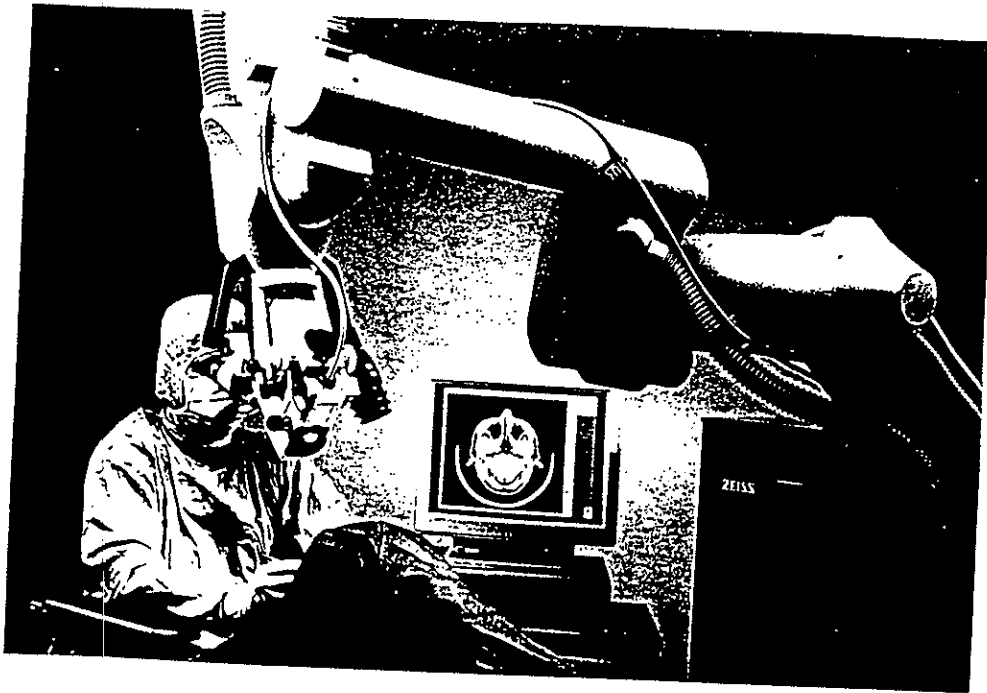


第 5 章 重力負荷と動的負荷の分離法

5. 1 はじめに

本論文では，多自由度システムにおいて，提案するパワーアシスト法を実現する制御系，及びその制御系のパラメータの決定法について明らかにしてきた．その中には，動力学特性が既知である負荷を対象に，負荷からアームに加わる力を，重力成分と動的成分に分離する手法も含まれていた．したがって，負荷の動力学特性が既知である場合は，これまで述べてきたことを総合することにより，提案するパワーアシスト法に基づく装置を実現することができる．なお，特性が既知である負荷を対象とするパワーアシスト装置の応用分野としては，例えば，Fig.5-1 に示すような，重いヘッドマウントディスプレイのアシストや^{22)-25),60)}，工場内における重い工作工具の操作のアシストなど様々な用途が考えられる．ただし，この手法を用いてパワーアシストするためには，負荷の動力学特性，具体的には，負荷の重量 m_L とセンサ座標系における負荷重心位置ベクトル $[l_x, l_y, l_z]^T$ を予め計測し，パワーアシスト装置の手先に負荷を固定した状態で，装置を起動することが必要となる．このような準備を行った上で，動力学特性が既知である負荷に対するパワーアシストを行うことができる．ただし，パワーアシスト装置がアシストする負荷は，このような既知負荷ばかりではなく，例えば，Fig.5-2 に示すような，病院内における患者の移動などの応用例にみられるように，動力学特性が未知であり，さらに始めからアーム手先に固定されていない負荷もある．本章では，このような動力学特性が未知である負荷に対するパワーアシストを行うために必要な，重力負荷と動的負荷の分離法を論じる．

本章ではまず、負荷の動力学特性と力・トルクセンサから計測される信号の関係を定式化する。次に、この関係に基づき、負荷の重力成分の推定法を、並進力成分とトルク成分のそれぞれについて論じる。既知負荷の場合と同じく、重力負荷を推定することにより、同時に動的負荷も推定されるため、結果的に、これが求める分離法となる。さらに、この分離法が有効であるかどうかを判別するため、この分離法に基づいて構成した装置による検証実験を行い、その結果について述べる。



cf. G.Hirzinger et al: "Transferring space robot technologies into terrestrial applications", 25th Int. Symposium on Industrial Robots, 1/6 (1994).

Fig.5-1 既知負荷を対象とするパワーアシスト装置の応用例

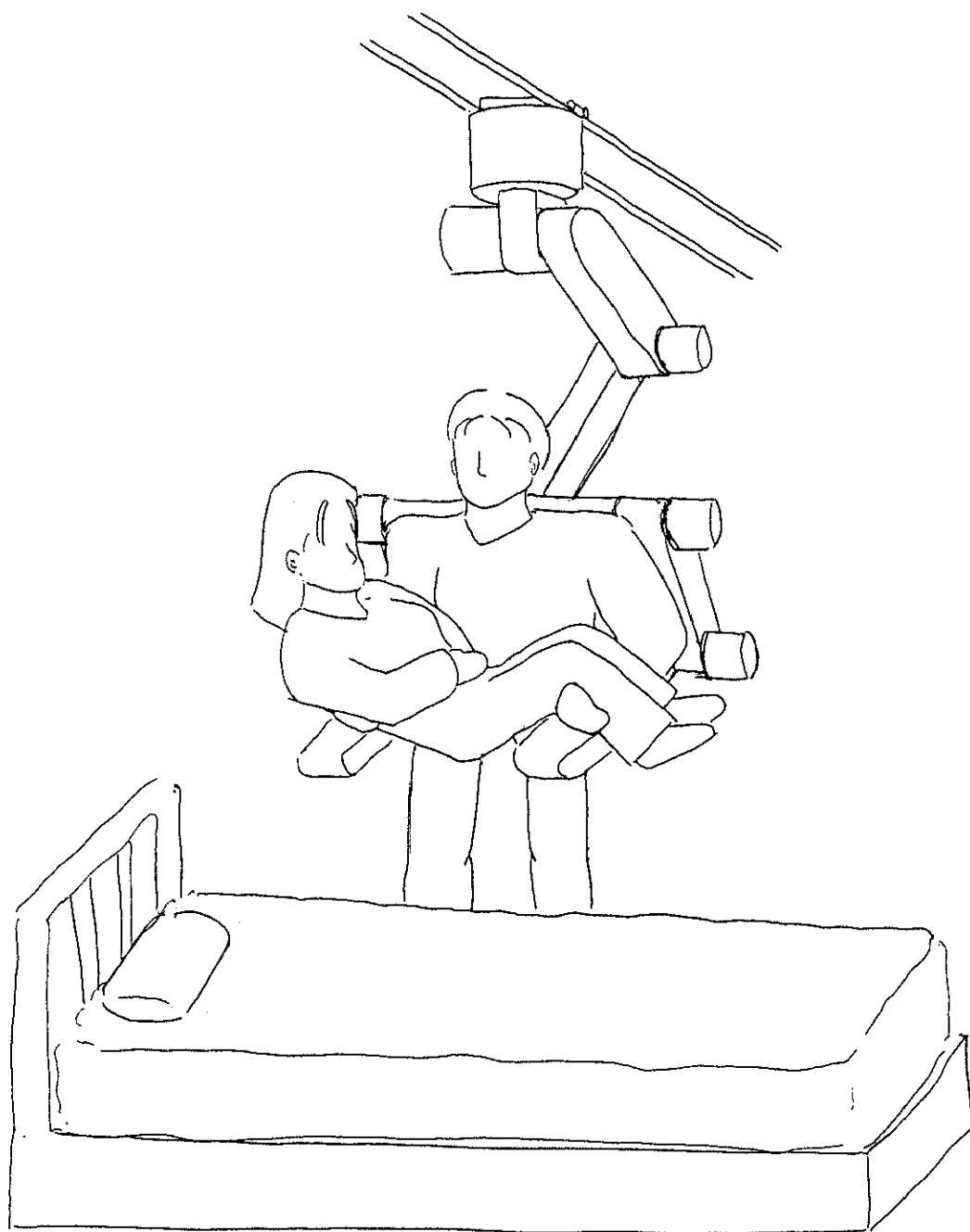


Fig.5-2 未知負荷を対象とするパワーアシ
スト装置の応用例

5. 2 負荷とセンサ信号の関係の定式化

まず始めに，パワーアシスト装置に付加された各センサから得られる信号と，負荷の動力学特性の関係を定式化する．ここで，負荷の動力学特性を推定するために用いられるセンサ信号としては，アーム手先に配した力・トルクセンサから得られる力・トルクベクトル ${}^L\mathbf{F}_L$ と，アームの各関節に配した角度センサから得られる変位角ベクトル $\boldsymbol{\theta}$ がある．したがって，最終的には，これらの値，又はこれらの値から求められる値で，負荷の動力学特性を表すように定式化する．

5. 2. 1 並進力成分の定式化

まず，並進力成分を定式化する．力・トルクセンサに加わる並進力ベクトル $[f_{Lx} \ f_{Ly} \ f_{Lz}]^T$ は，負荷の重力と慣性力の和であるため，負荷の重量を m_L とし，ベース座標系に基づく負荷重心位置の加速度ベクトルを $[\ddot{x}_{Lg} \ \ddot{y}_{Lg} \ \ddot{z}_{Lg}]^T$ とすると，

$$\begin{bmatrix} f_{Lx} \\ f_{Ly} \\ f_{Lz} \end{bmatrix} = -m_L \begin{bmatrix} \ddot{x}_{Lg} \\ \ddot{y}_{Lg} \\ \ddot{z}_{Lg} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -g \end{bmatrix} \quad (5.1)$$

と表すことができる．ただし，この並進力ベクトル $[f_{Lx} \ f_{Ly} \ f_{Lz}]^T$ は，力・トルクセンサから得られる並進力ベクトル $[{}^L f_{Lx} \ {}^L f_{Ly} \ {}^L f_{Lz}]^T$ を， 3×3 の回転行列 ${}^L\mathbf{R}(\boldsymbol{\theta})$ を用いてベース座標系に変換したベクトルである．また，加速度ベクトル

$[\ddot{x}_{Lg} \ \ddot{y}_{Lg} \ \ddot{z}_{Lg}]^T$ は、アーム関節の角度センサから得られる変位角ベクトル θ と、センサ座標系に基づく負荷重心位置ベクトル $[l_x \ l_y \ l_z]^T$ により算出することができるが、本推定法はこのベクトル $[\ddot{x}_{Lg} \ \ddot{y}_{Lg} \ \ddot{z}_{Lg}]^T$ の正確な値を必要としないため、具体的な算出法については省略する。

