全方向歩行形移動機構の研究*

(第2報, 不整地における傾斜制御)

福田 敏男^{*1}, 足達 勇治^{*2}, 星野 春夫^{*3}, 小菅 一弘^{*1}
室 英治^{*3}, 松永 勇雄^{*3}, 新井 史人^{*1}

Omnidirectional Walking Mechanism

(2nd Report, Inclination Control while Walking on Rough Terrain)

Toshio FUKUDA, Yuji ADACHI, Haruo HOSHINO, Kazuhiro KOSUGE,
Eiji MURO, Isao MATSUNAGA and Fumihito ARAI

This paper proposes an inclination control algorithm of the Omnidirectional Walking Mechanism, which consists of a parallel link mechanism connecting two frames with three linear actuators and six elastic legs. The relative position and angle of the frames are selected arbitrarily by three actuators. Walking motion is produced by combining them with extendable legs. The ground is not always flat, and many different levels and obstacles exist, so posture control is essential for robot-labor. Posture of the robot can be controlled by changing the lengths of the legs referring data from inclination sensors. We constructed an experimental prototype model, and used the above method to control the inclination of the upper surface of the prototype model. The performance was investigated in terms of motion in every direction and over steps, and as a result of the experiments, it is confirmed that this robot can walk in all directions and can walk on a gentle slope by controlling the inclination of the upper surface.

Key Words: Robot, Moving Robot, Parallel Link Mechanism, Inclination Control, Inclinator, Rough Terrain, Omnidirectional Walking Mechanism

1. はじめに

製造業をはじめとして, 多くの分野で人間に代わりロボットが作業を行うようになってきた。今後, 建築・サービスをはじめ, 福祉や医療といった我々の身近な分野に至るまで, ロボットが活用されていくことが期待されている。宇宙や深海, 火災現場のような極限環境において, 探査・開拓・建設・資材の運搬・災害の救援や復旧に活躍する作業用ロボットもその一つである^{(1)~(6)}。

作業用ロボットは, 大きく分けて二つの機構を有する。第1は移動機構である。上記のような極限環境下においてロボットが円滑に作業を行うためには, 平坦な地面上だけでなく坂や凹凸を有する不整地において自由に移動できる機能が必要であり, 車輪機構やクローラ機構では不十分な段差乗り越え機構, つまり上下移動を伴う歩行機構が不可欠である。第2は作業を行うマニピュレータ機構である。物の把持・加圧・熔接

作業など, その場に適した作業が自由に行えるフレキシブルな機構が必要とされる。そして, 転倒を含めた不安定な状態を避け, 安定した姿勢で作業を行うには, 移動機構とマニピュレータ機構の協調制御が必要である。

不整地で作業を実際に行っている一例として建設現場での作業が挙げられる。現在, 労働者とクレーンやブルドーザなど建設機器が作業の担い手となっており, 建設機器を用いて大まかな作業を行い, 細かい作業を労働者が補うことでタスクをこなしている。しかしながら, 人手に頼っている部分は多く, 今後予想される労働力の不足・労務者の高齢化に対処し, 生産性の向上を目指すためには, 物を運んだり組み立てたり支えたりといった複数の仕事が可能なロボットを導入していく必要がある。

これまで, 2脚・4脚・6脚などさまざまな多脚ロボットが提案されてきた^{(7)~(11)}。6脚ロボットは常に3本の脚を接地させていれば, 場合によっては1本または2本で体重を支えなければならない2脚や4脚のロボットに比べ安定して歩行移動を行うことができ, 不整地歩行に適している。著者らは, パラレルリンク機構・SLIM(=Sliding Mobile Mechanism)⁽¹²⁾⁽¹³⁾から成り, △形とY形の二つのフレームの相対移動と各フレー

* 原稿受付 1994年11月28日。

^{*1} 正員, 名古屋大学工学部 (〒460-01 名古屋市千種区不老町1)。^{*2} 学生員, 名古屋大学大学院。^{*3} (株)竹中工務店技術研究所 (〒230-13 千葉県印旛郡印西町大塚1-5)。

図 1 作業ロボット構想図

ムに固定された脚の伸縮により、段差のある地面を歩行できる6脚ロボットを提案してきた^{(14)~(18)}。本機構では、片方のフレームの3本の脚を遊脚、他方を接地脚としてフレームを交互に相対移動させて静歩行を行うため、常に3本の脚で支えることができ、安定した移動が可能である。将来的には、図1に示すように、マニピュレータをもつ作業ロボットとすることを予定している。

