHIKAWA(Univ.of Tokyo), Makoto SHIMOJO(UEC)

Abstract— This paper describes constitution method of the net structure proximity sensor without singular point. The net structure proximity sensor can be attached to free-form surface and needs only six wires. The sensor can detect the center position of current distribution and total current within 1ms. However, when mounting on general shape, it has singular point problem. Therefore it was difficult to make full use of the characteristic. We have developed a net structure proximity sensor without singular point and confirmed the effectiveness of the proposed sensor.

Key Words: Non-Singular Point, Proximity Sensor, Free-form surface

1. はじめに

人間とロボットが共存する環境で、センサを用いてより安全にロボットを動作させる研究が多く行われている。現在、ロボットが環境を認識するためのセンサとして、大域では視覚、測域センサ、局所的には触覚センサなどが用いられている。ロボットおよび人を含めた外環境での安全性を考えると、360°全方位のセンシングが可能であることは有用である。しかし、視覚、測域センサは、情報取得可能な角度が限定されるため、360°全方位センシングするためには、レンズ、ミラー、センサの複数配置、センサを回転させる[1]等の工夫が必要である。これらの工夫を用いると、情報処理時間の増加や、システムの複雑化を招く。また、視覚、測域センサはある程度の大きさを有するためロボットの本体近傍をすべてカバーするように複数実装することはスペース的に難しく、死角が生じてしまう。死角を極力少なくしてセンシングを行うには、ロボットへのセンサの全面実装が有効であり、接触式の触覚センサにおいて全面実装可能なものが多数開発されている[2][3]。しかし、接触センサは物体に接触しなければ反応せず、安全面で問題が残る。

これらの問題点に対して、本研究室では、大域・局所の中間に位置する近接覚センサの提案、開発を行ってきた[4]。このセンサは、自由曲面に配置可能、省配線、高速応答といった利点を有する。しかしながら、センサを3次元形状へと実装した場合、継ぎ目の部分が特異点となり、センサの有する特長を十分に生かすことが困難であった。そこで、本論文では特異点問題を根本から解決した360°全方位センシング可能なネット状近接覚センサの構成法を提案し、試作したセンサの基本特性について報告する。

2. ネット状近接覚センサ

2.1 構造と特徴

ネット状近接覚センサは、図1に示すように、フォトトランジスタを2層の抵抗ネットワークで挟み込んだ構造である。赤外LEDから照射し、物体表面より反射した赤外線がフォトトランジスタが受光することにより、回路内に電流分布が発生する。本センサは電流分布の中心位置を回路端部の電圧から求めることができ、また、フォトトランジスタが受光する赤外線の量

は、物体との距離に応じて変化するため、物体の位置と距離を検出することが可能である。ネット状近接覚センサの特徴は

- 1) 自由曲面に配置可能
- 2) センサ素子数、面積に無関係に6本の配線で接続可能
- 3) センサ素子数に無関係に1ms以下の高速応答性を有する

等が挙げられる。

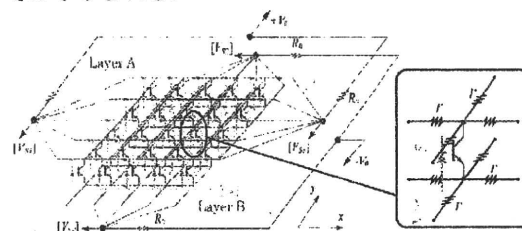


Fig.1 Net Structure Proximity Sensor

2.2 3次元形状へ実装する際の問題点

前述したようにネット状近接覚センサは多くの利点を有するが、3次元形状へ実装する際に「特異点」という問題が残っていた。

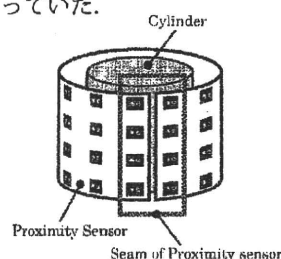


Fig.2 Seam of Proximity Sensor (Oblique View)

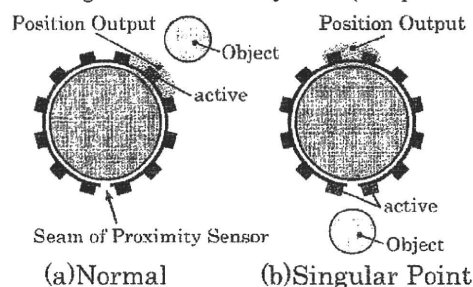


Fig.3 Position Output (Top View)

一例としてここではロボットに適用する際に一番応用性が高いと考えられる円筒形状への実装について述べる。図2に示すように、ネット状近接覚センサを円筒へ巻き付けるようにして実装した場合、継ぎ目が生じる。

継ぎ目部分以外に物体が存在する場合、位置出力は図3(a)のように反応した検出部付近に出力される。

次に継ぎ目部分に物体が存在する場合について述べる。ネット状近接覚センサは電流分布の中心位置を出力するため、センサ両端の検出部が反応する場合、位置出力は図3(b)のように円筒の逆側に出力される。このように、継ぎ目部分に物体が存在する場合、位置出力は反応した検出部付近に出力されず、他の場合と異なる性質を持つ。このことから、継ぎ目部分を特異点と定義する。

上記した特異点の存在により、物体の位置によってはロボットシステムが意図しない動作を行う可能性がある。もちろん特異点付近に物体が接近しない環境・動作設定を行い、使用条件を限定すれば問題は発生しないが、センサの用途は限られたものとなり、汎用性が著しく低下してしまう。よってロボットへの実装を考えた場合、センサは 360° 全方位特異点無しにセンシング可能であることが望ましいと言える。

3. 360° 全方位検出可能な近接覚センサ

特異点問題を解決した近接覚センサとして、以下に2種類3パターンのセンサ構成を提案する。

3.1 放射状近接覚センサ

放射状近接覚センサの構造を図4に示す。フォトリフレクタを放射状に配置し、同心正方形上の素子数が等しいことが特徴である。図4では、一例として円周を8分割、高さ方向に3段の構成を示している。このセンサの実装方法は回路を円筒形状に対して巻くのではなく、図5のように円筒の軸に沿ってかぶせるようにして構成する。これにより位置出力の方向角を物体の方向角と見なすことができ、特異点無しにセンサを

構成可能となる。また、対象物体が1つの場合、位置出力の原点からの距離によって高さ方向の位置もセンシング可能である。

放射状近接覚センサの問題点としては、

- 1) 配線問題
- 2) フォトリフレクタを放射状に配置しなければならないため、円周上の素子数は8の倍数に限られる
- 3) 大型のセンサを構成する際、素子数が増大する。例えば、16分割4段の場合、 17×17 、24分割4段の場合、 25×25 のマトリクスが必要

