水晶振動子による滑りとその方向のセンシング†

村 岡 茂 信*

Sensing Slip and Its Direction Using Quartz Resonators†

Shigenobu MURAOKA*

It is considered that a person grasps an object efficiently by utilizing a critical force such that the object does not slip in the hand, and that regulation of the 'grasp force' based on slip information is useful for grasp control. Various slip sensors have been proposed for grasp control^{2)~5)}. Because many of the slip sensors and force sensors used in robots have analogue outputs, they are prone to being affected by electrical noise. Therefore they often require amplifiers, low pass filters and A-D converters. On the other hand, a force sensor using quartz resonators is robust to electrical noise since the output in this case is a frequency shift. This type of force sensor also has quick response time, high sensitivity, high resolution and wide bandwidth. Information on the grasp force, grasp position and slip and its direction is important for grasp control. Detection of grasp force and grasp position was reported in my previous paper⁶⁾. In this paper, a method of detecting slip and its direction by quartz resonators is reported. A principle for detecting slip and its direction, the results of changes in frictional force under various contact forces and slip speeds, and slip direction derived from two components of a frictional force are shown. It is demonstrated that an individual slip and its direction can be detected using quartz resonators, and that quartz resonators are useful in constructing a robot sensor.

Key Words: sensor, slip and its direction, grasp, quartz resonator, frequency output

1. はじめに

ヒトは対象物を滑り落ちないぎりぎりの力で効率的に把持する¹⁾とされている。ロボットハンドにおける把持制御でも、滑り情報に基づく把持力調整が有効な手法とされ、各種の滑りセンサが提案されている^{2)~5)}。これらの滑りセンサの多くはアナログ出力のため、ノイズの影響を受けやすく信号処理も容易でない。把持制御に使用されている大半の力センサも、歪みゲージ式に代表されるように出力がアナログでそのレベルも低く、アンプ、フィルタ、A-D変換器などを要することが多い。これらに対して、水晶振動子の発振周波数が外力により変化することを利用した力センサは、出力が周波数変化量であるためノイズに強く信号処理が容易で高感度・高分解能・広帯域といった特長を有する。水晶振動子による力センサはこのように多くの利点をもつが、現在のところ把持力や滑りに伴う摩擦力変化といった動的な力のセンサとして実用化された例はみかけない。外力による水晶振動子の周波数変化とその応用に関する研究や歴史⁶⁾についてはすでに紹

介したので省略する。

著者は、水晶振動子をロボットの把持用センサに応用するため、水晶振動子の応力感度とその温度特性⁸⁾、差動法⁹⁾、機械的強度、力感度の周波数特性、把持力把持位置センサ⁶⁾、外界センシング⁷⁾などについてすでに報告し、水晶振動子がロボットの把持力センサとして有用であることを示した。本論文では、水晶振動子を用いて滑りに伴う摩擦力変化を検出したのでこれについて報告する。滑り情報に基づく把持力調整では、把持力、把持位置、滑りの有無、滑り方向に関する情報を必要とすることが多い。このうち把持力と把持位置の検出については報告済⁶⁾なので、ここでは水晶振動子を用いた滑りとその方向の検出について報告する。

2. 水晶振動子による滑り検出

一定の接触力の下で2物体の間に相対速度 v の滑り(2物体間の接触点が継続的に変化している状態)が生じているとき、摩擦力の時間的变化はFig. 1 (B)の3つのパターンに大別できる¹⁰⁾。(1)は動摩擦力が最大静摩擦力より小さい場合で、Fig. 1 (A)に示すように、物体IとIIの接触面に剪断方向の力が加わると付着点Oは付着したまま接線方向に移動し、物体表面の復元力の増加とともに静摩擦力も増加していく。このように同じ点で接触が継続して接触面が接線方向に変形している状態は"ずれ"と呼ばれている。a点までずれると復元力が最大静摩擦力より大きくなり滑りが発生す

† 第37回SICE学術講演会で一部発表(1998) /
第39回SICE学術講演会で発表(2000)