本報では、マニピュレータが取り付けられる移動機構の上面の姿勢制御について報告する。静歩行においては、動歩行に比べ制御は単純であるが、実際には地面のコンプライアンスや制御誤差により傾きが生じ、また多脚ロボットであるために脚が相互に干渉するので、姿勢(傾斜)の制御は容易ではない。そこで、フレームごとの3本の脚の伸縮による傾斜制御を行い、脚の伸縮によって移動機構の上面の傾斜を制御できることを示す。最後に、上面を水平に保ちながら斜面上を歩行する実験を行い、本報で提案する制御方法の有効性を示す。

2. 全方向歩行形移動機構の特徴

2.1 歩行機構 本研究で用いる移動機構は、図2に示すように、△形とY形の2組のフレームから構成されている。二つのフレームは、DCモータによって駆動される三つのボールねじによって結合されており、ボールねじの長さを変えることにより平面的に相対移動を行うことができる。また、フレームの各頂点に位置する脚は、ギヤを介してステッピングモータによって駆動され、それぞれ独立して上下運動を行うことができる。

フレーム間の相対移動を論じるために、図3のように△形フレームの上面の中心を原点として、ロボット

図 2 六脚ロボットの歩行機構

図 3 ロボット固定座標系

正三角形1辺=2a=500 mm
 $D_1, D_2, D_3, Y_1, Y_2, Y_3$: 脚番号
 l =ボールねじ交点とYフレーム中心の距離

図 4 歩行パターン

固定座標系 $\{F\}$ を設定する。その座標系に対するY形フレームの中心 C の平行移動量 (x, y) と回転角 θ を指定してボールねじの長さ (l_1, l_2, l_3) を算出し、相対位置を一意に定めることができる。ボールねじの変位は次の式(1)~(3)で計算される。そして、図4に示すように、片方のフレームの脚を接地脚、他方を遊脚とした状態で、もう片方のフレームを相対的に移動し、接地する脚を交互に変えることによって移動が実現できる。

$$l_1 = \sqrt{\left(x + l \sin \theta + a - \frac{d}{2}\right)^2 + \left(y - l \cos \theta + \frac{a}{\sqrt{3}} - \frac{\sqrt{3}}{2}d\right)^2} \dots\dots\dots (1)$$

$$l_2 = \sqrt{\left(x + l \cos(30^\circ + \theta) - a + \frac{d}{2}\right)^2 + \left(y + l \sin(30^\circ + \theta) + \frac{a}{\sqrt{3}}\right)^2} \dots\dots\dots (2)$$

$$l_3 = \sqrt{\left(x - l \cos(30^\circ - \theta) - \frac{d}{2}\right)^2 + \left(y + l \sin(30^\circ - \theta) - \frac{2a}{\sqrt{3}} + \frac{\sqrt{3}}{2}d\right)^2} \dots\dots\dots (3)$$

2・2 上下運動機構 地面の凹凸は作業ロボットの姿勢に影響を与える。その影響を除去するためには、マニピュレータの設置部分である移動機構の上面の傾きを制御しなければならない。本ロボットは鉛直方向に伸縮自在の脚を6本有し、それぞれの脚の長さはステッピングモータによって独立に変えることが可能でありその伸縮距離は130 mm、フレームの相対移動を考慮して、傾斜11°までの斜面上を上面の水平を維持して移動できる(図5)。

3. 傾斜制御方法

3・1 傾斜制御の意義 不整地作業ロボットが産業用ロボットと大きく異なる点は、作業を行うマニピュレータ部が固定設置されていないことである。固定されていれば、その固定点を基準とした座標系において一意にロボットの姿勢が決定する。しかし、移動が伴うと被作業物体との相対位置はそれに伴い変化する。つまり、上体の姿勢が接地する移動部の上面(マニピュレータ設置部)の傾きに依存してくる。したがって、不整地においては上半身の作業を円滑に行う一つの手段として、その上面の傾きを脚の伸縮により水平に保つことが有効と思われる。さらに、上面の傾きを変化できれば、重心のずれを補正したり上下方向を含めた作業範囲(Work Space)を拡大したりできると考えられる。

三次元空間内で面(結合面)の位置・傾斜を決めるためには面の3点の座標が決まっていなければならない。本研究に用いたロボットでは、二つのフレームが同一平面を成している。そして、歩行時には接地するフレームと非接地フレームがはっきりと分かれるため、各フレームの3本の脚の伸縮で傾斜生成を行うことが必要とされる。移動を伴わない一地点で作業を行う場合は、6本のうち3本以上を常に接地させ、傾斜変化をさせることによって姿勢の最適化を図らなければならない。

