

自動追尾型買い物カートの開発

6年A組 川口 恭平 5年B組 岡田 真太郎
5年B組 中島 研人 4年B組 西田 惇
4年C組 樋口 幸太郎 4年C組 前澤 俊哉
指導教諭 末谷 健志

1. 要約

私たちは、独自に開発したモーションキャプチャシステムとモーターコントローラを組み合わせて、特定のマーカを貼り付けた、人や車いすと一定の距離を保ちながら自動で追尾する買い物カートの製作に成功した。従来と異なり、この買い物カートはいちいち押す必要がなく、買い物中に常に両手が使えるというメリットがある。

キーワード モーションキャプチャ Web カメラ PIC DC モーター 買い物カート

2. 研究の背景

スーパーでカートを押しながら買い物をしているとき、カートの動作が非常に単純であることに気が付いた。買い物をしている自分の動きとカートとの動きは同じで、自分とカートの距離は常にうでの長さである。そこで、買い物客との距離を一定に保ちながら自動で追尾するカートを実現できたら、買い物の最中にいちいちカートを押す必要はないし、両手が常に使えて便利であろうと考えるようになった。これらのメリットは、特に、車いすを利用している人にとっては大きいだろうと推測された。

以前から私たちは、1台のカメラに映し出されたマーカの三次元座標を取得するモーションキャプチャシステムを研究するとともに、サーボモーターを利用したロボットの開発に取り組んできた。この自動追尾型買い物カートは、私たちが培ってきたハードウェアおよびソフトウェア技術を組

み合わせれば可能ではないかと思うようになり、研究を進めるようになった。

3. 研究の目的

事前に登録したマーカを人に貼り付け、そのマーカを自動で追尾する買い物カートを開発する。このカートは、機能毎に大まかに分けて次の3つの要素で構成される。

マーカの三次元座標を取得するモーションキャプチャシステム、三次元座標情報を解析してDCモーターを動かすパルス信号を生み出す制御システム、DCモーターの動きを車輪に伝えるなどする駆動システムである。

