ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1996
Seria: AUTOMATYKA z.119 Nr kol. 1339

Jarosław WARCZYŃSKI
Politechnika Poznańska, Katedra Automatyki, Robotyki i Informatyki

STEROWANIE RUCHEM MANIPULACYJNYM ROBOTA Z KOREKCJĄ BŁĘDÓW WYKONANIA

Streszczenie. Praca przedstawia wynki badań nad sterowaniem ruchem manipulacyjnym robota w procesach montażu, dotyczących problemu autonomicznej korekcji potencjalnych błędów wykonania. Błędy takie mogą powstawać w wyniku działania wielu czynników, w szczególności zaś w wyniku ograniczonej dokładności robota. Zaprezentowane eksperymenty montażowe, oparte na przyjętej koncepcji sterowania autokorekcją ruchu manipulacyjnego, pokazują, że wybrane zadania montażowe mogą być wykonane nawet wówczas, gdy dokładność robota jest znacznie mniejsza niż tolerancje pasowania łączonych elemenów. W pracy dokonano przeglądu aktualnej problematyki planowania i sterowania produkcją w elastycznych systemach montażowych. W szczególności omówiono problemy wielokryterialnego równoważenia obciążeń maszyn, szeregowania operacji w elastycznych liniach montażowych oraz jednoczesnego szeregowania operacji montażowych i transportowych w elastycznych systemach montażowych ogólnej konfiguracji.

ROBOT FINE MOTION ADJUSTING AND CONTROL

Summary. The paper presents results of our research on robot fine motion control for robotized assembly processes and it concerns the problem of autonomous adjustment of fine motion misplacements resulted from a number of factors but especially from the constrained accuracy of robots. The paper also describes some assembly experiments based on the presented fine motion control strategy which show that for some tasks a successful assembly is possible even then the robot accuracy is considerable lower than the fit tolerancing of parts under assembly.

1. Robotyzacja procesów montażowych

Istnieje powszechne przekonanie (patrz np. [1, 8]), iż najbardziej uzasadnionym kierunkiem rozwoju metod wytwarzania w obrębie dyskretnych procesów przemysłowych, w ostatnim okresie, okazały się tzw. elastyczne systemy produkcyjne (ESP), które wraz z filozofią CIM (ang. Computer-Integrated Manufacturing) mogą tworzyć dogodne warunki dla podnoszenia, szeroko rozumianej, efektywności produkcji. Przesłanką wdrażania tych

systemów jest oczywiście elastyczna (programowalna) automatyzacja procesów wytwórczych, stąd też w systemach tych znaczące miejsce zajmują roboty przemysłowe.

W szczególności, w zaawansowanym technologicznie przemyśle, utrzymuje się duże zainteresowanie wykorzystaniem robotów w automatyzacji procesów montażu [1, 5, 6]: porównanie udziału poszczególnych technik wytwarzania w ogólnej pracochłonności procesów wytwórczych pokazuje, że montaż stanowi w niej średnio nie mniej niż 30% i jest udziałem największym po zarządzaniu i zbycie, przy czym średni udział montażu np. w kosztach wytwarzania maszyn wynosi 30-80%. Dane te wskazują wyraźnie na procesy montażu jako na potencjalnie znaczne źródło obniżenia kosztów wytwarzania.

Szersze zastosowanie robotów w procesach montażu wymaga jednak rozwiązania wielu problemów związanych z zapewnieniem niezawodności przeprowadzania montażu oraz jego dostatecznej efektywności [5, 7]. Zauważmy, że wykonanie większości zadań montażowych wymaga zdolności systemu manipulacyjnego do autonomicznej korekcji nie dających się z góry przewidzieć błędów wykonania (ang. fault-tolerance) [2, 3, 4, 9]. Wspomniane błędy mogą być spowodowane przez cały zespół różnych czynników, spośród których można wyróżnić ograniczoną dokładność robota. W przypadku zadań montażu precyzyjnego dokładność ta może być nawet o kilka rzędów wielkości mniejsza niż tolerancje pasowania łączonych elementów.

Prezentowana praca nawiązuje do podniesionego powyżej zagadnienia autokorekcji ruchu manipulacyjnego (ang. fine motion) wykonywanego przez robota, przedstawiając pewną koncepcję realizacji wspomnianej autokorekcji, oraz wyniki eksperymentów fizycznych przeprowadzonych w ramach wykonanego stanowiska doświadczalnego obejmującego robota badawczego Zebra ZERO oraz specjalnie skonstruowany system jego programowania i sterowania [10].

