



# Перемещение по осязанию

Управление по усилию превращает роботы для механической обработки в универсальные устройства  
Петер Фиксель, Томас Грот, Матс Исакссон, Хью Занг, Джанджун Ванг, Джанмин Хе, Мартин Кольмайер, Райнер Краппингер, Джинггоу Ге

Компания АББ вписала новую главу в книгу робототехнических приложений. Тогда как в прошлом программирование робота для тонких операций точной обработки было делом утомительным и трудоемким, теперь роботы способны самостоятельно обучаться выполнению таких заданий. Этот новаторский подход может снизить общее время программирования на величину до 80 % для роботов, используемых при шлифовке литых деталей, в высшей степени повышая уровень производительности.

С новой системой гибкой обработки Flex Finishing компании АББ, оснащенной функцией управления по усилию (RobotWare Machining Force Control), было преодолено одно из последних реальных препятствий на пути повышения производительности.

Долгое время достижение быстрого перемещения робота при обеспечении устойчивого контакта с изделием было сложной задачей для инженеров-робототехников. Компания АББ впервые начала действовать в этой области несколько лет назад, разработав роботы, способные выполнять задачи точной сборки в автомобильной промышленности [1]. Это достижение стало возможным благодаря использованию датчиков для измерения контактного усилия, а также петля обратной связи для управления этим усилием и его преобразования в перемещение манипулятора робота. С этими роботами, управляемыми по усилию, работающими на базе контроллера робота S4Cplus, продолжительность сборки автомобильной трансмиссии оказалось возможным понизить на 75%.

Еще один шаг в применении роботов, управляемых по усилию, был недавно сделан в классе более сложных приложений: снятия облоя<sup>1)</sup>, зачистки и полировки деталей, изготовленных, например, с помощью литья. В отличие от механической сборки к управлению усилием при обработке в таких приложениях предъявляются гораздо более высокие требования, и до сих пор оно было невозможным. Имеется несколько причин такой повышенной сложности: износ инструмента неодинаков, детали имеют различные размеры, а позиционирование деталей не является абсолютно точным и повторяемым, что приводит к риску больших отклонений и противоречивым результатам.

Традиционно процесс чистовой обработки был очень трудоемким, и по качеству готовая продукция была несравнима с отливками, зачищенными и отполированными вручную. До сих пор роботы, применявшиеся для таких задач, были управляемыми по положению. Они имели адаптивное крепление инструмента и позиционируемой детали, перемещались по заданным

траекториям и с определенными скоростями, иногда поддерживались дополнительным сервоприводом для подстройки к разнице в размерах. В этом режиме работы, если робот не может достичь нужной траектории из-за неправильного положения детали, он будет все же стремиться пройти по ней сквозь деталь. В результате робот останавливается, ломается инструмент или повреждается обрабатываемая деталь. Во избежание таких повреждений обычные роботы для зачистки отливок, как правило, работают в замедленном темпе, с ограниченной производительностью. Из-за необходимости в управлении по положению эти роботы должны программироваться, чтобы удовлетворять высоким требованиям к точности траектории, что весьма трудоемко для инженера. Все эти недостатки – высокая трудоемкость программирования, дополнительный инструмент, дополнительные серводвигатели и существенный риск брака – замедляли распространение роботов в этой отрасли промышленности.

#### Пять шагов к серьезной инновации

Новое уникальное робототехническое приложение, выпущенное компанией АББ в 2007 году, объединяет в себе пять новаторских элементов:

- использование новейшего контроллера робота компании АББ, типа IRC5 с высокоскоростным интерфейсом датчиков;
- среда программирования, которая позволяет роботу самостоятельно находить оптимальную траекторию;
- петля обратной связи для управления давлением на инструмент;
- петля обратной связи для регулирования скорости инструмента;
- простое в использовании изделие, собираемое из готовых узлов.

