スキーロボットターンと作用力*

米 山 猛^{*1}, 香 川 博 之^{*1}

Ski Robot Turn and the Reacting Forces

Takeshi YONEYAMA and Hiroyuki KAGAWA

Acting forces from the snow surface to the skiing robot have been measured in a ski turn using force sensors embedded in the legs of the skiing robot. The robot makes a turn onto the side curve line by the rotation of the hip joints into side direction. Acting force from the snow surface corresponds to the ski motion. In the right turn, force acts to the right direction and in the left turn, force acts to the left direction. If it is assumed that the turning force is caused by the centripetal force and the force is in proportion to the edge angle, the elemental simulation result agrees well with the experimental result.

Key Words: Ski, Measurement, Robot, Dynamics, Force, Turn, Sports science

1. 緒 言

スキーターンのメカニズムの解明については、スキーヤーの動作と作用力⁽¹⁾⁽²⁾, ロボットを用いた動作⁽³⁾⁽⁴⁾, 力学シミュレーション⁽⁵⁾, 板の特性と測定⁽⁶⁾, スキーによる噴流・切削抵抗⁽⁷⁾ などさまざまな視点から研究が行われている。ロボットを用いてスキーターンを行わせることは、特定の動作でどのようなターンを起こすかを調べることができ、複雑な人間動作の中で本質的な動作要素は何か、それぞれの動作要素によってどのような運動が起こるかを調べることができる。さらにターンの力学を解明するためには、ターンの動作とそれに伴う雪面からの作用力との相互関係について検討することが必要である。しかしこれまで、スキーロボットのターン中に作用する力については測定がなされていないため、この点についての検討が行われてこなかった。そこで、著者らはスキーロボットの足に力センサを取り付け、ターン時に働く作用力を測定し⁽⁸⁾, 動作と作用力との関係を解明しようと試みている。本論文では、まず単純な動作である内転外転動作によるターンをロボットに行わせ、その際に発生する

作用力を測定し、動作と作用力との関係について分析する。

2. スキーロボット

2.1 スキーロボットの構造 製作したスキーロボットの構造を図1に示す。スキーターンの基本動作は、スキーヤーが股関節を内転外転させる動作であるという高橋の考察⁽⁹⁾に基づいて、股関節の内転外転動作

Fig. 1 Structure of the ski robot

* 原稿受付 1997 年 9 月 1 日。

^{*1} 正員, 金沢大学工学部 (☎ 920-8667 金沢市小立野 2-40-20)。

のみを行うロボットを製作した。ロボットの大きさは高さ 300 mm, 足の長さ 171 mm, 足の幅 100 mm で、板の長さは 100 mm, 板の質量は 1 本 0.2 kg でロボットの全体質量は 1.5 kg である。スキー板のサイドカーブの円弧半径は 2 m とした。股関節の内転・外転動作を行わせるモータは無線式のサーボモータで、リンクを通じて股関節を回転させる。胴体の部分にバッテリーを積んでいる。足の部分が力センサになっている。

3・2 カセンサ ロボットの足に取付けた力センサの構造を図 2 に示す。三軸力と足軸まわりのモーメントを測定できるようになっている。XY 方向の力を検出する部分は平行平板構造で、表面にひずみゲージを貼り付けて力を検出する⁽¹⁰⁾。この構造は、着力点の変化の影響を受けにくい特性をもっており、モーメントの影響を受けずに、力成分のみを検出することができる。z 軸の力とモーメントを検出する部分は、放射平板構造で、この部分のねじり(平板にとっては曲げ)変形からモーメントを検出することができる。z 軸方向の力は平板部分のちぢみ・のびから検出する。ひずみゲージを対象な位置に貼付けてあるので、z 軸の力の検出に際しても着力点の変動によるモーメントの影響を受けにくいセンサとなっている。

3. 実験方法

3・1 実験システム 一定の斜度をもった滑走台の表面に雪を敷き、その上でロボットにターンを行わせる。ロボットの股関節の角度 θ の変化動作をあらかじめプログラムで組んでおき、無線で送信して駆動させる。足センサからの出力は有線でアンプおよび記録計に取込む。この際、出力コードがロボットの走行の抵抗にならないようにロボットの動きに合せながらコードをつっておく。実験システムを図 3 に示す。センサで検出される力、トルクを図の向きを正とする。これに対し斜面上の座標系 xyz を図 3 のようにとる。

