

半球形状移動ロボット *Giga-Bowl* の開発

Development of Hemisphere-shaped Mobile Robot *Giga-Bowl*

○学 楠本拓也 (鈴鹿高専) 正 白井達也 (鈴鹿高専)
正 富岡 巧 (鈴鹿高専)

Takuya KUSUMOTO, Suzuka National College of Technology
Tatsuya SHIRAI, Suzuka National College of Technology, shirai@mech.suzuka-ct.ac.jp
Takumi TOMIOKA, Suzuka National College of Technology

In this paper, we propose new mobile mechanism which can control the position by slanting the posture instead of using tires or legs. Many mobile mechanisms which control the position of a center of gravity had been already suggested. Most of them have sphere-shaped body or column-shaped body, and its whole body rotates continuously when it moves the position on the surface of ground. The mobile mechanism we proposed in this paper has a hemisphere-shaped body, and we name it *Giga-Bowl*.

Key Words: Hemisphere-shaped Mobile Robot, *Giga-Bowl*

1. 緒言

本研究では、タイヤやクローラのような動力伝達機構でなく、図1に示すような移動車両の重心移動による姿勢変位を利用した半球形状の移動機構を提案する。重心移動を利用した小型の移動機構は既に提案されているが、そのほとんどは球体形状あるいは円柱形状の外形を持ち、内部の重心位置を移動させて無限回転しながら移動する機構である。これらの移動機構は本体が大きく回転するため人員や貨物の輸送には適さない。本研究では本体構造に半球体を用いた移動機構を提案し、*Giga-Bowl* と名付ける。*Giga-Bowl* は有限の回転角度までしか本体を傾斜させない点で従来の重心移動式の移動機構とは異なる。

2. 半球形状移動機構 *Giga-Bowl*

2.1 *Giga-Bowl* の動作原理と基本構造

Giga-Bowl の移動原理は原田らが提案したロボットハンドによる重力平衡する対象物の転がりによる操りの手法に基づいている[1]。図2に示すように平面上のA点に置かれた半径 r_B の半球体を一方方向に角度 $\pi/2$ [rad] 傾斜させる。平面と球面の接触点をそれぞれの面上に軌跡として描くと、平面上には直線、球面上には測地線と呼ばれる曲率半径が一定の線が描かれ、半球体は平面上をB点まで移動する。この姿勢から半球体を上面の円の円周に沿ってC点まで $\pi/2$ [rad] 回転させる。回転方向が直角に変更されたので球面上および平面上の直線 A-B と直線 B-C の間の成す角は共に $\pi/2$ [rad] である。同じく回転方向を $\pi/2$ [rad] 変更して半球体を A' のように $\pi/2$ [rad] 回転させると、球面上の平面との接触点はA点に戻る。しかしこの時、平面上での半球体の位置はA点から A' 点に移動しており、姿勢は $\pi/2$ [rad] 回転している。半球体の三回の姿勢変位の結果、

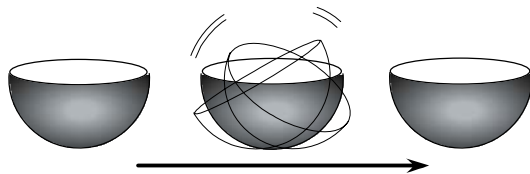


Fig.1 New mobile mechanism

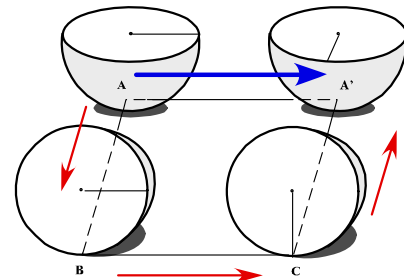


Fig.2 Movement principle

半球体の姿勢は元に戻るが、平面上を移動し、かつ中心軸に対して回転する。*Giga-Bowl* はこの三回の姿勢変位を繰り返しながら、目的の位置・姿勢へ移動する。1サイクルで移動する距離はA-B点/C-A'点へ移動する際の回転角度とB-C点へ移動するときの回転角度によって調整可能である。

図3は *Giga-Bowl* の基本構造を示したモデル図である。*Giga-Bowl* の構造は半球形状の本体と、その上部平面上に取り付けた重心移動機構に分けられる。重心移動機構は本体直径と同程度の長さのガイドレールとガイドレール上を端から端まで移動する移動質量から構成される。中心軸の回転変位とレール上での直線変位を組み合わせることで、移動質量は上部平面上の全領域へ移動可能である。*Giga-Bowl* は半球部分の重心と移動質量の重心による地面との接触点回りのモーメントの釣り合いによって平衡状態を作り静止する。半球部分は重心位置が変化しないので、*Giga-Bowl* の姿勢制御は移動質量の位置制御によって行われる。