等が挙げられる。よって、放射状近接覚センサは特異点がないという大きな利点を有するが、解決すべき問題点が残っている。そこで、放射状近接覚センサの問題点を解決し 360° 全方位センシングが可能なセンサ構成を次項に提案する。

3.2 リング状近接覚センサ

3.2.1 単段式

単段式リング状近接覚センサの構造を図6に示す。フォトリフレクタをマトリクスの最外部のみ配置している。このセンサの実装方法は、放射状近接覚センサと同様に、円筒の軸に沿ってかぶせるようにして構成する。図中では一例として 4×4 のマトリクスとしているが、 $m \times n$ と縦横比が異なっても構成可能である。よって、円周上のフォトリフレクタ素子数を変化させることが容易であり、放射状近接覚センサより設計の自由度が大きいと言える。しかし、単段式リング状近接覚センサは高さ方向に1段という構成となっているため、高さ方向に不感領域が存在する。次項にその解決策を示す。

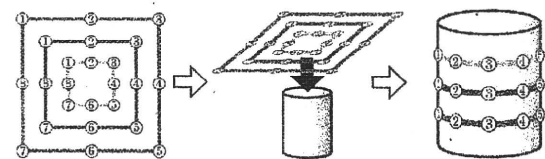


Fig.5 Mounting Method of Radial Proximity Sensor

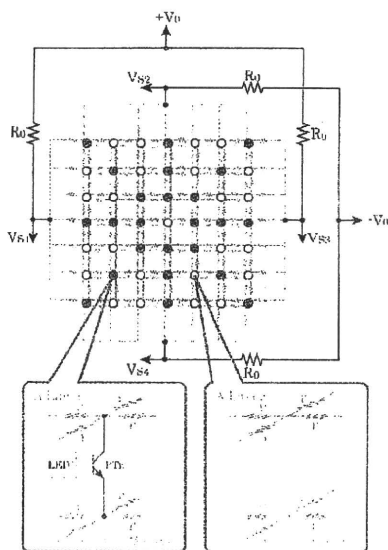


Fig.4 Radial Proximity Sensor

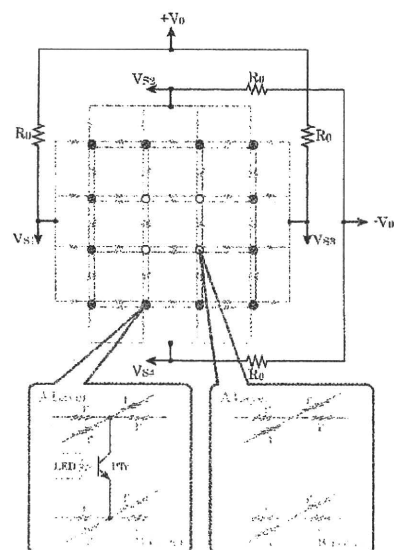


Fig.6 Ring Proximity Sensor

3.2.2 多段式

ネット状近接覚センサは、フォトリフレクタの受光部を2層の抵抗ネットワークで挟み込んだ3層構造である。従来まで、A層、B層に挟まれるフォトリフレクタは、1つであった(図7(a))。しかし、挟まれるフォトリフレクタの数は1個でなければならないという条件は存在せず、フォトリフレクタを並列に接続したものを1つの検出部として考えれば、A層B層の間に複数の素子を配置できることになる。図7(b)にその回路構成を示す。図7(b)の回路を用いることで、高さ方向へ任意の段数を有する多段式リング状近接覚センサを構成することが可能である。

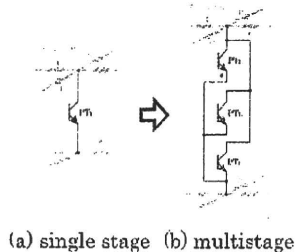


Fig.7 Multistage Ring Sensor

4. 位置出力方向角の誤差及びその除去法

$m \times n$ のマトリクスで構成された近接覚センサの位置出力は、 $(-1,1)(1,1)(-1,-1)(1,-1)$ を頂点とする正方形にマッピングされる。円筒形状に多段式リング状近接覚センサを実装する場合、フォトリフレクタは円周上に配置される。しかし、位置出力は、正方形にマッピングされて出力されてしまうので、位置出力の方向角と、物体の方向角とに誤差が生じる。一例として 4×4 のセンサから多段式リング状近接覚センサを構成し、円周上に12個等間隔にフォトリフレクタが配置されている場合を考える。図8に示すように、対象物体が原点と点P3の延長線上に存在し、その角度を円周上方向角 ϕ とする。このときフォトリフレクタP3が反応したとすると、センサの位置出力は、点P3'となる。X軸から点P3'までの角度を位置出力方向角 θ とすると、 ϕ と θ は一致しておらず、誤差が発生している。

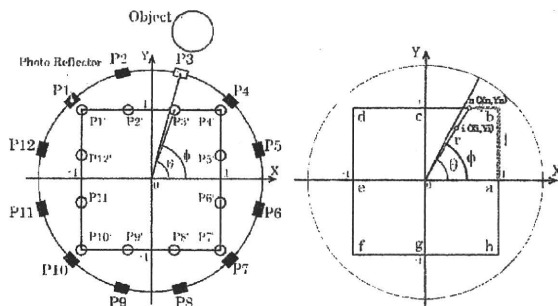


Fig.8 Direction Angle Error Fig.9 Definition of each Point Caused by Mapping

次にこの誤差がどのような傾向、大きさを有するのか調べるために図9のように各点を定義し、以下の手順で誤差を算出した。

- 1) 位置出力 点 $i(X_i, Y_i)$ から位置出力方向角 θ を求める

- 2) 原点、点 i を通る直線の原点から正方形に接触する点 $n(X_n, Y_n)$ までの距離 r を求める
 - 3) 点 $n(X_n, Y_n)$ の座標を求める
 - 4) ϕ は点 a から点 n まで反時計回りに正方形を進んだ距離 l に比例することを利用し、場合分けにより円周上方向角 ϕ を求める
 - 5) θ, ϕ の差をとることで誤差 $E[\text{deg}]$ を求める
- 以下に誤差を算出するために用いた式を列挙する。

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{Y_i}{X_i}\right) \quad (1)$$

$$r = \begin{cases} \left\lfloor \frac{1}{\cos \theta} \right\rfloor & (|X_i| \geq |Y_i|) \\ \left\lfloor \frac{1}{\sin \theta} \right\rfloor & (|X_i| < |Y_i|) \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} X_n = r \cos \theta \\ Y_n = r \sin \theta \end{cases} \quad (3)$$

$$\phi = \begin{cases} Y_n \times 45^\circ & (0^\circ \leq \theta < 45^\circ) \\ (2 - X_n) \times 45^\circ & (45^\circ \leq \theta < 135^\circ) \\ (4 - Y_n) \times 45^\circ & (135^\circ \leq \theta < 225^\circ) \\ (6 + X_n) \times 45^\circ & (225^\circ \leq \theta < 315^\circ) \\ (8 + Y_n) \times 45^\circ & (315^\circ \leq \theta < 360^\circ) \end{cases} \quad (4)$$

$$E = \theta - \phi \quad (5)$$

誤差のグラフを図12に青色の実線で示す。図12より誤差は最大で $\pm 4[\text{deg}]$ であり、周期的に発生しているため、角度により誤差の大きさが変化することになる。この誤差はあらかじめ発生することが予期できる誤差であるので、 θ から ϕ への変換マップを作成しておき、逐次処理することで、誤差を除去することが可能である。つまり、この誤差は本質的な問題とはならず、変換マップの使用で解決可能である。

