

車椅子用サッカー・マシンの開発

筑波大学 太田道男

(共同研究者) 同 山海嘉之

同 真島澄子

Development of a Soccer-machine Adapted with a Wheelchair

by

Michio Ohta, Yoshiyuki Sankai, Sumiko Majima
Tsukuba University

ABSTRACT

A soccer-machine was developed to adapt a wheelchair for physically handicapped peoples. Reserches were made from three sequential aspects. A basic discussion was made on the energy source of kick action which was resultantly chosen as the sum of the kinetic moment of body and arm power.

A link action simulator was developed here based on an object language which has clarified the relation of initial link postures and kick velocity. A prototype machine was fabricated using a friction type energy transmission from wheelchair. By pulling a handle from the initial link position to kick position, the link was accelerated by wheel and arm until the handle were released or turned out to indside-kick position.

要 旨

車椅子に簡単に取り付けて、身体障害者がサッ

カーを楽しめるような装置を設計、試作した。報告の主部は、つぎの3部からなる。まず、蹴りの動作をできるだけ人の動作に近いものとするため

に、大腿部と下腿部の2リンクをフリー結合として、基本構造を構築した。

つぎに、設計用シミュレーションのために、自由度の高いプログラムを開発した。これにより、2リンクの初期姿勢とエネルギー効率について計算し、下肢を垂直に挙上する初期姿勢が最も大きな蹴りの速度を得ることを明らかにした。最後に、蹴りの動作のエネルギー源について考察し、身体と車椅子の運動エネルギーと、腕自身のトルクとを併用する必要性を示した。試作機の製作に当っては、車椅子から摩擦により駆動トルクを得、また、インサイドキックが行えるような構造とした。

緒 言

最近のサッカー熱は大変なものであるが、車椅子で簡単にサッカーを楽しめないかというのが本研究の出発点である。本格的に走り回るサッカーは無理にしても、PK戦のゴールキックや穏やかに走ってのボール回しでも楽しいだろう。装置は簡単であることに越したことはない。使用するエネルギーも自身のエネルギーを有効に利用しスポーツとしての楽しみと、またある意味で上達の喜びを味わえるようなものにしたい。

基本的な仕様としては、車の車輪から動力を得るのか、腕の力で駆動して蹴るのかの検討が重要であろう。また、肝心なことは、ピッチングマシンのような構造ではなく、人工の脚が蹴る構造とし、脚の振りの方向や爪先の方向が、相手に見えることが自然であり、試合を進めるうえで必要である。

基本構想では、蹴り動作の設計について、基本的な構造の検討を行い、設計の基礎構想をシミュレーションで確認しつつ、CAD的に設計を行う。最後に試作では、実機に装着するための試作を行い構想をまとめる。

1. 基本構想

1.1 蹴り動作を行う基本構造の検討

ボールを蹴る動作は速い動作であり、これを実現する原理としては2リンク構造において、一方のリンクの運動量を他のリンクに集中させる、いわゆる角運動量の保存則を有効に使うようなメカニズムが望ましい。これは脚の大腿部、下腿部をそれぞれリンクとする構造、すなわち2リンク構造とし、さらに大腿リンクにはトルクを加えるが下腿リンクはフリーとすることにより実現されることを示す。

これは1) 構造を簡単にするため、2) 駆動部を加えた場合に生じる内部インピーダンスを排除して、下腿部が運動量保存則により有効に加速されるようにするためである。ここで駆動部の内部インピーダンスとは、力学的な摩擦と駆動部の慣性、自動車のエンジンプレーキに相当する逆駆動トルクなどの総和を意味する。

一方、Robertson (1985年)によると、キック時の股関節トルクは支持足着地後最大値をとり、以後はインパクトに向けて減少している。特筆すべきは、インパクトでは関節トルクがほとんど0である点である。これは外部に作用するトルクが0ということであり、実際には筋肉は屈曲筋と伸展筋がともに緊張した形で釣り合っていると考えられる。同じことは膝関節のデータについても見られる。膝関節のトルクは股関節の約1/3である。しかし、パワーからみると膝関節ではほとんど仕事はしていないことがわかる。すなわちある意味では、膝関節ではむだにトルクを発生していることになる。この意味では、本設計のように、膝関節をフリーとすることの不利益はさほどないように考えられる。構造が簡単になる分だけ利益が大きいと考えるべきであろう。