5. 2. 2 トルク成分の定式化

次に、トルク成分を定式化する。そのため、まず、センサ座標系に基づく、重心における負荷の慣性テンソルを、

$$\begin{bmatrix} I_{xx} & -I_{xy} & -I_{xz} \\ -I_{xy} & I_{yy} & -I_{yz} \\ -I_{xz} & -I_{yz} & I_{zz} \end{bmatrix} \quad (5.2)$$

と定義する。ここで、Fig.5-3 に示すように、センサと負荷は一体化して動くことから、センサ座標系における負荷の位置と姿勢は常に一定であるため、式(5.2)の慣性テンソルはアームの姿勢に依存して変化しない。これは、重心位置ベクトル $[l_x \ l_y \ l_z]^T$ についても同様に当てはまり、ベクトル $[l_x \ l_y \ l_z]^T$ の値はアームの姿勢に依存して変化しない。

次に、負荷側の力・トルクセンサに加わるトルクについて考えると、このトルクを生じさせる要因として、以下の2つが挙げられる。まず一つは、先に述べた負荷の慣性テンソルにより生じる慣性モーメントであり、もう一つは、負荷の重心位置に働く並進力、つまり負荷重心に働く重力と慣性力によって、力・トルクセンサ中心に生じるモーメントである。力・トルク

センサにはこの2つのトルクを合計したトルクが加わる。したがって、力・トルクセンサに加わるトルクベクトル ${}^L n_{Lx} \quad {}^L n_{Ly} \quad {}^L n_{Lz}$ は、センサ座標系に基づく負荷重心に働く並進力ベクトルを ${}^L f_{Lx} \quad {}^L f_{Ly} \quad {}^L f_{Lz}$ とし、角加速度ベクトルを ${}^L \ddot{\phi}_x \quad {}^L \ddot{\phi}_y \quad {}^L \ddot{\phi}_z$ とすると、

$$\begin{bmatrix} {}^L n_{Lx} \\ {}^L n_{Ly} \\ {}^L n_{Lz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_x \\ l_y \\ l_z \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} {}^L f_{Lx} \\ {}^L f_{Ly} \\ {}^L f_{Lz} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} I_{xx} & -I_{xy} & -I_{xz} \\ -I_{xy} & I_{yy} & -I_{yz} \\ -I_{xz} & -I_{yz} & I_{zz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^L \ddot{\phi}_x \\ {}^L \ddot{\phi}_y \\ {}^L \ddot{\phi}_z \end{bmatrix} \quad (5.3)$$

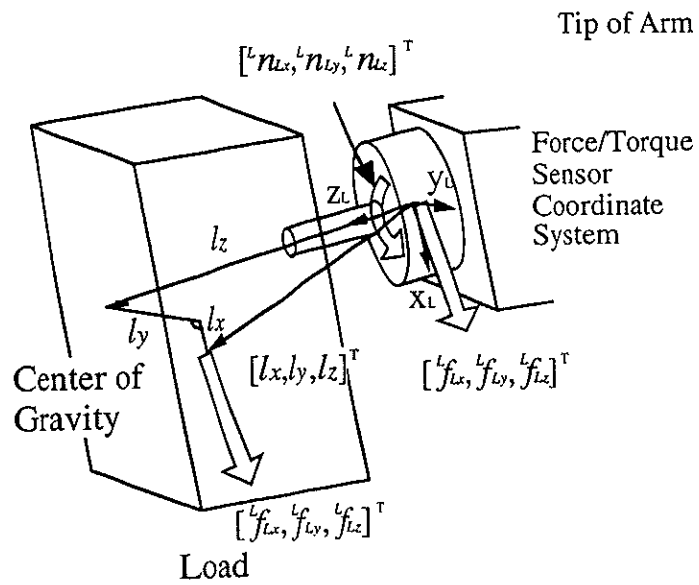
と表すことができる。ここで、センサ座標系に基づく並進力ベクトル ${}^L f_{Lx} \quad {}^L f_{Ly} \quad {}^L f_{Lz}$ とトルクベクトル ${}^L n_{Lx} \quad {}^L n_{Ly} \quad {}^L n_{Lz}$ は、力・トルクセンサで計測される値そのままである。また、負荷重心の角加速度ベクトル ${}^L \ddot{\phi}_x \quad {}^L \ddot{\phi}_y \quad {}^L \ddot{\phi}_z$ についても変位角ベクトル θ から求めることができる。具体的には、まず、運動学を用いて、アーム関節の変位角ベクトル θ をアーム手先の位置ベクトル $\mathbf{X} = [x \quad y \quad z \quad \phi_x \quad \phi_y \quad \phi_z]^T$ に変換する。次に、このベクトルの内、姿勢を表す角度ベクトル $[\phi_x \quad \phi_y \quad \phi_z]^T$ を、2回微分することにより角加速度ベクトル $[\ddot{\phi}_x \quad \ddot{\phi}_y \quad \ddot{\phi}_z]^T$ を求める。さらに、このベクトル $[\ddot{\phi}_x \quad \ddot{\phi}_y \quad \ddot{\phi}_z]^T$ はベース座標系に基づくベクトルであるため、回転行列 ${}^L \mathbf{R}(\theta)$ を用いてセンサ座標系に基づくベクトル ${}^L \ddot{\phi}_x \quad {}^L \ddot{\phi}_y \quad {}^L \ddot{\phi}_z$ へと変換する。これにより、負荷重心の角加速度ベクトル ${}^L \ddot{\phi}_x \quad {}^L \ddot{\phi}_y \quad {}^L \ddot{\phi}_z$ を求めることができる。

以上、パワーアシスト装置に付加された各センサにより計測される信号と、負荷の動力学特性の関係を定式化した。以後、

これらの式を用いて，動力学特性が未知である負荷に対する重力負荷と動的負荷の分離法を述べる．

Moment of Inertia

$$\begin{bmatrix} I_{xx} & -I_{xy} & -I_{xz} \\ -I_{xy} & I_{yy} & -I_{yz} \\ -I_{xz} & -I_{yz} & I_{zz} \end{bmatrix}$$



$$\begin{bmatrix} {}^L n_{Lx} \\ {}^L n_{Ly} \\ {}^L n_{Lz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_x \\ l_y \\ l_z \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} {}^L f_{Lx} \\ {}^L f_{Ly} \\ {}^L f_{Lz} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} I_{xx} & -I_{xy} & -I_{xz} \\ -I_{xy} & I_{yy} & -I_{yz} \\ -I_{xz} & -I_{yz} & I_{zz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^L \ddot{\phi}_x \\ {}^L \ddot{\phi}_y \\ {}^L \ddot{\phi}_z \end{bmatrix}$$

Fig.5-3 カ・トルクセンサに加わるトルクベクトル

5. 3 分離法の提案

前節では，負荷の動力学特性と各センサの関係を，式(5.1)，式(5.3)のように定式化した．本節では，これらの式に基づいて，負荷からアームに加わる力・トルクベクトル \mathbf{F}_L を，重力成分 \mathbf{F}_{Lg} と動的成分 \mathbf{F}_{Ld} にリアルタイムで分離する手法について論じる．それを論じるに，既知負荷の場合と同じく，まず重力成分 \mathbf{F}_{Lg} について考え，これを推定することから始める．なお，重力負荷によりアーム手先に加わる力・トルクベクトル $\mathbf{F}_{Lg} = [f_{Lgx} \ f_{Lgy} \ f_{Lgz} \ ; \ n_{Lgx} \ n_{Lgy} \ n_{Lgz}]^T$ は，並進力成分 $[f_{Lgx} \ f_{Lgy} \ f_{Lgz}]^T$ とトルク成分 $[n_{Lgx} \ n_{Lgy} \ n_{Lgz}]^T$ からなり，これらの値の推定法は個々に異なるため，以下で別個に論じることとする．

5. 3. 1 重力負荷の並進力成分の推定法

まず，負荷の重力成分によりアーム手先に加わる力・トルクベクトル \mathbf{F}_{Lg} の内，並進力成分 $[f_{Lgx} \ f_{Lgy} \ f_{Lgz}]^T$ を推定する方法から論じる．ここで，負荷によりアーム手先に加わる並進力を表す式(5.1)に注目すると，右辺は，慣性力と重力の和で表されているため，この式から，重力負荷によりアーム手先に加わる力ベクトル $[f_{Lgx} \ f_{Lgy} \ f_{Lgz}]^T$ は，

$$\begin{bmatrix} f_{Lgx} \\ f_{Lgy} \\ f_{Lgz} \end{bmatrix} = -m_L \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -g \end{bmatrix} \quad (5.4)$$

と表すことができる．ここで，重力加速度ベクトル $[0 \ 0 \ -g]^T$

は一定値であり，既知であるため，負荷の重量 m_L を推定することで，求めるベクトル $[f_{Lgx} \ f_{Lgy} \ f_{Lgz}]^T$ を推定することができる．そのため，まず，この負荷の重量 m_L を推定する方法について検討する．

この負荷の重量 m_L を推定する最も単純な方法としては，まず負荷重心の加速度ベクトル $[\ddot{x}_{Lg} \ \ddot{y}_{Lg} \ \ddot{z}_{Lg}]^T$ を求め，その後，式(5.1)を用いて m_L を算出する方法が考えられる．つまり，例としてベース座標系の z 軸方向を採り上げると，まず加速度 \ddot{z}_{Lg} を求め，力・トルクセンサの計測値から並進力 f_{Lz} を求めた後，式(5.1)から，負荷の重量 m_L を，

$$m_L = -f_{Lz} / (\ddot{z}_{Lg} - g) \quad (5.5)$$

に従い求めるといった方法が考えられる．ただし，ここで負荷重心の加速度ベクトル $[\ddot{x}_{Lg} \ \ddot{y}_{Lg} \ \ddot{z}_{Lg}]^T$ が，先にも述べたように，センサ座標系における負荷の重心位置ベクトル $[l_x \ l_y \ l_z]^T$ に依存する変数であることが問題となる．この位置ベクトル $[l_x \ l_y \ l_z]^T$ は，後に重力負荷によるトルクベクトルを推定する際に同時に推定されるが，値が漸近的に推定されるため，その値は時間に連れて変化する．このように変動するベクトル $[l_x \ l_y \ l_z]^T$ を用いて，加速度ベクトル $[\ddot{x}_{Lg} \ \ddot{y}_{Lg} \ \ddot{z}_{Lg}]^T$ を正確に推定することは，加速度ベクトルが位置ベクトルの2回微分により求められ，ベクトル $[l_x \ l_y \ l_z]^T$ を含む位置ベクトルの変動に対し非常に影響を受けやすい変数であることから，非常に困難である．したがって，上記の手法は，負荷の重量 m_L の推定には適さないことが分かる．また，同時に，負荷の重量 m_L の推定に際して，加速度ベクトル