本レポートでは、それぞれの研究内容を報告したい。

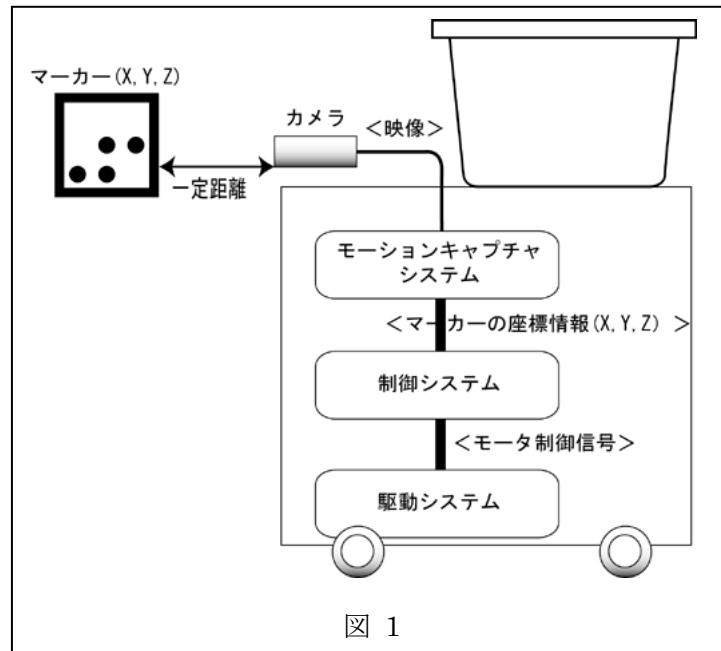


図 1

研究1 モーションキャプチャシステムの開発

特定のパターンをもったマーカ-の三次元座標を、精度よくリアルタイムに取得する。

研究2 制御システムの開発

(1) 制御ハードウェア・ソフトウェアの開発

モーターなど様々なデバイスを制御するハードウェアの開発と、マーカ-の三次元座標から必要な動作を判断し、そのハードウェアに指示を出すソフトウェアを開発する。

(2) 制御ロジックの開発

マーカ-を一定の距離を保って追尾する動作ロジックおよび、カメラの視野からマーカ-が外れたときに自動でマーカ-を探し出す動作ロジックをそれぞれ開発する。

研究3 駆動システムの開発

(1) モーターとギア

モーターの回転を車軸に伝えるギアな

どを検討し、製作する。

(2) 買い物かごを支える筐体を制作する。

システムを全て搭載し、荷物を置くことのできる筐体を検討し、製作する。

4. 研究方法

研究1 モーションキャプチャシステムの開発

C言語を用いて、1台のWebカメラに映し出された映像を元に、マーカ-の三次元座標を精度よく、リアルタイムに取得するシステムを開発する。

その方法として、私たちは、“三点直角法”および“パターン認識法”を組み合わせたものを採用した。これらの方法は、私たちが独自に開発したモーションキャプチャアルゴリズムである。

(1) 三点直角法

三点直角法とは、図のように、直角二等辺三角形を形作るように配置された三つのマーカ-を用いて、カメラから得られる見

かけの二次元座標から、各マーカーの正確な三次元座標を求めるアルゴリズムである。

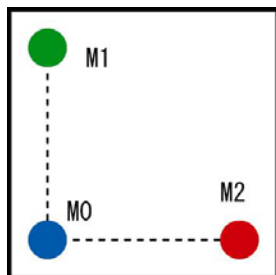


図 2

三つのマーカーM0,M1,M2のうち、直角部分を形作っているマーカーを M0、それ以外のマーカーをそれぞれ M1、M2 とする。二等辺三角形であるから、M0M1、M0M2 は等しく、またその長さを定数 L とする。

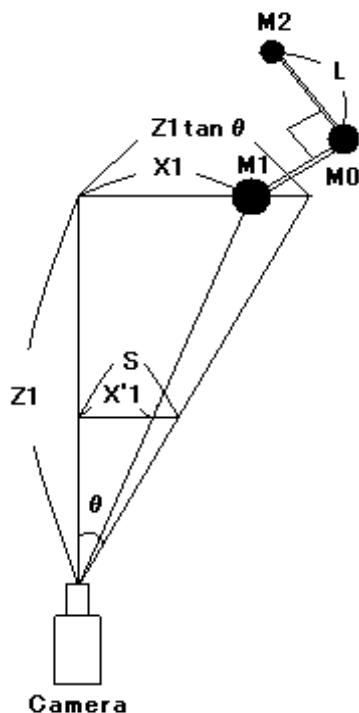


図 3

ここで、カメラの固有定数である水平画角の半分 θ とカメラの横解像度 S を用いて、定数 K を定義する。

$$K = \tan \theta / S$$

この K は正確なマーカーの Z 座標と組み合わせ、マーカーの見かけの二次元座標を正確な二次元座標に変換するための係数である。マーカーの見かけの二次元座標をそれぞれ $M0(X'0, Y'0)$, $M1(X'1, Y'1)$, $M2(X'2, Y'2)$ 、正確な三次元座標をそれぞれ $M0(X0, Y0, Z0)$, $M1(X1, Y1, Z1)$, $M2(X2, Y2, Z2)$ とする。

$$M0M1 = L, M0M2 = L \text{ から}$$

$$(X1 - X0)^2 + (Y1 - Y0)^2 + (Z1 - Z0)^2 = L^2 \quad \textcircled{1}$$

$$(X2 - X0)^2 + (Y2 - Y0)^2 + (Z2 - Z0)^2 = L^2 \quad \textcircled{2}$$

が成り立つ。

また、角 $M1M0M2$ が直角だから、ベクトルの内積が 0 になることから

$$(X1 - X0)(X2 - X0) + (Y1 - Y0)(Y2 - Y0) + (Z1 - Z0)(Z2 - Z0) = 0 \quad \textcircled{3}$$