5. 基礎特性実験

提案したセンサ構成によって、特異点無しに 360° 全方位センシング可能か検証するために、円周上12分割、4段の多段式リング状近接覚センサを試作し、方向角検出特性、距離検出特性の評価実験を行った。なお、センサのフォトリフレクタはROHM社のRPR-220を用いた。試作したセンサと実験装置を図10に示す。

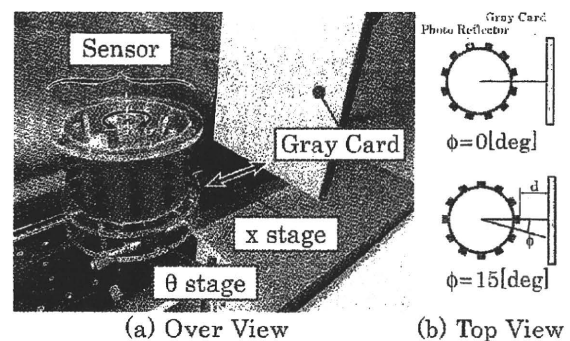


Fig.10 Experimental System

5.1 方向角検出特性実験

Kodak90 %グレーカードをセンサ表面から $6[\text{mm}]$ の距離に正対させ、 θ ステージにより $3[\text{deg}]$ 刻みでセンサを回転させ、測定を行った。各検出電圧から求めた位置出力を図11に示す。なお、各LEDへの電流は $15[\text{mA}]$ とした。実験結果より、特異点無しに 360° 全方位センシング可能であることが確認できた。

図 11 の位置出力は正方形ではなく、45[deg] から 90[deg] ごとに出力が内側に寄り、角丸状の出力となっている。この原因としては、位置出力の正方形端点に対応する素子と、それに隣り合う素子が反応し、電流分布中心位置を取得したからであると考えられる。正方形の同一辺上に対応した素子が反応した場合、位置出力は $(-1,1)(1,1)(1,-1)(-1,-1)$ を頂点とする正方形上となるが、それ以外の場合、位置出力は中心方向へ寄る。この特性は 2 物体以上が同時にセンサに近づいた場合、それを検出できる可能性を示唆しており、今後、検証を行う予定である。

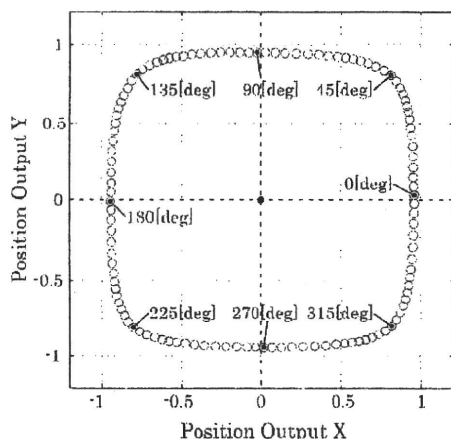


Fig.11 Position Output Characteristics

誤差 E と円周方向角 ϕ の関係を図 12 に示す。理論値として 4. 節で求めた方向角誤差を示している。実験結果は理論値と概ね傾向が一致している。最大誤差の絶対値が 5.9[deg] と 4. 節で求めた誤差より大きな値をとった理由は、センサ試作時の誤差や、センサをステージに取り付けた際の誤差によるものと考えられる。

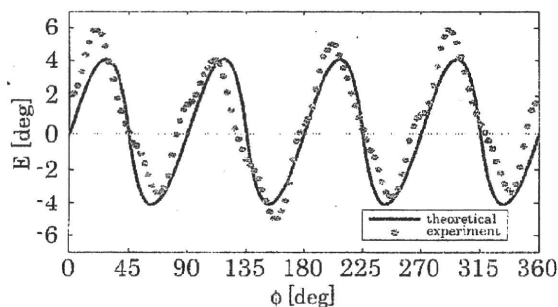


Fig.12 Direction Angle Error

5.2 距離検出特性実験

Kodak90 % グレーカードをセンサ表面から 6[mm] の距離に正対させ、200[mm] まで 1[mm] ずつ変化させたときの総電流値の変化を図 13 に示す。なお、各 LED への電流は 15[mA] とした。実験結果より、6[mm] 付近に最大 0.6[mA] の差が見られるものの、その他の部分ではセンサの角度によって距離出力は変化しないことが確認できる。本実験ではセンサの角度を 5[deg] 刻みに 45[deg] までしか測定を行っていないが、試作したセンサは、対称性を有するため、45[deg] の範囲の特性を全方位についての特性として考えることが可能である。よって本実験結果は、提案するセンサが全方位に等しい距離特性を有することを示唆している。

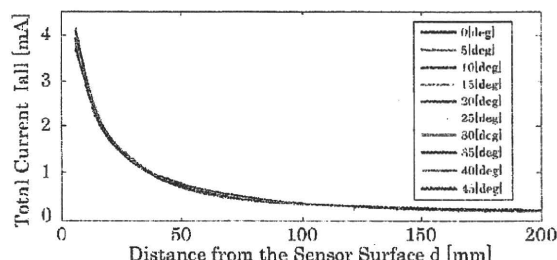


Fig.13 Distance Output Characteristics

以上の実験により本論文で提案した方式で (1) 方向角, (2) 距離の 2 つが特異点を持つことなく 360° 全方位に検出可能であることを、試作機を用いた実験により検証した。

6. 応用例

今回提案したセンサは、円周方向と、高さ方向の素子数を変化可能なため、物体の表面、特に側面を覆うようにして全面実装可能である。また、既存のロボットの構造には、柱形状を組み合わせて構築されるものが多いため、大きな適用性を有している。具体的な適用例として、ロボットアーム、指、ロボットの脚部、移動体などが挙げられる (図 14)。