また、インパクト時の膝関節のトルクを同じ論文で見ると、膝を屈曲する方向の力が発生してい

るとしている。実際には、蹴るときに膝を曲げる動作をすることは考えにくいので、これは膝の大きな角速度に対する筋肉の粘性抵抗であると考えられる。この解釈が正しいとすると、本設計のように、動力機構を省いて付随して発生する粘性抵抗を省くことにより、より効率の高い蹴り動作が期待できるはずである。

以上から、膝関節をフリーとした場合についての動きの様子を次節で解析し、蹴り動作の実現に対する有効性を論じる。

1.2 シミュレータによる蹴りの運動設計

リンク系は、非線形なパラメータを持つ運動系であるので、その設計にはシミュレータを使用するのが不可欠である。シミュレータには各種の方法が考えられるが、ここでは設計に使用するため機械的な構造も可変で、自由度が高いことの必要性を考慮して、オブジェクト指向のプログラムを作

成した(今泉ら, 1993年)。

オブジェクト指向のプログラムは、機械要素(部品)に相当するオブジェクトを構成し、オブジェクト間の結合を機械の組み立てと同じように、自由に結合することにより、容易にシステムの構成が実行できる。

オブジェクト指向プログラムの構成は、機構要素、運動方程式、トルク制御各オブジェクトなどからなる。機構要素としては、リンク、関節などのオブジェクトがあり、各オブジェクトには形状、質量、慣性モーメント等の属性とその役割が記述されており、実際にはリンクごとにそれを複製し、使用時にパラメータを設定して使用する。