が成り立つ。

一方、 $X0$ は、定数 K および $Z0, X'0$ を用いると、次の関係式が成り立つ。

$$X0 = K * Z0 * X'0$$

他の $Y0, X1, Y1, X2, Y2$ も同様に求めることができるため、①,②,③はそれぞれ次のように書き換えられる。

①に関して

$$(X'1 * Z1 * K - X'0 * Z0 * K)^2 + (Y'1 * Z1 * K - Y'0 * Z0 * K)^2 + (Z1 - Z0)^2 = L^2$$

②に関して

$$(X'2 * Z2 * K - X'0 * Z0 * K)^2 + (Y'2 * Z2 * K - Y'0 * Z0 * K)^2 + (Z2 - Z0)^2 = L^2$$

こ

③に関して

$$(X'1 * Z1 * K - X'0 * Z0 * K)(X'2 * Z2 * K - X'0 * Z0 * K) + (Y'1 * Z1 * K - Y'0 * Z0 * K)(Y'2 * Z2 * K - Y'0 * Z0 * K) + (Z1 - Z0)(Z2 - Z0) = 0$$

最後の3つの方程式をよく見ると、未知数は Z_0, Z_1, Z_2 の3つであるため、すべての未知数を求めることが論理的に可能である。さらに、これらの Z 値から、全てのマーカ-の正確な三次元座標を求めることができる。

実際の作業としては、カメラからの映像から得られる、各マーカ-の見かけ上の二次元座標をこれらの方程式に代入し、未知数を求めて、マーカ-の三次元座標を取得することになる。

方程式の解を求める方法としては、二分法を用いて近似解を得る手法を採用した。

これらの一連の作業をソフトウェア上で、次々とカメラから送られてくる画像に対して行い、マーカ-の三次元座標をリアルタイムに取得する。

(2) パターン認識法

カメラを用いてモーションキャプチャを行った場合、その精度を大きく左右するのがノイズ処理である。マーカ-を色の違いのみで認識した場合、マーカ-と同じ色をもつ全ての物体がノイズとなる。ノイズが入ると、マーカ-の座標を正確に得ることができなくなり、当然、買い物カートは、あさっての方向に動いてしまう。カラフルなパッケージの商品で満ちあふれているスーパーにおける実用化を考えた場合、この問題の解決は急務であった。

私たちは、これを根本的に解決する方法

を考えた。それがパターン認識法である。

これは、図のようなパターンをつけた正方形のマーカ-を用いることにより、形状とパターンからノイズや他マーカ-との認識分けを行い、マーカ-の4隅の座標を求めるアルゴリズムである。

これにより、ノイズを大幅にカットできるとともに、複数のマーカ-がカメラに写った場合でも、特定のパターンのマーカ-のみをキャプチャすることが期待される。

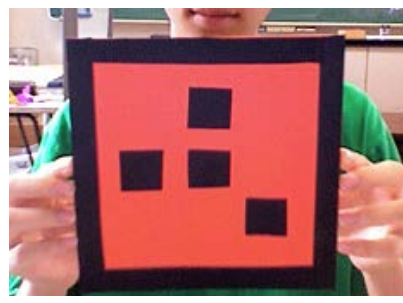


図 4

まず、正方形マーカ-の4隅の座標を得る手順を以下に示す。

- ① 大まかに画像を走査し、マーカ-が存在すると思われる二次元座標を見つける。
- ② 見つけた二次元座標から任意の方向へ走査していき、色が大幅に変わるところ、つまりマーカ-と背景との境界を見つける。そこから境界線を追跡していき、境界の二次元座標を記録していく。
- ③ 記録された二次元座標を順に三つずつ調べていくと、その三つの座標が成す角度が一定以下の座標と、そうでない座標とに分けることができる。
- ④ 前者を辺とみなし、後者を角とみなす。また、連続する角は一つの角と見なす。すると一つの境界線についてある多角形を得ることができる。