Контроллер IRC5 работает на основе самой совершенной в промышленности операционной системы для управления роботами и перифе-

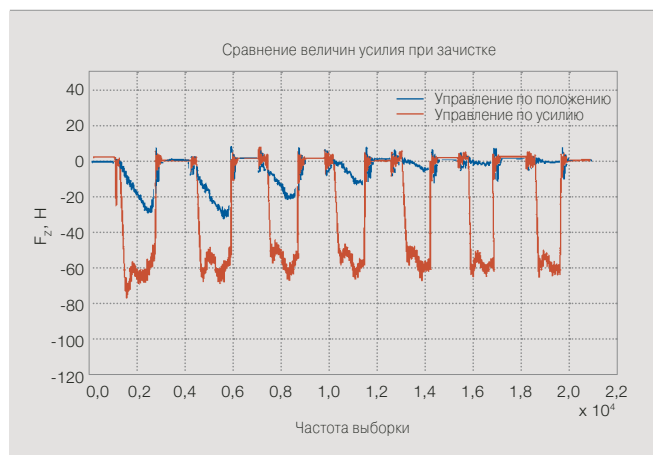
рийным оборудованием. Операционная система RobotWare OS, отличительными особенностями которой являются разработанная компанией АББ технология перемещения и связи (Motion Technology and Communication) и язык программирования RAPID, – это наиболее мощная операционная система для контроллеров из числа существующих на сегодняшний день. Контроллер IRC5 имеет два канала Ethernet – один для локальной сети и один для локального оборудования, – а также два последовательных канала для прямой связи с датчиками. Производительность, которую обеспечивает контроллер IRC5, является критичной для технических характеристик робота в целом и для времени реакции робота при корректировке и регулировании его положения. Чтобы реализовать правильную частоту выборки сигналов для настройки динамического позиционирования робота, датчик должен быть в высокой степени

1 Контроллер IRC5 с сенсорным экраном FlexPendant



1) Снятия облоя – это удаление заливок, выступов и заусенцев с детали, изготовленной литьем или механической обработкой.

2 Измеренное контактное усилие при зачистке лопасти турбины за семь последовательных проходов; синяя кривая показывает результаты для традиционного управления по положению, красная кривая показывает соответствие, достигнутое для управления по усилию.



## Инновации в изделиях

интегрирован с электронной схемой контроллера, обеспечивая успешную работу этого новаторского приложения.

Контроллер IRC5 компании АББ, оснащенный функцией MultiMove, является всемирным эталоном, позволяя одновременно координировать перемещение до четырех роботов (с 36 степенями подвижности) (рис. 1). Одна деталь может обрабатываться совместно несколькими роботами, при этом обеспечивается координация сложных траекторий. Функция MultiMove также характеризуется переключением между независимым и координированным перемещением. Эти уникальные эксплуатационные качества дают возможность решать комплексные задачи по снятию облоя, зачистке и полировке.

Среда программирования, которая поддерживает пользователя этого новаторского приложения, является первым из когда-либо сделанных пред-

3 Робот с функцией управления по усилию.



ложений такого нового аспекта программирования. Она обеспечивает простое и эффективное программирование за счет использования самого датчика усилия для определения траектории перемещения робота. Программирование производится с сенсорного экрана FlexPendant и формирует специализированный модуль приложения для создания программы обработки с управлением по усилию. Эта концепция дает оператору возможность передвигать робот рукой и обучить его перемещению по приблизительной траектории. После этого робот будет пользоваться этой приблизительной информацией для перемещения по траектории, одновременно он будет автоматически записывать точную траекторию и создавать программу для себя самого (рис. 2).

Длительность рабочего цикла робота при более точном управлении была сокращена приблизительно на 20 %, а срок службы шлифовального инструмента возрос на 20 %.

