

すべり検出システムの精度向上と実用化

田中智大*¹ 関根俊彰*²

Accuracy Improvement and Practical Use of Slip Detection System

TANAKA Tomohiro*¹, SEKINE Toshiaki*²

抄録

すべり検出システムの高精度化と定量的な評価技術の確立を目指し、ハード及びソフトの両面からシステムの改良を行った。ハード面では、センサ部位の軽量化と電源周りのノイズ対策を行い、出力信号の信頼性を向上させた。ソフト面では、すべり検出プログラムのアルゴリズムの再構築と機能強化を行い、新たに動摩擦係数とすべり量を検出できるようにした。また、システムの実験では、これまでのシステムとの比較により検出精度の向上が確認できた。

キーワード：すべりセンサ，変位センサ，重心検出，動摩擦係数，すべり量

1 はじめに

高齢社会の到来に伴い、介護現場では寝たきり状態にある人の褥瘡（床ずれ）が問題となっている。褥瘡の発症要因としては、圧迫による患部の鬱血が知られているが、最近の研究によると、人体とマットレス間に生じるずれ力（すべり）もその要因の一つであることが分かってきた。ところが、その一方で、すべりの検出手法が確立されていないため、すべりが褥瘡に与える影響を客観的に評価できないといった問題が生じている。

著者らは、これまでの研究で、物体の重心変位ベクトルと接線方向のカベクトル（以下、XYカベクトル）との比較から、すべりと転がりの判別が可能であることを確認し、すべりの検出原理を發明した。また、この原理を実現するためのシステムとして、すべり検出システムを開発した^{1),2)}。このシステムは、すべりと転がりの判別は可能で

あるが、摩擦係数やすべり量などの定量的な評価はできず、精度の高い測定も難しかった。本研究では、これらの課題を解決するため、すべり検出システムの高精度化を図り、すべりや転がりといった検出情報の定量的な評価と、その精度について検証を行った。

2 検出原理

2.1 すべり及び転がりの検出原理

すべりには摩擦を伴うものと摩擦を伴わないものがあるが、本研究では摩擦を伴わないすべりを単に変位と定義し、摩擦を伴うすべりを検出すべきすべりと定義している。

例えば、図1に示すように、すべりの場合は、重心変位ベクトルとXYカベクトルが同時に検出され、その向きは常に同じである。一方、転がりの場合は、移動中の摩擦を殆ど生じないためXYカベクトルは検出されず、重心変位ベクトルのみが検出される。この特徴の違いに着目し、すべりの検出原理とした。

*¹ 福祉・デザイン部

*² 生産技術部

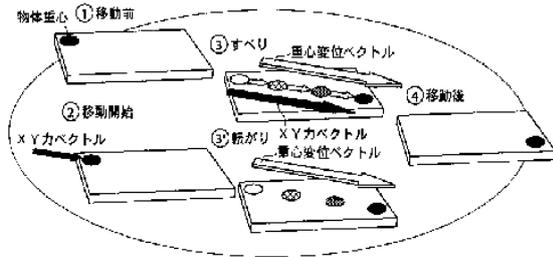


図1. すべりの検出原理 (概念図)

2.2 摩擦係数及びすべり量の検出原理

検出情報の定量的な評価方法として、摩擦係数及びすべり量の検出原理について検討した。

2.2.1 摩擦係数の検出原理

摩擦係数とは、互いに接する物体間に固有の定数で、接触面及び物体の材質や表面状態などによって定まる。アモントン・クーロンの摩擦法則によれば、摩擦力 F は物体に働く垂直抗力 N に比例し、

$$F = \mu N \quad (1)$$

で与えられる。

このときの比例定数 μ が摩擦係数であり、静止状態における摩擦係数を静摩擦係数と呼び、すべり状態における摩擦係数を動摩擦係数と呼ぶ。

本研究では、すべり時の摩擦係数、すなわち動摩擦係数に着目し、被測定物のすべり易さを定量的に評価することとした。センサ部位を構成している三軸力覚センサの Z 軸の値を z_i とし、同様に XY 軸の値をそれぞれ、 x_i , y_i とした場合、被測定物とセンサ部位間に生じる摩擦係数 μ は、

$$\mu = \sqrt{(\sum_{i=1}^4 x_i)^2 + (\sum_{i=1}^4 y_i)^2} / \sum_{i=1}^4 z_i \quad (2)$$