図5 水平維持可能範囲

3・2 座標系の設定 上面の姿勢と傾きを数学的に取扱うために、図6のようにZ-Y-Xオイラー角(α, β, γ)を導入して座標系を定義する⁽¹⁹⁾。各座標系は以下の座標変換によって形成される。なお、表記法として基本的に大文字の変数はベクトルあるいは座標軸、小文字の変数はスカラーを示す。また、添字はどの座標系で書かれているかを示し、三角関数($\sin \theta, \cos \theta, \tan \theta$)は、省略して($s\theta, c\theta, t\theta$)と表記する場合がある。

{U} から {F} までの座標変換は、V を任意のベクトルとして次式のように示される。

$$\begin{aligned} {}^A R &= \begin{bmatrix} c\alpha & -s\alpha & 0 \\ s\alpha & c\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c\beta & 0 & s\beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -s\beta & 0 & c\beta \end{bmatrix} \\ &\times \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c\gamma & -s\gamma \\ 0 & s\gamma & c\gamma \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} c\alpha c\beta & c\alpha s\beta s\gamma - s\alpha c\gamma & c\alpha s\beta c\gamma + s\alpha s\gamma \\ s\alpha c\beta & s\alpha s\beta s\gamma + c\alpha c\gamma & s\alpha s\beta c\gamma - c\alpha s\gamma \\ -s\beta & c\beta s\gamma & c\beta c\gamma \end{bmatrix} \dots\dots\dots (4) \end{aligned}$$

$${}^U V = {}^A R^F V + {}^U P \dots\dots\dots (5)$$

ここでオイラー角 α が零のときに X_a 軸と X_f 軸とが同一鉛直面内にあるようにとる。座標系 {A} と {F} との関係は次式のように表される。姿勢制御では座標系 {A} を基準とした座標系 {F} の姿勢を用いて上面の傾斜の表現を行う。

$${}^A R = \begin{bmatrix} c\beta & 0 & s\beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -s\beta & 0 & c\beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c\gamma & -s\gamma \\ 0 & s\gamma & c\gamma \end{bmatrix}$$

図6 座標変換

$$\begin{bmatrix} \{U\}: \text{地面に固定された基準座標系} \\ \{A\}: \{U\} \text{を}\{P\} \text{だけ平行移動した座標系} \\ \{F\}: \{A\} \text{の, Z-Y-X オイラー変換座標系} \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} c\beta & s\beta s\gamma & s\beta c\gamma \\ 0 & c\gamma & -s\gamma \\ -s\beta & c\beta s\gamma & c\beta c\gamma \end{bmatrix} \dots\dots\dots (6)$$

$${}^A V = {}^A R {}^F V \dots\dots\dots (7)$$

3・3 上面の方程式と傾斜方向 ${}^F X_0, {}^F Y_0$ は座標系 $\{F\}$ の単位ベクトルとすると次のように表され、

$${}^F X_0 = (1, 0, 0)^T \dots\dots\dots (8)$$

$${}^F Y_0 = (0, 1, 0)^T \dots\dots\dots (9)$$

$\{A\}$ 座標系において

$${}^A X_0 = {}^A R {}^F X_0 = (c\beta, 0, -s\beta)^T \dots\dots\dots (10)$$

$${}^A Y_0 = {}^A R {}^F Y_0 = (s\beta s\gamma, c\gamma, c\beta c\gamma)^T \dots\dots\dots (11)$$

と表される。 Δ 形フレームの中心を $\{A\}$ 座標系の原点とすると上面の方程式は次式となる。

$$lx + my + nz = 0 \dots\dots\dots (12)$$

ここで、係数 (l, m, n) は次式のように算出できる。

$$(l, m, n) = \begin{vmatrix} i & j & k \\ {}^A X_0^T \\ {}^A Y_0^T \end{vmatrix} = (s\beta c\gamma, -s\gamma, c\beta c\gamma) \dots\dots\dots (13)$$

上式より、上面の方程式は式(14)となり、また X_a 軸方向および Y_a 軸方向の上面のこう配は、式(15)、(16)となる。

$$s\beta c\gamma x - s\gamma y + c\beta c\gamma z = 0 \dots\dots\dots (14)$$

$$\frac{\partial z}{\partial x} = -\tan \beta \dots\dots\dots (15)$$

$$\frac{\partial z}{\partial y} = \frac{\tan \gamma}{c\beta} \dots\dots\dots (16)$$