運動方程式オブジェクトには、運動方程式導出の手順が記されている。トルク制御オブジェクトには関節に与えるトルクの計算方法が記されている。

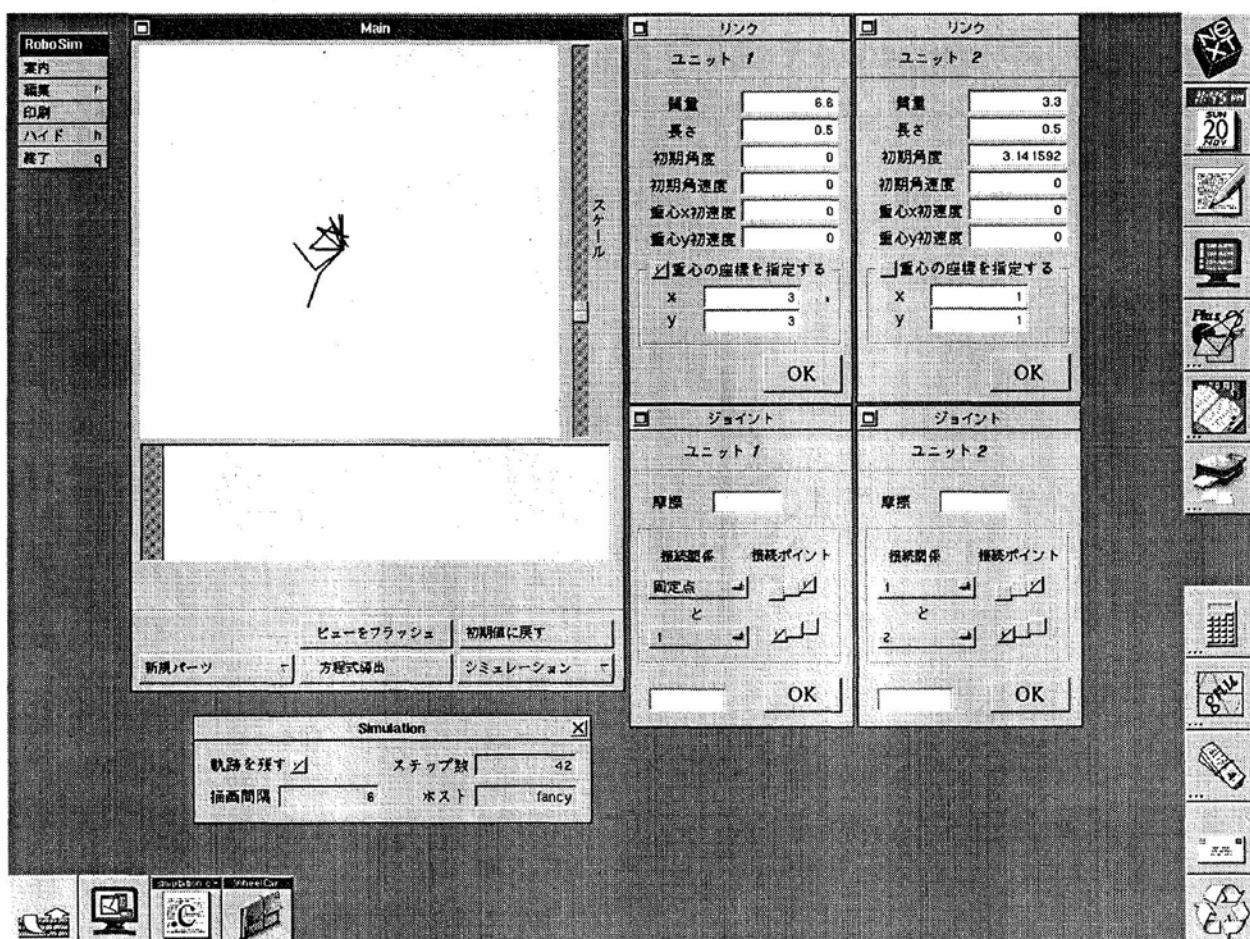


図1 リンクシミュレータの表示画面

一方、使用者とのインターフェイスとして、図1のようにウィンドウを設定し、パラメタの設定や計算結果の表示にあてる。つぎに、本運動シミュレータによる蹴り動作の設計について述べる。ここでの目的は、下肢リンクの先端が最下点に達したときの先端（爪先）の速度が最大となり、かつ、下肢の両リンクが一直線になるような、リンクの初期姿勢を見いだすことである。

人の大腿部、下腿部のデータ（阿江ら、1992年）を参考にして、両者の質量比を2:1とした。この場合、回転中のトルクは一定とするが、トルク大きさは試技により各種変化させた。この場合の結果を表1に示す。ここでとくに問題としたのは、下肢を挙上した場合の初期姿勢であり、ゴルフスウィングでいうトップでの腕とクラブシャフトの位置の選択の問題である。選択の条件としては、キックポイントで爪先が最大速度となるように選ぶこととした。

データは爪先の蹴りの動作中の最大速度と、キックポイントでの速度を計算した。表1から、

初期姿勢としては下腿リンクをなるべく上方に置いたほうが、大きな最高速度および最下点での速度を得られることが伺える。両者の比は、下腿が高い順に約1, 約0.7, 約0.6とかなりの開きがみられた。一般のサッカーでは、足先の速さは15-35 m/s, そのときのボールの初速度は10-25 m/s程度である。

1.3 考 察

下肢の初期姿勢、すなわち両リンクの位置とリンク間角度をどのようにするかは、この種の問題では重要であることは言うまでもない。実際、選手がボールを蹴るときには、脚を後方に高く挙上しようとしていることには違いないが、各人の体の柔らかさが関係して一様ではない。また、上体があるので脚を挙上する角度は制限される。ここでの計算結果は制限一杯、高く挙上しろということになるので、人の動きに対しては必ずしもあてはまらないかも知れない。

この初期姿勢は、ゴルフのトップ状態に対応するが、いわゆるオーバースウィングのような大き

表1 股関節トルク大きさと下腿の初期姿勢の変化による蹴りの速さ
表中、分母は最高速度、分子は最下点速度 (m/s)

