

# 節体幹型移動ロボット KR II の開発

広瀬 茂男\* 森島 昭男\* 塚越 真一\*  
妻木 俊道\*\* 物部 宏之\*\*

## Design of Snake Like Vehicle : Articulated Body Mobile Robot KR II

Shigeo HIROSE\* Akio MORISHIMA\* Shinichi TSUKAGOSHI\*  
Toshimichi TSUMAKI\*\* Hiroki MONOBE\*\*

The characteristics and the applications of the articulated body mobile robot, "Koryu (KR)", a mobile robot with a new style of articulated body is identified, and the construction of newly developed "Koryu-II (KR-II)" is discussed. KR-II takes the form of linked seven articulations and its total length is 3.3 m, and its total weight is 320 kg. KR-II introduces new mechanisms and control systems such as, 1) easily detachable unified segments, 2) self contained driving system with wireless control, 3) traction wheels attached on one side of the segment, 4) the long stroke vertical prismatic joint to cope with a steep inclination, 5) robot hand driven by the coordination control of the body articulation, 6) force sensor based on photodetecting technology, 7) an analog bus system to simplify the electrical installation. Finally, this paper describes fundamental results of the experiment of KR-II and shows the validity to move and operate in an unstructured environment.

**Key Words :** Articulated Body Mobile Robot, Terrain Adaptability, Unified System, Off Road Vehicle

### 1. ま え が き

対地適応性の高い移動ロボットを開発することは、これからのロボットの活動分野を拡大してゆくために不可欠である。ロボットは、たとえば階段の昇降、床面に放置されている障害物の乗り越え、狭く曲がりくねった通路の移動が出来なくてはならない。また、林の中や山道などの屋外でも動き回る必要がある。このような不整地で自律的に移動できるロボットを実現するためには、その形態設計を十分慎重に行わなければならない。筆者らは、これまでヘビをモデルとした新しいタイプの移動ロボット「蛟龍(以降 KR と呼ぶ)」の開発を行ってきた<sup>1,2)</sup>。

近年、新たに消防士の災害現場の偵察作業の代行を行うことなどを前提とした第 2 次試作モデル KR II を開発した。本研究ではこの KR II の機構、センサ、制御

系の構成を論じ、その基本的な走行実験の様子を報告する。

### 2. 節体幹型移動ロボット「蛟龍(KR)」の基本特性

本論文で扱う節体幹型移動ロボット KR とは、複数の節を直列に連結した形態の移動ロボットである<sup>1-4)</sup>。KR の各節は一般的には円筒形を成しており、円筒の中心軸を常に鉛直に立てた姿勢で連結されている。これらの節に装備される屈曲運動のための自由度は、隣の節を鉛直方向(以降  $z$  軸方向と呼ぶ)に駆動する自由度と、隣の節を  $z$  軸回りに回転させる自由度( $\theta$  軸)の 2 つである。また、推進運動は、各節の下部に装備する車輪または無限軌道車などの推進機の自由度( $s$  軸)によって生じる。つまり、KR には 1 節当たり 3 自由度が装備されていることになる。そしてこれらの能動自由度の協調駆動により移動運動が生成される。

KR は列車のような細長い形態をなし、しかもその体

原稿受付 1990 年 11 月 6 日

\* 東京工業大学工学部

\*\* 三菱重工株式会社 相模原製作所

形を能動的に変形できる。この特性を生かすことにより、KRによる移動には以下のような特有の機能性が発揮される。

1) 階段や山道などでも地形の凹凸に能動的に適応して移動運動が出来る。また通路が狭あいでも屈曲していても、地形に適応しながら通路できる。

2) 溝があっても、自分自身の体幹を橋のようにすることで乗り越え動作ができる。また、これは同様の制御により、床の上に置かれた障害物を接触せずに乗り越えられる。

3) 使用目的によっては、この多関節構造の体幹をロボットアームとして利用しマニピュレーションができる。なお、上述の2)の機能性はこの3)の効果を生かしたものであるとも言える。

KRはまた、各節単位の駆動系が単純な3自由度駆動系で軽量に構成され、各節単位の(積載質量/車体質量)比が高いという特徴を有する。さらに、連結する節の台数を増加すれば、移動ロボットとしての運動性能をほとんど変えずその積載質量を増加できる。これらのことから、次の特性も有する。

4) 移動に必要なとする通過断面積に比較して物質積載性能を高くできる。一般に、移動ロボットを開発する上での最大の問題点は、物質積載性能が著しく限定されることであることが多い。KRは、このような従来の形態の移動ロボットが受ける制約を受け難いという点で著しく実用性が高いと言える。