- ⑤ 得た多角形が正方形でなかった場合は、マーカーではないと判断し、正方形を形作る境界線が見つかるまでは、①から④の作業を繰り返す。
- ⑥ 最後に、見つけた4つの辺の座標群から最小自乗法を用いて4つの直線方程式を求め、それらの四つの交点、すなわち正方形を形作る4隅の座標を求める。

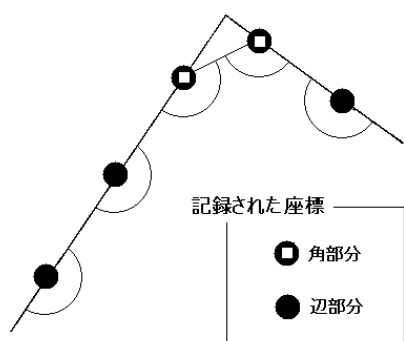


図 5

以上の手順で得られた4隅の座標から、三点直角法を使ってマーカーの三次元座標を計算することができる。

次に、マーカーのパターンを取得する手順について以下に示す。

- ① 先の手順で画像から抜き出したマーカーを格子に分割する。
- ② 格子の各点の色を求め、マーカー内のパターンを得る。
- ③ 登録したパターンと照合する。

これにより、複数のマーカーがカメラに写った場合でも、特定のパターンをもったマーカーのみをキャプチャすることが可能となる。

研究2 制御システムの開発

(1) 制御ハードウェア・ソフトウェアの開発

モーションキャプチャで取得したマーカーの三次元座標を解析し、動作に必要な命令をモーターコントローラ基盤にシリアル通信するソフトウェアを、VisualStudio 2005 を用いて開発する。この開発言語は、シリアル通信する際のパッケージが標準装備されているなど、開発上のメリットが大きい。

シリアル通信で出力されるデータプロトコルは、次のようなものである。

```
255:255:127:127:127
Startbit   Parameter
```

図 6

RS232C は一対一の通信しかできないため、多対多の通信が可能である RS485 を採用した。

また、シリアル通信で送られてきたデータを元に、モーターなどを制御する信号を生成するハードウェアコントローラを PIC により開発する。PIC とは、Microchip 社が製造開発しているマイコンで、内部にプログラムを書き込むことにより様々な周辺機器を制御できるものである。

このコントローラの概略図は次のようなものである。通信および全体を制御する PIC に、DC モーターやサーボモーターなどを制御する PIC がぶら下がる形になっている。これにより、信号処理の負荷が分散され、マーカーの動きとカートの動きの間に生じる時間的な遅れ（ディレイ）を軽減することをねらった。