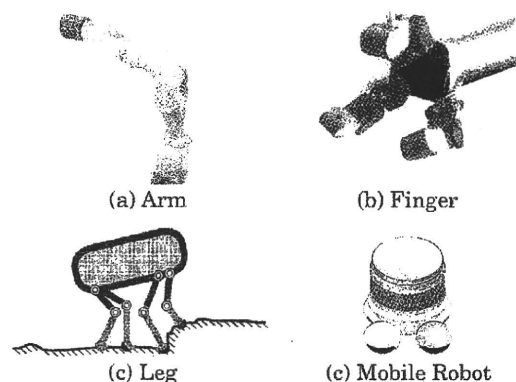


Fig.14 Application Examples

7. おわりに

本稿では、360° 全方位特異点無しにセンシング可能なネット状近接覚センサの構成法を提案し、その基礎特性について検証した。今回は、応用性が高いと考えられる円筒形状に限定して述べたが、物体の側面を覆う用途であれば提案したセンサ構成を応用可能である。また、検出素子としてフォトリフレクタを用いているが、提案したセンサの検出素子は、物理量 (力, 光, 磁気など) によって抵抗値が変化するものなら全てに利用可能である。今後は本センサモジュールを用いたアプリケーションを試作し、その有用性を示す予定である。

参考文献

- [1] 大野, 桜田, 竹内, 小山, 田所: “高速で密な形状計測を行う小型 3 次元レーザースキャナーの開発”, ロボティクス・メカトロニクス講演会, 09 講演論文集, 1A1-E04, 2009.
- [2] 荒木拓真, 郡司大輔, 下条誠: “自由曲面への装着と省配線化を可能とする網目状触覚センサ”, ロボティクス・メカトロニクス講演会, 06 講演論文集, 2P2-B01, 2006.
- [3] Hassan Alirezaei, 長久保品彦, 國吉康夫: “伸縮可能な触覚分布センサ: 可動関節への試験的実装”, 第 25 回ロボット学会学術講演会, 07 講演論文集, 3O12, 2007.
- [4] 天本晴之, 下条誠: “2 次元状に配置した近接覚センサによる対象物の中心位置検出方式”, 第 24 回ロボット学会学術講演会, 06 講演論文集, 1C24, 2006.

感圧導電性ゴムを用いた高感度型滑り覚センサの研究開発

○勅使河原誠一(電通大) 清水智(電通大) 多田隼建二郎(電通大) 明愛国(電通大)
石川正俊(東京大) 下条誠(電通大)

High Sensitivity Slip Sensor Using Pressure Conductive Rubber

*Seiichi TESHIGAWARA (UEC), Satoru, SHIMIZU (UEC), Aiguo MING (UEC), Kenjiro TADAKUMA (UEC), Ishikawa MASATOSHI (Univ. of Tokyo), Makoto SHIMOJO (UEC)

Abstract— Slip detecting tactile sensors are essential to achieve a human-like gripping motion with a robot hand. In previous researches, we have proposed flexible, thin and lightweight slip sensor utilizing characteristics of pressure conductive rubber. However, It was hard for this sensor to distinguish between the object slip and the normal force change. Therefore, we consider the separative method using high frequency elements generated by object slipping. In this paper, we design the information processing method and developed the sensor detecting both contact and initial slip in high sensitivity and a simple composition.

Key Words: Tactile Sensor, Slip Detection, Pressure Conductive Rubber

1. はじめに

人間の生活を支援・補助するロボットの研究開発が様々な研究機関で行われている。しかし、人間の生活空間にロボットが進出するためには、その環境に適応する必要がある。物体の把持動作について考えてみると、ロボットは多自由度なハンドを有し、かつそれを用いて多種多様な物体の把持、操りを実行できなければならない。ロボットがこのような動作を行うためには、接触位置や接触力、滑りなどの情報を取得するための触覚センサが必要である。特に、物体を破壊しない最小把持力で把持する場合や、物体の操りを行うためには滑り覚が重要な役割を果たす [1]。

そこでこれまでに、滑りが発生した際の振動を検出するタイプのセンサ [2][3] や、滑り発生時のひずみや応力を検出するタイプのセンサ [4][5] など、様々な滑り覚センサが開発されている。検出手法はそれぞれ異なるが、物体の滑りが生じる直前の変化、すなわち“初期滑り”を検出するタイプのセンサが数多く報告されている。しかし、これらのセンサは構造が複雑であり、小型化・軽量化・省配線化の問題がある。また、受感素子を内部に埋め込む必要があるため、製作に時間とコストがかかる。

本研究室では、厚さ 0.5mm の薄型かつ柔軟な感圧導電性ゴムを用いた滑り覚センサを提案している [6]。本センサは感圧導電性ゴムがせん断変形した際に発生する特異な抵抗値変化を利用している (Fig.1)。しかしながら、感圧導電性ゴムが法線方向力を受けた際の抵抗値変化と、物体の滑りが発生した際の区別が困難であった。すなわち、滑りと法線方向力変化との分離に難点があり、物体の滑りを検出する際には法線方向力が一定であるという条件が必要であった。そこで、本稿では感圧導電性ゴムの抵抗値変化そのものではなく、物体の滑りが発生する直前に起こる複雑な電圧変化を利用し、滑りと法線力による抵抗値変化を分離する手法を提案する。

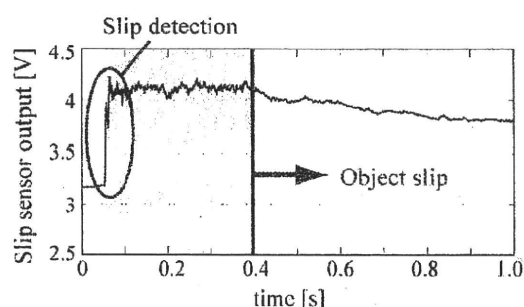


Fig.1 Output change of slip sensor

2. 滑り覚センサの構成

本センサの構成を Fig.2 に示す。正極と負極が互いに渦を巻いた電極上に感圧導電性ゴム (イナバゴム社製) を貼り付け、滑り覚センサを構成している。これに 1kΩ の抵抗を介し、5V の電源を与えている。センサの出力は電極間の電位差 (V_{out}) である。本センサの特徴はゴムを主体として構成しているため、柔軟・軽量・薄型である。今回試作したセンサは 6mm×6mm で、厚さは 0.5mm である。また、検出面を大きくしても、配線数は 2 本と省配線である。

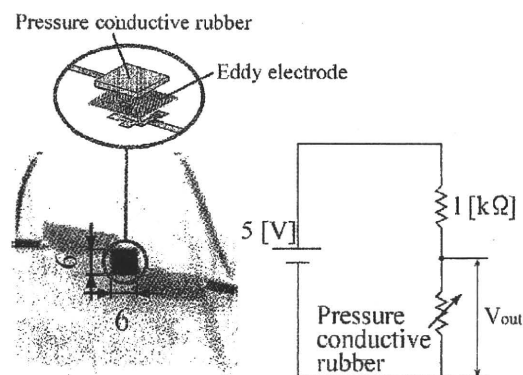


Fig.2 Structure of slip sensor

3. 滑り発生時の出力変化と周波数解析

物体の滑り発生時における複雑なセンサ出力変化を利用し、滑りと法線力変化を判別することができると思われる。ここでは、はじめに物体の滑りが発生した際の複雑な出力変化について述べた後、この出力変化に対して連続ウェーブレット解析を行い、その周波数特性を調べる。さらに、法線方向力が変化した際の周波数成分と比較し、両者の周波数の違いについて述べる。