Fig. 2 Structure of the force sensor

滑走台の幅は 1.8 m, 長さは 5.4 m である。ロボットを滑走台の上部で最大斜度方向に向けて放し、一定の時間の後、股関節を左右へ変化させて、ターン動作を行わせる。滑走台の上面と正面からビデオ撮影を行った。

3・2 実験内容 直滑降状態から股関節を左に開き、次に右に開くという動作を行わせ、右ターンから左ターンへ切り返るターンを行わせた。ロボットに与えた股関節の角度変化を図 4 に示す。最初の右ターンにおける最大開き角度を 10° 、次の左ターンの最大開き角度を 20° とした。 θ の変化速度を変えて実験を行った。斜度 α は 18° 、気温は 4°C 、湿度 60% であった。滑走距離は約 4 m である。滑走の状況を図 5 に示す。滑走台の正面から撮影したターン中の 6 カットを示している。

4. 実験結果

4・1 滑走状況の特徴 うまくターンができた場合のほか、ターンの初期にすぐ転倒してしまう場合、ターンの途中で転倒してしまう場合、そしてターンの円弧が大きくなって直滑降のようになってしまう場合とがあった。これらの状況から判断したことをまず述べる。滑走速度に対応した股関節の内転外転角 θ を与えないと転倒してしまう。つまり速度が出ていないうちに θ をはやく変化させるとターンの初期や切り

Fig. 3 Experimental system for the measurement

Fig. 4 Rotation angle of the hip joint

Fig. 5 Snap shots of the skiing robot

返し時に内側に転倒してしまう。 θ の角度をつけすぎるとターンの途中で転倒しやすい。また θ の変化動作を遅くすると概してターン円弧が大きくなって直滑降のようになってしまう。うまくターンできたときの θ の角度変化は、先に示した図4のような時間的变化を与えたときであった。以後の実験結果では、この場合の結果を示す。

4・2 ターンの軌跡と速度 図4で示した動作を与え、転倒せずにターンした場合のターンの軌跡を図6に示す。上面から撮影したビデオから読みとったものである。左右の板の先端・後端の位置とそれらを結んだ線分とを示している。破線で示したのは半径2mの円で、左ターンの円弧の半径は約2mであることがわかる。これはサイドカットの円弧の半径と一致している。したがってエッジの切り返しが終わった後は、ほぼサイドカットのラインに沿って滑っていることがわかる。スタート初期からどのくらいの時間にどの位置にいるかがわかるように軌跡上に時間を示した。軌跡の接線方向と板の方向はほぼ一致しており、いわゆる迎え角はほとんど生じていない。軌跡から速度 v を読みとったのが図7である。ただしスタートから0.5sまではビデオ上で速度を読みとるのが困難であったのでプロットしていない。次第に速度が直線的に増している。図6の軌跡から方位角 ω の変化を求め

Fig. 6 Ski turn trace of the robot

Fig. 7 Skiing velocity of the robot

Fig. 8 Plate direction in the ski turn

て図8に示す。これは、スキー板の方向の時間的变化を示している。

4・3 作用力測定結果 カセンサで測定したデータを式(1)によって、図9のような雪面にそった座標成分に表したのが図10である。この式に示した θ はエッジ角であるが、エッジ角は内転外転角 θ に等しいとし、図4からその時刻に与えている内転外転角 θ を与えた。方位角 ω は図8から求めて与えた。

Fig. 9 Force components acting from the snow surface

(a) F_x (b) F_y (c) F_z

Fig. 10 Acting forces from the snow surface

$$\left. \begin{aligned} F_x &= -(RX + LX)\cos \omega \\ &\quad + (RY - LY)\cos \theta \sin \omega \\ &\quad + (RZ + LZ)\sin \theta \sin \omega \\ F_y &= -(RX + LX)\sin \omega \\ &\quad - (RY - LY)\cos \theta \cos \omega \\ &\quad - (RZ + LZ)\sin \theta \cos \omega \\ F_z &= -(RY - LY)\sin \theta + (RZ + LZ)\cos \theta \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

F_x は、変動が大きいものの、 -5 N 程度の力となって

Fig. 11 Calculated trace by the measured forces

おり、斜面上方向への抵抗が働いている。 F_y は右ターンにあたる 0.7 s から 1.6 s において負となっており、斜面の下方向に面して右向きに力が働いている。そして、左ターンに相当する 1.6 s 以降では、正つまり斜面の下方向に面して左向きの力が働いている。したがってターンした方向と作用した力の方向とが一致している。 F_z は $10 \sim 15 \text{ N}$ でほぼ一定である。