図7に示すように、上面が水平面 (X_a - Y_a 平面) となる最大こう配を ξ 、その二次元的方向を η 方向として、その二つのパラメータで、面の傾斜をより視覚的に表現する。この場合、 η 方向の単位ベクトルは $(\cos \eta, \sin \eta)^T$ と表され、 (η, ξ) と (β, γ) との関係は以下のように導かれる。

図7 最大傾斜方向 (η, ξ)

$$\begin{aligned} \tan \xi &= \frac{1}{c\beta c\gamma} (s\gamma s\eta - s\beta c\gamma c\eta) \\ &= \frac{\tan \gamma}{c\beta} s\eta - \tan \beta c\eta \dots\dots\dots (17) \end{aligned}$$

ξ を η で偏微分して、右辺を零として最大傾斜方向 η とオイラー角との関係式(19)が導出される。

$$\frac{\partial(\tan \xi)}{\partial \eta} = \frac{\tan \gamma}{c\beta} c\eta + \tan \beta s\eta = 0 \dots\dots\dots (18)$$

$$\tan \eta = -\frac{\tan \gamma}{s\beta} \dots\dots\dots (19)$$

式(19)を式(17)に代入して

$$\tan \xi = \tan \beta \tan \eta s\eta - \tan \beta c\eta \dots\dots\dots (20)$$

となり、最大こう配 ξ とオイラー角との関係も導かれる。

3・4 三脚による傾斜制御 前述のように、本ロボットでは、各フレームの3本の脚の伸縮で傾斜生成を行うことが必要とされる。各フレームの脚は、位置的には合同な正三角形上にあり、異なるのは相対的な回転角のみである。本節では、 Δ 形とY形の二つの三脚傾斜制御のうち Δ 形の場合を例として述べる。 ${}^F D_1, {}^F D_2, {}^F D_3$ は Δ 形フレームの脚を表す。そして、それらのベクトルは座標系 $\{F\}$ および $\{A\}$ において次のように表される。

$${}^F D_1 = \left(-a, -\frac{\sqrt{3}}{3}a, 0 \right)^T \dots\dots\dots (21)$$

$${}^F D_2 = \left(a, -\frac{\sqrt{3}}{3}a, 0 \right)^T \dots\dots\dots (22)$$

$${}^F D_3 = \left(0, \frac{2\sqrt{3}}{3}a, 0 \right)^T \dots\dots\dots (23)$$

$$\begin{aligned} {}^A D_1 &= {}^A R {}^F D_1 \\ &= -a \left(c\beta + \frac{\sqrt{3}}{3}s\beta s\gamma, \frac{\sqrt{3}}{3}c\gamma, \frac{\sqrt{3}}{3}c\beta s\gamma - s\beta \right) \dots\dots\dots (24) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} {}^A D_2 &= {}^A R {}^F D_2 \\ &= -a \left(\frac{\sqrt{3}}{3}s\beta s\gamma - c\beta, \frac{\sqrt{3}}{3}c\gamma, s\beta + \frac{\sqrt{3}}{3}c\beta s\gamma \right) \dots\dots\dots (25) \end{aligned}$$

$${}^A D_3 = {}^A R {}^F D_3$$

図8 傾斜計

図9 接地点間距離

図10 4本接地状態

$$= a \left(\frac{2\sqrt{3}}{3} s\beta s\gamma, \frac{2\sqrt{3}}{3} c\gamma, \frac{2\sqrt{3}}{3} c\beta s\gamma \right)^T \quad \dots\dots\dots (26)$$

3 頂点の高さ (h_1, h_2, h_3) とオイラー角の関係は以下のよう表される。

$$(h_1, h_2, h_3) = -a \times \left(\frac{\sqrt{3}}{3} c\beta s\gamma - s\beta, s\beta + \frac{\sqrt{3}}{3} c\beta s\gamma, -\frac{2\sqrt{3}}{3} c\beta s\gamma \right) \quad \dots\dots\dots (27)$$

$$h_1 - h_2 = 2as\beta \quad \dots\dots\dots (28)$$

$$h_3 = -\frac{2\sqrt{3}a}{3} c\beta s\gamma \quad \dots\dots\dots (29)$$

式(28)と(29)より (h_1, h_2, h_3) を用いてオイラー角は以下のように表される。

$$\beta = \sin^{-1} \left(\frac{h_1 - h_2}{2a} \right) \quad \dots\dots\dots (30)$$

$$\gamma = \sin^{-1} \left(\frac{\sqrt{3} h_3}{2a \cos \beta} \right) \quad \dots\dots\dots (31)$$