* 大阪工業大学 大阪市旭区大宮5-16-1

* Faculty of Technology, Osaka Institute of Technology,
Asahi-ku Osaka

(Received November 1, 1999)

(Revised March 31, 2000)

Fig. 1 Three typical patterns of change in a frictional force under slippage

る。b 点まで滑ると復元力と動摩擦力が釣り合い、2 物体は再び付着する。以後は a 点と b 点の間で滑りと付着を繰り返す。これはスティックスリップ現象として知られているものである。(2) は動摩擦力が最大静摩擦力より小さく、a 点で滑りが起きて b 点まで復元した後は一定の摩擦力の下で滑るとされている場合、(3) は最大静摩擦力と速度 v での動摩擦力の大きさが等しく、a 点で滑りが起きた後は摩擦力が一定のまま滑るとされている場合である。これらのうち、(3) のパターンは“ずれ”でも生じるので、このパターンからは“滑り”と“ずれ”の識別が困難である。したがって、滑りセンサとしては“滑っている”ときに (1) または (2) のパターンを検出できることが望ましい。本章では水晶振動子を用いて滑りにともなう摩擦力変化と滑り方向の検出について報告する。

2.1 検出原理

Fig. 2 は滑り特有の摩擦力変化を検出するための水晶振動子を用いた力センサの概略で、2 組の水晶振動子対 Q_{1T} と

Fig. 2 Main components of a slip sensor incorporating two pairs of quartz resonators

Q_{1C} , Q_{2T} と Q_{2C} が互いの主面を直交するように角柱に装着されている。角柱の固定端側と自由端側の水晶振動子対の主面に垂直な方向および角柱の軸線方向をそれぞれ X , Y , Z 方向とし、角柱の固定端から摩擦力 F と接触力 N が作用する P 点までの距離を Z 、各水晶振動子対までの距離を ℓ_1 , ℓ_2 、水晶振動子と角柱の中立面の距離を h 、水晶振動子装着部の断面 2 次モーメントを I とする。P 点は、角柱先端にピアノ線を介して取り付けられた球上の点で、センサの中心軸から Δr 離れているとし、P 点とセンサ中心軸を結ぶ直線が X 軸と α の角をなしているとする。水晶振動子を対で用いるのは環境ノイズを除去するための差動法⁹⁾を適用しているからで、2 対用いているのは X - Y 平面内のあらゆる方向の滑りに対処するためである。対象物が接触力 N で P 点に押しつけられて X - Y 面内で滑ると、 F と N が水晶振動子に伝搬され発振周波数が変化する。摩擦力 F の X , Y 成分をそれぞれ F_X , F_Y とし、 F が X 軸となす角を ϕ とする。水晶振動子を Q で表し、角柱の固定端側と自由端側の水晶振動子対にそれぞれ添え字 $_1$ と $_2$ を付し、対の水晶振動子を区別するため各々に添え字 $_T$ と $_C$ を付す。2 対の水晶振動子 Q_{1T} と Q_{1C} および Q_{2T} と Q_{2C} の差周波数の変化量をそれぞれ Out_1 , Out_2 とし、各水晶振動子に関する諸量に添え字 $_{1T}$ と $_{1C}$ および $_{2T}$ と $_{2C}$ を付す。 Z 方向の圧縮力は対の各々の水晶振動子に同様に加わり差動法により相殺されるので、以下の議論ではこの圧縮力を考慮しない。摩擦力 F と接触力 N の偏心による各水晶振動子の曲げ応力 σ_{1T} , σ_{1C} , σ_{2T} , σ_{2C} は、近似的に

$$\sigma_{1T} = -\sigma_{1C}$$

$$= F(Z - \ell_1)h \cos \phi / I + N \Delta r h \cos \alpha / I \quad (1)$$

$$\sigma_{2T} = -\sigma_{2C}$$

$$= F(Z - \ell_2)h \sin \phi / I + N \Delta r h \sin \alpha / I \quad (2)$$

となる。各水晶振動子対の Out_i ($i = 1, 2$) は、

$$Out_i = (f_{iC} - f_{iT}) - (f_{0iC} - f_{0iT})$$

$$= [(f_{0iC} + f_{0iT})\mu_0$$

$$+ (f_{0iC} \cos 2\psi_{iC} + f_{0iT} \cos 2\psi_{iT})\mu_1$$

$$+ \{(f_{0iC} + f_{0iT})\nu_0$$

$$+ (f_{0iC} \cos 2\psi_{iC} + f_{0iT} \cos 2\psi_{iT})\nu_1\} T] \sigma_{iT} \quad (3)$$