Функция прижатия с управлением по усилию (FC Pressure) позволяет роботам зачищать или полировать отливки, поддерживая постоянным давление инструмента на рабочую поверхность. Программное обеспечение FC Pressure предназначено для процессов, требующих высококачественной отделки поверхности. Оно дает роботу возможность эффективно «чувствовать» рельеф детали и следовать поверхности отливки, изменяя свое положение, так чтобы оказывать неизменное давление на поверхность, даже если точное положение поверхности неизвестно. Поскольку имеется плотный контакт, то такие

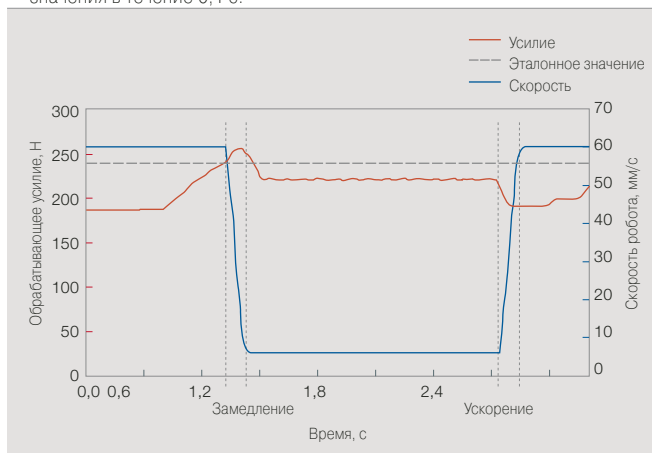
неровности, как заусенцы, удаляются на одинаковую глубину.

В результате улучшается качество поверхности, появляется возможность справиться с отклонениями в размерах отливок, минимизируется риск повреждения поверхности отливки и прогнозируется износ инструмента. Поскольку давление получают за счет смещения траектории движения, эта функция особенно удобна для снятия облоя, зачистки и полировки, когда поверхность должна быть ровной и гладкой (рис. 3).

Вторая функция программного обеспечения, изменение скорости с управлением по усилию (FC SpeedChange), дает роботу возможность полировать или удалять заусенцы с поверхности отливки с постоянной скоростью, замедляясь при столкновении с крупным заусенцем. В процессах, где важна точность траектории и где конечный результат должен соответствовать конкретным размерам, FC SpeedChange – это правильный выбор. С функцией FC SpeedChange робот управляется по положению и следует по запрограммированной траектории, что поддерживает постоянную скорость удаления материала. Эта функция действует на максимальной скорости обработки, автоматически замедляя движение робота, когда усилия механической обработки становятся слишком большими, чтобы минимизировать изменения размеров из-за прогиба манипулятора робота и чтобы избежать повреждения детали или инструмента из-за механической нагрузки или перегрева. Как и в случае функции FC Pressure, это сокращает время цикла обработки, дает возможность компенсировать отклонения размеров отливок, минимизирует риск повреждения отливки и позволяет прогнозировать износ инструмента (рис. 4).

Конечный продукт данной разработки объединяет в себе усовершенствованную обработку

4 Процесс зачистки, при котором робот замедляется, столкнувшись с крупным заусенцем. Измеренное обрабатываемое усилие превышает установленную эталонную величину, что инициирует замедление движения робота. Когда усилие снизится, робот будет наращивать скорость до запрограммированного значения в течение 0,1 с.



5 Вид графического интерфейса пользователя на экране FlexPendant. Траектория представлена в трех измерениях для облегчения просмотра и редактирования графики.



сигналов датчиков, математический аппарат, логическое решение и графический интерфейс пользователя для быстрого, простого и точного программирования, при котором датчик используется для того, чтобы оператор мог провести робот рукой с целью интуитивного практического программирования. Предлагаемый продукт, готовый к немедленному применению, содержит все необходимые компоненты, вместе с датчиком, электронной схемой и кабелями, установленными и проверенными на роботе, оставляя для интегратора или покупателя только процесс адаптации (рис. 5).

#### Согласованные действия во имя успеха

Как и для большинства наиболее серьезных инноваций, разработка этой системы была плодом объединенных усилий. Результаты труда многих университетских ученых и исследователей компании АББ, инженеров компании АББ и потребителей следовало собрать вместе для решения этой сложной задачи, лежащей на стыке нескольких научных дисциплин.