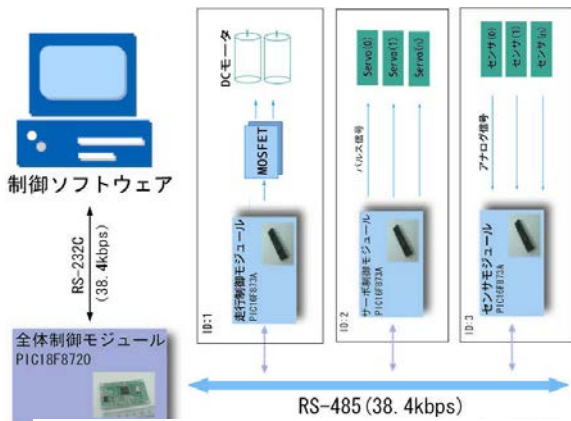


図 7

また、モータードライブ IC の出力電流が小さいという問題については、FET を用いた H ブリッジ制御回路を採用した。

(2) 制御ロジックの開発

① 通常追尾モード

マーカと一定の距離を保って追尾する動きのロジックは次のようなもの考えた。このロジックは、制御ソフトに組み込んだ。

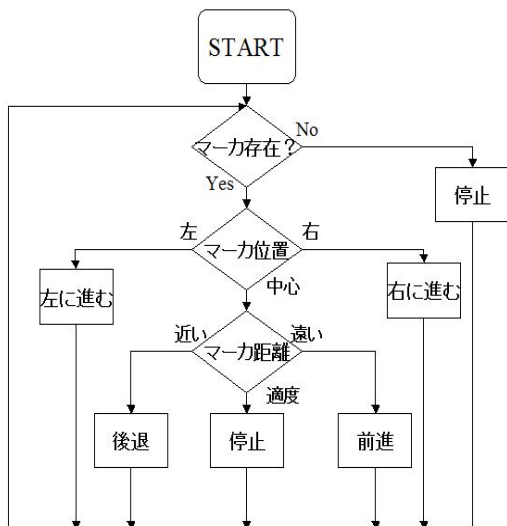


図 8

② マーカ探索モード

カメラの視野からマーカが外れたとき、自動でマーカを検索する動きのロジックは、次のようなもの考えた。これは人間が物を見失ったときに首を左右に振って探す、という動作から考えついた動きである。このロジックは、制御ソフトに組み込んだ。

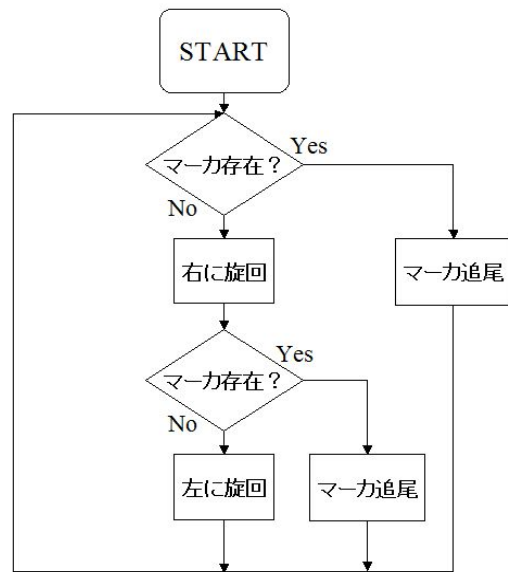


図 9

研究 3 駆動システムの開発

(1) モーターとギア

自動追尾型カートの速度とトルクを考える際に、モーターと車輪をつなぐギヤ比の計算が必要である。

カートの最大速度としては、買い物という状況から判断して、人が歩く速度の半分つまり、50cm/sec が必要だろうと考えた。

タイヤの直径とモーターの回転数を計測した結果、次のようになった。

$$\text{タイヤの直径} = 7.5\text{cm}$$

$$\text{モーターの回転数} = 2.7 \text{ 回/sec}$$

モーターとタイヤの回転数を一致させた場合、カートの様子は、次のようになる。

$$\begin{aligned} \text{カートの速度} &= 7.5 \times \pi \times 2.7 \\ &= 63.585(\text{cm/sec}) \end{aligned}$$

これは必要な速度を満たしている。従って、特に速度を交換する必要は無いため、ギヤ比は1 : 1に決めた。

(2) 買い物かごを支える筐体の制作

DC モーターとタイヤそれぞれにギヤを取り付け駆動させることで、モーターの軸への負荷を減らし、重いものに乗せてもカートの移動ができるように工夫する。さらに、この方法により、モーターとタイヤを直付けするよりも、タイヤの空回りが少なくなることを期待される。