2. Koncepcja sterowania autokorekcją

Zakładamy, iż mechanizm autokorekcji powinien spełniać dwie następujące funkcje podstawowe:

1. Wykrywanie zaistniałego błędu wykonania;

2. Podejmowanie akcji naprawczej zmierzającej do likwidacji powstałego błędu.

Do realizacji tych zadań zastosowano system produkcji operujący na odpowiednich zbiorach reguł zebranych w bazie wiedzy.

Mechanizm działania systemu w zakresie zadania pierwszego jest następujący: Po wykonaniu każdego ruchu system warstwy sterowania bezpośredniego robota odwołuje się do warstwy nadrzędnej, przekazując jej dane sensoryczne, tzn. pomiary enkoderów w poszczególnych węzłach kinematycznych oraz pomiary umieszczonego w nadgarstku manipulatora czujnika sił i momentów sił wywieranych na efektor końcowy. Dane te charakteryzują osiągnięty stan wykonania zadania montażu. Zadaniem systemu produkcji jest weryfikacja tego stanu, tzn. sprawdzenie, czy jest to stan, który powinien zaistnieć po bezbłędnym wykonaniu ostatniego ruchu. Jeśli jest to właśnie taki pożądany stan, to warstwa sterowania bezpośredniego może rozpocząć relizację kolejnego ruchu przewidzianego programem. Jeśli natomiast osiągnięty stan nie jest stanem przewidzianym jako następstwo wykonanego ruchu, to zachodzi potrzeba podjęcia akcji naprawczej. Podjęcie akcji naprawczej wymaga jednak identyfikacji zaistniałego stanu. Identyfikacji tej dokonuje się przeszukując zbiór regul, których składnię podajemy poniżej.

Składnia reguły identyfikacji stanu:

<reguła identyfikacji stanu> ::=
STATE IDENTIFICATION RULE *<identyfikator reguły identyfikacji stanu>*
(*<term reguły identyfikacji stanu>*)
<ciało reguły identyfikacji stanu>
END.

<ciało reguły identyfikacji stanu> ::= *<lista <element reguły identyfikacji stanu>>*

<element reguły identyfikacji stanu> ::= *<poprzednia relacja>*
<element reguły identyfikacji stanu> ::= *<docelowa relacja identyfikacji stanu>*
<element reguły identyfikacji stanu> ::= *<warunki pozycji>*
<element reguły identyfikacji stanu> ::= *<warunki siły>*
<element reguły identyfikacji stanu> ::= *<aktualna relacja identyfikacji stanu>*

<poprzednia relacja> ::=
PREVIOUS RELATION
<alternatywa relacji>

<docelowa relacja identyfikacji stanu> ::=
GOAL RELATION
<alternatywa relacji>

<warunki pozycji> ::=

POSITION CONDITIONS
<wyrażenie logiczne>

<warunki siły> ::=
FORCE CONDITIONS
<wyrażenie logiczne>

<aktualna relacja identyfikacji stanu> ::=
CURRENT RELATION
<koniunkcja relacji>

Proces identyfikacji stanu bieżącego może się zakończyć jednym z następujących trzech wyników:

1. Stan bieżący zostanie jednoznacznie zidentyfikowany;
2. Stan bieżący nie może być jednoznacznie zidentyfikowany;
3. Żadna reguła identyfikacji stanu nie znajduje zastosowania.

Przypadek pierwszy nie wymaga komentarza, przypadek drugi natomiast jest traktowany jako stan niepożądany, wymagający korekcji pozwalającej przejść do stanu jednoznacznie identyfikowalnego. Przypadek trzeci oznacza, że należy bazę wiedzy uzupełnić o nowe reguły identyfikacji stanu. Kilka przykładowych stanów, zidentyfikowanych przez system w trakcie przeprowadzania poniżej opisanych eksperymentów, przedstawiono w tablicy 2.

Po zidentyfikowaniu stanu bieżącego, jeśli nie jest on stanem planowanym, należy przejść do zadania drugiego, tj. do realizacji akcji naprawczej, która ma zlikwidować powstały błąd. Zadanie to obejmuje przede wszystkim wybór właściwej akcji naprawczej. Wybór ten związany jest z przeszukiwaniem drugiego zbioru reguł, który można nazwać regułami korekcji. Składnia tych reguł przedstawiona jest poniżej:

<reguła korekcji> ::=
ADJUSTMENT RULE *<identyfikator reguły korekcji>*
(*<term reguły korekcji>*)
<ciało reguły korekcji>
END.