さらに、KRはユニット化された構造となっている。このことから、実際に利用する場合には以下のような特有の機能も示す。

5) メンテナンスがしやすい。これは節が故障した場合、その節を取り外し置き換えることで修理できることを意味する。

6) 節の組み合わせを変えることにより汎用性を発揮できる。たとえば、長時間走行を行わせようとするときには、エネルギー源搭載節の連結台数を増やすことで対応できる。

7) 節に分解すれば運搬しやすい。そのため、作業現場へのロボットの持込み作業が容易になる。

以上のような特性を有することから、KRは有効性の高い移動ロボット形態であると考えられる。KRの具体的な応用分野としては、原子炉内の点検作業用ロボット、消防士の偵察作業ロボット、山林での物質搬送ロボットなどが考えられる。なお開発したKR IIは、これらのうちの消防用偵察作業を直接的な開発ターゲットとしている。KR IIの行うべき作業は以下のようになっている。a) 有毒ガスセンサ、監視用テレビなどを搭載し、

消防士の代わりに自律的に初期火災現場を巡回し偵察する。そして、偵察結果を無線通信で外部の操縦者に伝送する。b) 必要によっては部屋のドアを自分で開けたり、障害物を排除したり、逃げ遅れた人の救助、誘導などを行う。

### 3. 蛟龍2号機の機構設計

開発したKR IIの全景をFig. 10に示す。全長3.3m、高さ1.08m、幅0.46mである。KR IIは電源、制御装置を各節に分散して搭載しており、独立自走可能なロボットである。KR IIの先端第0節は第1節に取り付けられるマニピュレータ部分である。この第0節には駆動されない車輪が取り付けられ、移動運動を補助するようになっている。第1節から第6節まではユニット化された節である。第0節の質量は25kg、第1～6節の固有の質量は43kgである。積載される制御装置、動力源(バッテリー)等の質量も加算すると全質量は現在320kgである。節の平板構造部にはハニカムを使用し軽量化を計っている。

駆動系にはアンプも含めて小型軽量化を計れるDCモータを使用している。第1～6節ではそれぞれのモータ駆動系アンプは節の底部に個別に格納されている。第0節駆動系のアンプは第1節に分離して搭載されている。

バッテリーは12V5Ahのソールド鉛蓄電池7個を直列結合したものであり、質量は1ユニット18kgである。これはどの節にも搭載でき、3ユニットを積載した場合、屋外の不整地で30分程度の走行が可能である。

以降新しいモデルKR IIの機構設計において、特に留意した点を論ずる。

#### 3.1 ユニット化構造

災害現場の偵察を行うロボットの設計を想定すると、まず第1に現場への搬送性能が必要である。火災はエレベータが使用できなくなった高層ビルや、機器の錯綜した化学プラントの内部で発生することがある。偵察ロボットが大きくて重たくまた容易に分解できないのでは、いかにロボットの性能が高くても現場に急行できず役に立たないことも起きてしまう。

KR IIでは、前章の7)で示した特性を発揮するため、Fig. 1のように各節を簡単に着脱できるような構成にした。つまり、KR IIの節の連結は連結面をノックピンで位置合わせした後、6個の結合ネジ $S_6$ で簡単に実施できるようにしている。また、各節への動力配線、信号配線もこの目的のために第4章で示すように共通バス化している。そして、これらのバスラインコネクタは節の連結面に対向するように設置した。そのため、機械的に節を連結すると電気的にも同時に結合される構造となっ

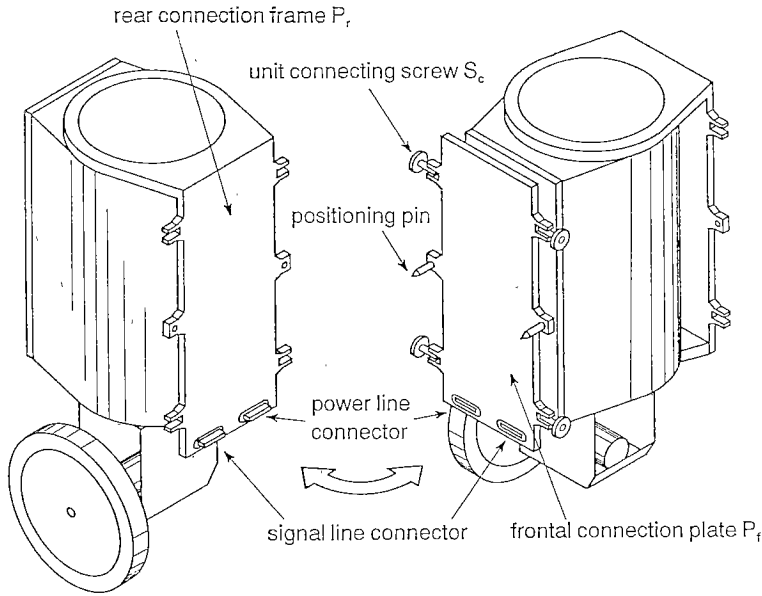


Fig. 1 Unit connecting mechanism of KR-II.