4・4 作用力測定結果の検証 測定された力データが妥当なものであるかを評価するため、測定された力成分によってロボットが起こすであろう軌跡を式(2)および(3)で算出してみたのが、図11

$$\left. \begin{aligned} m\ddot{x} &= F_x + mg \sin \alpha \\ m\ddot{y} &= F_y \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2)$$

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}_n &= \dot{x}_{n-1}\Delta t + \dot{x}_{n-1} \\ x_n &= \dot{x}_{n-1}\Delta t + x_{n-1} \\ \dot{y}_n &= \dot{y}_{n-1}\Delta t + \dot{y}_{n-1} \\ y_{n-1} &= \dot{y}_{n-1}\Delta t + y_{n-1} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3)$$

である。ただし、 m はロボットの質量、 g は重力加速度、 $\dot{x}$ は x の時間微分、 $\ddot{x}$ は $\dot{x}$ の時間微分、 $\dot{x}_n, x_n$ は n 番目の $\dot{x}, x$ のデータ、 α は斜面の角度で 18° 、 Δt はデータの時間間隔を意味する。図11は、ロボットがターンする軌跡を描いており、力センサによる測定値は、各成分の力の傾向をよく表していると考えられる。

4・5 軌跡にそった作用力 雪面からの作用力を図12のような、板に垂直な力 f_b 、進行方向の力 f_t 、軌

Fig. 12 Force components along the ski line

Fig. 13 Acting forces along the ski line

跡に垂直な方向の力 f_n になおして示したのが図 13 である。ただしこの図では板の質量分も考慮して求めている。 f_t は進行方向に対する抵抗で、変動が大きい。平均すると 5 N 程度の抵抗が働いている。 f_n は速度方向に対して垂直方向に働く力で、右ターンの期間である 0.7 s から 1.6 s では正つまり進行方向に対し右向きに、左ターンの期間である 1.6 s 以降では負つまり進行方向に対して左向きに力が作用している。この f_n がターンを起こす向心力であり、ターンの向きと作用する力の向きが合っていることがわかる。斜面に垂直な力 f_b は 15 N 程度でほぼ一定である。

Fig. 14 Relation between f_n and $\theta \times v^2$

5. 考 察

5.1 ターン動作と作用力との関係 実験結果から、単純に股関節を内転外転させてエッジ角を与えるのみでターンを起こす作用力が発生することがわかった。またこのロボットのターンでは、ほとんど迎え角が生じず、速度の方向と板の方向とが一致していた。そこで、与えた θ の動作と作用力との関係を考えてみる。 θ とエッジ角とは等しいと考える。

まず θ とターン半径との関係について考える。直滑降のときや、切り返しの反転点(本実験では 1.6 s)では、 θ は零であり、ターン半径は無限大である。またあるエッジ角を与えた後(本実験では $\theta = 20^\circ$)では、ターン円弧は、ほぼサイドカーブの円弧と一致している。その途中では、 θ の増加とともにターン半径が無限大から徐々に減少していると考えることができる。

次に θ と雪面からの作用力との関係について考える。ターン運動の際には遠心力が作用し、雪面からは、それに対する向心力が作用すると考えられる。この向心力は、ターン半径に反比例し、速度 v の二乗に比例するであろう。ここで、切り返しの過程において、 θ の増加とともにターン半径が減少する関係があることから、 θ とターン半径とが反比例すると仮定すると、向心力は θ に比例することになる。つまりエッジ角を増加するにつれて、ターン半径が小さくなり、それに伴って向心力が大きくなるという関係である。実験における軌跡の接線方向に垂直な力 f_n と $\theta \times v^2$ との関係を示したのが、図 14 である。 f_n は時間的な変動が大きいので、0.2 s 間ずつの移動平均値を用いた。 $\theta \times v^2$ の正負に対して f_n のこの配が異なっているが、基本的に $\theta \times v^2$ の増大・減少に対して f_n の増大・減少が対応している。

5.2 ターン運動の方程式 本研究で用いたロボットによるターン運動の方程式を考える。進行方向の抵抗を f_t 、進行方向に対して垂直に雪面上に働く力を f_n とすると、ロボットの重心の運動は、式(4)で表せ