となる⁹⁾。ここで、 $\mu_0 \approx 14.1 \times 10^{-12} \text{Pa}^{-1}$, $\mu_1 \approx 13.1 \times 10^{-12} \text{Pa}^{-1}$, $\nu_0 \approx -9.9 \times 10^{-15} \text{Pa}^{-1} \text{K}^{-1}$, $\nu_1 \approx 28.4 \times 10^{-15} \text{Pa}^{-1} \text{K}^{-1}$ で⁸⁾, f と f_0 はそれぞれ $F \neq 0$ と $F = 0$ での周波数、 ψ は水晶振動子の電気軸と外力の方向のなす角、 T は温度である。(3) 式は

$$f_{0iC} \cos 2\psi_{iC} + f_{0iT} \cos 2\psi_{iT} = -(f_{0iC} + f_{0iT})\nu_0/\nu_1 \quad (4)$$

のとき

$$Out_i = (f_{0iC} + f_{0iT})\{\mu_0 - \mu_1(\nu_0/\nu_1)\} \sigma_{iT} \quad (5)$$

となり、出力 Out_i が温度に無関係となる。以下の議論では

Table 1 Number of occurrences of each pattern in Fig. 1

(1) Acrylic resin							
v	N	0.25N	0.49N	0.98N	1.47N	1.96N	2.45N
5 mm/s	v	500	131	410	500	500	500
		410	500	500	500	500	500
10 mm/s	v	500	113	500	500	500	500
		410	320	500	500	500	500
15 mm/s	v	500	122	320	500	500	500
		410	500	500	500	500	500
20 mm/s	v	500	122	230	500	500	500
		410	320	500	500	500	500
25 mm/s	v	500	140	320	500	500	500
		320	320	500	320	500	500
30 mm/s	v	500	140	500	410	500	500
		230	230	230	320	500	500

(2) Aluminum							
v	N	0.25N	0.49N	0.98N	1.47N	1.96N	2.45N
5 mm/s	v	500	131	410	500	500	500
		500	500	500	500	500	500
10 mm/s	v	500	113	500	500	500	500
		500	500	500	500	500	500
15 mm/s	v	500	113	320	500	500	500
		500	500	500	500	500	500
20 mm/s	v	500	122	320	500	500	500
		500	500	500	320	500	500
25 mm/s	v	500	131	320	500	500	500
		500	500	500	500	500	500
30 mm/s	v	500	140	500	230	500	500
		500	500	500	500	500	500

(3) Cloth							
v	N	0.25N	0.49N	0.98N	1.47N	1.96N	2.45N
5 mm/s	v	500	410	410	410	320	050
		230	140	050	050	050	050
10 mm/s	v	410	410	320	500	320	230
		140	050	140	140	050	050
15 mm/s	v	500	410	410	410	500	320
		140	140	140	140	140	140
20 mm/s	v	500	500	500	500	500	500
		410	230	140	140	140	140
25 mm/s	v	500	500	500	500	500	500
		500	410	230	320	230	140
30 mm/s	v	500	500	500	500	500	500
		500	500	500	410	230	320

(4) Kent paper							
v	N	0.25N	0.49N	0.98N	1.47N	1.96N	2.45N
5 mm/s	v	230	320	500	500	500	500
		320	500	500	500	500	500
10 mm/s	v	050	140	500	500	500	500
		320	500	500	500	500	500
15 mm/s	v	050	140	500	500	500	500
		230	410	500	500	500	500
20 mm/s	v	050	050	410	500	500	500
		140	410	500	500	500	500
25 mm/s	v	050	050	320	500	500	500
		050	410	500	500	500	500
30 mm/s	v	041	050	500	500	500	500
		050	500	500	500	500	500