ている。

KR II の運搬は、Fig. 13 のように KR II を個別の節に分解し 2 名で担いで行えるようにした。

### 3.2 走行系設計

以前に試作した機械モデル KR I では、推進機としては各節の下部にクローラを装備していた。クローラは車輪と比較すると機構が複雑である。そのため、より大型な装置を実際に設計してみると、車輪の方がより軽量に設計でき望ましいことが明らかになった。そこで KR II では車輪を使用することにした。

さて、不整地走行時には Fig. 2 のように斜面を横切することも必要となる。このような移動を各節に通常の 2 輪車を設置し実現しようとする、車輪はロール軸回り  $\phi_r$  に揺動出来なければならない。しかしこの揺動運動を能動的に行おうとすると、車輪支持部に余分の自由度を付加することになり車体質量が増加してしまう。また、 $\phi_r$  の揺動を受動的なサスペンションで吸収しようとする、KR II が Fig. 2(a) のような直線状の姿勢を取ったときに上部部の姿勢を保持できない。そのためこの構造も不適當である。

そこで KR II には Fig. 3 のように各節の駆動系は片輪とし、連結される節の左右交互に片輪が配置される片輪走行系を新しく導入した。このような片輪走行系は一見著しく不安定で奇異な設計のように思われるかも知れない。しかし、節を連結した状態では走行系全体としての安定性はそれほど悪いものではない。特に Fig. 12 の様に W 字形の体型にする状態では、このような形態で

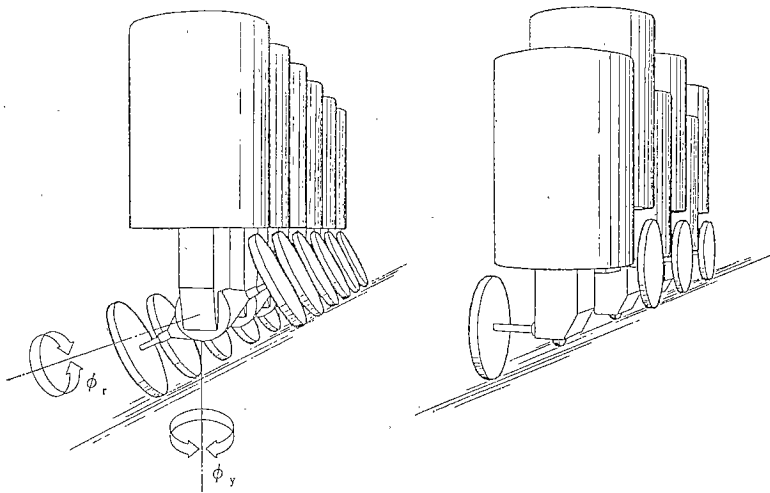
も高い安定性が確保できる。Fig. 12 のような体型の KR II は、見方を変えれば複輪の車体の中心部を能動的にスライドできるようにしたアクティブサスペンション付きの車両と見なすことも出来る。

片輪走行系によれば、傾斜面へ適応する姿勢は Fig. 2 (b) のように  $z$  軸駆動系の運動を利用することで容易に実現出来る。また、両輪機構では不可欠な内輪差を吸収するための差動機構も不用でありこの点でも軽量化可能である。このように、片輪走行系は KR の駆動系として有効である。

### 3.3 $\theta$ 軸駆動系設計

節間の垂直軸まわりに回転する軸 ( $\theta$  軸) の駆動系構成は以下の通りである。各節の後部には、後部連結構造体  $P_r$  が節の中央部の垂直軸  $J_c$  に回転自在に軸着されている。ただし、この  $J_c$  軸の上部軸受けは大口径ベアリング  $B_1$  を使用している。また、後部連結構造体  $P_r$  の下部には平歯車  $G_{c_j}$  が  $J_c$  を軸として取り付けられている。一方、節の底板には軸  $J_c$  から距離  $L$  の位置に  $\theta$  軸駆動用 DC モータ  $A_\theta$  が架設され、その出力軸に軸装されたピニオン歯車  $G_{m_j}$  (ピッチ円半径  $r_{m_j}$ ) が後部連結構造体  $P_r$  の歯車  $G_{c_j}$  と咬合している。このような構成によって、 $\theta$  軸旋回運動が  $\theta$  軸駆動用 DC モータ  $A_\theta$  によって生成されるようになっている。

なお、有限長さの節を有する KR が連続的な軌道をなして移動を行うためには、 $\theta$  軸の駆動に連動して車輪の方向も独立に制御しなければならない。ただし、これを実現しようとする、車輪支持部には Fig. 2(a) のヨー



(a) Twice wheels with rotation axis  $(\phi_r)$  mechanism. (b) Single wheel mechanism in combination with vertical axis motion  $(\phi_y)$ .

Fig.2 Inclined terrain adaptation mechanism.