$[\ddot{x}_{Lg} \quad \ddot{y}_{Lg} \quad \ddot{z}_{Lg}]^T$ の正確な値を必要とする手法は全て適切でないことが分かる．そのため，本研究では，加速度ベクトル $[\ddot{x}_{Lg} \quad \ddot{y}_{Lg} \quad \ddot{z}_{Lg}]^T$ の正確な値を必要とすることなく，重力負荷の並進力ベクトル $[f_{Lgx} \quad f_{Lgy} \quad f_{Lgz}]^T$ を推定する手法を提案する．

まず，この加速度ベクトル $[\ddot{x}_{Lg} \quad \ddot{y}_{Lg} \quad \ddot{z}_{Lg}]^T$ の値の傾向から考える．人が負荷を操作する時，人は負荷を一定方向に加速し続けることはまずあり得ない．これは，パワーアシスト装置の可動領域に制限があることを考えても分かることである．したがって，加速度ベクトル $[\ddot{x}_{Lg} \quad \ddot{y}_{Lg} \quad \ddot{z}_{Lg}]^T$ の各成分は，必然的に0を中心として分布する波形となる．つまり，加速度ベクトル $[\ddot{x}_{Lg} \quad \ddot{y}_{Lg} \quad \ddot{z}_{Lg}]^T$ の定常成分は $[0 \quad 0 \quad 0]^T$ と表すことができる．それに対し，重力により負荷に生じる加速度，いわゆる重力加速度 $[0 \quad 0 \quad -g]^T$ は，ベース座標系において常に一定値であるため，その定常成分は，そのまま $[0 \quad 0 \quad -g]^T$ と表すことができる．以上の性質と，式(5.1)から，ベース座標系に基づく並進力ベクトル $[f_{Lx} \quad f_{Ly} \quad f_{Lz}]^T$ に対し，Fig.5-4に示すように，ローパスフィルタを用いてその定常成分を抽出することにより，ベクトル $[\ddot{x}_{Lg} \quad \ddot{y}_{Lg} \quad \ddot{z}_{Lg}]^T$ は0となり，ベクトル $[0 \quad 0 \quad -g]^T$ はそのまま変化しないため，負荷の重力成分 $[f_{Lgx} \quad f_{Lgy} \quad f_{Lgz}]^T$ を抽出することができる．これを，センサで計測される値を入力とする処理系として表すと，Fig.5-5のようになる．

まず，力・トルクセンサで計測された並進力ベクトル $[{}^L f_{Lx} \quad {}^L f_{Ly} \quad {}^L f_{Lz}]^T$ を，回転行列 ${}^L \mathbf{R}(\theta)$ を用いて，ベース座標系のベクトル $[f_{Lx} \quad f_{Ly} \quad f_{Lz}]^T$ に変換する．その後，時定数の大きな

ローパスフィルタを用いて、ベクトル $[f_{Lx} \ f_{Ly} \ f_{Lz}]^T$ の定常成分を抽出する。以上の手順によって、重力負荷によりアーム手先に加わる並進力ベクトル $[f_{Lgx} \ f_{Lgy} \ f_{Lgz}]^T$ を、リアルタイムに推定することができる。これは、負荷の重量 m_L を求めることなく負荷の重力成分を推定する方法であり、座標系の変換とローパスフィルタという非常に簡単な組み合わせで実現できるという特徴を有している。

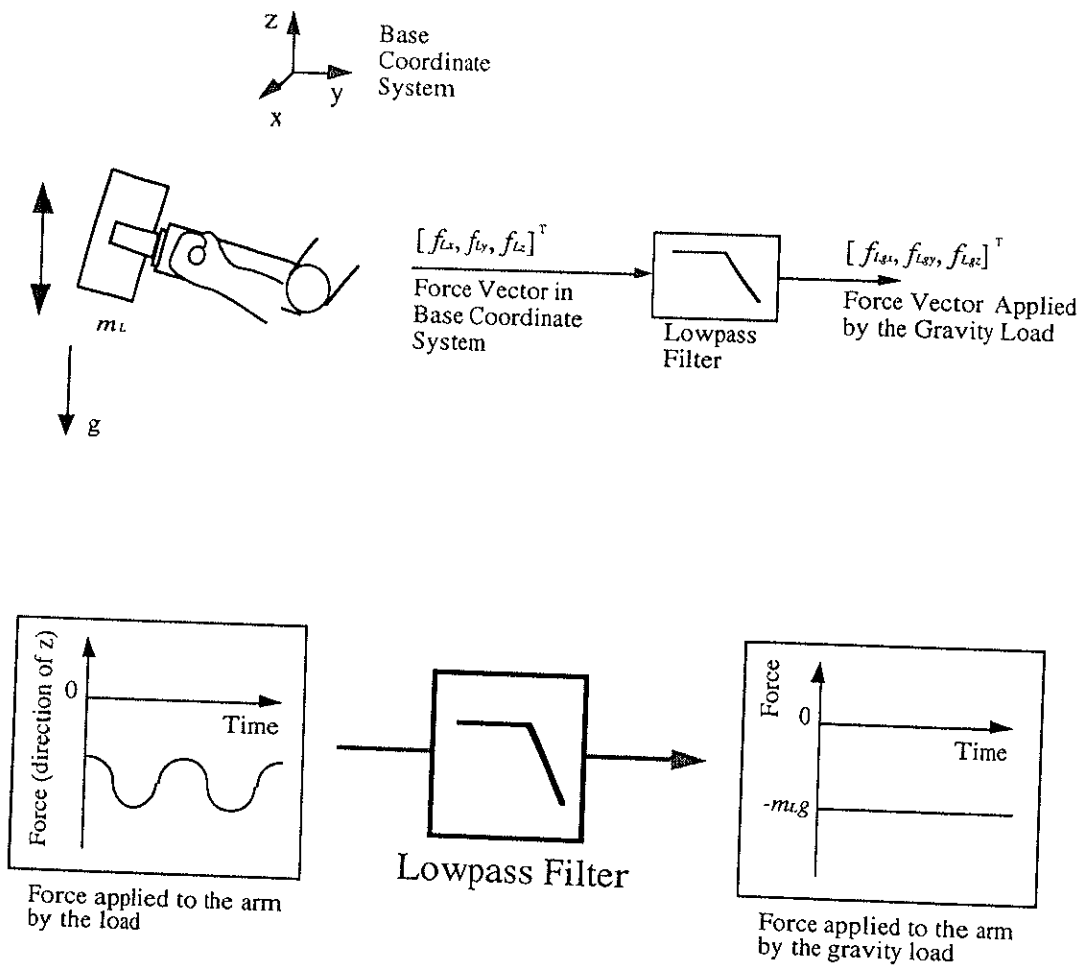


Fig.5-4 重力負荷による並進力のローパスフィルタを用いた推定法の概念図

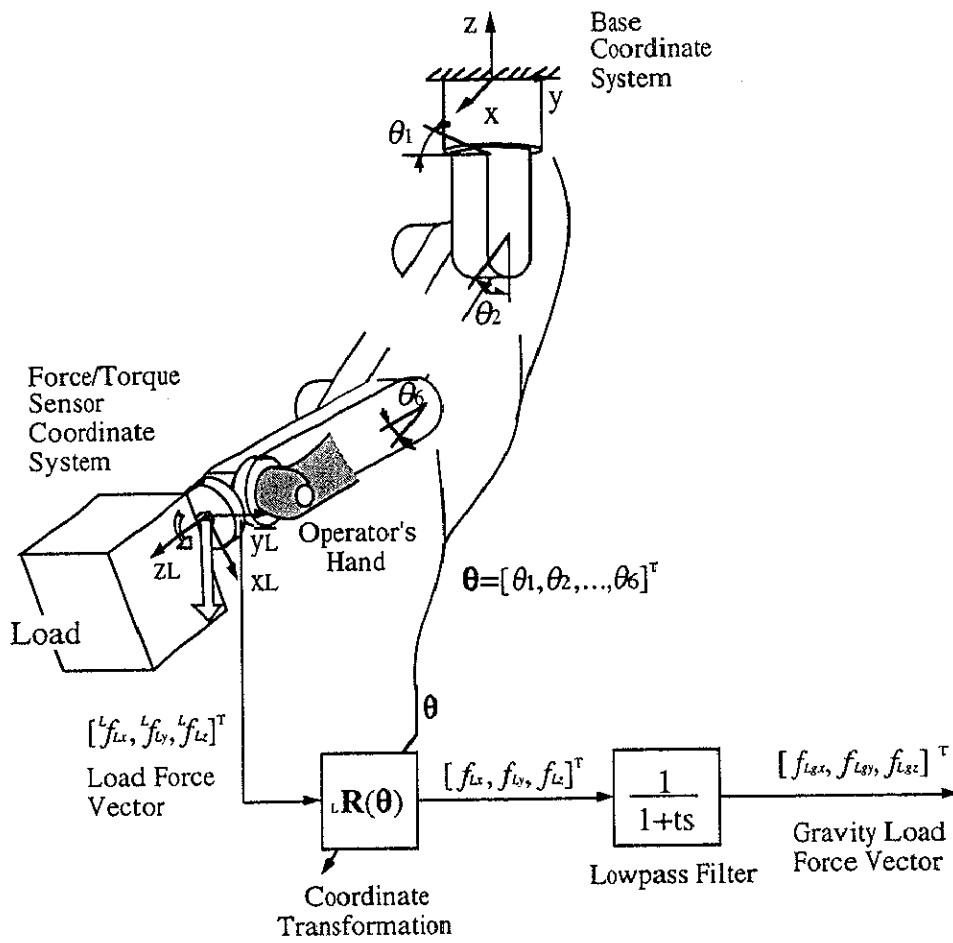


Fig.5-5 重力負荷による並進力のローパスフィルタを用いた推定法

5.3.2 重力負荷のトルク成分の推定法

次に、負荷の重力成分によりアーム手先に加わるトルクベクトル $[n_{Lgx} \ n_{Lgy} \ n_{Lgz}]^T$ の推定法について論じる。既知負荷の分離法を論じる際に述べたが、Fig.3-7 に示したように、このトルクベクトル $[n_{Lgx} \ n_{Lgy} \ n_{Lgz}]^T$ は、つまり、負荷に働く重力によってセンサ中心に生じるトルクのことである。したがって、ベース座標系に変換した負荷の重心位置ベクトル ${}_L\mathbf{R}(\boldsymbol{\theta})[l_x \ l_y \ l_z]^T$ と、重力負荷によりアーム手先に加わる並進力ベクトル $[f_{Lgx} \ f_{Lgy} \ f_{Lgz}]^T$ を外積することにより、このトルクベクトル $[n_{Lgx} \ n_{Lgy} \ n_{Lgz}]^T$ を求めることができる。つまり、重力負荷によってアーム手先に加わるトルクベクトル $[n_{Lgx} \ n_{Lgy} \ n_{Lgz}]^T$ は、

$$\begin{bmatrix} n_{Lgx} \\ n_{Lgy} \\ n_{Lgz} \end{bmatrix} = {}_L\mathbf{R}(\boldsymbol{\theta}) \begin{bmatrix} l_x \\ l_y \\ l_z \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} f_{Lgx} \\ f_{Lgy} \\ f_{Lgz} \end{bmatrix} \quad (5.6)$$