(5) Vinyl tape							
v	N	0.25N	0.49N	0.98N	1.47N	1.96N	2.45N
5 mm/s	v	140	500	500	500	500	122
		500	500	500	500	500	500
10 mm/s	v	140	500	500	500	500	050
		320	500	500	500	500	500
15 mm/s	v	140	500	500	500	500	140
		410	500	500	500	500	500
20 mm/s	v	140	500	500	500	500	131
		410	500	500	500	500	500
25 mm/s	v	140	500	500	500	410	113
		410	500	500	410	500	500
30 mm/s	v	410	500	500	500	500	140
		410	500	230	410	500	410

(6) Silicone rubber							
v	N	0.25N	0.49N	0.98N	1.47N	1.96N	2.45N
5 mm/s	v	005	005	005	005	005	005
		014	005	005	005	005	005
10 mm/s	v	014	005	005	005	005	005
		023	005	005	005	005	005
15 mm/s	v	023	005	005	005	005	005
		032	005	005	005	005	005
20 mm/s	v	005	005	005	005	005	005
		023	005	005	014	005	005
25 mm/s	v	032	005	005	005	005	005
		023	005	005	005	005	005
30 mm/s	v	023	005	005	005	005	005
		023	005	005	005	005	005

v が 5, 10, 15, 20, 25, 30 mm/s のもとで, 板ばね部の共振周波数 f_n が 140Hz と 220Hz の 2 種類のセンサを使用して, 各条件のもとで滑りに伴う摩擦力変化を 5 回ずつ測定した。Fig. 4 は測定系のブロック図で, 専用ディスプレイ付の周波数カウンタを使用した。

実験結果

Fig. 5 は Fig. 3 の装置で測定した滑りに伴う摩擦力の時間波形の典型的な 4 パターンである。横軸は時間で, 左の縦軸に摩擦力 F による差周波数の変化量 Out_1' , 右の縦軸に (11) 式により求めた摩擦力が示してある。ここでは滑り波形の特徴を示すためあえてスケールを統一していない。(1), (2), (3) は, Fig. 2 (B) の (1), (2), (3) に対応している。(1) はスティックスリップで, これから "滑りの発生" および "その継続" を知ることができる。(2) は最初の右下がりの部分が "滑りはじめ" で, この部分から "滑りの発生" を知ることができる。それ以降の波形からは "ずれ" と "滑りの継続" の識別が困難である。(3) は "ずれ", "滑り" いずれのときでも観測できる波形で, これからは "ずれ" と "滑り" の識別が困難である。(4) は Fig. 2 (B) の (1) と (2) の特徴を併せもつ波形で, (1) と同様に "滑りの発生" と "その継続" を知ることができる。したがって, (1), (2), (4) いずれかの波形が観測できれば "滑り" を検出したことになる。

Table 1 は, 対象物ごとに各接触力 N , 各滑り速度 v に

ついて, 上段に板ばね部固有振動数 f_n が 140Hz のセンサでの測定結果を, 下段に 220Hz のセンサでの測定結果を示している。各欄には 5 回の測定のうち Fig. 1 (B) の (1), (2), (3) のパターンが現れた回数を順に示している。なお, Fig. 5 (4) の波形は Fig. 1 (B) の (1) として分類した。 f_n の違いによる顕著な滑り波形の差は認められなかった。またシリコンゴムでは大半が (3) のパターンとなっていることがわかる。