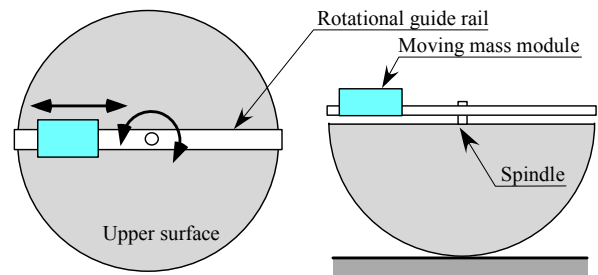


Fig.3 Structure of *Giga-Bowl*

2.2 二次元空間における静的釣り合い条件

図4はGiga-Bowlの二次元モデルである。 Σ_R は絶対座標系、 Σ_B はGiga-Bowlの上の相対座標系である。 Σ_B は半球上部平面と中心軸の交差する点(以下、基準点)を原点とする。 θ_f 、 θ_B それぞれ床の傾斜角、Giga-Bowlの傾きで、水平方向をゼロとし、反時計方向を正とする。 m_f 、 m_l はGiga-Bowl本体の固定質量と、移動質量の質量の大きさである。 r_B はGiga-Bowlの半径。 l_{mf} 、 l_{ml} は基準点から半球体の重心と移動質量までのy方向の距離である。 x_{mf} 、 x_{ml} は基準点から移動質量の重心と移動質量までのx方向への距離を表す。Giga-Bowlが静的に安定しているとき、式(1)のモーメントの釣り合いを表す式が成立する

$$m_l g \mathbf{R}_B(-\theta_B) \mathbf{e}_g \times \left({}^B \mathbf{P}_{ml} - {}^B \mathbf{P}_c \right) + m_f g \mathbf{R}_B(-\theta_B) \mathbf{e}_g \times \left({}^B \mathbf{P}_{mf} - {}^B \mathbf{P}_c \right) = 0 \quad (1)$$

ここで、 $\mathbf{R}_B(\theta) \in \mathbf{R}^{2 \times 2}$ は Σ_R を Σ_B に変換する回転行列である。 g 、 $\mathbf{e}_g = [0 \ -1]^T$ はそれぞれ重力加速度と重力方向単位ベクトルである。式(1)よりGiga-Bowlの傾斜角度 θ_B は次式のように求められる。

$$\theta_B = \sin^{-1} \left\{ \frac{\alpha_m + 1}{\sqrt{(\alpha_m \beta_{lu} - \beta_{lf})^2 + (\alpha_m \beta_{xt} - \beta_{xf})^2}} \sin \theta_f \right\} - \tan^{-1} \frac{\alpha_m \beta_{xt} - \beta_{xf}}{\alpha_m \beta_{lu} - \beta_{lf}} + \pi \quad (2)$$

ここで α_m は移動質量と固定質量の質量比 m_l/m_f である。また、長さをGiga-Bowl半径 r_B で正規化するために $x_{ml} = \beta_{xt} r_B$ 、 $x_{mf} = \beta_{xf} r_B$ 、 $l_{ml} = \beta_{lu} r_B$ 、 $l_{mf} = \beta_{lf} r_B$ とした。式(2)よりGiga-Bowlの静的な姿勢はスケールに依存しないことが分かる。

固定質量の位置が中心軸から偏心している場合、Giga-Bowlの姿勢にどのような影響を与えるのかをコンピュータシミュレーションにより解析した結果を図5に示す。移動質量の位置を固定した状態で地面の傾き θ_f を0[deg]から50[deg]まで1[deg]ずつ変化させ、Giga-Bowlの傾き θ_B を求めた。固定質量の重心位置が移動質量と逆方向にある場合を正、同方向を負とする。図4の場合では固定質量の位置は正の方向となる。基準点から固定質量までの距離 x_{mf} をGiga-Bowlの端から端まで変化させるとき、 $l_{mf} = 190[\text{mm}]$ であるので移動範囲は-300[mm]~300[mm]となる。グラフの横軸は地面の傾き θ_f 、縦軸は水平面に対するGiga-Bowlの傾斜角度 θ_B である。Giga-Bowlが静的に釣り合わず転倒する点は表示していない。グラフより、 $x_{mf} = 300$ は地面の傾きが34[deg]で転倒するのに対して、 $x_{mf} = -300$ では傾きが50[deg]になっても転倒しない