3.1 滑り発生時の周波数成分について

本実験で用いた装置を Fig.3 に示す。2章で示した滑り覚センサを水平面上に配置し、この上にアクリルプレートをのせ、加圧子にて法線方向に荷重を加えた。加圧子を固定している自動ステージにて位置制御を行い、法線力を $2N$ に調節した。次に、挟みこんだアクリルプレートの端に糸を取り付け、ロードセルを介して自動ステージの動力によって引張り、センサ表面で滑らせた。アクリルプレートの滑り速度は $1mm/s$ に設定した。また、このときの電極間電位およびロードセルの出力をサンプリング周波数 $10kHz$ で計測した。

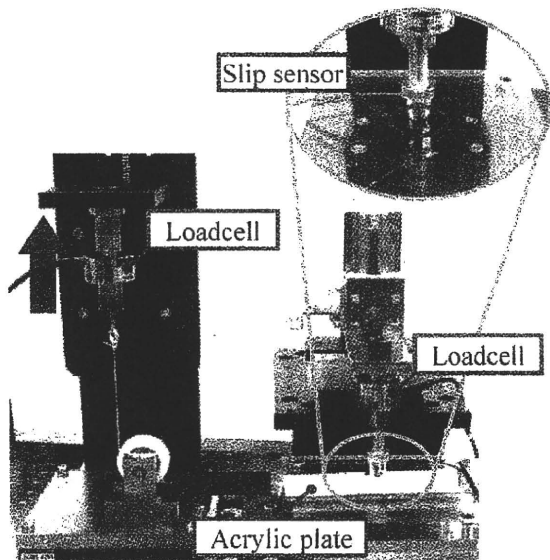


Fig.3 Experimental apparatus : object slip generator

以上の実験装置にて計測したデータを Fig.4 に示す。縦軸はアクリルプレートの引張力および滑り覚センサの出力を示しており、横軸は時間である。引張力の出力変化を見ると、 $3s$ 付近までは増加し、それ以降では一定となっている。すなわち、縦線の時刻において静摩擦から動摩擦へと変化していることがわかる。したがって、滑り覚センサ表面とアクリルプレートとの滑りは縦線の時刻以降で生じている。一方、滑り覚センサの出力を見ると、引張力が加わり始めると同時に上昇し始め、アクリルプレートが滑る直前において複雑な電圧変化をしていることがわかる。

次に、この結果に対して連続ウェーブレット変換を行った結果を Fig.5 に示す。上段に示すグラフは、滑り覚センサの出力変化であり、解析対象の信号である。

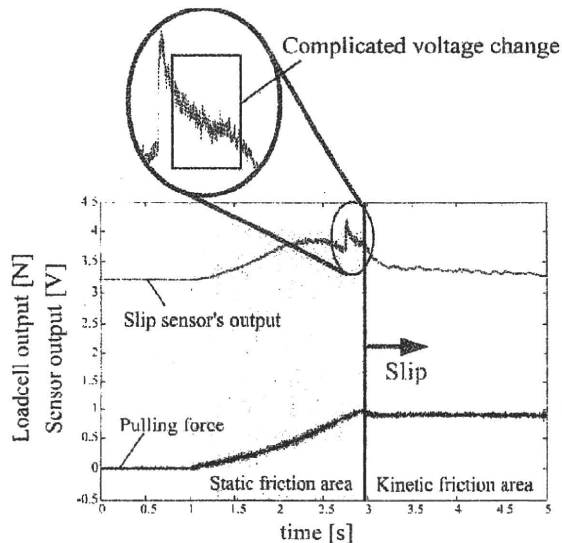


Fig.4 Experimental results : Output of slip sensor and Tensile force of object

本グラフの縦軸は電圧、横軸は時間である。中段のグラフは上段の出力変化に対して連続ウェーブレット変換を行ったグラフである。縦軸は周波数に相当するスケール、横軸は時間である。縦軸の上方にいくほど低周波をあらわし、下方ほど高周波であることを表す。また、色の濃淡で強度を表している。さらに、下段の三つのグラフは、中段グラフの□で囲んだ領域部分を拡大したものを示している。左側から順に、出力変化の初期、中期、滑り発生直前直後に拡大している。これより、接線力付加による出力変化が生じる初期においては、高周波成分はほとんど無く、強度も小さい。一方、プレートが滑り出す直前に向けて、高周波成分が増加し、 $1kHz$ 以上の高周波成分が現れることがわかった。また、物体が滑り出す直前付近において最大になっている。この高周波成分の発生要因は不明確であるが、これを用いることによって、初期滑りの検出が可能と思われる。

3.2 法線方向力変化の周波数成分との比較

物体の滑りが発生した場合の周波数成分と法線力の変化した際の周波数成分を比較するため、センサ表面に対して垂直に負荷と除荷を行った場合の信号に対してウェーブレット解析を行う。本実験における実験装置を Fig.6 に示す。図のように、水平面上に滑り覚センサを配置し、 $20mm \times 20mm$ のアクリルプレートを乗せ、半球状の加圧子を用いてセンサ表面に対して垂直な荷重を加えた。その後、除荷を行った。このときの滑り覚センサの出力変化に対してウェーブレット解析を行った。本実験結果を Fig.7 に示す。上段のグラフは滑り覚センサの出力変化、中段のグラフはウェーブレット変換を行った結果である。下段のグラフは、図の□で囲んだ領域を拡大したグラフを示している。

この結果から、負荷および除荷を行った際の周波数成分は高々 $600Hz$ 程度であり、物体を滑らせたときに生じるような高周波成分は現れなかった。以上より、滑

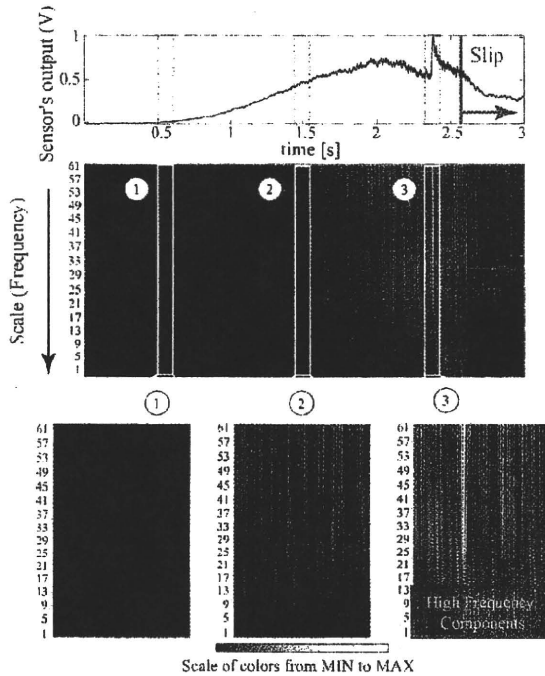


Fig.5 Analysis results : Continuous Wavelet Transform for the object slip

りによって発生する周波数成分は、法線方向力変化によって生じる周波数成分よりも高いことが明らかになった。したがって、両者の周波数成分の違いを利用し、分離が可能であると思われる。