Fig. 6 は, 6 種類の対象物について, 接触力が 1.47N, 滑り速度 10, 20, 30 mm/s のもとで, f_n が 140Hz のセンサを使用した場合の測定結果で, 横軸に時間, 左の縦軸に摩擦力 F による Out_1' , 右の縦軸に (11) 式により求めた摩擦力が示してある。(5) と (6) のビニールテープとシリコンゴムは摩擦力変化が大きく, その変化に要する時間も長くなっている。この理由は, 対象物が柔らかく, センサ先端の円柱部が対象物に押し込まれて "ずれ" から "スリップ" に移るまでの板ばねの変形量が大きくなり, 大きな力が水晶振動子に加わり周波数変化量が大きくなることと, 滑り速度が同じなら板ばねに大きな変形が生じるにはそれだけ時間もかかることのためと考えられる。Fig. 6 の (1)~(5) の最初の右上がりの部分で, センサ円柱部と対象物は付着状態で "ずれ" が徐々に大きくなり, 最初の極大点に達したとき復元力が最大静摩擦力より大きくなって滑り始め, つぎの極小点に達して動摩擦力が復元力と釣り合い再び付着状態となり, 以後これを繰り返すと考えられる。いずれの図においても付着状態にある右上がりの部分の傾きは滑り速度 v とともに大きくなっていることがわかる。(6) の滑り波形は "ずれ" でも "滑り" でも生じるので, 対象がシリコンゴムの場合には "ずれ" と "滑り" の識別が困難である。Fig. 7 は, 6 種類の対象物について, 滑り速度 20 mm/s, 接触力 0.25, 0.98, 2.45 N

Fig. 6 Patterns of change in frictional forces detected by quartz resonators when $N = 1.47$ N

Fig. 7 Patterns of change in frictional forces detected by quartz resonators when $v = 20$ mm/s

のもとでの測定結果で、横軸に時間、左の縦軸に摩擦力 F による Out_1' 、右の縦軸に (11) 式により求めた摩擦力が示してある。いずれの場合も摩擦力に対応する周波数変化量が接触力（垂直抗力）の増大とともに大きくなっているが、これは摩擦力が接触力に比例して大きくなることから容易に理解できる。また、(1)~(4) ではスティックスリップの周期が接触力の増大とともに大きくなっているが、このことは接触力の増大とともに“ずれ”が大きくなるためと考えられる。

2.3 滑り方向の検出

検出装置

Fig. 8 は、“滑り”と“その方向”の検出装置の概略で、

Fig. 8 An experimental setup using quartz resonators for detecting slip and its direction

Fig. 9 Block diagram of the measurement system

Fig. 3 との違いは、センサ部が回転台上に設置されていて対象物を水晶振動子対に対して任意の方向に滑らせることができること、直交した2組の水晶振動子対が使用されていること、対象物との接触部がピアノ線先端の球であることである。同時刻での各水晶振動子対の出力 Out_1' と Out_2' を (11) 式と (12) 式に代入して摩擦力の成分 F_X , F_Y を求め、これらを (14) 式に代入するとその時刻での滑り方向 ϕ が求められる。Fig. 9 は測定系のブロック図で、同時刻での Out_1' と Out_2' の演算が必要のため、周波数カウンタの出力を GPIB 経由でパソコンに取り込んでいる。

実験結果

Fig. 10 の (A) と (B) は $\phi = 30^\circ$ の方向に対象物を引張ったときの Out_1' と Out_2' の時間波形で、横軸に時間、左縦軸に Out_1' と Out_2' 、右縦軸に (11), (12) 式により求めた摩擦力 F_X , F_Y が示してある。(C) は Out_1' と Out_2' から (11), (12), (14) 式により求めた ϕ の時間波形である。今回は、信号の伝送時間などの関係でサンプリング周期が大きくなり、(A) と (B) にスティックスリップ波形を表示できなかった。対象物は、最初 Fig. 8 の装置上で適当な方向で静止していて、引張ることにより糸と同じ方向を向く。このため、(C) に示すように、最初の数 100ms の間は滑り方向が変化している。しかし、その後は $\pm 2^\circ$ 程度以内の精度で一定の方向に滑っている。 $-45^\circ \sim 135^\circ$ の範囲の ϕ について同様に実験した結果はほぼ同様の結果を得た。 ϕ の測定値は、 ϕ の設定値が 45° での Out_1' の測定値から (11), (12) 式により F_X と F_Y の値を求め、これらの値を用いて $k (F_Y/F_X) = 1$ となるように係数 k を定め、すべての F_Y/F_X の実験値にこの k を乗じた値を (14) 式右辺の中括弧内に代入して求めた。このことはセンサを校正したことに相当している。Fig. 11 は、 $-45^\circ \sim 135^\circ$ の範囲の ϕ について、 Out_1' と Out_2' から求めた滑り方向 ϕ の測定値と対象物を糸で引張った方向の関係を●印で示したものである。●印が $\pm 2^\circ$ 程度以内の