で求められる。

2.2.2 すべり量の検出原理

本研究では、すべり量を被測定物が摩擦を伴いながら移動した移動距離と定義し、移動開始の始点から終点までの移動経路の合計として検出するようにした。

検出方法としては、サンプリング周期ごとの重心変位ベクトルを加算していき、判定プログラムがすべり判定を返したときのみ、処理を与えるようにした。これにより、被測定物が滑った場合の距離の合計を求めることができ、例えば、被測定

物が移動途中で転がりに転じたとしても、その距離は加算されることなく、滑った距離のみを検出することが可能となる。

センサ部位を構成している三軸力覚センサの検出面に対する座標を (X_i, Y_i) 、Z 軸の値を z_i とすると、被測定物の重心 (X_G, Y_G) は、

$$(X_G, Y_G) = \left(\frac{\sum_{i=1}^4 X_i z_i}{\sum_{i=1}^4 z_i}, \frac{\sum_{i=1}^4 Y_i z_i}{\sum_{i=1}^4 z_i} \right) \quad (3)$$

で与えられ、1 周期の移動距離 ΔS_1 は、

$$\Delta S_1 = \sqrt{\Delta X_G^2 + \Delta Y_G^2} \quad (4)$$

で与えられる。

したがって、 n 周期の移動距離 S_n は、

$$S_n = \sum_{i=1}^n \Delta S_i \quad (5)$$

で求めることができる。

3 システムの高精度化

これまでの研究で試作したすべり検出システムは、外部ノイズの影響を強く受けるため、検出値が安定せず、精度の高い測定が難しかった。また、すべり検出プログラム自体も応答速度が遅く、誤判定が多いといった問題を抱えていた。

本研究では、センサ部位の軽量化、ノイズ源の割り出しと、それに伴う対策、すべり検出プログラムのアルゴリズムの再構築を行い、システムの高精度化を図った。

3.1 センサ部位

これまでのシステムでは、センサ部位の素材として軽量かつ高硬度なジュラルミニウムプレートを採用していた。新たに試作したセンサ部位の素材には、ジュラルミン (比重 2.79) よりもさらに軽量であるガラスエポキシ樹脂 (比重 1.75) を採用した。比重比にして約 35 %の軽量化が図れたことになる。センサにかかる初期荷重が減少すれば、測定レンジを広く取れるため、検出精度の向上を目指すうえで非常に有利である。

新たに試作したセンサ部位もこれまでと同様に、検出面の四隅にニッタ社製の三軸力覚センサ

PicoForce (PD3-30-05-15) をネジで垂直に固定した構造となっており、若干の遊びを持たせるため、上面の板とは O リングを介して接するようにしている。また、このセンサには若干の他軸干渉が認められるため、各センサを XY 平面に対して 180° づつ回転させ配置し、各々の他軸干渉を相殺するよう工夫している。試作したセンサ部位の外観を図 2 に示す。



図 2. 試作したセンサ部位 (300mm×300mm)

3.2 コントロールボックス

これまでのシステムでは、電力供給電源、バッテリー、計装アンプボード、及び制御基盤などが、それぞれ独立して剥き出しになっていたため、外部からのノイズの影響を受けやすかった。そこで、図 3 に示すアルミ製のコントロールボックスに、これらの回路を格納し、ノイズの低減を試みるとともに、システムの小型化を図った。



図 3. アルミ製のコントロールボックス

また、電力供給源は外部電源のみであったが、新たに試作したシステムでは、コントロールボックス内に格納した内部バッテリーによる駆動が可能になった。なお、トグルスイッチの操作により、電力供給源の切り替えも可能となり、内部バッテリーとスイッチング電源のどちらかを選択できるようになった。

3.3 すべり検出プログラム

制御端末上には、NATIONAL INSTRUMENTS 社製のプログラム開発環境 LabVIEW7.0 により開発したすべり検出プログラムが格納されている。

このすべり検出プログラムは、センサ部位上に置かれた被測定物の重心変位ベクトル、XY カベクトルとを別々に検出し、両ベクトルの検出状態から、すべりと転がりを判別する仕組みになっている。また、今回のアルゴリズムの再構築により、プログラムの処理速度が向上し、検出精度も改善した。これにより、動摩擦係数及びすべり量といった検出情報の定量的な評価が可能になった。

すべり検出プログラムのフロント画面は図 4 に示すとおりであり、画面左下のグラフに被測定物の重心位置が表示され、画面右下のグラフに重心変位ベクトルと XY カベクトルが表示される。ここで、画面右下のグラフの中心に表示されている二つの円は、それぞれ、すべりと転がりの閾値を表している。また、画面の右上に表示されている三つのランプは、圧力検出、すべり検出、転がり検出にそれぞれ対応しており、いずれかの運動状態が検出された場合には、対応するランプが点灯する仕組みとなっている。これらのランプの下に表示されている圧力値、動摩擦係数、すべり量の各項目の表示器には、被測定物の運動状態に応じた値がそれぞれ表示され、運動状態の定量的な測定が可能である。