5. 研究結果

研究1 モーションキャプチャの開発

(1) 三点直角法

1台のカメラに映し出された3つのマーカーの三次元座標を得ることができた。

図は、3つのマーカーを通る平面の法線ベクトルを表示している。それぞれのマーカーの正確な三次元座標を取得できていることが分かるであろう。



図 10

また、このソフトウェアを実行しているノート PC (CPU;Core2Duo1.8GHz) においては、平均 20fps の処理速度を得た。

(2) パターン認識法

カメラの視野にマーカーと同色の大きなノイズが混じった場合でも、マーカーのみをうまく抜き出すことができた。



図 11

また、マーカーのパターンを読み取ることによって、複数のマーカーを識別することができた。

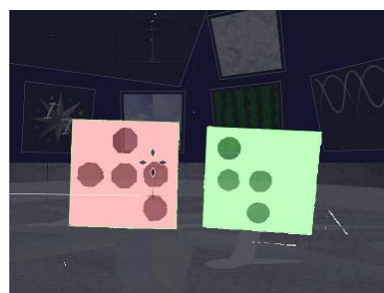


図 12

さらに、カメラからマーカーが少しはずれてしまい、角が少々欠けたとしても、うまく座標を抜き出すことができた。



図 13

研究2 制御システムの開発

(1) 制御ソフトウェア・ハードウェアの開発

制作した制御ソフトウェアは、次のようになった。

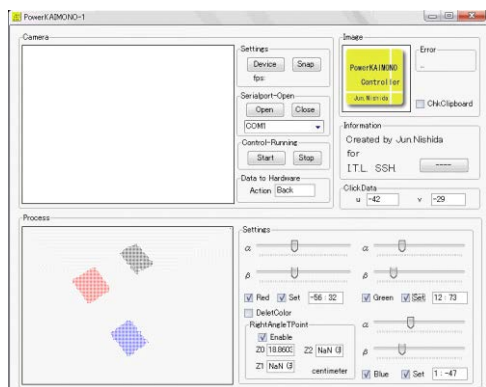


図 14

また、制作したモーターコントローラは、次のようになった。



図 15

特に、モーターコントローラでは、複数の PIC を階層的に用いることによって、機能の分散を図った。実際に動かしてみると、一つの PIC で構築した場合に比べて、データ通信の割り込み処理の内容が少なくなり、サーボモーターのジッタの問題が解決できた。

また DC モーター制御では、FET を用いた H ブリッジ制御回路によって電流不足の問題は解決された。

さらに、機能を分散させたことによって、複数の分散された最大 32 基の処理ユニットが同時並行的に処理を行うことができる。このため、モーター制御だけでなく、センサ入力、液晶表示から画像認識、音声認識などのモジュールを“信号線 2 本をつなげるだけ”で容易に追加することができるため、新規開発の場面で短期間にロボット等を設計、開発することが可能となった。