Fig. 10 (A) Out_1' and (B) Out_2' detected by quartz resonators, and (C) Slip direction ϕ derived from Out_1 and Out_2

Fig. 11 Relationship between measured values of slip direction ϕ and set points of ϕ

精度で 45° の直線にのっていることから、この程度の精度で水晶振動子により滑り方向を検出ができることがわかる。

3. おわりに

ノイズに強く信号処理が容易で、高感度、高分解能、広帯域といった利点を有する水晶振動子による力センサを用いて、滑りとその方向の検出を行った。まず、検出原理を示し、つ

ぎに、アクリル樹脂、アルミニウム、布テープ、ケント紙、ビニールテープ、シリコンゴムの6種類の対象物について、水晶振動子による滑り特有の摩擦力変化の検出結果を示した。これらの結果からシリコンゴム以外の対象物について“滑り”と“ずれ”の識別が可能であることがわかった。最後に、同時に測定した摩擦力の2成分 F_x と F_y から $\pm 2^\circ$ 程度以内の精度で滑り方向が求められることを示した。以上により、水晶振動子が滑りセンサとして使用できることを示した。

今後の課題は、シリコンゴムのような対象物でも“滑り”と“ずれ”を識別できる方法を確立し、把持力、把持位置、滑りとその方向などを同時に測定できる水晶振動子による多機能センサを実現することである。

謝 辞

本研究は文部省科学研究費補助金（基盤研究C 2 一般、課題番号 10650419）により行った。また、本論文は校閲者の有益なご教示ご指摘により改善された。記して謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) R.S.Johansson, et al.: Tactile Afferent Signals in the Control of Precision Grip, M.Jeannerod ed., Attention and Performance, XIII, 677/713 (1990)
- 2) 山田陽滋: 把持までのセンシング戦略 その2: 滑りと静摩擦係数の検出～表面粗さ情報の取得, 日本ロボット学会誌, **11**-7, 27/33 (1993)
- 3) 富田豊他: ゴムのスリップを用いた滑りセンサの開発, 計測自動制御学会論文集, **27**-1, 1/4 (1991)
- 4) 山田陽滋他: 3軸力覚・振動覚を有する触覚センサの開発と物体の並進・回転滑り識別への応用, 日本ロボット学会誌, **13**-4, 539/544 (1995)
- 5) R. Andrew Russell: Robot tactile sensing, 135/138, Prentice Hall (1990)
- 6) 村岡茂信: 水晶振動子による3成分把持力把持位置センサ, 計測自動制御学会論文集, **35**-6, 715/722 (1999)
- 7) 村岡茂信: 4対の水晶振動子を用いた接触力・接触位置センサとこれによる外界センシング, 電気学会論文誌, **120E**-3, 99/104 (2000)
- 8) 村岡茂信他: 力センサとしての矩形ATカット水晶振動子, 計測自動制御学会論文集, **32**-4, 604/606 (1996)
- 9) 村岡茂信: 差動法を用いた水晶振動子による力センサ, 計測自動制御学会論文集, **33**-12, 1117/1123 (1997)
- 10) 中久一郎: 摩擦のおはなし: 83/94, 日本規格協会 (1990)

[著 者 紹 介]

村 岡 茂 信 (正会員)

1972年神戸大学工学部計測工学科卒業, 74年神戸大学大学院工学研究科修士課程修了, 同年大阪工業大学工学部機械工学科に勤務, 現在に至る。計測工学, センシングシステムの研究に従事。日本機械学会, 日本ロボット学会, 電気学会などの会員