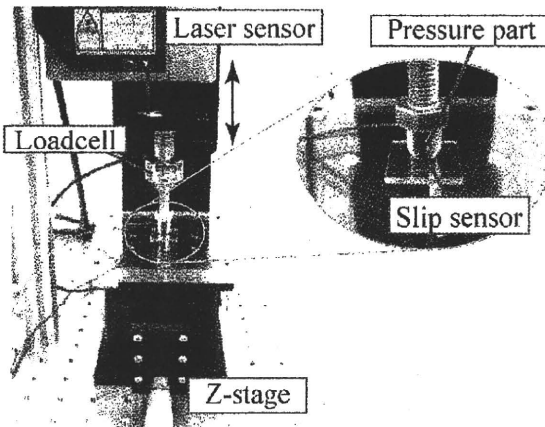


Fig.6 Experimental equipment : Additional normal force

4. 周波数成分を用いた分離手法の提案

以上より、滑りが発生した際の複雑な電圧変化には1kHz以上の高周波成分が含まれていることがわかった。また、それは法線力のみが付加された場合の周波数成分よりも高い。これにより、周波数成分の違いを利用することで、滑りと法線力変化との分離が可能と思われる。そこで、この瞬時的な高周波成分を検出する方法として、離散ウェーブレット変換（以下：DWT）

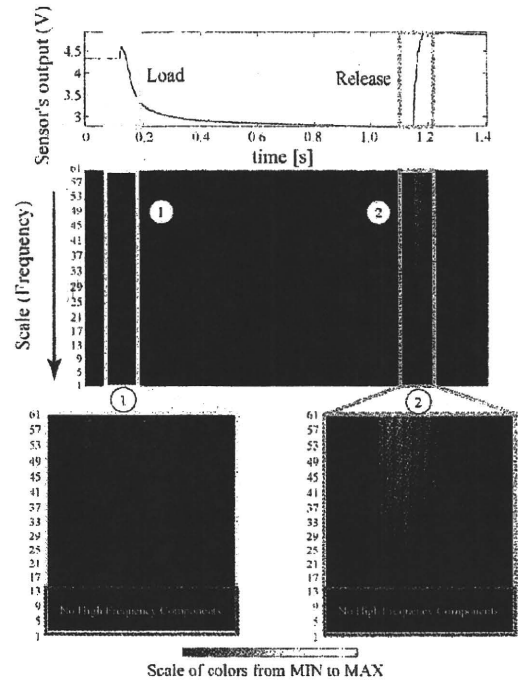


Fig.7 Analysis results : Continuous Wavelet Transform for the loading and unloading

を用いた手法を提案する。DWTを用いると、元の信号はインパルス応答が g のローパスフィルタと、インパルス応答が h のハイパスフィルタを利用して分解される。これら2つのフィルタは互いに密接な関係があり、Quadrature Mirror Filterとして知られたものである。応用としては、データの圧縮・伝送・ノイズ除去・エッジ認識などに利用されている。今回は、離散ウェーブレット変換のハイパスフィルタとしての機能を利用し、滑りと法線方向力の分離を行う。

Fig.3の実験機において、初期法線力（物体の押付け力）を2N, 3N, 4Nとし、アクリルプレートを滑らせた場合、およびFig.6の実験機において、法線力のみが変化した場合の出力変化に対し、Haarのウェーブレットを用いてレベル1のDWTを行った。これは、滑り覚センサの出力に対して、ハイパスフィルタをかける処理に相当する。この結果をFig.8~10およびFig.11にそれぞれ示す。上段のグラフは、滑り覚センサの出力を示しており、下段のグラフはDWTを行った結果である。Fig.11のように、法線方向力が変化した場合、ウェーブレット係数はほとんど変化していない。一方、Fig.8~10を見ると、滑りが発生する直前からウェーブレット係数が大きくなり、滑り出す直前において最大となることがわかった。すなわち、DWTによるフィルタリングを行った結果に対し、閾値を設定することで、物体の初期滑り状態と法線力変化とを分離することが可能である。さらに、初期法線方向力を2N, 3N, 4Nと変化させた場合、初期滑り時におけるウェーブレット係数の大きさにほとんど違いはなかった。以上より、法線力が変化した場合においても、すべて同じ閾値を用いて初期滑りと法線力変化とを分離することが可能である。

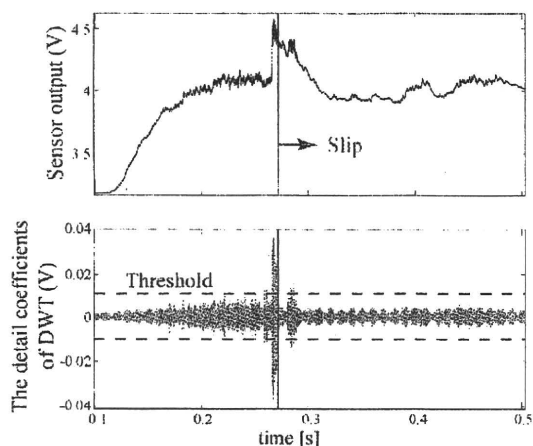


Fig.8 Analysis results : Discrete Wavelet Transform for the object slip. Initial normal force is 2N

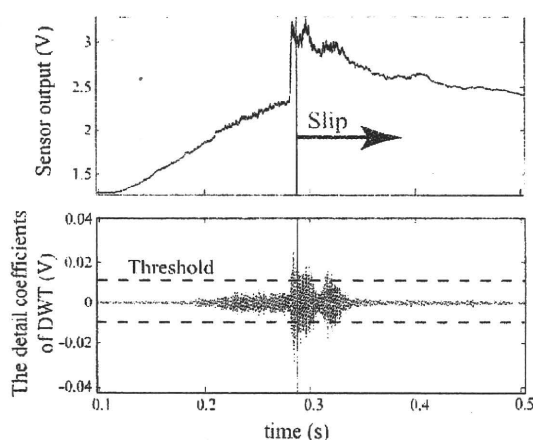


Fig.9 Analysis results : Discrete Wavelet Transform for the object slip. Initial normal force is 3N