3.5 目標値と傾斜制御 本節では、傾斜の制御法について述べる。図8のように、二つのオイラー角 (β, γ) が同時にはかれる2軸の傾斜計が△形フレームに取付けられておりオイラー角は常に計測できる。△形フレームの3本の脚の長さ (leg 1, leg 2, leg 3) も計測できるとし、上面を目標の傾斜にすることを考える。以下に上面制御のアルゴリズムを示す。

- (1) 傾斜計からオイラー角 (β, γ) を計測する。
 - ・式(19), (20)より上面の現在の最大傾斜方向 η と最大傾斜角 ξ が計算できる。
- (2) 式(27)を用いて (β, γ) より3頂点の高さ (h_1, h_2, h_3) を計算する。
- (3) 3本の脚の下の地面の高さ (floor 1, floor 2,

図11 四脚傾斜制御

(a) 傾斜生成
 $\eta : 30^\circ$ [$\beta : 8.68^\circ$]
 $\xi : 10^\circ$ [$\gamma : 4.98^\circ$]

(b) 水平生成
 $\eta : 0^\circ$ [$\beta : 0^\circ$]
 $\xi : 0^\circ$ [$\gamma : 0^\circ$]

図12 傾斜制御グラフ

floor 3) を次式のように算出する。

$$(\text{floor 1, floor 2, floor 3}) = (h_1 - \text{leg1}, h_2 - \text{leg2}, h_3 - \text{leg3}) \quad \dots\dots\dots (32)$$

・座標系 {A} に対する地面の傾き ($\beta_{\text{floor}}, \gamma_{\text{floor}}$) を式(30), (31)より計算する。

・座標系 {A} に対する地面の最大傾斜方向 η_{floor} と最大傾斜角 ξ_{floor} が式(19), (20)で計算できる。

(4) 目標傾斜方向と傾斜角 (η_d, ξ_d) を決めて、目標オイラー角 (β_d, γ_d) を式(19), (20)から計算する。

(5) 3 頂点の目標高さ (h_{1d}, h_{2d}, h_{3d}) を (β_d, γ_d) を用いて式(27)より求める。

(6) 脚を ($h_{1d} - h_1, h_{2d} - h_2, h_{3d} - h_3$) だけ伸縮させる。

3.6 四脚による姿勢制御 各フレームの三脚の傾斜生成は、脚がフレームに固定されているために、図9に示すように大きな傾斜変化を伴うとき接地点間距離が変化する ($L2 > L1$)。不整地上では、足場の位置がずれて不安定になると転倒する場合も考えられるため、足場の選択において、設置間距離のずれが許容できる場所を選ぶことが必要となる。

以下のように、大きな傾斜変化を伴うときには、フレーム間の相対移動を伴った4本の脚の伸縮による接地点を変えない傾斜制御を行うことができる。

- (1) 図10のように最大傾斜方向 η を挟んで4本

図 13 水平維持歩行グラフ

図 14 水平維持歩行アルゴリズム

の脚を接地させる。

(2) 接地点間距離 L の計測。

(3) 傾斜制御前と制御後のフレーム間距離 $L1$, $L2$ の導出(図 11)。

$$L1 = L \cos(\theta_1 - \xi) \dots\dots\dots (33)$$

$$L2 = L \cos(\theta_2 - \xi) \dots\dots\dots (34)$$

(4) 脚長の変化量の決定。

(5) 脚の伸縮と相対移動($L1 \rightarrow L2$)を同時に行う。

相対移動を同時に行うことにより接地点を変えずに傾斜制御を行える。厳密には、最大傾斜方向 η を挟んで 4 本の脚を接地させた特殊な場合のみ可能であり、傾斜制御の前にそのような脚の配置にする必要がある。

3.7 傾斜制御実験 本ロボットはステッピングモータによって制御される 6 本の脚をもち、上記のように変化させる脚長を計算した後、傾斜移動が行われる。足場はずれに十分許容できるとして、図 12 に、 Δ 形フレームの 3 本の脚によって傾斜制御を行った結果を示す。図 12(a) は水平状態からの傾斜生成実験、図 12(b) は水平生成実験の傾斜計の読み (β, γ) の変化を示す。分解能 0.01° の 2 軸の傾斜計を用いた実験の結果、目標傾斜角との誤差は 0.1° まで押さえることができ傾斜を任意の方向に制御できることが確かめられた。