<ciało reguły korekcji> ::= *<lista <element reguły korekcji>>*

<lista <A>> ::= *<A>*
<lista <A>> ::= *<A>*, *<lista <A>>*

<element reguły korekcji> ::= *<aktualna relacja korekcji>*
<element reguły korekcji> ::= *<docelowa relacja korekcji>*
<element reguły korekcji> ::= *<korekcja>*

<aktualna relacja korekcji> ::=
CURRENT RELATION
<alternatywa relacji>

<docelowa relacja korekcji> ::=
GOAL RELATION
<koniunkcja relacji>

<korekcja>:= ADJUSTMENT *<ciało korekcji>*

<ciało korekcji> ::= *<lista <element korekcji>>*

<element korekcji> ::=
<identyfikator ruchu>
<ruch>
<docelowa relacja ruchu>

<ruch> ::= MOTION *<wyrażenie>*

<docelowa relacja ruchu> ::=
GOAL RELATION
<alternatywa relacji>

Jak wynika z powyższego opisu, kolejność występowania poszczególnych elementów reguł korekcji i identyfikacji stanu nie jest istotna. Ponadto mogą pojawić się reguły, w których nie występuje któryś z elementów. Przyjmuje się wówczas, że w miejscu elementu, który nie wystąpił, wpisany został atom true.

3. Weryfikacja eksperymentalna

Przedstawiona powyżej koncepcja sterowania korekcją ruchu manipulacyjnego była weryfikowana doświadczalnie. Do przeprowadzenia eksperymentów wykorzystano stanowisko doświadczalne obejmujące robota badawczego Zebra ZERO wraz z jego systemem sterowania oraz wykonanym systemem programowania.

Zebra ZERO jest robotem o sześciu obrotowych węzłach kinematycznych, charakteryzującym się udźwigiem około 1kG oraz zasięgiem maksymalnym 0,64m. W każdym węźle kinematycznym, napędzanym silnikiem prądu stałego, znajduje się enkoder optyczny prze-

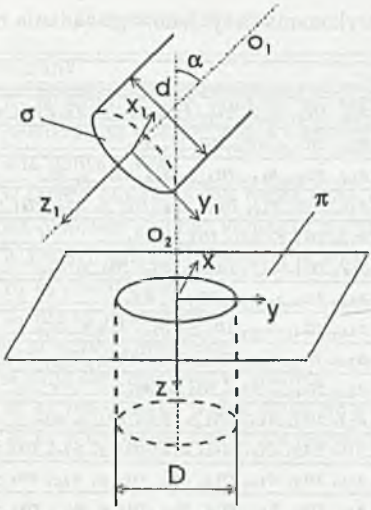
znaczony do mierzenia kąta obrotu. Ponadto, w nadgarstku robota umieszczony jest czujnik sił i momentów sił pozwalający mierzyć siły/momenty wywierane na efektor końcowy mnipulatora. Zebra ZERO jest robotem o dość dużej dokładności pozycjonowania — zadane położenia kątowe są odtwarzane z dokładnością nie mniejszą niż 0.05 stopnia. Jednak robot ten ma stosunkowo duże luzy, co powoduje, że w przypadku oddziaływania siłą na efektor końcowy następuje, pod jej działaniem, przesunięcie punktu, w którym umieszczony jest początek układu współrzędnych związany z narzędziem. Przesunięcie to wynosi średnio około 3mm i nie jest ono mierzalne w układzie sterowania robota, gdyż enkodery znajdują się na wałach silników.

Jak już wspomniano, przedstawiona powyżej koncepcja sterowania ruchem manipulacyjnym została zaimplementowana w systemie sterowania i programowania robota, w którego architekturze można wyróżnić trzy warstwy:

1. Warstwę pierwszą (najniższą) tworzą sprzętowe układy wykonawcze, zamontowane wewnątrz manipulatora: obejmują one wzmacniacze mocy sterujące silnikami poszczególnych węzłów oraz chwytaka, jak również system akwizycji danych sensorycznych, składający się z multipleksera analogowego wybierającego jeden z sześciu sygnałów analogowych czujnika sił/momentów, wzmacniacza pomiarowego wzmacniającego wybrany sygnał i 10-bitowego przetwornika analogowo-cyfrowego, przetwarzającego wzmocniony sygnał analogowy na postać cyfrową.