る。

$$\left. \begin{aligned} m\ddot{x} &= mg \sin \alpha - f_t \cos \omega - f_n \sin \omega \\ m\ddot{y} &= f_t \sin \omega - f_n \cos \omega \end{aligned} \right\} \dots\dots (4)$$

ここで、 f_t は、雪面からの摩擦抵抗のみとして、

$$f_t = \mu mg \cos \alpha \cos \omega \dots\dots\dots (5)$$

とする。ただし μ は摩擦係数である。 f_n はターン時の遠心力に対する反力と考えると、

$$f_n = m \frac{v^2}{r} \dots\dots\dots (6)$$

ただし r はターン半径である。ここで、5・1節で述べたようにエッジ角 θ とターン半径が反比例すると仮定すると、

$$f_n = km\theta v^2 = km\theta(\dot{x}^2 + \dot{y}^2) \dots\dots\dots (7)$$

とおくことができる。ただし k は比例定数である。

この仮定を式(4)にあてはめると運動方程式は式(8)となる。

$$\left. \begin{aligned} m\ddot{x} &= mg \sin \alpha - \mu mg \cos \alpha \cos^2 \omega \\ &\quad - km\theta \sin \omega(\dot{x}^2 + \dot{y}^2) \\ m\ddot{y} &= \mu mg \sin \alpha \cos \omega \sin \omega \\ &\quad - km\theta \cos(\dot{x}^2 + \dot{y}^2) \end{aligned} \right\} \dots\dots (8)$$

また ω は軌跡の接線方向と一致するので、

$$\tan \omega = \frac{\dot{y}}{\dot{x}} \dots\dots\dots (9)$$

の関係にある。結果的にこの運動方程式は、ターンの軌跡をサイドカーブに拘束するものではないが、エッジ角に比例して向心力が変わる関係を表している。

ルンゲクッタ・ギル法を用い、 $\mu=0.1$ とし、実験で与えた θ の時間変化を与えて計算した軌跡を図15に示す。 k の値は、図14を参考にして、 $k=0.025$ の場合と $k=0.05$ の場合について計算した。 k が大きいほど、向心力が大きくなり、ターンが膨らむ。左ターンの終了にいたるまでの時間が実験より少し短い、これらの軌跡は実験のターンの軌跡とよく似た形をしている。進行方向の摩擦係数 μ については、0.1程度の値で、実験に近い進み具合を得ることができた。このように、内転外転動作によるターンは、その動作によってエッジ角が与えられ、それによって、向心力が与えられる運動と考えて、初等的な近似を行うことができる。

6. 結 言

スキーロボットの足に力センサを取付けて、股関節

Fig. 15 Ski turn simulation

の内転外転動作のみによるターンにおいて、雪面から作用する力を測定し、ターンを起こす雪面からの作用力が発生することを確認した。ターンを起こす力が向心力によるものと考え、内転外転動作の角度と向心力とを結びつけることで、運動の初歩的な近似を行うことができた。

人間の動作はさらに複雑であるが、ねじりの動作を加えた場合や、反転の動作速度を変化させた場合など種々の応用動作をロボットにさせた場合の作用力の測定とそのモデル化をはかることで、ターン動作とそれによって生じる作用力、その結果としての運動との関係がさらに明らかになってくるものと考えられる。

本研究を進めるにあたり、金沢大学学生の勝見誠二君、越後隆治君、大竹庸人君、三井悟君の協力を得た。

文 献

- (1) Maxwell, S. M. and Hull, M. L., *J. Biomechanics*, 22-6/7 (1989), 609-624.
- (2) 香川博之・米山猛, 機講論, No. 96-20 (1996-10), 140-144.
- (3) 清水史郎, スキーの科学, (1987), 光文社.
- (4) 尾原呷夫, 機講論, No. 95-45 (1995-10), 62-65.
- (5) 長谷川健二・清水史郎, 機講論, No. 95-45 (1995-10), 57-61.
- (6) 棚橋良次, 機講論, No. 95-45 (1995-10), 52-56.
- (7) 平野陽一・多田憲孝, 機講論, No. 940-59 (1994-11), 42-46.
- (8) 米山猛・香川博之, 機講論, No. 96-20 (1996-10), 145-149.
- (9) 高橋昌也, 機講論, No. 940-59 (1994-11), 30-35.
- (10) 米山猛, 機械設計の基礎知識, (1993), 359-367, 日刊工業新聞社.