トルク \ 初期姿勢	直立	直角	垂下
10 kgm	18 / 20	14 / 18	10 / 17
15	25 / 25	15 / 22	12 / 20
20	30 / 30	17 / 26	15 / 25
25	35 / 35	17 / 30	17 / 27

(注) リンク長 各0.5m, 大腿部質量 6kg, 下腿部 3kg
摩擦トルクはリンク1, 2間で5 (kgm)

い動作が無駄であることを、本シミュレーションが図らずも示していることになる。これは重力に逆らって、よけいな仕事をしなくてはならないことを示しているが、心理が先行し位置のエネルギーを有効に使おうという理性が隠されてしまうのだろう。

2. 本体の設計・試作

本体の設計・試作にあたっての主要な問題は、蹴りのエネルギーをどこから得るかという問題である。

車椅子と身体の質量の和を M (kg), 速度を v (m/s) とすると、その運動エネルギーは $Mv^2/2$ である。一方、下肢を一体とみた場合の腰関節周りの慣性モーメントを I , 同じく角速度を w (rad/s) とすると、その運動エネルギーは $Iw^2/2$ となる。大腿の質量を $2m$ (kg), 下腿の質量を m (kg) とすると、下肢の長さを L (m) とし、 $I=3mL^2/4$ となる (注)。体の運動エネルギーがすべて下肢の振りのエネルギーに変わったとすると、両エネルギーを等しいと置いて

$$Lw/v \cong 5$$

となる。ただし、阿江ら (1992 年) のデータから、 $m/M=1/20$ とした。

$$\begin{aligned} \text{(注)} \quad I &= mL^2 / (3 \cdot 2^2) + 2mL^2 / 3 \\ &= 3mL^2 / 4 \end{aligned}$$

すなわち、体の運動エネルギーのすべてを使って 5 倍の速度しか得られないことになる。

実際には車椅子が止まるほどエネルギー変換がうまくいく構造は考えられないので、望めるのは $Lw/v=2$ 程度であろう。すなわち $v=Lw/2$, つまり振りの速さの $1/2$ 程度の速さで車椅子をこがねばならず、かなりの危険を伴うといわざるを得ない。この観点からは運動量のみではなく、腕の力にも頼らざるを得ないということになる。

一方、腕の力は堀田らによれば、振りの動作時に最高トルク 50 Nm であり、同じような動作時

に比較して下肢の約 $1/5$ である。車椅子上で十分鍛えた人をもってしても、約 $1/3$ というのが妥当なところであろう。したがって、腕の力と車椅子上の体の運動量の両者の和で、蹴りの動作を実現するしかないという結論になる。

身体プラス車椅子の運動量の大きさは、蹴り動作に変換できたとして動作の初期に大きく、逆に、人の腕の力はその力が発生するのに少し時間遅れをとらなう。したがって両者をうまく結合することにより、滑らかなトルクの蹴りの動作を実現するのが望ましいと考える。

車輪のトルクをリンクに伝えるための補助輪の設計に関しては、その大きさが問題であり、その決定に関してはつぎの 4 項目を考慮した。

a) 補助輪の半径を小さくすることにより大きな下肢の角速度を得ることが期待される。すなわち、図 2 のごとく車椅子の車輪 (以下主輪) の半径を l_1 , 角速度を w_1 , 補助輪の半径を l_2 , 角速度を w_2 とすると、

$$l_1 w_1 = l_2 w_2$$

したがって

$$w_2 = w_1 l_1 / l_2$$

なる関係を得る。

b) 補助輪の半径は小さい方が操作性がよい。すなわち、補助輪が小さければ脇の下に収まり、またハンドルレバーの大きさの自由度が高い。実際、身長 170-180 cm 程度では、

$$l_2 / l_1 = 1/2$$

よりも小さいことが望ましい。

c) 下肢としての長さは 80 cm 程度欲しいところで、この条件から補助輪は主輪の $1/2$ 以上の大きさが望ましい。

d) 補助輪は大きい方が、トルク伝達におけるこの原理から主輪に与えるショックが小さい。これについて少し詳しく検討する。主輪と補助輪が接触する前の角運動量は、車椅子と身体の車軸周りの慣性モーメントを I_1 , 主輪の角速度を w_0