に従い求めることができる。ここで、上式で用いた回転行列 ${}_L\mathbf{R}(\boldsymbol{\theta})$ は、角度センサの計測値 $\boldsymbol{\theta}$ により求めることができる。また、重力負荷によりアーム手先に加わる力・トルクベクトル $[f_{Lgx} \ f_{Lgy} \ f_{Lgz}]^T$ については、既に述べたように、ローパスフィルタを用いて推定することができる。したがって、残る未知パラメータであるセンサ座標系に基づく負荷の重心位置ベクトル $[l_x \ l_y \ l_z]^T$ を推定すれば、このトルクベクトル $[n_{Lgx} \ n_{Lgy} \ n_{Lgz}]^T$ を推定することができる。そのため、以下において、この位置ベクトル $[l_x \ l_y \ l_z]^T$ の推定法について論じる。

式(5.3)で示した関係を用いて、負荷の重心位置ベクトル $[l_x \ l_y \ l_z]^T$ を推定することを考える。この式において、ベクトル $[{}^L f_{Lx} \ {}^L f_{Ly} \ {}^L f_{Lz}]^T$, $[{}^L n_{Lx} \ {}^L n_{Ly} \ {}^L n_{Lz}]^T$, $[{}^L \ddot{\phi}_x \ {}^L \ddot{\phi}_y \ {}^L \ddot{\phi}_z]^T$ は、前に述べたように、全てセンサ情報に基づき算出できる値である。それに対し、先の位置ベクトル $[l_x \ l_y \ l_z]^T$ と負荷の慣性テンソルは、その各成分の値が未知であるため、推定を必要とするベクトルである。なお、慣性テンソルは 3×3 の行列であり、未知数は9となるが、この行列の各対角成分はそれぞれ等しいため、実際に推定すべき未知のパラメータは、 I_{xx} , I_{xy} , I_{xz} , I_{yy} , I_{yz} , I_{zz} の6つとなる。これら未知パラメータを成分とし構成されるベクトルを、

$$\mathbf{A}_e = [l_x \ l_y \ l_z \ I_{xx} \ I_{xy} \ I_{xz} \ I_{yy} \ I_{yz} \ I_{zz}]^T \quad (5.7)$$

とすると、式(5.3)は、

$$\mathbf{Z}_e \mathbf{A}_e = \mathbf{Y}_e \quad (5.8)$$

と変形することができる。ただし、上式の行列 \mathbf{Z}_e 、ベクトル \mathbf{Y}_e は、

$$\mathbf{Z}_e = \begin{bmatrix} 0 & {}^L f_{Lz} & -{}^L f_{Ly} & -{}^L \ddot{\phi}_x & {}^L \ddot{\phi}_y & {}^L \ddot{\phi}_z & 0 & 0 & 0 \\ -{}^L f_{Lz} & 0 & {}^L f_{Lx} & 0 & {}^L \ddot{\phi}_x & 0 & -{}^L \ddot{\phi}_y & {}^L \ddot{\phi}_z & 0 \\ {}^L f_{Ly} & -{}^L f_{Lx} & 0 & 0 & 0 & {}^L \ddot{\phi}_x & 0 & {}^L \ddot{\phi}_y & -{}^L \ddot{\phi}_z \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{Y}_e = [{}^L n_x \ {}^L n_y \ {}^L n_z]^T \quad (5.9)$$

である。なお、先に述べたように、上記の行列 \mathbf{Z}_e 、ベクトル \mathbf{Y}_e の全ての成分は、センサ情報を基に算出することができる。以上の式変形を行った後に、式(5.8)に対し、オンライン最小二乗

推定を用いることにより⁶¹⁾、未知ベクトル \mathbf{A}_e の各成分をリアルタイムで推定することができる。具体的には、推定回数 k の時点での、行列 \mathbf{Z}_e とベクトル \mathbf{Y}_e をそれぞれ $\mathbf{Z}_e(k)$ 、 $\mathbf{Y}_e(k)$ とし、求めるベクトル \mathbf{A}_e の推定値を $\hat{\mathbf{A}}_e(k)$ とすると、

$$\begin{aligned}\hat{\mathbf{A}}_e(k+1) &= \hat{\mathbf{A}}_e(k) + \mathbf{P}(k+1)\mathbf{Z}_e^T(k+1)\left[\mathbf{Y}_e(k+1) - \mathbf{Z}_e(k+1)\hat{\mathbf{A}}_e(k)\right] \\ \mathbf{P}(k+1) &= \mathbf{P}(k) - \mathbf{P}(k)\mathbf{Z}_e^T(k+1)\left(\mathbf{I}_3 + \mathbf{Z}_e(k+1)\mathbf{P}(k)\mathbf{Z}_e^T(k+1)\right)^{-1}\mathbf{Z}_e(k+1)\mathbf{P}(k)\end{aligned}\quad (5.10)$$

を繰り返し求めることにより、漸近的にベクトル \mathbf{A}_e の真値を推定することができる。ただし、 \mathbf{I}_3 は 3×3 の単位行列である。また、 $\mathbf{P}(k+1)$ は 9×9 の行列で、初期値 $\mathbf{P}(0)$ には、通常 9×9 の単位行列 \mathbf{I}_9 に十分に大きな係数 σ をかけた行列 $\mathbf{P}(0) = \sigma\mathbf{I}_9$ (σ : 大) が選ばれる。以上により、ベクトル \mathbf{A}_e が推定され、同時にその成分から、センサ座標系に基づく負荷の重心位置ベクトル $[l_x \ l_y \ l_z]^T$ も推定することができる。

さらに、この推定されたベクトル $[l_x \ l_y \ l_z]^T$ を、式(5.6)に代入することにより、重力負荷によりアーム手先に加わるトルクベクトル $[n_{Lgx} \ n_{Lgy} \ n_{Lgz}]^T$ が推定される。この推定における信号の流れを Fig.5-6 に示す。以上、重力負荷によりアーム手先に加わる力・トルクベクトル $[f_{Lgx} \ f_{Lgy} \ f_{Lgz} \ ; \ n_{Lgx} \ n_{Lgy} \ n_{Lgz}]^T$ を推定する手法について明らかにした。

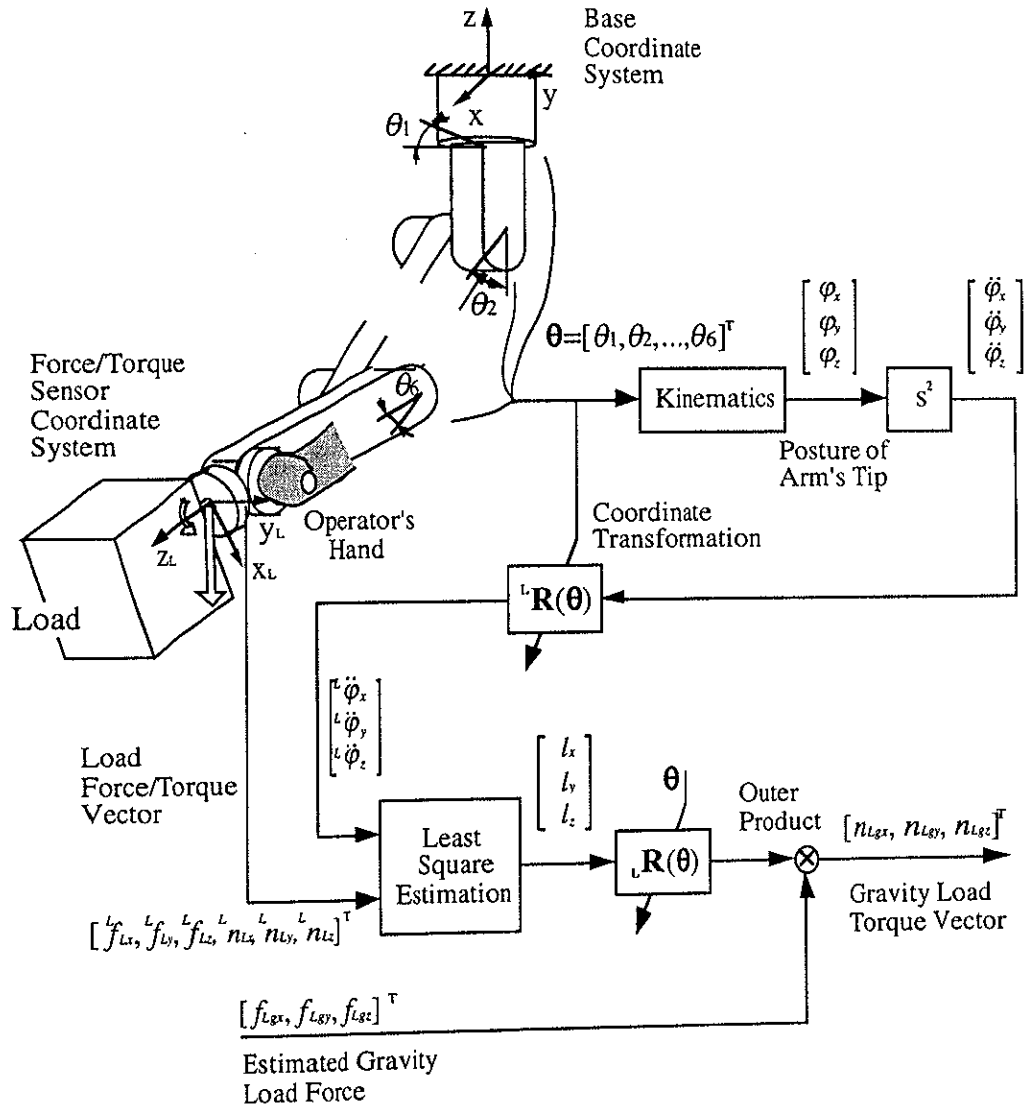


Fig.5-6 重力負荷によるトルクの最小二乗推定を用いた推定法

5. 3. 3 動的成分の推定

負荷によりアーム手先に加わる力・トルクベクトル \mathbf{F}_L の内、重力成分 \mathbf{F}_{Lg} の推定法については既に上で述べた。次に、動的成分 \mathbf{F}_{Ld} の推定法について述べ、これを総合することにより、重力負荷 \mathbf{F}_{Lg} と動的負荷 \mathbf{F}_{Ld} の分離法とする。ここで、これらの力の間には、式(3.6)で示したように、 $\mathbf{F}_L = \mathbf{F}_{Lg} + \mathbf{F}_{Ld}$ の関係があるため、重力負荷 \mathbf{F}_{Lg} が推定されているとすれば、動的負荷 \mathbf{F}_{Ld} は、

$$\mathbf{F}_{Ld} = \mathbf{F}_L - \mathbf{F}_{Lg} \quad (5.11)$$

に従い求めることができる。これを総合して図に示すと、Fig.5-7 のようになる。結果的に、パワーアシスト装置に付属する各種センサからの入力信号 ${}^L\mathbf{F}_L$, θ を、図の信号処理系により処理することにより、負荷によりアーム手先に加わる力・トルクベクトル \mathbf{F}_L を、重力成分 \mathbf{F}_{Lg} と動的成分 \mathbf{F}_{Ld} に分離することができる。