軸  $\phi_y$  まわりの駆動装置が必要となり、KR の重量増加を招く。そのため、KR II では KR I と同様に<sup>2)</sup>、機構的に車輪の方向を節のなす角度の常に半分の方向に保つ疑似的な制御法を導入することにした。

この車輪の連動駆動を実現するため、KR II では  $\theta$  軸駆動用 DC モータ軸にピニオン歯車  $G_{mj}$  以外にピニオン歯車  $G_{mw}$  (ピッチ円半径  $r_{mw}$ ) も取り付け、これを

平歯車  $G_{cw}$  (ピッチ円半径  $r_{cw}$ ) と咬合駆動するようにした。ただし、この平歯車  $G_{cw}$  は  $J_c$  を中心軸として後部連結構造体  $P_r$  に取り付けられたものである。そして、それぞれの歯車のピッチ円半径は、

$$r_{mj} = \frac{1}{1 + (\xi/2)} L$$

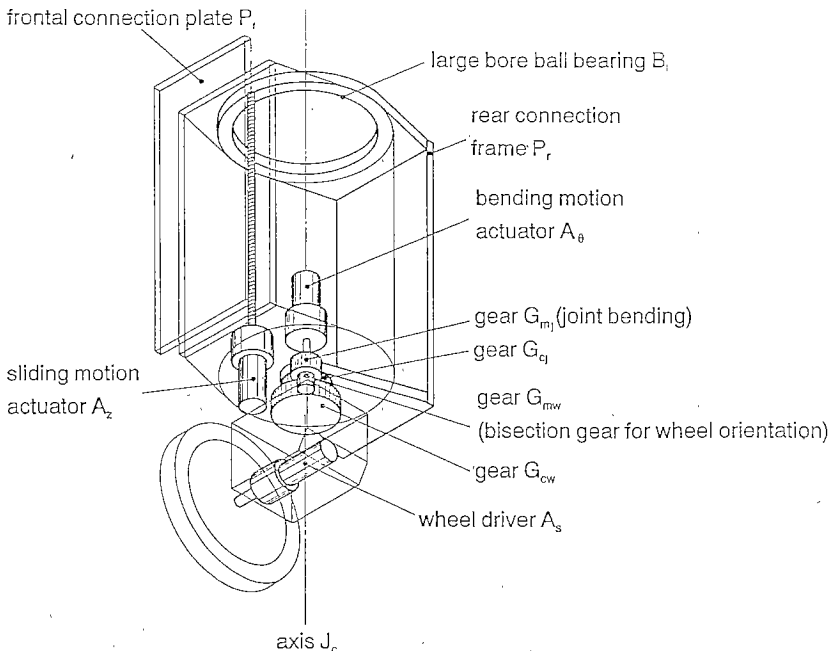


Fig. 3 The driving mechanism of i-th unit.

$$\left. \begin{aligned} r_{mw} &= \frac{1}{1+\xi} L \\ r_{cj} &= \frac{\xi}{1+(\xi/2)} L \\ r_{cw} &= \frac{\xi}{1+\xi} L \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

とした。これにより、車輪の方向は節のなす角度の半分の方向に常に保たれるようになっている。ただし、ここで $\xi$ は節駆動歯車系の減速比である。

### 3.4 z 軸駆動系設計

各節の前部には前部連結板  $P_f$  がリニアベアリングで結合され、相対的に  $z$  軸運動を生成するようになっている。上下方向の運動を生成しようとする場合、回転関節より直動関節の方が自重支持モーメントを機構的に支持できましい。このことはすでに論じた<sup>3)</sup>。そのため KR II でもこの駆動機構を使用することにした。しかし、この機構で節間支持モーメントを大きく生成しようとする、上下1対使用するリニアベアリング  $L_b$  の間隔を広く取らなければならない、 $z$  軸方向のストロークが制限される問題が生じてしまう、KR II は傾斜度 40 度程度の階段を  $z$  軸を垂直に保ったまま昇降出来ることを目的としている。これを従来の機構で実現しようとする、車体の高さが著しく高くなってしまふ。

そこで、KR II には新たに Fig. 4 のような運動拡大機構を  $z$  軸駆動系に導入した。これは前部連結板  $P_f$  と節  $U$  とを中間接合体  $P_i$  を介して連結したものである。前部連結板  $P_f$  と節  $U$  の対向面には、リニアベアリングのレール  $R$  が平行に設置されている。また、ラック歯車  $G_r$  もそれぞれの節にレールと平行に設置されている。中間接合体  $P_i$  にはこれらのレールに啮合するリニアベアリング  $L_b$  が両面から固定され、前部連結板と節とを連結している。この中間接合体  $P_i$  には、動力伝達歯車  $G_i$  が回動自在に支持され、対面する1対のラック歯車  $G_r$  両者に咬合している。そして、この中間接合体  $P_i$  は節に装備されたボールネジ  $B_a$  の回転で  $z$  軸方向に駆動されるという構成になっている。

この運動拡大機構において、中間接合体  $P_i$  が駆動される時の前部連結板  $P_f$  は、動力伝達歯車  $G_i$  で駆動されるため中間接合体  $P_i$  の2倍の速度となる。またその可動範囲も中間接合体の2倍となる。実際の機構ではレールの有効長さが 546mm、中間接合体の長さが 166mm である。そのため、中立状態からの前部連結板の上下可動範囲は  $\pm 380(\pm(546-166))$ mm となる。