として

$$I_1 w_0$$

接触後は、下肢リンクの補助輪の軸周りの慣性モーメントを I_2 として、

$$I_1 w_1 + I_2 w_2$$

両式は運動量の保存則から等置される。ただし、 $I_1 = Ml_1^2$ 、 $I_2 = ml_2^2$ である。ここに、 l_0 は大腿部および下腿部の長さであり、

$$2l_0 = 2l_1 + l_2$$

の関係にある。これらの式から、接触後の主輪の角速度を接触前のそれで割った値は

$$\frac{w_1}{w_0} = \frac{I_1}{I_1 + I_2 l_1 / l_2} = \frac{1}{1 + \frac{m}{M} \left(1 + \frac{1}{2} \frac{l_2}{l_1} \right)^2 \frac{l_1}{l_2}}$$

となる。この式の l_2/l_1 に関する微係数から、補助輪はできるだけ大きい方が w_1/w_0 の比が 1 に近い、すなわち主輪の角速度の変化が接触の前後で変わらないことになる。

以上の a) から d) を総合的に判断して、 $l_2/l_1 = 1/2$ とすると、 $w_1/w_0 = 0.9$ となり、ショックもさほどではないと思われるので、補助輪の半径は主輪の $1/2$ とする。

(車輪間の摩擦についての実験)

トルクの伝達やその滑らかさの計算には、摩擦係数の値が必要である。車椅子のゴム製の主輪と下肢の取り付けであるプラスチック製の補助輪との静摩擦係数を計測したところ、補助輪の押し付け圧が 10 kgw 程度までは 0.5 前後であった。このため、補助輪を主輪へ押し付けた直後には十分な回転トルクの伝達は期待できないが、逆に急激なブレーキ効果がなくなり乗り心地としては良くなる。もちろん摩擦係数向上のための手段は種々考えられるが、急激なブレーキ効果とともに主輪の摩耗等が危惧されるので、ここではとくに、これ以上の改変は行わないことにする。

(インサイドキックの実現)

ボールを正確な方向に蹴るためには、インサイドキックが行えることが望ましい。ここでは、大腿部がねじれるように、その途中を切断し、回転可能な継ぎ手を用いて、膝関節から下が一体となって回転する構造を採る。継ぎ手と膝関節の間にハンドルを固定する。

インサイドキックを行うには、ハンドルを右へ回転する。人の脚の場合と同じように、下肢の先端が最下点に達するか、またはボールと接触する直前にハンドルを回すのが良い。これは、角運動量の保存則による上肢から下肢への運動量の受け渡しを効率良くし、下肢の速度を上げるためである。ハンドルを左右に、90度回転した状態では、膝関節が蹴りの方向にロックされた状態となり、ボールを効率よく蹴ることができるのは人体の場合と同様である。この操作は速い蹴りに対してはかなりの熟練を要する。

(車椅子への取り付け)

補助輪の軸を、バネを介して車椅子のアームレストに取り付ける。補助輪が身体に触れぬようカバーをする (図 2)。

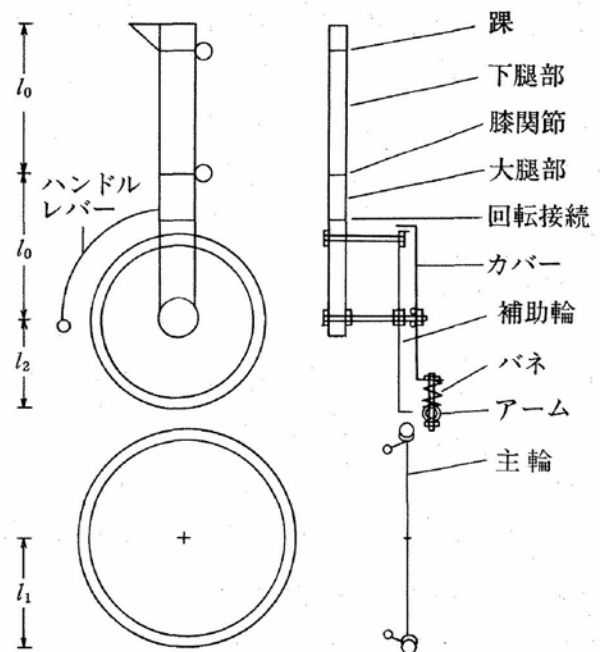


図 2 本体の構成と取り付け

3. 本装置の操作方法 (図3)