(2) 制御ロジックの開発

① 通常追尾モード

動作させた結果、マーカがカメラの視野内にあれば、それと一定の距離を保ってカートをスムーズに動作させることができた。

② マーカー探査モード

動作させた結果、画面外に出たマーカを自動的に探査し、再びとらえる時もあった。しかし、その頻度は低かった。

研究3 駆動システムの開発

(1) モーターとギア

作成したギアおよび車輪部分は、次のようになった。

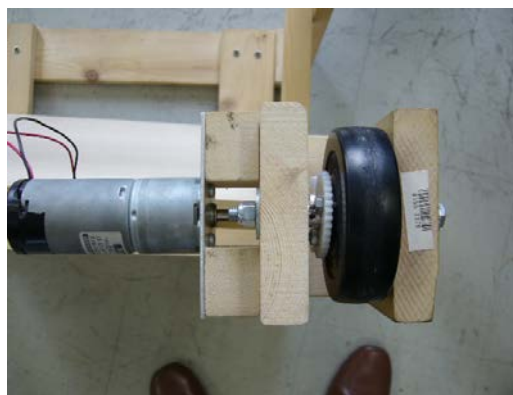


図 16

山が大きなギアを採用した結果、モーターが空転する頻度が減り、確実にカートを動作させることができた。さらに、摩耗を減らすことに成功した。

(2) 筐体の製作

本体のフレームと駆動部を組み立てた結果次のようになった。

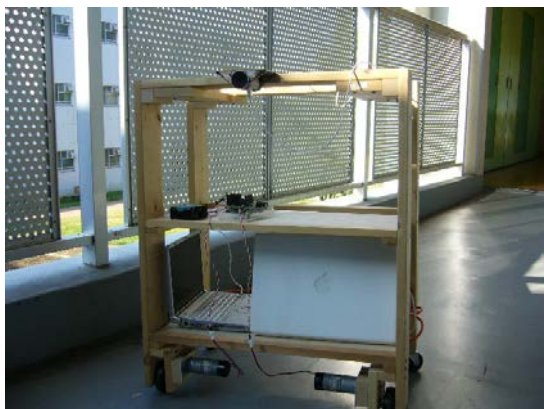


図 17

動作に必要な機材を全て搭載したところ、想定値の 0.6m/s の速度で動作した。筐体の上に 5kg 程度の荷物を乗せて動かすと、速度は 0.5m/s になった。

しかし、これ以上の負荷をかけると、重心が上になりすぎて不安定になったり、ギアが外れるなどした。

6. 考察

(1) モーションキャプチャに関して

私たちが独自に開発した三点直角法とパターン認識法の組み合わせによって、ノイズに強い、カメラ 1 台でマーカの正確な三次元座標を得るモーションキャプチャシステムを開発することに成功した。

また、複数のマーカが混在した場合でも、確実に特定のパターンをもったマーカのみをキャプチャすることができた。こ

れにより、スーパーの中で、複数台の自動追尾型買い物カートを走らせることが可能になった。

(2) 制御システムに関して

複数の PIC に処理を分散させることによって、安定してモーターを制御できるシステムを構築できた。また、このシステムにより、マーカとカートの動きの時間差(デレイ)を短くすることに成功した。

しかし、カメラがマーカを見失ったときのカートの動作アルゴリズムにはまだ改良の必要がある。カメラの左右からはずれる場合以外にも、ものの陰になってしまう場合など、マーカを見失う状況には様々あり、単純にカメラを左右に振っただけでは、マーカを見つけ出すことは難しいことが分かった。

(3) 駆動システムに関して

5kg 程度の負荷をかけた状態で、 0.5m/s の速度を得た。これは、十分に実用に耐えうる速度である。

しかし、これ以上負荷をかけて動作させるには難しく、さらに強力なモーターを採用したり、重心の位置を考慮した筐体を再検討する必要があることが分かった。

7. まとめと今後の課題

私たちは、特定のマーカをつけた人または車いすと、一定の距離を保って自動で追尾する買い物カートを開発するという研究目標をある程度達成できたと考える。

現時点において、カートに搭載されたカメラがマーカをとらえているときは、比較的スムーズに目的の動作が行える。

しかし、カメラがマーカを見失ったと

き、自動でマーカを探査できるには至っていない。この他にも、最大積載量の問題など、いくつかの課題が明らかになった。

今後は、実用化に向けて、ソフトウェアおよびハードウェア両面にわたって、さらなる研究をチームで進めていきたい。

8. 謝辞

この研究を進めるに当たり、ハードウェア技術やプログラミング技術などに関して、私たちの研究班の顧問である物理の末谷先生には数々のご指導をいただきました。また、児玉先生には、工作技術を教えて頂きました。さらに、数学の川口先生には、近似計算の方法などを教えて頂きました。先生方に深く感謝します。

また、予算面などで、植野前校長先生、前川校長先生、吉田信也副校長先生に多大なご協力をいただきました。

お世話になった先生方、大変ありがとうございました。

9. 参考文献

[1] 「Effective C++」、スコット・メイヤーズ著、ピアソン・エデュケーション(2006)

10. 資料

① 自動追尾型買い物カートのスペック

最大速度	0.5m/s
最大搭載質量	5kg
駆動部分	30W DC モーター×2
モーションキャプチャ	光学式、三次元座標取得、複数マーカ-の識別が可能
CPU	ノート PC×2
カメラ	Web カメラ×1

特徴	特定のマーカ-を一定の距離を保って自動で追尾する。
----	---------------------------

② 自動追尾型買い物カートの外観



③ コントローラ基板

MPU : PIC18F8720

動作電源 : PIC9V

外部 I/F : RS485*1、RS232C*1