このような運動拡大機構を導入したため、KR II が直線状の体型をとったときの踏破最大傾斜度は  $\pm 38^\circ$ 、 $\theta$  が最大 90 度の W 字形体型をとったときの踏破最大傾斜度は  $\pm 48^\circ$  まで大きくできた。ただし、この値は KR

II の関節間の幅が 480mm であることで求めた値である。

なお、節間の信号および動力伝達線は Fig. 4 に示すように中間接合体を介して電送するようにした。このことで、 $z$  方向に大きなスライド運動が行われても電装ワイヤが障害にならないようにできた。

### 3.5 マニピュレータ系の設計

移動ロボットにマニピュレーション機能を付加しようとする、既存の移動ロボットにマニピュレータをただ搭載するというような設計を行うことが多い。これは、ロボットの移動機構とマニピュレーション機構を個別に製作した後、それらを組み合わせる設計法であるといえる。しかし、可能な限り軽量化しなければならない作業用移動ロボットのためには、このような設計は望ましいものではない。上述の2つの機能を複合した総合化設計により、軽量化を計るべきである。

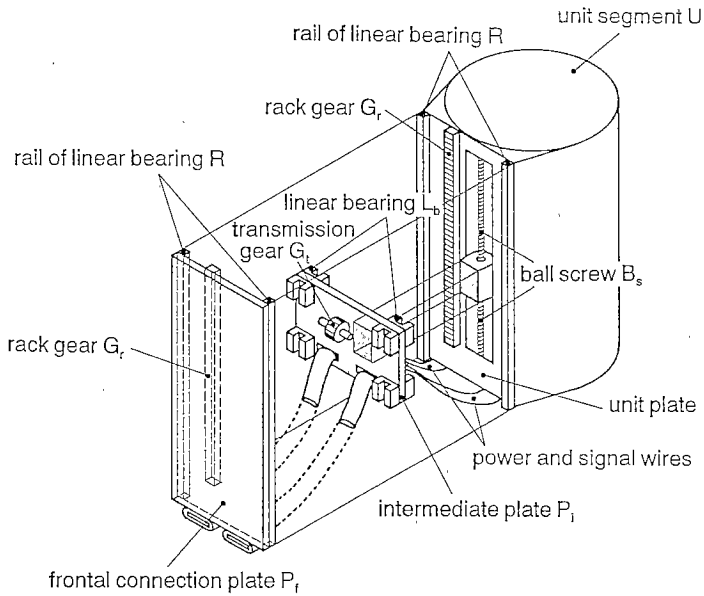
節体幹型移動ロボット KR は、第2章の3)で論じたように、体幹をロボットアームとしても利用できる。KR II でもこの機能を利用するため Fig. 5 の様に先端の第0節にマニピュレータの手首部を設置した形態を導入した。第0節の手首機構の自由度は、指の開閉を除いて3自由度  $\phi_a, \phi_b, \phi_c$  から構成されている。このうち、 $\phi_a$  は垂直軸回りの旋回軸である。この軸には下の受動車輪も連結されている。そして、移動時でマニピュレータを使用しない動作モードでは、この  $\phi_a$  軸は操舵に利用している。

$\phi_b$  は水平軸回りの旋回軸である。この軸の駆動でハンドは上下するが、別に装備したワイヤーによる平行運動機構によってハンドは常に水平に保持されるように構成されている。 $\phi_c$  はハンドの中心軸回りの旋回軸である。これはワイヤを用いて第0節基台部から遠隔的に駆動されている。ハンドの開閉も同様に遠隔駆動されるように構成され手首の軽量化が計られる。

ただし、これだけの自由度ではマニピュレーション作業には不十分である。KR II では、この不足自由度に対応するため先端の節を浮上させその  $z$  軸および  $\theta$  軸の自由度を同時に利用する制御法を導入することとした。この特殊なマニピュレータ制御法の詳細は、別報に報告するつもりである。

### 3.6 センサ系の設計

KR II は地表と複数の車輪で接する。そのため、その制御には地表からの反力を検出する力センサが不可欠である。KR II は KR I と同様に光学式の力センサ<sup>4)</sup>を使用した。光学式力センサとは、Fig. 6 のように LED 光源とフォトトランジスタなどを対向させたフォトリタラプタ、そして力の作用部に弾性的に支持され



**Fig. 4** The vertical ( $z$ ) axis motion expansion mechanism.

フォトカブラの光路を遮るための遮光板から構成されるものである。そして、外力は遮光板の微小変位を生じ、その微小変位がフォトトランジスタで大きな光量変化として検出される系となっている。この光学式力センサの特徴は以下の通りである。