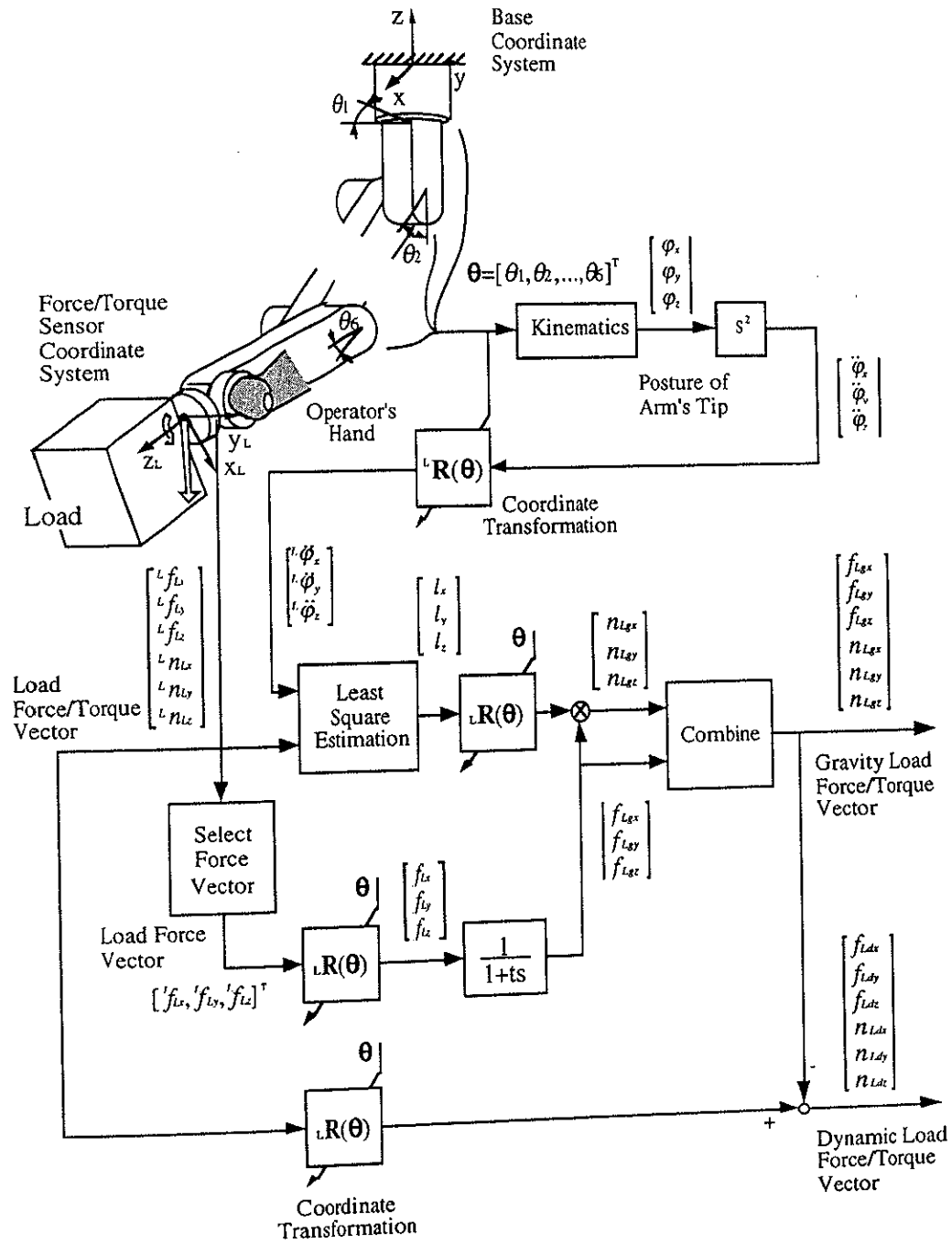


Fig.5-7 未知負荷における重力負荷と動的負荷の推定法

5. 4 床から受ける外力に対する対処法

本章では，動力学特性が未知である負荷を対象に，負荷からアーム手先に加わる力・トルクベクトル F_L を，重力成分 F_{Lg} と動的成分 F_{Ld} に分離する手法を示した．しかし，これは全て，自由空間内で負荷が操作されると仮定した上での議論であった．ここで，一般的な負荷の運搬作業などを考えると，負荷は常に自由空間内を操作されるわけではなく，床からの持ち上げ時，着地時には負荷は床からの外力を受けることとなる．したがって，負荷の運搬作業などを行うためには，床からの外力を考慮した重力負荷と動的負荷の分離法を考えることが必要となる．したがって，本研究では，先に示した分離法を基に，この外力に対する対処法を検討したので，以下に示す．なお，重力負荷と動的負荷を分離にあたり，並進力成分とトルク成分は異なる信号処理系を用いてこれを分離したため，本節の外力に対する対処法についても，並進力成分とトルク成分を個別に論じることとする．以下に，まず並進力成分から論じる．

5. 4. 1 並進力成分に対する対処法

まず始めに，提案した分離法を用いたパワーアシスト装置による負荷操作時に，床から外力が加わることにより，どのような問題が生じるかを明確にする．それを端的に表したのが，Fig.5-8 である．図に示すように，負荷が床上にあるときには，負荷に働く重力を打ち消すように床からの反力が負荷に加わるため，負荷からアーム手先に加わる力は等価的に減少する．このとき，操作者が負荷を持ち上げようとするとき，この反力が

徐々に減少するため，それに伴いアーム手先に加わる重力負荷は徐々に増加する．先に提案したローパスフィルタを用いた手法は，元々重力負荷が変化しないという仮定の下で有効な手法であったため，このように重力負荷が変動するときには，図に示すように重力負荷を適切に推定することができない．本研究では，この問題に対する対処法として，以下に示す2つの対処法を提案する．

まず，Fig.5-9 に示すように，ローパスフィルタの時定数 t をある程度小さくし，フィルタで抽出する信号の周波数帯を広げることにより，変動する重力負荷をすばやく推定できるようにする方法を提案する．ただし，変動する重力負荷をすばやく推定するために時定数 t を小さくすることは，同時に，動的負荷の低周波領域を重力負荷と推定してしまう危険性を含むため，むやみにこの時定数 t を小さくすることはできない．したがって，この方法を用いるときは，重力負荷と動的負荷によりアーム手先に加わる力が分布する周波数帯を考慮しながら，ローパスフィルタの時定数 t を決定することが望ましい．このように決定された時定数 t に基づく重力負荷の推定は，重力負荷の変動をある程度すばやく推定できると考えるが，図に示すように，完全に推定の遅れをなくすことはできない．これについては，この推定の遅れをある程度小さくできるなら，あとは操作者がこの特性を考慮しながら，負荷操作を行えば問題はないと考える．これが，床からの外力に対する一つの対処法である．

次に，Fig.5-10 に示すように，先の重力負荷の変動が，負荷の持ち上げ時，着地時など，負荷がほぼ静止しているときに生じていることを利用して，負荷の静止時にのみローパスフィルタの時定数 t を小さくすることにより，変動する重力負荷を

すばやく推定できるようにする方法を提案する。これは、負荷が置かれている状況により時定数 t を変動させる手法であり、より積極的に重力負荷を推定することを目指す手法である。ここでまず、負荷にアームから力が加わり、負荷が床から離れるまでを考える。このとき、床の剛性が十分に高いとすると、負荷は床から離れるまでに最小限の加速しかしないため、負荷からアームに加わる力はほぼ重力成分による力とみなすことができる。したがって、本手法では、このときローパスフィルタの時定数 t を非常に小さくし、アームに加わる力を全て重力負荷として推定する。そして、負荷が床を離れ、加速し始めるときにローパスフィルタの時定数 t を大きな値に戻し、前節に示したように重力負荷の推定を行う。これにより、自由空間内では、前説の手法に基づく重力負荷推定を行いながら、床から外力が加わる時は、変動する重力負荷に対してすばやい推定を行うことができる。

なお、本手法を実際に装置に適用するためには、さらに、負荷が自由空間内なのか、または持ち上げ時などの外力が加わる時なのかを判別せねばならないが、この判別はベース座標系に基づくアーム手先の z 軸方向の速度 z 、加速度 \dot{z} の絶対値を用いて行うこととする。つまり、速度、加速度のしきい値 z_{thre} 、 \dot{z}_{thre} を設定し、速度 z 、加速度 \dot{z} の絶対値がその値を共に超えるとき、負荷は自由空間内にあると判別し、速度 z 、加速度 \dot{z} の絶対値がその値を共に超えないとき、負荷は持ち上げ時などの外力が加わる時であると判別する。また、どちらでもないときには、前の状態の判別結果を維持する。ちなみに、このような判別法により負荷の状態を判別すると、負荷が自由空間内にあるときでも、負荷を静止させ、アーム手先の z 軸方向の速度 z 、

加速度 \ddot{z} の絶対値がしきい値 \ddot{z}_{thre} 、 \ddot{z}_{thre} 以下になると、負荷に外力が加わると判別され、時定数 t が小さくなる。しかし、このとき負荷は停止しており、アーム手先に加わるのはほぼ負荷の重力成分のみであるため、これによって重力負荷の推定に問題が生じることはないと考える。