2. Warstwę drugą tworzy komputer typu PC wraz z umieszczoną w nim płytą rozszerzającą, na której znajduje się sterownik HCTL 1. Sterownik ten, poprzez układy Hewlett-Packard HCTL 1000, steruje wzmacniaczami mocy oraz odczytem danych z enkoderów umieszczonych na wałach silników poszczególnych osi manipulatora. Oprócz tego, steruje on również systemem odczytu danych sensora sił i momentów. Sterownik ten komunikuje się z programem obsługi zaimplementowanym w środowisku Microsoft C i działającym pod kontrolą systemu operacyjnego MS-DOS. Wspomniany program obsługi pośredniczy pomiędzy sterownikiem a warstwą trzecią (nadrzędną), realizującą programowanie i planowanie sterowania, przyjmując od niej polecenia ralizacji ruchów bądź innych funkcji poziomu manipulatora.

3. Warstwa trzecia — nadrzędna została zrealizowana na oddzielnym komputerze i jest zaimplementowana w środowisku programowym LPA 386-Prolog działającym



Rys. 1. Montaż walka w otworze
Fig. 1. Assembly of cylinder in aperture port

pod kontrolą systemu Windows. Do zadań tej warstwy należy właśnie generowanie strategii ruchów korekcyjnych.

Jako przykład zadania montażu wybrano klasyczne zadanie polegające na umieszczeniu wałka w otworze. Dokładne warunki zadania są następujące: Krążek stalowy o średnicy 50mm, grubości 15mm, z wywierconym centralnie otworem o średnicy 10mm wkręcony jest w imadło tak, że oś otworu jest skierowana pionowo. W chwytaku robota znajduje się stalowy wałek o średnicy 10mm i długości 48mm, zakończony ostrą krawędzią, tzn. zarówno wałek, jak i otwór nie posiadają ścięcia ułatwiającego montaż. Wałek umieszczony jest nad otworem, a jego oś jest również skierowana pionowo. Położenie otworu znane jest z dokładnością ok. 2mm, a tolerancja pasowania nie przekracza 0.3mm. W tablicy 1 zebrano wyniki 25 eksperymentów montażowych, jakie zostały powtórzone dla przedstawionego powyżej zadania pasowania wałka w otworze. Łatwo zauważyć, że wszystkie eksperymenty zakończyły się stanem s_{3a}, który jest stanem docelowym zadania: oznacza, że wałek znajduje się w otworze. Wszystkie przyjęte oznaczenia stanów i ruchów objaśniają tablice 2 i 3.