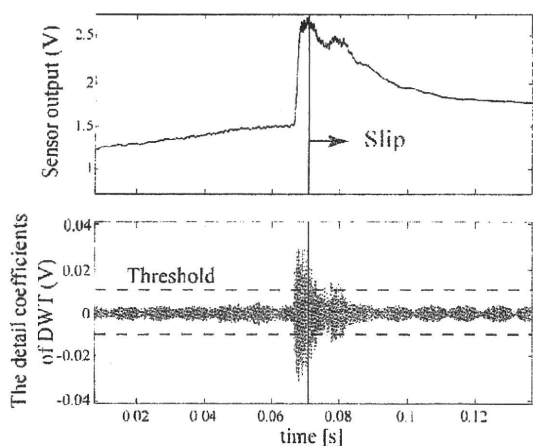


Fig.10 Analysis results : Discrete Wavelet Transform for the object slip. Initial normal force is 4N

5. まとめ

感圧導電性ゴムと電極というシンプルな構成のセンサを作製した。本センサ上で物体を滑らせると、物体

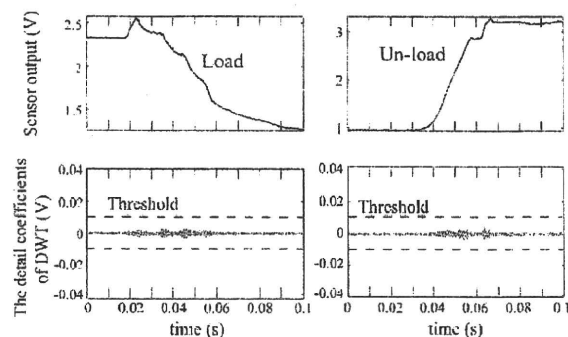


Fig.11 Analysis results : Discrete Wavelet Transform for the loading and unloading

が滑る直前付近において、複雑な出力変化が生じることがわかった。この出力変化を連続ウェーブレット変換を用いて解析した結果、数 kHz の高周波成分を含んでいることがわかった。また、この高周波成分は法線方向力変化における周波数成分よりも一桁ほど高いことがわかった。そこで、この周波数成分の違いを利用し、法線方向力変化と滑りとを分離するアルゴリズムを提案した。ここでは、離散ウェーブレット変換 (DWT) のハイパスフィルタとしての機能を利用し、滑りの周波数成分を抽出した。その結果、DWT を行ったウェーブレット係数に対して閾値を設定することにより、物体の滑りと法線力を分離することが可能であることがわかった。

今後は、物体の滑り速度、滑る物体が変化した場合における影響および物体がセンサ表面に衝突した場合などについて検証し、本手法による分離能力を確かめる。また、高周波成分の発生要因について検証していく。

- [1] R.S. Johanson, G. Westling, *Roles of glabrous skin receptors and sensorimotor memory in automatic control of precision grip when lifting rougher or more slippery objects*, Exp Brain Res, Vol.56, pp. 550-564, 1984
- [2] J.S. Son, E.A. Monteverde and R.D. Howe, *A Tactile Sensor for Localizing Transient Events in Manipulation*, Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.471-476, 1994
- [3] 山田陽滋, 森田裕之, 梅谷陽二, “ロボットハンドのための指紋を備えた高周波微振動検出式滑り覚センサ”, 計測自動制御学会論文集, vol.36, No.6, pp.473-480, 2000
- [4] 古海, 但馬, 加賀美, 篠田, 稲葉, 井上: “音響共振型テンソルセル触覚センサによる滑り予知と把持動作への応用”, 日本ロボット学会誌, Vol.20, No.8, pp.868-875, 2002
- [5] K. Noda, I. Shimoyama, *A Shear Stress Sensing for Robot Hands -Orthogonal arrayed Piezoresistive Cantilevers standing in Elastic Material-*, pp.63-66, HAPTICS' 06
- [6] S. Teshigawara, M. Ishikawa, M. Shimojo, *Development of High Speed and High Sensitivity Slip Sensor*, Proc. IEEE Int. conf. on Intelligent Robots and Systems, pp.47-52, 2008
- [7] S. Teshigawara, K. Tadakuma, A. Ming, M. Ishikawa, M. Shimojo *Development of High-Sensitivity Slip Sensor Using Special Characteristics of Pressure Conductive Rubber*, Proc. IEEE Int. conf. on Robotics and Automation, pp.3289-3294, 2009

インテリジェントロボットハンドの研究開発 — Pick and Place の達成 —

Development of Intelligent Robot Hand — Achievement of Pick and Place —

溝口 善智 (電通大) 〇堤 隆弘 (電通大) 長谷川 浩章 (電通大) 正 明 愛国 (電通大)
正 多田 隈 建二郎 (電通大) 正 石川 正俊 (東京大) 正 下条 誠 (電通大)

Yoshitomo MIZOGUCHI(UEC), 〇 Takahiro TSUTSUMI(UEC), Hiroyuki HASEGAWA(UEC),
Aiguo MING(UEC), Kenjiro TADAKUMA(UEC), Masatoshi ISHIKAWA(Tokyo.Univ), Makoto SHIMOJO(UEC)

Abstract— To achieve a skillful operation like the human being by robot hand, an interaction with the vision and the tactile sense is indispensable. To consider the safe and certain grasping operation by the robot hand, we proposed use of proximity sensor which can detect the several tens of millimeters from finger-tip surface and tactile sensor. And we call such a robot hand an “ intelligent robot hand ” and develop this. This time, we propose the control method of internal force based on CoP(center of pressure) tactile sensor for the achievement of grasping by three fingers and confirmed utility of the proposal method by the experiments.

Key Words: Robot Hand, Tactile Sensor, Proximity Sensor

1. 序論

近年ロボットハンドに関する研究が盛んであるが、その目的は人間のような手指の巧緻性を工学的に再現することである。ロボットハンドによる器用な動作の実現には、視覚・触覚情報のインタラクションが不可欠である。既存のロボットハンド研究においては、視覚情報の取得にカメラを用いる方法がほとんどであったが、この場合ロボットハンドと対象物の距離が極めて近い非接触相と接触相の境界面においては、オクルージョン等の影響が顕在化し情報が欠落するという問題があった。我々はここに近接覚という感覚を導入することにより、ロボットハンドの把持動作を効率化することを考えた。そして近接覚・触覚・滑り覚といったセンサ群を有し、近接から接触までをシームレスに検出し、確実な把持を達成するロボットハンド、インテリジェントロボットハンドを提案している。

本研究においては、インテリジェントロボットハンドの実際の構成例と、インテリジェントロボットハンドを用いた具体的なタスクとして、Pick & Placeの実現方法について提案し、実験による検証を行う。