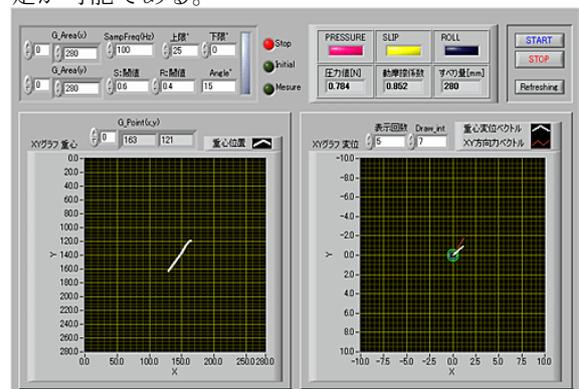


図 4. すべり検出プログラム

4 特性評価

本システムの基本的な特性及び動作を確認するため、以下に示す評価実験を行った。

4.1 検出精度の評価

本研究において精度向上のために実施した主な対策は、センサ部位の軽量化、電源周りのノイズ低減、すべり検出プログラムにおけるアルゴリズムの再構築である。これらの対策を講じた結果、ノイズレベルを低減させることに成功し、ノイズ対策に設けた閾値を約3割弱まで抑えられるようになった。

そこで、新たに試作したすべり検出システムの検出精度を評価するため、旧システムとの比較実験を行った。実験方法は、質量 500g の円筒状の重りをセンサ部位上で滑らせた場合、及び転がした場合における判定の正確さについて、検証を行うこととした。実験時の測定条件は、サンプリング周期 100kHz、重りとセンサ部位間の動摩擦係数は約 0.5 であり、センサ部位の表面温度は 22℃、湿度は 31% であった。

測定は各 10 回行い、判定結果の正誤比較により検出精度を評価した。その結果を表 1 に示す。旧システムでは、すべり及び転がりともに 8 割の確率で判定に成功しているが、誤判定がすべりの場合 4 回、転がりの場合 2 回の計 6 回という結果になった。ここで言う誤判定とは、目的の判定が行われているにもかかわらず、目的外の判定も同時に行われてしまうことを指している。例えば、重りを滑らせた際に、すべり判定を正しく返している一方で、転がりとしての判定も同時に返してしまう場合がある。このような状態を誤判定としてカウントした。また、新たに試作したシステムでは、すべり 9 割、転がり 10 割の確率で判定に成功しており、誤判定は 0 回という結果になった。

以上の結果から、新たに試作したシステムは旧システムと比較して、検出精度が向上していることが確認できた。

表 1. 検出精度の比較結果

	すべり判定	転がり判定	誤判定
旧システム	8/10	8/10	6
新システム	9/10	10/10	0

4.2 圧力検出特性

システムの圧力検出特性を調べるために、100～2000g のスチール製の重りをセンサ部位上に乗せ、そのときの検出値と実際の負荷との比較を行った。その結果、図 5 に示すように検出値と実際の負荷の大きさは、ほぼ一致していることが確認でき、高い線形性を有していることが分かった。

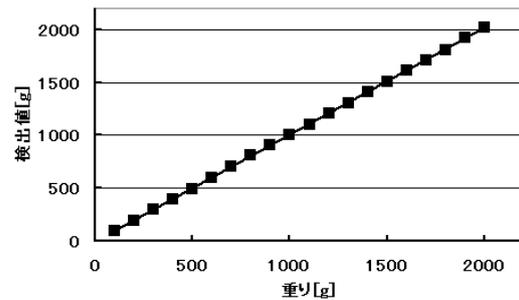


図 5. システムの圧力検出特性

4.3 動摩擦係数測定

被測定物の定量的な評価を目的として、動摩擦係数の測定を行えるようにした。そこで、システムによる実測値と計算により求めた理論値とを比較し、その精度について検証した。

センサ部位の検出面には、ガラスエポキシ樹脂を使用しており、この検出面上でスチール製の重りをすべらせた場合の摩擦係数を比較対象とした。なお、理論値の算出には、エー・アンド・デイ社のデジタルフォースゲージ (AD-4935-200N) を使用した。

検出面の特性とデジタルフォースゲージとの対応関係を把握するため、傾斜法により理論的に導かれた静摩擦係数の値とデジタルフォースゲージにより導かれた値との比較を行った。