Dodajmy, że przedstawione eksperymenty były przeprowadzane przy różnych położe-

Tablica 1

Sposoby wykonania przykładowego zadania montażu

Nr	Sposób wykonania
$sp.0$	$s_0, m_{1_1}, s_{1d}, m_4, s_{1b}, m_2, s_{1c}, m_4, s_{1a}, m_{1_2}, s_{2a}, m_{1_3}, s_{3a}$
$sp.1$	$s_0, m_{1_1}, s_{1d}, m_4, s_{1a}, m_{1_2}, s_{2a}, m_{1_3}, s_{3a}$
$sp.2$	$s_0, m_{1_1}, s_{1d}, m_4, s_{1d}, m_4, s_{1a}, m_{1_2}, s_{2a}, m_{1_3}, s_{3a}$
$sp.3$	$s_0, m_{1_1}, s_{1d}, m_4, s_{1b}, m_2, s_{1c}, m_4, s_{1a}, m_{1_2}, s_{2a}, m_{1_3}, s_{3a}$
$sp.4$	$s_0, m_{1_1}, s_{1d}, m_4, s_{1a}, m_{1_2}, s_{2a}, m_{1_3}, s_{3a}$
$sp.5$	$s_0, m_{1_1}, s_{1b}, m_2, s_{1d}, m_4, s_{1a}, m_{1_2}, s_{2a}, m_{1_3}, s_{3a}$
$sp.6$	$s_0, m_{1_1}, s_{1d}, m_4, s_{1a}, m_{1_2}, s_{2a}, m_{1_3}, s_{3a}$
$sp.7$	$s_0, m_{1_1}, s_{1d}, m_4, s_{1d}, m_4, s_{1a}, m_{1_2}, s_{2a}, m_{1_3}, s_{3a}$
$sp.8$	$s_0, m_{1_1}, s_{1d}, m_4, s_{1d}, m_4, s_{1d}, m_4, s_{1a}, m_{1_2}, s_{2a}, m_{1_3}, s_{3a}$
$sp.9$	$s_0, m_{1_1}, s_{1c}, m_4, s_{1a}, m_{1_2}, s_{2a}, m_{1_3}, s_{3a}$
$sp.10$	$s_0, m_{1_1}, s_{1c}, m_4, s_{1d}, m_4, s_{1a}, m_{1_2}, s_{2a}, m_{1_3}, s_{3a}$
$sp.11$	$s_0, m_{1_1}, s_{1d}, m_4, s_{1b}, m_2, s_{1c}, m_4, s_{1a}, m_{1_2}, s_{2a}, m_{1_3}, s_{3a}$
$sp.12$	$s_0, m_{1_1}, s_{1d}, m_4, s_{1b}, m_2, s_{1c}, m_4, s_{1a}, m_{1_2}, s_{2a}, m_{1_3}, s_{3a}$
$sp.13$	$s_0, m_{1_1}, s_{1c}, m_4, s_{1b}, m_2, s_{1c}, m_4, s_{1a}, m_{1_2}, s_{2a}, m_{1_3}, s_{3a}$
$sp.14$	$s_0, m_{1_1}, s_{1c}, m_4, s_{1c1}, m_3, s_{1d}, m_4, s_{1a}, m_{1_2}, s_{2a}, m_{1_3}, s_{3a}$
$sp.15$	$s_0, m_{1_1}, s_{1c}, m_4, s_{1c1}, m_3, s_{1c}, m_4, s_{1a}, m_{1_2}, s_{2a}, m_{1_3}, s_{3a}$
$sp.16$	$s_0, m_{1_1}, s_{1c}, m_4, s_{1c1}, m_3, s_{1c}, m_4, s_{1d}, m_4, s_{1a}, m_{1_2}, s_{2a}, m_{1_3}, s_{3a}$
$sp.17$	$s_0, m_{1_1}, s_{1c}, m_4, s_{1c1}, m_3, s_{1c}, m_4, s_{1a}, m_{1_2}, s_{2a}, m_{1_3}, s_{3a}$
$sp.18$	$s_0, m_{1_1}, s_{1c}, m_4, s_{1c1}, m_3, s_{1d}, m_4, s_{1c}, m_4, s_{1a}, m_{1_2}, s_{2a}, m_{1_3}, s_{3a}$
$sp.19$	$s_0, m_{1_1}, s_{1b}, m_2, s_{1c}, m_4, s_{1d}, m_4, s_{1a}, m_{1_2}, s_{2a}, m_{1_3}, s_{3a}$
$sp.20$	$s_0, m_{1_1}, s_{1c}, m_4, s_{1c1}, m_3, s_{1d}, m_4, s_{1d}, m_4, s_{1a}, m_{1_2}, s_{2a}, m_{1_3}, s_{3a}$
$sp.21$	$s_0, m_{1_1}, s_{1c}, m_4, s_{1c1}, m_3, s_{1c}, m_4, s_{1c1}, m_3, s_{1d}, m_4, s_{1a}, m_{1_2}, s_{2a}, m_{1_3}, s_{3a}$
$sp.22$	$s_0, m_{1_1}, s_{1c}, m_4, s_{1c1}, m_3, s_{1c}, m_4, s_{1a}, m_{1_2}, s_{2a}, m_{1_3}, s_{3a}$
$sp.23$	$s_0, m_{1_1}, s_{1c}, m_4, s_{1c1}, m_3, s_{1d}, m_4, s_{1d}, m_4, s_{1a}, m_{1_2}, s_{2a}, m_{1_3}, s_{3a}$
$sp.24$	$s_0, m_{1_1}, s_{1c}, m_4, s_{1a}, m_{1_2}, s_{2a}, m_{1_3}, s_{3a}$

niach początkowych otworu, tzn. przed każdą nową próbą wykonania zadania krążek z otworem był nieznacznie (o ok. 3mm) przemieszczany, aby w ten sposób zwiększyć efekt niepewności i niedokładności. Pomimo to wszyskie próby umieszczenia wałka w otworze zakończyły się sukcesem.