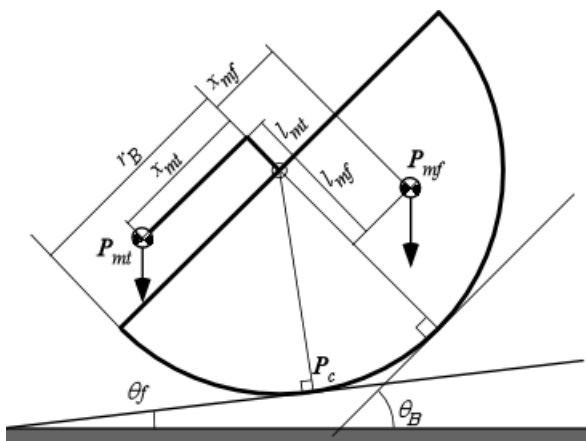


Fig.4 Two-dimensional model of Giga-Bowl

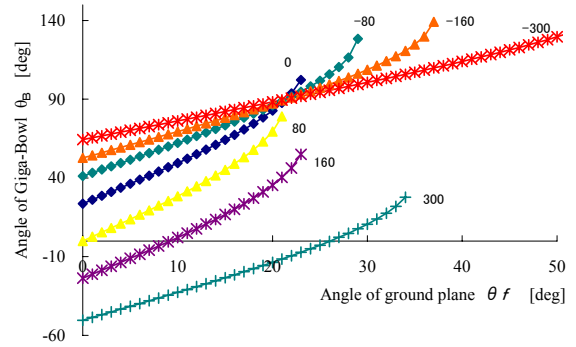


Fig.5 Simulation result

ことが分かる。また、転倒が生じる時のGiga-Bowlの傾き θ_B も $x_{mf} = -300$ の方が大きい。このことから固定質量と移動質量が同方向にある場合、Giga-Bowlは大きく傾くが転倒しにくくなることが分かる。

2.4 ミニチュア Giga-Bowl の製作

Giga-Bowlの実際の挙動を解析するために、図6に示すような実験用の小型模型(以下、ミニチュアGiga-Bowl)を設計・製作した。ミニチュアGiga-Bowl本体は透明のアクリル半球($\phi 800$, $t=5$)を用いた。ミニチュアGiga-Bowlは、重心移動機構と半球部分に各一個ずつ取り付けたDCギアードモータによって重心位置を変位させる。重心移動機構は長さ0.8[m]のアルミ平板に二本のスライドレールを平行に固定したベースプレートと、スライドレール上に取り付けられた移動ユニットからなる。ベースプレートの両端で固定されたタイミングベルトを利用して、移動ユニット内のタイミングプーリーを回転させて移動ユニットはベースプレート上を直線移動する。移動ユニットはそれ自体が移動質量となり、ミニチュアGiga-Bowlの重心を変化させる役割を持つ。

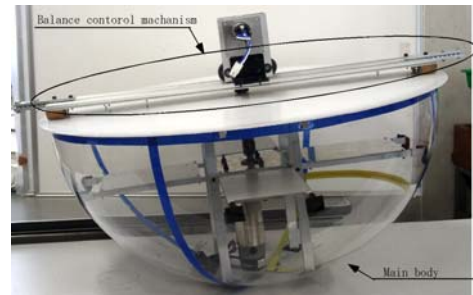


Fig.6 Overview of miniature Giga-Bowl

3. 結言

半球体の重心位置の移動により生じる姿勢変位によって移動を行う移動機構Giga-Bowlを提案した。二次元モデルによる力学的な釣り合いの定式化を行なった。モデルの正当性の検証およびダイナミクスも考慮に入れた挙動の解析を行なうために直径0.8[m]のミニチュアGiga-Bowlを製作した。今後は、モデルの三次元化および接触点まわりの回転とダイナミクスを考慮に入れた定式化を行ない、準静的な移動アルゴリズムとは異なる、慣性を積極的に利用した高効率な移動アルゴリズムの構築を目指す。

文献

- [1] 原田研介, 川嶋大雅, 金子 真: “重力平衡する対象物の転がりによる操り”, 日本ロボット学会誌, Vol.20, No.2, pp.164-172, 2002.