1) 検出される信号にはヒステリシスがほとんど無く、

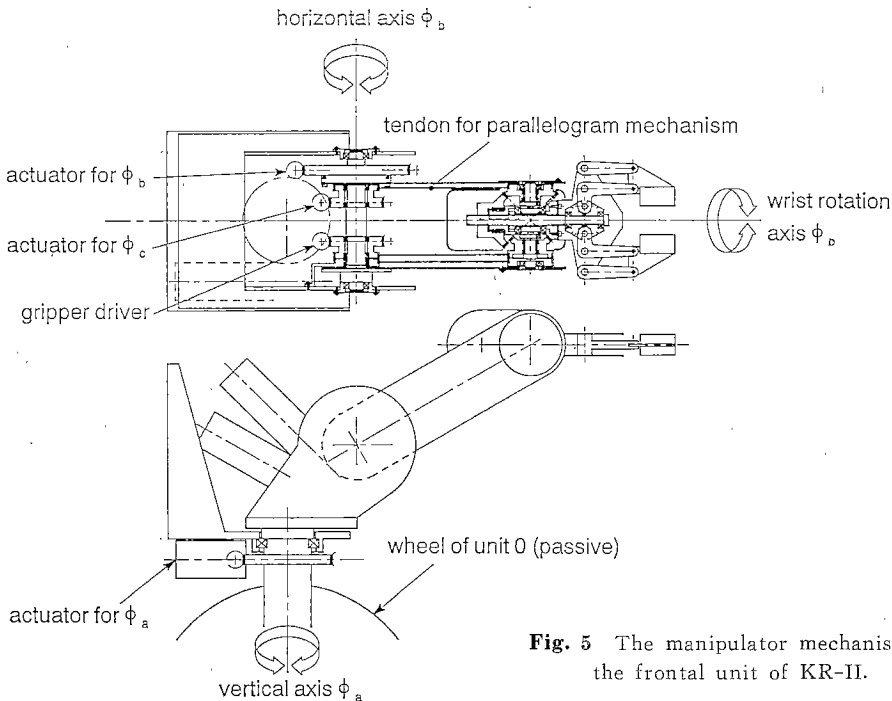
再現性が著しく高い。

2) 変位量は 0.1mm 程度の微小量で十分である。

3) 外付けのアンプが不要で著しく安価・簡便に設置できる。

力検出には現在歪ゲージが一般的に使用されている。

しかし、歪ゲージ方式では検出すべき歪量そのものが著



**Fig. 5** The manipulator mechanism introduced at the frontal unit of KR-II.

しく小さいため高性能のアンプが必要となり、小型化しにくく高価となる。導入した光学式力センサは、原理的に検出される光量の変化が大きく、またフォトトランジスタを使用するため、直接計算機に入力できるレベルの信号が外部アンプ無しで出力できる。そのため、ロボットに多量に使用するのに有効なセンサであると考えられる<sup>5)</sup>。

各車輪の地表面反力  $F_{zi}$  は、 $z$  軸駆動系の力センサで計測された力  $f_{zi}$  から

$$F_{zi} = M_i g + f_{zi} - f_{zi+1} \quad (2)$$

のように求めている。

KR II には、車輪が水平方向に受ける推力の計測用力センサを新たに装備した。これは KR II が障害物に接触したとき、その接触を能動的に回避する制御に使用するためのものである。Fig. 6 は第 0 節に装備した光学式力センサである。これは車輪軸受け部に放電加工で切込みを入れ微小変位を生成する構造となっている。

#### 4. KR II の制御系設計

KR II の制御系は Fig. 7 のように本体の制御装置と、無線モデムで連結される外部操縦装置から構成されている。制御コンピュータとしては、16bit マシンである PC 9801 UV 11 が本体と外部操縦装置に搭載されている。本体側コンピュータには V33 スーパーチャージャー (I.C. コーポレーション製) を付加している。KR II 本体の制御系の構成には、Fig. 8 に示すアナログ信号伝達用のアナログバスを新たに導入している。

アナログバスを KR II に使用することの効果は以下の通りである。

1) バスラインを用いて信号伝達を行おうとすると、通常は当然信号をデジタル化して電送する。しかし、デジタル信号を電送しようとする配線数が増えてしまう。アナログバスであれば信号ラインを減らすことが出来る。また各節に装備する結合コネクタのピン数も当然少なくできる。具体的には、デジタルバスを使用する場合 31ch 必要だったピン数は 9ch に減少できている。

2) AD, DA 変換器を各節ごと設置する必要がなくなり、本体計算機に直結して 1 ユニット設置すればよくなる。この代わりに新たに必要となる装置は、本体計算機に装備する DPRAM (Dual Port RAM) とマルチプレクサ、そして各節のアナログスイッチなどである。つまり回路構成がかなり単純化できる。

3) アナログ信号を使用するため、アナログバスは一般にそれほど高い分解能の信号電送には適さない。しかし、移動ロボットのサーボ系あるいはセンサ系にはさほど高い分解能の信号は必要ない。よって、この欠点は問

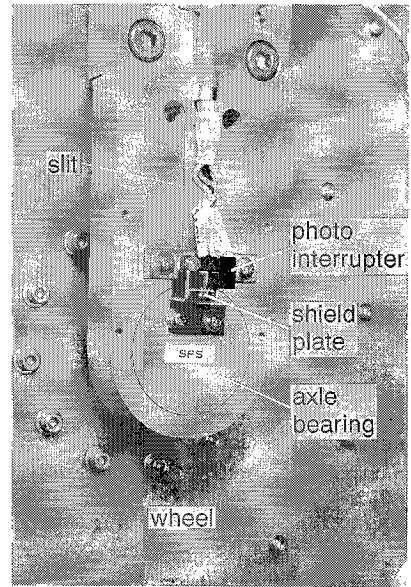


Fig. 6 Newly introduced optical force sensor to measure horizontal reaction force installed at unit 0.