LITERATURA

1. Banaszak Z., Jampolski L.: Komputerowo wspomagane modelowanie elastycznych systemów produkcyjnych. WNT, Warszawa 1991.

2. Dufay B., Latombe J.C.: An approach to automatic robot programming based on inductive learning, Proc. 1st International Symposium on Robotics Research, MIT Press, Cambridge 1983.

Tablica 2

Oznaczenia stanów

Oznaczenie	Stan oznaczany
s_0	osie o_1 i o_2 są współliniowe, kontakt nie zachodzi
s_{1a}	kontakt powierzchni bocznej walca i krawędzi otworu
s_{1b}	za mała siła kontaktowa
s_{1c}	kontakt w trzech punktach lub wałek poza otworem
s_{1c1}	wałek poza otworem - punkt kontaktu na płaszczyźnie π
s_{1d}	kontakt krawędzi walca z krawędzią otworu
s_{2a}	osie o_1 i o_2 są równoległe
s_{2b}	osie o_1 i o_2 nie są równoległe
s_{3a}	wałek jest w pozycji docelowej
s_{3b}	wałek znajduje się częściowo w otworze
s_{3c}	osie o_1 i o_2 są równoległe, wałek styka się z powierzchnią krążka
s_{4a}	osie o_1 i o_2 są równoległe, wałek nie dotyka krążka

Tablica 3

Oznaczenia ruchów

Oznaczenie	Ruch oznaczany
m_{1_1}	obrót dokoła osi x_1 o kąt 45° i przesunięcie w dół (pierwszy ruch)
m_{1_2}	obrót dokoła osi x_1 o kąt $-\alpha$ (drugi ruch)
m_{1_3}	wsunięcie wałka do otworu (trzeci ruch)
m_2	przesunięcie wałka w dół o odległość `uncert_dist`
m_3	przesunięcie wałka po powierzchni krążka w kierunku otworu
m_4	niewielkie przesunięcie w kierunku y mała sztywność w osi x_1
m_5	obrót dokoła osi x_1 o kąt $-\alpha$
m_6	wsunięcie wałka do otworu
m_7	odsunięcie wałka od krążka, ustawienie go nad otworem (pierwszy ruch)

3. Lozano-Pérez T.: Task planning [in] Robot motion: Planning and control, ed. M. Brady et al., MIT Press, Cambridge, 1982, pp. 463-498.

4. Lozano-Pérez T.: Robot Programming, Proceedings of the IEEE, July 1983.

5. Łunarski J., Szabajkowicz W.: Automatyzacja procesów technologicznych montażu maszyn, WNT, Warszawa. 1993.

6. Puff W., Soltys W.: Podstawy technologii montażu maszyn i urządzeń. WNT, Warszawa 1980.

7. Nof S.Y.(Ed.): Handbook of Industrial Robotics, John Wiley & Sons, New York 1985.

8. Ranky P.G.: FMS in CIM. Robotica, vol. 3, 1985, pp. 205-214.

9. Taylor R.: A Synthesis of Manipulator Control Programs from Task-Level Specifications, Stanford University AI Memo 282, 1976.

10. Warczyński J., Szmanda M.: Sterowanie z autokorekcją w procesie manipulacyjnym robota, Raport z badań nr 45-029, Katedra Automatyki, Robotyki i Informatyki Politechniki Poznańskiej (praca nie publikowana), Poznań 1995.

Recenzent: Prof. dr inż. Henryk Kowalowski

Wpłynęło do Redakcji do 30.06.1996 r.

Abstract

The paper presents results of our research on robot fine motion control for robotized assembly processes and it concerns mainly the problem of autonomous adjustment of fine motion misplacements. The misplacements can result from a number of factors, especially from the constrained accuracy of robots. It has been proposed to apply production system operating on an approppriate knowledge base for synthesizing sensor-based fine motion control strategies. Both the system and the knowledge base has been implemented in LPA-386 Prolog for Windows. The system solves two tasks: an identification of the contact state resulted from the last robot movement and a proper choice of the adjustment strategy provided the identified state is not the required one. This system was placed in the supervisory level of the three-layerd control system of Zebra ZERO robot which was applied for experimental verification of the proposed approach. The results of experiments with a sample part-mating task has been also provided with the presented paper. They show that for some tasks a successful assembly is possible even then the robot accuracy is considerable lower than the fit tolerancing of parts under assembly.