4. 水平維持歩行

荷物の運搬を行うときにマニピュレータを安定状態に保つため上面の傾斜を一定に保つことが必要とされる。三脚での傾斜制御を用いての実験では面の傾斜を水平に保ちながら斜度 10° 程度の傾斜地をこう配に沿って上方に向かい歩行させた。歩行データを図 13 に示す。傾いた面を水平にした後、図 14 のアルゴリズムを用いて、フレームの相対移動後に、あらかじめ計算させた距離を伸縮させ、遊脚と接地脚の切換え後に再び傾斜計の読みから補正させる形で歩行を行った。接地脚の切換え時に 1° 程度の誤差が生じるがこれは相対移動後の脚の長さの計算誤差と地面のコンプライアンスによるものと考えられ、ほぼ水平に保ちながら斜面を移動することができた。

5. ま と め

本報では、二つのフレームからなる 6 脚ロボットの姿勢を任意に生成する方法を提案した。そして、実験により傾斜計の読みと脚の伸縮によって姿勢を制御できること、一定の傾斜面上で水平を維持しながら歩行できることを確認した。実験では、3 本の脚が接地できるという前提で実験を行っているが、実際に不整地においてはフレームを切換えるとき次に支持すべきフレームの脚が必ずしも接地できるとは限らず不安定となることがある。今後は接地センサを用いて地面の状態を考慮した歩行が必要となる。

文 献

- (1) 山本・柿倉, 極限作業ロボット, (1992), 217-364, 工業調査会。
- (2) 福田, 極限作業用知能ロボット, (1986), 1-47, マグロウヒル。
- (3) 大山, 機械技術研究所における極限作業ロボットの研究成果, 日本ロボット学会誌, 9-5(1991), 623-627。
- (4) 杉山, 原子力ロボット用 4 脚移動システム, 日本ロボット学会誌, 9-5(1991), 638-643。
- (5) 滝川, 海中ロボットシステム, 日本ロボット学会, 9-5(1991), 644-651。
- (6) 藤江, 極限作業における 4 足歩行ロボット, 日本ロボット学会誌, 11-3(1993), 366-371。
- (7) 中野・大久保, 跳躍ロボット全般について, 日本ロボット学会誌, 11-3(1993), 342-347。
- (8) 広瀬・米田, 実用的 4 足歩行機械の開発, 日本ロボット学会誌, 11-3(1993), 360-365。
- (9) 小谷内, 多足ロボットの世界, 日本ロボット学会誌, 11-3(1993), 379-384。
- (10) 小谷内・安達・中村, 階段登降可能な固定歩容形 6 脚移動ロボットの開発(第 6 報), 第 9 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, (1991), 907-908。
- (11) 馬場・牧野・金子・本多, 傾斜センサを用いた 4 脚歩行ロボットの歩行制御, 第 10 回日本ロボット学会学術講演会

- 予稿集, (1992), 563-564.
- (12) 小菅・竹尾・福田・ほか3名, スチュワートプラットホーム形パレルリンクマニピュレータの動力学計算法, 機論, **60**-569, C(1994), 218-224.
- (13) Luh, J. Y. S., Computation of Input Generalized Forces for Robotics with Closed Kinematic Chain Mechanisms, *IEEE J. Robotics and Automa.*, Vol. RA-1, No. 2 (1985), 95-103.
- (14) 星野, 歩行型全方向移動機構の開発, 第10回日本ロボット学会学術講演会予稿集, (1992), 61-62.
- (15) Hoshino, H., Development of Omnidirectional Walking Vehicle, *Proc. Int. Sympo. Theory of Mechanics and Mechanisms*, Vol. 2 (1992), 725-728, IF00MM-jc.
- (16) 藤澤・福田・小菅・星野, 全方向脚移動機構の開発, 第3回建設ロボットシンポジウム, (1993), 155-160.
- (17) 藤澤・福田・小菅・星野, 全方向脚移動機構の制御, 第32回計測自動制御学会学術講演会予稿集, (1993), 435-436.
- (18) 藤澤・星野・福田・小菅・室・菊地, 全方向型移動機構の研究(第1報, アクチュエータの協調による移動制御), 機論, **60**-571, C(1994), 236.
- (19) Craig J. J. (三浦・下山訳), ロボティクス, (1991), 17-57, 共立出版.