1) 腰をおろして、レバーの長さを調節する。試作機ではレバーの長さは固定で、下肢の方向から90°ずれた方向に取っ手がくるように設定してある。これを各人の腕の長さ、肩幅、腕の力の入りやすさ等を考慮して調節するのが望ましい。調節機構は写真の三脚の長さを調節する機構と同じで、より強力なものが良いと思われる。

2) 車椅子を蹴りに応じた速さで走らせる。軽

いドリブル、トスの場合には走らせる必要はない(図4)。

3) レバーを蹴りの強さを想定して、それに応じた分だけ後ろに振り上げる。軽く腕を後ろに振るよう振り上げ、補助輪が主輪と接触しないように注意する。レバーをいきなり下向きに押し下たり、強く後方へ水平に押し下たりしない限り問題はないと思われる。

4) 押し上げた状態で蹴りのタイミングを待つ。

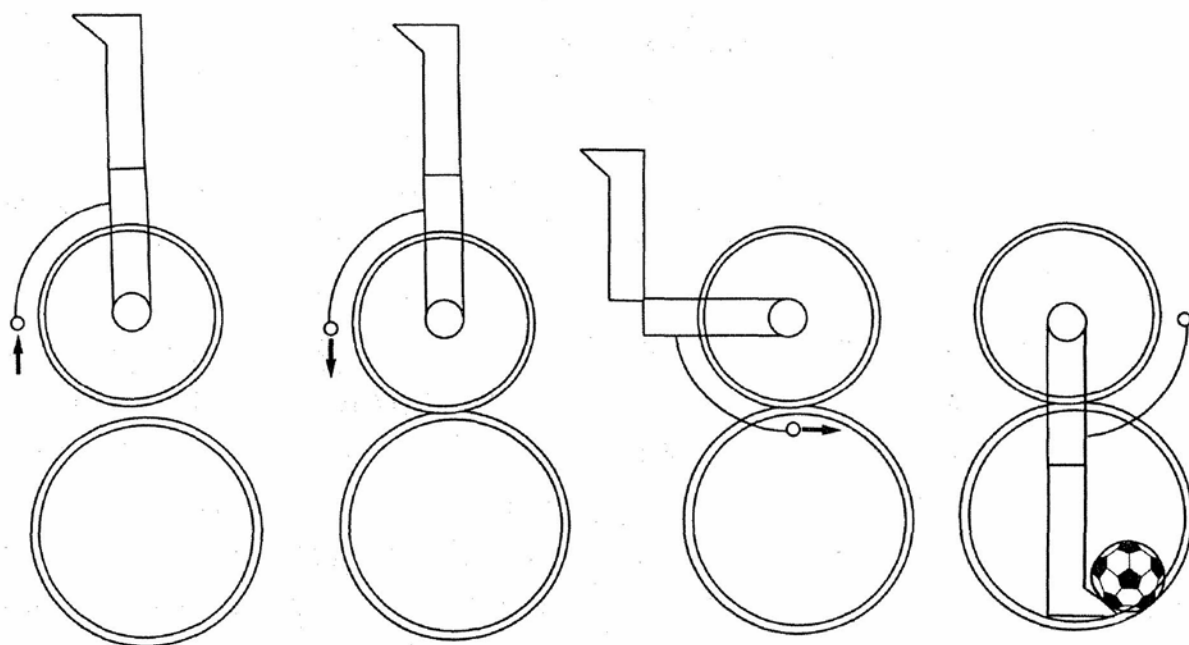


図3 ハンドルレバーの操作と蹴りの様子

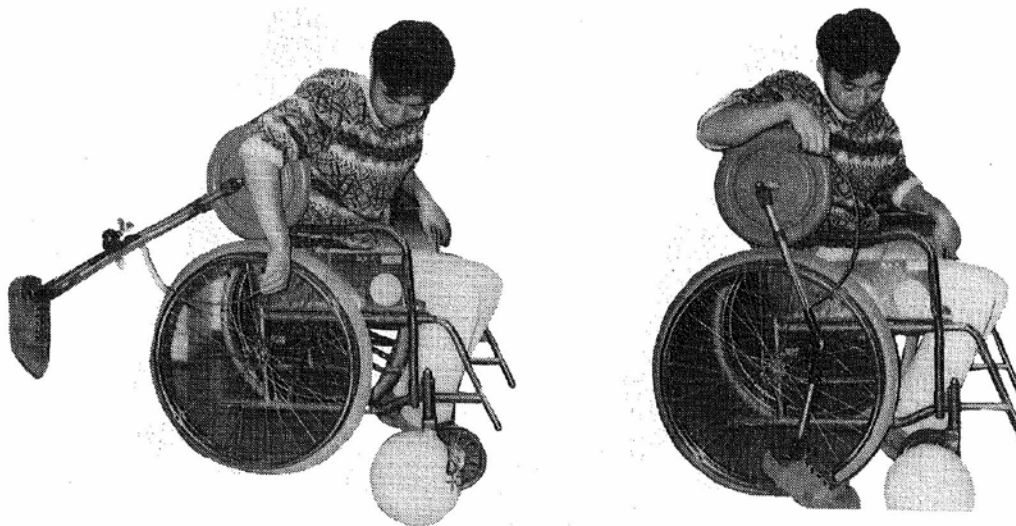


図4 腕の力による軽いキックの様子



図5 一般的なキックの様子

5) レバーを引き下げる。腕を前に振る感覚で行う。レバーの引き下げにより補助輪が車椅子の主輪に触れて増速されるのを実感する。腕のトルクは、車椅子の方向が狂わない程度に補助をするつもりぐらいがよい(図5)。

6) レバーが腕の肘の高さに近づくと、大腿は垂直に近づき下腿も急激に垂直になろうとする。腕は逆にレバーによって振り上げられる状態になり、大腿部の動きにブレーキをかける状態になるが、これが逆に下腿を増速することになりキック

の瞬間を迎える。この状態ではレバーを下向きに押さえる力も抜けているので、補助輪は主輪から離れているはずである。