Компания АББ и Технический Университет города Лунд (Швеция) совместно сделали первые шаги для описания и реализации основных функций датчика и управления [2, 3]. С этой точки зрения стало необходимо достичь лучшего понимания данного приложения и найти оптимальный интерфейс пользователя [4]. Очевидным способом добиться успеха было привлечение глобальных ресурсов компании АББ – это концепция управления по усилию и ее практическая реализация из Швеции и Соединенных Штатов, знание приложения из Австрии и графический интерфейс пользователя из Китая, а также серии практических испытаний, обеспеченные партнерами с промышленных предприятий. Джон Кун из компании Rimrock Corporation, проводивший испытания в реальном времени, сказал: «Изделие с управлением по усилию обладает таким высоким потенциалом воздействия на наш бизнес, как никакой другой продукт из ранее выпущенных компанией АББ». Компания Rimrock Corporation – основной поставщик автоматизированных устройств

и услуг по интеграции для Северной Америки и долгое время является важным партнером компании АББ.

#### Высокий рыночный спрос

Когда решение RobotWare Machining Force Control было впервые представлено публике на Международной специализированной выставке в области литейного производства GIFA, крупнейшем в мире форуме по этой тематике в Дюссельдорфе, резонанс среди потребителей был просто ошеломляющим. Потребители ясно представили себе качество усовершенствованного продукта и существенную экономию во времени проектирования, которая к настоящему моменту может составлять до 80%. Более того, длительность рабочего цикла робота при более точном управлении была сокращена приблизительно на 20%, а срок службы шлифовального инструмента возрос на 20%.

После успешного начала применения технологии управления по усилию в области сборки и механической обработки компания АББ пробует внедрить ее в новых областях. Одна из таких областей – это аэрокосмическая промышленность, где для гибкого производства требуется точное, надежное и эффективное сверление с помощью роботов [5].

В настоящее время с технологией RobotWare Machining Force Control операции по обработке изделий стали намного проще, обеспечивая более качественное, быстрое и дешевое производство литых изделий.

Робот для удаления заусенцев с датчиком, захватом и неподвижным шпинделем



Питер Фиксель

Томас Грот

Матс Исаксон

ABB Robotics

Вестерос, Швеция

peter.fixell@se.abb.com

tomas.groth@se.abb.com

mats.isaksson@se.abb.com

Хью Занг

Джанджун Ванг

Джанмин Хе

ABB Corporate Research

Виндзор, штат Коннектикут, США

hui.zhang@us.abb.com

jianjun.wang@us.abb.com

jianmin.he@us.abb.com

Мартин Кольмайер

Райнер Краппингер

ABB AG, Robotics

Винер Нойдорф, Австрия

martin.kohlmaier@at.abb.com

rainer.krappinger@at.abb.com

Джинггоу Ге

ABB Corporate Research

Шанхай, Китай

jingguo.ge@cn.abb.com

#### Литература

1. Х. Чжан, Ч. Гань, Т. Бругард, Ц. Вэн, М. Исаксон, Искусство обучаемости. Робототехника для сборки автомобильной трансмиссии. АББ Ревю 1/2004, с. 13–16.
2. Johansson, R., Robertsson, A., Nilsson, K., Brogårdh, T., Cederberg, P., Olsson, M., Ollson, T., Bolmsjö, G.(2004). Sensor integration in task-level programming and industrial robotic task execution control. *Industrial Robot*, 31(3), 284–296.
3. Blomdell, A., Bolmsjö, G., Brogårdh, T., Cederberg, P., Isaksson, M., Johansson, R., Haage, M., Nilsson, K., Olsson, M., Ollson, T., Robertsson, A., Wang, J.(2005). Extending an industrial robot – implementation and applications of a fast open sensor interface. *IEEE Robotics Automation Magazine*, 12(3), 85–94.
4. He, J., Pan, Z., Zhang, H.(2007). Adaptive force control for robotic machining process. *American Control Conference, ACC '07*, 1–6.
5. Kihlman, H., Brogårdh, T., Haage, M., Nilsson, K., Ollson, T.(2007). On the use of force feedback for cost efficient robotic drilling. Paper 07ATC-278 presented at the SAE 2007 AeroTech Congress & Exhibition, Los Angeles, CA.