題にならない。

このような特性があることから、アナログバスが一見時代に逆行するようなシステムであるが、移動ロボットシステムなどには有効なシステムであると筆者らは考えている。試作した KR II の回路構成では最大 8 節までが連結可能になっている。

KR II の運動制御は、Fig. 9 の様にレベル A, B, C から構成されている。レベル A は移動戦略の生成を行うレベルで、ここしばらくは人間の知能に依存することになる。レベル B は操縦者を補助する予測的な推進計画の立案、運動の安全警報の生成などを行う。これらレベル A, B の制御は操縦側の計算機で行われる。レベル C は KR II 本体側の計算機で実行される。ここでは、一定のサンプリングタイム (現状では 20msec) ごとに KR II の全センサ系信号の読み取りをまず行う。そして、姿勢制御と支持力制御を組み合わせるインビダンス制御や操縦のために車輪速度制御などを行う。そしてこれらの結果得られた全サーボモータへのトルク指令値を指令するという制御を繰り返すものである。これらの制御系の詳細は別報で報告する。

#### 5. 基本走行実験

試作した KR II により走行実験を行った。その様子を Fig. 10 から Fig. 13 に示す。Fig. 10 は屋外の自然環境での走行実験、Fig. 11 は階段の昇降実験、Fig. 12 は W 字形を成して走行する実験の様子を示している。平

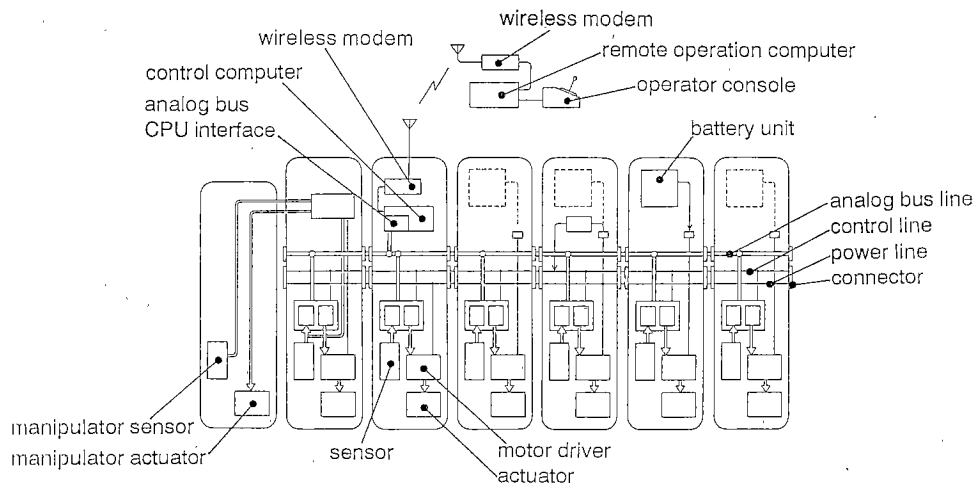


Fig. 7 Total control system of KR-II.

地での走行速度は現状では 0.5 m/sec であった。なお、Fig. 13 は節を分解して搬送する状態である。

6. ま と め

へびをモデルにした節体幹型移動ロボット「蛟龍 (KR)」の特徴をまず明らかにし、新しく開発した蛟龍 2号機 KR II の機構設計を主として論じた。また、センサ系、制御系の構成についても論じ、KR II の基本的な走行実験の様子を示した。

今回開発した KR II はまだ動き出したばかりである。

KR II が有する機能性を最大限発揮するためには、今後その制御系について十分検討を深めて行くことが必要である。たとえば、より滑らかな推進運動を生成するための操舵制御法、レベル B で行う地形を予測するタイプの制御法、テレビモニタを用いた遠隔操縦法、先端のマニピュレータの協調制御法などである。今後これらの制御問題について引き続き検討してゆきたいと考えている。