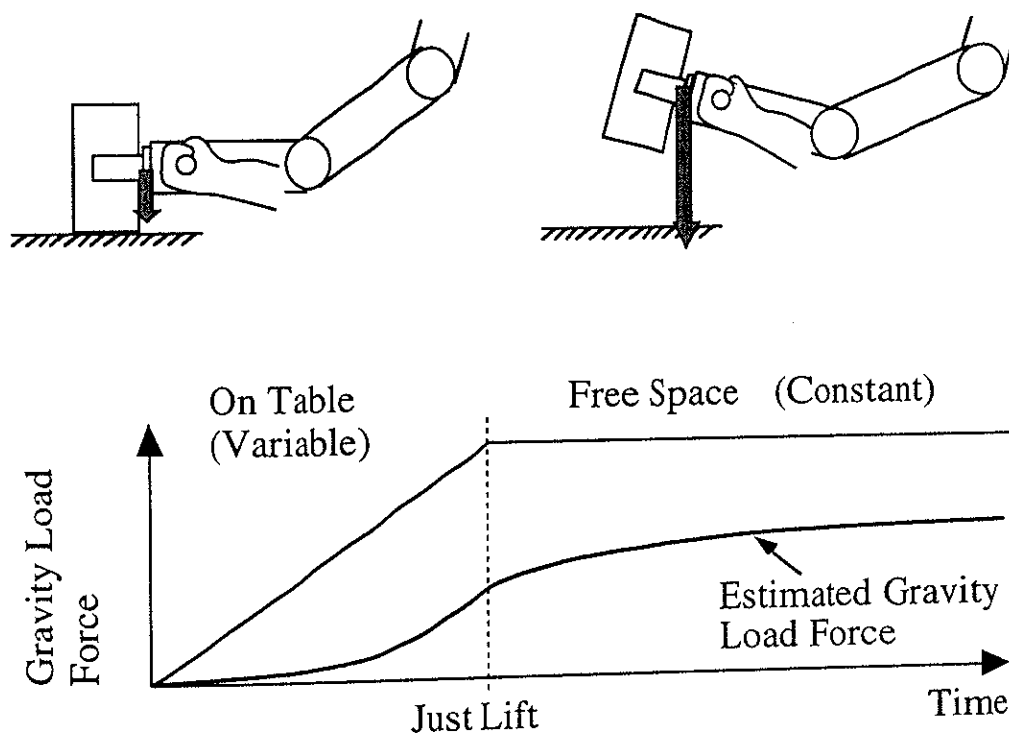
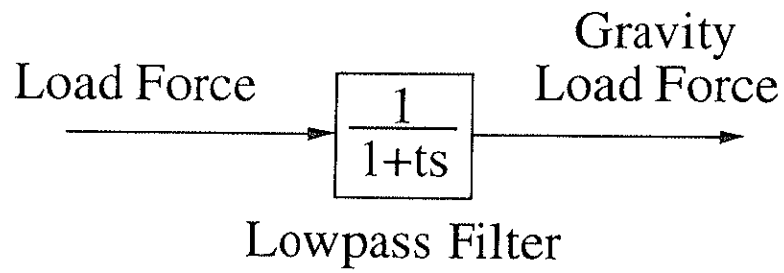


Fig.5-8 負荷持ち上げ時の重力負荷による並進力の推定



$t \rightarrow \text{Small} \implies \text{Delay} \rightarrow \text{Small}$

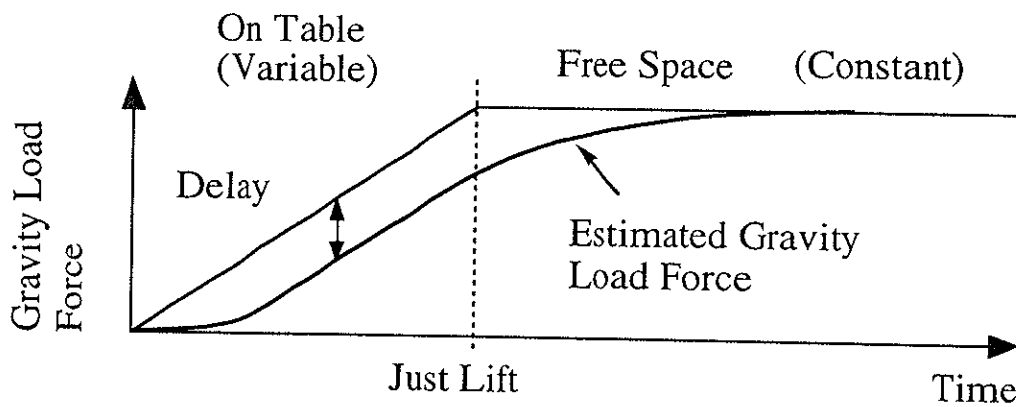


Fig.5-9 ローパスフィルタの時定数 t を予め小さな値に固定する方法

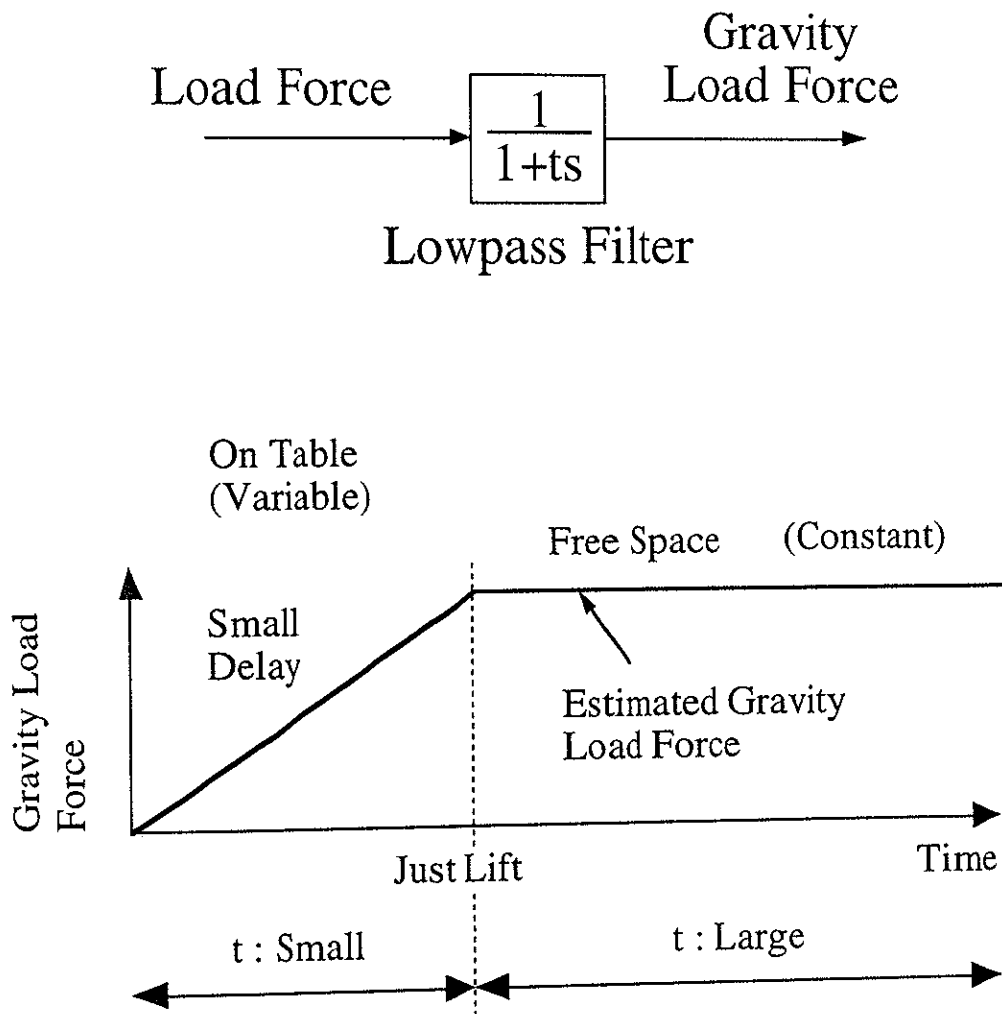


Fig.5-10 ローパスフィルタの時定数 t を重力負荷変動時のみ小さくする方法

5. 4. 2 トルク成分に対する対処法

次にトルク成分について、床からの外力が負荷に加わる時、重力成分と動的成分がどのように推定されるのかを論じる。式(5.6)に示したように、トルクの重力成分と動的成分の推定値は、センサ座標系に基づく負荷の重心位置 $[l_x \ l_y \ l_z]^T$ の推定値を基に導き出される。したがって、まず、床からの外力が負荷に加わる時、この重心位置 $[l_x \ l_y \ l_z]^T$ の値がどのように推定されるかについて論じる。

負荷の持ち上げ時、センサ信号に基づいて負荷の重心位置 $[l_x \ l_y \ l_z]^T$ がどのように推定されるかをFig.5-11に示す。まず、持ち上げの初期の段階においては、操作者が故意にアーム手先にトルクを加えない限り、負荷側の力・トルクセンサにはトルクが加わらないため、このときオンライン最小二乗推定に用いる式(5.10)のベクトル Y_c は $\mathbf{0}$ 周辺の値となる。推定するベクトル \hat{A}_c も初期値が $\mathbf{0}$ であるため、式(5.10)から分かるように、このときベクトルの値 \hat{A}_c はほとんど変動しない。したがって、図に示すように、ベクトル \hat{A}_c の成分であるセンサ座標系に基づく負荷の重心位置ベクトル $[l_x \ l_y \ l_z]^T$ は $\mathbf{0}$ 周辺、つまりセンサ座標系の原点付近にあると推定される。

次に、図に示すように、操作者が負荷を持ち上げる方向にトルクを加えると、それが増幅されて負荷に加えられ、負荷側の力・トルクセンサにトルクが加わる。そして、そのトルクに従いベクトル Y_c の値が $\mathbf{0}$ 周辺以外に分布するようになるため、式(5.10)に基づきベクトル \hat{A}_c の推定値が変動する。このように、操作者がアーム手先にトルクを加えることにより、床からの外

力の影響が徐々に少なくなるため、推定される負荷の重心位置ベクトル $[l_x \ l_y \ l_z]^T$ は、実際の重心位置に近づいていく。これはすなわち、ベクトル $[l_x \ l_y \ l_z]^T$ によって求められる、重力負荷のトルクベクトル $[n_{Lgx} \ n_{Lgy} \ n_{Lgz}]^T$ の推定値が真値に近づいていくことを示している。

以上示したように、トルク成分については、床からの外力が加わる負荷の持ち上げ時においても、重力成分と動的成分は適切に推定されると考えられる。また、負荷の着地時については、持ち上げ時と丁度逆の現象が生じると想定されるため、過度の外力が加わらない限り、このときも適切な推定が行われると考える。ただし、実際には、推定の初期の段階で、推定に用いるトルク $[{}^L n_{Lx} \ {}^L n_{Ly} \ {}^L n_{Lz}]^T$ に多くの外力が含まれると、その影響で負荷重心 $[l_x \ l_y \ l_z]^T$ を適切に推定するまでに多くの時間が必要になると考えられるため、これがあまりにも長い場合には何らかの対処法が必要となる。この問題に対しては、例えば推定に用いる式(5.10)中の、誤差に対する修正ゲインを決定する行列 \mathbf{P} を一定値とするなどして、新しい入力に対して大きな比重を置く推定を行うことにより、ある程度回避できるものと考えられる。