傾斜法によれば、静摩擦係数 μ_0 は傾斜角 θ の大きさで一意に定まり、その他の変数には依存しないことで知られている。式で表すと、

$$\mu_0 = \tan \theta \tag{6}$$

となる。また、デジタルフォースゲージによる静摩擦係数の導出方法は、被測定物に対し接線方向に加えた力を直接検出し、2.2.1 の(1)式により値を算出するものとした。

これらの方法により、質量 300g の円筒状の重

りと検出面との間に生ずる静摩擦係数を求めた結果、傾斜法では 0.21 となり、デジタルフォースゲージによる測定では 0.20 となった。これは、5 回行った測定の平均値である。以上の結果から、デジタルフォースゲージによる摩擦係数の測定は、ほぼ正確に行われていることが確認できた。

次に、すべり検出システムで実際に測定した動摩擦係数と、デジタルフォースゲージにより算出した値との比較を行った。その結果を図 6 に示す。それぞれの値は、5 回の測定の平均値として表している。数値に多少のばらつきはあるが、一般的な動摩擦係数は、スティック・スリップ現象などの影響により、10 %程度は変化するため、これらの影響を考慮すれば、比較的高い精度の測定ができていたものと考察できる。なお、実験時の測定条件は、システムのサンプリング周期 100kHz、センサ部位の表面温度 25℃、湿度 36%であった。

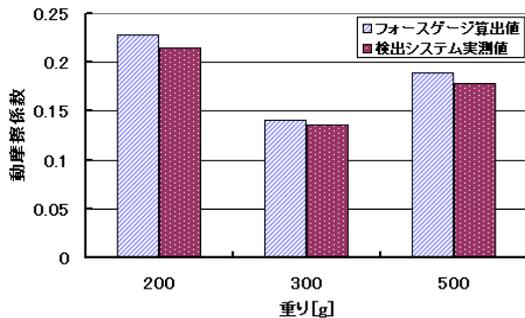


図 6. 動摩擦係数の検出特性

4.4 すべり量測定

動摩擦係数の測定に加え、すべり量の検出も行えるようにした。本研究におけるすべり量とは、被測定物が摩擦を伴いながら移動した移動距離と定義している。実験では、センサ部位上で質量 500g の円筒状の重りを、50mm, 100mm, 150mm, 200mm, 及び 250mm のそれぞれの距離に対して滑らせ、システムの実測値との比較を行った。その結果を図 7 に示す。なお、実測値は 5 回の測定の平均値として表している。グラフ上では平均化した値を載せているため、実際に滑らせた距離と実測値との差は小さいが、個々の測定値には 10% 前後のばらつきが生じていた。これは、プログラ

ムが判定結果を返すまでのタイムラグが影響しているものと考えられる。この点に関しては、今後、実用化を目指す過程で解決していく必要がある。なお、実験時の測定条件は、システムのサンプリング周期 100kHz、重りとセンサ部位間の動摩擦係数は約 0.5、センサ部位の表面温度は 23℃、湿度は 35%であった。

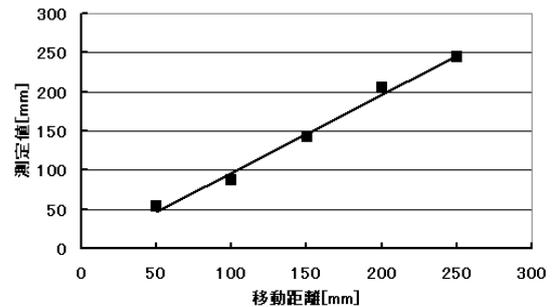


図 7. すべり量の検出特性

5 まとめ

本研究では、すべり検出システムの高精度化と定量的な評価技術の確立を目指し、ハード及びソフトの両面からシステムの改良を行った。その結果、検出精度が向上し、動摩擦係数及びすべり量の定量的な評価が行えるようになった。

また、試作したすべり検出システムの評価実験では、すべりと転がりの判定率が 9 割以上となり、動摩擦係数の測定も比較的高い精度が得られた。一方で、すべり量の測定では、検出値に 10% 前後のばらつきが見られた。これは、プログラム処理のタイムラグに起因するものと推測され、実用化を目指す過程で解決していく必要があると考えている。

参考文献

- 1) 関根俊彰, 田中智大: すべりセンサの開発と応用, 埼玉県産業技術総合センター研究報告, **2**, (2004), 57
- 2) 関根俊彰, 田中智大: すべり検出システム及びすべり検出方法, 特開 2005-342443