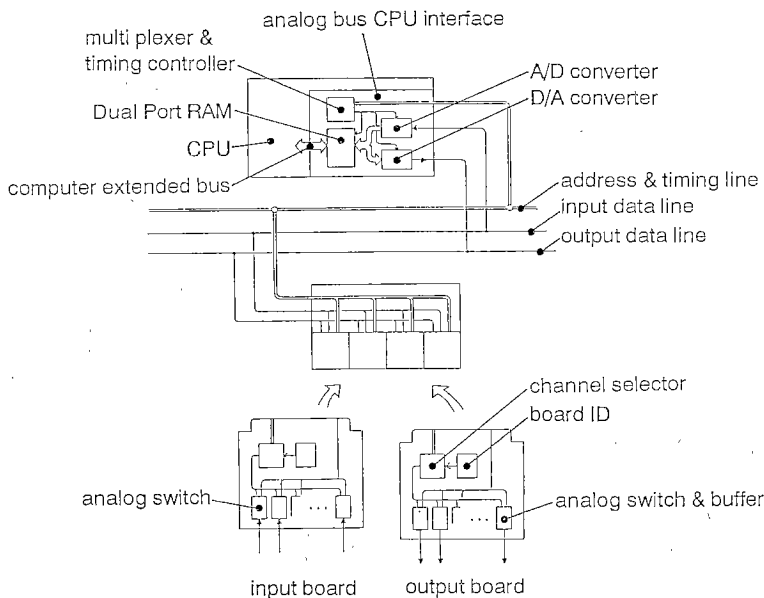


Fig. 8 Introduced analog bus system.



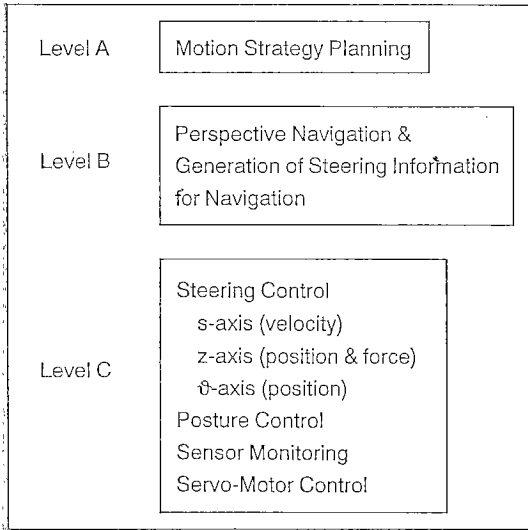


Fig. 9 Hierarchical control system for KR-II.



Fig. 10 Overall view of KR-II.

参 考 文 献

- 1) 広瀬, 索状能動型移動ロボットの提案 (極限作業ロボットのための概念設計). 第3回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.275-276 (1985).
- 2) 広瀬, 森島, 永井. 節体幹型移動ロボット. 日本ロボット学会誌. Vol.7, No.1, pp.56-61 (1989).
- 3) Hirose, S., and Morishima, A. Basic Motion Regulation of Articulated Body Mobile Robot. Proc. 5th Int. Symp. Robotics Research. pp.433-440 (1989).
- 4) Hirose, S., and Morishima, A Design and Control of Mobile Robot with an Articulated Body. Int. J. Robotics Research. Vol.9, No.2, pp.99-114 (1990).

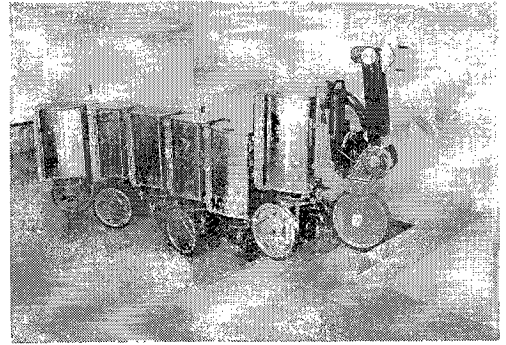


Fig. 11 Stair ascending and descending experiment of KR-II.

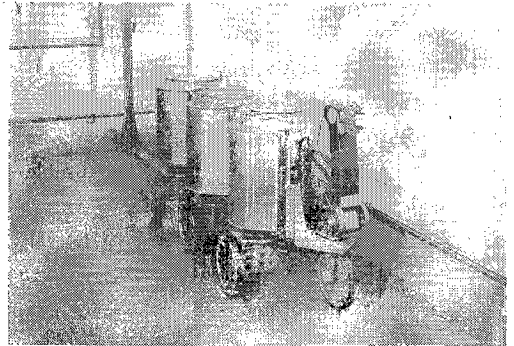


Fig. 12 W shaped locomotion experiment of KR-II.

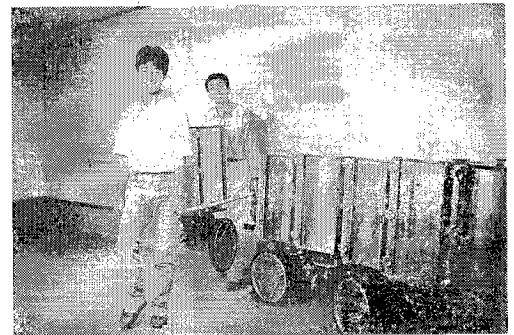


Fig. 13 Unit segment transportation of KR-II by two men.

- 5) Hirose, S., and Yoneda, K. Robotic Sensors with Photodetecting Technology. Proc. 20th ISIR, Tokyo, pp.271-278 (1989).