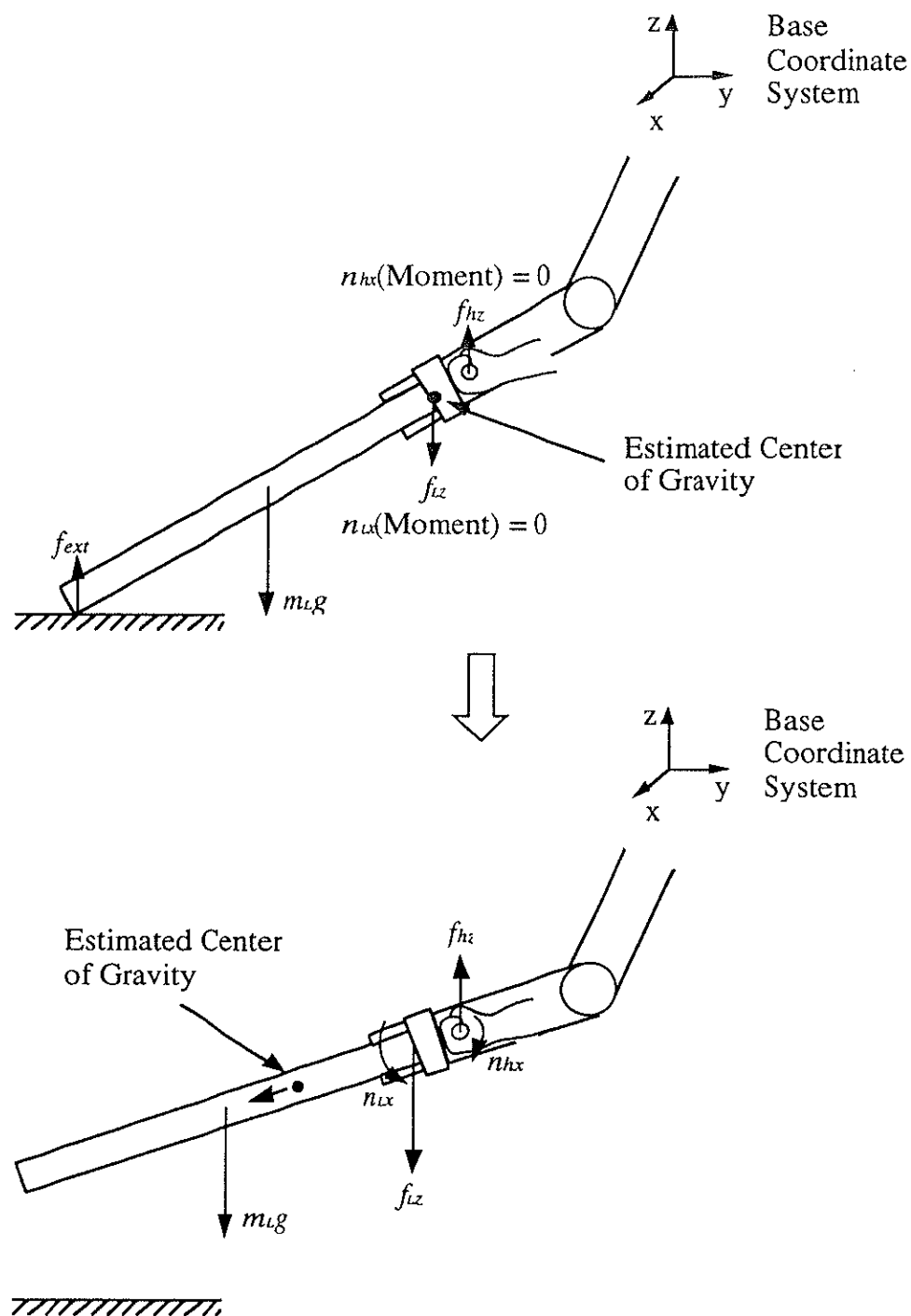


Fig.5-11 負荷の持ち上げ時に推定される負荷重心位置

5. 5 検証実験

本節で提案した，負荷からアーム手先に加わる力を，重力成分と動的成分に分離する手法の有効性を検証するため，パワーアシスト装置による負荷操作の実験を行った結果について以下に示す．なお，始めに並進力成分における本分離法の有効性を確認し，その後，トルク成分における本分離法の有効性を確認する．

5. 5. 1 並進力成分の分離法の実験

(a) 実験方法

まず始めに，並進力成分における本分離法，つまりローパスフィルタを用いて重力負荷と動的負荷の並進力成分を分離する方法が有効であるかを検証する．そのため，第3章に示した実験装置を用い，10kgの負荷を対象に，床からの持ち上げ，自由空間内での移動，床への着地を行い，これら一連の動作を行ったときに推定された重力負荷，及び操作者に加わる力に基づいて，本分離法の有効性を評価した．なお，本実験では，床からの外力による重力負荷の変動に対して，先に示したローパスフィルタを固定する方法と変動させる方法の両方を用いて，これを推定することを試みた．

実験に用いたパラメータは，まずローパスフィルタの時定数 t を固定する方法を用いた実験(a)については，重力負荷と動的負荷の操作者負担率を $\alpha_{ii}=0.2$ ， $\beta_{ii}=0.5$ ，アーム手先に設定する目標インピーダンスを $m_{dii}=16.0$ ， $b_{dii}=49.0$ ，ローパス

フィルタの時定数を $t=2.0$ とした。なお、この時定数 t の値は、重力負荷と動的負荷を適切に分離し、かつ比較的重力負荷推定の時間遅れが少ないことを指標として、試行錯誤的に求めた値である。また、負担率 α , β , 及び目標インピーダンス \mathbf{M}_d , \mathbf{B}_d は全方向に対して同じ値を用いた。

次に、ローパスフィルタの時定数 t を変動させる方式を用いた実験 (b) については、操作者負担率 α , β と目標インピーダンス \mathbf{M}_d , \mathbf{B}_d は実験 (a) と等しい値とし、ローパスフィルタの時定数を自由空間内で $t=10.0$, 重力負荷変動時に $t=0.1$ とした。また、負荷の状態を推定する指標であるアーム手先の z 軸方向の速度 \dot{z} , 加速度 \ddot{z} のしきい値を $\dot{z}_{thre}=0.1$, $\ddot{z}_{thre}=0.1$ とした。

(b) 実験結果

Fig.5-12 に実験結果を示す。Fig.5-12(a) は、ローパスフィルタの時定数 t を固定する方式を用いた場合であり、図は上から、ベース座標系の z 軸方向のアーム手先位置 z , 同じく z 軸方向に操作者及び負荷からアーム手先に加わった力 f_{hz} , f_{Lz} , 推定された重力負荷 f_{Lgz} を表している。また、Fig.5-12(b) は、時定数 t を変動させる方式を用いた場合であり、上図は、 z 軸方向のアーム手先位置 z , 速度 \dot{z} , 加速度 \ddot{z} を表している。また、速度 \dot{z} , 加速度 \ddot{z} の図中に記した点線は、負荷の状態を推定する指標として用いる速度、加速度のしきい値 \dot{z}_{thre} , \ddot{z}_{thre} を表している。速度 \dot{z} , 加速度 \ddot{z} の絶対値がこのしきい値 \dot{z}_{thre} , \ddot{z}_{thre} を共に超えるとき、自由空間内の時定数 $t=10.0$ が選択され、共に超えないとき、負荷変動時の時定数 $t=0.1$ が選択される。

実験結果から、どちらの方式を用いても、重力負荷と動的負

荷の並進力成分を適切に分離できていることが分かる。また、操作者に加わる力などからも分かるように、問題となるようなシステムの振動現象も見られない。したがって、ローパスフィルタを用いて重力負荷と動的負荷の並進力成分を分離する本提案手法は有効であるといえる。

ただし、時定数 t を固定する方式を用いた場合、Fig.5-12(a)から分かるように、負荷の持ち上げ時または着地時に、重力負荷 f_{Lgz} をやや遅れて推定している。そのため、負荷の持ち上げ時、操作者は負荷をほぼ一定に保持しているにも関わらず、操作者に加わる力は徐々にではあるが変動している。これは、重力負荷と動的負荷の負担率 α , β が異なるため、推定した重力負荷 f_{Lgz} が変動すると、全体的なアシスト力が変動することにより生じている。この力の変動の原因となる推定の遅れは、時定数 t を小さく設定し直すことで小さくすることができるが、先にも述べたように任意に小さくすることはできないため、最終的に操作者がこの変動に適應することが要求される。ただし、この現象は負荷の持ち上げ時に限って生じるため、操作者がこれを考慮して負荷を操作することは、あまり困難な作業ではないと考える。

一方、時定数 t を変動させる方式を用いた場合は、Fig.5-12(b)から分かるように、上記のような推定の遅れはほとんど無く、理想的に重力負荷 f_{Lgz} が推定されていることが分かる。なお、自由空間内で負荷を停止することで、自由空間内にも関わらず、負荷変動時の時定数 $t=0.1$ が選択されてしまうという問題を先に指摘したが、図からも分かるように、負荷停止時に負荷に働く力は重力だけであるため、それによる悪影響は生じていない。また、厳密に言えば再度動き出すときに、重力負荷

の推定値が少し小さくなっているが、速度 \dot{z} 、加速度 \ddot{z} の絶対値がしきい値 \dot{z}_{thre} 、 \ddot{z}_{thre} を超えることで、速やかに自由空間内の時定数 $t=10.0$ が選択されるため、その影響は最小限に止められている。

しかし、この時定数を変動する方式では、床が柔らかくなると、どこまでが持ち上げ時で、どこまでが自由空間内なのかの負荷状態の境界が曖昧になり、持ち上げ時に重力負荷を適切に推定することができなくなる。そのため、推定値が自由空間内で急激に変動し、それに伴い操作者に加わる力が急激に変動するといった現象も見られた。したがって、負荷を置く床が柔らかいときには、重力負荷の変動にすばやく対応することはできないが、負荷を操作する環境に対してロバストである時定数 t を固定する方式を選択することが望ましいと考える。