2. 触・近接覚複合センサ

2.1 荷重分布中心位置検出触覚センサ

2.1.1 概要

触覚センサは当研究室開発の荷重分布中心位置検出触覚センサ (以下 CoP センサと呼ぶ) を採用した。本センサは感圧導電性ゴムを二枚の導電性フィルムで挟み込んだ3層構造からなり、出力としてセンサに加えられた荷重分布の中心位置と、その力の総和を得ることが出来る。柔軟な素材から構成されるために、指先へ巻きつけての実装が可能である。またセンサ面積に依らず4本という省配線を実現しておりロボットような構造物への実装上有利なセンサである。

2.1.2 CoP センサによる滑り検出

さらに本センサはセンサ接線方向の力に対しても特異な挙動を示すことが確認されている。CoP センサに接線方向の力を負荷した場合の出力とそのときの力及び、センサに接線力を加えた対象物の変位を見たものが Fig.1 である。

これから接線方向力が増加するにつれてセンサ出力が急激に低下することが確認できる。この力出力の降下に注目することで、滑りの予知/検出が可能であると考えられる。今回は次の2つの条件を滑り判定条件として導入し、これらが成立した場合を滑りの発生とした [4]。

$$\text{条件 1: } \Delta V > V_{th} \quad (1)$$

$$\text{条件 2: } \frac{d}{dt} \Delta V < c \quad (2)$$

このとき V_{th} , c は適当な定数である。

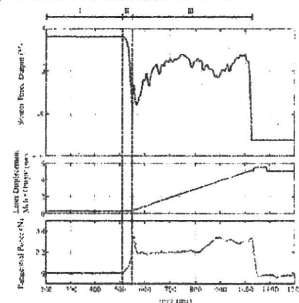


Fig.1 法線方向負荷試験

2.2 ネット状近接覚センサ

近接覚センサは、こちらも当研究室開発のネット状近接覚センサを用いた。ネット状近接覚センサは、フォトリフレクタをマトリクス上に構成したもので、CoP センサを離散系において実現した構造となっている。出力としては、フォトリフレクタ発光部が照射した赤外光が対象物に反射したときにセンサ面上に生じる反射照度分布の中心位置

と、対象物とセンサとの距離を取得することが出来るセンサとなっている。

2.3 穿孔 CoP による触・近接覚複合センサの実現

インテリジェントロボットハンドの実現に際しては、上述の触覚センサと近接覚センサが対象物の接近から接触までを同一面上において計測する必要がある。この要求から両センサはロボットハンド表面で共存しなければならない。今回はその実現に貫通孔を設けた CoP センサを用いる方法を考案した。即ち、Fig.2 に示すように、CoP センサに貫通孔を設けその開口部から近接覚センサの感受面を露出させることにより両センサの共存を図る。

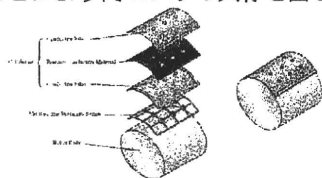


Fig.2 触・近接覚複合センサ

これには穿孔処理を行った場合の触覚センサの挙動について確認する必要がある。そこで実際に穿孔処理を施した CoP センサを用いて検証試験を行った。結果を Fig.3 に示す。これより貫通孔近傍ほど位置出力が穴の半径方向外側へずれることが確認できる。しかしながらそのオフセット量は最大でも 2(mm) 程度であり、従前と変わらず触覚センサとして機能することが確認された。

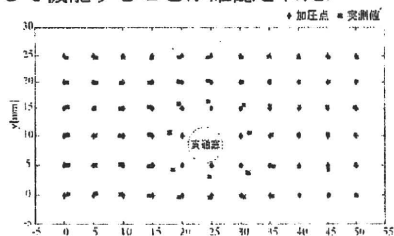


Fig.3 穿孔 CoP 位置出力特性

3. インテリジェントロボットハンドの構成

3.1 多指ロボットハンド

今回インテリジェントロボットハンドを構成するプラットフォームとしては、3本指8自由度ロボットハンドを使用した。ロボットハンドはXZステージ上に実装され、鉛直方向及び水平方向にそれぞれ1自由度を有する構成となっている。

インテリジェントロボットハンドの全体像を Fig.4 に示す。3つの指先は触・近接覚複合センサを実装され、手掌部にはネット状近接覚センサが実装されている。システムの全体像を Fig.5 に示す。制御 OS としては ART-Linux を採用し制御ループ 1ms を実現している。



Fig.4 インテリジェントロボットハンドの構成

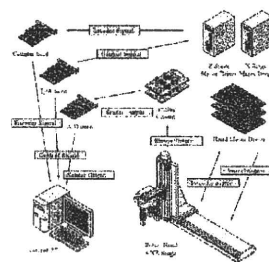


Fig.5 システム全体像

3.2 指先の製作

指先に装着する近接覚センサは検出距離の長い RPR-220(ROHM 社製)を採用し、指先に1素子を埋設した。

指先の構成を Fig.6 に示す。指先形状は CoP センサ実装上の都合と、指先把持を実現する要求から、先端にアールを持つ角指とした。2液型の硬質ウレタン樹脂で成形する際に予め素子を埋設した。CoP センサには該当部位にφ6(mm)の孔を設け指先へ実装した。またセンサ表面は保護用のメッシュで被っている。

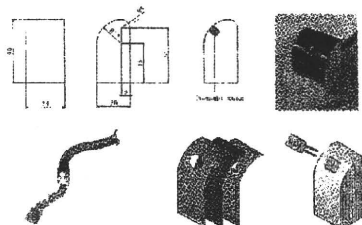


Fig.6 指先の構成

3.3 手掌部近接覚センサの製作

続いて手掌部に実装する近接覚センサの制作を行った。使用する近接覚素子は指先同様 RPR-220 とし、ロボットハンド手掌部面積に合わせて、3×5のマトリクス構成とした。回路定数である素子間抵抗と、外付け抵抗の選定は回路シミュレータを用いて行い、制御器の A/D ボード入力レンジ±10(V)に合わせて設計した。

センサ自体の製作は、プリント基板上で構成したセンサ回路の素子間をウレタン樹脂で充填し、IR フィルタで全面を被うことによってセンサ面を保護することとした。このような構成により、掌の接触面としての機能を維持することが出来、今回は行わなかったが穿孔 CoP センサの実装も可能となる。

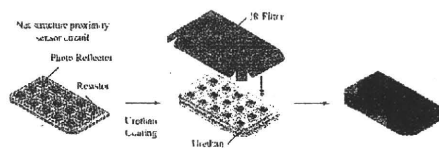


Fig.7 手掌部近接覚センサ構造

製作したセンサについて特性試験を行った。結果が Fig.8, Fig.9 である。実験は (3,1) エレメントに対して円形の白紙を正対させ、接触した状態から遠ざけた場合の出力を測定した。まず Fig.8 より、センサ距離出力は、1つのピークを持つ波形であることが確認できる。これは近接覚素子の特性を反映したものである。一方 Fig.9 に示すように、セン