7) キックの段階でレバーを車椅子から遠ざける方向に上腕を開くと、大腿部がねじれて、膝関節から下が横を向き、インサイドキックが行える状態となる。レバーを横に開くタイミングとしては、キックの直前で膝関節が伸びたあたりで行うのが望ましい。したがって、ある程度の練習を要し、またあまり速いキックでは無理がある。こ



図6 インサイドキックの状態

の場合、膝関節が固定されているかどうかに注意する(図6)。

8) キック後レバーを放し、下肢が最下点に垂下された状態で車椅子の走行に入る。

4. まとめ

試作機は、実用面からはスムーズな動き、頑健さ等の点で、また個人への適応という面からは、各部の長さの可変性の点などからまだ不都合な点が多いのは否めない。機構的にはバネで車椅子本体と結合しているが、上下方向には柔らかく、前後左右には硬いという支持方法の更なる改良が望まれる。一方で、構造が簡単であるので量産向きであると考えている。今後実用化に向けて努力し

たい。

謝 辞

本研究の進行にあたり当研究室の学生の協力に対して、ここに謝意を表す。

参考文献

- 1) 阿江ら; バイオメカニズム, 11, 23-33 (1992)
- 2) Robertson D., R. Mosher; Work and power of leg muscles in soccer kicking, Biomechics IX-B, Human Kinetic Publishers, 53, 3-538 (1985) (ただし平野裕一“打つ科学”大修館書店, 66-67 (1992) より引用)
- 3) 今泉, 狩谷, 山海; オブジェクト指向ロボット制御系設計システムと分散・並列処理, 第11回日本ロボット学会学術講演会, 907-910 (1993)