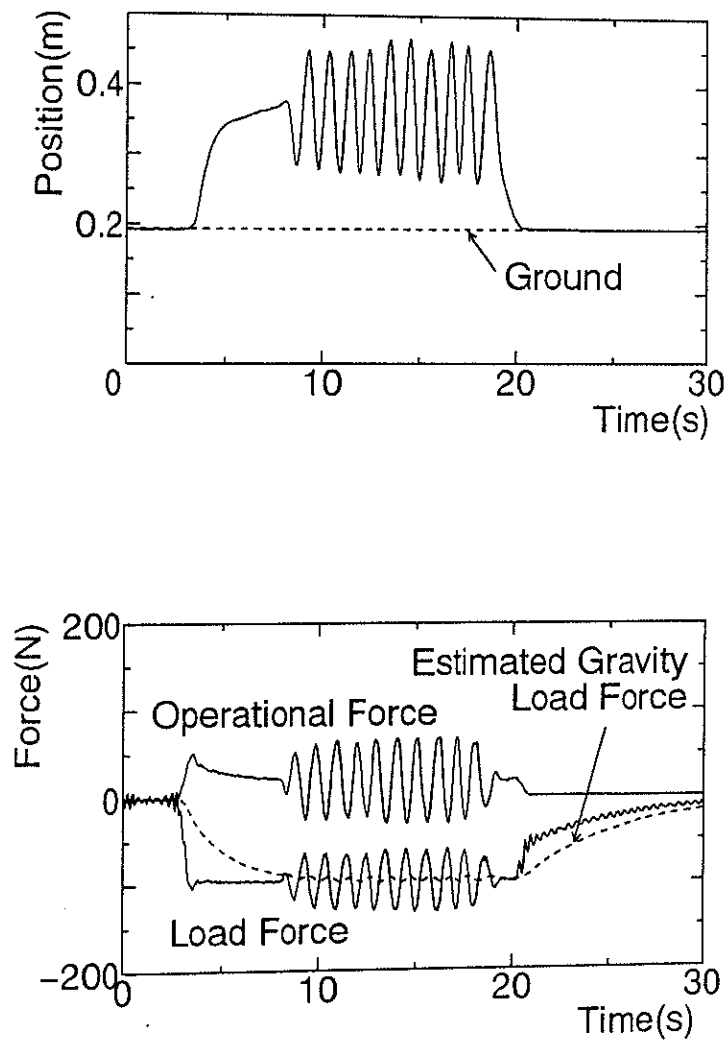


Fig.5-12(a) 実験結果

時定数 $t=2.0$

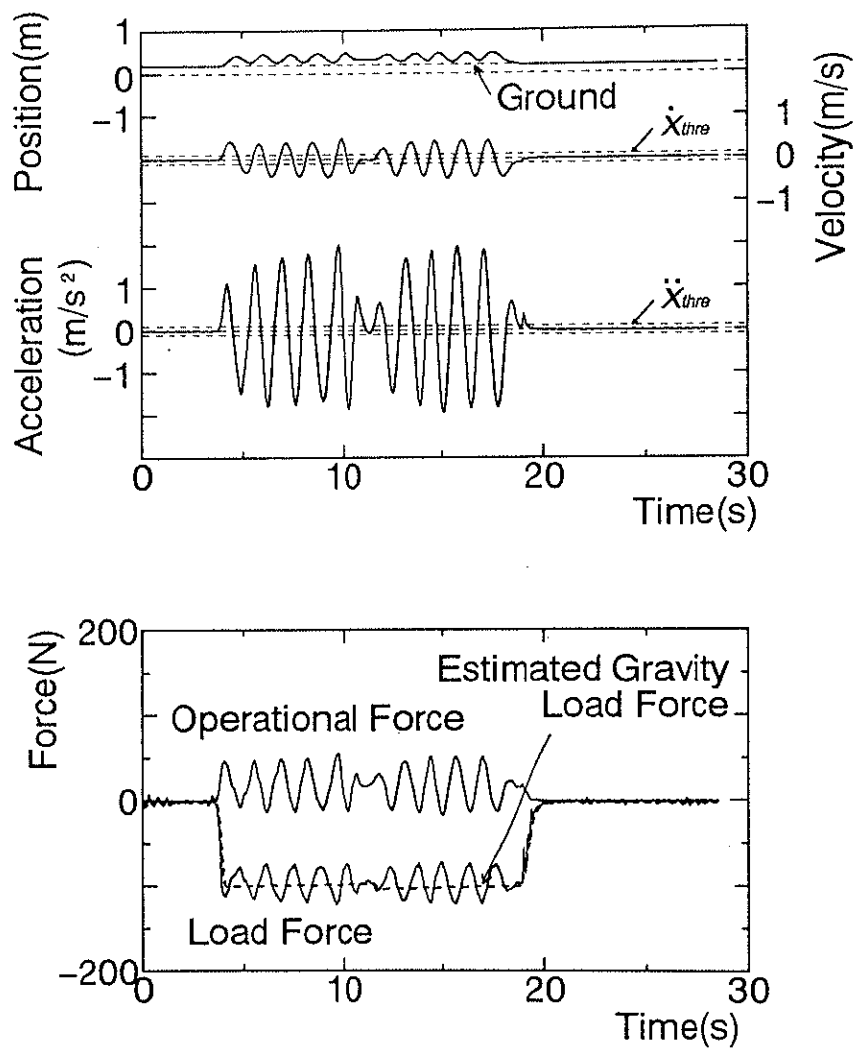


Fig.5-12(b) 実験結果

時定数 (自由空間内) $t=10.0$

時定数 (その他) $t=0.1$

5. 5. 2 トルク成分の分離法の実験

(a) 実験方法

次に、トルク成分において提案する分離法、つまりセンサ座標系における負荷の重心位置をオンライン最小二乗推定を用いて推定することにより重力成分と動的成分を分離する方法が有効であるかどうかを検証する。実験には、第3章に示した実験装置を用い、5kgの負荷を回転及び並進方向に操作し、このとき推定されたx軸周りの重力負荷のトルク成分 n_{Lgx} 、および操作者に加わるトルク n_{hx} 、また負荷重心位置 l_y 、 l_z の推定結果から、本手法の有効性を評価した。ここで、重力負荷の並進力成分 f_{Lgz} は既に推定され、負荷は自由空間内にあるとする。

実験に用いたパラメータは、並進方向については、先の並進力成分を分離する実験のパラメータをそのまま用いて、回転方向については、重力負荷と動的負荷の操作者負担率を $\alpha_{ii}=0.1$ 、 $\beta_{ii}=0.3$ 、アーム手先に設定する目標インピーダンスを $m_{dii}=0.2$ 、 $b_{dii}=1.7$ とした。また、オンライン最小二乗推定で用いる、式(5.10)中の行列 $\mathbf{P}(k)$ の初期値 $\mathbf{P}(0)$ の対角成分には 1.0×10^4 を用いた。

(b) 実験結果

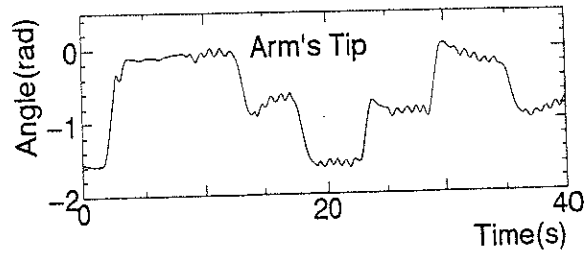
Fig.5-13 に実験結果を示す。図は上から、ベース座標系に基づいてx軸方向にアーム手先が回転した角度 φ_x 、操作者及び負荷がアームの手先に加えたトルク n_{hx} 、 n_{Lx} 、推定された重力負荷のトルク成分 n_{Lgx} を表している。またその下に、センサ座

標系における負荷重心位置 l_y, l_z の推定値を示す.

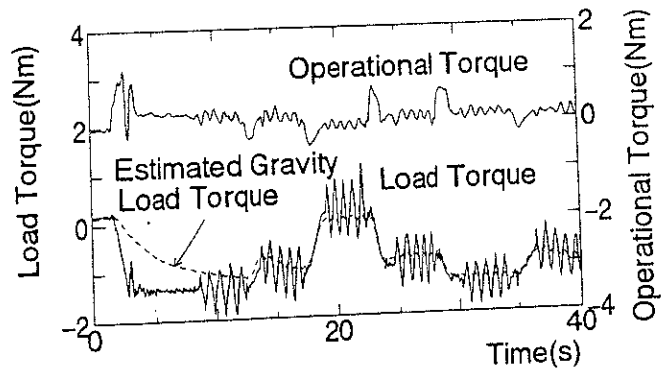
実験結果から, アーム手先の姿勢 ϕ_x が変化し, 重力負荷のトルク成分 n_{Lgx} が急激に変動する場合においても, オンライン最小二乗推定に基づく本手法は, トルクの重力成分 n_{Lgx} を適切に推定していることが分かる. また図から, 問題となるような振動現象も生じていないことが分かる. ちなみに, 操作者及び負荷からアーム手先に加わる力の小刻みな上下は, 操作者の意図的な操作により故意に生じさせたものである.

ただし, 負荷の重心位置 l_y, l_z の推定値は徐々に実際の重心位置に近づいていくことから, 推定の初期の段階においては, 重力負荷のトルク n_{Lgx} は実際のトルクよりその絶対値において小さく推定される. そのため, このとき操作者に大きなトルクが加わっている. このような重力負荷のトルク成分 n_{Lgx} の推定の遅れによって生じる現象は, 時定数固定のローパスフィルタを用いて, 重力負荷の並進力成分 f_{Lgz} を推定したときに生じた現象と類似している. この現象は, 並進力成分と同じく推定の初期でのみ生じる現象であるため, この推定が極端に遅くならないのであれば, 操作者がこの特性を考慮しながら, 負荷操作を行えば問題ないと考える.

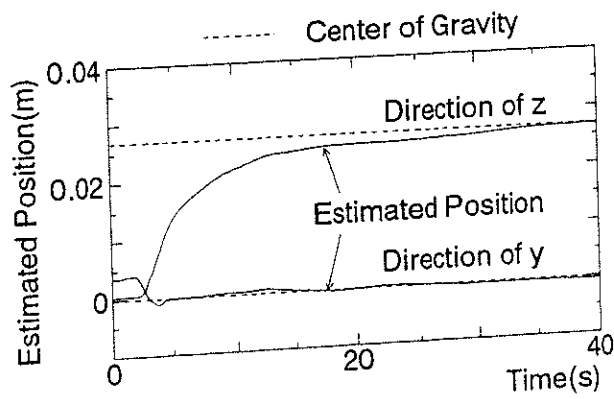
以上, オンライン最小二乗推定を用いてセンサ座標系における負荷の重心位置 l_y, l_z を推定し, その値に基づき, 負荷からアーム手先に加わるトルク n_{Lx} を重力成分 n_{Lgx} と動的成分 n_{Ldx} に分離する, 本提案手法の有効性を一例ではあるが確認した.



(a) Arm's Angle of Tip



(b) Operational Torque, Load Torque and Estimated Gravity Load Torque



(c) Estimated Position of Center of Gravity

Fig.5-13 実験結果

5. 6 まとめ

本章では，動力学特性が未知である負荷に対して，提案するパワーアシスト法に基づくパワーアシストを行うために必要となる，重力負荷と動的負荷の分離法について論じた．まず，重力負荷を推定するため，負荷の動力学特性とセンサ情報を定式化した．次に，重力負荷の並進力成分を推定するにあたり，負荷重心の加速度情報を用いることは困難であることを指摘し，これを用いない推定の方法として，ベース座標系に変換した並進力に対し，ローパスフィルタを用いる分離法を提案した．また，トルク成分については，重力負荷のトルク成分が，センサ座標系における負荷重心位置を推定することで，推定することができることを示し，さらに，この重心位置はオンライン最小二乗法により推定することができることを示した．また，負荷の持ち上げ時などの床からの外力に対する対処法として，ローパスフィルタの時定数を固定する方法と，時定数を負荷の状態に応じて変動させる方法の2種類の方法を提案した．そして，以上の分離法を検証するため，パワーアシスト装置を用いた負荷操作の実験を行い，その有効性を確認した．以上示した本分離法を，パワーアシスト装置に適用することにより，動力学特性が未知である負荷に対しても，提案するパワーアシスト法に基づくアシストが可能となる．